

侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 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 Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, 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.

稻田径流易发期不同类型肥料的氮素流失风险

侯朋福¹, 薛利祥¹, 俞映惊¹, 江瑜², 汪吉东¹, 薛利红^{1*}, 杨林章¹

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2.中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要:依据 60 年典型自然降雨资料分析了太湖地区稻田径流易发期, 结合不同肥料减量运筹长期定位试验(2009 年开始)近 3 年的径流监测数据, 比较了径流易发期内不同处理的实际径流氮素控制效果。结果表明, 太湖地区水稻生长前期降雨概率较大, 6 月 21 日—7 月 6 日单日降雨概率均超过 50%。从阶段统计结果来看, 基肥期和蘖肥期(含基肥—蘖肥阶段)降雨概率和降雨量均明显高于穗肥期、蘖肥—穗肥阶段和穗肥后至成熟阶段, 降雨概率分别达 48.15% 和 49.81%, 降雨量分别为 12.81 mm 和 12.84 mm, 均超过实际监测到径流的同期最低降雨量 11.5 mm, 产生径流可能性较大, 是稻季径流易发期。从定位试验的实际产生径流和田面水氮素浓度结果来看, 易发期径流和田面水氮素以铵态氮为主, 硝态氮差异不显著。与常规用量分次施肥处理(CN)相比, 化肥减量优化处理(RF)和有机无机减量配施处理(OCN)径流易发期径流氮素浓度分别较 CN 处理平均降低 8.83% 和 19.18%。缓控释肥减量替代处理(SCU)的基肥期和基肥—蘖肥阶段径流氮素浓度和田面水氮素浓度明显高于其他处理, 径流氮素浓度较 CN 处理分别增加了 20.3% 和 11.72%, 但蘖肥期径流氮素浓度减少 30.72%。全有机肥减量替代处理(OF)肥期径流和田面水氮素浓度降低, 其中基肥期径流氮素浓度较 CN 处理降低 9.04%、蘖肥期降低 28.53%, 但基肥—蘖肥阶段氮素浓度较 CN 处理增加了 19.7%, 增加了氮素径流损失风险。不同氮肥减量措施能够降低易发期内不同阶段径流氮素浓度, 但在径流易发期的径流氮素损失控制效果不能一概而论。

关键词:稻田; 径流; 易发期; 肥料类型; 氮素流失

中图分类号: X592 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2017)07-1353-09 **doi:**10.11654/jaes.2017-0695

Nitrogen loss risk of paddy field under different fertilizations in runoff prone period

HOU Peng-fu¹, XUE Li-xiang¹, YU Ying-liang¹, JIANG Yu², WANG Ji-dong¹, XUE Li-hong^{1*}, YANG Lin-zhang¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The runoff prone period of paddy field in Taihu Lake region was analyzed according to the typical natural rainfall data of 60 years in this study. Then, the actual runoff nitrogen control effect from paddy field in runoff prone period of different fertilization reduction treatment were compared using the runoff monitoring data in recent 3 years of a long-term fertilization reduction experiment that initiated in 2009. The results showed that, the rainfall probability was larger in early rice growth stage in Taihu Lake region and daily rainfall probability between June 21st and July 6th were more than 50%. The rainfall probability of basal fertilization stage and tillering fertilization stage were 48.15% and 49.81%, respectively, obviously higher than other stages. The mean precipitation of these two stages were 12.81 mm and 12.84 mm, both exceed the minimum rainfall for runoff (11.5 mm), implying high probability for paddy runoff in these two periods. The nitrogen in runoff water and surface water in the runoff prone period were mainly ammonium nitrogen as the long-term experiment study indicated. Compared with conventional nitrogen rate (CN) treatment, the nitrogen concentrations of reduced nitrogen rate treatment (RF) and organic combined with chemical nitrogen treatment (OCN) were decreased 8.83% and 19.18%, respectively. The nitrogen

收稿日期: 2017-05-12

作者简介: 侯朋福(1986—), 男, 山东高密人, 博士, 助理研究员, 主要从事农田养分管理与面源污染控制研究。E-mail: pengfuhou100smy@163.com

* 通信作者: 薛利红 E-mail: njxuelihong@gmail.com

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503106); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41601319); 国家重点研发计划项目(2017YFD0300100)

Project supported: The Special Fund for Agro-scientific Research on Public Interests(201503106); The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(41601319); The National Key Research and Development Program China(2017YFD0300100)

concentrations in runoff water and surface water of sulfur coating urea treatment (SCU) in basal fertilization and basal fertilization-tillering fertilization stage were higher than those of other treatments, which increased 20.3% and 11.72% respectively in comparison with CN treatment. The nitrogen concentration in runoff water of organic fertilizer treatment (OF) decreased 9.04% and 28.53% in basal fertilization and tillering fertilization stage, respectively, but increased 19.7% in tillering fertilization-panicle fertilization stage compared with CN treatment, which increased the risk of runoff nitrogen loss. The nitrogen reduction measures referred in this study can reduce the runoff water nitrogen concentrations in the runoff prone period of paddy field, but the effect on nitrogen loss control in the runoff prone period are different.

Keywords: paddy field; runoff; prone period; fertilizer type; nitrogen loss

随着工业废水和城市生活污水等点源污染得到控制,农村面源污染控制逐步成为现代农业和社会可持续发展的重大课题,农田氮肥面源污染作为其中的重要组成部分备受关注^[1]。太湖地区水资源丰富,是我国农业集约化种植区域之一,水稻种植面积占耕地总面积的75%^[2-3]。王桂良等^[4]基于文献数据的Meta分析发现,氮素径流损失是长江流域单季稻生长期的主要损失途径。课题组前期研究表明,太湖地区不同氮肥管理模式稻田氮素环境排放总量为40.4~85.8 kg·hm⁻²,其中径流氮损失为6.8~9.2 kg·hm⁻²,占氮素环境排放的10.7%~23%,是氮素损失的主要途径^[5]。为了控制稻田氮素损失,研究人员通过系列研究逐步形成了调整肥料用量及运筹方式、新型缓控释肥料替代和有机肥料替代等系列源头减量控制技术^[6]。稻田田面在田埂保护下形成封闭径流体系,只有在特殊情况如降雨发生时,田面水才会溢出形成机会径流,因此稻田径流的发生具有突发性偶然性的特征,年际间随降雨波动较大^[6-7]。因此,不同减量技术由于不同时期肥料投入差异较大,季节氮素径流损失可能呈现不同的阶段损失特征^[8-10]。目前对径流氮素损失控制效果的评价主要依靠径流池或径流收集管等对径流收集测定后比较随机发生径流的氮素损失强度,对不同时期径流发生风险关注较少^[10-13]。不同类型肥料的养分释放特性差异较大^[14]。尿素等无机化肥施入稻田后迅速溶于水,短时间内田面水氮素浓度升至峰值,有机肥由于本身成分的复杂性,其养分释放通常呈现一个长期的波动过程,而缓控释肥料由于肥料的缓慢释放,田面水氮素浓度变化也呈现出长期的变化过程^[9,15-17]。因此不同减量技术氮素损失主要与径流-施肥时间间隔及作物的不同生育期有关,短期监测数据的分析可能由于年际间降雨的差异而无法真实反映或掩盖单项技术的实际流失特征及控制效果。太湖地区地处长江下游,水稻种植季降雨频发,本研究拟利用历史气象数据,分析区域多年份降雨数据,寻求太

湖地区径流发生的易发期,并结合长期定位监测试验结果,对不同源头减量技术的径流氮素损失控制效果进行综合评价,提出适宜该区域的径流氮素减排技术。

1 材料与方法

1.1 历史气象资料分析

径流是多种因素综合发生的,受降雨量、降雨强度、田间植被覆盖度/LAI、土壤水分状况或水深等影响^[18]。而稻田田面在田埂保护下形成封闭径流体系,只有在特殊情况如降雨发生时,田面水才会溢出形成机会径流^[6],因此作者在本文中根据径流发生受驱动因子的先后将降雨划分为前驱动因子,将田间植被和土壤水分划分为后驱动因子。而有研究表明只要有径流发生,径流初始期就是氮素流失的高风险期。由于田间和土壤条件时空变化差异较大,且属后驱动因子,因此本文中仅以前驱动因子降雨为依据来定性分析稻田径流易发期(即径流潜在发生风险)。

1.1.1 田间管理及统计区间划分

根据苏州历年水稻栽插实际,一般年份水稻栽插时间在6月5号左右开始,6月25号栽插结束,按基肥期与栽插同步及施肥后7 d作为肥期,将基肥期区间划分为6月6日至7月2日,共27日历天。此外,一般栽插后10 d左右于水稻缓苗后追施一次分蘖肥,并将施肥后7 d时间划分为蘖肥期,因此蘖肥期区间划分为6月16日至7月12日,共27日历天。太湖地区水稻孕穗期一般集中在7月底8月初,按生产实践并考虑7 d肥期,将7月26日至8月12日划分为穗肥期,共18日历天。其余时间均为非肥期,并按生育进程分为蘖肥-穗肥阶段(7月13日至7月25日)和穗肥后至成熟阶段(8月13日至11月10日)。需说明的是,由于地区水稻栽插时间历时较长,因此在统计区间上基肥和蘖肥期有时间重合,基肥-蘖肥阶段无法统计体现。

此外,该地区田间水分管理以干湿交替灌溉为主,前期栽插后保持 5~8 cm 浅水层促进水稻活棵并抑制田间杂草发生,施肥前和孕穗扬花期间灌水保持 5~8 cm 水层,够苗期晒田,其他时间灌水后至自然落干再补充水分。大面积田块田埂高度一般在 20 cm 左右,但水稻生长前期为了防止淹苗,田埂排水口高度一般控制在 10 cm 左右,水层较浅,拔节后水稻株高增加,排水口高度和田埂高度一致。

1.1.2 统计分析方法

将 1956—2015 年 60 年历史气象资料(中国气象局气象数据中心)按上述统计区间分别统计区间内降雨频次(天数)、累积降雨量,并折算降雨概率(降雨频次÷区间天数)和单次平均降雨量(累积降雨量÷降雨频次)。

1.2 田间试验

1.2.1 试验设计

试验于 2009 年稻季开始在太湖东岸苏州市相城区望亭镇迎湖村进行,供试土壤类型为黄泥土。稻季采用大田育苗移栽,水稻收获后作冬闲处理。试验设置 5 个处理,3 次重复,随机区组排列,小区面积 40 m²,小小区作埂隔离防渗。每个小区单设进、排水口。水稻栽插规格为 30 cm×13.3 cm,每穴定植 2 株。近 3 年(2014—2016 年)水稻栽插及施基肥、施分蘖肥和施穗肥时间分别为 2014-06-24、2014-07-10 和 2014-08-10,2015-06-21、2015-07-01 和 2015-08-13,2016-06-21、2016-07-06 和 2016-08-10。田间水分管理同当地一致。按高产栽培要求进行病虫草害防控。试验处理如下:

当地常规施肥处理(CN):总氮量 270 kg·hm⁻²,分次施用,基肥:分蘖肥:穗肥分配比例为 3:3:4。磷肥用量为 80 kg·hm⁻²,一次性基施,钾肥用量 90 kg·hm⁻²,分两次使用,基施 50%、穗肥施用 50%。

化肥减量优化处理(RF):总氮量 200 kg·hm⁻²,分次施用,基肥:分蘖肥:穗肥分配比例为 3:3:4。磷肥用量为 0 kg·hm⁻²,钾肥用量 90 kg·hm⁻²,分两次使用,基施 50%、穗肥施用 50%。

缓控释肥减量替代处理(SCU):总氮量 200 kg·hm⁻²,70%的氮采用水稻专用硫包衣尿素(N37%,汉枫集团),基施,剩余 30%氮采用尿素作为穗肥追施。磷肥用量为 65 kg·hm⁻²,一次性基施,钾肥用量 90 kg·hm⁻²,分两次使用,基施 50%、穗肥施用 50%。

有机无机减量配施处理(OCN):总氮量 200 kg·hm⁻²,其中有机肥占 20%,采用商品有机肥(基施),其余 80%为尿素。基肥:分蘖肥:穗肥分配比例为 3:3:4。

磷肥用量为 65 kg·hm⁻²,一次性基施,钾肥用量 90 kg·hm⁻²,分两次使用,基施 50%、穗肥施用 50%。

全有机肥减量替代处理(OF):总氮量 200 kg·hm⁻²,采用商品有机肥,一次性基施。

1.2.2 采样及测定方法

田面水:分别于基、追肥后一周时间内,每天连续采集各田块田面水样,采集部位按 S 型每小区采集 3 个点位样品混合;采集后的混合水样过滤后用 AA3 流动分析仪分析水样的总氮、铵态氮和硝态氮含量。

径流样品:每次降雨产流后记录同期降雨量并采集各小区预埋径流收集管内的径流水样,随即带回实验室过滤后利用 AA3 流动分析仪分析径流水样的总氮、铵态氮和硝态氮含量。

1.2.3 统计分析方法

按 1.1 区间划分方法,对径流易发期不同区间 3 年发生径流进行均值计算,来评价不同肥料类型该期径流发生风险。常规数据处理和作图在 Excel 2007 中进行,方差分析在 SPSS 16.0 中采用 Duncan 法对数据进行差异显著性分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 径流易发期频次统计

2.1.1 1956—2015 年历史年降雨量和稻季降雨量

图 1 为 1956—2015 年 60 年历史降雨数据统计分析。结果表明,近 60 年太湖地区年降雨量在 680.1~1 699.7 mm 之间,平均年降雨量为 1 132.6 mm。水稻季(6 月 6 日至 11 月 10 日)降雨量约为 215.3~1 285.1 mm,平均约为 629.1 mm。其中稻季降雨最低和最高年份分别出现在 1967 年和 1999 年。稻季降雨占全年降雨量的比例平均为 54.68%(27.94%~75.61%),占比较高。从近 10 年降雨数据来看,年均降雨量约为 1 182.3 mm(914~1364 mm),波动较小。稻季降雨量均值和占比分别为 650.8 mm 和 55.17%。近 10 年降雨统计数据与 60 年统计数据均值接近,说明利用近 60 年降雨数据预测和指征该区域降雨具有一定代表性。

2.1.2 稻季不同肥期区间降雨概率

近 60 年水稻生长季单日降雨概率列于图 2。结果可以看出,水稻生长前期降雨概率较大,除个别天次,6 月 21 日—7 月 6 日单日降雨概率均超过 50%。从肥期划分统计结果来看,基肥期(BF)和蘖肥期(TF)降雨概率明显高于其他时期,是稻田径流的易发期,降雨概率分别达到 48.15%和 49.81%。蘖肥—穗肥

阶段(T-H)、穗肥期(HF)和穗肥后至成熟阶段(H-M)降雨概率较小,分别为 35.13%、30.28%和 32.74%。五个时期降雨概率表现为:TF>BF>T-H>H-M>HF。

2.1.3 稻季不同肥区区间单次平均降雨量

近 60 年日均降雨量数据表明(图 3),与降雨概率相一致,基肥期和穗肥期日均降雨量较高,分别为 12.81 mm 和 12.84 mm。此外,穗肥期日均降雨量也较

高,为 11.73 mm。穗肥-穗肥阶段和穗肥后-成熟阶段降雨量较低,分别为 10.11 mm 和 9.43 mm。五个时期日均降雨量整体表现为:TF>BF>HF>T-H>H-M。

2.2 径流易发期实际发生径流

2.2.1 径流易发期实际径流发生频次

前述分析表明,基肥期和穗肥期(含基肥-穗肥阶段)是径流发生的高风险期和径流减排的关键时期。

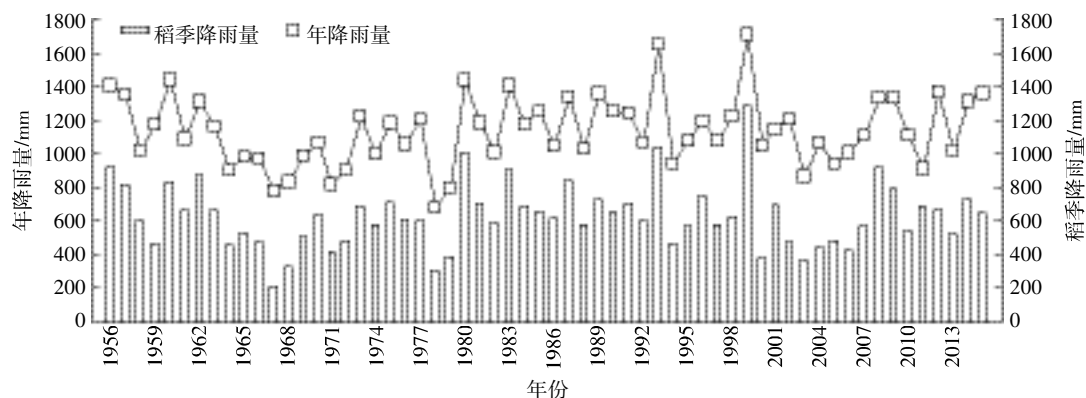


图 1 近 60 年苏州地区年降雨量和稻季降雨量(1956—2015)

Figure 1 Annual and rice season rainfall in Suzhou in recent 60 years(1956—2015)

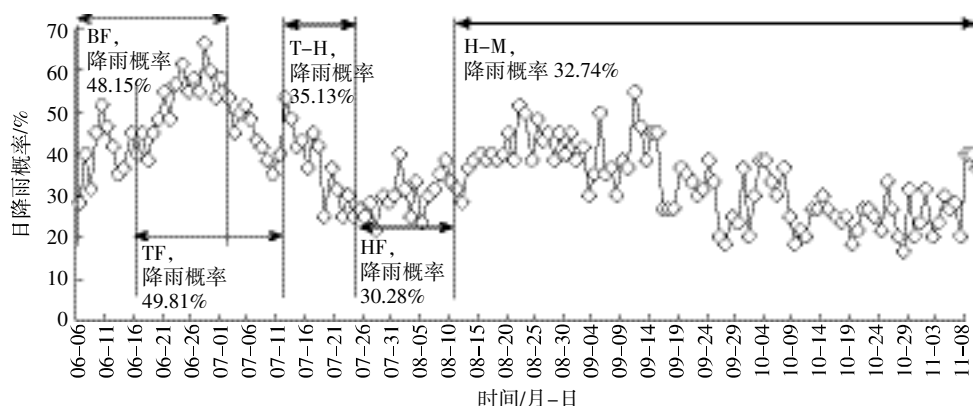


图 2 水稻生长季单日降雨概率统计(1956—2015)

Figure 2 Day rainfall probability in rice growing season(1956—2015)

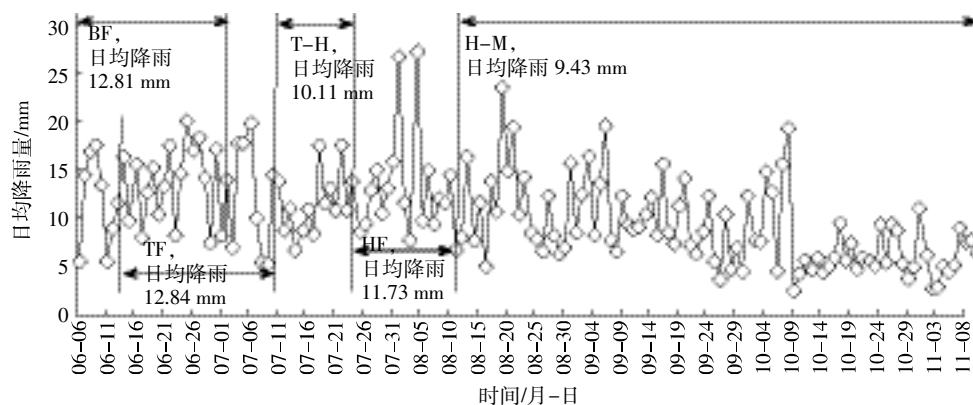


图 3 水稻生长季有降雨天次日平均降雨量(1956—2015)

Figure 3 The average rainfall for rainfall day in rice growing season(1956—2015)

表 1 为长期定位监测试验 2014、2015 年和 2016 年在基肥期、蘖肥期和基肥至蘖肥阶段三个径流易发期实际发生径流频次的统计结果。从结果可以看出,近 3 年径流易发期共有 9 次径流事件发生,降雨量集中在 11.5~282.3 mm。其中,基肥期共有 4 次径流发生,其中 2014 年 1 次(降雨量 80 mm),2015 年 1 次(降雨量 24.3 mm),2016 年 2 次(降雨量分别为 70.2 mm 和 157.5 mm);蘖肥期共有 2 次径流发生,分别发生在 2014 年(降雨量 73.9 mm)和 2016 年(降雨量 11.5 mm);基肥至蘖肥阶段共有 3 次径流发生,3 年各产生 1 次径流事件(降雨量分别为 19、31.3 和 282.3 mm)。

表 1 径流易发期实际发生径流频次及同期降雨量

Table 1 The actual frequency of runoff and precipitation in the same period in runoff prone period

径流易发期	径流发生时间	同期降雨量/mm
基肥期	2014-06-26	80
	2015-06-27	24.3
	2016-06-24	70.2
	2016-06-28	157.5
基肥-蘖肥阶段	2014-07-02	19
	2015-06-29	31.3
	2016-07-04	282.3
蘖肥期	2014-07-13	73.9
	2016-07-13	11.5

2.2.2 径流氮素浓度

表 2 为三年监测期实际径流发生不同形态氮素质量浓度。为便于统计分析和分期比较,对同一时期径流事件实测氮素质量浓度进行了均值计算(表 2)。结果表明,稻田径流易发期径流氮素损失以铵态氮为主,基肥期和蘖肥期的径流总氮和铵态氮质量浓度明显高于基肥-蘖肥阶段。从总氮质量浓度结果来看,与氮素常规用量 CN 处理相比,年际间变化较一致,化肥减量优化处理 RF 和有机肥部分替代处理 OCN 在三个时期的径流氮素浓度均较低,RF 分别减少了 10.64%、2.49% 和 13.36%,OCN 分别减少了 18.61%、14.71% 和 24.22%,均减少了径流损失的风险。硫包衣尿素减量替代处理 SCU 基施后的基肥期和基肥-蘖肥阶段的径流氮素浓度较高,2014 年和 2016 年基肥期总氮浓度均显著高于当地常规施肥处理 CN,增加了氮素径流流失风险(基肥期增加 20.3%、基肥-蘖肥阶段增加 11.72%),但蘖肥期氮素浓度较低,其中 2014 年差异达到显著水平,降低了蘖肥期氮素流失风险(减少 30.72%)。而全有机肥减量替代处理 OF 肥期的径流氮素浓度较低(基肥期降低 9.04%、蘖肥期降低 28.53%),但非肥期(基肥-蘖肥阶段)径流氮素浓度较高,增加了 19.7%。与无机化肥减量优化处理 RF 相比,相同氮素用量下,SCU 和 OF 处理均表现为

表 2 径流易发期实际发生径流氮素质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Nitrogen concentration in runoff water in runoff prone period

氮素形态	处理	基肥期					基肥-蘖肥阶段				蘖肥期		
		2014-06-26	2015-06-27	2016-06-24	2016-06-28	均值	2014-07-02	2015-06-29	2016-07-04	均值	2014-07-13	2016-07-13	均值
TN	CN	19.51b	3.83ab	20.00ab	8.89b	13.06	5.35ab	3.93ab	2.74a	4.01	16.05a	10.45a	13.25
	RF	17.22b	3.67ab	17.05b	8.74b	11.67	5.75ab	3.67ab	2.31a	3.91	14.43ab	8.53ab	11.48
	SCU	23.38a	4.13ab	23.67a	11.66a	15.71	6.20a	4.48ab	2.77a	4.48	13.09b	5.26ab	9.18
	OCN	16.89b	2.84b	16.08b	5.36b	10.29	4.46b	3.17b	2.62a	3.42	13.89ab	6.18ab	10.04
	OF	18.26b	5.11a	17.38b	6.76bc	11.88	6.34a	5.10a	2.95a	4.80	14.76ab	4.18b	9.47
NH_4^+-N	CN	19.21b	3.31ab	15.46ab	6.37b	11.09	3.08b	3.46bc	2.02a	2.85	13.55a	6.17a	9.86
	RF	16.96b	3.11ab	12.92b	5.92b	9.73	3.00b	3.10bc	1.53a	2.54	12.67a	4.96ab	8.82
	SCU	23.16a	3.65ab	16.63a	9.13a	13.14	4.51a	3.88ab	1.88a	3.42	11.47a	2.58ab	7.03
	OCN	15.85b	1.87b	12.89b	3.05c	8.42	3.31ab	2.56c	1.62a	2.50	12.22a	3.12ab	7.67
	OF	16.72b	3.79a	14.00ab	3.79c	9.58	2.92b	4.44a	2.09a	3.15	11.80a	1.05b	6.42
NO_x-N	CN	0.30a	0.39a	1.33a	0.23a	0.56	2.27a	0.41a	0.71a	1.13	0.36a	0.14a	0.25
	RF	0.26ab	0.39a	1.13a	0.18ab	0.49	1.60ab	0.40a	0.76a	0.92	0.29a	0.10a	0.20
	SCU	0.22ab	0.38a	1.29a	0.15b	0.51	1.70ab	0.47a	0.87a	1.01	0.23ab	0.12a	0.18
	OCN	0.21b	0.30a	1.42a	0.19ab	0.53	1.17b	0.34a	0.82a	0.78	0.31a	0.10a	0.21
	OF	0.23ab	0.32a	1.54a	0.17ab	0.56	1.79ab	0.33a	0.84a	0.98	0.12b	0.11a	0.11

注:同列不同字母代表多重比较差异性显著($P<0.05$),采用方法为 Duncan's,下同。

Note: Different letters for the same index mean significant difference between treatments at $P<0.05$ by Duncan's. The same below.

基肥期和基肥-蘖肥阶段径流氮素浓度较高,OCN 处理径流氮素浓度较低。径流铵态氮浓度变化趋势与总氮浓度一致。不同阶段硝态氮浓度年际间变化差异较大,其中基肥期 2016 年 6 月 24 发生的径流硝态氮浓度明显高于其他 3 次,基肥-蘖肥阶段的 2014 年 7 月 2 日径流硝态氮浓度明显高于其他 2 次,这可能与干湿交替水分管理有关。处理间硝态氮浓度比较来看,当地常规化肥处理处理的硝态氮浓度三个时期均较高,2014 年 6 月 26(基肥期)和 2014 年 7 月 2 日(基肥-蘖肥阶段)显著高于 OCN 处理,2016 年 6 月 28(基肥期)显著高于 SCU 处理,2014 年 7 月 13(蘖肥期)显

著高于 OF 处理,其他处理间差异均未达到显著水平。

2.3 基肥期和蘖肥期田面水氮素浓度

太湖地区稻季田面水氮素径流损失是太湖水体富营养化的重要原因。因此,田面水氮素质量浓度在一定程度上可以反映稻田氮素径流损失风险。为进一步实证不同减量替代处理在径流易发期径流流失风险,对定位试验稻田施肥后基肥期和蘖肥期田面水氮素质量浓度进行了分析(表 3)。结果表明,稻田田面水氮素以铵态氮为主,硝态氮浓度较低。田面水铵态氮浓度变化与总氮浓度变化一致。从总氮浓度结果来

表 3 不同施肥处理基肥期和蘖肥期田面水氮素质量浓度(2016)($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Table 3 Nitrogen concentration in surface water in basal fertilization and tillering fertilization stages under different fertilization treatments($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

氮素形态	肥期	处理	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	平均浓度
TN	基肥期	CN	31.58a	12.42ab	19.74a	10.23b	12.33b	5.99a	6.99ab	14.18
		RF	18.25a	15.25ab	19.16a	10.93b	11.77b	7.51a	4.75bc	12.52
		SCU	28.75a	18.58a	20.79a	13.49a	17.70a	6.26a	9.20a	16.40
		OCN	23.92a	8.25b	10.14b	5.55c	8.35b	3.87a	3.68c	9.11
		OF	23.58a	11.17ab	12.92b	7.22c	9.58b	4.69a	5.55bc	10.67
	蘖肥期	CN	62.17ab	12.50a	11.97a	11.48a	17.94ab	13.06a	8.53ab	19.66
		RF	32.83ab	11.10a	10.77a	10.76ab	20.32a	10.43a	10.45a	15.24
		SCU	21.08b	9.67a	9.73a	8.60ab	15.66ab	9.78a	5.26ab	11.40
		OCN	52.58a	8.30a	8.30a	10.08ab	13.42b	9.51a	6.18ab	15.48
		OF	29.67ab	8.83a	8.90a	6.32b	12.57b	9.26a	4.18b	11.39
$\text{NH}_4\text{-N}$	基肥期	CN	21.08a	9.83a	13.58a	8.23b	9.22b	3.18a	4.84a	10.00
		RF	13.00c	12.83a	11.99a	8.65b	8.32bc	3.80a	2.91b	8.79
		SCU	20.75ab	11.17a	14.03a	11.41a	13.54a	4.90a	6.65a	11.78
		OCN	15.25bc	6.83a	5.64b	3.63c	4.99c	1.78a	1.82b	5.71
		OF	16.42abc	11.58a	6.68b	4.35c	5.06c	2.98a	2.75b	7.12
	蘖肥期	CN	61.50a	11.70a	11.57a	11.04a	13.36ab	8.02a	4.96a	17.45
		RF	32.08ab	10.90a	10.47a	10.42a	14.78a	6.31ab	6.17a	13.02
		SCU	19.92b	8.80a	8.07a	8.49a	10.24abc	5.06ab	2.58ab	9.02
		OCN	51.67a	7.77a	7.90a	9.80a	8.96bc	5.27ab	3.12ab	13.50
		OF	27.25ab	8.27a	8.57a	6.28a	6.56c	3.10b	1.05b	8.72
$\text{NO}_x\text{-N}$	基肥期	CN	1.92a	0.68a	0.15a	0.26a	0.17a	0.22ab	0.25a	0.52
		RF	1.50a	0.69a	0.14a	0.20ab	0.10ab	0.25a	0.17a	0.44
		SCU	1.83a	0.65a	0.11a	0.17b	0.09b	0.12b	0.21a	0.45
		OCN	2.08a	0.64a	0.13a	0.19ab	0.17a	0.20ab	0.18a	0.51
		OF	2.33a	0.72a	0.17a	0.17b	0.10ab	0.18ab	0.21a	0.55
	蘖肥期	CN	0.67a	0.80a	0.40a	0.44a	0.12a	0.50a	0.37a	0.47
		RF	0.75a	0.47bc	0.30a	0.33a	0.05a	0.29ab	0.10a	0.33
		SCU	0.67a	0.50bc	0.37a	0.11a	0.08a	0.12b	0.21a	0.29
		OCN	0.92a	0.53b	0.40a	0.28a	0.10a	0.27ab	0.10a	0.37
		OF	0.63a	0.33c	0.33a	0.04a	0.06a	0.03b	0.07a	0.21

注:1 d 代表施肥后第 1 d,其他相同。

Note: 1 d stands for first days after fertilization, the others are the same.

看,不同处理下田面水氮素浓度均在施肥后 1 d 达到峰值,此后逐渐降低。从田面水氮素浓度均值来看,除基肥期 SCU 处理的氮素浓度高于 CN 处理,其他处理基肥期和蘖肥期氮素浓度均低于 CN 处理。此外,从基肥期 SCU 处理的单日田面水氮素浓度变化来看,SCU 处理的田面水峰值浓度低于 CN 处理,但后期 CN 处理浓度下降较快。

与减量优化施肥处理 RF 相比,等氮量的 SCU 处理的基肥期田面水氮素浓度较高,但蘖肥期较低。全有机肥替代 OF 处理的田面水氮素浓度在基肥期和蘖肥期均低于 RF 处理。而有机肥部分替代处理 OCN 则表现为基肥期较低,但蘖肥期较高,这可能与蘖肥期无机氮素投入相同,但基肥期施入的有机肥缓慢释放有关。

田面水硝态氮浓度结果表明,与 CN 处理相比,基肥期施用有机肥处理(OCN 和 OF)的硝态氮浓度较高,减量优化施肥处理 RF 和硫包衣尿素替代处理 SCU 的硝态氮浓度较低,蘖肥期施用无机尿素处理(CN、RF 和 OCN)的硝态氮浓度较高,CN 处理的浓度最高,而在该期不施肥的 SCU 和 OF 处理硝态氮浓度较低,但处理间差异未达到显著水平。

3 讨论

对于稻田径流发生流失风险的研究,多集中于径流浓度和损失量的比较,对于不同生育期发生风险的关注较少^[10-13]。稻田田面在田埂保护下形成封闭径流体系,只有在特殊情况如降雨发生时,田面水才会溢出形成机会径流^[6]。有研究指出,增加田埂排水口高度是减少稻田氮素流失的重要途径,但水稻生长前期为了防止淹苗,田埂一般较低,水层较浅,这更增加了水稻生长前期的流失风险^[14,19]。此外,焦瑞峰等^[18]研究发现,水稻生长后期水稻冠层对于降雨能量有一定的缓冲作用,这在一定程度上减缓了径流发生的风险。本研究结果表明,水稻生长前期降雨概率较大,6 月 21 日—7 月 6 日单日降雨概率均超过 50%(图 2)。从阶段统计结果来看,基肥期和蘖肥期(含基肥-蘖肥阶段)降雨概率和降雨量均明显高于其他阶段,降雨概率分别达 48.15%和 49.81%,降雨量分别为 12.81 mm 和 12.84 mm,均超过实际监测到径流的同期最低降雨量 11.5 mm(表 1),产生径流可能性较大。这说明,由降雨驱动的水稻生长前期降雨概率和降雨量本身高于其他生育期。而当地的前期水层管理措施(栽插后保持 5~8 cm 浅水层促进水稻活棵并抑制田间杂草发生,此外前期为了防止淹苗,田埂排水口高度一般

控制在 10 cm 左右)及较小的水稻冠层叶面积加重了径流发生的风险。此外,水稻高产氮肥运筹中基肥和蘖肥的氮肥投入约占施氮总量的 50%~60%^[20-22],这更增加了前期氮素流失风险。

新型缓控释肥和有机肥等替代肥料的养分释放特性与无机化肥差异较大^[14]。尿素等化肥施入稻田后迅速溶于水,短时间内田面水氮素浓度升至峰值,有机肥由于本身成分的复杂性及受微生物作用,其氮素释放通常呈现一个长期的波动过程,而缓控释肥料由于肥料的缓慢释放,田面水氮素浓度变化也呈现出长期的变化过程^[9,15-17]。为了明确不同肥料类型及施用方式在径流易发期径流流失风险,本研究利用长期定位试验从实际观测径流和施肥后田面水氮素质量浓度两方面进行了分析。结果表明,径流和田面水氮素均以铵态氮为主,硝态氮浓度较低,不同年际间径流氮素浓度变化处理间较一致。化肥减量处理较常规用量处理的径流和田面水氮素浓度均降低,径流易发期 3 个阶段分别较 CN 处理降低了 10.64%、2.49% 和 13.36%,有利于降低径流氮素流失。而硫包衣尿素由于一次施用较大,基肥期和基肥-蘖肥阶段实测径流氮素浓度和基肥期田面水氮素浓度明显高于其他处理(基肥期较 CN 增加了 20.3%、基肥-蘖肥阶段较 CN 增加了 11.72%),增加了氮素径流流失风险,但蘖肥期径流和田面水氮素浓度均较低,径流总氮浓度较 CN 降低了 30.72%,流失风险较小。这可能与硫包衣尿素的释放特性有关。谷佳林等^[23]对硫包衣尿素肥料释放特性研究发现,硫包衣尿素养分释放速率受温度和水分影响较大,肥料所处环境温度越高,水分含量越大,养分释放速率越快。稻田温度较高,移栽时土壤水分含量处于饱和状态,这加快了硫包衣尿素的释放^[24-25]。有机肥氮素分解是一个复杂的过程,受其化学成分和土壤温湿度、通气状况、C/N 等多因素影响^[26-27]。本研究结果表明,有机肥部分替代(20%替代)和全量替代处理径流易发期氮素流失风险表现不一致,基肥期和基肥-蘖肥阶段 OF 处理的氮素浓度较高,蘖肥期 OCN 处理的径流和田面水氮素浓度较高,这可能是由于添加量和施肥方式差异导致的。此外,与无机化肥处理相比,有机肥全量替代处理的肥期(基肥期和蘖肥期)径流氮素浓度和田面水氮素浓度均低于高量和等量无机化肥处理(CN、RF),较 CN 处理基肥期降低了 9.04%、蘖肥期降低了 28.53%,但非肥期(基肥-蘖肥阶段)径流氮素浓度较高,较 CN 增加了 19.7%,氮素径流损失增加。与有机肥全量添加不同的是,20%有

机肥添加处理 OCN 的径流易发期的径流氮素浓度低于高量和等量无机化肥处理(CN、RF),三个阶段分别较 CN 处理减少了 18.61%、14.71%和 24.22%,但等氮量下藁肥期田面水峰值浓度较无机化肥 RF 处理高,这可能与有机肥的释放密切相关。与单施有机肥相比,配施化肥可以降低初始碳氮比,并为异养微生物提供充足的无机氮源,促进有机肥氮素矿化,增加氮素矿化量^[28-30]。此外,从径流硝态氮浓度结果来看,除 CN 处理的径流硝态氮浓度较高外,其他处理均不显著,但值得注意的是,不同阶段硝态氮浓度年际间变化差异较大,其中基肥期 2016 年 6 月 24 日发生的径流硝态氮浓度明显高于其他 3 次,基肥-藁肥阶段的 2014 年 7 月 2 日径流硝态氮浓度明显高于其他 2 次。有研究表明,在一定土壤水分含量下,硝化速率随水分含量的增加而增加,在氧供应受限时,硝化速率开始下降^[31]。因此,不同年际间硝态氮浓度的变化可能与干湿交替水分管理导致的土壤含水量及氧化还原电位变化有关。由于田间径流监测仅采用径流收集管对径流氮素浓度进行了评估,因此对不同时期径流损失量未进行量化比较,这需要在今后试验中进一步补充量化,以此对不同阶段氮素实际损失量进行比较分析。

4 结论

(1)基肥期和藁肥期(含基肥-藁肥阶段)降雨概率和降雨量较高,降雨概率分别达 48.15%和 49.81%,降雨量分别为 12.81 mm 和 12.84 mm,均超过实际监测到径流的同期最低降雨量 11.5 mm,产生径流可能性较大,是稻田径流的易发期。

(2)不同类型肥料能够降低易发期内不同阶段径流氮素浓度,但在径流易发期的径流氮素损失控制效果不能一概而论。与常规化肥用量处理相比,化肥减量和有机肥减量替代处理能够降低径流易发期径流氮素损失;但硫包衣尿素减量替代处理的基肥期和基肥-藁肥阶段径流氮素损失风险增加,但藁肥期径流氮素浓度减少;而全有机肥减量替代处理的肥期径流和田面水氮素浓度降低,其中基肥期径流氮素浓度较 CN 处理降低 9.04%、藁肥期降低 28.53%,但基肥-藁肥阶段径流氮素浓度较 CN 处理增加了 19.7%,氮素径流损失风险较高。

参考文献:

[1] 杨林章,施卫明,薛利红,等.农村面源污染治理的“4R”理论与实践——总体思路与“4R”治理技术[J].农业环境科学学报,2013,32(1):1-8.

YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, XUE Li-hong, et al. Reduce-retain-reuse-restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 1-8.

[2] Yang S, Peng S, Xu J, et al. Nitrogen loss from paddy field with different water and nitrogen managements in Taihu Lake region of China[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(16): 2393-2407.

[3] 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 & Environment*, 2012, 156(4): 1-11.

[4] 王桂良,崔振岭,陈新平,等.南方稻田活性氮损失途径及其影响因素[J].应用生态学报,2015,26(8):2337-2345.

WANG Gui-liang, CUI Zhen-ling, CHEN Xin-ping, et al. Reactive nitrogen loss pathways and their effective factors in paddy field in Southern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(8): 2337-2345.

[5] 薛利红,俞映琼,杨林章.太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J].环境科学,2011,32(4):1133-1138.

XUE Li-hong, YU Ying-liang, YANG Lin-zhang. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu Lake region[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4): 1133-1138.

[6] 薛利红,杨林章,施卫明,等.农村面源污染治理的“4R”理论与实践——源头减量技术[J].农业环境科学学报,2013,32(5):881-888.

XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, et al. Reduce-retain-reuse-restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Source reduction technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 881-888.

[7] Ye Y S, Liang X Q, Chen Y X, et al. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use[J]. *Field Crops Research*, 2013, 144(6): 212-224.

[8] 侯明福,薛利祥,范立慧,等.氮肥类型及施用方式对节水抗旱稻田面水氮动态及产量的影响[J].中国稻米,2016,22(3):43-48.

HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, FAN Li-hui, et al. Effects of nitrogen fertilizer type and application method on surface water nitrogen dynamics and yield of drought-resistance rice[J]. *China Rice*, 2016, 22(3): 43-48.

[9] Shaviv A, Mikkelsen R L. Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation: A review[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1993, 35(1): 1-12.

[10] Xue L H, Yu Y L, Yang L Z. Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(11): 115010.

[11] Yu Y L, Xue L H, Yang L Z. Winter legumes in rice crop rotations reduces nitrogen loss, and improves rice yield and soil nitrogen supply[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(3): 633-640.

[12] Qiao J, Yang L Z, Yan T M, et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice

- production for two consecutive years in the Taihu Lake area[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 146(1): 103–112.
- [13] 纪雄辉, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 施用尿素和控释氮肥的双季稻田表层水氮素动态及其径流损失规律[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2521–2530.
- JI Xiong-hui, ZHENG Sheng-xian, LU Yan-hong, et al. Dynamics of floodwater nitrogen and its runoff loss, urea and controlled release nitrogen fertilizer application regulation in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(12): 2521–2530.
- [14] 傅朝栋. 基于 ArcGIS 的区域尺度稻田降雨径流氮磷流失负荷估算[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- FU Chao-dong. ArcGIS based regional estimation of nitrogen and phosphorus loss loads in surface runoff from rice paddy fields[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [15] 郭 智, 周 炜, 陈留根, 等. 施用猪粪有机肥对稻麦两熟农田稻季养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 21–25.
- GUO Zhi, ZHOU Wei, CHEN Liu-gen, et al. Effect of pig manure application on surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during the paddy season in intensive rice-wheat rotation field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(6): 21–25.
- [16] Guo H Y, Zhu J G, Wang X R, et al. Case study on nitrogen and phosphorus emissions from paddy field in Taihu region[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2): 209–219.
- [17] 金 洁, 杨京平, 施洪鑫, 等. 水稻田面水中氮磷素的动态特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 357–361.
- JIN Jie, YANG Jing-ping, SHI Hong-xin, et al. Variations of nitrogen and phosphorus in surface water body of a paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 357–361.
- [18] 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 Rui-feng, ZHANG Hong-rui, BIAN Xin-min. Analytical analysis of paddy runoff disturbance coefficient[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2012, 24(5): 898–903.
- [19] Mishra A, Ghorai A K, Singh S R. Rainwater, soil and nutrient conservation in rainfed rice lands in Eastern India[J]. *Agricultural Water Management*, 1998, 38(1): 45–57.
- [20] 薛利红, 李刚华, 侯朋福, 等. 太湖地区稻田持续高产的减量施氮技术体系研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 729–736.
- XUE Li-hong, LI Gang-hua, HOU Peng-fu, et al. Nitrogen reduction technique system for sustaining high yield of paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 729–736.
- [21] 林晶晶. 水稻对基肥穗肥氮素的吸收利用差异及适宜比例的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- LIN Jing-jing. Studies on absorption and utilization and optimum proportion of nitrogen of basic, tillering and panicle fertilizer in rice[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [22] 范立慧, 徐珊珊, 侯朋福, 等. 不同地下基肥运筹比例对水稻产量及氮肥吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(10): 1872–1884.
- FAN Li-hui, XU Shan-shan, HOU Peng-fu, et al. Effect of different ratios of basal to tiller nitrogen on rice yield and nitrogen utilization under different soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(10): 1872–1884.
- [23] 谷佳林, 徐 凯, 付铁梅, 等. 不同密闭材料硫包衣尿素氮素释放特性及对夏玉米生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 630–637.
- GU Jia-lin, XU Kai, FU Tie-mei, et al. Nitrogen release characteristics of different hermetic material sulfur coated urea and their effects on summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 630–637.
- [24] Miao X K, Xing X M, Ding Y F, et al. Yield and nitrogen uptake of bowl-seedling machine-transplanted rice with slow-release nitrogen fertilizer[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 108(1): 313–320.
- [25] 李 敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对水稻产量、光合特性及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 808–815.
- LI Min, GUO Xi-sheng, YE Shu-ya, et al. Effects of sulfur-and polymer-coated controlled release urea on yield, photosynthetic characteristics and nitrogen fertilizer efficiency of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(4): 808–815.
- [26] 刘更另, 金维续. 中国有机肥料[M]. 北京: 农业出版社, 1991.
- LIU Geng-ling, JIN Wei-xu. Chinese organic fertilizer[M]. Beijing: Agricultural Press, 1991.
- [27] 朱大威, 黄 耀, 卢燕宇. 有机肥氮素释放动态模型的初步研究[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(3): 146–150.
- ZHU Da-wei, HUANG Yao, LU Yan-yu. A primary study on modeling nitrogen release from organic manure[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2006, 29(3): 146–150.
- [28] 张 璐, 石 林, 蔡泽江, 等. 有机肥与化肥不同比例配施下水稻土铵态氮释放特征[J]. 中国土壤与肥料, 2015(4): 15–22.
- ZHANG Lu, SHI Lin, CAI Ze-jiang, et al. The ammonium nitrogen release characteristic of paddy soil with mixed application of different ratios of organic and inorganic fertilizer[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(4): 15–22.
- [29] Chantigny M H, Angers D A, Prévost D, et al. Dynamics of soluble organic C and C mineralization in cultivated soils with varying N fertilization[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(4): 543–550.
- [30] Sikora L J, Enkiri N K. Efficiency of compost-fertilizer blends compared with fertilizer alone[J]. *Soil Science*, 2000, 165(5): 444–451.
- [31] 张 威, 张旭东, 何红波, 等. 干湿交替条件下土壤氮素转化及其影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2010, 29(4): 783–789.
- ZHANG Wei, ZHANG Xu-dong, HE Hong-bo, et al. Research advances in soil nitrogen transformation as related to drying/wetting cycles[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(4): 783–789.