

卢挺天,徐德福,林海芝,等. 基于剩余污泥制备的鸟粪石-椰壳炭混合肥对大豆生长和氮磷吸收的影响[J]. 江苏农业科学,2026,54(3):137-145.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2026.03.016

基于剩余污泥制备的鸟粪石-椰壳炭混合肥 对大豆生长和氮磷吸收的影响

卢挺天, 徐德福, 林海芝, 陈 丝, 陈赞美, 苏 静
(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏南京 210044)

摘要: 剩余污泥中含有大量的氮和磷, 利用剩余污泥中的氮磷制备肥料, 可实现剩余污泥中氮磷的资源化利用。本研究使用流化床反应器, 并添加椰壳炭从剩余污泥上清液中回收氮磷制备了鸟粪石-椰壳炭混合肥, 且评价其对大豆的施肥效果。研究表明, 制备的鸟粪石、鸟粪石-椰壳炭混合肥的氮含量分别为 4.76、2.61 mg/g, 磷含量分别为 11.32、5.74 mg/g。当鸟粪石或鸟粪石-椰壳炭混合肥的施用量为 100、200、300 mg/kg 磷时, 大豆的生长及其对氮和磷的吸收发生明显变化。与对照(CK)相比, 施入鸟粪石和鸟粪石-椰壳炭混合肥均能促进大豆的发芽和根系的生长, 其中, 鸟粪石-椰壳炭混合肥在施磷量为 200 mg/kg 时, 大豆的发芽率、株高及各组织鲜重和干重均最高。与施鸟粪石相比, 施鸟粪石-椰壳炭混合肥后, 大豆的发芽率与株高分别提高 30.77% 和 8.16%; 荚果、根、叶、茎的干重分别提高 0.39%、32.72%、3.45%、19.45%。然而, 随着鸟粪石-椰壳炭混合肥施用量的提高, 大豆发芽率、株高及各组织鲜重和干重呈现先提高后减少的趋势。在相同施磷水平(即施磷量为 100、200、300 mg/kg)下, 与只施鸟粪石的处理相比, 施入鸟粪石-椰壳炭混合肥后, 大豆对磷的吸收总量分别提高 10.95%、19.76%、16.16%, 且土壤磷含量分别提高 3.96%、7.16%、5.01%。这些结果说明与施鸟粪石相比, 施鸟粪石-椰壳炭有利于提高土壤中的磷含量, 促进植物对磷的吸收, 提高磷的利用率, 因此通过采用流化床并添加椰壳炭回收剩余污泥中的氮磷制备鸟粪石-椰壳炭混合肥, 能提高大豆对磷的利用率。

关键词: 剩余污泥; 鸟粪石; 椰壳炭; 大豆; 氮磷吸收

中图分类号: X703; S565.106 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2026)03-0137-08

磷矿是一种稀有资源, 预计将在 100 年内耗尽^[1]。自 2002 年以来, 原国土资源部将磷矿石列为国民经济发展急需的 20 种重要矿产资源之一^[2]。一方面工农业生产等导致磷矿资源不断枯竭, 另一方面大量含磷废水排入水环境, 造成水体富营养化等环境污染。由此可见, 从污水中回收磷并开展资源化利用具有重要意义。污水处理厂作为除天然磷矿石以外的第二大磷源, 90% 以上的磷经生物处理和化学处理后从污水转移到剩余污泥中^[3-4], 如果这些剩余污泥中的磷不能有效回收, 势必会造成磷资源流失。目前, 磷回收工艺主要包括化学沉淀法、生物法、吸附法、鸟粪石结晶法等^[5-6]。鸟粪石

结晶法是近年来备受关注的磷回收方法, 该方法是向含氮磷废水中添加镁源, 通过调节 Mg:P:N 的摩尔比和溶液 pH 值, 形成鸟粪石(MAP)晶体, 从而实现氮磷的同步回收。该方法回收的 MAP 中磷含量较高, 可作为农业生产中的缓释肥料, 实现磷的资源化利用^[7]。生物炭可以诱导鸟粪石晶体成核, 促进结晶反应的发生, 提高鸟粪石形成速率^[8]。如 Muhmood 等通过生物炭吸附与诱导鸟粪石成核, 将磷和氮回收率分别提高 6% 和 11%; 且鸟粪石颗粒粒径从 70 μm 增大到 100 μm ^[9]。可见, 生物炭可以促进鸟粪石的形成。生物炭可作为一种调节剂, 促进作物生长^[10]。张伟明等的研究表明, 生物炭与肥料配施能够提高大豆的株高及叶片、茎秆的干重^[11]。吕贝贝等也报道, 生物炭与化肥配施能够有效提高玉米的总根长和总根表面积, 很好地促进了玉米根系的发育^[12]。综上可知, 鸟粪石、生物炭以及生物炭与化肥混合施用均能促进作物生长。然而有关使用椰壳炭回收剩余污泥中氮磷制备鸟粪石-椰壳炭混合肥及其对作物生长的研究鲜见报

收稿日期: 2025-03-27

基金项目: 江苏高校“青蓝工程”项目(编号: 20161507); 江苏省“六大人才高峰”项目(编号: JNHB-057)。

作者简介: 卢挺天(2000—), 男, 浙江金华人, 硕士研究生, 主要从事污泥养分循环利用研究。E-mail: 202212120003@nuist.edu.cn。

通信作者: 徐德福, 博士, 教授, 主要从事固废资源化利用研究。E-mail: defuxu1@163.com。

道。因此,本研究以剩余污泥为研究对象,通过鸟粪石结晶法回收剩余污泥中氮磷制备鸟粪石,以及添加椰壳炭制备鸟粪石-椰壳炭混合肥,并评价其肥效,从而为新型肥料的制备提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

土壤采自南京信息工程大学校园,类型为红壤,pH 值为 4.9,氨态氮、总磷、速效钾含量分别为 0.26、0.18、0.03 g/kg。椰壳生物炭购自某活性炭有限公司,其比表面积、平均孔径和总孔容分别为 415.79 m²/g、1.21 nm 和 0.19 cm³/g。盆钵为聚氯乙烯(PVC)花盆,其上直径、下直径、高分别为 17.0、10.5、18.5 cm。钾肥为 KCl,含钾量为 52%。剩余污泥取自南京某污水处理厂,其 pH 值为 7.45,氨态氮、磷含量分别为 15.83、49.97 mg/L。

1.2 鸟粪石-椰壳炭混合肥的制备

设计流化床反应器(图 1),剩余污泥经预处理后得到氨态氮、磷含量分别为 188.20、166.46 mg/L 的上清液。将上清液经图 1 中的污水进水口通入反应器中,然后添加 MgCl₂ 和椰壳炭,运行一段时间后通过反应器的下部排泥阀获得沉淀物,沉淀物洗净后于 40 ℃ 下烘干,即获得鸟粪石或鸟粪石-椰壳炭混合肥,其主要步骤如下:(1)鸟粪石的制备。向反应器中通入剩余污泥上清液,随后通过曝气系统曝气,并添加 MgCl₂,使 Mg:P 摩尔比为 1.2:1,然后再通过添加 NaOH 溶液,调节反应器中的 pH 值为 9.5,通过流速控制上清液在反应器中的停留时间(HRT)为 90 min。持续运行一段时间,当反应器底部有大量沉淀物生成时,打开反应器底部排泥阀收集的沉淀物,沉淀物在 40 ℃ 条件下烘干,即为鸟粪石。(2)鸟粪石-椰壳炭混合肥的制备。向反应器中通入剩余污泥上清液后,采用相同的运行参数,即 HRT、pH 值、Mg:P 摩尔比分别为 90 min、9.5、1.2:1,然后向反应器中加入椰壳炭 0.33 g/L。运行一段时间后,经底部排泥阀收到的沉淀物烘干后即得到鸟粪石-椰壳炭混合肥。

1.3 盆栽试验

将 1.5 kg/盆土壤装入盆中,随后加入 0.29 g/盆氯化钾,并将其混合均匀,再施入鸟粪石或鸟粪石-椰壳炭混合肥,具体施肥措施为:(1)向盆中分别施入 1.32、2.64、3.96 g/盆鸟粪石,使各土壤中磷的施用量分别为 100、200、300 mg/kg,即记为 M100、

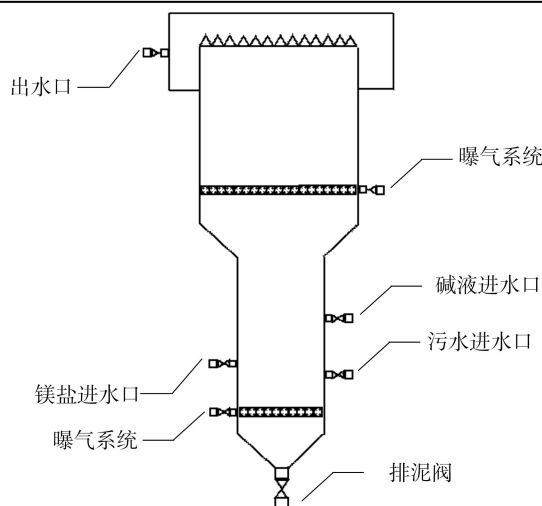


图1 流化床反应器图示

M200、M300 处理。(2)向盆中施入 2.6、5.2、7.8 g/盆鸟粪石-椰壳炭混合肥,磷的施用量为 100、200、300 mg/kg,即记为 C + M100、C + M200、C + M300 处理。(3)对照(CK),即不施鸟粪石或鸟粪石-椰壳炭混合肥处理。各处理具体施肥量详见表 1。将盆中土壤和肥料混合均匀后,播种 8 粒大豆种子,试验于 2021 年 6 月 21 日开始,在播种 7 d 后观察种子发芽情况。9 月 6 日盆栽试验结束后,将大豆完好地从土壤中取出,用水清洗干净,然后将大豆的根、茎、叶和荚果各部位分开,测定总根长、总根体积、总根比表面积和总根投影面积及各部位鲜重;然后烘干至恒重,测定干重,并分析其氮、磷含量。此外,取土壤分析铵态氮和总磷含量。

表 1 大豆盆栽试验的施肥方案

处理	施肥量(g/盆)		
	鸟粪石	鸟粪石-椰壳炭	氯化钾
CK	—	—	0.29
M100	1.32	—	0.29
M200	2.64	—	0.29
M300	3.96	—	0.29
C + M100	—	2.6	0.29
C + M200	—	5.2	0.29
C + M300	—	7.8	0.29

1.4 分析方法

1.4.1 大豆发芽率、株高和根系测定 通过计数和测量的方法测定大豆的发芽率和株高,大豆发芽率计算公式见式(1):

$$\eta = \frac{a}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为种子发芽率,% ; a 为发芽种子数,粒; M

为供试种子数,粒。

总根长、总根体积、总根比表面积和总根投影面积用加拿大 Regent 公司的 WinRHIZO 植物根系扫描仪测量分析。

1.4.2 大豆氮和磷含量测定 大豆氮含量采用元素分析仪测定;磷含量采用硫酸-双氧水消解,钼锑抗比色法测定^[13]。

1.4.3 大豆对氮磷的吸收总量 大豆对氮或磷的吸收总量计算详见公式(2):

$$Q = m_{\text{根}} \times n_{\text{根}} + m_{\text{茎}} \times n_{\text{茎}} + m_{\text{叶}} \times n_{\text{叶}} + m_{\text{荚果}} \times n_{\text{荚果}} \quad (2)$$

式中: Q 为大豆对氮或磷的吸收总量,mg/盆; n 为大豆不同组织中氮或磷的含量,mg/g; m 为大豆不同组织的干重,g。

1.4.4 土壤铵态氮和总磷含量的测定 土壤铵态氮含量采用 KCl 浸提,靛酚蓝比色法测定;总磷含量采用 NaOH 碱熔-钼锑抗分光光度法测定^[13]。

1.5 数据处理与分析

采用 Microsoft Office Excel 2016 对数据进行处

理,利用 Origin 2017 绘图;采用 SPSS 22.0 软件分析不同处理间各指标的差异,并采用单因素方差分析中的 LSD 多重比较进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 鸟粪石和鸟粪石-椰壳炭肥料特征

从图 2-a 可以看出,沉淀物的图谱与鸟粪石标准卡片图谱的吻合度高,说明沉淀物主要为鸟粪石。对比鸟粪石、沉淀物和椰壳炭+沉淀物的图谱,发现椰壳炭+沉淀物具有鸟粪石的图谱,但其相对强度的峰值弱于沉淀物,这主要与其含有椰壳炭有关,导致其鸟粪石的纯度降低。由图 2-b、图 2-c 可知,沉淀物的晶型为斜方晶结构,且棒状晶体形状较规则,这与鸟粪石的晶形相似^[14],进一步说明回收的沉淀产物以鸟粪石为主。椰壳炭+沉淀物的 SEM 图也有大量斜方晶结构存在,说明投加椰壳炭情况下,产生的沉淀物中有鸟粪石。经分析,鸟粪石中的氮、磷含量分别为 4.76、11.32 mg/g,而鸟粪石-椰壳炭分别为 2.61、5.74 mg/g。

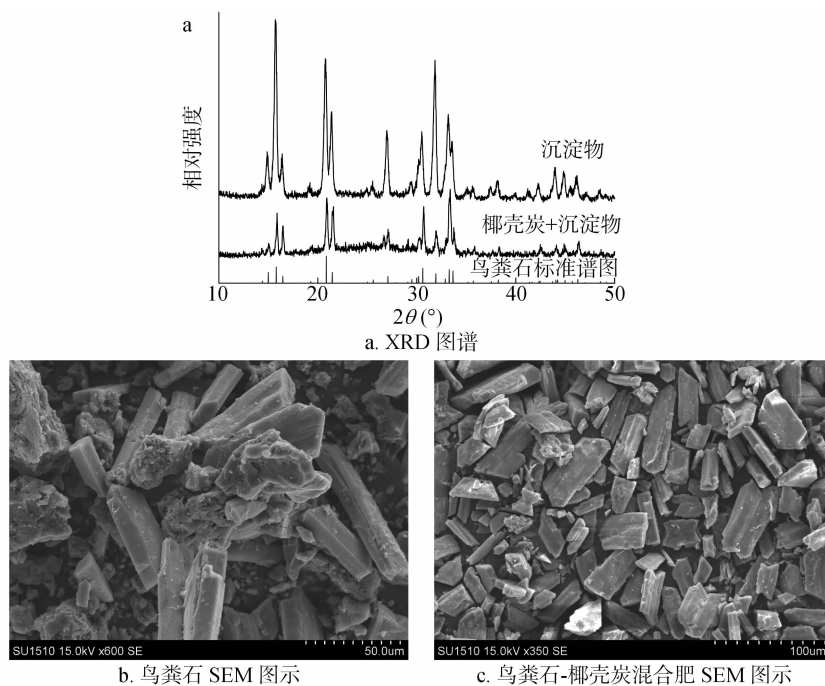


图2 鸟粪石和鸟粪石-椰壳炭混合肥的 XRD 图谱和鸟粪石及鸟粪石-椰壳炭混合肥 SEM 图示

2.2 鸟粪石-椰壳炭对大豆种子发芽率和株高的影响

由图 3 可知,与 CK 相比,鸟粪石处理组和鸟粪石-椰壳炭混合肥处理组均能促进大豆种子发芽率和株高提高;C + M200 处理效果最明显,发芽率和株高分别提高 54.55% 和 24.62%。同样地,与

M200 处理相比,C + M200 处理发芽率和株高分别提高 30.77% 和 8.16%。这些结果表明,椰壳炭能促进大豆的发芽和生长,这与椰壳炭具有多孔结构,能够增强土壤的通透性有关^[15]。然而,C + M300 处理的发芽率低于 M300 处理,其原因可能是过量椰壳炭阻碍了大豆的生长。该结果与前人的

研究结果^[16-17]相一致。刘凯传等的研究表明,适量添加生物炭后,黑麦草发芽率提高 23.53%,而过量添加反而抑制其种子的发芽率^[16];Arshad 等也

报道,施用磷肥可以显著提高苜蓿株高,然而过量施用磷肥则会降低株高^[17]。

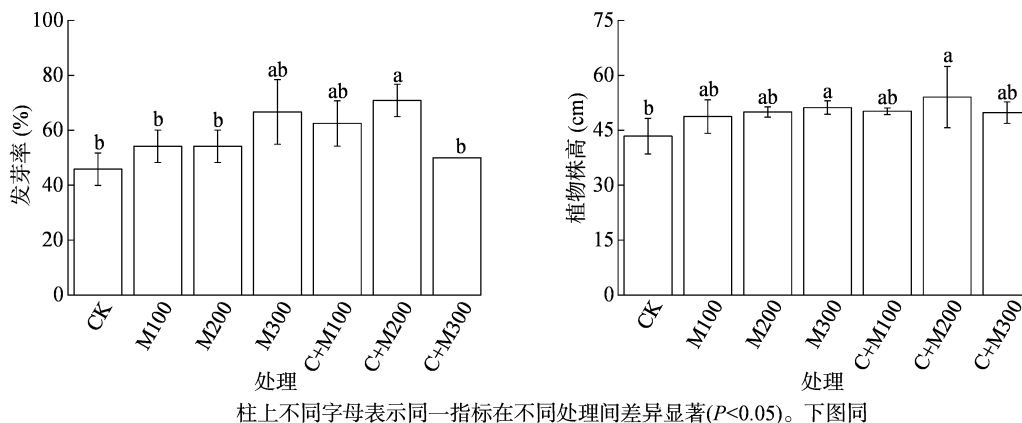


图3 不同施肥处理下大豆种子发芽率及株高的变化

2.3 鸟粪石-椰壳炭对大豆鲜重与干重的影响

与 CK 相比,施鸟粪石或鸟粪石-椰壳炭均能明显提高大豆荚果、根和叶的鲜重和干重(图 4)。随着鸟粪石施肥量的提高,大豆荚果鲜重和根干重也提高,然而叶、茎的鲜重则表现为先提高后降低的趋势。这说明施用鸟粪石有利于促进物质在大豆根和荚果中的积累^[18],也有利于促进根系生长^[19]。随着鸟粪石-椰壳炭混合肥施用量提高,大豆各组织的鲜重、干重均呈现先提高后降低的趋势,这说明施用椰壳炭-鸟粪石混合肥能促进大豆生长,然后当混合肥施用量较大时,过量的椰壳炭可能会影响大豆生长。赵凤亮等在砖红壤-油麦菜系统中发现,随着椰壳炭的增加,油麦菜产量呈现先提高后降低的趋势^[20]。Valle 等报道,硫化物-鸟粪石缓释肥的施用,加快了大豆的生长发育进程,扩大了大豆叶片的表面积,然而过高的施肥量反而会影响大豆生长^[21],本研究的结果与之相一致。由图 4 可知,C + M200 处理下大豆荚果、根、叶、茎的鲜重、干重均最高,且均高于 M200 处理,说明适量配施椰壳炭与鸟粪石相比于单独施用鸟粪石效果更好。Olmo 等也研究发现了类似的结果,即椰壳炭与矿物肥料配施能够使小麦产量提高 20% ~ 30%^[22]。

2.4 鸟粪石-椰壳炭对大豆根系特征的影响

与未施肥相比,施用鸟粪石或鸟粪石-椰壳炭混合肥能明显增加大豆总根长、总根比表面积和总根投影面积(图 5)。施入一定量的鸟粪石或鸟粪石-椰壳炭混合肥能促进大豆根的生长,如 C +

M200 处理下大豆总根长和总根体积均最高,与 M200 处理相比,总根长和总根体积分别提高 9.32% 和 20.37%。Valle 等报道,向大豆施加多硫化物-鸟粪石缓释肥,能增加大豆二级侧根数量^[21]。本研究结果也说明,鸟粪石或鸟粪石-椰壳炭混合肥能提高大豆的总根长、总根体积、总根比表面积和总根投影面积等,可能与促进大豆二级侧根生长有关。

2.5 鸟粪石-椰壳炭对大豆氮和磷含量的影响

与 CK 相比,施入鸟粪石或鸟粪石-椰壳炭混合肥后,均能提高大豆叶、根、茎、荚果的氮含量(图 6),其原因是施入的肥料中含有氮营养,促进了植物对氮的吸收。随着鸟粪石施入量的提高,大豆的氮含量也在不断提高,然而随着鸟粪石+椰壳炭混合肥施用量的提高,大豆叶、茎和荚果中的氮含量则呈先提高后降低的趋势。陈照明等发现,生物炭与氮肥配施处理比单独施用氮肥处理的氮积累量提高 18.5% ~ 26.5%^[23]。在本研究中,相比 C + M200 处理,C + M300 处理除大豆根中氮含量提高外,其叶、茎、荚果中氮含量均降低,这可能是过多的椰壳炭抑制了地上部分对氮的吸收。

与 CK 相比,鸟粪石处理或鸟粪石-椰壳炭处理均能明显提高大豆叶、根、茎、荚果中的磷含量,在相同的施磷水平下,与只施鸟粪石的 M100、M200 和 M300 处理相比,施鸟粪石-椰壳炭混合肥的 C + M100、C + M200 和 C + M300 处理的大豆根、茎、叶磷含量分别提高 -1.84%、24.00%、17.24%、8.93%、21.52%、14.48%、9.80%、9.30%、34.48%。这些结

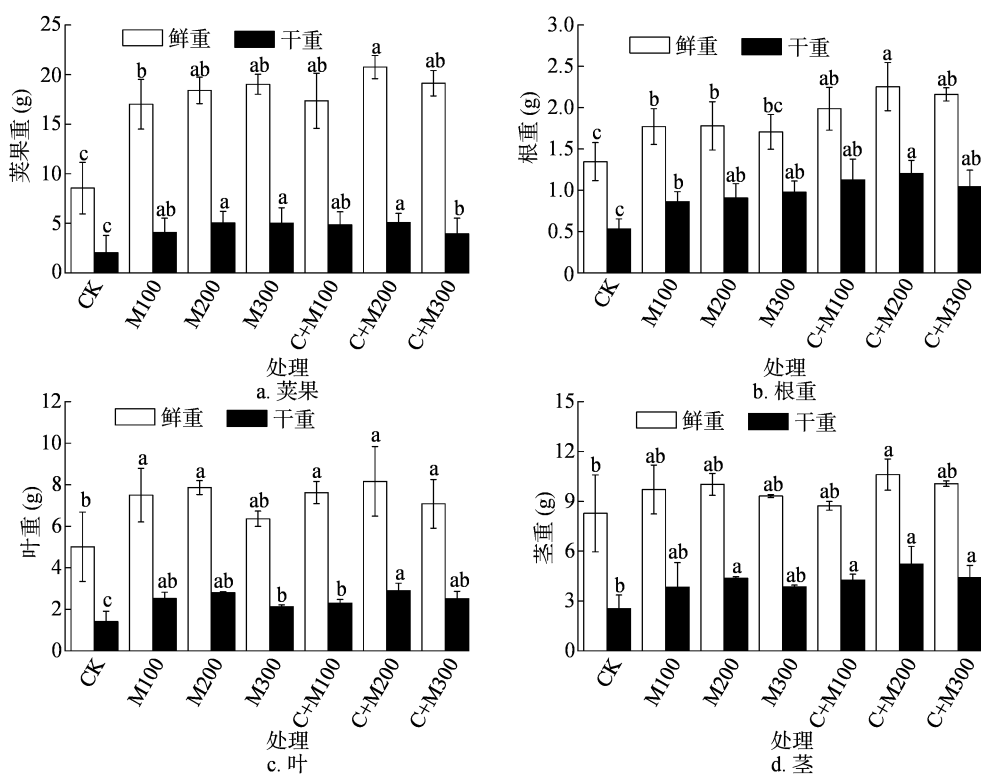


图4 不同施肥下大豆荚果、根、叶、茎鲜重和干重的变化

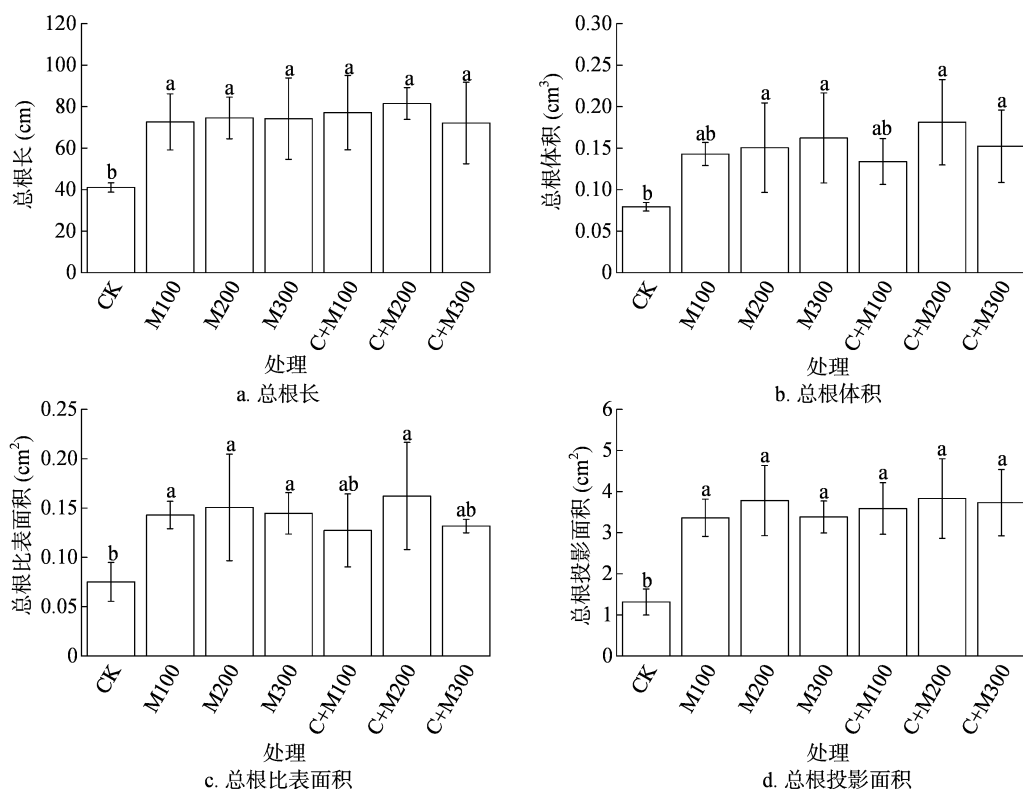


图5 不同施肥下大豆总根长、总根体积、总根比表面积和总根投影面积的变化

果说明鸟粪石-椰壳炭处理中大豆磷含量高于鸟粪石处理,说明椰壳炭的添加有助于大豆对磷元素的吸收。随着鸟粪石或鸟粪石-椰壳炭混合肥施用

量的提高,大豆各组织中的磷含量均提高(图7)。

2.6 鸟粪石-椰壳炭对大豆吸收氮和磷的影响

与CK相比,施入鸟粪石或鸟粪石-椰壳炭混

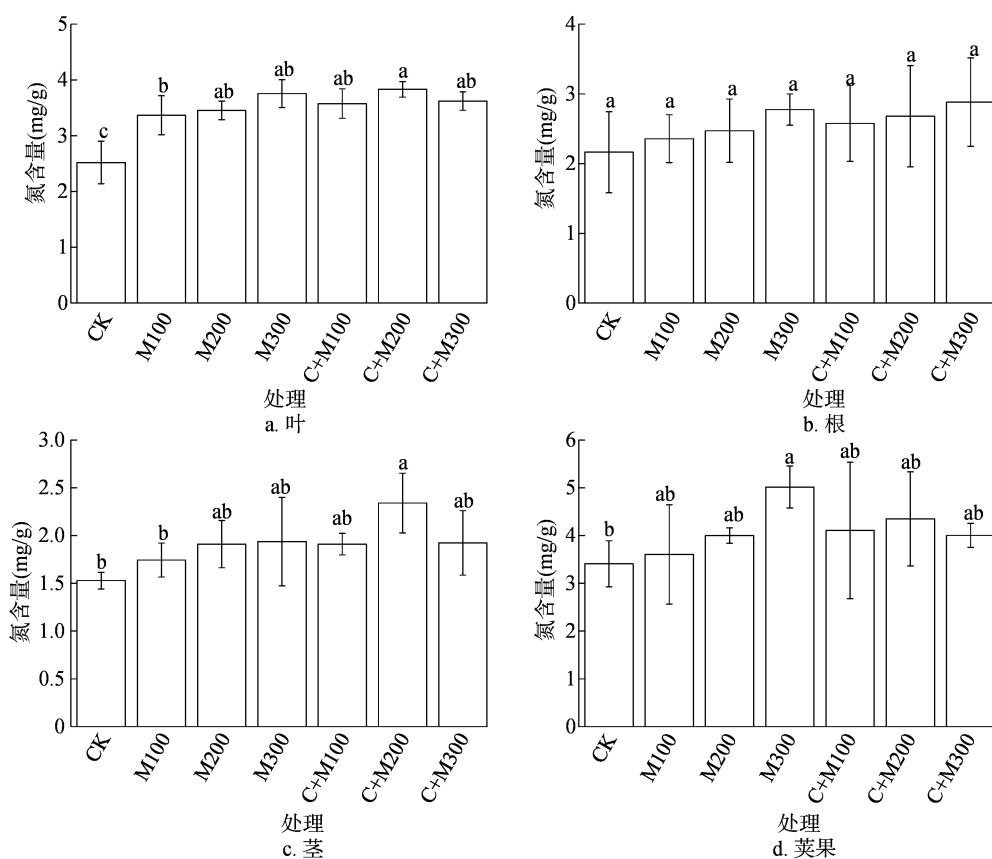


图6 不同施肥下大豆叶、根、茎和荚果中氮含量的变化

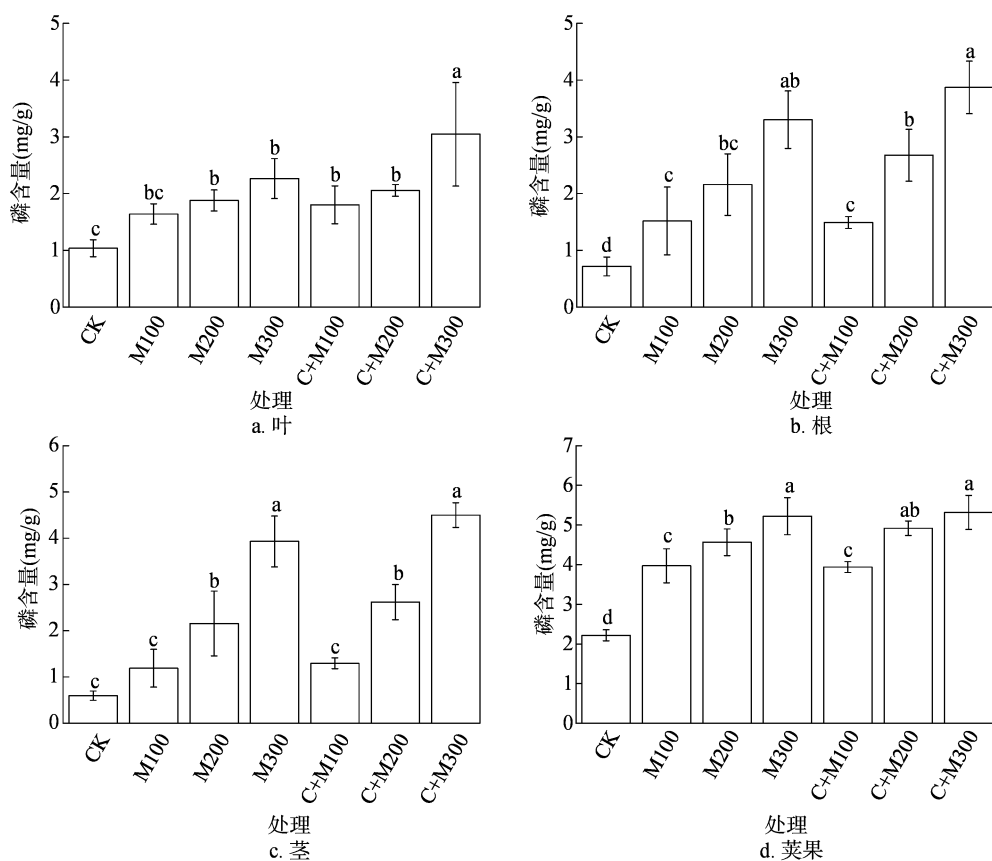


图7 不同施肥处理对大豆叶、根、茎、荚果中磷含量的影响

合肥后,大豆根、茎、叶和荚果中的氮吸收量均显著提高($P < 0.05$),且荚果对氮的吸收量远高于茎和叶,根对氮的吸收量最低(表 2),说明施鸟粪石或鸟粪石-椰壳炭混合肥促进了氮向大豆荚果中迁移。在不同的处理中,C + M200 处理下大豆对氮的总吸收量最高(47.66 mg/盆),说明鸟粪石-椰壳炭混

合肥的施用效果好于鸟粪石。然而,当鸟粪石-椰壳炭的施入量较高时,如 C + M300 处理对氮的总吸收量较低(40.46 mg/盆),同时也低于只施鸟粪石的 M300 处理(43.68 mg/盆),其原因可能是过多的椰壳炭抑制了大豆对氮的吸收。

表 2 大豆各部位对氮的吸收量

处理	对氮的吸收量(mg/盆)				
	根	茎	叶	荚果	总和
CK	1.15 ± 0.53f	3.88 ± 0.55e	3.55 ± 0.54e	7.02 ± 1.44f	15.60 ± 1.56c
M100	2.03 ± 0.48e	6.68 ± 0.51d	8.52 ± 1.65d	18.26 ± 4.26d	35.49 ± 2.64b
M200	2.25 ± 0.99d	8.35 ± 1.33b	9.67 ± 2.98b	19.62 ± 6.35c	39.89 ± 4.36b
M300	2.71 ± 1.02c	7.68 ± 0.82c	7.96 ± 1.44d	25.23 ± 3.59a	43.68 ± 5.99a
C + M100	2.92 ± 0.63b	8.14 ± 0.33b	8.22 ± 1.62d	16.17 ± 2.94e	35.45 ± 5.24b
C + M200	3.22 ± 1.23a	12.21 ± 3.45a	11.11 ± 3.35a	21.12 ± 3.92b	47.66 ± 2.05a
C + M300	3.00 ± 1.11b	8.47 ± 1.27b	9.09 ± 2.75c	19.90 ± 1.28c	40.46 ± 1.57b

注:同列数据后不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下表同。

由表 3 可知,与 CK 相比,施入鸟粪石或鸟粪石-椰壳炭混合肥后,大豆根、茎、叶和荚果中的磷吸收量均显著提高($P < 0.05$)。在相同施磷水平下,与只施鸟粪石的 M100、M200 和 M300 处理相比,施入鸟粪石-椰壳炭混合肥的 C + M100、C + M200 和 C + M300 处理的大豆对磷的吸收总量分别提高-10.95%、19.76%和16.16%。这说明大豆对鸟粪石-椰壳炭混合肥中磷的利用率高于鸟粪

石。鸟粪石-椰壳炭混合肥中的椰壳炭具有较高的比表面积,能在局部环境内提供较多的碳或磷,刺激土壤微生物利用分解碳源的代谢能量分泌磷酸酶^[24],提高磷的生物可利用性。Qian 等研究发现,在沙质水稻土中添加 10%的生物炭后,植物有效磷含量提高 1.89 倍^[25]。本研究也说明鸟粪石-椰壳炭混合肥的施用,有利于促进大豆对磷的吸收。

表 3 大豆各部位对磷的吸收量

处理	对磷的吸收量(mg/盆)				
	根	茎	叶	荚果	总和
CK	0.38 ± 0.16e	1.51 ± 0.21g	1.46 ± 0.54f	4.57 ± 1.25d	7.92 ± 2.68e
M100	1.31 ± 0.15d	4.57 ± 0.54f	4.15 ± 1.54e	20.12 ± 5.67b	30.15 ± 5.39d
M200	1.96 ± 0.54c	9.42 ± 2.54d	5.26 ± 1.64c	22.38 ± 6.28b	39.02 ± 8.14c
M300	3.24 ± 0.96b	15.57 ± 3.35b	4.80 ± 1.56d	26.26 ± 5.56a	49.87 ± 7.34b
C + M100	1.68 ± 0.45cd	5.52 ± 1.25e	4.14 ± 1.72e	15.51 ± 3.56c	26.85 ± 3.95d
C + M200	3.21 ± 1.33b	13.67 ± 3.44c	5.96 ± 1.14b	23.89 ± 3.84ab	46.73 ± 7.62b
C + M300	4.03 ± 1.24a	19.84 ± 4.37a	7.64 ± 2.72a	26.42 ± 5.66a	57.93 ± 6.72a

2.7 鸟粪石-椰壳炭对土壤中铵态氮和磷含量的影响

施入不同水平的鸟粪石或鸟粪石-椰壳炭混合肥后,土壤中铵态氮含量均高于不施肥的 CK(图 8)。在相同施磷水平下,与只施鸟粪石的 M200、M300 处理相比,施鸟粪石-椰壳炭混合肥的 C + M200、C + M300 处理的土壤中铵态氮含量分别提高 25.28%、29.55%,说明肥料中有椰壳炭有利于降低

土壤中铵态氮的流失量。相同地,与只施鸟粪石的 M100、M200、M300 处理相比,施鸟粪石-椰壳炭混合肥的 C + M100、C + M200 和 C + M300 处理的土壤中磷含量分别提高 3.96%、7.16%和5.01%,说明鸟粪石-椰壳炭处理中土壤磷含量比鸟粪石处理更高,这可能与椰壳炭对磷的吸附并降低其淋溶量有关。Khan 等发现,施用硬木生物炭改良后的土壤对磷的保留能力提高了 16%^[26]。本研究结果也

说明,鸟粪石与椰壳炭混合肥的施用能提高磷的保留能力,降低淋失量。以上结果说明与只施鸟粪石相比,施鸟粪石-椰壳炭有利于提高土壤中的磷含量,促进植物对磷的吸收,提高磷的利用率。

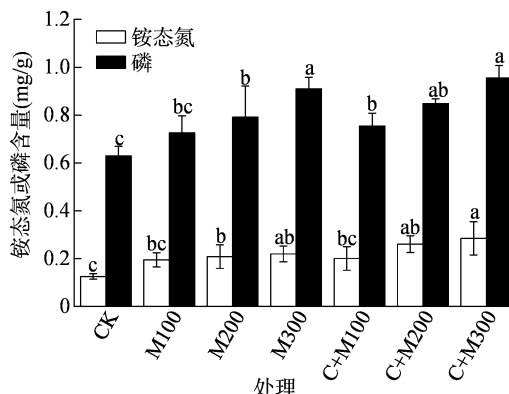


图8 施肥后土壤中铵态氮和磷含量的变化

3 结论

在 HRT、pH 值和 Mg:P 摩尔比分别为 90 min、9.5 和 1.2:1 时,使用流化床反应器回收剩余污泥中的氮和磷制备鸟粪石和鸟粪石-椰壳炭混合肥,其中鸟粪石中氮、磷含量分别为 4.76、11.32 mg/g,鸟粪石-椰壳炭中氮、磷含量分别是 2.61、5.74 mg/g。

在相同施磷水平下,与只施鸟粪石的 M100、M200 和 M300 处理相比,施鸟粪石-椰壳炭混合肥的 C+M100、C+M200 和 C+M300 处理的大豆根中磷含量分别提高 24.17%、24.07% 和 17.27%,茎中磷含量分别提高 9.24%、21.30% 和 14.50%,叶中磷含量分别提高 9.76%、9.57% 和 34.51%。在相同施磷水平下,与只施鸟粪石的 M100、M200 和 M300 处理相比,施鸟粪石-椰壳炭混合肥的 C+M100、C+M200 和 C+M300 处理对大豆中磷的吸收总量分别提高 10.95%、19.76% 和 16.16%。在相同施磷水平下,与只施鸟粪石的 M100、M200 和 M300 处理相比,施鸟粪石-椰壳炭混合肥的 C+M100、C+M200 和 C+M300 处理的土壤中磷含量分别提高 3.96%、7.16% 和 5.01%。综上,施入鸟粪石-椰壳炭混合肥可降低磷的流失量,提高作物对磷的吸收量。

参考文献:

- [1] Li B, Boiarkina I, Young B, et al. Prediction of future phosphate rock: a demand based model [J]. Journal of Environmental Informatics, 31(1):41-53.
- [2] 张汉泉,周峰,许鑫,等. 中国磷矿开发利用现状[J]. 武汉

工程大学学报, 2020, 42(2):159-164.

- [3] Cieslik B, Konieczka P. A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. The concept of "no solid waste generation" and analytical methods [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142:1728-1740.
- [4] Tarayre C, de Clercq L, Charlier R, et al. New perspectives for the design of sustainable bioprocesses for phosphorus recovery from waste [J]. Bioresource Technology, 2016, 206:264-274.
- [5] 王昶,吕晓翠,贾青竹,等. 含磷废水处理技术研究进展[J]. 水处理技术, 2009, 35(12):16-21.
- [6] 郝晓地,衣兰凯,王崇臣,等. 磷回收技术的研发现状及发展趋势[J]. 环境科学学报, 2010, 30(5):897-907.
- [7] Zhang T, Ding L L, Ren H Q. Pretreatment of ammonium removal from landfill leachate by chemical precipitation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 166(2/3):911-915.
- [8] 张荣新,刘祎,傅金祥,等. 鸟粪石沉淀法处理高浓度氮磷废水研究进展[J]. 环境污染与防治, 2024, 46(8):1175-1183.
- [9] Muhmood A, Lu J X, Kadam R, et al. Biochar seeding promotes struvite formation, but accelerates heavy metal accumulation [J]. Science of the Total Environment, 2019, 652:623-632.
- [10] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. Geoderma, 2010, 158(3/4):436-442.
- [11] 张伟明,管学超,黄玉威,等. 生物炭与化学肥料互作的大豆生物学效应[J]. 作物学报, 2015, 41(1):109-122.
- [12] 吕贝贝,张丽萍,张贵云,等. 生物炭配施化肥对土壤肥力及玉米生长的影响[J]. 山西农业科学, 2020, 48(1):81-86.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2000:159-170.
- [14] Korchef A, Saidou H, Ben A M. Phosphate recovery through struvite precipitation by CO₂ removal: effect of magnesium, phosphate and ammonium concentrations [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1):602-613.
- [15] 孙军娜,董陆康,徐刚,等. 糠醛渣及其生物炭对盐渍土理化性质影响的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3):532-538.
- [16] 刘凯传,刘佳欢,孙甲玉,等. 污泥-秸秆混合基生物炭对土壤性质和植物生长的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(6):1015-1019.
- [17] Arshad I, Ali W, Khan Z A, et al. Effect of nitrogen and phosphorus on the growth and yield of alfalfa (*Medicago sativa* L.) under agro-climatic conditions of Tando Adam [J]. PSM Biological Research, 2016, 1(2):74-77.
- [18] 王生文. 不同播种方式下播量和刈割对垂穗披碱草和老芒麦人工草地的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2014:25-26.
- [19] Grant C A, Flaten D N, Tomasiewicz D J, et al. The importance of early season phosphorus nutrition [J]. Canadian Journal of Plant Science, 2001, 81(2):211-224.
- [20] 赵凤亮,邹雨坤,朱治强,等. 施用椰壳生物炭对砖红壤氮素淋失和油菜吸收利用的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(增刊1):400-404.

王锦丹,余亚军,郭建伟,等. 珠芽魔芋叶斑病菌生物学特性研究、内生细菌及防治药剂筛选[J]. 江苏农业科学,2026,54(3):145-154.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2026.03.017

珠芽魔芋叶斑病菌生物学特性研究、 内生细菌及防治药剂筛选

王锦丹,余亚军,郭建伟,高鹏华,李丽芳,齐颖,邹颖,余磊,黄飞燕,杨敏

(云南省魔芋生物学重点实验室/昆明学院农学与生命科学学院/云南省都市特色农业工程技术研究中心,云南昆明 650214)

摘要:为明确云南省珠芽魔芋叶斑病菌生物学特性,并筛选出有效的生物防治菌剂和杀菌剂。采用菌丝生长速率法,测定其在不同光照、温度、pH 值、氮碳源和培养基条件下的生长情况;随后采用平板对峙法筛选所分离的珠芽魔芋植株内生细菌对叶斑病菌有拮抗作用的菌株;并测定 7 种杀菌剂对该菌的毒力大小。结果表明,该菌在 4~35℃ 内均可生长,其中 25~30℃ 是最适生长温度;pH 值范围在 4~11 时病原菌均可生长,最适生长 pH 值为 9;全光照条件下最有利于病原菌的生长;CAS 培养基是该病原菌生长的最适培养基;蛋白胨、D-果糖分别为最适氮、碳源。共筛选出 10 株对该病菌有抑制效果的内生细菌,其中,菌株 J4(*Bacillus velezensis*)的抑菌效果最好,抑菌率为 73.72%。此外,供试的 7 种杀菌剂对病原菌的生长均有一定的毒力作用,其中抑菌能力最强的是 50% 福美双 WP,其 EC_{50} 为 1.114 2 mg/L;20% 噻菌铜 SC 和 80% 多菌灵 WP 抑菌效果最差,其 EC_{50} 分别为 10.507 2、3.280 0 mg/L。综上,在防治珠芽魔芋叶斑病时,可采用拮抗菌 J4 菌株或杀菌剂 50% 福美双 WP。

关键词:珠芽魔芋;叶斑病;细极链格孢;生物学特性;内生细菌;毒力测定

中图分类号:S182;S436.32 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2026)03-0145-10

珠芽魔芋(*Amorphophallus bulbifer*)是一种天南星科魔芋属的多年生单子叶植物^[1],是一类既能利用球茎和实生籽种进行繁殖,也能利用在叶柄分叉处着生的气生珠芽来进行繁殖的经济作物,具有繁

殖系数大、产量高等特点,是近年广泛种植的一类魔芋新品种^[2-3]。已在云南、四川、广东、广西等地大面积推广种植^[4]。然而,随着珠芽魔芋产业的发展,病害问题逐渐显现,叶斑病已经成为限制珠芽魔芋产业发展的重要因素。目前,已经有多种病原菌被报道与魔芋叶斑病的发生相关,其中包括胶孢炭疽菌(*Colletotrichum gloeosporioides*)、细极链格孢(*Alternaria tenuissima*)、拟漆斑霉(*Paramyrothecium breviseta*)以及多主棒孢霉(*Corynespora cassiicola*)等^[5-8]。笔者所在课题组在前期研究中发现,珠芽魔芋叶斑病的主要病原为 *A. tenuissima*,并且这是国内首次报道该病原可引发珠芽魔芋叶斑病^[5],目前关于珠芽魔芋叶斑病菌的生物学特性研究仍较为

收稿日期:2025-02-13

基金项目:云南省科技计划(编号:202501AU070008、202401BA070001-001);云南省科技厅云南省魔芋生物学重点实验室专项(编号:202449CE340009);云南省余磊专家基层科研工作站专项。

作者简介:王锦丹(1998—),女,云南文山人,硕士研究生,研究方向为资源利用与植物保护。E-mail:2277271844@qq.com。

通信作者:黄飞燕,博士,研究员,主要从事经济作物生产技术研究,E-mail:125593879@qq.com;杨敏,博士,助理研究员,主要从事作物抗病研究,E-mail:2576241960@qq.com。

[21] Valle S F, Giroto A S, Guimarães G G F, et al. Co-fertilization of sulfur and struvite-phosphorus in a slow-release fertilizer improves soybean cultivation[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13:861574.

[22] Olmo M, Alburquerque J A, Barrón V, et al. Wheat growth and yield responses to biochar addition under Mediterranean climate conditions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(8):1177-1187.

[23] 陈照明,王强,刘晓霞,等.¹⁵N 示踪法研究生物炭施用对水稻-土壤系统氮肥去向的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36

(2):331-336.

[24] Allison S D, Weintraub M N, Gartner T B, et al. soil enzymology [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011:229-243.

[25] Qian T T, Zhang X S, Hu J Y, et al. Effects of environmental conditions on the release of phosphorus from biochar[J]. *Chemosphere*, 2013, 93(9):2069-2075.

[26] Khan S, Chao C, Waqas M, et al. Sewage sludge biochar influence upon rice (*Oryza sativa* L.) yield, metal bioaccumulation and greenhouse gas emissions from acidic paddy soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(15):8624-8632.