

华玲玲, 王洪媛, 翟丽梅, 等. 玉米秸秆生物炭对稻油轮作农田磷流失风险的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1376–1383.

HUA Ling-ling, WANG Hong-yuan, ZHAI Li-mei, et al. Effects of maize stover biochar on phosphorus losses in rice–oilseed rape cropping system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1376–1383.

玉米秸秆生物炭对稻油轮作农田磷流失风险的影响

华玲玲¹, 王洪媛¹, 翟丽梅^{1*}, 付 斌², 盖霞普¹, 胡万里²

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部面源污染控制重点实验室, 北京 100081; 2. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205)

摘 要:以云南大理洱海流域典型稻油轮作模式为研究对象,通过2年田间定位试验,研究生物炭(玉米秸秆制备)、玉米秸秆与化肥配施对我国稻油轮作模式农田磷流失风险的影响。田间小区试验包括常规施用化肥(NPK)、生物炭与化肥配施(NPK+C)、生物炭与化肥减半配施(1/2NPK+C)、玉米秸秆与化肥配施(NPK+S)四个处理,通过比较不同处理间土壤有效磷含量、作物产量、吸磷量和水稻生长期间土壤有效磷、田面水总磷、可溶性总磷的动态变化特征,分析施用玉米秸秆生物炭和直接施用玉米秸秆对土壤、作物和磷流失风险的影响。结果表明,与NPK处理相比,增施生物炭和玉米秸秆,可显著提高水稻和油菜产量,但对水稻季田面水磷浓度无显著影响;施用生物炭条件下减施化肥,短期内未造成水稻和油菜减产,却降低了水稻整个生育期内田面水总磷(TP)和可溶性总磷(TDP)浓度;各处理水稻季田面水TP和TDP浓度在栽秧后第1d内达到峰值,4~5d内浓度迅速降低,7d之后浓度趋于稳定。在此过程中,田面水TP下降64.2%~79.1%,TDP下降63.1%~82.4%。上述研究结果表明,为降低稻油轮作农田磷流失风险,可以考虑在水稻季施用生物炭的条件下减施化肥磷,并且在水稻栽秧后7d内控制田面水外流。

关键词:生物炭;玉米秸秆;稻油轮作;田面水;磷

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2016)07-1376-08 doi:10.11654/jaes.2016.07.021

Effects of maize stover biochar on phosphorus losses in rice–oilseed rape cropping system

HUA Ling-ling¹, WANG Hong-yuan¹, ZHAI Li-mei^{1*}, FU Bin², GAI Xia-pu¹, HU Wan-li²

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Agricultural Resources & Environment Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

Abstract: A two-year (2013–2015) plot experiment was conducted to investigate the effect of biochar (made from maize stover) on phosphorus (P) losses in rice–oilseed rape cropping system in Dali Erhai Lake Basin in Dali, Yunnan Province, China. The experiment consisted of four treatments: conventional fertilizer (NPK), conventional fertilizer plus biochar (NPK+C), biochar in replacement of half of the conventional fertilizer (1/2NPK+C), and conventional fertilizer plus maize stover (NPK+S). Soil available P content, crop yields and P uptake as well as total P (TP) and dissolved P (TDP) in paddy field water were determined for all treatments throughout the study. Compared with the conventional fertilizer treatment, applications of biochar or maize stover significantly increased rice and rape yields, but did not significantly affect P concentrations in paddy field water. The treatment with biochar replacing half of the conventional fertilizer significantly decreased TP and TDP concentrations in paddy field water without reducing rice and rape yields. During the first week of transplanting rice, the concentrations of TP and TDP in paddy field water peaked on the first day, then decreased rapidly, and ultimately became stable. They decreased by 64.2% to 79.1% and 63.1% to 82.4% at the end of the first week. We conclude that replacing P fertilizer rate with biochar can reduce P loss risks via paddy field water without negatively affecting crop yields, and that the first week of transplanting rice is a critical period for controlling the risks of field water P losses.

Keywords: biochar; maize stover; rice–rape cropping system; paddy field water; phosphorus

收稿日期: 2016-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41203072); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201303095)

作者简介: 华玲玲(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事农田面源污染防治方面研究。E-mail: hualing0329@163.com

* 通信作者: 翟丽梅 E-mail: zhailimei@caas.cn

磷既是作物生长必需的营养元素之一^[1],又是湖泊水体富营养化的限制因子^[2]。国内外大量研究表明,农田磷流失已成为引起农业非点源污染的重要原因之一^[3-5]。水旱轮作系统是我国主要的作物生产系统之一^[6],有研究表明,农田地表径流总磷流失主要发生在降雨集中的6—8月,即水稻种植季^[7-8],因此,正确掌握水旱轮作模式下农田磷的流失风险(尤其水稻季)对防控农业非点源污染具有重要意义。

目前,秸秆制备成生物炭还田在改善土壤环境效应方面的研究受到越来越多的关注^[9-10]。Strelko等^[11]研究指出,生物炭可通过对磷等营养元素的强烈吸附将它们固定在土壤的表层,提高作物利用率,减少损失量。盖霞普等^[12]通过室内培养试验研究表明,土壤中添加玉米秸秆生物炭能有效降低土壤无机氮素的淋失风险。除制备成生物炭外,大量研究表明,秸秆直接还田不仅能提高土壤肥力,改善作物生长品质^[13-15],还可降低农田磷流失^[16]。郭智等^[17]对稻麦轮作体系研究指出,秸秆还田和还田减肥两种措施分别能够有效减少稻季磷径流流失总量的17.55%和22.69%。其他研究结果也表明,秸秆还田和秸秆还田后翻耕均可显著降低稻油(稻麦)两熟制农田周年地表径流磷流失率^[18]。目前,虽然已有关于施用玉米秸秆对农田氮磷流失影响的研究,但对于秸秆制备成生物炭还田后对氮磷流失风险的研究还鲜有报道,尤其是对富营养化发生的限制因子——磷素。

近年来,作为我国重点水源保护地之一的洱海流域,因发展节水农业,部分水田改为旱地玉米种植模式,流域秸秆资源日渐丰富,本文以云南大理洱海流域典型稻油轮作模式为研究对象,通过研究玉米秸秆制备成生物炭还田后对土壤有效磷、作物产量及稻季田面水磷的影响特征,评价生物炭施用后对稻油轮作模式农田磷流失风险的影响,为流域内玉米秸秆的多途径利用以及降低稻油轮作农田磷流失措施的筛选提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于云南省大理州洱源县凤羽镇白米

村(25°58′51.4″N,99°57′34.7″E,海拔2099 m),属洱海上游凤羽河小流域,是洱海的主要水源地。流域属于北亚热带高原季风气候,四季温差小,年平均气温13.9℃,年均降雨量745 mm,冬春干旱,夏秋多雨,雨旱两季分明,降雨主要集中在6—10月。试验时间为2013年9月至2015年10月,轮作模式为稻油轮作。供试土壤类型为水稻土,土壤质地为砂壤土,试验农田区域地形为平坝。近几年,流域内玉米为主要旱作作物,秸秆资源丰富,为本研究玉米秸秆的主要来源。试验前耕作层(0~20 cm)土壤理化性质见表1。

1.2 试验设计

试验共设4个处理:常规施用化肥(NPK,当地农民习惯性施肥);常规施用化肥+生物炭(NPK+C);50%常规施用化肥量+生物炭(1/2NPK+C);常规施用化肥+玉米秸秆(NPK+S)。水稻、油菜季各处理具体施肥情况见表2。玉米秸秆的化学组成为:有机质94.53%,全氮0.83%,全磷0.08%,全钾1.88%。化肥品种分别为尿素(N≥46%)、过磷酸钙(P₂O₅≥16%)、硫酸钾(K₂O≥50%)。油菜季,生物炭、玉米秸秆随基肥一次性施入,30%的氮肥、70%磷肥、70%钾肥作为基肥施用,30%氮肥在莲座期第一次追施,40%的氮肥、30%磷肥、30%钾肥在开花期第二次追施。水稻季,将生物炭、玉米秸秆随基肥一次性施入,70%的氮肥、70%的钾肥和100%的磷肥作为基肥施用,30%的氮肥、30%的钾肥作为穗肥追施,追肥时间为栽秧后的第7 d。

各处理设置3次重复,随机排列,小区面积30 m²。各小区四周用宽20 cm、高30 cm的水泥台隔离,

表2 水稻、油菜季各处理施肥情况
Table 2 Fertilization rates for each treatment in rice and rape seasons

处理	油菜/kg·hm ⁻²				水稻/kg·hm ⁻²			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	生物炭/ 秸秆	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	生物炭/ 秸秆
NPK	180	75	120	0	75	52	60	0
NPK+C	180	75	120	4500	75	52	60	2250
1/2NPK+C	90	37.5	60	4500	37.5	26	30	2250
NPK+S	180	75	120	6900	75	52	60	3450

表1 供试土壤基本性状
Table 1 Basic properties of soil used in field experiment

土壤	有机质/g·kg ⁻¹	pH	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	硝态氮/mg·kg ⁻¹	铵态氮/mg·kg ⁻¹	Olsen-P/mg·kg ⁻¹
水稻土	43.92	5.7	2.07	0.76	12.63	0.99	20.31

有独立的灌/排水系统,防止试验过程各小区串肥串水。试验小区外围设置保护行并用土埂围起。

本研究采用的生物炭制备方法参考盖霞普等^[12]。实验采用地上部玉米秸秆作为材料,用蒸馏水清洗干净后,65℃烘箱烘干,经植物粉碎机粉碎后装满不锈钢盒(长×宽×高=20 cm×10 cm×15 cm),加盖密封后置于马弗炉(SXZ-12-10)中,逐渐升温至500℃,升温速率25℃·min⁻¹,并于500℃条件下持续碳化1.5 h,碳化后样品冷却,过20目筛(1 mm)保存。生物炭的基本理化性质见表3。

表3 生物炭理化性质

Table 3 Physical and chemical properties of biochar

指标	数值
产率/%	30
pH	10.0
C/%	23.2
H/%	0.9
N/%	0.7
O/%	15.1
TP/g·kg ⁻¹	2.5
TK/g·kg ⁻¹	2.6
铵态氮/mg·kg ⁻¹	2.4
硝态氮/mg·kg ⁻¹	0.4
灰分/%	34.0
阳离子交换量/cmol·kg ⁻¹	23.8
电导率/μS·cm ⁻¹	1319
比表面积/g·m ⁻²	14.7

1.3 样品采集及测试

1.3.1 土壤采集及测试

试验开展前,在整个试验地块用五点采样法,采集0~20 cm耕作层土壤,四分法混匀后作为基础土壤,其测试指标见表1。土壤pH、有机质、全氮、全磷、铵态氮、硝态氮均采用常规分析方法^[19]。土壤pH采用pH计(Mettler Toledo Delta 320)测定(水/土为5:1);土壤有机质测定采用重铬酸钾-外加热容量法;土壤全氮采用浓H₂SO₄消煮-半微量开氏法测定;土壤铵态氮、硝态氮采用0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂浸提,紫外分光光度计(PerkinElmer UV 25)测定;土壤全磷采用NaOH熔融-钼锑抗比色法,紫外分光光度计(型号同上)测定;土壤有效磷(Olsen-P)采用0.5 mol·L⁻¹的NaHCO₃浸提,钼锑抗比色法,紫外分光光度计(型号同上)测定。试验期间,采集水稻栽秧后的第7、13、19、25、31、37、43、49、55、61、70、76、82、88、94、100、

106、113、120、126、132 d及水稻收获后的各处理土壤样品,取样方法同基础样品的采集。采集的土壤样品自然风干后过2 mm筛,用于测定土壤Olsen-P含量,测试方法同上。

1.3.2 田面水采集及测试

水稻生长期,根据施肥等情况进行田面水取样。各处理于2015年水稻栽秧后的第1、2、3、4、5、6、7、12、17、23、29、35、41、47、53、59 d取田面水水样,采样时间均为上午8:00—10:00。为避免人为扰动田面水,利用长杆采样器伸入小区内采样,每个小区采5个子样点,混合后分取2份,各250 mL,冷冻保存。其中1个样品作为待测样,另1个备用。田面水测试指标为总磷(TP)和可溶性总磷(TDP),用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)测定。

1.3.3 植株采集及测试

每季油菜、水稻收获后,每小区采集1 m²有代表性样方的油菜、水稻植株,烘干后将油菜籽粒和水稻籽粒分别称重,推算各处理的油菜、水稻产量。测定秸秆和籽粒的全磷含量,计算地上部吸磷量。植株全磷用浓H₂SO₄消煮,钼锑抗吸光光度法测定。

水稻/油菜产量(kg·hm⁻²)=水稻/油菜样品重量(kg·m⁻²)×10 000

植株吸磷量(mg·hm⁻²)=植株磷含量×地上部生物量

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2013处理数据与作图,SAS 9.2进行统计检验和方差分析。

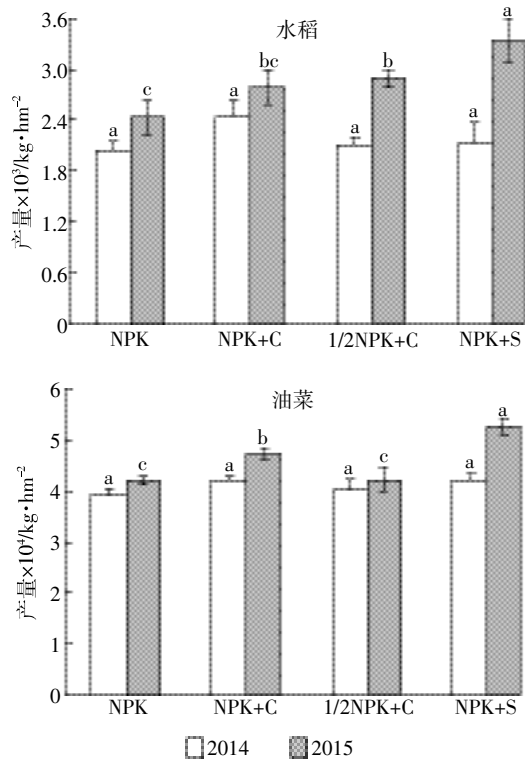
2 结果与讨论

2.1 生物炭对水稻和油菜产量的影响

对水稻产量研究的结果表明(图1),试验第一年不同处理间水稻产量未呈现出显著差异($P<0.05$)。第二年开始施用玉米秸秆生物炭和玉米秸秆对水稻的产量有增产趋势,生物炭用量相同条件下,NPK+C处理水稻产量与1/2NPK+C处理水稻产量差异不显著($P<0.05$)。由此表明,施用生物炭条件下,减施化肥短期内未造成水稻减产。四个处理之间水稻产量比较结果表明,NPK+S处理水稻产量显著($P<0.05$)高于其他处理,达3339 kg·hm⁻²,比单独施用化肥处理产量增加27%。对油菜产量的研究结果表明,各处理间油菜产量在第一年并未表现出显著性($P<0.05$)差异。第二年开始施用玉米秸秆生物炭和玉米秸秆的油菜产量有增产趋势,与NPK处理相比,NPK+C和NPK+S处

理均显著($P<0.05$)提高了油菜产量,增施秸秆对油菜的增产效果最显著($P<0.05$),比 NPK 处理增加 25.1%,比 NPK+C 处理增加 11.2%(图 1)。研究结果还表明,1/2NPK+C 处理与 NPK 处理相比,油菜产量并未呈现显著差异($P<0.05$),由此可见,施用生物炭后减施化肥也并未造成油菜显著减产。

根据以上结果,施用生物炭在短期内对油菜和水稻增产效果最好,但试验进行到第二年,施用秸秆比施用生物炭对油菜和水稻的增产效果显著。已有研究结果也表明,施用生物炭短期内对土壤化学性质和养分状况虽有一定改善作用,但作物增产效应不明显^[20],而施用作物秸秆,可以显著增加水稻的有效穗数、结实率、千粒重,从而增加水稻产量^[21]。



图中不同小写字母分别表示不同年份不同处理间差异显著, $P<0.05$ 。下同

图 1 不同处理水稻/油菜产量

Figure 1 Rice and rape yields in different treatments

2.2 生物炭对作物吸磷量的影响

稻油轮作模式下不同处理水稻和油菜地上部的吸磷量如图 2 所示。各处理水稻地上部吸磷量显著($P<0.05$)高于油菜地上部吸磷量,各处理之间的差异第二年开始显著。根据 2015 年度试验结果,水稻季 NPK+C 和 1/2NPK+C 处理地上部吸磷量高于 NPK 处

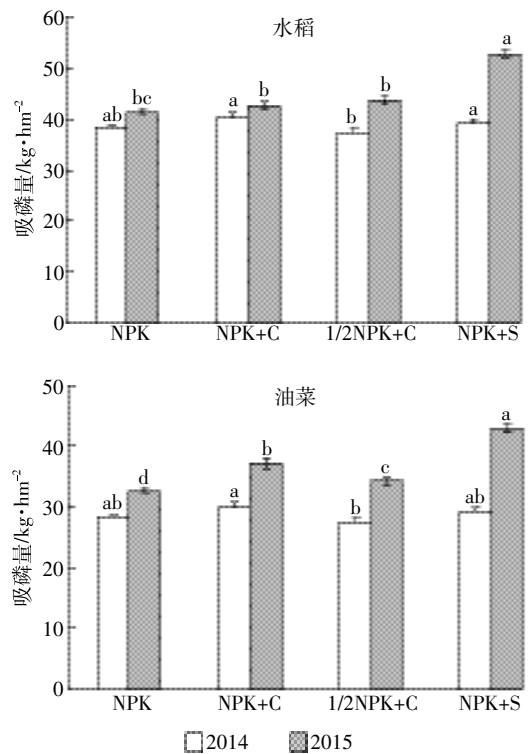


图 2 不同处理水稻/油菜吸磷量

Figure 2 Amount of rice/rape phosphorus uptake in different treatments

理,但无显著性($P<0.05$)差异;增施玉米秸秆处理水稻地上部的吸磷量显著($P<0.05$)高于添加生物炭处理和单独施用化肥处理,吸磷量为 $52.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,高出比例达 20.8%~27.3%。油菜吸磷量结果表明,与 NPK 处理相比,NPK+C、1/2NPK+C 和 NPK+S 处理均显著($P<0.05$)提高了油菜吸磷量。根据以上结果可以看出,生物炭、玉米秸秆的施用可促进作物对磷的吸收,同时也与施用生物炭和玉米秸秆可增加水稻和油菜产量有关。

2.3 水稻季土壤 Olsen-P 动态变化特征

研究结果表明,不同处理间水稻栽秧后 7 d 内,NPK 处理土壤有效磷含量显著高于($P<0.05$)添加生物炭和玉米秸秆处理,水稻整个生长期,不同处理间土壤有效磷含量并未呈现显著($P<0.05$)差异,但在水稻栽秧后 120~132 d;除了施用秸秆处理,其余三个处理土壤有效磷含量均呈现不同程度降低,其中施用化肥处理土壤有效磷含量降低最明显,不同处理之间土壤有效磷在栽秧 132 d 呈现明显差异(图 3)。种植期内,各处理土壤中有效磷含量随着生育期的延长而降低,直至栽秧后 60 d,土壤磷含量趋于平稳,此时 NPK、NPK+C、1/2NPK+C 和 NPK+S 处理土壤有效磷

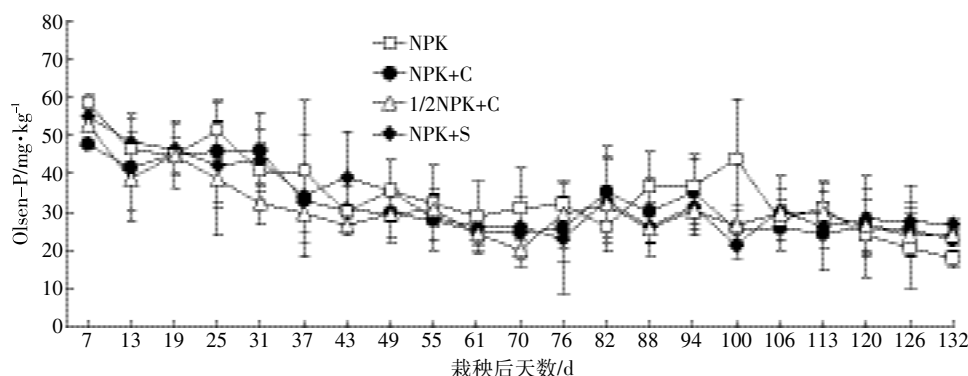


图3 水稻生育期内土壤有效磷的动态变化

Figure 3 Dynamic changes of soil available phosphorus during rice growth

分别降到 28.8、24.8、24.2、26.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比种植前分别降低了 49.8%、47.0%、50.3% 和 43.4%。水稻抽穗期直到收获, 土壤有效磷含量有明显下降趋势, 各处理收获期(栽秧后第 138 d 水稻收获)土壤有效磷含量与栽秧后的第 132 d 相比, NPK、NPK+C、1/2NPK+C 和 NPK+S 处理土壤有效磷含量下降比例分别为 1.9%、4.1%、2.8% 和 2.1% (图 3 和图 4)。这主要由于水稻从抽穗开始, 植株生长中心转向籽粒的形成, 对磷吸收较多, 导致这一时期土壤中磷含量降低明显^[22]。

不同处理连续施肥 2 a, 作物收获后, 与 NPK 相比, NPK+C、1/2NPK+C 和 NPK+S 处理土壤有效磷含量均显著 ($P<0.05$) 增加, 分别增加 60.8%、68.4% 和 113.4% (图 4)。NPK+C 和 1/2NPK+C 处理之间土壤有效磷含量差异不显著 ($P<0.05$), 即施用生物炭后, 减施化肥并没有降低土壤中有效磷含量。施肥 2 a 后, 单独施用化肥处理土壤有效磷比基础土壤显著 ($P<0.05$) 降低 6.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降幅达 32% (图 4 和表 1), 而 NPK+C、1/2NPK+C 和 NPK+S 处理土壤有效磷含量相比基础土壤有了显著 ($P<0.05$) 增加, 增幅分别为 9.4%、14.3% 和 30.3%。本研究中每年因肥料施用带入土壤的磷素量为 58.4 $\text{kg P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 施用生物炭带入 22.3 $\text{kg P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 玉米秸秆带入 8.3 $\text{kg P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, NPK 处理水稻和油菜地上部携出的磷量为 74 $\text{kg P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 因而作物携出的磷远超过 NPK 处理施入的磷, 导致 NPK 处理土壤有效磷出现耗竭。由此可以看出, 研究流域内现有的单施化肥使土壤磷处在一个耗竭的过程中。本研究中添加生物炭处理土壤有效磷比基础土壤有所积累, 可能由于玉米秸秆制备生物炭灰分中含有磷酸盐, 进入土壤后能提高土壤 Olsen-P 含量, 还有可能因为生物炭是碱性物质, 可提升土壤 pH 值, 从而增加土壤中磷的有效性^[23-24]。添加秸秆处理土

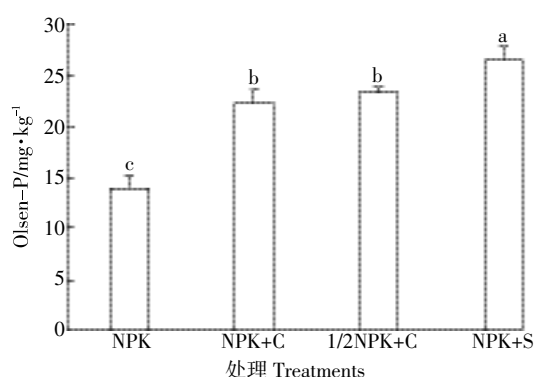


图4 不同处理施肥2年作物收获后土壤有效磷含量

Figure 4 Content of soil available phosphorus after 2-years of growing crops

壤有效磷累积效果最显著 ($P<0.05$)。这可能是由于作物秸秆中含有磷, 经腐熟后自身释放的磷增加了土壤中磷含量, 同时, 腐熟后的玉米秸秆增加了土壤腐殖质含量, 腐殖质能与难溶性的磷起反应, 增加其溶解度^[22], 并且, 秸秆直接还田还可能提高磷酸酶活性, 从而增加土壤磷的有效性^[25]。

2.4 水稻季田面水总磷、可溶性总磷浓度动态变化特征

栽秧后的第 1 d, 田面水总磷浓度达到峰值, 与 NPK 处理相比, NPK+C 和 NPK+S 处理均显著 ($P<0.05$) 提高了田面水磷含量, 施用生物炭后减施化肥能显著 ($P<0.05$) 降低田面水磷含量。栽秧第 1~5 d, 田面水总磷浓度迅速降低, 总磷浓度分布在 1.08~1.93 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 降幅为 64.2%~79.1%, 在此期间各处理之间田面水总磷浓度无显著 ($P<0.05$) 差异 (图 5)。各处理栽秧后第 7 d 田面水总磷浓度出现小的波峰, 分析原因可能由于水稻追氮、钾肥造成田面水扰动, 引起田面水总磷浓度提高。追肥过后田面水中总磷浓度迅速降低并在第 14 d 左右趋于稳定。在栽秧后的第

47 d, 即7月14日, 田面水总磷浓度出现明显的降低, 降低幅度在49.5%~80.1%, 可能是由于7月9日—14日期间有累积超过22 mm的降雨, 使田面水总磷浓度被稀释1~2倍, 降雨过后随着水分蒸发, 田面水总磷浓度开始升高。总体看来, 化肥减半与生物炭配施处理的田面水总磷浓度在整个生育期内低于其他处理。

水稻季田面水中可溶性总磷浓度变化特征与总磷浓度变化趋势一致, 栽秧后的第1 d, 各处理田面水中可溶性总磷浓度达到峰值, NPK+C与NPK+S处理田面水TDP浓度无显著性差异($P<0.05$), 但显著高于NPK和1/2NPK+C两处理, 其中, 1/2NPK+C处理田面水中可溶性总磷浓度最低, 为 $3.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图6)。TDP浓度在栽秧后的第4 d降到最低, 与第1 d相比, 各处理田面水中TDP浓度降低了63.1%~82.4%。栽秧后第7 d, 受追肥扰动影响, 各处理田面水中TDP浓度升高, 在第14 d之后降到平稳状态。栽秧后的第47 d, 受降雨影响, 各处理田面水中TDP浓度下降比例在43.3%~84.1%。降雨过后, 田面水TDP浓度升高。

从水稻季田面水中总磷、可溶性总磷浓度变化特征可以看出, 水稻栽秧后第1 d田面水中总磷、可溶性总磷浓度最高, 持续5 d后降到最低值, 因而栽秧后5~6 d是防止田面水外流造成周边水体污染的关键时期^[26]。总体看来, 化肥减半与生物炭配施处理的田面水TP和TDP浓度在整个水稻生育期内相对于其他常规施用化肥的处理相对较低。因此, 化肥磷是田面水中TP和TDP的主要来源, 降低化肥投入可以显著降低田面水中磷含量; 除了受外源磷的影响, 人为扰动和降雨也是田面水中磷浓度的主要影响因子, 应在追肥或其他人为扰动后2周内, 尽量采取措施避免田面水外流。

3 结论

生物炭、玉米秸秆与化肥配施可不同程度增加土壤有效磷含量, 提高水稻和油菜产量; 减量化肥与生物炭配施显著降低了田面水总磷含量, 短期内并未造成水稻和油菜减产, 从降低磷的环境风险角度可以考虑在稻油轮作模式下水稻季施用生物炭的同时减施化肥磷; 栽秧后7 d内是水稻季田面水中磷浓度峰值

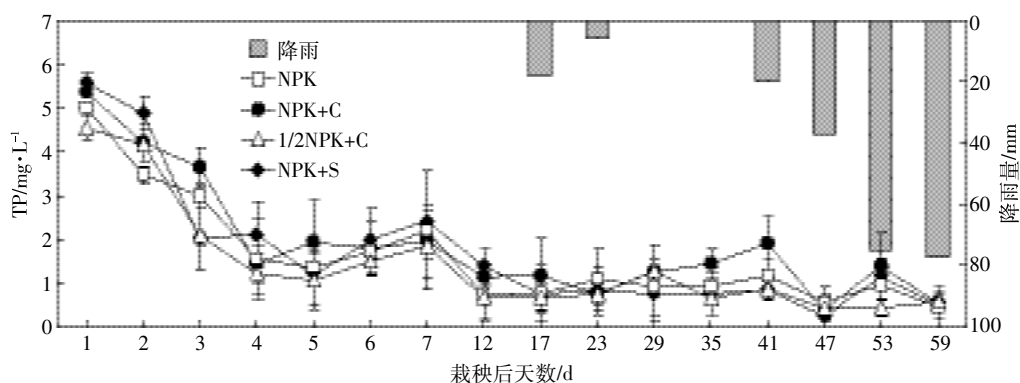


图5 水稻季田面水总磷(TP)浓度变化特征

Figure 5 Dynamic changes of TP concentrations in paddy field water

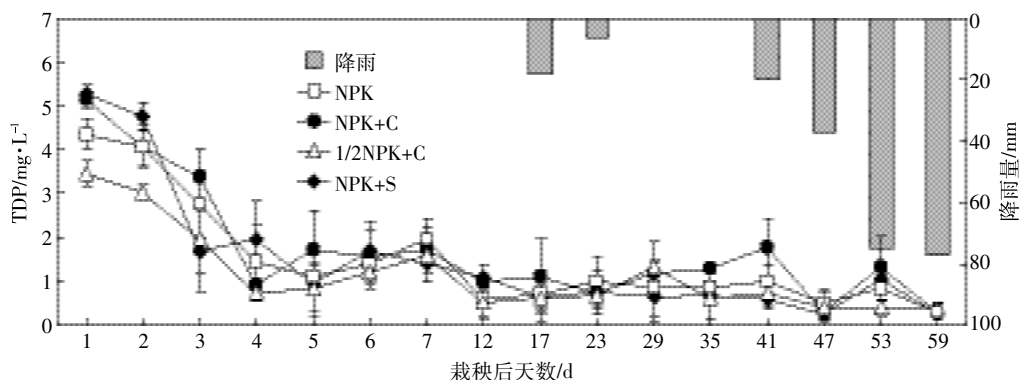


图6 水稻季田面水可溶性总磷(TDP)浓度变化特征

Figure 6 Dynamic changes of TDP concentrations in paddy field water

期,控制这一时期田面水外流对于防控农田磷流失至关重要。

参考文献:

- [1] 沈其荣. 土壤肥科学通论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 202-213.
SHEN Qi-rong. Soil fertilizer general theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 202-213.
- [2] Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, et al. Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index[J]. *Environ Qual*, 2000, 29: 130-144.
- [3] Dong C, Paul Szostak, Zong S W, et al. Reduction of orthophosphates loss in agricultural soil by nano calcium sulfate[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 539: 381-387.
- [4] Sharpley A N, Daniel T, Sims T, et al. Agricultural phosphorus and eutrophication[M]. Second edition. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS. 2003: 149.
- [5] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 农田土壤中的磷向水体释放的风险评价[J]. 环境科学学报, 2001, 21(3): 344-348.
GAO Chao, ZHANG Tao-lin, WU Wei-dong. Risk evaluation of agricultural soil phosphorus release to the water bodies[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(3): 344-348.
- [6] 范明生, 江荣凤, 张福锁, 等. 水旱轮作系统作物养分管理策略[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 424-432.
FAN Ming-sheng, JIANG Rong-feng, ZHANG Fu-suo, et al. Nutrient management strategy of paddy rice-upland crop rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 424-432.
- [7] 刘红江, 郑建初, 陈留根, 等. 秸秆还田对农田周年地表径流氮、磷、钾流失的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1031-1036.
LIU Hong-jiang, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Effects of straw-returning on annual overland runoff NPK loss in farmland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(6): 1031-1036.
- [8] 高超, 朱继业, 朱建国, 等. 不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征[J]. 环境科学学报, 2005, 25(11): 1543-1549.
GAO Chao, ZHU Ji-ye, ZHU Jian-guo, et al. Phosphorus exports via overland runoff under different land uses and their seasonal pattern[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(11): 1543-1549.
- [9] 褚军, 薛建辉, 金梅娟, 等. 生物炭对农业面源污染氮、磷流失的影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(4): 409-415.
CHU Jun, XUE Jian-hui, JIN Mei-juan, et al. Review of researches on effects of biochar in reducing nitrogen and phosphorus losses with agricultural Non-point source pollution[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(4): 409-415.
- [10] 王萌萌, 周启星. 生物炭的土壤环境效应及其机制研究[J]. 环境化学, 2013, 32(5): 768-780.
WANG Meng-meng, ZHOU Qi-xing. Environmental effects and their mechanisms of biochar applied to soils[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(5): 768-780.
- [11] Strelko V, Malik D J, Streat M. Characterisation of the surface of oxidised carbon adsorbents[J]. *Carbon*, 2002, 40(1): 95-104.
- [12] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 等. 玉米秸秆生物炭对土壤无机氮素淋失风险的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 310-318.
GAI Xia-pu, LIU Hong-bin, ZHAI Li-mei, et al. Effects of corn-stalk biochar on inorganic nitrogen leaching from soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2): 310-318.
- [13] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526-535.
PAN Jian-ling, DAI Wan-an, SHANG Zhan-huan, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5): 526-535.
- [14] 李继福, 鲁剑巍, 任涛, 等. 稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 292-302.
LI Ji-fu, LU Jian-wei, REN Tao, et al. Effect of straw incorporation substitute for K-fertilizer under different paddy soil K supply capacities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2): 292-302.
- [15] Yao C X, Stephen Joseph, Li L Q, et al. Developing more effective enhanced biochar fertilisers for improvement of pepper yield and quality[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(5): 703-712.
- [16] 刘世平, 张洪程, 戴其根, 等. 免耕套种与秸秆还田对农田生态环境及小麦生长的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16: 393-396.
LIU Shi-ping, ZHANG Hong-cheng, DAI Qi-gen et al. Effect of no-tillage plus inter-planting and remaining straw on the field on cropland eco-environment and wheat growth[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16: 393-396.
- [17] 郭智, 周炜, 陈留根, 等. 稻秸还田对稻麦两熟农田麦季养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 17-20.
GUO Zhi, ZHOU Wei, CHEN Liu-gen, et al. Effects of rice straw return on surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during wheat growing season in intensive rice-wheat rotation field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 17-20.
- [18] 朱利群, 夏小江, 胡清宇, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 6-10.
ZHU Li-qun, XIA Xiao-jiang, HU Qing-yu, et al. Effects of different tillage and straw return on nitrogen and phosphorus runoff loss from paddy fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6): 6-10.
- [19] 鲁如坤. 土壤和农业化学分析法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU Ru-kun. Analytical method of soil agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [20] 高海英, 何绪生, 陈心想, 等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1948-1955.
GAO Hai-ying, HE Xu-sheng, CHEN Xin-xiang, et al. Effect of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil chemical properties and crop yield[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(10): 1948-1955.
- [21] 段华平, 牛永志, 李凤博, 等. 耕作方式和秸秆还田对直播产量及稻

- 田土壤碳固定的影响[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(3): 706-708.
- DUAN Hua-ping, NIU Yong-zhi, LI Feng-bo, et al. Effects of tillage styles and straw return on soil carbon sequestration and crop yields of direct seeding rice[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2009, 25(3): 706-708.
- [22] 叶丽丽, 王翠红, 彭新华, 等. 秸秆还田对土壤质量影响研究进展[J]. 湖南农业科学, 2010(19): 52-55.
- YE Li-li, WANG Cui-hong, PENG Xin-hua, et al. Effect of straw returning on soil quality[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2010(19): 52-55.
- [23] Zhai L M, Caiji Z M, Liu J, et al. Short-term effects of maize residue biochar on phosphorus availability in two soils with different phosphorus sorption capacities[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(1): 113-122.
- [24] 才吉卓玛, 翟丽梅, 习 斌, 等. 生物炭对不同类型土壤中 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 163-168.
- CAI Ji-zhuoma, ZHAI Li-mei, XI Bin, et al. Effect of biochar on Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ in different types of soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1): 163-168.
- [25] 张电学, 韩志卿, 刘 微, 等. 不同促腐条件下玉米秸秆直接还田的生物学效应研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2005, 11(6): 742-749.
- ZHANG Dian-xue, HAN Zhi-qing, LIU Wei, et al. Biological effect of maize stalk return to field directly under different accretion decay conditions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6): 742-749.
- [26] 叶玉适, 梁新强, 李 亮, 等. 不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(4): 1125-1135.
- YE Yu-shi, LIANG Xin-qiang, LI Liang, et al. Effects of different water and nitrogen managements on phosphorus loss via runoff and leaching from paddy fields in Taihu Lake basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(4): 1125-1135.