

广西野生水松表型多样性及其与地理-气候因子的关系

杨晓娟¹, 梁永延², 王禧龙¹, 邓必玉², 卢志海¹, 童德文², 刘世男^{1,①}

(1. 广西大学林学院 广西高校亚热带人工林培育与利用重点实验室, 广西 南宁 530004;

2. 广西壮族自治区森林资源与生态环境监测中心, 广西 南宁 530028)

摘要: 以广西贵港覃塘、梧州苍梧、南宁宾阳、桂林雁山和桂林平乐的野生水松 [*Glyptostrobus pensilis* (Staunton ex D. Don) K. Koch] 为研究对象, 采用方差分析、相关性分析、主成分分析、综合评价及聚类分析等方法对 5 个分布地水松球果、种子和叶的表型性状进行分析。结果表明: 南宁宾阳水松的果长、果宽、单果鲜质量、单果出籽率、种子宽、种子厚、种翅宽、种子大小、种子千粒质量和叶形指数最大; 桂林雁山水松的果长、果宽、单果鲜质量、单果籽粒数、果形指数、单果出籽率、种子长、种子宽、种子厚、种翅长、种翅宽、种形指数、种子大小和种翅长宽比最小, 而其叶长、叶宽和叶面积最大。方差分析结果表明: 分布地间球果、种子和叶的表型性状差异达到极显著水平 ($p < 0.01$)。供试表型性状的分布地间变异系数为 7.43% ~ 69.03%, 其中, 叶表型性状的分布地间变异系数均值最大 (38.20%)。绝大多数表型性状间的相关性显著 ($p < 0.05$) 或极显著, 其中, 果长、单果鲜质量、种子长、种翅长、种翅宽、种子大小和叶宽与其他表型性状显著或极显著相关, 可作为水松优良种质筛选的重要指标。总体来看, 球果和种子表型性状与经度、纬度、海拔、年均降水量和年均空气相对湿度呈显著或极显著负相关, 与年均温呈极显著正相关; 叶表型性状与经度、纬度、海拔、年均降水量和年均空气相对湿度呈极显著正相关, 与年均温呈极显著负相关。主成分分析结果表明: 前 3 个主成分的累计贡献率为 95.890%, 表明这 3 个主成分能够反映水松表型性状的绝大部分信息。从不同分布地水松表型性状的综合得分看, 南宁宾阳最高 (1.854)、贵港覃塘次之 (1.187)、桂林雁山最低 (-3.128)。聚类分析结果显示: 贵港覃塘、梧州苍梧和南宁宾阳为一组, 桂林雁山和桂林平乐分别单独为一组。综上所述, 广西 5 个分布地野生水松的表型多样性较为丰富, 尤其是叶表型性状; 比较而言, 南宁宾阳和贵港覃塘的水松表型性状较好, 可作为广西水松优良单株筛选和良种选育的材料。经度、纬度、海拔、年均温、年均降水量和年均空气相对湿度是影响广西水松表型性状变化的重要地理-气候因子。

关键词: 水松; 表型多样性; 相关性分析; 地理-气候因子

中图分类号: Q944; Q948.11; S791.29.01 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)04-0061-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.04.07

Phenotypic diversity of wild *Glyptostrobus pensilis* in Guangxi and its relationship with geographical-climatic factors YANG Xiaojuan¹, LIANG Yongyan², WANG Xilong¹, DENG Biyu², LU Zhihai¹, TONG Dewen², LIU Shinan^{1,①} (1. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory for Cultivation and Utilization of Subtropical Forest Plantation, College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Guangxi Forest Resources and Environment Monitoring Center, Nanning 530028, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(4): 61-70

Abstract: Taking wild *Glyptostrobus pensilis* (Staunton ex D. Don) K. Koch from Qintang of Guigang, Cangwu of Wuzhou, Binyang of Nanning, Yanshan of Guilin, and Pingle of Guilin in Guangxi as research objects, the phenotypic traits of cones, seeds, and leaves of *G. pensilis* from five distribution areas were

收稿日期: 2023-10-25

基金项目: 2023 年中央财政林业草原生态保护恢复资金国家重点野生保护植物保护补助项目 (502039202309)

作者简介: 杨晓娟 (1999—), 女, 广西贺州人, 硕士研究生, 主要从事森林培育与经营方面的研究。

① 通信作者 E-mail: lsn_smile8866@126.com

引用格式: 杨晓娟, 梁永延, 王禧龙, 等. 广西野生水松表型多样性及其与地理-气候因子的关系 [J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(4): 61-70.

analyzed by using the methods of variance analysis, correlation analysis, principal component analysis, comprehensive evaluation, cluster analysis, etc. The results show that the cone length, cone width, fresh mass per cone, seed yield per cone, seed width, seed thickness, seed wing width, seed size, 1 000-grain mass of seeds, and leaf shape index of *G. pensilis* from Binyang of Nanning are the largest; the cone length, cone width, fresh mass per cone, seed number per cone, cone shape index, seed yield per cone, seed length, seed width, seed thickness, seed wing length, seed wing width, seed shape index, seed size, and seed wing length-width ratio of *G. pensilis* from Yanshan of Guilin are the smallest, while the leaf length, leaf width, and leaf area of *G. pensilis* from this distribution area are the largest. The variance analysis result shows that the differences in phenotypic traits of cones, seeds, and leaves among distribution areas reach an extremely significant level ($p < 0.01$). The coefficients of variation among distribution areas of test phenotypic traits are 7.43%–69.03%, in which, the mean of coefficient of variation among distribution areas of phenotypic traits of leaves is the largest (38.20%). There are significant ($p < 0.05$) or extremely significant correlations between most phenotypic traits, in which, the cone length, fresh mass per cone, seed length, seed wing length, seed wing width, seed size, and leaf width show significant or extremely significant correlations with other phenotypic traits, so these phenotypic traits can be used as important indexes for screening excellent germplasm resources of *G. pensilis*. In general, the phenotypic traits of cones and seeds show significant or extremely significant negative correlations with longitude, latitude, altitude, mean annual precipitation, and mean annual air relative humidity, and show extremely significant positive correlations with mean annual temperature; while the phenotypic traits of leaves show extremely significant positive correlations with longitude, latitude, altitude, mean annual precipitation, and mean annual air relative humidity, and show extremely significant negative correlations with mean annual temperature. The principal component analysis result shows that the cumulative contribution rate of the first three principal components is 95.890%, indicating that the three principal components can reflect most information of the phenotype traits of *G. pensilis*. From the view of comprehensive score of phenotypic traits of *G. pensilis* from different distribution areas, Binyang of Nanning has the highest score (1.854), followed by Qintang of Guigang (1.187), while Yanshan of Guilin has the lowest score (-3.128). The cluster analysis result shows that Qintang of Guigang, Cangwu of Wuzhou, and Binyang of Nanning are clustered into one group, Yanshan of Guilin and Pingle of Guilin are in separate groups. Taken together, the phenotypic diversity of wild *G. pensilis* from five distribution areas in Guangxi are relatively abundant, especially leaf phenotypic traits; in comparison, the phenotypic traits of *G. pensilis* from Binyang of Nanning and Qintang of Guigang are better, both of them can be used as the materials for screening excellent individuals and breeding improved varieties of *G. pensilis* in Guangxi. Longitude, latitude, altitude, mean annual temperature, mean annual precipitation, and mean annual air relative humidity are the important geographical-climatic factors for affecting the variation of phenotypic traits of *G. pensilis* in Guangxi.

Key words: *Glyptostrobus pensilis* (Staunton ex D. Don) K. Koch; phenotypic diversity; correlation analysis; geographical-climatic factor

表型多样性是植物在遗传变异和表型可塑性上对环境变化的适应性表达^[1-3]。表型性状是调查和评价林木种质资源多样性最直接的方法,对林木资源保护和合理利用起到至关重要的作用^[4]。研究植物在不同地区的表型差异,尤其是濒危植物在不同地区的表型差异,有助于掌握植物在一定地理分布范围内的相关性,在探讨濒危植物进化潜力和濒危机制上也具有重要意义。果实和种子是植物繁殖系统的重要组成部分^[5],其表型性状决定了植物的传播方式和传播能力,并影响植物的种子萌发和幼苗生长,进而影响植物种群的分布格局^[6]。叶是植物将自然光能

转化为化学能的主要器官^[7],其形态与植物的营养状况、生理状况及所处生境密切相关^[8]。相关研究表明:受环境因子和地理分布的强烈影响,果实、种子和叶的表型性状差异广泛存在于植物的不同群体间^[9-12],已成为植物表型性状研究的常用指标^[2],能够反映植物对不同生境的响应。

水松 [*Glyptostrobus pensilis* (Staunton ex D. Don) K. Koch] 是中国特有的单种孑遗树种,为柏科 (Cupressaceae) 水松属 (*Glyptostrobus* Endl.) 常绿乔木^[13],早在 1999 年就被《国家重点保护野生植物名录(第一批)》(<https://www.gov.cn/gongbao/content/>

2000/content_60072.htm)列为国家 I 级重点保护野生植物。水松的自然分布区较窄,仅生长在中亚热带东部地区,在中国主要零散分布于福建、广西、广东等地的河岸、沼泽及水田边缘^[14]。水松树干通直,其木材颜色鲜艳(淡红黄色)、结构细密、材质轻软,具有耐水湿和抗腐蚀的特点,是极具经济价值的珍贵用材树种^[15];水松根系发达,有较强的重金属富集能力,并对铬(Cr)和镍(Ni)污染有一定抗性,具有较高的生态价值^[16];水松枝叶富含黄酮类化合物,具有抗氧化、降血糖、降血压等活性^[17];水松叶精油则含有多种萜类化合物,具有抗肿瘤、抗炎、抗菌等作用^[18-19],极具药用开发价值。近年来,受人为过度干扰和全球气候变化的影响,国内的水松分布范围和数量加速减少,多数分布地仅剩孤立木^[20]。项目组在前期调查中发现,广西境内的水松天然分布区现仅存 7 株野生水松(其中,崇左天等、贵港覃塘、梧州苍梧、南宁宾阳、桂林雁山和桂林平乐各 1、1、1、1、2、1 株),因此,亟需开展水松种质资源的保护和繁育工作。

目前,已有学者对水松的地理分布和濒危原因^[14]、化学成分^[21-22]、栽培和繁殖^[23-24]、遗传多样性^[25-27]、胚胎发育^[28-29]进行了研究报道,而关于不同分布地水松表型多样性的研究尚未见报道,阻碍了

水松优良种质资源筛选及种质资源的保护和繁育进程。鉴于此,对广西不同产地野生水松球果、种子、叶的 20 个表型性状进行多样性分析,并对这些表型性状间及其与分布地部分地理-气候因子进行 Pearson 相关性分析,以期探究广西水松表型性状的地理变异规律,为水松的生存、繁育及保护提供基础资料。

1 材料和方法

1.1 材料

基于前期调查结果,于 2022 年 11 月,使用高空采样器在贵港覃塘、梧州苍梧、南宁宾阳、桂林雁山和桂林平乐采集野生水松树冠中上部发育正常、成熟且未开裂的球果。由于崇左天等的水松果实成熟较早,故未采集该地的水松样品。于 2023 年 4 月,剪取树冠中下层健康、完整的成熟叶。由于桂林雁山的 2 株水松距离不足 5 m,故将 2 株水松样品混合,作为 1 个样品。水松分布地的地理-气候因子见表 1。其中,经度、纬度及海拔数据采用 S7 手持 GPS 经纬度定位仪(成都恒易力科技有限公司)测定,气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)1982 年至 2022 年的统计结果。

表 1 广西 5 个水松分布地的地理-气候因子

Table 1 Geographical-climatic factors of five distribution areas of *Glyptostrobus pensilis* (Staunton ex D. Don) K. Koch in Guangxi

分布地 Distribution area	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	年均温/°C Mean annual temperature	年均降水量/mm Mean annual precipitation	年均空气相对湿度/% Mean annual air relative humidity
贵港覃塘 Qintang of Guigang	E109°24'	N23°06'	61.1	22.1	1 529.5	75.8
梧州苍梧 Cangwu of Wuzhou	E110°58'	N23°29'	26.1	21.9	1 444.1	78.5
南宁宾阳 Binyang of Nanning	E108°42'	N23°12'	119.1	21.6	1 551.9	77.8
桂林雁山 Yanshan of Guilin	E110°19'	N25°02'	132.8	19.4	1 905.6	79.0
桂林平乐 Pingle of Guilin	E110°42'	N24°51'	202.8	20.4	1 468.3	77.2

1.2 表型性状测定方法

每株随机选取 30 个球果,使用游标卡尺(精度 0.01 mm)测量每个球果的果长(果实纵切面的最大长度)和果宽(果实横切面的最大长度),使用电子天平(精度 0.001 g)称量单果鲜质量。阴干后,统计每个球果的种子总数,即单果籽粒数;使用电子天平称量每个球果所有种子的总质量,即单果种子质量。根据测量结果计算果形指数(果长与果宽的比值)和单果出籽率[单果出籽率=(单果种子质量/单果鲜质量)×100%]。

每株随机选取 30 粒无病害且籽粒饱满的种子,使用游标卡尺测量种子长(种子纵切面的最大长度)、种子宽(种子横切面的最大长度)、种子厚(种子中部的厚度)、种翅长(种翅纵切面的最大长度)、种翅宽(种翅横切面的最大长度),根据测量结果计算种形指数(种子长与种子宽的比值)、种子宽厚比(种子宽与种子厚的比值)、种子大小(种子长、种子宽和种子厚的乘积)、种翅长宽比(种翅长与种翅宽的比值);采用四分法^[30],随机选取 100 粒种子,使用电子天平称量百粒种子质量,重复称量 8 次,结果取平均

值,根据称量结果计算种子千粒质量。

每株随机选取 240 枚叶片,使用 3DM-HK830 体视显微镜(深圳市奥斯微光学仪器有限公司)拍照,采用 ImageJ 2 图像分析软件检测叶长和叶宽。根据检测结果计算叶形指数(叶长与叶宽的比值),并参照顾泽等^[31]的方法计算叶面积,计算公式为叶面积 $= (\pi+2) \times \text{叶长} \times \text{叶宽}$ 。

1.3 数据处理和统计分析

采用 IBM SPSS Statistics 25.0 软件对 5 个分布地水松的表型性状进行方差分析、差异显著性检验和 Pearson 相关性分析;运用 Origin 2022 软件对水松各表型性状间及其与分布地地理-气候因子进行 Pearson 相关性分析。同时,参照郑雷等^[32]的隶属函数分析法,采用 IBM SPSS Statistics 25.0 软件对各表型性状数据进行标准化处理,在此基础上进行主成分分析;提取特征值大于 1 的主成分,以特征向量值为依据确定主成分权重,构建综合得分函数,得到不同分布地水松表型性状的综合得分。采用 corplot 0.84 软件中的离差平方和法对不同分布地水松进行聚类分析。

2 结果和分析

2.1 广西不同分布地水松表型性状多样性分析

对广西贵港覃塘、梧州苍梧、南宁宾阳、桂林雁山和桂林平乐水松球果、种子和叶的表型性状进行比较,结果见表 2。

从球果表型性状看,南宁宾阳的果长、果宽、单果鲜质量和单果出籽率最大,且基本在 0.01 水平上显著高于其他分布地;桂林平乐的单果籽粒数最多,且在 0.01 水平上显著高于其他分布地;贵港覃塘的果

形指数最大,梧州苍梧、南宁宾阳、桂林平乐的果形指数较大,且这 4 个分布地的果形指数在 0.01 水平上差异不显著。桂林雁山的果长、果宽、单果鲜质量、单果籽粒数、果形指数和单果出籽率最小,且在 0.01 水平上显著低于其他分布地。方差分析结果表明:供试 5 个分布地间水松球果 6 个表型性状的差异均达到极显著水平($p < 0.01$)。

从种子表型性状看,贵港覃塘的种子长、种翅长、种形指数和种翅长宽比最大,其中,种子长和种形指数在 0.01 水平上显著高于其他分布地;南宁宾阳的种子宽、种子厚、种翅宽、种子大小和种子千粒质量最大,且在 0.01 水平上显著高于其他分布地;梧州苍梧的种子宽厚比最大,贵港覃塘和南宁宾阳的种子宽厚比较大,且这 3 个分布地的种子宽厚比在 0.01 水平上差异不显著。桂林雁山的种子长、种子宽、种子厚、种翅长、种翅宽、种形指数、种子大小和种翅长宽比最小,且在 0.01 水平上显著低于其他分布地;桂林平乐的种子宽厚比最小,桂林雁山的种子宽厚比较小,且这 2 个分布地的种子宽厚比在 0.01 水平上差异不显著,但这 2 个分布地的种子宽厚比在 0.01 水平上显著低于其他分布地。方差分析结果表明:供试 5 个分布地间水松种子 10 个表型性状的差异均达到极显著水平。

从叶表型性状看,桂林雁山的叶长、叶宽和叶面积最大,且在 0.01 水平上显著高于其他分布地;南宁宾阳的叶形指数最大,且在 0.01 水平上显著高于其他分布地。桂林平乐的叶长、叶形指数和叶面积最小,且在 0.01 水平上显著低于其他分布地;南宁宾阳的叶宽最小,桂林平乐的叶宽较小,且这 2 个分布地的叶宽在 0.01 水平上差异不显著,但这 2 个分布地的叶宽在 0.01 水平上显著低于其他分布地。方差分

表 2 广西 5 个分布地水松表型性状的比较 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Comparison on phenotypic traits of *Glyptostrobus pensilis* (Staunton ex D. Don) K. Koch from five distribution areas in Guangxi ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

分布地 Distribution area	果长/mm Cone length	果宽/mm Cone width	单果鲜质量/g Fresh mass per cone	单果籽粒数 Seed number per cone	果形指数 Cone shape index
贵港覃塘 Qintang of Guigang	19.90±2.10AB(10.55%)	12.15±1.42B(11.68%)	1.157±0.067B(5.77%)	7.4±1.0B(13.56%)	1.64±0.09A(5.78%)
梧州苍梧 Cangwu of Wuzhou	18.95±1.30B(6.85%)	11.87±0.84B(7.09%)	0.736±0.039D(5.25%)	7.1±0.9B(12.06%)	1.60±0.10A(6.06%)
南宁宾阳 Binyang of Nanning	20.77±1.78A(8.59%)	12.98±1.13A(8.73%)	1.254±0.073A(5.82%)	7.7±1.1B(13.71%)	1.60±0.08A(5.24%)
桂林雁山 Yanshan of Guilin	14.94±0.50C(3.33%)	10.26±1.17C(11.37%)	0.604±0.042E(6.97%)	6.5±0.9C(13.30%)	1.47±0.17B(11.48%)
桂林平乐 Pingle of Guilin	18.98±1.39B(7.30%)	11.68±0.84B(7.19%)	1.048±0.096C(9.21%)	9.3±1.3A(10.58%)	1.63±0.08A(5.09%)
均值 Mean	18.71±2.50(7.32%)	11.79±1.40(9.21%)	0.960±0.258(6.60%)	7.6±1.3(12.64%)	1.59±0.12(6.73%)
CV/%	13.37	11.91	26.94	17.47	7.82
F 值 F value	65.543 **	24.179 **	520.320 **	35.591 **	10.907 **

续表 2 Table 2 (Continued)

分布地 Distribution area	单果出籽率/% Seed yield per cone	种子长/mm Seed length	种子宽/mm Seed width	种子厚/mm Seed thickness	种翅长/mm Seed wing length
贵港覃塘 Qintang of Guigang	4.5±0.5C(11.14%)	11.60±0.64A(5.55%)	2.54±0.22C(8.66%)	1.28±0.06C(4.36%)	7.12±0.96A(13.42%)
梧州苍梧 Cangwu of Wuzhou	6.0±0.5B(8.81%)	10.67±0.51C(4.74%)	2.69±0.12B(4.45%)	1.35±0.08B(6.21%)	6.95±0.47A(6.74%)
南宁宾阳 Binyang of Nanning	7.1±1.0A(13.47%)	11.23±0.52B(4.67%)	2.84±0.22A(7.82%)	1.43±0.06A(4.08%)	6.99±0.87A(12.5%)
桂林雁山 Yanshan of Guilin	3.5±0.2E(6.62%)	7.54±0.21E(2.77%)	2.18±0.04E(1.94%)	1.18±0.03D(2.21%)	3.25±0.40B(12.43%)
桂林平乐 Pingle of Guilin	4.0±0.6D(14.76%)	9.55±0.44D(4.59%)	2.38±0.11D(4.82%)	1.33±0.03B(2.06%)	6.69±0.50A(7.53%)
均值 Mean	5.0±1.5(10.96%)	10.12±1.54(4.47%)	2.53±0.28(5.54%)	1.31±0.1(3.78%)	6.20±1.63(10.52%)
CV/%	29.27	15.26	11.12	7.43	26.33
F 值 F value	181.119 **	339.584 **	79.526 **	82.659 **	178.153 **

分布地 Distribution area	种翅宽/mm Seed wing width	种形指数 Seed shape index	种子宽厚比 Seed width-thickness ratio	种子大小/mm ³ Seed size	种翅长宽比 Seed wing length-width ratio
贵港覃塘 Qintang of Guigang	2.58±0.25C(9.53%)	4.60±0.43A(9.34%)	1.99±0.21A(10.62%)	37.57±4.08B(10.87%)	2.78±0.40A(14.25%)
梧州苍梧 Cangwu of Wuzhou	2.62±0.20BC(7.66%)	3.97±0.29B(7.23%)	2.00±0.17A(8.38%)	38.78±2.98B(7.69%)	2.67±0.26A(9.71%)
南宁宾阳 Binyang of Nanning	3.11±0.26A(8.45%)	3.97±0.28B(7.16%)	1.99±0.17A(8.44%)	45.62±4.94A(10.82%)	2.26±0.33B(14.63%)
桂林雁山 Yanshan of Guilin	2.15±0.14D(6.44%)	3.47±0.11C(3.23%)	1.84±0.06B(3.14%)	19.44±0.78D(3.99%)	1.51±0.21C(13.79%)
桂林平乐 Pingle of Guilin	2.76±0.26B(9.28%)	4.01±0.16B(3.91%)	1.79±0.08B(4.44%)	30.40±2.87C(9.45%)	2.44±0.25B(10.11%)
均值 Mean	2.64±0.38(8.27%)	4.00±0.45(6.17%)	1.92±0.17(7.00%)	34.36±9.54(8.56%)	2.33±0.53(12.50%)
CV/%	14.45	11.31	8.98	27.76	22.91
F 值 F value	70.585 **	63.021 **	13.874 **	252.016 **	85.178 **

分布地 Distribution area	种子千粒质量/g 1 000-grain mass of seeds	叶长/mm Leaf length	叶宽/mm Leaf width	叶形指数 Leaf shape index	叶面积/cm ² Leaf area
贵港覃塘 Qintang of Guigang	0.842±0.014B(1.63%)	48.05±4.06C(8.45%)	4.10±0.17B(4.22%)	11.73±0.90B(7.70%)	10.14±1.10B(10.85%)
梧州苍梧 Cangwu of Wuzhou	0.726±0.028C(3.82%)	46.21±3.98C(8.62%)	3.99±0.21B(5.35%)	11.60±0.97B(8.38%)	9.49±1.12B(11.78%)
南宁宾阳 Binyang of Nanning	1.216±0.041A(3.41%)	58.56±3.24B(5.54%)	3.54±0.19C(5.50%)	16.56±1.03A(6.23%)	10.68±0.98B(9.15%)
桂林雁山 Yanshan of Guilin	0.457±0.018D(3.97%)	85.27±7.53A(8.84%)	7.46±0.80A(10.72%)	11.57±1.71B(14.82%)	32.66±4.35A(13.31%)
桂林平乐 Pingle of Guilin	0.484±0.019D(3.86%)	38.18±2.40D(6.28%)	3.60±0.15C(4.13%)	10.60±0.68C(6.38%)	7.08±0.60C(8.44%)
均值 Mean	0.745±0.281(3.34%)	55.25±17.02(7.54%)	4.54±1.53(5.98%)	12.41±2.39(8.70%)	14.01±9.67(10.71%)
CV/%	37.74	30.81	33.72	19.25	69.03
F 值 F value	1 139.728 **	475.870 **	526.808 **	134.53 **	731.598 **

¹⁾ 同列中不同大写字母表示在 0.01 水平差异显著 Different uppercases in the same column indicate the significant differences at 0.01 level. 括号内百分数为分布地内的变异系数 The percentages in parentheses are the coefficients of variation within distribution area. CV: 分布地间的变异系数 Coefficient of variation among distribution areas. **: $p < 0.01$.

析结果表明:供试 5 个分布地间水松叶 4 个表型性状的差异均达到极显著水平。

水松上述表型性状分布地间变异系数的变化范围为 7.43% ~ 69.03%, 均值为 22.14%, 其中, 叶面积的分布地间变异系数最大, 种子千粒质量、叶宽和叶长的分布地间变异系数较大(均高于 30%), 种子厚的分布地间变异系数最小, 果形指数和种子宽厚比的分布地间变异系数较小(均低于 10%)。经计算, 叶表型性状的分布地间变异系数均值最大(38.20%), 种子表型性状的分布地间变异系数均值次之(18.33%), 球果表型性状的分布地间变异系数均值最小(17.80%)。

2.2 相关性分析

2.2.1 水松表型性状间的相关性分析

水松球果、种子和叶表型性状的相关性分析结果(表 3)表明:在 20 个表型性状组成的 190 对性状组合中, 17 对性状的相关性不显著, 16 对性状的相关性显著($p < 0.05$), 157 对性状的相关性极显著($p < 0.01$)。果长、单果鲜质量、种子长、种翅长、种翅宽、种子大小和叶宽与其他表型性状的相关性显著或极显著。

2.2.2 水松表型性状与分布地地理-气候因子的相关性分析 水松球果、种子和叶表型性状与分布地地理-气候因子的相关性分析结果(表 4)表明:总体来看, 球果和种子表型性状与经度、纬度、海拔、年均降水量和年均空气相对湿度呈显著或极显著负相关, 与年均温呈极显著正相关; 叶表型性状与经度、纬度、海拔、年均降水量和年均空气相对湿度呈极显著正相关, 与年均温呈极显著负相关。

表3 广西水松表型性状间的相关性分析¹⁾Table 3 Analysis on correlations between phenotypic traits of *Glyptostrobus pensilis* (Staunton ex D. Don) K. Koch in Guangxi¹⁾

表型性状 Phenotypic trait	表型性状间的相关系数 Correlation coefficient between phenotypic traits									
	l_c	b_c	m_c	n_c	I_c	Y_c	l_s	b_s	d_s	l_{sw}
l_c	1.000									
b_c	0.829 **	1.000								
m_c	0.714 **	0.594 **	1.000							
n_c	0.392 **	0.301 **	0.392 **	1.000						
I_c	0.441 **	-0.132	0.313 **	0.214 **	1.000					
Y_c	0.502 **	0.466 **	0.351 **	0.005	0.150	1.000				
l_s	0.815 **	0.676 **	0.702 **	0.195 *	0.361 **	0.597 **	1.000			
b_s	0.733 **	0.661 **	0.492 **	0.101	0.248 **	0.717 **	0.717 **	1.000		
d_s	0.567 **	0.512 **	0.515 **	0.211 **	0.187 *	0.669 **	0.530 **	0.603 **	1.000	
l_{sw}	0.674 **	0.479 **	0.633 **	0.316 **	0.427 **	0.512 **	0.805 **	0.570 **	0.593 **	1.000
b_{sw}	0.567 **	0.502 **	0.651 **	0.359 **	0.207 *	0.535 **	0.571 **	0.600 **	0.648 **	0.609 **
I_s	0.427 **	0.296 **	0.526 **	0.185 *	0.276 **	0.145	0.711 **	0.025	0.179 *	0.594 **
R_s	0.451 **	0.394 **	0.189 *	-0.045	0.173 *	0.339 **	0.469 **	0.744 **	-0.080	0.240 **
S_s	0.827 **	0.731 **	0.661 **	0.164 *	0.299 **	0.765 **	0.893 **	0.916 **	0.757 **	0.733 **
R_{sw}	0.518 **	0.315 **	0.417 **	0.185 *	0.409 **	0.317 **	0.679 **	0.368 **	0.371 **	0.878 **
m_s	0.567 **	0.555 **	0.513 **	0.001	0.128	0.568 **	0.673 **	0.674 **	0.443 **	0.463 **
l_l	-0.566 **	-0.337 **	-0.478 **	-0.522 **	-0.462 **	-0.205 *	-0.603 **	-0.344 **	-0.474 **	-0.783 **
b_l	-0.728 **	-0.538 **	-0.694 **	-0.455 **	-0.424 **	-0.526 **	-0.766 **	-0.602 **	-0.702 **	-0.860 **
I_l	0.351 **	0.418 **	0.460 **	-0.094	-0.047	0.665 **	0.353 **	0.548 **	0.475 **	0.174 *
A_l	-0.699 **	-0.486 **	-0.636 **	-0.481 **	-0.457 **	-0.433 **	-0.752 **	-0.538 **	-0.635 **	-0.868 **

表型性状 Phenotypic trait	表型性状间的相关系数 Correlation coefficient between phenotypic traits									
	b_{sw}	I_s	R_s	S_s	R_{sw}	m_s	l_l	b_l	I_l	A_l
b_{sw}	1.000									
I_s	0.230 **	1.000								
R_s	0.210 **	-0.095	1.000							
S_s	0.682 **	0.364 **	0.517 **	1.000						
R_{sw}	0.165 *	0.613 **	0.177 *	0.525 **	1.000					
m_s	0.465 **	0.295 **	0.467 **	0.730 **	0.315 **	1.000				
l_l	-0.449 **	-0.538 **	-0.062	-0.492 **	-0.727 **	-0.180 *	1.000			
b_l	-0.668 **	-0.519 **	-0.184 *	-0.755 **	-0.695 **	-0.448 **	0.841 **	1.000		
I_l	0.472 **	-0.034	0.268 **	0.557 **	-0.058	0.563 **	0.246 **	-0.296 **	1.000	
A_l	-0.603 **	-0.560 **	-0.164 *	-0.696 **	-0.742 **	-0.377 **	0.937 **	0.973 **	-0.093	1.000

¹⁾ l_c : 果长 Cone length; b_c : 果宽 Cone width; m_c : 单果鲜质量 Fresh mass per cone; n_c : 单果籽粒数 Seed number per cone; I_c : 果形指数 Cone shape index; Y_c : 单果出籽率 Seed yield per cone; l_s : 种子长 Seed length; b_s : 种子宽 Seed width; d_s : 种子厚 Seed thickness; l_{sw} : 种翅长 Seed wing length; b_{sw} : 种翅宽 Seed wing width; I_s : 种形指数 Seed shape index; R_s : 种子宽厚比 Seed width-thickness ratio; S_s : 种子大小 Seed size; R_{sw} : 种翅长宽比 Seed wing length-width ratio; m_s : 种子千粒质量 1 000-grain mass of seeds; l_l : 叶长 Leaf length; b_l : 叶宽 Leaf width; I_l : 叶形指数 Leaf shape index; A_l : 叶面积 Leaf area. *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$.

表4 广西水松表型性状与分布地地理-气候因子间的相关性分析

Table 4 Analysis on correlation between phenotypic traits of *Glyptostrobus pensilis* (Staunton ex D. Don) K. Koch in Guangxi and geographical-climatic factors of distribution areas

表型性状 Phenotypic trait	与地理-气候因子的相关系数 ¹⁾ Correlation coefficient with geographical-climatic factors ¹⁾					
	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude	年均温 Mean annual temperature	年均降水量 Mean annual precipitation	年均空气相对湿度 Mean annual air relative humidity
果长 Cone length	-0.461 **	-0.384 **	-0.443 **	0.675 **	-0.674 **	-0.498 **
果宽 Cone width	-0.399 **	-0.313 **	-0.291 **	0.516 **	-0.469 **	-0.315 **
单果鲜质量 Fresh mass per cone	-0.769 **	-0.279 **	-0.145	0.536 **	-0.526 **	-0.720 **
单果籽粒数 Seed number per cone	-0.437 **	-0.456 **	-0.375 **	0.035	-0.438 **	-0.311 **

续表4 Table 4 (Continued)

表型性状 Phenotypic trait	与地理-气候因子的相关系数 ¹⁾ Correlation coefficient with geographical-climatic factors ¹⁾					
	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude	年均温 Mean annual temperature	年均降水量 Mean annual precipitation	年均空气相对湿度 Mean annual air relative humidity
果形指数 Cone shape index	-0.178 *	-0.180 *	-0.319 **	0.373 **	-0.444 **	-0.377 **
单果出籽率 Seed yield per cone	-0.391 **	-0.500 **	-0.359 **	0.608 **	-0.436 **	0.063
种子长 Seed length	-0.290 **	-0.207 *	-0.455 **	0.919 **	-0.742 **	-0.621 **
种子宽 Seed width	-0.340 **	-0.423 **	-0.424 **	0.693 **	-0.554 **	-0.154
种子厚 Seed thickness	-0.550 **	-0.681 **	-0.535 **	0.513 **	-0.623 **	-0.122
种翅长 Seed wing length	-0.345 **	-0.446 **	-0.670 **	0.790 **	-0.871 **	-0.570 **
种翅宽 Seed wing width	-0.663 **	-0.599 **	-0.399 **	0.462 **	-0.563 **	-0.260 **
种形指数 Seed shape index	-0.091	0.103	-0.248 **	0.633 **	-0.531 **	-0.742 **
种子宽厚比 Seed width-thickness ratio	0.044	0.038	-0.105	0.458 **	-0.196 *	-0.110
种子大小 Seed size	-0.432 **	-0.432 **	-0.478 **	0.831 **	-0.690 **	-0.356 **
种翅长宽比 Seed wing length-width ratio	-0.034	-0.202 *	-0.614 **	0.730 **	-0.772 **	-0.573 **
种子千粒质量 1 000-grain mass of seeds	-0.288 **	-0.087	-0.111	0.657 **	-0.343 **	-0.304 **
叶长 Leaf length	0.222 **	0.502 **	0.820 **	-0.596 **	0.928 **	0.576 **
叶宽 Leaf width	0.500 **	0.621 **	0.738 **	-0.726 **	0.923 **	0.537 **
叶形指数 Leaf shape index	-0.585 **	-0.272 **	0.139	0.281 **	-0.022	0.066
叶面积 Leaf area	0.391 **	0.575 **	0.792 **	-0.728 **	0.960 **	0.580 **

¹⁾ *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$.

2.3 广西水松表型性状的主成分分析

水松球果、种子和叶表型性状的主成分分析结果(表5)表明:前3个主成分的特征值均大于1,累计贡献率达95.890%,表明这3个主成分能够反映水松20个表型性状的绝大部分信息。第1主成分能够解释总变异的68.87%,其中,果形指数、种翅长、叶长、叶宽和叶面积的特征向量绝对值明显高于其他表型性状;第2主成分能够解释总变异的18.89%,其中,单

果籽粒数、果形指数和叶长的特征向量绝对值明显高于其他表型性状;第3主成分能够解释总变异的8.12%,其中,单果籽粒数、种翅宽、果形指数和种翅长宽比的特征向量绝对值明显高于其他表型性状。

2.4 广西不同分布地水松表型性状的综合评价

从5个分布地水松表型性状的综合得分(表6)看:南宁宾阳最高(1.854)、贵港覃塘次之(1.187)、梧州苍梧居中(0.298)、桂林平乐较低(-0.211)、桂林

表5 广西水松表型性状的主成分分析

Table 5 Principal component analysis on phenotypic traits of *Glyptostrobus pensilis* (Staunton ex D. Don) K. Koch in Guangxi

主成分 Principal component	表型性状的特征向量 ¹⁾ Eigenvector of phenotypic traits ¹⁾											
	l_c	b_c	m_c	n_c	I_c	Y_c	l_s	b_s	d_s	l_{sw}	b_{sw}	I_s
1	0.48	0.38	0.38	0.33	0.56	0.06	0.31	0.18	0.39	0.54	0.42	0.26
2	-0.02	0.14	-0.41	-0.90	-0.54	0.10	0.03	0.18	0.19	-0.23	0.14	-0.27
3	-0.04	-0.09	0.01	-1.27	0.12	-0.03	0.30	0.01	-0.47	0.11	-0.60	0.52

主成分 Principal component	表型性状的特征向量 ¹⁾ Eigenvector of phenotypic traits ¹⁾								特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	R_s	S_s	R_{sw}	m_s	l_l	b_l	I_l	A_l			
1	-0.08	0.28	0.41	0.02	0.53	0.60	-0.05	0.60	13.775	68.874	68.874
2	-0.14	0.17	-0.38	0.03	-0.80	-0.28	-0.17	-0.46	3.779	18.893	87.767
3	-0.23	0.05	0.52	0.00	-0.06	-0.27	0.09	-0.13	1.625	8.123	95.890

¹⁾ l_c : 果长 Cone length; b_c : 果宽 Cone width; m_c : 单果鲜质量 Fresh mass per cone; n_c : 单果籽粒数 Seed number per cone; I_c : 果形指数 Cone shape index; Y_c : 单果出籽率 Seed yield per cone; l_s : 种子长 Seed length; b_s : 种子宽 Seed width; d_s : 种子厚 Seed thickness; l_{sw} : 种翅长 Seed wing length; b_{sw} : 种翅宽 Seed wing width; I_s : 种形指数 Seed shape index; R_s : 种子宽厚比 Seed width-thickness ratio; S_s : 种子大小 Seed size; R_{sw} : 种翅长宽比 Seed wing length-width ratio; m_s : 种子千粒质量 1 000-grain mass of seeds; l_l : 叶长 Leaf length; b_l : 叶宽 Leaf width; I_l : 叶形指数 Leaf shape index; A_l : 叶面积 Leaf area.

表6 广西不同分布地水松表型性状的综合评价
Table 6 Comprehensive evaluation of phenotypic traits of *Glyptostrobus pensilis* (Staunton ex D. Don) K. Koch from different distribution areas in Guangxi

分布地 Distribution area	在各主成分中的得分 ¹⁾ Score in each principal component ¹⁾			综合得分 Comprehensive score
	F1	F2	F3	
贵港覃塘 Qintang of Guigang	1.751	-1.022	2.138	1.187
梧州苍梧 Cangwu of Wuzhou	-0.011	1.246	0.864	0.298
南宁宾阳 Binyang of Nanning	2.680	0.594	-1.274	1.854
桂林雁山 Yanshan of Guilin	-4.549	0.053	-0.065	-3.128
桂林平乐 Pingle of Guilin	0.128	-0.870	-1.663	-0.211

¹⁾ F1, F2, F3; 分别表示第1、第2和第3主成分 Represent the first, second, and third principal components, respectively.

雁山最低(-3.128),说明南宁宾阳的水松表型性状相对最佳,而桂林雁山的水松表型性状相对最差。

2.5 广西不同分布地水松的聚类分析

基于欧氏距离对广西5个分布地水松进行聚类分析,结果(图1)表明:在欧氏距离8.8处,5个分布地被分为3组,其中,贵港覃塘、梧州苍梧和南宁宾阳为一组,桂林雁山和桂林平乐分别单独为一组。



图1 广西不同分布地水松的聚类分析
Fig. 1 Cluster analysis on *Glyptostrobus pensilis* (Staunton ex D. Don) K. Koch from different distribution areas in Guangxi

3 讨论和结论

植物的表型性状受自身遗传和外界环境共同影响。在环境复杂和长期地理隔离的条件下,植物不断进行自我选择,最终形成形态和生理适应策略,产生丰富的表型多样性^[4]。变异系数能够反映植物在适应环境过程中产生的变异程度^[33],其数值越大,表示表型多样性越丰富,说明植物适应环境的能力越强。本研究中,广西不同分布地水松球果、种子和叶的表型性状差异均达到极显著水平($p < 0.01$),说明广西水松的表型多样性十分丰富;比较发现,广西水松叶表型性状的分布地间变异系数均值是球果和种子的

2倍多,说明广西水松的球果和种子对环境的适应能力弱于叶。

植物在进化过程中能够通过不同表型性状间的相互调节达到适应环境的目的,因此,植物的多数表型性状之间往往存在一定的联系^[34];并且,植物不同表型性状与环境因子的相关性存在明显差异^[35]。本研究中,水松的果长、单果鲜质量、种子长、种翅长、种翅宽、种子大小和叶宽与其他表型性状间均存在显著($p < 0.05$)或极显著相关性,说明这些指标能够反映水松的生长状况,可将其作为水松优良种质筛选的重要指标。多数研究结果表明:经度、纬度、海拔、年均温、年均降水量及年均空气相对湿度是影响植物表型性状差异的重要环境因子^[24,36-39]。总体来看,水松的球果和种子表型性状与经度、纬度、海拔、年均降水量和年均空气相对湿度呈显著或极显著负相关,与年均温呈极显著正相关;叶表型性状则与经度、纬度、海拔、年均降水量和年均空气相对湿度呈极显著正相关,与年均温呈极显著负相关,说明随经度、纬度、海拔、年均降水量和年均空气相对湿度的降低以及年均温的升高,水松的叶变得狭小,球果和种子则增大,由此推断经度、纬度、海拔、年均温、年均降水量和年均空气相对湿度是影响水松表型性状的重要地理-气候因子。

主成分分析结果表明:前3个主成分的累计贡献率为95.890%,说明这3个主成分能够反映广西水松表型性状的绝大部分信息。值得注意的是,果形指数的特征向量绝对值在3个主成分中均较大,叶长的特征向量绝对值在第1和第2主成分中较大,单果籽粒数的特征向量绝对值在第2和第3主成分中较大,说明这3个表型性状对水松表型变异的贡献率较大,与其他表型性状存在紧密且复杂的相关关系。因此,可将这3个表型性状作为生物标记,用于分析不同分布地水松的适应性和变异特征^[40]。

综合评价结果表明:南宁宾阳水松表型性状的综合得分(1.854)最高,贵港覃塘水松表型性状的综合得分(1.187)次之,可作为广西水松优良单株选择或良种选育的材料。另外,对于大多数生境破碎化的濒危物种来说,种群个体数量长期较少或处于孤立状态,会增大近交衰退导致的种实败育和种群灭绝的风险^[41]。因此,可将这2个分布地的水松作为广西水松引种回归的种质来源,以增强水松种群的基因交流,丰富其遗传多样性。

聚类分析结果表明:南宁宾阳、贵港覃塘和梧州苍梧聚为一组,而桂林雁山和桂林平乐分别单独为一组,推测这可能与5个分布地的地理位置有关,南宁宾阳、贵港覃塘和梧州苍梧均位于广西南部,纬度相对较低,而桂林雁山和桂林平乐则位于广西北部,纬度相对较高,说明广西水松表型性状具有以纬度变化为主的地理变异格局。另外,综合评价结果表明广西低纬度分布地水松表型性状的综合得分明显高于纬度较高的分布地,由此推测,水松更适合生长在广西的低纬度地区。但在引种栽培水松时,还应综合考虑引种地经度、海拔、年均温、年均降水量和年均空气相对湿度等地理-气候因子。

综上所述,广西5个分布地的野生水松表型多样性较为丰富,尤其是叶表型性状;比较而言,南宁宾阳和贵港覃塘的水松表型性状较好,可作为广西水松优良单株筛选和良种选育的材料。经度、纬度、海拔、年均温、年均降水量和年均空气相对湿度是影响该地区水松表型性状变化的重要地理-气候因子。

参考文献:

- [1] 孙荣喜,潘昕昊,仲小茹,等.不同种源米楮种子形态特征与营养成分变异分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(2):41-48.
- [2] CHEN T, LIU L, ZHOU Y L, et al. Characterization and comprehensive evaluation of phenotypic characters in wild *Camellia oleifera* germplasm for conservation and breeding[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1052890.
- [3] YUAN G Y, GUO Q Q, ZHANG Y Q, et al. Geographical differences of leaf traits of the endangered plant *Litsea coreana* Levl. var. *sinensis* and its relationship with climate[J]. *Journal of Forestry Research*, 2023, 34: 125-135.
- [4] LI H G, WANG R Z, TIAN Z W, et al. Phenotypic variation and diversity in fruit, leaf, fatty acid, and their relationships to geoclimatic factors in seven natural populations of *Malania oleifera* Chun et S. K. Lee[J]. *Forests*, 2022, 13: 1733.
- [5] 郭松,李在留,薛建辉,等.不同种源掌叶木果实和种子表型性状多样性分析及综合评价[J].植物资源与环境学报,2018,27(4):11-20.
- [6] 李帅锋,苏建荣,刘万德,等.思茅松天然群体种实表型变异[J].植物生态学报,2013,37(11):998-1009.
- [7] HU Y, YANG L, GAO C, et al. A comparative study on the leaf anatomical structure of *Camellia oleifera* in a low-hot valley area in Guizhou Province, China [J]. *PLoS ONE*, 2022, 17(1): e0262509.
- [8] CHEN X X, GAI Z S, ZHAI J T, et al. Phenotypic variation of natural *Populus pruinosa* Schrenk populations shaped by geographical and climatic factors [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2022, 20(2): 1065-1083.
- [9] 陈菊艳,李鹤,李启祥,等.濒危植物滇桐的种实特征及种子萌发的差异分析[J].贵州林业科技,2021,49(1):19-22,11.
- [10] 韩旻昊,任飞,燕丽萍,等.山东元宝枫天然种群种实的表型多样性[J].中南林业科技大学学报,2023,43(11):173-184,192.
- [11] 尚海琳.桃儿七形态与生理特征的地理变异及种子萌发生理[D].西安:西北大学,2009:57.
- [12] 赵娜,缪亚梅,姚梦楠,等.蚕豆种质资源籽粒表型与营养品质性状的多样性分析[J].江苏农业学报,2022,38(3):597-604.
- [13] YANG Y, FERGUSON D K, LIU B, et al. Recent advances on phylogenomics of gymnosperms and a new classification[J]. *Plant Diversity*, 2022, 44(4): 340-350.
- [14] 李发根,夏念和.水松地理分布及其濒危原因[J].热带亚热带植物学报,2004,12(1):13-20.
- [15] 吴则焰,刘金福,洪伟,等.子遗植物水松(*Glyptostrobus pensilis*)数量性状间的相关聚类分析[J].北华大学学报(自然科学版),2009,10(4):358-361.
- [16] 刘军,刘云鹏,孙春刚,等.太湖滩涂造林树种水松对重金属富集作用初步研究[J].江苏林业科技,2013,40(3):5-7,14.
- [17] XIONG J, HU C L, WANG P P, et al. Spiroflavonoid stereoisomers from the endangered conifer *Glyptostrobus pensilis* and their protein tyrosine phosphatase 1B inhibitory activity [J]. *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters*, 2020, 30: 126943.
- [18] ZHANG Y M, YIN R T, JIA R R, et al. A new abietane diterpene from *Glyptostrobus pensilis*[J]. *Fitoterapia*, 2010, 81: 1202-1204.
- [19] PHONG N V, TRANG N M, QUYEN C T, et al. SARS-CoV-2 main protease and papain-like protease inhibition by abietane-type diterpenes isolated from the branches of *Glyptostrobus pensilis* using molecular docking studies [J]. *Natural Product Research*, 2022, 36(24): 6336-6343.
- [20] 郑心桦.水松天然林种群结构特征及其保护对策[J].南方农业,2021,15(36):107-110.
- [21] SIMONEIT B R T, OTTO A, OROS D R, et al. Terpenoids of the swamp cypress subfamily (Taxodioideae), Cupressaceae, an overview by GC-MS[J]. *Molecules*, 2019, 24(17): 3036.
- [22] 杨志业,谭颖仪,汪芸,等.水松叶药材质量标准研究[J].广东化工,2021,48(3):24-26.
- [23] YUANY L, MA S Y, LIU K, et al. High frequency adventitious shoot regeneration from hypocotyl-derived callus of *Glyptostrobus pensilis*, a critically endangered plant[J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2023, 152: 139-149.
- [24] 吴则焰,刘金福,洪伟,等.水松扦插繁殖体系研究[J].中国农学通报,2012,28(22):22-26.
- [25] LI X Y, LIN X Y, RUHSAM M, et al. Development of chloroplast microsatellite markers for the critically endangered conifer *Glyptostrobus pensilis* (Cupressaceae) using transcriptome data[J]. *Silvae Genetica*, 2019, 68: 41-44.

- [26] WU X T, RUHSAM M, WEN Y F, et al. The last primary forests of the Tertiary relict *Glyptostrobus pensilis* contain the highest genetic diversity[J]. *Forestry*, 2020, 93: 359–375.
- [27] 李鑫玉. 基于叶绿体标记的水松系统发育地位及其谱系地理学研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019: 22.
- [28] DÖRKEN V M, RUDALL P J. Understanding the cone scale in Cupressaceae: insights from seed-cone teratology in *Glyptostrobus pensilis*[J]. *PeerJ*, 2018, 6: e4948.
- [29] 刘雄盛, 徐刚标, 梁文斌, 等. 濒危植物水松小孢子发生和雄配子体发育的研究[J]. *植物科学学报*, 2014, 32(1): 58–66.
- [30] 贾 婷, 杜宣瑾, 张 露, 等. 毛红椿种子性状的种源差异及综合评价[J]. *森林与环境学报*, 2023, 43(5): 548–554.
- [31] 顾 泽, 王 博, 陈思帆, 等. 不同火烈度火烧迹地内油松叶功能性状的变化[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1497–1504.
- [32] 郑 雷, 王化东, 梁雪兰. 不同栝楼种质果实和种子性状分析及综合评价[J]. *中国瓜菜*, 2023, 36(9): 36–41.
- [33] 丁翠香, 谭 化, 张海燕, 等. 吉林省引进甜瓜种质资源表型遗传多样性分析[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(7): 147–153.
- [34] 郝丙青, 张 幸, 屈 艳, 等. 越南油茶种实表型性状多样性分析及其与环境因子的关系[J]. *植物资源与环境学报*, 2023, 32(4): 33–43.
- [35] 李东宝, 吴 敏, 余 蓉, 等. 不同种源麻竹表型多样性及其与环境因子的相关性[J]. *植物资源与环境学报*, 2023, 32(5): 39–50.
- [36] 白天道, 余春兰, 甘泽朝, 等. 细叶云南松种实性状变异与地理气象因子的关联[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(12): 1224–1235.
- [37] 曹秋霞, 梁文斌, 杨 艳, 等. 椴子表型多样性及其与环境因子的相关性[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2023, 38(4): 587–596.
- [38] 李卫英, 章正仁, 辛雅萱, 等. 云南松、思茅松和卡西亚松天然种群间的针叶表型变异[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(6): 833–846.
- [39] GAO C J, LIU F Y, MIAO Y C, et al. Effects of geo-climate factors on phenotypic variation in cone and seed traits of *Pinus yunnanensis*[J]. *Ecology and Evolution*, 2023, 13: e10568.
- [40] LI Y G, LIU X H, MA J W, et al. Phenotypic variation in *Phoebe bournei* population preserved in the primary distribution area[J]. *Journal of Forestry Research*, 2018, 29: 35–44.
- [41] 李洪果, 陈达镇, 许靖诗, 等. 濒危植物格木天然种群的表型多样性及变异[J]. *林业科学*, 2019, 55(4): 69–83.

(责任编辑: 佟金凤)

《植物资源与环境学报》启事

为了扩大科技期刊的信息交流、充分实现信息资源共享,《植物资源与环境学报》已先后加入“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据——数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”等网络文献资源数据库,凡在本刊发表的论文将编入数据库供上网交流、查阅及检索,作者的著作权使用费与本刊稿酬一次性给付,不再另付。如作者不同意将文章收编入数据库,请在来稿时声明,本刊将做适当处理。

《植物资源与环境学报》的投稿网址为 <http://zwzy.cnbg.net>; 联系电话: 025-84347014; E-mail: zwzybjb@163.com; QQ: 2219161478。

《植物资源与环境学报》编辑部
2024-07