



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.01.024

贾文飞, 杨洋, 赵阳, 等. 潮白河地下水调蓄区水岩作用过程模拟[J]. 2016, 14(1): 143-148, 135.

JIA Wen fei, YANG Yang, ZHAO Yang, et al. Simulation of the water rock reaction in Chaobai River ground water storage area[J]. 2016, 14(1): 143-148, 135. (in Chinese)

潮白河地下水调蓄区水岩作用过程模拟

贾文飞^{1,4}, 杨洋¹, 赵阳¹, 李娟^{1,2}, 吕宁馨¹, 席北斗¹, 李鸣晓^{1,3}, 杨津津¹, 郭艳菲¹

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;
3. 广东省浩蓝环保水污染治理院士工作站, 广州 510630; 4. 东华理工大学, 南昌 330013)

摘要: 南水北调中线工程通水后, 将有部分结余水量用于补给潮白河地下水调蓄区。由于南方地表水(以下简称南水)与北京当地地下水的水质存在一定差异, 回灌过程中很有可能发生水岩相互作用。研究以潮白河地下水回灌区为例, 通过静态摇瓶实验和水文地球化学模拟等研究方法, 对南水补给北京深层地下水过程中产生的水岩作用过程和水质影响程度进行分析评价。研究表明: 南水回灌过程中, 地下水的主要离子成分会受到硝化作用、阳离子交换作用及包气带矿物质溶解等作用的综合影响。两种水混合过程中, 土壤矿物相中的方解石和白云石不断溶解, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度逐渐升高, 反应过程中还伴随强烈的阳离子交换作用, 主要为 Na^+ 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的交换。南水比例越大, 溶解氧促进硝化作用越明显; 在硝化作用和碳酸平衡的共同影响下, 地下水的 pH 值呈现先降低后升高的趋势。

关键词: 南水北调; 水-岩相互作用; 硝化作用; 阳离子交换; 水文地球化学模拟; 饱和指数; 矿物溶解

中图分类号: X142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0143-06

Simulation of the water rock reaction in Chaobai River ground water storage area

JIA Wen fei^{1,4}, YANG Yang¹, ZHAO Yang¹, LI Juan^{1,2}, LYU Ning qing¹, XI Bei dou¹, LI Ming xiao^{1,3}, YANG Jir jin, GUO Yan fei¹

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

2. Water Science Research Institute of Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Guangdong Province Haolan Environmental Protection Water Pollution Governance Academician Workstation, Guangzhou 510630, China; 4. East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: In the process of The South to North Water Transfers, some of the water will be used to supplement the groundwater of Chaobai River basin. Due to the differences of Danjiangkou reservoir water and Beijing groundwater, water rock interaction may occur. Taking the example of Chaobai River basin, we analyzed the water rock interaction and changes of water during recharge by batch experiments and hydrogeochemistry simulation. The results showed that: during the recharge, the water was affected by nitrification, cation exchange and solution of minerals. With the increase of proportion of southern water, calcite and dolomite dissolve and concentrations of calcium and magnesium were elevated coupled with cation exchange which mainly is sodium with calcium and/or magnesium. The higher proportion of south water, the stronger of nitrification is found. Affected by nitrification and carbonate balance, pH of groundwater was reduced at early stage then elevated at late stage.

Key words: The South to North Water Transfers; water rock interaction; nitrification; cation exchange; hydrogeochemistry simulation; saturation index; dissolution of minerals

收稿日期: 2015-03-24 修回日期: 2015-12-14 网络出版时间: 2016-02-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1644.015.html>

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07203010)

Fund: Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment of China(2014ZX07203010)

作者简介: 贾文飞(1990-), 男, 山西霍州人, 主要从事地下水溶质迁移机理及地下水环境研究。E-mail: jiawenfei_512@163.com

通讯作者: 李娟(1981-), 女, 陕西宝鸡人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事地下水污染与修复技术研究。E-mail: lijuan@craes.org.cn

为了缓解我国北方地区水资源严重短缺的局面,我国于 2003 年 12 月正式启动了南水北调中线跨流域调水工程,用于补给北方地区的生活、农业和工业用水,部分结余外调水还将用于补充当地地下水。但是,由于南方来水(以下简称:南水)与北方地下水(以下简称:北水)的水质存在不同,两者混合之后是否会发生物理、化学和水岩反应,是否会引发北京地下水及土壤的理化性质改变,成为目前关注的热点^[1-3]。

水-岩相互作用从 20 世纪 50 年代被提出^[2],目前国外做了很多这方面的研究。Roy 等^[3]通过室内模拟实验研究佛罗里达州回灌区地下水中高浓度砷的来源,结果表明,回灌过程中发生了水-岩相互作用,由于氧化还原条件的改变,导致区域内的黄铁矿发生溶解,释放出矿物内的砷;Orly 等分析了污水回灌过程中地下水钙离子浓度升高的原因,得出水-岩相互作用过程中的强烈的阳离子交换和 CaCO_3 的溶解是两个主要原因^[4]。国内也做了很多相关研究,如石旭飞等对上海某人工回灌场地在人工回灌过程中的水文地球化学变化进行了分析^[5-6],结果表明人工回灌过程中发生了阳离子交换反应,石膏、方解石等矿物组分的溶解以及含铁锰矿物的溶解反应;章丽萍等^[7]针对北京团城湖调蓄池浅层地下水与丹江口水库库水混合过程对含水层水质的影响进行了研究,结果表明模拟含水层在水岩作用的影响下,各项水质指标都发生了变化,但基本稳定在地下水质量Ⅲ类标准以内;张志永等^[8]通过建立地下水水流模型研究了不同地下水回灌方案对地下水开采能力的影响;刘立才等^[8]利用引潮入城水源地的管井开展回灌试验,研究回灌过程中回灌水量与地下水水位的关系,结果表明二者呈线性相关。目前前人的研究主要针对的是南水北调对浅层地下水的影

响。南水进京后,用于回补潮白河地下水源地的方式有河道自然入渗和井灌 2 种方式^[9]。潮白河地下水水源地由于常年超采,局部地区地下水埋深已将近 100 m,因此,研究南水与北京深层地下水混合过程中的水岩作用,对于保障北京地下水的水质安全具有重要意义。本文以北京潮白河地下水调蓄区为研究对象,通过室内模拟实验和水文地球化学模拟等手段,对南水补给北京深层地下水时可能发生的水岩作用机理和影响展开研究,为保障区域供水安全提供理论支撑。

1 研究区水文地质背景

潮白河冲洪积扇位于北京市东北部,地理坐标为

北纬 $40^{\circ}10' - 40^{\circ}30'$,东经 $116^{\circ}30' - 117^{\circ}00'$ 。研究区北部狭窄,南部开阔,东北、西北和北部三面环山,南部为平原区,地形北高南低;北部含水层介质主要由砂、卵石和砾石组成,由北往南介质粒径逐渐变细,岩层厚度由薄变厚,含水层岩性由单一过渡至多层^[10]。

2 样品采集和测试

2.1 样品采集

本次研究主要采集的水样是丹江口地表水、北京潮白河地区地下水;采集的土样是潮白河地下含水层的土样。北水采集点位于潮白河向阳闸处的取水井,采样深度约为 100 m,采样量 20 L;土样采集点是潮白河向阳闸取水井含水层的土壤介质,采样量 10 kg;南水采集点位于丹江口水库距库边 30 m 处,采样量 20 L。采样点示意图 1。

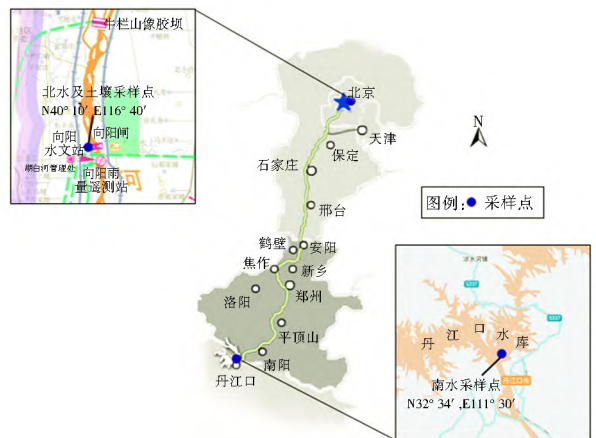


图 1 采样点位置

Fig. 1 Sampling point location

2.2 样品测试

实验样品的采集时间为 2014 年 6 月-7 月,现场对水样中的 pH 值、Eh、溶解氧和水温等指标进行测试,钠(Na^+)、钾(K^+)等 11 项水质指标送至北京理化分析测试中心进行检测,检测结果见表 1。

表 1 南水和北水水质检测结果

Tab. 1 Quality test results of water from south and north

检测项目	mg/L						
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-
北水	44.8	11.5	1.43	36.7	36.76	< 1.0	253
南水	41.2	7.48	2.36	5.42	37.47	< 1.0	140
检测项目	Cl^-	NO_3^-	NH_4^+	pH	Eh	溶解氧	
北水	21.68	0.88	/	7.93	97.9	3.52	
南水	7.13	6.9	/	7.56	278	7.04	

注:/表示该项目未检出

土样经预处理之后,送至北京理化分析测试中心测定含水层介质的矿物组成,检测结果见表 2。

表2 潮白河土壤样品中的矿物组分
Tab.2 Mineral components of sand sample

土壤类型	矿物种类(%)						
	方解石	白云石	石英	氟石	钾长石	斜长石	其它
土样	3	13	44	1	16	14	9

3 水岩作用摇瓶实验

实验设计土样与水样的混合比控制在 1:10, 将南水和北水分别按照 0:10, 2:8, 3:7, 4:6, 5:5, 6:4, 7:3, 8:2, 10:0 的比例制作 9 组混合溶液来进行摇瓶实验。

摇瓶实验过程中, 将南水和北水按照不同的比例配制为 500 mL 的混合溶液加入到玻璃瓶中, 同时分别称取 50g 土壤介质加入反应。将玻璃瓶密闭, 放置于恒温振荡培养箱中。将 9 组模拟序列分别振荡 1、2、4、6、10、15、20 d 后, 取各玻璃瓶中的上清液, 测定 pH、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻、Cl⁻、NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N 离子浓度。其中 SO₄²⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻ 和 Cl⁻ 用 ICS-2000 离子色谱仪测定, Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 用电感耦合等离子体原子发射光谱仪测定, HCO₃⁻ 用滴定法测定, NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N 采用 UV-4802 紫外分光光度仪测定。

4 结果分析

4.1 三氮转化过程分析

地下水环境中, 主要的氮化合物为离子态的氨氮(NH₄⁺-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N), 即常称为的“三氮”^[11]。三氮浓度若超出一定值, 会对地下水造成污染, 若进入人体会造成巨大损害^[12]。

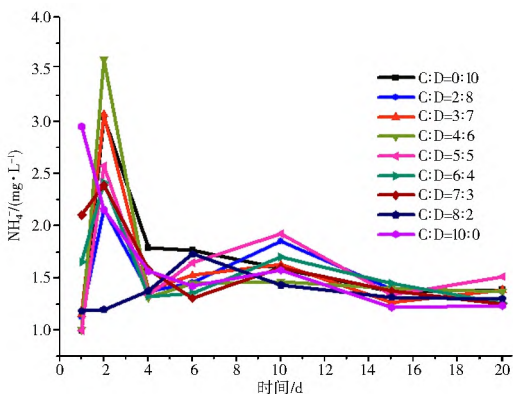


图2 氨氮浓度变化

Fig.2 Concentration changes of NH₄⁺

由表 1 和图 2 可知, 氨氮浓度随时间呈现先升

高后降低的趋势。实验之初, 南水、北水中的氨氮并未检出, 而在水土混合摇瓶实验的第 1 天, 混合液中的氨氮检出浓度即达到 1.0 mg/L 以上, 到第 2 天体系中的氨氮浓度达到峰值, 随后氨氮浓度开始下降, 从第 4 天开始体系中的氨氮浓度逐渐达到平衡。伴随着实验的进行, 氨氮浓度逐步下降, 最终处于 1.33 mg/L 左右, 低于前 4 天的平均值。分析认为, 在水样和土样混合过程中, 吸附在土壤颗粒上的氨氮离子解析释放^[13] 是引起氨氮浓度升高的主要原因。

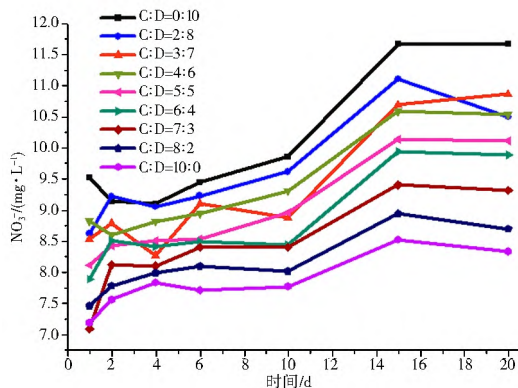


图3 硝氮浓度变化

Fig.3 Concentration changes of NO₃⁻

由图 3 中硝氮浓度变化可以看出, 硝氮浓度随着时间呈现持续升高的趋势, 当南水所占比例为零时, 混合溶液中的硝酸盐浓度基本未发生变化。由表 1 可知, 南水中的溶解氧为 7.04 mg/L, 约为北水溶解氧含量的两倍, 高浓度的溶解氧加速了氨氮转化为亚硝氮、硝氮的过程^[14]; 当南水在体系中占主导时, 溶解氧丰富, 硝化反应顺利进行, 硝氮浓度显著增加。

上述变化规律表明随着时间的推移, 南水比例越大, 硝化反应越明显, 具体硝化反应方程式^[15]如下:

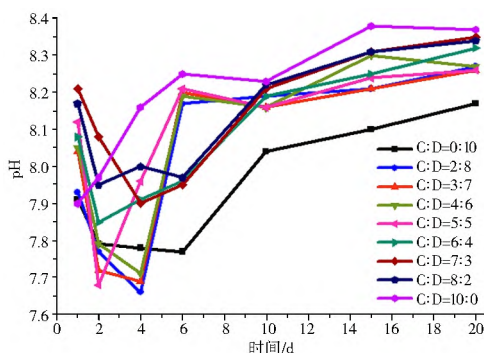
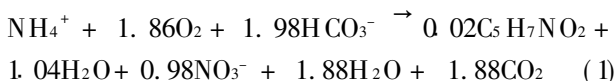


图4 pH 值变化过程

Fig.4 Changes of pH

硝化反应与地下水的 pH 变化也密切相关, 硝化反应过程中释放的 CO₂ 会引起体系中的 pH 值的变化。从 pH 的变化趋势图(图 4)中可以看出, pH 变化呈现先降低后升高的规律。对比图 2 和图 4 可知, 实验过程中氨氮的演变过程与 pH 值变化呈现一定的反相关, 见图 5。实验进行前 4 天, 硝化作用效应较大, CO₂ 不断释放, 受之影响 pH 值呈下降趋势; 随着时间的推移, 氨氮浓度下降, 硝化作用逐渐减弱, 随着土壤介质中的方解石和白云石矿物的溶解不断消耗体系中产生的 CO₂^[16], 实验后期 pH 呈现升高趋势。

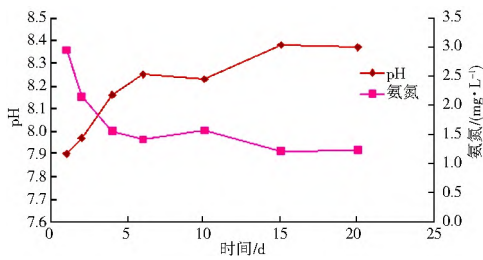


图 5 pH 和氨氮浓度变化

Fig. 5 Changes of pH and ammonia nitrogen concentration

闫芙蓉等对三氮转化影响因素的研究表明: 硝化作用在高 pH 下更易转化, pH 等于 8 是进行硝化作用的最适宜环境^[7]。由图 4 可知, 南水和北水混合反应体系中 pH 值变化范围在 7.7 至 8.4 之间, 硝化反应的 pH 值环境最佳。

4.2 水文地球化学演化模拟

4.2.1 反向地球化学模拟

水文地球化学模拟主要是对天然地下水系统的

一些地球化学过程进行数值模拟, 并预测地球化学过程能否进行及进行的限度。反向模拟的原理是根据同一水流路径上的初始水化学成分、终止水化学成分及反应路径上可能产生的中间矿物相, 从而确定此过程中的水-岩反应过程^[18-19]。

PHREEQC(平衡化学反应模型)是一个被广泛应用的反向水文地球化学模拟软件, 它可以选择调用数据库中一系列描述水化学成分、离子强度、离子交换种类、不同相物质溶解平衡等过程来描述多组分溶液中相应的化学反应过程。在 PHREEQC 中组成的方程组, 采用改进的牛顿-拉斐逊(Newton-Raphson)方法进行迭代求解。

利用 PHREEQC 计算南水和北水中各个矿物组分的饱和指数, 从结果(表 3)可以看出, 北水中方解石、白云石和文石处于过饱和状态, 石膏、氟石和岩盐处于未饱和状态; 而南水中矿物组分均处于未饱和状态。

根据土壤样品的矿物组分及体系中的离子浓度值, 选择方解石、白云石、钾长石、石英、岩盐、Ca-Na 阳离子交换作为模型中的可能矿物相, 并选择 K、Ca、Na、Mg、Cl、F、SO₄²⁻、C 和 Si 等 9 种元素作为模型中的约束变量。整个过程中, SO₄²⁻ 的浓度变化较小且接近南水中的浓度, 这表明整个过程中土壤岩层中的石膏的变化可以忽略。

根据选择的中间矿物相及约束变量, 输入水质数据及相关参数, 模拟不确定度为 0.05^[20], 通过 PHREEQC 可以模拟出实验过程中主要矿物相的转化量, 见表 4。模拟的结果通常是多解的, 需要根据研究区内的水文地质条件及土壤矿物组分, 选择准确

表 3 南水和北水中各矿物组分的饱和指数

Tab. 3 Saturation index of the mineral in each water

	硬石膏	文石	方解石	白云石	钾长石	氟石	石膏	石英	岩盐	CO ₂
北水	-2.38	0.37	0.52	0.74	/	-1.81	-2.19	/	-7.66	-2.49
南水	-2.39	-0.25	-0.10	-0.65	/	-2.26	-2.15	/	/	-2.36

表 4 模拟结果

Tab. 4 The results of the simulation

	方解石	白云石	钾长石	岩盐	CO ₂	MgX	CaX ₂	NaX
C: D= 0: 10	0.8981	0.495	0.1290	0.2066	1.876	-0.2666	/	0.533
C: D= 2: 8	0.8104	0.645	0.1686	0.2776	2.031	-0.7314	/	0.634
C: D= 3: 7	0.7113	1.002	0.1633	0.3136	2.173	-0.8958	/	0.792
C: D= 4: 6	0.5364	1.030	0.1791	0.3496	2.593	-0.4779	/	0.956
C: D= 5: 5	0.3440	1.185	0.1738	0.3841	2.656	-0.6043	/	1.209
C: D= 6: 4	0.3281	1.331	0.1844	0.4227	2.900	-0.7025	/	1.465
C: D= 7: 3	0.3586	1.410	0.2002	0.4580	3.065	/	-0.7763	1.553
C: D= 8: 2	0.5236	1.448	0.2081	0.5167	3.302	/	-0.7984	1.590
C: D= 10: 0	0.6012	1.479	0.2635	0.5698	3.420	/	-0.8162	1.632

的中间矿物相,才能筛选出最符合实际的反应路径。

从模拟结果中可以看出,混合过程中,体系中发生了方解石、白云石、钾长石、岩盐和 CO_2 的溶解以及 $\text{Mg}/\text{Ca}/\text{Na}$ 阳离子交换反应。

4.2.2 离子变化分析

(1) Na^+ 、 Cl^- 、 K^+ 变化分析: 由于 Cl^- 性质较为稳定, Cl^- 质量浓度变化主要受混合作用的影响。从 Na^+ 的变化趋势和 PHREEQC 模拟结果综合来

看, Na^+ 不仅受物理混合作用的影响,还伴随有岩盐的溶解和相应的阳离子交换过程。PHREEQC 软件模拟结果表明: 南水北水混合过程中发生了阳离子交换过程, $\text{Mg}/\text{Ca}/\text{Na}$ 阳离子交换反应; 当南水所占比例大于 40% 时, 为 $\text{Mg}-\text{Na}$ 阳离子交换反应, 当南水所占比例小于 40% 时, 发生的是 Ca/Na 阳离子交换反应, 随着南水所占比例的增加, 阳离子交换吸附作用逐渐减弱。

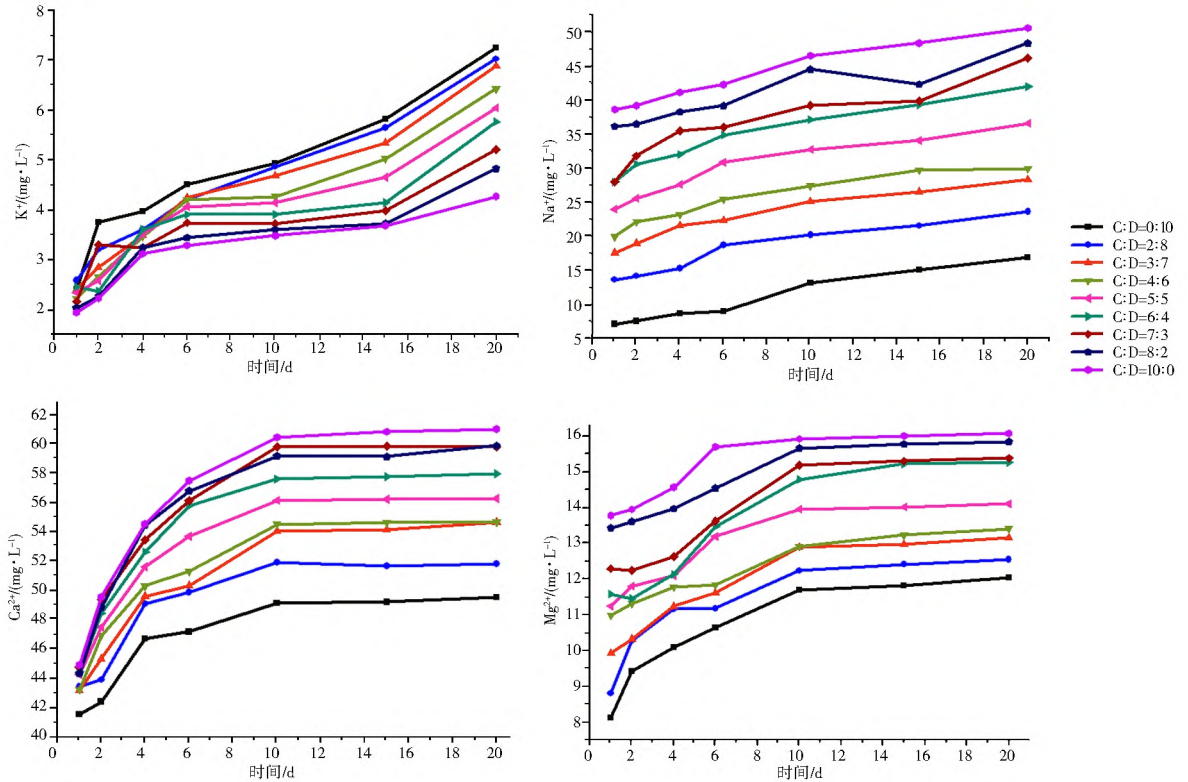


图6 主要阳离子的浓度变化

Fig. 6 Concentration changes of major ions

由表 1 可以看出, 南水中的 K^+ 质量浓度略高于北水, 从实验结果来看, 随着南水比例的增加, K^+ 的浓度表现为升高趋势。随着时间的增加, 浓度值超过了南水中 K^+ 的浓度, 分析其原因可能是在混合过程中 K^+ 浓度受到介质中钾长石溶解的影响, 而 PHREEQC 模拟结果也表明混合过程中发生了钾长石溶解反应。

(2) Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 变化分析: 方解石和白云石在南水中处于未饱和状态, 在北水中处于过饱和状态, 因此当北水在混和体系中占主导地位时, 方解石的溶解程度较低; 但当南水在体系中占主导时, 方解石的溶解趋势增强。所以南水增加能增强对方解石的溶蚀, 且南水所占比例越大, 溶蚀作用越明显。

由硝化反应方程可知, 硝化作用过程中会产生 CO_2 , 硝化作用产生的 CO_2 将引起体系中的 CO_2 分压升高, 从而加速溶解体系中的方解石和白云石。

随着这些水-岩反应的进行, 体系中的矿物逐渐溶解^[21], 从而使得 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子浓度增加。

由表 4 可知, 混合过程中, 阳离子交换吸附作用和矿物溶解共同影响体系中各阳离子的浓度。阳离子交换作用会提高地下水中的 Na^+ 、 K^+ 浓度, 降低 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度, 而矿物溶解会在一定程度上提高钙、镁的浓度。从图 6 可知, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在实验后期的稳定浓度高于初始浓度, 这表明方解石、白云石的溶解对钙镁浓度提升效应大于阳离子交换对其的降低效应, 从而造成地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度有一定程度的升高。

5 结论

(1) 摇瓶实验结果显示: 随着南水比例的增大, 体系中溶解氧的升高, 受硝化作用的影响, 硝氮浓度逐渐升高, pH 值在硝化作用和碳酸平衡的共同影

响下,呈现先降低后升高的变化趋势,与氨氮浓度变化过程呈反相关。

(2) 反向地球化学模拟结果显示:混合过程中,体系中发生了方解石、白云石、钾长石、岩盐和 CO_2 的溶解以及 Mg/Ca Na 阳离子交换反应。南水比例占主导时,方解石溶解趋势增强,期间伴随着阳离子交换反应。当南水比例大于 40%,呈现 $\text{Mg}-\text{Na}$ 阳离子交换反应;当南水所占比例小于 40% 时,呈现 $\text{Ca}-\text{Na}$ 阳离子交换反应。南水在混合体系中所占比例越大,阳离子交换吸附作用越弱。

参考文献(References):

- [1] 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):22-28. (ZHENG Fandong, LIU Licai, YANG Muqi, 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 and Engineering Geology, 2012, 39(6): 22-28. (in Chinese))
- [2] 黄大英,王萍.北京市南水北调配套工程南水北调北京市水资源配置规划[R].北京:北京市水利规划设计研究院,2005. (HUANG Daying, WANG Ping. Beijing Water Resources Distribution Planning of Matching Engineering of South to North Water Diversion[R]. Beijing: Beijing Institute of Water, 2005. (in Chinese))
- [3] 刘立才,曹力娟,于景川.南水北调水源在引潮入城水源地的管井回灌试验研究[J].北京水务,2014(1):4-6. (LIU Licai, CAO Lijuan, YU Jingchuan. Study on tubular well injecting test of South to North water in Yinchaorucheng groundwater sources area[J]. Beijing Water, 2014(1): 4-6. (in Chinese))
- [4] 沈照理,王焰新,郭华明.水岩相互作用研究的机遇与挑战[J].地球科学中国地质大学学报,2012,37(2):207-219. (SHEN Zhao li, WANG Yan xin, GUO Minghua. Opportunities and challenges of water rock interaction studies[J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(2): 207-219. (in Chinese))
- [5] Price R E, Pichler T. Abundance and mineralogical association of arsenic in the Suwannee Limestone (Florida): Implications for arsenic release during water rock interaction[J]. Chemical Geology. 2006, 228(4): 44-56.
- [6] Orly G, Ittai G, Avihu B, et al. Cation exchange and CaCO_3 dissolution during artificial recharge of effluent to a calcareous sandstone aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2011(400): 165-167.
- [7] 石旭飞,王寒梅,焦珣,等.人工回灌条件下的水岩作用室内实验研究[J].上海国土资源,2012,33(2):21-24. (SHI Xufei, WANG Hanmei, JIAO Xun, et al. Experimental study of water-rock interaction during artificial recharge[J]. Shanghai Land and Resources, 2012, 33(2): 21-24. (in Chinese))
- [8] 林学钰,张文静,何海洋,等.人工回灌对地下水水质影响的室内模拟实验[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,5(42):1404-1409. (LIN Xueyu, ZHANG Wenjing, HE Haiyang, et al. Experiment on impact of groundwater quality during artificial recharge process[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 5(42): 1404-1409. (in Chinese))
- [9] 章丽萍,温晓东,张剑,等.南水北调工程北京段地下水回灌对含水层水质影响[J].水资源保护,2014,30(4):7-9. (ZHANG Liping, WEN Xiaodong, ZHANG Jian, et al. Influence of groundwater recharge on aquifer water quality in Beijing section of South to North Water Diversion Project[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(4): 7-9. (in Chinese))
- [10] 张志永,焦剑妮,李凤翀,等.地下水回灌对地下水开采能力影响[J].南水北调与水利科技,2014,12(6):51-56. (ZHANG Zhiyong, JIAO Jianni, LI Fengchong, et al. Impact of groundwater recharge in underground reservoirs on groundwater production capacity[J]. South to North Water Transfers and Water Sciences & Technology, 2014, 12(6): 51-56 (in Chinese))
- [11] 翟远征,王金生,周俊.北京市潮白河冲洪积扇地下水流动和更新模式的水化学和同位素标记[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(1):32-44. (ZHAI Yuezheng, WANG Jisheng, ZHOU Jun. Hydrochemical and isotopic markers of flow patterns and renewal mode of groundwater in Chaobai River alluvial fan in Beijing[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(1): 32-44. (in Chinese))
- [12] 罗泽娇,靳孟贵.地下水三氮的污染的研究进展[J].水文地质工程地质,2002,4(65):65-69. (LUO Zhejiao, JIN Menggui. Research progress of ammonia, nitrite and nitrate pollution in groundwater[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2002, 4(65): 65-69. (in Chinese))
- [13] 邹环,王金生,赖德胜.松花江吉林段沿岸浅层地下水硝酸盐污染特征和影响因素分析[J].南水北调与水利科技,2014,12(6):202-207. (XUN Huan, WANG Jisheng, LAI Desheng. Characteristics and influencing factors of nitrate pollution in shadow groundwater at Jilin section of Songhua River[J]. South to North Water Transfers and Water Sciences & Technology, 2014, 12(6): 202-207. (in Chinese))
- [14] 王伟宁,许光泉,何晓文.淮北平原地下水三氮浓度分布规律及其影响因素分析[J].水资源保护,2010,26(2):45-52. (WANG Weining, XU Guangquan, HE Xiaowen. Distribution and analysis of factors influencing three nitrogen compounds in groundwater of Huaibei Plain[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(2): 45-52. (in Chinese))
- [15] 孙大志,刘华中,孟凡宇.氨氮在土壤中吸附影响因素的研究[J].吉林化工学院学报,2007,24(4):31-33. (SU Dazhi, LIU Huazhong, MENG Fanyu. Study on the influence factors of ammonia adsorption in soil[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2007(12): 163-165. (in Chinese))
- [16] 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[J].水文地质工程地质,2012,39(1):1-7. (LIU Licai, ZHENG Fandong, ZHANG Chunyi. Characteristics of water quality of South to North water diversion mixed with groundwater in Beijing[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2012, 39(1): 1-7. (in Chinese))

(上转第 135 页)

- you, SUO Li sheng. Rigid model of transient analysis for multiple characteristic long pipelines with trapped air mass[J]. Journal of Hydrodynamics, 2005(1): 44-49. (in Chinese)
- [8] 高婧宇, 车威. 重力有压输水系统主线调节阀关闭水锤计算[J]. 阀门, 2012(1): 29-32. (GAO Jing yu, CHE Wei. Water hammer calculation on the main regular valve closed condition in gravity pressure conveyance system[J]. Valve, 2012(1): 29-32. (in Chinese))
- [9] 高学平, 蒋琳琳, 刘奕朗, 等. 长距离重力流输水管路水锤压力数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2012(6): 69, 41. (GAO Xue ping, JIANG Lin lin, LIU Yi lang, et al. Numerical simulation of water hammer pressure in long distance water gravitational transportation pipeline[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012(6): 69, 41. (in Chinese))
- [10] 齐向南, 高小涛, 刘建红, 等. 长距离重力流输水管道充水调试关键问题探讨[J]. 给水排水, 2013(8): 114-116. (QI Xiang nan, GAO Xiao tao, LIU Jian hong, et al. Discussion of the key problems about water filled debugging in long distance gravitational water transportation pipeline [J]. Water and Wastewater Engineering, 2013(8): 114-116. (in Chinese))
- [11] 王超, 陈文立, 康学飞. 长距离重力输水工程中水锤防护措施的对比如研究[J]. 供水技术, 2013(3): 25-28. (WANG Chao, CHEN Wen li, KANG Xue fei. Comparison of measures for water hammer control in long distance gravity water transfer projects [J]. Water Technology, 2013(3): 25-28. (in Chinese))
- [12] 朱小双. 长距离大高差多级消能重力流输水系统水锤防护研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. (ZHU Xiao shuang. Research on the protection technology of water hammer in long distance, large elevation difference, multi-level energy dissipation and gravity flow water supply system[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese))
- [13] 马兰兰. 长距离多支管重力流输水系统水锤防护研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. (MAN Lan lan. Study on the water hammer prevention of long-distance and multiple branches, with gravity flow, water supply system[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese))
- [14] Wylie E B, Streeter V L, SUO Li sheng. Fluid transient in systems[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993: 6F-65.
- [15] 封金磊. 关于减小关阀水锤危害的阀调节的优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012. (FENG Jin lei. Optimization of valve adjustment for reducing the closing valve water hammer damage[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese))
- [16] 陈明, 李秉昕, 贾如玉, 等. 管道耦合水击的最优阀调节问题研究[J]. 流体机械, 2011(3): 3F-36. (CHEN Ming, LI Bing xin, JIA Cong yu, et al. Study on optimal valve stroking of coupling water hammer in the pipeline[J]. Fluid Machinery, 2011(3): 3F-36. (in Chinese))
- [17] 冯卫民. 泵系统最优阀调节策略及水锤控制方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004. (FENG Wei min. Research on the optimization strategy of pumping system valve stroking and water hammer protecting[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese))
- [18] 王林锁, 索丽生, 屈磊飞, 等. 水力机组过渡过程阀调节应用研究[J]. 水力发电学报, 2007(2): 143-146. (WANG Lin suo, SUO Li sheng, QU Lei fei, et al. Study on application of valve stroking in hydro turbine system[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007(2): 143-146. (in Chinese))
- [19] 张健, 俞晓东, 朱永忠. 长距离供水工程的关阀水锤与线路充填[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 183-189. (ZHANG Jian, YU Xiao dong, ZHU Yong zhong. Study on water hammer and line packing in long distance water supply project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2): 183-189. (in Chinese))
- [20] CECS 193: 2005, 城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程[S]. (CECS 193: 2005, Technical specification for long distance water transmission pipeline engineering of urban water supply [S]. (in Chinese))

(下接第 148 页)

- [17] 闫芙蓉, 邓清海, 潘国营. 陕西省冯家山灌区三氮转化机理实验研究[J]. 西部探矿工程, 2003(12): 163-165. (YAN Fu rong, DENG Qing hai, PAN Guo ying. The experimental research of three nitrogen transformation mechanism in Fengjia mountain irrigation area in Shanxi province [J]. West-China Exploration Engineering, 2003(12): 163-165. (in Chinese))
- [18] 杜新强, 齐素文, 廖资生, 等. 人工补给对含水层水质的影响[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 2(37): 293-297. (DU Xin qiang, QI Su wen, LIAO Zi sheng, et al. Influence of artificial recharge on groundwater quality [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 2(37): 293-297. (in Chinese))
- [19] 王焰新, 郭华明, 阎世龙, 等. 浅层孔隙地下水系统环境演化及污染敏感性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (WANG Yan xin, GUO Hua ming, YAN Shi long, et al. Geochemical evolution of shallow groundwater systems and their vulnerability to contaminants[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [20] 曹振东, 危润初, 段启杉, 等. 犀牛洞地下水-岩作用反向模拟[J]. 人民黄河, 2012, 34(10): 74-76. (CAO Zhen dong, WEI Rui chu, DUAN Qi shan, et al. Inverse Geochemical simulation of Water Rock interaction of Xiniudong underground river of Xiniu Cave [J]. Yellow River, 2012, 34(10): 74-76. (in Chinese))
- [21] 朱中竹, 王维平, 蒋颖魁, 等. 屋面雨水回灌裂隙岩溶水水岩作用实验研究[J]. 中国岩溶, 2012, 31(3): 272-278. (ZHU Zhong zhu, WANG Wei pin, JIANG Ying kui, et al. Laboratory experiment on water rock interaction of the karst fracture water after recharged with roof rainwater [J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(3): 272-278. (in Chinese))