

|                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <div>地<br/>热<br/>能</div> <div>(双月发行)</div> <div>主 编：王贵玲<br/>副主编：朱家玲<br/>马 岩<br/>张 薇<br/>责 编：李 曼</div> | <div>目 次</div> <div>2024年第6期</div>                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                                                                                       | <div>学述论文</div> <div>青藏高原东北部温泉分布及水文地球化学特征<br/>.....刘玲霞等（3）</div> <div>地埋管换热器动态热负荷下地层温度场的解析解<br/>.....李嘉舒等（21）</div>                                                                                                                                                                   |
|                                                                                                       | <div>地热信息</div> <div>由开山集团建设、运营的肯尼亚 Menengai III 地热发电站<br/>正式开工<br/>.....开山集团股份有限公司（28）</div> <div>藏在地下100多米全球最大洞中实验室用上地热能<br/>.....科技日报、中国青年报、徐州日报（30）</div> <div>2024年国际干热-超热地热资源研究与开发研讨会在<br/>长春顺利召开<br/>.....冯 波（31）</div> <div>中国石化在地热领域的开拓又有新进展<br/>.....中国石油化工集团有限公司（32）</div> |
|                                                                                                       | <div>(内部资料)</div>                                                                                                                                                                                                                                                                     |

GEOHERMAL ENERGY

**Editor-in-Chief:**  
Wang Guiling  
**Editor-in-Chief:**  
Zhu Jialing  
Ma Yan  
Zhang Wei  
**Duty Editor:**  
Li Man

CONTENTS

No.6 2024

ACADEMIC ARTICLES

Distribution and hydrogeochemical characteristics of hot springs in the northeastern Tibetan Plateau  
..... Lingxia Liu et al.( 3 )

Analytical solution of formation temperature field under dynamic heat load of buried-loop heat exchangers  
..... Jiashu Li et al.( 21 )

News

The Menengai III geothermal power station in Kenya, constructed and run by Kaishan Group, has officially started construction  
..... Kaishan Group Co., Ltd ( 28 )

Geothermal energy has been used for the world's largest cave-laboratory hidden more than 100 meters underground  
... Science and Technology Daily, China Youth Daily, Xuzhou Daily( 30 )

2024 International Workshop on Hot Dry Rock and Supercritical Geo - thermal Resources was successfully held in Changchun  
..... Bo Feng( 31 )

Sinopec has made new progress in the development of geothermal field  
..... Sinopec Group Co., Ltd( 32 )

# 青藏高原东北部温泉分布及水文地球化学特征

刘玲霞<sup>1,2</sup>, 路睿<sup>3,4</sup>, 谢文萃<sup>3,4</sup>, 刘博<sup>3,4</sup>, 王亚茹<sup>1,2</sup>, 姚海慧<sup>5</sup>, 蔺文静<sup>1,2,\*</sup>

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061

2. 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 河北 石家庄 050061

3. 青海省地质调查局, 青海 西宁 810000

4. 自然资源部高原荒漠区战略性矿产勘查开发技术创新中心, 青海 西宁 810000

5. 许昌学院 土木工程学院, 河南 许昌 461000

**摘要:** 青藏高原是我国地热活动最强烈的地区, 传统观点认为其东北部地区处于相对稳定的地块, 地热赋存条件一般。青海省位于青藏高原东北部, 地热资源种类齐全, 以往研究主要集中在勘查程度较高或单个温泉温度较高的区域, 而区内大部分地区研究程度较低, 地热资源整体分布特征和热源机制不清。本文依据主要控热活动断裂和温泉集中区将温泉自东北向西南划分为11个区, 利用水文地球化学和同位素分析手段对温泉的分布特征和成因进行了综合研究。结果表明: 温泉补给来源均为其附近大气降水和冰雪融水。温泉水化学特征与热储的地层岩性相关, 花岗岩热储中地热水阳离子以 $\text{Na}^+$ 为主, 阴离子以 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Cl}^-$ 为主; 灰岩热储中地热水阳离子以 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 为主, 阴离子以 $\text{HCO}_3^-$ 为主; 砂岩热储中地热水主要阳离子有 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ , 主要阴离子有 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 。温泉主要沿活动断裂展布方向呈串珠状分布, 且主要密集在不同构造体系的交接复合部位和同一构造体系的转折部位; 分布于一、二级断裂结合部位的热储循环深度最大, 径流路径最长、水岩反应较充分; 而分布于被少量小规模断裂切割的三级断裂沿线的温泉循环深度相对较小, 径流路径较短, 水岩反应程度较低。热储温度从东北向西南整体呈现出中部和西南部高、南部和东北部低, 中高温热储主要分布于共和、贵德、乌兰和唐古拉山一带, 温度在89.0~139.0℃之间, 平均117.7℃。温泉热源主要来自于大地热流传导增热、放射性元素衰变生热、岩浆余热、活动断层摩擦生热, 以及低速-高导熔融体和地幔通道流传热等。此次主要聚焦于青海省水热型地热资源的分布规律和地热成因等方面的研究, 可为后期青海省地热资源开发利用提供参考依据。

**关键词:** 青藏高原东北部; 水文地球化学; 地球化学温标; 硅-焓图解; 控热活动断裂

## 前言

地热资源作为一种高效清洁的可再生新型能源, 对于缓解环境能源紧张和积极应对日益突出的全球环境问题具有重要的意义。温泉作为地热资源的天然露头, 经历了地下水循环的补、径、排过程, 其水文地球化学信息可用于识别地热水来源及水岩反应过程<sup>[2]</sup>。青藏高原作为地中海-喜马拉雅地热带的重要组成部分, 是我国地热活动最强烈的地区。我国对青藏高原地热研究始于20世纪90年代, 然而以往的研究主要集中在青藏高原的南

部和东部地区, 如滇藏地热带、喜马拉雅南北裂谷带和川西地区等, 对青藏高原东北部的关注相对较少。近年来随着青海共和-贵德盆地高温地热资源的探获, 该地区的地热资源受到了业内越来越多的关注。

青海省位于青藏高原东北部, 地质构造复杂, 新构造运动较强烈, 地热资源种类齐全, 目前全省已发现水温15℃以上的温泉点共84处。前人针对青海省共和、贵德盆地地热资源进行了大量的研究, 提出共和盆地热源主要由3部分组成, 即中

酸性岩体的放射性生热、新生代中-下地壳发育的低速高导层和深部幔源热物质上侵对上部地层所提供的幔源热,中晚三叠世花岗岩是良好的导体和储热体,新生代低热导率沉积层是良好的盖层。贵德盆地地下热水主要补给来源为大气降水,地下水由周边山区向盆地中心成聚辅状汇流,经深部循环加热,上部水热性地热系统共分3个热储层段,即浅部新近系低温热储层、中部古近系中低温热储层和深部白垩系、侏罗系中低温热储层,深部为干热岩地热系统。热能主要来源于地球内部地幔和地壳岩石放射性元素衰变,新生界沉积地层为区内地下热水的形成与赋存提供了储、盖条件。西宁盆地“凹中凸”的构造有利于地热水在深部热储富集和增温,石维栋首次提出了西宁盆地“层控热储,侧向径流补给,大地热流供热,深大断裂导热,低热导率岩层聚热”热储概念模型,即盆地地下热水的主要热源来自于偏高的大地热流供热,地热储层埋深主要位于700~1600 m,水温30~70℃。青海省东北部祁连地区江仓盆地地下热水同样接受大气降水和冰雪融水补给,下渗后沿构造通道在盆地内径流,经深循环加热,在断层构造、多年冻土层和泥岩阻水影响作用下沿断层破碎带向上运移,以低温构造温泉的形式出露于地表。

尽管前人针对青海省境内地热资源开展了大量的研究,但主要集中于共和盆地、贵德盆地、西宁盆地和祁连地区等勘查程度较高或单个温泉温度较高的区域,而区内大部分地区研究程度较低,地热资源整体分布特征及热源机制不清,限制了该区地热资源的开发与利用。温泉作为地热资源的天然露头,蕴含了丰富的地热地质信息,对地热资源形成具有良好的指示作用,因此,本文采集了青海省境内不同地热异常区的温泉水样品,结合区域地质条件和主要控热活动断裂,利用水文地球化学和同位素分析手段对温泉地热地质规律开展了系统的研究,分析了不同地热异常区温泉分布的主控因素及热源机制,为后期青海省地热资源开发利用提供参考依据。

## 1 研究区概况

青海省位于青藏高原东北部,东西长约1200

km,南北宽约800 km,总面积为 $72.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。省区地势具有南西高,北东低和南、北高,中部低的组合特征。阿尔金山—祁连山、昆仑山、唐古拉山脉横亘于北、中和南部。柴达木、青海湖、共和、贵德、西宁等一些规模较大的断陷盆地则夹持于阿尔金山—祁连山脉与昆仑山脉之间,为新生代青藏高原隆升的补偿性沉降带。

区内断裂构造十分发育(图1),构造以北西西向、近东西向、北西向的褶皱和断裂为主,其次为北东向、近东西向和近南北向的褶皱和断裂。主断裂(带)控制了构造和地层的分布。受印度板块向欧亚板块俯冲影响,晚更新世以来区内形成的主要活动断裂带共24条,活动断裂控制了青海省主要热水的分布。本次调查温泉共91处,主要沿以下9条活动断裂展布,即中祁连北缘断裂、疏勒南山—拉脊山北缘断裂、宗务隆—青海南山活动断裂、贵德—多禾茂断裂带、哇洪山—温泉活动断裂、昆南活动断裂、可可西里南缘活动断裂、乌兰乌拉湖—玉树活动断裂和乌丽—囊谦活动断裂。

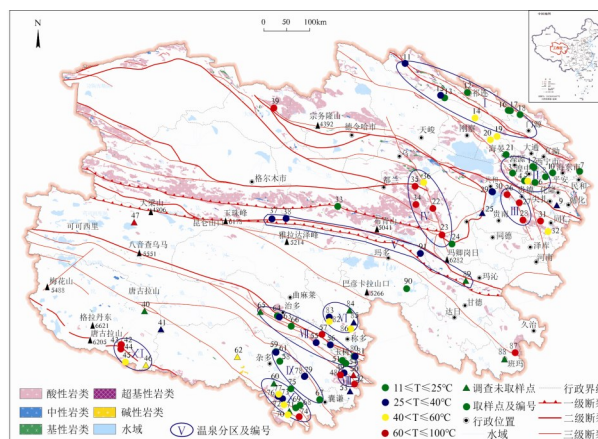


图1 青海省地质简图及主要温泉点分布图(据文献)

前第四纪地层在省内皆有出露,地层发育齐全。但以元古代、古生代、中生代三叠系和新生代古近系、新近系最为发育<sup>[32]</sup>。元古代和古生代地层见于昆仑山及祁连山地区,地层岩性主要为片麻岩、花岗岩、花岗闪长岩等酸性岩类及闪长岩类和超基性岩类;中生代早期三叠系等地层岩性主要为砾岩、砂岩、石英砂岩、页岩、千枚岩、结晶灰岩和板岩,中晚期侏罗系、白垩系和新生代古近系、新近系地层岩性主要为红色、紫红色砂岩、砂砾

岩、杂色泥岩、粉砂质泥岩、夹薄层砂岩、碳质泥岩和煤系。在漫长的地质历史时期,境内不同时代的岩浆活动较频繁和强烈,尤以晚古生代及中生代岩浆活动为主。由于受岩浆活动影响,火成岩沿断裂带广泛发育,且以中酸性岩类为主(图1)。

因受构造、岩浆活动、地层岩性和水文地质条件等因素的控制,青海省境内温泉分布具有明显的分带性,主要沿北北西向断裂呈串珠状分布,且温度较高温泉主要密集在不同构造体系的交接复合部位和同一构造体系的转折部位(图1)。

## 2 数据与方法

### 2.1 样品采集与测试

本次调查于2022. 6—2023. 9开展,温泉温度下限采用青海省全省40个气象站2012—2022年近10年年平均气温的3倍(11℃),截至目前共调查代表性温泉89个,采集分析温泉水样68组(见图1)。根据温泉出露条件和地热地质条件,结合主要控热活动断裂分布情况,将现有测试数据的温泉自东北向西南共划分为11个区,即北祁连地区温泉集中区(I区)、拉脊山活动断裂温泉集中区(II区)、瓦力贡山断裂温泉集中区(III区)、哇洪山—温泉断裂带温泉集中区(IV区)、,昆南活动断裂带温泉集中区(V区)、,称多扎朵—珍秦温泉集中区(VI区)、治多—玉树温泉集中区(VII区)、巴木曲—格拉断裂带温泉集中区(VIII)、,杂多—囊谦温泉集中区(IX)、乌兰乌拉湖南缘断裂带温泉集中区(X)和唐古拉山温泉集中区(XI)(图1)。

本次研究测试项目包括温度、pH值、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SiO}_2$ 、TDS和氢氧同位素( $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ )。样品采集之前,利用多参数水质测试仪(WTW Multi340i/SET,德国)现场测定pH值和温度指标。样品均在现场采用0.22  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤,并收集于250 mL耐高温聚四氟乙烯瓶,采样前聚四氟乙烯瓶用待取水样润洗3次,采样后冷藏保存,尽快送达实验室。

采用电感耦合等离子体发射光谱仪(Optima 8000 ICP-OES, PerkinElmer)测定阳离子(检测限为0.01 mg/L);采用离子色谱仪(ICS-2500, Dionex)测定 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ (检测限为0.01 mg/L);采用酸

碱滴定法测定 $\text{HCO}_3^-$ ,测试误差为 $\pm 2\%$ ;采用紫外分光光度计(UV-2550, SHIMADZU)测定硅酸盐,测试误差0.0003%以下。 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素采用美国picarro公司的超高精度氢氧同位素分析仪(L2130-i, Picarro)测定,测试精度为0.025%。实验室测试过程中均等间距插入标准样品对测试结果进行准确性验证。通过阴阳离子平衡验证,所有样品误差均在 $\pm 10\%$ 以内。测试结果见表1。

### 2.2 地球化学温标

储层温度是划分地热系统的成因类型和评价地热资源潜力所不可缺少的重要参数,但在通常情况下难以直接测量。基于水中矿物质的平衡,地热温标提供了对储层温度的间接估算。通常使用的地球化学温标有阳离子地热温标和 $\text{SiO}_2$ 地热温标。

阳离子地热温标是通过建立热水中阳离子比值与温度之间的关系来推算热储温度的方法,主要有Na-K地热温标、K-Mg地热温标和Na-K-Ca地热温标,计算公式如下。 $w_{\text{Na}}$ 、 $w_{\text{K}}$ 、 $w_{\text{Ca}}$ 、 $w_{\text{Mg}}$ 分别为 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 质量浓度,mg/L;T为热力学温度,℃。

Na-K地热温标:

$$T = \frac{1217}{\lg(w_{\text{Na}}/w_{\text{K}}) + 1.483} - 273.15$$

K-Mg地热温标:

$$T = \frac{4410}{\lg(w_{\text{K}}/\sqrt{w_{\text{Mg}}}) + 14.00} - 273.15$$

Na-K-Ca地热温标<sup>[36]</sup>:

$$T = \frac{1647}{\lg(\frac{w_{\text{Na}}}{w_{\text{K}}}) + \beta(\lg(\frac{\sqrt{w_{\text{Ca}}}}{w_{\text{Na}}}) + 2.06) + 2.47} - 273.15$$

$\beta=4/3$ (当 $t < 100^\circ\text{C}$ )或 $\beta=1/3$ (当 $t > 100^\circ\text{C}$ )

$\text{SiO}_2$ 地热温标目前被广泛应用于估算地下热储温度。它是基于水溶液中硅的浓度是由水-岩相互作用时的温度下 $\text{SiO}_2$ 的溶解性决定的。硅的总浓度是温度的函数。热水在上升到地面过程中没有蒸汽损失,或者说仅存在传导冷却时, $\text{SiO}_2$ 温标采用无蒸汽损失表达式。当热水在上升到地面的过程中具有某一温度下最大蒸汽损失,或者是以绝热冷却为主时,采用最大蒸汽损失温标表达

式,计算公式如下。 $w_{\text{SiO}_2}$  为  $\text{SiO}_2$  质量浓度,  $\text{mg/L}$ ;  
 $T$  为热力学温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

石英(无蒸汽损失):

$$T = \frac{1309}{5.19 - \lg(w_{\text{SiO}_2})} - 273.15$$

石英(最大蒸汽损失):

玉髓:

$$T = \frac{1522}{5.75 - \lg(w_{\text{SiO}_2})} - 273.15$$

$$T = \frac{1032}{4.69 - \lg(w_{\text{SiO}_2})} - 273.15$$

表 1 温泉水化学组分及氢氧同位素组成

| 温泉<br>分区               | 温泉<br>编号 | 温泉名称           | pH   | 温度<br>/ $^{\circ}\text{C}$ | 水化学成分/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) |                 |                  |                  |                 |                    |                    |                          | 同位素/ $\text{‰}$    |                       | 离子<br>平衡<br>/ $\text{‰}$ |
|------------------------|----------|----------------|------|----------------------------|-----------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|
|                        |          |                |      |                            | $\text{K}^{+}$                          | $\text{Na}^{+}$ | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{Cl}^{-}$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{HCO}_3^{-}$ | $\text{H}_2\text{SiO}_3$ | $\delta^2\text{H}$ | $\delta^{18}\text{O}$ |                          |
| 北祁连地区<br>温泉集中区         | 10       | 祁连托勒河甲波温泉      | 6.72 | 32                         | 7.0                                     | 48.7            | 219.0            | 104.0            | 27.9            | 56.1               | 1144.0             | 91.3                     | -58.0              | -9.1                  | 5.7                      |
|                        | 11       | 祁连冰沟村北温泉       | 9.42 | 14                         | 7.0                                     | 410.0           | 8.0              | 3.7              | 120.5           | 124.9              | 512.6              | —                        | —                  | —                     | 8.4                      |
|                        | 12       | 刚察大通河上游温泉      | 6.80 | 11                         | 117.0                                   | 398.0           | 517.0            | 150.0            | 348.0           | 19.8               | 2930.0             | 35.8                     | -60.0              | -8.3                  | 0.7                      |
|                        | 13       | 刚察热水煤矿温泉       | 6.81 | 46                         | 22.6                                    | 46.9            | 198.0            | 77.5             | 21.1            | 68.3               | 1012.0             | 49.7                     | -65.0              | -10.0                 | 2.0                      |
|                        | 14       | 刚察江仓煤矿温泉       | 5.93 | 40                         | 12.8                                    | 91.1            | 105.1            | 38.9             | 71.8            | 29.7               | 612.9              | 0.0                      | -61.0              | -8.9                  | 0.7                      |
|                        | 15       | 门源狮子口矿泉        | 6.77 | 20                         | 3.2                                     | 17.8            | 673.0            | 37.0             | 10.6            | 15.2               | 2189.0             | 9.95                     | -55.0              | -9.1                  | 2.9                      |
|                        | 16       | 门源硫磺沟温泉        | 7.28 | 15.3                       | 3.2                                     | 25.2            | 350.7            | 85.1             | 7.1             | 96.1               | 1464.5             | —                        | —                  | —                     | 1.6                      |
| 拉脊山活动<br>断裂温泉集<br>中区   | 17       | 门源岗什卡雪山温泉      | 6.82 | 13                         | 2.4                                     | 29.3            | 314.0            | 52.0             | 7.7             | 178.0              | 1004.0             | 7.97                     | —                  | —                     | 4.7                      |
|                        | 1        | 西宁西杏园温泉        | —    | 15                         | 73.0                                    | 10600.0         | 293.1            | 71.9             | 6860.0          | 12900.0            | 1340.0             | —                        | -79.6              | -10.5                 | 0.1                      |
|                        | 2        | 西宁药王庙温泉        | —    | 12.7                       | 15.2                                    | 3927.0          | 43.5             | 21.4             | 1090.0          | 3556.0             | 2208.0             | —                        | —                  | —                     | 1.8                      |
|                        | 3        | 湟源药水村温泉        | 7.70 | 18                         | 6.4                                     | 24.3            | 63.5             | 36.5             | 25.9            | 20.2               | 356.0              | 16.3                     | —                  | —                     | 6.2                      |
|                        | 4        | 湟中门旦峡温泉        | 7.29 | 25                         | 1.6                                     | 9.7             | 91.6             | 55.5             | 9.6             | 35.1               | 514.0              | 21.8                     | -61.0              | -9.7                  | 2.5                      |
|                        | 5        | 湟中药水滩温泉        | 6.60 | 43                         | 4.6                                     | 16.6            | 272.0            | 87.6             | 9.6             | 51.5               | 1238.0             | 32.0                     | -65.0              | -10.0                 | 0.5                      |
|                        | 6        | 湟中子沟峡矿泉        | 6.62 | 22                         | 1.8                                     | 9.7             | 228.0            | 65.0             | 7.2             | 40.3               | 969.0              | 17.9                     | —                  | —                     | 2.1                      |
| 瓦力贡山断<br>裂温泉集中<br>区    | 8        | 平安冰棱山矿泉        | 6.80 | 22                         | 298.0                                   | 851.0           | 577.0            | 164.0            | 292.0           | 1448.0             | 2840.0             | 16.3                     | —                  | —                     | 2.6                      |
|                        | 25       | 贵德曲乃亥温泉        | 8.16 | 97                         | 55.6                                    | 575.0           | 35.9             | 4.4              | 807.0           | 221.0              | 59.5               | 104.8                    | -80.0              | -10.0                 | 1.0                      |
|                        | 26       | 贵德扎仓沟温泉        | 8.65 | 98                         | 19.9                                    | 395.0           | 58.6             | 2.7              | 323.0           | 488.0              | 23.8               | 99.6                     | -83.0              | -10.9                 | 5.8                      |
|                        | 27       | 贵德新街温泉         | 8.64 | 67                         | 13.0                                    | 180.0           | 10.0             | 2.4              | 46.1            | 264.2              | 115.9              | 92.3                     | -93.0              | -12.3                 | 1.8                      |
|                        | 28       | 共和克才温泉         | 8.14 | 25.3                       | 3.0                                     | 287.0           | 50.6             | 14.0             | 315.0           | 226.0              | 173.0              | 28.0                     | —                  | —                     | 1.0                      |
|                        | 29       | 共和阿乙亥温泉        | 8.36 | 37                         | 2.4                                     | 625.0           | 9.2              | 3.1              | 553.0           | 240.0              | 372.0              | 24.7                     | —                  | —                     | 4.7                      |
|                        | 30       | 同仁兰采温泉         | 8.68 | 76                         | 5.4                                     | 124.0           | 5.2              | 2.4              | 41.3            | 103.0              | 89.2               | 120.0                    | —                  | —                     | 2.0                      |
| 哇洪山-温泉<br>断裂带温泉<br>集中区 | 31       | 同仁曲库乎温泉        | 8.84 | 51                         | 4.0                                     | 106.0           | 6.8              | 1.2              | 29.3            | 136.0              | 56.5               | 81.1                     | -88.0              | -12.1                 | 8.5                      |
|                        | 32       | 都兰博鲁克斯坦河温泉     | 8.04 | 20                         | 8.6                                     | 217.4           | 99.3             | 38.5             | 231.2           | 296.4              | 268.3              | —                        | -72.0              | -10.6                 | 4.3                      |
|                        | 21       | 兴海桑持沟温泉        | 8.29 | 78                         | 13.7                                    | 303.0           | 24.3             | 3.9              | 296.0           | 186.0              | 116.0              | 99.6                     | -92.0              | -11.7                 | 6.5                      |
|                        | 22       | 兴海温泉乡温泉        | 7.91 | 64                         | 21.9                                    | 267.0           | 41.8             | 5.3              | 169.0           | 329.0              | 140.0              | 101.0                    | -90.0              | -11.6                 | 5.6                      |
|                        | 23       | 兴海温泉乡南木塘村温泉    | 7.97 | 50                         | 6.1                                     | 96.1            | 205.0            | 181.0            | 142.0           | 889.0              | 328.0              | 7.51                     | —                  | —                     | 6.2                      |
|                        | 33       | 都兰察汗乌苏温泉       | 7.46 | 87                         | 133.0                                   | 983.0           | 90.4             | 8.9              | 1658.0          | 34.4               | 131.0              | 148.0                    | —                  | —                     | 3.7                      |
|                        | 34       | 都兰安固滩温泉        | 8.08 | 67                         | 23.8                                    | 482.0           | 78.5             | 1.7              | 610.0           | 282.0              | 56.5               | 141.0                    | -88.0              | -12.2                 | 6.7                      |
| 昆南活动断<br>裂带温泉          | 35       | 乌兰巴硬格莉温泉       | 8.82 | 44                         | 2.6                                     | 150.0           | 16.3             | 2.2              | 120.0           | 156.0              | 29.7               | 56.2                     | —                  | —                     | 6.4                      |
|                        | 36       | 格尔木温泉水库温泉      | 7.75 | 35                         | 9.2                                     | 221.7           | 88.7             | 50.3             | 283.3           | 386.1              | 132.9              | —                        | -77.0              | -11.2                 | 1.6                      |
|                        | 37       | 格尔木秀沟东温泉       | 6.91 | 39                         | 82.0                                    | 2500.0          | 118.0            | 14.4             | 2153.0          | 685.0              | 2375.0             | 91.0                     | —                  | —                     | 3.5                      |
|                        | 87       | 玛沁东倾沟温泉        | 7.18 | 18                         | 2.2                                     | 17.4            | 171.0            | 22.2             | 15.9            | 101.0              | 512.0              | 10.9                     | -85.0              | -11.9                 | 2.4                      |
| 称多扎朵-珍<br>秦温泉集中<br>区   | 89       | 玛多花石峡卓儿啦温泉     | 7.42 | 27.5                       | 3.3                                     | 33.4            | 77.9             | 36.6             | 72.7            | 107.0              | 228.0              | 17.2                     | —                  | —                     | 5.7                      |
|                        | 80       | 称多扎朵镇温泉        | 8.07 | 45                         | 65.6                                    | 552.0           | 10.0             | 49.1             | 59.1            | 155                | 1642.0             | 147.0                    | -106.0             | -13.9                 | 5.0                      |
|                        | 81       | 称多扎朵镇晒柴沟温泉     | 8.00 | 42                         | 51.4                                    | 348.0           | 34.3             | 48.8             | 20.4            | 53.0               | 1196.0             | 33.0                     | —                  | —                     | 4.3                      |
|                        | 84       | 称多珍秦日格沙老隆巴沟口温泉 | 7.33 | 45                         | 56.0                                    | 293.0           | 96.7             | 30.9             | 27.6            | 35.4               | 1157.0             | 41.5                     | —                  | —                     | 5.2                      |

续表

| 温泉<br>分区                | 温泉<br>编号 | 温泉名称            | pH   | 温度<br>/℃ | 水化学成分/(mg·L <sup>-1</sup> ) |                 |                  |                  |                 |                               |                               |                                 | 同位素/‰            |                   | 离子<br>平衡<br>/% |
|-------------------------|----------|-----------------|------|----------|-----------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------|-------------------|----------------|
|                         |          |                 |      |          | K <sup>+</sup>              | Na <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> | δ <sup>2</sup> H | δ <sup>18</sup> O |                |
| 治多-玉树温<br>泉集中区          | 50       | 玉树巴塘河温泉         | 7.57 | 12.5     | 1.0                         | 15.4            | 106.0            | 18.2             | 6.6             | 136.0                         | 268.0                         | —                               | —                | —                 | 1.3            |
|                         | 52       | 玉树沙巴纠公主温泉       | 7.84 | 24       | 0.6                         | 4.5             | 54.2             | 14.2             | 1.9             | 21.3                          | 217.0                         | —                               | -104.0           | -14.0             | 1.2            |
|                         | 53       | 玉树隆宝镇娥曲曲尼温泉     | 8.21 | 34       | 3.8                         | 100.0           | 7.8              | 4.7              | 22.1            | 61.1                          | 195.0                         | 52.5                            | -108.0           | -14.2             | 2.6            |
|                         | 54       | 玉树安冲乡带让村昂普寺温泉   | 6.93 | 33       | 31.6                        | 169.0           | 225.0            | 47.8             | 33.9            | 58.7                          | 1215.0                        | 33.1                            | —                | —                 | 5.7            |
|                         | 55       | 玉树安冲乡茶桐温泉       | 7.14 | 65       | 79.0                        | 682.0           | 84.5             | 25.5             | 131.0           | 233.0                         | 1663.0                        | 64.4                            | —                | —                 | 6.0            |
|                         | 61       | 治多白海螺温泉         | 7.18 | 27       | 8.3                         | 79.1            | 79.3             | 93.5             | 30.3            | 35.3                          | 883.0                         | 26.1                            | -107.0           | -14.4             | 4.2            |
|                         | 62       | 治多贡萨寺温泉         | 7.49 | 24       | 7.0                         | 67.7            | 37.1             | 85.8             | 24.0            | 48.7                          | 663.0                         | 19.0                            | -101.0           | -14.2             | 3.5            |
|                         | 64       | 治多日青当江温泉        | 7.45 | 19       | 4.2                         | 22.6            | 135.0            | 30.9             | 21.7            | 35.7                          | 528.0                         | 16.8                            | —                | —                 | 4.0            |
|                         | 78       | 称多挡巴沟沟口温泉       | 7.56 | 23.5     | 1.9                         | 4.7             | 106.0            | 14.4             | 1.2             | 34.6                          | 350.0                         | 18.1                            | —                | —                 | 3.9            |
|                         | 79       | 称多挡巴沟温泉         | 7.63 | 26       | 1.4                         | 7.1             | 112.0            | 7.7              | 5.8             | 45.8                          | 324.0                         | 12.6                            | —                | —                 | 2.5            |
| 巴木曲—格<br>拉断裂带温<br>泉集中区  | 47       | 玉树热水沟上游温泉       | 7.00 | 65       | 21.5                        | 141.0           | 99.6             | 24.6             | 32.7            | 116.0                         | 619.0                         | 74.1                            | —                | —                 | 1.7            |
|                         | 48       | 玉树热水沟哈桑查果温泉     | 6.90 | 35       | 11.7                        | 185.0           | 339.0            | 101.0            | 31.7            | 162.0                         | 1800.0                        | 35.2                            | —                | —                 | 0.2            |
|                         | 51       | 玉树小苏莽乡西曲托吉温泉    | 7.32 | 63       | 53.8                        | 389.0           | 71.8             | 15.1             | 27.0            | 289.0                         | 937.0                         | 92.4                            | —                | —                 | 4.4            |
| 杂多-囊谦温<br>泉集中区          | 56       | 杂多巴额公温泉         | 7.60 | 21       | 12.2                        | 118.0           | 471.0            | 88.1             | 26.3            | 1324.0                        | 375.0                         | 17.7                            | —                | —                 | 5.3            |
|                         | 57       | 杂多扎沟温泉          | 8.00 | 21       | 2.2                         | 7.9             | 151.0            | 44.8             | 1.8             | 417.0                         | 195.0                         | 11.7                            | —                | —                 | 2.1            |
|                         | 59       | 杂多扎沟上游温泉        | 7.40 | 30       | 3.1                         | 19.2            | 435.0            | 89.6             | 1.8             | 1072.0                        | 342.0                         | 16.4                            | -117.0           | -16.3             | 7.4            |
|                         | 76       | 囊谦觉拉温泉          | 7.86 | 27       | 1.4                         | 5.6             | 78.9             | 16.9             | 8.7             | 151.0                         | 131.0                         | 17.4                            | -115.0           | -15.6             | 1.7            |
|                         | 77       | 囊谦香巴温泉          | 7.66 | 38       | 2.8                         | 12.8            | 120.0            | 21.3             | 9.6             | 201.0                         | 229.0                         | 32.6                            | -116.0           | -15.7             | 2.3            |
|                         | 65       | 囊谦香达北山温泉        | 7.99 | 18       | 4.6                         | 25.7            | 101.0            | 46.3             | 23.2            | 199.0                         | 342.0                         | 18.1                            | —                | —                 | 2.6            |
| 乌兰乌拉湖<br>南缘断裂带<br>温泉集中区 | 66       | 囊谦吉尼塞乡玉郭温泉      | 7.78 | 25       | 17.7                        | 415.0           | 306.0            | 53.0             | 198.0           | 1246.0                        | 387.0                         | 34.7                            | —                | —                 | 0.9            |
|                         | 67       | 囊谦吉尼塞乡宗杂温泉      | 7.95 | 25       | 4.1                         | 78.5            | 45.3             | 14.8             | 19.5            | 109.0                         | 256.0                         | 21.8                            | —                | —                 | 0.0            |
|                         | 68       | 囊谦吉尼塞乡达那温泉      | 7.03 | 57       | 82.0                        | 568.0           | 235.0            | 21.5             | 724.0           | 150.0                         | 898.0                         | 65.0                            | —                | —                 | 5.3            |
|                         | 70       | 囊谦杂羊乡茶滩村加翁温泉    | 7.19 | 59       | 109.0                       | 619.0           | 129.0            | 18.8             | 562.0           | 311.0                         | 881.0                         | 81.5                            | —                | —                 | 2.6            |
|                         | 71       | 囊谦东坝乡兰岔滩温泉      | 7.37 | 27       | 58.1                        | 1165.0          | 167.0            | 92.1             | 1624.0          | 535.0                         | 731.0                         | 22.2                            | —                | —                 | 1.0            |
|                         | 72       | 囊谦吉曲乡瓦卡村万康温泉    | 6.90 | 62       | 58.5                        | 748.0           | 244.0            | 40.3             | 574.0           | 1111.0                        | 484.0                         | 49.9                            | —                | —                 | 4.8            |
|                         | 73       | 囊谦着晓乡由涌村达杰寺温泉   | 6.88 | 24       | 35.6                        | 2043.0          | 371.0            | 55.9             | 2278.0          | 1508.0                        | 843.0                         | 20.1                            | —                | —                 | 3.2            |
|                         | 74       | 囊谦东坝乡瓦浩温泉       | 6.79 | 40       | 78.0                        | 1454.0          | 300.0            | 37.4             | 1289.0          | 801.0                         | 1674.0                        | 31.3                            | —                | —                 | 3.5            |
| 唐古拉山温<br>泉集中区           | 75       | 囊谦东坝乡过永村佳仁温泉    | 6.80 | 46       | 124.0                       | 3322.0          | 338.0            | 37.1             | 4086.0          | 1265.0                        | 1396.0                        | 37.7                            | —                | —                 | 2.0            |
|                         | 41       | 唐古拉山兵站温泉        | 6.97 | 63       | 66.1                        | 276.0           | 300.0            | 29.0             | 69.3            | 973.0                         | 450.0                         | 153.0                           | —                | —                 | 5.0            |
|                         | 42       | 唐古拉山兵站东南800 m温泉 | 6.79 | 68       | 48.0                        | 193.0           | 419.0            | 38.6             | 43.4            | 1130.0                        | 462.0                         | 95.7                            | —                | —                 | 4.4            |
|                         | 43       | 唐古拉山兵站南日嘎温泉     | 7.34 | 67       | 172.0                       | 727.0           | 127.0            | 13.6             | 80.8            | 1234.0                        | 818.0                         | 75.8                            | —                | —                 | 5.0            |
|                         | 44       | 唐古拉山口温泉         | 7.12 | 46       | 42.5                        | 190.0           | 428.9            | 39.6             | 49.6            | 1128.7                        | 528.4                         | —                               | —                | —                 | 1.5            |

## 2.3 矿物饱和度

饱和度可以指示地热水中矿物的平衡状态,其定义为:

$$SI = \lg \frac{Q}{K}$$

式中:Q为水溶液中某矿物的阴阳离子活度积;K为某温度下矿物平衡常数。利用饱和度(SI)判断地热水中每种矿物的平衡状态。当SI>0

时,表示矿物过饱和,由该矿物估算的热储温度将过高;当SI=0时,表示水和矿物之间的完全平衡,估算热储温度结果可信;当SI<0时,表示不饱和,估算的热储温度将偏低。因此,大多数矿物组合趋于收敛的温度(SI~0),代表岩石-水之间的平衡条件,从而表明近似储层温度。

## 2.4 冷水混入比例

本研究采用硅-焓图解法估算温泉上升过程

中浅层冷水的混入比例,即利用石英溶解度-热水焓值曲线图求解。如图2根据当地冷水焓和 $\text{SiO}_2$ 含量在坐标系中投下点A,再根据泉水焓和 $\text{SiO}_2$ 含量在坐标系中投下另一点B,连接AB两点,延长该直线于石英溶解度曲线相较于点C,C点所对应的焓值即为地下热水的焓。AB、AC两段的长度比即为地下热水在混合水中的比例,用1减这一比值即可得到冷水混入的比例<sup>[41]</sup>。同时根据热水温度-焓- $\text{SiO}_2$ 含量之间的关系查取该地下热水相对应的温度。

门源县硫磺沟温泉和唐古拉山口温泉的二氧化硅含量未测,利用二氧化硅和硅焓图解估算热储温度以及冷水混入比例时,二氧化硅含量采用同一区内相同热储层岩性的温泉值作为参考。其他几个未测二氧化硅含量且较近范围内未有相同热储层岩性的温泉,根据水化学特征选取合适的阳离子地热温标估算热储温度。

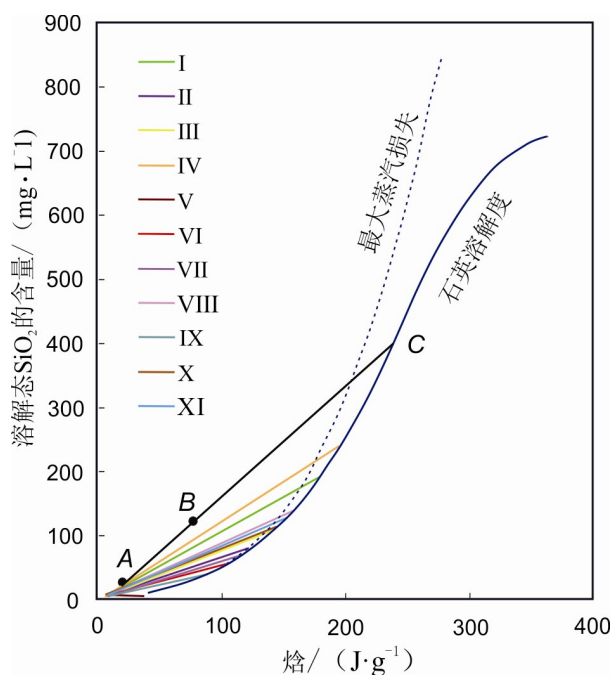


图2 研究区温泉水硅-焓模型图(引自文献)

### 3 结果

#### 3.1 温泉水化学特征

##### 3.1.1 温泉水化学类型

依据水化学数据绘制了piper三线图(图3)。

根据不同区的温泉水化学组分可知,地下水沿其循环路径发生的各种地球化学过程,使得来自不同断裂带和盆地的温泉表现出不同的化学成分特征。其中I、Ⅶ和Ⅸ区温泉阳离子以 $\text{Ca}^{2+}$ 为主;Ⅲ、Ⅳ、Ⅵ和Ⅹ区的温泉阳离子以 $\text{Na}^{+}$ 为主;Ⅱ、Ⅴ、Ⅷ和ⅩI区温泉阳离子不唯一,Ⅱ区以 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 为主,其次为 $\text{Na}^{+}$ ,Ⅴ、Ⅷ和ⅩI区以 $\text{Na}^{+}$ 和 $\text{Ca}^{+}$ 为主,个别温泉 $\text{Mg}^{2+}$ 含量较高。I、Ⅵ、Ⅶ和Ⅷ区温泉阴离子以 $\text{HCO}_3^{-}$ 为主;Ⅲ、Ⅳ和Ⅹ区温泉阴离子以 $\text{Cl}^{-}$ 为主,其次为 $\text{SO}_4^{2-}$ ;ⅩI区温泉阴离子以 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主,其次为 $\text{HCO}_3^{-}$ ;Ⅱ和Ⅸ区温泉阴离子以 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^{-}$ 为主;Ⅴ区温泉的阴离子较为复杂, $\text{Cl}^{-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^{-}$ 均有出现,位于混合区域。不同区域温泉的TDS也存在较大差异性,TDS平均值最小为698.2 mg/L,位于治多-玉树温泉集中区;TDS平均值最大达4029.1 mg/L,位于乌兰乌拉湖南缘断裂带温泉集中区。不同区温泉离子组分和TDS的差异性,在一定程度上指示了水岩反应程度的差异和热储层岩性的不同,同一岩性温度较高的温泉水岩作用相对更为充分。结合图5可知,TDS大于2000 mg/L的Ⅴ、Ⅹ和Ⅵ区除了受水岩作用外,同时也受到强烈蒸发作用的影响。

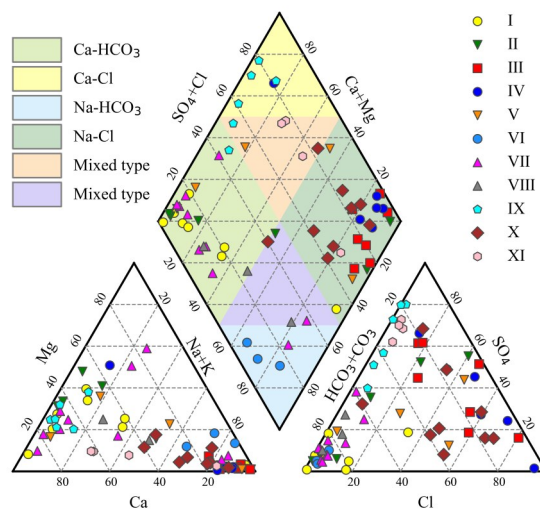
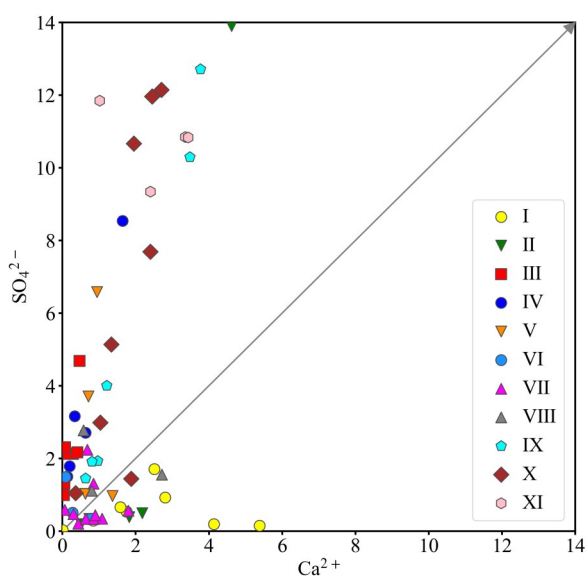


图3 温泉水化学piper图

图4 温泉水中 $\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{SO}_4^{2-}$ 的关系图

结合热储层岩性分析可知,热储层岩性为砂岩的温泉阳离子以 $\text{Na}^+$ 为主,其次为 $\text{Ca}^{2+}$ ,阴离子以 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 为主,个别温泉出现 $\text{Cl}^-$ 含量较高;热储层岩性为灰岩的温泉阳离子以 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 为主,其次为 $\text{Na}^+$ ,阴离子以 $\text{HCO}_3^-$ 为主,少数温泉 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Cl}^-$ 含量较高;热储层为花岗岩的温泉阳离子主要为 $\text{Na}^+$ ,阴离子主要为 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ ,在治多-玉树一带出现了阴离子以 $\text{HCO}_3^-$ 为主的温泉。李学礼等<sup>[42]</sup>提出岩浆岩中 $\text{Cl}^-$ 主要存在于氯磷灰石或方钠石氯化物的液体包裹体中,因此在阴离子以 $\text{Cl}^-$ 为主的火成岩热储中,阳离子 $\text{Na}^+$ 一部分来源于铝硅酸盐,另一部分可能来源于方钠石氯化物,对于火

成岩中的重碳酸型水, $\text{HCO}_3^-$ 是生物成因的,主要来源于岩浆作用。 $\text{SO}_4^{2-}$ 的可能来源之一为沿渗流途径硫酸盐矿物(如石膏)的溶解,同时根据 $\text{Ca}^{2+}$ : $\text{SO}_4^{2-}$ 散点图(图4,单位为摩尔浓度比)显示,阴离子以 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主的IX和XI区以及 $\text{Cl}^-$ 为主 $\text{SO}_4^{2-}$ 次之的III、IV、V和X区温泉样品均位于1:1等摩尔线的上方,说明地热水中 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量除了受石膏溶解影响之外,可能同时受到诸如岩石介质中黄铁矿的氧化等地球化学过程的影响。

### 3.1.2 温泉水化学成分的形成与演化

(1)基于Gibbs图的离子分析。Gibbs图是利用水中 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 与TDS之间的关系来研究地下水中主要离子形成的影响因素,包括蒸发浓缩、水岩作用和降雨补给3种。从Gibbs图(图5)可知,I、II和IX区温泉主要分布于 $\text{Na}^+/( \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^-/( \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值小于0.5,且TDS含量较高的中间区域,表明这4个区内的温泉主要受水岩作用控制;III、IV和X区温泉主要分布于 $\text{Na}^+/( \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^-/( \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值大于0.5,且TDS含量很高的右上角区域,表明这3个区内的温泉主要受蒸发浓缩作用控制;其余5个区的温泉在两个图中有所差异,表明水化学主要受水岩反应和蒸发浓缩的双重控制。在Gibbs图中受水岩作用控制的水样均偏上部,这说明温泉TDS的升高还受到其他离子的影响,如 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{F}^-$ 等,这可能是因地下水在深循环的过程中,岩石中一些不易溶解的矿物在高温高压作用下溶于水所致。

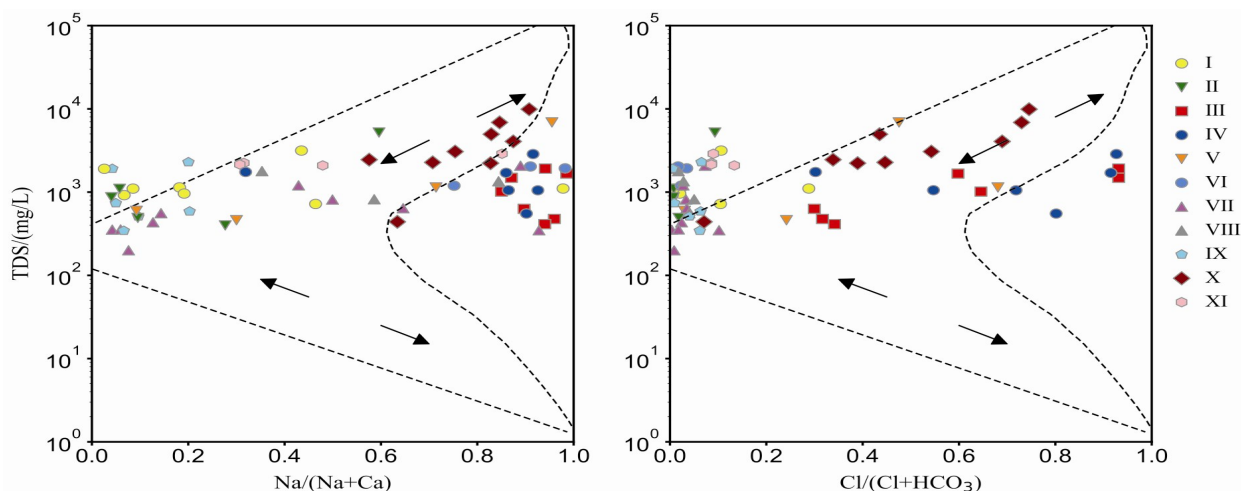


图5 温泉水化学吉布斯(Gibbs)图

(2) 温泉水特征系数。地下水中一些离子之间物质的量浓度比例可以帮助分析地下水的各种状态与地质作用,进而用于分析热水的运移聚集和赋存环境。根据温泉水化学数据计算的结果见表2。

$\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$  值表征地下水变质系数,可以反映地层封闭性、地层水变质程度和其活动性。其值越小,变质程度越大,反映地下水所处环境封闭条件越好;其值越大,反映地下水受渗入水影响越大。由表2可知,在Ⅵ、Ⅷ、ⅩⅠ和Ⅸ区的温泉

水变质系数较大,平均值均大于5,说明其受到了地表和浅层地下水补给的影响,封闭条件较差。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅶ和Ⅴ区温泉变质系数相对较小,平均值在2.21~4.78之间,反映了这些区域内温泉封闭条件相对较好,受浅层地下水补给的影响较小。标准海水和海相沉积水系的平均值为0.85,含岩盐地层溶滤水值约为1。结合吉布斯图可知,这也不排除Ⅳ和Ⅴ区  $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$  值较低的温泉受海相沉积地层和含盐地层溶滤作用的影响。

表2 研究区温泉水离子特征系数表

| 分区  | 特征系数                                  |                                          |                                          | 特征系数平均值                               |                                          |                                          |
|-----|---------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
|     | $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ | $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Ca}^{2+}$ | $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{HCO}_3^-$ | $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ | $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Ca}^{2+}$ | $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{HCO}_3^-$ |
| Ⅰ区  | 1.77~5.88                             | 0.04~33.87                               | 0.01~0.40                                | 3.63                                  | 4.70                                     | 0.11                                     |
| Ⅱ区  | 1.45~5.56                             | 0.07~56.47                               | 0.01~8.80                                | 2.88                                  | 15.95                                    | 1.43                                     |
| Ⅲ区  | 1.10~6.07                             | 4.99~136.05                              | 0.73~23.32                               | 3.20                                  | 35.12                                    | 7.82                                     |
| Ⅳ区  | 0.92~2.44                             | 1.56~41.33                               | 0.74~21.75                               | 1.52                                  | 18.93                                    | 9.07                                     |
| Ⅴ区  | 0.71~1.79                             | 0.21~41.12                               | 0.05~3.66                                | 1.35                                  | 12.66                                    | 1.46                                     |
| Ⅵ区  | 14.42~26.33                           | 0.64~13.37                               | 0.03~0.06                                | 19.04                                 | 5.12                                     | 0.04                                     |
| Ⅶ区  | 1.61~8.04                             | 0.03~6.43                                | 0.01~0.14                                | 4.78                                  | 1.33                                     | 0.07                                     |
| Ⅷ区  | 9.01~22.24                            | 0.21~0.85                                | 0.03~0.09                                | 12.63                                 | 0.60                                     | 0.06                                     |
| Ⅸ区  | 1.00~16.84                            | 0.01~0.52                                | 0.02~0.12                                | 5.91                                  | 0.18                                     | 0.07                                     |
| Ⅹ区  | 1.11~6.21                             | 0.97~21.91                               | 0.13~5.03                                | 2.21                                  | 10.80                                    | 2.26                                     |
| ⅩⅠ区 | 5.91~13.89                            | 0.23~1.43                                | 0.16~0.26                                | 8.20                                  | 0.61                                     | 0.19                                     |

$\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Ca}^{2+}$  值表征地下水水动力特征,其值越大,反映地下水流动条件越差,地下水流动越缓慢。由表2可知Ⅲ、Ⅳ、Ⅱ、Ⅴ和Ⅹ区温泉水的  $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Ca}^{2+}$  值最大,平均值均大于10,说明该区域温泉水地下水流动条件较差,流动速率最慢。其次为Ⅰ、Ⅴ和Ⅶ区温泉水,其  $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Ca}^{2+}$  平均值为1.33~5.12,温泉水流动性相对缓慢。其余区域的  $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Ca}^{2+}$  平均值均小于1,这表明这些区域的地下水流动性较好,更新速率最快。这与  $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$  变质系数所表征出的条件一致。

盐化系数  $\gamma\text{Cl}^-/(\gamma\text{HCO}_3^-)$  主要反映地层水的浓缩程度,其值越大反映出地下水流动路径越长,水循环越慢。Ⅲ和Ⅳ区温泉水盐化系数值最大,平均值分别为7.82和9.07,说明这两个区的地下水流动路径最长,水循环速率最慢。其次为Ⅱ、Ⅴ和Ⅹ区温泉,盐化系数平均值为1.43~2.26,

说明该区域地下水循环更替速率较快。其他地区的温泉盐化系数均小于0.1,说明这些区域温泉水循环路径最短,更新速率最快,且受到浅层地下水混入的影响。

对比  $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 、 $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Ca}^{2+}$  和  $\gamma\text{Cl}^-/(\gamma\text{HCO}_3^-)$  3组数据分析结果可知,整体上体现了中东部瓦力贡山和哇洪山-温泉断裂带的地层水封闭条件最好,循环路径最长;拉脊山、治多-玉树和囊谦地区地下水的封闭条件相对较好,浅层地下水混入比例中等;东北部祁连地区、西南部的称多-扎朵-珍秦、杂多和唐古拉山一带地下水的封闭条件较差,径流条件较好,更新速率较快。

### 3.2 温泉稳定同位素特征及成因分析

#### 3.2.1 温泉补给来源

$\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  为水中较为稳定的同位素,有助于判识地下水的起源,确定地下水与大气降水及地

表水之间的水力联系,追溯地下水补给条件,探索地下水的循环途径。

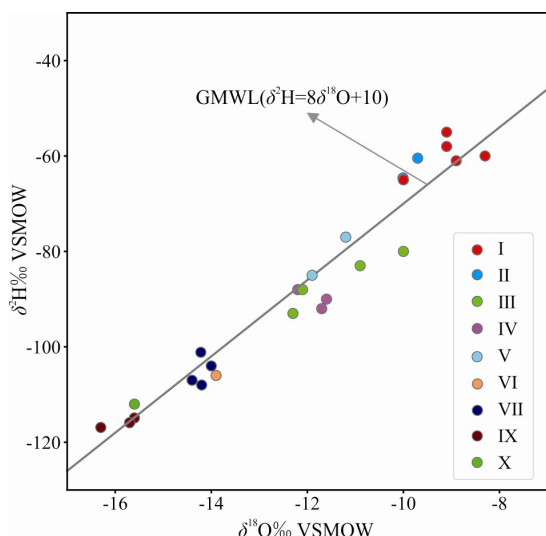


图6 青海省温泉水样 $\delta D$ - $\delta^{18}O$ 关系图

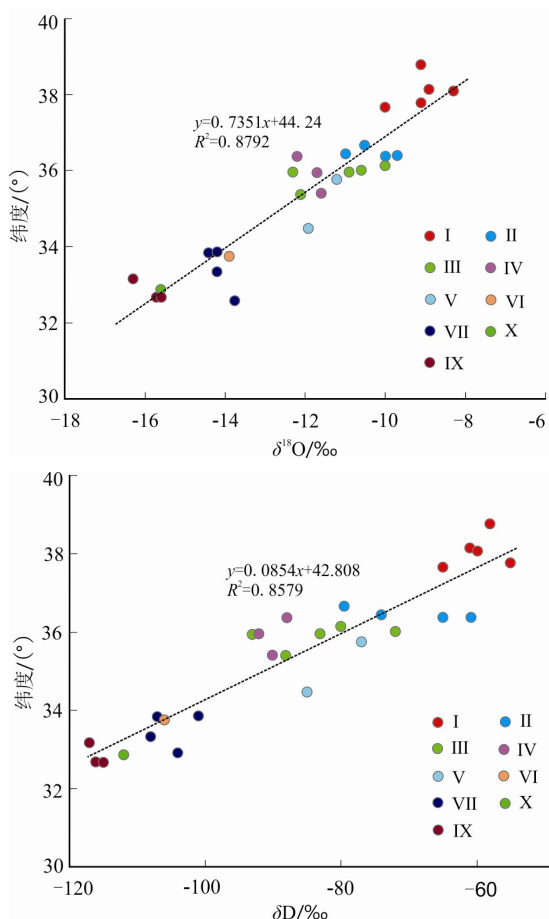


图7 青海省温泉水样 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 与纬度关系图

此次共采集、搜集温泉水同位素样品28组,由 $\delta D$ - $\delta^{18}O$ 关系图(图6)可知,温泉水样中的氢、氧稳定同位素基本落在大气降水线附近,说明温泉补给源均为大气降水成因。但不同区的同位素组成又具有显著的差异性,由东北部的北祁连地区温泉集中区到西南部的杂多-囊谦温泉集中区同位素的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 平均值逐渐降低, $\delta D$ 平均值变化范围为 $-59.8\text{‰} \sim -116.0\text{‰}$ , $\delta^{18}O$ 平均值变化范围为 $-9.1\text{‰} \sim -15.9\text{‰}$ 。Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ和Ⅶ区的温泉部分分布在GMWL的右侧,指示温泉受到了蒸发作用的影响,水在蒸发过程中造成同位素分馏,使得地下水重同位素富集,这与前述Gibbs图分析所得的结论一致。同时氢氧稳定同位素的离散分布特征反映了大气降水补给源的差别,西南部Ⅵ、Ⅶ、Ⅹ和Ⅸ区温泉的 $\delta^2H$ 和 $\delta^{18}O$ 值远小于其他区,表明该区域内温泉水来自于更高海拔的大气降水或气候更寒冷时的大气降水补给。结合图7可得知,温泉的 $\delta^2H$ 和 $\delta^{18}O$ 值具有一定的纬度效应,随纬度的增加, $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值也呈现逐渐增加的趋势。这与田立德等<sup>[50]</sup>提出的青藏高原从北向南降水中 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 的空间分布呈现北高南低的趋势相一致,他提出唐古拉山以北 $\delta D$ 的值基本上在 $-12\text{‰}$ 左右,唐古拉山以南 $\delta D$ 值大幅下降。温泉由降水补给,因此 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 呈现出与降水相一致的分布特征。

### 3.2.2 温泉补给高程

前人研究表明,高程效应是影响大气降水同位素的重要因素,表现出随着海拔升高同位素值下降的特征<sup>[51]</sup>。一般情况下,大气降水的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 与气温呈线性关系,高程效应就是随着海拔的升高,温度降低, $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 的值也随着降低<sup>[52]</sup>。

根据大气降水同位素的这种高程效应特征可确定温泉水的补给区和补给海拔高度。补给海拔高度计算公式如下:

$$H = \frac{\delta_s - \delta_p}{k} + h$$

式中: $H$ 为地下水补给海拔高度,m; $\delta_s$ 为取样点温泉同位素值, $\text{‰}$ ;  $\delta_p$ 为大气降水同位素值, $\text{‰}$ ;  $k$ 为同位素高度梯度值, $-\delta/100\text{m}$ ;  $h$ 为取样点高度,m。

据前人报道,青藏高原东北部降水中氧同位素全年平均值如下:祁连地区 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-7.6\text{‰}$ ,西宁地区 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-5.56\text{‰}$ ,共和-贵德地区 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-6.9\text{‰}$ ,沱沱河地区 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-10.1\text{‰}$ 。计算温泉补给的海拔高度结果如表3所示。

针对有同位素数据的温泉,经计算,不同区温泉补给海拔高度平均值为3928~6270 m,自东北部祁连地区到西北部的杂多-囊谦一带温泉所处高度依次增加,温泉补给高度也逐步增加,表明各地区的温泉主要来源于附近大气降水补给。

表3 温泉补给高程

| 温泉分区及编号 |    | 温泉口高程/m | $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ | 补给区高程/m | 温泉分区及编号 |    | 温泉口高程/m | $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ | 补给区高程/m |
|---------|----|---------|--------------------------------|---------|---------|----|---------|--------------------------------|---------|
| I 区     | 11 | 3771    | -9.10                          | 4271    | IV 区    | 22 | 4282    | -11.70                         | 5525    |
|         | 13 | 3776    | -8.30                          | 4009    |         | 23 | 3945    | -11.60                         | 5155    |
|         | 14 | 3630    | -10.00                         | 4430    |         | 35 | 3790    | -12.20                         | 5200    |
|         | 15 | 3824    | -8.90                          | 4257    | V 区     | 37 | 3969    | -11.20                         | 5046    |
|         | 16 | 3460    | -9.10                          | 3960    |         | 89 | 3860    | -11.90                         | 5170    |
| II 区    | 1  | 2281    | -10.50                         | 3928    | VI 区    | 82 | 4076    | -13.9                          | 5343    |
|         | 4  | 2891    | -9.70                          | 4271    | VII 区   | 63 | 4226    | -14.40                         | 5659    |
|         | 5  | 2980    | -10.00                         | 4460    |         | 64 | 4331    | -14.20                         | 5698    |
|         | 8  | 2317    | -10.99                         | 4127    |         | 54 | 3997    | -14.00                         | 5297    |
| III 区   | 26 | 2436    | -10.00                         | 3297    |         | 55 | 4219    | -14.20                         | 5586    |
|         | 27 | 2492    | -10.90                         | 3603    | X 区     | 60 | 4281    | -15.60                         | 5809    |
|         | 28 | 3235    | -12.30                         | 4735    | IX 区    | 78 | 3978    | -15.60                         | 5506    |
|         | 32 | 2890    | -12.1                          | 4334    |         | 61 | 4548    | -16.30                         | 6270    |
|         | 33 | 3726    | -10.6                          | 4754    |         | 79 | 3940    | -15.70                         | 5496    |

3.3 热储温度及循环深度

3.3.1 水岩平衡状态分析

估算热储温度的前提是与地热温标相关的矿物在热储中达到了水岩相互作用的平衡。因此在进行热储温度计算前需对地下热水的水岩矿物平衡状态进行判断,分析地热温标使用的可靠性。Na-K-Mg三角图是判断阳离子地热温度计(Na/K/Mg)适用性和地热流体-矿物平衡程度的有效工具。它将地热流体分为完全平衡、部分平衡或混合和未成熟水3种类型(图8),其中II区内杏园温泉和药王庙温泉位于平衡区,其余少数几个位于部分平衡或混合水区域外,其余大部分温泉均位于未成熟水区域,反映了水-岩之间尚未达到离子平衡状态,溶解作用仍在进行,或地下热水在上升过程混入了浅层冷水。

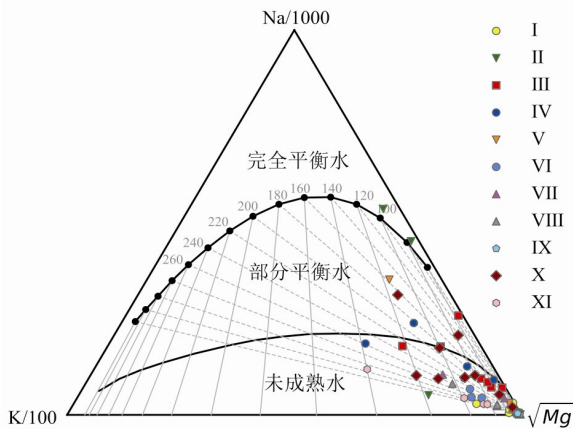


图8 青海省温泉水样品Na-K-Mg三角图(Na、K、Mg浓度单位mg/L)

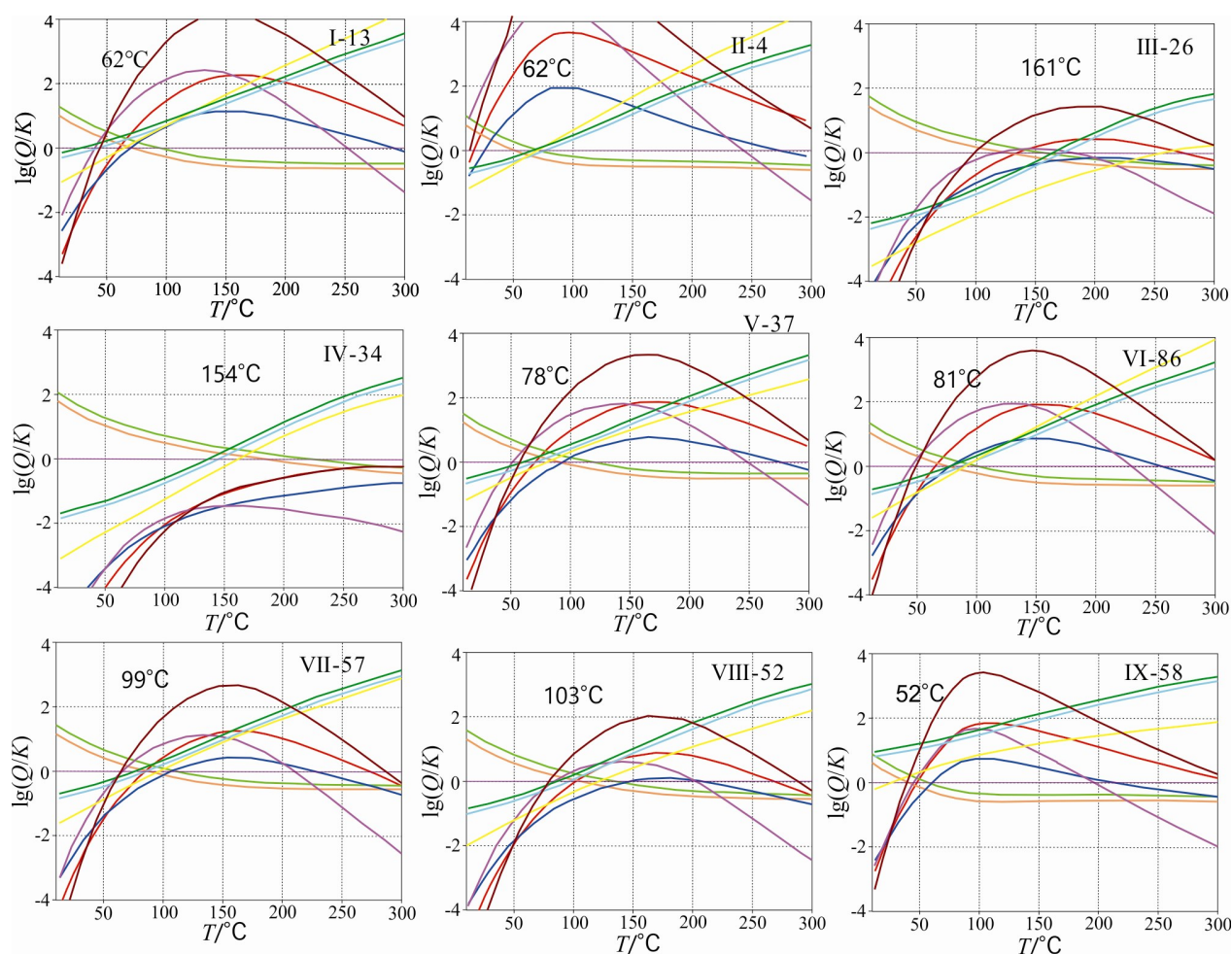
3.3.2 矿物饱和度

不同矿物的沉淀是由矿物的溶解差异性所造

成的,溶解度受温度的影响,导致矿物溶解度的不确定性。研究区温泉的水化学数据中铝的浓度低于检出限,无法生成含铝的硅酸盐矿物。事实上在常见的地热系统中总是有两种以上的含铝硅酸盐矿物达到平衡,在利用水化学成分来判断和推测深部地下热储的温度时,铝成了一个关键因素,因此,Pang和Reed提出了用固定铝的方法来还原热储层深部含铝硅酸盐矿物的平衡。当Al含量未知时,可以在不同温度下通过假设Al的活度是被某个含铝矿物如斜长石固定来估算,得到Al的浓度值,然后用来计算其他铝硅酸盐矿物的 $Q/K$ 值。由于地热系统中至少有两种铝硅酸盐矿物是平衡的,因此估算Al浓度值的方法对于给定的地热系统是有效的。

通过用斜长石固定Al的方法来分析研究区内温泉水的平衡状态。根据岩石矿物调查分析资

料,选取10种常见矿物,利用PREEQC软件计算各矿物的饱和指数,绘制饱和指数(SI)和温度(T)的曲线图(图9)。图中展示了每个区选取的一个具有代表性温泉的SI-T曲线(Ⅲ-26表示:区号-温泉编号),结果表明,石英、玉髓和钾长石矿物对所有的温泉水都达到或接近平衡,方解石和霏石在Ⅸ-58和X-74温泉水中处于过饱和状态,温泉出露于地表时有沉淀析出,这可能是受大气压的影响温泉中的 $\text{CO}_2$ 逸出使得热液pH值升高,导致温泉出露时的方解石沉淀。整体上Ⅰ-13、Ⅲ-26、Ⅴ-37、Ⅶ-57、Ⅷ-52和XⅠ-44曲线收敛性较好,获得的热储温度分别为62、161、78、99、103和107 $^{\circ}\text{C}$ ,Ⅱ-4、Ⅳ-34、Ⅵ-86、Ⅸ-58和X-74曲线收敛性稍差,其热储温度约为62、154、81、52和108 $^{\circ}\text{C}$ 。所有温泉中Ⅲ和Ⅳ区内的热储温度最高,其次为XⅠ区,这与其温泉口出露的温度高低相一致。



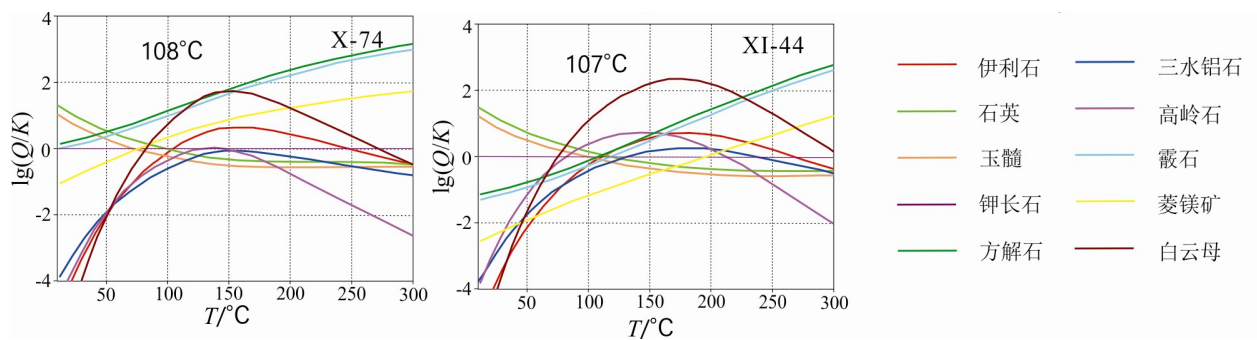


图9 各区典型温泉矿物SI-T图

3.3.3 热储温度

根据温泉水样品中的水化学组分分别利用前面提到的不同类型地温计来估算其热储温度,计算结果见表4。

由4.1节水岩平衡状态分析可知,Ⅱ区内的杏园温泉和药王庙温泉位于平衡区,表明这两处温泉的水岩反应程度相对较高,其余均位于未成熟区和混合水区域(图9),表明这些温泉均未达到水岩作用平衡状态,可能在上升过程中受到了浅层地下水混合作用影响。鉴于温泉样品水-岩相互作用尚不平衡,离子浓度未达到饱和,因此利用阳离子地热温标估算热储温度存在较大偏差,在本文中利用阳离子地热温标计算的热储温度仅作参考。

利用SiO<sub>2</sub>和多矿物平衡估算热储温度,除玉髓估算温度偏低外,其余3种估算结果85%以上温泉误差在30℃以内,选取3种温标估算结果的平均值作为热储温度(表4),同时对比贵德扎仓沟ZR1和ZR2钻孔测温数据可知,ZR1井在孔深1600 m处温度为132.7℃,ZR2井在孔深1600 m处温度为

110℃,与估算热储温度平均值122℃较为接近,说明该估算结果较为可靠。有4个温泉未测SiO<sub>2</sub>含量,根据温泉水化学特征选取相对合适的地热温标估算温度。由表4可知,Ⅲ、Ⅳ和Ⅷ区热储层以花岗岩为主,温度相对较高,花岗岩热储平均温度范围为90.7~143.5℃。XⅠ唐古拉山温泉集中区热储温度与花岗岩热储温度较为接近,温度范围为89.0~139.0℃之间,平均114.0℃,据资料显示,中侏罗世末早燕山运动使该区域褶皱隆起,造成轴向北西西的复式向斜构造,沿背斜带核部多有花岗岩入侵,花岗岩放射性生热可能为上部热储层提供了热源,因此使得该区热储温度偏高。Ⅵ和Ⅹ区温度次之,平均值分别为96.6和82.1℃,热储层岩性以砂岩和砂板岩为主。其余几个区的温泉平均温度位于58.3~68.8℃之间,热储层岩性主要为灰岩。整体上,单从热储层岩性来看,位于青海省中部的共和、贵德和乌兰等一带的花岗岩热储温度最高,称多-扎朵和唐古拉山地区温度次之,其余地区热储温度平均值较为接近,砂岩热储温度大于灰岩热储。

表4 热储温度及循环深度估算结果

| 温泉分区<br>及编号    |    | 测量<br>温度<br>/℃ | 地热温标计算热储温度/℃ |      |         |                               |                              |      |          |           |              | 冷水混入<br>比例/% | 热储循环<br>深度/m |
|----------------|----|----------------|--------------|------|---------|-------------------------------|------------------------------|------|----------|-----------|--------------|--------------|--------------|
|                |    |                | Na/K         | K/Mg | Na-K-Ca | SiO <sub>2</sub> (最大蒸<br>汽损失) | SiO <sub>2</sub> (无蒸<br>汽损失) | 玉髓   | 硅焔<br>图解 | 多矿物<br>平衡 | 热储平均<br>温度/℃ |              |              |
| 北祁连地区温泉集<br>中区 | 11 | 32.0           | 249.5        | 35.6 | 158.7   | 116.8                         | 118.4                        | 89.8 | 250.7    | 82.0      | 105.7        | 87.3         | 4688         |
|                | 12 | 14.0           | 101.2        | 70.8 | 80.4    | —                             | —                            | —    | —        | —         | 80.4         | —            | 3633         |
|                | 13 | 11.0           | 330.9        | 94.7 | 206.2   | 80.0                          | 75.9                         | 44.4 | 234.8    | 102.0     | 86.0         | 95.1         | 2230         |
|                | 14 | 46.0           | 402.9        | 62.7 | 228.3   | 92.1                          | 89.7                         | 58.9 | 152.9    | 90.0      | 90.6         | 73.9         | 2340         |
|                | 15 | 40.0           | 247.9        | 57.8 | 163.5   | 93.5                          | 91.4                         | 60.7 | 179.7    | 78.0      | 87.6         | 81.9         | 2270         |
|                | 16 | 20.0           | 272.3        | 30.7 | 144.2   | 39.7                          | 30.8                         | -2.0 | 72.0     | 40.0      | 36.8         | 82.5         | 1627         |
|                | 17 | 15.3           | 238.4        | 23.4 | 142.4   | 36.8                          | 27.6                         | -5.2 | 80.0     | 23.0      | 29.1         | 73.2         | 1329         |
|                | 18 | 13.0           | 200.1        | 22.6 | 126.0   | 33.6                          | 24.2                         | -8.7 | 89.9     | 45.0      | 34.3         | 94.7         | 1527         |

续表

| 温泉分区<br>及编号                |    | 测量<br>温度<br>/℃ | 地热温标计算热储温度/℃ |       |         |                               |                              |       |          |           |              | 冷水混入<br>比例/% | 热储循环<br>深度/m |
|----------------------------|----|----------------|--------------|-------|---------|-------------------------------|------------------------------|-------|----------|-----------|--------------|--------------|--------------|
|                            |    |                | Na/K         | K/Mg  | Na-K-Ca | SiO <sub>2</sub> (最大蒸<br>汽损失) | SiO <sub>2</sub> (无蒸<br>汽损失) | 玉髓    | 硅熔<br>图解 | 多矿物<br>平衡 | 热储平均<br>温度/℃ |              |              |
| 拉脊山活<br>动断裂温<br>泉集中区       | 1  | 15.0           | 60.7         | 91.9  | 52.9    | —                             | —                            | —     | —        | —         | 52.9         | —            | 1545         |
|                            | 2  | 12.7           | 39.3         | 68.3  | 37.5    | —                             | —                            | —     | —        | —         | 37.5         | —            | 1053         |
|                            | 3  | 18.0           | 316.2        | 44.0  | 190.0   | 54.1                          | 46.8                         | 14.2  | 119.9    | 73.0      | 57.9         | 89.7         | 1172         |
|                            | 4  | 25.0           | 263.9        | 15.2  | 149.2   | 63.2                          | 56.9                         | 24.6  | 119.9    | 64.0      | 61.4         | 83.6         | 1247         |
|                            | 5  | 43.0           | 322.5        | 29.5  | 174.8   | 76.1                          | 71.4                         | 39.7  | 107.9    | 71.0      | 72.8         | 65.0         | 1495         |
|                            | 6  | 22.0           | 276.4        | 15.9  | 144.1   | 57.0                          | 50.0                         | 17.5  | 98.9     | 116.0     | 74.3         | 82.7         | 1527         |
|                            | 8  | 22.0           | 354.6        | 120.0 | 218.2   | 54.1                          | 46.8                         | 14.2  | 97.9     | 96.0      | 65.6         | 83.0         | 1338         |
| 瓦力贡山<br>断裂温泉<br>集中区        | 26 | 97.0           | 214.1        | 124.2 | 148.5   | 122.9                         | 125.5                        | 97.6  | 160.6    | 125.0     | 124.5        | 45.9         | 3096         |
|                            | 27 | 93.0           | 164.5        | 101.3 | 119.8   | 120.6                         | 122.8                        | 94.7  | 143.2    | 123.0     | 122.2        | 37.3         | 3035         |
|                            | 28 | 67.0           | 156.1        | 77.5  | 114.5   | 117.3                         | 118.9                        | 90.4  | 177.8    | 121.0     | 119.1        | 66.9         | 2954         |
|                            | 29 | 25.3           | 77.9         | 38.6  | 64.4    | 71.5                          | 66.3                         | 34.3  | 136.5    | 73.0      | 70.2         | 88.0         | 1254         |
|                            | 30 | 37.0           | 38.9         | 49.0  | 37.2    | 67.3                          | 61.5                         | 29.4  | 76.0     | 101.0     | 76.6         | 58.2         | 1379         |
|                            | 31 | 76.0           | 154.4        | 69.4  | 113.7   | 129.0                         | 132.8                        | 105.6 | 201.4    | 116.0     | 125.9        | 63.7         | 2651         |
|                            | 32 | 51.0           | 145.1        | 70.4  | 107.9   | 111.7                         | 112.4                        | 83.3  | 191.9    | 119.0     | 114.4        | 77.6         | 2394         |
| 哇洪山-温<br>泉断裂带<br>温泉集中<br>区 | 22 | 78.0           | 157.2        | 86.4  | 115.5   | 120.6                         | 122.8                        | 94.7  | 165.4    | 139.0     | 127.5        | 56.4         | 4045         |
|                            | 23 | 64.0           | 200.6        | 94.5  | 140.5   | 121.2                         | 123.6                        | 95.5  | 192.9    | 135.0     | 126.6        | 71.0         | 4016         |
|                            | 24 | 50.0           | 180.5        | 28.1  | 125.8   | 32.0                          | 22.4                         | -10.4 | —        | 60.0      | 38.2         | —            | 2939         |
|                            | 34 | 87.0           | 244.3        | 140.8 | 164.9   | 139.0                         | 144.6                        | 118.7 | 204.9    | 159.0     | 147.5        | 62.4         | 4686         |
|                            | 35 | 67.0           | 163.1        | 112.9 | 119.0   | 136.6                         | 141.8                        | 115.6 | 229.5    | 152.0     | 143.5        | 74.5         | 4557         |
|                            | 36 | 44.0           | 101.6        | 54.4  | 80.2    | 96.8                          | 95.1                         | 64.7  | 168.3    | 80.0      | 90.7         | 75.6         | 2864         |
| 昆南活动<br>断裂带温<br>泉          | 37 | 35.0           | 151.6        | 48.2  | 111.5   | 30.9                          | 21.2                         | -11.7 | —        | 76.0      | 42.7         | —            | 1903         |
|                            | 38 | 39.0           | 137.0        | 117.8 | 103.4   | 116.7                         | 118.2                        | 89.6  | 255.7    | 95.0      | 110.0        | 88.6         | 4594         |
|                            | 89 | 18.0           | 237.5        | 28.6  | 141.8   | 42.2                          | 33.7                         | 0.8   | —        | 60.0      | 45.3         | —            | 2008         |
|                            | 91 | 27.5           | 216.5        | 31.6  | 142.7   | 55.7                          | 48.6                         | 16.1  | 51.0     | 88.0      | 64.1         | 57.4         | 2760         |
| 称多扎朵-<br>珍秦温泉<br>集中区       | 82 | 45.0           | 232.2        | 94.1  | 158.6   | 138.6                         | 144.2                        | 118.3 | —        | 128.0     | 136.9        | —            | 4112         |
|                            | 83 | 42.0           | 252.9        | 87.8  | 169.1   | 77.2                          | 72.6                         | 41.0  | 107.9    | 68.0      | 72.6         | 65.0         | 2162         |
|                            | 86 | 45.0           | 279.6        | 96.1  | 182.3   | 85.4                          | 82.0                         | 50.8  | 123.9    | 73.0      | 80.1         | 66.9         | 2390         |
| 治多-玉树<br>温泉集中<br>区         | 51 | 12.5           | 182.6        | 16.8  | 115.4   | —                             | —                            | —     | —        | —         | 66.1         | —            | 1965         |
|                            | 54 | 24.0           | 243.8        | 10.5  | 128.5   | 33.9                          | 24.5                         | -8.3  | —        | 136.0     | 64.8         | —            | 1927         |
|                            | 55 | 34.0           | 146.0        | 54.4  | 108.4   | 94.2                          | 92.1                         | 61.5  | 185.3    | 90.0      | 92.1         | 84.2         | 2753         |
|                            | 56 | 33.0           | 277.2        | 76.0  | 179.2   | 77.3                          | 72.8                         | 41.1  | 134.6    | 70.0      | 73.3         | 79.2         | 2185         |
|                            | 57 | 65.0           | 229.9        | 108.3 | 157.1   | 102.2                         | 101.4                        | 71.4  | 133.6    | 90.0      | 97.9         | 53.4         | 2928         |
|                            | 63 | 27.0           | 221.6        | 40.1  | 149.6   | 69.1                          | 63.6                         | 31.5  | 123.9    | 93.0      | 75.2         | 82.3         | 2242         |
|                            | 64 | 24.0           | 219.2        | 37.4  | 149.0   | 58.8                          | 52.1                         | 19.6  | 91.9     | 72.0      | 61.0         | 79.2         | 1809         |
|                            | 66 | 19.0           | 277.3        | 37.7  | 166.6   | 55.0                          | 47.8                         | 15.2  | 101.9    | 38.0      | 46.9         | 86.7         | 1384         |
|                            | 80 | 23.5           | 375.6        | 29.8  | 171.7   | 57.3                          | 50.4                         | 17.9  | 99.9     | 41.0      | 49.6         | 82.0         | 1464         |
|                            | 81 | 26.0           | 282.4        | 29.9  | 147.9   | 46.4                          | 38.3                         | 5.5   | 48.0     | 53.0      | 45.9         | 53.5         | 1353         |
|                            |    |                |              |       |         |                               |                              |       |          |           |              |              |              |
| 巴木曲—<br>格拉断裂<br>带温泉集<br>中区 | 48 | 65.0           | 256.0        | 74.7  | 169.0   | 108.0                         | 108.0                        | 78.6  | 154.8    | 120.0     | 112.0        | 60.8         | 3356         |
|                            | 49 | 35.0           | 180.6        | 46.0  | 127.1   | 79.4                          | 75.2                         | 43.7  | 119.9    | 70.0      | 74.9         | 73.5         | 2231         |
|                            | 52 | 63.0           | 246.5        | 104.8 | 165.6   | 117.3                         | 119.0                        | 90.5  | 73.0     | 102.0     | 112.8        | 33.8         | 3379         |

续表

| 温泉分区<br>及编号                |      | 测量<br>温度<br>/℃ | 地热温标计算热储温度/℃ |       |         |                               |                              |       |          |           |              | 冷水混入<br>比例/% | 热储循环<br>深度/m |
|----------------------------|------|----------------|--------------|-------|---------|-------------------------------|------------------------------|-------|----------|-----------|--------------|--------------|--------------|
|                            |      |                | Na/K         | K/Mg  | Na-K-Ca | SiO <sub>2</sub> (最大蒸<br>汽损失) | SiO <sub>2</sub> (无蒸<br>汽损失) | 玉髓    | 硅熔<br>图解 | 多矿物<br>平衡 | 热储平均<br>温度/℃ |              |              |
| 杂多-囊温<br>泉集中区              | 58   | 21.0           | 219.9        | 48.2  | 146.6   | 56.6                          | 49.6                         | 17.1  | 91.9     | 50.0      | 52.1         | 82.5         | 1504         |
|                            | 59   | 21.0           | 324.8        | 22.6  | 164.1   | 44.3                          | 35.9                         | 3.1   | 46.0     | 57.0      | 45.7         | 63.4         | 1311         |
|                            | 61   | 30.0           | 261.8        | 22.4  | 146.4   | 54.3                          | 47.0                         | 14.4  | 50.0     | 62.0      | 54.4         | 45.6         | 1575         |
|                            | 78   | 27.0           | 309.9        | 23.0  | 157.6   | 56.1                          | 49.0                         | 16.5  | 70.0     | 88.0      | 64.4         | 67.4         | 1876         |
|                            | 79   | 38.0           | 293.9        | 33.3  | 165.7   | 76.7                          | 72.2                         | 40.5  | 121.9    | 85.0      | 78.0         | 73.1         | 2288         |
|                            | 67   | 18.0           | 271.9        | 35.3  | 167.3   | 57.3                          | 50.4                         | 17.9  | 120.9    | 59.0      | 55.6         | 89.7         | 1609         |
| 唐古拉山<br>南缘断裂<br>带温泉集<br>中区 | 68   | 25.0           | 153.4        | 61.5  | 112.5   | 78.9                          | 74.7                         | 43.1  | 179.7    | 76.0      | 76.5         | 89.4         | 2245         |
|                            | 69   | 25.0           | 167.3        | 44.3  | 119.7   | 63.2                          | 56.9                         | 24.6  | 92.9     | 57.0      | 59.1         | 35.2         | 1715         |
|                            | 70   | 57.0           | 250.6        | 111.8 | 167.6   | 102.6                         | 101.8                        | 71.9  | 154.8    | 93.0      | 99.1         | 88.3         | 2930         |
|                            | 72   | 59.0           | 270.8        | 122.4 | 178.3   | 111.9                         | 112.7                        | 83.6  | 180.6    | 120.0     | 114.9        | 92.5         | 3407         |
|                            | 73   | 27.0           | 163.8        | 82.9  | 119.6   | 63.8                          | 57.6                         | 25.3  | 114.9    | 85.0      | 68.8         | 63.6         | 2011         |
|                            | 74   | 62.0           | 196.8        | 93.7  | 138.5   | 92.3                          | 89.9                         | 59.1  | 114.9    | 102.0     | 94.7         | 48.8         | 2796         |
|                            | 75   | 24.0           | 102.3        | 77.0  | 81.0    | 60.6                          | 54.0                         | 21.6  | 113.9    | 52.0      | 55.6         | 84.0         | 1609         |
|                            | 76   | 40.0           | 168.8        | 102.5 | 122.5   | 75.3                          | 70.6                         | 38.8  | 114.9    | 108.0     | 84.6         | 69.7         | 2490         |
| 77                         | 46.0 | 144.9          | 116.0        | 108.3 | 81.9    | 78.0                          | 46.6                         | 112.9 | 97.0     | 85.6      | 62.8         | 2521         |              |
| 唐古拉山<br>温泉集中<br>区          | 42   | 63.0           | 305.4        | 101.5 | 193.9   | 140.6                         | 146.5                        | 120.9 | 259.1    | 130.0     | 139.0        | 78.8         | 3087         |
|                            | 43   | 68.0           | 309.9        | 89.1  | 194.5   | 118.9                         | 120.8                        | 92.4  | 178.8    | 122.0     | 120.5        | 64.7         | 2692         |
|                            | 44   | 67.0           | 303.9        | 142.4 | 194.9   | 108.9                         | 109.1                        | 79.8  | 156.7    | 104.0     | 107.3        | 60.5         | 2410         |
|                            | 45   | 46.0           | 297.3        | 85.6  | 188.4   | 92.7                          | 90.3                         | 59.6  | —        | 84.0      | 89.0         | —            | 2018         |

3.3.4 冷热水混和比例

地热流体从热储到出露于地表成泉之前,可能与浅层地表水或其他类型的地下水混合,对地热流体中的化学组分产生不可忽略的影响,致使地热流体的温度降低。利用前述提到的硅熔图解法对研究区温泉进行分析(图2),结果表明(表5)研究区温泉冷水混入比例介于33.8%~95.1%,差异性较大,其中Ⅲ、Ⅳ、Ⅵ和Ⅷ区冷水混入比例平均值均较低,介于56%~68%之间,Ⅰ、Ⅱ和Ⅶ区冷水

混入比例较大,均大于75%。整体上温泉水温大于80℃,其冷水混入比例小于50%,温泉水温小于40℃,其冷水混入比例大于70%。由此可见,整个研究区的温泉存在大量冷水混入,东北部祁连山、拉脊山地区冷水混入比例最大,中部贵德、兴海、都兰和玉树巴塘等一带温泉冷水混入比例最小,西南部玉树、杂多、囊谦和唐古拉兵站一带温泉冷水混入比例中等。

表5 研究区温泉冷水混入比例

| 温泉<br>编号 | 冷水混入比例<br>/% | 温泉温度<br>/℃ | 温泉<br>编号 | 冷水混入比例<br>/% | 温泉温度<br>/℃ | 温泉<br>编号 | 冷水混入比例<br>/% | 温泉温度<br>/℃ |
|----------|--------------|------------|----------|--------------|------------|----------|--------------|------------|
| Ⅰ区       |              |            | Ⅳ区       |              |            | Ⅷ        |              |            |
| 11       | 87.3         | 32         | 22       | 56.4         | 78         | 48       | 60.8         | 65         |
| 12       | —            | 14         | 23       | 71.0         | 64         | 49       | 73.5         | 35         |
| 13       | 95.1         | 11         | 24       | —            | 50         | 52       | 33.8         | 63         |
| 14       | 73.9         | 46         | 34       | 62.4         | 87         | Ⅸ        |              |            |
| 15       | 81.9         | 40         | 35       | 74.5         | 67         | 58       | 82.5         | 21         |
| 16       | 82.5         | 20         | 36       | 75.6         | 44         | 59       | 63.4         | 21         |
| 17       | 73.2         | 15.3       | Ⅴ区       |              |            | 61       | 45.6         | 30         |
| 18       | 94.7         | 13         | 37       | —            | 35         | 78       | 67.4         | 27         |

续表

|    |      |      |    |      |      |     |      |    |
|----|------|------|----|------|------|-----|------|----|
| Ⅱ区 |      |      | 38 | 88.6 | 39   | 79  | 73.1 | 38 |
| 1  | —    | 15   | 89 | —    | 18   | 67  | 89.7 | 18 |
| 2  | —    | 12.7 | 91 | 57.4 | 27.5 | X   |      |    |
| 3  | —    | 18   | Ⅵ区 |      |      | 68  | 89.4 | 25 |
| 4  | 83.6 | 25   | 82 | —    | 45   | 69  | 35.2 | 25 |
| 5  | 65.0 | 43   | 83 | 65.0 | 42   | 70  | 88.3 | 57 |
| 6  | 82.7 | 22   | 86 | 66.9 | 45   | 72  | 92.5 | 59 |
| 8  | 83.0 | 22   | Ⅶ区 |      |      | 73  | 63.6 | 27 |
| Ⅲ区 |      |      | 51 | —    | 12.5 | 74  | 48.8 | 62 |
| 26 | 45.9 | —    | 54 | —    | 24   | 75  | 84.0 | 24 |
| 27 | 37.3 | 98   | 55 | 84.2 | 34   | 76  | 69.7 | 40 |
| 28 | 66.9 | 67   | 56 | 79.2 | 33   | 77  | 62.8 | 46 |
| 29 | 88.0 | 25.3 | 57 | 53.4 | 65   | X I |      |    |
| 30 | 58.2 | 37   | 63 | 82.3 | 27   | 42  | 78.8 | 63 |
| 31 | 63.7 | 76   | 64 | 79.2 | 24   | 43  | 64.7 | 68 |
| 32 | 77.6 | 51   | 66 | 86.7 | 19   | 44  | 60.5 | 67 |
|    |      |      | 80 | 82.0 | 23.5 | 45  | —    | 46 |
|    |      |      | 81 | 53.5 | 26   |     |      |    |

3.3.5 热储循环深度

为详细了解不同区域温泉成因,可对热水的循环深度进行估算。地下热水通常是在深部循环的过程中受到深部热源的加热而增温。通过下列公式大致推测温泉循环深度。

$$H = \frac{t - t_0}{k} + H_0$$

式中: $t$ 为热储温度,℃; $t_0$ 为当地多年平均气温,℃; $k$ 为地温梯度,℃/100m; $H_0$ 为常温带厚度,m。

因研究区范围较大,为了使计算结果更准确,在本次调查和综合分析的基础上,结合前人研究成果,确定了不同地区的地温梯度值如下:祁连年平均气温-5.6℃,恒温带厚度50m,地温梯度2.40℃/100m;刚察年平均气温-5.6℃,恒温带厚度50m,地温梯度4.2℃/100m;门源年平均气温-4℃,恒温带厚度50m,地温梯度2.59℃/100m;拉脊山、西宁地区年平均气温6.1℃,恒温带厚度50m,地温梯度3.13℃/100m;平安年平均气温6.1℃,恒温带厚度50m,地温梯度4.62℃/100m;贵德年平均气温7.1℃,恒温带厚度10m,地温梯度3.8℃/100m;共和年平均气温7.1℃,恒温带厚

度10m,地温梯度5.07℃/100m;同仁年平均气温7.1℃,恒温带厚度10m,地温梯度4.5℃/100m;兴海、乌兰、都兰地区年平均气温2.7℃,恒温带厚度45m,地温梯度3.12℃/100m;玛沁地区年平均气温-3.9℃,恒温带厚度40m,地温梯度3.3℃/100m;治多、玉树、囊谦一带年平均气温2.9℃,恒温带厚度50m,地温梯度3.3℃/100m。唐古拉山年平均气温-3.1℃,恒温带厚度20m,地温梯度为自测数据4.68℃/100m。根据各地年平均气温、恒温带厚度、地温梯度及各热储层温度估算出各温泉区循环深度(见表4)。整体上在整个研究区内热储循环深度最小的位于祁连山-拉脊山一带,热储循环深度最大的位于贵德-兴海-乌兰和称多、唐古拉山一带,自昆南大断裂向南治多-玉树-杂多-囊谦一带热储循环深度处于中等。

4 讨论

4.1 岩性对温泉分布的控制作用

水作为各种地下活动不可缺少的组成部分,其水化学成因受水岩反应程度、接触围岩性质以及后期构造和岩浆活动的多重控制,会呈现出不同的水化学特征。整体上从水化学类型来看,I、

Ⅱ、Ⅶ区水化学类型主要以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 为主,Ⅸ区水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 和 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ ,这几个区域主要以沉积岩为主,在热储循环过程中,碳酸盐岩中的石灰岩( $\text{CaCO}_3$ )、白云岩( $\text{MgCO}_3$ )的水岩反应成为 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 的补给来源,同时,砂岩、砾岩中的钠长石等矿物的溶解成为 $\text{Na}^+$ 的补给来源。在火成岩分布的Ⅲ、Ⅳ区,水化学类型主要为 $\text{Cl-Na}$ 、 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 和 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na}$ ,温泉水上升过程中,在高温高压作用下花岗岩及其他火成岩中的长石类矿物(钠长石、钾长石等)和黏土类矿物的溶解是造成地下水中 $\text{Na}^+$ 偏高的主要因素, $\text{SO}_4^{2-}$ 主要来源于渗流途径中硫酸盐矿物(如石膏)的溶解,同时可能受到诸如岩石介质中黄铁矿的氧化等地球化学过程的影响。玉树热水沟哈桑查果温泉、安冲乡茶桐温泉、囊谦县杂羊乡茶滩村加翁温泉和Ⅵ区内温泉热储层岩性均为砂板岩,水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型,原岩可能为凝灰岩,因此具有与火成岩相同的阳离子。Ⅴ区4个温泉的水化学差异性较大,热储层岩性也各不相同,卓儿啦温泉水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Mg}$ ,玛沁县东倾沟灰岩热储水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ,阴、阳离子均来源于碳酸盐岩矿物的溶解。温泉水库上游温泉和秀沟东温泉水化学类型分别为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 和 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ ,热储层岩性为砂岩和变质砂岩,该类岩石在长期水岩作用下演化出 $\text{Na}(\text{Ca})\text{-(HCO}_3\text{)}\text{SO}_4$ 水类型,断裂的深切致使幔源 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 和 $\text{SO}_2$ 气体混入,也可能导致 $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度偏高。Ⅹ和ⅩⅠ区热储层岩性为砂岩,热储温度次之,平均值分别为82.1和114℃,ⅩⅠ区热储温度相对其他砂岩热储较高,推测除受岩性影响外,可能还受其他因素的控制。整体上,地热流体水化学类型主要受热储层岩性的控制,单从岩性与热储温度的对应关系来看,花岗岩热储温度最高,砂岩次之,灰岩热储温度最低。

#### 4.2 断裂构造对温泉分布的控制作用

断裂构造是地球上最普遍的控热构造,地壳中除了常见的一般规模的断层外,还存在一些区域性大断裂。区域性大断裂按其切割深度可划分为:岩石圈断裂(一级断裂),规模大,延深切穿岩

石圈达到软流圈,该断裂多是活动带或稳定区的分界线,也是板块俯冲碰撞带的聚敛边界断裂;地壳断裂(二级断裂),切穿地壳到达莫霍面,该断裂对中基性-超基性岩浆作用、成矿作用和沉积作用的发生、发展演化具有控制作用;基底断裂(三级断裂),切穿结晶基底,止于中地壳上部低速层的断裂,该断裂对中酸性岩浆活动、沉积相带和矿田的分布具有控制作用;盖层断裂(其他断裂),切穿沉积盖层达到变质基底顶面。区域性大断裂的活动一方面会改变地下深部的温、压状态,促使岩浆形成,另一方面为深部物质向上运移和地表温泉深循环提供通道。断裂构造活动性差异往往使断裂带上的温泉流表现出不同的地球化学特征,同时流体地球化学也能反映断裂、地热和地震活动规律。在区域性大断裂控制作用下,青海省境内温泉主要沿断裂展布方向呈串珠状分布,且温度较高温泉主要密集在不同构造体系的交接复合部位和同一构造体系的转折部位。

Ⅰ、Ⅴ、Ⅶ和ⅩⅠ区温泉所处断裂带为地壳断裂,断开了整个地壳并接触到上地幔,有利于地幔热流沿断裂向上传输,形成了区域性的控热断裂,该断裂被少量小规模断裂切割,这些深浅不一、纵横交错的断裂系统为区内深部热水对流循环提供了有利的通道,各区热储循环深度平均值为1808~3598 m,热储温度平均值为65.5~114℃。

Ⅲ和Ⅳ区温泉沿北北西向的基底断裂瓦里贡山断裂和哇洪山-温泉断裂展布。瓦里贡山断裂带切割较深,沿线分布燕山期中酸性侵入岩,第四纪新构造运动强烈,为深部热流体对流运移提供了良好的通道,形成纵贯西秦岭-东昆仑南北向地热带,沿此构造岩浆带分布的温泉温度最高,由南向北3个较高温度温泉依次为新街温泉(67℃/28)、扎仓沟温泉(98℃/27,超过当地沸点97℃,为沸泉)和曲乃亥温泉(86℃/26),这3个温泉热储温度为119.1~124.5℃,热储循环深度为2673~2802 m。另该区内克才温泉和阿乙亥温泉距离断层较远,热储温度为70.2~76.6℃,热储循环深度为1577~2243 m,循环通道可能为次级断裂,进一步说明了断裂对温泉的控制作用。哇洪山-温泉断裂为右行走滑为主兼压性逆冲的断裂,切割较

深,沿线分布有三叠系鄂拉山群火山岩和印支-燕山期中酸性岩体,第四纪构造活动强烈。近东西向的岩石圈深大断裂昆中断裂和地壳深大断裂昆北断裂均被该断裂截断,同时沿线发育的少量小规模近南北向和近东西向断裂,将地质体切割形成100~170 m宽的断层破碎带,为深部热流体对流运移提供了良好的通道,沿此构造带分布的温泉温度为44~87 °C,热储温度90.7~147.5 °C,热储循环深度平均值为2000~3263 m。在整个研究区内温泉循环深度较大,这表明热储循环深度与断层切割深度相关。

Ⅱ、Ⅷ、Ⅸ和X区温泉均沿三级断裂分布,属基底断裂,切穿结晶基底,达中地壳上部低速层,较其他断裂而言切割相对较浅。Ⅱ和Ⅸ区温泉分布距离断层稍远,整体热储温度和循环深度均较小。拉脊山活动断裂由拉脊山南缘断裂和拉脊山北缘断裂共同组成一组向NE方向突出的弧形挤压逆冲断裂带,在甘子河北合并为一条断裂,为热储的循环提供了良好的通道,温泉即出露于两条断裂的结合部位,热储温度37.5~74.3 °C,热储循环深度平均为1224 m。乌丽-囊谦断裂与拉鸡山断裂相似,均呈向NE方向凸起的弧形逆断层,整体走向北西-南东向,同时该断裂被少量北北东向小断裂切割,形成局部断裂破碎带,温泉出露于此,热储温度45.7~78.0 °C,循环深度平均1694 m。Ⅷ和X区温泉均沿断裂两侧展布,距断裂较近,整体温度和热储循环深度较大。巴木曲-格拉断裂和唐古拉山南缘断裂均为活动断裂,目前仍处于强烈活动期,热储平均温度为99.9和82.1 °C,热储循环深度为2989 m和2414 m。热储温度除受常规地温梯度的影响,可能还受到构造-岩浆活动的影响。

#### 4.3 温泉热源机制

温泉热源主要有岩浆活动热、岩浆余热、化学反应热与放射热、活动断裂产生的构造热及天然地热增温等<sup>[80-81]</sup>。研究区不同温泉的热源也不尽相同,有单一的地热增温,也有叠加了放射性生热、构造热和岩浆余热的组合热源(图10)。

通常,地面以下按温度状况可分为变温层、常温层和增温层。天然地热增温指常温层以下地层

温度随深度的增加而增加,不同地区增温率有所不同,地壳的近似平均地温梯度为2.5 °C/100m。地下水在深循环的过程中会受到地热增温的影响,水温升高。一般仅受天然地热增温影响的热储温度相对较低,如研究区东北部的祁连、拉脊山和南部的杂多-囊谦一带,热储层岩性主要为砂岩或灰岩。

在地壳岩石中含有多种放射性元素,放射性元素的衰变生热是地球内部热的主要来源之一。U、Th和K等放射性元素因具有生热量大、丰度高和半衰期长等特性而成为地壳内最主要的放射性生热元素。前人研究结果显示,地球上放射性元素的浓度随深度指数衰减,主要集中在地表一定深度范围内,即地壳放射性元素集中层的厚度,全球平均为10 km。研究区位于青藏高原东北部,青藏高原印度板块与亚洲板块碰撞导致地壳增厚,使得U、Th、K等放射性元素浓度在挤压增厚的地壳内,通过放射性生热层的增厚而相对富集,最终使壳内放射性生热效应增强,从而为热储富集提供了重要的热源。如研究区中东部共和、贵德一带热储温度最高,该地区中酸性岩体发育,岩体U、K和Th含量高,花岗岩放射性生热率平均值为3.20  $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ,略高于世界花岗岩放射性生热率的平均值2.5  $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ,花岗岩产生放射热为热源,壳幔正常增温和壳内花岗岩中放射性元素蜕变生成的放射热作为局部热源形成较高热流背景,使得该地区具有较高的热储温度。

岩浆余热和活动断层摩擦生热也是地球内部热的主要热源之一。青藏高原新生代岩浆活动仍然存在,上升到地壳浅层或地壳表面的岩浆在冷却的过程中释放的热量称为岩浆余热,这部分热量以传导方式转移给围岩,成为地球内部热源的一部分。同时,研究区有晚更新世以来的活动断裂带共24条,在区域构造应力作用下,断裂构造变形造成摩擦生热,即构造活动热,也是地球内部热源的重要组成部分。研究区西南部唐古拉山地处羌塘盆地,区内新生带岩浆活动仍然存在。第四纪青藏高原整体快速隆升,羌塘深部热力作用整体活跃与差异活动发展、北羌塘深部地幔热柱整体隆升。同时根据中国地震台网资料显示,

1988—2008年期间该地区共发生三级以上地震38次,地震活动频繁,表明现今构造活动强烈,该区域温泉热源主要为构造-岩浆活动,据测温资料显示,唐古拉山地区地温梯度为4.68 °C/100m,较高的地温梯度成为其另一主要热源。

早期有学者发现青藏高原中北部地壳15~50km深处有一低速-高导层,Wang等证实了该低速-高导层为来自地壳岩石8%~22%的部分熔融层,该熔融层也为热储提供了部分热源。Lin等报道称青藏高原增厚地壳中的“低速层”为共和盆地干热岩资源的形成提供了最重要的壳内恒常热源。因此低速-高导的熔融层也成为共和盆地温泉热源的一个重要组成。同时有学者指出,在区域构造应力作用下,软流圈热物质上涌形成地幔通道流,地幔通道流是地壳熔融体的重要来源和造成壳内热异常的重要原因。因此地幔通道流也对共和盆地及周边浅部地热异常产生了重要影响。

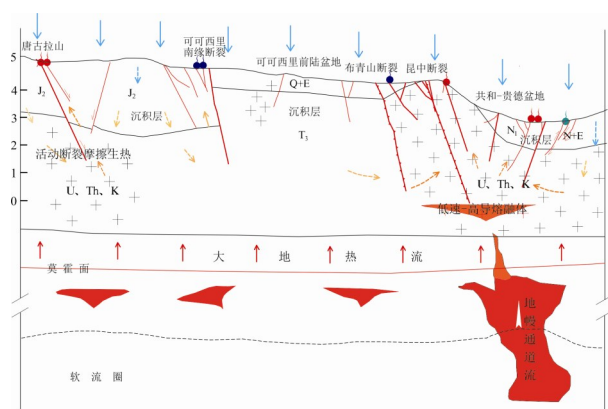


图10 青海省温泉热源机制简图

## 5 结论

本文结合地热地质条件、断裂构造等对青海地区主要温泉的水化学同位素进行了综合分析,得出以下结论。

(1)不同温泉集中区水化学类型具有明显的差异性,水化学类型主要受热储层岩性影响,花岗岩热储阳离子以 $\text{Na}^+$ 为主,阴离子以 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Cl}^-$ 为主;灰岩热储阳离子以 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 为主,阴离子以 $\text{HCO}_3^-$ 为主,个别温泉出现 $\text{SO}_4^{2-}$ 偏高的现象,表明该区热液溶解了石膏矿物;砂岩热储阴、阳离子呈

现出多样性,阳离子以 $\text{Na}^+$ 为主,其次为 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ ,阴离子以 $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主,其次为 $\text{Cl}^-$ 。

(2)温泉水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素基本落在大气降水线附近,且自东北部祁连地区到西北部的杂多-囊谦整体呈现出逐渐减小的趋势,表明区内温泉主要来源于附近大气降水和冰雪融水。大气降水及冰雪融水在山区顺断裂和裂隙进入深部,形成深部地热水。在循环过程中与围岩发生一系列的水化学和水岩作用,当遇到导水断层后,沿导水断层向上运移至地表,并于浅层地下水发生不同程度的混合,最终以不同温度的温泉出露于地表。由硅焓模型估算,冷水混入比例介于33.8%~95.1%,其中东北部祁连山、拉脊山地区冷水混入比例最大,中东部贵德、兴海、都兰和西南唐古拉山等地区温泉冷水混入比例最小。

(3)不同岩性热储温度的差异性较大,同时受不同规模断层构造的影响,热储循环深度也存在较大的差异性。花岗岩热储温度最高,平均值为119.3 °C,热储循环深度平均3264 m;砂岩热储温度平均值为88.2 °C,热储循环深度平均2316 m;灰岩热储温度最低,平均值为59.4 °C,热储循环深度平均1739 m。整体上,高温热储主要分布于共和、贵德、乌兰和唐古拉山等一带。沿一、二级断裂或三级与二级断裂交汇部位的温泉循环深度最大,而分布于被少量小规模断裂切割的三级断裂,且距主断层距离稍远的温泉循环深度相对较小。

(4)温泉热源主要有大地热流传导增热、岩石放射性生热、岩浆余热、活动断层摩擦生热以及壳内低速-高导熔融体和地幔通道流传热等。在多重热源叠加作用下往往形成较高温度的热储,如共和、贵德和唐古拉山等地均为多种热源叠加模式。唐古拉山地热在大地热流传导增热的基础上叠加了花岗岩放射性生热、岩浆余热和断裂构造摩擦生热等,共和盆地除前述几种热源外,还叠加了壳内低速-高导熔融体和地幔通道流传热。

## 参考文献略

转自《地学前缘》. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.7.17>

# 地埋管换热器动态热负荷下地层温度场的解析解

李嘉舒<sup>1</sup>, 戴传山<sup>1,2</sup>, 雷海燕<sup>1,2\*</sup>, 马非<sup>1,2</sup>

1. 天津大学机械工程学院地热中心  
天津大学教育部中低温高效利用重点实验室

**摘要:**垂直地埋管换热器(BHE)是利用浅层地热能的主要换热装置,如何确定合理的地埋管间距对地源热泵系统(GSHPs)的传热性能与经济性影响很大。以往工程应用中未考虑地埋管热负荷的动态变化,常采用最大延米热/冷负荷(即最不利情况下)的影响半径作为设计依据,这难免会使设计参数趋于保守,很难实现地源热泵系统的技术和经济优化,而考虑了负荷变化的数值模拟方法耗时复杂,用于工程时存在很大不便。本文提出了一种考虑地埋管实际热冷负荷动态变化条件下,计算地埋管换热器影响半径的简单数学方法。该法首先推导了地埋管换热器在周期性热流边界条件下,井筒周围地层温度场的解析解,在此基础上将地面建筑物全年周期下的实际波动热冷负荷进行傅里叶级数展开近似,最后通过线性叠加每个周期函数对应的解析解,即可得到建筑物实际动态热冷负荷下的地层温度动态分布。本文提出的解析解实时耦合了地面建筑动态热冷负荷,计算结果接近实际应用,具有计算精度高、简单方便快捷的优点,便于工程实际的推广应用。

**关键词:**地源热泵系统;埋管换热器;解析解;周期动态负荷;傅里叶级数展开

## 引言

我国是化石燃料消耗大国,向国际社会承诺的双碳战略目标也给我国新能源或可再生能源的开发利用带来了机遇与挑战。地热能是一种储量丰富的可再生能源,近年来我国浅层地热能的开发利用增速较高,总装机容量2020年底已达到2.6万兆瓦,已连续20多年处世界领先地位<sup>[1]</sup>。与空气源热泵相比,地源热泵系统性能系数(COP)较高且运行稳定。然而,由于地源热泵的设计单位参差不齐,系统运行过程中也出现了一些问题,如长期运行后系统冷热负荷不平衡导致的热/冷堆积现象等。地源热泵系统达不到预期效果有多种原因,如地层热物性参数测量不准确、系统冷热负荷不匹配、运行管理不善等。一些设计能力较好的企业通常采用国外商用软件,如ANSYS, TRNSY等进行设计,这些软件采用的数值计算方法通常为

有限体积法和有限差分法。但这些软件的使用需要掌握一定的专业知识,且模拟过程比较耗费机时。本文提出了一种新的计算地埋管动态热负荷下地层温度的解析解法,该法实时耦合了地面建筑动态热负荷,计算结果接近实际应用,具有计算精度高、简单方便快捷的优点,便于工程实际的推广应用。

地埋管换热器是地源热泵系统中的关键部件,较早的单根埋管设计采用的理论方法是无限长线热源(ILS),此后出现了考虑井筒直径影响的无限长柱热源模型(ICS),以及考虑埋管深度影响的有限长线热源(FLS)或柱热源(FCS)模型等。为研究地埋管群之间的传热影响,Eskilson提出了无量纲g函数,Bernier利用该方法及线性叠加原理(superposition principle),提出了无限长柱源模型下的井群热干扰计算方法。Marcotte

和 Pasquier 结合线性叠加原理、时间卷积与快速傅里叶变换方法,提出了可以耦合地面“小时”级热负荷变化的地层温度计算方法。Man 等人<sup>[16]</sup>同样基于短时间热负荷阶跃变化温度响应及线性叠加原理,采用有限长线源模型对埋管周围的地层温度变化及出水温度进行了计算。此外,Zhang 等人采用 g 函数与线性叠加原理,计算了有地下水渗流及埋管间歇运行情况下的埋管温度场。Wang 等人研究了埋管冷热负荷不平衡对地层温度场及系统经济性的影响。杨等人在南京典型埋管热泵工程布设监测孔拟合了地温场的变化方程。

刘等人<sup>[21]</sup>布设了观测孔以研究埋管换热区地温垂向深度的影响。

目前为止,针对有动态热冷负荷变化的埋管管地层温度场的解析解大部分都是基于 Eskilson 提出的线热源 g 函数结合线性叠加原理。该法是将随时间变化的实际热流曲线分解为多个不同的恒定热流及不同启动时间的 g 函数解的叠加。这一方法虽较数值方法计算简单,但也存在以下缺点:(1)g 函数针对的是线源模型,未考虑井筒内径带来的影响;(2)当热负荷随时间变化较剧烈时,需要更多或间隔时间更短的不同启动时间下的阶跃 g 函数,以满足计算精度,但计算量也随之增加。本文提出了一种更为简便且可快速计算埋管换热器长期年周期运行下的地层温度的解析算法。该法基于无限长圆柱模型,首先求解井筒壁面有周期性热流密度下的地层温度分布的解析解,再将年周期内埋管热冷负荷随时间任意变化的曲线进行傅里叶或切比雪夫变换,最后将每个函数对应的解析解与其波幅相乘叠加,即可得到任意时刻的地层温度。由于该模型直接设定井筒壁面边界条件为周期性热流边界,对埋管运行初期的地层温度计算会带来一定误差,但随着埋管的长期运行,该法快速计算得到的地层温度与数值解吻合良好,而用户更为关心的设计指标也正是埋管长期运行后周围地层的温度场和热干扰半径。故与现有解析解和数值解相比,此法分别具有计算精度高和快速便捷的优点,可推广用于工程实际。

## 1 埋管周期性热负荷边界下的无限长圆柱模型

### 1.1 周期性热流边界下无限长圆柱地层温度解析解

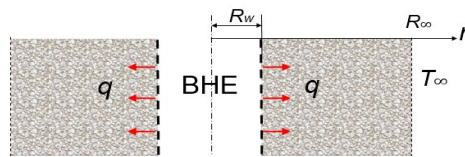


图1 无限长柱源导热模型示意图

一维径向轴对称导热模型如图1所示,假设:

- (1)无限长圆柱径向导热轴对称;
- (2)初始温度是常数且均匀,
- (3)忽略地下水渗流,地层物性各向同性且为常数;

(4)井内壁面的热流密度随时间呈正弦或余弦周期性变化,即  $q(t) = A \cos(\omega t + \varphi) + B$ , 其中:  $A$  是波幅,  $B$  是偏离量或周期内平均值,  $\omega$  是年周期下的频率 ( $=2\pi/T$ ),  $T$  为年周期 (12个月),  $\varphi$  为相角。

井筒周围地层的能量控制方程为:

$$(\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_s r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$$\begin{cases} t = 0, & T = T_\infty \\ r \rightarrow \infty, & T = T_\infty \\ r = R_w, & -2\pi R_w \lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_w} = q(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + B \end{cases} \quad (2)$$

式中:角标“s”——地层;

$R_w$ ——井筒半径/m;

$T$ ——温度/℃;

$\lambda_s$ ——地层导热系数/( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )。

一般偏微分方程的解析解可通过分离变量法、积分变换法等得到。由于本方程包含有井筒壁面的非齐次边界条件,分离变量法不适用,因此,本文采用拉普拉斯积分变换,先消去时间项得到修正的贝塞尔方程,再通过 Gaver-Stehfest 进行拉氏逆变换。在进行拉氏变换之前,将温度变量变换为过余温度,即定义:  $\theta = (T_s - T_\infty)$ , 变换后的方程形式为<sup>[9]</sup>:

$$s\bar{\theta} = a \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial r^2} \right) \quad (3)$$

$$\begin{cases} r \rightarrow \infty, \bar{\theta} = 0 \\ r = R_w, -2\pi R_w \lambda_s \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial r} \Big|_{r=R_w} = A \frac{s \sin \varphi + w \cos \varphi}{s^2 + w^2} + B \frac{1}{s} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon^2 = s/a$ ,  $a = \lambda_s / (\rho C_p)_s$

贝塞尔方程(3)的解形式为:

$$\bar{\theta} = C_1 I_0(\varepsilon r) + C_2 K_0(\varepsilon r)$$

式中:  $I_0$ ——修正后的第一类贝塞尔函数。

$K_0$ ——修正后的第二类贝塞尔函数。

带入边界条件后进行拉氏逆变换可得变换后  
过余温度的解为:

$$\theta = \frac{1}{2\pi R_w \lambda} \frac{1}{2\pi i} \int_{s-i\infty}^{s+i\infty} \frac{K_0(\varepsilon r)}{\varepsilon K_1(\varepsilon R_w)} \left( A \frac{s \sin \varphi + w \cos \varphi}{s^2 + w^2} + B \frac{1}{s} \right) e^s ds \quad (5)$$

式(5)的解可以分解为三部分,分别为  $\theta_{A1}$ 、 $\theta_{A2}$  和  $\theta_B$ 。波幅  $A$  的乘积系数包括两项,对应的解分别  
设为  $\theta_{A1}$  和  $\theta_{A2}$ , 常数  $B$  项的乘积系数只有一项,对应  
的解设为  $\theta_B$ , 即定常热流密度下的解析解<sup>[9]</sup>。

$$\text{设置 } \gamma = \sqrt{w/a} f(u) = \frac{J_0(ur) Y_1(uR_w) - Y_0(ur) J_1(uR_w)}{J_1^2(ur) + Y_1^2(ur)}$$

$$\theta = \theta_{A1} + \theta_{A2} + \theta_B \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \theta_{A1} &= \frac{A}{2\pi R_w \lambda} \left[ \frac{1}{2i} \frac{e^{i(u\varphi + \varphi)} K_0(\sqrt{iw/a} r)}{\sqrt{iw/a} K_1(\sqrt{iw/a} R_w)} + \frac{1}{2(-i)} \frac{e^{-i(u\varphi + \varphi)} K_0(\sqrt{-iw/a} r)}{\sqrt{-iw/a} K_1(\sqrt{-iw/a} R_w)} \right] \\ &= \frac{A}{2\pi R_w \lambda} \left[ \frac{1}{2} \frac{e^{i(u\varphi + \varphi + \pi/4)} M e^{-\theta_1}}{\sqrt{w/a} N e^{-\theta_2}} - \frac{1}{2} \frac{e^{i(u\varphi + \varphi + \pi/4)} M e^{-\theta_1}}{\sqrt{w/a} N e^{-\theta_2}} \right] \\ &= \frac{A}{2\pi R_w \lambda} \left[ -\frac{M}{N \gamma} \cos(u\varphi + \varphi + \pi/4 + \theta_1 + \theta_2) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

式中:

$M$ ——零阶第二类修正贝塞尔函数的模;

$\theta_1$ ——零阶第二类修正贝塞尔函数的相角;

$N$ ——一阶第二类修正贝塞尔函数的模;

$\theta_2$ ——一阶第二类修正贝塞尔函数相角补角。

$$\begin{aligned} \theta_{A2} &= \frac{1}{2\pi R_w \lambda} \frac{1}{2\pi i} \int_{s-i\infty}^{s+i\infty} \frac{K_0(\varepsilon r)}{\varepsilon K_1(\varepsilon R_w)} \left( A \frac{s \sin \varphi + w \cos \varphi}{s^2 + w^2} \right) e^s ds \\ &= \frac{1}{2\pi R_w \lambda} \left[ \frac{2A}{\pi} \int_0^\infty \frac{(\gamma^2 \cos \varphi - u^2 \sin \varphi)}{u^4 + \gamma^4} f(u) e^{-au^2 t} du \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \theta_B &= \frac{1}{2\pi R_w \lambda} \frac{1}{2\pi i} \int_{s-i\infty}^{s+i\infty} \frac{B}{s} \frac{K_0(\varepsilon r)}{\varepsilon K_1(\varepsilon R_w)} e^s ds \\ &= \frac{1}{2\pi R_w \lambda} \left[ \frac{2B}{\pi} \int_0^\infty f(u) (e^{-au^2 t} - 1) \frac{du}{u^2} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

其中:  $\ker_0(\gamma r) = \operatorname{Re} [K_0(e^{i\pi/4} \gamma r)]$

$\ker_1(\gamma r) = \operatorname{Im} [K_0(e^{i\pi/4} \gamma r)]$

$$\ker_1(\gamma r) = \operatorname{Re} [e^{-i\pi/2} K_1(e^{i\pi/4} \gamma r)]$$

$$\ker_1(\gamma r) = \operatorname{Im} [e^{-i\pi/2} K_1(e^{i\pi/4} \gamma r)]$$

$$M = \sqrt{\ker_0(\gamma r)^2 + \ker_1(\gamma r)^2}$$

$$N = \sqrt{\ker_1(\gamma r)^2 + \ker_1(\gamma r)^2}$$

$$\theta_1 = \arctan \frac{\ker_0(\gamma r)}{\ker_1(\gamma r)} \quad \theta_2 = \arctan \frac{\ker_1(\gamma r)}{\ker_1(\gamma r)}$$

## 1.2 周期性冷热负荷变化情况下的地温场求解

上文推导得到的公式(6)是针对井壁面热流  
随时间满足完整周期性三角函数情况下的解。实  
际上, 地埋管换热过程中, 管壁热流并非随时间的  
完全周期性变化, 而是随环境温度变化的非周期  
性波动函数。因此, 如何将非周期性时间函数转  
换为周期性函数, 利用上述推导得到的解是解决  
该问题的关键。本文利用傅里叶变换方法, 将实  
际热负荷波动函数可近似表示为多组正弦周期  
函数的和, 同时利用导热微分方程解的可叠加性。  
具体表示如下:

$$q(t) \approx \sum_{i=0}^n q_i(t) = a_0 + \sum_{n=1}^n \left( a_n \cos \frac{n\pi}{L} t + b_n \sin \frac{n\pi}{L} t \right) \quad (10)$$

其中

$$a_0 = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L q(t) dt, \quad a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L q(t) \cos \frac{n\pi}{L} t dt$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L q(t) \sin \frac{n\pi}{L} t dt$$

$L$ 为半个周期(6个月),  $n$ 表示展开的三角函  
数的个数。

$$\theta(t) \approx \sum_{i=0}^n (\theta_{\cos,i}(t) + \theta_{\sin,i}(t)) \quad (11)$$

式中,  $\theta_{\cos,i}(t)$ ,  $\theta_{\sin,i}(t)$  分别为对应  $i$  个余弦周期  
函数和正弦周期函数的解。

具体计算流程图如图2(审2)

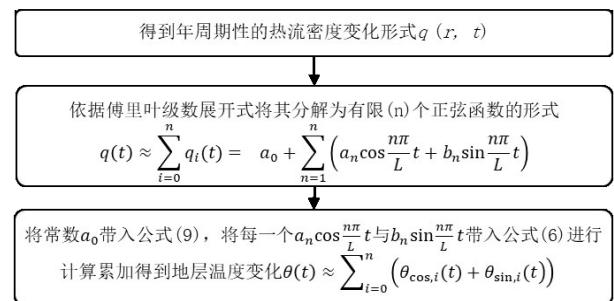


图2 周期性边界条件下地埋管解析解计算流程

## 2 我国典型地区浅层地埋管周围地层温度场的快速求解

### 2.1 解析解模型验证

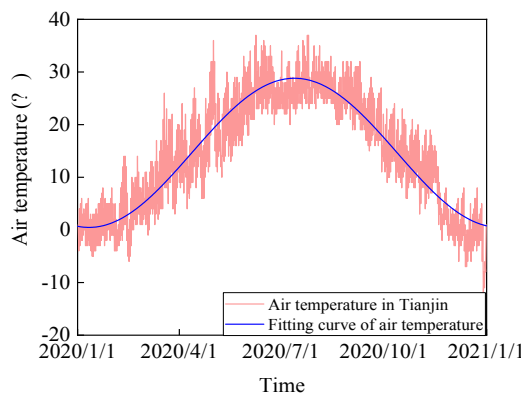
为了验证本文提出的解析解,本文以天津市为例,分析北方典型地区的地埋管换热器供热/冷负荷,并将数值模拟结果与本文解析解进行对比验证。选取的地埋管几何参数和地层热物性如表1所示。

表1 地埋管几何与地层物性参数

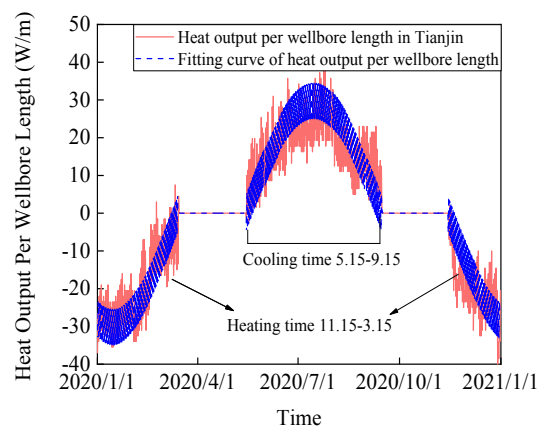
| 参数名称                | 值           | 参数名称                  | 值                                        |
|---------------------|-------------|-----------------------|------------------------------------------|
| 地埋管半径, $R_w$        | 55 mm       | 地层原始温度, $T_0$         | 15 °C                                    |
| 地层导热系数, $\lambda_s$ | 2.2 W/(m·K) | 地层比热容, $(\rho C_p)_s$ | $2.16 \times 10^6$ J/(m <sup>3</sup> ·K) |
| 运行周期, $2 \times L$  | 12 月        | 运行时间                  | 10 年                                     |
| 傅里叶展开系数(年), $n_m$   | 20          | 傅里叶展开系数(天), $n_h$     | 500                                      |

图3为2020年天津市的年平均气温变化。可以看出,天津市一年的平均气温可近似成一个三角函数,日最高气温与最低气温也可用近似为三角函数。由于室外气温与地埋管冷热负荷变化的线性关系较强<sup>[20]</sup>,故可根据室外气温变化得到地埋管井壁处的径向热流量,可表示为年( $t_m$ )周期三角函数 $q_m(t_m)$ 和日周期函数 $q_h(t_h)$ 的和,即

$$q(t) = q_m(t_m) + q_h(t_h) \quad (12)$$



(a)



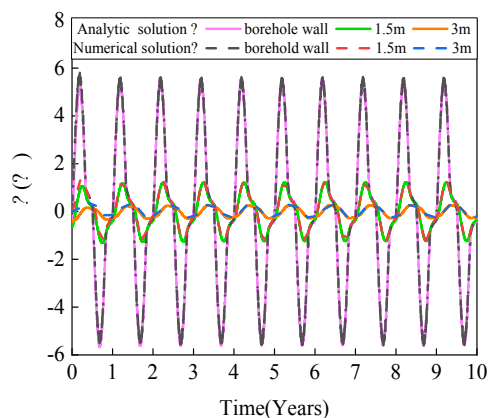
(b)

图3 天津市气温变化(a)与地埋管延米功率(b)的变化

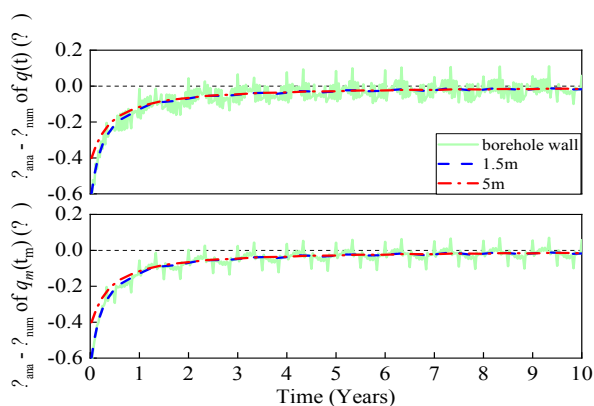
天津市集中供暖时间为每年11月15日至次年3月15日,供冷时间为每年5月15日至9月15日;日热量峰谷值近似为以天( $t_h$ )为周期的三角函数 $q_h(t_h)$ 。因此,从供冷时间开始,即开始运行年份的5月15日, $t_m=0$ ,全年冷热负荷时长相同,冷热负荷延米功率相同,冷热负荷不平衡率较小,可认为冷热负荷平衡,假设地埋管延米功率月负荷峰值为30 W/m,日负荷峰谷值为5 W/m,由此可近似得到井壁处的总周期延米功率 $q(t)$ 的函数形式,如式(13)所示:

$$q_{TJ}(t) = \begin{cases} 30\sin(\frac{\pi}{4}t_m) - 5\cos(\frac{\pi}{12}t_h), & 0 \leq t_m \leq 4m, 0 \leq t_h \leq 24h \\ 0, & 4 \leq t_m \leq 6m, 0 \leq t_h \leq 24h \\ 30\sin(\frac{\pi}{4}t_m - \frac{\pi}{2}) - 5\cos(\frac{\pi}{12}t_h), & 6 \leq t_m \leq 10m, 0 \leq t_h \leq 24h \\ 0, & 10 \leq t_m \leq 12m, 0 \leq t_h \leq 24h \end{cases} \quad (13)$$

通过代入上文中的周期负荷公式(13),可以得到解析解与数值解的对比结果,如图4所示。



(a)地层温升的解析解与数值解对比



(b)解析解与数值解的偏差

图4 不同径向距离下地层温度解析解与数值解的对比

可以看到,在前三个周期,解析解和数值解之间偏差较大,这是因为解析解的求解忽略了初始条件;随着地埋管运行时间的增大,解析解和数值解之间的偏差逐渐减少,直至忽略不计。另外可以看到,在井壁处解析解和数值解之间的偏差波动较别处更为剧烈。这是因为此偏差受限于动态热负荷的傅里叶展开精度,增加傅里叶展开级数的项数可降低此偏差。此外,解析解和数值解之间的偏差会随着距管壁距离的增加而减小,距管壁较远处地层温度的两种解的偏差可忽略不计。公式(13)中,总周期负荷可分为年周期负荷与日周期负荷两部分。对比总周期和年周期的解的误差可以看出,靠近井壁处的总周期误差大于年周期偏差,这同样受限于日周期负荷的傅里叶展开精度,可通过增加傅里叶级数展开的项数降低偏差。另外可以看到,距井壁较远处地层温度的两种解之间的偏差可忽略不计。由此可知,总周期负荷下的解析解适用于计算地埋管长期运行时的地层温度变化,运行三年后的解析解与数值解的偏差小于 $0.1^{\circ}\text{C}$ 。

## 2.2 天津市浅层地埋管周围的地层温度场

分别计算公式(12)中的年周期函数 $q_m(t_m)$ 与日周期函数 $q_h(t_h)$ 对地温场的影响,结果如图5所示。可以看出,在日周期函数 $q_h(t_h)$ 峰谷值对称的情况下, $q_h(t_h)$ 的负荷波动只影响近井壁处的地层温度,且 $q_m(t_m)$ 波动引起的地层温升为相同时间段内总周期延米功率 $q(t)$ 的平均值,日周期延米功率 $q_h(t_h)$ 引起的地层温升在 $q_m(t_m)$ 的基础上对称波动,近井壁

处的波动范围在 $0.4^{\circ}\text{C}$ 以内,而距井壁较远处地层温度波动趋于0,故较远处 $q_m(t_m)$ 与 $q(t)$ 波动引起的地层温升相同。此外还可看出,地层温度主要由年周期负荷确定,日周期负荷对于地层温度的影响很小,相比于年周期函数的傅里叶展开级数,为得到更好的拟合精度,日周期函数需要更多的傅里叶展开项数,这会影响计算效率。因此计算过程中,可酌情忽略日周期负荷的影响,从而简化解析解。

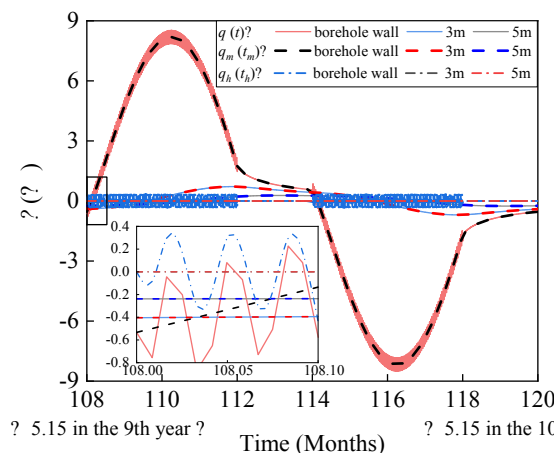


图5 不同半径处的地层温度随时间的变化

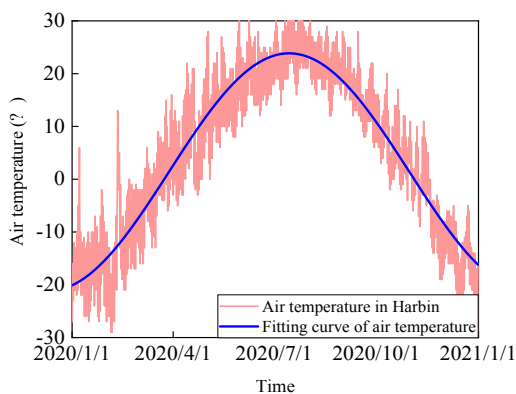
## 2.3 其他城市浅层地埋管周围地层温度场

为研究地埋管冷热负荷的均衡程度和不同运行时间下地层温度场的变化规律及热影响半径,本文同时选取东北城市哈尔滨市为研究对象。该地区以冬季热需求为主,即冬季热负荷运行周期长,夏季冷负荷运行时间短。反之夏季冷负荷时间长,冬季热负荷时间短的广州可作为哈尔滨市的反向类型。

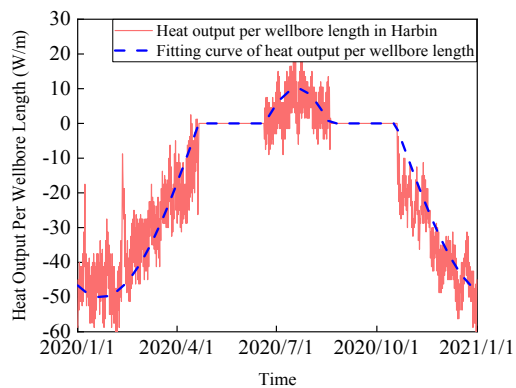
通过对哈尔滨市2020年气温变化的统计,得到周期冷热负荷周期函数如图6所示,哈尔滨市法定供暖时间为每年10月20日至4月20日,供冷时间为每年6月20日至8月20日。自供冷时间开始计算,即开始运行年份的6月20日为 $t_m=0$ ,由2.2节可知,日周期负荷对计算结果影响不大,因此此处忽略日周期负荷,可近似得到井壁处的总周期延米功率,类似可以得到广州的总周期延米功率为:

$$q_{HB}(t) = \begin{cases} 10\sin(\frac{\pi}{2}t_m) & 0 \leq t_m \leq 2m \\ 0, & 2 \leq t_m \leq 4m \\ 50\sin(\frac{\pi}{6}t_m + \frac{\pi}{3}), & 4 \leq t_m \leq 10m \\ 0, & 10 \leq t_m \leq 12m \end{cases}$$

$$q_{CZ}(t) = \begin{cases} 50\sin(\frac{\pi}{6}t_m) & 0 \leq t_m \leq 6m \\ 0, & 6 \leq t_m \leq 8m \\ 10\sin(\frac{\pi}{2}t_m + \pi), & 8 \leq t_m \leq 10m \\ 0, & 10 \leq t_m \leq 12m \end{cases} \quad (14)$$



(a)

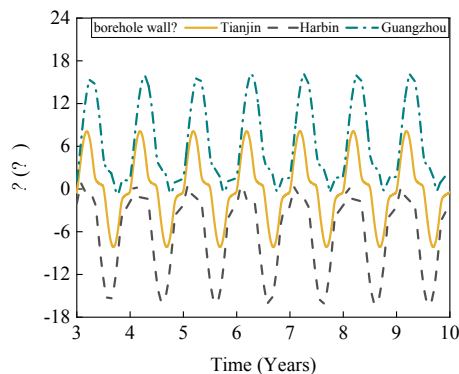


(b)

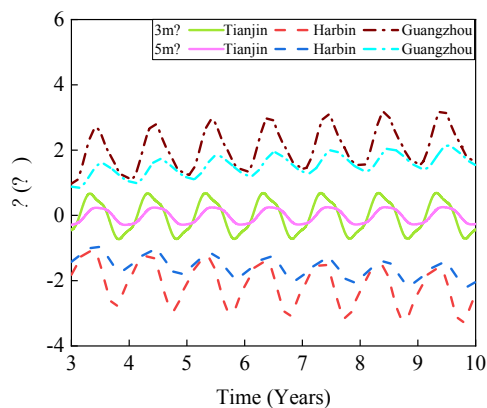
图6 哈尔滨市(a)年气温与(b)地埋管延米功率变化

分别对公式(14)与公式(13)的年周期函数  $q_m(t_m)$  进行计算,研究年周期负荷的影响,结果如

图7所示。可以看到,由于哈尔滨的热负荷远大于冷负荷,因此地埋管运行过程中会造成冷堆积现象,导致地层温度逐年下降,系统运行10年后,距地埋管5m处的地层温度会降低2.2°C,影响地埋管取热效率,反之,由于广州的冷负荷远大于热负荷,造成热负荷堆积,地层温度逐年上升,系统运行10年后,距地埋管5m处的地层温度上升2.1°C。



(a)井壁处



(b) 热影响半径3m和5m处

图7 同年周期负荷下的地层温度随时间的变化

## 2.4 总周期延米功率解析解对地层温度的影响分析

表2 不同地区的傅里叶展开级数

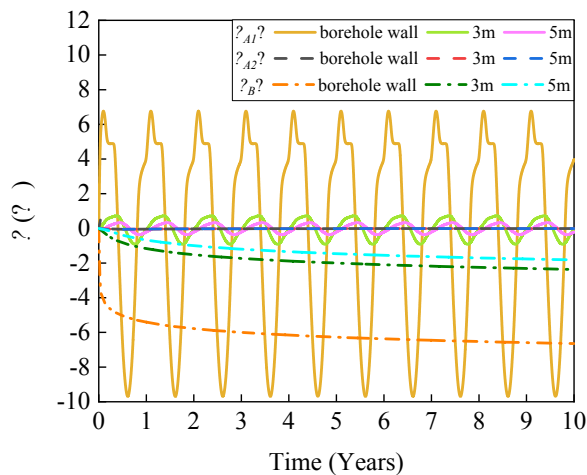
| 地区 | $a_0$                                                              | $a_n (n=1 \cdots n)$                                                                                                                                  | $b_n (n=1 \cdots n)$                                                                                                               |
|----|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 天津 | $\frac{1}{6} \left( \frac{8}{\pi} A_1 - \frac{8}{\pi} A_2 \right)$ | $\frac{6A_1 \left[ \cos\left(\frac{2n\pi}{3}\right) + 1 \right] - 6A_2 \left[ \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) + \cos(n\pi) \right]}{(3+2n)(3-2n)\pi}$ | $\frac{6A_1 \sin\left(\frac{2n\pi}{3}\right) + 6A_2 \left[ \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) + \sin(n\pi) \right]}{(3+2n)(3-2n)\pi}$ |

续表

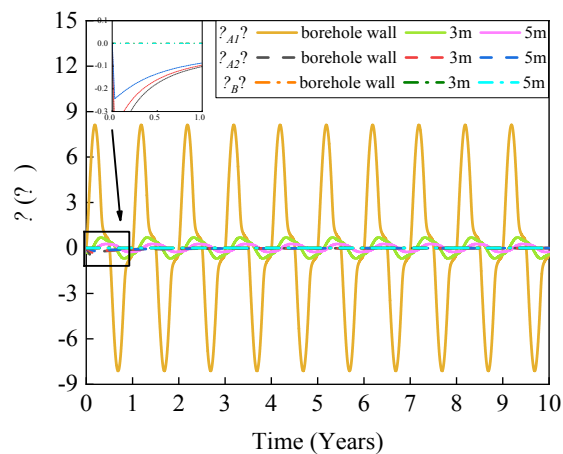
| 地区                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $a_0$                                                               | $a_n (n=1 \cdots n)$                                                                                                                                                                                                                       | $b_n (n=1 \cdots n)$                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 哈尔滨                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $\frac{1}{6} \left( \frac{4}{\pi} A_1 - \frac{12}{\pi} A_2 \right)$ | $\frac{12A_1 \left[ \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) + 1 \right]}{(6+2n)(6-2n)\pi} (n=3, 0) +$ $\frac{4A_2 \left[ \cos\left(\frac{5n\pi}{3}\right) + \cos\left(\frac{2n\pi}{3}\right) \right]}{(2+2n)(2-2n)\pi} (n=1, -\frac{\sqrt{3}}{4})$ | $\frac{12A_1 \left[ \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) \right]}{(6+2n)(6-2n)\pi} (n=3, \frac{1}{6}) +$ $\frac{4A_2 \left[ \sin\left(\frac{5n\pi}{3}\right) + \sin\left(\frac{2n\pi}{3}\right) \right]}{(2+2n)(2-2n)\pi} (n=1, -\frac{1}{4})$ |
| 天津年周期负荷: $q_{TJ}(t) = A_1 \sin\left(\frac{\pi}{4} t_m\right) (0 \leq t_m \leq 4m) + A_2 \sin\left(\frac{\pi}{4} t_m - \frac{\pi}{2}\right) (6 \leq t_m \leq 10m)$<br>哈尔滨年周期负荷: $q_{HB}(t) = A_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} t_m\right) (0 \leq t_m \leq 2m) + A_2 \sin\left(\frac{\pi}{6} t_m + \frac{\pi}{3}\right) (4 \leq t_m \leq 10m)$<br>傅里叶展开公式: $q(t) \approx \sum_{i=0}^n q_i(t) = a_0 + \sum_{n=1}^n \left( a_n \cos \frac{n\pi}{L} t + b_n \sin \frac{n\pi}{L} t \right)$ |                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                           |

通过傅里叶级数展开,我们对天津与哈尔滨拟合的周期负荷展开如表2。通过展开式(10)可以看到,其傅里叶展开系数有一定关联, $a_n$ 的结果为 $\sin$ 函数,与 $a_n$ 相比, $b_n$ 的展开式中除 $A_1$ 项系数项少了第二项外,其余系数中只需将 $a_n$ 公式中的 $\cos$ 函数改为 $\sin$ 函数即可。

公式(6) $\theta = \theta_{A1} + \theta_{A2} + \theta_B$ 表明,地层温度变化的解析解由三部分组成。为研究各部分对地层温度的影响,本文分别计算了哈尔滨(式14)与天津(式13)地区的解析解的三部分,结果如图8所示。



(a) 哈尔滨



(b) 天津

图8 不同地区地埋管不同半径处地层温度总周期延迟功率的解析解

可以看出,在地埋管长期运行条件下, $q_{A2}$ 对于地层温度的影响有限,可以忽略不计,因此可认为周期性负荷引起的地层温度波动主要由 $q_{A1}$ 与 $q_B$ 组成,即:

$$\theta = \theta_{A1} + \theta_{A2} + \theta_B$$

式中, $\theta_{A1}$ 由公式(7)可得。 $\theta_B$ 可近似为式(15):

$$\theta_B = \frac{B}{2\pi R_w \lambda} \sum \frac{V_j K_0(w_j r)}{j w_j K_1(w_j R_w)} \quad (15)$$

$$\text{其中: } w_j = \sqrt{\frac{j \ln(2)}{at}},$$

$$V_j = \sum_{k=\ln((j-1)/2)}^{\min(j,5)} \frac{(-1)^{j-5} k^5 (2k)!}{(5-k)!(k-1)!k!(j-k)!(2k-j)!}$$

当  $r/R_w \gg 1$  时,无线长线热源与无线长柱热源的解高度吻合,  $\theta_B$  可进一步近似为

$$\theta_B \Big|_{r=R_w} \approx \frac{B}{4\pi\lambda} \left( \ln \frac{4at}{r^2} - 0.57722 \right)$$

壁面温升可以近似为<sup>[8]</sup>

$$\theta_B \Big|_{r=R_w} \approx \frac{1}{1 + 0.412 (at/r^2)^{0.426}} \frac{B}{\pi\lambda} \sqrt{\frac{at}{r^2} \pi}$$

故耦合实际建筑物供热/冷负荷年周期性的地埋管换热器周围地层温度场的解析解为:

$$\theta = \frac{A}{2\pi R_w \lambda} \left[ -\frac{M}{N\gamma} \cos\left(ut + \varphi + \pi/4 + \theta_1 + \theta_2\right) \right] + \frac{B}{4\pi\lambda} \left( \ln \frac{4at}{r^2} - 0.57722 \right) \quad (16)$$

### 3 结论

本文提出了一种快速求解地埋管换热器周围地层温度场的简化解析解。与以往计算方法不同,该法通过耦合实际建筑物的供热/冷负荷的年周期性变化,侧重地埋管长期运行条件下的地层温度变化规律,较以往解析解计算精度高,且与数值解相比具有计算快捷、简单方便的特点,适宜工程实际的推广应用。主要结论如下:

(1)提出了耦合实际建筑物供热/冷负荷的地

埋管换热器周围地层温度场的解析解:

$$\theta = \frac{A}{2\pi R_w \lambda} \left[ -\frac{M}{N\gamma} \cos\left(ut + \varphi + \pi/4 + \theta_1 + \theta_2\right) \right] + \frac{B}{4\pi\lambda} \left( \ln \frac{4at}{r^2} - 0.57722 \right)$$

(2)与数值解的对比验证结果表明:本文提出的方法虽未考虑地层初始条件对温度场的影响,但仅影响前3年的计算精度;随着时间的推移,解析解和数值解的逐渐减小,三年以后基本保持在1%以内,工程上可以忽略不计。

(3)地层温度的变化主要由年周期冷热负荷函数控制,日周期负荷对于地层温度的影响可忽略。

(4)本文给出了中国北方两个典型地区单根地埋管运行工况下的地层地温场算例。通过修改冷热负荷函数波幅,可以获取适合不同建筑物类型的地埋管周围地层的温度变化规律。若用户有多年实测的冷热负荷数据,也可通过实测数据得到的实际冷热负荷函数计算地埋管周围的地温场。

(5)结合线性叠加原理,本文所提出的解析解也可用于分析地埋管群的地层温度场变化。

### 参考文献略

转自《水文地质工程地质》2023, 50(2)

## 由开山集团建设、运营的肯尼亚 Menengai III 地热发电站正式开工

开山集团股份有限公司 报

2024年10月24日上午,开山集团在著名的肯尼亚 Menengai 地热区举办了开山建设、运营的35MW 地热发电站开工典礼暨绿氨项目备忘录签字仪式,肯尼亚共和国总统 Willam Ruto 阁下率能源部长 Opiyo Wanyai 博士等内阁成员莅临出席典礼并见证了双方代表的签字。

开山集团有限公司旗下的 Orpower TwentyT - wo Limited 35MW 地热发电项目又称 Menengai III 地热发电项目,该项目位于 Nakuru 县 Menengai 地热区,是更大规模的  $3 \times 35\text{MW}$  Menengai 地热项目的一部分,项目最终业主为国家地热开发公司(GDC)。之前,我集团旗下公司作为 EPC 承包商

建设了 Menengai I 地热发电站,电站投入运营一年多时间的出色表现得到了业内和当地相关各方的高度评价和肯定,被赞誉为“肯尼亚目前表现最好的地热发电站”。



William Ruto 总统发表了热情洋溢的演讲,他强调可持续能源发展在实现肯尼亚 2030 愿景中的重要性,他说:“投资可再生能源是高效、可靠和可持续的。启动这个 35MW 发电厂项目彰显了我们巨大地热潜力、推动经济增长和激励公私合营 (PPP) 合作、加速经济转型的承诺。开山等投资者展示了政府与私营部门合作在吸引外商直接投资和为年轻人创造就业机会方面的价值。通过他们的投资,我们获得了能源、就业机会,并推动了工业化,实现了双赢的结果”。

开山集团股份有限公司总经理汤炎博士也发表了演讲,他在简要介绍开山在地热领域的创新成果和取得的成绩后表示:Menengai III 发电站将是开山在肯尼亚的第二个里程碑,项目将在 14 个月内全面竣工实现 COD。“这就是开山速度和开山效率,将继续彰显开山模块化地热电站技术优势”。

开工典礼,总统阁下还见证了肯尼亚电力生产公司 (KenGen) 董事总经理 Eng. Peter Njenga 与

开山集团董事总经理汤炎博士签署合作备忘录 (MOU),该备忘录概述了双方在可持续绿色氨生产方面的合作,开山将 KenGen 在著名的 Olkaria 地热田用于的尚未利用的蒸汽生产绿色电力,最终产品是氢气和年产 20 万吨液氨。该项目预计总投资 5.4 亿美元,建成投产后将是多重里程碑事件:这是撒哈拉沙漠以南第一座化肥厂,是非洲第一座绿色化肥厂,也是全球第一个地热电制氢/氨项目,我集团将因此进一步转型成为绿色能源公司。最重要是,该项目将助力非洲绿色工业化,促进东非的农业发展,有助于减轻国家财政在肥料补贴方面的负担前提下生产出本土绿色化肥。

William Ruto 总统在演讲表示将全力支持这一确保粮食安全,并在不增加碳足迹的情况下创造就业机会的创举。他评论道:“我非常兴奋,今天我们将签署协议,在 24 个月内为我们的农民生产首批氢气、氨和肥料,利用这里的地热资源。我很高兴开山宣布,公司将在 24 个月内实现这一目标”。

汤炎总经理表示:作为全球氢气和工艺气体压缩机领域的领航者,我们非常认同总统阁下提出的绿色工业化和可再生能源愿景,并坚定地参与总统阁下倡导的非洲绿色工业化进程。开山将在总统阁下的鼎力支持下,双方团队共同完成这一伟大项目,打造非洲绿色工业化新地标。

开山控股集团股份有限公司董事长曹克坚率氢能事业部、地热电站事业部、绿氨事业部及为绿氨项目提供氢压缩机的奥地利子公司 LMF 等领导参加了活动。开山决心在创新与当地优秀企业的合作中引领潮流,肩负着“为节约地球做贡献”的核心使命,在“技术驱动未来”核心价值观的指引下不断壮大、发展。

转自《地热能在线》

## 藏在地下 100 多米全球最大洞中实验室用上地热能

科技日报、中国青年报、徐州日报 报

从地表到地下 1 万米,石油、天然气、煤炭和许多未知的矿产资源分布其中。近年来,随着浅层传统化石能源开采越来越困难,向地球深部进军是必须解决的战略问题。在江苏徐州市区卧牛山地下 100 多米处,有一座深地工程领域全球最大的地下实验室——深地科学与工程云龙湖实验室,它的建设对突破世界深地开发领域的前沿科技难题、解决国家发展面临的资源空间制约难题等具有重大战略意义。“地下除了已知的石油、天然气、页岩气、页岩油等外,还蕴藏着很多丰富的未知资源,具有很大的研究和应用价值。我们的目标是向地球深部进军,要资源、要空间、要安全。”深地科学与工程云龙湖实验室主任、中国矿业大学教授李晓昭告诉记者,深地科学不是简单的地质学,而是包括若干重要研究方向的前沿交叉科学,如深地空间探测开发、原位保真取芯技术、深地非常规岩石力学行为、深地结构与开采的透明推演理论与技术、深地地震学与地球物理学、深地微生物学、深部资源开发与能源储存、深地地下水赋存、运移及水质变化、地下生态圈等。

地下除了已知的石油、天然气、页岩气、页岩油等外,还蕴藏着很多丰富的未知资源,具有很大的研究和应用价值。我们的目标是向地球深部进军,要资源、要空间、要安全。”深地科学与工程云龙湖实验室主任、中国矿业大学教授李晓昭告诉记者,深地科学不是简单的地质学,而是包括若干重要研究方向的前沿交叉科学,如深地空间探测开发、原位保真取芯技术、深地非常规岩石力学行为、深地结构与开采的透明推演理论与技术、深地地震学与地球物理学、深地微生物学、深部资源开发与能源储存、深地地下水赋存、运移及水质变化、地下生态圈等。

如何科学利用采空的地下矿井成为新的课

题。目前,世界各国都在研究将废弃的矿井用来储存石油、天然气、二氧化碳以及核废料等。“例如,在邳州石膏矿采空区,矿井埋深为 50 至 400 米,是很好的原位实验场地,许多技术装备可以在这里进行现场开发、验证,比如多功能系列实验舱、地下岩隙检测等技术,一旦成熟就能立刻用于流态能源开发、地下储能、热/碳/废安全封储等领域。”李晓昭说。云龙湖实验室 2 万平方米、10 万立方米的宽敞空间会让人产生错觉,以为这是一个大型建筑内部,只有墙壁上整齐的开凿痕迹才能让人意识到这并不是大自然的杰作。在深地科学与工程云龙湖实验室主控中心,这里如同一个高大宽敞的剧场,虽然身处地下,但空气清新、温度适宜。工作人员介绍说,实验室充分利用了地热能源,通过抽取矿井中的冷热能源,对实验室的环境进行调控。深地科学与工程云龙湖实验室主控中心的服务器也与其他算力中心不同。这里充分利用了地下的免费能源结合液冷技术,大幅降低了系统能耗。“我们把地下的冷能收集起来给算力设备降温,服务器散发的热量还可以在矿井中跨季节存储,满足清洁供暖的需求。”李晓昭说,随着 AI 技术的快速发展,算力中心的耗能越来越大,这些试验为算力中心节能减排提供了全新的思路。



图为深地科学与工程云龙湖实验室

随着经济社会高速发展,全球范围内浅部资源日益短缺,资源开采必然转向深部。目前,城市地下空间开发深度普遍在50米以内;50米至200米深层地下空间的开发利用,已成为一项重大课题。2021年10月22日,深地科学与工程云龙湖实验室由徐州市人民政府、中国矿业大学、徐州高新区、徐工集团、徐州地铁集团、中煤集团大屯煤电公司和徐矿集团等单位联合发起创建,这是政产学研深化合作的重大硕果。深地科学与工程云龙湖实验室2022年获批重大科技设施预研,2023年获批筹建江苏省实验室,成为江苏省4个省实验室之一,2024年江苏省政府工作报告明确提出要“加

快建设深地科学与工程云龙湖实验室”。深地科学与工程云龙湖实验室的一期工程已建成深地装备、数字深地、深地开发和深地环生等4个综合科研平台。未来5年,深地科学与工程云龙湖实验室将继续围绕深地空间流态物质运移、深地工程围岩力学响应、深地空间环境演化灾变开展研究,实现深地空间储热与高效利用、深地空间碳废二氧化碳与废物封储、矿山地下空间协同开发与国土空间优化。持续建设地下智能建造试验场、深地储氢储气储热试验场、地下CO<sub>2</sub>封存试验场等特色应用场景。

转自 地热加

## 2024年国际干热-超热地热资源研究与开发研讨会在长春顺利召开

冯 波

吉林大学新能源与环境学院

2024年国际干热-超热地热资源研究与开发研讨会于9月22日至24日在长春召开,会议由吉林大学主办,吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室、吉林大学地热资源开发技术与装备教育部工程研究中心、吉林大学新能源与环境学院承办。本次会议邀请了来自美国、德国、意大利、新西兰的6位国际地热领域专家,吸引了来自国内32所高校、6家科研院所、24家企事业单位的行业专家和相关人员参加,与会者共同探讨国际干热岩与超临界地热资源研究的最新进展,推动了科学技术进步,促进了地热行业发展。

中国石油大学(北京)李根生院士,美国犹他大学Joseph Moore教授,中国地质调查局文冬光研究员,新西兰地质与核科学研究所Peter Rendel研究员,意大利地球科学与地质资源研究所Fabrizio Gherardi研究员,中国石化石油勘探开发研究院郑

和荣正高级工程师,中国科学院地质与地球物理研究所庞忠和研究员,德国卡尔斯鲁厄理工学院Thomas Kohl教授,中国地质科学院水文地质环境地质研究所王贵玲研究员,中国煤炭地质总局水文地质局蒋向明正高级工程师,吉林大学许天福教授,新西兰地质与核科学研究所Lucjan Sajkowski研究员等12位专家学者做了大会主旨报告。

本次会议共设置7个主题分会,安排了58个学术报告。与会学者围绕地热资源研究与开发领域关切问题、理论、方法与技术等方向进行交流讨论。报告领域和方向不仅涵盖干热岩及超热地热资源的基本研究内容,还总结展示了国际干热岩、超临界地热的最新研究成果,促进了全球范围内的知识共享与科技成果转化。

## 中国石化在地热领域的开拓又有新进展

中国石油化工集团有限公司 报

地热能是一种稳定可靠、绿色低碳的可再生能源,具有储量大、分布广、节能环保等特点,广泛应用于供暖制冷、发电、养殖等领域。其中,地热发电方面,根据2023年世界地热大会发布的《世界地热发电进展》报告显示,目前,世界上已有31个国家有地热发电厂在运行,全球地热发电总装机容量已经从1980年的2110兆瓦增长到如今的16260兆瓦。

中国石化是国内最大的地热能开发利用企业,持续深耕地热领域,成为国内最大的地热能开发利用领跑企业。在探索地热能规模开发方面,22座城市地热供暖超百万平方米,在全国72个市(县、区)建成地热供暖能力超1亿平方米,其中在雄安新区建设的地热供暖项目被国际可再生能源机构列入全球推广项目名录。在推动地热产业科技进步方面,创新形成了地热系统形成机制、热储传热机理两大基础理论,攻克了“取热不耗水”工程技术等一批关键核心技术,并成功钻探了我国最深地热科探井——福深热1井。在服务国家地热产业发展方面,牵头编制了超过50%的行业标准以及我国在全球地热领域第一项国际地热协会标准,并成功举办2023年世界地热大会。

在地球大气层中有一种气体被誉为“黄金气体”在大气层中所占比例只有几百万分之一这就是氦气He。该项目集中低温发电、水溶氦气提取、供暖于一体是中国石化首个地热发电示范项目也

是我国首个“热电氦”集成先导性试验项目对拓展地热能产业链、优化能源结构具有积极意义

该项目位于陕西省咸阳市,属于关中地区。关中地区是一个大型中低温沉积盆地型地热田,地热资源以其规模大、温度高、水质优而独具特色。该项目选取了一口位于宝石佳苑小区的地热井,井深3000米,井口水温约102℃,供暖季时,地热水取上来后进行低负荷发电,同步提取地热水中的氦气,发电后的地热水再利用热交换进行供暖。非供暖季时,项目全时段满负荷发电,并同步提取氦气,使用后地热水通过回灌井回注到原热储层再加热。项目供暖能力达17万平方米,年发电量约70万千瓦时。

氦气是重要战略资源,被称为“黄金气体”,广泛应用于航空航天、科研、医疗、工业等领域。作为制造业大国,我国的氦气需求量大,但长期大量依赖进口。目前,氦气提取主要来源于含氦天然气、煤层气、空气分离装置的副产品等。

该项目所在的渭河盆地拥有水溶氦和游离态氦及伴生气资源,经分析,专家团队发现该地区多数地热井的氦气含量之高国内外少见。近年来,中国石化在咸阳市持续开展水溶氦气分离提纯试验及关键技术攻关,并成功运用到该项目,通过膜分离和变压吸附耦合工艺已获得纯度99%以上的氦气,为地热水溶氦气进一步产业化积累了宝贵技术经验。