

# 降水和施肥对稻田地表径流总氮流失量的耦合作用

李建强<sup>1</sup>, 王鸢<sup>2</sup>, 陈晓冬<sup>2</sup>, 费冰雁<sup>1</sup>, 郭彬<sup>2</sup>, 刘琛<sup>2</sup>, 李华<sup>2\*</sup>

(1.平湖市农业农村局, 浙江 平湖 314200;

2.浙江省农业科学院 环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021)

**摘要:**【目的】揭示降水和施肥对稻田地表径流总氮(TN)流失量的耦合作用, 为水稻种植区面源污染削减提供理论支撑。【方法】基于水稻田间试验, 设置4种施肥方式, 分别为常规氮肥处理(N18)、减量氮肥处理(N15)、有机肥处理(OF)和不施肥(CK), 监测2019—2021年水稻生育期内的地表径流量、地表径流中的TN浓度及气象数据, 分析降水和施肥对稻田地表径流TN流失量的耦合作用。【结果】2019—2021年, 降水量和TN流失量呈同步下降趋势, 而回归分析表明日降水量与TN流失量之间没有显著相关性, 考虑降水间隔时间后所获得的分段日平均降水量与TN流失量呈正相关(回归系数 $\geq 0.36$ )。不同施肥处理对TN流失量的促进作用由高到低依次为: N18处理>N15处理 $\geq$ OF处理>CK。结构方程模型的结果表明, 分段日平均降水量、降水间隔时间、施肥量、施肥种类和降水距施肥的天数是影响TN流失量的重要因素, 以上各因素的标准化总影响因子分别为0.264、-0.126、0.078、0.033和-0.038。降水相比施肥对稻田TN流失量的影响更强, 且分段日平均降水量和降水间隔时间是决定地表径流TN流失量的关键因素。【结论】降水间隔时间的缩短相比降水量的增加对稻田TN流失量的促进效应更强, 雨季有机肥配施相比化肥施用能够有效减少地表径流中的TN浓度, 从而削减稻田TN流失量。

**关键词:** 稻田; 总氮流失; 面源污染; 施肥; 降水

中图分类号: X522; X501

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022690

OSID: 

李建强, 王鸢, 陈晓冬, 等. 降水和施肥对稻田地表径流总氮流失量的耦合作用[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(10): 39-45.

LI Jianqiang, WANG Yuan, CHEN Xiaodong, et al. The Coupled Effect of Precipitation and Fertilization on Nitrogen Loss Via Surface Runoff from Paddy Fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(10): 39-45.

## 0 引言

【研究意义】在通过增施氮肥达到水稻增产的同时, 稻田氮素流失问题也日益突出。2017年全国污染普查报告显示, 我国年平均总氮(TN)排放量为304.14万t, 农业TN排放量为141.49万t<sup>[1]</sup>。耿芳等<sup>[2]</sup>探究了长江流域典型单季稻田的TN流失特征, 发现在整个水稻生育期内, 由稻田地表径流产生的TN流失量为8.70 kg/hm<sup>2</sup>, 为稻田氮素流失的关键途径。因此, 控制稻田地表径流下的TN流失量对于水环境保护、防治水体富营养化具有重要意义。

【研究进展】TN在稻田地表径流下的迁移过程本质上是土壤可溶态氮素和颗粒态氮素通过土壤水迁移进入水体的过程<sup>[3]</sup>。因此, 降水是增加稻田TN流失量的直接驱动因子。目前, 大部分研究主要聚焦于降水量对稻田TN流失量的影响<sup>[4-5]</sup>。然而, 围绕降

水距离施肥的间隔时间、降水频率等因素对稻田地表径流TN流失量的影响研究甚少。此外, 施肥模式会通过影响稻田径流中的TN浓度及氮素赋存形态来改变稻田径流中的TN浓度。Cui等<sup>[6]</sup>探究了长期施用尿素或有机肥对于稻田TN流失量的影响, 结果表明施加有机肥明显降低了TN流失量, 且与施用尿素相比显著减少了NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N流失量。Wang等<sup>[7]</sup>发现, 随着氮肥施用水平的提高, 稻田TN流失量和水稻产量同步增加。Hou等<sup>[8]</sup>基于Meta分析探究了中国农田TN损失的主要影响因素, 指出季节性降水、氮肥施用量和氮肥种类是决定地表TN流失量的主要因子。【切入点】综上所述, 施肥模式和降水特征在稻田TN流失过程中具有重要作用<sup>[9]</sup>。然而, 施肥模式和降水要素的耦合作用机制尚不明确。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究聚焦于浙江典型稻田, 对比分析了2019—2021年不同降水分布和施肥处理耦合作用下的稻田地表径流和TN流失特征, 以期对稻田面源污染防治提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于平湖新埭镇鱼圻塘村(121°10.68 E,

收稿日期: 2022-12-17 修回日期: 2023-05-05 网络出版日期: 2023-10-17  
基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2021C03025-01(1)); 国家自然科学基金项目(41671300)

作者简介: 李建强(1981-), 男, 湖北枣阳人。高级农艺师, 主要从事土壤肥料技术推广研究。E-mail: 275279089@qq.com

通信作者: 李华(1977-), 女。副研究员, 主要从事农业面源污染阻控研究。E-mail: lihua@zaas.ac.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

30°78.22'N), 海拔高度为 2.9 m, 试验地面积为 1 098 m<sup>2</sup>, 试验区属于北亚热带季风性气候区, 多年平均气温为 15.7 °C, 多年平均降水量为 1 186.3 mm, 多年平均相对湿度为 82%。试验区土壤类型为脱潜水稻土。耕层土壤基本化学性状为: pH 值 6.99, 有机质量 29.70 g/kg, 全氮量 2.09 g/kg, 全磷量 1.53 g/kg, 全钾量 20.92 g/kg, 碱解氮量 207 mg/kg, 速效磷量 62.50 mg/kg, 有效钾量 126.20 mg/kg。

## 1.2 试验方案

试验设置 4 个处理, 分别为: 常规氮肥处理(N18)、减量氮肥处理(N15)、有机肥处理(OF)和不施肥(CK)。各处理所用化肥为尿素(N-46%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-12%)和氯化钾(K<sub>2</sub>O-60%)。OF 处理有机肥由万里神农有限公司提供, 施用量为 2 250 kg/hm<sup>2</sup>, 其养分组成为: N-1.63%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-3.5%, K<sub>2</sub>O-1%, 具体施肥方案如表 1 所示。

表 1 施肥处理的具体施肥情况

Table 1 Fertilization of different treatments

处理	养分指标	基肥/ (kg hm <sup>-2</sup> )	分蘖肥/ (kg hm <sup>-2</sup> )	孕穗肥/ (kg hm <sup>-2</sup> )	合计/ (kg hm <sup>-2</sup> )
N15	N	103	69	53	225
	P	24	0	0	24
	K	47	0	43	90
N18	N	124	83	63	270
	P	24	0	0	24
	K	47	0	43	90
OF	N	103	69	53	225
	P	24	0	0	24
	K	47	0	43	90
CK	N	0	0	0	0
	P	0	0	0	0
	K	0	0	0	0

试验采用完全随机设计, 每个处理均设置 3 个小区作为 3 个重复, 共布设 12 个 5 m×6 m 标准的小区, 每个小区四周设置宽 1.5 m 的保护行, 小区由砖块和泥土围隔而成。各小区单独排灌, 东侧设有排水渠和

径流采集池, 当田面水位超过 10 cm 后形成地表径流, 汇集于径流采集池中, 通过径流池内实时的水位监测仪测定产流量。在收集完成径流水样后排空径流池, 以保证所收集径流均为当次降水产生。

水稻品种选用苏南粳 46, 种植株距为 10 cm, 行距为 30 cm。2019 年水稻季的基肥、分蘖肥、孕穗肥施用时间分别为 6 月 14 日、7 月 13 日、8 月 12 日, 2020 年 3 次施肥时间分别为 6 月 23 日、7 月 2 日、8 月 12 日, 2021 年 3 次施肥时间分别为 6 月 16 日、7 月 11 日、8 月 17 日。

## 1.3 数据采集与测定

降水数据由当地自动气象站监测获得。降水产生后立即通过径流收集池、实时水位检测仪获取各小区地表径流量, 并采集地表径流水样 500 mL, 置于 4 °C 冰箱中保存。在径流水样采集后的 3 d 内采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定水样中的 TN 浓度<sup>[10]</sup>。

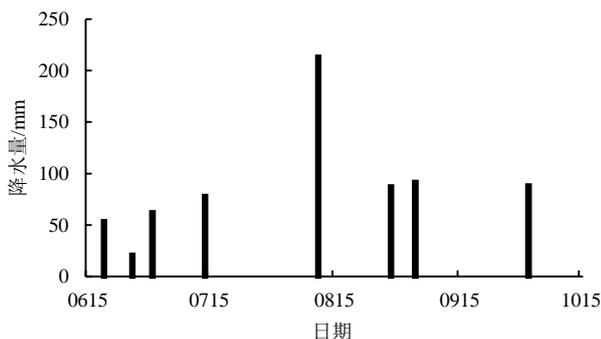
## 1.4 数据分析

利用 R 语言进行数据分析和处理, 运用 Microsoft Excel 2010 进行绘图, 运用 SPSS 20 方差分析进行显著性检验 ( $P<0.05$ ), 采用 AMOS 21 软件构建结构方程模型, 基于 LSD 法进行差异性比较。

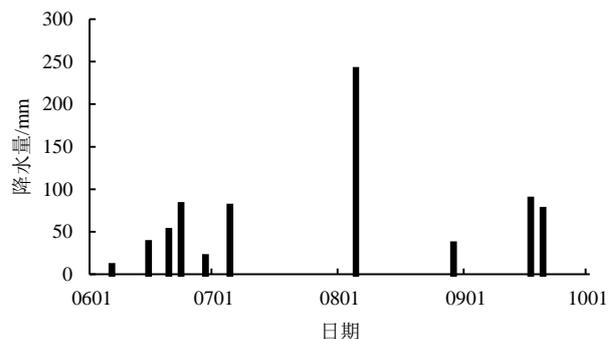
## 2 结果与分析

### 2.1 试验期间的降水特征

2019—2021 年, 稻季降水分布如图 1(a)~图 1(c) 所示。其中, 2019 年 8 月 11 日、2020 年 8 月 5 日、2021 年 6 月 19 日和 7 月 9 日发生了暴雨, 日降水量分别达到 212.9、240.5、175.8、103.1 mm。2019、2020 年和 2021 年产生稻田地表径流的降水事件分别为 8、10 次和 8 次。不同降水事件距施肥时间下的降水量如图 1(d) 所示。2019 年, 稻季降水主要分布于施肥后的 30 d 内; 2020 年, 稻季降水主要分布于施肥前 17 d~施肥后 6 d; 2021 年, 稻季降水主要分布于施肥后 16~35 d。2019—2021 年的稻季降水参数如表 2 所示。稻季总降水量为 2019 年>2020 年>2021 年, 各年度稻季降水量分布存在差异。



(a) 2019 年



(b) 2020 年

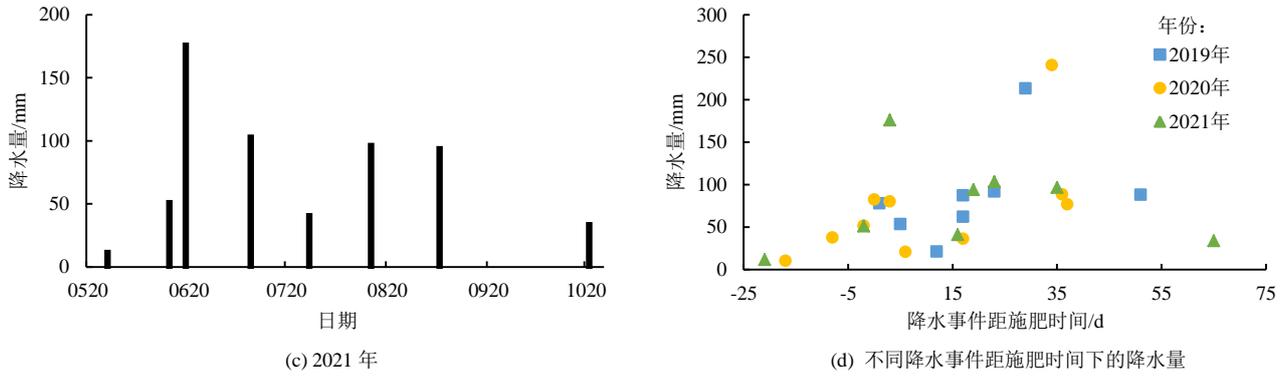


图 1 2019—2021 年稻季产生地表径流的降水量分布

Fig.1 Distribution of rainfall in rice season from 2019 to 2021

表 2 2019—2021 年稻季降水参数

Table 2 Rainfall parameters in 2019, 2020 and 2021

降水参数	2019 年	2020 年	2021 年
稻季降水量/mm	759.5	722.9	606.7
总频次/次	20	15	15
方差/mm	52.5	61.8	49.0
中雨量/mm	20.9	30.9	11.7
大雨量/mm	0.0	73.2	74.5
暴雨量/mm	672.8	618.8	520.5

### 2.2 稻田地表径流下的 TN 流失量

2019—2021 年，施肥后不同时间的 TN 流失量和相应的降水量如图 2 (a) —图 2 (c) 所示。施肥后 10 d 内的 TN 流失量最高，表明施肥后 10 d 是 TN 流失的关键时期。图 2 (d) 为 2019—2021 年稻季 TN 流失量及对应的降水量。2019—2021 年，稻季降水量和 TN 流失量呈同步下降趋势，且稻季 TN 流失量表现为：N18 处理>N15 处理≥OF 处理>CK。此外，2019 年 OF 处理的 TN 流失量 (1.80 g/m<sup>2</sup>) 显著低于 N15 处理 (P<0.05)。

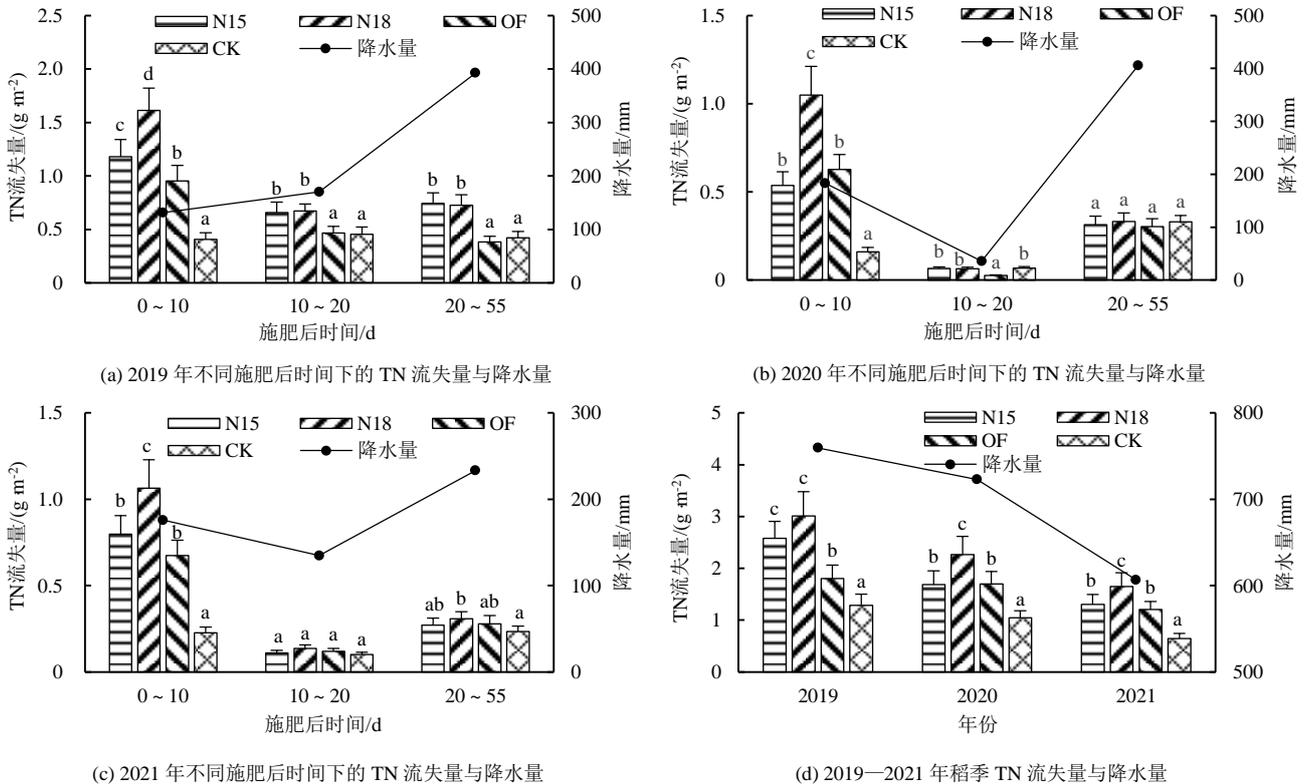


图 2 2019—2021 年稻季 TN 流失量及降水量

Fig.2 Surface runoff TN loss flux and corresponding rainfall in rice season from 2019 to 2021

### 2.3 降水-施肥模式对稻田 TN 流失量的影响

不同处理下的日降水量与 TN 流失量之间的关系如图 3 所示。当日降水量小于 50 mm 时，TN 流失量为 0.79~10.64 g/m<sup>2</sup>；当日降水量介于 50~100 mm 之

间时，TN 流失量为 1.18~19.04 g/m<sup>2</sup>；当日降水量超过 200 mm 时，TN 流失量为 2.78~6.89 g/m<sup>2</sup>。在各处理中，TN 流失量与对应日降水量之间没有显著的相关性。

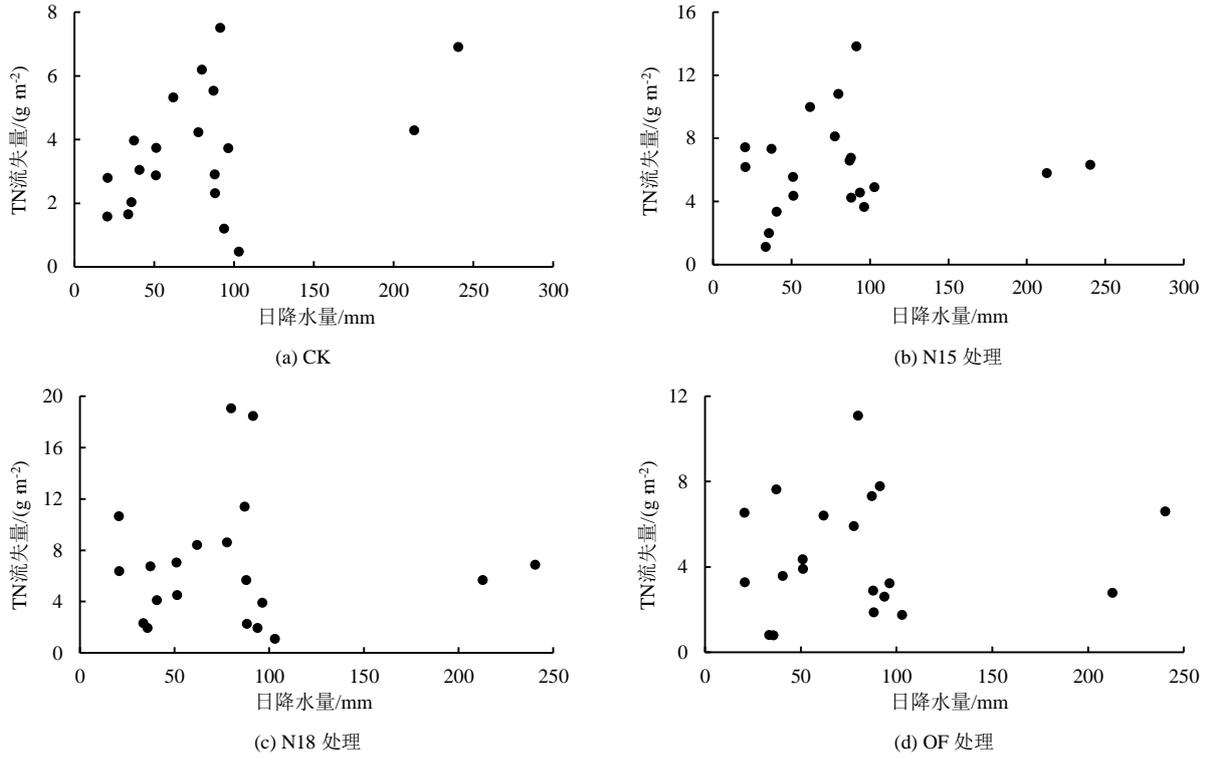


图3 不同处理下的日降水量与 TN 流失量之间的对应关系

Fig.3 Surface runoff TN loss flux and single rainfall amount under different fertilization treatments

进一步采用分段日平均降水量 ( $P_p$ ) 以同时考虑日降水量与降水间隔时间, 其计算式为:

$$P_p = \frac{P_i}{T_p}, \quad (1)$$

式中:  $P_p$  代表 2 次相邻降水事件期间的日平均降水量 ( $\text{mm}/\text{d}$ );  $P_i$  代表当次降水量 ( $\text{mm}$ );  $T_p$  代表上次

降水事件距本次降水事件所间隔的时间 ( $\text{d}$ )。

不同处理下的分段日平均降水量与 TN 流失量间的线性回归分析结果如图 4 所示。4 个处理下的  $R^2$  均  $> 0.4$ , 表明在不同施肥处理下分段日平均降水量与 TN 流失量之间呈正相关。

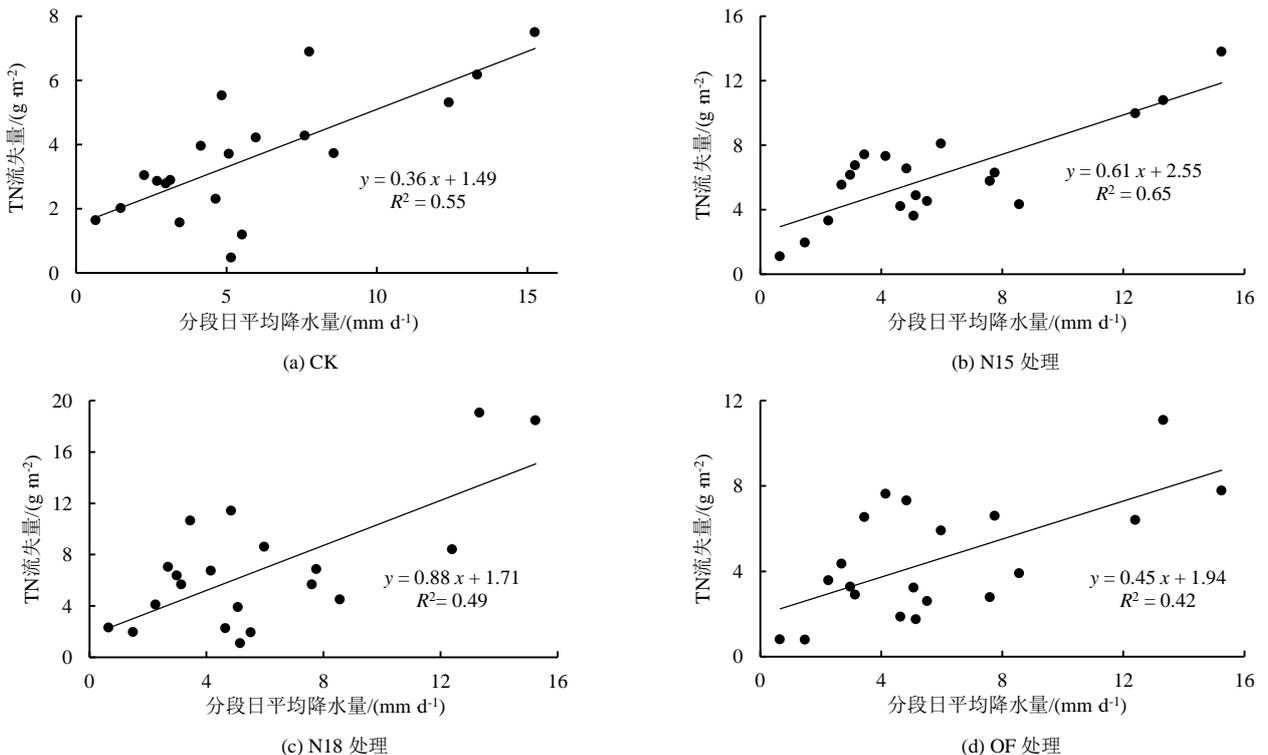
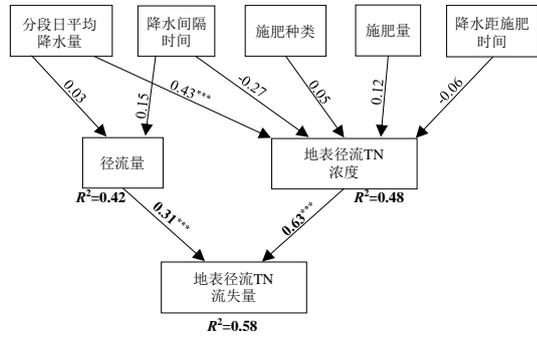


图4 不同处理下的分段日平均降水量与稻田地表径流 TN 流失量

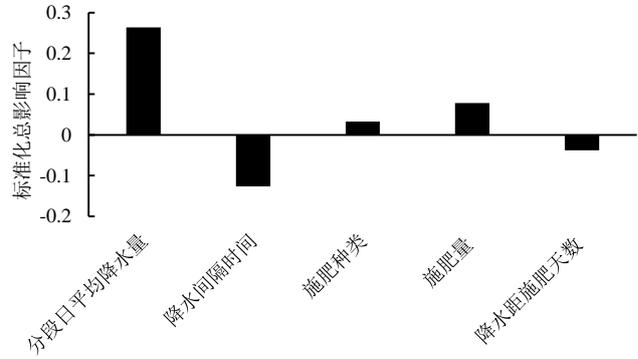
Fig.4 Surface runoff TN loss flux and partitioned daily rainfall in average with different treatments

进一步采用结构方程模型揭示了降水和施肥的耦合作用对稻田 TN 流失量的影响, 结果见图 5。58% 的稻田 TN 流失量的变异性可以通过结构方程模型解释。TN 流失量直接受径流量 ( $\lambda=0.31^{***}$ ,  $P<0.001$ ) 和径流当中的 TN 浓度 ( $\lambda=0.63^{***}$ ,  $P<0.001$ ) 影响。分段日平均降水量 ( $\lambda=0.03$ ,  $P=0.82$ ) 和降水间隔时

间 ( $\lambda=0.15$ ,  $P=0.25$ ) 与径流量没有显著相关性, 而分段日平均降水量与地表径流的 TN 浓度呈显著正相关 ( $\lambda=0.43^{***}$ ,  $P<0.001$ )。由标准化总影响因子可知, 分段日降水量的增加对稻田 TN 流失量的促进效应最强, 降水间隔时间的增加是稻田 TN 流失量降低的主要原因。



(a) 降水和施肥对稻田 TN 流失量的耦合作用



(b) 降水和施肥对稻田 TN 流失量的标准化影响

图 5 降水和施肥在结构方程模型中对稻田地表径流 TN 流失量的影响

Fig.5 Effects of precipitation and fertilization on TN loss in rice field surface runoff in structural equation model

### 3 讨论

氮肥施用后, 稻田田面水中 TN 浓度提高, 进而提高了稻田的 TN 流失量。王利民等<sup>[11]</sup>发现, 常规施肥处理 (273 kg/hm<sup>2</sup>) 下的稻田田面水中 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度高于优化施肥处理 (240 kg/hm<sup>2</sup>)。本研究表明, N18、N15、OF 处理相比 CK 显著增加了稻田的 TN 流失量。2019 年, OF 处理相比 N15 处理显著削减了 TN 流失量, 这与有机肥的氮素缓释效应有关, 与王伟娜<sup>[12]</sup>的研究结果相似。然而, 2020—2021 年的 OF 处理相比 N15 处理对稻田 TN 流失量的削减效果并不显著, 这与有机肥施用对土壤微生物活性的促进效应和土壤氮素的累积效应有关。赵健宇等<sup>[13]</sup>发现, 有机肥的长期施用显著提高了氮循环功能基因丰度, 从而促进了土壤有机态氮转化为速效态氮, 进而削减有机肥的氮素缓释效应。同时, 有机肥施用初期可以减少稻田 TN 淋失<sup>[14]</sup>和稻田地表径流的 TN 流失量, 这也导致了本研究中 2020—2021 年 OF 处理下的土壤 TN 背景浓度高于 N15 处理, 造成 2020—2021 年 OF 处理和 N15 处理间土壤高流动性氮素浓度差距缩小。

农田地表径流主要由降水导致, 地表径流将稻田中的氮素带入水体, 因此降水强度、降水时间等降水参数会影响稻田 TN 流失量<sup>[15]</sup>。本研究发现, 尽管施肥后 20~55 d 的降水量高于施肥后 10 d 内的降水量, 但稻田的 TN 流失主要是由施肥后 10 d 内的降水所导致。Wang 等<sup>[16]</sup>研究也表明, 施肥后 7 d 内的降水是导致稻田 TN 流失的主要因素, 这主要是由于施肥后

稻田土壤和稻田田面水中 TN 浓度在短时间内快速升高, 随后下降。本研究中, TN 流失量与相应日降水量之间没有显著相关性。Yan 等<sup>[17]</sup>研究也表明, 稻田 TN 流失量不会随着降水强度的增加而增加。余萍<sup>[18]</sup>发现, 降水量与 TN 流失量呈显著正相关。这种差异可能与不同试验的监测周期、降水分布、土地利用类型和土壤性质等方面的差异有关。Qiao 等<sup>[19]</sup>研究发现, 降水后土壤反硝化速率显著增加, 使得降水后一段时间内的土壤氮素形态发生改变, 进而影响后续降水产流过程中的 TN 流失量。不同的降水间隔时间下氮素与土壤颗粒间的结合状况、田面水中 TN 浓度、田面水位、土壤氧化还原电位等方面存在差异<sup>[20-21]</sup>, 进而导致不同降水间隔时间下的 TN 流失量存在差异。

本研究发现, 地表径流中的 TN 浓度是影响 TN 流失量的主要因素, 而分段日平均降水量显著影响地表径流 TN 浓度。各参数的标准化总影响因子表明, 分段日降水量、降水间隔时间比施肥量对 TN 流失量的影响更强。Zhao 等<sup>[22]</sup>也发现, 降水量相比施肥对稻田 TN 流失量的影响更大。

### 4 结论

施肥后 10 d 是控制稻田 TN 流失量的关键时期, 应结合当地降水规律合理安排施肥日期。

水稻季降水对 TN 流失量的促进作用表现为: 常规氮肥处理 > 减量氮肥处理 ≥ 有机肥配施处理 > 不施肥。

降水比施肥对稻田 TN 流失量的影响更大, 各因

素的影响表现为:分段日平均降水量>降水间隔时间>施肥量>降水距施肥天数>施肥种类。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

#### 参考文献:

- [1] 陈晓雯, 向明灯, 韩雅静, 等. 关于第二次全国污染源普查的回溯分析与优化[J]. 环境科学研究, 2021, 34(8): 2 018-2 025.  
CHEN Xiaowen, XIANG Mingdeng, HAN Yajing, et al. Retrospective analysis and optimization suggestions of second state pollution source survey[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(8): 2 018-2 025.
- [2] 耿芳, 刘连华, 欧阳威, 等. 长江流域典型单季稻田水文及氮素流失特征[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 132-141.  
GENG Fang, LIU Lianhua, OUYANG Wei, et al. Hydrology and nitrogen loss characteristics of a typical rice paddy field in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(1): 132-141.
- [3] 陈开放. 不同降雨和施肥条件下茶园坡地地表径流和壤中流氮磷流失通量研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.  
CHEN Kaifang. Study on nitrogen and phosphorus loss fluxes in slope surface runoff and soil flow of tea garden under different rainfall and fertilization conditions[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.
- [4] FU J, WU Y L, WANG Q H, et al. Importance of subsurface fluxes of water, nitrogen and phosphorus from rice paddy fields relative to surface runoff[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 627-635.
- [5] LI Y Y, FENG G, TEWOLDE H, et al. Soil, biochar, and nitrogen loss to runoff from loess soil amended with biochar under simulated rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2020, 591: 125-318.
- [6] CUI N X, CAI M, ZHANG X, et al. Runoff loss of nitrogen and phosphorus from a rice paddy field in the East of China: Effects of long-term chemical N fertilizer and organic manure applications[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 22: 1 011.
- [7] WANG J L, FU Z S, CHEN G F, et al. Runoff nitrogen (N) losses and related metabolism enzyme activities in paddy field under different nitrogen fertilizer levels[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(27): 27 583-27 593.
- [8] HOU P F, JIANG Y, YAN L, et al. Effect of fertilization on nitrogen losses through surface runoffs in Chinese farmlands: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2021, 793: 148-554.
- [9] 陈晓冬, 郭彬, 刘俊丽, 等. 浮萍对不同氮肥用量下稻田水中氮含量动态的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(11): 2 674-2 679.  
CHEN Xiaodong, GUO Bin, LIU Junli, et al. Effects of duckweed on changes of nitrogen content in rice floodwater with variable nitrogen fertilizer application[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(11): 2 674-2 679.
- [10] 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 等. 减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5 405-5 413.  
JIANG Haibin, ZHANG Keqiang, ZOU Hongtao, et al. Effects of different fertilization patterns on nitrogen leaching loss from paddy fields under reduced nitrogen[J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5 405-5 413.
- [11] 王利民, 黄东风, 张秉涯, 等. 不同水肥耦合下双季稻氮磷吸收、利用与流失差异[J]. 应用生态学报, 2022, 33(4): 1 037-1 044.  
WANG Limin, HUANG Dongfeng, ZHANG Bingya, et al. Differences in uptake, utilization and loss of nitrogen and phosphorus in a Chinese double rice cropping system under different irrigation and fertilization managements[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(4): 1 037-1 044.
- [12] 王伟娜. 有机无机复混肥与化学缓释肥对氮素的缓释作用比较研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.  
WANG Weina. Comparison of the release of nitrogen from organic-inorganic fertilizers and chemical slow release fertilizer[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [13] 赵健宇, 王凤新, 孟潮彪, 等. 生物有机肥对马铃薯产量与土壤氮循环作用机制研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 343-351.  
ZHAO Jianyu, WANG Fengxin, MENG Chaobiao, et al. Mechanism of bio-organic fertilizer on potato yield and soil nitrogen-cycling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 343-351.
- [14] 张祺, 孙万春, 俞巧钢, 等. 长期施用有机肥对稻田土壤理化性状的影响[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(7): 1 441-1 444, 1 448.  
ZHANG Qi, SUN Wanchun, YU Qiaogang, et al. Effect of long-term application of organic fertilizer on physical and chemical properties of paddy soil[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63(7): 1 441-1 444, 1 448.
- [15] WU Y L, HUANG W C, ZHOU F, et al. Raindrop-induced ejection at soil-water interface contributes substantially to nutrient runoff losses from rice paddies[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 304: 107-135.
- [16] WANG Y, CHEN X D, GUO B, et al. Alleviation of aqueous nitrogen loss from paddy fields by growth and decomposition of duckweed (*Lemma minor* L.) after fertilization[J]. Chemosphere, 2023, 311: 137-073.
- [17] YAN L, XUE L H, PETROPOULOS E, et al. Nutrient loss by runoff from rice-wheat rotation during the wheat season is dictated by rainfall duration[J]. Environmental Pollution, 2021, 285: 117-382.
- [18] 余萍. 粤西地区天然降雨条件下农田氮素径流流失特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
YU Ping. Characteristic of nitrogen loss from farmland in Guangdong West by natural rainfall runoff[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [19] QIAO P W, WANG S, LI J B, et al. Process, influencing factors, and simulation of the lateral transport of heavy metals in surface runoff in a mining area driven by rainfall: A review[J]. Science of the Total Environment, 2023, 857: 159-119.
- [20] GUO C, LI J K, LI H E, et al. Influences of stormwater concentration infiltration on soil nitrogen, phosphorus, TOC and their relations with enzyme activity in rain garden[J]. Chemosphere, 2019, 233: 207-215.
- [21] 金鑫, 牛志强, 王春振, 等. 小型红壤坡面土壤含水率时空特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 28-34, 39.  
JIN Xin, NIU Zhiqiang, WANG Chunzhen, et al. Spatial-temporal characteristics of soil moisture on small red soil slope[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(7): 28-34, 39.
- [22] ZHAO Z, SHA Z M, LIU Y B, et al. Modeling the impacts of alternative fertilization methods on nitrogen loading in rice production in Shanghai[J]. Science of the Total Environment, 2016, 566/567: 1 595-1 603.

## The Coupled Effect of Precipitation and Fertilization on Nitrogen Loss Via Surface Runoff from Paddy Fields

LI Jianqiang<sup>1</sup>, WANG Yuan<sup>2</sup>, CHEN Xiaodong<sup>2</sup>, FEI Bingyan<sup>1</sup>, GUO Bin<sup>2</sup>, LIU Chen<sup>2</sup>, LI Hua<sup>2\*</sup>

(1. Pinghu Agriculture and Rural Bureau, Pinghu 314200, China;

2. Institute of Environment Resource, Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

**Abstract:** 【Objective】 Nitrogen loss from soils is a pervasive environmental issue facing agricultural production in many countries. In this paper, we studied the combined effect of rainfall and fertilization on nitrogen loss via surface runoff from paddy fields in attempts to improve nitrogen management and reduce the nonpoint source pollution of rice production in Southern China. 【Method】 The experiment was conducted from 2019 to 2021 in a paddy field in Zhejiang province. It consisted of four nitrogen treatments: conventional nitrogen fertilization (N18), reduced nitrogen fertilization (N15), organic fertilization (OF). Without fertilization was the control. In the experiment, we measured surface runoff, total nitrogen concentration in the surface runoff. The rainfall data were obtained from a weather station on the experimental site. 【Result】 ① Annual rainfall and annual nitrogen loss were closely correlated, but linear regression analysis showed that daily rainfall and total nitrogen did not correlate significantly. Considering the delay between rainfall and nitrogen loss via the surface runoff can make piecewise average daily rainfall positively correlated to nitrogen loss, with the regression coefficient  $\geq 0.36$ . ② The effect of fertilization on nitrogen loss from the runoff was ranked in the order of N18>N15>OF>CK. ③ Structural equation showed that, when considering the delay between rainfall and nitrogen loss, the piecewise average daily rainfall, the runoff volume, rainfall interval, the interval between rainfall and fertilization, fertilization amount, and fertilizer types were the factors affecting nitrogen loss, with their standardized total effect being 0.264, -0.126, 0.078, 0.033, and -0.038, respectively. The rainfall affected nitrogen loss more than the fertilization, and the piecewise average daily rainfall and rainfall interval were key factors affecting nitrogen loss. 【Conclusion】 For rice-wheat rotation cultivation in Zhejiang Province, a short rainfall interval affected nitrogen loss via surface runoff from paddy fields more than an increase in rainfall. Applying organic fertilizer in the wet season can reduce nitrogen loss from the runoff.

**Key words:** paddy fields; nitrogen loss; non-point source pollution; fertilization; rainfall

责任编辑：韩 洋

## 关于评选优秀论文的公告

本刊已开启优秀论文评选活动，每年评选优秀论文 10 篇，每篇奖励 800 元，并颁发获奖证书，届时将在期刊网站首页展示，同时微信公众号推送。欢迎广大读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部