

磷尾矿制备的钙镁肥对叶菜类生长、产量及土壤养分含量的影响

杨大润¹, 孙玉翠¹, 余孝娜², 李 恒¹, 李莹莹¹, 吴雪怡²

(1. 云南云天化股份有限公司, 云南 昆明 650228; 2. 云南大学 资源植物研究院, 云南 昆明 650504)

[摘 要] 为探究基于磷尾矿制备的钙镁肥对叶菜类蔬菜生长、产量及土壤养分的影响, 以5种叶菜为供试作物开展田间试验研究。结果表明: 钙镁肥对各类叶菜苗期、生长初期及中期、收获期的株高最显著增长率分别为48.48%、30.61%、27.66%、32.20%; 钙镁肥对提升叶菜类作物产量具有极为显著的正向作用, 其产量范围介于48 480~131 460 kg/hm², 含1.0%腐植酸钙镁肥的增产效果最好; 增施钙镁肥处理的土壤中交换性钙、交换性镁及有机质质量分数最高可提升81.08%、51.04%、161.61%。综上, 磷尾矿制备的钙镁肥可促进叶菜类蔬菜的生长、产量及土壤养分含量提高。

[关键词] 磷尾矿; 钙镁肥; 叶菜类蔬菜; 生长; 产量; 土壤养分

[中图分类号] S147.2; TQ445 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 03-0102-07

Effects of calcium and magnesium fertilizer based on phosphorus tailings on growth, yield of leafy vegetables and soil nutrient content

YANG Darun¹, SUN Yucui¹, YU Xiaona², LI Heng¹, LI Yingying¹, WU Xueyi²

(1. Yunnan Yuntianhua Co., Ltd., Kunming 650228, China;

2. Institute of Resources and Plants, Yunnan University, Kunming 650504, China)

Abstract: In order to explore the effects of calcium and magnesium fertilizer based on phosphorus tailings on the growth, yield of leafy vegetables and soil nutrients, five kinds of leafy vegetables are used as test crops in the field. The results show that calcium and magnesium fertilizer has a positive effect on the plant height of various types of leafy vegetables, and the most significant growth rates at seedling stage, early and middle growth stages, and harvest stage are 48.48%, 30.61%, 27.66%, and 32.20%, respectively. Calcium and magnesium fertilizer has a significant positive effect on increasing the yield of leafy vegetable crops, and its yield ranges from 48 480 kg/hm² to 131 460 kg/hm², and calcium and magnesium fertilizer containing 1.0% humate has the best yield increase effect. The application of calcium and magnesium fertilizer also effectively increases the contents of exchangeable calcium, exchangeable magnesium and organic matter in the soil, the highest increase rates are 81.08%, 51.04%, 161.61%. In summary, calcium and magnesium fertilizer based on phosphorus tailings can increase the growth, yield of leafy vegetables and soil nutrient content.

Key words: phosphorus tailings; calcium and magnesium fertilizer; leafy vegetables; growth; yield; soil nutrient

0 引言

我国磷矿资源主要分布在云南、四川、贵州、湖南和湖北等地^[1], 据统计, 截至2024年, 我国磷矿储量约为37亿t, 较2023年降低1亿t。全国对磷

矿资源需求量大, 且以每年2.3%的幅度迅速增长。但由于我国磷矿品位较低, 平均品位仅为 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 17%^[2-3], 磷矿开采过程中会产生富钙镁尾矿粉; 磷矿应用前需对其进行富集, 浮选也会产生磷尾

收稿日期: 2024-12-10; 修回日期: 2025-07-20

作者简介: 杨大润(1995—), 女, 云南保山人, 工程师, 主要从事新型肥料产品开发及应用研究。

通信作者: 孙玉翠, 女, 高级工程师, 主要从事新型肥料生产工艺及产品开发与应用。

基金项目: 云南省科技厅重大科技计划项目(202202AE090034); 云南云天化股份有限公司科技项目(YTH-YF-2024009); 云南云天化股份有限公司科技项目(YTH-LYYZX-YF-2022-05)

矿。目前我国通常采用简单堆积的方式处理磷尾矿，不仅占用大量的土地资源，还造成环境污染，引发安全风险^[4-5]。因此，需要进一步加大磷尾矿综合利用技术的开发力度，使得磷化工产业逐渐向着绿色产业的方向发展。

磷尾矿可以用来生产钙镁肥料，在为各类农作物提供养分的同时，对土壤的物理性质进行调整优化，以此来促进农业增产。钙、镁是作物生长发育过程中不可缺少的重要营养元素，其在作物蛋白质合成、酶活化和光合作用等新陈代谢过程中发挥着重要作用^[6]。郑建国等^[7]采用高温分子间脱水聚合的方法，利用磷尾矿合成聚合态钙镁磷肥，结果表明磷的聚合率在80%以上，钙、镁、磷的元素有效率在90%以上；苗林平等^[8]针对湿法磷酸渣和磷尾矿难以利用的问题，提出了一种焙烧湿法磷酸渣和磷尾矿的混合物制备聚磷酸钙镁肥的策略，结果显示产品中磷、钙、镁等有效养分占总养分的比例超过85%。近年来，前人在磷尾矿制备钙镁肥的工艺方面研究较多，而对其制备的钙镁肥的效果验证研究较少。

本研究重点探究利用磷尾矿制备的钙镁肥对多种叶菜类蔬菜（如大肉包心芥菜、高山娃娃菜、结球白菜、京箭白菜及京春黄白菜）产量及土壤养分含量的影响，以验证其实际应用效果，旨在为磷尾矿制备中量元素肥料的可行性与推广应用提供坚实的数据支持，并为磷化工企业在磷尾矿的综合利用领域开辟一条新颖且具有潜力的研究方向。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试的叶菜类蔬菜作物品种有大肉包心芥菜、高山娃娃菜、结球白菜、京箭白菜、京春黄白菜。

供试土壤为砖红壤，土壤中 w (全氮)、 w (有效磷)、 w (速效钾)、 w (交换性钙)、 w (交换性镁)、pH分别为0.186%、146.3 mg/kg、464 mg/kg、3 520 mg/kg、900 mg/kg、6.6。

试验肥料：本次试验采用的磷尾矿基钙镁肥为实验室自制。通过将80%的磷尾矿与20%的草余酸进行反应活化，成功制备出1#磷尾矿基钙镁肥。此外，将20%的草余酸与不同比例（1%、3%）的褐煤反应，再与80%的磷尾矿混合反应活化，制备出2#和3#磷尾矿基钙镁肥。除此之外，18-18-18平衡水溶肥、由实验室自制。

1#、2#和3#磷尾矿基钙镁肥的具体养分含量见表1。

表 1 磷尾矿基钙镁肥养分含量

Table 1 Nutrient content of calcium and magnesium fertilizer based on phosphorus tailings

肥料产品	$w(\text{Ca})/\%$	$w(\text{Mg})/\%$	$w(\text{腐植酸})/\%$	pH
1#	15.99	6.06	0	7.56
2#	16.72	6.41	1.1	7.48
3#	17.90	6.10	1.3	7.53

1.2 试验设计

本次验证试验为大棚田间示范试验，于2022年11月—2023年1月在云南精垦农业科技有限公司基地开展。试验采用完全随机方式设计，每种作物均设4个处理，每个处理长20 m、宽5 m，面积为100 m²。不同处理均按S型取点方法取5个点定期测量株高、根长、根质量及产量等数据，每个点4株作物。每种作物试验处理设常规施肥对照(CK)，在常规施肥基础上增施1#、2#、3#钙镁肥处理（分别记为A1、A2和A3）。试验期内幼苗株高5~10 cm时追施18-18-18平衡水溶肥，施肥量30 kg/hm²；之后每隔10 d追施18-18-18的平衡型水溶肥一次，施肥量60 kg/hm²，追施2次。施肥方式为将水溶肥稀释1 000倍之后随滴灌带施于叶菜根部；其他除草、打药等管理措施所有处理组一致。

1.3 测量指标

1.3.1 生长指标

本研究选取株高、根长和根质量作为衡量植物生长发育的3个关键指标。具体测量方法如下：株高是通过使用卷尺测量植株从根部到顶部的垂直长度；根长的测量采用卷尺，测量从根茎基部至最长根尖的长度；而根质量的测定则是通过电子秤称量已清洗干净的根部。株高于每次施肥前测量一次，测产时测量一次，共计4次；测产时测量根长、根质量。

1.3.2 产量指标

产量测定方法：产量=各处理定点植株平均单株质量×每公顷种植株数（此试验大棚种植密度平均约为120 000株/hm²）。

1.3.3 土壤养分指标

采收叶菜时取不同试验处理的土壤样品，经阴干、粉碎后过0.425 mm筛网备用，分析土壤中交换性钙、交换性镁和有机质的含量，其中交换性钙和交换性镁的测定方法参考标准NY/T 1121.13—2006《土壤检测 第13部分：土壤交换性钙和镁的测定》^[9]，有机质的测定方法参考NY/T 1121.6—2006

《土壤检测 第6部分：土壤有机质的测定》^[10]。

1.4 数据处理与分析

表格数据处理使用Excel 2016、数据统计分析（单因素ANOVA分析）使用SPSS26软件，并进行显著性分析（根据邓肯多重比较分析数据的差异性，

$P<0.05$ 代表有显著差异，并使用不同字母进行标注）。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对叶菜类作物株高的影响

不同施肥处理对叶菜类作物株高的影响见表2，相对于CK株高增长情况见表3。由表2可知，

表2 各处理下各叶菜类蔬菜株高

Table 2 The height of leafy vegetables under different treatment

叶菜种类	处理	株高/cm			
		苗期	生长初期	生长中期	收获期
大肉包心芥菜	CK	4.27 ± 0.247 2a	10.90 ± 0.229 4a	22.45 ± 0.564 2a	35.90 ± 0.413 0a
	A1	5.30 ± 0.193 5b	11.28 ± 0.228 8a	22.95 ± 0.564 2a	37.80 ± 0.583 1b
	A2	5.73 ± 0.217 4b	11.98 ± 0.215 5b	23.30 ± 0.764 7a	39.15 ± 0.519 5b
	A3	6.34 ± 0.116 8c	12.83 ± 0.224 7c	24.10 ± 0.997 1a	41.30 ± 0.470 7c
高山娃娃菜	CK	9.30 ± 0.216 9a	15.06 ± 0.313 3a	25.65 ± 1.029 2a	32.55 ± 0.328 3a
	A1	12.33 ± 0.246 5b	17.58 ± 0.387 1b	29.45 ± 0.413 4b	33.45 ± 0.407 0ab
	A2	12.81 ± 0.220 9b	18.19 ± 0.309 5b	30.35 ± 0.789 0b	34.15 ± 0.466 1b
	A3	12.94 ± 0.227 2b	19.67 ± 0.337 3c	31.00 ± 0.497 4b	36.20 ± 0.426 7c
结球白菜	CK	10.55 ± 0.243 2a	19.00 ± 0.330 2a	27.30 ± 0.879 9a	32.75 ± 0.279 8a
	A1	11.88 ± 0.254 3b	22.08 ± 0.433 1b	32.75 ± 0.911 6b	33.85 ± 0.448 8ab
	A2	12.18 ± 0.250 3b	22.53 ± 0.405 2b	34.25 ± 0.920 2b	35.00 ± 0.557 3bc
	A3	13.09 ± 0.203 6c	23.96 ± 0.399 6c	34.85 ± 0.392 5b	35.15 ± 0.342 4c
京箭白菜	CK	12.18 ± 0.250 3a	22.33 ± 0.456 8a	32.60 ± 0.563 8a	39.10 ± 0.369 2a
	A1	14.08 ± 0.209 8b	25.13 ± 0.556 0b	37.50 ± 0.535 6b	41.55 ± 1.024 6b
	A2	13.91 ± 0.204 2b	24.86 ± 0.981 0b	36.65 ± 0.654 0b	42.30 ± 0.722 2b
	A3	14.49 ± 0.274 9b	26.44 ± 0.695 9b	37.25 ± 0.446 5b	42.00 ± 0.714 5b
京春黄白菜	CK	10.48 ± 0.190 9a	18.75 ± 0.513 7a	27.95 ± 0.809 4a	35.25 ± 0.561 4a
	A1	11.38 ± 0.230 4b	21.93 ± 0.549 5b	30.70 ± 0.423 6b	46.60 ± 0.563 8b
	A2	10.90 ± 0.238 4ab	19.90 ± 0.299 2a	28.85 ± 0.405 7a	45.35 ± 0.466 1b
	A3	11.10 ± 0.219 0ab	18.90 ± 0.514 3a	28.45 ± 0.478 4a	46.30 ± 0.523 7b

表3 叶菜类蔬菜株高增长情况

Table 3 The growth situation of leafy vegetables in plant height

叶菜种类	处理	对比CK株高增长率/%			
		苗期	生长初期	生长中期	收获期
大肉包心芥菜	A1	24.12	3.49	2.23	5.29
	A2	34.19	9.91	3.79	9.05
	A3	48.48	17.71	7.35	15.04
高山娃娃菜	A1	32.58	16.73	14.81	2.76
	A2	37.74	20.78	18.32	4.92
	A3	39.14	30.61	20.86	11.21
结球白菜	A1	12.61	16.21	19.96	3.36
	A2	15.45	18.58	25.46	6.87
	A3	24.08	26.11	27.66	7.33
京箭白菜	A1	15.60	12.54	15.03	6.27
	A2	14.20	11.33	12.42	8.18
	A3	18.97	18.41	14.26	7.42
京春黄白菜	A1	8.59	16.96	9.84	32.20
	A2	4.01	6.13	3.22	28.65
	A3	5.92	0.80	1.79	31.35

各作物株高随着生育期的推进均呈增加趋势；不同生育期内，施用磷尾矿基钙镁肥对叶菜类作物株高的促进效果存在差异。大肉包心芥菜，在苗期、收获期A1、A2、A3处理株高对比CK均具有显著差异，A3处理表现最佳；在生长初期，对比CK，A1处理无明显差异，而A2、A3处理则具有显著差异，A3处理表现最优；生长中期对比CK，各处理之间并未呈现显著差异。高山娃娃菜在苗期、生长初期、生长中期对比CK，A1、A2、A3处理均具显著差异，特别是在生长初期，A3处理表现最好；收获期对比CK，A1处理无明显差异，A2、A3处理则差异显著。结球白菜在苗期、生长初期、生长中期对比CK，A1、A2、A3处理均具显著差异，尤其在苗期和生长初期阶段，A3表现最为突出；在收获期与CK比较，A1处理并未展现出明显的差异，但A2和A3处理则差异显著。京箭白菜在四个生育期内，与CK相比，A1、A2、A3处理均展现出了明显的差异性。

京春黄白菜在株高方面的表现与上述 4 种作物存在显著不同，在苗期、生长初期与生长中期，与 CK 相比，仅 A1 处理表现出显著差异；而到了收获期，A1、A2、A3 处理均明显区别于对照，表现出显著的差异；结果显示，在收获期之前，增施钙镁肥对京春黄白菜株高的促进作用相对有限；然而在收获期，所有增施钙镁肥的处理均显著促进了株高的增长。

综上所述，在常规施肥基础上，增施磷尾矿基钙镁肥对叶菜类作物株高具有较为显著的促进作用，并且含有腐植酸的钙镁肥具有更加显著的促进作物地上部生长的效果。

2.2 不同施肥处理对叶菜类作物根系的影响

不同施肥处理对叶菜类作物根系的影响见表 4。由表 4 可知，不同施肥处理对各类叶菜作物根系的影响各有差异。关于作物根长的变化，并未呈现出明显的规律性，甚至存在增施钙镁肥处理的根长反而短于对照处理的情况。对比 CK，京箭白菜

各施肥处理均具有显著差异，且为正向促进作用，根长增长率在 9.69%~14.34%；大肉包心芥菜的 A3 处理根长与 CK 相比具有显著差异，根长增加率 9.20%，A2 处理无显著差异，A1 处理的根长增加率为-6.51%，具有负增长效应；结球白菜各处理无显著差异；高山娃娃菜、京春黄白菜 A1、A2、A3 处理根长增长率均为负增长。

关于叶菜根质量变化，增施磷尾矿基钙镁肥对提升叶菜类根质量具有积极作用。对比 CK，大肉包心芥菜和结球白菜这两种叶菜，A2、A3 处理均具有显著差异，且 A2 处理在促进根质量增加方面表现最为突出，根质量增加率分别为 29.58%、42.08%；而对于高山娃娃菜和京箭白菜，A1、A2、A3 处理均展现出显著的促进效果，根质量增加率分别在 43.32%~92.51%、68.15%~165.66%；至于京春黄白菜，A1 处理对其根质量的促进效果最为明显，根质量增加率 74.50%，CK、A1、A2、A3 处理之间无显著差异。

表 4 磷尾矿基钙镁肥对叶菜类蔬菜根系的影响

Table 4 Effects of calcium and magnesium fertilizer based on phosphorus tailings on the root system of leafy vegetables

叶菜种类	处理	根长/cm	根长对比 CK 增长率/%	根质量/g	根质量对比 CK 增长率/%
大肉包心芥菜	CK	13.05 ± 0.393 9ab		6.49 ± 0.276 5a	
	A1	12.20 ± 0.249 7a	-6.51	7.03 ± 0.376 8ab	8.32
	A2	13.58 ± 0.249 7bc	4.06	8.41 ± 0.408 6c	29.58
	A3	14.25 ± 0.389 8c	9.20	7.63 ± 0.323 7bc	17.57
高山娃娃菜	CK	13.45 ± 0.419 7c		4.94 ± 0.336 4a	
	A1	12.10 ± 0.323 6ab	-10.04	7.08 ± 0.497 2b	43.32
	A2	11.80 ± 0.394 7a	-12.27	7.86 ± 0.421 1b	59.11
	A3	13.05 ± 0.336 2bc	-2.97	9.51 ± 0.344 9c	92.51
结球白菜	CK	15.20 ± 0.550 6a		7.70 ± 0.443 4a	
	A1	15.20 ± 0.516 1a	0	7.83 ± 0.356 8a	1.69
	A2	14.95 ± 0.393 9a	-1.64	10.94 ± 0.356 5c	42.08
	A3	15.60 ± 0.483 4a	2.63	9.21 ± 0.330 9b	19.61
京箭白菜	CK	12.90 ± 0.298 2a		5.62 ± 0.234 9a	
	A1	14.20 ± 0.381 1b	10.08	9.45 ± 0.741 4b	68.15
	A2	14.15 ± 0.326 7b	9.69	11.22 ± 0.331 8c	99.64
	A3	14.75 ± 0.403 1b	14.34	14.93 ± 0.534 4d	165.66
京春黄白菜	CK	18.15 ± 0.563 2b		9.41 ± 0.492 3a	
	A1	13.55 ± 0.234 8a	-25.34	16.42 ± 4.585 4a	74.50
	A2	13.30 ± 0.317 1a	-26.72	10.86 ± 0.407 7a	15.41
	A3	14.00 ± 0.397 4a	-22.87	11.69 ± 0.408 6a	24.23

2.3 不同施肥处理对叶菜类作物产量的影响

磷尾矿基钙镁肥对叶类蔬菜产量的影响见表 5。由表 5 中可知，不同施肥处理对除大肉包心芥菜以外 4 种叶菜作物产量的影响呈现出显著差异。具体而言，与 CK 叶菜平均鲜质量相比，大肉包心

芥菜在 A1、A2、A3 处理下虽无显著性差异，但均优于 CK 处理，增产率稳定在 12.07%~20.67%；而高山娃娃菜、结球白菜、京箭白菜及京春黄白菜在 A1、A2、A3 处理下则表现出显著的增产效果，增产率分别高达 47.26%~75.57%、14.89%~31.96%、

87.75%~114.80%，以及29.04%~41.01%。结果表明，增施钙镁肥尤其是富含腐植酸的钙镁肥，对提升叶菜类作物地上部鲜质量具有极为显著的正向作用，其产量范围介于48 480~131 460 kg/hm²，而增产率更是从最低的12.07%跃升至最高的114.80%，平均增产率达40%以上。

表5 磷尾矿基钙镁肥对叶菜类蔬菜产量的影响

Table 5 Effects of calcium and magnesium fertilizer based on phosphorus tailings on the yield of leafy vegetables

叶菜种类	处理	平均每棵鲜质量/g	产量/ (kg·hm ⁻²)	增产 率/%
大肉包心芥菜	CK	360.50 ± 26.591 8a	43 260	
	A1	404.00 ± 29.010 8a	48 480	12.07
	A2	416.00 ± 13.661 1a	49 920	15.39
	A3	435.00 ± 30.290 3a	52 200	20.67
高山娃娃菜	CK	374.50 ± 17.164 6a	44 940	
	A1	577.50 ± 37.790 5b	69 300	54.21
	A2	551.50 ± 45.156 7b	66 180	47.26
	A3	657.50 ± 43.135 0b	78 900	75.57
结球白菜	CK	547.50 ± 17.975 7a	65 700	
	A1	629.00 ± 36.164 6ab	75 480	14.89
	A2	722.50 ± 53.121 3b	86 700	31.96
	A3	708.50 ± 17.385 3b	85 020	29.41
京箭白菜	CK	510.00 ± 19.316 4a	61 200	
	A1	973.50 ± 38.605 4b	116 820	90.88
	A2	957.50 ± 36.340 4b	114 900	87.75
	A3	1 095.50 ± 46.760 0c	131 460	114.80
京春黄白菜	CK	664.50 ± 24.917 4a	79 740	
	A1	865.50 ± 27.988 8b	103 860	30.25
	A2	857.50 ± 43.294 1b	102 900	29.04
	A3	937.00 ± 23.958 3b	112 440	41.01

2.4 不同施肥处理对土壤养分的影响

磷尾矿基钙镁肥对土壤养分的影响见表6。由表6可知，针对大肉包心芥菜，与CK相比，A2处理交换性钙下降1.34%，其他处理均在一定程度上提高了土壤交换性钙、交换性镁和有机质含量，增加率分别在0.33%~6.35%、2.70%~5.41%、0.22%~5.47%；对于高山娃娃菜，与CK相比，A3处理对有机质没有促进作用，其他处理均有效提升了土壤3种养分含量，增加率分别在1.74%~63.89%、0.88%~38.05%、28.74%~33.27%；对于结球白菜和京春黄白菜，与CK相比，各处理均具有提高土壤3种养分的效果，结球白菜土壤3种养分增加率分别在50.00%~81.08%、39.58%~51.04%、115.18%~161.61%，A3处理对结球白菜

土壤3种养分提高最明显；对于京春黄白菜，与CK相比，各处理土壤3种养分增加率分别在32.11%~43.90%、16.67%~19.79%、34.60%~67.30%；然而，对于京箭白菜，与CK相比，A3处理对土壤3种养分略有提升作用，A1、A2处理却呈现出相反的趋势，有效钙、有效镁、有机质养分均有所下降，原因可能是增施钙镁肥后，京箭白菜对钙镁的吸收能力增强，从而提高了钙、镁及有机质的利用效率，导致土壤中残留的有效成分降低。综上所述，增施钙镁肥对于提升土壤中交换性钙、交换性镁及有机质含量具有积极作用，同时也在一定程度上提高了土壤的肥力水平。

表6 磷尾矿基钙镁肥对土壤养分的影响

Table 6 Effects of calcium and magnesium fertilizer based on phosphorus tailings on soil nutrients

叶菜种类	处理	w(交换性钙)/ (mg·kg ⁻¹)	对比CK 增加/ %	w(交换性镁)/ (mg·kg ⁻¹)	对比CK 增加/ %	w(有机质)/ (g·kg ⁻¹)	对比CK 增加/ %
大肉包心芥菜	CK	5 980		1 332		45.7	
	A1	6 000	0.33	1 404	5.41	47.4	3.72
	A2	5 900	-1.34	1 380	3.60	45.8	0.22
	A3	6 360	6.35	1 368	2.70	48.2	5.47
高山娃娃菜	CK	5 760		1 356		50.8	
	A1	9 440	63.89	1 872	38.05	65.4	28.74
	A2	7 680	33.33	1 596	17.70	67.7	33.27
	A3	5 860	1.74	1 368	0.88	45.6	-10.24
结球白菜	CK	4 440		1 152		22.4	
	A1	6 660	50.00	1 608	39.58	48.2	115.18
	A2	6 760	52.25	1 632	41.67	49.3	120.09
	A3	8 040	81.08	1 740	51.04	58.6	161.61
京箭白菜	CK	6 760		1 584		51.4	
	A1	6 320	-6.51	1 464	-7.58	44.6	-13.23
	A2	6 400	-5.33	1 452	-8.33	49.2	-4.28
	A3	6 920	2.37	1 680	6.06	52.2	1.56
京春黄白菜	CK	4 920		1 152		36.7	
	A1	7 080	43.90	1 380	19.79	55.8	52.04
	A2	6 900	40.24	1 356	17.71	61.4	67.30
	A3	6 500	32.11	1 344	16.67	49.4	34.60

3 讨论

3.1 不同施肥处理对叶菜蔬菜生长及产量的影响

相关研究表明，增施活化褐煤腐植酸能显著提升油菜的干鲜质量、根系活力、品质及氮肥利用率，其效果极为显著^[11]。腐植酸具有活化土壤中各类养分，特别是中微量元素的能力，因此，施用腐植酸肥料对洋葱产量和品质的提升作用也极为明显^[12]。叶面喷施钙镁肥可显著提高甘蓝球的

横径、纵径和产量^[13]。施用硫酸钾钙镁肥能显著提高叶菜的地上部鲜质量、茎粗和根质量,同时增产提质效果也极为显著^[14]。

本研究增施钙镁肥及腐植酸钙镁肥对各类白菜作物的株高产生了不同程度的积极促进作用,具体表现为:苗期株高最高增长率达 48.48%,生长初期为 30.61%,生长中期为 27.66%,收获期则为 32.20%。此外,各施肥处理对叶菜作物根系的影响不同,作物根长并未展现出明显的规律性趋势。就叶菜根质量变化而言,增施磷尾矿基中量元素肥显著提升了叶菜类根质量,显著性处理的根质量增加均超过 30%。而增施钙镁肥对叶菜类作物产量具有极其显著的正向效应,其产量范围介于 48 480 kg/hm² 至 131 460 kg/hm² 之间。综上所述,利用钙镁元素与腐植酸协同制备的中量元素肥料,不仅有效促进了叶菜类作物的生长,还显著提高了其产量。本研究通过增施钙镁肥及含腐植酸的钙镁肥,促进了叶菜类作物生长与产量提升,这一结论与前人的研究成果相吻合,尤其是含腐植酸钙镁肥的表现更加突出。

3.2 不同施肥处理对土壤养分的影响

相关研究表明硫酸钾钙镁肥该肥料施入叶菜土壤后,还能提高土壤有机质、交换性钙和交换性镁的含量^[14],施用钙镁肥能显著提高水稻土壤交换性钙含量^[15]。施钙可以增加花生土壤中水溶性钙的含量,使其保持较高交换性钙的水平,同时促进根系对磷的利用以及镁的吸收^[16]。本研究结果表明,针对叶菜类作物,施加自制的钙镁肥以及腐植酸钙镁肥显著提升了土壤中交换性钙、交换性镁以及有机质的质量分数,其中最高增幅分别达到 81.08%、51.04% 和 161.61%,进一步证明了钙镁肥在增强土壤交换性钙、交换性镁及有机质含量方面的积极作用,并有助于提升土壤的肥力水平,和前人研究成果一致。

4 结论

本研究以磷尾矿为主要原料,采用萃余磷酸活化制备钙镁肥或者采用萃余酸部分活化褐煤后再和磷尾矿反应制备含腐植酸钙镁肥,制备的 3 种肥料在 5 种叶菜类蔬菜上完成了效果评价。结果表明,增施磷尾矿制备的钙镁中量元素肥及含腐植酸钙镁中量元素肥对各类白菜作物的株高具有不同程度的积极促进作用,苗期、生长初期、生长中期、收获期 4 个不同生育期最高增长率分别高达 48.48%、30.61%、27.66%、32.20%;增施钙镁肥尤其是含

腐植酸钙镁肥,对提升叶菜类作物产量具有极为显著的正向作用,其产量范围介于 48 480 kg/hm² 至 131 460 kg/hm² 之间;增施钙镁肥对于提升土壤中交换性钙、交换性镁及有机质含量具有积极作用,同时也在一定程度上提高了土壤的肥力水平。

针对磷化工企业,提升磷尾矿的综合利用效率已成为当务之急。在这一背景下,磷尾矿中钙镁元素的回收研究^[17],特别是关于制备磷酸铵镁肥^[18]、碱式碳酸镁^[19]、氢氧化镁^[20-21]、硫酸镁^[22]、醋酸钙镁^[23]、聚磷酸钙镁^[24]等肥料或化工产品、工艺参数的探索,始终占据着近期行业研究的显著位置。以磷尾矿为核心原料制备中量元素肥料,已成为磷化工及肥料企业竞相采纳的策略。本研究表明,利用磷尾矿制备富含中量元素的肥料,不仅技术上可行,效果也较为显著,更在经济与环保层面具备合理性。

【参考文献】

- [1] 何宾宾,姜威,龚丽.中低品位磷矿绿色全量资源化利用[J].磷肥与复肥,2020,35(4):28-29.
HE B B, JIANG W, GONG L. Green full-scale resource utilization of medium-low grade phosphate rock [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35(4): 28-29.
- [2] 焦森,郑厚义,任永健,等.中国主要农用矿产资源安全保障战略研究[J].地球学报,2021,42(2):279-285.
JIAO S, ZHENG H Y, REN Y J, et al. A Study of the Security Strategy of Main Agricultural Mineral Resources in China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(2): 279-285.
- [3] 肖晨星,高璐阳.磷矿伴生资源的利用[J].磷肥与复肥,2022,37(5):27-30,46.
XIAO C X, GAO L Y. Utilization of associated phosphate mineral resources [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2022, 37(5): 27-30, 46.
- [4] 张家鑫,潘益,夏琰,等.磷尾矿副产物制备改性氢氧化镁的研究[J].武汉工程大学学报,2020,42(1):33-37.
ZHANG J X, PAN Y, XIA Y, et al. Preparation of Modified Magnesium Hydroxide from By-products of Phosphorus Tailings [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2020, 42(1): 33-37.
- [5] 朱志伟,唐远,李智力,等.电炉法制磷过程热力学及动力学分析[J].过程工程学报,2022,22(7):927-934.
ZHU Z W, TANG Y, LI Z L, et al. Thermodynamics and kinetics analysis of phosphorus production by electric-furnace method [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022, 22(7): 927-934.
- [6] 林敏霞,张晓东,邱美欢,等.植物镁素生理功能及镁素营养诊断和施用[J].热带农业科学,2016,36(3):39-43.
LIN M X, ZHANG X D, QIU M H, et al. Physiological Function, Nutrition Diagnosis and Application of the Magnesium Element on Plant [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2016, 36

- (3): 39-43.
- [7] 郑建国,于南树,刘永秀,等. 磷酸活化磷尾矿制取聚合态钙镁磷肥的工艺条件研究[J]. 无机盐工业,2020,52(2): 43-46.
ZHENG J G, YU N S, LIU Y X, et al. Study on technological conditions of polymeric calcium magnesium phosphate fertilizer from phosphoric acid activated phosphate tailings [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020, 52(2): 43-46.
- [8] 苗林平,许森,王辛龙,等. 聚磷酸钙镁的制备研究[J]. 无机盐工业, 2022, 54(9): 63-68.
MIAO L P, XU M, WANG X L, et al. Study on preparation of calcium magnesium polyphosphate [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54(9): 63-68.
- [9] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第13部分: 土壤交换性钙和镁的测定: NY/T 1121.13—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [10] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第6部分: 土壤有机质的测定: NY/T 1121.6—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [11] 范仲卿,苏秀荣,郭新送,等. 不同活化方式腐植酸对油菜生长特性的影响[J]. 腐植酸, 2019(1): 32-36.
FAN Z Q, SUN X R, GUO X S, et al. Effects of Different Activation Methods of Humic Acid on the Growth Characteristics of Rape [J]. Humic Acid, 2019(1): 32-36.
- [12] 何生丽,徐万里,马海刚,等. 施用腐植酸肥料对洋葱产量和品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(6): 1178-1181.
HE S L, XU W L, MA H G, et al. The Impact of Humic Acid Fertilizer on Yield and Quality of Onion [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47(6): 1178-1181.
- [13] 周晓琳,李洪杰,赵同凯,等. 叶面喷施钙镁肥对结球甘蓝养分积累及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2015, 47(9): 98-100.
ZHOU X L, LI H J, ZHAO T K, et al. Effects of Foliar Application of Calcium and Magnesium Fertilizers on Nutrient Accumulation and Yield of Cabbage [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2015, 47(9): 98-100.
- [14] 吴宇佳,张冬明,吉清妹,等. 硫酸钾钙镁肥在叶菜上施用效果研究[J]. 湖南农业科学, 2021(3): 45-47.
WU Y J, ZHANG D M, JI Q S, et al. Effect of K-Ca-Mg Complex Fertilizer on Leafy Vegetables [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2021(3): 45-47.
- [15] 韩科峰,陈开俊,马庆旭,等. 钙镁肥对水稻和小龙虾产量、品质及土壤养分状况的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 346-351.
HAN K F, CHEN K J, MA Q X, et al. Effects of calcium magnesium fertilizer on yield and quality of rice and crayfish Effects of soil nutrient status [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(2): 346-351.
- [16] 周卫,林葆,朱海舟. 硝酸钙对花生养分吸收和土壤养分状况的影响[J]. 土壤通报, 1995, 26(6): 279-282.
- [17] 邓杰,毛益林,张俊辉,等. 煅烧-铵盐两步浸出法对磷矿浮选尾矿钙镁回收研究[J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(1): 39-47.
DENG J, MAO Y L, ZHANG J H, et al. Recovery of calcium and magnesium from phosphate rock flotation tailings by calcination-ammonium salt two-step leaching process [J]. Industrial Minerals & Processing, 2023, 52(1): 39-47.
- [18] 周坤,唐云,张群,等. 磷尾矿制备磷酸铵镁试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(4): 31-33.
ZHOU K, TANG Y, ZHANG Q, et al. Experimental Study on the Preparation of Ammonium Magnesium Phosphate from Phosphorus Tailings [J]. Mining Research and Development, 2015, 35(4): 31-33.
- [19] 谢娟,刘松林,陶绍程,等. 高镁磷尾矿碳化法制备碱式碳酸镁研究[J]. 无机盐工业, 2021, 53(12): 135-139.
XIE J, LIU S L, TAO S C, et al. Study on preparation of magnesium carbonate hydroxide by carbonization method from high-Mg phosphate tailings [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2021, 53(12): 135-139.
- [20] 张家鑫,潘益,夏琰,等. 磷尾矿制备氢氧化镁阻燃剂的试验研究[J]. 非金属矿, 2020, 43(3): 64-68.
ZHANG J X, PAN Y, XIA Y, et al. Preparation of Magnesium Hydroxide Flame Retardant from Phosphorus Tailings [J]. Non-Metallic Mines, 2020, 43(3): 64-68.
- [21] 张萍花,张春丽,王红艳,等. 硝酸酸解磷尾矿制备氢氧化镁工艺条件研究[J]. 现代化工, 2017, 37(5): 102-105.
ZHANG P H, ZHANG C L, WANG H Y, et al. Study on the process conditions to produce magnesium hydroxide from phosphate tailings by using nitric acid leaching [J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(5): 102-105.
- [22] 马会娟,杨成,潘志权,等. 磷尾矿制备硫酸镁试验研究[J]. 非金属矿, 2017, 40(1): 93-95.
MA H J, YANG C, PAN Z Q, et al. Experimental Study on the Preparation of Magnesium Sulfate from Phosphate Tailings [J]. Non-Metallic Mines, 2017, 40(1): 93-95.
- [23] 李梦雨,汤建伟,刘咏,等. 醋酸酸解磷尾矿制备醋酸钙镁融雪剂工艺研究[J]. 无机盐工业, 2024, 56(1): 73-80.
LI M Y, TANG J W, LIU Y, et al. Study on preparation process of calcium magnesium acetate snowmelt agent from phosphorous tailings by acetic acid hydrolysis [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024, 56(1): 73-80.
- [24] 郑建国,于南树,刘永秀,等. 利用磷尾矿合成新型缓释肥料聚磷酸钙镁的试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2019, 48(7): 64-67, 71.
ZHENG J G, YU N S, LIU Y X, et al. Experimental study on synthesis of new slow release fertilizer calcium magnesium polyphosphate [J]. Industrial Minerals & Processing, 2019, 48(7): 64-67, 71.