

# 镁改性粪便污泥水热炭对土壤改良和小白菜生长的影响

叶雨涛, 汤 焯\*

温州大学生命与环境科学学院, 浙江 温州

收稿日期: 2026年5月22日; 录用日期: 2026年6月23日; 发布日期: 2026年6月30日

## 摘 要

在无废城市背景下, 对粪便污泥等有机废弃物进行资源化利用已成为农业与环境领域的重要课题。传统磷肥虽能为土壤补充养分, 但其较高的淋溶风险易导致水体富营养化等环境问题。相比之下, 镁改性粪便污泥水热炭表面富集了镁活性位点, 其特殊的界面化学行为可高效固持磷素并阻控其淋溶迁移, 进而延长土壤有效磷的供应周期, 实现长效缓释供肥。为了探索镁改性粪便污泥水热炭对土壤改良以及植物生长的促进作用, 文章采用水热炭化技术, 以粪便污泥(FS)、粪便污泥水热炭(HC)及镁改性粪便污泥水热炭(MgHC)为研究对象, 开展土壤培养试验以分析其特性变化, 并通过小白菜种植试验验证镁改性水热炭对植物促生以及土壤的改良效果。结果表明, 与对照组(CK)相比, 土壤培养60 d时, 5% MgHC处理组处理效果最佳, 总氮、总磷、有机质及有效磷分别提高了51.7%、39.5%、19.1%和305.6%。植物种植60 d时, 5% MgHC处理组的植物生长性状表现最好, 与CK相比, 小白菜株高、鲜重、叶面积、生物量分别增加了245.6%、183.4%、543.5%和250.7%。因此, 5% MgHC添加比例是本探究添加下的最佳比例。研究证明了镁改性粪便污泥水热炭对土壤改良以及植物生长具有相对明显的促进作用, 在农业领域有一定的应用前景。

## 关键词

粪便污泥, 水热炭改性, 土壤改良, 植物生长

# Effects of Mg-Modified Fecal Sludge Hydrochar on Soil Amendment and Pak Choi Growth

Yutao Ye, Ye Tang\*

College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou Zhejiang

\*通讯作者。

## Abstract

Under the zero-waste city initiative, the resource utilization of organic wastes such as fecal sludge has become a critical research topic in agriculture and environmental science. Although traditional phosphorus fertilizers can supplement soil nutrients, their high leaching risk tends to cause environmental problems such as water eutrophication. By comparison, magnesium-modified fecal sludge hydrochar is enriched with magnesium active sites on its surface; its distinctive interfacial chemistry enables efficient phosphorus immobilization and suppression of leaching losses, thereby prolonging the availability of soil phosphorus and achieving sustained slow-release fertilization. To investigate the promoting effects of magnesium-modified fecal sludge hydrochar on soil amendment and plant growth, this study employed hydrothermal carbonization technology, using fecal sludge (FS), fecal sludge hydrochar (HC), and Mg-modified fecal sludge hydrochar (MgHC) as research subjects. Soil incubation experiments were conducted to investigate changes in soil characteristics, and pak choi cultivation experiments were performed to verify the effects of Mg-modified hydrochar on plant growth promotion and soil amendment. The results showed that, compared with the control (CK), the 5% MgHC treatment exhibited the optimal performance after 60 days of soil incubation, with total nitrogen, total phosphorus, organic matter, and available phosphorus increasing by 51.7%, 39.5%, 19.1%, and 305.6%, respectively. After 60 days of plant cultivation, the 5% MgHC treatment group demonstrated the best plant growth traits; compared with CK, the plant height, fresh weight, leaf area, and biomass of pak choi increased by 245.6%, 183.4%, 543.5%, and 250.7%, respectively. Therefore, the 5% MgHC addition ratio is the optimal ratio under the conditions investigated in this study. Mg-modified fecal sludge hydrochar exerts significant positive effects on soil amendment and plant growth promotion, demonstrating broad application prospects in the agricultural sector.

## Keywords

Fecal Sludge, Hydrochar Modification, Soil Improvement, Plant Growth

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

当前, 全球每年产生的人类粪便超过数十亿吨, 管理不善则会导致严重的水污染, 以及由氮(N)、磷(P)、有机物和病原体引起的一系列公共卫生和环境风险[1]。我国部分城市由于排水设施效能不足, 城市排水系统雨季溢流问题严重[2], 而化粪池外溢的危害不容小觑——不仅会污染环境, 其携带的病原体还会危害居民的身体健康[3], 同时存在安全隐患: 外溢导致地面湿滑, 老人与小孩容易摔倒受伤。目前主流的粪便处理方式主要包括化粪池 + 污水管网集中处理、干化焚烧、直接土地利用、堆肥及厌氧消化。其中, 化粪池与污水管网集中处理模式对营养物质的回收效率较低; 干化焚烧技术需通过预干燥去除水分, 导致能耗上升, 并可能产生粉尘、二噁英等有害污染物[4]; 直接土地利用与堆肥处理方式不仅占用大量土地, 还存在污染土壤和地下水的潜在风险[5]; 厌氧消化工艺处理周期较长, 且难以彻底消除病原微生物所带来的环境风险[6]。鉴于上述处置方法均存在一定局限, 亟需探索更优的人类粪便处理途径。

近年来, 国内外学者利用水热技术处理人类粪便, 但相关研究较少。水热技术是指反应物在高温高压下, 以水为反应介质, 利用水在高温高压下的特殊性质, 使有机固体废弃物发生一系列降解反应并获得可利用产物的处理技术[7]-[9]。人类粪便含水率较高, 利用水热法在一定的温度、时间、压力下发生聚合等反应后, 生成的固体产物中含有具有较高的农用价值和独特的结构, 可以作为缓释肥和土壤改良剂来使用。此外, 水热后, 固废原料的体积常常可以缩减到原来的 10%左右[10], 减少了粪便的处置压力。基于此, 将水热炭作为一种新型肥料应用于农业生产成为可能[11]。小白菜作为一种常见的蔬菜, 根系分布浅, 吸收能力弱, 生长周期短, 施用化肥增产效果明显。施肥是小白菜提高产量的重要措施之一, 合理的施肥能有效促进小白菜的生长[12]。

本研究利用水热炭化技术来制备人类粪便污泥水热炭, 使用镁系添加剂对其进行改性, 并将改性完的水热炭添加至土壤中对土壤进行改良, 探究土壤有机质、养分等基本性质的变化。通过分析小白菜的生长性状以直观地评价水热炭对植物的促生效果, 为人类粪便的资源化利用提供一定的参考。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 材料

使用的小白菜种子为四季奶油小白菜。供试土壤采自温州市瓯海区农田, 依据中国土壤系统分类检索表, 归类为人为土纲、水耕人为土亚纲下的水稻土土类[13]。实验前将原始土壤去除石子和植物残留的根系, 风干后研磨后过筛备用。粪便污泥取自温州大学二级化粪池。将取回的粪便污泥(FS)经过恒温鼓风干燥箱在 105℃的条件下干燥至恒重, 污泥经烘干处理后, 采用粉碎机进行破碎, 过 60 目筛后将所得样品装入封装袋密封保存, 以备后续使用。

水热试验采用水热反应釜作为综合反应器。经早期实验筛选, 确定粪便污泥水热炭(HC)的制备条件为反应温度 220℃、反应时间为 2 h、固液比为 1:5。确定镁改性粪便污泥水热炭(MgHC)制备中 MgCl<sub>2</sub> 粉末添加量为粪便污泥原料重量的 5%。在反应容器内添加 200 g 烘干后的粪便污泥和 1000 mL 去离子水, 将其混合均匀后放入烘箱中, 从室温升温至 220℃保温 2 h 后冷却至室温, 将水热处理后的产物抽滤实现固液分离, 固体产物在烘箱中 105℃烘干至恒重, 得到粪便污泥水热炭。同理, 在称取粪便污泥 200 g 后, 添加 10 g MgCl<sub>2</sub> 粉末与粪便污泥进行充分混合, 后续通过与 HC 制备相同的操作得到镁改性粪便污泥水热炭。磷肥(PF)为磷酸镁铵, 来源于河南升峰化工, 纯度为 99.5%。以上材料的基本理化性质详见表 1。

**Table 1.** Basic physicochemical properties of experimental materials

**表 1.** 实验材料基本理化性质

名称	总氮/(mg·g <sup>-1</sup> )	总磷/(mg·g <sup>-1</sup> )	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	pH 值
原始土壤	2	2	37	6.3
FS	44	8	525	7.1
HC	27	9	477	6.8
MgHC	26	10	450	6.7

### 2.2. 方法

#### 2.2.1. 实验设计

本次盆栽实验在温州大学生命与环境科学学院 3 楼实验室中室内光照良好的窗台处进行, 日正常光照时间约为 4~6 小时, 满足小白菜日常生长所需光照时间[14]。采用盆栽试验, 使用底部有孔的塑

料盆,并在每个盆下放置塑料托盘。播种完成后,对各盆栽浇透水,维持土壤微润而不积水,覆盖保鲜膜,三天后揭膜。盆栽试验设置了9个处理:空白对照(CK);粪便污泥(FS)按土壤质量的2%、5%添加;粪便污泥水热炭(HC)按土壤质量的2%、5%添加;镁改性粪便污泥水热炭(MgHC)按土壤质量的2%、5%添加;以及以土壤质量2%、5%添加量MgHC所含有效磷为标准折算的传统磷肥对照组。传统磷肥处理以磷酸镁铵提供,每个处理设4个重复。栽培过程不施加其他肥料[15]。

将过筛后土壤与各种添加剂处理充分混匀均匀后装盆。预先在底部铺一层碎石后加入已经和添加剂混匀的土壤。轻压土壤但避免过度压实,确保排水良好。挑选饱满的小白菜种子,使用40℃温水浸泡6h,使用穴施法对小白菜进行播种,深度约1cm,播种时向每盆均匀撒入10颗小白菜种子,每颗种子1穴。在有菜苗长出真叶后进行间苗,剪除弱苗并保留健壮苗,根据土壤湿度适当浇水。种植60天后收获,并将所有盆栽土壤收集,自然阴干后粉碎过60目筛,装入自封袋中,以供后续测定土壤养分含量。

### 2.2.2. 土壤基本性质的测定

依据HJ 717-2014中凯氏法测定土壤总氮、HJ 632-2011中碱熔-钼锑抗分光光度法测定土壤总磷、NY/T 525-2021中重铬酸钾容量法测定土壤有机质、NY/T 1121.7-2014中盐酸氟化铵法测定土壤有效磷。

### 2.2.3. 小白菜生长指标的测定

当小白菜生长至60天后,用刻度尺测定株高与单株叶面积;测定结束后对盆栽中的小白菜进行收割,用蒸馏水清洗,擦干后测定其鲜重,从而反映其整体生长水平。上述指标测定完成后,将小白菜置于105℃烘箱中杀青30min,随后转入60℃烘箱烘干至恒重,以测定其生物量。

### 2.2.4. 数据处理

实验数据以“平均值±标准差”表示。每个处理设置4个生物学重复。采用SPSS 27.0软件对植物数据进行单因素方差分析,并进行组间差异显著性检验。绘图使用Origin 2021。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 对土壤改良的影响

#### 3.1.1. 对土壤总磷总氮的影响

土壤总磷与总氮是评价土壤基础肥力的关键指标。作为植物生长不可或缺的营养元素,磷能够驱动光合作用、促进根尖分生组织细胞分裂、增强根系吸收能力并助力植物开花结果[16];氮则直接参与蛋白质等生物大分子的合成,进而决定作物的产量与品质[17]。如图1所示,不同处理对土壤总磷(TP)和总氮(TN)含量产生了一定影响。与对照(CK)相比,所有处理均提高了土壤TP含量;在2%添加水平下,2%HC和2%MgHC处理的TP含量较高,而2%FS和2%PF处理相对较低,在5%添加水平下,5%MgHC处理TP含量最高,且5%添加量各处理的TP含量均高于相应的2%添加量处理,表现出比较明显的剂量效应。类似地,各项处理也提高了土壤TN含量;在2%添加水平下,2%FS、2%HC和2%MgHC处理的TN含量高于CK,而2%PF处理低于前三者;在5%添加水平下,5%FS处理的TN含量最高,5%MgHC和5%PF处理相对较低,且5%添加量各处理的TN含量普遍高于2%添加量处理。

#### 3.1.2. 对土壤有机质有效磷的影响

土壤有机质是构建良好土体结构的物质基础,能够有效优化土壤的物理性状,特别是通过促进团粒结构的形成来缓解土壤板结或紧实等问题[18]。土壤中可供植物直接吸收利用的磷素形态称为有效磷[19],其丰缺程度直接反映了土壤的磷素供应潜力,据此可评估现有磷养分是否足以支撑作物的正常生长发育。

如图 2 所示, 不同处理对土壤有机质和有效磷含量均产生一定影响。在土壤有机质含量方面, 5% FS 处理处于最高水平, 高于 CK 及多数处理; 5% MgHC 处理有机质含量处于第二高水平, 高于全部 2% 添加量处理及 5% PF 处理, 而 2% PF 和 5% PF 处理的有机质含量与 CK 相近甚至更低, 表明 PF 的加入对土壤有机质的提升作用有限。在有效磷含量方面, 所有处理均高于 CK; 在 2% 添加水平下, 2% HC 和 2% MgHC 处理的有效磷含量高于 2% FS 和 2% PF 处理; 在 5% 添加水平下, 5% MgHC 处理的有效磷含量最高水平, 且 5% 添加量各处理的有效磷含量均高于相应的 2% 添加量处理, 表现出比较明显的剂量效应。

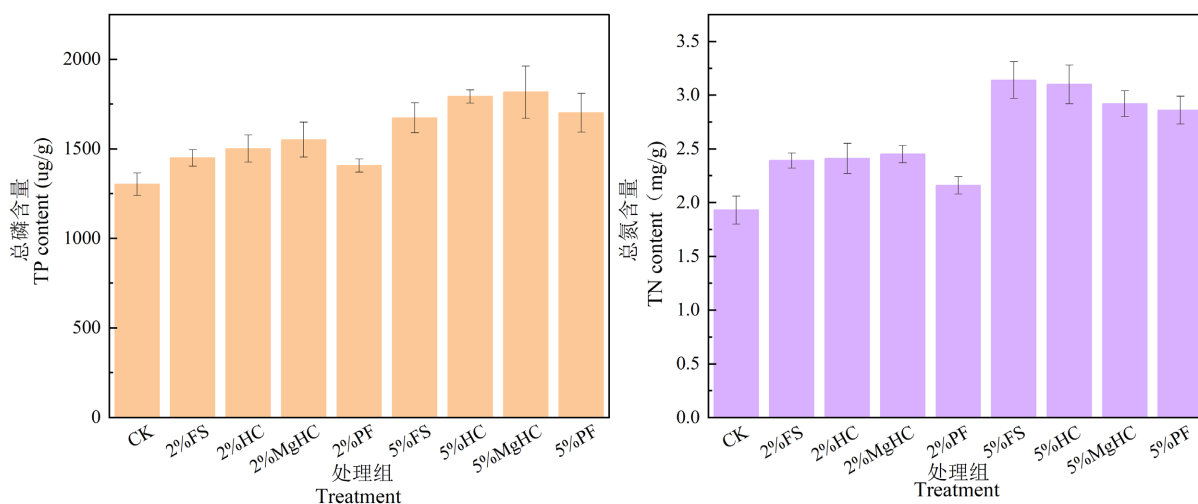


Figure 1. Effects of different treatments on TP and TN in soil

图 1. 不同处理对土壤总磷和总氮的影响

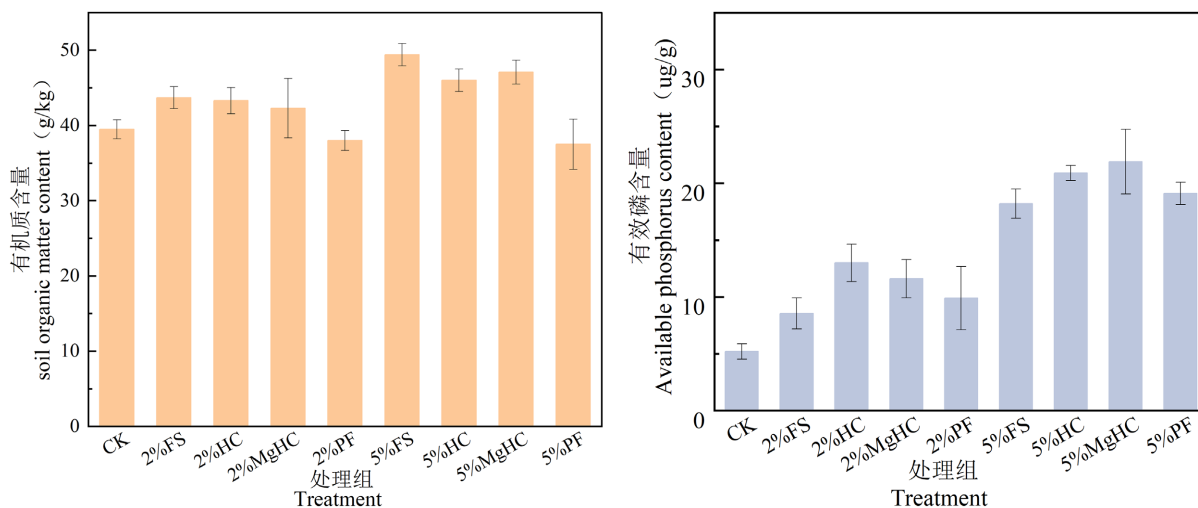


Figure 2. Effects of different treatments on soil organic content and available phosphorus

图 2. 不同处理对土壤有机质和有效磷的影响

### 3.2. 对小白菜生长的影响

对小白菜的鲜重、生物量株高、生物量以及叶面积进行了单因素方差分析(One-Way ANOVA), 分析结果均达到显著水平( $P < 0.05$ ), 表明不同的处理对小白菜的生长产生了显著影响, 如表 2 所示。在 5% 施用量下, HC 和 MgHC 处理组的小白菜生长指标相较于 FS 和 PF 处理组更优, 相比 HC 处理组而言,

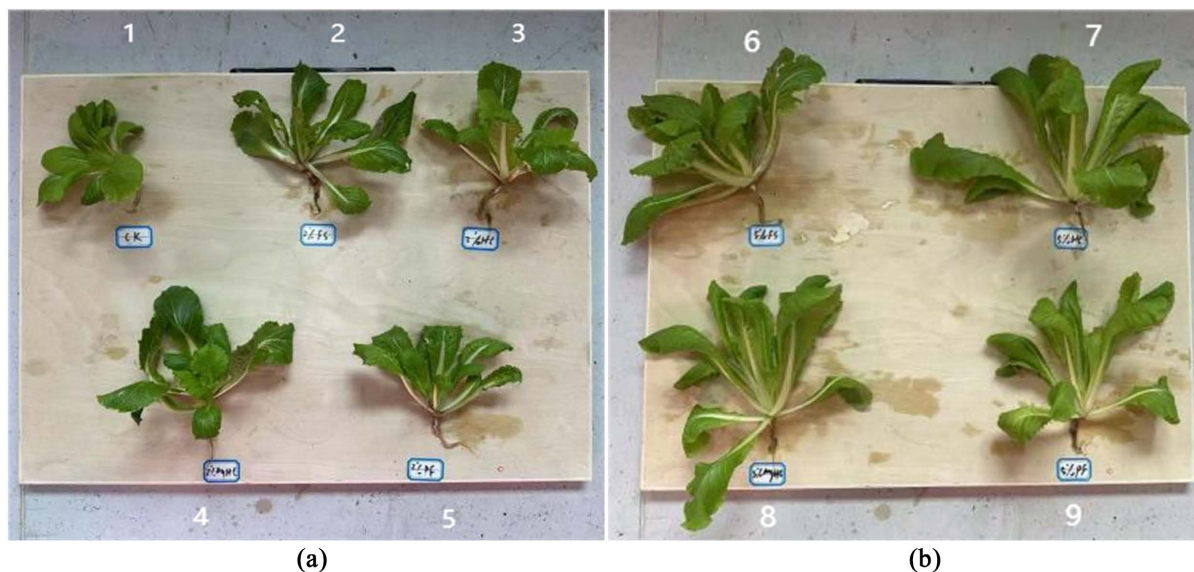
MgHC 处理组小白菜株高、鲜重、叶面积、生物量均高于 HC 处理组。这表明 MgHC 能促进小白菜的物质积累和植株的生长。对比 MgHC 处理组与 PF 处理组可以发现, 在添加有效磷相同情况下, MgHC 的加入更能促进小白菜各个组织器官生物量的积累, 且促进作用比较明显。随着 MgHC 添加量的增加可以发现小白菜生物量持续增加, 株高变高、叶面积增大。这一现象说明, 适度提高 MgHC 的添加比例, 会对小白菜的发育起到推动作用, 有利于小白菜的优质高产。图 3 为不同处理对小白菜的促生效果, 与 CK 相比, 所有其他处理(2% FS, 2% HC, 2% MgHC, 2% PF)均对小白菜生长产生了显著的促进作用。这表明, 无论是直接施用 FS、HC、MgHC, 还是 PF, 都能改善小白菜的生长状况。此外。还发现 5% 添加量下小白菜生长比 2% 添加量白菜生长状况更佳, 说明提高添加的比例或许有利于小白菜更好生长。

**Table 2.** The influence of different treatments on the growth indicators of pak choi

**表 2.** 不同处理对小白菜生长指标的影响

处理组	株高(cm)	鲜重(g)	叶面积(cm <sup>2</sup> )	生物量(g)
CK	6.2 ± 0.7 <sup>g</sup>	9.68 ± 3.61 <sup>d</sup>	9.0 ± 2.0 <sup>g</sup>	0.426 ± 0.086 <sup>f</sup>
2% FS	10.8 ± 1.0 <sup>de</sup>	16.41 ± 1.66 <sup>c</sup>	13.8 ± 2.1 <sup>fg</sup>	0.554 ± 0.076 <sup>f</sup>
2% HC	10.4 ± 0.4 <sup>e</sup>	17.33 ± 0.75 <sup>c</sup>	23.9 ± 4.0 <sup>df</sup>	0.776 ± 0.072 <sup>e</sup>
2% MgHC	11.9 ± 0.4 <sup>d</sup>	18.00 ± 1.73 <sup>c</sup>	33.1 ± 11.1 <sup>de</sup>	0.872 ± 0.070 <sup>de</sup>
2% PF	9.0 ± 0.6 <sup>f</sup>	17.17 ± 0.23 <sup>c</sup>	16.7 ± 0.8 <sup>fg</sup>	0.502 ± 0.091 <sup>f</sup>
5% FS	16.0 ± 0.6 <sup>e</sup>	22.90 ± 1.50 <sup>b</sup>	48.1 ± 11.0 <sup>bc</sup>	1.084 ± 0.059 <sup>c</sup>
5% HC	19.2 ± 1.5 <sup>b</sup>	26.13 ± 0.98 <sup>a</sup>	54.5 ± 8.8 <sup>ab</sup>	1.292 ± 0.172 <sup>b</sup>
5% MgHC	21.4 ± 1.3 <sup>a</sup>	27.43 ± 2.31 <sup>a</sup>	61.1 ± 14.0 <sup>a</sup>	1.484 ± 0.087 <sup>a</sup>
5% PF	15.6 ± 1.2 <sup>c</sup>	21.80 ± 2.59 <sup>b</sup>	40.0 ± 9.4 <sup>cd</sup>	0.977 ± 0.062 <sup>cd</sup>

注: 表中不同小写字母表示不同处理间差异显著(P < 0.05, Duncan 法)。



注: 图(a)中的 1~5 分别为 CK、2% FS、2% HC、2% MgHC 和 2% PF 处理组。图(b)中的 6~9 分别为 5% FS、5% HC、5% MgHC 和 5% PF 处理组。

**Figure 3.** The promoting effect on pak choi of different treatments

**图 3.** 不同处理对小白菜的促生效果

## 4. 讨论

本研究通过盆栽实验初步探究了镁改性粪便污泥水热炭作为土壤改良剂兼肥料对土壤性质及小白菜生长的影响。

在土壤改良方面: 镁改性粪便污泥水热炭能有效调节土壤总氮、总磷、有机质和有效磷含量。在 5% 添加比例下, 改善效果较优。5% MgHC 处理对土壤养分指标的协同改善, 可能源于  $Mg^{2+}$  与水热炭的耦合效应。 $Mg^{2+}$  可与水热炭中的磷酸根形成生物有效性较高的镁-磷酸盐(如  $MgHPO_4$ ), 其释放速率优于传统矿物磷, 从而直接提高土壤有效磷库[20]; 同时, 5% 的足量添加使炭基载体通过多孔结构及含氧官能团固持氮素, 并借助  $Mg^{2+}$  与磷酸根的配位作用调控磷释放节律, 减少养分流失[21]。因此, 镁改性水热炭具有改良土壤的正向作用。

在小白菜生长方面: 镁改性粪便污泥水热炭显著提升了植物的株高、鲜重、叶面积、生物量。例如, 在 5% 添加量下, 5% 镁改性水热炭使株高、鲜重、叶面积和生物量相比 CK 分别提升 245.6%、183.4%、543.5% 和 250.7%, 优于其他处理。相比蔬菜废弃物水热炭而言, 镁改性粪便污泥水热炭对小白菜的促生效果更为显著[22]。5% MgHC 对小白菜生长的显著促进, 可能源于土壤养分供给的改善和镁素的直接营养效应。一方面, 该处理提高了土壤有效磷和总氮含量, 为植株提供了充足的矿质营养, 促进了细胞分裂与组织伸长; 另一方面, 水热炭的多孔结构改善了土壤保水通气性能, 有利于根系发育[23]。因此, 镁改性水热炭具有一定的植物促生效果。

## 5. 结论

镁改性粪便污泥水热炭的促生效果良好, 其通过改善土壤肥力和结构, 为植物提供了更优的生长环境, 具有作为肥料和土壤改良剂的潜力。

## 基金项目

温州市基础科研项目(S20220013)。

## 参考文献

- [1] Xu, Y., Li, N., Yang, L., Liu, T., Xiao, S., Zhou, L., *et al.* (2023) Optimizing Directional Recovery of High-Bioavailable Phosphorus from Human Manure: Molecular-Level Understanding and Assessment of Application Potential. *Water Research*, **245**, Article ID: 120642. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120642>
- [2] 唐磊, 程小文, 刘广奇. 对我国城市雨季溢流控制目标的思考[J]. 给水排水, 2025, 51(12): 34-41.
- [3] Lewis, D.L., Gattie, D.K., Novak, M.E., Sanchez, S. and Pumphrey, C. (2002) Interactions of Pathogens and Irritant Chemicals in Land-Applied Sewage Sludges (Biosolids). *BMC Public Health*, **2**, Article No. 11. <https://doi.org/10.1186/1471-2458-2-11>
- [4] Wang, L.P., Chang, Y.Z. and Li, A.M. (2019) Hydrothermal Carbonization for Energy-Efficient Processing of Sewage Sludge: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **108**, 423-440. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.011>
- [5] 殷琳鑫, 余鋈, 王智聪, 等. 城市污泥水热碳化的研究与应用进展[J]. 当代化工研究, 2022(16): 4-8.
- [6] 荣毅. 环境工程污泥处理处置技术及资源化利用策略[J]. 资源再生, 2025(12): 39-41.
- [7] 安迪, 杨令, 王冠达, 等. 磷在土壤中的固定机制和磷肥的高效利用[J]. 化工进展, 2013, 32(8): 1967-1973.
- [8] Simpson, R.J., Oberson, A., Culvenor, R.A., Ryan, M.H., Veneklaas, E.J., Lambers, H., *et al.* (2011) Strategies and Agronomic Interventions to Improve the Phosphorus-Use Efficiency of Farming Systems. *Plant and Soil*, **349**, 89-120. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0880-1>
- [9] 李飞飞, 封圆圆, 白红娟. 生物质改性前后对亚甲基蓝的吸附研究进展[J]. 河南科技, 2023, 42(6): 79-84.
- [10] 张会文, 代晓炫, 姜伟, 等. 市政污泥的水热反应减量及水分赋存形态研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(7): 96-100.

- [11] 杨英, 包兴幸, 赵彦琦, 等. 猪粪水热处理产物对土壤性质及小白菜生长的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2025(1): 76-85.
- [12] Kleemann, R., Chenoweth, J., Clift, R., Morse, S., Pearce, P. and Saroj, D. (2017) Comparison of Phosphorus Recovery from Incinerated Sewage Sludge Ash (ISSA) and Pyrolysed Sewage Sludge Char (PSSC). *Waste Management*, **60**, 201-210. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.055>
- [13] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组. 中国土壤系统分类检索[M]. 第3版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2016.
- [14] Li, R., Wang, H., Wu, S., Chen, J., Zhou, Z., Zhang, Y., *et al.* (2026) Optimizing Light Environment for Pakchoi in Plant Factories: Interactive Effects of Photoperiod and Light Intensity on Growth, Photosynthesis, and Energy-Use Efficiency. *Horticulturae*, **12**, Article No. 215. <https://doi.org/10.3390/horticulturae12020215>
- [15] 徐勃. 不同磷肥和磷形态对黄花苜蓿(*Medicago falcata* L.)叶片微观结构、氮磷吸收及产量的影响[D]: [博士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- [16] Chen, X.X., Zhang, W., Liang, X.Y., Liu, Y.M., Xu, S.J., Zhao, Q.Y., *et al.* (2019) Physiological and Developmental Traits Associated with the Grain Yield of Winter Wheat as Affected by Phosphorus Fertilizer Management. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 16580. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53000-z>
- [17] 黄勤楼, 黄秀声, 陈钟佃, 等. 施氮水平与方式对黑麦草生物学特性和硝酸盐含量的影响[J]. 草业学报, 2010, 19(1): 103-112.
- [18] 王红兰, 蒋舜媛, 崔俊芳, 等. 基于聚类及 PCA 分析的羌活栽培区土壤质量评价[J]. 安徽农业大学学报, 2024, 51(5): 857-864.
- [19] Bhat, M.A., Mishra, A.K., Shah, S.N., Bhat, M.A., Jan, S., Rahman, S., *et al.* (2024) Soil and Mineral Nutrients in Plant Health: A Prospective Study of Iron and Phosphorus in the Growth and Development of Plants. *Current Issues in Molecular Biology*, **46**, 5194-5222. <https://doi.org/10.3390/cimb46060312>
- [20] Leite, A.d.A., Melo, L.C.A., Hurtarte, L.C.C., Zuin, L., Piccolla, C.D., Werder, D., *et al.* (2023) Magnesium-Enriched Poultry Manure Enhances Phosphorus Bioavailability in Biochars. *Chemosphere*, **331**, Article ID: 138759. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138759>
- [21] Ibrahim, M.M., Lin, H., Chang, Z., Li, Z., Riaz, A. and Hou, E. (2024) Magnesium-Doped Biochars Increase Soil Phosphorus Availability by Regulating Phosphorus Retention, Microbial Solubilization and Mineralization. *Biochar*, **6**, Article No. 68. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00360-z>
- [22] 许传阳, 杨英, 唐建恒, 等. 蔬菜废弃物水热产物对小白菜生长性状和土壤微生物的影响[J]. 天津农业科学, 2024, 30(5): 85-90.
- [23] Jeffery, S., Verheijen, F.G.A., van der Velde, M. and Bastos, A.C. (2011) A Quantitative Review of the Effects of Biochar Application to Soils on Crop Productivity Using Meta-Analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **144**, 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>