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

华北平原农田裂缝对硝态氮淋溶的影响

阿力曼，张杰，曾辉，丁天宇，罗志英，李丽丽，胡克林，刘刚

引用本文:
阿力曼, 张杰, 曾辉, 等. 华北平原农田裂缝对硝态氮淋溶的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 76–84.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200506

(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

华北平原大孔隙优先流对农田氮素淋溶的影响

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

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 66–75 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200508

施氮量对潮土区冬小麦–夏玉米轮作农田氮磷淋溶的影响

Effects of nitrogen application on nitrogen and phosphorus leaching in fluvo–aquic soil on a winter wheat–summer maize rotation farmland

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 29–37 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200548

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

褐土区农田土壤氮磷淋溶特征及其管理措施

Effects of field management practices on nitrogen and phosphate leaching in the cinnamon soil area of China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 163–175 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200576

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

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 1 月 第 29 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2021, 29(1): 76−84

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200506

阿力曼, 张杰, 曾辉, 丁天宇, 罗志英, 李丽丽, 胡克林, 刘刚. 华北平原农田裂缝对硝态氮淋溶的影响[J].中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 76−84

A L M, ZHANG J, ZENG H, DING T Y, LUO Z Y, LI L L, HU K L, LIU G. The effects of farmland cracks on nitrate leaching in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(1): 76−84

华北平原农田裂缝对硝态氮淋溶的影响*

阿力曼[1], 张 杰[1], 曾 辉[1], 丁天宇[1], 罗志英[1,2], 李丽丽[3], 胡克林[1], 刘 刚[1**]

(1. 中国农业大学 北京 100193; 2. 中山火炬高技术产业开发区农业服务中心 中山 528436;
3. 清华大学 北京 100084)

摘 要: 土壤干缩开裂是常见的自然现象。目前关于土壤干缩开裂的研究主要集中于裂缝的最终形态特征, 并且以室内试验为主。本研究通过室外大田试验, 结合动态计算机图像分析及水氮运移模拟软件 WHCNS, 研究土壤干缩开裂的动力学过程、特征及其对农田水氮运移的影响。利用原位熔化石蜡浇筑得到了裂缝三维结构形态, 借助三维激光扫描仪量化裂缝的几何特征, 发现每平米裂缝平均长度为 4.58 m, 裂缝上表面平均宽度为 5.72 mm, 平均深度为 9.06 cm。基于三维扫描仪提取得到的裂缝几何参数, 通过 WHCNS 仿真模拟, 发现相较于无裂隙情况, 裂隙的存在分别增加了传统施肥和优化施肥情况下 97.40%和 256.43%的硝态氮淋失量; 与优化施肥模式相比, 传统施肥模式更容易造成硝态氮的淋失风险。在模拟灌溉模式对硝态氮淋洗情况的影响时, 其差异不明显; 强降雨的设置同样增加了硝态氮的淋失风险, 导致硝态氮的年均淋洗量增加 83.61%。裂缝的存在严重影响农田作物对肥料的吸收和利用, 通过优化施肥量、更改灌溉模式以及避免强降雨前施肥都可以减少肥料的损失。

关键词: 农田土壤; 裂缝; 三维结构; WHCNS 模型; 硝态氮淋失

中图分类号: S143.1+3 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

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

A Liman[1], ZHANG Jie[1], ZENG Hui[1], DING Tianyu[1], LUO Zhiying[1,2], LI Lili[3], HU Kelin[1], LIU Gang[1**]

(1. China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Agricultural Service Center of Zhongshan Torch High-tech Industrial Development Zone, Zhongshan 528436, China; 3. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Desiccation cracking is a common soil natural phenomenon. Research on desiccation cracking has mainly focused on morphological characteristics in lab-based experiments. In this study, three-dimensional (3D) geometric crack structures were extracted using paraffin casting in the field and transient image processing. The influence of cracks on farmland water and nitrogen leaching was quantified using the Water Heat Carbon Nitrogen Simulator (WHCNS) model. The 3D structural characteristics of the cracks obtained by the laser scanner were as follows: average length per square meter = 4.58 m, average surface width = 5.72 mm, and average depth = 9.06 cm. WHCNS analysis showed that cracks increased nitrogen leaching (97.40%, traditional fertilizer; 256.43%, optimized fertilizer), and that traditional fertilizer application had a greater nitrate nitrogen leaching risk. Irrigation type did not affect nitrate leaching, but heavy rainfall increased the risk and led to an 83.61%

* 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能量与质量传递过程、溶质和水分的运动规律、热脉冲探针方法的改进。E-mail: liug@cau.edu.cn

阿力曼, 主要研究方向为土壤裂隙的动态发育规律。E-mail: 1351050909@qq.com

收稿日期: 2020-06-27 接受日期: 2020-09-08

* 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. 27, 2020; accepted Sep. 8, 2020

annual leaching volume increase. Additionally, the WHCNS model was used to simulate the effects of fracture, fertilization, irrigation, and rainfall intensity on nitrate leaching. The results showed that cracks had a notable influence on nitrate nitrogen leaching using optimal and traditional fertilization methods, and optimized fertilization reduced nitrate nitrogen leaching. Precipitation intensity was a key factor affecting nitrogen leaching. In this study, the simulation only calculated the nitrate nitrogen leached to underground and ignored nitrogen runoff from heavy precipitation, reducing the effect of precipitation on nitrogen leaching; however, the timing and amount of fertilizer and precipitation should be considered together when managing fields, especially in the summer, when rainfall is concentrated. The simulation showed that irrigation did not affect nitrate nitrogen leaching, which may be related to irrigation intensity and the leaching soil layer (100 cm) set by the model. However, the basin irrigation amount simulated in this study could not leach nitrate nitrogen below the 100 cm soil layer, which may have contributed to the small differences between methods. Thus, sprinkling irrigation and optimized fertilization should be adopted in combination to take full advantage of the water and fertilizer saving methods.

Keywords: Farmland soil; Crack; 3D structure; WHCNS model; Nitrate leaching

由于土壤水分蒸发而导致的土壤干缩开裂，普遍存在于自然界中。失水导致的土壤干缩开裂，对土壤学、环境科学、生态科学等相关研究具有重要的学术价值和实际应用价值。首先，裂缝的存在会导致垂向宏观大裂隙的存在，并继而诱发优先流[1]，造成地表污染物随水分快速地进入地下水[2]，并继而污染地下含水层。此外，大量存在的裂隙还会加快包气带水分和溶质向深层迁移，这会降低农业灌溉用水以及肥料的利用效率[3-5]。

我国农田存在氮肥利用率低，氮肥损失严重等问题，大量的氮肥随着土壤水分向下运移。而通过优先流途径的土壤水分和溶质更容易运移到土体深层，增加了污染物向下迁移的几率，从而造成土体和地下水污染。由土壤开裂造成的裂隙流是优先流的一种[6]，开展有关土壤干缩开裂过程的研究，有助于了解土壤开裂过程的主要影响因素，并促进对开裂过程的预测与控制[7-9]。目前，针对土壤裂缝引发的优先流，及其对水分和溶质乃至农田氮磷等养分向深层的淋洗和迁移规律被绝大多数研究者忽略。因此研究优先流存在对于农田土壤的溶质运移具有重要的环境和经济效应。为了定量化研究裂缝及其优先流对土壤水分和溶质及养分迁移的影响，需要提取裂缝三维结构形态。目前，对于野外裂缝形态的提取，有沙子填充、乳胶灌注、CT 扫描等方法。Dasog 等[10]利用沙子填充法，测量开裂裂缝的体积，并用钢丝和麻绳测量宽度和深度等特征，该方法测量精度较低，并且繁琐；Abou 等[11]利用乳胶灌注开裂的土体，乳胶凝固后将其挖出，获得裂隙的三维结构。该方法由于乳胶容易变形，不能准确反映裂缝三维形态，且乳胶易黏附土壤颗粒等杂质，造成失真。Zhang 等[12]利用 CT 扫描方法测定裂隙的三维结构，但该方法不适合提取大尺寸样品(通常样品尺寸不足 10 cm 直径)且测试分析昂贵。此外，Peng 等[2]利用图像处理技术研究土壤裂缝收缩。由于石蜡具有易凝固成型，可以填充土壤细小裂缝、附着力小于乳胶、具有一定的硬度不易变形的特点，本研究选用石蜡，通过将其熔化后灌入土壤裂缝中来提取裂缝空间结构。

在获取土壤裂隙的形态结构参数后，借助软件模拟[13]，即可定量化研究土壤裂隙诱发的优先流对农田水氮运移的影响。目前模拟氮淋失的模型主要有 LEACHM (Leaching Estimation and Chemistry Model)[14]、SWAT (Soil Water Assessment Tool)[15]和 RZWQM (Root Zone Water Quality Model)模型[16]等。LEACHM 由康奈尔大学开发，主要描述土壤中水分、氮素及农药等污染物的迁移转化; SWAT 模型是利用自由水中硝酸盐的浓度差来获取地表径流和侧向流中损失的硝酸盐，主要用 SCS 径流曲线数法和 Green-Ampt 下渗法; RZWQM 模型是由美国农业部农业系统研究所(USDA-ARS, Great Plain System Research Unit)于 1992 年推出的农业系统作物和环境管理模型，综合考虑了作物根区所有对作物生长的物理、生物和化学过程的影响。以上模型虽然在国内外获得良好的应用，但它们仍然没有考虑到土壤中裂隙对氮淋失的影响。现有裂隙优先流模型大多数是基于理想化裂缝假设，把裂缝近似为楔状体。例如, Hoogmoed 等[17]模拟含有裂隙的土壤的入渗情况，它能较好地预测表层土壤的垂直入渗，但对于裂缝对水分入渗的贡献仍不明朗。Janssen 等[18]提出 PADDY-FLUX 模型来评估稻田中裂隙变化对于水分渗漏的影响，但未能量化土体中裂缝存在对于溶质运移的影响。WHCNS (Soil Water Heat Carbon and Nitrogen Simulation)是梁浩等[19]在已有土壤-作物系统模拟的基础上，构建的适用于分析农田土壤水氮运移、作物生长的模型，模拟人工排水农田的地下排水和氮损失，表明地下排水和氮损失总量的

模拟效果较好。Liang 等[20]应用该模型对中国西北绿洲地区不同水肥管理模式的灌溉制度进行了优化; Wang 等[21]利用该模型成功模拟了北京地区冬小麦(*Triticum aestivum*)和夏玉米(*Zea mays*)轮作系统的水氮运移过程; Li 等[22]应用 WHCNS 模型对华北平原小麦-玉米典型轮作区的不同水肥与栽培管理组合模式进行了校验和评估。此外, WHCNS 模型在设施菜地上也有较好的应用[23]。因此, 本研究通过 WHCNS 模型结合野外裂缝三维形态结构参数, 来量化由于土壤裂隙存在而引起的农田土壤中水分和硝态氮的变化。

本研究拟从田间土壤开裂的动态监测出发, 提取华北农田裂缝三维几何结构形态特征参数; 通过 WHCNS 模型结合野外裂缝三维形态结构参数, 量化由于土壤裂隙存在而引起的农田土壤中水分和硝态氮的变化, 分析裂缝、施肥方式、灌溉方式以及强降雨对农田氮素运移的影响, 为农田水肥的高效管理提供理论依据, 并进一步减少肥料的浪费以及地下水的污染。

1 材料与方法

1.1 试验地点和土壤样品

室外试验地点选在中国农业大学上庄实验站。该实验地点位于北京市海淀区, 属于温带大陆性气候, 年降水量 650 mm, 土壤以潮土为主。土壤矿物经 X 射线衍射仪测定, 发现主要成分为石英与长石(表 1)。经中国科学院南京土壤研究所液塑限分析仪(GYS-2 型)测试得到: 土壤的液限为 0.75 $g\cdot g^{-1}$, 塑限为 0.44 $g\cdot g^{-1}$(本文中使用的含水量均为质量含水量)。利用激光粒径仪(马尔文 2000 激光粒度仪)测试土壤样品粒径大小分布(PSD), 其砂粒、粉粒和黏粒(美国制)含量分别为 78.49%、19.15%和 2.35%。

表 1 试验地土壤 X 射线衍射仪测定的矿物组成

Table 1 Soil mineral composition of the experimental field determined by X-ray diffractometer %

蒙脱石 Montmorillonite	石英 Quartz	斜长石 Albite	微斜长石 Microcline	云母 Muscovite	绿泥石 Clinochlore	闪石 Amphibole
5	53	18	13	5	3	3

本研究于 2019 年 8—10 月在上庄实验站进行自然条件下的土壤开裂试验。试验地由 4 个 5 m×1.2 m 的地块构成, 每个地块划分成 4 个 1 m×1 m 的小区域用于拍摄。其中一个 5 m×1.2 m 地块用于裂缝发育动力学特性研究。其他 3 块地用于原位提取裂缝三维结构。用相机记录裂缝瞬态发育过程, 为了消除后期图像畸变, 在拍摄前对每个拍摄区域的 4 个角用白色塑料棒标记。为了消除树叶、废塑料、作物秸秆、石子等杂质对裂缝发育的影响, 将整个区域 30 cm 厚的土壤过 10 mm 的筛以去除杂质。

试验田去除杂质并平整之后注水, 注水时间为 3 h, 保证注水结束后地表残留 15 cm 左右深的积水, 以保证地表以下 50 cm 土层完全饱和。然后启动单反相机(600D, 佳能)拍摄, 拍摄高度为 140 cm, 并设置拍摄间隔为 1 h。

1.2 图像处理

由于视角的原因, 相机在拍摄过程中容易导致图像畸变失真以及摄入不相关的背景杂散元素。因此, 对拍摄好的照片进行后处理, 消除几何变形。如图 1A 所示, 本文统一截取 1 m×1 m 的区域作为研究对象, 借助专业图像处理软件 Adobe Photoshop CS6 中的透视裁剪功能对开裂图片区域进行裁剪、变形消除, 最终图像处理效果如图 1B 所示。

由于拍照时不可避免地出现土壤表面反光及明暗阴影的干扰, 图片需经过滤波、平滑、二值化处理才能用于进一步的分析。本文采用开源图像处理软件 Image J 对几何校正后的图片进行二值化处理、平滑去噪等处理, 得到了清晰且信噪比高的二值化图像(图 1C)。利用 Python 程序中自带的 morphology 子模块中的 Skeletonize 函数对土壤裂缝的骨架进行提取, 骨架提取后将图像中的像素个数经尺度换算即得到裂缝长度。图像处理过程如图 1 所示。

1.3 裂缝发育形态特征的提取

为保证三维裂缝完整、不变形, 选用石蜡开展野外试验。将石蜡熔化后, 灌入注水后 72 h 的干缩开裂土壤的裂缝中, 冷却定型后, 选择原始裂缝边长为 1 m 区域, 采取破坏性取样方式将石蜡取出, 冲洗表面杂质, 得到土壤裂缝形态。本研究利用三维激光扫描仪(天远三维扫描仪 OKIO-5M)对取出的石蜡进行三面扫描、处理、合并后, 得到土壤裂缝的三维形态。

1.4 WHCNS 模型模拟农田裂缝对水氮运移的影响

使用 WHCNS 模型, 以天为时间步长, 对水分分布和入渗过程分别采用 Green-Ampt 模型以及 Richard's 方程量化。WHCNS 模型中的氮素运移模拟, 选用对流-弥散方程, 并考虑了矿化、挥发、硝

化、反硝化、吸收等源汇项。有关 WHCNS 模型详细的参数校验、模型参数输入等细节参考 Liang 等[20]。本研究利用校验后的 WHCNS 模型模拟了 2014 年 10 月—2016 年 10 月期间玉米-小麦轮作的农田表层有无裂隙情况下土壤水分和溶质运移的情况。试验地土壤物理性质和水力学参数如表 2 所示，其中的土壤大孔隙度，来自于三维激光扫描仪提取的裂隙等价孔隙度。表层 0~10 cm 土层存在裂隙时，其饱和导水率与 Cook[24]在 2003 年提出的介于裂隙之间的饱和导水率的计算方法一致。

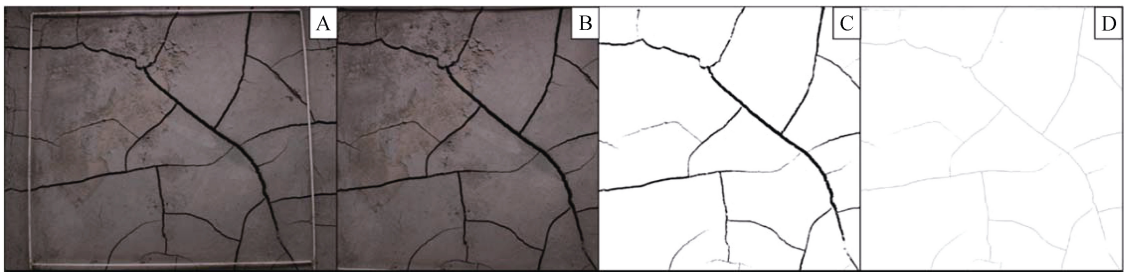

图 1　农田土壤裂缝的图像处理过程(A 为原始图像, B 为几何校正后的图片, C 是二值化的 B 图, D 是 C 图的骨架部分)
Fig. 1　Image processing process of farmland soil crack (A: original image; B: geometrically corrected images; C: binarization diagram of figure B; D: skeleton part of figure C)

表 2　WHCNS 模型中土壤水力学性质参数
Table 2　Parameters of soil hydraulics in WHCNS model

土层深度 Soil depth (cm)	容重 Soil bulk density ($g\cdot cm^{-3}$)	K_s ($cm\cdot d^{-1}$) 有土壤裂缝 With soil crack	K_s ($cm\cdot d^{-1}$) 无土壤裂缝 No soil crack	θ_s ($cm^3\cdot cm^{-3}$)	θ_r ($cm^3\cdot cm^{-3}$)	FC ($cm^3\cdot cm^{-3}$)	WP ($cm^3\cdot cm^{-3}$)	大孔隙度 Macroporosity (%) 有土壤裂缝 With soil crack	大孔隙度 Macroporosity (%) 无土壤裂缝 No soil crack
0~10	1.53	743 340.35	23.72	0.45	0.08	0.30	0.15	1.31	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 是饱和导水率, θ_s 是饱和含水量, θ_r 是残余含水量, FC 是田间持水量, WP 是萎蔫点。K_s is saturated water conductivity. θ_s is saturated water content. θ_r is residual water content. FC is field water capacity. WP is wilting point.

2　结果与讨论

2.1　土壤干缩裂缝三维形态特征

野外提取土壤三维裂缝形态如图 2 所示。裂缝表面没有呈现明显的等水势线及羽状发育的轮廓线，裂缝发育尖端的形态趋于复杂化与无序化。利用软件 Geomagic DesignX 测量裂缝的发育的深度、表面宽度及横截面积，并利用 Origin 处理数据。对所有提取的三维裂缝几何结构参数的分析显示：地表处裂缝宽度的最大值为 7.19 mm，最小值为 3.77 mm，平均值为 5.72 mm；裂缝深度是所得到裂缝在地面以下所能发育的最大值，最大值为 101.50 mm，最小深度为 76.20 mm，平均值为 90.60 mm，其中深度为 8~10 cm 的裂缝占绝大部分。通过统计照片中裂缝开裂长度数据，得到每平方米内的平均裂隙长度为 4.58 m。

2.2　WHCNS 模型模拟土壤裂缝、施肥方式、灌溉方式以及降雨强度对硝态氮淋洗量的影响

利用 WHCNS 模型模拟了 2014—2016 年的农田

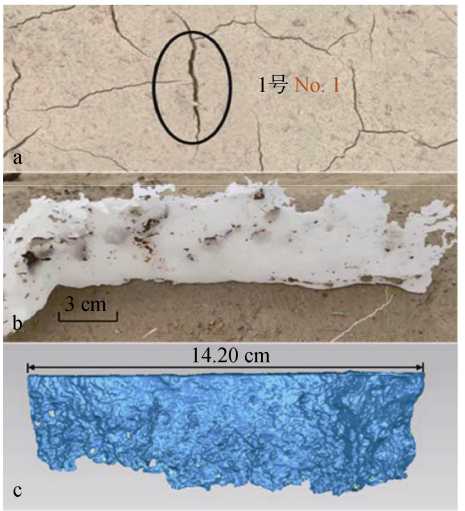

图 2　农田土壤裂缝三维形态提取裂缝示意图(a: 灌水 72 h 的土壤开裂情况; b: 石蜡灌制后的裂隙; c: 经三维扫描仪扫描并处理后的 1 号裂缝三维结构)
Fig. 2　Schematic diagram of 3D morphology extraction of farmland soil crack (a: soil cracking after 72 h of irrigation; b: cracks after paraffin irrigation; c: 3D structure of crack No. 1 after scanning and processing by 3D scanner)

生长数据，农田种植制度为冬小麦和夏玉米轮作。分别设置了有裂缝与无裂缝、传统施肥与优化施肥、喷灌与漫灌以及强降雨与正常降雨的 4 个对比情景进行模拟，具体模拟设置如表 3 所示。其中裂缝对比设置分为传统施肥条件下的模拟 1 和 2 以及优化施肥条件下的模拟 3 和 4；施肥模式对比设置了裂缝存在条件下的模拟 1 和 3 以及无裂缝条件下的模拟 2 和 4，传统施肥和优化施肥量分别为 560 kg·hm^{-2} 和 380 kg·hm^{-2}；同时模拟 1 和 5 为灌溉模式对比，模拟中设置漫灌次数为 4 次，每次漫灌水量为 135 mm，喷灌次数为 8 次，喷灌水量为 45 mm；模拟 1 和 6 为降雨对比，其中正常年降水量为 635 mm，强降雨分别在 6、7、8 月份设置了 3 次强降雨，每次降水量为 250 mm。

表 3 WHCNS 模型模拟设置以及硝态氮淋洗量

Table 3 WHCNS model simulation setting and nitrate leaching volume

编号 Number	模拟设置 Simulation setting						年均淋洗量 Annual average leaching (kg·hm^{-2})
	土壤裂缝 Soil crack	施肥 Fertilization		灌溉 Irrigation		降水 Precipitation	
		方式 Pattern	量 Amount [kg(N)·hm^{-2}]	方式 Regime	次/量 Times / amount (mm)		
1	有 Yes	传统 Traditional	560	喷灌 Spray	8/45	正常 Normal (635 mm)	236.93
2	无 No	传统 Traditional	560	喷灌 Spray	8/45	正常 Normal (635 mm)	120.03
3	有 Yes	优化 Optimized	380	喷灌 Spray	8/45	正常 Normal (635 mm)	198.60
4	无 No	优化 Optimized	380	喷灌 Spray	8/45	正常 Normal (635 mm)	50.72
5	有 Yes	传统 Traditional	560	漫灌 Flooding	4/135	正常 Normal (635 mm)	241.39
6	有 Yes	传统 Traditional	560	喷灌 Spray	8/45	强 Heavy (750 mm)	435.02

2.2.1 施肥方式以及裂缝的存在对硝态氮淋溶的影响

图 3a 为模拟期间降水随时间的变化情况以及灌溉和施肥的对应时间刻度(因为优化和传统施肥量不同，故此处仅对应施肥时刻，无施肥量设置)。图 3b 和 3d 显示了存在裂缝和无裂缝情况下，传统施肥土壤剖面硝态氮含量随时间的变化情况，结果显示裂缝的存在加速了硝态氮的淋洗，导致土壤剖面的硝态氮含量整体下降，年平均淋洗量较无裂缝情况下增加 116.91 kg·hm^{-2}。图 3c 和 3e 显示了存在裂缝和无裂缝情况下，优化施肥处理土壤剖面硝态氮含量随时间的变化情况，裂缝的存在同样也加速了硝态氮的淋洗，年平均淋洗量较无裂缝存在情况下增加 142.88 kg·hm^{-2}。由此可见裂缝的存在可明显增加硝态氮的淋洗，对作物生长产生影响。

土壤硝态氮含量同时也受施肥、土壤质地和温度等因素的影响[25]。对比图 3b 和 3c 可见，在裂缝的存在下，传统施肥造成土壤剖面的硝态氮含量比优化施肥条件下的低，二者硝态氮的年均淋洗量有 39.33 kg·hm^{-2} 的差异；在无裂缝存在的条件下，传统施肥的硝态氮年均淋洗量仍然比优化施肥多 64.31 kg·hm^{-2}。由此可见，优化田间施肥量对减少氮素淋失具有重要意义。

2.2.2 灌溉方式对硝态氮淋溶的影响

喷灌的水分利用率一般可达 90%以上，相比于漫灌省水高达 30%~50%，在透水性强的砂质土可省水高达 70%[26]。因此，在灌溉方式的模拟中，根据当地农民的灌溉习惯和经验数据，设置每年漫灌 4 次，漫灌量为 135 mm；喷灌次数设置为 8 次，喷灌水量为 45 mm。图 4b 和 4c 分别为漫灌和喷灌条件下土壤剖面硝态氮浓度随时间的变化情况。因为土壤裂缝的存在下，0~10 cm 土层硝态氮含量在施肥后快速增加，漫灌条件比喷灌更加明显。模拟显示，漫灌的硝态氮年均淋洗量比喷灌多 4.46 kg·hm^{-2}。

2.2.3 强降雨对硝态氮淋溶的影响

当降雨发生时，土壤水分快速入渗，导致硝态氮在水的驱动下向土壤深层迁移，继而发生淋溶损失，因而降雨是影响土体中硝态氮含量的重要因素。为了探讨强降雨对硝态氮淋失的影响，增加了强降水情景模拟。图 5 给出了模拟的一个夏玉米生长季的硝态氮淋洗情况，在正常降水的基础上，分别在 6、7、8 月份设置了 3 次强降雨(250 mm)。通过对比图 5b 和 5c，强降水发生时，两种情况下的土壤硝态氮淋洗量还是有比较大的差距，强降水条件下硝态氮的淋洗量相较于正常降水条件下增加了 83.61%，同时，裂隙的存在也加大了硝态氮淋失风险，使两者的差距进一步扩大。

3 结论与讨论

3.1 讨论

本文借助 WHCNS 模型模拟了土壤裂缝、施肥方式、灌溉方式以及降雨强度对土壤硝态氮淋失的

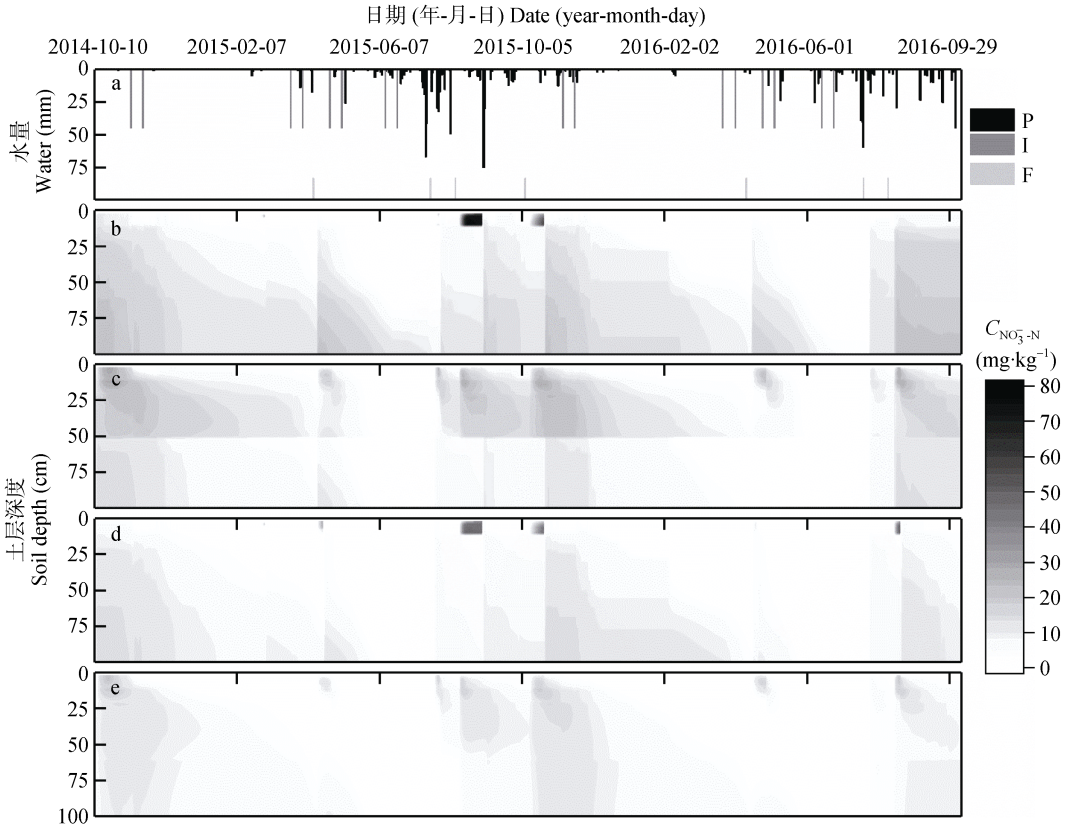

图 3　裂缝存在及不同施肥方式下土壤剖面硝态氮含量随时间的变化(a：模拟期间降水、灌溉和施肥的时间；b：存在土壤裂缝+传统施肥；c：存在土壤裂缝+优化施肥；d：无土壤裂缝+传统施肥；e：无土壤裂缝+优化施肥)

Fig. 3　Change of nitrate content in soil profile over time under influence of soil crack and fertilization modes (a: precipitation, irrigation and fertilization during simulation period; b: soil crack + traditional fertilization; c: soil crack + optimized fertilization; d: no soil cracks + traditional fertilization; e: no soil cracks + optimized fertilization)

P 为降水，I 为灌溉，F 为施肥；$C_{NO_3^-\text{-}N}$ 为土壤硝态氮含量。P is precipitation, I is irrigation, and F is fertilization. $C_{NO_3^-\text{-}N}$ is soil nitrate content.

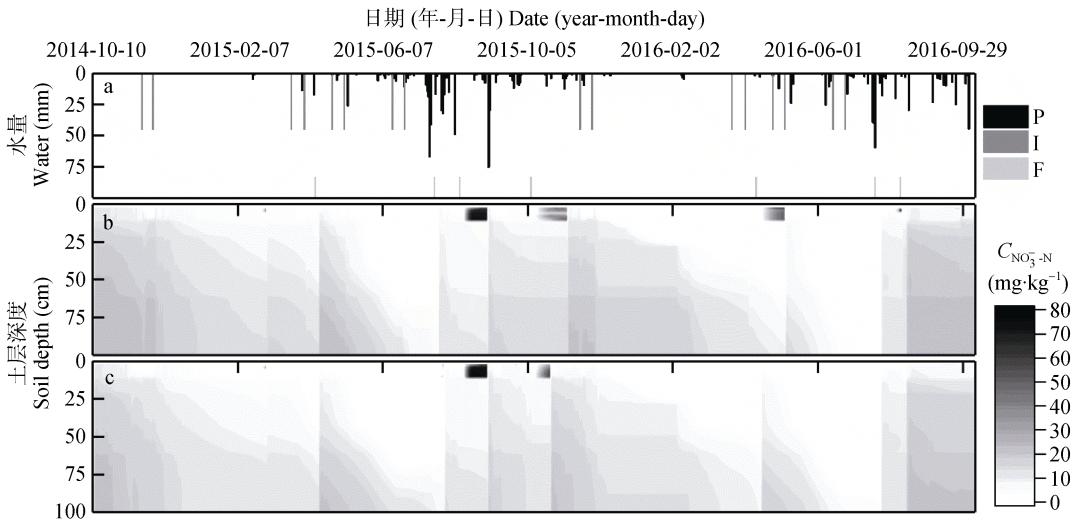

图 4　不同灌溉模式下土壤剖面硝态氮含量随时间的变化(a：模拟期间降水、灌溉和施肥的时间；b：漫灌；c：喷灌)

Fig. 4　Change of nitrate content in soil profile over time under influence of irrigation modes (a: precipitation, irrigation and fertilization during simulation period; b: flooding irrigation; c: sprinkler irrigation)

P 为降水，I 为灌溉，F 为施肥；$C_{NO_3^-\text{-}N}$ 土壤硝态氮含量。P is precipitation, I is irrigation, and F is fertilization. $C_{NO_3^-\text{-}N}$ is soil nitrate content.

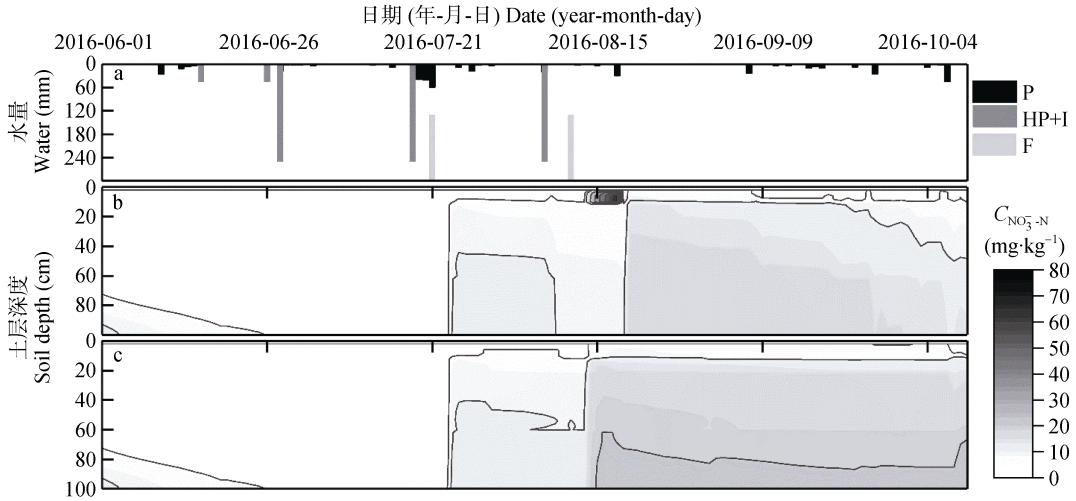

图 5 降水影响下的土壤剖面硝态氮浓度随时间的变化情况(b: 强降水; c: 正常降水)

Fig. 5 Change of nitrate concentration in soil profile over time under the influence of precipitation (b: heavy precipitation; c: normal precipitation)

P 为降水, HP+I 为强降水+灌溉, F 为施肥; $C_{NO_3^-\text{-}N}$ 为土壤硝态氮含量。P is precipitation, HP+I is heavy precipitation + irrigation, and F is fertilization. $C_{NO_3^-\text{-}N}$ is soil nitrate content.

影响。通过模拟得知不管是在优化施肥还是传统施肥条件下, 裂缝的存在都会对硝态氮的淋失产生重大影响, 致使其淋洗量增加了一倍多。王彬俨等[27]为了研究优先流对农田土壤水分和溶质运移的影响, 通过室内土柱试验分别模拟了存在优先流和平衡入渗的水分下渗过程, 结果显示优先流能够使硝态氮大量、快速下渗, 优先流引起的硝态氮累计淋出量占总量的 97.60%, 这表明优先流的存在提高了硝态氮在土壤中的运移, 这与本文的结论具有一致性。随着我国经济发展, 为了追求作物的高产, 农业生产中一味地增加肥料用量, 导致肥料利用率低下和地下水污染。卢数昌等[28]研究了传统施肥和优化施肥对设施芹菜(*Apium graveolens*)土壤硝态氮运移等方面的影响, 结果显示优化施肥不仅能够减少硝态氮向土壤中下部运移, 减轻环境风险, 同时提高了芹菜品质。本文模拟结果同样显示优化施肥条件减少了硝态氮的淋洗量, 与前人的研究结果具有一致性。相对于其他情景, 模拟结果显示更改灌溉方式对硝态氮淋失的影响并不明显, 这可能与灌溉强度以及模型设置的淋失土层(100 cm)有关。根据赵付江等[29]在不同灌溉方式对土壤硝态氮淋溶影响的研究中指出, 在 0~30 cm 土层, 滴灌下的土壤硝态氮含量明显高于常规沟灌; 在 30~90 cm 土层, 常规沟灌的硝态氮含量高于滴灌, 其中在 30~60 cm 土层的差异不显著, 60~90 cm 土层差异显著。因为本研究综合探讨 100 cm 土层深度的硝态氮淋失量, 所以两种灌溉方式所带来的差异并不明显。喷灌和滴灌作为节水灌溉措施, 对硝态氮的淋洗效果也类似。喷灌和漫灌作为不同的灌溉方式能改变硝态氮在土层的分布, 喷灌因为灌水量小, 水分入渗速度慢, 使硝态氮更多地保留在根区, 供植物充分利用, 而大水漫灌的水量大而急, 更容易将土壤表层的硝态氮带入更深的土层, 使植物无法使用, 造成浪费。因此在后期的田间水分管理中, 要更多地采用喷灌等方式, 并结合合理的施肥方式, 使之发挥省水、省肥的优点。高海鹰等[14]利用 LEACHM 模型和室内试验分析了不同降水强度对农田土壤氮素淋失的影响, 结果显示降水强度越大, 硝态氮淋失速率也越大, 当径流出现时, 水分下渗速率也随着降水的增加而不断增大。但在本研究中, 由于 WHCNS 模型在模拟时仅计算了淋洗到地下的硝态氮, 忽略了强降水带来的氮素径流损失, 从而降低了强降水所带来的影响。降水强度是影响氮素淋失的关键因素之一, 在田间管理时应合理安排施肥时间和施肥量, 特别是降雨集中的夏季应尽量避免在强降雨发生前进行施肥活动。

3.2 结论

在野外通过对田间土壤开裂形态的动态监测以及裂隙的灌制, 成功获取了裂隙的三维形态特征。利用三维扫描仪获取的裂缝平均宽度为 5.72 mm, 平均深度为 9.06 cm; 利用图像分析得到试验区土壤每平米裂缝的平均长度为 4.58 m。借助 WHCNS 模型进行模拟显示, 土壤干缩裂缝的形成增加了硝态氮的淋失风险。与无土壤裂缝相比, 土壤裂缝的存

在，导致硝态氮淋洗量在传统施肥条件下增加 116.90 kg·hm^{-2}，在优化施肥条件增加 142.88 kg·hm^{-2}；相较于优化施肥模式，传统施肥模式更容易造成硝态氮的淋失风险，且在有或无土壤裂缝存在的情况下表现一致；模拟喷灌和漫灌模式对硝态氮淋洗影响差异不明显，漫灌模式的硝态氮淋失量仅比喷灌模式多 4.46 kg·hm^{-2}，这与喷灌在节水灌溉方面的作用有关；强降雨的设置同样增加了硝态氮的淋失风险，导致硝态氮的年均淋洗量增加 67%。土壤裂缝的存在极大提高了硝态氮的向下运移，因此为了减少硝态氮的淋失，在田间裂缝产生时可通过中耕等措施破坏裂缝，在农田管理时选择优化施肥模式以及喷灌等节水灌溉措施，同时避免在强降雨发生前对作物进行施肥。

参考文献 References

[1] 张展羽，陈于，孔莉莉，等. 土壤干缩裂缝几何特征对入渗的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 192–197
ZHANG Z Y, CHEN Y, KONG L L, et al. Impacts of desiccation crack geometric characteristics on infiltration in soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 192–197

[2] PENG X, HORN R, PETH S, et al. Quantification of soil shrinkage in 2D by digital image processing of soil surface[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 91(1/2): 173–180

[3] GREVE A, ANDERSEN M S, ACWORTH R I. Investigations of soil cracking and preferential flow in a weighing lysimeter filled with cracking clay soil[J]. Journal of Hydrology, 2010, 393(1/2): 105–113

[4] NOVÁK V. Soil-crack characteristics-estimation methods applied to heavy soils in the NOPEX area[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 98/99: 501–507

[5] NOVÁK V, ŠIMÅUNEK J, VAN GENUCHTEN M T. Infiltration of water into soil with cracks[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2000, 126(1): 41–47

[6] 张中彬，彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 477–488
ZHANG Z B, PENG X H. A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flows[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 477–488

[7] CHERTKOV V Y. Modelling cracking stages of saturated soils as they dry and shrink[J]. European Journal of Soil Science, 2002, 53(1): 105–118

[8] GOEHRING L. Evolving fracture patterns: Columnar joints, mud cracks and polygonal terrain[J]. Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2013, 371(2004): 20120353

[9] VOGEL H J, HOFFMANN H, LEOPOLD A, et al. Studies of crack dynamics in clay soil: Ⅱ. A physically based model for crack formation[J]. Geoderma, 2005, 125(3/4): 213–223

[10] DASOG G S, SHASHIDHARA G B. Dimension and volume of cracks in a vertisol under different crop covers[J]. Soil Science, 1993, 156(6): 424–428

[11] ABOU NAJM M R, JABRO J D, IVERSEN W M, et al. New method for the characterization of three-dimensional preferential flow paths in the field[J]. Water Resources Research, 2010, 46(2): W02503

[12] ZHANG Z B, ZHOU H, ZHAO Q G, et al. Characteristics of cracks in two paddy soils and their impacts on preferential flow[J]. Geoderma, 2014, 228/229: 114–121

[13] LIU G, LI B G, HU K L, et al. Simulating the gas diffusion coefficient in macropore network images: Influence of soil pore morphology[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(4): 1252–1261

[14] 高海鹰，黄丽江，张奇，等. 不同降雨强度对农田土壤氮素淋失的影响及 LEACHM 模型验证[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1346–1352
GAO H Y, HUANG L J, ZHANG Q, et al. Nitrogen leaching under different rainfall intensities for agricultural soils-laboratory experiments and numerical modeling using LEACHM[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1346–1352

[15] DECHMI F, BURGUETE J, SKHIRI A. SWAT application in intensive irrigation systems: Model modification, calibration and validation[J]. Journal of Hydrology, 2012, 470/471: 227–238

[16] 薛长亮，张克强，杨德光，等. RZWQM 模拟小麦-玉米轮作系统氮素运移及损失特征[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(2): 150–158
XUE C L, ZHANG K Q, YANG D G, et al. RZWQM simulation of nitrogen transport and loss under winter wheat/summer maize rotation system in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(2): 150–158

[17] HOOGMOED W B, BOUMA J. A simulation model for predicting infiltration into cracked clay soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(3): 458–461

[18] JANSSEN M, LENNARTZ B, WÖHLING T. Percolation losses in paddy fields with a dynamic soil structure: Model development and applications[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(7): 813–824

[19] 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

[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] 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

[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] 梁浩, 胡克林, 孙媛, 等. 设施菜地WHCNS_Veg水氮管理模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 96–105
LIANG H, HU K L, SUN Y, et al. Integrated water and nitrogen management model of WHCNS_Veg for greenhouse vegetable production system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(5): 96–105

[24] COOK P G. A Guide to Regional Groundwater Flow in Fractured Rock Aquifers[M]. Henley Beach: Seaview Press, 2003

[25] 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-Environment Science, 2001, 20(5): 351–354

[26] 张新星, 杨振杰, 彭云, 等. 我国节水灌溉的现状与分析[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(33): 11972–11974
ZHANG X X, YANG Z J, PENG Y, et al. Status and analysis of water-saving irrigation in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(33): 11972–11974

[27] 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

[28] 卢数昌, 王小波, 翁福军, 等. 不同施肥处理对设施土壤硝态氮运移和芹菜生长与品质的影响[J]. 天津农业科学, 2015, 21(11): 8–11
LU S C, WANG X B, WENG F J, et al. Effect of different fertilization treatments on soil nitrate nitrogen movement and the growth and quality of celery in greenhouse[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2015, 21(11): 8–11

[29] 赵付江, 赵巍, 谢松青, 等. 不同灌溉方式对茄子生长水分利用和土壤硝态氮淋溶的影响[J]. 河北农业科学, 2018, 22(3): 20–22
ZHAO F J, ZHAO W, XIE S Q, et al. Effects of different irrigation methods on growth and water use efficiency of eggplant and soil nitrate leaching[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2018, 22(3): 20–22