

天津市地热资源开发利用特征及存在问题分析

林 澍, 于 彦, 秦莉红, 康 楠

(天津地热勘查开发设计院, 天津 300250)

摘要: 天津地区的地热地质条件良好, 蕴藏着丰富的地热资源。在地热资源的开发利用过程中, 每年可产生可观的经济、社会和环境效益, 但由于开发方式的不尽合理, 带来诸多问题。文章阐述了天津开发利用地热资源的特征, 分析了存在的问题。认为不同热储层间水力联系的存在和地热井间距的过小, 造成开采层间相互影响较大; 地热井布局不合理、开采层位相对集中、回灌程度不高导致局部热储层压力大幅度下降, 持续的大幅度压力下降将引发吊泵和地面沉降; 超标准排放地热尾水会造成资源浪费和热污染; 采、灌井间距的过小和相对位置的不合理, 存在冷突破风险。针对不同问题, 给出了针对性解决问题的建议。

关键词: 地热; 热储层; 开采层; 地热尾水; 回灌程度; 地面沉降; 天津市

中图分类号: P314, TK529 **文献标识码:** A

0 引言

随着天津市经济和社会的发展, 环境问题日益突出, 近几年挥之不去的雾霾危机便是很好的例证, 地热能作为一种传统的新能源被提上“美丽天津”建设的议事日程。天津地区的地热地质条件良好, 蕴藏着丰富的地热资源, 被广泛用于建筑供暖、生活用水、温泉洗浴等诸多领域, 带来了巨大的社会、环境效益和较好的经济效益。但同时, 地热资源的欠科学开发也引发了诸多的问题, 亟待我们发现问题和解决问题。

1 地热地质条件

1.1 地质构造条件

天津地处华北盆地东北部, 以宁河—宝坻断裂为界划为南北两个区(图1)。

北区属地质构造Ⅱ级单元燕山台褶带的次一级

(Ⅲ级)构造单元蓟宝隆褶, 其发育地层有前古生界及古生界, 为基岩裸露区和浅覆盖区, 易于大气降水的入渗, 是南部地热流体的补给区。

南区属地质构造Ⅱ级单元华北断拗, 属于中-新生代断陷、拗陷盆地, 其区内的次一级(Ⅲ级)构造单元包括一隆两拗, 即沧县隆起、冀中拗陷和黄骅拗陷; 在隆起、拗陷及其间还发育有诸多次级(Ⅳ级)的构造单元(凸起、凹陷), 其展布方向为NNE向。区内发育有两组主要断裂, 延伸方向为NNE向和近EW向^[1]。该区新生界松散沉积层厚度大, 是地热资源的良好储层和盖层。

1.2 地温场分布特征

约占全市总面积77%的南部平原区普遍蕴藏着地热资源, 其富集程度受构造控制, 与隆起、凸起和断裂正相关, 地温梯度高值区位于中间的沧县隆起带, 低值区位于其两侧的拗陷(图2)。据统计, 盖层平均地温梯度大于3.5℃/100m的地热异常区有10个, 其中有7个分布在沧县隆起上, 占南部地热异常区总面积的86%^[2]; 利于开发的地热资源主要集中在基岩埋藏较浅的隆起上, 这大大降低了开发成本, 为大规模的开发利用地热资源提供了良好的前提条件。

收稿日期: 2016-04-27; 责任编辑: 王传泰

作者简介: 林澍(1988—), 女, 助理工程师, 南京师范大学地理科学学院本科毕业, 主要从事地热资源的勘查、评价工作。通信地址: 天津市河东区卫国道189号, 天津地热勘查开发设计院; 邮政编码: 300250; E-mail: tawanna1211@126.com

1.3 热储层特征

天津地区开发的热储层主要有新近系明化镇组(Nm)、新近系馆陶组(Ng)、古近系东营组(Ed)、寒武系(Є)、奥陶系(O)、蓟县系雾迷山组(Jxw)。

各热储层基本特征,如表 1 所述。

2 地热资源开发利用特征分析

本次研究的地热开发利用特征分析资料均以 2015 年监测数据^[3]为基础,监测周期为 2014 年 11 月—2015 年 10 月,文中不再特别说明。

2.1 开发布局特征

开发强度较大的集中开采区位于经济发展速度较快的中心城区至滨海新区的东西向发展轴带上,主要包括中心城区、东丽区和滨海新区。全市共有开采井 398 眼,其中集中开采区有 277 眼,占总数的 70%,最小开采井间距不足 1 km。全市地热资源总开采量为 $3\,884.52 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,其中集中开采区开采量为 $2\,793.93 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,占总开采量的 72%。

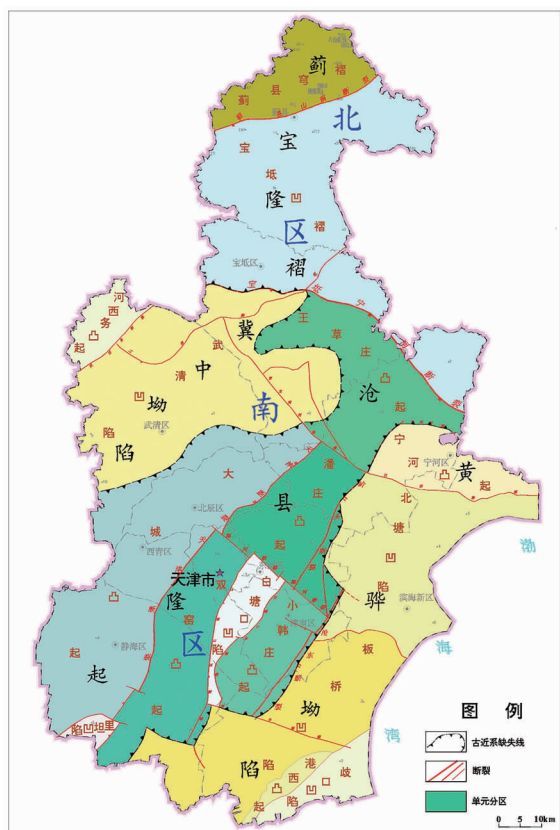


图 1 天津市地质构造单元分区图

Fig.1 Division of tectonic units in Tianjin

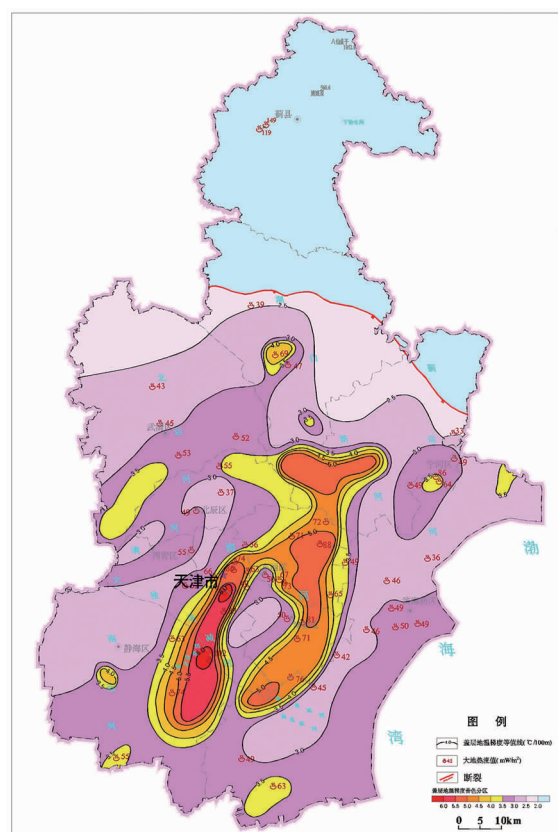


图 2 天津市盖层地温梯度等值图

Fig.2 The geothermal gradient contour of cover layer in Tianjin

2.2 开发层位特征

雾迷山组(Jxw)热储层是天津地热资源主力开采层,共有开采井 123 眼,占开采井总数的 31%,开采量为 $2\,029.78 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,占总开采量的 52%。其次为馆陶组(Ng)热储层,共有开采井 137 眼,占开采井总数的 34%,开采量为 $1\,035.32 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,占总开采量的 27%。

各热储层开采情况如表 2 所述。

2.3 地热回灌特征

地热回灌用水为供暖后的尾水,以基岩裂隙型热储层为主,松散孔隙型热储层为辅。从表 2 可知,雾迷山组(Jxw)热储层为主要回灌层位,回灌量为 $1\,048.44 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,占总回灌量的 60%。奥陶系(O)和寒武系(Є)热储层由于异层采灌,回灌率均超过了 100%。其它热储层回灌率则相对较低:明化镇组(Nm)热储层回灌率较低的原因在于热流体温低、水质较好且难以回灌,主要用于生活、洗浴和种养殖等;馆陶组(Ng)和雾迷山组(Jxw)热储层回灌率低的主要原因是采灌系统不完善,早期施工的地

表 1 天津地区各热储层基本特征

Table 1 The basic characteristics of the thermallayer in Tianjin

热储层	热储分布特征	顶板埋深/m	揭露厚度/m	井口温度/℃	岩性	孔(裂)隙率/%
Nm	在南区广泛分布	300~460	295~1657	40~80	为半胶结的粉细砂、细砂和杂色泥岩不等厚互层	15~40
Ng	在双窑凸起核部等地区缺失,在南区的其余地区广泛分布,沧县隆起区分布厚度薄、埋深小,向两侧坳陷区逐渐加厚、加深	988~2660	14~776	40~82	以灰色、灰黄色粉细砂岩夹棕红色泥岩为主,底部有砂砾岩	18~36.6
Ed	在沧县隆起区缺失,在两侧的坳陷区广泛分布	1412~2500	55~648	78~93	以灰白色砂岩为主	21.16~35
O	在沧县隆起区的核部大面积缺失,其它地区广泛分布	882~3104	29~1511	48~99	由白云质灰岩、灰岩及泥质灰岩、泥岩组成	2.0~6.25
Є	主要以昌平组为主,该组分布不均,厚度不稳定,在隆起区上的凸起部位缺失,但在坳陷区和沧县隆起区的大城凸起区埋深普遍大于 4000 m	950~3734	14~1160	70~80	以灰白色灰质白云岩为主	2.6~5.0
Jxw	主要分布在天津断裂以东的沧县隆起区,在两侧的坳陷区埋深普遍大于 4000 m	912~4041	1278.52	70~113	以深灰色厚层状白云岩为主	2.4~5.8

表 2 2015 年各热储层开采及回灌情况统计表^[3]

Table 2 Statistics of exploitation and recharge of each geothermal layers in 2015

热储层	开采井数量/眼	回灌井数量/眼	开采量/10 ⁴ m ³	回灌量/10 ⁴ m ³	回灌率/%
Nm	95	7	431.72	22.49	5.21
Ng	137	36	1035.32	213.29	20.6
Ed	4	1	26.54	0	0
O	32	32	309.9	392.1	126.52
Є	7	4	51.26	72.08	140.62
Jxw	123	68	2029.78	1048.48	51.65
合计	398	148	3884.52	1748.44	45.01

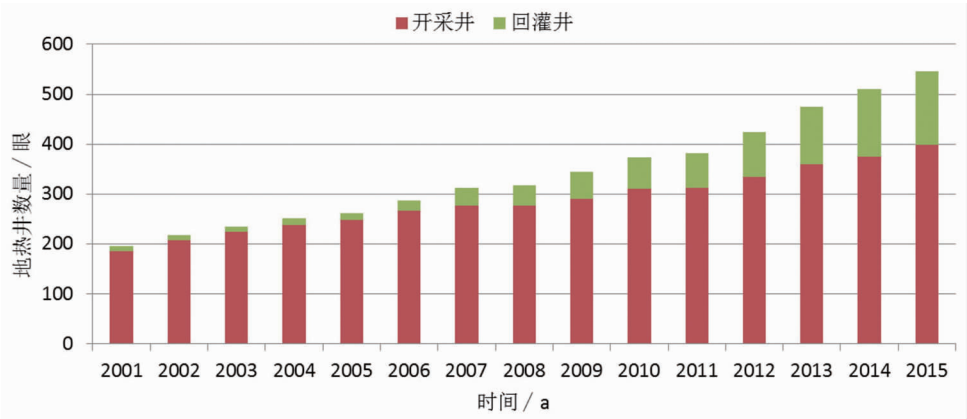


图 3 天津市地热开采井和回灌井数量多年统计图

Fig. 3 Plot showing statistical numbers of the exploitation and recharge wells from 2001 to 2015 in Tianjin
(摘自 2015 年度天津市地热资源开发利用动态监测年报)

热开采井为单采系统;而东营组(Ed)热储层尚处试开发阶段,开采井少,主要用于洗浴,无回灌。

2.4 开发趋势

随着对地热资源需求的增加,地热资源开采量呈逐年增长趋势,由 2002 年的 $1\,821\times10^4\text{ m}^3$ 增加到 2015 年的 $3\,884.52\times10^4\text{ m}^3$ 。为了实现环境保

护和资源的可持续利用,天津市加大了地热尾水回灌力度;从图 3 可看出,从 2006 年起,地热开采和回灌井数量同步增长,到 2015 年回灌井已有 148 眼,回灌量由 2006 年的 $350\times 10^4\text{ m}^3$ 增加到 2015 年的 $1\,748\times 10^4\text{ m}^3$ 。回灌率呈整体快速增长趋势,2015 年达到了 45.01%。

2.5 利用特征

天津市的地热资源主要用于建筑供暖,供暖面积达到 $2\,350\times 10^4\text{ m}^2$,约占全市集中供暖总面积的 6.7%,供暖面积居于全国领先地位。由表 3 可以看出,供暖用地热流体开采量最大,占年度地热流体开采量的 76.67%,其次为生活用水,占年度地热流体开采量的 16.73%,其余用途所占的比重很小。

2.6 地热利用效益

(1)经济效益:2015 年地热资源开发产生的总收益为 10.84 亿元(见表 3)。经济效益贡献较大的利用方式是建筑供暖和温泉洗浴(图 4),温泉洗浴的收益率明显要高得多。

(2)社会效益:地热资源的开发提高了就业率和人民生活质量,带动了相关产业发展。据有关部门统计,2015 年度开发地热资源产生的直接从业人员 1 592 人、间接从业人员 3 011 人,为增加人民收入和保障社会稳定做出了贡献;地热生活水小区近 200 个、约 10 万户居民足不出户享受温泉水洗浴;全市温泉旅游单位达 14 家之多,为市民的休闲生活提供了更多选择;利用地热供暖的小区及公建达到 448 个,农业种植养殖面积达 $76.6\times 10^4\text{ km}^2$,有力的带动了相关产业的发展。

(3)环境效益:地热资源开发可有效的减少常规燃料的需求和有害气体的排放量,节约污染治理费用,并相应的减少城市废物运输量,有效地保护了生态环境,具有明显的环境效益。根据统计计算,2015 年开采地热流体量所产生的热量为 $0.57\times 10^{16}\text{ J}$,相当于 $32.4\times 10^4\text{ t}$ 标准煤,总体减排量约为 $81.55\times 10^4\text{ t}$,不计煤灰碴运输费用,约可减少环境治理费 9 010.44 万元(表 4)。

3 地热资源开发利用存在问题分析及对策

3.1 水力联系造成开采层间相互影响

不同构造单元间各热储层的水力联系程度有所不同。雾迷山组(Jxw)热储层是天津地区地热流体的主力开采层,集中式的高强度开发,热储压力急剧下降,引发了上覆热储层的越流补给,加剧了上覆热储层的热储压力下降,造成各开采层位间的相互影响。

在潘庄凸起部分地区,明化镇组(Nm)直接覆盖于雾迷山组(Jxw)之上,两组热储层的地热流体水质非常接近,水质类型均为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{—Na}$ 型。有 4 眼分布相对集中的明化镇组(Nm)地热井,与周边相同层位地热井距离较远,但最近 3 个年度的静水位埋深和最大水位降幅出现在非开采井。该非开采井水位降幅变化与井底位置距其 400 m 左右的一眼雾迷山组(Jxw)地热井的开采及回灌量相关。说明该区雾迷山组(Jxw)热储层与明化镇组(Nm)热储层存在较好的水力联系。

表 3 2015 年天津市地热资源利用方向 and 经济效益统计表

Table 3 The statistics of utilization and economic benefits the geothermal resources in 2015 in Tianjin

利用方向	建筑供暖	生活用水	温泉洗浴	医疗保健	农业利用	2015 年总计
开采地热流体量/ 10^4 m^3	2978.08	650	204.8	44.7	6.94	3884.52
开采比例/%	76.67	16.73	5.27	1.15	0.18	100
经济效益/亿元	5.75	0.65	3.42	0.45	0.57	10.84

表 4 地热资源环境效益数据表

Table 4 The statistics of environmental benefits the geothermal resources in 2015 in Tianjin

项目	计算系数	减排量/ $10^4\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$	节约治理费	
			单价/元 $\cdot\text{kg}^{-1}$	金额/万元
减少二氧化硫量	1.7%	0.55	1.1	605.88
减少氮氧化物量	0.60%	0.19	2.4	466.56
减少二氧化碳量	2.386%	77.31	0.1	7730.64
减少悬浮粉尘量	0.80%	0.26	0.8	207.36
减少煤灰碴量	10%	3.24	—	—
合 计		81.55		9010.44

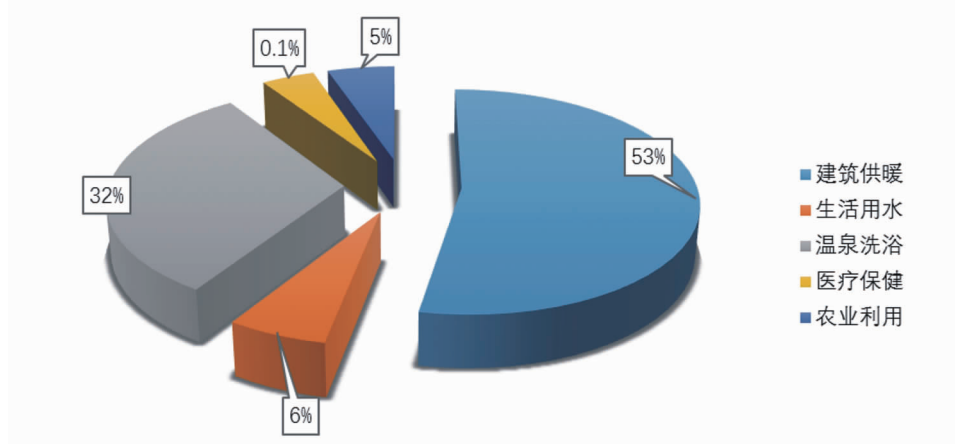


图 4 天津市 2015 年地热开发利用各用途效益比率图

Fig. 4 Plot showing proportion of economic benefits of each utilization of the exploited geothermal resources in 2015 in Tianjin

在小韩庄凸起上,集中着几对雾迷山组(Jxw)地热井与奥陶系(O)地热井组成的异层采灌系统。奥陶系(O)回灌井数量多,回灌量远远大于开采量,但水位降幅居高不下,且静水位埋深大于下覆热储层,小于上覆热储层;该区基本上不开采寒武系(ε)地热流体。在潘庄凸起上,虽然寒武系热储层开采和回灌井数量较少,但基本情况与上述奥陶系(O)热储层类似。说明两区雾迷山组(Jxw)热储层分别与奥陶系(O)热储层和寒武系(ε)热储层存在较好的水力联系。

在沧东断裂、白塘口西断裂和海河断裂附近,存在各热储层地热流体样的 δD 、 $\delta(^{18}O)$ 组成以及地热流体样的主要阴阳离子含量十分接近,其接近率达 50%,水化学类型相同,说明开启性断裂附近热储层之间连通性好,有较强水力联系^[4]。

在沧县隆起上存在区域性的各热储层间水力联系,具体范围尚不清楚。

建议:一是加强各热储层间水力联系的研究和评价,确定其分布范围和强度;二是在开凿地热井时,要科学确定异层地热井间距。

3.2 热储压力下降导致吊泵和产生地面沉降

现有地热回灌仅对热储层压力下降起到了减缓作用,未能改变所有热储层压力逐年下降趋势。明化镇组(Nm)热储层集中开采区位于中心城区,最大静水位埋深已大于 110 m,年最大降幅已超 4 m;馆陶组(Ng)热储层集中开采区位于武清区和滨海新区,最大静水位埋深已大于 125 m,年最大降幅已近 7 m;东营组(Ed)热储层开采井少,主要位于滨海新区,最大静水位埋深已近 70 m,年最大降幅大于 2

m;奥陶系(O)热储层集中开采区位于中心城区和东丽区,最大静水位埋深已达 140 m,年最大降幅已近 5 m;寒武系(ε)热储层开采井较少,最大静水位埋深已达 125 m,年最大降幅已达 2 m;雾迷山组(Jxw)热储层集中开采区位于中心城区和新四区,静水位埋深已大于 160 m,年最大降幅已近 13 m。

东营组(Ed)热储层和部分地区奥陶系(O)热储层,因热储条件较差,抽水时动水位埋深分别达到 128 m 和大于 180 m。

分布广泛和开采量较大的明化镇组(Nm)、馆陶组(Ng)和雾迷山组(Jxw)热储层,已形成区域性降落漏斗,降落漏斗范围逐年增大。以明化镇组(Nm)热储层为例,2012 年中心城区开始出现水位埋深大于 98 m 的漏斗(图 5),到 2015 年 98 m 级的漏斗范围覆盖了中心城区大部分地区(图 6)。南部平原区整体上形成了以中心城区为中心向外辐射的统一漏斗区。从开采和回灌量看,中心城区 2012 年—2015 年最大年开采量变幅在 $45 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右,回灌量很小。由此可见,明化镇组(Nm)热储层一直处于超采状态。

集中式开采造成的超采是热储层压力持续下降和水位降落漏斗形成的主要原因,热储层间水力联系引发或加剧了相邻热储层的压力下降。水位埋深的逐年加大将导致吊泵和出现地面沉降:天津地热开采井的泵室设置不一,上世纪开凿的地热井,泵室有的在 100 多米,极易产生吊泵现象,天津市环保院内供暖用地热开采井,已因水位下降引发吊泵,导致开采井报废,发生吊泵直接影响企事业单位正常生产或居民正常生活;新生界地层成岩程度差,特别

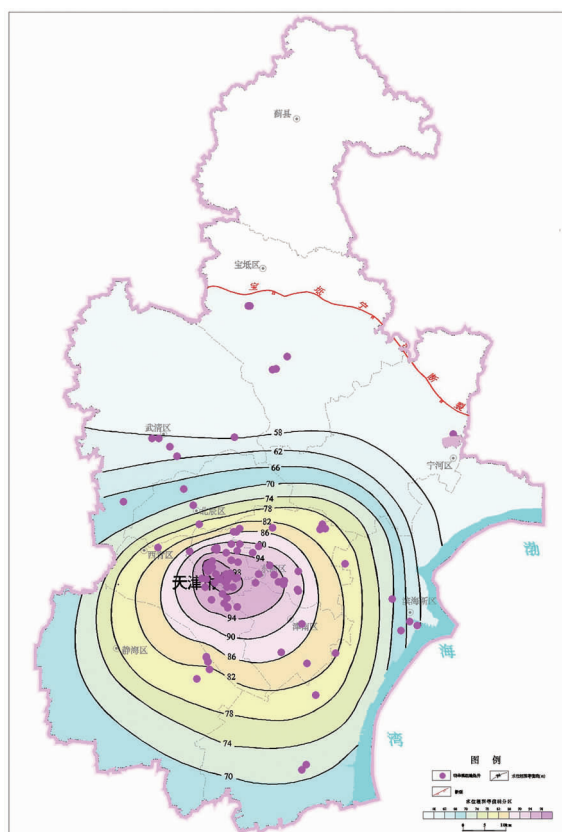


图 5 2012 年天津明化镇组热储层 20℃
液面静水位埋深等值线

Fig. 5 The burial depths contour of static water table of 20℃ Minhua geothermal layer in Tianjin in 2012

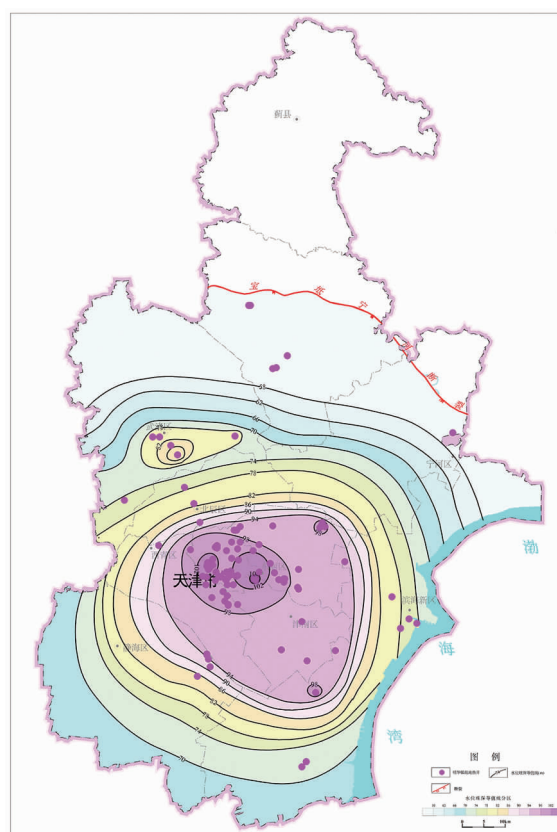


图 6 2015 年天津明化镇组热储层 20℃
液面静水位埋深等值线

Fig. 6 The burial depths contour of static water table of 20℃ Minhua geothermal layer in Tianjin in 2015

是明化镇组(Nm)地层松散,热储压力下降,孔隙水压力减小,会影响相邻弱透水层水动力场稳定,引起弱透水层水位下降,使弱透水层孔隙水压力减小,有效应力增加,导致弱透水层和含水层压缩变形,长期高强度开采将出现地面沉降。部分学者认为,天津地热资源开发已产生地面沉降。

建议:一是加紧对空白区地热资源的勘查和地热田跟踪评价,科学确定可开采资源量,为地热开发提供依据;二是在集中开采区控制开采量,加大回灌量,严格限制开凿地热开采井;三是按资源条件细化分区,调整地热井布局结构,科学确定各区开采量。

3.3 超标准排放造成资源浪费和热污染

地热资源集约利用程度较低,导致地热尾水排放温度居高不下,除采灌系统少有尾水排放外,单采系统的地热供暖尾水直接排放,排放温度为 20~50℃,多数在 30~45℃ 之间。2015 年总开采量为 $3\,884.52 \times 10^4 \text{ m}^3$,回灌量为 $1\,748.44 \times 10^4 \text{ m}^3$,按平均排放温度为 40℃ 和排放达标温度为 20℃ 计,排放的热量约 $0.18 \times 10^{16} \text{ J}$,相当于 $10.2 \times 10^4 \text{ t}$ 标准

燃煤热量,排放必然产生热污染。

建议:一是补建回灌井,升级单采系统成采灌系统;二是加大梯级利用的推广力度,降低直排尾水温度;三是调整各种用途地热流体开采比例。

3.4 回灌存在冷突破危险

地热回灌使得低温流体进入热储层,在回灌井附近形成低温区域。回灌间歇期,来自深部的热流作用使得降温的热储层逐步升温,直至温度场恢复到天然状态。如果来自深部的热能不足以在间歇期恢复温度场至天然状态,随着地热回灌的运行,低温区域将逐步扩大。H1 井为一眼雾迷山组(Jxw)热储层回灌井,其历年连续测温曲线(图 7)显示,热储层温度呈逐年下降趋势,以回灌井为中心的低温区域正在逐年扩大,回灌期即将开始的 2015 年 11 月初,热储层温度与天然温度场状态下热储层温度之差已大于 20℃。如果采灌井间距过小或相对位置与裂隙发育走向一致,极易造成冷突破,导致开采流体温度降低。

建议:一是对井采灌系统建设时,要考虑裂隙发

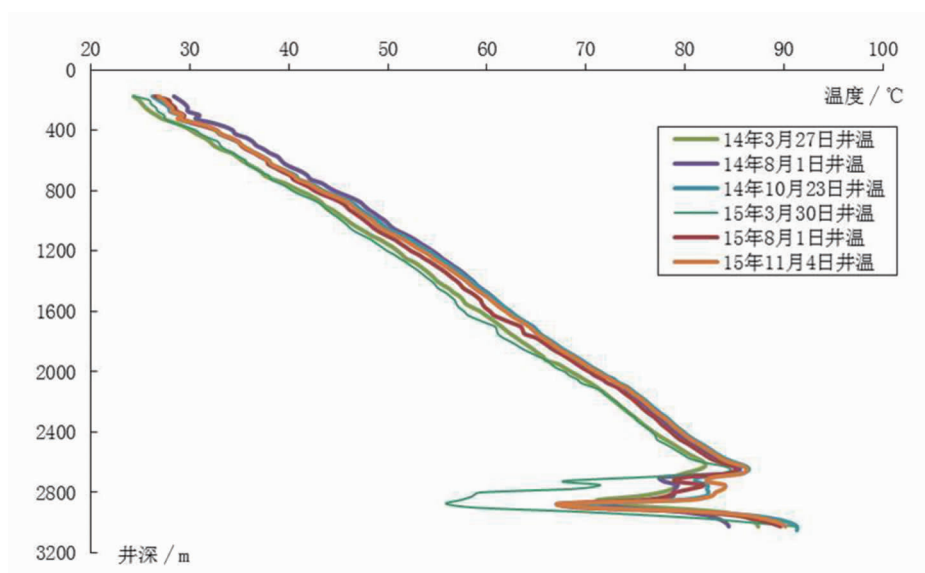


图7 H1 地热井历年测温曲线图

Fig. 7 H1's temperature curve for many years

育程度和方向;二是在地热井密度较大的集中开采区逐步建立统一的回灌系统;三是加强示踪试验、温度场模拟预测和监测,做到及时预警。

4 结语

(1)地热地质条件不清和开发布局的不合理,导致了大面积热储压力下降和水位降落漏斗的形成,水位的持续下降将引发地热开采井报废和出现地面沉降,应开展地热田跟踪评价、调整地热井布局、控制开采量和增加回灌量。

(2)地热资源的不合理利用造成了资源浪费和

环境污染,需加大推广集约节约技术力度。低温区域的逐年扩大应引起高度重视,要加强研究和监测,建立集中回灌系统。

(3)热储层间水力联系是未来地质研究的重要课题,为合理确定地热井间距提供依据。

参考文献:

- [1] 陈墨香. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 3-36.
- [2] 林黎, 高宝珠, 阮传侠, 等. 天津市地热资源调查评价与区划[R]. 天津: 天津地热勘查开发设计院, 2015: 38.
- [3] 田光辉, 蔡芸, 刘东林, 等. 天津市地热资源开发利用动态监测年报[R]. 天津: 天津地热勘查开发设计院, 2015: 24-29, 33-43.
- [4] 张芬娜, 贾志, 钱洪强, 等. 天津市中心城区及附近热储层间的水力联系[J]. 地质找矿论丛, 2015, 30(3): 448-455.

Development and utilization characteristics and problem analysis of the geothermal resource in Tianjin

LIN Wei, YU Yan, QIN Li-hong, KANG Nan

(*Tianjin Geothermal Exploration and Development-designing Institute, Tianjin 300250, China*)

Abstract: Tianjin is endowed with good geothermal condition and is abundant with the resources and considerable economic, social and environmental benefits have resulted from the geothermal production each year. However, unreasonable development method resulted in many problems. In the article, the author analyze the development and utilization situation and the existing problems and consider that hydraulic connection of different geothermal water layers and small interval between wells affect heavily the production. Unreasonable layout of wells, concentrated exploitation at some layers and low recharge rate have led to dramatic pressure drop of geothermal water layers and triggered pump lift and ground subsidence. Excessive disposal of geothermal water may probably cause the resource waste and heat pollution. Short distance of the exploitation well and recharge well and unreasonable layout of the wells will take risk of breakthrough of the recharged cold water into the geothermal layer. The counter measures are put forward.

Key Words: geothermal; thermallayer; exploitation layer; tail water; recharge rate; ground subsidence; Tianjin