

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0065

李倩雯,邢国章,孙红福,等.北京西郊浅层地下水回灌的水质预测[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):105-114,154. LI Q W, XING G Z, SUN H F, et al. Water quality prediction of shallow groundwater recharge in the western suburbs of Beijing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 105-114, 154. (in Chinese)

## 北京西郊浅层地下水回灌的水质预测

李倩雯<sup>1</sup>, 邢国章<sup>2</sup>, 孙红福<sup>1</sup>, 杨萌<sup>1</sup>, 褚闪闪<sup>1</sup>, 张玉虎<sup>1</sup>, 乔丽<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 北京市地质工程勘察院, 北京 100048)

**摘要:**地下水回灌不仅能够弥补地下水资源的亏空,而且能够稀释净化受污染的地下水。根据北京水源四厂的回灌试验数据,利用 PHREEQC 模拟软件进行了水质混合模拟和水质预测研究。回灌试验对南井水质影响较大,北井和东井的水质基本没有变化;南井的水质由Ⅲ类水质提升为Ⅱ类水质,其氯化物、硫酸盐、硝酸盐和碳酸氢、盐质量浓度在回灌结束时与回灌井的质量浓度非常接近;而钾、钙和镁的最终质量浓度略微低于回灌井中相应指标的质量浓度,可能是由于阳离子交换作用导致。混合模拟水质与其回灌实测水质数据具有很好的相关性,由此获得南井的模拟混合比与回灌时间的线性方程,其  $R^2$  高达 0.999。据此预测北井在相同的回灌条件下需要回灌 11 d,其水质才能由最初Ⅳ类水质提升为Ⅱ类水质。本研究的水质预测方法能够有效提高地下水回灌的效率,对于地下水的精准回灌具有重要的指导意义。

**关键词:**回灌试验;PHREEQC;水质;预测;混合模拟

中图分类号:X824;P641.3 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Water quality prediction of shallow groundwater recharge in the western suburbs of Beijing

LI Qianwen<sup>1</sup>, XING Guozhang<sup>2</sup>, SUN Hongfu<sup>1</sup>, YANG Meng<sup>1</sup>, CHU Shanshan<sup>1</sup>, ZHANG Yuhu<sup>1</sup>, QIAO Li<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Beijing Institute of Geological & Prospecting Engineering, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Groundwater recharge can not only cover the deficit of groundwater resources, but also dilute and purify contaminated groundwater. The recharge experiments at Beijing Water Source No. 4 Plant and the PHREEQC simulation software were used in this study for water quality mixing simulations and water quality prediction. The results showed that the recharge has a great impact on the water quality of South Well, but limited impacts on that of North Well and East Well. The water quality of South Well was upgraded from Class III to Class II. The chloride, sulfate, nitrate and bicarbonate were recharged and their the concentration, at the end were very close to those of the recharge wells. The final mass concentrations of potassium, calcium and magnesium were slightly lower than those of the recharge wells, probably due to cation exchanges. The simulated water quality of mixed water had a good correlation with the observations, and a linear equation of the simulation mixing ratio and recharge time of South Well were obtained. Its coefficient of determination ( $R^2$ ) was as high as 0.999. It predicted that the groundwater in Beijing needed 11 days to be recharged under the same conditions for the water quality being upgraded from the Class IV to Class II. The water quality prediction method of this study can effectively improve the efficiency of groundwater recharge and has useful guideline for groundwater recharge prediction.

**Key words:** recharge test; PHREEQC; water quality; prediction; hybrid simulation

收稿日期:2018-12-12 修回日期:2019-04-09 网络出版时间:2019-04-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190412.1136.002.html>

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项“北京受水区饮用水安全保障技术研究与工程示范项目”

作者简介:李倩雯(1994—),女,山东潍坊人,主要从事水文地质方面的研究。E-mail: lqw3\_7@163.com

通信作者:孙红福(1977—),男,河南鹤壁人,副教授,博士,主要从事地下水污染防治研究。E-mail: shf\_cumtb@163.com

由于工业废污水及生活污水的大量排放,农业用水的过量开采造成地下水水质恶化、供水不足等一系列问题<sup>[1-2]</sup>。南水北调工程大大缓解了北京市水资源紧缺的局面,在保障居民生活用水的前提下,富余的水将回灌至地下储存,以涵养长期严重亏损的地下水资源<sup>[3-4]</sup>。地下水回灌不仅可以增加地下水资源、提高地下水位,而且还可以改善地下水水质<sup>[4-7]</sup>。近年来对于地下水回灌的研究主要集中在地下水人工回灌堵塞问题的解决,涉及机械堵塞、生物堵塞以及气相堵塞<sup>[8-10]</sup>、回灌对于地下水年龄分布规律的影响<sup>[11]</sup>、维持地下水收支平衡的回灌量预算<sup>[12-14]</sup>、回灌对于基坑安全的影响<sup>[15-17]</sup>、回灌对地下水水质的影响<sup>[4-7,18-26]</sup>等方面。地表水回灌对地下水水质的影响研究主要通过模拟含水层的室内土柱实验<sup>[4,6,18-19]</sup>、水样混合试验<sup>[5]</sup>、模型和软件模拟<sup>[21-22]</sup>、渗滤池砂样对回灌水中污染物去除<sup>[27]</sup>、松散砂层及其有效粒径对回灌水水质影响的实验进行研究<sup>[28]</sup>,但地下水实际赋存和径流环境对水质的影响更加复杂<sup>[29]</sup>,通过原位回灌试验数据对地下水水质变化规律的研究更具有应用价值。本文以北京地区水源四厂回灌试验为研究对象,利用 PHREEQC 软件混合模拟功能研究回灌后地下水水质的变化规律,为地下水的精准回灌提供科学依据。

## 1 回灌试验概况

### 1.1 研究区概况

水源四厂井院位于北京市丰台区莲花池东南一带,北京西站以南、徽都大酒店以西。水源四厂区域第四系地层主要为结构单一、岩性简单的砂卵石。丰台区地势总体上由西北向东南逐步降低,西部为山区,东部为平原,平原占丰台区面积的 3/4。区域内冬季受高纬度内陆季风影响,寒冷干燥;夏季受海洋季风影响,高温多雨,是典型的暖温带半湿润季风型气候。永定河自北而南由石景山流经本区进入大兴区,长约 15 km 的河段,将丰台区分为东西两部,试验区位于东部。

### 1.2 水源四厂试验

水源四厂井院始建于 1954 年,设计供水能力为 5 万  $\text{m}^3/\text{d}$ 。近些年,水厂附近水位下降严重,水质较差。水厂开采地下水以压采为主,开采量较小,选择水厂内北部区域进行试验。该区分布有编号为 421、426、429 等 3 眼水井和编号为 175 的 1 眼北京市市级动态监测井(图 1),可用于回灌试验监测,另外需要在已有水源井 421、426、429 中间施工了 1 眼

深 38 m,直径 529 mm 的回灌井。回灌井从地表到地下 4.2 m 为黏土,4.2~38 m 为砂卵石。通过管线、泵房及相关设备组成的试验系统,把地表水源引入新施工的回灌井中试验。具体的区域地下水等水位线见图 2。

水源四厂回灌试验开始时间为 2014 年 4 月 21 日 10 时 55 分,停止时间 2014 年 5 月 22 日 9 时 44 分,回灌持续时间为 742 h 49 min(约 31 d)。为研究地区初始水质和回灌水水质,试验开始前和试验进行过程中对回灌水、南井、北井、东井进行了水质取样。



图 1 水源四厂回灌试验体系

Fig. 1 Recharge system at No. 4 water source plant

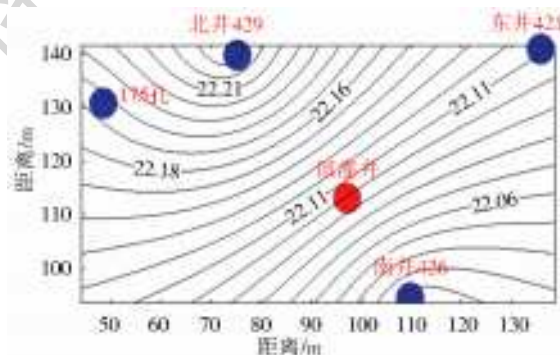


图 2 研究区域地下水等水位线

Fig. 2 Water level contour at study area

#### 1.2.1 回灌井水位变化

结合回灌数据和图 3 回灌前、回灌中及回灌后(4 月 21 日—5 月 24 日)回灌井的水位变化曲线可知,回灌试验开始后回灌井水位上升约 14 m,其后水位出现整体缓慢上升趋势,水位从 36.28 m 缓慢上升到了停灌时 40.4 m,停灌后水位下降到了 21.9 m,下降了 18.5 m。在回灌试验过程中,回灌井水位出现有短时的波动,包括第 225 h(4 月 30 日 19 时)、第 232—241 h(5 月 1 日 2 时—11 时)水位出现升高(3.5 m);第 696 h(5 月 20 日 10 时 4 分)水位出现下降(85 cm);5 月 22 日 8 时 20 分停灌后水位上升约 3 m,持续 1.58 h(8 时 24 分—9 时 59 分)降到最低。

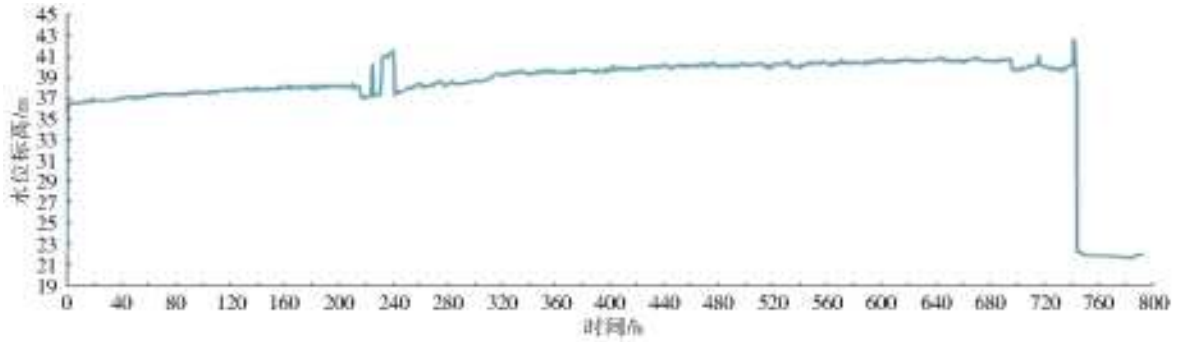


图3 4月21日至5月24日回灌井水位变化曲线(5月22日9时44分停止回灌)

Fig. 3 Water levels of the recharge well from April 21 to May 24 (Recharge stopped at 9:44AM on May 22)

### 1.2.2 监测井水位变化

回灌前、回灌中及回灌后(4月21日—5月24日)各监测井的水位变化曲线见图4,结果显示:

(1)回灌试验期间,监测井水位整体呈先升高后降低趋势,约在试验进行167h(4月28日8时04分)时南井、东井水位出现了降低,北井、175孔水位变化不大;约在试验进行213h(4月30日7时04分)时北井、175孔水位出现下降。此后持续到试验结束回灌时,各监测井水位整体呈下降趋势。

(2)5月22日9时44分停灌后,各监测井水位

均下降,除北井外(北井为人工观测水位,1天测2次)各监测井整体在5月24日3时59分下降到最低,南井水位从20.764m下降到19.4263m,东井从21.7755m下降到21.2265m,175孔从22.041m下降到21.527m,南井、东井、175孔分别下降了1.3377m、0.549m、0.514m。其后监测井水位整体出现回升,南井水位回升到21.2419m,上升了1.8156m;东井水位回升到了21.3709m,上升了0.1444m;175孔水位回升到了21.729m,水位上升了0.202m。

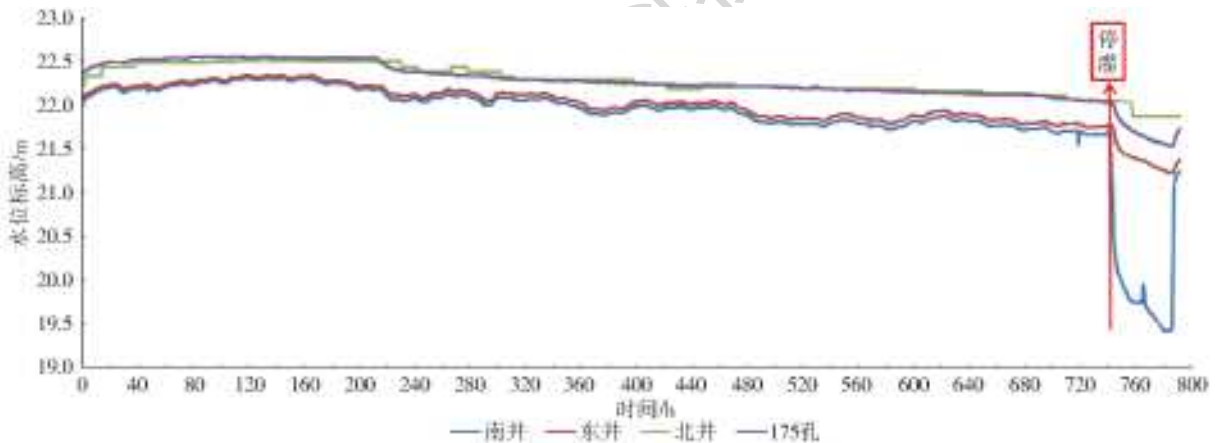


图4 4月21日至5月24日监测井水位变化曲线(5月22日9时44分停灌)

Fig. 4 Water levels at the monitoring well from April 21 to May 24 (irrigation stopped at 9:44AM on May 22)

### 1.2.3 回灌水量变化

回灌水量每天监测6次,频率为1次/4h,将每天6个回灌水量数按累计小时数进行排列,绘制了回灌水量的变化曲线(图5)。

(1)回灌试验进行的过程中,回灌量整体缓慢下降,第一天 $156.6 \text{ m}^3/\text{h}$ (合 $3758 \text{ m}^3/\text{d}$ ),5月22日降低到 $131.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ( $3148 \text{ m}^3/\text{d}$ ),试验持续的33天内衰减程度为 $18.48 \text{ m}^3/\text{d}$ 。在240h,回灌水量出现猛增,推测其原因为220h水位出现一定幅度降低,为维持水位保持小幅度内变化,所以人为调大流量,导致在240h,回灌水量会出现猛增的现象。

(2)从回灌水量与回灌井水位的同期对比可以看出,随着回灌量的大小变化,回灌井水位出现了高低的变化曲线,回灌停止后,回灌井水位立即出现了降低。在整体回灌过程中,回灌井水位整体呈上升趋势,但是回灌量呈降低趋势。本次回灌试验为重力回灌且水源为水厂处理后的清洁自来水,伴随着回灌井水压的增加、回灌量降低,说明随着时间的延续,采用水井进行回灌,回灌井回灌量会衰减,其原因可能是物理、化学、气体等堵塞作用造成<sup>[9-10]</sup>。

## 2 回灌试验水质结果分析

回灌井、南井、北井和东井在回灌前后的水质指



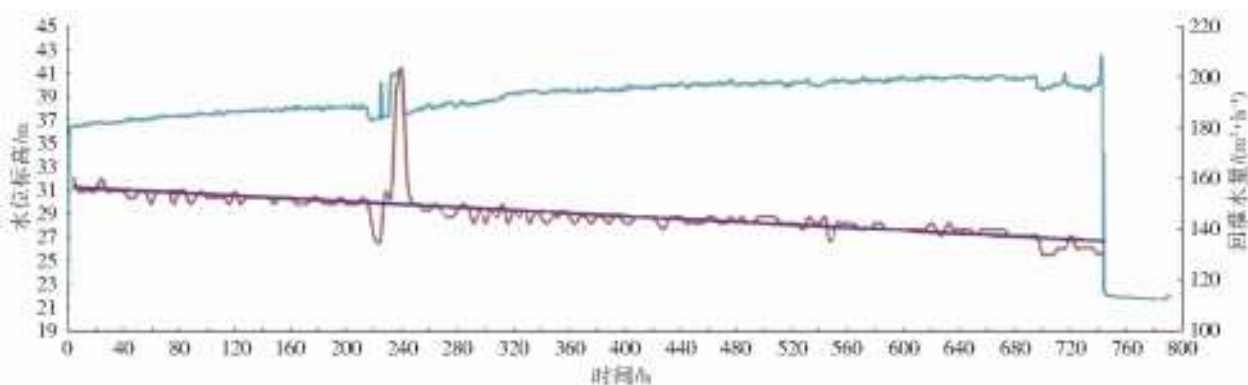


图 5 试验回灌井水位与回灌量变化曲线

Fig. 5 Water levels and recharge amount of recharge well

标见表 1。回灌井回灌前水质与回灌水的水质相同,南井、北井和东井回灌前原始井水的水质较差,依据《地下水质量标准(GB/T 14848—2017)》,4 个井水的水质等级分别为Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅳ类和Ⅳ类。其中回灌井中硫酸盐和硝酸盐分别达到了 60.3 mg/L 和 2.74 mg/L,略微超过了Ⅰ类地下水标准限制。南井中硝酸盐质量浓度高达 18.8 mg/L,超过了Ⅲ类地下水水质标准,硫酸盐和氯化物质量浓度达到Ⅱ类地下水水质标准。北井和东井较南井污染更重,北井和东井中的硝酸盐质量浓度均超过 26 mg/L,为Ⅳ类地下水;硫酸盐超过Ⅱ类地下水水质限制;氯化物质量浓度未超过Ⅱ类地下水水质限制。此外,只有东井的亚硝酸盐超过了Ⅰ类地下水标准限制。地下水中超标的

硝酸盐表明地下水很早以前就受到污染,而亚硝酸盐的存在表明地下水是在近期受到污染<sup>[30-31]</sup>。北京城近郊区地下水中超标的硝酸盐和氯化物主要来源为人为污染,而硫酸盐为次要人为污染<sup>[20]</sup>。因此,回灌试验的北井、南井、东井的井水很久以前就被人为污染源污染,而东井近期也遭受了污染。

回灌对南井的水质影响最大,经过 31 d 的回灌,南井的水质由Ⅲ类水质降为Ⅱ类,南井中硫酸盐和硝酸盐分别降为 50.8 mg/L 和 2.89 mg/L,与回灌井的水质非常接近,略微超过Ⅰ类水质。而回灌对北井和东井的水质影响较小,超标组分硝酸盐、硫酸盐、氯化物和亚硝酸盐的质量浓度呈现小幅减少,2 口井水回灌后依旧为Ⅳ类水质。

表 1 回灌试验 4 个井的水质指标

Tab. 1 Water quality at four wells before and after recharges

单位:mg/L

项目	pH	钙	镁	钠	钾	碳酸氢盐	硫酸盐	氯化物	硝酸盐	亚硝酸盐	水质等级	
回灌井	回灌前	8.03	59.5	22.9	20.1	2.58	219.54	60.3	32.8	2.74	<0.010	Ⅱ
	回灌后	7.74	70.4	23.0	21.1	2.53	274.00	50.4	29.5	2.86	<0.001	Ⅱ
南井	回灌前	7.32	134.0	45.4	71.2	3.44	460.68	137.0	105.0	18.80	<0.001	Ⅲ
	回灌后	7.79	64.5	20.4	23.9	2.24	252.83	50.8	27.4	2.89	<0.001	Ⅱ
北井	回灌前	7.15	167.0	55.8	90.2	3.92	532.92	174.0	150.0	27.00	<0.001	Ⅳ
	回灌后	7.19	177.0	56.4	92.8	4.08	660.26	128.0	134.0	26.30	<0.001	Ⅳ
东井	回灌前	7.15	168.0	55.7	90.4	3.78	545.56	176.0	143.0	26.70	0.007	Ⅳ
	回灌后	7.14	169.0	55.1	89.6	3.80	636.97	120.0	130.0	26.70	0.004	Ⅳ

回灌试验四口井中钾、钠、钙和镁质量浓度随回灌时间的变化规律见图 6。在整个回灌周期内,北井和东井中钾、钠、钙和镁质量浓度比较稳定,不受回灌的影响;而南井中的钾、钠、钙和镁质量浓度变化非常显著,在回灌的前 4 天质量浓度下降速率最大,钾、钠、钙和镁质量浓度分别降低了 75%、68%、83%和 80%,之后质量浓度缓慢降低;在回灌试验的中后期,南井中的钾、钙和镁质量浓度低于回灌井中的质量浓度;在回灌试验结束时,回灌井中钾、钙和镁质量浓度分别比南井对应的质量浓度高 0.29、

2.6 和 5.9 mg/L。这些现象的原因可能是回灌水在混合的过程中发生了化学反应导致的。南水北调地下水回灌的室内模拟实验证实了在回灌的过程中确实会伴随阳离子交换作用<sup>[4,18,22]</sup>。

回灌试验 4 个井水中的碳酸氢盐、硫酸盐、氯化物和硝酸盐质量浓度随回灌时间的变化规律见图 7。回灌主要影响南井中的碳酸氢盐、硫酸盐、氯化物和硝酸盐,回灌前 9 天碳酸氢盐、硫酸盐、氯化物和硝酸盐质量浓度迅速降低,它们的质量浓度分别降低了 48.6%、66.5%、82.9%和 53.6%,之后它们质量浓度与回灌



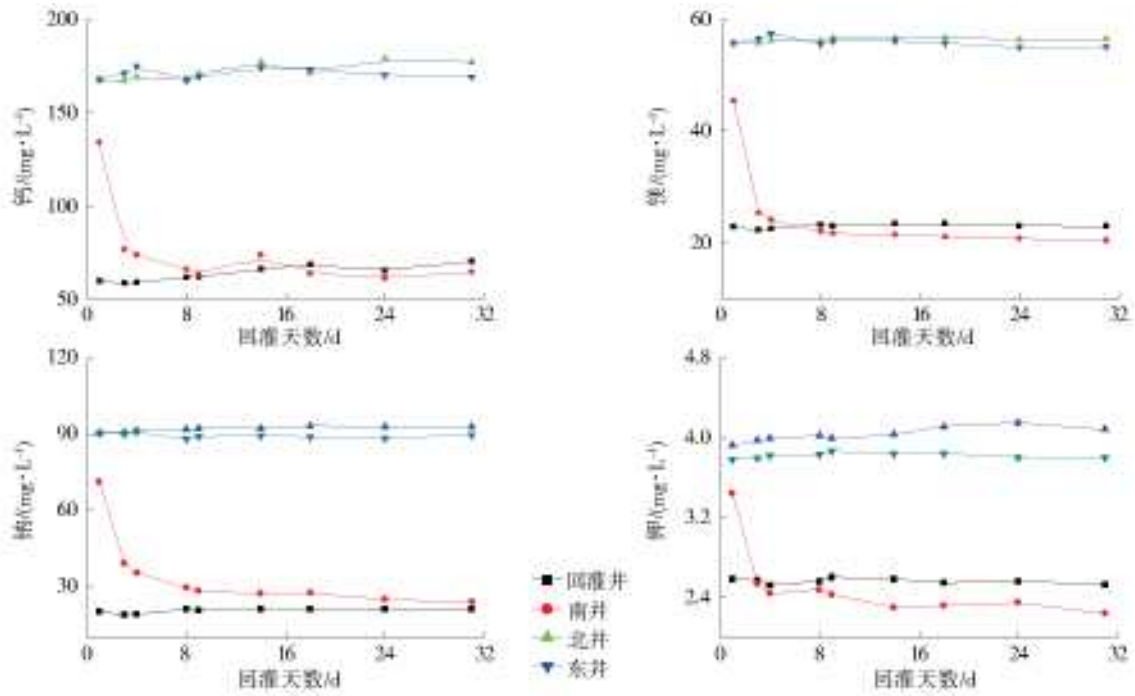


图6 井中钙镁钠钾质量浓度随回灌时间的变化规律

Fig. 6 Temporal variations of calcium, magnesium, sodium and potassium mass concentrations

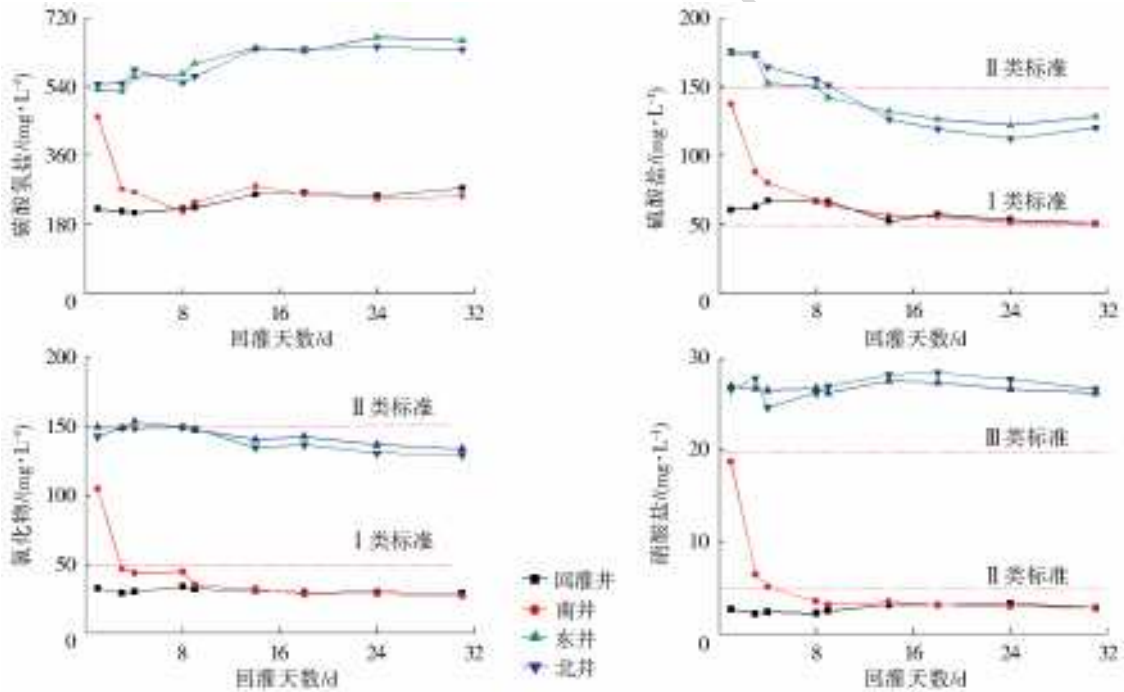


图7 井水中常量项目质量浓度随回灌时间的变化规律

Fig. 7 Temporal variations of some water quality indicators

井的碳酸氢盐、硫酸盐、氯化物和硝酸盐质量浓度保持一致。南井中硫酸盐的最终质量浓度为 50.8 mg/L, 非常接近I类地下水标准限制(50 mg/L);氯化物在回灌第 3 天时其质量浓度降至 47.1 mg/L, 该指标已经达到I类地下水标准;硝酸盐质量浓度在回灌第 4 天由 18.8 mg/L 降至 5.14 mg/L, 该质量浓度已经非常接近II类地下水水质标准的限值(5 mg/L), 之后其质量浓度快速降低至II类地下水水质标准内, 回灌结束

时其浓度为 2.89 mg/L, 该值仍高于I类地下水标准限制(2 mg/L)。北井和东井中碳酸氢盐、氯化物和硝酸盐质量浓度在回灌试验中波动较小, 但硫酸盐质量浓度出现明显的降低, 北井和东井中的硫酸盐质量浓度在回灌过程中分别降低了 52 mg/L 和 64 mg/L。

综上所述, 回灌试验对南井水质影响较大, 而北井和东井受影响较小。这可能与地下水流动方向有很大的关系, 回灌井流向南井的回灌水比例较高, 流

向北井与东井的回灌水比例很小,符合北京地区地下水水流方向由西北流向东南的规律。

### 3 PHREEQC 模拟

根据本研究中回灌实验中回灌井和南井的水质变化规律,可以判定回灌主要影响南井的水质,在回灌的过程中不仅涉及简单的物理反应,还包含化学反应,混合后的水质指标基本符合混合作用,特别是钠、钾、氯化物和硝酸盐完全符合,尽管南井中硫酸盐、碳酸氢盐、钙和镁的最终质量浓度与回灌井的质量浓度出现偏差,但偏差很微弱。本研究利用地球化学模拟软件 PHREEQC 软件的 MIX 模块对回灌井和南井的井水进行混合模拟研究,选取地下水中的钙、镁、钠、钾、碳酸氢盐、硫酸盐、氯化物、硝酸盐、亚硝酸盐、pH 等 10 项化学指标进行混合模拟,回灌井与南井的模拟混合比例分别设定为 1:9、2:8、3:7、4:6、5:5、6:4、7:3、8:2、9:1、10:1、11:1、12:1、13:1、14:1、15:1、16:1、17:1、18:1、19:1、20:1、22:1、24:1、26:1、28:1、30:1、31:1、32:1 和 40:1。

#### 3.1 模拟结果分析

根据 28 个不同混合比例(回灌井:南井)的水质混合模拟结果见表 2。由于回灌井的各项水质指标均低于南井的水质指标,提高回灌井与南井的混合比例,会导致混合水中各组分质量浓度不断降低。

将回灌井与南井模拟混合后的水质指标与不同回灌时间对应的南井实测水质指标进行对比分析(图 8),发现某些模拟混合的南井水质与南井的回灌实测水质具有很好地对应关系。回灌第 1、9、14、18、24 和 31 天的南井实测水质数据与混合比为 1:9、9:1、14:1、18:1、24:1 和 31:1 的南井模拟混合水质数据一致性非常好。如回灌第 9 天,南井实测水样中氯化物和硝酸盐质量浓度分别降至 35.2 mg/L 和 3.22 mg/L;第 9 天的实测水样对应混合比为 9:1 的模拟水样,该模拟水样中氯化物和硝酸盐质量浓度分别为 40 mg/L 和 4.28 mg/L,与实测值非常接近,氯化物和硝酸盐质量浓度值达到 I 类地下水标准和 II 类地下水标准。但回灌第 3、4 和 8 天的南井实测水质数据与混合比为 3:7、5:5 和 6:4 的南井模拟混合水质的一致性较差,特别是硝酸盐、氯化物、硫酸盐、钙离子的偏差比较大。

为了定性分析模拟混合数据与实测数据的一致性程度,对图 8 涉及到的南井模拟混合水质数据与回灌实测数据进行了相对误差分析(相对误差 =  $\frac{\text{模拟数值} - \text{实测数值}}{\text{实测数值}} \times 100\%$ ),相对误差分析结果

见表 3。南井回灌第 3、4 和 8 天的实测数据与模拟数据硝酸盐的相对误差高达 114.2%、108.9% 和 152.7%,表明 3:7、5:5 和 6:4 的混合比与回灌第 3、4、8 天的测试数据无法匹配,应该寻找更适合的混合比进行混合模拟。南井回灌第 1、9、14、18、24、31 天的实测数据与模拟数据的相对误差均低于 33%,表明混合比为 1:9、9:1、14:1、18:1、24:1、31:1 模拟水样数据能够很好地匹配回灌实测数据。

此外,不同组分的模拟数值与实测数值的相对误差存在较大差异,去掉匹配性较差的第 3 天、第 4 天和第 8 天对应的数据,钙、钠和碳酸氢盐对应的实测值高于模拟质量浓度,而其它 5 个项目对应的模拟值高于实测值。这与前人的研究工作基本一致。丹江

表 2 回灌井与南井混合模拟数据  
Tab. 2 Mixed water simulation parameters of recharge well and South well 单位:mg/L

混合比例	钾	钠	钙	镁	碳酸氢盐	硫酸盐	氯化物	硝酸盐
1:9	3.36	66.1	126.4	43.2	437.0	129.4	97.9	17.2
2:8	3.27	61.0	119.0	40.9	412.8	121.7	90.6	15.6
3:7	3.18	55.9	111.5	38.7	388.7	114.0	83.4	14.0
4:6	3.10	50.8	104.1	36.4	364.5	106.3	76.2	12.3
5:5	3.01	45.7	96.6	34.2	340.4	98.7	68.9	10.7
6:4	2.93	40.6	89.2	31.9	316.2	91.0	61.7	9.12
7:3	2.84	35.5	81.7	29.7	292.1	83.3	54.5	7.51
8:2	2.75	30.3	74.3	27.4	267.9	75.6	47.3	5.89
9:1	2.67	25.2	66.9	25.2	243.8	68.0	40.0	4.28
10:1	2.66	24.8	66.2	25.0	241.6	67.3	39.4	4.13
11:1	2.65	24.4	65.6	24.8	239.7	66.7	38.8	4.01
12:1	2.65	24.0	65.1	24.6	238.2	66.2	38.4	3.91
13:1	2.64	23.8	64.7	24.5	236.9	65.8	38.0	3.82
14:1	2.64	23.5	64.4	24.4	235.7	65.4	37.6	3.74
15:1	2.64	23.3	64.1	24.3	234.7	65.1	37.3	3.68
16:1	2.63	23.1	63.8	24.2	233.8	64.8	37.1	3.62
17:1	2.63	23.0	63.6	24.2	233.0	64.6	36.8	3.57
18:1	2.63	22.8	63.3	24.1	232.3	64.3	36.6	3.52
19:1	2.62	22.7	63.1	24.0	231.7	64.1	36.4	3.48
20:1	2.62	22.5	63.0	24.0	231.1	63.9	36.3	3.44
22:1	2.62	22.3	62.7	23.9	230.1	63.6	36.0	3.37
24:1	2.62	22.2	62.4	23.8	229.3	63.4	35.7	3.31
26:1	2.61	22.0	62.2	23.7	228.5	63.1	35.5	3.27
28:1	2.61	21.9	62.0	23.7	227.9	62.9	35.3	3.23
30:1	2.61	21.8	61.8	23.6	227.4	62.8	35.1	3.19
31:1	2.61	21.7	61.7	23.6	227.1	62.	35.1	3.17
32:1	2.61	21.7	61.7	23.6	226.9	62.6	35.0	3.16
40:1	2.60	21.4	61.2	23.5	225.5	62.2	34.6	3.06

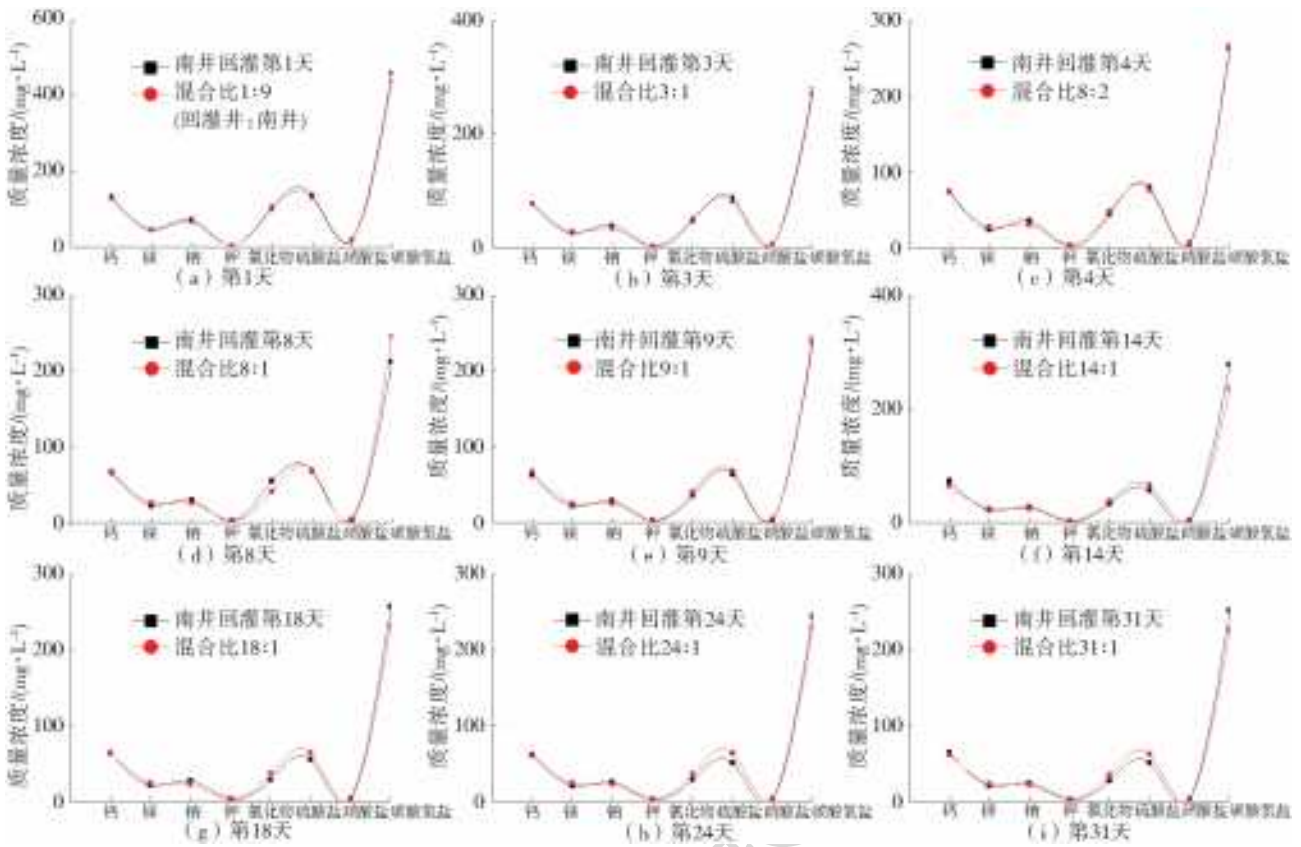


图8 南井的混合模拟数据与回灌实测数据对比

Fig. 8 Comparisons of simulation results and observations of South well

口地表水与北京调蓄池附近地下水的混合过程中受平衡的影响,钙、重碳酸盐和 pH 值的变化较大,表明混合溶液中发生了与碳酸平衡相关的化学变化<sup>[5]</sup>。其中污水回灌过程中地下水钙离子质量浓度升高的原因包括水—岩相互作用过程中的强烈的阳离子交换和碳酸钙的溶解,而钠离子会由于阳离子交换作用导致其质量浓度发生变化<sup>[22]</sup>。

综上所述,模拟混合比和回灌试验的时间具有较好的相关性。剔除相对误差较大的回灌第 3、4 和

8 天的相关数据,选择第 1、9、14、18、24 和 31 天,对它们的回灌时间与模拟混合比进行了拟合分析(见图 9)。回灌时间与模拟混合比的线性关系式为  $Y=1.02X-0.53$ ,其中  $X$  表示回灌时间, $Y$  表示回灌井与目标井的模拟混合比例。线性拟合的确定系数  $R^2$  高达 0.999,表明模拟混合比与回灌时间具有非常显著的线性关系,可以利用该关系式对该研究区或相似地质条件的回灌试验进行预测和指导。

表 3 南井混合模拟水质数据与实测水质数据的相对误差

Tab. 3 Relative errors between simulated water quality and observations at South well

相对误差		钙	镁	钠	钾	氯化物	硫酸盐	硝酸盐	碳酸氢盐
混合比	回灌时间								
1:9	第 1 天	-5.6%	-4.8%	-7.1%	-2.4%	-6.8%	-5.5%	-8.6%	-5.1%
3:7	第 3 天	46.0%	52.3%	42.7%	25.4%	77.1%	30.0%	114.2%	43.3%
5:5	第 4 天	31.2%	41.8%	29.1%	23.5%	57.1%	23.7%	108.9%	29.4%
6:4	第 8 天	35.4%	44.5%	37.6%	18.0%	12.7%	35.2%	152.7%	49.0%
9:1	第 9 天	6.0%	16.0%	-10.5%	9.8%	13.8%	7.0%	33.0%	2.8%
14:1	第 14 天	-12.5%	13.6%	-13.5%	14.7%	16.2%	16.8%	6.1%	-15.6%
18:1	第 18 天	-0.3%	13.7%	-17.1%	-22.3%	29.4%	16.6%	11.0%	-9.9%
24:1	第 24 天	2.0%	14.5%	-11.4%	11.3%	24.9%	24.5%	10.1%	-6.6%
31:1	第 31 天	-4.3%	15.8%	-9.2%	16.4%	28.0%	23.4%	9.8%	-10.2%



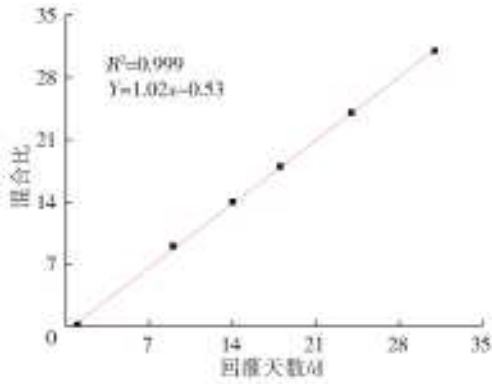


图 9 模拟混合比例与回灌时间的关系

Fig. 9 Linear relationship between mixed ratio and recharge time

表 4 南井第二次混合模拟水质数据相对误差

Tab. 4 Relative errors between simulation water quality and observations for second mixture at South well

相对误差		钙	镁	钠	钾	氯化物	硫酸盐	硝酸盐	碳酸氢盐
混合比	回灌时间								
2.53 : 1	第 3 天	5.4%	15.3%	-11.7%	11.3%	13.2%	-6.4%	11.0%	6.2%
3.55 : 1	第 4 天	2.8%	15.6%	-11.4%	13.6%	11.0%	-3.3%	20.9%	3.6%
7.63 : 1	第 8 天	3.3%	15.5%	-11.7%	8.1%	-24.8%	2.8%	25.7%	16.7%

染更严重的北井和东井水质几乎没有影响。根据北京地区地下水自西北向东南的流动方向,如果计划通过地下水回灌方式净化北井的水质,需要将回灌井的位置设置在北井的西北方向,沿地下水流动的方向距离北井越近则效果越显著,即在地层岩性、回灌水量、水质条件基本一致的情况下,距离与时间成正比,距离越近,达到指定的水质指标所需时间越短。北井的水质为Ⅳ类地下水,主要超标离子为硝酸盐、硫酸盐和氯化物,其中硝酸盐浓度超过Ⅲ类地下水的限制。利用 PHREEQC 软件的 MIX 模块对回灌井和北井进行混合模拟研究,假定回灌井位于北井的西北方向,回灌井的水质仍采用原来的水质数据,模拟混合比分别设置为 1 : 9、2 : 8、3 : 7、4 : 6、5 : 5、6 : 4、7 : 3、8 : 2、9 : 1、10 : 1、11 : 1、12 : 1、13 : 1、14 : 1 和 15 : 1,其它模拟条件不变。

在不同混合比下,回灌井与北井的模拟混合水样中项目浓度质量的变化情况(图 10 和 11),随着回灌井在混合水中所占比例的不断增大,混合水中 8 个项目质量浓度随之降低。《地下水质量标准(GB/T 14848—2017)》规定Ⅱ类地下水中硝酸盐质量浓度 ≤ 5 mg/L,氯化物和硫酸盐质量浓度 ≤ 150 mg/L。根据北井中硫酸盐、氯化物和硝酸盐模拟质量浓度的变化情况(见图 11):当回灌井与北井的混合比位 3 : 7 时,硫酸盐质量浓度降至 139.9 mg/L,达到Ⅱ类地下水水质标准;当回灌井与北井的混合比为 9 : 1 时,氯化物质量浓度降为 44.5 mg/L,达到Ⅱ

根据模拟混合比与回灌时间的线性方程,计算出回灌第 3、4 和 8 天对应的模拟混合比分别为 2.53 : 1、3.55 : 1 和 7.63 : 1。根据该模拟混合比对回灌井和南井的水样进行了二次模拟,并计算了模拟数据与实测数据的相对误差(见表 4)。由表 4 可以看出,南井回灌第 3、4 和 8 天的实测数据与模拟数据的相对误差较之前明显降低,表明新混合比对应的模拟水质数据与实测数据非常匹配,同时证实模拟混合比和回灌时间的线性方程非常有效。

### 3.2 混合模拟预测

本次回灌实验主要影响了南井的水质,而对污

类水质标准;当回灌井与北井的混合比位 10 : 1 时,硝酸盐质量浓度降为 4.8 mg/L,达到Ⅱ类地下水水质标准。因此,只有回灌井与北井的混合比达到 10 : 1 的时候,北井的水质才能达到Ⅱ类地下水的标准。再结合回灌时间与模拟混合比的线性方程,10 : 1 混合比对应的回灌时间为 10.3 d;即在相同的回灌条件下,北井需要回灌 11 d,其水质才能给达到Ⅱ类标准。

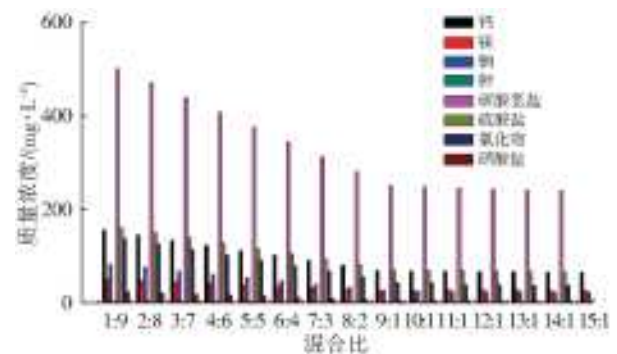


图 10 不同混合比对应的北井模拟水样中项目质量浓度的变化

Fig. 10 Water quality mass concentrations from simulation at North well among different with mixing ratios

## 4 结 论

(1)回灌试验主要影响南井的水质,对北井和东井的水质影响非常微弱,这与北京地区地下水自西北向东南流动的方向有关;

(2)南井的超标项目包括硫酸盐、氯化物和硝酸盐,经过 31 d 的回灌试验,南井的水质由Ⅲ类水质

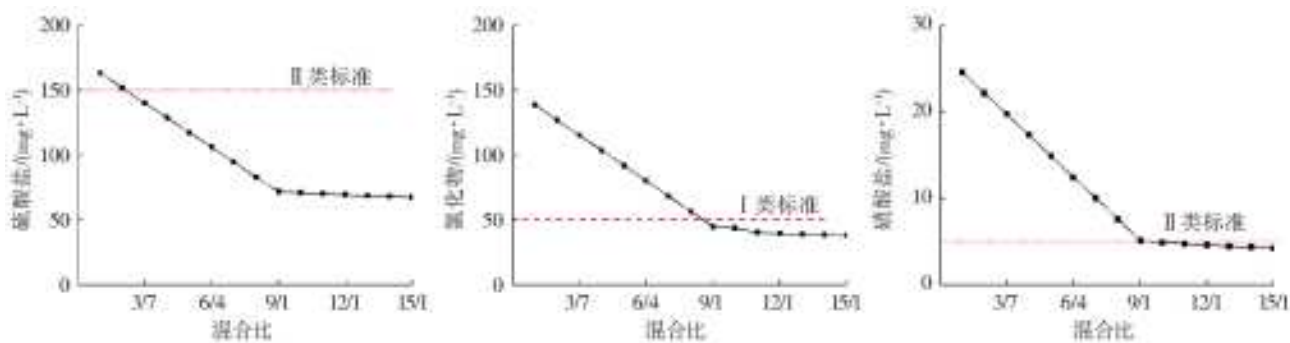


图 11 北井混合模拟水质中硫酸盐、氯化物和硝酸盐质量浓度随混合比的变化

Fig. 11 Mass concentrations of Sulfate, Chloride and Nitrate from different mixing ratios at North well

降为Ⅱ类,其中硫酸盐浓度由最初的 137 mg/L 降至 50.8 mg/L,硝酸盐质量浓度从 18.8 mg/L 降为 2.89 mg/L,与回灌井的水质非常接近;但南井钾、钙和镁的最终质量浓度分别比回灌井中这些质量浓度低 0.29、2.6 和 5.9 mg/L,可能是化学反应所致。

(3)南井混合模拟水质与南井回灌实测水质数据具有很好的相关性,获得南井模拟混合比与回灌时间的线性方程,方程的  $R^2$  高达 0.999。

(4)在相同回灌条件下,预测北井需要回灌 11 d,其水质才能由Ⅳ类降为Ⅱ类地下水标准。

#### 参考文献(References):

- [1] 方生,陈秀玲.地下水开发引起的环境问题与治理[J].地下水,2001,23(1):8-11. (FANG S, CHEN X L. Environmental problems and treatment caused by groundwater development[J]. Groundwater, 2001, 23(1): 8-11. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-1184. 2001. 01. 004.
- [2] 李会安,窦艳兵.南水北调水进京后北京市地下水利用与保护[J].水利规划与设计,2006(5):19-21. (LI H A, DOU Y B. Groundwater utilization and protection in Beijing after water diversion from Beijing to south China[J]. Water Resources Planning and Design, 2006 (5):19-21. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-2469. 2006. 05. 006.
- [3] 潘莉,李玉仙,王体明,等.南水北调来水对北京市供水的影响[J].南水北调与水利科技,2016(A01):205-208. (PAN L, LI Y X, WANG T M, et al. Impact of South-to-North Water Transfer on water supply in Beijing[J]. South-to-North Water Transfer and Water Science and Technology, 2016(A01): 205-208. (in Chinese))
- [4] 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 F D, LIU L C, YANG M Q, et al. Simulation of water-rock interaction in the western suburbs of the South-to-North Water Transfer Project in Beijing[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2012, 39(6): 22-28. (in Chinese)) DOI: 10. 16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 2012. 06. 005.
- [5] 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. Variation characteristics of water quality mixed with water source from South-to-North Water Transfer Project and Beijing groundwater[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2012, 39(1): 1-7. (in Chinese)) DOI: 10. 16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 2012. 01. 025.
- [6] 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),2012,42(5):1404-1409. (LIN X Y, ZHANG W J, HE H Y, et al. Indoor simulation experiments on the influence of artificial recharge on groundwater quality[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(5): 1404-1409. (in Chinese)) DOI: 10. 13278/j. cnki. jjuese. 2012. 05. 026.
- [7] 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),2007,37(2):293-297. (DU X Q, QI S W, LIAO Z S, et al. Effects of artificial recharge on aquifer water quality[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(2): 293-297. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-5888. 2007. 02. 017.
- [8] 杜新强,冶雪艳,路莹,等.地下水人工回灌堵塞问题研究进展[J].地球科学进展,2009,24(9):973-980. (DU X Q, YE X Y, LU Y, et al. Research progress on artificial recharge blockage of groundwater[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(9): 973-980. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-8166. 2009. 09. 003.
- [9] 黄修东,束龙仓,刘佩贵,等.注水井回灌过程中堵塞问题的试验研究[J].水利学报,2009,40(4):430-434. (HUANG X D, SHU L C, LIU P G, et al. Experimental study on clogging problems in recharged water injection wells[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(4): 430-434. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j.

- . cnki . slxb. 2009. 04. 015.
- [10] 束龙仓,张永杰,许杨,等. 地下水人工回灌气相堵塞特征的试验研究[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 756-762.(SHU L C, ZHANG Y J, XU Y, et al. Experimental study on gas clogging characteristics of groundwater artificial recharge[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5): 756-762. (in Chinese)) DOI: 10. 14042 / j. cnki. 32. 1309. 2017. 05. 013.
- [11] 张永杰,束龙仓,温忠辉,等. 人工回灌对地下水年龄分布规律的影响[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 8-14, 44.(ZHANG Y J, SHU L C, WEN Z H, et al. Effects of artificial recharge on the age distribution of groundwater [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2018, 45(1): 8-14, 44. (in Chinese)) DOI: 10. 16030 / j. cnki. Issn. 1000-3665. 2018. 01. 02.
- [12] 刘东,张健,付强. 三江平原井灌区地下水人工回灌量测算[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 240-243. (LIU D, ZHANG J, FU Q. Calculation of groundwater artificial recharge in well irrigation area of Sanjiang Plain [J]. Soil and Water Conservation Research, 2012, 19(2): 240-243. (in Chinese))
- [13] 周建军,虎维岳,张壮路. 废弃矿井地下水回灌模拟分析研究[J]. 西安科技大学学报, 2008, 28(3): 434-438. (ZHOU J J, HU W Y, ZHANG Z L. Simulation analysis of groundwater recharge in abandoned mines [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2008, 28(3): 434-438. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-9315. 2008. 03. 008.
- [14] 刘青勇,潘世兵,武晓峰,等. 地下水回灌补源防治咸水入侵技术研究——以山东省广饶县为例[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(3): 100-104. (LIU Q Y, PAN S B, WU X F, et al. Study on the prevention and control of saltwater intrusion by recharge of groundwater: A case study of Guanghuan County, Shandong Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(3): 100-104. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-4574. 2006. 03. 017.
- [15] 陆建生,潘伟强. 上海某枢纽基坑工程浅层承压水回灌试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(4): 810-817. (LU J S, PAN W Q. Experimental analysis of shallow confined water recharge in foundation pit engineering of a certain hub in Shanghai [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(4): 810-817. (in Chinese))
- [16] 瞿成松. 上海陆家嘴地区回灌试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 295-298. (QU C S. Analysis of recharged test in Lujiazui Area of Shanghai [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2): 295-298. (in Chinese))
- [17] 牛磊,张春福,孟祥玉,等. 天津地区浅层地下水回灌试验分析[J]. 施工技术, 2016, 45(19): 46-48. (NIU L, ZHANG C F, MENG X Y, et al. Experimental analysis of shallow groundwater recharge in Tianjin area [J]. Construction Technology, 2016, 45(19): 46-48. (in Chinese)) DOI: 10. 7672/sgjs2016190046.
- [18] 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, (4): 7-9. (ZHANG L P, WEN X D, ZHANG J, et al. Influence of groundwater recharge on aquifer water quality in Beijing section of South-to-North Water Transfer Project [J]. Water Resources Protection, 2014, (4): 7-9. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-6933. 2014. 04. 002.
- [19] 刘立才,郑凡东,李炳华,等. 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[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 18-22. (LIU L C, ZHENG F D, LI B H, et al. Experimental study on groundwater quality change of the South-to-North Water Transfer Project in the water source of Mishunshun [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(4): 18-22. (in Chinese)) DOI: 10. 16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 2015. 04. 04.
- [20] 程东会,陈鸿汉,何江涛,等. 北京城近郊区地下水人为影响和水-岩作用指示性指标研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(5): 37-42. (CHENG D H, CHEN H H, HE J T, et al. Anthropogenic impacts of groundwater and indicators of water-rock interaction in the suburbs of Beijing City [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34(5): 37-42. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-3665. 2007. 05. 010.
- [21] 杨维,陈曦,李晨霞. 回灌条件下地下水水质模拟与预测[J]. 工程勘察, 2002(4): 23-25. (YANG W, CHEN X, LI C X. Simulation and prediction of groundwater quality under recirculation conditions [J]. Engineering Investigation, 2002(4): 23-25. (in Chinese))
- [22] 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]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 143-148. (JIA W F, YANG Y, ZHAO Y, et al. Simulation of water-rock process in the groundwater storage area of Chaobai River [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science and Technology, 2016, 14(1): 143-148. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 01. 024.
- [23] ONG" OR B T I, LONG-CANG S. Groundwater overdraft and the impact of artificial recharge on groundwater quality in a cone of depression, Jining, China [J]. Water International, 2009, 34(4): 468-483. DOI: 10. 1080/02508060903377619.

(下转第 154 页)



- 的应用[J]. 水利水电技术, 2004, 35(12): 19-22. (ZHANG Y F, ZHANG L R. Jet flow scouring experiments and application of their results to the Tongguan stretch of Yellow River[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2004, 35(12): 19-22. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0860. 2004. 12. 005.
- [19] ADERIBIGBE O O, RAJARATNAM N. Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets[J]. Journal of Hydraulic Research, 1996, 134(1): 19-34. DOI: 10. 1080/00221689609498762.
- [20] 槐文信, 王增武, 钱忠东, 等. 二维垂向射流沙质河床冲刷的数值模拟[J]. 中国科学: 技术科学, 2012(1): 72-81. (HUAI W X, WANG Z W, QIAN Z D, et al. Numerical simulation of two-dimensional vertical jet sand bed erosion[J]. Chinese Science: Technical Science, 2012(1): 72-81. (in Chinese)) DOI: 10. 1007/s11431-011-4574-y.
- [21] 顾磊, 倪福生, 李雯, 等. 喷嘴间距对双股平面射流冲刷的影响[J]. 泥沙研究, 2016(6): 32-37. (GU L, NI F S, LI W, et al. Influence of nozzle distance on scour by two plane water jets[J]. Sediment Research, 2016(6): 32-37. (in Chinese)) DOI: 10. 16239/j. cnki. 0468-155x. 2016. 06. 006.
- [22] BELTAOS S, RAJARATNAM N. Impinging circular turbulent jets[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol, 100, No. HY10, Oct, 1974.
- [23] PERNG A T H, CAPART H. Underwater sand bed erosion and internal jump formation by travelling plane jets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 595(595): 1-43. DOI: 10. 1017/S0022112007008567.
- [24] RAJARATNAM N. Erosion by plane turbulent jets [J]. Journal of Hydraulic Research, 1981, 19(4): 20. DOI: 10. 1080/00221688109499508.
- [25] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京, 科学出版社, 1983: 41-43. (QIAN N, WAN Z H. Sediment movement mechanics[M]. Beijing, Science Press, 1983: 41-43. (in Chinese))
- [26] 钱忠东, 胡晓清, 槐文信, 等. 基于欧拉模型的淹没射流冲刷数值模拟[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(4): 419-425. (QIAN Z D, HU X Q, HUI W X, et al. Numerical simulation of submerged jet scour based on Euler model[J]. Chinese Science: Technical Science, 2011, 41(4): 419-425. (in Chinese)) DOI: 10. 1007/s11431-010-4165-3.
- .....
- (上接第 114 页)
- [24] QIN D, QIAN Y, HAN L, et al. Assessing impact of irrigation water on groundwater recharge and quality in arid environment using CFCs, tritium and stable isotopes, in the Zhangye basin, northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2011, 405(1): 194-208. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2011. 05. 023.
- [25] MILLER C J, MILLER C J. Impact of artificial recharge on Tucson area groundwater quality[J]. 1990.
- [26] KUMAR S, GHOSH N C, SINGH R P, et al. Impact of canal recharge on groundwater quality of Kolar Area, District Bikaner, India[J]. 2016. DOI: 10. 1007/978-3-319-18663-4\_52.
- [27] 黄修东, 束龙仓, 刘佩贵, 等. 渗滤池砂样对回灌水中污染物去除的研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(1): 62-65. (HUANG X D, SHU L C, LIU P G, et al. Study on the removal of pollutants in recirculating water by percolating sand samples[J]. Hydropower Science, 2009, 27(1): 62-65 (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7709. 2009. 01. 017.
- [28] 王恩, 束龙仓, 黄修东, 等. 松散砂层及其有效粒径对回灌水水质影响的实验研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(4): 37-40. (WANG E, SHU L C, HUANG X D et al. Experimental study on the effect of loose sand layer and its effective particle size on the quality of recharged water[J]. Hydropower Energy Science, 2009, 27(4): 37-40. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7709. 2009. 04. 013.
- [29] 武显仓, 赵琪, 桓颖, 等. 深层承压含水层人工回灌条件下地下水中硝酸根的衰减[J]. 科技导报, 2015, 33(4): 28-32. (WU X C, ZHAO Q, HUAN Y, et al. Attenuation of nitrate in groundwater under artificial recharge conditions of deep confined aquifer[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(4): 28-32. (in Chinese)) DOI: 10. 3981/j. issn. 1000-7857. 2015. 04. 004.
- [30] 李学礼, 孙占学, 刘金辉. 水文地球化学. 第 3 版[M]. 北京: 原子能出版社, 2010. (LI X L, SUN Z X, LIU J H. Hydrogeochemistry. 3rd edition [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2010. (in Chinese))
- [31] BIAN C, CAI W T, LIU J W, et al. In Situ determination of nitrite in water and its application in groundwater contamination investigation [J]. Environmental Engineering, 2016, 39(9): 130-133. )DOI: 10. 13205 / j. hjgc. 201609028.