

应用 DRAINMOD - N II 模型对暴雨后 稻田排水量和氮素模拟

王姣^{1,2}, 俞双恩^{1,2}, 李或伟^{1,2}, 王梅^{1,2}, 张逸迪^{1,2}, 高世凯^{1,2}

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 南方地区高效灌排与
农业水土环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究暴雨后稻田氮素的排放过程,在宿迁市船行灌区开展了试验,测定了常规灌排和控制灌排模式下暴雨后 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度和稻田排水量,并用 DRAINMOD - N II 模型对暴雨后稻田排水量、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失负荷进行模拟。试验结果表明:控制灌排模式可以显著减少雨后稻田排水量和氮素排放量;在两种灌排模式下,DRAINMOD - N II 模型对雨后排水量模拟值与测量值的相对误差 RE 在 2% 以内,相关系数 R 在 0.98 以上,模拟效率系数 NS 在 0.96 以上,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失负荷的模拟值与测量值的相对误差在 5% 以内,相关系数 R 在 0.95 以上,模拟效率系数 NS 在 0.90 以上,因此通过模型率定得到的各参数值较为合理,可以利用该 DRAINMOD - NII 模型对未来暴雨后稻田排水量、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失负荷进行预测。

关键词: 暴雨; DRAINMOD - N II; 排水量; 氮素流失; 稻田

中图分类号: S276.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0246-07

Simulation of drainage and nitrogen in paddy fields after rainstorm using DRAINMOD - N II

WANG Jiao^{1,2}, YU Shuang'en^{1,2}, LI Yuwei^{1,2}, WANG Mei^{1,2}, ZHANG Yidi^{1,2}, GAO Shikai^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Efficient Irrigation - Drainage and Agricultural Soil - Water Environment in Southern China,
Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explore the process of nitrogen emission from paddy field after rainstorm, a field experiment was conducted at Chuanhang irrigation district, located in Suqian, Jiangsu Province. The concentration of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$, paddy drainage were measured at conventional and controlled irrigation and drainage mode. And the DRAINMOD - N II mode was used to simulate the drainage load of paddy fields, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ loss after rainstorm. Measured results show that: controlled irrigation and drainage mode can significantly reduce paddy field drainage and nitrogen emission after rainstorm. The relative error RE between the simulated and measured values of drainage after rain using the DRAINMOD - N II model is less than 2%, the correlation coefficient R is above 0.98, and the simulation efficiency NS is more than 0.96. The relative error RE between the simulated and measured values of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ is less than 5%, the correlation coefficient R is above 0.95, and the simulation efficiency NS is more than 0.90. Therefore, the parameters obtained by model calibration are more reasonable, and the DRAINMOD - N II model can be used to predict the drainage after rainstorm, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ loss in the future.

Key words: rainstorm; DRAINMOD - N II; drainage; nitrogen loss; paddy field

收稿日期: 2017-12-09; 修回日期: 2017-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479063、41401628);

作者简介: 王姣(1991-), 女, 河南焦作人, 硕士研究生, 研究方向为农业水土资源规划与管理。

通讯作者: 俞双恩(1961-), 男, 安徽安庆人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源规划与管理、现代灌排理论的研究工作。

水稻作为我国主要的粮食作物之一,其生长期间水肥消耗量大,大量的磷素、氮素会通过地表径流和稻田排水等途径进入自然环境^[1-2],稻田排水中流失的氮磷已经成为造成周围水体富营养化的重要影响因素之一^[3-6]。南方地区水稻生长期和雨季重合,经常会发生暴雨乃至大暴雨,此时地表排水和径流中含有大量氮磷元素,因此研究暴雨后稻田地表水氮磷流失规律对于制定合理的排水方案、减少氮磷流失量是十分必要的。DRAINMOD - N II 模型是目前国际上广泛用来模拟农田氮素运移和排水过程的模型,由美国的 Skaggs 等人于 20 世纪 70 年代开发,其初衷是为了找到一条能够量化评估田间排水系统性能的途径。1994 年,为了研究田间氮素运移过程,Breve 等为 DRAINMOD 模型添加了氮素循环模块,从而得到了 DRAINMOD - N 模型。2003 年,M. Youssef 完善了 DRAINMOD - N 模型中的氮素循环模块,并同时添加了碳素循环模块,从而得到了 DRAINMOD - N II 模型。相比于 DRAINMOD - N 模型,DRAINMOD - N II 模型可以更加准确地模拟农田氮素运移过程和排水过程^[7-8]。截至目前,DRAINMOD - N II 模型已经在很多地区进行了测试和应用,其模拟准确,优点显著^[9-10]。本文用 DRAINMOD - N II 模型对宿迁 2014 年 4 次暴雨后的稻田排水量、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量和流失过程进行模拟,探究在暴雨条件下稻田排水以及氮素的运移过程,以期制定合理的水稻控制灌排技术指标提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

本次试验于 2014 年在宿迁市宿城区船行灌区开展。试验田位于江苏省宿迁市宿城区西南,介于北纬 $34^\circ 02' \sim 34^\circ 13'$ 、东经 $118^\circ 10' \sim 118^\circ 40'$ 之间,区内阳光充足、降雨量充沛。灌区内降雨多发生在夏季,多年平均降水量为 900.6 mm,平均水面蒸发量 856.6 mm,年最大、最小降水量分别为 1 647.1 及 573.9 mm;多年平均日照总时数 2 291.6 h,日照百分率为 52%。试验区耕层土壤(0~30 cm)质地为砂壤土,土壤容重 1.35 g/cm^3 ,总孔隙度 45.32%,pH 值 7.5,土壤有机质 22.31 g/kg 、全氮 0.9105 g/kg 、速效氮 0.02746 g/kg 、全磷 0.31 g/kg 、速效磷 0.0115 g/kg 。

1.2 试验设计

此次试验所用水稻为粳稻,按照当地施肥标准

来确定施肥量。试验期间共施肥 3 次,移栽前 1 天施基肥、分蘖初期施分蘖肥和拔节孕穗中期施穗肥,施肥量以纯氮计算,分别为 120、60 和 60 kg/hm^2 ,共计 240 kg/hm^2 。除此之外,每个试验田基肥中还需施用磷肥(P_2O_5)和钾肥(K_2O)各 50 kg/hm^2 。

此次试验设置常规灌排和控制灌排两种灌排模式,各设置 3 个重复组,一共 6 个试验小区,小区呈南北方向布置,每个小区的面积均为 0.15 hm^2 。田间小区布置如图 1,两种灌溉模式下水稻全生育期田间水位如表 1。试验选取 2014 年最大 4 次降雨进行模拟,分别发生在 7 月 18 日、8 月 13 日、8 月 28 日和 9 月 20 日,降雨量分别是 105.3、168.5、77.3 和 60.5 mm。

暴雨前需取地表水样,暴雨后连续 4 天用 50 mL 医用注射器定时取水样,以不扰动地表水层为原则,分别在测坑两端和中间各取 250 mL 的地表水。用紫外分光光度法测定 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,用纳氏试剂光度法测定 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,所用紫外分光光度仪型号为 UV2800。

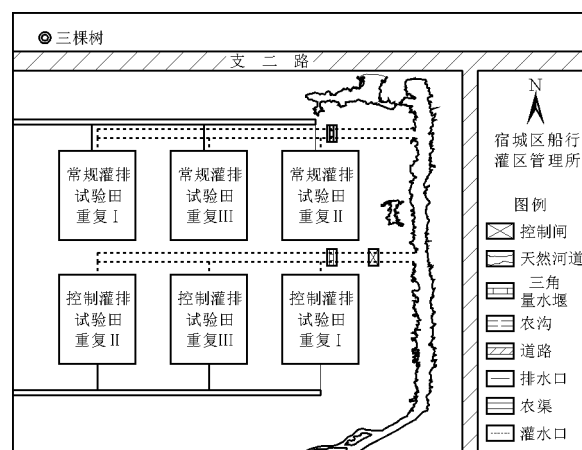


图1 试验小区布置示意图

2 模型原理和参数确定

2.1 模型原理

DRAINMOD 模型是一种基于流程的田间分布式模拟模型。在 DRAINMOD 的基础上,DRAINMOD - N II 模型增加了氮素、碳素循环模块和有机物模块,氮素运移需要输入水均衡结果。该模型采用多相一维对流弥散方程对氮素的运移过程建模,用一阶有限差分法近似求解方程^[11-12]。多相一维对流弥散方程表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_a C_a + \theta_g C_g + \rho_b C_s) =$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\theta_a D_a \frac{\partial C_a}{\partial z} + \theta_g d_g \frac{\partial C_g}{\partial z}\right) - \frac{\partial(\nu_a C_a)}{\partial z} + S \quad (1)$$

式中： θ_a 和 θ_g 分别为土壤液相、气相体积分数； C_a 、 C_g 分别为不同形式氮素液相和气相的浓度， kg/m^3 ； C_s 为某种形式氮素的固相浓度， kg/kg ； ρ_b 为土壤固相干容重， kg/m^3 ； D_a 为水动力扩散系数， m^2/s ； d_g 为分子扩散系数， m^2/s ； ν_a 为液相的体积通量， m/s ； S 为源汇项， $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ； $S = S_{dep} + S_{fer} + S_{mnl} - S_{upt} - S_{rnf} - S_{den} \circ S_{dep}$ 为大气沉降， S_{fer} 为肥料溶解， S_{mnl} 为净矿化， S_{upt} 为植物吸收， S_{rnf} 为地表径流损失， S_{den} 为反硝化作用。

DRAINMOD - N II 中氮素循环模块详尽地描述了氮素循环和运移过程，其中氮素的转变过程（硝化、反硝化作用和尿素水解）遵循 Michaelis - Menten 模型，硝化反应表达式(2)，反硝化反应表达式(3)。

$$S_{nit} = f_e f_{inh} V_{\max, nit} \left(\frac{C_{\text{NH}_4^+}}{K_{m, nit} + C_{\text{NH}_4^+}} \right) \left(\frac{\rho_b}{\theta_a} \right) \quad (2)$$

式中： S_{nit} 为硝化反应速率， $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ； f_e 为环境因子的无量纲响应函数； f_{inh} 为硝化抑制因子的无量纲响应函数； $V_{\max, nit}$ 为硝化反应最大速率，

$\text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{s})$ ； $K_{m, nit}$ 为半饱和常数， mg/kg^3 ； $C_{\text{NH}_4^+}$ 为底物（铵）浓度， mg/kg^3 。

$$S_{den} = f_e V_{\max, den} \left(\frac{C_{\text{NO}_3^-}}{K_{m, \text{NO}_3^-} + C_{\text{NO}_3^-}} \right) \left(\frac{C_c}{K_{m, c} + C_c} \right) \left(\frac{\rho_b}{\theta_a} \right) \quad (3)$$

式中： S_{den} 为反硝化反应速率， $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ； $V_{\max, den}$ 为反硝化反应的最大速率， $\text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{s})$ ； $C_{\text{NO}_3^-}$ 为硝氮浓度， kg/m^3 ； C_c 为碳基质浓度， kg/kg ； K_{m, NO_3^-} 为硝氮半饱和常数， kg/m^3 ； $K_{m, c}$ 为碳基质半饱和常数， kg/kg 。

2.2 主要参数的设置

模型的主要输入参数有试验小区的气象资料、土壤参数、排水系统参数、作物参数、氮素运移参数、有机质相关参数等。2013 年水稻生长期最大的 4 次降雨降雨量分别为 44.3、47.2、39.6 和 42.8 mm。参照这 4 次降雨后两种灌排模式的实测稻田排水总量、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失总负荷，对 DRAINMOD - N II 模型的土壤侧向饱和和导水率、硝化作用最大反应速率等部分初始输入参数进行模拟率定。各参数见表 2~6。

表 1 两种灌排模式全生育期间水位指标

生育期	分蘖期		拔节孕穗期		抽穗开花期		乳熟期	
	常规	控制	常规	控制	常规	控制	常规	控制
适宜水层上限/mm	30	30	30	30	30	30	30	30
适宜水层下限/mm	0	-200	0	-200	0	-200	0	-200
允许水层深度/mm	50	80(5d)	70	150(5d)	70	150(5d)	60	100(5d)

注：表中正值为田面地表水层深度，负值为地下水位距地表的距离，单位：mm；括号内为淹水时间，单位：d。

表 2 试验小区土壤主要参数资料

参 数	不同土层深度测定值/cm			参 数	不同土层深度测定值/cm		
	0~20	20~50	50~300		0~20	20~50	50~300
土壤饱和含水量 θ_s	0.319	0.296	0.245	侧向饱和和导水率/ $(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	1.50	0.65	0.47
土壤残余含水量 θ_r	0.015	0.012	0.010	垂向饱和和导水率/ $(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	4.52	2.61	2.25
α	0.007	0.007	0.006	砂粒/%	75.6	75.1	75.3
n	1.685	1.396	1.611	粉粒/%	15.2	15.7	15.3
m	0.430	0.267	0.419	黏粒/%	9.5	9.3	9.4

2.3 DRAINMOD - N II 模型模拟效果的评价参数

引入相对误差 RE、相关系数 R 和效率系数 NS 对 DRAINMOD - N II 模型的模拟效果进行综合评价。其中相对误差 RE 是模拟值和测量值的绝对误差和测量值之比，绝对值越小，模拟值与测量值越接

近，数值越大，模拟值与测量值差值越大；相关系数 R 表示模拟值与测量值之间接近程度， $R \in (0, 1)$ ，R 越接近于 1，表明模拟值和测量值更密切相关，越接近于 0，则表明模拟值与测量值的越不相关；效率系数 NS 表示模型的模拟结果可信度， $NS \in (-\infty, 1)$ ，

NS 越靠近 1,表示模拟结果的可信度越高,越靠近 $-\infty$,表示模拟结果越不可信。各评价参数为:

$RE = (N_i - M_i)/M_i \times 100\%$ (4)

$R =$

$$\sqrt{[\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(N_i - \bar{N})]^2 / [\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2]}$$
 (5)

$$NS = 1.0 - \sum_{i=1}^n (N_i - M_i)^2 / \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2$$
 (6)

式中: M_i 为第 i 个时间段的测量值; $\bar{M}$ 为全部时间段测量值的平均值; N_i 为第 i 个时间段的模拟值, $\bar{N}$ 为全部时间段模拟值的平均值。

表 3 各参数调整范围和率定结果

参数	调整范围	率定值
土壤侧向饱和导水率(0~20cm)/(cm·h ⁻¹)	0~5.50	1.50
土壤侧向饱和导水率(20~50cm)/(cm·h ⁻¹)	0~5.50	0.65
土壤侧向饱和导水率(50~300cm)/(cm·h ⁻¹)	0~5.50	0.47
纵向弥散度/cm	5~20	10
硝化作用最大反应速率/(μg·ng ⁻¹ ·d ⁻¹)	7.5~30.0	8.5
硝化作用半饱和常数/(μg·ng ⁻¹)	10.0~50.0	15.0
硝化作用最适宜温度/℃	15.0~25.0	20.0
反硝化作用最大反应速率/(μg·ng ⁻¹ ·d ⁻¹)	2.5~30.0	3.0
反硝化作用半饱和常数/(μg·ng ⁻¹)	10.0~40.0	35.0
反硝化作用最适宜温度/℃	20.0~35.0	25.0

注:各参数的调整范围由相关参考文献[13~15]获得。

表 4 2014 年雨前不同土层深度土壤含水率及地下水埋深

日期	常规模式				控制模式			
	不同土层深度土壤含水量			雨前地下 水埋深/cm	不同土层土壤含水量			雨前地下 水埋深/cm
	0~20cm	20~50cm	50~300cm		0~20cm	20~50cm	50~300cm	
07-18	0.298	0.295	0.247	2.15	0.221	0.290	0.245	19.71
08-13	0.292	0.296	0.245	1.97	0.217	0.293	0.240	18.63
08-28	0.297	0.290	0.245	1.93	0.232	0.295	0.242	18.75
09-20	0.296	0.295	0.240	1.68	0.225	0.291	0.245	17.32

表 5 DRAINMOD - N II 排水设计参数

参数	取值	参数	取值
排水间距/cm	1500	排水系数/(cm·d ⁻¹)	2
排水深度/cm	100	农沟底宽/cm	50
不透水层深度/cm	600	农沟边坡系数	1

注:2014 年在 7 月 18 日、8 月 13 日、8 月 28 日和 9 月 20 日,水稻根系深度分别为 15、18.5、20.5 和 22.5 cm。

3 结果与分析

3.1 DRAINMOD - N II 模型对暴雨后稻田排水量的模拟

表 7 显示了各次暴雨后稻田排水量的测量值与模拟值。可以看出,控制灌排模式不论在实测还是

模拟情况下,排水量都比常规灌排模式减少 15%~45%,随着降雨量的不断增加,减排效果也更加显著。每次暴雨后不管在常规还是控制灌排模式下,稻田排水量的模拟值与测量值都很接近,其相对误差绝对值都不超过 10%;另外,4 次暴雨后稻田总排水量的模拟值与测量值的相对误差绝对值更小,两种灌排模式都不超过 2%,而相关系数 R 和模拟效率 NS 都大于 0.95。

综上所述,DRAINMOD - N II 模型对暴雨后稻田排水量的模拟结果较好,通过模型率定得到的土壤侧向饱和导水率等参数是合理的,利用该 DRAINMOD - N II 模型预测未来暴雨后稻田排水量的可行性较高。

表 6 2014 年 DRAINMOD - N II 中氮素运移及转化初始输入参数

日期	0 ~ 20cm		20 ~ 50cm		50 ~ 300cm		降雨中 氨氮浓度/ (mg · L ⁻¹)	降雨中 硝氮浓度/ (mg · L ⁻¹)
	土壤初始 硝氮浓度/ (mg · kg ⁻¹)	土壤初始 氨氮浓度/ (mg · kg ⁻¹)	土壤初始 硝氮浓度/ (mg · kg ⁻¹)	土壤初始 氨氮浓度/ (mg · kg ⁻¹)	土壤初始 硝氮浓度/ (mg · kg ⁻¹)	土壤初始 氨氮浓度/ (mg · kg ⁻¹)		
07 - 18	38.70	8.85	28.72	4.71	10.85	0.97	0.23	0.21
08 - 13	29.45	3.93	26.46	2.73	10.69	0.92	0.25	0.18
08 - 28	25.63	2.62	22.59	2.02	10.4	0.85	0.29	0.19
09 - 20	24.85	2.51	19.79	2.41	9.87	0.89	0.22	0.2

表 7 2014 年各次暴雨后稻田排水量测量值和模拟值统计

暴雨 日期	降雨量/ mm	常规灌排						控制灌排						控制灌排较 常规灌排测 量排水量减 少百分率/%	控制灌排较 常规灌排模 拟排水量减 少百分率/%
		测量排 水量/mm	模拟排水量/mm			测量与模 拟误差/%	测量排 水量/mm	模拟排水量/mm			测量与模 拟误差/%				
			总量	径流	侧渗			总量	径流	侧渗					
07 - 18	105.3	63.1	61.2	43.1	18.1	-3.01	42.1	40.7	20.3	20.4	-3.33	-33.28	-33.50		
08 - 13	168.5	87.2	88.7	68.9	19.8	1.72	49.3	51.8	29.7	22.1	5.07	-43.46	-41.60		
08 - 28	77.3	35.5	36.5	20.2	16.3	2.82	25.5	27.8	8.7	19.1	9.02	-28.17	-23.84		
09 - 20	60.5	28.9	30.8	15.3	15.5	6.57	23.7	22.8	6.3	16.5	-3.80	-17.99	-25.97		
总量	411.6	214.7	217.2	147.5	69.7	1.16	140.6	143.1	65.0	78.1	1.78	-34.51	-34.12		

3.2 DRAINMOD - N II 模型对暴雨后 NH₄⁺—N 和 NO₃⁻—N 浓度的模拟

采用 DRAINMOD - N II 模型模拟暴雨后稻田排水中 NH₄⁺—N 和 NO₃⁻—N 的浓度,模拟值与测量值见图 2。由图 2 可以看出,在不同灌排模式下,每次暴雨后排水中的 NH₄⁺—N 和 NO₃⁻—N 浓度模拟值与测量值的变化趋势大致相同,均呈逐渐下降趋势。这是因为土壤颗粒对 NH₄⁺—N 的吸附作用很大,雨水击溅使得土壤颗粒飘散在水中,从而增加 NH₄⁺—N 浓度。雨滴的击溅作用,增加了水中氧气的含量,从而加速了硝化反应,使 NH₄⁺—N 转化为 NO₃⁻—N 速率加快,从而 NO₃⁻—N 浓度增加。所以雨后第 1 天 NH₄⁺—N 和 NO₃⁻—N 浓度都很大,然而随着时间的推移,土壤颗粒不断沉淀,加上农田排水以及侧渗的影响,氮素浓度会不断下降。

暴雨后第 1 天和第 5 天的 NH₄⁺—N 和 NO₃⁻—N 浓度模拟值和测量值基本相同,第 2 ~ 4 天的 NH₄⁺—N 和 NO₃⁻—N 浓度模拟值均稍稍低于测量值。通过计算发现,两种灌排模式各次暴雨后排水中的 NH₄⁺—N 和 NO₃⁻—N 浓度模拟值与测量值的相关系数 *R* 均在 0.95 以上,模拟效率 *NS* 指标均在 0.85 以上,说明 DRAINMOD - N II 模型对暴雨后排

水中的 NH₄⁺—N 和 NO₃⁻—N 浓度的模拟结果是可靠的。

3.3 DRAINMOD - N II 模型对暴雨后 NH₄⁺—N 和 NO₃⁻—N 流失负荷模拟

根据暴雨后每天稻田排水中 NH₄⁺—N 与 NO₃⁻—N 的浓度以及排水量,可以计算出各次暴雨后 NH₄⁺—N 与 NO₃⁻—N 的流失负荷的模拟值和测量值,结果见表 8。由表 8 可以看出,在不同灌排模式下,暴雨后 NH₄⁺—N 与 NO₃⁻—N 流失负荷的模拟值与测量值相对误差绝对值都在 9% 以内。相关系数 *R* 与模型模拟效率 *NS* 指标都处于较高水平,且控制灌排模式下模拟的效果更佳合理,贴近测量值。利用 EXCEL 2013 的数据分析功能分别对两种灌排模式下氮素流失负荷的模拟值与测量值做方差齐性检验(*F* 检验),每一项的模拟值与测量值都无显著性差异。对模拟值和测量值做双样本方差 *t* 检验,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下,检验统计量 *t* 均满足 $|t| < t_{\alpha} = 1.86$ 且 $|t| < t_{\alpha/2} = 2.31$,表明在不同灌排模式下,其模拟效果都是合理的。综上所述, DRAINMOD - N II 模型对暴雨后稻田排水中氮素流失负荷的模拟结果较好,利用该模型预测未来暴雨后稻田氮素流失负荷的可行性较高。

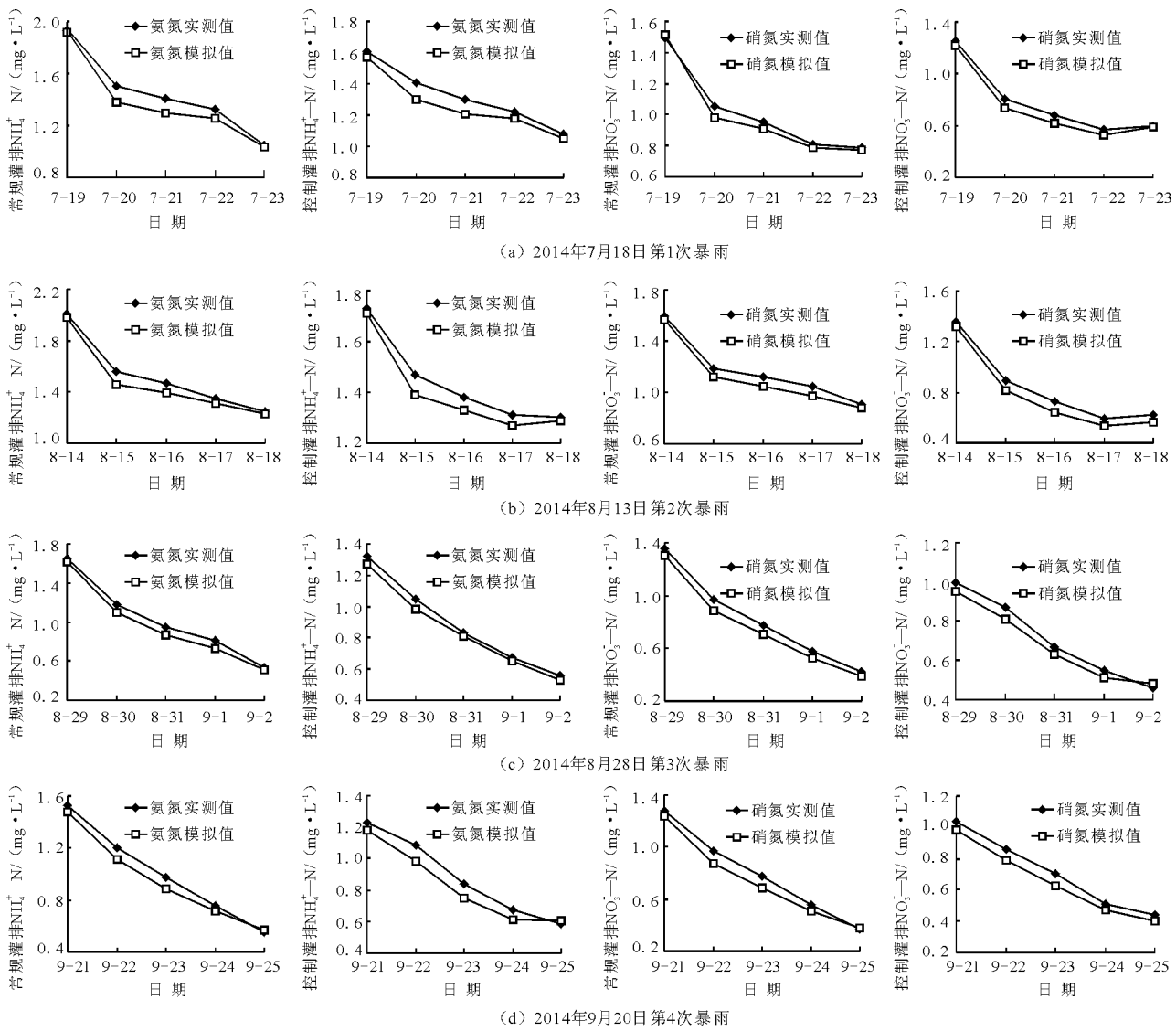


图 2 2014 年各次暴雨后稻田排水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的模拟值与测量值对比

表 8 各次暴雨后稻田 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失负荷的测量值与模拟值统计

氮素 形态	日期	总观测值/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)		总模拟值/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)		相对误差 $RE/\%$		相关系数/ R		效率系数 NS		F 检验 P 值		t 检验 t 值	
		常规	控制	常规	控制	常规	控制	常规	控制	常规	控制	常规	控制	常规	控制
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	07-18	1.11	0.55	1.08	0.53	-2.7	-3.64	0.97	0.97	0.98	0.99	0.48	0.49	0.33	0.49
	08-13	1.63	0.73	1.66	0.77	1.84	5.48	0.97	0.96	0.97	0.97	0.49	0.48	-0.29	-0.35
	08-28	0.51	0.23	0.49	0.21	-3.92	-8.70	0.96	0.96	0.95	0.93	0.50	0.47	0.22	-0.21
	09-02	0.41	0.19	0.38	0.18	-7.32	-5.26	0.95	0.96	0.94	0.98	0.45	0.44	-0.19	0.31
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	07-18	0.81	0.36	0.83	0.35	2.47	-2.78	0.97	0.97	0.98	0.99	0.45	0.50	0.13	0.24
	08-13	1.33	0.51	1.30	0.49	-2.26	-3.92	0.97	0.98	0.92	0.95	0.48	0.48	0.34	-0.30
	08-28	0.41	0.18	0.39	0.17	-4.88	-5.56	0.96	0.97	0.95	0.98	0.48	0.42	-0.24	-0.29
	09-02	0.33	0.12	0.31	0.13	-6.06	8.33	0.95	0.96	0.90	0.95	0.46	0.47	-0.23	0.31

注:当 F 检验的 P 值大于 0.05 时,表示模拟值与测量值无显著性差异。

4 结 论

控制灌排可以显著减少暴雨后稻田排水量以及氮素的排放,与常规灌排模式相比,在控制灌排模式下,稻田排水量减少了 34.51%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失负荷分别减少 53.55%、59.38%,稻田排水量、和氮素流失量明显减少。因此在水稻生长过程中采取控制灌排模式,可以达到节水、控污的目标。

利用 DRAINMOD - N II 模型对 2014 年 4 次暴雨后的稻田排水量、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失负荷进行模拟。模拟效果良好,其中两种灌排模式 4 次暴雨后的稻田排水总量模拟值与测量值的相对误差 RE 均在 2% 以内,相关系数 R 都大于 0.98,模拟效率系数 NS 都大于 0.96;而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失负荷的模拟值与测量值的相对误差都在 5% 以内,相关系数 R 都大于 0.95,模拟效率系数 NS 都大于 0.90。因此未来可以通过该 DRAINMOD - N II 模型对暴雨后的稻田排水量、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失负荷进行模拟预测,从而为制定更加合理的水稻控制灌排技术指标提供科学依据。

参考文献:

- [1] 徐鹏程,张兴奇. 江苏省主要农作物的生产水足迹研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 232 - 237.
- [2] 晏维金,尹澄清,孙 濮,等. 磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程[J]. 应用生态学报, 1999, 10(3): 312 - 316.
- [3] 陈建平,李 想,王明玉,等. 水稻田铁锰对氮素转化影响的实验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(1): 109 - 111.
- [4] 冯国禄,杨仁斌. 不同耕作模式下稻田水中氮磷动态特征及减排潜力[J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4235 - 4243.
- [5] 彭世彰,张正良,罗玉峰,等. 灌排调控的稻田排水中氮素浓度变化规律[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 21 - 26.
- [6] 季亚辉,俞双恩. 水位管理对稻田地表水总磷的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 777 - 780.
- [7] BREVÉ M A, SKAGGS R W, GILLIAM J W, et al. Field testing of DRAINMOD - N[J]. Transactions of the Asae, 1997, 40(4): 1077 - 1085.
- [8] HAWARY A E, ATTA Y, SAADI A E. Assessment of the DRAINMOD - N II model for simulating nitrogen losses in newly reclaimed lands of Egypt[J]. Alexandria Engineering Journal, 2015, 54(4): 1305 - 1313.
- [9] 罗 炤,贾忠华,SKAGGS R W,等. 利用 DRAINMOD 模型模拟银南灌区稻田排水过程[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 53 - 57.
- [10] 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.
- [11] 景卫华. 农田排水系统管理及氮素流失模拟研究[D]. 西安:西安理工大学, 2010.
- [12] 陈丽群,胡铁松. DRAINMOD 模型参数灵敏度分析[J]. 节水灌溉, 2011(10): 37 - 41.
- [13] 洪 林,罗文兵. 基于 DRAINMOD 的农田地表径流氮素流失动态模拟[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 703 - 709.
- [14] 高学睿,董 斌,秦大庸,等. 用 DRAINMOD 模型模拟稻田排水与氮素流失[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 52 - 58.
- [15] 王 宁,俞双恩,叶兴成. DRAINMOD - N II 模拟暴雨后稻田排水及氮素变化[J]. 人民黄河, 2014, 36(10): 136 - 140.