

# 地表水—地下水交互下傍河土壤硝酸盐氮 迁移规律试验研究

于宗民, 武桂芝, 黄明翔, 李利霞

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266000)

**摘要:**为了研究地表水与地下水不同补给关系下硝酸盐氮在傍河农田的迁移规律,选取大沽河河床沙样作为沙槽试验介质,设计地表水与地下水相互补给装置,模拟无补给、地表水补给地下水和地下水补给地表水 3 种方式下硝酸盐氮在土壤中的迁移,通过测定各取样点硝酸盐氮含量和到达时间,分析了其迁移规律。结果表明:纯淋洗实验中,淋洗强度与沙样颗粒越小,硝酸盐氮在表层沙中的累积越明显,硝酸盐氮的迁移也越慢。地表水与地下水相互补给试验中,补给水位上升,硝酸盐氮的积累量增加、迁移到饱水带的时间缩短;补给水力坡度为 0.5 时,硝酸盐氮在细沙饱水带中迁移速度约为 5.3 cm/min;水力坡度变为 0.7 时,迁移速度约为 9.4 cm/min;补给水力坡度为 0.5 时,硝酸盐氮在中沙饱水带的迁移速度约为 12.3 cm/min。硝酸盐氮在包气带中的积累量随着沙层深度的增加而减少;淋洗强度、水力坡度及沙样颗粒越大,硝酸盐氮在包气带和饱水带中的迁移速度越快;补给水位越高,硝酸盐氮迁移至饱水带的时间越短。

**关键词:**地表水—地下水交互;土壤;硝酸盐氮;迁移规律

中图分类号:X523

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0067-07

## Experimental Study on Nitrate Nitrogen Migration in Soils Along the River Under Interaction of Surface Water and Groundwater

YU Zongmin, WU Guizhi, HUANG Mingxiang, LI Lixia

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266000, China)

**Abstract:** This research aimed to study the migration pattern of nitrate nitrogen in farmland next to rivers under different recharge relations between surface water and groundwater. Sand samples from riverbeds at different locations on the Dagu River were used as sand tank experimental media. Surface water and groundwater complementary feeding devices were designed to simulate leaching of nitrate nitrogen in the soil in three ways: no recharge, surface water recharge, and groundwater recharge, migration of nitrate nitrogen was determined by measuring the nitrate nitrogen content and the arrival time at each sampling point. The results show that: in the pure leaching experiment, the smaller the leaching intensity and sand-like particles, the more obvious the accumulation of nitrate nitrogen in the surface sand, and the slower the migration of nitrate nitrogen; in the experiment of supplementary surface water and groundwater, the supply water level increased, the accumulation of nitrate nitrogen increased, and the time of nitrate migration to the saturated zone was shortened; when the supply hydraulic gradient is 0.5, the speed of nitrate nitrogen migrates in the fine sand saturated zone is about 5.3 cm/min; when the hydraulic gradient becomes 0.7, the speed of nitrate migration is about 9.4 cm/min; when the recharge hydraulic gradient is 0.5, the nitrate nitrogen migration speed is about 12.3 cm/min. The accumulation of nitrate nitrogen in the unsaturated zone decreases with the increase of the sand depth. The greater the leaching intensity, hydraulic slope and sand-like particles, the faster the migration speed of nitrate nitrogen in the unsaturated zone and saturated zone; the higher the recharge water level, the shorter the time for nitrate nitrogen to migrate to the saturated zone.

**Keywords:** surface water-groundwater interaction; soil; nitrate nitrogen; migration law

收稿日期:2020-04-20

修回日期:2020-06-01

资助项目:青岛市公共领域科技支撑计划“大沽河流域蔬菜生产化肥面源污染头控制技术与示范”(14-2-3-53-nsh)

第一作者:于宗民(1995—),男,山东烟台人,硕士,研究方向为土壤、地下水污染防治。E-mail:569850305@qq.com

通信作者:武桂芝(1974—),女,河南商丘人,博士,副教授,主要从事水环境模拟、地下水污染防治研究。E-mail:guizhiwu701@163.com

受密集型农业活动和工业活动的影响,硝酸盐氮成为地表水和地下水中最为广泛的污染物之一<sup>[1-4]</sup>,硝酸盐氮含量超标,使供水质量降低,还可能引发高铁血红蛋白症、消化系统癌症等一系列疾病,危害人类健康,部分水源地供水井因此停止供水,成为阻碍经济和社会发展的的重要因素<sup>[5-8]</sup>。

在我国,大部分城市用水都依赖于地下水,傍河地下水水源地是一种开采地下水资源的重要水源地类型,它靠近河岸,主要依靠河水渗漏补给,对城市供水起着无可替代的作用,其安全性尤为重要,相较于其他区域,其地表水与地下水的水力联系比较密切<sup>[9-10]</sup>。部分研究发现,硝酸盐氮的迁移过程受地表水—地下水交互作用的影响十分显著,且地表水—地下水作用带(潜流带)是硝酸盐氮迁移转化最为复杂的区域之一<sup>[11-13]</sup>,因此,亟需我们对它开展更为细致的研究。闫雅妮等<sup>[14]</sup>研究发现硝酸盐氮在潜流带的衰减方式主要包括:合成有机氮、反硝化及 DNRA;李晶<sup>[15]</sup>通过室内模拟土柱试验,发现不同深度土层对硝酸盐氮的处理能力随硝酸盐氮浓度的增大而呈逐渐减小的趋势;Liu 等<sup>[16]</sup>研究发现:水力停留时间及地下水与地表水之间的交互作用,会对硝化作用、反硝化作用、DNRA 的速率以及相应的产物产生影响;Gutierrez 等<sup>[17]</sup>对非饱和区与饱和区地下水水质监测数据进行了分析,发现硝酸盐浓度会随着流速和

土壤介质渗透性的降低而降低。

多数研究把关注点放在硝酸盐的衰减和转化过程上,而对不同水力条件影响硝酸盐氮迁移规律的研究较少。大沽河是青岛市重要的水源地,通过对大沽河流域硝酸盐氮污染现状进行调查,发现其地表水、地下水均受到了污染,其中地下水受污染程度最为严重,其硝酸盐氮最大含量达到 135.7 mg/L。

本试验从大沽河河床取沙样,设计制作地表水—地下水相互补给及降雨模拟装置,从水力学角度出发,通过室内试验来研究地表水与地下水交互作用下傍河土壤硝酸盐氮的迁移规律,以期为当地农业管理和水资源保护提供科学指导。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

试验装置(图 1)由沙槽、水箱以及模拟降雨装置组成,用来模拟地表水—地下水系统。沙槽长 120 cm、宽 30 cm、高 120 cm,左端模拟河流断面,中部填充沙样模拟傍河土壤,右端模拟地下水抽水井,中间由透水板材相隔,沙槽正面布设水分传感器以确定入渗水流在包气带的迁移过程,背面布设测压管来观测沙槽内的水位;左右两个水箱分别与沙槽左右端形成连通器控制沙槽内的水位,用来模拟地表水与地下水之间不同的水力坡度;上方装置模拟降雨并可调节淋洗强度。

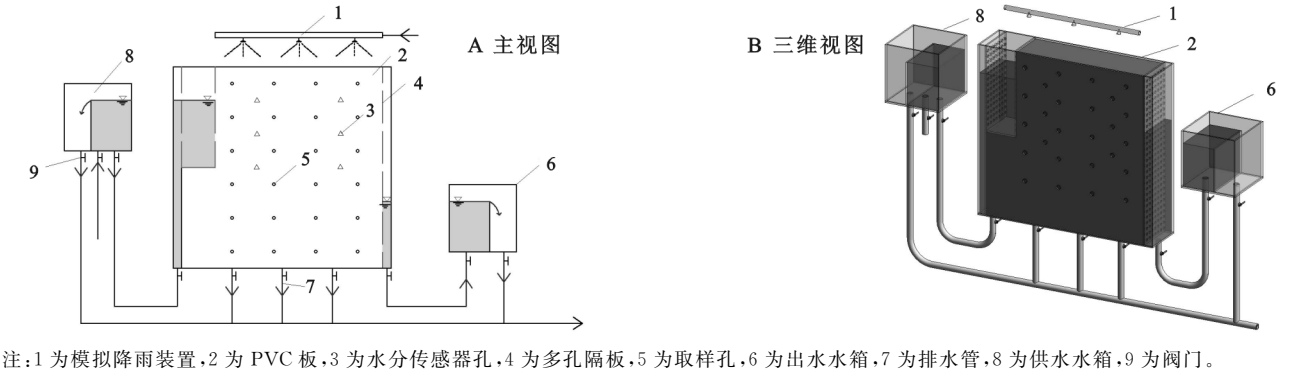


图 1 试验装置示意图

2018 年 3 月 12 日,从大沽河中、下游两处(马军寨村与贾疃村)河床中采集试验沙样,经颗粒级配后发现,中游沙样颗粒较大,文中称为“中沙”;下游颗粒较小,文中称为“细沙”。经检测,试验沙样的硝酸盐氮含量极低,不影响试验结果。试验于 2018 年 3 月 20 日正式开始,共持续 2 个月。

1.2 试验方法

1.2.1 沙槽装填与调试 将试验沙样多次均匀的填入试验装置中,每次装填量按照沙子的干容重和含水量进行计算,使试验沙样接近自然状态下的容重。

沙样装填完成后,从沙槽下方注水,对整个试验

装置进行排气,并控制不同水位进行调试,确保试验系统与观测系统正常工作。每次试验结束后更换沙样并重复上述步骤。

1.2.2 纯淋洗试验 在左右两个水箱中注入外源活水并调整水箱高度,控制地表水和抽水井的水位均为 50 cm;两侧水流通过透水板材进入沙槽中部,最终从装置下方流出。

将 10 g 硝酸钾粉末溶解,加入到模拟降雨装置中;打开模拟降雨装置,对沙样淋洗 30 min,淋洗过程中,每隔 30 s 从地表水、抽水井及浸润面下方各取样孔取水样,检测其硝酸盐氮含量;淋洗结束 1.5 h

后取包气带沙样检测其硝酸盐氮含量,根据不同试验条件将该试验分为4组,每组试验重复进行3次,具体试验方案见表1。

表1 纯淋洗试验方案

组别	沙样	淋洗强度/(L·h <sup>-1</sup> )
A	细沙	20
B	细沙	40
C	中沙	20
D	中沙	40

1.2.3 地表水补给地下水淋洗试验 沙槽中装填试验效果较明显的细沙<sup>[18]</sup>,在左右两个水箱中注入外源活水并调整水箱高度,控制地表水水位100 cm不变,进行4组试验,分别调节抽水井水位为0,30,50,70 cm,计算出各组水力坡度分别为1,0.7,0.5,0.3,用地表水—地下水缩写和其水位差表示不同组别,即S-G100,S-G70,S-G50,S-G30。另设一个对照组,对照组在S-G50试验条件的基础上将细沙改为中沙(用S-GM50表示)。

将10 g硝酸钾粉末溶解,加入到模拟降雨装置中;打开模拟降雨装置,调节40 L/h的淋洗强度,对沙样淋洗30 min,根据测压管水位绘制浸润曲线,淋洗过程中,每隔30 s,从地表水、抽水井及浸润面下方各取样孔取水样,检测其硝酸盐氮含量;淋洗结束1.5 h后取包气带沙样,检测其硝酸盐氮含量,每组试验重复进行3次,根据数据绘制包气带硝酸盐氮含量等浓度线。

1.2.4 地下水补给地表水淋洗试验 沙槽中装填试验效果较明显的细沙<sup>[18]</sup>,在左右两个水箱中注入外源活水并调整水箱高度,控制抽水井水位80 cm不变,进行两组试验,分别调节抽水井水位为100,110 cm,计算出各组水力坡度分别为0.2,0.3,用地下水—地表水缩写和其水位差表示不同组别,即G-S20,G-S30。

将10 g硝酸钾粉末溶解,加入到模拟降雨装置中;打开模拟降雨装置,考虑到该试验模拟的是春、冬季节的河流枯水期,此时降雨量较小,故调节为20 L/h的淋洗强度,对沙样淋洗30 min,根据测压管水位绘制浸润曲线,淋洗过程中,每隔30 s,从地表水、抽水井及浸润面下方各取样孔取水样,检测其硝酸盐氮含量,淋洗结束1.5 h后取包气带沙样,检测其硝酸盐氮含量,每组试验重复进行3次,根据数据绘制包气带硝酸盐氮含量等浓度线。

2 结果与分析

2.1 纯淋洗试验

如图2所示,各组硝酸盐氮含量整体随着沙层深度的增加而减小,而B,D组淋洗强度较高,出现优先流现象,导致10 cm深度沙层的硝酸盐氮含量高于表层。

A,B,C,D这4组试验中表层沙的硝酸盐氮平均

含量分别为27.97,20.02,26.05,18.94 mg/kg,当施用硝酸盐氮含量相同且沙样相同时,淋洗强度为20 L/h的组别(A,C)硝酸盐氮在包气带表层累积量明显大于淋洗强度为40 L/h的组别(B,D);当控制淋洗强度相同,硝酸盐氮在细沙表层的累积量明显高于中沙表层,而对比各组在30,50 cm深度沙层硝酸盐氮平均含量,可以发现其大小顺序与表层正好相反。

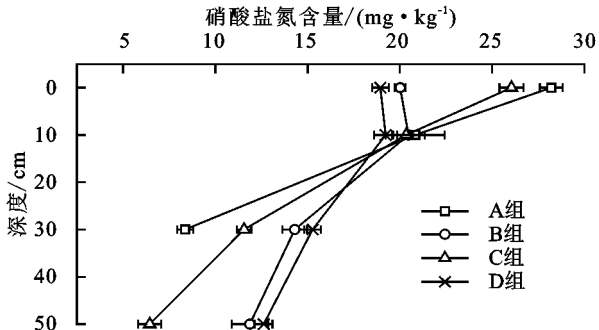


图2 纯淋洗试验不同深度沙层硝酸盐氮含量平均值

A组硝酸盐氮没能进入饱水带,B,C,D这3组硝酸盐氮迁移到饱水带所用时间(图3)与50 cm深度含水率开始上升的时间几乎一致,可以认为包气带内入渗水流会伴随硝酸盐氮一起向下迁移,D组硝酸盐氮迁移到饱水带所用时间明显小于B组和C组。

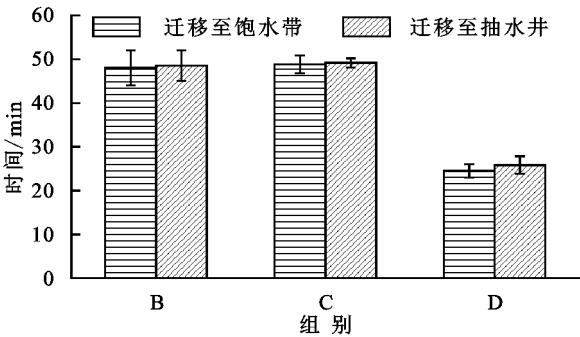


图3 纯淋洗试验硝酸盐氮迁移到饱水带和抽水井所用时间

2.2 地表水补给地下水试验

抽水井水位设为0 cm时(图4A),地表水与地下水出现脱节,在沙槽底部形成了一个悬挂的饱水带,无法绘制连续的浸润曲线;S-GM50组的浸润曲线明显比其他组弯曲程度更大,这是因为S-GM50组沙样颗粒较大,入渗水流的迁移速度较快<sup>[19]</sup>。

各组硝酸盐氮积累量整体随着沙层深度的增加而减小,抽水井水位上升,硝酸盐氮在沙层的积累量逐渐增多,而从单个组别来看,沙槽左侧(靠近地表水一侧)硝酸盐氮含量高于右侧(靠近抽水井一侧)。

对比图4C、图4E,S-G50组0,10,30,50 cm深度沙层硝酸盐氮平均含量分别为22.26,21.78,15.49,11.89 mg/kg,而S-GM50组相应深度沙层硝酸盐氮平均含量分别为20.26,20.29,16.51,12.8 mg/kg,说明S-G50组硝酸盐氮更容易积累在表层,而S-GM50组硝酸盐氮更容易向下迁移。



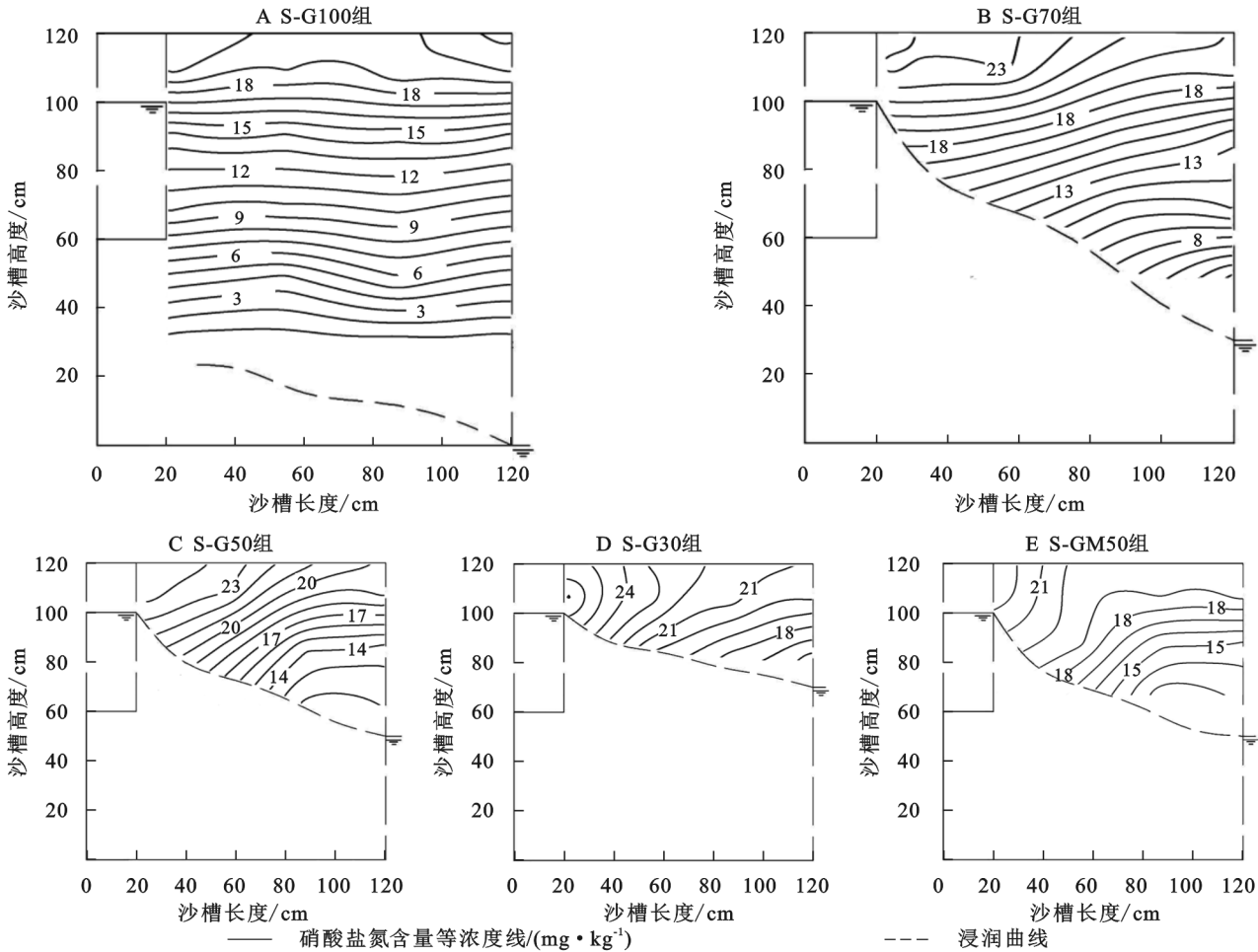


图 4 地表水补给地下水试验浸润曲线及硝酸盐氮含量等浓度线

地表水补给地下水试验中各组硝酸盐氮进入饱水带所用时间均小于纯淋洗试验(图 3,图 5),这主要是因为纯淋洗试验各组地下水水位为 50 cm,硝酸盐氮向下迁移 70 cm 才能进入饱水带,地下水补给地表水试验中沙槽左侧的水位升高,硝酸盐氮在包气带中迁移很短的距离就可以进入饱水带,S-G70 组、S-G50 组和 S-G30 这 3 组几乎同时在左侧取样口检测到硝酸盐氮进入饱水带。由此可知,当地表水补给地下水时,硝酸盐氮进入饱水带所用时间主要由地表水水位决定。

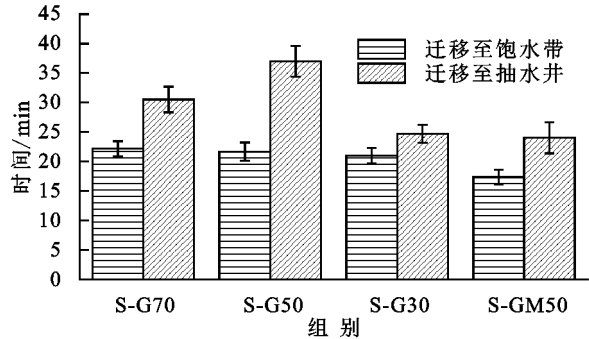


图 5 地表水补给地下水试验硝酸盐氮迁移到饱水带和抽水井所用时间

S-G70 组硝酸盐氮用了 30.5 min 迁移到抽水井,而右侧 50 cm 深度的沙层 55 min 时含水率才开

始上升(图 6,左侧传感器自上而下为 1,3,5 号;右侧为 2,4,6 号),因此可以推断,抽水井中检测到的硝酸盐氮是从沙槽左侧的饱水带中运移而来。硝酸盐氮迁移至抽水井所用时间为 22 min,可以计算出 S-G70 组硝酸盐氮在饱水带中的迁移时间为 8.5 min,据此可绘制 S-G70 组的硝酸盐氮迁移过程示意图(图 7)。

用相同方法分析可得:S-G50 组硝酸盐氮在饱水带中的迁移时间为 15 min;S-GM50 组迁移时间为 6.5 min。S-G100 组地表水与地下水脱节,包气带变厚,硝酸盐氮被截留在包气带内(图 4A),所以未在饱水带和抽水井中检测到硝酸盐氮。

2.3 地下水补给地表水试验

对比 G-S20 组与 G-S30 组(图 8),两组试验各沙层的硝酸盐氮累积量相差较小。这主要是由于两组试验整体水位都较高且抽水井水位变化不大,所以硝酸盐氮在包气带的迁移速度和硝酸盐氮在包气带中的停留时间的变化程度较小。两组试验硝酸盐氮含量等浓度线表层稀疏且不规律,分析认为试验淋洗强度大且淋洗到表层的硝酸盐氮可能不均匀,加上试验沙样表层较松散、颗粒较大,导致优先流现象明显,部分硝酸盐氮不经常规渗透,而是随水流快速穿过表层,直接运移至一定深度<sup>[20-22]</sup>,所以出现 10 cm 深度的硝酸盐氮含量

反而高于上层的现象。在图 2、图 4 和上述对 S-G50 组和 S-GM50 组的对比分析中也能发现该现象。

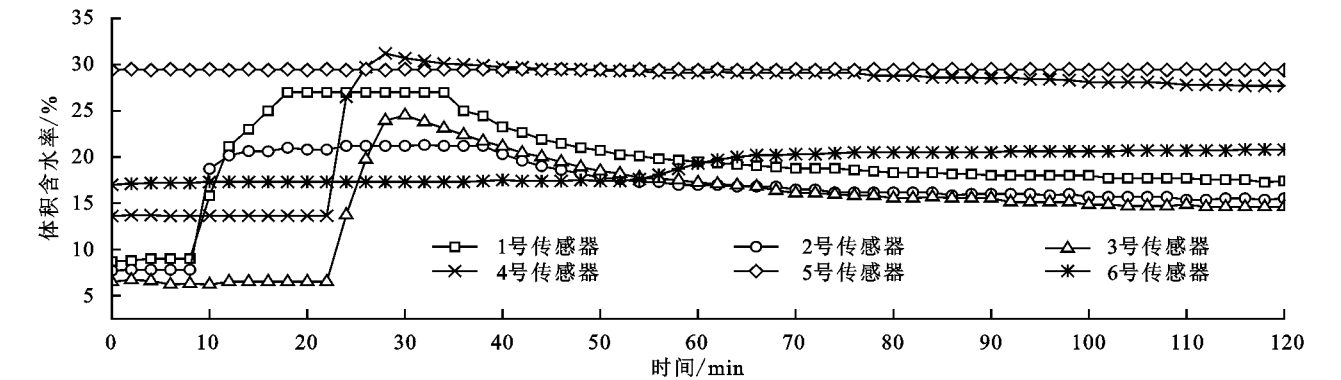


图 6 S-G70 组体积含水率

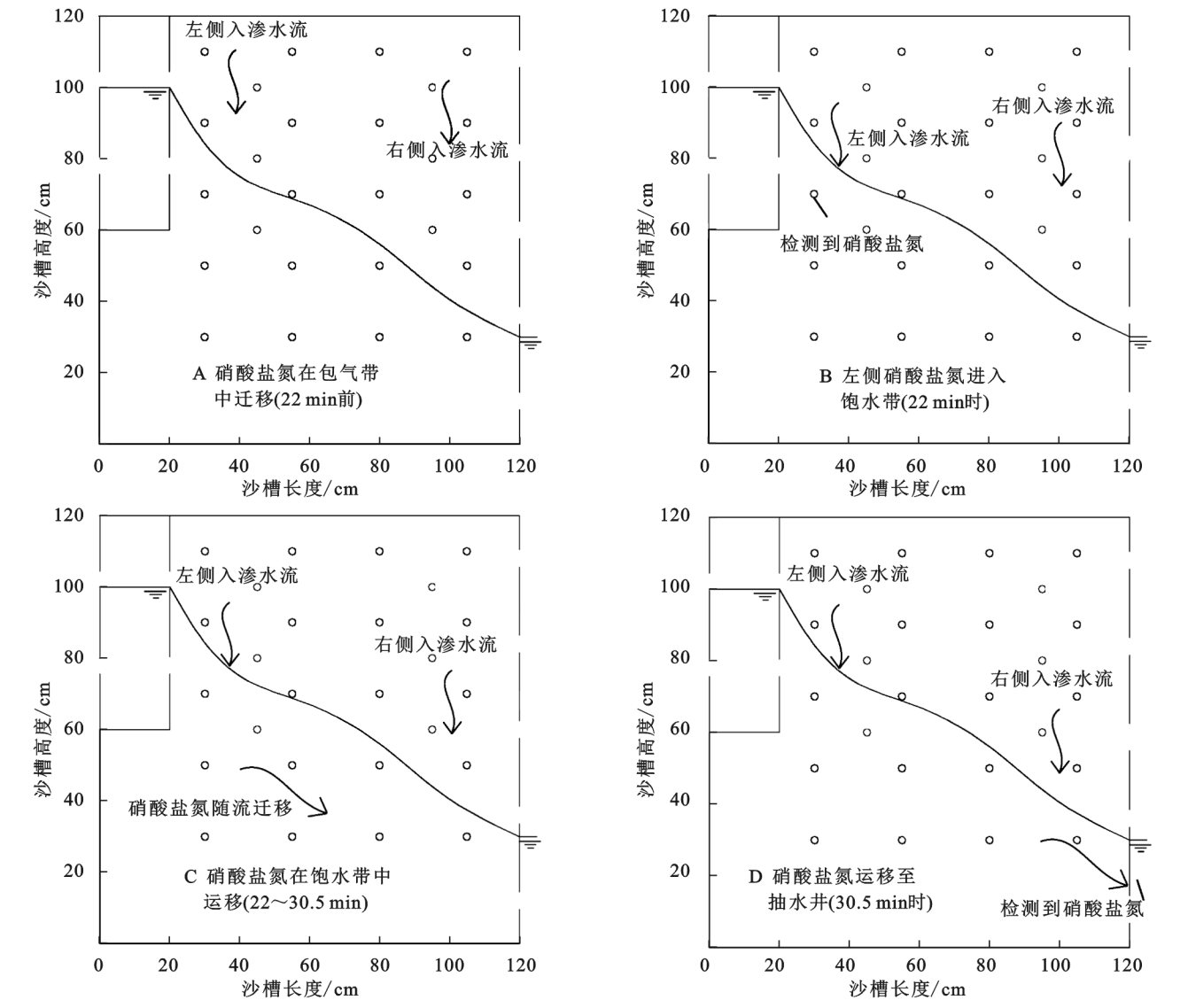


图 7 S-G70 组硝酸盐氮迁移过程示意图

而将图 8 中地下水补给地表水试验的硝酸盐氮数据与纯淋洗试验和地表水补给地下水试验(图 2, 图 4)相比,发现相同深度中,地下水补给地表水试验沙层中累积的硝酸盐氮含量最多。与 A 组相比, G-S20 组与 G-S30 组在表层的硝酸盐氮累积量平均值分别增加了 67.5%,66.9%;在 30 cm 沙层的硝酸盐氮累积量平均值分别增加了 95.7%,80.9%。这主要由于 G-S20 组与 G-S30 组包气带中含水率很高,硝酸盐氮在包气带中迁移速度慢,且更容易在沙层中累积<sup>[23-24]</sup>。

由图 9 可知,G-S20 组与 G-S30 组中硝酸盐氮进入饱水带所需时间为 14,15 min,比纯淋洗试验和地表水补给地下水试验中各组硝酸盐氮进入饱水

带所用时间都短,这是因为 G-S20 组与 G-S30 组沙槽右侧地下水水位高,入渗水流及硝酸盐氮可以更快地进入饱水带;而这两组硝酸盐氮从右侧饱水带检测到硝酸盐氮开始计,分别用了 19,20 min 才在地表水中检测到硝酸盐氮,比其他组从饱水带到抽水

井时间都长。分析认为,一方面,靠近地表水一侧的硝酸盐氮在包气带中运移距离长,运移速度慢;另一方面靠近抽水井一侧的硝酸盐氮由于地下水—地表水之间的水力坡度小,在饱水带中的运移速度也较慢<sup>[14-15,24]</sup>。

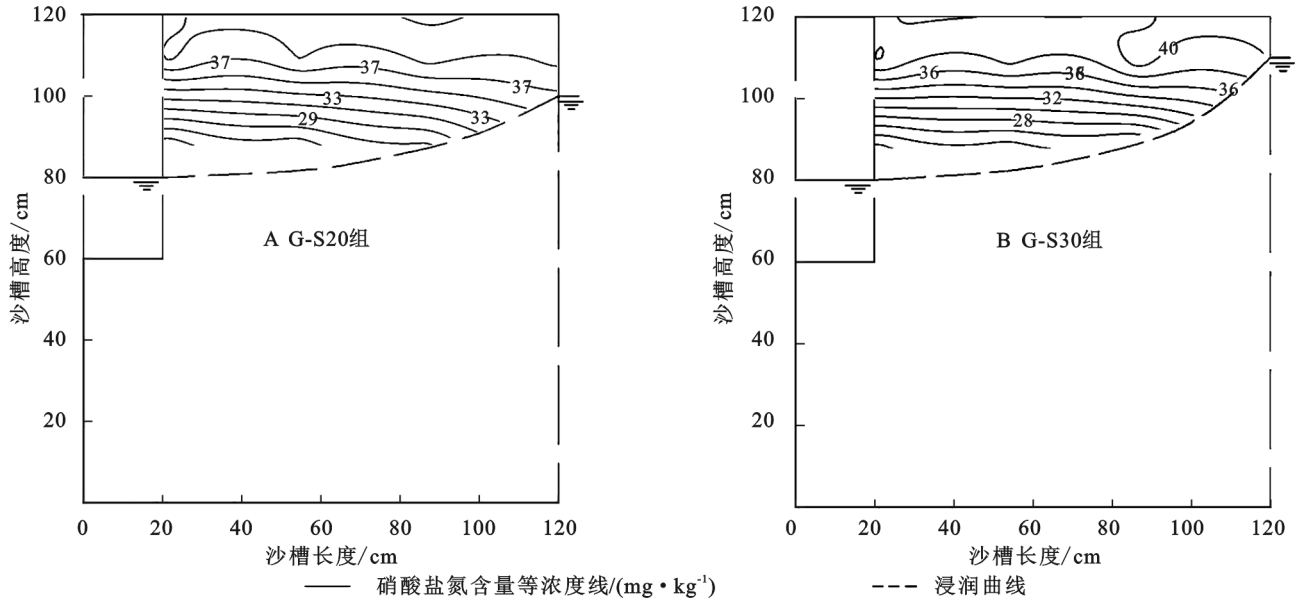


图 8 地下水补给地表水试验浸润曲线及硝酸盐氮含量等浓度线

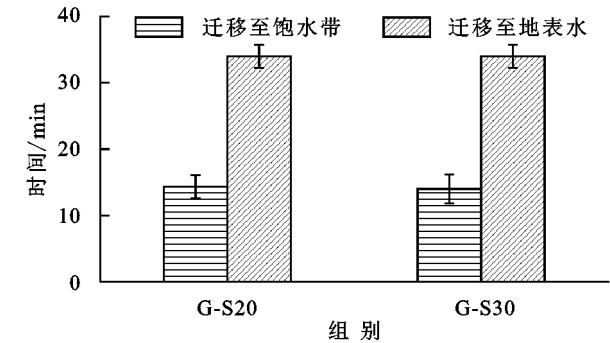


图 9 地下水补给地表水试验硝酸盐氮迁移到饱水带和地表水所用时间

3 讨论

本文从水力学角度出发,通过模拟试验来探究河流汛期和枯水期(不同补给方式)地表水—地下水交互作用下硝酸盐氮的迁移规律。

纯淋洗试验中,中沙介质中淋洗强度由 20 L/h 增大到 40 L/h,硝酸盐氮在包气带中迁移速度增大 92%,而将中沙改为细沙,淋洗强度控制在 20 L/h,硝酸盐氮在包气带中迁移速度约减小 90%,淋洗强度与沙样颗粒越小,硝酸盐的迁移速度越慢,在表层沙中的累积越明显;在 30 cm 以下深层中,累积量则与表层沙中呈现相反规律,这与 MODFLOW 模拟<sup>[25]</sup>和谢婷<sup>[26]</sup>的研究结果大致相同,李晶<sup>[15]</sup>也发现不同土质截留硝酸盐氮能力都较弱。

地表水与地下水相互补给试验中,不同深度沙层硝

酸盐氮累积量均高于纯淋洗试验,且靠近补给一侧的硝酸盐氮累积量高于被补给一侧,这是由于沙槽内的含水率上升,硝酸盐氮迁移速度变慢,更容易累积,这与 Alexander 等<sup>[27]</sup>在阿肯色河、蒂姆帕斯河和杨帆等<sup>[23]</sup>在大沽河研究中发现的规律一致。通过对不同深度沙层硝酸盐氮含量的检测,发现细沙组硝酸盐氮更容易积累在表层,而中沙组硝酸盐氮更容易向下迁移,这与纯淋洗试验得到的结论相同;地表水补给地下水试验中,补给水力坡度为 0.5 时,硝酸盐氮在细沙饱水带中迁移速度约为 5.3 cm/min,水力坡度变为 0.7 时,迁移速度约为 9.4 cm/min;补给水力坡度为 0.5 时,硝酸盐氮在中沙饱水带的迁移速度约为 12.3 cm/min,水力坡度和沙样颗粒越大,地表水对地下水的补给速度越快,硝酸盐的迁移速度也越快<sup>[28-30]</sup>;在地下水补给地表水试验中,硝酸盐在饱水带中的迁移速度没有量化。本试验没有考虑硝酸盐氮的转化,计时方法较粗糙,一定程度上增加了试验误差。

4 结论

(1) 硝酸盐氮随着入渗水流在包气带内迁移,淋洗强度越大、沙样颗粒越大,硝酸盐氮迁移速度越快,迁移深度越深;反之,硝酸盐氮越容易在表层累积。

(2) 地表水或地下水水位升高时,沙槽内的含水率上升,这会导致入渗水流向下迁移速度变慢,硝酸盐氮更容易累积,反之则相反;地表水与地下水中补给方的水位越高,硝酸盐氮迁移到饱水带所用的时间越短。

(3) 水力坡度与沙样颗粒越大,硝酸盐氮在饱水

带中的迁移速度越快。

(4) 当地表水与地下水出现脱节时,包气带变厚,硝酸盐氮迁移至饱水带的时间增长。

#### 参考文献:

- [1] Agarwal M, Singh M, Hussain J. Assessment of groundwater quality with special emphasis on nitrate contamination in parts of Gautam Budh Nagar district, Uttar Pradesh, India[J]. *Acta Geochimica*, 2019, 38(5): 703-717.
- [2] 林珊, 韦会松, 刘俊菊. 农村地下水中硝酸盐氮污染状况及原因分析[J]. *中国卫生产业*, 2019, 16(22): 154-155.
- [3] Kmecl V, Žnidarčič D, Franič M, et al. Nitrate and nitrite contamination of vegetables in the Slovenian market[J]. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 2019, 12(3): 216-223.
- [4] 李艳利, 孙伟, 杨梓睿. 太子河流域中游地区河流硝酸盐氮来源及迁移转化过程[J]. *环境科学*, 2017, 38(12): 5039-5046.
- [5] 程智慧, 刘旭新, 董志刚, 等. 西安蔬菜主产区土壤硝态氮累积现状与蔬菜产品、浅层地下水氮素污染调查研究[J]. *西北农业学报*, 2008, 17(1): 188-192.
- [6] 周雪萍, 宋艳秋, 王嘉成, 等. 大理市市售蔬菜硝酸盐氮及亚硝酸盐氮污染现状分析[J]. *现代预防医学*, 2017, 44(21): 3879-3882.
- [7] Ravindra K, Thind P S, Mor S, et al. Evaluation of groundwater contamination in Chandigarh: Source identification and health risk assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 255. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113062.
- [8] 盛丹睿, 温小虎, 冯起, 等. 张掖盆地地下水硝酸盐氮污染与人体健康风险评价[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(5): 37-44.
- [9] 赵丰昌. 傍河型水源区地下水脆弱性评价方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [10] 王佳琪, 马瑞, 孙自永. 地表水与地下水相互作用带中氮素污染物的反应迁移机理及模型研究进展[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(4): 270-280.
- [11] Krause S, Bronstert A, Zehe E. Seasonal variability of groundwater: surface exchange and its implications for riparian groundwater nitrate retention at the Havel River[J]. *International Journal of River Basin Management*, 2009, 7(4): 329-343.
- [12] Kaandorp V P, Molina-Navarro E, Andersen H E, et al. A conceptual model for the analysis of multi-stressors in linked groundwater-surface water systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 880-895.
- [13] Valiente N, Carrey R, Otero N, et al. A multi-isotopic approach to investigate the influence of land use on nitrate removal in a highly saline lake-aquifer system[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631: 649-659.
- [14] 闫雅妮, 马腾, 张俊文, 等. 地下水与地表水相互作用下硝态氮的迁移转化试验[J]. *地球科学*, 2017, 42(5): 783-792.
- [15] 李晶. 氮污染在地下水中迁移、转化规律的研究[J]. *环境保护科学*, 2010, 36(1): 21-23.
- [16] Liu Y, Liu C, Nelson W C, et al. Effect of water chemistry and hydrodynamics on nitrogen transformation activity and microbial community functional potential in hyporheic zone sediment columns[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(9): 4877-4886.
- [17] Gutierrez A, Baran N. Long-term transfer of diffuse pollution at catchment scale: Respective roles of soil, and the unsaturated and saturated zones (Bréville, France)[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 369(3/4): 381-391.
- [18] 武桂芝, 李宁宁, 冯增帅, 等. 季节性河床不同沙样的水分特征曲线研究[J]. *人民黄河*, 2017, 39(1): 57-61.
- [19] 冯增帅, 武桂芝, 李宁宁, 等. 基于季节性河流大沽河河床沙样的侧向非饱和入渗试验研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2017, 38(3): 79-83, 107.
- [20] 谢颂华, 涂安国, 莫明浩, 等. 自然降雨事件下红壤坡地壤中流产流过程特征分析[J]. *水科学进展*, 2015, 26(4): 526-534.
- [21] 阙云, 詹小军, 陈嘉. 强降雨条件下残积土坡优先流特性的数值模拟[J]. *有色金属: 矿山部分*, 2017, 69(6): 71-77.
- [22] 张东旭, 张洪江, 程金花. 基于多指标评价和分形维数的坡耕地优先流定量分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(12): 214-220, 277.
- [23] 杨帆, 武桂芝, 冯增帅, 等. 大沽河野外垂向入渗试验研究[J]. *人民黄河*, 2018, 40(4): 45-48, 54.
- [24] Collins S, Singh R, Rivas A, et al. Transport and potential attenuation of nitrogen in shallow groundwaters in the lower Rangitikei catchment, New Zealand[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2017, 206: 55-66.
- [25] 李天. 河北平原区农田土壤硝态氮运移规律及地下水污染数值模拟研究[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2013.
- [26] 谢婷. 不同化肥用量及降雨强度下面源污染中氮素流失特征研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [27] Alexander, Huizenga, Ryan, et al. Stream-aquifer and in-stream processes affecting nitrogen along a major river and contributing tributary[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2017, 199(4): 24-35.
- [28] 丁清华. 硝酸盐氮在包气带与饱水带中迁移转化规律[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [29] Tarki M, Hammadi M B, El Mejri H, et al. Assessment of hydrochemical processes and groundwater hydrodynamics in a multilayer aquifer system under long-term irrigation condition: A case study of Nefzaoua basin, southern Tunisia[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2016, 110: 138-149.
- [30] 黄明翔. 地表水—地下水联合作用下傍河农田硝酸盐氮迁移机理试验研究[D]. 山东青岛: 青岛理工大学, 2018.