

不同磷肥对附子农艺性状、产量以及品质的影响研究

闫鹏东¹,付 盟¹,韦洁敏²,张国彦³,崔浪军¹

(1. 西北濒危药材资源开发国家工程实验室/药用资源与天然药物化学教育部重点实验室/陕西师范大学 生命科学学院,陕西 西安 710119;2. 延安大学 生命科学学院,陕西延安 716000;3. 城固县群利中药材合作社,陕西 汉中 723200)

摘 要:以汉中道地产区附子为研究对象,在相同状况下对其分别施入磷酸二氢钾、过磷酸钙、钙镁磷肥三种磷肥,并且每种磷肥设置低、中、高三个施肥水平。收获不同处理的附子后,测量其农艺性状、产量,可溶性蛋白含量,多糖含量以及生物碱含量,采用 Duncan 法、Dunnett 法进行差异分析,最后以主成分分析对不同处理效果进行综合评价。结果显示在不同施肥处理后,附子的相关农艺性状以低、中水平的钙镁磷肥处理效果好,产量在高水平磷酸二氢钾处理下最高,可溶性蛋白在低水平磷酸二氢钾处理下含量最多,多糖含量在磷酸二氢钾处理下整体较高。生物碱方面,施用三种磷肥后,与对照相比,附子总生物碱含量和总单酯型生物碱含量增加,总双酯型生物碱含量降低,其中总生物碱和总单酯型生物碱含量分别以中、低水平钙镁磷肥处理后增加最多,而总双酯型生物碱含量以低、中水平钙镁磷肥处理后减少最少。最后通过主成分综合评价分析,中、低水平钙镁磷肥处理后效果最好,不施磷肥的空白组排名最差。综合以上,附子施磷肥时,应首选钙镁磷肥,并以中水平的施肥量最好,低水平次之。

关键词:附子;磷肥;农艺性状;产量;品质;生物碱

中图分类号:S567.239 **文献标识码:**A **文章编号:**0488-5368(2022)02-0016-07

Effects of Different Phosphate Fertilizers on Agronomic Characters, Yield and Quality of *Aconitum carmichaeli* Debx

YAN Pengdong, FU Meng, WEI Jiemin, ZHANG Guoyan, CUI Langjun

(1. National Engineering Laboratory for Resource Development of Endangered Crude Drugs in Northwest China/ The Key Laboratory of Medicinal Resources and Natural Pharmaceutical Chemistry, The Ministry of Education/College of Life Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China; 2. School of Life Science, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China; 3. Qunli Traditional Chinese Medicinal Materials Cooperative of Chenggu, Hanzhong 723200, China)

Abstract: The genuine Chinese medicinal materials *Aconitum carmichaeli* Debx in Hanzhong production area was taken as object, three kinds of phosphate fertilizers, including potassium dihydrogen phosphate, calcium magnesium phosphate and calcium superphosphate, were applied under the same condition, and three fertilization levels of high, medium and low were set up for each phosphate fertilizer. After harvest under different treatments, the cultivars' agronomic characters, yield, and contents of soluble protein, polysaccharide and alkaloid in the lateral roots were determined. Then the difference analysis and principal component analysis were carried out. Under fertilization application, the agronomic characters of *A. carmichaeli* in both low and medium calcium magnesium phosphate levels showed bet-

收稿日期:2021-02-22 修回日期:2021-03-10

基金项目:国家科技部科技惠民计划(2012GS610102);中央高校创新团队项目(GK202001006);陕西省重点研发项目(2019ZDLSF04-01-01);陕西省重点研发计划(S2020-YF-YBSF-1029)。

第一作者简介:闫鹏东(1996-),男,甘肃定西人,硕士生,主要从事药用植物栽培方面的研究。

通信作者:崔浪军。

ter than other groups. Among all the groups, the yield and the soluble protein content were the highest in the high and low level of potassium dihydrogen phosphate application, respectively, while the polysaccharide content was higher under all potassium dihydrogen phosphate groups than other ones. Compared to the control group, both the total alkaloid content and total monoester alkaloid content increased, but the total diester alkaloid content decreased. At low and medium levels of calcium magnesium phosphate fertilizers, the increments of both the total alkaloid and total monoester alkaloid contents were the highest, and the decrease of total diester alkaloid content was the least compared to the other treatments. As a whole, based on the comprehensive evaluation of principal components, the treatments at medium and low levels of calcium magnesium phosphate fertilizer were the highest, and the blank group without phosphate fertilizer was the lowest. Combined with difference analysis and principal component comprehensive evaluation analysis, the medium level of calcium magnesium phosphate fertilizer should be the first choice when phosphate fertilizer was applied to *A. carmichaeli*, it was followed by the low level, while the high level should not be chosen.

Key words: *Aconitum carmichaeli* Debx; Phosphate fertilizer; Agronomic characters; Yield; Quality; Alkaloid

附子是毛茛科植物乌头 (*Aconitum carmichaeli* Debx.) 的子根, 是我国著名的传统大宗中药材之一。附子始载于《神农本草经》, 被誉为“回阳救逆第一品药”。附子因其具有抗炎、镇痛、强心、抗心律失常、降血糖、抗癌、免疫抑制等药理作用^[1], 被广泛用于医药、食疗行业。随着近年来我国中医药行业的升温, 以及附子的相关药理学研究的深入, 市场对附子的需求量逐步增加, 全国附子的种植面积也随之增加。磷是植物生长和繁殖过程中所必需的基本营养元素之一, 对植物的生长发育、产量形成、品质改善具有重要意义^[2, 3]。磷肥包括磷酸二氢钾、过磷酸钙、钙镁磷肥等多种, 不同的磷肥对不同的作物产量和品质影响不同^[4, 5]。磷肥施入土壤, 经溶解和水解作用, 以不同形式的磷酸离子存在, 易被土壤吸附、固持, 加之一些土壤微生物将磷肥转化为作物不易吸收的有机形式, 使磷肥在土壤中表现为低利用性, 因此在生产实践中常投入过量磷肥。过量的使用磷肥不仅造成肥料肥效降低、作物收益减少、作物品质下降等问题, 还引起水土安全隐患^[6, 7]。因此农业生产中, 需要根据作物种类科学选择合适的磷肥以及合适的施用量。

目前附子以陕西、四川和云南等地为主产地, 经笔者走访, 当地药农在附子栽培过程中大量使用磷肥, 但施用的磷肥种类和效果各异。科学选择磷肥在最大可能提高附子产量与品质的同时, 对于降低磷肥的施用量、保护水土安全意义重大。而目前

关于附子对磷肥种类的偏好和用量上缺乏系统研究。基于此, 本研究在盆栽条件下, 研究了三种磷肥在不同施肥水平下对附子产量、农艺性状以及品质的影响, 以期对附子合理施加磷肥提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试附子种质: 试验前一周自附子道地产区汉中采挖附子种根, 挑选无焦巴、霉烂、锄伤、水渍及缺芽的大小均一的二级种根用于试验。种根经形态学鉴定及薄层色谱鉴定^[8]为 *A. carmichaeli* Debx. 的子根。

主要试验试剂: 甲醇、乙腈、乙酸铵、甲酸均购于美国 Fisher Chemical, 生物碱对照品均购于成都曼斯特生物科技有限公司, 磷酸二氢钾 ($P_2O_5 = 52\%$) 购于什邡华蓉科技有限责任公司, 过磷酸钙 ($P_2O_5 = 18\%$) 购于山东科达化肥有限公司, 钙镁磷肥 ($P_2O_5 = 17\%$) 购于广西鹿寨化肥有限责任公司, 碳酸氢铵、硫酸钾、以及其余试剂均购于天津天利化学试剂有限公司。

主要试验仪器: 岛津 LC-2030 高效液相色谱仪 (日本岛津株式会社), Tecan Infinite®-reg F50 酶标仪 (上海帝肯贸易有限公司)。

1.2 试验设计

2017 年 10 月在陕西师范大学长安校区试验田进行盆栽试验。首先, 将除去草根、石头等杂物

并充分搅拌均匀的中性壤土装入直径 35 cm、高 40 cm 的塑料盆中,共装 100 盆。再将所有盆施入等量的氮肥 (NH_4HCO_3 : 21.33 g 和钾肥 (K_2SO_4 : 2.097 g)。随后将这些盆随机分为 10

组,每组 10 个重复,随机选取一组作为不施任何磷肥的空白对照组,剩余 9 组以 P_2O_5 含量为基准按照表 1 方案进行施肥处理。

表 1 磷肥试验方案

磷肥种类	空白	磷酸二氢钾				过磷酸钙			钙镁磷肥		
施肥水平	零	低	中	高	低	中	高	低	中	高	
P ₂ O ₅ 含量(g/盆)	0	1.63	3.26	4.89	1.63	3.26	4.89	1.63	3.26	4.89	
施肥量(g/盆)	0	3.13	6.27	9.40	9.06	18.11	27.17	9.52	19.05	28.58	
处理编号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

1.3 农艺性状测定

所有附子于 2018 年 10 月 15 日采挖。采挖前,量取附子株高和茎粗,采挖后统计每个植株的附子个数,将附子洗净、晾干后,测量其最大附子直径、最小附子直径、最大附子重量和最小附子重量。

1.4 附子产量、可溶性蛋白含量、多糖含量测定

统计完附子农艺性状后,随机取 4 个植株的附子,放置于 60 °C 的烘箱中烘干至恒重,称量干重并计算出每株产量。随后将干燥后的附子粉碎过 100 目筛,搅拌均匀,取适量粉末用考马斯亮蓝法^[9]测定其可溶性蛋白含量,同时取部分粉末用蒽酮—硫酸法^[10]测定其多糖含量,剩余粉末在室温下保存备用。

1.5 附子生物碱测定

采用高效液相色谱法(HPLC)测定生物碱含量。

1.5.1 液相色谱条件 色谱柱为 Venusil XBP C18 (L),规格为 4.6 mm×250 mm×5 μm。

流动相 A 液为含 0.1%甲酸的 2 mmol/L 乙酸铵溶液,B 液为乙腈。

洗脱程序:柱温 35 °C;流速 1 mL/min;进样量 10 μL;梯度程序为 0 min 时 0%B 液,3 min 时 8%B 液,10 min 时 20%B 液,15 min 时 25%B 液,30 min 时 50%B 液。

1.5.2 对照品制备 精密称取盐酸多巴胺、去甲猪毛菜碱、宋果灵、多根乌头碱、棍掌碱、塔拉萨敏、苯甲酰新乌头原碱、苯甲酰乌头原碱、苯甲酰次乌头原碱、新乌头碱、乌头碱、次乌头碱这 12 种标准品,分别置于 25 mL 容量瓶中,加 0.05 mol/L 盐酸溶液定容至 25 mL,配制成浓度为 0.5 mg/ml 的标准品对照溶液。取上述 12 种对照品溶液各 1 mL 至 25 mL 量瓶中,加 0.05 mol/L 盐酸溶液定

容至 25 mL,得混合对照品贮备液。

1.5.3 供试品制备 将附子干燥、粉碎、过 100 目筛后混匀。精密称取附子粉末 1.0 g,加入 5 mL 0.05 mol/L 盐酸溶液,摇匀,超声 30 min,于 3 000 r/min 离心 10 min。精密量取上清液 0.5 mL,用甲醇定容至 2.5 mL,用 0.22 μm 微孔滤膜过滤,即得供试品溶液。

1.5.4 建立标准曲线 取对照品储备液适量,用色谱甲醇稀释成不同浓度梯度的对照品溶液,在拟定的 HPLC 条件下测定。以待测物的质量浓度为横坐标 X,待测物的峰面积为纵坐标 Y,绘制标准曲线,计算各生物碱回归方程及其相关系数。

1.5.5 方法学验证 精密度试验、稳定性试验、重复性试验、加样回收率试验参考唐进法文章^[11]进行验证。

1.6 数据分析方法

采用 Excel 2019、SPSS 23、GraphPad Prism 8 进行组间差异分析,综合评价分析。

2 结果与分析

2.1 附子农艺性状结果

表 2 为不同处理下的附子农艺性状。从表 2 中可以看出,茎粗、单株附子个数、最小附子直径在各处理下虽有变化但彼此间无显著差异($P > 0.05$)。与对照组相比,株高在低水平钙镁磷肥处理下显著增长($P < 0.05$),其余处理均无显著变化;最大附子重量在低、中水平钙镁磷肥处理下增加最多,但与对照组相比无显著差异;最大附子直径在中水平钙镁磷肥处理下最大,低水平钙镁磷肥处理次之,但与对照组相比均无显著差异。最小附子重量在施肥后全部减少,以中水平钙镁磷肥处理下减少的最少,且与对照组相比无显著差异,其余处理与对照相比均显著减少。

表 2 不同处理下的附子农艺性状

处理 编号	株高 /cm	茎粗 /cm	单株附子个数	最大附子重量 /g	最大附子直径 /cm	最小附子重量 /g	最小附子直径 /cm
0	86.20bcd	0.66a	8a	21.90ab	3.33abcd	4.83a	1.60a
1	81.80bcd	0.69a	9a	13.47cd	3.17bcd	2.07b	1.70a
2	82.85bcd	0.86a	8a	18.91bcd	3.17bcd	2.58b	1.77a
3	99.38ab	0.69a	12a	21.45abc	3.73ab	2.43b	1.90a
4	72.12cd	0.88a	8a	11.96d	2.80cd	1.88b	1.70a
5	91.15abc	0.78a	9a	18.36bcd	3.63abc	1.54b	1.57a
6	69.45d	0.53a	8a	12.91d	2.67d	2.67b	1.47a
7	108.69a	0.81a	11a	26.95a	3.90ab	2.01b	1.13a
8	89.59bc	0.87a	10a	28.37a	4.10a	3.18ab	1.27a
9	82.42bcd	0.92a	8a	13.91cd	3.07bcd	1.57b	1.13a

注:差异检验为 Duncan 法,同列数据不同小写字母表示同一指标在不同处理间相比差异显著($P<0.05$)。

2.2 附子产量、可溶性蛋白含量、多糖含量结果

图 1 为不同处理下的附子产量、可溶性蛋白含量和多糖含量。在产量方面,高水平磷酸二氢钾处理下产量最高,中水平钙镁磷肥产量次之,两者与空白对照组相比均显著增加。在低水平过磷酸钙处理下产量最低,高水平钙镁磷肥处理次之,与对照组相比均极显著减少($P<0.01$)。在可溶性蛋白含量方

面,与对照组相比其在所有处理下均增加,除高水平磷酸二氢钾、高水平过磷酸钙处理无显著差异外,其余处理都为显著增加,且以低水平磷酸二氢钾处理增加最多。在附子多糖含量方面,与对照组相比低、中、高水平磷酸二氢钾处理的附子多糖含量均为极显著增加,其余处理均有减少,其中以高水平钙镁磷肥处理减少最多,为极显著减少。

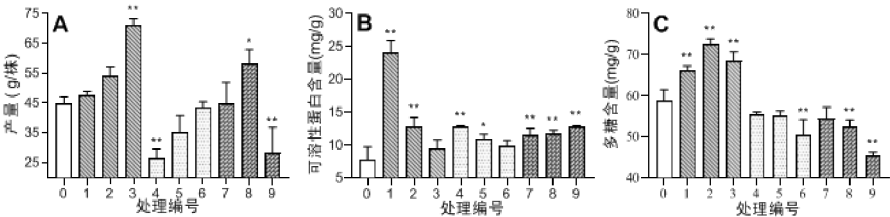


图 1 不同处理下的附子产量(A)、可溶性蛋白含量(B)、多糖含量(C)

注:差异检验为 Dunnett 法,“*”表示各指标在不同处理与空白对照组相比差异显著($P<0.05$),“**”表示为差异极显著($P<0.01$)。

2.3 附子生物碱含量结果

2.3.1 附子生物碱标准曲线与液相色谱方法学验证结果 附子各生物碱标准曲线回归方程及其相关系数结果见表 3。

方法学验证结果见表 3,其中精密度试验结果显示 12 种生物碱精密度 RSD 在 1.05%~3.99%

之间,稳定性试验 RSD 在 1.38%~4.89%之间,重复性试验 RSD 在 1.38%~4.23%之间,加样回收率试验回收率在 97.64%~101.75%之间,RSD 在 1.01%~4.53%之间,这些表明该方法精密度良好,重复性良好,且供试品溶液在在 24 h 内基本稳定。

表 3 生物碱含量回归方程、相关系数以及方法学验证

生物碱	回归方程	R ²	精密度 RSD%	稳定性 RSD%	重复性 RSD%	加样回收率 /%	回收率 RSD%
盐酸多巴胺	Y=764.02X+12 529	0.999	1.37	1.80	1.61	98.55	3.71
去甲猪毛菜碱	Y=122.31X-2 120.5	0.998	3.74	1.65	4.17	97.64	3.61
宋果灵	Y=273.6X-17 901	0.997	3.50	3.71	1.82	100.42	2.22
多根乌头碱	Y=3.8845X+4279.8	0.997	1.86	3.15	1.41	99.08	4.31
棍掌碱	Y=40.29X-2 299.9	0.991	3.19	1.38	1.38	101.37	3.68
塔拉萨敏	Y=0.8309X-2 004.6	0.998	1.05	2.95	2.44	98.71	4.06
苯甲酰新乌头原碱	Y=996.71X-704	0.999	3.99	3.07	3.60	99.21	3.08
苯甲酰乌头原碱	Y=769.93X-16544	0.999	3.04	1.92	2.53	100.05	4.53
苯甲酰次乌头原碱	Y=1 432.8X-2585	0.999	2.66	4.41	4.23	101.75	2.88
新乌头碱	Y=1 441.1X-55 444	0.999	2.31	3.78	2.90	97.86	1.01
乌头碱	Y=805.59X-41 477	0.995	1.33	4.89	3.87	99.46	2.15
次乌头碱	Y=1 050.5X-149 026	0.999	3.54	4.29	1.72	99.76	1.98

2.3.2 附子生物碱含量结果 表 4 为不同处理下的各种生物碱的含量。与对照组相比,其中盐酸多巴胺在处理全部显著增加,且以低水平钙镁磷肥处理增加最多,高水平磷酸二氢钾处理次之;去甲猪毛菜碱除在中水平磷酸二氢钾处理略有减少、高水平钙镁磷肥处理显著减少外,其余处理下均增加,且在低、中水平钙镁磷肥处理下显著增长,并以中水平钙镁磷肥处理增加最多;宋果灵则在处理后全部显著降低,其中以中水平磷酸二氢钾、低、中水平钙镁磷肥处理降低最少;多根乌头碱在处理除高水平磷酸二氢钾轻微增长外,其余皆为显著增加,且以中水平钙镁磷肥、高水平过磷酸钙处理下增加最多;棍掌碱在低、中水平磷酸二氢钾处理下降低,其余处理下均增加,其中低、高水平过磷酸钙、低水平钙镁磷肥处理显著增加;塔拉萨敏在处理只有中水平过磷酸钙、低、中水平钙镁磷肥略有增加,其余均为减少,但整体无显著差异;苯甲酰新乌头原碱除在低、中水平磷酸二氢钾处理下显著减少外,其余处理下均显著增加,以低水平钙镁磷肥增加最多;苯甲酰乌头原碱除在低、中水平磷酸

二氢钾处理下显著增加外,其余处理下变化不大;苯甲酰次乌头原碱在处理均显著增加,以中水平钙镁磷肥处理增加最多,低水平钙镁磷肥次之;新乌头碱在在低、中水平钙镁磷肥处理下增加最多,高水平钙镁磷肥处理下减少最多,但整体上均无显著差异;乌头碱在中水平钙镁磷肥处理下显著增加,其余处理均减少,其中在高水平过磷酸钙、高水平钙镁磷肥、中水平磷酸二氢钾处理下显著减少;次乌头碱除在低、中水平钙镁磷肥处理后无显著变化外,其余处理均显著降低,并以高水平钙镁磷肥减少最多。

整体来看,总双酯型生物碱在处理,除高水平钙镁磷肥显著减少外,其余处理下虽有所减少,但都无显著差异,并以中、低水平钙镁磷肥处理减少最少;总单酯型生物碱在处理均上升,除低水平磷酸二氢钾无显著差异外,其余均显著增加,其中以低水平钙镁磷肥增加最多;总生物碱在处理均有所增长,其中中水平钙镁磷肥、低水平过磷酸钙、低水平钙镁磷肥、高水平过磷酸钙处理下显著增加,其余处理无显著差异。

表 4 不同处理下的附子生物碱含量

(mg/g)

处理 编号	盐酸多 巴胺	去甲猪 毛菜碱	宋果 灵	多根乌 头碱	棍掌 碱	塔拉 萨敏	苯甲酰 乌头 原碱	苯甲 酰乌 头原碱	苯甲酰 次乌头 原碱	新乌 头碱	乌头 碱	次乌 头碱	总双 脂型 生物碱	总单脂 型生 物碱	总生 物碱	苯甲酰 新乌头 原碱
0	0.548 d	78.557 cd	2.639 a	14.107 b	39.473 cde	6.778 a	0.101 cd	0.101 cd	0.213 e	2.382 ab	1.101 b	3.089 a	6.572 a	0.459 b	149.133 c	0.146 c
1	1.150 a	83.576 bcd	1.349 b	22.601 a	33.760 e	6.741 a	0.208 b	0.208 b	0.292 d	2.357 ab	1.074 bc	2.598 b	6.030 ab	0.539 b	155.746 c	0.038 d
2	0.870 b	76.358 d	1.451 b	25.462 a	37.002 de	6.662 a	0.286 a	0.286 a	0.338 bc	2.335 ab	0.891 cd	2.441 bc	5.666 ab	0.703 a	154.174 c	0.080 d
3	1.174 a	84.584 bcd	0.822 b	14.725 b	43.255 abcd	6.650 a	0.101 cd	0.101 cd	0.343 bc	2.296 ab	0.941 bcd	2.372 bc	5.610 ab	0.653 a	157.473 bc	0.209 ab
4	1.112 a	87.946 bc	1.126 b	25.372 a	50.800 a	6.698 a	0.111 cd	0.111 cd	0.375 ab	2.525 ab	1.033 bc	2.632 b	6.189 ab	0.723 a	179.966 ab	0.237 ab
5	0.975 b	80.690 cd	0.928 b	24.294 a	44.646 abc	6.942 a	0.103 cd	0.103 cd	0.367 ab	2.244 ab	0.938 bcd	2.321 bc	5.504 ab	0.685 a	164.663 abc	0.215 ab
6	0.735 c	88.256 bc	1.092 b	26.721 a	49.502 a	6.698 a	0.116 c	0.116 c	0.342 bc	2.240 ab	0.768 d	2.581 b	5.589 ab	0.675 a	179.268 ab	0.217 ab
7	1.217 a	91.268 b	1.392 b	23.914 a	47.870 ab	6.802 a	0.104 cd	0.104 cd	0.382 a	2.724 a	0.973 bc	2.800 ab	6.497 a	0.731 a	179.691 ab	0.246 a
8	0.889 b	101.141 a	1.385 b	26.937 a	41.314 bcd	6.819 a	0.094 d	0.094 d	0.395 a	2.565 ab	1.278 a	2.672 ab	6.514 a	0.683 a	185.682 a	0.193 b
9	0.891 b	65.919 e	1.007 b	24.977 a	46.475 abc	6.710 a	0.101 cd	0.101 cd	0.317 cd	1.966 b	0.888 cd	2.082 c	4.935 b	0.655 a	151.570 c	0.237 ab

注:差异检验为 Duncan 法,同列数据不同小写字母表示同一指标在不同处理间相比差异显著($P < 0.05$)。

2.4 主成分分析结果

通过 SPSS 软件,将所有试验附子的产量、株高、多糖含量、盐酸多巴胺含量等 22 项指标的数据采取标准化处理进行主成分分析。以特征值大于

1 提取了六个主成分,其累积方差贡献率为 89.542%,可代表原始数据的绝大部分信息,其中主成分特征值及方差贡献率见表 5,成分矩阵见表 6。

表 5 主成分的特征值及方差贡献率

主成分	1	2	3	4	5	6	7	8	9
总计	5.548	5.194	3.785	2.339	1.765	1.068	0.945	0.72	0.635
方差百分比	25.218	23.611	17.204	10.634	8.024	4.853	4.295	3.274	2.889
累积百分比	25.218	48.828	66.032	76.665	84.689	89.542	93.838	97.111	100

表 6 成分矩阵

主成分	1	2	3	4	5	6
株高	0.737	0.314	0.214	-0.271	-0.356	-0.082
茎粗	-0.022	0.42	0.199	0.407	-0.458	0.306
单株附子个数	0.69	0.284	0.491	-0.4	-0.019	-0.128
最大附子重量	0.908	0.211	-0.1	-0.014	-0.182	0.281
最大附子直径	0.86	0.337	0.139	-0.039	-0.327	0.054
最小附子重量	0.474	-0.603	-0.593	-0.053	0.088	0.18
最小附子直径	-0.017	-0.604	0.415	-0.285	0.338	-0.093
可溶性蛋白含量	-0.185	-0.227	0.588	0.559	-0.067	-0.413
多糖含量	0.287	-0.638	0.628	-0.126	0.111	0.103
产量	0.662	-0.278	0.397	-0.355	0.145	0.284
盐酸多巴胺含量	0.141	0.451	0.74	0.025	0.13	-0.358
去甲猪毛菜碱含量	0.604	0.324	-0.008	0.282	0.621	0.004
宋果灵含量	0.379	-0.615	-0.596	0.225	-0.122	0.005
多根乌头碱含量	-0.41	0.492	0.12	0.609	0.139	0.332
棍掌碱含量	-0.319	0.728	-0.367	-0.253	0.352	-0.014
塔拉萨敏含量	0.317	0.36	-0.27	0.29	-0.356	-0.302
苯甲酰新乌头原碱含量	-0.074	0.822	-0.389	-0.357	0.101	0.006
苯甲酰乌头原碱含量	-0.181	-0.582	0.568	0.324	-0.01	0.343
苯甲酰次乌头原碱含量	0.068	0.809	0.37	0.157	0.287	0.269
新乌头碱含量	0.695	0.182	-0.009	0.399	0.449	-0.039
乌头碱含量	0.658	-0.047	-0.116	0.517	-0.101	-0.13
次乌头碱含量	0.573	-0.347	-0.508	0.259	0.369	-0.167

计算特征向量系数 $k = \frac{\text{各指标的成分载荷}}{\sqrt{\text{对应主成分的特征值}}}$,构建各主成分的函数式: $F_j = \sum_i (K_{ij} * Z_i)^{[12]}$ 。其中 F_j 为第 j 主成分函数, k_{ij} 为第 j 主成分下第 i 个指标对应的特征向量系数 k , Z_i 为第 i 个指标标准化的数据。以各主成分

对应方差贡献率为权数,构建主成分综合得分函数式^[13]: $F = 0.282F_1 + 0.264F_2 + 0.192F_3 + 0.119F_4 + 0.090F_5 + 0.054F_6$ 。计算不同处理下附子的得分和排名,得分越高表明该附子越好,得分结果见表 7。

表 7 得分及排名

处理编号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
F	-1.353	-0.19	-0.341	0.55	-0.029	0.2	-0.932	1.536	1.546	-0.987
排名	10	6	7	3	5	4	8	2	1	9

以综合得分来看,不施磷肥的对照组排名最低,施加低、中、高水平磷酸二氢钾的排名为第 6、7、3,施加低、中、高水平过磷酸钙的排名为 5、4、8,施加低、中、高水平钙镁磷肥的排名为 2、1、9。

3 讨论

3.1 不同处理对附子农艺性状和产量的影响

在本试验中,笔者发现施加了高水平磷酸二氢钾的单株附子个数最多,并且产量为最好。施加了中水平钙镁磷肥的附子个头最大,产量也有明显提升。而施加了过磷酸钙后的附子产量全部降低。

笔者推测可能是由于磷酸二氢钾作为一种特殊的磷肥,在高水平处理时引入了一定量的钾元素,促进附子根系的生长,使附子个头和个数增多,从而提高了附子的产量,在戴维等人的研究中发现,钾元素对附子有着良好的增产效果^[14],这与笔者的试验现象吻合;钙镁磷肥为枸溶性磷肥^[15],肥效长,能提供一定的钙、硅、硫、镁等有益元素^[16],从促进附子的生长,使其性状与产量都较好;过磷酸钙为水溶性速效肥,其有效成分移动慢、移动距离短、易被固定的特定,其在施用时需尽量与作物根系接触,在唐莉等人的研究中发现尿素施用过多会“烧伤”附子种根创口^[17],经查阅文献,过磷酸钙也有类似烧苗的现象^[18],而附子用块根繁殖,推测施加过磷酸钙时对附子创口造成了伤害,从而导致附子种根生长状态差,进而引起产量降低。

整体来看,中、低水平钙镁磷肥和高水平磷酸二氢钾能有效提升附子的性状与产量。

3.2 不同处理对附子品质的影响

药用植物的品质主要是由其化学成分决定的^[19]。在当前研究中,附子可溶性蛋白作为一种潜在的有效化学成分^[20],目前研究较少。在本试验中,附子可溶性蛋白含量在所有处理后均增加,以低水平磷酸二氢钾处理效果最好,各水平钙镁磷肥处理效果也比较好,其余一般。

附子多糖具有调节免疫、保护心肌细胞、降血糖降血脂等作用^[1],是近年来的附子药理研究的热

点。笔者在此次施肥试验中发现,附子多糖含量在磷酸二氢钾处理中全部极显著增加,而在过磷酸钙、钙镁磷肥组中全都降低,并在高水平时均为极显著降低。目前有学者在研究施肥对黄精多糖含量影响时发现,磷肥对多糖的合成影响为负效应,钾肥对多糖合成影响为正效应,同时发现黄精多糖的合成需要一个较为稳定的营养环境,施肥过多或过少均会导致多糖含量降低^[21]。这与笔者的试验现象较为一致。由此推断,较好的多糖含量,需要在施磷肥的同时增施一定的钾元素,且要使其保持在稳定水平。

生物碱是附子的主要药用化学成分,具有强心、抗炎、镇痛等多种功效^[1, 22],研究不同磷肥在不同施肥量下对其含量的影响具有重要意义。在张燕对益母草的施肥试验^[23]和邓秋林对瓦布贝母的施肥试验^[24]中,发现施加过磷酸钙后作物总生物碱含量增加,同时岳聪慧在土壤营养成分与附子生物碱含量的关系研究中发现,土壤速效磷与总生物碱存在显著正相关^[25],这些表明磷肥能促进生物碱的合成,这与笔者的试验结果一致。同时笔者在试验中发现,中水平钙镁磷肥处理时,去甲猪毛菜碱、多根乌头碱、塔拉萨敏、苯甲酰次乌头原碱、新乌头碱、乌头碱、次乌头碱含量都比较高,且总生物碱含量最高。在低水平钙镁磷肥处理时,盐酸多巴胺、去甲猪毛菜碱、宋果灵、槲掌碱、塔拉萨敏、苯甲酰新乌头原碱、苯甲酰次乌头原碱、苯甲酰次乌头原碱、次乌头碱含量也比较高。由此推断,中、低水平的钙镁磷肥对附子生物碱的合成具有促进效果。

3.3 基于主成分分析的附子施肥效果综合评价

主成分分析法是一种降维分析,能将多个指标转化成彼此相互独立的几个主成分,同时在转化过程中产生能反映主成分信息量的权数。以此来计算综合评价价值,可以在一定程度上克服主观盲目性,进而客观地反映样本间的真实关系^[26]。

在基于主成分分析的附子施肥效果综合评价中,中水平钙镁磷肥处理排名最高、低水平钙镁磷

肥次之、高水平磷酸二氢钾排第 3。同时,不施磷肥的对照组最差,排名第 10。结合前面施肥对附子农艺性状、产量和品质的影响分析,此主成分分析清晰的将综合施肥效果展示了出来,并且和农艺性状、产量、品质数据相互印证。

4 结论

综上所述,施磷肥时应首先考虑施用钙镁磷肥,以中水平的施肥量最好,低水平次之。同时也应注意到,施加高水平钙镁磷肥时,其对附子的综合效果变差,因而要避免使用高水平的钙镁磷肥。因而笔者今后的研究目标将是细化钙镁磷肥的施肥用量梯度,以寻找最适合附子生长的最佳钙镁磷肥施用量。

参 考 文 献:

- [1] Zhou Guohong, Tang Liying, Zhou Xidan, *et al.* A review on phytochemistry and pharmacological activities of the processed lateral root of *Aconitum Carmichaelii* Debeaux [J]. *Journal of ethnopharmacology*, 2015, 160: 173-193.
- [2] 杜森鑫, 顿建明, 曹永康, 等. 磷肥对秋冬季节设施辣椒生长及光合特性的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2019, 54(03): 47-53.
- [3] 杨恒山, 谷永丽, 张瑞富, 等. 不同磷肥用量对绿芦笋产量及营养品质的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(02): 426-430.
- [4] 凌秋平, 周文灵, 陈迪文, 等. 不同种类磷肥对果蔗的有效性研究[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(06): 1 613-1 618.
- [5] 赵永伟, 李瑛, 高玉红, 等. 施磷水平对胡麻干物质积累和磷吸收与利用的影响[J]. *甘肃农业科技*, 2021, 52(01): 15-22.
- [6] 黄东风, 王果, 李卫华, 等. 菜地土壤氮磷面源污染现状、机制及控制技术[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(04): 991-1 001.
- [7] López-Arredondo Damar Lizbeth, Leyva-González Marco Antonio, González-Morales Sandra Isabel, *et al.* Phosphate nutrition: improving low-phosphate tolerance in crops [J]. *Annual review of plant biology*, 2014, 65: 95-123.
- [8] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(2015 年版一部) [S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.
- [9] 赵英永, 戴云, 崔秀明, 等. 考马斯亮蓝 G-250 染色法测定草乌中可溶性蛋白质含量[J]. *云南民族大学学报(自然科学版)*, 2006(03): 235-237.
- [10] 舒晓燕, 刘慧, 梁静, 等. 川附子粗多糖提取工艺的研究[J]. *中药材*, 2006, (12): 1 349-1 352.
- [11] 唐进法, 张书琦, 王晓艳, 等. HPLC-MS/MS 多组分含量测定研究附子配方颗粒的质量一致性[J]. *中国中药杂志*, 2018, 43(09): 1 871-1 879.
- [12] 刘丹. 基于主成分分析的空域使用效能评价 [D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2015.
- [13] 高云, 郁志芳. 基于主成分分析的芹菜品质评价[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(03): 1-14.
- [14] 戴维, 黄晶, 王涛, 等. 江油道地产区附子施肥配比研究[J]. *中药材*, 2019, 42(02): 256-259.
- [15] 王哲丹. 磷肥的水溶率控制研究[J]. *化工进展*, 2003(08): 886-888+891.
- [16] 许秀成. 钙镁磷肥发展前景综述[J]. *磷肥与复肥*, 2006(03): 17-22.
- [17] 唐莉, 梁丽娟, 刘天成, 等. 附子施肥技术研究[J]. *中药材*, 2005(06): 447-450.
- [18] 申永英. 防止自产过磷酸钙烧苗[J]. *新农业*, 1973(10): 6.
- [19] 张定堃, 韩雪, 李瑞煜, 等. UPLC-Q-TOF-MS 分析不同产地泥附子化学成分的差异[J]. *中国中药杂志*, 2016, 41(03): 463-469.
- [20] 朱元龙, 吕植楨. 植物中的活性氨基酸、肽及蛋白质[J]. *中国药理学杂志*, 1982(02): 14-19.
- [21] 王占红, 王瑾, 朱伍凤, 等. 杨凌地区黄精氮磷钾优化施肥模式研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(03): 143-148.
- [22] Chen Xiaofei, Cao Yan, Zhang Hai, *et al.* Comparative Normal/Failing Rat Myocardium Cell Membrane Chromatographic Analysis System for Screening Specific Components That Counteract Doxorubicin-Induced Heart Failure from *Aconitum Carmichaeli* [J]. *Analytical Chemistry*, 2014, 86(10): 4 748-4 757.
- [23] 张燕, 王文全, 杜世雄, 等. 氮、磷、钾对益母草生长及水苏碱和总生物碱影响的研究[J]. *中草药*, 2007(12): 1 881-1 884.
- [24] 邓秋林, 杨正明, 陈雨, 等. 氮磷钾配施对瓦布贝母产量及总生物碱质量分数的影响[J]. *西北农业学报*, 2019, 28(07): 1 138-1 146.
- [25] 岳聪慧, 侯大斌, 匡青芬. 附子不同栽培区土壤养分对其双酯型生物碱的比较研究[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(11): 2 594-2 597.
- [26] 张荣超, 辛杰, 郭庆梅. 基于主成分分析的桔楼优良品系筛选研究[J]. *四川农业大学学报*, 2016, 34(01): 91-96.