

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.03.004

地下水开采引起水质变化的机理 ——以北京怀柔应急水源地为例

杨楠^{1,2}, 周俊³, 李世君³, 潘懋^{1,2}

(1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;
3. 北京市地质工程勘察院, 北京 100048)

摘要:为探究北京怀柔应急水源地地下水开采引起水质变化的机理,依据实测水位、水质监测资料,对水源地水质状况及开发利用地下水对水质的影响及原因进行了分析。结果表明,怀柔应急水源地地下水由于长期大量开采,导致地下水位下降并引起水质变化:①补给水源入渗途径变长,淋滤作用时间增加;②潜水越流补给承压水。基于以上结论,根据水位、水质直接关系式预测 2012—2014 年怀柔应急水源地地下水水位、水质情况,建议南水北调工程的水资源进京后对怀柔应急水源地采取必要的停采、回灌措施,以保障首都的供水安全。

关键词:地下水开采;水质变化;供水保障;怀柔应急水源地;北京市

中图分类号:S273.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2013)03-0015-04

Mechanism of water quality variation caused by groundwater exploitation: A case study of Huairou emergency water source area in Beijing

YANG Nan^{1,2}, ZHOU Jun³, LI Shijun³, PAN Mao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Peking University, Beijing, 100871, China;
2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;
3. Beijing Institute of Geological and Prospecting Engineering, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to investigate the mechanism of water quality variation caused by groundwater exploitation in the Huairou emergency water source area in Beijing, we analyzed the water quality situation and the effect of groundwater exploitation on the water quality and its causes based on monitoring water level and water quality data. The results show that long-term excessive exploitation of the local groundwater leads to a drop of the water table and the variation of water quality: (1) the length of the infiltration path of recharge water gets longer, leading to an increase of eluviation time, and (2) the phreatic water supplies the confined water through leakage recharge. The groundwater level and quality in the Huairou emergency water source area from 2012 to 2014 were predicted with formulas based on the conclusions above. To guarantee the water safety in Beijing, we suggest that necessary measures, such as prohibition of groundwater exploitation and groundwater recharge, should be taken when water is transferred to Beijing through the South-to-North Water Diversion Project.

Key words: groundwater exploitation; water quality variation; water supply guarantee; Huairou emergency water source area; Beijing City

2003 年开始,北京市先后建立了怀柔、平谷、张坊、马池口等应急水源地以缓解城市供水问题。调查表明,怀柔应急水源地自开采以来,平均应急开采量约为 1.2 亿 m³/a^[1],其在为城市供水提供保障的

作者简介:杨楠(1986—),女,硕士研究生,研究方向为应用地质。E-mail:nan.yang@pku.edu.cn
通信作者:潘懋,教授。E-mail:panmao@pku.edu.cn

同时,也引起了地下水动力场和水化学场的变化,最直接的表现是地下水位持续下降、地下水水质指标(硬度、矿化度)持续升高等。

1 研究区水文地质概况

北京市怀柔应急水源地位于潮白河冲洪积扇的中上部,区内第四系沉积物广泛分布于平原和山间沟谷,沉积层呈北薄南厚、东薄西厚的特点;岩性呈典型的冲洪积扇分布特征。根据松散层的沉积规律和埋藏条件,区内含水层由上到下分为潜水含水层(小于45 m)、浅层承压含水层(45~120 m)和深层承压含水层(大于120 m),其中,潜水含水层与浅层承压含水层之间没有连续隔水层,水力联系较为密切,通常统一定义为浅层含水层,而埋深超过120 m的含水层为深层含水层,地下水水化学类型为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}^{[24]}$ 。

怀柔应急水源地位共布设42眼水源井,其中深、浅层开采井各21眼,图1所示为怀柔应急水源地位范围及水源井位置。

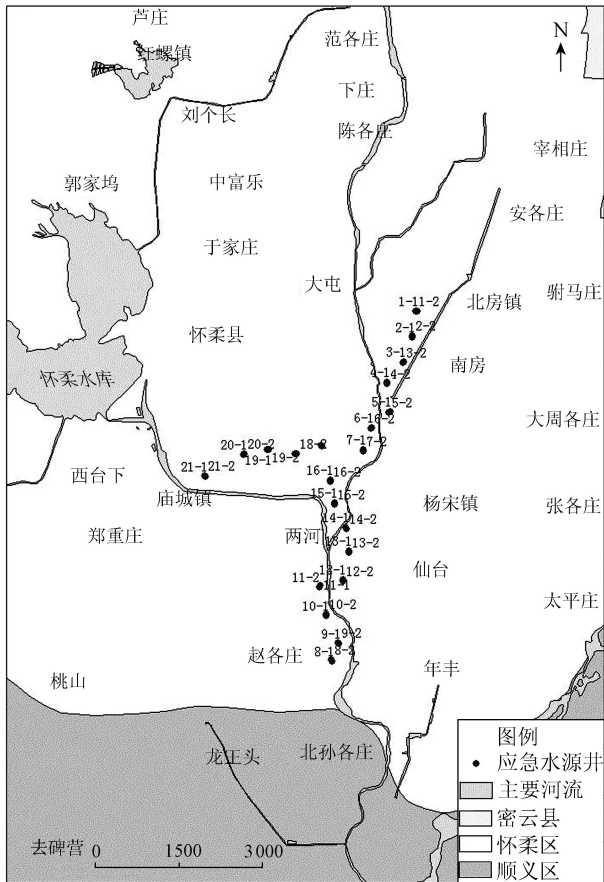


图1 怀柔应急水源地位范围及水源井分布

2 地下水水质变化情况

2.1 地下水水质随时间的变化

怀柔应急水源地位地下水在自然条件和人为条件

的共同作用下,其水质变化可分为如下3个阶段。

a. 1981—1998年为水质稳定时期。在这一时期,怀柔应急水源地位地下水硬度的平均年变化率约为6%,矿化度平均年变化率约为5%,虽然年际间矿化度和硬度有所波动,但总体趋势保持不变,甚至在1993—1994年矿化度和硬度有明显下降趋势,如图2所示。

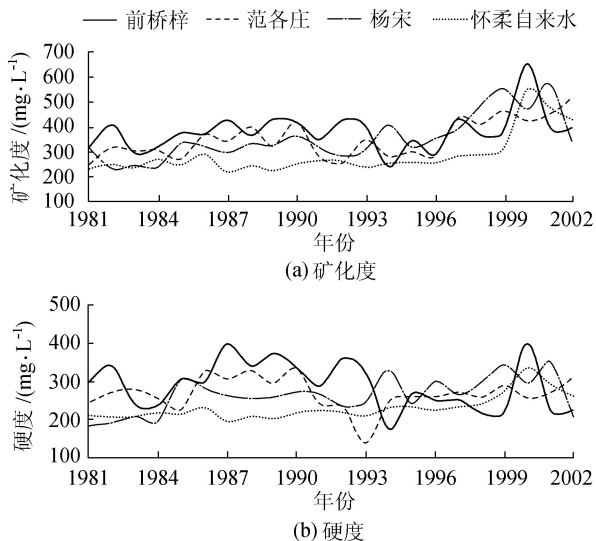


图2 怀柔应急水源地位开采前水质动态分布

b. 1999—2002年为水质陡变时期。在这一阶段,水质指标变化幅度突然加大,前桥梓地区和怀柔自来水的矿化度变化率分别达到70%和74%,硬度变化率达到79%和22%。另外,在这一阶段,北京一直处于干旱时期,降水量不足加上地下水开采量增大,导致研究区内水位降幅增大。

c. 2003年至今为水质平稳变化阶段。在这一时期,区内水源井水质的变化较为平缓,但总体呈上升趋势(图3),2010年监测到的浅井平均硬度较开采前增加了约29%,平均矿化度较开采前增加了32%。水源深井的矿化度和硬度变化相对较小,与开采前相比,2010年监测的深井平均硬度上升了4.5%,平均矿化度增加了为8.7%。

2.2 地下水水质空间上的变化

怀柔应急水源地位水源井空间上呈倒“Y”字形,中心位置为15号井。图4(a)所示为2003年地下水硬度分布图,图4(b)为2010年地下水硬度分布图,表1为怀柔应急水源地位开采前和2010年地下水硬度空间分布规律;矿化度与硬度的分布规律相似。

表1 怀柔应急水源地位开采前和2010年地下水硬度分布对比

年份	开采井位置	硬度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	硬度变化	开采井分布
2003	4号、15号、20号	168~242	中心高,四周低	多点分布
2010	15号	228~296	中心高,四周低	集中分布

3 地下水开采与水质变化的关系

国内外许多学者就地下水长期过量开采导致地下水硬度和矿化度呈逐年上升这一问题展开了讨论,一般认为,地下水硬度和矿化度升高的原因有以下几种:①自然界和地下水中的 CO₂ 分压增加和盐效应作用;②与地下水过量开采有关;③盐污染产生的阳离子交换作用^[5-6]。

笔者重点探讨地下水开采与水质变化的关系,因此通过对怀柔应急水源地水源井的平均水位、硬度与矿化度资料进行收集,分析水源井地下水水位与水质的相关关系,拟合它们之间的关系式(图 5)。

分析地下水开采引起水质变化的机理主要有如下两点:

a. 怀柔应急水源地水源浅井的硬度与水位的相关系数平方数为 0.907 3,矿化度与地下水位的相关系数平方数为 0.934 1;水源深井硬度与地下水位的相关系数平方数为 0.920 6,矿化度与地下水位的相关系数的平方数为 0.688 9,以上相关系数均为正值。怀柔应急水源地地下水水位与硬度、矿化度均呈正相关关系,说明地下水开采导致地下水位埋深增加,进而导致地下水硬度和矿化度增大,根据已有数据可以计算出水源深井和水源浅井与水质变化的定量公式。

水源浅井:

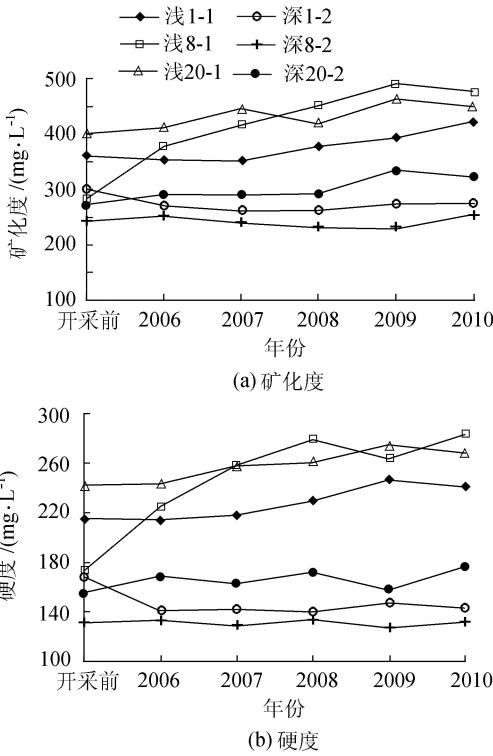


图 3 怀柔应急水源地多年水质变化曲线

怀柔应急水源地自 2003 年投入使用以来,水源地中心(15 号井)的开采量最大,向水源地四周开采量逐渐降低,即地下水的开采量与 2010 年地下水硬度的空间分布规律相同。

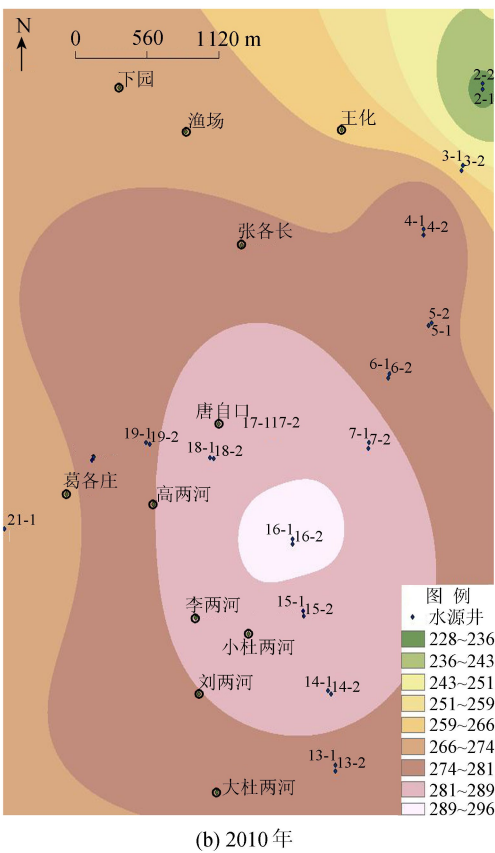
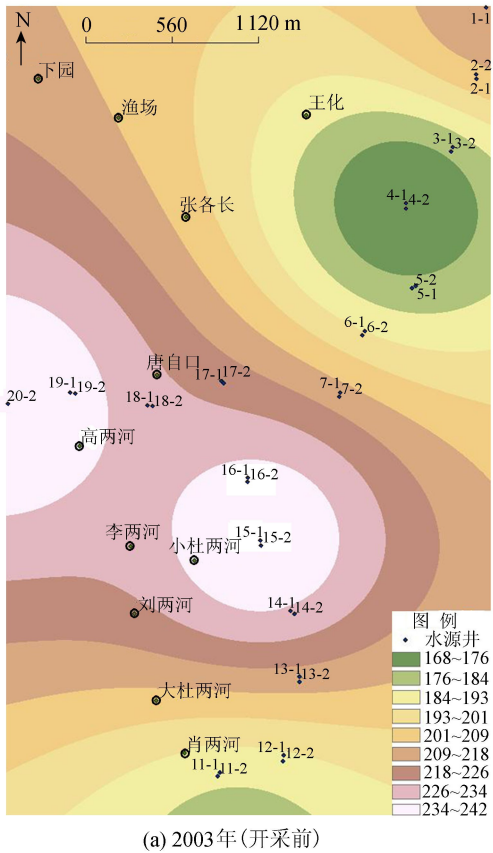


图 4 地下水硬度空间分布(单位:mg/L)

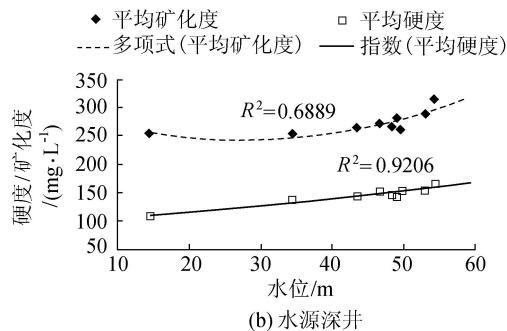
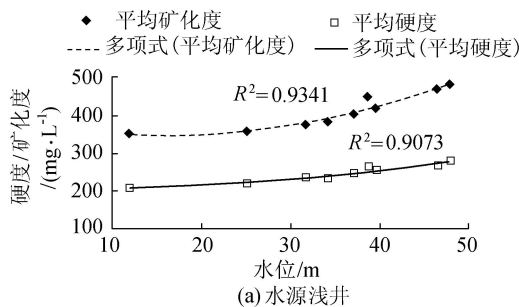


图5 地下水水位与水质关系

水位与硬度 $y=0.0363x^2-0.2123x+203.59$

水位与矿化度 $y=0.1347x^2-4.2523x+378.72$

水源深井:

水位与硬度 $y=94.901\exp(0.0095x)$

水位与矿化度 $y=0.0737x^2-4.0411x+298.08$

式中: y 为水位; x 为硬度或矿化度。

按照这种趋势,分别对2012—2014年的水位、硬度和矿化度进行预测,预测结果见表2。由此判断,如果继续以目前的开采规模和方式开采地下水,怀柔应急水源地地下水的水质指标将持续升高。

表2 怀柔应急水源地地下水埋深与水质预测

年份	地下水埋深/m		硬度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		矿化度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	
	深井	浅井	深井	浅井	深井	浅井
2012	63.6	53.7	173.6	296.8	313.8	538.5
2013	67.4	57.5	179.9	311.3	338.9	579.2
2014	71.2	61.3	186.6	326.9	383.8	623.8

b. 怀柔应急水源地含水层在垂向上的分为浅层和深层含水层,地下水开采是两者水质变化的主要原因之一,但两者水质的变化原理略有不同。

因为潜水与浅层承压水之间为不连续的隔水层,形成天窗,随着地下水的开采,地下水水位低于潜水与浅层承压水之间的不连续隔水层(图6),因此硬度和矿化度相对较高的潜水越流补给硬度和矿化度相对较低的浅层承压水,使水源井开采的地下水水质变差。

地下水埋深的大小反映了包气带的厚薄:水位下降,地下水埋深大,包气带厚度增大,补给水源入渗的途径变长使淋滤距离大,作为补给来源的水与

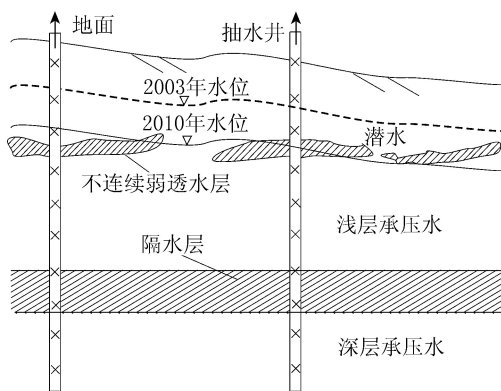


图6 潜水越流补给浅层承压水示意图

包气带及土壤的相互作用时间及距离增加,因此进入浅层地下水中的矿物离子也随之增加,源井开采的地下水水质发生变化^[7-10]。怀柔应急水源地地下水水质变化的机理主要有两点:①地下水的大量开采导致地下水位下降、地下水埋深大,包气带厚度增大,补给水源入渗的途径变长,使淋滤距离大;②潜水与浅层承压水之间为不连续的隔水层,形成天窗,随着地下水的开采,地下水水位低于潜水与浅层承压水之间的不连续隔水层,因此硬度和矿化度相对较高的潜水越流补给硬度和矿化度相对较低的浅层承压水,使水源井开采的地下水水质变差。

4 结 语

通过以上分析,除了降雨、农业灌溉等因素影响外,在北京连续干旱年的时段中,怀柔应急水源地中经过8年多的持续开采,使得区域地下水位普遍下降,这是该地区地下水水质恶化的重要原因,根据预测,2014年水源深井的矿化度、硬度将分别达到383.8 mg/L 和186.6 mg/L ,水源浅井的矿化度、硬度将分别达到623.8 mg/L 和326.9 mg/L ,如不能对地下水水质进行有效控制,最终可能导致相应水质指标超出国家饮用水标准而使得水源地的水不能作为生活饮用水继续开采。

基于以上分析,建议在南水北调工程的水资源进京后对怀柔应急水源地进行停采,利用一切回灌设施进行人工回灌恢复地下水水位,保障怀柔应急水源地在以后持续发挥应急备用功能,保障首都的供水安全。

参考文献:

- [1] 周俊,李世君.北京市怀柔应急水源地地下水动态检测报告(2010)[R].北京:北京市地质工程勘察院,2004-2011.

(下转第24页)

后的研究中,需进一步研究区域气候环境和人类活动对植被的综合影响。另外,作为评估长时间序列尺度下气候变化对水资源影响的重要因素,模拟的潜在植被动态变化过程将被引入水文模型,以模拟水文过程对气候变化的响应,进而预测未来全球气候变化情景下的水资源空间格局变化。

参考文献:

[1] SOLOMON S. Climate change 2007: the physical science basis working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[2] 刘晓帆,任立良,袁飞. 老哈河流域 NDVI 动态变化及其与其后因子的关系 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38 (1): 1-5. (LIU Xiaofan, REN Liliang, YUAN Fei, et al. Dynamic variation of DNVI in Laoha River Basin and its relationship with climate factors [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38 (1): 1-5. (in Chinese))

[3] 刘华民,吴绍洪,郑度,等. 潜在自然植被研究与展望 [J]. 地理科学进展, 2004, 23 (1): 62-70. (LIU Huamin, WU Shaohong, ZHENG Du, et al. The study on the potential natural vegetation and future prospect [J]. Progress in Geography, 2004, 23 (1): 62-70. (in Chinese))

[4] 赵东升,吴绍洪,尹云鹤. 气候变化情景下中国自然植被净初级生产力分布 [J]. 应用生态学报, 2011, 22 (4): 897-904. (ZHAO Dongsheng, WU Shaohong, YIN Yunhe. Variation trends of natural vegetation net primary productivity in China under climate change scenario [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22 (4): 897-904. (in Chinese))

[5] NI J, SANDY P H, PRENTICE I C, et al. Impact of climate variability on present and holocene vegetation: a model-based study [J]. Ecological Modeling, 2005, 191 (3/4): 1-18.

[6] YUAN Fei, REN Liliang, YU Zhongbo, et al. Potential natural vegetation dynamics driven by future long-term climate change and its hydrological impacts in the Hanjiang River basin, China [J]. Hydrology Research, 2011, 43 (1-2): 73-90.

[7] 袁飞,任立良. 环境变化与水文过程模拟 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2012.

[8] 孙艳玲,延晓冬,谢德体,等. 应用动态植被模型 LPJ 模拟中国植被变化研究 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2007, 29 (11): 86-91. (SUN Yanling, YAN Xiaodong, XIE Deti, et al. Application of LPJ model in simulating vegetation distribution of China [J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2007, 29 (11): 86-91. (in Chinese))

[9] 江善虎,任立良,雍斌,等. 老哈河流域降水变化特征分析 [J]. 水电能源科学, 2009, 27 (1): 1-4. (JIANG Shanhu,

REN Liliang, YONG Bin, et al. Analysis of precipitation change in characteristic Laoha River Basin [J]. Water Research and Power, 2009, 27 (1): 1-4. (in Chinese))

[10] 方秀琴,任立良,李琼芳. 老哈河流域水文要素变化研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37 (6): 620-624. (FANG Xiuqin, REN Liliang, LI Qiongfang. Variation of hydrological elements in Laoha River Basin [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37 (6): 620-624. (in Chinese))

[11] SITCH S, SMITH B, PRENTICE I C, et al. Valuation of ecosystem dynamics, plant geography, and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic vegetation model [J]. Global Change Biology, 2003, 9: 161-185.

[12] 方秀琴. 基于流域空间信息的土地利用变化的水文响应 [D]. 南京: 河海大学, 2010.

(收稿日期: 2013 - 03 - 18 编辑: 彭桃英)

+++++

(上接第 18 页)

[2] 任志远. 北京市平原区地下水资源研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.

[3] 林健. 北京市城近郊区地下水污染演变分析研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.

[4] 林沛. 北京市城近郊区地下水水质评价与趋势分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.

[5] 费宇红, 张兆吉, 宋海波, 等. 华北平原地下咸水垂向变化及机理探讨 [J]. 水资源保护, 2009, 25 (6): 21-23. (FEI Yuhong, ZHANG Zhaoji, SONG Haibo, et al. Discussion of vertical variations of saline groundwater and mechanism in North China Plain [J]. Water Resources Protection, 2009, 25 (6): 21-23. (in Chinese))

[6] 张建中, 刘庆胜. 地下水水质恶化成因分析及对策 [J]. 科技情报开发与经济, 2005, 15 (14): 72-73. (ZHANG Jianzhong, LIU Qingsheng. The analysis of the cause of and countermeasures for the worsening of groundwater quality [J]. Sci/tech Information Development & Economy, 2005, 15 (14): 72-73. (in Chinese))

[7] 殷勇. 城市地下水开发引起的环境地质问题刍议 [J]. 地下水, 2009, 31 (6): 134-136. (YIN Yong. Primary opinion on environmental geological problems caused by groundwater exploitation in the urban [J]. Ground Water, 2009, 31 (6): 134-136. (in Chinese))

[8] 冯娟. 开采条件下德州地区地下水水质演化研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.

[9] 杜涛. 南水北调入京后北京西南地区地下水水质演变的实验模拟研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.

[10] 朱树亮. 论过量开采地下水造成的危害及应采取的保护措施 [J]. 黑龙江水利科技, 2004 (2): 100-101. (ZHU Shuliang. A study on the damage caused by excessive groundwater exploitation and protection measures [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2004 (2): 100-101. (in Chinese))

(收稿日期: 2012 - 08 - 13 编辑: 高渭文)