

DOI:10.12171/j.1000-1522.20210013

北京市区国槐表型差异及综合评价研究

李佳慧 彭祚登 刘勇

(北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:【目的】为了准确把握北京市区国槐资源表型性状的变异程度及表型多样性的主要来源, 对其进行综合评价并定向筛选最优种质, 为国槐良种选育提供理论支撑和选育材料。【方法】本研究以 135 株胸径在 20~30 cm、树龄在 23 年左右的国槐实生单株为材料, 根据其叶部位特征、果实特征、冠幅特征等共 26 个表型性状, 利用方差分析、多重比较和主成分分析等统计方法, 分析表型性状的变异程度以及性状变异主要来源, 量化评价定向筛选优良国槐单株。【结果】国槐表型性状平均变异系数为 25.08%, 变异系数的变化幅度为 7.01%~264.44%, 其中叶背绒毛、新枝皮孔数、叶片大小形状、叶色指标的变异系数较大, 果实大小和千粒质量指标变异系数较小。由方差分析和多重比较可知, 居群间的国槐除基部小叶长/宽、树冠圆满度、叶背绒毛性状外, 其余表型性状均达到显著或极显著水平, 表明国槐不同居群的表型性状存在广泛变异, 且变异程度各不相同。主成分分析结果显示, 前 8 个主成分代表了 81.93% 的国槐形态多样性, 其中, 叶片大小、叶片颜色、叶片形状、果实饱满是造成不同居群表型性状差异的主要因素。利用主成分综合评价得分来定向筛选国槐不同类型的观赏性性状, 筛选出 3 类国槐优良种质各 10 份, 最优种质来自朝阳区幸福大街和奥林西路 2 个居群。【结论】北京市区国槐种质资源的表型性状变异丰富, 变异程度较高, 其中叶部位的变异是表型多样性的主要来源, 且国槐叶片等营养性器官的变异程度大于果实等繁殖器官的变异程度, 为国槐良种选育提供了丰富的资源和极大的空间。筛选出的 3 类各 10 份国槐最优种质, 为国槐种质资源的进一步收集、保存和遗传改良提供了优良的繁殖材料。

关键词: 国槐; 表型差异; 主成分分析; 综合评价

中图分类号: S792.26 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2022)06-0023-11

引文格式: 李佳慧, 彭祚登, 刘勇. 北京市区国槐表型差异及综合评价研究 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(6): 23-33. Li Jiahui, Peng Zuodeng, Liu Yong. Phenotypic difference and comprehensive evaluation of *Sophora japonica* in Beijing urban area [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(6): 23-33.

Phenotypic difference and comprehensive evaluation of *Sophora japonica* in Beijing urban area

Li Jiahui Peng Zuodeng Liu Yong

(Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to explore the degree of variation of phenotypic traits and main source of phenotypic diversity of *Sophora japonica* resources in Beijing urban area, comprehensively evaluate *S. japonica* and directly select the best germplasm, then provide theoretical support and breeding materials for the breeding of improved varieties of *S. japonica*. [Method] In this study, 135 seedlings of *S. japonica* with DBH of 20 – 30 cm and tree age of about 23 years old were used as materials. According to their 26 phenotypic traits such as leaf position characteristics, fruit characteristics and crown width characteristics, the variation degree of phenotypic traits and the main sources of trait variation were analyzed by statistical methods such as analysis of variance, multiple comparison and principal component analysis, and the excellent *S. japonica* individuals were selected by quantitative evaluation and orientation.

收稿日期: 2021-01-12 修回日期: 2021-06-07

基金项目: 北京市园林绿化局科技创新工程项目(CEG-2018-01)。

第一作者: 李佳慧。主要研究方向: 林木种苗培育理论与技术研究。Email: 1805856826@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者: 彭祚登, 博士, 教授。主要研究方向: 森林培育理论与技术研究。Email: zuodeng@sina.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

[Result] The average coefficient of variation of the phenotypic traits of *S. japonica* was 25.08%, and the variation range of the coefficient of variation was 7.01% – 264.44%, among them, the variation coefficients of dorsal fluff, number of lenticels, leaf size and shape and leaf color were larger, and the variation coefficients of fruit size and thousand-grain mass were smaller. From the analysis of variance and multiple comparisons, it can be seen that, except for the basal leaf length to width, crown round rate, dorsal fluff, the other phenotypic traits of the *S. japonica* among populations reached significant or extremely significant levels, it showed that there were wide variations in phenotypic traits in different populations of *S. japonicus*, and the degree of variation was different. The results of principal component analysis showed that the first eight principal components represented 81.93% of the morphological diversity of *S. japonica*, among which, leaf size, leaf color, leaf shape and fruit fullness were the main factors causing differences in phenotypic traits among varied populations. Targeted screening of different types of ornamental traits of *S. japonica* by means of comprehensive evaluation of principal components, 10 excellent germplasms for each of 3 types of *S. japonica* were screened out, and the best germplasm came from 2 populations of Xingfu Street (XFDJ) and Aolin West Road (ALXL) in Chaoyang District of Beijing. **[Conclusion]** The phenotypic traits of *S. japonica* germplasm resources in Beijing urban area are rich in phenotypic variation, and the degree of variation is high. Among them, the variation of leaf positions is the main source of phenotypic diversity, in addition, the variation degree of leaf and other vegetative organs of *S. japonicus* is greater than that of fruit reproductive organs, which provides abundant resources and great space for the selection and breeding of *S. japonica* varieties. In each of the three categories, 10 optimal germplasms were selected, which provide excellent propagation materials for the further collection, preservation and genetic improvement of the germplasm resources of *S. japonica*.

Key words: *Sophora japonica*; phenotypic difference; principal component analysis; comprehensive evaluation

国槐 (*Sophora japonica*)为蝶形花科 (Papilionaceae)槐属 (*Sophora*)的落叶乔木,原产地位于我国北部,现如今全国各地均有栽植,尤其分布在华北平原及黄土高原地带^[1]。国槐在我国的栽培历史悠久,因其叶色墨绿、树冠浓密、树形高大等特征,以及具有强遮荫效果、强适应能力以及丰富的历史文化内涵等诸多优点,被广泛应用于城市绿化和园林造景^[2]。国槐作为北京市的市树,也是目前北京市首都功能核心区栽植数量最大的行道树树种,约占所有树种栽植数量的57%。因此,探究国槐表型变异规律和特征,筛选出具有不同变异型的国槐单株作为繁殖材料,应用于行道树苗木培育过程中,具有极其重要的实践意义。一直以来,国外对国槐的研究大都以叶片某些蛋白或基因的提取、槐花芽中黄酮类化合物的提取分析、对重金属的富集能力、叶片滞尘抗污染能力等^[3-4]为研究重点,而国内的研究则主要集中于文化和经济价值、径阶分布、健康状况评价、古树健康及保护、病虫害防治、培育措施、材质材性、各变种形态特点、无性和有性繁殖等方面^[5-8],而对国槐种群的表型变异都鲜少研究。

表型,又称表现型,是指生物体在给定的环境

中,确定基因型表现出来的形态、结构、大小、颜色、成分与功能特征等物理、生理、生化性状,是基因型和环境共同作用的结果^[9]。表型可以直观地揭示生态系统多样性和物种多样性^[10],表型变异是生物遗传受制于环境条件的遗传表征,也是遗传多样性研究的重要内容^[11],利用表型和表型变异程度来研究物种的多样性是遗传育种工作中最为简便、快速、重要且有效的手段^[12]。国槐种内遗传变异丰富,在生长和栽植过程中分化出了不同类型的变异,变异性状涉及形态、生理和生长等多个方面。目前国槐种内已选育出多个形态类型的变异品种,如龙爪槐 (*S. japonica* var. *japonica* f. *pendula*)、金枝槐 (*S. japonica* ‘Golden Stem’)、金叶槐 (*S. japonica* var. *flavi-rameus*)、聊红槐 (*S. japonica* ‘Liao Hong’)、五叶槐 (*S. japonica* var. *oligophylla*)等^[13],这些品种凭借在枝条弯曲、新枝颜色、叶片颜色、花颜色等方面的变异特色,被广泛用于公园、小区绿地、庭院、寺庙、公路旁等区域造景,景观效果良好,观赏体验独特,栽培价值较高。本研究参照群体数量遗传学与生态遗传学的理论和方法,对国槐的叶形、叶色、果实、树冠等形态学表型特征进行研究,旨在探究国槐表型性状的变异程度以及变异来源,定

向筛选优良单株, 为推进国槐优质苗木培育基地建设和保存优质种质资源提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料采集

采样地点的选取参照植物遗传学研究的取样原则, 在北京市的东西南北 4 个方位设置取样点, 每个取样地作为 1 个居群处理(居群名为采集地的拼音首字母), 并采用手持式 GPS 测量仪测量每个种群的经纬度和海拔信息。各采样点的地理信息因子等基本情况见表 1。

本研究采用随机取样方法, 选择胸径在 20 ~ 30 cm 范围内、树龄在 23 年左右、性状稳定表达、树体长势良好、结果主枝达到 3 根以上的国槐实生健康植株, 片林中测量 20 m × 30 m 样方内的样树, 且各样株修剪程度、管护措施等基本一致, 非嫁接, 各个取样点的样木株数见表 1。取样时间为 2019 年 8 月夏季, 每个样株采集中部树冠的东南西北 4 个方位的当年生枝条中部完好无损的复叶, 每个方位取 3 个复叶, 共计 12 个; 同年 10 月底秋季, 采集中部树冠的东南西北 4 个方位的成熟果实, 每个方位取 5 次, 保证每个方位果实数量大于 100 粒, 带回实验室测量。

1.2 北京市国槐表型性状测量及方法

用电子游标卡尺测量国槐的叶形状特征和果实特征, 测量精度为 0.01 mm。测量带回的复叶和果实样品, 每个样品测量重复 3 次, 再取平均值。测量复叶长(CLL)、复叶宽(CLW)、顶生小叶长(TLL)、顶生小叶宽(TLW)、中部小叶长(MLL)、中部小叶宽(MLW)、基部小叶长(BLL)、基部小叶宽(BLW)、果实纵径(FL)和果实横径(LW)等指标数据。同时观测新生枝 5 cm 长度内的皮孔数量(LN), 计算平均值, 并观测叶片背面是否着生白色绒毛(DF), 着生绒毛记为 1, 否则记为 0。计算 CLL/CLW、TLL/TLW、MLL/MLL、BLL/BLW 和 FL/LW 作为形状指数。将每个国槐单株上采集到的果实混合均匀, 随机取 100 粒成

熟的果实, 用电子天平称量, 精度为 0.01 g, 重复 3 次, 取平均值, 换算成果实千粒质量(FTGM)。

叶片颜色采用 8 mm 测色光斑直径的日本全自动 KonicaMinolta CR-10 测色色差计, 每组样品测量 3 次, 取平均值。测量叶色参数 L^* 、 a^* 、 b^* 表示叶片颜色^[14](三维色空间用 L^* 、 a^* 和 b^* 空间直角坐标系来表示), 其中 L^* 表示光泽明亮度, 范围从 0(黑)到 100(白), 数值越大, 表示亮度越高; a^* 值的正值表示色泽红, 负值表示色泽绿, 正值越大, 表示红色越深, 负值越小, 表示绿色越深; b^* 的取值表示黄色程度, 负值表示蓝色程度。

此外, 根据公式

$$C = (a^{*2} + b^{*2})^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$h = \arctan(b^*/a^*) \quad (2)$$

式中: C 为色度, h 为色相角, 二者用来表示定位于该空间直角坐标系上的颜色变化^[15], C 愈大, 则距离原点的长度愈大; 色相角 h 范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 0° 附近是红紫色区域, 90° 附近是黄色区域, 180° 和 270° 附近分别代表了蓝绿色和蓝色区域。

1.3 统计分析方法

应用 SPSS 19.0 及 Excel 2010 软件对国槐的表型性状进行统计分析。通过方差分析、多重比较、主成分分析等统计方法得出北京市国槐的表型性状变异规律, 其中变异系数 $CV = \text{标准差}/\text{平均值} \times 100\%$, 用以衡量表型性状在居群内和居群间的变异水平; 通过主成分分析法对各居群内国槐的表型性状进行分析, 得出表型性状多样性的主要来源; 根据 3 种定向筛选原则和相关性状指标组合, 对各样本进行综合评价并排名, 取前 10 株最优种质, 定向筛选出不同类型的优良单株。

2 结果与分析

2.1 北京市国槐表型性状的变异分析

变异系数反映了性状值离散程度大小, 变异系数越大, 性状值离散程度越大。本文对采集到的

表 1 北京市区国槐居群的采样点地理信息

Tab. 1 Geographic information of sampling sites of *Sophora japonica* population in Beijing urban area

居群 Population	采样地点 Sampling site	生长方式 Growth mode	个体数 Individual number	经度 Latitude	纬度 Longitude	海拔 Altitude/m
XFDJ	幸福大街 Xingfu Street	行道树 Street tree	21	116°25'21"E	39°53'26"N	40
BCXL	北辰路 Beichen Road	行道树 Street tree	17	116°22'50"E	40°00'21"N	40
ALXL	奥林西路 Aolin West Road	行道树 Street tree	28	116°22'38"E	40°00'14"N	50
YQL	月泉路 Yuequan Road	行道树 Street tree	20	116°20'10"E	40°00'49"N	50
ZGCGY	中关村森林公园 Zhongguancun Forest Park	片林 Fragment forest	33	116°16'21"E	40°03'23"N	40
ASGY	奥林匹克森林公园 Olympic Forest Park	群状散生 Clustered scattered tree	16	116°23'08"E	40°00'20"N	40

135份国槐植株的26个表型性状进行统计分析,如表2所示:北京市国槐的各表型性状存在不同程度的变异。从总体上看,国槐的表型变异系数范围为5.01%~264.44%,平均变异系数为25.08%。其中,DF的变异系数最高(264.44%);LN的变异系数次之

(28.18%),变异幅度为6~30个; h 的变异系数最低(7.01%),变异幅度为48.24°~65.36°。另外,LW、树冠率(CR)、 L^* 、 h 的变异系数小于10%,表明这4个性状的稳定性较高。其他性状的变异系数均大于10%,表现出丰富的多样性和变异性。

表2 北京市区国槐表型性状的统计分析

Tab. 2 Statistical analysis of phenotypic traits of *S. japonica* in Beijing urban area

性状 Trait	极小值 Min. value	极大值 Max. value	极差 Range	均值 Mean	SD	变异系数 Coefficient of variation/%
CLL/cm	15.35	30.25	14.90	22.15	2.66	12.03
CLW/cm	6.40	14.75	8.35	10.12	1.80	17.78
CLL/CLW	1.53	3.05	1.52	2.23	0.31	13.73
TLL/mm	31.09	82.15	51.06	50.10	9.43	18.82
TLW/mm	15.03	35.73	20.70	24.04	4.08	16.95
TLL/TLW	1.37	3.04	1.67	2.10	0.29	13.74
MLL/mm	34.78	85.75	50.97	52.45	9.29	17.72
MLW/mm	15.38	30.75	15.37	22.41	3.25	14.51
MLL/MLW	1.62	3.54	1.92	2.35	0.33	14.13
BLL/mm	18.89	65.04	46.15	34.03	8.28	24.34
BLW/mm	11.04	29.10	18.06	17.98	3.61	20.10
BLL/BLW	1.36	2.74	1.38	1.89	0.26	13.80
L^*	30.97	42.77	11.80	35.07	2.33	6.65
a^*	-13.50	-6.73	6.77	-9.89	1.42	14.40
b^*	8.53	25.67	17.14	14.66	3.21	21.86
C	10.90	29.00	18.10	17.71	3.40	19.21
h	48.24	65.36	17.12	55.60	2.78	5.01
FL/mm	10.71	19.46	8.75	12.86	1.46	11.34
FW/mm	6.56	10.58	4.02	8.19	0.67	8.21
FL/FW	1.20	2.07	0.87	1.58	0.17	11.04
FTGM/g	190.00	523.33	333.33	338.25	66.11	19.54
LN	6.00	30.00	24.00	14.30	4.03	28.18
DF	0.00	1.00	1.00	0.13	0.33	264.44
CW/m	4.00	11.10	7.10	6.91	1.55	22.39
CRR	0.64	1.64	1.00	1.04	0.15	14.31
CR	0.60	0.85	0.25	0.74	0.06	7.92
均值 Mean						25.08

注: CLL. 复叶长; CLW. 复叶宽; TLL. 顶生小叶长; TLW. 顶生小叶宽; MLL. 中部小叶长; MLW. 中部小叶宽; BLL. 基部小叶长; BLW. 基部小叶宽; FL. 果实纵径; FW. 果实横径; FTGM. 千粒质量; LN. 新枝皮孔数; DF. 叶背绒毛; CW. 冠幅; CRR. 树冠圆满度; CR. 树冠率; C . 色度; h . 色相角; L^* , a^* , b^* 为叶色参数。下同。Notes: CLL, compound leaf length; CLW, compound leaf width; TLL, top leaflet length; TLW, top leaflet width; MLL, middle leaflet length; MLW, middle leaflet width; BLL, basal leaflet length; BLW, basal leaflet width; FL, fruit longitudinal diameter; FW, fruit transverse diameter; FTGM, thousand-grain mass; LN, number of new branch lenticels; DF, dorsal leaf villi; CW, crown width; CRR, crown round rate; CR, crown ratio; C , chroma; h , hue angle. L^* , a^* , b^* represent leaf color parameters. The same below.

2.2 北京市国槐表型性状方差分析

通过对北京市区内国槐的表型性状进行 F 检验可知: BLL/BLW、CRR、DF 差异不显著; TLL/TLW、FL/FW 差异达到了显著水平($0.05 < P < 0.01$), 而其余的表型性状均达到了极显著水平($P < 0.01$)。

对北京市区内不同分布区国槐表型性状均值的多重比较分析结果见表3, 由表3可知: 从控制叶片大小和形状指标的性状来看, 幸福大街居群的国槐复叶、顶生小叶、中部小叶、基部小叶的表型性状均值均出现最大值, 复叶的长宽比出现最小值(2.04),

且该区内的国槐叶片表型性状与其他地区有显著差异; 中关村森林公园居群的国槐复叶、顶生小叶、中部小叶、基部小叶的表型性状均值均出现最小值, 且该区内的国槐叶片表型性状与其他地区有显著差异。就叶色而言, L^* 值越大, 表示明亮度越强, 奥林西路居群的国槐叶片 L^* 值出现最大值(37.53), 月泉路居群的国槐叶片 L^* 值出现最小值(33.55); a^* 的负值越小, 表明叶片色彩的绿色越深, 奥林西路居群的国槐叶片 a^* 值出现最小值(-11.48), 幸福大街居群的国槐叶片 a^* 值出现最大值(-8.71); b^* 的正值越大, 表示叶片色彩的黄色程度越深, 奥林西路居群的国槐叶片 b^* 值出现最大值(17.93), 月泉路居群的国

槐叶片 b^* 值出现最小值(12.32), 参照色彩的三维色空间直角坐标系并综合考虑色度 C 和色相角 h , 认为奥林西路居群的国槐叶片色彩最浓绿, 月泉路居群的国槐叶片色彩最浅。FL、FW、FL/FW 以及 FTGM 指标与种子饱满率有较大关联, 均在幸福大街居群表现出最大值, 与其余区域国槐有显著差异; FL、FL/FW 在中关村森林公园居群表现为最小值, FW、FTGM 指标在北辰西路居群表现为最小值。CW 和 CRR 均在北辰西路居群表现出最大值(9.05 和 1.07), CW 在中关村森林公园居群表现出最小值(5.43); CR 在奥林匹克森林公园居群表现为最大值(0.79), CRR 和 CR 均在月泉路居群表现出最小值

表 3 北京市区国槐表型性状的均值及多重比较

Tab. 3 Mean value and multiple comparison of phenotypic traits of *S. japonica* in Beijing urban area

性状 Trait	居群 Population					
	XFDJ	BCXL	ALXL	YQL	ZGCGY	ASGY
CLL/cm	23.87 ± 2.52a	22.34 ± 1.77bc	23.44 ± 2.3ab	22.14 ± 2.61bc	20.03 ± 2.24d	21.83 ± 2.36c
CLW/cm	11.91 ± 1.74a	10.48 ± 1.67bc	10.26 ± 1.44bc	9.64 ± 1.60c	8.69 ± 1.11d	10.66 ± 1.59b
CLL/CLW	2.04 ± 0.34b	2.17 ± 0.3ab	2.30 ± 0.22a	2.34 ± 0.38a	2.32 ± 0.27a	2.06 ± 0.17b
TLL/mm	59.04 ± 9.55a	53.48 ± 9.96b	50.20 ± 8.26bc	46.82 ± 8.23cd	44.17 ± 6.05d	50.91 ± 7.92bc
TLW/mm	27.26 ± 3.87a	24.98 ± 4.15ab	24.76 ± 3.98b	21.12 ± 3.54c	22.20 ± 3.11c	24.97 ± 2.96ab
TLL/TLW	2.19 ± 0.39ab	2.15 ± 0.33ab	2.04 ± 0.23ab	2.23 ± 0.22a	2.00 ± 0.25b	2.04 ± 0.26ab
MLL/mm	59.71 ± 10.89a	55.31 ± 8.22ab	55.04 ± 8.70ab	51.40 ± 7.21b	45.20 ± 5.65c	51.61 ± 7.57b
MLL/mm	24.47 ± 3.15a	22.80 ± 2.98ab	23.36 ± 3.91a	21.08 ± 2.75b	20.88 ± 2.64b	22.46 ± 2.12ab
MLL/MLW	2.47 ± 0.47a	2.45 ± 0.35a	2.38 ± 0.27ab	2.45 ± 0.28a	2.18 ± 0.28b	2.29 ± 0.21ab
BLL/mm	39.91 ± 10.33a	36.23 ± 8.24ab	34.48 ± 6.74b	35.24 ± 6.98ab	28.00 ± 5.31c	34.05 ± 7.62b
BLW/mm	20.68 ± 4.36a	18.22 ± 2.9b	18.17 ± 3.66b	18.79 ± 3.43ab	15.69 ± 2.29c	17.61 ± 3.04bc
BLL/BLW	1.94 ± 0.35ab	1.98 ± 0.29a	1.91 ± 0.21ab	1.88 ± 0.17ab	1.79 ± 0.21b	1.94 ± 0.32ab
L^*	33.58 ± 1.35c	35.03 ± 2.04b	37.53 ± 2.22a	33.55 ± 2.16c	35.14 ± 1.72b	34.50 ± 1.67bc
a^*	-8.71 ± 1.13a	-9.61 ± 1.17b	-11.48 ± 1.13c	-8.89 ± 1.18a	-10.12 ± 0.82b	-9.70 ± 1.11b
b^*	12.62 ± 2.2dc	14.17 ± 2.97bc	17.93 ± 3.16a	12.32 ± 2.83d	15.29 ± 1.84b	13.78 ± 2.36bcd
C	15.35 ± 2.41c	17.14 ± 3.08b	21.31 ± 3.18a	15.21 ± 2.95c	18.35 ± 1.87b	16.86 ± 2.50bc
h	55.18 ± 2.03bc	55.40 ± 2.97abc	57.06 ± 2.75a	53.71 ± 3.03c	56.35 ± 2.31ab	54.63 ± 2.54c
FL/mm	14.43 ± 2.04a	12.83 ± 1.22bc	12.59 ± 1.04bc	12.36 ± 0.81c	12.17 ± 0.97c	13.36 ± 1.35b
FW/mm	8.76 ± 0.89a	7.92 ± 0.70b	8.11 ± 0.61b	8.06 ± 0.36b	8.09 ± 0.45b	8.28 ± 0.77b
FL/LW	1.65 ± 0.18a	1.63 ± 0.20a	1.56 ± 0.18ab	1.54 ± 0.09ab	1.51 ± 0.15c	1.63 ± 0.20a
FTGM/g	379.34 ± 77.07a	290.92 ± 73.53c	327.83 ± 60.28bc	342.51 ± 61.75ab	323.52 ± 46.04bc	377.92 ± 46.69a
LN	15.10 ± 5.34ab	16.65 ± 4.43a	15.75 ± 3.38ab	14.80 ± 2.89ab	11.15 ± 2.50c	14.06 ± 2.86b
DF	0.10 ± 0.30a	0.06 ± 0.24a	0.18 ± 0.39a	0.20 ± 0.41a	0.12 ± 0.33a	0.06 ± 0.25a
CW/m	8.27 ± 0.99b	9.05 ± 0.97a	6.97 ± 0.69d	5.45 ± 0.59e	5.43 ± 0.67e	7.65 ± 0.89c
CRR	1.05 ± 0.23a	1.07 ± 0.13a	1.04 ± 0.12a	0.98 ± 0.08a	1.04 ± 0.13a	1.03 ± 0.17a
CR	0.76 ± 0.05bc	0.78 ± 0.05ab	0.74 ± 0.03c	0.64 ± 0.03d	0.75 ± 0.03c	0.79 ± 0.02a

注: 不同小写字母代表样本间具有显著性差异。Note: different lowercase letters represent significant differences between samples.

(0.98 和 0.64)。

2.3 不同居群内国槐表型变异特征分析

北京市国槐表型变异特征见表4。由表4可知：国槐26个表型性状在不同居群内的平均变异系数为24.35%，变异幅度为4.71%~302.22%。DF、LN、BLL指标的变异系数均大于20%，变异程度较高；叶色指标 L^* 、 h 、FL、FW、CR指标的变异系数均小于10%，稳定性较强。国槐的叶形叶色、果实、冠幅的平均变异系数分别是13.60%、11.41%、9.91%，稳定性排列顺序依次是：冠幅>果实>叶片，冠幅变异最小可能是人为修枝造成。同一表型性状在不同种群中变异系数差别很大，如：CRR在幸福大街的变

异系数(21.90%)远大于在月泉路(8.16%)；同一居群中的不同性状变异系数也有很大差别，如：奥林匹克森林公园内的DF指标变异系数(416.67%)远大于CR(4.71%)；由此可见：不同生态因子对同一性状的影响不同，不同性状对同一生态因子的反应也不同。

变异系数的结果还可以反映北京市区国槐居群的多样性丰富程度，平均变异系数大说明居群变异幅度较大，丰富性较高。比较6个居群表型性状的平均变异系数，变化幅度为20.20%~29.15%，其中北辰西路和奥林匹克森林公园2个居群的平均变异系数较大，分别为29.15%和28.01%，表明这2个居群国槐的多样性较高。6个居群中，平均变异系数由

表4 北京市区不同居群国槐表型性状的变异系数

Tab. 4 Coefficient of variation of phenotypic traits of *S. japonica* in different populations in Beijing urban area

性状 Trait	居群 Population						均值 Mean
	XFDJ	BCXL	ALXL	YQL	ZGCGY	ASGY	
CLL	10.56	7.92	9.81	11.79	11.18	10.81	10.35
CLW	14.61	15.94	14.04	16.60	12.77	14.92	14.81
CLL/CLW	16.67	13.82	9.57	16.24	11.64	8.25	12.70
TLL	16.18	18.62	16.45	17.58	13.70	15.56	16.35
TLW	14.20	16.61	16.07	16.76	14.01	11.85	14.92
TLL/TLW	17.81	15.35	11.27	9.87	12.50	12.75	13.26
MLL	18.24	14.86	15.81	14.03	12.50	14.67	15.02
MLL	12.87	13.07	16.74	13.05	12.64	9.44	12.97
MLL/MLW	19.03	14.29	11.34	11.43	12.84	9.17	13.02
BLL	25.88	22.74	19.55	19.81	18.96	22.38	21.55
BLW	21.08	15.92	20.14	18.25	14.60	17.26	17.88
BLL/BLW	18.04	14.65	10.99	9.04	11.73	16.49	13.49
L^*	4.02	5.82	5.92	6.44	4.89	4.84	5.32
a^*	12.97	12.17	9.84	13.27	8.10	11.44	11.30
b^*	17.43	20.96	17.62	22.97	12.03	17.13	18.02
C	15.70	17.97	14.92	19.40	10.19	14.83	15.50
h	3.68	5.36	4.82	5.64	4.10	4.65	4.71
FL	14.14	9.51	8.26	6.55	7.97	10.10	9.42
FW	10.16	8.84	7.52	4.47	5.56	9.30	7.64
FL/FW	10.91	12.27	11.54	5.84	9.93	12.27	10.46
FTGM	20.32	25.27	18.39	18.03	14.23	12.35	18.10
LN	35.36	26.61	21.46	19.53	22.42	20.34	24.29
DF	300.00	400.00	216.67	205.00	275.00	416.67	302.22
CW	11.97	10.72	9.90	10.83	12.34	11.63	11.23
CRR	21.90	12.15	11.54	8.16	12.50	16.50	13.79
CR	6.58	6.41	4.05	4.69	4.00	2.53	4.71
均值 Mean	26.55	29.15	20.55	20.20	21.63	28.01	24.35

大到小排列为: 北辰西路 > 奥林匹克森林公园 > 幸福大街 > 中关村森林公园 > 奥林西路 > 月泉路。

2.4 北京市国槐表型变异主成分分析

对北京市 6 个居群的国槐表型进行主成分分析, 样本数据通过了 KMO 和 Bartlett 球形检验, 主成分分析结果见表 5。由表 5 可知: 前 8 个主成分的特征根的值大于 1, 且累积贡献率达 81.931%, 因而选用这 8 个综合指标对国槐表型进行评价分析。

由表 5 可知: 第一主成分的方差贡献率为 21.908%, 载荷值较高的表型性状是 CLL、CLW、TLL、TLW、MLL、MLW、BLL、BLW, 反映出叶片

长和宽的特点, 因而可以将第一主成分作为近似反映国槐叶片大小的综合指标; 第二主成分的方差贡献率为 17.058%, 载荷值较高的性状是 L^* 、 a^* 、 b^* 、 C 、 h , 反映出叶片的颜色特点, 因而可以将第二主成分作为近似反映国槐叶片颜色的综合指标; 第三主成分方差贡献率为 12.421%, 载荷值较高的性状是 TLL/TLW、MLL/MLW、BLL/BLW, 反映出叶片的形状特点, 因而可以将第三主成分作为近似反映国槐叶片形状的综合指标; 第四主成分方差贡献率为 8.827%, 载荷值较高的性状是 FL、FW、FL/FW、FTGM, 反映出果实的特点, 因而可以将第四主成分

表 5 北京市区国槐表型性状的主成分因子载荷矩阵

Tab. 5 Principal component factor loading matrix of phenotypic traits of *S. japonica* in Beijing urban area

性状 Trait	成分 Component							
	1	2	3	4	5	6	7	8
CLL	0.523	0.023	0.411	0.157	-0.072	-0.034	0.101	0.547
CLW	0.814	-0.103	0.380	0.132	0.128	-0.049	0.038	-0.143
CLL/CLW	-0.585	0.134	-0.115	0.004	-0.228	0.003	0.049	0.661
TLL	0.706	-0.055	0.459	0.102	0.327	0.022	-0.029	0.047
TLW	0.825	0.000	-0.177	0.088	0.326	-0.031	0.029	-0.039
TLL/TLW	-0.059	-0.085	0.852	0.029	0.028	0.070	-0.076	0.117
MLL	0.807	-0.025	0.471	0.058	0.058	-0.018	0.134	0.093
MLL	0.870	-0.020	-0.287	0.120	0.088	0.052	0.073	0.091
MLL/MLW	0.103	-0.008	0.888	-0.049	-0.044	-0.050	0.089	0.019
BLL	0.817	-0.064	0.383	0.117	-0.058	0.002	0.095	-0.070
BLW	0.867	-0.104	-0.106	0.068	-0.152	0.078	0.045	0.018
BLL/BLW	0.191	0.042	0.790	0.107	0.098	-0.088	0.089	-0.165
L^*	-0.032	0.934	0.015	-0.099	0.022	-0.007	0.018	0.027
a^*	0.087	-0.899	0.032	0.054	0.022	0.064	-0.095	-0.106
b^*	-0.064	0.992	-0.021	-0.039	0.014	0.000	0.003	0.000
C	-0.072	0.987	-0.022	-0.043	0.005	-0.014	0.024	0.025
h	-0.002	0.826	-0.027	-0.006	0.109	0.092	-0.145	-0.169
FL	0.261	-0.094	0.069	0.907	0.132	-0.101	0.020	-0.018
FW	0.165	-0.032	-0.017	0.441	-0.033	0.844	-0.017	0.026
FL/FW	0.139	-0.070	0.078	0.579	0.169	-0.756	0.037	-0.040
FTGM	0.095	-0.113	0.028	0.871	-0.113	0.231	0.011	-0.041
LN	0.312	0.015	0.044	0.085	-0.151	-0.144	0.680	0.018
DF	0.051	0.017	-0.052	0.053	-0.319	-0.103	-0.731	0.083
CW	0.333	-0.001	0.199	0.069	0.612	-0.050	0.261	0.151
CRR	0.084	-0.110	-0.038	-0.204	0.375	0.085	-0.221	0.547
CR	0.051	0.131	-0.025	0.016	0.858	-0.092	0.014	-0.063
特征值 Eigenvalue	5.696	4.435	3.229	2.295	1.785	1.440	1.219	1.203
方差贡献率 Variation contribution rate/%	21.908	17.058	12.421	8.827	6.864	5.538	4.688	4.627
累积方差贡献率 Cumulative variation contribution rate/%	21.908	38.966	51.387	60.214	67.079	72.617	77.304	81.931

作为近似反映国槐果实饱满性的综合指标;第五主成分方差贡献率为6.864%,载荷值较高的性状是CW、CR,反映出冠幅的特点,因而可以将第五主成分作为近似反映国槐树冠浓密程度的综合指标。由各个主成分的方差贡献率大小可知,北京市国槐居群表型多样性的基本来源排序为:叶片大小 > 叶片

颜色 > 叶片形状 > 果实饱满 > 树冠浓密程度,与上述的变异系数、方差分析所得结果基本一致。

2.5 北京市国槐表型变异综合评价

本研究利用主成分分析法,对135份国槐进行综合评价,得到的北京市不同居群国槐表型性状的定向筛选综合评价结果见表6。

表6 北京市区国槐表型性状综合得分与排名

Tab. 6 Comprehensive score and ranking of phenotypic traits of *S. japonica* in Beijing urban area

排名 Ranking	叶特征与冠幅 Leaf trait and crown width			叶色 Leaf color			果实饱满度 Fruit plumpness		
	编号 Code	居群 Population	综合得分 Comprehensive score	编号 Code	居群 Population	综合得分 Comprehensive score	编号 Code	居群 Population	综合得分 Comprehensive score
1	10	XFDJ	5.060	25	ALXL	6.535	8	XFDJ	4.435
2	14	ALXL	3.984	26	ALXL	6.172	9	XFDJ	3.326
3	8	XFDJ	3.619	19	ALXL	4.652	20	XFDJ	3.030
4	3	BCXL	3.091	18	ALXL	3.860	7	XFDJ	2.883
5	2	BCXL	3.050	28	ALXL	3.788	4	ASGY	2.191
6	9	BCXL	2.948	8	ALXL	3.526	10	XFDJ	2.037
7	20	XFDJ	2.631	5	BCXL	3.424	17	ALXL	2.003
8	18	XFDJ	2.619	24	ALXL	3.150	2	ASGY	1.908
9	3	ALXL	2.471	27	ALXL	3.111	7	ASGY	1.459
10	1	ASGY	2.164	16	ALXL	3.011	6	XFDJ	1.353

(1)树冠、叶片大且圆满的国槐单株定向筛选。采用与叶片大小、形状以及冠幅相关的15个表型指标性状进行主成分分析,从结果中提取了前4个特征值大于1、累积方差贡献率达77.977%、能够代表遮荫效果绝大部分信息的主成分。如表6所示:筛选前10名符合要求的单株,其中具有叶片大、形状圆满和冠幅大、冠形圆满特点的最优国槐单株来自幸福大街居群的10号国槐。

(2)叶色墨绿的国槐单株定向筛选。采用 L^* 、 a^* 、 b^* 、 C 、 h 这5个与叶色相关的叶色参数指标进行主成分分析,从结果中提取了1个特征值大于1、累积方差贡献率达87.189%、能够代表叶色特征绝大部分信息的主成分。如表6所示:筛选前10名符合要求的单株,其中叶色最浓绿的国槐单株来自奥林匹克西路居群的25号国槐,且前10名中有90%的国槐单株来自该居群,该居群国槐的叶色较其他居群更为浓绿。

(3)果实饱满的国槐单株定向筛选。采用与果实相关的FL、FW、FL/FW、FTGM 4个指标性状进行主成分分析,从结果中提取了前2个特征值大于1、累积方差贡献率达92.671%、能够代表果实性状绝大部分信息的主成分。如表6所示:筛选前10名符合要求的单株,其中具有较高经济价值和繁殖潜力

的国槐单株来自幸福大街居群的8号国槐,且该居群国槐所结果实具有较大的FL、FTGM。

3 讨论

3.1 北京市国槐表型变异规律

生物学将种与个体之间的各种差异称之为变异,变异是生物进化和人工育种的根源,包括居群的个体表型变异、环境变异和遗传变异。其中,表型变异是指基因型相同的植物个体因外部环境条件不同而表现出不同性状的现象,是植物形成和进化的基础,也是适应环境的体现^[16]。本实验调查记录了北京市区内国槐植株的叶片、树冠、果实等共26项指标,对6个居群的国槐的表型变异系数进行了统计学分析,26个表型性状的平均变异系数为25.08%,明显高于林玲等^[17]、童跃伟等^[18]研究中的平均变异系数,本实验中国槐的不同表型性状的变异幅度各不相同,其中叶背绒毛指标的变异系数和变异幅度最大,但影响该性状变异的因素和规律需深入研究。此外,国槐绝大部分的表型变异系数均在10%以上,则说明其表型性状变异明显^[19]。变异系数也可以衡量观测值的离散程度,变异系数范围越大,观测值的离散程度越高,表型变异越丰富^[20],即居群内多种基因型所对应的遗传表型变化范围广,

这使得居群内植株整体更加适应环境的变化^[21-22]。

3.2 北京市国槐表型变异主要来源

一般而言,植株叶片的长短、长宽比、叶片颜色等性状容易受环境等外界条件变化的影响,所以本研究中叶片颜色测定的时间一致,在一周内每天的上午进行测量,保证数据的可靠性。果实和种子是传递遗传物质的载体,果实繁殖器官的变异需经历较为复杂的发育分化,变异较小,稳定性较高,受到外界环境的影响较小^[23]。国槐的叶形叶色、果实的平均变异系数分别是 13.60% 和 11.41%,果实稳定性高于叶片。主成分分析结果也表明,叶片的变异贡献率高于果实,即国槐的营养性表型变异大于繁殖器官,这与吕婷等^[16]、张翠琴等^[11]、童冉等^[22]研究的结论一致。

本研究中 6 个采样地点的选取参照了植物遗传学研究的取样原则,分布在北京市的东西南北 4 个方位,国槐的修剪强度、管护措施较一致,修剪下的枝条大都是枯枝、病虫枝,对实验影响较小,研究中采集测量的是长势旺盛、健康的植物材料,所以本研究结果能代表北京市区国槐的表型变异特征。国槐表型性状在居群间均存在显著的遗传变异,同一表型性状在不同居群中变异系数有较大差别,例如:树冠圆满率在幸福大街的变异系数(21.90%)远大于月泉路(8.16%),造成这种结果的主要原因是样本所处的地理位置、生境处的土壤条件、以及生长方式的差异;而同一居群中的不同性状变异系数也有很大差别。以上表明不同环境因子对同一性状的影响不同,不同性状对同一环境因子的反应也不同^[24-26]。引起国槐表型性状变化的原因是多样的,而地理位置、生境处的土壤条件等因素对国槐表型变异的影响规律需进一步探索和研究。

3.3 北京市国槐表型差异筛选

随着社会的不断发展,人们通过植物的搭配和造景,增强视觉上的美感,所以定向筛选出新的变异品种作为园林绿化植物材料尤为重要。丰富的表型变异对于国槐优良种质的评价与筛选具有重要的意义。随着国槐的广泛种植,全国各地分别以植株的形态特征、形质指标、抗性评价、观赏要求以及栽植地特点等为筛选原则开展国槐的选育工作^[27],目前筛选出的变种主要有龙爪槐、金枝槐、金叶槐、聊红槐、五叶槐等,每个变种都具有独特的观赏价值。

对于国槐来说,较大的叶片和浓密的树冠使之具有良好的遮荫效果,墨绿的叶色能够营造更好的景观,饱满的种子则使国槐具有更高的经济价值和繁殖潜力,所以本研究以国槐这 3 个性状特征定向筛选国槐优良单株。参考刘济铭等^[28]研究中的定向

筛选方法,本研究筛选出了 3 类具有不同观赏特点的优良国槐各 10 株,其中幸福大街居群的 10 号国槐叶片较大,树冠浓密;奥林西路国槐的叶色较其他居群更为浓绿;幸福大街居群的国槐所结果实较大且更为饱满,表明不同居群国槐的表型主要特点不同,也体现出国槐植株对不同地理环境的适应性。本研究中的国槐单株样本在北京市的环境条件下,经过了长期生长和适应的过程,使其在树冠、叶片、果实 3 个部位产生了明显的表型变异,但其表型是否能稳定遗传还有待深入研究。所以,在选育新品种时,一方面可以选择具有不同类型优良性状的植株,另一方面在选择育种亲本时可扩大采集地点范围,寻找更有价值的材料。国槐表型变异丰富,应加大对优良植株的收集、筛选、保存和培育力度,在保持和提高国槐种质资源的多样性和丰富度的同时,为建立国槐优良种质评价体系以及良种基地提供一定的参考价值。

4 结 论

(1)北京市区国槐种质资源表型性状遗传变异丰富,叶背绒毛、新枝皮孔数、叶片大小形状、叶色指标的变异系数较大,变异程度较高,果实大小指数和千粒质量指标变异系数较小,果实形态相对稳定。

(2)北京市国槐居群表型多样性基本来源排列顺序为:叶片大小 > 叶片颜色 > 叶片形状 > 果实饱满 > 树冠浓密程度,即国槐的营养性表型变异大于繁殖器官变异。

(3)本实验利用主成分分析法,对北京市区内 135 份国槐进行了综合评价,筛选出叶大且树冠浓密、叶色浓绿及果实饱满的各 10 份优质种质资源,作为国槐良种选育的优良繁殖材料。

参 考 文 献

- [1] 朱衍杰,张秀省,穆红梅. 国槐的研究进展[J]. 林业实用技术, 2013, 16(3): 11-15.
Zhu Y J, Zhang X S, Mu H M. Research progress of *Sophora japonica*[J]. Practical Forestry Technology, 2013, 16(3): 11-15.
- [2] 孙昱,彭祚登. 国槐的历史文化与价值研究[J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2018, 56(2): 23-31.
Sun Y, Peng Z D. Insights into history culture and value of *Sophora japonica*[J]. Journal of Beijing Forestry University (Social Sciences), 2018, 56(2): 23-31.
- [3] Buhyoff G J, Wellman J D. The specification of an on linear psychophysical function for visual landscape dimensions[J]. Journal of Leisure, 1980, 12(14): 97-99.
- [4] Mok J H, Harlow C, Landphair B, et al. Landscape improvement

- impacts on roadside safety in Texas[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 78(3): 263-274.
- [5] 张楠,董丽,郝培尧,等.北京市中心城区行道树结构的研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(5): 101-106.
Zhang N, Dong L, Hao P Y, et al. Study on structure of street trees in central districts of Beijing[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2014, 34(5): 101-106.
- [6] 刘忠香.国槐主要病虫害综合防治措施[J]. *林业科技情报*, 2018, 50(1): 16-17.
Liu Z X. Comprehensive protection technology for the main pests of *Sophora japonica*[J]. *Forestry Science and Technology Information*, 2018, 50(1): 16-17.
- [7] 孟祥涛.关于国槐行道树栽培技术研究[J]. *农业与技术*, 2018, 38(2): 198.
Meng X T. Research on *Sophora japonica* street tree cultivation technology[J]. *Agriculture & Technology*, 2018, 38(2): 198.
- [8] 孟庆杰,王光全,孟庆军,等.蝴蝶槐的组织培养和快速繁殖技术[J]. *林业科技*, 2006, 31(3): 63-64.
Meng Q J, Wang G Q, Meng Q J, et al. Studies on rapid in vitro propagation of *Sophora japonica* var. *oligophylla*[J]. *Forestry Science & Technology*, 2006, 31(3): 63-64.
- [9] Howe G T, Aitken S N, Neale D B, et al. From genotype to phenotype: unraveling the complexities of cold adaptation in forest trees[J]. *Canadian Journal of Botany*, 2003, 81(12): 1247-1266.
- [10] 顾万春.统计遗传学[M].北京:科学出版社,2004.
Gu W C. Statistical genetics[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [11] 张翠琴,姬志峰,林丽丽,等.五角枫种群表型多样性[J]. *生态学报*, 2015, 35(16): 5343-5352.
Zhang C Q, Ji Z F, Lin L L, et al. Phenotypic diversity of *Acer mono* maxim population[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(16): 5343-5352.
- [12] 顾万春,王棋,游应天.森林遗传资源学概论[M].北京:中国科学技术出版社,1998.
Gu W C, Wang Q, You Y T. Introduction to forest genetic resources[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 1998.
- [13] 宋琼.国槐实生后代优良单株选择与组织培养繁殖[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.
Song Q. Superior individuals selection and propagation of seedlings in *Sophora japonicus*[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2017.
- [14] 史宝胜.紫叶李叶色生理变化及影响因素研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2006.
Shi B S. The research on physiological characters and the influence factors on leave color of purple leaf cherry plum [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2006.
- [15] 王改萍,张磊,姚雪冰,等.金叶银杏叶色变化特性分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(5): 41-48.
Wang G P, Zhang L, Yao X B, et al. An analysis of color variation characteristics of golden leaf ginkgo[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2020, 44(5): 41-48.
- [16] 吕婷,刘涛,梁瑞芳,等.沙生植物沙鞭不同居群形态变异研究[J]. *植物研究*, 2021, 41(1): 60-66.
Lü T, Liu T, Liang R F, et al. Morphological variation of different populations from *Psammochloa villosa*, a peculiar sandy plant[J]. *Bulletin of Botanica Research*, 2021, 41(1): 60-66.
- [17] 林玲,王军辉,罗建,等.砂生槐天然群体种实性状的表型多样性[J]. *林业科学*, 2014, 50(4): 137-143.
Lin L, Wang J H, Luo J, et al. Phenotypic diversity of seed and fruit traits in natural population of *Sophora moorcroftiana*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(4): 137-143.
- [18] 童跃伟,唐杨,陈红,等.红松种子园种群表型多样性研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(17): 6341-6348.
Tong Y W, Tang Y, Chen H, et al. Phenotypic diversity of *Pinus koraiensis* populations in a seed orchard[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(17): 6341-6348.
- [19] 贺丹,唐婉,刘阳,等.尾叶紫薇与紫薇 F1 代群体主要表型性状与 SSR 标记的连锁分析[J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34(6): 121-125.
He D, Tang W, Liu Y, et al. Linkage analysis of phenotypic traits of *Lagerstroemia caudata* and *L. indica* F1 population using SSR markers[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(6): 121-125.
- [20] Li Y G, Liu X H, Ma J W, et al. Phenotypic variation in *Phoebe bournei* populations preserved in the primary distribution area[J]. *Journal of Forestry Research*, 2018, 29(1): 35-44.
- [21] Kazuma K, Noda N, Suzuki M. Flavonoid composition re-lated to petal color in different lines of *Clitoria ternatea*[J]. *Phytochemistry*, 2003, 64(6): 1133-1139.
- [22] 童冉,吴小龙,姜丽娜,等.野生玫瑰种群表型变异[J]. *生态学报*, 2017, 37(11): 3706-3715.
Tong R, Wu X L, Jiang L N, et al. Phenotypic variations in populations of *Rosa rugosa*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11): 3706-3715.
- [23] 井振华,李皓,邵文豪,等.浙江柿天然群体表型多样性研究[J]. *植物研究*, 2010, 30(3): 325-331.
Jing Z H, Li H, Shao W H, et al. Phenotypic diversity of natural populations in *Diospyros glaucifolia*[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2010, 30(3): 325-331.
- [24] 徐永杰,韩华柏,王滑,等.大巴山区核桃实生居群的坚果表型和遗传多样性[J]. *林业科学*, 2016, 52(5): 111-119.
Xu Y J, Han H B, Wang H, et al. Nut phenotype and genetic diversity of *Carya cathayensis* seedling populations in Daba Mountains[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(5): 111-119.

- [25] 王永康, 吴国良, 赵爱玲, 等. 枣种质资源的表型遗传多样性[J]. 林业科学, 2014, 50(10): 33-41.
Wang Y K, Wu G L, Zhao A L, et al. Phenotypic genetic diversity of *Ziziphus jujuba* germplasm resources[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(10): 33-41.
- [26] 张欣怡. 竹节草种资源遗传多样性研究及抗性评价[D]. 海口: 海南大学, 2016.
Zhang X Y. Study on genetic diversity and tolerant evaluation of *Chrysopogon aciculatus* (Retz.) Trin. germplasm[D]. Haikou: Hainan University, 2016.
- [27] 孙荣喜, 郑勇奇, 张川红, 等. 不同群体国槐种子表型变异研究[J]. *河北农业大学学报*, 2011, 34(3): 65-70.
Sun R X, Zheng Y Q, Zhang C H, et al. Study on the seed phenotypic variation of *Sophora japonica* L. in different populations[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2011, 34(3): 65-70.
- [28] 刘济铭, 陈仲, 孙操稳, 等. 无患子属种质资源种实性状变异及综合评价[J]. *林业科学*, 2019, 55(6): 44-54.
Liu J M, Chen Z, Sun C W, et al. Variation in fruit and seed properties and comprehensive assessment of germplasm resources of the genus *Sapindus*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(6): 44-54.

(责任编辑 范娟 赵田芸
责任编辑 马履一)