

# Groundwater Dynamic Characteristics and Numerical Simulation for Reclaimed Water Reclaimed Water Irrigation District\*

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

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

<sup>2</sup>Beijing Engineering Technique Research Center for Exploration and Utilization of Non-Conventional Water Resources and Water Use Efficiency, Beijing

Email: yinshiyang@yahoo.cn

Received: Aug. 16<sup>th</sup>, 2012; revised: Aug. 29<sup>th</sup>, 2012; accepted: Sep. 9<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** In order to predict the changing trends of groundwater under different scenarios and make regulation programs, a groundwater numerical model of reclaimed water irrigation district is developed based on GMS software. Research results indicate that with the gradual increase of reclaimed water utilization, irrigation area groundwater level progressive uplift, lateral excretion to the lower reaches also show a trend of increase. In order to avoid the soil salinization, shallow groundwater resources must be mining to control the depth of groundwater according to the different utilization rates of the reclaimed water. 50% of total water consumption is reclaimed water, 33.1 million m<sup>3</sup> replacement of shallow groundwater resources should be exploited, 70% of total water consumption is reclaimed water, 45.7 million m<sup>3</sup> replacement of shallow groundwater resources should be exploited, 90% of total water consumption is reclaimed water, 61.3 million m<sup>3</sup> replacement of shallow groundwater resources should be exploited. The results are meaningful to guide safety usage with reclaimed water and conservation of groundwater resources.

**Keywords:** Reclaimed Water Irrigation District; Groundwater; Dynamic Characteristics; Numerical Simulation

## 北京市再生灌区地下水动态特征及数值模拟研究\*

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

<sup>1</sup>北京市水科学技术研究院, 北京

<sup>2</sup>北京市非常规水资源与节水工程技术研究中心, 北京

Email: yinshiyang@yahoo.cn

收稿日期: 2012年8月16日; 修回日期: 2012年8月29日; 录用日期: 2012年9月9日

**摘要:** 本文基于 GMS 软件建立了北京市再生水灌区地下水数值模型, 预测了不同情景下地下水的动态变化趋势及调控方案。研究表明, 随着再生水灌区的再生水利用率逐步提高, 灌区内的地下水位逐步抬升, 向下游地区的侧向排泄量也呈加大趋势; 为了减少下游的侧向排泄量、避免该区域由于地下水位过高而产生土壤次生盐渍化, 应控制灌区内的地下水位埋深; 再生水利用率达到 50% 时, 每年需开采出 3307.2 万 m<sup>3</sup> 置换的浅层地下水资源, 再生水利用率达到 70% 时, 每年需开采出 4567.0 万 m<sup>3</sup> 置换的浅层地下水资源, 再生水利用率达到 90% 时, 每年需开采出 6128.3 万 m<sup>3</sup> 置换的浅层地下水资源。研究成果对再生水的安全利用、地下水资源的涵养具有重要意义。

\*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); 2012 年度北京市优秀人才资助课题——再生水输配过程对地下水影响的试验研究与数值模拟的资助。

作者简介: 尹世洋(1984-), 男, 河南濮阳人, 工程师, 硕士, 主要从事再生水利用、水文水资源工作。

**关键词:** 再生水灌区; 地下水; 动态特征; 数值模拟

## 1. 引言

北京是严重缺水的特大城市, 多年平均降雨 585 mm, 1999 年以来, 北京遭遇连续 12 年干旱, 年均降水量 470 mm, 比多年平均减少了 1/4。密云、官厅水库上游来水量仅为多年平均的 20%, 平原区地下水水位持续下降, 创历史最低, 地下水超采 60 亿  $m^3$ 。北京市有丰富的再生水资源, 2010 年再生水资源量为 11.4 亿  $m^3$ ; 据预测, 2020 为 14.5 亿  $m^3$ , 再生水资源利用成为缓解北京市水资源紧缺重要举措。再生水利用能够减少地下水水资源的开采, 2009 年北京市东南郊水网工程开始实施<sup>[1]</sup>, 再生水灌区的水资源形势与以往地表水紧缺的局面有很大的改变, 再生水来水稳定, 各输水河道、渠系常年保持蓄水状态, 极大地涵养了周边地下水资源。2006 年北京市再生水灌区地下水水位出现抬升现象, 近几年抬升幅度日益增大, 局部地区地下水位已恢复 1999 年的水平。随着再生水利用量的日益加大, 北京市再生水灌区地下水会产生怎样的变化趋势, 是否会因水位抬升过高而产生次生盐碱化等问题日益受到大家的关注。

目前关于再生水的利用的研究多侧重于安全性及利用率等方面, 再生水利用对地下水动态变化过程影响及调控方案方面还没有进行系统开展。因此建立基于 GMS<sup>[2,3]</sup>的北京市再生水灌区地下水变化数值模拟模型, 分析预测不同模拟情景下(不同再生水利用率和南水北调水置换地下水)灌区地下水位动态变化及时空演变规律, 提出再生水灌溉置换地下水的潜力, 制定不同情景下地下水资源的调控方案, 对于再生水的安全利用、地下水资源的涵养具有重要意义。

## 2. 研究区域概况

### 2.1. 地理位置

研究区域位于北京市东南郊地区的大兴和通州区, 与市区相距 20 余 km, 南与河北省廊坊、天津武清区相连, 南北长 68 km, 东西宽 63 km, 总面积 1937  $km^2$ 。该区域建有国内最大的再生水灌区, 截止到 2010 年底, 再生水灌溉面积达到了 4 万  $hm^2$ , 年引用再生水 3.0 亿  $m^3$ 。

### 2.2. 水文地质

该区域地处永定河、潮白河冲积洪积扇的中下部, 地形平坦, 地势由西北向东南缓慢倾斜, 高程 9~51 m, 坡降 0.3%~1.6%, 第四系埋藏深度由西北向东南逐渐加深, 西部地第四系埋深一般在 100 m 以内, 在马驹桥、台湖、城关一带, 第四系厚度小于 200 m, 向东及东南逐渐加厚, 最厚可大于 500 m, 具体位置见图 1。

西北部的芦城、黄村以北, 东磁各庄 - 建新庄一线以西以及东广德庄以北地区为卵石分布区, 含水层以卵石、砾石为主, 卵石直径 3~5 cm, 鹅房一带达 10 cm, 呈滚圆状, 厚度在 5~25 m。往南至孔家铺 - 钥匙头 - 半壁店 - 枣林村一线以北地区过渡为砾石分布区, 含水层以砾石、粗砂为主, 砾石层厚度在 5~20 m。再向南至南部边界, 以及佟家务 - 河南辛庄 - 沙河村 - 采育镇 - 北辛店 - 凤河营以西、以北、北东一带为粗砂分布区, 含水层主要为粗砂和细砂层, 粗砂层厚度在 10~20 m 左右。安定、长子营朱庄南部地区、采育东部地区及采育大皮营为细砂分布区, 主要含水层为细砂、粉砂层, 细砂层厚度在 20~40 m 左右。永乐店、柏福村以北地区, 含水层主要为多层砂及少量砂砾石层; 在北运河下游地区, 含水层以砂层为主,

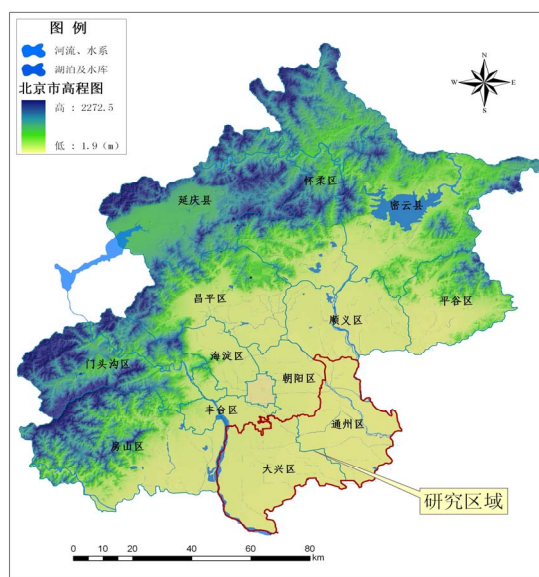


Figure 1. Location of study district  
图 1. 研究区域位置图

层多而薄, 多达 10 层, 单层厚度一般小于 10 m, 累计厚度大于 50 m, 在台湖、三间房以西为 30~50 m。永乐店以南, 含水层以砂层为主, 层次有 3~8 层, 单层厚度小于 10 m, 累计厚度多为 30~50 m。

### 3. 区域地下水动态特征

目前, 北京市通州区、大兴区境内共设有地下水水位观测井 81 个, 并建有地下水动态观测网数据库(每 5 日观测一次), 如图 2 所示。再生水灌区外地区是指通州、大兴区内部、再生水灌区(南红门灌区、新河灌区)以外的区域, 如图 3(b), 再生水灌区外的地下水埋深逐年呈增大趋势(2004 年地下水埋深呈减小趋势), 地下水埋深由 1999 年的 9.51 m 增加到了 2010 年的 14.48 m, 11 年间增大了 4.97 m, 年均增幅 0.45 m。

如图 3(a), 从 1999 年到 2003 年再生水灌区内的地下水埋深呈逐年增大趋势, 4 年间增加了 3.48 m, 年均增幅 0.87 m; 2004 年到 2006 年, 再生水灌区内的地下水资源局部得到涵养, 但整体还是呈现下降趋势; 2006 年到 2008 年, 随着再生水灌区内再生水利用率的提高, 灌区内的地下水水位逐步得到涵养和恢复, 地下水埋深由 2006 年的 10.19 m 减小到了 2010 年的 8.95 m, 年均降幅 0.31 m。对比可知, 利用再生资源不仅可以减少地下水的开采, 还能在一定程度上回补地下水, 极大程度上缓解和扭转了该区域地下水

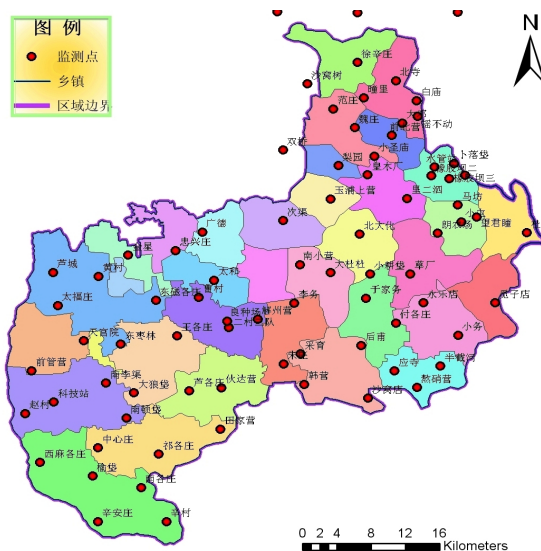


Figure 2. Zoning map of observation-wells for groundwater level  
图 2. 地下水水位监测井分布图

位埋深日益增大的趋势, 在一定程度上改善了北京平原地区的地下水资源的状况。

### 4. 地下水数值模型的构建与验证

#### 4.1. 数学模型

研究区域的地下水数学模型可概化成三维非恒定流<sup>[4,5]</sup>, 对于非均质、各向同性、空间三维结构、非稳定地下水流系统, 可采用下述定解方程来描述:

$$\begin{aligned} \mu \frac{\partial h}{\partial t} &= k_x \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + k_y \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + k_z \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial h}{\partial z} (k_z + P) + P & x, y, z \in \Gamma_0, t \geq 0 \\ h(x, y, z, t) \Big|_{t=0} &= h_0 & x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\ h &= h_1 & x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ k_n \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} &= q(x, y, t) & x, y, z \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{aligned} \tag{1}$$

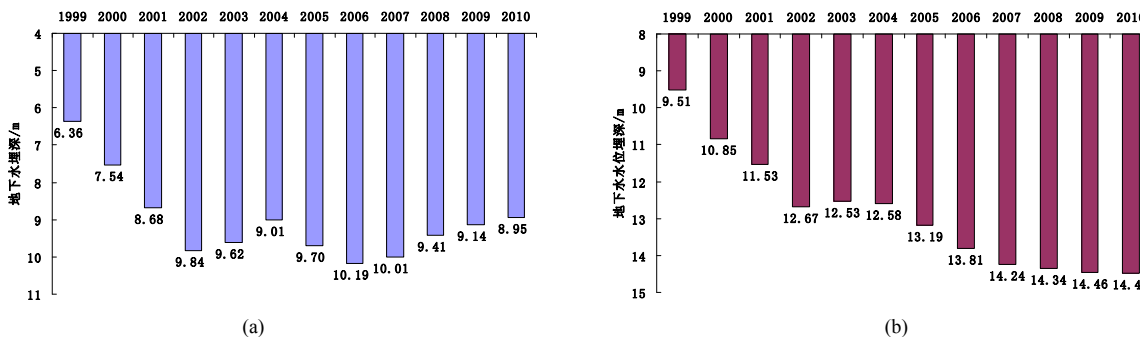


Figure 3. Annual variation of groundwater depth inside (a) outside (b) of reclaimed water irrigation district  
图 3. 再生水灌区内(a)、外(b)地下水水位变化趋势

式中:  $\Omega$ ——渗流区域;  $h$ ——含水层的水位标高(m);  $h_1$ ——含水体的一类边界值;  $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_z$ ——分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的渗透系数(m/d);  $k_n$ ——边界法向方向的渗透系数(m/d);  $\mu$ ——潜水含水层的重力给水度;  $p$ ——潜水面的降水和农业灌溉回归等(L/d);  $h_0$ ——含水层的初始水位分布(m);  $\Gamma_0$ ——渗流区域的上边界, 即地下水的自由表面;  $\Gamma_1$ ——含水层的一类边界;  $\Gamma_2$ ——渗流区域的侧向边界;  $\Gamma_3$ ——含水体的混合边界条件;  $q(x, y, z, t)$ ——定义为二类边界的单宽流量( $m^2/d \cdot m$ ), 流入为正, 流出为负, 隔水边界为 0。

#### 4.2. 定解条件的处理

初始条件: 地下水数值模拟的初始流场采用 2006 年 1 月份的平均水位, 根据实测的浅层地下水水位, 按照内插法和外推法获得含水层的初始水位, 通过模拟计算, 获得含水层的初始流场。

边界条件: 各个流量边界的参数通过调研详细的边界资料, 拟合边界的入流和出流量。时间步长为程序控制, 每一次运算都严格控制误差。灌溉入渗补给量与河道的渗漏补给量由预先设置的参数进行控制, 通过总补给量校正参数<sup>[6]</sup>。

#### 4.3. 地下水模型源汇项分析

地下水均衡要素是指研究区域的补给项和排泄项, 系统分析地下水数值模拟的源汇项是为了确定地下水各补排项随时间和空间的变化规律, 为建立地下水数值模拟模型准备数据。

降雨入渗补给量: 根据再生水灌区 59 个雨量站的降水量数据, 利用 GIS 等值线生成工具勾绘出再生水灌区降水等值线图。根据空间上的分布得出研究区域降雨入渗回补量。

$$W_{\text{入渗}} = a P_{\text{年}} F \quad (2)$$

式中:  $F$ ——研究区域的计算面积,  $m^2$ ;  $a$ ——降水入渗系数, 无量纲;  $P_{\text{年}}$ ——分区年降水量,  $m^3$ 。

田间灌溉回归入渗量: 计算见公式 3:

$$Q_{\text{灌}} = B_{\text{灌}} \times Q_{\text{田}} \quad (3)$$

式中:  $Q_{\text{灌}}$ ——农业灌溉回归入渗量, 万  $m^3/a$ ;  $B_{\text{灌}}$ ——农业灌溉回归系数;  $Q_{\text{田}}$ ——农业灌溉水资源量, 万  $m^3/a$ 。

河道入渗回补量: 根据《北京水资源》卷 2 究表

明, 潮白河水系在输水时, 河道的入渗率为 0.2; 永定河河床多为粗砂砾石, 补给地下水十分明显, 入渗系数为 0.41; 北运河以前是排泄地下水的河道, 随着地下水位连年下降, 河道逐级建闸蓄水, 北运河变成了补给地下水的河道, 补给系数取 0.18, 通过计算得出研究区域内河道年均入渗补给量为 2148.1 万  $m^3$ 。

侧向补给量: 根据地下水位等值线分布情况, 确定研究区域的侧向流入边界主要在北部以及西北部。取断面含水层水利渗透系数的平均值为 21.9 m/d, 水力坡度为 1.15‰, 断面长度为 75.5 km, 含水层厚度以 70 m 计, 计算得到每年地下水侧向补给量为 4858.35 万  $m^3$ 。侧向流出量: 根据地下水位等值线分布情况, 确定研究区域的侧向流出边界主要在东南部区域。取断面含水层水利渗透系数的平均值为 11.8 m/d, 水力坡度为 0.90‰, 断面长度为 65.3 km, 含水层厚度以 60 m 计, 计算得到每年地下水侧向流出量为 1518.7 万  $m^3$ 。

地下水开采量: 本文主要研究浅层地下水的动态变化区域, 浅层地下水主要用于农业生产和生活用水, 根据北京市水务局月报数据, 整理可得 2006 年浅层地下水的开采量为 43997.78 万  $m^3$ 。

潜水蒸发量: 在平原区地下水埋深大于 4 m, 潜水的蒸发量可以忽略不计, 研究区域内的地下水埋深都在 4 m 以上, 潜水蒸发量忽略不计。

#### 4.4. 模型的检验

以均匀分布为原则<sup>[7,8]</sup>, 在研究区域内选择 6 眼地下水水位监测井对模拟的结果进行验证, 用地下水数值模型计算的地下水水位与实际观测的地下水水位进行耦合比较, 见图 4。

由地下水位拟合曲线可知, 所建立的模拟模型达到了模型精度要求(单井的模拟水位与计算水位之差不小于 0.5 m), 符合研究区水文地质条件, 基本反映了研究区域地下水系统的动态特征, 可利用该模型进行地下水资源评价。

### 5. 再生水灌区地下水变化规律预测及调控方案分析

#### 5.1. 模拟情景设置

设置情景 1 至情景 4 等四种情景, 预测不同的

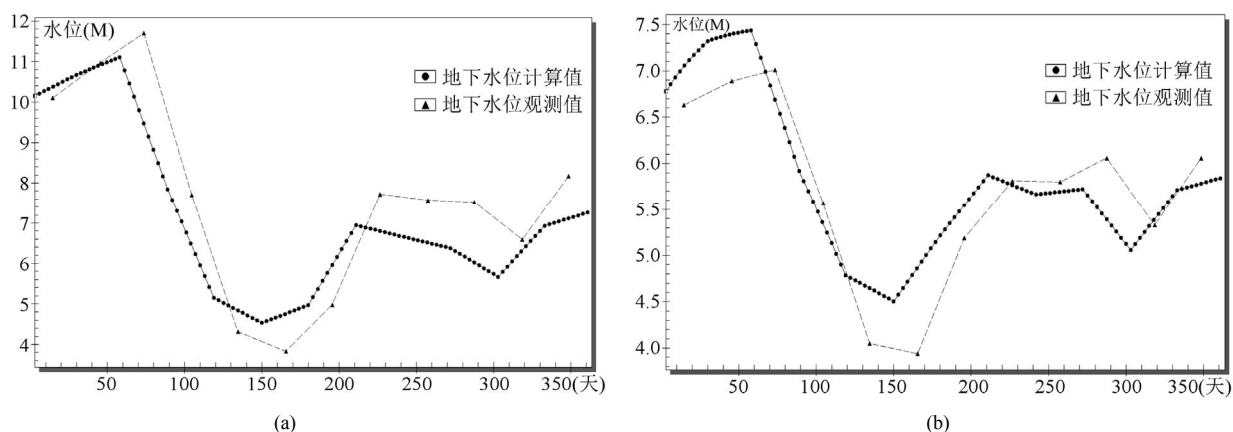


Figure 4. Fitting curves of groundwater level for the monitoring wells in Xincun (a) and Hanying (b)

图 4. 辛村(a)、韩营(b)地下水监测井水位拟合曲线

再生水利用率条件下地下水位动态变化趋势, 模拟期以月为时间单位划分为 108 个应力期, 每个应力期设置 2 个步长; 2014 年南水北调水进京后, 研究区域的水源地的自备井进行封存, 预测 2014 年在南水北调水进京后, 研究区域在不同的再生水利用率的条件下地下水位动态变化趋势, 模拟期以月为时间单位划分为 168 个应力期, 每个应力期设置 2 个步长, 见表 1。

## 5.2. 地下水水位动态变化趋势分析

如图 5(a), 在 2006 年的水资源条件进行模拟的情况下(情景 1), 再生水灌区内的平均水位呈下降趋势, 水位由 2008 年的 8.7 m 降到 2020 年的 4.8 m; 情景 2、情景 3、情景 4 下, 随着再生水灌区的再生水利用率逐步提高, 地下水涵养量逐渐加大, 再生水灌区内的地下水水位逐步得到涵养和恢复。

如图 5(b), 在不同的情景模式下, 再生水灌区以外地区的地下水水位呈不同的变化趋势, 在以 2006 年的水资源条件进行模拟的情况下(情景 1), 再生水灌区内的平均水位呈下降趋势, 水位由 2008 年的 19.8 m 降到 2020 年的 6.2 m; 情景 2、情景 3、情景 4 中, 南水北调水引入后, 随着黄村水源地自备井的封存, 该区域的地下水水位逐渐抬升, 下游地区再生水利用率越高, 黄村地区地下水水位的抬升幅度越大, 但差别不太明显。

## 5.3. 再生水灌区不同调控方案对下游水资源的影响

再生水的利用以及南水北调水的引用, 能够极大

的改善研究区域的水资源状况, 缓解该区域用水危机, 也能在很大程度上涵养下游河北地区的地下水资源, 改善下游的地下水环境。

基于研究区域的水量平衡, 以地下水数值模拟模型的计算结果和 ArcGIS 的 3D 分析模块, 通过每个计算单元格源汇项分析, 推求研究区域地下水资源的侧向排泄量, 见表 2。在情景 1 中地下水侧向流出量为 1518 万  $\text{m}^3/\text{a}$ , 情景 4(2006~2014a)中侧向排泄量达到 7443 万  $\text{m}^3/\text{a}$ ; 情景 3(2015~2020a)地下水侧向流出量为 3058 万  $\text{m}^3/\text{a}$ ; 情景 5(2015~2020a)中地下水侧向流出量为 7851 万  $\text{m}^3/\text{a}$ , 随着再生水灌区内再生水利用率的提高, 地下水侧向排泄量呈加大趋势。

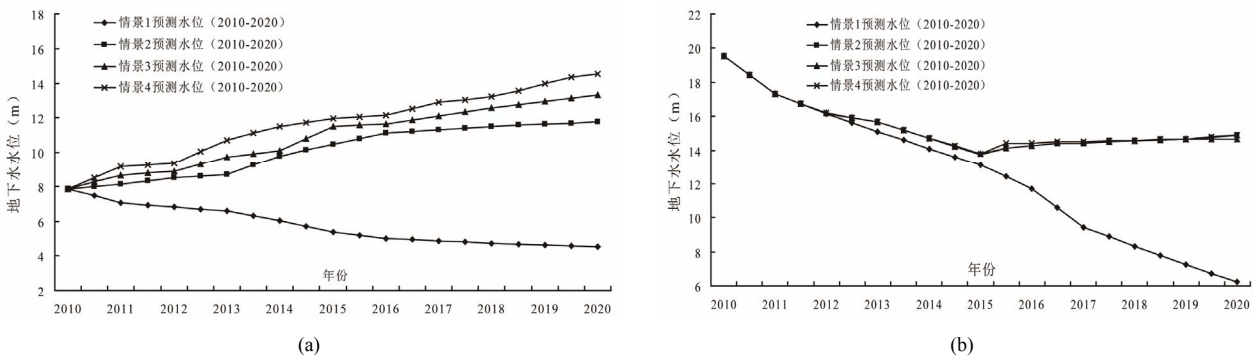
## 5.4. 再生水灌区地下水采补平衡方案

再生水的利用以及南水北调水的引入能够在很大程度上涵养再生水灌区的地下水资源, 使该区域的地下水水位得到恢复而逐步抬升。随着地下水位的持续抬升, 研究区域的东南部部分区域的地下水埋深会抬升到 3 m 左右, 从而使该区域的土壤因为地下水埋深过浅而产生次生盐渍化的可能。为了减少再生水灌区地下水资源大量向下游河北地区排泄以防止土壤次生盐渍化的发生, 必须严格控制研究区域的地下水水位埋深, 根据北京市水利科学研究所多年研究成果, 选定 8 m 作为再生水灌区的地下水控制埋深。随着再生水利用率的提高以及南水北调水的引入, 为了控制再生水灌区内的地下水水位过度抬升, 必须定量开采一定的浅层地下水资源, 供其他行业应用。通过 ArcGIS 的空间分析功能, 计算每一种模拟情景下的



**Table 1. Imitated context of situation in the groundwater model system**  
**表 1. 地下水数值模型中模拟情景设置**

年份	不同模拟情景	再生水灌区 农用井封存率	大兴黄村供水 自备井封存率	通州新城供水 自备井封存率	再生水利用率
2006~2020	情景 1	0	0	0	30%
	情景 2	40%	0	0	50%
2006~2014	情景 3	60%	0	0	70%
	情景 4	80%	0	0	90%
2015~2020	情景 2	40%	100%	100%	50%
	情景 3	60%	100%	100%	70%
	情景 4	80%	100%	100%	90%



**Figure 5. Annual variation of groundwater level inside (a), outside (b) the reclaimed water irrigation district**  
**图 5. 不同情景下再生水灌区内(a), 外(b)地下水水位变化趋势**

**Table 2. Excretion amount & replacement amount of groundwater under different conditions**  
**表 2. 不同情景地下水对下游的排泄量和置换量**

不同模拟情景	地下水侧向出流量 (亿 m <sup>3</sup> )	年均地下水侧向出流量 (万 m <sup>3</sup> )	地下水置换总量(m <sup>3</sup> )	地下水年均置换量 (万 m <sup>3</sup> )
情景 1(2006~2020)	1.06	1518	0	0
情景 2(2006~2014)	1.93	2769	1.65	3307.2
情景 3(2006~2014)	3.66	5229	2.28	4567.0
情景 4(2006~2014)	5.21	7443	3.06	6128.3
情景 2(2015~2020)	6.06	3058	3.40	3503.1
情景 3(2015~2020)	6.43	5562	4.79	5012.6
情景 4(2015~2020)	6.92	7851	6.33	6536.5

地下水储量的变化情况, 取每个单元格的中心点作为单元区域的取值代表点, 通过 Raster Calculator 对栅格图进行差值计算, 得到一定时间内, 研究区域的地下水水位埋深小于 8 m 区域的水资源量, 如表 2, 这些水资源量可以作为置换水源供其他行业应用。

情景 1 以 2006 年的水资源条件进行预测模拟, 预测到 2020 年灌区内的地下水埋深大于 8 m, 不会因地下水埋深过浅而使土壤产生次生盐渍化现象; 在情景 2(2006~2014a)中灌区的再生水利用率达到 50%, 为

了避免土壤次生盐渍化的产生, 保持区域浅层地下水采补平衡, 每年需开采出 3307.2 万 m<sup>3</sup> 置换的浅层地下水资源; 在情景 3(2006~2014a)中灌区的再生水利用率达到 70%, 为避免土壤次生盐渍化的产生, 每年需开采出 4567.0 万 m<sup>3</sup> 置换的浅层地下水资源; 情景 4(2006~2014a)灌区的再生水利用率达到 90%, 为避免土壤次生盐渍化的产生, 每年需开采出 6128.3 万 m<sup>3</sup> 置换的浅层地下水资源, 供其他行业应用。南水北调水引入后, 黄村水源地的自备井、通州水源地的自备

井 100%封存, 为避免土壤次生盐渍化的产生, 在再生水利用率 50%的条件下(情景 2(2015~2020a)), 每年需开采出 3503.1 万  $\text{m}^3$  置换的浅层地下水资源; 在再生水利用率 70%的条件下(情景 3(2015~2020a)), 每年需开采出 5012.6 万  $\text{m}^3$  置换的浅层地下水资源; 在再生水利用率 90%的条件下(情景 4(2015~2020a)), 每年需开采出 6536.5 万  $\text{m}^3$  置换的浅层地下水资源。

## 6. 结论与建议

采用灌区内 81 个地下水位观测井的连续观测资料系统分析了再生水灌区地下水动态特征。近 10 年来, 地下水埋深在年内变化与灌溉用水密切相关, 年际变化则呈现逐年加大趋势, 年均地下水埋深增大 0.48 m; 通过灌区内外地下水位的比较显示, 从 2002 年开始大量利用再生水以后, 灌区内部的地下水位下降速度小于灌区以外的其它区域, 再生水灌区内部分区域的地下水水位呈逐年抬升趋势, 且地下水水位抬升区域的面积呈逐年加大趋势。

基于北方典型再生水灌区运行特点与水文地质条件, 建立了基于 GMS 的灌区地下水数值模拟模型, 模拟预测 4 种情景下(再生水利用率、地下水开采率及南水北调水进京)地下水埋深时空变化规律、对下游水资源的影响及灌区地下水采补平衡调控方案, 得出情景 2~情景 4 灌区地下水抬升 1.22~2.40 m, 情景 2~情景 4 排泄量增加 1251~6333 万  $\text{m}^3$ , 可置换水资源量 3307~6536 万  $\text{m}^3$ , 研究成果已成为指导北京市再生水灌区的规划、设计、管理、运行的决策依据。

再生水灌溉对地下水水质的影响是一个非常值得关注的问题, 本文研究建立了再生水灌区地下水数值模型, 分析了地下水位的变化规律, 以及提出防止灌区土壤次生盐渍化的调控方案, 但在以后的研究中, 应重点分析长期再生水灌溉情况下灌区优先污染物对地下水水质影响的数值模拟模型和定点监测试

验, 污染物质在土壤-地下水中的迁移转化规律, 再生水灌区地下水遭受污染的预警机制, 实现再生水安全灌溉利用。

## 参考文献 (References)

- [1] 尹世洋, 吴文勇, 刘洪禄, 等. 北京市农业用水监测与评价[J]. 北京水务, 2011, 增刊 1: 54-59.  
Yin Shiyang, Wu Wenyong, Liu Honglu, et al. Utilization status and monitoring of reclaimed water for agriculture in Beijing. Beijing Water, 2011, Suppl. 1: 54-59. (in Chinese)
- [2] 白利平, 王金生. GMS 在临汾盆地地下水数值模拟中的应用[J]. 山西建筑, 2004, 30(16): 78-82.  
BAI Liping, WANG Jinsheng. The application of GMS in numerical simulation of ground water in Linfen basin. Shanxi Architecture, 2004, 30(16): 78-82. (in Chinese)
- [3] 谭文清, 孙春, 胡婧敏, 等. GMS 在地下水污染质迁移数值模拟预测中的应用[J]. 东北水利水电, 2008, 16(5): 54-59.  
TAN Wenqing, SUN Chun, HU Jingmin, et al. Application of GMS in simulation of pollutants migration for groundwater. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2008, 16(5): 54-59. (in Chinese)
- [4] 孙纳正. 地下水污染——数学模型和数值方法[M]. 北京: 地质出版社, 1981: 10-13.  
SUN Nazheng. Mathematical modeling of groundwater pollution. Beijing: Geological Publishing House, 1981: 10-13. (in Chinese)
- [5] 李俊亭. 地下水流数值模拟[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 23-30.  
LI Junting. Groundwater numerical simulation. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 23-30. (in Chinese)
- [6] 卢文喜. 地下水运动数值模拟过程中边界条件问题探讨[J]. 水利学报, 2003, 3: 33-36.  
LU Wenxi. Approach on boundary condition in numerical simulation of groundwater flows. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 3: 33-36. (in Chinese)
- [7] 张明江, 门国发, 陈崇希, 等. 渭干河流域三维地下水流数值模拟[J]. 新疆地质, 2004, 22(3): 238-243.  
ZHANG Mingjiang, MEN Guofa, CHEN Chongxi, et al. Three-dimensional digital simulating of Groundwater. Flow of Weigan river Drainage area. Xinjiang Geology, 2004, 22(3): 238-243. (in Chinese)
- [8] 王宏, 娄华君, 邹立芝. Modflow 在华北平原区地下水模拟中的应用[J]. 世界地质, 2003, 22(1): 69-72.  
WANG Hong, LOU Huajun and ZOU Lizhi. The application of modflow software in the simulation for the underground reservoir of Huabei plain. Global Geology, 2004, 22(3): 238-243. (in Chinese)