

## N、P、K 配施对丹参产量和质量的影响

陈晓玉<sup>1</sup>, 贺超<sup>1</sup>, 闫滨滨<sup>2</sup>, 李文斌<sup>3</sup>, 耿业业<sup>3</sup>, 夏贵惠<sup>3</sup>, 侯俊玲<sup>3</sup>, 王文全<sup>1,3,4\*</sup>, 宋 熾<sup>5</sup>, 朱光明<sup>5</sup>

1. 中国医学科学院 北京协和医学院药用植物研究所, 北京 100193
2. 成都中医药大学药学院, 四川 成都 610075
3. 北京中医药大学中药学院, 北京 100102
4. 中药材规范化生产教育部工程研究中心, 北京 100102
5. 上海华宇药业有限公司, 上海 200002

**摘要:** **目的** 通过研究 N、P、K 配比对丹参产量、生长及质量的影响, 探寻鲁中南地区丹参最佳 N、P、K 配比及用量, 为鲁中南地区棕壤土质下丹参精准施肥提供理论指导。 **方法** 采用“3414”随机区组设计 N、P、K 3 种肥料不同配施组合, 共 14 个施肥处理, 测定丹参产量、生长性状、生物活性成分含量。分析不同施肥处理对丹参产量和质量的影响, 并通过逐步回归分析建立鲁中南丹参的肥料效应模型, 估测该地区丹参最大产量施肥量及最佳经济施肥量。 **结果** N、P、K 缺乏处理较最高产量处理分别减产 27.29%、22.09%、23.83%, 增收最佳处理为 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>, 产量为 16 740 kg/hm<sup>2</sup>; 单因素肥料效应分析表明丹参产量随单种肥料施用量的增加呈先增加后减少的趋势, 限制山东地区丹参产量及效益的主要营养元素依次为 N>K>P; 两因素交互效应分析表明, 在较低施入水平下, N、P、K 肥之间相互促进, 且交互效应 NP>NK>PK; N、P、K 配施对生长性状影响分析得出 N 肥显著促进丹参根部物质积累, K 肥对丹参株幅、根粗有促进作用; 对活性成分含量影响分析得出 P 肥对酚酸类成分积累均有促进作用, 促进丹参酮类成分积累, K 肥对其有抑制作用。 **结论** 丹参施肥量与产量之间二次函数拟合结果均符合报酬递减定律, 能较好反映施肥量与产量的关系, 通过建立三元二次效应函数估测鲁中南地区最佳经济施肥量为 N 195.63 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 116.64 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 153.84 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 丹参; 肥料效应; 产量; 质量; 生长性状; 生物活性

中图分类号: R282.21 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2019)03-0722-09

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2019.03.028

## Effect of fertilization combination of nitrogen, phosphorus, and potassium on yield and quality of *Salvia miltiorrhiza*

CHEN Xiao-Yu<sup>1</sup>, HE Chao<sup>1</sup>, YAN Bin-bin<sup>2</sup>, LI Wen-Bin<sup>3</sup>, GENG Ye-ye<sup>3</sup>, XIA Gui-hui<sup>3</sup>, HOU Jun-Ling<sup>3</sup>, WANG Wen-Quan<sup>1,3,4</sup>, SONG Yan<sup>5</sup>, ZHU Guang-ming<sup>5</sup>

1. Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medicinal Sciences and Peking Union Medical Collage, Beijing 100193, China
2. College Pharmacy, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 610075, China
3. School of Chinese Materia Medica, Beijing University of Chinese Medicine, Beijing 100102, China
4. Engineering Research Center of Good Agricultural Practice for Chinese Crude Drugs, Ministry of Education, Beijing 100102, China
5. Shanghai Huayu Pharmaceutical Co., Ltd., Shanghai 200002, China

**Abstract: Objective** To study the effect of fertilization combination of nitrogen, phosphorus, and potassium on the yield and quality of *Salvia miltiorrhiza* in order to explore the optimal N, P, and K ratios and dosages in middle south of Shandong, and provide theoretical guidance for precision fertilization. **Methods** Based on “3414” randomized block design, 14 fertilization combination treatments of N, P and K were designed to determine the yield, growth, and bioactive components of *S. miltiorrhiza*. The effects of different fertilization treatments on the yield and quality of *S. miltiorrhiza* were analyzed, and a fertilizer effect model of *S. miltiorrhiza* in middle south of Shandong was established by stepwise regression analysis. The maximum yield of fertilized *S. miltiorrhiza* and the

收稿日期: 2018-08-05

基金项目: 国家工业与信息化部中药材生产扶持项目(2020071620008); 中医药行业科研专项(201407005)

作者简介: 陈晓玉(1995—), 女, 在读硕士研究生, 专业方向为中药材规范化生产及其调控机制。E-mail: 1033049477@qq.com

\*通信作者 王文全, 博士生导师, 从事中药材规范化生产及其调控机制研究。E-mail: wwq57@126.com

best amount of economic fertilization were estimated. **Results** Nitrogen, phosphorus, and potassium deficiency treatments reduced the yields by 27.29%, 22.09%, and 23.83%, respectively, and the optimal treatment for increasing yield was  $N_2P_2K_2$  with a yield of 16 740 kg/hm<sup>2</sup>. Single factor fertilizer effect analysis showed that the yield of *S. miltiorrhiza* showed a trend of increasing first and then decreasing with the increase in the application amount of these fertilizers. The main nutrient elements limiting yield and benefit of *S. miltiorrhiza* in middle south of Shandong were as follow:  $N > K > P$ . The analysis of the interaction between the two factors showed that the nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers promoted each other at a certain application amounts, the interaction effect were as follow:  $NP > NK > PK$ . Through the effects of fertilization combination of nitrogen, phosphorus, and potassium on growth, nitrogen significantly promoted the material accumulation in roots of *S. miltiorrhiza*. Potassium had a certain role in promoting the plant width and root width. The effect of fertilization on the content of active ingredients showed that potassium promoted the accumulation of phenolic acids and tanshinones, while potassium had the adverse effect. **Conclusion** The quadratic function fitting result between the amount of fertilizer applied and the yield of *S. miltiorrhiza* is in line with the law of diminishing returns, which can better reflect the relationship between the amount of fertilizer and yield. The best fertilizer scheme in middle south of Shandong should be  $N\ 195.63\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,  $P_2O_5\ 116.64\ \text{kg}/\text{hm}^2$ , and  $K_2O\ 153.84\ \text{kg}/\text{hm}^2$  estimated by ternary quadratic function fitting.

**Key words:** *Salvia miltiorrhiza* Bge.; fertilization effect; yield; quality; growth character; bioactivity

丹参药材为唇形科植物丹参 *Salvia miltiorrhiza* Bge. 的干燥根和根茎<sup>[1]</sup>。其药用历史悠久,最早被记载于《神农本草经》,并将其列为上品,具有活血祛瘀、通经止痛功效。其主要成分是酚酸类水溶性成分和二萜类脂溶性成分<sup>[2-3]</sup>,具有抗肿瘤<sup>[4-7]</sup>、抗纤维化<sup>[8]</sup>等药理作用,且对心血管系统疾病<sup>[9-13]</sup>的疗效显著,由于丹参药用需求量不断增加,野生丹参被过度采挖,人工栽培品逐渐代替野生资源,人工栽培的丹参已成为丹参药材的主流来源<sup>[12]</sup>。丹参生长适宜性较强,产地分布广泛,山东、河南、四川、陕西等地区为丹参栽培的主产区,山东地区丹参种植面积约为  $1.5 \times 10^4\ \text{hm}^2$ ,产量居<sup>[14]</sup>全国首位<sup>[15]</sup>。由于丹参植株对施肥较为敏感,施肥是丹参栽培技术中的重要环节之一<sup>[16]</sup>,且合理施肥是提高药用植物产量和质量的重要途径之一,但是施肥量过大不但不能提高产量反而对环境有很大污染破坏<sup>[17]</sup>。

以往对丹参施肥量及施肥比例研究较多,王渭玲等<sup>[17-18]</sup>在陕西商洛不同土壤肥力下,对丹参 N、P 肥施用配比及用量对产量影响进行研究,得出不同目标产量下 N、P 肥用量,但仅考虑产量,对其活性成分含量进行动态研究<sup>[19]</sup>,得出单施 N 肥造成丹参素和丹参酮含量下降,需 N、P 合理配施。翟彩霞等<sup>[20]</sup>和夏奉乾等<sup>[21]</sup>分别研究 N、P、K 配施对河北、豫西地区丹参产量的影响,分别得出适合于当地的 N、P、K 最优配比。张峰等<sup>[22]</sup>研究单种肥料 K 肥对白花丹参和紫花丹参产量及品质的影响,得出 K 肥与产量之间的效应函数及紫花丹参最佳施 K 量。夏贵惠等<sup>[23]</sup>通过盆栽试验探究不同浓度 N、P 配比对丹参生长和活性成分积累影响,发现低浓度 N 促进丹参干物质积累向地下转移,且 N 抑制丹参活性成分积

累, P 促进活性成分积累。施肥对丹参生长发育及次生代谢的影响由于受产地土壤、气候等影响,得出的结果不尽相同,对丹参主产区鲁中南地区棕壤土质地下丹参施肥研究未见报道,且前人大多研究仅讨论了 N、P、K 对丹参产量的影响,单种肥料用量对丹参质量影响,没有结合产量、质量及性状对丹参 N、P、K 配施系统分析 3 种营养元素交互影响。为此本研究采用农业部推荐的“3414”肥料效应试验方案,在鲁中南地区棕壤土质下探寻 N、P、K 配施对丹参产量、生长及质量的影响,并借助数学分析的方法建立丹参 N、P、K 肥料效应模型,得出适宜于鲁中南地区最佳 N、P、K 配比及用量,以期对丹参生产的精准施肥提供科学依据。

## 1 试验地与材料

### 1.1 试验地概况

试验于 2017 在山东省临沂市平邑县温水镇进行,地理坐标纬度:  $35^{\circ}29'N$ ; 经度:  $117^{\circ}46'E$ ,海拔 209.8 m。试验地为平地,前茬为玉米,土质为棕壤土,土壤有机质质量分数 16.53 g/kg, pH 值为 8.03,含盐量 193 mg/kg,全 N 1.14 g/kg,碱解 N 68.96 mg/kg,全 P 0.43 g/kg,速效 P 24.18 mg/kg,全 K 14.01 g/kg,速效 K 171.56 mg/kg。

### 1.2 材料

供试的一年生丹参种苗来自山东省农科院培育的“鲁丹 1 号”,由中国医学科学院王文全教授鉴定为唇形科鼠尾草属植物丹参 *Salvia miltiorrhiza* Bge.。供试种苗单株鲜质量  $(20.08 \pm 2.14)\text{g}$ ,根长  $(6.12 \pm 1.01)\text{cm}$ ,根粗  $(2.23 \pm 0.31)\text{mm}$ 。N 肥为尿素(含 N 46.4%),P 肥为过磷酸钙(含  $P_2O_5$  12%),K 肥为硫酸钾(含  $K_2O$  50%)。施肥量见表 1。

表 1 丹参“3414”试验方案和施肥量

Table 1 “3414” fertilization combination scheme and fertilizer amounts of *S. miltiorrhiza*

编号	处理	N/(kg·hm <sup>-2</sup> )		P/(kg·hm <sup>-2</sup> )		K/(kg·hm <sup>-2</sup> )		肥料成本/(元·hm <sup>-2</sup> )
		N	CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
1	N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	0	0	0	0	0	0	0
2	N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	0	0	100	833	150	300	2 550
3	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	75	162	100	833	150	300	3 000
4	N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	150	323	0	0	150	300	1 950
5	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	150	323	50	417	150	300	2 700
6	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	150	323	100	833	150	300	3 450
7	N <sub>2</sub> P <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	150	323	150	1 250	150	300	4 200
8	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	150	323	100	833	0	0	2 400
9	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	150	323	100	833	75	150	2 925
10	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	150	323	100	833	225	450	3 975
11	N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	225	485	100	833	150	300	3 900
12	N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	75	162	50	417	150	300	2 250
13	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	75	162	100	833	75	150	2 475
14	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	150	323	50	417	75	150	2 175

纯 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 价格分别为 6、15、7 元/kg

Price of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, and K<sub>2</sub>O are 6, 15, and 7 CNY/kg

## 2 方法

### 2.1 试验方案

采用农业部推荐的“3414”回归随机区组设计完全实施方案, 设 N、P、K 3 个因素, 4 个水平, 共 14 个处理, 每个处理 3 个重复, 采用随机区组排列。4 水平分别指 0 水平不施肥, 2 水平为当地推荐施肥水平, 1 水平为 2 水平×0.5 倍量, 3 水平为 2 水平×1.5 倍量。小区面积 3 m×6 m, 大垄双行种植, 种植密度为 12.5 株/m<sup>2</sup>, 以株距 20 cm, 行距 80 cm 定植, 保护行 80 cm。每个小区 N、P、K 肥按相应的比例及量混合后作为基肥施入, 丹参种苗移栽时浇 1 次透水, 移栽于 2017 年 3 月 16 日完成, 丹参生长期不定期除草, 11 月 16 日收获。其他采用常规田间管理措施进行栽培管理。

### 2.2 土壤理化性质测定

种植前, 参照《土壤农化分析》<sup>[24]</sup>采用 5 点采样法, 采集 0~30 cm 混合土样, 测定土壤 pH、有机质、全 N、全 P、全 K、碱解 N、速效 P、速效 K。

### 2.3 产量及生长性状指标测定

11 月 16 日收获, 各小区采用 5 点取样法, 挖取 5 m<sup>2</sup> 丹参, 称量总根鲜质量, 计以产量; 每个小区取 30 株样品, 取样前测定地上部分形态指标株

高; 取样时先剪掉地上部分, 并称量地上部分鲜质量; 将根全部挖出后测定根部形态指标单株根长、根粗、根条数、根鲜质量。株高为根茎上端至主茎顶端, 地上部分鲜质量为地上部分茎、叶鲜质量, 根长为从芦头至根最长处距离, 根粗为最粗根条距芦头 2 cm 处直径, 根条数为直径大于 0.2 cm 的根条数量, 根鲜质量为刚采挖出的根除去泥土之后的质量。

### 2.4 生物活性成分含量测定

将所取丹参鲜根样品带回实验室于 40 °C 烘箱中干燥, 粉碎后过 40 目筛, 待生物活性成分含量检测。采用 UPLC 双波长法对丹参中水溶性成分迷迭香酸、丹酚酸 B, 脂溶性成分隐丹参酮、丹参酮 I、丹参酮 II<sub>A</sub> 含量同时进行检测, 总丹参酮以隐丹参酮、丹参酮 I 和丹参酮 II<sub>A</sub> 总量计<sup>[25]</sup>。

### 2.5 计算方法和数据分析

采用方差分析 Duncan 多重比较法、逐步回归分析等方法进行统计。应用 SPSS 19.0、Excel 2016 等软件完成数据处理和做图。各指标的计算方法如下。

经济效益 = 产值 - 肥料成本

增产量 = 产量 - 空白处理产量

增收 = 经济效益 - 空白处理经济效益

肥料贡献率 = 增产量 / 产量

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同 N、P、K 配施处理下丹参产量和效益分析

经过对山东平邑不同施肥处理下丹参产量和经济效益的分析表明(表 2), 不同施肥处理下丹参产量及经济效益差异较大。N、P、K 元素是植物生长所需的大量元素, 处理 N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>0</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>0</sub> 肥料贡献率低, 在 15% 以下, 说明 N、P、K 3 种元素缺一不可。处理 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 的肥料贡献率较高, 最高达 33.22%, 说明合理的 N、P、K 配施可极大提高丹参产量。施肥处理的产量均高于不施肥, 且不同施肥处理下产量存在一定的差异。N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 施肥处理较空白增产 5 561 kg/hm<sup>2</sup>, 其增产效果最大; 其次为 N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>, 较 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 仅低 610 kg/hm<sup>2</sup>, N<sub>2</sub>P<sub>3</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>1</sub>K<sub>2</sub> 施肥处理, 产量较次之,

说明 N 肥施用量增加到一定程度后, 产量趋于稳定, 不再随着施肥量增加而增加, P、K 肥也呈现相似规律。N、P、K 缺素处理较最高产量分别减产 27.29%、22.09%、23.83%, 其中 N 肥增产较 K、P 肥增产高。与空白对照相比, 不同施肥处理均可提高经济效益, 增加收入。N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 经济效益最高为 83 700 元/hm<sup>2</sup>, 从增产量和增加收入综合考虑, N<sub>2</sub>P<sub>3</sub>K<sub>2</sub> 处理产量虽较高, 但因肥料成本高其收益反而降低, 而 N<sub>2</sub>P<sub>1</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>1</sub> 处理因肥料成本低, 收益有所提升。收益前 3 位的处理依次是 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>1</sub>K<sub>2</sub>, 缺素处理较最高收益处理利润分别降低。增收最佳处理为 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>, 产量为 16 740 kg/hm<sup>2</sup>, 说明 N、P、K 配比适中利于丹参产量提高, 且试验设计较合理。

表 2 N、P、K 配施对丹参产量和效益的影响

Table 2 Effects of combined application of N, P, and K fertilizers on yield and economic benefits of *S. miltiorrhiza*

编号	处理	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	经济效益/(元·hm <sup>-2</sup> )	增产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	增收/(元·hm <sup>-2</sup> )	肥料贡献率/%
1	N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	11 179 ± 971 <sup>e</sup>	55 895	0	0	0
2	N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	12 172 ± 1 043 <sup>de</sup>	60 862	993	2 417	8.16
3	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	14 799 ± 340 <sup>abc</sup>	73 998	3 620	15 102	24.46
4	N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	13 042 ± 1 285 <sup>bcd</sup>	65 213	1 863	7 367	14.29
5	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	15 497 ± 1 002 <sup>ab</sup>	77 488	4 319	18 893	27.87
6	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	16 740 ± 860 <sup>a</sup>	83 700	5 561	24 355	33.22
7	N <sub>2</sub> P <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	15 534 ± 1 248 <sup>ab</sup>	77 672	4 355	17 577	28.04
8	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	12 750 ± 1 446 <sup>cde</sup>	63 753	1 572	5 458	12.32
9	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	14 572 ± 2 056 <sup>abcd</sup>	72 862	3 393	14 041	23.29
10	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	14 659 ± 1 165 <sup>abcd</sup>	73 298	3 480	13 427	23.74
11	N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	16 130 ± 607 <sup>a</sup>	80 650	4 951	20 855	30.69
12	N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	14 863 ± 1 996 <sup>abc</sup>	74 317	3 684	16 171	24.79
13	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	14 930 ± 1 334 <sup>abc</sup>	74 651	3 751	16 281	25.12
14	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	14 176 ± 1 664 <sup>abcd</sup>	70 884	2 998	12 813	21.15

不同字母表示差异显著, P<0.05

Different letters indicate significant differences, P<0.05

#### 3.2 N、P、K 单种肥料的增产效应分析

根据在 P、K 保持 2 水平, 施用不同量 N; 在 N、K 保持 2 水平, 施用不同量 P; 在 N、P 保持 2 水平, 施用不同量 K 的结果, 对 N、P、K 单种肥料下的产量进行比较分析。对 N、P、K 肥同丹参产量的关系做散点图, 拟合一元二次曲线(图 1)。

从单因素肥料效应曲线可见, 3 种肥料效应曲线都呈抛物线, 且抛物线开口向下, 表明丹参产量随单种肥料施用量的增加呈先增加后减少的趋势, 符合报酬递减规律。N 肥施用量与产量的拟合函数

为  $Y=12\ 079+50.799 X-0.143\ 9 X^2$  ( $r^2=0.990$ ), 由 N 肥的一元二次肥效函数可知, 一元二次方程二次项系数为负数, 一次项为正数, 说明函数具有极大值。缺 N 时的理论产量为 12 079 kg/hm<sup>2</sup>, 与实际试验中所得到的 12 172 kg/hm<sup>2</sup> 基本一致。根据拟合函数求偏导可得出最大施 N 量为 176.49 kg/hm<sup>2</sup>, 此时最大理论产量为 16 561.71 kg/hm<sup>2</sup>。最佳经济施肥量为 172.32 kg/hm<sup>2</sup>, 此时最佳经济产量为 16 556.21 kg/hm<sup>2</sup>。

同法得到 P 肥和 K 肥的拟合函数及最大施肥

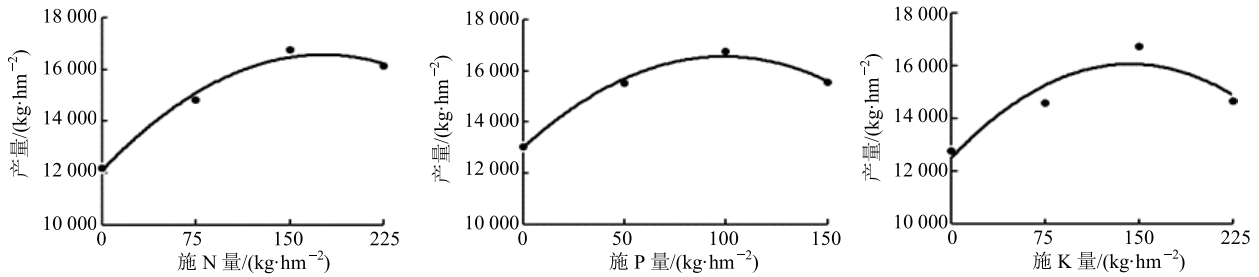


图 1 N、P、K 施用量与产量的拟合曲线

Fig. 1 Fitted curve of yield to N, P and K application rates

量、最佳施肥量。P 肥施用量与产量的拟合函数为  $Y=12\ 981+72.345 X-0.366\ 1 X^2$  ( $r^2=0.990$ )，最大施 P 量为  $98.80\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，此时最大理论产量为  $16\ 554.96\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，最佳经济施肥量为  $94.71\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，此时最佳经济产量为  $16\ 528.29\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。K 肥施用量与产量的拟合函数为  $Y=12\ 521+49.537 X-0.173\ 4 X^2$  ( $r^2=0.870$ )，得出最大施 K 量为  $142.86\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，此时最大理论产量为  $16\ 059.64\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，最佳经济施肥量为  $138.82\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，此时最佳经济产量为  $16\ 046.70\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。由单元素肥料的效应函数可知，N 肥增产效果较明显，K 肥次之，P 肥最小。K 肥施入过量后的下降趋势最大，N 肥次之，P 肥最小。

### 3.3 N、P、K 肥的互作效应分析

**3.3.1 N、P、K 的交互作用分析** 根据表 2 数据对 N、P、K 肥两两交互作用进一步分析，结果（图 2-a）表明，在  $K_2$  水平下，当 N 肥施用量从  $N_1$  增加到  $N_2$ ， $P_1$  水平减产  $634\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ， $P_2$  水平增产  $1\ 940\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，说明 P 肥用量在  $50\sim 100\ \text{kg}/\text{hm}^2$  可提高 N 肥肥效的发挥，对 N 肥具有增效作用。在  $P_2$  水平下，当 N 肥量增加， $K_1$  水平减产  $357\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ， $K_2$  水平增产  $1\ 940\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，K 肥用量在  $75\sim 150\ \text{kg}/\text{hm}^2$

可提高 N 肥肥效发挥。当 P、K 在较高水平，N 肥肥效可被促进。在  $K_2$  水平下（图 2-b），当 P 肥用量从  $P_1$  增加到  $P_2$ ， $N_1$  水平减产  $64\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ， $N_2$  水平增产  $1\ 242\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，说明 N 肥用量在  $75\sim 150\ \text{kg}/\text{hm}^2$  可提高 P 肥肥效的发挥。在  $N_2$  水平下，当 P 用量增加， $K_1$  水平增产  $396\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ， $K_2$  水平增产  $1\ 242\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，说明 K 肥在  $75\sim 150\ \text{kg}/\text{hm}^2$  可提高 P 肥肥效发挥。提高 N、K 用量，更有利于 P 肥肥效发挥。在  $P_2$  水平下（图 2-c），当 K 肥用量从  $K_1$  增加到  $K_2$ ， $N_1$  水平减产  $131\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ， $N_2$  水平增产  $2\ 168\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，说明 N 肥用量  $75\sim 150\ \text{kg}/\text{hm}^2$  可提高 K 肥肥效的发挥。在  $N_2$  水平下，当 K 用量增加， $P_1$  水平增产  $1\ 321\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ， $P_2$  水平增产  $2\ 168\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，说明较高用量 P 肥可提高 K 肥肥效发挥。当较高水平的 N、P 肥用量，更有利于 K 肥肥效发挥。

**3.3.2 两元素之间的交互效应及最佳施肥量** 二元肥料效应拟合结果，根据处理 2~7、11、12，处理 2、3、6~10、13，处理 4~9、11、14，通过逐步回归，拟合 NP、NK、PK 两两交互作用下二元二次肥效函数（表 3），交互效应  $NP>NK>PK$ 。

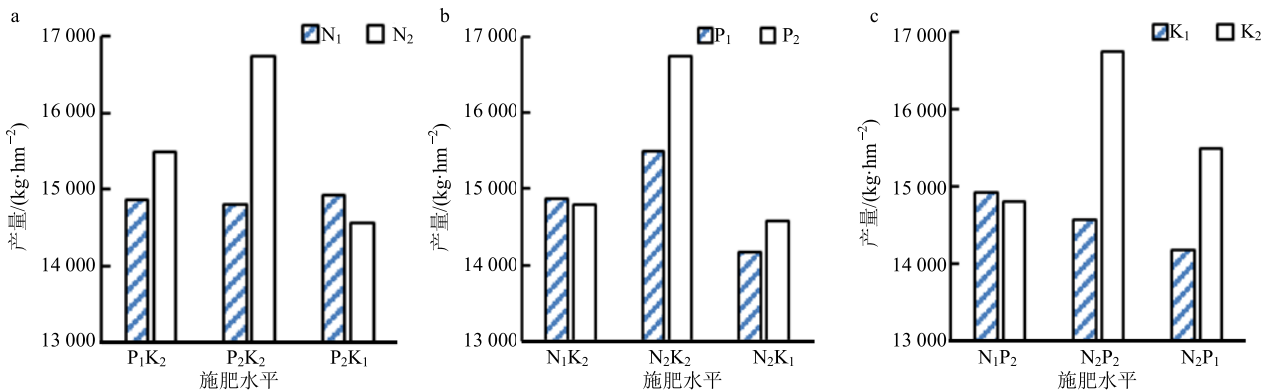


图 2 N、P、K 两两交互效应分析

Fig. 2 Analysis of interactions among N, P, and K fertilization levels

表 3 二元肥料效应模型拟合结果

Table 3 Fitting results of two-factor fertilization models

元素	肥料效应方程	$r^2$
N、P	$Y=13\ 325.15+14.056\ 2\ N-0.101\ 5\ N^2-14.324\ 3\ P-0.253\ 5\ P^2+0.259\ 2\ NP$	0.920
N、K	$Y=13\ 082.9+11.574\ 8\ N-0.100\ 5\ N^2+18.760\ 2\ K-0.163\ 1\ K^2+0.187\ 8\ NK$	0.960
P、K	$Y=8\ 027.01+73.690\ 7\ P-0.289\ 8\ P^2+60.819\ 3\ K-0.180\ 2\ K^2-0.095\ 5\ PK$	0.960

### 3.4 N、P、K 肥料效应函数和最佳施肥量的确定

根据表 2 的 14 个处理, 采用逐步回归法建立以产量为目标函数的 N、P、K 三元二次回归模型  $Y=11\ 178.76-3.29\ N-0.12\ N^2+39.50\ P-0.29\ P^2+35.98\ K-0.18\ K^2+0.23\ NP+0.16\ NK-0.09\ PK$ , 该拟合函数  $r^2=0.980$ ,  $F(12.34) > F_{0.05}(6.00)$ 。空白处理时的理论产量为  $11\ 178.76\ \text{kg}/\text{hm}^2$ , 与实际试验中所得到的  $11\ 179\ \text{kg}/\text{hm}^2$  基本一致。对该函数关于 N、P、K 求偏导, 令其为 0, 即可得当  $N=221.80\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $P=130.31\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $K=165.95\ \text{kg}/\text{hm}^2$ , 可得到最大产量  $16\ 373.59\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。当  $N=195.63\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $P=116.64\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $K=153.84\ \text{kg}/\text{hm}^2$ , 可得到最佳经济产量  $16\ 328.25\ \text{kg}/\text{hm}^2$ , 除去肥料成本后经济效益为  $77\ 641\ \text{元}/\text{hm}^2$ 。

### 3.5 N、P、K 配施对丹参生长性状的影响

不同 N、P、K 处理除丹参的根条数外, 对丹参的根粗、根长、单根鲜质量、地上鲜质量、株高、株幅影响均存在显著性差异(表 4)。丹参产量最高处理  $N_2P_2K_2$  及  $N_2P_2K_3$  的单株根鲜质量、地上鲜质量、根长、株高均显著高于空白处理 ( $P < 0.05$ )。

除处理  $N_2P_2K_3$ 、 $N_1P_1K_2$  外, 其他处理的株幅虽高于空白, 但是均未达显著性水平 ( $P > 0.05$ )。施肥处理对根粗的影响中  $N_3P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_2$  显著高于空白 ( $P < 0.05$ ),  $N_0P_2K_2$ 、 $N_2P_0K_2$ 、 $N_2P_2K_0$  处理与空白无显著差异 ( $P > 0.05$ )。  $N_2P_2K_2$  处理下根长显著高于其他处理。在保持  $P_2K_2$  水平, 随着 N 施入的增加, 丹参株高、株幅、地上鲜质量无显著性差异, 根粗、根长呈现先增高后降低的趋势, 根鲜质量呈现先增高后持平的趋势。保持  $N_2K_2$  水平, 随着 P 施入的增加, 株高、地上鲜质量、根质量逐渐增大, 株幅无显著性差异, 根粗无显著性差异, 根长先增加后降低。保持  $N_2P_2$  水平, 随着 K 的施入增加, 株高、地上鲜质量无显著性差异, 株幅、根粗逐渐增加, 根长、根鲜质量先增加后减少。

### 3.6 N、P、K 配施对丹参生物活性成分含量的影响

施肥对迷迭香酸、丹酚酸 B、丹参酮类含量均有显著性影响(表 5), 且各施肥处理下质量均符合《中国药典》标准(丹酚酸 B  $\geq 3.0\%$ , 总丹参酮  $\geq 0.25\%$ )。产量最高施肥处理  $N_2P_2K_2$  下, 酚酸类、丹参酮类含量均处于较高水平, 迷迭香酸含量为

表 4 N、P、K 配施对丹参生长性状的影响

Table 4 Effects of combined application of N, P, and K fertilizers on growth character of *S. miltiorrhiza*

处理	株高/cm	株幅/cm	根粗/mm	根长/cm	根条数/个	单株地上鲜质量	单株根鲜质量/g
$N_0P_0K_0$	32.3 ± 5.1 <sup>c</sup>	36.3 ± 3.1 <sup>cd</sup>	6.6 ± 0.5 <sup>c</sup>	22.7 ± 1.5 <sup>c</sup>	11.3 ± 2.1	53.1 ± 5.8 <sup>d</sup>	80.3 ± 6.3 <sup>c</sup>
$N_0P_2K_2$	38.3 ± 3.2 <sup>cde</sup>	42.0 ± 9.8 <sup>bcd</sup>	7.5 ± 1.2 <sup>cde</sup>	24.0 ± 1.0 <sup>de</sup>	12.7 ± 1.5	66.7 ± 1.8 <sup>cd</sup>	105.6 ± 9.9 <sup>d</sup>
$N_1P_2K_2$	42.7 ± 2.3 <sup>abcd</sup>	40.3 ± 1.5 <sup>bcd</sup>	8.8 ± 1.7 <sup>bcde</sup>	26.0 ± 1.0 <sup>cde</sup>	13.0 ± 1.7	73.3 ± 9.7 <sup>bc</sup>	107.4 ± 8.8 <sup>d</sup>
$N_2P_0K_2$	34.0 ± 5.6 <sup>de</sup>	34.7 ± 1.5 <sup>d</sup>	9.1 ± 0.1 <sup>abcde</sup>	28.0 ± 2.0 <sup>cd</sup>	11.3 ± 0.6	77.0 ± 6.3 <sup>bc</sup>	111.5 ± 4.9 <sup>cd</sup>
$N_2P_1K_2$	33.7 ± 4.0 <sup>de</sup>	34.0 ± 2.6 <sup>d</sup>	9.3 ± 2.5 <sup>abcde</sup>	25.0 ± 2.0 <sup>de</sup>	18.7 ± 3.1	78.2 ± 2.8 <sup>abc</sup>	113.5 ± 3.1 <sup>bcd</sup>
$N_2P_2K_2$	45.7 ± 2.3 <sup>abc</sup>	40.7 ± 5.1 <sup>bcd</sup>	12.3 ± 1.9 <sup>a</sup>	42.0 ± 2.6 <sup>a</sup>	14.3 ± 2.3	79.4 ± 10.4 <sup>abc</sup>	136.4 ± 13.0 <sup>a</sup>
$N_2P_3K_2$	47.3 ± 7.2 <sup>abc</sup>	40.0 ± 7.9 <sup>bcd</sup>	8.5 ± 2.5 <sup>bcde</sup>	28.0 ± 4.0 <sup>cd</sup>	18.3 ± 0.6	95.5 ± 13.0 <sup>a</sup>	134.8 ± 4.3 <sup>a</sup>
$N_2P_2K_0$	44.7 ± 6.1 <sup>abc</sup>	42.0 ± 8.7 <sup>bcd</sup>	7.7 ± 1.5 <sup>cde</sup>	25.3 ± 2.5 <sup>cde</sup>	11.0 ± 1.0	78.9 ± 11.1 <sup>abc</sup>	105.7 ± 9.7 <sup>d</sup>
$N_2P_2K_1$	51.0 ± 10.6 <sup>a</sup>	43.0 ± 6.6 <sup>abcd</sup>	7.2 ± 2.5 <sup>de</sup>	24.0 ± 2.0 <sup>de</sup>	16.0 ± 3.0	71.3 ± 14.4 <sup>c</sup>	114.9 ± 5.5 <sup>bcd</sup>
$N_2P_2K_3$	52.0 ± 1.0 <sup>a</sup>	52.3 ± 4.5 <sup>a</sup>	10.0 ± 1.7 <sup>abcd</sup>	29.3 ± 2.5 <sup>c</sup>	16.0 ± 3.6	75.4 ± 8.6 <sup>bc</sup>	129.6 ± 12.7 <sup>ab</sup>
$N_3P_2K_2$	40.0 ± 4.6 <sup>bcde</sup>	43.7 ± 4.5 <sup>abcd</sup>	11.7 ± 2.3 <sup>ab</sup>	33.7 ± 1.5 <sup>b</sup>	17.7 ± 1.5	79.8 ± 15.7 <sup>abc</sup>	128.5 ± 12.7 <sup>abc</sup>
$N_1P_1K_2$	42.3 ± 4.9 <sup>abcd</sup>	47.3 ± 1.2 <sup>ab</sup>	10.1 ± 0.4 <sup>abcd</sup>	25.0 ± 2.6 <sup>de</sup>	15.7 ± 2.1	66.9 ± 3.0 <sup>cd</sup>	126.0 ± 14.9 <sup>abc</sup>
$N_1P_2K_1$	49.7 ± 3.5 <sup>abcd</sup>	45.3 ± 3.1 <sup>abc</sup>	10.8 ± 1.7 <sup>abc</sup>	25.3 ± 2.5 <sup>cde</sup>	14.0 ± 3.6	90.9 ± 8.9 <sup>ab</sup>	121.3 ± 5.3 <sup>abcd</sup>
$N_2P_1K_1$	46.7 ± 3.2 <sup>abc</sup>	44.0 ± 4.4 <sup>abcd</sup>	10.0 ± 1.0 <sup>abcd</sup>	25.3 ± 2.1 <sup>cde</sup>	13.0 ± 3.5	78.1 ± 7.1 <sup>abc</sup>	112.2 ± 7.1 <sup>cd</sup>

多重比较采用 Duncan's, 不同字母表示差异显著, 下同

Duncan's was used for multiple comparisons, different letters indicate significant differences, same as below

0.150%、丹酚酸 B 为 5.63%、总丹参酮为 1.27%。 $N_0P_0K_0$  处理产量最低，丹酚酸 B、总丹参酮含量均处于较低水平，分别为 5.09%、0.88%。迷迭香酸含量在  $N_1P_1K_2$ 、 $N_1P_2K_2$  处理下最高 0.153%， $N_2P_2K_3$ 、 $N_2P_0K_2$  处理下含量最低均 0.126%。丹酚酸 B 含量  $N_0P_0K_0$  处理下最低 5.09%，在  $N_2P_2K_0$  处理下含量最高 6.26%，最高比最低高 22.8%。总丹参酮含量在  $N_1P_2K_2$  处理下含量最低 0.79%，在  $N_2P_2K_0$  处理下含量最高 1.70%，是  $N_1P_2K_2$  处理的 1.14 倍。

根据处理 2、3、6、11 的结果，分析 N 肥对丹参活性成分含量影响，迷迭香酸含量随 N 肥施入增加呈现先增后减的现象，对丹酚酸 B 含量无

显著性影响 ( $P>0.05$ )，低 N 肥处理下总丹参酮显著低于其他处理。根据处理 4~7 的结果，分析 P 肥对丹参活性成分含量影响，迷迭香酸含量随 P 肥施入量的增加而增加，P 肥对丹酚酸 B 含量无显著性影响 ( $P>0.05$ )，总丹参酮含量随 P 肥施入量的增加而增加。根据处理 6、8~10 的结果，分析 K 肥对丹参活性成分含量影响，迷迭香酸含量随 K 肥施入增加呈现先增加的趋势，但施肥量过高后含量骤减，K 肥对丹酚酸 B 含量无显著性影响 ( $P>0.05$ )，总丹参酮含量随 K 肥施入增加而减少，不施 K 肥处理下总丹参酮含量显著高于其他处理 ( $P<0.05$ )。

表 5 N、P、K 配施对丹参生物活性成分含量的影响

Table 5 Effects of combined application of N, P, and K fertilizers on active constituents of *S. miltiorrhiza*

处理	迷迭香酸/%	丹酚酸 B/%	总丹参酮/%
$N_0P_0K_0$	$0.138 \pm 0.006^{abc}$	$5.09 \pm 0.14^d$	$0.88 \pm 0.24^{fg}$
$N_0P_2K_2$	$0.132 \pm 0.003^{bc}$	$5.29 \pm 0.19^{cd}$	$1.36 \pm 0.23^{abc}$
$N_1P_2K_2$	$0.153 \pm 0.007^{ab}$	$5.25 \pm 0.29^{cd}$	$0.79 \pm 0.24^g$
$N_2P_0K_2$	$0.126 \pm 0.008^c$	$5.23 \pm 0.38^{cd}$	$0.95 \pm 0.22^{defg}$
$N_2P_1K_2$	$0.143 \pm 0.017^{abc}$	$5.82 \pm 0.43^{abc}$	$1.05 \pm 0.24^{cdefg}$
$N_2P_2K_2$	$0.150 \pm 0.014^{ab}$	$5.63 \pm 0.16^{abcd}$	$1.27 \pm 0.06^{abcde}$
$N_2P_3K_2$	$0.152 \pm 0.016^{ab}$	$5.71 \pm 0.07^{abcd}$	$1.33 \pm 0.32^{bc}$
$N_2P_2K_0$	$0.140 \pm 0.16^{abc}$	$6.26 \pm 0.14^a$	$1.70 \pm 0.15^a$
$N_2P_2K_1$	$0.150 \pm 0.008^{ab}$	$5.70 \pm 0.41^{abcd}$	$1.39 \pm 0.09^{abc}$
$N_2P_2K_3$	$0.126 \pm 0.011^c$	$5.96 \pm 0.50^{ab}$	$1.25 \pm 0.19^{bcdef}$
$N_3P_2K_2$	$0.136 \pm 0.016^{abc}$	$5.49 \pm 0.40^{bcd}$	$1.29 \pm 0.24^{bcd}$
$N_1P_1K_2$	$0.153 \pm 0.007^{ab}$	$5.96 \pm 0.48^{ab}$	$1.56 \pm 0.06^{ab}$
$N_1P_2K_1$	$0.148 \pm 0.005^{ab}$	$5.98 \pm 0.36^{ab}$	$1.17 \pm 0.12^{cdefg}$
$N_2P_1K_1$	$0.134 \pm 0.001^{abc}$	$5.65 \pm 0.45^{abcd}$	$0.90 \pm 0.18^{efg}$

#### 4 讨论

通过对丹参“3414”N、P、K 配施试验结果分析，缺素处理的肥料贡献率均显著低于 N、P、K 配施的处理，N、P、K 作为植物必须的大量元素，其缺乏均会限制植物生长发育，且 3 种元素相互作用、相互影响<sup>[26]</sup>。限制丹参产量及效益的主要营养元素依次为  $N>K>P$ ，N 肥增产效果较明显，K 肥次之，P 肥最小，N、P、K 肥之间相互促进肥效发挥，且交互效应  $NP>NK>PK$ 。N 肥施入过量后的产量下降趋势也是最大，K 肥次之，P 肥最小。王渭玲等<sup>[19]</sup>对旱地丹参研究表明在豫西地区 N 肥对丹参产量影响最大，P 肥次之，K 肥最小，该结论与本文研究结果对比，说明 N 肥对丹参产量影响显

著，对丹参根长有显著影响，进而影响根重。有报道表明， $NO_3^-$  通过促进生长素的积累来促进根长<sup>[27]</sup>，也有研究表明  $NO_3^-$  促进细胞分裂素合成<sup>[28]</sup>，这是必要的响应促进根系生长系统 N 信号<sup>[29]</sup>。P 肥的施入对丹参地上部分有一定的促进作用，可能是 P 是核酸、磷脂和 ATP 等重要组成<sup>[30]</sup>，这些对于光合、能量传递、碳水化合物及蛋白质合成以及脂质代谢都是必需的<sup>[31]</sup>。因为 K 肥对丹参株幅、根粗有一定促进作用，这一结论与翟彩霞等<sup>[32]</sup>研究相似，N 肥对丹参根长影响最大，K 肥对根粗影响比较大。

本研究结果表明，山东平邑地区丹参药材品质均达到药典标准，且不同施肥处理对丹参生物活性成分积累有显著影响。产量最高施肥处理  $N_2P_2K_2$

下, N、P、K 均处于中等水平, 酚酸类、丹参酮类含量均处于较高水平。P 肥对酚酸类成分积累均有促进作用, 丹参酮类成分积累受 P 肥和 K 肥影响较大, P 肥对其有促进作用, K 肥对其有抑制作用。N 肥的施入对丹参有效成分积累无显著影响。这一结果与夏贵惠等<sup>[23]</sup>的结果相似, P 肥能促进丹参酮类成分积累, 但 N 肥对丹参有效成分影响结果均不同。以往研究大多停留在证明施肥对药用植物活性成分含量影响<sup>[33-34]</sup>, 对其缺乏深入研究。研究 N、P、K 对丹参生物活性成分的合成途径及其合成中的关键酶和基因的影响, 揭示施肥对活性成分的影响, 才能更准确的指导药用植物施肥。

合理的 N、P、K 配施能提高植物产量和品质是基于改变土壤肥力, 弥补当地土壤肥力不足, 促进植物对营养元素的吸收。本实验条件下, 丹参产量以 N、P、K 肥施用量分别为 150、100、150 kg/hm<sup>2</sup> 处理组合最高, 通过建立三元二次效应函数估测鲁中南地区最佳经济施肥量为 N 195.63 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 116.64 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 153.85 kg/hm<sup>2</sup>。与以往其他对丹参最佳施肥量研究结果不尽相同<sup>[17-22]</sup>, 这与试验地区不同有密切关系, 试验地土壤肥力、气候各不相同, 做施肥试验应考虑土壤肥力, 在不考虑土壤肥力的情况下, 得出的施肥量仅适用于当地指导施肥, 后需进一步考虑土壤肥力与施肥量同丹参需肥量之间的关系, 研究大区域精准指导施肥。

#### 参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2015.
- [2] Liang W, Chen W, Wu L, *et al.* Quality evaluation and chemical markers screening of *Salvia miltiorrhiza* Bge. (Danshen) based on HPLC fingerprints and HPLC-MS<sup>n</sup> coupled with chemometrics [J]. *Molecules*, 2017, 22(3): 478-483.
- [3] 曾慧婷, 沙秀秀, 宿树兰, 等. 不同产地丹参茎叶 UPLC 指纹图谱与化学模式识别研究 [J]. *中草药*, 2017, 48(4): 767-772.
- [4] Wang Y, Lu H, Liu Y, *et al.* Cryptotanshinone sensitizes antitumor effect of paclitaxel on tongue squamous cell carcinoma growth by inhibiting the JAK/STAT3 signaling pathway [J]. *Biomed Pharm*, 2017, 95: 1388-1396.
- [5] Li H, Shi L, Wei J, *et al.* Cellular uptake and anticancer activity of salvianolic acid B phospholipid complex loaded nanoparticles in head and neck cancer and precancer cells [J]. *Colloid Surface B: Biointerfaces*, 2016, 147: 65-72.
- [6] 葛宇清, 程汝滨, 陈 梦, 等. 二氢丹参酮抑制人胃癌 SGC7901 细胞侵袭迁移作用及机制研究 [J]. *中草药*, 2017, 48(15): 3138-3144.
- [7] 王加茹, 徐宛婷, 刘 畅, 等. 隐丹参酮抗肿瘤药理作用机制研究进展 [J]. *药物评价研究*, 2018, 41(6): 1160-1163.
- [8] Zhang Y, Zhang Y, Xie Y, *et al.* Multitargeted inhibition of hepatic fibrosis in chronic iron-overloaded mice by *Salvia miltiorrhiza* [J]. *J Ethnopharm*, 2013, 148(2): 671-681.
- [9] Zhou Z, Wang S, Liu Y, *et al.* Cryptotanshinone inhibits endothelin-1 expression and stimulates nitric oxide production in human vascular endothelial cells [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 2006, 1760(1): 1-9.
- [10] Geng Z, Huang L, Song M, *et al.* Cardiovascular effects in vitro of a polysaccharide from *Salvia miltiorrhiza* [J]. *Carbohydr Polymers*, 2015, 121: 241-247.
- [11] Cui Z, Liu J, Wei W. The effects of tanshinone II<sub>A</sub> on hypoxia/reoxygenation-induced myocardial microvascular endothelial cell apoptosis in rats via the JAK2/STAT3 signaling pathway [J]. *Biomed Pharm*, 2016, 83: 1116-1126.
- [12] Xu Z C, Ji A J, Zhang X, *et al.* Biosynthesis and regulation of active compounds in medicinal model plant *Salvia miltiorrhiza* [J]. *Chin Herb Med*, 2016, 8(1): 3-11.
- [13] 赵志刚, 郜舒蕊, 宋 嫵, 等. 丹参主产区生产技术调查研究 [J]. *中药材*, 2014, 37(3): 375-379.
- [14] 郭宝林, 冯毓秀, 赵杨景. 丹参种质资源研究进展 [J]. *中国中药杂志*, 2002, 27(7): 15-18.
- [15] 赵 魁, 郭晓恒, 宋 杰, 等. 全国丹参生产现状的调查和分析 [J]. *时珍国医国药*, 2010, 21(9): 2307-2310.
- [16] Xia P, Guo H, Zhao H, *et al.* Optimal fertilizer application for *Panax notoginseng* and effect of soil water on root rot disease and saponin contents [J]. *J Gin Res*, 2016, 40(1): 38-46.
- [17] 王渭玲, 梁宗锁, 孙 群, 等. 丹参氮、磷肥效应及最佳施肥模式研究 [J]. *西北植物学报*, 2003, 23(8): 1406-1410.
- [18] 王渭玲, 梁宗锁, 孙 群, 等. 丹参 N、P、K 肥效反应模式研究 [J]. *西北农业学报*, 2002, 11(4): 59-62.
- [19] 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]. 2005, 21(3): 218-221.
- [20] 翟彩霞, 温春秀, 王凯辉, 等. N、P、K 肥对丹参根系生长及养分含量的影响 [J]. *华北农学报*, 2008, 23(S1): 220-223.
- [21] 夏奉乾, 苗艳芳, 李俊伟, 等. N、P、K 肥配施对豫西旱地丹参生产的影响 [J]. *河南科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 31(6): 70-73.



- [22] 张 锋, 韩金龙, 倪大鹏, 等. 钾素对白花丹参和紫花丹参产量、品质及养分吸收的影响 [J]. 西北农业学报, 2016, 25(3): 1050-1055.
- [23] 夏贵惠, 王秋玲, 王文全, 等. 不同浓度氮磷配比对丹参生长和活性成分积累的影响 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(22): 4175-4182.
- [24] 张南平, 肖新月, 林瑞超. 中药材 GAP 生产技术及管理体系的构想 [J]. 中药研究与信息, 2001(2): 13-15.
- [25] 李 耿, 孟繁蕴, 杨洪军, 等. UPLC 法同时测定丹参中 11 种成分的含量 [J]. 中国药房, 2014, 25(19): 1766-1768.
- [26] Usherwood N R, Segars W I. Nitrogen interactions with phosphorus and potassium for optimum crop yield, nitrogen use effectiveness, and environmental stewardship [J]. *Sci World J*, 2001, 1(Suppl 2): 57-60.
- [27] Krouk G, Lacombe B, Bielach A, *et al*. Nitrate-regulated auxin transport by NRT1.1 defines a mechanism for nutrient sensing in plants [J]. *Dev Cell*, 2010, 18: 927-937.
- [28] Sakakibara H, Takei K, Hirose N. Interactions between nitrogen and cytokinin in the regulation of metabolism and development [J]. *Trends Plant Sci*, 2006, 11: 440-448.
- [29] Ruffel S, Krouk G, Ristova D, *et al*. Nitrogen economics of root foraging: Transitive closure of the nitrate-cytokinin relay and distinct systemic signaling for N supply vs. demand [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108(45): 18524-18529.
- [30] Schachtman D P, Reid R J, Ayling S M. Phosphorus uptake by plants: From soil to cell [J]. *Plant Physiol*, 1998, 116: 447-453.
- [31] Rhykerd C L, Overdahl C J. *Nutrition and Fertilizer Use* [M]. New York: Agronomy Monograph, 1982.
- [32] 翟彩霞, 温春秀, 张彦才, 等. 丹参施肥数学模型研究 [J]. 华北农学报. 2009, 29(S1): 226-230.
- [33] 韩建萍, 梁宗锁, 孙 群, 等. 丹参根系氮、磷营养吸收及丹参酮积累规律研究 [J]. 中国中药杂志, 2004, 29(3): 19-23.
- [34] 王 丹, 侯俊玲, 万春阳, 等. 中药材施肥研究进展 [J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 225-228.