

适宜氮磷钾用量和配比提高油用牡丹产量和出油量

魏双雨¹, 李敏², 吉文丽^{1*}, 郭堤³, 张延龙¹

(1 西北农林科技大学风景园林艺术学院, 陕西杨凌 712100; 2 信阳师范学院, 河南信阳 464000;
3 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】油用牡丹是我国新兴的木本油料作物, 但施肥不平衡严重制约油用牡丹的产量和品质。研究氮、磷、钾不同施肥量和配施比例对油用牡丹产量和出油量的影响, 探明油用牡丹高产、优质的适宜氮、磷、钾施用量和配比, 对提高油用牡丹的生产效率具有重要的现实意义。【方法】以五年生油用牡丹品种‘凤丹’为试验材料, 采用“3414”不完全正交回归设计进行了大田试验。试验地常用施肥量为尿素 750 kg/hm²、重过磷酸钙 270 kg/hm²、硫酸钾 600 kg/hm²。设氮、磷、钾 4 个施肥水平为 0 (不施肥)、1 (常用量的一半)、2 (常用施肥量)、3 (常用量的 1.5 倍)。调查了‘凤丹’产量, 分析了籽粒出油量。对‘凤丹’产量进行肥效模型拟合, 得出最优经济效益的氮、磷、钾肥推荐施肥量。【结果】1) 施用氮、磷、钾肥可改善‘凤丹’单株果荚数、单个果荚重量、果荚直径、百粒重等农艺性状, 进而提高‘凤丹’产量; 氮、磷、钾肥的施用使‘凤丹’分别增产 283.7、276.8 和 150.6 kg/hm², 增产率分别为 55.5%、50.3% 和 23.5%, 增加纯收入分别为 7310.4、7494.3 和 2118.9 元/hm², 农学效率分别为 0.96、2.76 和 0.59 kg/kg。2) 施肥增产及对产量的贡献率均表现为 N > P₂O₅ > K₂O, 肥料农学效率和增收效果则表现为 P₂O₅ > N > K₂O, 但过量施用氮、磷、钾肥会使产量有所下降, 且经济效益和肥料利用效率显著降低, 氮、磷、钾肥增产和增收效果以及肥料贡献率均以推荐施肥水平处理的最高, 农学效率均以 1 水平最高。3) 施用氮、磷、钾肥通过影响出仁率和种仁含油率来影响产油量, 最高出仁率可达 65.0%, 最高种仁含油率可达 32.9%, 较对照组分别增加 13.0%、12.6%, 氮、磷、钾均衡施肥产油量可高达 193.3 kg/hm², 三因素对产油量影响大小顺序为 N > P₂O₅ > K₂O。4) 氮、磷、钾肥之间存在明显的交互作用, 配合施用能提高肥效和促进‘凤丹’的产量和种仁含油率, 任一肥料的过量施用均会导致产量降低。5) 使用不同拟合方法建立肥料与‘凤丹’产量效应函数方程, 通过对比分析二元二次模型为最适模型, 基于该最适肥效模型得出‘凤丹’氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)的最优推荐施肥量为 343.2、109.7、248.4 kg/hm², 适宜的氮、磷、钾施肥比例为 1 : 0.32 : 0.72。【结论】合理的肥料配比和用量是‘凤丹’增产的保障。施用适量的氮、磷、钾肥可提高‘凤丹’农艺性状、产量、出仁率、种仁含油率等指标, 进而提高产油量, 氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)的最优推荐施肥量为 343.2、109.7、248.4 kg/hm², 适宜的氮、磷、钾施肥比例为 1 : 0.32 : 0.72。

关键词: 油用牡丹; 氮、磷、钾肥; 肥料效应; 出油量; 最优施肥量

Appropriate N, P and K fertilizer rates and combination ratios to increase seed yield and oil production of oil tree peony

WEI Shuang-yu¹, LI Min², JI Wen-li^{1*}, GUO Di³, ZHANG Yan-long¹

(1 College of Landscape Architecture and Arts, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2 Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China; 3 College of Resource and
Environmental Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: 【Objectives】 Oil tree peony is an emerging woody oil crop in China, but unbalanced fertilization has limited the seed yield and quality of oil tree peony severely. It is important to investigate the effect of fertilization on the seed yield and oil production of oil tree peony and to seek the optimum nitrogen (N), phosphorus (P₂O₅) and potassium (K₂O) application rates for its high seed yield and oil production. 【Methods】 In this study, five-year-

收稿日期: 2018-04-03 接受日期: 2018-06-20

基金项目: 林业公益性行业科研重大专项(201404701); 杨凌示范区科技计划项目(2017NY-16)资助。

联系方式: 魏双雨 E-mail: weisy@nwfufu.edu.cn; * 通信作者 吉文丽 E-mail: jiwenli@nwsuaf.edu.cn

old *Paeonia ostii* 'Fengdan' was used in a field experiment. The amount and proportion of N, P₂O₅ and K₂O fertilizers were designed by "3414" incomplete orthogonal regression. The conventional fertilizer rates were urea 750 kg/hm², triple superphosphate 270 kg/hm² and potassium sulfate 600 kg/hm², and the four levels of N, P₂O₅ and K₂O in the treatments included 0 (no fertilization), 1(half conventional), 2 (conventional) and 3 (1.5 folds of conventional). The seed yield and oil content were measured, and empirical models were established to achieve the optimum rate for fertilizer application. **【 Results 】** 1) The application of N, P₂O₅ and K₂O fertilizers improved the agronomic traits including the pods per plant, single fruit weight, fruit diameter and 100-seed weight, and the overall seed yield. Respective application of N, P₂O₅ and K₂O fertilizer increased seed yield by 283.7, 276.8 and 150.6 kg/hm², or 55.5%, 50.3% and 23.5%. The corresponding increase of net income was 7310.4, 7494.3 and 2118.9 yuan/hm², respectively, and the agronomic efficiencies were 0.96, 2.76 and 0.59 kg/kg, respectively. 2) The effect of fertilizer on yield was N > P₂O₅ > K₂O, while fertilizer agronomic efficiency and its improvement followed the order: P₂O₅ > N > K₂O. Over-application of N, P₂O₅ and K₂O fertilizer resulted in lower yield and significantly reduced economic efficiency and fertilizer utilization efficiency. The recommended amount of fertilizer treatment was found to be optimal. The maximum agronomic efficiency was observed at "1". 3) Application of N, P₂O₅ and K₂O affected oil yield by affecting the seed number and seed oil content. The high seed number was up to 65.0% and the seed oil content was up to 32.9%, which were respectively increased by 13.0% and 12.6% compared to the control group. The oil yield was 193.3 kg/hm² under the balanced fertilization. The effects of the three fertilizers on oil production was in the order of N > P₂O₅ > K₂O. 4) There were obvious interactions among the N, P₂O₅ and K₂O fertilizers. Combined application increased fertilizer efficiency, seed yield and the oil content of seed. Over application of any of the three fertilizers would reduce seed yield. 5) Among different models to fit yield versus the amounts of N, P₂O₅ and K₂O fertilization, we found the binary secondary fertilizer efficiency model was the optimal one. According to the model, the optimum fertilizer amounts of N, P₂O₅ and K₂O were 343.2, 109.7, and 248.4 kg/hm², respectively. The optimal ratio of N, P and K fertilization was 1 : 0.32 : 0.72. **【 Conclusions 】** Optimal fertilizer ratio and amount are required to increase the production of 'Fengdan' efficiently. Appropriate application of N, P₂O₅ and K₂O fertilizers can significantly improve the agronomic traits, yield, seed number, and seed oil content. The optimal amounts of N, P₂O₅ and K₂O application are 343.2, 109.7, and 248.4 kg/hm² and the optimal ratio of N, P and K fertilization was 1 : 0.32 : 0.72.

Key words: oil tree peony; N, P, K fertilizers; fertilizer effects; oil production; optimum fertilizer rate

油用牡丹为芍药科 (Paeoniaceae) 芍药属 (*Paeonia*) 牡丹组 (Section *Mouton*) 植物中结实能力强、出油率高 (≥ 22%) 的种的统称^[1], 是我国特有的木本油料资源, 适生分布广, 营养价值优良, 综合利用产业链长, 附加值高, 具有很高的经济效益、生态效益和社会效益^[2-3]。油用牡丹中 '凤丹' (*Paeonia ostii* 'Fengdan') 适应性强, 出油量高, 耐干旱、耐瘠薄, 管理粗放, 是目前种植推广的主要品种^[4]。油用牡丹籽油是国家卫生部批准的新资源食用油^[5], 含 17 种脂肪酸成分, 不饱和脂肪酸含量约为 92.42%, 其中 α -亚麻酸高达 42.82%, 多项指标均优于 "液体黄金" 橄榄油, 被认为是目前发现的最利于人体健康、最有营养的油脂^[6-7]。目前, 我国食用油对外依存度已超过 60%, 大力种植油用牡丹可有效缓解我

国食用油严重依赖进口的局面^[3]。随着国内外市场对牡丹籽油的需求量大幅增加, 提高单产、增加总产已成为我国油用牡丹科研和生产发展的首要任务^[8]。

目前, 我国油用牡丹的栽培多参考药用牡丹, 常因肥料的施用水平、比例、方法不当导致油用牡丹产量较低、投入产出比不协调。因此, 合理平衡施肥, 提高土壤供肥能力, 已成为提高油用牡丹产量的重要措施。前人围绕施肥对油用牡丹生长发育及产量的影响进行了一些研究, 但这些研究都只针对氮肥进行^[9-10], 关于氮、磷、钾配施对油用牡丹产量及其经济效益影响的研究还未见报道。农业部制定的 "3414" 测土配方施肥是一种处理少、效果明显的肥料效应试验方法, 也是确定作物最佳施肥量、优化施肥配比的主要方法, 应用较广泛^[11], 已在

花生^[12]、芝麻^[13]，大豆^[14]等油料作物的田间试验中取得了显著的效果，而在油用牡丹大田试验中未见报道。本研究通过“3414”试验设计，研究油用牡丹‘凤丹’的氮、磷、钾肥料效应，旨在建立氮、磷、钾肥料效应模型，以确定油用牡丹最佳施肥量，优化施肥配比，达到提高肥料利用率、降低生产成本、增加经济效益的目的，为指导油用牡丹的高效生产提供科学的理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地概况

试验地点位于陕西省杨凌区五泉镇西北农林科技大学油用牡丹试验基地。该地区属大陆性季风气候区，年降水量 635.1 mm，年均气温 12.9℃，年均日照时数 2163.8 h，全年 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的积温为 4184℃。供试田块为关中黄壤土，土壤 pH 为 8.5、有机质含量 24.81 g/kg、全氮含量 0.85 g/kg、有效磷含量 15.32 mg/kg、速效钾含量 165.01 mg/kg。

1.2 试验材料

供试材料选用五年生油用牡丹品种‘凤丹’。供试肥料氮肥用尿素(含 N 46.0%)，磷肥用重过磷酸钙(含 P_2O_5 46.0%)，钾肥为硫酸钾(含 K_2O 54.0%)。

1.3 试验设计

试验采用农业部推荐的“3414”最优回归设计肥效试验方案^[15]，即设置氮、磷、钾 3 个因素；4 个施肥水平为 0(不施肥)、1(2 水平的 0.5 倍)、2(试验地常用施肥量)、3(2 水平的 1.5 倍)。14 个处理的具体施肥量见表 1，以 N、 P_2O_5 、 K_2O 计。试验地常用施肥量为尿素 750 kg/hm²、重过磷酸钙 270 kg/hm²、硫酸钾 600 kg/hm²，每个处理设 3 个重复，每个重复设置小区面积 24 m²(4 m×6 m)，每小区四周设 1 m 宽保护行，试验采用随机区组排列。肥料分三次施入，

入冬前施基肥；第二年春分前后和花后结荚期分别施一次追肥，每次施肥量均为总量的 1/3。其他养护管理措施同一般栽培。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 产量及肥料效应分析 于 8 月中旬种子成熟时采收果荚，统计单株果荚数、单荚重量、果荚直径、小荚籽粒数、百粒重等农艺性状及各处理产量；利用公式计算地力贡献率、肥料贡献率、农学效率^[16]，计算公式如下：

地力贡献率 = 无肥区经济产量 / 氮磷钾平衡施肥区经济产量 × 100%

肥料贡献率 = (施肥区经济产量 - 缺素区经济产量) / 施肥区经济产量 × 100%

农学效率 (kg/kg) = (施肥区经济产量 - 缺素区经济产量) / (施肥区施肥量 - 缺素区施肥量)

1.4.2 牡丹籽油的提取及果实含油量的测定 取各处理种子烘干、去壳、粉碎过 40 目筛，采用超临界 CO_2 法提取牡丹籽油，参照史国安等^[17]、Ni 等^[18]的方法，并稍作改进。相同条件下每个样品重复 3 次，利用公式计算种仁含油率和产油量^[19-20]。

种仁含油率 = 提取的牡丹籽油质量 / 种仁质量 × 100%；

产油量 (kg/hm²) = 籽粒产量 × 出仁率 × 种仁含油率。

1.4.3 肥料效应回归方程的建立 分别用一元、二元和三元方程对氮、磷、钾及其组合效应进行拟合，根据边际效应计算最高产量和最佳产量下的推荐施肥量^[21]。对比不同拟合结果，确定合理的推荐施肥量。

1.5 数据处理与分析

用 Excel 2010 进行数据整理，用 SPSS20.0 进行方差分析、回归分析、Duncan 多重比较，用 Sigmaplot 10.0 绘制三维图形。

表 1 “3414”试验方案和施肥量 (kg/hm²)

Table 1 Experiment design and fertilizer amounts

编号 No.	处理 Treatment	N	P_2O_5	K_2O	编号 No.	处理 Treatment	N	P_2O_5	K_2O
1	$\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$	0.0	0.0	0.0	8	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_0$	345.0	124.2	0.0
2	$\text{N}_0\text{P}_2\text{K}_2$	0.0	124.2	324.0	9	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_1$	345.0	124.2	162.0
3	$\text{N}_1\text{P}_2\text{K}_2$	172.5	124.2	324.0	10	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_3$	345.0	124.2	486.0
4	$\text{N}_2\text{P}_0\text{K}_2$	345.0	0.0	324.0	11	$\text{N}_3\text{P}_2\text{K}_2$	517.5	124.2	324.0
5	$\text{N}_2\text{P}_1\text{K}_2$	345.0	62.1	324.0	12	$\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_2$	172.5	62.1	324.0
6	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2$	345.0	124.2	324.0	13	$\text{N}_1\text{P}_2\text{K}_1$	172.5	124.2	162.0
7	$\text{N}_2\text{P}_3\text{K}_2$	345.0	186.3	324.0	14	$\text{N}_2\text{P}_1\text{K}_1$	345.0	62.1	162.0

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理的油用牡丹产量

分别对不同施肥处理下‘凤丹’产量及农艺性状数据进行方差分析。由表 2 可知, 施肥处理后的‘凤丹’单株果荚数、单荚重量、果荚直径、小荚籽粒数、百粒重等农艺性状和产量比对照组均有所增加和改善。在 P_2K_2 水平上, 果荚数、单荚重量和籽粒产量以 $N_2 > N_3 > N_1 > N_0$, 果荚直径、小荚籽粒数、百粒重和荚果产量以 $N_2 > N_1 > N_3 > N_0$, 籽粒产量以 N_2 显著高于 N_1 和 N_3 , N_1 和 N_3 显著高于 N_0 。在 N_2K_2 水平上, 各农艺性状和产量均为 $P_2 > P_1 > P_3 > P_0$, 籽粒产量以 P_2 显著高于 P_1 和 P_3 , 且 P_1 和 P_3 显著高于 P_0 。在 N_2P_2 水平上, 农艺性状和产量以 $K_2 > K_1 > K_3 > K_0$, 籽粒产量以 K_2 显著高于 K_1 , 且 K_1 显著高于 K_3 和 K_0 。综合来看, 不同氮、磷、钾处理的单株果荚数以处理 $N_2P_2K_2$ 最高, 与处理 $N_2P_1K_2$ 、 $N_2P_3K_2$ 、 $N_2P_2K_1$ 、 $N_3P_2K_2$ 差异不显著, 但显著高于其余 9 个处理; 单荚重量以对照组最低, 显著低于其他所有处理; 果荚直径以处理 $N_0P_0K_0$ 、 $N_0P_2K_2$ 、 $N_2P_0K_2$ 较低, 且显著低于处理 $N_1P_2K_2$ 、 $N_2P_1K_2$ 、 $N_2P_2K_2$; 小荚粒数、百粒重和籽粒产量以处理 $N_2P_2K_2$ 最高, 显著高于其他 13 个处理; 荚果产量以

处理 $N_2P_2K_2$ 最高, 除与处理 $N_2P_1K_2$ 差异不显著外, 显著高于其他 12 个处理。此外, 由表 2 还可以看出, 缺氮 ($N_0P_2K_2$)、缺磷 ($N_2P_0K_2$) 和缺钾 ($N_2P_2K_0$) 3 个处理的农艺性状和产量都普遍较低, 说明氮、磷、钾的平衡施用对‘凤丹’的产量形成有重要影响。

分别选用处理 $N_0P_2K_2$ 、 $N_1P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_2$ 、 $N_3P_2K_2$, 计算 P_2K_2 (磷、钾推荐用量) 条件下的氮肥肥效; 选用处理 $N_2P_0K_2$ 、 $N_2P_1K_2$ 、 $N_2P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_1$, 计算 N_2K_2 (氮、钾推荐用量) 条件下的磷肥肥效; 选用处理 $N_2P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_0$ 、 $N_2P_2K_1$ 、 $N_2P_2K_3$, 计算 N_2P_2 (氮、磷推荐用量) 条件下的钾肥肥效 (表 3)。

由表 3 可以看出, 施用氮肥‘凤丹’平均增产 283.7 kg/hm^2 , 较不施氮肥处理增产 55.5%, 可增加纯收入 7310.4 yuan/hm^2 , 平均每增施 1 kg 氮肥‘凤丹’增产 0.96 kg ; 施用磷肥‘凤丹’平均增产 276.8 kg/hm^2 , 较不施磷肥处理增产 50.3%, 增加纯收入 7494.3 yuan/hm^2 , 平均每增施 1 kg 磷肥‘凤丹’增产 2.76 kg ; 施用钾肥‘凤丹’平均增产 150.6 kg/hm^2 , 较不施钾肥处理增产 23.5%, 增加纯收入 2118.9 yuan/hm^2 , 平均每增施 1 kg 钾肥‘凤丹’增产 0.59 kg 。施肥增产及对产量的贡献率均表现为 $N > P_2O_5 > K_2O$, 肥料农学效率和增收效果则表现为 $P_2O_5 > N > K_2O$ 。

表 2 不同处理对油用牡丹‘凤丹’农艺性状及产量的影响

Table 2 Effects of different treatments on oil tree peony ‘Fengdan’ agronomic traits and yield

处理 Treatment	果荚数 Pod No. per plant	单荚重 (g) Pod weight	果荚直径 (cm) Pod diameter	单荚粒数 Seed No. per pod	百粒重 (g) 100-seed weight	荚果产量 (kg/hm^2) Pod yield	籽粒产量 (kg/hm^2) Seed yield
$N_0P_0K_0$	6.1 c	47.2 f	8.5 c	8.7 c	25.4 h	823.1 i	442.2 h
$N_0P_2K_2$	6.4 c	49.8 de	8.5 c	8.8 bc	27.3 gh	951.2 h	511.4 gh
$N_1P_2K_2$	7.4 bc	55.1 bc	9.9 ab	10.4 bc	34.7 c	1354.3 bc	731.4 cde
$N_2P_0K_2$	6.7 c	50.2 de	8.5 c	9.1 bc	28.5 g	1000.3 gh	550.1 g
$N_2P_1K_2$	7.8 ab	59.7 a	10.1 a	10.9 b	37.0 b	1444.5 ab	816.5 b
$N_2P_2K_2$	8.2 a	61.7 a	10.1 a	12.9 a	39.7 a	1555.6 a	903.7 a
$N_2P_3K_2$	7.8 ab	56.8 b	9.4 abc	10.0 bc	31.9 def	1305.6 cd	760.7 bcd
$N_2P_2K_0$	6.7 bc	51.5 cd	8.7 bc	8.9 bc	28.5 g	1083.4 fg	640.5 f
$N_2P_2K_1$	7.8 ab	57.1 b	9.4 abc	10.3 bc	33.6 cd	1318.4 bcd	779.4 bc
$N_3P_2K_3$	7.1 bc	52.5 c	8.1 abc	9.8 bc	31.4 ef	1166.7 ef	690.1 def
$N_2P_2K_2$	7.7 abc	56.4 b	9.1 abc	9.9 bc	33.4 cde	1258.5 cde	750.2 bcde
$N_1P_1K_2$	6.9 bc	52.2 c	8.8 bc	9.2 bc	28.8 g	1125.1 efg	670.8 ef
$N_1P_2K_1$	7.2 bc	52.7 c	8.9 abc	9.1 bc	31.2 f	1159.4 ef	697.7 def
$N_2P_1K_1$	7.5 bc	54.9 bc	9.0 abc	9.8 bc	31.5 ef	1202.9 def	728.7 cde

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments at the 5% level.

表 3 油用牡丹‘凤丹’氮磷钾肥的产量效应、效益及肥料贡献率

Table 3 Seed yield and profit of oil tree peony ‘Fengdan’ and the contribution rate and agronomic efficiency of fertilizers

肥料 Fertilizer	处理 Treatment	籽实产量 Seed yield (kg/hm ²)	增产量 Increase (kg/hm ²)	增产率 Increase (%)	毛收入 Gross profit (yuan/hm ²)	纯收入 Net profit (yuan/hm ²)	贡献率 Contribution (%)	农学效率 Agronomy efficiency (kg/kg)
N	N ₀ P ₂ K ₂	511.4 c						
	N ₁ P ₂ K ₂	731.4 b	220.0 b	43.0 b	6599.4 b	5999.4 b	30.1 b	1.28 a
	N ₂ P ₂ K ₂	903.7 a	392.3 a	76.7 a	11768.7 a	10568.7 a	43.4 a	1.14 a
	N ₃ P ₂ K ₂	750.2 b	238.8 b	46.7 b	7163.1 b	5363.1 b	31.8 b	0.46 b
	平均 Mean		283.7	55.5	8510.4	7310.4	35.1	0.96
P ₂ O ₅	N ₂ P ₀ K ₂	550.1 d						
	N ₂ P ₁ K ₂	816.5 b	266.3 b	48.4 b	7989.6 b	7584.6 b	32.6 b	4.29 a
	N ₂ P ₂ K ₂	903.7 a	353.6 a	64.3 a	10606.8 a	9796.8 a	39.1 a	2.85 b
	N ₂ P ₃ K ₂	760.7 c	210.6 b	38.3 b	6316.5 c	5101.5 c	27.7 c	1.13 c
	平均 Mean		276.8	50.3	8304.3	7494.3	33.1	2.76
K ₂ O	N ₂ P ₂ K ₀	640.5 c						
	N ₂ P ₂ K ₁	779.4 b	139.0 b	21.7 b	4169.4 b	2969.4 b	17.8 b	0.86 a
	N ₂ P ₂ K ₂	903.7 a	263.2 a	41.1 a	7897.2 a	5497.2 a	29.1 a	0.81 a
	N ₂ P ₂ K ₃	690.1 c	49.7 c	7.8 c	1490.1 c	-2109.9 c	7.2 c	0.10 b
	平均 Mean		150.6	23.5	4518.9	2118.9	18.1	0.59

注 (Note): ‘凤丹’籽、N、P₂O₅、K₂O 价格分别为 30、3.48、6.52、7.41 yuan/kg; 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 The prices of ‘Fengdan’ seed, N, P₂O₅ and K₂O are 30, 3.48, 6.52, 7.41 yuan/kg, respectively. Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments at the 5% level.

氮、磷、钾肥的施用均有显著的增产效果, 各处理均以推荐施肥水平产量最高, 而过量施肥会使产量有所降低。氮、磷、钾肥增产、增收效果以及肥料贡献率均以推荐施肥水平处理的最高, 其农学效率均以 1 水平最高。由此表明本试验中氮、磷、钾肥推荐用量总体上是合理的, 且只有确定合理的施肥量才能达到作物高产、肥料高效, 同时增收利益最大化的目的。

地力贡献率反映了农田当季种植作物收获的产量中由土壤本身的肥力做出的贡献, 可用无肥区作物产量占氮、磷、钾推荐施肥区产量的百分率表示^[22]。本试验中供试土壤的地力贡献率为 53.7%, 即‘凤丹’产量的一半以上是由土壤养分提供的, 表明培肥土壤的重要性。

2.2 不同施肥处理对‘凤丹’种仁含油率和出油量的影响

依据 1.4.2 的提取方法, 计算不同施肥处理下‘凤丹’种仁含油率和产油量 (表 4)。由表 4 可知, 各施肥处理‘凤丹’出仁率显著高于对照组, 其中以处理 N₂P₂K₂ 出仁率最高, 达 65.0%, 较对照组提

高 13.0%。出仁率代表了果实的饱满程度, 由表 4 可知, 处理 N₂P₁K₂、N₂P₂K₂、N₂P₂K₁ 果实相对较饱满, 其余处理果实相对较干瘪。不同施肥处理与对照组相比, 种仁含油率均有所提高, 其中处理 N₁P₂K₂、N₂P₁K₂、N₂P₂K₂、N₂P₃K₂、N₂P₂K₁、N₃P₂K₂、N₁P₂K₁、N₂P₁K₁ 达到显著水平, 以处理 6 最高, 含油率为 32.9%, 较对照组提高 12.6%。不同施肥处理通过影响出仁率和种仁含油率来影响产油量, 各处理间差异较大, 其中以处理 N₂P₂K₂ 产油量最高为 193.3 kg/hm², 显著高于其它各处理。氮磷钾肥平均增加产油量分别为 80.5%、74.0%、37.1%, 因此对产油量影响大小顺序为 N > P₂O₅ > K₂O。

2.3 氮、磷、钾肥间交互作用分析

根据试验设计, 对氮磷、氮钾、磷钾两因素间的交互作用进行了分析, 将氮、磷、钾施肥水平分别固定在 345.0、124.2、324.0 kg/hm², 根据试验结果运用插值法绘制另外两个因素的交互作用曲面图 (产量以荚果计)。由图 1 可知, 氮、磷、钾对‘凤丹’的产量效应均呈抛物线型, 产量先升高后降低, 符合报酬递减规律, 而且氮磷、氮钾和磷钾对‘凤丹’

表 4 各处理种仁含油率及产油量
Table 4 Oil contents in kernel and oil outputs in different treatments

处理 Treatment	籽实产量 (kg/hm ²) Seed yield	出仁率 (%) Kernel rate	种仁含油率 (%) Oil content	产油量 (kg/hm ²) Oil output
N ₀ P ₀ K ₀	442.2 h	57.5 f	29.2 c	74.3 h
N ₀ P ₂ K ₂	511.4 gh	59.7 e	29.9 bc	91.3 g
N ₁ P ₂ K ₂	731.4 cde	62.8 bc	32.2 ab	147.7 cd
N ₂ P ₀ K ₂	550.1 g	60.3 de	30.2 bc	100.1 f
N ₂ P ₁ K ₂	816.5 b	64.1 ab	32.7 a	171.3 b
N ₂ P ₂ K ₂	903.7 a	65.0 a	32.9 a	193.3 a
N ₂ P ₃ K ₂	760.7 bcd	63.6 abc	32.7 a	158.2 bc
N ₂ P ₂ K ₀	640.5 f	60.9 d	30.6 abc	119.3 fg
N ₂ P ₂ K ₁	779.4 bc	63.9 ab	32.9 a	163.7 bc
N ₂ P ₂ K ₃	690.1 def	62.3 c	31.1 abc	133.6 def
N ₃ P ₂ K ₂	750.2 bcde	63.5 abc	32.2 ab	153.7 c
N ₁ P ₁ K ₂	670.8 ef	61.6 cd	30.9 abc	127.7 ef
N ₁ P ₂ K ₁	697.7 def	62.6 bc	31.8 ab	138.7 cde
N ₂ P ₁ K ₁	728.7 cde	63.2 bc	31.9 ab	146.7 cd

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments at the 5% level.

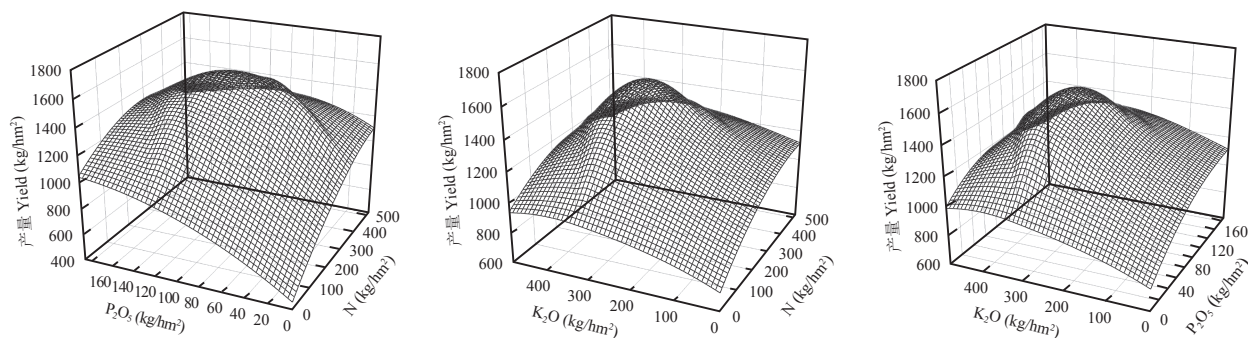


图 1 氮磷钾肥交互作用分析

Fig. 1 Interaction among the nitrogen, phosphorous and potassium fertilization

产量的影响存在较强的交互效应, 即在综合施肥时, 产量的变化不单纯是各因子单独效应的线性累加, 还存在配合因子, 某一单一肥料的偏高或偏低均不利于‘凤丹’产量的形成, 而由于交互效应, 两者配施则对产量有较强的促进作用。由图 1 还可以看出, 氮磷互作效应中, ‘凤丹’产量随着氮肥和磷肥施用量的增加而增加, 两者具有明显的相互促进作用, 在中氮和中磷水平时产量达到最大范围, 但当过量施肥时‘凤丹’的产量又有下降趋势; 氮钾互作效应中, 低氮肥水平时‘凤丹’产量较低, 且钾肥施用量对‘凤丹’产量影响不大, 曲

线较为平缓; 但在中氮肥水平时, ‘凤丹’产量随着钾肥施用量的增加迅速增加; 在高氮肥水平时, ‘凤丹’产量有所下降且钾肥施用量对产量影响较小; 在磷钾互作效应中, 磷肥的增产效应随钾肥施用量的增加呈现先增加后降低的趋势, 同时钾肥对‘凤丹’产量的影响受磷肥施用量的影响, 磷肥具有促进钾肥施用效果的作用。

2.4 肥料效应函数拟合及施肥量分析

对试验方案中不同氮、磷、钾处理的‘凤丹’产量分别进行三元、二元和一元方程拟合, 根据边际效应值计算最高产量和最佳产量时对应的氮、

磷、钾施用量,其中当边际效应为0时所得结果为最高产量下的推荐施肥量,当边际效应为肥料与产值的比值时,所得结果为最佳产量时的推荐施肥量,并通过检验和筛选得出最适宜的肥料用量(表5)。由表5可知,对于氮元素一元二次效应方程和氮、磷、钾三元二次效应方程进行检验均达到显著水平,对于磷元素一元二次效应方程推算出的施用量偏高,但氮、磷二元二次方程检验结果达到极显著水平,且氮、磷最佳施肥量均在合理范围内,所以氮、磷最高施肥量和经济最佳施肥量由氮、磷二元二次拟合方程进行决策,分别为氮最高施用量346.5 kg/hm²、最佳施用量343.2 kg/hm²;磷最高施用量110.6 kg/hm²、最佳施用量109.7 kg/hm²。对于钾元素一元二次效应方程检验结果不显著,氮钾、磷钾二元二次效应方程和氮磷钾三元二次效应方程检验达到显著水平,综合分析三种模型,选用氮钾二元二次模型对钾肥施用量进行决策,结果为钾肥最高施用量为261.8 kg/hm²、最佳施用量为248.4 kg/hm²。综上所述,油用牡丹‘凤丹’氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)的最佳施肥量分别为343.2、109.7、248.4 kg/hm², N : P₂O₅ : K₂O=1 : 0.32 : 0.72。

3 讨论

油用牡丹是以收获果实获得牡丹籽油为经营目标的经济林木,其籽粒产量与产油率的形成不仅受遗传因素的影响,同时还受制于矿质营养元素的供给。合理配施肥料,达到养分之间的平衡是实现资

源高效、作物高产的重要途径^[23]。目前,关于施肥对油用牡丹的影响报道较少,姜天华等^[9]通过试验研究表明增施氮肥能够显著增加油用牡丹株高、冠幅、花径和产量,但当氮肥施用量达到一定程度时产量不再增加;魏冬峰等^[24]研究表明施用氮磷钾肥能显著提高油用牡丹的净光合速率,随着氮、磷、钾肥施用量的增加净光合速率呈现先增加后降低的趋势。本试验结果表明,油用牡丹‘凤丹’施用氮、磷、钾肥增产效果显著,以试验所设最适氮、磷、钾肥用量组合处理产量最高,增产率高达89.0%。缺素处理产量最低,说明氮、磷、钾肥的平衡配施是影响‘凤丹’产量的关键因子。试验中施肥增产及对产量的贡献率均表现为N > P₂O₅ > K₂O,肥料农学效率和增收效果则表现为P₂O₅ > N > K₂O。在本试验研究范围内,氮、磷、钾任何一因素过量施用均会导致产量降低,一种养分的过量投入往往可导致多种元素的不协调,使投入的营养元素无增产效果,甚至会造成减产^[25],其结果与前人在西瓜^[21]、桑叶^[26]等作物上进行的氮、磷、钾肥效试验研究结果一致。

关于施肥对油料作物产油量的影响已有一些研究,汪瑞清等^[27]研究表明施用氮、磷、钾肥能提高油菜产油量,且影响因素大小顺序为N > P₂O₅ > K₂O;刘海龙等^[28]通过对澳洲茶树氮、磷、钾肥效应研究表明三种肥料配合施用对澳洲茶树产油量有显著影响;张文元等^[19]研究表明施用适量钾肥可提高油茶产油量,过量则会降低产油量。本试验研究表明施用氮、磷、钾肥可增加干籽出仁率和种仁含油率进而

表5 ‘凤丹’肥料效应方程及相应的推荐用量

Table 5 Fertilizer response equations and recommended fertilizer application rates for ‘Fengdan’

模型 Model	养分 Nutrients	肥料效应方程 Fertilizer response equation	显著性(P) Significance	R ²	最大用量(kg/hm ²) Maximum rate	最佳用量(kg/hm ²) Optimum rate				
三元 Ternary	N	$y = -372.936 + 4.188N + 10.366P + 3.631K -$	0.018	0.9649	335.4	332.9				
	P ₂ O ₅	$0.005N^2 - 0.033P^2 - 0.004K^2 -$								
	K ₂ O	$0.002NP - 0.002NK - 0.005PK$								
二元 Binary	N	$y = -391.708 + 6.872N + 14.114P -$	0.008	0.9999	346.5	343.2				
	P ₂ O ₅	$0.008N^2 - 0.045P^2 - 0.012NP$								
	N	$y = -56.83 + 5.011N + 4.993K - 0.005N^2 -$					0.045	0.9314	370.2	370.5
	K ₂ O	$0.006K^2 - 0.005NK$								
P ₂ O ₅	$y = 73.87 + 10.653P + 5.572K - 0.022P^2 -$	0.047	0.9366	131.6	148.9					
K ₂ O	$0.006K^2 - 0.019PK$									
一元 Unitary	N	$y = -0.0059N^2 + 3.6951N + 936.36$	0.026	0.9768	313.1	307.7				
	P ₂ O ₅	$y = -0.045P^2 + 10.042P + 998.62$	0.012	0.9998	111.6	110.2				
	K ₂ O	$y = -0.0059K^2 + 3.1893K + 1051.9$	0.045	0.8469	270.3	256.7				

影响‘凤丹’产油量, 氮、磷、钾三因素对产油量影响大小顺序为 $N > P_2O_5 > K_2O$ 。

养分间的交互作用是植物营养与土壤肥料学研究的重点内容, 许多研究表明各营养元素之间的关系是复杂的、相互联系的, 只有明确不同养分之间交互作用的方向(正交互作用还是负交互作用)及大小, 才能制定适宜的养分配比, 以充分发挥肥料的作用^[25]。本试验研究结果表明, 氮、磷、钾间存在不同程度的交互作用, 能够相互促进肥效的发挥。魏冬峰等^[24]对油用牡丹净光合速率的研究表明氮磷之间、氮钾之间、磷钾之间表现出协同作用, 氮、磷、钾三因素综合施用具有更明显的加和效应, 在盛花期净光合速率显著增加。马海洋等^[22]通过“3414”试验发现氮、磷、钾肥间存在明显的交互作用, 配合施用能提高肥效和卡因菠萝的产量。张美俊等^[29]对糜子氮、磷、钾肥的“3414”试验的产量效应研究也表明氮、磷、钾肥之间存在一定的正交互作用, 互相影响肥效的发挥。本研究结果与上述研究结果一致。

对于“3414”肥效试验拟合的方法有多种, 常用的肥效模型有三元二次模型、一元二次模型、二元二次模型、线性加平台型。在众多研究结果中发现不同的肥效模型在对不同地点的不同作物拟合时所得产量结果也有所不同。韩峰等^[30]对贵州 71 种水稻进行“3414”肥效拟合结果表明一元二次模型和线性加平台型是对三元二次模型的优化; 王圣瑞等^[1]对 27 种小麦进行“3414”肥效拟合结果表明一元二次模型是三元二次模型的补充。本次研究中对‘凤丹’分别采用三元、二元和一元模型进行拟合, 综合分析不同拟合结果发现, 二元二次模型最适合拟合‘凤丹’产量与氮、磷、钾肥之间的关系, 根据氮磷和氮钾二元二次肥料效应模型计算出氮、磷、钾肥推荐最佳施肥量, 分别为 N 343.2 kg/hm²、 P_2O_5 109.7 kg/hm²、 K_2O 248.4 kg/hm², 最优经济产量可达 1517.8~1579.5 kg/hm², $N : P_2O_5 : K_2O = 1 : 0.32 : 0.72$, 氮、磷、钾肥的二元二次肥效模型推荐施肥量与试验实际设计采用的最适施肥量相比, 较接近本地区的氮、磷、钾实际最佳施肥量。

4 结论

合理的肥料配比和用量是‘凤丹’增产的保障。施用适量的氮、磷、钾肥可改善‘凤丹’单株果荚数、果荚直径、百粒重等农艺性状, 增加产量, 并且提高出仁率和种仁含油率, 从而显著影响‘凤丹’单位面积的出油量, 根据肥效试验拟合模

型得出氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)的最佳推荐施肥量分别为 343.2、109.7、248.4 kg/hm², 适宜的氮、磷、钾施肥比例为 1 : 0.32 : 0.72。研究结果为本地地区的油用牡丹‘凤丹’生产中氮、磷、钾肥的施用提供科学依据。

参 考 文 献:

- [1] 杨静莹, 吉文丽, 刘玲, 等. 株行距配置对油用牡丹‘凤丹’生长发育及产量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 202–208.
Yang J X, Ji W L, Liu L, *et al.* Effects of plant-row spacing on growth and yield components of oil tree peony *Paeonia ostii* ‘Feng Dan’[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(6): 202–208.
- [2] 周琳, 王雁. 我国油用牡丹开发利用现状及产业化发展对策[J]. 世界林业研究, 2014, 27(1): 68–71.
Zhou L, Wang Y. Development and utilization of oilseed peony and its industrial development strategy in China[J]. *World Forestry Research*, 2014, 27(1): 68–71.
- [3] 李育才. 中国油用牡丹工程的战略思考[J]. 中国工程科学, 2014, 16(10): 58–63.
Li Y C. The strategy on the oil tree peony industry in China[J]. *Engineering Science*, 2014, 16(10): 58–63.
- [4] 史国安, 焦封喜, 焦元鹏, 等. 中国油用牡丹的发展前景及对策[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(9): 124–128.
Shi G A, Jiao F X, Jiao Y P, *et al.* Development prospects and strategies of oil tree peony industry in China[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2014, 29(9): 124–128.
- [5] 中华人民共和国卫生部. 中华人民共和国卫生部公告2011年第9号[Z]. 2011-03-18.
Ministry of Health of the People’s Republic of China . Announcement of the Ministry of Health of the People’s Republic of China 2011 No. 9[Z]. 2011-03-18.
- [6] 周海梅, 马锦琦, 苗春雨, 等. 牡丹籽油的理化指标和脂肪酸成分分析[J]. 中国油脂, 2009, 34(7): 72–74.
Zhou H M, Ma J Q, Miao C Y, *et al.* Physicochemical indexes and fatty acid composition of peony seed oil[J]. *China Oils and Fats*, 2009, 34(7): 72–74.
- [7] 李凯, 周宁, 李赫宇. 牡丹花、牡丹籽成分与功能研究进展[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(3): 228–230.
Li K, Zhou N, Li H Y. Composition and function research of peony flowers and peony seeds[J]. *Food Research and Development*, 2012, 33(3): 228–230.
- [8] 刘德晶. 我国油用牡丹产业发展若干问题的思考[J]. 中国林业产业, 2015, (1): 67–71.
Liu D J. Thoughts on the development of the oil tree peony industry in China[J]. *China Forestry Industry*, 2015, (1): 67–71.
- [9] 姜天华, 单佩佩, 黄在范, 等. 施用氮肥对油用牡丹叶片氮素吸收积累与籽粒品质的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3257–3263.
Jiang T H, Shan P P, Huang Z F, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on the nitrogen uptake, accumulation, and seed quality of oil peony[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10): 3257–3263.
- [10] 段祥光, 张利霞, 刘伟, 等. 施氮量对油用牡丹‘凤丹’光合特性及产量的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(1): 48–54.

- Duan X G, Zhang L X, Liu W, *et al.* Effects of nitrogen application on photosynthetic characteristics and yields of oil tree peony *Paeonia ostii* 'Feng dan'[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2018, 42(1): 48–54.
- [11] 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 S R, Chen X P, Gao X Z, *et al.* Study on simulation of "3414" fertilizer experiments[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4): 409–413.
- [12] 祁大成, 冯旭东, 董红梅, 等. 花生"3414"肥料效应试验及推荐施肥分析[J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(14): 2831–2834.
Qi D C, Feng X D, Dong H M, *et al.* "3414" fertilizer trial of peanut and analysis on the optimal fertilization amounts[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(14): 2831–2834.
- [13] 卫双玲, 李春明, 高桐梅, 等. 芝麻氮、磷、钾肥的效应研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 644–649.
Wei S L, Li C M, Gao T M, *et al.* Study on the effects of N, P, K fertilizer in sesame[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(3): 644–649.
- [14] 白龙男, 玄哲宇, 尹昌连, 等. 大豆3414试验分析[J]. *延边大学学报*, 2009, 31(1): 10–15.
Bai L N, Xuan Z Y, Yin C L, *et al.* Test analysis of soybean 3414[J]. *Journal of Agricultural Science Yanbian University*, 2009, 31(1): 10–15.
- [15] 高祥照, 马常宝, 杜森. 测土配方施肥技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005. 30–60.
Gao X Z, Ma C B, Du S. Soil testing and fertilizer application[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005. 30–60.
- [16] 刘芬, 同延安, 王小英, 等. 渭北旱塬春玉米施肥效果及肥料利用效率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 48–55.
Liu F, Tong Y A, Wang X Y, *et al.* Effects of N, P and K fertilization on spring maize yield and fertilizer use efficiency in Weibei rainfed highland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(1): 48–55.
- [17] 史国安, 郭香凤, 金宝磊, 等. 牡丹籽油超临界CO₂萃取工艺优化及抗氧化活性的研究[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(4): 47–50, 107.
Shi G A, Guo X F, Jin B L, *et al.* Optimization of supercritical CO₂ extraction and analysis of antioxidant activity of peony seed oil[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2013, 28(4): 47–50, 107.
- [18] Ni Q X, Gao Q X, Yu W W, *et al.* Supercritical carbon dioxide extraction of oils from two *Torreya grandis* varieties seeds and their physicochemical and antioxidant properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(2): 1226–1234.
- [19] 张文元, 牛德奎, 郭晓敏, 等. 施钾水平对油茶养分积累和产油量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(3): 863–868.
Zhang W Y, Niu D K, Guo X M, *et al.* Effect of different levels of potassium fertilization on nutrient accumulation and oil yield of *Camellia oleifera* Abel[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(3): 863–868.
- [20] 林萍, 姚小华, 曹永庆, 等. 油用牡丹'凤丹'果实性状及其脂肪酸组分的变异分析[J]. *经济林研究*, 2015, 33(1): 67–72.
Lin P, Yao X H, Cao Y Q, *et al.* Variation analysis of fruit characteristics and fatty acid components in *Paeonia ostii*'Phoenix White'[J]. *Economic Forest Researches*, 2015, 33(1): 67–72.
- [21] 杜少平, 马志明, 薛亮. 氮磷钾施肥对砂田西瓜产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 468–475.
Du S P, Ma Z M, Xue L. Effects of combined application of N, P and K on yield and quality of watermelon in gravel-mulched fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(2): 468–475.
- [22] 马海洋, 石伟琦, 刘亚男, 等. 氮、磷、钾肥对卡因菠萝产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 901–907.
Ma H Y, Shi W Q, Liu Y N, *et al.* Influence of N, P, K fertilization on yield and quality of *Smooth Cayenne* pineapple[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(4): 901–907.
- [23] 孙小花, 谢亚萍, 牛俊义, 等. 不同供钾水平对胡麻花后干物质转运分配及钾肥利用效率的影响[J]. *核农学报*, 2015, 29(1): 192–201.
Sun X H, Xie Y P, Niu J Y, *et al.* Effect of different potassium supply levels on transportation, distribution of dry matter and K-fertilizer utilization efficiency after anthesis in oil flax[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2015, 29(1): 192–201.
- [24] 魏冬峰, 张利霞, 常青山, 等. 氮磷钾平衡施肥对凤丹光合特性的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(11): 2265–2273.
Wei D F, Zhang L X, Chang Q S, *et al.* Effects of N, P and K balanced fertilization on photosynthetic characteristics of *Paeonia ostii* Fengdan[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2016, 30(11): 2265–2273.
- [25] 李生秀. 植物营养与肥料学科的现状与展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 6(3): 193–205.
Li S X. The current state and prospect of plant nutrition and fertilizer science[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 6(3): 193–205.
- [26] 刘刚, 殷浩, 罗春燕, 等. 不同施肥处理对桑叶产量及其品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 506–511.
Liu G, Yin H, Luo C Y, *et al.* Effects of different fertilizer treatments on yield and quality of mulberry leaves[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 506–511.
- [27] 汪瑞清, 杨国正, 史茜莎, 等. 氮磷钾镁锌混合施用对油菜产油量和蛋白质产量的影响[J]. *湖北农业科学*, 2009, 48(5): 1096–1100.
Wang R Q, Yang G Z, Shi Q S, *et al.* Effects of the mixed application of N, P, K, Mg, Zn on oil and protein yield of rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2009, 48(5): 1096–1100.
- [28] 刘海龙, 覃子海, 张烨, 等. 配方施肥对澳洲茶树枝叶产量和产油量的影响[J]. *热带农业科学*, 2017, 37(9): 21–25.
Liu H L, Qin Z H, Zhang Y, *et al.* Effects of different fertilization treatments on stand growth and oil production of *Melaleuca Alternifolia*[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2017, 37(9): 21–25.
- [29] 张美俊, 乔治军, 杨武德, 等. 糜子氮、磷、钾肥的效应及优化研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 347–353.
Zhang M J, Qiao Z J, Yang W D, *et al.* Effect of N, P and K fertilizer application and optimum rate for yield of millet[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 347–353.
- [30] 韩峰, 高雪, 彭志良, 等. 贵州水稻"3414"肥料试验模型拟合的探讨[J]. *贵州农业科学*, 2009, 37(6): 235–238.
Han F, Gao X, Peng Z L, *et al.* The study on the fit of rice fertilization models from "3414" formulation in Guizhou[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2009, 37(6): 235–238.