

优化施肥效应模型对佛手产量和品质的影响

张建海^{1,2}, 王向平³, 冯彬彬^{1,2*}, 潘声旺⁴

1. 重庆三峡医药高等专科学校, 重庆 404120; 2. 三峡库区道地药材开发利用重庆市重点实验室, 重庆 404120; 3. 河南省洛阳市洛龙区农林技术推广站, 河南洛阳 471023; 4. 成都大学, 四川成都 610106

摘要: 本研究以适宜在万州种植的佛手为研究对象, 采用“3414”不完全区组正交设计的 N、P、K 三因子施肥试验, 选取最优施肥效应模型进行验证, 并以佛手的单果干重和橙皮苷含量为指标进行统计分析。结果表明: N、P、K 肥对佛手单果干重和佛手中橙皮苷含量有影响, 在不同施肥处理中 N₂P₂K₂ (N 为 40 g/株、P 为 40 g/株、K 为 45 g/株) 的处理效果最佳, 不施或者少施肥均不同程度导致万州佛手的品质下降; 单因子效应分析表明, 随着氮、磷和钾施肥量的提高, 佛手单果干重和橙皮苷含量呈先升后降的趋势; 双因素交互效应分析表明, 当 N、P、K 肥任一因素处于 2 水平时, 随着另外 2 个因素施肥量的增加, 佛手单果干重和橙皮苷含量均表现为先增加后减少的趋势, 说明任意 2 个因素在一定范围内存在着相互作用, N、P、K 三因子中两因子存在着交互效应, 对万州种植佛手产量和橙皮苷的含量有一定影响; 施肥模型优化结果表明, 万州佛手栽培 N、P、K 肥的最佳施用量分别为 38.78~51.25、35.67~42.35、48.17~60.37 g/株。在最优施肥效应模型中间值条件下验证实验, 结果显示佛手单果干重产量较“3414”组的最高组高出 8.14%, 橙皮苷含量较“3414”的最高组高出 1.94%。说明最优配方施肥模型合理, 这对佛手的大田栽培具有一定的实践指导作用。

关键词: 佛手; 施肥效应模型; “3414”设计方案; 产量; 品质

中图分类号: R282.2 文献标识码: A

Optimum Effect Model of Fertilizer Impact on the Yield and Quality of *Citrus medica* ‘Fingered’

ZHANG Jianhai^{1,2}, WANG Xiangping³, FENG Binbin^{1,2*}, PAN Shengwang⁴

1. Chongqing Three Gorges Medical College, Chongqing 404120, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Development and Utilization of Genuine Medicinal Materials in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 404120, China; 3. Agriculture and Forestry Technology Promotion Station, Luolong District, Luoyang City, Luoyang, Henan 471023, China; 4. Chengdu University, Chengdu, Sichuan 610106, China

Abstract: In this paper, a 3-factor fertilization experiment with N, P and K in an incomplete orthogonal design of “3414” was conducted to validate the optimal fertilization effect model, and the dry weight of single fruit and hesperidin content of *Citrus medica* ‘Fingered’ (CM) were used as the indicators for statistical analysis. The results showed that nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers had effects on the dry weight of single fruit and hesperidin content in CM and N₂P₂K₂ (40g/plant for N, 40g/plant for P and 45g/plant for K) had the best effect among the different fertilization treatments, and no or less fertilization led to the decrease of quality of CM in Wanzhou to different degrees. The two-factor interaction analysis showed that when any of the N, P and K fertilizers were at the level of 2, with the increase of the other two factors, the single fruit dry weight and hesperidin content of CM showed a trend of increasing and then decreasing, indicating that any two factors interacted with each other within a certain range, and two of the N, P and K factors had an interaction effect. The optimization results of the fertilization model indicated that the suitable fertiliza-

收稿日期 2022-03-09; 修回日期 2022-05-27

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 31300439); 重庆市卫健委中医药科技项目 (No. ZY201802120); 重庆市万州区科技计划项目 (No. wzstc-022017042)。

作者简介 张建海 (1968—), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 药用植物栽培。*通信作者 (Corresponding author): 冯彬彬 (FENG Binbin), E-mail: fengbin1024@sina.com。

tion rates of N, P and K for cultivation of CM in Wanzhou ranged from 38.78 g to 51.25 g per plant, 35.67 g to 42.35 g per plant and 48.17 g to 60.37 g per plant, respectively. The results of the validation experiments under the intermediate conditions of the optimal fertilizer application effect model showed that the dry weight yield of single fruit of CM was 8.14% higher than that of the highest group of “3414”, and the hesperidin content was 1.94% higher than that of the highest group of “3414”. This indicates that the optimal formulation fertilization model is reasonable which has some practical guidance for the field cultivation of *C. Sarcodactylis* Fructus.

Keywords: *Citrus medica* ‘Fingered’; fertilizer effect model; “3414” mis-classification orthogonal design; yield; quality

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.01.017

佛手为我国传统的药食两用药材,是我国常见的热带、亚热带植物,同时也可作为园林植物,具有疏肝理气,和胃止痛,燥湿化痰,一般用于肝胃气滞,胸胁胀痛,胃脘痞满,食少呕吐,咳嗽痰多^[1-2]。佛手来源于芸香科植物佛手(*Citrus medica* ‘Fingered’)的干燥果实^[1-2]。佛手中主要的化学成分为多糖类、黄酮类、挥发油、香豆素、无机元素、氨基酸及维生素等^[3-5]。目前对佛手的研究多局限在提取分离、化学成分、药效物质等方面,而施肥对佛手产量和品质的研究尚无相关报道^[3-5]。本研究在万州长坪乡中兴村试验基地进行,利用 N、P、K 三因子进行不完全区组正交设计田间试验,采集同一时期的田间试验材料进行品质测试分析,并根据试验结果对万州佛手栽培中的 N、P、K 肥配方与单果产量和品质变化进行研究,初步建立二者之间的数据模型,根据最优模型进行验证,为探讨万州栽培佛手的施肥规律及其高产优质栽培提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 材料与地点 供试材料为栽培 3 年的佛手植株,种植面积约为 $6.67 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。试验地点在万州区长坪乡中兴村。长坪乡属亚热带季风气候;地处丘陵,地势东高西低;种植区域海拔为 350 m;年平均气温为 23.9°C ,年平均生长期为 220 d,年平均无霜期为 300 d;年平均日照时数为 1275 h;年平均降水量为 1100 mm。土壤为红壤,有机质为 55.32 g/kg,全氮为 3.17 g/kg,硝态氮为 35.84 mg/kg,全磷为 0.54 g/kg,有效磷为 9.54 mg/kg,全钾为 26.35 g/kg,有效钾为 99.65 mg/kg。佛手主要物候期如下:佛手从春季芽萌动到秋梢生长停止,冬季部分老叶脱落,生长期结束,最后进入休眠或半休眠状态。生长期与休眠期的长短因各地气温条件不同而有差异。

本地产区一年四季开花、三季结果,生长期为 2—11 月,主要花期以 4 月为主,果期以 7—8 月为主,停止生长的时间只有 3 个月左右。

1.1.2 主要仪器与试剂 主要仪器:岛津 LC-30A 高效液相色谱仪、EL-204 电子天平、J-HH-6A 精密数显恒温水浴锅、惠源 HY-5000 反渗透全膜法设备—纯水生产设备。主要试剂:乙腈和甲醇色谱纯试剂购自霍尼韦尔贸易(上海)有限公司;橙皮苷标准品购自中国药品生物制品检定所,乙醇和甲醇等分析纯试剂购自川东化工(集团)有限公司,氮肥(尿素)和钾肥(氯化钾)购自重庆江北化肥有限公司,磷肥(过磷酸钙)购自重庆江北磷肥厂。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 根据农业农村部下发的“测土配方施肥技术规范(试行)”中推荐的“3414”不完全区组正交设计的 N、P、K 三因子施肥试验方案^[6-8],即:设 N、P、K 3 个因素,每个因素 4 个施肥水平,共 14 个处理的肥料试验设计方案(表 1),试验设 3 次重复。栽种株行距为 $200 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$,每个处理小区面积为 $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ (共 9 株)。肥料用量按照表 1 中的试验设计方案,采用单株施肥量,不施有机肥,氮肥(尿素)50%作基肥,50%作追肥;磷肥(过磷酸钙)全部作基肥一次性施用;钾肥(氯化钾)60%作基肥,40%作追肥^[6-8]。基肥在当年 12 月施入,追肥在第二年 4 月施入^[6-8]。

采收期选择同一季节开花、同一季节成熟的果实,采收后,称重测得单果的平均鲜重,然后切片烘干,测果实的平均干重;按照《中国药典》2020 版一部,高效液相色谱法(通则 0512)测定佛手中橙皮苷的含量。具体方法如下:以十八烷基硅烷键合硅胶为填充剂;以甲醇—水—冰醋酸(33:63:2)为流动相;检测波长为 284 nm ^[2]。理论板数按橙皮苷峰计算应不低于 5000;取橙皮

苷对照品适量，精密称定，加甲醇制成浓度为 15 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的溶液，即得对照品溶液；取本品粉末（过五号筛）约 0.5 g，精密称定，置具塞锥形瓶中，精密加入甲醇 25 mL，称定重量，加热回流 1 h，放冷，再称定重量，用甲醇补足减失的重量，摇匀，过滤，取续滤液，即得供试品溶液^[2]；分别精密吸取对照品溶液与供试品溶液各 10 μL ，注入液相色谱仪测定^[2]。

1.2.2 验证试验 根据最优施肥效应模型，取 N、P、K 施肥区间的中间值作为施肥量进行验证试验，主要进行干果单重和橙皮苷含量的检测。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 软件和 SPSS 19.0 软件等进行一元二次、二元二次、三元二次回归统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同配方佛手单果干重分析

由表 1 可知，在不施肥情况下佛手单果干重最低，不同施肥水平均能不同程度提高佛手单果干重，除了第 8、第 13、第 14 水平因子处理差异不显著外，其他处理项均有显著差异 ($P < 0.05$)，其中 $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2$ 处理单果干重最高，为 $(202.45 \pm 0.058)\text{g}$ ，与 $\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$ 相比增产 34.78%。不同施氮水平 (N_1 、 N_2 、 N_3) 佛手平均单果干重分别为

186.32、190.22、194.21 g，与不施氮水平相比分别增产 24.04%、26.63%和 29.29%；不同施磷水平 (P_1 、 P_2 、 P_3) 佛手单果平均干重分别为 185.83、190.50、195.47 g，与不施磷肥处理相比分别增产 23.71%、26.82%和 30.13%；不同施钾水平 (K_1 、 K_2 、 K_3) 佛手单果干重分别为 181.87、192.13、198.24 g，与不施钾肥处理相比分别增产 21.08%、27.91%和 31.98%。由于佛手单果干重及单株结果数量是佛手产量的主要因素，结果表明 N、P、K 肥均是佛手产量提高的决定因子。

2.2 不同配方佛手橙皮苷含量分析

由表 1 可知，在不施肥情况下，佛手中橙皮苷含量最低，为 0.0306%，施用不同水平的 N、P、K 肥料后，均能不同程度地提高佛手中橙皮苷的含量，但含量差异较大，除第 8、第 9 水平因子处理差异不显著外，其他处理均有显著差异 ($P < 0.05$)。N、P、K 肥最佳配比为 $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2$ 时，佛手中橙皮苷的含量最高为 0.0412%，比不用肥处理提高 34.64%。不同施氮水平 (N_1 、 N_2 、 N_3) 佛手中橙皮苷含量为 0.0366%、0.0362%、0.0392%，与不施氮水平相比分别增加 19.61%、18.30%、20.06%；不同施磷水平 (P_1 、 P_2 、 P_3) 佛手中橙皮苷含量为 0.0363%、0.0366%、0.0364%，与不施磷肥处理相比分别增加 18.63%、19.61%、18.95%；不同施钾水平 (K_1 、 K_2 、 K_3)

表 1 不同配方佛手产量和质量

Tab. 1 Yield and quality of *C. medica* 'Fingered' of different treatments

编号 No.	因素水平 Factor level	N/g	P/g	K/g	单果干重 Dry weight of single fruit/g	橙皮苷含量 Hesperidin content/%
1	$\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$	0	0	0	150.21 \pm 0.043	0.0306 \pm 0.024
2	$\text{N}_0\text{P}_2\text{K}_2$	0	40	45	187.25 \pm 0.012*	0.0344 \pm 0.029*
3	$\text{N}_1\text{P}_2\text{K}_2$	20	40	45	190.27 \pm 0.008*	0.0387 \pm 0.054*
4	$\text{N}_2\text{P}_0\text{K}_2$	40	0	45	185.21 \pm 0.042*	0.0352 \pm 0.016*
5	$\text{N}_2\text{P}_1\text{K}_2$	40	20	45	192.40 \pm 1.028*	0.0391 \pm 0.098*
6	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2$	40	40	45	202.45 \pm 0.058*	0.0412 \pm 0.027*
7	$\text{N}_2\text{P}_3\text{K}_2$	40	60	45	195.47 \pm 0.029*	0.0364 \pm 0.047*
8	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_0$	40	40	0	181.28 \pm 0.072	0.0324 \pm 0.086
9	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_1$	40	40	22.5	191.34 \pm 0.041*	0.0324 \pm 0.032
10	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_3$	40	40	67.5	198.24 \pm 0.083*	0.0384 \pm 0.025*
11	$\text{N}_3\text{P}_2\text{K}_2$	60	40	45	194.21 \pm 0.019*	0.0392 \pm 0.021*
12	$\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_2$	20	20	45	189.74 \pm 0.087*	0.0352 \pm 0.023*
13	$\text{N}_1\text{P}_2\text{K}_1$	20	40	22.5	178.94 \pm 1.004	0.0358 \pm 0.038*
14	$\text{N}_2\text{P}_1\text{K}_1$	40	20	22.5	175.34 \pm 1.008	0.0346 \pm 0.076*

注：*表示与不施肥处理比较差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: * indicates significant difference from no fertilization treatment ($P < 0.05$).

佛手中橙皮苷含量为 0.0343%、0.0374%、0.0384%，与不施钾肥处理相比分别增加 12.09%、22.22%、25.49%。因此，N、P、K 肥均能明显提高佛手中橙皮苷的含量，不同的 N、P、K 肥水平和 N、P、K 肥水平组合均对提高佛手中橙皮苷的含量有所不同。

2.3 佛手施肥模型的建立与分析

2.3.1 佛手单果干重和橙皮苷含量的三因素效应分析 利用二次回归分析，形成了佛手大田条件下 N、P、K 肥与佛手单果干重和橙皮苷含量的三元二次肥料效应函数模型（表 2）。由表 2 可知，佛手中单果干重与施肥量之间有极显著回归关系，三元二次肥料效应函数模型方程中的常数项与不施肥处理相比数值相近（不施肥为 150.2100，常数项为 149.4183），说明模型拟合效果好，为佛手 N、P、K 肥的合理配比及产量预测具有较好的指导作用。从函数方程中可看出，佛手单果干重

肥料效应函数方程中，N 肥与 P 肥交互效应系数为正值，而 N 肥与 K 肥、P 肥与 K 肥的交互效应系数为负值，说明以单果干重为研究对象，N 肥与 P 肥之间存在正交互效应，而 N 肥与 K 肥、P 肥与 K 肥之间存在负交互作用，则佛手单果干重随施肥量的增加而呈现渐减率缓慢增加的趋势。

佛手中橙皮苷含量与施肥量之间也存在显著回归关系，并且三元二次肥料效应函数模型方程中的常数项与不施肥处理相比数值相近（不施肥为 0.0306%，常数项为 0.0304%），以万州种植佛手中橙皮苷含量为考察对象，拟合效果较好。万州种植佛手橙皮苷含量肥料效应函数方程中，一次项系数中的 N 肥为负值，而 P 肥和 K 肥均为正值、二次项系数为负值。同时 N、P 肥和 K 肥的交互效应系数也有差别，N 肥和 P 肥之间存在负交互效应，而 N 肥和 K 肥与 P 肥和 K 肥之间存在正交互效应。

表 2 三元肥料效应函数及显著性检验
Tab. 2 Ternary fertilizer effect function and significance test

指标 Index	三元肥料效应函数 Three fertilizer effect function	显著性检测 Saliency detection	
		F	R
单果干重	$Y=149.4183+0.0241N+0.3684P+1.1691K-0.0024N^2-0.0025P^2-0.0016K^2+0.0147NP-0.0064NK-0.0133PK$	8.0264*	0.9734
橙皮苷含量	$Y=0.0304-1.3021\times 10^{-3}N+0.0003P+2.0525\times 10^{-5}K-1.1093\times 10^{-6}N^2-3.0184\times 10^{-6}P^2-1.5321\times 10^{-6}K^2-2.0031\times 10^{-6}NP+5.1697\times 10^{-6}NK+1.5963\times 10^{-7}PK$	1.5957	0.8844

注：*表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: * indicates significant difference ($P<0.05$).

2.3.2 佛手单果干重和橙皮苷含量单因素效应分析 以佛手单果干重和橙皮苷含量为研究对象，经单因子效应分析，得到佛手单果干重及橙皮苷含量的一元二次肥料效应函数模型（表 3）和曲线图（图 1）。

从图 1 可看出，N、P 肥曲线图呈现先升后降的趋势，说明 N、P 肥存在最佳施肥量。从佛手

表 3 一元肥料效应函数及显著性检验
Tab. 3 Univariate fertilizer effect function and significance test

指标 Index	一元肥料效应函数 One fertilizer effect function	R 值 R value
单果干重	$Y=157.67+2.1405N-0.0255N^2$	0.9997
	$Y=165.37+1.7797P-0.0213P^2$	0.9990
	$Y=181.28+0.5450K-0.0044K^2$	0.9994
橙皮苷含量	$Y=0.0317+0.0005N-5.625\times 10^{-6}N^2$	0.9991
	$Y=0.0301+0.0006P-8.625\times 10^{-5}P^2$	0.9993
	$Y=0.0324-4.4440\times 10^{-5}K+1.9753\times 10^{-6}K^2$	0.9992

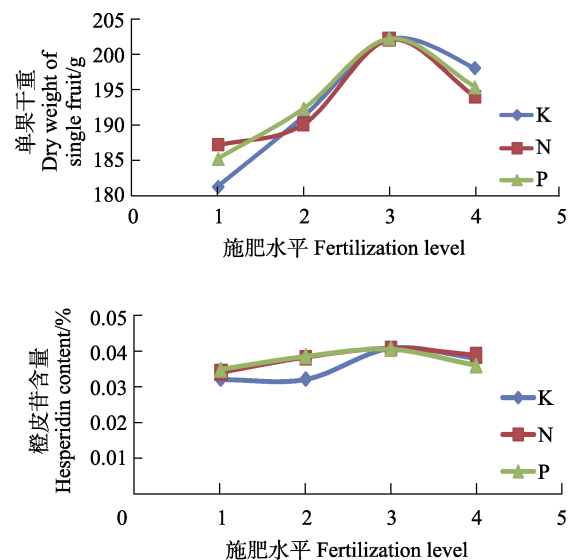


图 1 单因素影响下单果干重和橙皮苷含量变化

Fig. 1 Changes of dry weight and hesperidin content of single fruit under the influence of single factor

单果干重及橙皮苷含量回归方程可看出（表 3），除了 K 肥对佛手中橙皮苷含量为正值外，N、P、K 肥的二次项系数均小于 0，说明抛物线向下基本符合生物学规律，回归模型真实。从佛手单果干重和橙皮苷含量一元二次肥料效应函数模型一次项系数得出，肥料因子对佛手单果干重影响从大到小依次为 $N > P > K$ ，对佛手中橙皮苷含量影响从大到小依次为 $P > N > K$ 。以最大产量为指标，以佛手单果干重和橙皮苷含量一元二次单因素效应方程计算分析，佛手单果干重 N、P、K 肥的最佳施肥量分别为 52.21、41.78、61.93 g/株，佛手橙皮苷 N、P、K 肥的最佳施肥量分别为 44.44、34.88、49.50 g/株。

2.3.3 N、P、K 二因素效应分析 以佛手单果干重和橙皮苷含量为研究对象，得到佛手单果干重和橙皮苷含量的二元二次肥料效应函数模型（表

4）和二因子的曲线图（图 2）。由表 4 和图 2 可知，因素处理并非仅仅表现出肥料因素简单的加和作用，同时还存在肥料因素之间的协同促进作用和拮抗作用。以万州引种佛手单果干重为指标，N 肥因素中的任意一个处于 2 水平时，随着另外 2 个因素施肥量的增加，佛手单果干重均表现为先增加后减少的趋势，说明任意 2 个因素在一定范围内存在着相互作用；以佛手中橙皮苷含量为指标时，当 N、P、K 肥处于 2 水平时，佛手中橙皮苷含量同样也表现出先增加后减少的趋势，所以在一定范围内也表现出相互作用。

2.3.4 模型的优化方案 本研究对佛手单果干重和橙皮苷含量经验模型进行优化，按照试验条件的一般规律，产量越高，有效成分的含量越高，从佛手单果干重和橙皮苷含量模型上常用求最大

表 4 二元肥料效应函数及显著性检验

Tab. 4 Binary fertilizer effect function and significance test

指标 Index	二元肥料效应函数 Two fertilizer effect function	显著性检测 Saliency detection	
		F	R
佛手单果干重	$Y=165.5815+1.1880N+0.3802P-0.0181N^2-0.0089P^2+0.0089NP$	1.5772	0.9421
	$Y=124.9865+2.1623N+1.2071K-0.01938N^2-0.0070K^2+0.0114NK$	6.2839**	0.9845
	$Y=109.7165+2.3746P+1.7164K-0.0151P^2-0.0070K^2-0.0241PK$	7.9389**	0.9876
橙皮苷含量	$Y=0.01679+0.0006N+0.0006P-3.7125 \times 10^{-6}N^2-5.4375 \times 10^{-6}P^2-7.325 \times 10^{-6}NP$	4.6408	0.9791
	$Y=0.03324-0.0001N+0.0002K-2.0250 \times 10^{-6}N^2-1.3827 \times 10^{-6}K^2-4.8812 \times 10^{-7}NK$	0.4821	0.8407
	$Y=0.02524+0.0002P+0.0004K-9.7500 \times 10^{-7}P^2-1.3827 \times 10^{-6}K^2+4.0437 \times 10^{-6}PK$	0.4685	0.8371

注：**表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

Note: ** indicates extremely significant difference ($P < 0.01$).

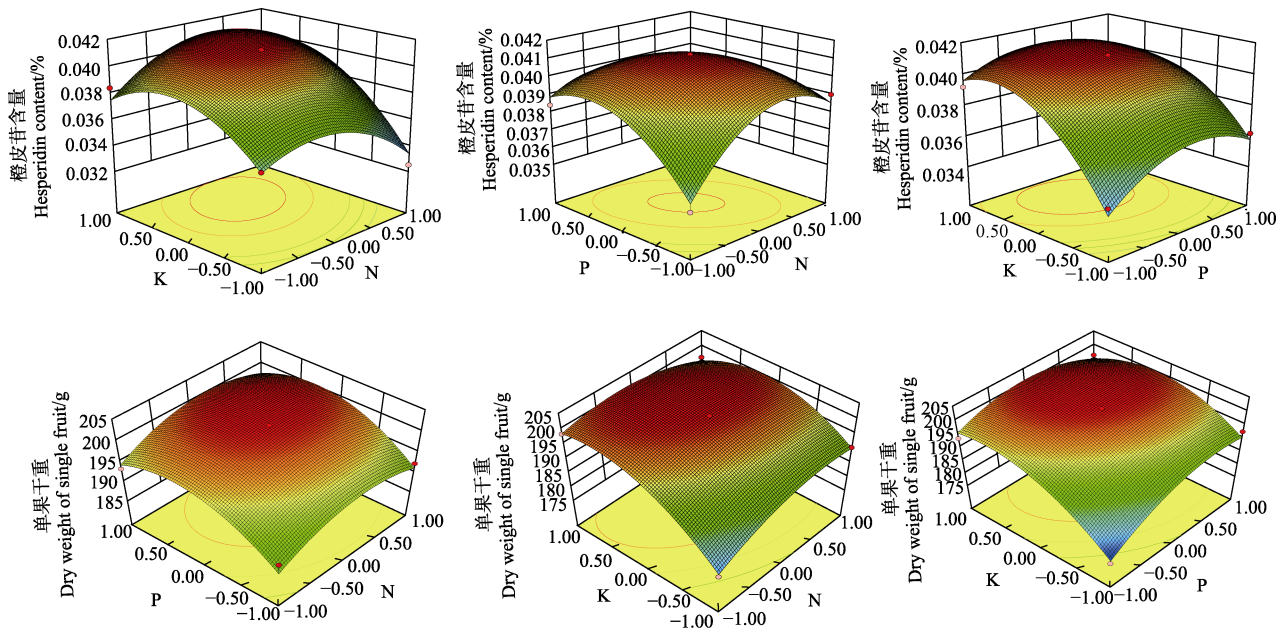


图 2 肥料对佛手单果干重和橙皮苷含量两因素交互效应三维图

Fig. 2 Three dimensional interaction effect of fertilizer on dry weight and hesperidin content of bergamot fruit

值的方法来优化模型，然而，从佛手单果干重和橙皮苷含量模型上看，佛手单果干重和橙皮苷含量最大值仅仅是理论值，但在生产实际中出现的概率较低，因此一般不采用求佛手单果干重和橙皮苷含量最大值的方法来优化模型，而是利用频次分析方法进行模型的优化。按照佛手单果干重和橙皮苷含量“3414”试验，共有 $4^3=64$ 方案。其中，根据佛手单果干重和橙皮苷含量肥料效应模型分析，采用数学求导法计算出万州种植佛手最佳施肥量，对产量和有效成分含量进行频次分析，结果显示佛手单果干重在 181.25 g 以上的方

案有 36 个，佛手中橙皮苷的含量在 0.0351% 以上有 32 个，综合佛手单果干重和佛手中橙皮苷的含量的结果，对佛手单果干重和橙皮苷含量进行模拟优化寻优，选择有效方案 28 个，肥料试验编码取值分布情况见表 5。

从表 5 可看出，佛手种植大田试验 N、P、K 肥的最佳施肥量分别为 38.78~51.25、35.67~42.35、48.17~60.37 g/株。可见，N、P、K 肥的施用比例并非固定不变，而应根据土壤的基础肥力适当调整，才能达到佛手单果干重和佛手中橙皮苷含量的最大化。

表 5 产量与质量的频率分析及优化方案

Tab. 5 Frequency analysis and optimization scheme of yield and quality

因数水平 Factor level	N		P		K	
	次数 Number of times	频率 Frequency/%	次数 Number of times	频率 Frequency/%	次数 Number of times	频率 Frequency/%
0	4	14.29	1	3.57	3	10.71
1	7	25.00	8	28.57	9	32.14
2	8	28.57	11	39.29	11	39.29
3	9	32.14	8	28.57	5	17.86
合计	28	100.00	28	100.00	24	100.00
标准误	0.34		1.28		1.48	
加权均数	46.51		39.01		55.25	
95%置信区间	38.78	51.25	35.67	42.35	48.12	60.37

2.3.5 最优方案的验证试验结果 根据最优施肥效应模型，取 $N_2P_2K_2$ 施肥区间的中间值作为主要最优值进行验证，验证结果见图 3 和图 4。由图 3 和图 4 可看出，在最优施肥模型条件下，栽培佛手的产量和橙皮苷含量均比“3414”组高。单果干重产量较“3414”组的最高产量高出 8.14%，橙皮苷含量较“3414”最高组高出 1.94%，说明最优配方施肥模型合理。

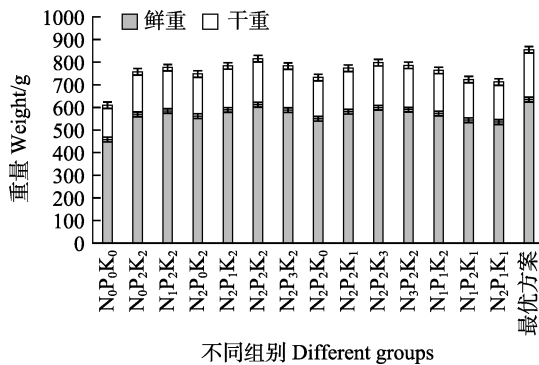


图 3 最优施肥模型单果干重比较

Fig. 3 Comparison of dry weight of single fruit in optimal fertilization model

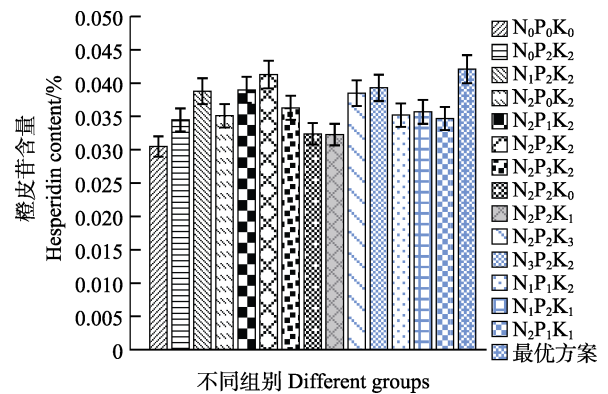


图 4 最优施肥模型橙皮苷含量比较

Fig. 4 Comparison of hesperidin content in optimal fertilization models

3 讨论

研究表明，佛手 N、P、K 配合施肥能够明显增加万州佛手单果干重和佛手中橙皮苷含量，可在实际操作过程中，由于种植药农观念上的差异，造成肥料施用过程中有所偏好，造成产量和品质的下降，制约了万州佛手产业的发展。

已有研究表明, 氮肥能促使树木繁茂, 增加叶绿素, 补充植物成长的营养; 磷肥能促使植物茎枝坚韧、促花芽形成和开花、果实早熟, 提高植物的抗寒抗旱能力^[6-8]; 而钾肥能促使植物的茎干强健, 提高植物抗病、抗虫、抗旱、抗倒伏的能力, 使其根系发达, 提高果实的品质。佛手单果干重和器官的分化、发育及光合产物的分配和积累密切相关, 了解其形成规律与 N、P、K 之间的关系是进行合理肥效调控, 实现稳产、高产的基础^[6-8]。本研究结果表明, N、P、K 肥对万州种植佛手单果干重和橙皮苷含量有影响, 在万州种植佛手生长和发育过程中 N 肥是主要限制因子, 其含量决定着营养物质的合成, 同时 P 肥和 K 肥也能协助万州种植佛手光合作用产物到营养器官的运输, 使万州种植佛手产量增加, 品质提高, 与 N、P、K 肥料的作用相符。验证实验表明, 佛手单果干重产量较“3414”组的最高组高出 8.14%, 橙皮苷含量较“3414”组的最高组高出 1.94%。说明最优配方施肥模型合理, 这对佛手的大田栽培具有一定的实践指导作用。

药用植物的品质形成与药用植物中有效成分的含量高低有关。天然黄酮类化合物多以苷类形式存在, 橙皮苷是黄酮类化合物, 而黄酮苷的形成多以可溶性糖为基础^[6-8]。佛手中水溶性浸出物中含有较多的可溶性糖类, 这说明可溶性糖类与佛手中总黄酮的合成可能直接有关^[6-8]。土壤养分缺乏或不平衡可能影响佛手中可溶性糖的合成, 从而降低佛手中橙皮苷的含量, 平衡施肥促进佛手中可溶性糖的合成, 从而提高了佛手中橙皮苷的含量^[6-8]。本研究结果表明, 不施 N、P、K 肥能显著降低万州种植佛手中橙皮苷的含量, N、P、K 三因子中两因子存在着交互效应, 对佛手中橙皮苷的含量有一定的影响。

参考文献

- [1] 张思荻, 杨海燕, 曾俊, 李敏. 佛手的研究进展[J]. 中华中医药杂志, 2018, 33(8): 3510-3514.
ZHANG S D, YANG H Y, ZENG J, LI M. Research progress of bergamot[J]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine, 2018, 33(8): 3510-3514. (in Chinese)
- [2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 185.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the people's republic of china: volume I[M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020: 185. (in Chinese)
- [3] 赵秀玲. 佛手生理活性成分的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(21): 393-399.
ZHAO X L. Research progress of physiologically active compounds of bergamot[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(21): 393-399. (in Chinese)
- [4] 周龙艳, 田奥飞, 胡旭光. 佛手化学成分及调节糖脂代谢紊乱药理作用研究进展[J]. 广东化工, 2017, 44(7): 146-148.
ZHOU L Y, TIAN A F, HU X G. Pharmacological study on glucose and lipid metabolism and regulation of the chemical composition of bergamot[J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(7): 146-148. (in Chinese)
- [5] 陈汉民, 许剑华, 张淑芝, 汪华灯, 贺豪杰. 佛手精油研究进展[J]. 农产品加工, 2017(7): 69-70, 74.
CHEN H M, XU J H, ZHANG S Z, WANG H D, HE H J. Research progress of bergamot essential oil[J]. Farm Products Processing, 2017(7): 69-70, 74. (in Chinese)
- [6] 张建设, 冯彬彬, 徐晓玉. N、P、K 配施效应模型及对野菊花产量和质量的影响[J]. 中草药, 2013, 44(11): 1495-1500.
ZHANG J H, FENG B B, XU X Y. Effect of fertilization combinations of nitrogen, phosphorus, and potassium on yield and quality of flowers in *Chrysanthemum indicum*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2013, 44(11): 1495-1500. (in Chinese)
- [7] 张建设, 冯彬彬, 徐晓玉, 姚永红. 优化施肥效应模型对山银花产量和品质的影响[J]. 西南农业学报, 2013, 26(4): 1546-1552.
ZHANG J H, FENG B B, XU X Y, YAO Y H. Optimum effect model of fertilizer impact on yield and quality of *Lonicerae Flos*[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(4): 1546-1552. (in Chinese)
- [8] 张建设, 冯彬彬. 影响巫山淫羊藿品质的施肥指标体系构建[J]. 中草药, 2015, 46(12): 1819-1824.
ZHANG J H, FENG B B. Establishment of fertilization recommendation index of *Epimedium wushanensis* Herba[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2015, 46(12): 1819-1824. (in Chinese)