



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.025

李卓, 张光辉, 王茜, 等. 冀中平原地热水资源变化特征与可持续利用性[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 150-154. LI Zhuo, ZHANG Guanghui, WANG Qian, et al. Variation characteristics and sustainable utilization of geothermal water resources in Central Hebei Plain: A case study of Xinji geothermal field[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 150-154. (in Chinese)

冀中平原地热水资源变化特征与可持续利用性

——以辛集地热田为例

李卓¹, 张光辉², 王茜², 田言亮², 严明疆²

(1. 河北省地矿局 水文工程地质勘查院, 石家庄 050021; 2. 中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

摘要: 针对冀中平原辛集地区地热水开发利用中出现的地下水位大幅下降问题, 通过研究1999年以来该地热田地下水位的年际及年内变化特征、趋势和地下水位降幅变化规律, 及其与上游山区年降水量之间关系, 结果表明: (1) 辛集地热田地下水水位下降幅度, 不只是随着地热水开采量变化而变化, 还存在其他影响因素。有些年份, 开采量增大, 而地下水位的降幅却减小, 表明该地热田存在外域补给水源的补给。(2) 通过该地热田地下水水位下降幅度与上游山区年降水量之间关系分析表明, 随着上游山区年降水量明显增大(或减小), 该区地下水水位降幅呈减小(或增大)特征, 辛集地热田地热水资源具有一定的更新补给能力。(3) 目前该地热田地下水资源开发利用已处于超采状态, 急需压采或人工增大补给等措施。

关键词: 冀中平原; 地热水资源; 地下水位; 变化特征; 年降水量

中图分类号: P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0150-05

Variation characteristics and sustainable utilization of geothermal water resources in Central Hebei Plain: A case study of Xinji geothermal field

LI Zhuo¹, ZHANG Guanghui², WANG Qian², TIAN Yanliang², YAN Mingjiang²

(1. Hebei Institute for Hydrogeological and Engineering Geological Exploration, Shijiazhuang 050021, China;

2. The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: In view of the sharp decline of groundwater level during the development and utilization of geothermal water resources at Xinji county in Central Hebei Plain, this paper studied the inter-annual and annual variation characteristics and trend of the groundwater level and the variation pattern of the water level decline in the geothermal field since 1999, as well as their relationship with the annual precipitation in the upstream mountains. The results showed that: (1) As geothermal water yield increases, the groundwater level of the geothermal field declines, and the growth of groundwater level at the non-heating period is decreasing year by year. (2) The development and utilization of the geothermal field is not simply consumption of groundwater storage resources. The groundwater level decline range is not only related to the amount of geothermal water yield, but also to the annual precipitation in the upstream mountains. As the annual precipitation increases (decreases), the decline of groundwater level decreases (increases). (3) The groundwater resources of the geothermal field have already been over-exploited. It is urgent to control the exploitation or increase the supply.

Key words: Central Hebei Plain; geothermal water resources; groundwater level; variation characteristics; annual precipitation

收稿日期: 2016-05-24 修回日期: 2016-09-14 网络出版时间: 2017-01-04
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170104.0924.007.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172214); 地质调查项目(12120115049701)

Fund: National Natural Science Foundation of China(41172214); Geological Survey Project(12120115049701)

作者简介: 李卓(1988-), 男, 河北石家庄人, 主要从事水文地质以及地热资源方面研究。E-mail: lzlixiaoyao@126.com

通讯作者: 张光辉(1959-), 男, 辽宁沈阳人, 研究员, 博士生导师, 主要从事区域水循环演化和地下水可持续利用研究。E-mail: Huanjing59@163.com

冀中平原(河北平原的保定-石家庄-邯郸-衡水一带)地热水资源开发利用近 20 年,倍受关注。该平原地热水资源比较丰富,但是由于对该区地热水资源形成和变化成因认识不足,且开发利用引起地热水位大幅下降。

有关地热资源可持续利用问题研究较多^[1-13]。董华松等^[2]利用遗传算法实现了对地形地貌复杂区地热资源的预测,高志娟等^[3]曾对华北地区地热资源更新能力进行研究。刘杰等^[4]、王曦等^[5]和高凤栋等^[6]先后探讨了天津地热资源合理开发及可持续利用问题。李金鹿等^[7]提出了河北省地热开发利用模式,包艳等^[8]认为浅层地热开发利用需要开展人工回灌,可以提高可持续利用能力。周亚醒^[9]提出,浅层地热资源开发利用需要开展适宜性评价。段景春^[10]、张金华等^[11]、陈秀忠等^[12]和周总瑛等^[13]从不同角度分别提出了浅层地热资源合理开发利用建议。王浩等^[14]认为,地热资源开发对地下水环境具有一定影响。自然条件下,地下水系统中水位年际与年内动态变化同当地气象要素特别是大气降水密切相关。在地下水、地热水资源富集的动断裂带及相邻地带,水位动态常叠加有“短周期小型波状起伏”的微动态^[15]。人类历史的发展对地下水环境演化产生了明显影响,地下水资源的补给机制、流场特征和水化学组分等受人类活动的影响发生改变,逐渐由单纯的自然资源转变为带有社会属性的自然资源^[16-18]。目前,地下热水资源主要研究方法有:水文地球化学模拟、氦气测量技术应用、综合物探和高频大地电磁法,以及反射波二维地震法等^[1-15]。

本文以冀中平原辛集地区地热田为例,针对该地热田开发利用中出现地下水位大幅下降的属性及开发利用潜力问题,依据作者在该区完成的地热资源调查评价项目获取的资料作为基础,通过该地热田地下水位年际、年内变化特征、趋势和地下水位降幅变化规律,以及它们与其上游山区年降水量之间关系的研究,对地热田开发利用中出现地下水位大幅下降的特征及可持续利用性进行如下探讨。

1 研究区概况

冀中平原辛集地区位于石家庄市东 65 km 处,北界与深泽、安平县接壤,东界与深州市为邻,南界与冀州、宁晋县相接,西界与晋州市毗连,全区总面积 951 km²,总人口 61.6 万。辛集地势平坦,春、夏、秋、冬四季分明,年均气温 12.5 ℃,一月份平均温度-3.9 ℃。

辛集地热田是华北地区发现并开发利用较早的

孔隙型地热田,地热水主要取自新近系馆陶组,补给区位于西部太行山的滹沱山区,距辛集地热田的水平距离约 170 km。该地热田正在利用的开采井 22 眼,其中开发利用较早的辛热 1 井、辛热 2 井是利用石油废弃井改造而成。这些地热开采井的井深介于 1 410~3 560 m,井口水温介于 57 ℃~64 ℃。根据 2014 年 11 月份监测结果,该地热田的地下水水位埋深介于 76~81.3 m,热水开采量 1 872~3 120 m³/d,供暖面积 84.56 万 m²。

2 开发利用中地热水动态特征与趋势

2.1 年际变化

辛热 1 井是该区地热水最早的开采和监测井,2000 年该井的地下水位埋深与周围地热井水位埋深近同,初始水位埋深仅 10.0 m。随着该地热田开采井数量的不断增加,地热水年开采量也不断增大,至 2014 年开采量达 285.02 万 m³/a,累计开采量 2 151.94 万 m³/a。同期,辛热 1 井的地下水位埋深下降至 81.3 m,年均降幅 5.1 m(表 1)。

表 1 辛集地热田地热水开采量及地下水位变化特征

Tab. 1 Variation characteristics of the yield and the groundwater level of Xinji geothermal field

年份	开采井数 /眼	年开采量 /(万 m ³ ·a ⁻¹)	累计开采 量/万 m ³	地下水位/m	
				埋深	年降幅
1999	0	0	0	10.0	0
2000	2	17.87	17.87	12.2	2.2
2001	4	35.12	52.99	14.8	2.6
2002	4	35.12	88.11	17.0	2.2
2003	5	63.37	151.48	19.5	2.5
2004	6	75.82	227.30	22.0	2.5
2005	8	108.11	335.41	28.2	6.2
2006	9	110.23	445.64	33.5	5.3
2007	12	144.41	590.05	35.2	1.7
2008	12	147.49	737.54	42.1	6.9
2009	12	146.97	884.51	48.9	6.8
2010	13	172.20	1 056.71	54.7	5.8
2011	17	240.66	1 297.37	58.3	3.6
2012	20	276.45	1 573.82	66.4	8.1
2013	21	293.10	1 866.92	70.4	4.0
2014	22	285.02	2 151.94	81.3	10.9

备注:年开采量是指从上一供暖期开始至当年供暖期开始之前开采量;水位埋深为每年 11 月份辛热 1 井监测数据。

从图 1 可见,辛集地热田的地热水年开采量呈增大趋势,地下水位埋深不断加大,水位年降幅也呈增大特征(表 1)。在 2005 年之前,该区地热水水位的年降幅小于 2.61 m,对应地热水年开采量不足 80 万 m³。在 2005 年-2010 年期间,地热水水位的年降幅由 2004 年的 2.50 m 增大为 2010 年的 5.8 m,

期间最大年降幅达 6.9 m(2008 年), 对应地热水年开采量从 2004 年的 75.82 万 m³ 增大至 2010 年的 172.20 万 m³(表 1)。

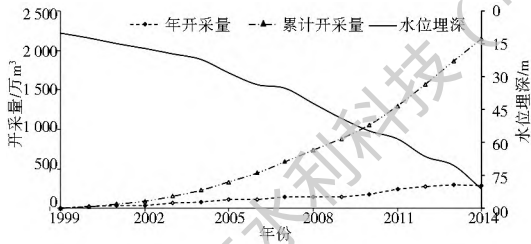


图 1 辛集地热田地热水开采量及地下水水位埋深年际变化特征

Fig. 1 Interannual variation characteristics of the yield and the groundwater level depth of Xinji geothermal field

虽然 2008 年地下水位降幅是 2005 年-2010 年期间的最大降幅, 但是其对应的地热水年开采量却小于 2010 年的开采量(172.20 万 m³)。2005 年-2010 年期间最小的地下水位年降幅仅 1.7 m(2007), 但对应的地热水年开采量 144.41 万 m³ 大于 2005 年的地热水开采量, 2005 年地下水位降幅为 6.2 m(表 1)。

在 2011 年-2014 年期间, 该地热田地热水年开采量继续增大, 由 2010 年的 172.20 万 m³ 增大至 285.02 万 m³, 增加 65.52%。同期的地下水位年降幅从 2010 年的 5.5 m 增大为 10.9 m。期间, 地热水水位较大的年降幅 8.1 m(2012 年), 对应地热水年开采量 276.45 万 m³; 最小的水位年降幅 3.6 m(2011 年), 对应地热水年开采量 240.66 万 m³(表 1)。在 2011 年-2014 年期间, 该地热田最大的年开采量是 2013 年的 293.10 万 m³, 对应的地下水位年降幅 4.0 m。

从上述分析可见, 辛集地热田地热水水位下降

表 2 辛集地热田年内各月份的地热水开采量及地下水水位埋深变化特征

Tab. 2 Variation characteristics of the monthly yield and groundwater level depth of Xinji geothermal field

年份	月开采量/万 m ³												水位埋深/m												3-5 月份 地下水 升幅/m	6-11 月 份地下 水位升 幅/m	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
2009	3.1	2.7	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	3.0	108.0	118.1	113.1	87.2	77.6	66.8	61.5	60.4	57.0	55.4	51.7	93.2	35.5	25.9
2010	3.1	2.8	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	3.0	114.5	119.3	116.2	88.1	77.1	70.5	65.9	61.8	59.0	56.9	55.2	89.6	39.1	21.9
2011	3.2	2.8	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	3.1	118.7	122.5	119.0	90.6	81.2	74.4	70.8	67.6	65.1	63.5	61.5	106.4	37.8	19.7
2012	3.3	3.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	3.1	122.8	124.8	123.3	93.1	84.4	78.6	75.9	73.4	71.3	70.1	68.8	113.3	38.9	15.6
2013	3.3	3.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	3.3	127.0	127.6	125.5	95.7	88.2	82.7	81.0	79.2	77.5	76.8	76.1	121.2	37.3	12.1

3 地热水资源变化特征及其与上游山区降水量之间关系

3.1 地热水资源变化特征

从图 1 和表 1 可见, 1999 年以来辛集地热田地

热水的主要影响因素, 不仅是地热水开采量变化影响, 还存在其他影响因素, 这一因素对该地热水具有一定的补给作用。

2.2 年内变化

从辛集地热田 2009 年-2013 年期间的各月份地热水开采量及对应的地下水位埋深来看, 地下水水位的变化幅度与对应的热水开采量大小之间密切相关(图 2)。每年的 11 月至来年的 1 月份, 地热水的月开采量逐月增大, 对应地下水位埋深急剧增大, 降幅达 58.8~67.6 m。在每年的 1 月-3 月, 随着地热水的月开采量逐月减少, 对应地下水位埋深呈现缓慢减小, 升幅介于 1.5~3.5 m。当每年 4 月份停止开采地热水之后, 4 月-5 月份的地下水位累计升幅 35.5~39.1 m, 地热水水位呈现快速上升过程。进入雨季之(6 月份)后, 至当年取暖之前(11 月份), 地下水位仍然不断上升, 升幅介于 12.1~25.9 m。但是, 这一期间的地下水位上升幅度呈逐年变小趋势(图 2 和表 2)。

从上述分析可见, 在停止开采地热水之后, 直至 11 月份再度开采地下水热水为止, 该区地热水水位持续上升, 并结合其年际变化特征分析, 这不是单纯的开采之后恢复性上升, 应存在一定的补给条件。

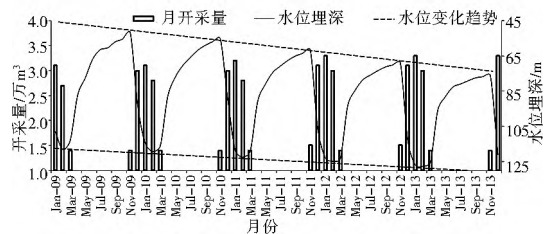


图 2 辛集地热田地热水各月开采量及地下水水位年内变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of the monthly yield and groundwater level of Xinji geothermal field

热水的年开采量是逐年增大的。但是, 每年地下水位的下降幅度不是持续增大。例如 2013 年的地热水年开采量是过去十几年中最大值, 即 293.10 万 m³/a, 但是对应的地下水位年降幅仅 4.0 m, 小于 2005 年(开采量 108.11 万 m³, 年降幅 6.2 m), 也小

于2010年(开采量 172.20 万m^3 ,年降幅 5.8 m)。2005年、2010年的地热水开采量分别比2013年开采量小 63.11% 和 41.25% 。如果该地热田没有可更新的水源补给,只是消耗地下水的储存资源,那么该地热田地下水位的下降幅度应是呈现随着地热水开采量增加而不断增大的特征。

3.2 地热水资源与上游山区降水量之间关系

采用1999年以来辛集地热田每年开采期的地下水位降幅与对应开采量之比(记作 S_g ,单位 $\text{cm}/\text{万m}^3$)和地下水位的年降幅,分别与该地热田所在地下水系统上游山区的年降水量进行关系分析,发现该地热田地下水位降幅的大小与上游山区年降水量变化之间存在一定相关性,尤其是 S_g 值变化与上游山区年降水量之间存在明显的互动性(图3)。例如2001年上游山区的年降水量仅 285 mm ,对应的单位数量开采量条件下地下水位降幅达 $7.39 \text{ cm}/\text{万m}^3$;2005年上游山区的年降水量 466 mm ,对应的 S_g 值 $5.73 \text{ cm}/\text{万m}^3$ 。而当2007年、2011年降水量明显增大,即年降水量分别达 645 mm 和 632 mm ,对应的 S_g 值明显减小,分别为 $1.18 \text{ cm}/\text{万m}^3$ 和 $1.49 \text{ cm}/\text{万m}^3$ 。由此可见,辛集地热田地热水资源具有一定的更新补给能力。

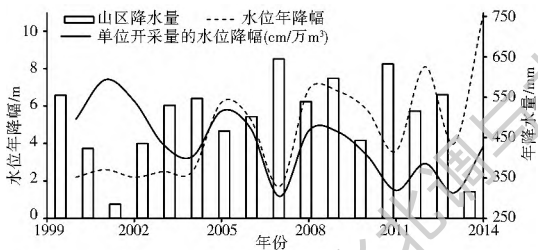


图3 辛集地热田地下水位降幅与上游山区年降水量之间互动特征

Fig. 3 Interaction between the groundwater level decline in Xinji geothermal field and annual precipitation in upstream mountains

从图4可见,辛集地热田单位开采量下地下水位降幅(S_g)与该地热田所在地下水系统上游山区的年降水量之间存在一定相关性。按两者直线相关关系式分析,降水量减少 100 mm ,该地热田单位开采量下地下水位降幅(S_g 值)增大 1.67 cm 。当上游山区年降水量不小于 753.6 mm 时, S_g 值趋于零。换言之,该地热田地下水热水开采量不大 $293 \text{ 万m}^3/\text{a}$,上游山区年降水量大于 754 mm 条件下,该地热田地下水位可处于稳定状态。若以上游山区多年平均降水量(509.2 mm)作为约束条件,则只有地下水热水开采量小于 $133.8 \text{ 万m}^3/\text{a}$ 时,该地热田地下水位才能处于稳定状态。相对上游山区多年平均降

水量条件下的地下热水可开采量,近5年平均地热水开采量的年均超采量为 $119.7 \text{ 万m}^3/\text{a}$ 。由此可见,按现状年开采量水平,该地热田开发利用不可持续,合理利用的年开采量不应大于 $133.8 \text{ 万m}^3/\text{a}$ 。

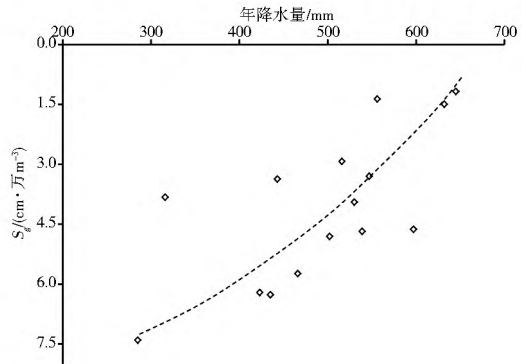


图4 研究区地热田单位开采量下水位降幅与上游山区年降水量之间相关关系

Fig. 4 Relationship between the water level decline per unit yield in the studied geothermal field and the annual precipitation in the upstream mountains

4 结语

(1) 辛集地热田地下水水位下降幅度,不只是随着地热水开采量变化而变化,还存在其他影响因素。有些年份,开采量增大,而地下水位的降幅却减小,表明该地热田存在外域补给水源的补给。

(2) 通过该地热田地下水位下降幅度与上游山区年降水量之间关系分析表明,随着上游山区年降水量明显增大(或减小),该区地下水位降幅呈减小(或增大)特征,辛集地热田地热水资源具有一定的更新补给能力。

(3) 目前该地热田地下水资源开发利用已处于超采状态,每年6月-11月的地下水位升幅逐年减小,表明该区地热水资源难以可持续利用,需压采或人工增大补给等措施。

参考文献(References):

- [1] 李悦,关铨.我国地热资源开发利用优势对比分析[J].水文地质工程地质,2011(6):139-141. (LI Yue, GUAN Xin. A contrast research of utilization advantage of geothermal resources in China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011(6): 139-141. (in Chinese))
- [2] 董华松,黄文辉.利用遗传算法优化的小波神经网络实现地热水资源预测[J].资源与产业,2014,16(3):101-106. (DONG Hua song, HUANG Wen hui. Prediction of geothermal resources by means of wavelet neural network optimized by genetic algorithm[J]. Resources and Industries, 2014, 16(3): 101-106. (in Chinese))
- [3] 高志娟,李书恒.华北地区地热资源更新能力研究[J].科技视

- 界, 2014(34): 73-74. (GAO Zhi juan, LI Shi heng. The renewable capability in geothermal water in North China[J]. Science and Technology Vision, 2014, (34): 73-74. (in Chinese))
- [4] 刘杰, 宋美钰, 田光辉. 天津地热资源开发利用现状及可持续发展利用建议[J]. 地质调查与研究, 2012, 35(1): 67-73. (LIU Jie, SONG Mei yu, TIAN Guang hui. Development situation of the geothermal resources and suggestion on sustainable development utilization in Tianjin[J]. Geological Survey and Research, 2012, 35(1): 67-73. (in Chinese))
- [5] 王曦, 靳宝珍, 杨永江, 等. 天津市宝坻区地热资源开发利用对策[J]. 地下水, 2012, 34(4): 65-67. (WANG Xi, JIN Bao zhen, YANG Yong jiang, et al. Utilization and development project of geothermal resources in Baodi area, Tianjin[J]. Groundwater, 2012, 34(4): 65-67. (in Chinese))
- [6] 高凤栋, 展民晓. 对天津市地热资源科学开发利用的思考[J]. 中国国土资源经济, 2013(12): 30-32. (GAO Feng dong, ZHAN Min xiao. Thoughts on scientific development and utilization of geothermal resources in Tianjin[J]. Natural Resource Economics of China, 2013(12): 30-32. (in Chinese))
- [7] 李金鹿, 陈安国. 河北省地热开发利用模式分析[J]. 中国国土资源经济, 2013(8): 28-31. (LI Jin lu, CHEN An guo. Analysis on geothermal exploitation and utilization pattern in Hebei province[J]. Natural Resource Economics of China, 2013(8): 28-31. (in Chinese))
- [8] 卮艳, 赵长荣, 胡云状, 等. 廊坊地区浅层地热开发前景及回灌试验[J]. 地质调查与研究, 2012, (4): 310-314. (NIE Yan, ZHAO Chang rong, HU Yun zhuang, et al. Groundwater recharge experiments for shallow geothermal energy development[J]. Geological Survey and Research, 2012, 35(4): 310-314. (in Chinese))
- [9] 周亚醒. 鲁西地区浅层地温能地热地质条件与开发利用适宜性评价[J]. 山东国土资源, 2015, 31(8): 45-49. (ZHOU Ya xing. Geological conditions of geothermal and suitability evaluation on development and utilization of shallow geothermal energy in Luxi area[J]. Shandong Land and Resources, 2015, 31(8): 45-49. (in Chinese))
- [10] 段景春. 地热资源利用的开发效应和对策[J]. 创新科技, 2013(8): 90-91. (DUAN Jing chun. Utilization effect and protection project of China geothermal resources[J]. CHUANGXINKEJI, 2013(8): 90-91. (in Chinese))
- [11] 张金华, 魏伟, 杜东, 等. 地热资源的开发利用及可持续发展[J]. 中外能源, 2013, 18(1): 30-35. (ZHANG Jin hua, WEI Wei, DU Dong, et al. The development, utilization and sustainable development of geothermal resources[J]. Sino Global Energy, 2013, 18(1): 30-35. (in Chinese))
- [12] 陈秀忠, 陈洪波, 刘忠, 等. 浅层地热资源的开发与利用[J]. 华北科技学院学报, 2014, 11(10): 23-27. (CHEN Xiuzhong, CHEN Hong bo, LIU Zhong, et al. Development and utilization of shallow geothermal resources[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2014, 11(10): 23-27. (in Chinese))
- [13] 周总瑛, 刘世良, 刘金侠. 中国地热资源特点与发展对策[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1210-1221. (ZHOU Zongying, LIU Shir liang, LIU Jin xia. Study on the characteristics and development strategies of geothermal resources in China[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7): 1210-1221. (in Chinese))
- [14] 王明章, 王诗扬. 晚近期活动断裂带的地下水微动态特征及研究意义[J]. 贵州地质, 2013, 30(4): 293-296. (WANG Ming zhang, WANG Shi yang. Micro behavior characteristics and study significance of groundwater in active fractural zone in Cenozoic[J]. Guizhou Geology, 2013, 30(4): 293-296. (in Chinese))
- [15] 王浩, 赵季初. 鲁西北平原区地热资源开发对地下水环境的影响[J]. 山东国土资源, 2015, 31(7): 36-39. (WANG Hao, ZHAO Ji chu. Effect of geothermal resources exploitation to groundwater environment in Northwestern Plain in Shandong province[J]. Shandong Land and Resources, 2015, 31(7): 36-39. (in Chinese))
- [16] 张光辉, 严明疆, 杨丽芝, 等. 地下水可持续开采量与地下水功能评价的关系[J]. 地质通报, 2008, 27(6): 875-881. (ZHANG Guang hui, YAN Ming jiang, YANG Li zhi, et al. Relationship between the groundwater sustainable yield and groundwater function assessments[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(6): 875-881. (in Chinese))
- [17] 张宗祜, 施德鸿, 沈照理, 等. 人类活动影响下华北平原地下水环境演化与发展[J]. 地球学报, 1997, (4): 291-294. (ZHANG Zong hu, SHI De hong, SHEN Zhao li, et al. Evolution and development of groundwater environment in North China Plain under human activities[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997, 18(4): 291-294. (in Chinese))
- [18] 费宇红, 张兆吉, 张凤娥, 等. 华北平原地下水位动态变化影响因素分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(5): 538-541. (FEI Yu hong, ZHANG Zhao ji, ZHANG Feng e, et al. Factors affecting dynamic variation of groundwater level in North China Plain[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(5): 538-541. (in Chinese))