

畦灌条件下不同水肥处理对麦田水氮运移的影响

汪顺生^{1,2}, 武闯¹, 柳腾飞¹, 张昊^{1*}, 李志利³

(1.华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450046; 2.黄河流域水资源高效利用省部共建协同创新中心, 郑州 450046; 3.山东省农业生态与资源保护总站, 济南 250023)

摘要:【目的】探究不同水肥梯度对冬小麦生育期内土壤水、氮分布的影响。【方法】在田间试验基础上利用 HYDRUS-1D 模型对畦灌麦田根区土壤水氮运移特性进行数值模拟。【结果】HYDRUS-1D 模型可较好的模拟根区土壤水氮分布, 模拟值与实测值的决定系数 R^2 大于 0.84, $RMSE$ 和 MAE 分别小于 0.807 和 0.695; 提高土壤水分控制下限, 冬小麦生育期内灌水次数增加, 灌水后 1~2 d 内表层土壤硝态氮量向下淋溶, 导致 0~20 cm 土层硝态氮量明显降低并随时间推移向 20~100 cm 土层运移, 而灌水对各土层铵态氮量无明显影响; 随施氮量的增加, 0~60 cm 土层中硝态氮、铵态氮量有明显提升, 其中 0~40 cm 土层中硝态氮量和 0~20 cm 铵态氮量较其他土层明显增加, 0~40 cm 土层土壤含水率随施氮量的增加而下降。【结论】HYDRUS-1D 模型可以较好地模拟不同水氮处理下土壤中水氮分布情况。

关键词: 氮素分布; 土壤含水率分布; 畦灌; 冬小麦; HYDRUS 模拟

中图分类号: S275.3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022234

OSID: 

汪顺生, 武闯, 柳腾飞, 等. 畦灌条件下不同水肥处理对麦田水氮运移的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 18-26.
WANG Shunsheng, WU Chuang, LIU Tengfei, et al. Effect of Irrigation and Fertilization on Water and Nitrogen Dynamics in Soil of Wheat Field under Border Irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 18-26.

0 引言

【研究意义】在作物生长过程中, 通常可以调控水、肥施用量实现作物高产。高水高肥是传统追求高产的方式^[1], 但作物对土壤中水肥吸收存在阈值, 当水肥施用量超过一定范围时增加水肥投入, 作物产量增加不明显, 甚至出现降低趋势^[2-3]; 过量肥料投入, 作物不能及时吸收, 导致土壤氮素积累^[4-5]。旱田中无机氮主要以硝态氮的形态存在, 而硝态氮不易被土壤胶粒吸附的特性决定了其易受灌溉和降雨影响特点。在受到较大降雨量或灌溉量的影响下, 硝态氮会被淋溶并逐渐脱离作物根系吸收范围, 向深层土壤运动, 导致深层土壤氮素积累, 甚至污染地下水^[6]。所以过量水肥投入不仅造成水肥浪费, 还会增加氮素向深层淋溶的风险, 进而产生农业面源污染^[7-8]。故研究不同水肥条件下田间土壤水氮分布特性对提高作物产量和减少农业面源污染有十分重要意义。【研究进展】近年来, 很多学者针对不同水肥条件下土壤水氮分布特性开展研究, 取得了大量的研究成果。袁浩等^[9]通过探究氮肥基追比对麦田土壤水氮分布及利用的影响发现小麦生育期内氮素追施量越多土壤表层铵态氮与

硝态氮量越高, 且随土层加深土壤铵态氮与硝态氮量均降低; 韩梦雪等^[10]通过开展大田试验探究施肥方式和施氮量对枸杞微孔陶瓷根灌土壤水氮分布的影响发现, 微孔陶瓷根灌水肥一体化实施减氮处理时会降低土壤硝态氮的量; 此外, 还有部分学者开展了不同条件下番茄^[11]、玉米^[12]、棉花^[13]、甘蓝^[14]等作物生育期内土壤水氮分布特性, 发现灌水量较大会引起硝态氮和铵态氮向深层土壤淋溶。此外, 追肥量不变的情况下, 增加追肥次数能显著降低作物生育期土壤中氮素量峰值和减少氮素向深层土层淋溶的风险^[15]。【切入点】以上有关水、氮分布的研究均采用大田试验, 大田试验由于试验周期长, 工作量大, 很难同时进行多组处理的试验。近年来, 有学者结合室内试验数据利用 HYDRUS 进行土壤水分分布研究^[16-18]。不同于室内试验, 大田试验的影响因素众多, 其中不同地区由于气候和土壤理化性质不同土壤水氮分布规律也不尽相同, 因此本文结合前人有关水氮分布试验结论, 利用 HYDRUS 进行黄河流域冬小麦不同水肥处理下土壤水氮运移模拟研究。【拟解决的关键问题】本文在常规底肥的基础上进行 2 次追肥, 通过控制灌水下限进行灌水, 开展畦灌条件下冬小麦不同水肥处理田间水氮运移试验, 并结合 HYDRUS-1D 模型分析不同水分控制下限和施氮量对小麦生育期土壤水氮分布的影响, 以期改进施肥灌溉管理和降低农业面源污染提供理论依据。

收稿日期: 2022-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52079051); 河南省高等学校重点科研项目 (22A570004)

作者简介: 汪顺生 (1978-), 男, 教授, 博士, 主要从事农业水土环境研究。E-mail: wangshunsheng609@163.com

通信作者: 张昊 (1989-), 男, 讲师, 博士, 主要从事节水灌溉原理及理论方面研究。E-mail: abelzhanghao@163.com

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020 年 10 月—2021 年 5 月在郑州华北水利水电大学龙子湖校区农业高效用水试验场进行 (34.78°N、113.76°E, 海拔 110 m), 试验场地位于

华中平原, 该气候属暖温带大陆性季风气候, 年均气温 14.5 °C、多年平均降水量 637.1 mm、平均日照时长 6.57 h/d、无霜期 220 d。试验场地地势平坦, 表层土壤为黏壤土。0~100 cm 土层平均土壤有机质、速效钾、速效磷、全氮、碱解氮质量分数分别为 870、104.4、11.8、539、45~60 mg/kg。

表 1 试验区 0~100 cm 土壤理化性质

Table 1 Physical parameters and mechanical composition of 0~100 cm soil in the test area

土层深度/cm	物理参数				粒径组成/%		
	体积质量/(g cm ⁻³)	田间持水率/(cm ³ cm ⁻³)	初始硝态氮量/(mg cm ⁻³)	初始铵态氮量/(mg cm ⁻³)	砂粒	壤粒	黏粒
0~20	1.35	32	0.036 8	0.010 4	0.17	0.64	0.19
20~40	1.56	34	0.020 4	0.003 3	0.11	0.65	0.24
40~60	1.41	34	0.013 2	0.001 8	0.09	0.65	0.26
60~80	1.36	37	0.012 9	0.001 3	0.08	0.65	0.27
80~100	1.40	37	0.010 5	0.000 9	0.05	0.61	0.34

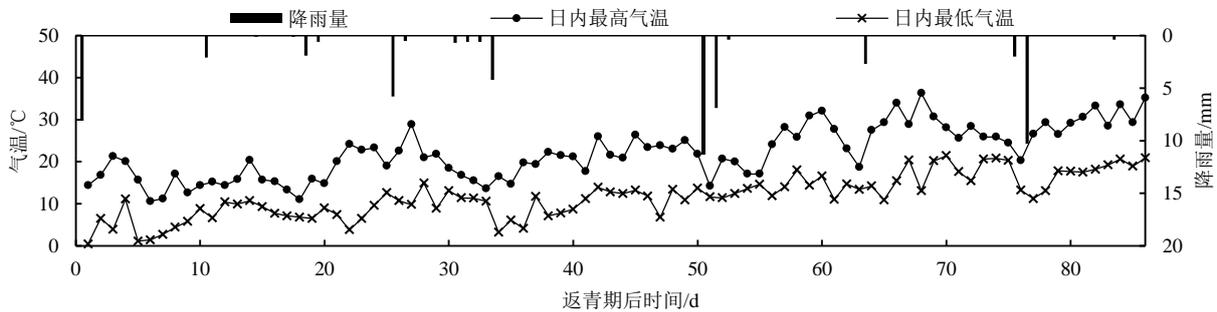


图 1 冬小麦生育期内温度和降雨量

Fig.1 Temperature and rainfall during the growing period of winter wheat

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计, 设置 3 种水分控制下限、3 种施氮水平, 共 9 个处理, 每个处理 3 次重复, 共 27 个小区。施氮处理 3 个水平分别为 120 kg/hm² (N₁)、220 kg/hm² (N₂)、320 kg/hm² (N₃)。每种施氮水平下设置 3 种水分控制下限, 分别为 60% θ_f (W₁)、70% θ_f (W₂) 和 80% θ_f (W₃) (θ_f 为田间持水率)。各处理施氮分为底肥和追肥, 其中底肥施氮量保持一致, 均为 67.5 kg/hm², 并按量进行 2 次追肥, 施肥时间为冬小麦返青期和抽穗期, 灌水时以各生育期内计划湿润层土壤水分标准为标准, 当各处理土壤含水率低于设计水分控制下限时进行灌水, 冬小麦灌水定额为 45 mm。试验水肥处理方案详见表 2。小麦种子采用济麦 22, 田间试验灌溉方式采用常规畦灌, 各试验小区区长 10 m、宽 1.5 m, 试验小区间设置宽 1.5 m 的保护区。

1.3 观测项目及方法

1.3.1 气象数据

气象数据由高精度自动气象站 (HM-NL08) 和国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/>) 获得。

1.3.2 土壤含水率

在冬小麦生育周年内, 采用 TRIME 管检测法分别在播前、收获后和关键生育期内每隔 5~10 d 测定 1 次土壤含水率。TRIME 管检测法在试验前期采用烘

干法进行率定。各处理土壤含水率测量深度为 100 cm, 每隔 20 cm 测量 1 次 (降雨和灌水前、后各加测 1 次)。

表 2 试验水肥处理方案

Table 2 Experimental water and fertilizer treatment scheme

处理	水分处理	灌水次数	灌水/量/mm	灌溉/定额/mm	施氮量/(kg hm ⁻²)	底肥 (全氮量)/(kg hm ⁻²)	追肥/(kg hm ⁻²)
							全氮量
W ₁ N ₁	60% θ_f				120		52.5
W ₁ N ₂	60% θ_f	4		180	220		152.5
W ₁ N ₃	60% θ_f				320		252.5
W ₂ N ₁	70% θ_f				120		52.5
W ₂ N ₂	70% θ_f	6	45	270	220	67.5	152.5
W ₂ N ₃	70% θ_f				320		252.5
W ₃ N ₁	80% θ_f				120		52.5
W ₃ N ₂	80% θ_f	9		405	220		152.5
W ₃ N ₃	80% θ_f				320		252.5

注 底肥为: 硫酸钾型三元复合肥 (N/15%、P/15%、K/15%)、追肥为: 尿素 (含 N 量 46.3%)、 θ_f 为田间持水率。

1.3.3 土壤氮素测量方法

硝态氮测量采用紫外分光光度法^[20-21], 铵态氮测量采用靛酚蓝比色法^[22]。

2 模型构建与验证

2.1 模型介绍

HYDRUS-1D 模型是一种用来模拟土壤水分运动和溶质运移有限元模型。本次试验模型模拟过程中

水分控制方程采用修改过的 Richards 方程, 溶质运移方程采用对流-弥散方程, 植株根系吸水采用 Feddes 模型计算, 土壤水力特性采用 V-G 模型计算。

2.2 定解条件

2.2.1 初始条件

模拟时间范围为 2021 年冬小麦返青期到成熟期 (3 月 1 日-5 月 25 日)。土壤含水率、土壤硝态氮量和铵态氮量初始值均为返青期初期 (2020 年 3 月 1 日) 实测值。

$$\begin{cases} \theta(x, z, t) = \theta_0(x, z) & (x \geq 0, z \geq 0, t = 0) \\ c(x, z, t) = c_0(x, z, t) & (x \geq 0, z \geq 0, t = 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ_0 为土壤初始含水率 (cm^3/cm^3); c_0 为初始硝态氮或铵态氮量 (mg/cm^3)

2.2.2 边界条件

1) 上边界条件

考虑到灌溉时的影响上边界条件视为变通量边界条件。上边界条件灌溉时视为通量边界条件, 计算式为:

$$\begin{cases} \theta(t) = \theta_s & t \geq 0 \\ -D(\theta) \left[\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial z} \right] + qc = q_s c_s(t) & t \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

非灌水时期, 上边界条件视为大气边界条件, 计算式为:

$$\begin{cases} -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) = 0 \\ D_{ij} \frac{\partial c}{\partial z} - q_i c = 0 \\ \left[-D \left(\frac{\partial c}{\partial z} \right) + \varepsilon c \right]_{z=0} = 0 \\ c_{z=0} < c_m \\ t \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

2) 下边界条件

研究区内地下水位较深, 不影响模型下边界, 因此模型下边界条件设置为自由出流边界条件, 计

算式为:

$$\text{水分边界条件: } \begin{cases} \theta_0 = \theta_{in} \\ \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{硝态氮和铵态氮边界条件: } \begin{cases} C(x, z, t) = c_b \\ z = 100 \text{ cm} \end{cases} \quad (5)$$

3) 其他边界条件

该模型其他边界均设置为 0 通量边界条件, 即水分、硝态氮和铵态氮通量均为 0。计算式为:

$$\begin{cases} D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \\ D(\theta) \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: t 为时间 (d); K 为非饱和导水率 (cm/d); D 为水力弥散系数 (cm^2/d); θ 为土壤体积含水率 (cm^3/cm^3); c_b 为地下水矿化度 (mg/cm^3); c_m 为土壤硝态氮或铵态氮饱和质量浓度 (mg/cm^3); ε 为蒸散发强度 (cm/d); c 为土壤硝态氮或铵态氮质量浓度 (mg/cm^3)。

2.3 模型参数及验证

2.3.1 参数率定

结合试验区实测土壤物理参数, 运用 Rosetta 模块进行模型的土壤水力和溶质运移参数率定。作物根系吸水采用 Feddes 提出的广义根系吸水模型计算^[23]。具体参数见表 3、表 4 和表 5。

2.3.2 模型验证

通过试验实测数据与模型模拟结果对比 (图 2) 可知, 土壤含水率、铵态氮量以及硝态氮量的模拟值与实测值具有较好的一致性, 各土层含水率、硝态氮和铵态氮量模拟值与实测值的决定系数 R^2 分别为 0.915 4、0.887 9、0.843 4, 因此, 模型率定后的水力参数和溶质运移参数具有较高的可靠性。

表 3 土壤水分运移参数

Table 3 Parameters of soil water transport

指标	土层深度/cm	残余含水率 $\theta_r/(\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3})$	饱和含水率 $\theta_s/(\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3})$	形状系数 n	进气吸力 α/m^{-1}	饱和导水率 $K_s/(\text{cm}^3 \text{ d}^{-1})$
初始值	0~20		0.37	0.023 8	1.485 6	7.90
	20~40		0.38	0.022 9	1.447 4	19.30
	40~60	0.032 4	0.39	0.021 3	1.466 2	17.50
	60~80		0.37	0.015 9	1.554 3	14.20
	80~100		0.38	0.018 7	1.634 5	8.50
率定值	0~20	0.037	0.32	0.025 3	1.479 3	8.95
	20~40	0.038	0.34	0.024 6	1.437 6	15.03
	40~60	0.041	0.34	0.023 1	1.456 3	16.23
	60~80	0.043	0.37	0.015 8	1.523 9	13.34
	80~100	0.042	0.37	0.019 3	1.627 1	7.45

表 4 溶质运移参数

Table 4 Solute transport parameters

指标	土层深度/cm	$\mu'_{w,urea}/d^{-1}$	$K_d/(cm^3 mg^{-1})$	$\mu_{w,NH_4^+}/d^{-1}$	$\mu'_{w,NH_4^+}/d^{-1}$	$\mu'_{s,NH_4^+}/d^{-1}$	$\mu_{w,NO_3^-}/d^{-1}$	$\mu'_{s,NO_3^-}/d^{-1}$	$\gamma_{w,NH_4^+}/(mg (cm^3 d)^{-1})$	$\gamma_{s,NH_4^+}/(mg (cm^3 d)^{-1})$
初始值	0~20	0.56	0.003 5	0.024	0.52	0.52	0.04	0.04	0.000 7	0.000 7
	20~40	0.55	0.003 5	0.005	0.38	0.38	0.03	0.03	0.000 5	0.000 5
	40~60	0.54	0.003 5	0.003	0.22	0.22	0.02	0.02	0.000 4	0.000 4
	60~80	0.58	0.003 5	0.002 8	0.17	0.17	0.02	0.02	0.000 2	0.000 2
	80~100	0.57	0.003 5	0.003 7	0.16	0.16	0.03	0.03	0.000 1	0.000 1
率定值	0~20	0.52	0.003 2	0.020	0.54	0.54	0.03	0.03	0.000 8	0.000 8
	20~40	0.51	0.003 5	0.008	0.35	0.35	0.02	0.02	0.000 7	0.000 7
	40~60	0.50	0.003 5	0.004	0.18	0.18	0.010 5	0.010 5	0.000 4	0.000 4
	60~80	0.48	0.003 2	0.003	0.15	0.15	0.01	0.01	0.000 1	0.000 1
	80~100	0.527	0.003 7	0.002	0.14	0.14	0.01	0.01	0	0

表 5 作物根部参数

Table 5 Parameters of crop root coefficient

P_0/cm	P_{opt}/cm	P_2H/cm	P_2L/cm	P_3/cm	$r2H/(cm d^{-1})$	$r2L/(cm d^{-1})$
0	-1	-500	-900	-16 000	0.5	0.1

注 $\mu'_{w,urea}$: 尿素水解一级动力学系数; K_d : 铵态氮吸附系数; μ_{w,NH_4^+} : 铵态氮液相一级动力学系数; μ'_{w,NH_4^+} 、 μ'_{s,NH_4^+} : 铵态氮液相和固相参与硝化反应的次一级动力学系数; μ_{w,NO_3^-} 、 μ_{s,NO_3^-} : 液相和固相反硝化反应系数; γ_{w,NH_4^+} 、 γ_{s,NH_4^+} : 氮素转化零级动力学系数(矿化和生物固持); P_0 : 根部吸水压力头; P_{opt} : 根部最大速率吸水压力头; P_2H : 极限压力头; P_2L : 蒸腾速率为 $r2L$ 时压力头; P_3 : 枯萎点压力头; $r2H$: 小时潜在蒸腾速率; $r2L$: 潜在蒸腾速率。

误差分析表明(表 6), 土壤各层含水率模拟值与实测值误差较小, 其中均方根误差(RMSE)为 0.807, 平均绝对误差(MAE)为 0.695, F 检验 P 为 0.772 7。硝态氮质量浓度模拟值与实测值对比的均方根误差(RMSE)为 0.387 1, 平均绝对误差(MAE)为 0.275 3, F 检验 P 为 0.281 9。由于铵态氮分布特性, 各土层铵态氮量模拟值与实测值均主要集中在 0~0.5 mg/cm^3 , 但二者误差较小, 其中均方根误差(RMSE)为 0.143 4,

平均绝对误差(MAE)为 0.042 7, F 检验 P 为 0.561 1。

表 6 模拟结果与实测值误差分析

Table 6 Error analysis of simulation results and measured values

深度	RMSE	MAE	P	R^2
含水率	0.807	0.695	0.772 7	0.915 4
硝态氮	0.387 1	0.275 3	0.281 9	0.887 9
铵态氮	0.143 4	0.042 7	0.561 1	0.843 4

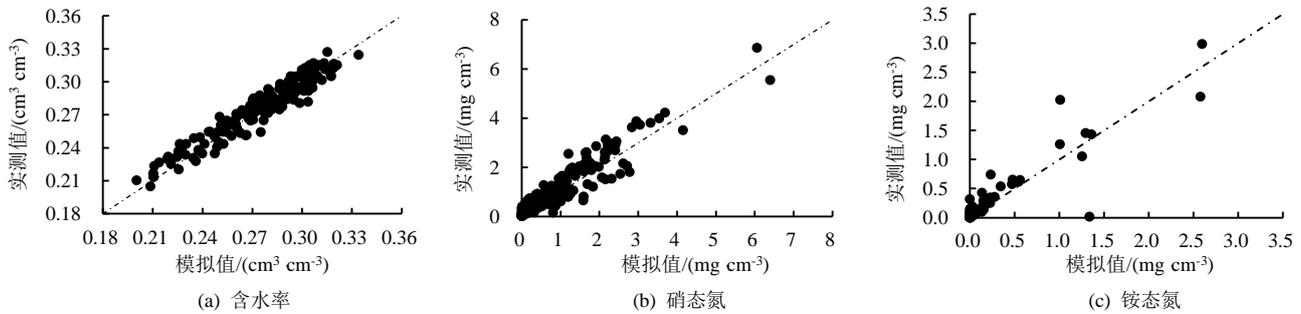


图 2 试验实测结果与模拟值对比

Fig.2 Comparison between measured results and simulated values

3 模型应用

利用验证过的 HYDRUS-1D 模型参数对试验区畦灌冬小麦返青期到成熟期 0~100 cm 土层中含水率、硝态氮和铵态氮分布情况进行模拟。

3.1 水分运移模拟

冬小麦返青期到成熟期 0~100 cm 土层含水率模拟结果如图 3 所示。由图 3 可知, 不同水肥处理下不同土层土壤含水率以及生育期灌水次数存在较大差异。

相同施氮条件下, 随着水分控制下限的提高, 冬小麦生育期内灌水次数均增加, 与 W_1 处理下冬小麦从返青期到成熟期 4 次灌水相比, W_2 、 W_3 处理下灌

水次数分别增加了 2、5 次, W_2 、 W_3 的灌水定额也从 W_1 的 180 mm 分别增加到 270 mm 和 405 mm。不同水肥处理下 0~60 cm 土层含水率波动频率和幅度远大于 60~100 cm。

相同水分控制下限下, 不同施氮量 0~100 cm 土壤含水率模拟结果也不尽相同, 其中与 N_1 处理下 0~100 cm 土层含水率相比, N_2 、 N_3 处理下 0~40 cm 土层含水率峰值分别降低了 8.49% 和 13.81%, 40~100 cm 土层含水率分别减低 2.038% 和 1.71%, 由此可知随施氮量增加 0~40 cm 土层土壤含水率表现出降低趋势, 40~100 cm 土层土壤含水率变化不明显。

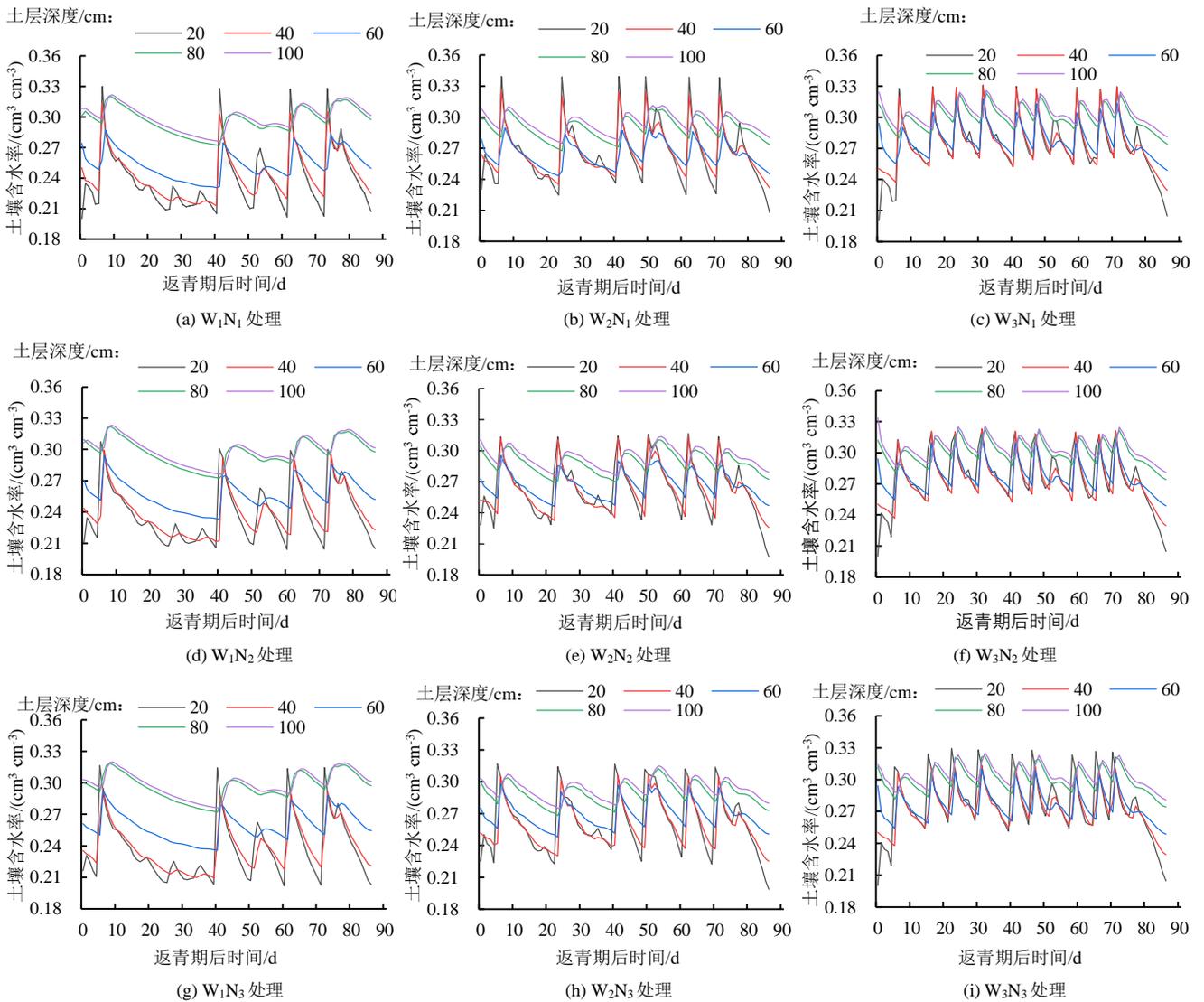


图3 畦灌冬小麦返青期至成熟期土壤含水率

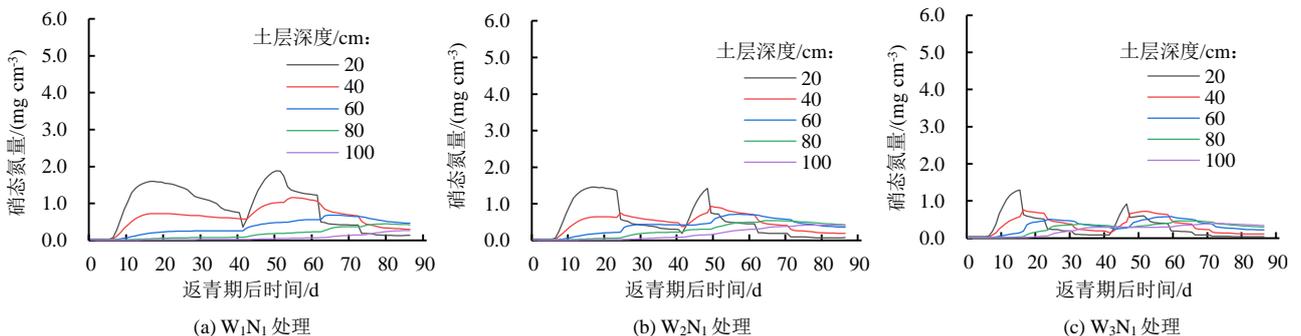
Fig.3 Soil moisture content from green to mature stage of winter wheat under border irrigation

3.2 硝态氮运移模拟

图4为不同水肥处理下冬小麦返青期到成熟期0~100 cm土壤硝态氮量模拟变化情况。由图4可知，追肥后10 d左右不同水肥条件下的硝态氮量均达到最大值，随着时间的推移其量逐渐降低，且每次灌水处理后均会导致0~20 cm硝态氮量大幅降低，而40~100 cm硝态氮量呈增加趋势。

不同水肥处理条件下土壤硝态氮质量浓度变化情况不同。相同水分控制条件下，随着施氮量的增加，0~100 cm不同土层硝态氮量均有不同程度增加，就

追肥后硝态氮量峰值而言，N₁、N₂、N₃处理分别为1.299~1.881、2.45~3.696、3.93~4.46 mg/cm³，与N₁处理下相比，N₂、N₃处理追肥后硝态氮量峰值平均分别增加88.6%~96.5%、137.1%~205.5%。相同施氮量条件下，随着水分控制下限的提高，0~100 cm土层硝态氮量呈降低趋势，就2次追肥后0~20 cm土层硝态氮量峰值而言，W₁、W₂、W₃处理分别为1.598~5.94、1.456~4.751、1.299~2.015 mg/cm³，与W₁处理下相比，W₂、W₃处理追肥后硝态氮量峰值平均分别降低了8.88%~20.02%、18.71%~66.08%。



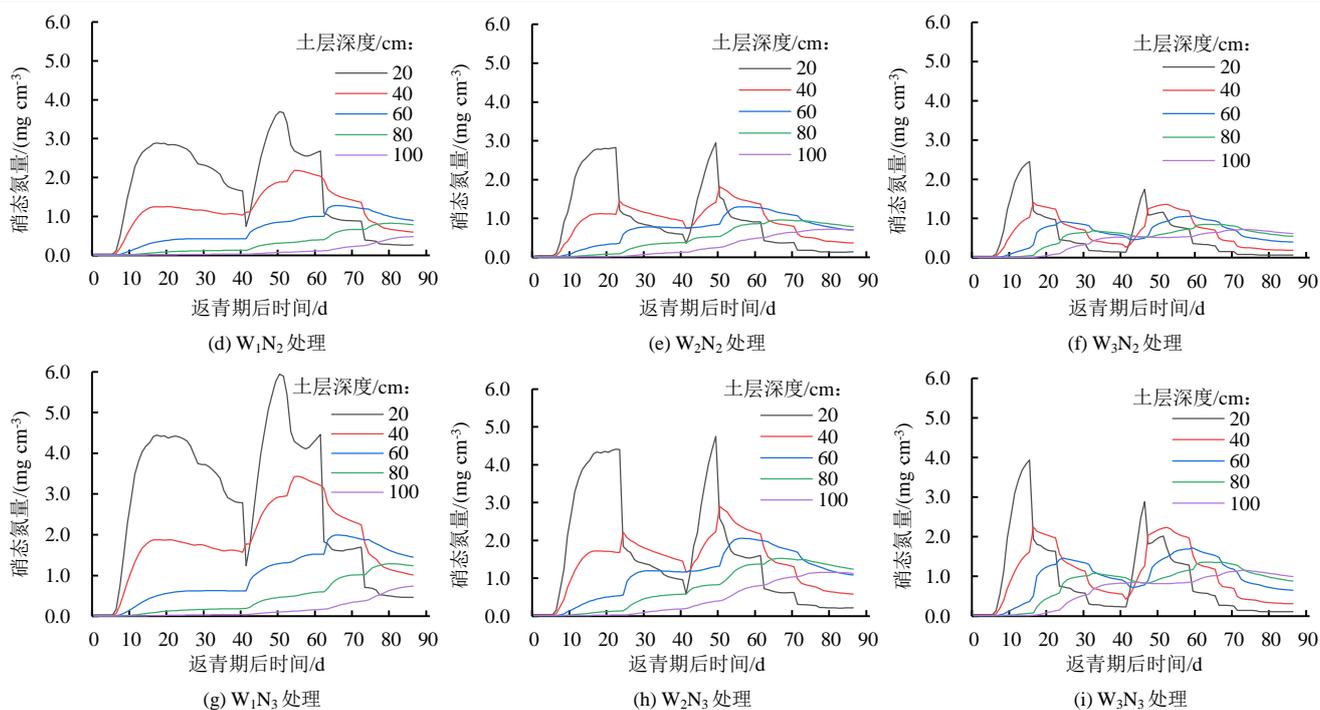


图4 畦灌冬小麦返青期至成熟期土壤硝态氮变化

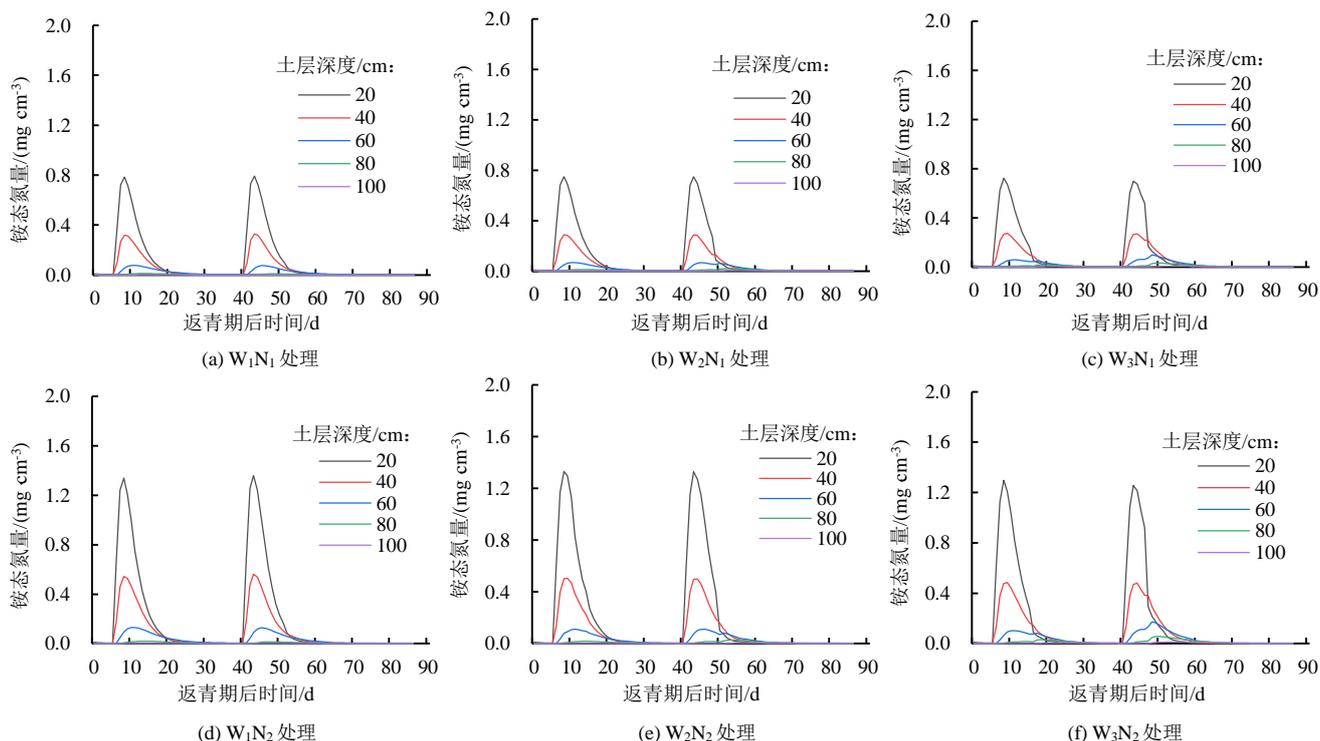
Fig.4 Variation soil nitrate nitrogen content in winter wheat from green to mature stage under border irrigation

3.3 铵态氮运移模拟

冬小麦返青期至成熟期土壤铵态氮量模拟结果如图5所示。各处理追肥后4~5 d 铵态氮量均达到最大值, 然后逐渐降低并在追肥后15 d左右回落至初始量附近, 说明尿素在本试验条件下7 d内可以基本完成水解过程, 然后在挥发、作物吸收以及硝化反应的共同作用下铵态氮基本在追肥后20 d内消耗殆尽。

通过对比不同施氮量条件下追肥前后铵态氮量峰值可以发现, 随着施氮量的增加, 0~60 cm各土层铵态氮量均得到明显提升, 其中0~20 cm土层铵态氮

量增加最为显著。故以0~20 cm土层为例, N_1 、 N_2 、 N_3 处理追肥后铵态氮峰值范围分别为0.7~0.8、1.25~1.36、1.94~2.01 mg/cm^3 , N_2 、 N_3 处理施肥后0~20 cm铵态氮量与 N_1 处理相比分别增加70%~78.57%、177%~151%。同时, 在 N_2 处理下, 随着水分控制下限的增加, W_1 、 W_2 、 W_3 处理追肥后0~20 cm土层铵态氮量峰值分别为1.338、1.331、1.296 mg/cm^3 。由于铵态氮的吸附性, 土壤中铵态氮不易受水分运动的影响, 故水分控制下限改变对冬小麦施肥前后铵态氮分布影响不明显。



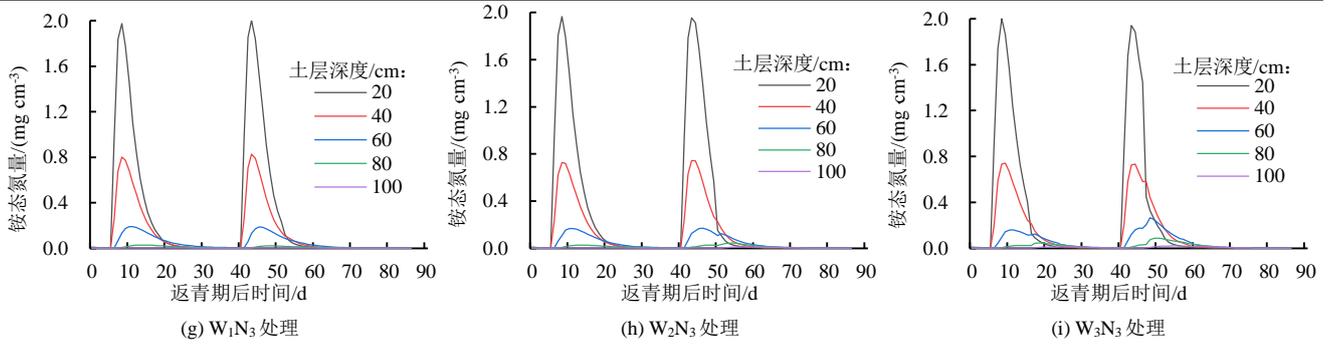


图5 畦灌冬小麦返青期至成熟期土壤铵态氮量变化

Fig.5 Variation soil ammonium nitrogen content in winter wheat from green to mature stage under border irrigation

4 讨论

运用 HYDRUS-1D 对畦灌条件下不同水肥处理冬小麦返青期到成熟期土壤水氮分布进行模拟,通过试验实测数据与模型模拟结果对比发现,各土层含水率、硝态氮和铵态氮量模拟值与实测值的决定系数 R^2 均大于 0.84。因此土壤含水率、铵态氮量以及硝态氮量的模型模拟值与田间试验实测值具有较好的一致性,且土壤含水率的模拟效果要优于土壤硝态氮和铵态氮的模拟效果,这与刘秀花等^[24]研究结果一致。这是由于溶质运移过程中易受到土壤中温度、水分分布、正负离子以及各种酶活性的影响,运移过程比水分运动更复杂。

土壤水分在土层中分布主要受土壤结构、灌溉方式、灌溉定额和灌溉次数等因素的影响^[25-26]。施氮量的增加,会促进土壤表层结构发生变化,而且还会改变土壤基质势,进而会对土壤中水分分布产生影响^[27]。本试验通过对比各处理 0~100 cm 土层含水率变化发现:随着施氮量的增加,0~40 cm 土层含水率均发生了不同程度降低,40~100 cm 土层土壤含水率无明显变化,其原因可能如下:①在一定施氮量范围内随着施氮量的增加土壤中的基质势增加,导致土壤 0~40 cm 土壤中水势增加,促进土壤水分向深层土壤运动;②随着施氮量的增加促进了植物根系生长,增加了植物耗水量,进而导致小麦 0~40 cm 土层土壤含水率降低。综合冬小麦返青期到成熟期土壤含水率分布规律来看,与吴现兵等^[14]结论一致,水分控制下限的提高,能显著增加返青期到成熟期的灌水次数,灌水主要集中在灌浆期前后。同时灌水后 0~60 cm 土层含水率出现明显的增加,而 60 cm 以下土层变化不大,说明 0~60 cm 土层为活跃层,受降雨、蒸发量以及作物吸收的影响大,这与孙宁霞等^[28]结论一致。

追肥后土壤中氮素运动情况受土壤水分分布影响极大,合理的水肥处理可以显著减少土壤中氮素的深层渗漏^[29]。有学者认为不同土层土壤中硝态氮量与施氮量成正比,即施氮量的增加能显著提高土壤各层

硝态氮量^[29-30];本文研究结果与之略有不同,本文研究发现增加施氮量能显著增加 0~60 cm 土层中硝态氮量,但对 60~100 cm 土层硝态氮量影响不大,这主要是因为前者是室内试验。未综合考虑作物生长、气候影响。由于本试验分 2 次追肥,这与陈琳^[31]仅 1 次追肥的研究结果相比,追肥后 0~60 cm 土层硝态氮量峰值降低明显,同时降低了硝态氮向深层土壤淋溶的风险。

与硝态氮分布不同,铵态氮带正电荷,容易吸附于带负电荷土壤胶粒上,因此铵态氮更不容易受到淋溶的影响^[32]。本研究表明,冬小麦返青期到成熟期,随着土壤水分控制下限从 60% θ_f 增加到 80% θ_f ,0~20 cm 各层土壤中铵态氮量有降低趋势但变化均不大,大于 20 cm 土层土壤中铵态氮量几乎无变化,因此在一定范围内提高土壤水分控制下限对铵态氮在 0~100 cm 土层中分布影响不大。通过对比施氮量从 120 kg/hm² 增加到 320 kg/hm² 冬小麦返青期—成熟期内铵态氮分布规律发现,施氮量的增加能显著提高 0~20 cm 土壤中铵态氮量,大于 20 cm 土层铵态氮量变化不大。

5 结论

1) 冬小麦返青期到成熟期 0~100 cm 土层中含水率、硝态氮和铵态氮量模拟结果和实测数据均有较好的一致性, HYDRUS-1D 模型适用于该区域不同水肥处理下的水、氮运移模拟研究。

2) 0~60 cm 土层为土壤含水率活跃层,受灌水和降雨影响敏感。

3) 试验区冬小麦返青期到成熟期内,每次追肥后 5 d 左右铵态氮量达到最大值,施肥后 20 d 左右铵态氮量回落至追肥前水平,随施氮水平的增加 0~20 cm 土层铵态氮量明显增加,提高水分控制下限对铵态氮分布影响不明显。

4) 硝态氮不仅受施氮量的影响显著,受水分控制下限的影响同样显著。冬小麦返青期到成熟期内硝态氮分布表现规律为:施氮量增加对 0~100 cm 土层

内硝态氮量有促进作用；水分控制下限的提高会导致表层（0~20 cm）土壤中硝态氮向深层淋溶，但对追肥后硝态氮峰值影响不明显。

参考文献：

- [1] 陈静. 华北小麦-玉米滴灌施肥下水氮运移和 N_2O 排放研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
CHEN Jing. Water-Nitrogen dynamics and N_2O emissions from wheat-maize rotation fields under drip fertigation in North China Plain[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [2] 岳文俊, 张富仓, 李志军, 等. 水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 88-96, 119.
YUE Wenjun, ZHANG Fucang, LI Zhijun, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen uptake and soil nitrate nitrogen accumulation in melon[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 88-96, 119.
- [3] 孟兆江, 刘安能, 吴海卿, 等. 黄淮豫东平原冬小麦节水高产水肥耦合数学模型研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(1): 91-95.
MENG Zhaojiang, LIU Anneng, WU Haiqing, et al. Mathematical model of water fertilizer interaction for water saving and high yield winter wheat in east area of Henan Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1998, 14(1): 91-95.
- [4] 刘洋, 李金山, 孙秀路, 等. 液施肥不同畦灌方式对土壤水氮分布及夏玉米生长性状影响[J]. 节水灌溉, 2019(11): 27-32.
LIU Yang, LI Jinshan, SUN Xiulu, et al. Effects of different furrow irrigation methods with liquid fertilization on soil water and nitrogen distribution and growth characteristics of summer maize[J]. Water Saving Irrigation, 2019(11): 27-32.
- [5] 雒文鹤, 师祖姣, 王旭敏, 等. 节水减氮对土壤硝态氮分布和冬小麦水氮利用效率的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(6): 924-936.
LUO Wenhe, SHI Zujiao, WANG Xumin, et al. Effects of water saving and nitrogen reduction on soil nitrate nitrogen distribution, water and nitrogen use efficiencies of winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(6): 924-936.
- [6] 王小燕, 褚鹏飞, 于振文. 水氮互作对小麦土壤硝态氮运移及水、氮利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 992-1 002.
WANG Xiaoyan, CHU Pengfei, YU Zhenwen. Effects of irrigation and nitrogen interaction on soil NO_3^- -N transport, nitrogen use efficiency and water use efficiency in wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(5): 992-1 002.
- [7] 谷晓博, 李援农, 黄鹏, 等. 水氮互作对冬油菜氮素吸收和土壤硝态氮分布的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(7): 1 283-1 293.
GU Xiaobo, LI Yuannong, HUANG Peng, et al. Effects of irrigation and nitrogen coupling on nitrogen absorption and soil nitrate content of winter oilseed rape[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(7): 1 283-1 293.
- [8] 李静, 张富仓, 江明杰, 等. 水氮供应对温室黄瓜氮素吸收及土壤硝态氮分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3): 52-58.
LI Jing, ZHANG Fucang, JIANG Mingjie, et al. Effects of water and nitrogen supply on nitrogen uptake of greenhouse cucumber and nitrate nitrogen distribution in soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(3): 52-58.
- [9] 袁浩, 王继唯, 李贻虹, 等. 氮肥基追比对小麦产量、土壤水氮分布及利用的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 299-307.
YUAN Hao, WANG Jiwei, LI Yunhong, et al. Effects of the ratio of base-topdressing nitrogen on wheat yield, distribution and utilization of water and nitrogen in soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 299-307.
- [10] 韩梦雪, 张林. 施肥方式和施氮量对枸杞微孔陶瓷根灌土壤水氮分布的影响[J]. 节水灌溉, 2021(1): 60-64.
HAN Mengxue, ZHANG Lin. Effects of fertilization methods and nitrogen content application on soil water and nitrogen distribution under microporous ceramic root irrigation of lycium barbarum[J]. Water Saving Irrigation, 2021(1): 60-64.
- [11] 张新燕, 王浩翔, 牛文全. 水氮供应对温室滴灌番茄水氮分布及利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 106-115.
ZHANG Xinyan, WANG Haoxiang, NIU Wenquan. Effects of water and N-fertilizer supplies on the distribution and use efficiency of water and nitrogen of drip-irrigated tomato in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 106-115.
- [12] 王秀康, 邢英英, 李占斌. 覆膜和施氮肥对玉米产量和根层土壤硝态氮分布和去向的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3 944-3 957.
WANG Xiukang, XING Yingying, LI Zhanbin. Effect of mulching and nitrogen fertilizer on maize yield, distribution and fate of nitrogen in root layer[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(20): 3 944-3 957.
- [13] 忠智博, 翟国亮, 邓忠, 等. 水氮施量对膜下滴灌棉花生长及水氮分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 67-76.
ZHONG Zhibo, ZHAI Guoliang, DENG Zhong, et al. The impact of N application and drip irrigation amount on cotton growth and water and N distributions in soil mulched with film[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 67-76.
- [14] 吴现兵, 白美健, 李益农, 等. 水肥耦合对膜下滴灌甘蓝根系生长和土壤水氮分布的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 110-119.
WU Xianbing, BAI Meijian, LI Yinong, et al. Effect of water and fertilizer coupling on root growth, soil water and nitrogen distribution of cabbage with drip irrigation under mulch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(17): 110-119.
- [15] 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 等. 氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4 538-4 547.
FU Peijiao, JI Hengkuan, HE Qiuxiang, et al. Effects of nitrogen fertilizer application times and nitrification inhibitor on N_2O emission from potted maize[J]. Environmental Science, 2021, 42(9): 4 538-4 547.
- [16] 尚世龙. 滴灌施肥双点源交汇土壤水氮分布特征及数值模拟研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
SHANG Shilong. Soil water and nitrogen distribution characteristics and simulation under double-point intersection of drip fertilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [17] 张建君. 滴灌施肥灌溉土壤水氮分布规律的试验研究及数学模拟[D]. 北京: 中国农业科学院, 2002.
ZHANG Jianjun. Experimental investigation and simulation on water and nitrogen distributions as affected by fertigation from A point source[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2002.
- [18] 陈春来. 宽垄沟灌土壤肥液入渗水氮运移特性及数值模拟研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
CHEN Chunlai. Study on water and nitrogen transport characteristics and numerical simulation of soil fertilizer infiltration under wide ridge furrow irrigation[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021.
- [19] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
LIU Guangsong. Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles[M]. Beijing: Standards Press of China, 1996.
- [20] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 土壤硝态氮的测定 紫外分光光度法: GB/T 32737—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [21] 宋歌, 孙波, 教剑英. 测定土壤硝态氮的紫外分光光度法与其他方法的比较[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 288-293.
SONG Ge, SUN Bo, JIAO Jianying. Comparison between ultraviolet spectrophotometry and other methods in determination of soil nitrate-N[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(2): 288-293.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU Rukun. Methods for Soil agrochemical Analysis[M]. Beijing: China

- Agriculture Sciencetech Press, 2000.
- [23] 罗毅, 于强, 欧阳竹, 等. 利用精确的田间实验资料对几个常用根系吸水模型的评价与改进[J]. 水利学报, 2000(4): 73-81.
LUO Yi, YU Qiang, OUYANG Zhu, et al. The evaluation of water uptake models by using precise field observation data[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(4): 73-81.
- [24] 刘秀花, 卢杰, 齐燕, 等. 水氮耦合对作物氮素吸收利用与迁移转化的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 1-12.
LIU Xiuhua, LU Jie, QI Yan, et al. The effects of water-nitrogen coupling on uptake and transformation of nitrogen in soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 1-12.
- [25] 赵经华, 杨庭瑞, 胡文军, 等. 水氮互作对滴灌小麦土壤硝态氮运移、氮平衡及水氮利用效率的影响[J]. 中国农村水利水电, 2021(4): 141-149.
ZHAO Jinghua, YANG Tingrui, HU Wenjun, et al. Effects of water and nitrogen interaction on nitrate transport, nitrogen balance and water and nitrogen use efficiency in drip irrigation wheat soil[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(4): 141-149.
- [26] 陈琳, 费良军, 刘利华, 等. 土壤初始含水率对浑水膜孔灌肥液自由入渗水氮运移特性影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 58-66.
CHEN Lin, FEI Liangjun, LIU Lihua, et al. Effects of soil initial water content on transport characteristics of free infiltration water and nitrogen under film hole irrigation with muddy water[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 58-66.
- [27] 康守旋, 费良军, 姜瑞瑞, 等. 肥液浓度对浑水膜孔灌多点源入渗水氮运移的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 156-161.
KANG Shouxuan, FEI Liangjun, JIANG Ruirui, et al. Effect of fertilizer concentration on water and nitrogen migration in multi-point source infiltration of muddy water film hole irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 156-161.
- [28] 孙宁霞, 马英, 胡晓农, 等. 基于同位素示踪的夏玉米土壤水分动态变化规律[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(S1): 256-260.
SUN Ningxia, MA Ying, HU Xiaonong, et al. Soil moisture dynamic variation law of summer maize based on isotopic tracing[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(S1): 256-260.
- [29] 李若楠, 武雪萍, 张彦才, 等. 节水减氮对温室土壤硝态氮与氮素平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(4): 695-704.
LI Ruonan, WU Xueping, ZHANG Yancai, et al. Effects of reduced application of nitrogen and irrigation on soil nitrate nitrogen content and nitrogen balance in greenhouse production[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(4): 695-704.
- [30] 栗博. 宽垄沟灌土壤水分运动与氮素运移试验及模拟研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
LI Bo. Study on simulation and experiment of irrigation in soil water and nitrogen transport under the wide ridge furrow[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019.
- [31] 陈琳. 膜孔灌土壤水氮运移转化特性及作物耦合效应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
CHEN Lin. Study on the soil water-nitrogen transport and transformation characteristics and crop coupling effects[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [32] 隋娟, 王建东, 龚时宏, 等. 滴灌条件下水肥耦合对农田水氮分布及运移规律的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(1): 1-6, 29.
SUI Juan, WANG Jiandong, GONG Shihong, et al. Coupling effects of water-fertilizer on soil water distribution and soil nitrogen under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(1): 1-6, 29.

Effect of Irrigation and Fertilization on Water and Nitrogen Dynamics in Soil of Wheat Field under Border Irrigation

WANG Shunsheng^{1,2}, WU Chuang¹, LIU Tengfei¹, ZHANG Hao^{1*}, LI Zhili³

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2. Provincial and Ministry Co-construction Collaborative Innovation Center for the Efficient Utilization of Water Resources,

Zhengzhou 450046, China; 3. Rural Energy and Environment Agency of Shandong, Ji'nan 250023, China)

Abstract: 【Objective】Bioavailable water and nutrients to crops depend not only on root architecture but also on how water and nitrogen fertilizer are applied. In this paper, we investigated the effects of irrigation and fertilization on water and nitrogen dynamics in soil of a winter wheat field under border irrigation. 【Method】The experiment was conducted in a wheat field in Henan province, where changes in water and nitrogen in soil under border irrigation were measured. These data were used to validate the HYDRUS-1D model, and the validated model was then used to elucidate how a change in irrigation and fertilization modulates water and nitrogen dynamics in the root zone of wheat under border irrigation. 【Result】The HYDRUS-1D model simulated water and nitrogen dynamics in the root zone well. The coefficient of determination (R^2) between the simulated and measured data was greater than 0.84, with its associated *RMSE* and *MAE* less than 0.807 and 0.695, respectively. Increasing the low critical soil water content for resuming irrigation moved nitrate in the top 0~20 cm soil layer to 20~100 cm soil layer 1~2 days after the irrigation, but it did not show significant effects on ammonium dynamics in the soil. Increasing nitrogen fertilization increased nitrate and ammonium nitrogen in the 0~60 cm soil layer significantly, especially in the 0~40 cm soil, but reduced water content in the 0~40 cm soil layer. 【Conclusion】The HYDRUS-1D model is able to simulate water and nitrogen movement in soil under border irrigation, and the simulated results can help to improve irrigation and fertilization management for wheat production in the studied and similar areas.

Key words: nitrogen distribution; distribution of soil water content; border irrigation; winter wheat; HYDRUS simulation

责任编辑: 白芳芳