



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

腐植酸钾与磷肥施用方式对土壤磷素移动性的影响

王敏, 刘石磊, 张帅, 张强, 慕康国, 陈清

引用本文:

王敏, 刘石磊, 张帅, 等. 腐植酸钾与磷肥施用方式对土壤磷素移动性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 209–215.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0028>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超微细活化磷肥对小白菜生长及磷利用的影响

王桂伟, 陈宝成, 王国鹏, 李晗灏, 梁海, 周华敏, 陈剑秋

农业资源与环境学报. 2019, 36(1): 9–15 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0065>

模拟淋溶条件下沼液对菜田土壤磷素淋洗及其形态的影响

王敏锋, 陈硕, 朱睿, 刘石磊, 陈清, 李吉进, 许俊香

农业资源与环境学报. 2017, 34(4): 368–375 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0289>

施用生物炭对云南烟区典型土壤养分淋失的影响

李江舟, 张庆忠, 娄翼来, 张立猛, 杜章留, 刘杏认, 王一丁

农业资源与环境学报. 2015(1): 50–55 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0213>

施用腐植酸和生物肥对草莓品质、产量及土壤农化性状的影响

刘继培, 刘唯一, 周婕, 李桐, 赵跃, 张蒙

农业资源与环境学报. 2015(1): 56–61 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0205>

钱塘江附近农田土壤磷的积累及其流失的潜在风险

应金耀, 阮弋飞, 邬奇峰, 谢国雄, 章明奎

农业资源与环境学报. 2019, 36(1): 26–32 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0051>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王 敏, 刘石磊, 张 帅, 等. 腐植酸钾与磷肥施用方式对土壤磷素移动性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 209–215.

WANG Min, LIU Shi-lei, ZHANG Shuai, et al. Effect of potassium humate and phosphate fertilizer application method on soil phosphate mobility[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(2): 209–215.

腐植酸钾与磷肥施用方式对土壤磷素移动性的影响

王 敏^{1,3}, 刘石磊², 张 帅², 张 强^{1,3}, 慕康国², 陈 清^{1,2*}

(1. 养分资源开发与综合利用国家重点实验室, 山东 临沂 276700; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 3. 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东 临沂 276700)

摘 要:为探明腐植酸与磷肥施用方式对土壤磷素移动性和淋失量的影响,通过室内土柱淋溶试验,分别设计了不施肥(CK)、基施腐植酸钾追施/不追施磷肥(HA-P、HA)、基施磷肥追施/不追施腐植酸钾(P-HA、P)和磷肥腐植酸钾共同基施(P+HA)共6个处理,来探讨将腐植酸水溶性肥料中的主要原料腐植酸钾与磷肥按照不同施用方式施入土壤后对土壤磷素剖面迁移能力和淋出的影响。结果表明:在相同的灌溉条件下,HA-P处理显著增加了土壤磷素的淋出,分别比P-HA、P和P+HA 3个处理的磷素淋出总量高244.08%、78.51%和35.34%,而P-HA则显著降低了土壤磷素的淋出量;P+HA和P-HA处理土壤剖面的速效磷和全磷含量均随土层深度的增加而显著增加,与P处理结果相似,而HA-P处理剖面各层土壤的速效磷和全磷含量差异较小;HA处理会使土壤磷素淋出略有增加。研究表明,腐植酸钾与磷肥等量输入时,以腐植酸钾为基肥、磷溶液进行追肥的施用方式对土壤磷素移动的促进作用最大,有较高的淋失风险,而基施磷肥、追施腐植酸钾则可以显著控制土壤剖面磷素移动,降低土壤磷素的淋出量。

关键词:腐植酸钾;磷肥;施用方式;磷迁移;淋失风险

中图分类号:S143

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)02-0209-07

doi: 10.13254/j.jare.2019.0028

Effect of potassium humate and phosphate fertilizer application method on soil phosphate mobility

WANG Min^{1,3}, LIU Shi-lei², ZHANG Shuai², ZHANG Qiang^{1,3}, MU Kang-guo², CHEN Qing^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Efficient Development and Comprehensive Utilization of Nutrient Resources, Linyi 276700, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Kingenta Ecological Engineering Group Co., Ltd., Linyi 276700, China)

Abstract: With the popularization of humic acid functional water-soluble fertilizers, the risk of non-point source pollution caused by leaching of soil phosphorus has increased because humic acid has a significant effect on the mobility of soil phosphorus. It is particularly important to determine the influence of application methods of humic acid and phosphate fertilizer on the mobility and leaching of phosphorus in soil. The optimized application method of humic acid fertilizers may contribute to the reduction of phosphorus leaching and non-point source pollution. In the current study, the effects of the application method for potassium humate and phosphate fertilizer (the main raw materials of humic acid water-soluble fertilizer) on the soil phosphorus migration ability and leaching were investigated using a soil column leaching test. The results showed that under the same irrigation conditions, application of phosphate fertilizer topdressing with potassium humate as the base fertilizer significantly increased soil phosphate leaching, and was 244.08%, 78.51% and 35.34% greater than that of the treatment applications for potassium humate topdressing with phosphate fertilizer as a base fertilizer, phosphate fertilizer as a base fertilizer without potassium humate topdressing, and phosphate fertilizer and potassium humate as a base fertilizer, respectively. The content of available phosphorus and total phosphorus in soil increased with the increase of soil depth in the treatments of application of phosphate fertilizer and potassium humate as a base fertilizer and application of potassium humate topdressing with phosphate fertilizer as a base fertilizer, which was similar to that of the phosphate fertilizer as a base fertilizer without potassium humate topdressing treatment. There was little effect on the content of available phosphorus and total phosphorus in the different layers of soil when potassium humate was applied as a

收稿日期: 2019-01-14 录用日期: 2019-05-20

作者简介: 王 敏(1980—), 女, 山东泰安人, 硕士, 高级农艺师, 从事新型肥料研究。E-mail: wangmin@kingenta.com

*通信作者: 陈 清 E-mail: qchen@cau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200405)

Project supported: National Key R&D Program of China (2016YFD0200405)

<http://www.aed.org.cn>

base fertilizer with phosphorus fertilizer topdressing. Phosphorus leaching slightly increased when potassium humate was used as a base fertilizer. In conclusion, the same input amount of potassium humate as a base fertilizer and phosphorus solution as topdressing fertilizer had the greatest promoting effect on soil phosphorus movement, which increased the risk of phosphate leaching. Phosphate movement and leaching in soil could be reduced when phosphorus solution and potassium humate were used as the base fertilizer and topdressing fertilizer, respectively.

Keywords: potassium humate; phosphate fertilizer; application method; phosphorus migration; leaching risk

施用磷肥是为作物生长发育提供所必需磷素的主要途径。传统观点认为,磷肥施入土壤后,会与土壤碳酸盐和钙、铁、铝等活性金属阳离子强烈作用,被显著吸附固定和沉淀,使其在土壤中难以移动和被植物吸收利用,尤其是在高pH、高钙离子含量的石灰性土壤中,磷素的固定作用更加强烈^[1],但越来越多的研究表明,不同的土壤改良措施会显著影响土壤磷素的赋存形态,进而增加土壤磷素移动和流失的风险。腐植酸是一种富含羧基、酚羟基、醇羟基等活性官能基团,并具有一定物理、化学、生物活性的天然高分子物质^[2]。但由于腐植酸本身的吸附作用或其解离出的羧基等活性基团的存在,施入土壤后会对土壤中磷素的吸附解吸过程、沉淀溶解过程产生显著影响^[3-4]。有文献报道,腐植酸与磷肥混合施用,可以减少土壤无机磷的固定、活化土壤固持的磷^[5],增加土壤有效磷含量^[6],增加磷在土壤中的垂直移动距离至4~6 cm^[7-8]和肥际微域中水溶性磷的含量和迁移距离,并促使磷素由肥源向周围土壤扩散^[9]。因此,通过施用腐植酸增加磷素有效性并改变土壤磷素移动性和淋失风险受到越来越多的关注。

外源添加腐植酸对土壤磷素形态转化和释放的影响与其添加量和添加时间有关^[10]。王斌等^[11]在典型灰漠土的试验表明,腐植酸的施用量达到一定水平后会活化土壤固持的磷,且土壤速效磷含量会随着腐植酸用量的增加而增加。而腐植酸与磷不同添加顺序会导致针铁矿对磷吸附量的显著差异,并且对体系中磷吸附达到平衡的时间产生显著影响,先添加磷再添加腐植酸会使体系中磷的吸附平衡变得更加缓慢^[12]。

随着水肥一体化技术的发展和腐植酸水溶肥的大力推广和应用,大量的腐植酸水溶肥被施用在农田土壤中,但目前仍未有针对磷素施用安全和淋失风险的腐植酸施用指南和方法。基于此,探究腐植酸钾与磷肥的施用方式差异是否会影响土壤磷素有效供给,改变土壤磷素的剖面迁移能力、增加土壤磷素的淋溶风险,对于推进腐植酸与磷素耦合作用机理研究,指导农业中腐植酸水溶性肥料的正确使用,防止农业磷素

面源污染等均具有重要意义。本文拟通过室内土柱淋洗试验,探究腐植酸钾与磷肥的不同施用方式对土壤剖面磷素移动的影响,并剖析土壤中磷素的迁移与土壤理化性状之间的相关性,以及不同施用方式下磷素淋出量的差异,为提高磷素的植物有效性、磷肥利用率,以及降低土壤磷素的淋失风险提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验装置

试验装置如图1所示。淋洗柱为内径2.5 cm、高20 cm的PVC管,柱体上部留有4 cm的空间,用于盛放淋溶液。柱体底部自下而上依次为纱布、滤纸和1 cm厚的石英砂(分析纯)过滤层,装填土壤为15 cm高,土柱中装填土壤的容重为1.36 g·cm⁻³。将柱体固定在稳定的铁架台上,使柱体保持与地面垂直,柱体正下方用塑料瓶收集土柱淋洗液。

1.1.2 供试材料

供试石灰性土壤取自北京市大兴区农业技术示范站,采集越冬日光温室0~30 cm的表层鲜土,去除作物根茎、石块,自然风干后过1 mm筛备用,供试土壤理化性状见表1。

1.1.3 供试腐植酸钾

试验所用的腐植酸钾是以木本泥炭为原料通过碱液提取获得的,腐植酸钾的pH为8.5,有机碳含量为50.3%,含氮量为8.7 g·kg⁻¹。具体提取方法如下:称取过0.25 mm筛的木本泥炭1 kg于反应釜中,加入浓度为0.1 mol·L⁻¹的氢氧化钾溶液8 L,缓慢升温至90℃,边升温边搅拌,当温度恒定后继续反应1 h。将反应后的溶液静置,待温度下降至常温后,将上清液在4000 r·min⁻¹下离心10 min,倾倒上清液于托盘中并置于65℃的烘箱中烘干,烘干后的腐植酸钾过0.25 mm筛备用。

1.1.4 供试淋洗溶液

试验所用磷肥溶液和腐植酸钾溶液为磷酸二氢钾(KH₂PO₄,分析纯)和先前制备的腐植酸钾溶于超纯水中。

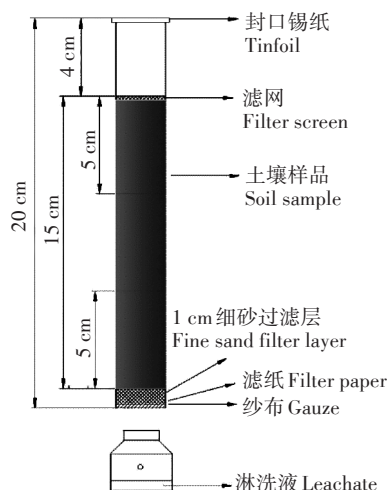


图1 淋洗试验装置

Figure 1 Leaching experiment device

1.2 试验设计

试验共设6个处理,每个处理3次重复,试验过程分4个阶段进行,包括一个培养阶段和3个淋洗阶段,每个阶段均为7 d。

试验设计如下:①不施肥(CK),淋洗液为超纯水;②基施磷肥追施腐植酸钾(P-HA),前两阶段淋洗液为腐植酸钾水溶液,后一阶段为超纯水;③基施腐植酸钾追施磷肥(HA-P),前两阶段淋洗液为 KH_2PO_4 水溶液,后一阶段为超纯水;④基施磷肥和腐植酸钾(P+HA),淋洗液为超纯水;⑤基施磷肥不追施腐植酸钾(P),淋洗液为超纯水;⑥基施腐植酸钾不追施磷肥(HA),淋洗液为超纯水。

试验土壤的装填量为100 g,根据田间土壤容重压实土壤以规避试验装填可能引起的优势流,磷酸二氢钾的施用量为0.989 g(相当于 $300 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的施用量),腐植酸钾的施用量为1.5 g(m/m ,1.5%的土壤施用量),所有处理的土壤在淋洗之前均先在恒温恒湿(25°C ,70%土壤最大持水量)条件下培养7 d,并通过测定质量和加水保持土壤持水量不变。7 d后,加水至土壤的最大持水量,进行淋洗。不同处理淋洗液均配制300 mL或超纯水300 mL,淋洗分为三个阶段,前两个阶段每阶段淋洗溶液150 mL(相当于300 mm的

灌溉量),第3阶段所有处理均用150 mL的超纯水淋洗。具体淋洗方式如下:每阶段前6 d每日早8点加超纯水或磷溶液15 mL,晚11点加10 mL,最后1 d使土柱中溶液的淋洗自行调节至稳定状态。每次灌水前收集淋洗液,于 4°C 冰箱保存,每个处理在1个淋洗阶段收集的淋洗液作为1个淋洗液样品。

淋洗试验结束后,将各处理土柱土壤自上而下分为0~5、5~10、10~15 cm三层进行土壤采集,采集土壤自然风干后过2 mm筛进行相关指标测定。

1.3 分析指标与方法

土壤全磷采用硫酸-高氯酸消解、钼锑抗比色法测定。土壤速效磷用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的碳酸氢钠浸提(土水比1:20, m/V)后,钼锑抗比色法测定。淋洗液中总磷采用硝酸-双氧水消解、钼锑抗比色法测定。土壤pH、EC、有机质等指标采用常规方法测定。

1.4 数据处理与统计

采用Microsoft Excel 2010软件和IBM SPSS Statistics 20对数据进行统计分析和计算,所有数据结果均以3次重复的平均值表示,差异显著性分析采用LSD法,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面理化性状

2.1.1 剖面土壤EC和pH变化

不同处理淋洗后各层土壤的EC值如图2a所示。各处理土壤在经历大水淋洗后,土壤EC值相较于原土($758 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)均降低显著,CK处理变化最显著。在施用磷肥或腐植酸钾的处理中,随着土壤深度的增加,各处理土壤的电导率均呈显著增加趋势,说明随着淋洗的进行,土壤中水溶性盐的下移显著。但腐植酸钾与磷肥不同施用方式显著影响土壤水溶性盐的下移过程,P+HA处理0~5 cm和5~10 cm的土层土壤中水溶性盐的含量低于P-HA和HA-P处理。说明腐植酸钾和磷肥共同作基肥再用水进行淋洗会导致更多的水溶性盐的下移。

淋洗后,不同处理不同土层土壤pH值如图2b所示。CK处理各土层土壤pH在经历大水淋洗后显著

表1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Properties of the tested soil in the leaching experiment

供试土壤 Soil	pH	EC/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	速效磷 Available phosphorus/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾 Available potassium/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷 Total phosphorus/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 Total nitrogen/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机质 Organic matter/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	容重 Bulk density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	饱和含水量 Saturation water content/ $\text{mL} \cdot \text{cm}^{-3}$
石灰性土壤 Calcareous soil	7.67	758	112	224	1.23	1.60	28.5	1.36	0.297

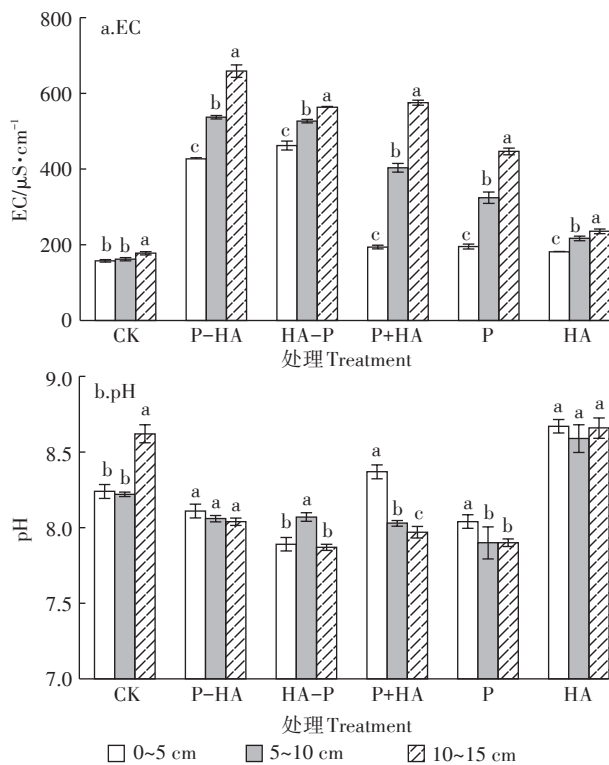


Figure 2 Effects of potassium humate and phosphate fertilizer application method on soil EC and pH

上升超过0.5个单位,5~15 cm层土壤pH升幅最大。试验所用的腐植酸钾为碱性,其本身pH高于土壤pH,试验中施用磷肥为磷酸二氢钾,其水溶液呈酸性,因此,HA处理0~10 cm土壤的pH均高于CK处理,而P处理各层土壤的pH均低于CK处理。HA处理各土层土壤间pH无显著差异,而P处理0~5 cm土壤的pH显著高于5~15 cm土层。在腐植酸钾与磷肥不同施用方式的三个处理(P-HA、HA-P和P+HA)中,HA-P处理显著降低了0~5 cm和10~15 cm土层土壤的pH,P+HA处理则显著提高了0~5 cm土层土壤的pH。说明腐植酸钾与磷肥不同施用方式显著影响土壤剖面的pH特征。

2.1.2 土壤剖面有机质

试验中各处理不同土层土壤有机质含量如图3所示。总体而言,施用腐植酸钾的所有处理均显著提高了土壤有机质含量。对添加腐植酸钾和磷肥的三个处理(P-HA、HA-P和P+HA)进行比较发现,P-HA处理显著提高了0~5、5~10 cm土层土壤的有机质含量,而基施腐植酸钾处理(HA-P、HA+P)均未导致土

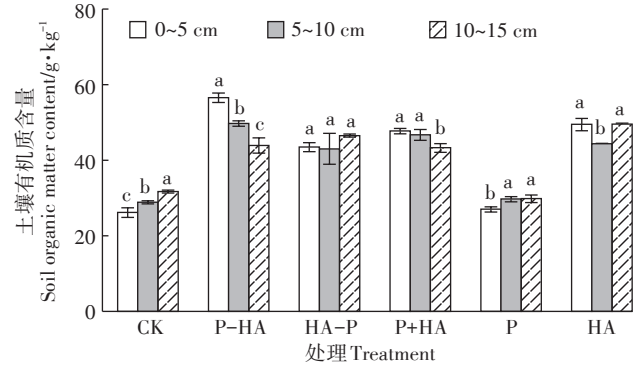


Figure 3 Effects of potassium humate and phosphate fertilizer application method on soil organic matter content

壤剖面土壤有机质含量发生显著变化。而在CK处理和P处理中,0~5 cm表层土壤的有机质含量显著低于5~10、10~15 cm土层,说明两个处理中有机质均存在移动现象。

2.2 土壤剖面磷含量

2.2.1 速效磷含量

腐植酸钾与磷肥不同施用处理淋洗后各土层土壤的速效磷含量如图4所示。由图4可知,未施用磷肥的CK和HA处理,5~10 cm和10~15 cm土层土壤的速效磷含量均显著大于0~5 cm的表层土壤,说明在水的淋洗作用下,土壤磷素存在明显移动。HA处理5~10 cm和10~15 cm土层土壤速效磷含量均大于CK处理相应土层,而HA处理中0~5 cm土层土壤速效磷含量小于CK处理,说明腐植酸钾活化了部分磷素并促进磷素在土壤中的移动。

在基施腐植酸钾的基础上,追施磷肥显著增加了土壤剖面的速效磷含量,但对比HA-P和P处理发现,HA-P处理显著提高了0~5 cm土层土壤速效磷水

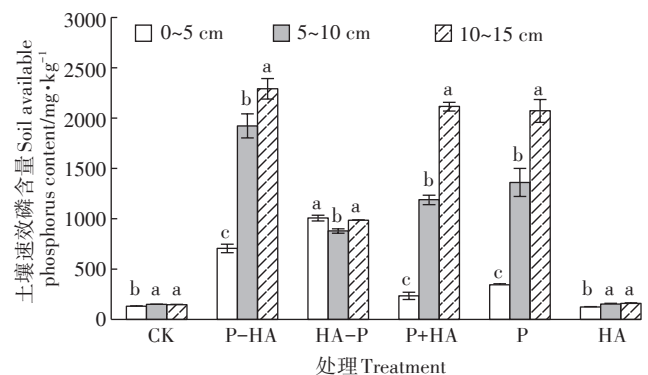


Figure 4 Effects of potassium humate and phosphate fertilizer application method on soil available phosphorus content

平,但各土层之间的差异显著小于P处理,说明腐植酸钾与磷肥的不同施用顺序显著影响土壤剖面的速效磷分布特征。

对比基施磷肥的3个处理(P-HA、P+HA和P)发现,P处理0~10 cm土层土壤速效磷含量大于P+HA处理对应土层,并小于P-HA处理对应土层,说明腐植酸钾和磷肥的不同施用方式显著影响土壤磷素的有效性,同时基施磷肥与腐植酸钾降低土壤有效磷含量,而基施磷肥追施腐植酸钾则活化土壤已固定磷素,提升土壤有效磷含量。

2.2.2 全磷含量

不同处理土壤全磷的剖面分布如图5所示。腐植酸钾与磷肥的不同施用方式对土壤全磷的剖面分布存在显著影响。相比于CK和HA两个处理,施入磷肥的处理均显著提高了土壤剖面中的全磷含量。并且磷肥的不同施用方式对土壤全磷剖面分布的影响也存在显著差异,但总体变化趋势与速效磷分布特征相似。在磷肥作基肥的三个处理(P-HA、P+HA和P)中,随土层的加深土壤全磷含量逐渐升高,说明在水的淋洗作用下,土壤磷素存在显著性移动,其中各层土壤全磷含量又均以P-HA处理为最高,说明该试验在等量磷肥施入的条件下,基施磷肥追施腐植酸钾能有效地降低土壤中磷素向15 cm以下的土层移动,保持土壤较高的磷固持能力。而HA-P处理中,同样出现了与速效磷分布特征一致的现象,土壤全磷含量并未在土壤剖面表现出显著的迁移特征。在等量磷肥施入的4个处理(P-HA、HA-P、HA+P和P)中,P-HA处理土壤剖面全磷平均含量分别比HA-P、P+HA、P处理高47.69%、27.79%、26.57%,说明HA-P、P+HA、P处理中更多的土壤磷素向剖面15 cm以下淋出。因

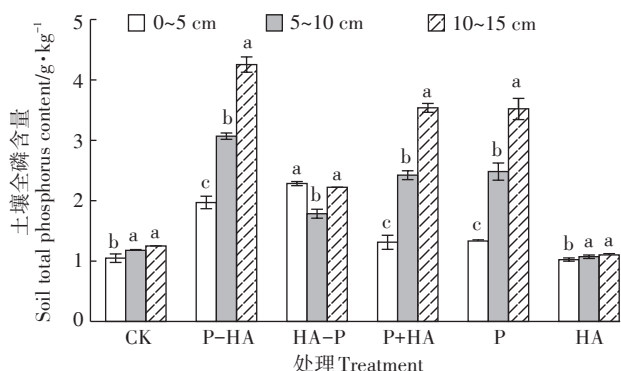


图5 腐植酸钾与磷肥不同施用方式对土壤全磷含量的影响

Figure 5 Effects of potassium humate and phosphate fertilizer application method on soil total phosphorus content

此,该试验在腐植酸钾与磷肥不同施用方式的处理中,HA-P处理对土壤磷素移动的促进作用最大,其次为P+HA处理,P处理的土壤磷素移动效果比P+HA处理稍差,对土壤磷素移动促进效果最差的为P-HA处理。

2.3 土壤磷素淋出量

2.3.1 淋洗液体积的动态变化

不同处理每个淋洗阶段的淋洗液收集体积如图6所示,由图6可知,不同处理在同一淋洗阶段的淋洗液收集体积存在差异。三个淋洗阶段中,未添加腐植酸钾的CK处理的淋洗液收集体积高于其他处理,说明土壤中腐植酸钾和磷肥的添加均能降低淋洗液的收集体积。而在前两个淋洗阶段,相比于腐植酸钾作基肥的HA-P、P+HA和HA处理,以腐植酸钾溶液作淋洗液的P-HA处理的淋洗液收集体积则降低,说明腐植酸钾的施用方式同样会对土壤淋洗液体积的收集产生影响,可能是因为腐植酸钾以溶液形式施入土壤中,大分子的有机物能阻塞表层土壤的孔隙,从而降低了土柱土壤中水的渗漏速率。

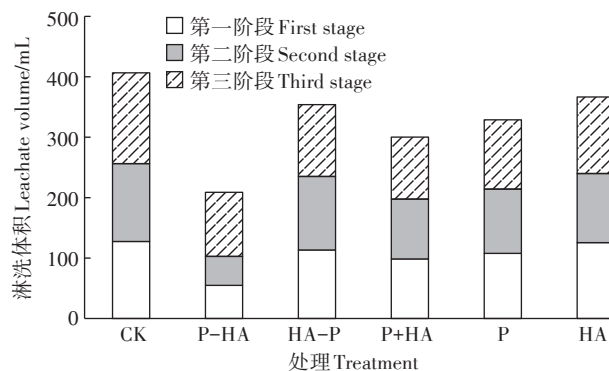


图6 不同处理各阶段淋洗液收集体积变化特征

Figure 6 Characteristics of leachate volume change at three stages of different treatments

2.3.2 各阶段土壤磷素淋出量和淋出总量

腐植酸钾与磷肥不同施用方式下磷素淋出量的变化特征如表2所示。在整个淋洗试验过程中,无磷肥输入的CK、HA两个处理的磷素淋出量从第一淋洗阶段到第三淋洗阶段均逐渐增加,而由两处理的磷素淋出总量可知,HA处理磷素淋出总量比CK处理高38.5%。

对比P+HA和P处理的磷素淋出总量可以发现,相比于单独以磷肥为基肥,磷肥和腐植酸钾共同添加到土壤中作基肥更能促进磷素的淋出,说明该试验条件下腐植酸钾显著促进磷素的移动。

表2 腐植酸钾与磷肥不同施用方式下土壤磷素淋出量(mg)

Table 2 Amount of phosphorus leaching under different application methods of potassium humate and phosphate fertilizer(mg)

处理 Treatment	第一阶段 First stage	第二阶段 Second stage	第三阶段 Third stage	淋洗总量 Total leaching
CK	0.25d	0.73e	1.02d	2.00f
P-HA	17.72c	11.55d	19.71c	48.98d
HA-P	1.02d	80.00a	87.51a	168.53a
P+HA	65.61a	33.76b	25.16b	124.52b
P	41.92b	30.04c	22.45bc	94.41c
HA	0.39d	0.65e	1.73d	2.77e

注:同列不同字母表示差异达5%显著水平。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference at 5% level.

而有磷肥输入的4个处理(P-HA、HA-P、HA+P和P)中,磷素的淋出量在各淋洗阶段表现不一。在第一阶段的淋洗过程中,4个处理磷素的淋出量大小顺序表现为P+HA>P>P-HA>HA-P,但在第二阶段和第三阶段的淋洗过程中,4个处理磷素的淋出量从大到小依次为HA-P>P+HA>P>P-HA。整个淋溶过程中,磷素淋出总量最多的为HA-P处理,分别比P+HA、P、P-HA处理多35.34%、78.51%、244.08%,说明腐植酸钾和磷肥的添加顺序对磷素移动的促进作用也存在显著差异。

HA-P处理的磷素淋出量在第一阶段和第二、三阶段所表现出来的显著差异性,可能与磷肥的均匀淋溶有关,前期磷溶液淋溶过程中大部分的磷素均被土壤固持,而随着土壤磷饱和度的增加,土壤对淋溶液中磷素的固定作用下降,导致磷素的淋出量显著增加。

3 讨论

3.1 土壤剖面全磷含量与其他因素的相关性分析

不同处理土壤剖面的全磷含量与pH、EC、有机质、速效磷的相关性如表3所示。在本淋溶试验中,各处理土壤剖面的全磷含量均与速效磷含量呈正相关关系,且均为显著相关。说明土壤磷素的剖面迁移形式主要是活性磷形态。有关土壤磷素的迁移与有机质迁移的相关性研究表明,土壤磷素的径向移动往往伴随着水溶性碳的剖面迁移。对比无腐植酸钾添加的CK处理和P处理,土壤剖面的全磷含量与有机质含量呈显著正相关关系。而在有腐植酸钾添加的P-HA处理和P+HA处理中,土壤剖面的全磷含量却与有机质呈极显著负相关关系。这可能是由于腐植酸钾的引入显著增加了土壤有机质含量,掩盖了土壤

有机质与全磷含量之间的关系。土壤剖面全磷与土壤剖面pH的相关关系中,对于CK处理,土壤剖面全磷与pH呈显著正相关关系,而对于有磷肥施入的处理,由于磷酸二氢钾的酸化作用,土壤剖面全磷与pH均呈显著负相关关系。根据土壤的电中性原理,土壤中带负电的磷酸根的剖面迁移也必然会引起带正电的其他离子的迁移,因而,除HA-P处理因为施肥方式不同而导致的差异外,其余各处理土壤剖面的全磷含量均与EC值呈极显著正相关关系。

3.2 腐植酸钾与磷肥不同施用方式对土壤磷素淋出量的影响

腐植酸钾影响土壤磷素的移动性主要是通过以下两种途径来实现的。腐植酸大分子有机酸类物质施入土壤后,其解离出的羟基、酚基、羧基等阴离子官能基团与磷酸根竞争土壤胶体表面的吸附位点,或腐植酸与土壤中钙、铁、铝等离子发生络合溶解反应,促进土壤难溶性磷的溶解,从而提高土壤中的水溶性磷含量。腐植酸具有较大的比表面积,可以吸附土壤中的磷酸根离子,减少土壤对磷的吸附固定^[3];或与钙、铁、铝等离子络合形成络合物,通过生成HA-金属(M)-磷酸盐等络合物将金属离子固定,减缓有效性磷向难溶性磷的转化速度,从而抑制土壤对磷肥的固定,间接增加土壤磷素的有效性^[13-14]。在本淋溶试验中,相比于施用磷肥(P)处理,施用磷肥后追施腐植酸钾(P-HA)显著降低了土壤磷素淋出量48%以上,且其主要发生在前两次淋溶阶段中,显著提高了土壤剖面全磷、速效磷和有机质含量,说明对高磷素累积土壤而言,追施腐植酸钾可以抑制土壤磷素的移动

表3 不同处理土壤剖面全磷含量与pH、EC、有机质、速效磷的Pearson系数和显著性检验

Table 3 Pearson coefficient and significance test of total phosphorus content and pH, EC, organic matter, and available P in soil profile under different treatments

处理 Treatment	pH	EC	有机质 Organic matter	速效磷 Available phosphorus
CK	0.705*	0.800**	0.814**	0.694*
P-HA	-0.708*	0.996**	-0.973**	0.947**
HA-P	-0.933**	-0.279	0.333	0.931**
P+HA	-0.913**	0.996**	-0.856**	0.998**
P	-0.729*	0.997**	0.777*	0.996**
HA	-0.018	0.859**	-0.211	0.759*

注:*和**分别表示显著性差异水平达到5%和1%水平。

Note: * and ** respectively indicate significance levels of 5% and 1% respectively.

性,增加土壤磷素的有效性,减少土壤磷素的淋失,其原因可能在于腐植酸钾吸附土壤中的磷酸根离子或通过生成HA-金属(M)-磷酸盐等络合物固定了土壤中的游离磷酸根离子。就基施腐植酸钾的处理(HA-P、HA+P)而言,相比于施用磷肥(P)处理,基施磷肥和腐植酸钾(HA+P)处理提高了土壤磷素的淋出量31%以上,且磷素的淋失主要发生在第一次淋洗阶段,而基施腐植酸钾追施磷肥(HA-P)则显著提升土壤磷素的淋出量78%以上,且磷素的淋失主要发生在第二、三淋洗阶段,结合对应处理土壤剖面速效磷和全磷含量可知,磷肥与腐植酸钾共同基施后,腐植酸钾显著减缓有效性磷向难溶性磷的转化速度,导致更多的活性磷在第一个淋洗阶段迅速随水淋失,而基施腐植酸钾后再追施磷肥,腐植酸钾降低了土壤胶体表面的吸附位点和钙、铁、铝等离子对磷酸盐固定能力,导致仅在第一淋洗阶段土壤表现出一定的磷素固持能力,第二、三阶段大量磷素迅速随水淋失。综上所述,腐植酸钾与磷肥的不同施用方式显著影响土壤磷素的移动和淋出,施用腐植酸钾在时间梯度上落后于施用磷肥,可以有效降低土壤磷素的淋出,而基施腐植酸钾则显著提升了土壤磷素的淋出。

4 结论

(1)腐植酸钾与磷肥不同施用方式显著影响土壤磷素淋出特征,先施腐植酸钾后施磷肥显著增加了磷素淋溶风险,而先施磷肥后施腐植酸钾则显著降低磷素淋溶风险。

(2)于磷肥施用后或与磷肥同时施用腐植酸钾几乎不改变土壤剖面的速效磷和全磷含量分布特征,但于磷肥施用后施用腐植酸钾可显著提高0~5 cm土层土壤速效磷含量。

参考文献:

- [1] Eliassi M D, Zhao W, Tan W F. Effect of carbonate and phosphate ratios on the transformation of calcium orthophosphates[J]. *Materials Research Bulletin*, 2014, 55: 114-120.
- [2] 马红梅,洪坚平,谢英荷. 腐植酸绿色肥效机理浅析[J]. *江苏农业科学*, 2009(6): 392-394.
MA Hong-mei, HONG Jian-ping, XIE Ying-he. Analysis of mechanism on green efficiency about humic acid[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2009(6): 392-394.
- [3] Río J C del, González-Vila F J, Martín F, et al. Characterization of humic acids from low-rank coals by ^{13}C -NMR and pyrolysis-methylation. Formation of benzenecarboxylic acid moieties during the coalification process[J]. *Organic Geochemistry*, 1994, 22(6): 885-891.
- [4] Alvarez-Puebla R A, Valenzuela-Calahorra C, Garrido J J. Retention of $\text{Co}(\text{II})$, $\text{Ni}(\text{II})$, and $\text{Cu}(\text{II})$ on a purified brown humic acid. Modeling and characterization of the sorption process[J]. *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces & Colloids*, 2004, 20(9): 3657-3664.
- [5] 安志装,介晓磊,李有田,等. 不同水分和添加物料对石灰性土壤无机磷形态转化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(1): 58-64.
AN Zhi-zhuang, JIE Xiao-lei, LI You-tian, et al. Effect of different water and material on inorganic phosphorus transformation in calcareous soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2002, 8(1): 58-64.
- [6] 李志坚,林治安,赵秉强,等. 增值磷肥对潮土无机磷形态及其变化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5): 1183-1191.
LI Zhi-jian, LIN Zhi-an, ZHAO Bing-qiang, et al. Effects of value-added phosphate fertilizers on transformation of inorganic phosphorus in calcareous soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(5): 1183-1191.
- [7] 晏维金,亢 宇,章 申,等. 磷在土壤中的解吸动力学[J]. *中国环境科学*, 2000, 20(2): 97-101.
YAN Wei-jin, KANG Yu, ZHANG Shen, et al. The desorption kinetics of phosphorus from calcareous soil in China[J]. *China Environmental Sciences*, 2000, 20(2): 97-101.
- [8] 孙桂芳,金继运,石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2011(2): 1-9.
SUN Gui-fang, JIN Ji-yun, SHI Yuan-liang. Research advance on soil phosphorous forms and their availability to crops in soil[J]. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2011(2): 1-9.
- [9] 杜振宇,王清华,刘方春,等. 腐植酸物质对磷在褐土中迁移的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2012(2): 14-17.
DU Zhen-yu, WANG Qing-hua, LIU Fang-chun, et al. Phosphorus movement in a cinnamon soil as affected by humic substances[J]. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2012(2): 14-17.
- [10] 秦国新,朱靖蓉,马兴旺,等. 改性腐植酸对土壤磷素的激活效应[J]. *新疆农业科学*, 2008, 45(6): 1048-1051.
QIN Guo-xin, ZHU Jing-rong, MA Xing-wang, et al. Active effects of modified humic acids on soil fixed phosphorus[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2008, 45(6): 1048-1051.
- [11] 王 斌,马兴旺,许咏梅. 腐植酸对灰漠土棉田土壤无机磷形态的影响[J]. *新疆农业科学*, 2007, 44(3): 312-317.
WANG Bin, MA Xing-wang, XU Yong-mei, et al. Effects of humic acids on inorganic phosphorus forms in gray desert soil and soil of cotton field[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2007, 44(3): 312-317.
- [12] 李 军,袁 亮,赵秉强,等. 磷肥中腐植酸添加比例对玉米产量、磷素吸收及土壤速效磷含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 641-648.
LI Jun, YUAN Liang, ZHAO Bing-qiang, et al. Effect of adding humic acid to phosphorous fertilizer on maize yield and phosphorus uptake and soil available phosphorus content[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(3): 641-648.
- [13] Sharif M, Khattak R, Sarir M S. Effect of different levels of lignitic coal derived humic acid on growth of maize plants[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33(19/20): 3567-3580.
- [14] Suteerapataranon S, Bouby M, Geckeis H, et al. Interaction of trace elements in acid mine drainage solution with humic acid[J]. *Water Research*, 2006, 40(10): 2044-2054.