

陈新宇, 杨 智, 杨 根, 等. 吸附磷后的镧改性秸秆替代化学磷肥施用对土壤磷形态的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(6): 1020-1027.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.06.008

# 吸附磷后的镧改性秸秆替代化学磷肥施用对土壤磷形态的影响

陈新宇<sup>1,2</sup>, 杨 智<sup>2</sup>, 杨 根<sup>2</sup>, 俞映惊<sup>1,2</sup>, 汤 婕<sup>1</sup>, 周丹一<sup>2</sup>, 任 卓<sup>2</sup>, 薛利红<sup>2</sup>, 杨林章<sup>2</sup>

(1.安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 2.农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室/江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 定向改性材料能提升吸附磷的能力, 高效去除水体中磷污染, 然而吸附材料的后端利用却鲜有研究和报道。本研究以镧元素改性秸秆用于吸附畜禽养殖尾水中的磷, 并将吸附磷后的材料作为磷肥进行小麦盆栽试验, 动态取样测定不同形态的磷含量, 分析其对土壤中磷形态的影响。结果表明: 本研究镧改性秸秆对养殖尾水中磷吸附效率达到 98.59%, 最佳投加量为 1.4 g/L。小麦生长初期, 附磷镧改性秸秆继续吸附土壤的活性态磷, 促进土壤中活性磷转化为钙吸附态磷, 防止土壤磷的流失。随着小麦生长, 钙吸附态磷含量逐渐下降, 转变为活性态磷持续供应养分, 说明附磷镧改性秸秆具备缓释磷肥的属性。本研究为附磷后材料的利用提供了一种新的思路, 有助于缓解农业面源污染。

**关键词:** 镧改性秸秆; 磷形态; 面源污染; 小麦

**中图分类号:** S158.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)06-1020-08

## Effects of replacing chemical phosphate fertilizer with lanthanum modified straw after phosphorus adsorption on soil phosphorus forms

CHEN Xinyu<sup>1,2</sup>, YANG Zhi<sup>2</sup>, YANG Bei<sup>2</sup>, YU Yingliang<sup>1,2</sup>, TANG Jie<sup>1</sup>, ZHOU Danyi<sup>2</sup>, REN Zhuo<sup>2</sup>, XUE Lihong<sup>2</sup>, YANG Linzhang<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** The directional modified materials can enhance the ability of phosphorus adsorption and effectively remove phosphorus pollution from water, but the back-end utilization of adsorption materials is seldom studied and reported. In this

收稿日期: 2023-06-05

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2021YFD1700805); 江苏省重点研发计划项目(D21YFD17008); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX19(1007)]; 安徽省科技重大专项(202103a06020011)

**作者简介:** 陈新宇(1999-), 男, 安徽泾县人, 硕士研究生, 研究方向为农业面源污染治理。(E-mail) 2638244370@qq.com

**通讯作者:** 杨 根, (E-mail) yangbeimail@126.com; 汤 婕, (E-mail) tangjie@ahau.edu.cn

study, lanthanum modified straw was used to adsorb phosphorus from livestock and poultry tail water, and the material after adsorbing was used as phosphorus fertilizer in wheat pot experiment. Dynamic sampling was used to determine the content of different forms of phosphorus, and the effect on phosphorus forms in the soil was analyzed. The results showed that the phosphorus adsorption efficiency of lanthanum modified straw was 98.59%, and the optimal input was 1.4 g/L. In the early stage of wheat growth,

lanthanum phosphate modified straw continued to absorb active phosphorus in the soil, promoted the conversion of active phosphorus into calcium-adsorbed phosphorus, and prevented the loss of soil phosphorus. With the growth of wheat, the content of calcium-adsorbed phosphorus decreased gradually, and the calcium-adsorbed phosphorus was converted into active phosphorus to continuously supply nutrients, which indicated that the modified straw with lanthanum phosphate had the properties of slow-release phosphate fertilizer. This study provides a new idea for the utilization of phosphorus-added materials, which is helpful to alleviate agricultural non-point source pollution.

**Key words:** lanthanum modified straw; phosphorus forms; non-point source pollution; wheat

磷是作物生长发育必需的营养元素,也是一种不可再生资源<sup>[1-4]</sup>。土壤是植物获取磷养分的主要来源,磷以活性态无机磷的形式被植物吸收<sup>[5-6]</sup>。然而磷肥的过量施用会造成植物体内微量元素的代谢紊乱,致使作物的产量和农产品品质降低<sup>[7]</sup>,同时盈余的磷可以通过侵蚀、径流和淋溶的方式从农田转移到邻近的水体,导致水体富营养化,造成农业面源污染<sup>[8-12]</sup>。

吸附法具有成本低、效率高等优点,是高效处理水体磷污染的手段之一<sup>[13-14]</sup>。镧(La)作为自然界中储量丰富的稀土元素,因其具有良好的磷酸盐吸附性能,已获得广泛的认同<sup>[15-17]</sup>。已有研究证实,即使水中磷浓度较低,镧系化合物也可通过配位交换与磷酸根结合形成络合物,去除水中的磷<sup>[18-20]</sup>。另外,镧系吸附剂需要合适的载体为反应提供充分的空间<sup>[21-22]</sup>,吸附后的复合材料可能作为潜在的磷肥。Zouhair等<sup>[23]</sup>的研究结果表明,将吸附磷的镧修饰污泥生物炭添加到土壤后,土壤有效磷含量提高了6.7倍,这有利于碱性土壤中黑麦草的生长;Jia等<sup>[24]</sup>的研究结果表明,负载 $\text{La}(\text{OH})_3$ 的沙田柚中果皮生物炭吸附磷达到饱和后,能够作为玉米的高效缓释磷肥<sup>[24]</sup>。秸秆是典型的农业废弃物,储量丰富,利用镧改性秸秆吸附养殖尾水中的磷,也为秸秆的资源化利用提供了一种新途径。载体间存在较大差异,目前还没有研究报道载镧秸秆的磷吸附能力,以及吸附磷后的载镧秸秆磷养分供应能力。

土壤磷素分级可有效评估土壤有效磷库水平和反映土壤磷素供应状况,也可以表明土壤磷流失潜力。Hedley提出的磷素分级方法得到了广泛的认同,是目前较为科学合理的磷素分级方法之一。根据提取过程的不同可分为活性态磷(弱吸附态磷、潜在活性磷)、中度活性态磷(铁铝结合态磷、钙结合态磷)和残留态磷<sup>[25-27]</sup>。因此,本研究拟以化学

沉淀法制备镧改性秸秆,用于吸附养殖尾水中的磷,吸附完成后的材料作为磷肥替代施入土壤。通过动态磷分级试验观测其施入后土壤磷形态的变化,分析其对土壤中磷形态的影响,评估土壤磷流失的潜力。本研究旨在提供一种有效去除养殖尾水中磷污染的材料,以及为该材料吸附磷后的再利用提供科学参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

自制小麦秸秆风干样,长度<60 mm。养殖尾水来自南京某养猪厂,总磷含量为7.80 mg/L。 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{LaCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 均为分析纯。试验土壤取自江苏省农业科学院(118.88°N, 32.04°E),土壤pH值为7.19,全磷含量为0.22 g/kg,溶解态磷含量为6.20 mg/kg,交换磷含量为51.60 mg/kg,铁铝吸附态磷含量为74.00 mg/kg,钙吸附态磷含量为76.00 mg/kg,残留态磷含量为13.20 mg/kg,电导率为47.74  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,可溶性有机碳含量为0.02 g/kg,氨态氮含量为3.52 mg/kg,硝态氮含量为45.90 mg/kg。

### 1.2 试验方法

1.2.1 镧改性秸秆制备 小麦秸秆(WS)用水数次清洗后,于60℃烘箱干燥后,粉碎研磨,过60目筛。取5.0 g 秸秆粉末于锥形瓶中,与50 ml 0.5 mol/L  $\text{LaCl}_3$ 溶液混合均匀后,置于振荡箱中,以180 r/min的转速于30℃下连续振荡6 h,将10 ml 1.5 mol/L NaOH溶液加入混合液中(边振荡边加),继续振荡20 h,离心过滤,反复用去离子水冲洗直至滤液pH值为8。将秸秆烘干并粉碎,得到改性材料——镧改性秸秆(WS-La)。

1.2.2 吸附试验 动力学试验:分别称取0.05 g WS-La于100 ml锥形瓶中,加入养殖尾水50 ml,在25℃、150 r/min的条件下连续振荡6 h,分别在15

min、30 min、60 min、120 min、240 min、480 min 用 0.45  $\mu\text{m}$  滤头过滤取样,测定吸附率。

投加量试验:分别称取 WS-La 0.01 g、0.02 g、0.03 g、0.07 g、0.12 g、0.20 g 于 100 ml 锥形瓶中,各加入养殖尾水 50 ml,在 25  $^{\circ}\text{C}$ 、150 r/min 条件下连续振荡 6 h,用 0.45  $\mu\text{m}$  滤头过滤取样并测定吸附率。

通过上述试验优选出最佳投入量参数后,加入 15 L 养殖尾水,搅拌后静置一夜,在 80  $^{\circ}\text{C}$  下静置烘干,得到用于附磷镧改性秸秆 (WS-La-P),测定磷含量,用于下一阶段盆栽试验。

1.2.3 盆栽试验 盆栽试验于 2021 年 11 月至 2022 年 5 月在江苏省农业科学院大棚内进行。尿素作为无机氮肥,硫酸钾作为钾肥,磷酸二氢钠作为磷肥一次性基施。试验共设置 4 个处理,分别为不施肥对照 (CK)、施用化肥磷肥处理 (F)、附磷镧改性秸秆全量替代化肥磷肥处理 (SLa)、附磷镧改性秸秆半量替代化肥磷肥处理 (SLaF)。施磷量以  $\text{P}_2\text{O}_5$  计,施钾量以  $\text{K}_2\text{O}$  计,各处理设 3 次重复,共 12 盆。各处理化肥施用量如表 1 所示。

表 1 各处理化肥施用量

Table 1 The amount of chemical fertilizer applied in each treatment

处理	CK	F	SLa	SLaF
施氮量 (g/kg)	0	0.31	0.31	0.31
施磷量 (g/kg)	0	0.11	0.11	0.11
施钾量 (g/kg)	0	0.13	0.13	0.13

CK: 不施肥对照; F: 施用化肥磷肥处理; SLa: 附磷镧改性秸秆全量替代化肥磷肥处理; SLaF: 附磷镧改性秸秆半量替代化肥磷肥处理。

试验容器选用 5.1 L 的塑料开口盆,每盆装 5 kg 土壤。挑选籽粒饱满、无病虫害的小麦种子,25  $^{\circ}\text{C}$  浸种 24 h,催芽 36 h,每盆播种 12 粒种子,种子上覆盖 1 cm 厚土壤。分别于小麦播种后第 10 d、第 100 d、第 150 d 采用“S”形 5 点采样法采集 0~20 cm 土层土样制成混合样,放入 -40  $^{\circ}\text{C}$  冰箱冷冻保存,待测时用冷冻干燥机冻干土样,挑出杂物研磨后过 100 目筛,用于磷素分级测定。地上部秸秆和籽粒全部收获后于 105  $^{\circ}\text{C}$  下杀青,65  $^{\circ}\text{C}$  烘干至恒重,进行产量和养分测定。

### 1.3 测定指标与方法

土样磷含量采用修正的 Hedley 磷素分级方

法<sup>[28]</sup>进行分级测定,具体为将 0.50 g 土样加入 30 ml 去离子水,浸提得到溶解态磷 ( $\text{H}_2\text{O-P}$ );倒掉上清液,剩余土样加入 30 ml 0.50 mol/L  $\text{NaHCO}_3$ ,浸提得到交换态磷;倒掉上清液,剩余土样加入 30 ml 0.10 mol/L  $\text{NaOH}$ ,浸提得到铁铝吸附态磷 ( $\text{NaOH-P}$ );倒掉上清液,剩余土样加入 30 ml 1 mol/L  $\text{HCl}$ ,浸提得到钙吸附态磷 ( $\text{HCl-P}$ );倒掉上清液,剩余土样加入 5 ml  $\text{H}_2\text{SO}_4$  和  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,浸提得到残留态磷 (Residual-P)。小麦秸秆和籽粒用  $\text{H}_2\text{SO}_4$ - $\text{H}_2\text{O}_2$  消煮,全磷含量采用钼锑抗比色法测定<sup>[29]</sup>。

### 1.4 数据统计与分析

本试验中吸附率计算公式如下:

$$R = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $R$  为吸附率;  $C_0$  为初始溶液磷质量浓度 (mg/L);  $C_t$  为  $t$  时磷质量浓度 (mg/L);  $t$  为吸附时间 (min)。

采用 Microsoft Excel 2021 和 SPSS 27.0 软件对数据进行统计分析,采用单因素方差分析 (ANOVA) 和最小显著性差异法 (LSD) 对不同处理的差异显著性进行多重比较 ( $P < 0.05$ )。采用 Origin 2022 软件作图,图表中数据为平均值  $\pm$  标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 镧改性秸秆吸附效果

镧改性秸秆在不同吸附时间对养殖尾水中磷的吸附效果如图 1 所示。由图 1a 可知,在 240 min 内,WS-La 吸附率随着吸附时间的增加快速提高,在 240 min 时达到最大,此时吸附率达到 98.59%,养殖尾水中的磷质量浓度为 0.11 mg/L,已经低于《地表水环境质量标准 (GB 3838-2002)》中 III 类标准。从图 1b 中可以看出,随着投加量增加 WS-La 吸附率逐渐增加,在投加量为 1.4 g/L 时吸附率达到最大,几乎接近 100%,之后随着投加量的增加 WS-La 吸附率无明显变化。因此,镧改性秸秆最佳投加量为 1.4 g/L,投加后的吸附时间需要超过 4 h。因此,基于上述试验结果,按照最佳投加量为 1.4 g/L,加入 15 L 养殖尾水,搅拌后静置一夜,离心过滤后在 80  $^{\circ}\text{C}$  烘干,备用。根据钼锑抗比色法测得吸附磷后材料全磷含量为 2.24 g/kg (以  $\text{P}_2\text{O}_5$  为标准计算),将此含磷量作为下一步添加量的依据。

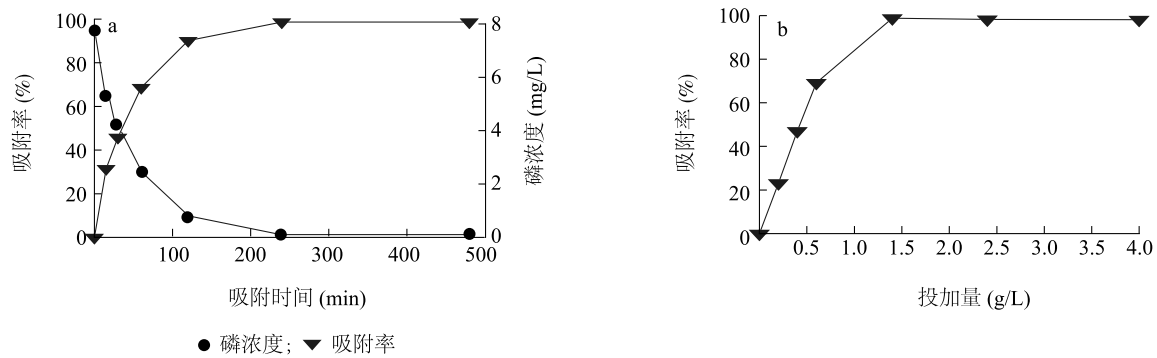


图1 吸附时间(a)和投加量(b)对镧改性秸秆吸附率的影响

Fig.1 Effects of adsorption time (a) and adding amount (b) on the adsorption rate of lanthanum modified straw

## 2.2 附磷镧改性秸秆施用后对土壤磷活性的影响

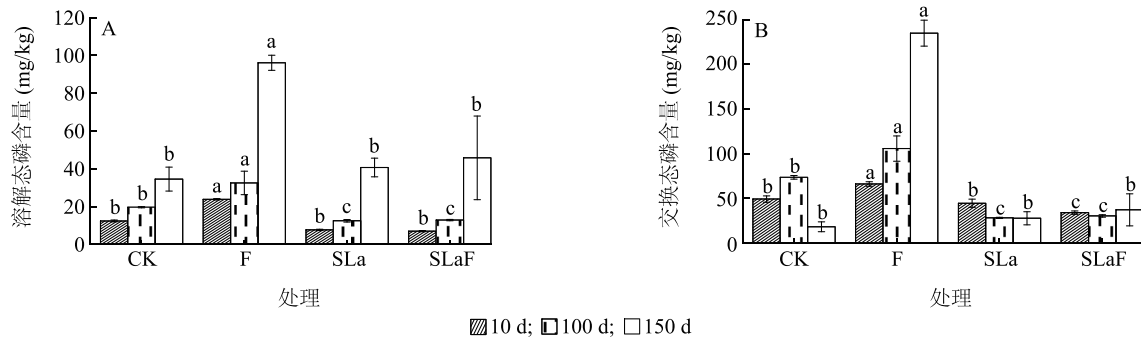
2.2.1 土壤活性态磷 由图 2A 可知,由于外源添加无机磷肥,结果显示培养第 10 d、第 100 d、第 150 d F 处理土壤中溶解态磷含量均显著高于 CK、SLa 处理和 SLaF 处理 ( $P < 0.05$ )。在培养第 10 d, SLa 处理、SLaF 处理土壤中溶解态磷含量与 CK 相比无显著差异 ( $P > 0.05$ )。在培养第 10 d, 与 F 处理相比, SLa 处理土壤中溶解态磷含量显著降低 68.07% ( $P < 0.05$ ), SLaF 处理土壤中溶解态磷含量显著降低 70.87% ( $P < 0.05$ )。在培养第 100 d, 与 CK 相比, SLa 处理土壤中溶解态磷含量显著降低 36.73% ( $P < 0.05$ ), SLaF 处理土壤中溶解态磷含量显著降低 34.69% ( $P < 0.05$ )。在培养第 100 d, 与 F 处理相比, SLa 处理土壤中溶解态磷含量显著降低 61.81% ( $P < 0.05$ ), SLaF 处理土壤中溶解态磷含量显著降低 60.58% ( $P < 0.05$ )。在培养第 150 d, SLa 处理、SLaF 处理土壤中溶解态磷含量与 CK 相比无显著差异 ( $P > 0.05$ )。在培养第 150 d, 与 F 处理相比, SLa 处理土壤中溶解态磷含量显著降低 ( $P < 0.05$ ), SLaF 处理土壤中溶解态磷含量显著降低 ( $P < 0.05$ )。从图 2A 中可以看出,所有处理溶解态磷含量的变化趋势一致,说明附磷镧改性秸秆添加不影响土壤中溶解态磷含量变化总体趋势。在培养初期,添加附磷镧改性秸秆的处理溶解态磷的浓度甚至是低于 CK 处理,说明材料本身还有多余的吸附位点,进入土壤后继续吸附土壤中溶解态磷。

由图 2B 可知,在培养第 10 d, SLa 处理土壤中

交换态磷含量和 CK 相比无显著差异 ( $P > 0.05$ )。与 CK 相比, SLaF 处理土壤中交换态磷含量显著降低 30.98% ( $P < 0.05$ )。在培养第 10 d, 与 F 处理相比, SLa 处理土壤中交换态磷含量显著降低 32.66% ( $P < 0.05$ ), SLaF 处理土壤中交换态磷含量显著降低 48.63% ( $P < 0.05$ )。在培养第 100 d, 与 CK 相比, SLa 处理土壤中交换态磷含量显著降低 61.85% ( $P < 0.05$ ), SLaF 处理土壤中交换态磷含量显著降低 58.86% ( $P < 0.05$ )。在培养第 100 d, 与 F 处理相比, SLa 处理土壤中交换态磷含量显著降低 73.48% ( $P < 0.05$ ), SLaF 处理土壤中交换态磷含量显著降低 71.40% ( $P < 0.05$ )。在培养第 150 d, SLa 和 SLaF 处理土壤中交换态磷含量与 CK 无显著差异 ( $P > 0.05$ )。在培养第 150 d, 与 F 处理相比, SLa 处理土壤中交换态磷含量显著降低 88.25% ( $P < 0.05$ ), SLaF 处理土壤中交换态磷含量显著降低 84.25% ( $P < 0.05$ )。

值得注意的是,交换态磷主要是吸附在土壤颗粒表面的易溶态无机磷<sup>[30-31]</sup>,而土壤中易溶态无机磷超过一定阈值时,便会溢出导致面源污染。Hesketh 和 Brookes<sup>[32]</sup>的试验结果表明,当土壤中的 Olsen-P (NaHCO<sub>3</sub> 提取的有效态磷) 含量超过 60.0 mg/kg 的阈值时,可溶性磷的浸出速度更快。柏兆海等<sup>[33]</sup>发现,轻壤的 Olsen-P 淋溶拐点为 40.1 mg/kg。而本研究镧改性秸秆处理土壤中交换态磷含量最低分别为 27.6 mg/kg (SLa)、30.2 mg/kg (SLaF),均低于上述 2 项阈值。因此,该材料具有减缓磷流失的能力,或许更适合应用在磷盈余的场景中。





CK、F、SLa 和 SLaF 见表 1 注。同一培养时间不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 2 不同处理土壤中溶解态磷含量 (A) 和交换态磷含量 (B) 的变化

Fig.2 Changes of dissolved phosphorus content (A) and exchangeable phosphorus content (B) in soil under different treatments

**2.2.2 土壤中活性态磷** 由图 3A 可知,在培养第 10 d,与 CK 相比,SLa 处理土壤中钙吸附态磷含量显著降低 57.03% ( $P < 0.05$ ),SLaF 处理土壤中钙吸附态磷含量显著降低 36.95% ( $P < 0.05$ )。在培养第 10 d,与 F 处理相比,SLa 处理土壤中钙吸附态磷含量显著降低 68.34% ( $P < 0.05$ ),SLaF 处理土壤中钙吸附态磷含量显著降低 53.54% ( $P < 0.05$ )。在培养第 100 d,与 CK 相比,SLa 处理土壤中钙吸附态磷含量显著降低 ( $P < 0.05$ ),SLaF 处理土壤中钙吸附态磷含量显著降低 64.27% ( $P < 0.05$ )。在培养第 100 d,与 F 处理相比,SLa 处理土壤中钙吸附态磷含量显著降低 ( $P < 0.05$ ),SLaF 处理土壤中钙吸附态磷含量显著降低 60.86% ( $P < 0.05$ )。在培养第 150 d,SLa 和 SLaF 处理土壤中钙吸附态磷含量与 CK 相比无显著差异 ( $P > 0.05$ )。在培养第 150 d,与 F 处理相比,SLa 处理土壤中钙吸附态磷含量显著降低 81.02% ( $P < 0.05$ ),SLaF 处理土壤中钙吸附态磷含量显著降低 85.57% ( $P < 0.05$ )。

随着培养时间的延长,SLa 和 SLaF 处理土壤中钙吸附态磷含量均呈下降趋势。F 处理土壤中钙吸附态磷含量也呈现递减的规律,而 CK 土壤中钙吸附态磷含量呈现先增加后减少的趋势。同一培养时间,添加镧改性秸秆的 SLa 和 SLAF 处理土壤中钙吸附态磷含量均低于 CK 和 F 处理。

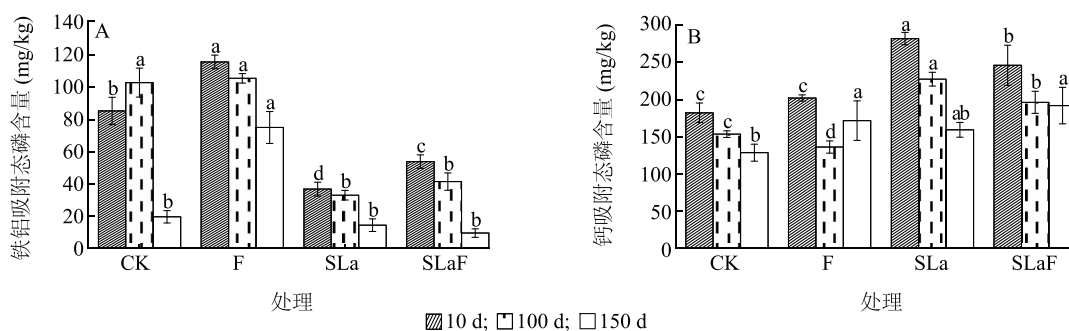
由图 3B 可知,在培养第 10 d,与 CK 相比,SLa 处理土壤中钙吸附态磷含量显著提高 54.87% ( $P < 0.05$ ),SLaF 处理土壤中钙吸附态磷含量显著提高 35.14% ( $P < 0.05$ )。在培养第 10 d,与 F 处

理相比,SLa 处理土壤中钙吸附态磷含量显著提高 39.59% ( $P < 0.05$ ),SLaF 处理土壤中钙吸附态磷含量显著提高 21.80% ( $P < 0.05$ )。在培养第 100 d,与 CK 相比,SLa 处理土壤中钙吸附态磷含量显著提高 48.28% ( $P < 0.05$ ),SLaF 处理土壤中钙吸附态磷含量显著提高 27.90% ( $P < 0.05$ )。在培养第 100 d,与 F 处理相比,SLa 处理土壤中钙吸附态磷含量显著提高 67.17% ( $P < 0.05$ ),SLaF 处理土壤中钙吸附态磷含量显著提高 44.19% ( $P < 0.05$ )。在培养第 150 d,SLa 处理土壤中钙吸附态磷含量和 CK 相比无显著差异 ( $P > 0.05$ ),与 CK 相比,SLaF 处理土壤中钙吸附态磷含量显著提高 49.42% ( $P < 0.05$ )。在培养第 150 d,与 F 处理相比,SLa 和 SLAF 处理土壤中钙吸附态磷含量均无显著变化 ( $P > 0.05$ )。在培养第 10 d 和第 100 d,SLa 和 SLAF 处理土壤中钙吸附态磷含量均显著高于 CK 和 F 处理,说明添加材料促进磷形态向钙吸附态磷的转化。

另外,随着培养时间的延长,SLa 和 SLAF 处理土壤中钙吸附态磷含量逐渐减低,这是由于钙吸附态磷通过解吸等作用间接被植物吸收利用<sup>[34]</sup>。根据文献[35-38]可知,钙吸附态磷是土壤中有有效磷的主体,但难以被作物吸收利用。而缓释肥的作用机理正是根据作物的需求,促进钙吸附态磷转化为易被植物吸收利用的磷形态,因此,附磷镧改性秸秆具备缓释磷肥的属性。

**2.2.3 土壤残留态磷** 残留态磷难以被植物吸收利用,由图 4 可知,在培养第 10 d、第 100 d,SLa 和 SLAF 处理土壤中残留态磷含量与 CK、F

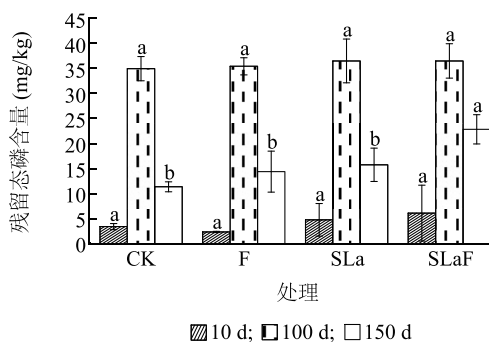
处理相比均无显著差异 ( $P>0.05$ )。在培养第 150 d, SLa 处理土壤中残留态磷含量与 CK、F 处理相比均无显著差异 ( $P>0.05$ ), 与 CK 相比, SLaF 处理土壤中残留态磷含量显著提高 99.74% ( $P<0.05$ ); 与 F 处理相比, SLaF 处理土壤中残留态磷含量显著提高 58.21% ( $P<0.05$ )。



CK、F、SLa 和 SLaF 见表 1 注。同一培养时间不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 3 不同处理土壤中铁铝吸附态磷含量 (A) 和钙吸附态磷含量 (B) 的变化

Fig.3 Changes of iron-aluminum adsorbed phosphorus content (A) and calcium adsorbed phosphorus content (B) in soil under different treatments



CK、F、SLa 和 SLaF 见表 1 注。同一培养时间不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 4 不同处理土壤中残留态磷含量的变化

Fig.4 Changes of the content of residual phosphorus in soil under different treatments

### 2.3 附磷镧改性秸秆施用后对小麦磷含量和产量的影响

图 5 为不同处理小麦磷含量。由图 5A 可知, CK、F 处理、SLa 和 SLaF 处理小麦秸秆磷含量分别为 0.66 g/kg、1.09 g/kg、0.44 g/kg、0.51 g/kg, 处理间均无显著差异 ( $P>0.05$ )。CK、F 处理、SLa 和 SLaF 处理小麦籽粒磷含量分别为 6.24 g/kg、6.78 g/kg、3.98 g/kg、4.82 g/kg。与 CK 相比, SLa 处理

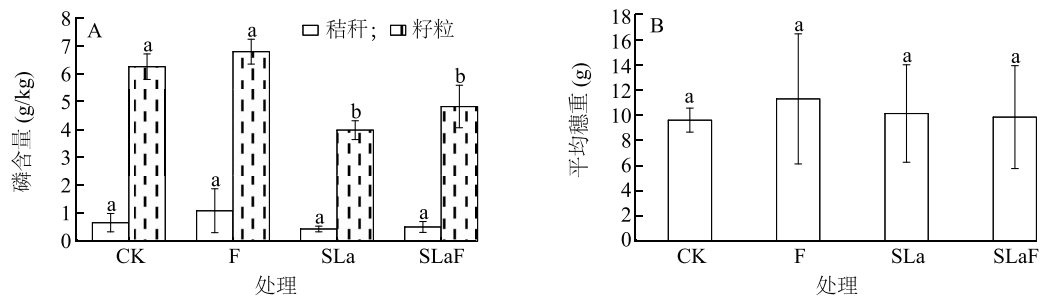
随着培养时间的延长, 所有处理土壤中残留态磷含量变化趋势均为先上升后下降。在相同培养时间点, 各处理土壤中残留态磷含量变化不大, 并无显著差异, 说明添加附磷镧改性秸秆对土壤残留态磷含量影响较弱<sup>[39]</sup>。

小麦籽粒磷含量显著降低 36.22% ( $P<0.05$ ), SLaF 处理小麦籽粒磷含量显著降低 22.76% ( $P<0.05$ )。由此说明, 附磷镧改性秸秆会使小麦籽粒磷含量降低。

由图 5B 可知, CK、F 处理、SLa 和 F 处理间小麦平均穗重无显著差异 ( $P>0.05$ )。有研究表明, 有机磷肥与无机磷肥配施能够满足作物生育前期的速效养分的需求, 促进有效穗数和结实率的增加, 提高磷肥利用率, 进而使作物产量增加<sup>[40-42]</sup>。因此附磷镧改性秸秆替代化肥磷肥的比例应合理, 才能实现稳定产量和减少面源污染的双重目的。

### 3 结论

镧改性秸秆对畜禽养殖尾水中磷的处理效率达到 98.59%, 最佳投加量为 1.4 g/L。附磷镧改性秸秆进入土壤初期会继续吸附土壤的活性态磷, 明显促进了钙吸附态磷含量的增加, 减缓土壤中磷流失。随着小麦生长, 添加附磷镧改性秸秆的土壤中钙吸附态磷含量递减, 活性态磷含量递增, 说明其具备缓释磷肥的属性, 可持续供磷。附磷镧改性秸秆施入土壤后, 对小麦产量有一定的影响, 需采用合理的替代比例。



A:小麦磷含量;B:小麦平均穗重。CK、F、SLA和SLAF见表1注。不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

图5 不同处理小麦磷含量和平均穗重的变化

Fig.5 Changes of phosphorus content and average spike weight of wheat under different treatments

### 参考文献:

- [1] 齐 鹏, 王晓娇, 焦亚鹏, 等. 施磷对陇中黄土高原春小麦耕层土壤磷组分及有效性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 99-106.
- [2] LI X, ROMANYÀ J, LI N, et al. Biochar fertilization effects on soil bacterial community and soil phosphorus forms depends on the application rate[J]. Science of the Total Environment, 2022, 843: 167022.
- [3] 田志杰, 李景鹏, 杨 福. 非生物胁迫下作物磷素利用研究进展[J]. 生态学杂志, 2017, 36(8): 2336-2342.
- [4] 高艺伦, 方 芳, 唐子超, 等. 三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4630-4638.
- [5] ZHANG Y J, GAO W, LUAN H, et al. Long-term organic substitution management affects soil phosphorus speciation and reduces leaching in greenhouse vegetable production[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 327: 129464.
- [6] LI Y P, WANG J, SHAO M A. Earthworm inoculation and straw return decrease the phosphorus adsorption capacity of soils in the Loess region, China[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 312: 114921.
- [7] SANDAÑA P, PINOCHET D. Grain yield and phosphorus use efficiency of wheat and pea in a high yielding environment [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2014, 14(4): 973-986.
- [8] ZHANG S, CHEN S, JIN J W, et al. Incorporation of calcium cyanamide and straw reduces phosphorus leaching in a flooded agricultural soil[J]. Geoderma, 2022, 428: 116150.
- [9] LI Y Y, YANG R, GAO R, et al. Effects of long-term phosphorus fertilization and straw incorporation on phosphorus fractions in subtropical paddy soil[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(2): 365-373.
- [10] 赵 敏, 张小平, 王梁嵘. 硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5433-5439.
- [11] 周 健, 李春辉, 张志永, 等. 淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 130-136.
- [12] JALALI M, JALALI M, ANTONIADIS V. Impact of sewage sludge, nanoparticles, and clay minerals addition on cucumber growth, phosphorus uptake, soil phosphorus status, and potential risk of phosphorus loss[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 23: 101702.
- [13] SUN C Y, CAO H, HUANG C, et al. Eggshell based biochar for highly efficient adsorption and recovery of phosphorus from aqueous solution: kinetics, mechanism and potential as phosphorus fertilizer [J]. Bioresource Technology, 2022, 362: 127851.
- [14] QUISPERIMA A, PÉREZ S, FLÓREZ E, et al. Valorization of potato peels and eggshells wastes: ca-biocomposite to remove and recover phosphorus from domestic wastewater [J]. Bioresource Technology, 2022, 343: 126106.
- [15] PAN Y, LIU G, CHAI B B, et al. Control of endogenous phosphorus release at the sediment-water interface by lanthanum-modified fly ash[J]. Coatings, 2022, 12(6): 719.
- [16] YANG B, FENG Y F, YU Y L, et al. Lanthanum ferrite nanoparticles modification onto biochar: derivation from four different methods and high performance for phosphate adsorption[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26: 22010-22020.
- [17] KAJJUMBA G W, MARTI E J. A review of the application of cerium and lanthanum in phosphorus removal during wastewater treatment: characteristics, mechanism, and recovery[J]. Chemosphere, 2022, 309: 136463.
- [18] ZHI Y, ZHANG C, HJORTH R, et al. Emerging lanthanum (III)-containing materials for phosphate removal from water: a review towards future developments[J]. Environment International, 2020, 145: 106115.
- [19] LUO D, WANG L Y, NAN H Y, et al. Phosphorus adsorption by functionalized biochar: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2022, 21(1): 497-524.
- [20] 董佳佳, 尚 瑜, 苏三宝, 等. 聚乙烯胺改性麦秸秆对废水中磷酸根的吸附研究[J]. 化工新型材料, 2022, 50(12): 288-291, 297.
- [21] THI-HUONG P, KI-MYEONG L, MIN S K, et al. La-modified ZSM-5 zeolite beads for enhancement in removal and recovery of

- phosphate[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2019, 279: 37-44.
- [22] JIA Z W, ZENG W, XU H H, et al. Adsorption removal and reuse of phosphate from wastewater using a novel adsorbent of lanthanum-modified platanus biochar[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 140: 221-232.
- [23] ZOUHAIR E, MUHAMMAD K, AHSAN M, et al. Phosphate-lanthanum coated sewage sludge biochar improved the soil properties and growth of ryegrass in an alkaline soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 216: 112173.
- [24] JIA X X, ZHAO X, ZHOU Y T, et al. Tri-functional lanthanum-based biochar for efficient phosphorus recovery, bacterial inhibition, and soil fertility enhancement[J]. *Biochar*, 2023, 5: 16.
- [25] 胡 佩, 周顺桂, 刘德辉. 土壤磷素分级方法研究评述[J]. *土壤通报*, 2003, 34(3): 229-232.
- [26] TIECHER T, GOMES M V, AMBROSINI V G, et al. Assessing linkage between soil phosphorus forms in contrasting tillage systems by path analysis[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 175: 276-280.
- [27] 王晓锋, 刘婷婷, 龚小杰, 等. 三峡库区消落带典型植物根际土壤磷形态特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(4): 1342-1356.
- [28] 王 宁. 生物炭对土壤磷吸附解吸及磷形态转化的影响[D]. 太原: 山西大学, 2017.
- [29] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [30] 李黄维, 吴小红, 刘 婷, 等. 不同林分土壤磷形态与磷酸酶特征[J]. *生态学报*, 2023, 43(3): 1257-1266.
- [31] WANG Q, ZHANG N Y, CHEN Y H, et al. The phosphorus availability in mollisol is determined by inorganic phosphorus fraction under long-term different phosphorus fertilization regimes[J]. *Agronomy*, 2022, 12(10): 2364.
- [32] HESKETH N, BROOKES P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 105-110.
- [33] 柏兆海, 万其宇, 李海港, 等. 县域农田土壤磷素积累及淋失风险分析——以北京市平谷区为例[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1853-1860.
- [34] 战威名, 诸葛玉平, 库 元, 等. 聚磷酸铵与不同物料配施对滨海盐化潮土磷素形态的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(21): 119-126.
- [35] 王宇莹, 龚会蝶, 王雪艳, 等. 施磷对灌耕草甸土无机磷形态和有效磷的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(1): 135-142.
- [36] 秦贞涵, 王 琼, 张乃于, 等. 黑土有效磷阈值区间的磷形态特征及对土壤化学性质的响应[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(22): 4419-4432.
- [37] 蒋艳红, 李安玉, 严 发, 等. 载镁香蕉秆基生物炭对氮磷的吸附性能研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(6): 559-567.
- [38] 田 仓, 虞轶俊, 吴龙龙, 等. 不同灌溉和施肥模式对稻田磷形态转化和有效性的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(24): 112-122.
- [39] 韩 梅, 李东坡, 武志杰, 等. 持续六年施用不同磷肥对稻田土壤磷库的影响[J]. *土壤通报*, 2018, 49(4): 929-935.
- [40] 陈猛猛, 张士荣, 吴立鹏, 等. 有机-无机配施对盐渍土壤水稻生长及养分利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 3(6): 311-317, 325.
- [41] 罗健航, 任发春, 赵 营, 等. 有机、无机磷肥配施对宁夏引黄灌区露地蔬菜磷素吸收利用与磷平衡的影响[J]. *宁夏农林科技*, 2014, 55(8): 24-27, 34.
- [42] 胡艳飞, 刘 涛, 唐 诚, 等. 不同有机替代对滴灌玉米生长和磷素营养的影响[J]. *新疆农业科学*, 2016, 53(7): 1251-1259.

(责任编辑:成纾寒)