

网络出版时间:2022-04-13 15:35 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.10.010
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20220412.0949.010.html

氮磷钾配施对多花黄精产量品质及养分吸收的影响

刘宇航¹, 邓远苇², 刘亚敏¹, 刘玉民¹

(1 西南大学 资源环境学院, 重庆 北碚 400715; 2 核桃产业技术研究所, 四川 广元 628012)

[摘要] **【目的】**研究氮、磷、钾肥配施对多花黄精产量、有效成分含量和养分吸收的影响,揭示多花黄精的需肥规律,为多花黄精栽培提供理论依据。**【方法】**2018—2019 年,采用“3414”试验方案,设置氮、磷、钾 3 个因子,每个因子 4 个水平,共计 14 个处理,测定不同处理多花黄精的产量、根茎多糖和皂苷含量以及地上部、地下部的 N、P、K 含量;采用回归分析法拟合氮、磷、钾肥施用量与多花黄精产量、根茎多糖间的肥料效应模型,使用频率分析法确定多花黄精的最佳推荐施肥量。**【结果】**氮、磷、钾肥配施能明显提高多花黄精的产量、根茎多糖和皂苷含量,在一定施肥区间内,多花黄精产量、根茎多糖和皂苷含量均随施肥量的增大呈先上升后下降的趋势,均在 N₂P₂K₂ 处理(N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 160,160,80 kg/hm²)时达到最大值。氮、磷、钾肥对多花黄精产量、根茎多糖含量的影响表现为氮肥>磷肥>钾肥,氮、磷、钾肥对多花黄精根茎皂苷含量的影响表现为氮肥>钾肥>磷肥。氮、磷、钾肥配施对多花黄精地上部和地下部的 N、P、K 含量有明显影响,不论是地上部还是地下部,同一处理中植株 N、K 含量均高于 P 含量。拟合的氮、磷、钾肥施用量与多花黄精产量、根茎多糖间的肥料效应模型的相关性均达到显著水平($P<0.05$),可知模型拟合成功。使用频率分析法,确定了本研究土壤肥力条件下多花黄精产量达 14 000 kg/hm² 以上及根茎多糖含量达 100 mg/g 以上时的氮、磷、钾肥施用量。**【结论】**综合考虑产量和品质,2 年生多花黄精的高产优质施肥方案为 N 145~167 kg/hm²,P₂O₅ 129~158 kg/hm²,K₂O 59~80 kg/hm², $m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})$ 为 1:0.92:0.45。

[关键词] 多花黄精; 配方施肥; 肥料效应模型; 施肥方案
[中图分类号] S567.239.062 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2022)10-0097-09

Effects of combined application of N,P and K on yield, quality and nutrient absorption of *Polygonatum cyrtonema*

LIU Yuhang¹, DENG Yuanwei², LIU Yamin¹, LIU Yumin¹

(1 College of Resources and Environment, Southwest University, Beibei, Chongqing 400715, China;
2 Institute of Walnut Industry Technology, Guangyuan, Sichuan 628012, China)

Abstract: **【Objective】** This study researched the effects of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on yield, active ingredient content and nutrient absorption of *Polygonatum cyrtonema* and explored the fertilizer requirement of *P. cyrtonema* to provide basis for cultivation of *P. cyrtonema*. **【Method】** From 2018 to 2019, the “3414” experimental scheme was used to set up three factors of nitrogen, phosphorus and potassium and four levels for each factor with a total of 14 treatments. The yield, polysaccharide and saponin contents in rhizome, and N, P and K contents in aboveground and underground parts of *P. cyrtonema* under different treatments were determined. The regression analysis method was used to fit the fertilizer effect model of the application amounts of nitrogen, phosphorus and potassium fer-

[收稿日期] 2021-11-11
[基金项目] 中央财政林业科技推广示范项目(渝林科推 2017-07); 中央高校基本科研业务费专项(SWU119066)
[作者简介] 刘宇航(1998—), 女, 河北承德人, 在读硕士, 主要从事药用植物开发与利用研究。E-mail: xzwliuyuhang@163.com
[通信作者] 刘亚敏(1976—), 女, 重庆北碚人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事药用植物资源开发与利用研究。
E-mail: yaminliu0511@163.com

tilizers with yield and rhizome polysaccharide of *P. cyrtonema*. The optimal fertilization amounts of *P. cyrtonema* were also determined using frequency analysis. 【Result】 Combined application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers significantly improved the yield, rhizome polysaccharide and saponin contents of *P. cyrtonema*. The yield, rhizome polysaccharide and saponin contents of *P. cyrtonema* increased first and then decreased with the increase of fertilization amount, and all reached peaks in $N_2P_2K_2$ treatment with N, P_2O_5 and K_2O of 160, 160 and 80 kg/hm², respectively. The effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on yield and rhizome polysaccharide content of *P. cyrtonema* were in the order of nitrogen fertilizer > phosphorus fertilizer > potassium fertilizer. The effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on rhizome saponin content of *P. cyrtonema* were in the order of nitrogen fertilizer > potassium fertilizer > phosphorus fertilizer. Combined application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer had significant effects on N, P and K contents in aboveground and underground parts of *P. cyrtonema*. N and K contents in both aboveground or underground parts were higher than P contents in each treatment. The correlation of fitted fertilizer effect model reached the significant level ($P < 0.05$), indicating that the model was successfully fitted. The application amounts of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer were determined by frequency analysis for the yield of above 14 000 kg/hm² and the rhizome polysaccharide content of above 100 mg/g. 【Conclusion】 Based on the comprehensive consideration of high yield and quality, the optimal fertilization scheme of 2-year *P. cyrtonema* was $N\ 145 - 167\ kg/hm^2$, $P_2O_5\ 129 - 158\ kg/hm^2$ and $K_2O\ 59 - 80\ kg/hm^2$ with $m(N) : m(P_2O_5) : m(K_2O)$ ratio of 1 : 0.92 : 0.45.

Key words: *Polygonatum cyrtonema*; formula fertilization; fertilizer effect model; fertilization scheme

多花黄精 (*Polygonatum cyrtonema*) 为百合科 (Liliaceae) 多年生草本植物, 作为正品黄精收录于中国药典^[1]。多花黄精具有降血压、降血糖、降血脂的作用^[2-3], 对于癌症^[4-5] 和阿尔茨海默症^[6] 也有一定疗效; 还可加工成蜜饯、保健酒等应用于食品和保健品行业; 其活性成分具有抗菌抑菌、保湿和抗氧化等效果^[7-8], 在护肤品行业也有很大的开发应用前景^[9]。随着人们对多花黄精的深度开发, 野生资源已无法满足市场需求, 人工高效栽培是解决这一问题的有效途径。配方施肥是均衡土壤供肥和作物需肥的一种养分调控策略, 其中 N、P、K 作为植物最为需要的营养元素而广受关注^[10-12]。大量研究表明, 氮、磷、钾配施不仅可以提高中药材产量和品质, 还可以提高肥料利用率^[13-14]。但在中药材生产实践中, 常因无生态化、规范化种植标准而造成肥料过量投入, 不仅增加了成本, 还会产生环境污染等问题。目前, 对于多花黄精的人工种植研究, 多集中在栽培模式^[15]、林下透光率^[16]、繁殖方法^[17] 等方面, 关于氮、磷、钾肥对多花黄精产量和品质的影响机理还不明确, 优化的施肥技术还很欠缺, 因此探讨高产优质施肥方案是多花黄精人工高效栽培亟待解决的关键问题。本试验研究了氮磷钾肥配施对多花黄精产量和品质的影响, 通过回归分析建立多花黄精肥料效应模型, 利用频率分析确定合理的施肥量, 旨在为多

花黄精高产优质栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试黄精由重庆市山里来中药材种植合作社提供, 经西南大学资源环境学院刘亚敏副教授鉴定为多花黄精。试验所用肥料包括尿素 (含 N 46%)、过磷酸钙 (含 P_2O_5 12%)、硫酸钾 (含 K_2O 52%)。

试验地位于重庆市潼南区龙形镇鹅形村 (东经 $105^{\circ}55'12''$, 北纬 $30^{\circ}15'49''$), 海拔约 350 m, 年均日照时数 1 123.0 h, 年均降水量 991.3 mm, 年均气温 $17.5^{\circ}C$, 属亚热带湿润季风气候区。试验基地土壤为紫色土, 成土母质以遂宁组母质为主, 0~20 cm 土层土壤理化性质为: 土壤全氮含量 0.75 g/kg, 土壤碱解氮含量 130.00 mg/kg, 土壤全磷含量 0.73 g/kg, 土壤有效磷含量 10.15 mg/kg, 土壤全钾含量 25.00 g/kg, 土壤速效钾含量 75.00 mg/kg, 土壤有机质含量 8.72 g/kg, pH 值 7.75。

1.2 试验设计

试验设置氮 (N)、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 3 个养分因子, 每个因子设置 4 个水平 (编码为 0, 1, 2, 3), 依据“3414”试验方案设计 14 个施肥处理组合 (表 1)。每个养分因子的 2 水平为基准肥料施用量 (根据当地生产实际及历年试验数据确定), 其中 N 为 160

kg/hm²,P₂O₅ 为 160 kg/hm²,K₂O 为 80 kg/hm²,0 水平为无肥料处理,即 N、P₂O₅、K₂O 施用量均为 0 kg/hm²;1 水平施肥量为 2 水平的 0.5 倍,即 N、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 80,80,40 kg/hm²;3 水平

施肥量为 2 水平的 1.5 倍,即 N、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 240,240,120 kg/hm²。每个处理均设 3 个重复,合计 42 个小区。

表 1 基于“3414”试验方案的不同施肥处理的氮磷钾肥施用量

处理 Treatment	试验因子编码 Experimental factor code			施用量/(kg·hm ⁻²) Fertilizer application		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
T1(N ₀ P ₀ K ₀)	0	0	0	0	0	0
T2(N ₀ P ₂ K ₂)	0	2	2	0	160	80
T3(N ₁ P ₂ K ₂)	1	2	2	80	160	80
T4(N ₂ P ₀ K ₂)	2	0	2	160	0	80
T5(N ₂ P ₁ K ₂)	2	1	2	160	80	80
T6(N ₂ P ₂ K ₂)	2	2	2	160	160	80
T7(N ₂ P ₃ K ₂)	2	3	2	160	240	80
T8(N ₂ P ₂ K ₀)	2	2	0	160	160	0
T9(N ₂ P ₂ K ₁)	2	2	1	160	160	40
T10(N ₂ P ₂ K ₃)	2	2	3	160	160	120
T11(N ₃ P ₂ K ₂)	3	2	2	240	160	80
T12(N ₁ P ₁ K ₂)	1	1	2	80	80	80
T13(N ₁ P ₂ K ₁)	1	2	1	80	160	40
T14(N ₂ P ₁ K ₁)	2	1	1	160	80	40

设计的 14 个处理中,T1(N₀P₀K₀)为空白处理;T2(N₀P₂K₂)、T4(N₂P₀K₂)、T8(N₂P₂K₀)为缺肥处理(单一养分缺失);其余 10 个处理均施用了氮磷钾 3 种肥料,称施肥处理,其中 T6(N₂P₂K₂)为基准施肥处理,T7(N₂P₃K₂)、T10(N₂P₂K₃)、T11(N₃P₂K₂)为高肥处理(单一养分高施)。

试验小区按照完全随机区组排列,各小区面积为 4 m×5 m。按照试验设计的施肥方案于 2018 年 4 月起连续施肥 2 年,磷肥和钾肥于每年 4 月底作为基肥全部施入,氮肥每年分 2 次施入(于每年 4 月底作为基肥施入一半,7 月中旬作为追肥施入一半),期间进行常规田间管理。

2017 年 11 月,选择大小基本一致(20 g 左右)、顶芽完整的多花黄精根茎作为无性繁殖材料,定植在株行距为 3.0 m×3.5 m、透光率为 50%~70%的川黄柏林下。多花黄精栽植的株行距为 30 cm×40 cm,密度约为 130 000 株/hm²。试验小区与黄柏树之间各留 50 cm 隔离带,隔离带边缘有高 20 cm 的田埂。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 多花黄精产量及肥料效用 2019 年 11 月,在各小区采收 1 m² 的多花黄精,用电子天平称取根茎鲜质量,即为产量(本研究中产量均指药材鲜质量)。在此基础上,计算各个处理的肥料效应。计算公式为:

农学效率(agronomic efficiency, kg/kg)=(施肥处理产量-缺肥处理产量)/(施肥处理施肥量-缺肥处理施肥量);

肥料贡献率(nutrient contribution rate)=(施肥处理产量-缺肥处理产量)/施肥处理产量×100%;

地力贡献率(soil contribution rate)=空白处理产量/基准施肥处理产量×100%;

增产率(increase rate)=(施肥处理产量-缺肥处理产量)/缺肥处理产量×100%。

1.3.2 根茎有效成分含量 2019 年 11 月,在每个小区随机挖取 3 株多花黄精,洗净擦干,将其分为地上部(茎秆、叶片)和地下部(根茎),分别全部进行干燥粉碎后,再过孔径 0.175 mm 筛,混合均匀后装于自封袋中备用,用于测定地下根茎多糖、皂苷含量以及地上和地下部的 N、P、K 含量。参照 2015 年《中国药典》中的方法^[1]进行多花黄精根茎多糖的提取及测定;采用乙醇超声波法提取根茎皂苷,采用香草醛-冰醋酸比色法测定根茎皂苷含量^[18]。

1.3.3 植株 N、P、K 含量及其分配比例 将地上部和地下部样品用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮得到 N、P、K 待测液,按照靛酚蓝比色法测定 N 含量,由火焰分光光度计测定 K 含量,按照钒钼黄比色法测定 P 含量^[19]。在此基础上,计算不同处理多花黄精地上部和地下部的 N、P、K 分配比例。

1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2010 整理试验数据,采用 SPSS Statistics 22.0 进行单因素方差分析,使用 Origin 2017 绘图,利用 Excel 数据分析模块的回归分析进行肥料效应模型的拟合,使用频率分析法^[20]确定合理施肥量。

2 结果与分析

2.1 氮磷钾配施对多花黄精产量的影响

表 2 显示,氮磷钾配施能显著提高多花黄精的产量,但不同施肥处理的增产效果差异较大,基准施肥处理 T6 产量最高,较空白处理 T1 显著提升了 265.99%($P<0.05$)。缺氮处理 T2、缺磷处理 T4 和缺钾处理 T8 分别较 T6 处理减产 61.46%,36.85%,26.97%,说明氮、磷、钾肥对多花黄精产量的影响表现为氮肥>磷肥>钾肥,且氮肥的影响远高于磷肥、钾肥,这与从肥料贡献率和增产率得到的

结论一致。通过空白处理和基准施肥处理计算的地力贡献率仅为 27.32%,这表明土壤供肥能力较差,可知多花黄精对养分的需求更多依赖于外源的供给。缺氮处理 T2、缺磷处理 T4、缺钾处理 T8 的产量较空白处理 T1 分别增产 41.07%,131.13%,167.27%,说明氮、磷、钾肥对产量的交互作用表现为氮磷>氮钾>磷钾。

由表 2 可知,随着氮、磷、钾肥施用量的增加,多花黄精产量先上升后下降,高氮($N_3P_2K_2$)、高磷($N_2P_3K_2$)、高钾($N_2P_2K_3$)处理的产量较基准施肥处理 T6 分别减少了 2.03%,10.01%,9.84%。此时肥料的农学效率、贡献率、增产率均有所下降,肥料的投入与产出不成正比,这与肥料的“报酬递减律”变化一致。磷肥的农学效率在 1 水平下达到最大,而氮、钾肥的农学效率和氮、磷、钾肥的贡献率、增产率均在 2 水平下最大,这说明试验设计方案较为合理。

表 2 不同氮磷钾配施处理下多花黄精的产量及肥料效应

Table 2 Yield of *Polygonatum cyrtoneuma* and fertilizer effect under different N, P and K combined treatments

处理 Treatment		产量/(kg·hm ⁻²) Yield	农学效率/(kg·kg ⁻¹) Agronomic efficiency	肥料贡献率/% Nutrient contribution rate	增产率/% Increase rate
N	T2($N_0P_2K_2$)	7 447.51±302.47 b	—	—	—
	T3($N_1P_2K_2$)	11 394.81±150.16 c	49.34	34.64	53.00
	T6($N_2P_2K_2$)	19 321.88±312.92 i	74.21	61.46	159.44
	T11($N_3P_2K_2$)	18 929.46±488.58 i	47.84	60.66	154.17
	平均 Average	—	57.13	52.25	122.20
P ₂ O ₅	T4($N_2P_0K_2$)	12 201.98±317.37 d	—	—	—
	T5($N_2P_1K_2$)	17 526.18±606.81 h	66.55	30.38	43.63
	T6($N_2P_2K_2$)	19 321.88±312.92 i	44.50	36.85	58.35
	T7($N_2P_3K_2$)	17 387.14±286.84 h	21.60	29.82	42.49
	平均 Average	—	44.22	32.35	48.16
K ₂ O	T8($N_2P_2K_0$)	14 109.91±413.29 ef	—	—	—
	T9($N_2P_2K_1$)	15 853.70±567.22 g	43.59	11.00	12.36
	T6($N_2P_2K_2$)	19 321.88±312.92 i	65.15	26.97	36.94
	T10($N_2P_2K_3$)	17 421.15±304.17 h	27.59	19.01	23.47
	平均 Average	—	45.45	18.99	24.25
其他 Else	T1($N_0P_0K_0$)	5 279.32±68.13 a	—	—	—
	T12($N_1P_1K_2$)	14 192.38±380.33 ef	—	—	—
	T13($N_1P_2K_1$)	13 793.22±114.87 e	—	—	—
	T14($N_2P_1K_1$)	14 861.91±345.50 f	—	—	—

注:表中产量数值为“平均值±标准差”,同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note:The yield value is “means±standard deviation”. Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$).

2.2 氮磷钾配施对多花黄精根茎有效成分含量的影响

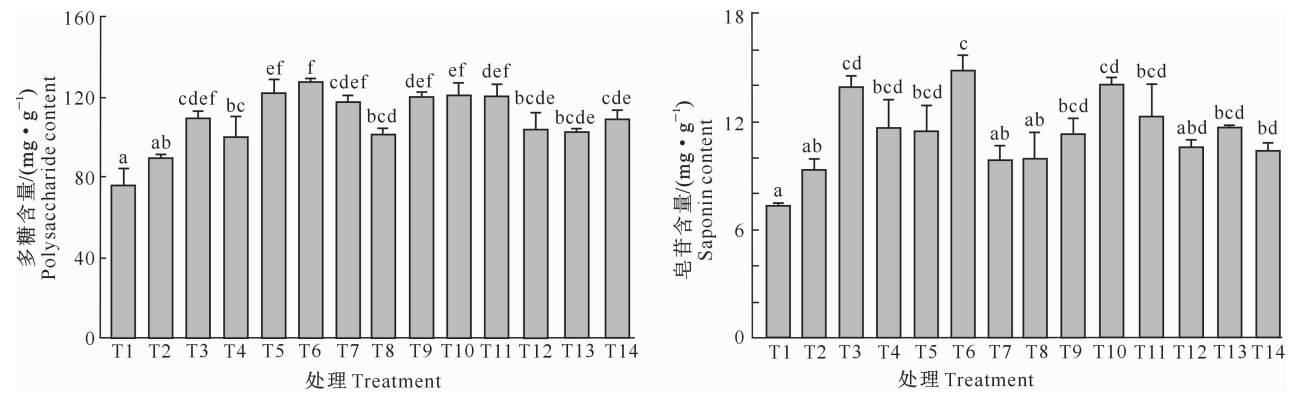
多糖和皂苷是多花黄精的主要活性成分,多糖也是中国药典规定的评价黄精品质的唯一指标。由图 1 可知,各施肥处理均可以有效提高多花黄精根茎的多糖和皂苷含量,当氮、磷、钾肥中的 2 种肥料保持常规施用量(2 水平)时,根茎多糖、皂苷含量均

随肥料施用量的增加呈先上升后下降的趋势,且均在 T6 处理达到最高。T6 处理的根茎多糖和皂苷含量较空白处理 T1 分别显著提高了 67.89%和 101.77%($P<0.05$)。缺氮处理 T2、缺磷处理 T4、缺钾处理 T8 的多糖含量较基准施肥处理 T6 分别显著降低了 29.54%,21.29%,20.43%,说明氮、磷、钾肥对多花黄精根茎多糖含量的影响表现为氮

肥>磷肥>钾肥。与空白处理 T1 相比,T2、T4、T8 处理的多糖含量分别提高了 18.30%,32.15%和 33.60%,表明氮、磷、钾肥对根茎多糖的交互作用表现为氮磷>氮钾>磷钾。

由图 1 还可知,与空白处理 T1 相比,缺氮处理 T2、缺磷处理 T4、缺钾处理 T8 的根茎皂苷含量分

别提高了 26.51%,58.79%和 35.87%,说明氮、磷、钾肥对根茎皂苷的交互作用表现为氮钾>氮磷>磷钾。与 T6 相比,T2、T4、T8 处理的皂苷含量分别降低了 37.03%,21.30%和 32.66%,说明氮、磷、钾肥对多花黄精根茎皂苷含量的影响表现为氮肥>钾肥>磷肥。



图柱上标不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)
Different lowercase letters indicate significant differences between treatments (P<0.05)

图 1 氮磷钾配施对多花黄精根茎有效成分含量的影响
Fig. 1 Effects of N,P and K combined application on contents of effective components in rhizome of *Polygonatum cyrtonema*

2.3 氮磷钾配施对多花黄精氮磷钾养分吸收与分布的影响

2.3.1 氮磷钾含量 由表 3 可知,磷肥和钾肥施用量相同(T2、T3、T6、T11)时,多花黄精地上部 N 含量随氮肥施用量的增加而升高,而地下部 N 含量却先增加后减少,表明氮肥施用量过大会使地上部营

养生长旺盛,更多的 N 被运输到地上部,相应降低了地下部 N 含量。在磷肥和钾肥施用量相同时,随着氮肥用量的增加,地上部和地下部 P 含量无显著变化,但 P 素主要分配给地上部。施用氮肥使 K 素主要分配到多花黄精地上部,抑制了地下部对 K 素的积累。

表 3 氮磷钾配施对多花黄精地上部和地下部 N、P、K 含量的影响
Table 3 Effects of N,P and K combined application on contents of N,P and K in aboveground and underground parts of *Polygonatum cyrtonema* mg/g

处理 Treatment	N 含量 N content		P 含量 P content		K 含量 K content	
	地上部 Aboveground	地下部 Underground	地上部 Aboveground	地下部 Underground	地上部 Aboveground	地下部 Underground
T1	18.69±0.55 a	6.50±0.56 a	4.48±0.46 abc	1.92±0.18 abc	14.81±0.19 b	6.19±0.72 a
T2	19.39±0.26 ab	6.95±0.53 a	5.44±0.32 cde	1.89±0.44 abc	16.10±0.09 def	16.28±1.37 cd
T3	21.01±0.09 cde	8.79±0.74 ab	5.11±0.15 bcd	1.83±0.46 ab	13.84±0.31 a	13.80±1.44 c
T4	20.57±0.41 bcd	17.35±1.92 d	5.25±0.37 cd	1.38±0.20 a	16.69±0.45 fg	18.41±1.88 d
T5	21.95±0.57 ef	10.10±1.32 abc	5.32±0.29 cd	2.80±0.33 bcd	17.47±0.35 h	15.57±1.43 cd
T6	22.01±0.51 ef	13.81±1.95 bcd	4.14±1.33 ab	2.61±0.17 bcd	16.20±0.24 def	10.45±0.81 b
T7	21.60±0.60 def	13.25±0.81 bcd	4.01±0.69 a	2.35±0.11 abcd	16.63±0.39 fg	9.46±0.67 b
T8	21.83±0.68 ef	15.97±3.15 cd	4.12±0.30 ab	1.69±0.18 ab	14.07±0.25 a	6.30±0.61 a
T9	24.16±0.99 g	17.51±3.14 d	5.59±0.47 de	1.76±0.29 ab	15.23±0.26 bc	8.29±0.48 ab
T10	22.38±1.12 f	15.57±3.21 cd	5.29±0.30 cd	1.83±0.16 ab	17.54±0.28 h	9.97±0.59 b
T11	26.03±0.93 h	10.41±0.83 abc	4.96±0.70 abcd	2.29±0.29 abc	16.47±0.23 ef	9.56±0.58 b
T12	20.29±0.68 bc	7.95±0.98 a	4.53±0.40 abc	2.98±0.46 cd	15.73±0.45 cd	11.00±0.70 c
T13	20.02±0.71 bc	8.11±1.46 ab	6.31±0.29 e	3.41±0.26 d	17.07±0.43 gh	7.92±0.83 ab
T14	26.70±0.67 h	9.18±1.07 ab	5.71±0.32 de	2.42±0.30 abcd	16.05±0.19 de	9.06±0.42 ab

注:表中数值为“平均值±标准差”,同列数据后标不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。
Note:The values are “means±standard deviation”. Different lowercase letters indicate significant differences (P<0.05).

由表 3 可知,固定氮肥和钾肥施用量(T4、T5、T6、T7),施用磷肥可以促进多花黄精地上部对 N 素的积累,抑制地下部对 N 素的吸收;多花黄精地上部和地下部 P 含量随磷肥施用量增加先增大后减小,均在磷肥施用量较低时有最大值,P 素大部分分配给地上部;施用磷肥使 K 素主要向地上部转运,对多花黄精地下部 K 素的吸收表现出抑制作用,且磷肥施用量越大,抑制作用越明显。

由表 3 还可知,固定氮肥和磷肥施用量(T8、T9、T6、T10),随着钾肥施用量的增大,多花黄精地上部和地下部 N 含量均先增加后降低,且均在钾肥施用量较低时有最大值,表明高钾肥抑制了多花黄精根茎对 N 素的吸收、积累和向上运输;随着钾肥施用量的增大,地上部 P 含量无明显变化规律,而地下部 P 含量先增加后降低,其中以基准施肥 T6 处理的 P 含量最高;随着钾肥施用量的增大,多花黄精

植株地上部和地下部 K 含量均增大,K 素主要分配给地上部。

2.3.2 氮磷钾分布比例 由图 2 可知,不同施肥处理对多花黄精地上部 N、P、K 比例变化的影响较小,而地下部受施肥影响较大。磷肥和钾肥施用量相同(T2、T3、T6、T11)时,随氮肥施用量的增加地下部 P 的占比升高,但 K 的占比降低。固定氮肥和钾肥的施用量(T4、T5、T6、T7),施用低量磷肥降低了地下部 N 素的占比,却提高了 K 素的占比,随着磷肥施用量的增加,地下部 N 占比有所提高,而 K 占比降低。氮肥和磷肥相同(T8、T9、T6、T10)时,施用钾肥降低了地下部 N 的占比,而 P 占比随钾肥施用量的增大呈先上升后下降的趋势,适量钾肥对多花黄精地下部 P 素的积累有促进作用,但高钾肥则会产生抑制作用。

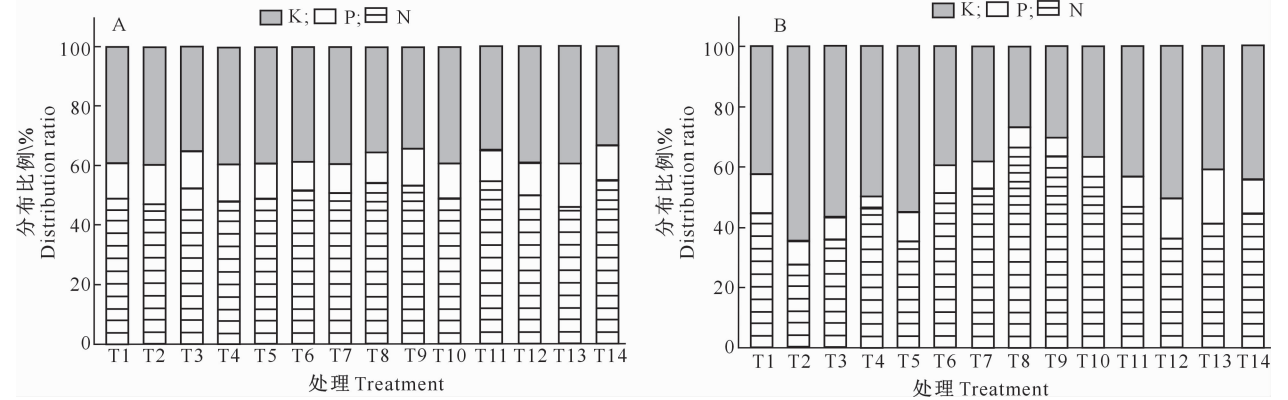


图 2 氮磷钾配施对多花黄精地上部(A)和地下部(B)N、P、K 分布比例的影响
Fig. 2 Effects of N,P and K combined application on distribution ratio of N,P and K in aboveground (A) and underground (B) parts of *Polygonatum cyrtonema*

2.4 多花黄精肥料效应模型的建立

以产量(y_1)为因变量,氮、磷、钾肥的施用量(x_1 、 x_2 、 x_3)为自变量,建立以产量为目标的肥料效应模型,即有: $y_1 = 5\,341.41 + 2\,869.20x_1 + 3\,278.88x_2 + 2\,982.96x_3 - 1\,339.64x_1^2 - 1\,244.63x_2^2 - 810.89x_3^2 + 1\,653.57x_1x_2 + 1\,047.42x_1x_3 - 715.98x_2x_3$,模型的 $R^2=0.95$, $F=8.92$, $P=0.02<0.05$,相关性达到显著水平,可知模型拟合成功。考虑到多糖含量数值较小,采用氮、磷、钾肥施用量的编码值(x_1' 、 x_2' 、 x_3')为自变量,根茎多糖含量(y_2)为因变量,建立以根茎多糖含量为目标的肥料效应模型: $y_2 = 74.92 + 18.24x_1' + 10.88x_2' + 8.54x_3' - 5.67x_1'^2 - 5.13x_2'^2 - 3.82x_3'^2 + 2.81x_1'x_2' + 2.49x_1'x_3' + 2.44x_2'x_3'$,

模型的 $R^2=0.95$, $F=9.21$, $P=0.02<0.05$,相关性达到显著水平,表明模型拟合成功。

2.5 多花黄精合理施肥区间的确定

经过频率寻优分析,得出多花黄精的高产优质施肥方案见表 4 和表 5。由表 4 可知,当施肥方案为 N 145~175 kg/hm²、P₂O₅ 129~164 kg/hm²、K₂O 56~80 kg/hm² 时,多花黄精产量可达 14 000 kg/hm² 以上。由表 5 可知,当施肥方案为 N 137~167 kg/hm²、P₂O₅ 116~158 kg/hm²、K₂O 59~80 kg/hm² 时,多花黄精根茎的多糖含量可达 100 mg/g 以上。

为了同时获得具有高产量和高品质的多花黄精,采取交集法得出同时满足产量大于 14 000 kg/hm² 和根茎多糖含量大于 100 mg/g 的优化施肥

方案为: N 145 ~ 167 kg/hm², P₂O₅ 129 ~ 158 kg/hm², K₂O 59~80 kg/hm², $m(\text{K}_2\text{O})$ 为 1 : 0.92 : 0.45。
 $m(\text{N}) : m(\text{P}_2\text{O}_5) :$

表 4 多花黄精产量在 14 000 kg/hm² 以上时氮磷钾肥施用量的取值频率分布

Table 4 Frequency distribution of application amounts of N,P and K fertilizers with *Polygonatum cyrtonema* yield of above 14 000 kg/hm²

编码值 Code	N(x_1)		P ₂ O ₅ (x_2)		K ₂ O(x_3)	
	次数 Count	频率/% Freq	次数 Count	频率/% Freq	次数 Count	频率/% Freq
0	0	0.00	0	0.00	2	7.69
1	3	11.54	8	27.59	7	26.92
2	20	76.92	18	62.07	14	53.85
3	3	11.54	3	10.34	3	11.54
加权平均数/(kg·hm ⁻²) Weighted avg	160.00		146.21		67.69	
标准差/(kg·hm ⁻²) Standard deviation	39.19		48.14		31.54	
施用量/(kg·hm ⁻²) Application rate	145~175		129~164		56~80	

表 5 多花黄精根茎多糖含量在 100 mg/g 以上时氮磷钾肥施用量的取值频率分布

Table 5 Frequency distribution of application amounts of N,P and K fertilizer with rhizome polysaccharide content of above 100 mg/g of *Polygonatum cyrtonema*

编码值 Code	N(x_1')		P ₂ O ₅ (x_2')		K ₂ O(x_3')	
	次数 Count	频率/% Freq	次数 Count	频率/% Freq	次数 Count	频率/% Freq
0	0	0.00	2	6.45	2	6.45
1	6	19.35	8	25.81	7	22.58
2	22	70.97	18	58.06	19	61.29
3	3	9.68	3	9.68	3	9.68
加权平均数/(kg·hm ⁻²) Weighted avg.	152.20		136.77		69.68	
标准差/(kg·hm ⁻²) Standard deviation	43.11		59.13		29.15	
施用量/(kg·hm ⁻²) Application rate	137~167		116~158		59~80	

3 讨 论

3.1 氮磷钾对多花黄精产量和有效成分的肥料贡献率

不同中药材对肥料的需求存在差异,导致氮、磷、钾肥对不同药材产量、有效成分的贡献率有所不同。前人发现,桔梗产量和总皂苷含量主要受氮肥控制^[21],磷肥对裸花紫珠叶片总酚酸和总糖含量影响最大^[22],而钾肥对膜荚黄芪毛蕊异黄酮苷和多糖含量影响最大^[23]。郭妮^[24]对 1 年生多花黄精的试验表明,氮肥对黄精根茎产量影响最大,其次为钾肥和磷肥,对根茎多糖的影响表现为氮肥>磷肥>钾肥。本研究结果表明,氮、磷、钾肥对 2 年生多花黄精产量和根茎多糖含量贡献均表现为氮肥>磷肥>钾肥。氮、磷、钾肥对 1 年和 2 年生多花黄精根茎多糖含量的影响表现一致,而对产量来讲,磷肥在 1 年生多花黄精产量中影响最弱,钾肥在 2 年生多花黄精产量中影响最弱。本试验结果与郭妮^[24]的研究结果稍有不同,这与多花黄精不同生长年限对肥料的需求不同有关,同时可以看出,氮肥是 1 和 2 年生多花黄精生产的重点控制因子。王占红等^[25]对杨

凌地区黄精的研究表明,磷肥是黄精产量的主要影响因子,钾肥对根茎多糖贡献率最大。而本试验中,多花黄精的产量和根茎多糖含量主要由氮肥控制,产生差别的原因可能与不同药材品种及其对氮、磷、钾肥的需求不同有关。

3.2 氮磷钾配施对多花黄精养分吸收的影响

根状茎是多花黄精的主要药用部位,因此增加地下根茎的质量能获得更大的经济产量,而 N、P、K 等养分累积是干物质形成的基础。本研究中,N、P、K 3 种元素主要存在于多花黄精地上部,且 N 含量最高,K 含量次之,P 含量最少,这可能是由于在植株地上部的叶中,N 是叶绿素、光合作用关键酶等重要有机化合物的主要成分,而 K 能促进光合作用,参与光合产物的运输。因此植株叶片中 N、K 累积有利于碳水化合物的合成与转运,为物质累积提供先决条件。

本研究中,多花黄精中 N、P、K 的分配规律在不同施肥处理下存在差异。地下部 N、P、K 含量均在氮、磷、钾肥中低水平施用量时有最高值,说明适宜的施肥组合可以提高植株 N、P、K 含量,但并不是氮、磷、钾肥施用量越高效果越好,如果过多施用,

则会抑制 N、P、K 的吸收,导致产量、品质的降低。本研究中,多花黄精地上部 N 含量最高,其次为 K 含量, P 含量最少,说明多花黄精是氮肥需求量较大的作物,生产中应根据品种特性、土壤肥力以及目标产量,采取合理施肥措施,提高经济效益。

3.3 多花黄精的优质施肥

配方施肥是均衡地力与植物营养需求的一种优化施肥技术方案,可确定氮、磷、钾肥的合理用量及比例,在实现收获目标的同时,将损失到环境中的养分降低到最小。适宜的氮、磷、钾肥配比是人工栽培药材施肥的关键,有研究表明,适宜的肥料配比可以有效提高黄芪^[23]、广金钱草^[26]、积雪草^[27-28]的产量和有效成分含量,施肥量过低或过高,都达不到最佳效果。但是同一种药材产量最大时的施肥量和有效成分含量最高时的施肥量往往存在差异,这时就要对不同收获目标的施肥区间取交集,尽量使二者同时达到最大。为了兼顾多花黄精的高品质和高产量,本研究对氮、磷、钾肥施用量区间取交集,最终确定了最优的氮、磷、钾肥施用方案,这与唐海龙等^[29]探索藤椒的最佳氮、磷、钾肥施用区间时,综合考虑了产量和品质综合值的做法类似;赵彩云等^[30]也在综合 4 种酚类成分含量的基础上得出了大花红景天的合理施肥量。

本研究建立的施肥方案是基于同时收获更多产量和根茎多糖含量,在本试验区按照试验设计的栽培管理措施获得的,但是中药材对养分的吸收利用以及产量、品质的形成是多方面综合作用的结果,在生产中应该根据土壤、气候以及具体的栽培措施来进行合理调整。另外,多花黄精经营周期以 4 年为宜,因此有必要进行多年试验,对氮、磷、钾肥施肥方案与产量、有效成分间的关系作进一步研究。此外,在中药材的栽培中不仅要调整无机肥料的用量和各肥料的施用比例,也要注重无机肥料和有机肥料^[13]、生物肥料^[31]、纳米肥料^[32]的结合使用,多肥并举,不仅可以提高中药材产量,还可以改善土壤质量,减少环境污染。

4 结 论

在本试验区域的土壤肥力状况下,人工栽培 2 年生多花黄精的高产优质施肥方案为: N 145~167 kg/hm², P₂O₅ 129~158 kg/hm², K₂O 59~80 kg/hm², $m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})$ 为 1:0.92:0.45,在此施肥方案下多花黄精产量可达 14 000 kg/hm² 以上,根茎多糖含量可达 100 mg/g 以上。

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部 [S]. 北京:中国医药科技出版社,2015:306.
State Pharmacopoeia Committee. Pharmacopoeia of the People's Republic of China: Part I [S]. Beijing: China Pharmaceutical Science and Technology Press, 2015:306.
- [2] Lu Y, Shi Z F, Li L. Effects of Polysaccharide from *Polygonatum cyrtonema* Hua on blood glucose, survival rate and liver cell protection in type I diabetic mice [J]. Acta Microscopica, 2020, 29(5): 2711-2717.
- [3] 陶爱恩, 赵飞亚, 王莹, 等. 黄精属植物抗糖尿病本草学、物质基础及其作用机制研究进展 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2019, 25(15): 15-24.
Tao A E, Zhao F Y, Wang Y, et al. Research progress on herbaceous, material basis and mechanism of antidiabetic of *Polygonatum* species [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2019, 25(15): 15-24.
- [4] Liu T, Wu L, Wang D, et al. Role of reactive oxygen species-mediated MAPK and NF-kappa B activation in *Polygonatum cyrtonema* lectin-induced apoptosis and autophagy in human lung adenocarcinoma A549 cells [J]. Journal of Biochemistry, 2016, 160(6): 315-324.
- [5] Li L, Thakur K, Cao Y Y, et al. Anticancerous potential of polysaccharides sequentially extracted from *Polygonatum cyrtonema* Hua in human cervical cancer Hela cells [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 843-850.
- [6] Huang L P, Wu Y, Yin H X, et al. Two new compounds from the stewed *Polygonatum cyrtonema* Hua and their protective effect against A β_{25-35} induced cytotoxicity and oxidative stress damage [J]. Natural Product Research, 2021, 35(23): 4945-4952.
- [7] Zeng T, Tang Y R, Li B, et al. Chemical characterization of constituents from *Polygonatum cyrtonema* Hua and their cytotoxic and antioxidant evaluation [J]. Natural Product Research, 2020, 34(17): 2482-2489.
- [8] Li L, Thakur K, Liao B, et al. Antioxidant and antimicrobial potential of polysaccharides sequentially extracted from *Polygonatum cyrtonema* Hua [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 114: 317-323.
- [9] 彭俊瑛. 多花黄精活性成分的提取、表征及其在护肤品中的应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
Peng J Y. Extraction characterization and applications in cosmetics of active ingredients of *Polygonatum cyrtonema* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [10] Meena V S, Maurya B R, Meena R S. Residual impact of well-grow formulation and NPK on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Bangladesh Journal of Botany, 2015, 44(1): 143-146.
- [11] Ahmed A M S, Abu-zreig M, Adballa M A, et al. Integration of composts with NPK improved soil fertility, growth and yield of sorghum in sandy desert soils of Sudan [J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2020, 23(2): 373-

- 380.
- [12] Ahmad W, Khan F, Shah Z, et al. Quality and crop yield potential of moderately degraded alfisols under different nutrient inputs and cropping patterns [J]. *Pedosphere*, 2019, 29(2): 235-247.
- [13] Bistgani Z E, Siadat S A, Bakhshandeh A, et al. Application of combined fertilizers improves biomass, essential oil yield, aroma profile, and antioxidant properties of *Thymus daenensis* Celak [J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 121: 434-440.
- [14] Arrobas M, Ferreira I Q, Afonso S, et al. Sufficiency ranges and crop nutrient removals for peppermint (*Mentha x piperita* L.) established from field and pot fertilizer experiments [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2018, 49(14): 1719-1730.
- [15] 樊艳荣, 陈双林, 杨清平, 等. 毛竹材用林林下植被群落结构对多花黄精生长的影响 [J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1471-1480.
- Fan Y R, Chen S L, Yang Q P, et al. The impact of understory vegetation structure on growth of *Polygonatum cyrtoneuma* in extensively managed *Phyllostachys edulis* plantation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 1471-1480.
- [16] 梁永富, 易家宁, 王康才, 等. 遮阴对多花黄精生长及光合特性的影响 [J]. *中国中药杂志*, 2019, 44(1): 59-67.
- Liang Y Y, Yi J N, Wang K C, et al. Response of growth and photosynthetic characteristics of *Polygonatum cyrtoneuma* to shading conditions [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2019, 44(1): 59-67.
- [17] 陈松树, 赵致, 王华磊, 等. 多花黄精初生根茎破除休眠及其成苗的条件研究 [J]. *时珍国医国药*, 2017, 28(7): 1748-1750.
- Chen S S, Zhao Z, Wang H L, et al. Study on the condition of breaking dormancy of primary rhizome and seedling formation of *Polygonatum cyrtoneuma* [J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2017, 28(7): 1748-1750.
- [18] 范书珍, 陈存武, 王林. 多花黄精总皂甙的提取研究 [J]. *皖西学院学报*, 2005(5): 39-41.
- Fan S Z, Chen C W, Wang L. Study on extraction of total saponins from *Polygonatum cyrtoneuma* [J]. *Journal of West Anhui University*, 2005(5): 39-41.
- [19] 杨剑虹. 土壤农化分析与环境监测 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- Yang J H. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring [M]. Beijing: China Land Press, 2008.
- [20] 李洪文, 叶和生, 李保华, 等. 田间肥效试验数据的频率分析和施肥决策 [J]. *中国农学通报*, 2014, 30(27): 132-138.
- Li H W, Ye H S, Li B H, et al. Frequency analysis and fertilization decision data field fertilizer efficiency test [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(27): 132-138.
- [21] 王静, 王渭玲, 徐福利, 等. 氮磷钾对桔梗生长及次生代谢产物的影响 [J]. *草业科学*, 2012, 29(4): 586-591.
- Wang J, Wang W L, Xu F L, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on the growth and secondary metabolites of *Platycodon grandiflorum* [J]. *Pratacultural Science*, 2012, 29(4): 586-591.
- [22] 刘式超, 周再知, 马华明, 等. 施肥与种植密度对裸花紫珠药材产量和活性成分的影响 [J]. *中药材*, 2017, 40(4): 769-774.
- Liu S C, Zhou Z Z, Ma H M, et al. Effects of fertilization and planting density on yield and active component of *Callicarpa nudiflora* [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2017, 40(4): 769-774.
- [23] 王晓飞, 姚琴, 魏国江, 等. 氮磷钾养分对寒地膜黄芩生长及药用成分影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2021(2): 149-155.
- Wang X F, Yao Q, Wei G J, et al. Effects of N, P and K fertilization on the growth and medicinal components of *Astragalus membranaceus* in cold region [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(2): 149-155.
- [24] 郭妮. 栽培措施对林下多花黄精产量和品质的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- Guo N. Effects of cultivation measures on yield and quality of *Polygonatum cyrtoneuma* Hua under forest [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [25] 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.
- [26] 卢挺, 杨全, 唐晓敏, 等. 氮磷钾配比施肥对广金钱草产量及质量的影响 [J]. *广西植物*, 2014, 34(3): 426-430.
- Lu T, Yang Q, Tang X M, et al. Effects of combined application of nitrogen, phosphorous and potassium on the yield and quality of *Desmodium styracifolium* [J]. *Guihaia*, 2014, 34(3): 426-430.
- [27] Jat R S, Gajbhiye N A. Variability in yield and phytochemicals content in mandukapanri (*Centella asiatica*) as influenced by nutrient management [J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 86(8): 1004-1009.
- [28] Jat R S, Gajbhiye N A. Secondary metabolites production influenced with soil fertility and irrigation in medicinal plant; Mandukaparni (*Centella asiatica* L.) [J]. *National Academy Science Letters-India*, 2017, 40(2): 87-90.
- [29] 唐海龙, 龚伟, 王景燕, 等. 氮磷钾不同配比对藤椒产量和品质的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(10): 18-26.
- Tang H L, Gong W, Wang J Y, et al. Effects of different N, P and K ratios on yield and quality of *Zanthoxylum armatum* [J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed)*, 2019, 47(10): 18-26.
- [30] 赵彩云, 贾国夫, 何正军, 等. 氮磷钾配施对驯化栽培大花红景天 4 种酚类成分的影响 [J]. *中国中药杂志*, 2018, 43(9): 1812-1817.
- Zhao C Y, Jia G F, He Z J, et al. Effect of fertilization combinations of nitrogen, phosphorus, and potassium on four phenolic compounds of cultivated *Rhodiola crenulata* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2018, 43(9): 1812-1817.

- chives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014, 40(4): 139-144.
- [17] 李博伦, 迺超普, 颜晓元. Landsat 8 陆地成像仪影像的缨帽变换推导 [J]. 测绘科学, 2016, 41(4): 102-107.
Li B L, Ti C P, Yan X Y. Study of derivation of tasseled cap transformation for Landsat 8 OLI images [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(4): 102-107.
- [18] Rodriguez-Galiano V F, Ghimire B, Rogan J, et al. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 67: 93-104.
- [19] Belgiu M, Drăgut L. Random forest in remote sensing: a review of applications and future directions [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 114: 24-31.
- [20] Liu C R, Frazier P, Kumar L. Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy [J]. Remote sensing of environment, 2007, 107(4): 606-616.
- [21] McHugh M L. Interrater reliability: the kappa statistic [J]. Biochemia Medica, 2012, 22(3): 276-282.
- [22] Congalton R G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data [J]. Remote sensing of environment, 1991, 37(1): 35-46.
- [23] 杨 通, 郭旭东, 岳德鹏, 等. 基于联合变化检测的耕地撂荒信息提取与驱动因素分析 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 201-208.
Yang T, Guo X D, Yue D P, et al. Information extraction and driving factor assessment of farmland abandonment based on joint change detection [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 201-208.
- [24] 李升发, 李秀彬. 耕地撂荒研究进展与展望 [J]. 地理学报, 2016, 71(3): 370-389.
Li S F, Li X B. Research progress and prospect of farmland abandonment [J]. Acta Geographical Sciences, 2016, 71(3): 370-389.
- [25] 胡 敏, 王成超. 劳动力非农转移对农户耕地撂荒的影响 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2013, 8(2): 56-63.
Hu M, Wang C C. Impacts of rural labor's non-agricultural transfer on cropland abandonment [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2013, 8(2): 56-63.
- [26] 张晓玲. 粮食价格波动对农民收入的影响探析: 以贵州省为例 [J]. 中国市场, 2018(16): 133-135.
Zhang X L. Analysis on the impact of grain price fluctuation on farmers' income: taking Guizhou Province as an example [J]. China Market Marketing, 2018(16): 133-135.
- [27] 黄艳平. 中华人民共和国成立 70 年我国粮食补贴政策演变研究 [J]. 乡村科技, 2019(19): 12-14.
Huang Y P. Research on the evolution of China's grain subsidy policy in the 70 years since the founding of the people's Republic of China [J]. Rural Science and Technology, 2019(19): 12-14.
- [28] Gale F, Lohmar B, Tuan F. China's new farm subsidies [R]. US: Department of Agriculture, 2005.
- [29] 卢 锋, 杨业伟. 中国农业劳动力占比变动因素估测: 1990—2030 年 [J]. 中国人口科学, 2012(4): 13-24, 111.
Lu F, Yang Y W. Measurement of factors behind the decline of the agricultural labor share in total labor force of China (1990—2030) [J]. Chinese Journal of Population Science, 2012(4): 13-24, 111.
- [30] 卢 锋. 中国农民工工资走势: 1979—2010 [J]. 中国社会科学, 2012(7): 47-67.
Lu F. Wage trends among Chinese migrant workers: 1979—2010 [J]. Social Sciences in China, 2012(7): 47-67.
- [31] 陕西省人民政府. 陕西省人民政府关于印发省粮食直补实施方案的通知 [EB/OL]. (2004-04-03) [2021-10-11]. http://www.shaanxi.gov.cn/zfxxgk/zfgb/2004/d9q_4325/200806/t20080626_1640782.html.
The People's Government of Shaanxi Province. Circular of the People's Government of Shaanxi Province on printing the provincial implementation plan of direct grain subsidy [EB/OL]. (2004-04-03) [2021-10-11]. http://www.shaanxi.gov.cn/zfxxgk/zfgb/2004/d9q_4325/200806/t20080626_1640782.html.
- [32] 徐 莉. 城市化进程中如何解决农地抛荒问题: 以四川省为例 [J]. 农村经济, 2010(3): 21-24.
Xu L. How to solve the problem of farmland abandonment in the process of urbanization: taking Sichuan Province as an example [J]. Rural Economy, 2010(3): 21-24.
- [33] 李琳琳, 曹林奎. 发达国家农业生态补贴政策及其对中国的启示 [J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2019, 37(4): 51-57.
Li L L, Cao L K. Analysis of agricultural ecological subsidy policies in developed countries and/or regions and their implications for China [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science), 2019, 37(4): 51-57.

(上接第 105 页)

- [31] 韦学敏. 生物肥料和金属纳米肥料对丹参根际微生物及药材品质的影响 [D]. 北京: 北京协和医学院, 2020.
Wei X M. Impacts of biofertilizers and metal nanofertilizers on the rhizosphere microorganisms and herbal quality of *Salvia miltiorrhiza* [D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2020.
- [32] Ghasemi V M, Moghaddam S S, Rahimi A, et al. Winter cultivation and nano fertilizers improve yield components and antioxidant traits of dragon's head (*Lallemantia iberica* (M. B.) Fischer & Meyer) [J/OL]. Plants, 2020, 9(2): 252. (2019-12-27). <https://doi.org/co.3390/plants9020252>.