

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2022.04.005

## 稻田氮磷流失方式及时间分布研究

潘旭鸣<sup>1</sup>, 丁 淼<sup>1</sup>, 徐 萱<sup>2</sup>, 刘远康<sup>1</sup>, 刘建国<sup>1</sup>

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州市农业农村局, 江苏 常州 213000)

**摘要:** 农田氮、磷流失是造成水体富营养化的主要污染源。为测算水稻生产过程中氮、磷随地表径流的流失量并探索流失规律, 在常州市水稻主产区设立稻田定位监测点, 对稻田的水分输入、输出量及氮、磷含量进行了监测。结果表明, 稻田通过降雨和灌溉水输入的氮、磷分别为 2.663 8, 0.154 3 g/m<sup>2</sup>, 通过径流水、排水和径流水泥沙流失的氮、磷分别为 4.732 5, 0.342 5 g/m<sup>2</sup>。氮、磷流失量扣除输入量, 试验期间稻田氮、磷表观净排放量分别为 2.068 7, 0.188 2 g/m<sup>2</sup>。在氮、磷流失方式的分布方面, 以排水方式流失的氮占总流失量的 80% 以上、流失的磷占总流失量的 70% 以上。在氮、磷流失时间的分布方面, 7 月流失的氮、磷占总流失量的 60% 左右, 6 月流失的氮、磷占比也达 20% 以上。该结果说明, 要降低稻田的氮、磷流失量, 最有效的方法是减少排水量, 特别是在 7 月。

**关键词:** 水稻; 氮; 磷; 流失; 地表径流

**中图分类号:** X 52

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-0411(2022)04-0035-08

## Study on the Ways and Times Distribution of Nitrogen and Phosphorus Losses from Paddy Field

PAN Xuming<sup>1</sup>, DING Miao<sup>1</sup>, XU Xuan<sup>2</sup>, LIU Yuankang<sup>1</sup>, LIU Jianguo<sup>1</sup>

(1. School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Changzhou Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Changzhou 213000, China)

**Abstract:** Losses of nitrogen and phosphorus from farmland are the main sources of eutrophication pollutants. In order to calculate the quantities of nitrogen and phosphorus losses via surface runoff during a rice production cycle and investigate the rules, a paddy field in-situ monitoring site was established in the main rice production area of Changzhou, China. The import and loss of water, nitrogen and phosphorus in the paddy field had been monitored. The results showed that the imports of nitrogen

**收稿日期:** 2022-02-08。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(31071350); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(SJ CX21\_1267, SJ CX21\_1195)。

**作者简介:** 潘旭鸣(1997—), 男, 江苏常州人, 硕士生。通信联系人: 刘建国(1963—), E-mail: liujianguo@cczu.edu.cn

**引用本文:** 潘旭鸣, 丁淼, 徐萱, 等. 稻田氮磷流失方式及时间分布研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2022, 34(4): 35-42.

and phosphorus via rainfall and irrigation were  $2.6638 \text{ g/m}^2$  and  $0.1543 \text{ g/m}^2$  respectively in the paddy field during the experimental period. The losses of nitrogen and phosphorus via runoff water, drainage water and runoff sediment were  $4.7325 \text{ g/m}^2$  and  $0.3425 \text{ g/m}^2$  respectively. So the net exports of nitrogen and phosphorus from the paddy field (deduction of nitrogen and phosphorus imports from the losses) were  $2.0687 \text{ g/m}^2$  and  $0.1882 \text{ g/m}^2$  respectively. With regard to the ways of nitrogen and phosphorus losses, the quantities of nitrogen and phosphorus losses via drainage water accounted for more than 80% and 70% of total nitrogen and phosphorus losses respectively. On the time of nitrogen and phosphorus losses, the quantities of nitrogen and phosphorus losses in July accounted for about 60% of total nitrogen and phosphorus losses. The losses of nitrogen and phosphorus in June accounted for more than 20% of total nitrogen and phosphorus losses. The results indicate that reducing drainage water of paddy field is the most effective measure to cut down the losses of nitrogen and phosphorus from paddy field, especially in July.

**Key words:** rice; nitrogen; phosphorus; loss; surface runoff

中国是农业大国,人口数量大。随着社会、经济的快速发展及国民生活水平的提高,对农产品的需求量日益增加,而耕地面积却在不断减少。农业生产,特别是粮食生产承受着巨大的压力,因此中国农业生产中大量使用化肥<sup>[1-2]</sup>。化肥的过量及不合理施用不但会造成肥料利用率低、经济效益下降等问题,还会造成一系列环境问题<sup>[3-4]</sup>。据研究,中国单季稻生产中的氮肥利用率只有 27%~35%,磷肥利用率仅为 10%~20%<sup>[5-7]</sup>,大量没有被利用的氮、磷通过地表径流等途径流失,进入农田周围水环境,进而进入湖泊、河流甚至近海水体,造成水体富营养化<sup>[8]</sup>。

近 30 多年来,太湖流域地区工农业生产及经济迅速发展,人口密度也大幅度增加,导致水污染问题不断加剧。据研究,农业面源污染物的排放已成为太湖水体的主要污染源,特别是氮、磷的排放是太湖流域水体富营养化的主要原因。种植业排放的氮、磷污染物占太湖水体中总氮、总磷的比例分别达 29%, 19%<sup>[9-11]</sup>。太湖流域农业生产中的化肥施用量高,大大高于中国平均水平。在太湖流域的典型种植体系中,稻麦轮作的种植体系通过地表径流向周边水体排放的氮、磷每年高达  $5.52\sim 7.79 \text{ g/m}^2$ ,  $0.149\sim 0.286 \text{ g/m}^2$ <sup>[12-13]</sup>。

因此,对太湖流域水污染研究与治理,在控制工业点源污染达标排放的同时,还需要重点加强对农业面源污染的研究和治理,点源控制与面源治理相结合,才能持续、有效改进太湖流域的水体质量<sup>[14-15]</sup>。常州市属于太湖流域的核心地区,为研究常州市水稻生产中氮、磷排放现状及其迁移分布规律,找出削减对策,在常州市水稻主产区设立监测点,对水稻田的水分运动及氮、磷的迁移实行全程定位监测和研究,研究结果将为太湖流域水稻田氮、磷排放控制对策的制定提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 监测点土质特征

监测点位于常州市奔牛镇水稻田,土壤类型为水稻土,土壤基础肥力:土壤  $\text{pH}=6.2$ 、土壤有机质含量  $32.3 \text{ g/kg}$ 、总氮含量  $1.82 \text{ g/kg}$ 、总磷含量  $0.61 \text{ g/kg}$ 、碱解氮含量  $189 \text{ mg/kg}$ 、速效磷含量  $25.1 \text{ mg/kg}$ 、速效钾含量  $157 \text{ mg/kg}$ 。

1.2 监测小区建设

选择远离居民区及其他污染源的水稻田块建立 4 个监测小区，每个监测小区面积为 40 m<sup>2</sup>（长 8 m，宽 5 m）。监测小区示意图，如图 1 所示。

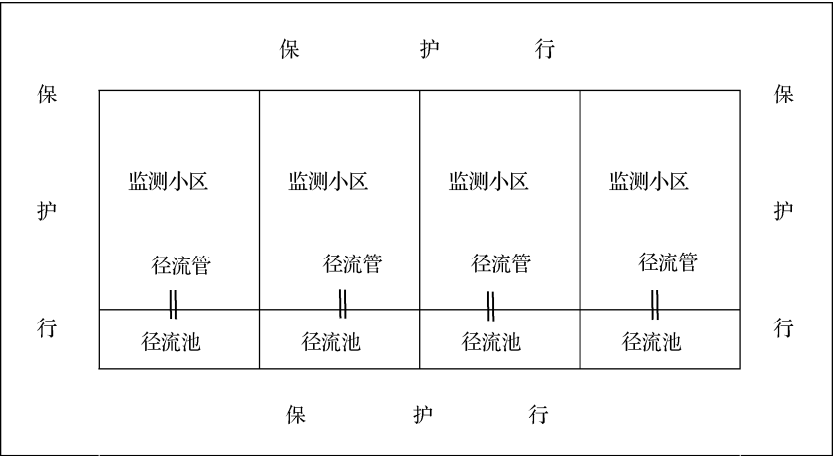


图 1 监测小区示意图  
Fig.1 The sketch map of monitoring site

每个监测小区四周建设水泥墙体结构，防止监测小区之间及与周边地块间发生串水现象，水泥墙体高 80 cm，地面以下埋设 30 cm，露出地面以上高度 50 cm。针对每个监测小区设置 1 个径流池，径流池长 5 m，宽、高均为 1 m。径流池用水泥建造，四面池壁及池底都进行防渗处理，防止径流水流失，在池壁上设置刻度线标记，以便观察径流水积存量。每个径流池表面铺设防护设施，用于防止雨水、异物、灰尘等落入径流池，也能防止人和动物等不慎跌落径流池。

1.3 稻田监测小区的管理

稻田监测时间为 2019 年 6 月 1 日—10 月 31 日，覆盖整个水稻大田生长期。监测小区于 6 月 10 日整地并灌水浸泡，6 月 20 日栽秧，10 月 30 日收割。稻田监测小区施肥管理依据当地生产常用技术方案，具体见表 1。

1.4 样品取样及测定

每次监测小区产生径流后，对径流量进行测定，然后采集径流水样，带回实验室测定总氮、总磷含量。径流水体积测定并取样后用抽水机抽干径流池内存水，并将池中泥土冲洗出来，晾干后测定总氮、总磷含量。同时，计量进入稻田监测小区的雨水、灌溉水水量及排水水量，采集雨水、灌溉、排水样品，对采集的所有样品，测定总氮和总磷的含量。水样中总氮含量的测定采用国标水质凯氏氮测定方法，总磷含量的测定采用国标钼酸铵分光光度法。土壤中总氮含量的测定采用农业部推荐的半微量凯氏法（NY/T 53—1987）、总磷含量的测定采用农业部推荐方法（NY/T 88—1988）。

表 1 稻田监测小区施肥投入的氮、磷量

Table 1 The quantities of nitrogen and phosphorus imported via fertilization in the paddy field

施肥品种	施肥量/kg	折合纯氮量/g	折合全磷量/g
碳酸氢铵	2.0	340	
45%NPK 复合肥	1.0	150	150
尿素	1.0	460	
合计		950	150

说明：施肥量相当于每平方米施氮 23.75 g，施磷 3.75 g。

## 2 结果与分析

### 2.1 监测小区通过雨水及灌溉水输入的氮、磷量

稻田监测小区通过雨水输入的氮、磷量见表 2。试验期间,每个监测小区接收的降雨量为  $28.90 \text{ m}^3$ ,其中 7 月降雨量最高,6 月与 8 月相当,9 月降雨量较小。不同月份降雨的氮质量浓度为  $1.62 \sim 1.83 \text{ mg/L}$ ,磷质量浓度为  $0.11 \sim 0.14 \text{ mg/L}$ ,月份之间差异不大。小区通过雨水输入的氮为  $49.41 \text{ g}$ ,折合每平方米输入量为  $1.235 3 \text{ g}$ 。其中 7 月最高,占  $42.72\%$ ;6 月与 8 月相当,分别占  $21.78\%$ , $22.97\%$ ;9 月仅占  $12.53\%$ 。小区通过雨水输入的磷为  $3.46 \text{ g}$ ,折合每平方米输入量为  $0.086 5 \text{ g}$ ,各月份磷输入量的占比与氮基本相当。

表 2 稻田监测小区通过雨水输入的氮、磷量

Table 2 The quantities of nitrogen and phosphorus imported via rainfall in the paddy field

月份	降雨量/ $\text{m}^3$	氮质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	磷质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	氮输入量/g	磷输入量/g
6	6.15	1.75	0.13	10.76	0.80
7	13.03	1.62	0.11	21.11	1.43
8	6.34	1.79	0.12	11.35	0.76
9	3.38	1.83	0.14	6.19	0.47
合计	28.90			49.41	3.46

监测小区通过灌溉水输入的氮、磷量见表 3。试验期间,监测小区通过灌溉水输入的氮为  $57.14 \text{ g}$ ,折合每平方米输入量为  $1.428 5 \text{ g}$ ;输入的磷为  $2.71 \text{ g}$ ,折合每平方米输入量为  $0.067 8 \text{ g}$ 。不同月份通过灌溉水输入氮、磷的比例,以 6 月为最高,分别占  $66.45\%$ , $66.05\%$ ;7 月、8 月、9 月占比较小,且不同月份之间差异不大。

通过表 2 和表 3 计算,试验期间,监测小区通过降雨和灌溉水输入的氮为  $106.55 \text{ g}$ ,折合每平方米输入量为  $2.663 8 \text{ g}$ ;输入的磷为  $6.17 \text{ g}$ ,折合每平方米输入量为  $0.154 3 \text{ g}$ 。不同月份输入氮的比例,以 6 月为最高,占  $45.73\%$ ;7 月其次,占  $26.53\%$ ;8 月和 9 月占比较小,分别为  $15.77\%$ 和  $11.97\%$ 。不同月份输入磷的比例,也以 6 月为最高,占  $41.98\%$ ;7 月其次,占  $29.01\%$ ;8 月和 9 月占比较小,分别为  $16.21\%$ 和  $12.80\%$ 。

表 3 稻田监测小区通过灌溉水输入的氮、磷量

Table 3 The quantities of nitrogen and phosphorus imported via irrigation in the paddy field

月份	灌溉水量/ $\text{m}^3$	氮质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	磷质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	氮输入量/g	磷输入量/g
6	8.13	4.67	0.22	37.97	1.79
7	1.55	4.62	0.23	7.16	0.36
8	1.22	4.47	0.20	5.45	0.24
9	1.35	4.86	0.24	6.56	0.32
合计	12.25			57.14	2.71

### 2.2 监测小区通过地表径流及排水流失的氮、磷量

监测小区通过径流水流失的氮、磷量见表 4。试验期间,监测小区通过径流水流失的氮为  $23.98 \text{ g}$ ,

折合每平方米流失量为 0.599 5 g; 流失的磷为 0.76 g, 折合每平方米流失量为0.019 0 g。7 月通过径流水流失的氮、磷量为最高, 分别占 43.49%, 44.74%; 6 月次之, 分别占 36.86%, 30.26%; 8 月占比最低, 分别为 19.65%, 25.00%。

监测小区通过排水流失的氮、磷量见表 5。试验期间, 监测小区通过排水流失的氮、磷量比通过径流水流失的氮、磷量要高得多。监测小区通过排水流失的氮高达 161.77 g, 折合每平方米流失量为 4.044 3 g; 流失的磷为 10.19 g, 折合每平方米流失量为 0.254 8 g。通过排水流失的氮、磷主要分布在 7 月, 分别占总流失量的 66.44%, 65.26%; 6 月和 8 月的占比较低, 都在 20%以下, 且这 2 个月份间差别不大。

表 4 稻田监测小区随径流水流失的氮、磷量

Table 4 The quantities of nitrogen and phosphorus lost via runoff water in the paddy field

月份	径流量/m <sup>3</sup>	氮质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	磷质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	氮流失量/g	磷流失量/g
6	0.43	20.56	0.53	8.84	0.23
7	0.69	15.11	0.49	10.43	0.34
8	0.36	13.08	0.52	4.71	0.19
合计	1.48			23.98	0.76

表 5 稻田监测小区随排水流失的氮、磷量

Table 5 The quantities of nitrogen and phosphorus lost via drainage water in the paddy field

月份	排水量/m <sup>3</sup>	氮质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	磷质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	氮流失量/g	磷流失量/g
6	1.17	25.47	1.62	29.80	1.90
7	4.26	25.23	1.56	107.48	6.65
8	1.03	23.78	1.59	24.49	1.64
合计	6.46			161.77	10.19

监测小区通过径流水泥沙流失的氮、磷量见表 6。试验期间, 监测小区通过径流水泥沙流失的氮很少, 仅 3.55 g、折合每平方米流失量仅为 0.088 8 g; 但通过径流水泥沙流失的磷为 2.75 g, 折合每平方米流失量为 0.068 8 g, 比通过径流水流失的磷还要多。监测小区通过径流水泥沙流失的氮、磷以 7 月为最多, 6 月次之, 8 月最少, 但不同月份间差异较小。

表 6 稻田监测小区随径流水泥沙流失的氮、磷量

Table 6 The quantities of nitrogen and phosphorus lost via runoff sediment in the paddy field

月份	泥沙量/g	氮质量分数/%	磷质量分数/%	氮流失量/g	磷流失量/g
6	606.65	0.20	0.15	1.21	0.91
7	828.81	0.18	0.14	1.49	1.16
8	565.32	0.15	0.12	0.85	0.68
合计	2 000.78			3.55	2.75

2.3 监测小区氮、磷表观排放量及氮、磷流失的方式和时间分布

稻田监测小区氮、磷输入量、流失量统计及表观排放量见表 7。监测小区通过雨水和灌溉水输入的氮、磷分别为 106.55, 6.17 g, 折合每平方米输入量分别为 2.663 8, 0.154 3 g; 通过径流水、排水和径流水泥沙流失的氮、磷分别为 189.30, 13.70 g, 折合每平方米流失量分别为 4.732 5, 0.342 5 g。

表观排放量 = 流失量 - 输入量，可视为肥料及土壤养分的流失量。根据该公式计算，监测小区的氮、磷表观排放量分别为 82.75，7.53 g，折合每平方米排放量分别为 2.068 7，0.188 2 g。

表 7 稻田监测小区氮、磷输入量、流失量统计及表观排放量

Table 7 The imports, losses and net exports of nitrogen and phosphorus in the paddy field

元素	输入量			流失量				表观排放量
	雨水	灌溉水	合计	径流水	排水	径流水泥沙	合计	
氮	49.41	57.14	106.55	23.98	161.77	3.55	189.30	82.75
磷	3.46	2.71	6.17	0.76	10.19	2.75	13.70	7.53

稻田监测小区氮、磷流失方式的分布，如图 2 所示。可以看出，以排水方式流失的氮、磷占绝对优势。通过排水方式流失的氮高达 161.77 g，占总流失量的 85.46%；通过径流水方式流失的氮只有 23.98 g，仅占总流失量的 12.67%；而通过径流水泥沙方式流失的氮很少，不到总流失量的 2%。在磷的流失量中，通过排水方式流失的磷为 10.19 g，占总流失量的 74.38%；通过径流水泥沙方式流失的占比约 20%，而通过径流水方式流失的占比仅有 5.55%。

稻田监测小区氮、磷流失的时间分布，如图 3 所示。试验期间，监测小区的氮、磷流失分布在 6 月、7 月、8 月，其中主要流失月是 7 月，该月流失的氮、磷占总流失量的 60%左右；其次在 6 月，该月流失的氮、磷占总流失量的 20%以上；8 月氮、磷流失量占比较低，不到 20%。但 6 月与 8 月之间的差异不大。

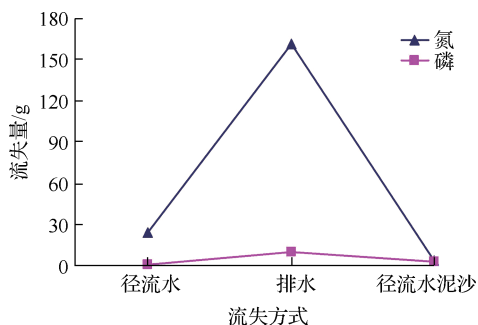


图 2 稻田监测小区氮、磷流失方式分布

Fig.2 The ways of nitrogen and phosphorus losses in the paddy field

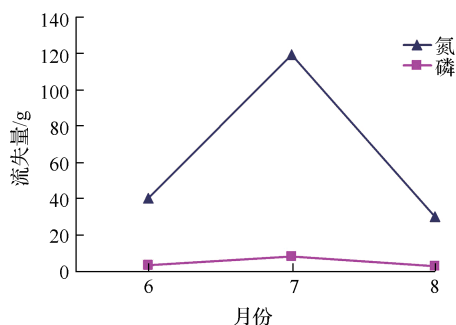


图 3 稻田监测小区氮、磷流失时间分布

Fig.3 The times of nitrogen and phosphorus losses in the paddy field

### 3 讨 论

氮、磷是农业生产过程中通过施肥大量输入农田的主要元素，但这些大量施入的营养元素在降雨等因素的作用下，会以地表径流、排水、泥沙等形式进入周围水体，甚至流入较远的湖泊、河流及近海水体，引起水体富营养化<sup>[16-18]</sup>。因此，对农田氮、磷随地表径流的流失规律进行研究，对农业生产中进行肥、水科学管理，减少农业面源污染物排放及保护水环境都具有非常重要的意义。

本研究通过对稻田氮、磷输入的监测表明，在试验期间（6 月—9 月），稻田通过降雨和灌溉水输入了一定量的氮、磷，输入的氮为 2.663 8 g/m<sup>2</sup>，输入的磷为 0.154 3 g/m<sup>2</sup>。在氮、磷的输入量方面，降雨与灌溉水差异不大，通过降雨输入的氮、磷占总输入量的 46.37%，56.08%，通过灌溉水输入的氮、磷占总输入量的 53.63%，43.92%。关于不同月份输入氮、磷的比例，以 6 月最高，占 40%以上；7 月其次，占 25%以上；8 月和 9 月占比较小，都在 10%~20%。不同月份氮、磷输入量的差异与降雨量及灌水量的差异有关，6 月氮、磷输入量高与灌水量高有关，6 月的稻田灌水量占试

验期总灌水量的 66.37%; 7 月氮、磷输入量较高与降雨量高有关, 7 月的降雨量占试验期总降雨量的 45.09%。

监测表明, 稻田通过径流水、排水和径流水泥沙流失的氮达到  $4.732\ 5\ \text{g}/\text{m}^2$ , 流失的磷为  $0.342\ 5\ \text{g}/\text{m}^2$ 。扣除通过降雨和灌溉水输入的氮、磷后, 试验期间稻田氮、磷表观排放量分别为  $2.068\ 7$ ,  $0.188\ 2\ \text{g}/\text{m}^2$ , 可视为肥料及土壤养分的流失量, 主要为肥料的流失量。本研究稻田监测小区施氮量为  $23.75\ \text{g}/\text{m}^2$ , 施磷量为  $3.75\ \text{g}/\text{m}^2$ 。因此, 稻田氮、磷通过地表径流的表观排放量分别占稻田施氮量的 8.71%、施磷量的 5.02%。缪杰杰等<sup>[19]</sup>研究表明, 在常规施肥水平下, 通过地表径流流失的氮占当季施氮量的 8.6%, 流失的磷占当季施磷量的 1.9%。其研究结果中氮的流失率与本研究相当, 但磷的流失率明显低于本研究的结果。

杨坤宇等<sup>[20]</sup>研究表明, 农田地表径流中氮、磷流失量取决于径流水的氮、磷浓度及径流量, 而降雨是影响径流水量的主要因素。关于稻田的氮、磷流失方式, 本研究表明, 以排水方式流失的氮、磷占绝对优势。通过排水方式流失的氮、磷分别占总流失量的 85.46%, 74.38%, 通过径流水方式流失氮、磷的占比分别仅有 12.67%, 5.55%。其原因有 2 个方面: ①稻田排水量大大高于径流量。试验期间, 监测小区排水量达  $6.46\ \text{m}^3$ , 而径流量为  $1.48\ \text{m}^3$ , 排水量是径流水量的 4.36 倍。②排水的氮、磷浓度也大大高于径流水。根据表 4 和表 5 计算, 排水的平均氮、磷质量浓度分别为 25.04, 1.58 mg/L, 而径流水的平均氮、磷质量浓度分别为 16.20, 0.51 mg/L, 排水的氮、磷质量浓度分别是径流水氮、磷质量浓度的 1.55 倍和 3.10 倍。因此, 在水稻生产中, 要减少氮、磷的流失量, 最有效的方法是减少排水量。

关于稻田的氮、磷流失时间分布, 研究表明, 试验期间氮、磷流失的主要月份是 7 月, 该月流失的氮、磷量分别占总流失量的 63.07%, 59.49%; 其次在 6 月, 该月流失的氮、磷占比分别为 21.05%, 22.19%。其原因与主要降雨量的时间分布有关, 与灌溉水的时间分布也有一定关系。从降雨量分布来说, 试验期间, 7 月的降雨量大大高于另 3 个月份, 7 月降雨量占试验期总降雨量的 45.09%, 导致 7 月排水量、径流量及径流水泥沙排放量都是最高的。6 月氮、磷流失量比 8 月高, 与 6 月灌水量高有关。虽然 6 月降雨量并不比 8 月高, 但 6 月径流量和排水量比 8 月高, 这是导致 6 月氮、磷流失量比 8 月高的原因。因此, 要减少稻田氮、磷随地表径流的流失量, 一方面要尽量减少排水量和径流量, 而排水量和径流量与降雨量和灌水量有关, 所以在下雨前特别是大雨前尽量不灌水或少灌水; 另一方面, 要尽量降低排水和径流水的氮、磷浓度, 这可以通过优化施肥种类、配比及施肥时间进行控制。

## 4 结 论

在试验期间 (6 月—9 月), 稻田监测小区输入氮  $2.663\ 8\ \text{g}/\text{m}^2$ , 输入磷  $0.154\ 3\ \text{g}/\text{m}^2$ , 降雨与灌溉水的输入量差异不大, 6 月的输入量最多, 占总输入量的 40% 以上。氮流失量  $4.732\ 5\ \text{g}/\text{m}^2$ , 磷流失量  $0.342\ 5\ \text{g}/\text{m}^2$ ; 通过排水流失的氮、磷占绝对优势, 分别占总流失量的 85.46%, 74.38%; 7 月为主要流失月份, 其氮、磷流失量分别占总流失量的 63.07%, 59.49%; 6 月流失的氮、磷占比分别为 21.05%, 22.19%。流失量减去输入量后, 氮的表观净排放量为  $2.068\ 7\ \text{g}/\text{m}^2$ , 占稻田施氮量的 8.71%; 磷的表观净排放量为  $0.188\ 2\ \text{g}/\text{m}^2$ , 占施磷量的 5.02%。

## 参考文献:

[1] 孔凡斌, 郭巧苓, 潘丹. 中国粮食作物的过量施肥程度评价及时空分异[J]. 经济地理, 2018, 38(10): 201-

- 210, 240.
- [2] WANG H L, HE P, SHEN C Y, et al. Effect of irrigation amount and fertilization on agriculture non-point source pollution in the paddy field[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(10): 10363-10373.
- [3] 闫鹏, 武雪萍, 华路, 等. 不同水氮用量对日光温室黄瓜季土壤硝态氮淋失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 645-653.
- [4] 王吉苹, 朱木兰, 李青松. 农田土壤氮素渗漏淋失研究进展[J]. *四川环境*, 2014, 33(6): 118-125.
- [5] ZHANG D, WANG H Y, PAN J T, et al. Nitrogen application rates need to be reduced for half of the rice paddy fields in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 265: 8-14.
- [6] 刘操, 马宁, 龚明波. 模拟降雨条件下北运河流域农田养分流失特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(3): 238-243.
- [7] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.
- [8] KOPÁČEK J, HEJZLAR J, POSCH M. Factors controlling the export of nitrogen from agricultural land in a large central European catchment during 1900—2010 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(12): 6400-6407.
- [9] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [10] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践: 总体思路与“4R”治理技术[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1): 1-8.
- [11] 闵炬, 孙海军, 陈贵, 等. 太湖地区集约化农田氮素减排增效技术实践[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(11): 2418-2426.
- [12] 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: 1-11.
- [13] LIU J, ZUO Q, ZHAI L M, et al. Phosphorus losses via surface runoff in rice-wheat cropping systems as impacted by rainfall regimes and fertilizer applications[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(3): 667-677.
- [14] 黄智华, 薛滨, 逢勇. 太湖水环境演变与流域经济发展关系及趋势[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(5): 627-631.
- [15] 徐恒省, 洪维民, 王亚超, 等. 太湖饮用水源地蓝藻水华预警监测体系的构建[J]. *环境监测管理与技术*, 2008, 20(1): 1-3, 50.
- [16] WERNER F, DE LA HAYE T R, SPIELVOGEL S, et al. Small-scale spatial distribution of phosphorus fractions in soils from silicate parent material with different degree of podzolization[J]. *Geoderma*, 2017, 302: 52-65.
- [17] 申荣艳, 樊思慰, 王永娃, 等. 玉米秸秆处理餐饮废水厌氧发酵初步研究[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2020, 32(5): 58-66.
- [18] 刘方谊, 夏颖, 黄敏, 等. 湖北省三峡库区不同种植模式下农田地表径流氮磷流失特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(6): 550-558.
- [19] 缪杰杰, 刘运峰, 胡宏祥, 等. 不同施肥模式对稻田氮磷流失及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 86-93.
- [20] 杨坤宇, 王美慧, 王毅, 等. 不同农艺管理措施下双季稻田氮磷径流流失特征及其主控因子研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8): 1723-1734.

(责任编辑:谭晓荷)