

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.04.04

南水北调水源在密怀顺水源地回灌的 地下水水质变化试验

刘立才,郑凡东,李炳华,杨 勇
(北京市水科学技术研究院,北京 100048)

摘要:南水北调水源进京后,部分水源计划将进入密怀顺水源地回补严重亏损的地下水。水源地地下水水质的未来变化引起了人们的关注。本次研究通过开展动态含水层模拟试验,分析了南水北调水源进入含水层过程中地下水水质变化,并利用溶质运移模型,在不考虑吸附、降解等水岩相互作用等条件下,模拟了试验土柱中各常规组分的水质变化。研究表明:南水北调水源进入含水层过程中,对地下水水质的稀释作用占主导地位,其它水岩相互作用对地下水水质的影响程度较小,南水北调水源在密怀顺水源地回补地下水是可行的。为此,南水北调水源回补地下水后,不仅能够涵养并增加水源地的地下水资源,而且能够改善地下水水质,保证水源地的供水安全。

关键词:南水北调水源;含水层;稀释作用;水岩相互作用

中图分类号: P641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3665(2015)04-0018-05

Experiment of groundwater quality change for simulating the South-to-North water into the Mihuaishun aquifer

LIU Licai, ZHENG Fandong, LI Binghua, YANG Yong
(Beijing Water Science & Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: After the South-to-North water entering Beijing, part of the water will be injected into the aquifer of Mihuaishun groundwater wellfield. Close attention is paid to the groundwater quality change. To examine the groundwater quality change, a soil column experiment was executed to simulate the South-to-North water entering the aquifer. The results show that the dilution effect of the South-to-North water plays a leading role and other water-rock interactions have little effect on groundwater quality. A solute transport model was established to verify this point of view and it is found that it is correct. Using the South-to-North water to supply the Mihuaishun groundwater wellfield is feasible. Consequently, using the South-to-North water to recharge the groundwater not only conserves and increases groundwater resources, but also improves the groundwater quality and ensures the safety of water supply.

Keywords: South-to-North water; aquifer; dilution effect; water rock interaction

南水北调工程是应对水资源危机和供需矛盾的国家级战略举措。南水北调中线工程主要为沿线的河南、河北、北京和天津四省市供水,规划年调水量 $97 \times 10^8 \text{ m}^3$, 计划每年提供给北京 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在南水北

调开通初期,在河南、河北等省市配套设施不完善的情况下,将会有多于计划的南水北调水供给北京。2014年底,南水北调水源进入北京。

南水北调水源进京后,部分水源拟自团城湖经过

收稿日期: 2014-08-20; 修订日期: 2014-10-18

基金项目: 国家水专项“海河流域水资源调蓄区水质保障及生态修复关键技术与示范”(2014ZX07203010);北京市科委项目“北京新航城地区水资源可持续利用研究”(Z131100005612001)。

第一作者: 刘立才(1973-),男,博士,长期从事水文地质及地下水环境研究。E-mail:llc1021@126.com

京密引水渠反向输至密怀顺水源地,回灌至地下,补充水源地长期超采引起的资源量亏损,抑制地下水水位大幅下降,恢复并涵养地下水,并使水源地地下水成为北京市水资源战略储备,保障北京市的未来供水安全。据初步估算,密怀顺水源区因八厂水源地、怀柔应急水源地长期超采形成的地下水库调蓄库容为 $11.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,具备优良的储存条件^[1]。

南水北调对地下水资源环境的影响研究多体现在南水对地下水的回补以及南水与地下水的联合调蓄^[2-3],水质层面涉及较少。由于丹江口水库水与密怀顺水源地地下水化学组分的物源不同,南水北调水源进入地下含水层后,含水层中可能发生水岩相互作用,进而改变地下水水质。作者以往的研究侧重于南水北调水源与西郊地下水之间的混合作用和水岩相互作用^[4-5],但西郊地下水与密怀顺水源区地下水水质在物源和浓度上均有差异。为规避南水北调水源回灌可能引起密怀顺水源地的地下水水质变化负面风险,本次研究开展了南水北调水源回灌过程中的含水层水质变化模拟试验,分析了地下水水质变化及可能存在的水岩相互作用,为南水北调水源回灌提供了科学的参考依据。

1 两地水质对比

采集丹江口水库水样和密怀顺地下水水样进行水质分析,两地水质测试指标均为32项,包括八大离子 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- ,以及pH值、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 F^- 、 CN^- 、TDS、总硬度、 COD_{Mn} 、 BOD_5 、阴离子合成洗涤剂、Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、Fe、Mn、Ni、Hg、As、Se、Al、Mo、Co等。二者常规指标浓度对比见表1。

表1 两地水常规水质指标对比

Table 1 Comparison of water quality between Danjiangkou reservoir and the Mihuaishun groundwater

水质指标	丹江口水库水	密怀顺地下水
$\text{K}^+ / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1.62	3.27
$\text{Na}^+ / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	4.91	26.49
$\text{Ca}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	34.3	95.07
$\text{Mg}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	6.22	34.38
$\text{HCO}_3^- / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	99.54	333.97
$\text{Cl}^- / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	5.8	54.82
$\text{SO}_4^{2-} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	24.84	92.06
pH	8.0	7.33
$\text{NO}_3\text{-N} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.87	4.61
$\text{NO}_2\text{-N} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.01	0.024
$\text{NH}_3\text{-N} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.06	0.04
总硬度 $/ (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	143.1	411.1
TDS $/ (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	160	670

经水质检测,丹江口水库水和密怀顺地下水的水质均较好,重金属、非金属或未检出,或检出浓度很低。检测的32项指标满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。二者的水质差别主要体现在常规指标(即八大离子和pH值),具体表现为:密怀顺地下水中的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、总硬度、TDS显著高于丹江口水库水,而pH值显著低于丹江口水库水。三氮的差异性主要体现在地下水的硝酸盐氮浓度大于丹江口水库水。

2 含水层模拟试验

2.1 土样采集及试验装置

为开展含水层模拟试验研究,在干涸的潮白河河道实施钻探采集土样。由于密怀顺水源地地下水长期超采,地下水埋深已达50m,难以采集到含水层土样。本次通过钻探采集到10m以下的土样,作为含水层土样。

构建1.5m长水平放置的有机玻璃柱,利用采集的含水层介质充填土柱,并压实。玻璃柱内径22cm。水平柱侧壁均匀布置7个采样孔,采样孔间距23cm。试验装置见图1。

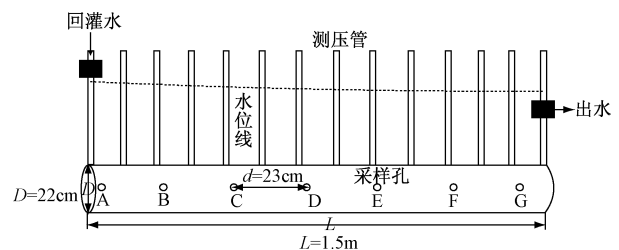


图1 含水层模拟试验装置

Fig. 1 Experiment device of the simulated aquifer

2.2 试验方案

利用密怀顺水源区地下水将水平柱饱和,形成初始地下水含水层。然后在水平柱一端将丹江口水库水缓慢注入含水层中,不断驱替柱内地下水,水平柱另一端出水。每天进水量0.3L,水平柱孔隙度0.33,地下水流速为0.032m/d,含水层渗透系数为5.3m/d,水力梯度为2‰。

试验过程中采集各采样孔水样送至实验室测试分析。采集水样时间为:第1天,第2天,第4天,第7天,第10天,第14天,第21天,第27天。采集水样8次。

2.3 试验水质分析评价

(1) 试验数据分析

根据试验过程的水质分析数据,可绘制出各化学组分每时刻自进口至出口地下水流程上的浓度历时变化曲线,见图2。

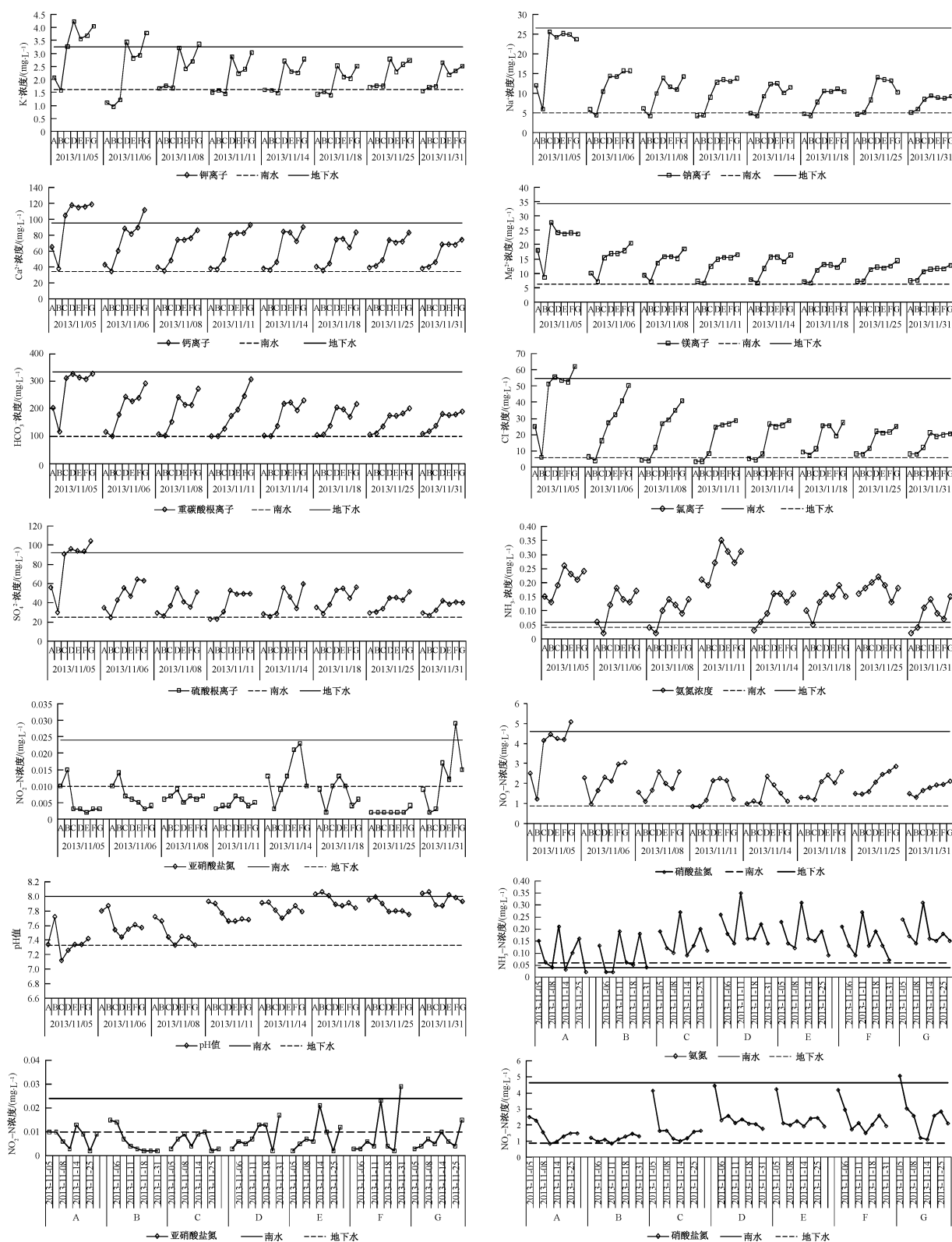


图 2 地下水流程的水质变化及各采样孔的三氮浓度变化

Fig. 2 Water quality change along the groundwater flow and three nitrogen change of the sampling holes

从图 2 可以看出,在各采样时刻,在地下水流程上各化学组分的变化特征为: K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、

HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子浓度呈升高的变化特征; pH 值呈降低的变化特征;氨氮和硝酸盐氮浓度呈升高的

变化特征;亚硝酸盐氮浓度变化没有固定的变化规律,时而降低,时而平稳,时而波动幅度较大。

同样据图2,各样点各化学组分浓度随时间的变化特征为:各采样点出水的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子浓度呈降低的变化特征,各采样点出水的pH值呈升高的变化特征。采样孔A紧邻进水口,其各组分浓度快速降低并接近丹江口水库水质。远离进水口的采样孔,其浓度不断降低。但距进水口越远的采样孔,其出水浓度降幅越小。各采样孔出水的氨氮和硝酸盐氮总体呈现出降低的变化特征,而亚硝酸盐氮总体呈升高的变化特征。

(2) 水质变化评价

根据上述地下水流程的水质特征和各采样孔出水的水质变化特征,可以看出,丹江口水库水对地下水的稀释作用明显。随着时间推移,各采样孔常规指标浓度不断降低,同时各常规指标在地下水流程上浓度升高的特点,能够较为鲜明地反映出丹江口水库水对地下水的驱替和稀释作用。

柱内各采样孔氨氮浓度高于密怀顺地下水和南水北调水源,但在地下水流程上,呈现出浓度升高的变化特征。可能原因在于:由于密怀顺水源区地下水埋深约为50m,而本次的采样深度约为10m,采集的土样土体颗粒表面存在吸附的分子态氨氮,分子态氨氮的解析作用使得土柱沿程的氨氮浓度不断升高。同时,在丹江口水库水驱替地下水过程中,各采样孔的氨氮浓度总体呈较为明显的降低趋势。试验过程中,亚硝酸盐氮浓度多低于丹江口水库水,可能与亚硝酸盐氮极不稳定的特性有关。由C-G采样孔出水亚硝酸盐氮浓度总体呈升高的变化趋势,可能与氨氮的硝化反应有关。各采样孔出水硝酸盐氮浓度呈降低的变化趋势,表明丹江口水库水对地下水的稀释作用占主导地位,而相较之下,氨氮的硝化作用对硝酸盐氮的贡献较为微弱。

3 柱内常规组分浓度变化数值模拟

根据不同时刻地下水流程上的水质浓度变化,上述研究做出了丹江口水库水进入地下含水层后对地下水的稀释作用占主导地位的推断,但该推断的正确性需要核准。本研究构建了不考虑吸附降解等作用、仅考虑水动力弥散作用的溶质运移偏微分方程及其定解条件,利用数值法计算了不同时刻土柱出水中各常规指标的浓度值,并与实测值进行拟合比对,不仅估算出了纵向弥散度,而且证明了丹江口水库水对地下水的

稀释作用占主导地位,并探讨了阳离子交换吸附作用。

3.1 溶质运移偏微分方程构建

根据试验条件,可将研究土柱概化为半无限长多孔介质柱体、一端为定浓度边界一维水动力弥散问题^[6]。偏微分方程及其定解条件为:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} \\ C(x, 0) = C_0 \quad x \geq 0 \\ C(0, t) = C_1 \quad t > 0 \\ C(\infty, t) = C_0 \quad t > 0 \end{cases}$$

式中: D_L ——纵向弥散系数/($m^2 \cdot d^{-1}$);

u ——地下水流速/($m \cdot d^{-1}$);

C_0 ——柱内初始浓度/($mg \cdot L^{-1}$);

C_1 ——土柱进水浓度/($mg \cdot L^{-1}$)。

$$D_L = \alpha_L \cdot u$$

式中: α_L ——纵向弥散度/m;

3.2 出水水质指标计算浓度与实测浓度对比

由于采用解析法求解难度较大,本次研究采用数值法进行求解。利用数值法求解过程中,将土柱延长至30m,地下水流速与柱内地下水流速一致,模型的孔隙度采用试验土柱的孔隙度。进水浓度为丹江口水库水质浓度,出水浓度为柱内初始浓度。求解出1.5m处的水质浓度,即可认为实际试验柱出水的计算浓度。由于氯离子的稳定性好,在含水层中不发生吸附和生物降解作用,为此,利用氯离子作为指示指标,通过反演率定出纵向弥散度数值。率定后的纵向弥散度 $\alpha_L = 10m$,氯离子的拟合曲线见图3。通过氯离子拟合求得弥散度后,计算其余指标的出水浓度,并与实测值对比,详见图3。从图中可以看出,各指标的计算值与实测值的变化趋势基本一致,线性相关关系较好。

3.3 水质浓度实测值与计算值对比解释及柱内水岩相互作用推测

各水质指标出水水质计算浓度反映了丹江口水库水进入土柱后对地下水的稀释作用,不包括诸如吸附、降解及阳离子交换吸附等水岩相互作用。将各指标的计算值和实测值作为一个样本的两个变量,在自由度为6,置信度为95%条件下,只要相关系数大于0.622,即可认为二变量显著相关^[7]。据图3,所有常规指标计算值与实测值的相关系数均大于0.622,且随时间计算浓度与实测浓度的变化趋势一致,表明试验过程中丹江口水库水对土柱内地下水的稀释作用占主导地位,土柱内发生的水岩相互作用对水质的影响程度较小。

- Press, 2004. (in Chinese)]
- [3] 王常明. 土力学[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2004. [WANG C M. Soil Mechanics [M]. Changchun: Jilin University Press, 2004. (in Chinese)]
- [4] 曹卫平, 罗少峰, 张文杰. 土力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011. [CAO W P, LUO S F, ZHANG W J. Soil Mechanics [M]. Beijing: Peking University Press, 2011. (in Chinese)]
- [5] 周东久. 关于土体自重应力计算方法及分析[J]. 河南交通科技, 1999, 19(2): 25 - 26. [ZHOU D J. The Calculating Method and Analysis of Soil Mass Weight Stress [J]. Science and Technology of Henan Communication, 1999, 19 (2): 25 - 26. (in Chinese)]
- [6] 卢廷浩. 土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. [LU T H. Soil Mechanics [M]. Beijing: High Education Press, 2002. (in Chinese)]
- [7] 王健. 三角形分布条形荷载作用下的土应力计算探讨[J]. 路基工程, 2007(3): 34 - 35. [WANG J. Discussion on calculation of soil stress under triangle distributing stripe preloading [J]. Subgrade Engineering, 2007(3): 34 - 35. (in Chinese)]
- [8] 郭永发. 堆载作用下软土地基强度增长及变形特性分析[D]. 上海: 同济大学, 2011. [GUO Y F. Strength Increasing and Deformation Properties of soft clay foundation under preloading [D]. Shanghai: Tongji University, 2011. (in Chinese)]
- [9] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. [QIAN J H, YIN Z Z. Soil Principle and Calculation[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1996. (in Chinese)]
- [10] 胡中雄. 土力学与环境土工学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997. [HU Z X. Soil Mechanics and Environmental Geotechnique [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997. (in Chinese)]
- [11] 刘天韵. 直剪试验固结快剪强度指标影响因素分析[J]. 中国港湾建设, 2009(6): 32 - 34. [LIU T Y. Approaching of factors influencing strength indexes for the consolidation quick test [J]. China Harbour Engineering, 2009(6): 32 - 34. (in Chinese)]

责任编辑: 张明霞

(上接第22页)

- [2] 乔令海, 徐军祥, 张中祥, 等. 南水北调入鲁后地下调蓄研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(5): 31 - 36. [QIAO L H, XU J X, ZHANG Z X, *et al.* A study of subsurface regulation and storage of water after the South-to-North Water Diversion Project into Shandong[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(5): 31 - 36. (in Chinese)]
- [3] 史入宇, 崔亚莉, 赵婕, 等. 滹沱河地区地下水适宜水位研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(2): 36 - 41. [SHI R Y, CUI Y L, ZHAO J, *et al.* A study of the suitable groundwater level of the Hutuo River area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(2): 36 - 41. (in Chinese)]
- [4] 刘立才, 郑凡东, 张春义. 南水北调水源与北京地下水混合的水质变化特征[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 1 - 7. [LIU L C, ZHENG F D, ZHANG C Y. Quality characteristics of water mixed by South-to-North water and Beijing groundwater[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(1): 1 - 7. (in Chinese)]
- [5] 郑凡东, 刘立才, 杨牧骑, 等. 南水北调水源北京西郊回灌的水岩相互作用模拟[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(6): 22 - 27. [ZHENG F D, LIU L C, YANG M Q, *et al.* Simulation of water-rock interaction in the injection of water from the South-to-North Diversion Project to the aquifer in the western suburb of Beijing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(6): 22 - 27. (in Chinese)]
- [6] 陈崇希, 李国敏. 地下水溶质运移理论及模型[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996. [CHEN C X, LI G M. Theory and model of groundwater solute transport [M]. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1996. (in Chinese)]
- [7] S 伯恩斯坦, R 伯恩斯坦. 统计学原理 - 推断性统计学[M]. 北京: 科学出版社, 2002. [Stephen Bernstein, Ruth Bernstein. Elements of Statistics II: Inferential Statistics [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)]
- [8] 沈照理, 朱宛华, 钟佐桑, 等. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1996. [SHEN Z L, ZHU W H, ZHONG Z S, *et al.* Element of Hydrogeochemistry [M]. Beijing: Geology Press, 1996. (in Chinese)]

责任编辑: 张若琳