

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

王新霞¹, 左婷¹, 王肖君¹, 黄山¹, 王剑¹, 冷明珠², 倪吾钟¹

(1.浙江大学环境与资源学院, 浙江省农业资源与环境重点实验室, 杭州 310058;

2.浙江省安吉县农业农村局, 浙江 安吉 313300)

摘要: 稻—麦轮作是太湖流域典型的集约化粮食作物种植体系, 化肥用量大, 氮磷流失控制广为关注。采用大区田间对比试验, 研究了习惯施肥(FP)和优化控制施肥(CM)2种施肥模式对作物产量及氮磷肥料偏生产力的影响, 同时探讨了2种施肥模式下农田径流水中各形态氮、磷的特征和径流氮、磷损失的差异。结果表明: 优化控制施肥水稻和小麦地上部总生物量、籽粒产量、植株地上各部位养分(氮磷钾)含量及积累量与习惯施肥差异不显著($P>0.05$); 优化控制施肥水稻和小麦的氮肥偏生产力显著大于习惯施肥($P<0.05$), 磷肥偏生产力也相似。稻季和麦季优化控制施肥径流水中各形态氮、磷浓度小于习惯施肥, 甚至达到显著水平($P<0.05$); 稻季、麦季和完整轮作期优化控制施肥总氮、总磷的累积流失量显著小于习惯施肥($P<0.05$)。优化控制施肥模式不仅能保持水稻和小麦的籽粒产量, 而且能显著减少稻—麦轮作体系的氮磷流失, 可以在实际农业生产中加以推广和利用。

关键词: 水稻; 小麦; 施肥模式; 籽粒产量; 氮; 磷; 径流流失

中图分类号: S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0020-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2020.03.004

Comparative of Two Fertilization Modes on Crop Yields and Nitrogen/Phosphorus Runoff Losses Under Rice-wheat Rotation

WANG Xinxia¹, ZUO Ting¹, WANG Xiaojun¹, HUANG Shan¹,

WANG Jian¹, LENG Mingzhu², NI Wuzhong¹

(1.College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang Provincial Key

Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Zhejiang University, Hangzhou 310058;

2.Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Anji County, Zhejiang Province, Anji, Zhejiang 313300)

Abstract: Rice-wheat rotation is a typical intensive cropping system for food production with application of huge amounts of chemical fertilizers in the Tai Lake Basin and the control of nitrogen and phosphorus runoff losses is widely concerned. In this paper, the effects of two different fertilization modes including farmer practice (FP) and optimized control fertilization (CM) on crop yield and partial productivity of nitrogen and phosphorus fertilizers were investigated with a large-area field comparison experiment. Meanwhile, the characteristics of nitrogen and phosphorus forms in runoff water and the differences of nitrogen and phosphorus runoff losses were explored. The results showed that rice or wheat above-ground total biomass, grain yield, nutrient (nitrogen, phosphorus and potassium) contents and accumulation in plant ground parts of CM mode were not significantly ($P>0.05$) different from those of FP mode. The rice or wheat grain partial productivity of nitrogen fertilizer of CM mode was significantly ($P<0.05$) greater than that of FP mode, the same results was found for phosphate fertilizer. The concentrations of all nitrogen and phosphorus forms in runoff water of CM mode during rice and wheat growth seasons were lower than those of FP mode, even significantly ($P<0.05$). In the rice or wheat growth season and the whole rotation period, the cumulative losses of total nitrogen or total phosphorus of CM mode were significantly ($P<0.05$) less than that of FP mode. Optimized control fertilization mode could not only maintain the grain yield of rice and wheat, but also signifi-

收稿日期: 2019-09-24

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07101-012)

第一作者: 王新霞(1993—), 女, 硕士, 主要从事养分资源管理与农业面源污染控制研究。E-mail: 2392149668@qq.com

通信作者: 倪吾钟(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事新型肥料研制与养分资源管理、植物营养与环境胁迫诊断、植物营养与农产品安全、污染环境植物修复原理与技术等研究。E-mail: wzni@zju.edu.cn

cantly reduce the runoff losses of nitrogen and phosphorus in the rice-wheat rotation system, which could be promoted and utilized in actual agricultural production.

Keywords: rice; wheat; fertilization mode; grain yield; nitrogen; phosphorus; runoff loss

水稻—小麦轮作是太湖流域地区重要的种植模式之一,由于农业经济迅速发展,土地集约化生产程度较高,水稻小麦年均施氮量远远超过全国平均水平^[1]。过量氮肥会通过地表径流、淋失和挥发等方式损失,这些损失降低了氮肥利用率并导致环境水体的富营养化、土壤酸化、地下水硝酸盐污染和温室气体排放等环境问题^[2]。2016 年太湖流域跨界区域农业面源污染负荷总量较大,总氮、总磷入水负荷分别为 3 000,690 t,农田径流贡献率约为 20%~30%^[3]。苕溪流域是太湖流域一个重要源流,同时也是浙江八大水系之一,流经杭州和湖州等县市,太湖苕溪流域整体水质情况较差,总氮污染超标比例高,处于磷限制状态^[4]。苕溪流域农作物种植以水稻、小麦为主,水稻、小麦化肥污染负荷居整个苕溪流域前三位^[5]。长兴与安吉肥料污染负荷较高,主要是因为当地以种植业为主(种植业产值占农业总产值的 60%),化肥施用量最高^[6]。苕溪流域水质的恶化必然会影响太湖流域整体的环境质量,所以合理利用肥料资源以降低农业生产造成的环境负面影响势在必行。

关于控制农田氮磷流失的研究较多,国内外研究表明,农田土壤氮、磷流失程度受降雨情况、施肥状况、坡度、作物类型及覆盖度、土壤条件及人为管理措施等多种因素的综合影响,不同试验研究报道农田养分径流流失结果差异较大。陈秋会等^[7]研究表明,苕溪流域稻麦轮作系统下,有机种植模式与常规种植模式相比农田总氮流失负荷显著降低,降低幅度因年际降雨量不同而产生差异。现研究多集中在模拟试验及风险研究,忽略了环境因素对氮磷流失的综合影响,关于自然降雨条件下,减施氮磷和有机肥部分替代化肥相结合与习惯施肥 2 种施肥模式对氮磷径流流失的田块尺度对比研究还少见报道。本文以田块为尺度分析了安吉地区自然降雨条件下,稻麦轮作系统中 2 种施肥模式对作物产量和农田氮磷径流流失的影响,旨在验证减量施肥与有机肥部分替代化肥施肥模式对控制农田氮磷径流流失的效果,以期为农田

合理施肥和控制农业面源污染提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2017 年 6 月至 2018 年 6 月进行,地点位于浙江省湖州市安吉县梅溪镇(30°46′57″N,119°46′19″E)。安吉县属亚热带海洋性季风气候,年平均降水量 1 413.2 mm,年日照时间 1 732.6 h,年平均气温 15.6 ℃,光照充足、气候温和、雨量充沛、四季分明,适宜作物生长发育。试验前供试土壤为青紫泥田,基本理化性质为: pH 5.5,全氮、全磷、全钾、碱解氮含量分别为 0.99, 0.34, 8.35, 0.15 g/kg,有效磷、速效钾含量分别为 41.6, 67.2 mg/kg。供试水稻品种为“嘉花 1 号”,小麦品种为“扬麦 12”。供试肥料为尿素(含 N 46%)、钙镁磷肥(含 P₂O₅ 12%)、氯化钾(含 K₂O 60%)和商品有机肥(含 N 2.69%,P₂O₅ 2.24%,K₂O 1.03%)。

1.2 试验设计

试验采用田块尺度对比试验设计,选择一定面积的 9 块稻田,每块稻田一分为二,分别设置习惯施肥区 FP 和优化控制施肥区 CM,每个区块重复 9 次,各试验区块的面积为 0.167 hm²,相间排列。水稻和小麦养分投入量及详细施肥方案见表 1,其中优化控制施肥区稻麦氮肥施用总量的 20%用有机肥氮替代。水稻于 2017 年 7 月 6 日施用苗肥,7 月 16 日施用分蘖肥,8 月 5 日施用穗肥,8 月 24 日施用拔节肥;小麦 11 月 25 日施用基肥,2018 年 1 月 17 日施用分蘖肥,3 月 19 日施用拔节肥,除施肥外,其他田间管理与当地农户相同。

种植水稻时,在田埂出水口处安装径流收集箱,装置分为 2 个管道,淹水期自然降雨导致水面高于淹水层 2~3 cm 时将会沿上管道流出田外产生径流,晒田期与成熟期通过与地面相平的下管道流出。仪器内置水表,记录每次径流量。种植小麦时每田块设有独立灌排水沟,排水口处理入径流水收集桶,排水管道与排灌水沟面相平,弯管深入桶内,自然降雨产生径流直接由排水管道流出,管道后置水表,记录径流量。

表 1 水稻和小麦不同处理施肥方案 单位:kg/hm²

作物	处理	N			P ₂ O ₅			K ₂ O			分次施用方式
		化肥	有机肥	总量	化肥	有机肥	总量	化肥	有机肥	总量	
水稻	FP	300	0	300	150	0	150	120	0	120	氮肥苗肥、分蘖肥、拔节肥、穗肥比例:25%,30%,25%,20%;钾肥苗肥、分蘖肥、拔节肥、穗肥比例:30%,20%,20%,30%;磷肥和有机肥基肥一次施入
	CM	180	60	240	55	50	105	97	23	120	
小麦	FP	270	0	270	120	0	120	90	0	90	氮肥基肥、蘖肥、拔节肥比例:40%,20%,40%;钾肥基肥、拔节肥比例 70%,30%;磷肥、有机肥基肥一次施入
	CM	169	56	225	58	47	105	100	20	120	

1.3 测定项目与方法

试验前采集试验田土样,测定土壤基本理化性质,同时记录水表初始读数。试验过程中,每次降雨产流测径流量后及时采集径流水样,测定径流水总氮、铵态氮、硝态氮、总磷和无机磷浓度,同时读取水表读数,记录径流量。为保证测试结果的准确度,水样采集后冷藏(4℃以下)保存,从样品采集到测定完成不超过2天。

水稻和小麦收获期后各田块单独收割记产,采集水稻饱粒、瘪粒和秸秆样品,饱粒样品再分为糙米和稻壳两部分。采集小麦秸秆和籽粒样品,105℃杀青30min,75℃烘干至恒重后分别进行称重,用不锈钢磨样机磨碎植株样品过筛备用,测定氮磷钾含量,计算地上部生物量及氮磷钾积累量,计算氮肥偏生产力。

土壤基本理化性质采用常规方法测定。植物样品统一采用H₂SO₄—H₂O₂消煮,消煮待测液中氮、磷、钾分别采用靛酚蓝比色法、钒钼黄比色法和火焰光度法测定。径流总氮采用过硫酸钾—紫外分光光度法测定,硝

态氮采用紫外分光光度法测定,铵态氮采用靛酚蓝比色法测定;径流总磷采用过硫酸钾—钼锑抗比色法测定,无机态磷采用钼锑抗比色法测定^[8]。

1.4 数据处理及统计分析

采用Excel 2013和SPSS 22.0软件对数据进行处理,Duncan法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 水稻和小麦收获期植株地上部生物量及籽粒产量

水稻各部位生物量及籽粒产量见表2。习惯施肥区FP和优化控制施肥区CM植株地上部生物量及籽粒产量无显著差异。FP、CM处理地上部总生物量分别为16 271.9,16 122.2 kg/hm²,籽粒产量分别为8 109.8,8 066.7 kg/hm²。CM处理各部位生物量略低于FP处理,CM、FP处理秸秆生物量分别为7 197.3,7 287.2 kg/hm²,瘪粒生物量分别为858.2,874.9 kg/hm²,糙米生物量分别为6 684.1,6 711.6 kg/hm²,稻壳生物量分别为1 382.6,1 398.2 kg/hm²。

表 2 水稻地上部生物量及籽粒产量 单位:kg/hm²

处理	生物量					籽粒产量
	秸秆	瘪粒	糙米	稻壳	总量	
FP	7287.2±103.4a	874.9±43.6a	6711.6±118.3a	1398.2±45.8a	16271.9±194.6a	8109.8±136.6a
CM	7197.3±143.3a	858.2±38.3a	6684.1±78.9a	1382.6±37.9a	16122.2±149.2a	8066.7±76.2a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示处理间差异达到显著水平(P<0.05)。下同。

小麦各部位生物量及籽粒产量见表3。习惯施肥区FP和优化控制区CM地上部总生物量分别为9 809.0,9 797.9 kg/hm²,籽粒产量分别为4 703.0,4 699.8 kg/hm²,秸秆生物量分别为5 106.0,5 098.1 kg/hm²。CM处理秸秆和籽粒生物量略低于FP处理,无显著差异。

表 3 小麦地上部生物量及籽粒产量

单位:kg/hm²

处理	秸秆	籽粒产量	总量
FP	5106.0±173.7a	4703.0±72.6a	9809.0±179.9a
CM	5098.1±140.4a	4699.8±71.0a	9797.9±190.1a

2.2 水稻和小麦收获期地上部营养状况及氮磷肥料偏生产力

水稻地上部养分含量及积累量见表4。习惯施肥区FP地上部氮含量和氮积累量分别为6.0~15.9 g/kg和7.9~101.9 kg/hm²。优化控制施肥区CM地上部氮含量和氮积累量分别为6.1~15.6 g/kg和7.4~100.2 kg/hm²。CM处理秸秆和稻壳氮含量高于FP处理,瘪粒和糙米氮含量低于FP处理,地上各部位氮积累量和地上部积累总量均低于FP处理,差异不显著。

习惯施肥区FP地上部磷含量和磷积累量分别为0.6~4.2 g/kg和0.6~28.3 kg/hm²。优化控制施肥区CM地上部磷含量和磷积累量分别为0.6~4.1 g/kg

和0.5~27.2 kg/hm²。CM处理水稻植株秸秆、瘪粒和糙米磷含量和磷积累量均低于FP处理,稻壳磷含量和磷积累量高于FP处理,地上部磷积累总量低于FP处理,均无显著差异。

习惯施肥区FP地上部钾含量和钾积累量分别为2.5~17.4 g/kg和2.2~126.8 kg/hm²。优化控制施肥区CM地上部钾含量和钾积累量分别为2.7~18.0 g/kg和2.3~129.6 kg/hm²。CM处理水稻植株秸秆、瘪粒和糙米钾含量和钾积累量均高于FP处理,稻壳钾含量和钾积累量低于FP处理,地上部钾积累总量高于FP处理,均无显著差异。

小麦植株养分含量见表5。不同处理小麦地上部氮含量和氮积累量分别为8.6~18.1 g/kg和43.7~85.0 kg/hm²。CM处理小麦秸秆、籽粒氮含量和氮积累量均低于FP处理,地上部氮积累量平均为125.32 kg/hm²,相比于FP处理降低3.9%,差异不显著。

不同处理小麦地上部磷含量和磷积累量分别为0.7~4.6 g/kg和3.7~21.8 kg/hm²。CM处理小麦秸秆、籽粒磷含量和磷积累量均低于FP处理,其中秸秆磷积累量差异达到显著水平(P<0.05),地上部磷积累量为25.2 kg/hm²,相比于FP处理降低2.6%,差异不显著。

不同处理小麦地上部钾含量和钾积累量分别为 5.1~16.5 g/kg 和 24.2~83.9 kg/hm²。CM 处理小麦秸秆、籽粒钾含量和钾积累量略高于 FP 处理,地上部钾积累量为 108.9 kg/hm²,相比于 FP 处理增加 2.4%,差异不显著,说明优化控制施肥能促进稻麦对钾的吸收。

表 4 水稻地上部养分含量与积累量

处理	水稻地上部	氮含量/ (g·kg ⁻¹)	磷含量/ (g·kg ⁻¹)	钾含量/ (g·kg ⁻¹)	氮积累量/ (kg·hm ⁻²)	磷积累量/ (kg·hm ⁻²)	钾积累量/ (kg·hm ⁻²)
FP	秸秆	7.56±0.24a	2.10±0.21a	17.40±1.04a	53.50±4.05a	15.34±1.61a	126.78±8.12a
	瘪粒	9.42±0.14a	0.63±0.05a	2.47±0.29a	7.89±0.52a	0.55±0.05a	2.15±0.29a
	糙米	15.85±0.13a	4.22±0.34a	4.42±0.52a	101.87±3.54a	28.30±2.38a	29.69±3.63a
	稻壳	6.01±0.21a	1.90±0.20a	3.13±0.34a	8.67±0.62a	2.66±0.29a	4.39±0.54a
	总量	—	—	—	171.93±5.83a	46.85±2.85a	163.01±10.11a
CM	秸秆	7.72±0.17a	1.96±0.22a	18.01±1.05a	53.24±2.46a	14.12±1.74a	129.59±7.54a
	瘪粒	9.32±0.13a	0.59±0.05a	2.67±0.38a	7.39±0.37a	0.51±0.05a	2.28±0.29a
	糙米	15.58±0.29a	4.06±0.41a	4.67±0.59a	100.21±1.12a	27.15±2.51a	31.21±4.18a
	稻壳	6.11±0.31a	1.95±0.19a	3.06±0.32a	8.45±0.50a	2.70±0.32a	4.24±0.51a
	总量	—	—	—	169.28±3.05a	44.47±3.01a	167.32±8.07a

表 5 小麦地上部养分含量与积累量

处理	水稻地上部	氮含量/ (g·kg ⁻¹)	磷含量/ (g·kg ⁻¹)	钾含量/ (g·kg ⁻¹)	氮积累量/ (kg·hm ⁻²)	磷积累量/ (kg·hm ⁻²)	钾积累量/ (kg·hm ⁻²)
FP	秸秆	8.90±0.44a	0.80±0.08a	16.09±0.44a	45.43±2.40a	4.10±0.39a	82.13±1.88a
	籽粒	18.06±0.53a	4.63±0.51a	5.14±0.37a	84.95±2.38a	21.79±2.35a	24.15±1.61a
	总量	—	—	—	130.38±1.93a	25.89±2.40a	106.28±2.90a
CM	秸秆	8.57±0.59a	0.73±0.08a	16.46±0.68a	3.70±0.38a	15.34±1.61a	83.86±3.17a
	籽粒	17.37±0.88a	4.58±0.51a	5.32±0.46a	21.52±2.58a	15.34±1.61a	25.00±2.29a
	总量	—	—	—	125.32±5.80a	25.22±2.61a	108.85±4.75a

水稻和小麦氮磷肥料偏生产力见图 1。CM 处理水稻氮肥偏生产力为 33.61 kg/kg,磷肥偏生产力为 76.83 kg/kg,均显著高于 FP 处理($P<0.05$)。

CM 处理小麦氮肥偏生产力为 20.89 kg/kg,磷肥偏生产力为 44.76 kg/kg,均显著高于 FP 处理($P<0.05$)。

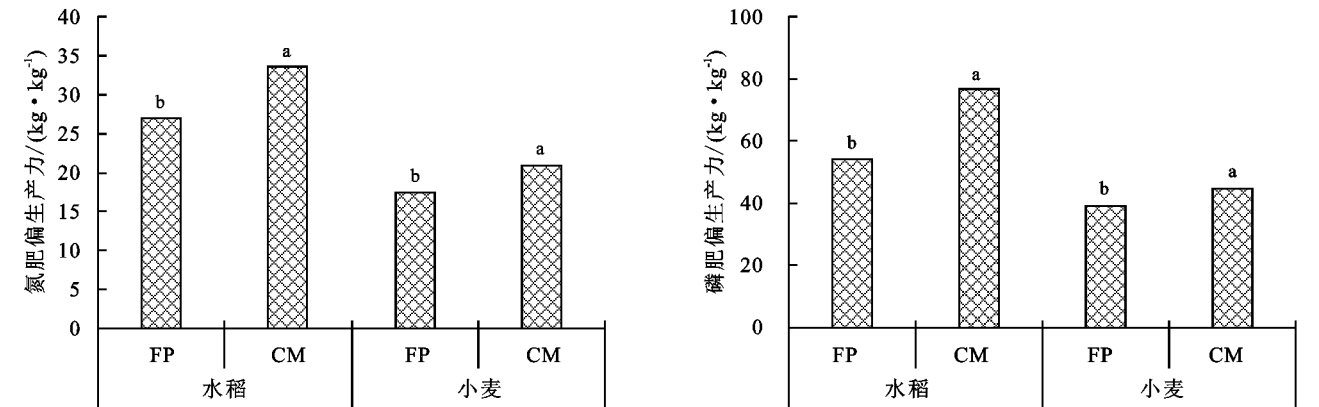


图 1 水稻和小麦肥料偏生产力

2.3 水稻和小麦生长季径流量

水稻和小麦生长季农田径流量见表 6。水稻生长季共发生 6 次产流事件,FP 处理累积径流量为 912.5 m³/hm²,CM 处理累积流失量为 907.2 m³/hm²。CM 处理每次产流事件径流量和累积径流量均与 FP 处理无显著差异。小麦生长季共发生 6 次产流事件,FP 处理累积流失量为 815.4 m³/hm²,CM 处理累积流失量为 806.3 m³/hm²,2018 年 3 月 26 日 FP 处理径流量要显著高于 CM 处理($P<0.05$),其

余产流事件 2 个示范区径流量及累积径流量均无显著差异。小麦生育期产流时间主要发生在 2 月以后,占到整个生育期径流量的 80%。

2.4 水稻和小麦生长季径流水氮磷浓度

水稻产流事件稻田径流水氮素浓度见表 7。7 月 7 日产流事件 CM 处理径流水各形态氮素浓度均显著低于 FP 处理($P<0.05$),此次产流事件距离苗肥施用时间只有 1 天,FP 处理稻田径流水铵态氮、有机氮和总氮平均浓度分别高达 16.59,11.52,30.97 mg/

L,CM 处理径流水铵态氮、有机氮和总氮平均浓度分别为 4.69,3.21,10.24 mg/L。CM 处理径流水氮素浓度显著低于 FP 处理($P<0.05$),主要是 CM 处理在苗肥仅施用了有机肥,未施用化学肥料,从而显著降低了铵态氮和有机氮浓度。7 月 26 日产流事件 CM 处理径流水硝态氮浓度显著低于 FP 处理,其他形态氮素无显著差异。8 月 7 日产流事件发生在穗

肥后 2 天,CM 处理径流水铵态氮浓度显著低于 FP 处理,有机氮和硝态氮无显著差异,FP 处理稻田径流水铵态氮和总氮平均浓度分别高达 19.72、33.18 mg/L,CM 处理径流水铵态氮和总氮平均浓度分别为 14.15、26.51 mg/L,最后 3 次产流事件距施肥时间较长,稻田径流水氮素浓度处于较低水平,二者径流水氮素浓度相差不大。

表 6 水稻和小麦生长季农田径流量 单位:m³/hm²

作物	处理	2017-07-07	2017-07-26	2017-08-07	2017-08-17	2017-09-26	2017-10-24	总量
水稻	FP	161.9±15a	55.1±8.7a	106.2±9.1a	181.5±11.1a	250.3±9.8a	157.5±10.2a	912.5±22.2a
	CM	168.8±13.4a	57.6±9.3a	101.9±7.9a	178.9±13.9a	251.5±8.8 a	148.5±8.6a	907.2±33.6a
作物	处理	2017-12-12	2018-01-03	2018-02-05	2018-03-26	2018-04-18	2018-05-01	总量
小麦	FP	49.5±6.9a	84.9±10.5a	138.8±10.1a	151.1±9.0a	216.1±8.8a	175±5.7a	815.4±23.5a
	CM	50.2±5.4a	90.1±7.7a	136±9.4a	134.5±11.8b	223.9±13.1a	171.6±8.5a	806.3±20.9a

表 7 稻田径流氮素浓度 单位:mg/L

日期(年-月-日)	处理	铵态氮	硝态氮	有机氮	总氮
2017-07-07	FP	16.59±0.84a	2.86±0.34a	11.52±1.24a	30.97±1.09a
	CM	4.69±0.66b	2.34±0.29b	3.21±0.48b	10.24±0.65b
2017-07-26	FP	1.67±0.35a	1.50±0.14a	2.50±0.55a	5.67±0.40a
	CM	1.46±0.45a	1.19±0.23b	2.66±0.56a	5.32±0.36a
2017-08-07	FP	19.72±1.49a	2.38±0.31a	11.08±1.50a	33.18±1.58a
	CM	14.15±0.76b	2.15±0.34a	10.20±1.65a	26.51±1.91b
2017-08-17	FP	0.15±0.01a	1.37±0.08a	2.20±0.11a	3.72±0.16a
	CM	0.13±0.02b	1.14±0.08b	1.88±0.12b	3.15±0.09b
2017-09-26	FP	0.12±0.01b	0.73±0.03a	2.45±0.17a	3.30±0.19a
	CM	0.14±0.01a	0.69±0.02b	1.97±0.17b	2.80±0.16b
2017-10-24	FP	0.16±0.02a	0.69±0.03a	1.11±0.11a	1.98±0.13a
	CM	0.14±0.02b	0.69±0.04a	1.01±0.13a	1.78±0.16b

小麦生长季麦田径流氮素浓度见表 8。6 次采样中,3 月 26 日径流水总氮、铵态氮和硝态氮浓度最高,其次是 12 月 12 日、1 月 3 日和 2 月 5 日。前 4 次产流事件麦田径流水总氮、铵态氮、硝态氮、有机氮浓度分别在 5.68~9.21,0.54~1.05,2.69~4.98,2.09~3.18 mg/L,最后 2 次产流事件各形态氮素浓度均较低。总体来说,CM 处理径流水总氮浓度低于 FP 处理,除第 1 次和最后 1 次产流事件外,其余均达到显著水平($P<0.05$)。前 3 次产流事件 CM 处理麦田径流水铵态氮浓度均显著低于 FP 处理($P<0.05$),后 3 次产流事件浓度相当。3 月 26 日产流事件 CM 处理径流水有机氮浓度显著低于 FP 处理($P<0.05$),其余产流事件两区有机氮浓度相当。CM 处理麦田径流水硝态氮浓度低于 FP 处理,除 3 月 26 日和 5 月 1 日产流事件外均达到显著水平($P<0.05$)。

由表 9 可知,7 月 7 日产流事件径流水磷素浓度相对较高,CM 处理稻田径流水各形态磷浓度显著低于 FP 处理($P<0.05$),其余产流事件两区径流水磷素浓度均较低。8 月 7 日 CM 处理稻田径流水有机

磷显著高于 FP 处理($P<0.05$)。小麦季麦田径流水磷素浓度较低,总磷平均浓度为 0.09~0.20 mg/L。径流水磷素浓度随水稻生育期变化幅度不大,且径流水有机磷浓度略高于无机磷。

2.5 水稻和小麦生长季径流氮磷累积流失量

农田径流氮磷累积流失量见表 10。对不同处理小麦、水稻及全年内测定的总氮、总磷累积流失量进行了测算研究。FP、CM 处理稻田总氮累积流失量分别为 1 0671.3、6 267.3 g/hm²,CM 处理与 FP 处理相比降低 40.9%,主要归功于 NH₄⁺-N 和有机氮流失量的大幅度下降,CM 处理 NH₄⁺-N 和有机氮累积流失量相比 FP 处理分别降低 51.3%和 31.7%。FP、CM 处理总磷流失量分别为 273.6、212.0 g/hm²,CM 处理与 FP 处理相比降低 22.5%。CM 处理稻田无机磷和有机磷累积流失量均显著低于 FP 处理($P<0.05$)。

FP、CM 处理麦田总氮累积流失量分别为 4 047.6、3 449.1 g/hm²,CM 处理与 FP 处理相比总氮累积流失量降低 14.8%,CM 处理麦田径流水各形态氮素累积流失量均显著低于 FP 处理($P<0.05$)。FP 处理

总磷流失量显著高于 CM 处理,分别为 109.9,100.0 g/hm²,CM 处理与 FP 处理相比总磷累积流失量降低 9.0%,CM 处理麦田无机磷和有机磷累积流失量均低于 FP 处理,显著不差异。

表 8 麦田径流水氮素浓度					单位:mg/L
日期(年-月-日)	处理	铵态氮	硝态氮	有机氮	总氮
2017-12-12	FP	1.04±0.15a	4.26±0.45a	2.30±0.41a	7.60±0.54a
	CM	0.79±0.09b	3.16±0.3b	2.09±0.29a	6.04±0.39a
2018-01-03	FP	0.65±0.07a	3.46±0.89a	2.47±0.39a	6.59±0.67a
	CM	0.54±0.07b	2.69±0.58b	2.45±0.21a	5.68±0.62b
2018-02-05	FP	0.80±0.10a	3.42±0.44a	2.38±0.56a	6.60±0.42a
	CM	0.68±0.06b	2.88±0.41b	2.22±0.46a	5.78±0.68b
2018-03-26	FP	1.05±0.08a	4.98±0.34a	3.18±0.45a	9.21±0.29a
	CM	0.95±0.14a	4.70±0.36a	2.65±0.42b	8.30±0.32b
2018-04-18	FP	0.35±0.04a	1.54±0.24a	0.61±0.14a	2.50±0.17a
	CM	0.33±0.05a	1.23±0.18b	0.63±0.13a	2.18±0.18b
2018-05-01	FP	0.33±0.06a	0.80±0.07a	0.38±0.08a	1.51±0.05a
	CM	0.29±0.05a	0.78±0.07a	0.37±0.07a	1.44±0.1a

表 9 农田径流水磷浓度								单位:mg/L
处理	日期 (年-月-日)	水稻			日期 (年-月-日)	小麦		
		无机磷	有机磷	总磷		无机磷	有机磷	总磷
FP	2017-07-07	0.43±0.06a	0.37±0.04a	0.80±0.05a	2017-12-12	0.11±0.02a	0.09±0.03a	0.20±0.02a
CM		0.29±0.04b	0.23±0.04b	0.52±0.04b		0.08±0.02b	0.10±0.02a	0.18±0.01b
FP	2017-07-26	0.10±0.02a	0.15±0.03a	0.25±0.03a	2018-01-03	0.06±0.01a	0.10±0.01a	0.16±0.01a
CM		0.08±0.01b	0.10±0.02b	0.18±0.02b		0.06±0.01a	0.10±0.01a	0.15±0.02a
FP	2017-08-07	0.07±0.01a	0.19±0.02a	0.27±0.03a	2018-02-05	0.05±0.01a	0.08±0.02a	0.13±0.02a
CM		0.06±0.01a	0.22±0.07b	0.28±0.06a		0.04±0.01a	0.07±0.02a	0.12±0.02a
FP	2017-08-17	0.07±0.01a	0.12±0.02a	0.19±0.02a	2018-03-26	0.06±0.01a	0.07±0.01a	0.13±0.02a
CM		0.05±0.01b	0.11±0.02a	0.16±0.01b		0.06±0.01a	0.07±0.01a	0.12±0.01a
FP	2017-09-26	0.07±0.01a	0.09±0.01a	0.17±0.01a	2018-04-18	0.05±0.01a	0.08±0.02a	0.14±0.02a
CM		0.05±0.01b	0.08±0.02a	0.14±0.02b		0.05±0.01a	0.08±0.02a	0.13±0.02a
FP	2017-10-24	0.05±0.01a	0.12±0.02a	0.17±0.01a	2018-05-01	0.04±0.01a	0.07±0.01a	0.10±0.01a
CM		0.05±0.01a	0.09±0.01b	0.14±0.01b		0.03±0.01b	0.06±0.01a	0.09±0.01b

表 10 农田径流氮磷累积流失量								单位:g/hm ²
作物	处理	氮素流失量				磷素流失量		
		NH ₄ ⁺ —N	NO ₃ ⁻ —N	有机氮	总氮	无机磷	有机磷	总磷
水稻	FP	4952.7±465.9a	1343.5±98.9a	4375.1±442.0a	10671.3±844.1a	122.1±11.9a	151.5±8.1a	273.6±13.9a
	CM	2396.8±184.8b	1153.6±44.6b	2716.9±254.0b	6267.3±300.2b	91.1±10.4b	120.9±15.8b	212.0±15.5b
小麦	FP	509.1±28.7a	2211.7±144.5a	1326.7±100.8a	4047.6±168.6a	45.6±3.6a	64.4±5.7a	109.9±7.8a
	CM	431.9±18.2b	1829.1±118.7b	1188.0±87.1b	3449.1±134.5b	39.6±3.1a	60.4±6.9a	100.0±8.7b
年际	FP	5461.8±446.1a	3555.2±180.9a	5701.9±440.3a	14718.9±739.2a	167.7±9.9a	215.9±7.9a	383.5±10.5a
	CM	2828.7±198.9b	2982.8±101.7b	3904.9±214.6b	9716.4±234.5b	130.7±13.0b	181.3±15.9b	312.0±19.2b

FP、CM 处理两季作物农田总氮累积流失量分别为 14 718.9,9 716.4 g/hm²,CM 处理与 FP 处理相比总氮累积流失量降低 34.0%。CM 处理两季作物农田径流水各形态氮素累积流失量均显著低于 FP 处理($P<0.05$)。FP、CM 处理总磷流失量分别为 383.5,312.0 g/hm²,CM 处理与 FP 处理相比总磷累积流失量降低 18.6%,CM 处理两季作物农田无机磷和有机磷累积流失量均显著低于 FP 处理($P<0.05$)。

由表 11 可知,稻田铵态氮、硝态氮、有机氮流失量分别占总氮流失量的 0.38~0.46,0.13~0.18,0.41~0.43,其中 CM 处理有效降低了铵态氮流失量占总氮流

失量的比例,稻田氮素流失以铵态氮和有机氮为主,CM 处理有效降低铵态氮流失量。稻田无机磷和有机磷流失量分别占总磷流失量的 0.43~0.45,0.55~0.57,由此可知,稻田磷素流失有机磷略高于无机磷,施用有机肥料会增加有机磷流失比例。

麦田铵态氮、硝态氮、有机氮流失量分别占总氮的 0.13,0.53~0.55,0.33~0.34。麦田氮素主要以硝态氮形式流失,CM 处理有效降低了麦田硝态氮含量。麦田无机磷和有机磷流失量分别占总磷的 0.40~0.41,0.59~0.60,由此可得,麦田磷素流失主要以有机磷为主,施用有机肥对各形态氮磷流失比例影响不大。

表 11 农田各形态氮磷流失量占比

项目	处理	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$	有机氮/TN	无机磷/总磷	有机磷/总磷
水稻	FP	0.46	0.13	0.41	0.45	0.55
	CM	0.38	0.18	0.43	0.43	0.57
小麦	FP	0.13	0.55	0.33	0.41	0.59
	CM	0.13	0.53	0.34	0.40	0.60

3 讨论

地上部生物量可直接反映作物生长状况,本试验可得优化控制施肥与习惯施肥相比,稻麦植株地上部生物量并无显著差异,优化控制施肥可保持作物的正常生长。作物产量是衡量施肥效果的重要参考^[9],哈丽哈什·依巴提等^[10]研究表明:在施氮量减少 10%~15%的情况下,有机无机配施可以保持作物产量。本试验可得优化控制施肥水稻和小麦籽粒产量分别为 8 066.7,4 699.8 kg/hm²,与习惯施肥相比并无显著差异,高于当地平均水平^[11]。这说明在当地习惯施肥基础上减氮 20%后用部分有机氮替代化肥氮施用可以保持水稻产量,在当地习惯施肥基础上减氮 16.7%后用部分有机氮替代化肥氮施用可以保持小麦产量。

植株各部位养分含量和积累量可以有效反映土壤供肥能力和作物生长情况,为确定适宜施肥量提供依据^[12]。本试验水稻生产优化控制区减氮 20%、减磷 30%和等钾施肥,植株地上各部位氮磷钾含量、积累量和地上部积累量均与习惯施肥差异不大。小麦生产优化控制区减氮 16.7%、减磷 12.5%、增钾 33%施肥,植株地上部氮磷钾含量、积累量(秸秆除外)和地上部积累量与习惯施肥差异不大,稻麦各部位氮磷钾含量均符合农业技术推广中心^[13]统计结果,说明优化控制施肥可以满足水稻和小麦的营养需求,保持其正常生长,这与杜加银等^[14]研究结果相似。

减少肥料施用量和有机肥部分替代化肥均可降低农田氮磷径流流失^[15-16]。径流流失是农田氮素流失最直观的一种表现形式,本试验中控制施肥与习惯施肥相比稻田总氮和总磷累积流失量分别降低 40.9%和 22.5%,麦田总氮和总磷累积流失量分别降低 14.8%和 9.0%,年际农田总氮和总磷累积流失量分别降低 34.0%和 18.6%,表明优化控制施肥可有效控制氮、磷径流流失,降低氮、磷流失风险,这与王桂苓等^[17]、斯圆丽等^[18]的研究结果相似。径流水氮磷浓度对氮磷流失量起到至关重要的作用^[19],总体来讲,本试验优化控制施肥区每次产流事件径流水氮磷浓度均低于习惯施肥,水稻季第 1 次和第 3 次产流事件发生在施肥 2 天内,优化控制施肥区氮磷浓度与习惯施肥相比下降幅度较大,防控效果更加明显。产流事件与施肥事件间隔较长时,不同示范区径流水中氮磷浓度差异较小。郑小龙等^[20]研究表明,施肥后 1

周是氮磷流失的高风险期,施肥时应多注意当地天气情况。施肥会在短期内显著影响农田各形态养分含量,影响径流氮磷流失比例^[21]。本试验得出,稻田氮素流失以铵态氮和有机氮为主,优化控制施肥会降低铵态氮流失比例,主要通过降低径流水铵态氮比例,从而有效控制氮素流失。麦田氮素流失主要以硝态氮为主,这与王静等^[22]研究结果相似。整体来讲,施用有机肥会增加有机氮和有机磷流失,在实际生产中要注意有机肥料的施用量。

4 结论

与习惯施肥比较,优化控制施肥水稻减氮 20%、减磷 30%,小麦减氮 16.7%、减磷 12.5%、增钾 33%,2 种施肥模式下,水稻和小麦的地上部总生物量、籽粒产量、植株的地上各部位氮磷钾含量及积累量均无显著差异。优化控制施肥下,水稻和小麦的氮肥、磷肥的偏生产力均显著大于习惯施肥。优化控制施肥可满足作物对养分的需求,保持作物正常生长和籽粒产量,有效提高氮磷肥的利用效率。优化控制施肥模式能较大幅度降低水稻、小麦生育期间径流水中氮、磷浓度和总氮、总磷的累积流失量,削减农田面源污染负荷。氮磷减施结合配施有机肥料的优化施肥模式可以在保持作物产量的基础上,有效控制农田氮磷径流流失,农学效应和生态环境效应明显。实际应用时,推荐的施肥方案为:水稻 N 240 kg/hm²、P₂O₅ 105 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm²,小麦 N 225 kg/hm²、P₂O₅ 105 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm²,并用有机肥氮替代 20%的化肥氮。

参考文献:

[1] 蒋孝松,刘彩玲,隋标,等.太湖流域稻麦轮作体系施肥现状分析与对策[J].中国农学通报,2012,28(15):15-18.

[2] Piirainen S, Domisch T, Moilanen M, et al. Long-term effects of ash fertilization on runoff water quality from drained peatland forests [J]. Forest Ecology and Management, 2013,287:53-66.

[3] 彭兆弟,李胜生,刘庄,等.太湖流域跨界区农业面源污染特征[J].生态与农村环境学报,2016,32(3):458-465.

[4] 郭茹,杨京平,梁新强,等.太湖苕溪流域氮磷的生物学阈值评估[J].环境科学学报,2013,33(10):2756-2765.

[5] 张忠明,周立军,宋明顺,等.太湖苕溪流域农业面源污染评价及对策[J].环境污染与防治,2012,34(3):105-109.

[6] 虎陈霞,周立军,黄祖庆,等.苕溪流域农业面源污染的综合评价[J].浙江农业学报,2011,23(6):1199-1202.

[7] 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.

[8] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.

[9] Maryam R, Sina F, Zahra L, et al. The effect of organic manure and chemical fertilizer on essential oil, chemical compositions and antioxidant activity of dill (*Anethumgraveolens*) in sole and intercropped with soybean (*Glycine max*) [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,199:18-26.

[10] 哈丽哈什·依巴提,张丽,陆强,等.猪粪堆肥与化肥不同配施方式对水稻产量和养分累积的影响[J].南京农业大学学报,2013,36(5):77-82.

[11] 浙江省统计局.《浙江省 2018 年统计年鉴》[Z].北京:中国统计出版社,2018.

[12] 陈红金.浙江省冬小麦籽粒和秸秆中氮磷钾养分含量变化[J].浙江农业科学,2015,56(9):1370-1372.

[13] 全国农业技术推广服务中心.中国有机肥料养分志[M].北京:中国农业出版社,1999.

[14] 杜加银,茹美,倪吾钟.减氮控磷钾施肥对水稻产量及养分积累的影响[J].植物营养与肥科学报,2013,19(3):523-533.

[15] 石丽红,纪雄辉,李洪顺,等.湖南双季稻田不同氮磷施用量的径流损失[J].中国农业气象,2010,31(4):551-557.

[16] 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.

[17] 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):6-10,29.

[18] 斯圆丽,朱少威,王季丰,等.施用包膜尿素对水稻生长和氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):48-53.

[19] 马晓焉,刘明,李忠佩.不同猪粪施用量下红壤水稻土表层水氮磷动态[J].土壤,2015,47(2):289-296.

[20] 郑小龙,吴家森,陈裴裴,等.不同施肥与生物质炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J].水土保持学报,2013,27(4):39-43,48.

[21] 吴俊,樊剑波,何园球,等.不同减量施肥条件下稻田田面水氮素动态变化及径流损失研究[J].生态环境学报,2012,21(9):1561-1566.

[22] 王静,郭熙盛,王允青,等.保护性耕作与平衡施肥对巢湖流域稻田氮素径流损失及水稻产量的影响研究[J].农业环境科学学报,2010,29(6):1164-1171.

(上接第 13 页)

[16] 张素,熊东红,郑学用,等.干热河谷不同活跃程度冲沟沟床土体抗冲性差异[J].水土保持学报,2015,29(3):13-17.

[17] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.

[18] Patheniades E. Erosion and deposition of cohesive soils[J]. Journal of the Hydraulics Division,1965,9(1):48-53.

[19] Elliot W J, Laflen J M. A Process-based RILL erosion model[J].Trasactions of the ASAE,1988,136(1):65-72.

[20] 肖海兵.黄土高原侵蚀与植被恢复驱动下土壤有机碳矿化与固定特征及其微生物作用机制[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2019.

[21] 王义霞.黄土丘陵区水力侵蚀和植被恢复对土壤有机碳输移及分布的影响[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2018.

[22] 刘雷,安韶山,黄华伟.应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区植被类型对土壤团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2013,33(20):6670-6680.

[23] 刘宝元,张科利,焦菊英.土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J].自然资源学报,1999,14(4):345-350.

[24] 王彬.东北典型薄层黑土区土壤可蚀性关键因子分析与土壤可蚀性计算[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2009.

[25] 柴军瑞,崔中兴.渗流对土体抗剪强度的影响[J].岩土工程技术,2001,12(1):12-13.

(上接第 19 页)

[19] 郑粉莉,高学田.坡面汇流汇沙与侵蚀—搬运—沉积过程[J].土壤学报,2004,41(1):134-139.

[20] Zheng F L, Huang C H, Norton L D. Vertical hydraulic gradient and run-on water and sediment effects on erosion processes and sediment regimes [J]. Soil Science Society of America Journal,2000,64(1):4-11.

[21] Fu X T, Zhang L P, Wang Y. Effect of slope length and rainfall intensity on runoff and erosion conversion from laboratory to field [J]. Water Resources,2019,46(4):530-541.

[22] Perreault L M, Yager E M, Aalto R. Effects of gradient, distance, curvature and aspect on steep burned and unburned hillslope soil erosion and deposition [J]. Earth Surface Processes and Landforms,2017,42(7):1033-1048.

[23] Fang H Y, Sun L Y, Tang Z H. Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: An experimental study using two loess soils [J]. Hydrological Processes,2015,29(11):2649-2658.

[24] 丁文峰,李勉,姚文艺,等.坡沟侵蚀产沙关系的模拟试验研究[J].土壤学报,2008,45(1):32-39.

[25] 王玲玲,姚文艺,王文龙,等.黄土丘陵沟壑区多尺度地貌单元输沙能力及水沙关系[J].农业工程学报,2015,31(24):120-126.