# 再生水灌溉土壤主要盐离子迁移模拟

叶 文1,王会肖1\*,高 军1,刘海军1,李 艳2

(1.北京师范大学水科学研究院,北京 100875; 2.中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083)

摘 要:在北京市通州新河灌区,再生水已逐步成为农田灌溉的主体水源。与一般常规灌溉水源不同,再生水虽经过处理,仍含有 多种重金属和盐分离子以及一些有机污染物。针对再生水灌溉过程中盐离子可能在土壤中积累进而产生地下水污染问题,运用非 饱和土壤水流和溶质运移模型 Hydrus-1D,模拟再生水灌溉条件下主要盐离子 SO<sup>2</sup>、Cl和 NO3-N 在土层中的垂向分布及其随时间 向深层的迁移情况,讨论了再生水灌溉是否对地下水构成潜在威胁。模拟结果显示,新河灌区的再生水盐离子主要集中在 50 cm 以 内的表层土壤中,其浓度累积不足以迁移到深层土壤并进而污染地下水,盐离子甚至会随着时间的延长逐渐被作物吸收利用。该灌 区的使用现状表明再生水进行农田灌溉是可行的,对地下水污染的可能性极小,但为避免表层土壤含盐量超标影响作物生长,建议 采用基于土壤环境和作物生命健康的再生水灌溉制度。

关键词:再生水灌溉;Hydrus-1D;盐离子运移;地下水污染

中图分类号:X523 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)05-1007-09 doi:10.11654/jaes.2014.05.026

## Simulation of Salt Ion Migration in Soil Under Reclaimed Water Irrigation

YE Wen<sup>1</sup>, WANG Hui-xiao<sup>1\*</sup>, GAO Jun<sup>1</sup>, LIU Hai-jun<sup>1</sup>, LI Yan<sup>2</sup>

(1.College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875; 2.College of Water Resources & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083)

**Abstract**: Reclaimed water has gradually become one of the main water sources for agricultural irrigation in the Northern China. Though treated, it may still contain heavy metals, salt ions and organic pollutants, and thus pose potential soil and groundwater pollution. Here, un-saturated soil water and solute movement model Hydrus-1D was used to simulate the vertical distributions of major nutrient ions  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ , and  $NO_3^-$  in soil profile over time, in order to understand the potential risk to the underground water. Salts in the current reclaimed water water not high enough to migrate into or pollute the underground water, but were adsorbed and accumulated in soil over time at the Xinhe irrigation district of Tongzhou county. The salt ions were mainly concentrated at the surface soil layer less than 50 cm. Our data show that reclaimed water was safe for agricultural irrigation. In order to prevent the secondary salinization of surface soils, however, high frequent flood-ing irrigation of reclaimed water should not be allowed, but alternate irrigation of reclaimed water and well water would be recommended. **Keywords**; reclaimed water irrigation; Hydrus-1D; salt ion migration; groundwater pollution

随着社会经济的发展,一些城市和地区的水资源 短缺状况越来越严重,在新增水资源困难、常规水资 源又无法满足人们的需求时,再生水的回用逐渐成为 人们关注的焦点<sup>[1]</sup>。一般而言,污水经过二级(或以上 的)处理就可以回用<sup>[2]</sup>到包括景观需水、工业用水、绿 地灌溉等用户中。然而,再生水虽经处理,其中仍然含 有各类氮素和盐离子甚至有机污染物,再生水的农业 利用存在潜在的二次污染风险。

氮素是环境中普遍存在的一种元素,少量的氮素 化合物存在于水体中是自然作用的结果,而随着人类 活动的加强,氮污染(铵态氮、硝态氮、亚硝态氮和有 机氮)已成水污染的一个普遍现象,地表水和地下水 的氮污染已经成为一个国际性的问题<sup>[3]</sup>。据全国水资 源综合规划项目调查结果显示,我国平原区浅层地下 水的主要污染物依次为铵态氮、亚硝态氮、高锰酸钾 指数、硝态氮、挥发酚,全国范围内"三氮"超标十分普 遍,氮污染已成为我国最突出的水质问题之一<sup>[4]</sup>。杨

收稿日期:2013-10-15

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009SD-10);国家 自然科学基金项目(41371043)

**作者简介:**叶 文(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态水文方面 的研究。E-mail:leaf24@126.com

<sup>\*</sup>通信作者:王会肖 E-mail:huixiaowang@bnu.edu.cn

维等<sup>19</sup>通过 2 个土柱的动态试验结果显示,在包气带 通气性良好的环境中,硝酸盐氮是污染地下水的氮素 主要存在形态。已有研究成果表明,再生水中氮的成 分过多会造成灌溉作物晚熟、果实不够丰满、味道减 退、糖分减少,当含盐量累积超过 2000 mg·L<sup>-1</sup> 便会严 重影响作物的生长<sup>[6]</sup>。更多的研究表明,铵态氮含量的 严重超标跟小麦苗死亡、玉米缺苗有直接关系,甚至 对景观树木的叶片也造成伤害<sup>[7]</sup>。关于氯化物和硫酸 根离子对人们生产生活的影响已早有研究<sup>[8]</sup>,酸性硫 酸盐对作物的产量有十分显著的影响,而氯离子的迁 移对地下水环境的污染风险也不容忽视<sup>[9]</sup>。

对于诸如氮素等土壤溶质运移的研究,在上世纪 60年代初,Nileson和 Biggar<sup>[10-14]</sup>就从实验和理论上阐 明了溶质运移过程中质流、扩散和化学反应的耦合性 质,并应用数学模型模拟溶质运移过程,建立了溶质 运移的对流-弥散方程,成为土壤溶质运移研究的经 典和基本方程。面对再生水灌溉的污染风险,通过物 理模型模拟再生水灌溉条件下土壤水盐运动规律,并 对土壤盐分累积迁移过程做出预测[15],对再生水灌溉 制度的制定具有指导意义,可为安全合理地利用再生 水提供有力的技术支持。土壤溶质运移的研究涉及土壤 学、生物学、水文学及水资源和环境科学[16-19]等多个学 科,近几十年的研究成果很好地指导了农业生产和资 源环境保护,产生了可观的生态效益和环境效益。目 前,经典的溶质运移机理性模型主要有 LEACHM<sup>[20]</sup>、 RZWQM<sup>[21]</sup>、Hydrus-1D<sup>[22]</sup>等,它们在不同的试验条件 下提出,在模型结构和过程考虑上的侧重点也各不 相同,有各自的适用范围和限制条件。本文采用的 Hydrus-1D 模型具有广泛适用性,可用于模拟不同土 壤和环境条件下的水盐运移与氮素转化过程。用该模 型进行新河再生水灌区土壤盐离子(硫酸根离子与氯 离子)和硝态氮迁移的模拟,并着重对土壤环境质量 影响最大的氮素进行模拟,旨在分析再生水灌溉盐离 子运移对土壤环境质量和地下水的潜在影响。

# 1 材料与方法

# 1.1 研究区概况及试验材料

新河灌区位于通州区中南部,北京市东南郊,京 杭大运河的北端,是北京市再生水管理与利用的示范 区,地处北纬 39°36′~39°53′、东经 116°32′~116°56′之 间,总面积 447 km<sup>2</sup>。灌区多年平均气温为 13.7 ℃,最 高平均气温在 7 月,为 26.9 ℃,最低月均气温在 1 月,为-3.2 ℃,多年平均降水量 589.7 mm,多年平均

#### 农业环境科学学报 第 33 卷第 5 期

蒸发量1480.0 mm,约是降水量的2.5 倍。灌区内永 乐店试验站(即图1所示率定点)的土样数据表明,其 含水层土壤以粘土、粘质粉土和砂质粉土为主,浅层 土壤则以粘、砂质壤土为主<sup>[23]</sup>。地形自西北向东南倾 斜,地面平均坡度为1/2000~1/2500,是北京市的主要 泄洪区和纳污区。新河灌区大规模的再生水农业灌溉 始于2003年,主要为经由通惠干渠与通惠南干渠引 自高碑店污水处理厂的二级处理再生水。

研究区灌溉水引自高碑店污水处理厂,取再生水 水样检测,其中硝态氮、硫酸根离子与氯离子的检测 含量与灌区井灌水质对比如表1。

表 1 灌溉水质检测结果(mg·L<sup>-1</sup>)

Table 1 Quality of irrigated water( $mg \cdot L^{-1}$ )

水样	硝态氮	Cl-	$\mathrm{SO}_4^{2-}$
再生水	0.629	153.84	120.71
井水	0.15	10.67	36.10



图 1 研究区域与采样点位置 Figure 1 Studied area and sampling sites

#### 1.2 采样和分析方法

由于 Hydrus-1D 模型没有考虑作物根系对氮素 的吸收,采样点需避开作物种植带,以减少不确定性。 本次实验将样点选在棵间裸土上,选用灌区内具有代 表性的两个样点用于模拟,并分别于 2011 年 12 月和 2012 年 6 月进行两次取样。且据调研,本次模拟周期 内少降雨,也少施肥。通常土壤深耕的标准为18~20 cm,室内土柱模拟试验表明:耕翻处理小麦根系深度 为50 cm,再生水灌溉以地面灌溉为主,四次灌水分 布在小麦生长周期内的四个阶段(播前灌 2011 年 10 月 15 日,冬灌 2011 年 11 月 12 日,拨节灌 2012 年 4 月 27 日,抽穗灌 2012 年 5 月 12 日),前两次灌水多 于后两次,每次灌水约 90 mm 左右,湿润层一般可达 到 100 cm 以下,但较少达到200 cm 深度。为全面分析 再生水灌溉对土壤环境质量的影响,取样以 20 cm 为 一个土层,分成 10 个取土层取样,选取 0~200 cm 的 土壤剖面。

称取湿土样品适量置于铝盒中,在105℃烘箱 中烘干后称重,计算土壤含水率,以百分数表示土样 水分含量。准确称取湿土样品2.5g,置于洗净干燥的 塑料瓶中,轻轻摇散样品,使之平铺展开,加入25 mL 水,盖紧瓶盖,超声波振荡30 min,取上清液过0.45 µm 滤膜,采用美国 DIONEX 公司生产的离子色谱仪 (DX 600)分析测定土壤盐离子含量。采用离子色谱 法测定分层土样中氯离子与硫酸根离子的含量;铵态 氮检测方法为纳氏剂分光光度法,硝态氮含量检测用 酚二磺酸分光光度法。

## 1.3 模型描述

Hydrus-1D 模型是美国农业部盐土实验室开发的 模拟非饱和介质中一维水分、热、溶质运移的模型,该 模型考虑根系吸水和土壤持水能力的滞后影响,应用 于恒定或非恒定的边界条件,具有灵活的输入输出功 能<sup>[24]</sup>,在土壤水分运动<sup>[25]</sup>、盐分<sup>[26]</sup>、农药和土壤氮素运移 方面广泛应用。本研究结合再生水灌区实际情况,用对 流-弥散方程描述氮素在土壤中的运移过程。前期采 样分析表明,研究区土壤硝态氮含量远高于铵态氮,铵 态氮检测量偏低,故对氮的研究以分析硝态氮为主。

土壤水分运移方程采用修正的 Richards 对流-弥散方程,进行数值求解<sup>[27]</sup>。

水分运动基本方程:

$$\frac{\partial \theta(h,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(h) \left[ \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] \right\}$$
$$\theta_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha h|^n)^{-m}$$
$$K(\theta) = K_s \theta_e^l \left[ 1 - \left( \frac{1}{1 - \theta_e} \right)^m \right]^2$$

式中:θ为土壤含水率, cm<sup>-3</sup>;θ<sub>e</sub>为有效土壤含水 率, cm<sup>-3</sup>; θ<sub>r</sub>为残余土壤含水率, cm<sup>-3</sup>; θ<sub>e</sub>为饱 和土壤含水率, cm<sup>-3</sup>; cm<sup>-3</sup>。以上均为体积含水率, 除实 测的土壤含水率外,其他各项土壤含水率均参考永乐 店试验站的最新数据<sup>[23]</sup>。h 为负压水头,cm;K 为水力 传导系数,cm·d<sup>-1</sup>;K<sub>s</sub> 为渗透系数,cm·d<sup>-1</sup>;t 为时间,d; z 为空间坐标,原点在地面,向上为正;l 为地下水埋 深,cm;n、m、α 均为经验参数。

上式是被广泛采用的经典 Rien van Genuchten 方程(简称 VG 方程),是基于 Mualem 的统计孔径分布模型,以土壤水分特征参数函数的形式估计非饱和渗透系数的模型。

对于硝态氮:

$$\frac{\partial c\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \theta D(\theta, q) \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \frac{\partial (qc)}{\partial z} + S_N(t, z)$$

式中: $\theta$ 为体积含水率,cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>;c 为土壤溶液中硝态 氮的浓度,mg·L<sup>-1</sup>;q 是垂向水分通量; $D(\theta,q)$ 为综合 弥散系数,反映的是土壤水中有效分子扩散和机械弥 散机制; $S_N$ 为源汇项,包括作物根系吸收量及不同形 态氮素的转化等,可用下式表示:

 $S_N = k_2 \theta c - S_W c_R - k_3$ 

式中: $k_2$ 、 $k_3$ 分别为铵态氮的硝化速率与硝态氮的反 硝化速率;c是土壤溶液中铵态氮的浓度,mg·L<sup>-1</sup>; $c_R$ 为根系吸收硝态氮浓度; $S_W$ 为根系吸水量。

初始条件:  $c(z,0)=c_0(z) [z \in (0,L),t=0]$ 上边界条件:  $\begin{bmatrix} c(z,t)=C_0 [z=L,0<t\leq t_1] \\ c(z,t)=0 (z=L,t>t_1) \end{bmatrix}$ 下边界条件:  $\frac{\partial c}{\partial z}(L,t)=0 (z=0,t>0)$ 

以上水分和盐分运移的基本方程可以模拟硝态 氮,也可以对氯离子与硫酸根离子采用如上同样的方 程进行模拟。

#### 1.4 参数率定

采用 Hydrus-1D 模型模拟新河再生水灌区内典 型样点从 2011 年 12 月 1 日至 2012 年 6 月 30 日的 溶质运移过程。模拟的取样土下边界设在 2 m 处,结 合根系和灌水下渗的深度特点,假定为自由排水和浓 度零梯度下边界条件,上边界为通量边界条件,依次 输入的上边界通量包括降水、蒸发量以及溶质通量 等;输出结果有 2 m 土体水分平衡各项和氮平衡各 项。本研究将土壤划分为 7 个层次,土壤质地从土壤 表面向纵深依次为黏质壤土、砂质壤土、砂土以及中 壤土,根据实际测定的各层次土壤物理构成,参考 Hydrus-1D 系统自带土壤数据库和经验系数,模拟计 算各层土壤水力学参数。利用实测的再生水灌区 2011年12月15日的分层土壤水分数据,对水分运移 的有关参数进行率定,结果见表2。

氮的转化过程十分复杂,其转化参数通过查阅文 献获得,经实测的土壤分层硝态氮含量对模型选用参 数进行率定。纵向弥散度 D<sub>ℓ</sub>参考经验取值法设定<sup>[28]</sup>; 溶质在纯水中的自由扩散系数 D<sub>W</sub> 采用经验公式<sup>[29]</sup>预 估,实际确定取值主要通过与实验测试样点值对比, 在系数取值容许的范围内调参,进行率定的模型选用 参数列于表 3。

# 2 结果与分析

## 2.1 模型的可靠性验证

利用已知样点数据率定各项参数后,输入相邻站 点在2012年6月12日的实测分层数据,查阅相关资 料获得的土壤性质参数来验证 Hydrus-1D 模型的可 靠性。以不同深度的初始土壤含水量、离子检测值、灌 水条件等为模型的初始边界条件,模拟氮元素的变化

## 农业环境科学学报 第33卷第5期

## 表 3 土壤分层氮素迁移转化模拟参数

Table 3 Simulated parameters for nitrogen migration in soil profile

土层/cm	$D_w$	$D_L$	生物固持常数/d <sup>-1</sup>	$k_1$	$k_n$	$k_{\scriptscriptstyle d}$
0~20	2.32	3.2	0.004	1.500	0.100	0.015
20~40	2.32	3.2	0.003	0.500	0.040	0.010
40~60	2.32	3.2	0.002	0.001	0.040	0.010
60~80	2.32	2.1	0.001	0.001	0.001	0.001
80~120	2.32	2.1	0.001	0.001	0.001	0.001
120~160	2.32	2.1	0.001	0.001	0.001	0.001
160~200	2.32	2.1	0.001	0.001	0.001	0.001

注: $D_u$ 为硝态氮在自由水中扩散系数, $cm^2 \cdot d^{-1}$ ;D为弥散系数, $d^{-1}$ ;  $k_1$ 表示矿化反应数, $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ ; $k_n$ 、 $k_d$ 分别为硝化反应、反硝化反应的 一级动力学反应系数, $d^{-1}$ 。

#### 情况。

调参率定结果与可靠性验证结果分别如图 2、图 3 所示,结果表明,不同深度土层的实测数据跟模 拟值的分布基本一致,拟合效果较好。通过 SPSS 软件进行模拟值与实测值的距离相关分析(以 Pearson 相关系数为距离),相关系数皆达到显著水平;Nash-

表 2	模型中采用的土壤剖面水力学参数

Table 2 Tryarautic parameters of soil profile used in the simulated model						
土壤层次/ cm	残余含水率 Q,/ cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup>	饱和含水率 Q <sub>s</sub> / cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup>	经验参数 α/ m <sup>-1</sup>	经验参数 n	饱和导水率 K,/ cm·d <sup>-1</sup>	孔隙连通性系数
0~20	0.045 7	0.483 8	0.005 2	1.625 8	5.00	0.5
20~40	0.034 8	0.383 3	0.017 1	1.547 9	3.50	0.5
40~60	0.048 9	0.320 0	0.009 7	1.467 5	4.50	0.5
60~80	0.046 4	0.339 8	0.008 7	1.639 9	1.75	0.5
80~120	0.046 4	0.339 8	0.008 7	1.364 6	3.00	0.5
120~160	0.046 4	0.469 8	0.005 7	1.835 1	0.50	0.5
160~200	0.046 4	0.439 8	0.008 7	1.444 6	0.50	0.5





(calibration results)



Figure 3 Simulated and measured values of soil water and nitrate contents in soil profile on the 195th day of simulation period (Validation results)

Suttcliffe 效率系数  $E_{Ns}$  检验模拟效果也较好,除硝态 氮模拟的 E<sub>Ns</sub>为 0.62 以外,水分模拟与硫酸根离子、 氯离子的 Ens均在 0.71 以上,模型模拟结果符合精度 要求(表 4)。第二次采样深度为 0~80 cm,比第一次取 点深度浅,但其模拟趋势与率定组一致,模拟值与样 点值十分接近,并不影响验证。据此检验结果,认为应 用 Hydrus-1D 模型模拟田间水分与离子的运移过程

表 4 相关系数、Nash-Suttcliffe 效率系数检验及均值检验 Table 4 Correlation index, Nash-Suttcliffe efficiency coefficient

test and mean test						
项目	土壤水分 模拟	硝态氮 模拟	硫酸根离子 模拟	氯离子 模拟		
模型率定	0.972	0.973	0.964	0.982		
模型验证	0.982	0.993	0.957	0.976		
E <sub>Ns</sub> 检验	0.929	0.619	0.715	0.765		
实测均值/模拟均值	1.033	1.393	0.979	0.975		

是可靠可行的。

## 2.2 溶质运移模拟计算

模拟过程中,将 0~200 cm 土壤剖面划分为以 20 cm 为等间距的土层,分别于每层土壤中选取观察点, 即地面以下 10、30、50、70、90、110、130、150、170、190 cm 共 10 个观察点,观察土壤水分与溶质的运移动态 和规律,模拟周期共213d。根据率定和验证选定的土 壤水分和溶质运移参数,模拟取样点1在模拟期内第 15、75、135 和 195 d 氮素运移随土壤剖面的变化并进 行分析,同时与灌区内另一取样点2数据的模拟情况 进行比对,交互验证模拟效果。硝态氮的含量随深度 的变化见图 4。

硫酸根离子和氯离子在土层中的含量随时间变 化的累积曲线如图 5、图 6、图 7 所示,通过选取的三 个观察点(深度依次为 20、80、160 cm)的模拟值,可 反映土壤不同深度未来含量的变化趋势。





Figure 4 Simulation of nitrate distribution in soil profile from sampling site1 and 2 at different times



图 5 模拟周期内第 15 d SO₄、CI 的实测值与模拟值(参数验证)

Figure 5 Simulated and measured values of  $SO_4^2$  and  $Cl^2$  on the  $15^{th}$  day of simulation period(Validation results)



图 6 取样点 2 不同土壤深度观察点 SO<sup>2</sup> 含量随时间的分布模拟 Figure 6 Simulation of SO<sup>2-</sup> distribution over time at different soil depths from sampling site 2



图 7 取样点 2 不同土壤深度观察点 Cl-含量随时间的分布模拟 Figure 7 Simulation of Cl<sup>-</sup> distribution over time at different soil depths from sampling site2

# 3 讨论

采用灌区取样数据对模型进行参数调整,从图 2 可以看出,调参后的模拟效果与实测数据拟合度很 高。从率定曲线可以看出,随着灌水时间的推移,土壤 含水量随土壤深度逐渐增加,到1.5m深度开始减 小,表明水分运移至1.5m深度后下渗不明显。由于 采样时间(2011年12月15日)与最近一次灌水时间 (2011年11月12日)相隔一个多月,灌溉水分的垂 向运动基本停止。硝态氮含量从表层到地下40~60 cm有明显降低趋势,可能是由周边作物或微生物的 吸收转化造成,也可能是降水溶解淋洗作用的结果, 吕殿青等<sup>[30]</sup>早期的相关研究可以说明这一问题;在约 80 cm处硝态氮含量达到最低值,更深层的含量则渐 趋稳定,可能是因为灌区作物的根系分布深度主要在 80 cm深处<sup>[30]</sup>;而在约130 cm深处,实测土壤硝态氮 含量有明显升高,与模拟值偏离较大,这可能是由取 样点变化造成的土壤背景值差异所导致。

模型检验(图 3)表明,率定的参数对后期的模拟 也十分准确,无论是含水率还是硝态氮的含量,均与 实测数据十分接近,其趋势与率定组也一致,证明率 定的参数可以用于模型模拟。由于验证组的数据(6 月12日)与最近一次灌水(5月12日)相隔一个月,其 浓度最大值只有 0.8 mg·L<sup>-1</sup>,明显低于率定组的 2.2 mg·L<sup>-1</sup>;由于前者取样的时间与灌水时间更接近,在 第二次取样时,前几次灌水携带的溶质已经淋溶损失 或形成了深层运移,硝态氮含量在浅层较低。可以对 照水分模拟情况说明这一问题。

图 4 是本文的模拟组,采用率定验证后的参数, 输入水分含量、溶质初值等数据驱动模型对灌区内的 取样点 1 和点 2 进行模拟,可以看出:

(1)空间上,无论是第15天,还是模拟的另外三 个时间,取样点1在浅层的硝态氮含量都较高,向下 层递减,约在80 cm 深处,硝态氮含量达到最低值,接 近0.1 mg·L<sup>-1</sup>,表明80 cm 以下根系分布已经不多,在 150 cm 以下的土壤深度根系分布相当稀少,因此硝 态氮含量维持在 0.20 mg·L<sup>-1</sup>左右,基本保持不变。在 约 130 cm 深出现一个极值,对比实测数据在该点的 浓度值(0.4 mg·L<sup>-1</sup>),也是一个极值,而剖面其他位置 的模拟数据与实测数据也呈现较高的一致性,表明模 拟结果受输入条件的影响,比较符合真实情况。取样 点 2 中硝态氮含量从 80 cm 处出现明显转折,逐渐向 深层累积,与实测数据的分布趋势一致,也与该测点 位于地势较低的下游有一定的联系。

(2)在时间上,结果表明随时间的累积,溶质有逐 渐降低的趋势,这与一般室内土柱模拟灌溉实验的结 果恰好相反,产生这种"反常"现象的原因可能有如下 几点:①新河灌区虽然为再生水灌区,但是实际灌溉 的再生水是经过上游高碑店污水处理厂处理合格达 标的二级水,盐离子及硝态氮的含量偏低。②模拟区 域种植有小麦、玉米,一般根系深度能达到80 cm<sup>[30]</sup>, 但是有研究表明,小麦主根系深度最深可达 1.5 m,虽 然本试验取点考虑到 Hydrus-1D 模型模拟植物吸氮 的局限性,避开了作物根系,但由于模拟周期刚好是 冬小麦的生长周期,附近区域发达的小麦根系以及自 然生长的植物对土壤中氮元素的吸收会对硝态氮的 垂向运移产生轻微影响。③本实验的模拟周期为 2011年12月至2012年6月,冬小麦在北京市新河 再生水灌区的播种期一般为10月下旬,来年5、6月 收获,考虑小麦在生长周期内对硝态氮的需求量是逐 渐增加的,排除增施肥料的影响,再生水灌溉引入的 硝态氮含量基本处于"供不应求"的浓度范围,所以实 际模拟中曲线呈现随时间累积而含量降低的趋势。

图 5 是对硫酸根离子与氯离子模拟进行的参数 再验证,可以看出,模型模拟的效果较为理想,模拟值 与实测值分布趋势一致。图 6、7 反映了在长期的再生 水灌溉下,硫酸根离子与氯离子的累积主要发生在浅 层土壤(深约 20 cm),更深层的累积效果并不明显, 甚至有随时间的推移而减少的趋势。一方面,作物对 硫酸根离子与氯离子有一定的吸收能力,浅层密集的 根系能阻缓灌水或降水下渗速度,同步影响两种离子 的下移;另一方面,作为灌溉水源的再生水水质标准 本身就较高,灌溉引入量不大。

基于模型可靠性和本次较好的模拟效果,综合以 上模拟的曲线图可以看出, 硝态氮与硫酸根离子、氯 离子的含量在深度约为2m的土壤中累积含量最大 值分别为0.4、10、9mg·L<sup>-1</sup>,根据地下水质量标准(GB/ T 14848—1993)<sup>[31]</sup>, 在不超过2mg·L<sup>-1</sup>和50mg·L<sup>-1</sup> (硫酸根与氯离子的限制量一致)浓度范围内,均属一 类地下水。鉴于再生水水源离子含量不高,从本研究 中没有发现时间累积效应,不构成对地下水的污染, 前人的研究也可以说明这一问题<sup>[32-34]</sup>。但是浅层硫酸 根离子和氯离子在模拟周期 213 d 左右的含量(例如 20 cm 土深处)为 110~120 mg·L<sup>-1</sup>,对作物浅层根系有 一定的影响<sup>[35]</sup>,值得注意。由于检测技术有限,硝态氮 自身是易挥发物质,从取样到冷冻送检过程有挥发分 解的不确定性存在,今后的研究可考虑采用更为精确 的检测技术来排除样品检测误差,采用长序列的取样 方法排除偶然性误差值也值得后续研究。

# 4 结论

在新河再生水灌区模拟水分与三种溶质的垂向 运移,虽然为大田取样试验,但本研究利用灌区垄间 非种植带区域进行模拟,作物影响小,能减少冬小麦 根系吸收带来的影响,还原再生水灌溉下土壤中溶 质迁移随时间的累积效应,探讨对地下水的污染风 险。由于试验取样周期内的冬小麦根系十分发达,有 一定的吸收溶质的能力,对试验数据产生了一定的 影响。尽管如此,Hydrus(-123D)系列模型是一个十 分成熟的模型,本研究采用的一维模型,经过开发 者与使用者的优化完善,对水分溶质的模拟已经非 常理想。调参后的部分拟合系数也达到显著性水平, 因此能够反映再生水灌溉下的土壤溶质运移的基本 特征。

模拟与实测结果显示:①硝态氮含量在土壤中分 布没有明显的深层累积,相反,通过模拟与实测发现, 在将近十年的大规模再生水灌溉后,其在土壤中的含 量仍然偏低,表明营养元素在灌区没有构成污染,而 可能是优先满足作物吸收,其在土壤中的分布与根系 生长的周期相关。②表层土壤的离子含量在灌水期偏 高,证明再生水的短期集中灌溉会造成一定程度的累 积;另外,试验区蒸发量大也会导致土壤表层盐分累 积,但是其含量一般集中在浅层 50 cm 以内,容易被 作物吸收或降雨淋洗分解(硝态氮、铵态氮等)、微生 物降解,因而无法造成深层累积,通过本次模拟可以 排除硝态氮和几种常见的盐离子污染地下水的可能, 至于其他元素包括有机污染物的迁移对地下水的污 染有待进一步的研究。

## 参考文献:

[1]杨 玲,杨培岭,任树梅.再生水灌溉的污染问题研究[C]//都市农业

1014

工程科技创新与发展—2005 北京都市农业工程科技创新与发展国际学术研讨会论文集(II).北京:2005.

YANG Ling, YANG Pei-ling, REN Shu-mei. Irrigation with reclaimed water pollution problems[C]//Urban agriculture engineering innovation and development: 2005 Science and technology innovation and development in agricultural engineering for international symposium of Beijing (II). Beijing; 2005.

[2] 周陆波, 韩烈保. 再生水灌溉草坪绿地的研究进展[J]. 节水灌溉, 2004(5):17-20.

ZHOU Lu-bo, HAN Lie-bao. Advance in research on application of reclaimed water for turf-grass irrigation [J]. *Water Saving Irrigation*, 2004 (5):17–20.

- [3] Roberts G, Marsh T. The effects of agricultural practices on the nitrate concentrations in the surface water domestic supply sources of Western Europe[C]. IAHS, 1987, 164; 365–380.
- [4] 丁素玲. 非均质包气带中"三氮"迁移转化数值模拟[D]. 中国地质大学(北京), 2012.

DING Su-ling. The numerical simulation of nitrogen migration and transformation in heterogeneous vadose zone[D]. China Geosciences U-niversity(Beijing), 2012.

[5] 杨 维, 郭 毓, 王晓华, 等. 氮素在包气带与饱水层迁移转化的试验研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(3):69-75.
 YANG Wei, GUO Yu, WANG Xiao-hua, et al. Nitrogen migration and

transformation in the vadose zone with full water migration and research[J]. *Environmental Science Research*, 2008, 21(3):69–75.

- [6] 师荣光, 刘凤枝, 赵玉杰, 等. 中国城市再生水安全回用农业的对策研究[J]. 中国农业科学, 2008(8):2355-2361.
  SHI Rong-guang, LIU Feng-zhi, ZHAO Yu-jie, et al. Urban reclaimed water safety countermeasures of recycle agriculture research in China[J]. *China A gricultural Science*, 2008(8):2355-2361.
- [7] Devitt D A, Morris R L, Fenstermaker L K. Foliar damage, spectral reflectance, and tissue ion concentrations of trees sprinkle irrigated with waters of similar salinity hut different chemical composition[J]. *Hort Science*, 2005, 40(3):819–826.
- [8] 江 南,郑芝波,麦景郁,等.酸性硫酸盐土壤的综合改良措施对叶菜生长的影响[J].中国蔬菜,2005(08):18-19.
   JIANG Nan, ZHENG Zhi-bo, MAI Jing-yu, et al. Acid sulfate soils in the comprehensive improvement measures of the effects of leaf vegeta-

bles growth[J]. *China Vegetables*, 2005(08):18-19. [9] 朱艳飞, 哈建强, 付学功. 不同浓度污水入渗土壤氯离子运移特性

及其对地下水环境的影响[CJ//2010 重金属污染综合防治技术研讨 会论文集. 长沙, 2010:40-46.

ZHU Yan-fei, HA Jian-qiang, FU Xue-gong. Different concentrations of soil water infiltration chloride ion migration characteristics and its influence on the groundwater environment[C]//2010 The technical seminar for prevention and control of heavy metal pollution. Changsha, 2010:40– 46.

- [10] Nielsen D R, Biggar J W. Miscible displacement in soils: Experimental information[J]. Soil Science Society of America Journal, 1961, 25: 1–5.
- [11] Biggar J W, Nielsen D R. Miscible displacement II: Behavior of tracers
   [J]. Soil Science Society of America Journal, 1962, 26(2):125–128.

- [12] Nielsen D R, Biggar J W. Miscible displacement is soil Ⅲ: Theoretical consideration[J]. Soil Science Society of America Journal, 1962, 26: 216–221.
- [13] Nielsen D R, Biggar J W. Miscible displacement IV : Mixing in glass beads[J]. Soil Science Society of America Journal, 1963, 27(1):10–13.
- [14] Biggar J W, Nielsen D R. Miscible displacement V: Exchange processes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1963, 27(6):623–627.

[15] 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥. 模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的 影响[J]. 环境科学, 2012(12):4100-4107. LU Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e. Simulation of effect of irrigation with reclaimed water on soil water-salt movement by ENVI-RO-GRO model[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2012 (12):4100-4107.

[16] Kutilek M, Nielsen D R. Soil hydrology: Textbook for students soil science, agriculture, forestry, genecology, hydrology, geomorphology or other related disciplines[M]. Catena–Verlag Germany, 1994.

[17] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京:科学出版社, 1998. LI Yun-zhu, LI Bao-guo. Soil solute transport[M]. Beijing: Science Press, 1998.

- [18] Selim H M, Sparks D L. Physical and chemical processes of water and solute transport/retention in soils[M]//SSSA Special Publication No. 56. Madison: Soil Sci Soc Am, Inc. 2001.
- [19] Dane J H, Topp G C. Methods of soil analysis Part 4: Physical methods
   [M]. Madison: Soil Sci Soc Am, Inc. 2002:1253–1531.
- [20] 刘昆鹏. 再生水灌溉地区氮素在土壤中运移规律模拟的研究[D]. 北京:北京工业大学, 2006.

LIU Kun-peng. The simulation research on the nitrogen transport rule in the soil under re-use water irrigation[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.

- [21] 王 风,张克强,黄治平,等, RZWQM 模型介绍及其应用进展[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(4):501-504.
  WANG Feng, ZHANG Ke-qiang, HUANG Zhi-ping, et al. Introduction and application progress of the root zone water quality model (RZWQM)[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2008, 24(4):501-504.
- [22] Simunek J, HYDRUS-1D[EB/OL]. http://www.ussl.ars.usda.gov/ modelsmenu.htm.
- [23] 刘洪禄, 吴文勇, 等. 再生水灌溉技术研究[M]. 北京:中国水利水电 出版社, 2009.

LIU Hong-lu, WU Wen-yong, et al. Reclaimed water irrigation technology research[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2009.

[24] Liu Q C, Xie S C. A study on field soil water balance for summer corn in North China Plain[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 1:62– 68.

[25] 王水献,周金龙,余 芳,等. 应用 HYDRUS-1D 模型评价土壤水资源量[J]. 水土保持研究, 2005, 12(2):36-38.
WANG Shui-xian, ZHOU Jin-long, YU Fang, et al. Application of HY-DRUS-1D model to evaluating soil water resource[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(2):36-38.

[26] 尹大凯, 胡和平, 惠士博. 青铜峡银北灌区井灌井排水盐运动数值

#### 农业环境科学学报 第 33 卷第 5 期

#### 2014年5月 叶 文,等:再生水灌溉土壤主要盐离子迁移模拟

1015

模拟[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3):1-4.

YIN Da-kai, HU He-ping, HUI Shi-bo. Numerical simulation of water-salt movement under well-canal combined irrigation scheme in Qingtongxia Yinbei Irrigation District[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(3):1-4.

[27] 杨金中, 蔡树英, 王旭升. 地下水运动数学模型[M]. 北京:科学出版 社, 2009.

YANG Jin-zhong, CAI Shu-ying, WANG Xu-sheng. A mathematical model of groundwater movement[M]. Beijing: Science Press, 2009.

- [28] Šimunek J, Šejna M, Saito H, et al. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media[EB/OL]. http://www.pcprogress.com/en/Default.aspx?.
- [29] 施瓦茨巴赫瑞恩 P, 施格文菲利普 M, 英博登迪特尔 M. 环境有机 化学[M]. 王连生等, 译. 北京:化学工业出版社, 2004:309-313, 464-499, 545-556.

Schwartzenbach R P, Gschwend P M, Imboden D M. Environmental organic chemistry[M]. WANG Lian-sheng et al, translate. Beijing: Chemical Industry Press, 2004:309–313, 464–499, 545–556.

[30] 吕殿青,杨进荣,马林英. 灌溉对土壤硝态氮淋洗效应影响的研究
[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(4):307-315.
LU Dian-qing, YANG Jin-rong, MA Lin-ying. Study on effect of irrigation on soil nitrate leaching and uptake[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(4):307-315.

[31] 中华人民共和国地质矿产部. GB/T 14848—1993 地下水质量标准 [S]. 北京:中国标准出版社, 1994. Ministry of Geology and Mineral Resources of P. R. China. GB/T 14848—1993 The groundwater quality standard [S]. Beijing: China Standards Press, 1994.

[32] 黄冠华. 再生水农业灌溉安全的有关问题研究[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(1):26-35.

HUANG Guan-hua. The safety use of treated waste water for irrigation in agriculture[J]. *Review of China Agricultural Science and Technolo*gy, 2007, 9(1):26–35.

[33] 巫常林,黄冠华,刘洪禄,等.再生水短期灌溉对土壤-作物中重金 属分布影响的试验研究[J].中国农业工程学报,2006,22(7):91-96.

WU Chang-lin, Huang Guan-hua, LIU Hong-lu, et al. Experimental investigation on heavy metal distribution in soil-crop system with irrigation of treated sewage effluent[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22 (7):91–96.

[34] 徐小元, 孙维红, 吴文勇, 等. 再生水灌溉对典型土壤盐分和离子浓度的影响[J]. 中国农业工程学报, 2010, 26(5): 34–39.

XU Xiao-yuan, SUN Wei-hong, WU Wen-yong, et al. Effect of irrigation with reclaimed water on soil salt and ion content in Beijing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(5):34–39.

[35]张奇珠,孙云秀,刘日明,等.根层土壤盐分浓度与小麦生长关系的初步研究[J].石河子大学学报(自然科学版),1984(1):51-55. ZHANG Qi-zhu, SUN Yun-xiu, LIU Ri-ming, et al. The preliminary

research about the root layer soil salt concentration and the relationship between wheat growth[J]. *Journal of Shihezi University*(*Natural Science*), 1984(1):51–55.