

不同雨强和植被盖度对稻田径流及氮素流失的影响

严磊, 邓旭哲, 薛利红, 侯朋福, 徐德福, 杨林章

引用本文:

严磊, 邓旭哲, 薛利红, 等. 不同雨强和植被盖度对稻田径流及氮素流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(12): 2761–2769.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0397>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响

秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 翟丽梅, 王洪媛, 武淑霞, 刘宏斌

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1558–1567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1364>

模拟降雨条件下农田氮素径流流失特征研究

薛鹏程, 庞燕, 项颂, 胡小贞, 王欣泽

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1362–1368 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0382>

长江下游“玉米-花菜”轮作模式下旱地降雨产流过程及氮磷输出特征研究

朱文俊, 李金文, 钱晓雍, 沈根祥, 张敏, 付侃, 王振旗, 赵庆节

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2167–2178 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0323>

广东稻田氮素径流流失特征

姚建武, 宁建凤, 李盟军, 王荣辉, 曾招兵, 罗英健, 艾绍英, 李振森, 陈位超, 欧计寅

农业环境科学学报. 2015(4): 728–737 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.04.018>

长兴县合溪水库集水区不同土地利用方式下径流氮流失特征研究

吕婷, 廖敏, 叶照金, 方至萍, 黄小辉, 张云, 施海龙, 沈杰

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1369–1377 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1676>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

严磊, 邓旭哲, 薛利红, 等. 不同雨强和植被盖度对稻田径流及氮素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2761–2769.

YAN L, DENG X Z, XUE L H, et al. Effects of different rainfall intensities and vegetation coverages on runoff and nitrogen loss from rice fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(12): 2761–2769.



开放科学 OSID

不同雨强和植被盖度对稻田径流及氮素流失的影响

严磊^{1,2}, 邓旭哲³, 薛利红^{1,3}, 侯朋福^{1,3*}, 徐德福², 杨林章¹

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 3. 江苏大学环境安全与工程学院, 江苏 镇江 212001)



摘要:阐明径流及养分流失特征对制定农田径流削减策略、降低面源污染发生风险具有重要意义。为明确稻田径流和氮素流失对雨强的响应,分别在水稻生育前期(低植被盖度)和后期(高植被盖度)选择3个降雨强度[低雨强(SI), $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; 中雨强(MI), $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; 高雨强(LI), $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$]进行了田间降雨模拟试验。结果表明:稻田径流率均呈先上升后下降的趋势,且径流率峰值随雨强增大而增加。不同降雨强度下径流率峰值分别为 $72.58(\text{SI})$ 、 $126.45(\text{MI})$ 、 $234.90(\text{LI}) \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (低植被盖度)和 $41.94(\text{SI})$ 、 $70.02(\text{MI})$ 、 $83.30(\text{LI}) \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (高植被盖度)。径流氮素浓度在初始产流期较高,不同植被盖度和雨强下径流氮素浓度随径流时间的变化均可以用对数函数方程进行描述 [$Y=a-b \times \ln(X+c)$, $P<0.01$]。与浓度表现不同,受径流率影响,径流发生后的前40 min内的氮素流失风险较高,特别是在径流发生后的20~30 min(流失率峰值时间)。低植被盖度下氮素流失率更易受降雨强度影响,两种植被盖度下氮素流失率峰值分别为 $0.07(\text{SI})$ 、 $0.10(\text{MI})$ 、 $0.27(\text{LI}) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (低植被盖度)和 $0.05(\text{SI})$ 、 $0.04(\text{MI})$ 、 $0.06(\text{LI}) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (高植被盖度)。

收稿日期:2021-04-13 录用日期:2021-06-30

作者简介:严磊(1995—),女,江苏苏州人,硕士研究生,从事农业面源污染控制研究。E-mail:yanleiwork@126.com

*通信作者:侯朋福 E-mail:pengfuhou100smby@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(42077092);国家重点研发计划项目(2017YFD0300104);江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(19)1007)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (42077092); The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0300104); The Jiangsu Agricultural Science and Technology Innovation Fund (CX(19)1007)

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (高植被盖度)。因此,不同雨强下氮素流失负荷在低植被盖度条件下差异显著,且高降雨强度的氮素流失量($10.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$)显著高于中、低降雨强度,铵态氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)是稻田径流氮素流失的主要形态(占比约41%~52%)。氮素流失负荷与径流发生前期(0~20 min)和中期(20~40 min)的径流率及氮素浓度密切相关。结果表明,初始产流期是稻田氮素流失的高浓度风险期,而径流发生后的20~30 min内氮素流失最快,低植被盖度下径流发生更易受雨强影响。

关键词:面源污染;稻田;地表径流;氮素流失;分时特征

中图分类号:X52; X71 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)12-2761-09 doi:10.11654/jaes.2021-0397

Effects of different rainfall intensities and vegetation coverages on runoff and nitrogen loss from rice fields

YAN Lei^{1,2}, DENG Xuzhe³, XUE Lihong^{1,3*}, HOU Pengfu^{1,3*}, XU Defu², YANG Linzhang¹

(1. Key Lab of Agro-environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212001, China)

Abstract: To develop strategies to reduce the risk of non-point source pollution, it is important to elucidate the characteristics of runoff and nutrient loss. This understanding will inform the development of farmland runoff reduction strategies, which will reduce the risk of non-point source pollution. To understand the response of runoff and nitrogen loss from paddy fields to rainfall intensity, three rainfall intensities [small(SI), $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; middle(MI), $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; and large(LI), $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$] were selected for the field rainfall simulation experiment. The experiment was conducted in the early (low vegetation coverage, LVC) and late (high vegetation coverage, HVC) rice growing stages. The results showed that the runoff rate in paddy fields first rose and then fell with runoff duration; the peak runoff rate increased with rainfall intensity. The peak runoff rates at different rainfall intensities were $72.58(\text{SI})$, $126.45(\text{MI})$ and $234.90(\text{LI}) \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ under LVC, and $41.94(\text{SI})$, $70.02(\text{MI})$, $83.30(\text{LI}) \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ under HVC. In addition, the nitrogen concentration in runoff water was the highest during the initial runoff period. The relationship between the nitrogen concentration and the duration of this concentration for different rainfall intensities under the two vegetation coverages was described using a logarithmic functional equation: [$Y=a-b \times \ln(X+c)$, $P<0.01$]. As opposed to the nitrogen concentration, the risk of nitrogen loss was higher during the first 40 min following the onset of runoff. This was influenced by the runoff rate, particularly during the initial 20~30 min after the runoff (time of peak loss rate). The nitrogen loss rate under LVC was more likely to be affected by rainfall intensity. The peak runoff rates at different rainfall intensities were $0.07(\text{SI})$, $0.10(\text{MI})$, $0.27(\text{LI}) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ under LVC, and $0.05(\text{SI})$, $0.04(\text{MI})$, $0.06(\text{LI}) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ under HVC. As such, the loads of nitrogen loss with different rainfall intensities varied significantly under LVC, and nitrogen loss at high rainfall intensity ($10.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$) was considerably greater than that at moderate and low rainfall intensities. Here, ammonium nitrogen($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) was the major form of nitrogen loss (accounting for approximately 41%~52%). The nitrogen loss load was closely related to the runoff rate and nitrogen concentration in the initial (0~20 min) and middle (20~40 min) runoff periods. The results suggest that during the initial runoff period, the nutrient concentration peaks, whereas the nitrogen loss rate in paddy fields is the highest within 20~30 min after the onset of runoff. The runoff in the LVC scenario is more likely to be affected by rainfall intensity.

Keywords: non-point source pollution; paddy field; surface runoff; nitrogen loss; temporal characteristic

长江中下游地区是我国重要的稻米生产基地,素有“鱼米之乡”之称,亦为我国水资源最丰富的地区。长江天然水系及纵横交错的人工河渠使该区域成为我国河网密度最大的地区。由于大量工业废水和生活污水的人为排放及农业化肥农药的随水流失,河流湖泊水污染难以有效控制,引起水环境恶化、水生态系统退化,水质型缺水普遍存在。废污水大量排放引起的水质性缺水问题是长江经济带现在及未来可持续发展面临的严峻挑战^[1]。

以太湖地区为例,胡开明等^[2]的研究指出氮磷是水体富营养化的主要驱动因子,而外源输入是湖体水

质污染的主要原因。大量研究显示农业源污染是造成太湖水体富营养化的主要因子^[3-5]。“十一五”国家水专项课题研究表明,农村面源污染贡献的总氮占太湖流域污染负荷来源的58%,是重要的污染排放源^[6]。刘庄等^[7]对太湖流域污染负荷的调研分析表明,流域内(江苏省、浙江省、上海市)农田总氮年输出量为6.76万t,占面源污染年总排放量的18%。可以预见,在未来气候变化引起的极端降水事件频次和强度增加的前提下,如不采取必要措施,农田径流氮损失和污染规模也将呈现增加的趋势^[8]。因此,除采取必要的养分管理优化措施外,明确农田径流发生特征,是

精准制定径流蓄存策略、降低面源污染发生风险的重要一环。

除主动排水,降雨是农田径流发生的前驱因子,降雨强度显著影响径流发生和养分流失^[9~11]。当前,有较多学者基于降雨的前提对不同利用方式的土地进行产流特征的研究。李瑞玲等^[12]的研究表明丘陵地区径流和氮素流失特征受降雨强度和降雨量的综合影响。WU等^[13]则发现坡耕地氮素流失量不受降雨强度和坡度的显著影响。而LIN等^[14]的研究指出,旱地径流及养分流失受植被盖度及前期土壤含水量影响较大。向速林^[15]的研究也表明,设施菜地养分流失峰值对降雨强度有较好的响应。这说明,不同类型农田的径流和养分流失特征并不一致,地形条件、植被盖度和土壤水分含量等也是径流发生的重要驱动因素。水稻是长江中下游地区的主要种植作物。与旱地、坡地、菜地等不同,稻田是一种封闭的径流体系,只有降雨超过田面蓄存高度时才会发生径流。除受田面水背景浓度影响,雨强引起的降雨扰动也会显著影响稻田养分流失^[16]。已有研究表明,径流发生初期是稻田氮素流失的高浓度时期^[17],且雨强显著影响稻田氮素流失^[18]。值得一提的是,植被盖度对雨强的削减作用必然会显著影响稻田产流过程及养分流失,然而目前对不同植被盖度下稻田氮素流失特征缺乏定量研究。

明确农田径流发生特征对因时因地制定养分削减策略具有重要指导意义,如在径流易发期调整灌溉策略、仅拦截高浓度径流等。长江下游地区地处亚热带季风气候区,降水资源丰富,雨热同期,水稻季是农田径流损失的高发季节。已有研究利用降雨发生概率和日均降水量对本地区的稻田径流易发期进行了定性研究^[19]。在此基础上,对养分径流发生特征进行解析不仅有助于进一步阐明稻田径流发生机制,研究结果还将为本地区精准制定稻田养分削减策略提供重要依据。为此,本研究采用人工降雨装置在不同植被盖度下对稻田径流特征进行研究,阐明不同植被盖度和降雨强度下氮素径流迁移特征,量化稻田径流发生与养分流失的关系,为该地区农田面源污染防控提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验于2020年6—10月在江苏省南京市江宁区阜庄村水稻田进行。该地区为典型亚热带季风气

候,稻季年均降水量为629.1 mm。试验田土壤为长期水旱轮作水稻土,土壤类型为马肝土,其理化性质如下:pH5.93,有机质29.22 g·kg⁻¹,全氮1.95 g·kg⁻¹,碱解氮196.81 mg·kg⁻¹,有效磷6.87 mg·kg⁻¹,速效钾83.78 mg·kg⁻¹。

1.2 试验装置

本试验采用室外人工模拟降雨系统,该系统由人工模拟降雨装置和径流收集装置构成,人工模拟降雨装置为南林电子有限公司人工降雨系统NLJY-10。该装置由降雨器、供水管、储水箱、雨量计等部分组成,其安装高度为4 m,有效降雨面积为4 m×3 m,雨滴直径介于1.0~5.0 mm,降雨均匀度约86%。通过降雨控制软件参数的改变可实现降雨强度的实时调节,可调降雨强度范围为15~150 mm·h⁻¹。径流收集装置主要由PVC隔板和径流收集桶组成。在试验小区四周用PVC隔板围挡并用土埂砌围,PVC隔板高出地面10 cm,入土30 cm,其中一块PVC隔板开孔连接径流溢出管道,以保证径流发生后所有地面径流可汇入集流桶中。

1.3 试验设计

根据太湖流域多年水文资料记录的暴雨特点,本试验设置30(低雨强,SI)、60 mm·h⁻¹(中雨强,MI)和90 mm·h⁻¹(高雨强,LI)3个降雨强度。由于径流样品按径流发生分阶段采集,因此累积降雨量越大,能够代表的范围越广。以60 mm·h⁻¹降雨强度为例,降雨后20 min内累积降雨量为20 mm,此阶段径流流失量同时可代表20 mm降雨量分级下的径流流失量。据此,为保证径流产流过程更具代表性,并对不同降雨强度进行直接比较,本研究将3种降雨强度的降水量统一设定为60 mm(暴雨级别),降雨历时分别为120、60 min和40 min。每个处理重复3次,共9个小区,每个小区长×宽为4 m×3 m。所有处理磷钾肥均在基肥时一次性施入,其中磷肥和钾肥的用量分别是108 kg·hm⁻²和216 kg·hm⁻²。氮肥分3次施入,即基肥(移栽前1 d)、分蘖肥(移栽后8 d)、拔节肥(移栽后58 d),施加量分别为94.5、81.0 kg·hm⁻²和94.5 kg·hm⁻²。试验水稻品种为南粳3908,移栽密度30 cm×14 cm,移栽时间为6月14日。根据水稻生长动态,分别在水稻生长前期(分蘖期)[低植被盖度(LVC):NDVI=0.6]和生长后期(抽穗后)[高植被盖度(HVC):NDVI=0.8]进行模拟降雨试验。

1.4 样品采集

模拟降雨试验前,将田面水补充至与径流溢出管

齐平处。收集径流发生后每5 min及径流发生40 min后每10 min的各时段混合径流样并记录径流量。此外,为便于分析,对径流发生过程中不同的阶段进行定义,即径流初期(0~20 min)、径流中期(20~40 min)、径流中后期(40~60 min)和径流后期(>60 min)。每次试验前皆收集模拟雨水,以扣除雨水中养分背景值。试验结束后将径流样带回实验室及时测定。

1.5 分析方法与数据处理

植被覆盖指数(NDVI)采用Trimble GreenSeeker光谱分析仪测定。径流水样过0.45 μm滤纸后使用AA3流动分析仪测定总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)浓度。溶解性有机氮(DON)浓度为TN浓度减去NH₄⁺-N和NO₃⁻-N浓度。

不同生育期受水稻养分吸收能力和施肥策略等影响,田面水氮素浓度背景值差异较大,因此未对氮素流失特征进行不同植被盖度的直接比较。采用Excel 2016进行数据统计分析,用SPSS 21.0统计软件进行方差分析,采用Duncan检验进行差异显著性分析($P<0.05$)。使用Pearson系数进行相关性分析($P<0.05$),使用Canoco 5.0进行指标间PCA分析。使用Origin 8.0和Excel 2016软件绘图。

2 结果与分析

2.1 径流率

图1为不同降雨强度下稻田径流率动态变化。结果表明,不同植被盖度和雨强下径流率随径流持续时间延长呈先上升后下降的趋势,且两种植被盖度下

径流率峰值均随雨强增加而明显增加。中、高雨强下径流率峰值分别出现在径流发生后的15 min和20 min,而低雨强下峰值则出现在径流发生后40 min左右。植被盖度明显改变了径流率峰值和振幅变化。低植被盖度的径流率峰值和振幅变化(图1a)明显高于高植被盖度(图1b)。低植被盖度下SI、MI、LI雨强的径流率峰值分别为72.58、126.45、234.90 m³·hm⁻²·h⁻¹,高植被盖度下分别为41.94、70.02、83.30 m³·hm⁻²·h⁻¹。

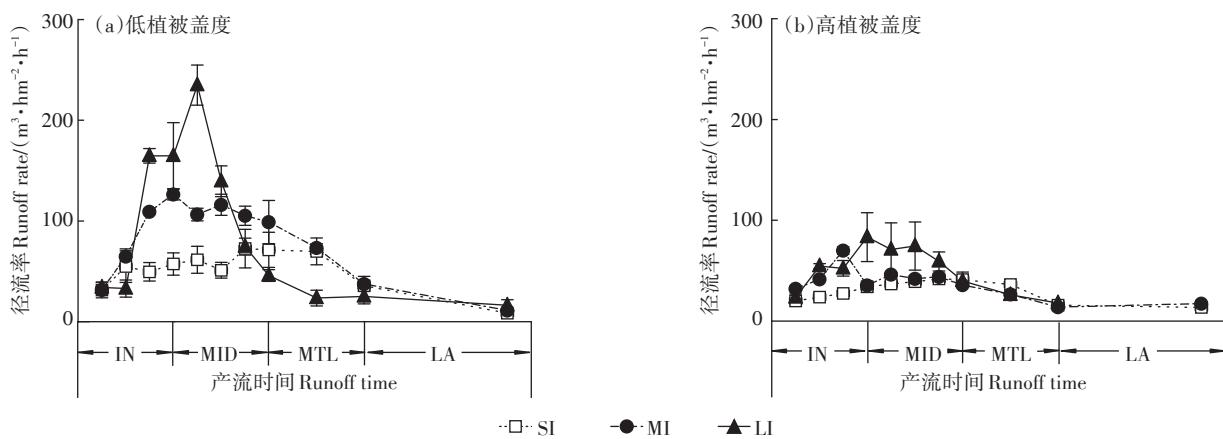
2.2 径流氮浓度

不同降雨强度下径流TN浓度的时序变化见图2。如图所示,不同植被盖度下均表现为径流初始氮素浓度较高,随径流的持续而逐渐下降的趋势。拟合结果表明,不同植被盖度和雨强下径流氮素流失浓度随径流持续时间的变化可以用对数函数方程进行描述,相关系数均达到极显著水平(表1)。

低植被盖度下雨强对稻田系统的扰动明显,且高雨强的径流氮素峰值浓度明显高于中、低雨强,而中、低雨强间无明显差异。SI、MI、LI降雨强度下径流氮素流失浓度峰值分别为1.35、1.32、1.72 mg·L⁻¹。此外,随着径流的持续发生,中、高雨强下的氮素浓度在径流中后期产生了一定的波动,而低雨强下的氮素浓度随着径流的发生持续下降。与低植被盖度表现不同,高植被盖度的雨强削减作用明显,SI、MI、LI降雨强度下的径流氮素峰值浓度相当,分别为0.96、1.00、1.03 mg·L⁻¹。此外,不同雨强下径流氮素流失浓度差异随径流持续而逐渐减小。

2.3 氮素流失率

不同雨强下径流氮素流失率随产流时间的变化



IN:径流初期;MID:径流中期;MTL:径流中后期;LA:径流后期。下同
IN:initial period during runoff;MID:middle period during runoff;MTL:middle to late period during runoff;LA:late period during runoff. The same below

图1 不同降雨强度下稻田径流率随产流时间的动态变化

Figure 1 Dynamics of runoff rate in paddy fields with runoff time under different rainfall intensities

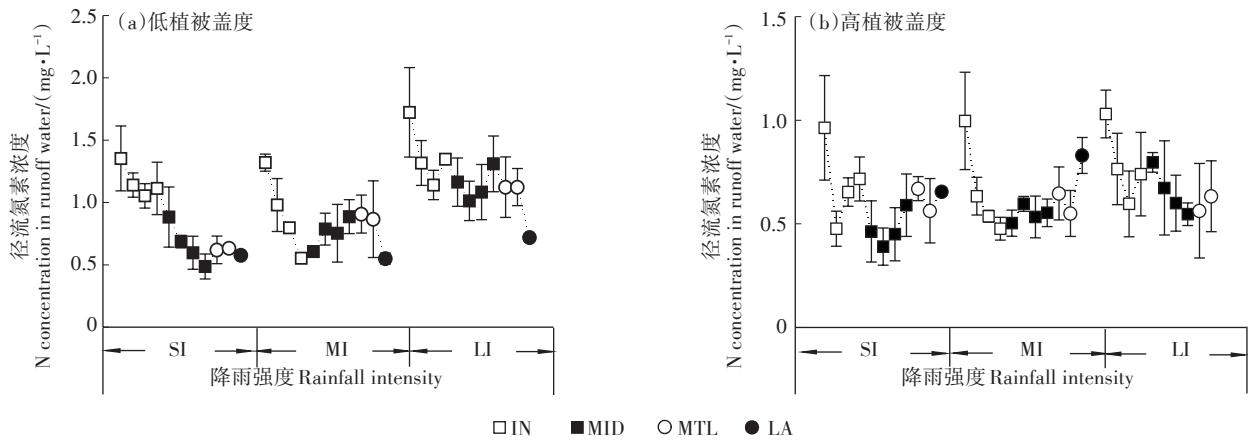


图2 不同降雨强度下径流氮素浓度随产流时间的动态变化

Figure 2 Dynamics of nitrogen concentration in runoff water with runoff time under different rainfall intensities

表1 不同雨强下径流氮素浓度与产流时间的拟合关系

Table 1 The fitting relationship between nitrogen concentration in runoff water and runoff time under different rainfall intensities

植被盖度 Vegetation coverage	降雨强度 Rainfall intensity	拟合公式 Fitting formula	a	b	c	R ²	P
LVC	SI	$Y=a-b\times\ln(X+c)$	1.78	0.29	-1.05	0.79	<0.01
	MI		0.91	0.05	-4.99	0.53	<0.01
	LI		1.60	0.14	-4.52	0.64	<0.01
HVC	SI		0.59	0.04	-4.90	0.44	<0.01
	MI		0.62	0.01	-5.00	0.49	<0.01
	LI		0.85	0.06	-4.90	0.69	<0.01

注:Y为径流氮素浓度,X为径流发生时间。

Note: Y indicates nitrogen concentration in runoff water, X indicates runoff time.

规律结果表明,与径流氮素浓度表现一致,低植被盖度下,径流氮素流失率受雨强影响明显(图3a),且高雨强下氮素流失率变化波动明显,整体呈现先上升后下降的变化趋势,其峰值出现在径流中期(25 min, 0.27 kg·hm⁻²·h⁻¹)。而中、低雨强下氮素流失率呈“波浪”形波动变化,峰值较低,峰值出现时间和速率分别为20 min和0.07 kg·hm⁻²·h⁻¹(SI)、30 min和0.10 kg·hm⁻²·h⁻¹(MI)。此外,不同雨强下径流氮素流失速率在中后期整体较低。由图3b可见,受植被盖度影响,径流氮素流失率在高植被盖度下受降雨强度影响较小。SI、MI、LI降雨强度下氮素流失率均呈“波浪”形波动变化,峰值较低,分别为0.05、0.04 kg·hm⁻²·h⁻¹和0.06 kg·hm⁻²·h⁻¹。

2.4 氮素流失量及流失形态

表2为降雨过程中氮素总流失量及不同形态占比。结果表明,低植被盖度下,降雨强度对稻田径流氮素流失量影响显著。高雨强下的氮素流失量显著高于中低雨强,达10.02 mg·m⁻²。中、低雨强下氮素流失量差异不显著,分别为6.97 mg·m⁻²和4.85 mg·m⁻²。

m⁻²。高植被盖度下氮素流失量同样表现为随雨强的增大而增加,但差异未达到显著水平。此外,形态占比结果表明,不同植被盖度和降雨强度下氮素径流损失均以NH₄⁺-N为主,LVC下占比为47%~52%,HVC下占比为41%~47%。

2.5 氮素累积流失量与阶段径流流失参数之间的关系

由于流失过程中不同变量均为氮素累积流失量的直接驱动因素,且变量间在计算过程中相互引用(如,氮素流失率由径流率和径流氮素浓度决定),为便于分组和直观展示,本部分主要利用主成分分析(PCA)对氮素累积流失量的关键影响过程和变量进行分析。对径流率、氮素浓度、氮素流失率和径流量、氮素流失量及降雨开始前田面水氮素浓度的PCA分析结果表明,植被盖度对氮素累积流失量影响较大,高植被盖度和低植被盖度在第一轴被区分开。氮素流失量与径流发生初期氮素流失率密切相关。此外,氮素流失量也与径流初期径流率、氮素浓度和径流中期径流率、氮素流失率及氮素浓度密切相关,但与径流后期各参数相关性较弱。

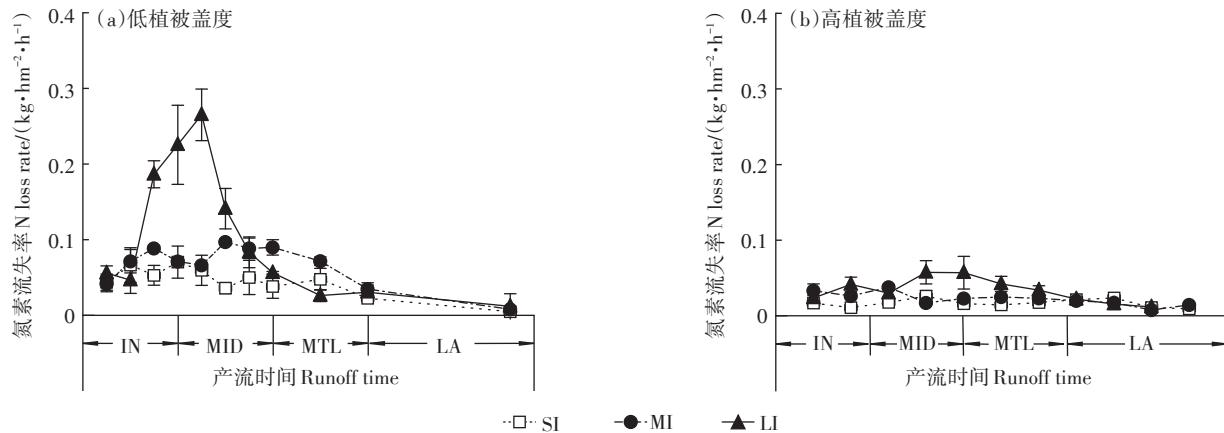


图3 不同降雨强度下氮素流失率随产流时间的动态变化

Figure 3 Dynamics of nitrogen loss rate with runoff time under different rainfall intensities

表2 不同降雨强度对氮素流失量及形态占比的影响

Table 2 Effects of different rainfall intensities on nitrogen loss volume and proportion of lost form

处理 Treatment	氮素流失量 Nitrogen loss volume/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-2})$	不同形态氮素占比 Different nitrogen proportion of lost form/%		
		NH_4^+ -N	NO_3^- -N	DON
LVC	SI	4.85b	49	23
	MI	6.97b	52	15
	LI	10.02a	47	23
HVC	SI	1.83a	41	33
	MI	2.20a	47	32
	LI	3.01a	45	35

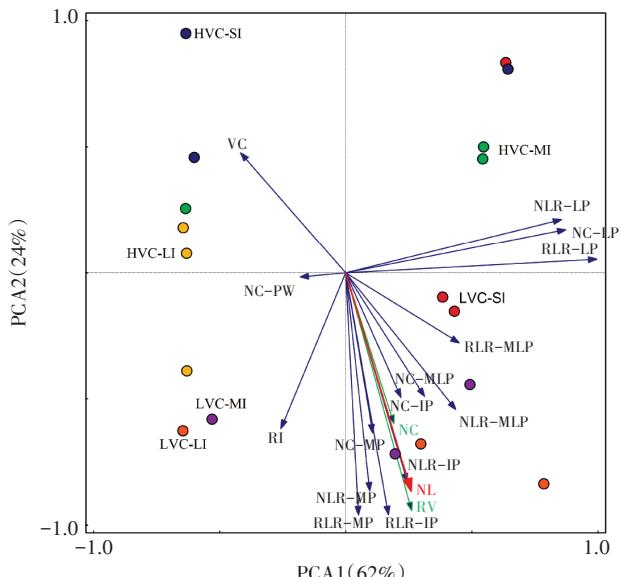
注: 不同小写字母代表相同植被覆盖度下不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ in the same vegetation coverage.

3 讨论

3.1 径流率

稻田径流的发生主要受降雨驱动^[20-22],当降雨发生后,雨水受淹水层缓冲作用后仍有一部分在淹水层表面转化成势能^[23],产生间歇性的压力扰动,引起水土界面土壤孔隙水的释放^[24]。随着降雨的持续进行,田埂内累积水量逐渐增多。在孔隙水、淹水层和降雨的叠加影响下形成水平推流,径流迅速产生^[25]。因此,不同雨强下高植被盖度与低植被盖度的产流速率均表现出先上升后下降的变化趋势,径流率峰值也随雨强增大而增加。这与徐爱国^[26]、李玖颖等^[21]和 RAN 等^[27]的研究结果一致,这可能与水分迁移途径的改变有关。稻田犁底层的存在会减缓水分下移(渗漏)速率^[28],因此降雨发生后即迅速产生径流,径流率迅速



RV: 径流体积; NL: 氮素流失量; IP: 径流初期; MP: 径流中期; MLP: 径流中后期; LP: 径流后期; RI: 降雨强度; VC: 植被盖度; NC: 氮素浓度; PW: 试验前田面水; RLR: 径流率; NLR: 氮素流失率
RV: runoff volume; NL: nitrogen loss volume; IP: initial period during runoff; MP: middle period during runoff; MLP: middle to late period during runoff; LP: late period during runoff; RI: rainfall intensity; VC: vegetation coverage; NC: nitrogen concentration; PW: floodwater before the simulation; RLR: runoff loss rate; NLR: nitrogen loss rate

图4 氮素累积流失量与阶段径流流失参数的PCA分析

Figure 4 PCA analysis of cumulative nitrogen loss and stage runoff loss parameters

增加^[21, 26-27]。但随降雨进行,在降雨扰动(雨滴动能)和水压增强(重力作用)等的共同作用下,土壤入渗速率加快^[25, 29],这可能是降雨后期径流率降低的主要原因。

本研究还发现植被盖度明显改变了径流率变化。低植被盖度的径流流失速率峰值和振幅变化明显较强,尤其在中、高雨强下。这主要是由于此时期水稻

植株群体较小,对雨滴的拦截能力较弱;随着雨强的增加,雨滴的动能也增大,导致水土界面土壤孔隙水的释放速率加快^[28~29]。而高植被盖度下,当降雨强度较小时水稻冠层可能通过合并小雨滴导致更大的雨滴动能^[30],而在高雨强时拦截并吸收雨滴动能^[31],导致不同雨强下雨滴动能造成的差异减小,因此高植被盖度下不同雨强的径流率较为接近,也更为平缓。此外,高植被盖度下的水稻生长发育处于后期,其根系较为发达^[32~33],这也导致了此时的水分迁移中垂直运动的占比较前期增大,因此高植被盖度下(生育后期)不同雨强的径流率峰值明显低于低植被盖度(生育前期)。

3.2 径流氮素流失

降雨形成的地表径流是稻田氮素迁移的重要载体。研究表明,不同植被盖度下径流初始氮素浓度较高,且随径流的持续而呈下降趋势。张继宗等^[17]在开展太湖地区稻田养分流失规律研究时也得出相同的结论。这主要是由于降雨发生后,在雨滴的冲击作用下,淹水层发生扰动,土壤表层氮素在水体压力下释放出来^[25],并与水体混合进行迁移;随雨强增加,初期径流氮素浓度受到淹水层、初期径流率及土壤中氮素释放的联合效应可能增加。陈育超等^[18]也指出,土壤颗粒表面或土壤间隙水、上覆水中的养分可在雨滴扰动下进入上覆水而随径流流失,降雨强度对稻田淹水层的扰动随雨强增大而增加。因此高雨强下的径流初期氮素浓度明显高于中、低雨强。随着降雨的持续进行,氮素可能通过吸附解析作用再次沉淀,并且由于降雨过程中雨水不断进入稻田生态系统,径流中养分进一步被稀释^[34~35],径流氮素浓度随时间呈下降趋势。本研究同时表明,与低植被盖度下雨强对稻田系统的扰动不同,高植被盖度的雨强削减作用明显,不同降雨强度下的径流氮素峰值浓度相当。这可能主要与生育后期水稻高植被冠层对雨滴动能的介导有关。如前所述,高植被盖度下,不同雨强下雨滴动能造成的差异减小,因此径流氮素峰值浓度相当。此外,降雨前田面水氮素浓度差异也可能是不同植被盖度下氮素浓度表现差异的原因之一(高、低植被盖度下降雨前田面水氮素浓度均值分别为 $1.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。本研究还表明氮素流失浓度随径流时间的变化可以较好地用对数函数描述,这与杨瑞等^[23]的研究存在一定的差异,可能与试验条件及土壤质地不同等有关。本试验在野外田间原位条件下开展,且试验地土壤为长期水旱轮作水稻土,具有典型的犁底

层结构。

本研究表明,径流发生后前40 min内的氮素流失率较高,流失风险较大,流失率峰值出现在径流发生后的20~30 min。氮素流失率是径流氮素浓度与径流率共同作用的结果。径流率和氮素流失率动态变化对比结果表明,氮素流失率峰型变化和峰值时间与径流率变化较为一致。这说明,径流率是氮素流失率变化的主要影响因素。此外,不同于降雨后期的降水稀释,降雨初期受降雨瞬时迁移和土壤表层氮素释放等因素影响^[25],初始产流期的径流氮素浓度较高,这同样会增加氮素流失风险。但从氮素流失率动态变化结果来看,径流率对氮素流失率的影响效应要高于氮素浓度,是氮素流失率变化的主要驱动因素。研究同时表明,不同植被盖度下径流氮素流失率对雨强的响应不同。低植被盖度下,径流氮素流失率受雨强影响明显,且高雨强的氮素流失率峰值明显高于中、低雨强。因此,高降雨强度下,径流发生前、中期的高径流率能快速携带氮素流出,增加了此时期氮素流失风险。张继宗等^[17]通过模拟降雨试验也发现,稻田径流氮素流失率在产流初始阶段直线上升,之后减缓并下降。值得一提的是,研究发现径流氮素流失率在高植被盖度下受降雨强度影响较小。这可能是由于随着作物的生长,植株高度和植被盖度都产生变化,植被结构改变了降雨过程中雨滴到达淹水层和土壤层的灵敏度^[36~37],进而削弱了高植被盖度下氮流失率对雨强的响应。

径流氮素流失负荷结果表明,不同植被盖度下氮素流失量均随雨强的增大而增加,低植被盖度下差异显著,这与LI等^[38]的监测结果一致,即降雨强度越大,氮素流失越严重。这主要与降雨强度对田面水层的冲击有关,而在高强度降雨扰动和水体压力下,土壤表层氮素释放到田面水的过程中也会增加氮素流失负荷^[39]。PCA分析结果发现,氮素流失量与径流发生前期和中期的径流率、氮素流失率及径流氮素浓度密切相关,但与径流后期各参数相关性较弱。因此,与前述分析一致,径流前、中期较高的径流氮素浓度和径流率可以携带大量氮素迁移,尤其在低植被盖度下。而随着作物的生长,生长后期(高植被盖度)作物氮素吸收、根系氮素固定和水分运移能力变化的多重影响导致氮素对雨强的响应减弱^[40];同时,此时期高植被盖度对降雨动能的介导也削弱了不同降雨强度的降雨冲刷差异,减少了降雨对淹水层和土壤表层的扰动差异^[16]。因此,高植被盖度下不同雨强的氮素流失量

差异不显著。研究同时发现,稻田氮素流失以 NH_4^+-N 为主,这与大部分研究相同^[41-43]。这主要与水稻长期处于淹水状态,厌氧条件下硝化作用的受限有关^[44]。

4 结论

(1) 初始产流期(0~5 min)是稻田氮素流失的高浓度时期,中期(20~30 min)则是氮素快速流失时期。低植被盖度下,稻田径流和氮素流失更易受雨强的影响。

(2) 低植被盖度下氮素流失负荷受雨强影响显著。氮素流失负荷与径流发生前期径流率、中期径流率、径流氮素浓度密切相关,但与径流后期各参数相关性较弱。

参考文献:

- [1] 李群,于法稳.中国生态治理发展报告(2019—2020)[M].北京:社会科学文献出版社,2019:242-258. LI Q, YU F W. China ecological governance development report (2019—2020) [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2019:242-258.
- [2] 胡开明,李冰,王水,等.太湖流域(江苏省)水质污染空间特征[J].湖泊科学,2014,26(2):200-206. HU K M, LI B, WANG S, et al. Spatial distribution characteristics of water quality pollution in the Lake Taihu basin, Jiangsu Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(2):200-206.
- [3] KLING C L, PANAGOPOULOS Y, RABOTYAGOV S S, et al. LUMINATE: Linking agricultural land use, local water quality and gulf of Mexico hypoxia[J]. *European Review of Agricultural Economics*, 2014, 41(3):431-459.
- [4] SCAVIA D, ALLAN J D, AREND K K, et al. Assessing and addressing the re-eutrophication of Lake Erie: Central basin hypoxia[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, 40(2):226-246.
- [5] LI S, LIU H, ZHANG L, et al. Potential nutrient removal function of naturally existed ditches and ponds in paddy regions: Prospect of enhancing water quality by irrigation and drainage management[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718:137418.
- [6] 杨林章,薛利红,施卫明,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——案例分析[J].农业环境科学学报,2013,32(12):2309-2315. YANG L Z, XUE L H, SHI W M, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: A case study[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12):2309-2315
- [7] 刘庄,李维新,张毅敏,等.太湖流域非点源污染负荷估算[J].生态与农村环境学报,2010,26(增刊1):45-48. LIU Z, LI W X, ZHANG Y M, et al. Estimation of non-point source pollution load in Taihu Lake basin[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(Suppl 1):45-48.
- [8] MARTINEZ-MENA M, CARRILLO-LOPEZ E, BOIX-FAYOS C, et al. Long-term effectiveness of sustainable land management practices to control runoff, soil erosion, and nutrient loss and the role of rainfall intensity in Mediterranean rainfed agroecosystems[J]. *Catena*, 2020, 187:104352.
- [9] 辜世贤,熊亚兰,徐霞,等.土壤水库与降水资源化研究进展[J].西南农业学报,2003(增刊1):29-32. GU S X, XIONG Y L, XU X, et al. Research progress on soil reservoir and utilization rainfall resources [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2003 (Suppl 1): 29-32.
- [10] CUI N, 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:e01011.
- [11] LI J, ZHANG F, WANG S, et al. Combined influences of wheat-seedling cover and antecedent soil moisture on sheet erosion in small-flumes[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 151:1-8.
- [12] 李瑞玲,张永春,刘庄,等.太湖缓坡丘陵地区雨强对农业非点源污染物随地表径流迁移的影响[J].环境科学,2010,31(5):1220-1226. LI R L, ZHANG Y C, LIU Z, et al. Rainfall intensity effects on nutrients transport in surface runoff from farmlands in gentle slope hilly area of Taihu Lake basin[J]. *Environmental Science*, 2010, 31 (5):1220-1226.
- [13] WU L, PENG M, QIAO S, et al. Assessing impacts of rainfall intensity and slope on dissolved and adsorbed nitrogen loss under bare loessial soil by simulated rainfalls[J]. *Catena*, 2018, 170:51-63.
- [14] LIN Q, XU Q, WU F, et al. Effects of wheat in regulating runoff and sediment on different slope gradients and under different rainfall intensities[J]. *Catena*, 2019, 183:104196.
- [15] 向速林.赣江流域农田地表径流氮磷迁移与流失研究[J].生态环境学报,2013,22(7):1204-1207. XIANG S L. Nitrogen and phosphorus migration and loss of surface runoff in Ganjiang River watershed[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22 (7) : 1204-1207.
- [16] WU Y, HUANG W, 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, 304:107135.
- [17] 张继宗,雷秋良,左强,等.模拟降雨条件下太湖地区稻田氮素径流流失特征[J].湖北农业科学,2009,48(11):2688-2692. ZHANG J Z, LEI Q L, ZUO Q, et al. Nitrogen loss characteristics with runoff under simulated rainfall conditions in paddy field of Taihu Lake region[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2009, 48(11):2688-2692.
- [18] 陈育超,李阳,于海明,等.太湖地区典型降雨水稻田径流污染物输出特点及相关性分析[J].环境工程学报,2016,10(1):137-144. CHEN Y C, LI Y, YU H M, et al. Analysis of output characteristics and interrelationship of pollutants from typical rainfall runoff of rice fields in Taihu Lake region[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(1):137-144.
- [19] 侯朋福,薛利祥,俞映倞,等.稻田径流易发期不同类型肥料的氮素流失风险[J].农业环境科学学报,2017,36(7):1353-1361. HOU P F, XUE L X, YU Y L, et al. Nitrogen loss risk of paddy field under different fertilizations in runoff prone period[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7):1353-1361.

- [20] 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 N, YU S E, YE X C. Simulation of drainage and changes of nitrogen in paddy fields during rainstorms using DRAINMOD-N II [J]. *Yellow River*, 2014, 36(10): 136–140.
- [21] 李玖颖,卫琦,王海渝,等. 典型降雨-稻田排水过程中氮素流失规律[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(12): 97–102. LI J Y, WEI Q, WANG H Y, et al. Nitrogen loss with rainfall leaching from paddy field[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(12): 97–102.
- [22] 盛婧,王子臣,朱普平,等. 农田养分流失及水生植物吸收再利用研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(10): 1733–1740. SHENG J, WANG Z C, ZHU P P, et al. Research progress on field nutrient loss and its uptake and reuse by aquatic plants[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(10): 1733–1740.
- [23] 杨瑞,童菊秀,魏文硕,等. 土壤中氮磷流失试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(8): 9–15. YANG R, TONG J X, WEI W S, et al. Experimental study on nitrogen and phosphorous loss in soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(8): 9–15.
- [24] HIGASHINO M, STEFAN H G. Modeling the effect of rainfall intensity on soil–water nutrient exchange in flooded rice paddies and implications for nitrate fertilizer runoff to the Oita River in Japan[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(11): 8611–8624.
- [25] 黄微尘,周丰,梁浩,等. 稻田氮磷径流流失模型研究进展[J]. 湖泊科学, 2021, 33(2): 336–348. HUANG W C, ZHOU F, LIANG H, et al. Research progress on nitrogen and phosphorus runoff loss models for rice paddy[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(2): 336–348.
- [26] 徐爱国. 原位模拟降雨条件下太湖地区不同农田类型氮磷流失特征研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009: 25–35. XU A G. Study on nitrogen and phosphorus loss from different croplands with simulated rainfall in Taihu region[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009: 25–35.
- [27] RAN Q, SU D, LI P, et al. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 424/425: 99–111.
- [28] ZHOU W, LV T F, CHEN Y, et al. Soil physicochemical and biological properties of paddy–upland rotation: A review[J]. *Scientific World Journal*, 2014, 856352.
- [29] LU J, ZHENG F, LI G, et al. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Molisol region of northeast China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 161: 79–85.
- [30] GEISSLER C, KUEHN P, BOEHNKE M, et al. Splash erosion potential under tree canopies in subtropical SE China[J]. *Catena*, 2012, 91: 85–93.
- [31] BOCHET E, POESEN J, RUBIO J L. Runoff and soil loss under individual plants of a semi-arid Mediterranean shrubland: Influence of plant morphology and rainfall intensity[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(5): 536–549.
- [32] 董桂春,陈琛,袁秋梅,等. 氮肥处理对氮素高效吸收水稻根系性状及氮肥利用率的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 642–651. DONG G C, CHEN C, YUAN Q M, et al. The effect of nitrogen fertiliz-
- er treatments on root traits and nitrogen use efficiency in indica rice varieties with high nitrogen absorption efficiency[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 642–651.
- [33] SUN G, ZHOU G, ZHANG Z, et al. Potential water yield reduction due to forestation across China[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(3/4): 548–558.
- [34] NAN Z, WANG X, DU Y, et al. Critical period and pathways of water borne nitrogen loss from a rice paddy in northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 753: 142116.
- [35] FERREIRA C S S, KEIZER J J, SANTOS L M B, et al. Runoff, sediment and nutrient exports from a Mediterranean vineyard under integrated production: An experiment at plot scale[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 256: 184–193.
- [36] 张海东,于东升,史学正,等. 地面三维激光扫描方法研究红壤侵蚀恢复区植被垂直结构[J]. 土壤, 2014, 46(5): 948–953. ZHANG H D, YU D S, SHI X Z, et al. Retrieval of forest vertical structure in eroded area of southern China using terrestrial lidar systems[J]. *Soils*, 2014, 46(5): 948–953.
- [37] XU C, YANG Z, QIAN W, et al. Runoff and soil erosion responses to rainfall and vegetation cover under various afforestation management regimes in subtropical montane forest[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(14): 1711–1724.
- [38] LI S, WANG X, QIAO B, et al. First flush characteristics of rainfall runoff from a paddy field in the Taihu Lake watershed, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(9): 8336–8351.
- [39] 焦瑞峰,张鸿睿,卞新民. 稻田降雨径流扰动系数的解析分析[J]. 浙江农业学报, 2012, 24(5): 898–903. JIAO R F, ZHANG H R, BIAN X M. Analytical analysis of paddy runoff disturbance coefficient [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2012, 24(5): 898–903.
- [40] 王晓玲,涂佳敏,李松敏,等. 稻田沟渠施肥后降雨径流中氮素迁移规律研究[J]. 水利学报, 2014, 45(9): 1075–1081. WANG X L, TU J M, LI S M, et al. Nitrogen transport mechanisms in ditches of rainfall-runoff after fertilizing[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(9): 1075–1081.
- [41] CAO Y, SUN H, LIU Y, et al. Reducing N losses through surface runoff from rice–wheat rotation by improving fertilizer management[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(5): 4841–4850.
- [42] WANG L, ZHAO X, GAO J, 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 & Environment*, 2019, 285: 106605.
- [43] LI P, LU J, WANG Y, et al. Nitrogen losses, use efficiency, and productivity of early rice under controlled-release urea[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 251: 78–87.
- [44] 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 H X, XU L G, ZHAO X, et al. Study on nitrogen loss in rice–wheat rotation farmland in Taihu basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(2): 255–262.