

紫色土减磷配施有机肥的磷肥效应与磷素动态变化

韩晓飞^{1,2}, 谢德体², 高明², 王子芳², 陈晨³, 祁乐²

(1. 重庆市农业技术推广总站, 重庆 401121; 2. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 3. 辽宁省发展与改革委员会农业资源区划研究所, 沈阳 110034)

摘要: 为探索长江上游稻油轮作系统减少农田磷素流失和有效提高磷肥利用率的最佳施肥模式, 降低磷对水体富营养化的影响, 采用长期田间定点试验并结合室内试验分析, 研究了化肥配施猪粪和水稻秸秆还田对紫色土磷肥效应及磷素迁移的影响。结果表明: 在常规作物施肥基础上配合施用有机肥, 适当减少化学磷肥施用量, 对作物产量没有显著的减产效应, 且能在一定程度上减少农田磷素损失, 提高磷肥利用率。水稻磷肥利用率总体表现为常规施磷量减 20% + 猪粪有机肥 (MDP) > 常规施磷量减 20% + 秸秆还田 (SDP) > 常规施肥 + 猪粪有机肥 (MP) > 常规施肥 + 秸秆还田 (SP) ≈ 优化施肥 (P), 各处理利用率在 20% ~ 25% 之间。油菜磷肥利用率总体表现为 SDP > MDP > MP > SP > P, 各处理利用率在 17% ~ 29% 之间。在水稻生长前一个月内, 田面水总磷含量随着施磷水平的增加而增加, 其中常规施肥 (P) 比不施磷肥 (P₀) 处理总磷含量高 4 倍左右。各处理中磷含量大小表现为 P > MP > SP > MDP > SDP > P₀, 配施有机肥可以提高稻田土壤对磷的吸附, 降低前期土壤磷向水体中释放, 配施秸秆比配施猪粪对减少土壤磷素流失效果更好, 磷肥施用后的 7~10 天内是控制稻田磷素流失的关键时期。油菜蕾苔期的土壤有效磷含量较苗期明显降低, 但在油菜开花期和收获后期, 土壤有效磷含量明显上升, 油菜生长花期以后是土壤有效磷淋失的主要时期。有机无机肥配施可以显著提高土壤有效磷含量。化学磷肥减量并配施有机肥是应对农业面源污染“控源节流”的较好措施。

关键词: 减磷配施有机肥; 磷素利用率; 磷素流失; 控源节流

中图分类号: S147; S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0207-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.06.035

Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer Combining Organic Fertilizers and Phosphorus Dynamics Changes in Purple Soil

HAN Xiaofei^{1,2}, XIE Deti², GAO Ming², WANG Zifang², CHEN Chen³, QI Le²

(1. Chongqing Agricultural Technology Extension Station, Chongqing 401121; 2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715; 3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Liaoning Province Development and Reform Commission, Shenyang 110034)

Abstract: In order to explore the optimum fertilization model for reducing the loss of phosphorus in farmland and improve the utilization ratio of phosphate fertilizer in the Yangtze River Basin, as well as reduce the threat to the water quality of the Yangtze River, a long-term field experiment and laboratory analysis were carried out to study the effect of phosphate fertilizer and phosphorus element transportation on chemical fertilizer application combined with pig manure and rice straw in purple soil. The results showed that the application of reduced chemical fertilizers combined with organic fertilizer did not significantly affect crop yield, and to some extent it could reduce agricultural phosphorus loss and improve phosphorus utilization. The utilization rate of phosphate fertilizer by rice showed that pig manure + 20% reduced conventional phosphorus fertilizer (MDP) > straw + 20% reduced conventional phosphorus fertilizer (SDP) > pig manure + conventional phosphorus fertilizer (MP) > straw + conventional phosphorus fertilizer (SP) ≈ optimal fertilizer (P), with the utilization rate of phosphate fertilizer between 20% to 25% in all treatments. The utilization rate of phosphate fertilizer of rape listed in the order of SDP > MDP > MP > SP > P, with the utilization rate of phosphate fertilizer between 17% to 29%. In the first month of rice growth period, total phosphorus content in field surface water increased with the increase of the levels of phosphorus fertilizer, and that in the

收稿日期: 2016-07-02

资助项目: 国家国际科技合作专项 (2013DFG92520); 国家科技重大专项 (2012ZX07104003); 西南大学中央高校基本科研业务专项 (XDJK2013D005)

第一作者: 韩晓飞 (1984—), 男, 博士, 主要从事土壤磷素迁移转化研究。E-mail: hanxiaofei55@126.com

通信作者: 高明 (1965—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤质量与环境研究。E-mail: gaoming@swu.edu.cn

conventional fertilization (P) treatment was 4 times higher than that in no P fertilizer (P0). The phosphorus content listed in the order of $P > MP > SP > MDP > SDP > P0$. Combined application of organic manure in paddy soil could improve the phosphorus fixation and reduce early phosphorus release to the water, and straw showed better effect than pig manure. The critical period of field control of phosphorus loss was 7 to 10 days after adding P fertilizer into the field. The available P content was much lower in bud stage of rape than in seedling stage, but it increase significantly in flowering stage and the later stage of rape. It was the main period of soil phosphorus leaching after flowering period of rape. The application of organic and inorganic fertilizer could significantly increase the content of available phosphorus in soil, and chemical phosphate fertilizer reduction and combined application of organic fertilizer is a good measure to deal with “control source and curb loss” of agricultural non-point source pollution.

Keywords: reduced phosphorus fertilizer combining organic fertilizers; phosphorus utilization ratio; phosphorus loss; control source and curb the loss

长江中上游流域水体富营养化问题日益突出,与其农业面源污染有着密切关系^[1]。稻油(麦)水旱轮作制度是该区域非常典型的种植模式,肥料的不恰当施用及稻田施肥初期排水都会给被排入的水体造成严重影响。作物秸秆是一种重要的可再生有机资源,其作为潜在的生物质能源是农业生态循环系统中重要物质基础,对维持循环系统的平衡具有重要作用^[2],秸秆还田作为一项重要的农业保护性耕作方式,在提高土壤肥力,保护农业资源环境方面具有良好的经济生态效益,已成为国内外学者研究热点^[3-4]。此外,随着畜禽养殖的快速发展和集约化迅速提高,畜禽粪便排泄物作为农业面源污染的重要组成部分受到越来越多人的关注。畜禽粪便作为面源污染物的同时,由于其含有丰富氮磷钾,将其作为有机肥料回田是其资源化利用的较好途径^[5-6]。因此,结合我国当前“一控两减三基本”的农业资源和环境对策,注重化肥的减量优化以及有机无机肥配合施用,深入研究基于秸秆、畜禽粪便等生物有机肥资源化利用的稻油水旱轮作体系农田土壤磷素迁移特征对建立良性农业生态循环系统具有重要的理论和现实生产实践意义。近些年来,部分研究学者针对秸秆还田和猪粪有机肥对作物生长和土壤性质方面做了相关研究^[7-10]。虽然秸秆还田对地表径流磷流失影响已有研究^[11-12],但是关于秸秆配施化学磷肥对农田土壤磷淋溶影响方面的研究相对较少^[13],并且已有的研究结果对秸秆还田和猪粪有机肥可以降低土壤氮淋失有一致意见^[14-16],但是在是否能降低土壤磷素淋失上却产生了分歧^[16-18]。此外,减量磷肥配施不同有机肥对水旱轮作原位稻田土壤磷素迁移以及对作物产量和磷肥利用率的影响还未有深入研究^[19]。基于此,本研究采用渗漏池长期定位监测试验,选择长江三峡库区常见的紫色土为研究对象,采用土—水—植并析的生态学方法,通过定性和定量跟踪分析秸秆和猪粪有机肥等不同施肥处理条件下稻油轮作系统农田土

壤磷肥效应和磷素的迁移特征。通过对不同施磷水平以及磷肥减量配施不同有机肥条件下水旱轮作稻季田面水磷素动态变化和油菜季不同层次土壤磷素动态变化进行原位定点监测,分析了秸秆还田和猪粪有机肥配施化肥条件下紫色土磷素动态变化特征,探讨了不同有机肥对土壤磷素迁移的影响,对农业生产上制定施磷消减优化方案、控制紫色土农田磷素流失产生的水体污染和评价秸秆还田、猪粪有机肥的生态效应具有重要的实践意义,同时也为控制农田面源污染和农业生产省本增效提供了科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验地点设在国家紫色土土壤肥力与肥料效益长期监测基地(以下称长期定位点),长期定位点位于重庆市北碚区西南大学试验农场,地处东经 $106^{\circ}26'$, 北纬 $30^{\circ}26'$,属紫色丘陵区,方山浅丘坳谷地形,海拔 266.3 m,年均气温 18.4°C ,年日照时数 1 276.7 h,全年降水 1 105.5 mm,为亚热带季风气候。试验土壤为侏罗纪沙溪庙组紫色泥页岩发育形成的紫色土,试验田种植方式为水稻—油菜轮作。本试验为定位试验,从 2010 年 10 月开始,为油菜(2010/2011)—水稻(2011)……油菜(2014/2015)—水稻(2015)轮作体系。本文主要讨论 2014 年和 2015 年的水稻和油菜试验研究结果。供试土壤基本理化性质为 pH 6.34,有机质含量 14.8 g/kg,全氮含量 1.4 g/kg,全磷含量 0.729 g/kg,全钾含量 14.9 g/kg,碱解氮含量 60.3 mg/kg,有效磷含量 41.2 mg/kg,速效钾含量 217.0 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设 6 个处理,3 次重复,分别为不施磷肥(P0)、优化施肥(P)、优化施肥+秸秆还田(SP)、优化施肥+猪粪有机肥(MP)、优化施磷量减 20%+秸秆还田(SDP)、优化施磷量减 20%+猪粪有机肥(MDP)。M 代表猪粪有机肥(猪粪经过一周左右腐

熟),其全氮、磷、钾含量分别为 1.34%,1.3%,0.8%,施用量每年 2 250 kg/hm²;S 代表稻草秸秆翻压还田,其 N、P₂O₅、K₂O 分别为 0.49%,0.18%,0.75%,施用量每年 7 500 kg/hm²。水稻品种为汕优 63 号,油菜品种为渝油 1 号。水稻优化施肥量按每公顷施纯 N、P₂O₅、K₂O 分别为 150,60,75 kg 进行。油菜优化施肥按每公顷施纯 N、P₂O₅、K₂O 分别为 195,60,75 kg 进行。水稻和油菜施用肥料种类一致:氮肥用尿素(含 N 46%),磷肥用过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),钾肥用硫酸钾(含 K₂O 50%)。水稻磷、钾肥作基肥一次性施用,氮肥基肥和追肥各占 50%。油菜磷肥作基肥一次性施入,氮、钾肥在基肥中施入 60%,剩余的 40%氮、钾肥作追肥施入。有机肥作为底肥与土壤混合均匀施用。

2014 年 5 月 7 日施用基肥,5 月 15 日进行水稻移栽,8 月 26 日水稻收获。磷钾肥作基肥一次性施用,氮肥基肥和追肥(蘖、穗肥)各占 50%。水稻整个生长期除成熟期排水烤田外,始终调节保持 5 cm 左右的田面水。分别于 6,7 月份进行 2 次稻田稻纵卷叶螟、稻飞虱、纹枯病、水稻螟虫等水稻常见病虫害的防治。2014 年 10 月 1 日进行油菜播种育苗,2014 年 11 月 10 日移栽,2015 年 4 月 25 日收获。油菜整个生育期除移栽时浇灌足量的定根水外,其余时间均未进行浇水灌溉,基肥于油菜苗移栽 3 天前施用(全部的磷肥和 60%的氮钾肥),剩余的 40%氮肥做追肥于抽苔初期和初花期分别施用 20%,剩余的 40%钾肥在抽苔期一次追施。在 2015 年 3 月进行 2 次菌核病的统一防治。

1.3 样品采集及测定方法

水稻季田面水的采集:施入基肥后第 1 周每天取 1 次田面水,之后每间隔 3,4,7 天各取 1 次田面水,从 2014 年 5 月 28 日开始每 10 天取 1 次田面水。用 100 ml 医用注射器采用“S”型抽取各处理小区 5 处田面水混合作为 1 个水样,注入 200 ml 小塑料瓶中。24 h 内测定完毕,测定指标为总磷 TP (total phosphorus)、总可溶性磷 TDP (total dissolve phosphorus)、可反应性无机磷 MRP (molybdate reaction phosphorus)。同时水稻生育期内降雨和灌溉的水样也同时采集,测试指标同田面水水样。在油菜不同生育时期分别采集其 0—20,20—40,40—60,60—80 cm 土层土壤样品。测定其土壤中全磷、有效磷等指标。

水样 TP 含量采用 H₂SO₄—HClO₄ 消解,钼锑抗比色法测定;TDP 含量采用先真空泵 0.45 μm 滤膜过滤,再 H₂SO₄—HClO₄ 消解,钼锑抗比色法测定;MRP 含量采用直接真空泵 0.45 μm 滤膜过滤,钼锑抗比色法测定;颗粒态磷 PP (particle phosphorus) = TP—TDP;可溶性有机磷 DOP (dissolve

organic phosphorus) = TDP—MRP^[20]。土壤 pH 采用电位法测定;土壤全磷含量采用碱熔—钼锑抗比色法测定;土壤有效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定;土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定;土壤碱解氮含量采用扩散法测定;土壤全钾、速效钾含量采用火焰光度计法测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定^[21-22]。植株地上部分营养体及籽粒经烘干粉碎后,采用硫酸—双氧水消化—钒钼黄比色法测定全磷含量。作物养分吸收量 = 籽粒产量 × 籽粒养分含量 + 秸秆产量 × 秸秆养分含量。磷肥利用率 = (施肥区磷素吸收量—不施磷区吸收量)/施磷量 × 100%。

1.4 数据处理及分析

数据处理采用 SPSS 19.0 进行统计分析,制图采用 Microsoft Excel 2007、SigmaPlot 12.0 处理,采用 LSD 法对各试验处理数据进行方差分析和显著性检验,显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对水稻、油菜生长和磷肥利用率的影响

2.1.1 优化及减磷配施有机肥对水稻地上部生物量及磷肥利用率的影响 从表 1 可以看出,各处理水稻稻谷产量在 7 174~8 715 kg/hm² 之间,各处理与不施磷肥(P₀)处理之间存在显著性差异,而优化施肥量磷减 20%+秸秆还田(SDP)处理的产量较低,但与其他处理之间差异不显著。各施肥处理稻谷产量表现为:优化施肥+猪粪有机肥(MP)>优化施肥量磷减 20%+猪粪有机肥(MDP)>优化施肥+秸秆还田(SP)>优化施肥(P)>优化施肥量磷减 20%+秸秆还田(SDP)>不施磷肥(P₀)。本试验研究中,优化施肥+猪粪有机肥(MP)稻谷产量最高 8 715 kg/hm²,相对于常规优化施肥高出了 3%。

从表 1 还可看出,不同施肥处理试验中磷肥利用率在 20%~25%之间,比已有研究报道的磷肥利用率 10%~20%略高^[23]。各处理以减磷配施猪粪、秸秆有机肥的磷肥利用率最高,这与施肥量和有机肥料通过影响土壤磷的吸附解吸进而提高磷素的活性有关。水稻对磷肥的利用率总体表现为:优化施肥量磷减 20%+猪粪有机肥(MDP)>优化施肥量磷减 20%+秸秆还田(SDP)>优化施肥+猪粪有机肥(MP)>优化施肥+秸秆还田(SP)≈优化施肥(P)。

2.1.2 优化及减磷配施有机肥对油菜地上部生物量及磷肥利用率的影响 从表 2 可以看出,各处理小区油菜籽粒实产量在 1 356~2 135 kg/hm² 之间。各处理与不施磷肥(P₀)处理之间存在显著性差异,而优化施肥量磷减 20%+秸秆还田(SDP)处理的油菜

产量与优化施肥(P),从整个轮作系统看,前茬减磷配施秸秆有机肥处理水稻产量较低,而后续油菜生物量保持了与单施化肥处理相当甚至略高的产量水平,可能是由于有机肥养分释放缓慢且肥效长的特点导致的。总体来看,优化施肥(P)油菜产量较其他有机无机肥配施低,且各处理差异不显著。各施肥处理油菜产量表现为:优化施肥+猪粪有机肥(MP)>优化施肥量磷减 20%+猪粪有机肥(MDP)>优化施肥+

表 1 水稻地上部分生物量及磷肥利用率

试验处理	糙米/(kg·hm ⁻²)	稻壳/(kg·hm ⁻²)	稻谷/(kg·hm ⁻²)	秸秆/(kg·hm ⁻²)	磷肥利用率/%
P0	5857±61b	1317±5a	7174±43b	6846±43a	—
SDP	7084±44a	1327±4a	8411±54a	7003±31a	23
MDP	7321±46a	1351±6a	8672±78a	6978±23a	25
P	7155±37a	1345±3a	8500±75a	6811±34a	20
SP	7301±66a	1336±5a	8637±68a	7020±41a	20
MP	7349±25a	1366±6a	8715±38a	7055±55a	21

注:不同字母表示同一指标在不同施用量下差异显著($p<0.05$)。下同。

表 2 油菜地上部分生物量及磷肥利用率

试验处理	籽粒/(kg·hm ⁻²)	荚壳/(kg·hm ⁻²)	茎秆/(kg·hm ⁻²)	磷肥利用率/%
P0	1356±13b	1131±3b	1655±11b	—
SDP	1990±21a	1913±7a	2135±5a	29
MDP	2012±14a	1897±10a	2234±7a	26
P	1900±16a	1766±9a	2346±24a	17
SP	2067±8a	1875±5a	2324±16a	21
MP	2135±17a	1976±7a	2297±15a	23

从表 2 还可以看出,不同施肥处理试验中磷肥利用率在 17%~29%。70%左右的磷肥没有被作物吸收利用或残留在土壤中或通过其他途径流失,既造成了资源的浪费又增加了农田环境面源污染。各处理均以减磷配施猪粪、秸秆有机肥的磷肥利用率为最高,这与施肥量和有机肥料通过影响土壤磷的吸附解吸进而提高磷素的活性有关。油菜对磷肥的利用率总体表现为:优化施肥量磷减 20%+秸秆还田(SDP)>优化施肥量磷减 20%+猪粪有机肥(MDP)>优化施肥+猪粪有机肥(MP)>优化施肥+秸秆还田(SP)>优化施肥(P)。

以上研究结果表明,在常规作物施肥基础上适当减少化学磷肥施用量,并配合施用有机肥,对作物产量并没有显著的减产效应,而且能在一定程度上减少农田磷素损失,提高磷素利用率。

2.2 稻、油水旱轮作紫色土农田磷素动态变化特征

2.2.1 不同施肥处理水稻田面水总磷动态变化 不同施肥处理水稻田面水 TP 含量动态变化见图 1。从图 1 可以看出,各处理的田面水 TP 含量变化趋势基本一致,基肥施入后一周内,水稻田面水总磷含量最高。不同施肥处理水稻田面水总磷含量大致表现为:在基肥施入水田后的 2 天内各处理 TP 含量达到最高峰,之后迅速降低。前一周各处理田面水 TP 含量在 2.34~0.11 mg/L 之间波动,之后田面水总磷含量呈缓慢下降最后趋于平稳接近空白的趋势,在缓慢

秸秆还田(SP)>优化施肥量磷减 20%+秸秆还田(SDP)>优化施肥(P)>不施磷肥(P0)。本试验中,优化施肥+猪粪有机肥(MP)油菜产量最高(2 135 kg/hm²),较常规优化施肥量高 5.7%。有机肥中含有丰富的有机质,无机肥料配合有机肥料可以起到增加土壤有机质、改良土壤的作用。有机无机肥配施能明显提高油菜、水稻等农作物的产量,且随着有机肥施使用年限的延长,土壤肥力不断提高,效果更加明显^[24]。

下降阶段,出现了磷含量的波动。

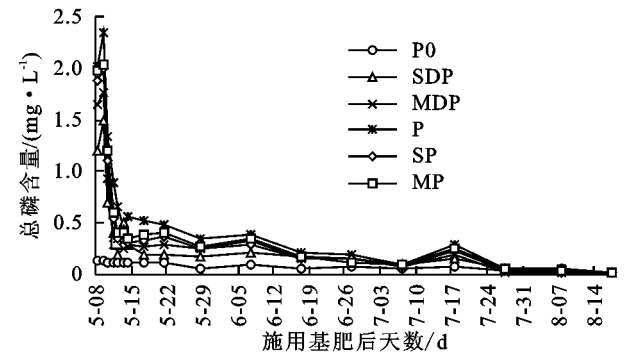


图 1 水稻田面水总磷含量的动态变化

出现以上现象的原因是首先施进水田中的水溶性磷肥在前两天未被土壤所吸附固定,大部分还留在田面水中,这就使得施用了过磷酸钙后的第 2 天各处理田面水磷素含量达到最高峰,之后随着磷养分的释放、土壤对磷素的吸附固定、水稻对磷的吸收以及磷素的淋溶下渗等途径,使得水稻田面水总磷含量开始逐步降低。在 7 月 17 日取样测定田面水含量时发现各处理磷含量有一个小的波峰(不施磷肥 P0 除外)。出现波峰的原因可能是因为当时温度高,田面水分蒸发较快,磷素被土壤颗粒态物质吸附富集在地表层,出现了磷素“浓缩富集”,然后随着降雨或者灌水被扰动使得附着在水田表面的磷素又重新溶解到田面水中,使磷素含量出现一个小波峰。从图 1 还可看出,在水稻生长前一个月内,田面水总磷含量随着施磷水平的增加而增加,优化施肥(P)比不施磷肥(P0)处理总磷含量高 4 倍左右。处理优化施肥+猪粪有机肥(MP)、优化施肥+秸秆还田(SP)低于处理优化施肥(P),且处理优化施肥+秸秆还田(SP)低于优化施肥+猪粪有机肥(MP),说明配施有机肥稻田土壤可以提高对磷的固定,降低前期磷素向水体中释放,且配

施秸秆比配施猪粪有机肥对减少土壤磷素流失效果更好。这可能是因为秸秆在腐解时,纤维和半纤维含量降低,难降解的木质素相对含量增加,导致秸秆呈疏松多孔结构,易于吸附土壤和秸秆所释放的磷素。各处理中磷素含量大小表现为优化施肥(P)>优化施肥+猪粪有机肥(MP)>优化施肥+秸秆还田(SP)>优化施肥量磷减 20%+猪粪有机肥(MDP)>优化施肥量磷减 20%+秸秆还田(SDP)>不施磷肥(P0)。1 个月后不同施肥处理田面水总磷含量基本一致,80 天后各处理总磷含量接近不施磷处理。

通过水稻田面水总磷含量的动态变化可以看出,磷肥施用后的 7~10 天内是控制稻田磷素流失的关键时期,在此时期内任何降雨径流或者人为扰动以及农田排水都可能使大量的磷素流失进入水环境之中,从而增加对水体污染的风险。因此,在此期间稻田田间水分的控制对磷素流失至关重要,应该尽量避免排

水和中耕等田间操作,同时也要避开暴雨期施磷,或者在减少磷肥施用基础上配合有机肥施用,这些都可以显著减少稻田磷素流失。

2.2.2 不同施肥处理水稻田面水各形态磷组分变化特征 从表 3 可以看出,水稻田面水总磷含量中主要以总可溶性磷为主,在施肥后第 3 天,总可溶性磷占总磷的比例在各处理中达到最大。出现这种现象的原因是磷肥全部作为基肥,施肥后初期可溶性磷肥溶解水中此时还未被土壤固定和水稻吸收。随后几日田面水总可溶性磷含量维持较低水平,是因为小雨落入水田产生击溅作用,此时田面水中磷主要以颗粒态磷表现出来,总可溶性磷含量随之下降。之后的几次灌水和降雨均有相同现象。值得注意的是,在水稻分蘖期追施氮肥后面水总可溶性磷含量出现一个明显的上升,可能是因为氮肥施用在一定程度上会影响磷素变化,具体原因有待进一步研究。

表 3 不同施肥处理水稻田面水总可溶性磷占总磷百分比动态变化特征 %

处理	处理日期(月一日)																
	5-8	5-9	5-10	5-11	5-12	5-13	5-14	5-17	5-21	5-28	6-7	6-17	6-27	7-7	7-17	7-27	8-7
P0	10.55	20.44	46.35	28.34	29.69	12.34	36.55	21.34	36.52	64.21	52.34	46.54	60.11	40.21	21.33	59.32	81.25
SDP	39.89	44.21	86.55	53.33	50.42	57.67	46.65	37.88	31.24	63.44	68.56	45.88	61.33	49.85	27.56	56.44	78.65
MDP	28.44	47.84	84.32	50.69	50.87	58.66	49.32	40.67	39.09	79.56	69.88	59.87	58.77	50.34	26.31	67.98	70.44
P	42.34	53.55	70.43	51.45	29.32	23.34	34.56	20.88	40.45	64.33	67.34	58.21	44.15	56.24	15.34	69.11	60.34
SP	35.34	48.90	89.44	58.75	48.56	51.24	50.11	49.88	41.49	59.23	58.99	51.32	50.33	51.22	26.22	65.22	80.57
MP	36.77	37.90	77.57	55.44	49.22	56.77	52.45	50.01	40.54	79.56	60.22	57.31	51.44	59.09	28.39	76.35	79.39

2.2.3 水稻田面水磷素动态变化模型表征 对磷肥施用后 10 天内各施肥处理田面水 TP 含量随时间变化趋势进行拟合,其最优方程为: $Y=C_0 \times e^{-kt}$,拟合结果达到了显著水平($P<0.05$)(表 4)。

表 4 各处理水稻田面水 TP 动态变化模型表征

处理	拟合方程	R^2	P
P0	—	—	—
SDP	$Y=2.10 \times e^{-0.477x}$	0.965	0.003
MDP	$Y=2.09 \times e^{-0.438x}$	0.954	0.004
P	$Y=3.28 \times e^{-0.490x}$	0.952	0.004
SP	$Y=2.43 \times e^{-0.456x}$	0.961	0.005
MP	$Y=3.01 \times e^{-0.354x}$	0.912	0.008

从拟合方程可以看出:(1)田面水 TP 含量在诸多因素的共同作用下随时间呈指数递减趋势;(2)从各处理的反应常数 C_0 看,有机无机肥配施处理要明显小于单施化肥的,说明有机肥配施可以有效降低田面水 TP 的初始反应浓度,其中优化施肥量磷减 20%+秸秆还田(SDP)和优化施肥量磷减 20%+猪粪有机肥(MDP)反应常数都较低,说明减量化学磷肥配施有机肥对控制稻田田面水磷素对水体的污染更加有效;(3)从衰减速率值可知,各处理衰减速率无明显规律,说明有机肥不是 k 值决定因子,是否其他因素在决定衰减速率方面起更为主导的作用还有待于做

进一步深入研究。

2.2.4 油菜季作物不同生育期土壤磷素动态变化 从图 2 可以看出,土壤有效磷在油菜苗期含量稍高,蕾苔期稍有降低,土壤有效磷含量在油菜花期达到相对较高的水平,之后收获期又略有下降。0—20,20—40,40—60,60—80 cm 土壤有效磷含量在油菜各生育期动态变化大致相同。相同时期各处理之间,土壤各层有效磷都以优化施肥配施有机肥为最高,不施磷肥处理最低,且优化施肥+猪粪有机肥(MP)也较优化施肥+秸秆还田(SP)处理高。不同施肥处理 0—20 cm 土层有效磷在油菜花期达到最大,收获期含量变化不大,总体上有升高趋势,而 20—40 cm 和 40—60 cm 土层有效磷含量在油菜不同生育期的变化较为明显,60—80 cm 土层有效磷在作物不同生育期变化不大。

由计算可得,各处理中不同土层有效磷含量均以 0—20 cm 为最高,20—40 cm 次之,相对于耕层有效磷平均含量降低幅度达到了 60.3%,40 cm 以下土层有效磷含量较低,且 40—60,60—80 cm 土层有效磷含量差异不明显。总体来看,亚表土层以下土层(40—80 cm)相对于亚表土层以上土层(0—40 cm)有效磷含量降低了约 50%以上,可知该研究区域土壤有效磷主要集中于表层和亚表层。油菜季不同生育期土壤磷素动态变化图可以看到在蕾苔期土壤有效

磷含量较苗期有一个明显的降低,产生这种现象的原因可能是当化学磷肥过磷酸钙施进土壤过后,易被土壤固定,且蕾苔期是油菜生长最快、需磷量最大的时期,故此时土壤中有效磷含量偏低。但在油菜开花期和收获后期,土壤有效磷含量有一个明显的上升,可能原因是此时间段环境温度增加,雨水增多,加快了

磷在土壤溶液中的扩散速度,从而提高了磷的有效性,同时,随着油菜生长根系更加发达,根系生长的同时会向周围土壤环境中分泌有机酸使土壤 pH 值降低,间接提高了土壤中磷的有效性,进而增加了此时期土壤有效磷含量。可见,油菜生长花期以后是土壤有效磷淋失的主要时期。

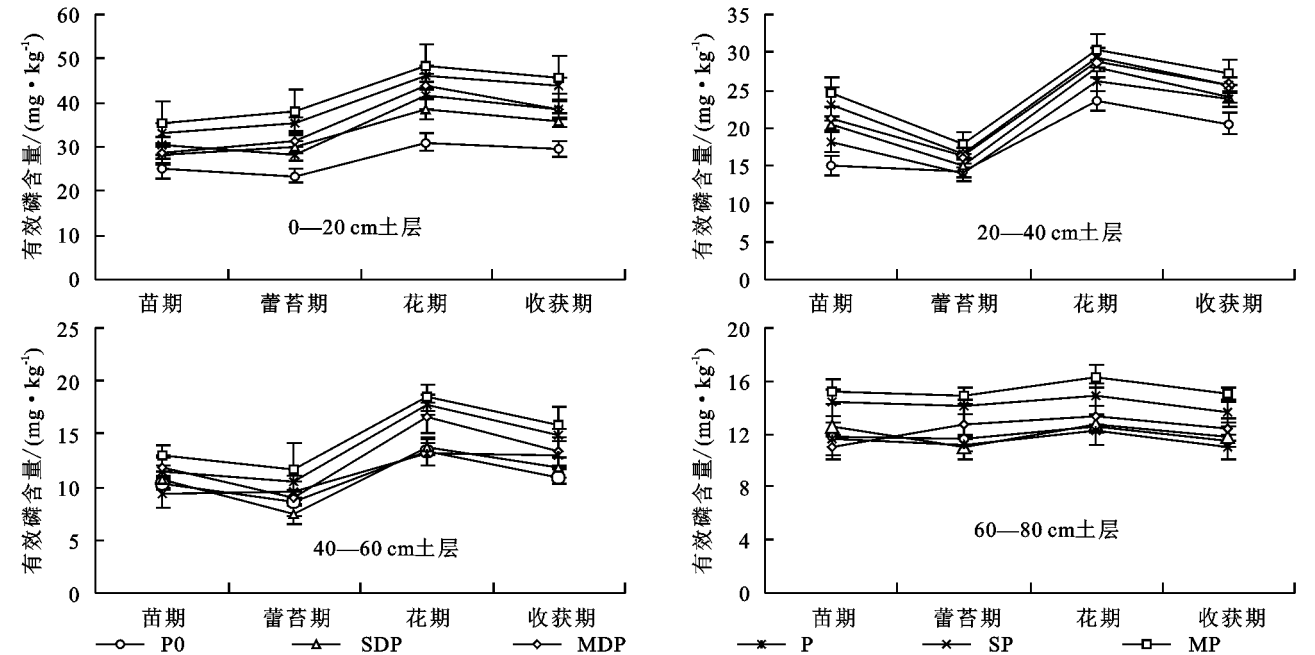


图 2 油菜生长期有效磷动态变化

3 讨论

稻—油水旱轮作主要分布在我国长江中下游紫色土区,高投入高产出是该地区稻—油两熟制农田的特点。农民按照传统施磷习惯往农田中施入大量磷肥,然而作物对当季磷肥的利用率仅仅为 10%~25%左右^[25],造成了三峡库区一部分农田土壤中磷素出现了盈余现象,多余的磷会随地表径流或淋溶进入地表水体和地下水体,对该区域水环境产生不利影响,加剧水体富营养化。因此根据土壤自身磷素水平,结合生产、生态、经济等综合目标,实施优化施肥措施具有重要的实践意义。

作物磷素营养来自土壤有效磷库和磷肥施用,所以在土壤自身有效磷含量增加的情况下,仍保持较高的施磷量,会造成磷肥资源的浪费和作物利用率的降低。近年来,部分学者针对一些集约化程度相对较高的农作体系进行了减量施肥的研究探索,在有效磷含量相对较高的土壤上研究减磷的可行性和对作物效应方面已有部分成果^[26-27]。再者,有机无机肥配施是我国农作物重要的施肥制度之一,化学肥料的肥效较快,而有机肥分解缓慢,虽然有机肥不能满足作物生长前期对养分的需求但是其具有长效性。因此,减少一定量化学肥料同时,配施有机肥可以在满足作物良好生长且获得较高产量的同时又节省了生产成本和

降低了农业面源污染^[28-29]。本研究在固定其他变量条件的情况下,研究化学磷肥不同施用量及减量磷肥配施不同有机肥对水稻和油菜生长和对磷肥利用率的影响,结果表明,有机无机肥配施在提高作物产量的同时也显著提高了作物对磷肥的利用,且以优化施肥量磷减 20%+猪粪有机肥(MDP)和优化施肥量磷减 20%+秸秆还田对磷肥利用率最高。

施肥和灌溉、降雨都是影响农田土壤磷素迁移的重要原因,虽然土壤自身对磷素有很强的固定能力,加之磷肥主要施与耕层土壤,所以含磷量较低的下层土壤被认为是吸持磷素的容量库,之前的研究认为磷素沿旱地土壤剖面向下淋溶迁移的可能性不大或者是不重要的^[15,30]。但是随着农业土壤耕作施肥年限日益增长,土地利用程度日益提高,磷素在土壤中大量积累,在降雨或者灌溉水量较大时就极易垂直向下发生淋溶^[31]。土壤磷素淋失受到诸如土壤性质、气候条件、施肥方式和施肥量、土地利用类型等因素的影响^[13,16,32]。本试验主要是在固定其他变量条件的情况下,研究化学磷肥不同施用量及减量磷肥配施不同有机肥对土壤磷素淋失的影响。结果表明同等条件下化肥减量可以降低不同土层深度土壤有效磷含量,从而抑制磷素的渗漏淋失。就试验处理优化施肥(P)和不施磷肥(P0)来看,同样没有配施有机肥,但

是不施磷肥(P0)处理土壤中磷含量低,降低了土壤中磷活性,故该处理磷淋失量就小,而处理优化施肥(P)增加了土壤中磷含量,提高了土壤中磷活性,因而增加了磷淋溶损失的风险。对于配施有机肥处理的优化施肥+猪粪有机肥(MP)和优化施肥+秸秆还田(SP)与优化施肥量磷减 20%+猪粪有机肥(MDP)和优化施肥量磷减 20%+秸秆还田(SDP)相比土壤中磷含量会更高些,因此土壤中磷素活性提高,下层土壤有效磷含量相对较高,同样增加磷肥用量会增加磷素淋失风险。刘之广等^[33]在太湖直湖港地区模拟条件下研究不同施肥处理对土壤磷素淋失的影响中也有同样结论。本研究结果表明,猪粪有机肥和秸秆还田对稻油水旱轮作体系土壤磷素淋溶具有一定的促进作用。这是因为稻田淹水以后氧化还原电位降低,配施有机肥后,土壤有机质增加,有机质在还原条件下进行嫌气分解产生多种有机酸,有机酸与磷酸根之间竞争吸附,从而会降低土壤仅仅对磷酸根的吸附,同时有机酸根离子与土壤中各种金属离子可以发生络合反应,可以在一定程度上屏蔽掉土壤磷的吸附位点,这样一来磷素在土壤中的迁移就会变得相对容易。同时有机肥中磷含量也较高,Fe、Al 含量较低,可降低土壤的固磷能力^[34]。因此促进了磷素在土壤剖面中的垂直迁移。而李学平等^[18]在模拟条件下研究农田磷素渗漏淋失特征时发现,无机化肥配施秸秆对磷素渗漏淋失起抑制作用;胡宏祥等^[16]在秸秆还田配施化肥对黄褐土磷素淋失的影响研究中发现,秸秆还田对土壤磷素的淋溶具有一定的促进作用。产生分歧的原因是否在于所用土壤差异或者是因为室内模拟与田间试验差异,这些还需要进一步研究验证。

4 结论

(1)优化及减磷配施有机肥对水稻、油菜生长发育和磷肥利用率的影响研究表明,在常规作物施肥基础上适当减少化学磷肥施用量,并配合施用有机肥,对作物产量并没有显著的减产效应,而且能在一定程度上减少农田磷素损失提高磷素利用率。水稻对磷肥的利用率总体表现为:MDP>SDP>MP>SP≈P,磷肥利用率在 20%~25%之间;油菜对磷肥的利用率总体表现为:SDP>MDP>MP>SP>P,磷肥利用率在 17%~29%之间。

(2)不同施肥处理对水稻田面水 TP 含量动态变化研究表明,在水稻生长前一个月内,田面水总磷含量随着施磷水平的增加而增加,优化施肥(P)比不施磷肥(P0)处理总磷含量高 4 倍左右。一个月后不同施肥处理田面水总磷含量基本一致,80 天后各处理总磷含量接近不施磷处理。

(3)从油菜不同生育期土壤磷素动态变化研究结果可以看出,蕾苔期土壤有效磷较苗期有一个明显的降低,但在油菜开花期和收获后期,土壤有效磷有一个明显的上升,油菜生长花期以后是土壤有效磷淋失的主要时期。

参考文献:

- [1] 马经安,李红清. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况[J]. 长江流域资源与环境,2002,11(6):575-578.
- [2] 赵金花,张丛志,张佳宝. 激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响[J]. 土壤学报,2016,53(2):438-449.
- [3] 武际,郭熙盛,鲁剑巍,等. 连续秸秆覆盖对土壤无机氮供应特征和作物产量的影响[J]. 中国农业科学,2011,45(9):1741-1749.
- [4] 赵士诚,曹彩云,李科江,等. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(6):1441-1449.
- [5] 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.
- [6] Aronsson K A, Ekelund N G A. Biological effects of wood ash application to forest and aquatic ecosystems [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33 (5): 1595-1605.
- [7] 汪金舫,刘月娟,李本银. 秸秆还田对砂姜黑土理化性质与锰、锌、铜有效性的影响[J]. 中国生态农业学报,2006,14(3):49-51.
- [8] 邹晓霞,陕红,陈磊,等. 秸秆和猪粪施用对樱桃萝卜的效果比较及对土壤性状的影响[J]. 中国农学通报,2009,25(5):165-172.
- [9] 武际,郭熙盛,王允青,等. 麦稻轮作下耕作模式对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(3):87-93.
- [10] Beare M H, Wilson P E, Fraser P M, et al. Management effects on barley straw decomposition, nitrogen release, and crop production[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(3):848-856.
- [11] 唐涛,郝明德,单凤霞. 人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J]. 水土保持研究,2008,15(1):9-11.
- [12] 王静,郭熙盛,王允青. 自然降雨条件下秸秆还田对巢湖流域旱地氮磷流失的影响[J]. 中国生态农业学报,2010,18(3):492-495.
- [13] Wand J, Wang D, Zhang G, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention [J]. Agricultural Water Management, 2014, 141(7):66-73.
- [14] 廖义善,卓慕宁,李定强,等. 适当化肥配施有机肥减少稻田氮磷损失及提高产量[J]. 农业工程学报,2013,29(增刊 1):210-217.