

宋希梅, 朱永全, 卢迎春, 等. 基于“3414”的三七氮磷钾施肥量研究[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1): 16-25.

SONG Xi-mei, ZHU Yong-quan, LU Ying-chun, et al. Studies on application rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer in *Panax notoginseng* cultivation based on "3414" fertilizer experiment[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(1): 16-25.

基于“3414”的三七氮磷钾施肥量研究

宋希梅^{1,3}, 朱永全², 卢迎春², 陈军文², 张广辉², 龙光强^{1,2*}, 杨生超²

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 云南农业大学西南中药材种质创新与利用国家地方联合工程研究中心, 昆明 650201; 3. 米易县湾丘彝族乡农业综合服务中心, 四川 攀枝花 617000)

摘要:通过研究氮磷钾肥对三七[*Panax notoginseng*(Burk) F.H. Chen]产量及主要有效成分产量的影响,为三七种植生产推荐合理的施肥量,试验采用“3414”随机区组设计,进行连续2年的田间小区试验,测定三七植株农艺性状、产量、总皂苷产量等指标,通过肥料效应函数方程拟合氮磷钾施肥量。结果表明,施肥不同程度促进了三七株高、茎粗、叶长、叶宽等农艺性状,且以适当施氮和磷的效果为最佳;二年七(二年生三七)对钾的依赖性较氮磷强,而三年七(三年生三七)对氮的依赖性最强;施氮能显著提高三七单位面积总皂苷产量,在低氮水平即可获得最高总皂苷产量,而磷、钾肥对皂苷含量及总皂苷产量的影响不明显;氮磷钾对三七产量的影响有互作效应,低磷、中钾水平利于氮肥肥效发挥,低氮、中钾水平利于磷肥肥效发挥,而低氮、中磷水平利于钾肥肥效发挥。根据三七总皂苷产量的三元二次回归方程,最大化三七总皂苷产量的施肥量:二年七为N 157~164 kg·hm⁻²、P₂O₅ 179~187 kg·hm⁻²、K₂O 337~356 kg·hm⁻²;三年七为N 192~200 kg·hm⁻²、P₂O₅ 179~187 kg·hm⁻²、K₂O 412~435 kg·hm⁻²。因此,分别针对二年七和三年七,适当控制施氮量和施钾量,增加施磷量,将三者进行合理配比,对提高单位面积三七总皂苷产量有重要意义。

关键词:三七;“3414”肥效试验;互作效应;肥料效应函数

中图分类号:S147.22

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)01-0016-10

doi: 10.13254/j.jare.2018.0040

Studies on application rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer in *Panax notoginseng* cultivation based on "3414" fertilizer experiment

SONG Xi-mei^{1,3}, ZHU Yong-quan², LU Ying-chun², CHEN Jun-wen², ZHANG Guang-hui², LONG Guang-qiang^{1,2*}, YANG Sheng-chao²

(1. College of Resource and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Local Joint Engineering Research Center on Gemplasm Utilization & Innovation of Chinese Medicinal Materials in Southwest China, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. Agricultural Integrated Service Center of Wanqiu Yi Town, Miyi County, Panzhihua 617000, China)

Abstract: To recommend reasonable fertilizer application amount, effects of N, P and K levels on yield and output of main components of *Panax notoginseng* were researched in this study. Agronomic properties, yield and saponins output were measured in field plot experiments in 2 successive years with "3414" design. Application amount of N, P and K was simulated using fertilizer effect function equation. The results showed that fertilization at different degrees promoted the growth of agronomic characters as plant height, stem diameter, leaf size when the best promotion effect occurred with proper nitrogen and phosphorus application. Growth of two-year-old *Panax notoginseng* was more dependent on the phosphorus and potassium than nitrogen while the three-year-old was most dependent on nitrogen; N application improved significantly the total saponin output per unit area with the highest total saponin output in low nitrogen level. However, the effects of phosphorus and potassium application on saponin content and saponins output were not obvious. Effect of N, P and K on yield of

收稿日期:2018-02-06 录用日期:2018-04-17

作者简介:宋希梅(1992—),女,四川米易人,硕士研究生,从事特色作物施肥技术研究。E-mail:576684215@qq.com

*通信作者:龙光强 E-mail:ynaulong2316@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502503);云南省重大科技专项(2016ZF001,2017ZF001);云南省中青年学术技术带头人后备人才项目(2017HB027)

Project supported: National Key R&D Program of China (2016YFC0502503); Major Science and Technology Projects in Yunnan Province (2016ZF001, 2017ZF001); Reserve Talents Project for Young and Middle-aged Academic Technology Leaders in Yunnan Province (2017HB027)

Notoginseng was interactive. A combination low P and medium K was beneficial to N efficiency, and low N and medium K was to P efficiency, while K efficiency maximized in low nitrogen and medium phosphorus level. According to ternary quadratic regression equation of total saponins output of *Panax Notoginseng*, suitable fertilization rate was N 157~164 kg·hm⁻², P₂O₅ 179~187 kg·hm⁻² and K₂O 337~356 kg·hm⁻² for 2-year-old *Panax notoginseng*, and N 192~200 kg·hm⁻², P₂O₅ 179~187 kg·hm⁻², K₂O 412~435 kg·hm⁻² for 3-year-old *Panax notoginseng* when the total output of total saponins was maximized. Therefore, aiming at 2 and 3-year-old *Notoginseng*, properly controlling application amount of nitrogen and potassium and increasing amount of phosphorus with reasonable proportion, three is of great significance to increase the total saponin yield.

Keywords: *Panax notoginseng*; "3414" fertilizer experiment; interaction effects; fertilizer effect function

三七 [*Panax notoginseng* (Burk) F.H. Chen] 是五加科 (Araliaceae) 人参属 (*Panax* L.) 多年生草本植物, 根、根茎、花和叶均可入药, 具有消肿定痛、散瘀止血的疗效, 主要用于治疗心脑血管疾病、血液系统疾病和中枢神经系统疾病^[1]。三七是我国人工栽培较早的传统名贵中药材, 云南是三七的道地产区, 其种植面积和产量均占全国 98% 以上^[2]。栽培技术是保障栽培药材产量和品质的核心要素之一, 而施肥是栽培技术的关键环节^[3-4]。

施肥调查显示, 部分农户施肥量严重超过三七生长养分需求, 且存在过于偏施钾肥的现象^[5]。当前对三七的施肥研究更多关注单因素(氮、磷或钾)营养的影响^[6-9], 对于氮磷钾三因素综合肥效方面的研究较少^[10]。然而, 肥料投入中的营养元素间存在明显的互作效应, 即氮磷钾肥料三要素在各自发挥作用的同时, 两两之间还通过互作效应, 促进或者拮抗养分的肥效, 相关研究已在党参^[11]、黄芪^[12]、灯盏花^[13]等药材上开展。此外, 施肥会影响三七产量和有效成分含量, 而前期报道缺乏综合产量和品质等方面(如单位面积总皂苷产量)的研究, 这对当前大部分用作有效成分提取的三七而言, 难以提供有效的种植指导。因此, 明确氮磷钾营养对三七产量和品质的影响及互作效应, 开展基于有效成分产量最大化的三七施肥研究, 对指导当前三七种植有重要意义。

“3414”肥料效应试验方案是农业部《测土配方施肥技术规范(试行)修订稿》中推荐采用的方案设计, 既有回归最优设计处理少、效率高的优点, 又符合肥料试验和施肥决策的专业要求, 可运用肥料效应函数法、土壤养分丰缺指标法、养分平衡法等进行施肥量的推荐, 依据土壤供肥能力、作物需肥规律和肥料效应, 合理确定氮磷钾的施用量^[14]。本研究通过“3414”肥效试验, 将肥料三因素、产量、品质相互结合起来, 同时还基于单位面积有效成分产量最大化分析了最

优的施肥量, 以期生产出产量高、品质好的三七提供科学依据, 为三七栽培施肥理论与实践提供数据支撑, 推进三七产业的健康持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验地概述

连续两年大田试验在云南省文山州砚山县盘龙乡苗乡三七科技园(23°53'N, 104°32'E)进行, 海拔 1500 m, 地属低纬北亚热带高原季风气候, 立体气候明显。年平均气温 16.1℃, 年降雨量 1008 mm, 全年无霜期 250~320 d, 四季不明显, 干湿分明, 具有春暖秋凉、夏无酷暑、冬无严寒、四季温和的特点。土质为疏松肥沃的沙壤土, pH 6.70, 有机质 11.09 g·kg⁻¹, 碱解氮 124.05 mg·kg⁻¹, 速效磷 74.85 mg·kg⁻¹, 速效钾 261.01 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验为两年连续试验, 第 1 年为二年生三七(简称二年七), 经过 1 年生长到第 2 年即为三年生三七(简称三年七), 小区试验采用“3414”随机区组设计, 即氮、磷、钾 3 个因素, 4 个施肥水平, 共 14 个处理, 每个处理设 3 次重复, 小区面积 1.8 m² (1.5 m×1.2 m)。二年七基础施肥水平为 N 225 kg·hm⁻², P₂O₅ 225 kg·hm⁻², K₂O 450 kg·hm⁻², 三七基础施肥水平为 N 270 kg·hm⁻², P₂O₅ 225 kg·hm⁻², K₂O 540 kg·hm⁻²。4 个水平的施肥量如表 1 所示。

试验用氮肥为尿素(含纯 N>46%), 磷肥为普钙(含 P₂O₅>14%), 钾肥为硫酸钾(含 K₂O>50%)。氮、钾肥分于 2014 年 4 月 8 日(30%)、6 月 18 日(35%)、8 月 22 日(35%)三次施入, 磷肥在 2014 年 4 月 8 日一次性全部施入土壤; 施肥方式为表土撒施, 将肥料与细土混匀后撒施, 并扫尽叶面上残留肥料和土粒。三七在两年的生长过程中均不留花苔, 其他田间管理(浇水、除草、病虫害防治等)与当地生产管理相同。

表1 三七“3414”肥效试验N、P、K因素水平

Table 1 The levels of N, P and K factors in the "3414" fertilizer efficiency of *Panax notoginseng*

七龄	因素	施肥水平/kg·hm ⁻²			
		0	1	2	3
二年七	N	0	112.5	225	337.5
	P	0	112.5	225	337.5
	K	0	225	450	675
三年七	N	0	135	270	405
	P	0	112.5	225	337.5
	K	0	270	540	810

1.3 样品采集与分析

三七开花期(8月)在田间原位测定三七茎粗、株高、中叶长和中叶宽。12月三七采收时,在田间原位测定存苗率,采收后测定单株产量、小区产量及5种皂苷(三七皂苷R₁、人参皂苷R_{g1}、人参皂苷R_{b1}、人参皂苷R_d、人参皂苷R_e)的含量并计算总皂苷含量和单位面积总皂苷产量。参照《中国药典》2015版所规定的方法^[1],用HPLC测定三七块根中5种主要皂苷的含量。单株产量是指平均每株三七地下部药用根的干质量(g·株⁻¹),产量是指单位面积三七根茎的干质量(kg·hm⁻²)。

1.4 数据统计与分析

采用Excel 2010对数据进行统计和分析;采用SPSS 18.0进行处理间差异显著性检验($\alpha=0.05$),并进行单因素方差分析和回归分析。采用一元二次和三元二次方程对产量进行拟合,分析确定三七最佳产量和有效成分产量下的氮磷钾施用量。

1.5 计算方法

空白区相对产量 = $N_0P_0K_0$ 产量 ÷ $N_2P_2K_2$ 产量 × 100%

缺氮的相对产量 = $N_0P_2K_2$ 产量 ÷ $N_2P_2K_2$ 产量 × 100%

缺磷的相对产量 = $N_2P_0K_2$ 产量 ÷ $N_2P_2K_2$ 产量 × 100%

缺钾的相对产量 = $N_2P_2K_0$ 产量 ÷ $N_2P_2K_2$ 产量 × 100%

缺氮区相对增产量 = ($N_2P_2K_2$ 产量 - $N_0P_2K_2$ 产量) ÷ $N_0P_2K_2$ 产量 × 100%

缺磷区相对增产量 = ($N_2P_2K_2$ 产量 - $N_2P_0K_2$ 产量) ÷ $N_2P_0K_2$ 产量 × 100%

缺钾区相对增产量 = ($N_2P_2K_2$ 产量 - $N_2P_2K_0$ 产量) ÷ $N_2P_2K_0$ 产量 × 100%

空白区相对增产量 = ($N_2P_2K_2$ 产量 - $N_0P_0K_0$ 产量) ÷ $N_0P_0K_0$ 产量 × 100%

施肥依存度(%) = 100% - 相对产量(%)

全肥区的施肥依存度(%) = 100% - 空白区相对产

量(%)

总皂苷产量 = 总皂苷含量 × 产量

皂苷含量 = (HPLC 读数 ÷ 进样量) × 定容体积 ÷ 称样量

总皂苷含量 = 皂苷 R₁ + 皂苷 R_{g1} + 皂苷 R_{b1} + 皂苷 R_d + 皂苷 R_e

2 结果与分析

2.1 氮磷钾配施对三七农艺性状、产量与品质的影响

2.1.1 不同施肥处理对三年七植株农艺性状的影响

从表2可以看出,与不施肥($N_0P_0K_0$)相比,施肥总体上提高了三年七株高、叶长、茎粗和单株产量, $N_2P_2K_3$ 处理单株产量最高,为14.22 g·株⁻¹。但施肥降低三年七存苗率,除 $N_2P_3K_2$ 、 $N_2P_2K_3$ 处理外,其他处理存苗率均低于不施肥处理。

当磷、钾肥施用水平为中等水平(P_2K_2)时,与不施氮肥处理($N_0P_2K_2$)相比,施氮分别增加了三年七株高、茎粗、叶长和叶宽,以株高和叶长增幅最为明显。单株产量随施氮量的增加呈增加趋势,在 N_2 水平时达到最高单株产量13.62 g·株⁻¹。施氮较不施氮平均增加了3.32 g·株⁻¹,平均增长率为25.66%。施氮能增加单株产量,但是降低存苗率,这可能与施氮加重病害有关。当氮、钾肥施用水平为中等水平(N_2K_2)时,与不施磷肥($N_2P_0K_2$)相比,施磷能够增加株高、叶宽。单株产量随施磷量的增加呈增加趋势,到 P_2 水平最高,之后增加磷肥施用量单株产量逐渐降低,而施磷对存苗率影响不明显。当氮、磷肥施用水平为中等水平(N_2P_2)时,与不施钾肥($N_2P_2K_0$)相比,施钾肥能增加株高、茎粗、叶长和叶宽。三年七单株产量随施钾量的增加而增加,存苗率的变化不明显,在 K_3 水平时单株产量与存苗率均最高。

2.1.2 不同施肥处理下三七产量和品质

由表3和表4数据计算得到,无肥区二年七的相对产量和相对总皂苷产量为100.28%、105.52%,三年七为55.20%、53.64%。二年七的缺氮、磷、钾区的相对产量分别为95.14%、95.71%、87.85%,相对总皂苷产量分别为96.19%、83.01%、103.15%。三年七的缺氮、磷、钾区的相对产量分别为71.84%、101.77%、115.44%,相对总皂苷产量分别为68.67%、106.43%、114.49%,均表现为空白区产量 < 缺氮区产量 < 缺磷区产量 < 缺钾区产量。表明该试验地二年七时土壤肥力较高,尤其是碱解氮和速效钾含量相对较高,三年七时试验地速效磷、速效钾均较高,而碱解氮含量较低。

二年七对钾的依赖性相对较氮磷肥强,而三年七对氮的依赖性最强,施肥依存度为28.16%,对磷和钾的依存度较弱;氮磷钾配施时,施肥依存度为45.79%。说明氮肥对三七产量起着重要作用,磷和钾对三七产量

的影响不大,当氮磷钾配合施用,效果最好。

由表4可知,三年七产量水平最低为 $N_0P_0K_0$ 、最高为 $N_1P_1K_2$,三年七总皂苷产量水平最低为 $N_0P_0K_0$ 、最高为 $N_1P_2K_1$ 。产量和总皂苷产量排前三的处理为

表2 不同施肥处理下三年七植株农艺性状、存苗率和单株产量

Table 2 Agronomic properties, survival rate and root weight of the three-year-old *Panax notoginseng* under the different fertilizer treatments

分组	处理	株高/cm	茎粗/mm	叶长/cm	叶宽/cm	存苗率/%	单株产量/g·株 ⁻¹
N 组	$N_0P_2K_2$	56.29±6.73a	0.51±0.03a	12.06±1.72a	4.81±0.45a	0.80±0.07a	11.58±0.54a
	$N_1P_2K_2$	66.78±1.38a	0.55±0.03a	14.36±0.61b	5.38±0.57a	0.81±0.07a	12.94±0.38a
	$N_2P_2K_2$	64.70±4.67a	0.53±0.02a	14.10±0.41ab	5.23±0.19a	0.77±0.07a	13.62±0.69a
	$N_3P_2K_2$	65.66±8.83a	0.55±0.04a	13.86±1.22ab	5.50±0.26a	0.75±0.08a	13.39±0.40a
P 组	$N_2P_0K_2$	56.78±11.03a	0.55±0.03a	13.98±1.24a	5.04±0.20a	0.85±0.06a	13.14±0.42a
	$N_2P_1K_2$	57.11±4.10a	0.56±0.05a	13.92±0.25a	5.01±0.37a	0.83±0.06a	12.58±0.41a
	$N_2P_2K_2$	64.70±4.67a	0.53±0.02a	14.10±0.41a	5.23±0.19a	0.77±0.07a	13.62±0.69a
	$N_2P_3K_2$	64.52±5.21a	0.52±0.02a	13.39±1.03a	5.11±0.20a	0.88±0.04a	11.71±0.19a
K 组	$N_2P_2K_0$	64.44±3.83a	0.53±0.01a	13.47±0.44a	5.07±0.23a	0.84±0.05a	13.11±0.46a
	$N_2P_2K_1$	66.19±3.60a	0.56±0.01a	13.88±0.63ab	5.39±0.48a	0.79±0.04a	13.49±0.51a
	$N_2P_2K_2$	64.70±4.67a	0.53±0.02a	14.10±0.41ab	5.23±0.19a	0.77±0.07a	13.62±0.69a
	$N_2P_2K_3$	66.41±4.26a	0.57±0.09a	14.50±0.55b	5.41±0.31a	0.88±0.07a	14.22±0.38a
其他组	$N_0P_0K_0$	58.13±3.67a	0.49±0.04a	12.87±1.07a	5.37±1.16a	0.88±0.06a	10.28±0.51a
	$N_1P_1K_2$	63.94±0.97a	0.53±0.03ab	14.86±0.63b	5.50±0.38a	0.88±0.08a	13.61±0.32b
	$N_1P_2K_1$	66.93±2.70a	0.58±0.05b	14.20±1.17ab	4.99±0.39a	0.87±0.10a	14.62±0.53b
	$N_2P_1K_1$	67.39±3.92a	0.50±0.02a	13.36±0.66ab	5.18±0.79a	0.83±0.04a	12.56±0.65ab
	$N_2P_2K_2$	64.70±4.67a	0.53±0.02ab	14.10±0.41ab	5.23±0.19a	0.77±0.07a	13.62±0.69ab

注:同一组内不同字母代表在 $\alpha=0.05$ 时各处理间有显著差异。下同。
Note: Different letters mean significant differences in the same group at 0.05 level. The same below.

表3 二年七产量、皂苷含量和总皂苷产量(平均值±标准差,n=3)

Table 3 Yield, saponin contents and output of the two-year-old *Panax notoginseng*(Mean±SD, n=3)

分组	处理	产量/kg·hm ⁻²	总皂苷含量/%	总皂苷产量/kg·hm ⁻²
N 组	$N_0P_2K_2$	1 611.49±117.54a	5.49±0.04ab	88.50±7.05a
	$N_1P_2K_2$	2 047.22±111.97b	5.33±0.04a	109.20±8.34b
	$N_2P_2K_2$	1 693.68±62.52a	5.43±0.17a	92.01±5.74a
	$N_3P_2K_2$	1 744.15±87.63a	5.73±0.14b	99.97±7.50ab
P 组	$N_2P_0K_2$	1 621.00±129.24a	4.72±0.13a	76.38±4.89a
	$N_2P_1K_2$	2 013.05±95.17b	4.92±0.02b	99.06±4.25b
	$N_2P_2K_2$	1 693.68±62.52a	5.43±0.17d	92.01±5.74b
	$N_2P_3K_2$	2 098.35±70.36b	5.16±0.04c	108.25±2.90c
K 组	$N_2P_2K_0$	1 487.83±122.56a	6.37±0.12c	94.91±9.65a
	$N_2P_2K_1$	2 032.62±85.73c	5.20±0.09ab	105.58±2.75a
	$N_2P_2K_2$	1 693.68±62.52b	5.43±0.17b	92.01±5.74a
	$N_2P_2K_3$	1 820.10±119.88b	5.10±0.19a	92.92±9.32a
其他组	$N_0P_0K_0$	1 698.38±122.82a	5.71±0.12b	97.08±8.95a
	$N_1P_1K_2$	2 296.19±85.39c	5.39±0.25a	123.90±6.36b
	$N_1P_2K_1$	2 478.63±150.93c	6.12±0.11c	151.85±11.77c
	$N_2P_1K_1$	1 923.18±141.39b	5.17±0.10a	99.48±9.87a
	$N_2P_2K_2$	1 693.68±62.52a	5.43±0.17a	92.01±5.74a

表4 三年七产量、总皂苷含量和总皂苷产量(平均值±标准差, $n=3$)Table 4 Yield, saponin contents and output of the three-year-old *Panax notoginseng*(Mean±SD, $n=3$)

分组	处理	产量/kg·hm ⁻²	总皂苷含量/%	总皂苷产量/kg·hm ⁻²
N组	N ₀ P ₂ K ₂	2 278.55±63.01a	12.91±0.12b	294.00±5.56a
	N ₁ P ₂ K ₂	3 332.64±101.70c	13.07±0.04c	435.53±12.63c
	N ₂ P ₂ K ₂	3 171.76±77.12b	13.50±0.07d	428.15±11.36c
	N ₃ P ₂ K ₂	3 103.77±93.46b	12.55±0.08a	389.47±11.87b
P组	N ₂ P ₀ K ₂	3 227.83±54.90bc	14.12±0.09d	455.67±10.04c
	N ₂ P ₁ K ₂	3 391.36±104.63c	13.34±0.05b	452.34±15.47b
	N ₂ P ₂ K ₂	3 171.76±77.12ab	13.50±0.07c	428.15±11.36b
	N ₂ P ₃ K ₂	3 009.43±110.28a	12.59±0.07a	378.84±14.99a
K组	N ₂ P ₂ K ₀	3 661.55±86.25c	13.39±0.15b	490.18±15.38b
	N ₂ P ₂ K ₁	3 429.17±124.58b	12.45±0.08a	426.76±13.12a
	N ₂ P ₂ K ₂	3 171.76±77.12a	13.50±0.07b	428.15±11.36a
	N ₂ P ₂ K ₃	3 476.26±78.59b	13.59±0.12b	472.36±14.28b
其他组	N ₀ P ₀ K ₀	1 751.00±113.59a	13.12±0.13b	229.64±14.01a
	N ₁ P ₁ K ₂	3 881.37±99.65c	12.92±0.25ab	501.62±19.77c
	N ₁ P ₂ K ₁	3 839.02±53.01c	13.78±0.11d	529.07±3.35d
	N ₂ P ₁ K ₁	3 226.81±85.16b	12.74±0.10a	411.16±13.49b
	N ₂ P ₂ K ₂	3 171.76±77.12b	13.50±0.07c	428.15±11.36b

N₁P₁K₂、N₁P₂K₁、N₂P₂K₀,产量分别比空白区 N₀P₀K₀增加了121.67%、119.25%和109.11%,总皂苷产量较空白区增加了118.44%、130.39%、113.45%。

施氮能够显著增加二年七和三年七的产量,从总皂苷产量来看,施氮能显著提高三七总皂苷产量,在低氮水平时可获得最高总皂苷产量;同时施氮利于三年七总皂苷含量的积累;磷肥明显增加二年七产量、总皂苷含量和总皂苷产量,但对三年七产量、总皂苷含量和总皂苷产量影响较弱。施钾显著增加二年七产量,但对三年七产量影响不明显;钾素对三年七产量、总皂苷含量和总皂苷产量的影响较弱,不施钾肥处理的三项指标均高于施钾处理,这可能是由三七品种、土壤肥力及其他环境因素导致的。

2.2 氮磷钾肥的互作效应

2.2.1 磷钾肥施用对氮肥效果的影响

氮磷钾肥三者分别在三七生长中发挥着各自的作用,同时,氮磷钾肥效的发挥还受三者彼此间互作的影响。从图1可看出,当钾肥施用量在K₂水平时,二年七和三年七产量在低氮和中氮处理均表现为随施磷量的增加而降低,二年七分别减产248.97、319.30 kg·hm⁻²,减产率为10.84%、15.86%,三年七分别减产548.73、219.60 kg·hm⁻²,减产率为14.14%、6.48%。二年七总皂苷含量在低氮水平时随施磷量的增加而减少,中氮水平时随施磷量的增加而增加,增长

率为10.33%;三年七总皂苷含量在低氮和中氮处理随施磷量的增加而增加,增长率为1.15%、1.20%。

当磷肥施用量在P₂水平时,随施钾量的增加,二年七和三年七产量在低氮和中氮处理均表现为随施钾量的增加而降低,二年七减产431.41、338.92 kg·hm⁻²,减产率为17.41%、16.67%,三年七产量减少506.38、257.41 kg·hm⁻²,减产率为13.19%、7.51%。二年七、三年七总皂苷含量在低氮水平时随施钾量的增加而减少,减产率为12.91%、5.17%;中氮水平时随施钾量的增加而增加,增长率为4.49%、8.43%。由此可见,在中磷、中钾水平时的产量低于其他施肥水平,各处理间总皂苷含量差别不大,这说明低磷、中钾水平利于氮肥效果的发挥。

2.2.2 氮钾肥施用对磷肥效果的影响

如图2所示,当钾为K₂水平时,低磷和中磷处理的二年七、三年七产量随施氮量的增加而减少,二年七产量减少283.14、353.54 kg·hm⁻²,减产率为12.33%、17.27%,三年七产量分别减少490.01、160.88 kg·hm⁻²,减产率为10.67%、4.83%。二年七总皂苷含量在低磷水平下随施氮量的增加而减少8.72%,在中磷水平下随施氮量的增加而增加1.88%;三年七总皂苷含量在低、中磷水平下均随施氮量的增加而增加,总皂苷含量分别增加0.42%、0.43%,增长率为3.24%、3.29%。

当氮为N₂水平时,低磷处理中二年七、三年七产

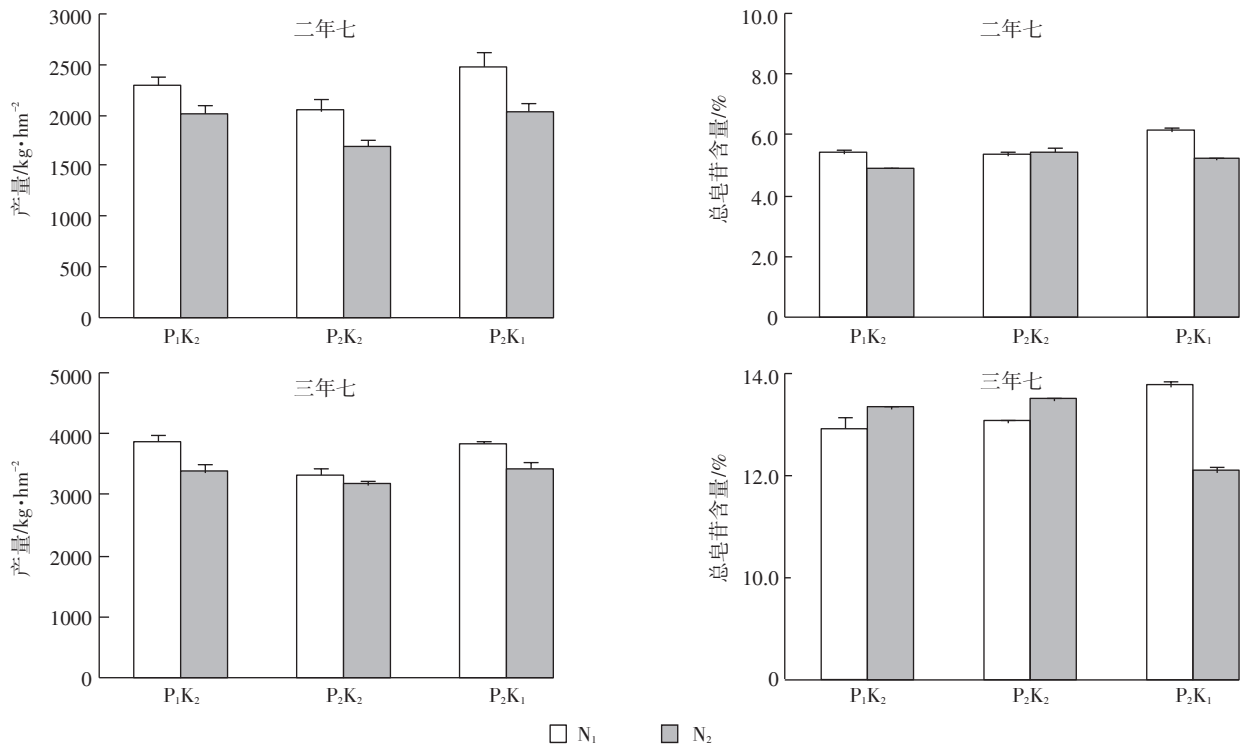


图1 不同磷钾肥用量对氮肥效果的影响

Figure 1 Effect of phosphorus and potassium fertilizer on nitrogen efficiency

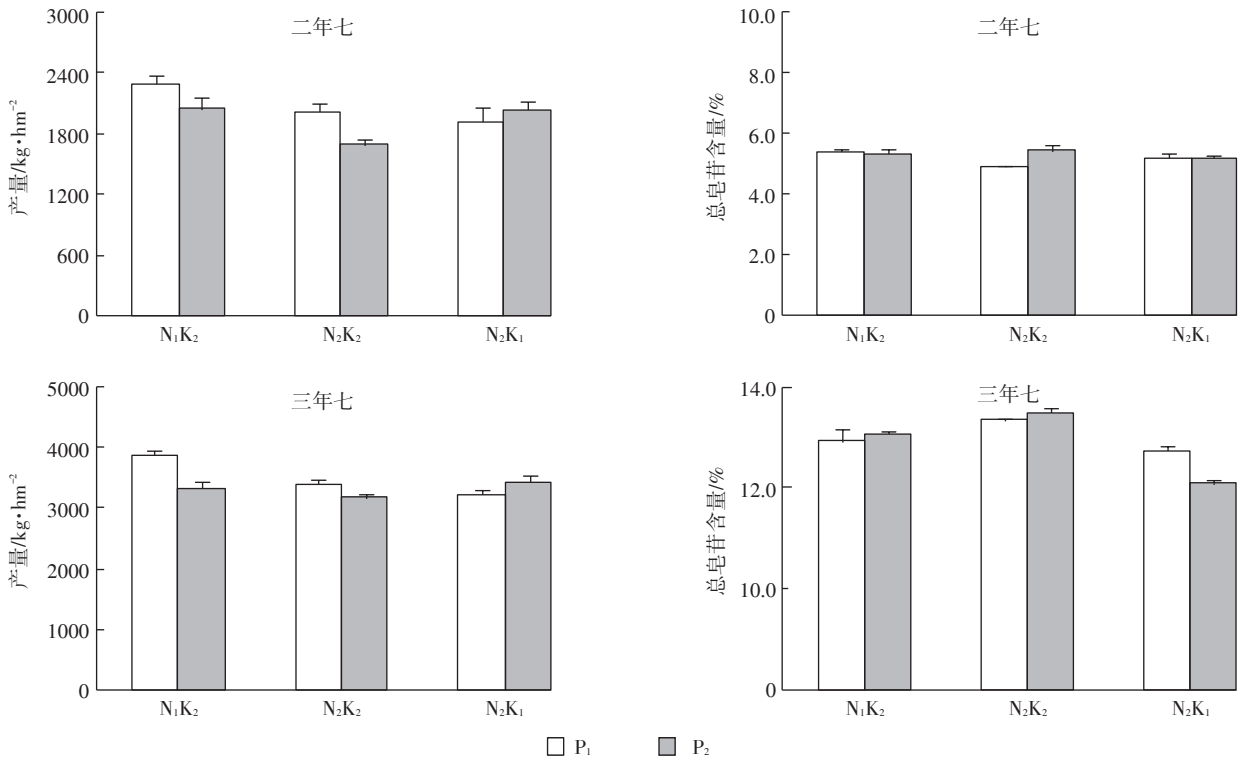


图2 不同氮钾肥用量对磷肥效果的影响

Figure 2 Effect of nitrogen and potassium fertilizer on phosphorus efficiency

量随施钾量增加而增加,分别增加 89.87、164.55 kg·hm⁻²,增长率为 4.67%、5.10%;在中磷水平时,二年七、三年七产量随施钾量增加而减少,分别减产 338.94、257.41 kg·hm⁻²,减产率为 16.68%、7.51%。二年七总

皂苷含量在低磷水平时随施钾量增加而降低,减产率为4.84%,在中磷水平时则随施钾量的增加而增加,增长率为4.42%;三年七总皂苷含量随施钾量的增加而增加,增长率为4.70%、11.75%。

因此,氮钾肥施用对磷肥的增产增质效应不明显,中氮、中钾水平时,产量和总皂苷含量均未达到最大,反而产量最低,在低氮、中钾水平时,低磷处理的产量最高,而对总皂苷含量的影响不明显,说明低氮、中钾水平利于磷肥效果的发挥。

2.2.3 氮磷肥施用对钾肥效果的影响

如图3所示,磷肥为 P_2 水平时,低钾、中钾水平处理的二年七、三年七产量随施氮量的增加而减少。二年七产量分别减少446.03、353.54 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,减产率为17.99%、17.27%,三年七产量分别减少409.85、160.88 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,减产率为10.68%、4.83%。二年七、三年七总皂苷含量在低磷水平下随施氮量的增加而降低,减产率为15.03%、9.67%,二、三年七在中钾水平下随施氮量增加而增加。

氮肥为 N_2 水平时,二年七、三年七产量在低钾水平时随施磷量的增加分别增加109.42、202.36 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,增长率为5.69%、6.27%;在中钾水平时随施磷量的增加而减少,分别减少319.37、219.60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,减产

率为15.86%、6.48%。二年七总皂苷含量在低钾、中钾水平时均随磷肥施入量的增加而增加;三年七总皂苷含量则是在低钾水平上随施磷量的增加而降低,中钾水平反之。低钾、中钾水平处理的二年七、三年七产量和总皂苷含量的变化不明显,在低氮、中磷、低钾水平下三七的产量和总皂苷含量均为最高,说明低氮、中磷水平有利于钾肥效果的发挥。

2.3 三因素肥料与三七产量、品质的综合函数拟合

以三七的产量和总皂苷产量作为因变量,氮、磷、钾施肥量作为自变量进行三元二次回归分析,结果如表5所示。二年七试验数据结果显示,当 N 88.61 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 227.56 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 K_2O 191.43 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,可得到最高三七产量2 341.71 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;当 N 312.57 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 96.94 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 K_2O 748.50 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,可得到最高总皂苷产量100.89 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

三年七试验数据结果显示,当 N 364.33 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 373.07 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 K_2O 749.10 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,可得到最高三七产量3 625.83 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;当 N 348.69 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 357.98 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 K_2O 791.44 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,可得到最高总皂苷产量474.68 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

根据三年七产量、总皂苷产量的三元二次回归方程,且按照二年七施氮和钾肥用量占45%、三年七占

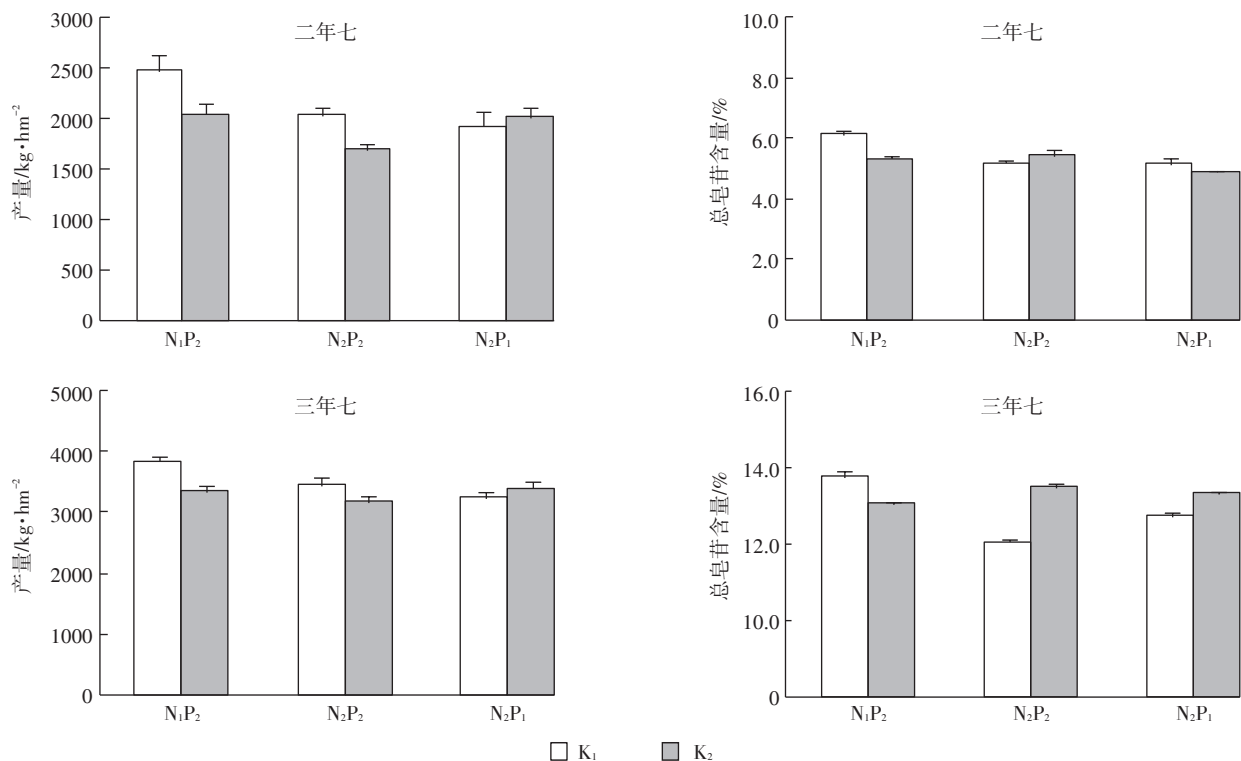


图3 不同氮磷肥用量对钾肥效果的影响

Figure 3 Effect of nitrogen and phosphorus fertilizer on potassium efficiency

表5 肥料效应函数的拟合结果
Table 5 The fitting result of effect function of fertilizer

七龄	类别	拟合方程	R ²	最高产量/kg·hm ⁻²
二年七	产量	$Y=1\ 734.176-1.713N-0.017\ 9N^2+4.177\ 8P-0.008\ 7P^2+2.174\ 1K-0.004\ 4K^2+0.011\ 9NP+0.011\ 4NK-0.006\ 6PK$	0.73	2 341.71
	总皂苷产量	$Y=99.904-0.333\ 3N-0.000\ 78N^2+0.508\ 1P-0.000\ 71P^2+0.076K-0.000\ 2K^2+0.000\ 64NP+0.001NK-0.000\ 76PK$	0.74	100.89
三年七	产量	$Y=1\ 799.28+0.926N-0.006N^2+5.907P-0.004\ 5P^2+1.484K-9.419K^2+0.005\ 2NP+0.002NK-0.005\ 9PK$	0.92	3 625.83
	总皂苷产量	$Y=236.05+0.093N-0.000\ 86N^2+1.036\ 6P-0.000\ 54P^2+0.093K+0.000\ 04K^2+0.000\ 27NP+0.000\ 5NK-0.000\ 94PK$	0.93	474.68

55%、磷肥二年七和三年七各占50%计算,建议在与本试验环境(土壤、气候等)相似条件下,合理的二年七施肥量为N 157~164 kg·hm⁻²、P₂O₅ 179~187 kg·hm⁻²、K₂O 337~356 kg·hm⁻²,三年七施肥量为N 192~200 kg·hm⁻²、P₂O₅ 179~187 kg·hm⁻²、K₂O 412~435 kg·hm⁻²。

3 讨论

本研究采用农业部推荐的“3414”肥料效应试验,试验设计的独特优势是试验结果既可以用二元或一元二次肥料效应函数拟合,还可以用三元二次肥料效应函数拟合,符合肥料试验和施肥决策的专业要求^[15]。试验结果显示,施肥影响三七的植株农艺性状,施肥总体上能够提高三七株高、叶长和茎粗,这与前人的研究结果^[4]一致。

肥料种类对三七相对产量的影响表现为空白区<缺氮区<缺磷区<缺钾区。试验中全肥区(N₂P₂K₂)三七产量相对较低,这可能是试验设置的基础水平过高引起的。试验区三七从二年生到三年生时,土壤肥力由高碱解氮、高速效磷、中速效钾含量变化为低碱解氮、高速效磷、高速效钾含量,三年七对氮的依赖性最强,对磷和钾的依存度较弱,而氮磷钾三者配合施用,产量效果达最佳。崔秀明等^[16]的研究显示,氮磷钾三因素中,三七吸收养分最多的是钾素,其次为氮和磷,本试验结果与此结论不一致,可能是由试验地土壤肥力状况不同或三七品种差异造成的。因此,在不同地力条件下开展更多的试验来进一步考证是非常必要的。

植物次生代谢产物是许多中药材的主要药效成分,是保持药材质量及其有效性的基础。碳素/营养平衡假说指出,在植物体内以C为基础的次生代谢物质(如酚类、萜烯类以及其他一些仅以C、H、O为主要结构的化合物),随植物体内C/N(碳素/营养)增加而

增加^[17]。有研究指出,开花的灯盏花植株中黄酮含量随施氮量的增加而下降^[17]。另外,研究显示,在一定的钾素施用范围内,短亭飞蓬单株生物量、总咖啡酸酯和灯盏乙素产量随施钾量增加而增加,而植株总咖啡酸酯和灯盏乙素的含量则呈先升高后降低的趋势;植株中N含量与总咖啡酸酯和灯盏乙素的含量呈线性负相关关系,这与碳素/营养平衡假说相呼应^[18]。研究指出,萜类等次生代谢产物与转录因子调控、转录后或翻译水平的调控等有关,但这些研究更多集中在光照、大气、温度等非生物胁迫^[19]。养分供应是影响药用植物次生代谢的重要因素^[18],但基于分子层面解析营养供应的影响机制尚缺乏研究,这将成为今后研究中需要重点关注的领域^[20]。三七皂苷为萜类化合物,氮磷钾肥对三七皂苷的影响不断被证实,籍此进一步探讨养分供应调控与次生代谢物质的途径对明确养分调控皂苷形成的机理至关重要。

氮磷钾肥三者不仅在三七生长中发挥着各自的作用,同时,氮磷钾肥效的发挥还受三者彼此间互作的影响^[21]。本试验针对三七产量和品质探讨了氮磷钾三因素之间的互作效应,低磷、中钾水平利于氮肥效果的发挥,低氮、中钾水平利于磷肥效果的发挥,低氮、中磷水平有利于钾肥效果的发挥。而三七在这方面的研究尚少,且不同地力条件下,可能判定出不同施肥量,因此还需更多的试验进行考证和深入研究。

长期以来,对三七的研究多注重施肥对三七的产量或品质的影响,而产量与品质综合作用的研究较少。本试验将产量与品质结合,在同一试验地连续开展两年试验(二年七、三年七)。试验中,虽根据二年七试验结果推荐了二年七最佳施氮量,但是在实际生产中一般不采收二年七,而主要以采挖三年七为主。前人推荐的施肥量或高^[22]或低^[23],与本试验推荐量之间存在的差异可能是试验种植区基础地力条件不同及之前的研究只考虑了产量而忽略了品质引起的。

本试验在考虑产量的同时考虑了品质,达到产量和品质的平衡。三七的产量和品质除了受施肥的影响外,还受人工栽培措施、自然环境因素(土壤、气候等)、病虫害、三七品种等其他因素的多重影响,因此在今后还需在这些方面进行更深入的研究和探讨。

4 结论

(1)施肥是保障三七较高产量和总皂苷产量的基础,对三七株高、叶长、茎粗和存苗率等农艺性状有较大影响,同时也是保障三七较高产量和总皂苷产量的基础。二年七对钾的依赖性较氮磷肥强,而三年七对氮的依赖性最强;施氮能显著提高三七单位面积总皂苷产量,磷、钾肥对皂苷含量及总皂苷产量的影响不明显。

(2)氮磷钾三者之间有互作效应,低磷、中钾条件利于氮肥肥效发挥,低氮、中钾条件促进磷肥肥效发挥,而低氮、中磷条件利于钾肥肥效发挥。

(3)本实验结合三七的产量和品质,根据三年七产量、品质的三元二次回归方程,且按照二年七施氮和钾肥用量占45%、三年七占55%、磷肥二年七和三年七各占50%,建议在与本试验环境相似条件下,合理的二年七施肥量为 $N\ 157\sim 164\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 179\sim 187\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $K_2O\ 337\sim 356\ kg\cdot hm^{-2}$,三年七施肥量为 $N\ 192\sim 200\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 179\sim 187\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $K_2O\ 412\sim 435\ kg\cdot hm^{-2}$ 。适当控制氮肥和钾肥施用量,增加施磷量,同时将三者进行合理配比,对提高三七总皂苷产量有重要意义。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(2015年版一部)[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China (Volume I 2015 Edition)[M]. Beijing: China Medical Science press, 2015.
- [2] Guo H B, CUI X M, An N, et al. Sanchi ginseng (*Panax notoginseng* (Burkill) F. H. Chen) in China: Distribution, cultivation and variations [J]. *Genet Resour Crop Evol*, 2010, 57(3): 453-460.
- [3] 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.
JIN Yan-qing, WANG Qiu-ling, HOU Jun-ling, et al. Effects of combined application of N, P and K on biomass and active components of licorice[J]. *Mod Chin Med*, 2016, 18(7): 881-887.
- [4] 王朝梁, 陈中坚, 孙玉琴, 等. 不同氮磷钾配比施肥对三七生长及产量的影响[J]. 现代中药研究与实践, 2007, 21(1): 5-7.
WANG Chao-liang, CHEN Zhong-jian, SUN Yu-qin, et al. Effect of different proportion fertilizing on the growth and yield of *Panax notoginseng*[J]. *Research and Practice of Chinese Medicines*, 2007, 21(1): 5-7.
- [5] 宋希梅. 三七施肥效应分析与专用肥肥效评价[D]. 昆明: 云南农业大学, 2017.
SONG Xi-mei. Analysis of fertilization effect of *Panax notoginseng* and fertilizer efficiency evaluation of special fertilizer[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2017.
- [6] 韦美丽, 孙玉琴, 黄天卫, 等. 不同施氮水平对三七生长及皂苷含量的影响[J]. 现代中药研究与实践, 2008, 22(1): 17-20.
WEI Mei-li, SUN Yu-qin, HUANG Tian-wei, et al. Effects on the growth and the contents of saponin with different level of nitrogen applied in *Panax notoginseng*[J]. *Research and Practice of Chinese Medicines*, 2008, 22(1): 17-20.
- [7] 王朝梁, 韦美丽, 孙玉琴, 等. 三七施用磷肥效应研究[J]. 人参研究, 2008(2): 29-30.
WANG Chao-liang, WEI Mei-li, SUN Yu-qin, et al. Study on the phosphorus fertilizer effect of *Panax notoginseng*[J]. *Research of Ginseng*, 2008(2): 29-30.
- [8] 张良彪, 孙玉琴, 韦美丽, 等. 钾素供应水平对三七生长发育及产量的影响[J]. 特产研究, 2008(4): 46-48.
ZHANG Liang-biao, SUN Yu-qin, WEI Mei-li, et al. Effects of potassium supplement level on the growth and yield of *Panax notoginseng*[J]. *Special Wild Economic Animal and Plant Research*, 2008(4): 46-48.
- [9] Xia P G, Guo H B, Zhao H G, et al. Optimal fertilizer application for *Panax notoginseng* and effect of soil water on root rot disease and saponin contents[J]. *Journal of Ginseng Research*, 2016, 40(1): 38-46.
- [10] 欧小宏, 金航, 郭兰萍, 等. 三七营养生理与施肥的研究现状与展望[J]. 中国中药杂志, 2011, 36(19): 2620-2624.
OU Xiao-hong, JIN Hang, GUO Lan-ping, et al. Status and prospective on nutritional physiology and fertilization of *Panax notoginseng* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2011, 36(19): 2620-2624.
- [11] 王渭玲, 梁宗锁, 孙群, 等. 不同氮磷施用量对丹参产量及有效成分的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(3): 218-221.
WANG Wei-ling, LIANG Zong-suo, SUN Qun, et al. N, P fertilization recommendation of Danshen by quadratic best design[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(3): 218-221.
- [12] 王渭玲, 王振, 徐福利. 氮、磷、钾对膜荚黄芪生长发育及有效成分的影响[J]. 中国中药杂志, 2008, 33(15): 1802-1806.
WANG Wei-ling, WANG Zhen, XU Fu-li. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium application on growth and active ingredient of *Astragalus membranaceus*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2008, 33(15): 1802-1806.
- [13] 赵峥, 龚苏, 段承俐, 等. 氮、磷、钾对灯盏花生长发育及光合色素含量的影响[J]. 云南农业大学学报, 2006, 20(5): 676-679.
ZHAO Zheng, GONG Su, DUAN Cheng-li, et al. Effects of different N, P and K levels on growth and photosynthetic pigment contents of *Erigeron breviscapus*[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2006, 20(5): 676-679.
- [14] 陈新平, 张福锁. 通过“3414”试验建立测土配方施肥技术指标体系[J]. 中国农技推广, 2006, 22(4): 36-39.
CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-suo. The soil testing and fertilizer recommendation system[J]. *Research and Practice of Chinese Medicines*, 2007, 21(1): 5-7.

- ommendation index was established by "3414" test[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2006, 22(4):36-39.
- [15] 王圣瑞,陈新平,高祥照,等. “3414”肥料试验模型拟合的探讨[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4):409-413.
- WANG Sheng-ru, CHEN Xin-ping, GAO Xiang-zhao, et al. Study on simulation of "3414" fertilizer experiments[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4):409-413.
- [16] 崔秀明,王朝梁,李伟,等. 三七吸收氮、磷、钾动态的分析[J]. 云南农业科技, 1994(2):9-10.
- CUI Xiu-ming, WANG Chao-liang, LI Wei, et al. Analysis of absorbs nitrogen, phosphorus and potassium dynamic of *Panax notoginseng*[J]. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 1994(2):9-10.
- [17] 苏文华,张光飞,李秀华,等. 植物药材次生代谢产物的积累与环境的关 系[J]. 中草药, 2005, 36(9):1415-1418.
- SU Wen-hua, ZHANG Guang-fei, LI Xiu-hua, et al. Relationship between accumulation of secondary metabolism in medicinal plant and environmental condition[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2005, 36(9):1415-1418.
- [18] 苏文华,张光飞,郭晓荣,等. 钾素对药用植物短葶飞蓬生长和有效成分积累的影响[J]. 植物分类与资源学报, 2011, 33(4):396-402.
- SU Wen-hua, ZHANG Guang-fei, GUO Xiao-rong, et al. Effects of potassium on the growth and accumulation of active constituents of a medicinal plant *Erigeron breviscapus* (Asteraceae)[J]. *Plant Diversity and Resources*, 2011, 33(4):396-402.
- [19] 巢牡香,叶波平. 环境非生物因子对植物次生代谢产物合成的影响[J]. 药物生物技术, 2013, 20(4):365-368.
- CHAO Mu-xiang, YE Bo-ping. Influence of environmental abiotic factors on plant secondary metabolite biosynthesis[J]. *Pharmaceutical Biotechnology*, 2013, 20(4):365-368.
- [20] 王凌健,方欣,杨长青,等. 植物萜类次生代谢及其调控[J]. 中国科学:生命科学, 2013, 43(12):1030-1046.
- WANG Ling-jian, FANG Xin, YANG Chang-qing, et al. Biosynthesis and regulation of secondary terpenoid metabolism in plants[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2013, 43(12):1030-1046.
- [21] 王伟妮,王亚艺,姚忠清,等. 早稻“3414”施肥效果及推荐用量研究[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(12):1268-1271.
- WANG Wei-ni, WANG Ya-yi, YAO Zhong-qing, et al. Effect of “3414” fertilizer experiment and fertilizer recommendation for early-season rice[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2008, 48(12):1268-1271.
- [22] 韦美丽,陈中坚,孙玉琴,等. 3年生三七吸肥规律研究[J]. 特产研究, 2008, 30(1):38-41.
- WEI Mei-li, CHEN Zhong-jian, SUN Yu-qin, et al. Study on the law of assimilating fertilizer of three-year-old *Panax notoginseng* (Burk) F. H. Chen[J]. *Special Wild Economic Animal and Plant Research*, 2008, 30(1):38-41.
- [23] 崔秀明,陈中坚,皮立原. 密度及施肥对二年生三七产量的影响[J]. 中药材, 2000, 23(10):596-598.
- CUI Xiu-ming, CHEN Zhong-jian, PI Li-yuan. Effect of density and fertilization on the yield of two-year-old *Panax notoginseng*[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2000, 23(10):596-598.