

DRAINMOD-N II 模拟冬季长期覆盖黑麦对 地下排水及 NO_3^- -N 流失的影响

杜璇^{1,2,3}, 冯浩^{1,2,4*}, Matthew J. Helmers³, 齐志明⁵

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水

农业研究院, 杨凌 712100; 3. Department of Agricultural and Biosystems Engineering, Iowa

State University, Ames IA 50011, USA; 4. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100;

5. Department of Bioresource Engineering, McGill University, Ste-Anne-de-Bellevue, QC, H9X 3V9, Canada)

摘要: 在玉米-大豆轮作系统中种植冬季覆盖作物黑麦有助于减小地下排水量和硝态氮 (NO_3^- -N) 的流失量。该研究利用美国爱荷华州的试验数据校正和验证了 DRAINMOD-N II 模型在美国寒冷地区的适用性, 并模拟长期 (20 a) 种植冬季覆盖作物黑麦对地下排水量和氮素运移的影响。结果表明, 模型模拟地下排水量和 NO_3^- -N 流失量时, Nash-Sutcliffe 模型效率系数 (Nash-Sutcliffe efficiency, NSE) > 0.65、百分比偏差 (percent bias, PBIAS) 在 $\pm 25\%$ 之间、均方根误差与标准差比值 (ratio of root mean square error to standard deviation, RSR) ≤ 0.7 均在误差范围内; 模拟地下排水中 NO_3^- -N 浓度时, NSE > 0.50、PBIAS 在 $\pm 15\%$ 之间、RSR ≤ 0.5 均在误差范围内, 说明模型模拟的效果好。长期种植冬季覆盖作物黑麦可降低排水量 8.1% (2.5 cm), 减小 NO_3^- -N 流失量 16.6% (6 kg/hm²), NO_3^- -N 流量加权平均浓度下降了 8.6% (1 mg/L, 以 N 计), 增加蒸散值 5.9%, 模型模拟值与实测值拟合效果好, 表明模型具有良好的水文和氮素运移模拟功能, 可以模拟不同农田管理措施对地下水及氮素运移的长期影响, 为优化农田管理措施提供参考。

关键词: 氮; 排水; 蒸散; 玉米-大豆轮作系统; DRAINMOD-N II; 冬季覆盖作物黑麦

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.020

中图分类号: S626.2; S276;

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-12-0153-09

杜璇, 冯浩, Matthew J. Helmers, 齐志明. DRAINMOD-N II 模拟冬季长期覆盖黑麦对地下排水及 NO_3^- -N 流失的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 153—161. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.020 <http://www.tcsae.org>

Du Xuan, Feng Hao, Matthew J. Helmers, Qi Zhiming. Simulating effects of winter rye cover on subsurface drainage and NO_3^- -N loss based on DRAINMOD-N II [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 153—161. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.020 <http://www.tcsae.org>

0 引言

人工农田排水系统是改善农田土壤排水状况、治理涝渍灾害的一种重要手段^[1-2], 但在其排走农田多余水分的同时, 也导致土壤中氮素淋失^[3], 降低了氮肥的利用率, 造成水体污染。研究表明, 70%的排水发生在尚未种植作物或作物处于出苗期的 4—6 月^[4], 冬季种植覆盖作物不仅可以减少地表水土流失, 也是减小地下排水量及硝态氮 (NO_3^- -N) 流失量的潜在措施之一^[5]。Qi 等^[6-7]在美国爱荷华州的研究结果表明冬季种植覆盖作物黑麦可显著减小地下排水量; 还有研究表明^[8-9]冬季覆盖作物可以减

小 NO_3^- -N 的流失量及浓度。利用计算机模型模拟不同管理措施以及气候变化条件下的农田水文和环境过程, 可节约劳动力、缩减资金和研究时间。国际上已经有多种农业系统模型被用于研究模拟不同环境条件和农田管理措施对水文循环和氮素动态变化的影响。常见的模型包括 RZWQM (The Root Zone Water Quality Model)^[10]、DNDC (Denitrification-Decomposition)^[11]、CERES (Crop Environment Resource Synthesis)^[12]、APSIM (Agricultural Production Systems Simulator)^[13]等。这些模型均可较好地模拟作物生长、水文与环境等过程、有助于水资源管理及施肥的高效管理等。经 Skaggs 等^[14-16]开发的与改进的 DRAINMOD-N II 模型是基于过程的田间尺度的模型, 可用于模拟不同田间管理措施和不同环境及土壤条件下氮素的动态变化及在土壤-水-作物系统中的转化运移过程。该模型基于简单的水量平衡原理和完整的氮素运移过程, 参数输入数量少且易获取, 易于理解 and 操作。目前, 在中国应用该模型多以预测地下排水量、地下水位及作物产量等为主, 关于应用模型模拟冬季覆盖作物对水循环和氮素运移过程影响的研究尚不多见。本研究以美国爱荷华州北部农业排水管理研究示范点的数据为依

收稿日期: 2016-12-20 修订日期: 2017-04-14

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2013AA102904); 高等学校学科创新引智计划 (111 计划) 资助项目 (B12007); Iowa Department of Agriculture and Land Stewardship

作者简介: 杜璇, 陕西咸阳人, 博士生, 主要从事农业水土工程研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。

Email: lemon_19988@163.com

*通信作者: 冯浩, 陕西杨凌人, 教授, 博士, 主要从事水土资源高效利用以及节水灌溉新技术、新方法和新材料研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: nercwsi@vip.sina.com

据, 主要目的是校正和验证模型在美国爱荷华州北部的适用性, 并模拟冬季种植覆盖作物对水循环和氮素运移的长期影响, 为中国相同环境条件、种植系统和管理措施的地区提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地及试验处理

本试验点为农业排水管理研究示范点 (Agricultural Drainage Water Quality-Research and Demonstration Site, ADWQ-RDS) 坐落于爱荷华州 Pocahontas 县 Gilmore 城附近 (42°45'N, 94°30'W), 该试验田总面积约为 7.3 hm², 平均坡度为 0.5%~1.5%, 海拔 373 m。该区多年平均降水量 784 mm, 平均气温 8 °C, 平均最高气温 13.6 °C, 平均最低气温 2.4 °C。该区主要的土壤种类包括 4 种^[17]: *Nicollet*, 细壤土, 混合土质, 湿润的薄层土壤; *Webster*, 细壤土, 混合土质, 石灰质, 湿润的薄层土壤; *Canisteo*, 细壤土, 混合土质, 石灰质, 湿润的薄层土壤; *Okoboji*, 细质土, 含蒙脱石, 壤土。试验期间, 为减小不同土质对试验结果的影响, 所有处理随机排列。试验结束时采集土深 15 cm 处土样, 分析结果显示土壤磷测试 Bray P1 值为 31 mg/kg, pH 值为 7.7, 说明有机质含量非常高^[18], 这是导致土壤均排水不畅的主要原因。

试验地共 78 个小区, 每个小区面积为 0.5 hm² (15 m×38 m), 在小区中心线布设地下排水管道, 2 条平行管道间距 7.6 m, 埋深 1.06 m。每小区两侧平行铺设管道以保护小区。每 3 个小区设 1 个观测井, 用于记录和收集小区中心线排水管的排水量和水样。小区共 26 个观测井, 每个观测井直径 1.2 m, 垂直埋在每 3 个小区的终点部位, 观测井中, 每个独立小区的管道分别连接 1 个集水坑, 并放置 1 个 M53 潜水泵 (肯塔基州路易斯维尔城 Zoeller Pump 有限公司), 抽取地下排水, 在集水坑上方连接管道并安装流量计 (亚拉巴马州塔拉西海王星科技有限公司) 记录排水量, 在管道上开小孔自动采集水样 (水样收集瓶为 20 L 的玻璃瓶, 水量约占总排水量的 0.25%)。一般地, 当排水量为 13 mm 时, 会收集到 10 L 的水样。

本试验设计 2 个处理, 即无冬季覆盖作物玉米-大豆轮作处理 (NC) 和冬季覆盖作物黑麦-玉米-黑麦-大豆轮作系统处理 (CC), 在试验地小区中随机布置各处理。试验历时 5 a (2005—2009 年), CC 处理从 2004 年 10 月开始, 试验期间每年冬季种植黑麦 (*Secale cereale*) 作为覆盖作物, 播种量为 100 kg/hm², 次年在轮作物种植前喷施草甘膦终止黑麦生长。春季玉米萌发后注射氮肥 (28% 的氨氮溶液) 到试验地土层 10 cm 处, 施氮总量为 140 kg/hm² (以 N 计, 下同)。各小区在作物种植之前用大田耕作机耕地 1 次, 耕地深度 10 cm, 耕作强度为 0.25; 收获之后用双列圆盘耙耕地 1 次, 耕地深度 10 cm, 耕地强度为 0.45。耕作强度由修正的土壤流失方程版本 2 计算 (Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2, RUSLE2)。

1.2 DRAINMOD-N II 简介

DRAINMOD-N II^[19]由 DRAINMOD 发展而来, 优化了 DRAINMOD-N 中氮素循环过程的不足, 是基于过程

的田间尺度的模型, 用于模拟不同田间管理措施和不同环境及土壤条件下氮素的动态变化及在土壤—水—作物系统中的转化运移过程。模型的水文模块是以土壤剖面中的水量平衡为基础, 主要模拟的是单位地表面积与地下不透水土层及 2 条平行排水管道之间土层的水量平衡, 以小时或日为单位, 在特定气象条件、排水系统、土壤类型和耕种系统条件下, 预测地下排水、地表径流、蒸散、地下水位和深层渗漏等水平衡参数, 模型描述的水文过程示意图详见文献^[19]。

在 Δt 时段内单位土层内水量平衡公式为^[14,19]:

$$\Delta V_a = D + ET + D_{LS} - F \quad (1)$$

式中 ΔV_a 为土体内水量变化量, cm; D 为单位体积土壤排水量 (或地下灌溉量), cm; ET 为蒸散量, cm; D_{LS} 为深层渗漏和侧向渗漏, cm; F 为入渗量, cm。

当地表形成积水或径流时, Δt 时段内单位土层内水量平衡公式为^[14,19]:

$$P = F + \Delta S + RO \quad (2)$$

式中 P 为降雨量, cm; ΔS 为地表蓄积水的体积变化量, cm; RO 为径流量, cm。

模型中氮素运移模块的氮循环子模块包含了硝态氮 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、还原性氮化物 ($\text{NH}_x\text{-N}$)、有机氮 (organic N, ON) 3 个氮库, 并加入了 1 个简单的碳循环可以模拟有机碳 (organic C, OC) 的动态变化。同时, 模型中引入了 1 个施肥子模块, 包含了尿素、无水氮肥及缓释肥等肥料的反应原理, 使得模型模拟更为精准。该模型利用多项一维对流弥散反应方程 (advection dispersion reaction, ADR) 模拟氮素的运移, 公式如下^[16]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta_a C_a + \theta_g C_g + \rho_b C_s) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta_a D_a \frac{\partial C_a}{\partial z} + \theta_g d_g \frac{\partial C_g}{\partial z} \right) - \frac{\partial (v_a C_a)}{\partial z} + S \quad (3)$$

式中 C_a 和 C_g 分别是某种氮形式在液态和气态阶段时的浓度, M/L³; C_s 是某种氮形式在固态阶段时的浓度, M/M; θ_a 和 θ_g 分别为土壤液相和气相体积分数, L³/L³; ρ_b 是固态阶段的干容重, M/L³; v_a 是液相的体积通量, L/T; D_a 是水动力弥散系数, L²/T; d_g 是分子扩散系数, L²/T; S 是源汇项, M/(L³·T); t 是时间, T; z 为空间坐标, L。

1.3 数据收集和模型参数化

1.3.1 气象及土壤资料

试验地设有小型自动气象站 (犹他州洛根 Campbell Scientific 有限公司), 实时记录试验区的气温和降雨等数据, 由于设备原因缺失的个别数据从试验地东部 15 km 处的 Humboldt 气象站获得, 该站是由美国国家气象中心 (National Climatic Data Center, NCDC) 下设的站点 (COOP ID133985), 由于该地冬季降雪多, 故需将降雪转换为降水数据, 一般地, 降雪深度与水量之比一般为 10:1^[6]。风速、太阳辐射、相对湿度等数据由距试验地东北部 50 km 的 Kanawha 气象站获得。根据逐日气温数据、日或小时降雨数据, 按照 DRAINMOD-N II 模型要

求的格式建立气象数据文件, 利用模型自带气象数据处理模块自动生成模型所需的气象文件。

通过气象站可获得风速、太阳辐射、相对湿度、最高气温及最低气温等数据, 据 FAO56 中式 (40) 计算得到净辐射量^[20], 计算得到潜在蒸散量 (potential evapotranspiration, PET₀)。根据 Luo 等^[21]的研究利用作物系数得到实际潜在蒸散量 PET_{crop}。Penman-Monteith 公式计算日 PET 输入模型模拟结果会更为精确, 参考作物的蒸散量可根据不同作物调整计算作物蒸散量 (PET_{crop}), 作物系数 (K_c) 主要参考 FAO56 推荐的系数值^[20], 见式 (4)。试验地主要轮作系统为玉米-大豆轮作系统, 冬季覆盖作物为黑麦, 作物生长期间的根系深度及作物系数见表 1。

$$PET_{crop} = K_c \cdot PET_0 \tag{4}$$

实测获得土壤容重、饱和导水率、土壤在基质势 (10、33 和 1 500 kPa) 的含水率以及土壤颗粒分布等值, 通过 ROSETTA 模型计算便可获得 DRAINMOD-N II 模型需要的参数值, 如饱和含水率、残余含水率、饱和导水率及曲线形状参数值等。ROSETTA 模型所需的输入值与模型输出值见表 2。

表 1 研究期间轮作系统生长季根系深度及作物系数
Table 1 Root depth and crop coefficient in crop rotation during research years

作物 Crop	生育阶段 Growth period	种植后天数 Days after planting/d	根系深度 Root depth/cm	作物系数 Crop coefficient
玉米 Corn	初期	1~30	3	0.3
	发育期	31~70	3.8~29.2	0.3~1.24
	中期	71~120	30	1.24
	后期	121~170	29.3~9.5	0.51
大豆 Soybean	初期	1~20	3	0.4
	发育期	21~50	3.5~24	0.4~1.15
	中期	51~120	25	1.15
	后期	121~140	24~10	0.35
黑麦 Rye	初期	1~160	5	0.4
	发育期	161~235	3.5~17	0.4~1.15
	中期	236~310	18	1.15
	后期	311~335	15~3	0.25

注: FAO56 根据作物生长特点将其生育期分为 4 个阶段, 即生长初期、生长发育期、生长中期及生长后期。见 FAO56 图 24^[20]。
Note: Crop growth period is divided into 4 stages according to characteristics of crop growth based on FAO56. They are initial stage, crop development stage, mid-season stage and late season stage. Shown in Fig.24 of FAO56^[20].

表 2 实测土壤水力学参数值及 ROSETTA 模型计算值
Table 2 Observed values of soil hydraulic parameters and calculated values obtained from ROSETTA model

土深 Soil depth/cm	颗粒组成 Particle composition			容重 Bulk density/(g·m ⁻³)	α	N	K /(cm·d ⁻¹)	L	K_{sat} /(cm·d ⁻¹)	体积分水率 Water content/(cm ⁻³ ·cm ⁻³)				
	砂粒 Sand	粉砂 Silt	黏粒 Clay							Z: 10 kPa	Z: 33 kPa	Z: 1 500 kPa	θ_r	θ_s
0~10	0.32	0.36	0.32	1.37	0.01	1.46	3.02	-0.46	18.11	0.38	0.38	0.19	0.46	0.07
>10~30	0.32	0.45	0.23	1.39	0.01	1.56	2.32	-0.1	17.95	0.38	0.38	0.22	0.45	0.07
>30~60	0.43	0.3	0.27	1.39	0.01	1.45	4.01	-0.54	16.17	0.4	0.38	0.21	0.45	0.07
>60~120	0.44	0.34	0.22	1.46	0.01	1.47	4.02	-0.49	16.04	0.35	0.33	0.19	0.42	0.06
>120~390	0.44	0.34	0.22	1.5	0.01	1.45	4.22	-0.58	13.42	0.31	0.29	0.17	0.4	0.06

注: Z 为基质势; θ_r 为残余含水率; θ_s 为饱和含水率; α 和 N 为曲线形状参数; K 为水分饱和时的匹配点; L 为曲折度或连通性参数; K_{sat} 为饱和导水率。 θ_r 、 θ_s 、 α 、 N 、 K 、 L 及 K_{sat} 为 ROSETTA 模型输出值, 其他为实测值。
Note: Z is matric potential; θ_r is residual water content; θ_s is saturated water content; α and N are curve shape parameters; K is the matching point at saturation; L is an empirical pore tortuosity or connectivity parameter; K_{sat} is saturated hydraulic conductivity. θ_r 、 θ_s 、 α 、 N 、 K 、 L and K_{sat} are output from ROSETTA, others are observations.

1.3.2 地下排水量、NO₃⁻-N 流失量及模型参数化

模型水力设计参数输入主要取决于当地排水系统的设置, 该研究区域的排水管埋深为 1.05 m, 间距 7.6 m, 半径 1.5 cm, 排水系数为 3.5 cm/d, 不透水层深度为 390 m, 初始地下水位为 2 m, 地表最大蓄积量为 3.1 cm。其他参数输入值详见 Du 等^[22]论文中表 II。与排水量息息相关的土壤参数, 包括地下水位、排水量及地下水上升通量之间的关系, 计算土壤入渗时 Green-Ampt 公式中的 A 和 B 系数与地下水位之间的关系, 均由模型自带的土壤文件生成器计算。

每个小区在观测井中均有相应的流量计, 用来记录地下排水量, 根据降雨量每周或每 2 周人工采集 1 次数据。在管道上开小孔自动采集水样 (水样收集瓶为 20 L 的玻璃瓶, 水量约占总排水量的 0.25%), 并保存在 4 ℃ 的冷库里, 利用二阶导数光谱技术测得 NO₃⁻-N 的浓度 (在爱荷华州立大学湿地研究实验室进行)^[6]。NO₃⁻-N 流失量等于由实验室测得的 NO₃⁻-N 的浓度值乘以相应的排水量。

模型中碳氮循环参数包括施肥参数 (施肥量、肥料

溶解速率等)、作物参数 (潜在产量、收获指数、根茎比及根茎籽粒中碳氮含量) 以及碳氮运移过程参数等。Wang 等^[23]对比 LH-OAT 和 VARIANCE-BASED 2 种敏感性分析方法分析 DRAINMOD-N II 模型的参数敏感性, 得出对氮素流失模拟值最重要的 8 个参数, 即反硝化作用最适温度、温度曲线形状经验系数值、土壤水分方程中的经验系数值、土壤孔隙含水率 (water-filled pore space, WFPS) 临界值、Michaelis-Menten 公式最大反应速率以及有机碳腐解作用最适温度和活性土壤有机质库腐解速率, 详见 Du 等^[22]的论文。利用非线性参数检验模型 (non-linear parameter estimation, PEST) 对这些参数进行校正, 得到合适的参数值, 提高模型模拟精度。

1.4 模型校正、验证及适用性评价

模型校正的主要目的是确定最符合研究区域种植环境的水力学参数、作物参数及氮素循环参数的参数值, 提高模型模拟精度。本文利用无覆盖作物处理的玉米-大豆轮作系统 5 a (2005—2009 年) 的数据, 结合 PEST 模型校正模型的各项参数, 用覆盖作物处理的黑麦-玉米-黑

麦-大豆轮作系统的实测数据验证校正后的模型。

本文基于 2005—2009 年 ADWQ-RDS 试验基地的实测值, 对比模型模拟值进行模型在该地的适用性评价。采用 3 种统计参数验证模型模拟效果^[24]: Nash-Sutcliffe 模型效率系数 (Nash-Sutcliffe efficiency, NSE); 百分比偏差 (percent bias, PBIAS); 均方根误差与标准差比值 (ratio of root mean square error to standard deviation, RSR)。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

$$PBIAS = 100 \times \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] \quad (6)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_0} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (7)$$

式中 O_i 为观测值; P_i 为预测值, \bar{O} 是所有观测值的平均值, n 是总数。模型模拟地下排水量及硝态氮流失量时, 当 $NSE > 0.65$ 、 $PBIAS$ 在 $\pm 25\%$ 之间及 $RSR \leq 0.7$ 时, 表明误差在范围内, 模拟效果好; 模型模拟地下排水中硝态氮浓度时, 当 $NSE > 0.5$ 、 $PBIAS$ 在 $\pm 15\%$ 之间及 $RSR \leq 0.5$ 时, 表明误差在范围内, 模拟效果好^[24]。

2 结果与分析

2.1 模型参数校正

基于 PEST 模型对氮素运移参数进行校正, 校正结果见表 3。

表 3 DRAINMOD-N II 模型氮素循环过程中参数校正值
Table 3 Calibrated values of nitrogen cycling parameters in DRAINMOD-N II model

过程 Process	输入参数 Inputs	校正值 Calibrated value
运移 Transport	纵向弥散性 λ/cm	15
	弯曲度 τ	0.5
硝化作用 Nitrification	最大反应速率 $V_{\max\text{-nit}}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$	20
	半饱和常数 $K_{\text{m-nit}}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	10
	最适温度 $T_{\text{opt-nit}}/^\circ\text{C}$	25
	经验形状系数 β_{nit}	0.255
反硝化作用 Denitrification	最大反应速率 $V_{\max\text{-den}}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$	0.7
	半饱和常数 $K_{\text{m-den}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	40
	最适温度 $T_{\text{opt-den}}/^\circ\text{C}$	30
	经验形状系数 β_{den}	0.186
	土壤充水孔隙临界值	0.65
	土壤水分经验指数	2
有机碳 Organic matter	最适温度 $T_{\text{opt-oc}}/^\circ\text{C}$	30
	经验形状系数	0.186
	经验指数	1

2.2 模型验证及适用性评价

2.2.1 地下排水量

试验研究期间 (2005—2009 年), 5 a 平均年降水量

为 82.6 cm, 其中生长季 (5 月—9 月) 为 47.5 cm, 排水季 (3 月—11 月) 为 73.1 cm, 这与多年 (1971—2000 年) 年平均降水量 82.1 cm、生长季降水量 51.4 cm 及排水季降水量 75.3 cm 较为接近。表 4 中显示 5 a 期间试验地在 2 种不同的耕作系统下地下排水量的观测值及模型模拟值。校正小区 NC 处理模拟结果显示 5 a 平均地下排水量为 31.7 cm, 与观测值相比较, PBIAS、NSE 及 RSR 的误差分别为 2.03%、0.91 及 0.29, 均在误差范围内。验证小区 CC 处理模拟结果显示 5 a 平均地下排水量为 27.7 cm, PBIAS 显示模拟值比观测值 28.3 cm 小 2.28%, NSE 及 RSR 分别为 0.98 及 0.15, 均在误差范围内, 表明模型模拟地下排水量的效果很好。试验期间, 观测地下排水量在 11.6 cm (2006 年) 和 54.5 cm (2007 年) 之间波动, 模拟地下排水量在 10.6 cm (2006 年) 和 51.6 cm (2007 年) 范围内变化, 5 a 间最小降水量为 2006 年的 62.7 cm, 最大降雨量为 2007 年 105 cm, 这个现象说明排水量受降水量影响较大, 与降水量基本呈正相关, 这与前人研究结果一致^[25]。DRAINMOD-N II 模型可捕捉到排水量随降雨量变化的规律, 极大地提高模拟效果。

表 4 2005—2009 年不同小区地下排水量的观测值及模拟值

Table 4 Observations and simulations of subsurface drainage in different plots during 2005-2009

年份 Year	作物 Crop	地下排水量 Subsurface drainage/cm			
		校正小区 Calibration plot NC		验证小区 Validation plot CC	
		观测值 Observations	模拟值 Simulations	观测值 Observations	模拟值 Simulations
2005	玉米	25.8	24.8	17.7	19.8
2006	大豆	12.4	16.9	11.6	10.6
2007	玉米	48.8	51.5	54.5	51.6
2008	大豆	49.2	41.9	35.2	36.6
2009	玉米	19.2	23.5	22.7	19.7
均值 Mean		31.1	31.7	28.3	27.7
PBIAS		0.0203		-0.0228	
NSE		0.91		0.98	
RSR		0.29		0.15	

注: PBIAS 是百分比偏差; NSE 是 Nash-Sutcliffe 效率系数; RSR 是均方根误差与标准差比值。NC 为冬季无覆盖小区, CC 为冬季覆盖小区, 下同。

Note: PBIAS is percent bias, NSE is Nash-Sutcliffe efficiency, RSR is ratio of root mean square error to standard deviation. NC and CC are plots without and with rye, respectively. Same as below.

图 1a 为 NC 和 CC 处理下 5 a 月平均地下排水量及累积量。由图可知, DRAINMOD-N II 模型模拟 5 a 排水季的月平均地下排水量与观测值除个别月份出现较大差异外, 其他月份模拟值与观测值基本符合, 月地下排水累积量曲线走势基本相同, 模型模拟效果较好。DRAINMOD-N II 模型经 Luo 等^[21]改进后, 提高了在寒冷地区的模拟精度, 但在温度长期处于 0°C 以下时, 受风漂移等环境因素影响, 模拟效果仍会受到影响^[26]。与 NC 相比, 排水季 CC 出现较大模拟差异的月份为 3 月。这个月份的气温偏低,

3 月月均最高气温为 5.8 ℃, 最低气温为-4.1 ℃, 单日最低气温可达-15.1 ℃, 在低气温下排水管道受冻后无排水量或排水量较小造成了模拟偏差。冬季降雪量可受当地风速的影响, 试验地冬季风速平均为 4 m/s, 个别日风速可达 8 m/s, 研究表明由风可带走 20%的雪量^[26], 因此导致观测值小而模拟值偏高。

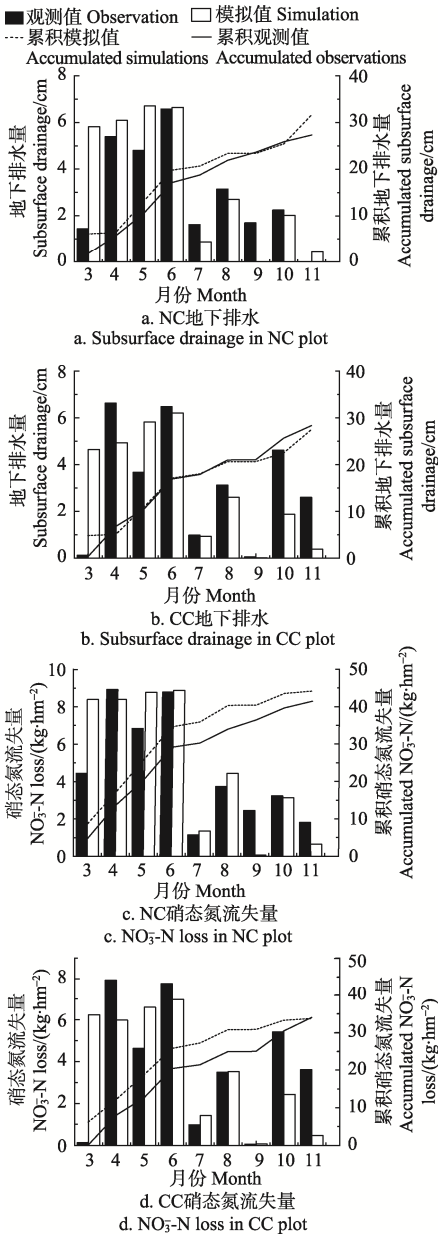


图 1 2005—2009 年 NC 和 CC 处理地下排水量和地下排水中硝态氮流失量的观测值及模型模拟值

Fig.1 Observations and simulations of subsurface drainage and NO₃-N loss in drainage for NC and CC plots during 2005-2009

2. 2. 2 氮素运移

DRAINMOD-N II 模型对 NC 和 CC 2 种不同的耕作系统下地下排水中 NO₃⁻-N 流失量的模拟效果很好(表 5)。校正小区 NC 处理模型模拟 5 a 平均值为 44.7 kg/hm², 比观测值高 8.1%, NSE 和 RSR 分别为 0.89 和 0.33, 均在误差范围内。验证小区 CC 处理模型模拟 5 a 平均值和观测值分别为 34.2 和 34.4 kg/hm², PBIAS、NSE 及 RSR 分

别为-0.5%、0.96 及 0.21, 均在误差范围内。NO₃⁻-N 的流失量与降水量及排水量基本呈显著的正相关, 以 NC 为例, 2006 年降水最少为 62.6 cm 对应 NO₃⁻-N 流失量观测值和模拟值分别为 18.6 和 22.4 kg/hm², 2007 年降水最多为 105 cm 对应 NO₃⁻-N 流失量观测值和模拟值分别为 65.8 和 77.9 kg/hm²。DRAINMOD-N II 模型可以反映 NO₃⁻-N 流失量随降雨量变化的规律, 模拟值随降水量增大而增大。

表 5 显示 DRAINMOD-N II 模型在 NC 和 CC 处理下对地下排水中 NO₃⁻-N 浓度的模拟效果好。校正小区 NC 处理观测值流量加权平均在 12.6~15.6 mg/L 之间, 模拟值流量加权平均在 13.0~15.1 mg/L 之间, 5 a 观测平均值为 14.0 mg/L, 比模拟值高 1.3 %,NSE 和 RSR 分别为 1.00 和 0.06, 均在误差范围内。验证小区 CC 处理观测值在 11.4~13.7 mg/L 之间, 模拟值在 11.4~12.9 mg/L 之间, 5 a 平均模拟值和观测值分别为 12.3 和 12.4 mg/L,PBIAS、NSE 及 RSR 分别为-0.6 %、1.00 及 0.06, 均在误差范围内, 表明模拟效果好。

表 5 2005—2009 年 NC 及 CC 小区 NO₃⁻-N 在地下排水中的流失量及流量加权平均浓度的观测值及模拟值

Table 5 Observations (obs) and simulations (sim) of NO₃⁻-N loss and its flow-weighted average in NC and CC plots during 2005-2009

年份 Year	作物 Crop	NO ₃ -N 流失量 NO ₃ -N loss/(kg·hm ⁻²)				流量加权平均 NO ₃ -N 浓度 Flow-weighted average NO ₃ -N concentration/(mg·L ⁻¹)			
		NC		CC		NC		CC	
		观测值 Obs	模拟值 Sim	观测值 Obs	模拟值 Sim	观测值 Obs	模拟值 Sim	观测值 Obs	模拟值 Sim
2005	玉米	38.4	32.2	22.5	25.2	12.6	13.0	12.7	12.8
2006	大豆	18.6	22.4	14.5	12.7	15.1	13.3	12.5	12.0
2007	玉米	65.8	77.9	62.4	66.7	15.6	15.1	11.4	12.9
2008	大豆	55.8	58.3	41.7	41.5	13.1	13.9	11.8	11.4
2009	玉米	28.3	32.8	31.1	24.9	13.8	13.9	13.7	12.6
均值 Mean		41.4	44.7	34.4	34.2	14.0	13.9	12.4	12.3
PBIAS		0.081		-0.005		-0.013		-0.006	
NSE		0.89		0.96		1.00		1.00	
RSR		0.33		0.21		0.06		0.06	

图 1c~图 1d 中为在排水季 NC 和 CC 处理下 NO₃⁻-N 流失量的 5 a 月均值, 与图 1a~图 1b 排水量的规律相似, 除 3 月与 11 月外, 其他月份的模型模拟值与观测值无显著性差异。受气温、风漂移和雪蒸发的影响, 3 月的排水量较小导致 NO₃⁻-N 流失量观测值较小, 造成模型高估 NO₃⁻-N 流失量的现象。NC 处理比 CC 处理的 NO₃⁻-N 流失量高 17%, 尤其是 3—5 月期间,NC 处理比 CC 处理 NO₃⁻-N 流失量高 37%, 但作物生长期,NC 和 CC 处理的 NO₃⁻-N 流失量差别不大。研究表明 DRAINMOD-N II 在美国爱荷华州北部适用性良好, 可以较精确地模拟地下排水量、地下排水中 NO₃⁻-N 流失量及浓度, 且可以对其长期影响进行模拟, 进而对优化农业耕作措施, 指导农业生产。

2. 3 模型应用

本研究中校正过的 DRAINMOD-N II 模型在 NC 和

CC 2 种不同种植系统条件下对地下排水量、排水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量及浓度的模拟效果显著, 可以对爱荷华州在进行特定耕作条件下的排水量、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量及浓度等方面进行长期模拟, 以期对当地耕作方式进行调整达到减少对水体污染的目的, 并可为中国相似气候环境、种植系统及农田管理措施下的农田地下排水量及 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失的研究提供理论参考。

2.3.1 对水文循环的长期影响

模拟期为 20 a (1990—2009 年), 20 a 平均降水量为 75.7 cm, 比多年平均年降水量小 7%, 期间最低降水量为 1997 年的 54.4 cm, 最高降水量为 2007 年的 105 cm。模拟结果显示, 长期种植冬季覆盖作物黑麦可使地下排水量逐年减小, 并且随着时间的推移减少量有缓慢增长的趋势 (表 6)。冬季覆盖黑麦处理 CC 的多年平均排水量 28.5 cm 比 NC 处理的 31.0 cm 降低了 8.1%, 5 a 动态平均排水量减少百分比在 5% 与 14% 之间 (图 2a), 由最初的 5% 逐渐增大, 后期除 2008 年的 14% 外基本在 12%, 这与 Strock 等^[27]在南明尼苏达州玉米种植区的实测值和 Qi 等^[6]在爱荷华州北部用 RZWQM2 模拟的结果 11% 相近, 但不排除减少量继续增大的可能。CC 和 NC 处理的 DRAINMOD-N II 排水量模拟值长期变化趋势基本一致, 5 a 动态平均值曲线的走势也基本一致, 最小值为 2000 年的 13 cm (CC) 和 14.2 cm (NC), 最大值为 1993 年的 52.6 cm (CC) 和 56.9 cm (NC)。

表 6 1990—2009 年在不同轮作系统中

DRAINMOD-N II 模型模拟水量平衡多年均值

Table 6 Multiyear average of DRAINMOD-N II simulations for water balance parameters in different rotation systems during 1990-2009

处理 Treatment	降水 Precipitation /cm	入渗 Infiltration /cm	ET/cm			排水量 Drainage/cm			径流 Runoff /cm
			玉米大豆 Corn-soybean	玉米 Corn	大豆 Soybean	玉米大豆 Corn-soybean	玉米 Corn	大豆 Soybean	
NC	75.7	75.3	43.7	45.2	42.2	31.0	26.9	35.2	1.7
CC	75.7	75.3	46.3	45.6	45.0	28.5	25.0	31.0	1.6
差值 Difference	-	0	2.6	0.5	2.7	-2.5	-1.9	-4.2	-0.1
相对 误差 RE /%	-	0	5.9	1.0	6.4	-8.1	-7.1	-11.9	-3.1

注: ET 是模型根据潜在作物蒸散量排除与作物和土壤有关因子的影响计算得到的; 排水量 (玉米): 种植玉米的年份排水量均值; 排水量 (大豆): 种植大豆的年份排水量均值。除降水外, 其他均为模拟值。

Note: ET was calculated by model which eliminates effect of factors related to crop and soil based on potential crop evapotranspiration; Drainage (Corn) is average for corn year; Drainage (Soybean) is average for soybean year. All parameter values are simulations except precipitation.

冬季种植覆盖作物对 ET 影响较大, 可提高 ET 值。冬季种植覆盖作物黑麦 ET 值为 46.3 cm, 较未种植黑麦处理的 ET 值 43.7 cm 增加了 5.9%。在种大豆前种植黑麦, 排水量降低了 11.9%, ET 提高了 6.4%, 在种玉米前种植黑麦, 排水量降低了 7.1%, ET 提高 1%。可知, 在种大豆前种植黑麦比在种玉米前种植黑麦, 对多年平均排水量和 ET 值的影响更大。冬季种植覆盖作物黑麦, 模型模

拟值显示对地下排水量和 ET 值均有较大影响, 对入渗、径流及潜在 ET 等影响不大, 这一结果与 Qi 等用 RZWQM2 模拟的结果一致^[6]。

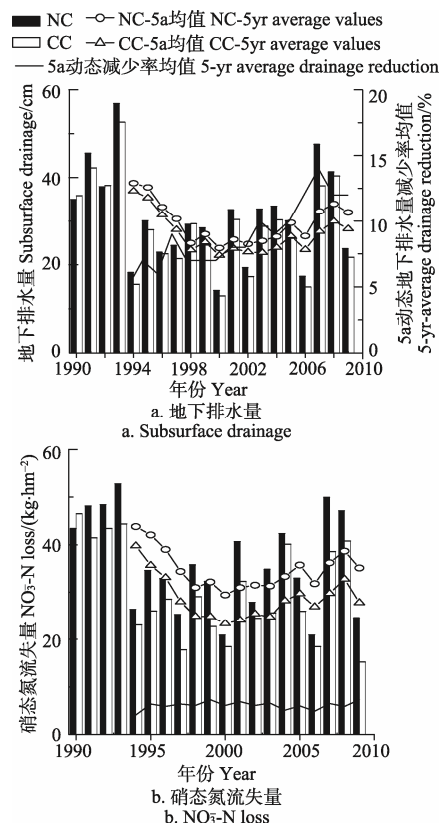


图 2 1990—2009 年 NC 和 CC 处理下对排水量和硝态氮流失量的长期影响

Fig.2 Long-term effects of NC and CC treatments on subsurface drainage and $\text{NO}_3\text{-N}$ loss during 1990-2009

2.3.2 对氮素循环的长期影响

本研究中, NC 和 CC 处理在研究期间模拟 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量的变化范围主要在 21~53 kg/hm^2 和 15~46 kg/hm^2 之间, 5 a 动态均值曲线的变化显示 NC 和 CC 处理下近 20 a 的年均排水量变化趋势基本一致, 与地下排水量的 5 a 动态变化趋势相似 (图 2b)。冬季种植覆盖作物黑麦降低了排水中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量, CC 处理的流失量模拟值比 NC 处理的流失量模拟值小 16.6% (表 7), 5 a 动态 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量的变化幅度在 4.1~7.3 kg/hm^2 之间, 平均减小流失量为 6.0 kg/hm^2 , 这与 Feyereisen 等^[28]在明尼苏达州西南部研究的模拟结果 5.8 kg/hm^2 相近, 比 Malone 等^[29]用 RZWQM2 和 APSIM 模型模拟的长期减小量 3.9 和 4.8 kg/hm^2 高。Qi 等^[6]在同一研究区相同处理设置条件下, 用 RZWQM2 模拟冬季长期种植覆盖作物黑麦对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量的长期影响, 研究期内其减少量为 11.8 kg/hm^2 。冬季长期种植覆盖作物黑麦 CC 处理的年均流量加权平均为 10.6 mg/L , 比 NC 处理降低了 8.6%, 接近美国环境保护署 (USEPA) 规定的最大污染物浓度值 10 mg/L (以 N 计)^[30]。比 Qi 等^[6]的长期模拟浓度值减小量 12% 和 Li 等^[31]的短期模拟浓度值减小量 49% 小。另外, RZWQM2 模拟

的种植冬季覆盖作物轮作系统下地下排水中 NO_3^- -N 的浓度要比 DRAINMOD-N II 模拟值高 42%，根据统计学分析，RZWQM2 模拟值 NSE 的负数值和 $\text{RSR} > 0.7$ 均显示该模型对地下排水中 NO_3^- -N 的浓度的模拟效果不佳。由此可见，不同模型在同一条件下的模拟结果存在差异，主要是在氮素运移中对部分参数模拟的差异造成的，比如净矿化量、固氮量及作物吸收量等。

本研究中 NC 处理长期模拟的净矿化量为 171 kg/hm^2 ，与 Carpenter-Boggs 等^[32]在南达科他州田间实测值 142 kg/hm^2 和 Qi 等^[6]在爱荷华州北部用 RZWQM2 模拟的值 168 kg/hm^2 相近。CC 处理的净矿化量较 NC 处理的低 6.1%，与 Parkin 等^[8]和 Bremer 等^[33]研究的实测结果

相似，Parkin 等^[8]表示种植冬季覆盖作物会增加氮的固定量及减小净矿化量。然而 Li 等^[31]在爱荷华州中部布恩镇 2000—2005 年间开展的研究结果显示，冬季覆盖作物种植条件下净矿化量比未种植冬季覆盖作物的高 11%，Qi 等^[6]模拟结果为 CC 处理比 NC 处理的净矿化量高 34%。不过，有研究表明，RZWQM2 在模拟冬季覆盖作物种植系统条件下会高估净矿化量^[6,31]。这应该与 2 种模型不同的碳氮循环模块有关，DRAINMOD-N II 模型引入了 CENTURY 模型^[34]计算 C:N 动态变化过程，地上及地下作物残余物均参与到养分循环中，而 RZWQM2 是基于 OMNI^[35]模块来模拟 C:N，只考虑地下残余物的循环，地上残余物量化处理。

表 7 1990—2009 年不同轮作系统下 DRAINMOD-N II 模型模拟的氮素变化参数多年均值
Table 7 Multiyear average of DRAINMOD-N II simulated nitrogen parameters in different rotation systems during 1990-2009

处理 Treatment	施肥量 Fertilization /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	降水中 氮沉降量 N in precipitation /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	固氮量 N fixation /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	反硝化作用 Denitrification /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	挥发 Volatilization /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	径流中 氮流失量 N in runoff /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	排水中 NO_3^- -N 量 NO_3^- -N in drainage /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	作物吸收量 Crop N uptake /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	净矿化量 Net mineralization /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	流量加权 NO_3^- -N 平 均浓度 Annual flow-weighted average NO_3^- -N concentration/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
NC	140	7.7	94.8	5.2	0	0.2	36.1	139	171	11.6
CC	140	7.7	106	8.5	0	0.1	30.1	149	161	10.6
差值 Difference	—	-0.1	11.3	3.3	0	-0.1	-6.0	10.1	-10.4	-1.0
相对误差 RE/%	—	-1.3	11.9	63.5	0	-50	-16.6	7.3	-6.1	-8.6

注：玉米种植年施肥量为 $140 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ （以 N 计）。

Note: Fertilizer was applied at $140 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (based on N) to corn.

3 结 论

1) 校正后的 DRAINMOD-N II 模型可以较好地模拟不同轮作系统下年均地下排水量、地下排水中 NO_3^- -N 的流失量及浓度。经统计学分析，Nash-Sutcliffe 模型效率系数、百分比偏差和均方根误差与标准差比值均在误差范围内。

2) 排水季中除了 3 月和 11 月受低温及风速影响较大导致模型模拟高估外，其他月份模拟值与观测值拟合较好，由累计曲线可知该模型基本可以反映月均地下排水量和地下排水中 NO_3^- -N 流失量的变化规律。DRAINMOD-N II 模型在爱荷华州北部适用性良好，是模拟农田尺度水利和氮素动态变化比较可靠的农业模型之一，本研究也为与爱荷华州具有相似气候环境和农田耕作管理措施的地区，应用 DRAINMOD-N II 模型提供了参考。

3) 模型模拟不同轮作系统下（玉米-大豆，黑麦-玉米-黑麦-大豆）对地下排水量和地下排水中 NO_3^- -N 的流失量的长期影响过程，结果表明种植冬季覆盖作物黑麦可以降低排水量 8.1%（2.5 cm），减小 NO_3^- -N 的流失量 16.6%（6 kg/hm^2 ），增加 ET 值 2.6 cm（5.9%），主要是在大豆前种植冬季覆盖作物黑麦影响较大，ET 值增加了 6.4%（2.7 cm）。

4) 长期种植冬季覆盖作物可以降低地下排水中 NO_3^- -N 的浓度，年均流量加权平均浓度为 10.6 mg/L ，降低了 8.6%（1 mg/L ），同时，研究结果表明长期种植冬季

覆盖作物可降低净矿化量和增加作物吸收量和固氮量。一些研究认为长期种植冬季覆盖作物净矿化量反而会增大，对模型模拟氮素运移过程仍存在争议，今后需在此方面投入更深入的研究。

[参 考 文 献]

- [1] Darzi-Naftchali A, Mirlatifi S M, Shahnazari A, et al. Effect of subsurface drainage on water balance and water table in poorly drained paddy fields[J]. Agricultural Water Management, Elsevier B V, 2013, 130: 61—68.
- [2] 王少丽, 王兴奎, Prasher S O, 等. 应用 DRAINMOD 农田排水模型对地下水位和排水量的模拟[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 54—59.
Wang Shaoli, Wang Xingkui, Prasher S O, et al. Field application of DRAINMOD model to the simulation of water table, surface runoff and subsurface drainage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(2): 54—59. (in Chinese with English abstract)
- [3] Baker J L, Campbell K L, Johnson H P, et al. NO_3^- -N, phosphorus, and sulfate in subsurface drainage water[J]. J Environ Qual, 1975, 4(3): 406—412.
- [4] Helmers M J, Lawlor P A, Baker J L, et al. Temporal Subsurface Flow Patterns from Fifteen Years in North-Central Iowa[C]. 2005 Tampa, FL July 17—20, 2005, St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2005.

- [5] Dinnes D L, Karlen D L, Janynes D B, et al. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils[J]. *Agron. J*, 2002, 94(1): 153—171.
- [6] Qi Z, Helmers M J, Malone R W, et al. Simulating long-term impacts of winter rye cover crop on hydrologic cycling and nitrogen dynamics for a corn-soybean crop system[J]. *Transactions of the ASABE*, 2011, 54(5): 1575—1588.
- [7] Qi Z, Helmers M J. The conversion of permittivity as measured by a PR2 capacitance probe into soil moisture values for Des Moines loess soils in Iowa[J]. *Soil Use and Management*, 2010, 26(1): 82—92.
- [8] Parkin T B, Kaspar T C, Singer J W. Cover crop effects on the fate of N following soil application of swine manure[J]. *Plant and Soil*, 2006, 289(1/2): 141—152.
- [9] Kaspar T C, Jaynes D B, Parkin T B, et al. Effectiveness of oat and rye cover crops in reducing nitrate losses in drainage water[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 110(3): 25—33.
- [10] Thorp K R, Malone R W and Jayness D B. Simulating long-term effects of nitrogen fertilizer application rates on corn yield and nitrogen dynamics[J]. *Trans ASABE*, 2007, 50(4): 1287—1303.
- [11] Li C, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events. 1. Model structure and sensitivity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(D9): 9776—9799.
- [12] Jones C A, Kiniry J R. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development[M]. TX: Texas A&M University Press, 1986.
- [13] Mccown R L, Hammer G L, Hargreaves J N. APSIM: An agricultural production system simulation model for operational research[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1995, 39(10): 225—231.
- [14] Skaggs R W. A Water Management Model for Shallow Water Table Soils[M]. Raleigh: Water Resources Research Institute of the University of North Carolina, 1978.
- [15] Brevé M A. Modeling the Movement and Fate of Nitrogen in Artificially Drained Soils[D]. Raleigh: North Carolina State University, 1994.
- [16] Youssef M A, Skaggs R W. The Nitrogen Simulation Model, DRAINMOD-N II: Field Testing and Model[C]//The American Society of Civil Engineers. World Environmental and Water Resources Congress. Reston: American Society of Civil Engineers, 2006: 1—11.
- [17] US Department of Agriculture. Soil survey of Pocahontas County, Iowa[M]. Washington, D C: USDA Soil Conservation Service, 1985.
- [18] Lawlor P A, Helmers M J, Baker J L, et al. Nitrogen application rate effect on nitrate-nitrogen concentration and loss in subsurface drainage for a corn-soybean rotation[J]. *Transactions of the ASABE*, 2008, 51(1): 83—94.
- [19] Skaggs R W, Youssef M A, Chescheir G M. DRAINMOD: Model use, calibration, and validation[J]. 2012, 55(4): 1509—1522.
- [20] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. FAO Irrigation and Drainage Paper no. 56: Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome: FAO, 1998.
- [21] Luo W, Skaggs R W, Madani A, et al. Predicting field hydrology in cold conditions with DRAINMOD[J]. *Transactions of the ASAE*, 2001, 44(4): 825—834.
- [22] Du X, Feng H, Helmers M J, et al. Comparing simulated nitrate-nitrogen concentration in subsurface drainage using Drainmod-N II and RZWQM2[J]. *Irrigation and Drainage*, 2017, 66(2): 238—251.
- [23] Wang X, Youssef M A, Skaggs R W, et al. Sensitivity analyses of the nitrogen simulation model, DRAINMOD-N II[J]. 2005, 48(3): 2205—2212.
- [24] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885—900.
- [25] Thorp K R, Youssef M A, Jaynes D B, et al. DRAINMOD-N II: Evaluated for an agricultural system in Iowa and compared to RZWQM-DSSAT[J]. *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(5): 1557—1573.
- [26] Randall G W, Mulla D J. Nitrate nitrogen in surface waters as influenced by climatic conditions and agricultural practices[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2): 337—344.
- [27] Strock J S, Porter P M, Russelle M P. Cover cropping to reduce nitrate loss through subsurface drainage in the northern U.S. Corn Belt[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(3): 1010—1016.
- [28] Feyereisen G W, Wilson B N, Sands G R, et al. Potential for a rye cover crop to reduce nitrate loss in southwestern Minnesota[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(6): 1416—1426.
- [29] Malone R W, Huth N, Carberry P S, et al. Evaluating and predicting agricultural management effects under tile drainage using modified APSIM[J]. *Geoderma*, 2007, 140(3): 310—322.
- [30] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Hypoxia in the Northern Gulf of Mexico: An Update by the EPA Science Advisory Board[M]. Washington, DC: USEPA, 2007.
- [31] Li L, Malone R W, Ma L, et al. Winter cover crop effects on nitrate leaching in subsurface drainage as simulated by RZWQM-DSSAT[J]. *Transactions of the ASABE*, 2008, 51(5): 1575—1583.
- [32] Carpenter-Boggs L, Pikul J L Jr, Vigil M F, et al. Soil nitrogen mineralization influenced by crop rotation and nitrogen fertilization[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64(6): 2038—2045.
- [33] Bremer E, Kuikman P. Influence of competition for nitrogen in soil on net mineralization of nitrogen[J]. *Plant and Soil*, 1997, 190(1): 119—126.
- [34] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1173—1179.
- [35] Shaffer M J, Rojas K W, Decoursey D G, et al. Root Zone Water Quality Model: Modeling Management Effects on Water Quality and Crop Production, Chapter 5: Nutrient chemistry processes[M]. Highlands Ranch: Water Resources Publications, LLC, 2000: 119—144.

Simulating effects of winter rye cover on subsurface drainage and NO_3^- -N loss based on DRAINMOD-N II

Du Xuan^{1,2,3}, Feng Hao^{1,2,4*}, Matthew J. Helmers³, Qi Zhiming⁵

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China (IWSA), Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. Department of Agricultural and Biosystems Engineering, Iowa State University, Ames IA 50011, USA;

4. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling 712100, China;

5. Department of Bioresource Engineering, McGill University, Ste-Anne-de-Bellevue, QC, H9X 3V9, Canada)

Abstract: Planting winter rye cover crop can reduce subsurface drainage and NO_3^- -N loss in corn-soybean rotation. Field data from Iowa was used to calibrate DRAINMOD-N II and evaluate its applicability in cold regions in US. This study simulated the long-term (20 years) effects of winter rye cover crop on subsurface drainage and nitrogen dynamics using DRAINMOD-N II. Two treatments were set in Agricultural Drainage Water Quality-Research and Demonstration Site in Iowa. One treatment was with rye planting in winter (rye-maize-rye-soybean rotation) and the other was bare in winter (only maize-soybean). The experiments lasted for 5 years from 2005 to 2009. The drainage was collected and NO_3^- -N content in the drainage was measured. The DRAINMOD-N II model was used for simulation of change in the drainage and NO_3^- -N content from 1990 to 2009. The results showed that the DRAINMOD-N II model satisfactorily simulated subsurface drainage and NO_3^- -N loss with Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) larger than 0.65, percent bias (PBIAS) smaller than 25%, and ratio of root mean square error to standard deviation (RSR) not larger than 0.70. Flow-weighted average NO_3^- -N concentration (FWANC) were simulated satisfactorily, with NSE larger than 0.50, PBIAS within 15%, and RSR not larger than 0.50. The errors between simulation and measurements of drainage and NO_3^- -N loss mainly reflected in March when temperature was low (average monthly temperature was -4.1°C), which may partially cause by drainage delay. Also the larger wind speed (4 m/s) which can take away 20% of snow could affect our estimates. These results suggested that DRAINMOD-N II had good applicability in Iowa and could simulate the long-term effect of winter rye cover crop on subsurface drainage and NO_3^- -N loss. Long-term simulations (1990-2009) indicated that adding winter rye cover crop could reduce drainage, NO_3^- -N loss and FWANC by 8.1% (2.5 cm), 16.6% (6 kg/hm², by N) and 8.6% (1 mg/L, by N), respectively. The amount of drainage was decreased year by year and the 5-yr dynamic reduction rates increased from 5% to 14%. The 5-yr dynamic NO_3^- -N loss varied between 4.1 and 7.3 kg/hm², with a mean of 6.0 kg/hm². The winter rye as a cover crop could increase evapotranspiration (ET) by 5.9% (2.6 cm), and the time period to plant cover crop also affected ET increase. Planting cover crops before soybean ET increased by 6.4%. Meanwhile, adding winter rye cover crop could increase crop N uptake by 7.3% (10.1 kg/hm²) and N fixation by 11.9% (11.3 kg/hm²). Planting winter rye could reduce net mineralization by 6.1% (10.4 kg/hm²), but it was in disagreement with the existing experiments and simulations by the other researchers. These results indicated that there is still some debate about net mineralization response to adding winter rye cover crop. Further research is necessary to understand the simulated nitrogen transport and transformation mechanisms in soil. The field data is well matched with the calibrated model, showing that the DRAINMOD-N II model could reliably simulate water and nitrogen movement in the soil. This model could simulate the effect of different cropland management practices on subsurface drainage and nitrogen dynamics to optimizing cropland management practice.

Keywords: nitrogen; drainage; evapotranspiration; corn-soybean rotation; DRAINMOD-N II; winter rye cover