



配方施肥对盆栽‘康乃馨’杜鹃生长及生理特性的影响

吴林世, 李巧云, 廖菊阳, 彭立云, 宋胤, 黄雅奇, 王玲, 陈婵, 刘艳

引用本文:

吴林世, 李巧云, 廖菊阳, 等. 配方施肥对盆栽‘康乃馨’杜鹃生长及生理特性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2026, 34(3): 317–327.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.5007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氮素形态对铁线莲光合特性及氮代谢的影响

Effect of Nitrogen Forms on Photosynthetic Characteristics and Nitrogen Metabolism of *Clematis*

热带亚热带植物学报. 2021, 29(3): 276–284 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4281>

盐度、温度和光照强度对针叶蕨藻的生长及光合活性的影响

Effects of Salinity, Temperature and Light Intensity on Growth and Photosynthetic Activity of *Caulerpa sertularioides*

热带亚热带植物学报. 2021, 29(6): 626–633 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4378>

铁皮石斛花总RNA提取方法的比较研究

Comparison of Several Total RNA Extraction Methods from Flowers of *Dendrobium officinale*

热带亚热带植物学报. 2020, 28(5): 479–486 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4202>

不同种植模式下重金属污染对牧草叶片光合特性和重金属含量的影响

Effects of Heavy Metal Pollution on Photosynthetic Characteristics and Heavy Metal Contents in Forage Leaves under Different Planting Patterns

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 31–40 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4244>

云南木兰科48种野生植物资源的遗传多样性研究

Studies on Genetic Diversity of 48 Wild Species of Magnoliaceae in Yunnan

热带亚热带植物学报. 2020, 28(3): 277–284 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4161>

向下翻页，浏览PDF全文

配方施肥对盆栽‘康乃馨’杜鹃生长及生理特性的影响

吴林世¹, 李巧云¹, 廖菊阳¹, 彭立云², 宋胤¹, 黄雅奇¹, 王玲¹, 陈婵¹, 刘艳^{1*}

(1. 湖南省植物园, 国家林业草原杜鹃工程技术研究中心, 长沙 410116; 2. 中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘要: 为筛选‘康乃馨’杜鹃(*Rhododendron hybrid* ‘Carnation’)盆栽栽培的最适肥料配方, 采用三因素三水平 $L_9(3^4)$ 正交试验设计, 系统探究不同氮(N)、磷(P)、钾(K)配比对植株生长和生理特性的影响。试验因素包括尿素($N \geq 46\%$, 设 0.5、1.0、1.5 g/pot, 分别用 N_1 、 N_2 、 N_3 表示)、过磷酸钙($P_2O_5 \geq 12\%$, 设 0.8、1.6、2.4 g/pot, 分别用 P_1 、 P_2 、 P_3 表示)和硫酸钾($K_2O \geq 52\%$, 设 1.0、2.0、3.0 g/pot, 分别用 K_1 、 K_2 、 K_3 表示)。结果表明, 处理 M5 ($N_2P_2K_2$) 显著促进株高增长和开花数量, 处理 M6 ($N_2P_3K_1$) 最有利于地径增粗。P、K 肥施用量对地上部、地下部和总生物量积累具有显著影响。处理 M9 的叶绿素含量最高; 处理 M5 下可溶性糖含量最优; 处理 M7 ($N_3P_1K_2$) 下可溶性蛋白含量最高; 抗氧化酶活性方面, 处理 $N_1P_2K_1$ 的超氧化物歧化酶活性最高, 处理 $N_3P_1K_1$ 的过氧化物酶含量最高; 处理 M7 下丙二醛含量最低。基于主成分分析的综合评价表明, 各处理综合得分排序为 $M5 > M4 > M6 > M1 > M2 > M7 > M8 > M3 > M9 > CK$ (对照)。其中, 最优处理 M5 在促进‘康乃馨’杜鹃生长、提升生理活性和开花方面效果最为显著。这为‘康乃馨’杜鹃的高效栽培与繁育技术优化提供了理论依据。

关键词: 杜鹃; 肥料; 生长; 生理特性

doi: 10.11926/jtsb.5007 CSTR:32235.14.jtsb.5007

Effects of Formula Fertilization on Growth and Physiological Characteristics of Potted *Rhododendron hybrid* ‘Carnation’

WU Linshi¹, LI Qiaoyun¹, LIAO Juyang¹, PENG Liyun², SONG Yin¹, HUANG Yaqi¹, WANG Ling¹, CHEN Chan¹, LIU Yan^{1*}

(1. Hunan Botanical Garden, Rhododendron Engineering & Technology Research Center of China's National Forestry and Grassland Administration, Changsha 410116, China; 2. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: To screen the optimal fertilizer formula for pot cultivation of *Rhododendron hybrid* ‘Carnation’, a three-factor three-level $L_9(3^4)$ orthogonal test design was adopted to systematically investigate the effects of different nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) ratios on plant growth and physiological characteristics. The test factors included urea ($N \geq 46\%$, set at 0.5, 1.0, and 1.5 g/pot, represented by N_1 , N_2 , and N_3 respectively), superphosphate ($P_2O_5 \geq 12\%$, set at 0.8, 1.6, and 2.4 g/pot, represented by P_1 , P_2 , and P_3 respectively), and potassium sulfate ($K_2O \geq 52\%$, set at 1.0, 2.0, and 3.0 g/pot, represented by K_1 , K_2 , and K_3 respectively). The results showed that treatment M5 ($N_2P_2K_2$) significantly promoted plant height growth and flower quantity, while

收稿日期: 2025-01-21 接受日期: 2025-06-23

基金项目: 林业生态保护修复及发展专项(XLK202501); 中央财政林业科技推广示范基金项目([2023]XT20); 湖南省自然科学基金面上基金项目(2024JJ5235); 湖南省林业科技创新项目(XLKY202303, XLKY202313); 湖南省利用欧洲投资银行贷款提高森林质量和效率示范项目(OT-s-KTA4)资助。This work was supported by the Special Project for Ecological Protection, Restoration and Development of Forestry (Grant No. XLK202501), the Project for Forestry Science and Technology Promotion and Demonstration of Central Finance (Grant No. [2023]XT20), the Project for Natural Science in Hunan (Grant No. 2024JJ5235), the Project for Forestry Science and Technology Innovation in Hunan (Grant No. XLKY202303, XLKY202313), and the Demonstration Project for Improving Forest Quality and Efficiency in Hunan by Utilizing Loans from the European Investment Bank (Grant No. OT-s-KTA4).

作者简介: 吴林世(1990年生), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事新优园林植物种质资源保育及开发利用的研究。E-mail: 282678605@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuyan6287@163.com

treatment M6 ($N_2P_3K_1$) was most conducive to stem diameter thickening. The application amounts of P and K fertilizers had significant effects on the accumulation of aboveground, underground, and total biomass. Treatment M9 had the highest chlorophyll content; treatment M5 had the optimal soluble sugar content; treatment M7 ($N_3P_1K_2$) had the highest soluble protein content; in terms of antioxidant enzyme activity, treatment $N_1P_2K_1$ had the highest superoxide dismutase activity, and treatment $N_3P_1K_1$ had the highest peroxidase content; treatment M7 had the lowest malondialdehyde content. Based on the comprehensive evaluation by principal component analysis, the comprehensive score ranking of each treatment was $M5>M4>M6>M1>M2>M7>M8>M3>M9>CK$ (control). Among them, the optimal treatment M5 was most effective in promoting the growth, enhancing physiological activity, and increasing flowering of ‘Carnation’. This provides a theoretical basis for the optimization of efficient cultivation and propagation techniques for ‘Carnation’.

Key words: *Rhododendron hybrid*; Fertilizer; Growth; Physiological characteristic

花卉产业是当前经济发展的热门产业, 杜鹃又是我国花卉生产中的重要花卉。中国巨大的花卉市场吸引了大量国外高品质杜鹃园艺产品的引入^[1], 使我国花卉产业蓬勃发展, ‘康乃馨’杜鹃(*Rhododendron hybrid* ‘Carnation’)具有三季开花特性, 近年来广受好评。‘康乃馨’杜鹃是杜鹃花科(Ericaceae)杜鹃属安酷杜鹃系列(属于春鹃)中的一种, 为常绿灌木, 其叶呈薄革质近纸质, 卵圆形, 叶长 3~5 cm, 宽 1~3.5 cm, 叶背面少量毛, 叶正面有光泽; 花色粉红、重瓣, 花径 6.5~7.0 cm, 一年多季开花, 3 月、8 月 2 次开的花较盛, 花期长达 2 个月。‘康乃馨’杜鹃抗寒性强、耐热性好^[2], 喜疏松、肥沃、排水良好的偏酸性土壤^[3]。‘康乃馨’杜鹃应用广泛, 用于片植、丛植, 快速开花形成花境; 种植于道路两侧、林缘边, 与高大乔木配置, 用以增强整体景观的欣赏性^[4]。但在实际的生产过程中, 由于我国针对花卉施肥的理论支持不足^[5-7], 养护不当时‘康乃馨’杜鹃往往会出现生长势变缓、开花性变差、花期缩短等问题, 本试验旨在通过研究不同的配方施肥与‘康乃馨’杜鹃的生长关系, 探索适合‘康乃馨’杜鹃的最佳施肥配方, 以期能通过施肥技术改进‘康乃馨’杜鹃的生长特性, 为‘康乃馨’杜鹃产业化和规模化提供施肥技术支撑。

1 材料和方法

1.1 材料

试验材料选择湖南省植物园培育的 3 a 生‘康乃馨’杜鹃(*Rhododendron hybrid* ‘Carnation’)扦插苗, 挑选株高、地径相近, 长势一致, 健壮饱满的植株进行试验。参照郑绍傑等^[8]的试验设计方法及杜鹃

营养特性, 确定试验选用肥料, 其中氮肥选用尿素(N 含量 $\geq 46\%$), 为速效性氮肥; 磷肥选用过磷酸钙(P_2O_5 含量 $\geq 12\%$), 属于水溶性速效磷肥; 钾肥选用硫酸钾(K_2O 含量 $\geq 52\%$), 为速效性钾肥。文中氮肥简写为 N, 磷肥简写为 P, 钾肥简写为 K。

1.2 方法

2023 年 6 月 15 日‘康乃馨’杜鹃上盆后摆放在室外, 不遮阴。盆规格为上口径 20.6 cm, 高 17.5 cm, 下口径 15 cm, 缓苗半月后, 7 月 1 日开始进行施肥试验, 每 15 d 施肥 1 次。盆内基质为育苗专用泥炭土、园土、珍珠岩按体积比 3:1:1 的比例混合均匀而成, 盆内配土的净重为 1.68 kg, 配土的 pH 为 5.8。施肥量根据三因素三水平 $L_9(3^4)$ 的正交试验, 以不施肥的空白组作为对照, 共计 10 个处理, 150 盆苗木。尿素设计 3 个施肥水平, 分别为 N_1 (0.5 g/pot)、 N_2 (1.0 g/pot)、 N_3 (1.5 g/pot); 过磷酸钙设计 3 个施肥水平, 分别为 P_1 (0.8 g/pot)、 P_2 (1.6 g/pot)、 P_3 (2.4 g/pot); 硫酸钾设计 3 个施肥水平, 分别为 K_1 (1.0 g/pot)、 K_2 (2.0 g/pot)、 K_3 (3.0 g/pot)。施肥方法为浇灌施肥。

1.3 指标测定与分析

生长指标 从 2023 年 7 月 1 日试验开始时, 测试初始数据, 此后每隔 15 d 测定 1 次, 按月统计总增长量。在试验结束后, 每个处理随机选取 3 株整株挖出, 测生物量。2024 年 2 月下旬, 每日观察开花情况, 记录花期和开花情况, 测定开花指标。

生理指标测定 在开花结束至植株快速生长期结束后, 每个处理中随机选择 3 株植株, 每株植株树冠的东南西北 4 个方向分别选择 1 片健康、成熟、长势相近的叶片, 每个处理共计 12 片叶片。将选取的叶片剪碎(除去主叶脉)后, 采用丙酮-乙醇提取法测定叶绿素含量^[9], 蒽酮比色法^[10]测定可溶

性糖含量,考马斯亮蓝(G-250)染色法^[11]测定可溶性蛋白质含量,硫代巴比妥酸显色法^[12]测定丙二醛(MDA)含量,氮蓝四唑(NBT)光化还原法^[13]测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,愈创木酚法^[14]测定过氧化物酶(POD)活性,每个样品重复 3 次测定。

1.4 数据的统计分析

试验数据采用 SPSS 26.0 和 SPSSAU 进行方差分析和主成分分析,采用 WPS 绘图制表。

2 结果和分析

2.1 施肥对株高、地径的影响

由表 1 可见,在整个试验周期中各个组植株的株高、地径均有不同程度的持续增长。第 2 季度各组的株高增长量均最多,花期过后,高温的夏季是快速生长期,株高增长最为迅速。第 4 季度增长量最少,冬季生长速度变缓,12 月生长速度达到最低值,表明受低温的影响,植株进入休眠状态,2 月气温回暖,植株又开始恢复快速生长。各试验组的株高增长量均高于对照(CK),说明不同配方比施肥对‘康乃馨’杜鹃的株高增长有促进作用,其中 M5 的株高增长量最大,达到 38.4 cm,增长率也最大,为 143.04%,说明 M5 对‘康乃馨’杜鹃株高生长的促进作用最好。

从地径增长趋势可见,未施肥的对照组对比其他试验组的地径增长速度要明显缓慢。不同施肥配方组间的增长速度也不同,表明不同肥料元素对地径增长的促进作用也不同,与株高增长类似。地径

增长最快的分别是 5 月—6 月。M6 的植株地径增长总量最大,相对 CK 增长量为 255.27%。

采用极差分析和多重比较进一步分析 N、P、K 与株高、地径增长间的关系(表 2)。N、P、K 在不同水平上对株高的影响都存在极显著差异。对株高极差值进行分析,表明 N、P、K 对株高增长量的影响程度中等,N 最大,P 次之,K 最小,处理组 M5 的效果最好。通过植株地径的变化分析,N 的 3 个水平 N₁、N₂、N₃之间存在极显著差异($P<0.01$),处理组 M6 效果最好。

2.2 施肥对根系的影响

由图 1 可见,在整个试验周期中各组的植株除根长外,根直径、最长根、一级根数量均比 CK 大;根长也只有 M3 和 M9 略低于 CK。最长根根长和一级根数量变化明显,M5 的根长最长,达 23.17 cm,较 CK 高 70.89%;一级根数量最多的是 M7,有 19.00 条,较 CK 高 90.00%。对不同水平的 N、P、K 进行极差分析和多重比较,根据 R 值,N、P、K 影响根长的比重依次为:K ($R=1.16$)>N=P ($R=1.40$),因此推测对根长影响最显著的处理组为 N₂P₁K₂。

2.3 施肥对生物量的影响

由表 3 可见,M1 组的茎生物量增长最大,为 48.86 g,比 CK 增长了 80.56%;叶生物量增长最大的是 M7 (28.04 g),比 CK 增长了 171.41%,地上生物量增幅最大的是 M7,比 CK 增长了 91.74%;总生物量影响最大的是 M7 处理,比 CK 增长 108.63%。极差分析和多重比较表明,N、P、K 对根长影响依次为 K ($R=1.16$)>N=P ($R=1.40$),影响最显著的为 N₂P₁K₂ 处

表 1 配方施肥对‘康乃馨’株高、地径增长量的影响

Table 1 Effect of formula fertilization on height and diameter increment of ‘Carnation’

编号 No.	施肥配比 Fertilizer ratio	株高 Height			地径 Base diameter		
		施肥前 (cm) Before fertilizer	增长量 (cm) Increment	增长率 /% Increase rate	施肥前 (cm) Before fertilizer	增长量 (cm) Increment	增长率 /% Increase rate
CK	0	44.94±0.66	15.8±1.22Gg	0	5.91±0.19	2.37±0.20Fg	0.00
M1	N ₁ P ₁ K ₁	42.82±0.32	22.7±0.48Ee	43.67	6.36±0.16	6.63±0.16Bb	179.75
M2	N ₁ P ₂ K ₃	41.09±48.05	28.5±0.52Cc	80.38	5.79±0.19	5.37±0.19Dd	126.58
M3	N ₁ P ₃ K ₂	48.05±0.35	35.3±0.59Bb	123.42	6.04±0.18	6.24±0.18BCbc	163.29
M4	N ₂ P ₁ K ₃	42.40±0.36	23.8±1.06DEe	50.63	6.01±0.49	5.82±0.49CDcd	145.57
M5	N ₂ P ₂ K ₂	43.48±0.62	38.4±2.41Aa	143.04	6.40±0.29	8.13±0.29Aa	243.04
M6	N ₂ P ₃ K ₁	45.25±0.93	36.8±0.91ABab	132.91	5.42±0.14	8.42±0.14Aa	255.27
M7	N ₃ P ₁ K ₂	45.41±0.81	18.7±1.68Ff	18.35	5.24±0.24	3.97±0.24Eef	67.51
M8	N ₃ P ₂ K ₁	43.68±0.45	26.3±0.33CDd	66.46	5.59±0.26	4.28±0.26Ee	80.59
M9	N ₃ P ₃ K ₃	31.43±0.48	17.9±0.73FGf	13.29	5.91±0.43	3.66±0.43Ef	54.43

不同大小写字母分别表示差异极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$)。下同

Different capital and small letters indicate significant differences at 0.01 and 0.05 level, respectively. The same below

表 2 配方施肥对‘康乃馨’株高、地径、根系、开花的极差分析和多重比较

Table 2 Range analysis and multiple comparison of formula fertilization on height, diameter, root and flowering of ‘Carnation’

项目 Item	因子 Factor	极差 R Range R	项目 Item	因子 Factor	极差 R Range R	项目 Item	因子 Factor	极差 R Range R
株高 Plant height	N	17.20	根直径 Root diameter	N	3.22	盛花数量 Number of blooming flower	N	26.52
	P	15.27		P	2.75		P	23.17
	K	15.00		K	3.12		K	19.10
地径 Base diameter	N	5.09	最长根 Longest root	N	9.35	单花花期 Single flowering period	N	2.89
	P	3.74		P	4.50		P	3.34
	K	4.07		K	4.87		K	2.56
根长 Root length	N	1.40	一级根数量 Number of first order root	N	5.44	整株花期 Whole plant flowering period	N	6.00
	P	1.40		P	4.78		P	4.22
	K	1.16		K	5.11		K	5.00

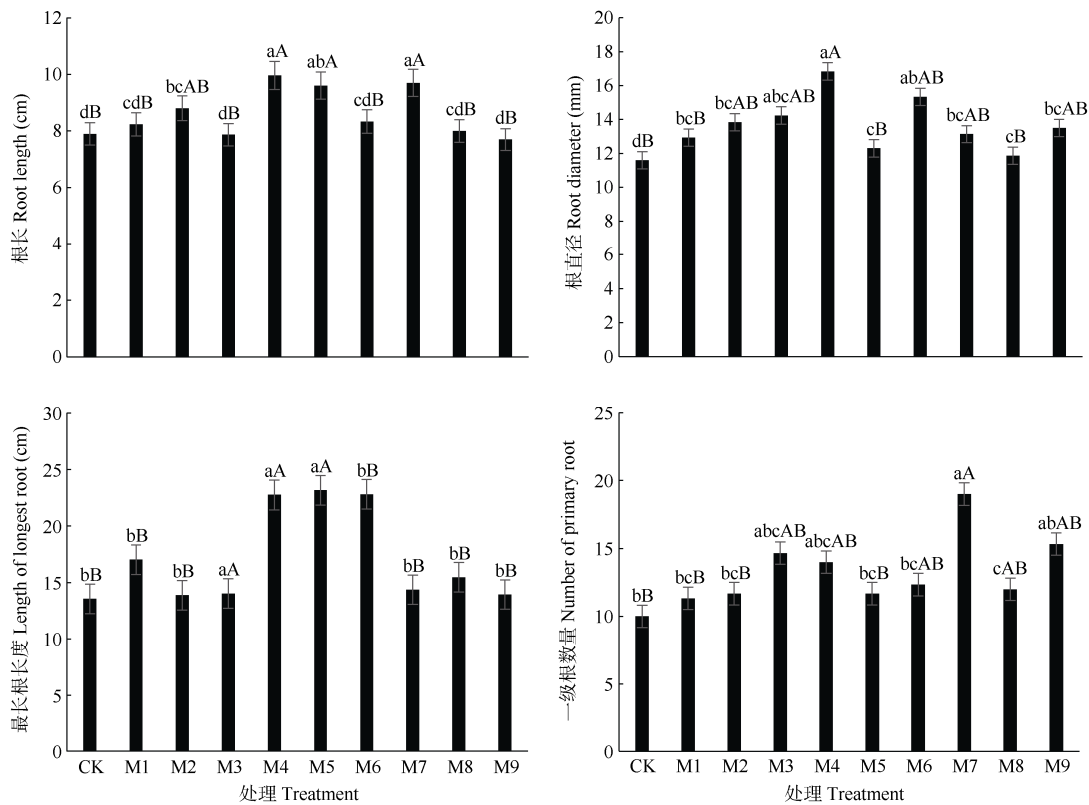


图 1 配方施肥对‘康乃馨’根系指标的影响。CK、M1~M9 见表 1。下同
Fig. 1 Effect of formula fertilization on root indexes of ‘Carnation’. CK, M1–M9 see Table 1. The same below

理；对一级根数量而言，最好的处理为 M7。

2.4 施肥对开花特性的影响

通过数据分析，不同试验组对花期影响较为显著，始花期前后最大相差 4 d，最早的是 M4 组，3 月 18 日进入始花期，最迟的是 M6 和 M9，3 月 22 日才进入始花期，比 CK 还推迟了 1 d (表 4)。盛花期时间较为一致，基本都在 4 月 5 日—8 日之间，且当时天气为连续的小雨至中雨，故而盛花期较为接近。从花期时间分析，整株的花期大约在 40 d 左右，

大大高于目前市场上杜鹃类花卉的观花期，若算上花蕾期和最后一朵花完全凋落的时间，整体花期可以达到 2 个月以上。M9 处理组开花最少，平均花量也有 21.07 朵，比 CK 高出 15.33%；开花数量最佳的 M5 组，开花数量多达 52.49 朵。综合来看，施肥均能有效促进花期花量的增长。进一步分析 N、P、K 对花期的影响，选取盛花数量、单花花期、整株花期进行极差分析及多重比较，结果表明对盛花数量影响依次为 N ($R=26.52$)>P ($R=23.17$)>K ($R=$

19.10), 最佳组合为 M5, 与记录的开花数量最多一致; M5 组单朵花期最长, 不同水平 N、P、K 间对单花的影响都没有显著差异; M5 组整株花期最长, 对整株花期影响依次为 N ($R=6.00$)>K ($R=5.00$)>P ($R=4.22$)。

表 3 配方施肥对‘康乃馨’生物量的影响

Table 3 Effect of fertilizer formula on biomass of ‘Carnation’					
处理 Treatment	根 (g) Root	茎 (g) Stem	叶 (g) Leaf	地上部分 (g) Above-ground	总和 (g) Total
CK	11.63±0.36Ce (0.00)	27.06±3.19DEde (0.00)	10.33±0.65De (0.00)	37.39±3.77DEd (0.00)	49.01±4.03Eef (0.00)
M1	26.36±2.16ABbc (126.69)	48.86±4.18Aa (80.53)	18.18±3.02BCbcd (75.99)	67.04±1.44Aba (79.32)	93.40±3.61ABab (90.55)
M2	26.85±3.23ABb (130.96)	31.90±1.49CDcd (17.90)	23.74±2.72ABab (129.82)	55.64±2.59BCc (48.83)	82.50±4.81ABbcdC (68.32)
M3	20.32±4.35Bd (74.80)	19.57±2.77EFef (-27.68)	14.54±2.24CDde (40.79)	34.11±4.97Ede (-8.76)	54.43±9.22Dee (11.06)
M4	33.74±6.46Aa (190.17)	40.02±2.95ABCbc (47.91)	26.58±2.32Aa (157.28)	66.60±4.57ABab (78.14)	100.33±7.23Aa (104.71)
M5	20.46±3.48Bcd (75.97)	31.28±11.11CDd (15.61)	17.89±6.05BCDcd (73.22)	49.18±12.13CDc (31.54)	69.64±14.95CDd (42.08)
M6	26.02±3.84ABbcd (123.82)	26.65±4.93DEde (-1.50)	23.98±6.45Aba (132.17)	50.63±11.31CDc (35.43)	76.66±14.23BCcd (56.40)
M7	30.57±3.45Aab (162.93)	43.65±4.27ABab (61.31)	28.04±1.00Aa (171.41)	71.69±4.86Aa (91.74)	102.26±4.28Aa (108.63)
M8	29.44±2.94Aab (153.21)	32.57±4.32BCDcd (20.35)	23.21±1.95ABabc (124.72)	55.78±6.20BCbc (49.20)	85.22±9.02ABCc (73.87)
M9	12.01±0.65Ce (3.30)	14.79±2.04Ff (-45.36)	11.09±1.00CDc (7.33)	25.87±1.69Ee (-30.80)	37.88±2.24Ef (-22.71)

括号内数据为相对对照增长率(%)。下同

The data in parentheses are relative increase rate (%) to control. The same below

表 4 配方施肥对‘康乃馨’开花的影响

Table 4 Effect of formula fertilization on flowering of ‘Carnation’						
处理 Treatment	始花期 Initial flowering period (M/D)	盛花期 Full-bloom period (M/D)	末花期 Late flowering period (M/D)	盛花数量 Number of full- bloom flower	单花花期 (d) Single-flower flowering period	整株花期 (d) Whole plant flowering period
CK	3/21	4/5	4/28	18.27±1.73Hi (0.00)	8.33±0.58DEd (0.00)	38.00±0.00Ff (0.00)
M1	3/20	4/7	4/29	27.57±0.49Ff (50.92)	10.67±0.58BCbc (28.00)	39.67±0.58eE (4.39)
M2	3/21	4/7	5/1	41.29±1.30Cc (126.02)	11.67±1.15ABab (40.00)	40.67±0.58dD (7.02)
M3	3/21	4/7	5/1	34.57±1.30Dd (89.22)	11.00±1.00ABCb (32.00)	41.00±0.00dD (7.89)
M4	3/18	4/5	5/1	36.40±0.63Dd (99.25)	9.67±0.58CDc (16.00)	44.00±0.00bB (15.79)
M5	3/19	4/5	5/4	52.49±0.75Aa (187.28)	12.67±0.58Aa (52.00)	46.00±0.00aA (21.05)
M6	3/22	4/7	5/3	45.47±0.69Bb (148.88)	11.33±1.15ABCb (36.00)	42.00±0.00cC (10.53)
M7	3/19	4/5	4/30	25.06±0.97Fg (37.16)	8.33±0.58DEd (0.00)	42.00±0.00cC (10.53)
M8	3/20	4/8	4/29	30.55±0.74Ee (67.23)	10.67±0.58BCbc (28.00)	40.00±0.00eE (5.26)
M9	3/22	4/8	4/28	21.07±1.90Gh (15.33)	7.67±1.71Ed (-8.00)	37.00±0.00gG (-2.63)

表 5 配方施肥对‘康乃馨’杜鹃叶中叶绿素含量的影响

Table 5 Effect of formula fertilization on chlorophyll content in leaves of ‘Carnation’			
处理 Treatment	叶绿素 a 含量 (mg/g) Chlorophyll a	叶绿素 b 含量 (mg/g) Chlorophyll b	总叶绿素含量 (mg/g) Total chlorophyll
CK	1.16±0.02 (0.00)	0.47±0.01 (0.00)	1.63±0.02 (0.00)
M1	1.46±0.01 (25.22)	0.54±0.01 (15.71)	2.01±0.04 (23.27)
M2	1.27±0.04 (9.17)	0.52±0.01 (12.13)	1.79±0.04 (9.80)
M3	1.53±0.03 (31.81)	0.54±0.01 (12.13)	2.06±0.04 (9.80)
M4	1.46±0.01 (25.22)	0.53±0.01 (13.56)	1.98±0.07 (21.23)
M5	1.54±0.03 (32.38)	0.55±0.01 (17.14)	2.04±0.08 (25.10)
M6	1.47±0.05 (26.65)	0.53±0.01 (12.86)	2.00±0.05 (22.45)
M7	1.38±0.05 (18.91)	0.49±0.02 (4.29)	1.87±0.04 (14.49)
M8	1.39±0.02 (19.77)	0.51±0.01 (8.57)	1.90±0.04 (16.33)
M9	1.54±0.03 (32.67)	0.57±0.01 (21.43)	2.10±0.03 (28.78)

N_1 、 $P_3 > P_1 > P_2$ 、 $K_2 > K_1 > K_3$ ，同种元素不同水平对总叶绿素的影响为 $N_2 > N_3 = N_1$ 、 $P_3 > P_1 > P_2$ 、 $K_2 > K_1 > K_3$ ，因此组合 $N_2P_3K_2$ 对‘康乃馨’杜鹃叶中叶绿素含量的增长促进作用最好。

2.6 施肥对可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响

从图 2 可见，各处理的可溶性糖含量比 CK 分别增长了 27.84%、26.16%、-1.10%、26.67%、29.69%、8.27%、19.55%、17.53%、12.841%，除 M3 外，其余处理均显著提高了可溶性糖含量($P < 0.05$)，其中 M5 组提升幅度最大。极差分析和多重比较表明(表 6)，对可溶性糖含量的影响依次为： P ($R=4.36$) $>K$ ($R=3.86$) $>N$ ($R=3.80$)。同一元素不同水平间的影响分别为 $P_2 > P_1 > P_3$ 、 $N_2 > N_1 > N_3$ 和 $K_2 > K_1 > K_3$ ，最优施

肥配方是 $N_2P_2K_2$ ，即 M5 组效果最好。

只有 M7 的可溶性蛋白含量高于对照，其余的都相对较低，与 CK 间均存在显著差异($P < 0.05$)，可见施肥是影响可溶性糖含量的重要因素。可溶性蛋白含量最高的 M7 为 8.91 mg/g，含量最低的 M5 为 7.79 mg/g，对照为 8.67 mg/g，这表明所有的施肥配方对‘康乃馨’杜鹃可溶性蛋白含量的促进作用效果较低。极差分析和多重比较表明(表 6)，N、P、K 对可溶性蛋白含量的影响依次为： P ($R=0.66$) $>K$ ($R=0.55$) $>N$ ($R=0.52$)，同一元素不同水平间表现为 $P_1 > P_3 > P_2$ 、 $N_3 > N_1 > N_2$ 、 $K_2 > K_1 > K_3$ ，对‘康乃馨’杜鹃可溶性糖含量促进作用最大的施肥配方是 $N_3P_1K_2$ ，即 M7 组效果最好。

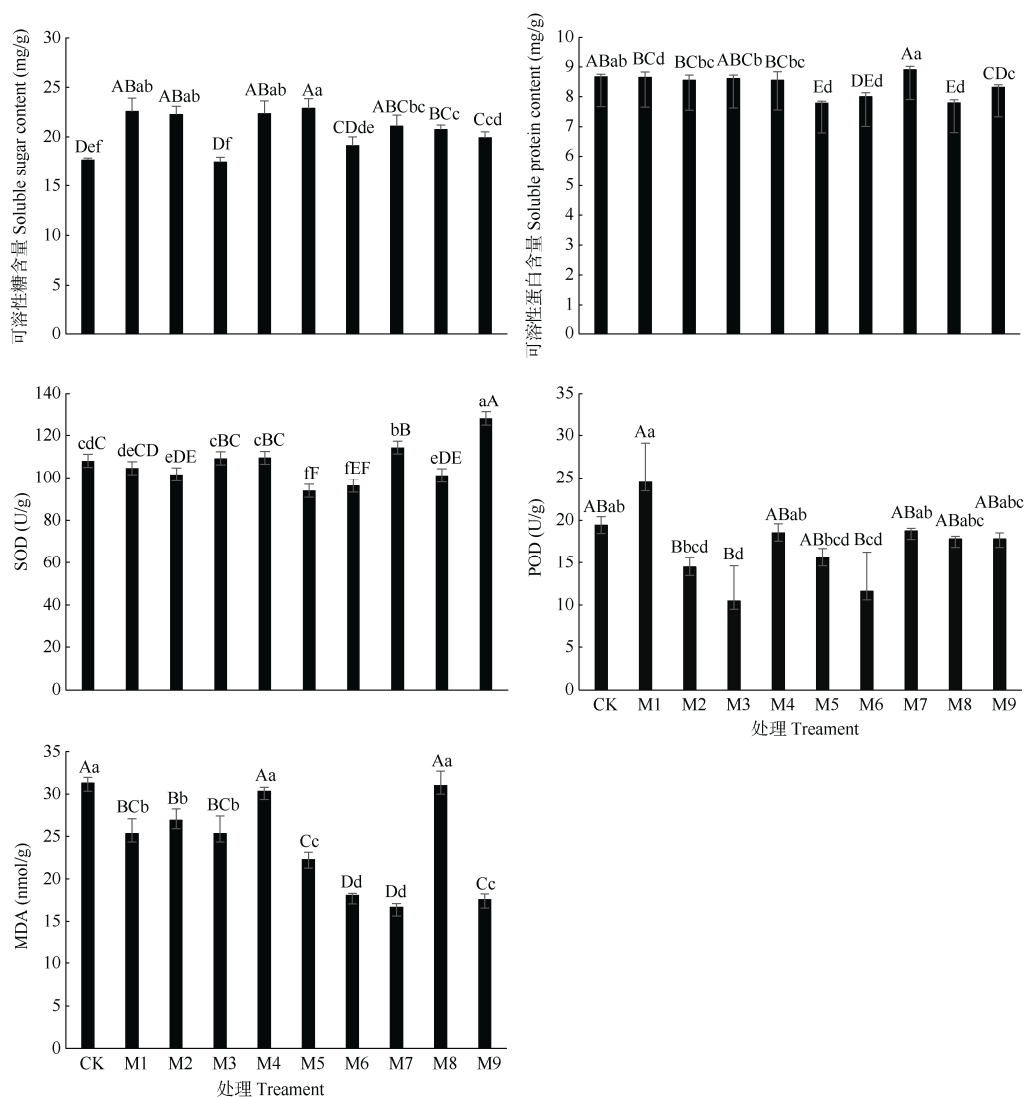


图 2 配方施肥对‘康乃馨’杜鹃可溶性糖、可溶性蛋白、丙二醛(MDA)含量和过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

Fig. 2 Effect of formula fertilization on contents of soluble sugar, soluble protein, malondialdehyde (MDA), and activities of peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD) in ‘Carnation’.

表 6 配方施肥对‘康乃馨’可溶性糖、可溶性蛋白、丙二醛(MDA)含量和过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性的极差分析和多重比较

Table 6 Range analysis and multiple comparisons of formula fertilizer on contents of soluble sugar, soluble protein, and malondialdehyde (MDA), and activities of peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD) in ‘Carnation’

指标 Index	因子 Factor	对照 Control	水平 1 Level 1	水平 2 Level 2	水平 3 Level 3	极差 R
可溶性糖含量 (mg/g FW) Soluble sugar content	N	17.65bB	20.76ABa	21.45Aa	20.58ABa	3.80
	P	17.65Bb	21.96Ab	22.00Aa	18.82Bb	4.36
	K	17.65Bb	20.80ABa	21.51ABa	20.48Aa	3.86
可溶性蛋白含量 (mg/g FW) Soluble protein content	N	8.67Aa	8.61Aa	8.12Ab	8.65Aab	0.55
	P	8.67Aab	8.71Aa	8.05Bc	8.32ABbc	0.66
	K	8.67Aa	8.15Aa	8.48Aa	8.44Aa	0.52
MDA (nmol/L)	N	31.33Aa	25.87ABab	23.57ABb	21.74Bb	9.58
	P	31.33Aa	24.12ABbc	26.73Aab	20.33Bc	10.99
	K	31.33Aa	24.82ABab	21.43Bb	24.94ABab	9.90
SOD (U/g)	N	108.01ABab	105.14ABb	99.88Bb	114.46Aa	14.58
	P	108.01ABab	109.45ABa	98.88Bb	111.15Aa	12.27
	K	108.01ABab	100.65Bb	105.79ABab	113.04Aa	12.38
POD (U/g)	N	19.46Aa	16.5Aa	15.26Aa	18.15Aa	4.21
	P	19.46Aa	20.6Aa	15.97ABbc	13.33Bc	7.27
	K	19.46Aa	17.99Aa	14.95Aa	16.96Aa	4.51

2.7 施肥对 MDA 含量的影响

由图 2 可见, CK 组除了与 M8 组无显著性差异外, 与其余组均有极显著差异, 各组相比 CK 增长量分别为-19.07%、-14.11%、-19.10%、-3.10%、-28.88%、-42.26%、-46.84%、-1.00%、-43.92%。其中 CK 组的 MDA 活性最高, 为 31.33 nmol/g; M7 组最低, 为 16.65 μmol/g。极差分析和多重比较表明(表 6), K 在降低 MDA 含量中的效果最大, 同种元素不同水平间对 MDA 含量的影响存在极显著差异, 不同元素对 MDA 含量的影响依次为: P ($R=10.99$)>K ($R=9.90$)>N ($R=9.58$)。通过多重比较分析, 同种元素不同水平间, N₁ 与 N₂、N₃ 间差异极显著 ($P<0.01$), 表现为 N₁>N₂>N₃, P₂>P₁>P₃, K₃>K₁>K₂, 综合分析, 对降低 MDA 含量作用最大的施肥配方是 N₁P₂K₃。

2.8 施肥对 SOD 活性的影响

从图 2 可见, CK 与处理间的 SOD 活性都存在显著差异($P<0.05$), 最低的是 M5, 为 93.85 U/g, 最高的是 M9, 为 127.96 U/g。SOD 活性随 N 浓度增加呈先升高后降低再升高的趋势, 中等 N 浓度时 SOD 含量最低, 但株高和地径最大, 可能是因为杜鹃对 N 含量变化更为敏感, 过高或过低都有可能使植株生长受到抑制。极差分析和多重比较表明(表 6), 同种元素不同水平间的 SOD 活性存在极显著差异, 不同元素对 SOD 含量的影响权重为: N ($R=114.46$)>K ($R=113.04$)>P ($R=111.15$)。同种元素不同

水平对 SOD 活性的影响不同, N₁ 与 N₂、N₃ 间差异极显著($P<0.01$), N₂、N₃ 间差异显著($P<0.05$), N₁>N₂>N₃; P₁、P₂、P₃ 间差异极显著($P<0.01$), P₂>P₁>P₃; K₂ 与 K₁、K₃ 间差异极显著, K₁、K₃ 间差异不显著, K₁>K₃>K₂, 综合分析, SOD 活性最佳的施肥配方是 N₁P₂K₁。

2.9 施肥对 POD 活性的影响

由图 2 可见, CK 与 M4、M7 间的 POD 活性差异不显著, 但与其余处理则差异显著。除 M1 外, 各处理的 POD 活性均低于 CK, 最低是 M3, 为 10.51 U/g, 最高是 M1, 为 24.49 U/g。极差分析和多重比较表明(表 6), 同种元素不同水平间的 POD 活性差异不显著, 不同元素对 POD 活性的影响权重为: P ($R=7.27$)>K ($R=4.51$)>N ($R=4.21$), 同种元素不同水平对 POD 活性的影响分别为 N₃>N₁>N₂、P₁>P₂>P₃、K₁>K₃>K₂, 因此, 对 POD 活性最佳的施肥配方是 N₃P₁K₁。

2.10 主成分分析

对 25 个指标进行主成分分析, 将生理指标和生长指标全部重新转化 X1~X25, 即 X1: 株高; X2: 地径; X3: 叶长; X4: 叶宽; X5: 叶面积; X6: 根长; X7: 根直径; X8: 最长根; X9: 主根数量; X10: 根生物量; X11: 茎生物量; X12: 叶生物量; X13: 地上部分生物量; X14: 总生物量; X15: 盛花数量; X16: 单花花期; X17: 整株花期; X18: 叶绿素 a; X19: 叶绿素 b; X20: 叶绿素含量; X21: 可溶性糖;

X22: 可溶性蛋白; X23: MDA 含量; X24: SOD 活性; X25: POD 活性。对数值进行标准化处理, 通过主成分提取后作主成分提取表, 从表中可看出公共因子的特征根及累积贡献率。前 6 项公共因子的特征根大于 1, 且累计贡献率为 83.578%, 大于 80%, 这 6 项公共因子可以对‘康乃馨’杜鹃的生长、生理和开花状况的 25 个指标做出比较完整的解释。将原来的 25 个指标转换为 6 个独立的主成分并进行特征向量分析(表 7)。

对因子负荷矩阵和特征向量矩阵进行分析, 在

主成分 1 中, 因子荷载值排序前 5 的是 X14 (0.875)、X10 (0.858)、X17 (0.839)、X13 (0.829)、X12 (0.795), 故第一主成分反映了生物量的积累和花期情况; 在主成分 2 中, 因子荷载值排序前 5 的是 X1 (0.772)、X19 (0.748)、X20 (0.687)、X18 (0.685)、X2 (0.661), 故第二主成分反映了植株生长状态和光合能力的强弱; 在主成分 3 中, 因子荷载值排序前 5 的是 X5 (0.686)、X24 (0.649)、X3 (0.618)、X4 (0.601)和 X7 (0.476), 故第三主成分反映了叶片形态、根系形态和抗氧化酶活性。

表 7 所有指标主成分提取的总方差解释

Table 7 Total variance explanation of principal component extraction of all indexes

成分 Ingredient	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extract load square sum			旋转载荷平方和 Rotational load square sum		
	总计 Total	方差百分比 Variance percentage	累积 /% Accumulation	总计 Total	方差百分比 Variance percentage	累积 /% Accumulation	总计 Total	方差百分比 Variance percentage	累积 /% Accumulation
1	6.935	27.741	27.741	6.935	27.741	27.741	6.465	25.861	25.861
2	5.529	22.117	49.858	5.529	22.117	49.858	4.810	19.239	45.100
3	3.223	12.890	62.749	3.223	12.890	62.749	3.535	14.141	59.240
4	2.506	10.026	72.774	2.506	10.026	72.774	2.973	11.891	71.132
5	1.512	6.046	78.820	1.512	6.046	78.820	1.658	6.633	77.764
6	1.189	4.757	83.578	1.189	4.757	83.578	1.453	5.813	83.578

依据主成分得分计算各处理的综合得分(表 8), 依次为 M5>M4>M6>M1>M2>M7>M8>M3>M9>CK。从‘康乃馨’杜鹃的整体长势综合判断, 在 M5 处理

下, 植株株高增量最多, 最长根最长, 始花期最早, 盛花数量最多, 单花花期和整株花期最长, 整体状况最佳, 而 M4、M6 次之, CK 最差。

表 8 配方施肥对‘康乃馨’杜鹃生长的主成分分析

Table 8 Principal component scores and comprehensive scores of formula fertilization on seedling indexes increment of *Rhododendron hybrid* ‘Carnation’

处理 Treatment	主成分得分 Score for principal component						综合得分 Comprehensive score	排序 Rank
	1	2	3	4	5	6		
M1	5.295	1.406	2.260	1.568	-0.633	1.061	2.681	4
M2	4.643	1.990	1.413	1.856	-0.049	1.322	2.580	5
M3	1.861	1.959	2.809	2.021	0.470	1.713	1.943	8
M4	3.928	3.865	3.342	1.922	-0.001	2.131	3.194	2
M5	6.032	1.588	2.251	2.693	-0.036	2.224	3.216	1
M6	3.928	3.158	2.908	1.645	0.670	1.278	2.906	3
M7	5.973	-0.127	1.548	1.341	0.406	1.266	2.450	6
M8	4.281	1.766	1.431	1.630	-0.398	1.020	2.334	7
M9	0.576	-0.316	3.230	1.950	0.147	0.967	0.905	9
CK	1.469	-0.569	-0.367	1.011	-0.612	0.850	0.406	10

3 讨论和结论

3.1 配方施肥对‘康乃馨’杜鹃生长特性的影响

施肥显著提升了‘康乃馨’杜鹃的株高、地径和

生物量, 表明合理养分供给可激活其生长潜能。根系指标的同步增长印证了氮磷钾协同促进养分吸收效率, 与莫艺蕊等^[25]对中国无忧花(*Saraca dives*)的研究结果一致。中等磷钾水平(P₂K₂)最有利于根

系发育^[26], 而乔木中华楠(*Machilus chinensis*)在 P_3K_3 水平表现更优^[27]。这可能源于植物生活型差异, 乔木木质化过程需高磷钾构建结构物质, 而灌木型杜鹃更依赖氮素驱动营养生长。本研究中生物量最优组合为 $N_2P_1K_1$, 过量氮则抑制生长; 但闽楠(*Phoebe bournei*)在高氮下未抑制^[28], 推测这与原生地氮限制强度有关, 闽楠分布区土壤全氮含量(0.08~0.12 g/kg)显著低于杜鹃适生区(0.15~0.25 g/kg), 导致其对高氮耐受性增强。正交设计虽能筛选主效因子, 但未能解析 $N \times P$ 交互作用(如 N_2P_2 组合对生物量的协同效应)。建议后续采用响应面法建立精准预测模型。

3.2 配方施肥对‘康乃馨’杜鹃生理特性的影响

研究表明, 增施氮磷钾肥显著提高了‘康乃馨’杜鹃叶片中的可溶性糖、可溶性蛋白和叶绿素含量以及SOD、POD活性, 同时降低了MDA含量, 这与尹梦雅^[29]对黄栀子(*Gardenia jasminoides*)幼树的研究结果一致。氮肥对叶绿素含量提升的贡献最为显著, 氮是叶绿素合成的关键组分, 氮素充足有利于促进叶绿素合成, 增强光合效率, 进而利于植株生长; 反之, 氮缺乏则抑制光合作用。钾肥则对可溶性糖和可溶性蛋白含量的提升作用最大, 这与袁洁^[30]对沃柑(*Fertile orange*)的研究结果相吻合。施肥处理的MDA含量均显著低于对照, MDA是膜脂过氧化的主要产物, 其含量降低表明施肥有效缓解了‘康乃馨’杜鹃的膜脂过氧化程度, 增强了植株清除氧自由基的能力, 从而提高了抗逆性。

3.3 配方施肥对‘康乃馨’杜鹃开花特性的影响

‘康乃馨’杜鹃的花发育过程复杂且周期较长。本研究结果表明, 其开花质量(如花期、花量、花朵大小等)随施肥量增加呈现先上升后下降的趋势, 这表明存在一个最适施肥量区间, 过量施肥(特别是氮肥)反而可能抑制开花。这与黄兰清等^[17]对‘紫精灵’紫薇(*Lagerstroemia india* ‘Zijingling’)的研究结果一致。本研究表明钾肥在促进‘康乃馨’杜鹃开花方面作用显著, 这与李芹等^[31]认为磷酸二氢钾可提升芍药(*Paeonia lactiflora*)开花品质, 邱丹丹^[32]认为NPK配比影响小菊(*Matricaria chamomilla*)开花的研究结果相吻合。因此, 在‘康乃馨’杜鹃的花期管理中, 应优先保证钾肥的充足供应, 并严格控制氮肥用量, 以避免营养生长过旺对生殖生长的抑制。值得注意的是, M5处理虽然可溶性蛋白含量相对较低, 但其开花表现却较好, 可能是在该施肥条件下, 植

株将更多的营养物质(如碳水化合物、氨基酸等)优先分配供给花器官的发育(“库”强), 而非大量用于叶片等营养器官中可溶性蛋白(“源”的一部分)的积累。即使可溶性蛋白水平不高, 只要花器官能够获得充足且平衡的营养供给, 仍可支持其良好发育与开花。

综上, 本研究结果表明, 施肥能够有效促进“康乃馨”杜鹃各项生长生理指标正向增加, 氮肥1.0 g/pot、磷肥1.6 g/pot、钾肥2.0 g/pot能显著促进株高、地径、根系等营养生长, 同时能显著提升叶片可溶性糖、可溶性淀粉和可溶性蛋白等重要养分含量。氮肥在3种因子中占主导作用, 氮肥含量1.0 g/pot时, 对株高、地径的增长量最大, 开花数量最多, 整体花期最长。因此, 建议在南方开展“康乃馨”杜鹃育苗栽培施肥时, 选择氮肥含量适中的肥料, 能够有效的降本增效, 促进杜鹃花卉产业快速发展。

参考文献

- [1] JEONG B R, PARK Y G, PARK P H. The value of orchids in Korean culture and the Korean flower industry [M]// ISHS Acta Horticulturae 1262: III International Orchid Symposium. Seoul, Korea: ISHS, 2019: 1–6. doi: 10.17660/ActaHortic.2019.1262.1.
- [2] XIE J J, LIAO J Y, ZHOU X R, et al. Establishment of rapid propagation system for tissue culture of new superior species of Azalea such as ‘Carnation’ [J/OL]. Mol Plant Breed, [2024-05-31]. [谢嘉尧, 廖菊阳, 周心茹, 等. ‘康乃馨’等杜鹃新优品种组培快繁体系的建立 [J/OL]. 分子植物育种, [2024-05-31]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20240531.0942.004>]
- [3] GUO L. Anku cuckoo variety resources and its application [J]. Mod Agric Sci Technol, 2020(6): 145–146. [郭兰. 安酷杜鹃品种资源及其应用 [J]. 现代农业科技, 2020(6): 145–146. doi: 10.3969/j.issn.1007-5739.2020.06.093.]
- [4] LIU B Y. Technology of facility cultivation and conservation management of cuckoo [J]. S Hort, 2010, 21(2): 52–53. [刘柏炎. 杜鹃花的设施栽培及养护管理技术 [J]. 南方园艺, 2010, 21(2): 52–53. doi: 10.3969/j.issn.1674-5868.2010.02.023.]
- [5] DIWEKAR U, PATEL N, JOAG S. From particulate processes to *in-vitro* fertilization: Theory to clinical practice [J]. F&S Fam J, 2023, 120(S1): e72.
- [6] YANG G Z. The theory and technology innovation and application of light, simple and efficient fertilization of cotton [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. [杨国正. 棉花轻简高效施肥理论与技

- 术创新及应用 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.]
- [7] SONG A Y. Precision fertilization, into the digital era 2016 China digital fertilization technology innovation and development forum was held in Jinan [J]. *Agrochem Sci Technol*, 2016(41): 15. [宋安勇. 精准施肥, 迈入数字化时代 2016 中国数字化施肥技术创新发展论坛在济南召开 [J]. *中国农资*, 2016(41): 15.]
- [8] ZHENG S J, JIN Y F, DONG Q, et al. Effects of different ratios of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization on the growth and leaf nutrient content of *Cypomandra betacea* seedlings [J]. *Soil Ferti Sci China*, 2024(7): 108–122. [郑绍傑, 金友帆, 董琼, 等. 氮磷钾不同配比施肥对树番茄幼苗生长及叶片养分含量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2024(7): 108–122. doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23499.]
- [9] YANG M W. Study on rapid determination of chlorophyll content of leaves [J]. *Chin J Spectrosc Lab*, 2002, 19(4): 478–481. [杨敏文. 快速测定植物叶片叶绿素含量方法的探讨 [J]. *光谱实验室*, 2002, 19(4): 478–481. doi: 10.3969/j.issn.1004-8138.2002.04.015.]
- [10] CAI Y P. *Plant Physiology Experimental Guide* [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2014: 170–172. [蔡永萍. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2014: 170–172]
- [11] HAO Z B, CANG J, XU Z. *Plant Physiology Experiment* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004: 67–68. [郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 67–68.]
- [12] LI Z F, WU X D. Experimental design scheme for the effect of drought stress on content of malondialdehyde of indoor ornamental plants [J]. *Tianjin Agric Sci*, 2016, 22(9): 49–51. [李子芳, 吴锡冬. 植物丙二醛含量测定试验设计方案 [J]. *天津农业科学*, 2016, 22(9): 49–51. doi: 10.3969/j.issn.1006-6500.2016.09.011.]
- [13] TU J, SHEN W B, LIN G Q, et al. Elimination of the interference of nitric oxide donor SNP in determining SOD activity of wheat leaves with NBT photoreduction method [J]. *Plant Physiol J*, 2003, 39(5): 483–485. [屠洁, 沈文飏, 林国庆, 等. 一氧化氮供体 SNP 干扰 NBT 光化还原法测定小麦叶片 SOD 活性的消除 [J]. *植物生理学通讯*, 2003, 39(5): 483–485. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2003.05.034.]
- [14] LI Z G, GONG M. Improved guaiacol method for the determination of peroxidase activity in plants [J]. *Plant Physiol Commun*, 2008, 44(2): 323–324. [李忠光, 龚明. 愈创木酚法测定植物过氧化物酶活性的改进 [J]. *植物生理学通讯*, 2008, 44(2): 323–324. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2008.02.018.]
- [15] ZHANG W Q, LI L T, LIU B, et al. Effect of ridge tillage with rice-rape rotation on the root system and yield of crops [J]. *Plant Soil*, 2025, 510(1): 291–304. doi: 10.1007/s11104-024-06914-1.
- [16] DAVE N, VARADAVENKATESAN T, SELVARAJ R, et al. Modelling of fermentative bioethanol production from indigenous *Ulva prolifera* biomass by *Saccharomyces cerevisiae* NFCCI1248 using an integrated ANN-GA approach [J]. *Sci Total Environ*, 2021, 791: 148429. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.148429.
- [17] HUANG L Q, WU L J, WANG X M, et al. Effects of formula fertilization on growth, flowering and physiology of container seedlings of *Lagerstroemia indica* ‘Zi Jing Ling’ [J]. *Plant Physiol J*, 2022, 58(9): 1735–1746. [黄兰清, 吴丽君, 王小明, 等. 配方施肥对‘紫精灵’紫薇容器苗生长、开花及生理的影响 [J]. *植物生理学报*, 2022, 58(9): 1735–1746. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.100131.]
- [18] QIU S T, ZHU X Z, YUE Z L, et al. Correlation analysis and estimation of chlorophyll content with color characteristics for *Ginkgo biloba* under water-nitrogen interactions [J]. *J NW For Univ*, 2024, 39(4): 15–23. [裘赛铤, 朱兴洲, 岳子龙, 等. 水氮互作下银杏叶绿素含量与颜色特征的相关分析及估测 [J]. *西北林学院学报*, 2024, 39(4): 15–23. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2024.04.02.]
- [19] LÜ Y D, WEN A T, ZHANG Y Y, et al. Effects of light intensity and different tending measures on chlorophyll and photosynthetic characteristics of *Tilia amurensis* artificially regenerated under forest canopy [J]. *For Sci Technol*, 2024, 49(3): 1–5. [吕跃东, 温爱亭, 张妍妍, 等. 光强和不同抚育措施对林冠下人工更新紫椴苗木叶绿素和光合特性的影响 [J]. *林业科技*, 2024, 49(3): 1–5. doi: 10.19750/j.cnki.1001-9499.2024.03.001.]
- [20] XIAO Q, YE S Y, WANG H, et al. Soluble sugar, organic acid and phenolic composition and flavor evaluation of plum fruits [J]. *Food Chem X*, 2024, 24: 101790. doi: 10.1016/j.fochx.2024.101790.
- [21] LIU H Y, YU Z L, ZHANG C P, et al. Effect of spermidine on seed germination and physiological characteristics of *Cassia obtusifolia* L. seedlings under drought stress [J]. *J SW Univ (Nat Sci)*, 2013, 35(5): 43–50. [刘海英, 喻泽莉, 张春平, 等. 亚精胺对干旱胁迫下决明种子萌发及幼苗生理特性的影响 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(5): 43–50. doi: 10.13718/j.cnki.xdzk.2013.05.026.]
- [22] WANG Y L, XU D P, YANG Z J, et al. Influence of different cultivation measures on protective enzymes, PAL activity and MDA content of *Dalbergia odorifera* [J]. *Mol Plant Breed*, 2019, 17(2): 635–642. [王玥琳, 徐大平, 杨曾奖, 等. 不同培育措施对降香黄檀保护性酶、PAL 活性及 MDA 含量的影响 [J]. *分子植物育种*, 2019, 17(2): 635–642. doi: 10.13271/j.mpb.017.000635.]
- [23] WANG X X. Effects of exogenous SOD on physiological characteristics of *Petunia hybrida* under low temperature stress [J]. *Seed*, 2021, 40(9): 108–111. [王晓晓. 低温胁迫下外源 SOD 对矮牵牛生理特性的影响 [J]. *种子*, 2021, 40(9): 108–111. doi: 10.16590/j.cnki.1001-4705.2021.09.108.]

- [24] YANG S, LIU Z W, YANG X Y, et al. Effects of endogenous rare earths on physiological characteristics of crops under ammonium nitrogen stress [J]. *Chin Rare Earth*, 2020, 41(3): 34–43. [杨士, 刘祖文, 杨秀英, 等. 内源稀土对铵态氮胁迫下农作物生理特性的影响 [J]. *稀土*, 2020, 41(3): 34–43. doi: 10.16533/J.CNKI.15-1099/TF.202003005.]
- [25] MO Y T, LI C D, MA D C, et al. Effects of NPK proportional fertilization on physiological characteristics of *Saraca dives* seedlings [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2024, 52(4): 38–46. [莫艺蕊, 李承东, 马道承, 等. 氮磷钾配比施肥对中国无忧花幼苗生理特性的影响 [J]. *贵州农业科学*, 2024, 52(4): 38–46. doi: 10.3969/j.issn.1001-3601.2024.04.005.]
- [26] LONG H Y, DENG L X, XU C R, et al. Effects of NPK formula fertilization on growth and root morphology of *Camellia huana* [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2022, 50(8): 25–33. [龙海燕, 邓伦秀, 徐超然, 等. 氮磷钾配方施肥对贵州金花茶生长及根系形态的影响 [J]. *贵州农业科学*, 2022, 50(8): 25–33. doi: 10.3969/j.issn1001-3601.2022.08.004.]
- [27] LIN W H, ZHU X W, WU Y H, et al. Effects of ratio fertilization of N, P, K on seedling growth of *Machilus chinensis* [J]. *For Environ Sci*, 2021, 37(6): 142–147. [林文欢, 朱晓武, 吴悦宏, 等. 氮磷钾施肥配比对中华楠苗木生长的影响 [J]. *林业与环境科学*, 2021, 37(6): 142–147. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2021.06.021.]
- [28] LONG D X. Effects of phosphorus addition on photosynthetic and physiological characteristics of *Phoebe bournei* seedlings [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2021: 55–56. [龙大鑫. 施磷对闽楠幼苗生长和生理特性影响的研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021: 55–56. doi: 10.27662/d.cnki.gznlc.2021.000190.]
- [29] YIN M Y. Effects of fertilization on growth and physiological characteristics of annual *Gardenia jasminoides* Eills seedlings [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2022: 53–57. [尹梦雅. 施肥对一年生黄栀子幼苗生长及生理特性的影响 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022: 53–57. doi: 10.27662/d.cnki.gznlc.2022.000528.]
- [30] YUAN J. Effects of growth regulators and different fertilization treatments on flower formation and fruit development of Orah Mandarin [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2023: 37. [袁洁. 生长调节剂及不同施肥处理对沃柑成花与果实生长发育的影响 [D]. 桂林: 广西师范大学, 2023: 37. doi: 10.27036/d.cnki.ggxsu.2023.000916.]
- [31] LI Q, GONG Y Z, QIU S Y, et al. Effect of leaf spraying potassium dihydrogen phosphate on flowering quality of potted peony [J]. *Anhui Agric Sci Bull*, 2024, 30(1): 30–35. [李芹, 龚亦钊, 仇淑影, 等. 叶面喷施磷酸二氢钾对盆栽芍药开花品质的影响 [J]. *安徽农学通报*, 2024, 30(1): 30–35. doi: 10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2024.01.012.]
- [32] QIU D D. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium nutrition on growth and flowering of three *Chrysanthemum* varieties [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021: 53. [邱丹丹. 氮磷钾营养对三个小菊品种生长开花的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2021: 53. doi: 10.26949/d.cnki.gblyu.2021.000436.]