

## 基于主成分分析的紫薇氮高效基因型筛选

宋振兴<sup>a,b</sup>, 王淑安<sup>a,b</sup>, 吕芬妮<sup>a,b</sup>, 李素梅<sup>a,b</sup>, 王鹏<sup>a,b</sup>, 高露璐<sup>a,b,①</sup>

[江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园):

a. 江苏省植物资源保护与利用重点实验室, b. 江苏省园林植物资源与种质创新工程研究中心, 江苏 南京 210014]

**摘要:** 为筛选紫薇(*Lagerstroemia indica* Linn.)氮高效基因型并明确氮效率评价的关键指标,通过盆栽氮素响应实验,对10个基因型在不同施氮水平下的生长及氮素相关指标进行了统计分析。结果显示:与未施氮处理相比,施氮处理明显促进紫薇生长,地径、株高、单株干质量均值的增幅分别为37.75%、49.53%、87.32%,但氮素生理效率均值下降了27.13%,反映高氮环境对氮素利用效率的双重影响。基因型和施氮水平对紫薇生长及氮素相关指标均具极显著影响( $P < 0.01$ ),且其中8项指标存在基因型与施氮水平的互作效应,表明不同基因型氮素的响应机制存在差异。基于相关性分析和主成分分析,提取了反映生长与氮积累、氮素效率及根氮含量特征的主成分,并将10个基因型分为双高效型、高氮高效型、双低效型及低氮高效型4类,其中双高效型基因型L2(NL00325 × NL00503)和L9(NL00320 × NL00231)在2种施氮水平下均表现突出,可作为氮高效育种的优良材料。综上,本研究初步明确了适用于紫薇氮效率评价的主要指标,筛选获得优异紫薇种质。

**关键词:** 紫薇; 基因型; 氮高效种质; 主成分分析

中图分类号: Q945.3; S685.99 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2026)03-0062-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2026.03.07

**Screening of nitrogen-efficient genotypes of *Lagerstroemia indica* based on principal component analysis** SONG Zhenxing<sup>a,b</sup>, WANG Shu'an<sup>a,b</sup>, LYU Fenni<sup>a,b</sup>, LI Sumei<sup>a,b</sup>, WANG Peng<sup>a,b</sup>, GAO Lulu<sup>a,b,①</sup> [Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen): a. Jiangsu Key Laboratory for Conservation and Utilization of Plant Resources, b. Jiangsu Engineering Research Center for Landscape Plant Resources and Germplasm Innovation, Nanjing 210014, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2026, 35(3): 62-70

**Abstract:** To screen nitrogen-efficient genotypes of *Lagerstroemia indica* Linn. and identify key parameters for evaluating nitrogen efficiency, statistical analyses were conducted on the growth and nitrogen related parameters of ten genotypes under different nitrogen application levels by using a pot nitrogen response experiment. The results show that compared with the no nitrogen application treatment, nitrogen application treatment obviously promotes the growth of *L. indica*, and the increments of averages of ground diameter, plant height, and dry mass per plant are 37.75%, 49.53%, and 87.32%, respectively, while the average of nitrogen physiological efficiency decreases by 27.13%, reflecting the dual impact of high nitrogen environment on nitrogen use efficiency. Both genotype and nitrogen application level have extremely significant effects ( $P < 0.01$ ) on the growth and nitrogen related parameters of *L. indica*, and the interaction effects between genotype and nitrogen level are observed for eight parameters, indicating that the response mechanisms to nitrogen differ among genotypes. Based on correlation analysis and principal component analysis, principal components reflecting the characteristics of growth and nitrogen accumulation, nitrogen efficiency, and root nitrogen content are extracted. The ten genotypes are classified into four types, namely dual high-efficiency type, high-nitrogen high-efficiency

收稿日期: 2025-11-25

基金项目: 江苏省林业科技创新与推广项目(LYKJ[2023]19)

作者简介: 宋振兴(1981—),男,江苏南京人,硕士,主要从事紫薇逆境生理方面的研究。

①通信作者 E-mail: gaolulu@jib.ac.cn

引用格式: 宋振兴, 王淑安, 吕芬妮, 等. 基于主成分分析的紫薇氮高效基因型筛选[J]. 植物资源与环境学报, 2026, 35(3): 62-70.

type, dual low-efficiency type, and low-nitrogen high-efficiency type, among which the dual high-efficiency genotypes L2 (NL00325 × NL00503) and L9 (NL00320 × NL00231) perform outstandingly under both nitrogen application levels, and can be used as superior materials for nitrogen-efficient breeding. In conclusion, this study preliminarily clarifies the main parameters suitable for evaluating nitrogen efficiency in *L. indica*, and screens out excellent germplasm of *L. indica*.

**Key words:** *Lagerstroemia indica* Linn.; genotype; nitrogen-efficient germplasm; principal component analysis

氮是植物生长必需的三大营养元素之一,也是植物生长的关键限制因子。大量研究证实植物对氮素的吸收、转运及利用效率存在显著的种间分化与种内基因型差异<sup>[1],[2]83,[3-6]</sup>。通过植物营养性状改良、培育并推广氮高效新品种,是替代传统的通过增施氮肥提高植物生产效率的重要途径<sup>[7-11]</sup>,也是土壤贫瘠地区提高农牧生产效益的有效手段。林业作为中国生态安全屏障建设的核心组成部分,在国民生产、气候调节和环境保护等方面发挥着不可替代的作用<sup>[12]14-15</sup>。当前,中国土地资源紧缺,全球对低碳经济的需求也日益迫切,而过量施肥会造成生产经营成本增加和水体污染,因此,筛选、开发和利用氮高效林木种质已成为破解林业生产中氮素限制、实现林业生态与经济效益协同提升的关键举措。

林木氮效率方面的研究始于 20 世纪 90 年代,相较于作物氮效率领域的深入研究,该方向林木的相关研究报道相对匮乏。Li 等<sup>[13]</sup>鉴于美国东南部森林土壤严重缺氮,对火炬松(*Pinus taeda* Linn.)家系的氮效率遗传变异进行了研究,发现火炬松家系间的氮效率差异显著,受到中等至较高强度的遗传控制。Karim 等<sup>[14]</sup>的研究指出,在施用等量氮肥的条件下,美洲黑杨(*Populus deltoides* W. Bartram ex Marshall)3 代家系世代间和世代内的生长响应差异显著。马祥庆等<sup>[15]</sup>和樊瑞怀等<sup>[16]</sup>通过施肥实验分别从杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 和马褂木 [*Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sarg.] 中筛选出氮高效基因型。马纵横等<sup>[17]</sup>设置低氮胁迫处理,从 112 个文冠果(*Xanthoceras sorbifolium* Bunge)实生后代的无性系中筛选出 8 个氮高效株系。张曦等<sup>[18]</sup>通过比较 6 个黑杨(*Populus nigra* Linn.) (别称欧洲黑杨)杂交无性系在不同供氮水平下的响应差异,基于生长、生理等指标,筛选出 3 个耐低氮能力较强的无性系。刘希华等<sup>[19]</sup>研究了 104 份欧洲黑杨无性系氮素利用效率的差异,依据 2 个供氮水平下的生长表现划分氮效率类型,揭示了双高效型和高氮高效型欧洲黑杨氮

效率差异的生理机制。陈存<sup>[12]84-85</sup>对 338 份美洲黑杨无性系的遗传多样性进行评价,基于表型、生理和基因表达等方面的分析,解析优异种质的氮高效利用分子机制。这些研究不仅揭示了林木树种氮效率存在显著遗传差异,还证实其受遗传控制,并明确了氮高效基因型株系的筛选方法与评价指标,为林木氮高效种质筛选提供了理论依据与技术参考。

紫薇(*Lagerstroemia indica* Linn.)为千屈菜科(Lythraceae)紫薇属(*Lagerstroemia* Linn.)落叶灌木或小乔木,是一种优良的园林景观与绿化树种,具有分布范围广、适应性强、枝干优美、花期长等优点,其观赏价值和生态价值较高,深受大众青睐,在中国多地广泛应用。近年来,国内在紫薇属植物的种质资源调查、品种分类、新品种选育、遗传多样性等方面取得较大研究进展。王献<sup>[20]</sup>的调查结果表明:中国现有紫薇属植物 18 种,3 个引入种,共计 21 种,其中紫薇、南紫薇(*L. subcostata* Koehne)和福建紫薇(*L. limii* Merr.)在中国广泛分布,云南紫薇(*L. intermedia* Koehne)、广东紫薇(*L. frodii* Oliv. et Koehne)、福建紫薇和狭瓣紫薇(*L. stenopetala* Chun)为中国特有种。张鸽香等<sup>[21]</sup>对南京和常州地区紫薇品种资源进行了深入调查,共确定 65 个紫薇品种,其中新品种有 16 个。聂硕等<sup>[22]</sup>以二倍体紫薇与四倍体紫薇为亲本,从杂交后代中获得了花色艳丽的三倍体紫薇新品种。江苏省中国科学院植物研究所选育了花叶兼赏的紫薇彩叶新品种‘紫金’(‘Zijin’)<sup>[23]</sup>。乔东亚等<sup>[24]</sup>基于 SNP 标记对国内外 85 份紫薇材料进行聚类分析,结果表明 85 份材料遗传多样性丰富,不同类群间存在较高的基因流。但是目前有关紫薇氮素利用效率的研究鲜有报道。

鉴于此,以源于 7 个全同胞家系的 10 个紫薇优良基因型为供试材料,设置 2 个施氮水平的盆栽氮素响应实验,比较 10 个基因型在不同施氮水平下的生长差异及其碳氮代谢干物质分配情况,以期筛选出氮高效种质,为紫薇氮高效育种提供新的种质资源。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

供试紫薇 10 个基因型来源于 7 个杂交组合的  $F_1$  群体(表 1)。选择生长状况基本一致、株龄 1 a 的植株定植于 6 L 塑料盆中,每盆 1 株。栽培基质由园土和商品基质按体积比 2 : 1 混合而成,其中,园土为黄

棕壤,有机质含量  $17.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮含量  $1.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷含量  $95.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾含量  $233.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Mg 含量  $17.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Ca 含量  $4.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cu 含量  $43.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Fe 含量  $37.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , pH 6.7<sup>[25]</sup>;商品基质购自江苏培蕾基质科技发展有限公司,其总养分(N、 $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{K}_2\text{O}$ )含量为 1.0%~5.0%,有机质含量(干基)大于或等于 20%。每塑料盆装入栽培基质约 5 L。

表 1 供试紫薇基因型  
Table 1 Genotypes of *Lagerstroemia indica* Linn. tested

基因型 Genotype	杂交组合 (♀×♂) Hybrid combination (♀×♂)	基因型 Genotype	杂交组合 (♀×♂) Hybrid combination (♀×♂)
L1	NL00635 × ‘香腮雪’ NL00635 × ‘Xiangsaixue’	L6	NL00312 × NL00231
L2	NL00325 × NL00503	L7	NL00312 × ‘金姬’ NL00312 × ‘Jinji’
L3	‘红火球’ × ‘金玫’ ‘Dynamite’ × ‘Jinmei’	L8	NL00320 × NL00231
L4	NL00328 × NL00231	L9	NL00320 × NL00231
L5	NL00312 × NL00231	L10	NL00320 × NL00231

### 1.2 方法

1.2.1 实验设计 采用双因素随机区组设计,设置未施氮 ( $N_0$ ) 和施氮 ( $N_1$ ) 2 个处理。参考黄兰清等<sup>[26]</sup>的研究结果,并结合基质中全氮含量和植株需氮特性确定施氮量。施氮处理以氮含量大于或等于 46.0% 的尿素为氮源,每盆 2 g,配制成 1 L 水溶液,均分为 5 份,于 2022 年 5 月 1 日至 7 月 6 日期间浇灌(每次间隔约 15 d);未施氮处理浇灌等体积去离子水。每个基因型每个处理 3 盆,重复 4 次,共 12 盆。实验期间栽培管理措施保持一致。于 7 月 15 日取样并于  $-80 \text{ }^\circ\text{C}$  超低温冰箱保存,7 月 16 日收获整株。

1.2.2 生长指标测量 使用精度为 0.1 cm 的钢卷尺测量株高(盆土表面至植株自然生长最高点的垂直距离);使用精度为 0.02 cm 的游标卡尺测量地径(距盆土表面 5 cm 处的幼苗直径,分别在互相垂直的 2 个方向各测量 1 次,结果取平均值)。

将整株植株取出后,用去离子水洗净根系表面附着的基质,将植株分为根、茎、叶 3 个部分,于  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  杀青 30 min,然后于  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  烘干至恒质量。使用精度为 0.001 g 的电子分析天平称量各器官干质量,计算单株地上部干质量(单株茎、叶干质量之和)和单株干质量(单株根、茎、叶干质量之和)。

1.2.3 氮含量测定 烘干样品经粉碎机磨细后过 60 目筛,干燥密封保存,备用。参考文献[27]中的方法测定植株根、茎、叶氮含量,略有改动。称取 0.2 g 样

品粉末置消煮管中,用少量蒸馏水湿润,加入 5 mL 浓硫酸摇匀后放置过夜;次日加入 3 mL 双氧水,  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  消煮 30 min;温度升至  $270 \text{ }^\circ\text{C}$  时,重复上步操作 1 次;温度升至  $360 \text{ }^\circ\text{C}$  时,加入双氧水消煮至管中液体透明;冷却后过滤,定容至 50 mL,使用全自动凯氏定氮仪 K375 及配套自动进样器 K376/K377(瑞士 Buchi 公司)测定氮含量。每个处理每个样品测定 3 次。

1.2.4 氮效率相关指标计算 由于茎的氮含量极低,本研究未予计入。全株氮含量为根和叶氮含量分别与各自干质量乘积之和,然后除以单株干质量;氮素累积量为单株干质量与全株氮含量的乘积;氮素生理效率为单株干质量与氮素累积量的比值;氮素利用指数为单株干质量的平方与氮素累积量的比值。

### 1.3 数据处理与统计分析

利用 EXCEL 2010 软件进行实验数据的整理及图表绘制;利用 SPSS 26.0 软件进行多重比较(Duncan's 新复极差法)、Pearson 相关性分析和主成分分析,计算得到氮效率的各主成分值( $y$ )及综合评价价值( $D_i$ )<sup>[28-29]</sup>。

## 2 结果和分析

### 2.1 紫薇不同基因型对氮素响应的差异分析

2 个施氮水平下 10 个紫薇基因型生长及氮素相关指标统计结果见表 2。结果显示:与未施氮处理相

表 2 2 个施氮水平下 10 个紫薇基因型生长及氮素相关指标统计结果 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>  
 Table 2 Statistical results of growth and nitrogen related parameters of ten genotypes of *Lagerstroemia indica* Linn. under two nitrogen application levels ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

统计项 Statistical item	地径/mm Ground diameter		株高/cm Plant height		单株干质量/g Dry mass per plant		单株根干质量/g Root dry mass per plant		单株地上部干质量/g Shoot dry mass per plant	
	N <sub>0</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	N <sub>1</sub>
L1	3.58±0.29de	5.13±0.18cde	47.55±4.36a	69.50±4.42ab	5.84±0.66d	13.50±1.20e	2.12±0.26e	2.75±0.34ef	3.72±0.41d	10.75±1.05cde
L2	5.10±0.44a	4.75±0.59de	51.85±3.67a	61.43±5.09c	10.67±1.24ab	17.18±1.52abcd	3.33±0.51bc	3.78±0.56bcd	7.35±0.73a	13.41±1.02abc
L3	3.80±0.14cde	4.60±0.14e	37.20±2.97c	57.93±2.63cd	8.97±1.44bc	15.19±2.75bcde	2.39±0.41de	2.54±0.57f	6.57±1.04ab	12.65±2.19abcd
L4	3.93±0.27cd	5.50±0.25bc	50.78±1.99a	71.10±2.27a	7.39±1.35cd	13.84±2.22de	2.21±0.58e	2.84±0.38ef	5.18±0.78c	11.00±1.87bcde
L5	4.03±0.15bcd	5.85±0.18ab	41.58±2.45bc	74.13±4.19a	8.23±0.97c	17.18±2.13abcd	2.68±0.16cde	3.52±0.31cde	5.55±0.82bc	13.66±1.85ab
L6	3.68±0.55cde	5.25±0.49bcde	38.48±6.09c	63.80±3.96bc	7.97±1.30c	12.61±0.60e	2.93±0.38cd	3.09±0.09def	5.04±1.03c	9.51±0.63e
L7	3.30±0.10e	5.38±0.54bcd	36.13±1.26c	60.23±5.09c	6.40±1.27ab	14.73±1.21cde	2.78±0.32cde	4.27±0.23bc	4.30±0.29cd	10.46±1.07de
L8	4.20±0.11bc	6.50±0.22a	46.40±1.27ab	71.20±4.55a	8.69±0.51c	18.75±1.98a	3.16±0.28bc	4.62±0.52ab	5.53±0.29bc	14.14±1.53a
L9	4.55±0.34b	6.25±0.15a	41.70±1.34bc	61.63±4.49c	11.34±0.87a	18.14±1.54abc	4.25±0.29a	4.49±0.42ab	7.09±0.60a	13.65±1.12ab
L10	3.78±0.30cde	5.85±0.50ab	38.43±2.99c	52.30±1.89d	8.97±1.33bc	18.52±2.53ab	3.72±0.44ab	5.33±0.98a	5.25±0.91bc	13.19±1.86abcd
M	4.00	5.51	43.00	64.30	8.52	15.96	2.96	3.72	5.56	12.24
CV/%	12.65	11.16	13.36	10.80	19.14	14.15	22.97	25.00	20.86	13.48
F <sub>G</sub>	9.26 **		13.96 **		8.14 **		17.92 **		7.00 **	
F <sub>N</sub>	300.01 **		517.18 **		354.95 **		44.91 **		479.24 **	
F <sub>G×N</sub>	7.80 **		4.54 **		1.80		2.45 *		1.68	

统计项 Statistical item	根氮含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Root nitrogen content		叶氮含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Leaf nitrogen content		全株氮含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Nitrogen content in total plant		氮素生理效率/(g·g <sup>-1</sup> ) Nitrogen physiological efficiency		氮素利用指数/(g <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> ) Nitrogen utilization index	
	N <sub>0</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	N <sub>1</sub>
L1	11.82±0.82a	19.19±0.61bc	13.88±1.05ab	24.58±0.77b	52.34±2.70e	196.71±18.25bc	111.24±8.01cd	68.73±3.34e	654.40±118.16e	929.05±105.92e
L2	11.17±0.62ab	19.77±0.55ab	14.08±0.74a	22.78±0.25cd	95.14±10.33a	251.58±24.18a	112.31±6.12bcd	68.37±1.73e	1 200.95±174.89ab	1 174.61±103.15cde
L3	12.00±1.05a	20.76±0.65a	13.52±0.87abc	22.33±0.15cd	82.86±14.30ab	191.31±37.50bc	108.47±4.32cd	79.73±1.73d	971.57±155.13bcd	1 206.75±199.40cde
L4	11.30±0.38a	19.32±0.27bc	13.03±0.94abcd	21.45±0.65d	60.85±8.90de	161.95±24.34bc	120.86±5.77ab	85.35±1.29bcd	899.94±197.35cde	1 182.74±202.99cde
L5	10.16±0.49b	18.59±0.65bcd	12.79±0.66bcde	22.18±0.70cd	71.76±6.19bcd	200.68±33.11b	114.39±4.28bcd	86.44±7.55bcd	944.84±142.73bcd	1 482.02±213.09bc
L6	12.20±0.47a	17.38±0.63c	12.49±0.81cde	23.45±0.23bc	74.01±9.45bcd	151.40±4.92c	107.27±3.73d	83.34±4.62cd	860.13±171.31cde	1 052.89±103.95de
L7	11.94±0.61a	18.50±0.96cde	12.06±0.27def	17.26±1.16e	64.75±6.25cde	159.21±13.92bc	109.60±3.04cd	92.67±3.93b	776.06±62.64de	1 365.62±134.82cd
L8	11.51±0.50a	17.48±0.76de	11.64±0.33ef	16.15±1.35ef	69.55±3.74bcd	170.35±27.56bc	124.99±2.32a	111.23±8.34a	1 087.19±75.05abc	2 075.16±167.34a
L9	11.56±0.26a	19.02±0.30bc	12.77±0.22bcde	28.08±0.47a	97.20±7.18a	268.41±24.41a	116.65±2.86abc	67.73±4.32e	1 323.06±116.84a	1 230.19±140.97cde
L10	11.96±0.68a	19.28±0.92bc	11.09±0.42f	15.65±1.02f	78.47±11.73bc	205.86±29.79b	114.34±4.87bcd	90.40±6.87bc	1 026.82±160.27bcd	1 674.34±263.54b
M	11.56	18.93	12.74	21.39	74.69	195.75	114.01	83.08	972.85	1 332.77
CV/%	5.12	5.34	7.52	18.44	19.10	19.88	4.96	15.84	20.27	24.83
F <sub>G</sub>	4.92 **		60.08 **		10.56 **		17.75 **		11.58 **	
F <sub>N</sub>	1 950.47 **		2 066.49 **		607.12 **		585.19 **		78.88 **	
F <sub>G×N</sub>	4.97 **		30.76 **		3.68 **		8.67 **		6.47 **	

<sup>1)</sup> L1: NL00635 × ‘香腮雪’ NL00635 × ‘Xiangsaixue’; L2: NL00325 × NL00503; L3: ‘红地球’ × ‘金政’ ‘Dynamite’ × ‘Jinmei’; L4: NL00328 × NL00231; L5: NL00312 × NL00231; L6: NL00312 × NL00231; L7: NL00312 × ‘金姬’ NL00312 × ‘Jinji’; L8: NL00320 × NL00231; L9: NL00320 × NL00231; M: 均值 Mean; CV: 变异系数 Coefficient of variation; F<sub>G</sub>: 基因型的 F 值 F value of genotype; F<sub>N</sub>: 施氮水平的 F 值 F value of nitrogen application level; F<sub>G×N</sub>: 基因型与施氮水平交互作用的 F 值 F value of interaction between genotype and nitrogen application level. N<sub>0</sub>: 未施氮 No nitrogen application; N<sub>1</sub>: 施氮 Nitrogen application. 同列中不同小写字母表示差异显著 (P<0.05). \*\* : P<0.01. significant differences (P<0.05). \* : P<0.05; \*\* : P<0.01.

比,施氮处理明显提升了紫薇的生长表现。相较于未施氮处理,施氮处理 10 个紫薇基因型地径、株高及单株干质量均值的增幅分别为 37.75%、49.53% 和 87.32%;全株氮含量均值的增幅最大,为 162.06%;单株根干质量均值的增幅最小,为 25.68%。值得注意的是,施氮处理的氮素利用指数均值上升了 37.00%,而氮素生理效率均值下降了 27.13%。

进一步分析结果表明:各指标在不同紫薇基因型间存在明显分化。未施氮和施氮处理 L2(NL00325 × NL00503)和 L9(NL00320 × NL00231)的单株干质量较高,属于氮素吸收优势型,而 L6(NL00312 × NL00231)的单株干质量较低。未施氮和施氮处理 L8(NL00320 × NL00231)的氮素生理效率均最高,分别达到 124.99 和 111.23  $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ;施氮处理 L10(NL00320 × NL00231)和 L5(NL00312 × NL00231)的氮素利用指数较高。总之,不同紫薇基因型采取了差异化的氮素适应策略,L2 和 L9 侧重于通过提高干物质积累实现氮积累,而 L8 侧重于高效的氮素转化。

从变异系数看,施氮处理 10 个紫薇基因型的单株根干质量、叶氮含量、全株氮含量及氮素利用指数的变异系数范围为 18.44%~25.00%,表现出较高的

遗传多样性,表明这 4 个指标具有更好的基因型区分能力,是筛选评价中的重要指标。而未施氮和施氮处理根氮含量的变异系数均较低,分别为 5.12% 和 5.34%,在筛选评价中的分辨能力较弱。值得注意的是,氮素生理效率的遗传稳定性受氮素水平影响较大,未施氮处理该指标的变异系数最小(4.96%),但在施氮处理下上升至 15.84%。

方差分析结果显示:基因型和施氮水平对紫薇的 10 项生长及氮素相关指标均具有极显著影响( $P < 0.01$ );除单株干质量和单株地上部干质量外,基因型与施氮水平的交互作用对其余指标的影响达到显著( $P < 0.05$ )或极显著水平。

## 2.2 相关性分析

2 个施氮水平下紫薇生长及氮素相关指标间的相关性分析结果见表 3。结果表明:未施氮和施氮处理紫薇单株干质量、单株根干质量、单株地上部干质量、地径之间呈极显著( $P < 0.01$ )正相关,全株氮含量与单株干质量、单株根干质量、单株地上部干质量均呈极显著正相关。未施氮处理下全株氮含量与氮素利用指数呈极显著正相关,而施氮处理下全株氮含量与氮素生理效率呈极显著负相关。

表 3 2 个施氮水平下紫薇生长及氮素相关指标间的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation analysis between growth and nitrogen related parameters of *Lagerstroemia indica* Linn. under two nitrogen application levels<sup>1)</sup>

指标 Parameter	未施氮(横线上方)和施氮(横线下方)处理下的相关系数 Correlation coefficient under no nitrogen application (above the horizontal lines) and nitrogen application (below the horizontal lines) treatments									
	<i>d</i>	<i>h</i>	<i>m<sub>p</sub></i>	<i>m<sub>r</sub></i>	<i>m<sub>s</sub></i>	<i>w<sub>r</sub></i>	<i>w<sub>l</sub></i>	<i>w<sub>p</sub></i>	NPE	NUI
<i>d</i>	—	0.517 **	0.815 **	0.586 **	0.831 **	-0.338 *	0.186	0.747 **	0.367 *	0.823 **
<i>h</i>	0.264	—	0.133	-0.021	0.201	-0.307	0.436 **	0.051	0.332 *	0.203
<i>m<sub>p</sub></i>	0.623 **	-0.004	—	0.839 **	0.952 **	-0.174	-0.074	0.961 **	0.268	0.969 **
<i>m<sub>r</sub></i>	0.670 **	-0.227	0.772 **	—	0.632 **	-0.029	-0.354 *	0.788 **	0.256	0.829 **
<i>m<sub>s</sub></i>	0.506 **	0.101	0.955 **	0.547 **	—	-0.232	0.094	0.925 **	0.238	0.914 **
<i>w<sub>r</sub></i>	-0.375 *	-0.246	0.032	-0.139	0.107	—	-0.168	-0.096	-0.359 *	-0.231
<i>w<sub>l</sub></i>	-0.197	0.185	-0.223	-0.428 **	-0.093	0.178	—	0.065	-0.475 **	-0.191
<i>w<sub>p</sub></i>	0.225	-0.077	0.693 **	0.447 **	0.703 **	0.347 *	0.422 **	—	-0.003	0.863 **
NPE	0.405 **	0.096	0.153	0.250	0.084	-0.457 **	-0.804 **	-0.589 **	—	0.492 **
NUI	0.676 **	0.079	0.764 **	0.668 **	0.692 **	-0.282	-0.673 **	0.073	0.749 **	—

<sup>1)</sup> *d*: 地径 Ground diameter; *h*: 株高 Plant height; *m<sub>p</sub>*: 单株干质量 Dry mass per plant; *m<sub>r</sub>*: 单株根干质量 Root dry mass per plant; *m<sub>s</sub>*: 单株地上部干质量 Shoot dry mass per plant; *w<sub>r</sub>*: 根氮含量 Root nitrogen content; *w<sub>l</sub>*: 叶氮含量 Leaf nitrogen content; *w<sub>p</sub>*: 全株氮含量 Nitrogen content in total plant; NPE: 氮素生理效率 Nitrogen physiological efficiency; NUI: 氮素利用指数 Nitrogen utilization index. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

未施氮处理下株高与地径、叶氮含量、氮素生理效率呈显著( $P < 0.05$ )或极显著正相关,而施氮处理下株高与其他生长及氮素相关指标的相关性均不显著,难以有效表征紫薇的生长和氮素利用特性,在进

一步的分析中剔除该指标。

## 2.3 主成分分析

2 个施氮水平下紫薇生长及氮素相关指标旋转后主成分载荷矩阵见表 4。结果显示:未施氮处理

下,主成分 1 中单株干质量、全株氮含量、单株地上部干质量、氮素利用指数和单株根干质量的载荷较高,分别为 0.989、0.980、0.939、0.933 和 0.833,表明该主成分主要综合了植株的干物质积累、全株氮积累及氮素利用信息,可定义为生长与氮积累因子。主成分 2 主要由叶氮含量和氮素生理效率决定,载荷分别为 -0.946 和 0.696,反映了叶氮含量与氮素生理效率的权衡关系,可定义为氮素效率因子。主成分 3 则主要由根氮含量解释,载荷为 -0.892,表征根的氮素营养特征。

由表 4 还可见:施氮处理下,主成分 1 中单株干质量和单株地上部干质量的载荷较高,分别为 0.988 和 0.928,但全株氮含量和氮素利用指数的载荷分别较未施氮处理降至 0.757 和 0.694。主成分 2 中叶氮

含量和氮素生理效率的载荷分别为 -0.950 和 0.907,载荷绝对值较高,氮素利用指数的载荷绝对值也较高(0.659),表明在施氮处理下,该主成分更侧重于表征氮素代谢与利用效率。主成分 3 依然主要由根氮含量主导,载荷为 -0.921。

综上,不同施氮水平下主成分的差异主要体现在氮素相关指标(全株氮含量、氮素利用指数、氮素生理效率)上。未施氮处理下氮积累和氮素利用指数与干物质积累量高度协同;而施氮处理下氮素生理效率更多作为独立的代谢特征与叶氮含量相关联。

### 2.4 紫薇不同基因型氮效率评价

2 个施氮水平下 10 个紫薇基因型氮效率的主成分值( $y$ )与综合评价值( $D_i$ )见表 5。结果显示:未施

表 4 2 个施氮水平下紫薇生长及氮素相关指标旋转后主成分载荷矩阵

Table 4 Rotated principal component loading matrix of growth and nitrogen related parameters of *Lagerstroemia indica* Linn. under two nitrogen application levels

主成分 Principal component	载荷 <sup>1)</sup> Loading <sup>1)</sup>								
	$d$	$m_p$	$m_r$	$m_s$	$w_r$	$w_l$	$w_p$	NPE	NUI
未施氮 No nitrogen application									
1	0.825	0.989	0.833	0.939	-0.092	0.003	0.980	0.158	0.933
2	-0.090	0.091	0.367	-0.078	0.102	-0.946	-0.112	0.696	0.264
3	0.401	0.089	-0.119	0.194	-0.892	0.172	-0.067	0.617	0.221
施氮 Nitrogen application									
1	0.663	0.988	0.793	0.928	0.073	-0.133	0.757	0.059	0.694
2	0.157	0.102	0.244	0.020	-0.175	-0.950	-0.587	0.907	0.659
3	0.585	-0.011	0.179	-0.098	-0.921	0.018	-0.243	0.352	0.225

<sup>1)</sup>  $d$ : 地径 Ground diameter;  $m_p$ : 单株干质量 Dry mass per plant;  $m_r$ : 单株根干质量 Root dry mass per plant;  $m_s$ : 单株地上部干质量 Shoot dry mass per plant;  $w_r$ : 根氮含量 Root nitrogen content;  $w_l$ : 叶氮含量 Leaf nitrogen content;  $w_p$ : 全株氮含量 Nitrogen content in total plant; NPE: 氮素生理效率 Nitrogen physiological efficiency; NUI: 氮素利用指数 Nitrogen utilization index.

表 5 2 个施氮水平下 10 个紫薇基因型氮效率的主成分值( $y$ )与综合评价值( $D_i$ )

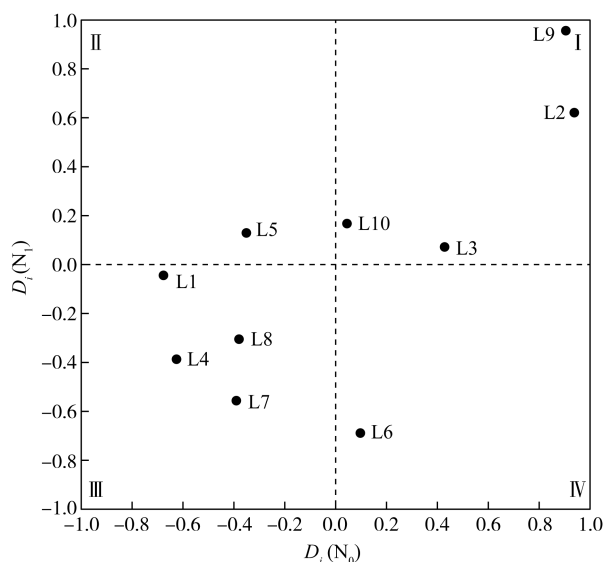
Table 5 Principal component scores ( $y$ ) and comprehensive evaluation scores ( $D_i$ ) of nitrogen efficiency in ten genotypes of *Lagerstroemia indica* Linn. under two nitrogen application levels

基因型 <sup>1)</sup> Genotype <sup>1)</sup>	未施氮 No nitrogen application					施氮 Nitrogen application				
	$y(1)$	$y(2)$	$y(3)$	$D_i$	排序 Rank	$y(1)$	$y(2)$	$y(3)$	$D_i$	排序 Rank
L1	-1.29	-0.69	0.06	-0.68	10	-0.73	-0.92	-0.11	-0.04	6
L2	1.29	-1.16	0.52	0.94	1	0.40	-0.69	-1.11	0.63	2
L3	0.24	-0.92	-0.53	0.43	3	-0.40	0.13	-1.72	0.07	5
L4	-0.70	0.12	0.95	-0.63	9	-0.71	0.17	-0.11	-0.38	8
L5	-0.28	-0.25	1.23	-0.35	6	0.36	-0.08	0.37	0.14	4
L6	-0.18	-0.13	-1.03	0.10	4	-1.18	-0.37	1.25	-0.69	10
L7	-0.75	0.33	-0.78	-0.39	8	-0.47	0.92	0.13	-0.55	9
L8	-0.02	1.29	0.61	-0.38	7	0.82	1.54	1.12	-0.30	7
L9	1.48	0.22	-0.18	0.91	2	1.05	-1.74	0.66	0.96	1
L10	0.21	1.19	-0.84	0.05	5	0.86	1.05	-0.46	0.17	3

<sup>1)</sup> L1: NL00635 × ‘香腮雪’ NL00635 × ‘Xiangsaixue’; L2: NL00325 × NL00503; L3: ‘红火球’ × ‘金玫’ ‘Dynamite’ × ‘Jinmei’; L4: NL00328 × NL00231; L5: NL00312 × NL00231; L6: NL00312 × NL00231; L7: NL00312 × ‘金姬’ NL00312 × ‘Jinji’; L8: NL00320 × NL00231; L9: NL00320 × NL00231; L10: NL00320 × NL00231.

氮处理下, L2 (NL00325 × NL00503)、L9 (NL00320 × NL00231) 和 L3 [‘红火球’ (‘Dynamite’) × ‘金玫’ (‘Jinmei’)] 的  $D_i$  值较高, 分别为 0.94、0.91 和 0.43, 而 L1 [NL00635 × ‘香腮雪’ (‘Xiangsaixue’)] 的  $D_i$  值最低 (-0.68); 施氮处理下, L9、L2 和 L10 (NL00320 × NL00231) 的  $D_i$  值较高, 分别为 0.96、0.63 和 0.17, 而 L6 (NL00312 × NL00231) 的  $D_i$  值最低 (-0.69)。

10 个紫薇基因型氮效率的散点分布图见图 1。结果显示: 根据  $D_i$  值, 10 个紫薇基因型划分为 4 种类型。L2、L3、L9 和 L10 位于 I 区, 属于双高效型 (高氮高效-低氮高效型, HH-LH); L5 (NL00312 × NL00231) 位于 II 区, 属于高氮高效型 (高氮高效-低氮低效型, HH-LL); L1、L4 (NL00328 × NL00231)、L7 [NL00312 × ‘金姬’ (‘Jinji’)] 和 L8 (NL00320 × NL00231) 位于 III 区, 属于双低效型 (高氮低效-低氮低效型, HL-LL); L6 位于 IV 区, 属于低氮高效型 (高氮低效-低氮高效型, HL-LH)。进一步分析结果显示: 未施氮和施氮处理 L2 和 L9 的  $D_i$  值明显优于 L3 和 L10, 可作为氮高效育种的优良材料。



L1: NL00635 × ‘香腮雪’ NL00635 × ‘Xiangsaixue’; L2: NL00325 × NL00503; L3: ‘红火球’ × ‘金玫’ ‘Dynamite’ × ‘Jinmei’; L4: NL00328 × NL00231; L5: NL00312 × NL00231; L6: NL00312 × NL00231; L7: NL00312 × ‘金姬’ NL00312 × ‘Jinji’; L8: NL00320 × NL00231; L9: NL00320 × NL00231; L10: NL00320 × NL00231.  $D_i$ : 综合评价价值 Comprehensive evaluation score.  $N_0$ : 未施氮 No nitrogen application;  $N_1$ : 施氮 Nitrogen application.

图1 10个紫薇基因型氮效率的散点分布图

Fig. 1 Scatter plot of nitrogen efficiency for ten genotypes of *Lagerstroemia indica* Linn.

## 3 讨论

### 3.1 基因型与施氮水平对紫薇生长及氮素相关指标的影响

施氮可极显著 ( $P < 0.01$ ) 调控紫薇生长发育。与未施氮处理相比, 施氮处理 10 个紫薇基因型的地径、株高、干物质积累量、氮含量及氮素积累量等相关指标明显增加, 但氮素生理效率明显下降, 与王准等<sup>[11]</sup>和葛礼姣等<sup>[30]</sup>的研究结果一致, 印证了氮素供给与植物氮效率间的普遍调控规律。

同一施氮水平下, 供试紫薇不同基因型的生长及氮素相关指标差异明显, 这与前人在棉花 (*Gossypium hirsutum* Linn.)、菊花 [*Chrysanthemum × morifolium* (Ramat.) Hemsl.] 等植物上证实的“基因型差异是氮高效种质筛选的基础”结论相符<sup>[3-5, 11, 31-32]</sup>, 这为紫薇种质资源库中筛选出氮高效基因型提供了理论依据。性状指标的变异程度是判断其能否作为筛选指标的重要依据, 变异程度越大, 对基因型间氮效率差异的灵敏度越高<sup>[33]</sup>。施氮处理紫薇叶氮含量、氮素生理效率及相关指标的变异系数较大, 这有助于提高筛选的灵敏度, 但需结合这类指标对氮效率的表征能力验证其可靠性。

### 3.2 紫薇氮效率评价关键指标的筛选与验证

植物氮效率是遗传特性与环境因子共同作用的复合性状, 其核心在于氮素的吸收、未同化、运输及利用过程<sup>[34]</sup>。相关性分析结果表明: 未施氮和施氮处理下, 紫薇单株地上部干质量均与单株干质量、全株氮含量、氮素利用指数呈极显著 ( $P < 0.01$ ) 正相关, 表明单株地上部干质量可作为评价紫薇氮效率的核心指标。

目前, 已有对林木氮效率的评价与筛选普遍以生长指标为核心。如樊瑞怀等<sup>[16]</sup>明确氮胁迫条件下马褂木的苗高、干物质积累量可作为氮效率评价指标; 陈存<sup>[12]</sup><sup>[136-138]</sup>指出叶生长性状是美洲黑杨氮素利用特性的核心评价指标; Zhou 等<sup>[35]</sup>以株高和地径为核心指标, 分析了 408 份青杨 (*Populus cathayana* Rehder) 材料在 2 种供氮水平的生长状况。本研究结合紫薇的地径、单株干质量、单株地上部干质量等生长指标及全株氮含量、氮素利用指数等氮素相关指标构建评价体系, 既延续了前人研究的思路, 又针对紫薇的物种特性优化了指标体系。

### 3.3 主成分分析在紫薇氮高效种质筛选中的应用

与农作物的氮效率评价标准<sup>[36]</sup>不同,林木不以特定部位产量为收获目标,且兼具绿化与环境改善功能,生物量和氮素累积量是其氮效率评价的关键指标。但林木生物量大,直接以单株干质量和全株氮含量为指标进行筛选不仅耗时耗资,可操作性也较差。以主成分分析为核心的多元统计方法的有效性已在多种林木中证实。陈存<sup>[12]84-85</sup>通过主成分分析整合美洲黑杨生长与生理指标,从338份材料中精准筛选出26个氮高效无性系;刘希华等<sup>[19]</sup>基于双氮水平下的材积生长量,通过多元分析将欧洲黑杨基因型划分为4类氮效率类型;张曦等<sup>[18]</sup>也通过多指标差异分析筛选出低氮适应能力强的黑杨杂交无性系。本研究结合相关性分析、主成分分析和综合评价,确保了紫薇不同基因型氮效率评价的无偏性。不仅提升了筛选效率,也为紫薇氮高效种质的精准筛选奠定了方法学基础。值得注意的是,本研究与上述研究均未脱离对“生物量”这一核心指标的依赖,真正便捷、高效且脱离生物量指标的筛选方法及其关键指标仍需要进行进一步探究,这也是未来树木氮效率研究的重要方向。

### 3.4 紫薇氮效率差异的内在机制探讨

同一施氮水平下紫薇不同基因型间单株干质量具有明显差异,反映了紫薇不同基因型间氮效率的差异,但该差异是由氮素吸收效率还是氮素生理利用效率主导,尚需进一步明确。关于氮素吸收效率与氮素生理利用效率对氮效率的贡献,学术界一直存在争议。米国华等<sup>[37]</sup>在玉米(*Zea mays* Linn.)氮效率(以产量表征)研究中提出,当氮素供应较低时,植株氮素累积量是制约氮效率提升的主导因子,且氮素累积量与氮效率呈显著正相关;当氮素供应充足时,限制氮效率进一步提高的主导因子则转变为碳代谢过程的强度及碳氮代谢的协调程度。这一结论在本研究中得到了验证。未施氮处理下,紫薇单株干质量和全株氮含量的变异系数均较高(分别为19.14%和19.10%),远高于氮素生理效率的变异系数(14.96%),说明紫薇不同基因型单株干质量的差异主要由氮素吸收量决定;而施氮处理下,氮素限制被解除,氮素利用指数的变异系数较高(24.83%),表明紫薇不同基因型单株干质量的差异不再仅依赖氮素吸收量,可能由其自身碳氮代谢能力(碳同化效率及碳氮互作协调程度)主导。

## 4 结论和展望

植物氮高效的核心是通过高效吸收、合理分配和利用氮素,维持良好光合势与碳同化能力,从而获得较高生物量<sup>[2]1-12</sup>。典型氮高效种质在不同氮水平下均能高效利用氮素,实现高产高效<sup>[38-39]</sup>。本研究基于主成分分析将10个紫薇基因型划分为双高效型(HH-LH)、高氮高效型(HH-LL)、双低效型(HL-LL)和低氮高效型(HL-LH)4个类型。筛选得到的基因型L2(NL00325×NL00503)和L9(NL00320×NL00231)为双高效型紫薇,为紫薇氮高效栽培与种质创新提供了优质材料。此外,作为紫薇氮效率评价和筛选的核心指标,单株地上部干质量的测定较单株干质量和全株氮含量更为便捷。未来研究可构建其与地径等易测指标的函数关系,以实现氮效率评价方法的进一步简化,并从生理生化水平对评价方法及关键指标进行验证。

### 参考文献:

- [1] OHNISHI M, HORIE T, HOMMA K, et al. Nitrogen management and cultivar effects on rice yield and nitrogen use efficiency in Northeast Thailand[J]. *Field Crops Research*, 1999, 64: 109-120.
- [2] 张亚丽. 水稻氮效率基因型差异评价与氮高效机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [3] 崔文芳, 高聚林, 于晓芳, 等. 高产氮高效玉米品种的筛选及其指标研究[J]. *作物杂志*, 2016(6): 38-43.
- [4] 刘敏娜, 刘晓霞, 丁文雅, 等. 不同菠菜基因型氮素吸收与利用效率的差异及其评价[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2012, 38(5): 599-607.
- [5] 王静, 刘晓静, 程甜甜, 等. 不同氮效率紫花苜蓿叶特征及其产量效应研究[J]. *草地学报*, 2021, 29(9): 1941-1949.
- [6] YANG Y, GAO S, JIANG Y, et al. The physiological and agronomic responses to nitrogen dosage in different sugarcane varieties[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 406.
- [7] 盛炜彤. 关于我国人工林长期生产力的保持[J]. *林业科学研究*, 2018, 31(1): 1-14.
- [8] RENNENBERG H, WILDHAGEN H, EHLTING B. Nitrogen nutrition of poplar trees [J]. *Plant Biology*, 2010, 12(2): 275-291.
- [9] HIREL B, LE GOUIS J, NEY B, et al. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(9): 2369-2387.
- [10] HAN M, OKAMOTO M, BEATTY P H, et al. The genetics of nitrogen use efficiency in crop plants [J]. *Annual Review of*

- Genetics, 2015, 49: 269-289.
- [11] 王 准, 张恒恒, 董 强, 等. 棉花耐低氮和氮敏感种质筛选及验证[J]. 棉花学报, 2020, 32(6): 538-551.
- [12] 陈 存. 美洲黑杨遗传多样性及氮响应差异机制研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021.
- [13] LI B, MCKEAND S E, ALLEN H L, et al. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings [J]. Forest Science, 1991, 37(2): 613-626.
- [14] KARIM S A, HAWKINS B J. Variation in response to nutrition in a three-generation pedigree of *Populus* [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1999, 29(11): 1743-1750.
- [15] 马祥庆, 刘爱琴, 黄宝龙, 等. 氮素高效基因型杉木无性系的选择研究[J]. 林业科学, 2002, 38(6): 53-57.
- [16] 樊瑞怀, 杨水平, 周志春, 等. 氮素营养对马褂木家系苗木生长效应分析[J]. 林业科学研究, 2009, 22(1): 85-90.
- [17] 马纵横, 崔铭洋, 胡 楠, 等. 文冠果实生后代氮素利用效率差异分析[J]. 延边大学农学学报, 2020, 42(4): 44-49.
- [18] 张 曦, 胡增辉, 苏晓华, 等. 土壤氮水平对几种黑杨新无性系苗木生长的影响[J]. 现代农业科学, 2009, 16(1): 80-82.
- [19] 刘希华, 丁昌俊, 张伟溪, 等. 不同基因型欧洲黑杨幼苗氮素利用效率差异及其机理初探[J]. 林业科学研究, 2010, 23(3): 368-374.
- [20] 王 献. 我国紫薇种质资源及其亲缘关系的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2004: 70-74.
- [21] 张鸽香, 宋 桃. 南京和常州地区紫薇品种资源分类研究[J]. 中国野生植物资源, 2015, 34(6): 51-55, 60.
- [22] 聂 硕, 张 林, 王 峰, 等. 紫薇杂种 F<sub>1</sub> 代的性状表现与倍性研究[J]. 山东农业科学, 2017, 49(1): 17-22.
- [23] 杨如同, 王 鹏, 王淑安, 等. 紫薇新品种‘紫金’[J]. 园艺学报, 2019, 46(2): 401-402.
- [24] 乔东亚, 王 鹏, 王淑安, 等. 基于 SNP 标记的紫薇遗传多样性分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(4): 21-28.
- [25] LI S M, WANG S A, SONG Z X, et al. The oxidative damage of the *Lagerstroemia indica* chlorosis mutant *gll* involves in ferroptosis [J]. Journal of Plant Physiology, 2023, 280: 153886.
- [26] 黄兰清, 王晓明, 吴丽君, 等. 配方施肥对‘紫精灵’紫薇容器苗生长及养分积累的影响 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023, 43(5): 31-38.
- [27] 李朝英, 郑 路, 卢立华, 等. 测定植物全氮的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮法改进[J]. 中国农学通报, 2014, 30(6): 159-162.
- [28] 孙东雷, 卞能飞, 王 幸, 等. 高油酸花生萌发期耐冷性综合评价及种质筛选[J]. 核农学报, 2021, 35(6): 1263-1272.
- [29] 孙 炜, 于瑞宁, 张 飞, 等. 菊花扦插生根能力的量化评价[J]. 园艺学报, 2019, 46(3): 540-548.
- [30] 葛礼姣, 方馨妍, 张云月, 等. 菊花苗期氮高效品种资源筛选及氮效率评价体系建立[J]. 南京农业大学学报, 2021, 44(6): 1054-1062.
- [31] 李 强, 罗延宏, 谭 杰, 等. 玉米杂交种苗期耐低氮指标的筛选与综合评价[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(10): 1190-1199.
- [32] 王改丽. 新型甘蓝型油菜氮高效种质的筛选及其氮高效机制的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014: 89-91.
- [33] 田晓莉, 王刚卫, 朱 睿, 等. 棉花耐低钾基因型筛选条件和指标的研究[J]. 作物学报, 2008, 34(8): 1435-1443.
- [34] XU G H, FAN X R, MILLER A J. Plant nitrogen assimilation and use efficiency[J]. Annual Review of Plant Biology, 2012, 63(1): 153-182.
- [35] ZHOU X L, XIANG X D, ZHANG M, et al. Combining GS-assisted GWAS and transcriptome analysis to mine candidate genes for nitrogen utilization efficiency in *Populus cathayana* [J]. BMC Plant Biology, 2023, 23: 182.
- [36] LADHA J K, KIRK G J D, BENNETT J, et al. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved lowland rice germplasm[J]. Field Crops Research, 1998, 56: 41-71.
- [37] 米国华, 陈范骏, 春 亮, 等. 玉米氮高效品种的生物学特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 155-159.
- [38] 张鹏钰, 高桐梅, 苏小雨, 等. 芝麻苗期氮高效品种筛选及氮效率评价体系建立[J]. 河南农业科学, 2022, 51(6): 54-66.
- [39] PRESTERL T, GROH S, LANDBECK M, et al. Nitrogen uptake and utilization efficiency of European maize hybrids developed under conditions of low and high nitrogen input [J]. Plant Breeding, 2002, 121: 480-486.

(责任编辑: 张明霞)