

污泥施用对园林土壤磷素有效性的影响

胡超¹, 王朴², 李雨锟¹, 付庆灵¹, 胡红青^{1*}

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉市园林科学研究院, 湖北 武汉 430064)

摘要: 土壤质量下降和磷素供应不足是限制园林植物正常生长的重要影响因子, 城市污泥作为富磷有机物质, 可有效改善土壤结构、提升土壤磷素供给能力。然而, 目前关于城市污泥施用对不同园林土壤的改良作用及磷组分的研究依旧不足。以湖北省武汉市红壤和黄棕壤为研究对象, 施用 0%、3%、5%、10%、15% 的腐熟污泥进行土培试验, 通过测定培养前后土壤 Hadley 磷组分及磷酸酶活性等指标, 探究添加污泥对园林土壤磷有效性的影响。结果表明, 污泥添加后, 土壤 pH 值向中性变化, 且随着污泥施用量的增加, 两种土壤的全磷和有效磷含量均呈增加趋势。添加污泥对红壤和黄棕壤的磷组分也有一定影响, 添加污泥后, 两种土壤中磷均以无机磷为主, 主要提高了 NaOH-Pi、NaHCO₃-Pi 和 D.HCl-Pi 含量; 有机磷中提升幅度最大的磷形态为 NaOH-Po, 且培养 60 d 后 NaHCO₃-Po 含量明显下降。添加污泥能提升土壤中磷酸酶活性, 培养 60 d 后, 添加 15% 比例的污泥对两种土壤的酸(碱)性磷酸酶活性提升效果最好, 其中红壤酸性磷酸酶活性和碱性磷酸酶活性分别提升 68.6% 和 181.8%, 黄棕壤中两种酶活性分别提升 178.7% 和 88.9%。施用污泥后园林土壤磷素有效性得到显著提升, 土壤中各形态磷素含量和磷酸酶活性均大幅增加。

关键词: 城市污泥; 园林土壤; 磷组分; 磷酸酶

随着人们对城市绿化环境的要求不断提高, 园林土壤研究越来越受到重视^[1], 而土壤质量下降^[2]与磷素供应不足^[3]是阻碍园林植物正常生长的重要限制因素。城市污泥作为一种富磷的外源性有机物质^[4], 可有效改善土壤结构、提升土壤磷素供给能力^[5-7], 但城市污泥施用量对不同园林土壤的改良作用及磷组分的影响仍需探究。有研究发现, 污泥中无机磷包括铁铝结合态磷和钙结合态磷, 有机磷主要是肌醇六磷酸、植酸盐等^[8], 污泥中包含的不同磷形态对园林植物有效性存在差异。不同于磷肥, 施用污泥除能提供有效磷外, 还可通过改变园林土壤理化性质、提高磷酸酶活性等方式^[9], 促进无机磷溶解和有机磷矿化, 因而对植物磷的供给往往具有长效性。污泥除了能提升对园林植物的磷供应量, 还能通过改善土壤结构, 降低容重, 提高土壤通气透水能力和有机质含量等^[5, 10-11], 为植物生长构建良好的土壤环境。

污泥作为一种重要的废弃资源, 其中含有大量的磷素, 若能将其充分应用于园林方向, 不仅能提高土壤质量, 还能有效缓解园林植物对磷素的需求, 但污泥施用对不同园林土壤中磷有效性的影响, 尤其对园林土壤中磷组分的影响尚缺乏研究。因此, 本文以湖北省武汉市红壤和黄棕壤为研究对象, 通过施用不同梯度的腐熟污泥进行土培试验, 探究污泥添加对土壤磷组分及磷酸酶活性的影响, 以期污泥资源的高效化利用和经济型园林建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试污泥取自湖北省武汉市某污水处理厂, 充分风干, 研磨并过 2 mm 筛备用。供试污泥基本性质为: pH 值 7.83, 有机质含量 365.60 g · kg⁻¹, 全氮(以 N 计)、全磷(以 P₂O₅ 计)、全钾(以 K₂O 计)质量比分别为 36.63、10.19、4.50 g · kg⁻¹。所选污泥基础养分指标符合《城镇污水处理厂污泥处置园林绿化用泥质量》(GB/T 23486—2009)的要求。供试污泥中重金属含量符合《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)的规定。供试园林

收稿日期: 2024-01-04; 录用日期: 2024-03-11

基金项目: 武汉市园林局科研项目(武园林发[2020]22号)。

作者简介: 胡超(1998-), 硕士研究生, 主要研究方向为土壤肥力。

E-mail: 468903697@qq.com。

通讯作者: 胡红青, E-mail: hqhu@mail.hzau.edu.cn。

土壤分别取自湖北省武汉市江夏区安山郊野公园 (30° 17' 89" N, 114° 27' 30" E) 和武汉市洪山区狮子山街学府路 (30° 47' 14" N, 114° 35' 41" E),

土壤类型分别为红壤和黄棕壤, 成土母质分别为 Q₂ 和 Q₃ 沉积物, 主要植被类型为银木和法桐。各土壤基本理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤的基本理化性质

土壤类型	地点	pH	有机质 (g · kg ⁻¹)	全磷 (g · kg ⁻¹)	碱解氮 (mg · kg ⁻¹)	有效磷 (mg · kg ⁻¹)	速效钾 (mg · kg ⁻¹)
红壤	安山	5.46	12.83	0.47	80.08	8.28	141.7
黄棕壤	狮子山	7.36	5.53	0.26	68.82	3.86	170.3

1.2 污泥添加试验

称取 300 g 过 2 mm 的风干土壤置于塑料盆中, 分别按土重的 0%、3%、5%、10%、15% 添加污泥, 同时设置磷肥添加处理, 即过磷酸钙添加量为 0.1475 g (磷添加量等同于 3% 污泥添加量的全磷量), 各处理对应编号分别为 CK、S1、S2、S3、S4 和 P, 每个处理设 3 次重复。将土壤样品和添加物混合均匀后, 调节土壤含水量至田间持水量的 60%, 置于 25℃ 的培养箱内进行培养, 培养期间每 3 d 调节一次水分含量, 培养第 3 和 60 d 时进行采样, 一部分土壤样品风干、磨细过筛备用, 另一部分新鲜土壤样品放于 -20℃ 冰箱中备用。

1.3 土壤理化性质及磷组分分析

土壤 pH 值采用电位法测定, 土水比 1 : 2.5; 有机质采用重铬酸钾 - 浓硫酸外加热法测定; 总磷采用硫酸 - 高氯酸消煮法测定, 有效磷采用 Olsen 法测定。具体操作步骤见《土壤农化分析》^[12]。

采用 Sui 等^[13] 修订后的 Hedley 分级法测定土壤磷组分含量, 该法根据不同土壤磷活性分为 6 种类型: H₂O-Pi, NaHCO₃-P (NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po), NaOH-P (NaOH-Pi、NaOH-Po), D.HCl-Pi, C.HCl-P (C.HCl-Pi、C.HCl-Po) 及 Residual-P。操作步骤为称取 0.5 g 过 0.15 mm 筛的土壤, 按顺序通过去离子水、0.5 mol · L⁻¹ NaHCO₃ (pH=8.2), 0.1 mol · L⁻¹ NaOH、1 mol · L⁻¹ 稀盐酸和浓盐酸进行分级提取, 每次提取时间为 16 h, 提取液体积为 30 mL, 然后在高速离心机上 10000 r/min 离心 10 min, 取上清液测定每一级全磷含量和无机磷含量 (钼蓝比色法), 通过总磷减去无机磷计算差值, 得到每一级有机磷含量。

1.4 土壤磷酸酶活性的测定

取 1.000 g 过 1 mm 筛的新鲜土壤于 50 mL 离心管中, 加 4 mL MUB 缓冲液 [取 12.1 g 三羟甲基氨基甲烷 (C₄H₁₁NO₃)、14.0 g 柠檬酸 (C₆H₁₀O₈)、

11.6 g 马来酸 (C₄H₄O₄) 和 6.3 g 硼酸 (H₃BO₃) 溶于 500 mL 1 mol · L⁻¹ NaOH 溶液中, 用去离子水定容到 1 L], 其中测定酸性磷酸酶活性时加入 pH 为 6.5 的缓冲液, 测定碱性磷酸酶活性时加入 pH 为 11 的缓冲液, 加入用相同缓冲液配制的 15 mmol · L⁻¹ 对硝基酚磷酸钠溶液 1 mL, 将其充分混匀后置于 37℃ 下培养 1 h, 培养结束后立即加入 4 mL 0.5 mol · L⁻¹ CaCl₂ 溶液和 4 mL 0.5 mol · L⁻¹ NaOH 溶液终止酶促反应, 充分混匀后过滤。于 400 nm 处测定吸光度, 通过单位时间内磷酸酶催化水解产生的对硝基苯酚数量计算土壤磷酸酶活性。

1.5 数据处理与分析

所有数据均用 Excel 2016、SPSS 18.0 计算, 所有图表均通过 Origin 2018 制作。多重比较采用 Duncan 法检验数据的差异显著性 (P<0.05), 图表中不同的小写英文字母代表各处理间差异达 0.05 显著性水平。

2 结果与分析

2.1 添加污泥对园林土壤 pH 的影响

添加污泥能提高酸性红壤 pH, 而中性黄棕壤 pH 则呈现先升高后降低的趋势 (图 1)。对红壤而言, 污泥添加 3 d 后能快速提高土壤 pH, 增幅为 1.74 ~ 2.28, 培养期间其 pH 值十分稳定, 而磷肥处理在一定程度上降低了土壤 pH 值; 对黄棕壤而言, 污泥添加 3 d 时 pH 值会随污泥施用量增加而提高, 污泥 S4 处理的 pH 值最高, 达到 7.85, 而培养 60 d 后污泥处理与 CK 处理相比, 土壤 pH 值分别下降了 0.27、0.20、0.11 和 0.22, 但不同用量污泥处理间差异不显著 (P>0.05), 磷肥处理会降低土壤 pH 值。

由此可见, 施用污泥会使得两种土壤 pH 值趋向中性变化, 且对于酸性红壤的 pH 值提升效果更显著。

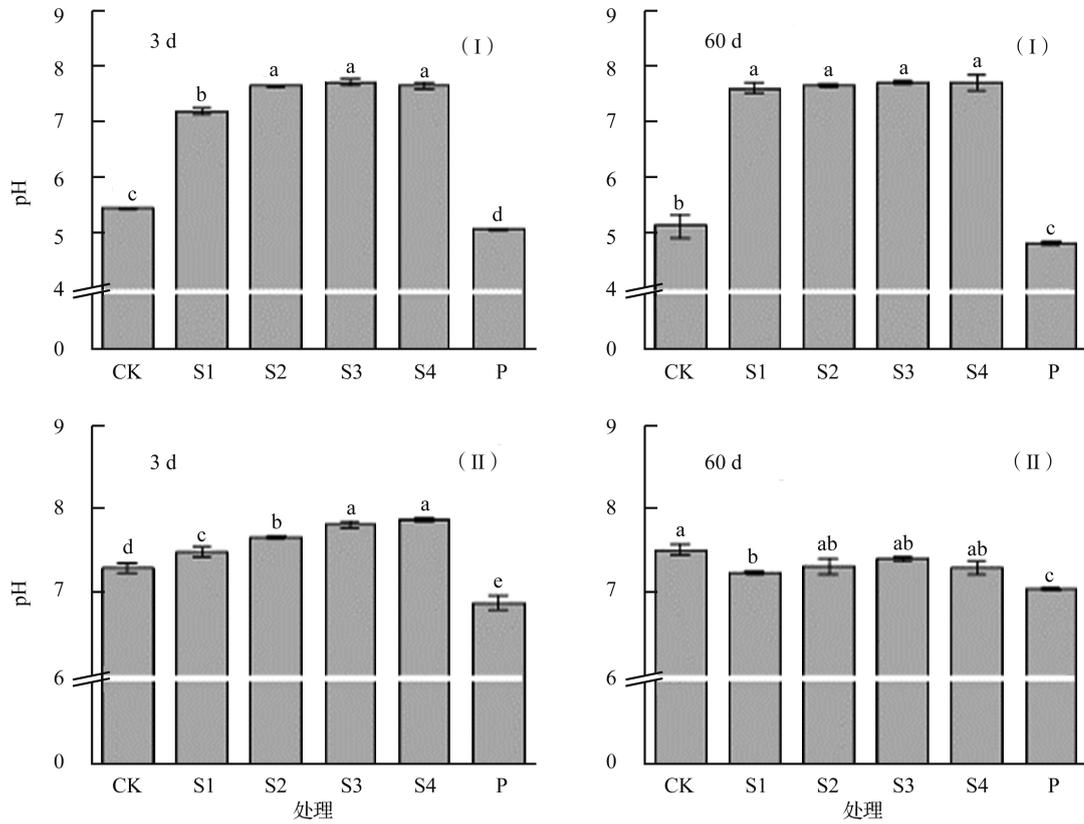


图1 pH值随污泥添加量及培养时间的变化

注：图中不同罗马数字表示不同土壤类型，其中I为红壤、II为黄棕壤；不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 添加污泥对园林土壤全磷和有效磷含量的影响

供试污泥添加对两种土壤全磷含量的影响如图2所示。添加污泥和磷肥均能提高土壤全磷含量。两种土壤全磷含量在污泥S4处理下达到最高，红壤和黄棕壤相较于CK处理分别提高了0.79和0.92 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，各污泥处理间差异显著 ($P < 0.05$)，P处理的全磷含量与S1处理无显著差异 ($P > 0.05$)。两种土壤在相同污泥添加量下，红壤的全磷含量高于

黄棕壤。

添加污泥能提高两种土壤有效磷含量，且有效磷含量随污泥施用量增加而升高（图3）。与CK处理相比，污泥添加3 d时红壤和黄棕壤中污泥处理的有效磷含量均显著增加，两种土壤的增加范围为6.06 ~ 16.92和2.20 ~ 15.70 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。污泥S1处理与P处理相比，其全磷含量大体一致，无显著变化，但P处理下有效磷含量明显高于S1处理，显然，磷肥中的磷有效性高于污泥。

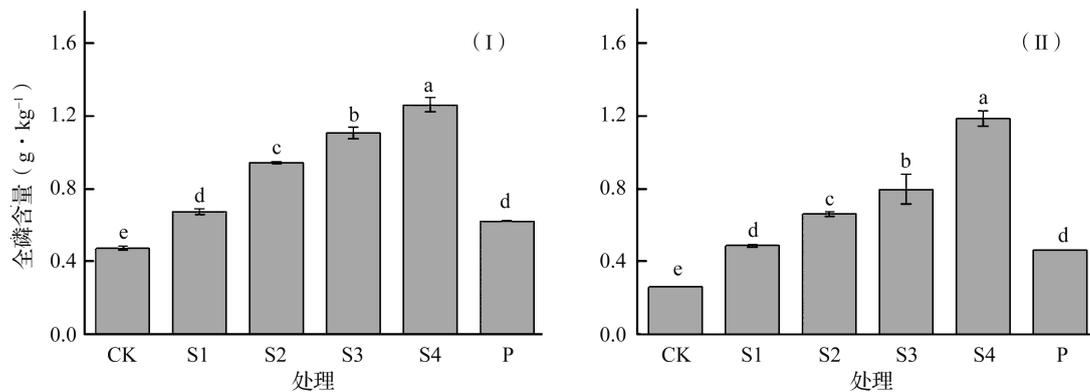


图2 全磷含量随污泥添加量的变化

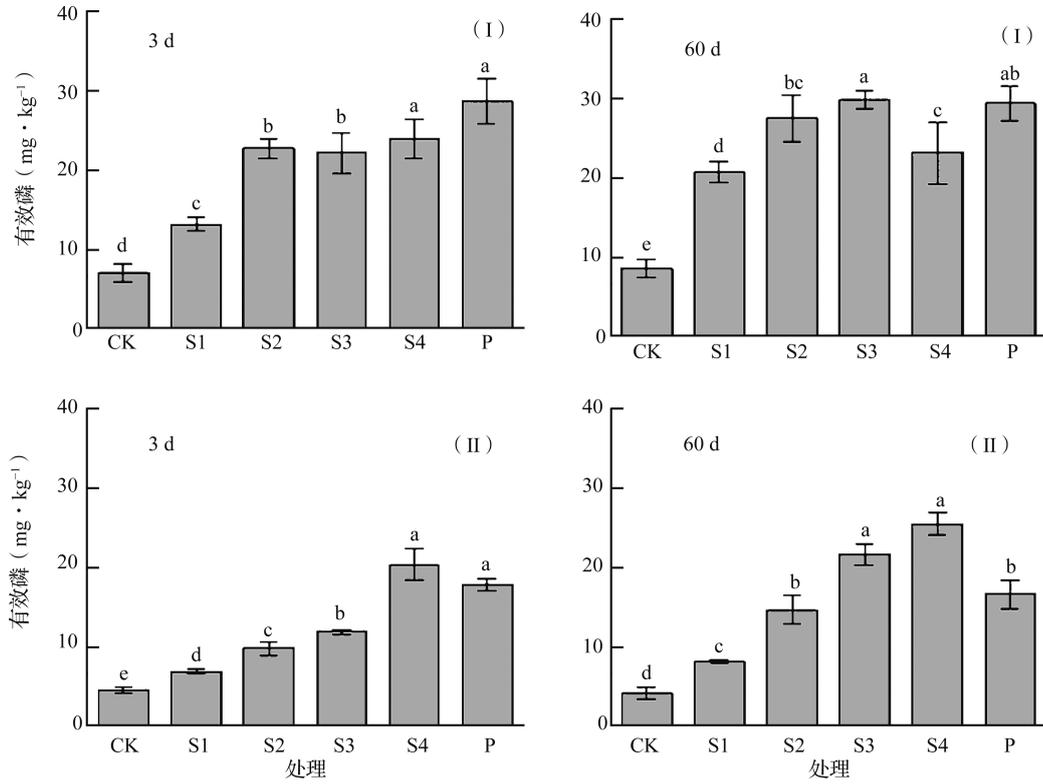


图3 土壤有效磷含量随污泥添加及培养时间的变化

培养 60 d 时, 两种土壤 S1、S2 和 S3 处理有效磷含量相较于培养前期进一步提高。红壤中 S3 处理有效磷含量超过 S4 和 P 处理, 增幅最大, 较 CK 处理提高了 $19.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 黄棕壤中 S4 处理有效磷含量仍最高, 较 CK 处理提高了 $21.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。说明适当添加污泥, 土壤有效磷含量随时间而提高。

然而, 红壤 S4 处理培养后期有效磷含量出现一定程度下降, 这可能是由于添加污泥量过高, 导致土壤碳磷比过大, 充足的碳源提高了土壤微生物活性, 造成有效磷被微生物固定。

2.3 添加污泥对园林土壤无机磷组分的影响

培养前后, 两种土壤各无机磷组分的含量变化如图 4 和图 5 所示。添加污泥培养后, 主要增加了两种土壤中 NaOH-Pi、D.HCl-Pi 和 NaHCO₃-Pi, 这 3 种形态磷含量均随污泥添加量增加而提高, 在 S4 处理下达最大, 培养 60 d 后红壤中 S4 处理相较于 CK 处理分别提高了 456.12、235.94 和 $148.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 黄棕壤中 S4 处理相较于 CK 处理分别提高了 513.80、176.93 和 $151.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 各污泥处理与 CK 处理间差异显著 ($P < 0.05$), 而添加污泥对 H₂O-Pi 和 C.HCl-Pi 含量影响不显著。添加污泥培养 60 d 后, H₂O-Pi 和 NaHCO₃-Pi 含量有不同程

度增加, 而其他形态无机磷组分随时间有不同程度的增加或减少, 但变化规律不明显。

无机磷形态分级表明, 添加污泥不仅能增加土壤中活性无机磷的含量, 而且能大幅提高土壤中缓效磷含量, NaOH-Pi 会随植物对有效磷的吸收和有效磷的降低而逐渐释放^[14], 有利于植物生长后期对磷的需求。

2.4 添加污泥对园林土壤有机磷组分的影响

污泥施用前后土壤各有机磷组分含量的变化如图 6 所示, 可以看出, 添加污泥后, 土壤中各形态有机磷含量均有不同程度增加, 其中 NaHCO₃-Po 和 NaOH-Po 含量随污泥用量增加而提高, 且在 S4 处理下达到最大, 培养 60 d 后红壤相较于 CK 处理分别提高了 50.31 和 $168.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 黄棕壤相较于 CK 处理分别提高了 32.43 和 $96.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 各污泥处理与 CK 处理间差异显著 ($P < 0.05$), 添加污泥后 C.HCl-Po 明显高于 CK 和 P 处理, 但不同污泥用量间差异不显著。

培养 60 d 后, 两种土壤添加污泥处理下 NaHCO₃-Po 含量比培养前有不同程度下降, 且 S4 处理的降幅最大, 红壤和黄棕壤较培养前分别下降了 14.81% 和 26.88%。

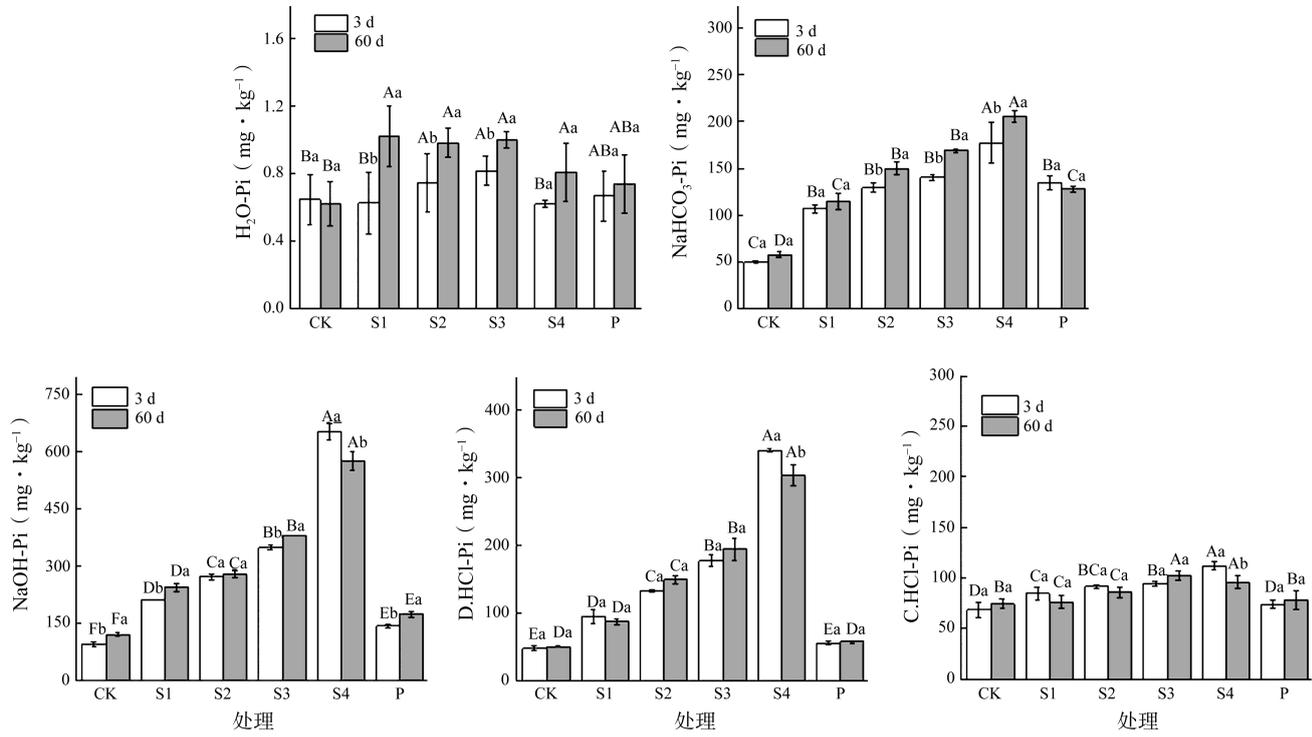


图 4 培养前后红壤中无机磷各组分含量随污泥添加量的变化

注：图中不同大写字母表示同一培养时间下不同污泥处理之间差异显著 ($P < 0.05$)；不同小写字母表示同一污泥处理下不同培养时间之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

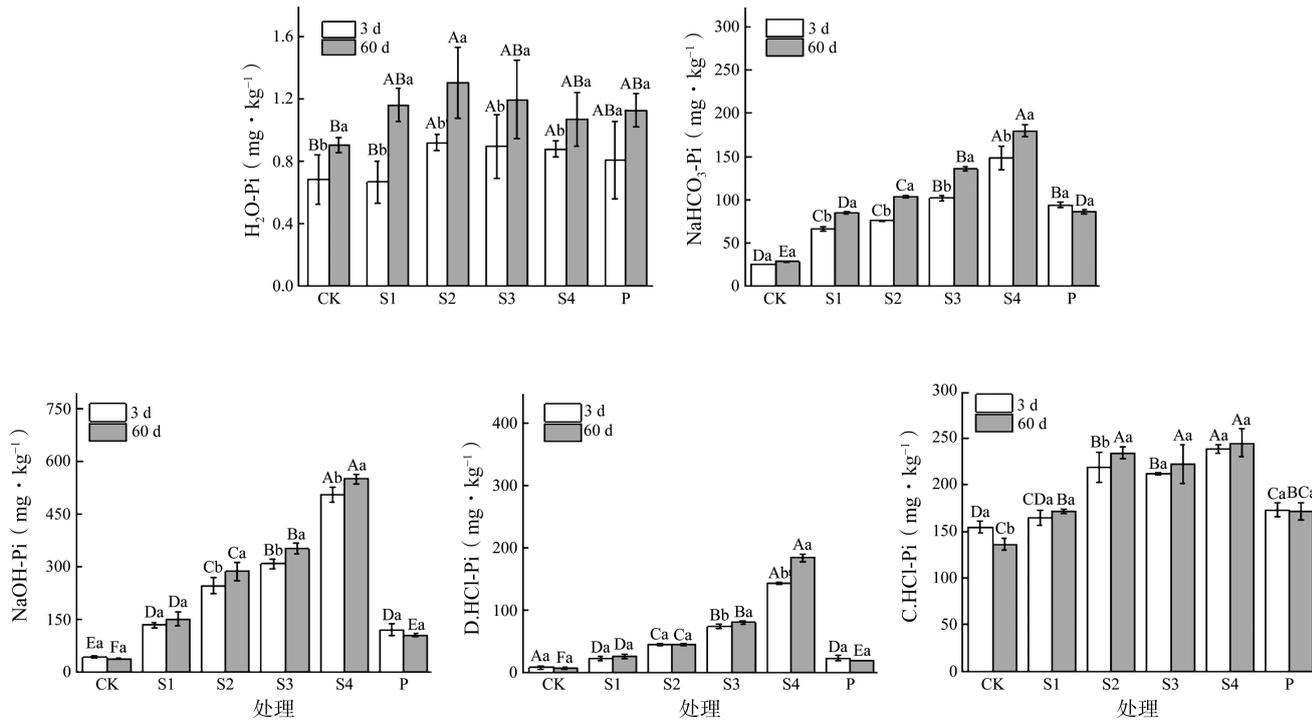


图 5 培养前后黄棕壤中无机磷各组分含量随污泥添加量的变化

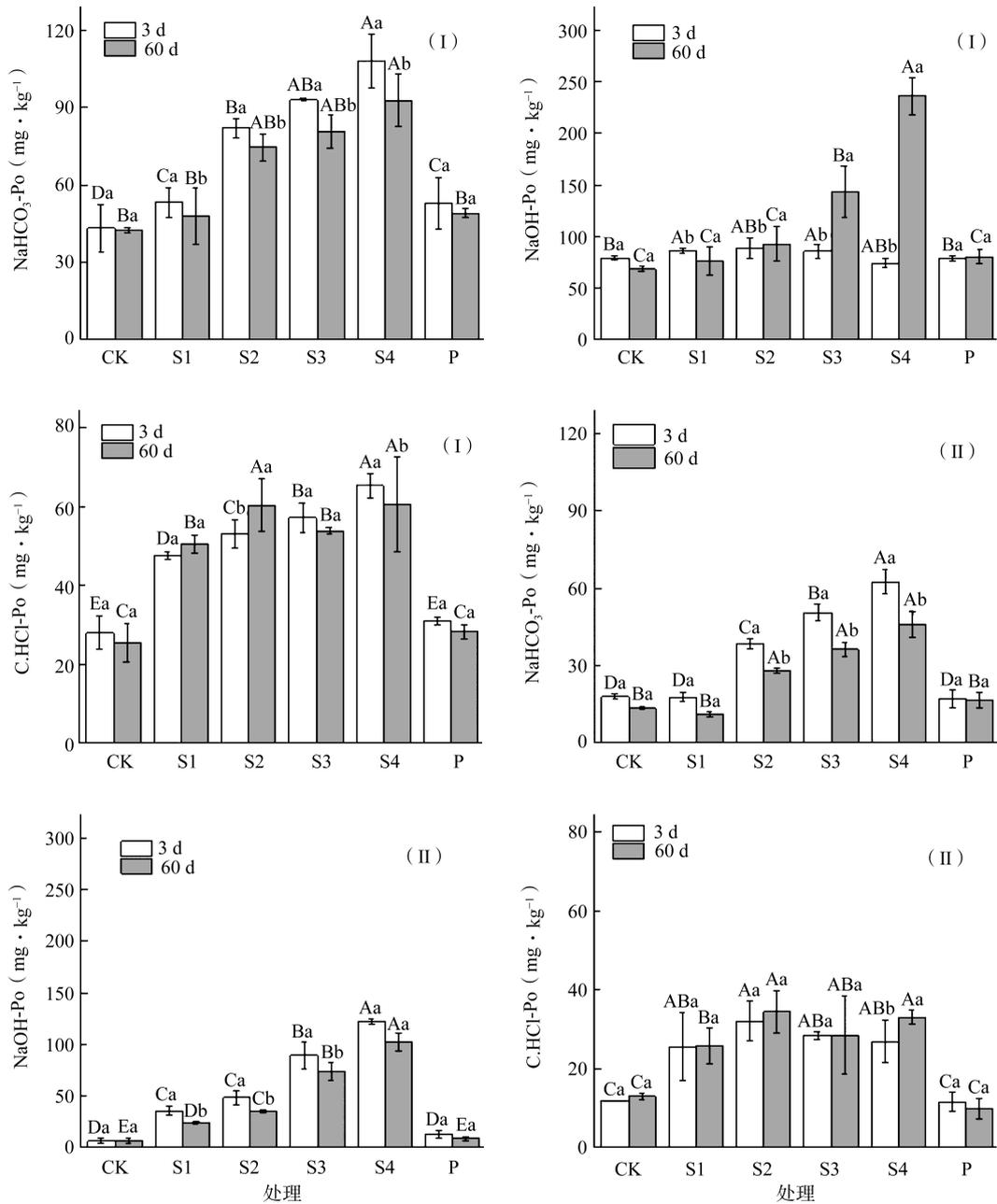


图6 有机磷组分含量随污泥添加量及培养时间的变化

2.5 添加污泥对园林土壤磷酸酶活性的影响

污泥对两种土壤酸(碱)性磷酸酶活性的影响见表2,随着污泥用量增加,红壤和黄棕壤的酸(碱)性磷酸酶活性均升高,两者呈正相关,施用磷肥对两种土壤的磷酸酶活性影响则不大。除红壤中碱性磷酸酶外,在污泥处理下红壤酸性磷酸酶和黄棕壤酸(碱)性磷酸酶第60 d的酶活性明显高于第3 d,其中黄棕壤S3处理培养前后磷酸酶活性增幅最大,添加60 d时的酸性和碱性磷酸酶活性较第

3 d时分别增加了0.42和0.68 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,分别提升了34.71%和44.74%。

两种土壤60 d后均在污泥S4处理磷酸酶活性达最高。对红壤而言,添加污泥提升碱性磷酸酶活性程度更高,污泥S4处理下酸性磷酸酶活性较CK处理提升了68.57%,而碱性磷酸酶活性提升了181.82%;对黄棕壤而言,添加污泥提升酸性磷酸酶活性更明显,污泥S4处理下碱性磷酸酶活性较CK处理提升88.89%,而酸性磷酸酶活性提升178.69%。

表2 磷酸酶活性随污泥添加量和培养时间的变化 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)

土壤类型	处理	酸性磷酸酶		碱性磷酸酶	
		3 d	60 d	3 d	60 d
红壤	CK	0.65 ± 0.01c	0.70 ± 0.07c	0.32 ± 0.02d	0.33 ± 0.02c
	S1	0.56 ± 0.02d	0.66 ± 0.06c	0.49 ± 0.03c	0.45 ± 0.04c
	S2	0.66 ± 0.09c	0.77 ± 0.06c	0.68 ± 0.06b	0.58 ± 0.06b
	S3	0.77 ± 0.02b	1.05 ± 0.03b	0.76 ± 0.04b	0.66 ± 0.03b
	S4	0.99 ± 0.09a	1.18 ± 0.08a	1.05 ± 0.04a	0.93 ± 0.09a
	P	0.63 ± 0.12c	0.75 ± 0.05b	0.31 ± 0.07d	0.38 ± 0.07c
黄棕壤	CK	0.59 ± 0.02d	0.61 ± 0.01c	1.15 ± 0.10c	1.17 ± 0.18c
	S1	0.79 ± 0.03c	0.60 ± 0.01c	1.49 ± 0.14b	1.46 ± 0.10bc
	S2	1.05 ± 0.09b	1.20 ± 0.04b	1.44 ± 0.09b	1.75 ± 0.19b
	S3	1.21 ± 0.03b	1.63 ± 0.04a	1.52 ± 0.16b	2.20 ± 0.23a
	S4	1.67 ± 0.07a	1.70 ± 0.01a	1.87 ± 0.07a	2.21 ± 0.17a
	P	0.63 ± 0.02cd	0.63 ± 0.02c	1.10 ± 0.08c	1.22 ± 0.07c

注：磷酸酶单位以每克土壤在 1 h 内释放对硝基苯酚量 (μg) 计；同列不同小写字母表示差异达 5% 显著水平。

3 讨论

3.1 添加污泥对园林土壤无机态磷的影响

本研究通过在红壤和黄棕壤中施用不同量污泥，发现均增加了土壤磷有效性。施用污泥直接增加了红壤和黄棕壤中总磷和有效磷含量，且在一定范围内随污泥用量增加而提高，这与 De Figueiredo 等^[15] 研究结果一致。当培养 60 d 时，污泥 S1、S2、S3 处理有效磷含量比培养前均有不同幅度的上升，说明添加污泥后土壤磷素有效性随时间而增加，一段时间后趋于稳定，成为土壤中稳定的磷源。有研究表明，添加污泥不仅可以提供直接磷源，而且可以通过改变土壤容重、pH、有机质等理化性质^[16]，进而影响土壤磷有效性。本研究中两种土壤的 pH 值在培养过程中均趋于中性，可能是土壤磷素有效性提高的原因之一^[17]。

有机肥对土壤磷有效性主要由施磷量与磷组成决定^[18]。本研究中两种土壤添加污泥培养后，无机磷和有机磷均有不同程度的上升，且无机磷增加量明显大于有机磷，说明污泥中的磷以无机态为主，这与 Kidd 等^[19] 和 Xie 等^[20] 的研究结果一致。两种土壤各种形态无机磷变化规律相似，不同污泥添加量下 $\text{H}_2\text{O}-\text{Pi}$ 和 $\text{C.HCl}-\text{Pi}$ 变化不大，主要增加了 NaHCO_3-Pi 、 $\text{NaOH}-\text{Pi}$ 和 $\text{D.HCl}-\text{Pi}$ ，且均随着污泥添加量增加而增大，其含量大小为 $\text{NaOH}-\text{Pi} > \text{NaHCO}_3-\text{Pi} > \text{D.HCl}-\text{Pi}$ ，说明添加污泥

主要增加的是土壤中缓效态无机磷，其形态稳定，可随作物对有效磷吸收而逐渐释放^[14]，且 Kidd 等^[19] 认为， $\text{NaOH}-\text{Pi}$ 是土壤添加污泥后无机磷的主要存在形式，可通过解吸而成为植物可利用态。添加污泥培养 60 d 后，各污泥处理 $\text{H}_2\text{O}-\text{Pi}$ 和 NaHCO_3-Pi 含量呈不同程度上升，活性无机磷含量增加。有研究对施用 10 年有机肥的土壤进行调查，发现施用有机肥后土壤 pH 呈增加趋势，会降低土壤对无机磷的吸附，提高土壤溶液中磷含量，从而间接提高土壤磷有效性^[18]。

3.2 添加污泥对园林土壤有机磷及磷酸酶的影响

土壤有机磷作为磷素的重要组成部分，对磷的有效性也起到重要作用。本研究中，添加污泥后不同形态的有机磷含量均增加，且增加幅度最高的为 $\text{NaOH}-\text{Po}$ ；培养前后，各污泥处理下只有 NaHCO_3-Po 出现明显下降趋势，且培养前后黄棕壤 NaHCO_3-Po 含量降幅高于红壤，说明培养过程中可能存在 NaHCO_3-Po 向无机磷的转化，且添加污泥主要是通过促进微生物利用高活性有机磷而起作用；培养 60 d 后 NaHCO_3-Po 含量在黄棕壤中降幅更大，说明黄棕壤中有机磷矿化程度高于红壤。

许多研究认为，添加污泥等有机肥后土壤磷酸酶活性会增加^[21]，且磷酸酶活性与污泥用量呈正相关^[22]，这可能是由于污泥中丰富的有机物可为解磷微生物提供充足的能源，但受到有机物原料、用量及腐熟程度的影响，有机肥施用后磷酸酶的反

应也有不同^[23]。本研究中施加污泥能明显提高土壤磷酸酶活性,且培养前后各污泥处理的磷酸酶活性有所上升,这与 Albrecht 等^[24]的研究结果不一致,他们认为污水、猪粪等有机物与污泥混合堆肥后施用,土壤磷酸酶活性呈先增后减的趋势,并在 30 d 时活性达到最高,这可能是由于本试验中取样时间已过最高峰值所致。本研究发现,添加各污泥培养 60 d 后,红壤和黄棕壤中酸(碱)性磷酸酶活性提升效果不同。污泥对红壤中碱性磷酸酶活性提升幅度更大,而对黄棕壤中酸性磷酸酶活性提升幅度更大,这可能受到原土 pH 值的影响,红壤偏酸性,其碱性磷酸酶活性较低,黄棕壤偏中碱性,其酸性磷酸酶活性较低,随着污泥施用,两种土壤的 pH 值均趋向中性,使原活性较低的磷酸酶活性大幅提升。

4 结论

(1) 供试土壤添加污泥后, pH 值均趋向中性变化,且全磷和有效磷均随污泥用量增加而提高,与添加等量磷的污泥相比,磷肥处理则降低了 pH 值,且磷肥对土壤有效磷含量提升效果更好。

(2) 红壤和黄棕壤中添加污泥后,磷以无机态为主,主要增加的为 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、 NaOH-Pi 和 D.HCl-Pi , 培养 60 d 后,各污泥处理下 $\text{H}_2\text{O-Pi}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 含量逐渐增加。

(3) 红壤和黄棕壤中添加不同量污泥后,各形态有机磷含量均增加,增幅最高的形态均为 NaOH-Po ; 培养前后 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 含量明显下降,且黄棕壤的降幅大于红壤。

(4) 施用不同量污泥后,红壤和黄棕壤中酸(碱)性磷酸酶活性均随污泥用量增加而提高,且两种土壤中污泥对酸(碱)性磷酸酶活性的提升效果不同,而施用磷肥对两种土壤的磷酸酶活性影响则不大。

参考文献:

- [1] 刘兴诏, 黄旻, 黄柳菁. 中国部分大中城市居住区园林土壤碱化现状及主要成因 [J]. 西北林学院学报, 2019, 34 (6): 202-207.
- [2] 朱本国, 胡艳燕, 吴松成, 等. 重庆城市绿地土壤障碍因子分析 [J]. 现代园艺, 2021, 44 (21): 33-34.
- [3] 王朴, 康凯丽, 金晶, 等. 武汉市园林土壤理化性状的空间分布规律 [J]. 江苏农业科学, 2020, 48 (18): 256-261.
- [4] Kahiluoto H, Kuisma M, Ketoja E, et al. Phosphorus in

manure and sewage sludge more recyclable than in soluble inorganic fertilizer [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49 (4): 2115-2122.

- [5] 潘志强, 张淑琴, 任大军, 等. 城市剩余污泥的直接施用对矿区土壤修复的影响 [J]. 环境工程, 2019, 37 (11): 189-193.
- [6] Borjesson G, Katterer T. Soil fertility effects of repeated application of sewage sludge in two 30-year-old field experiments [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 112 (3): 369-385.
- [7] Lwin C M, Murakami M, Hashimoto S. The implications of allocation scenarios for global phosphorus flow from agriculture and wastewater [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2017, 122: 94-105.
- [8] Waldrip H M, He Z Q, Erich M S. Effects of poultry manure amendment on phosphorus uptake by ryegrass, soil phosphorus fractions and phosphatase activity [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47 (4): 407-418.
- [9] 杨长明, 范博博, 荆亚超. 厌氧消化污泥对退化苗圃土壤的改良效果研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46 (1): 74-80.
- [10] 杨文彬, 王海东, 彭祚登, 等. 施用污泥制有机营养土对沙地国槐榆树林土壤理化性质的影响 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52 (4): 559-566.
- [11] 马德刚, 叶羽, 孟凡怡. 无害化污泥对沙性土即时团聚体稳定性及黏聚力影响的研究 [J]. 安全与环境学报, 2021, 21 (6): 2781-2788.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] Sui Y B, Thompson M L, Shang C. Fractionation of phosphorus in a Mollisol amended with biosolids [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63 (5): 1174-1180.
- [14] Crews T E, Brookes P C. Changes in soil phosphorus forms through time in perennial versus annual agroecosystems [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 184: 168-181.
- [15] De Figueiredo C C, Pinheiro T D, De Oliveira L E Z, et al. Direct and residual effect of biochar derived from biosolids on soil phosphorus pools: A four-year field assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 140013.
- [16] 黄殿男, 谭杰, 傅金祥, 等. 城市污水处理厂污泥对沙漠化土壤的改良效果 [J]. 水土保持学报, 2017 (1): 323-327.
- [17] Kajino H, Fukui M, Fujimoto Y, et al. Variations in soil nutrient availabilities and foliar nutrient concentrations of trees between temperate monsoon karst and non-karst forest ecosystems on Mount Ibuki in Japan [J]. *Ecological Research*, 2023, 10: 12414.
- [18] Nobile C M, Bravin M N, Becquer T, et al. Phosphorus sorption and availability in an andosol after a decade of organic or mineral fertilizer applications: Importance of pH and organic carbon modifications in soil as compared to phosphorus

- accumulation [J]. *Chemosphere*, 2020, 239: 124709.
- [19] Kidd P S, Dominguez-rodriguez M J, Diez J, et al. Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge [J]. *Chemosphere*, 2007, 66 (8): 1458-1467.
- [20] Xie C S, Zhao J, Tang J, et al. The phosphorus fractions and alkaline phosphatase activities in sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (3): 2455-2461.
- [21] Tarf O J, Akca M O, Donar Y O, et al. The short-term effects of pyro- and hydrochars derived from different organic wastes on some soil properties [J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, 12 (1): 129-139.
- [22] Houben D, Michel E, Nobile C, et al. Response of phosphorus dynamics to sewage sludge application in an agroecosystem in northern France [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 137: 178-186.
- [23] Basak B B. Soil phosphorus dynamics and P uptake by medicinal crops as Influenced by locally available organic amendments in light-textured soil of Semi-Arid western India [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23 (2): 2190-2201.
- [24] Albrecht R, Lepetit J, Calvert V, et al. Changes in the level of alkaline and acid phosphatase activities during green wastes and sewage sludge co-composting [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101 (1): 228-233.

Influence of sewage sludge application on phosphorus availability in two landscape soils

HU Chao¹, WANG Pu², LI Yu-kun¹, FU Qing-ling¹, HU Hong-qing^{1*} (1. College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan Hubei 430070; 2. Institute of Landscape Sciences of Wuhan City, Wuhan Hubei 430064)

Abstract: Declining soil quality and insufficient phosphorus supply are important factors that limit the normal growth of garden plants. As phosphorus-rich organic matter, urban sludge can effectively improve soil structure and enhance soil phosphorus supply capacity. However, there is still insufficient research on the improvement effect of urban sludge application on different types of garden soil and its phosphorus components. In this study, the red soil and yellow-brown soil in Wuhan were sampled, and soil culture experiments were carried out by applying 0%, 3%, 5%, 10%, 15% of decomposed sludge to explore the effect of sludge addition on soil phosphorus components and phosphatase activity, in order to provide theoretical basis and technical guidance for the efficient utilization of phosphorus resources in sludge and the construction of green and economical gardens. The results showed that after the addition of sludge, the soil pH value changed towards neutral, and as the amount of sludge application increased, the total phosphorus and available phosphorus contents of both soils showed an increasing trend. Adding sludge also had a certain impact on the phosphorus components of red soil and yellow-brown soil. After adding sludge, the phosphorus in both soils was mainly inorganic phosphorus, which mainly increased the contents of NaOH-Pi, NaHCO₃-Pi and D.HCl-Pi; The phosphorus form with the greatest increase among organic phosphorus was NaOH-Po, and the NaHCO₃-Po content dropped significantly after 60 days of culture. Sludge-adding increased the phosphatase activity in the soil. After 60 days of cultivation, adding 15% sludge had the best effect on improving the acid (alkaline) phosphatase activity of the two soils, among which the acid phosphatase activity of red soil and alkaline phosphatase activity were the best. The activities of the two enzymes in yellow-brown soil increased by 68.6% and 181.8%, respectively, and the activities of the two enzymes in yellow-brown soil increased by 178.7% and 88.9%, respectively. After the application of sewage sludge, the phosphorus availability of garden soil was significantly improved, and the content of various forms of phosphorus and phosphatase activity in the soil increased significantly.

Key words: sewage sludge; landscape soil; phosphorus fractions; phosphatase