

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201808029

基于示踪试验及动态数据的北京小汤山地区 地热资源量评价

杨亚军, 丁桂伶, 徐 巍, 李海京, 鲁 鹤, 王雨石, 张俊华, 王翊虹
(北京市地质工程勘察院, 北京 100048)

摘要:北京市地热资源丰富, 开发历史悠久, 用户众多。为科学合理评价地热资源潜力, 更好地可持续开发利用地热资源。结合实际开采利用情况, 充分考虑了回灌的影响, 并以小汤山热田详细勘察资料和长序列的监测数据为基础, 采用示踪试验和数值计算方法, 给出了典型地热井要保持 100 a 温度不下降可持续开发利用的地热流体资源量为 $340 \text{ m}^3/\text{h}$; 结合地热流体温度监测数据, 发现年均净开采量与年均水位下降成对数相关性, 且在保持地热流体温度不发生显著变化的前提下, 年均水位下降 2.0 m, 可以保障的最少年均可开采量为 $365.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。结合小汤山热田多年的开发利用资料和经验, 提出合理科学可持续的开发利用地热资源, 必须坚持“以热定采, 以灌定采”模式。

关键词: 地热资源; 示踪实验; 动态监测; 资源评价

中图分类号: P314

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)05-0196-05

Tracer test and geothermal resource quantity evaluation based on dynamic data in the Xiaotangshan area of Beijing

YANG Yajun, DING Guiling, XU Wei, LI Haijing, LU He, WANG Yushi, ZHANG Junhua, WANG Yihong
(Beijing Geological Engineering Survey Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: Geothermal resources are very rich in Beijing with a long development history and many user companies. In order to scientifically and rationally evaluate geothermal resources, the actual exploitation and utilization and the influence of recharge are fully considered. Based on the detailed survey data and the long series of monitoring data of the Xiaotangshan geothermal field, tracer tests are used to calculate the resources of a typical geothermal heating project in the Xiaotangshan area, and the available resources are estimated as $340 \text{ m}^3/\text{h}$ under the current temperature kept for 100 years. At the same time, the long-term dynamic monitoring data are used to analyze the whole thermal field in the Xiaotangshan area. The results show that the average annual net production is correlated with the average annual groundwater level decrease, and the geothermal resources are $365.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ while the annual groundwater level decline is controlled at 2.0 m. Combined with the development and utilization data and experience of the Xiaotangshan geothermal field for many years, it is considered that the reasonable and scientific development and utilization of geothermal resources must adhere to the mode of “fixed mining by heat and irrigated mining”.

Keywords: geothermal resources; tracer text; dynamic monitoring; resource evaluation

收稿日期: 2019-09-13; 修订日期: 2019-12-24

第一作者: 杨亚军(1968-), 男, 硕士, 高工, 主要从事地热资源勘察、资源量评价、监测预警及开发利用等工作。

E-mail: 460349858@qq.com

通讯作者: 丁桂伶(1982-), 女, 博士, 高工, 主要从事地热资源及泥石流灾害调查评价、动态监测及预警研究等工作。

E-mail: 06115242@bjtu.edu.cn

小汤山热田是北京地区最早开展地热资源量评价工作的地热田,自1958年的 0.6 km^2 ,一直到2004年的 86.5 km^2 。1971年,北京城区完成4眼地热井 30 km^2 的地热田资源量勘查评价工作。2001年,北京城区完成基82眼地热井 406 km^2 的地热田资源量评价,年储量达到 $6.70 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。同时,完成了李遂热田、良乡热田等其他地热田资源量的评价。在此基础上,分别在1900年、1999年、2005年采用热储法、比拟法、统计分析法等方法评价了全市的地热资源量,其中最近一次是为了编制《北京市2006—2020年地热资源可持续利用规划》进行了资源量评价,基于315眼地热井,对全市 2760 km^2 的地热资源进行了计算,认为北京年可开采量为 $3.470 \times 10^7 \text{ m}^3$,总量相当于 $2.14 \times 10^8 \text{ t}$ 标准煤的能量。然而,北京地区通过历时60余年的地热开发利用,发现资源评价仍存在问题,主要是已有的可开采地热水资源量及其所携带出的热量,并没有考虑地热流体回灌的影响。《地热资源勘查规范》中对地热资源评价周期要求:在地热开采阶段,资源量的更新和计算周期最好小于 $5 \text{ a}^{[1-2]}$ 。地热资源量的计算应随着勘查工作程度的不断提高及动态监测数据日益丰富完善,其精度越来越高。

本文通过示踪试验和长期动态监测数据对小汤山地区一处典型地热供暖项目和小汤山整个热田进行了资源量计算分析,得到了保持温度不变的条件下,典型地热井及热田的地热资源可开采量。

1 地热开发现状

小汤山热田是北京市10个热田中资源条件较好、开发利用较早,动态监测内容全面、监测时间序列最长,勘查资料完善,回灌量较大,供暖用户最多,研究程度最高的热田。从1956年开始进行地热勘查和开发,小汤山热田目前已有地热井100余眼,成井深度 $70 \sim 3500 \text{ m}$,开采热储主要为蓟县系和寒武系,出水温度 $40 \sim 70^\circ\text{C}$,单日出水量 $1000 \sim 2000 \text{ m}^3$ 。地热资源主要用于地热供暖、温室种植和温泉洗浴等,其中地热供暖的用户最多,地热水换热后尾水90%实现回灌。

小汤山地区北部为山区,南部被大型断裂截断,地热水主要赋存在蓟县系热储中,上下都有隔水层,因此可以视为一个均衡区^[3]。小汤山热田已有40多年的开采历史,主要开采的热储层是蓟县系雾迷山组,其次是蓟县系铁岭组和寒武系。从20世纪70年代初期开始,开采规模逐年增加,到20世纪80年代中期突破年均开采量 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。1990—2000年年均开采量大

于 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2000年开始实施回灌等措施控制,年均净开采量开始逐渐减少,2005年开采量已经下降到 $150 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以下。然而,从2007年开始随着区域经济的发展,地热温泉优势越来越突出,一些单位的地热用水规模不断扩大,年开采量达到 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$,2013—2016年突破 $360 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。年均水位变化与年均净开采量呈正相关,净开采量越大,水位降深越大,多年平均水位下降在 $1 \sim 2 \text{ m}$ 范围内,但2004—2007年由于净开采量的骤减,热储压力下降速度开始减缓,甚至出现回升现象。

2 基于示踪试验的典型地热井资源量评价

采用小汤山热田一处典型地热供暖项目示踪试验及动态监测数据,进行了回灌模式下地热资源可开采量计算及温度预测计算,最终提出了开采温度 100 a 不下降可持续开发利用的地热流体资源量^[4-5]。

2.1 地热井开发利用概况

该地热井地热利用模式是“两采一灌”,热储为蓟县系雾迷山组,开采量 $110 \text{ m}^3/\text{h}$,回灌量 $76 \text{ m}^3/\text{h}$,开采温度为 69° ,回灌温度为 30° ,回灌井距离两个开采井的距离分别为 $300, 500 \text{ m}$,其开发利用示意图见图1。该用户从2004年开始利用地热实施供暖,已有16a,由动态监测数据显示,地热井的水位没有下降,说明热储压力保持稳定,生产井温度也没有明显下降,说明回灌还没有对生产井产生影响^[6-7]。

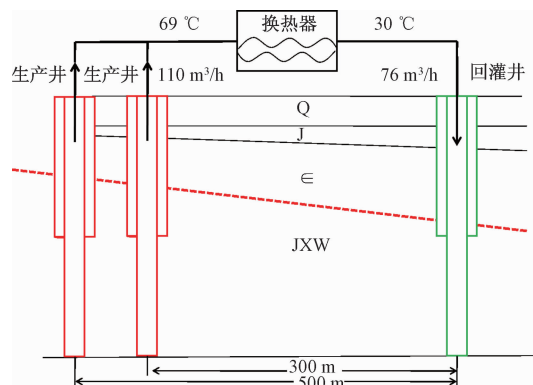


图1 典型地热井开发利用示意图

Fig. 1 Development and utilization diagram of a typical geothermal well

2.2 示踪试验

对回灌井投放碘化钾示踪剂,在开采井进行不同频率的取样,测试碘化钾的浓度^[8-9],历时106d,取样总数为752个,其中化验166个,测出碘离子浓度大于 0.02 mg/L 的样品为80个(表1)。由图2可以看出,1

号生产井在试验第 5 天,示踪剂从回灌井到达生产井,在第 34 天浓度达到了峰值 0.267 mg/L,之后开始下降,最后趋于平稳。2 号生产井在试验的第 5 天,示踪剂从回灌井到达生产井,且在第 32 d 浓度达到了峰值 0.338 mg/L,之后开始下降,最后趋于平稳。采用数值计算软件模拟计算,推断出这 2 口井之间存在着 3 条通道,计算得到通道长度、流速、弥散系数、通道截面积等参数(表 2,图 3)。

表 1 示踪试验取样结果
Table 1 Tracer tests results

井号	采灌井距/m	取样频率/(次·日 ⁻¹)	取样总数/个	化验总数/个	示踪离子检出数量/个	示踪剂到达的最早时间	检出浓度/(mg·L ⁻¹)	示踪剂浓度达到高峰的时间	检出浓度/(mg·L ⁻¹)
1#	300	2~24	369	81	42	示踪试验第 5 天	0.02	示踪试验第 34 天	0.267
2#	500	2~24	383	85	38	示踪试验第 5 天	0.02	示踪试验第 32 天	0.338

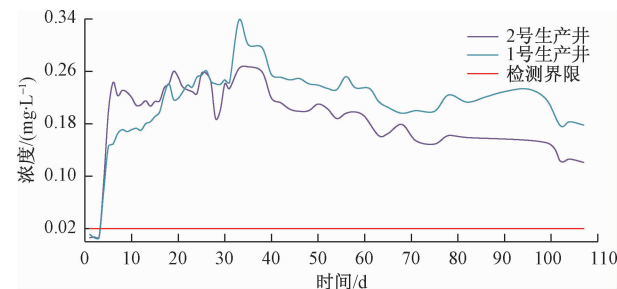


图 2 示踪试验浓度变化曲线
Fig.2 Tracer test concentration curve

表 2 示踪试验模拟计算结果
Table 2 Simulation results of the tracer test

通道	通道长度/m	流速/($\times 10^{-5}$ m·s ⁻¹)	弥散系数/($\times 10^{-2}$ m ² ·s ⁻¹)	通道截面积/m ²	回收率/%
1 号	300	3.14	1.49	332.5	48.4
2 号	500	9.38	6.27	68	29.8

2.3 可开采量计算

基于示踪试验数据及模拟计算结果,采用专业计算软件研究分析了 1 号和 2 号生产井开采量分别为 200 m³/h、500 m³/h 及 1 000 m³/h,回灌温度为 30°,100% 回灌的三种供暖方案条件下,生产井后期出水温度影响变化情况(图 4 和表 3)。

表 3 数值模拟计算结果
Table 3 Numerical simulation results

开采量/(m ³ ·h ⁻¹)	1 号生产井温度变化情况	2 号生产井温度变化情况
200	100 年不下降	100 年不下降
500	66 年开始下降	100 年不下降
1 000	34 年开始下降	55 年开始下降

进一步深入分析,绘制温度预测曲线,得出了该地热井要保持 100 a 温度不下降可持续开发利用的地热流体资源量为 340 m³/h。

3 基于长期动态监测数据的地热田资源量评价

小汤山热田是北京地区 10 个地热田中最早开

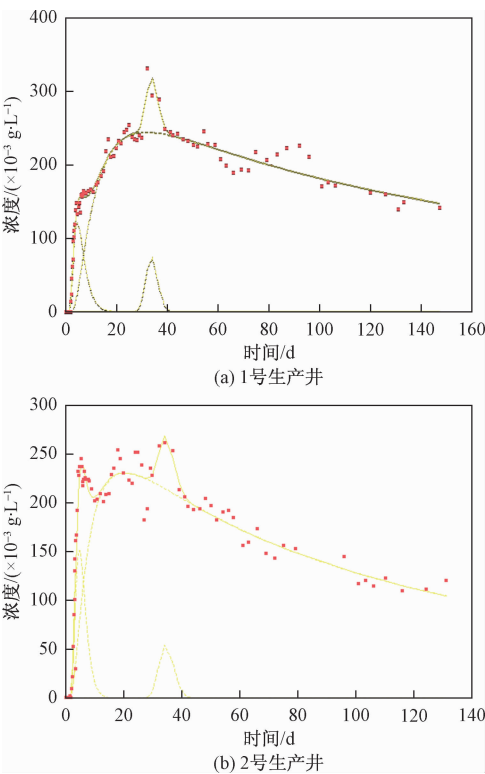


图 3 1 号和 2 号生产井通道模拟曲线
Fig.3 Channel simulation curve of the No.1 and No.2 production wells

始开发利用的热田,至今已经开发利用近二十年。本文通过收集小汤山热田自 1990—2015 年地热资源量开发利用监测数据,统计分析了地热资源平均开采量、平均回灌量和累计下降水位之间的关系,根据监测数据稳定性特征将 25 a 的监测数据分为 7 个阶段,并进一步对年平均净开采量、年均水位变化和单位降深净开采量进行了计算和绘制曲线(表 4 和图 5)^[10-11]。

根据曲线拟合发现多年平均净开采量和水位变化呈对数相关性,确定系数为 0.858:

$$y = -2.019\ln x + 9.8962 \tag{1}$$

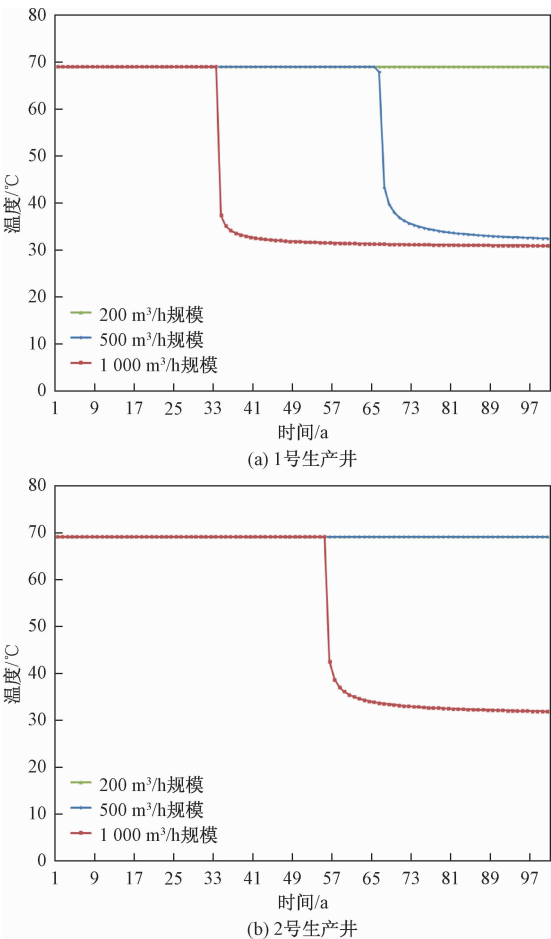


图 4 1 号和 2 号生产井温度预测曲线

Fig. 4 Temperature prediction curve of the No. 1 and No. 2 production wells

由式(1)可知,若要保持小汤山热田水位不下降,年平均可开采量为 $1.345 \times 10^6 \text{ m}^3$;若平均水位下降 0.5 m,年平均可开采量为 $1.724 \times 10^6 \text{ m}^3$;若平均水位下降 1.0 m,年平均可开采量为 $2.214 \times 10^6 \text{ m}^3$;若平均水位下降 2.0 m,年平均可开采量为 $3.651 \times 10^6 \text{ m}^3$;若平均水位下降 5.0 m,年平均可开采量为 $1.6036 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。但地热资源量不仅与地热流体的量有关,而且与地热流体的温度息息相关。

在小汤山热田整个开发利用阶段,仅 1990—2000 年小汤山热田年平均水位下降在 1.42 ~ 2.15 m,因此对该段时间内地热资源开发利用范围内的地面沉降、地裂缝、地震、地下水水质等地下水环境及周边地质环境进行了详细的调查和资料收集发现,小汤山热田在地热资源利用过程中,热储压力水位下降 2.0 m 时未发现任何地质环境问题。

地热资源补给包括地热流体的补给和热量的补给,通过多年长期的监测显示小汤山地区在目前开采条件下,地热流体温度未发生显著变化。因此,基于长期动态监测数据可以得出小汤山热田保持地热流体温度不发生显著变化的前提下,年均水位下降 2.0 m,可以保障的最少可开采量为 $3.651 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

4 结论

(1)基于采灌平衡条件,采用示踪试验对小汤山地区典型地热井开采资源量进行了计算,得出该地热井要保持 100 a 温度不下降可持续开发利用的地热流

表 4 小汤山地区热田多年动态监测数据统计值

Table 4 Statistical and analytical results of the multi-year dynamic monitoring data of the geothermal field in the Xiaotangshan area

阶段/年	年均开采量/ ($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	年均回灌量/ ($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	年均净开采量/ ($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	累计下降 水位/m	年均水位 变化/m	单位降净开采量/ ($\times 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)
1990—1993	328	0	318	23.65	-1.42	
1994—1995	312	0	312	29.61	-2.15	145
1996—2000	376	0	376	38.6	-2.09	180
2001—2004	285	15	270	43.98	-1	270
2004—2007	193	92	101	43.85	0.69	246
2008—2009	303	104	199	45.2	-1.31	
2013—2015	361	139	222	54.7	-0.85	261

体资源量为 $340 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

(2)根据多年连续的动态监测数据对小汤山热田资源量进行了分析,发现年均净开采量与年均水位下降成对数相关性。

(3)结合地热流体温度监测数据,分析认为小汤山热田保持地热流体温度不发生显著变化的前提下,年均水位下降 2.0 m,可以保障的最少年均可开采量为 $3.651 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

结合小汤山热田多年的开发利用资料和经验,提出如果合理科学可持续的开发利用地热资源,必须坚

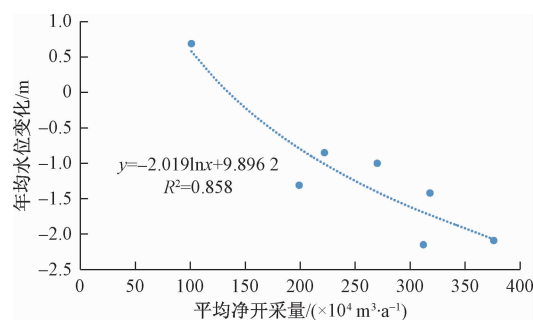


图5 小汤山地区热田多年平均净开采量与水位变化曲线

Fig.5 Curve of average annual net exploitation and groundwater level changes in the geothermal field of the Xiaotangshan area

持“以热定采,以灌定采”模式。

参考文献 (References):

- [1] 北京市国土资源局. 北京市地热资源 2006~2020 年可持续利用规划[R]. 北京:北京市国土资源局, 2006. [Beijing Municipal Bureau of Land and Resources. Sustainable utilization planning of geothermal resources in Beijing during 2006—2020 [R]. Beijing: Beijing Municipal Bureau of Land and Resources, 2006. (in Chinese)]
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地热资源地质勘查规范:GB/T 11615—2010[S]. 北京:中国标准出版社, 2010. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Geologic exploration standard of geothermal resources: GB/T 11615—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)]
- [3] 吴基文,王广涛,翟晓荣,等. 淮南矿区地热地质特征与地热资源评价[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2566—2578. [WU J W, WANG G T, ZHAI X R, et al. Geothermal geological characteristics and geothermal resources evaluation of Huainan mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2566—2578. (in Chinese)]
- [4] AXELSSON G, FLOVENZ O G, HAUKSOTTIR S, et al. Analysis of tracer test data, and injection-induced cooling, in the Laugaland geothermal field, N-Iceland [J]. Geothermics, 2001, 30(6): 697—725.
- [5] 王树芳,刘久荣,林沛,等. 岩溶热储回灌实验与示踪试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(6): 129—133. [WANG S F, LIU J R, LIN P, et al. A study of reinjection experiment and tracer test in a karst geothermal reservoir [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(6): 129—133. (in Chinese)]
- [6] 杨义栋,李芳芳,张瀚予. 焦作—商丘断裂永城段地热资源评价[J]. 能源与环境, 2020, 42(1): 127—131. [YANG Y D, LI F F, ZHANG H Y. Evaluation of geothermal resources in Yongcheng section of Jiaozuo-Shangqiu Fault[J]. China Energy and Environmental Protection, 2020, 42(1): 127—131. (in Chinese)]
- [7] 任光远. 基于热储法的银川盆地地热资源评价[J]. 环境与发展, 2019, 31(10): 30—31. [REN G Y. Geothermal resource evaluation of Yinchuan Basin based on thermal storage method [J]. Environment and Development, 2019, 31(10): 30—31. (in Chinese)]
- [8] 赵志宏,刘桂宏,谭现锋,等. 基于等效渗流通道模型的地热尾水回灌理论模型[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(3): 158—164. [ZHAO Z H, LIU G H, TAN X F, et al. Theoretical model of geothermal tail water reinjection based on the equivalent flow channel model [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(3): 158—164. (in Chinese)]
- [9] 杨杨,赵良杰,苏春田,等. 基于 CFP 的岩溶管道流溶质运移数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 51—57. [YANG Y, ZHAO L J, SU C T, et al. A study of the solute transport model for karst conduits based on CFP [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(4): 51—57. (in Chinese)]
- [10] 李元杰. 地热回灌示踪技术及热储模拟实验研究[D]. 北京:中国地质科学院, 2010. [LI Y J. Study on geothermal reinjection of tracer technology and simulation of thermal energy storage [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2010. (in Chinese)]
- [11] 刘凯,叶超,刘玉忠,等. 北京地区地热资源潜力区划[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 551—560. [LIU K, YE C, LIU Y Z, et al. Regionalization of geothermal resource potential in Beijing[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 551—560. (in Chinese)]