

DOI: 10.5846/stxb201602210304

韩晓飞, 谢德体, 高明, 王子芳, 陈晨. 减磷配施有机肥对水旱轮作紫色水稻土磷素淋失的消减效应. 生态学报, 2017, 37(10): - .
Han X F, Xie D T, Gao M, Wang Z F, Chen C. Effects of reduced-phosphorus fertilizer and combinations of organic fertilizers on phosphorus leaching in purple paddy soil with conventional paddy-upland rotation tillage. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10): - .

减磷配施有机肥对水旱轮作紫色水稻土磷素淋失的消减效应

韩晓飞^{1,2}, 谢德体^{2,*}, 高明², 王子芳², 陈晨³

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:为探索长江流域稻油轮作系统水稻季减少农田磷素流失的最佳施肥模式和有效耕作措施,降低其对长江水质的威胁。采用渗漏池长期田间原位定点试验并结合室内实验分析,研究了化肥配施猪粪有机肥和水稻秸秆还田对土壤磷素淋溶迁移的影响。结果表明在水稻生长期土壤淋溶水中磷素浓度随时间延长呈逐渐下降的趋势,前期波动幅度大且下降迅速,到 55 天之后逐步稳定达到平衡。总可溶性磷(TDP)是渗漏水磷素的主要形态。土壤淋溶水中总磷(TP)和总可溶性磷(TDP)含量均表现为优化施肥+猪粪有机肥(MP)>优化施肥+秸秆还田(SP)>优化施肥(P)>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)。土壤总磷(TP)淋失负荷在 0.295—0.493 kg/hm²之间。施用有机肥提高了淋溶水中的磷素含量,促进了土壤中磷素的淋失,同时显著提高了土壤中有效磷的含量,猪粪有机肥的促进作用比水稻秸秆大。减少化肥施用量有利于降低土壤磷素淋失。在综合考虑农业生产省本增效和控制农田面源污染的情况下,可以采取减量化肥配施有机肥的施肥模式。

关键词:减磷配施有机肥;稻油轮作;水稻土;磷素淋失

Effects of reduced-phosphorus fertilizer and combinations of organic fertilizers on phosphorus leaching in purple paddy soil with conventional paddy-upland rotation tillage

HAN Xiaofei^{1,2}, XIE Deti^{2,*}, GAO Ming², WANG Zifang², CHEN Chen³

1 Chongqing Agricultural Technology Extension Station, Chongqing 401121, China

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

3 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Liaoning Province Development and Reform Commission, Shenyang 110034, China

Abstract: To explore methods to reduce phosphorus leaching and thus improving river water quality, we conducted field experiments on the effects of reduced-phosphorus fertilizer and combined application of organic and inorganic fertilizers on phosphorus leaching in purple paddy soil with conventional paddy-upland rotation tillage. With these treatments, phosphorus seepage decreased over time, but the amount leached was high and variable in the early stages, gradually reaching stable equilibrium after 55 days. Total dissolved phosphorus (TDP) had the highest levels of phosphorus leaching into the waters of the purple paddy soil. The total phosphorus (TP) and total dissolved phosphorus (TDP) contents in soil leachates were

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

收稿日期:2016-02-21; 网络出版日期:2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xdt@swu.edu.cn

as follows: [optimized fertilizer + pig manure application] > [optimized fertilizer + straw return] > [optimized fertilizer] > [optimized fertilizer with phosphorus reduced by 20% + pig manure application] > [optimized fertilizer with phosphorus reduced by 20% + straw return] > [without phosphate]. TP loss ranged between 0.295 and 0.493 kg/hm². Organic fertilizer promoted phosphorus leaching, and the effect of pig manure was larger than that of rice straw. Decreasing the amount of chemical fertilizer can reduce the amount of phosphorus leached into the soil. To improve agricultural production and control nonpoint source pollution, it is important to reduce the use of chemical fertilizers and use combined application of organic and inorganic fertilizers.

Key Words: reduced-phosphorus fertilizer; combining organic fertilizers; conventional paddy-upland rotation tillage; purple paddy soil; phosphorus leaching

磷素不仅是植物生长发育所必需的大量营养元素^[1],同时也是湖泊水体富营养化限制性因子^[2-5]。植株所需的磷主要从土壤本身磷库和外界所施入土壤的磷肥中获得的。磷肥施入农田容易被土壤固定难以被植物所利用,当季利用率一般仅为 10%—25%^[6]。为了维持农业高产稳产,势必每年要向土壤中施加大量磷肥与生物有机肥,过量施肥的结果使得土壤耕层中磷素大量累积^[7-10],农田土壤中过量的磷素可以通过地表径流、侵蚀和淋溶的方式进入地表水体和地下水,从而造成农业面源污染^[11-12],进而给环境带来一系列问题,农田生态系统中磷的流失已经成为水体富营养化的重要来源^[13]。

国内外对磷素在土壤中的迁移、转化、循环及污染控制进行了较多研究^[14-27],同时土壤磷素行为与有机无机肥料协同之间关系也越来越被广大研究者所关注,我国有机肥磷流失研究大多集中在对畜禽粪便排放量、发生量的统计^[28],即使进行有机肥对水体富营养化影响研究也大多数是在实验室利用模拟土柱采用排水收集的方法,田间原位条件下研究较少,而磷肥减量配施不同有机肥对水旱轮作原位稻田土壤磷素渗漏淋失的影响还未有深入研究^[29]。本研究采用渗漏池长期定位监测试验,选择长江三峡地区常见的紫色土为研究对象,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土壤磷素淋溶规律进行了原位定点研究,发现了秸秆还田和猪粪有机肥配施化肥条件下紫色土渗漏水中磷素淋溶规律,分析了磷素淋失特征,探讨了不同有机肥对土壤磷素淋失的影响,对控制稻田磷素流失对地下水的污染、制定施磷消减优化方案和评价秸秆还田、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 试验地点与材料

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,位于重庆市北碚区西南大学试验农场,地处东经 106°26',北纬 30°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℃,年日照 1276.7 h,全年降水 1105.5 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,中性紫色土亚类,灰棕紫泥土属。长江三峡流域多分布此类土壤,因此,用作供试土壤具有广泛的代表性。试验田种植方式为水稻-油菜轮作。供试土壤基本理化性质为 pH 6.34,有机质 14.8 g/kg,全氮 1.4 g/kg,全磷 0.729 g/kg,全钾 14.9 g/kg,碱解氮 60.3 mg/kg,有效磷 41.2 mg/kg,速效钾 217 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)、优化施肥量磷减 20%+秸秆还田(SDP)、优化施肥量磷减 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 22500 kg/hm²,S 代表稻草秸秆还田,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 7500 kg/hm²。水稻品种为汕优 63 号。优化施肥量按每公顷施 N、P₂O₅、K₂O 分别为 150 kg、60 kg、75 kg 进行。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%)。磷、钾肥作基肥一次性施用,氮肥基肥和追肥各占 50%。有机肥作为底肥与土壤混合均匀施用。渗漏池小区面积 2 m×1 m,深 1.5 m,砖混结构,渗漏池池底采用 C20 钢筋混凝土现浇(掺防水剂);渗漏池墙体采用 M7.5 浆砌砖砌筑;墙体表面采用 2 cm 厚 1:2.5 防水砂浆抹面。小区修筑完成后按原装土层回填(至今已进行了 5 季的稻油水旱轮作种植),在距地面 40 cm、60 cm、100 cm 深处平铺 3 cm 厚粗砂砾,用 0.15 mm 尼龙网覆盖并安装陶土管和排水塑料管,每个小区之间都用 12 cm 浆砌砖墙(防水砂浆抹面)隔开,使之互不渗漏,并能够进行独立的排灌。塑料管与池外的排水收集瓶相连以收集淋溶渗漏液。田间随机排列。

1.3 样品采集与测定

2014 年 5 月 15 日进行水稻移栽,5 月 7 日施用基肥,8 月 20 日水稻收获。水稻整个生长期除了成熟期排水烤田外始终调节保持 5 cm 左右的田面水,分别在水稻施用基肥后第 7、14、21、28、35、45、55、65、75 和 85 天各测量并取一次 40 cm、60 cm、100 cm 土壤剖面的渗漏淋溶水样,每次获得淋溶水后收集于 200 mL 塑料瓶中^[30-31],当日分析测定其中的总磷 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,测试指标同淋溶水样。水稻收获后分别用土钻采集各处理小区 40 cm、60 cm、100 cm 剖面土壤样品。测定其全磷及其有效磷含量。总磷 TP 采用 H₂SO₄-HClO₄消解,钼锑抗比色法;总可溶性磷 TDP 采用先真空泵 0.45 μm 滤膜过滤,再 H₂SO₄-HClO₄消解,钼锑抗比色法;可反应性无机磷 MRP 采用直接真空泵 0.45 μm 滤膜过滤,然后钼锑抗比色法;颗粒态磷 PP (particle phosphorus) = TP - TDP;可溶性有机磷 DOP (dissolve organic phosphorus) =

TDP - MRP。稻田磷素渗漏淋失量 P 累积量(kg/hm²)计算公式 $P_i = \frac{C_{ij}V_{ij}}{100S}$;水稻生长季累积淋失量计算公式

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^{11} C_{ij}V_{ij}}{100S}$$

其中 P_i 为第 i 种施肥处理某形态磷累积淋溶流失量,单位是 kg/hm², C_{ij} 为第 i 种施肥处理第 j 次

淋溶渗漏水某形态磷浓度,单位是 mg/L, V_{ij} 为第 i 种施肥处理第 j 次淋溶渗漏水某形态磷溶液体积,单位是 mL, S 是淋溶试验小区横截面积单位是 m²。土壤基本理化性质按常规方法测定^[32],土壤 pH 采用电位法;土壤全磷采用碱熔-钼锑抗比色法;土壤有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法;土壤全氮采用凯氏定氮法;土壤碱解氮采用扩散法;土壤全钾、速效钾采用火焰光度计法;土壤有机质采用重铬酸钾容量法。

1.4 数据计算与统计分析方法

数据处理采用 SPSS17.0 进行统计分析,作图采用 Microsoft Excel2007、SigmaPlot12.0 处理,各处理均值多重比较采用 LSD 法,显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 水稻生长期不同处理土壤剖面淋溶水中各形态磷素动态变化

从图 1 可以看出,水稻生长期,0—40 cm 和 40—60 cm 土层,无论是只施用化肥还是有机无机肥配施处理的土壤淋溶水中 TP 浓度变化趋势大体一致,都是前一周浓度含量最高,其中 0—40 cm、40—60 cm 淋溶水中 TP 平均含量分别达到了 0.363 mg/L、0.306 mg/L,均大幅超过了水体富营养化的临界浓度 0.02 mg/L^[33],可能原因是本试验田是水稻-油菜水旱轮作土壤,油菜收获之后土壤较为干燥,并且土壤中有很多裂缝、动物洞穴和植物腐烂的根茎孔隙,在水田灌水施肥之后,大量的可溶态磷就顺着这些通道(优先流)快速到达土壤下部,从而导致前一周内各处理淋溶水中总磷浓度很高。之后就整体出现波动下降的趋势,这是因为一方面磷素进入土壤会被其中的矿物和无定型氧化物吸附固定,另一方面水稻生长发育过程中也吸收了部分磷素,这都导致土壤淋溶水中磷素浓度的降低。其中前 55 天淋溶水中 TP 浓度波动幅度最大,0—40 cm、40—60 cm

各处理淋溶水中 TP 平均浓度分别在 0.024—0.504 mg/L、0.016—0.473 mg/L 之间波动,不施磷肥(P0)处理波动幅度和下降幅度都是最小的。值得注意的是 60—100 cm 土层渗漏水中 TP 浓度变化很小。10 次取样检测数据显示,随着土层深度的增加,各处理淋溶水中 TP 浓度总体呈现波动下降的态势,说明磷素在土壤剖面中的移动迁移能力弱,但在施肥初期 40—60 cm 与 0—40 cm 渗漏水中 TP 浓度几乎相当,说明此时土壤中磷素还是有明显的向下迁移的趋势。

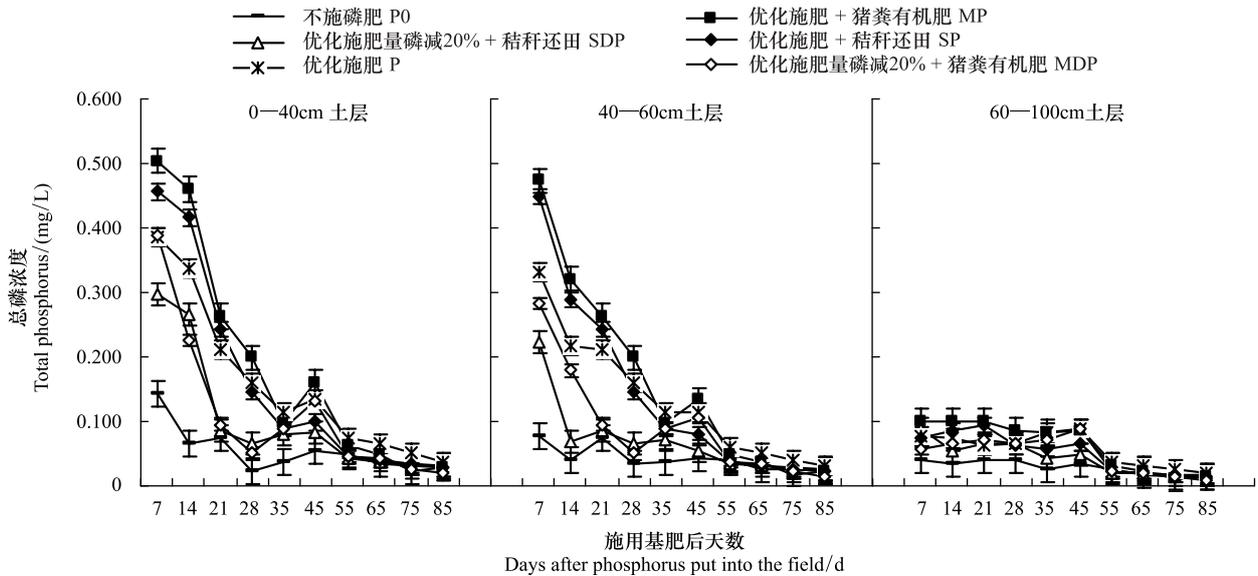


图 1 不同施肥处理渗漏水总磷 TP 浓度动态变化

Fig.1 Dynamic TP concentrations in percolating water of different fertilization treatment

土壤淋溶水中 TP 含量受到磷肥施用及有机肥的影响。同等条件下,猪粪有机肥处理和秸秆处理的土壤渗漏水中 TP 浓度都要高于不施猪粪和秸秆处理,化肥施用量大的 TP 浓度也高于化肥施用量小的。6 个处理土壤淋溶水中 TP 含量大小情况为,优化施肥+猪粪有机肥(MP)>优化施肥+秸秆还田(SP)>优化施肥(P)>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)。土壤渗漏水中 TP 含量结果总体可以说明,随着化学无机磷肥用量的增加和施用猪粪与秸秆都会提高土壤磷素的淋失风险,其中施用猪粪有机肥的风险要高于秸秆还田。

由图 2 可知,磷肥施用和有机肥配施对土壤淋溶水中 TDP 含量影响也比较明显。整体上,各处理 0—100 cm 土层淋溶水中 TDP 含量与 TP 含量的动态变化趋势较为一致,都是随着基肥施入天数的增加淋溶水中 TDP 含量呈降低趋势,同样条件下,随着化学磷肥的施用增加和有机肥的施入,土壤淋溶水中 TDP 含量都比较高。唯一不同的是 40—60 cm 土层中的 TDP 含量在 45 天之前大于 0—40 cm 土层,其中施入基肥第 7 天时优化施肥+猪粪有机肥(MP)和优化施肥+秸秆还田(SP)处理 40—60 cm 土层中淋溶水 TDP 浓度比 0—40 cm 土层浓度分别高出 0.114mg/L 和 0.146 mg/L,这可能就是与之前所说的水旱轮作土壤中磷素淋溶损失优先流(或大孔隙流)作用的结果。以上试验结果同样说明,化学磷肥的施用量增加会提高土壤中磷素的活性,增施有机肥对土壤磷素淋失贡献最大。

图 3 所示,淋溶水中 MRP 浓度变化与 TP、TDP 动态变化不尽一致。在基肥施入后的 14 天里,优化施肥+猪粪有机肥(MP)和优化施肥+秸秆还田(SP)处理的 0—100 cm 渗漏水中可反应无机磷 MRP 浓度是增加的,之后随着时间的增加逐步降低。相同条件下整体 MRP 含量大小表现为优化施肥+猪粪有机肥(MP)>优化施肥+秸秆还田(SP)>优化施肥(P)>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)。其中不施磷肥(P0)处理土壤各个剖面淋溶水中 MRP 浓度都很低,且几无波动。

由图 1—图 3 都可以明显的看出,60 cm 以下土层各施肥处理淋溶水中的 TP、TDP、MRP 浓度都波动不

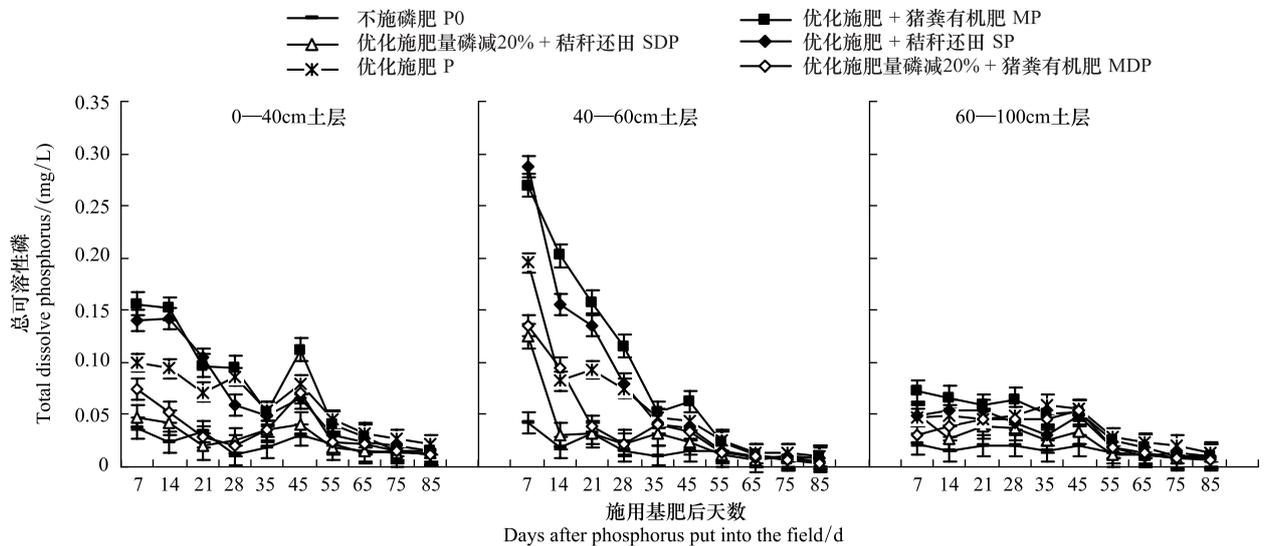


图 2 不同施肥处理渗漏水总可溶性磷 TDP 浓度动态变化

Fig.2 Dynamic TDP concentrations in percolating water of different fertilization treatment

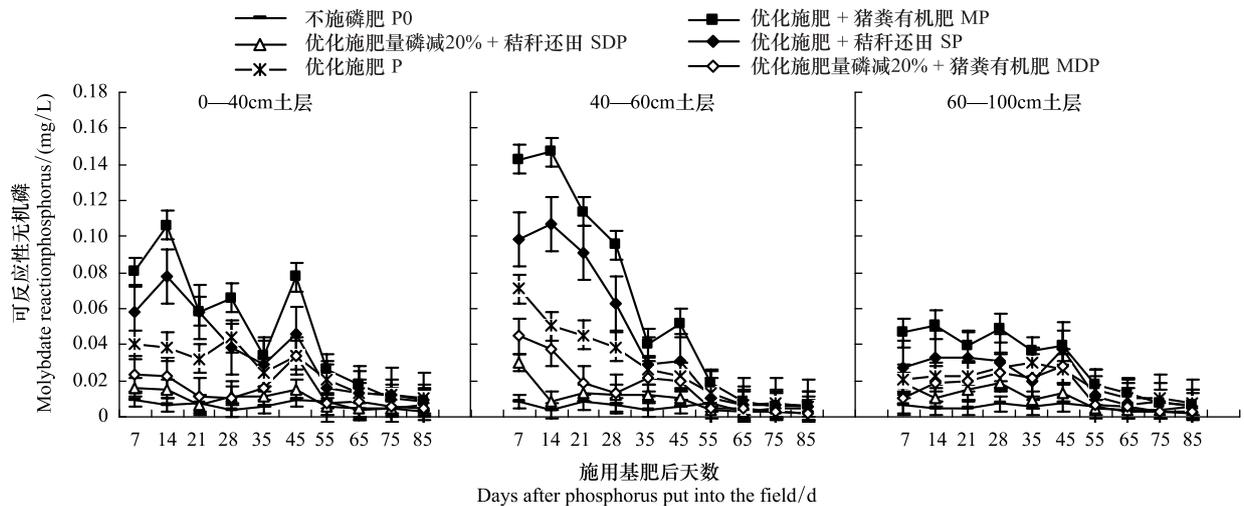


图 3 不同施肥处理渗漏水可反应无机磷 MRP 浓度动态变化

Fig.3 Dynamic MRP concentrations in percolating water of different fertilization treatment

大,虽然土壤中有优势流的存在,但是一般认为优先流可以影响的最低深度在地表下 60 cm 左右^[34]。所以 60—100 cm 土壤淋溶水中磷素浓度受优先流影响较小,加之磷素在土壤中被吸附固定不易迁移,故其含量较低且波动不大。

2.2 水稻生长期不同施肥处理总磷淋失量

水稻在生长期各处理 3 个土壤层次总磷 TP 淋失量如图 4 所示。各处理各层总磷 TP 淋失量范围在 0.068—0.224 kg/hm²。三层总磷淋失负荷在 0.295—0.493 kg/hm²之间。0—100 cm 土层,不施磷肥(P0)处理与其他施磷处理之间总磷淋失量差异显著,优化施肥+猪粪有机肥(MP)处理、优化施肥+秸秆还田(SP)处理与优化施肥(P)处理、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)处理间总磷淋失量差异显著,但是它们两组处理间差异不显著。其中优化施肥+猪粪有机肥(MP)处理三层总磷淋失量最多,为 0.493 kg/hm²,不施磷肥(P0)处理三层总磷淋失量最少,为 0.295 kg/hm²,比优化施肥(P)处理总磷淋失量降低 39%。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)

处理比优化施肥+猪粪有机肥 (MP) 和优化施肥+秸秆还田 (SP) 处理三层总磷淋失量分别降低 21.7% 和 19.6%。土壤剖面总磷淋失的变化趋势是随着土层深度的增加,淋失量有所减少,60—100 cm 土层与 0—40 cm 土层相比,处理优化施肥+猪粪有机肥 (MP) 和优化施肥+秸秆还田 (SP) 减少了 59.8% 和 58.2%,对照不施磷肥 (P0) 处理减少了 40%。0—40 cm 土层各施磷肥处理间总磷淋失量差异不显著,与不施磷肥处理总磷淋失量之间差异显著。40—60 cm 土层有机无机肥配施处理与其他处理间总磷淋失量差异显著,有机肥处理之间差异不显著。60—100 cm 土层各处理间总磷淋失量差异均不显著。

2.3 不同施肥处理对不同层次土壤全磷和有效磷含量影响

表 1 所示,水稻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—40 cm 土层,土壤全磷含量大小是,优化施肥+猪粪有机肥 (MP) (0.721 g/kg) > 优化施肥 (P) (0.719 g/kg) > 优化施肥量磷减 20%+猪粪有机肥 (MDP) (0.711 g/kg) > 优化施肥+秸秆还田 (SP) (0.681 g/kg) > 优化施肥量磷减 20%+秸秆还田 (SDP) (0.669 g/kg) > 不施磷肥 (P0) (0.621 g/kg)。其中 SDP 与 SP 处理之间差异性不显著,MDP、MP、P 之间差异也不显著,但是猪粪有机肥处理与秸秆及单纯施用化肥处理之间差异显著,且施肥处理与不施磷肥处理之间差异显著。在 40—60 cm 土层,土壤中全磷含量与 0—40 cm 土层大致一样的规律。其中优化施肥+秸秆还田 (SP)、优化施肥量磷减 20%+秸秆还田 (SDP) 与不施磷肥 (P0) 之间差异都不显著,但是与施用化肥和猪粪有机肥处理的差异显著。60—100 cm 土层,各处理之间全磷含量变化不大,没有显著性差异。

表 1 不同处理不同层次土壤全磷、有效磷含量

Table 1 Total phosphorus and available phosphorous of different soil depth in different fertilization treatment

处理 Treatment	全磷 Total phosphorus/(g/kg)			有效磷 Available phosphorous/(mg/kg)		
	0—40 cm	40—60 cm	60—100 cm	0—40 cm	40—60 cm	60—100 cm
P0	0.621±0.007c	0.592±0.005c	0.628±0.002a	39.1±0.64c	30.6±0.5d	23.8±0.39c
SDP	0.669±0.005b	0.607±0.003bc	0.631±0.007a	42.9±0.71ab	31.9±0.46cd	24.9±0.64c
MDP	0.711±0.002a	0.665±0.001a	0.634±0.001a	43.1±0.79ab	32.4±0.66c	25.1±0.67c
P	0.719±0.003a	0.679±0.004a	0.630±0.002a	42.6±1.02b	32.7±0.71c	25.0±0.78c
SP	0.681±0.001b	0.610±0.007bc	0.629±0.004a	43.8±0.89a	34.7±0.68b	28.3±1.05b
MP	0.721±0.003a	0.683±0.008a	0.641±0.007a	44.0±1.34a	36.8±1.54a	30.5±1.36a

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

各处理之间有效磷含量也差异明显。0—40 cm 土层,优化施肥+猪粪有机肥 (MP) 处理的土壤中速效磷含量最高,达到了 44 mg/kg,不施磷肥处理的速效磷含量最低仅为 39.1 mg/kg。优化施肥+秸秆还田 (SP) 处理的土壤中有有效磷的含量也达到了 43.8 mg/kg。即使优化施肥量磷减 20%+秸秆还田 (SDP) 和优化施肥量磷减 20%+猪粪有机肥 (MDP) 处理土壤中有有效磷含量也都高于优化施肥 (P) 处理。40—60 cm 土层,优化施肥+猪粪有机肥 (MP)、优化施肥+秸秆还田 (SP)、优化施肥 (P) 处理之间有效磷含量达到了显著性差异水平。60—100 cm 土层,优化施肥+猪粪有机肥 (MP) 与优化施肥+秸秆还田 (SP) 之间差异显著,且他们与其他处理

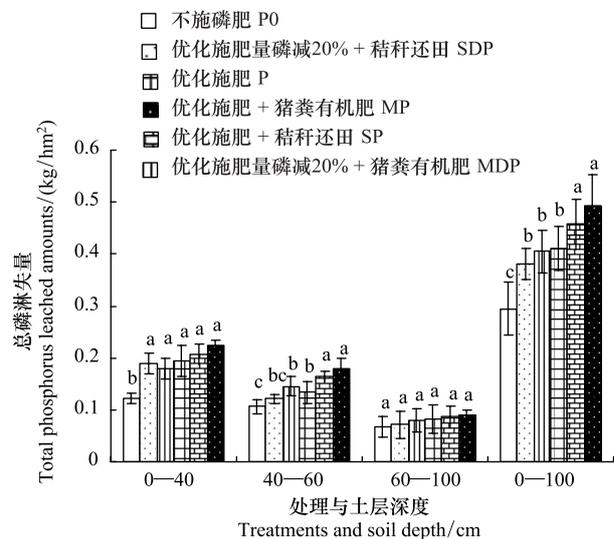


图 4 水稻生长期不同层次土壤总磷淋失量

Fig. 4 Phosphorus leaching amount of different soil depth in rice growth period

a, b, c 不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

之间也都达到了显著性差异,但是其他处理间并没有显著性差异,这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,李学平^[20]的研究也证实了这一点。

3 讨论

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^[35-36]。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化肥配施不同有机肥对土壤磷素淋失的影响。本研究结果表明,同等条件下化肥减量可以降低淋溶水中磷素含量,从而减少磷素的渗漏淋失,龚蓉^[37]在中南丘陵旱地磷肥减量对不同形态磷素养分淋失的影响中指出,磷肥减量 10%—30%后渗漏水中总磷及可溶性渗漏淋失量均显著减少。胡宏祥^[26]在秸秆还田配施化肥对黄褐土氮磷淋失、Wang^[38]在秸秆配施化肥对稻田土壤中氮磷淋失等研究都得出类似结论。

本研究结果表明,猪粪有机肥和秸秆还田对土壤磷素淋溶具有一定的促进作用,且猪粪有机肥的作用比秸秆作用要大。这是因为猪粪和稻草秸秆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,提高土壤中的孔隙度^[39],更加有利于土壤中优势流的形成,而且在水稻生长初期刚施入基肥,这时候施入土壤中的磷还未被土壤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深层地下水迁移的风险。再者,有很多学者认为施用有机肥料提高磷素的活性是有机肥影响了土壤磷的吸附解吸而起作用的。有机无机肥配施模式下,有机肥在分解作用下产生有机酸,有机酸与磷酸根之间竞争吸附,从而会降低土壤矿物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。李想^[40]研究了有机无机肥配合对土壤磷素吸附、解吸和迁移的影响,发现了有机无机肥配施可以减少磷素的固定,可以促进磷素在土壤中迁移。另外也有研究^[41]表明,某些有机物料施入土壤后,土壤磷素可以与其有机质的功能团(如羟基)等发生螯合作用,从而能够降低磷素在土壤溶液中的迁移能力。是否是因为稻草秸秆施入土壤中同时发生了类似的化学变化过程导致对土壤磷素的活化作用比猪粪有机肥作用要弱,这个问题还需要进一步研究。

随着农田中化学肥料的长期施用,土壤中磷素出现盈余,尤其在施用化肥的同时配施有机肥可以使磷素在土壤中显著累积,并出现向下迁移的趋势,农田土壤磷素对水环境影响的潜能明显提高。因此在施用有机肥的同时要考虑有机肥磷带入量以及土壤中多余累积的磷素的去向问题。

4 结论

(1) 水稻生长期内稻田土壤淋溶水中磷素含量呈现波动下降趋势。淋溶水中 TP 和 TDP 浓度变化趋势一致,均在施用基肥 7 天达到最大值,然后就逐渐下降;淋溶水中 TP 浓度随着土层深度增加而降低。

(2) 施用猪粪有机肥和稻草秸秆提高了淋溶水中的磷素含量,促进了土壤中磷素的淋失,猪粪有机肥的促进作用比秸秆大。同一时期各处理同一土层中各形态磷素含量大小依次为,优化施肥+猪粪有机肥(MP)>优化施肥+秸秆还田(SP)>优化施肥(P)>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)。

(3) 化学磷肥减量有利于降低土壤淋溶水中磷素含量。不施磷肥(P0)处理比优化施肥(P)处理总磷淋失量降低 39%。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)处理比优化施肥+猪粪有机肥(MP)和优化施肥+秸秆还田(SP)处理三层总磷淋失量分别降低 21.7%和 19.6%。

(4) 施用猪粪有机肥和稻草秸秆可以显著提高土壤中有效磷的含量,但对土壤全磷含量影响不大。

参考文献(References):

[1] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 169-175.

- [2] 吕家珑. 农田土壤磷素淋溶及其预测. 生态学报, 2003, 23(12): 2689-2701.
- [3] Haygarth P M, Sharpley A N. Terminology for phosphorus transfer. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 10-14.
- [4] 甄兰, 廖文华, 刘建玲. 磷在土壤环境中的迁移及其在水环境中的农业非点源污染研究. 河北农业大学学报, 2002, 25(Z1): 55-59.
- [5] 张乃明, 洪波, 张玉娟. 农田土壤磷素非点源污染研究进展. 云南农业大学学报, 2004, 19(4): 453-456, 465.
- [6] 胡宁, 袁红, 蓝家程, 袁道先, 傅瓦利, 王志林. 岩溶石漠化区不同植被恢复模式土壤无机磷形态特征及影响因素. 生态学报, 2014, 34(24): 7393-7402.
- [7] 王新民, 侯彦林. 有机物料对石灰性土壤磷素形态转化及吸附特性的影响研究. 环境科学学报, 2004, 24(3): 440-443.
- [8] 颜晓, 王德建, 张刚, 冉景, 郑继成. 长期施磷的产量效应及其环境风险评价. 环境科学, 2013, 34(8): 3205-3210.
- [9] 戚瑞生, 党廷辉, 杨绍琼, 马瑞萍, 周丽萍. 长期轮作与施肥对农田土壤磷素形态和吸持特性的影响. 土壤学报, 2012, 49(6): 1136-1146.
- [10] Zheng Z M, Simard R R, Lafond J, Parent L E. Changes in phosphorus fractions of a Humic Gleysol as influenced by cropping systems and nutrient sources. *Canadian Journal of Soil Science*, 2001, 81(2): 175-183.
- [11] Hendricks N P, Sinnathamby S, Douglas-Mankin K, Smith A, Sumner D A, Earnhart D H. The environmental effects of crop price increases: nitrogen losses in the U.S. Corn Belt. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2014, 68(3): 507-526.
- [12] McDowell R W. Minimising phosphorus losses from the soil matrix. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012, 23(6): 860-865.
- [13] 毛战坡, 杨素珍, 王亮, 程东升. 磷素在河流生态系统中滞留的研究进展. 水利学报, 2015, 46(5): 515-524.
- [14] 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. 环境科学学报, 2001, 21(3): 344-348.
- [15] 李庆召, 王定勇, 朱波. 自然降雨条件下紫色土区磷素的非点源输出规律. 农业环境科学学报, 2005, 23(6): 1050-1052.
- [16] 王建国, 杨林章, 单艳红, 沈明星, 路长纓. 长期施肥条件下水稻土磷素分布特征及对水环境的污染风险. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3): 88-92.
- [17] 李同杰, 刘晶晶, 刘春生, 杨力. 磷在棕壤中淋溶迁移特征研究. 水土保持学报, 2006, 20(4): 35-39.
- [18] 刘方, 罗海波, 舒英格, 刘元生, 何腾兵, 龙健. 黄壤旱地-水系统中磷释放及影响因素的研究. 中国农业科学, 2006, 39(1): 118-124.
- [19] 庄远红, 吴一群, 李延. 有机无机磷肥配施对蔬菜地土壤磷素淋失的影响. 土壤, 2007, 39(6): 905-909.
- [20] 李学平, 孙燕, 石孝均. 紫色土稻田磷素淋失特征及其对地下水的的影响. 环境科学学报, 2008, 28(9): 1832-1838.
- [21] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 罗专溪. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量. 水利学报, 2009, 40(6): 659-666.
- [22] 李学平, 石孝均. 模拟条件下农田磷素渗漏淋失特征研究. 环境科学与技术, 2010, 33(3): 32-36.
- [23] 刘文静, 张平究, 董国政, 孔令柱, 郑真, 司红君. 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化. 生态学报, 2014, 34(10): 2654-2662.
- [24] 曹雪艳, 李永梅, 张怀志, 张维理, 王自林. 滇池流域原位模拟降雨条件下不同土壤质地磷素流失差异研究. 水土保持学报, 2010, 24(3): 13-17.
- [25] 秦伟, 陆欢欢, 王芳, 田苗苗, 赵言文. 太湖流域典型农田系统土壤中磷的流失. 江苏农业科学, 2012, 40(6): 321-323.
- [26] 胡宏祥, 汪玉芳, 陈祝, 刘晶, 徐启荣, 马友华, 王闵. 秸秆还田配施化肥对黄褐土氮磷淋失的影响. 水土保持学报, 2015, 29(5): 101-105.
- [27] 叶玉适, 梁新强, 李亮, 苑俊丽, 朱思睿. 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. 环境科学学报, 2015, 35(4): 1125-1135.
- [28] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.
- [29] 李学平, 邹美玲. 农田土壤磷素流失研究进展. 中国农学通报, 2010, 26(11): 173-177.
- [30] Li C F, Cao C G, Wang J P, Zhan M, Yuan W L, Ahmad S. Nitrogen losses from integrated rice - duck and rice - fish ecosystems in southern China. *Plant and Soil*, 2008, 307(1/2): 207-217.
- [31] 徐琦, 杨林章, 董元华, 等. 中国稻田生态系统. 北京: 中国农业出版社, 1998: 156.
- [32] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 141-149.
- [33] Sharpley A, Meyer M. Minimizing agricultural nonpoint-source impacts: a symposium overview. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(1): 1-3.
- [34] 杨学云, Brookes P C, 李生秀. 土壤磷淋失机理初步研究. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 479-482.
- [35] 杨茜, 蒋珍茂, 石艳, 闫金龙, 何明靖, 魏世强. 低分子量有机酸对三峡库区消落带典型土壤磷素淋溶迁移的影响. 水土保持学报, 2015, 29(1): 126-131.
- [36] 李宗新, 董树亭, 王空军, 刘鹏, 张吉旺, 王庆成, 刘春晓. 不同施肥条件下玉米田土壤养分淋溶规律的原位研究. 应用生态学报, 2008, 19(1): 65-70.
- [37] 龚蓉, 刘强, 荣湘民, 张玉平. 中南丘陵旱地磷肥减量对不同形态磷素养分淋失的影响. 水土保持学报, 2015, 29(5): 106-110.
- [38] Wang J, Wang D J, Zhang G, Wang Y, Wang C, Teng Y, Christie P. Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention. *Agricultural Water Management*, 2014, 141: 66-73.
- [39] 聂军, 郑圣先, 杨曾平, 廖育林, 谢坚. 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. 中国农业科学, 2010, 43(7): 1404-1413.
- [40] 李想, 刘艳霞, 刘益仁, 徐阳春. 有机无机肥配合对土壤磷素吸附、解吸和迁移特性的影响. 核农学报, 2013, 27(2): 253-259.
- [41] Haygarth P M, Jarvis S C. Transfer of phosphorus from agricultural soil. *Advances in Agronomy*, 1999, 66: 195-249.