

党参氮磷钾施肥效应与最优施肥量研究

胡佳栋¹, 武子丁¹, 刘子哲¹, 李雯君¹, 王二欢², 梁宗锁³, 董娟娥^{1*}

(1 西北农林科技大学生命科学院, 陕西杨凌 712100; 2 陕西步长制药有限公司, 陕西咸阳 710000;

3 浙江理工大学, 杭州 310000)

摘要:【目的】利用数学模型研究氮、磷、钾不同配比对党参产量以及有效成分含量的影响, 以确定试验区党参的施肥模式和最优的氮磷钾配比, 为党参规范化栽培提供依据。【方法】采用氮、磷、钾三因素二次 D-饱和最优设计, 进行了田间试验, 建立了氮、磷、钾的施肥量编码值与党参根产量、党参炔苷含量以及党参多糖含量的效应函数。【结果】氮、磷、钾肥对党参产量的影响大小依次为氮 > 钾 > 磷; 氮、磷、钾肥对党参炔苷含量的影响为磷 > 氮 > 钾; 氮、磷、钾肥对党参多糖含量的影响为磷 > 钾 > 氮。寻优结果表明, 目标产量在 2100~2500 kg/hm² 范围内, 95% 的置信区间所对应的优化施肥量为 N 128.4~174.1 kg/hm²、P₂O₅ 49.26~80.41 kg/hm²、K₂O 45.31~70.42 kg/hm²; 炔苷含量高于 0.75 mg/g, 95% 的置信区间所对应的优化施肥量为 N 128.5~196.6 kg/hm²、P₂O₅ 77.09~118.0 kg/hm²、K₂O 41.34~53.72 kg/hm²; 多糖含量高于 22.50%, 95% 的置信区间所对应的优化施肥量为 N 96.04~141.6 kg/hm²、P₂O₅ 61.53~88.33 kg/hm²、K₂O 40.22~75.83 kg/hm²。【结论】党参高产优质高效栽培最优施肥量为 N 128.5~141.6 kg/hm²、P₂O₅ 77.09~80.41 kg/hm²、K₂O 45.31~53.72 kg/hm², N、P₂O₅、K₂O 的最优施肥量配比为 1 : 0.54~0.63 : 0.32~0.42。

关键词: 党参; 产量; 党参炔苷; 党参多糖; 效应函数; 最优施肥组合

Effects and optimum rate of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization for *Codonopsis pilosula*

HU Jia-dong¹, WU Zi-ding¹, LIU Zi-zhe¹, LI Wen-jun¹, WANG Er-huan², LIANG Zong-suo³, DONG Juan-e^{1*}

(1 College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2 Shanxi Buchang Pharma Co., LTD, Xianyang 710000, China; 3 Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: 【Objectives】The effects of nitrogen, phosphorus and potassium on the growth and bioactive component contents of *Codonopsis pilosula* were studied, and the optimum rates of N, P and K were proposed using mathematical model, in order to ensure reasonable fertilization for standardized cultivation of *Codonopsis pilosula*. 【Methods】Using three-factor D-saturation optimal design, a field experiment was conducted. The effect functions of nitrogen, phosphorus and potassium application codes on the yield, lobetyolin and polysaccharide of *Codonopsis pilosula* were established, and the optimum rates were calculated by the models. 【Results】The effect of N, P₂O₅ and K₂O on yield is N > K₂O > P₂O₅, on lobetyolin content is P₂O₅ > N > K₂O, and on polysaccharide is P₂O₅ > K₂O > N. From the results of the frequency analysis, the optimal fertilizer application rates of N, P₂O₅ and K₂O were respectively 128.4–174.1, 49.26–80.41 and 45.31–70.42 kg/hm² for the target yield between 2100 and 2500 kg/hm² and confidence interval 95%, and 128.5–196.6, 77.09–118.0 and 41.34–53.72 kg/hm² for the lobetyolin content over 0.75 mg/g and confidence interval 95%, and 96.04–141.6, 61.53–88.33 and 40.22–75.83 kg/hm² for the polysaccharide content over 22.50% and confidence interval 95%. 【Conclusions】The optimal fertilizer application rates for both high yield and high quality of *Codonopsis pilosula* are N 128.5–141.6, P₂O₅ 77.09–80.41 and K₂O 45.31–53.72 kg/hm², respectively, and the corresponding

收稿日期: 2018-09-12 接受日期: 2018-10-08

基金项目: 陕西省社会发展科技攻关项目 (2016SF-359); 陕西步长制药有限公司校企合作项目。

联系方式: 胡佳栋 E-mail: 784034126@qq.com; * 通信作者 董娟娥 E-mail: dzsys@nwsuaf.edu.cn

fertilizer ratio of N:P₂O₅:K₂O is 1:0.54–0.63:0.32–0.42.

Key words: *Codonopsis pilosula*; yield; lobetyolin; polysaccharide; effect function; optimal fertilization combination

中药材党参为桔梗科植物党参 *Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf.、素花党参 *Codonopsis pilosula* Nannf. var. *modesta* (Nannf.) L. T. Shen 或川党参 *Codonopsis tangshen* Oliv. 的干燥根。性味甘、平归脾、肺经，具有补中益气、健脾益肺的功效^[1]。现代药理研究表明，党参具有调节血糖、降压、抗缺氧、耐疲劳等作用^[2]，并且是一种药食同源的经济作物。近年来，党参的使用量大增，其野生资源已不能满足市场的需求，党参主要生长于山地、林缘、灌丛中，在甘肃、山西、陕西、湖北、四川等省及东北地区多有栽培，其中甘肃省的党参产量为全国之最^[3]。党参植株对肥料的需求量大，合理的施肥模式对党参的良好生长至关重要^[4]。目前，党参施肥的研究主要集中在氮磷钾、微量元素的施肥量及比例对其产量及质量的影响^[4-7]，没有参照种植区的土壤肥力提供准确的量化标准，而生产中往往因为土壤氮、磷、钾的比例失衡而成为产量和品质提高的限制因子。如何能够参照各种种植区的土壤肥力状况提供有效的氮磷钾平衡施肥量是实现现有土地资源提质增效和推动农业绿色发展的重点任务^[4]。

本研究通过田间试验，采用氮、磷、钾 3 因素 2 次 D-饱和和最优设计方案，研究了 N、P、K 不同配比对党参产量以及有效成分含量的影响，建立了相关的数学模型，定量研究了氮、磷、钾各因子的效应，确定了甘肃宕昌县所代表的土壤肥力状况下党参的施肥模式和 NPK 的最优配比，为实现党参的规范化栽培提供了重要的理论依据和技术规程，并为其它根类药材的规范化栽培提供技术参考。

1 材料与与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2017 年 3—11 月在甘肃省宕昌县进行，试验区海拔 2400 m，年均日照 1986.5 h，年均降水量 450 mm，年均气温 10℃，年均无霜期 180 d，最大冻土深度 45 cm，适宜于党参生长^[4]。

0—20 cm 耕层土壤的基本性质：pH 7.86，有机质 23.6 g/kg、全氮 1.60 g/kg、碱解氮 100 mg/kg、全磷 1.05 g/kg、有效磷 32.4 mg/kg、全钾 17.9 g/kg、速效钾 237 mg/kg。前茬作物为马铃薯。

1.2 材料

供试材料为一年生党参 *Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf.。供试肥料：尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 14%)、硫酸钾(含 K₂O 51%)，氮肥、磷肥、钾肥整地时作基肥一次施入。

1.3 试验设计

采用 N、P、K 三因素二次 D-饱和和最优设计方案(310)^[8](表 1)，设置 10 个处理，3 次重复，30 个小区，小区面积为 24 m² (6 m × 4 m)，栽植深度 3~5 cm。栽植密度为 50 株/m²，各处理田间除草、病虫害防治和水分管理等措施保持一致^[4]。

1.4 测定项目和方法

2017 年 10 月 20 日采收党参^[4]，每小区采收 4 m²，将植株的根完整挖出后用卷尺测定根长；用游标卡尺测量根粗(主根最粗部位直径)；然后洗净根部泥土，在 105℃ 烘箱杀青 10 min，在 70℃ 干燥，测干重并折算至公顷产量。将干燥后的药材粉碎，过 0.18 mm (80 目) 筛，备用。

采用超声法提取党参炔苷，高效液相色谱法测定党参炔苷含量^[4,9]；采用超声法提取党参多糖，3,5-二硝基水杨酸(DNS)法和蒽酮-浓硫酸法相联合测定党参多糖含量^[4]。

1.5 统计方法

数据整理及处理使用 Excel 2010 软件，方差分析用 SPSS 23.0，用 Origin 8.0 和 Design-Expert 8.0.6 作图。

2 结果与分析

2.1 党参产量效应函数

氮、磷、钾肥对党参生长产量和品质指标的影响见表 2。

根据试验结果，拟合得到党参根产量 Y_i 与 N(x_1)、P(x_2)、K(x_3) 的码值效应函数如下：

$$Y_i = 2403 + 174.4x_1 - 36.28x_2 + 66.87x_3 - 349.4x_1^2 - 249.7x_2^2 - 137.1x_3^2 - 32.21x_1x_2 + 35.82x_1x_3 - 84.98x_2x_3 \quad (1)$$

对方程进行 F 检验， $F = 215.8 > F_{0.01}(9, 20) = 3.46$ ，决定系数 $R^2 = 0.9898$ ，存在极显著的回归关

表 1 党参氮, 磷, 钾配比设计
Table 1 Ratio design of NPK in *Codonopsis pilosula*

处理 Treatment	水平编码值 Level code			施肥量 Fertilization rate (kg/hm ²)		
	X_1	X_2	X_3	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
N ₀ P ₀ K ₀	-1	-1	-1	0	0	0
N ₃ P ₀ K ₀	1	-1	-1	250.00	0	0
N ₀ P ₃ K ₀	-1	1	-1	0	150.00	0
N ₀ P ₀ K ₃	-1	-1	1	0	0	100.00
N ₀ P ₂ K ₂	-1	0.1925	0.1925	0	89.43	59.62
N ₂ P ₀ K ₂	0.1925	-1	0.1925	149.10	0	59.62
N ₂ P ₂ K ₀	0.1925	0.1925	-1	149.10	89.43	0
N ₁ P ₃ K ₃	-0.2912	1	1	88.60	150.00	100.00
N ₃ P ₁ K ₃	1	-0.2912	1	250.00	53.16	100.00
N ₃ P ₃ K ₁	1	1	-0.2912	250.00	150.00	35.44

表 2 不同氮, 磷, 钾配比对党参产量和有效成分含量的影响
Table 2 Effects of different ratios of NPK on the yield and bioactive components of *Codonopsis pilosula*

处理 Treatment	根长 (cm) Root length	根粗 (mm) Root diameter	产量 (kg/hm ²) Yield	党参炔苷 (mg/g) Lobetyolin	党参多糖 (%) Polysaccharide
N ₀ P ₀ K ₀	27.2 ± 0.5 cd	9.54 ± 0.15 abc	1380 ± 26 f	0.314 ± 0.006 g	14.69 ± 0.29 e
N ₃ P ₀ K ₀	23.1 ± 0.3 f	9.62 ± 0.14 ab	1722 ± 25 c	0.488 ± 0.011 e	16.28 ± 0.37 d
N ₀ P ₃ K ₀	28.5 ± 0.9 ab	8.79 ± 0.08 d	1542 ± 47 e	0.467 ± 0.012 e	17.78 ± 0.42 c
N ₀ P ₀ K ₃	26.1 ± 0.5 e	9.28 ± 0.34 bc	1612 ± 30 d	0.444 ± 0.008 f	15.19 ± 0.29 d
N ₀ P ₂ K ₂	27.8 ± 0.3 bc	9.99 ± 0.26 a	1867 ± 23 b	0.705 ± 0.016 b	22.42 ± 0.49 a
N ₂ P ₀ K ₂	26.3 ± 0.3 de	9.08 ± 0.18 cd	2242 ± 27 a	0.693 ± 0.012 bc	18.67 ± 0.32 b
N ₂ P ₂ K ₀	26.5 ± 0.3 de	9.76 ± 0.19 ab	2212 ± 25 a	0.692 ± 0.014 bc	22.12 ± 0.38 a
N ₁ P ₃ K ₃	26.9 ± 0.9 cde	9.58 ± 0.53 ab	1880 ± 63 b	0.673 ± 0.013 c	22.17 ± 0.43 a
N ₃ P ₁ K ₃	28.9 ± 0.5 a	9.93 ± 0.22 a	2217 ± 42 a	0.644 ± 0.016 d	19.18 ± 0.49 b
N ₃ P ₃ K ₁	27.0 ± 0.3 cde	10.04 ± 0.16 a	1893 ± 23 b	0.832 ± 0.014 a	17.92 ± 0.30 c

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments at the 5% level.

系, 能较好地指导党参施肥。 $F(1) = 456.6$, $F(2) = 19.75$, $F(3) = 67.09$, $F(1, 1) = 492.5$, $F(2, 2) = 251.5$, $F(3, 3) = 75.83$, $F(1, 2) = 11.00$, $F(1, 3) = 13.60$, $F(2, 3) = 76.58$ 。经比较, 所有项 $> F_{0.01}(1, 20) = 8.10$, 偏回归系数均达极显著水平。氮、磷、钾对党参根产量的影响程度可通过比较每个一次项偏回归系数的绝对值得到^[10-12]。由方程 (1) 可得, 氮、磷、钾偏回归系数的绝对值分别为 174.4、36.28、66.87, 说明对党参产量的影响大小依次为氮 $>$ 磷 $>$ 钾。

2.2 党参炔苷含量效应函数

根据试验结果, 拟合得到党参炔苷含量 Y_2 与 $N(x_1)$ 、 $P(x_2)$ 、 $K(x_3)$ 的码值效应函数如下:

$$Y_2 = 0.8490 + 0.07255x_1 + 0.07891x_2 + 0.02680x_3 - 0.08514x_1^2 - 0.08609x_2^2 - 0.1606x_3^2 + 0.01318x_1x_2 - 0.02728x_1x_3 - 0.01048x_2x_3 \quad (2)$$

对方程进行 F 检验, $F = 497.51 > F_{0.01}(9, 20) = 3.46$, 决定系数 $R^2 = 0.9956$, 存在极显著的回归关系。 $F(1) = 653.9$, $F(2) = 773.6$, $F(3) = 89.25$, $F(1, 1) = 242.2$, $F(2, 2) = 247.6$, $F(3, 3) = 861.8$, $F(1,$

2) = 15.24, $F(1, 3) = 65.37$, $F(2, 3) = 9.640$ 。经比较, 所有项均 $> F_{0.01}(1, 20) = 8.10$, 模型的偏回归系数都达到极显著水平。由方程 (2) 可得, N、P、K 的偏回归系数绝对值分别为 0.0725, 0.0789, 0.0268, 说明磷肥对党参根炔苷含量的影响最大, 氮肥与磷肥的差距不大, 钾肥的影响最小。

2.3 党参多糖含量效应函数

根据试验结果, 拟合得到党参多糖含量 Y_3 与 $N(x_1)$ 、 $P(x_2)$ 、 $K(x_3)$ 的码值效应函数如下:

$$Y_3 = 23.87 - 0.4441x_1 + 1.5101x_2 + 0.5000x_3 - 2.375x_1^2 - 3.562x_2^2 - 1.164x_3^2 - 0.7615x_1x_2 - 0.4790x_1x_3 + 0.7265x_2x_3 \quad (3)$$

对该方程进行 F 检验, $F = 164.89 > F_{0.01}(9, 20) = 3.46$, 决定系数 $R^2 = 0.9867$, 存在极显著的回归关系。 $F(1) = 24.95$, $F(2) = 288.5$, $F(3) = 31.62$, $F(1, 1) = 191.8$, $F(2, 2) = 431.6$, $F(3, 3) = 46.12$, $F(1, 2) = 51.84$, $F(1, 3) = 20.51$, $F(2, 3) = 47.19$ 。经比较, 所有项 $> F_{0.01}(1, 20) = 8.10$, 模型的偏回归系数都达到极显著水平。由方程 (3) 可得, N、P、K 偏回归系数的绝对值分别为 0.4441, 1.5101, 0.5000, 表明磷肥对党参根的多糖含量影响最大, 钾肥的影响其次, 氮肥的影响最小。

2.4 党参产量、炔苷含量和多糖含量效应函数的解析

2.4.1 单因子效应分析 方程 (1)、(2)、(3) 采用降维法^[13], 得到三组单因子效应方程 (图 1)。

1) $N(x_1)$ 、 $P(x_2)$ 、 $K(x_3)$ 与产量的单因子效应方程

氮肥对党参产量的影响:

$$Y_{11} = -2403 + 174.4x_1 - 349.4x_1^2$$

磷肥对党参产量的影响:

$$Y_{12} = -2403 - 36.28x_2 - 249.7x_2^2$$

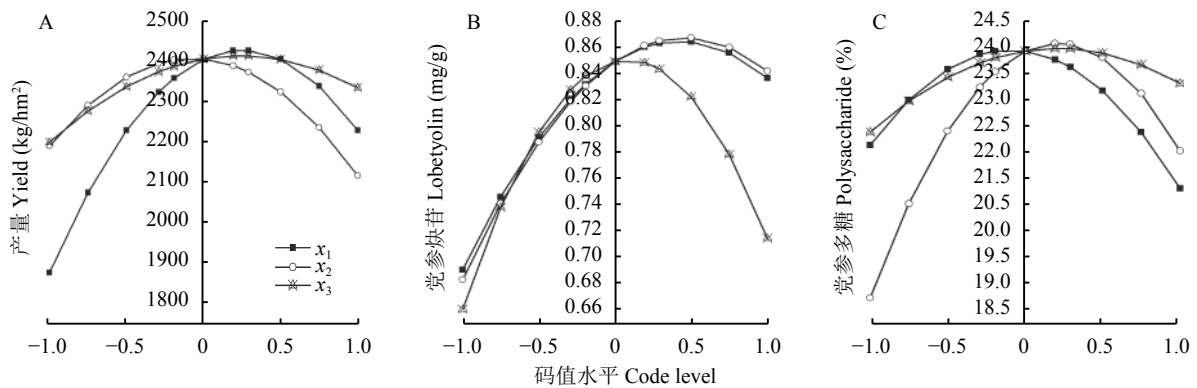


图 1 养分因子对党参产量、炔苷和多糖的单因子效应

Fig. 1 Effects of single nutrient factor (N, P, K) on the yield, lobetyolin and polysaccharide content of *Codonopsis pilosula*

钾肥对党参产量的影响:

$$Y_{13} = -2403 + 66.87x_3 - 137.1x_3^2$$

2) $N(x_1)$ 、 $P(x_2)$ 、 $K(x_3)$ 与炔苷含量的单因子效应方程

氮肥对党参炔苷含量的影响:

$$Y_{21} = 0.8490 + 0.07255x_1 - 0.08514x_1^2$$

磷肥对党参炔苷含量的影响:

$$Y_{22} = 0.8490 + 0.07891x_2 - 0.08609x_2^2$$

钾肥对党参炔苷含量的影响:

$$Y_{23} = 0.8490 + 0.02680x_3 - 0.1606x_3^2$$

3) $N(x_1)$ 、 $P(x_2)$ 、 $K(x_3)$ 与多糖含量的单因子效应方程

氮肥对党参多糖含量的影响:

$$Y_{31} = 23.87 - 0.4441x_1 - 2.375x_1^2$$

磷肥对党参多糖含量的影响:

$$Y_{32} = 23.87 + 1.510x_2 - 3.562x_2^2$$

钾肥对党参多糖含量的影响:

$$Y_{33} = 23.87 + 0.5000x_3 - 1.164x_3^2$$

图 1-A 显示, 三条曲线都是开口朝下的抛物线, 说明氮磷钾与党参产量的关系符合先上升后下降的 Mitscherlich 学说 (报酬递减律)^[14]。由于氮肥在施肥量水平较低时最利于党参产量的提高, 为了实现高产, 必须加大对氮肥施用的重视。在本试验约束范围 ($-1 \leq x \leq 1$) 内, 党参产量存在极大值: $x_1 = 0.2496$ (即施 N 156.2 kg/hm^2) 时, $Y_{11max} = 2425 \text{ kg/hm}^2$; $x_2 = -0.07265$ (即施 P 69.55 kg/hm^2) 时, $Y_{12max} = 2404 \text{ kg/hm}^2$; $x_3 = 0.2439$ (即施 K 62.19 kg/hm^2) 时, $Y_{13max} = 2411 \text{ kg/hm}^2$ 。

图 1-B 显示, 三条曲线都是开口朝下的抛物线, 在施肥量水平较低时, 在一定范围内, 党参炔苷含量与氮、磷、钾施用量呈现正相关关系。此

时, 磷肥的促进效果最好, 其次是施用氮肥。在本试验约束范围 ($-1 \leq x \leq 1$) 内, 党参炔苷含量存在极大值: $x_1 = 0.4260$ (即施 N 178.2 kg/hm^2) 时, $Y_{21max} = 0.8644 \text{ mg/g}$; $x_2 = 0.4582$ (即施 P 109.4 kg/hm^2) 时, $Y_{22max} = 0.8671 \text{ mg/g}$; $x_3 = 0.08344$ (即施 K 54.17 kg/hm^2) 时, $Y_{23max} = 0.8501 \text{ mg/g}$ 。当施肥量超过临界值后, 会导致党参炔苷含量的降低。

图 1-C 显示, 三条曲线都是开口朝下的抛物线, 在施肥量水平较低时, 在一定范围内, 党参多糖含量与氮、磷、钾施用量呈现正相关关系。此时, 磷肥的促进效果最好, 其次是施用钾肥。在本试验约束范围 ($-1 \leq x \leq 1$) 内, 党参多糖存在极大值: 当 $x_1 = -0.09351$ (即施 N 113.3 kg/hm^2) 时, $Y_{31max} = 23.89\%$; $x_2 = 0.2120$ (即施 P 90.90 kg/hm^2) 时, $Y_{32max} = 24.03\%$; $x_3 = 0.2147$ (即施 K 60.73 kg/hm^2) 时, $Y_{33max} = 23.92\%$ 。施肥量超过临界值会导致党参多糖含量的降低。

2.4.2 两因素互作效应分析 方程 (1)、(2)、(3) 采用降维法^[13], 并分别作曲面图 (图 2)。

从图 2 显示, 磷氮的交互作用, 党参产量、炔

苷含量及多糖含量都为开口向下的抛物曲面, 氮肥和磷肥较低水平时, 交互促进作用明显。氮肥对产量影响更大, 磷肥对多糖和炔苷含量影响更大。在钾氮的交互作用中, 党参产量与肥料使用量呈现正相关关系, 交互促进作用明显; 党参炔苷含量的效应图为一张开口朝下的抛物曲面。同一水平的钾肥使用量下, 施氮的多少对党参产量影响较大, 同一水平的氮肥施用量下, 钾施用量的多少对党参产量无显著影响。氮元素对党参产量及炔苷含量的影响更大, 钾元素对党参多糖含量的影响更大。在磷钾的交互作用中, 党参产量的效应图为一张开口朝下的抛物曲面; 党参炔苷及多糖含量与肥料使用量呈现正相关关系, 交互促进作用明显。钾肥对产量影响更大, 磷肥对炔苷和多糖含量影响更大。总的来说, 氮磷钾三者配施, 施氮的多少对党参产量影响较大, 氮参与构成植物功能与结构蛋白, 施氮能显著提高植株的光合能力, 有利于有机物的形成, 为根的生长提供物质基础^[15]。

2.5 施肥模式寻求

Hessian Matrix 的主子式如下: $|A1| = -699$, $|A2| =$

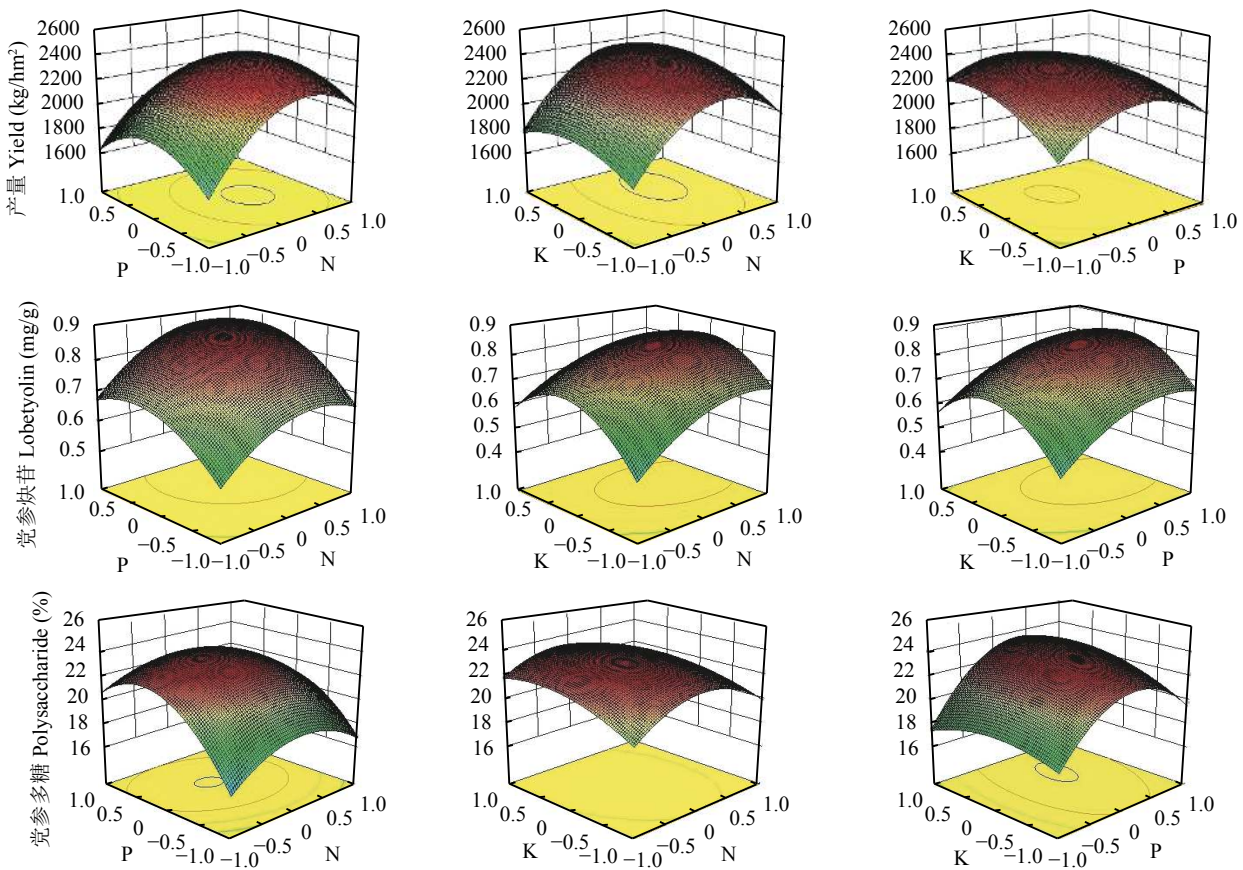


图 2 交互作用分析

Fig. 2 Interaction effect analysis

347935, $|A3| = -89515533$ 。说明方程 (1) 为非典型的效应函数^[10,16]。因此, 本文采用频率分析法对党参产量-施肥模型进行寻优(表 3)。当 x_1 为 0.02711~0.3930, x_2 取-0.3432~-0.07213, x_3 取-0.09384~0.4083, 对应的优化施肥量为 N 128.4~174.1 kg/hm²、P₂O₅ 49.26~80.41 kg/hm²、K₂O 45.31~70.42 kg/hm² 时, 可以实现目标产量在 2100~2500 kg/hm² 范围内。

Hessian Matrix 的主子式如下: $|A1| = -0.1703$, $|A2| = 0.0291$, $|A3| = -0.0092$ 。说明方程 (2) 为非典型的效应函数, 采用频率法寻优。表 4 显示, 当炔苣苷含量高于 0.75 mg/g, 95% 的置信区间的优化施肥组合为 x_1 取 0.02786~0.5730, x_2 取 0.02786~0.5730, x_3 取-0.1731~0.07442, 对应的优化施肥量为 N 128.5~196.6 kg/hm²、P₂O₅ 77.09~118.0

kg/hm²、K₂O 41.34~53.72 kg/hm²。

Hessian Matrix 的主子式如下: $|A1| = -4.75$, $|A2| = 33.25$, $|A3| = -72.77$ 。说明方程 (3) 为非典型的效应函数。同理, 多糖含量高于 22.50%(表 5), 95% 的置信区间的优化施肥组合为 x_1 取-0.2317~0.1330, x_2 取-0.1797~0.1777, x_3 取-0.1955~0.5166, 对应的优化施肥量为 N 96.04~141.6 kg/hm²、P₂O₅ 61.53~88.33 kg/hm²、K₂O 40.22~75.83 kg/hm²。

采用交集法既能实现党参的高产又能保证其品质, 得到党参的氮磷钾最优施肥组合为 N 128.5~141.6 kg/hm²、P₂O₅ 77.09~80.41 kg/hm²、K₂O 45.31~53.72 kg/hm², N、P₂O₅、K₂O 的最优施肥量配比为 1 : 0.54~0.63 : 0.32~0.42。

表 3 党参目标产量在 2100~2500 kg/hm² 的因素频率分布

Table 3 Frequency distribution of factors for target yield of *Codonopsis pilosula* between 2100 and 2500 kg/hm²

项目 Item	编码值 Code	N (x_1)		P ₂ O ₅ (x_2)		K ₂ O (x_3)	
		次数 Count	频率 (%) Frequency	次数 Count	频率 (%) Frequency	次数 Count	频率 (%) Frequency
	-1	0	0	5	17.86	3	10.72
	-0.2912	9	32.14	10	35.71	8	28.57
	0.1925	13	46.43	11	39.29	9	32.14
	1	6	21.43	2	7.14	8	28.57
平均值 Average		0.2101		-0.1355		0.1572	
标准误 Standard error		0.08916		0.1012		0.1224	
95% 置信区间 95% confidence interval		0.02711~0.3930		-0.3432~-0.07213		-0.09384~0.4083	
最佳施肥量 (kg/hm ²) The optimal fertilizer rate		128.4~174.1		49.26~80.41		45.31~70.42	

表 4 党参炔苣苷含量高于 0.75 mg/g 的因素频率分布

Table 4 Frequency distribution of factors for lobetyolin content over 0.75 mg/g

项目 Item	编码值 Code	N (x_1)		P ₂ O ₅ (x_2)		K ₂ O (x_3)	
		次数 Count	频率 (%) Frequency	次数 Count	频率 (%) Frequency	次数 Count	频率 (%) Frequency
	-1	0	0	0	0	0	0
	-0.2912	6	33.34	6	33.34	9	50.00
	0.1925	6	33.33	6	33.33	9	50.00
	1	6	33.33	6	33.33	0	0
平均值 Average		0.3004		0.3004		-0.04935	
标准误 Standard error		0.1292		0.1292		0.05865	
95% 置信区间 95% confidence interval		0.02786~0.5730		0.02786~0.5730		-0.1731~0.07442	
最佳施肥量 (kg/hm ²) The optimal fertilizer rate		128.5~196.6		77.09~118.0		41.34~53.72	

表 5 党参多糖含量高于 22.50% 的因素频率分布
Table 5 Frequency distribution of factors for polysaccharide content over 22.50%

项目 Item	编码值 Code	N (x_1)		P ₂ O ₅ (x_2)		K ₂ O (x_3)	
		次数 Count	频率 (%) Frequency	次数 Count	频率 (%) Frequency	次数 Count	频率 (%) Frequency
	-1	0	0	0	0	0	0
	-0.2912	5	50.00	4	0.40	4	0.40
	0.1925	5	50.00	6	0.60	4	0.40
	1	0	0	0	0	2	0.20
平均值 Average			-0.04935		-0.0009800		0.1605
标准误 Standard error			0.08062		0.07899		0.1574
95% 置信区间 95% confidence interval			-0.2317~0.1330		-0.1797~0.1777		-0.1955~0.5166
最佳施肥量 (kg/hm ²) The optimal fertilizer rate			96.04~141.6		61.53~88.33		40.22~75.83

3 讨论

氮磷钾合理配施不仅能提高药用植物产量, 而且能改善其品质^[16-19]。本研究表明, 合理施用氮、磷、钾肥能促进党参的生长发育, 并提高党参的产量和质量。党参的高产施肥应在保证充足氮肥的基础上, 合理配施磷、钾肥。这与王静等^[11]得出的氮、磷、钾对桔梗产量的影响结果一致。对党参炔苷含量的影响为磷 > 氮 > 钾, 对党参多糖的影响为磷 > 钾 > 氮。根据碳-养分平衡假说, 施磷肥与其他处理相比, 植物生长速度大为减慢, 使植物体内的 C/N 比增大, 导致植物积累的碳水化合物超过自身生长的需要, 引起非结构碳水化合物过剩且多于其他处理, 从而促进了以碳为基础的多糖和炔苷的合成^[20-22]。上述结果与本课题组前期研究的结果基本一致^[4]。

施肥模式寻优结果表明, 在本试验条件下, 当 x_1 为 0.0271~0.3930, x_2 取 -0.3432~-0.0721, x_3 取 -0.0938~0.4083, 对应的优化施肥量为 N 128.39~174.13 kg/hm²、P₂O₅ 49.26~80.41 kg/hm²、K₂O 45.31~70.42 kg/hm², 目标产量在 2100~2500 kg/hm² 范围内。炔苷含量高于 0.75 mg/g, 95% 的置信区间所对应的优化施肥量为 N 128.48~196.63 kg/hm²、P₂O₅ 77.09~117.98 kg/hm²、K₂O 41.34~53.72 kg/hm²; 多糖含量高于 22.5%, 95% 的置信区间所对应的优化施肥量为 N 96.04~141.63 kg/hm²、P₂O₅ 61.53~88.33 kg/hm²、K₂O 40.22~75.83 kg/hm²。综合考虑党参施肥对产量、党参炔苷含量及党参多糖含量的影响, 党参的氮磷钾最优施肥组合为 N 128.48~141.63 kg/hm²、P₂O₅ 77.09~80.41 kg/hm²、

K₂O 45.31~53.72 kg/hm², N、P₂O₅、K₂O 的最优施肥量配比为 1 : 0.54~0.63 : 0.32~0.42。该结果与龚成文等^[3]得出的党参氮磷钾最优配方相一致。

4 结论

本试验区所代表的土壤肥力状况下, 党参高产优质高效栽培最优施肥量为 N 128.5~141.6 kg/hm²、P₂O₅ 77.09~80.41 kg/hm²、K₂O 45.31~53.72 kg/hm², N、P₂O₅、K₂O 的最优施肥量配比为 1 : 0.54~0.63 : 0.32~0.42。在全国范围内, 由于党参生长的生态与土壤环境条件不断变化, 在生产中, 本模型的参数应根据具体土壤肥力条件进行调整和优化, 以实现氮磷钾的平衡配施。

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, 2015.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Chinese pharmacopoeia I [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2015.
- [2] 夏丹, 刘文哲. 党参根的形态发生及组织化学研究[J]. 中草药, 2009, 40(2): 289-292.
Xia D, Liu W Z. Morphogenesis and histochemistry of roots in *Codonopsis pilosula*[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2009, 40(2): 289-292.
- [3] 龚成文, 赵欣楠, 冯守疆, 等. 配方施肥对党参生产特性的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(11): 130-136.
Gong C W, Zhao X N, Feng S J, et al. Effect of formula fertilization on the production of *Codonopsis pilosua*[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2013, 22(11): 130-136.
- [4] 胡佳栋, 毛歌, 张志伟, 等. 不同施肥处理对党参产量和次生代谢物含量的影响研究[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(15): 2946-2953.
Hu J D, Mao G, Zhang Z W, et al. Effect of different fertilization

- treatments on yield and secondary metabolites of *Codonopsis pilosula*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2017, 42(15): 2946–2953.
- [5] 何春雨, 张延红, 蔺海明. 不同栽植密度和施肥量下党参生物量变化动态及其效应研究[J]. *中药材*, 2005, 28(9): 745–748.
He C Y, Zhang Y H, Lin H M. Study on biomass dynamic changes of *Codonopsis pilosula* under the planting density and fertilizing amount[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2005, 28(9): 745–748.
- [6] 王兰霞, 赵菊霞. 党参高产高效施肥与内在质量的研究[J]. *中国中药杂志*, 1996, 21(2): 88–89.
Wang L X, Zhao J X. Study on high-yielding and efficient fertilization and internal quality of *Codonopsis pilosula*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 1996, 21(2): 88–89.
- [7] 何春雨, 张延红, 蔺海明. 甘肃道地党参生长动态研究[J]. *中国中药杂志*, 2006, 31(4): 285–289.
He C Y, Zhang Y H, Lin H M. Study on dynamic growth of *Codonopsis pilosula*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2006, 31(4): 285–289.
- [8] 白厚义, 肖俊璋. 试验研究及统计分析[M]. 西安: 世界图书出版公司, 1998, 274–275.
Bai H Y, Xiao J Z. Experimental study and statistic analysis[M]. Xi'an: World Book Publishing Company, 1998, 274–275.
- [9] 王惠珍, 连中学, 陆国弟, 等. 党参种苗等级与药材产量及质量的关系[J]. *中国中药杂志*, 2016, 41(21): 3950–3955.
Wang H Z, Lian Z X, Lu G D, et al. Relationship between seedling grade of *Codonopsis pilosula* and yield and quality of medicinal materials[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2016, 41(21): 3950–3955.
- [10] 徐福利, 王振, 徐慧敏, 等. 日光温室滴灌条件下黄瓜氮、磷、有机肥肥效与施肥模式研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 177–182.
Xu F L, Wang Z, Xu H M, et al. Study on the response and fertilization model of cucumber for nitrogen, phosphorus and manure application in greenhouse under drip irrigation[J]. *Plant Nutrition Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 177–182.
- [11] 王静, 王渭玲, 徐福利, 等. 桔梗氮、磷、钾施肥效应与施肥模式研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 196–202.
Wang J, Wang W L, Xu F L, et al. Effects and models of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization for *Platycodon grandiflorum*[J]. *Plant Nutrition Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 196–202.
- [12] 赵斌, 王勇, 路钰, 等. 多元二次肥料效应函数极值的判别及函数优化[J]. *园艺与种苗*, 2001, 21(2): 42–45.
Zhao B, Wang Y, Lu Y, et al. The determination of extreme values and optimization of multivariate quadratic fertilization effect function[J]. *Horticulture and Seed*, 2001, 21(2): 42–45.
- [13] 徐中儒. 回归分析与试验设计[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
Xu Z R. Regression analysis and experimental design[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1998.
- [14] Kivisaari S. Importance of secondary and micronutrients in a balanced fertilizer schedule in S.E. Asia[R]. Manila, Philippines: Fertilizer Asia Conference and Exhibition, 1989.
- [15] 张继澍. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Zhang J S. Plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [16] 王振, 王渭玲, 徐福利. 膜荚黄芪氮磷钾优化施肥模式研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(3): 552–557.
Wang Z, Wang W L, Xu F L. Study on the optimization models of nitrogen, phosphorus and potassium application for *Astragalus membranaceus* production[J]. *Plant Nutrition Fertilizer Science*, 2008, 14(3): 552–557.
- [17] 刘大会, 朱端卫, 郭兰萍, 等. 氮肥用量对药用菊花生长及其药用品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 188–195.
Liu D H, Zhu D W, Guo L P, et al. Effects of nitrogen fertilization on growth, yield and quality of *Chrysanthemum morifolium*[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 188–195.
- [18] 郁万文, 曹福亮, 吴广亮. 镁、锌、钼配施对银杏苗木生物量和药用品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 981–989.
Yu W W, Cao F L, Wu G L. Effects of combining application of Mg, Zn and Mo fertilizers on leaf biomass and medicinal quality of ginkgo seedlings[J]. *Plant Nutrition Fertilizer Science*, 2012, 18(4): 981–989.
- [19] 汤璐, 林江辉, 闫广轩, 等. 铜、锌、硒对药用菊花主要有效成分和花中硒含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1475–1480.
Tang L, Lin J H, Yan G X, et al. Effects of Cu, Zn and Se on contents of total flavonoid, chlorogenic acid and Se in the flower of *Chrysanthemum morifolium* Ramat[J]. *Plant Nutrition Fertilizer Science*, 2009, 15(6): 1475–1480.
- [20] 董娟娥, 张康健, 梁宗锁. 植物次生代谢与调控[M]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2009.
Dong J E, Zhang K J, Liang Z S. Plant secondary metabolism and its regulation[M]. Yangling, Shaanxi: Press of Northwest A&F University, 2009.
- [21] Gershenzon J, Murtagh G J, Croteau R. Absence of rapid terpene turnover in several diverse species of terpene-accumulating plants[J]. *Oecologia*, 1993, 96(4): 583–592.
- [22] Barto E K, Cipollini D. Testing the optimal defense theory and the growth-differentiation balance hypothesis in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Oecologia*, 2005, 146(2): 169–178.