文章编号: 1672 - 3317 (2023) 04 - 0057 - 10

# 基于 HYDRUS-2D 模型的滴灌土壤水氮动态模拟研究

崔赫钊<sup>1</sup>,周青云<sup>1\*</sup>,韩娜娜<sup>1</sup>,张宝忠<sup>2</sup> (1.天津农学院,天津 300392; 2.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100083)

摘 要: 【目的】探究河套灌区滴灌条件下玉米各生育期土壤水氮变化规律及不同灌水量对土壤硝态氮累积量的影响。【方法】通过田间试验,设置高灌水量(D1:76mm)处理和低灌水量(D2:60mm)处理,分析土壤含水率和土壤氮素(铵态氮和硝态氮)的动态变化规律,利用 HYDRUS-2D 模型进行模拟验证与预测。【结果】各处理灌水后土壤含水率呈增加趋势;而土壤铵态氮和硝态氮在灌水施肥后迅速升高,随后下降,D1处理和D2处理不同生育期 0~10 cm 土层铵态氮量和硝态氮量的平均降幅分别为 60.0%~62.0%和 40.0%~46.7%。拔节期、抽雄期和灌浆期各土层灌水后 D1 处理相比 D2 处理的土壤含水率分别增加了 5.9%、8.0%和 6.7%,而土壤铵态氮量和硝态氮量随着土层深度的增加而降低。不同生育期硝态氮累积量为拔节期>抽雄期>灌浆期,随着生育期的推进,硝态氮累积量呈降低趋势。土壤含水率及氮素模拟值与实测值的吻合度较高, R<sup>2</sup>、RMSE 和 d 均介于合理范围内。【结论】玉米生育期 120 mm 的灌溉定额可有效降低 0~60 cm 土层的硝态氮累积量,可降低硝态氮在 60~100 cm 土层的积累量。该研究可为当地灌区合理的水肥调控及灌溉制度的制定提供参考。

关键词:土壤含水率; 铵态氮; 硝态氮; 数值模拟; HYDRUS-2D 模型
 中图分类号: S27
 文献标志码: A
 doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022361
 OSID:



崔赫钊,周青云,韩娜娜,等.基于 HYDRUS-2D 模型的滴灌土壤水氮动态模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(4): 57-66. CUI Hezhao, ZHOU Qingyun, HAN Nana, et al. Simulating Water and Nitrogen Dynamics in Drip-irrigated Soil Based on the HYDRUS-2D Model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(4): 57-66.

### 0 引 言

【研究意义】全球平均氮回收率为 59%, 近 41%的氮在生态系统中损失<sup>[1]</sup>。预计到 2030 年,全 球化肥总消费量将增加 32%,其中氮、磷、钾肥的 消费量将同比增长 37%、25.8%和 21%<sup>[2]</sup>。我国主要 粮食作物的氮肥平均利用率不足 30%,低于世界平 均水平,提高农田水肥利用效率迫在眉睫。灌区施 肥前,一方面需要考虑肥料施用的安全性,另一方 面也要警惕灌水导致的氮淋失风险。土壤水分运动 是养分运移的基础,影响氮素在各土壤剖面的分布, 不同灌水量对土壤养分的淋洗作用也不尽相同<sup>[3]</sup>。在 半干旱地区, 灌水量比施肥量的影响程度更大, 低 灌水量会加速氮挥发,而高灌水量易使氮素向深层 土壤运移。综上所述,合理灌溉与肥料高效利用对 于制定安全高效的水肥调控策略颇为重要。【研究进 展】相比于传统的田间试验, HYDRUS-2D 模型操 作更为便捷,应用更为广泛,在土壤水<sup>[4]</sup>、盐<sup>[5]</sup>、

热<sup>[6]</sup>和药<sup>[7]</sup>的模拟验证及模型应用方面效果显著。 Shafeeq 等<sup>[8]</sup>认为 HYDRUS-2D 模型能够模拟土壤水 分与氮素的平衡,并通过模型优化对土壤剖面氮素 变化进行了逐日分析。Azad 等<sup>[9]</sup>利用 HYDRUS-2D 模型模拟了土壤水氮运移过程,提供了优化方案以 最大限度地提高作物对氮素的吸收程度,并减少深 层土壤的氮素损失。【切入点】在河套灌区,以往 研究主要通过田间试验分析氮素淋失量[10]、水肥耦 合<sup>[11]</sup>、水氮利用效率<sup>[12]</sup>与作物产量的关系,而利用 模型进行水氮模拟验证并设置情景预测灌区水氮运 移规律的研究却鲜有报道。【拟解决的关键问题】为 探讨不同灌水定额对滴灌条件下土壤水氮运移动态 变化的影响,本研究利用 HYDRUS-2D 模型对田间 试验测得的玉米各生育期土壤含水率、铵态氮和硝 态氮进行了模拟验证,分析玉米不同生育期及灌水 前后不同土壤剖面的水氮分布变化,在此基础上设 置不同的灌水定额假设情景,对土壤水氮分布进行 模拟预测,以探究更为高效的灌溉制度。

1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市杭锦后旗 县,地处河套灌区,属温带大陆性气候,种植作物

收稿日期: 2022-06-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51609170);国家重点研发计划项目(2019YFC0409203);天津市研究生科研创新项目(2021YJSS135) 作者简介:崔赫钊(1997-),男,天津人。硕士研究生,主要从事节水灌

溉理论与新技术研究。E-mail: 1455336083@qq.com 通信作者:周青云(1980-),女,山西河津人。教授,主要从事节水灌溉

通信1F看: 周貢云(1980-),女,田四河洋八。教授,王安从事节水灌溉 理论与新技术研究。E-mail: zhouqyand@126.com

包括向日葵、小麦及玉米等。由于土壤母质含盐量 较大,且土壤存在盐渍化等障碍因素,严重制约当地 农业发展。灌区年平均气温为 3.8~7.6 ℃,降水量少 而分布不均,多集中于每年的 6-9 月,年平均降水 量为 130~185 mm, 年平均蒸发量为 2030~2380 mm。 玉米生育期降水量及参考作物蒸散量如图1所示。



图 1 2020 年试验区玉米生育期降水量及参考作物蒸散量

Fig.1 Precipitation and evapotranspiration during maize growth period in 2020

#### 1.2 试验设计

供试作物为玉米,品种为"金田8号",于 2020年5月20日播种,在拔节期、抽雄期和灌浆期 (6月21日、7月8日、8月4日)共灌水3次,于 每次灌水前施肥,第1次施肥为磷酸二铵和钾肥, 后 2 次追肥为尿素, 施肥量为 75 kg/hm<sup>2</sup>, 于 2020 年 10 月 3 日收获。试验小区面积为 244.8 m<sup>2</sup>,试验 设计 2 种灌水水平,分别为高灌水量和低灌水量, 灌水方式为膜下滴灌,覆膜方式为1膜1管2行, 膜宽 80 cm; 滴灌带间距为 60 cm, 滴头间距为 30 cm, 滴灌带布置在 1/2 行距处, 滴头流量为 1.35 L/h。 试验设计及灌水定额如表1所示。

表1 试验设计及灌水定额

Table1 Experimental design and irrigation quota in the study area

お平田	<b>谦</b> 业 古才	海水旱	灌	水定额/r	溥孤宁痴/mm		
处理	准小刀式	准小里	里 0621 0708		0804	准矾足积加加	
D1	膜下滴灌	高灌水量	20	28	28	76	
D2	膜下滴灌	低灌水量	16	22	22	60	

### 1.3 测试指标及方法

考虑灌溉周期、降水历时和地下水位等因素的 影响,在拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟前期每隔 10~15 d取样,灌水前后加测,全生育期共取样7次。 土壤纵向取土深度为0~10、10~30、30~60、60~80、 80~100 cm。所测指标包括土壤含水率、铵态氮及硝 态氮。采用烘干法测定土壤体积含水率;土壤铵态 氮和硝态氮采用2 mol/L的氯化钾溶液进行浸提,取5 g土样放入锥形瓶,加入50 mL的氯化钾溶液,放入 振荡器后过滤,采用流动分析仪测定滤液中的硝态 氮量和铵态氮量。

土壤硝态氮累积量采用等质量法计算,计算式 为<sup>[13]</sup>:

$$M_{\rm TN} = \sum_{i=1}^{5} \frac{\rho_i h_i m_i}{10} , \qquad (1)$$

式中:M<sub>TN</sub>为等质量土壤硝态氮累积量(kg/hm<sup>2</sup>);式中:θ<sub>r</sub>和θ<sub>s</sub>分别为残余含水率和饱和含水率

 $\rho_i$ 为第 *i* 层土壤体积质量(g/cm<sup>3</sup>);  $h_i$ 为第 *i* 层土壤 厚度(cm);  $m_i$ 为第 i 层土壤硝态氮量(mg/kg)。 玉米生育期土壤硝态氮累积变化量计算式为:

$$\Delta M_{\rm TN} = M_{\rm TNM} - M_{\rm TNJ} , \qquad (2)$$

式中: M<sub>TNM</sub>和M<sub>TNI</sub>分别为夏玉米成熟期和拔节期对 应土层的硝态氮累积量(kg/hm<sup>2</sup>)。

### 1.4 数值模拟及模型验证

### 1.4.1 基本原理

HYDRUS-2D 是用于多孔介质中水、热运动与 离子交换、溶质运移等模块的数值模拟软件。考虑 到滴头位置所在平面两侧呈对称分布,因而本试验 中膜下滴灌的土壤水分运动可以将三维水分运动简 化为中心对称的二维水分运动[14]。假设土壤为均质、 各向同性的多孔介质,不考虑气体及温度对水分运 动的影响<sup>[15]</sup>,模型中水分运动方程参见文献[16]。 土壤溶质运移控制方程参见文献[17]。土壤中氮的转 化包括矿化、水解、吸附硝化、反硝化等。模型中 土壤氮素的矿化作用应用零级动力学反应方程,分 配系数  $K_d$  取值为 3.5; 分配指数  $\beta$  取值为 1; 液气分 布平衡常数 Henry 取值为 0。其他相关溶质参数通过 参数反演并参考前人研究中的参数[17]获得。

#### 1.4.2 土壤水力特性参数

数值模型中土壤水分特征曲线  $\theta(h)$  和水力传 导度 K(h) 采用 Van Genuchten 公式描述<sup>[18]</sup>, 计算 式为:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_{\mathrm{r}} + \frac{\theta_{\mathrm{s}} \cdot \theta_{\mathrm{r}}}{[1+|ah|^{n}]^{m}} & h < 0\\ \theta_{\mathrm{s}} & h \ge 0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$K(h) = K_{\rm s} S_{\rm e}^{l} \left[ 1 - \left( 1 - S_{\rm e}^{l/m} \right)^{m} \right]^{2} , \qquad (4)$$

$$S_{\rm e} = \frac{\theta - \theta_{\rm r}}{\theta_{\rm s} - \theta_{\rm r}}$$
, (5)

m = 1 - 1/n,

 $(cm^{3}/cm^{3})$ ;  $K_{s}$ 为饱和水力传导度(cm/d);  $S_{e}$ 为 经验参数; l为孔隙关联参数,取值为0.5。土壤水力 有效饱和度; a为进气阈值的倒数 $(cm^{-1})$ ; m和n为 特性参数如表2所示。

AL 上版小月刊 正例	表2	土壤水	力	特性	参数
-------------	----	-----	---	----	----

G 111

Iable 2     Soil hydraulic characteristic parameters									
土层深度/cm	质地	饱和含水率/ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	残余含水率/ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	进气值倒数/ (cm <sup>-1</sup> )	经验参数	饱和导水率/ (cm d <sup>-1</sup> )	电导率 曲折性参数	体积质量/ (g cm <sup>-3</sup> )	
0~35	粉砂壤土	0.066	0.369	0.003 4	1.136	10.80	0.5	1.517	
36~50	粉砂壤土	0.072	0.389	0.041 0	1.907	11.80	0.5	1.416	
51~78	粉质黏土	0.100	0.420	0.006 6	1.212	0.48	0.5	1.544	
79~100	砂壤土	0.115	0.489	0.004 4	1.419	20.00	0.5	1.421	

### 1.4.3 模型几何划分及模型边界

利用HYDRUS-2D模型对玉米各生育期共计 84 d 的土壤水氮运移进行模拟,沿垂直方向将 0~100 cm 土层划分成 4 层,共划分 101 个节点,水平方向划 分 121 个节点。模拟时间设置为 84 d,时间步长为 天。上边界未覆膜区域设定为大气边界,覆膜区域 设定为零通量边界,滴头处设定为时变通量边界, 下边界设定为自由排水边界,互为对称面的左右边 界两侧设为零通量边界。

1.4.4 精度评价

利用决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)和一致性指数(d)评价模型精度,计算式为:

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} |S_{i} - M_{i}|}{\sum_{i=1}^{N} |S_{i} - M_{avg}|}, \qquad (7)$$

$$RMSE = \left| \frac{\sum_{i=1}^{N} (S_i - M_i)^2}{N} \right|^{\frac{1}{2}}, \qquad (8)$$

$$d=1-\frac{\sum_{i=1}^{N}|S_{i}-M_{i}|}{\sum_{i=1}^{N}(|S_{i}-M_{avg}|+|M_{i}-M_{avg}|)^{2}},$$
 (9)

式中: S<sub>i</sub>和 M<sub>i</sub>分别代表田间实测值和模型模拟值; N 为实测值的个数; M<sub>avg</sub>为实测值的平均值。

### 2 结果与分析

#### 2.1 不同土层的土壤水氮变化

不同土层土壤含水率随生育期的变化如图2所示。 拔节期、抽雄期和灌浆期灌水后土壤含水率均呈上 升趋势,0~60 cm土层土壤含水率增幅尤为明显。抽 雄期土壤含水率变幅较大,不同处理0~10、10~30、 30~60 cm 土 层 的 增 幅 分 别 为 26.1%~39.0% 、 26.0%~34.1%、1.6%~4.4%;60~100 cm土层受地下 水位和其他环境因素影响,灌水后各生育期土壤含 水率为抽雄期>拔节期>灌浆期。灌浆期灌水前后 取样的间隔时间较长,灌水后土壤含水率增幅不明 显,生育后期因无灌水施肥,土壤含水率呈降低趋 势,0~10 cm土层降幅较大,含水率降至0.28~0.29 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。





不同土层土壤铵态氮量、硝态氮量随生育期的 变化见图3和图4。由于各生育期灌水前施氮,土壤 氮素在灌水施肥后迅速升高,随后下降,其中0~10 cm和10~30 cm土层降幅较为明显,各处理拔节期、 抽雄期和灌浆期灌水前后土壤铵态氮平均降幅分别 为60.0%~62.0%和56.3%~63.8%;土壤硝态氮平均降 幅分别为40.0%~46.7%和22.0%~25.4%。拔节期 30~60 cm土层土壤氮量略有回升,与氮的硝化与反 硝化作用有关。因无肥料施入,灌浆期后土壤铵态 氮和硝态氮趋于稳定,并维持在较低水平。成熟前 期,0~10、10~30 cm和30~60 cm土层硝态氮略有回 升,与灌浆期相比各处理硝态氮增加量介于 0.13~0.66 mg/kg之间。







2.2 不同生育期灌水前后土壤水氮在土层剖面的分布 变化

不同生育期灌水前后土壤含水率在土层剖面的 分布如图 5 所示。拔节期、抽雄期和灌浆期灌水后 0~100 cm 各土层 D1 处理相比 D2 处理土壤含水率平 均分别增加了 5.9%、8.0%和 6.8%,表明土壤含水 率随灌水量的增大而增加,其中 0~10 cm 土层 D1 处 理和 D2 处理的土壤含水率差幅较大。拔节期和灌浆 期各处理土壤含水率随土层深度增加而增大,并在 30~60 cm 土层存在较大增幅,拔节期土壤含水率达 到 0.44~0.46 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。拔节期和抽雄期土壤含水率 在 60~80 cm 土层大幅度降低,D1 处理和 D2 处理降 幅分别为 3.7%~10.2%和 9.2%~10.3%,80~100 cm 土 层受地下水位季节性变化影响略有小幅升高。

图 6 为不同生育期灌水前后铵态氮在土层剖面 的分布情况。拔节期灌水后 D1 处理 10~30 cm 相比 0~10 cm 土层降幅达到 59.3%,由于生育前期作物吸 氮量较高,各处理 30~60 cm 土层出现小幅回升,增 幅介于 0.05~0.28 mg/kg。抽雄期和灌浆期土壤铵态 氮硝化作用较强,氮素的稀释及淋溶作用降低,D1 处理和 D2 处理各土层铵态氮整体处于较低水平。由 于铵态氮的随水迁移能力较弱,硝化作用消耗的铵 态氮随之减少,少部分铵态氮可能向下淋溶至深层 土壤,因而抽雄期和灌浆期 80~100 cm 土层铵态氮 量有小幅度升高的趋势。



图 5 不同生育期濯水前后土壤含水举在土层剖面的分布 Fig.5 Distribution of soil water content with profile before and after irrigation at different growth stages

图 7 为不同生育期灌水前后硝态氮在土层剖面 的分布情况。硝态氮易随水向下淋溶,为硝化作用 创造有利条件,土壤硝态氮量整体高于铵态氮量, 灌水后 0~10 cm 土层硝态氮量的降幅亦高于铵态氮 量。随着肥料施入,硝态氮易在 0~10 cm 土层积累, 各处理拔节期硝态氮量介于 13.20~14.16 mg/kg 之间, 抽雄期硝态氮量介于 4.12~4.32 mg/kg 之间,灌浆期 硝态氮介于 1.27~1.68 mg/kg 之间,随着生育期的推 进,灌水前 0~10 cm 土层硝态氮量整体呈降低趋势。 由于土壤的通透性与强烈的淋洗作用,灌水后 0~10 cm 和 10~30 cm 土层硝态氮不断被消耗并随着土层 深度增加而降低。拔节期和抽雄期灌水后各处理 60~100 cm 土层硝态氮处于较低水平,这是因为生育 前期地下水位埋深较浅,且玉米根系主要分布在 0~60 cm 土层,硝态氮易在该土层积累并利于作物 吸收。 灌溉排水学报 http://www.ggpsxb.com





Fig.6 Distribution of soil ammonium nitrogen with profile before and after irrigation at different growth stages







#### 2.3 HYDRUS-2D 模型验证结果分析

模型验证结果如表3所示。尽管个别实测值与模 拟值存在偏差,但总体上拟合效果较好。各处理土 壤含水率在0~60 cm土层R<sup>2</sup>、*RMSE、d*的变化范围分 别为0.55~0.85、0.01~0.03 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>和0.79~0.92。土 壤氮素在0~60 cm土层的拟合度较高,各处理R<sup>2</sup>的变 化范围为0.82~0.99, *RMSE*的变化范围为0.03~0.34 mg/kg, d的变化范围为0.91~0.99。部分实测值略低 于模拟值,这与氮素挥发及内部转化、模型边界条 件与实际边界条件的差异性及溶质迁移参数的复杂 性有关。各评价指标均处于合理范围<sup>[19]</sup>,表明模型 可预测滴灌条件下土壤水氮动态变化。

表3 土壤含水率、铵态氮和硝态氮的模型验证结果

	Table 3	Model validation and	statistical analysis of soil	water content, ammonium	nitrogen and nitrate nitroger
--	---------	----------------------	------------------------------	-------------------------	-------------------------------

处理	一日次亩	土壤含水率/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )		土壤硝态氮量/(mg·kg <sup>-1</sup> )			土壤铵态氮量/(mg·kg <sup>-1</sup> )			
	工层/休度/cm	$R^2$	RMSE	d	$R^2$	RMSE	d	$R^2$	RMSE	d
	0~10	0.79	0.03	0.89	0.97	0.21	0.97	0.97	0.04	0.97
D1	10~30	0.85	0.03	0.92	0.95	0.24	0.95	0.93	0.05	0.95
	30~60	0.56	0.02	0.81	0.85	0.29	0.91	0.82	0.07	0.91
	60~80	0.83	0.01	0.94	0.34	0.39	0.42	0.14	0.09	0.86
	80~100	0.42	0.02	0.75	0.69	0.48	0.31	0.59	0.18	0.71
	0~10	0.77	0.02	0.90	0.99	0.21	0.99	0.98	0.03	0.97
D2	10~30	0.61	0.03	0.84	0.97	0.27	0.97	0.96	0.03	0.97
	30~60	0.55	0.02	0.79	0.86	0.34	0.95	0.96	0.05	0.98
	60~80	0.37	0.02	0.55	0.41	0.58	0.53	0.70	0.09	0.87
	80~100	0.58	0.02	0.80	0.86	0.40	0.60	0.53	0.10	0.76

2.4 不同生育期土壤硝态氮累积量的变化 不同生育期0~100 cm土壤硝态氮累积量变化如 图8所示。各生育期灌水前由于氮肥水解速率较高, 硝态氮累积量基本维持在较高水平。拔节期、抽雄 期和灌浆期D2处理相比D1处理硝态氮累积量分别增加22.9%、18.7%和9.1%,表明低灌水量更易使硝态氮在0~100 cm土层中积累。抽雄期作物处于生长旺盛时期,灌水前后D1处理和D2处理土壤硝态氮累积量平均降低了62.5%~68.4%。从拔节期到灌浆期硝态氮累积量呈逐渐减少趋势,灌浆期后作物进入成熟阶段,从土壤当中吸收的氮素随之减少,因此各处理硝态氮累积量略有回升,占生育期总累积量的21.8%~22.4%。



图 8 不同生育期 0~100 cm 土层硝态氮累积量变化 Fig.8 Changes of nitrate nitrogen accumulation in 0~100 cm soil layer under different growth stages

#### 2.5 模型应用情景分析

在干旱半干旱地区,施肥是土壤硝态氮的主要来 源,而灌水是硝态氮向深层土壤淋失的关键因素<sup>[20]</sup>, 灌水量及氮素在深层土壤的累积和淋失对于作物产 量及灌溉水生产力显著影响。在河套灌区,由于玉 米生育期耗水量较多,水分对灌区作物生长发育的 影响举足轻重,增加灌水量在一定程度上促进了作 物长势的提高,土壤水分和作物产量均随着滴灌次 数的增加而增加<sup>[21]</sup>,但灌水量过大则会降低水分利 用效率并使氮素在深层土壤积累<sup>[22]</sup>。为探求适合灌 区的灌溉制度,经过 HYDRUS-2D 模型校正后,依 据本试验设置的灌水定额,在不同生育期增加了灌 水次数并相应调整了灌水量,根据模拟情景的不同 灌水处理分析不同土层土壤含水率和硝态氮量的分 布规律以及各生育期硝态氮累积量在 0~60 cm 和 60~100 cm 土层的变化情况,模拟情景灌水处理如 表 4 所示。

#### 表4 模拟情景灌水处理

Table 4 Irrigation treatment of simulated scenarios

处		灌溉				
理技	拔节前期	拔节期	抽雄前期	抽雄期	灌浆期	定额/mm
M1	12	12	12	12	12	60
M2	18	18	18	18	18	90
M3	24	24	24	24	24	120

HYDRUS-2D 模型模拟情景下的不同土层土壤 含水率随生育期的变化情况见图 9(a)—图 9(c), 土壤硝态氮量随生育期的变化情况见图 9(d)—图 9(f)。各生育期灌水后土壤含水率略有升高,其中 10~30 cm 和 30~60 cm 土层 M3 处理土壤含水率相比 M1 处理和 M2 处理分别增加了 3.4%~32.6%和 2.8%~25.9%, 表明土壤含水率随滴灌次数的增加和 灌水量的提升而增大,较高的灌水量可以维持土壤 根系层(0~60 cm)的湿润度并增加保水性,适于作 物根系生长。不同生育期土层硝态氮量随灌水量的 增加呈小幅降低趋势,各处理硝态氮量降幅为 M3 处理>M2 处理>M1 处理,降幅在 0~10 cm 土层变 化尤为显著。生育后期硝态氮量整体处于较低水平, 不同土层硝态氮量变化范围介于 0.70~1.12 mg/kg。 图 10 为模拟情景下的不同生育期各处理 0~60 cm 和 60~100 cm 土层硝态氮累积量。0~60 cm 土层 M1、 M2 处理和 M3 处理土壤硝态氮累积量分别为 225.37、 230.33 kg/hm<sup>2</sup> 和 235.32 kg/hm<sup>2</sup>; 60~100 cm 土层各 处理土壤硝态氮累积量介于 199.14~203.35 kg/hm<sup>2</sup>。 随着灌水量的增加, M3 处理较 M1 处理和 M2 处理 各土层硝态氮累积量略有降低,其中 0~60 cm 土层 各处理变幅较为明显; 而 60~100 cm 土层硝态氮累 积量仅在抽雄期略有回升,其他生育期均随灌水量 的增加而降低。



灌溉排水学报 http://www.ggpsxb.com



Fig.9 Changes of soil water content and nitrate nitrogen with growth period in different soil layers under simulated scenario



图 10 不同生育期各处理 0~60 cm 和 60~100 cm 土层硝态氮累积量

Fig.10 Nitrate nitrogen accumulation in 0~60 cm and 60~100 cm soil layers of different growth periods

### 3 讨论

水肥管理失调易导致氮素向深层土壤运移,造 成灌区土壤环境污染。随着土层深度增加,硝态氮 量和铵态氮量均呈降低趋势,其中铵态氮量降低速 率明显于硝态氮量,这是因为铵态氮的吸附能力较 强,而硝态氮易随水迁移,硝态氮的反硝化作用使 铵态氮易在 30~60 cm 土层积累<sup>[23]</sup>。施肥后的短期内 铵态氮急剧增加,且主要发生在 0~60 cm 土层<sup>[24]</sup>, 而铵态氮的硝化作用迅速,0~10 cm 土层大多数的铵 态氮就已转化为硝态氮<sup>[25]</sup>。

研究区玉米生育期地下水位介于 60~180 cm, 丰水期和灌溉集中期地下水中的氮素浓度较高,在 60~100 cm 土层,土壤氮素在 60~80 cm 土层降至最 低,而在 80~100 cm 土层出现小幅回升,这与白雪 原等<sup>[24]</sup>在河套灌区的试验结论基本一致,表明部分 未被作物吸收的氮素随水分淋失至深层土壤,降低 了氮肥利用率的同时易造成地下水的污染。研究认 为,0~80 cm 土层土壤硝态氮较低,80 cm 土层以下 硝态氮和氮素积聚系数显著增加<sup>[26]</sup>,表明硝态氮出 现明显的向深度土层淋失现象,因此灌水量与硝态 氮累积量关系密切。灌水是影响硝态氮在 0~30 cm 土层积累的主效应,而水氮耦合是导致硝态氮向下 淋溶的主效应<sup>[27]</sup>;梁运江等<sup>[28]</sup>认为适当增加灌水量 有助于 0~30 cm 土层硝态氮的淋洗和 30~60 cm 土层 硝态氮的积累,本试验中 D2 处理的氮肥水解能力较 低,土壤硝态氮在 0~10 cm 土层累积较多;而 D1 处 理的氮肥溶解速率较快,加速了土壤氮素的再分布, 因而促使硝态氮在土壤根系层积累,与上述试验结 论基本一致。

河套灌区存在干旱少雨,蒸发强烈,日照温差 较大等因素,目前多以田间试验结合数值模型探求 并优化适合灌区的灌溉制度。王航等<sup>[29]</sup>利用 HYDRUS-2D 模型分析了玉米生育期和非生育期不 同滴灌方式对盐分离子的迁移转化,并预测了河套 灌区不同灌溉制度下的土壤水盐运移规律,表明模 型在模拟预测水分与溶质迁移运动方面成效显著, 由此通过模型模拟情景分析了不同的灌水定额对于 水氮运移规律的影响。在模拟情景中,灌水量的增 加有效遏制了硝态氮在 60~100 cm 土层的累积,但 不排除硝态氮会向更深土层淋溶,进而对地下水构 成危害。因此未来可通过田间试验或数值模型将灌 水定额和施肥量、施肥品类或地下水位进行结合, 对于 HYDRUS-2D 模型在长时间序列上的应用及深 层土壤水氮运移的研究仍需进一步探讨。

### 4 结 论

1)拔节期、抽雄期和灌浆期灌水后土壤含水率

均呈升高趋势;灌水后土壤铵态氮和硝态氮迅速降低, 0~10 cm 和 10~30 cm 土层降幅较为明显,生育后期整体处于较低水平。随着生育期的推进,各处理硝态氮累积量呈降低趋势。

2) 灌水后土壤含水率 D1 处理较 D2 处理增幅 明显;土壤氮素随土层深度的增加而降低,且灌水 后 0~10 cm 土层硝态氮降幅高于铵态氮。

3) 根据 HYDRUS-2D 模型模拟值与实测值的评价模拟指标,土壤含水率、铵态氮和硝态氮的 R<sup>2</sup>、 RMSE 和 d 的变化均在可接受范围内,模型拟合效果 较好。

4) HYDRUS-2D 模型模拟情景结果表明,适当 增加灌水量和滴灌次数,玉米生育期 120 mm 的灌 溉定额可有效降低 0~60 cm 土层硝态氮累积量,并 遏制硝态氮在 60~100 cm 土层的积累。

#### 参考文献:

- LIU Junguo, YOU Liangzhi, AMINI Manouchehr, et al. A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(17): 8 035-8 040.
- [2] MOTESHAREZADEH Babak, VALIZADEH-RAD Keyvan, DADRASNIA Arezoo, et al. Trend of fertilizer application during the last three decades[J]. Journal of Plant Nutrition, 2017, 40(4): 532-542.
- [3] 罗帅. 河套灌区垄膜沟灌模式不同灌水量对春玉米田水盐氮运移特 征的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. LUO Shuai. The influence of irrigation amounts on transport characteristics of soil water-salt-nitrogen in spring maize fields under ridge mulched with plastic film-furrow irrigation in Hetao irrigation District[D]. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2021.
- [4] 周青云,李松敏,孙书洪,等. 基于Hydrus-2D的负压灌溉水分动态 模拟[J]. 人民黄河, 2017, 39(8): 133-136.
   ZHOU Qingyun, LI Songmin, SUN Shuhong, et al. Simulation of soil water dynamic based on HYDRUS-2D under negative pressure irrigation[J]. Yellow River, 2017, 39(8): 133-136.
- [5] ROBORTS Trenton, LAZAROVITCH Naftal, WARRICK A W, et al. Modeling salt accumulation with subsurface drip irrigation using HYDRUS-2D[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(1): 233-240.
- [6] 齐智娟.河套灌区盐碱地玉米膜下滴灌土壤水盐热运移规律及模拟研究[D].杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2016.

QI Zhijuan. Soil water, heat and salt transport and simulation under mulched drip irrigation for corn of saline soil in Hetao Irrigation District[D]. Yangling: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, 2016.

 [7] 毛萌. 阿特拉津在室内滴灌施药条件和农田尺度下运移的数值模 拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
 MAO Meng. Numerical simulation of Atrazine transport in soils under

drip irrigation and at field scale[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.

[8] SHAFEEQ Poomadathil Mohammed, AGGARWAL Pramila, KRISHNAN Prameela, et al. Modeling the temporal distribution of water, ammonium-N, and nitrate-N in the root zone of wheat using HYDRUS-2D under conservation agriculture[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(2): 2 197-2 216.

- [9] AZAD Nasrin, BEHMANESH Javad, REZAVERDINEJAD Vahid, et al. Developing an optimization model in drip fertigation management to consider environmental issues and supply plant requirements[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208: 344-356.
- [10] RANDALL Gyles W, VETSCH Jeffrey A, HUFFMAN Jerald R. Corn production on a subsurface-drained mollisol as affected by time of nitrogen application and nitrapyrin[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(5): 1 213-1 219.
- [11] 戴嘉璐,李瑞平,李聪聪,等. 河套灌区不同水肥处理对玉米生长影响的AquaCrop模型模拟[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 312-319.
  DAI Jialu, LI Ruiping, LI Congcong, et al. Simulation of effects of different water and fertilizer treatments on maize growth with aquacrop in Hetao Irrigation Area[J]. Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 312-319.
- [12] 丁艳宏, 屈忠义, 李昌见, 等. 不同灌溉水源及方式对玉米生长特性及 水肥利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 1-7.
  DING Yanhong, QU Zhongyi, LI Changjian, et al. Effects of different water sources and irrigation methods on growth and water-fertilizer use efficiency of maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(8): 1-7.
- [13] 叶优良,包兴国,宋建兰,等.长期施用不同肥料对小麦玉米间作产量 氮吸收利用和土壤硝态氮累积的影响[J].植物营养与肥料学报, 2004,10(2):113-119.

YE Youliang, BAO Xingguo, SONG Jianlan, et al. Effects of long-term fertilizer application on yield, nitrogen uptake and soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N accumulation in wheat/maize intercropping[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(2): 113-119.

- [14] SKAGGS Toddh, TROUT T J, ŠIMŮNEK Jirka, et al. Comparison of HYDRUS-2D Simulations of drip irrigation with experimental observations[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2004, 130(4): 304-310.
- [15] ZHOU Qingyun, KANG Shaozhong, ZHANG Lu, et al. Comparison of APRI and Hydrus-2D models to simulate soil water dynamics in a vineyard under alternate partial root zone drip irrigation[J]. Plant and Soil, 2007, 291(1): 211-223.
- [16] KANDELOUS Maziar M, ŠIMŮNEK Jirka, VAN Genuchten M Th, et al. Soil water content distributions between two emitters of a subsurface drip irrigation system[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75: 488-497.
- [17] CHOWDARY V M, RAO N H, SARMA P B S. A coupled soil water and nitrogen balance model for flooded rice fields in India[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004, 103(3): 425-441.
- [18] VAN Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [19] DEB Sanjit K, SHARMA Parmodh, SHUKLA Manoj K, et al. Numerical evaluation of nitrate distributions in the onion root zone under conventional furrow fertigation[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 21(2): 211-223.
- [20] 杨荣, 苏永中. 水氮配合对绿洲沙地农田玉米产量 土壤硝态氮和氮 平衡的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1 459-1 469. YANG Rong, SU Yongzhong. Effects of nitrogen fertilization and irrigation rate on grain yield, nitrate accumulation and nitrogen balance on sandy farmland in the marginal oasis[J]. Acta Ecoligica Sinica, 2009, 29(3): 1 459-1 469.
- [21] 刘晓宇. 河套灌区灌溉方式与施肥对玉米生长及土壤养分的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.

LIU Xiaoyu. Effects of irrigation methods and fertilization on maize growth and soil nutrients in Hetao Irrigation District[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricutural University, 2019.

[22] 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(3): 992-1 002. WANG Xiaoyan, CHU Pengfei, YU Zhenwen. Effects of irrigation and nitrogen interaction on soil NO<sub>3</sub>-N transport, nitrogen use efficiency and water use efficiency in wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(3): 992-1 002.

- [23] 武岩. 施肥措施对河套灌区农田氮素损失及平衡的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
  WU Yan. Effects of fertilization on farmland nitrogen loss and balance in Hetao Irrigation Area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricutural University, 2018.
- [24] 白雪原, 红梅, 武岩, 等. 施肥对河套灌区土壤铵态氮 硝态氮的影响[J]. 北方农业学报, 2016, 44(3): 15-17.
  BAI Xueyuan, HONG Mei, WU Yan, et al. Effects of fertilizer on NH4<sup>+</sup>-N and NO3<sup>-</sup>-N of soil in Hetao Irrigation Area[J]. Journal of Northern Agricuture, 2016, 44(3): 15-17.
- [25] HANSON Blaine R, ŠIMŮNEK Jirka, HOPMANS Jan W. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1/2): 102-113.
- [26] 郭路航, 王贺鹏, 李妍, 等. 河北太行山山前平原葡萄园土壤硝态氮累 积特征及影响因素[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 280-285.

GUO Luhang, WANG Hepeng, LI Yan et al. Accumulation characteristics and influencing factors of soil nitrate nitrogen in vineyards in piedmont plain of Taihang Mountain, Hebei Province[J]. Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 280-285.

- [27] 尔晨,林涛,夏文,等. 灌溉定额和施氮量对机采棉田水分运移及硝态
   氦残留的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(2): 497-510.
   ER Chen, LIN Tao, XIA Wen, et al. Effects of irrigation quota and nitrogen application rate on water transport and nitrate residue in mechanized cotton field[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(2): 497-510.
- [28] 梁运江, 依艳丽, 许广波, 等. 水肥耦合效应对保护地土壤硝态氮运移的影响[J]. 农村生态环境, 2004(3): 32-36.
   LIANG Yunjiang, YI Yanli, XU Guangbo, et al. Effect of coupling effect of water and fertilizer on nitrate nitrogen transport in protected soil[J]. Rural Eco-Environment, 2004(3): 32-36.
- [29] 王航,周青云,张宝忠.不同滴灌水量对河套灌区覆膜玉米田土壤盐 分的影响研究[J].灌溉排水学报,2022,41(5):72-83.
  WANG Hang, ZHOU Qingyun, ZHANG Baozhong. The effects of drip-irrigation amount on soil salinity in film-mulched corn field in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5):72-83.

## Simulating Water and Nitrogen Dynamics in Drip-irrigated Soil Based on the HYDRUS-2D Model

CUI Hezhao<sup>1</sup>, ZHOU Qingyun<sup>1\*</sup>, HAN Nana<sup>1</sup>, ZHANG Baozhong<sup>2</sup>

(1. Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Water flow and solute transport in soil is important not only for plant acquisition of resources from soil but also for soil and water environment. In terrestrial ecosystems, they are impacted by numerous factors. The objective of this paper is to investigate the effects of drip irrigation amount on spatiotemporal change in water and nitrogen in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia. [Method] A field experiment was conducted to measure the movement of water, nitrate and ammonium in soils, with the irrigation amount controlled at 6 mm (D1) or 60 mm (D2). The measured data was used to calibrate the HYDRUS-2D model, and the calibrated model was then used to elucidate how increasing the irrigation amount to 120 mm would affect water and nitrogen movement. [Result] Irrigation increased soil water content in all growth stages. Following irrigation and nitrate in the 0~10 cm soil layer decreased by 60.0%~62.0% and 40.0%~46.7%, respectively, after the D1 and D2 irrigations, with the decreasing rate varying with growing stage. Compared to D2, D1 increased soil water content at jointing,

heading and filling stage by 5.9%, 8.0% and 6.7%, respectively. Soil ammonium and nitrate both decreased along the soil depth. Nitrate accumulation decreased gradually when the crop grew from jointing stage to filling stage. The simulated soil water content and nitrogen agreed well with the measured data. [Conclusion] Experimental data and simulated results showed that irrigating the maize by 120 mm of water can effectively reduce accumulation of nitrate in the 0~60 cm soil layer, and that increasing irrigation frequencies can further curtail nitration accumulation in the 60~100 cm soil layer. These results provide guidance for improving irrigation and fertigation for maize production in Hetao Irrigation District.

Key words: soil water content; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen; numerical simulation; HYDRUS-2D model