

黄淮海平原微喷灌下冬小麦农田水分渗漏及氮素淋失模拟分析

乔毅博, 吴鹏年, 王艳丽, 刘长硕, 李煜铭, 温鹏飞, 关小康, 王同朝

引用本文:

乔毅博, 吴鹏年, 王艳丽, 刘长硕, 李煜铭, 温鹏飞, 关小康, 王同朝. 黄淮海平原微喷灌下冬小麦农田水分渗漏及氮素淋失模拟分析[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1540-1553.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1171>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

季铵盐改性秸秆阻控养殖肥液灌溉土壤氮淋失

张理胜, 赵迪, 薄录吉, 张克强, 王凤

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2582-2588 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1028>

养殖肥液不同灌溉强度下硝化-脲酶抑制剂-生物炭联合阻控氮淋溶的研究

杨涵博, 罗艳丽, 赵迪, 赖睿特, 张克强, 梁军锋, 沈丰菊, 王凤

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2363-2370 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0471>

黄腐酸改性膨润土对氮素淋失和氮肥利用率的影响

孔柏舒, 焦树英, 李永强, 沈玉文, 李焯, 张子胥, 付春雨

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2371-2379 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0838>

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

秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 翟丽梅, 王洪媛, 武淑霞, 刘宏斌

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1558-1567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1364>

硝化抑制剂阻控养殖肥液灌溉土壤氮素淋失

杨涵博, 赖睿特, 张克强, 沈丰菊, 李佳佳, 高文萱, 罗艳丽, 王凤

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1751-1758 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1572>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

乔毅博, 吴鹏年, 王艳丽, 等. 黄淮海平原微喷灌下冬小麦农田水分渗漏及氮素淋失模拟分析[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1540–1553.
QIAO Y B, WU P N, WANG Y L, et al. Simulation analysis on water leakage and nitrogen leaching of winter wheat farmland under micro sprinkler irrigation in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(7): 1540–1553.

黄淮海平原微喷灌下冬小麦农田水分渗漏及氮素淋失模拟分析

乔毅博¹, 吴鹏年², 王艳丽², 刘长硕¹, 李煜铭¹, 温鹏飞¹, 关小康¹, 王同朝^{1,2*}

(1. 河南农业大学农学院, 郑州 450046; 2. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450046)

摘要: 为了解黄淮海平原冬小麦水分渗漏和氮淋失特征, 以优化小麦生产灌溉制度, 降低农田水肥施用后土壤氮淋失对环境的影响, 本试验于2020—2022年在设置不同灌水处理(充分灌溉、亏缺灌溉)和雨养处理的大田试验基础上, 利用土壤-作物系统水热碳氮耦合(WHCNS)模型, 通过优化土壤水力学和作物参数, 评价模型适用性, 并使用校验后的模型量化分析不同水分管理条件下的农田氮淋失、水分渗漏及特征。结果表明: 土壤含水率和硝态氮(以N计)的均方根误差范围分别为0.01~0.07 cm³·cm⁻³和3.37~6.39 mg·kg⁻¹; 叶面积指数和干物质质量模拟R²≥0.9, 一致性指数均≥0.7, 模型模拟达到预期效果。使用校验后的模型对0~100 cm土层水分渗漏和氮淋失进行动态模拟的结果显示, 硝态氮淋失与水分渗漏动态一致, 二者均表现为单日量小且持续时间较长, 产生渗漏的累计天数占全生育期天数的59.2%~69.4%。与充分灌溉相比, 亏缺灌溉在两季冬小麦产量无显著差异的情况下, 日氮淋失和水分渗漏量分别减少3.88%~66.94%和37.01%~44.87%。研究表明, 校正后的WHCNS模型可以用于模拟研究区农田水氮运移和作物生长过程。

关键词: 冬小麦; WHCNS模型; 水分渗漏; 氮淋失

中图分类号: S512.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)07-1540-14 doi:10.11654/jaes.2022-1171

Simulation analysis on water leakage and nitrogen leaching of winter wheat farmland under micro sprinkler irrigation in Huang-Huai-Hai Plain

QIAO Yibo¹, WU Pengnian², WANG Yanli², LIU Changshuo¹, LI Yuming¹, WEN Pengfei¹, GUAN Xiaokang¹, WANG Tongchao^{1,2*}

(1. College Agronomy, Henan Agriculture University, Zhengzhou 450046, China; 2. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Understanding the characteristics of water leakage and nitrogen leaching from winter wheat in the Huang-Huaihai Plain, can help optimize the irrigation system for wheat production and reduce the environmental impact of soil nitrogen leaching after water and fertilizer application on farmland. In this study, based on a field trial with different irrigation treatments (eg., full irrigation, deficit irrigation) and rainfed treatments set up in 2020—2022, the Soil Water Heat Carbon and Nitrogen Simulation (WHCNS) model was used to evaluate the applicability of the model by optimizing soil hydraulics and crop parameters. The calibrated model quantitatively analyzed the nitrogen leaching, water seepage, and characteristics of farmland under different water management conditions. The root mean squared error (RMSE) ranges for soil water content and nitrate-N (calculated by N) were 0.01–0.07 cm³·cm⁻³ and 3.37–6.39 mg·kg⁻¹, respectively; the simulated R² for leaf area index (LAI) and dry matter mass were ≥0.9, and the consistency indices were both ≥0.7, and the model

收稿日期: 2022-11-15 录用日期: 2023-01-17

作者简介: 乔毅博(1998—), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 从事农田氮肥高效利用研究。E-mail: yibo_9527@126.com

*通信作者: 王同朝 E-mail: wtcwm@126.com

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFD1700903); 河南省高等学校重点科研项目(21A210028)

Project supported: The National Key Research and Development program of China(2021YFD1700903); Key Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Henan Province(21A210028)

simulations achieved the expected results. The results of simulating the dynamics of water seepage and nitrogen loss in the 0–100 cm soil layer using the validated model showed that nitrate nitrogen seepage and water seepage were consistent, and both were characterized by small single-day amounts but long duration, with the cumulative number of days of seepage accounting for 59.2%–69.4% of the total number of days in the reproductive period. Compared with full irrigation, N leaching and water leakage were reduced by 3.88%–66.94% and 37.01%–44.87%, respectively, in the two seasons of deficit irrigation, and there was no significant difference in yield between the two treatments of full and deficit irrigation, which were significantly higher than that of rainfed. The calibrated WHCNS model can be used to simulate water and nitrogen transport and crop growth in the study area.

Keywords: winter wheat; WHCNS model; water leakage; nitrogen leaching

黄淮海平原作为我国粮食主产区之一,稳定该地区的粮食生产对我国粮食安全具有重要意义。为获得更高的粮食产量,农民进行了过量的水肥投入,长期的氮肥施用已造成土壤硝酸盐大量累积^[1-2]。加之该地区水资源匮乏,年均70%左右的降雨集中在7—9月,这使得小麦季基本靠灌溉维持小麦生长,而当地大多采用大水漫灌和畦灌等灌溉方式,这些方式不仅灌溉效率低下,也更容易导致硝态氮淋失,进而造成地下水污染等环境问题。相关研究发现,黄淮海平原地下水NO₃平均超标率($\geq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)高达19.3%,个别地区甚至超过 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[3-6]。因此,对土壤水分渗漏和氮淋失状况进行量化研究,有助于了解该地区农田土壤水氮的迁移变化趋势,促进农田可持续健康发展。

当前农田水分渗漏和氮淋失的研究方法主要包括地下埋设淋溶盘^[7]、Lysimeter法^[8]、水通量法^[9]等,这些方法是通过定期取样达到观测目的,其操作难以实现持续有效观测,无法实现对土壤水分渗漏和氮淋失过程的全面认识。农田生态系统由于受人为调节和控制,输入物质与输出产物相对固定,这为其数值化和理论化提供了基础^[10]。使用计算机模型对作物生育期内的生长和土壤、环境等条件的变化进行模拟已有许多报道^[11-13]。赖晓明等^[14]应用Hydrus-1D模型对稻麦轮作农田水分渗漏和氮淋失特征进行分析,结果显示无机氮淋失的主要形式为硝态氮,氮淋失容易在每年6、7月份和作物生长早期达到峰值。王鹏宇等^[15]、刘影等^[16]借助DSSAT模型对作物灌溉制度进行模拟并优化,确定了作物最佳灌溉时期与灌溉量。柯华东等^[17]运用DNDC模型通过模拟单一情景和多组合情景下N₂O排放量,对不同情景的减排潜力进行了评估。土壤-作物系统水热碳氮耦合模型(Soil water heat carbon and nitrogen simulation, WHCNS)是基于我国气候环境条件和高度集约化农田种植背景所开发,该模型借鉴主流模型的一些模块并进行了本地化调整,将土壤水、热溶质迁移转化模型与作物生长模型

以及土壤碳氮循环过程相耦合,可用于分析土壤水热动态、氮素去向、有机质周转、水氮胁迫下的作物产量^[18]。Liang等^[19]使用欧洲国际土壤水氮动态模拟会议的开放数据集对WHCNS模型与其他14个土壤-作物模型模拟结果进行对比,结果表明WHCNS对土壤体积含水量、硝态氮含量、干物质积累等指标有更好的模拟效果。到目前为止,借助WHCNS模型在微喷灌条件下对冬小麦农田水分渗漏和氮淋失的报道较少,尤其该模型在黄淮海小麦-玉米轮作高产区的适用性有待进一步验证。

本研究以黄淮海平原地区微喷灌下的冬小麦为研究对象,利用2020—2022年微喷灌田间定位试验实测数据,通过对WHCNS模型的参数校准,进而对土壤含水率、土壤硝态氮含量和作物生长进行验证,以评价该模型的模拟精度,并以此为基础模拟农田水分渗漏和氮淋失及其特征进行分析。研究结果可为黄淮海平原冬小麦水肥合理施用和田间管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于2020—2022年在原阳县河南农业大学科教园区(35.10°N, 113.94°E)进行。该区属暖温带大陆性季风气候,海拔76 m,试验期间年平均气温14.4℃,年平均降水量549.9 mm。试验期间的气象数据如图1所示,其中2020—2021年小麦季生育期降雨量155.9 mm,2021—2022年小麦季生育期降雨量77.5 mm。2020年冬小麦播前0~20 cm土层土壤基础养分有机质 $6.94 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效氮 $50.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $5.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $48.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤质地为砂壤土。

1.2 试验设计

本试验在冬小麦-夏玉米周年轮作模式基础上进行,采用单因素随机区组设计,分别在冬小麦拔节

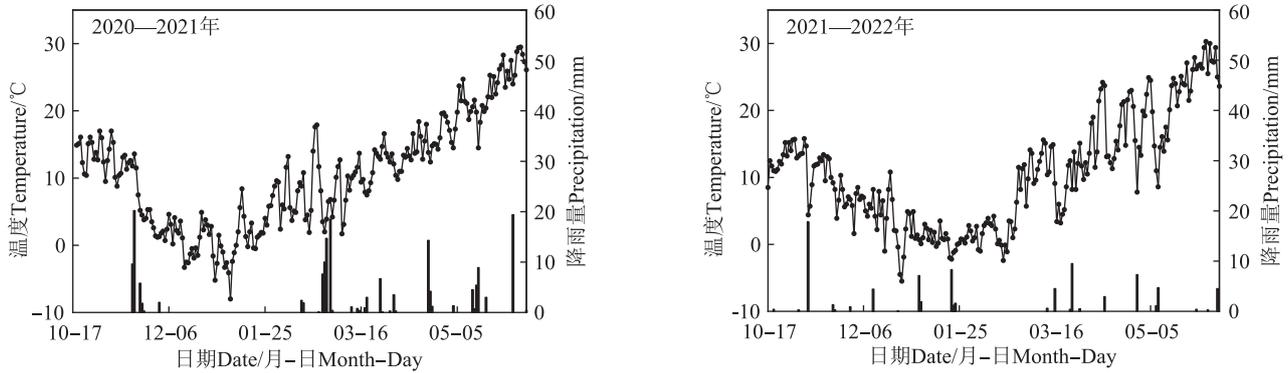


图1 试验地冬小麦在2020—2021年和2021—2022年生长季的气象数据

Figure 1 Daily air temperature and precipitation during winter wheat growing seasons in 2020—2021 and 2021—2022

期和开花期根据目标土层的土壤质量含水量进行测墒补灌,设计3种灌水处理,分别为:充分灌溉(F),灌至60 cm土层含水量达到80%田间持水量;亏缺灌溉(D),灌至40 cm土层含水量达到60%田间持水量;雨养(R),整个生育期不进行灌溉处理,即为对照处理。所有灌溉均采用微喷带灌溉,单次灌溉量由公式(1)计算,灌溉量由智能水表精准控制。各处理重复3次,小区面积为10 m×21 m=210 m²。各小区间设置隔离带,带宽为1 m。

$$I = \sum_{i=1}^n 10 \times \gamma \times H \times (w_i - w_0) \quad (1)$$

式中:I为灌溉量,mm;γ为补灌层土壤平均容重,g·cm⁻³;H为补灌土层厚度,cm;w_i为目标含水量,%;w₀为灌溉前土壤含水量,%。

供试小麦品种为“平安11号”,两季小麦播种日期均为10月19日。2020—2021年小麦播种量为180 kg·hm⁻²,2021—2022年受播前降雨影响,小麦播种量较前一年有所提高,为195 kg·hm⁻²。2020—2021年

小麦季基肥和追肥量(折合纯N)分别为168 kg·hm⁻²和225 kg·hm⁻²,2021—2022小麦季基肥和追肥量(折合纯N)分别为112.5 kg·hm⁻²和225 kg·hm⁻²。小麦季具体管理措施如表1所示。冬小麦收获后进行夏玉米播种,夏玉米播种后各处理统一灌出苗水,由于降雨量充足,出苗后各处理均未进行灌溉。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 作物生长参数

冬小麦生育期,根据冬小麦的生长情况,记录冬小麦各关键生育时期,本试验中冬小麦关键生育时期包括越冬期、返青期、拔节期、开花期、灌浆期、成熟期。各生育时期地上部生物量和叶面积指数(LAI):分别于各小区内选取0.1 m²样方内的作物带回实验室后放入烘箱105℃杀青30 min,调至75℃烘干至恒质量,并折算生物量;LAI使用便携式叶面积仪(Yaxin-1241)进行测定,并折算LAI。

1.3.2 土壤参数

土壤参数包括土壤容重、土壤含水量、土壤硝态

表1 2020—2022年冬小麦田间管理措施

Table 1 Field management for winter wheat in 2020—2022

| 田间管理 Field management | 2020—2021年 | 2021—2022年 |
|---|---|---|
| 播种日期 Date of sowing | 2020年10月19日 | 2021年10月19日 |
| 播种量 Seeding rate | 180 kg·hm ⁻² | 195 kg·hm ⁻² |
| 基肥种类、用量及日期 Base fertilizer type, dosage and date | 复合肥(N-P-K:28-6-6);600 kg·hm ⁻² ; 2020年10月19日 | 复合肥(N-P-K:15-15-15); 750 kg·hm ⁻² ;2021年10月19日 |
| 追肥种类、用量及日期 Additional fertilizer type, dosage and date | 尿素(折合纯N);225 kg·hm ⁻² ; 2021年3月20日 | 尿素(折合纯N);225 kg·hm ⁻² ; 2022年3月20日 |
| 灌溉量及日期 Irrigation volume and data | D处理2021年4月9日与5月8日分别灌溉33.26、 58.47 mm;F处理同期分别灌溉55.24、78.62 mm | D处理2022年3月23日与4月22日分别灌溉29.13、 47.13 mm;F处理同期分别灌溉76.09、81.39 mm |
| 收获日期 Harvest date | R,D,F 3种处理分别为2021年5月28日、6月2日、6月4日 | R,D,F 3种处理分别为2022年5月28日、6月1日、6月3日 |

注:R、D、F分别代表雨养、亏缺灌溉、充分灌溉。下同。

Note: R, D, F represents rain-fed, deficit irrigation, full irrigation, respectively. The same below.

氮含量和土壤水力学参数。于小麦生长季每隔2周对试验地0~100 cm土壤按照0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60、60~80 cm和80~100 cm层采用土钻法采集土样。每个处理小区3个重复。土壤含水量采用烘干法测定,土壤容重采用环刀法测定。土壤经2 mol·L⁻¹氯化钾浸提后,使用紫外分光光度法测定硝态氮含量。土壤水力学参数获取方法参照文献[20-21]。

1.4 WHCNS模型的输入参数

1.4.1 初值与边界条件

采用试验开始前实测的田间剖面土壤含水率和土壤无机氮含量作为初值。试验模拟土壤剖面深度为地下0~100 cm,将模型上边界设为地表,下边界设为-100 cm,模型下边界设置为自由排水边界。模型可计算出地下100 cm处的土壤水分和硝态氮含量,该量即为地下100 cm以下的水分渗漏和硝态氮淋失量。

1.4.2 气象数据

模型运行所需的气象数据包括站点的经度、纬度、海拔高度(m)、日最高气温(℃)、日最低气温(℃)、日平均温度(℃)、日平均相对湿度(%)、日平均风速(m·s⁻¹)、日最小相对湿度(%)、日照时数(h)、日降雨量(mm),所有气象资料从国家气象数据中心获取(<http://data.cma.cn>)。

1.4.3 土壤数据

土壤剖面模拟需输入土壤剖面的基本参数以及土壤水力学参数。本试验根据梁浩等^[22]的方法,使用水肥供应相对充足的处理来校准模型参数,利用2020—2021年亏缺灌溉处理的冬小麦田间试验数据进行模型参数率定,以雨养处理和充分灌溉处理的田间试验数据进行模型参数验证。土壤水分特征曲线使用 Van Genuchten 模型来描述^[23],通过 WHCNS 模

型内嵌的 PEST 调整工具^[22]和试错法相结合的方式对土壤水力学参数进行调整,率定后的土壤水力学模型参数值见表2。

1.4.4 田间管理参数

模型所需的田间管理数据如表1所示,主要包括作物播种日期、播种量、肥料施用类型、灌溉类型、灌溉量、收获日期等。

1.4.5 作物遗传参数

作物遗传参数是用于描述作物基因遗传特性与其生长环境之间的相互作用的一套参数集合,每一种作物都有一套相对应的参数值,这些参数值反映出同种作物不同品种间在生长发育性状和产量性状等方面的特征差异。本文根据梁浩等^[22]的方法确定了作物模型的基本参数,并采用“试错法”以实测数据为基础对作物模型的基本参数进行调整,调整后的作物参数如表3所示。

1.5 模型评价指标

采用均方根误差(RMSE)、纳什模型效率系数(E)和一致性指数(d)等评价指标来定量评价模型的模拟性能。计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (3)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (4)$$

式中: O_i 为实测值; P_i 为模拟值; n 为样本容量; O 为实

表2 土壤水力学参数

Table 2 Soil hydraulic parameters

| 土层 Soil depth/cm | 容重 Bulk density/(g·cm ⁻³) | 饱和导水率 K_s /(cm·d ⁻¹) | 饱和含水量 θ_s /(cm ³ ·cm ⁻³) | 残余含水量 θ_r /(cm ³ ·cm ⁻³) | α /(cm ³ ·cm ⁻³) | n |
|------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--|--|--|---------|
| 0~10 | 1.40 | 56.93 | 0.431 7 | 0.050 2 | 0.021 2 | 1.547 2 |
| 10~20 | 1.42 | 58.63 | 0.390 7 | 0.050 2 | 0.024 0 | 1.693 7 |
| 20~30 | 1.46 | 44.49 | 0.378 9 | 0.051 1 | 0.026 0 | 1.670 5 |
| 30~40 | 1.50 | 35.55 | 0.364 7 | 0.049 6 | 0.026 0 | 1.679 8 |
| 40~50 | 1.48 | 37.47 | 0.372 1 | 0.054 9 | 0.028 2 | 1.684 2 |
| 50~60 | 1.47 | 38.72 | 0.374 2 | 0.055 2 | 0.020 1 | 1.650 5 |
| 60~80 | 1.43 | 8.02 | 0.413 4 | 0.084 2 | 0.011 5 | 1.581 0 |
| 80~100 | 1.42 | 8.61 | 0.408 0 | 0.079 3 | 0.008 6 | 1.437 3 |

注: α 和 n 均为水分特征曲线参数($l=0.5$)。

Note: α and n are the water characteristic curves parameters ($l=0.5$).

表3 冬小麦作物遗传参数

Table 3 Winter wheat genetic parameters

| 参数 Parameter | 描述 Description | 初始值 Initial value | 调整值 Calibrated value |
|-----------------|--|----------------------|-------------------------|
| T_{base} | 作物生长发育最低温度(°C) | 0 | 0 |
| T_{sum} | 出苗到成熟积温(°C) | 1 700 | 1 900 |
| K_e | 消光系数 | 0.6 | 0.6 |
| K_{ini} | 前期作物系数 | 0.90 | 0.66 |
| K_{mid} | 中期作物系数 | 1.20 | 1.23 |
| K_{end} | 后期作物系数 | 1.05 | 0.60 |
| SLA_{max} | 最大比叶面积($m^2 \cdot kg^{-1}$) | 25.0 | 30.5 |
| SLA_{min} | 最小比叶面积($m^2 \cdot kg^{-1}$) | 9 | 12 |
| $AMAX$ | 最大同化率($kg \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$) | 56 | 59 |
| R_{max} | 最大根长(cm) | 100 | 110 |

测值的平均值。一般认为RMSE的值越接近于0,模型模拟的精度就越高,模拟的结果也越准确可靠。E的变化范围从 $-\infty$ 到1, $E=1$ 表明模拟值和实测值吻合得很

好, $E=0$ 表明模拟值和实测值的平均值具有很好的—致性, $-1 < E < 0$ 表明模型的模拟值不能很好地模拟田间的实测情况。 $0 < d < 1$, 当 d 趋近于1时, 说明模拟值与实测值具有较好的一致性。根据梁浩等^[24]的研究结果, 将 $E > 0.36$ 和 $d > 0.7$ 时, 认为模型模拟结果是可以接受的。

1.6 数据处理

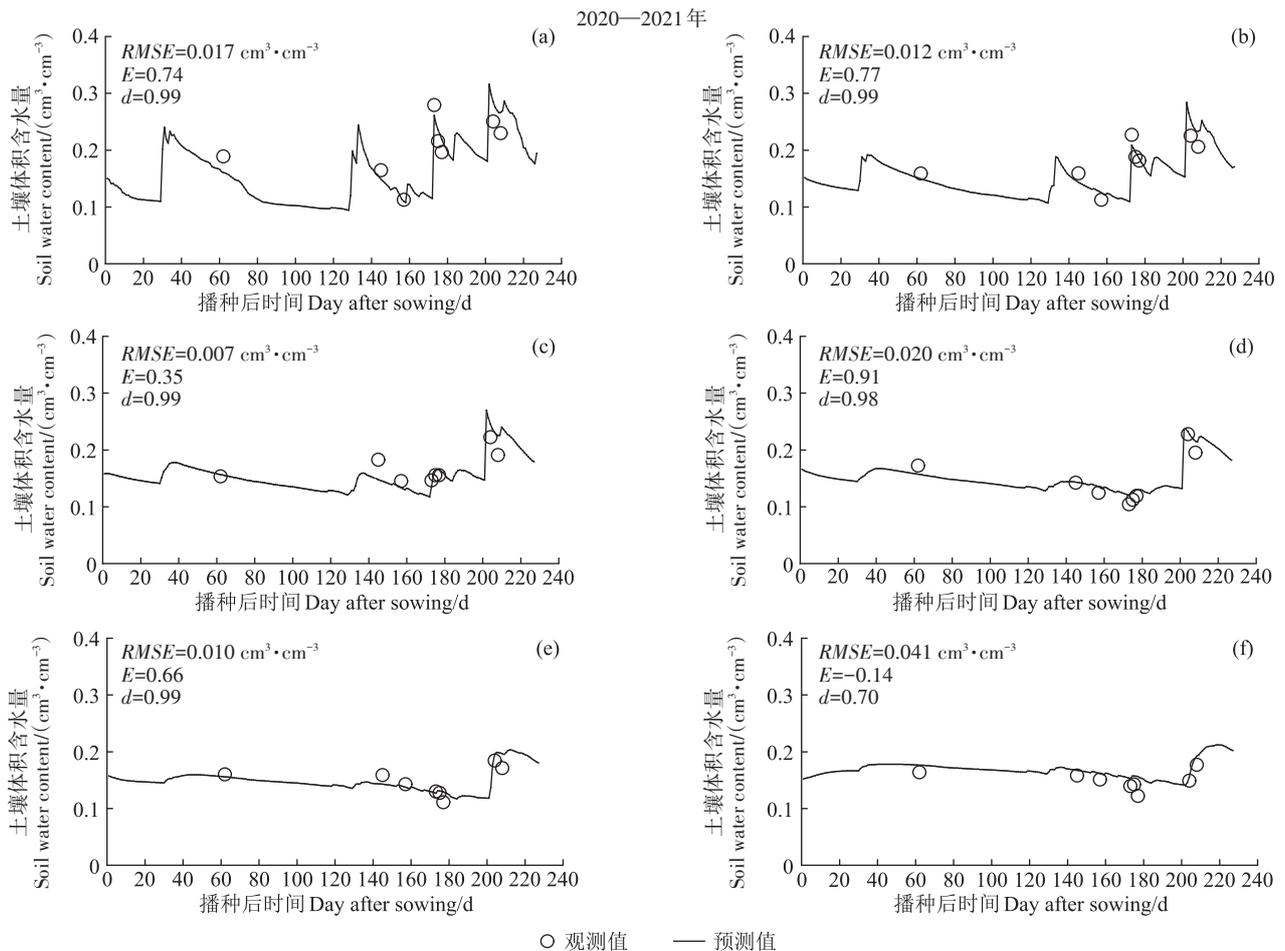
使用Excel 2021对所采集的土壤含水量、硝态氮含量、LAI、干物质质量等数据进行分析整理, 应用Origin 2021绘图。

2 结果与分析

2.1 WHCNS模型的率定与验证

2.1.1 土壤体积含水量

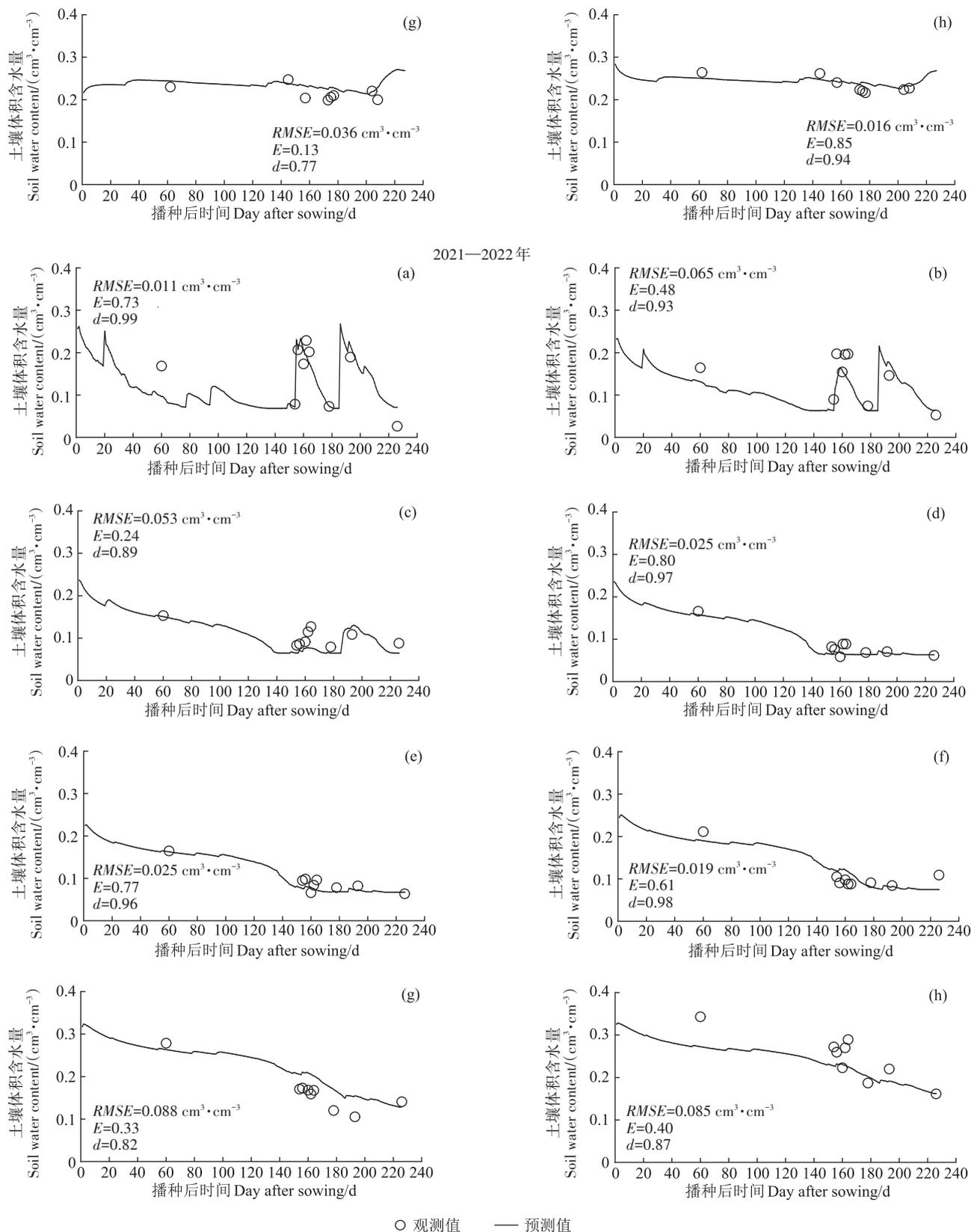
田间0~100 cm土层的土壤体积含水量观测值和模拟值变化状况如图2所示, 整体来看, 0~100 cm土



a, b, c, d, e, f, g, h 分别代表0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60、60~80、80~100 cm 土层。下同。
a, b, c, d, e, f, g, h represents 0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~60, 60~80, 80~100 cm soil layer, respectively. The same below.

图2 2020—2022年亏缺灌溉土壤剖面体积含水量模拟值与实测值对比图

Figure 2 Comparison of simulated and measured volumetric water content of soil profile under wheat deficit irrigation in 2020—2022 years



a, b, c, d, e, f, g, h 分别代表 0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~60, 60~80, 80~100 cm 土层。下同。

a, b, c, d, e, f, g, h represents 0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~60, 60~80, 80~100 cm soil layer, respectively. The same below.

续图 2 2020—2022 年亏缺灌溉土壤剖面体积含水量模拟值与实测值对比图

Continued figure 2 Comparison of simulated and measured volumetric water content of soil profile under wheat deficit irrigation in 2020—2022 years

壤体积含水量的模拟值与实测值变化趋势基本接近。其中,0~40 cm浅层土壤的水分变化波动较大,而60~100 cm深层土壤水分变化较为稳定。所有土层体积含水量模拟值与实测值之间的 $RMSE$ 值范围为 $0.007\sim 0.088\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$,均接近于0。 E 值范围为 $0.13\sim 0.91$, d 值范围为 $0.70\sim 0.99$,接近于1。整体来看,模型模拟效果可以接受,表明 WHCNS 模型可以较为准确的对土壤水分变化过程进行模拟。

2.1.2 土壤硝态氮含量

土壤硝态氮模拟值与实测值的变化情况如图3

所示,亏缺灌溉处理各层硝态氮模拟值与实测值之间的 $RMSE$ 值介于 $0.17\sim 4.85\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,一致性指数 d 大于 0.7 ,除个别土层外,大部分土层的 E 值大于 0.36 ,由于土壤氮素转化过程易受如温度、水分、土壤等多种环境因素的影响,硝态氮含量具有较大的空间变异性。表层(0~30 cm)硝态氮变化较为明显,底层(60~100 cm)土壤硝态氮含量变化较为平缓,模型模拟动态与实测值动态变化趋势较为一致。本研究中出现负 E 值范围为 $-0.28\sim -0.01$ 之间(参考范围 $-0.81\sim -0.20$ ^[25]),考虑到土壤氮素转化过程的复杂性,

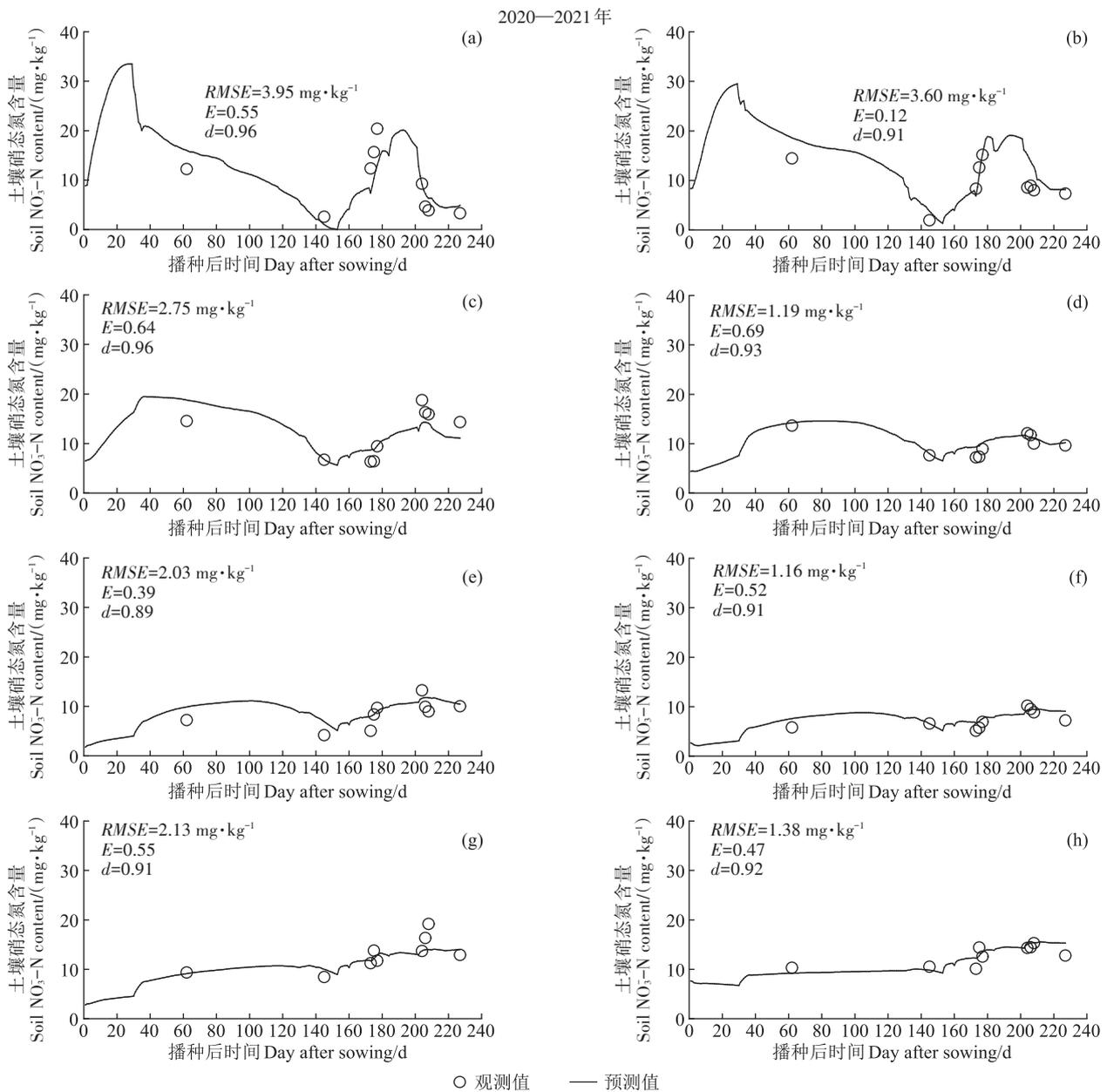
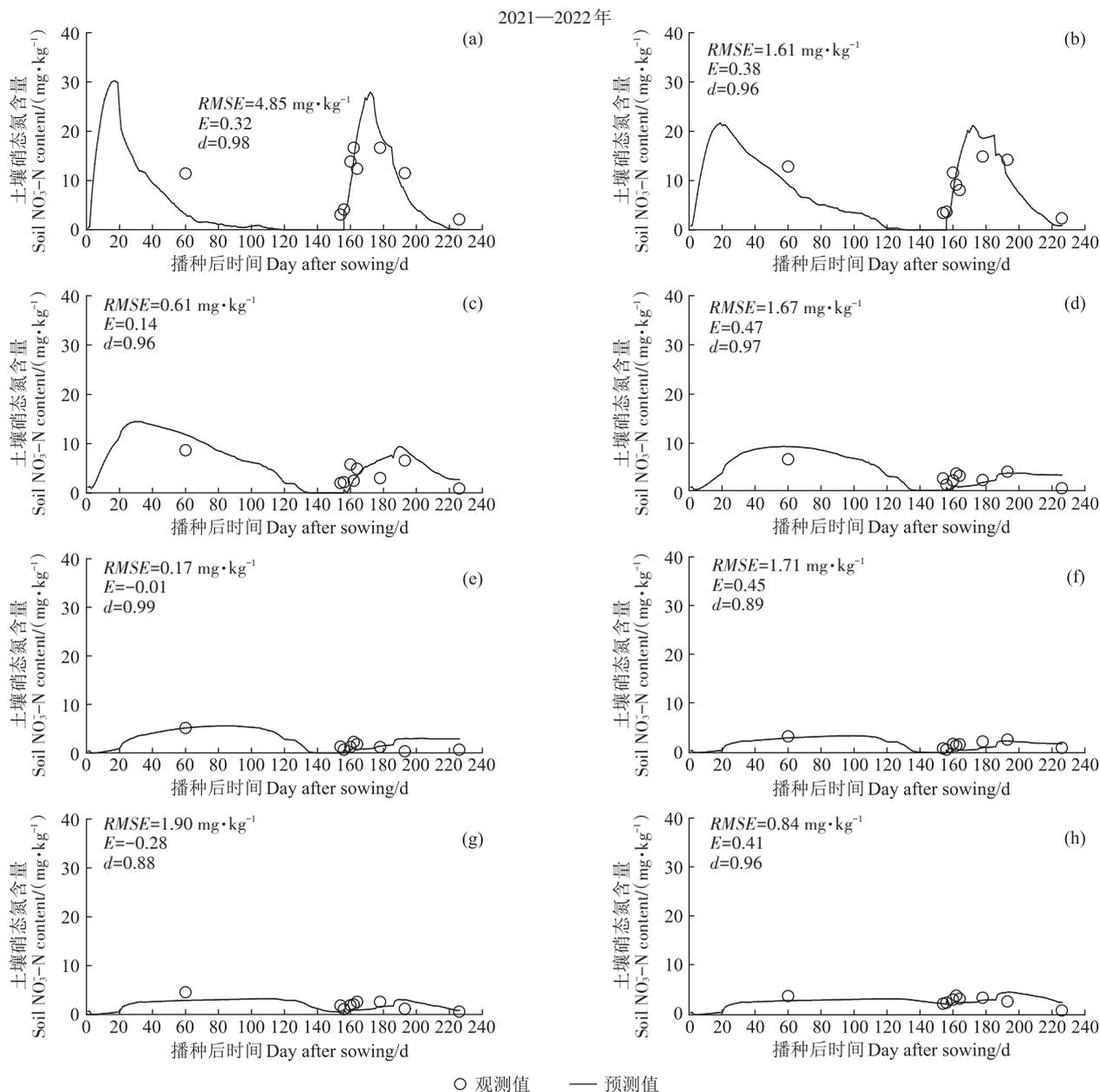


图3 2020—2022年亏缺灌溉土壤剖面硝态氮含量模拟值与实测值对比图

Figure 3 Comparison of simulated and measured nitrate content in soil profile under wheat deficit irrigation in 2020—2022



续图3 2020—2022年亏缺灌溉土壤剖面硝态氮含量模拟值与实测值对比图

Continued figure 3 Comparison of simulated and measured nitrate content in soil profile under wheat deficit irrigation in 2020—2022

本模型模拟的硝态氮结果是可以接受的。

2.1.3 地上部干物质质量及LAI

WHCNS模型对冬小麦地上部干物质质量及LAI的模拟对比结果见图4,可以看出,模型对于地上部干物质质量和LAI的模拟具有较好的模拟精度,地上部干物质质量相关系数达到0.90,LAI相关系数达到0.84,模拟值与实测值之间的线性回归系数接近于1,调整后的冬小麦生长参数可以用于描述冬小麦生长及叶面积变化。

2.1.4 模型模拟效果验证

R、D、F 3种处理下土壤体积含水量、硝态氮含

量、地上部干物质质量和LAI的模拟效果评价如表4所示。模型模拟的土壤体积含水量的RMSE值接近于0, $E \geq 0.79$, $d \geq 0.98$ 。土壤硝态氮含量(以N计)的RMSE值范围为 $3.37 \sim 6.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $E \geq 0.70$, $d \geq 0.89$ 。地上部干物质的RMSE值范围为 $930.86 \sim 1505.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $E \geq 0.86$, $d \geq 0.98$ 。LAI的RMSE范围为 $0.51 \sim 0.68$, $E \geq 0.70$, $d \geq 0.97$ 。模型模拟值与实测值具有较好的一致性,说明模型模拟结果比较理想。因此,该模型可用于模拟分析该地区微喷灌条件下的土壤氮素损失与水分渗漏过程。

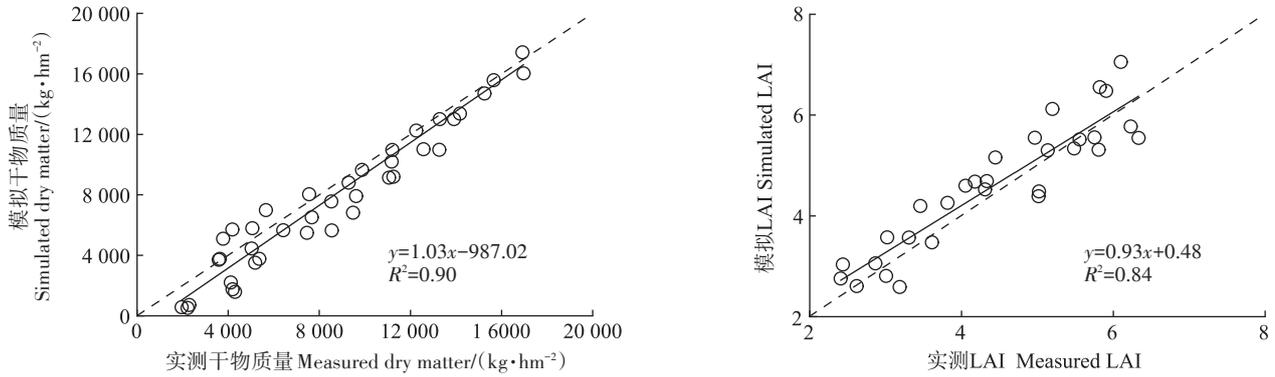


图4 2020—2022年冬小麦地上部干物质质量及LAI模拟值与实测值

Figure 4 Simulated and measured values of aboveground dry matter mass and leaf area index of wheat from 2020 to 2022

表4 WHCNS模型模拟效果评价

Table 4 Evaluation of WHCNS model simulation effect

| 项目 Project | D(率定) | | | R(验证) | | | F(验证) | | |
|-----------------------------------|----------|------|------|--------|------|------|----------|------|------|
| | RMSE | E | d | RMSE | E | d | RMSE | E | d |
| 土壤体积含水量 Soil volume water content | 0.01 | 0.83 | 0.98 | 0.07 | 0.86 | 0.99 | 0.02 | 0.79 | 0.98 |
| 土壤硝态氮含量 Nitrate content in soil | 6.39 | 0.76 | 0.89 | 3.37 | 0.70 | 0.99 | 4.42 | 0.86 | 0.99 |
| 地上部干物质 Aboveground dry matter | 1 436.50 | 0.86 | 0.98 | 930.86 | 0.89 | 0.99 | 1 505.15 | 0.89 | 0.99 |
| 叶面积指数 LAI | 0.53 | 0.80 | 0.99 | 0.51 | 0.81 | 0.99 | 0.68 | 0.70 | 0.97 |

2.2 田间水分渗漏和氮淋失的动态变化

图5分别为模型模拟得到的不同水分处理下100 cm以下农田土壤水分和硝态氮淋失的动态过程。总体来看,硝酸盐淋失与水分渗漏动态基本一致,说明过量的水分向下渗漏时会带走土壤中残留的硝态氮。由模拟结果可知,3种处理(R、D、F)两季冬小麦在生育后期几乎均不产生水分渗漏和氮淋失,累计产生渗漏的天数占总生育期天数的59.2%、61.6%、61.4%。2020—2021年3种处理单日最大水分渗漏分别为0.20、0.99、1.25 mm,产生最大渗漏的同时氮淋失量也最大,氮淋失量分别为0.10、0.39、0.55 kg·hm⁻²。2021—2022年播前受玉米季降雨影响,播种时土壤水分含量较高,而硝态氮含量接近于0,播种后单日水分渗漏量≥2.6 mm,氮淋失量<0.03 kg·hm⁻²。

2.3 田间水分渗漏和氮淋失累积量

两年小麦播种后水分渗漏和氮淋失累积量如图6所示。2020—2021年R、D、F3种处理下水分渗漏量和氮淋失量均呈现F>D>R的趋势,R、D、F的水分渗漏累积量分别为7.38、16.03、26.76 mm,土壤硝态氮淋失累积量(以N计)分别为3.7、8.6、15.6 kg·hm⁻²。2021—2022年小麦R、D、F3种处理全生育期水分渗漏量分别为57.29、50.81、52.78 mm,土壤水分渗漏总量较前一年有所提升,且主要集中在小麦生长前期,

其中3种处理播种后前30 d水分渗漏量分别占全生育期总渗漏量的49.4%、46.5%、45.6%。而3种处理土壤硝态氮淋失量(以N计)分别为4.43、3.91、5.22 kg·hm⁻²,除R处理外,其他两个处理均较上一年大幅降低。

2.4 土壤硝态氮损失率及产量

表5为两年硝态氮损失率及小麦产量。由表5可知,两年产量均呈现F>D>R的趋势,R处理显著低于D处理和F处理,D、F处理之间无显著差异。2020—2021年硝态氮损失率与灌溉量呈正相关关系,即灌溉量越大引起的氮淋失量越多,D处理较F处理氮淋失量降低44.87%。在2021—2022年土壤硝态氮淋失量表现为D<R<F,D灌溉处理下硝态氮淋失量较F处理和R处理分别降低37.01%和16.27%,损失率最低。与其他两种处理相比,D处理可以在减少氮淋失的同时维持一定的产量。

3 讨论

3.1 微喷灌条件下WHCNS模型适用性分析

本文借助WHCNS模型分析微喷灌条件不同水分处理下黄淮海平原土壤水分、硝态氮运移状况,并对生物量和LAI进行模拟。结果表明该模型对土壤含水率的模拟效果达到预期,其中深层土壤含水率模

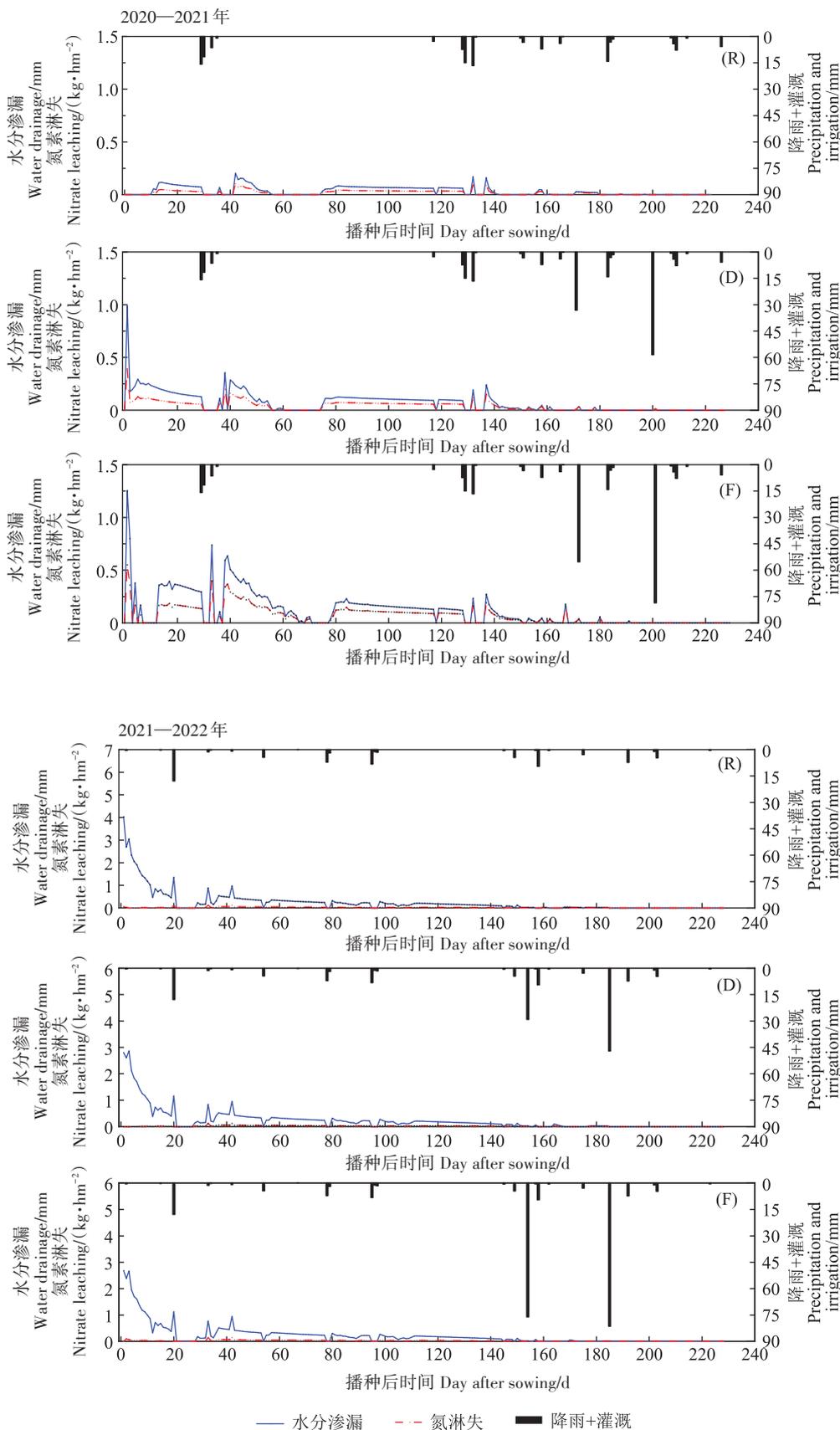


图5 2020—2022年土壤水分渗漏与氮淋失动态

Figure 5 Dynamic of soil water leakage and nitrogen leaching in wheat from 2020—2022 years

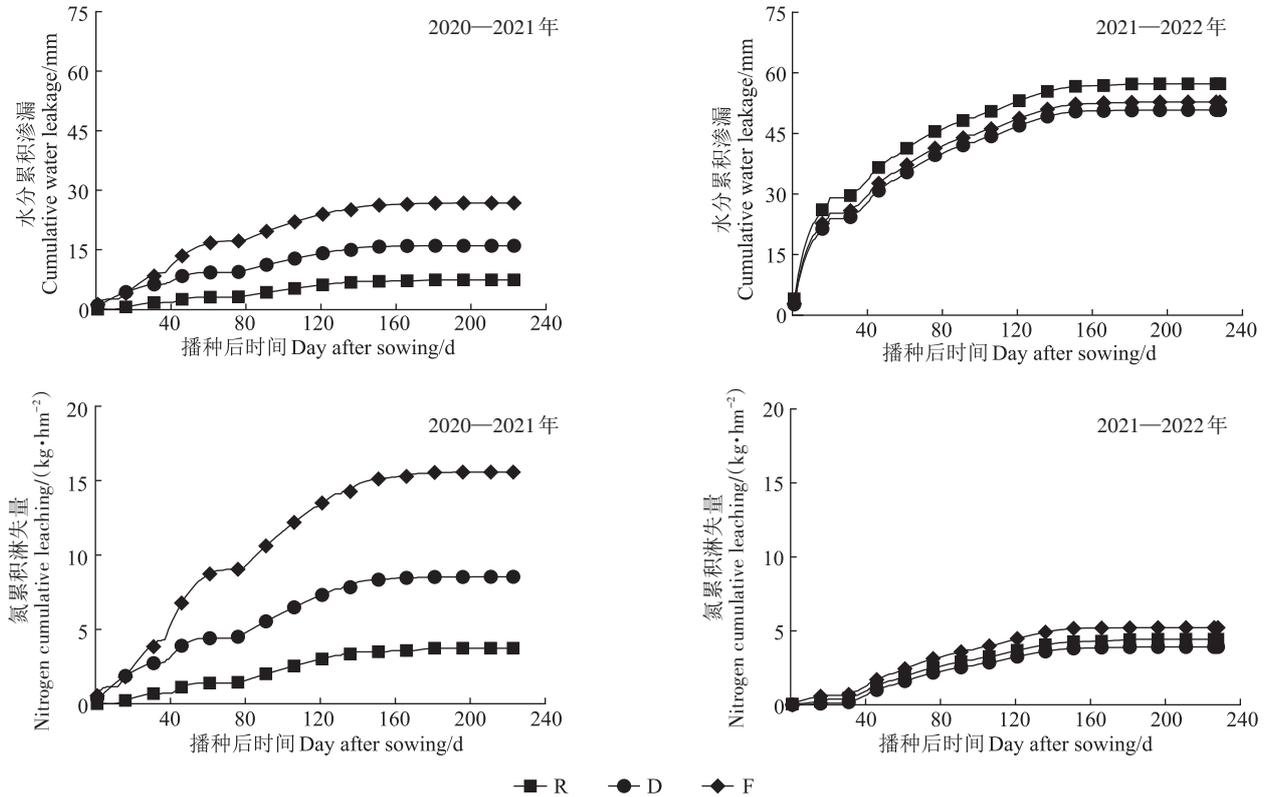


图6 2020—2022年累积水分渗漏和氮淋失

Figure 6 Cumulative water leakage and nitrogen leaching in 2020—2022

表5 2020—2022年硝态氮损失率及产量

Table 5 Nitrate nitrogen loss rate and yield in 2020—2022

| 年份 Year | 处理 Treatment | 氮投入 N input/(kg·hm ⁻²) | 氮淋失 N leaching/(kg·hm ⁻²) | 淋失/投入 Loss rate/% | 籽粒产量 Grain yield/(kg·hm ⁻²) |
|------------|-----------------|---------------------------------------|--|----------------------|--|
| 2020—2021年 | R | 393.00 | 3.70 | 0.94 | 6 735.35±321.89b |
| | D | 393.00 | 8.60 | 2.19 | 9 193.84±255.82a |
| | F | 393.00 | 15.60 | 3.97 | 9 325.79±233.85a |
| 2021—2022年 | R | 337.50 | 4.43 | 1.31 | 6 479.40±388.23b |
| | D | 337.50 | 3.81 | 1.16 | 8 455.51±216.22a |
| | F | 337.50 | 5.22 | 1.55 | 8 704.49±224.61a |

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

拟效果优于浅层,这与 Leghari 等^[26]的研究结果一致,可能是由于浅层土壤易受降雨、灌溉和气候等因素影响。宜丽宏等^[27]的研究表明,微喷灌对表层土壤含水率响应明显,本研究结果表明两次灌溉后表层土壤水分含量均出现峰值。模拟结果显示模拟水分含量在峰值处略高于实测值,原因可能是模型模拟时间步长是以天为单位,在水分输入后,模型模拟土壤含水率会立刻上升,而田间采样发生在灌溉后,从而导致实测与模拟有一定差异。土壤硝态氮含量在施肥后升高,模型模拟显示表层土壤硝态氮含量在施底肥和追

肥后分别出现峰值。由于土壤硝态氮含量受施肥、耕作、灌溉等多种因素的影响,不同研究对于土壤硝态氮含量的模拟效果不尽相同,戴嘉璐等^[28]使用 DNDC 模型对 0~20 cm 土层土壤硝态氮含量进行模拟,结果显示 E 和 R^2 均高于 0.75,说明 DNDC 模型在浅层土壤中具有较好的模拟效果。王贵云等^[29]使用 RZWQM 模型的研究发现,模型对中上层土壤硝态氮迁移的模拟效果优于下层土壤。本研究中深层土壤(60~100 cm)硝态氮(以 N 计) $RMSE$ 值范围为 0.17~2.13 mg·kg⁻¹,模拟效果优于浅层土壤(0~40 cm, $RMSE$ 值范围

为 $0.61\sim 4.85\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。胡春胜等^[30]的研究表明,深层土壤硝态氮转化主要受微生物丰度和酶活性的影响,低 O_2 浓度限制了酶活性,进而影响土壤反硝化作用,深层硝态氮含量较浅层土壤稳定,这与本研究模拟结果类似。使用WHCNS模拟干物质量、LAI的效果均较为良好,模型决定系数 R^2 均高于0.9。整体来看,WHCNS模型对土壤含水率、土壤硝态氮含量、植株生长等均有较好的模拟效果,因此,WHCNS模型可适用于黄淮海平原微喷灌种植条件下的冬小麦模拟研究。

3.2 不同灌溉水平对农田水分渗漏和硝态氮淋失的影响

水、氮运移存在明显的耦合作用,是农业生产中人为可调控的影响因子^[31]。本研究发现农田水分渗漏同降雨和灌溉量存在正相关关系,即降雨或灌溉量越大,100 cm土层处水分渗漏和氮淋失总量越多,2020—2021年小麦季亏缺灌溉较充分灌溉水分渗漏降低40.01%。有研究表明^[32]水分渗漏还与土壤基础水分含量有关,2021—2022年冬小麦生长前期受夏季降雨影响,深层土壤初始墒情较高,土壤库容变大,此后温度逐日降低,田间蒸散量减少,降雨容易产生水分渗漏或氮淋失。随着时间推移,冬小麦拔节期灌溉后植株快速生长,气温逐渐升高,作物蒸腾作用旺盛,0~100 cm土层整体含水量呈快速下降趋势,此时再进行降雨或灌溉较难对地下100 cm土体处产生明显影响^[33]。两年试验均呈渗漏周期长但渗漏量小的规律,3种处理(R、D、F)发生渗漏累计天数分别占总生育期的59.2%、61.6%、61.4%,且集中在小麦生长前期。

硝态氮淋失动态与水分渗漏动态基本一致,冬小麦播种后由于气温较低,冬小麦生长较为迟缓,对氮素利用较少,施基肥所产生的硝态氮大量积累在土壤表层,极易随着降雨或灌溉向下移动而淋失。有研究发现,多次、小水量灌溉比单次、大水量灌溉可显著减少氮淋失^[7]。本研究中2020—2021年小麦亏缺灌溉处理下硝态氮淋失量较充分灌溉减少44.9%。2021—2022年小麦季播前受特大暴雨及后续降雨的影响,大量水分进入土体,3种处理下土壤硝态氮淋失量差异较小。Kamran等^[34]的研究表明,适度的灌溉和施肥处理可显著降低 N_2O 和 CO_2 等温室气体的排放,提高农田生态系统的可持续性,本研究中亏缺灌溉处理下两年氮淋失量均较低,且在特殊降雨年型下表现出一定的稳定性,这与前人研究结果一致。在本研究中除2020—2021年第一次灌溉外,其余处理

灌溉后均未产生明显水分渗漏和氮淋失,但不同处理间却表现出差异,原因可能是本试验在已经进行的不同水分处理的基础上展开,水分处理导致前茬作物的土层水分和硝态氮贮存量不同,最终呈现出处理间水分渗漏和氮淋失量差异。

综上所述,本研究使用模型对微喷灌条件不同灌溉水平下冬小麦农田适用性进行验证,并对冬小麦季农田水分渗漏及氮淋失特征进行初步分析,研究表明适宜的灌溉措施可降低农田水分渗漏和氮淋失。本试验仅在不同灌水条件下对冬小麦单季水分渗漏和氮淋失情况进行了初步探讨,后续应在此基础上开展施肥、灌溉、管理等综合措施作用下周年轮作水分渗漏和氮淋失研究,以期全面系统阐明综合管理措施以及周年轮作效应对土壤水、氮的影响,从而达到防治地下水污染的效果。

4 结论

(1)WHCNS模型在黄淮海平原微喷灌处理下对土壤含水量、硝态氮含量、地上部干物质量及LAI的模拟效果较好。土壤含水量、硝态氮含量的纳什效率系数和一致性指数均大于0.7,均方根误差范围分别为 $0.01\sim 0.07\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $3.37\sim 6.39\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (以N计),地上部干物质量和LAI的决定系数 >0.9 。该模型可以用来模拟研究区农田的水氮运移和作物生长过程。

(2)模拟结果显示冬小麦生长季氮淋失与水分渗漏动态基本一致,二者特征均表现为量少但持续时间长。发生渗漏和淋失累计天数占全生育期的59.2%~69.4%,且集中在生长前期。2020—2021年3种处理的渗漏量和淋失量均表现为充分 $>$ 亏缺 $>$ 雨养。亏缺处理在保证产量的同时可较充分灌溉减少3.88%~66.94%的水分渗漏和37.01%~44.87%氮淋失量。在本试验条件下,在冬小麦拔节期、开花期补灌至0~40 cm土层田间持水量的60%时水分渗漏和氮淋失量较少,推荐作为该区域适宜灌水量。

参考文献:

- [1] LIU X, ZHANG Y, HAN W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.
- [2] 李晓欣,王仕琴,陈肖如,等. 北方区域尺度地下水-包气带硝酸盐分布与变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 208-216. LI X X, WANG S Q, CHEN X R, et al. Spatial distribution and changes of nitrate in the vadose zone and underground water in northern China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(1): 208-216.

- [3] 水利部地下水监测中心. 地下水动态月报[R]. 北京: 水利水文局, 2016. Groundwater Monitoring Center of the Ministry of Water Resources. Monthly groundwater regime report[R]. Beijing: Bureau of Water Resources and Hydrology, 2016.
- [4] 马林, 王洪媛, 刘刚, 等. 中国北方农田氮磷淋溶损失污染与防控机制[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 1-10. MA L, WANG H Y, LIU G, et al. Mitigation of nitrogen and phosphorus leaching from cropland in northern China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(1): 1-10.
- [5] 汪兆辉, 张友良, 冯绍元. 旱地硝态氮淋失阻控措施研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2021, 12: 39-45. WANG Z H, ZHANG Y L, FENG S Y. Review of soil nitrate leaching control measures in dry farmland[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021, 12: 39-45.
- [6] LIU G D, WU W L, ZHANG J. Regional differentiation of non-point source pollution of agriculture-derived nitrate nitrogen in groundwater in northern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 107(2/3): 211-220.
- [7] 叶优良, 李隆, 张福锁, 等. 灌溉对大麦/玉米带田土壤硝态氮累积和淋失的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 105-109. YE Y L, LI L, ZHANG F S, et al. Effect of irrigation on soil NO_3^- -N accumulation and leaching in maize/barley intercropping field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(5): 105-109.
- [8] GU L, LIU T, WANG J, et al. Corrigendum to "Lysimeter study of nitrogen losses and nitrogen use efficiency of northern Chinese wheat"[J]. *Field Crops Research*, 2016, 196: 473-474.
- [9] ZHANG Y, HU C, ZHANG J, et al. Nitrate leaching in an irrigated wheat-maize rotation field in the North China Plain[J]. *Pedosphere*, 2005, 15(2): 196-203.
- [10] 王激清, 马文奇, 江荣风, 等. 中国农田生态系统氮素平衡模型的建立及其应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 210-215. WANG J Q, MA W Q, JIANG R F, et al. Development and application of nitrogen balance model of agro-ecosystem in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(8): 210-215.
- [11] WU A, SONG Y, VAN OOSTEROM E J, et al. Connecting biochemical photosynthesis models with crop models to support crop improvement[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1518.
- [12] ADAM M, WERY J, LEFFELAAR P A, et al. A systematic approach for re-assembly of crop models: an example to simulate pea growth from wheat growth[J]. *Ecological Modelling*, 2013, 250: 258-268.
- [13] LINKOSALO T, KOLARI P, PUMPANEN J. New decomposition rate functions based on volumetric soil water content for the ROMUL soil organic matter dynamics model[J]. *Ecological Modelling*, 2013, 263: 109-118.
- [14] 赖晓明, 廖凯华, 朱青, 等. 基于Hydrus-1D模型的太湖流域农田系统水分渗漏和氮磷淋失特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(9): 1491-1498. LAI X M, LIAO K H, ZHU Q, et al. Feature analysis of soil water leakage and leaching of nitrogen and phosphorus in the typical farmland of Tai Hu Lake basin based on HYDRUS-1D model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(9): 1491-1498.
- [15] 王鹏宇, 刘婧然, 张廷强, 等. 基于DSSAT模型的广西地区甘蔗亏缺灌溉优化[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(6): 133-139. WANG P Y, LIU J R, ZHANG T Q, et al. Optimizing deficit irrigation for sugarcane in Guangxi Province using the DSSAT model[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(6): 133-139.
- [16] 刘影, 关小康, 杨明达, 等. 基于DSSAT模型对豫北地区夏玉米灌溉制度的优化模拟[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5348-5358. LIU Y, GUAN X K, YANG M D, et al. Optimizing the summer maize irrigation schedule in north Henan Province based on the DSSAT model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(14): 5348-5358.
- [17] 柯华东, 孔陈琛, 雷豪杰, 等. 基于DNDC模型的设施菜地 N_2O 减排潜力评估[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(8): 1269-1282. KE H D, KONG C C, LEI H J, et al. Assessment of the N_2O emission reduction potential in greenhouse vegetable fields based on the DNDC model[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(8): 1269-1282.
- [18] 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 CSAE*, 2014, 30(24): 54-66.
- [19] LIANG H, HU K, BATCHELOR W D, et al. An integrated soil-crop system model for water and nitrogen management in north China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 25755.
- [20] 刘建军, 王全九, 王卫华, 等. 利用Hydrus-1D反推土壤水力参数方法分析[J]. 世界科技研究与发展, 2010, 32(2): 173-175. LIU J J, WANG Q J, WANG W H, et al. Inverse solution soil hydraulic parameters and verification using Hydrus-1D model[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2010, 32(2): 173-175.
- [21] 聂春燕, 胡克林, 邵元海, 等. 基于支持向量机和神经网络的土壤水力学参数预测效果比较[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(6): 102-107. NIE C Y, HU K L, SHAO Y H, et al. Comparison of predicting results of soil hydraulic parameters by SVR and rosetta models[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2010, 15(6): 102-107.
- [22] 梁浩, 胡克林, 李保国. 基于PEST的土壤-作物系统模型参数优化及灵敏度分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 78-85. LIANG H, HU K L, LI B G. Parameter optimization and sensitivity analysis of soil-crop system model using PEST[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(3): 78-85.
- [23] YANG W, CLIFFORD D, MINASNY B. Mapping soil water retention curves via spatial Bayesian hierarchical models[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 524: 768-779.
- [24] 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 CSAE*, 2020, 36(5): 96-105.
- [25] KERSEBAUM K C. Modelling nitrogen dynamics in soil-crop systems with HERMES[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 77(1): 39-52.
- [26] LEGHARI S J, HU K, LIANG H, et al. Modeling water and nitrogen balance of different cropping systems in the North China Plain[J].

Agronomy, 2019, 9(11):696.

- [27] 宜丽宏, 王丽, 张孟妮, 等. 不同灌溉方式对冬小麦生长发育及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(10):14-19. YI L H, WANG L, ZHANG M N, et al. Effect of irrigation methods on growth and water use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(10):14-19.
- [28] 戴嘉璐, 李瑞平, 李聪聪, 等. 盐渍化灌区玉米施氮量阈值DNDC模型模拟[J]. 农业工程学报, 2021, 37(24):131-140. DAI J L, LI R P, LI C C, et al. Simulation of the threshold of maize nitrogen application using a DNDC model in salinized irrigation areas[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(24):131-140.
- [29] 王贵云, 张克强, 付莉, 等. RZWQM2模型模拟牛场肥水施用夏玉米土壤硝态氮迁移特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14):47-54. WANG G Y, ZHANG K Q, FU L, et al. Simulation of the soil nitrate nitrogen migration characteristics of summer maize fertilized with dairy manure and wastewater using RZWQM2[J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(14):47-54.
- [30] 胡春胜, 张玉铭, 秦树平, 等. 华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10):1501-1514. HU C S, ZHANG Y M, QIN S P, et al. Nitrogen processes and related environmental effects on agro-ecosystem in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(10):1501-1514.
- [31] 金修宽, 马茂亭, 赵同科, 等. 测墒补灌和施氮对冬小麦产量及水分、氮素利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(7):1334-1344. JIN X K, MA M T, ZHAO T K, et al. Effects of nitrogen application on yield, water and nitrogen use efficiency of winter wheat under supplemental irrigation based on measured soil moisture content[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(7):1334-1344.
- [32] 赵影星, 宋彤, 陈源泉, 等. 华北平原麦-玉年际轮作的土壤氮磷钾分布及淋洗研究[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(2):1-14. ZHAO Y X, SONG T, CHEN Y Q, et al. Distribution and leaching of soil nitrogen, phosphorus and potassium under wheat-maize interannual rotation patterns in North China Plain[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(2):1-14.
- [33] CHEN S, SUN C, WU W, et al. Water leakage and nitrate leaching characteristics in the winter wheat-summer maize rotation system in the North China Plain under different irrigation and fertilization management practices[J]. *Water*, 2017, 9(2):141.
- [34] KAMRAN M, YAN Z, AHMAD I, et al. Assessment of greenhouse gases emissions, global warming potential and net ecosystem economic benefits from wheat field with reduced irrigation and nitrogen management in an arid region of China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 341:108197.