

不同钾肥施用量对二年生射干生长、产量和品质的影响

李金鑫, 刘雨, 杨雅雯, 陈昌婕, 王梓灵, 苗玉焕, 刘大会*

(湖北中医药大学药学院, 武汉 430065)

[摘要] **目的:**探究不同钾肥施用量对二年生射干生长、产量和品质的影响,为实现射干的高产优质栽培提供合理的施钾依据。**方法:**在施用氮肥、磷肥均为 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的基础上,设置 $0(K_0)$ 、 $60(K_{60})$ 、 $120(K_{120})$ 、 $180(K_{180})$ 、 $240(K_{240})\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 共5个施钾处理,通过大田试验研究不同钾肥施用量处理对二年生射干农艺性状、药材产量、黄酮类成分含量和钾肥利用效率的影响。**结果:**施用钾肥可促进射干根系发育及分蘖苗产生,显著提高射干药材产量,与 K_0 处理相比增施钾肥射干增产 $16.0\%\sim 44.0\%$,其中 K_{180} 处理射干产量最高。不同钾肥施用量处理组均能促进射干根茎中的药效成分黄酮类物质的积累,其中 K_{120} 处理组芒果苷、射干苷、野鸢尾苷、鸢尾黄素、野鸢尾黄素、次野鸢尾黄素6种黄酮类成分的总积累量与 K_0 处理组比较增加 33.2% ;同时还能促进射干氮、钾、镁、铁、锌等元素的积累。随钾肥施用量增加,射干根茎钾积累量呈现先增加后减小趋势;偏生产力及根茎及叶片吸收率呈现逐渐降低的趋势;而钾肥的农学效率则在低钾至中高钾施用量时较高,达到高钾状态后明显下降。结合主成分分析对射干综合品质得分进行排名,由高到低的顺序为 $K_{120}>K_{180}>K_{240}>K_{60}>K_0$ 。**结论:**综合考虑二年生射干产量、品质、钾肥利用效率等因素,在团风县射干种植生产中推荐钾肥施用量以 $120\sim 166\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为宜。

[关键词] 射干; 施钾量; 产量; 品质; 钾肥利用效率

[中图分类号] R284.2;R289;R22;R2-031;R33 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-9903(2022)23-0142-07

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20221312

[网络出版地址] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20220803.2019.005.html>

[网络出版日期] 2022-08-04 9:19

Effects of Different Potassium Application Rates on Growth, Yield and Quality of Two-year-old *Belamcanda chinensis*

LI Jinxin, LIU Yu, YANG Yawen, CHEN Changjie, WANG Ziling, MIAO Yuhuan, LIU Dahui*

(Pharmacy Faculty, Hubei University of Chinese Medicine, Wuhan 430065, China)

[Abstract] **Objective:** To investigate the effects of different potassium application rates on the growth, yield and quality of two-year-old *Belamcanda chinensis* and to provide a basis for potassium application to achieve high yield and quality of *B. chinensis*. **Method:** On the basis of nitrogen and phosphorus fertilization at $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, we designed five potassium treatments of $0(K_0)$, $60(K_{60})$, $120(K_{120})$, $180(K_{180})$ and $240(K_{240})\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in a field experiment to study the effects of different potassium application rates on the agronomic traits, rhizome yield, flavonoid content and potassium fertilizer utilization efficiency of the two-year-old *B. chinensis*. **Result:** The application of potassium fertilizer promoted the root development and tillering, which significantly improved the yield of *B. chinensis*. Compared with the K_0 treatment, the other potassium treatments increased the rhizome yield by $16.0\%\sim 44.0\%$ and K_{180} had the highest yield. The application of potassium fertilizer increased the accumulation of flavonoids in the rhizomes of *B. chinensis*. The total accumulation of six flavonoids (mangiferin, tectoridin, iridin, tectorigenin, irigenin and irisfloreantin) increased

[收稿日期] 2022-06-13

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2017YFC1700704);国家中医药管理局青年岐黄学者支持项目;国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-21);湖北省教育厅高校优秀中青年科技创新团队计划项目(T2021008)

[第一作者] 李金鑫,在读博士,从事中药资源及生态农业研究,E-mail:996127503@qq.com

[通信作者] *刘大会,教授,从事中药资源及生态农业研究,E-mail:liudahui@hbtc.edu.cn

by 33.2% in the K_{120} treatment compared with that in the K_0 treatment. Furthermore, the application of potassium fertilizer promoted the accumulation of N, K, Mg, Fe and Zn. With the increase in potassium application rate, the potassium accumulation of *B. chinensis* first increased and then decreased, while the partial productivity and the absorptivity of roots and leaves gradually decreased. The agronomic efficiency of potassium fertilizer was higher at low to medium potassium application rates and decreased significantly at high potassium application rates. The results of the principal component analysis indicated that the ranking of the overall quality score of *B. chinensis* was $K_{120} > K_{180} > K_{240} > K_{60} > K_0$. **Conclusion:** Considering factors such as yield, quality and potassium utilization efficiency of two-year-old *B. chinensis*, the potassium application at 120-166 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ is recommended for the production of *B. chinensis* in Tuanfeng County.

[Keywords] *Belamcanda chinensis*; potassium application rate; yield; quality; potassium utilization efficiency

射干为鸢尾科射干属多年生草本植物,其干燥根茎为传统常用大宗药材射干,始载于《神农本草经》,具有清热解毒、消痰、利咽等功效^[1]。射干中化学成分类型较为丰富,主要为黄酮类、三萜类、挥发油、甾体类等,一般认为异黄酮为其主要药效成分^[2],2020年版《中华人民共和国药典》(简称《中国药典》)规定次野鸢尾黄素不得少于0.10%^[1]。《中药志》^[3]中记载射干“主产于湖北孝感、黄冈、襄阳,河南信阳、南阳,江苏江宁、江浦,安徽六安、芜湖。此外湖南、陕西、浙江、贵州、云南等地均有野生。其中以河南产量大,湖北品质好”。《药材资料汇编》^[4]也记载“湖北产者集散汉口,故名‘汉射干’。质结色黄,须根修净,又名‘光射干’,品质较优”。现湖北射干主要在黄冈团风、罗田、红安和孝感的大悟、孝昌等地有大面积种植,其中黄冈团风县的“团风射干”于2011年被国家质检总局批准为国家地理标志保护产品,也成为当地重要的乡村振兴产业。

钾为植物生长的必需营养元素之一,对提高农作物产量和改善农作物品质均有突出作用,有着品质元素之称。近年来在中药材栽培上通过施用钾肥来提高产量及品质的研究日趋受到重视。如钾肥能提高福白菊产量,同时显著增加菊花中的黄酮及绿原酸等药效成分^[5];不同种钾肥及其配施均能显著促进三七植株对钾的吸收和三七地下部对氮、磷的吸收,并显著提高三七皂苷含量与累积量^[6];增施钾肥能促进蕲艾的生长发育,显著提高艾叶产量及出绒率^[7]等。施用复合肥、有机肥、配方肥3种肥料处理对射干生长和产量的影响^[8],而关于射干合理规范施用钾肥的文献尚未见报道。因此本研究以湖北团风县射干为研究对象,采用田间试验研究不同钾肥施用量对团风二年生射干生长、产量及品质的影响,旨在为团风射干的规范化施肥提供科学

指导。

1 材料

试验于2018—2020年在国家中药材产业技术体系黄冈综合试验站在团风建立的试验示范基地黄冈农科院现代产业示范园(位于黄冈市团风县回龙山镇梅家墩)进行。团风县地处东经114°47'至115°14',北纬30°35'至30°54',属亚热带季风气候,江淮小气候区,年平均气温为15.7~17.5℃,年降水量1100 mm左右。试验地为黄壤,土壤基本理化性状为pH 7.18、有机质12.61 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮0.66 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷0.39 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾27.75 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮58.40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷3.96 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾137.28 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试种子来源于黄冈市农业科学院,经湖北中医药大学刘大会教授鉴定为鸢尾科植物射干*Belamcanda chinensi*。本试验选用二年生射干进行钾肥试验,即2018年4月16日进行射干种子直播种植,田间起垄宽70 cm、沟宽30 cm、沟深25 cm的小高垄,每垄上开3条浅沟,按照株行距30 cm×30 cm点播3条射干种子;田间射干种子在6月初逐步出苗,6月中下旬进行射干间苗和补苗,以保证田间全苗,12月中旬射干种苗地上部分枯萎。为了促进射干种苗生长,2018年射干播种前田间基施复合肥10 kg/亩(1亩≈667 m^2),9月份苗期追施复合肥5 kg/亩。肥料试验于2019年3月—2022年4月进行。供试肥料为尿素(N,46%),过磷酸钙(P_2O_5 ,15%)、氯化钾(K_2O ,60%)、复合肥(N- P_2O_5 - K_2O ,15:15:15)。

SH220N型石墨消解仪、K9860型全自动凯氏定氮仪、TANK ECO型微波消解仪(山东海能科学仪器有限公司),A580型紫外-可见分光光度计(翱艺仪器有限公司),A3型原子吸收分光光度计(北京

普析通用仪器责任有限公司), UltiMate 3000 型高效液相色谱仪(美国戴安公司), XB220A 型分析天平(普利赛斯国际贸易有限公司), DGG-9123AD 型电热恒温鼓风干燥箱(上海森信实验仪器有限公司), KQ2200DB 型数控超声波清洗器(上海科导超声仪器有限公司), 5110 ICP-OES 型等离子体发射光谱仪(美国 Agilent 公司)。

对照品芒果苷、野鸢尾苷、鸢尾黄素、野鸢尾黄素(上海源叶生物科技有限公司, 批号分别为 4773-96-0、491-74-7、548-77-6、548-76-5, 纯度均 $\geq 98\%$); 对照品射干苷、次野鸢尾黄素(中国食品药品检定研究院, 批号分别为 111632-200602、11157-201703, 纯度 $\geq 99.9\%$); 磷、镁、锰、铁、铜、锌[国家有色金属及电子材料分析测试中心, 质量浓度 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 批号分别为 GSB 04-1721-2004(a)、GSB 04-1735-2004、GSB 04-1736-2004、GSB 04-1726-2004、GSB 04-1725-2004、GSB 04-1761-2004]; 钾、钙[中国计量科学研究院, 批号分别为 GBW(E)080125、GBW(E)080118]。乙腈为色谱纯, 其他试剂均为分析纯。

2 方法

2.1 试验设计 田间试验在施用氮肥 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和磷肥 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的基础上, 共设计 5 个钾肥施用量处理, 0 、 60 、 120 、 180 、 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 依次表示为 K_0 、 K_{60} 、 K_{120} 、 K_{180} 、 K_{240} 。每处理设置 4 次重复, 共计 20 个小区, 每个小区面积为 $6\text{ m}\times 2\text{ m}=12\text{ m}^2$, 二年生射干田间密度为 $30\text{ cm}\times 30\text{ cm}$ 。田间试验的磷肥和钾肥作为追肥, 于 2019 年 3 月 8 日射干冒青时行间开沟一次性全部施入; 氮肥 60% 做追肥施用(3 月 8 日基施), 5 月 4 日追施 20%, 10 月 8 日追施剩下 20%。田间试验除施肥外, 其他按照常规管理措施执行。

2.2 测定项目

2.2.1 不同施肥处理组农艺性状测定 于 2019 年 9 月 18 日进行射干植株农艺性状的测量, 主要包括株高、叶片数、茎秆数、叶片宽、分枝数、果荚数、分蘖苗数、分蘖苗高等。

2.2.2 小区产量测量 于 2020 年 4 月上旬进行射干采收测产。将田间各小区射干地下根茎全部挖取, 清水清洗干净, 在大棚里晾干后, 搓去须根统计根茎质量。

2.2.3 单株各器官干物质积累量测量 每个小区取 4 株长势均一的射干, 挖取全株, 洗净, 按地下部分、茎秆、叶片等分开制样, 称重, 晾干后称重, 计算折干率, 搓去须根, 统计单株根茎、须根、茎、叶各器

官的干物质积累量。

2.2.4 黄酮类成分测定 参照杨雅雯等^[9]建立的方法通过高效液相色谱法对射干中芒果苷、射干苷、野鸢尾苷、鸢尾黄素、野鸢尾黄素、次野鸢尾黄素等黄酮类成分的含量进行测定。

2.2.5 矿质元素测定 取样品 0.1 g , 利用石墨炉经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 法消化, 采用凯氏定氮法测氮、钼抵抗比色法测磷, 火焰法-原子吸收分光光度法测钾。另取样品 0.1 g , 用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 浸提过滤, 取滤液适当稀释后经 ICP-OES 测钙、镁、铁、锰、铜和锌。

2.3 钾肥利用效率计算 射干根茎钾积累量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) = 射干根茎钾浓度 (%) \times 射干根茎产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); 钾肥偏生产力 (PFP, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) = 施钾射干产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) / 钾肥的投入量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); 钾肥根茎和叶片利用率 (ARE) = (施钾区根茎和叶片钾积累量 - 未施钾区根茎和叶片钾积累量) / 钾肥的投入量 $\times 100\%$; 钾肥农学效率 (AE) = (施钾作物经济产量 - 不施钾作物经济产量) ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) / 肥料投入量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

2.4 数据处理与分析 利用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行数据统计和分析。

3 结果与分析

3.1 不同钾肥施用量对射干农艺性状、生长和产量的影响 由表 1 可知, 不同钾肥施用量对射干株高、叶宽、叶长、叶片数、果荚数、茎秆数等生长性状的影响在统计学上无明显差异。但随钾肥施用量的增加, 分蘖苗数目成显著增加趋势, K_{180} 处理组和 K_{240} 处理组相较于 K_0 处理分别增加 46.8%、63.8%; 射干植株茎秆数、叶宽、叶片数也均呈现逐渐增加趋势; 果荚数目及分蘖苗高度则呈先增加后减小的趋势。结果表明施用钾肥对射干植株农艺性状的影响主要体现为能够促进射干植株不断分蘖, 产生新生分蘖苗和茎秆等。

不同钾肥施用量对射干生长过程中各器官干物质的积累影响显著。随着钾肥施用量的增加, 射干根茎、须根、茎秆及叶片的干物质积累量均呈现先增加后减小的趋势。当田间钾肥施用量为 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 叶片的干物质积累量达最大值, 相较于 K_0 处理组增加 11.2%; 施用量为 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 射干根茎、须根、茎秆的干物质积累量达到最大值, 相较于 K_0 处理组增加 39.8%、41.3%、24.9%。随着钾肥施用量继续增加, 射干植株中各器官积累量下降明显, 高钾环境会对射干植株的正常生长产生抑制作用, 其地上部分所受抑制程度更为明显, 根茎所占单株

表1 不同钾肥施用量对射干农艺性状的影响 ($\bar{x}\pm s, n=4$)

Table 1 Effect of different potassium fertilizer application on agronomic traits of *B. chinensis* ($\bar{x}\pm s, n=4$)

组别	株高/cm	茎秆数	叶片数	叶宽/cm	叶长/cm	果荚数	分蘖苗数	分蘖苗高/cm
K ₀	138.0±18.6 ^a	5.1±1.2 ^a	9.1±1.8 ^a	2.8±0.6 ^a	46.4±6.2 ^a	13.3±5.0 ^a	9.4±2.3 ^b	53.8±4.4 ^b
K ₆₀	142.1±10.3 ^a	6.3±2.1 ^a	9.7±1.9 ^a	2.9±0.8 ^a	47.2±5.3 ^a	13.3±5.0 ^a	8.4±1.7 ^b	58.0±7.1 ^{ab}
K ₁₂₀	129.2±10.8 ^a	7.1±2.8 ^a	10.0±1.1 ^a	3.0±0.4 ^a	44.1±2.1 ^a	14.5±6.3 ^a	10.2±2.3 ^b	74.8±18.0 ^a
K ₁₈₀	132.5±40.1 ^a	7.1±2.6 ^a	10.1±1.1 ^a	3.0±0.5 ^a	47.7±5.9 ^a	14.9±8.6 ^a	13.8±1.5 ^a	72.8±15.9 ^{ab}
K ₂₄₀	136.7±9.8 ^a	7.1±1.9 ^a	10.2±1.9 ^a	3.1±0.5 ^a	46.2±6.0 ^a	14.3±5.7 ^a	15.4±3.4 ^a	68.0±18.0 ^{ab}

注:同列不同字母表示具有统计学差异 $P<0.05$ (表2、表3同)

的比例不断升高。此外,随着钾肥施用量的增加,射干产量呈现先增加后减小的趋势,在施钾量为180 kg·hm⁻²时,药材产量达到最大值;与K₀(未施钾)处理相比,不同水平钾肥施用量处理下田间射干根茎产量分别增加了16.0%、25.8%、44.0%、

22.7%。以每公顷产量为Y,钾肥施用量为X进行曲线拟合,得出拟合方程为 $Y=-0.0316X^2+10.511X+2331.6$ ($R^2=0.8317$)。由方程可知当田间钾肥施用量达到166 kg·hm⁻²时,射干产量可达最大值。结果见表2。

表2 不同钾肥施用量对射干单株各器官干物质质量及田间药材产量的影响 ($\bar{x}\pm s, n=4$)

Table 2 Effect of different potassium fertilizer application on dry matter quality of each organ of single plant and herb yield in field ($\bar{x}\pm s, n=4$)

组别	根茎/g/株	须根/g/株	茎秆/g/株	叶片/g/株	单株总重/g/株	药材产量/kg·hm ⁻²
K ₀	24.2±1.6 ^b	6.7±1.9 ^b	12.3±1.3 ^{ab}	31.7±0.8 ^{ab}	74.9±3.5 ^{bc}	2391.5±138.8 ^c
K ₆₀	27.4±4.9 ^{ab}	7.7±0.8 ^{ab}	14.6±0.6 ^a	35.2±3.1 ^a	85.6±8.1 ^{ab}	2771.8±127.8 ^b
K ₁₂₀	29.3±1.1 ^{ab}	7.4±0.5 ^{ab}	14.6±2.2 ^a	34.6±2.3 ^a	85.8±2.9 ^{ab}	3008.2±143.5 ^b
K ₁₈₀	33.9±3.4 ^a	9.5±1.3 ^a	15.3±2.8 ^a	30.3±4.3 ^{ab}	89.0±8.3 ^a	3448.5±149.5 ^a
K ₂₄₀	27.3±3.0 ^{ab}	6.6±1.0 ^b	10.6±4.0 ^b	27.1±5.2 ^b	71.6±12.2 ^c	2930.3±138.5 ^b

3.2 不同钾肥施用量对射干根茎黄酮类成分含量的影响 由图1可知,随着钾肥施用量的增加,射干根茎中射干苷和鸢尾黄素含量呈逐渐增加的趋势,高钾条件下(K₂₄₀)相较K₀处理分别增加49.5%、58.5%。芒果苷、野鸢尾苷、野鸢尾黄素和次野鸢尾黄素含量则呈现先增加后减小的趋势,当大田钾肥施用量为180 kg·hm⁻²时,芒果苷含量达到最大值,与K₀处理相比含量增加23.9%;当钾肥施用量为120 kg·hm⁻²时,野鸢尾苷、野鸢尾黄素及次野鸢尾黄素含量达到最高,较之K₀处理下含量分别增加10.2%、44.9%、44.8%,高钾条件下芒果苷、野鸢尾黄素和次野鸢尾黄素含量较之K₀处理仍有所增加,但野鸢尾苷含量则显著下降,可知高钾环境不利于野鸢尾苷含量的积累。此结果表明适量的钾肥施用量处理能够显著促进射干根茎中6种黄酮类药效成分的合成和积累,提高射干药材品质。

3.3 不同钾肥施用量对射干根茎和叶片中矿质元素含量的影响 由表3可知,在射干根茎中,随着钾肥施用量的增加,氮、镁、铁含量均呈现减小的趋势,施钾量达180 kg·hm⁻²时,根茎中铁含量较K₀处

理增加32.4%;磷、钙、锰含量随钾肥施用量增加呈现先减小后增加的趋势,除锰外,磷、钙含量在不同水平钾肥施用量处理下均低于K₀处理组;钾、锌含量随钾肥施用量增加呈增加趋势,铜含量呈降低趋势。而在射干叶片中,随钾肥施用量增加,氮、钾、铁含量呈增加趋势,磷、钙、镁含量呈降低趋势,锰含量呈现先增加后减小的趋势,铜与锌含量呈先减小后增加的趋势。

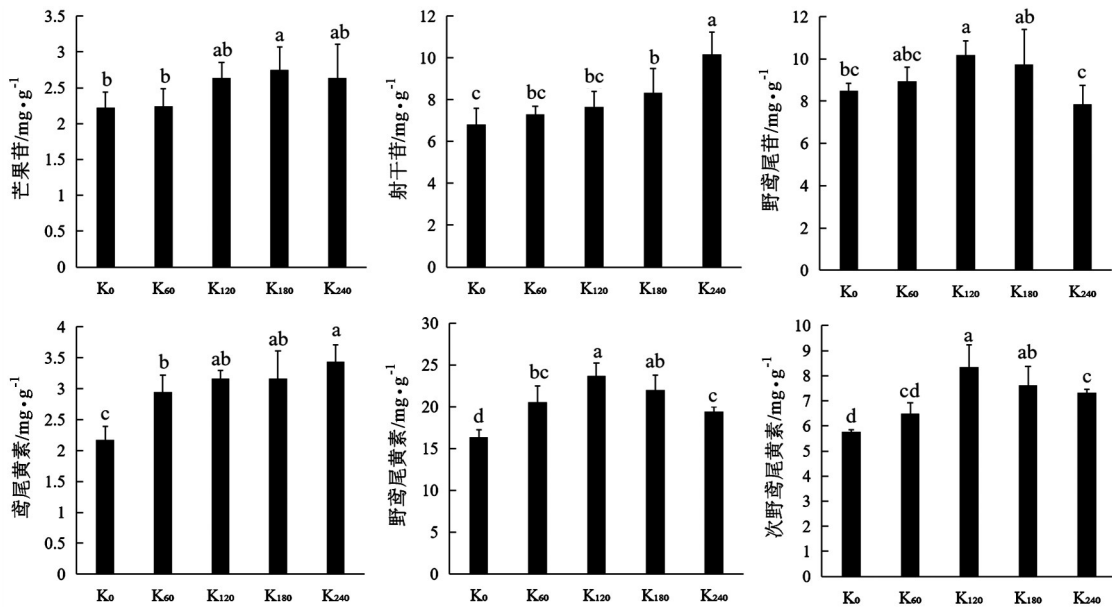
3.4 不同钾肥施用量对射干钾肥利用效率的影响

3.4.1 不同钾肥施用量对射干钾积累量的影响

随着钾肥施用量的增加,射干根茎中钾积累量呈显著性增加趋势,K₁₈₀处理下达到最大值,K₂₄₀组相较于K₁₈₀处理组略有下降,与K₁₂₀处理组中根茎钾积累量相当。K₆₀、K₁₂₀、K₁₈₀、K₂₄₀相较于K₀处理钾积累量分别增加25.0%、42.7%、68.2%和45.7%。见图2。

3.4.2 不同钾肥施用量对钾肥偏生产力的影响

射干钾肥的偏生产力随施用量的增加耳逐渐降低,且各处理组之间均存在显著差异。在本实验中K₆₀处理下射干钾肥的偏生产力最高,K₁₂₀、K₁₈₀、K₂₄₀较之分别降低45.7%、58.5%和73.6%。见图2。



注:不同字母表示差异具有统计学意义 $P < 0.05$ (图2同)

图1 不同钾肥施用量对射干根茎中6种黄酮类成分含量 ($\bar{x} \pm s, n=4$)

Fig. 1 Content of six flavonoid components in rootstock of *B. chinensis* under different potassium application treatment ($\bar{x} \pm s, n=4$)

表3 不同钾肥施用量对射干根茎和叶片中矿质元素含量的影响

Table 3 Mineral element contents in rootstock and leaves of *B. chinensis* under different potassium application treatments

器官	组别	氮/%	磷/%	钾/%	钙/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	镁/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	锰/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	铁/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	铜/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	锌/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
根茎	K_0	2.54±0.09 ^a	0.24±0.01 ^a	0.71±0.07 ^b	2.80±0.06 ^a	2.87±0.07 ^{ab}	38.73±2.74 ^{ab}	0.74±0.08 ^c	15.27±0.54 ^a	41.86±1.94 ^a
	K_{60}	2.61±0.20 ^a	0.22±0.01 ^b	0.77±0.01 ^{ab}	2.63±0.14 ^{ab}	3.06±0.11 ^a	36.31±1.17 ^{ab}	0.80±0.04 ^{bc}	14.68±2.16 ^{ab}	41.27±3.92 ^a
	K_{120}	2.56±0.27 ^a	0.22±0.01 ^b	0.81±0.03 ^a	2.32±0.09 ^c	2.89±0.11 ^{ab}	34.74±2.77 ^b	0.98±0.01 ^a	13.52±0.75 ^{ab}	41.88±3.27 ^a
	K_{180}	2.53±0.03 ^a	0.23±0.00 ^{ab}	0.83±0.08 ^a	2.47±0.09 ^{bc}	2.79±0.10 ^b	37.22±4.30 ^{ab}	0.86±0.08 ^b	14.07±0.66 ^{ab}	42.33±2.33 ^a
	K_{240}	2.15±0.24 ^b	0.23±0.01 ^{ab}	0.84±0.05 ^a	2.70±0.16 ^a	2.90±0.25 ^{ab}	39.76±2.79 ^a	0.80±0.05 ^{bc}	13.18±0.56 ^b	43.92±1.41 ^a
叶片	K_0	2.70±0.10 ^b	0.32±0.01 ^a	3.40±0.11 ^d	2.52±0.02 ^a	4.47±0.06 ^a	22.09±1.14 ^{ab}	0.16±0.01 ^d	7.89±0.75 ^{ab}	43.76±2.87 ^a
	K_{60}	2.87±0.27 ^{ab}	0.29±0.02 ^b	3.90±0.14 ^c	2.43±0.06 ^a	4.18±0.04 ^b	22.65±0.61 ^a	0.20±0.01 ^{ab}	7.58±0.51 ^{bc}	37.74±1.79 ^{bc}
	K_{120}	2.99±0.12 ^a	0.29±0.02 ^b	3.95±0.18 ^c	2.23±0.04 ^b	3.97±0.07 ^c	21.10±0.93 ^{ab}	0.18±0.09 ^c	6.72±0.87 ^{cd}	36.56±2.81 ^{bc}
	K_{180}	3.00±0.07 ^a	0.27±0.01 ^b	4.35±0.14 ^b	2.18±0.04 ^b	3.57±0.04 ^d	20.22±1.35 ^b	0.19±0.01 ^{bc}	6.14±0.34 ^d	33.97±2.46 ^c
	K_{240}	3.09±0.10 ^a	0.29±0.02 ^b	4.69±0.12 ^a	2.12±0.16 ^b	3.76±0.27 ^d	21.81±1.74 ^{ab}	0.21±0.01 ^a	8.99±1.00 ^a	39.02±1.89 ^b

3.4.3 不同钾肥施用量对射干根茎和叶片吸收率的影响 从图2中可知,随着施钾肥施用量增加,射干根茎和叶片吸收率呈现逐渐降低的趋势,且各处理间吸收率均存在显著性差异, K_{60} 处理下吸收率最高,为63.61%。与 K_{60} 处理组相比, K_{120} 、 K_{180} 、 K_{240} 处理下射干的根茎和叶片吸收率分别下降28.5%、46.6%和71.2%。

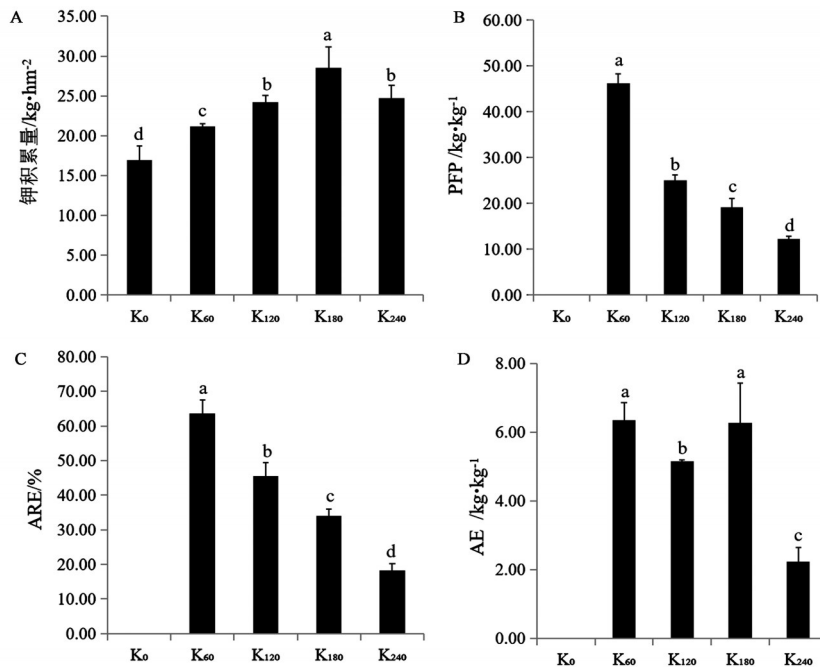
3.4.4 不同钾肥施用量对钾肥农学效应的影响

射干钾肥农学效率随钾肥施用量增加总体上呈现下降趋势,见图2,施钾量在60~180 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,钾肥农学效应呈现先降低后升高的趋势,且变化具有显著性差异,其中 K_{60} 与 K_{180} 处理下农学效率相当,与 K_{60} 处理相比, K_{120} 和 K_{240} 处理分别下降18.9%、

64.8%。

3.5 不同钾肥施用量处理下射干品质指标的主成分分析

选择射干根茎中6种黄酮类成分作为射干品质标准指标,将其导入SPSS 19.0进行主成分分析,提取特征值 ≥ 1 ,累积贡献率为94.746%的2个主成分(F_1, F_2),进行主成分得分分析。选择贡献率作为权重,建立主成分评价函数为 $F=0.655 7F_1+0.291 7F_2$,取特征值根方计算各个品质指标权重系数见表4。将标准化的射干品质指标带入公式进行不同钾肥施用量处理组的主成分得分分析,结果及排名见表5。不同钾肥施用量处理组射干品质指标高低依次为 $K_{120} > K_{180} > K_{240} > K_{60} > K_0$,随着钾肥施用量增加,射干品质呈现先增高后降低的趋势,说明提高钾肥



注:A.钾积累量;B.钾肥偏生产力;C.根茎和叶片钾肥吸收利用率;D.钾肥农学效率

图2 不同钾肥施用量对射干指标的影响($\bar{x} \pm s, n=4$)

Fig. 2 Effect of different potassium applications of *B. chinensis* under different potassium application treatments ($\bar{x} \pm s, n=4$)

施用量有助于射干品质提升,但过量则会导致品质下降。

表4 不同钾肥施用量处理下射干根茎品质指标主成分分析

Table 4 Principal component analysis of rootstock quality indexes of *B. chinensis* under different potassium fertilizer application treatments

品质指标	主成分	
	因子1	因子2
芒果苷	0.460 0	-0.126 5
射干苷	0.275 0	-0.632 9
野鸢尾苷	0.269 1	0.634 6
鸢尾黄素	0.445 9	-0.279 2
野鸢尾黄素	0.447 8	0.304 1
次野鸢尾黄素	0.490 9	0.101 6
初始特征值	3.934 4	1.750 4
贡献百分率/%	65.572 5	29.173 7
累积贡献率/%	65.572 5	94.746 2

4 讨论与结论

从钾矿资源储量来看,我国可溶性钾资源匮乏,仅能满足当前农业需求的50%左右,需长期依靠进口满足内需^[10],提高钾肥利用效率可在一定程度上缓解此问题。因此,通过探索在实际射干种植中应该精准控制的钾肥投入量,在提高钾肥利用效率的同时实现射干的增产提质十分必要。

表5 不同钾肥施用量处理下射干根茎品质指标综合得分及排名

Table 5 Comprehensive scores and ranking of rootstock quality indicators of *B. chinensis* under different potassium fertilizer application treatments

组别	F ₁	F ₂	F	排名
K ₀	-1.967 4	0.070 5	-1.896 9	5
K ₆₀	-0.632 0	0.113 6	-0.518 4	4
K ₁₂₀	1.180 8	0.373 5	1.554 3	1
K ₁₈₀	0.928 5	0.097 5	1.026 0	2
K ₂₄₀	0.490 1	-0.655 0	-0.164 9	3

4.1 不同钾肥施用量对射干生长和药材产量的影响 增施钾肥可提高作物的抗病和抵抗环境胁迫的能力,故又被誉为品质元素^[11]。适量增施钾肥可在一定程度上增强水稻的分蘖能力,进而达到增产的目的^[12]。本试验研究发现,增施钾肥能够明显提高射干的新生分蘖苗数目及高度,其中K₂₄₀处理分蘖苗最多,从产量及其构成因素可见,射干作为多年生药材,适量钾肥能够通过促进分蘖苗的产生提高射干产量。此外,钾素能使作物根系发达,增加根部淀粉含量,促进根部干物质积累,进而提高根茎类作物产量^[13]。本试验中K₁₈₀处理组显著提高了射干的须根、根茎等根系器官的干物质积累,最终使产量相较于不施钾肥提高43.90%。但过量施用钾肥会对射干产量产生不利影响,随着钾肥施用量的不断增加,射干根茎产量呈现先增加后减小的

趋势,这与金燕清等^[14]研究发现随钾浓度增加甘草鲜根重呈现先增后减趋势的结果一致。

4.2 不同钾肥施用量对射干药材品质的影响 黄酮类成分是射干的指标性成分,也是表征射干质量的关键质量标志物^[2]。本文通过高效液相色谱法(HPLC)测定了不同钾肥施用量下射干药材中6种黄酮类成分,发现适量增施钾肥有助于芒果苷、射干苷、野鸢尾苷、鸢尾黄素、野鸢尾黄素及次野鸢尾黄素的生成,当钾肥施用量超过120 kg·hm⁻²时,根茎中野鸢尾苷、野鸢尾黄素及次野鸢尾黄素等黄酮类成分的积累受到抑制、含量呈下降趋势,此结果与报道的其他中药材施用钾肥实验结果相似^[15-16]。本试验结果表明,不同钾肥施用量对射干药材吸收和积累不同元素的影响不同,与不施用钾肥相比,中低施用量下促进了射干根茎对镁和铁元素的吸收与积累,高施用量下促进了射干根茎对锰元素的吸收与积累,所有施用钾肥的情况下均能够促进射干根茎对锌元素的吸收与积累、抑制射干根茎中铜元素的积累。这些变化趋势可能与植物元素相互作用、生理需求和基质养分有效性的变化相关^[17]。

4.3 不同钾肥施用量对射干钾肥利用效率的影响 钾积累量、钾肥偏生产力等指标,从不同角度描述了植物对钾肥的利用效率。随着钾肥施用量增加,射干钾积累量呈现先增加后减小趋势;偏生产力和根茎及叶片利用率呈现逐渐降低的趋势;而钾肥的农学效率则在低钾至中高钾施用量时较高,达到高钾状态后明显下降。结果表明,一定范围内增施钾肥可以提高植株干物质积累与根系产量,但随钾素增加植株钾素吸收利用率、钾素生产效率呈下降趋势^[18];增施钾肥有利于提高植株对氮、磷、钾养分的吸收速率,但过量则会抑制植株对氮、钾的吸收^[19]。

在本试验条件下,施用钾肥显著影响射干的生长、药材产量和品质。适宜的钾肥用量可以显著的促进射干产生分裂苗、并提高产量。此外,由不同钾肥施用量下射干根茎黄酮类成分含量的主成分分析结果可知,提高田间钾肥施用量有助于射干品质的提高,但钾肥不宜过量。结合不同钾肥施用量对射干产量的影响,建议射干人工栽培过程中钾肥的投入量在120~166 kg·hm⁻²为宜。

[利益冲突] 本文不存在任何利益冲突。

[参考文献]

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[M]. 北京:

中国医药科技出版社,2020:297-298.

[2] 凌悦,陈金鹏,叶晴,等. 射干的研究进展及其质量标志物的预测分析[J]. 中草药,2022,53(5):1595-1608.
[3] 中国医学科学院药物研究所. 中药志. 第1册[M]. 北京:人民卫生出版社,1959.
[4] 中国药学会上海分会. 药材资料汇编. 下册[M]. 上海:科技卫生出版社,1959.
[5] 刘大会,杨特武,朱端卫,等. 不同钾肥用量对福田河白菊产量和质量的影响[J]. 中草药,2007,38(1):120-124.
[6] 郑冬梅,欧小宏,米艳华,等. 不同钾肥品种及配施对三七产量和品质的影响[J]. 中国中药杂志,2014,39(4):588-593.
[7] 陈昌婕,马琳,苗玉焕,等. 施用钾肥对蕲春蕲艾产量、出绒率及品质的影响[J]. 中国农业科技导报,2022,24(2):201-209.
[8] 姚春娟,熊光康,郭圣茂. 施肥处理对射干生理和生长的影响[J]. 北方园艺,2018(15):149-158.
[9] 杨雅雯,刘勇,刘雨,等. 不同干燥方法对射干药材干燥特性、外观性状和有效成分的影响[J]. 中国中药杂志,2021,46(2):366-373.
[10] 谭慧婷,孙伟,崔玉照,等. 钾矿资源现状与杂卤石的开发应用分析[J]. 无机盐工业,2022,54(6):23-30.
[11] 李莉,展铭,万正煌,等. 钾素水平对绿豆产量及养分吸收积累的影响[J]. 湖北农业科学,2012, 51(24):5621-5624.
[12] 王丽妍,杨成林,史国庆. 不同钾肥用量对寒地水稻产量和品质的影响[J]. 北方水稻,2018,48(3):1-4,8.
[13] 张海燕,董顺旭,解备涛,等. 钾肥用量对瘠薄地甘薯产量和钾肥利用率的影响[J]. 核农学报,2020, 34(10):2299-2306.
[14] 金燕清,王秋玲,侯俊玲,等. 氮磷钾配施对甘草生物量和活性成分的影响[J]. 中国现代中药,2016, 18(7):881-887.
[15] 卢丽兰,杨新全,战晴晴,等. 钾水平对广藿香生长、挥发油及药效成分的影响[J]. 中药材,2020,43(3):541-545.
[16] 张锋,韩金龙,倪大鹏,等. 不同钾肥用量对白花丹参产量及药材品质的影响[J]. 山东农业科学,2014,46(10):60-62,67.
[17] YAN Z, HOU X, HAN W, et al. Effects of nitrogen and phosphorus supply on stoichiometry of six elements in leaves of *Arabidopsis thaliana* [J]. Ann Bot, 2019, 123(3):441-450.
[18] 杨雪,王引权. 钾素营养对药用植物品质形成影响的研究进展[J]. 浙江中医药大学学报,2017,41(8):711-714.
[19] 李婉豫,田丽波,商桑,等. 不同氮、钾用量对嫁接苦瓜养分吸收、分配及产量的影响[J]. 热带作物学报,2021,42(10):2881-2889.

[责任编辑 顾雪竹]