

近三十年天津市 地热大规模开发热储动态特征研究

殷肖肖, 赵苏民, 蔡 芸, 闫佳贤, 许 磊

(1. 天津地热勘查开发设计院, 天津 300250
2. 地热资源开发利用技术创新基地, 天津 300250)

摘 要:天津是我国较早大规模开发深层地热的地区之一, 经过 30 多年的持续开采回灌, 对深部热储特征有无影响, 是否引起了资源枯竭、水质恶化以及热储温度下降等环境问题, 一直是社会关注的焦点。本文系统收集了 1992 年以来天津市地热开发过程中的不同热储层热水开发利用量、回灌量、水位、水质、水温等近 30 年的时间序列监测资料, 通过垂向及横向对比, 对地热持续开发 30 年来天津市不同地区不同热储层的热水动态特征进行了分析。结果表明, 天津市各热储层地热流体的主要化学组分基本稳定, 多年来无明显变化, 地热采灌系统尾水回灌不会从根本上改变地热流体的原始化学特征, 但深大断裂作为热流通道引起的顶托补给, 会对上层热储水质造成一定的影响; 随着近年来天津市回灌工作力度不断加大, 大部分热储水位下降幅度减缓或出现回升, 热储的温度没有明显的升高或降低的趋势, 但回灌井热储段经过非供暖期的恢复无法达到最初的温度, 呈逐年下降趋势。未来持续采灌条件下, 回灌井筒的“冷堆积”及采灌井的优化调配应是重点关注的问题。

关键词:地热开发; 水动力场; 化学场; 温度场; 天津

地热是一种清洁低碳、分布广泛、资源丰富、安全稳定的优质可再生能源, 是在可以预见的未来时间内能够被人类经济开发和利用的地球内部热能资源(Wang et al., 2020a; Lin et al., 2021)。天津是我国地热大规模开发利用最早的城市之一。上个世纪七十年代, 天津开始规模化开发利用地热资源, 至今已形成了我国开发利用规模最大的“地热城”。同时, 天津也是我国开展地热回灌比较成熟的地区之一, 截至 2021 年底, 天津市热储总体回灌率已达到 81%(天津地热勘查开发设计院, 2022)。持续开采及大规模回灌条件下热储层特征的变化以及是否会影响天津市地热资源可持续开发利用已成为业内关注的焦点。Sheng et al. (2010) 基于地热动态监测数据, 系统分析了 2001—2007 年天津市地热开发利用情况, 评价了地热开发的社会经济及环境效应。Cheng et al. (2010) 分析了 2008 年天津市地热回灌情况下热储温度和压力监测数据, 数据显示靠近回灌井的热储水位下降速度比其他地方慢得多, 而且在

周围的生产井中没有观察到温度变化。Zeng et al. (2010) 以 2006—2008 年天津地热开采井井口流温和回灌井井下连续测温数据为基础, 对开采、回灌状态下的热储温度场动态特征进行了简要分析, 认为原水回灌后热储在下一个回灌期来临之前可恢复至同期的热储原始温度水平。Duan et al. (2011) 利用模糊综合评价法开展了天津地区地热资源可持续性评价, 结果显示, 由于回灌不足天津地区碳酸岩热储层可持续利用性较低, 为了实现可持续生产, 必须增加回灌量。An et al. (2016) 以 2001—2014 年天津市地热资源利用情况为例, 按供暖、生活热水、洗浴和农业等利用方式进行了数据分析, 探讨了开展的地热发电的可行性, 提出应加强地热资源的回灌、监测, 实现中低温地热资源可持续开发。Ruan et al. (2017a)、Liu et al. (2019) 开展了天津市东丽湖地区基岩热储地表水回灌研究, 分析了地表水回灌后热储层的动力场、温度场以及化学场, 认为增加湖水回灌可减缓热储压力下降速率, 对温度场、化学场不会产生明显影响,

不会破坏储层结构。Yin et al.(2020)开展了集中采灌条件下天津东丽湖地区碳酸盐岩热储群井示踪试验研究,认为在现状开发利用模式下,不会造成热储层温度的显著变化,水位除受正常采灌影响外没有明显变化,热储系统基本处于稳定状态。

本文系统收集了 1992 年以来天津市地热开发过程中的不同热储层热水开发利用量、回灌量、水位、水质、水温等近 30 年时间序列监测数据,对地热持续开发 30 年来天津市不同地区不同热储层的热水动态特征进行垂向及横向对比,分析长期持续开采及大规模回灌条件下热储层的演化特征,为进一步推进天津市大规模开发利用地热资源提供科学依据。

1 研究区概况

天津地处华北平原东北部,东临渤海,北依燕

山,其北部为山地丘陵区,南部为平原区。地质构造上跨黄骅拗陷、沧县隆起、冀中拗陷三个Ⅱ级构造单元,构成了华北断陷盆地所特有的凸凹相间的构造格局,为深部热流的聚集提供了良好的地质条件(Su et al., 2021; Lin et al., 2022a),从而形成了沉积地层与古潜山叠加的沉积盆地古潜山复合型水热系统(Wang et al., 2017, 2020a, 2020b)。天津地区地热资源主要分布在宁河-宝坻断裂以南的广大平原区(图 1),根据区内不同热储所赋存的热储岩性、孔裂隙性质和结构等条件,自上而下划分为两类(Zhao et al., 2013):陆相碎屑沉积为主的新生界孔隙型热储(孔隙热储)和海相沉积为主的古生界、中元古界碳酸盐岩岩溶裂隙型热储(基岩热储)。其中孔隙热储包括新近系明化镇组(N_m)和馆陶组(N_g)、古近系东营组(E_d)热储;基岩热储包括古生界奥陶系(O)、寒武系(C)和中元

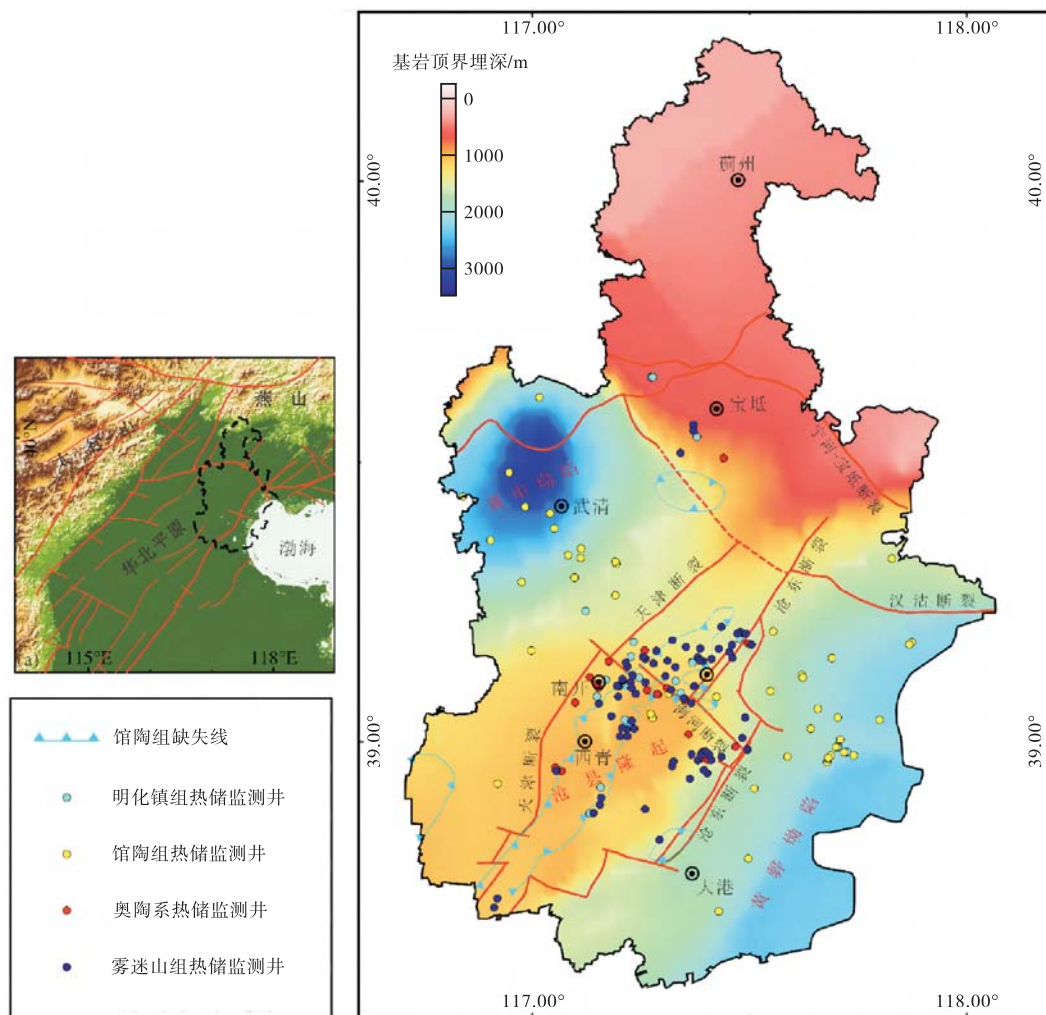


图 1 天津地区基岩埋深及主要热储层监测井分布

古界蓟县系雾迷山组(J_{xw})热储。目前天津市以开采明化镇组、馆陶组、奥陶系以及雾迷山组热储为主,其中明化镇组(N_m)热储埋藏较浅,在宁河-宝坻断裂以南普遍分布,厚度由沧县隆起区向两侧凹陷区逐渐增厚、加深,岩性为半胶结的粉细砂、细砂和杂色泥岩不等厚互层,井口稳定流温为 $40\sim 80^{\circ}\text{C}$,由于回灌困难,目前该热储层的开采规模在不断缩减;馆陶组(N_g)热储伏于明化镇组热储之下,除在宁河-宝坻断裂以北及沧县隆起中部地区缺失外,在坳陷区分布稳定,岩性以厚层砂岩、砂砾砂岩为主,中间夹泥岩(Lin et al., 2010),井口稳定流温 $48\sim 82^{\circ}\text{C}$;奥陶系(O)热储在沧县隆起区的核部大面积缺失,在研究区南部其它地区则广泛分布,岩性由白云质灰岩、灰岩及泥质灰岩、泥岩组成,岩溶裂隙发育,赋水性强(Jin et al., 2019),井口稳定流温 $48\sim 76^{\circ}\text{C}$,目前该热储的开采量呈逐年扩大趋势;雾迷山组(J_{xw})热储在研究区南部普遍分布,岩性为深灰色粗晶白云岩、燧石条带状白云岩为主,井口稳定流温为 $70\sim 113^{\circ}\text{C}$,该热储层分布范围广,厚度大,是天津市地热资源开发的主要层位(Lin et al., 2007)。

2 动态监测及数据

天津市从 1985 年开始进行深层地热动态监测工作,1992 年开始作为长期项目建立动态监测系统,经过 30 多年不断完善、改进,到目前已建立起较为系统和科学的动态监测体系。通过多年来连续的热储动态数据积累,为天津市地热勘查开发利用及其管理信息系统的完善提供了科学依

据。根据近 30 年来天津市不同热储层监测情况(图 2、表 1、表 2),大致将天津市地热动态监测工作划分为四个阶段:①初期阶段(1985—1991 年),此期间地热井监测主要服务于大型地热田的勘探工作,为项目提供分析研究资料;每年监测井数量为 20 眼左右,主要监测市内六区和塘沽地热集中开采区及王兰庄热田区和山岭子热田区;监测方法是人工监测,重点监测水位动态和流体化学动态;②起步阶段(1992—2002 年),1992 年开始地热动态监测作为基础公益性地质项目单独立项,开始建立动态监测系统,监测井范围覆盖到天津市所有的行政区;监测方法仍是人工监测,监测地热井水位、水量与水质,编制动态监测年度报告;③稳步发展阶段(2003—2012 年),2003 年以后从所处构造位置、开采热储层、地热田和行政区分布情况等诸多因素综合考虑,将地热井分为一般监测井(1 次/月)和重点监测井(2 次/月),监测方法和手段也得到了不断提高,从最初的人工监测到远程自动化智能监测与人工监测相结合,纳入动态监测的地热井数量不断增加,到 2012 年调查和监测井总数达到 424 眼,其中日常水位监测井数量达 205 眼;④系统化阶段(2013 年—至今),这一时期纳入动态监测的地热井数量不断增加,年度重点监测井维持在 220 眼左右,监测范围涵盖深层单井、采灌系统以及浅层地热能(Tian et al., 2011),自动化监测井所占比重不断提高,监测效率和精度得到了有效提升,天津市地热监测工作进入系统化监测阶段。

表 1 1992—2021 年天津市砂岩热储地热开发及动态监测一览表

年份	明化镇组						馆陶组						东营组					
	开采井 数量(眼)	开采量 (10^4m^3)	回灌井 数量(眼)	回灌量 (10^4m^3)	回灌率 (%)	监测井 数量(眼)	开采井 数量(眼)	开采量 (10^4m^3)	回灌井 数量(眼)	回灌量 (10^4m^3)	回灌率 (%)	监测井 数量(眼)	开采井 数量(眼)	开采量 (10^4m^3)	回灌井 数量(眼)	回灌量 (10^4m^3)	回灌率 (%)	监测井 数量(眼)
1992	69	854	0	0	0	11	16	438	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0
1993	--	1540	0	0	0	--	--	413	0	0	0	--	0	0	0	0	0	0
1994	--	1288	0	0	0	--	--	425	0	0	0	--	0	0	0	0	0	0
1995	81	1331	0	0	0	6	44	753	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0
1996	--	456	0	0	0	--	--	274	0	0	0	--	0	0	0	0	0	0
1997	--	521	0	0	0	--	--	705	0	0	0	--	0	0	0	0	0	0
1998	--	468	0	0	0	--	--	739	0	0	0	--	0	0	0	0	0	0
1999	--	--	0	0	0	--	--	--	0	0	0	--	0	--	0	0	0	0
2000	47	450	0	0	0	8	65	732	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0
2001	50	393	0	0	0	7	70	703	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0
2002	68	489	0	0	0	9	73	647	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0
2003	75	611	0	0	0	10	78	748	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0

2004	76	720	0	0	0	10	89	695	0	0	0	8	0	0	0	0	0
2005	81	769	0	0	0	16	95	722	2	0	0	21	0	0	0	0	0
2006	85	524	0	0	0	17	95	760	2	13	2	23	0	0	0	0	0
2007	82	401	2	11	3	15	101	764	6	2	0	30	0	0	0	0	0
2008	77	390	2	13	3	21	102	811	6	10	1	35	3	8	0	0	2
2009	87	386	2	17	4	35	102	803	7	37	5	38	3	17	0	0	2
2010	89	470	3	0	0	35	107	784	7	20	3	38	4	25	1	0	2
2011	87	442	3	1	0	34	111	608	11	13	2	38	4	23	1	0	2
2012	93	383	4	9	2	38	118	748	22	27	4	40	4	18	1	0	2
2013	91	442	6	3	1	39	125	628	26	62	10	46	4	17	1	0	3
2014	92	369	6	16	4	39	130	563	36	88	16	46	4	19	1	0	3
2015	95	432	7	22	5	39	137	1035	36	213	21	46	4	27	1	0	3
2016	96	402	7	18	4	39	154	1023	50	266	26	46	4	17	1	0	3
2017	101	435	8	36	8	39	164	1399	61	582	42	46	4	9	1	0	3
2018	91	456	9	28	6	39	164	1395	63	504	36	46	4	11	1	0	3
2019	90	427	10	41	10	39	168	1413	70	510	36	46	4	11	1	0	3
2020	83	321	12	29	9	39	163	1420	76	610	43	46	4	16	1	0	3
2021	72	199	14	29	14	39	145	1144	83	677	59	46	4	30	1	0	3

表 2 1992—2021 年天津市基岩热储地热开发及动态监测一览表

年份	奥陶系						寒武系						雾迷山组					
	开采井	开采量	回灌井	回灌量	回灌率	监测井	开采井	开采量	回灌井	回灌量	回灌率	监测井	开采井	开采量	回灌井	回灌量	回灌率	监测井
	数量(眼)	(10 ⁴ m ³)	数量(眼)	(10 ⁴ m ³)	(%)	数量(眼)	数量(眼)	(10 ⁴ m ³)	数量(眼)	(10 ⁴ m ³)	(%)	数量(眼)	数量(眼)	(10 ⁴ m ³)	数量(眼)	(10 ⁴ m ³)	(%)	数量(眼)
1992	4	36	0	0	0	3	2	171	0	0	0	0	4	224	0	0	0	1
1993	--	36	0	0	0	0	--	117	0	0	0	0	--	128	0	0	0	--
1994	--	37	0	0	0	0	--	154	0	0	0	0	--	185	0	0	0	--
1995	2	31	0	0	0	0	3	135	0	0	0	0	16	218	0	0	0	7
1996	--	44	0	0	0	0	--	141	0	0	0	0	--	284	0	0	0	--
1997	--	65	0	0	0	0	--	85	0	0	0	0	--	378	0	0	0	--
1998	--	122	0	0	0	0	--	90	0	0	0	0	--	609	0	0	0	--
1999	--	--	0	0	0	0	--	--	0	0	0	0	--	--	0	0	0	--
2000	8	81	0	0	0	4	5	96	0	0	0	0	48	869	9	166	19	24
2001	9	84	2	50	60	2	4	56	0	0	0	0	52	886	9	118	19	44
2002	9	77	2	49	63	3	4	48	0	0	0	0	53	1200	9	124	10	43
2003	9	90	2	48	53	5	4	0	0	0	0	0	57	1200	9	96	10	42
2004	10	95	2	59	62	5	0	71	0	0	0	0	60	887	9	119	11	42
2005	12	108	1	59	55	7	5	72	0	0	0	3	69	892	11	119	13	44
2006	11	89	4	109	123	7	5	72	1	0	0	3	70	1361	13	228	9	53
2007	12	73	4	107	148	10	5	36	2	0	0	3	77	1285	22	289	18	69
2008	12	103	8	143	139	16	4	22	2	3	11	4	77	1250	24	417	23	78
2009	15	110	10	149	135	17	4	44	3	7	15	5	80	1289	31	484	32	90
2010	21	218	13	160	73	17	3	62	4	24	39	5	87	1362	35	550	36	90
2011	17	259	14	277	107	19	5	70	3	45	64	6	89	1499	36	573	37	91
2012	21	246	18	258	105	21	5	85	3	36	42	6	93	1676	42	758	34	98
2013	24	283	24	325	115	23	5	100	3	67	67	6	110	1769	55	838	43	103
2014	27	355	27	421	119	23	6	151	4	104	69	6	116	1995	62	957	42	103
2015	32	310	32	392	127	23	7	51	4	72	141	6	123	2030	68	1048	47	103
2016	34	304	37	410	135	23	9	75	4	58	76	6	146	2106	90	1143	50	103
2017	37	443	43	491	111	23	8	93	5	79	85	6	152	2601	99	1415	44	103
2018	40	474	43	588	124	23	7	109	5	124	114	6	165	2633	114	1637	54	103
2019	43	550	48	640	116	23	6	97	5	133	137	6	170	2884	120	1879	57	103
2020	41	593	47	695	117	23	6	126	5	150	119	6	173	2907	126	2188	65	103
2021	44	675	49	785	116	23	5	117	6	133	113	6	174	3018	129	2434	73	103

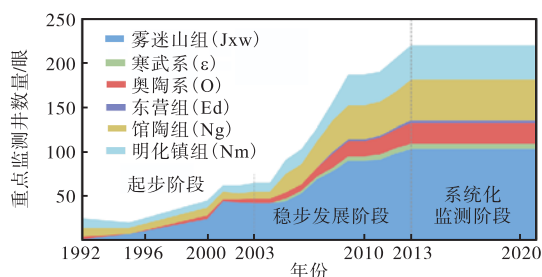


图2 1992—2021年天津市不同热储层重点监测井数量

截至2021年10月纳入监测的地热井共有763眼，其中重点监测井220眼（图1、表1、表2），监测范围基本涵盖所有地热井，监测内容包括水位日常监测、井口流温监测、水质监测、流量监测以及深井稳态测温测压等。水位监测以人工监测为主，所使用的便携式电子水位计、钢尺水位计的测量误差均小于7cm/100m，其中已有40眼监测井实现了压力式自动水位仪监测，测量精度大于 $\pm 0.1\%$ 。温度监测包括动水位埋深对应的出水温度以及稳态条件下的地层温度(Zong et al., 2018)，主要采用红外测温枪、井口温度自动化监测及表盘式温度表测量井口流温，热储温度则由专门的测井仪器进行测量，温度分辨率为 2°C ；其中已有34眼监测井实现了井口流温实时监测和自动传输，测量精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。流量监测采取电磁流量计实现了自动化监测，目前天津市登记在册在用的地热井全部安装了电磁流量计(LDG型)，监测精度达到十分位。水质监测为开展监测井全分析样品采集测试工作，样品采集严格按照《地下水水质分析方法水样的采集和保存》(DZ/T 0064.2-2021)的要求进行，水质分析委托国土资源部天津矿产资源监督检测中心(天津市地质矿产测试中心)完成。深井稳态测温测压测量工作选择集中采灌区的地热井进行，观测回灌对开采井有无影响，设备采用PS-2712压差温差组合测井仪，由专业的测井公司完成。

3 结果

3.1 开发利用动态变化

天津地热资源的开发利用是伴随着地热大会战起步的(天津地热温泉志编委会, 2018)。上世纪七十年代，著名地质学家李四光先生专程对天津地热工作进行考察，要求把天津地热利用作为一

个试点和样板。1970年12月全市召开了千人参加的地热会战誓师动员大会，成立多单位组成的“地热会战指挥部”，在市区及近郊发现了王兰庄和万家码头两个地热异常区。随后，地矿部门在全市范围内开展了一系列的地热地质调查工作。1987年提交的《天津市区及王兰庄地热田勘探报告》在全国影响深远。其后天津陆续完成了山岭子、滨海、武清、万家码头、宁河-汉沽、潘庄-芦台、看财庄等地区的地热资源勘查工作。

地热勘查程度的提高推动了天津市地热开发利用。1974年天津市建成第一眼馆陶井，1978年建成第一眼基岩井，1992年建成第一眼回灌井，1995年建成的第一对基岩定向采灌对井，见证了天津地热开发利用从浅到深、从无序到有序、从粗放到集约演变的历程(天津地热温泉志编委会, 2018)。历经50多年的发展，天津市地热井数量、开采回灌量、整体回灌率都呈总体增长的趋势。

3.1.1 开采井数量变化

1992—2021年天津市不同热储开采井数量变化情况见图3、表1、表2。2000年以前，以开采浅部砂岩热储为主，明化镇组和馆陶组热储开采井数量平均占到总开采井数量的85%；2000年后，明化镇组地热开采井数量基本保持不变，但馆陶组地热开采井数量开始稳步增加，雾迷山组开采井数量也开始增加。到2012年，雾迷山组地热开采井数量与明化镇组数量持平并开始超越。到2018年，雾迷山组地热开采井数量开始超过馆陶组，但此时明化镇组和馆陶组热储开采井数量依旧占到总开采井数量的50%以上。2019年后，受回灌政策影响，部分砂岩热储地热开采井因无法实现回灌要求而关停，明化镇组和馆陶组热储开采井数量开始下降。截止到2021年，天津市基岩热储开采井数量已占到全市总开采井数量的

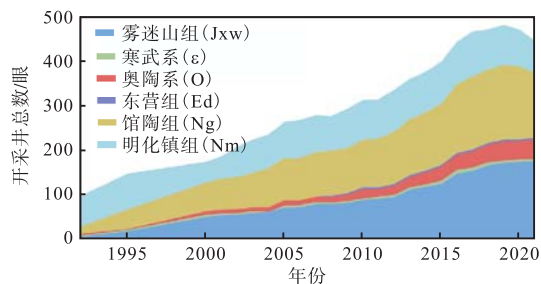


图3 1992—2021年天津市不同热储开采井数量变化图

50%。

3.1.2 开采量及主要开采储层变化

1992—2021 年不同年份天津市不同热储层的开采量统计见图 4 及表 1、表 2,大致可划分为四个阶段:①上世纪 80 年代末至 90 年代中期,房地产业的高速发展带动了地热产业的发展,天津市地热利用规模、利用水平得到了空前的提高,1995 年地热资源开采量达到了 2468 万 m^3 ;②2000—2009 年期间,地热资源开采量年际变化不大,略有升降,年平均开采量 2516 万 m^3 ,与 1995 年开采量基本持平;③2010—2016 年期间,地热资源开采量缓慢增加,到 2016 年达到了 3927 万 m^3 ;④2017 年全市地热开采量迅速增加,达到了 4979 万 m^3 ,随后又缓慢增加,到 2021 年达到了 5287 万 m^3 。

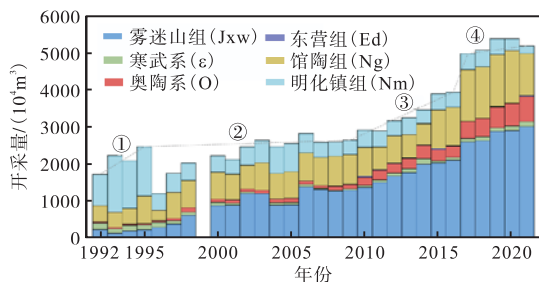


图 4 1992—2021 年天津市不同热储开采量统计图

按开采热储来分,2005 年前以开采砂岩热储为主,明化镇组与馆陶组热水开采量平均占到全市年度开采量的 60%,其中 1995 年前又以开采明化镇组热储为主,1995 年明化镇组热储开采量占到了全年热水总开采量的 50%,后期基岩热储的开采量开始逐渐增大;2002—2003 年间,雾迷山组地热资源开采量占到了全年开采量的 47%。自 2006 年起,砂岩热储开采量开始缩减,并维持开采总量基本不再变化,基岩热储的开采量持续增大;到 2016 年,雾迷山组地热资源开采量已达到了 2106 万 m^3 ,占到了全年开采量的 54%。2017 年起始,馆陶组、奥陶系、雾迷山组热储热水开采量又经历一次快速增长,此后呈缓慢增长状态,而后,受 2019 年回灌政策实施、部分砂岩热储地热井关停影响,2020 年开始砂岩热储的开采量开始下降。截止到 2021 年,全年地热资源开采总量 5287 万 m^3 ,其中雾迷山组热储热水开采量 3200 万 m^3 ,占到当年全市热水开采总量的 61%,而砂

岩热储开采量占比仅 25%。

3.1.3 地热尾水回灌

天津基岩热储回灌研究工作始于 20 世纪 70 年代末,初期是针对埋藏较浅的新近系孔隙型热储进行(Sun et al., 2005)。90 年代后开始进行基岩热储回灌试验,1992 年建成第一眼回灌井,1995 年建成的第一对基岩定向采灌对井,1996 年开始不同回灌模式的试验研究工作(Zeng et al., 2008),逐渐形成了成熟的回灌技术和理论成果,为天津市的地热回灌工作奠定了坚实的基础。2004 年,天津市地热管理处正式推广基岩地热对井回灌开采的模式,同时政府出台了多种措施鼓励开凿回灌井和原有单井地热利用系统技术改造,回灌工作开始进入了一个崭新的阶段。

天津市地热尾水回灌工作大致可划分为以下三个阶段(图 5):①试验探索阶段(20 世纪 70 年代—1996 年),20 世纪 70 年代末,天津市针对相对埋藏浅的新近系孔隙型热储先后进行了对井回灌、多井回灌数值模拟及回灌理论的研究工作;1995—1996 年针对雾迷山组热储开展了基岩热储回灌试验(Sun et al., 2005)。②生产实践阶段(1997—2011 年),这一阶段先后分别针对基岩热储和新近系砂岩热储开展了生产性回灌试验;1997 年开始开展了 10 对基岩回灌对井的生产性回灌试验,回灌率达到 56%;在基岩回灌取得经验的基础上,2001 年又针对东丽区、武清区的砂岩热储开展了生产性回灌试验(Lin et al., 2006)。③大规模回灌阶段(2012—至今),2010 年天津市出台了《天津市地热资源规划(2011—2015 年)》,提出了 52%的总体回灌率规划目标,天津地热回灌工作进入大规模实施阶段,地热回灌井数量开始猛增,2011 年全市仅有回灌井 68 眼,到十二五末(2015 年)已增加到 148 眼,翻了一番;地热回灌量也逐年增加,十二五期间地热平均回灌率为 39%,其中 2015 年达到了 45%,接近了规划目标;十三五期间,天津市出台了《天津可再生能源“十三五”规划》,提出到 2020 年全市深层地热总体回灌率达到 58%,这一时期得益于砂岩热储回灌技术的进步(Shen et al., 2016; Ruan et al., 2017b),除了基岩热储回灌量得到快速增长外,馆陶组热储回灌工作也得到了快速发展,到 2020 年

全市地热回灌井数量达到 267 眼,其中馆陶组热储回灌井 76 眼,占到全市地热回灌井总数的 28%;地热总体回灌率达到 71%,超过了规划目标要求。截止到 2021 年,天津市地热资源年开采总量为 $5287 \times 10^4 \text{ m}^3$,年回灌总量为 $4280 \times 10^4 \text{ m}^3$,年总体回灌率达到 81%(图 6、表 1、表 2)。

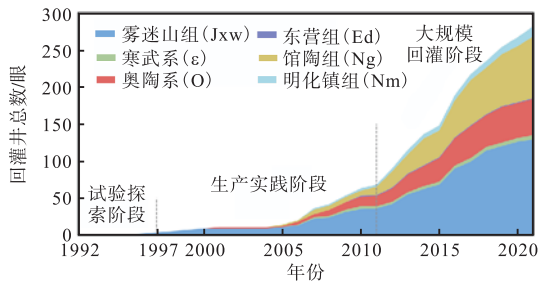


图5 1992—2021 年天津市不同热储地热回灌井数量变化

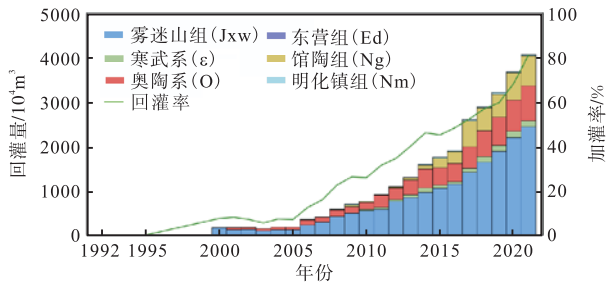


图6 1992—2021 年天津市不同热储回灌量及回灌率统计

3.2 热储动力场演化

热储水位动态的变化主要受到热储动力环境、开发利用、资源保护与管理等多方面的共同影响,其中热储动力环境受地质条件和构造条件限制,基本不可控,资源保护与管理成效又直接反映在开发利用上,因此主要影响水位动态变化的就是对资源的开发利用。天津市不同热储层水位动态大致可划分为两个阶段。以馆陶组为例(图 7),2019 年以前为持续下降阶段,其平均水位埋深由 1999 年的 40~50m 持续下降到 2019 年度的 115~140m,水位年度降幅超过 4m。2019 年以后随着回灌工作力度不断加大和无证地热井关停,热储水位开始大幅回升。雾迷山组热储水位也有基本相同的变化特征(图 8),2018 年以前为持续下降阶段,其平均水位埋深由 1999 年的 35~65m 持续下降到 2018 年度的 140~165m,水位年度降幅 4~6m(Zong et al., 2018);随着多年持续不断

加大的回灌力度,到 2018 年热储水位下降幅度减缓甚至出现回升。整体而言,近年来各主要热储水位变化特征表现为:馆陶组热储由下降幅度逐渐减小转为局部水位开始小幅度回升至 2021 年中部热储发育区大部分区域回升;奥陶系热储由下降幅度逐渐减小转为局部水位回升至 2021 年热储发育区一半区域回升;雾迷山组热储由下降幅度逐渐减小转为局部水位开始小幅度回升至 2021 年热储发育区大部分区域回升,且回升幅度增加,其中南开区开发利用时间久,常年是雾迷山组水位漏斗区,水位漏斗区水位近年来表现为水位下降速率减缓,漏斗区外围水位开始由下降转为缓慢回升。

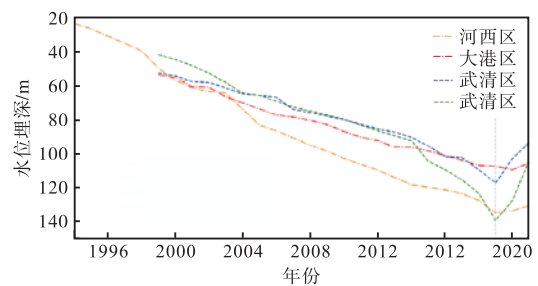


图7 1994—2021 年天津馆陶组热储主要开采区水位动态曲线

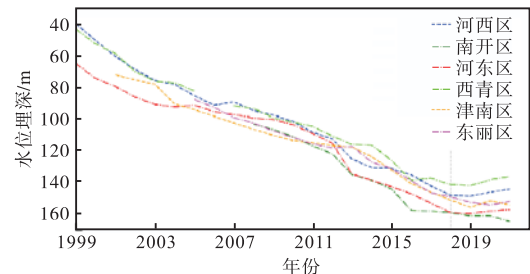


图8 1999—2021 年天津雾迷山组热储主要开采区水位动态曲线

3.3 热储温度场演化

温度监测包括井口流温监测及井下连续稳态温度测量,可提供集中采灌条件下不同热储温度的时空演变信息。近年来天津市回灌工作力度不断加大,由于回灌过程中低温流体的注入,在一个局部区域的一定时间内,会引起热储局部热流体温度的降低,形成以回灌井为起点向外运移的冷锋面,因此近年来除了常规的流温测量外,重点开展了回灌对热储温度场的影响监测,即在非供暖期对地热井井底热储段进行连续测温,掌握停灌

后热储温度变化规律,研究回灌前后热储温度场变化特征。

3.3.1 开采井井口稳定流温

地热井井口稳定流温普遍略低于热储温度,是热储平均温度的直接反映(Deng et al., 2022)。天津地区主要热储层的井口流温主要与储层埋深、基岩起伏、断裂构造关系密切,其中明化镇组热储地热井井口稳定流温一般低于 60°C , 温度高值区基本与构造凸起部位相对应;馆陶组热储地热井井口稳定流温一般介于 $60\sim 80^{\circ}\text{C}$ 之间,高值区基本与热储埋深相对应,埋藏较深的地热流体通过地层正常增温从而形成了较高的热储温度,部分地段受构造隆起和附近控热断裂影响,温度较高;雾迷山组储层地热井井口稳定流温则普遍高于 75°C , 温度高值区对应高凸起部位,与地热异常区相对应,且在同一凸起单元内越是临近导水、导热断裂,流体温度越高。通过对多年不同储层开采井井口稳定流温监测(图9),发现这些地热井的井口稳定流温多年来基本保持稳定,由此可见地热井的流体温度并没有因长期开采或回灌而出现明显的变化。

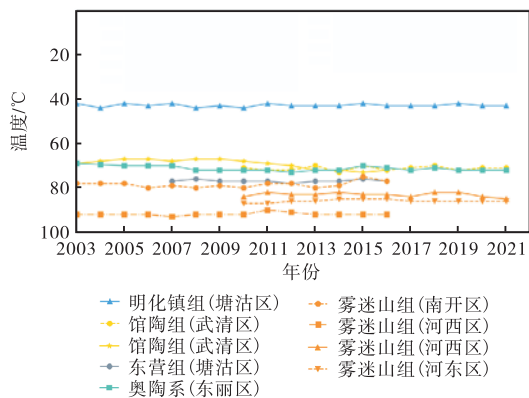


图9 2003—2021年天津主要热储层温度动态曲线

3.3.2 回灌井井筒垂向温度变化

在地热对井采灌运行过程中,开采井抽取的地热流体经过换热后,其大部分热能已被提取,因此,当把失掉大部分热能的地热尾水通过回灌井回注入原热储时,这部分低温流体在注入和流动过程中,与储层中的原有热流体不断相互作用,同时不断吸取围岩热量,热传递作用使得原先处于天然状态下的温度场在一定热储空间范围内被打破。由于回灌过程中低温流体的注入,在一个局部

区域的一定时间内,会引起热储局部热流体温度的降低,形成以回灌井为起点向外运移的冷锋面。在非供暖期对地热井井底热储段进行连续测温,可掌握停灌后热储温度变化规律。现分别以 WQ-23B 井和 HD-02 井为例,分析不同热储层回灌条件下井筒周边温度场的变化。

WQ-23B 井位于武清区,热储为新近系馆陶组,成井时储层温度为 65°C ,目前用于回灌,2021年度回灌量为 $11.48\times 104\text{m}^3$,尾水温度为 $34^{\circ}\text{C}\sim 38^{\circ}\text{C}$,回灌效果良好。近几年采暖期结束后均在停采期开展了多次稳态测温测压工作,根据近8年的井温测试数据绘制测温曲线见图10。根据测温曲线可知,WQ-23B井地面至1550m井段井温随深度增加而增加,体现为传导性增温特征;1550m~1840m为该井射孔段,也是回灌目标层位,由于整个供暖季回灌尾水温度较低,在此处形成一个因多年低温流体回灌造成的低温带,多年温度介于 $40\sim 55^{\circ}\text{C}$ 之间,低于正常情况下该段平均温度(约 65°C),此段后温度逐渐恢复正常。绘制2021年4月与8月WQ-23B井的年内动态测井曲线见图11,除了浅部受第四系含水层影响温度变化不太规律外,从250m以下地温升温速率呈逐渐增大趋势,其中非含水层段(250~1550m)测温曲线比较平缓,表现为传导型增温特点,由上而下地温升温速率由 $0.004^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 增加为 $0.037^{\circ}\text{C}/\text{d}$,平均增温速率 $0.023^{\circ}\text{C}/\text{d}$;含水层段(1550~1840m)则由于低温流体的回灌表现为一定的对流型特点,但可以明显看出明显的年内同

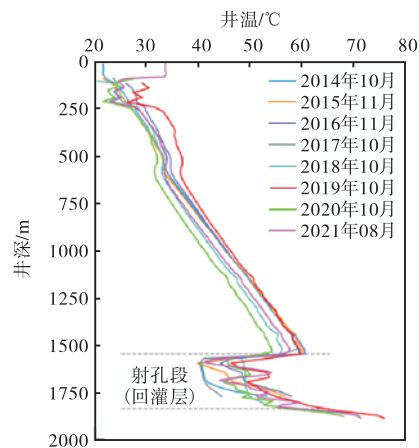


图10 2014—2021年馆陶组热储 WQ-23B 地热回灌井井下连续测温曲线

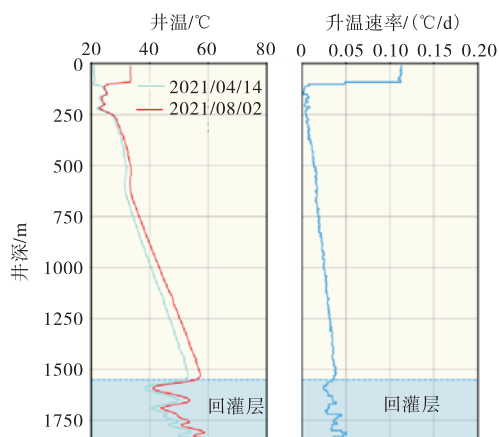


图 11 2021 年 4—8 月 WQ-23B 回灌井井温度动态曲线及回升速率

步回温特征,平均增温速率达到 $0.034^{\circ}\text{C}/\text{d}$,略高于非含水层段。

HD-02 井位于河东区,热储为蓟县系雾迷山组,为回灌井,回灌层位为 2686~3155m。近几年采暖期结束后均在停采期开展了多次稳态测温测压工作,根据 2011-2019 年的井温测试数据绘制测温曲线见图 12。根据测温曲线可知,2600m 以浅井段,井筒温度随深度增加而增加,体现为传导性增温特征;2686m~3155m 为回灌目标层位,由于整个供暖季回灌尾水温度较低($35\sim 47^{\circ}\text{C}$),在此处形成一个因多年低温流体回灌造成的低温带,多年温度介于 $60\sim 80^{\circ}\text{C}$ 之间,低于正常情况下该段平均温度(约 85°C),此段后温度逐渐恢复正常。绘制 2020 年 4 月至 10 月 HD-02 井的年内逐月动态测井曲线见图 13,除了浅部受第四系含水层影响温度变化不太规律外,从 220m 以下地

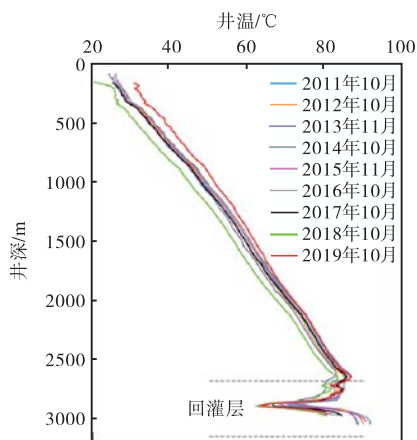


图 12 2011—2019 年雾迷山组热储 HD-02 地热回灌井井下连续测温曲线

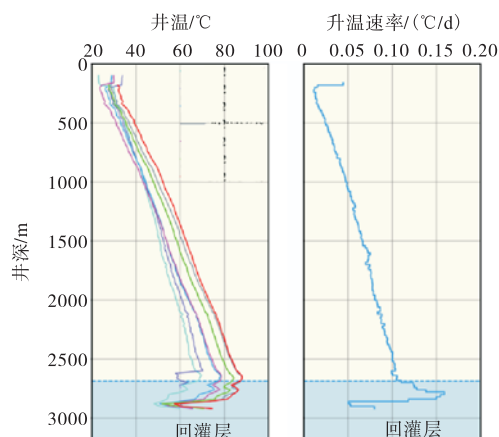


图 13 2020 年 4—10 月 HD-02 回灌井井温度动态曲线及回升速率

温升温速率呈逐渐增大趋势,其中非含水层段(220~2686m)测温曲线比较平缓,表现为传导型增温特点,由上而下地温升温速率由 $0.012^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 增加为 $0.105^{\circ}\text{C}/\text{d}$,平均增温速率 $0.062^{\circ}\text{C}/\text{d}$;含水层段(2686~3155m)则由于低温流体的回灌表现为一定的对流型特点,但可以明显看出明显的年内同步回温特征,平均增温速率达到 $0.116^{\circ}\text{C}/\text{d}$,高于非含水层段。

3.4 热储化学场演化

天津市 2021 年度不同热储层热水水化学特征见图 14。总体上各主要热储地热流体水化学特征表现为沿径流方向从北向南水化学类型渐趋复杂。明化镇组热储地热流体水化学类型由 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型逐渐变为复杂的 $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$ 型;馆陶组热储

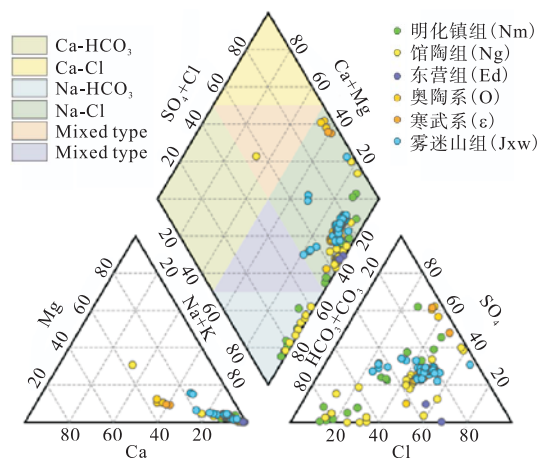


图 14 2021 年度天津不同热储层 piper 图

地热流体水化学类型由 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型逐渐变为复杂的 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型;奥陶系热储地热流体水化学类型由 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型逐渐过渡到复杂的 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型;寒武系热储地热流体水化学类型由 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型过渡到 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型;雾迷山组热储地热流体水化学类型由 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\text{-Na}$ 型过渡到 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型。

近年来天津市大力推动地热尾水回灌工作,而地热流体因受温度、压力及管道材质等影响在流动过程中发生化学反应产生的化学沉淀是影响回灌效果的重要因素之一(Liu et al., 2009)。根据以往对部分地热井的流体垢样的鉴定可知,沉淀的主要成份包括 CaCO_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 等化合物,主要元素有 O、Si、Fe、Al、Cl 等。开采回灌过程中,地热流体化学组分的变化主要表现为一定量的 CO_2 气体释放的同时产生 CaCO_3 或 MgCO_3 沉淀。

通过对天津主要开采热储层多年的水质进行统计分析,各热储层地热流体的主要化学组分基本稳定,多年来无明显变化(图 15~图 16),因此可以说明地热流体的化学性质、离子组分在开采、回灌过程中,短期内的动态变化是较为微弱的,地热采灌系统尾水回灌对地热流体的水质影响很小,不会从根本上改变地热流体的原始化学特征。

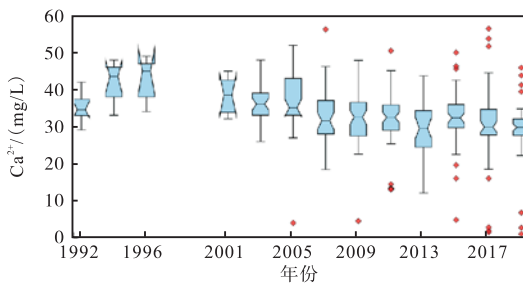


图 15 近 30 年雾迷山组热储 Ca^{2+} 离子统计特征

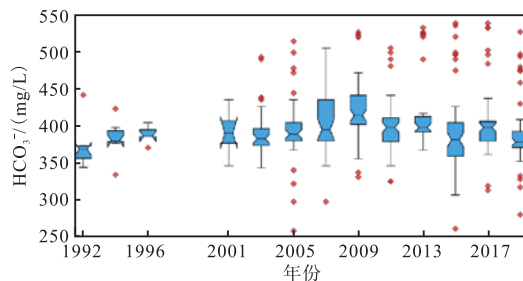


图 16 近 30 年雾迷山组热储 HCO_3^- 离子统计特征

另外,垂直发育的断裂带可形成渗流的优势

通道(Lin et al., 2022b),沟通上下储层,对不同储层的水质造成一定的影响。研究区内沧东断裂发育较多裂隙,有较好的垂向连通性,能将下部热储层中的高位热能以热对流形式传递到浅部(Zhao et al., 2007; Yin et al., 2021)。对比分析沧东断裂与天津断裂地区的地热流体水质资料发现(图 17),沧东断裂附近奥陶系与雾迷山组热储地热流体水化学类型相同、矿化度相近,且奥陶系地热流体的水质要明显优于天津其它地区地热流体,如奥陶系地热井 DL-16 井矿化度为 1753.3mg/L,水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型,与雾迷山组热储地热流体基本相同。而从天津断裂附近分布的奥陶系和雾迷山组地热流体水化学分析结果来看,其水化学类型比较复杂,矿化度变化比较大,这也说明天津断裂一带相对沧东断裂区域地下流体径流缓慢,断裂性质完全不同。

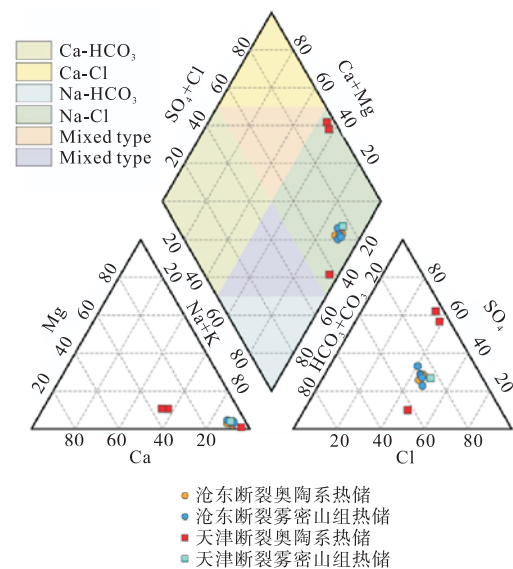


图 17 沧东断裂与天津断裂附近不同热储地热流体 Piper 图

4 讨论

地热资源虽然是可再生的清洁能源,但这种“可再生”也是有限度的,长期持续的无序开发也可能造成区域地热资源的枯竭(Wang et al., 2020c)。以美国 Geysers 地热田为例(Sanyal et al., 2011, 2016),该地热田是继意大利 Lardarello、新西兰 Wairakei 之后,全球第三个大规模开发的地热田,上世纪 60 年代开始商业运营,70—80 年代受“石油危机”带来的石油、天气价格暴涨以及

美国联邦和州政府为开发地热发电提供的一系列激励措施等因素影响,其开发日益加速,发电量激增,到 1987 年鼎盛期年发电量达到了 1500 ~ 1600MW。但由于不同运营商之间缺乏合作且信息闭塞,导致了热田的过度开发,具体表现在储层压力迅速下降,1987—1988 年热田某些地方出现过热蒸汽(意味着储层的局部干燥),热田的生产力也迅速下降,净发电量从 1987 年的 1600MW 高峰下降到 1995 年的不到 900MW。为缓和衰减率,1997 年后通过修建管道将经过处理的城市污水远距离输送到地热田来增加回灌量,同时开展了热田经营权的整合以优化热田管理,到 1998 年后,The Geysers 地热田基本实现了稳定运行,2010—2015 年间其年发电量稳定在 800 ~ 850MW,比 30 年前的预测高出 33%,反映了回灌策略等管理方面创新的巨大成就。

地热回灌是避免地热废水直接排放引起热污染和化学污染的措施,并对维持热储压力,保证地热田的持续开采条件具有重要的作用,回灌是最有力的热储管理工具(Sanyal et al., 2011)。回灌已经成为世界范围内重要地热田生产运行中的一项日常工作,在过去的几十年里,全球至少有一半的地热田采用了完全回灌战略(Kamila et al., 2021)。

天津市规模化开发地热始于 20 世纪 90 年代,广泛用于地热供暖、温泉理疗、养殖、工农业等多个领域,目前已形成了市区及近郊、武清、塘沽、大港等多个集中开采区。受多年集中开采影响,区域水位埋深分布特征表现为以市区为中心向外围扩展的漏斗区,且在武清、津南等地区形成多个次一级的漏斗区。主要开采热储层中,明化镇组热储在上世纪 80 年代已大量开采,1992 年中心城区明化镇组中心水位埋深约 51m(天津市地热勘查开发设计院, 1992),到 2021 年市中心漏斗水位埋深达到 108m,近 30 年水位累计下降 57m,年平均降幅 1.9m;馆陶组 1992 年中心城区水位埋深 15 ~ 20m,到 2021 年漏斗中心水位埋深达到 131.51m,近 30 年水位累计下降超过 110m,年平均降幅 3.7m;奥陶系热储 1992 年中心城区水位埋深 10 ~ 15m,到 2021 年漏斗中心水位埋深达到 155.35m,近 30 年水位累计下降超过 140m,年平

均降幅 4.7m;雾迷山组热储从上世纪 90 年代初的自流,到 2021 年漏斗中心水位埋深达到 169.96m,近 30 年水位累计下降超过 170m,年平均降幅超过 5.6m。规模化的人工集中开采和早期只采不灌的开发利用模式是造成不同热储层水位持续下降、资源加速枯竭的主要原因(Zong et al., 2018)。近年来天津市遵循“以灌定采、采灌平衡”的开发原则,加大地热回灌力度,实施“回灌系统整合”、“补建回灌井”等地热资源管理保护措施,相继建成了 200 多处地热对井回灌开发系统,并积极探索地表水补充回灌技术,目前,这些措施已初步取得成效,自 2018 年以来,馆陶组、雾迷山组等主要开发热储层的水位已由下降幅度逐渐减小转为局部水位回升(图 7、8)。

天津市属沉积盆地型地热资源,其地温场特征主要与基岩起伏、断裂构造关系密切。一般在构造凸起部位和导水导热断裂附近,热储温度相对较高。明化镇组地热井井口稳定流温为 40 ~ 80℃,其高值区基本都和构造凸起部位相对应。馆陶组热储地热井井口稳定流温为 48 ~ 86℃,温度高值区主要分布在东丽区山岭子地热异常区东部和南部、武清凹陷、北塘凹陷、板桥凹陷等地。雾迷山组储层地热井井口稳定流温普遍高于 75℃,最高温度位于周良庄地热异常区内,达到 113℃。近 30 年的系统监测显示,地热流体的开采会导致井孔附近浅部地温缓慢升高并逐年累积,长期停采后其地温会缓慢恢复;地热井的井口稳定流温与成井时的流温相差不大,基本保持稳定,说明地热井的流体温度并没有因长期开采或回灌而出现明显的变化。从水化学特征来看,天津市各主要热储地热流体水化学类型呈从北向南渐趋复杂、矿化度逐渐增大的趋势,与地热流体径流方向基本一致,在导水、导热断裂附近,水质相对较好。对比多年的水质监测结果可以看出:各主要热储地热流体化学性质比较稳定,除有一定波动外,主要离子含量并没有因人为开采或回灌而发生明显变化。

总的来说,天津市自 1985 年开始进行地热资源动态监测工作,历经近 40 年的发展,已形成地热资源监测历时最久、监测内容最丰富、监测规模最大、监测水平最高的地热动态监测体系:目前天

津市范围内已布设了由 700 余眼监测井组成的动态监测网,对包括浅层地热能、深层地热资源在内全市地热开发利用情况进行系统监测,按特定频率以及成熟的技术方法获取地热资源的压力(水位)、流量、水质、井口温度、热储温度、岩土体温度、能耗等数据,按年度形成监测成果报告、图件、数据库;在执行国家、行业标准基础上,制定了地热资源动态监测地方标准;在地热监测信息平台建设方面进行多次尝试,形成了地热资源开发利用动态数据库、地热资源动态监测信息管理系统、地热资源野外科学观测研究信息系统、天津市矿产资源监管信息平台中的监测、计量模块化功能等成果;《天津市地热资源管理规定》《天津市地热资源管理实施办法》等规章制度也对监测工作及监测设施有明确要求。规范有序的动态监测为科学开发天津市地热资源提供了科学保障,天津地热资源的开发已走上了可持续的良性发展轨道。

5 结 论

(1)近 30 年来,天津市地热资源开发可划分为四个阶段:①上世纪 80 年代末至 90 年代,开采量快速增加,以开采明化镇组热储为主;②2000—2009 年期间,开采量较稳定,基岩热储开采量逐渐增加;③2010—2016 年期间,开采量缓慢增加,雾迷山组热储开采量超过一半份额;④2017 年至今,全市地热开采量迅速增加,砂岩热储开采量占比降到 25%以下。

(2)天津市地热尾水回灌工作开始于 20 世纪 70 年代末,可划分为三个阶段:①试验探索阶段(20 世纪 70 年代—1996 年),针对砂岩热储和基

上接第 15 页

近期以来,山东省出台政策举措支持绿色低碳高质量发展。近日,山东省发展改革委、山东省科学技术厅、山东省工信厅等 13 部门联合印发《关于进一步完善绿色金融体系推动能源和产业转型的若干措施》,明确从行业端、企业端、项目端齐发力,大力发展可再生能源,优化能源结构,提高能源利用效率。

山东省自然资源厅日前发布《关于印发加强自然资源要素保障服务全省高质量发展若干政策措施的通知》指出,扎实推进新一轮找矿突破战

岩热储分别开展了回灌试验;②生产实践阶段(1997—2011 年),针对具体地热开发工程开展了生产性回灌试验;③大规模回灌阶段(2012—至今),天津地热回灌工作进入大规模实施阶段。

(3)近 30 年来,天津市不同热储层水位动态大致可划分为两个阶段,2019 年以前为持续下降阶段,以后随着回灌工作力度不断加大和地热无证井治理,热储水位下降幅度减缓甚至出现回升。

(4)天津市主要开采储层地热井的井口稳定流温多年来基本保持稳定,并没有因长期开采或回灌而出现明显的变化,但采灌系统中回灌井的井筒垂向温度在灌目标层位处因多年低温流体回灌形成一个低温带,经过非供暖期的恢复无法达到最初的温度。

(5)近 30 年来,天津市主要开采热储层地热流体的主要化学组分基本稳定,地热采灌系统尾水回灌对地热流体的水质影响很小,没有从根本上改变地热流体的原始化学特征。

(6)近年来随着一系列地热资源管理保护措施的实施,天津市馆陶组、雾迷山组等主要开发热储层的水位已由下降幅度逐渐减小转为局部水位回升,天津地热资源的开发已逐渐走上可持续的良性发展轨道。

注 释

天津地热勘查开发设计院. 2022.2021 年度天津市地热资源开发利用动态监测报告.

天津地热勘查开发设计院. 1992.九二年天津市地下热水动态监测工作年报.

参考文献略

转自《地质学报》Vol 98, No.1

略行动,以鲁西北、鲁西南地热资源富集区以及鲁东、鲁南地热资源丰富地区为重点,部署开展 15 个典型地热田的地热能调查评价与勘查。

2023 年以来,山东省先后制定出台了《关于支持地热能开发利用的若干措施》《关于加快推进地热能开发利用的指导意见》,各市党委、政府也都积极推动,系统谋划,全面提升地热能开发规模和利用水平,奋力打造国家地热能高质量发展示范区。