中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

华北平原大孔隙优先流对农田氮素淋溶的影响

曾辉，温娜，张建丰，张杰，胡克林，刘刚

引用本文:
曾辉, 温娜, 张建丰, 等. 华北平原大孔隙优先流对农田氮素淋溶的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 66−75.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200508

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北平原农田裂缝对硝态氮淋溶的影响

The effects of farmland cracks on nitrate leaching in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 76−84 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200506

华北潮土冬小麦−夏玉米轮作包气带氮素淋溶机制

Mechanism of nitrogen leaching in fluvo−aquic soil and deep vadose zone in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 53−65 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200644

盐地碱蓬生长对滨海重盐碱地的改土效应

Soil improving effect of Suaeda salsa on heavy coastal saline−alkaline land

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(10): 1578−1586 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190178

旱地土壤硝态氮的产生、淋洗迁移及调控措施

Review of soil nitrate formation, leaching transport and their control measures in upland farming systems

中国生态农业学报. 2017, 25(12): 1731−1741 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170425

RZWQM模拟小麦−玉米轮作系统氮素运移及损失特征

RZWQM simulation of nitrogen transport and loss under winter wheat/summer maize rotation system in the North China Plain

中国生态农业学报. 2015(2): 150−158 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.140934

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200508

曾辉, 温娜, 张建丰, 张杰, 胡克林, 刘刚. 华北平原大孔隙优先流对农田氮素淋溶的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 66−75
ZENG H, WEN N, ZHANG J F, ZHANG J, HU K L, LIU G. Effect of macropore preferential flow on nitrogen leaching in a North China Plain farmland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(1): 66−75

华北平原大孔隙优先流对农田氮素淋溶的影响*

曾 辉[1], 温 娜[1], 张建丰[2], 张 杰[1], 胡克林[1], 刘 刚[1**]

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院 北京 100193; 2. 西安理工大学水利水电学院 西安 710048)

摘 要: 优先流是土壤水分入渗的一个重要途径, 大孔隙是产生优先流的关键因素。研究优先流对于土壤水分和溶质运移研究及生态环境保护、制定合理的田间管理措施等具有重要意义。本研究将田间亮蓝染色示踪试验和 WHCNS (soil water heat carbon nitrogen simulator)模型模拟相结合, 研究了华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系存在大孔隙下, 强降雨和不同施肥、灌溉情景下土壤水氮运移的情况, 以此探讨大孔隙优先流对于土体中水分和硝态氮运移的影响。结果表明: 明显含有虫洞的免耕土壤入渗深度和染色面积均高于旋耕土壤; 免耕土壤的染色面积和稳定入渗速率的 Pearson 相关性不显著, 染色示踪不能定量化土壤稳定入渗速率。同时 WHCNS 模拟的 0~100 cm 土层硝态氮淋洗量结果显示: 一方面, 相较于无大孔隙情景, 大孔隙存在会显著增加硝态氮的淋洗量; 另一方面, 大孔隙存在下优化施肥模式的硝态氮淋洗量比传统施肥模式减少 46.0%。常规灌溉量下喷灌比漫灌处理的硝态氮淋洗量减少 15.6%; 强降雨导致硝态氮淋洗量增加 119.4%。本研究为华北平原地区大孔隙存在条件下的农田水肥优化管理措施提供了理论指导。

关键词: 优先流; 水分入渗; 染色示踪; WHCNS 模型; 氮素淋洗
中图分类号: S15 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Effect of macropore preferential flow on nitrogen leaching in a North China Plain farmland*

ZENG Hui[1], WEN Na[1], ZHANG Jianfeng[2], ZHANG Jie[1], HU Kelin[1], LIU Gang[1**]

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Preferential flow is an important mechanism that relies on macropores for moisture to infiltrate into soil. Understanding this process affects the study of soil moisture, solute transport, and environmental protections for field management practices. In this study, a brilliant blue staining tracer field experiment and the soil water heat carbon nitrogen simulator (WHCNS) model were used to explore the effects of preferential flow of macropores on soil water transport and nitrate nitrogen leaching. The WHCNS model was used to simulate soil water and nitrogen migration through macropores in a North China Plain winter wheat-summer maize rotation field with heavy rainfall, fertilization, and irrigation. A dyeing tracer was used to follow water infiltration into no-tillage and rotary-tillage soil, and Pearson correlation coefficient analysis was performed on the stained area and the no-tillage soil stable infiltration rate. The results showed that the no-tillage soil infiltration depth and dyeing area were higher than that of the rotary-tillage soil. The no-tillage soil had a deeper dyeing depth, reaching 80–100 cm,

* 国家重点研发计划项目(2016YFD0800102)和国家自然科学基金项目(41771257)资助
** 通信作者: 刘刚, 主要研究方向为多孔介质中的传热传质过程、水分及热特性测量方法、热脉冲探针方法的改进。E-mail: liug@cau.edu.cn
曾辉, 主要研究方向为土壤中大孔隙优先流的影响。E-mail: huizeng01@163.com
收稿日期: 2020-06-28 接受日期: 2020-09-02

* The study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0800102) and the National Natural Science Foundation of China (41771257).
** Corresponding author, E-mail: liug@cau.edu.cn
Received Jun. 28, 2020; accepted Sep. 2, 2020

while that of rotary-tillage was shallow, reaching only 15–20 cm. The no-tillage soil had a high degree of preferential flow and transported moisture to the deep-soil. There was no correlation between the no-tillage soil dyeing area and the stable infiltration rate (P = 0.68). Therefore, dye tracers cannot quantify the soil stable infiltration rate. At the same time, the WHCNS simulation results of nitrate nitrogen leaching in 0–100 cm soil layer showed that the presence of macropores increased the nitrate nitrogen leaching in both traditional and optimal fertilization modes, compared with no macropores. On the other hand, in the presence of macropores, optimized fertilization reduced nitrate nitrogen leaching by 46.0% compared with that in traditional fertilization. The sprinkler irrigation reduced leaching by 15.6% compared with that in conventional flood irrigation, and heavy rainfall increased leaching by 119.4%. If the farmland has macropores, organic fertilizer and sprinkler irrigation may be used to save water and reduce nitrate nitrogen leaching; however, increased leaching is expected during heavy rainfall. Therefore, climatic conditions should be considered when fertilizing to determine suitable irrigation amounts. This study used a field tracing experiment and WHCNS model simulation to demonstrate that preferential flow can increase soil water infiltration and nitrate nitrogen downward movement and provides guidance for optimizing farmland water and fertilizer management with macropores in the North China Plain.

Keywords: Preferential flow; Water infiltration; Dye tracer; WHCNS model; Nitrogen leaching

氮素是作物生长必不可少的营养元素, 土体中氮素转化过程十分复杂, 主要包括 4 种化学形态: 有机氮、氨态氮、硝态氮(硝酸盐和亚硝酸盐氮)和气态氮[1], 其中硝态氮易随水移动, 发生淋洗, 通过虫洞等大孔隙的水分和氮素能够更快地运移到土体深层, 造成氮肥损失和地下水污染, 因此研究大孔隙优先流对于土体中的水氮运移具有重要意义。

农田中的大孔隙是由植物根系、动物洞穴等土壤生物活动和干湿交替、地下水流等土壤物理过程造成的孔隙[2]。优先流是指流体、气体或者溶质绕过大部分多孔系统, 通过优先通道移动的现象[3-5]。大孔隙对于土壤中水分运动的影响是土壤学中一个重要科学问题[6]。众多学者结合染色示踪与土壤剖面染色图像处理在不同研究区域对不同类型土壤优先流与水分下渗及其影响因素进行了大量研究。Kramers 等[7]通过在不同草地土壤进行染色示踪试验发现, 入渗前土壤含水量对于有大孔隙土壤的水分运动存在影响; 徐宗恒等[8]利用亚甲基蓝染色剂示踪和图像处理法, 研究了优先流染色面积、路径数量、入渗深度等因素的关系与变化规律, 研究发现染色总面积与优先流发育情况有密切关系。另一方面, 国内外学者通过田间试验和模型模拟研究了大孔隙优先流对于土体硝态氮淋洗的影响, 但定量化研究土壤大孔隙优先流对于农田作物生长中土壤水氮运移的研究仍较少。Fishkis 等[9]研究探讨了在含硝酸盐污染地下水的沙质农田中优先流与非吸附溶质运移的相关性; Hussain 等[10]研究了土壤大孔隙连通性对氮变化的影响; Cheng 等[11]采用原状土柱和填充土柱, 研究了优先流对硝态氮运移的影响; 吕文星[12]通过土柱的硝态氮穿透曲线, 系统研究了三峡库区 3 种土地利用方式[荒地、玉米(*Zea mays* L.)地、柑橘(*Citrus reticulata* Blanco.)地]土壤优先流及硝态氮运移特征。上述研究结果表明, 大孔隙优先流加速了硝态氮在土壤中的运移, 但研究都未对大孔隙进行定量化以及未考虑农田作物和气候条件的影响。Larsson 等[13]通过 MACRO-SOILN 耦合模型, 研究了大孔隙流对结构性土壤中硝态氮淋洗的影响, 但该研究对于大孔隙流的划分是通过土壤水力传导率实现的, 不能定量化大孔隙对硝态氮淋洗的影响。

田间管理直接影响了作物生长以及氮素运移。传统施肥模式普遍存在氨挥发、氮素径流损失和淋洗等问题, 造成环境污染且肥料利用率低[14]。合理施肥可以提高养分利用率, 减少肥料损失, 降低成本。土壤中的硝态氮随水分运移, 合适的灌溉量对于作物生长和水氮运移至关重要, 因此探究大孔隙存在下不同施肥、灌溉方式和强降雨对硝态氮淋洗的影响, 通过模型定量研究大孔隙存在、不同施肥灌溉方式、强降雨条件下农田土体中水氮运移的情况, 对于农民农事管理具有现实指导意义。土壤水热碳氮过程耦合模型(WHCNS, soil water heat carbon nitrogen simulator)是梁浩等[15]借鉴国内外土壤-作物模型研发的适用于模拟大孔隙存在下农田水氮运移、作物生长的关键过程, 及模拟降雨、施肥和灌溉等因素对于土壤水分和溶质运移影响的模型。Zhang 等[16]利用河北省定州市大棚蔬菜地两年的野外试验数据, 成功地校准和验证了 WHCNS 模型。本研究通过田间原位提取虫洞(蚯蚓洞)形态, 并将统计的虫洞平均直径、长度等数量特征计算得到的土壤大孔隙度参数输入至 WHCNS 模型中, 定量化模拟大孔隙优先流对于农田土壤硝态氮淋洗的影响。同时本研究将利用改进的自动双环入渗仪进行田间亮蓝染色示踪试验, 研究大孔隙优先流对于土体中水分运移的影响[17], 并借助 WHCNS 模型模拟华北平原冬小麦(*Triticum aestivum* L.)-夏玉米轮作

体系在存在大孔隙下，强降雨、施肥和灌溉情景下土壤水氮运移的情况，旨在为该地区水肥管理措施优化提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于北京市海淀区中国农业大学西校区科学园(116°18′E，39°57′N)和中国农业大学上庄实验站(116°18′E，39°57′N)，两个地点相距约 20 km。研究区地处华北北部山前冲积平原区，为暖湿带半湿润大陆季风气候区。年均气温 11.5 ℃，年平均降雨量 640 mm，降雨主要集中于夏季(6—8 月)，夏季降水占年总降水量的 70%，夏季雨水多，春秋干旱，冬季寒冷，年蒸发量 1800~2000 mm。科学园 0~100 cm 土壤机械组成含砂粒 42.4%，粉粒 54.0%，黏粒 3.6%；有机质含量为 10.5 $g·kg^{-1}$。上庄实验站 0~100 cm 土壤机械组成含砂粒 84.2%，粉粒 14.0%，黏粒 1.8%；有机质含量为 6.4 $g·kg^{-1}$。

1.2 研究方法

1.2.1 染色示踪试验

耕作方式是影响土壤大孔隙优先流的重要因素。本研究选取免耕处理的中国农业大学科学园和旋耕处理的上庄实验站两个地块进行亮蓝染色示踪试验。科学园地块前茬收获玉米后移除秸秆，免耕播种白菜[*Brassica pekinensis* (Lour.) Rupr.]；上庄地块前茬小麦收获后移除秸秆，旋耕土壤 10−15 cm 后种植玉米。试验选取地表较为平整干净、杂草较少、能够明显观察到虫洞且地表具有一定蚯蚓分泌物的地块进行试验。其中，科学园有 9 个试验点，上庄 8 个试验点，现场试验如图 1 所示。染色示踪试验前需要平整样地，除去杂草等干扰因素。本研究用马氏瓶结合双环入渗仪测定土壤水分入渗，将环嵌入土体 10 cm 深处，以保证环内水分的垂直入渗[17]。进行亮蓝染色示踪试验时，将配置好的 4 $g·L^{-1}$ 浓度的亮蓝液加入内环，作为水分入渗测定和剖面染色的溶液，外环加入清水，试验中记录内环容器中水量的变化[18]。入渗结束 24 h 后，从内环切线开始，径向内环四等分处挖掘垂直剖面，每个入渗点挖掘 5 个剖面，修正剖面后放置标尺并用数码相机拍照。

1.2.2 图像处理

1)图片校正：由于拍摄角度的原因，会引起图片变形，因此使用 Photoshop 软件的透视裁剪工具，根据图片中放置的折叠尺组成的矩形框，对扭曲的照片进行校正，同时将多余的图片区域裁剪掉。

2)染色面积统计：染色面积由 ImageJ 软件进行统计。经 Photoshop 软件校正后的图片，通过 Analyze 的 Set Scale 功能设置比例尺，根据标注的比例尺确定照片的实际尺寸。然后调整图片格式为 RGB color，为了将图片分为染色区与未染色区两部分，打开 Adjust 的 Threshold 窗口，调节 Hue (色度)、Saturation (饱和度)与 Brightness (亮度)，使得染色区域被完全选中。进一步利用 Process 中 Binary 功能对图片进行二值化处理，将图片转化为仅有黑白两种颜色的二值化图。最后通过 Analyze 的 Measure 测量功能统计染色区域的面积。

1.2.3 WHCNS 模型模拟

本研究在中国农业大学科学园和上庄实验站通过灌注法(灌注熔融高纯度金属锡)提取虫洞形态，提取的实物分别如图 2a 和 2b 所示，进一步导入三维扫描仪(天远三维扫描仪 OKIO-5M)，得到虫洞的三维结构，图 2c 展示的是图 2a 中提取的科学园虫洞形态经三维扫描仪处理的虫洞三维结构图。统计发现 1 m^2 蚯蚓洞个数平均为 1.24 个，直径平均为 6.63 mm，长度平均为 118.66 mm，因此本研究在应用 WHCNS 模型模拟虫洞对土体中氮运移的影响时，假定 1 m^2 内 1 个虫洞(直径为 7 mm，长度为 100 mm)。

WHCNS 模型主要包括土壤水分运动、氮素运移与转化、土壤热传导、有机质周转、作物生长、气象和田间管理等模块[15]。大量研究工作验证了 WHCNS 的适用性。目前该模型成功模拟了华北地区冬小麦和夏玉米轮作系统的水氮运移过程[19]；Liang 等[20]模拟了荒漠绿洲中不同灌溉和氮管理方式下的排水和硝态氮淋溶；Liang 等[21]将 WHCNS 和 LIXIM(简化的净矿化模型)相结合，研究了不同水稻(*Oryza sativa* L.)田系统在不同氮肥管理措施下水氮资源利用率和作物产量；Li 等[22]借助 WHCNS 模拟不同综合管理措施下硝态氮淋失量和水利用效率等指标；Liang 等[23]评估了在集约化温室蔬菜生产系统中，不同氮管理实践下的硝酸盐和溶解有机氮淋洗。本研究利用 WHCHS 模型模拟大孔隙存在下土壤氮素的运移。模拟土壤的水力学参数如表 1 所示，其中 0~10 cm 存在虫洞的饱和导水率通过 Poiseuille 公式得出[24]。在施肥、灌溉和强降雨参数设置上，根据当地农民习惯，设置传统施肥模式中冬小麦和夏玉米各季施氮总量均为 280 $kg·hm^{-2}$，而优化施肥模式中冬小麦和夏玉米各季施氮总量分别为 200 $kg·hm^{-2}$ 和 180 $kg·hm^{-2}$。在模拟灌溉方式影响时，单次漫灌和喷灌灌水量分别为 70 mm 和 30 mm，两种灌溉方式的灌水日期和次数相同，具体灌溉设

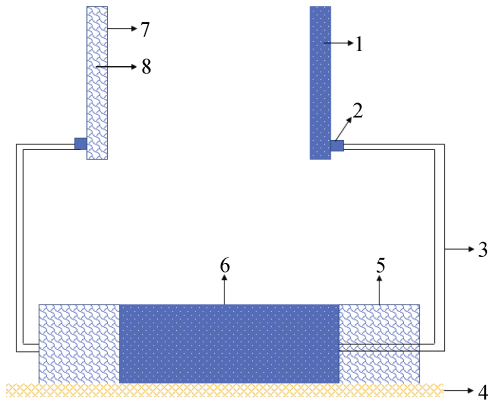

图 1　上庄实验站亮蓝染色示踪试验示意图

Fig. 1　Schematic diagram of bright blue staining tracer test at Shangzhuang Experimental Station

1: 亮蓝溶液; 2: 马氏瓶发泡口; 3: 输水软管; 4: 土壤; 5: 外环; 6: 内环; 7: 马氏瓶; 8: 清水。1: bright blue solution; 2: Markov bottle foaming mouth; 3: water hose; 4: soil; 5: outer ring; 6: inner ring; 7: Markov bottle; 8: fresh water.

置来自前人试验研究[25]。为研究强降雨对氮素运移的影响，本研究模拟了 2016 年夏玉米整个生长季中 3 次特大暴雨(24 h 内降水量达 250 mm)的情况。

2　结果与分析

2.1　亮蓝染色示踪剖面特征

土壤水分入渗完成后，分别对科学园(9 个)和上庄实验站(8 个)的观测点进行挖掘。部分亮蓝染色示踪剖面如图 3 所示，亮蓝染料溶液在科学园土壤中运移十分明显，内环染色效果显示 0~10 cm 土层属于垂直一维入渗。在 10 cm 土层以下，染色斑块分散，优先流分布明显。上庄土壤存在较少优先流情况，染色剖面较为集中连块。免耕处理的科学园土壤的染色深度较深，达 80~100 cm；而旋耕处理的上庄实验站土壤的染色深度较浅，仅达 15~20 cm。

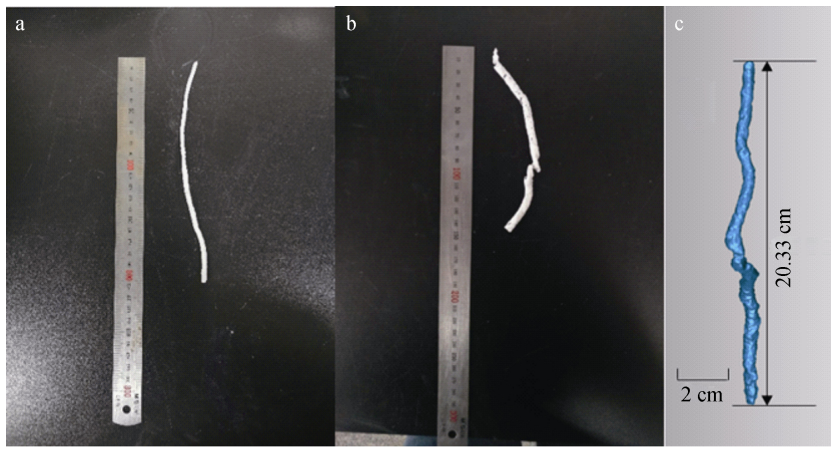

图 2　灌注法提取的虫洞形态示意图**(a、b)**和经三维扫描仪得到的虫洞三维结构示意图**(c)**

Fig. 2　Schematic diagram of wormhole shape extracted by perfusion method (a, b) and schematic diagram of three-dimensional structure of wormhole obtained by 3D scanner (c)

a、b 虫洞形态分别采自科学园和上庄实验站, c 是 a 经三维扫描仪处理得到的三维结构图。The wormhole shapes in the figure a and b are collected from Kexueyuan and Shangzhuang Experimental Station, respectively, and the figure c is a three-dimensional structure map of the figure a obtained by processing with a three-dimensional scanner.

表 1　**WHCNS** 模型土壤水力学参数

Table 1　Soil hydraulic parameters of WHCNS model

土壤深度 Soil depth (cm)	容重 Bulk density ($g·cm^{-3}$)	K_s ($cm·d^{-1}$)		θ_s ($cm^3·cm^{-3}$)	θ_r ($cm^3·cm^{-3}$)	FC ($cm^3·cm^{-3}$)	WP ($cm^3·cm^{-3}$)	大孔隙度 Macroporosity (%)	
		有虫洞 With wormhole	无虫洞 Without wormhole					有虫洞 With wormhole	无虫洞 Without wormhole
0~10	1.53	4988.40	23.72	0.45	0.08	0.30	0.15	0.0039	0
10~20	1.49	16.10	16.10	0.49	0.08	0.36	0.16	0	0
20~40	1.44	18.83	18.83	0.48	0.08	0.36	0.18	0	0
40~60	1.36	24.61	24.61	0.46	0.08	0.34	0.17	0	0
60~100	1.36	28.12	28.12	0.48	0.08	0.36	0.18	0	0

K_s: 饱和导水率; θ_s: 饱和含水量; θ_r: 残余含水量; FC: 田间持水量; WP: 萎蔫点。K_s: saturated hydraulic conductivity; θ_s: saturated water content; θ_r: residual water content; FC: field water capacity; WP: wilting point.

2.2 土壤入渗相关性分析

本研究通过双环入渗仪测量含有虫洞等大孔隙土壤的稳定入渗速率, 同时借助土壤垂直剖面上的染色面积来描述大孔隙影响下土壤水分渗透性和水流特征, 进一步通过稳定入渗速率和染色面积的相关性分析研究亮蓝染色示踪与双环入渗仪测得的土壤水分入渗速率的关系。由于上庄实验站常年耕作, 浅层出现犁底层, 土壤空间异质性强, 因此本研究选用科学园进行入渗染色面积和稳定入渗速率的相关性分析。科学园试验地点的稳定入渗速率、染色面积的正态性检验结果如表 2 所示。由于本试验样本数小于 50, 需要使用 Shapiro-Wilk 检验结果。当显著性水平 sig.>0.05 时, 该变量服从正态分布。如表 2 所示, 稳定入渗速率、染色面积两个变量都服从正态分布, 因此在计算两个变量的相关系数时, 将采用 Pearson 相关系数。

表 2 科学园观测点稳定入渗速率和染色面积的正态性检验

Table 2 Normality test of stable infiltration rate and dyed area at observation points of Kexueyuan

	统计量 Statistics	df	Sig.
稳定入渗速率 Stable infiltration rate ($cm \cdot min^{-1}$)	0.88	9	0.14
染色面积 Dyed area (cm^2)	0.91	9	0.29

df: 自由度; Sig.: 显著性。df: degrees of freedom; Sig.: significance.

从 Pearson 相关性检验结果可知, 染色面积和稳定入渗速率两个变量之间的关系未达显著水平 (P=0.68>0.05), 表明两者之间无显著相关性。

2.3 WHCNS 模拟大孔隙、施肥模式、灌溉方式和强降雨对土体中硝态氮含量的影响

土壤硝态氮含量与土壤结构、降雨、灌溉方式、施肥量等有关[26]。本研究通过校验后的 WHCNS 模型模拟了 2014—2016 年冬小麦-夏玉米轮作体系不同情景方式下土体中氮素的运移特征, 各处理下 0~100 cm 土体的硝态氮淋量情况如表 3 所示, 其中灌溉方式和强降雨影响都设定为农田存在大孔隙的情景。

2.3.1 有无虫洞及施肥方式对土体硝态氮含量变化的影响

图 4 表明, 传统施肥处理土层中硝态氮含量远高于优化施肥处理; 土壤中存在虫洞时, 表层 0~20 cm 土壤的硝态氮含量低于无虫洞时, 而 20~100 cm 的土壤硝态氮含量则高于无虫洞时。从表 3 中 0~100 cm 土壤硝态氮淋洗量可以看出, 优化施肥能够显著降低硝态氮的年淋洗量, 存在虫洞时, 优化施肥比传统施肥的硝态氮年淋洗量低 70.28 $kg \cdot hm^{-2}$, 无虫洞时, 淋洗量减少 61.28 $kg \cdot hm^{-2}$。虫洞的存在增加了 0~100 cm 的土壤硝态氮的年淋洗量, 其中传统施肥时存在虫洞的年淋洗量较无虫洞增加 20.65 $kg \cdot hm^{-2}$, 优化施肥则增加 11.65 $kg \cdot hm^{-2}$。

2.3.2 不同灌溉方式对土体硝态氮含量变化的影响

图 5 表明喷灌模式下的各深度土层中的硝态氮含量高于漫灌模式, 喷灌模式下土壤中累积了更多的硝态氮; 从不同层次土壤的硝态氮垂直分布来看, 随着土层加深, 硝态氮含量总体呈增加趋势。表 3 表明喷灌模式下土壤 0~100 cm 处硝态氮年平均淋洗量比漫灌模式降低 15.6%。当降水或灌溉发生时, 两种灌溉方式下 0~40 cm 土层硝态氮含量下降, 此时产生了硝态氮的地表径流损失和向下运移。

2.3.3 强降雨对土体硝态氮含量变化的影响

图 6 是模拟夏玉米整个生长季期间设置 3 次强降雨后, 土体中硝态氮含量的变化情况。本研究发现强降雨发生后, 第 1 次强降雨由于土体中的硝态氮含量低, 影响较小; 此后两次强降雨使土体中的硝态氮含量显著减少, 第 3 次强降雨尤为明显。结果表明强降雨会增加氮素淋洗的风险, 3 次强降雨使得整个夏玉米生长季硝态氮淋洗量增加 119.4%。

表 3 WHCNS 模型模拟的不同情景模式下 0~100 cm 土壤硝态氮的淋洗量

Table 3 Leaching amount of nitrate nitrogen of 0–100 cm soil under different scenarios simulated by WHCNS model

	有无虫洞及施肥方式 With or without wormhole and fertilization method				灌溉方式 Irrigation method		强降雨 Heavy rainfall	
	WW+Con	WW+Opt	NW+Con	NW+Opt	FI	SI	WHR	NR
硝态氮淋洗量 Nitrate nitrogen leaching [$kg(N) \cdot hm^{-2}$]	152.75	82.47	132.10	70.82	168.98	142.63	81.80	37.29

WW: 有虫洞; Con: 传统施肥; NW: 无虫洞; Opt: 优化施肥; FI: 漫灌; SI: 喷灌; WHR: 有强降雨; NR: 正常降雨。有无虫洞及施肥方式和灌溉方式下统计的是硝态氮年平均淋洗量, 强降雨统计的是一个夏玉米全生长季的年平均淋洗量。WW: with wormholes; Con: traditional fertilization; NW: without wormholes; Opt: optimized fertilization; FI: furrow irrigation; SI: sprinkler irrigation; WHR: with heavy rainfall; NR: normal rainfall. The statistics of wormholes and fertilization methods, and irrigation methods are the annual average leaching amount of nitrate nitrogen, and the statistics of heavy rainfall are the average annual leaching amount of a summer corn growing season.

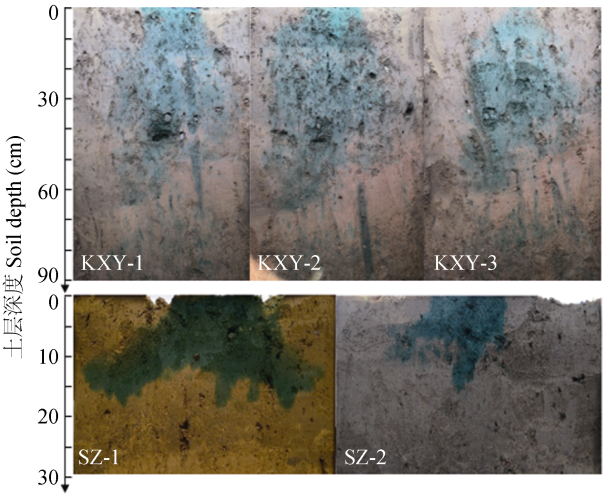

图 3　科学园(KXY)和上庄实验站(SZ)部分观测点染色剖面图

Fig. 3　Dyeing cross-sectional view of some soil profiles of observation points of the Kexueyuan (KXY) and Shangzhuang Experimental Station (SZ)

3　讨论

3.1　亮蓝染色示踪试验研究土壤水分入渗

土壤水分入渗主要受土壤质地、土壤含水量、土壤密度、土壤有机质、生物结皮、植被和凋落物等因素影响。不同的耕作方式导致不同的入渗特征。郑欣等[27]研究表明北京地区潮土基质流深度为 8.56 cm，本研究与其结论类似，旋耕处理的土壤基质入渗深度较浅。张静举[28]发现免耕处理下土壤大孔隙流发育程度较连年深耕处理高，由于中国农业大学科学园常年免耕，土壤虫洞丰富，在 10 cm 以下土层形成了具有连通性好的大孔隙，亮蓝溶液随着大孔隙更快地向下移动，因此形成更深、更为分散的染色区域。上庄机械深耕导致土壤形成犁底层，土壤犁底层的存在使得土壤容重增大，总孔隙度减小。因此土壤犁底层的存在一定程度上减少了大孔隙优先流对于土壤水分入渗的影响。长期观测与试验发现，与旋耕相比，免耕虽短期内不能显著提高大孔隙数量，但耕作过程中土壤被机械压实，经历多年耕作后，免耕反而可以增加土壤中大孔隙度，提高土壤渗透性[29]。就本研究两种耕作方式而言，免耕处理的科学园土壤水分入渗深度和染色面积大于旋耕处理的上庄实验站。此外上庄犁底层导致的土壤分层异质性使得土壤水分难以垂直入渗，进而产生侧渗，影响土壤水分运移[30]。本研究通过改进的自动双环入渗仪测定土壤稳定入渗速率并进行亮蓝染色示踪试验，统计了两个试验地的染色面积和稳定入渗速率，并进行相关性分析，研究表明，亮

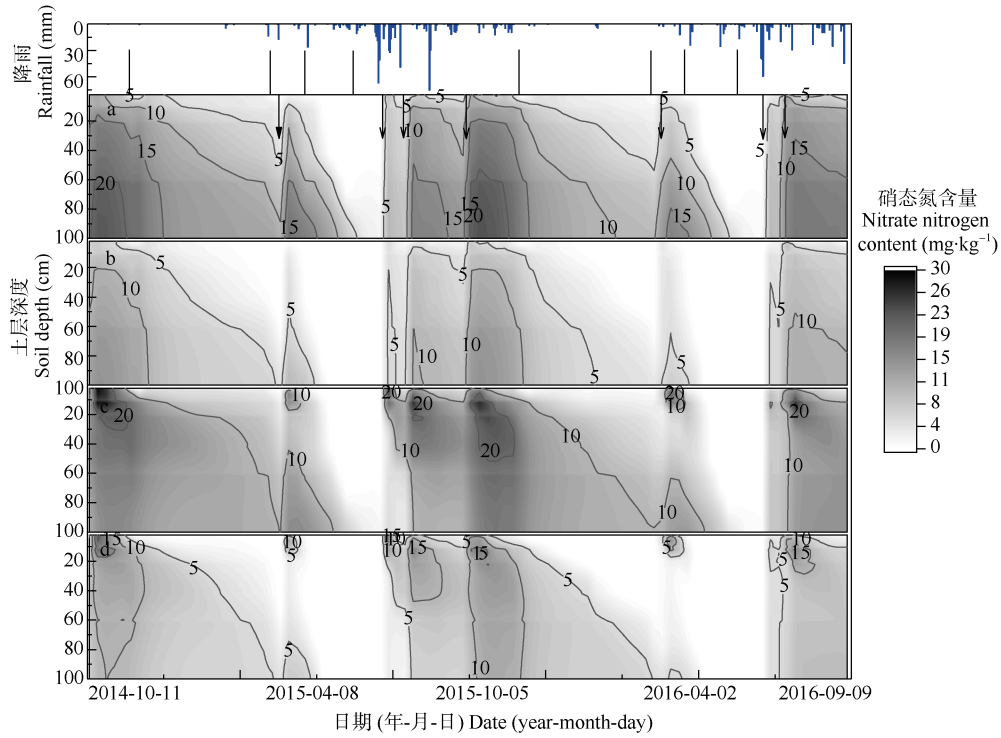

图 4　有无虫洞及不同施肥方式下各土层硝态氮含量变化的模拟结果

Fig. 4　Simulation results of soil nitrate nitrogen content of each soil layer with or without wormholes under different fertilization methods

a: 传统施肥+有虫洞; b: 优化施肥+有虫洞; c: 传统施肥+无虫洞; d: 优化施肥+无虫洞; 竖线指灌溉点; 带单箭头的竖线指施肥点。

a: traditional fertilization + wormhole; b: optimized fertilization + wormhole; c: traditional fertilization + without wormhole; d: optimized fertilization + without wormhole. Vertical lines refer to irrigation points; vertical lines with single arrows refer to fertilization points.

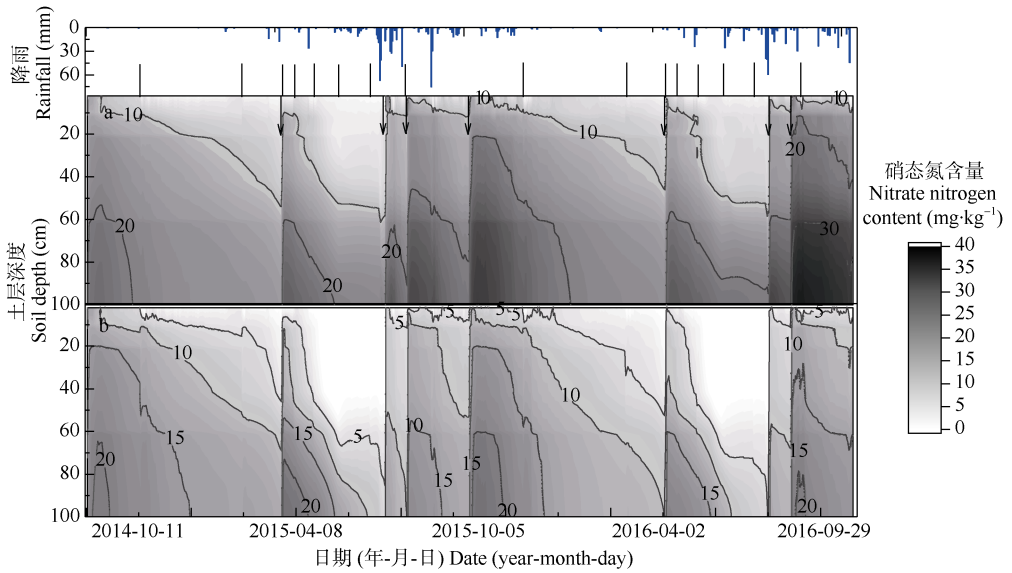

图 5　不同灌溉方式下各土层硝态氮含量变化的模拟结果

Fig. 5　Simulation results of soil nitrate nitrogen content of each soil layer under different irrigation methods

a: 喷灌; b: 漫灌; 竖线指灌溉点; 带单箭头的竖线指施肥点。a: sprinkler irrigation; b: furrow irrigation. Vertical lines refer to irrigation points; vertical lines with single arrows refer to fertilization points.

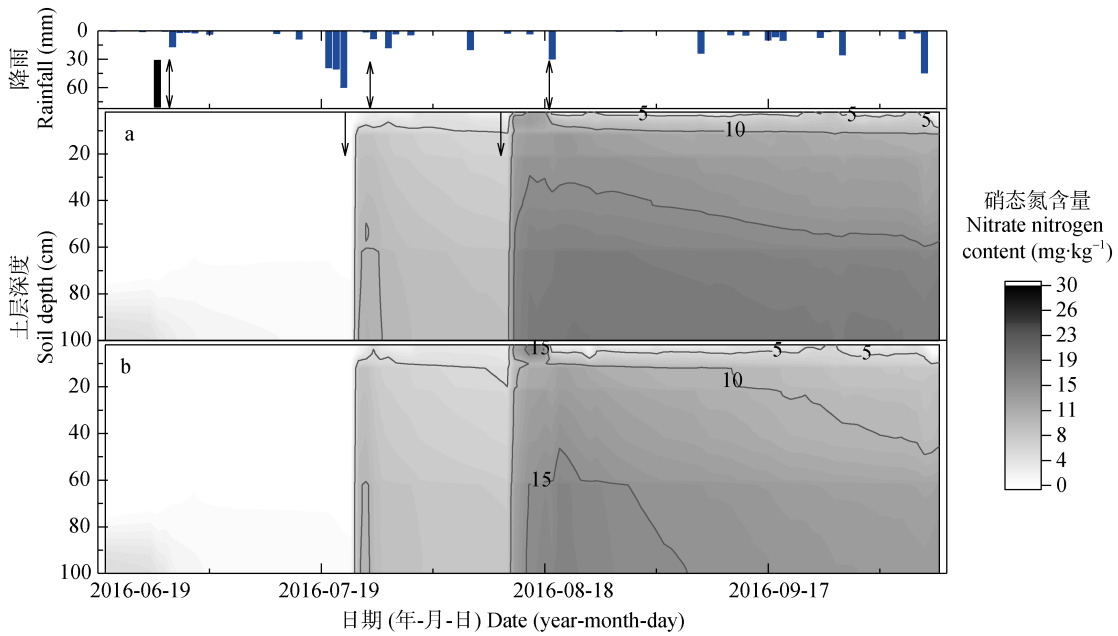

图 6　有无强降雨条件下各土层硝态氮含量变化的模拟结果

Fig. 6　Simulation results of changes in nitrate nitrogen content of each soil layer with or without heavy rainfall

a: 正常降雨; b: 存在强降雨; 竖线指灌溉点; 带单箭头的竖线指施肥点; 带双箭头的竖线指强降雨发生点。a: normal rainfall; b: heavy rainfall. Vertical lines refer to irrigation points; vertical lines with single arrows refer to fertilization points; vertical lines with double arrows refer to points where heavy rainfall occurs.

蓝染色示踪只能定性地描述土壤大孔隙优先流对土壤水分入渗的影响，今后计划研究土壤染色剖面和湿润峰的分形维数与稳定入渗速率的关系，并考虑建立分形维数和入渗速率的函数关系。

野外田间试验发现，大孔隙优先流发育较好的科学园试验点产生了更深的土壤水分入渗，但未能定量化优先流对土壤水分入渗的影响，本研究将进一步讨论定量化模拟农田尺度下大孔隙优先流对硝态氮淋失的影响。

3.2　大孔隙、施肥模式、灌溉方式和强降雨对土体中硝态氮淋失的影响

施肥是影响硝态氮含量的最直接因素，土壤硝态氮含量随着施肥量的增加而显著增加[31]。肥料中的氮是氮淋失的基础，从 WHCNS 模拟结果可以看

出, 施肥量是影响硝态氮淋洗的重要条件, 控制其他条件相同时, 虫洞、灌溉方式和强降雨引起的硝态氮淋洗量变化都低于施肥模式的改变。秦雪超等[32]研究化肥减量对华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系下的作物产量和氮淋洗量发现, 减施氮肥不会降低小麦和玉米的产量, 且年均氮淋失量降低30.6%。本研究模拟结果显示, 与传统施肥相比优化施肥下氮素淋失量减少 46.0%, 与前人研究的差异可能是由于作物模型在模拟作物生长时比实际生长偏理想化造成。土壤存在虫洞等大孔隙时, 土体结构类似于海绵状, 有较强的导水能力。王彬俨等[33]采集农用地原状土进行土柱试验发现, 优先流的存在使得土壤中的硝态氮快速下渗。Patil 等[34]也发现, 动物(如蚯蚓)活动容易产生较大直径的土壤孔洞, 进而造成农田灌溉水的大量流失, 硝态氮会随着水分快速流失, 水是其运移的主要载体。本研究发现存在虫洞条件下, 表层土壤硝态氮含量低于无虫洞土壤, 无虫洞土壤氨的挥发和硝化作用更高, 这表明虫洞存在使得表层土壤的无机氮更容易发生下移, 提高了下层土壤的硝态氮含量。

灌溉是影响土体硝态氮淋失的重要因素, 灌溉带来的下渗水流使得土壤中硝态氮下移, 引起淋失。灌溉方式和灌水量对硝态氮的淋失具有重要影响[35]。孙泽强等[36]研究发现, 喷灌灌水时间长, 灌水量较多地储存在土体 0~40 cm, 下渗量小。而漫灌灌水时间短, 灌溉带来较深的下渗水, 增加淋失风险。另一方面, 新型节水灌溉措施所需灌水量远低于传统灌溉, 漫灌的单次灌水量比喷灌高 40 mm, 灌水量越高, 发生淋失风险越高。此外, 喷灌由于低灌水量和灌水均匀性, 可以减少径流产生, 降低表层硝态氮的损失。本研究考虑大孔隙的存在, 相较于喷灌, 漫灌下渗水产生的优先流通道使得更多硝态氮向下运移。研究模拟结果表明, 在合适的灌溉量、灌溉次数条件下, 喷灌比漫灌更为节水, 且减少土体硝态氮的淋失。但喷灌在多风的情况下, 会出现喷洒不均匀、蒸发损失增大的问题。因此农民在选择灌溉时, 要综合考虑所有因素, 选择适合的灌溉方式。

降雨是影响土壤水氮运动的重要气候条件, 降水量越大淋溶到下层硝态氮越多, 浅表层含量越少, 这与黄绍敏等[26]的研究结果一致。带负电荷的硝态氮不易被同样带负电荷的土壤胶体所吸附, 强降雨带来的过量水分易使土壤氮素发生径流淋失和深层淋洗, 使得整个玉米生长季硝态氮淋洗量大大增加。另一方面, 3 次强降雨带来影响不同, 第一次强降雨对硝态氮淋洗的影响远低于后两次强降雨, 说明硝态氮的淋洗需要土体中足够的硝态氮含量。今后农事管理中, 进行灌溉时要充分考虑灌溉量和当地降雨量, 制定合理的灌溉方式。

4　结论

本研究结合田间亮蓝染色示踪试验和 WHCNS 模型, 模拟探讨大孔隙优先流对于硝态氮淋失的影响。通过中国农业大学科学园和上庄实验站的亮蓝染色示踪试验发现, 优先流发育程度高的科学园具有更深的入渗深度和更大的染色面积, 同时上庄实验站发现了侧向入渗的情况。但亮蓝染色示踪法只能定性地描述土壤水分入渗过程, 对入渗剖面进行形态学上的描述, 无法定量化土壤稳定入渗速率。本研究同时借助 WHCNS 模型定量化模拟了土壤虫洞存在对 0~100 cm 土体中硝态氮淋失的影响, 并讨论了大孔隙存在下施肥方式的影响, 及灌溉和强降雨的影响。结果表明, 相较于无虫洞存在的情景, 虫洞存在显著增加了硝态氮的淋洗量。另一方面, 有虫洞结构存在时, 优化施肥模式的硝态氮淋洗量比传统施肥模式减少 46.0%, 喷灌比漫灌淋洗量减少 15.6%, 存在强降雨条件下硝态氮淋洗量增加 119.4%。因此, 虫洞等大孔隙存在时, 如果氮肥施用量、灌溉模式不合理, 土壤中的硝态氮容易发生下移, 甚至发生淋洗。建议可以采用有机肥替代部分化肥的方式, 一方面有机肥中微生物可以固定土壤中的氮, 减少淋洗量; 另一方面有机质的存在可以改善土壤性质, 给作物提供更为合适的生长空间。在灌溉方式上, 相比于漫灌, 在适合的气候条件下, 喷灌不仅能节水, 还能减少农田硝态氮淋失。下一步本研究将定量化研究多个虫洞所导致的优先流对土壤-作物系统氮素运移的影响。

参考文献 References

[1] 闫佰忠, 唐国林, 宋亚路. 氮在土壤中的迁移与转化研究[J]. 中国环境管理丛书, 2009, (2): 42–44
YAN B Z, TANG G L, SONG Y L. Study on the migration and transformation of nitrogen in soil[J]. China Environment Management, 2009, (2): 42–44

[2] BEVEN K, GERMANN P. Macropores and water flow in soils[J]. Water Resources Research, 1982, 18(5): 1311–1325

[3] FLÜHLER H, DURNER W, FLURY M. Lateral solute mixing processes — a key for understanding field-scale transport of water and solutes[J]. Geoderma, 1996, 70(2/4): 165–183

[4] GERKE H H. Preferential flow descriptions for structured soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2006,

169(3): 382–400

[5] LIN H. Linking principles of soil formation and flow regimes[J]. Journal of Hydrology, 2010, 393(1/2): 3–19

[6] GHODRATI M, JURY W A. A field study using dyes to characterize preferential flow of water[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(6): 1558–1563

[7] KRAMERS G, RICHARDS K G, HOLDEN N M. Assessing the potential for the occurrence and character of preferential flow in three Irish grassland soils using image analysis[J]. Geoderma, 2009, 153(3/4): 362–371

[8] 徐宗恒, 徐则民, 官琦, 等. 不同植被发育斜坡土体优先流特征[J]. 山地学报, 2012, 30(5): 521–527
XU Z H, XU Z M, GUAN Q, et al. The characteristic of preferential flow in different vegetated slope soils[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(5): 521–527

[9] FISHKIS O, NOELL U, DIEHL L, et al. Multitracer irrigation experiments for assessing the relevance of preferential flow for non-sorbing solute transport in agricultural soil[J]. Geoderma, 2020, 371: 114386

[10] HUSSAIN S I, FREY S K, BLOWES D W, et al. Reactive transport of manure-derived nitrogen in the vadose zone: consideration of macropore connectivity to subsurface receptors[J]. Vadose Zone Journal, 2019, 18(1): 1–18

[11] CHENG J H, ZHANG H J, ZHANG Y Y, et al. Characteristics of preferential flow paths and their impact on nitrate nitrogen transport on agricultural land[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2014, 23(6): 1959–1964

[12] 吕文星. 三峡库区三种土地利用方式优先流特征及其对硝态氮运移的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2013
LYU W X. Characteristics of preferential flow and its effect on nitrate nitrogen transport in three land use types of the Three Gorges Reservoir Area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013

[13] LARSSON M H, JARVIS N J. A dual-porosity model to quantify macropore flow effects on nitrate leaching[J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(4): 1298–1307

[14] ZENG S C, SU Z Y, CHEN B G, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from orchard soils in south China as affected by fertilization depths and rates[J]. Pedosphere, 2008, 18(1): 45–53

[15] 梁浩, 胡克林, 李保国, 等. 土壤-作物-大气系统水热碳氮过程耦合模型构建[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 54–66
LIANG H, HU K L, LI B G, et al. Coupled simulation of soil water-heat-carbon-nitrogen process and crop growth at soil-plant-atmosphere continuum system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(24): 54–66

[16] ZHANG H Y, HU K L, ZHANG L J. Exploring optimal catch crops for reducing nitrate leaching in vegetable greenhouse in North China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 273–282

[17] 孙权, 张建丰, 张杰, 等. 自动双环入渗仪设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 318–324
SUN Q, ZHANG J F, ZHANG J, et al. Design and experiment of automatic double-ring infiltrometer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(10): 318–324

[18] PRIEKSAT M A, ANKENY M D, KASPAR T C. Design for an automated, self-regulating, single-ring infiltrometer[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(5): 1409–1411

[19] WANG H Y, LI B G, JIN L, et al. Exploring a sustainable cropping system in the North China Plain using a modelling approach[J]. Sustainability, 2020, 12(11): 4588

[20] LIANG H, QI Z M, HU K L, et al. Can nitrate contaminated groundwater be remediated by optimizing flood irrigation rate with high nitrate water in a desert oasis using the WHCNS model?[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 181: 16–25

[21] LIANG H, HU K L, QIN W, et al. Ground cover rice production system reduces water consumption and nitrogen loss and increases water and nitrogen use efficiencies[J]. Field Crops Research, 2019, 233: 70–79

[22] LI Z J, HU K L, LI B G, et al. Evaluation of water and nitrogen use efficiencies in a double cropping system under different integrated management practices based on a model approach[J]. Agricultural Water Management, 2015, 159: 19–34

[23] LIANG H, HU K L, BATCHELOR W D, et al. Modeling dissolved organic nitrogen dynamics under different N management practices for intensive greenhouse production using an improved WHCNS_veg model[J]. Geoderma, 2019, 337: 1039–1050

[24] GERMANN P F, HENSEL D. Poiseuille flow geometry inferred from velocities of wetting fronts in soils[J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5(3): 867–876

[25] 邢素丽, 杜金钟, 刘孟朝, 等. 大尺度冬小麦-夏玉米微喷灌精准自动施肥增产效应[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 100–106
XING S L, DU J Z, LIU M C, et al. Yield increasing effect of precision automatic fertilization and micro-spray irrigation for winter wheat-summer maize in large-scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(6): 100–106

[26] 黄绍敏, 皇甫湘荣, 宝德俊, 等. 土壤中硝态氮含量的影响因素研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(5): 351–354
HUANG S M, HUANGPU X R, BAO D J, et al. Factors affecting content of nitrate-nitrogen in soil[J]. Agro-Environmental Protection, 2001, 20(5): 351–354

[27] 郑欣, 程金花, 张洪江, 等. 北京地区 2 种类型土壤优先流染色形态特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 113–119
ZHENG X, CHENG J H, ZHANG H J, et al. Characteristics and influencing factors of preferential flow dyeing morphology of two soils in Beijing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3): 113–119

[28] 张静举. 广西喀斯特区甘蔗地土壤大孔隙流特征研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018
ZHANG J J. Study on the macropore flow characteristics of sugarcane soil in karst region of Guangxi[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2018

[29] GISH T J, COFFMAN C B. Solute transport under no-till field corn[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1358–1363

[30] 杨霞, 邵东国, 徐保利. 东北寒区黑土稻田土壤水分剖面二维运动规律研究[J]. 水利学报, 2018, 49(8): 1017–1026
YANG X, SHAO D G, XU B L. Indoor experiment and simulation of soil water two-dimensional movement of the paddy fields in the northeast frigid of China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(8): 1017–1026

[31] 陈淼, 李小娟, 陈歆, 等. 不同施肥处理下热带土壤硝态氮累积特征及与土壤 pH 值、辣椒产量的关系[J]. 西南农业学报, 2018, 31(5): 1045–1050
CHEN M, LI X J, CHEN X, et al. Characteristics of nitrate nitrogen accumulation in tropical soil and its relationship with pH and chilly yield under different fertilization treatments[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(5): 1045–1050

[32] 秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 等. 化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1558–1567
QIN X C, PAN J T, GUO S F, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with biogas fertilizer on crop yield of wheat-maize rotation and soil nitrogen loss in North China Plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(7): 1558–1567

[33] 王彬俨, 程金花, 张洪江, 等. 北京昌平区农地土壤优先流影响硝态氮运移的试验分析[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(4): 36–41
WANG B Y, CHENG J H, ZHANG H J, et al. Experimental analysis of preferential flow and its effect on nitrate nitrogen migration in soil of farmland at Changping District in Beijing[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(4): 36–41

[34] PATIL M D, DAS B S, BHADORIA P B S. A simple bund plugging technique for improving water productivity in wetland rice[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 112(1): 66–75

[35] 杜春先, 聂俊华, 王祥峰. 室内模拟有机肥中 NO_3^-、NO_2^- 的淋失规律及其对土壤环境的影响[J]. 山东农业科学, 2004, (6): 48–50
DU C X, NIE J H, WANG X F. Effect of organic fertilizer on soil environment NO_3^-, NO_2^- under the condition of imitation[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2004, (6): 48–50

[36] 孙泽强, 康跃虎, 刘海军. 喷灌冬小麦农田土壤水分分布特征及水量平衡[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 100–107
SUN Z Q, KANG Y H, LIU H J. Characteristics of nitrate distribution in deep unsaturated zone in farmland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(1): 100–107