

有机无机肥配施对紫色土旱坡地 土壤无机磷迁移的影响

韩晓飞^{1,2}, 高明², 谢德体², 熊正辉¹, 王帅¹, 李红梅¹, 彭征忠¹, 商跃凤¹

(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)

摘要:为探索长江上游紫色土旱坡地麦玉轮作系统减少农田磷素流失的最佳施肥模式,降低磷对水体富营养化的影响。2011—2015年,以紫色土旱坡地典型农作冬小麦和夏玉米为材料,在西南大学试验农场进行田间定点试验。试验采用随机区组设计,共设置7个田间小区试验,分别为倍量施磷肥(2P)、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)。测定了各农田土壤基础性质,以及0—20, 20—40, 40—60 cm土层土壤全磷和有效磷含量,并对不同施磷水平以及磷肥减量配施不同有机肥条件下紫色土旱坡地土壤磷素迁移流失进行了原位定点研究。结果表明:不同施肥条件下紫色土旱坡地总磷(TP)和总可溶性磷(TDP)迁移流失量有明显的差异。TP流失量大小依次为2P>P>MP>SP>MDP>SDP>P₀。2P处理总磷流失量最高,P处理是SDP和MDP处理的1.5~2倍。TDP流失量大小依次为2P>MP>P>MDP>SP>SDP>P₀。坡上除了P₀和P处理全磷含量有所减少外,其他各处理全磷含量都呈增加趋势,坡中、坡下的增长幅度要大于坡上,其中坡下处理MP比种植季前增加了0.400 g/kg。除了P₀处理土壤有效磷含量降低外,其他各个小区处理坡上、坡中、坡下土壤中有效磷含量都呈增加趋势。猪粪有机肥和秸秆还田对土壤中磷素有一定的活化作用,促进了磷素在土壤中的迁移,且猪粪有机肥对土壤磷素活化作用更强。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;磷素流失;控源节流

中图分类号:S147;S158.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)05-0039-06

Effect of Combined Application of Organic and Inorganic Fertilizers on Inorganic Phosphorus Migration Characteristics in Purple Soil Sloping Field

HAN Xiaofei^{1,2}, GAO Ming², XIE Deti², XIONG Zhenghui¹,

WANG Shuai¹, LI Hongmei¹, PENG Zhengzhong¹, SHANG Yuefeng¹

(1. Chongqing Agricultural Technology Extension Station, Chongqing 401121, China;

2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to explore the optimum fertilization model for reducing the loss of phosphorus in purple soil sloping field in the Yangtze River Basin, as well as reducing the threat to the water quality of the Yangtze River, seven experiment plots were conducted consecutively in five years. The treatments are times the amount of applied fertilizer (2P), optimum fertilization (P), optimization fertilization + pig manure organic fertilizer (MP), optimization fertilizer + straw (SP), optimum amount of fertilizer phosphorus minus 20% pig manure organic fertilizer (MDP), optimization of fertilizer phosphorus reduced 20% straw (SDP) and No application of phosphate fertilizer (P₀). The total phosphorus and available phosphorus contents at 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm soil layers, the different level of phosphorus and migration characteristics of purple soil sloping field inorganic phosphorus were investigated. The results showed that the characteristics of the annual runoff of the soil under dry sloping field could be seen that the loss of total phosphorus (TP) and total soluble phosphorus (TDP) were significantly different under different fertilization treatments. TP

收稿日期:2016-09-17

修回日期:2016-09-29

资助项目:农业部测土配方施肥项目(渝农 201528);国家国际科技合作专项项目(2013DFG92520)

第一作者:韩晓飞(1984—),男,河南叶县人,高级农艺师,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:谢德体(1957—),男,四川开江人,教授,博士,主要从事土壤质量与环境研究。E-mail:xdt@swu.edu.cn

losses decreased in the order: $2P > P > MP > SP > MDP > SDP > P_0$. TP loss in P treatment was about 1.5 to 2 times of those in the SDP and MDP treatments. TDP losses decreased in the order: $2P > MP > P > MDP > SP > SDP > P_0$. Long-term of combined application of organic and inorganic fertilizers can significantly increase the accumulation of phosphorus in soil, suppress the decreasing of P fixation, enhance P mobility and P use efficiency, the promoting effect of pig manure is bigger than the rice straw. The application of organic and inorganic fertilizers can significantly increase the content of available phosphorus in soil, and reduction of chemical phosphate fertilizer and combined application of organic fertilizer is a good measure to deal with ‘source control and loss curb’ of agricultural non-point source pollution.

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

磷肥的过度和不合理施用被认为是导致农业面源污染的重要原因之一^[1]。磷肥施入农田容易被土壤固定,当季利用率较低,为了维持农业高产稳产,每年要向土壤中施加大量化学磷肥和生物有机肥,过量施肥的结果就使得土壤耕层中磷素大量累积,从而造成了资源的浪费和潜在的生态环境风险^[2-4]。长江中上游流域水体富营养化问题日益突出,与其农业面源磷污染有着密切关系^[5]。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紫色土旱坡地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实践意义^[6]。

国内外对磷素在土壤中的迁移、转化、循环及其污染控制进行了比较多的研究^[7-10],同时土壤磷素行为与有机无机肥料协同的关系也越来越被广大研究者所关注^[11-13]。已有研究大多数是在实验室模拟条件下进行的,田间原位条件下研究较少,减磷配施不同有机肥对紫色土旱坡地土壤磷素迁移流失的影响还未有深入全面的研究^[14]。本研究选择长江三峡库区常见的紫色土旱坡地为研究对象,通过2011—2015年连续5 a定位监测试验,对不同磷肥水平以及磷肥减量配施不同有机肥条件下紫色土旱坡地土壤磷素流失进行原位定点研究,发现秸秆和猪粪有机肥配施化肥条件下紫色土旱坡地磷素迁移规律,探讨不同有机肥对土壤磷素流失的影响,对控制紫色土旱坡地农田土壤磷素流失,制定施磷消减优化方案和评价秸秆、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节本增效提供科学依据。

1 研究区概况

试验地点位于重庆市北碚区西南大学试验农场,地处东经106°24′20″,北纬29°48′42″,属紫色丘陵区,

方山浅丘坳谷地形,年均气温18.4℃,日照1 276.7 h,年均降水1 105.5 mm,其中5—9月降雨量占全年总量的70%以上,为亚热带季风气候。供试土壤为侏罗纪沙溪庙组紫色泥页岩发育形成的紫色土,中性紫色土亚类,灰棕紫泥土属。长江三峡流域旱坡地多分布于此类土壤,因此用作供试土壤具有广泛的代表性。土层较浅60 cm左右,中等肥力水平。供试土壤基本理化性质为pH值7.04,有机质8.75 g/kg,全氮0.76 g/kg,全磷0.68 g/kg,全钾10.9 g/kg,碱解氮40.3 mg/kg,有效磷18.29 mg/kg,速效钾71.39 mg/kg。

2 材料与方法

2.1 试验设计

试验小区坡度为15°(紫色丘陵区坡耕地常见坡度),每个小区面积为32 m²(坡长8 m,宽4 m),坡向为东西方向。小区四周用砖砌成,之间用水泥墙的田埂隔开,同时在每个小区底部设置径流收集装置,并连接独立的水池,收集地表径流样品。径流池池内安装自记水位计记录水位。小区与水池由汇流沟连接,通过汇流管道将小区产生的水流导入相对应的集水池。试验小区种植制度为紫色土旱坡地典型的“冬小麦—夏玉米”轮作模式。根据不同的施肥措施设7个处理,每个处理3次重复,随机区组设计。分别为(1)不施磷肥(P₀);(2)优化施肥(P);(3)倍量施磷肥(2P);(4)优化施肥+秸秆还田(SP);(5)优化施肥+猪粪有机肥(MP);(6)优化施肥量磷减20%+秸秆还田(SDP);(7)优化施肥量磷减20%+猪粪有机肥(MDP)。冬小麦施肥方式:优化施肥指按照当地种植小麦所推荐的优化施肥量(每1 hm²施用N, P₂O₅, K₂O分别为225, 75, 150 kg)其中30%氮肥作为底肥,60%拔节期追肥,10%孕穗期追肥,磷肥全部作为基肥,钾肥70%做底肥,30%拔节期追肥。夏玉米施肥方式:优化施肥指按照当地种植夏玉米所推荐

的优化施肥量(每 1 hm² 施用 N,P₂O₅,K₂O 分别为 188,90,150 kg),其中全部磷肥、钾肥和 30%氮肥作为底肥 70%氮肥作为追肥。倍量施磷肥就是冬小麦、夏玉米磷肥在优化施肥的基础上施用加倍,其他施肥量和施肥方法不变。优化施肥量磷减 20%就按当地种植相应作物所推荐每 1 hm²P₂O₅ 施用量减少 20%,N 和 K₂O 不变。处理所用氮磷钾化肥分别为尿素(含 N 46.4%)、过磷酸钙(含 P₂O₅12%)、氯化钾(含 K₂O 60%),处理中 M 代表猪粪有机肥(猪粪经过一周左右腐熟),其中的大量营养元素全氮、磷、钾含量分别为 1.34%,1.3%,0.8%,施用量每年 22 500 kg/hm²;S 代表秸秆翻压还田,其中的营养元素含量折合成 N,P₂O₅,K₂O 分别为 0.49%,0.18%,0.75%,施用量每年 7 500 kg/hm²。有机肥作为底肥与土壤混合均匀施用。

2.2 样品采集及测定方法

土壤样品的采集与分析:2011 年 3 月夏玉米种植前和 2015 年 8 月夏玉米收获后分别采集各小区 0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm 土样,且根据坡面上、中、下不同位置分别采集,两次采集方法和采样点均相同,分别采用 S 形多点采样法,重复 3 次,相同层次的土样混合均匀,每个混合样取 1.5 kg,带回实验室风干、过筛,测定全磷和有效磷含量。土壤基本理化性质按常规方法测定^[15]。

水样的采集与分析:从 2011 年开始监测各处理小区各形态磷流失量。采集每次降雨产流事件各处理小区的径流过程样,降雨产流结束后,测定集水池中径流量,然后将池中水样充分混匀,用蒸馏水洗净的玻璃瓶(因磷酸盐易吸附在塑料瓶上,故含磷量较少的水样不用塑料瓶)在池中不同深度多点取混合水样 500 ml,立即送往实验室放入 4℃ 冰箱中保存,并于 48 h 内完成分析测定。每次取样后都将池内水和泥沙排放清洗干净,供下次降雨备用。同时在试验点布置虹吸式自记雨量计一个,以便记录每次降雨量。水样总磷 TP、总可溶性磷 TDP 测定详细步骤参见相关文献^[16]。径流量、各形态磷素含量及磷素流失量都是 3 个重复处理测定的平均值。单次降雨磷

素流失量计算公式 $Q_i = \frac{c_i \times q_i}{1000}$ 式中: Q_i 为单次磷素流失量(g/m²); c_i 为小区地表径流磷素浓度(mg/L); q_i 为小区地表径流单位面积径流深度(mm)。不同施肥处理 TP 和 TDP 的年际流失量为单次降雨相应形态磷素流失量之和。

2.3 数据处理及分析

数据处理采用 SPSS 19.0 进行统计分析,作图采

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。

3 结果与分析

3.1 不同施肥处理条件下紫色土旱坡地磷素年际流失特征

3.1.1 降雨特征 试验区域 2011—2014 年降雨量统计见表 1。从表中我们可以看出近 4 a 试验区平均降雨量为 1 086 mm,2012 年、2013 年、2014 年降雨量比年均降雨量分别多 1.7%,3.9%,17.5%,为丰水年,2011 年降雨量比年均降雨量少 22.8%,为水平年。试验年份内每年出现的日最大降雨量均在 85 mm 以上,且有随年降雨量增大而增大的趋势,出现的日期大致集中于 5—7 月份,降雨季节变化较为明显。降雨强度达到使坡面产生径流的降雨视为有效降雨,分析年降雨量和有效降雨次数、有效降雨量可以看出,随着年降雨量的增加,有效降雨次数和降雨量也有增大趋势。

表 1 试验区 2011—2014 年降雨特征统计

年份	年降		日最大降雨量		有效降雨	
	雨量/ mm	水文年	降雨量/ mm	出现 日期	次数	累积有效 降雨量/mm
2011	838.00	水平年	85.00	6.17	6	195.10
2012	1104.00	丰水年	89.00	5.21	11	538.20
2013	1128.00	丰水年	102.70	6.22	13	631.89
2014	1276.00	丰水年	106.10	7.11	14	647.50

3.1.2 不同施肥处理对旱坡地磷素流失含量的影响

从表 2 可以看出,同一年份不同施肥处理 TP 和 TDP 含量呈现不同变化。以 2014 年为例,各施肥处理 TP 含量变化范围为 0.207~1.732 mg/L,TDP 含量变化范围为 0.031~0.311 mg/L。2011—2014 年不同施肥处理 TP 和 TDP 平均含量可以看出,TP 含量大小依次为 2P>P>MP>SP>MDP>SDP>P₀。2P 处理流失总磷含量最高。P 处理分别是 SDP 和 MDP 处理的 2~2.4 倍。TDP 含量与 TP 含量大小顺序稍有不同,各处理大小依次为 2P>MP>P>SP>MDP>SDP>P₀。

3.1.3 不同施肥处理对旱坡地磷素流失量的影响

表 3 为不同施肥处理 TP 和 TDP 的年际流失量,从中可以看出,不同处理条件下 TP 和 TDP 流失量有明显的差异。各处理 TP 和 TDP 变化范围比较大,分别为 0.06~1.58 kg/(hm²·a)和 0.009~0.268 kg/(hm²·a)。2011—2014 年不同施肥处理 TP 和 TDP 平均流失总量可以看出,TP 流失量大小依次为 2P>P>MP>SP>MDP>SDP>P₀。2P 处理流失

总磷量最高。P 处理分别是 SDP 处理和 MDP 处理的 1.5~2 倍。TDP 流失量与 TP 流失量大小顺序稍有不同,各处理大小依次为 2P>MP>P>MDP>SP>SDP>P₀。

表 2 不同处理各形态磷流失含量 mg/L

指标	年份	处理						
		P ₀	P	2P	SP	MP	SDP	MDP
TP	2011	0.343±0.011b	1.142±0.035a	1.521±0.039a	0.812±0.010a	0.987±0.011a	0.476±0.033a	0.654±0.021ab
	2012	0.297±0.016b	1.291±0.033b	1.711±0.043b	0.853±0.016a	1.007±0.019a	0.523±0.017a	0.616±0.027a
	2013	0.251±0.024a	1.275±0.031ab	1.654±0.050ab	0.809±0.032a	0.934±0.022a	0.422±0.038a	0.509±0.016a
	2014	0.207±0.035a	1.389±0.047b	1.732±0.051b	0.901±0.016ab	1.007±0.017a	0.633±0.021b	0.714±0.019b
	2011	0.037±0.011a	0.171±0.020a	0.258±0.014a	0.154±0.013a	0.207±0.021a	0.109±0.015a	0.117±0.022a
TDP	2012	0.047±0.014b	0.245±0.021b	0.307±0.028b	0.179±0.019a	0.231±0.011a	0.135±0.023a	0.172±0.024b
	2013	0.045±0.014b	0.140±0.011a	0.264±0.020a	0.153±0.022a	0.186±0.010a	0.101±0.011a	0.127±0.023a
	2014	0.031±0.003a	0.277±0.021b	0.311±0.031b	0.171±0.023a	0.221±0.025a	0.158±0.010a	0.199±0.021b

注:同一形态磷素同一列中,不同小写字母表示差异显著($p<0.05$),下同。

表 3 不同处理各形态磷流失量 kg/(hm²·a)

指标	年份	处理						
		P ₀	P	2P	SP	MP	SDP	MDP
TP	2011	0.14±0.01b	1.01±0.04b	1.58±0.04b	0.69±0.01b	0.77±0.03b	0.41±0.02b	0.54±0.01b
	2012	0.12±0.01ab	0.59±0.03a	0.88±0.03a	0.45±0.01ab	0.51±0.01a	0.32±0.01a	0.43±0.02a
	2013	0.10±0.02a	0.47±0.03a	0.78±0.02a	0.36±0.01a	0.39±0.01a	0.22±0.01a	0.32±0.01a
	2014	0.06±0.02a	0.51±0.04a	0.81±0.04a	0.40±0.01a	0.42±0.02a	0.33±0.01a	0.35±0.01a
TDP	2011	0.015±0.011ab	0.151±0.021b	0.268±0.010b	0.131±0.010b	0.162±0.010b	0.094±0.001b	0.097±0.001a
	2012	0.019±0.010b	0.112±0.020b	0.158±0.020a	0.095±0.001a	0.117±0.010a	0.083±0.001b	0.120±0.001b
	2013	0.018±0.010b	0.051±0.001a	0.125±0.011a	0.068±0.021a	0.078±0.001a	0.053±0.001a	0.080±0.001a
	2014	0.009±0.003a	0.102±0.021b	0.146±0.030a	0.076±0.010a	0.092±0.011a	0.083±0.010b	0.098±0.000a

从不同年份来看,不同形态磷年际流失量也有较大差异。总体来说 2011 年度各施肥处理 TP 和 TDP 流失量较大,2012 年、2013 年、2014 年较小,这可能是因为 2011 年为试验开展的第一年,坡耕地经过翻耕之后土质较为疏松,再者试验初期作物长势较差,对雨水拦截能力较弱,综合导致大量的磷素随着地表径流流失。

3.2 不同施肥处理条件下磷素流失量与降雨量相关关系

由表 4 看出,将各施肥处理磷素流失量与降雨量做相关性分析,结果发现次降雨过程中磷素流失量与次降雨量没有明显的相关关系,但是降雨过程中总磷累积流失量和累积降雨量呈 $y=a\ln(x)-b,a>0$ 对数关系相关,总可溶性磷累积流失量和累积降雨量呈

$y=ax+b,a>0$ 线性关系相关(其中 P₀ 处理为对数关系相关)。

3.3 不同施肥处理对紫色土旱坡地土壤磷含量的影响

3.3.1 紫色土旱坡地坡上、坡中、坡下表层土壤磷素的变化 冬小麦—夏玉米轮作种植季结束后,施用磷肥处理的土壤中全磷和有效磷含量有不同程度的增加。各处理小区全磷和有效磷增长趋势较为一致。坡面下部磷素增长量较上、中部较大,说明坡位对土壤磷素的分布有一定的影响作用,土壤磷素多在坡中、坡下富集,可能与坡面的水土流失有关。从图 1 可以看出,坡上除了 P₀ 和 P 处理全磷含量有所减少外,其他各处理全磷含量都呈增加趋势,坡中、坡下的增长幅度要大于坡上,其中坡下处理 MP 比种植季前增加了 0.400 g/kg。

表 4 磷素累积流失量与降雨累积量相关关系分析

总磷			总可溶性磷		
处理	回归方程	R ²	处理	回归方程	R ²
P ₀	$y=2.2772\ln(x)-7.1064$	0.9473	P ₀	$y=3.2502\ln(x)-10.765$	0.9549
SDP	$y=3.2502\ln(x)-10.765$	0.8306	SDP	$y=0.003x-0.212$	0.9754
MDP	$y=3.6458\ln(x)-12.003$	0.9034	MDP	$y=0.0023x-0.0213$	0.9803
P	$y=5.4379\ln(x)-18.947$	0.8843	P	$y=0.0031x-0.00736$	0.9793
2P	$y=4.594\ln(x)-11.900$	0.8776	2P	$y=0.003x-0.0013$	0.9715
SP	$y=3.577\ln(x)-11.104$	0.9154	SP	$y=0.0021x-0.0204$	0.9793
MP	$y=3.431\ln(x)-10.100$	0.9015	MP	$y=0.0020x-0.0193$	0.9302

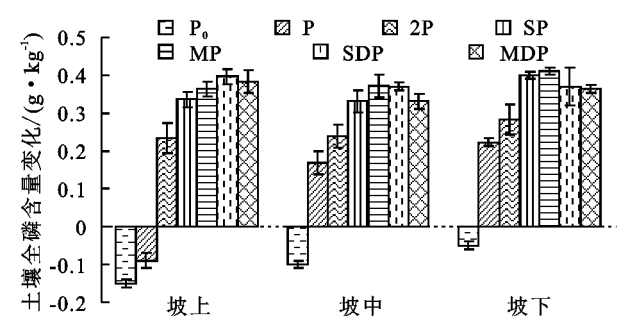


图 1 试验前后坡上、坡中、坡下土壤全磷含量变化

整体增长量大致表现为,MP>SP>MDP>SDP>2P>P>P₀,说明有机无机肥配施能够减缓土壤磷素的流失。

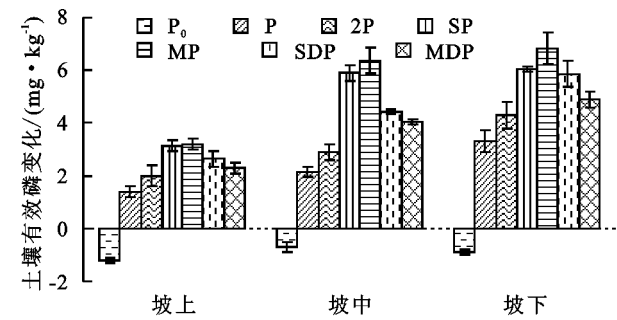


图 2 试验前后坡上、坡中、坡下土壤有效磷含量变化

表 5 不同处理不同层次土壤全磷、有效磷含量

处理	全磷/(g·kg ⁻¹)			有效磷/(mg·kg ⁻¹)		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
P ₀	0.59±0.01c	0.58±0.01b	0.60±0.02a	10.31±0.39c	8.38±0.23c	7.11±0.81c
SDP	0.65±0.02b	0.60±0.03ab	0.63±0.07a	19.81±0.82ab	14.63±0.76ab	9.98±0.79b
MDP	0.71±0.02a	0.64±0.01a	0.65±0.01a	20.55±0.94ab	15.39±1.32a	10.06±1.10ab
P	0.69±0.03ab	0.65±0.01a	0.66±0.01a	19.14±1.13b	13.01±0.82b	11.08±1.33a
2P	0.70±0.02ab	0.63±0.03a	0.65±0.02a	20.31±1.08ab	13.74±0.39b	11.55±1.02a
SP	0.71±0.01a	0.62±0.02a	0.61±0.04a	21.34±1.32a	15.89±1.63a	11.38±1.14a
MP	0.73±0.01a	0.67±0.01a	0.62±0.07a	22.71±1.03a	16.45±1.87a	12.15±1.09a

各处理之间有效磷含量也差异明显。首先,各施肥处理各层土壤有效磷均高于不施磷处理。0—20 cm 土层,MP 处理的土壤中有有效磷含量最高,达到了 22.71 mg/kg,不施磷肥处理的速效磷含量最低仅为 10.31 mg/kg。SP 处理的土壤中有有效磷的含量也达到了 21.34 mg/kg,即使 SDP 和 MDP 处理土壤中有有效磷含量也都高于 P 处理。20—40 cm 土层,MP, SP,MDP 与 P 处理之间有效磷含量达到了显著性差异水平($p<0.05$)。40—60 cm 土层,SDP 与 MP,SP 和 P 处理间差异显著($p<0.05$)。以上结果说明猪粪有机肥和秸秆还田对土壤中磷素有一定的活化作用,促进了磷素在土壤中的迁移,且猪粪有机肥对土壤磷素活化作用更强。

4 讨论与结论

紫色土旱坡地主要分布在我国长江中下游紫色土区域,高投入、高产出是该地区农田耕作的特点。农民

从图 2 可以看出,种植季结束后,除了 P₀ 处理土壤有效磷含量降低外,其他各个小区处理坡上、坡中、坡下土壤中有有效磷含量都呈增加趋势。其中坡中、坡下土壤中有有效磷含量增加幅度要高于坡上。各处理土壤有效磷增加量大致表现为 MP>SP>MDP>SDP>2P>P>P₀。说明有机无机肥配施可以增加土壤中磷素的有效性。整体来看,有效磷变化幅度要比全磷变化大,说明有机无机肥协同施肥对有效磷的影响要大于全磷。

3.3.2 不同施肥处理对紫色土旱坡地剖面土壤磷含量的影响 如表 5 所示,玉米收获后不同施肥处理土壤中的全磷和有效磷含量也存在一定的差异,不同处理不同层次之间的差异程度也不尽相同。0—20 cm 土层,土壤全磷含量大小是 MP(0.73 g/kg)>SP(0.71 g/kg)≈MDP(0.71 g/kg)>2P(0.70 g/kg)>P(0.69 g/kg)>SDP(0.65 g/kg)>P₀(0.59 g/kg)。其中 MDP,MP,SP, P,2P 之间差异不显著,P 与 SDP 差异也不显著($p<0.05$)。但是 SDP 与 SP 差异显著,且施肥处理与不施磷肥处理之间差异均达到显著水平($p<0.05$)。在 20—40 cm 和 40—60 cm 土层,土壤各处理全磷含量变化不大,基本没有显著性差异。

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%^[17],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者淋溶进入地表和地下水体,会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,实施优化施磷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外源磷肥施用,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,就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^[18-19]。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要但是其具有长效性,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农业面源污染^[20-21]。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紫色土旱坡地土壤无机磷迁移流失的影响,结果表明,减磷配施有机无机肥可以显著减少磷素流失量。从不同施肥条件下紫色土旱坡地磷素年际流失特征可以看出,TP 和 TDP 流失量有明显的差异。各处理 TP 和 TDP 变化范围比较大,分别为 0.06~1.58 kg/(hm²·a)和 0.009~0.268 kg/(hm²·a)。其中处理 SDP 无机磷流失量都较其他施肥处理低。本研究结果同时也表明,猪粪有机肥和秸秆还田对土壤无机磷素具有一定的活化作用,对其在土体垂直迁移具有一定的促进作用,且猪粪的作用比秸秆作用要大。这可能是因为有机无机肥协同施用条件下,有机肥分解作用下会产生有机酸,有机酸与磷酸根之间产生竞争吸附,会降低土壤矿物对磷酸根的吸附^[1],使得磷素在土壤中的迁移就变得相对容易,同时,猪粪和秸秆等生物有机肥与化肥配合施用可以显著地促进 5~0.5 mm 水稳性团聚体的形成和提高土壤团聚体的稳定性,并且能够降低土壤容重和土粒密度,提高土壤孔隙度^[22],更加有利于土壤中优势流的形成,而且在夏玉米生长初期刚施入基肥,这时候施入土壤中的磷还未被土壤中矿物和无定型氧化物固定,此时可溶性磷肥就随优势流有向下层迁移的风险。

根据植物需肥特征和土壤供肥规律,合理减少化学肥料的施用量,实行有机—无机协同施肥模式既能降低生产成本又能保护环境,从而更好地实现农业的可持续发展。研究土壤磷素行为与有机—无机肥料协同的关系具有重要意义。此外,确定有机—无机肥料施用的最佳合理配比,尚需深入研究。综上所述,肥料减量化且与有机肥合理配合施用是兼顾经济和环境效益的一种较好生产方式。

参考文献:

- [1] 韩晓飞,高明,谢德体,等. 长期定位施肥条件下紫色土无机磷形态演变研究[J]. 草业学报,2016,25(4):63-72.
- [2] 颜晓,王德建,张刚,等. 长期施磷稻田土壤磷素累积及其潜在环境风险[J]. 中国生态农业学报,2013,21(4):393-400.
- [3] 戚瑞生,党廷辉,杨绍琼,等. 长期轮作与施肥对农田土壤磷素形态和吸持特性的影响[J]. 土壤学报,2012,49(6):1136-1146.
- [4] Zheng Z, Simard R R, Lafond J, et al. Changes in phosphorus fractions of a Humic Gleysol as influenced by cropping systems and nutrient sources[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2001,81(2):175-183.
- [5] 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.
- [6] 韩晓飞,高明,谢德体,等. 减磷配施有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应[J]. 环境科学,2016,37(7):2770-2778.
- [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] 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.
- [9] 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.
- [10] 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):9-11,40.
- [11] 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.
- [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] Wang J, Wang D, Zhang G, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention [J]. Agricultural Water Management, 2014,141:66-73.
- [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(25):210-217.
- [15] 杨剑虹. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京:中国大地出版社,2008.
- [16] 王心芳,魏复盛,齐文启,等. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [17] 韩晓飞,高明,谢德体,等. 长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征[J]. 环境科学,2016,37(6):2284-2290.
- [18] 杜加银,茹美,倪吾钟. 减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(3):523-533.
- [19] 胡宏祥,汪玉芳,陈祝,等. 秸秆还田配施化肥对黄褐土氮磷淋失的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(5):101-105.
- [20] 郝小雨,高伟,王玉军,等. 有机无机肥料配合施用对设施番茄产量,品质及土壤硝态氮淋失的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(3):538-547.
- [21] 张玉平,荣湘民,刘强,等. 有机无机肥配施对旱地作物养分利用率及氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(3):44-48.
- [22] 聂军,郑圣先,杨曾平,等. 长期施用化肥,猪粪和稻草对红壤性水稻土物理性质的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(7):1404-1413.