

# A Study of Water Cycle in Reclaimed Water Irrigation District with Isotopic\*

Xingyao Pan<sup>1,2</sup>, Wenyong Wu<sup>1,2</sup>, Honglu Liu<sup>1,2</sup>, Shiyang Yin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing

<sup>2</sup>Beijing Engineering Research Center for Non-Conventional Water Resources Utilization and Water Saving, Beijing  
Email: 041087@163.com

Received: Jul. 25<sup>th</sup>, 2012; revised: Aug. 8<sup>th</sup>, 2012; accepted: Aug. 17<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** In reclaimed water irrigated district, the water resources characteristic with synthetic reclaimed water, stream water, ground water and so on. It is essential for security and efficiency utilization of reclaimed water to precisely assess the transformation among different water bodies in reclaimed water irrigation district. This study uses isotopic and hydrochemical data of water samples to quantity study the regional water cycle. It has shown that there is intense hydraulic connection between surface water and ground water. Most ground water is recharged from surface water. The reclaimed water irrigation is one of most important way for reclaimed water recharged to groundwater and results in obvious unstable variation of EC. The results of ground water isotopic composition showed an intense evaporation-concentration process during recharge from precipitation and surface water. The ground water isotopic concentration gradually decreases from Northwest to Southeast and results by decrease of surface water recharge to ground water.

**Keywords:** Isotopic; Surface Water; Ground Water; Reclaimed Water Irrigation District; Beijing

## 基于环境同位素技术的再生水灌区水循环特征解析\*

潘兴瑶<sup>1,2</sup>, 吴文勇<sup>1,2</sup>, 刘洪禄<sup>1,2</sup>, 尹世洋<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>北京市水利科学研究所, 北京

<sup>2</sup>北京市非常规水资源开发利用与节水工程技术研究中心, 北京  
Email: 041087@163.com

收稿日期: 2012年7月25日; 修回日期: 2012年8月8日; 录用日期: 2012年8月17日

**摘要:** 再生水灌区水源包括再生水、地表水、地下水等, 准确、客观的表征再生水灌区各水源之间的相互转换关系是开展多水源联合调度保障灌区用水安全和提高水资源利用率的关键。本研究采用环境同位素和水化学成分作为平原灌区水循环研究的示踪剂, 揭示了灌区水循环特征。结果表明, 灌区地表水和地下水之间存在强烈的水力联系, 整个灌区的补给排泄关系主要是地表水补给地下水, 人工抽取河道再生水灌溉农田产生深层渗漏, 补给地下水是导致灌区地下水电导率明显波动变化的主要原因, 同位素分析结果显示灌区再生水、地表水和地下水均呈现出强烈的蒸发浓缩作用, 地表再生水对地下水的补给从北到南逐渐减弱。

**关键词:** 同位素; 地表水; 地下水; 再生水灌区; 北京

\*基金项目: 水利部公益项目“东南郊水网再生水利用对地下水影响的研究”(201101051); 北京市非常规水资源开发利用与节水工程技术研究中心2011年阶梯计划项目(Z111105055311091)。

作者简介: 潘兴瑶(1980-), 男, 河北邢台, 博士, 主要从事城市水资源与水环境研究。

## 1. 引言

自 20 世纪 80 年代以后, 随着城市发展, 人类活动需水量急剧增加, 大规模抽取地下水导致平原地区地下水位持续下降<sup>[1]</sup>。为了缓解水资源供需矛盾, 减缓地下水持续下降的趋势, 北京市自 2003 年开始大规模开展再生水替代清水用于农业灌溉, 目前已建成全国最大的再生水灌区——北京市东南郊再生水灌区<sup>[2]</sup>。随着再生水的大规模利用以及减少地下水开采, 东南郊灌区部分区域已呈现地下水位回升现象。正确认识再生水灌区地下水的补给和循环规律是合理开发利用该区再生水和地下水的重要基础。目前对于灌区地下水循环及其补给过程和能力仍然存在许多争论, 有待进一步研究, 这些问题的解决对灌区水资源的合理调控和高效利用具有重要意义。

再生水中各离子含量相对清水较高, 如何避免再生水利用对地下水的影响成为再生灌区急需解决的难题。目前对于再生水灌区地下水循环及其补给过程和能力仍然存在许多争论, 有待进一步研究。本研究基于同位素监测技术分析灌区地下水同位素特征及其变化过程, 重点研究灌区地下水的补给来源及其相对比例, 确定灌区地下水补给过程, 为灌区地下水的安全利用提供技术保障。

## 2. 研究区概况

灌区位于北京东南郊地区, 现状面积为 56 万亩, 由位于北京市大兴区境内的南红门灌区和通州区境内的新河灌区组成, 属北运河水系位于北运河流域下游平原区, 流经灌区的河流主要由北运河、凉水河、凤河、凤港减河等主要干支流<sup>[3]</sup>。灌区年平均气温为摄氏 11.6℃, 多年(1956~2010 年)平均降雨量为 581.7 mm。北运河多年平均出境水量 9.31 亿 m<sup>3</sup>(1961~1998 年), 汛期径流量占全年径流总区为 570.9 mm, 平原为 584.9 mm, 每年汛期(6~8 月)降雨量占全年降雨总量的 47.7%~70.4%<sup>[4]</sup>。

再生水是灌区的重要水源, 其再生水主要来自 3 个大型污水处理厂, 其中高碑店污水处理厂设计处理能力 100 万 m<sup>3</sup>/d, 水厂出水进入通惠河后入通惠北干渠进入凉水河, 再经通惠南干渠引入凤港减河, 覆盖整个新河灌区用于农业灌溉。小红门污水处理厂设计处理能力 60 万 m<sup>3</sup>/d, 出水经凉水干渠和北野厂干渠

供给南红门灌区用于农业灌溉, 还有少部分出水直接进入新风河。黄村污水处理厂设计处理规模 8 万 m<sup>3</sup>/d, 出水排入新风河, 经北野厂干渠供南红门灌区灌溉用水。此外, 灌区内还有多个小型污水处理厂和污水处理设施处理的再生水也排入灌区地表河道或渠道。

## 3. 研究方法

分别于自 2011 年 8 月 9 日、9 月 10 日、10 月 20 日、11 月 8 日对再生水灌区进行了 4 次采样和现场调查, 主要沿河道和主干渠道地表水共计 11 个, 以及 3 个再生水厂高碑店污水处理厂、小红门污水处理厂、黄村污水处理厂出水进行采样。2011 年 10 月 20 日对沿河道和渠道地下水进行了采样, 共采集地下水样 30 个。利用中国科学院地理科学与资源研究所重点实验室先进的同位素质谱仪 MAT253(Finnigan, USA)用 TC/EA 法, 对所采集水样进行氢氧环境同位素分析。D 和 <sup>18</sup>O(‰)采用 VSMOW 标准, 精度分别为±1‰和±0.1‰。自然水体中稳定同位素 <sup>2</sup>H/<sup>1</sup>H 或 <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O 值很小, 因此同位素组成则用相对于国际标准平均海水(Standard Mean Ocean Water, SMOW)的标准偏差 δ 表示(单位为‰), 即样品中同位素比值( $R = ^2\text{H}/^1\text{H}$  或  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ )相对于 SMOW 中相应比值( $R_{\text{SMOW}}$ )的标准偏差, 计算为:

$$\delta = \left( \frac{R}{R_{\text{SMOW}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

同时采集样品送往大兴区水环境监测中心采用 pH/ISE 测试仪和 DDSJ-308A 电导仪测定水样的 pH 值和电导率。具体采样点见图 1。

## 4. 灌区水化学和氢氧同位素特征

### 4.1. 电导率变化特征

电导率(EC)是水体中总溶解离子浓度的总体反映, 在一定程度上反映了水分在区域水循环过程中径流路径和滞留时间的长短。水在运移过程中, 随着运移路径和滞留时间的延长, 不断溶解围岩和土壤中的溶解性盐类并发生离子交换, 在没有与电导率较小的水体混合、气体析出和溶解性固体沉淀的情况下, 水体的电导率是逐渐升高的。因此, 根据流域内不同水体的电导率在空间上的分布趋势, 可以大致推断水的

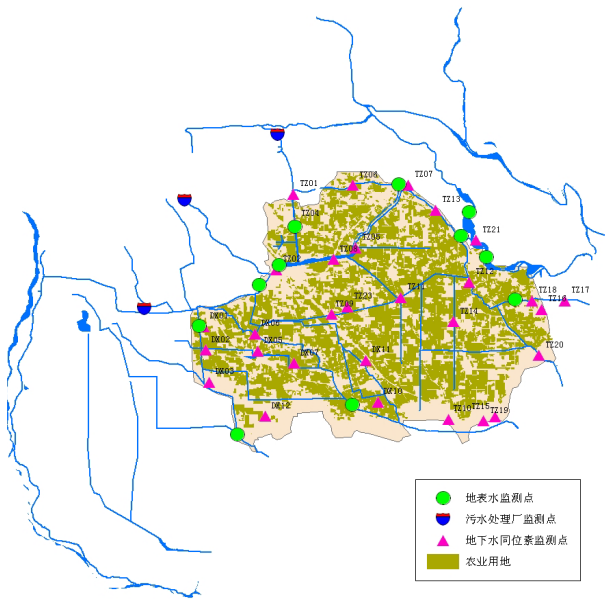


Figure 1. The location of water samples for isotopic and hydrochemical

图 1. 灌区地表和地下同位素监测点分布

运移路径, 进一步推断流域内地表水和地下水的补给排泄关系。东南郊再生水灌区水的电导率较高, 地表水电导率为 964~1521  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 地下水电导率为 659~2090  $\mu\text{s}/\text{cm}$ (图 2)。根据地表水和地下水电导率的空间分布差异性和灌区的地形特征可以看出, 灌区内各条河流地表水和地下水的电导率总体上是地下水的电导率大于地表水的电导率, 表明在河流干支流源头, 地表水和地下水的补给排泄关系主要是地表水补给地下水, 特别在凤河源头北野厂干渠附近地表水和地下水的电导率基本相等, 地下水主要由地表新凤河和北野厂干渠水补给。凉水河是过境河, 因此灌区的入境点上地下水电导率大于地表水电导率。灌区各河流

从上游到下游, 河道坡度较为平缓, 并且河道基本没有下切, 地表水的电导率在整个灌区都保持了一个相对稳定的状态, 各河流之间以及河流的上下游之间地表水电导率变化不大, 并且地表水的电导率始终小于地下水, 表明整个灌区的补给排泄关系主要是地表水补给地下水。

在凤河和凉水河流域地下水 EC 存在明显的波动变化, 而地表水相对稳定, 表明地表水对地下水的补给过程不是单一的河道入渗补给, 人工抽取河道再生水灌溉农田产生深层渗漏, 造成对地下水的补给是造成地下水电导率明显波动变化的主要原因, 此外还有降雨的直接入渗。再生水灌区地下水电导率呈现 3 个明显高值区是青云店(旱河)、采育南、通惠南干渠, 这三处正是主要的再生水灌溉的区域。

## 4.2. 氢氧同位素组成分析

### 4.2.1. 灌区同位素特征

Craig 的全球大气降水线(GMWL)是许多当地大气降水线的全球平均, 包含水汽的来源、降水期间的二次蒸发以及降水的季节性等当地因素, 这些因素影响着氘盈余和大气降水线的斜率。对某一区域而言, 由于大气降水是地表水和地下水的补给源, 将地表水和地下水的同位素组成与当地大气降水线进行对比研究是很重要的。地下水的同位素组成接近于降水的平均年组成, 但其平均同位素组成又与平均降水同位素组成有所区别, 这种区别往往是降水在补给地下水过程中所经历的水循环过程造成的。

本研究大气降水线采用宋献方等<sup>[5]</sup>基于国际原子能协会(IAEA)在中国的 27 个全球大气降水同位素检

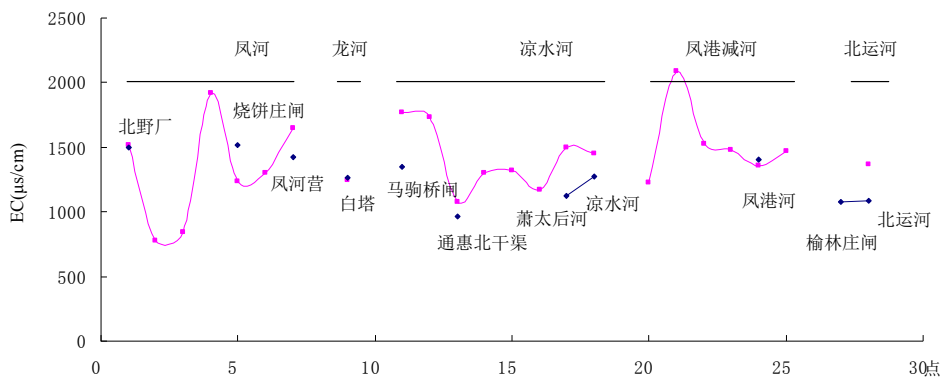


Figure 2. The EC variation for river and groundwater of the agricultural district

图 2. 灌区地表水、地下水电导率沿主要河道的变化

测网(GNIP)站点的降水氢氧稳定同位素组成进行回归得到的结果。大气降水线(MWL)为:

$$\delta D = 7.82 \cdot \delta^{18}O + 8.48 \quad (2)$$

式中,  $\delta D$  为氢同位素实测比值,  $\delta^{18}O$  为氧同位素实测比值。通过水样的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  组成和大气降水线进行对比, 可以用来区分灌区再生水、地表水、地下水的来源并阐明其相互转化关系。

#### 4.2.2. 灌区再生水同位素特征

再生水灌区地表水源主要包括降雨和再生水, 而再生水的最终来源也是降雨, 它主要是经过了人类活动的取用水、排水以及再生水厂的处理过程后排入灌区的河道和渠道中形成的地表水资源。因此再生水在排入灌区之前必定经历一定程度的蒸发作用使得同位素富集, 再生水氢氧同位素高于降水同位素位于大气降水线的右后方, 再生水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  分别为  $-8.06\text{‰}$ ~ $-7.3\text{‰}$  和  $-61.12\text{‰}$ ~ $-54.81\text{‰}$  之间变化, 同位素均值为  $\delta D = -7.68\text{‰}$  和  $\delta^{18}O = -58.72\text{‰}$ 。如图 3 所示由于从降水转变成再生水过程基本相同因此再生水同位素分布在一条直线上, 线性相关系数达到 0.9549, 这条直线与大气降水线保持平行, 位于大气降水线的下方, 我们把他定义为再生水同位素线:

$$\delta D = 8.6423 \cdot \delta^{18}O + 7.6243 \quad (3)$$

#### 4.2.3. 灌区地表水同位素特征

再生水灌区的地表水主要由降雨产流和再生水两部分组成, 如图 4 所示, 地表水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  分别在  $-9.23\text{‰}$ ~ $-6.27\text{‰}$  和  $-67.44\text{‰}$ ~ $-52.09\text{‰}$  之间变化, 蒸发线方程为  $\delta D = 4.3737\delta^{18}O - 24.926$ , 远远偏离大气降水线  $\delta D = 7.82\delta^{18}O + 8.48$ , 分布在再生水同位素线的两侧, 地表水同位素散点图分布相对比较集中分布在平均值的周围, 地表水同位素均值为  $\delta D = -8.1\text{‰}$  和  $\delta^{18}O = -60.8\text{‰}$ , 小于再生水的同位素组分。这是由于灌区地表水有再生水和雨水组成, 导致其同位素组分比再生水同位素贫化。

#### 4.2.4. 灌区地下水同位素特征

地下水样本主要是 80 m 左右埋深的浅层地下水, 如图 5 所示灌区地下水同位素  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的关系图, 一部分样点落在大气降水线附近的 B 区, 其拟合方程为  $\delta D = 5.3706\delta^{18}O - 20.834$ , 表明这个区域的地下水

主要来源于大气降水入渗补给。另外一部分样点分布在再生水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的关系曲线与大气降水线之间的 A 区, 其拟合方程为  $\delta D = 5.1625\delta^{18}O - 19.414$ , 说明这个区域地下水接受再生水和雨水的共同补给。在凤港减河及其以北灌区的地下水由大气降水与再生水共同补给。

### 5. 结论

平原再生水灌区多水源结构是其水平衡过程的主要特征, 如何定量分析不同水源之间的转化关系是再生水灌区水资源合理配置与高效利用的关键。本研究系统监测了再生水灌区再生水、地表水、地下水的同位素及其水化学特征, 初步明确了灌区再生水、雨水、地下水之间的补给关系及灌区主要水循环特征。灌区地表水和地下水之间存在强烈的水力联系, 整个灌区的补给排泄关系主要是地表水补给地下水, 人工抽取河道再生水灌溉农田产生深层渗漏, 补给地下水是导致灌区地下水电导率明显波动变化的主要原因,

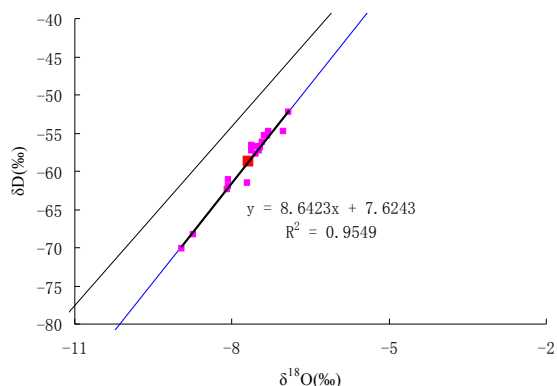


Figure 3. The isotopic composition of reclaimed water  
图 3. 再生水厂出水同位素

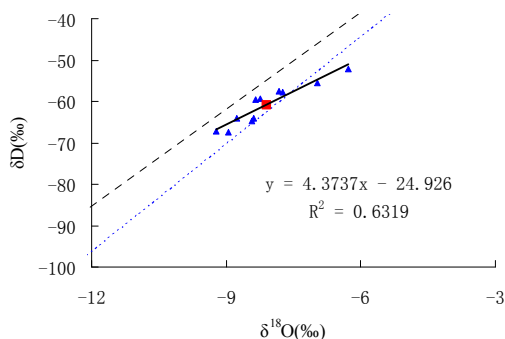


Figure 4. The isotopic composition of surface water (the red rectangle referred to mean value)  
图 4. 灌区地表水同位素特征(红色正方形为均值点)

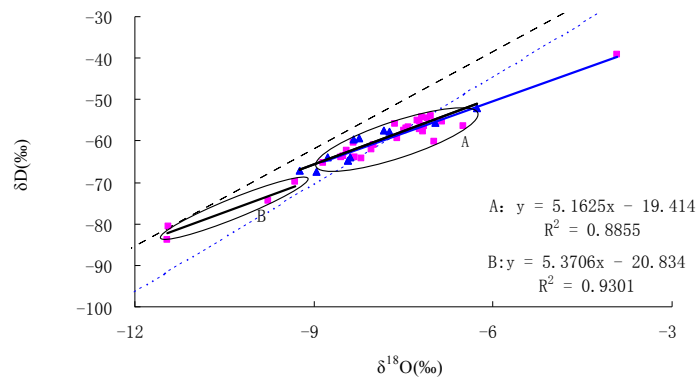


Figure 5. The isotopic composition of ground water  
图 5. 灌区地下水同位素特征

同位素分析结果显示灌区再生水、地表水和地下水均呈现出强烈的蒸发浓缩作用。灌区地下水同位素从北到南贫化表明地表再生水对地下水的补给从北到南逐渐减弱。同位素技术在平原灌区定量分析研究方面还处于探索阶段,但是具有其独特的应用途径和其他方法所不可替代的应用价值,应用前景可观,未来需进一步加强基于同位素和水化学分析技术定量分解不同水源的转化比例关系,对优化调度灌区多种水源,明确再生水补给地下水环境风险保护灌区地下水环境具有重大意义。

## 参考文献 (References)

- [1] 北京市地方志编纂委员会. 北京志地质矿产水利气象卷. 水利志[M]. 北京: 北京出版社, 2000.  
Chorography compile committee of Beijing city. Beijing chorography in geological, mineral, hydraulic, and meteorology. Beijing: Beijing Press, 2000. (in Chinese)
- [2] 刘洪禄, 吴文勇. 再生水灌溉技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.  
LIU Honglu, WU Wenyong. The research of reclaimed water irrigation technology. Beijing: China Hydraulic and Power Press, 2009. (in Chinese)
- [3] 潘兴瑶, 吴文勇, 尹世洋, 等. 基于 SWAT 模型的北运河流域水量水质模拟[A]. 北京市水利科学研究所, 北京水问题研究与实践[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 210-217.  
PAN Xingyao, WU Wenyong, YIN Shiyang, et al. Water quantity and quality modeling with SWAT model for Beiyunhe River. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing Water Problem Research and Practise. Beijing: China Hydraulic and Power Press, 2012: 210-217. (in Chinese)
- [4] 付春梅. 谈北运河污水资源的利用[J]. 北京水务, 2006, 3: 7-8.  
FU Chunmei. Wastewater utilization in Beiyungheriver. Beijing Water Resource, 2006, 3: 7-8. (in Chinese)
- [5] 宋献方, 刘相超, 夏军, 等. 基于环境同位素技术的怀沙河流域地表水和地下水转化关系研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(1): 102-110.  
SONG Xianfang, LIU Xiangchao, XIA Jun, et al. A study of interaction between surface water and groundwater using environmental isotopes in Huaisha River basin. Science in China (Series D), 2007, 37(1): 102-110. (in Chinese)