

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23329

氮磷钾配施对川贝母产量和品质及养分吸收的影响

王新月^{1, 2}, 高 旦¹, 杨泽敏^{1, 3}, 付邵兵⁴, 李西文^{1*}, 陈士林^{1, 2*}

(1. 中国中医科学院中药研究所, 北京 100700; 2. 贵州中医药大学药学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 云南中医药大学中药学院, 云南 昆明 650500; 4. 青海绿康生物开发有限公司, 青海 西宁 810003)

摘 要: 为探究氮、磷、钾配施对川贝母产量、总生物碱含量和养分吸收的影响, 揭示川贝母需肥规律, 为川贝母的精细化栽培提供理论指导。以 5 年生川贝母为试验对象, 设氮、磷、钾 3 个因子和 4 个浓度水平, 共 14 个处理, 测定不同氮、磷、钾浓度配施下的川贝母产量、总生物碱含量和全株中氮、磷、钾含量; 通过回归分析拟合氮、磷、钾用量与川贝母产量及总生物碱含量的肥效模型, 结合频率分析法获得 5 年生川贝母生产最适施肥用量。结果表明, 氮、磷、钾配施显著影响川贝母产量和总生物碱含量。随着用量的增加, 川贝母产量和总生物碱含量呈先上升后下降的趋势。T6 (N、P₂O₅、K₂O 分别为 24、18、21 g/m²) 处理和 T3 (N、P₂O₅、K₂O 分别为 12、18、21 g/m²) 处理下的产量与总生物碱含量分别为 899.8 g/m²、0.1794% 和 871.6 g/m²、0.1745%, 显著优于其他处理 ($P < 0.05$), 其中 T3 处理的农学效率在 14 个处理中最高, 为 30.96%。不同处理下川贝母全株中的氮、磷、钾吸收分配比例保持在 50.44% ~ 54.36%、5.72% ~ 7.22%、38.94% ~ 42.33%, 无显著性变化。较 T6 (基准施肥) 处理, T2 (缺氮)、T4 (缺磷) 和 T8 (缺钾) 处理的产量和总生物碱含量分别降低了 44.42%、32.31%、47.29% 和 21.29%、14.01%、21.66%。不同肥料对川贝母产量和总生物碱含量的影响表现为氮肥 ≈ 钾肥 > 磷肥。由氮、磷、钾施用量与产量和总生物碱含量拟合的肥料效应模型的相关性均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。基于肥效模型和频率分析法, 以产量和总生物碱含量为主要考察指标, 5 年生川贝母的最适施肥方案为 N 15.27 ~ 21.72 g/m², P₂O₅ 11.85 ~ 16.08 g/m², K₂O 13.82 ~ 18.65 g/m²。

关键词: 川贝母; 配方施肥; 产量; 肥料效应函数; 频率分析

川贝母 (*Fritillaria cirrhosa* D. Don) 为百合科贝母属多年生草本植物, 是 2020 版《中国药典》中收录的川贝母 6 种基源植物之一^[1]。主要分布在四川、西藏、云南、青海等省(自治区), 是我国传统名贵中草药之一, 具有极高的药用价值和经济价值^[2]。川贝母以干燥鳞茎入药, 味苦、甘, 具有清热润肺、化痰止咳、散结消痈等功效, 被广泛用于治疗虚劳久咳、肺热燥咳、肺痈吐脓等症^[3]。近年来, 随着呼吸道疾病在全球的流行, 以及人们对川贝母药理作用的深度开发, 市场需求量与日俱增。但由于野生川贝母自然繁殖能力差, 生长年限长, 以及人们长久以来

的无节制采挖等原因^[4-5], 川贝母野生资源日渐短缺, 市场供应量严重不足, 导致川贝母的价格常年保持高位。为缓解市场供需矛盾, 近年来开展了野生川贝母引种驯化和人工栽培等研究^[6-7]。但由于川贝母人工种植年限较短, 田间管理主要借鉴农作物生产经验, 缺乏科学的施肥技术, 栽培川贝母的产量和品质不稳定^[8]。因此, 开展川贝母科学施肥研究, 保障川贝母高产、稳产并提高药材品质以满足临床用药需求迫在眉睫。配方施肥是一种能够同时兼顾土壤供肥能力和植物需肥特点的精准施肥技术。氮、磷、钾作为植物生长必需的三大营养元素^[9], 是目前药材生产施肥的研究重点。研究表明, 科学的氮、磷、钾配施不仅能够有效提高苍术、金钱草、黄芪、多花黄精等药用植物的产量和药效成分, 还能提高肥料利用率^[10-13]。但在实际生产中, 由于缺乏规范化的种植生产标准, 依靠经验施肥极易造成施肥过量或不足。不合理的施肥不仅达不到药材的增产增质, 同时增加了种植成本, 甚至对土壤环境造成破坏, 影响翌年药

收稿日期: 2023-05-30; 录用日期: 2023-07-21

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFC1710600); 国家重大新药创制科技重大专项 (2019ZX09201005-006-001)。

作者简介: 王新月 (1995-), 在读硕士研究生, 从事药用无公害栽培。E-mail: wang20220313@163.com。

通讯作者: 李西文, E-mail: xwli@icmm.ac.cn; 陈士林, E-mail: slchen@icmm.ac.cn。

材正常的生长发育。

目前,对于川贝母的栽培研究,多集中在品种选育、种植密度、透光率和种苗繁育等方面^[14-17]。在川贝母的追肥研究中发现,不同肥料种类及用量对川贝母产量和品质影响显著^[18],但关于氮、磷、钾配施在全生育期下对川贝母产量及品质的影响研究还鲜有报道,科学高效的施肥基础研究还比较欠缺。本研究采用农学中经典的“3414”配方施肥方案,探究不同氮、磷、钾配施方案对川贝母产量、总生物碱含量和养分吸收的影响,旨在为川贝母的科学高效栽培提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料与地点

试验于青海省海东市互助县林川乡边滩川贝母规范化示范种植基地(36° 59' N, 101° 59' E, 海拔 3050 m)进行。供试土壤类型为山地灰褐土,土壤 pH 8.21,有机质含量 43.75 g/kg、全氮 1.99 g/kg、全磷 0.97 g/kg、全钾 20.23 g/kg、碱解氮 0.12 g/kg、有效磷(P₂O₅) 0.04 g/kg、速效钾(K₂O) 0.18 g/kg。供试肥料分别为尿素(N 46%,云南云天化股份有限公司)、硫酸钾(K₂O 52%,史丹利农业集团股份有限公司)和过磷酸钙(P₂O₅ 12%,汉中唐枫化工有限责任公司)。川贝母在 5 年生时产量增产显著,同时 5 年生川贝母也是种源繁育时主要的留种时期,因此,本试验对象为 5 年生川贝母。

1.2 试验设计

2021 年 10 月,选用大小、形状基本一致,健康无损的 5 年生川贝母鳞茎作为无性繁殖材料移栽至试验田。试验田划分为 1 m × 1 m 的小区,各小区间设 30 cm 隔断行,每个小区栽种 162 粒鳞茎,各小区栽种鳞茎平均鲜重为 338 g/m²,株行距为 5 cm × 8 cm。施肥依据“3414”试验设计方案进行(表 1),设氮、磷、钾 3 个因子,每个因子共设 4 个水平,分别记为 0、1、2、3 水平,其中 2 水平作为基准施肥量,1 水平为 2 水平的 0.5 倍,3 水平为 2 水平的 1.5 倍,共计 14 个处理组合。每个处理重复 3 次,共 42 个小区,采用随机区组排列。肥料的基准施用量参考 2009 年四川省质量技术监督局颁布的“川贝母生产流程”。14 个试验处理中,T1 为空白对照;T2、T4 和 T8 为缺肥处理(缺少一种养分);其余 10 个处理均施用了氮磷钾 3 种肥料,称为施肥处理,其中 T6 为基准施

肥处理,T7、T10 和 T11 为高施肥处理(单一养分含量高施)。施肥时期依据种植基地常规生产经验,共分 2 次进行,分别为底肥 50%和齐苗追肥 50%,其余管理同基地生产一致(如除草、浇水和保护措施)。繁殖材料经中国中医科学院中药研究所鉴定为百合科贝母属植物川贝母的鳞茎。

表 1 5 年生川贝母“3414”施肥方案

编号	施肥处理	施肥量 (g/m ²)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
T1	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0
T2	N ₀ P ₂ K ₂	0	18	21
T3	N ₁ P ₂ K ₂	12	18	21
T4	N ₂ P ₀ K ₂	24	0	21
T5	N ₂ P ₁ K ₂	24	9	21
T6	N ₂ P ₂ K ₂	24	18	21
T7	N ₂ P ₃ K ₂	24	27	21
T8	N ₂ P ₂ K ₀	24	18	0
T9	N ₂ P ₂ K ₁	24	18	10.5
T10	N ₂ P ₂ K ₃	24	18	31.5
T11	N ₃ P ₂ K ₂	36	18	21
T12	N ₁ P ₁ K ₂	12	9	21
T13	N ₁ P ₂ K ₁	12	18	10.5
T14	N ₂ P ₁ K ₁	24	9	10.5

1.3 测定指标与方法

1.3.1 川贝母产量测定

2022 年 9 月,待植株地上部分完全倒苗后,采挖鳞茎,每个小区单采单收,洗净并晾干水分后称量各小区鳞茎鲜重,即为本研究中的产量。在此基础上,利用公式计算不同处理的肥料效应。计算公式:

肥料贡献率 (%) = (施肥处理的产量 - 缺肥处理的产量) / 施肥处理的产量 × 100

肥料农学效率 (kg/kg) = (施肥处理的产量 - 缺肥处理的产量) / (施肥处理的施肥量 - 缺肥处理的施肥量)

增产率 (%) = (施肥处理的产量 - 缺肥处理的产量) / 不施肥处理产量 × 100

地力贡献率 (%) = 空白处理的产量 / 基准施肥的产量 × 100

1.3.2 鳞茎总生物碱含量测定

在每个小区采收的鳞茎中,随机挑选无破损鳞

茎 10 粒, 置于 55℃ 烘箱中烘干至恒重, 研磨粉碎后过 0.355 mm 筛, 用于总生物碱含量测定。总生物碱含量测定方法参考 2020 版《中国药典》中川贝母检测项下总生物碱测定的方法^[1]。

1.3.3 川贝母全株氮、磷、钾含量测定

2022 年 8 月, 施肥 90 d 后, 每个小区选取生长形状基本一致的植株 10 株, 整株采挖, 洗净阴干后, 将样品置于 105℃ 条件下杀青 20 min, 并于 55℃ 下烘干至恒重, 用分析天平称量植株全株干物质重。用粉碎机将不同处理下植株样品粉碎后过 0.5 mm 筛网, 装入密封袋, 用于测定全氮、全磷和全钾含量, 每个处理重复 3 次。采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 凯氏定氮法测定全氮含量; 用钒钼黄比色法测定植株全磷含量; 用火焰光度计测定植株全钾含量。在此基础上, 计算不同处理下川贝母植株中的氮、磷、钾的分配比例。

1.4 数据处理

利用 Excel 2017 和 GraphPad Prism 8.0.2 进行数

据处理分析和作图, 利用 Excel 2017 中的数据回归分析模块进行产量和总生物碱含量与氮、磷、钾的三元二次肥料效应模型拟合, 并利用频率分析法^[19]寻找并确定合理施肥用量。用 SPSS 21.0 进行单因素方差分析, Levene 方差齐性检验, 方差齐 ($P > 0.05$) 条件下使用 Duncan 法检验显著性, 显著性水平设为 0.05。

2 结果与分析

2.1 氮、磷、钾配施对川贝母产量的影响

氮、磷、钾的不同配比显著影响了川贝母鳞茎产量的形成 (表 2), 不同施肥处理的产量差异较大。本试验中, T6 处理的产量在 14 个试验处理中最高, 较空白处理 T1 显著提高了 113.17%。缺肥处理中, T2 (缺氮) 处理、T4 (缺磷) 处理和 T8 (缺钾) 处理分别较 T6 处理减产 44.42%、32.31% 和 47.29%, 表明钾肥和氮肥对鳞茎产量的影响大于磷肥, 该影响趋势与增产率以及肥料贡献率呈现

表 2 不同氮、磷、钾配施处理下川贝母的产量和肥料效应

处理	产量 (g/m ²)	农学效率 (kg/kg)	肥料贡献率 (%)	增产率 (%)
N	T2 (N ₀ P ₂ K ₂)	500.1 ± 47.1def	—	—
	T3 (N ₁ P ₂ K ₂)	871.6 ± 37.8a	30.96	42.63
	T6 (N ₂ P ₂ K ₂)	899.8 ± 23.0a	16.66	44.43
	T11 (N ₃ P ₂ K ₂)	428.4 ± 48.6fg	-1.99	-16.72
	平均	—	15.21	23.45
P ₂ O ₅	T4 (N ₂ P ₀ K ₂)	609.1 ± 22.6bc	—	—
	T5 (N ₂ P ₁ K ₂)	645.6 ± 24.6bc	4.05	5.65
	T6 (N ₂ P ₂ K ₂)	899.8 ± 23.0a	16.15	32.31
	T7 (N ₂ P ₃ K ₂)	615.0 ± 37.9bc	0.22	0.96
	平均	—	6.81	12.97
K ₂ O	T8 (N ₂ P ₂ K ₀)	474.3 ± 16.9efg	—	—
	T9 (N ₂ P ₂ K ₁)	661.2 ± 41.0b	17.80	28.26
	T6 (N ₂ P ₂ K ₂)	899.8 ± 23.0a	20.26	47.29
	T10 (N ₂ P ₂ K ₃)	506.5 ± 37.2de	1.02	6.34
	平均	—	13.03	27.30
其他	T1 (N ₀ P ₀ K ₀)	422.1 ± 18.6g	—	—
	T12 (N ₁ P ₁ K ₂)	566.3 ± 34.6cd	—	—
	T13 (N ₁ P ₂ K ₁)	568.9 ± 90.5cd	—	—
	T14 (N ₂ P ₁ K ₁)	584.9 ± 53.8bc	—	—

注: 同列不同小写字母表示组间差异显著 (Duncan 检验, $P < 0.05$); $n=3$ 。下同。

的结果一致。利用基准施肥 T6 处理和空白 T1 处理计算得到土壤对产量的贡献率，即地力贡献率为 46.91%。这表明该试验地土壤环境肥力较好，供肥能力强，但也显示出川贝母高产，除土壤基本营养供给外，外源的养分供给是不可或缺的。缺肥处理中 T2（缺氮）、T4（缺磷）和 T8（缺钾）的产量较空白 T1 处理分别提高了 18.48%、44.30% 和 12.37%，表明氮、磷、钾肥对于川贝母产量提高的交互影响顺序为氮钾 > 氮磷 > 磷钾。当氮、磷、钾肥施用量不断增大时，川贝母产量均呈现出先上升后下降的趋势，其中 T11、T7 和 T10 这 3 个高氮、高磷和高钾处理的产量分别较基准施肥 T6 处理减产 52.39%、31.65% 和 43.71%。高施肥处理的增产率、肥料贡献率和农学效率较基准施肥处理均表现出大幅下降，肥料的投入与经济产出不成正比，这符合农学中经典的“报酬递减律”理论^[20]。氮肥的农学效率在 1 水平时达到了最大，磷肥和钾肥的农学效率和氮、磷、钾肥的肥料贡献率、增产率在 2 水平下达到了最高，表明试验设计的合理性。

2.2 氮、磷、钾配施对川贝母鳞茎总生物碱含量的影响

总生物碱是川贝母的主要药效成分，也是 2020 版《中国药典》中用于评价川贝母质量的指标成分^[1]。如图 1 所示，不同氮、磷、钾配比施肥处理下鳞茎中总生物碱含量不同，当氮、磷、钾中的其中两种保持在推荐施用量（2 水平）时，川贝母的总生物碱含量均随着施肥量的增大表现出先上升后下降的趋势，在基准施肥 T6 处理达到最大。T6 处理中的总生物碱含量较空白处理 T1 显著提高了 36.42%。缺肥组中 T2、T4 和 T8 处理分别较基准施肥 T6 处理降低了 21.29%、14.01% 和 21.66%，表明氮肥和钾肥对总生物碱的影响大于磷肥。与 T1 对照处理比较，T2、T4 和 T8 处理的总生物碱含量分别提高了 7.39%、17.32% 和 6.88%，表明对于川贝母鳞茎总生物碱的交互影响强弱为氮钾 > 磷钾 > 氮磷。

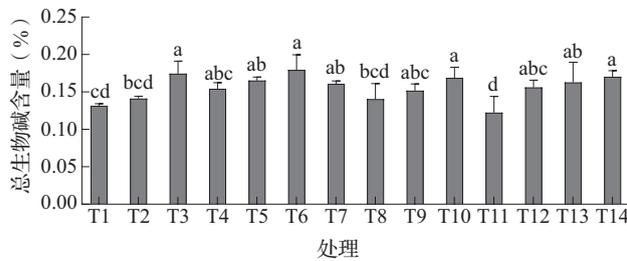


图 1 不同氮、磷、钾配施处理下川贝母总生物碱含量

注：不同小写字母表示组别间差异显著（Duncan 检验， $P < 0.05$ ）。

2.3 不同配施处理对川贝母全株氮、磷、钾养分吸收的影响

如表 3 所示，当磷肥和钾肥施用量保持不变（T2、T3、T6 和 T11 处理）时，川贝母全株中的氮含量随着施氮量的增加呈现先上升后下降趋势，说明适宜的氮肥浓度能够促进氮在植株体内的吸收与转运。但当施氮浓度过高时，植株叶片细胞可能受到损害^[21]，从而导致植株对氮的吸收与利用减慢。随着氮肥施用量的增加，川贝母植株中的磷和钾含量变化较小，但趋势与氮含量变化一致，均呈先上升后下降趋势。结果表明，适宜的氮肥浓度有助于植株对磷和钾的吸收，说明氮、磷、钾三元素间存在协同作用。当氮肥和钾肥的施用量保持不变（T4、T5、T6 和 T7 处理）时，施用磷肥后植株体内的磷含量表现出上升趋势，但上升幅度不大。植株体内随着磷元素含量增加，氮含量也增多，钾含量表现出轻微降低。表明磷可以促进植株对于氮的吸收，轻度抑制钾的吸收，且随着施磷量的增大，抑制效果明显，这与杨志坚等^[22]研究结果相似。当磷肥和钾肥的施用量保持不变（T8、T9、T6 和 T10 处理）时，随着钾肥施用量的增加，川贝母植株体内含钾量和含氮量的变化呈先升高后下降趋势，含磷量无明显变化规律。如图 2 所示，不同氮、磷、钾配施对于川贝母全株中氮、磷、钾的比例变化影响较小，说明氮、磷、钾三元素在川贝母体内协同能力较强，始终保持在一个相对平衡的分配状态。

表 3 不同氮磷钾配施下川贝母全株 N、P、K 含量 (g/kg)

处理	N	P	K
T1	14.00 ± 0.85f	1.59 ± 0.05h	11.00 ± 0.43f
T2	14.18 ± 0.26ef	2.03 ± 0.02bc	11.90 ± 0.24ab
T3	15.85 ± 0.16ab	2.08 ± 0.00a	12.08 ± 0.10a
T4	14.82 ± 0.16cde	1.55 ± 0.00h	11.79 ± 0.18abcd
T5	14.29 ± 0.72ef	1.80 ± 0.07ef	11.64 ± 0.35abcde
T6	15.32 ± 0.14bc	1.75 ± 0.02fg	11.59 ± 0.09bcde
T7	15.38 ± 0.32abc	1.99 ± 0.02c	11.55 ± 0.42bcde
T8	15.22 ± 0.12bcd	1.73 ± 0.01g	11.19 ± 0.03ef
T9	15.72 ± 0.18ab	1.84 ± 0.01e	11.36 ± 0.11def
T10	14.46 ± 0.16def	1.77 ± 0.00fg	11.46 ± 0.09bcde
T11	14.81 ± 0.11cde	1.59 ± 0.02h	11.41 ± 0.30cdef
T12	16.17 ± 0.74a	2.07 ± 0.04ab	11.63 ± 0.23abcde
T13	15.66 ± 0.21ab	1.92 ± 0.03d	11.60 ± 0.09bcde
T14	14.83 ± 0.63cde	1.73 ± 0.03g	11.86 ± 0.23abc

2.4 川贝母肥料效应模型的建立

氮、磷、钾的用量以 X_1 、 X_2 、 X_3 3 个自变量表示，鳞茎产量 Y_1 作为因变量，建立产量肥料效应函数模型。因总生物碱含量数值较小，故选用氮、磷、钾施用量的水平值 X_1' 、 X_2' 、 X_3' 为自变量，总生物碱含量为因变量 Y_2 ，构建总生物碱含量为目标的肥料效应函数模型（表 4）。产量函数中的 $R^2=0.55$ ， $F=4.35$ ， $P=9.1 \times 10^{-4} < 0.01$ ，相关性达到极显著水平。总生物碱含量模型中的 $R^2=0.62$ ， $F=5.81$ ， $P=8.9 \times 10^{-5} < 0.01$ ，相关性达到极显著水平。

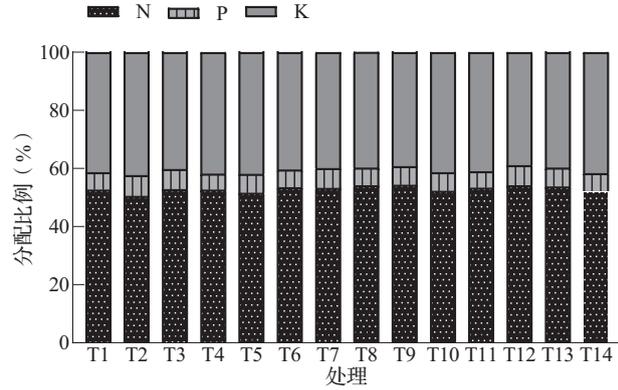


图 2 不同氮磷钾配施下川贝母全株 N、P、K 分配比例

表 4 川贝母产量和总生物碱含量的肥料效应函数

编号	肥料效应函数	R^2	F	P
①	$Y_1=396.404+28.199X_1-2.708 X_2+13.855 X_3-0.797 X_1^2-0.313 X_2^2-0.772X_3^2-0.067X_1X_2-0.003X_1X_3+0.825X_2X_3$	0.55	4.35	9.1×10^{-4}
②	$Y_2=0.131+0.072X_1' -0.004 X_2' -0.02 X_3' -0.019 X_1'^2-0.004 X_2'^2-0.004X_3'^2-0.013X_1' X_2' -0.003X_1' X_3' +0.019X_2' X_3'$	0.62	5.81	8.9×10^{-5}

2.5 川贝母合理施肥区间的确定

通过频率分析，可优化获得川贝母高产优质且肥效高的施肥方案（表 5 和表 6）。如表 5 所示，当施肥方案为 N 15.27 ~ 21.76 g/m^2 、 P_2O_5 11.85 ~ 16.58 g/m^2 、 K_2O 13.82 ~ 19.34 g/m^2 时，由肥料效应函数 Y_1 计算川贝母产量可达 736.93 g/m^2 以上。由表 6 可知，

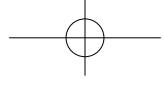
当施肥量为 N 15.25 ~ 21.72 g/m^2 、 P_2O_5 10.92 ~ 16.08 g/m^2 、 K_2O 12.85 ~ 18.65 g/m^2 时，由肥料效应函数 Y_2 计算得川贝母总生物碱含量可达 0.1486%。为了能够获得优质高产的川贝母，采用交集法得出产量和总生物碱含量的优化施肥方案为 N 15.27 ~ 21.72 g/m^2 、 P_2O_5 11.85 ~ 16.08 g/m^2 、 K_2O 13.82 ~ 18.65 g/m^2 。

表 5 川贝母产量频率分析

因素水平	N (X_1)		P_2O_5 (X_2)		K_2O (X_3)	
	次数	频率 (%)	次数	频率 (%)	次数	频率 (%)
0	5	14.29	5	13.16	5	13.16
1	8	22.86	9	23.68	9	23.68
2	20	57.14	21	55.26	21	55.26
3	2	5.71	3	7.90	3	7.90
加权平均数 (g/m^2)	18.51		14.21		16.58	
标准差 (g/m^2)	9.80		7.44		8.68	
均数标准差	1.66		1.21		1.41	
施用量 (g/m^2)	15.27 ~ 21.76		11.85 ~ 16.58		13.82 ~ 19.34	

表 6 川贝母总生物碱含量频率分析

因素水平	N (X_1)		P_2O_5 (X_2)		K_2O (X_3)	
	次数	频率 (%)	次数	频率 (%)	次数	频率 (%)
0	6	16.22	6	16.67	6	16.67
1	7	18.92	9	25	8	22.22
2	22	59.45	18	50	20	55.56
3	2	5.41	3	8.33	2	5.55
加权平均数 (g/m^2)	18.49		13.5		15.75	
标准差 (g/m^2)	10.04		7.90		8.87	
均数标准差	1.65		1.32		1.48	
施用量 (g/m^2)	15.25 ~ 21.72		10.92 ~ 16.08		12.85 ~ 18.65	



3 讨论

3.1 氮、磷、钾配施对川贝母产量和品质的影响

氮、磷、钾是植物生理活动的重要元素,对药用植物的生长和产量具有显著影响。氮是植物体内合成蛋白质和叶绿素的关键元素。适量的氮供应能促进药用植物的叶片生长和开发,增加药材的产量和营养价值。宋希梅等^[23]研究发现,适宜的氮肥浓度显著提高了三七的株高、叶长等农艺指标,并对三七产量的形成和药效成分的积累有显著的促进作用。然而,过量的氮供应可能导致植物过于繁茂,而对药用成分的积累产生负面影响。宋庆燕^[24]研究发现,过量施氮后黄芪中毛蕊异黄酮苷和芒柄花苷含量较适宜施氮处理出现不同程度的降低。磷是植物能量转移和物质代谢的重要组成部分。磷的充足供应可以促进根系生长、花芽分化和药用成分的合成。特别是在药用植物的药效品质中,磷对药材产量和质量具有关键作用。钾是调节植物渗透压和促进酶活性的重要离子。适量的钾供应可以增强药用植物的光合作用效率、抗病能力和药物品质^[25]。

不同药用植物因其自身的生理特性,对于养分的吸收存在自身的特点,导致氮、磷、钾肥对不同药用植物的产量和药效成分形成所做的贡献有所不同。前人在桔梗的研究中发现,氮肥对产量和药效成分的影响要大于磷肥和钾肥^[26];相较氮肥和钾肥,磷肥对于裸菝紫珠中的叶片总酚酸含量的影响更大^[27];钾肥对于膜荚黄芪中的异黄酮苷含量和多糖含量的影响效果比氮、磷、肥更显著^[28]。本研究结果显示,对于产量的形成氮肥和钾肥施用影响高于磷肥,这是由于适宜的氮肥能够有效促进川贝母出苗后茎叶的生长,充足的光合能提高生物量的积累^[29],适宜的钾肥有利于川贝母根须的生长,提高川贝母吸水吸肥的能力^[30]。氮、磷、钾对产量的交互影响表现为氮钾>氮磷>磷钾。生物碱属于次生代谢产物,是川贝母的主要品质指标。本研究中单一肥料对于川贝母鳞茎中的总生物碱含量影响顺序为氮肥>钾肥>磷肥,肥料的交互作用对总生物碱的影响顺序为氮钾>磷钾>氮磷。氮肥和钾肥对川贝母总生物碱影响较大,可能是由于生物碱属于含氮次生代谢产物,同时叶片是合成生物碱的第一器官,适宜的氮肥浓度能够增加生物碱合

成前体物质如氨基酸等所需的氮源,从而提高生物碱的积累^[31]。关于施肥对贝母生物碱含量影响的研究中,Sui等^[32]在对浙贝母的钾肥试验中发现,适宜的钾肥用量下,浙贝母碱的相对含量较低钾和高钾处理显著提高;李林宏等^[33]在川贝母的氮、磷、钾配施研究中发现,氮、钾肥对总生物碱的影响更大,这与本研究结果基本一致。川贝母生产中应根据不同的目的,在不同发育阶段采用相应的施肥配方以达到最优产量、品质效果和投入产出比,实现土壤营养平衡。此外,值得注意的是,青海省土壤与其他土壤存在一定的差异。青海省土壤主要以高原棕壤和黄土为主,并且由于青海省气候干燥,土壤水分含量相对较低。这些差异将直接影响到药用植物的生长和产量。

中药的产地是中医药学中的一个重要因素,不同产地的中成药可能在药效上存在差异。这种差异可以归因于产地的环境条件、土壤质量、种植技术等对药材品质和化学成分的影响。产地的环境条件对中药的药效有着显著影响。研究发现,生长在高海拔地区的中药植物如高山羌活和青藏高原的黄连富含更多的活性成分,具有更强的抗氧化和抗炎作用,这可以归因于高海拔地区的较低温度、强紫外线辐射和贫瘠的土壤条件^[34-35]。

土壤中的养分含量是影响中药药效的另一个关键因素。充足的氮、磷和钾供应可以促进中药植物生长和营养物质的积累,从而改善中成药的药效。一项对天麻进行的研究发现,适宜的氮和磷施用可以显著增加天麻中有效成分总酚的含量^[36]。另一项研究发现,在灵芝的种植中施用氮肥和薄钾肥能显著提高其多糖和次生代谢产物的产量,进而增强药效^[37]。然而,对于中药的药效产地关系的研究还相对有限,尚需进一步深入的研究来揭示不同产地对中药药效的影响机制及其潜在的生物活性成分。总之,中药的产地对药效有显著影响,其中环境条件和土壤质量是重要的因素。适宜的氮、磷、钾施用可以改善中药的药效表现。随着研究的进展,将进一步了解中药药效与产地之间的关系,并为中药的合理种植和生产提供科学依据。

3.2 氮、磷、钾配施对川贝母养分吸收的影响

本试验中,川贝母中的氮、磷、钾分配比例在不同施肥处理下差异不显著。当肥料施用过量时,川贝母体内氮、磷、钾的吸收均受到了抑制,且这些处理的产量与总生物碱含量同时出现了降低的趋

势。在所有的施肥处理中,川贝母全株中的氮含量始终处于最高水平,其次是钾含量,最低是磷,这说明川贝母对于氮肥的需求较磷肥和钾肥用量大,这与平贝母^[38]与浙贝母^[39]的氮、磷、钾吸收特性相似。在实际生产中,种植户需要根据土壤的特点进行合理施肥和管理。合理调控土壤中的氮、磷、钾含量,确保川贝母获得的养分符合其生长需求。此外,应该注重水分管理,使川贝母可以获得足够的水分,从而提高产量和药用成分的含量。

3.3 川贝母的优质施肥方案确定

配方施肥兼顾植物需肥规律、土壤供肥能力和肥料效率,能够确定药用植物生长期氮、磷、钾合理的施用比例和用量,在达到目标产量的同时,降低养分的损失,科学合理的氮、磷、钾肥比例是药用植物施肥技术的关键。孙迪等^[40]在桔梗的肥料配施研究中发现,适宜的氮、磷、钾配比能够有效提高桔梗根部产量。蒲盛才等^[41]发现,合理的氮、磷、钾配施对白芷的产量和药效成分存在显著的正效应。黄高鉴等^[9]发现,不同氮、磷、钾配比下,潞党参有效成分含量间存在显著差异,优化的配方施肥方案能够实现产量和药效成分的协同提升。频率分析法具有增加施肥决策信息量,同时减少或避免小概率事件发生的优点,该方法将田间肥效试验结果中产量高(药效含量高),出现频率大,用肥节省的组合作为优化施肥组合^[19]。同一种药材的产量最适施肥量和药效成分的最适施肥量可能会存在差异,这时往往需要对不同收获目标的最适施肥区间进行取交集,尽量使多个收获目标均获得最优。本试验中为了能够同时达到增产和增质的目的,对氮、磷、钾的施用区间进行了取交集处理,最终确定了最适的施肥量,此方法与刘宇航等^[10]在探索多花黄精的最优氮、磷、钾施用区间的方法相似。本研究得到的施肥方案是基于当地土壤环境和栽培管理措施获得,但由于药用植物对于养分的吸收和利用以及产量和品质的形成是多方面共同作用的结果,因此,在实际生产中还需结合当地环境进行合理的调整。

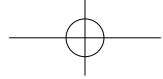
4 结论

科学合理的配方施肥是推动中药材栽培产业可持续发展的有效途径,合理施肥不仅能提高中药材产量和药效成分含量,促进植物养分吸收,还能防止因过量施肥造成的资源浪费和环境问题。

在本试验地点的土壤肥力状况下,5年生川贝母的优质施肥方案为: N 15.27 ~ 21.72 g/m²、P₂O₅ 11.85 ~ 16.08 g/m²、K₂O 13.82 ~ 18.65 g/m²,在此施肥方案下,川贝母产量和总生物碱含量能稳定达到 737 g/m² 和 0.15% 以上。不同氮、磷、钾配施对川贝母全株中的氮、磷、钾分配比例无显著影响,但适宜的肥料配比能够促进川贝母养分的吸收。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部 [S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
- [2] 李西文. 川贝母保护生物学研究 [D]. 北京: 清华大学医学部; 北京协和医学院; 中国医学科学院, 2009.
- [3] Wang D, Du Q, Li H, et al. The isosteroid alkaloid imperialine from bulbs of *Fritillaria cirrhosa* mitigates pulmonary functional and structural impairment and suppresses inflammatory response in a COPD-Like rat model [J]. *Mediators of Inflammation*, 2016, 2016: 1-17.
- [4] 宋奕辰, 车朋, 赵鑫磊, 等. 青藏高原及其毗邻地区川贝母类药材的资源调查 [J]. *中国现代中药*, 2021, 23 (4): 611-618, 626.
- [5] Mathela M, Kumar A, Sharma M, et al. Hue and cry for *Fritillaria cirrhosa* D. Don, a threatened medicinal plant in the Western Himalaya [J]. *Discover Sustainability*, 2021, 2 (1): 38.
- [6] 郭尚磊. 珍稀药用植物川贝母的研究综述 [J]. *西藏科技*, 2020 (12): 19-20.
- [7] Cunningham A B, Brinckmann J A, Pei S J, et al. High altitude species, high profits: Can the trade in wild harvested *Fritillaria cirrhosa* (Liliaceae) be sustained? [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2018, 223: 142-151.
- [8] 马靖. 栽培川贝母品质调控技术的初步研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2015.
- [9] 黄高鉴, 孙晋鑫, 张强, 等. 氮磷钾配施对潞党参产量与品质的影响及肥料效应 [J]. *中国土壤与肥料*, 2022 (9): 26-31.
- [10] 刘宇航, 邓远苇, 刘亚敏, 等. 氮磷钾配施对多花黄精产量品质及养分吸收的影响 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2022, 50 (10): 97-105, 115.
- [11] 卢挺, 杨全, 唐晓敏, 等. 氮磷钾配施对广金钱草产量及质量的影响 [J]. *广西植物*, 2014 (3): 426-430.
- [12] 冯禹壮, 徐伟, 肖春萍, 等. 氮磷钾配施对北苍术产量、品质及其相关酶基因表达的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28 (2): 302-312.
- [13] 高星, 林云, 王渭玲, 等. 蒙古黄芪对 N、P、K 的肥效响应 [J]. *西北农业学报*, 2017, 26 (12): 1845-1852.
- [14] Li X, Dai Y, Chen S. Growth and physiological characteristics of *Fritillaria cirrhosa* in response to high irradiance and shade in age-related growth phases [J]. *Environmental and Experimental*



- Botany, 2009, 67 (1): 77-83.
- [15] 王晓蓉, 王强, 余强, 等. 川贝母新品种川贝 1 号特征特性及栽培技术 [J]. 安徽农学通报, 2016 (3): 47-48.
- [16] 张礼, 伍燕华, 付绍兵, 等. 栽培密度和施肥对川贝母生长和产量的影响 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45 (3): 119-121.
- [17] 胡章薇, 熊芹, 肖小君. 中草药川贝母繁育技术研究进展 [J]. 安徽农学通报, 2017, 23 (11): 133-135, 165.
- [18] 王新月, 王业, 邬洁, 等. 花期追肥对川贝母产量和品质的影响 [J]. 世界中医药, 2022, 17 (13): 1789-1796.
- [19] 李洪文, 叶和生, 李保华, 等. 田间肥效试验数据的频率分析和施肥决策 [J]. 中国农学通报, 2014, 30 (27): 132-138.
- [20] 董秀茹, 刘强, 王秋兵. 对“土地报酬递减规律”的再思考 [J]. 北方经济, 2006 (9): 58-59.
- [21] 刘丽, 刘阿梅, 向言词, 等. 过量施肥对盆栽荷花生长表现的影响 [J]. 上海农业科技, 2023 (2): 147-152, 170.
- [22] 杨志坚, 冯金玲, 吴小慧, 等. 氮磷钾施肥对闽楠幼苗营养元素吸收与利用的影响 [J]. 生态学杂志, 2021, 40 (4): 998-1011.
- [23] 宋希梅, 汤利, 陈军文, 等. 连续两年不同施氮对三七产量和皂苷产出量的影响 [J]. 中药材, 2017, 40 (10): 2256-2261.
- [24] 宋庆燕. 氮磷钾配施对黄芪产量和质量的影响 [D]. 北京: 北京中医药大学, 2017.
- [25] 马业辉, 洪明, 马晓鹏, 等. 施钾量对和田日光温室番茄生长、产量及品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (6): 220-226.
- [26] 段云晶, 李柯, 王康才, 等. 氮磷钾对桔梗干物质积累及桔梗皂苷 D 含量的影响 [J]. 土壤通报, 2016, 47 (4): 921-927.
- [27] 黄梅, 于福来, 陈振夏, 等. 土壤因子对裸花紫珠有效成分含量的影响研究 [J]. 中国药房, 2018, 29 (15): 2095-2099.
- [28] 王晓飞, 姚琴, 魏国江, 等. 氮磷钾养分对寒地膜莢黄芪生长及药用成分影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (2): 149-155.
- [29] 于越, 韩俊龙, 李雪莲, 等. 甘草配方施肥及各元素对光合作用的贡献率 [J]. 北华大学学报 (自然科学版), 2017, 18 (5): 672-675.
- [30] 杨小锋, 别之龙. 氮磷钾施用量对水培生菜生长和品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2008, 24 (S2): 265-269.
- [31] 葛阳, 康传志, 万修福, 等. 生产中氮肥施用及其对中药材产量和质量的影响 [J]. 中国中药杂志, 2021, 46 (8): 1883-1892.
- [32] Sui N, Wang L, Sun J, et al. Estimating *Fritillaria thunbergii* Miq. yield, quality, and potassium use efficiency in response to potassium application rate [J]. Industrial Crops and Products, 2021, 164: 113409.
- [33] 李林宏, 叶本贵, 龚盼竹, 等. 不同施肥方式对川贝母产量及质量的影响 [J]. 华西药学杂志, 2019, 34 (3): 266-269.
- [34] Alperth F, Turek I, Weiß S, et al. Qualitative and quantitative LC-MS analysis of different *Rhodiola rosea* rhizome extracts [C]. Stuttgart · New York: Georg Thieme Verlag KG, 2019.
- [35] Kamath S, Skeels M, Pai A. Significant differences in alkaloid content of *Coptis chinensis* (Huanglian), from its related American species [J]. Chinese medicine, 2009, 4 (1): 17.
- [36] 张德著, 美亮, 何海艳, 等. 人工种植天麻的影响因子优化研究 (英文) [J]. 植物分类与资源学报, 2014, 36 (2): 254-260.
- [37] Zhou X, Su K, Zhang Y. Applied modern biotechnology for cultivation of *Ganoderma* and development of their products [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, 93 (3): 941-963.
- [38] 张继全. 平贝母养分的吸收特性研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [39] 崔培章. 浙贝母各生育期氮磷钾吸收特性及生物碱含量的变化 [J]. 中药材, 1990 (7): 3-5.
- [40] 孙迪, 樊桓均, 宋子叶, 等. 氮、磷、钾不同配比对一年生桔梗根部性状的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2019, 21 (12): 128-133.
- [41] 蒲盛才, 张兴翠, 丁德蓉, 等. 氮、磷、钾施用量及其配比对白芷产量的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2006 (1): 136-138.

Effects of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium on yield, quality and nutrient absorption of *Fritillaria cirrhosa* D. Don

WANG Xin-yue^{1, 2}, GAO Dan¹, YANG Ze-min^{1, 3}, FU Shao-bing⁴, LI Xi-wen^{1*}, CHEN Shi-lin^{1, 2*} (1. Institute of Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700; 2. School of Pharmacy, Guizhou University of Tradition Chinese Medicine, Guiyang Guizhou 550025; 3. School of Chinese Materia Medica, Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming Yunnan 650500; 4. Qinghai Lv Kang Biological Development Co., Ltd, Xining Qinghai 810003)

Abstract: This study was aimed to investigate the effects of combined application of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) on the yield, total alkaloid content and nutrient absorption of *Fritillaria cirrhosa* D. Don, to reveal the fertilization demand pattern of *F. cirrhosa*, and provide theoretical guidance for commercial cultivation of *F. cirrhosa*. The classical “3414” design scheme that include 14 treatments with three factors and four levels of N, P and K was employed to determine the yield, total alkaloid content and N, P and K content of five-year-old *F. cirrhosa* under different N, P and

K applications, and the fertilizer effect model of N, P and K dosage with yield and total alkaloid content of *F. cirrhosa* was fitted by using regression analysis method, combined with frequency analysis to obtain the high-quality fertilizer application dosage of *F. cirrhosa*. Combined application of N, P and K significantly affected the yield and total alkaloid content of *F. cirrhosa*. In a certain range of fertilization, the yield and total alkaloid content of *F. cirrhosa* exhibited a trend of ascending and then descending with the increase of fertilizer application, which was preferred under the dosage of T3 (N, P₂O₅ and K₂O were 12, 18 and 21 g/m², respectively) and T6 (N, P₂O₅ and K₂O were 24, 18 and 21 g/m², respectively). The agronomic efficiency of the T3 treatment was the highest among the 14 treatments, which was 30.96%. The N, P and K absorption and distribution ratios in the whole plant of *F. cirrhosa* under different treatments were 50.44%-54.36%, 5.72%-7.22% and 38.94%-42.33%, respectively, with no statistically considerable variation. Compared with T6 (baseline fertilization) treatment, the yield and total alkaloid content of T2 (N deficiency), T4 (P deficiency) and T8 (K deficiency) treatments decreased by 44.42%, 32.31%, 47.29% and 21.29%, 14.01%, 21.66%, respectively. The effects of different fertilizers on yield and total alkaloid content of *F. cirrhosa* were as follows: N ≈ K > P. The correlation between the application amount of N, P and K and the yield and total alkaloid content all achieved highly significant level ($P < 0.01$). According to the fertilizer efficiency model and frequency analysis method, the most suitable fertilization regimen for five-year-old *F. cirrhosa* was N 15.27-21.72 g/m², P₂O₅ 11.85-16.08 g/m² and K₂O 13.82-18.65 g/m², taking yield and total alkaloid content as the main indexes for investigation.

Key words: *Fritillaria cirrhosa* D. Don; formula fertilization; yield; fertilizer effect model; frequency analysis