

刘仁浪, 蒋翼杰, 江美彦, 等. 紫色土中氮肥、磷肥、钾肥配施对白芷产量及有效成分的影响[ J ]. 江苏农业学报, 2023, 39( 1 ): 208-217.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.01.024

## 紫色土中氮肥、磷肥、钾肥配施对白芷产量及有效成分的影响

刘仁浪<sup>1</sup>, 蒋翼杰<sup>1</sup>, 江美彦<sup>1</sup>, 陈靳松<sup>1</sup>, 肖婕妤<sup>1</sup>, 郑全林<sup>2</sup>, 吴卫<sup>1</sup>

(1. 四川农业大学农学院, 四川 温江 611130; 2. 遂宁天地网川白芷产业有限公司, 四川 遂宁 629000)

**摘要:** 在国家防止耕地“非粮化”政策下, 为合理利用四川地区紫色土(坡地、荒地等)进行白芷种植, 本研究采用 3 因素 5 水平二次正交回归旋转组合设计, 探究紫色土中氮肥、磷肥、钾肥配施对川芷 2 号白芷品种产量和有效成分含量的影响。结果表明, 紫色土中氮肥、磷肥、钾肥配施对白芷产量的影响大小为钾肥>磷肥>氮肥, 钾肥和磷肥对产量的影响都达到显著或极显著水平, 氮肥对白芷产量没有显著影响; 氮肥、磷肥、钾肥配施对欧前胡素含量的影响为钾肥>氮肥>磷肥, 对异欧前胡素含量的影响为磷肥>氮肥>钾肥, 可见钾肥显著影响欧前胡素含量, 磷肥显著影响异欧前胡素含量。通过统计频数法优化出施肥配方, 在氮肥施用量为 233.73~283.36 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥施用量为 1 380.66~1 522.04 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥施用量为 215.14~240.03 kg/hm<sup>2</sup> 时川芷 2 号能实现高产, 在氮肥施用量为 240.39~276.58 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥施用量为 1 097.69~1 197.45 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥施用量为 163.12~185.91 kg/hm<sup>2</sup> 时可以均衡地提高川芷 2 号根中欧前胡素和异欧前胡素含量。最终利用灰色关联度和逼近理想解排序法(DTOPSIS 法)综合获得在紫色土中川芷 2 号的最优施肥方案: 氮肥施用量为 193.40 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥施用量为 1 449.26 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥施用量为 239.88 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 紫色土; 白芷; 配施; 产量; 欧前胡素; 异欧前胡素

**中图分类号:**           **文献标识码:** A           **文章编号:** 1000-4440(2023)01-0208-10

## Effects of combined application of nitrogen fertilizer, phosphorus fertilizer and potassium fertilizer on yield and active components of *Angelica dahurica* in purple soil

LIU Ren-lang<sup>1</sup>, JIANG Yi-jie<sup>1</sup>, JIANG Mei-yan<sup>1</sup>, CHEN Jin-song<sup>1</sup>, XIAO Jie-yu<sup>1</sup>, ZHENG Quan-lin<sup>2</sup>, WU Wei<sup>1</sup>

(1. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, China; 2. Suining Tiandi Network Chuanbaizhi Industrial Co., Ltd., Suining 629000, China)

**Abstract:** Under the Chinese policy background of preventing non-grain conversion of cultivated land, a quadratic orthogonal regression rotation combination design using three factors and five levels was adopted in this study to make rational use of purple soil (sloping field, wasteland, etc.) in Sichuan area for *Angelica dahurica* var. *formosana* planting and to

收稿日期: 2022-03-25

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2021YFYZ0012); 四川省中医药重点学科建设项目(2021-16-4); 四川农业大学学科建设双支计划——学科创新团队项目(P202108)

作者简介: 刘仁浪(1994-), 男, 云南昭通人, 硕士研究生, 研究方向为药用植物栽培。(E-mail) 470032596@qq.com

通讯作者: 吴卫, (E-mail) ewuwei@sicau.edu.cn

explore the effects of combined application of nitrogen fertilizer, phosphate fertilizer and potassium fertilizer in purple soil on the yield and effective components content of *A. dahurica* var. *formosana* variety of Chuanzhi 2. The results showed that, the effect of combined application of nitrogen fertilizer, phosphate fertilizer and potassium fertilizer on *A. dahurica* var. *formosana* yield in purple soil was

ranked as follows: potassium fertilizer > phosphate fertilizer > nitrogen fertilizer. Both phosphate fertilizer and potassium fertilizer had significant or extremely significant effect on the yield of *A. dahurica* var. *formosana*, while nitrogen fertilizer had no significant effect on the yield of *A. dahurica* var. *formosana*. The effect of combined application of nitrogen fertilizer, phosphate fertilizer and potassium fertilizer on the imperatorin content was ranked as potassium fertilizer > nitrogen fertilizer > phosphate fertilizer, while the effect on isoimperatorin content was ranked as phosphate fertilizer > nitrogen fertilizer > potassium fertilizer. It can be seen that potassium fertilizer significantly affected imperatorin content, and phosphate fertilizer significantly affected isoimperatorin content. The fertilization formula was optimized by statistical frequency method, and it was found that Chuanzhi 2 could achieve high yield when the application levels of nitrogen fertilizer, phosphate fertilizer and potassium fertilizer were 233.73–283.36 kg/hm<sup>2</sup>, 1 380.66–1 522.04 kg/hm<sup>2</sup> and 215.14–240.03 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. The contents of imperatorin and isoimperatorin in roots of Chuanzhi 2 could equably increase when the application levels of nitrogen fertilizer, phosphate fertilizer and potassium fertilizer were 240.39–276.58 kg/hm<sup>2</sup>, 1 097.69–1 197.45 kg/hm<sup>2</sup> and 163.12–185.91 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. Finally, the optimal fertilization scheme for Chuanzhi 2 in purple soil was obtained by comprehensively using the grey relational degree and technique for order preference by similarity to ideal solution (DTOPSIS) method, and the application levels of nitrogenous fertilizer, phosphate fertilizer and potassium fertilizer were 193.40 kg/hm<sup>2</sup>, 1 449.26 kg/hm<sup>2</sup> and 239.88 kg/hm<sup>2</sup>, respectively.

**Key words:** purple soil; *Angelica dahurica*; combined application; yield; imperatorin; isoimperatorin

中药白芷 [*Angelica dahurica* (Fisch. ex Hoffm) Benth. et Hook. f.] 药食两用, 其原植物为伞形科当归属植物白芷 (*A. dahurica*) 和杭白芷 (*A. dahurica* var. *formosana*), 具有驱风散寒、清热排脓、消肿止痛等功效<sup>[1-2]</sup>。川白芷 (四川)、祁白芷 (河北)、禹白芷 (河南)、杭白芷 (浙江) 是目前市场上主要流通的白芷品种<sup>[3]</sup>。据《遂宁县志》和《遂宁白芷志》记载, 川白芷栽培历史至今已有400~600年, 是著名的川产道地药材<sup>[4-5]</sup>, 一般种植于涪江两岸的灰潮土上, 但目前随着城镇化进程的加快, 白芷种植区域从涪江两岸扩张于四川内地的紫色土区域<sup>[6]</sup>。《全国土地利用总体规划纲要(2006–2020年)》提出, 要确保18亿亩耕地红线, 而四川紫色土耕地集中分布于四川盆地丘陵区 and 海拔800 m以下的低山区, 占全省耕地面积的68%<sup>[7-8]</sup>。本课题组调研发现, 在国家防止耕地“非粮化”政策下, 川白芷种植于紫色土区域(坡地、荒地等)的面积越来越大, 且市场认可度和售价都超过用灰潮土种植的白芷。

施肥、产地土壤条件、生长环境、播种时期等因素会影响白芷的生长发育及次生代谢<sup>[9-14]</sup>。前人对白芷施肥的相关研究中大多探究施肥措施对白芷抽薹率和产量的影响以及不同肥料种类对川白芷产量的影响, 并未见关于紫色土中白芷配方施肥的研究报道<sup>[9-10, 15]</sup>。贾全全等<sup>[16]</sup>在江西省红壤丘陵区引种4大白芷品种(川白芷、杭白芷、禹白芷、祁白芷), 发现杭白芷最适宜栽培于江西省红壤丘陵区。因此应依

据白芷产地土壤和品种的特性制定科学合理的施肥措施, 本研究采用3因素5水平二次正交回归旋转组合设计方法, 探讨紫色土中氮肥、磷肥、钾肥配施对白芷品种川芷2号产量及品质的影响, 以期川芷2号在紫色土上种植时合理施肥提供科学依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料及试验点概况

本试验于2019–2020年在川白芷道地产区四川省遂宁市船山区余健村(30°50'N, 105°57'E)进行。试验地为平地, 前茬为白芷, 土质为紫色土, 土壤pH为8, 有机质含量13.41 g/kg, 全氮含量0.96 g/kg, 全磷含量0.73 g/kg, 全钾含量17.79 g/kg, 碱解氮含量76.03 mg/kg, 速效磷含量5.83 mg/kg, 速效钾含量144.10 mg/kg。

供试材料为四川农业大学吴卫教授选育的川芷2号白芷品种, 原植物为杭白芷, 其丰产性、稳定性和适应性良好<sup>[17]</sup>。

供试肥料: 氮肥为尿素(氮含量≥46.40%), 磷肥为过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥15%), 钾肥为硫酸钾(含K<sub>2</sub>O≥50%)。

### 1.2 试验设计

采用3因素5水平二次正交回归旋转组合设计进行田间试验, 设置氮肥( $x_1$ )、磷肥( $x_2$ )、钾肥( $x_3$ )3个因素, 各5个水平, 共23个小区随机排列, 每个小区面积为30 m<sup>2</sup>(长×宽=5 m×6 m)。二次正交回归旋转组合

设计试验因素水平编码见表1,设计与试验方案见表2。

### 1.3 田间管理

2019年10月采用条播方式将川芎2号播种于遂宁市船山区余健村,当苗高4~7 cm时,进行1~2次间苗,并按10 cm×40 cm株行距定苗。氮肥(尿

素)作为苗肥(12月)、冬肥(次年2月)、春肥(次年3月)施用,施用比例为2:5:3;磷肥(过磷酸钙)与钾肥(硫酸钾)作为底肥(9月)、春肥(次年3月)施用,施用比例为5:5。其余田间栽培措施,均与当地农户保持一致。

表1 二次正交回归旋转组合设计试验因素水平编码表

Table 1 Coding table of experimental factors and levels of quadratic orthogonal regression rotational combination design

水平	因素			施肥量(kg/hm <sup>2</sup> )		
	氮肥(x <sub>1</sub> )	磷肥(x <sub>2</sub> )	钾肥(x <sub>3</sub> )	氮肥(尿素)	磷肥(过磷酸钙)	钾肥(硫酸钾)
γ(1.68)	169.41	251.87	140.93	364.24	1 679.14	281.86
1	149.25	217.39	119.94	322.34	1 449.26	239.88
0	119.94	164.92	89.95	257.87	1 099.44	179.91
-1	89.95	112.44	59.97	193.40	749.62	119.94
-γ(-1.68)	68.96	76.46	38.98	148.27	509.74	77.96
Δ变化区间	29.98	52.47	29.98	64.47	349.82	59.97

γ=1.68时表示氮肥、磷肥、钾肥3个因素全部实施,Δ变化区间表示 $\Delta_j = \frac{x_{j\gamma} - x_{-j\gamma}}{2\gamma}$  (j=1,2,…)。

表2 二次正交回归旋转组合试验设计与实施方案

Table 2 Design and implementation scheme of quadratic orthogonal regression rotational combination experiment

处理	试验设计			实施方案(kg/hm <sup>2</sup> )		
	氮肥(x <sub>1</sub> )	磷肥(x <sub>2</sub> )	钾肥(x <sub>3</sub> )	氮肥(尿素)	磷肥(过磷酸钙)	钾肥(硫酸钾)
1	1.00	1.00	1.00	322.34	1 449.26	239.88
2	1.00	1.00	-1.00	322.34	1 449.26	119.94
3	1.00	-1.00	1.00	322.34	749.62	239.88
4	1.00	-1.00	-1.00	322.34	749.62	119.94
5	-1.00	1.00	1.00	193.40	1 449.26	239.88
6	-1.00	1.00	-1.00	193.40	1 449.26	119.94
7	-1.00	-1.00	1.00	193.40	749.62	239.88
8	-1.00	-1.00	-1.00	193.40	749.62	119.94
9	1.68	0	0	364.24	1 099.44	179.91
10	-1.68	0	0	148.27	1 099.44	179.91
11	0	1.68	0	257.87	1 679.14	179.91
12	0	-1.68	0	257.87	509.74	179.91
13	0	0	1.68	257.87	1 099.44	281.86
14	0	0	-1.68	257.87	1 099.44	77.96
15	0	0	0	257.87	1 099.44	179.91
16	0	0	0	257.87	1 099.44	179.91
17	0	0	0	257.87	1 099.44	179.91
18	0	0	0	257.87	1 099.44	179.91
19	0	0	0	257.87	1 099.44	179.91
20	0	0	0	257.87	1 099.44	179.91
21	0	0	0	257.87	1 099.44	179.91
22	0	0	0	257.87	1 099.44	179.91
23	0	0	0	257.87	1 099.44	179.91

## 1.4 测定指标与测定方法

1.4.1 农艺性状及产量指标的测定 2020年8月10日收获时采用5点取样法,每个小区取10株样品,将白芷植株从茎基部分离为地上部分和地下部分。用清水洗干净地下部分(根)后称鲜质量,用直尺测量根长,用游标卡尺测量根直径。将白芷根放置于105℃烘箱内杀青15~30 min后,45℃烘干至恒质量后称其干质量。各小区挖取3垄白芷称量总的根鲜质量,再折算出产量。

1.4.2 有效成分含量的测定 参照《中华人民共和国药典》<sup>[1]</sup>(简称《中国药典》)中的方法测定白芷根部欧前胡素及异欧前胡素的含量。

## 1.5 数据分析与处理

采用Excel 2017、DPS 7.05对数据进行初步整理与分析,并建立回归模型,使用Excel 2017和GraphPad Prism 8制图。

根折干率=根干质量(g)/根鲜质量(g)×100%

产量(kg/hm<sup>2</sup>)=挖取白芷总鲜质量(kg)/挖取面积(m<sup>2</sup>)×10 000

## 2 结果与分析

### 2.1 氮肥、磷肥、钾肥配施对川芷2号产量的影响

#### 2.1.1 模型的建立与检验 使用DPS7.05统计软

表3 白芷氮肥、磷肥、钾肥配施试验结果的方差分析(F值)

Table 3 Variance analysis on the test results of combined application of nitrogen fertilizer, phosphorus fertilizer and potassium fertilizer in *Angelica dahurica* (F value)

变异系数	产量 (Y <sub>1</sub> )	根鲜质量 (Y <sub>2</sub> )	根干质量 (Y <sub>3</sub> )	折干率 (Y <sub>4</sub> )	根长 (Y <sub>5</sub> )	根直径 (Y <sub>6</sub> )	欧前胡素含量 (Y <sub>7</sub> )	异欧前胡素含量 (Y <sub>8</sub> )
x <sub>1</sub>	1.394	0.002	0.005	0.059	0.497	0.257	0.596	0
x <sub>2</sub>	16.160**	1.981	1.622	16.981**	1.432	7.151*	0.216	7.203*
x <sub>3</sub>	8.913*	0.068	0.043	0.269	2.303	1.028	5.367*	0.357
x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	0.049	0.582	0.774	1.056	1.652	0.205	3.269*	1.026
x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	8.919*	0.731	0.049	32.866**	0.527	0.283	0.002	7.844*
x <sub>3</sub> <sup>2</sup>	12.703**	2.500	1.614	4.667*	1.021	2.479	0.034	0.034
x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	0.981	0.017	0.068	0.107	0.352	0.019	0.128	0
x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	1.145	0.001	0	0.001	0.777	0.004	9.976**	2.181
x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	7.185*	0.064	0.041	0.232	0.436	0.074	0.103	0.012
总回归系数(F <sub>R</sub> )	6.370**	0.656	0.466	6.244**	1.000	1.278	2.189	1.956
失拟度(F <sub>Lf</sub> )	2.117	0.347	0.438	3.272*	1.119	1.028	2.435	1.829

x<sub>1</sub>:氮肥;x<sub>2</sub>:磷肥;x<sub>3</sub>:钾肥。\*表示相关性达0.05显著水平;\*\*表示相关性达0.01显著水平;(\*)表示相关性为0.01~0.05显著水平。

2.1.2 因子主效应分析 根据表3中各项回归系数的F值,使用以下贡献率计算公式得出各因素对因变量的贡献率:

件对产量(Y<sub>1</sub>)、根鲜质量(Y<sub>2</sub>)、根干质量(Y<sub>3</sub>)、折干率(Y<sub>4</sub>)、根长(Y<sub>5</sub>)、根直径(Y<sub>6</sub>)、欧前胡素含量(Y<sub>7</sub>)、异欧前胡素含量(Y<sub>8</sub>)的数据进行回归分析,得到氮肥(x<sub>1</sub>)、磷肥(x<sub>2</sub>)、钾肥(x<sub>3</sub>)施肥量的回归模型。通过F检验分别验证方程各项回归系数、总回归系数和失拟度,得到方差分析结果(表3)。

由表3可知,产量、折干率的方程总回归系数F<sub>R</sub>(F<sub>1R</sub>=6.370,F<sub>4R</sub>=6.244)均达到极显著水平,失拟度F<sub>Lf</sub>未达到显著水平(F<sub>1Lf</sub>=2.117),失拟度F<sub>4Lf</sub>达到显著水平(F<sub>4Lf</sub>=3.272),说明产量的二次回归方程模型拟合得较好,其可靠程度较高。根鲜质量、根干质量、根长、根直径、欧前胡素含量、异欧前胡素含量方程的总回归系数F<sub>R</sub>和失拟度F<sub>Lf</sub>均不显著,说明其二次回归方程拟合效果不好,不可以进行模型决策。在产量的二次回归方程中,一次项(x<sub>2</sub>、x<sub>3</sub>)、二次项(x<sub>2</sub><sup>2</sup>、x<sub>3</sub><sup>2</sup>)、交互项(x<sub>2</sub>x<sub>3</sub>)均达到显著或极显著水平。因此,剔除在α=0.05显著水平下不显著的项后,可得到简化后的产量(Y<sub>1</sub>')二次回归方程:Y<sub>1</sub>'=1 390.01+200.08x<sub>2</sub>+148.56x<sub>3</sub>-137.77x<sub>2</sub><sup>2</sup>-164.42x<sub>3</sub><sup>2</sup>+174.27x<sub>2</sub>x<sub>3</sub>。

$$\delta = \begin{cases} 0 (F \leq 1) \\ 1 - \frac{1}{F} (F \geq 1) \end{cases}$$

$$\Delta_j = \delta_j + \frac{1}{2} \sum_{i=1, i \neq j}^m \delta_{ij} + \delta_{jj}$$

在紫色土中氮肥、磷肥、钾肥对川芎 2 号产量的贡献率分别为： $\Delta_{\text{氮肥}} = 0.346$ ， $\Delta_{\text{磷肥}} = 1.812$ ， $\Delta_{\text{钾肥}} = 1.842$ ，其贡献率大小排序为钾肥>磷肥>氮肥，其中钾肥和磷肥对产量的影响最大，氮肥对产量的影响最小。

2.1.3 单因素效应分析 由表 3 可知，单因素项中，氮肥对川芎 2 号产量没有显著影响，而磷肥和钾肥对其产量的影响达到显著或极显著水平，其中磷肥的影响达到极显著水平。通过降维法，得出磷肥、钾肥对产量的单因素效应方程，由方程作单因素效应图(图 1)。

由图 1 可知，随着磷肥和钾肥施用水平的升高，川芎 2 号产量先增加后降低，符合肥料报酬定律，说明磷肥和钾肥的施用范围设计合理。磷肥和钾肥在 0~1 水平时川芎 2 号的产量达到最高值，说明在紫色土中，当磷肥施用量为 1 099.44~1 449.26 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥施用量为 179.91~239.88 kg/hm<sup>2</sup> 时有利于川芎 2 号获得高产。

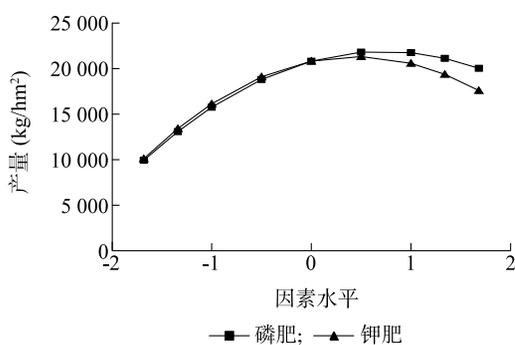


图 1 氮肥和钾肥与白芷产量的单因素效应分析

Fig.1 Single factor effect analysis of nitrogen fertilizer, potassium fertilizer on *Angelica dahurica* yield

2.1.4 互作效应分析 由表 3 的回归系数显著性分析可知，磷肥-钾肥互作对紫色土中川芎 2 号产量的影响达到了显著水平，而氮肥-磷肥、氮肥-钾肥互作对其产量影响不显著。使用降维法固定氮肥因子使其为 0，可得磷肥-钾肥互作与产量的方程，根据方程可作出互作效应图(图 2)。

由图 2 可知，不同磷肥、钾肥对比对紫色土中种植的川芎 2 号产量影响差异较大，当磷肥、钾肥水平处于低磷高钾和低钾高磷时都对白芷产量有明显的抑制作用。随着磷肥和钾肥施用水平的增加，产量也随着增加。磷肥水平为 1.68，钾肥水平为 1.34

(即磷肥施用量为 1 679.14 kg/hm<sup>2</sup>，钾肥施用量为 260.33 kg/hm<sup>2</sup>) 时川芎 2 号产量最高。说明磷肥-钾肥互作有利于川芎 2 号产量的增加。

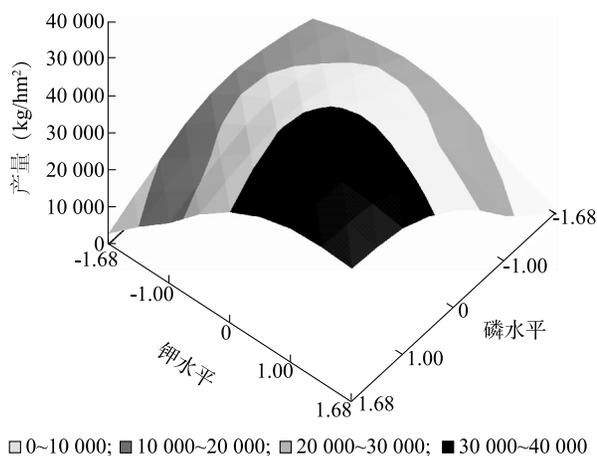


图 2 白芷产量的磷肥-钾肥互作效应分析

Fig.2 Analysis of phosphorus fertilizer-potassium fertilizer inter-interactive effect on *Angelica dahurica* yield

2.1.5 川芎 2 号施肥方案的优选 使用统计频数法进行分析可以得到一个合适的高产范围。由当地土壤、气候条件可知小区产量高于 27 347.68 kg/hm<sup>2</sup> 即为高产。因此，以产量方程作为相关函数目标，采用统计频数法优选出川芎 2 号产量高于 27 347.68 kg/hm<sup>2</sup> 的氮肥、磷肥、钾肥配施方案。由表 4 可知，在紫色土中种植的川芎 2 号产量高于 27 347.68 kg/hm<sup>2</sup> 的方案有 40 个，通过计算 95% 的置信区间，可优化出稳定的施肥范围，即氮肥施用量为 233.73~283.36 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥施用量为 1 380.66~1 522.04 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥施用量为 215.14~240.03 kg/hm<sup>2</sup> 时，在紫色土中种植的川芎 2 号产量高于 27 347.68 kg/hm<sup>2</sup>。

## 2.2 氮肥、磷肥、钾肥配施对川芎 2 号有效成分的影响

2.2.1 因子主效应分析 白芷有效药用成分主要为欧前胡素、异欧前胡素等香豆素类化合物<sup>[18]</sup>。利用 2.1.2 中贡献率公式计算各因素对川芎 2 号有效成分指标的贡献率。由表 5 可知，各因素对川芎 2 号根中的有效成分的影响不同，对欧前胡素含量的影响为钾肥>氮肥>磷肥，对异欧前胡素含量的影响为磷肥>氮肥>钾肥。钾肥对根中欧前胡素含量影响较大，而对根中异欧前胡素含量的影响最小，氮肥处于中间调控地位，磷肥对根中欧前胡素含量影响最小，而对根中异欧前胡素含量的影响较大。

表4 白芷产量超过 27 347.68 kg/hm<sup>2</sup>时的因素取值频数分布Table 4 Frequency distribution of factor values when *Angelica dahurica* yield exceeded 27 347.68 kg/hm<sup>2</sup>

变量因子	因素水平					频数合计	加权均数	标准误差	95%置信区间	最佳施肥量 (kg/hm <sup>2</sup> )
	-1.68	-1	0	1	1.68					
$x_1$ 次数	8	8	8	8	8	40	0	0.196	-0.384~0.384	233.73~283.36
	频率(%)	20.0	20.0	20.0	20.0	100				
$x_2$ 次数	0	0	10	15	15	40	1.006	0.103	0.804~1.208	1 380.66~1 522.04
	频率(%)	0	0	25.0	37.5	37.5	100			
$x_3$ 次数	0	0	15	15	10	40	0.795	0.106	0.588~1.003	215.14~240.33
	频率(%)	0	0	37.5	37.5	25.0	100			

$x_1$ :氮肥; $x_2$ :磷肥; $x_3$ :钾肥。

表5 氮肥、磷肥、钾肥对白芷有效成分的单因素贡献率

Table 5 Single factor contribution rate of nitrogen fertilizer, phosphorus fertilizer and potassium fertilizer to the effective components of *Angelica dahurica*

变异来源	欧前胡素含量	异欧前胡素含量
氮肥	0.797	0.283
磷肥	0	1.297
钾肥	1.263	0.270

2.2.2 单因素效应分析 由表3可知,单因素项中,钾肥显著影响川芷2号根中欧前胡素含量,磷肥显著影响川芷2号根中异欧前胡素含量,通过降维法得到钾肥对欧前胡素含量及磷肥对异欧前胡素含量影响的单因素方程,由方程得到单因素效应图(图3)。

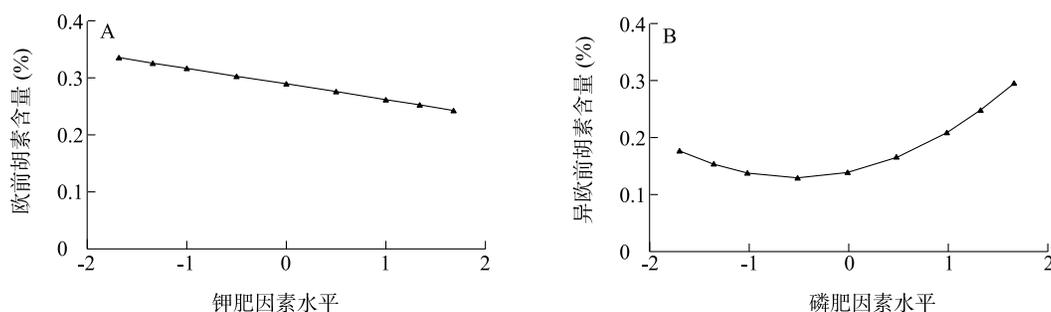


图3 钾肥与磷肥对白芷有效成分含量影响的单因素效应分析

Fig.3 Single factor effect analysis of potassium fertilizer and phosphorus fertilizer on the effective components contents in *Angelica dahurica*

2.2.3 提高川芷2号有效成分含量的施肥方案的优选 《中国药典》规定,白芷根中欧前胡素含量不得少于0.08%<sup>[1]</sup>。根据《中国药典》的规定和当地生产实际,将紫色土上种植的川芷2号根中的欧前胡素含量 $\geq 0.28\%$ ,异欧前胡素含量 $\geq 0.15\%$ 视为优质白芷标准。通过统计频数法得到欧前胡素含量

由图3可知,钾肥对欧前胡素含量及磷肥对异欧前胡素含量的影响各不相同。由图3A可知,钾肥对欧前胡素含量的影响整体呈下降的趋势,即随着钾肥施用水平加大,欧前胡素含量呈下降趋势,说明施用过量的钾肥不利于欧前胡素的积累,并对欧前胡素含量的积累有负面影响,钾肥施用量与欧前胡素含量呈负相关。由图3B可知,磷肥对异欧前胡素含量的影响呈先下降后上升趋势,随着磷肥施用水平的加大,异欧前胡素含量先降低再升高。磷肥施用量在-1.68~1.68水平时异欧前胡素含量先降低后再升高,1.68水平时异欧前胡素含量远远大于-1.68水平时异欧前胡素的含量,说明高磷水平比低磷水平更有利于异欧前胡素的积累,磷肥施用量与异欧前胡素含量呈正相关。

大于0.28%的方案有55个(表6);异欧前胡素含量大于0.15%的方案有75个(表7)。

由表6、表7可知,通过计算95%的置信区间,得出当氮肥施用量为233.73~277.06 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥施用量为1 001.35~1 197.45 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥施用量为144.83~185.91 kg/hm<sup>2</sup>时川芷2号根中的欧前胡素

含量可达到0.28%及以上;当氮肥施用量为240.39~276.58 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥施用量为1 097.69~1 317.05 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥施用量为163.12~196.70 kg/hm<sup>2</sup>时川芎2号根中的异欧前胡素含量可达到0.15%及以上。再进行交集优化后可得出当氮肥施用量为

240.39~276.58 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥施用量为1 097.69~1 197.45 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥施用量为163.12~185.91 kg/hm<sup>2</sup>时可以均衡地提高紫色土中种植的川芎2号根中欧前胡素和异欧前胡素含量。

表6 白芷欧前胡素含量 $\geq 0.28\%$ 时的因素取值频数分布

Table 6 Frequency distribution of factor values when the content of imperatorin in *Angelica dahurica*  $\geq 0.28\%$

变量因子	因素水平					频数合计	95%置信区间	最佳施肥量 (kg/hm <sup>2</sup> )
	-1.68	-1	0	1	1.68			
$x_1$ 次数	10	10	15	10	10	55	-0.312~0.312	233.73~277.06
频率(%)	18.18	18.18	27.27	18.18	18.18	100		
$x_2$ 次数	11	11	11	11	11	55	-0.327~0.327	1 001.35~1 197.45
频率(%)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	100		
$x_3$ 次数	15	15	5	10	10	55	-0.556~0.100	144.83~185.91
频率(%)	27.27	27.27	9.09	18.18	18.18	100		

$x_1$ :氮肥; $x_2$ :磷肥; $x_3$ :钾肥。

表7 白芷异欧前胡素含量 $\geq 0.15\%$ 时的因素取值频数分布

Table 7 Frequency distribution of factor values when the content of isoimperatorin in *Angelica dahurica*  $\geq 0.15\%$

变量因子	因素水平					频数合计	95%置信区间	最佳施肥量 (kg/hm <sup>2</sup> )
	-1.68	-1	0	1	1.68			
$x_1$ 次数	15	15	15	15	15	75	-0.280~0.280	240.39~276.58
频率(%)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	100		
$x_2$ 次数	25	0	0	25	25	75	0.005~0.662	1 097.69~1 317.05
频率(%)	33.33	0	0	33.33	33.33	100		
$x_3$ 次数	15	15	15	15	15	75	0.280~0.280	163.12~196.70
频率(%)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	100		

$x_1$ :氮肥; $x_2$ :磷肥; $x_3$ :钾肥。

### 2.3 基于灰色关联度和DTOPSIS法综合评价川芎2号的产量及有效成分含量

为了精准探究在紫色土中种植川芎2号的施肥配方,本研究综合了产量、欧前胡素含量、异欧前胡素含量,通过灰色关联度法得到其关联度和权重(表8)。通过关联度和权重进行DTOPSIS法处理,根据DTOPSIS法中的 $C_i$ (相对接近度)进行排序,并计算出待评材料的 $\gamma_i$ (关联度)(表9)。

由表9可知,灰色关联度法中最大关联度差异为45.15%,而DTOPSIS法中最大 $C_i$ 差异为71.03%,说明DTOPSIS法相比灰色关联度法放大了处理间的差异性,更有利于区分待评材料间的优劣。处理5、处理12和处理21等处理采用灰色关

联度和DTOPSIS法得到的综合评价排序结果一致,其中综合表现最优的是处理5,即当氮肥施用量为193.40 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥施用量为1 449.26 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥施用量为239.88 kg/hm<sup>2</sup>(氮肥:磷肥:钾肥=0.75:1.81:1.00)时在紫色土中川芎2号的产量和有效成分含量综合最优。

表8 白芷产量和有效成分含量的关联度( $\gamma_i$ )和权重( $\omega_k$ )

Table 8 Correlation between yield of *Angelica dahurica* and effective components contents ( $\gamma_i$ ) and related weight value ( $\omega_k$ )

指标	产量	欧前胡素含量	异欧前胡素含量
关联度	0.605	0.567	0.680
权重值	0.345	0.324	0.331

表9 白芷产量和有效成分含量的加权关联度( $r_i$ )与相对接近度( $C_i$ )排序Table 9 Weighted correlation degree ( $r_i$ ) and relative proximity ( $C_i$ ) ranking values of *Angelica dahurica* yield and effective components contents

处理	灰色关联度法分析结果			DPOPSISF 法分析结果		
	关联度	关联度差异 (%)	排序	相对接近度值	相对接近度差异 (%)	排序
1	0.164	39.02	19	0.412	49.02	18
2	0.194	27.89	11	0.546	32.39	9
3	0.148	45.15	23	0.311	61.51	20
4	0.194	28.00	12	0.544	32.70	10
5	0.269	0	1	0.808	0	1
6	0.158	41.33	20	0.289	64.19	22
7	0.204	24.33	9	0.476	41.07	14
8	0.154	42.81	21	0.307	62.04	21
9	0.167	38.02	17	0.425	47.38	17
10	0.202	25.05	10	0.584	27.73	7
11	0.152	43.61	22	0.234	71.03	23
12	0.259	3.65	2	0.738	8.71	2
13	0.235	12.76	4	0.493	38.98	13
14	0.164	38.93	18	0.410	49.29	19
15	0.189	29.78	14	0.533	33.99	12
16	0.189	29.64	13	0.539	33.33	11
17	0.211	21.40	6	0.621	23.19	5
18	0.227	15.52	5	0.711	11.98	4
19	0.177	34.34	15	0.475	41.17	15
20	0.208	22.72	8	0.590	26.95	6
21	0.236	12.38	3	0.734	9.23	3
22	0.173	35.80	16	0.455	43.64	16
23	0.209	22.48	7	0.574	28.97	8

### 3 讨论

遂宁市位于四川盆地中部丘陵低山地区,其土壤以紫红色砂土和泥岩为主<sup>[19]</sup>。由于川白芷种植区域由涪江冲积坝上(灰潮土)逐渐向丘陵低山地区扩张,导致白芷种植在紫色土上的面积越来越大。本课题组在川芷2号的多点试验中发现紫色土中种植川芷2号的产量与灰潮土基本一致,但其欧前胡素和异欧前胡素含量略高于灰潮土,可能是由于紫色土母岩疏松,易崩解,所以矿质养分含量高,肥力好,有机质含量较低,磷、钾等含量丰富<sup>[20]</sup>。本研究在紫色土中种植的川芷2号氮肥、磷肥、钾肥的配

比为0.75:1.81:1.00,其产量和欧前胡素含量最高。陈郡雯等<sup>[21]</sup>研究发现灰潮土中白芷氮肥、磷肥、钾肥配比为1.3:1.9:1.0时白芷产量和欧前胡素含量最高。这可能是由于紫色土与灰潮土的土壤母质、理化性质、养分状况及分布形态存在差异,从而对白芷产量和品质产生不同影响<sup>[22-24]</sup>;也可能是不同白芷品种需肥量有所差异。紫色土与灰潮土对川芷2号产量和品质的影响因素还需进一步探究。

土壤耕作层速效氮含量低,速效磷和速效钾含量较为丰富是白芷高产的基础<sup>[11]</sup>。从本研究单因素分析中可知,氮肥对紫色土中种植的川芷2号产量影响不显著,磷肥对产量有极显著影响,钾肥对产

量有显著影响,同时磷肥-钾肥对紫色土中种植的川芎2号产量还有交互作用。翟娟园等<sup>[13]</sup>研究发现,土壤有效磷及速效钾的含量与白芷根质量呈现正相关,这与本研究的结果一致。

白芷根中总香豆素主要为欧前胡素和异欧前胡素,欧前胡素和异欧前胡素含量能反映川白芷的品质<sup>[25-26]</sup>。贾蕾等<sup>[27]</sup>研究发现,磷肥和钾肥有利于提高白芷根中香豆素的含量。陈郡雯等<sup>[28]</sup>研究发现,川白芷在生长过程中异欧前胡素含量与根部氮、磷、钾的积累量呈显著正相关。在本研究中川芎2号根中的欧前胡素和异欧前胡素含量均大于0.1%,符合《中国药典》的规定。本研究中氮肥、磷肥、钾肥配施对白芷欧前胡素含量的影响为钾肥>氮肥>磷肥,对异欧前胡素含量的影响为磷肥>氮肥>钾肥,磷肥显著影响异欧前胡素含量,钾肥显著影响欧前胡素含量,磷肥施用量与异欧前胡素含量呈正相关,而钾肥施用量与欧前胡素含量呈负相关。陈郡雯等<sup>[21]</sup>在氮肥、磷肥、钾肥配施对川白芷欧前胡素和异欧前胡素含量影响的研究中发现,钾肥施用量与欧前胡素含量呈负相关,磷肥施用量与异欧前胡素含量呈正相关,本研究结果与其一致。因此在四川白芷主产区紫色土上种植白芷,只要选择合理的氮肥、磷肥、钾肥施用量及配比,就可以保障其产量和品质,白芷产量最高可达27 347.68 kg/hm<sup>2</sup>,欧前胡素和异欧前胡素含量分别可达0.28%、0.15%。这为新产区白芷生产提供了科学施肥指导,为合理利用坡地、荒地等开展白芷生产奠定了基础。

## 4 结论

本试验通过3因素5水平二次正交回归旋转组合设计,建立了以氮肥、磷肥、钾肥施用量为自变量,在紫色土中种植的白芷产量和有效成分含量为因变量的函数模型,通过模型分析得出,磷肥和钾肥施用量对川芎2号产量有显著影响,磷肥-钾肥对产量还有交互作用。利用频数分析法优化出紫色土中种植的川芎2号高产的施肥配方:氮肥施用量为233.73~283.36 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥施用量为1 380.66~1 522.04 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥施用量为215.142~240.03 kg/hm<sup>2</sup>。钾肥施用量对欧前胡素含量有显著作用,磷肥施用量对异欧前胡素含量有显著作用,使用频数分析法进行交集优化后可得出,当氮肥施用量为240.39~276.58 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥施用量为1 097.69~1 197.45

kg/hm<sup>2</sup>,钾肥施用量为163.12~185.91 kg/hm<sup>2</sup>时可以均衡地提高紫色土中种植的川芎2号根中欧前胡素和异欧前胡素含量。最后通过灰色关联度和DTOPSIS法综合评价同时兼顾紫色土中川芎2号的产量和有效成分含量的最优施肥方案:氮肥施用量为193.40 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥施用量为1 449.26 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥施用量为239.88 kg/hm<sup>2</sup>。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家药典委员会. 中华人民共和国药典 [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
- [2] WEI W L, ZENG R, GU C M, et al. *Angelica sinensis* in China-A review of botanical profile, ethnopharmacology, phytochemistry and chemical analysis [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2016, 190: 116-141.
- [3] 张庆芝,王开疆,刀莉芳. 中药白芷的品种论述 [J]. *云南中医学院学报*, 2000, 23(2): 22-24.
- [4] 王梦月,贾敏如. 白芷本草考证 [J]. *中药材*, 2004, 27(5): 382-385.
- [5] 遂宁市地方志编纂委员会. 遂宁县志 [M]. 成都: 巴蜀书社, 1992.
- [6] 郑利,邓聪,冯亮,等. 遂宁川白芷产业发展现状与分析 [J]. *农村经济与科技*, 2020, 31(20): 181-182.
- [7] 施业家,吴贤静. 生态红线概念规范化探讨 [J]. *中南民族大学学报(人文社会科学版)*, 2016, 36(3): 149-153.
- [8] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土(上篇) [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [9] 童文,孙佩,杨晓,等. 施用腐植酸肥对白芷产量和质量的影响 [J]. *西南农业学报*, 2011, 24(3): 1236-1238.
- [10] 张亚琴,雷飞益,陈雨,等. 锌硼钼配施对川白芷药材农艺性状与产量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(3): 769-778.
- [11] 陈兴福,丁德蓉,刘岁荣,等. 白芷生长土壤的研究 [J]. *中国中药杂志*, 1994, 19(10): 591-593.
- [12] 陈兴福,丁德蓉,刘岁荣,等. 白芷生态环境和土壤理化特性的研究 [J]. *中草药*, 1996, 27(8): 489-591.
- [13] 翟娟园,吴卫,廖凯,等. 土壤环境对川白芷产量和品质的影响研究 [J]. *中草药*, 2010, 41(6): 984-988.
- [14] 陈兴福,卢进,丁德蓉. 播种期对白芷早期抽苔影响的研究 [J]. *中国中药杂志*, 1999, 24(4): 211-212.
- [15] 丁德蓉,卢进,陈兴福,等. 肥料种类对白芷早期抽苔与产量的影响研究 [J]. *中国中药杂志*, 1999, 24(1): 24-25.
- [16] 贾全全,黄丽莉,杨春霞,等. 白芷在红壤丘陵区栽培适应性研究 [J]. *中药材*, 2019, 42(1): 22-24.
- [17] 四川省种子站. 2012年通过审定的农作物新品种(七) [J]. *四川农业科技*, 2013(5): 12-13.
- [18] 吴媛媛,蒋桂华,马逾英,等. 白芷的药理作用研究进展 [J]. *时珍国医国药*, 2009, 20(3): 625-627.

- [19] 景可,郑粉莉. 全国水土流失治理典型 [J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 34-38.
- [20] 朱新玉,董志新,况福虹,等. 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33(2): 464-474.
- [21] 陈郡雯,吴卫,侯凯,等. N、P 和 K 肥配施对川白芷产量及欧前胡素和异欧前胡素量的影响 [J]. 中草药, 2011, 42(1): 153-157.
- [22] 陈沧桑,孙锡发,何才富,等. 潮土、紫色土及黄壤上施钾对小麦产量的影响 [J]. 西南农业学报, 1999, 12(4): 48-52.
- [23] 吕忠贵,胡定金,黄隆斌,等. 湖北省主要油菜种植区油菜及土壤营养元素含量状况 [J]. 湖北农业科学, 1997(3): 28-32.
- [24] 钱晓华,杨平,周学军,等. 安徽省土壤有效硫现状及时空分布 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1357-1364.
- [25] 周爱德,李强,雷海民. 白芷化学成分的研究 [J]. 中草药, 2010, 41(7): 1081-1083.
- [26] 王梦月,贾敏如. 白芷的化学成分研究进展 [J]. 中药材, 2002, 25(6): 446-449.
- [27] 贾蕾,孙淑兰,李存东. 祁白芷的生长规律及氮磷钾肥效应 [J]. 农业与技术, 2009, 29(4): 66-70.
- [28] 陈郡雯,吴卫,侯凯,等. 川白芷生长发育、养分及有效成分的动态研究 [J]. 中国中药杂志, 2010, 35(21): 2812-2817.

(责任编辑:陈海霞)