

# 秦艽产量及主要药用成分对氮磷钾肥的响应

盛玉章<sup>1,5</sup>, 骆汉<sup>1,2</sup>, 谢永生<sup>1,2,3</sup>, 王渭玲<sup>4</sup>, 李镇<sup>1</sup>, 陈东凯<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100;  
3.陕西西汉农业标准化研究院,陕西西安 710000; 4.西北农林科技大学化学与药学院,陕西杨凌 712100;  
5.中南电力设计院有限公司,湖北武汉 430071)

**摘要:**为研究不同氮、磷、钾施肥模式对秦艽产量及主要药用成分含量的影响,同时探明宝鸡地区秦艽种植的最优施肥方案,通过田间试验,采用3因素2次饱和D-最优设计施肥方案,建立以氮、磷、钾肥施用量为自变量,秦艽产量、龙胆苦苷、马钱苷酸含量为因变量的数学模型,通过模型寻优获得最适施肥区间。根据对氮、磷、钾的单因素效应分析,适宜的氮肥、磷肥施用量可以增加秦艽产量以及龙胆苦苷和马钱苷酸含量,而施用量过高则会产生抑制作用;钾肥对马钱苷酸的影响和氮肥、磷肥相同,但钾肥的施用不利于秦艽龙胆苦苷的积累。氮、磷、钾3种元素对秦艽产量、龙胆苦苷、马钱苷酸含量影响均表现为:磷>氮>钾。对各函数进行频率分析法寻优,得到秦艽产量超过2 100.0 kg·hm<sup>-2</sup>、龙胆苦苷含量超过7.5%、马钱苷酸含量超过2.0%时的施肥区间为氮(N)147.2~185.1 kg·hm<sup>-2</sup>、磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)92.6~98.9 kg·hm<sup>-2</sup>、钾(K<sub>2</sub>O)95.8~134.2 kg·hm<sup>-2</sup>,N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O的最佳比例为:1:1.49~2.00:1.10~1.93。

**关键词:**秦艽;产量;龙胆苦苷;马钱苷酸;最优施肥模式

**中图分类号:**S567.2;S143 **文献标志码:**A

## Yield and medicinal ingredients of *G. macrophylla* Pall. response to N, P and K fertilization

SHENG Yuzhang<sup>1,5</sup>, LUO Han<sup>1,2</sup>, XIE Yongsheng<sup>1,2,3</sup>, WANG Weiling<sup>4</sup>, LI Zhen<sup>1</sup>, CHEN Dongkai<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Shaanxi Hantang Agricultural Standardization, Xi'an, Shaanxi 710000, China;

4. College of Chemistry and Pharmacy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

5. Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** To determine the optimal fertilization plan for *G. macrophylla* Pall. (Qinjiao) cultivation and the effects of various concentrations of N, P and K on the production of gentiopicroside and loganic acid in *G. macrophylla* Pall., a field experiment was conducted in the Baoji area. With a three-factor and quadratic saturation D-optimal design, the experiment was conducted to build a mathematical model with N, P and K fertilizer concentrations as independent variables and the yield of *G. macrophylla* Pall., along with the contents of gentiopicroside and loganic acid as dependent variables. The model was developed to enable the optimal fertilization pattern to be determined. Analysis promoted an increase in production and accumulation of gentiopicroside and loganic acid. According to the single factor effect analysis on N, P and K, the application of N and P with appropriate amount can increase the yield and the contents of gentiopicroside and loganic acid, but it will be inhibited when the amount is too high. The effect is the same as K, but the application of K is not conducive to the accumulation of gentiopicroside. The effects of N, P and K on the yield and gentiopicroside and loganic acid contents were ranked as follows: P>N>K. The frequency analysis method for optimizing each function indicated that the required fertilization pattern for a yield of >2 100.0 kg·hm<sup>-2</sup>, the contents of gentiopicroside of >7.5% and the contents of loganic acid of >

收稿日期:2022-03-08

修回日期:2022-09-16

基金项目:陕西省农业科技创新驱动项目(NYKJ-2021-YL(XN)23);西安市科技计划项目(20NYSF0024)

作者简介:盛玉章(1997-),男,安徽巢湖人,硕士研究生,研究方向为植物生理。E-mail:18408213897@163.com

通信作者:骆汉(1985-),男,山东淄博人,博士生导师,副研究员,主要从事植物生理、水土保持工程研究。E-mail:hanl@ms.iswc.ac.cn

2.0% was 147.2~185.1 kg·hm<sup>-2</sup> of N, 92.6~98.9 kg·hm<sup>-2</sup> of P(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) and 95.8~134.2 kg·hm<sup>-2</sup> of K (K<sub>2</sub>O). To ensure the greatest licorice yield and highest contents of gentiopicoside and loganic acid, the optimal ratio of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O was 1 : 1.49~2.00 : 1.10~1.93.

**Keywords:** *G. macrophylla* Pall.; yield; gentiopicoside; loganic acid; optimal fertilization model

秦艽 (*G. macrophylla* Pall.) 是龙胆科 (Gentianaceae) 龙胆属 (*Gentiana*) 多年生草本植物, 以根入药, 《中国药典》仅将秦艽、麻花艽、粗茎秦艽和小秦艽规定为正品秦艽, 其主要药用成分有龙胆苦苷和马钱苷酸等, 具有祛风湿、清湿热、止痹痛、退虚热等作用<sup>[1]</sup>。由于之前对野生秦艽资源保护的缺失以及市场对秦艽需求量的持续增加, 野生秦艽资源数量严重不足。陕西、甘肃等秦艽道地产区已经开展了将近 30 年的秦艽人工种植<sup>[2]</sup>, 但由于秦艽对海拔和环境要求较高以及人工栽培技术的不成熟, 品种退化、品质不好<sup>[3]</sup>等问题难以解决, 极大制约了秦艽产业的发展<sup>[4]</sup>。施肥是人工调控植物营养的重要手段, 对于保证中药材产量和品质至关重要<sup>[5]</sup>, 氮、磷、钾是植物生长过程中所需要的大量元素, 合理施用可以很好地保证人工栽培中药材产量和有效成分含量。调查表明农民在种植秦艽过程中缺乏科学指导, 施肥往往仅重视产量而忽视了其有效成分的积累, 导致秦艽品质参差不齐<sup>[6]</sup>。

有学者研究了施肥对秦艽产量及有效成分的影响, 如吴春等<sup>[7]</sup>发现适当施用磷、钾肥可以促进环烯醚萜的积累, 通过“3414”施肥方案筛选出秦艽产量—质量的最优施肥方案为: 氮肥 21.49~42.03 kg·667m<sup>-2</sup>, 磷肥 49.53~65.75 kg·667m<sup>-2</sup>, 钾肥 26.34~42.97 kg·667m<sup>-2</sup><sup>[6]</sup>。李向阳等<sup>[8]</sup>研究发现磷肥和尿素施肥比为 4 : 1 时秦艽叶中龙胆苦苷的含量显著提高。魏莉霞等<sup>[9]</sup>的研究表明施用尿素、磷二铵和有机肥均能够增加秦艽产量, 同时尿素有利于秦艽龙胆苦苷的积累。但目前此类研究仍不够深入, 存在试验设计简单、施肥种类单一等问题, 因此有必要进一步开展研究。针对秦艽种植中施肥不合理的问题, 本试验通过三因素二次 D-饱和和最优设计进行配方施肥, 建立数学模型分析研究不同施用量下氮、磷、钾肥对秦艽产量及其主要药用成分的影响, 以探明秦艽的优化施肥模式, 为秦艽规范化种植提供理论依据和数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于陕西省宝鸡市陇县八渡镇桃园村 (34°45′11″N, 106°52′43″E), 地处关中平原西部, 属

暖温带大陆性季风气候, 年平均气温 10.7℃, 无霜期 200 d, 日照时数 2 033.3 h, 年平均降雨量为 600.1 mm。土壤类型为棕壤, 选择 2019 年开始种植秦艽的地块进行试验, 播种株行距为 0.25 m×0.25 m, 施肥和灌溉为当地常规水平。试验开始前使用五点采样法采集 0~20、20~40 cm 土层土样, 风干后过 1 mm 筛, 用电位测定法测定土壤 pH, 用碱解扩散法测定土壤碱解氮含量, 用 0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量, 用 1 mol·L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>OAC 浸提-火焰光度法测定土壤速效钾含量, 土壤有机质含量用重铬酸钾容量法测定<sup>[10]</sup>。土壤基础农化性状见表 1。

### 1.2 试验设计

供试材料由陕西省宝鸡市陇县八渡镇桃园村药农提供, 经西北农林科技大学徐福利教授鉴定为秦艽 (*G. macrophylla* Pall.)。试验于 2021 年 7 月 13 日开始, 此时秦艽处于花期, 选择植株长势相近的地块共 120 m<sup>2</sup>, 采用三因素二次饱和 D-最优设计方案设计, 以不施肥为空白对照, 设 10 个处理, 3 次重复, 共 30 个小区, 小区面积为 4 m<sup>2</sup>, 随机区组排列。试验施肥设计编码值及施肥量见表 2。试验开

表 1 土壤农化性状

Table 1 Soil agrochemical traits

土壤深度 Depth of soil/cm	pH	碱解氮 Available N /(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available P /(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K /(mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质 Organic matter /(g·kg <sup>-1</sup> )
0~20	8.02	10.78	28.96	117.54	22.71
20~40	7.96	8.79	23.74	96.81	20.46

表 2 秦艽施肥设计方案

Table 2 Fertilization design scheme of *G. macrophylla* Pall.

处理 Treatment	X <sub>1</sub> (N)		X <sub>2</sub> (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )		X <sub>3</sub> (K <sub>2</sub> O)	
	编码 Code	施入量 Fertilization amount /(kg·hm <sup>-2</sup> )	编码 Code	施入量 Fertilization amount /(kg·hm <sup>-2</sup> )	编码 Code	施入量 Fertilization amount /(kg·hm <sup>-2</sup> )
CK	-1	0.00	-1	0.00	-1	0.00
N3	1	224.94	-1	0.00	-1	0.00
P3	-1	0.00	1	150.00	-1	0.00
K3	-1	0.00	-1	0.00	1	224.94
P2K2	-1	0.00	0.1925	89.44	0.1925	134.12
N2K2	0.1925	134.12	-1	0.00	0.1925	134.12
N2P2	0.1925	134.12	0.1925	89.44	-1	0.00
N1P3K3	-0.2912	79.72	1	150.00	1	224.94
N3P1K3	1	224.94	-0.2912	53.16	1	224.94
N3P3K1	1	224.94	1	150.00	-0.2912	79.72

始后,氮肥(尿素, N 46.4%)、磷肥(过磷酸钙,  $P_2O_5$  12%)、钾肥(硫酸钾,  $K_2O$  51%)一次性施入各小区。生育期全程不灌溉,田间管理同当地。2021年10月31日进行秦艽根的收获及取样。

### 1.3 测定项目和方法

于2021年10月31日将各小区秦艽根全部采挖收获,清水洗净后,用烘箱在55℃下烘干48 h至恒重,各处理分别称重并折算出公顷产量。将烘干后的秦艽根研磨至粉末,过3号筛。取粉末0.2 g置于具塞锥形瓶中,精密加入70%乙醇100 ml,密塞,称定重量,超声处理(功率250 W,频率40 kHz)30 min,放冷,再称定重量,用70%乙醇补足减失的重量,摇匀,过滤,取续滤液,即得待测液,通过高效液相色谱法<sup>[3]</sup>测定龙胆苦苷、马钱苷酸含量。

### 1.4 数据分析

使用Excel软件进行数据整理分类,运用SPSS 21进行单因素ANOVA方差分析,DPSv 7.05软件进行线性回归分析,Excel、Matlab进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 秦艽产量与氮、磷、钾肥效反应模式的建立与检验

以表2中氮( $X_1$ )、磷( $X_2$ )、钾( $X_3$ )编码值为自变量,以表3中秦艽产量( $Y_1$ )为因变量进行二次多项式回归,得到肥效方程:

$$Y_1 = 2115.851 + 79.005X_1 + 81.069X_2 - 0.214X_3 - 50.68X_{12} - 204.627X_{22} + 78.067X_{32} - 0.492X_1X_2 - 0.351X_1X_3 + 4.572X_2X_3 \quad (1)$$

该方程F检验结果为 $F = 19.602 > F_{0.01}(9, 20) = 3.46$ ,表明回归关系极显著,说明该方程能够很好地反映各施肥量与秦艽产量之间的关系。

### 2.2 龙胆苦苷、马钱苷酸与氮、磷、钾肥效反应模式的建立与检验

以表2中氮( $X_1$ )、磷( $X_2$ )、钾( $X_3$ )编码值为自变量,以表3中龙胆苦苷含量( $Y_2$ )为因变量进行二次多项式回归,得到肥效方程:

$$Y_2 = 7.407 + 0.393X_1 + 0.57X_2 - 0.025X_3 - 0.225X_{12} - 0.354X_{22} + 0.034X_{32} + 0.279X_1X_2 - 0.156X_1X_3 - 0.105X_2X_3 \quad (2)$$

$F = 53.198 > F_{0.01}(9, 20) = 3.46$ ,表明回归关系极显著,说明该方程能够很好地反映各施肥量与龙胆苦苷含量之间的关系。

同理,马钱苷酸的肥效方程为:

$$Y_3 = 2.074 + 0.053X_1 + 0.084X_2 + 0.027X_3 -$$

$$0.036X_{12} - 0.132X_{22} - 0.119X_{32} +$$

$$0.007X_1X_2 - 0.001X_1X_3 - 0.023X_2X_3 \quad (3)$$

$F = 19.172 > F_{0.01}(9, 20) = 3.46$ ,表明回归关系极显著,说明该方程能够很好地反映各施肥量与马钱苷酸含量之间的关系。

表3 氮、磷、钾肥对秦艽产量以及品质的影响

Table 3 The effects of N, P and K fertilization on the yield and quality indicators of *G. macrophylla* Pall.

处理 Treatment	产量 Yield /(kg · hm <sup>-2</sup> )	龙胆苦苷/% Gentiopicroside	马钱苷酸/% Loganic acid
CK	1782.48±137.61e	5.94±0.05g	1.61±0.01f
N3	1942.18±142.21cde	6.48±0.07ef	1.70±0.02ef
P3	1936.46±96.51cde	6.74±0.12de	1.81±0.13d
K3	1773.61±51.98e	6.41±0.06f	1.71±0.08e
P2K2	1997.37±121.67bcd	6.85±0.10d	1.99±0.03ab
N2K2	1845.54±45.11de	6.51±0.09ef	1.87±0.03cd
N2P2	2214.64±85.19a	7.69±0.44b	1.95±0.11abc
N1P3K3	2047.66±145.59abc	7.36±0.03c	1.89±0.02bcd
N3P1K3	2179.53±274.72ab	7.18±0.06c	1.97±0.01abc
N3P3K1	2025.58±45.34abcd	8.16±0.11a	2.04±0.03a

### 2.3 秦艽产量和主要药用成分效应函数的解析

由于氮、磷、钾肥和秦艽产量及龙胆苦苷、马钱苷酸回归方程中实际施肥量与编码值之间存在线性代换关系,因此各偏回归系数绝对值大小可以直接反映各因子的重要程度。式(1)中氮、磷、钾肥的一次项绝对值系数分别为79.005、81.069、0.214,式(2)中氮、磷、钾肥的一次项绝对值系数分别为0.393、0.570、0.025,式(3)中氮、磷、钾肥的一次项绝对值系数分别为0.053、0.084、0.027。各式中绝对值系数大小规律均表现为:磷肥>氮肥>钾肥,说明磷肥对秦艽产量以及龙胆苦苷、马钱苷酸含量影响最大,氮肥次之,钾肥最小。

2.3.1 氮、磷、钾肥单因素效应分析 使用降维法<sup>[11]</sup>,将式(1)、式(2)、式(3)中任意2个自变量固定为0,即可分别得到氮、磷、钾肥与秦艽产量、龙胆苦苷含量、马钱苷酸含量的单因子效应方程,根据方程分别作图。

从图1A可以看出,氮、磷的产量单因子效应方程开口向下,而钾的开口向上,氮肥曲线拐点编码值为0.5左右,磷肥和钾肥的曲线拐点编码值均为0左右;本试验范围内秦艽产量随氮、磷肥施用量的增加先增加后降低,随钾肥施用量的增加先降低后增加。氮、磷的龙胆苦苷含量单因子效应方程开口向下,钾的单因子效应方程开口向上,氮、磷肥曲线的拐点编码值在0.75左右,钾肥的曲线拐点编码值在0.5左右;在本试验范围内,龙胆苦苷含量随氮肥和磷肥施用量增加先上升后降低,随钾肥施用量的增加先降低后增加,但变化幅度很小(图1B)。氮、磷、

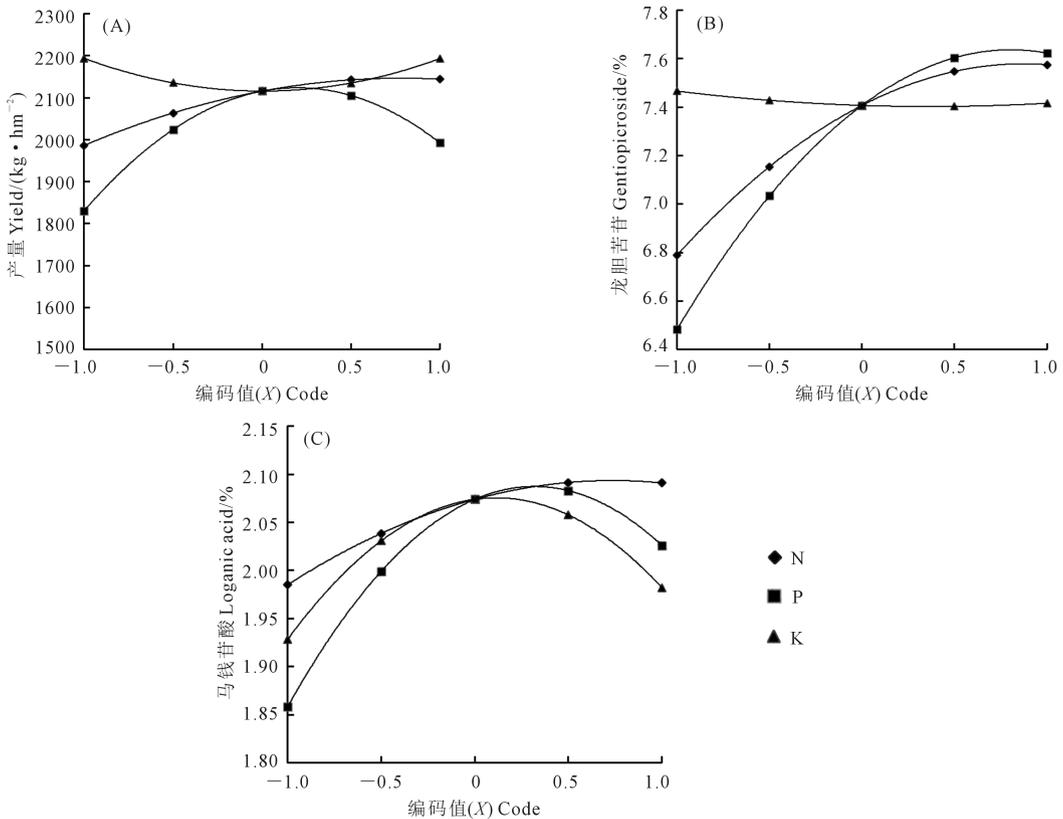


图 1 氮、磷、钾与秦艽产量(A)、龙胆苦昔含量(B)以及马钱苷酸含量(C)的单因子效应分析

Fig.1 Single factor analysis of N, P and K fertilization on the yield (A), gentiopicroside content (B) and loganic acid content (C) of *G. macrophylla* Pall.

钾的马钱苷酸含量单因子效应方程开口均向下,其中,氮肥曲线拐点在 1.0 左右,磷肥曲线拐点在 0.25 左右,钾肥曲线拐点在 0 左右;试验范围内秦艽马钱苷酸含量均随氮肥施用量的增加而增加,随磷肥和钾肥施用量的增加呈先增加后减少的趋势(图 1C)。

**2.3.2 双因素间交互作用分析** 本试验建立的秦艽产量以及龙胆苦昔、马钱苷酸含量回归模型中,存在氮磷、氮钾、磷钾交互项,其偏回归系数均达到显著水平,说明氮、磷、钾肥之间存在互作效应,共同对秦艽产量和龙胆苦昔以及马钱苷酸的积累产生了影响。使用降维法将式(1)、式(2)和式(3)中任意一个编码值变为 0,研究其余两因素之间的交互作用,并作曲面图(图 2)。

由图 2A、2D、2G 可知,氮磷互作效应中,氮、磷对秦艽产量、龙胆苦昔含量和马钱苷酸含量的交互作用曲面均开口向下。秦艽产量、马钱苷酸含量最小时氮、磷的编码值均为-1,最大时氮的编码值为 1,磷的编码值为 0,秦艽产量和马钱苷酸含量在氮肥施用量不变的情况下随磷肥施用量的增加先增加后降低,在磷肥施用量不变的情况下随氮肥施用量的增加而略增加。氮、磷对秦艽龙胆苦昔含量的

积累具有明显的交互促进作用,龙胆苦昔含量最高时氮、磷的编码值均为 1。

由图 2B、2E、2H 可知,氮钾互作效应中,氮、钾对秦艽产量的交互作用曲面开口向上,对龙胆苦昔和马钱苷酸含量的交互作用曲面开口向下。当氮、钾编码值均为 1 时秦艽产量达到最大,氮、钾编码值为-1,0 时产量最小;高水平钾肥施用量下氮、钾对秦艽产量的增加具有交互促进作用。龙胆苦昔含量最大时氮、钾的编码值为 1、-1;低水平钾肥施用量下龙胆苦昔含量随钾肥施用量增加而降低,高水平下随钾肥施用量增加而增加。马钱苷酸含量最小时氮、钾的编码值均为-1,最大时氮的编码值为 1,钾的编码值为 0;马钱苷酸含量在氮肥施用量不变的情况下随钾肥施用量的增加先增加后降低,在钾肥施用量不变的情况下随氮肥施用量的增加而增加。

由图 2C、2F、2I 可知,磷钾互作效应中,磷、钾对秦艽产量、龙胆苦昔、马钱苷酸含量的交互作用曲面开口均向下。秦艽产量最大时磷、钾的编码值为 0、-1;当磷肥施用量较低,钾肥施用量较高时,磷、钾对秦艽产量的增加具有明显的交互促进作用,当磷肥、钾肥施用量较高时,磷、钾对秦艽产量的增加

表现出交互抑制作用。钾肥的施用对龙胆苦苷含量影响很小,龙胆苦苷含量随磷肥施用量的增加而增加。马钱苷酸含量最大值出现时磷、钾的编码值均为 0;磷、钾肥施用量较低时对马钱苷酸的积累具有交互促进作用,施用量较高时则表现为交互抑制。

#### 2.4 施肥模式寻优

秦艽产量效应函数(式 1)的 Hessian 矩阵各阶顺序主子行列式分别为  $|A_1| = -101.36$ 、 $|A_2| = 4.15 \times 10^4$ 、 $|A_3| = 6.48 \times 10^6$ ,判定矩阵 A 为不定矩阵,函数为非典型函数,因此采用频率分析法寻优<sup>[12]</sup>。根据试验结果,选择目标产量大于 2 100.0  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的范围为产量优域。当  $X_1$  取 0.213 ~ 0.764、 $X_2$  取 -0.086 ~ 0.318、 $X_3$  取 -0.385 ~ 0.431 时,即施氮(N)136.4~198.4  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )68.6~98.9  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、钾( $\text{K}_2\text{O}$ )69.2~160.9  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,秦艽目标产量大于 2 100.0  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 4)。

同理,龙胆苦苷含量效应函数(式 2)以及马钱

苷酸含量效应函数(式 3)均为非典型函数,采用频率分析法寻优。龙胆苦苷含量超过 7.5%时的施肥量为氮(N)147.2~200.1  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )92.6~137.1  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、钾( $\text{K}_2\text{O}$ )58.9~147.5  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 5)。马钱苷酸含量大于 2.0%时的施肥量为氮(N)134.5~185.1  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )74.8~113.6  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、钾( $\text{K}_2\text{O}$ )95.8~134.2  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 6)。

中国药典<sup>[1]</sup>规定秦艽中龙胆苦苷和马钱苷酸的总含量不低于 2.5%,因此在秦艽的种植中应同时保证产量与药用成分含量。结合秦艽产量、龙胆苦苷含量、马钱苷酸含量三者的寻优结果,可以得到秦艽产量、龙胆苦苷含量、马钱苷酸含量的最优施肥区间,结果表明秦艽产量超过 2 100.0  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、龙胆苦苷含量超过 7.5%、马钱苷酸含量超过 2.0%时的施肥区间为氮(N)147.2~185.1  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )92.6~98.9  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、钾( $\text{K}_2\text{O}$ )95.8~134.2  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

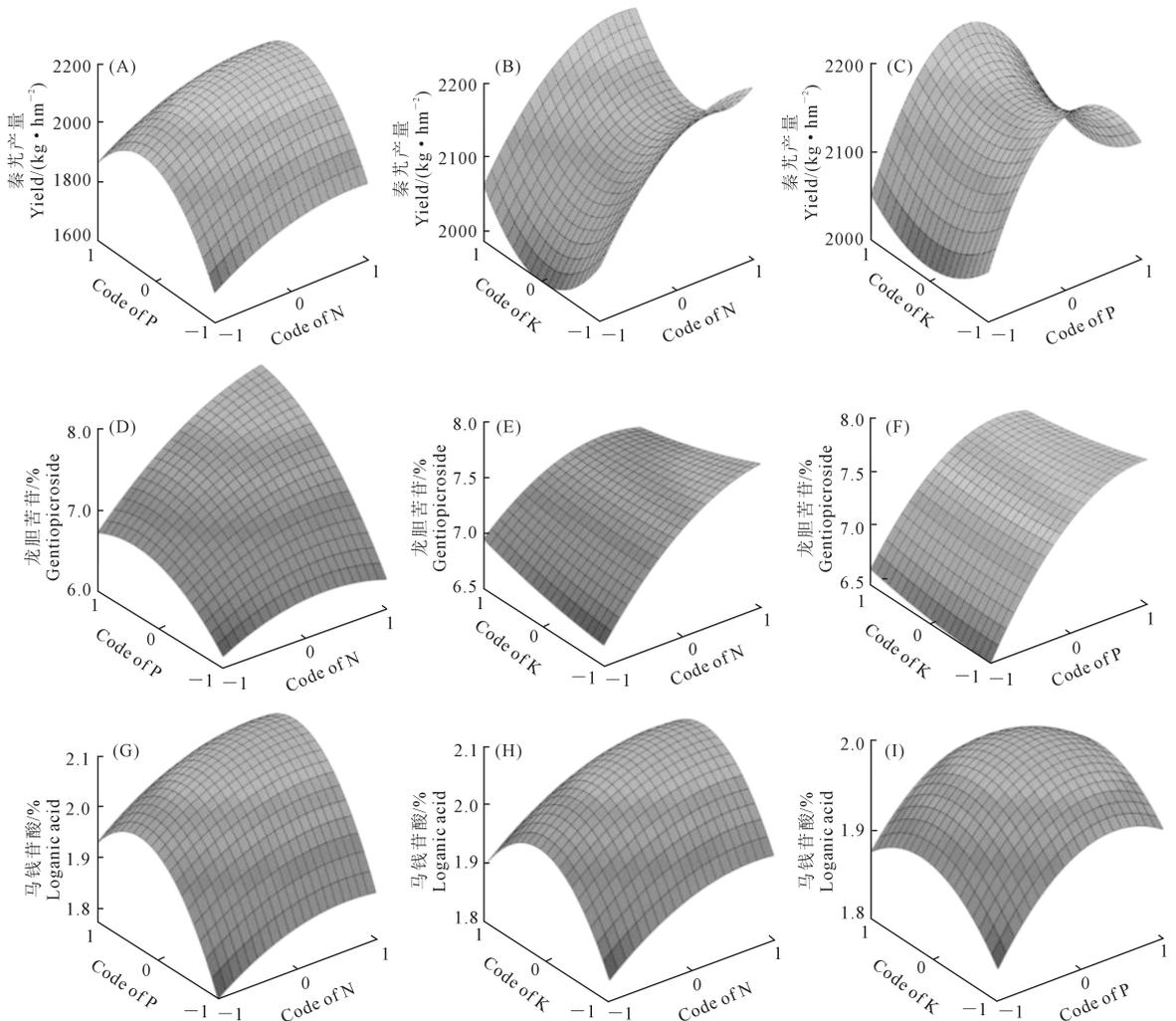


图 2 氮、磷、钾与秦艽产量(A,B,C)和龙胆苦苷含量(D,E,F)以及马钱苷酸含量(G,H,I)的双因素交互效应分析  
Fig.2 Two-factor interaction analysis of N, P and K on the yield(A,B,C), gentiopicroside content(D,E,F) and loganic acid content(G,H,I) of *G. macrophylla* Pall.

表 4 秦艽产量超过 2 100.0 kg · hm<sup>-2</sup>时的因素取值频率分布Table 4 Frequency distribution of factor values when the yield output of *G. macrophylla* Pall. exceeds 2 100.0 kg · hm<sup>-2</sup>

变量因子 Variable factor	因子水平 Factor level				加权平均值 Weighted average value	标准差 Standard deviation	95%置信区间 95% confidence interval	施肥量 Fertilization amount /(kg · hm <sup>-2</sup> )
	-1	-0.2912	0.1925	1				
X <sub>1</sub>	次数 Count	0	4	5	9	0.489	0.554	0.213~0.764
	频数 Frequency	0	0.222	0.278	0.500			
X <sub>2</sub>	次数 Count	0	6	11	1	0.076	0.326	-0.086~0.318
	频数 Frequency	0	0.333	0.611	0.056			
X <sub>3</sub>	次数 Count	5	4	3	6	0.023	0.820	-0.385~0.431
	频数 Frequency	0.278	0.222	0.167	0.333			

表 5 龙胆苦苷含量超过 7.5%时的因素取值频率分布

Table 5 Frequency distribution of factor values when the gentiopicroside content exceeds 7.5%

变量因子 Variable factor	因子水平 Factor level				加权平均值 Weighted average value	标准差 Standard deviation	95%置信区间 95% confidence interval	施肥量 Fertilization amount/ (kg · hm <sup>-2</sup> )
	-1	-0.2912	0.1925	1				
X <sub>1</sub>	次数 Count	0	1	8	8	0.544	0.458	0.309~0.779
	频数 Frequency	0	0.058	0.471	0.471			
X <sub>2</sub>	次数 Count	0	1	7	9	0.592	0.461	0.235~0.828
	频数 Frequency	0	0.058	0.412	0.530			
X <sub>3</sub>	次数 Count	5	4	4	4	-0.082	0.765	-0.476~0.311
	频数 Frequency	0.295	0.235	0.235	0.235			

表 6 马钱苷酸含量超过 2.0%时的因素取值分布

Table 6 Value distribution of factors when the loganinic acid content exceeds 2.0%

变量因子 Variable factor	因子水平 Factor level				加权平均值 Weighted average value	标准差 Standard deviation	95%置信区间 95% confidence interval	施肥量 Fertilization amount /(kg · hm <sup>-2</sup> )
	-1	-0.2912	0.1925	1				
X <sub>1</sub>	次数 Count	0	5	6	7	0.372	0.551	0.098~0.646
	频数 Frequency	0	0.278	0.333	0.389			
X <sub>2</sub>	次数 Count	0	6	7	5	0.256	0.520	-0.003~0.514
	频数 Frequency	0	0.333	0.389	0.278			
X <sub>3</sub>	次数 Count	0	8	9	1	0.022	0.343	-0.148~0.193
	频数 Frequency	0.	0.444	0.500	0.056			

### 3 讨论

氮、磷、钾是植物生长发育所必需的大量营养元素。氮、磷两种元素是植物体内蛋白质和酶的重要组成部分<sup>[13]</sup>,在中药材有效成分的积累过程中发挥巨大作用,磷、钾会促进中药材根系的生长<sup>[14]</sup>。龙胆苦苷和马钱苷酸均为环烯醚萜类物质,属于萜类化合物,研究表明异戊二烯为萜类化合物的结构单元,其合成的前体物质异戊烯焦磷酸(IPP)及其异构体二甲基烯丙基焦磷酸酯(DMAPP)通过MVA途径和MEP途径合成<sup>[15]</sup>。合成途径中的底物包括诸如乙酰辅酶A、丙酮酸和磷酸甘油醛以及参与合成的各种酶,氮、磷两种元素作为其原料参与了萜类化合物的合成<sup>[16]</sup>,钾元素则主要通过渗透调节作用影响秦艽次生代谢过程<sup>[17]</sup>。因此,在中药材生产过程中合理施用氮、磷、钾肥既可以增加产量又能保证中药材的品质。张青云等<sup>[18]</sup>、李明等<sup>[19]</sup>对甘

草的研究表明,肥料对甘草产量影响大小分别为:磷>钾>氮,对甘草总黄酮含量影响大小为:磷>氮>钾;施田田等<sup>[20]</sup>的研究表明肥料对丹参产量影响的强弱顺序分别为:氮>钾>磷;胡佳栋等<sup>[21]</sup>的研究发现肥料对党参产量及党参炔苷影响程度分别为:氮>钾>磷,磷>氮>钾;王占红等<sup>[22]</sup>对黄精的研究表明肥料对黄精产量及多糖含量影响强弱分别为:磷>钾>氮,钾>氮>磷。在本研究中氮、磷、钾3种元素对秦艽产量及龙胆苦苷、马钱苷酸含量的影响大小均表现为:磷>氮>钾。与前人结果有所不同,可能与不同植物营养特性差异以及各试验区土壤肥力情况不同有关<sup>[8]</sup>。

本研究结果表明,施肥处理下秦艽产量、龙胆苦苷、马钱苷酸含量均大于对照(表3),通过合理配施肥料能够有效提升中药材产量和有效成分含量,王婧等<sup>[23]</sup>、金冬雪等<sup>[24]</sup>、赵亚兰等<sup>[25]</sup>对黄芩、桔梗、党参的研究中也出现相同的结果。对氮、磷、钾

的单因素效应分析表明,氮、磷肥对秦艽产量及其有效成分积累的影响大于钾肥,适宜的氮、磷、钾肥施用量对秦艽产量的增长以及药用成分积累具有促进作用。本研究发现氮、磷、钾肥在秦艽生长和有效成分积累过程中具有交互作用,对氮、磷、钾的双因素效应分析表明高水平钾肥施用量下氮、钾,低水平磷肥施用量、高水平钾肥施用量下磷、钾,对秦艽产量的增加具有交互促进作用;高水平磷、钾肥施用量下,磷、钾对秦艽产量的增加表现出交互抑制作用。氮、磷对龙胆苦苷的积累具有交互促进作用;磷、钾肥施用量较低时二者对马钱苷酸的积累具有交互促进作用,施用量较高时则表现为交互抑制。李福安等<sup>[26]</sup>的研究发现在秦艽种植过程中施用适量草木灰、麻渣、尿素、复合肥对其产量以及龙胆苦苷含量的增长具有促进作用,但并未进行深入研究。吴春等<sup>[6]</sup>通过“3414”试验方案研究了粗茎秦艽质量与产量对施肥的响应,得出最佳 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 比例为 1 : 0.33~0.85 : 0.50~1.60。曾羽等<sup>[27]</sup>研究了农家肥、草木灰、过磷酸钙 3 种底肥对秦艽产量及品质的影响,结果表明农家肥 2 000 kg · 667m<sup>-2</sup>,过磷酸钙 20 kg · 667m<sup>-2</sup>,草木灰 100 kg · 667m<sup>-2</sup>作为底肥时秦艽产量和品质最好。本试验条件下秦艽产量超过 2 100.0 kg · hm<sup>-2</sup>、龙胆苦苷含量超过 7.5%、马钱苷酸含量超过 2.0%时的施肥区间为氮(N)147.2~185.1 kg · hm<sup>-2</sup>、磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)92.6~98.9 kg · hm<sup>-2</sup>、钾(K<sub>2</sub>O)95.8~134.2 kg · hm<sup>-2</sup>,N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 的最佳配施比例为 1 : 1.49~2.00 : 1.10~1.93。道地药材是指生长在特定自然条件、生态环境的地域,通过特定生产过程所产的药材较其他地区所产的同种药材品质更佳,疗效更好<sup>[28]</sup>,气候、土壤因素对于中药材的产量和品质影响很大,因此本试验通过寻优得到的最佳施肥方案在实际应用过程中应根据当地自然环境条件进行相应调整。

## 4 结 论

1)氮、磷、钾 3 种元素对秦艽产量以及龙胆苦苷、马钱苷酸含量的影响表现为:磷>氮>钾。

2)适宜的氮肥、磷肥施用量可以增加秦艽产量以及龙胆苦苷和马钱苷酸含量,而施用量过高则会产生抑制作用;钾肥对马钱苷酸的影响和氮、磷肥相同,但钾肥的施用不利于秦艽龙胆苦苷的积累。

3)在关中平原地区,本试验条件下秦艽产量超过 2 100.0 kg · hm<sup>-2</sup>、龙胆苦苷含量超过 7.5%、马钱苷酸含量超过 2.0%时的施肥区间为氮(N)147.2~185.1 kg · hm<sup>-2</sup>、磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)92.6~98.9 kg · hm<sup>-2</sup>、钾

(K<sub>2</sub>O)95.82~134.2 kg · hm<sup>-2</sup>,N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 的最佳比例为 1 : 1.49~2.00 : 1.10~1.93。

## 参 考 文 献:

- [1] 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: 282.  
Chinese Pharmacopoeia Commission.Pharmacopoeia of the People's Republic of China [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020: 282.
- [2] 周文平,赵洪峰,王亚飞,等.秦艽种质资源主要生物学特性与龙胆苦苷含量的相关分析[J].中药材,2015,38(5):933-936.  
ZHOU W P, ZHAO H F, WANG Y F, et al. Correlation analysis between the main biological characteristics and gentiopicroside content of the germplasm resources of *A.chinensis*[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2015, 38(5): 933-936.
- [3] 吴立宏,叶燕,李兴尚,等.反相高效液相色谱法测定道地产区秦艽药材中龙胆苦苷的含量[J].药物分析杂志,2009,29(2):184-187.  
WU L H, YE Y, LI X S, et al. RP-HPLC determination of gentiopicroside in *Radix Gentianae macrophyllae* in traditional area[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2009, 29(2): 184-187.
- [4] 何微微,韦翡翠,吕蓉,等.秦艽的资源现状和可持续利用[J].时珍国医国药,2019,30(7):1754-1756.  
HE W W, WEI F F, LV R, et al. Resource status and sustainable utilization of *Qin Jiao*[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2019, 30(7): 1754-1756.
- [5] 李祥栋,戴斌,潘虹,等.薏苡氮磷钾养分吸收分配及利用特征[J].中国农学通报,2021,37(9):9-15.  
LI X D, DAI Y, PAN H, et al. Nitrogen, phosphorus, and potassium in adlay: uptake, distribution and utilization characteristics [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(9): 9-15.
- [6] 吴春,陈兴福,杨文钰,等.秦艽质量与产量方程施肥效应研究[J].中药材,2015,38(9):1798-1803.  
WU C, CHEN X F, YANG W Y, et al. Fertilizer effect on yield and quality of *Gentiana crassicaulis*[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2015, 38(9): 1798-1803.
- [7] 吴春,杨永茂,陈兴福,等.磷、钾肥配施对秦艽主、侧根 4 种环烯醚萜的影响[J].中药材,2016,39(2):240-244.  
WU C, YANG Y M, CHEN X F, et al. Effect of P and K fertilization on four iridoids in axial and lateral root of *Gentiana crassicaulis* [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2016, 39(2): 240-244.
- [8] 李向阳,李福安,李建民,等.青海栽培秦艽中龙胆苦苷的影响因素考察[J].中草药,2005,36(8):1237-1239.  
LI X Y, LI F A, LI J M, et al. Investigation on the influencing factors of gentiopicroside in cultivation of *chinensis* in Qinghai [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2005, 36(8): 1237-1239.
- [9] 魏莉霞,漆燕玲,赵玮,等.栽培因子对秦艽产量和龙胆苦苷含量的影响[J].安徽农业科学,2008,36(23):10022-10023.  
WEI L X, QI Y L, ZHAO W, et al. Influences of planting factors on the growth indices of *Gentiana crassicaulis* Pall. and the content and the yield of gentiopicroside from its root [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(23): 10022-10023.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:106-107.  
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China

- Agriculture Press, 2000: 106-107.
- [11] 曹鲜艳,徐福利,王渭玲,等. 黄芩产量和黄芩苷含量对氮磷钾肥料的响应[J]. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2171-2177.  
CAO X Y, XU F L, WANG W L, et al. Responses of *Scutellaria baicalensis georgi* yield and root baicalin content to the fertilization rates of nitrogen, phosphorus, and potassium [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(8): 2171-2177.
- [12] 徐中儒. 回归分析与试验设计[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 143-146.  
XU Z R. Regression analysis and experimental design [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 143-146.
- [13] 陈雅君, 闫庆伟, 张璐, 等. 氮素与植物生长相关研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(4): 144-148.  
CHEN Y J, YAN Q W, ZHANG L, et al. Research progress on nitrogen and plant growth [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(4): 144-148.
- [14] 赵倩, 任任, 陈玉敏, 等. 磷肥和钾肥配合施用对甘草有效成分的影响[J]. 林业与生态科学, 2019, 34(1): 87-92.  
ZHAO Q, REN Q, CHEN Y M, et al. Effects of combined application of phosphate and potash fertilizer on the active ingredients of licorice [J]. Forestry and Ecological Sciences, 2019, 34(1): 87-92.
- [15] 张润. 陕西道地秦艽的成分积累与相关基因表达研究[D]. 西安: 西北大学, 2020: 3-6.  
ZHANG R. Studies on components accumulation and relevant key enzyme genes expression of *Gentiana macrophylla* Pall. from Shanxi [D]. Xi'an: Northwest University, 2020: 3-6.
- [16] 张海朋, 刘翠华, 刘园, 等. 柑橘中挥发性萜类物质代谢研究进展[J]. 园艺学报, 2020, 47(8): 1610-1624.  
ZHANG H P, LIU C H, LIU Y, et al. Research advances of volatile terpenoids metabolism in citrus [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2020, 47(8): 1610-1624.
- [17] 韩丽霞, 欧阳敦君, 张鸽香. NaCl 胁迫对流苏幼苗生长、钠钾离子分布及渗透调节物质的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(3): 502-509.  
HAN L X, OUYANG D J, ZHANG G X. Growth, Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> distribution and osmotic regulation of *Chionanthus retusus* seedlings under NaCl stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(3): 502-509.
- [18] 张清云, 李强, 蒋齐, 等. 氮、磷、钾互作效应对甘草产量影响的研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1119-1122.  
ZHANG Q Y, LI Q, JIANG Q, et al. Influence of interdependent effects of N, P and K fertilizers on the licorice yields [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(5): 1119-1122.
- [19] 李明, 张清云, 蒋齐, 等. 氮磷钾互作效应对甘草黄酮含量影响的初步研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 301-304.  
LI M, ZHANG Q Y, JIANG Q, et al. Interactive effect of N, P and K on licorice flavanone content [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(2): 301-304.
- [20] 施田田, 陶珊, 吴宇, 等. 氮磷钾配施对丹参生长和药用成分的影响[J]. 北方园艺, 2021, (4): 113-117.  
SHI T T, TAO S, WU Y, et al. Effects of N, P and K on the growth and medicinal ingredients of *Salvia multiorrhiza* Bge [J]. Northern Horticulture, 2021, (4): 113-117.
- [21] 胡佳栋, 武子丁, 刘子哲, 等. 党参氮磷钾施肥效应与最优施肥量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(9): 1615-1622.  
HU J D, WU Z D, LIU Z Z, et al. Effects and optimum rate of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization for *Codonopsis pilosula* [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(9): 1615-1622.
- [22] 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(3): 143-148.  
WANG Z H, WANG J, ZHU W F, et al. Study on the optimization models of nitrogen, phosphorus and potassium application for *Polygonatum sibiricum* Red. production in Yangling [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(3): 143-148.
- [23] 王婧, 盛晋华, 张雄杰, 等. 不同种植密度下施肥量对黄芩根系生长的影响[J]. 北方农业学报, 2019, 47(3): 41-45.  
WANG J, SHENG J H, ZHANG X J, et al. Effect of fertilization on the root growth of *Scutellaria baicalensis* in different planting densities [J]. Journal of Northern Agriculture, 2019, 47(3): 41-45.
- [24] 金冬雪, 孙迪, 樊桓均, 等. 基于“3414”施肥方案的二年生桔梗主要性状的综合评价[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (2): 156-161.  
JIN D X, SUN D, FAN H J, et al. Comprehensive evaluation of the main characters of the biennial *Platycodon grandiflorum* based on "3414" fertilization scheme [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021, (2): 156-161.
- [25] 赵亚兰, 代立兰, 王嵩德, 等. 不同基肥及其施肥量对黄芪产量和质量的影响[J]. 中药材, 2018, 41(12): 2741-2747.  
ZHAO Y L, DAI L L, WANG Y D, et al. Effects of different base fertilizers and fertilizer application amount on yield and quality of *Astragalus membranaceus* var. *mongolicus* [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2018, 41(12): 2741-2747.
- [26] 李福安, 李建民, 王祖训, 等. 不同肥料对秦艽根的产量和龙胆苦苷含量的影响[J]. 中草药, 2005, 36(1): 119-121.  
LI F A, LI J M, WANG Z X, et al. Effects of different fertilizers on the yield and gentiopicoside content of the roots of *Chinnia chinensis* [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2005, 36(1): 119-121.
- [27] 曾羽, 陈兴福, 孟杰, 等. 底肥用量及种根大小对秦艽质量和产量的影响初探[J]. 中药材, 2015, 38(3): 438-442.  
ZENG Y, CHEN X F, MENG J, et al. Influences of base fertilizer dosage and root size on quality and yield of *Gentiana crassicaulis* root [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2015, 38(3): 438-442.
- [28] 陈欢, 谭舒舒, 罗小泉, 等. 中药道地药材的研究进展[J]. 时珍国医国药, 2018, 29(9): 2228-2230.  
CHEN H, TAN S S, LUO X Q, et al. Research progress of traditional Chinese medicine for genuine regional drug [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2018, 29(9): 2228-2230.