

运用 DRAINMOD-N II 模拟平原河网地区 稻田排水氮素流失量

王亚妮¹, 李 磊², 胡林生¹, 沈 优¹, 齐露露¹

(1. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223005; 2. 水发规划设计有限公司, 山东 济南 250014)

摘要:运用 DRAINMOD-N II 模型模拟分析了江苏省临湖灌区不同排水间距对排水量和氮素流失量的影响。结果表明,排水量受排水间距影响较大,氮素流失量在水稻生长前期受施肥和排水间距影响较大,氮素流失量与排水量变化趋势基本一致,控制排水可以有效地降低稻田氮素流失。

关键词:DRAINMOD-N II 模型; 排水间距; 排水量; 氮素流失量; 临湖灌区

中图分类号:S276.7

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2023)01-0045-0006

Simulation of nitrogen loss for rice field drainage in plain river network area by using DRAINMOD_N II model

WANG Yani¹, LI Lei², HU Linsheng¹, SHEN You¹, QI Lulu¹

(1. Huai'an Water Conservancy Survey Design and Research Institute Co., Ltd. Huai'an 223005, China;

2. Shuifa Planning and Design Co., Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: The DRAINMOD-N II model was used to simulate and analyze the effects of different drainage spacing on drainage and nitrogen loss in the Linghu irrigation area of Jiangsu Province. The results show that water discharge is greatly affected by the drainage spacing, the nitrogen loss is greatly affected by the fertilization and drainage spacing. The variation trend of nitrogen loss and drainage is basically the same, so controlling drainage can effectively reduce nitrogen loss in paddy fields.

Key words: DRAINMOD-N II model; drainage spacing; water discharge; nitrogen loss; Lin-hu irrigation area

1 概 述

农业生产中为了提高作物产量而过度施肥情况日益严重化,农田氮磷流失是造成地表水体富营养化的主要污染途径。农田排水是氮素流失的主要影响因素之一。排水系统布置不合理导致排水量过大,使得氮素养分大量流失,不仅降低了化肥的利用率,而且成为农业面源污染的主要组成部

分,直接影响到了地表受纳水体的水质,对水环境造成了严重的威胁,直接危害人体健康。大量研究结果显示,通过实施不同排水系统布置来调控排水量,不仅能够使得排水再利用、节水灌溉、减缓涝渍灾害,而且减少氮磷等过度排放量。

DRAINMOD-N II 模型不仅包括水平衡原理,而且考虑了单循环过程中的铵态氮转化和运移过程及氨的挥发过程,且定量计算有机质矿化和生物固

收稿日期: 2022-06-26

作者简介: 王亚妮(1987—),女,工程师,硕士,主要从事水利工程规划设计工作。E-mail:wangyanixianligong@163.com

氮过程中考虑了碳循环过程。Youssef 等^[1]在北加福利尼亚东部进行了为期6年的农田排水试验,采集并分析研究了相关的数据,成功测试了 DRAINMOD-N II 氮素运移模型的可行性。王少丽等^[2]利用加拿大 Eugene F. Whelan 实验站大田实测的排水量和氮素流失量资料对 DRAINMOD-N 模型进行了验证,发现模拟值与实测值的相关性较好。Luo W 等^[3-4]应用 DRAINMOD-N II 模型模拟了氮素流失量,模拟结果能够很好地反映实际情况。

本文以平原河网地区的临湖灌区为研究对象,运用应用 DRAINMOD-N II 模型模拟稻田不同排水系统布置的排水量和氮素流失量,为评价灌区现状排水系统提供理论依据。

运用 DRAINMOD-N II 模型分析临湖灌区不同排水系统对排水量和氮素流失量的影响,以控制水量和氮素流失、降低涝渍灾害、减少水体污染为目标,寻求合理的排水系统,以此评价临湖灌区现状排水系统(间距 200 m,深度 1.5 m)下排水量和氮素流失量的情况,讨论灌区现有的排水系统布置是否满足农业生产需求。

2 临湖灌区概况

2.1 基本情况

临湖灌区位于江苏省淮安市淮阴区马头镇、南陈集镇、高家堰镇境内,南临洪泽湖、北靠中运河、东临淮沭河(二河段)、西与泗阳县接壤,南北长 22 km、东西宽有 16 km,灌区总面积 285.7 km²,总耕地面积 1.4 万 hm²,设计灌溉面积 1.33 万 hm²。灌区主要水源为洪泽湖水,北部局部地区水源为中运河水,通过分散建站分别从张福河、赵公河、南淮泗河等通湖河道提洪泽湖水及中运河水灌溉。灌区内以砂性土为主,适宜种植水稻、小麦、玉米等多种作物。

2.2 水文气象

临湖港区地处北亚热带和暖温带交界区,属暖温带半湿润季风气候,四季分明,季风显著,雨量充沛,光照时间长,有霜期短,气候条件比较优越,年平均气温 14.8℃,平均日照时数 2 080.6 h,多年平均降水量 945.5 mm,年雨雪日平均为 106.6 d,梅雨多雨季节,平均在 6 月 25 日进入雨季,7 月中旬雨季结束。由于受季风影响,降水量季节性变化显著,冬季雨水稀少,夏季雨水集中(约占全年 65%左右),春秋两季雨水量基本相当,占全年降水量 30%左右,无霜期 216 d,年均蒸发量 861 mm 左右,地下水

位在 0.8~1.9 m 之间。

2.3 排水系统布置

临湖灌区排水系统主要包括毛沟、小沟、中沟、大沟及外河。稻田排水经毛沟排入小沟,然后进入中沟,再排入大沟,最终汇入外河。其中,毛沟根据责任田块走向形成,小沟与毛沟正交或者斜交,中沟间距为 200 m 左右。区域排水系统分布图如图 1 所示。

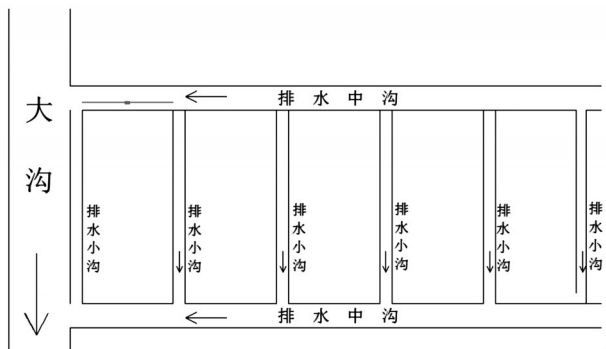


图1 灌区排水系统布置

3 DRAINMOD-N II 模型的基本原理

DRAINMOD-N II 模型包括水文计算过程和氮素运移部分。其中,氮素运移部分包括大气沉积物、矿物质氮肥的利用、动植物残留体等有机氮对土壤的改良作用,作物吸收作用、有机碳的分解、氮的矿化及固定、硝化反硝化作用、氨的挥发作用、地下排水及地表径流中氮素流失。

模型原理主要以氮循环和碳循环为基础描述氮素转化过程。该模型中编入了影响氮素转化的因素,如环境因素对碳和氮转化以及 C:N 比的影响;土壤温度、土壤含水率、土壤 pH、化肥和动物粪便的使用、植物残留体及耕作措施等对氮素转化的影响。氮素转化过程包括有机质的分解和固氮、硝化反硝化、作物吸收及氨挥发等。

3.1 DRAINMOD-N II 模型的水文计算过程

该模型水文部分包括水平衡计算过程和水管理措施计算过程,本文主要基于水平衡计算过程,如图 2 所示。

该过程包括地表和地下 2 个部分水量平衡方程, Δt 时间里的地下水平衡方程:

$$\Delta V_a = D + E_r + D_s - F \quad (1)$$

式中: ΔV_a 为土壤中的水量变化量, cm; D 为侧向排水量, cm; E_r 为蒸散发量, cm; D_s 为深层的渗漏量, cm; F 为土壤入渗量, cm。

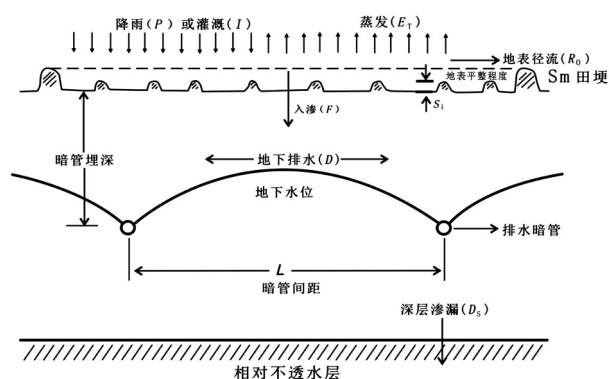


图2 DRAINMOD-N II 水平衡

Δt 时间里的地表水平衡方程为

$$\Delta S = P(I) - F - R_0 \quad (2)$$

式中: ΔS 为地表水变化量,cm; $P(I)$ 为降水量或灌溉量,cm; F 为土壤入渗量,m; R_0 为地表水径流量,cm。

3.2 DRAINMOD-N II 模型的氮素循环过程

模型考虑了详细的氮循环过程,包含 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 ON_3 种形式。其中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 是可选择性的,如果土壤溶液为酸性或者中性时,模型以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 为主;当土壤溶液的pH超过7.5时,就会出现 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。氮素模拟过程主要包括大气沉积物、矿物质氮肥的利用、有机氮资源的利用、作物吸收、矿化过程、生物固氮过程、硝化反硝化、氨挥发及地下排水及地表径流的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 流失。模型中氮循环过程见图3。

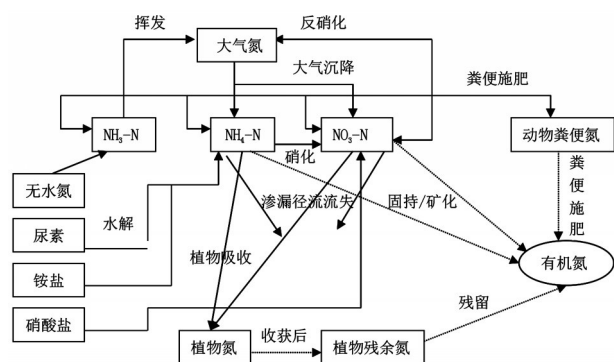


图3 DRAINMOD-N II 氮循环

3.3 氮素运移原理

DRAINMOD-N II 模型模拟氮素运移原理以多相一维对流弥散反应方程为基础。表达式如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_\alpha C_\alpha + \theta_g C_g + \rho_b C_s) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta_\alpha D_\alpha \frac{\partial C_\alpha}{\partial z} + \theta_g d_g \frac{\partial C_g}{\partial z} \right) - \frac{\partial(v_\alpha C_\alpha)}{\partial z} + S \quad (3)$$

式中: C_g 和 C_α 分别为某种氮形式的气态浓度和液态

浓度; C_s 为某种氮形式的固态浓度; θ_g 和 θ_α 分别为土壤气相和液相的积分分数; ρ_b 为土壤固相的干容重; v_α 为液相的体积通量; D_α 为水动力弥散系数; d_g 为分子扩散系数; t 为时间; z 为空间坐标; S 为源汇项。

式(1)中,氮的固态和液态的浓度之间通过下式可以进行转化:

$$C_s = K_d C_\alpha \quad (4)$$

式中: K_d 为分配系数;氮的气和液态的浓度之间通过下式可以进行转化:

$$C_g = \frac{C_\alpha}{H} \quad (5)$$

式中, H 为Henry系数,M/M。

将(2)式和(3)式代入(1)式可得:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\theta_\alpha + \frac{\theta_g}{H} + \rho_b K_d \right) C_\alpha \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\theta_\alpha D_\alpha + \theta_g \frac{d_g}{H} \right) \frac{\partial C_\alpha}{\partial z} \right] - \frac{\partial(v_\alpha C_\alpha)}{\partial z} + S \quad (6)$$

式(4)可以写成以氮素液态浓度为变量的紧凑公式:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\theta_\alpha R_f C_\alpha] = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_e \frac{\partial C_\alpha}{\partial z} \right] - \frac{\partial(v_\alpha C_\alpha)}{\partial z} + S \quad (7)$$

式中: R_f 为无量纲阻滞因子, D_e 为有效弥散系数;3种无机氮的阻滞因子和有效弥散系数的选取见表1。

表1 3种氮素形式的阻滞因子和有效弥散系数

N的形式	R_f	D_e
$\text{NO}_3\text{-N}$	1	$\theta_\alpha D_\alpha$
$\text{NH}_4\text{-N}$	$1 + \frac{\rho_b K_d, \text{NH}_4}{\theta_\alpha}$	$\theta_\alpha D_\alpha$
$\text{NH}_3\text{-N}$	$1 + \frac{\theta_g}{\theta_\alpha H} + \frac{\rho_b K_d, \text{NH}_3}{\theta_\alpha}$	$\theta_\alpha D_\alpha + \frac{\theta_g d_g}{H}$

汇源项见下式:

$$S = S_{\text{fer}} + S_{\text{dep}} + S_{\text{min/imm}} + S_{\text{nit}} - S_{\text{mf}} - S_{\text{den}} - S_{\text{hyd}} - S_{\text{upt}} - S_{\text{vol}} \quad (8)$$

式中: S_{fer} 为所施化肥溶解的氮素含量; S_{dep} 为大气沉降的氮素含量; $S_{\text{min/imm}}$ 为有机氮矿化和固定的氮素含量; S_{nit} 为硝化作用的氮素含量; S_{mf} 为随地表径流流失的氮素含量; S_{den} 为反硝化作用所消耗的氮素含量; S_{hyd} 为尿素水解的氮素含量; S_{upt} 为作物吸收的氮素含量; S_{vol} 为氨挥发损失的氮素。

DRAINMOD-N II 模型求解以为对流弥散方程的边界条件如下:

$$\rho_{\alpha}(0,t)=\begin{cases} 0 & v_{\alpha}(0)\leq 0 \\ \rho_{\text{rain}} & v_{\alpha}(0)>0 \end{cases} \quad t>0$$

$$\frac{\partial \rho_{\alpha}(L,t)}{\partial z}=0 \quad t>0 \quad (9)$$

初始条件:

$$\rho_{\alpha}(Z,0)=\rho_0(Z)$$

式中: ρ_{rain} 为降水 3 种形式氮素质量浓度, mg/L; $\rho_0(Z)$ 为以土壤深度为基础的 3 种形式氮素的初始质量浓度, mg/L; L 为氮素质量浓度的埋深, m。

4 模型输入参数的确定

模型输入参数主要包括水文部分和水质部分(氮素流失量)。具体参数确定情况如下。

4.1 气象数据输入

本文输入模型的气象资料由淮阴区码头镇气象信息服务站实测得到。输入的气象资料主要包括: (1) 气温: 日最低气温和日最高气温; (2) 降雨: 日降水量; (3) 潜在蒸发量: 日潜在腾发量, 本文根据气象站测的详细气象数据采用 Penman-Monteith 公式计算所得^[5]。

4.2 模型土壤参数

土壤水分特征曲线是根据实测土壤颗粒分析数据推导而得^[6]; 不同埋深的地下水土壤的排水能力和潜水的上升通量, 以排水模型提供的计算方法, 基于实测土壤颗粒分析值推算而求得, 包括计算入渗过程的 Green-Ampt 公式计算参数, 计算土壤排水量的给水度参数和潜水上升通量等参数。模型主要土壤输入参数见表 2。

4.3 灌溉与排水参数

灌溉输入参数主要包括灌溉日期, 灌溉周期,

每小时的灌水量。根据区域实际灌溉情况及模型参数输入要求, 稻田灌溉划分为 2 个周期: 从插秧前泡田(6 月 17 日)到开始晒田(7 月 21 日)为第一个灌水周期, 晒田结束(7 月 29 日)到水稻生长成熟期(10 月 15 日)为第二个灌水周期。灌溉制度为: 每隔 5 d 灌一次, 每次以 1.8 cm/h 灌水率从早 8:00 灌溉到晚 22:00 结束, 全生育期共灌水 16 次。

土壤水进入渗漏管的速度取决于土壤导水率、排水暗管间距、暗管埋深及地下水位埋深。模型以侧向饱和导水率及两排水管间距的中点处地下水位埋深来估算排水流量。模型中的排水量采用 Hooghoudt 稳定流公式计算得到。根据研究区稻田周围田埂高度的实际情况可得, 现有地表积水现象明显, 地表排水量非常小。

排水系统输入参数主要包括地下排水和地表排水, 地下排水参数有排水沟深度、间距、排水有效半径、不透水层的埋深、排水模数及侧向饱和导水率; 地表排水参数主要有地面平整程度。

根据灌区实际情况, 排水深度取 1.5 m, 排水沟间距模型选用 100 m、200 m、300 m 3 种进行分析对比;

根据灌区实际情况结合相关资料由模型率定所得不透水层取 350 cm、排水模数取 1.3 cm/d、侧向饱和导水率取 2.02 cm/h、等效排水半径取 2.0 cm 及地表平整程度的田埂高度 S_m 取 10 cm、田间地表积水深度 S_i 取 1.2 cm。

4.4 作物及氮素运移参数输入

灌区作物主要为水稻, 其输入参数包括水稻种植日期、收获日期, 生育期内水稻有效根深与时间的关系, 水稻生长期各阶段的敏感因子参数。种

表 2 模型主要选用的土壤参数

参数类型	土壤水分特征曲线		土壤排水能力		土壤蒸发能力		Green-Ampt 入渗		
	负压力/ cm	含水率/ (cm ³ ·cm ⁻³)	水位埋深/ cm	排水量/ cm	水位埋深/ cm	潜水上升通量/ (cm·h ⁻¹)	水位埋深/ cm	A/ (cm·h ⁻¹)	B/ (cm·h ⁻¹)
取值	0	0.33	0	0.000	0	0.5000	0	0.00	2.07
	-7	0.29	25	1.036	25	0.0183	10	0.13	2.07
	-91	0.27	45	1.513	45	0.0115	20	0.14	2.07
	-221	0.23	75	3.504	75	0.0043	50	0.09	1.14
	-930	0.12	90	5.173	90	0.0024	100	0.10	1.13
	-2 243	0.10	120	6.104	120	0.0013	120	0.10	1.13
	-7 029	0.09	150	6.773	150	0.0008	150	0.10	1.13

植和收获日期根据实际情况所得,有效根深与时间的关系的确定是根据模型方法计算所得,各参数的输入值见表3。

表3 模型主要选用的水稻根系深度变化参数

日期	水稻根深/cm
06-25	4
07-18	15
08-09	25
08-22	30
09-18	30
09-29	30
10-10	20
10-20	3

氮素运移参数包括水稻生育期内稻田施肥日期和施肥量、氮素转化参数。施肥参数根据灌区实际调查所得,并以模拟值和实际值之间误差达到最小为目标,调整和率定碳氮转化参数。

氮素运移参数:反硝化速率0.3,净矿化速率0.0001,降雨中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度0.32 mg/L,降雨中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 质量浓度0.34 mg/L。

水稻吸收氮素参数:收获指数0.42,根冠比0.1,籽粒氮积累量3%,根和茎氮积累量0.9%。具体见表4。

表4 模型主要输入的施肥参数

日期	施氮量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
06-28	65.30
07-09	87.19
07-20	122.10
08-07	122.10
08-09	39.38
08-18	102.60

5 模拟结果及讨论

5.1 模拟不同排水系统的排水量

结合2019年7-9月的降水量和实际灌溉量,运用DRAINMOD-N II模型模拟灌区不同排水间距(间距为100 m、200 m、300 m,排水深度1.5 m)下中沟排水量,如图4所示。

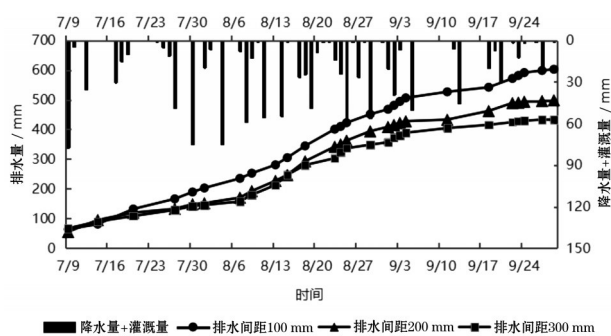


图4 不同排水系统的排水量

根据分析,水稻整个生育期内,排水间距100 m的累计排水量达到602.35 mm,排水间距200 m的累计排水量为498.51 mm,排水间距300 m的累计排水量为433.19 mm,排水间距100 m排水量高出排水间距200 m约21%,高出排水间距300 m约39%;从各排水间距下排水量累计数据的走势情况可见,水稻整个生育期内排水间距100 m的排水量远大于排水间距200 m和300 m。

由此可见,随着排水间距的增大,排水量不断减小,原因是,排水间距增大时,会引起下渗水分到排水沟处的水势差减小,导致水势梯度减小,则由达西定律可知,水流速度减慢,所以排水管的排水量减小。排水间距小导致田间大量水分流失,排水间距过大,稻田多余水分排不出,导致水稻受涝渍影响,而影响产量。

5.2 模拟不同排水系统的氮素流失量

结合2019年7-9月的稻田实际施肥量,运用DRAINMOD-N II模型的氮素循环利用原理,模拟灌区不同排水间距(间距为100 m、200 m、300 m,排水深度1.5 m)下中沟随排水量而流失的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的流失量变化情况,如图5~6所示。

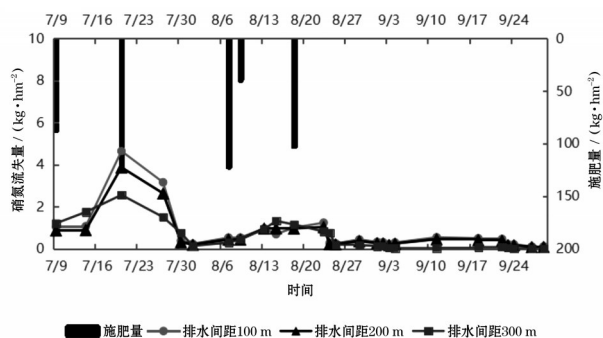


图5 不同排水系统的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量

根据图标趋势线显示,施肥后2~3 d,排水中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量最大达到4.64 kg/hm^2 , $\text{NH}_4\text{-N}$ 流失量

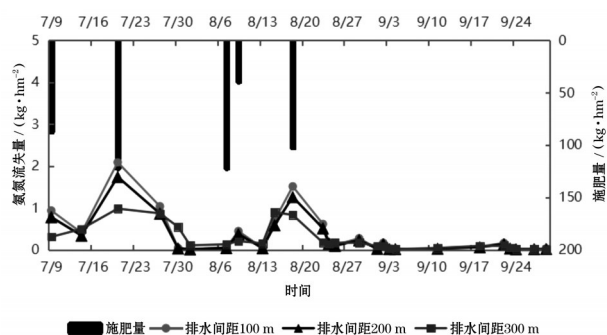


图6 不同排水系统的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 流失量

最大达到 2.08 kg/hm^2 。可见,施肥过后短时间内氮素流失量明显增高,且 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的流失量超过 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的2倍。

图5显示,生长前期(7月16–30日)排水间距100 m的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量达到 4.46 kg/hm^2 ,排水间距200 m和300 m的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量分别为 3.78 kg/hm^2 和 2.56 kg/hm^2 ,排水间距100 m $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量高出排水间距200 m和300 m约18%和74%;可见生长前期(水稻分蘖期和拔节孕穗期)排水间距对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量的影响与排水量基本一致,影响较大,中后期不同排水间距的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量差异不大;主要原因是水稻分蘖期和拔节孕穗期对氮素的吸收率较高^[7]。

图6显示,生长前期和中期排水间距100 m的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 流失量达到 2.08 kg/hm^2 和 1.51 kg/hm^2 ,排水间距200 m和300 m的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量分别为 1.74 kg/hm^2 、 1.26 kg/hm^2 和 0.98 kg/hm^2 、 0.89 kg/hm^2 ,排水间距100 m $\text{NH}_4\text{-N}$ 流失量高出排水间距200 m约19%,是排水间距300 m的2倍有余;可见 $\text{NH}_4\text{-N}$ 流失量受排水间距和施肥的影响较大。

6 结论与讨论

本文运用DRAINMOD-N II模型分析临湖灌区不同排水系统对排水量和氮素流失量的影响,以控制水量和氮素流失、降低涝渍灾害、减少水体污染为目标,寻求合理的排水系统。

经过对比分析,排水间距增大时,会引起下渗水分到排水沟处的水势差减小,导致水势梯度减小,则由达西定律可知,水流速度减慢,所以排水管

的排水量减小。排水间距过小导致田间大量水分流失,排水间距过大,稻田多余水分排不出,导致水稻受涝渍影响,进而影响产量。不同排水系统的氮素流失与排水量变化趋势基本一致,说明控制排水可以有效地降低稻田氮素流失^[8-9]。

结果显示,排水量受排水间距影响较大,氮素流失量在水稻生长前期受施肥和排水间距影响较大,氮素流失量与排水量变化趋势基本一致,因此,控制排水可以有效地降低稻田氮素流失。

临湖灌区现状排水系统(间距200 m,深度1.5 m)下排水量和氮素流失量适中,不会造成大量的水量和氮素流失,不会引起较严重涝渍灾害和水环境污染,说明灌区现有的排水系统布置基本满足农业生产需求。

参考文献:

- [1] YOUSSEF M A, SKAGGS R W, CHESCHEIR G M, et al. The nitrogen simulation model, DRAINMOD-N II [J]. Transactions of the ASABE, 2005, 48(2): 611–626.
- [2] 王少丽, PRASHER S O, CHUN-CHIEH YANG, 等. 排水氮运移模型对地表和地下排水量和硝态氮损失的模拟评价[J]. 水利学报, 2004(9): 111–117.
- [3] LUO W, SANDS G R, YOUSSEF M, et al. Modeling the impact of alternative drainage practices in the northern Corn-belt with DRAINMOD-N II [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(3): 389–398.
- [4] 王皎, 俞双恩, 李彧伟, 等. 应用DRAINMOD-N II模型对暴雨后稻田排水量和氮素模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 246–252.
- [5] 张登科. 平原河网地区稻麦轮作农田排水过程监测及模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
- [6] 吴鹏飞. 土壤水分特征曲线推求方法比较分析[J]. 科技致富向导, 2012(16): 31.
- [7] 何文寿, 李生秀, 李辉桃. 水稻对铵态氮和硝态氮吸收特性的研究[J]. 中国水稻科学, 1998, 12(4): 249–252.
- [8] LUO W, JIA Z H, FANG S X, et al. Outflow reduction and salt and nitrogen dynamics at controlled drainage in the YinNan Irrigation District, China [J]. Agricultural Water Management, 2008(95): 809–816.
- [9] 王亮. 宁夏银南灌区稻田控制排水试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.