

平原河网地区稻麦轮作农田排水与氮素流失特征研究

邹家荣¹ 贾忠华¹ 朱卫彬² 刘文龙¹ 丁世洪² 罗 纨¹

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009; 2. 扬州市江都区沿运灌区管理处, 扬州 225261)

摘要: 长江下游稻麦轮作区农田排水是区域面源污染的主要来源,明确农田排水与氮素流失特征对于区域农业生产可持续发展与生态环境保护具有重要意义。现有稻麦轮作农田排水与氮素流失研究中,一般采用农田测筒观测地表径流与深层渗漏量来估算农田氮素流失量,这与农田土壤水分与氮素主要通过侧向径流进入农田排水系统的实际情况存在偏差。本文基于4年的大田监测数据,运用田间水文水质模型 DRAINMOD-N II,模拟研究了不同气象条件下稻麦轮作农田排水与氮素流失规律。结果表明,稻麦轮作周年内,由排水造成的氮素流失量多年平均值为 28.4 kg/hm^2 ,占施肥量的 6.0% ,其中大部分集中在稻季,平均为 25.6 kg/hm^2 ,麦季氮素流失量仅为 2.8 kg/hm^2 。与现有文献报道值相比,本文模拟得出的排水总量高 35.4% ,氮素流失总量则低 44.6% ;差异主要来自麦作期,文献报道平均值 (31.8 kg/hm^2) 是本文的 11 倍,估算方法不同可能是造成这一差异大的主要原因。结合降雨规律分析发现,农田排水量和氮素流失量与降雨变化关系显著 (决定系数 $R^2 > 0.56$),三者相对增量的变化规律几乎一致;在降雨频率为 $20\% \sim 80\%$ 的年份内,氮素流失量相对稳定,维持在均值的 $0.8 \sim 1.2$ 倍之间;只有在重现期大于 5 年的干旱或湿润年份,氮素流失量才会出现较大变化。因此,通过排灌控制措施稳定农田水文过程是有效控制农田排水氮素流失的关键。

关键词: 稻麦轮作; 农田排水; 氮素流失; DRAINMOD-N II 模型; 降雨

中图分类号: S276.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)03-0321-10

OSID:



Characteristics of Drainage and Nitrogen Losses from Rice-wheat Rotation Fields in Plain River Network Area of Eastern China

ZOU Jiarong¹ JIA Zhonghua¹ ZHU Weibin² LIU Wenlong¹ DING Shihong² LUO Wan¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

2. Administrative Office of Yanyun Irrigated Area in Jiangdu District, Yangzhou 225261, China)

Abstract: Farmland drainage is the main contributor to regional non-point source pollution in the rice-wheat rotation area in the lower reaches of the Yangtze River, China, it is of great importance to examine the characteristics of farmland drainage and nitrogen (N) losses for sustainable development of regional agricultural production and ecological environment protection. In the existing studies on drainage and nitrogen losses from rice-wheat rotation fields, nitrogen losses were generally estimated by observing surface runoff and deep percolation with lysimeters or soil column test, which was different from the actual situation that soil moisture and nitrogen entered the drainage system mainly through the lateral flow path. A simulation study on nitrogen losses with field drainage was presented by using the DRAINMOD-N II model; drainage and nitrogen losses from rice-wheat rotation fields under different rainfall conditions were predicted after validating the model with 4-year field monitoring data. The results showed that the predicted average annual nitrogen loss in drainage was 28.4 kg/hm^2 , accounting for 6.0% of the fertilizer application rate; most N losses occurred in the rice growing season with the average value of 25.6 kg/hm^2 . The predicted nitrogen losses in the wheat growing season was only 2.8 kg/hm^2 . When compared with the report values in the existing literature, the total drainage volume was 35.4% higher, and the total nitrogen loss was 44.6% lower. The differences were mainly from wheat growing season, the

收稿日期: 2023-07-05 修回日期: 2023-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979239)

作者简介: 邹家荣(1995—),男,博士生,主要从事农业水资源管理与环境保护研究,E-mail: zjr3580@163.com

通信作者: 罗纨(1967—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水资源管理与环境保护研究,E-mail: luowan@yzu.edu.cn

average reported N losses (31.8 kg/hm^2) was 11 times of this research. The predicted field drainage and nitrogen losses were significantly correlated to the rainfall pattern (coefficient of determination $R^2 > 0.5$), the probabilities of the relative increment of the three variables were distributed nearly the same; the predicted nitrogen losses were relatively stable and maintained at 0.8 ~ 1.2 times of the average value in normal years with the rainfall return period of less than five years. In the drier or wetter years (i. e., with rainfall return period greater than five years), the predicted nitrogen losses appeared to be more variable. Hence, drainage reduction during the rice growing period through proper control measures was critical to overall reduction of drainage and nitrogen losses from the rice-wheat rotation fields.

Key words: rice-wheat rotation; farmland drainage; nitrogen loss; DRAINMOD - N II model; rainfall

0 引言

稻麦轮作是我国南方地区适应季风气候的一种耕作模式,可充分利用稻季丰富的雨热资源以及区域有限的土地资源。目前,长江下游稻麦轮作区均具有完善的农田排水系统,可用于满足水旱两种作物不同的除涝降渍要求;但因缺乏调控设施,在稻季大量降雨和补充灌溉的叠加作用下,农田排水峰高量大,通过排水系统流失的氮素已成为区域种植业面源污染的主要来源^[1-3]。冬小麦生长期降雨相对较少,作物生长依赖于区域较高的地下水位补给;但由于冬春季节气温低、植物蒸发蒸腾作用较弱,发生显著降雨时仍需要及时排水,防止农田渍害对小麦生长的不利影响。稻麦轮作区用于一年两季作物的施肥量较大,尤其是氮肥;因此,农田排水氮素流失对水环境的负面影响一直是区域粮食生产与生态环境保护工作中关注的重点^[4-5]。

现有文献中包括大量针对稻麦轮作农田排水与氮素流失问题的研究,但研究结果存在较大差异。以太湖流域为例,范宏翔等^[6]通过径流小区试验发现,稻麦轮作周年氮素流失量高达 75.7 kg/hm^2 ,其中稻季流失量为 22.3 kg/hm^2 ,麦季流失量为 53.4 kg/hm^2 ;王小治等^[7-8]通过土柱试验得到稻季和麦季的平均氮素流失量分别为 31.3 kg/hm^2 和 40.7 kg/hm^2 ;茅国芳等^[9]和刘红江等^[10]的研究结果则低很多,稻季流失量只有 $11.3\sim 18.0\text{ kg/hm}^2$,麦季流失量则为 $12.6\sim 22.6\text{ kg/hm}^2$;而王新霞等^[11]通过大田试验得到的流失量则更低,稻麦周年氮素流失量仅有 14.8 kg/hm^2 ,仅为文献报道最高值的 20%。造成这些研究成果差异较大的原因包括:①湿润区降雨是农田水文过程的主导因素^[12],而大田的观测期较短,一般只有 1 ~ 2 个生长季(不超过 4 周年),难以避免降雨差异造成的影响。②基于土柱和小区试验的研究中,主要考虑了水分的垂向运动,这与大田情况下,农田排水通过侧渗导致氮素流失的情形差异较大。在小尺度试验中,不同深度土壤水分与氮素浓度的差异较大,基于某一深度渗漏

水量与浓度得出的氮素流失负荷难以代表排水农田的实际情况。

针对上述研究中存在的不足,本文以江苏省扬州市沿运灌区稻麦轮作农田为例,在 4 年大田监测研究的基础上,采用农田排水水文与水质模型——DRAINMOD - N II,模拟分析长序列气象条件下(1955—2020 年)稻麦轮作农田氮素流失途径及负荷,以期合理估算稻麦轮作区排水农田氮素输出的实际情况,为研究区农业生产与水污染控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与基本数据收集

研究区位于江苏省扬州市江都区沿运灌区的农田水利科学研究所(32°33'N,119°30'E),该地属于典型的南方平原河网地区,实行水稻与冬小麦轮作。水稻生长期一般为 6 月初至 10 月底,冬小麦生长期为 11 月初至次年 5 月底。区内地势平坦,年降雨量约 1 020 mm,年平均气温为 15.6℃,年蒸发量为 1 009.6 mm。农田排水以明沟为主,沟深 60 cm,等效间距为 50 m,研究区监测点布置如图 1 所示。在试验区水位监测井内安装 2 个 HOBO 压力传感器(U20-001-04 型,美国),其中 1 个作为大气精度补偿,均以 15 min 的测试间隔实时记录监测井中压强的变化,并通过压强-水深公式计算地下水位埋深。

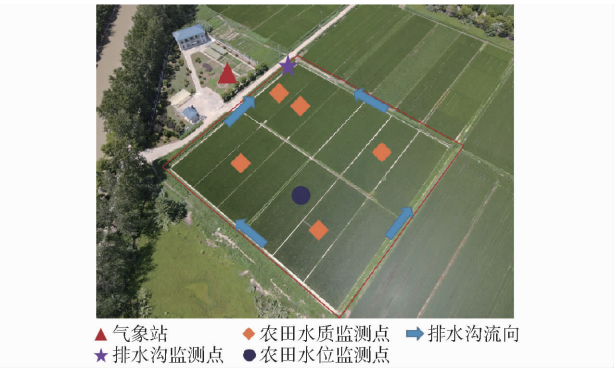


图 1 研究区试验田监测点布置示意图
Fig. 1 Layout of monitoring points for experimental fields

农田水文水质监测时段为 2018—2021 年,在排水农沟出口处安装 45°量水堰,上置 HOB0 压力传感器(U20-001-04 型,美国)自动记录堰上水头,最终计算得到排水量变化过程。农田排水中氮素流失量则通过每日监测的农田排水量乘以生育期内监测的平均氮素浓度计算得到。排水水质监测指标主要包括硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)含量和氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)含量;每 14 d 提取 1 次水样,带回实验室检测;其中,硝态氮含量采用紫外分光光度法检测,氨氮含量采用纳氏试剂分光光度法检测。

试验农田稻麦两季施氮量共计 477 kg/hm^2 ;其中稻作期 261 kg/hm^2 ,包括播种前施复合肥,含氮量为 75 kg/hm^2 ,在返青期追施复合肥或者有机肥,含氮量为 86 kg/hm^2 ,在拔节孕穗期再追施尿素,含氮量为 100 kg/hm^2 ;麦作期施氮量共计 216 kg/hm^2 ,包括播种前施复合肥,含氮量为 67.5 kg/hm^2 ,在 2 月下旬和 4 月中旬分别追施复合肥和尿素,含氮量分别为 45 kg/hm^2 和 103.5 kg/hm^2 。

1.2 农田排水与氮素流失模拟方法

1.2.1 DRINMOD-N II 模型基本原理及主要输入参数

DRAINMOD-N II 基于 DRAINMOD 模型水文模块的预测结果,考虑了农田氮素循环的整个过程^[13];氮循环包括 3 个土壤氮库:硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_x\text{-N}$)和有机氮库。该模型采用有限差分法求解多相一维对流弥散方程来模拟氮素运移过程,方程表达式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_a C_a + \theta_g C_g + \rho_b C_s) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta_a D_a \frac{\partial C_a}{\partial z} + \theta_g d_g \frac{\partial C_g}{\partial z} \right) - \frac{\partial (v_a C_a)}{\partial z} + S \quad (1)$$

其中 $S = S_{dep} + S_{fer} + S_{min/imm} + S_{nit} - S_{den} - S_{upt} - S_{hyd} - S_{vol} - S_{rnf}$ (2)

式中 θ_a 、 θ_g ——土壤液相和气相体积分数
 C_a ——某种形式氮素液相质量浓度,mg/L
 C_g ——某种形式氮素气相质量浓度,mg/L
 C_s ——某种形式氮素固相质量比,kg/kg
 ρ_b ——土壤干容重, g/cm^3
 D_a ——水动力扩散系数, m^2/s
 d_g ——分子扩散系数, m^2/s
 v_a ——液相体积通量, m/s
 t ——时间,s
 z ——空间坐标,m
 S ——源汇项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$

S_{dep} 、 S_{fer} 、 $S_{min/imm}$ 、 S_{nit} 、 S_{den} 、 S_{upt} 、 S_{hyd} 、 S_{vol} 、 S_{rnf} 分别为大气沉降、施肥、矿化/固持、硝化、反硝化、植物吸收、

尿素水解、氨挥发及通过地下排水和地表径流的硝态氮和氨氮输入、输出项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

模型主要输入参数包括:

(1)气象数据:研究站设有小型自动气象站(ET107 型,美国),可实时记录试验区的降雨量、最高气温、最低气温、相对湿度以及太阳辐射和风速等气象参数。本文中模型验证采用研究站 2018—2021 年记录的气象数据,长序列模拟则采用中国气象局气象数据中心发布的江苏省扬州高邮站(NO.: 58241)的逐日气象数据,时间范围为 1955—2020 年。在整理逐日降雨数据并生成模型输入文件的同时,采用 Penman-Monteith 公式逐日计算参考作物腾发量,乘以不同时段作物系数后生成 DRAINMOD 模型输入文件。

(2)土壤数据:主要包括田间不同土层深度的土壤水分特征曲线、土壤垂向和侧向饱和导水率(表 1)。在进行土壤数据采集时,分层取土后使用高速恒温冷冻离心机(CR21N 型,日本)测定土壤水分特征曲线;同时采用钻孔法测定农田侧向饱和导水率。

(3)排灌参数:研究区现有排水农沟深度约为 60 cm,等效间距为 50 m;试验期间实际观测的稻作期灌溉量为 94.8 cm,麦作期无灌溉;依此并结合模型灌溉模块设计输入灌溉制度进行模拟。

(4)氮素输入参数:根据大田观测的排水量和氮素浓度数据,并参考相关研究成果^[14-19],对 DRAINMOD-N II 中农田氮素转化等参数进行率定,主要输入参数见表 1。

1.2.2 模型评价指标

根据大田监测数据,选用 2018—2019 年为 DRAINMOD 模型率定阶段,2020—2021 年为模型验证阶段。从排水量、氮素浓度和氮素流失量 3 方面进行率定和验证,所采用的评价指标^[20-21]包括:决定系数(Coefficient of determination, R^2)、平均绝对误差(Mean absolute error, MAE)和纳什效率系数(Nash-sutcliffe efficiency, NSE)。

2 结果与分析

2.1 DRAINMOD 及 DRAINMOD-N II 模型率定与验证结果

表 2、图 2 为 DRAINMOD 模型模拟地下水位埋深、排水量以及 DRAINMOD-N II 模型模拟氮素流失的率定和验证结果。总体而言,模拟精度均在允许范围内,说明模型能够较好地反映田间实际情况,可用于研究区的排水及氮素流失预测。

图 2a 为研究区在测试时间内地下水位埋深模拟值与观测值的对比结果,针对 DRAINMOD 模型地

表 1 DRAINMOD 及 DRAINMOD - NII 模型主要输入参数

Tab.1 Main input parameters of DRAINMOD and DRAINMOD – NII models								
参数类别	参数	数值						
土壤水分特征曲线	吸力水头/cm	0	19	102	468	1 023	5 012	10 000
	体积含水率/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.44	0.43	0.41	0.35	0.30	0.23	0.20
土壤排水特性参数	地下水位埋深/cm	0	6	20	40	60	90	150
	土壤水可排空体积/cm	0	0.037	0.420	1.480	3.130	6.530	18.100
	潜水上升通量/($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)	0.500 0	0.500 0	0.096 0	0.023 0	0.008 6	0.002 4	0.000 3
排水系统设计参数	排水沟间距/m	50						
	排水沟深度/cm	60						
稻作期作物参数	种植时间/d	1 ~ 30			31 ~ 130		131 ~ 140	
	根系深度/cm	3 ~ 15			15 ~ 30		30 ~ 3	
	作物系数	1.15			1.20		0.80	
麦作期作物参数	种植时间/d	1 ~ 120			121 ~ 194		195 ~ 202	
	根系深度/cm	3 ~ 5			10 ~ 30		30 ~ 3	
	作物系数	0.40			1.05		0.25	
参数		范围				率定值		
氮素模块输入参数	硝化反应最大反应速率/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	9.0 ~ 80.0				60		
	硝化半饱和常数/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	10.0 ~ 100.0				20		
	反硝化反应最大反应速率/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	2.0 ~ 10.0				8		
	反硝化半饱和常数/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	10.0 ~ 60.0				50		
	尿素分解最大反应速率/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	10 ~ 100				100		
	尿素分解半饱和常数/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	10.0 ~ 80.0				30		

表 2 DRAINMOD 模型率定期和验证期模拟值与观测值比较结果

Tab.2 Statistical results of comparison between simulated and observed values during periodic and validation periods of DRAINMOD model								
指标	地下水位埋深		排水量		硝态氮流失量		氨氮流失量	
	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期
R^2	0.80	0.88	0.90	0.93	0.95	0.81	0.92	0.92
MAE	12.21	10.41	2.84	3.21	0.31	0.30	0.61	0.89
NSE	0.73	0.83	0.87	0.91	0.90	0.91	0.81	0.90

注:地下水位埋深和排水量的平均绝对误差单位为 cm,硝态氮及氨氮流失量的平均绝对误差单位为 kg/hm^2 。

下水位的校准在文献[22]中已经说明,在此不再赘述。图 2b 为 2018—2021 年水稻生长季模拟和观测的月累积排水量对比图。在率定期(2018—2019 年),模拟值与观测值有很好的相关性, R^2 为 0.90,校准模拟误差的 MAE 及 NSE 分别为 2.84 cm 及 0.87。在验证期(2020—2021 年),校准模拟的 R^2 、MAE 及 NSE 分别为 0.93、3.21 cm 及 0.91。这些指标高于文献建议的 $R^2 > 0.8$ 、NSE 大于 0.7 标准^[18, 23],表明模型精度较高。

图 2c、2d 为 2018—2021 年稻作期氮素月流失量及全生育期累积量的模拟对比图,从各月份的模拟结果来看,模拟值与观测值有很好的相似性;硝态氮与氨氮流失量在率定期和验证期的决定系数均大

于 0.81,平均绝对误差在 0.31 ~ 0.89 kg/hm^2 之间,纳什效率系数为 0.81 ~ 0.91。图 2e、2f 为麦作期氮素质量浓度对比图,麦作期硝态氮质量浓度观测值与模拟值变化趋势一致。麦作期大田硝态氮质量浓度平均为 2.10 mg/L ,而模拟质量浓度为 1.88 mg/L ,误差为 10.5%;氨氮平均观测质量浓度为 0.63 mg/L ,模拟质量浓度为 0.55 mg/L ,误差为 12.7%。

2.2 稻麦轮作农田排水与氮素流失过程模拟结果

表 3 为 DRAINMOD - NII 模拟的稻麦轮作周年排水量与氮素流失量,排水过程与种植模式主导了农田氮素流失总量与组分。在稻麦轮作中,氮素(硝态氮 + 氨氮)总流失量为 28.4 kg/hm^2 ,其中稻作期占 90.1% (25.6 kg/hm^2),麦作期仅占 9.9% (2.8 kg/hm^2)。就流失途径而言,地下排水(渗漏)排出的氮素为 11.6 kg/hm^2 ,占总量的 40.8%,地表径流输出为 16.8 kg/hm^2 ,占 59.2%。在不同作物生长期间,氮素流失的渠道存在明显差异,麦作期的氮素流失几乎全部由地下排水造成(地下排水占 97.0%),而稻作期的地下排水流失仅占其总流失量的 34.5%。造成这种现象的主要原因是受排水过程的影响。稻麦轮作周年排水总量模拟值为 99.0 cm,其中稻作期和麦作期分别为 92.8 cm 和 6.2 cm,其分配比例与氮素流失基本一致。从排水途径来看,稻作期地表和地下排水量接近,分别为

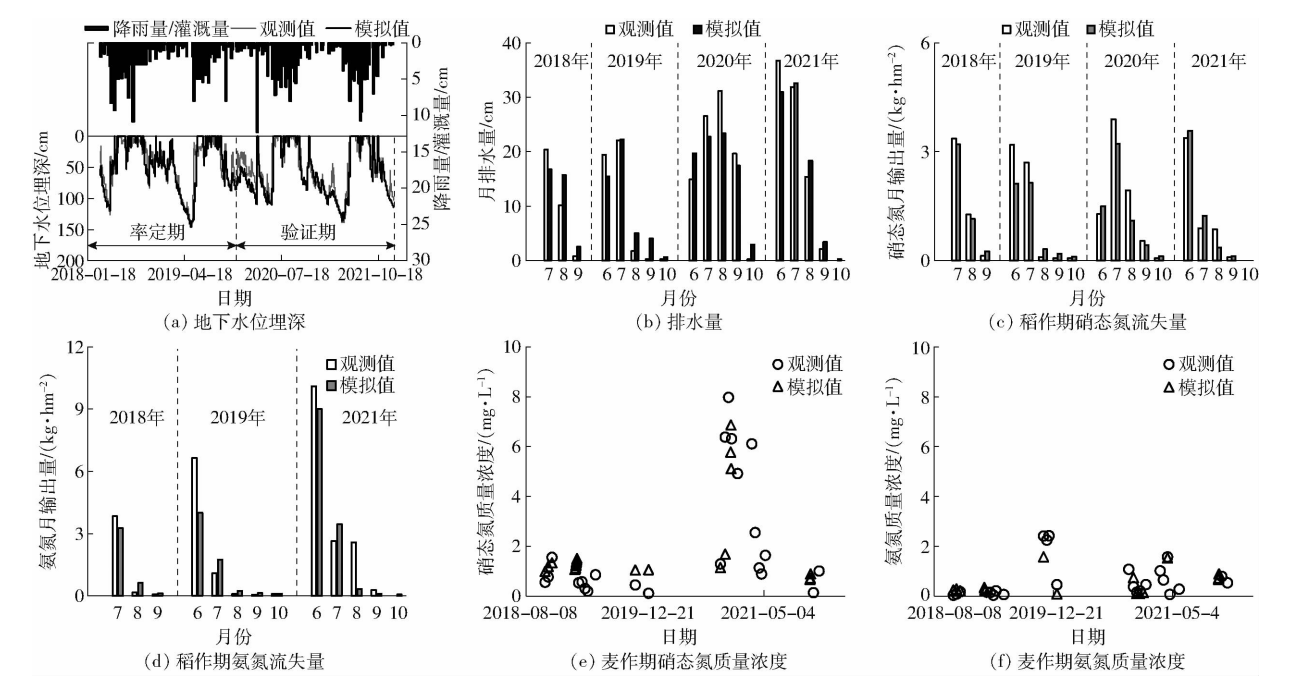


图2 排水量及氮素流失模拟值与观测值比较

Fig. 2 Comparison between simulated and observed values of drainage and nitrogen loss

表3 DRAINMOD-NⅡ模拟稻麦轮作周年平均排水量
和氮素输出量

Tab. 3 Annual average drainage and nitrogen output of
rice-wheat rotation simulated by DRAINMOD-NⅡ

	排水量/cm			氮素输出量/(kg·hm ⁻²)		
	生育期 地下排 水量	地表径 流量	总排 水量	生育期 地下排 水输出	地表径 流输出	总氮素 输出
稻作期	47.0	45.8	92.8	8.9	16.7	25.6
麦作期	5.8	0.4	6.2	2.7	0.1	2.8
稻麦周年	52.8	46.2	99.0	11.6	16.8	28.4

47.0、45.8 cm;而麦作期的地下排水量为5.8 cm,占麦作期的93.5%,地表排水仅占6.5%。综上所述,稻麦轮作中不同作物生长期期间的氮素流失和排水过程差异较大,并且排水量的分配将直接影响氮素流失量。

除了排水氮素流失以外,排水过程对氮素平衡的其他方面也有影响。图3为本文模拟的研究区稻

麦轮作农田氮素平衡图。其中,农田氮素输入总量为582.9 kg/hm²,主要部分来自化肥(477 kg/hm²),占比为81.8%。排水系统对氮素流失的两方面有着重要影响:首先,研究区较浅(沟深60 cm)的排水系统在一定程度上限制了排水氮素流失,年流失量为28.4 kg/hm²,占总输出量的4.9%(氮素总输出为582.7 kg/hm²);其次,较高的地下水位维持了较强烈的反硝化反应,年反硝化损失量高达169 kg/hm²,占总输出量的29.0%,是仅次于作物利用(300.5 kg/hm²)的氮素输出项。

DRAINMOD-NⅡ预测的氮素输入与输出比例与文献报道值较为一致。模拟结果显示,作物对氮素的利用占总量的51.6%,反硝化占比29%;文献[6,24-25]的研究结果中,作物氮素利用量占农田氮素输出的比例为35%~76.8%,反硝化损失占比为21%~36%。由于排水系统的影响,本文得到

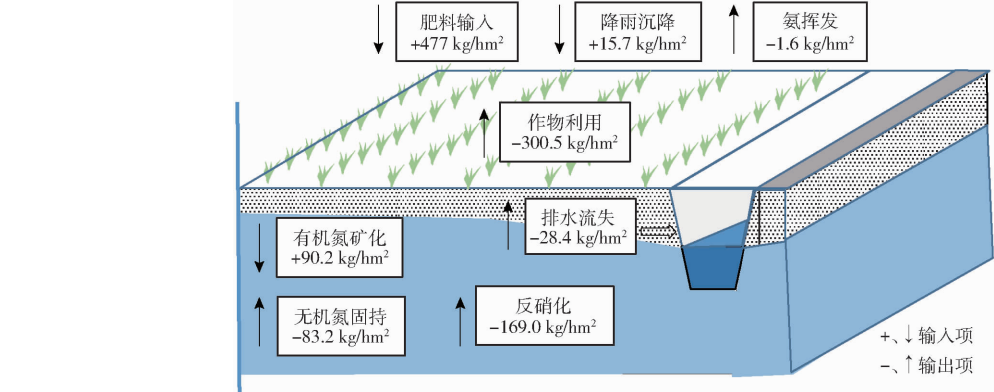


图3 稻麦轮作农田氮素平衡示意图

Fig. 3 Diagram of nitrogen balance in rice-wheat rotation farmland

的氮素随排水的流失量为 28.4 kg/hm²,占施肥量的 6.0%,这与刘红江等^[10]和王桂苓等^[26]研究结果基本一致,其发现,在常规施肥条件下,稻麦轮作地区氮素流失量分别占氮素投入量的 6.2%和 6.4%。

2.3 降雨对排水和氮素流失的影响

降雨的年际变化导致了不同年份农田排水氮素输出的差异。由图 4 可知,研究区年降雨量与模拟年排水量呈现良好的线性关系,决定系数为 0.819 9;年降雨量与年氮素流失量的相关关系则稍差,决定系数只有 0.560 5。考虑到土壤水分动态对于排水和氮素流失的缓冲作用,以及氮素转化过程的滞后效应,对模拟期内 66 年的氮素流失量、排水量和降雨量的频率分布进行了统计,并采用相对变化率作为统计参数,相对变化率为统计量与多年平均值的比值。

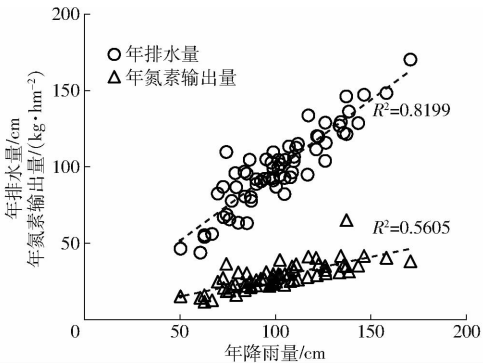


图 4 年氮素流失量与排水量和降雨量的关系
Fig. 4 Relationship between annual nitrogen loss and drainage and rainfall

图 5 为氮素流失量、排水量和降雨量的频率分布,可见三者的变化规律几乎一致,比图 4 所示的年数值之间的相关性高很多;其中,降雨量和排水量之间的决定系数高达 0.99,降雨量与氮素流失量的决定系数也达到 0.97。尽管在模拟的 66 年中,氮素流失量变化很大(最大为 65.1 kg/hm²,最小仅为 11.8 kg/hm²,相差 5.5 倍)。但在相当宽的范围内(图 5 中的阴影部分,降雨频率为 20%~80%,即小

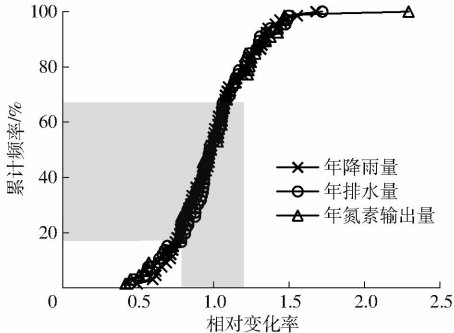


图 5 年降雨量、排水量和氮素流失量的累计频率曲线
Fig. 5 Cumulative frequency curves of annual rainfall, drainage and nitrogen loss

于 5 年一遇干旱或湿润年份),氮素流失量的相对变化率在均值的 0.8~1.2 倍之间,相对稳定。只有在重现期大于 5 年的湿润或干旱年份,氮素流失才会出现较大的波动。例如,在极端丰水年(降雨频率为 10%),排水量和氮素流失量分别为平均值的 1.35 倍;而在极端枯水年(降雨频率为 90%),排水量和氮流失量仅为平均值的 70%。这表明,在非极端降雨的年份,农田的氮素流失量相对稳定,采用多年平均值可以较好地代表农田氮素年流失情况。

3 讨论

农田排水导致的氮素流失一直是水环境保护研究工作的重点。本文检索了相关文献中对类似地区稻麦轮作区农田排水量及氮素流失的 21 项研究成果,见表 4。由于大多数研究不包括稻麦两季,为了数据一致性,选取了 8 项包括稻麦两季数据的成果与本文结果进行了比较。为了验证数据的代表性,首先将表 4 中所有研究和包含稻麦轮作的研究进行了比较,发现结果非常接近。稻季的氮素流失量分别为 18.8、19.7 kg/hm²,麦季分别为 30.6、31.8 kg/hm²,这表明选取的数据具有良好的代表性。

现有文献(表 4)中对于稻麦轮作农田氮素流失的研究主要基于土柱和小区试验,通过收集地表径流及渗漏水来估算氮素流失。然而,这种情况下只考虑了垂向运动的排水,无法真实反映大田情况下排水沟/管将侧渗的地下径流排出农田的实际情况。为了更准确地分析上述问题,本研究采用了专门用于模拟排水农田水文过程的 DRAINMOD 模型,该模型在国内外的实践中已被广泛应用,并且相关研究表明其模拟结果具有较高的可靠性^[41-45]。表 5 为本文模拟研究得出的稻麦周年排水量和氮素流失量统计值,同时整合了表 4 中稻麦轮作研究的文献数据,包括年平均值及均方差。从结果中可以看出,即使平均值相近,方差也较大。根据 *t* 双侧检验,在 $\alpha=0.05$ 显著性水平上,只有稻作期氮素流失量不存在显著差别。而就稻麦轮作周年而言,文献报道的氮素流失平均值为 51.3 kg/hm²,而本文计算结果为 28.4 kg/hm²,相差 44.6%;排水量也相差较大,文献报道值平均为 64.0 cm,而本文为 99.0 cm,相差 35.4%。这一显著差异主要来自麦作期,文献报道的氮素流失量和排水量(31.8 kg/hm²,24.8 cm)明显高于本文的模拟结果(2.8 kg/hm²,6.2 cm)。文献报道的稻作期氮素流失量与本研究结果相差不大,分别为 19.7、25.6 kg/hm²;但排水量相差很大,分别为 39.2、92.8 cm。

造成上述现象的主要原因为,在文献研究中,麦

表 4 稻麦轮作农田排水及氮素流失研究成果文献统计

Tab. 4 Literature statistics on research results of drainage and nitrogen loss in rice-wheat rotation farmland							
序号	作者	年份	地点	稻作期		麦作期	
				排水总	N 流失总量/	排水总	N 流失总量/
				量/cm	(kg·hm ⁻²)	量/cm	(kg·hm ⁻²)
1 *	王小治等 ^[7-8]	2001—2003	中国科学院常熟生态站	80. 0	31. 3	29. 8	40. 7
2	邱卫国等 ^[27]	2002	上海市青浦区农田水利技术推广站	52. 0	30. 6		
3 *	茅国芳等 ^[9]	2004—2006	上海市嘉定区南翔镇勤耕村	31. 4	13. 9	18. 0	19. 0
4	谢学俭等 ^[28]	2005—2006	江苏省南京市高淳县东坝镇和睦涧村			9. 5	1. 9
5 *	王桂苓等 ^[26]	2007—2008	巢湖市居巢区	19. 5	26. 1	26. 6	45. 8
6 *	范宏翔等 ^[6]	2007—2010	宜兴市大埔镇	50. 2	22. 3	24. 0	53. 4
7	常闻捷等 ^[29]	2008—2010	江苏省宜兴市、常州市			35. 4	47. 0
8	俞映倬等 ^[30]	2009—2010	江苏省无锡市滨湖区胡埭镇龙延村			44. 7	30. 2
9 *	刘红江等 ^[10]	2009—2010	江苏省无锡市安镇太湖水稻示范园	43. 0	18. 0	21. 0	12. 6
10	张丽娟等 ^[31]	2010	巢湖市居巢区	20. 5	12. 4		
11	朱利群等 ^[32]	2010	溧阳市南渡镇	34. 6	7. 8		
12 *	陈秋会等 ^[33]	2011—2013	江苏省常州市武进区雪堰镇万寿村	50. 4	25. 3	35. 6	41. 3
13	PENG 等 ^[34]	2012	江苏省苏州市昆山实验站	44. 8	10. 6		
14	赵峥等 ^[35]	2012—2013	上海市青浦区	50. 4	18. 8		
15 *	WANG 等 ^[36]	2013—2015	常州市雪堰镇	30. 1	9. 7	35. 3	37. 2
16	刘琛等 ^[37]	2016—2017	杭州市余杭区	78. 5	17. 3		
17	杨和川等 ^[38]	2016—2017	江苏省连云港市农业科学院东兴农场试验基地	32. 9	26. 1		
18 *	王新霞等 ^[11]	2017—2018	浙江省湖州市安吉县梅溪镇	9. 1	10. 7	8. 2	4. 1
19	陈子薇等 ^[39]	2019	浙江省嘉兴市桐乡市屠甸镇	32. 3	20. 1		
20	郭龙等 ^[40]	2020—2021	安徽省巢湖市烔炀镇唐嘴村农田示范基地			35. 5	33. 7
所有研究平均值				41. 2	18. 8	27. 0	30. 6
单独统计的稻麦季平均值(带*)				39. 2	19. 7	24. 8	31. 8

表 5 DRAINMOD－NII 模拟稻麦周年排水量、氮素流失量与文献报道值对比

Tab. 5 Statistical results of annual drainage and nitrogen loss of simulated rice and wheat by DRAINMOD－NII compared with reported values in literature						
数据源	排水量/cm			氮素流失量/(kg·hm ⁻²)		
	总量	稻作期	麦作期	总量	稻作期	麦作期
模型模拟值	99. 0 ± 25. 5	92. 8 ± 24. 8	6. 2 ± 8. 1	28. 4 ± 8. 6	25. 6 ± 6. 7	2. 8 ± 5. 2
文献报道值	64. 0 ± 26. 0	39. 2 ± 20. 5	24. 8 ± 8. 6	51. 3 ± 21. 9	19. 7 ± 7. 4	31. 8 ± 16. 4
t-检验 Z 值	3. 65 *	5. 86 *	－6. 08 *	－5. 75 *	2. 30	－10. 74 *

注：* 表示在 0. 05 水平上显著差异。

作期排水量主要是在试验小区或土柱底部收集的渗漏水量；而平原河网地区麦作期一般不灌溉，地下水位相对较低，降雨后不易形成显著排水而将氮素带出农田。例如，本文监测研究的 2018—2021 年麦作期，试验站深 60 cm 的排水农沟中几乎没有积水，结合图 2a 中的地下水位观测，研究区麦作期地下水位大多数情况下都低于农沟深度。从麦作期水量平衡的基本情况来看，研究区的年平均降雨量为 1 020 mm，其中麦作期为 400 mm，而小麦生长期需水量为 425 mm；所以，在没有灌溉的情况下，小麦生长过程中利用了大部分降雨，只有在少数暴雨和连续阴雨天气排水沟内才可能汇集排水径流。另外，文献中多数只在施肥后氮素高浓度阶段监测了排水过程，高估了氮素浓度，这也在一定程度上导致高估

氮素流失。因此，就长期的平均情况而言，稻麦轮作农田在麦作期的氮素流失量很低，而用小区试验中测筒得出的渗漏量来估算排水量和氮素流失量势必引起较大误差。对于稻作期的排水氮素流失量，文献中多数只在施肥后氮素高浓度阶段监测了排水过程，因而低估了总排水量；不过其他时段虽有排水发生，因低浓度产生的氮素流失负荷相对较小。因此，本文运用 DRAINMOD 模型模拟排水全过程得出的稻作期氮素流失总量与文献报道值相差不大。

前文中提到现有文献中定点试验得出的结果与本文所描述的农田排水氮素流失过程有所不同，文献中利用测筒在上下两端设置的水流收集口监测排水水量与水质，其测量结果与测筒在农田的安装位置有着直接的关系。在排水沟形成的水力梯度作用

下,越靠近排水沟的位置,地下水位越深,入渗率越大。测筒试验中只能监测固定位置的水氮通量,因此会由于距离排水沟位置的差异,出现高估或低估排水量与氮素输出量的现象。此外,气象条件也是造成不同研究结果差异的一个重要因素;在较短的监测期内,难以得到降雨对排水与氮素流失影响的一般性规律。因此,本文在大田监测的基础上,采用计算机模型进行长序列模拟,可对不同水文气象条件下农田排水与氮素流失过程进行更为合理的描述。

4 结 论

(1)稻麦轮作农田周年氮素流失量为 28.4 kg/hm²,其中 90.1%集中在稻作期;麦作期氮素流失量非常小,仅为 2.8 kg/hm²,占总量的 9.9%。稻麦两季氮素流失比例与排水量的比例大致相同,农田排水量和氮素流失量与降雨量有直接的关系,其相对增量

的变化规律几乎一致。在降雨频率为 20% ~ 80% 的年份内,稻麦轮作农田氮素流失量相对稳定,维持在多年平均值的 0.80 ~ 1.2 倍之间;在更为干旱或湿润的年份,氮素流失量将出现较大波动。

(2)与现有文献相比,本文得到的稻麦轮作农田由排水造成的氮素流失量年平均值比文献报道值低 44.6%,排水量则高 35.4%;这一差异主要来自麦作期,本文模拟得出的氮素流失量仅为文献报道值的 1/11,这一差异主要是不同测量方法造成的;对于配套有排水系统的稻麦轮作农田,本文得到的结果能够更好地反映农田排水与氮素流失的实际情况。

对于稻麦两季氮素流失特征的分析结果表明,减少稻作期排水量是控制稻麦轮作农田氮素流失的关键;通过排灌控制措施提高雨水利用率、减少灌溉排水量对于稻麦轮作区生产发展与生态环境保护具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 李亚威,徐俊增,刘文豪,等. 明沟-暗管组合控排下稻田水氮流失特征[J]. 农业工程学报,2021,37(19):113-121.
LI Yawei, XU Junzeng, LIU Wenhao, et al. Characteristics of water and nitrogen loss under subsurface pipe-open ditch controlled drainage in paddy fields[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(19): 113-121. (in Chinese)

[2] 窦旭,史海滨,李瑞平,等. 河套灌区控制排水对氮素流失与利用的影响[J]. 农业机械学报,2021,52(11):315-322.
DOU Xu, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effect of controlled drainage on loss and utilization of nitrogen in Hetao irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 315-322. (in Chinese)

[3] 李仙岳,冷旭,张景俊,等. 干旱区降解地膜覆盖农田硝态氮迁移与利用特征研究[J]. 农业机械学报,2020,51(7):294-303.
LI Xianyue, LENG Xu, ZHANG Jingjun, et al. Movement and utilization of nitrate nitrogen under biodegradable film mulching in arid area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 294-303. (in Chinese)

[4] 窦旭,史海滨,李瑞平,等. 农田排水改良盐渍化土壤效果与环境污染研究[J]. 农业机械学报,2022,53(4):372-385.
DOU Xu, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effect of farmland drainage on improving saline soil and environmental pollution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 372-385. (in Chinese)

[5] ZHAO X, ZHOU Y, MIN J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2012, 156: 1-11.

[6] 范宏翔,徐力刚,赵旭,等. 太湖流域典型稻-麦轮作农田区氮素流失过程研究[J]. 生态环境学报,2015,24(2):255-262.
FAN Hongxiang, XU Ligang, ZHAO Xu, et al. Study on nitrogen loss in rice-wheat rotation farmland in Taihu basin[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(2): 255-262. (in Chinese)

[7] 王小治,高人,朱建国,等. 麦季施用不同尿素的氮排水和渗漏损失[J]. 农村生态环境,2005,21(1):24-29.
WANG Xiaozhi, GAO Ren, ZHU Jianguo, et al. Nitrogen loss via runoff and leaching from soil as a function of types of urea applied in wheat season[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2005, 21(1): 24-29. (in Chinese)

[8] 王小治,高人,朱建国,等. 稻季施用不同尿素品种的氮素径流和淋溶损失[J]. 中国环境科学,2004,24(5):89-93.
WANG Xiaozhi, GAO Ren, ZHU Jianguo, et al. Nitrogen loss via runoff and leaching from employ of different urea bleeds in paddy season[J]. China Environmental Science, 2004, 24(5): 89-93. (in Chinese)

[9] 茅国芳,陆敏,黄明蔚,等. 稻麦轮作农田氮素流失及控制对策研究[J]. 上海农业学报,2006,22(4):86-92.
MAO Guofang, LU Min, HUANG Mingyu, et al. Nitrogen loss in rice-wheat cropping farmland and its control measures[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2006, 22(4): 86-92. (in Chinese)

[10] 刘红江,郑建初,陈留根,等. 秸秆还田对农田周年地表径流氮、磷、钾流失的影响[J]. 生态环境学报,2012,21(6):1031-1036.
LIU Hongjiang, ZHENG Jianchu, CHEN Liugen, et al. Effects of straw-returning on annual overland runoff NPK loss in farmland[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(6): 1031-1036. (in Chinese)

[11] 王新霞,左婷,王肖君,等. 稻-麦轮作条件下 2 种施肥模式作物产量和农田氮磷径流流失比较[J]. 水土保持学报,2020,34(3):20-27.
WANG Xinxia, ZUO Ting, WANG Xiaojun, et al. Comparison of two fertilization modes on crop yield and nitrogen/

phosphorus runoff loss under rice – wheat rotation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 20 – 27. (in Chinese)

[12] 魏林宏,张斌,程训强. 水文过程对农业小流域氮素迁移的影响[J]. 水利学报,2007,38(9):1145 – 1150.
WEI Linhong, ZHANG Bin, CHENG Xunqiang. Effects of hydrological factors on nitrogen loss in small agricultural catchments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(9): 1145 – 1150. (in Chinese)

[13] YOUSSEF M A, SKAGGS R W, CHESCHEIR G M, et al. The nitrogen simulation model, DRAINMOD – N II [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(2): 611 – 626.

[14] SHEDEKAR V S, KING K W, FAUSEY N R, et al. Exploring the effectiveness of drainage water management on water budgets and nitrate loss using three evaluation approaches[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106501.

[15] WILSON G L, MULLA D J, GALZKI J, et al. Effects of fertilizer timing and variable rate N on nitrate-N losses from tile drained corn-soybean rotation simulated using DRAINMOD – N II [J]. Precision Agriculture: an International Journal on Advances in Precision Agriculture, 2020, 21(2): 311 – 323.

[16] OSVALDO S, INGRID W, MOHAMED A Y, et al. Evaluation of the DRAINMOD – N II model for predicting nitrogen losses in a loamy sand under cultivation in south-east Sweden[J]. Agricultural Water Management, 2008, 96(2): 267 – 281.

[17] YOUSSEF M A, SKAGGS R W, CHESCHEIR G M, et al. Field evaluation of a model for predicting nitrogen losses from drained lands[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(6): 2026 – 2042.

[18] 王少丽,OPRASHER S O,CHUN-CHIEH Y,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,2004,35(9):111 – 117.
WANG Shaoli, OPRASHER S O, CHUN-CHIEH Y, et al. Field evaluation of DRAINMOD – N model for surface runoff subsurface drainage and nitrogen loss[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(9): 111 – 117. (in Chinese)

[19] STRONG D T, FILLERY I R P. Denitrification response to nitrate concentrations in sandy soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(7): 945 – 954.

[20] IRIS B, SIGRID K, MOHAMED A Y, et al. Simulating nitrogen leaching and turnover in a subsurface-drained grassland receiving animal manure in Northern Germany using DRAINMOD – N II [J]. Agricultural Water Management, 2007, 93(1): 30 – 44.

[21] DAVID R L, GREGORY J M. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation[J]. Water Resources Research, 1999, 35(1): 233 – 241.

[22] 邹家荣,罗纨,李林,等. 灌排控制措施结合沟塘湿地改善水稻灌区排水水质的模拟分析[J]. 农业工程学报,2022, 38(11):98 – 107.
ZOU Jiarong, LUO Wan, LI Lin, et al. Simulating the effects of irrigation and drainage control combined with ditch-pond wetlands on drainage water quality improvement in a rice irrigation area[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(11): 98 – 107. (in Chinese)

[23] SKAGGS R W, YOUSSEF M A, CHESCHEIR G M. DRAINMOD: model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1509 – 1522.

[24] 梁浩,胡宗荟,杨士红,等. 稻田-沟塘系统水氮动态模拟与灌排调控模型构建[J]. 农业工程学报,2021,37(22):49 – 57.
LIANG Hao, HU Zonghui, YANG Shihong, et al. Simulation of the water and nitrogen dynamics for paddy field – ditch pond system and model construction of irrigation and drainage regulation[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(22): 49 – 57. (in Chinese)

[25] 韩焕豪. 稻田-生态沟-塘堰湿地系统氮素迁移转化规律及机理研究[D]. 武汉:武汉大学, 2019.
HAN Huanhao. Study on the law and mechanism of nitrogen transfer and transformation in paddy field eco-ditch wetland system [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. (in Chinese)

[26] 王桂苓,马友华,孙兴旺,等. 巢湖流域麦稻轮作农田径流氮磷流失研究[J]. 水土保持学报,2010,24(2):6 – 10.
WANG Guiling, MA Youhua, SUN Xingwang, et al. Study of nitrogen and phosphorus runoff in wheat-rice rotation farmland in Chao Lake basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(2): 6 – 10. (in Chinese)

[27] 邱卫国,唐浩,王超. 水稻田面水氮素动态径流流失特性及控制技术研究[J]. 农业环境科学学报,2004,23(4):740 – 744.
QIU Weiguo, TANG Hao, WANG Chao. Rule of loss of nitrogen in the surface water of rice fields and the control technology [J]. Water Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(4): 740 – 744. (in Chinese)

[28] 谢学俭,陈晶中,宋玉芝,等. 磷肥施用量对稻麦轮作土壤中麦季磷素及氮素径流损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007,26(6):2156 – 2161.
XIE Xuejian, CHEN Jingzhong, SONG Yuzhi, et al. Effects of phosphorus application rates on surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during wheat season in rice-wheat rotation field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(6): 2156 – 2161. (in Chinese)

[29] 常闻捷,边博,蔡安娟,等. 太湖重污染区麦季养分输入与流失规律研究[J]. 环境科学与技术,2012,35(2):8 – 13.
CHANG Wenjie, BIAN Bo, CAI Anjuan, et al. Nutrient inputs and runoff losses during wheat season in highly-contaminated zone of Taihu Lake region[J]. Journal of Environmental Science and Technology, 2012, 35(2): 8 – 13. (in Chinese)

[30] 俞映惊,薛利红,杨林章. 太湖地区稻麦轮作系统不同氮肥管理模式对麦季氮素利用与流失的影响研究[J]. 农业环境

科学学报,2011,30(12):2475-2482.

YU Yingjing, XUE Lihong, YANG Linzhang. Nitrogen use efficiency and loss from runoff and leaching in wheat season with rice-wheat rotation system under different nitrogen management methods in Taihu Lake region, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(12): 2475-2482. (in Chinese)

- [31] 张丽娟,马友华,石英尧,等. 灌溉与施肥对稻田氮磷径流流失的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(6):7-12.

ZHANG Lijuan, MA Youhua, SHI Yingyao, et al. Effects of irrigation and fertilization on nitrogen and phosphorus runoff from paddy fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 7-12. (in Chinese)

- [32] 朱利群,夏小江,胡清宇,等. 不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(6):6-10.

ZHU Liqun, XIA Xiaojang, HU Qingyu, et al. Effects of different tillage and straw return on nitrogen and phosphorus runoff loss from paddy fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(6): 6-10. (in Chinese)

- [33] 陈秋会,席运官,王磊,等. 太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究[J]. 农业环境科学学报,2016,35(8):1550-1558.

CHEN Qiuhui, XI Yunguan, WANG Lei, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus runoff losses in organic and conventional rice-wheat rotation farmland in Taihu Lake region[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(8): 1550-1558. (in Chinese)

- [34] PENG S Z, HE Y P, YANG S H, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on nitrogen leaching losses from paddy fields[J]. Paddy and Water Environment, 2015, 13(4): 303-312.

- [35] 赵峥,吴淑杭,周德平,等. 基于 DNDC 模型的稻田氮素流失及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报,2016,35(12):2405-2412.

ZHAO Zheng, WU Shuhang, ZHOU Deping, et al. Modeling N loss from paddy fields and sensitivity analysis with DNDC model[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(12): 2405-2412. (in Chinese)

- [36] WANG L, ZHAO X, GAO J X, et al. Effects of fertilizer types on nitrogen and phosphorous loss from rice-wheat rotation system in the Taihu Lake region of China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2019,285: 106605.

- [37] 刘琛,张莉,林义成,等. 不同施肥模式下苕溪流域水稻田和蔬菜地氮磷流失规律[J]. 浙江农业学报,2019,31(2):297-306.

LIU Chen, ZHANG Li, LIN Yicheng, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss by runoff from paddy and vegetable fields under different fertilization modes in Tiaoxi catchment[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2019, 31(2): 297-306. (in Chinese)

- [38] 杨和川,樊继伟,任立凯,等. 种植密度与施氮量对稻麦轮作体系作物产量及地表径流氮素流失的影响[J]. 江西农业学报,2018,30(7):13-18.

YANG Hechuan, FAN Jiwei, REN Likai, et al. Effects of planting density and nitrogen application rate on crop yield and nitrogen overland runoff loss in rice-wheat rotation system[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, 30(7): 13-18. (in Chinese)

- [39] 陈子薇,应珊珊,刘银秀,等. 不同施肥类型对稻田氮素流失的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(1):36-43.

CHEN Ziwei, YING Shanshan, LIU Yinxu, et al. Effect of different fertilizer types on nitrogen loss in paddy fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 36-43. (in Chinese)

- [40] 郭龙,骆美,常珺枫,等. 有机养分替代对小麦产量、土壤肥力及麦田氮磷径流流失的影响[J]. 核农学报,2022,36(10):2063-2071.

GUO Long, LUO Mei, CHANG Junfeng, et al. Effects of organic nutrient replacement on wheat yield, soil fertility and runoff loss of nitrogen and phosphorus in wheat field[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(10): 2063-2071. (in Chinese)

- [41] YOUSSEF M A, LIU Y, CHESCHEIR G M, et al. DRAINMOD modeling framework for simulating controlled drainage effect on lateral seepage from artificially drained fields[J]. Agricultural Water Management, 2021, 254: 106944.

- [42] GHANE E, ASKAR M H. Predicting the effect of drain depth on profitability and hydrology of subsurface drainage systems across the eastern USA[J]. Agricultural Water Management, 2021, 258: 107072.

- [43] YOUSSEF M A, ABDELBAKI A M, NEGM L M, et al. DRAINMOD-simulated performance of controlled drainage across the U. S. Midwest[J]. Agricultural Water Management, 2018, 197: 54-66.

- [44] 杜璇,冯浩, MATTHEW Jhelters, 等. DRAINMOD-NⅡ模拟冬季长期覆盖黑麦对地下排水及 NO₃-N 流失的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(12):153-161.

DU Xuan, FENG Hao, MATTHEW Jhelters, et al. Simulating effects of winter rye cover on subsurface drainage and NO₃-N loss based on DRAINMOD-NⅡ[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 153-161. (in Chinese)

- [45] SKAGGS R W, YOUSSEF M A, CHESCHEIR G M. A DRAINMOD-based method to estimate effects of drainage water management on annual nitrogen loss to surface water[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(3): 799-808.