

应用 RZWQM 模型模拟华北玉米土壤剖面水氮迁移及淋溶特征

薛长亮^{1,2}, 张克强¹, 张国印³, 杨德光^{2*}, 宋 帅⁴, 王 风^{1*}

(1.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2.东北农业大学农学院, 哈尔滨 150030; 3.河北省农林科学院农业资源环境研究所, 石家庄 050051; 4.中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要:以河北石家庄大河实验站玉米-小麦轮作系统为研究对象,应用 RZWQM 模型对玉米季土壤剖面水分和硝态氮含量、硝态氮淋溶和氨挥发特征以及作物产量进行模拟,提出控制硝态氮淋溶的玉米施肥方案。设置冬小麦-夏玉米轮作周期施氮量分别为 575、400、215、0 kg·hm⁻² 4 个处理,应用轮作周期施氮量为 575 kg·hm⁻² 处理玉米季土壤剖面含水量、硝态氮和产量数据进行模型参数率定,应用其他 3 个施肥处理进行模型参数的验证。结果表明:率定与验证过程中土壤剖面含水量均方根误差方差分别为 0.003 6、0.010 6 cm³·cm⁻³,4 个处理土壤剖面硝态氮 RMSE 分别为 6.56、7.30、3.64、1.53 mg·kg⁻¹。在模型参数率定和验证的基础上,开展了 RZWQM 模型对轮作制度下玉米季土壤硝态氮淋溶和氨挥发的预测,虽然预测结果与实际值存在偏差,但在总体上 RZWQM 模型可以较好地模拟华北石家庄地区土壤剖面水氮的迁移转化,并且可为日后进一步准确预测和估算更大地区的土壤硝态氮淋溶提供一种便捷可靠的方法。

关键词:RZWQM 模型;玉米;氮素淋溶;华北地区;施肥量

中图分类号:S513 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)11-2179-08 doi:10.11654/jaes.2014.11.016

Simulating Migration and Leaching of Water and Nitrogen in Maize Soil Profile in North China Plain with RZWQM Model

XUE Chang-liang^{1,2}, ZHANG Ke-qiang¹, ZHANG Guo-yin³, YANG De-guang^{2*}, SONG Shuai⁴, WANG Feng^{1*}

(1.Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 2.Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3.Institute of Agro-Resource and Environment, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China; 4.Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: This study simulated the relationship between soil nitrogen leaching and crop yield in North China Plain using Root Zone Water Quality Model (RZWQM), and the feasibility of model to optimize fertilization was also explored. A rotation trial of winter wheat-summer maize was conducted on Dahe experiment station in Shijiazhuang, Hebei. Four nitrogen treatments were used, including 575 kg·hm⁻² (N₃), 400 kg·hm⁻² (N₂), 215 kg·hm⁻² (N₁), and 0 kg·hm⁻² (N₀). Water contents and nitrogen concentrations in different layers of soil profile from the N₃ treatment were used for model calibration, and the data obtained from three other treatments were used for model validation. The calibration and validation results showed the Root Mean Square Error (RMSE) of water contents in soil profile were 0.003 6 cm³·cm⁻³ and 0.010 6 cm³·cm⁻³, and nitrate RMSEs of N₃, N₂, N₁ and N₀ treatments were 6.56 mg·kg⁻¹, 7.30 mg·kg⁻¹, 3.64 mg·kg⁻¹ and 1.53 mg·kg⁻¹, respectively. We further predicted the dynamics of nitrate leaching and ammonia volatilization during summer maize using the model parameters. The results revealed that the amount of nitrate leaching and ammonia volatilization reduced significantly as the quantity of nitrogen fertilizer was decreased during the cultivation, and that this model is an efficient tool to predict nitrate leaching in soil profile during crop cultivation in North China Plain even though there was slight deviation in prediction.

Keywords: RZWQM model; maize; nitrogen leaching; North China Plain; fertilizer

收稿日期:2014-06-15

基金项目:公益性行业(环保)科技项目(201309035-1);“十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAD15B02)

作者简介:薛长亮(1989—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士,主要从事面源污染及控制研究。E-mail:kila215@163.com

*通信作者:杨德光 E-mail:deguangyang@sina.com;王 风 E-mail:wangfeng_530@163.com

由于普遍增施化肥以及不合理的农业管理措施,造成氮肥以挥发和淋溶等形式损失增大,硝态氮的淋失是农田氮素损失的重要途径之一,由此导致的对地下水资源污染问题日益突出^[1-2]。土壤剖面残留较高的氮素易形成垂直向下运移的趋势^[3],并伴随灌溉与降雨下渗造成地下水污染^[4-5]。如何在保护地下水水质和防控非点源污染的同时合理进行农田施肥已成为国内外研究热点^[1,6-7,14-15]。目前,计算和评估农田淋溶的方法包括直接测定法和其他模型法:前者包括淋溶盘或土水势法,由于其仅能测定点上数据,区域代表性差;后者在国内正在推广改进以及需要对国内区域环境进行耦合调整,实用性才能得到提高^[8-9,12]。模型模拟法因具有操作简单、模拟准确和代表性广等优点而成为评估和预测淋溶的核心方法,目前应用较多的模型有GLEAMS(Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems)^[8]、SWAT(Soil Water Assessment Tool)^[9-10]等,其在综合分析作物生产和土壤氮素运移方面还有待加强^[11-12]。本文选取 Root Zone Water Quality Model(RZWQM)模型耦合了农业生产管理以及环境影响的模块,成为预测和评估农田氮素淋溶的新工具^[12-13]。

RZWQM 模型是美国农业部大平原系统研究所(USDA-ARS, Great Plain System Research Unit)于1992年推出的农业系统作物和环境管理模型。该模型整合了作物根区所有影响作物生长的物理、生物和化学过程^[15-16],在我国华北地区已经进行了一些应用尝试,如Wang等^[17]用其优化污水灌溉条件下冬小麦-夏玉米施肥措施, Ma和Fang等^[18-20]模拟了不同灌溉制度下作物产量及水分利用效率。已有的研究多侧重于灌溉和施肥量的利用效率研究方面,应用模型对农田施肥过程硝态氮淋溶的评估虽然已有研究,但还处于初级阶段^[21-22]。该模型对田间实测数据指标要求高,根据实测数据对模型参数进行率定和验证后,可以在华北平原其他数据缺乏的田间进行更广泛的验

证或推广^[23],为华北地区农田硝态氮淋溶预测开辟新的思路和估算方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料

冬小麦-夏玉米轮作试验在河北省农林科学院大河试验站进行。该地区属于中温带大陆性季风气候,年均温度为12.9℃。年均降水量为496.6 mm左右,其中春季降雨量较少,7—9月降水量占全年总降水量的70%。

田间施肥试验始于2003年,但从2009年开始气象数据比较齐全,故本文以2009年田间实测数据进行模型参数率定,以2010和2011年试验数据进行模型参数验证。土壤类型为粘壤质洪冲积石灰性褐土,土壤剖面基本理化性状见表1。其中初始硝态氮和初始铵态氮数据在小麦收获后,玉米播种前测量,作为模型的本底值。设置4个冬小麦-夏玉米轮作周期施氮量,分别为0(N0)、215(N1)、400(N2)、575 kg·hm⁻²(N3)。每个处理设4次重复,随机区组排列。小区面积为44 m²。氮、磷、钾肥分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。小麦季氮肥施用量分别为0、150、250、350 kg·hm⁻²,磷肥(P₂O₅)225 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)105 kg·hm⁻²,氮肥于小麦播前和拔节期分两次施用(底追各半),磷钾肥做底肥一次施用。玉米季对应施氮量分别为0、65、150、225 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)施用量52.5 kg·hm⁻²,氮肥在玉米大喇叭口期和抽雄期分两次施用,钾肥在大喇叭口期一次施用。玉米收获时以小区计算产量,且采集1 m深土壤剖面样品,土样采集时间分别为2009年10月12日、2010年10月9日和2011年10月12日。挖取小区1 m深土层剖面,每20 cm为一层,分别用环刀取单位体积土样进行数据测定,分别测定土壤含水率以及土壤硝态氮含量,采用1 mol·L⁻¹ KCl浸提比色法测定硝态氮。

1.2 试验模型简介

RZWQM 模型是美国农业部大平原系统研究所

表1 土壤基本参数数据
Table 1 Soil basic parameters used

土壤深度 Soil depth/cm	土壤容重 Bulk density/g·cm ⁻³	田间持水率 Field water content/%	体积含水率 Volumetric water content /%	饱和导水率 Klat/cm·h ⁻¹	土壤 pH Soil pH	初始硝态氮 Initial NO ₃ -N/mg·kg ⁻¹	初始铵态氮 Initial NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹
0~20	1.45	28.08	17.06	0.32	8.2	13.10	0.91
20~40	1.50	27.52	16.17	1.20	8.3	9.95	1.20
40~60	1.51	26.52	16.38	1.47	8.3	6.58	0.88
60~80	1.46	27.78	15.37	1.40	8.0	8.20	1.03
80~100	1.49	25.24	14.19	1.61	8.1	11.22	1.64

研发的能够对土壤根区水质、土壤养分运移以及作物生长进行综合模拟的模型,由 6 个模块组成:物理模块、化学模块、养分模块、作物生长模块、杀虫剂模块和管理模块。RZWQM 模型包括“天”和“时”两个时间尺度:以“天”为尺度计算离子、肥料、灌溉水、耕地措施,以及潜在蒸散发和蒸腾量;水分迁移及营养化学过程以“时”尺度计算,包括土壤水分的再分配、营养盐的迁移转化、渗滤、径流、杀虫剂淋洗、热量损耗、实际蒸散发、植物养分吸收过程等,然后计算杀虫剂迁移转化过程(如果涉及的话)、碳氮迁移转化过程和土壤物质平衡过程,最后运行植物生长模块。RZWQM 模型能模拟土壤氮转化的主要过程,包括作物氮残留、有机态的矿化、氮素固定、氮素淋溶、氮挥发、硝化和反硝化等。应用该模型可以较好地模拟氮素的迁移转化,获得氮素淋溶数值和评估淋溶情况更加方便快捷,从而有针对性地实行优化施肥措施以削减损失。

模型初始输入数据包括气象数据和土壤基本数据。其中气象数据包括模拟期间日降水、日最高温、日最低温、风速、相对空气湿度等;土壤基本数据包括土层容重、田间持水量、土壤 pH 值、土壤含水率、剖面硝态氮和铵态氮初始含量(表 1)。

1.3 模拟效果评价

模型参数的率定遵循先水分模块,然后养分模块,最后作物模块的顺序^[24]。模型率定效果的评价是判定参数优化的关键,不同统计指标各有优缺点^[25],本文在模型参数率定过程中采用归一化误差(均方根差/平均值)进行参数优化^[11],即不断改变参数值以减小模拟结果和实测结果的差异,以归一化误差数值最

小时模型选定的参数作为最终率定结果。选用两个指标评价模型运行的结果:均方误差(RMSE),属于绝对误差指标,反映模拟效果的绝对无偏性和极值效应;平均相对误差(MRE),属于相对误差指标,反映模拟效果的相对无偏性。模型参数率定和验证效果通过 RMSE 和 MRE 体现,当 RMSE 达到最小值而 MRE 趋近于 0,表明模拟效果较优。计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}$$

$$RE = \frac{P_i - Q_i}{Q_i} \times 100\%$$

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RE$$

式中: N 是观测值的个数; Q_i 表示第 i 个观测值; P_i 表示第 i 个观测值的模拟值。

2 结果与分析

2.1 模型水分参数率定与验证

应用 2009—2011 年 N3 处理剖面实测水分数据率定模型参数,以 N2、N1 和 N0 处理实测数据验证模型参数(图 1)。2009—2011 年玉米收获时土壤剖面含水率模拟值与实测值变化趋势相同。2009 年在 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层的率定结果 RMSE 分别为 0.001 9、0.006 0、0.002 5、0.007 6、0.000 2 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, MRE 分别为 -1.13%、-3.43%、-1.35%、4.22%、-0.11%。在 2010—2011 年 N2、N1 和 N0 处理剖面含水率验证结果表明 RMSE 分别为 0.012 2~0.012 4、0.011 5~0.011 7、0.011 0~0.011 3、0.004 6~

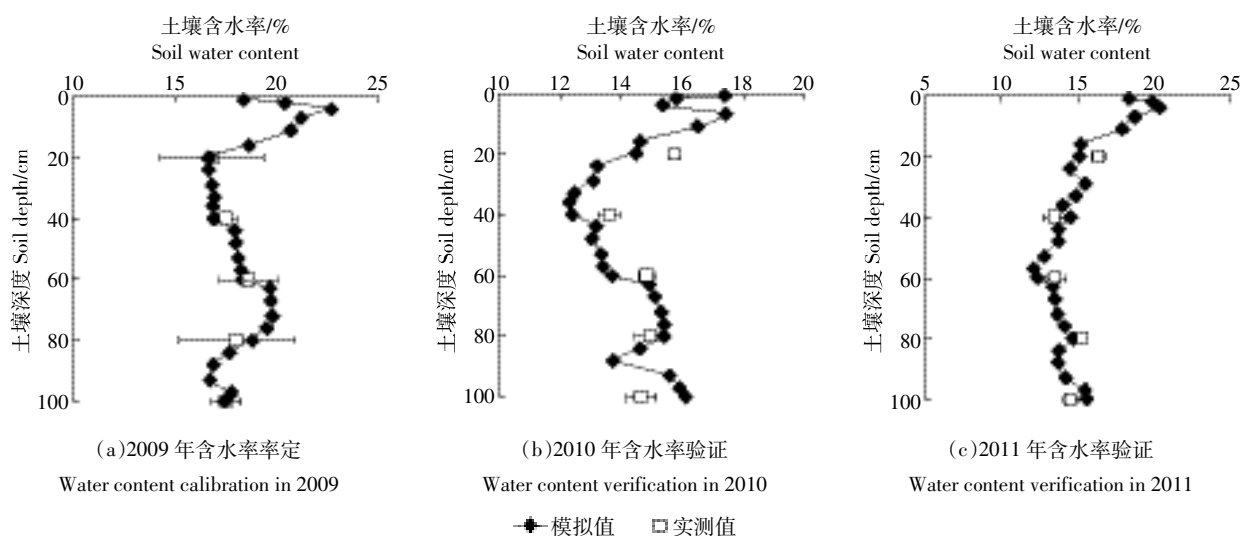


图 1 N3 处理土壤剖面含水率模拟值与实测值对比

Figure 1 Comparison of simulated and measured soil water contents in N3 treatment

0.006 1、0.010 2~0.014 8 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, MRE 分别为-7.81%~-7.53%、-8.54%~-8.23%、-8.80%~-7.42%、-4.00%~-3.08%和 7.07%~10.11%。

方差分析结果表明,上部土层含水率实测值和模拟值能够较好地吻合,效果优于下部土层,可能因为模型没有良好地模拟地表水分蒸散量与水分下渗作用造成的。但实测值与模拟值之间差异不显著,模型水分模块可以较好地反映土壤实际含水率。

2.2 土壤剖面硝态氮参数率定

2009—2011 年 N3 处理土壤剖面硝态氮模拟值与实测值变化趋势相同(图 2),0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层 RMSE 变化范围分别为 4.32~7.30、1.45~7.47、2.46~6.16、2.91~5.84、3.94~6.01 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, MRE 变化范围分别为 -11.7%~27.7%、-4.9%~

44.7%、-10.5%~33.8%、-16.2%~0.1%、-17.9%~26.7%。N3 处理土壤剖面硝态氮模拟值可以较好地反映土壤剖面硝态氮实测值。

2.3 模型硝态氮验证结果

应用 2009—2011 年 N2、N1 和 N0 处理剖面土壤硝态氮实测值对模型参数进行了验证。N2 处理土壤硝态氮模拟值与实测值变化趋势与 N3 处理相似(图 3),且方差分析结果表明实测值与模拟值之间差异不显著,对土壤剖面硝态氮含量模拟效果可以接受。此外,N2、N1 和 N0 处理模型剖面硝态氮含量模拟效果见表 2。统计分析结果表明模型可以模拟不同氮肥施用量条件下土壤剖面硝态氮含量。

2.4 作物产量的率定和验证

对土壤剖面含水量和硝态氮含量进行参数率定

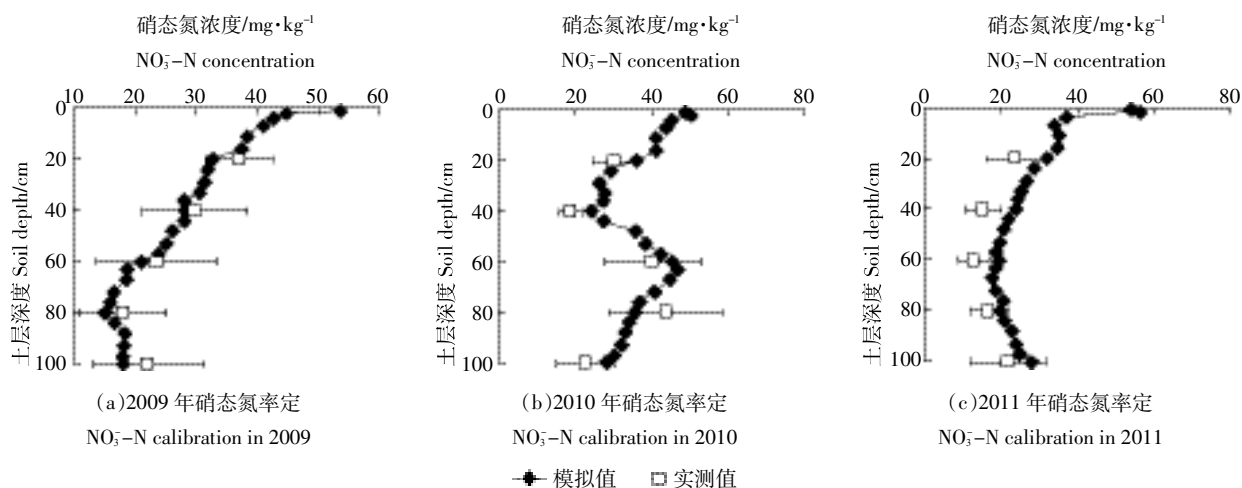


图 2 N3 处理土壤剖面硝态氮模拟值和实测值对比

Figure 2 Comparison of simulated and measured nitrate concentrations in N3 treatment

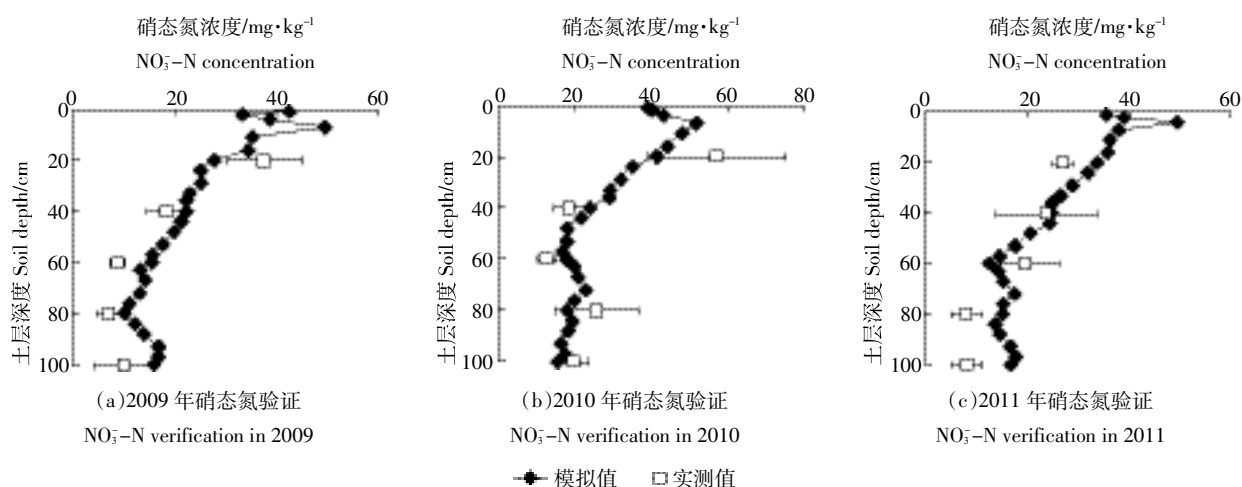


图 3 N2 处理土壤剖面硝态氮模拟值和实测值对比

Figure 3 Comparison of simulated and measured nitrate concentrations in N2 treatment

表 2 2009—2011 年不同施氮量条件下硝态氮验证参数

Table 2 Nitrate concentrations in different nitrogen applications from 2009 to 2011

土壤深度 Soil depth/cm	N2 处理下 RMSE RMSE under N2 treatment/mg·kg ⁻¹	N2 处理下 MRE MRE under N2 treatment/%	N1 处理下 RMSE RMSE under N1 treatment/mg·kg ⁻¹	N1 处理下 MRE MRE under N1 treatment/%	N0 处理下 RMSE RMSE under N0 treatment/mg·kg ⁻¹	N0 处理下 MRE MRE under N0 treatment/%
0~20	11.26	-9.32	4.79	-17.90	2.72	-37.04
20~40	3.99	18.91	3.57	37.63	0.77	-27.78
40~60	6.40	28.06	2.14	36.09	1.11	25.30
60~80	5.99	33.71	4.49	43.83	1.10	-16.43
80~100	6.50	46.24	3.57	57.05	2.14	43.98

和验证后,就可以进行作物产量率定和验证。2009—2011 年作物产量模型模拟值与实测值比较见图 4。各处理的产量模拟值均小于实测值,不同处理间产量的模拟值之间差异不明显,而且不同处理间实测值之间差异也不明显。这主要是因为试验开始前施氮量很大,导致土壤残留和积累的氮素已经能够满足作物生长需要。

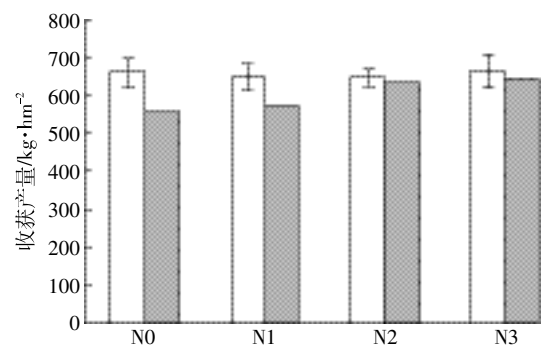
2.5 土壤氮挥发和淋溶预测

对土壤剖面水分和氮素,以及作物产量等参数率定和验证后,模型主要参数就被确定下来,可以开展不同施氮量条件下土壤氮挥发和硝态氮淋溶的预测研究。通过模型对土壤氮挥发进行的预测表明,土壤氮挥发与施氮量呈正相关关系。轮作周期内施氮量分别为 575、400、215、0 kg·hm⁻² 时,玉米季土壤氮挥发分别为 109.21、70.68、32.04、0.64 kg·hm⁻²。氮累计挥发损失约占全年施氮量的 17.2%。预测结果稍高于其他文献资料,具体模拟过程还有待细化^[26-27]。

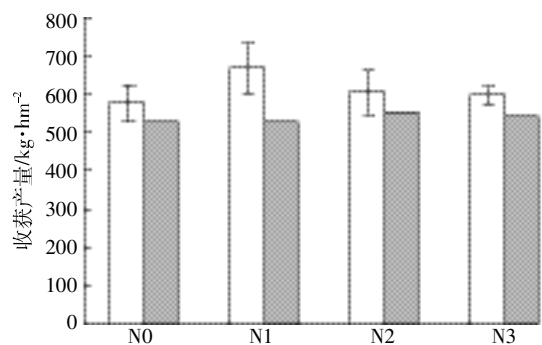
土壤剖面 1 m 以下硝态氮淋溶预测结果见图 5。可以看出,2009—2011 年土壤剖面硝态氮淋溶量随施氮量的减少而降低,在 2010 年不同施氮量处理硝态氮淋溶量对应比其他年份有所降低。这是由于 2010 年全年降雨量为 432 mm,均小于其前后两年 200 mm 左右,同时也说明土壤硝态氮淋溶与降水量密切相关。轮作周期内施氮量分别为 575、400、215、0 kg·hm⁻² 时,玉米季硝态氮淋溶量平均为 79.71、51.04、26.33、3.45 kg·hm⁻²。

3 讨论

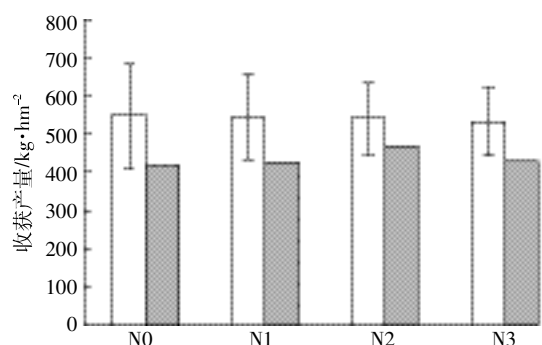
本文运用 RZWQM 模型对不同施氮水平下华北农田土壤水分氮素迁移转化以及氮挥发和淋溶进行了模拟和预测。通过依次对水分模块、养分模块和作物生长模块参数的率定和验证表明模拟结果在可接受范围内,再次印证 RZWQM 模型已经可以应用于



(a) 2009 年硝态氮验证
NO₃-N verification in 2009



(b) 2010 年硝态氮验证
NO₃-N verification in 2010



(c) 2011 年硝态氮验证
NO₃-N verification in 2011

□ 实测值 ■ 模拟值

图 4 2009—2011 年不同施氮量条件下产量关系比较

Figure 4 Comparison of simulated and measured yields in different nitrogen applications from 2009 to 2011

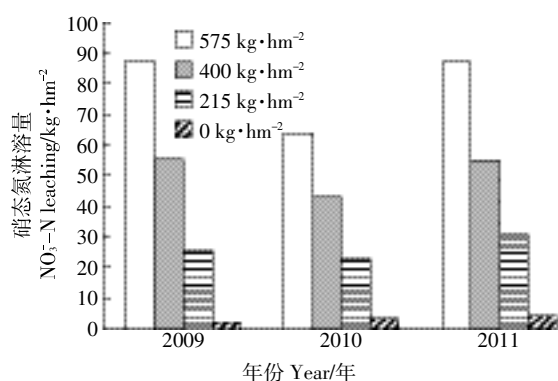


图5 2009—2011年不同施氮量条件下预测的1 m以下土层硝态氮淋溶情况

Figure 5 Predicted nitrate leaching below 1 meter in different nitrogen applications from 2009 to 2011

平原地形氮素迁移转化规律的研究^[28],也进一步证实RZWQM模型可以预测和评估平原地区施肥条件下土壤淋溶和氨挥发。当土壤类型为粘壤土、饱和导水率较低、pH值偏碱性时,模型参数率定过程中需要注意初期土壤含水量与实测值进行耦合调节,这是后期准确模拟剖面硝态氮含量的基础^[29-30]。此外,模型对不同施氮量水平下土壤剖面硝态氮模拟效果有一定的偏差,RMSE值最大达到 $12.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,可能因为前期施肥量过高导致土壤剖面氮素含量累积,对此问题还需要更进一步提高模型模拟效果。总体来看,模型参数率定和验证的效果可以接受。施氮量显著影响土层中硝态氮的累积,在土壤结构和降水的作用下会明显发生淋溶^[31],对环境及地下水造成污染。在封丘国家试验站有学者得出,在冬小麦-夏玉米轮作体系下,全年氮肥施用量最大为 $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,本研究3年施肥情况显示,2 m内不同土层硝态氮可累计达到 $260 \sim 418 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,如继续增加施氮量,将会造成严重的地下水源污染^[32]。在本文不同施氮量处理下,3年土壤平均残留硝氮量分别为 $397.54(\text{N}_3)$ 、 $225.76(\text{N}_2)$ 、 $109.03(\text{N}_1)$ 、 $6.88 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}(\text{N}_0)$ 。基本符合华北地区情况。

对硝态氮淋溶和氨挥发过程的模拟表明,玉米季土壤硝态氮淋溶量随施氮量下降而呈显著降低。轮作周期施氮量分别为 575 、 400 、 $215 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,2009—2011年硝态氮淋溶量均值分别占轮作周期总施氮量的 13.9% 、 12.8% 和 12.2% ,分别占玉米季施氮量的 35.4% 、 34.0% 和 40.5% 。表现出玉米季硝态氮淋溶较大,而相对前茬小麦作物当季玉米施氮量却较低。主要因为以往的研究多以轮作周期为对象,分析冬小麦-夏玉米轮作周期内氮素迁移转化,而忽略了不同

作物间的硝态氮淋溶相对重要程度。本研究发现虽然前茬小麦施氮量大于玉米季,反而玉米季淋溶量较大。这是因为华北地区降水主要集中在7—9月,麦季土壤存留的大量硝态氮在玉米季随降水下渗和淋失。由此推测,虽然麦季施氮量过高但淋溶可能相对玉米季较小,而在玉米季发生了硝态氮的损失和污染。此结论还有待结合整个轮作周期的模型模拟进行深入分析。氨挥发量和施氮量也具有正相关关系,3年氨挥发均值分别占轮作周期总施氮量的 18.9% 、 17.7% 和 15.0% 。模型预测结果基本符合当地情况。

模型不仅可对不同施氮量土壤剖面水分和氮素迁移情况进行模拟,同时也可以评估硝态氮淋溶损失以及作物产量。有研究表明,施肥过量会增加土壤硝态氮含量,增加氮素淋溶的风险和通过挥发途径的氮素损失^[33]。模型模拟结果表明,2009年玉米季施氮 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 作物产量达到最大,但是与其他处理间差异没有达到显著水平,而在模拟其他处理时存在一定偏差。这可能是因为农田养分投入和作物养分吸收间存在不平衡^[34],并且土壤本底值偏高,在不施肥的情况下作物利用土壤中原有氮肥而表现出对施氮量反映不明显。2010年玉米季施氮量 $65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 下,作物产量同样能保持在较高水平,全年总施氮量为 $215 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右就可以获得较高的玉米产量。从玉米产量、氮素的利用以及土壤中硝态氮积累综合考虑,夏玉米合理施氮量应该控制在 $195 \sim 260 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内^[35-36]。本试验结果进一步证明了该结论,在华北地区应进一步降低施氮量,同时也证实RZWQM模型在华北平原地区对农田氮素淋溶评估的可操作性。而RZWQM模型可以有效模拟作物氮素迁移、淋溶和氨挥发,在实测数据参数验证基础上,为提供合理有效控制氮素淋溶的施肥量提供基础。

4 结论

通过华北平原的玉米季土壤剖面含水量和硝态氮含量以及作物产量等实测数据,对RZWQM模型参数进行了率定和验证,并分析了该模型用于评估硝态氮淋溶和氨挥发的可行性。结果表明,冬小麦-夏玉米轮作周期施氮量分别为 575 、 400 、 215 和 $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,2009—2011年土壤剖面硝态氮平均均方误差分别为 6.56 、 7.30 、 3.64 、 $1.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均相对误差分别为 26.7% 、 17.7% 、 32.7% 和 -37.2% 。硝态氮淋溶和氨挥发平均损失量占轮作周期施氮量的 13.0% 和 17.2% ,且随施氮量的减少而降低。本研究对大田条件

下土壤氮素运移的模型模拟取得了较为理想的结果。在此结果上,推算轮作周期施氮量 $215 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时可以有效控制硝态氮的淋溶损失。此外,进一步完善 RZWQM 模型小麦季的参数率定对于拓展模型的预测功能极为重要。

参考文献:

- [1] 李 天, 杨路华, 高惠娟, 等. 河北平原区农田土壤硝态氮分布规律及影响因素分析[J]. 节水灌溉, 2013, 7: 30–33.
LI Tian, YANG Lu-hua, GAO Hui-yan, et al. Analysis of Hebei plain soil nitrate nitrogen distribution and influencing factors[J]. *Water Saving Irrigation*, 2013, 7: 30–33.
- [2] Zhang Z Y, Kong L L, Lei Z. Fate characteristics of nitrogen in runoff from a small agricultural watershed on the south of Huaihe River in China[J]. *Environ Earth Sci*, 2011, 66(3): 835–848.
- [3] 董娴娟, 刘新宇, 巨晓棠, 等. 潮褐土冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥后效及去向研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(11): 2209–2216.
DONG Xian-xian, LIU Xin-yu, JU Xiao-tang, et al. Fate and residual effect of fertilizer nitrogen under winter wheat–summer maize rotation in meadow cinnamon soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(11): 2209–2216.
- [4] 潘家荣, 巨晓棠, 刘学军, 等. 水氮优化条件下在华北平原冬小麦/夏玉米轮作中化肥氮的去向[J]. 核农学报, 2009, 23(2): 334–340.
PAN Jia-rong, JU Xiao-tang, LIU Xue-jun, et al. Fate of fertilizer nitrogen for winter wheat/summer maize rotation in North China Plain under optimization of irrigation and fertilization[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(2): 334–340.
- [5] Ju X T, Liu X J, Zhang F S, et al. Nitrogen fertilization soil nitrate accumulation and policy recommendations in several agricultural regions of China[J]. *Ambio*, 2004, 33(6): 305–330.
- [6] 赵 亮. RZWQM 模型模拟夏玉米生长条件下土壤水分及氮素分布研究[J]. 节水灌溉, 2013, 9: 30–39.
ZHAO Liang. RZWQM model to simulate the growth of summer maize under the conditions of soil water and nitrogen distribution study[J]. *Water Saving Irrigation*, 2013, 9: 30–39.
- [7] 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 200–205.
CHUAN Li-min, ZHAO Tong-ke, AN Zhi-zhuang, et al. Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soils[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(11): 200–205.
- [8] Knisel W G, Turtola E. Gleams model application on a heavy clay soil in Finland[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 43(3): 285–309.
- [9] Farida D, Javier B, Ahmed S. SWAT application in intensive irrigation systems: Model modification, calibration and validation[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 470–471(12): 227–238.
- [10] Lam Q D, Schmalz B, Fohrer N. Modeling point and diffuse source pollution of nitrate in a rural lowland catchment using the SWAT model[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(2): 317–325.
- [11] 李发东, 宋 帅. 陆地生态系统水体中硝酸盐行为过程模拟原理、进展及存在问题[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(2): 52–60.
LI Fa-dong, SONG Shuai. Review of Process-based Models of nitrate fate and their developments and limitations in terrestrial ecosystems[J]. *South–North Water Transfers and Water Science and Technology*, 2013, 11(2): 52–60.
- [12] Han J G, Li Z B, Li P, et al. Nitrogen and phosphorous concentrations in runoff from a purple soil in an agricultural watershed[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(5): 757–762.
- [13] Ma L, Hoogenboom G, Ahuja L R, et al. Evaluation of the RZWQM–CERES–Maize hybrid model for maize production[J]. *Agric Syst*, 2006, 87(3): 274–295.
- [14] Van der Laan M, Annandale J G, Bristow K L. Modelling nitrogen leaching: Are we getting the right answer for the right reason?[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 133: 74–80.
- [15] 王 风, 张克强, 黄治平, 等. RZWQM 模型介绍及其应用进展[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(4): 501–504.
WANG Feng, ZHANG Ke-qiang, HUANG Zhi-ping, et al. Introduction and application progress of the root zone water quality model (RZWQM)[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2008, 24(4): 501–504.
- [16] Cameira M R, Fernando R M, Ahuja L R, et al. Using RZWQM to simulate the fate of nitrogen in field soil–crop environment in the Mediterranean region[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 90(1): 121–136.
- [17] Wang X P, Huang G H. Evaluation on the irrigation and fertilization management practices under the application of treated sewage water in Beijing, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(9): 1011–1027.
- [18] Ma L, Malone R W, Jaynes D B, et al. Simulated effects of nitrogen management and soil microbes on soil nitrogen balance and crop production[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2008, 72: 1594–1603.
- [19] Fang Q, Ma L, Yu Q, et al. Irrigation strategies to improve the water use efficiency of wheat–maize double cropping systems in China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(18): 1165–1174.
- [20] Fang Q, Ma L, Yu Q, et al. Modeling nitrogen and water management effects in a wheat–maize double-cropping system[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(6): 2232–2242.
- [21] Cameira M R, Fernando R M, Ahuja L R, et al. Simulating the fate of water in field soil–crop environment[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 315(1–4): 1–24.
- [22] He J Q, Dukes M D, Jones J W, et al. Identifying irrigation and nitrogen best management practices for sweet corn production on sandy soils using CERES–Maize model[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 109: 61–70.
- [23] Fang Q X, Ma L, Green T R, et al. Water resources and water use efficiency in the North China Plain: current status and agronomic management options[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1102–1116.
- [24] Hanson J D, Rojas K W, Shaffer M J. Calibrating the root zone water quality model[J]. *Agron J*, 1999, 91(2): 171–177.
- [25] Legates D R, McCabe G J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimate model validation[J]. *Water Resour*

- Res, 1999, 35(1):233-241.
- [26] 王秀斌, 周卫. 优化施肥条件下华北冬小麦/夏玉米轮作体系的土壤氮挥发[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2):344-351.
WANG Xiu-bin, ZHOU Wei. Effect of optimized nitrogen application on ammonia volatilization from soil in winter wheat-summer corn rotation system in Northern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2):344-351.
- [27] 马银丽, 吉艳芝. 施氮水平对小麦-玉米轮作体系氮挥发与氧化亚氮排放的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2):225-230.
MA Yin-li, JI Yan-zhi. Effects of N fertilization rates on the NH_3 volatilization and N_2O Emissions from the wheat-maize rotation system in North China Plain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(2):225-230.
- [28] Niu L A, Hao J M, Zhang B Z, et al. Influences of long-term fertilizer and tillage management on soil fertility of the North China Plain[J]. *Pe-dosphere*, 2011, 21(6):813-820.
- [29] Hu C, Saseendran S A, Green T R, et al. Evaluating nitrogen and water management in a double-cropping system using RZWQM[J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5:493-505.
- [30] Sara Esmaili, Neil R Thomson, Bryan A Tolson, et al. Quantitative global sensitivity analysis of the RZWQM to warrant a robust and effective calibration[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511:567-579.
- [31] 郭子鹏, 任希文, 杨路华, 等. 河北平原区农田硝态氮分布规律研究[J]. 河北农业大学学报, 2013, 36(1):37-40.
GUO Zi-peng, REN Xi-wen, YANG Lu-hua, et al. Experimental study on nitrate nitrogen distribution characteristics in the Hebei Plain[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2013, 36(1):37-40.
- [32] 张玉铭, 张佳宝, 胡春胜, 等. 水肥耦合对华北高产区小麦-玉米产量和土壤硝态氮淋失风险的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3):532-539.
ZHANG Yu-ming, ZHANG Jia-bao, HU Chun-sheng, et al. Effect of fertilization and irrigation on wheat-maize yield and soil nitrate nitrogen leaching in high agricultural yield region in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(3):532-539.
- [33] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. On farm estimation of indigenous nitrogen supply for site specific nitrogen management in the North China Plain[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2008, 81(1):37-47.
- [34] Sainz H R, Barbie A. Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no tillage maize[J]. *Agron J*, 2004, 96(6):1622-1631.
- [35] Batlle Aguilar J, Brovelli A, Porporat A, et al. Modelling soil carbon and nitrogen cycles during land use change: A review[J]. *Agron Sustain Dev*, 2011, 31(2):251-274.
- [36] 张翠翠, 闫凌云, 赵鹏, 等. 施氮对夏玉米氮素利用及土壤硝态氮积累的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(18):57-61.
ZHANG Cui-cui, YAN Ling-yun, ZHAO Peng, et al. The effect of nitrogen fertilization on nitrogen use efficiency by summer corn and on the accumulation of soil nitrate nitrogen[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(18):57-61.



新书推荐



空气环境监测技术

黄浩华主编。本书从最基础的大气组成开始,讲述了空气监测的基本知识,样品的采集、处理和保存方法,空气污染物的测定方法,空气污染监测的概念、基础知识和方法,常用空气监测仪器的操作方法以及各类空气污染的特点及监测重点。

本书适合从事空气监测的基层技术人员、管理人员参阅。也可供大专院校相关专业师生参考。

※书号:9787122217721

※定 价:48.0 元

※开本:16

※出版日期:2014 年 11 月

如需更多图书信息,请登录 www.cip.com.cn

服务电话:010-64518888, 64518800(销售中心)

网上购书可登录化学工业出版社天猫旗舰店:<http://hxgyCBS.tmall.com>

邮购地址:(100011)北京市东城区青年湖南街 13 号 化学工业出版社

如要出版新著,请与编辑联系,联系电话:010-64519525。