

王敏锋, 陈 硕, 朱 睿, 等. 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[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(4): 368-375.

WANG Min-feng, CHEN Shuo, ZHU Jian, et al. Effects of Application of Biogas Slurry on the Form and Mobility of Soil Phosphorus in Vegetable Greenhouse Field[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(4): 368-375.

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¹, 陈 硕¹, 朱 睿¹, 刘石磊¹, 陈 清¹, 李吉进², 许俊香^{2*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097)

摘 要:以不同磷水平菜田土壤为研究对象,通过土柱淋溶模拟试验,探讨施用沼液对土壤磷素形态及其移动性的影响。结果表明:与单施去离子水的对照相比,施用沼液通过减少淋洗溶液体积降低淋洗液中总磷含量 $722.3 \mu\text{g}\cdot\text{柱}^{-1}$,中、高磷土壤淋洗液总无机磷(TIP)分别减少 $507.2 \mu\text{g}\cdot\text{柱}^{-1}$ 和 $1\,319 \mu\text{g}\cdot\text{柱}^{-1}$ 。低、中磷土壤淋洗液中水溶性无机磷(DIP)减少 $158.1 \mu\text{g}\cdot\text{柱}^{-1}$ 和 $474.3 \mu\text{g}\cdot\text{柱}^{-1}$ 。在低磷土壤中,施用沼液对剖面土壤全磷、有机磷和速效磷含量影响显著,上层(0~7 cm)土壤增加的比例分别为 34.8%、37.7%和 148%,土壤 pH 值显著降低 0.39 个单位,下层(7~14 cm)土壤增加的比例分别为 18.5%、29.3%和 32.9%,土壤 pH 值显著降低 0.28 个单位。在中磷土壤中,施用沼液对上层土壤全磷含量影响未达到显著水平,速效磷增加比例 20.1%,下层土壤 pH 值降低 0.33 个单位。在高磷土壤中,施用沼液对剖面土壤全磷、有机磷和速效磷含量影响未达到显著水平,下层土壤 pH 值降低 0.34 个单位。因此,施用沼液降低土壤磷素淋洗,增加低磷土壤磷素有效性含量,但对中磷和高磷水平土壤的磷素影响未达到显著水平。

关键词:沼液;土壤磷素形态;磷素淋洗

中图分类号:S141.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2017)04-0368-08

doi: 10.13254/j.jare.2016.0289

Effects of Application of Biogas Slurry on the Form and Mobility of Soil Phosphorus in Vegetable Greenhouse Field

WANG Min-feng¹, CHEN Shuo¹, ZHU Jian¹, LIU Shi-lei¹, CHEN Qing¹, LI Ji-jin², XU Jun-xiang^{2*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: A packed soil column experiment was conducted to investigate the effects of biogas slurry on phosphorus (P) form and mobility in a vegetable greenhouse soil with different P fertility levels. The results showed that application of biogas slurry all significantly reduced leachate volume and total phosphorus leaching in the experimental soil with different fertility levels. Compared with control treatments, the application of biogas slurry decreased total phosphorus content in leachate by $722.3 \mu\text{g}\cdot\text{column}^{-1}$ through reducing leachate volume. Total inorganic phosphorus (TIP) decreased by $507.2 \mu\text{g}\cdot\text{column}^{-1}$ and $1\,319 \mu\text{g}\cdot\text{column}^{-1}$ in the moderate-P-fertility and high-P-fertility soil, respectively. Dissolved inorganic phosphorus (DIP) was decreased by $158.1 \mu\text{g}\cdot\text{column}^{-1}$ and $474.3 \mu\text{g}\cdot\text{column}^{-1}$ in the low-P-fertility and moderate-P-fertility soil, respectively. In low-P-fertility soil, biogas slurry application significantly increased soil total P, Olsen-P and organic P in 0~7 cm soil depth by a proportion of 34.8%, 37.7% and 148%, respectively. It also reduced soil pH by 0.39 units. In 7~14 cm soil depth, biogas slurry application significantly increased soil total P, Olsen-P and organic P by a proportion of 18.5%, 29.3% and 32.9%, respectively. Soil

收稿日期:2016-12-05

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303089-2);北京市科技计划项目(D161100005516003);北京市农林科学院青年科研基金(QNJJ201413);北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20151205)

作者简介:王敏锋(1990—),男,山东泰安人,硕士,主要从事废弃物处理和资源化利用研究。E-mail: wangminfeng@cau.edu.cn

*通信作者:许俊香 E-mail: xujx100@126.com

pH was also decreased by 0.28 units. In moderate-P-fertility soil, application of biogas slurry had no significantly influence on soil total P, but increased soil Olsen-P by 20.1% in 0~7 cm soil depth compared with control treatment. In 7~14 cm soil depth, application of biogas slurry reduced soil pH by 0.33 units. In high-P-fertility soil, application of biogas slurry had no significantly influence on soil total P, Olsen-P and organic P in 0~7 cm soil depth compared with control treatment. In 7~14 cm soil depth, application of biogas slurry reduced soil pH by 0.34 units. In conclusion, application of biogas slurry significantly increased different forms of phosphorus contents in low-P-fertility soil, however, there was no significantly difference on the P forms in moderate-P-fertility soil and high-P-fertility soil.

Keywords: biogas slurry; soil phosphorus forms; phosphorus leaching

沼气工程是一种能消纳畜禽有机废弃物、缓解能源短缺的工程技术,但是在沼气工程运行中会产生大量的沼气发酵副产物——沼渣、沼液。截止 2013 年底,全国已有处理农业废弃物的大型沼气工程 5 814 处,同时产生大量的沼渣、沼液^[1-3]。由于沼液中含有丰富的有机质和氮、磷、钾等营养元素^[4],可以作为液体类有机肥在作物生长季进行追施,既可以减轻沼液乱排对环境的污染又可以为作物生长提供所需营养,提高资源的利用率^[3]。当前全国推行的畜禽废弃物资源化利用的行动中,沼气工程及沼渣沼液还田利用被作为主要的技术。

设施菜田作为我国设施农业的主体,三十年来发展较快,为了追求蔬菜的高产,往往施入大量肥料。研究表明,设施蔬菜生产中,磷素的当季利用率不足 10%,导致菜田土壤中磷素的累积现象十分突出^[5-7]。有研究显示,我国设施菜田单位面积磷素盈余量已达到 $155 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,有些甚至高达 $420 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,是目前磷盈余最严重的国家之一^[8-9]。长期以来,研究认为磷素在土壤中被吸附和固定,不易发生移动损失^[10],但是随着磷素积累的饱和程度加大,土壤出现磷素淋洗移动的风险也会加大。施入土壤的沼液中含有较多水溶态、以及有机态和胶体态磷,这些形态的磷素在土壤中可能易发生移动^[11-13]。在设施菜田大量而频繁地灌溉下,对土壤磷素的淋溶风险影响尚未有明确的研究^[14-15]。

本试验以北京市延庆区低磷、中磷、高磷设施菜田土壤为研究对象,采用室内土柱淋溶模拟试验,研究施用沼液对土壤磷素淋洗风险及其形态的影响,为设施菜田施用沼液提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

(1) 试验用装置如图 1 所示:淋洗柱为内径 2.5 cm,高 25 cm 的 PVC 管,柱体上部留有 10 cm 的空间,用于盛水和沼液。柱体底部由下到上分别为纱布、

无磷滤纸和 1 cm 厚细砂(石英砂,分析纯)过滤层,装填土壤为 14 cm 高。将柱体固定在稳定的铁架台上,使柱体保持与地面垂直,柱体正下方有玻璃瓶收集土壤淋洗液。

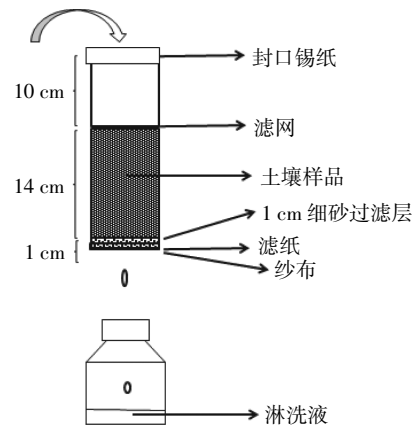


图 1 淋洗试验装置图

Figure 1 Schematic of the column apparatus used for soil P leaching experiment

(2) 供试土壤及其预处理:供试土壤取自北京市延庆区康庄镇小丰营村(东经 $115^{\circ}54'$,北纬 $40^{\circ}24'$)现代设施农业示范基地,分别取棚外空闲土壤(低磷土)、田间长期不施粪肥单施沼液的土壤(中磷土)、田间长期施用有机肥 $90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 配施沼液的土壤(高磷土)。鲜土样去除作物根茎、石块,自然风干,过 1 mm 筛,待用。风干土样具体化学性质见表 1。

(3) 供试肥料:沼液采自延庆小丰营试验点,具体化学性质见表 2。

(4) 灌水:实验室纯水仪自制($\text{pH} \approx 7$)去离子水。由于供试土壤质地不同,分别称取相应质量(低磷土=85 g、中磷土=100 g、高磷土=95 g)土壤均匀盛放于土柱内压实至相同高度,并在土样上层铺设一层尼龙网,以保证淋洗液能均匀浸透土样而不损失。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验设 6 个处理,试验过程分 5 个周期进行,每

表 1 供试土壤的基本化学性质

Table 1 Soil chemical properties used in the P leaching experiment

土样	全磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH 值(水:土=5:1)	土壤质地类型
低磷土	0.59	111	21.0	13.0	8.48	壤土
中磷土	1.16	285	159	34.4	8.17	粘质壤土
高磷土	2.06	431	442	60.7	7.82	粉质壤土

表 2 供试沼液的基本化学性质

Table 2 Chemical properties of biogas slurry used in the P leaching experiment

全氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	全钾/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	pH 值	总磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	总无机磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	总有机磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	水溶性总磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	水溶性无机磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	水溶性有机磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
379	348	7.89	45.8	31.0	14.8	31.1	24.2	6.9

个周期设计为 7 d,分别是:

- S1 处理:低磷土+去离子水;
- S2 处理:中磷土+去离子水;
- S3 处理:高磷土+去离子水;
- Z1 处理:低磷土+沼液+去离子水;
- Z2 处理:中磷土+沼液+去离子水;
- Z3 处理:高磷土+沼液+去离子水。

其中,去离子水处理为每个灌水周期灌施去离子水 100 mL(相当于 200 mm 降水量),施用沼液处理为每个灌水周期灌施 37 mL 沼液+63 mL 去离子水(按照推荐量每次带入 $30 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 计算沼液的施用量)。每个处理 3 次重复,共 18 个土柱。

为了使每个土柱灌水操作相同,施用沼液处理均采取将沼液与去离子水混合均匀,与去离子水处理按相同操作方式施入土柱。每次灌施完成后,用锡纸将土柱顶部覆盖(减少水分蒸发损失),使其在自然状态(实验室内,室温约 20°C)下进行淋洗。

1.2.2 淋洗操作

淋洗试验开始前,土柱需进行预处理,具体为:所有处理用 300 mL 去离子水淋洗 6 d,每日 9:00 am 和 9:00 pm 各淋洗 1 次,每次 25 mL,将土壤压实,以减少由于土柱装填所造成的差异,使土壤达到平衡稳定的状态。

正式试验在每个周期的灌溉中,灌水在前 5 d 内完成,每日 9:00 am 和 9:00 pm 各灌施 1 次,每次灌施 10 mL,稳定 2 d 后,继续下一次淋洗,每次灌水后收集淋洗液,将其置于 -20°C 冰箱储存,最终测定相关指标。

淋洗试验结束后,将 14 cm 高的土柱分为上、下两层,分别在 0~7、7~14 cm 采集土壤样品,风干后,过 2 mm 筛,用于测定土壤相关指标。

1.2.3 测定项目与方法

(1)淋洗液总磷(Total phosphorus, TP):过硫酸钾消解,钼蓝比色法测定总磷含量(880 nm 波长);水溶性总磷(Dissolved total phosphorus, DTP):过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜后,同测定总磷(TP)的方法测定水溶性总磷;颗粒态磷(Particulate phosphorus, PP): $\text{PP}=\text{TP}-\text{DTP}$ 。

(2)淋洗液中无机磷(Total inorganic phosphorus, TIP):直接用钼蓝比色法测定淋洗液水样中的磷含量(880 nm 波长);有机磷(Total organic phosphorus, TOP): $\text{TOP}=\text{TP}-\text{TIP}$ 。

(3)淋洗液水溶性无机磷(Dissolved inorganic phosphorus, DIP):将水样通过 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜,直接采用钼蓝比色法测定的磷含量(880 nm 波长);水溶性有机磷(Dissolved organic phosphorus, DOP): $\text{DOP}=\text{DTP}-\text{DIP}$ 。

(4)土壤有机磷:采用灼烧法测定^[16]。

(5)土壤全磷:采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消煮-钼锑抗比色法测定。

(6)土壤速效磷(Olsen-P):采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 (pH=8.5)溶液提取(水土比 20:1)后采用钼锑抗比色法测定^[17]。

(7)土壤 pH 值:采用 5:1 的水土比浸泡, pH 计测定。

1.3 统计分析

数据统计采用 Microsoft Excel 2010 软件,对不同处理进行 T 检验, 5%显著水平。

2 结果与分析

2.1 施用沼液对不同磷水平土壤淋洗液的影响

2.1.1 淋洗液体积、磷素浓度与磷素淋洗量

由图 2A 可以看出,每个灌水周期土柱淋洗液体

积在 30~85 mL 之间,且表现为施用沼液明显降低了淋洗液体积,尤其是对中磷水平土壤降低作用最明显。与 S2 处理相比,Z2 处理减少了 42.5% 的淋洗液体积,差异达到显著水平,与 S1 和 S3 处理相比,Z1 和 Z3 处理分别降低 31.1% 和 28.2%,差异均未达到显著水平。

不同处理淋洗液总磷浓度表现出随土壤磷水平的增加而升高的趋势(图 2B),施用沼液均减小了淋

洗液中的总磷浓度,相比去离子水处理,低、中、高磷水平土壤的总磷浓度减小比例依次为 52.5%、43.6%、44.2%,差异均达到显著水平。

S3 处理磷素淋洗量显著高于 Z3 处理,并且在第Ⅲ周期到第Ⅳ周期中,磷素淋洗量有明显的增加(图 2C)。

2.1.2 淋洗液中水溶性总磷和颗粒态磷淋洗量与比例

图 3A 和图 4A 分别为不同处理淋洗液中水溶性总磷(DTP)和颗粒态磷(PP)淋洗量及其分别占总磷的百分比。如图 3A 所示,不同处理条件下,淋洗液中 DTP 与 PP 变化趋势一致,随着土壤磷水平的升高而增大。比较相同磷水平土壤的淋洗液中 DTP 和 PP,施用沼液显著减少淋洗液中 DTP 和 PP 的淋洗量,分别减少 $694.8 \mu\text{g}\cdot\text{柱}^{-1}$ 和 $39.28 \mu\text{g}\cdot\text{柱}^{-1}$ 。

由图 4A 可知,各处理淋洗液中主要以 DTP 为主,其占总磷的比例均达到 80% 以上,由此可见,水溶态磷是淋洗液中磷素主要存在形态。与 S1 处理相比,Z1 处理 PP 占总磷的比例减少了 2.33%。而与 S2 和 S3 处理相比,Z2 和 Z3 处理颗粒态磷占淋洗液中总磷的比例分别增加 5.04% 和 8.94%。

2.1.3 淋洗液中无机磷和有机磷淋洗量与比例

图 3B 和图 4B 分别列出不同处理不同磷水平土壤的总无机磷(TIP)和总有机磷(TOP)的淋洗量及其分别占淋洗液总磷的百分比。由图 3B 和图 4B 可以看出,不同处理下,淋洗液中 TIP 和 TOP 的变化趋势基本一致,均随着土壤磷水平的增加而增加。同一磷水平的土壤中,施用沼液明显减少了淋洗液中 TIP 和 TOP 的淋洗量,中磷土壤淋洗液 TIP 减少 $507.2 \mu\text{g}\cdot\text{柱}^{-1}$,TOP 减少 $20.62 \mu\text{g}\cdot\text{柱}^{-1}$;高磷土壤淋洗液 TIP 减少 $1319 \mu\text{g}\cdot\text{柱}^{-1}$,TOP 减少 $117.3 \mu\text{g}\cdot\text{柱}^{-1}$ 。

图 4B 可以看出,所有处理淋洗液中 TIP 占 TP 的比例均在 55% 以上,由此可见,淋洗液中 TIP 为主要存在形态。Z1、Z2 和 Z3 处理,淋洗液中 TIP 占 TP 的比例平均为 68.6%;S1、S2 和 S3 处理,淋洗液中 TIP 占 TP 的比例平均为 88.1%,由此可见,施用沼液平均减少了淋洗液中 TIP 占 TP 的比例,但在低、中、高磷水平土壤淋洗液中,施用沼液 TIP 占 TP 的比例依次增加,分别为 55.1%、70.8% 和 79.9%;单施去离子水淋洗液中 TIP 占 TP 的比例几乎无差别。

2.1.4 淋洗液中水溶性无机磷和水溶性总磷淋洗量与比例

图 3C 和图 4C 分别列出不同处理不同含磷量土壤水溶性无机磷(DIP)和水溶性有机磷(DOP)淋洗量

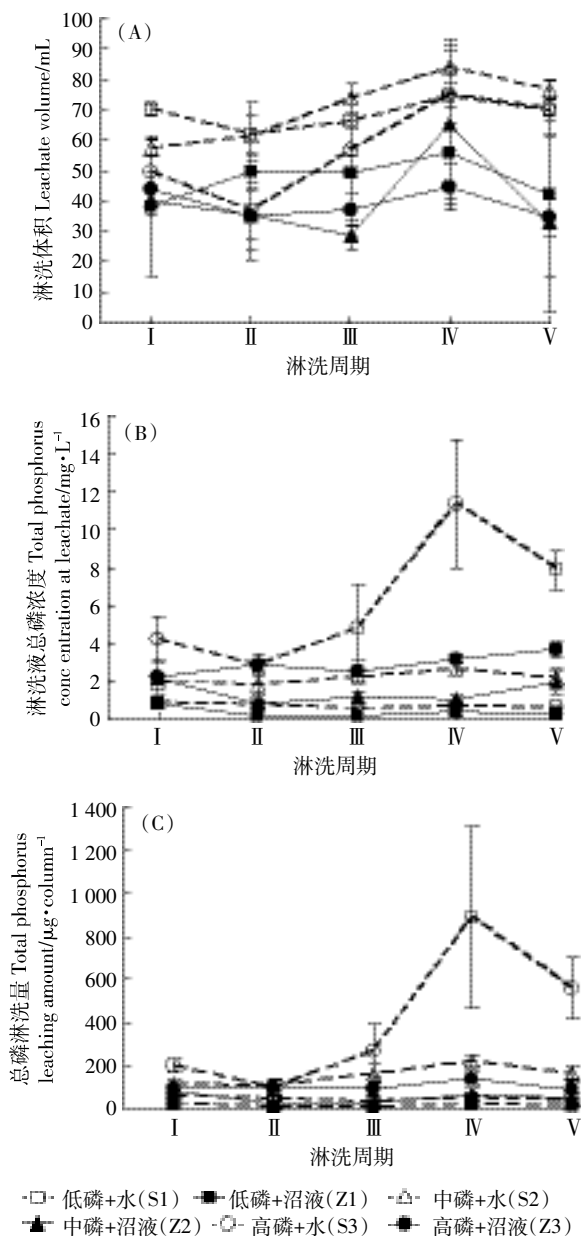


图 2 施用沼液对不同磷水平土壤淋洗液体积、总磷浓度和总磷淋洗量的影响

Figure 2 Effects of biogas slurry application on leaching volume, total phosphorus concentration and total phosphorus leaching amount in soil with different P fertilities

及其分别占淋洗液中水溶性总磷(DTP)的百分比。由图 3C 可以看出,不同处理下,淋洗液中 DIP 数量均随土壤磷水平的升高而增加,而淋洗液中 DOP 数量的变化规律则不尽相同。同一磷水平的土壤中,施用沼液明显减少了淋洗液中 DIP 和 DOP 的淋洗量,低磷土壤淋洗液中 DIP 减少 158.1 $\mu\text{g}\cdot\text{柱}^{-1}$,DOP 减少 90.84 $\mu\text{g}\cdot\text{柱}^{-1}$;中磷土壤淋洗液中 DIP 减少 474.3 $\mu\text{g}\cdot\text{柱}^{-1}$,

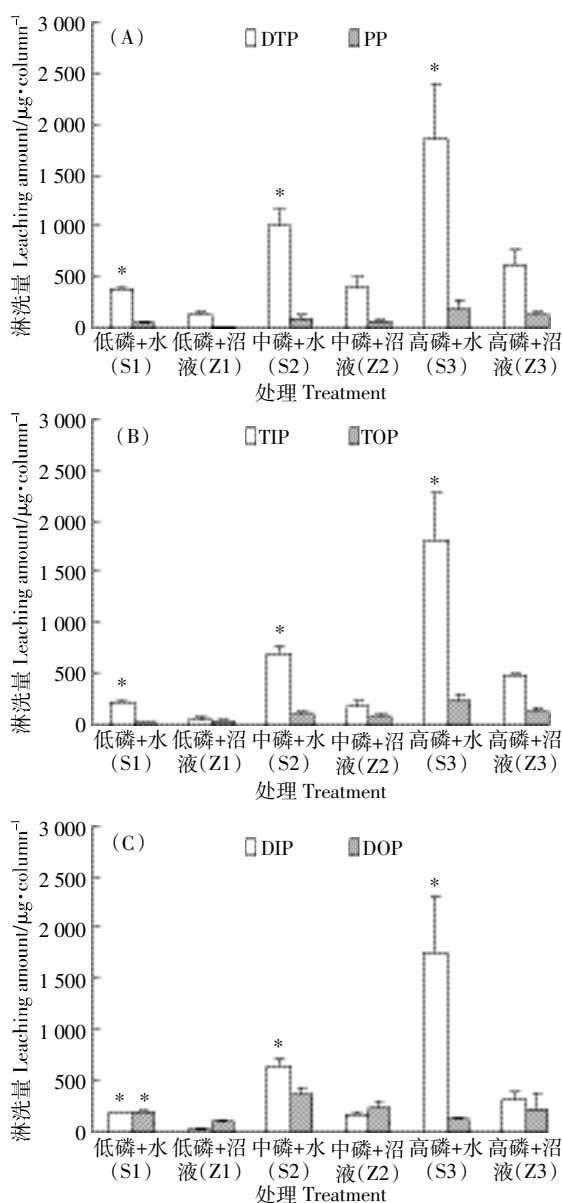
柱 $^{-1}$,DOP 减少 129.6 $\mu\text{g}\cdot\text{柱}^{-1}$ 。

由图 4C 可以看出,除 S3 处理外,DOP 占 DTP 的比例均在 36.6%以上。Z1、Z2 和 Z3 处理 DOP 占 DTP 的比例为 60.2%,S1、S2 和 S3 处理上述比例为 31.5%。可见施用沼液明显增加淋洗液中的 DOP 占 DTP 的比例。

2.2 土壤磷含量

2.2.1 土壤全磷含量

不同处理对不同磷水平的土壤全磷含量影响参



“*”代表同一指标层同一磷水平土壤中不同处理之间差异显著($P<0.05$)

“*”indicates significant differences of the same index among different treatments in soil with the same phosphorus level($P<0.05$)

图 3 施用沼液对不同磷水平土壤淋洗液中各形态磷素淋洗量的影响

Figure 3 Effects of biogas slurry application on leaching amount of various forms of phosphorus in soil with different P fertilities

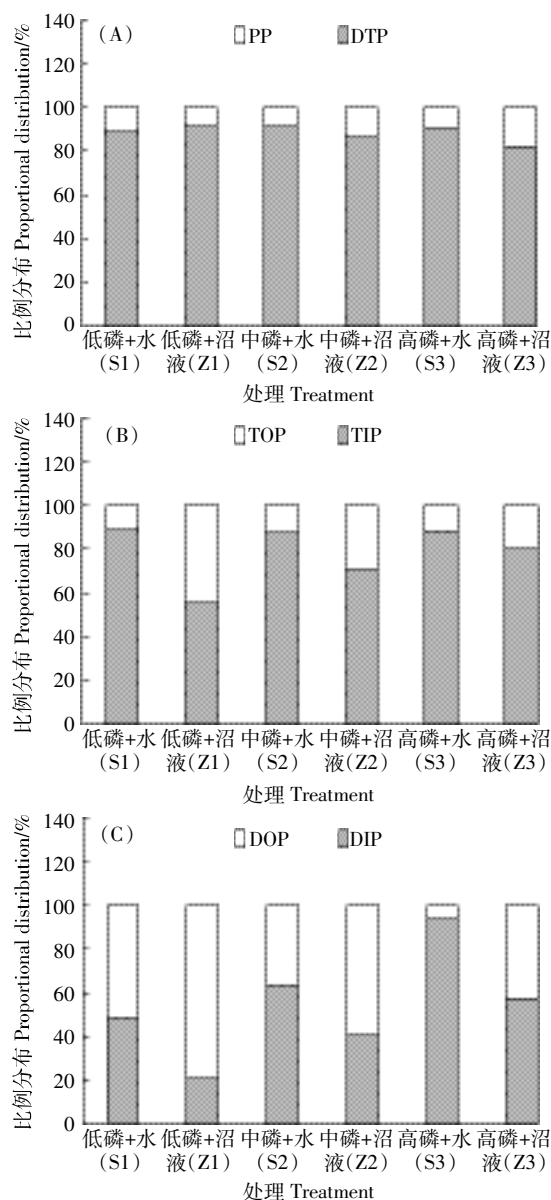


图 4 施用沼液对不同磷水平土壤淋洗液中各形态磷素淋洗量比例分布的影响

Figure 4 Effects of biogas slurry on the proportional distribution of leached various forms of phosphorus in soil with different P fertilities

见图 5A。在低磷水平土壤中,施用沼液均增加了上层(0~7 cm)和下层(7~14 cm)土壤全磷含量,增加比例分别为 34.8%和 18.5%。S1 处理中,上层和下层土壤之间的全磷含量差别不大;Z1 处理上层土壤全磷含量高出下层土壤 12.2%。在中磷水平和高磷水平土壤中,施用沼液对土壤全磷含量影响不大。

2.2.2 土壤有机磷含量

不同处理的土壤有机磷含量均表现为随土壤磷水平的升高而增加(图 5B)。与 S1 处理比较,Z1 处理增加了土壤上层和下层有机磷含量,分别增加 37.7%和 29.3%。与 S2 处理比较,Z2 处理对土壤中有有机磷含量及其移动性有一定的作用,但是影响不显著。Z3 与 S3 处理之间有机磷含量变化不大,差异不显著。

2.2.3 土壤 Olsen-P 含量

不同处理的土壤 Olsen-P 含量均表现为随土壤磷水平的升高而增加(图 5C)。在低、中、高磷水平的土壤中,施用沼液明显增加了上层土壤的 Olsen-P 含量,增加比例分别为 148%、20.1%和 14.9%;施用沼液增加 Z1 处理下层土壤 Olsen-P 比例 32.9%,而对 Z2 和 Z3 处理下层土壤 Olsen-P 含量的影响不大。高磷水平土壤中,S3 和 Z3 两个处理,土壤上层 Olsen-P 含量均低于土壤下层,降低比例分别为 12.5%和 7.56%,说明高磷土壤 Olsen-P 发生了向下移动。

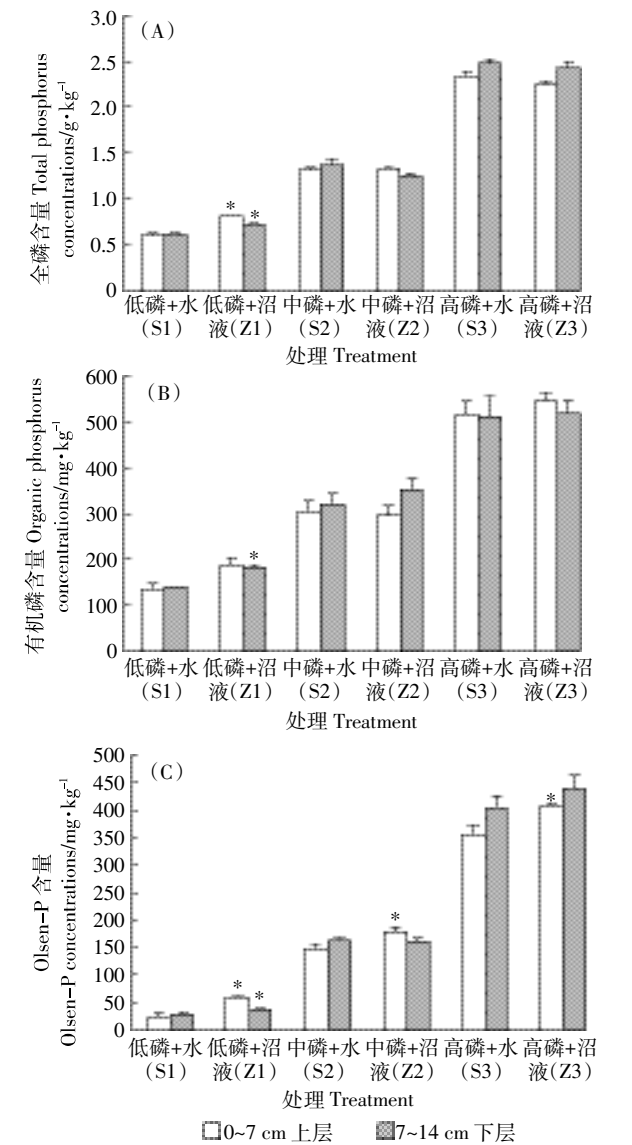
2.2.4 土壤 pH 值的变化

随着土壤磷水平的升高,土壤 pH 值呈下降趋势(表 3)。施用沼液(沼液 pH=7.89)显著降低了土壤 pH 值。具体表现为:在低磷水平土壤中,Z1 处理降低上层土壤 pH 值 0.39,下层土壤 pH 值降低 0.28;在中磷水平土壤中,Z2 处理降低上层土壤 pH 值 0.12,下层土壤 pH 值降低 0.33;在高磷土壤中,Z3 处理降低上层土壤 pH 值 0.19,下层土壤 pH 值降低 0.34。

3 讨论

3.1 施用沼液对土柱淋洗液中磷素形态的影响

按照形态可将沼液中的磷素形态分为 3 部分:水溶性总磷(DTP),颗粒态磷(PP),还有其他不确定形态的残余磷(Re-P)^[18]。水溶性磷和细小的颗粒态磷在土壤中较易发生移动,进而可能存在流失进入地下水的风险^[11-13]。本试验中,施用沼液处理的不同磷水平土壤的淋洗液体积、总磷淋洗量均减少,主要是因为施用沼液后,沼液中高悬浮物和有机胶体分子对土壤水分的移动起到阻碍作用,进而间接影响磷素的淋洗。由于总磷淋洗量减少,淋洗液中水溶性总磷和颗粒态



“*”代表同一土层同一磷水平土壤中不同处理之间差异显著 ($P<0.05$)
“**” indicates significant differences of the same soil depth among different treatments in soil with the same phosphorus level ($P<0.05$)

图 5 施用沼液对不同磷水平土壤中全磷、有机磷和 Olsen-P 含量的影响
Figure 5 Effects of biogas slurry application on concentrations of soil total phosphorus, organic phosphorus and Olsen-P in soil with different P fertilities

表 3 施用沼液对不同磷含量土壤中 pH 值的影响
Table 3 Effects of biogas slurry application on soil pH value in soil with different P fertilities

处理 Treatment	S1	Z1	S2	Z2	S3	Z3
上层(0~7 cm)	8.54*	8.15	8.27*	8.15	8.08*	7.89
下层(7~14 cm)	8.55	8.27	8.26*	7.93	8.02*	7.68

注:“*”代表同一土层同一磷水平土壤中不同处理之间差异显著 ($P<0.05$)。
Note:“*” indicates significant differences of the same soil depth among different treatments in soil with the same phosphorus level ($P<0.05$).

磷也相应减少,故降低了磷素淋洗的环境风险。施用沼液后,淋洗液中无机磷和溶解态无机磷占总磷的比例明显降低,其原因可能是土壤的 pH 值在 7.68~8.55 之间,处在形成鸟粪石结晶的最佳 pH 值 7~10 之间^[19],沼液带入的和土壤本身存在的磷酸根离子(PO_4^{3-} 、 HPO_4^{2-} 、 H_2PO_4^-)、铵根离子(NH_4^+)和镁离子(Mg^{2+})形成了鸟粪石($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)沉淀^[20],影响了磷酸根离子在土壤中的移动。这些新产生的磷素化合物不易发生移动,滞留在土壤中,而有机态磷由于其具有易移动性^[1],受到影响不大,所以淋洗液中无机磷的百分含量降低,有机磷的百分含量增加。

3.2 施用沼液对土壤中磷素移动的影响

土壤中磷素的不同存在形态,决定磷素在土壤中的移动性的大小^[21]。土壤中肌醇六磷酸盐的移动性比无机磷小,其他形态的有机磷比无机磷的移动性大而易于流失,同时磷素淋洗量还因土壤质地的不同而有所不同^[22]。Chen 等^[23]认为轻质的砂土、砂壤土或粉砂壤土等土壤吸附磷的能力较弱,通透性较强,当磷素释放和水分运移同步时,就会发生磷素的淋溶损失。大量的田间、室内试验证明:长期施用有机物料的土壤,不管是施用作物残茬还是有机肥,或者是施有机磷化合物都会增加土壤磷的移动性^[24-26]。与无机磷相比,有机磷移动性要大得多,这是土壤磷素损失的重要因素^[11-13]。本试验中,在低磷水平土壤中,施用沼液后,增加了上层土壤全磷的含量,但是对其移动性影响不大;在中磷和高磷水平土壤中,施用沼液后,对上层土壤全磷含量及其移动性无影响,主要是由于沼液磷含量很低,施入土壤后产生了稀释效应因而不会对高磷水平土壤磷含量产生较大影响。在低磷水平土壤中,施用沼液会增加上层土壤和下层土壤有机磷含量;在中磷水平土壤中,施用沼液对上层土壤有机磷贡献不明显,但是会增加下层土壤有机磷含量;在高磷水平土壤中,施用沼液对土壤有机磷的含量影响不明显,这主要是由于随着土壤磷水平的提高,沼液带入的磷素和有机物等物质对土壤中磷素的含量和形态的影响逐渐减弱。另外,施用沼液均降低了土壤的 pH 值,有利于土壤磷素的活化,增加土壤磷素有效性^[27-28],这与土壤中速效磷含量的变化具有一定的相关性,即施用沼液后,速效磷的含量有所增加。

4 结论

(1)施用沼液均显著降低 3 种不同磷水平土壤淋洗液体积以及总磷的淋洗量,淋洗液中水溶性总磷、

颗粒磷、无机磷、有机磷(除 S1 和 Z1 处理)、水溶性无机磷和水溶性有机磷均减少(除 S3 和 Z3 处理)。

(2)在低磷水平土壤中施用沼液增加了上层土壤全磷、有机磷和速效磷,降低了土壤 pH 值;在中磷水平土壤中施用沼液,上层土壤全磷和速效磷略有增加,降低土壤 pH 值;在高磷水平土壤中,施用沼液对土壤全磷、有机磷、速效磷影响未达到显著水平,但是会降低土壤 pH 值。

因此,施用沼液降低土壤磷素淋洗,增加低磷土壤磷素有效性含量,但对中磷和高磷水平土壤的磷素影响未达到显著水平。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料. 2013[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014: 172-173.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. China Agriculture Statistical Report. 2013[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014: 172-173. (in Chinese)
- [2] Lu J, Zhu L, Hu G, et al. Integrating animal manure-based bioenergy production with invasive species control: A case study at Tongren Pig Farm in China[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34(6): 821-827.
- [3] 张智辉. 沼液生物基滤料与膜浓缩一体化处理技术与工艺[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
ZHANG Zhi-ye. An integration treatment process of biogas slurry using bio-filtering material and membrane concentration[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [4] 陈钟佃, 冯德庆, 黄秀声, 等. 沼液及羊粪对牧草生产力和营养成分的影响[J]. 中国沼气, 2005, 23(4): 26-28.
CHEN Zhong-dian, FENG De-qing, HUANG Xiu-sheng, et al. Effect of fermented biogas slurry and goat dung on the biomass productivity and nutrient component of *pennisetumamericanum* × *p. purpureum* CV [J]. *China Biogas*, 2005, 23(4): 26-28. (in Chinese)
- [5] McDowell R W, Sharpley A N. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2): 508-520.
- [6] Gao J J, Bai X L, Zhou B, et al. Soil nutrient content and nutrient balances in newly-built solar greenhouses in Northern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94: 63-72.
- [7] Yan Z J, Liu P P, Li Y H, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: Overfertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42: 982-989.
- [8] Yan Z J, Chen S, Li J, et al. Manure and nitrogen application enhances soil phosphorus mobility in calcareous soil in greenhouses[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 26-35.
- [9] MacDonald G K, Bennett E M, Potter P A, et al. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(7): 3086-3091.

- [10] Lyngsie G, Penn C J, Hansen H C B, et al. Phosphate sorption by three potential filter materials as assessed by isothermal titration calorimetry[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 143:26–33.
- [11] Toor G S, Condon L M, Di H J, et al. Characterization of organic phosphorus in leachate from a grassland soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(10):1317–1323.
- [12] Galvão S R S, Salcedo I H. Soil phosphorus fractions in sandy soils amended with cattle manure for long periods[J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2009, 33(3):613–622.
- [13] Crews T E, Brookes P C. Changes of soil phosphorus forms through time in perennial versus annual agroecosystems[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 184:168–181.
- [14] 严正娟, 陈 硕, 王敏锋, 等. 不同动物粪肥的磷素形态特征及有效性分析[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(1):31–39.
YAN Zheng-juan, CHEN Shuo, WANG Min-feng, et al. Characteristics and availability of different forms of phosphorus in animal manures[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(1):31–39. (in Chinese)
- [15] 肖 辉, 潘 洁, 程文娟, 等. 不同有机肥对设施土壤有效磷累积与淋溶的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(5):1195–1200.
XIAO Hui, PAN Jie, CHENG Wen-juan, et al. Effect of different organic manures on accumulation and leaching of Olsen-P in greenhouse soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(5):1195–1200. (in Chinese)
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [17] Olsen S R, Cole C V, Watanabe F S. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate[J]. *Circular/United States Department of Agriculture*, 1954, 939:1–19.
- [18] 李洪刚, 陈玉成, 肖广全, 等. 鸟粪石结晶法处理牛场沼液过程中磷形态转化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3):228–233.
LI Hong-gang, CHEN Yu-cheng, XIAO Guang-quan, et al. Phosphorous transformation during cattle farm biogas slurry treatment using struvite crystallization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(3):228–233. (in Chinese)
- [19] 李金页, 郑 平. 鸟粪石沉淀法在废水除磷脱氮中的应用[J]. 中国沼气, 2004, 22(1):7–10.
LI Jin-ye, ZHENG Ping. Applications of struvite precipitation in removal of phosphorus and nitrogen from wastewater[J]. *China Biogas*, 2004, 22(1):7–10. (in Chinese)
- [20] 方 慈, 张 涛, 江荣风, 等. 磷酸铵镁结晶法回收养殖废水中磷素研究进展[J]. 水处理技术, 2015, 41(9):1–6.
FANG Ci, ZHANG Tao, JIANG Rong-feng, et al. Research progress of magnesium ammonium phosphate crystallization for phosphorus recovery from livestock wastewater[J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(9):1–6. (in Chinese)
- [21] Turner B L, Richardson A E, Mullaney E J, et al. Inositol phosphates: Linking agriculture and the environment[J]. *Inositol Phosphates Linking Agriculture & the Environment*, 2007, 1(4):1–15.
- [22] Tabatabai M A. Soil organic phosphorus: A review of world literature. 1987[J]. *Soil Science*, 1989, 147(1):77.
- [23] Chen J S, Mansell R S, Nkedi-Kizza P, et al. Phosphorus transport during transient, unsaturated water flow in an acid sandy soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(1):42–48.
- [24] 史吉平, 张夫道, 林 葆. 长期施用氮磷钾化肥和有机肥对土壤氮磷钾养分的影响[J]. 土壤肥料, 1998(1):7–10.
SHI Ji-ping, ZHANG Fu-dao, LIN Bao. Effects of long-term nitrogen phosphorus potassium and organic fertilization on nitrogen phosphorus and potassium in soil[J]. *Soils and Fertilizers*, 1998(1):7–10. (in Chinese)
- [25] 张翠荣. 土壤磷素淋溶状况模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2007.
ZHANG Cui-rong. The studies on simulations of phosphorus leaching in soil[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007. (in Chinese)
- [26] 赵亚杰, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. 施肥对设施菜地土壤磷累积及淋失潜能的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2):466–472.
ZHAO Ya-jie, ZHAO Mu-qiu, LU Cai-yan, et al. Effects of fertilization on the P accumulation and leaching in vegetable greenhouse soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(2):466–472. (in Chinese)
- [27] 吴 曦. 碱性土壤施硫磺对油菜生长和土壤环境的影响[D]. 太原:山西大学, 2007.
WU Xi. Effects of elemental sulfur application on growth of cole and soil environment in alkaline soil[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2007. (in Chinese)
- [28] Zhang M K. Effects of soil properties on phosphorus subsurface migration in sandy soils[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(5):599–610.