

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23335

基于“3414”试验的切花芍药氮磷钾推荐施肥量研究

赵俊福¹, 何晗颖¹, 张明泽¹, 米明¹, 赵文双³, 王连祥⁴, 马海林², 司东霞^{1*}

(1. 聊城大学农学与农业工程学院, 山东 聊城 252059; 2. 山东省林业科学研究院, 山东 济南 250014; 3. 山东盛世芍花智慧农业有限公司, 山东 菏泽 274035; 4. 菏泽市农业科学院, 山东 菏泽 274031)

摘要: 针对切花芍药生长过程中盲目施肥的现状, 以二年生芍药‘向天歌’为研究对象, 采用“3414”试验施肥方案, 结合隶属函数法, 研究氮、磷、钾肥不同用量对切花芍药生长的影响, 探讨切花芍药生产适宜的肥料用量。结果表明: 不同施肥处理对芍药株高、茎粗、蕾径、分株数和切花数影响显著 ($P < 0.05$); 氮、磷缺乏区的综合隶属函数值小于无肥区, 缺钾区大于无肥区, 对芍药生长的影响为氮 > 磷 > 钾; $N_2P_2K_1$ 处理的综合隶属函数值最大, 为 0.61, 芍药植株生长最好; 对各处理的综合隶属函数值和施肥量进行肥料效应函数拟合分析, 一元二次、二元二次肥料效应函数方程拟合相关性均达显著水平, 三元二次肥料效应方程为非典型模型, 采用频率分析法计算肥料推荐量。综合分析各肥料效应函数方程的推荐用量及相应的综合隶属函数值, 本试验切花芍药推荐施肥量为 $N\ 212.7\ kg/hm^2$ 、 $P_2O_5\ 46.2\ kg/hm^2$ 、 $K_2O\ 49.9\ kg/hm^2$, 施肥配比为 1 : 0.21 : 0.23, 可用于本试验区切花芍药生产的施肥参考。

关键词: “3414”施肥方案; 切花芍药; 肥料效应函数; 频率分析法

芍药 (*Paeonia lactiflora* Pall.) 是芍药科 (Paeoniaceae) 芍药属 (*Paeonia*) 多年生宿根草本花卉, 是世界上重要的观赏和药用植物。我国是芍药的主要起源地之一, 栽培历史悠久, 分布范围广, 品种资源十分丰富^[1-3]。芍药在我国以传统的露地栽培为主, 被广泛用于造景、医药、文化等领域, 具有较高的实用经济价值^[4-6]。近年来, 随着鲜切花产业的不断发展, 芍药作为高档切花进入花卉市场。芍药用作切花对比其他切花品种有成花率高、瓶插时间长、寓意美好等优势, 因此, 芍药鲜切花的需求量越来越高, 市场前景十分广阔^[7-9]。

氮、磷、钾是植物必需的大量营养元素, 也是植物产量和品质形成的关键影响因素^[10-11]。芍药作为喜肥植物, 其生长发育与肥料的施用密切相关^[12]。在芍药的养分管理中, 施用基肥有助于

提高芍药的产量和品质^[13], 而追施氮、磷、钾肥是芍药生长发育的主要养分来源^[14]。目前, 在芍药的栽培过程中, 盲目施肥的情况普遍存在, 施肥多以群众经验为主, 农户间施用水平差异大, 施肥量和养分配比缺乏科学依据, 迫切需要定量水平较高的养分管理技术^[15]。

“3414”不完全正交试验是以当地最佳施肥量的近似值为标准, 对氮、磷、钾肥进行 3 因素 4 水平的试验设计, 被广泛用于田间试验研究。已有不少学者基于“3414”试验设计, 研究了当地作物如南瓜 (*Cucurbita moschata*)^[16]、剑麻 (*Agave sisalana*)^[17]、无芒雀麦 (*Bromus inermis* Leyss.)^[18]、柑橘 (*Citrus orange*)^[19] 等的肥料推荐用量, 为节约养分资源, 提高养分的利用效率, 实现农业可持续生产提供了技术支撑。综合分析前人的研究成果, 基于“3414”试验设计的切花芍药推荐施肥技术研究尚未见报道。本试验以二年生切花芍药‘向天歌’为供试材料, 采用“3414”施肥方案, 研究不同施肥处理对切花芍药生长的影响, 通过建立肥料效应函数方程, 获得最佳推荐施肥量, 为田间切花芍药的养分管理提供依据。

收稿日期: 2023-06-01; 录用日期: 2023-06-22

基金项目: 山东省农业良种工程项目 (2020LZGC011); 山东省重点研发计划项目“药+食”健康产业高质量发展科技示范工程 (2021SFGC1201)。

作者简介: 赵俊福 (1998-), 硕士研究生, 主要从事园林植物栽培与保护研究。E-mail: 913692210@qq.com。

通讯作者: 司东霞, E-mail: sidongxia@126.com。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2022年3—10月在山东盛世芍药智慧农业有限公司(35° 21' 12" N, 115° 35' 5" E)芍药种植园进行。试验地点位于山东省菏泽市牡丹区都司镇,地处山东省西南部,属暖温带大陆性季风气候,四季分明,光热资源丰富,雨热同季。年平均气温

13.9℃,平均降水量625 mm,平均日照时数2389 h,全年无霜期一般为210 d,农业资源十分丰富。

1.2 试验材料

供试植物为二年生芍药,品种为‘向天歌’。供试土壤母质为黄河冲积物,土壤质地为壤质黏土,土壤基本理化性状见表1。供试肥料为尿素(N 46%),过磷酸钙(P₂O₅ 12%)、磷酸二氢钙(P₂O₅ 60%)和硫酸钾(K₂O 52%)。

表1 供试土壤的基本理化性质

土层 (cm)	全氮 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	水溶性盐含量 (g/kg)	pH	土壤颗粒组成(%)			土壤质地
						<0.002 mm	0.002 ~ 0.02 mm	2 ~ 0.02 mm	
0 ~ 30	1.169	7	114	0.11	7.94	24	36	40	壤质黏土
30 ~ 60	0.538	4	74	0.50	7.94	42	24	34	壤质黏土
60 ~ 90	0.597	3	73	0.44	7.98	44	27	29	壤质黏土

1.3 试验设计

试验采用“3414”最优回归方案,随机区组设计。试验因素氮、磷、钾均设置4个水平(分别标记为0、1、2、3),其中,0水平为不施肥,2水平为当地最佳施肥量的近似值,1水平=2水平×0.5,3水平=2水平×1.5,共14个处理,每处理重复4次。试验基于氮肥“总量控制、分期调控”和“磷钾恒量监控”的养分管理原则^[20-21],在前期研究和土壤养分测试的基础上确定氮、磷、钾的2水平。试验处理及肥料用量见表2。田间试验小区长2.5 m、宽4 m,小区面积10 m²,试验地总面积560 m²。芍药生长期内施肥4次,包括基肥(有机肥,1500 kg/hm²,土壤封冻前施用,所有处理用量相同)、萌芽肥(氮、磷、钾投入量分别为总用量的45%、50%、40%,3月下旬施用)、孕蕾肥(氮、磷、钾分别为总用量的30%、30%、45%,茎叶生长后期,4月中下旬施用)和花后肥(氮、磷、钾分别为总用量的25%、20%、15%,根芽生长肥,开花后2周施用)。基肥撒施耕翻,萌芽肥在距植株20 cm处行间条施,施肥深度15 cm,孕蕾肥和花后肥模仿滴灌将肥料溶解后施用。试验期间,松土、除草等其他管理措施同农民常规。

1.4 测定项目与方法

每小区随机选择代表性芍药3株测定株高、茎粗、蕾径等主要生长指标,测定方法参考李兆鹏等^[12]的方法并略做修改。用钢卷尺测定植株株

高,不开花植株测量从花枝的基部到花枝顶芽处的高度,开花植株测量从花枝的基部到花蕾最下端的高度;茎粗用游标卡尺测量花枝基部的直径;蕾径用游标卡尺测量花蕾横径最宽处。4月16日,芍药孕蕾期测定蕾径。6月12日测定植株株高、茎粗,每小区随机选择代表性芍药12株,调查每株分株数和切花数,计算单位面积的分株数和切花数。

表2 “3414”试验设计方案和施肥量

编码	处理	施肥量(kg/hm ²)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0
2	N ₀ P ₂ K ₂	0	60	90
3	N ₁ P ₂ K ₂	90	60	90
4	N ₂ P ₀ K ₂	180	0	90
5	N ₂ P ₁ K ₂	180	30	90
6	N ₂ P ₂ K ₂	180	60	90
7	N ₂ P ₃ K ₂	180	90	90
8	N ₂ P ₂ K ₀	180	60	0
9	N ₂ P ₂ K ₁	180	60	45
10	N ₂ P ₂ K ₃	180	60	135
11	N ₃ P ₂ K ₂	270	60	90
12	N ₁ P ₁ K ₂	90	30	90
13	N ₁ P ₂ K ₁	90	60	45
14	N ₂ P ₁ K ₁	180	30	45

注: N₀P₀K₀ 为不施肥的对照组。

1.5 数据分析

1.5.1 数据统计分析

试验采用 Excel 2016 进行数据处理和作图, 利用 SPSS 27.0 进行单因素方差分析 (One-way ANOVA)。

1.5.2 切花芍药生长指标的综合评价

采用模糊数学中的隶属函数法, 选择株高、茎粗、蕾径、分株数和切花数等 5 个指标, 计算各指标的隶属函数值, 根据各指标对芍药生长和经济效益的贡献进行权重分配, 分别为 15%、15%、15%、25% 和 30%, 通过各指标的隶属函数值和权重, 计算各处理的综合隶属函数值, 对切花芍药的生长状况进行综合评价。综合隶属函数值越高, 生长越好。

$$F(x_i) = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

$$F(x) = \sum F(x_i) \times W_i \quad (2)$$

式中, $F(x)$ 为综合隶属函数值; i 为各评价指标 (包括株高、茎粗、蕾径、分株数和切花数); $F(x_i)$ 为某项指标的隶属函数值, x_i 为某项指标测定值, x_{\max} 和 x_{\min} 为所有处理中某一指标测定值的最大值和最小值, W_i 为各项指标的加权重。

1.5.3 肥料效应函数方程的建立

根据吴志勇等^[22]的研究, 采用 Excel 2016 进行一元二次 (式 1)、二元二次 (式 2)、三元二次 (式 3) 肥料效应模型的拟合, 拟合方程如下:

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 \quad (3)$$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1x_2 \quad (4)$$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 + b_6x_3^2 + b_7x_1x_2 + b_8x_1x_3 + b_9x_2x_3 \quad (5)$$

式中, y 为肥料效应函数方程的综合隶属函数值 [$F(x)$]; 式 (1) 中 x 为氮、磷、钾任意一种肥料用量, 式 (2) 中 x_1 、 x_2 为氮、磷、钾任意两种肥料用量, 式 (3) 中 x_1 、 x_2 、 x_3 为氮、磷、钾肥料用量; b_0 为常数项, b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 b_5 、 b_6 、 b_7 、 b_8 、 b_9 为肥料效应函数方程的系数。

1.5.4 频率分析法

频率分析是考查某个数据落入指定区域内的频数, 以了解数据的分布状况的分析方法。根据李洪文等^[23]田间肥效试验数据的分析方法, 建立各小区的综合隶属函数值在统计区间出现的频率之间的定量关系, 将其中综合隶属函数值大、出现频率高的施肥组合作为优化施肥推荐用量。计算公式如下:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n_j} \sum_{j=0}^p u_j n_{ij} (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

n_{ij} 表示变量值 X_{ij} (即 u_j) 出现的次数, n_j 表示变量 X_i 总共出现的次数。

$$S_{\bar{x}_i} = \frac{1}{\sqrt{n_j - 1}} \cdot \sqrt{\sum_{j=0}^p (u_j - \bar{x}_i)^2 \cdot n_{ij}} \quad (7)$$

95% 置信区间: $[\bar{x}_i - S_{\bar{x}_i} t_{0.05}(n_j - 1)] \sim [\bar{x}_i + S_{\bar{x}_i} t_{0.05}(n_j - 1)]$, $t_{0.05}(n_j - 1)$ 查表可知。

均数标准差:

$$S_x = \frac{S}{\sqrt{n_j}} \quad (8)$$

2 结果与分析

2.1 切花芍药的生长状况

不同施肥处理显著影响芍药植株的生长状况 (表 3)。对 14 个处理的芍药植株各生长指标进行单因素方差分析, 表明植株株高、茎粗、蕾径、分株数和切花数不同处理间差异均达显著水平。其中, $N_2P_2K_2$ 株高最大, 比相同磷、钾用量的无氮处理 $N_0P_2K_2$ 增加 13.5%, 与对照差异不显著; 处理 $N_2P_2K_1$ 、 $N_2P_2K_2$ 和 $N_1P_1K_2$ 茎粗较大, 显著高于 $N_2P_0K_2$; $N_3P_2K_2$ 处理的蕾径最大, 为 29.24 mm, 显著高于 $N_0P_2K_2$, 较 $N_0P_2K_2$ 增加 11.0%; $N_2P_2K_1$ 处理具有较高分株数和切花数, 分株数与 $N_1P_2K_1$ 、 $N_1P_1K_2$ 相近, 切花数与 $N_3P_2K_2$ 差异不显著, $N_2P_1K_1$ 处理的分株数和切花数较少。表明本试验条件下, 氮肥施用有利于增加芍药的株高和蕾径, 中低量供应磷肥植株较粗, 适量增施氮、磷肥切花数提高, 大量施用钾肥分株数降低。

以切花芍药的植株株高、茎粗、蕾径、分株数和切花数为主要生长指标, 采用隶属函数法对芍药生长状况进行综合评价, 各施肥处理综合隶属函数值存在显著差异 (图 1), 其中, $N_2P_2K_1$ 处理的综合隶属函数值最大, 为 0.61, 较对照增加 47.6%, 植株生长最好; 其次为 $N_1P_1K_2$ 、 $N_2P_2K_2$, 综合隶属函数值分别为 0.53 和 0.52, 较对照分别增加 28.0% 和 25.3%。各缺素处理 $N_0P_2K_2$ 、 $N_2P_0K_2$ 、 $N_2P_2K_0$ 的综合隶属函数值分别为 0.25、0.33 和 0.47, 较对照增加 -40.6%、-19.7% 和 14.4%。表明本试验条件下, 氮磷对芍药生长的影响大于钾, 中等氮、磷和低钾供应有利于促进并协调芍药生长, 增加分枝数和切花数, 提高切花芍药的经济效益。

表 3 不同施肥处理切花芍药的生长指标

编码	处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	蕾茎 (mm)	分株数 (万株 /hm ²)	切花数 (万枝 /hm ²)
1	N ₀ P ₀ K ₀	75.14 ± 2.96ab	8.92 ± 0.21ab	27.38 ± 1.40ab	13.13 ± 0.28ab	6.75 ± 0.15ab
2	N ₀ P ₂ K ₂	69.06 ± 1.93b	8.28 ± 0.14bc	26.34 ± 0.84b	11.90 ± 0.19c	6.80 ± 0.19ab
3	N ₁ P ₂ K ₂	76.68 ± 1.74ab	8.94 ± 0.25ab	27.88 ± 0.70ab	12.98 ± 0.39abc	7.43 ± 1.01ab
4	N ₂ P ₀ K ₂	70.17 ± 3.16ab	8.02 ± 0.05c	27.83 ± 0.13ab	12.80 ± 0.07abc	6.90 ± 0.42ab
5	N ₂ P ₁ K ₂	75.14 ± 3.64ab	8.84 ± 0.38abc	28.89 ± 0.69ab	12.83 ± 0.39abc	7.20 ± 0.50ab
6	N ₂ P ₂ K ₂	78.37 ± 3.33a	9.29 ± 0.42a	29.04 ± 0.92ab	13.05 ± 0.57abc	7.35 ± 0.55ab
7	N ₂ P ₃ K ₂	76.02 ± 2.03ab	8.95 ± 0.19ab	26.64 ± 1.08ab	12.08 ± 0.39bc	6.83 ± 0.53ab
8	N ₂ P ₂ K ₀	75.43 ± 1.42ab	9.14 ± 0.18ab	28.30 ± 1.10ab	12.98 ± 0.19abc	7.35 ± 0.76ab
9	N ₂ P ₂ K ₁	76.50 ± 0.20ab	9.38 ± 0.01a	29.08 ± 0.59ab	13.50 ± 0.21a	8.50 ± 0.75a
10	N ₂ P ₂ K ₃	70.64 ± 1.88ab	8.87 ± 0.26abc	28.52 ± 0.22ab	11.90 ± 0.31c	7.10 ± 0.58ab
11	N ₃ P ₂ K ₂	71.84 ± 0.28ab	8.53 ± 0.20abc	29.24 ± 0.09a	12.90 ± 0.42abc	8.30 ± 0.31a
12	N ₁ P ₁ K ₂	75.75 ± 3.13ab	9.20 ± 0.49a	27.46 ± 0.55ab	13.50 ± 0.50a	7.95 ± 0.15ab
13	N ₁ P ₂ K ₁	77.19 ± 4.88ab	8.56 ± 0.27abc	28.28 ± 1.03ab	13.65 ± 0.47a	6.98 ± 0.19ab
14	N ₂ P ₁ K ₁	72.26 ± 3.25ab	8.79 ± 0.32abc	27.62 ± 1.19ab	11.85 ± 0.36c	6.45 ± 0.36b
变异系数 (%)		7.40	6.77	6.08	6.80	14.79

注: 数据为 4 次重复的平均值 ± 标准误 (n=4); 变异系数 (%) = 标准差 / 平均数 (\bar{x}) × 100; 同一列中不同小写字母表示不同处理间差异显著 (P < 0.05)。

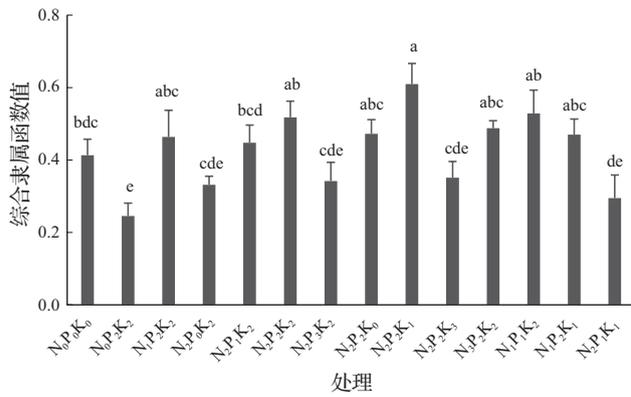


图 1 切花芍药生长指标综合分析

注: 图中数据为不同施肥处理各生长指标的平均隶属函数值 ± 标准差; 不同小写字母表示不同处理间差异显著 (P < 0.05)。

2.2 切花芍药肥料效应方程的拟合

2.2.1 一元二次肥料效应方程的拟合

分别选用处理 2、3、6、11, 处理 4、5、6、7 和处理 6、8、9、10, 拟合在当地 PK、NK、NP 最佳施肥量下切花芍药氮、磷、钾的肥料效应函数方程 (表 4)。由拟合的氮、磷、钾单因素肥料效应函数方程可知, 方程的二次项系数均为负值, 且相关均达显著水平。通过解方程得出, 在当地 P₂K₂、N₂K₂、N₂P₂ 条件下, 获得最高综合隶属函数值的氮、磷、钾肥料用量分别为 N 189.5 kg/hm²、P₂O₅ 46.8 kg/hm²、K₂O 53.4 kg/hm², 相应的综合隶属函数值分别为 0.52、0.50 和 0.59。

表 4 单因素肥料效应模型拟合结果

因素	肥料效应函数方程	R ²	F	P
N	y = 0.2493 + 0.0029N - 7.6501 × 10 ⁻⁶ N ²	0.6259	10.8773**	0.0017
P	y = 0.3214 + 0.0076P - 8.1135 × 10 ⁻⁵ P ²	0.4668	5.6908*	0.0168
K	y = 0.4800 + 0.0040K - 3.7479 × 10 ⁻⁵ K ²	0.5499	7.9409**	0.0056

注: * 代表显著相关 (P < 0.05), ** 代表极显著相关 (P < 0.01), *** 代表极其显著相关 (P < 0.001)。下同。

2.2.2 二元二次肥料效应方程的拟合

选用处理 2 ~ 7、11、12, 处理 2、3、6、8 ~ 11、13, 处理 4 ~ 10、14, 分别求得在以当地 K₂、P₂、N₂ 施肥水平下 NP、NK、PK 的二元二次肥料效

应方程 (表 5)。氮、磷、钾肥的两两交互效应均达到极其显著水平 (P < 0.001), 解方程得出, 在 N₂、P₂、K₂ 肥料用量条件下, 磷、钾肥的最佳推荐用量及相应的综合隶属函数值分别为 P₂O₅ 46.2 kg/hm²、K₂O

91.2 kg/hm² 和 0.53; 氮、钾肥的最佳推荐用量及相应的综合隶属函数值分别为 N 212.7 kg/hm²、K₂O 49.9 kg/hm² 和 0.60; 氮、磷肥的最佳推荐用量及相应的综合隶属函数值分别为 N 101.9 kg/hm²、P₂O₅ 29.7 kg/hm² 和 0.53。

表 5 两因素肥料效应模型拟合结果

因素	肥料效应函数方程	R ²	F	P
NP	$y = 0.5085 + 6.3144 \times 10^{-5} N + 1.1964 \times 10^{-3} P - 6.2742 \times 10^{-6} N^2 - 9.0076 \times 10^{-5} P^2 + 4.0854 \times 10^{-5} NP$	0.5348	5.9792***	0.0008
NK	$y = 0.0364 + 0.0040N + 0.0057K - 8.3367 \times 10^{-6} N^2 - 3.7740 \times 10^{-5} K^2 - 9.0877 \times 10^{-6} NK$	0.6060	7.9964***	0.0001
PK	$y = -0.7261 + 0.0259P + 0.0144K - 9.3933 \times 10^{-5} P^2 - 3.1204 \times 10^{-5} K^2 - 1.8801 \times 10^{-4} PK$	0.5604	6.6282***	0.0004

2.2.3 三元二次肥料效应方程的拟合

利用处理 1 ~ 14 进行氮、磷、钾三元二次效应方程拟合, 得到如下函数方程:

$$y = 0.4021 - 0.0035N + 0.0062P + 0.0067K - 4.5813 \times 10^{-6} N^2 - 7.4839 \times 10^{-5} P^2 - 2.2718 \times 10^{-5} K^2 + 7.0201 \times 10^{-5} NP + 1.6252 \times 10^{-5} NK - 1.2572 \times 10^{-4} PK$$

效应方程中的一次项系数出现负值, 方程拟合失败, 需要使用频率分析方法进行施肥量推荐。

2.2.4 频率分析法

(1) 确定统计区间

根据各处理的综合隶属函数值计算结果(图 1), 以综合隶属函数值的最大值和最小值给定统计区间范围为 0.244 < y < 0.611。

(2) 频率分析

分别计算每个试验小区的综合隶属函数值落入区间的次数, 再根据公式(6)~(8)计算平均数、标准差、均数标准差。统计得落入区间(0.244 < y < 0.611)的总数为 49, 氮、磷、钾(0~3)各施肥量落入区间的频率分别为: 氮, 12.2%、20.4%、59.2%、8.2%; 磷, 16.3%、16.3%、59.2%、8.2%; 钾, 16.3%、18.4%、57.1%、8.2%。以氮、磷、钾肥料的平均值 146.9 kg/hm²、47.8 kg/hm²、70.7 kg/hm² 为优化施肥量代入三元二次方程, 得到相应的综合隶属函数值为 0.51。以 95% 的置信区间确定推荐施肥量, 则氮、磷、钾肥料的推荐用量范围分别为 126.6 ~ 167.3 kg/hm²、40.5 ~ 55.0 kg/hm²、59.8 ~ 81.6 kg/hm²(表 6)。

表 6 频率分析

因素水平	N			P ₂ O ₅			K ₂ O		
	施肥量 (kg/hm ²)	次数	频率 (%)	施肥量 (kg/hm ²)	次数	频率 (%)	施肥量 (kg/hm ²)	次数	频率 (%)
0	0	6	12.2	0	8	16.3	0	8	16.3
1	90	10	20.4	30	8	16.3	45	9	18.2
2	180	29	59.2	60	29	59.2	90	28	57.1
3	270	4	8.2	90	4	8.2	135	4	8.2
总计	—	49	—	—	49	—	—	49	—
平均数 (\bar{x})	146.9	—	—	47.8	—	—	70.7	—	—
标准差	72.8	—	—	25.9	—	—	39.0	—	—
均数标准差	10.4	—	—	3.7	—	—	5.6	—	—
95% 置信区间	126.6 ~ 167.3			40.5 ~ 55.0			59.8 ~ 81.6		

2.3 不同肥料效应方程的施肥决策比较

将上述 7 种肥料效应方程计算出的推荐施肥量及其对应的综合隶属函数值进行汇总分析, 见表 7。结果表明, 各类型函数方程预测的综合隶属函数值从大到小依次为 NK 二元方程、K 一元方

程、NP 和 PK 二元方程、N 一元方程、NPK 三元方程和 P 一元方程。不同肥料效应方程计算的肥料推荐量存在一定差异, 氮、磷、钾的推荐范围分别为 N 101.9 ~ 212.7 kg/hm²、P₂O₅ 29.7 ~ 47.8 kg/hm²、K₂O 49.9 ~ 91.2 kg/hm², 施肥推荐量的变

异较大, 变异系数分别为 30.0%、20.3% 和 28.5%。其中, NK 二元方程用于 N 肥推荐, 其综合隶属函数值为 0.60, 接近于实际最高隶属函数值 0.61; PK 和 NP 二元方程用于 P 肥推荐, 综合隶属函数值相近, 均为 0.53, 考虑其 NP 二元方程 N 肥推荐量偏低, 优选 PK 二元方程进行 P 肥推荐; NK 二元方程和 K 一元方程综合隶属函数值差异不大, 钾肥推荐量相当, 考虑结合 N 肥推荐, 优选 NK 二元方程进行钾肥推荐较好。综合以上几种肥料效应方程推荐施肥结果, 确定本试验区切花芍药推荐施肥量为 N 212.7 kg/hm²、P₂O₅ 46.2 kg/hm²、K₂O 49.9 kg/hm², 施肥配比为 1 : 0.21 : 0.23。

表 7 不同肥料效应方程的施肥决策

肥料效应函数	因素	推荐施肥量 (kg/hm ²)			综合隶属函数值
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
一元二次	N	189.5	60	90	0.52
	P	180	46.8	90	0.50
	K	180	60	53.4	0.59
二元二次	NP	101.9	29.7	90	0.53
	NK	212.7	60	49.9	0.60
	PK	180	46.2	91.2	0.53
三元二次 / 频率分析法	NPK	146.9	47.8	70.7	0.51
推荐施肥量平均		162.8	42.6	66.3	
变异系数 (%)		30.0	20.3	28.5	

3 讨论

作为植物必需的大量元素, 氮、磷、钾的供应水平显著影响植物体内的多种生理代谢过程, 进而影响植物的生长发育^[24]。研究表明, 施氮对植物的氮代谢具有调节作用^[11], 适宜的供氮浓度可提高植物氮代谢关键酶的活性, 增强氮素同化能力, 改善芍药的氮素营养^[12]; 磷是植物细胞结构物质的组成成分, 参与能量代谢和碳氮代谢等过程, 并调节代谢进程, 在芍药发育盛期采用 5% 过磷酸钙溶液进行根外追肥, 增产效果显著^[25]; 钾既是植物的营养元素, 也是“抗逆元素”, 施用钾肥可提高芍药的抗性^[15]。除单施氮、磷、钾对芍药生长产生影响外, 肥料间的交互作用与切花芍药的生长也存在密切关系^[14]。本试验条件下, 不同施肥处理对芍药的生长影响显著, 拟合一元二次肥料效应

方程, 二次项系数均为负值, 曲线先升后降, 符合报酬递减律, 说明芍药生长对养分的吸收有一定的阈值, 这与王立民等^[26]的试验结果一致, 施肥量并非越多越好, 适量施肥在保障芍药良好生长的同时, 也能减少资源的浪费和环境污染风险^[27]。而拟合 NP、NK、PK 二元二次肥料效应方程, 相关性均达极显著水平, 表明氮、磷、钾肥之间存在明显的正交互作用。仅施用磷、钾肥料而不施氮肥的处理 N₀P₂K₂ 的综合隶属函数值最低, 生长状况最差, 甚至较不施肥的对照降低 40.6%, 充分说明平衡施肥对芍药生长十分重要, 生产中应予以重视^[28-29]。

肥料施用显著影响芍药的生长发育, 但芍药的生长状况是多指标的综合反映^[30], 单一生长指标难以判断施肥方案的优劣。万映伶等^[31]采用聚类分析法, 对中国 4 个主要栽培地的 346 个中国观赏芍药品种的表型多样性进行解析, 结果表明在芍药的数值性状中, 株高和茎粗多样性指数最高, 其次是蕾径和花径, 可作为评价芍药生长状况的评价指标。司仕英等^[32]利用层次分析法对芍药的生长状况、适应性、观赏性等 15 个指标进行综合性状评价。史小华等^[33]基于盆栽芍药品种的株型紧凑, 成花率高等为筛选目标, 以株高为负向择优指标, 分株数、花径、开花数和成花率等指标为正向择优指标, 采用隶属函数法对 8 个盆栽芍药品种进行了综合评估和筛选。切花芍药生长状况的优劣既要考虑其营养生长状况, 也应考虑切花的产量和品质, 本试验选择株高、茎粗、蕾径、分株数和切花数等 5 个指标, 并根据其对芍药生长和经济效益的贡献进行权重分配, 采用隶属函数法对芍药的生长状况进行综合评价, 在此基础上, 探讨不同施肥处理对综合隶属函数值的影响, 以此来反映施肥方案的优劣。

“3414”试验方案既吸收了回归最优设计的处理少、效率高的优点, 又符合肥料试验和施肥决策的专业要求, 被广泛用于作物推荐施肥的试验研究。通过对 14 个不同施肥处理的选择, 拟合不同施肥条件下的肥料效应方程, 确定最佳施肥量^[34]。利用“3414”的试验结果, 采用一元二次肥料效应模型进行施肥推荐时, 方程的拟合成功率较高; 在实际进行田间试验时, 由于土壤肥力、气候条件以及人为因素等的干扰, 充分考虑肥料因子交互效应的二元二次和三元二次肥料效应模型, 尤其是三元

二次肥料效应模型的拟合成功率相对较低^[34]。本试验模拟肥料施用和芍药生长的综合隶属函数值的数学关系,一元二次和二元二次肥料效应方程均达显著水平,可依据当地实际施肥情况选择最佳施肥量。但本试验拟合的三元二次方程一次项系数出现负值,方程拟合失败,拟合失败的三元二次方程为非典型肥料效应函数,不能采用边际求导法计算最佳施肥量,可采用频率分析法来确定适宜的推荐施肥量^[23]。通过不同肥料效应函数方程计算得到的推荐施肥用量有较大变异,还应根据生产实际结合肥料推荐用量下相应的综合隶属函数值进行分析,确定推荐的最佳肥料用量,同时,结合植物生育期内的养分需求特征确定不同生长阶段的养分配比^[35]。

4 结论

本试验条件下,氮、磷、钾肥料施用显著影响切花芍药的的生长发育,对芍药生长的影响为氮>磷>钾。对各施肥处理的综合隶属函数值和施肥量进行肥料效应模型拟合和综合分析,切花芍药推荐施肥量为 N 212.7 kg/hm²、P₂O₅ 46.2 kg/hm²、K₂O 49.9 kg/hm²,施肥配比为 1:0.21:0.23,可用于本试验区切花芍药生产的施肥参考。

参考文献:

[1] Yang Y, Sun M, Li S, et al. Germplasm resources and genetic breeding of *Paeonia*: a systematic review [J]. Horticulture Research, 2020, 7 (1): 107.

[2] 万映伶,金亦佳,刘爱青,等. 不同栽培地芍药品种资源遗传多样性的 SSR 分析比较 [J]. 园艺学报, 2023, 50 (4): 875-884.

[3] 毕雅琼,张明旭,陈元,等. 基于 Biomod2 组合模型的中国野生芍药 *Paeonia lactiflora* 适宜生境分布 [J]. 中国中药杂志, 2022, 47 (2): 376-384.

[4] 洪万木,王浩毅,张建国. 芍药的价值分析与开发路径研究 [J]. 园艺与种苗, 2022, 42 (11): 28-29, 48.

[5] Wu G, Shen Y, Nie R, et al. The bioactive compounds and cellular antioxidant activity of herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.) seed oil from China [J]. Journal of Food Science, 2020, 85 (11): 3815-3822.

[6] Wang X L, Wang Y T, Guo Z Y, et al. Efficacy of paeoniflorin on models of depression: a systematic review and meta-analysis of rodent studies [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2022, 290: 115067.

[7] Kamenetsky R, Dole J. Herbaceous peony (*Paeonia*): genetics, physiology and cut flower production [J]. Floriculture

and Ornamental Biotechnology, 2012, 6: 62-77.

[8] 周保国,董从国,张明春,等. 切花芍药采切期调控技术研究 [J]. 园艺与种苗, 2023, 43 (7): 22-24.

[9] 许文营,王煜,智利红,等. 洛阳地区切花芍药设施促成栽培技术 [J]. 北方园艺, 2022 (16): 150-153.

[10] Wang Y, Chen Y, Wu W. Potassium and phosphorus transport and signaling in plants [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2021, 63 (1): 34-52.

[11] Xu G H, Takahashi H. Improving nitrogen use efficiency: from cells to plant systems [J]. Journal of Experimental Botany, 2020, 71 (15): 4359-4364.

[12] 李兆鹏,姜楠南,孙音,等. 氮水平对盆栽芍药生长发育及氮代谢的影响 [J]. 山东林业科技, 2019, 49 (5): 13-17.

[13] 赵亚兰,代立兰,徐学军,等. 不同基肥施肥量对芍药产量和经济效益的影响 [J]. 中兽医医药杂志, 2023, 42 (2): 62-65.

[14] 陈暄,王康才,吴美丽,等. 正交法研究芍药生长过程中氮磷钾肥的平衡施用 [J]. 中药材, 2008 (6): 805-807.

[15] 牛立军. 芍药切花露地及设施生产栽培技术研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2010.

[16] Chen Y, Zhou X, Lin Y, et al. Pumpkin yield affected by soil nutrients and the interactions of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers [J]. HortScience, 2019, 54 (10): 1831-1835.

[17] 谭施北,习金根,陈河龙,等. 剑麻“3414”肥料效应研究 [J]. 热带农业科学, 2023, 43 (7): 1-9.

[18] 王琴,王旭成,李小云,等. “3414”施肥效应对宁夏干旱区无芒雀麦种子产量和质量的影响 [J]. 草地学报, 2022, 30 (12): 3470-3480.

[19] Mattos D, Quaggio J A, Cantarella H, et al. Response of young citrus trees on selected root stocks to nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization [J]. Journal of Plant Nutrition, 2006, 29 (8): 1371-1385.

[20] 陈朗,刘文欢,刘思雨,等. 柑橘营养施肥推荐专家系统的建立与验证 [J]. 农业工程学报, 2023, 39 (1): 146-154.

[21] 赵亚南,徐霞,孙笑梅,等. 基于 GIS 的河南省不同区域小麦氮磷钾推荐量与施肥配方 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (6): 938-948.

[22] 吴志勇,闫静,施维新,等. “3414”肥料效应试验的设计与统计分析 [J]. 新疆农业科学, 2008, (1): 135-141.

[23] 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.

[24] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants [M]. 2nd ed. London: Academic Press, 1995.

[25] 刘玉芬. 北药芍药栽培技术浅析 [J]. 园艺与种苗, 2017 (9): 49-51, 56.

[26] 王立民,吕品,于志民,等. 栽培赤芍配方肥优化分析 [J]. 腐植酸, 2020 (5): 40-44, 51.

[27] Zhang C, Huang X, Zhang X, et al. Effects of biochar application on soil nitrogen and phosphorous leaching loss and oil peony growth [J]. Agricultural Water Management, 2021, 255: 107022.



- [28] Novák V, Vidovič J. The relation between transpiration and nutrient uptake dynamics in plant canopies applicable to modelling of soil chemicals balance [C]. ERB and Northern European FRIEND Project 5 Conference, Demänovská dolina, Slovakia, 2002.
- [29] Fanjaniaina M L, Stark F, Ramarovaoka N P, et al. Nutrient flows and balances in mixed farming systems in madagascar [J]. Sustainability, 2022, 14 (2): 1-19.
- [30] 王慧娟, 王二强, 符真珠, 等. 芍药不同品种种群质资源表型多样性分析[J]. 河南农业科学, 2022, 51 (12): 110-121.
- [31] 万映伶, 朱梦婷, 刘爱青, 等. 中国观赏芍药表型多样性解析与资源评价 [J]. 中国农业科学, 2022, 55 (18): 3629-3639.
- [32] 司仕英, 孟秦语, 孙道阳, 等. 关中地区引种芍药品种的综合性状评价 [J]. 西北林学院学报, 2021, 36 (6): 134-139.
- [33] 史小华, 张佳平, 刘毅, 等. 国外引进盆栽芍药品种在杭州的生长观测及筛选 [J]. 分子植物育种, 2022, 20 (1): 334-342.
- [34] 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 (4): 409-413.
- [35] Du S, Zhang Z X, Chen P, et al. Fate of each period fertilizer N in Mollisols under water and N management: A ¹⁵N tracer study [J]. Agricultural Water Management. 2022, 272: 107872.

Study on the recommended fertilization amount of N, P, K for cut herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.) based on “3414” experiment

ZHAO Jun-fu¹, HE Han-ying¹, ZHANG Ming-ze¹, MI Ming¹, ZHAO Wen-shuang³, WANG Lian-xiang⁴, MA Hai-lin², SI Dong-xia^{1*} (1. School of Agricultural Science and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng Shandong 252059; 2. Shandong Academy of Forest, Jinan Shandong 250014; 3. Shandong Shengshi-Shaohua Intelligent Agriculture Co., Ltd., Heze Shandong 274035; 4. Heze Academy of Agricultural Sciences, Heze Shandong 274031)

Abstract: In view of the current situation of blind fertilization in the growth process of cut herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.), ‘Xiangtiange’ herbaceous peony was taken as the test material, the experimental fertilization scheme of “3414” was adopted, and the membership function method was used to study the effects of different amounts of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) fertilizer on the growth of herbaceous peony, and the appropriate fertilizer amount for the production of cut herbaceous peony. The results showed that different fertilization treatments had significant effects on plant height, stem diameter, bud diameter, plant number and cut flower number ($P < 0.05$). The comprehensive membership function value of N and P deficiency plots were less than that of no fertilizer plot, the K deficiency plot was greater than that of no fertilizer plot, and the effect on the growth of herbaceous peony was $N > P > K$. The comprehensive membership function value of $N_2P_2K_1$ treatment was the largest, which was 0.61, and the growth of herbaceous peony plants was the best. The comprehensive membership function value and fertilizer application rate of each treatment were simulated and analyzed by fertilizer effect functions. The fitting correlation of quadratic and binary quadratic fertilizer effect function equations reached a significant level. The ternary quadratic fertilizer effect equation was an atypical model, and the frequency analysis method was used to calculate the recommended amount of fertilizer. Based on the comprehensive analysis of the recommended dosage of each fertilizer effect function equation and the corresponding comprehensive membership function value, the recommended fertilization amount of cut herbaceous peony in this experiment was $N\ 212.7\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $P_2O_5\ 46.2\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $K_2O\ 49.9\ \text{kg}/\text{hm}^2$, and the fertilization ratio was $1 : 0.21 : 0.23$. It could be used as a fertilization reference for the production of cut herbaceous peony in this experimental area.

Key words: “3414” fertilization scheme; cut herbaceous peony; fertilizer effect function; frequency analysis method