

改性磷石膏对小白菜生长及根区土壤理化特性的影响

王要芳¹, 荚俊飞², 曾明志², 刘娟^{3,4}, 张乃明^{3,4}, 卢维宏^{2,3}, 韩云昌^{3,4}

(1. 宿州学院 生物与食品工程学院, 安徽 宿州 234000; 2. 宿州学院 环境与测绘工程学院, 安徽 宿州 234000;
3. 云南省土壤培肥与污染修复工程研究中心, 云南 昆明 650201; 4. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

[摘要] 开展5种不同改性磷石膏施用水平对小白菜生长发育、养分吸收利用效应和根区土壤理化特性的影响。结果表明: 从生长指标和养分吸收利用效应来看, 以0.3%改性磷石膏处理的效果最好, 与对照CK相比, 株高、SPAD值、根长、生物量分别增加80.6%、34.2%、37.5%、505.3%, 小白菜植株中全氮、全磷、全钾质量分数分别增加211.3%、100.0%、69.6%; 从根区土壤理化特性指标来看, 以4.8%改性磷石膏的效果最佳, 土壤pH、全磷、速效磷、碱解氮指标增幅分别达到了33.5%、29.7%、95.5%、43.8%, 速效钾降低11.0%。改性磷石膏可调控酸性土壤pH, 优化土壤中养分的有效性、提高养分吸收利用效率, 进而促进小白菜的生长发育, 以0.3%施用量时效果整体最为稳定。

[关键词] 改性磷石膏; 小白菜; 生长; 根区土壤理化特性

[中图分类号] S634.3; S156 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566 (2025) 03-0107-07

Effects of modified phosphogypsum on growth of Chinese cabbage and soil physicochemical properties in root zone

WANG Yaofang¹, JIA Junfei², ZENG Mingzhi², LIU Juan^{3,4}, ZHANG Naiming^{3,4},
LU Weihong^{2,3}, HAN Yunchang^{3,4}

(1. School of Biological and Food Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, China;

2. School of Environment and Surveying Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, China;

3. Yunnan Soil Fertilizer and Pollution Restoration Engineering Research Center, Kunming 650201, China;

4. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: The effects of 5 different concentrations of modified phosphogypsum on growth of Chinese cabbage, nutrient absorption and utilization, soil physicochemical properties in root zone are investigated. The results show that 0.3% modified phosphogypsum treatment has the best effect on growth of Chinese cabbage and nutrient absorption and utilization, compared with CK, plant height, SPAD value, root length and biomass are increased by 80.6%, 34.2%, 37.5% and 505.3% respectively; And the contents of total nitrogen, total phosphorus and total potassium in Chinese cabbage plants are increased by 211.3%, 100.0% and 69.6% respectively. In terms of soil physicochemical properties in root zone, 4.8% modified phosphogypsum has the best effect, the soil pH, total phosphorus, available phosphorus and alkali-hydrolyzed nitrogen are increased by 33.5%, 29.7%, 95.5% and 43.8% respectively, and available potassium is decreased by 11.0%. Modified phosphogypsum can improve the pH value of acidic soil, optimize the availability, increase absorption and utilization efficiency of nutrients in soil, and then promote the growth of Chinese cabbage, especially the effect of 0.3% modified phosphogypsum treatment is the most stable.

Key words: modified phosphogypsum; Chinese cabbage; growth; soil physicochemical properties in root zone

0 引言

磷石膏 (phosphogypsum, PG) 是湿法生产磷酸及磷肥过程中产生的主要副产品, 每生产磷酸1.0 t可副产磷石膏4.5~5.0 t, 是化工产业排放量最大的固体废弃物之一^[1], 主要成分为二水硫酸钙 (CaSO₄·2H₂O), 并含有少量的游离酸、磷酸盐、氟化物、有机质及中微量元素等^[2]。统计数据显示,

2023年我国磷肥总产量为P₂O₅ 1 615.7万 t, 磷石膏

[收稿日期] 2023-07-09; [修回日期] 2024-11-10

[作者简介] 王要芳(1984-),女,河南许昌人,硕士研究生,研究方向为农田土壤环境质量退化与修复。

[通信作者] 卢维宏(1984-),男,山西运城人,高级农艺师,主要研究方向为农田土壤环境质量退化与修复、农业废弃物资源化利用。

[基金项目] 宿州学院博士启动项目基金(2021BSK047);宿州学院大学生创新创业训练计划项目(YBXM23-197)

年产生量可达8 100万t,利用率为55.6%^[2-3]。云南、贵州、四川是我国磷肥的集中生产地,也是磷石膏处理压力最大的地方,其堆积量已达数亿吨,对周边环境(包括水、土壤、大气等)造成了极大的风险。如:磷石膏在堆存时会产生扬尘,引起粉尘污染;降雨时,堆存的磷石膏浸出液会污染地表水、土壤和地下水^[4-5]。因此,磷石膏无害化处理及资源化利用具有重要意义。大量研究表明磷石膏在资源化利用方面具有一定优势,如制硫酸联产水泥,用于矿坑填充、修筑道路,制备建材等^[6]。也有研究将磷石膏经过无害化处理后在农业中进行应用,如在盐碱地施用磷石膏能够有效降低土壤碱性和盐分含量^[5]、在农田干早期提供金属阳离子和降低Al³⁺有效性来改善土壤肥力^[7]等。本研究基于生物炭高温改性磷石膏^[8],分析了改性磷石膏施用水平对酸性红壤的修复调控效应及其对小白菜生长和养分吸收的影响,以期磷石膏的农业资源化利用提供切实可行的措施。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试的改性磷石膏为云南省土壤培肥与污染修复工程研究中心研究的基于生物炭高温改性磷石膏,是黑灰色粉状黏粒,其 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为279.5 mg/kg, $w(\text{MgO})$ 为11.2 mg/kg, $w(\text{CaO})$ 为33.0 mg/kg, $w(\text{水溶性氟})$ 为61 mg/kg, $w(\text{总Pb})$ 、 $w(\text{Cd})$ 、 $w(\text{Cr})$ 分别为34.12、0.51、35.21 mg/kg。供试土壤取自云南省红河州个旧市鸡街镇(23°25'47"N, 103°9'18"E,海拔1 567.4 m),土壤类型为红壤。供试小白菜为台湾小黄白,种子购自昆明市华兴种业有限公司。

1.2 试验处理及方法

使用实验室改性的磷石膏进行温室土培盆栽试验,试验土壤中磷石膏添加量有6个,分别为0(CK)、0.3%、0.6%、1.2%、2.4%、4.8%。每个试验处理设置3个重复。在盆栽试验过程中用2 L的塑料花盆,每个花盆可以盛土2 kg,然后再把不同添加量的磷石膏和土壤混合均匀,放置半个月,让磷石膏和土壤充分混合达到平衡。小白菜于2018年7月15日种植于塑料花盆中,每个花盆放置小白菜种子20粒,待小白菜出苗约一周的时候间苗至10棵长势均匀一致的白菜苗,玻璃温室内温度范围为15~33℃,在小白菜生长期间采用太阳光照,并用玻璃温室中的自来水对小白菜进行喷灌,期间追肥一次,一直到小白菜成熟,在2018年9月

5日采收,小白菜生长过程中没有出现病虫害的现象。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 植株相关指标测定方法

小白菜的株高、鲜质量、根长等均采用常规方法测定^[9]。小白菜中氮磷钾相关指标的测定:小白菜氮含量采用H₂SO₄-H₂O₂消煮、纳氏比色法测定,小白菜磷含量采用H₂SO₄-H₂O₂消煮、钒钼黄比色法测定,小白菜钾含量采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,火焰光度计法测定^[10-11]。叶片中的叶绿素指标采用SPAD仪测定。

1.3.2 土壤指标测定

土壤pH(水土质量比2.5:1.0)采用电位法测定。土壤氮磷钾相关指标的测定:土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定,土壤速效磷含量采用碳酸氢钠法测定,土壤速效钾含量采用NH₄OAc浸提-火焰光度法测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定^[11]。

1.4 数据统计

采用Microsoft Excel 2010对试验数据进行整理,用SPSS 19.0对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、最小显著差异(Least significance difference, LSD)和Pearson相关性等统计分析;采用OriginPro 9.1进行制图。

2 结果与分析

2.1 改性磷石膏施用量对小白菜生长指标的影响

改性磷石膏施用量对小白菜生长指标的影响见图1。由图1可以看出,施用不同量的改性磷石膏均可显著改善小白菜的长势,如株高、叶绿素、根长、总生物量指标。从株高指标分析来看(见图1a.),与对照CK相比,施用0.3%、0.6%、1.2%、2.4%、4.8%的改性磷石膏均提高了小白菜的株高,株高增幅达到了80.6%、72.4%、65.4%、62.4%、50.9%。其中,以改性磷石膏添加量为0.3%时,株高增幅最大,随着改性磷石膏施用量继续增加,小白菜的株高增幅表现出下降的趋势。从SPAD指标分析来看(见图1b.),与对照CK相比,施用0.3%、0.6%、1.2%、2.4%、4.8%的改性磷石膏均提高了小白菜的SPAD值,SPAD值增幅分别达到34.2%、40.5%、22.3%、17.3%、3.5%;当改性磷石膏添加量为0.6%时增幅最大,增幅达40.5%;随着改性磷石膏施用量增加,小白菜的SPAD值增幅表现出先升高后下降的趋势。从根长指标分析来看(见图1c.),与对照CK相比,施用

改性磷石膏均可不同程度地促进小白菜的根系生长,根长增幅分别达到37.5%、39.2%、24.2%、17.7%、15.1%;当改性磷石膏施用量为0.6%时,根长的增幅最大;随着改性磷石膏施用量增加,根长增幅表现出先增加后下降的趋势。从生物量指标

分析来看(见图1d.),与对照CK相比,施用0.3%、0.6%、1.2%、2.4%、4.8%的改性磷石膏均可不同程度地提高小白菜的生物量指标,其中,以施用量为0.3%时的效果最佳,小白菜生物量的增幅达到505.3%。综合来看,以0.3%、0.6%两个施用

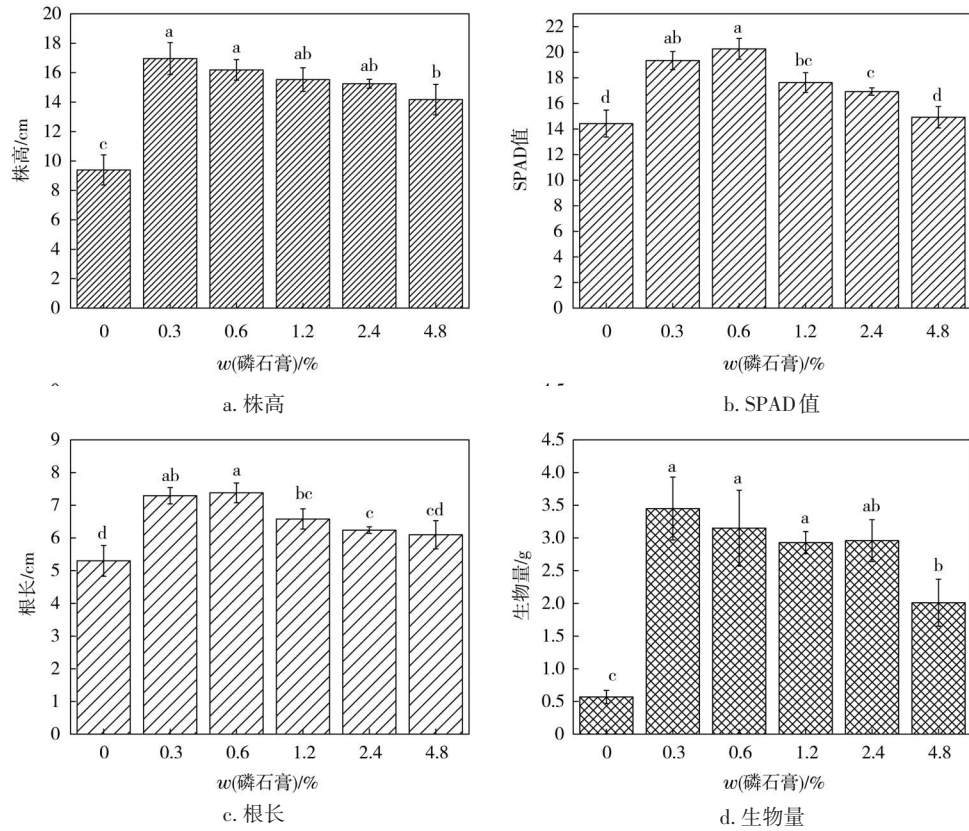


图1 改性磷石膏施用量对小白菜生长指标的影响

Fig. 1 Effects of modified phosphogypsum application dosage on the growth indicators of Chinese cabbage

量的改性磷石膏处理小白菜的生长指标更优。

2.2 改性磷石膏不同施用量对小白菜养分吸收量的影响

改性磷石膏不同施用量对小白菜养分吸收量的影响如图2所示。由图2可以看出,施用不同量的改

性磷石膏均可不同程度地提高小白菜对氮、磷、钾的吸收利用。以植株中全氮含量来看(见图2a.),施用0.3%、0.6%、1.2%、2.4%、4.8%的改性磷石膏均提高了小白菜植株中全氮的含量,与对照CK相比,各试验处理的植株 $w(\text{全氮})$ 增幅分别达到

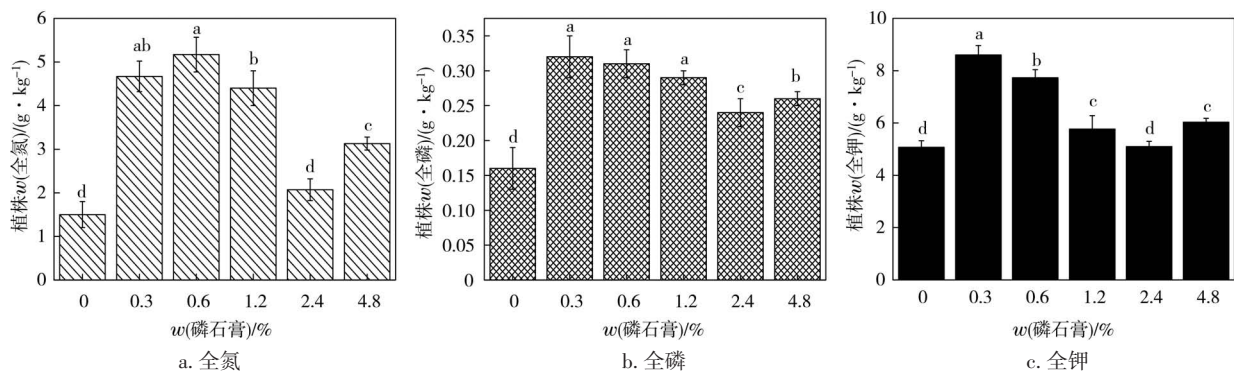


图2 改性磷石膏施用量对小白菜氮、磷、钾吸收的影响

Fig. 2 Effects of modified phosphogypsum application dosage on N, P, K absorption of Chinese cabbage

了211.3%、244.7%、193.3%、38.0%、108.7%，以施用0.6%改性磷石膏处理的效果最佳，植株 w (全氮)增幅达到了244.7%；随着磷石膏施用量增加，植株全氮增幅表现出先升高降低的趋势。以植株中全磷含量来看(见图2b.)，施用0.3%、0.6%、1.2%、2.4%、4.8%的改性磷石膏均提高了小白菜植株中全磷的含量，与对照CK相比，各试验处理的植株 w (全磷)增幅分别达到了100.0%、93.8%、81.3%、50.0%、62.5%，以施用0.3%改性磷石膏处理的效果最佳， w (全磷)增幅达到了100.0%，随着改性磷石膏用量继续增加，植株中全磷含量的增幅表现出降低的趋势。以植株中全钾含量来看(见图2c.)，施用0.3%、0.6%、1.2%、2.4%、4.8%的改性磷石膏均提高了小白菜植株中全钾的含量，与对照CK相比，各试验处理的植株 w (全钾)增幅分别达到了69.6%、52.5%、13.8%、0.6%、18.9%，以施用0.3%改性磷石膏时的效果最佳，植株中 w (全钾)增幅达到了69.6%。

2.3 改性磷石膏施用量对根区土壤理化特性的影响

改性磷石膏施用量对土壤pH的影响见图3。由图3可以看出，施用不同量的改性磷石膏均对根区土壤的pH具有一定调控作用。随着改性磷石膏施

用量增加，土壤pH逐步趋近于中性水平。施用0.3%、0.6%、1.2%、2.4%、4.8%的改性磷石膏后，土壤pH分别提高了12.4%、20.3%、17.8%、22.3%、33.5%，以改性磷石膏用量达到4.8%时，对根区酸性土壤的调控水平最佳，pH平均提高了1.7个单位，达到了6.9。

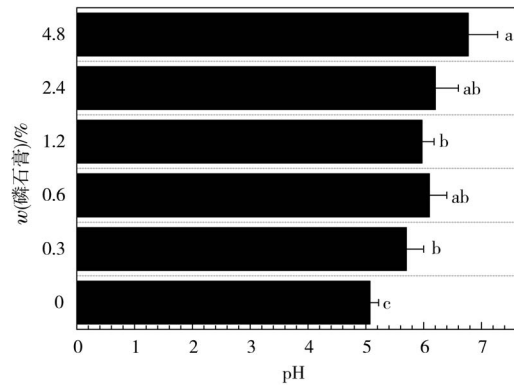


图3 不同用量改性磷石膏对土壤pH的影响
Fig. 3 Effects of different application dosage of modified phosphogypsum on soil pH

改性磷石膏施用量对土壤养分含量的影响见图4。由图4可以看出，施用不同量的改性磷石膏均有助于改善根区土壤的全磷、速效磷、速效钾、碱

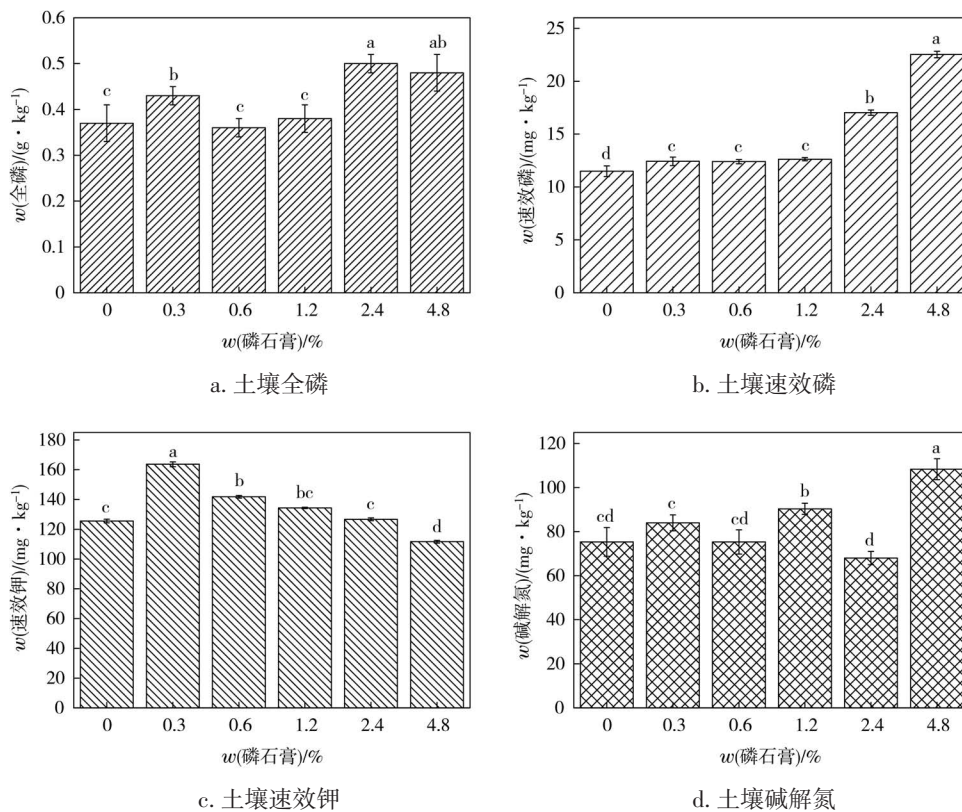


图4 改性磷石膏施用量对土壤养分含量的影响
Fig. 4 Effects of modified phosphogypsum application dosage on nutrient content in soil

解氮含量。从全磷（见图4a.）、速效磷指标分析来看（见图4b.），除了0.6%、1.2%添加量处理外，其余处理随着改性磷石膏施用量增加，土壤中的全磷、速效磷均表现出升高的趋势。土壤 w （速效磷）增幅以改性磷石膏添加量为4.8%时效果最佳， w （速效磷）增幅达到了95.9%，此时土壤 w （全磷）增幅达到29.7%；改性磷石膏添加量为2.4%时，土壤 w （全磷）、 w （速效磷）增幅分别达到了35.1%、48.1%。从速效钾指标分析来看（见图4c.），随着改性磷石膏用量增加，根区土壤中的速效钾含量增幅表现出先升高后降低趋势，以0.3%改性磷石膏用量处理的效果最佳，土壤 w （速效钾）增幅达到了30.4%；当磷石膏质量分数达到4.8%时，根区土壤速效钾含量较对照（CK）低，降低幅度达到了11.0%。从碱解氮指标来看（见图4d.），除了0.6%、2.4%两个改性磷石膏处理外，其余处理均不同程度地促进了根区土壤的碱解氮含量增加，其中，以改性磷石膏施用量为4.8%时的效

果最佳，土壤 w （碱解氮）增幅达到了43.8%。

2.4 小白菜生长指标及土壤速效养分的pearson相关性

改性磷石膏对小白菜生长指标及土壤速效养分的pearson相关性的影响见表1。由表1的pearson相关性指数分析可见，植株的株高、根长、生物量、叶绿素指标均与植株中全氮、全磷、全钾的含量表现了较好的pearson相关性。其中，株高与植株中的全氮、全磷、全钾含量的pearson相关性指数分别达到了0.766、0.912、0.646，且这种相关性均达到了极显著水平（ $P < 0.01$ ）；根长与植株中的全氮、全磷、全钾含量的pearson相关性指数分别达到了0.813、0.813、0.768，且这种相关性均达到了极显著水平（ $P < 0.01$ ）；生物量指标与植株中的全氮、全磷、全钾含量的pearson相关性指数分别达到了0.787、0.910、0.660，且这种相关性均达到了极显著水平（ $P < 0.01$ ）；同样，叶绿素指标与植株中全氮、全磷、全钾含量也表现出类似的pearson

表1 改性磷石膏对小白菜生长指标及根区土壤理化特性调控关系的影响

Table 1 The effect of modified phosphogypsum on the growth indicators of Chinese cabbage and the regulation of soil physicochemical indicators in root zone

项目	植株							根区土壤					
	株高	根长	生物量	SPAD值	全氮	全磷	全钾	pH	全磷	速效磷	速效钾	碱解氮	
植株	株高	1	0.769**	0.906**	0.740**	0.766**	0.912**	0.646**	0.506*	0.287	0.073	0.529*	0.123
	根长		1	0.798**	0.850**	0.813**	0.813**	0.768**	0.137	-0.180	-0.237	0.627**	-0.091
	生物量			1	0.793**	0.787**	0.910**	0.660**	0.348	0.133	-0.069	0.623**	0.017
	SPAD值				1	0.786**	0.768**	0.721**	-0.017	-0.249	-0.432	0.726**	-0.291
	全氮					1	0.912**	0.822**	0.288	-0.246	-0.239	0.642**	0.244
	全磷						1	0.792**	0.486*	0.128	0.000	0.639**	0.261
	全钾							1	0.108	-0.101	-0.252	0.804**	0.112
根区土壤	pH							1	0.639**	0.730**	-0.197	0.568*	
	全磷								1	0.738**	-0.175	0.262	
	速效磷									1	-0.620**	0.603**	
	速效钾										1	-0.242	
	碱解氮											1	

相关性特性。

进一步关注植株中全氮、全磷、全钾与土壤中pH、氮、磷、钾养分的pearson关系。结果表明，仅植株中的全磷含量与土壤pH表现出显著的pearson相关性，相关指数达到了0.486（ $P < 0.05$ ）。同时，植株中全氮、全磷、全钾含量水平也与土壤特性中的速效钾含量达到了较强显著的pearson相关性，相关性指数分别达到了0.642、0.639、0.804，且这种

相关均达到了极显著性差异水平（ $P < 0.01$ ）。

3 讨论

3.1 改性磷石膏对小白菜生长的影响

研究表明，生物炭搭载磷石膏进行共热改性，可增强其表面官能团的正电荷特性，促进其电导率（EC）、pH的提高，在酸性条件下，可促进改性磷石膏中的生物炭对 PO_4^{3-} 等阴离子的吸附，增强土壤磷的有效性^[12]，同时，磷石膏中 $w(P_2O_5) \geq 3.0$

mg/kg (最高可达434.5 mg/kg)、 $w(\text{有效S}) \geq 15.4$ mg/kg (最高可达489.0 mg/kg)、 $w(\text{有效Ca}) \geq 21.2$ mg/kg, 以及含有的Si、Mg、K等元素, 可有效缓解农田土壤养分(特别是中微量元素)失衡所形成的土壤健康障碍因子^[13-14], 可有效促进大豆、芝麻、芹菜、番茄、甘蓝、烟草、茶叶、大蒜等的生长发育, 同时还能有效预防农作物常见的生理性病害, 如番茄脐腐病、花生果腐病等。本研究结果也进一步证实了这一理论, 不同改性磷石膏施用量均不同程度地促进了小白菜的株高、叶片SPAD值、根长、生物量指标提高, 这与改性磷石膏中的中微量元素补充和土壤环境改善效应密切相关。与此同时, 本研究结果还进一步证实了随着改性磷石膏施用量增加, 小白菜生长指标增幅表现出先升高后下降的趋势, 表明改性磷石膏的施用并不是越多越好, 而是需要遵循适度和适量原则。

3.2 改性磷石膏对小白菜养分吸收利用的影响

农作物对不同养分的吸收利用过程中存在着协同与拮抗特性, 如缺镁加重钾过量, 而过量钾的供应会抑制农作物对镁的吸收利用^[15]。施用改性磷石膏对小白菜养分吸收利用促进效应的原因: 一方面, 磷石膏本身所含有的Ca、Mg、S等元素可对农作物吸收大中量元素形成协同促进效应, 进而增加了农作物中氮、磷、钾的累积浓度; 另一方面, 改性磷石膏对根系微环境具有改性调控效应, 大量研究表明, 生物炭可通过改善土壤微生物群落结构、优化土壤理化性质从而促进农作物对养分的吸收利用效率^[16-18]。本研究所涉及改性磷石膏不同施用量下, 小白菜对氮、磷、钾养分的吸收利用表现出先升高后下降趋势的原因, 一方面这可能是改性磷石膏与磷石膏中的有害物质差异性所致, 改性磷石膏降低了磷石膏中F、Pb、Cd的含量; 另一方面, 改性磷石膏浓度偏高后对农作物养分吸收利用效率的抑制效应可能与其中的有害物质溶出有关, 这尚有待进一步验证。在2.4节的pearson相关性结果也进一步证实了农作物生长发育的优势与农作物对氮、磷、钾的吸收利用效果具有较强的相关性, 故养分的协同吸收、土壤环境质量的优化效应是促进小白菜生长的关键所在。

3.3 改性磷石膏施用量对小白菜根区土壤理化特性的影响

土壤环境质量是农作物健康生长发育的基础。特别是土壤酸碱度, 适宜的土壤酸碱度可大幅提高其施入养分的有效性^[16], 本研究改性磷石膏有

助于适度提高酸性土壤的pH, 这可能与降低红壤中 Al^{3+} 的溶出以及改性磷石膏的“自动加石灰”效应有关^[17]。与此同时, 本研究结果还表明各改性磷石膏施用量均不同程度地增加了土壤中速效磷、速效钾、碱解氮的含量, 这也进一步表明改性磷石膏对土壤微环境的改善效应^[18-20]。此外, 在2.4节的pearson相关性结果中, 土壤中速效钾的含量水平是影响小白菜吸收氮、磷、钾, 进而促进其生长发育的关键指标, 这对改性磷石膏在调控改善土壤盐渍化、酸化等方面提供了一定的借鉴意义。

4 结论

改性磷石膏可调控酸性土壤pH, 优化土壤中养分的有效性和提高养分吸收利用效率, 进而促进农作物(小白菜)的生长发育, 特别是改性磷石膏在质量分数0.3%时的效果整体最为稳定。因此, 改性磷石膏对改善酸性土壤特性和促进农作物生长方面具有一定的推广应用价值。

[参考文献]

- [1] PÉREZ-LÓPEZ R, CASTILLO J, SARMIENTO A M, et al. Assessment of phosphogypsum impact on the salt-marshes of the Tinto River (SW Spain): Role of natural attenuation processes [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(12):2787-2796.
- [2] KWANG-HYUN B. Study on re-utilization of purified phosphogypsum for fertilizer [J]. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 2003, 40(1):25-32.
- [3] 崔荣政, 王臣, 修学峰. 2023年我国磷石膏综合利用情况及产业发展现状分析 [J]. *生态产业科学与磷氟工程*, 2024, 39(11):1-6.
- [4] CUI R Z, WANG C, XIU X F. Analysis of comprehensive utilization and industrial development status of phosphogypsum in China in 2023 [J]. *Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering*, 2024, 39(11):1-6.
- [4] 国亚非, 赵泽阳, 张正虎, 等. 磷石膏的综合利用探讨 [J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2021(4):4-7.
- [5] GUO Y F, ZHAO Z Y, ZHANG Z H, et al. Study on Comprehensive Utilization of Phosphogypsum [J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2021(4):4-7.
- [5] 木丽远, 周洪印, 黄祖志, 等. 改性磷石膏对镉铅污染土壤修复改良效果研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(11):1454-1462.
- [6] MU L Y, ZHOU H Y, HUANG Z Z, et al. Remediation of Cadmium - and Lead-contaminated Soil by Using Modified Phosphogypsum [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(11):1454-1462.
- [6] MICHALOVICZ L, MÜLLER M M L, TORMENA C A, et al. Soil chemical attributes, nutrient uptake and yield of no-till crops as affected by phosphogypsum doses and parceling in southern Brazil [J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 2019, 65(3):385-399.
- [7] 张茹, 李艳军, 刘杰, 等. 磷石膏的综合利用及有害元素处理方法 [J]. *矿产保护与利用*, 2015(2):50-54.

- ZHANG R, LI Y J, LIU J, et al. Utilization of Phosphogypsum and Treatment of the Impure Elements [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2015(2):50-54.
- [8] 卢维宏,王要芳,刘娟,等.磷石膏无害化改性及其在农田土壤改良中的应用研究进展[J].*土壤*,2023,55(4):699-707.
- LU W H, WANG Y F, LIU J, et al. Phosphogypsum (PG) harmless modification and its application in farmland soil improvement: A review [J]. *Soils*, 2023, 55(4):699-707.
- [9] 卢维宏,张乃明,张丽,等.增效肥料对设施栽培小白菜生长及土壤酶活性的影响[J].*南方农业学报*,2019,50(9):2022-2028.
- LU W H, ZHANG N M, ZHANG L, et al. Effects of synergistic fertilizer on the growth and soil enzyme activity of pakchoi in greenhouse cultivation[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(9):2022-2028.
- [10] 高珊,杨劲松,姚荣江,等.调控措施对滨海盐渍土磷素形态及作物磷素吸收的影响[J].*土壤*,2020,52(4):691-698.
- GAO S, YANG J S, YAO R J, et al. Effects of Different Management on Phosphorus Fractions in Coastal Saline Soil and Phosphorus Absorption and Utilization by Crops[J]. *Soils*, 2020, 52(4):691-698.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [12] WANG B, LIAN G Q, LEE X Q, et al. Phosphogypsum as a novel modifier for distillers grains biochar removal of phosphate from water[J]. *Chemosphere*, 2020, 238: 124684.
- [13] 赵建华,杨祥,高士浩.石膏矿物学分析及除杂研究[J].*硫酸工业*,2018(9):9-12,15.
- ZHAO J H, YANG X, GAO S H. Gypsum mineralogy analysis and impurity removal research[J]. *Sulphuric Acid Industry*, 2018 (9):9-12,15.
- [14] 张传光,白来汉,岳献荣,等.云南省主要磷石膏化学特性分析[J].*云南农业大学学报*,2012,27(5):756-762.
- ZHANG C G, BAI L H, YUE X R, et al. The Chemical Characteristics Analysis of Phosphogypsum in Yunnan Province [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2012, 27(5): 756-762.
- [15] 屈帅,李惠霞,张天一,等.钾镁互作对番茄养分吸收、积累及分配的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2023,29(5):935-948.
- QU S, LI H X, ZHANG T Y, et al. Interactive effects of potassium and magnesium on nutrient uptake, accumulation and allocation of tomato [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(5):935-948.
- [16] 张皓禹,黄志华,王娟,等.不同酸化剂对石灰性土壤pH值、磷有效性的影响[J].*中国土壤与肥料*,2019(1):145-150.
- ZHANG H Y, HUANG Z H, WANG J, et al. Effects of different acidifiers on pH and phosphorus availability in calcareous soil [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(1):145-150.
- [17] 李嘉琦,卢维宏,韩云昌,等.磷石膏改性及其在酸性土壤调控中的应用研究[J].*磷肥与复肥*,2021,36(10):16-20.
- LI J Q, LU W H, HAN Y C, et al. Study on modification of phosphogypsum and its application in acid soil regulation [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2021, 36(10):16-20.
- [18] 李彩斌,蒋寿安,刘青丽,等.生物炭不同施用量对烤烟养分与土壤理化性质的影响[J].*贵州农业科学*,2023,51(6):33-39.
- LI C B, JIANG S A, LIU Q L, et al. Effects of Different Biochar Application Amount on Nutrient Absorption of Flue-cured Tobacco and Soil Physicochemical Properties [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2023, 51(6):33-39.
- [19] 姜珊,张仲胜,李敏,等.短期生物炭添加对退化盐碱湿地土壤微生物群落结构特征影响[J].*土壤与作物*,2023,12(2):225-233.
- JIANG S, ZHANG Z S, LI M, et al. Effect of short-term biochar addition on soil microbial community structure in degraded saline-alkali wetland[J]. *Soils and Crops*, 2023, 12(2):225-233.
- [20] 周明星,樊军,王茜,等.免耕覆盖与生物炭对黑垆土团聚体稳定性和腐殖质性质的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2023,29(5):848-859.
- ZHOU M X, FAN J, WANG Q, et al. Effects of no-tillage mulching and biochar application on the stability and humus properties of black loam soil aggregate [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(5):848-859.