

ICS 27.101
F 15

DB 12

天 津 市 地 方 标 准

DB 12/T 664—2016

地热单（对）井资源评价技术规程

The technical specification for geothermal resources evaluation of single(double)
well

2016-09-27 发布

2016-11-01 实施

天津市市场和质量管理委员会 发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总则	2
5 地热井产能测试	3
6 热储水文地质参数计算方法	7
7 地热单（对）井资源计算与可靠性评价	14
8 地热资源开发利用评价	17
9 地热资源流体质量评价	18
10 资料归档、报告编写与储量评审、登记、备案	18
附录 A（规范性附录） 地热资源储量评价/勘探报告编写要求	19
附录 B（资料性附录） 降压试验观测原始记录表	21
附录 C（资料性附录） 回灌试验观测原始记录表	22
附录 D（资料性附录） 对井采灌试验资料的分析	24

前 言

本标准按照GB/T 1.1-2009《标准化工作导则 第一部分：标准的结构和编写》的规则起草。

本标准执行了GB/T 11615-2010《地热资源地质勘查规范》标准中的地热资源勘查工程控制程度要求、工作质量要求、储量计算与评价、地热流体质量评价、开发利用评价和资料整理、报告编写的技术要求，并结合天津市多年来地热单（对）井储量评价工作的实践经验，在标准的结构、主体内容、具体条款等方面均做了改动、补充和细化。

本标准由天津市国土资源和房屋管理局提出并归口。

本标准起草单位：天津地热勘查开发设计院、天津市国土资源和房屋管理局地热管理处。

本标准主要起草人员：曾梅香、张子亮、沈健、岳丽燕、田信民、刘荣光、李波、王光辉、李嫒嫒、刘九龙。

本标准于2016年9月首次发布。



引 言

本标准针对天津地区地热勘探工作实际情况，按照GB/T 11615-2010《地热资源地质勘查规范》，作了具体工作方法要求和补充：

- 注重了对地热井热水头的观测和计算；
- 由于地热流体的特殊性，地热井产能测试的各次降压试验和回灌试验均由流量控制；
- 在热储参数计算中增加了降压曲线拟合求参方法和越流系统降压试验求参方法，力求获得全面水文地质参数；
- 增加了地热井回灌试验技术要求和回灌井的可灌量估算与确定；
- 充分考虑了地热回灌的工作意义，并将对井中回灌井的回灌能力作为确定开采井许可开采量的重要依据之一；
- 在估算地热井可采资源量时，根据热储压力年降幅，对合理降深分别作了具体要求。同时，鉴于天津目前地热开采实际情况，提出在确定地热井合理的、允许的、稳定的许可采量时，不应以单一指标来简单评价，而要综合分析区域水位年降幅，合理降深，地热井回灌能力，开采井降压影响半径，相邻已有地热井的开采权益保护半径，以灌定采原则，资源利用整体规划和地区局部规划等多种因素，对地热井允许开采的资源量进行可靠性评价；
- 依据GB/T 11615-2010，规定了地热资源评价、开发利用评价、流体质量评价、经济环境效益评价等技术要求；
- 对地热资源勘探成果整理、勘探报告编写内容以及储量评审、登记、备案等作了具体规定和要求。

地热单（对）井资源评价技术规程

1 范围

本标准规定了地热井产能测试、热储水文地质参数的计算方法、单（对）井可开采量和可回灌量的计算与评价、开发利用评价、流体质量评价、地热单（对）井勘探报告编写内容、地热勘查成果及原始资料的整理和汇交的技术要求。

本标准适用于天津地区地热单（对）井储量评价、资料验收、报告评审备案、地热资源/储量登记统计。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 11615-2010 地热资源地质勘查规范

DB12/T 469-2012 地源热泵地下储能系统建设运行技术规范

3 术语和定义

GB/T 11615-2010界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

试验降压 a test before pressure drawdown test

正式降压试验之前，为检查抽水设备及其安装情况，掌握地热井最大出水量（ Q_{max} ）而进行的试验。

3.2

井筒效应 wellbore effect

地热井在抽水期间，尤其是在抽水的初期，井口流体温度随着时间的延续不断升高，而由于水的密度与温度的变化成反比，此时尽管地热井内水位上升或保持不变，但热储压力却下降，这种现象即井筒效应。是地热流体普遍具有的通性。

3.3

静水位 static water level

地热井在非井试条件下的闭井流体压力，在地热井产能测试中通常以静水位埋深或静水位（ H_1 ）表征。其数值是产能测试之前，消除了井筒效应的静止液面到自然地面的垂直距离。

3.4

热水头 hot water head

热储静压力按储层温度换算的地热井承压水头称为热水头，是井筒内流体上下形成统一热力场、隔水顶板之上的热液柱高度。以自然地面为基点到热水头液面之间的距离则为热水头埋深 (H_0)。

3.5

动水位 dynamic water level

地热井在井试时带有压力下降的流体压力，相当于动水位埋深或动水位 (h)。即产能测试过程中，井筒内某一时刻 (t) 的水位埋深 ($h_{(t)}$)。

3.6

降深 drawdown

地热井在井试条件下所产生的热流体水位变化或压力下降值。降压试验的稳定水位降深 (s_s) 为稳定动水位埋深 (h_i) 与热水头埋深 (H_0) 之差。

3.7

单位产量 specific capacity

指地热井在井试时，每米压力降的热流体产量。相当于单位涌水量 (q)。

3.8

地热尾水 geothermal tail water

地热流体经换热后，温度降低但水质未受污染的地热原水。

3.9

开采井开采权益保护半径 protection radius of exploitation rights for exploitation wells

地热井按许可开采量进行开采，对热储的影响半径 (R_E)。以此圈定地热井在整个开采期内，维持其正常开采，产量与流体温度不会下降的热储权益保护范围。

3.10

许可开采量 permission production

依据区域热储水位年降幅、合理降深、回灌井回灌能力及其50年热突破半径、开采井降压影响半径、相邻已有地热井的开采权益保护半径，按照以灌定采原则，同时结合地热资源规划等多种因素确定的地热井流体可采资源量，是可提供给行政管理部门储量审批的地热井许可开采量 (Q)。

4 总则

4.1 以供热为目的的地热开发，应采用对井方式开采地热资源；鼓励原单井供热系统补建回灌井，以回灌方式开发利用地热资源。

4.2 地热井完井后须准确测定井口标高及井位坐标，各项钻探资料应及时录入地热钻井数据库。

4.3 热储层顶、底板埋深及地热井静水位埋深、动水位埋深、热水头埋深统一以自然地面为零点进行计算。

4.4 计算热储参数时所用的热水头埋深、动水位埋深均按热储平均温度下的流体密度进行换算，即计算所得参数为热储温度下的渗透系数、导水系数和导压系数。

4.5 评价热储导水性能时，为消除温度所引起的井筒效应影响，统一用渗透率表征，或明确指出某一温度下的渗透系数（如热储温度）。

- 4.6 为获得热储全面、准确的水文地质参数，宜充分利用周围已有的同层地热井做观测井（如对井）进行多井降压试验。
- 4.7 地热井降压试验时，最大降深试验宜按非稳定流方法进行，以便确定流体运动方程，计算精确的热储水文地质参数。
- 4.8 地热井允许开采年限以 50 年计算。地热流体可开采量应综合分析开采动态、资源开采规划。每 5 年重新审核、每 10 年进行一次再评价。
- 4.9 对井资源评价，应根据对井采灌试验资料，按照采、灌平衡的原则，进行对井储量计算和可靠性评价。其步骤是：
- 利用采灌试验资料，计算采灌平衡条件下的热储水文地质参数；
 - 根据区域水位年降幅，确定对井开采井的合理降深和可开采量；
 - 根据对井采灌试验求得的水文地质参数和选定的可开采量，计算对井回灌水的冷穿透时间，评价可开采量的可靠性；
 - 根据对井采灌的流场影响范围，计算对井影响区的热储地热资源量。依据可采回收率计算可回收热资源量，评价对井可开采量的可靠性。

5 地热井产能测试

5.1 准备工作

- 5.1.1 产能测试前应进行洗井，疏通热储层，以达到最佳出水能力和回灌效果。
- 5.1.2 产能测试前应进行试验降压，确定地热井最大动水位埋深 $h_{\max}$ 、最大降深 $S_{\max}$ 和最大出水量 $Q_{\max}$ ，为选择抽水潜水泵型号提供依据。同时可利用试验降压后的水位恢复来初步确定热水头埋深 H_0 。

5.2 一般要求

- 5.2.1 地热井产能测试包括降压试验、放喷试验和回灌试验，通过测试取得目的热储层压力、产能、温度、单位产量、井流方程和采灌量比及热储层的渗透性等参数。
- 5.2.2 对负水头承压井采用定流量降压试验，对自流井（正水头）采用放喷试验。
- 5.2.3 产能测试所采用的设施均应是耐高温耐腐蚀材质。
- 5.2.4 试验操作人员应明确各类试验目的、方法，编写产能测试详细方案，提示试验过程中可能出现的各种风险及困难，并应提出应对预案。
- 5.2.5 热储压力测量宜采用井下压力计测量压力变化，条件不具备只能从井口测量水位（压）时，应同步观测对应的液面温度，以此来换算消除井筒效应之后的热储流体水位埋深或储层压力。
- 5.2.6 热储层天然动态监测宜选择距离试验井最近的同层未扰动地热井，也可选择符合静态条件的产能测试井自身作为监测井进行自然水位观测。如自然水位的日动态变化很大时，应掌握其变化规律，对水位进行动态校正试验。观测时间应不少于 24h 即一个潮汐周期，观测频率为 1 次/h，观测值精确到 $\pm 5\text{mm}$ 。

5.2.7 降压试验分类

- 5.2.7.1 地热井降压试验依据抽水时动水位稳定情况及是否有观测井分为稳定流和非稳定流。稳定流降压试验操作简单；非稳定流降压试验一般带有一个或多个观测井，所获取的信息量更多。应针对具体情况和条件按要求进行操作并取全取准相关数据。

5.2.7.2 稳定流降压试验：该方法通过不同的稳定流量 Q 及所对应的井中热储压力降低值即水位稳定降深 s_w ，计算热储水文地质参数（渗透系数 K 、导水系数 T 和降压影响半径 R 等）。并通过热储压力变化值与其对应的涌水量关系，推算地热井水流方程，绘制 $Q-f(s_w)$ 曲线。

5.2.7.3 非稳定流降压试验：该方法通过热储压力随时间变化过程计算热储水文地质参数（导水系数 T 和弹性释水系数 s 等）。

5.2.8 地热流体水化学分析

5.2.8.1 地热流体分析样宜在产能测试结束之前采集。对于需要酸化处理的地热井应在酸化前采集流体样。

5.2.8.2 一般流体质量化验为水质全分析。针对特殊利用行业的地热流体，还应有针对性的采集特殊组份样品送检，取样按照 GB/T 11615-2010 中附录 B 的要求进行。

5.3 降压试验

5.3.1 降压试验数据应能确定储层流体运动方程 $s_w=f(t)$ 和储层渗流类型，计算开采期内抽水井影响热储水文地质参数，进行开采动态预测。

5.3.2 降压试验数据应能确定井流量方程 $s_w=aQ+bQ^2$ 或 $Q=f(h)$ ，计算热储的热水头 H_0 和地热井的产能，确定地热井的可采资源量。

5.3.3 根据地热井试验降压情况，选择扬程、涌水量、温度、功率等技术指标相适宜的潜水泵，下泵深度要综合考虑热储层类型、动水位、降深等。

5.3.4 试验前应检查排水管道是否畅通，检查水位、水量、水温等测试仪器仪表及用品、工具，确保降压试验能连续进行。

5.3.5 在同一降压试验中应采用同一方法和工具进行数据观测和采集。

5.3.6 依据勘查工作需要，分为单井和多井降压试验。

5.3.7 单井降压试验

5.3.7.1 应进行 3 次定流量降压试验，反映 $Q-s_w$ 曲线形态。先进行最大流量 ($Q_3=Q_{max}$) 抽水，大降深停泵之后立即进行水位（压力）恢复试验恢复时间不少于 6h，之后再进行中、小降深试验单井降压试验。

5.3.7.2 降压试验各降次应采用流量控制，消除井筒效应，其比例分别为 $Q_3=Q_{max}$ ， Q_2 、 Q_1 分别为最大流量的 2/3 和 1/3 左右。

5.3.7.3 最大降压试验按非稳定流试验时间、观测要求进行，降压延续时间不少于 48h，稳定延续时间不少于 24h。中、小降深稳定延续时间分别不少于 12h、8h。应现场绘制 s_w-lgt 及 $s_w-\sqrt{t}$ 曲线，定性判断流体运动方程。

5.3.7.4 各落程是否达到稳定以观测出水量、动水位与时间关系曲线只在一定范围内波动、波动幅度小于 2~3cm，且水位动态数据没有持续下降或上升趋势为标准。

5.3.7.5 测试资料应满足确定流体运动方程。计算热储层渗透系数 K 、降压影响半径 R ，初步确定弹性释水系数 s 、压力传导系数 a 等热储水文地质参数，根据三次降压试验数据，建立井流量方程，计算热水头和单井合理产量。

5.3.8 多井降压试验

5.3.8.1 指带有一个或多个观测井的主孔降压试验,主要在对井中第二眼井成井时的降压试验中采用。当地热地质条件复杂、对井及附近地热井尤其是同层地热井较多且相距较近时,具备观测条件的都应进行多井降压试验。

5.3.8.2 宜进行 1~2 次的稳定流或非稳定流降压试验,最大一次降压的延续时间不少于 120h。如果同期观测井出现水位持续下降或水位波动较大情况,应适当延长试验时间。

5.3.8.3 抽水井抽水对最近观测井引起的水位下降值不小于 20cm。

5.3.8.4 试验资料除满足单井试验的各项要求外,还应能确定降压影响半径 R 、井间干扰系数等参数。

5.4 放喷试验

5.4.1 针对热储水头高于地面的地热井,即自流井。分为单井放喷试验和多井放喷试验。

5.4.2 放喷试验的方法和要求按 GB/T 11615-2010 中第 7.6.4 条执行。

5.5 对井采灌试验

5.5.1 技术要求

5.5.1.1 通过开采井的水位下降曲线,计算补给带的宽度和采、灌条件下的水文地质参数,估算对井采、灌的影响范围,对开采动态进行预测。计算方法执行 DB12/T 469-2012 中附录 C 和本标准的附录 D 的相关条款。

5.5.1.2 通过对井采灌的采、灌量与相应热储压力的变化情况,确定对井可采资源潜力,评价可采资源量。

5.5.1.3 对井采灌试验一般在对井采灌系统建成后进行,宜采用采、灌定流量的方式进行。要根据多井降压试验的资料设计“大、中、小”三级采、灌量,查明不同采、灌量封闭流场的影响范围和水动力条件。

5.5.2 系统工艺

5.5.2.1 水质处理系统

地热尾水回灌时,应作除砂、除污水质处理,应依据试验井目的层热储类型,选择精度适宜的过滤设备:

- a) 目的层为孔隙型热储时,需同时安装粗过滤和精细过滤两级过滤器,粗过滤精度为 $50\mu\text{m}$,精过滤精度为 $3\sim 5\mu\text{m}$;
- b) 目的层为基岩岩溶裂隙型热储时,过滤器精度不小于 $50\mu\text{m}$ 。

5.5.2.2 排气设备

在回灌井管路上须安装排气罐,用以排出回灌流体中的气体。试验时应检查排气阀门,罐体内压力应大于大气压,严禁空气进入,同时保证排气通道畅通。

5.5.2.3 系统管路

采、灌系统管路应保持密闭状态。仪表、仪器正常运行。正式回灌试验前应利用地热流体对管道及过滤设备内部污垢杂物进行冲洗,要求水清砂净

5.5.2.4 回灌方式

宜采用回灌管内进水方式进行回灌,回灌管应下至回灌井静水液面以下 $10\sim 15\text{m}$ 深度,保证回灌在真空密闭条件下进行。

5.5.3 试验操作

5.5.3.1 正式回灌前须对井筒内水位进行 24h 天然动态观测。观测要求按本标准的第 5.2.6 条进行。

5.5.3.2 一般应进行三组以上的试验。宜采用定流量方法，回灌量从小到大依次进行。第一组小灌量以其产能测试时最大抽水流量的 1/2 为宜，后续每组逐级增加 10~30m³/h，最大一组灌量应达到或接近产能测试时的最大涌水量。

5.5.3.3 第一组试验回灌井的动水位需稳定 8h 以上，第二、三组动水位需稳定 16h、48h 以上。各组试验是否达到稳定以观测水位波动幅度应小于 5cm/30min，且水位动态数据不再持续下降或上升为准。

5.5.3.4 停灌后应进行水位恢复试验。

5.5.3.5 测试资料应满足确定流体运动方程的要求。利用多组回灌试验数据建立井流方程，计算热储注水渗透系数 $K_{\text{注}}$ 、导水系数 $T_{\text{注}}$ 和回灌影响半径 $R_{\text{注}}$ 等热储水文地质参数，评价单井合理可灌量。

5.5.4 试验前期或试验中的回扬洗井

5.5.4.1 生产性采、灌运行可以采用回扬，供暖期后对回灌井进行洗井。利用回扬、洗井等措施来清洗井筒内部的腐蚀污垢、流体中的悬浮物，保护热储层，提高地热井回灌能力。

5.5.4.2 回扬、洗井按降压试验要求进行，根据水质清洁情况决定回扬、洗井时间。作好水量、水温、水位（压力）等动态数据观测记录。依据具体工作需要取样进行流体质量分析。

5.6 数据采集与资料整理

5.6.1 准确测定试验井的井口标高及井位坐标、测点至地面的距离。

5.6.2 试验前必须准确测量试验井的静水位埋深 h_0 及对应的液面温度。观测次数不少于 3 次。

5.6.3 观测数据精确到水位 1cm、水温 0.1℃。开采流量采用堰板计量时，过水堰高测量应读数精确到 1mm；采用水表计量时，开采量与回灌量读数应精确到 0.1m³。

5.6.4 降压试验数据观测要求

5.6.4.1 降压试验过程中，抽水井和观测井均要求水位液面温度及流量同步观测。

5.6.4.2 稳定流观测时间为开泵后第 5、10、15、20、25、30、40、60、80、100、120min，稳定后每 30min 观测一次。

5.6.4.3 非稳定流观测时间为开泵后第 1、2、3、4、6、8、10、15、20、25、30、40、50、60、80、100、120min，之后每隔 30min 观测一次。

5.6.4.4 大降压试验停泵后立即观测恢复水位，当恢复水位出现峰值（热水头）后，按非稳定流间隔时间观测， $h-t$ 曲线出现拐点后，再观测 3~5 个数据，持续时间不少于 6h，要求水位和液面温度同步监测。

5.6.5 回灌试验数据观测要求

5.6.5.1 每一组试验观测时间间隔为回灌开始后第 5、10、15、20、25、30、40、50、60、80、100、120min，之后每 30min 观测一次。

5.6.5.2 观测项目水位、液面温度、流量以及过滤器、排气装置的进口与出口压力，要求抽水井和回灌井同步进行。

5.6.6 产能测试资料整理

5.6.6.1 产能试验现场应做好试验原始数据记录工作，并在试验现场绘制必要的草图（如 $Q-s_w$ 、 s_w-lgt 、 $s_w-\sqrt{t}$ 曲线），判断是否存在管道流和降压反曲线，及时调整地热井采、灌方案。同时也可发现试验过程中出现的问题，做到现场及时纠正或补做试验。

5.6.6.2 检查产能测试各种记录表，表格见附录 B、附录 C。对水位、水量、水温、观测时间等数据，要进行审查、校对，发现有误可根据情况进行修正，誊清一份归档，并制成电子版及时录入地热钻井数据库。

5.6.6.3 绘制如下降压试验相关曲线图：

- a) Q 、 s_w 、 $T-t$ 历时曲线；
- b) s_w-lgt 及 $s_w-\sqrt{t}$ 曲线；
- c) $Q-f(s_w)$ 曲线；
- d) $q-f(s_w)$ 曲线；
- e) 计算参数时所需要的其它相应曲线。

6 热储水文地质参数计算方法

6.1 水位校正

6.1.1 将产能测试获得的、不同温度的观测水位统一换算到某一温度下的校正水位，消除井筒效应。一般按热储平均温度进行校正。

6.1.2 校正方法

观测水位换算到热储平均温度下的水位校正可采用 (1) 式进行。

$$H_t = H_{\text{中}} - \frac{\rho_{\text{平}} \times [H_{\text{中}} - (h_t - h_0)]}{\rho_{\text{高}}} \quad (1)$$

式中：

H_t ——校正后自然地面起算的热水头埋深 (m)；

$H_{\text{中}}$ ——热储富集段中点垂深 (m)；

$\rho_{\text{平}}$ ——井筒内水柱平均密度（即热储温度与液面温度的平均值所对应的流体密度）(kg/m³)；

h_t ——观测水位埋深 (m)；

h_0 ——观测基点距自然地面的高度 (m)；

$\rho_{\text{高}}$ ——热储温度所对应流体密度 (kg/m³)。

6.1.3 静水位埋深 H_1 求取方法

降压（回灌）前测得的观测静水位埋深 (h_1)，对应的是温度自上而下逐渐增高的液柱，须利用 (1) 式统一换算成热储平均温度下的液柱，此数即为热储平均温度下的静水位埋深 (H_1)。

6.1.4 热水头埋深 H_0 确定方法

6.1.4.1 用产能测试资料计算法：

用产能测试资料计算有以下两种方法：

- a) 依据降压试验时 3 次降深测得的稳定动水位 h_i 和对应的抽水流量 Q_i ，通过回归计算得出热水头埋深 H_0 值。

- b) 利用降压资料计算热水头 H_0 时, 应先采用 (1) 式将观测到的稳定动水位, 按热储平均温度进行水位校正。

6.1.4.2 水位恢复法

大落程降压试验停泵后, 立即观测恢复水位。恢复水位出现的峰值即为热水头 H_0 。

6.1.4.3 降压试验动水位校正

各次降深所取得的观测水位, 均应采用 (1) 式按热储平均温度进行水位校正, 形成温度统一的热力场才能对比分析, 方可进行热储温度下的水文地质参数计算。

6.1.4.4 回灌试验水位校正

回灌试验时, 回灌井内不同温度下的观测水位统一按 GB/T 11615—2010 中第 6.1.3 条地热资源温度分级所界定 25°C 、采用 (1) 式进行校正。

6.2 单位产量计算方法

地热井单位产量 q 可采用 (2) 式进行计算求得。

$$q = \frac{Q}{s_w} \quad (2)$$

式中:

q ——单位产量 ($\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$);

Q ——抽水流量 (m^3/d);

s_w ——抽水产生的稳定水位降深 (稳定动水位埋深 h_0 与热水头埋深 H_0 之差) (m)。

6.3 稳定流降压试验求参方法

6.3.1 采用承压完整井公式计算热储水文地质参数。

6.3.2 热储有效厚度 (M)

6.3.2.1 确定热储有效厚度 (M) 应结合地热井地质录井和地球物理测井资料, 统计具有有效空隙和渗透性的地层、岩体和构造带的总厚度。

6.3.2.2 岩溶裂隙型热储有效厚度为以测井结果划分的 I、II 类裂隙厚度之和。采取酸洗压裂措施后其厚度为 I、II、III 类裂隙厚度之和。

6.3.2.3 孔隙型热储有效厚度的确定应根据测井结果及滤水器 (射孔段) 位置, 为滤水器 (射孔段) 对应的热储段厚度之和。

6.3.3 单井降压试验求参方法

6.3.3.1 地热井单井稳定流降压试验时, 采用裘布依 Dupuit 公式 (3) 及奚哈特 W. Sihadrt 影响半径经验公式 (4), 采用叠代法求取热储渗透系数 K 和降压影响半径 R 。

$$K = \frac{0.366Q}{s_w M} \lg \frac{R}{r_w} \quad (3)$$

$$R = 10s_w \sqrt{K} \quad (4)$$

式中:

K ——热储平均温度下的热储渗透系数 (m/d);

Q ——抽水流量 (m³/d);

M ——热储层有效厚度 (m);

R ——降压影响半径 (m);

s_r ——抽水井稳定水位降深 (m);

r_w ——抽水井热储段井半径 (m);

其余符号意义同前。

6.3.3.2 热储导水系数 T 采用 (5) 式求得。

$$T = KM \dots\dots\dots (5)$$

式中:

T ——导水系数 (m²/d);

其余符号意义同前。

6.3.3.3 热储渗透率 k 采用 (6) 式求得。

$$k = \frac{\eta}{g} K \dots\dots\dots (6)$$

式中:

K ——热储渗透率 (m²/s);

η ——热储平均温度下热流体的运动粘滞系数 (m²/s);

g ——重力加速度 (9.8m/s²);

其余符号意义同前。

6.3.3.4 依据同一热储层渗透率 k 值相同的原理, 采用 (7) 式计算不同流体温度下的渗透系数 K_T 。

$$k = K \frac{\eta}{\rho g} = K_T \frac{\eta_T}{\rho_T g} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

K_T ——T℃时热储的渗透系数 (m/s);

η_T ——T℃时热流体的运动粘滞系数 (m²/s);

ρ_T ——T℃时热流体密度 (kg/m³);

其余符号意义同前。

6.3.4 多井降压试验求参方法

6.3.4.1 当带有一个观测井时, 如果观测井受抽水主井影响水位有变化时, 采用 (8) 式, (9) 式计算降压影响半径和热储渗透系数。

$$\lg R = \frac{s_w \lg r - s_1 \lg r_w}{s_w - s_1} \dots\dots\dots (8)$$

$$K = \frac{0.366Q}{M(s_w - s_1)} \lg \frac{r}{r_w} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

s_w ——抽水井稳定水位降深 (m) ;
 s_r ——观测井稳定水位降深 (m) ;
 r ——观测井与抽水井井底水平距离 (m) ;
 其余符号意义同前。

6.3.4.2 当带有两个观测井时,采用(10)式,(11)式计算水文地质参数。

$$\lg R = \frac{s_1 \lg r_2 - s_2 \lg r_1}{s_1 - s_2} \dots \dots \dots (10)$$

$$K = \frac{0.366Q}{M(s_1 - s_2)} \lg \frac{r_2}{r_1} \dots \dots \dots (11)$$

式中:

s_1 ——近观测井稳定水位降深 (m) ;
 s_2 ——远观测井稳定水位降深 (m) ;
 r_1 ——近观测井与抽水井井底水平距离 (m) ;
 r_2 ——远观测井与抽水井井底水平距离 (m) ;
 其余符号意义同前。

6.3.4.3 利用压力测试时,采用(12)式求取相关水文地质参数(带一个观测井)。

$$K = \frac{Qg}{2\pi\Delta P M} \ln \frac{r_1}{r_w} \dots \dots \dots (12)$$

式中:

K ——热储层渗透系数 (m/s) ;
 Q ——抽水流量 (kg/s) ;
 ΔP ——使水达到稳定状态时抽水井与观测井之间的流体压力差 (Pa) ;
 其余符号意义同前。

注:对单井可用奚哈特W. Sibardt降压影响半径经验公式与(12)式迭代计算。

6.4 非稳定流降压试验求参方法

6.4.1 Theis 配线法

计算步骤如下:

- 在双对数坐标纸上绘制 $W(u)-1/u$ 的标准曲线。
- 在另一张模数相同的透明双对数纸上绘制实测的 $s-t/r^2$ 曲线或 $s-t$ 曲线。
- 将实际曲线置于标准曲线上,在保持对应坐标轴彼此平行的条件下相对平移,直至两曲线重合为止。
- 任取一匹配点(在曲线上或曲线外均可),记下匹配点的对应坐标值: $W(u)$, $1/u$, s 和 t/r^2 (或 t),带入(13), (14), (15)式,分别计算有关参数。

$$K = \frac{0.08Q}{[s]M} [W(u)] \dots \dots \dots (13)$$

$$\mu^* = \frac{r^2}{4T} \left[\frac{1}{u} \right] \dots\dots\dots (14)$$

$$a = \frac{T}{\mu^*} \dots\dots\dots (15)$$

式中:

s ——抽水任一时刻的水位降深 (m);
 μ^* ——含水层的贮水系数;
 a ——含水层的导压系数 (m²/d);
 r ——观测孔与抽水井井底水平距离 (m);
 其余符号意义同前。

6.4.2 Jacob 直线图解法

当降压试验时间较长, $u = r^2/(4at) < 0.01$ 时, 可采用雅各布 Jacob 公式 (16) 计算参数。

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25Tt}{r^2 \mu^*} = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25Tt}{r^2 \mu^*} \dots\dots\dots (16)$$

将上式改写成 $s = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25T}{r^2 \mu^*} + \frac{0.183}{T} \lg t$, 即 s 与 $\lg t$ 成线性关系, 具体步骤如下:

- 绘制 $s-\lg t$ 曲线, 拟合成直线形式, 求直线斜率 i 。可在 excel 拟合公式上直接读取, 也可取一个对数周期对应的降深 Δs , 这就是斜率 i 。 $i = \frac{0.183Q}{T}$, 可求出导水系数 T 。
- 并将直线部分延长, 在零降深线上的截距为 t_0 , 代入 (16) 式有 $\lg \frac{2.25Tt_0}{r^2 \mu^*} = 0$, 即

$$\mu^* = 2.25T \frac{t_0}{r^2}, \text{ 可求出贮水系数 } \mu^*。$$

6.4.3 降压曲线拟合求参方法

6.4.3.1 利用相对误差较小的大降深 (s_s) 试验数据, 绘制 s_s-t 历时曲线, 采用泰斯 Theis 井函数 (18) 式拟合求参。

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \dots\dots\dots (17)$$

$$\text{井函数自变量 } u: u = \frac{r^2}{4at}$$

泰斯井函数级数展开式:

$$W(u) = -0.577216 - \ln u + u - \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \frac{u^n}{n!}$$

式中:

$s(r, t)$ ——任一点任一时刻的热储压力降低值 (m)；

t ——抽水开始到计算时的延续时间 (d)；

其余符号意义同前。

6.4.3.2 充分利用实测数据，通过调整导水系数 T 及压力传导系数 a ，使理论曲线与实测曲线达到最佳拟合状态，从而获得热储水文地质参数。

6.4.3.3 对于基岩热储层，主要拟合出流体温度基本稳定后的曲线尾支段。

6.4.4 水位恢复资料求参方法

当 $u < 0.01$ 时，依据泰斯Theis叠加公式 (18)，使用Excel表绘制降深—历时对数曲线，以历时 $\lg(t/t_0)$ 为x轴、剩余降深 s_r 为y轴，添加线性趋势线获得趋势线斜率 $i = \frac{2.3Q}{4\pi T}$ ，求取导水系数 T 。

$$s_r = \frac{2.3Q}{4\pi T} \lg \frac{t}{t-t_0} \dots\dots\dots (18)$$

式中：

s_r ——剩余降深值 (m)；

t ——抽水开始到计算时的延续时间 (d)；

t_0 ——恢复观测距抽水开始的时间 (d)；

i ——剩余降深对数历时曲线趋势线斜率；

其余符号意义同前。

6.4.5 有越流补给的降压试验求参方法

越流系统中降压试验可采用Hantush-Jacob公式 (19)、(20) 计算参数。

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0\left(\frac{r}{B}\right) \dots\dots\dots (19)$$

$$R = 1.123B \dots\dots\dots (20)$$

式中：

$K_0\left(\frac{r}{B}\right)$ ——零阶第二类虚宗量Bessel函数；

B ——越流因素 (m)；

其余符号意义同前。

s - $\lg t$ 曲线的斜率变化规律是由小到大，又由大变到小，存在着拐点P（见图1）。

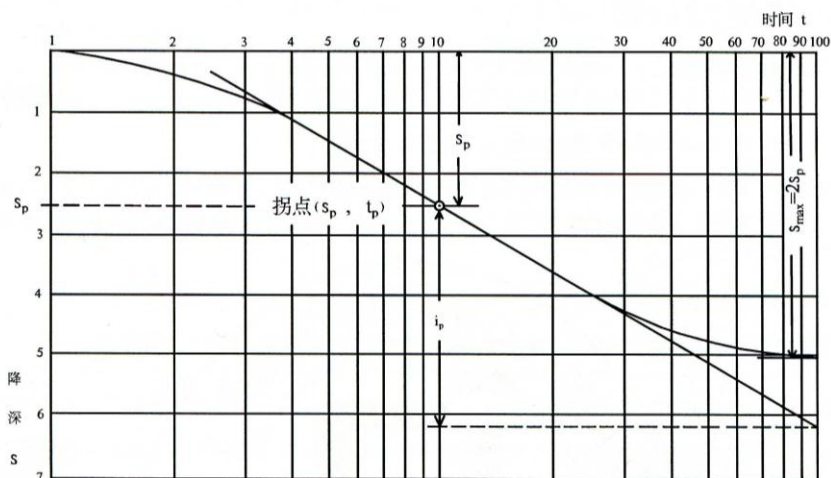


图1 s-lgt 曲线

拐点P处降深 s_p 与最大降深 $s_{\max}$ 的关系为:

$$s_p = \frac{Q}{4\pi T} K_0 \left(\frac{r}{B} \right) = \frac{1}{2} s_{\max} \quad (21)$$

拐点P处的时间 t_p 为:

$$t_p = \frac{\mu^* Br}{2T} \quad (22)$$

拐点P处切线的斜率为:

$$i_p = \frac{2.3Q}{4\pi T} e^{-\frac{r}{B}} \quad (23)$$

拐点P处降深 s_p 与斜率 i_p 之间的关系为:

$$\frac{2.3s_p}{i_p} = K_0 \left(\frac{r}{B} \right) e^{\frac{r}{B}} \quad (24)$$

应用上述原理, 具体计算参数步骤如下:

- 在单对数坐标纸上绘制 s-lgt 曲线, 用外推法确定最大降深 $s_{\max}$, 并用 (21) 式计算拐点 P 处降深 s_p 。
- 根据 s_p 确定拐点 P 位置, 并从图上读出拐点出现的时间 t_p 。
- 做拐点 P 处曲线的切线, 并从图上确定拐点 P 处切线的斜率 i_p (一个对数周期对应的降深 Δs)。
- 根据 (24) 式, 求出有关数值后, 查附录 D 表 D.1 确定 $\left(\frac{r}{B} \right)$ 和 $e^{\frac{r}{B}}$ 值。

e) 根据 $\left(\frac{r}{B}\right)$ 值求 B 值: $B = \frac{r}{\left(\frac{r}{B}\right)}$ 。

f) 按 (23) 式, (22) 式和 (20) 式分别计算 T、 μ^* 和 R 值。

6.5 复杂条件下热储水文地质参数计算

如果降压试验受到不同水文地质边界影响时,则应根据实际情况选取符合水文地质条件的方法进行计算,具体方法参见《供水水文地质手册》第二册、《试井分析》等。或按边界水力性质设置虚拟井并按势叠加原理进行计算。

6.6 热储水文地质参数选取

选取大降深产能测试资料所求得的相关参数,作为该地热井热储的水文地质参数。

7 地热单(对)井资源计算与可靠性评价

7.1 地热单(对)井可采量估算

7.1.1 地热井井流方程的确定

根据 3 次降深的降压试验观测数据,采用 (25) 式来确定地热井井流方程。

$$s_w = aQ + bQ^2 \dots\dots\dots (25)$$

式中:

a ——热储层流损失系数;

b ——井筒紊流损失系数;

其余符号意义同前。

7.1.2 单井地热流体可采量估算

对单个地热井可采量,可依据井产能测试资料按井流方程估算单井的稳定产量。或以降压试验资料采用内插法估算单井可采量,计算使用的压力降低值即水位降深见表 1。

表 1 单井水位降深约束条件一览表

热储类型	水位年降幅 (m/a)	推算降深 (m)
裂隙型	≤ 3	≤ 30
	> 3	≤ 20
孔隙型	≤ 2.5	≤ 30
	> 2.5	≤ 20

注:按内插法估算单井开采量时,采用的降深值不得大于降压试验最大降深值的 1.5 倍。

7.1.3 对井地热流体可采量估算

7.1.3.1 对井系统估算可采量时,应结合实际回灌试验,依据“以灌定采”的原则,计算其保持水头压力、热(量)均衡条件下的合理开采强度,充分考虑到流体回灌对热储的回补作用。

7.1.3.2 对井“以灌定采”应同时满足：回灌率大于 90%；地热流体回灌后，50 年内冷峰面不得到达开采井，即不产生热突破。

7.1.3.3 利用降压试验资料、采用内插法估算对井中开采井的可采量时，计算使用的压力降低值即水位降深见表 2。

表2 对井水位降深约束条件一览表

热储类型	水位年降幅 (m/a)	推算降深 (m)
裂隙型	≤ 3	≤ 40
	≤ 3	≤ 30
孔隙型	≤ 2.5	≤ 40
	> 2.5	≤ 30

7.2 对井采灌时可灌量估算与确定

7.2.1 利用采灌试验的回灌井注水指示曲线和静水位埋深确定。采灌试验可以是自流回灌，也可以是压力回灌。

7.2.2 利用回灌试验资料，采用 (3)，(4) 式计算回灌流体温度为 25℃ 时的注水渗透系数 $K_{注}$ 、回灌影响半径 $R_{注}$ 。采用 (26)，(27) 式来估算回灌流体温度为 25℃ 时回灌井的可灌量。

$$Q_{注} = \frac{K_{注} s_{注} M}{0.366lg \frac{R_{注}}{r_w}} \quad (26)$$

$$R_{注} = 10s_{注} \sqrt{K_{注}} \quad (27)$$

式中：

$Q_{注}$ ——回灌流体温度为 25℃ 时回灌井稳定可灌量 (m³/d)；

$K_{注}$ ——回灌流体温度为 25℃ 时的热储注水渗透系数 (m/d)；

$s_{注}$ ——回灌井内流体水位上升到允许的最大值 (统一取距离井口 10m，水位统一以 25℃ 校正) (m)；

$R_{注}$ ——回灌影响半径 (m)；

其余符号意义同前。

7.2.3 保证 50 年开采期内不产生热突破，用冷锋面运移时间估算回灌井的允许灌量。

7.2.3.1 对于基岩岩溶裂隙型热储层回灌井，采用 (28) 式来计算。

$$Q_{注} = \frac{\pi D^2 M (\rho_a \beta_a)}{3t \rho_w \beta_w} \quad (28)$$

式中：

D ——同层采、灌对井井底距离 (m)；

t ——冷峰面到达开采井的允许时间 (d，按 50 年计)；

$\rho_a \beta_a$ 、 $\rho_w \beta_w$ ——25℃ 时流体、储层的密度与比热之乘积 (MJ/m³·℃)；

其余符号意义同前。

7.2.3.2 对于松散孔隙型热储层回灌井，采用 (29) 式来计算。

$$Q_{\text{注}} = \frac{\pi D^2 M}{3t} \dots\dots\dots (29)$$

式中:

n ——热储平均孔隙度(无量纲);

其余符号意义同前。

7.2.4 回灌井可灌量综合确定

7.2.4.1 根据以上3种不同计算方法估算可灌量,结合回灌试验时地热井的实际回灌情况,来综合评价确定地热回灌井的合理可灌量。

7.2.4.2 确定回灌井合理可灌量时,有两种特殊情况应酌情考虑:

- a) 回灌井回灌能力极弱(小于出水量的三分之一)时:宜以该井回灌试验过程中相对延续时间较长的一段回灌量作为其可灌量。并采用类比方法,对比分析相同地质构造条件下、成井工艺相同的同类型地热井的回灌能力,作为确定其可灌量的依据。
- b) 回灌井回灌能力极强(大于最大出水量)时:主要是应考虑冷锋面的运移,以对井中的开采井和附近其它同层开采井流体温度不应下降、不产生热突破为宜。

7.3 地热资源可靠性评价

7.3.1 单(对)井的地热资源可靠性评价是在综合考虑各种因素影响的情况下,地热井所能允许的稳定的可采资源量即许可开采量(Q)。这些因素包括:区域水位年降幅;热(量)均衡条件下的开采合理降深;采灌对井合理井距;降压影响半径;开采权益保护半径;以灌定采;地热资源开发利用区域整体规划和地区局部规划;等等。无论是以单井方式、还是以对井采灌式开采地热资源,在确定地热井许可开采量时,不应以单一指标来简单评价。

7.3.2 鉴于目前单井开采与采灌对井开采共存的局面,地热资源可靠性评价大类上分两种情况,即单井地热资源评价和采灌对井地热资源评价。

7.3.3 单井地热资源可靠性评价是首先依据单井产能测试资料,按本标准的7.1.1条确定的井流量方程计算单井稳定产量。按单井产量和单井降压试验求出的储层流体运动方程,计算开采期的抽水影响范围。根据天津市地热开发利用规划和已有地热井的分布及井权保护范围,确定该单井可以利用的热储范围。

7.3.4 对井地热资源可靠性评价是按确定的对井采、灌量,计算出对井采灌形成的封闭流场的范围和范围内热储层的热资源量及可采热资源量,评价其资源保证程度。

7.3.5 依据初步估算的地热单井稳定产量,按相关公式估算其开采权益保护范围。对盆地型热储类型,可按地热井矿权出让年限50年,依据《地热资源评价方法》DZ 40—85中热储层地热流体回收率参考值,采用(30)式来估算地热井开采50年对热储的影响半径即热补给半径 $R_{\text{热}}$,视其为地热井开采权益保护半径。

$$R_{\text{热}} = \sqrt{\frac{NQ_{\text{估}}f}{\pi M_{\text{储}}\lambda_w}} \dots\dots\dots (30)$$

式中:

$R_{\text{热}}$ ——开采50年地热井权益保护半径(定向井以目的层中部为圆心)(m);

N ——地热井50年开采期内的开采总日数(d);

$Q_{\text{估}}$ ——地热井估算开采量(m^3/d);

f ——流体比热/储层比热的比值(基岩型热储取值3~5、孔隙型热储取值1.7);

$M_{\text{热}}$ ——热储层厚度 (m) ;
 $\lambda_{\text{热}}$ ——热储回收率 (积盆地热储取值0.15~0.25) ;
 其余符号意义同前。

7.3.6 同层各开采井之间的合理井距应同时大于2倍热补给半径和降压影响半径。

7.3.6.1 在该地热单(对)井周边尚无其它同层开采井或与其井距超过 $2R_{\text{热}}$ 时,估算可开采量可作为开采井的许可开采量 Q 。若井距小于 $2R_{\text{热}}$ 时,则首先应保证不能侵犯已取得开采允许证的现有开采井的权益保护范围,应以实际井距与已有开采井的热补给半径之差作为该开采井的权益保护半径,并以该范围内的可采热储量作为该井地热流体开采允许排放的热量,采用(30)式反求其可开采量,以此作为开采井的许可开采量 Q 。

7.3.6.2 当降压影响半径 R 大于热补半径 $R_{\text{热}}$ 时,应以 $2R$ 作为合理布井井距,并以此来计算地热井许可开采量 Q 。

7.3.7 根据确定的许可开采量 Q ,采用(31)式计算50年开采期内热储层的可采热能量(kJ),并折合成相应的热量(kCal)、电能(kW)。

$$W = QC_w N(T_r - T_0) \dots \dots \dots (31)$$

式中:

W ——地热井开采50年可采热能量(kJ);

Q ——地热流体许可开采量(m^3/d);

C_w ——地热流体平均比热($\text{kJ}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$);

T_r ——热储平均温度($^\circ\text{C}$);

T_0 ——常温层温度(取 13.5°C);

其余符号意义同前。

7.3.8 鉴于现阶段地热资源开采现状和规模、热储层压力场动态变化特点,以可持续性集约节约开发利用为前提,在集中开采区,单井应严格控制开采量。

7.3.9 地热井地热资源评价方法应每5年结合区域性评价进行调整和修正。

8 地热资源开发利用评价

8.1 地热资源开发利用经济效益评价

8.1.1 地热资源经济价值的评价采用类比常规能源(燃煤)的方法进行折算。依据地热流体许可开采量所采出的热能量,采用(32)式计算地热井的产能,采出热流体的产热功率(热能或电能)。

$$W_t = 4.1868Q(T_w - T_g) \dots \dots \dots (32)$$

式中:

W_t ——热功率(kW);

4.1868——热功当量换算系数;

Q ——地热流体许可开采量(L/s);

T_w ——地热流体温度($^\circ\text{C}$);

T_g ——当地年平均气温($^\circ\text{C}$)。

8.1.2 考虑热效比时,地热流体全年开采累计可利用的热能量,采用(33)式进行估算。

$$\sum W_t = \frac{86.4dW_t}{K_{\text{热}}} \dots\dots\dots (33)$$

式中:

$\sum W_t$ ——地热井开采一年可利用的热能量 (MJ);

d ——全年开采日数 (d);

W_t ——由 (23) 式计算得出的热功率值 (kW);

$K_{\text{热}}$ ——热效比 (按燃煤锅炉的热效率 0.6 计算);

86.4 ——单位换算系数。

8.2 地热资源开发利用环境评价

8.2.1 地热资源开发利用所获热量与之相当的节能效果, 减排量、节省污染治理费用、建筑采暖面积等, 按 GB/T 11615-2010 中附录 F 所列方法和要求进行估算和评价。

8.2.2 按 GB/T 11615-2010 中第 10.2 条要求, 对地热资源开发利用的环境影响进行综合分析和评价。

9 地热资源流体质量评价

地热流体的水质、不同用途、有用矿物组分、腐蚀性、结垢趋势等评价, 按 GB/T 11615-2010 中第 9 条所列方法和要求进行。理疗、洗浴等特殊行业按 GB/T 11615-2010 中附录 E 进行评价。

10 资料归档、报告编写与储量评审、登记、备案

10.1 地热井钻探原始资料、成果报告是地热资源勘查的阶段性或最终成果, 是地热资源勘查登记、评审、备案及开发利用规划与管理的主要依据。

10.2 针对地热采矿权, 编写储量评价报告; 针对地热探矿权, 编写地热资源勘探报告。

10.3 应对地热资源勘查工作取得的各项资料, 包括: 地质调查、地球物理与地球化学勘查、地热钻井、地球物理测井、试井、井史、地热流体化学分析、岩土测试、降压及回灌试验观测原始记录表、完井报告等资料, 进行分类整理、编目、造册、存档备查。

10.4 对地热钻井取得的实物地质资料 (岩心、岩屑等) 应进行整理, 建立标准地质剖面保存; 有重要地质意义的地热钻井实物资料 (岩心、岩屑) 应予以长期保存。

10.5 所有资料按照要求汇交至相关部门并按规定归档, 出具资料汇交合格证明之后方可进行储量评审。

10.6 储量评价/勘探报告编写具体要求见附录 A。

附录 A

(规范性附录)

地热资源储量评价/勘探报告编写要求

A.1 储量评价/勘探报告内容要求

A.1.1 地热井勘探工作完成后,应及时编写与勘查阶段相适应的地热井地热资源储量评价/勘探报告。

A.1.2 地热资源储量评价/勘探报告依据实际需要可分为:单井地热资源储量评价/勘探报告、对井地热资源储量评价/勘探报告。

A.1.3 单、对井地热资源储量评价/勘探报告:指为单个地热井开发单位提供利用的地热井储量评价/勘探报告,主要依据单、对井勘探成果评价其可开采量及开采保护区范围,为资源的开发管理提供依据。报告内容一般包括:

- a) 前言:简述地热勘查项目概况;地热井所处的地理位置、探矿权、采矿权登记概况;以往开展地热地质工作概况及地热地质研究程度;勘查目的和任务;勘查工作量及质量评述等。
- b) 地热地质特征:简述地热井所处的地质构造部位;构造特征;地层概况;地温场及热储层特征;勘查项目附近地热开发利用现状。
- c) 钻井工程:详述地热井勘探工程实施情况与问题;成井地质剖面;物探测井及井身结构;钻遇地层情况及特征;地温梯度及热储发育特点。
- d) 地热井许可开采量计算与评价:成井水文地质试验(降压、回灌等)资料分析;数据整理及热储水文地质参数计算;地热井可灌性分析及合理回灌量确定;估算地热井开采量及热补给半径。最终评价确定地热井开采权益保护半径、许可开采量,并计算整个开采期内的热储层可采热量、热能、电能。
- e) 开采保护区评价:结合地热井降压影响半径、热补给半径,评价并圈定地热开采权益保护范围,提出合理井距的建议。
- f) 水质评价:地热流体水质分析成果;水质评价应侧重供暖、理疗、洗浴、农业养殖种植等方面的用途评价。
- g) 利用效益评价:对地热流体利用所产生的经济、环境、社会效益进行客观评价。主要评价地热利用的节能和减排效果;针对高矿化度尾水废水直接排放可能的空气污染、热污染、地表水及地下水水质污染、土壤板结盐渍化等环境影响评价;地热开发对造成地面沉降可能性、海水入侵可能性、高铁地铁等线性工程、地质景观和浅层地下水源保护性地的影响评价。
- h) 结论及开发利用建议:侧重热储层特征、地热井可开采量、水质及用途、开采权益保护范围及其合理井距、环境影响评价等方面的结论和意见。

A.2 储量评价/勘探报告编写提纲

A.2.1 地热单(对)井储量评价/勘探报告是地热勘查项目的最终成果,是地热井储量审批和办理采矿权的重要依据。报告内容应充分反映地热勘探地质编录、物理测井和井试成果,明确提出地热井合理回灌量、许可开采量、开采权益保护半径,以及矿权开采期限内,热储可采热量、热能、电能。

A.2.2 报告编写提纲包括以下内容:

第一章 前言

第一节 项目概要

- 第二节 地热勘查研究程度
- 第三节 勘查目的任务
- 第四节 勘查工作质量评述
- 第二章 区域地热地质条件
 - 第一节 构造特征
 - 第二节 地层概况
 - 第三节 地温场特征
 - 第四节 热储层特征
 - 第五节 开发利用现状及区域热储开发现状
- 第三章 地热井热储工程
 - 第一节 地热井工程
 - 第二节 地球物理测井
 - 第三节 钻遇地层特征
 - 第四节 地热井热储特征
- 第四章 地热井产能测试与可开采量计算与评价
 - 第一节 降压试验
 - 第二节 回灌试验
 - 第三节 数据整理及热储参数计算
 - 第四节 地热井可灌性分析及可开采量计算与评价
 - 第五节 开采保护区论证
 - 第六节 开采初步预报
- 第五章 地热流体质量评述
 - 第一节 地热流体水质特征
 - 第二节 地热流体质量评价
- 第六章 地热资源开发利用经济效益及环境影响评价
 - 第一节 地热资源开发利用经济效益评价
 - 第二节 地热资源开发利用环境影响评价
- 结论及建议
- 附：
 - ① 钻井地质综合柱状图；
 - ② 降压试验观测记录表；
 - ③ 回灌试验观测记录表；
 - ④ 水、岩分析化验资料；
 - ⑤ 地热井竣工验收表。

A.3 地热单（对）井储量评价/勘探报告审批要求

- A.3.1 成井质量及各项测试数据资料的可靠性。
- A.3.2 地热井可采资源量的计算与评价：应确定地热井许可开采量、开采影响范围及合理井距。
- A.3.3 地热流体质量及其用途评价。
- A.3.4 地热流体开采利用中余热及废水排放对当地环境影响评价及消除影响的措施。
- A.3.5 审查结论应明确地热井主要开采层位、许可开采量、开采权益保护半径以及矿权开采期限内，热储可采热量、热能、电能。地热流体主要用途及开发中应注意的问题，审批文件内容可简化。

表C.2 回灌试验抽水井观测原始记录表

井位_____

第____页

测点距井口距离_____m

共 页

[illegible]

审核:

时间:

附录 D
(资料性附录)
对井采灌试验资料的分析

D.1 对井采灌形成的流场

如图D.1、D.2所示。

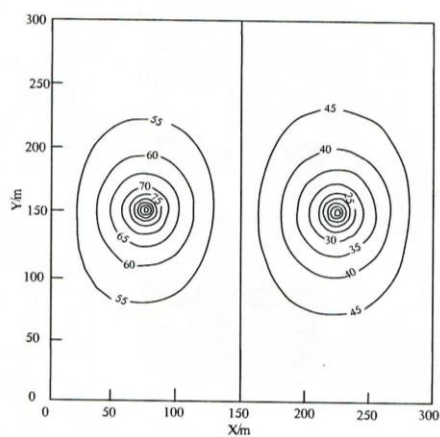


图 D.1 对井采灌稳定后的水头等高线

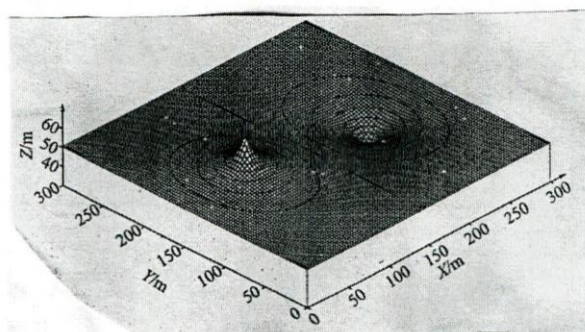


图 D.2 对井采灌稳定后的水头三维图

D.2 对井采灌试验的参数计算

D.2.1 计算公式

各向同性承压含水层中一抽一灌的对井抽灌稳定后的注水锋面如图D. 3所示。

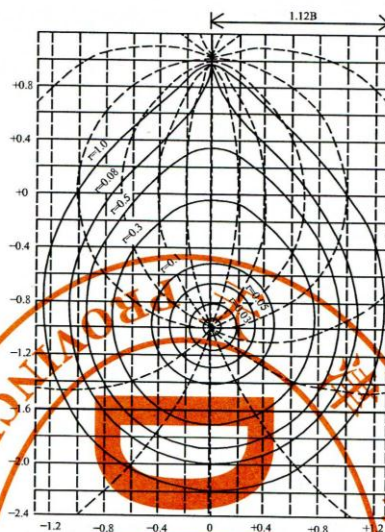


图 D. 3 从一注水井向一抽水井推进的注水锋面

抽水井水位降深稳定后的最大降深为：

$$s_m = \frac{Q}{2\pi KM} K_0\left(\frac{r}{B}\right) \quad \text{..... (D. 1)}$$

式中：

$K_0\left(\frac{r}{B}\right)$ ——虚宗量零阶第二类贝塞尔函数；

D. 2. 2 对井采灌时抽水井水位下降曲线

对井水位下降的半对数曲线如图D. 4。



图 D. 4 对井采灌时抽水井水位下降曲线图

$s-\lg(t)$ 曲线首段受井筒水温变化的影响，随着井水升温，温度影响逐渐消失， $s-\lg(t)$ 曲线在中部出现一个拐点，该点的降深为最大降深（稳定降深）的一半。可以证明：

$$s_i = \frac{Q}{4\pi T} K_0\left(\frac{r}{B}\right) = \frac{1}{2.3} i \cdot e^{\frac{r}{B}} \cdot K_0\left(\frac{r}{B}\right) \dots\dots\dots (D. 2)$$

式中:

T ——导水系数 (m^2/d) ;
 M ——热储层有效厚度 (m) ;
 B ——补给因子;
 r ——抽水井半径 (m) ;
 i —— $s\text{-lg}(t)$ 曲线拐点处切线斜率。

$$2.3 \frac{s_i}{i} = e^{\frac{r}{B}} \cdot K_0\left(\frac{r}{B}\right) \dots\dots\dots (D. 3)$$

储层导水系数 T :

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi i} e^{\frac{r}{B}} \dots\dots\dots (D. 4)$$

储层弹性给水度 μ :

$$\mu = \frac{2Tt_i}{r^2} \left(\frac{r}{B}\right) \dots\dots\dots (D. 5)$$

采灌井影响范围宽度之半径 R :

$$R = 1.12B \dots\dots\dots (D. 6)$$

D.3 水文地质参数的计算

对井采灌时, 利用抽水井资料计算水文地质参数, 步骤如下:

- 根据水井采灌时的抽水井水位观测资料绘制 $s\text{-lg}(t)$ 曲线;
- 由 $s\text{-lg}(t)$ 曲线找出稳定水位降深 s_m 和变曲点的降深 s_i , 由于 $s_i = \frac{1}{2}s_m$, 根据 s_m 和 s_i 的关系求出有效降深, 并估算出井筒水跃值 (Δh);
- 做拐点切线, 求出其斜率 i 并找出拐点对应的的时间 t_i ;
- 将 s_i 和 i 代入 D.3 式, 求得 $e^{\frac{r}{B}} \cdot K_0\left(\frac{r}{B}\right)$ 值, 并查表 D.1 求得 $\left(\frac{r}{B}\right)$ 和 $e^{\frac{r}{B}}$ 值;
- 由于 r 已知, 可求得 B ;
- 将 Q 、 i 和 $e^{\frac{r}{B}}$ 值代入 D.4 式, 可求得 T 值;
- 将 T 、 t_i 和 $\left(\frac{r}{B}\right)$ 值代入 D.5 式, 可求得 μ 值;
- 如果抽水曲线 ($s\text{-lg}(t)$) 不规则, 动水位稳定时, 可采用最大降深 s_m 及求得的导水系数 T 按 D.4 式求得 B , 用 D.6 式确定补给宽度 R ;

- i) 如若抽水井的观测资料不完整,不典型,可以根据抽水井稳定降深和对井进行的多井抽水试验求得的储层导水系数 T ,用 D.1 式求得 $K_0(\frac{r}{B})$,查表 D.1 求得 $(\frac{r}{B})$,再由 D.6 式求得对井抽、灌稳定后的影响范围。

D.4 对井采灌试验利用回灌井的资料作注水指示曲线



图 D.5 注水指示曲线图

常见的指示曲线见图 D.5,有以下三种类型:

- a) I 型为直线递增式指示曲线,它反映地层吸水量与注入压力成正比,在直线上任取一点可求出吸水指数(单位压差下的注水量)。

$$I_w = \frac{Q_{注}}{\Delta P} = \frac{Q_{注}}{P_{wf} - P_{ws}} \quad \text{..... (D.7)}$$

式中:

I_w ——吸水指数;

$Q_{注}$ ——回灌井稳定回灌量 (m^3/d);

ΔP ——回灌井注水压差 (Pa);

P_{ws} ——回灌井储层原始静压 (Pa);

P_{wf} ——回灌井井底流压 (Pa)。

- b) II 型为上翘式曲线,反映有断层遮挡或连通性差,需要高压回灌或水力压裂增产。

- c) III 型为下折式曲线,反映洗井不彻底或岩屑堵塞裂缝带,应进行酸化增产。

D.5 对井采灌形成封闭流场的概化

一般概化为两井间的长方形,两侧增加两个半圆形 (R 为采灌井影响范围宽度之半),见图 D.6。

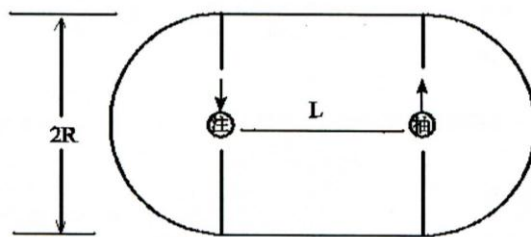


图 D.6 对井采灌流场概化图

表 D.1 $e^x, K_0(x), e^x K_0(x), -E_1(-x), -E_1(-x)e^x$ 数值表

x	e^x	$K_0(x)$	$e^x K_0(x)$	$-E_1(-x)$	$-E_1(-x)e^x$	x	e^x	$K_0(x)$	$e^x K_0(x)$	$-E_1(-x)$	$-E_1(-x)e^x$
0.010	1.0101	4.7212	4.7687	4.0379	4.0787	0.046	1.0471	3.1973	3.3478	2.5474	2.6672
0.011	1.0111	4.6260	4.6771	3.9436	3.9874	0.047	1.0481	3.1758	3.3287	2.5268	2.6483
0.012	1.0121	4.5390	4.5938	3.8576	3.9044	0.048	1.0492	3.1549	3.3100	2.5068	2.6300
0.013	1.0131	4.4590	4.5173	3.7785	3.8282	0.049	1.0502	3.1343	3.2918	2.4871	2.6120
0.014	1.0141	4.3849	4.4467	3.7054	3.7578	0.050	1.0513	3.1142	3.2733	2.4679	2.5945
0.015	1.0151	4.315	4.3812	3.6374	3.6925	0.051	1.0523	3.0945	3.2564	2.4491	2.5773
0.016	1.0161	4.2514	4.3200	3.5739	3.6315	0.052	1.0534	3.0752	3.2393	2.4306	2.5604
0.017	1.0171	4.1908	4.2627	3.5143	3.5746	0.053	1.0544	3.0562	3.2226	2.4126	2.5440
0.018	1.0182	4.1337	4.2088	3.4581	3.5209	0.054	1.0555	3.0376	3.2062	2.3948	2.5278
0.019	1.0192	4.0797	4.1580	3.4050	3.4705	0.055	1.0565	3.0194	3.1901	2.3775	2.5120
0.020	1.0202	4.0285	4.1098	3.3547	3.4225	0.056	1.0576	3.0015	3.1744	2.3604	2.4964
0.021	1.0212	3.9797	4.0642	3.3069	3.3771	0.057	1.0587	2.9839	3.1589	2.3437	2.4811
0.022	1.0222	3.9332	4.0207	3.2614	3.3340	0.058	1.0597	2.9666	3.1437	2.3273	2.4663
0.023	1.0233	3.8888	3.9793	3.2179	3.2927	0.059	1.0608	2.9496	3.1288	2.3111	2.4516
0.024	1.0243	3.8463	3.9398	3.1763	3.2535	0.060	1.0618	2.9329	3.1142	2.2953	2.4371
0.025	1.0253	3.8056	3.9019	3.1365	3.2159	0.061	1.0629	2.9165	3.0999	2.2797	2.4230
0.026	1.0263	3.7664	3.8656	3.0983	3.1799	0.062	1.0640	2.9003	3.0858	2.2645	2.4092
0.027	1.0274	3.7287	3.8307	3.0615	3.1452	0.063	1.0650	2.8844	3.0719	2.2494	2.3956
0.028	1.0284	3.6924	3.7972	3.0261	3.1119	0.064	1.0661	2.8688	3.0584	2.2346	2.3822
0.029	1.0294	3.6574	3.7650	2.9920	3.0800	0.065	1.0672	2.8534	3.0450	2.2201	2.3691
0.030	1.0305	3.6235	3.7339	2.9591	3.0494	0.066	1.0682	2.8382	3.0319	2.2058	2.3562
0.031	1.0315	3.5908	3.7039	2.9273	3.0196	0.067	1.0693	2.8233	3.0189	2.1917	2.3434
0.032	1.0325	3.5591	3.6749	2.8965	2.9908	0.068	1.0704	2.8086	3.0052	2.1779	2.3310
0.033	1.0336	3.5284	3.6468	2.8668	2.9631	0.069	1.0714	2.7941	2.9937	2.1643	2.3188
0.034	1.0346	3.4986	3.6196	2.8379	2.9362	0.070	1.0725	2.7798	2.9814	2.1508	2.3067
0.035	1.0356	3.4697	3.5933	2.8099	2.9101	0.071	1.0736	2.7657	2.9693	2.1376	2.2949
0.036	1.0367	3.4416	3.5678	2.7827	2.8848	0.072	1.0747	2.7519	2.9573	2.1246	2.2832
0.037	1.0377	3.4143	3.5430	2.7563	2.8603	0.073	1.0757	2.7382	2.9455	2.1118	2.2717
0.038	1.0387	3.3877	3.5189	2.7306	2.8364	0.074	1.0768	2.7247	2.9340	2.0991	2.2603
0.039	1.0398	3.3618	3.4955	2.7056	2.8133	0.075	1.0779	2.7114	2.9226	2.0867	2.2492
0.040	1.0408	3.3365	3.4727	2.6813	2.7907	0.076	1.0790	2.6983	2.9113	2.0744	2.2381
0.041	1.0419	3.3119	3.4505	2.6576	2.7688	0.077	1.0800	2.6853	2.9002	2.0623	2.2273
0.042	1.0429	3.2879	3.4289	2.6344	2.7474	0.078	1.0811	2.6726	2.8894	2.0503	2.2165
0.043	1.0439	3.2645	3.4079	2.6119	2.7267	0.079	1.0822	2.6599	2.8786	2.0386	2.2062
0.044	1.0450	3.2415	3.3874	2.5899	2.7064	0.080	1.0833	2.6475	2.8680	2.0269	2.1957
0.045	1.0460	3.2192	3.3673	2.5684	2.6866	0.081	1.0844	2.6352	2.8575	2.0155	2.1856

表D.1 (续)

x	e^x	$K_0(x)$	$e^x K_0(x)$	$-E_1(-x)$	$-E_1(-x)e^x$	x	e^x	$K_0(x)$	$e^x K_0(x)$	$-E_1(-x)$	$-E_1(-x)e^x$
0.082	1.0855	2.6231	2.8472	2.0042	2.1754	0.30	1.3499	1.3720	1.8526	0.9057	1.2226
0.083	1.0865	2.6111	2.8370	1.9930	2.1655	0.31	1.3634	1.3425	1.8304	0.8815	1.2018
0.084	1.0876	2.5992	2.8270	1.9820	2.1557	0.32	1.3771	1.3136	1.8089	0.8583	1.1820
0.085	1.0887	2.5875	2.8171	1.9711	2.1460	0.33	1.3910	1.2857	1.7883	0.8361	1.1630
0.086	1.0898	2.5759	2.8073	1.9604	2.1364	0.34	1.4050	1.2587	1.7685	0.8147	1.1446
0.087	1.0909	2.5645	2.7976	1.9498	2.1270	0.35	1.4191	1.2327	1.7493	0.7942	1.1270
0.088	1.0920	2.5532	2.7881	1.9393	2.1176	0.36	1.4333	1.2075	1.7308	0.7745	1.1101
0.089	1.0931	2.5421	2.7787	1.9290	2.1086	0.37	1.4477	1.1832	1.7129	0.7554	1.0936
0.090	1.0942	2.5310	2.7694	1.9187	2.0994	0.38	1.4623	1.1596	1.6956	0.7371	1.0779
0.091	1.0953	2.5201	2.7602	1.9087	2.0906	0.39	1.4770	1.1367	1.6789	0.7194	1.0626
0.092	1.0964	2.5093	2.7511	1.8987	2.0818	0.40	1.4918	1.1145	1.6627	0.7024	1.0478
0.093	1.0975	2.4986	2.7421	1.8888	2.0729	0.41	1.5068	1.0930	1.6470	0.6859	1.0335
0.094	1.0986	2.4881	2.7333	1.8791	2.0643	0.42	1.5220	1.0721	1.6317	0.6700	1.0197
0.095	1.0997	2.4776	2.7246	1.8695	2.0558	0.43	1.5373	1.0518	1.6169	0.6546	1.0063
0.096	1.1008	2.4673	2.7159	1.8599	2.0473	0.44	1.5527	1.0321	1.6025	0.6397	0.9933
0.097	1.1019	2.4571	2.7074	1.8505	2.0390	0.45	1.5683	1.0129	1.5886	0.6253	0.9807
0.098	1.1030	2.4470	2.6989	1.8412	2.0307	0.46	1.5841	0.9943	1.5750	0.6114	0.9885
0.099	1.1041	2.4370	2.6906	1.8320	2.0227	0.47	1.6000	0.9761	1.5617	0.5979	0.9566
0.100	1.1052	2.4271	2.6823	1.8229	2.0147	0.48	1.6161	0.9584	1.5489	0.5848	0.9451
0.11	1.1163	2.3333	2.6046	1.7371	1.9391	0.49	1.6323	0.9412	1.5363	0.5721	0.9338
0.12	1.1275	2.2479	2.5345	1.6595	1.8771	0.50	1.6437	0.9244	1.5241	0.5598	0.9229
0.13	1.1388	2.1695	2.4707	1.5889	1.8094	0.51	1.6653	0.9081	1.5122	0.5478	0.9123
0.14	1.1503	2.0972	2.4123	1.5241	1.7532	0.52		0.8921	1.5006	0.5362	0.9019
0.15	1.1618	2.0300	2.3585	1.4645	1.7015	0.53	1.6989	0.8766	1.4892	0.5250	0.8919
0.16	1.1735	1.9674	2.3088	1.4092	1.6537	0.54	1.7160	0.8614	1.4781	0.5140	0.8820
0.17	1.1853	1.9088	2.2625	1.3578	1.6094	0.55	1.7330	0.8466	1.4673	0.5034	0.8725
0.18	1.1972	1.8537	2.2193	1.3098	1.5681	0.56	1.7507	0.8321	1.4567	0.4930	0.8631
0.19	1.2093	1.8018	2.1788	1.2649	1.5295	0.57	1.7683	0.8180	1.4464	0.4830	0.8541
0.20	1.2214	1.7527	2.1408	1.2227	1.4934	0.58	1.7860	0.8042	1.4363	0.4732	0.8451
0.21	1.2337	1.7062	2.1049	1.1829	1.4593	0.59	1.8040	0.7907	1.4262	0.4637	0.8365
0.22	1.2461	1.6620	2.0710	1.1454	1.4273	0.60	1.8221	0.7775	1.4167	0.4544	0.8280
0.23	1.2586	1.6199	2.0389	1.1099	1.3969	0.61	1.8404	0.7646	1.4073	0.4454	0.8197
0.24	1.2713	1.5798	2.0084	1.0762	1.3681	0.62	1.8589	0.7520	1.3980	0.4366	0.8116
0.25	1.2840	1.5415	1.9793	1.0443	1.3409	0.63	1.8776	0.7397	1.3889	0.4280	0.8036
0.26	1.2969	1.5048	1.9517	1.0139	1.3149	0.64	1.8965	0.7277	1.3800	0.4197	0.7960
0.27	1.3100	1.4697	1.9253	0.9849	1.2902	0.65	1.9155	0.7159	1.3713	0.4115	0.7882
0.28	1.3231	1.4360	1.9000	0.9573	1.2666	0.66	1.9348	0.7043	1.3627	0.4036	0.7809
0.29	1.3364	1.4036	1.8758	0.9309	1.2441	0.67	1.9542	0.6930	1.3543	0.3959	0.7737

表D.1 (续)

x	e^x	$K_0(x)$	$e^x K_0(x)$	$-E_1(-x)$	$-E_1(-x)e^x$	x	e^x	$K_0(x)$	$e^x K_0(x)$	$-E_1(-x)$	$-E_1(-x)e^x$
0.68	1.9739	0.6820	1.3461	0.3883	0.7665	1.5	4.4817	0.2138	0.9582	0.1000	0.4482
0.69	1.9937	0.6711	1.3380	0.3810	0.7596	1.6	4.9530	0.1880	0.9309	0.0863	0.4275
0.70	2.0138	0.6605	1.3301	0.3738	0.7528	1.7	5.4739	0.1655	0.9059	0.0747	0.4086
0.71	2.0340	0.6501	1.3223	0.3668	0.7461	1.8	6.0496	0.1459	0.8828	0.0647	0.3915
0.72	2.0544	0.6399	1.3147	0.3599	0.7394	1.9	6.6859	0.1288	0.8614	0.0562	0.3758
0.73	2.0751	0.6300	1.3072	0.3532	0.7329	2.0	7.3891	0.1139	0.8416	0.0489	0.3613
0.74	2.0959	0.6202	1.2998	0.3467	0.7266	2.1	8.1662	0.1008	0.8230	0.0426	0.3480
0.75	2.1170	0.6106	1.2926	0.3403	0.7204	2.2	9.0250	0.0893	0.8057	0.0372	0.3356
0.76	2.1383	0.6012	1.2855	0.3341	0.7144	2.3	9.9742	0.0791	0.7894	0.0325	0.3242
0.77	2.1598	0.5920	1.2785	0.3280	0.7084	2.4	11.023	0.0702	0.7740	0.0284	0.3135
0.78	2.1815	0.5829	1.2716	0.3221	0.7027	2.5	12.182	0.0623	0.7596	0.0249	0.3035
0.79	2.2034	0.5740	1.2649	0.3163	0.6969	2.6	13.463	0.0554	0.7459	0.0219	0.2942
0.80	2.2255	0.5653	1.2582	0.3106	0.6912	2.7	14.879	0.0493	0.7329	0.0192	0.2854
0.81	2.2479	0.5568	1.2517	0.3050	0.6856	2.8	16.444	0.0438	0.7206	0.0169	0.2773
0.82	2.2705	0.5484	1.2452	0.2996	0.6802	2.9	18.174	0.0390	0.7089	0.0148	0.2693
0.83	2.2933	0.5402	1.2389	0.2943	0.6749	3.0	20.085	0.0347	0.6978	0.0131	0.2621
0.84	2.3164	0.5321	1.2326	0.2891	0.6697	3.1	22.198	0.0310	0.6871	0.0115	0.2551
0.85	2.3397	0.5242	1.2265	0.2840	0.6644	3.2	24.532	0.0276	0.6770	0.0101	0.2485
0.86	2.3632	0.5165	1.2205	0.2790	0.6593	3.3	27.112	0.0246	0.6673	0.0089	0.2424
0.87	2.3869	0.5088	1.2145	0.2742	0.6545	3.4	29.964	0.0220	0.6580	0.0079	0.2365
0.88	2.4109	0.5013	1.2086	0.2694	0.6495	3.5	33.115	0.0196	0.6490	0.0070	0.2308
0.89	2.4351	0.4940	1.2029	0.2647	0.6445	3.6	36.598	0.0175	0.6405	0.0062	0.2254
0.90	2.4596	0.4867	1.1972	0.2602	0.6400	3.7	40.447	0.0156	0.6322	0.0055	0.2204
0.91	2.4843	0.4796	1.1916	0.2557	0.6352	3.8	44.701	0.0140	0.6243	0.0048	0.2155
0.92	2.5093	0.4727	1.1859	0.2513	0.6306	3.9	49.402	0.0125	0.6166	0.0043	0.2108
0.93	2.5345	0.4658	1.1806	0.2470	0.6260	4.0	54.595	0.0112	0.6093	0.0038	0.2063
0.94	2.5600	0.4591	1.1752	0.2429	0.6218	4.1	60.340	0.0100	0.6022	0.0033	0.2021
0.95	2.7857	0.4524	1.1699	0.2387	0.6172	4.2	66.686	0.0089	0.5953	0.0030	0.1980
0.96	2.6117	0.4459	1.1647	0.2347	0.6130	4.3	73.699	0.0080	0.5887	0.0026	0.1941
0.97	2.6379	0.4396	1.1595	0.2308	0.6088	4.4	81.450	0.0071	0.5823	0.0022	0.1903
0.98	2.6645	0.4333	1.1544	0.2269	0.6046	4.5	90.017	0.0064	0.5761	0.0021	0.1866
0.99	2.6912	0.4271	1.1494	0.2231	0.6004	4.6	99.484	0.0057	0.5701	0.0018	0.1832
1.00	2.7183	0.4210	1.1445	0.2194	0.5964	4.7	109.94	0.0051	0.5643	0.0016	0.1798
1.1	3.0042	0.3656	1.0983	0.1860	0.5588	4.8	121.51	0.0046	0.5586	0.0014	0.1766
1.2	3.3201	0.3185	1.0575	0.1584	0.5259	4.9	134.28	0.0041	0.5531	0.0013	0.1734
1.3	3.6693	0.2782	1.0210	0.1355	0.4972	5.0	148.41	0.0037	0.5478	0.0011	0.1704
1.4	4.0552	0.2437	0.9881	0.1162	0.4712						