

文章编号: 1672-3317(2024)01-0028-07

冬小麦测墒补灌下土壤氮素迁移特征模拟研究

余静¹, 庞桂斌^{1*}, 于浩洋¹, 薛建文¹, 丛鑫¹, 张立志², 王昕², 徐征和¹
(1. 济南大学 水利与环境学院, 济南 250022; 2. 山东省水利科学研究院, 济南 250014)

摘要: 【目的】探究冬小麦测墒补灌条件下土壤氮素迁移特征。【方法】基于田间试验, 设置4个灌溉处理, 灌水上下限分别为田间持水率的60%~70% (W1)、70%~80% (W2)、80%~90% (W3) 和不灌溉处理 (CK), 施氮量均为240 kg/hm²。利用田间试验数据对RZWQM 2模型进行率定、验证, 进而模拟水氮调控对土壤硝态氮累积量和氮素利用的影响。【结果】土壤剖面含水率、土壤硝态氮量和产量的标准均方根误差 (NRMSE) 分别为9.3%~25.0%、0.3%~29.7%、4.03%~11.19%, 平均相对误差 (MRE) 分别为8.0%~24.2%、1.4%~30.4%、5.29%~11.98%, 一致性指标 (D) 均高于0.65; 基于验证后的RZWQM 2模型, 在W1、W2、W3测墒补灌条件下, 设置5个氮素施用水平 (180、200、220、240 kg/hm² 和 260 kg/hm²), W2、W3处理的土壤硝态氮累积量较W1处理分别增加了30.9%~59.7%、49.6%~79.6%; W2条件下, 将施氮量控制在220~240 kg/hm²更有利于土壤硝态氮在0~1 m土层内的累积, 累积量为108.30~125.10 kg/hm²。【结论】RZWQM 2模型可用于模拟冬小麦测墒补灌条件下的土壤氮素迁移, 测墒补灌W2和施氮量220~240 kg/hm²为合理的水氮管理措施。

关键词: RZWQM 2模型; 测墒补灌; 水氮调控; 硝态氮累积; 氮素利用效率

中图分类号: S156.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023090

OSID:

余静, 庞桂斌, 于浩洋, 等. 冬小麦测墒补灌下土壤氮素迁移特征模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(1): 28-34.

YU Jing, PANG Guibin, YU Haoyang, et al. Characteristics of soil nitrogen transport under moisture measurement and supplemental irrigation in winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(1): 28-34.

0 引言

【研究意义】冬小麦是华北地区最重要的粮食作物。增施氮肥和灌水是提高冬小麦产量的主要手段, 但过量的水肥投入不仅会造成资源浪费, 而且会引发面源污染^[1]。因此, 在保证产量的同时, 合理的水氮管理制度也成为研究热点。【研究进展】土壤氮素淋失是造成地下水污染的主要原因, 国内外学者对于水、氮的合理施用及氮素运移开展了大量研究^[2-3]。灌水量增加会导致土壤肥料损失, 加剧氮素淋失风险。合理的水氮施用在保证产量的同时可达到节水、节肥的目的。Yang等^[4]研究发现, 与传统水氮管理相比, 控制灌溉和特定地点的氮素管理可使水和氮投入量分别减少59.2%~63.3%和34.6%~43.0%, 使氮素利用效率提高15.1%~56.1%。利用模型评估和预测作物生长季土壤水分和氮素运移已成为重要手段^[5]。RZWQM 2 (Root zone water quality model 2) 模型能够准确模拟农田土壤水分、养分及作物生长状况, 被广泛应用于

指导农业生产^[6]。薛长亮等^[7]应用RZWQM 2模型对农田土壤硝态氮累积量、作物产量及氮挥发速率进行了模拟, 发现195~260 kg/hm²施氮量是河北地区农田最优施氮量。Shaukat等^[8]依据该模型开发了RZWQM P模型, 用于模拟农田磷流失。也有研究表明, RZWQM 2模型可以用来模拟地膜覆盖对棉田氮肥利用效率及作物产量的影响^[9]。【切入点】RZWQM 2模型能够结合特定地区的土壤性质、气候条件、管理措施及作物种类, 模拟环境因素对土壤水氮运移及作物产量的影响。然而, 以往基于该模型模拟冬小麦测墒补灌条件下的土壤氮素运移规律的研究甚少。【拟解决的关键问题】鉴于此, 以冬小麦为研究对象, 利用RZWQM 2模型模拟测墒补灌对冬小麦生育期土壤水分和氮素运移的影响, 并通过模型预测水氮调控下土壤硝态氮累积量, 以此探究合理的农田水氮管理模式, 以为华北平原粮食可持续生产和水氮高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

于2020年10月—2021年6月在山东省灌溉试验中心站 (36°34' N, 116°50' E) 开展田间试验。试验区为典型的夏玉米、冬小麦轮作种植区, 属于暖温带大

收稿日期: 2023-3-13 修回日期: 2023-09-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0800601)

作者简介: 余静 (1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉与农田生态环境研究。E-mail: Yz0101j@163.com

通信作者: 庞桂斌 (1981-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事节水灌溉与农田生态环境研究。E-mail: stu_panggb@ujn.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

陆性季风气候，年平均日照时间为 2 447.6 h，全年无霜期为 178 d，年平均气温为 14.2 °C，年平均降水量为 548.7 mm。试验期间降水量和气温变化见图 1。

试验区土壤质地为壤土，播种前 0~100 cm 土层土壤理化性质见表 1。

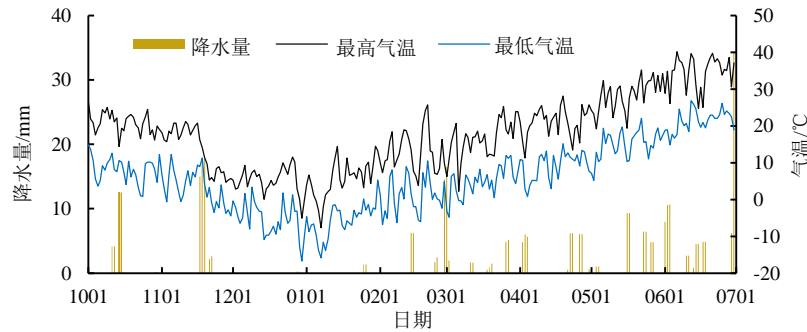


图 1 冬小麦生长期内气温及降水量

Fig.1 Temperature and precipitation during the growing season of winter wheat

表 1 试验地土壤基本理化性质

Tab.1 Basic physical and chemical properties of soil in the test site

土层深度/cm	体积质量/ (g cm ⁻³)	有机碳量/ (g kg ⁻¹)	全氮量/ (g kg ⁻¹)	有效磷量/ (mg kg ⁻¹)	田间持水率/ (cm ³ cm ⁻³)	土壤机械组成/%		
						>0.05 mm	0.002~0.05 mm	<0.002 mm
0~20	1.42	6.32	2.43	34.67	0.254	55.50	34.90	9.60
20~40	1.45	5.95	1.77	21.40	0.221	60.60	30.20	9.20
40~60	1.46	5.39	1.71	10.81	0.218	62.80	29.20	8.00
60~80	1.48	4.55	1.22	0.65	0.205	64.80	27.10	8.10
80~100	1.50	4.31	1.69	0.52	0.201	60.20	31.10	8.70

1.2 试验设计

试验设置 3 个灌溉水平，在冬小麦拔节期、灌浆期依据 0~60 cm 土层土壤质量含水率进行测墒补灌，使灌水上下限分别维持在田间持水率的 60%~70% (W1)、70%~80% (W2)、80%~90% (W3)，另设置不灌溉处理作为对照 (CK)，共计 4 个处理，每个处理重复 3 次，共计 12 个小区，每个小区面积为 6.66 m²。施用肥料为尿素 (纯 N: 46.4%)、过磷酸钙 (纯 P: 12%) 和氯化钾 (纯 K: 60%)。氮肥施用总量为 240 kg/hm²，分别在播种前和拔节期 (基肥: 追肥=2:3) 施用，磷肥和钾肥于播种前施用，施用量为 P₂O₅ 120 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²。供试小麦品种为“齐麦一号”，于 2020 年 10 月 16 日播种，2021 年 6 月 4 日收获，全生育期共 231 d。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤含水率

采用烘干法测定土壤含水率。于每次灌水前及各生育阶段始、末取土，取样土层深度分别为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm。

1.3.2 土壤硝态氮量

在冬小麦各生育期利用取土器采集 0~100 cm 土样，每 20 cm 为 1 层。将采集的新鲜土壤样品带回实验室，去除杂物，用 1 mol/L 的氯化钾溶液浸提，利用紫外分光光度计测定土壤硝态氮量。

1.3.3 产量

在冬小麦收获期，于各小区收割 1 m² 长势均匀的冬小麦进行考种测产。

1.4 RZWQM 2 模型

RZWQM 2 模型由美国系统研究单位 USDA-ARS 开发，由管理、潜在蒸散发、水热平衡、营养过程、植物生长、土壤化学、杀虫剂 7 个模块组成，模型需要输入的初始基础数据包括气象数据、研究区描述、管理信息、土壤信息^[10]。本研究基于 2020—2021 年 CK 条件下的各土层土壤含水率和硝态氮量的实测数据，采用试错法对模型进行率定，并采用同时期其他 3 个处理相对应的实测数据进行验证。

采用 3 个统计指标评估模型的模拟效果，分别为标准均方根误差 (NRMSE)、平均相对误差 (MRE) 和一致性指标 (D)^[11]。利用率定、验证后的 RZWQM 2 模型，在 3 个测墒补灌水平下设置 5 个施氮梯度，分别为 180、200、220、240、260 kg/hm²，模拟不同处理下的冬小麦氮素利用效率和氮肥偏生产力，计算方法详见文献[12]。

1.5 数据分析

采用 IBM SPSS Statistics 25 软件和 Excel 2021 软件进行数据整理和统计分析，采用 LSD 法进行差异显著性比较，采用 Excel 进行绘图。

表3 CK率定过程中各土层硝态氮量的NRMSE和MRE

Tab.3 NRMSE and MRE of nitrate-nitrogen in each soil layer during rate determination of CK

日期	NRMSE/%					MRE/%				
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
1015	8.5	3.9	2.4	2.4	9.3	9.7	5.7	7.1	16.9	22.7
1031	5.9	17.2	4.6	15.9	8.4	2.0	16.0	5.8	21.1	13.8
0102	8.1	6.3	8.6	11.8	11.8	19.1	5.3	7.2	11.2	11.6
0328	4.2	10.7	10.9	17.6	1.7	2.6	9.3	19.6	11.5	1.4
0507	3.6	15.8	12.9	15.5	20.8	29.9	17.1	10.8	10.1	18.6
0610	0.3	19.7	12.6	8.9	17.2	24.5	19.8	12.3	9.0	16.1

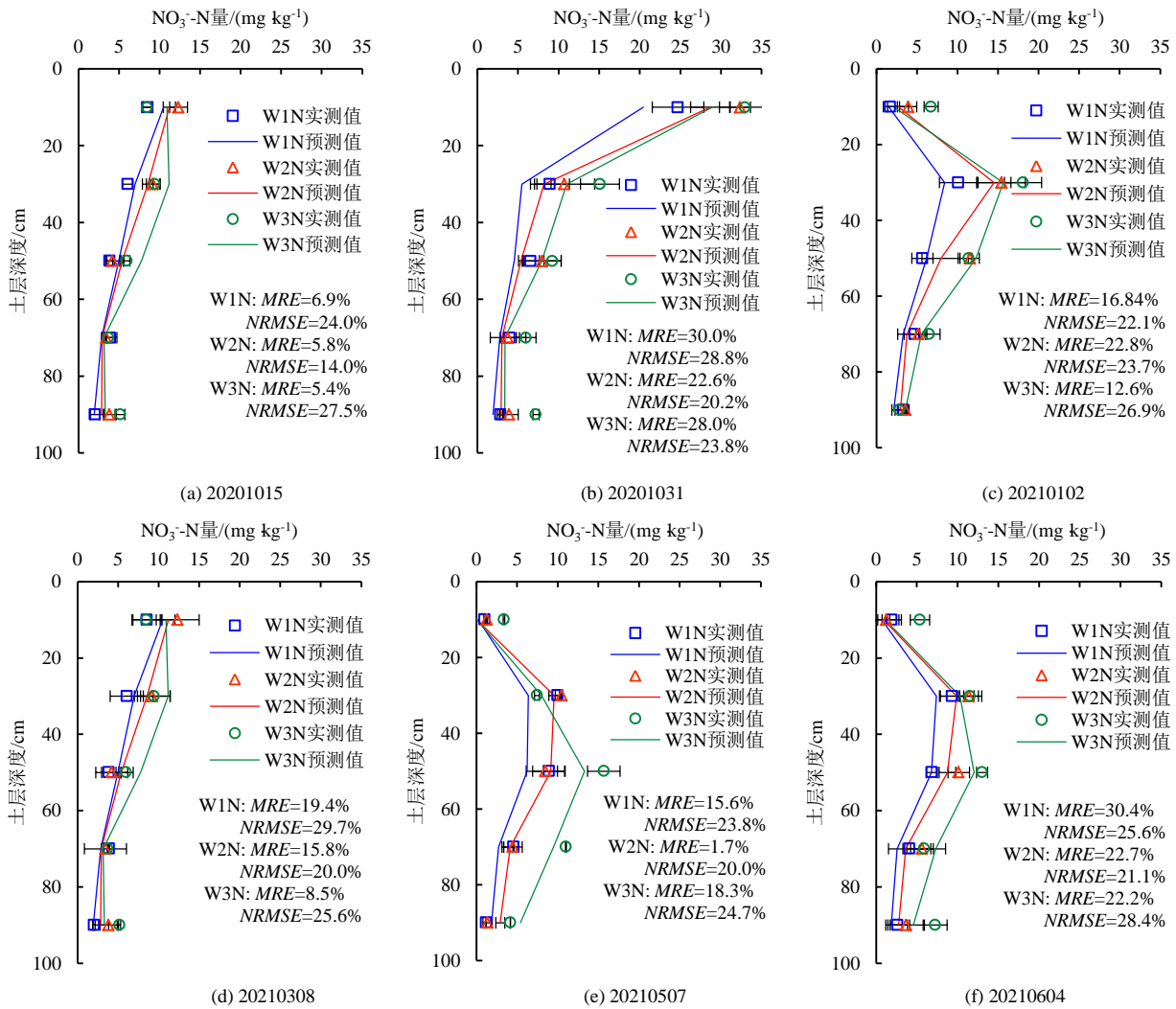


图 3 不同处理下土壤硝态氮量验证

Fig.3 Verification of soil nitrate-nitrogen under different treatments

2.3 产量的率定与验证

冬小麦产量实测值与模拟值如表 4 所示。各处理下的 NRMSE 介于 4.03%~11.19%，MRE 为 5.29%~11.98%，D 为 0.70~0.99，表明该模型能较好地模拟冬小麦产量。

2.4 基于模拟值的土壤硝态氮累积量分析

利用率定和验证后的RZWQM 2模型模拟不同施氮水平下作物根系土壤硝态氮累积量的变化，探究施氮量对土壤硝态氮累积量的影响。在 3 个测墒补灌水

平下设置了 5 个施氮梯度，模拟结果如图 4 所示。在 5 个施氮水平下，W1 灌溉水平下的土壤硝态氮累积量明显低于其余灌溉水平。在 3 个测墒补灌水平下，硝态氮累积量随施氮量的增加呈先增加后降低的趋势，W1、W2、W3 水平下土壤硝态氮累积量峰值分别为 81.9、130.2、125.9 kg/hm²，W2 灌溉水平下，施氮量 229 kg/hm²下的硝态氮累积量峰值最高。综上所述，施氮量为 220~240 kg/hm²，W2 灌溉水平促进了土壤硝态氮累积。

表4 不同灌溉水平下冬小麦产量实测值与模拟值比较

Tab.4 Comparison between measured and simulated values of winter wheat yield under different irrigation levels

处理	实测值/ (kg hm ⁻²)	模拟值/ (kg hm ⁻²)	NRMSE/%	MRE/%	D
CK	3 589.70±69.86c	3 399.86	4.03	5.29	0.99
W1	4 392.60±109.99b	3 866.26	11.19	11.98	0.79
W2	5 443.50±98.05a	4 968.54	10.09	8.73	0.77
W3	5 400.40±31.88a	4 910.96	10.40	9.06	0.70

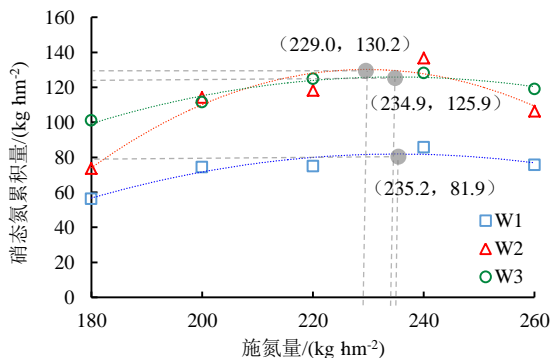
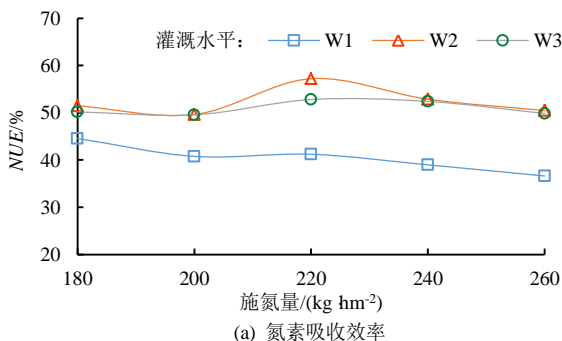


图 4 施氮量与 1 m 土层内土壤硝态氮累积量的关系

Fig.4 Relationship between nitrogen application rates and soil nitrate nitrogen accumulation within 1 m

2.5 氮素利用效率分析

模型模拟不同施氮水平下的作物产量如图 5 所示。当施氮量为 180~220 kg/hm² 时, 产量随施氮量增加而增加, 当施氮量高于 220 kg/hm² 后, 产量趋于稳定,



(a) 氮素吸收效率

且在施氮量 220 kg/hm² 和 W2 灌溉水平下产量达到峰值, 为 5 214.95 kg/hm²。模型模拟不同施氮水平下的氮素利用效率如图 6 所示。在 W1 灌溉水平下, 随着施氮量的增加, 冬小麦氮素吸收效率和氮肥偏生产力均呈下降趋势; 而在 W2、W3 灌溉水平下, 随着施氮量增加, 氮素吸收效率和氮肥偏生产力均呈先增后减的变化趋势。相同施氮水平下, W2、W3 灌溉水平的氮素吸收效率和氮肥偏生产力明显高于 W1 灌溉水平。综合考虑产量、氮素吸收效率和氮肥偏生产力, 施氮量 220 kg/hm² 和 W2 灌溉水平的水氮管理措施相对较优。

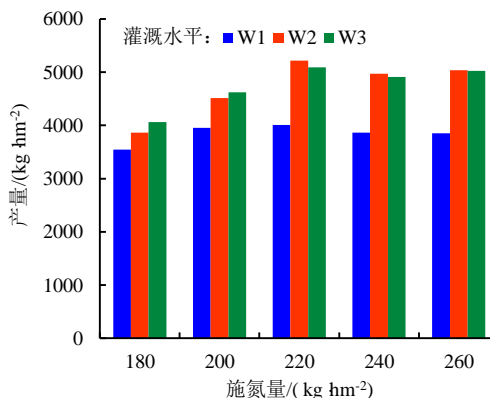
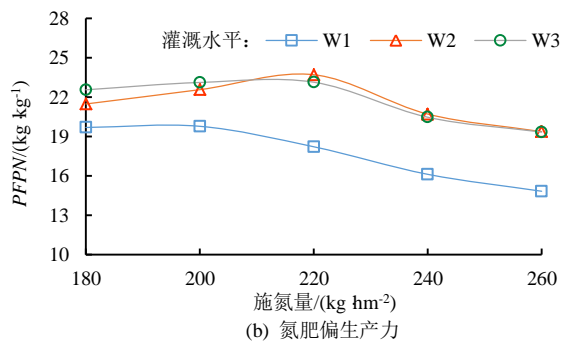


图 5 水氮调控下的冬小麦产量模拟

Fig.5 Simulation of winter wheat yield under water and nitrogen regulation



(b) 氮肥偏生产力

注 NUE 为氮素吸收效率, PFPN 为氮肥偏生产力。

图 6 水氮调控下冬小麦氮素吸收效率和氮肥偏生产力

Fig.6 Nitrogen uptake efficiency and nitrogen fertiliser bias productivity of winter wheat under water and nitrogen regulation

3 讨论

多种模型已被用于模拟田间管理措施和气候变化对农业生产的影响^[13]。本研究采用 RZWQM 2 模型模拟冬小麦不同测墒补灌水平下土壤水分及氮素运移状况, 模拟水氮调控下土壤氮素累积量, 并对氮素利用效率进行分析。土壤剖面含水率和土壤硝态氮量的模拟值和实测值的变化趋势相同, 且下层土壤模拟效果优于上层, 这与夏文等^[14]研究结果一致。从小麦整个生育期来看, 土壤剖面含水率随着灌水量的增加而上升, 小麦生长前期各剖面土壤含水率波动较为平稳, 这与石学萍等^[15]研究结果相同。从土壤深度来看, 60 cm 土层以下的深层土壤含水率波动幅度小于 60

cm 以上的表层土壤含水率, 高灌水量下的变化幅度较大。土壤硝态氮量随着施氮量的增加而增加, 但在灌溉和降水的影响下, 表层土壤硝态氮量不断淋溶至深层。小麦生长中后期, 由于没有氮肥输入, 0~40 cm 土层的土壤硝态氮量被冬小麦根系吸收而减少, 40~60 cm 土层硝态氮量逐渐增加, 这与樊军等^[16]研究结果一致。

硝态氮是氮素在土壤中的主要形态, 土壤氮素累积量与施氮量、灌水量和土壤性质密切相关。研究表明, 冬小麦根系可达到 3 m, 但 90% 以上的根系集中在 0~1 m 土层^[17]。因此, 本研究利用 RZWQM 2 模型模拟水氮调控对 0~1 m 内的土壤硝态氮累积量的影响。冬小麦根区土壤硝态氮累积量随着灌溉水平的增加

而增加,表明土壤水分运移会直接影响硝态氮在土壤中的累积,这与石玉等^[18]研究结果一致。在 W2 灌溉水平下,施氮量为 229 kg/hm² 时的硝态氮累积量达到峰值。崔政军等^[19]研究表明,在作物不同生育阶段,水肥对氮素积累量的影响不同。本研究表明,土壤硝态氮累积量受施氮量的影响较大,但从模拟结果来看,硝态氮累积量在一定施氮范围内随着施氮量的增加而增加,到达峰值后土壤硝态氮累积量却随施氮量增加而减少,这与陈小莉等^[20]研究结果存在差异,可能是由于土壤硝态氮累积量因区域气温、降水和土壤性质的不同而异。在 220~240 kg/hm² 施氮量条件下, W2 灌溉水平更利于土壤硝态氮累积,累积量为 108.30~125.10 kg/hm²,说明合理的水氮调控有利于作物根区硝态氮累积,提高氮素利用率。

作物对氮素的利用一般分为吸收和转运过程^[21]。张雨新^[22]发现,过高或过低的灌水量都不利于小麦对氮素的吸收利用,这与本研究结论一致。姜春霞等^[23]研究指出,随着施氮量的增加,氮肥吸收效率和氮肥偏生产力呈下降趋势,旱地作物高产高效的施氮量为 180 kg/hm²。在 W1 灌溉水平下,氮素吸收效率随施氮量增加呈下降趋势,在 W2、W3 灌溉水平下,氮素吸收效率随施氮量增加表现出先增后减的趋势,220 kg/hm² 施氮水平下的吸收效率最高。对比 W2、W3 灌溉水平可以发现, W3 灌溉水平下的合理施氮范围内的氮素吸收效率低于 W2 灌溉水平,可能是由于更高的灌水量加速了土壤氮素向深层土壤运移,这与李昱岐等^[24]的研究结果一致。随着施氮量的增加,冬小麦氮肥偏生产力与氮素吸收效率呈相同的变化规律,增施氮肥并未引起显著增产。综合考虑产量、氮素吸收效率及氮肥偏生产力,测墒补灌 W2 灌溉水平和施氮量 220 kg/hm² 可作为华北冬小麦主产区较为合理的水氮管理措施。

4 结论

RZWQM 2 模型能够较好地模拟冬小麦测墒补灌条件下的土壤氮素迁移,测墒补灌 W2 灌溉水平和施氮量 220~240 kg/hm² 为较为合理的冬小麦水氮管理措施。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 徐国伟,王贺正,翟志华,等.不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响[J].农业工程学报,2015,31(10):132-141.
XU Guowei, WANG Hezheng, ZHAI Zhihua, et al. Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 132-141.
- [2] LI Shengdong, LI Zongxin, BI Xiangjun, et al. Nitrogen fertilizer management on wheat yield and nitrogen utilization[J]. Journal of Plant Nutrition, 2022, 45(13): 1953-1960.
- [3] 朱波,周明华,况福虹,等.紫色土坡耕地氮素淋失通量的实测与模拟[J].中国生态农业学报,2013,21(1):102-109.
ZHU Bo, ZHOU Minghua, KUANG Fuhong, et al. Measurement and simulation of nitrogen leaching loss in hillslope cropland of purple soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 102-109.
- [4] YANG Shihong, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Nitrogen loss from paddy field with different water and nitrogen managements in Taihu Lake region of China[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2013, 44(16): 2393-2407.
- [5] FENG Genxiang, ZHU Chengli, WU Qingfeng, et al. Evaluating the impacts of saline water irrigation on soil water-salt and summer maize yield in subsurface drainage condition using coupled HYDRUS and EPIC model[J]. Agricultural Water Management, 2021, 258: 107-175.
- [6] ANAPALLI S S, NIELSEN D C, MA L W, et al. Effectiveness of RZWQM for simulating alternative great plains cropping systems[J]. Agronomy Journal, 2005, 97(4): 1183-1193.
- [7] 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 Changliang, ZHANG Keqiang, YANG Deguang, 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.
- [8] SHAUKAT M, MUHAMMAD S, MAAS E D V L, et al. Predicting methane emissions from paddy rice soils under biochar and nitrogen addition using DNDC model[J]. Ecological Modelling, 2022, 466: 109896.
- [9] 夏文,林涛,褚晓升,等.RZWQM2模型模拟地膜覆盖时间对棉田氮素迁移特征和氮肥利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2022,28(1):114-126.
XIA Wen, LIN Tao, CHU Xiaosheng, et al. Effects of film mulching time on nitrogen transport and nitrogen use efficiency in a cotton field using RZWQM2[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(1): 114-126.
- [10] FANG Quanxiao, MA Liwang, YU Qiang, et al. Irrigation strategies to improve the water use efficiency of wheat-maize double cropping systems in North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1165-1174.
- [11] 周始威.基于RZWQM2模拟的西北旱区玉米控墒补灌模式下水氮最优调控研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
ZHOU Shiwei. Study on optimal regulation of water and nitrogen in maize production in arid area of Northwest China under supplementary irrigation regulating soil moisture based on RZWQM2 model[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [12] 刘明,张忠学,郑恩楠,等.不同水氮管理模式下水玉米光合特征和水氮利用效率试验研究[J].灌溉排水学报,2018,37(12):27-34.
LIU Ming, ZHANG Zhongxue, ZHENG Ennan, et al. Photosynthesis, water and nitrogen use efficiency of maize as impacted by different combinations of water and nitrogen applications[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(12): 27-34.
- [13] VALLEJO A, GARCÍA-TORRES L, D'ÉZ J A, et al. Comparison of N losses (NO₃⁻, N₂O, NO) from surface applied, injected or amended (DCD) pig slurry of an irrigated soil in a Mediterranean climate[J]. Plant and Soil, 2005, 272(1): 313-325.
- [14] 夏文,林涛,褚晓升,等.RZWQM2模型模拟地膜覆盖时间对南疆棉田水分利用效率及产量的影响[J].农业工程学报,2021,37(11):140-150.
XIA Wen, LIN Tao, CHU Xiaosheng, et al. Effects of mulching time on water use efficiency and yield of cotton in Southern Xinjiang simulated by RZWQM2 model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(11): 140-150.
- [15] 石学萍,刘伊明,王九明,等.灌水量对冬小麦产量和水分利用效率

- 的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(11): 51-52, 71.
- SHI Xueping, LIU Yiming, WANG Jiuming, et al. Effects of irrigation amount on the yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(11): 51-52, 71.
- [16] 樊军, 郝明德. 旱地农田土壤剖面硝态氮累积的原因初探[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 263-266.
- FAN Jun, HAO Mingde. Nitrate accumulation in soil profile of dryland farmland[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2003, 22(3): 263-266.
- [17] 程立平, 齐光, 李彦娇, 等. 黄土塬区旱作冬小麦土壤水分利用特征的稳定同位素分析[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 170-176.
- CHENG Liping, QI Guang, LI Yanjiao, et al. Stable isotope analysis of soil water utilization by winter wheat in dryland of loess tableland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 170-176.
- [18] 石玉, 于振文. 施氮量和氮肥底追比例对小麦 20 产量、品质及氮肥利用率的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(4): 710-714.
- SHI Yu, YU Zhenwen. Effect of nitrogen rate and ratio of base and topdressing fertilizer on yield, quality and fertilizer-N use efficiency in wheat cultivar Jimai 20[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(4): 710-714.
- [19] 崔政军, 刘栋, 吴兵, 等. 水氮耦合对旱地胡麻产量形成与花后氮素积累转运的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 909-918.
- CUI Zhengjun, LIU Dong, WU Bing, et al. Effects of water and nitrogen coupling on grain yield formation and nitrogen accumulation, transportation of oil flax in dryland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(3): 909-918.
- [20] 陈小莉, 李世清, 王瑞军, 等. 半干旱区施氮和灌溉条件下覆膜对春玉米产量及氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 652-658.
- CHEN Xiaoli, LI Shiqing, WANG Ruijun, et al. Effect of film mulching on yield and nitrogen balance of spring maize under different nitrogen and irrigation treatments in semi-arid region[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2008, 14(4): 652-658.
- [21] MEIJIDE A, DÍEZ J A, SÁNCHEZ-MARTÍN L, et al. Nitrogen oxide emissions from an irrigated maize crop amended with treated pig slurries and composts in a Mediterranean climate[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 121(4): 383-394.
- [22] 张雨新. 生育期水分调控对河西春小麦生长和水氮利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- ZHANG Yuxin. Effects of water regulation in growth season on growth and water-nitrogen utilization of spring wheat in the Hexi Region[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [23] 姜春霞, 刘化涛, 张伟, 等. 减量施氮对鲜食玉米产量、氮素利用及土壤硝态氮含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(12): 61-67.
- JIANG Chunxia, LIU Huatao, ZHANG Wei, et al. Effect of reduced nitrogen application on yield, nitrogen utilization of fresh waxy maize and soil nitrate nitrogen content in Shanxi dryland[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(12): 61-67.
- [24] 李昱岐, 王凤, 徐征和, 等. 基于 RZWQM 模型的夏玉米水氮管理优化及淋溶过程模拟[J]. 节水灌溉, 2022(3): 50-55, 60.
- LI Yuqi, WANG Feng, XU Zhenghe, et al. Optimization of water and nitrogen management and simulation of leaching process of summer maize based on RZWQM model[J]. Water Saving Irrigation, 2022(3): 50-55, 60.

Characteristics of soil nitrogen transport under moisture measurement and supplemental irrigation in winter wheat

YU Jing¹, PANG Guibin^{1*}, YU Haoyang¹, XUE Jianwen¹, CONG Xin¹, ZHANG Lizhi², WANG Xin², XU Zhenghe¹

(1. College of Water Resources and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China;

2. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250014, China)

Abstract: 【Objective】 To explore reasonable water and nitrogen management practices in the main winter wheat producing areas of North China. 【Method】 A field experiment was carried out at the Irrigation Experiment Centre Station of Shandong Province from 2020 to 2021 using "Qimai No.1" wheat as the material. Four irrigation treatments were set up, with the upper and lower limits of irrigation at 60%-70% (W1), 70%-80% (W2), 80%-90% (W3) and no irrigation (CK) of the field water holding capacity, and the application rate of nitrogen was 240 kg/hm². The data from the experiments were used to determine the rate of the parameters of the RZWQM 2 model and to validate the model, and the model was applied to simulate the effects of the water and nitrogen regulation on the accumulation of soil nitrate nitrogen and nitrogen use. The model was used to simulate the effects of water and nitrogen regulation on soil nitrate nitrogen accumulation and nitrogen utilisation. 【Result】 The results showed that the standard root mean square errors (NRMSE) of soil profile water content, soil nitrate nitrogen amount and yield ranged from 9.3% to 25.0%, 0.3% to 29.7% and 4.03% to 11.19%, respectively, and the mean relative errors (MRE) ranged from 8.0% to 24.2%, 1.4% to 30.4%, and 5.29% to 11.98%, respectively, with consistency index D were all higher than 0.65; using the corrected RZWQM 2 model, five nitrogen levels (180, 200, 220, 240 kg/hm² and 260 kg/hm²) were set at W1, W2 and W3 moisture measurement and recharge levels, and the soil nitrate nitrogen accumulation produced at the W2 and W3 levels was increased by 30.9%-59.7% and 49.6%-79.6%, respectively, compared with the W1; The simulation concluded that N application of 220-240 kg/hm² and W2 levels were more favourable for soil nitrate N accumulation in the 0-1 m soil layer, with accumulation of 108.30-125.10 kg/hm². Nitrogen uptake efficiency and nitrogen fertilizer bias productivity of N application of 220 kg/hm² and W2 levels were 59% and 23.4 kg/kg, respectively. 【Conclusion】 In conclusion, the RZWQM 2 model can be used to simulate soil nitrate nitrogen accumulation and nitrogen utilisation in the main production area of winter wheat in North China, and moisture supplemental irrigation W2 and nitrogen application of 220-240 kg/hm² are more reasonable water and nitrogen management measures in this area.

Key words: RZWQM 2 model; supplemental irrigation by measuring moisture; water and nitrogen regulation; nitrate-nitrogen accumulation; nitrogen use efficiency

责任编辑: 韩洋