

# 基于 DRAINMOD 模型的不同灌排模式稻田水氮运移模拟

谢阳村<sup>1</sup>, 徐敏<sup>1\*</sup>, 高世凯<sup>2</sup>, 沈连起<sup>3</sup>

(1.生态环境部 环境规划院, 北京 100000; 2.华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450046; 3.寿光市水利局, 山东 寿光 262700)

**摘要:**【目的】研究不同灌排模式稻田水氮动态变化, 为南方稻作区节水减排提供科学依据。【方法】基于实测的田间灌排水量及氮素变化数据, 采用 Morris 方法检测 DRAINMOD 模型水氮运移相关参数的灵敏度, 并利用 DRAINMOD 模型对传统灌排模式和控制灌排模式下稻田水氮动态进行模拟。【结果】20~40 cm 土层侧向饱和导水率对稻田水分运移模拟结果影响最大, 弥散系数、反硝化参数、硝化反应参数、有机质适宜分解温度对稻田氮素运移模拟结果影响较大; DRAINMOD 模型能够较好地模拟不同灌排模式稻田水氮动态变化、灌排水量、氮素径流总负荷模拟值与实际值差别小于 11%; 与传统灌排模式相比, 控制灌排模式排水量减少 33.0%~72.6%, 灌水量减少 9.7%~37.1%, 铵态氮径流负荷减少 43.6%~45.0%, 硝态氮径流负荷分别减少 29.8%~53.1%。【结论】控制灌排模式稻田节水减排效果较好, 利用 DRAINMOD 模型进行不同灌排模式稻田水氮动态模拟可行有效。

**关键词:** 水稻; 水氮动态; DRAINMOD 模型; 灵敏度; 控制灌排

中图分类号: S276.7; S143.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020519

OSID:



谢阳村, 徐敏, 高世凯, 等. 基于 DRAINMOD 模型的不同灌排模式稻田水氮运移模拟[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 37-44.

XIE Yangcun, XU Min, GAO Shikai, et al. Using DRAINMOD to Simulate the Impact of Irrigation and Drainage on Reaction and Movement of Water and Nitrogen in Paddy Field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 37-44.

## 0 引言

【研究意义】氮素是农作物生长发育的关键因素, 在传统灌排模式下, 由于灌溉和降雨造成的排水较多, 大量氮素直接进入水体, 导致农业面源污染<sup>[1-4]</sup>。已有研究表明, 单一水稻控制灌溉与控制排水技术可高效利用养分和水分, 减轻环境负荷, 实现节水高产、减排、控污的目标<sup>[5-6]</sup>。但将水稻控制灌溉与控制排水技术进行有机结合, 形成水稻全生育期的控制灌排技术<sup>[4,7]</sup>, 进行节水减排控污效果的研究却较少。此外, 农业面源污染区域发生具有随意性、污染排放不确定性以及空间异质性的特点, 对其影响过程、影响因素以及产生的机理研究造成难度<sup>[8-9]</sup>。【研究进展】辅助于完善农田排水管理以及氮素流失的农田排水模型已经引起国内外的广泛关注<sup>[10-12]</sup>, 但对于稻田的排水和氮素运移模型较为少见。DRAINMOD 模型是美国农业部推荐的农田排水模型, 模型不断发展更新, 并逐渐得到推广应用<sup>[13-15]</sup>。部分学者利用 DRAINMOD 模型尝试应用于稻田, 认为该模型能够较好地模拟灌区稻田径流排水过程和地下水位动态变化<sup>[16-18]</sup>, 也有

学者利用 DRAINMOD 模型对暴雨排水过程氮素变化进行探究<sup>[19-20]</sup>。高学睿等<sup>[21]</sup>将 DRAINMOD 模型应用到气候相对湿润的湖北漳河灌区, 对灌区稻田的排水和氮素流失规律进行模拟, 发现模型可有效地模拟预测南方典型灌区稻田排水特性及氮素运移特性, 相对误差范围为 2.8%~16.0%。Hashemi 等<sup>[22]</sup>发现 DRAINMOD 模型可以较好地模拟不同排水深度和间距组合下稻田硝态氮损失和排水流量, 相对误差范围为 1.0%~35.0%。【切入点】综上, 对于 DRAINMOD 模型在稻田的应用研究多基于传统灌排模式, 但对于不同灌排模式下稻田的应用研究较少。【拟解决的关键问题】采用 Morris 方法对 DRAINMOD 模型的水氮运移参数进行灵敏度分析, 利用 DRAINMOD 模拟不同灌排模式稻田水氮动态变化规律, 探讨 DRAINMOD 模型在水稻不同灌排模式下的适用性, 以期为我国南方稻作区灌排实践提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验概况及农艺措施

试验研究于 2017 年和 2018 年 6—10 月在涟水县水利科学研究所的试验大田完成, 试验区位于江苏省淮安市涟水县朱码镇王二庄村境内, 地理坐标东经 119°16', 北纬 33°50', 属于亚热带湿润性气候区, 多年平均气温 14.4 °C, 年降水 979.1 mm, 降水量时程分布不均, 汛期降水量占全年降水量比重较大, 年均

收稿日期: 2020-09-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07111003); 国家自然科学基金项目 (51879074)

作者简介: 谢阳村 (1983-), 女, 吉林长春人。副研究员, 博士, 主要从事水环境管理研究。E-mail: xieyc@caep.org.cn

通信作者: 徐敏 (1979-), 浙江金华人。研究员, 博士, 主要从事水环境管理研究。E-mail: xumin@caep.org.cn

蒸发 1 385.4 mm, 年均日照时间 2 280 h, 年均无霜期 240 d。试验区 0~100 cm 土层土壤为壤土, 土壤体积质量为 1.42 g/cm<sup>3</sup>, pH 值为 6.82, 田间持水率为 27.9% (质量), 有机质量为 2.19%, 全氮量、全磷量分别为 0.98、1.12 g/kg, 速效氮量为 21.5 mg/kg。采用格田小区试验, 格田规格为 90 m×27 m, 格田田埂高 30 cm 以上, 底部宽 40 cm, 上部宽 30 cm, 除农沟一侧的田埂外, 格田周边嵌入 50 cm 的薄膜并覆盖至田埂, 避免了各小区间水位影响。试验区布置见图 1。

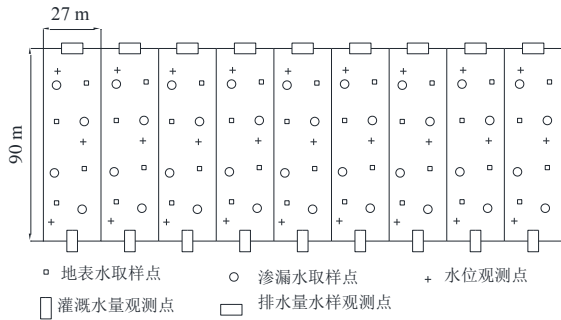


图1 试验区布置

Fig.1 The layout of the test area

供试水稻品种为两优 9918, 该品种株型松紧适中, 群体整齐, 茎秆坚韧, 叶色淡绿, 叶片内卷挺直, 熟期落色好, 抗病虫害性能较好, 耐高温能力强。该品种有效穗数 241.5 万穗/hm<sup>2</sup>, 穗总粒数 175.7 粒, 结实率 85.5%, 千粒质量 27.5 g, 株高可达 122.7 cm 左右, 全生育期平均为 130.8 d, 多年平均产量为

表2 各处理农田水位调控方案

Table 2 Water control program of each treatment

处理	分蘖期/cm	拔节孕穗期/cm	抽穗开花期/cm	乳熟期/cm	黄熟期
CK	-20~6~6	-20~6~6	-20~6~6	-20~6~6	
LCID	-20~6~10	-20~6~20	-20~6~20	-20~6~20	不留水层, 自然落干
HCID	-50~6~10	-50~6~20	-50~6~20	-50~6~20	

注 各数值为农田水位。例如-20~6~6 分别表示灌水下限农田水位、灌水上限农田水位以及雨后允许蓄水农田水位。

选取水稻分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期和乳熟期 4 个生育阶段进行控水试验, 共 3 个处理, 每个处理设 3 个重复。传统灌排 (CK) 农田水位达到灌水下限值-20 cm 立即灌水至 6 cm, 雨后水层深度超过 6 cm 即排水。控制灌排分为轻旱控排 (LCID) 和重旱控排 (HCID), LCID 达到灌水下限值-20 cm 立即灌水至 6 cm, 分蘖期雨后水层深度超过 10 cm 即排水, 其他生育期雨后水层深度超过 20 cm 即排水; HCID 达到灌水下限值-50 cm 立即灌水至 6 cm, 雨后排水方式与 LCID 相同。

### 1.3 试验观测指标及方法

1) 气象资料。由田间试验小区附近的自动气象站收集, 主要包括降雨时间、降雨历时及降雨量和大气温度、大气压强、大气相对湿度、风速、水面蒸发量、有效辐射量等。

2) 农田水位。每天 09:00 对农田水位进行观测。当农田地面有水层时, 通过竖尺在固定观测点测量农

597.1 kg。水稻农艺措施见表 1, 复合肥 N、P、K 质量比为 15:15:15, 尿素含氮量为 46.4%。

表1 2017—2018年水稻农艺措施

Table 1 Agronomic measures of rice in 2017—2018

年份	2017 年	2018 年
催芽	5 月 23 日	5 月 27 日
育秧	日期	5 月 25 日
泡田	6 月 18 日	6 月 23 日
移栽	日期	6 月 23 日
	叶龄	6
	密度	22 cm×15 cm
基肥	日期	6 月 23 日
	施肥量	复合肥 900 kg/hm <sup>2</sup>
分蘖肥	日期	7 月 16 日(23 d)
	施肥量	尿素 50 kg/hm <sup>2</sup>
穗肥	日期	8 月 4 日(42 d)
	施肥量	尿素 50 kg/hm <sup>2</sup>
收割	日期	10 月 28 日
		10 月 30 日

注 (42 d) 指移栽后第 42 天, 以此类推。

### 1.2 试验设计

考虑到南方地区水稻生长期与汛期同季, 控制灌排模式可以在保持较低灌水下限的同时, 提高雨后蓄水上限, 扩大稻田的储水库容, 达到充分利用天然降水, 减少灌排水频率、灌排定额和氮磷排放量, 并依据前人连续几年的试验结果<sup>[7,23,24]</sup>及江苏省水稻节水灌溉技术规范, 各处理水位调控方案见表 2。

田地面水层深度。无水层时, 通过在试验田块中间等距离安装的 3 个地下水位观测井记录各小区农田水位的埋深。

3) 灌水量。通过在农渠上安装的三角量水堰测定各格田灌溉水量。

4) 排水量。采用水位差法, 记录排水前后格田水层深度, 根据二者差值计算排泄水量, 其中当降雨引起的径流时应加上排水时段内的降雨量, 日内发生多次排水按 1 次计算。

5) 水样提取及分析。在格田小区选择 4 个取样点, 地表水用塑料注射器不扰动土层分别在水面、1/2 水深、底部取水, 混合装入采样瓶, 一般 5~7 d 取 1 次水样, 但施肥后以及暴雨后 1 周内隔日取样; 渗漏水通过地下水观测井, 深度为 1.5 m, 井管底部密封, 管壁打孔并用无纺布过滤, 井口加盖防雨。取样时先用真空泵清空井内积水, 1~2 h 后吸取井管中渗漏水, 取样频率同地表水。排水时在排水出口取水,

每 30 min 取 1 次，当产流均匀时可适当延长步长。所有水样采样后贴好标签，并进行冷藏(3 ℃)处理，在 24 h 内进行水质分析。水样中铵态氮、硝态氮分别采用絮凝沉淀纳氏试剂光度法、紫外分光光度法，所用仪器主要为 UV2800 岛津紫外分光光度仪。

## 2 模型原理及主要参数

### 2.1 模型原理

DRAINMOD 模型以简单的土壤剖面范围内水平衡原理为基础来描述农田水文变化过程，可以准确地预测出农田水位、地表径流和地下排水量以及作物产量等。在时间增量 $\Delta t$ 内，土壤水量平衡方程可表示为：

$$\Delta V = F - D - ET - DS, \quad (1)$$

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

式中： $\theta_a$  为土壤液相体积分数； $\theta_g$  为土壤气相体积分数； $\rho_b$  为土壤固相干体积质量 ( $M/L^3$ )； $C_a$  为某种形式氮素液相浓度 ( $M/L^3$ )； $C_g$  为某种氮素形式气相浓度 ( $M/L^3$ )； $C_s$  为某种形式氮素固相浓度 ( $M/M$ )；

式中： $\Delta V$  为土体水量的变化量 (cm)； $D$  为侧向排水量 (cm)； $ET$  为蒸发蒸腾量 (cm)； $DS$  为深层渗漏量 (cm)。

在单元 $\Delta t$ 时段内，地表水量平衡方程为：

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

式中： $\Delta S$  为地表蓄水量的变化量 (cm)； $P$  为降雨量 (含灌水量) (cm)； $F$  为入渗量 (cm)； $RO$  为地表径流量 (cm)。

DRAINMOD 模型可以用于模拟湿润地区浅水位条件下农田非饱和区 (一维，垂向) 及饱和区 (二维，垂向和侧向) 的土壤水和氮素转化运移，模型采用多相一维对流弥散方程表达式来模拟计算农田中的氮素运移，并用一阶有限差分法求解。多相一维对流弥散方程式为：

$D_a$  为水力扩散系数 ( $L^2/T$ )； $d_g$  为分子扩散系数； $V_a$  液相体积通量； $S$  为源汇项； $t$  为时间 (T)； $z$  为空间坐标 (L)。

表 3 土壤参数和排水参数

Table 3 Main input parameters of soil and drainage

土壤参数	0~20 cm	20~40 cm	40~100 cm	排水特性	取值	备注
土壤饱和含水率	0.378	0.365	0.342	暗管深度/cm	120	实测
土壤凋萎点含水率	0.047	0.046	0.039	排水间距/cm	10 000	实测
侧向饱和导水率/( $cm\ h^{-1}$ )	1.42	1.04	0.56	排水管有效半径/cm	18	率定
垂向饱和导水率/( $cm\ d^{-1}$ )	42	21	18.9	地面到不透水层深度/cm	300	率定
砂粒量/%	39.1	39	38	排水系数/( $cm\ day^{-1}$ )	2	文献[25]
粉粒量/%	48.9	49.2	49.5	Kirkham 积水深度/cm	0.5	文献[25]
黏粒量/%	12	11.8	11.5			
土壤体积质量/( $g\ cm^{-3}$ )	1.40	1.43	1.47			

表 4 氮素参数

Table 4 Nitrogen parameters

反应	参数	取值	备注
硝化反应	Michaelis-Menton 最大速率/( $\mu g\ ng^{-1}\ day^{-1}$ )	10	率定
	半饱和常数/( $\mu g\ ng^{-1}\ day^{-1}$ )	25	率定
	最适宜温度/℃	20	率定
反硝化反应	Michaelis-Menton 最大速率/( $\mu g\ ng^{-1}\ day^{-1}$ )	3.5	率定
	半饱和常数/( $\mu g\ ng^{-1}\ day^{-1}$ )	35	率定
	最适宜温度/℃	37	率定
水解反应	Michaelis-Menton 最大速率/( $\mu g\ ng^{-1}\ day^{-1}$ )	100	率定
	半饱和常数/( $\mu g\ ng^{-1}\ day^{-1}$ )	50	文献[26-27]
	最适宜温度/℃	51.6	文献[26-27]
肥料溶解	零阶反应系数/ $d^{-1}$	1.5	率定
氨挥发	土壤酸碱缓冲能力/( $g\ mole^{-1}$ )	150 000	文献[26-27]
	经验阻力系数/( $s\ cm^{-1}$ )	30	率定

### 2.2 模型参数

土壤参数通过入渗试验、野外钻孔法、环刀法等方法测定。由于原系统针对的是暗管排水，在应用于明沟排水时需要进行相应的参数调整，排水深度和排

水间距试验测定；排水管有效半径和地面到不透水层深度通过模型率定；由于土壤质地和试验条件相似，排水系数和Kirkham积水深度参考文献[25]确定。氮素相关参数通过模型率定和参考文献[26-27]确定。作物

参数有效根系深度根据2017年和2018年实测数据以及相关经验进行设定。模型初始参数见表3—表5。采

用2017年试验观测数据进行参数率定、2018年数据对模型进行验证。

表5 作物参数

Table 5 Growth parameters

日期	6月23—30日	7月1—31日	8月1—20日	8月21日—9月8日	9月9日—10月30日
水稻根系深度/cm	3	15	18.5	20.5	22.5

### 3 模型参数敏感性分析

#### 3.1 模型参数选择及分布

敏感性分析分为局部敏感性及全局敏感性，其中全局敏感性考虑了参数之间的相互影响，更加适用于DRAINMOD模型。将参数设定为均匀分布，其参数分布范围参考文献[25]，具体见表6。

表6 模型参数服从的分布

Table 6 Obedient probability distribution of model parameters

参数	参数服从分布
侧向饱和导水率 $K_{sat}/(\text{cm h}^{-1})$	$K_{sat1} \sim U(1.6, 1.2)$ , $K_{sat2} \sim U(1.4, 0.8)$ , $K_{sat3} \sim U(0.6, 0.45)$
排水管有效管径 $De/\text{cm}$	$De \sim U(16, 25)$
不透水层深度 $LL/\text{cm}$	$LL \sim U(200, 350)$
弥散系数 $\lambda/\text{cm}$	$\lambda \sim U(5, 20)$
最大速率 $V_{max}/(\mu\text{g ng}^{-1} \text{day}^{-1})$	$V_{maxnit} \sim U(7.5, 30)$ , $V_{maxden} \sim U(2.5, 30)$
半饱和常数 $K_m/(\mu\text{g ng}^{-1} \text{day}^{-1})$	$K_{mnit} \sim U(10, 50)$ , $K_{mden} \sim U(10, 40)$
最适宜温度 $T_{opt}/^\circ\text{C}$	$T_{optnit} \sim U(20, 35)$ , $T_{optden} \sim U(20, 35)$
氨挥发经验阻抗系数 $\gamma/(\text{s cm}^{-1})$	$\gamma \sim U(3, 100)$
有机质分解速率 $K_{dec}/\text{d}^{-1}$	$K_{deca} \sim U(1 \times 10^{-2}, 4 \times 10^{-2})$ , $K_{decs} \sim U(2.7 \times 10^{-4}, 11 \times 10^{-4})$
有机质适宜温度 $T_{optdec}/^\circ\text{C}$	$T_{optdec} \sim U(18.5, 74)$

水分运移模拟中水位变化选择通过衡量模拟值与观测值的拟合程度进而评估参数敏感性，即 Nash

Sutcliffe 效率 (Nash)、相对误差总量 RE 以及相关系数 CC，计算式为：

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}, \quad (4)$$

$$Re = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i}, \quad (5)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}}, \quad (6)$$

式中： $Q_i$ 为农田水位实测值 (cm)； $M_i$ 为农田水位模拟量 (cm)； $n$ 为模拟次数； $\bar{Q}$ 为农田水位实测平均值 (cm)； $\bar{M}$ 为农田水位模拟平均值 (cm)。

其他参数采用定性分析的 Morris 法<sup>[28]</sup>进行敏感性分析，该方法通过参数变化效应的平均值 $\mu$ 和标准差 $\sigma$ 来判断参数的敏感性，其中 $\mu$ 值反映参数敏感性大小， $\mu$ 值越大，代表参数对模型输出结果的影响越大； $\sigma$ 值反映参数间交互作用的大小或者表示参数为非线性影响， $\sigma$ 值越大，代表参数交互作用越大。

#### 3.2 水分运移模拟敏感性分析

对于选取的水分运移参数，依据 Morris 方法共进行 20 次抽样，得到 100 组模型参数的抽样样本，运行模型得出各个参数的灵敏度，结果如图 2 所示。

由目标函数均值 $\mu$ 可以得出， $LL$ 对模型农田水位输出结果影响最小， $De$ 影响最大，三层侧向饱和导水率在不同目标函数上有所区别，但  $K_{sat2}$ 影响最大，尤其在 Nash 和 CC 上响应较明显；对于地表排水量和地下渗漏量， $K_{sat2}$ 与  $De$ 的影响最大， $LL$ 影响最小。

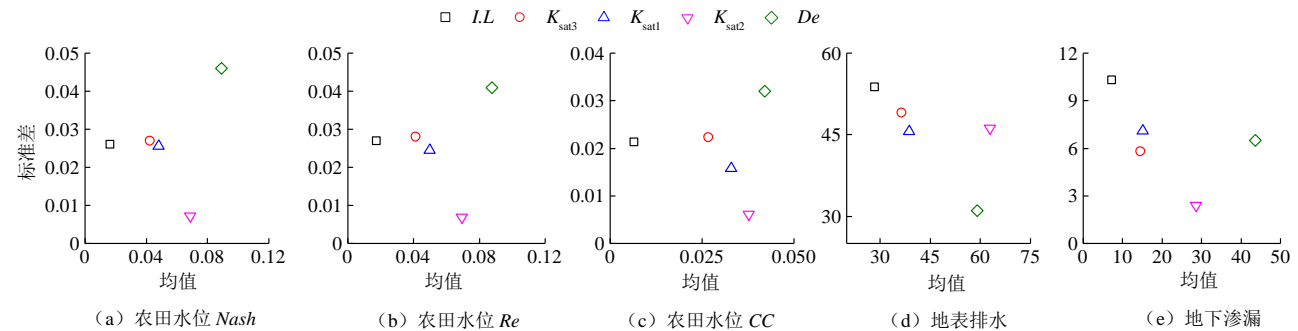


图2 水文参数均值与标准差散点

Fig.2 Mean value and standard value of hydrological parameters

由目标函数标准差 $\sigma$ 可以得出，整体呈现出“山谷”型， $De$ 受其他参数的影响（或非线性作用）最为明显，而  $K_{sat2}$ 基本不受其他参数的影响；对于地表排水量和地下渗漏量， $LL$ 处于较高水平， $De$ 和  $K_{sat2}$ 受其他因素影响较小。

#### 3.3 氮素运移模拟敏感性分析

对于选取的氮素运移参数，依据Morris方法共进

行20次抽样，采样220组数据得到220组模型参数的抽样样本，运行模型得出各个参数的灵敏度，如图3所示。

由目标函数均值 $\mu$ 可以得出，对于地表铵态氮径流损失， $\lambda$ 对输出结果的影响最明显，因为扩散是铵态氮运移的主要机理，当铵态氮垂向运移距离较短时会导致较多的铵态氮通过径流方式排出，其次为  $T_{optdec}$ ，因为当土壤温度与分解温度相近时，有利于

有机质分解为铵态氮；对于地表硝态氮径流损失，反硝化反应起主导作用，反硝化参数  $V_{\max\text{den}}$ 、 $K_{\text{mden}}$ 、 $T_{\text{optden}}$  对输出结果影响最大，有机质分解参数  $T_{\text{optdec}}$ 、 $K_{\text{deca}}$ 、 $K_{\text{decs}}$  影响最小；对于地下铵态氮渗漏损失，输出结果基本只受到有机质分解和硝化反应参数影响，依次为  $K_{\text{mnit}}$ 、 $T_{\text{optdec}}$ 、 $V_{\max\text{nit}}$ 、 $K_{\text{deca}}$ 、 $T_{\text{opt-nit}}$ 、 $K_{\text{decs}}$ ；对于地下硝态氮渗漏损失，输出结果基本只受到硝化反应及反硝化反应参数影响，依次为  $V_{\max\text{den}} > K_{\text{mnit}} >$

$$V_{\max\text{nit}} > K_{\text{mden}} > T_{\text{optden}} > T_{\text{optnit}}。$$

由目标函数标准差  $\sigma$  可以得出，整体呈“山峰”型趋势，地表铵态氮径流损失参数  $T_{\text{optdec}}$ 、 $T_{\text{optnit}}$ 、 $K_{\text{deca}}$ 、 $\lambda$  相互影响较大；地表硝态氮径流损失参数中仅  $K_{\text{mden}}$  略受其他参数影响；地下铵态氮渗漏损失  $T_{\text{optnit}}$  和  $K_{\text{deca}}$  相互影响较大；地下硝态氮渗漏损失  $K_{\text{mnit}}$  受其他参数影响大。

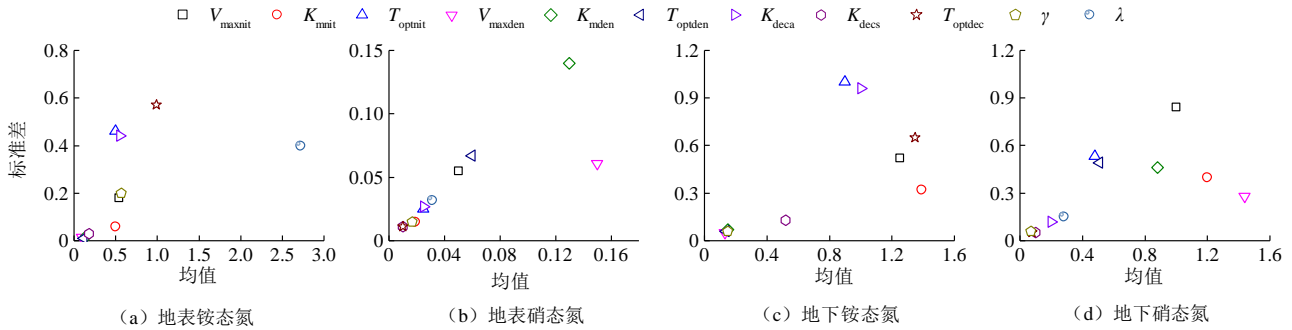


图3 氮素参数均值与标准差散点

Fig.3 Mean and standard values of nitrogen

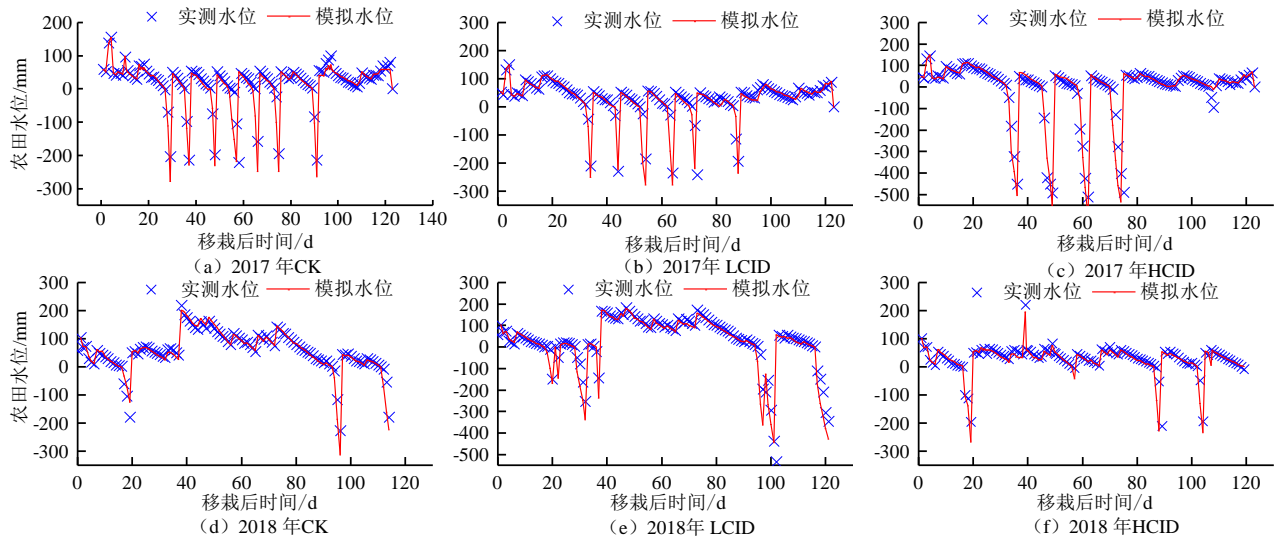


图4 农田水位变化模拟值和实测值对比

Fig.4 Simulated and measured values of farmland water level

表7 农田水位拟合性能

Table 7 Fitting performance of farmland water level

参数	2017年			2018年			
	CK	LCID	HCID	CK	LCID	HCID	
Nash	地表	0.90	0.98	0.99	0.93	0.92	0.93
	总计	0.97	0.93	0.89	0.84	0.81	0.91
Re	地表	-0.06	0.01	-0.04	-0.06	-0.02	0.10
	总计	-0.09	-0.03	-0.35	-0.55	-0.21	0.14
CC	地表	0.95	0.99	0.99	0.98	0.97	0.98
	总计	0.87	0.98	0.84	0.89	0.86	0.90

## 4 模拟结果与分析

### 4.1 不同灌排模式下稻田水动力学

各处理农田水位变化模拟值和实测值对比如图 4

所示。从图 4 可以看出，实测的农田水位与模型模拟结果之间吻合较好，模拟结果能较好地反映田间农田水位的变化情况。其中，正水位模拟程度较好，但负水位（即水位低于土壤表面）则模拟结果存在较大差别，但属于可接受范围。由表 7 可以得出，农田水位拟合性能参数  $Nash$  在 0.81~0.97 之间，均大于 0.8，模拟效果较好； $Re$  绝对值在 0.01~0.53 之间，且主要为地下水位模拟误差； $CC$  在 0.86~0.98 之间，模拟值与实测值变化趋势较为一致。

不同灌排模式灌排水量模拟值和实测值见表 7。各处理灌水量和排水量模拟值与实际值差别小于 10%，模拟效果较好。与 CK 相比，2017 年 LCID 和 HCID 灌水量分别减少 16.1%、37.1%，排水量分别减少 68.6%、72.6%；2018 年 LCID 和 HCID 灌水量分

别减少 9.7%、26.2%，排水量分别减少 33.0%、41.9%。说明控制灌排模式通过合理调蓄雨水资源，减少稻田排水次数和排水量，对于节约灌溉用水有重要意义。而 HCID 与 LCID 相比，灌水量更少，说明节水省工效果更加显著。

#### 4.2 不同灌排模式下稻田氮素动态

各处理氮素径流损失累计量如图 5 所示。从整体趋势看，各处理模拟值与实测值在前期径流损失量较

大，在移栽后几天发生较大变化是由于生育前期连续遇雨，而返青期和分蘖初期需要保持浅水层，因此地表排水量较大，且此时基肥的施入引起地表水中氮素浓度较高。其中，CK 径流损失量最大，主要是由于前期排水量较多，而控制灌排拦蓄雨水，减少了氮素的排放。与实测值相比，铵态氮径流损失模拟较好，虽然在 2018 年存在些许差异，主要是由于排水影响，而非氮素浓度导致，硝态氮径流损失模拟存在较大差别。

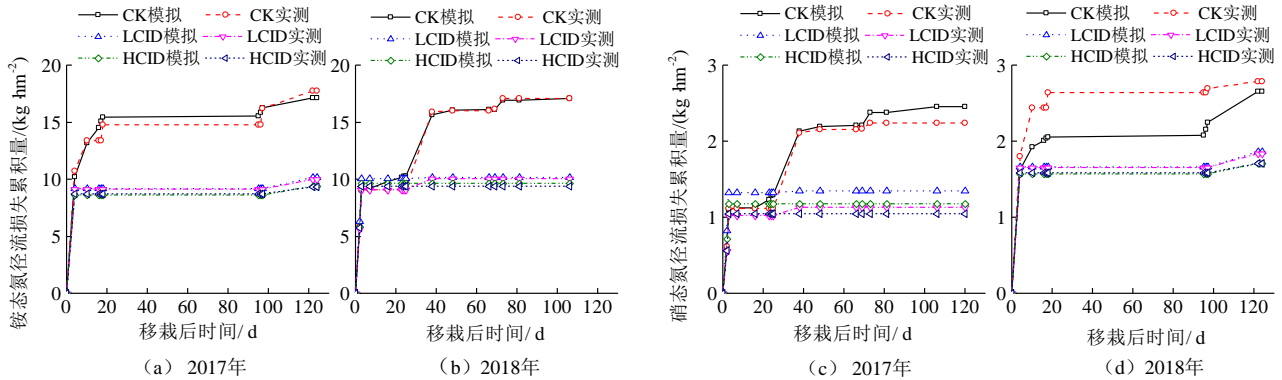


图5 氮素径流损失累计量

Fig.5 Cumulative nitrogen runoff loss

氮素径流损失累计总量模拟值与实测值对比见表 8。各处理氮素径流损失累计总量模拟值与实际值差别小于 20%，模拟效果较好。从铵态氮径流损失累计总量看，铵态氮模拟值与实际值相差不大，且与地表排水量模拟值变化情况保持一致；硝态氮径流损失累计总量在 2017 年各处理均有一定程度的升高，而 2018 年 CK 模式下有所降低，这主要是模型对排水中硝态氮质量浓度模拟存在偏差所致。与 CK 相比，2017 年 LCID 和 HCID 铵态氮径流损失累计总量分别减少 41.2%、45.0%，硝态氮径流损失累计总量分别减少 49.6%、53.1%；2018 年 LCID 和 HCID 铵态氮径流损失累计总量分别减少 43.6%、47.4%，硝态氮径流损失累计总量分别减少 29.8%、32.8%。说明控制灌排模式约束了地表水高质量浓度氮素时期的稻田排水，实现了减排控污的目标。

表8 不同处理氮素径流损失累计总量

Table 8 Fitting performance of nitrogen runoff loss

要素	2017 年			2018 年			
	CK	LCID	HCID	CK	LCID	HCID	
铵态氮/ (kg hm <sup>-2</sup> )	实际值	17.1	10.1	9.4	17.8	10.0	9.3
	模拟值	17.0	10.2	9.7	17.1	10.2	9.4
	差值 比/%	0.6	1.0	3.2	3.9	2.0	1.1
硝态氮/ (kg hm <sup>-2</sup> )	实际值	2.2	1.1	1.1	2.8	1.8	1.7
	模拟值	2.5	1.3	1.2	2.6	1.9	1.7
	差值 比/%	13.6	18.1	9.1	7.1	5.6	0

## 5 讨论

模型参数的合理选取对于模拟结果的精确性起

到关键作用，而大多数参数是依靠试验数据率定间接取得的，采用灵敏度分析来评价各个参数的不确定性对模拟结果的影响，确定出比较敏感的参数，有针对性地对这些参数进行测量和调节，从而选取合理的模型参数<sup>[29]</sup>。通过 DRAINMOD 模型进行模拟时，20~40 cm 土层侧向饱和和导水率  $K_{sat2}$  的变化对稻田水分运移结果影响较大，但与其他参数相互作用不明显，进行模拟输入时，可配合其他参数在适当范围内进行微调，来保证模拟精度。不透水层深度  $IL$  和排水管有效管径  $De$  极易受其他参数影响，故其初始输入值的精度直接影响模型的模拟效果。铵态氮模拟的准确性取决于弥散系数、硝化反应参数、有机质适宜分解温度，硝态氮模拟的准确性取决于反硝化参数和硝化参数<sup>[19, 21]</sup>，应该加强试验手段保证现场测量的精度。

DRAINMOD 模型进行模拟计算时，当农田水位为负值时，模拟值与实测值之间存在较大偏差，这可能是由于地下水位较浅时，土壤水力学特性对地下水位的预测比较敏感<sup>[14]</sup>，因此模拟效果存在偏差，但并未显著影响到灌水及灌水后地表水层深度。与采用 HYDRUS-1D 模型模拟稻田中水分运移的研究相比较<sup>[24]</sup>，DRAINMOD 模型表现良好。铵态氮模拟值与实际值相差不大，且与地表排水量模拟值变化情况保持一致，说明铵态氮径流负荷损失模拟偏差主要是由排水量所引起的。而 DRAINMOD 模型低估了生育前期排水中硝态氮浓度，高估了中后期硝态氮浓度，使得曲线呈现差别，还需进一步研究。

本研究对不同灌排模式下灌排水量和氮素径流负荷进行模拟，结果发现控制灌排模式将水稻控制灌溉技术与控制排水相结合，较传统灌排模式，可高效

利用养分和水分, 充分发挥稻田的湿地效应, 减少灌排水量和稻田氮磷污染物负荷, 实现节水减排的目标, 与前人研究结果<sup>[28]</sup>一致。同时, 已有研究发现控制灌排通过调控稻田水分状况, 可以实现水稻高产, 与传统灌排相比, 减产少于 10%, 且差异不显著<sup>[7,30-31]</sup>。但是, 对水稻田来说, 由于田间环境有很大差异, 稻作区的沟、田水体具有相互影响、协同控制的特点, DRAINMOD 模型对于不同灌排模式的适用性需要进一步在不同田间尺度、不同水文年型和不同地理分区中进行检验与推广。

## 6 结论

1) 20~40 cm 土层侧向饱和导水率  $K_{sat2}$  对稻田水分运移模拟结果影响最为明显, 同时各个参数间存在非线性作用, 以不透水层深度  $L$  和排水管有效管径  $De$  受其他参数影响最为明显; 弥散系数  $\lambda$ 、硝化反应参数 ( $K_{mnit}$ 、 $V_{maxnit}$ 、 $T_{optnit}$ )、有机质适宜分解温度  $T_{optdec}$  对稻田铵态氮运移模拟结果影响较大; 反硝化参数 ( $V_{maxden}$ 、 $K_{mden}$ 、 $T_{optden}$ ) 和硝化参数 ( $K_{mnit}$ 、 $V_{maxnit}$ 、 $T_{optnit}$ ) 对稻田硝态氮运移模拟结果影响较大。

2) DRAINMOD 模型能够较好模拟不同灌排模式的稻田水位, 拟合度在正水位时较高, 但在负水位时较低; DRAINMOD 模型能够较好地模拟不同灌排模式氮素运移, 其中铵态氮的拟合度较好。控制灌排模式通过合理调蓄雨水资源, 约束地表水高浓度氮素时期的稻田排水, 可以实现节水减排的目的。

### 参考文献:

- [1] 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.  
WANG Ning, YU Shuang'en, YE Xingcheng. Simulation of drainage and changes of nitrogen in paddy fields during rainstorms using DRAINMOD-N II[J]. Yellow River, 2014, 36(10): 136-140.
- [2] 晏军, 吴启侠, 朱建强, 等. 适雨灌溉下不同施肥模式对机插稻田水环境及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(2): 56-63.  
YAN Jun, WU Qixia, ZHU Jianqiang, et al. Effects of different fertilization models on paddy water environment and yield in machine-transplanted rice under irrigation adjusted by rainfall[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(2): 56-63.
- [3] WANG Z Y, SHAO G C, LU J, et al. Effects of controlled drainage on crop yield, drainage water quantity and quality: A meta-analysis[J]. Agricultural Water Management, 2020, 239: 106253.
- [4] GAO S K, YU S E, SHAO G C, et al. Effects of controlled irrigation and drainage on nitrogen and phosphorus concentrations in paddy water[J]. Journal of Chemistry, 2016, 2016: 1-9.
- [5] TOLOMIO M, BORIN M. Controlled drainage and crop production in a long-term experiment in North-Eastern Italy[J]. Agricultural Water Management, 2019, 222: 21-29.
- [6] 高焕芝, 彭世彰, 智晋, 等. 不同灌排模式稻田排水中氮磷流失规律[J]. 节水灌溉, 2009(9): 1-3, 7.  
GAO Huanzhi, PENG Shizhang, MAO Zhi, et al. N and P losses in surface drainage from paddy field under different irrigation and drainage modes[J]. Water Saving Irrigation, 2009(9): 1-3, 7.
- [7] SHAO G C, CUI J T, YU S E, et al. Impacts of controlled irrigation and

- drainage on the yield and physiological attributes of rice[J]. Agricultural Water Management, 2015, 149: 156-165.
- [8] 钱晓雍, 沈根祥, 郭春霞, 等. 基于水环境功能区划的农业面源污染源解析及其空间异质性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 103-108.  
QIAN Xiaoyong, SHEN Genxiang, GUO Chunxia, et al. Source apportionment and spatial heterogeneity of agricultural non-point source pollution based on water environmental function zoning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 103-108.
  - [9] 杨滨键, 尚杰, 于法稳. 农业面源污染防治的难点、问题及对策[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(2): 236-245.  
YANG Binjian, SHANG Jie, YU Fawen. Difficulty, problems and countermeasures of agricultural non-point sources pollution control in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(2): 236-245.
  - [10] LUO W, SANDS G R, YOUSSEF M, et al. Modeling the impact of alternative drainage practices in the northern Corn-belt with DRAINMOD-NII[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(3): 389-398.
  - [11] HASHEMI GARM DAREH S E, MALEKIAN R, MADANI A, et al. Simulation of nitrate-N leaching in No-till fields with DRAINMOD-N II in a cold-humid region[J]. Irrigation and Drainage, 2018, 67: 65-72.
  - [12] 田旖旎, 邵东国, 李思明, 等. 东北寒区水稻需水对地下水埋深的响应及灌溉模拟[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(12): 68-77.  
TIAN Yini, SHAO Dongguo, LI Siming, et al. Response of rice water requirement to groundwater depths and irrigations simulation in cold region of northeast China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(12): 68-77.
  - [13] BREVÉ M A, SKAGGS R W, PARSONS J E, et al. Drainmod-n, a nitrogen model for artificially drained soil[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(4): 1067-1075.
  - [14] 李家科, 刘周立, 张蓓. DRAINMOD 模型研究与应用进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(7): 679-687.  
LI Jiako, LIU Zhouli, ZHANG Bei. Research and application progress of DRAINMOD model[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(7): 679-687.
  - [15] 陈诚, 罗纨, 唐双成, 等. 满足机械收割农艺条件下稻田排水暗管布局 DRAINMOD 模型模拟[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 86-93.  
CHEN Cheng, LUO Wan, TANG Shuangcheng, et al. Drainage layout in paddy fields meeting machinery harvest requirement based on DRAINMOD model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(14): 86-93.
  - [16] 俞双恩, 李倩倩, 陈凯文, 等. DRAINMOD 和 HYDRUS-1D 模型对水稻控制灌排条件下农田水位的模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 46-52.  
YU Shuang'en, LI Qianqian, CHEN Kaiwen, et al. Simulations on water level of farmland under controlled irrigation and drainage of rice based on DRAINMOD and HYDRUS-1D Models[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 46-52.
  - [17] 武迪, 罗纨, 周明耀, 等. 平原河网地区稻田排水过程及其受外河影响的研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(3): 28-33.  
WU Di, LUO Wan, ZHOU Mingyao, et al. Paddy field drainage processes and its influence by lateral ditches in the polder area of southeastern China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(3): 28-33.
  - [18] GOLMOHAMMADI G, RUDRA R P, PRASHER S O, et al. Modeling the impacts of tillage practices on water table depth, drain outflow and nitrogen losses using DRAINMOD[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 124: 73-83.
  - [19] 王姣, 俞双恩, 李或伟, 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.  
WANG Jiao, YU Shuang'en, LI Yuwei, et al. Simulation of drainage and nitrogen in paddy fields after rainstorm using DRAINMOD-N II[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(2): 246-252.

- [20] 王姣, 俞双恩, 王梅, 等. 分蘖期稻田不同水深对暴雨后地表水氮磷变化的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 71-75, 82.  
WANG Jiao, YU Shuang'en, WANG Mei, et al. Effect of water depth over paddy field on nitrogen and phosphorus in the water after storms at tillering stage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(8): 71-75, 82.
- [21] 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.  
GAO Xuerui, DONG Bin, QIN Dayong, et al. Simulation of drainage process and nitrogen loss in paddy field using DrainMOD[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(6): 52-58.
- [22] HASHEMI S Z, DARZI-NAFTCHALI A, QI Z M. Assessing water and nitrate-N losses from subsurface-drained paddy lands by DRAINMOD-N II[J]. Irrigation and Drainage, 2020, 69(4): 776-787.
- [23] 俞双恩, 刘子鑫, 高世凯, 等. 旱涝交替胁迫对水稻荧光参数与光合特性的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 304-312.  
YU Shuang'en, LIU Zixin, GAO Shikai, et al. Effects of waterlogging and drought alternative stress patterns on fluorescence parameters and photosynthetic characteristics of rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 304-312.
- [24] 王君, 俞双恩, 丁继辉, 等. 水稻不同生育阶段稻田水位调控对产量因子及产量的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 664-669.  
WANG Jun, YU Shuang'en, DING Jihui, et al. Effects of paddy field water level control on yield factor and rice yield at different rice growth stages[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(6): 664-669.
- [25] YOUSSEF M A, SKAGGS R W. The nitrogen simulation model, DRAINMOD-N II: Field testing and model application for contrasting soil types and climatological conditions[C]/World Environmental and Water Resources Congress 2006. May 21-25, 2006, Omaha, Nebraska, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2006: 1-11.
- [26] WANG X, YOUSSEF M A, SKAGGS R W, et al. Sensitivity analyses of the nitrogen simulation model, drainmod-n ii[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(6): 2205-2212.
- [27] 庄旭东, 冯绍元, 于昊, 等. SWAP模型模拟暗管排水条件下土壤盐运移[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 93-101.  
ZHUANG Xudong, FENG Shaoyuan, YU Hao, et al. Simulating water flow and salt transport in soil under the impact of subsurface drains using the SWAP model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 93-101.
- [28] MORRIS M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2): 161-174.
- [29] 俞双恩, 王宁, 于智恒, 等. DRAINMOD-S模型参数的全局灵敏度分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 271-278.  
YU Shuang'en, WANG Ning, YU Zhiheng, et al. Global sensitivity analysis of parameters in DRAINMOD-S[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 271-278.
- [30] 俞双恩, 李偲, 高世凯, 等. 水稻控制灌排模式的节水高产减排控污效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 128-136.  
YU Shuang'en, LI Si, GAO Shikai, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on water saving, nitrogen and phosphorus loss reduction with high yield in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(7): 128-136.
- [31] 陈凯文, 俞双恩, 李倩倩, 等. 不同水文年型下水稻节水灌溉技术方案模拟与评价[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 268-277.  
CHEN Kaiwen, YU Shuang'en, LI Qianqian, et al. Simulation and evaluation of technical schemes for water-saving irrigation of rice in different hydrological years[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 268-277.

## Using DRAINMOD to Simulate the Impact of Irrigation and Drainage on Reaction and Movement of Water and Nitrogen in Paddy Field

XIE Yangcun<sup>1</sup>, XU Min<sup>1\*</sup>, GAO Shikai<sup>2</sup>, Shen Lianqi<sup>3</sup>

(1. Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100000, China; 2. North China University of Water Resources and Electric Power, School of Water Conservancy, Zhengzhou 450046, China; 3. Shouguang Water Conservancy, Shouguang 262700, China)

**Abstract:** **【Background】** Nonpoint source pollution from managed ecosystems is a major environmental concern in many countries. Using models to simulate contaminant movement in agricultural systems under different managements can help improve water management and reduce nitrogen loss. **【Objective】** The purpose of this paper is to study the movement and reaction of water and nitrogen in paddy field under different irrigation and drainage, with a view to improve water conservation and reduce gas emission from rice production in southern China. **【Method】** We used the DRAINMOD model to simulate water flow and nitrogen transport; the sensitivity of the simulated results to its parameters was quantified using the Morris analysis. **【Result】** Horizontal saturated hydraulic conductivity in the 20~40 cm soil layer affected the simulation results most; diffusion coefficient, denitrification and nitrification parameters, decomposition of soil organic matter all had a significant impact on the simulated nitrogen dynamics. The DRAINMOD model was able to simulate water and nitrogen dynamics in soil under different irrigations and drainages, and the difference between the simulated and measured drainage and irrigation amounts and the total load of nitrogen runoff was less than 11%. Compared with traditional irrigation and drainage, controlled irrigation and drainage reduced drainage amount by 33.0%~72.6%, irrigation amount by 9.7%~37.1%, ammonium runoff load by 43.6%~45.0%, and nitrate runoff load by 29.8%~53.1%. **【Conclusion】** Controlled irrigation and drainage can effectively reduce gas emission, drainage and nitrogen loss from the paddy field, and the DRAINMOD model is able to simulate water flow and contaminant transport in paddy fields under different irrigation and drainage managements.

**Key words:** rice; change in water and nitrogen; DRAINMOD model; sensitivity analysis; controlled irrigation and drainage

责任编辑: 陆红飞