•研究报告•

基于功能性状的水杉原生母树种群生境适应策略

陈俊 姚兰* 艾训儒 朱江 吴漫玲
黄小 陈思艺 王进 朱强

(湖北民族大学林学院园艺学院, 湖北恩施 445000)

摘要: 植物的功能性状变异和表型可塑性是其应对异质生境的主要机制, 对植物的生长和分布有重要贡献。本文以湖北星斗山国家级自然保护区的水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)原生母树为研究对象, 分析了母树种群功能性状对树木形态、地形因子及人为干扰的响应机制。结果表明: 水杉原生母树叶面积、叶干重和比叶面积的变异幅度大, 可塑性较强, 而枝和叶的干物质含量稳定性最高。人为干扰和4个地形因子均对每个功能性状变异方差有5%–20%的解释度, 冠幅对枝、叶干物质含量的变异方差有高达38%和76%的解释度。5个功能性状主要受海拔、坡位和人为干扰影响, 其中, 比叶面积对环境因子和干扰的响应规律不明显, 叶面积和叶干重在强烈人为干扰的环境中普遍增大, 枝和叶的干物质含量对坡向的变化最敏感。总之, 水杉原生母树种群通过功能性状变异对环境能产生一定的可塑性响应, 但人为干扰对母树生长影响较大, 建议人工辅助更新, 并适度减少农业和建筑对现存母树的影响。

关键词: 水杉; 功能性状; 种内变异; 表型可塑性; 适应策略

Adaptive strategies of functional traits of *Metasequoia glyptostroboides* parent trees to changing habitats

Jun Chen, Lan Yao*, Xunru Ai, Jiang Zhu, Manling Wu, Xiao Huang, Siyi Chen, Jin Wang, Qiang Zhu
School of Forestry and Horticulture, Hubei Minzu University, Enshi, Hubei 445000

Abstract: Functional trait variability and phenotypic plasticity are the main mechanisms plants use to respond to heterogeneous habitats. These can determine how well a plant grows and where it is distributed. In the Xingdoushan National Nature Reserve, we assessed the response of the functional traits of a population of *Metasequoia glyptostroboides* parent trees to tree morphology, terrain factors and human disturbance. We found that the leaf area (LA), leaf dry weight (LDW) and specific leaf area (SLA) had large variation and great plasticity, while leaf dry matter content (LDMC) and twig dry matter content (TDMC) were more stable. Human disturbance and the four terrain factors together explained 5%–20% of variance for each functional trait, and crown size explained 38% and 76% of the variation in TDMC and LDMC, respectively. The five functional traits were mainly affected by altitude, slope aspect and human disturbance. The SLA responded slightly to environmental factors and disturbance pattern, while LA and LDW generally increased with strong disturbance. LDMC and TDMC were most sensitive to change in slope aspect. Taken together, the population of *M. glyptostroboides* parent trees demonstrated significant plasticity in response to the environment through its variability in functional traits. Because human disturbance had a great influence on the growth of these trees, artificial regeneration is recommended, and the impact of agriculture and human construction needs to be reduced.

Key words: *Metasequoia glyptostroboides*; functional trait; intraspecific variability; phenotypic plasticity; adaptive strategy

收稿日期: 2019-03-24; 接受日期: 2019-05-16

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0503100)“极小种群野生植物种质资源保护技术与示范”课题(2016YFC0503102)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: hbmyyl@163.com

植物功能性状(plant functional trait)指影响植物存活、生长、繁殖速率和最终适合度的生物特征,同时是植物在漫长的进化过程中,采用特定生态策略或属性适应周围环境的结果(Cornelissen et al, 2003; 刘晓娟和马克平, 2015)。植物功能性状的种内变异表征了植物沿生物和非生物梯度上的最大适应能力,从根本上决定着植物的生态位宽度(Ackerly & Cornwell, 2007; Albert et al, 2010)。同时,种内变异可使物种通过非生物和生物筛选过程进入局域群落(Jung & Muller, 2010)。如Laforest-Lapointe等(2014)发现种内性状变异是决定植物能否应对气候变化和其他环境因子改变的重要因素。因此,种内变异有助于解释环境梯度上种群的结构与动态。

基于植物功能性状的种群生境适应策略近年来受到广泛关注,学者们发现物种对环境的适应性进化所导致的种内变异对种群和群落构建机制的影响不容忽视(Auger & Shipley, 2013; 陈磊等, 2014; Siefert et al, 2015; 唐青青等, 2016)。异质生境中,植物的不同功能性状之间存在权衡,通过表型可塑性达到对生境的适应是植物的一种重要生态对策(Gao et al, 2013; 李西良等, 2014)。植物表型可塑性指个体在响应环境过程中改变表型的能力,有助于植物在异质生境中最大限度地获取资源,进行资源的再分配,从而实现资源的有效利用,提高植物适合度(施建敏, 2014; 王姝和周道玮, 2017)。如罗琦等(2018)通过测定光合、水力等功能性状的变化,分析了木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)、椰子(*Cocos nucifera*)等5种植物的环境适应性,以进行植被恢复评价。

水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)是中国著名的杉科孑遗植物,其原生母树被列为国家一级保护植物,在世界植物学界有“活化石”之称,已列入世界自然保护联盟(IUCN) 2013年濒危物种红色名录。目前,湖北星斗山国家级自然保护区内的5,661株水杉原生母树种群趋于衰退,幼龄个体严重缺乏(林勇等, 2017)。同时,只有现存的水杉原生母树种群保留着其最完整的基因库^①。因此,本研究基于每株水杉原生母树个体的形态、地形和人为干扰数据,通过大规模的功能性状采样,分析该种群功能性状的结构和可塑性,以及对地形和人为干扰的响应,

旨在探讨该种群的生境适应策略,为进一步开展水杉原生母树的保护和恢复工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象

水杉原生母树主要分布在湖北省恩施市星斗山国家级自然保护区西部小河片区(108°31′–108°48′ E、30°04′–30°14′ N),分布面积约60,000 ha,涉及45个行政村。种群所处的自然环境和生态条件较差,50.89%的个体分布在居民房前屋后(间距小于30 m),因房屋建筑、道路维修、作物种植等,种群受到严重的人为干扰(林勇等, 2017)。

1.2 研究方法

1.2.1 水杉原生母树种群调查

2013年7月至2014年8月,根据相关资料对现存5,661株挂牌的水杉原生母树进行了详细调查,主要包括:(1)母树个体测树因子检测,包括胸径(DBH)、树高(H)、冠幅(crown size)和GPS坐标;(2)地形因子调查,包括坡度、坡位、坡向和海拔(852–1,565 m);(3)人为干扰程度调查,根据母树个体生长位置(房前屋后、道路、河流、水田、苗圃、山坡和森林)及植被状况,采用强烈干扰、中度干扰、轻微干扰进行分级。

1.2.2 功能性状的测定

2017年7–9月,根据水杉原生母树种群区域分布、海拔梯度和胸径分布特征,筛选出1,208株个体进行植物功能性状调查。参考Pérez-Harguindeguy等(2013)的功能手册指南,每株个体采集4片完整、无病虫害的健康成熟叶片,以及2段2–3年生枝条,每个枝条长约5 cm,直径约1 cm,用自封袋密封并放入保鲜箱。枝叶样本在12 h内处理,用电子天平称取鲜重,叶片用A4扫描仪(CanoScan LiDE 120)结合Image J软件测量叶面积。然后,将新鲜叶片和去皮的枝条烘干至恒重,用电子天平测量叶片和枝条的干重。选择叶干重(leaf dry weight, LDW)、叶面积(leaf area, LA)、比叶面积(specific leaf area, SLA)、叶干物质含量(leaf dry matter content, LDMC)、枝干物质含量(twig dry matter content, TDMC) 5个指标作为功能性状指标。

1.3 数据处理

采用多元因子分析(multiple factor analysis, MFA)检测水杉原生母树5个功能性状指标、形态特

^① 崔敏燕 (2011) 濒危物种水杉种群的引种和生存力分析. 硕士学位论文, 华东师范大学, 上海。

征(胸径、树高和冠幅)、地形因子(海拔、坡向、坡度和坡位)及人为干扰强度共13个因子之间的相关关系;运用R程序包“nlme”中的限制最大似然法,选择广义线性模型和“varcomp”函数对功能性状在形态、地形和人为干扰角度的变异进行方差分解;采用灰色关联度分析地形因子对功能性状的影响;采用偏相关分析(partial correlation)结合单因素方差分析(one-way ANOVA)和Tukey HSD Test事后比较分析,分别检测功能性状指标针对海拔、坡向、人为干扰的响应。数据分析参照Borcard等(2011)总结的数量生态学方法,在R 3.4.4中完成。显著度设定为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 功能性状的分布模式

水杉原生母树种群的叶干重为单峰偏左分布,偏度和峰度远大于其他功能性状(表1),且统计分析发现叶干重有较多的极小值,其极大值远大于正常水平。由表1可知,5个功能性状指标的变异幅度为9.059%–37.172%,平均变异系数为23.420%,叶干重、叶面积和比叶面积可塑性较强,而枝的干物质含量可塑性最低。

2.2 功能性状、形态及地形因子的相关性

多元因子分析仅保留相关关系最为显著的因子,胸径、冠幅、海拔因子与功能性状指标相关性最强,海拔是地形因子和人为干扰因子中的主导因子(图1)。叶干重、比叶面积、叶干物质含量与水杉原生母树的胸径、冠幅相关,同时受到海拔因子的强烈影响。叶面积、枝干物质含量与树木形态、地形因子和人为干扰的相关性较弱,具有较强的稳定性。

2.3 不同因子对功能性状影响的方差分解

功能性状变异方差分解的结果见图2。人为干扰和地形因子(海拔、坡位、坡向、坡度)对5个功能

性状变异方差的影响规律较为一致,且均对叶干物质含量的解释度最小;胸径和树高对功能性状变异方差的解释非常有限,仅胸径对枝干物质含量有17%的解释,其余的解释度小于5%;冠幅对枝、叶干物质含量分别有高达38%和76%的解释度,但对叶面积、比叶面积和叶干重的解释度几乎为零。

2.4 功能性状与地形因子灰色关联度分析

选取海拔、坡向、坡度和坡位4个典型的地形因子,分析功能性状受地形因子影响程度的相对大小(表2)。叶干重、比叶面积、叶干物质含量的影响因子大小均表现为:海拔 > 坡向 > 坡度 > 坡位,叶面积、枝干物质含量的影响因子大小表现为:海拔 > 坡度 > 坡向 > 坡位,说明地形因子中海拔对5个功能性状的影响程度最大,坡位的影响力最小,坡向对叶干重、比叶面积和叶干物质含量的影响较大,坡度主要影响叶面积和枝干物质含量指标。

2.5 功能性状值在坡向梯度上的变化

从图3可以看出,在从阴坡、平地到阳坡的坡向梯度变化中,叶干重、比叶面积呈波动变化,无明显规律。平地的水杉原生母树叶面积普遍较大,与半阴坡和半阳坡差异显著(P 值分别为0.001和0.037),同时阴坡和阳坡的叶面积差异不大($P = 0.898$)。叶干物质含量在半阴坡处普遍较低,且有更多的极小值,与阴坡、平地差异极显著(P 值分别为0.003和0.001)。枝干物质含量在阴坡、半阴坡和平地梯度上变化平稳,在半阳坡和阳坡明显上升。

2.6 不同人为干扰程度下功能性状的分布

偏相关分析发现,剔除地形因子的干扰后,叶干重、叶面积、比叶面积、叶干物质含量共4个叶性状与人为干扰相关性较强,而枝干物质含量与人为干扰不相关。因此,用单因素方差分析检测人为干扰对4个叶性状的影响(图4)。由图4可知,叶干重

表1 水杉原生母树功能性状及其变异

Table 1 Functional trait and its variance of *Metasequoia glyptostroboides* parent trees

性状 Trait	平均值 $\pm$ 标准差 Mean $\pm$ SD	最小值 Minimum	最大值 Maximum	中值 Median	偏度 Sewness	峰度 Kurtosis	变异系数 Coefficient of variation (%)
叶干重 Leaf dry weight (g)	0.229 $\pm$ 0.085	0.096	0.889	0.210	17,406.545	11.361	37.172
叶面积 Leaf area (cm ²)	28.316 $\pm$ 5.813	5.419	61.215	28.903	6,389.909	2.264	20.389
比叶面积 Specific leaf area (cm ² /g)	11.6 $\pm$ 3.735	1.915	32.454	11.322	4,838.621	0.983	32.121
叶干物质含量 Leaf dry matter content (g/g)	0.242 $\pm$ 0.045	0.129	0.430	0.237	4,740.165	0.902	18.358
枝干物质含量 Twig dry matter content (g/g)	0.415 $\pm$ 0.038	0.283	0.618	0.415	5,497.453	1.527	9.059

图1 功能性状、形态因子与地形因子的多元因子分析
Fig. 1 Multiple factor analysis of functional traits, tree forms, and topographical factors. LA, Leaf area; SLA, Specific leaf area; LDW, Leaf dry weight; LDMC, Leaf dry matter content; TDMC, Twig dry matter content; DBH, Diameter at breast height; H, Height.

图2 不同因子对功能性状影响的方差分解
Fig. 2 Variance partitioning for function traits by different factors. LA, Leaf area; SLA, Specific leaf area; LDW, Leaf dry weight; LDMC, Leaf dry matter content; TDMC, Twig dry matter content.

在强烈干扰的环境中均值和极差较大, 变化幅度大, 同时与中度干扰差异极显著($P = 0.004$); 叶面积总体呈平稳上升趋势, 且随着人为干扰变强, 其极差

表2 功能性状与地形因子灰色关联度分析
Table 2 Grey relational grade analysis between functional traits and topographic factors

性状 Trait	海拔 Altitude	坡向 Aspect	坡度 Slope	坡位 Slope position
叶干重 Leaf dry weight	0.788	0.724	0.653	0.542
叶面积 Leaf area	0.719	0.620	0.632	0.499
比叶面积 Specific leaf area	0.875	0.774	0.762	0.601
叶干物质含量 Leaf dry matter content	0.786	0.616	0.606	0.506
枝干物质含量 Twig dry matter content	0.770	0.567	0.626	0.480

增大, 变化幅度增大; 比叶面积和叶干物质含量在不同人为干扰程度下呈波动变化, 差异不显著($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 水杉原生母树功能性状种内变异与功能性状可塑性

表型可塑性研究包含所有类型(如形态、分配、生理、行为、物候、生活史等)的性状变化, 其中形态性状是最为直观和广泛的植物性状之一(翟偲涵等, 2017)。相对于叶面积、叶干物质含量和枝干物质含量, 水杉原生母树种群叶干重和比叶面积的变异幅度较大, 且对表征温度环境的海拔因子响应强烈, 趋向于通过权衡面积、比叶面积等性状来响应环境变化, 从而适应更加多样化的生境和占据更加广阔的地理范围。这与前人的相关研究结果一致。如: 段娜等(2018)通过干旱胁迫实验, 验证了欧李(*Cerasus humilis*)通过调整形态特性和各器官生物量对不同干旱胁迫条件产生较强的可塑性。李晓玲等(2018)在三峡库区的研究中发现, 中华蚊母树(*Distylium chinense*)的叶片功能性状对环境变化较为敏感且具有较强的可塑性, 即面对不同生境具有较宽的生态幅。以上研究表明, 水杉原生母树叶片功能性状变化能有效反映其表型可塑性, 是表型可塑性研究的重要基础。

3.2 水杉原生母树种群的生境适应策略

植物个体会根据它们的功能性状值确定其功能策略, 对所处环境进行响应(Kraft et al, 2015)。本研究发现, 水杉原生母树种群的叶干重、叶面积、叶干物质含量均与胸径呈显著正相关, 表明大树具

图3 功能性状值在坡向梯度上的变化
Fig. 3 Changes of functional trait values on the gradient of slope aspects. LA, Leaf area; SLA, Specific leaf area; LDW, Leaf dry weight; LDMC, Leaf dry matter content; TDMC, Twig dry matter content.

图4 人为干扰下功能性状值的分布
Fig. 4 Distribution of function trait values under human disturbances. LA, Leaf area; SLA, Specific leaf area; LDW, Leaf dry weight; LDMC, Leaf dry matter content.

有更强的捕获光能、制造和储存有机物的能力，与水杉速生、喜光的特性一致。熊彪等(2009)发现水杉原生母树的树高、胸径和冠幅均与坡向因子显著相关，但本研究中水杉原生母树叶面积、比叶面积、

叶干重性状对坡向因子的响应不明显。此外, 表征植物生长速率的母树叶、枝干物质含量在半阳坡和阳坡明显上升, 枝、叶器官生物量的积累对光照的响应强烈, 同时, 表征对光照资源捕捉能力的比叶面积对地形因子响应不明显, 且极低的比叶面积(均值 $0.116\text{ cm}^2/\text{g}$)降低了单位叶面积的呼吸碳损失, 这表明水杉母树的叶面积、比叶面积和叶干重的可塑性弱于树高、冠幅和胸径这3个形态因子, 母树在坡向梯度上更倾向于权衡树高、冠幅和胸径来适应生境变化。

3.3 水杉原生母树种群的保护建议

水杉原生母树自20世纪40年代被发现以来一直受到国家的重视和保护, 其中至少3,000株位于房屋、道路、苗圃和河流附近的母树得到有效保护, 但周围的非自然环境不适合母树种子繁殖, 难以天然更新, 同时, 图3中人为干扰对5个性状具有5%–20%的解释度, 也间接反映了非自然环境的影响作用。在人为干扰强烈的环境中, 水杉原生母树叶面积、叶干重性状值变异程度更大, 比叶面积和枝、叶干物质含量变化不显著, 人为干扰可能对母树叶性状已经产生影响, 而母树的枝、叶的生长速率和资源利用状态保持稳定。此外, 建筑、道路、苗圃、耕地可能导致母树的水环境干旱、贫瘠。综上所述, 水杉原生母树种群保护工作需要考虑到不同海拔和地形条件下性状的明显差异, 关注平地和阴坡处母树的长势, 同时注重人为干扰环境中母树的保护, 限制水杉母树周围的民房, 尽量拆除猪圈、围墙、弃房等建筑, 降低人为活动对水杉原生母树光照、水热环境的干扰。

参考文献

- Ackerly DD, Cornwell WK (2007) A trait-based approach to community assembly: Partitioning of species trait values into within- and among-community components. *Ecology Letters*, 10, 135–145.
- Albert CH, Thuiller W, Yoccoz NG, Soudant A, Boucher F, Saccone P, Lavorel S (2010) Intraspecific functional variability: Extent, structure and sources of variation. *Journal of Ecology*, 98, 604–613.
- Auger S, Shipley B (2013) Inter-specific and intra-specific trait variation along short environmental gradients in an old-growth temperate forest. *Journal of Vegetation Science*, 24, 419–428.
- Borcard D, Gillet F, Legendre P (2011) *Numerical Ecology* with R. Springer Science & Business Media, New York.
- Chen L, Mi XC, Ma KP (2014) Niche differentiation and its consequence on biodiversity maintenance in forest communities. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 26, 112–117. (in Chinese with English abstract) [陈磊, 米湘成, 马克平 (2014) 生态位分化与森林群落物种多样性维持研究展望. *生命科学*, 26, 112–117.]
- Cornelissen JHC, Lavorel S, Garnier E, Díaz S, Buchmann N, Gurvich DE, Reich PB, ter Steege H, Morgan HD, van der Heijden MGA, Pausas JG, Poorter H (2003) A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51, 335–380.
- Duan N, Xu J, Chen HL, Gao JL, Liu YT, Jia YK (2018) Effects of drought stress on phenotypic plasticity of *Cerasus humilis*. *Guihaia*, 39, 1159–1165. (in Chinese with English abstract) [段娜, 徐军, 陈海玲, 高君亮, 刘禹廷, 贾玉奎 (2018) 干旱胁迫对欧李幼苗表型可塑性的影响. *广西植物*, 39, 1159–1165.]
- Gao L, Li B, Liu WY, Shen YX, Liu WJ (2013) Inhibition effects of daughter ramets on parent of clonal plant *Eichhornia crassipes*. *Aquatic Botany*, 107, 47–53.
- Jung V, Muller S (2010) Intraspecific variability and trait-based community assembly. *Journal of Ecology*, 98, 1134–1140.
- Kraft NJB, Adler PB, Godoy O, James EC, Fuller S, Levine JM (2015) Community assembly, coexistence and the environmental filtering metaphor. *Functional Ecology*, 29, 592–599.
- Laforest-Lapointe I, Martínez-Vilalta J, Retana J (2014) Intraspecific variability in functional traits matters: Case study of Scots pine. *Oecologia*, 175, 1337–1348.
- Liu XJ, Ma KP (2015) Plant functional traits—Concepts, applications and future directions. *Scientia Sinica Vitae*, 45, 325–339. (in Chinese with English abstract) [刘晓娟, 马克平 (2015) 植物功能性状研究进展. *中国科学: 生命科学*, 45, 325–339.]
- Li XL, Hou XY, Wu XH, Sarula, Ji L, Chen HJ, Liu ZY, Ding Y (2014) Plastic responses of stem and leaf functional traits in *Leymus chinensis* to long-term grazing in a meadow steppe. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 440–451. (in Chinese with English abstract) [李西良, 侯向阳, 吴新宏, 萨茹拉, 纪磊, 陈海军, 刘志英, 丁勇 (2014) 草甸草原羊草茎叶功能性状对长期过度放牧的可塑性响应. *植物生态学报*, 38, 440–451.]
- Li XL, Wen HR, Wang XS, Yang J, Huang CM (2018) Phenotypic plasticity of *Distylium chinense* leaves in relation to soil environmental factors in heterogeneous habitats in the Three Gorges Reservoir Region. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 3581–3591. (in Chinese with English abstract) [李晓玲, 温浩然, 王雪松, 杨进, 黄成名 (2018) 三峡库区不同生境下中华蚊母树叶片表型可塑性及其与土壤环境因子的关系. *生态学报*, 38, 3581–3591.]
- Lin Y, Ai XR, Yao L, Guo QJ, Zhang MX, Chen J (2017) Population structure and dynamics of *Metasequoia glyptostroboides* parent trees. *Chinese Journal of Ecology*, 36,

1531–1538. (in Chinese with English abstract) [林勇, 艾训儒, 姚兰, 郭秋菊, 张敏霞, 陈俊 (2017) 水杉原生母树种群结构与动态. 生态学报, 36, 1531–1538.]

Luo Q, Liu H, Wu GL, He PC, Hua L, Zhu LW, Zhang H, Liu N, Jian SG, Ye Q (2018) Using functional traits to evaluate the adaptability of five plant species on tropical coral islands. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 1256–1263. (in Chinese with English abstract) [罗琦, 刘慧, 吴桂林, 贺鹏程, 华雷, 朱丽薇, 张辉, 刘楠, 简曙光, 叶清 (2018) 基于功能性状评价5种植物对热带珊瑚岛环境的适应性. 生态学报, 38, 1256–1263.]

Pérez-Harguindeguy N, Díaz S, Garnier E, Lavorel S, Poorter H, Jaureguiberry P, Bret-Harte MS, Cornwell WK, Craine JM, Gurvich DE, Urcelay C, Veneklaas EJ, Reich PB, Poorter L, Wright IJ, Ray P, Enrico L, Pausas JG, de Vos AC, Buchmann N, Funes G, Quétier F, Hodgson JG, Thompson K, Morgan HD, ter Steege H, Heijden MGAVD, Sack L, Blonder B, Poschlod P, Vaieretti MV, Conti G, Staver AC, Aquino S, Cornelissen JHC (2013) New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61, 167–234.

Siefert A, Violle C, Chalmandrier L, Albert CH, Taudiere A, Fajardo A, Aarssen LW, Baraloto C, Carlucci MB, Cianciaruso MV, de L Dantas V, de Bello F, Duarte LDS, Fonseca CR, Freschet GT, Gaucherand S, Gross N, Hikosaka K, Jackson B, Jung V, Kamiyama C, Katabuchi M, Kembel SW, Kichenin E, Kraft NJB, Lagerström A, Bagousse-Pinguet YL, Li Y, Mason N, Messier J, Nakashizuka T, Overton JM, Peltzer DA, Pérez-Ramos IM, Pillar VD, Prentice HC, Richardson S, Sasaki T, Schamp BS, Schöb C, Shipley B, Sundqvist M, Sykes MT, Vandewalle M, Wardle DA (2015) A global meta-analysis of the relative extent of intraspecific trait variation in plant communities. *Ecology Letters*, 18, 1406–1419.

Shi JM, Ye XH, Chen FS, Yang QP, Li ZY, Fang K, Yang GY (2014) Adaptation of bamboo to heterogeneous habitat: Phenotypic plasticity. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 5687–5695. (in Chinese with English abstract) [施建敏, 叶学华, 陈伏生, 杨清培, 黎祖尧, 方楷, 杨光耀 (2014) 竹类植物对异质生境的适应——表型可塑性. 生态学报, 34, 5687–5695.]

Tang QQ, Huang YT, Ding Y, Zang RG (2016) Interspecific and intraspecific variation in functional traits of subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forests. *Biodiversity Science*, 24, 262–270. (in Chinese with English abstract) [唐青青, 黄永涛, 丁易, 臧润国 (2016) 亚热带常绿落叶阔叶混交林植物功能性状的种间和种内变异. 生物多样性, 24, 262–270.]

Wang S, Zhou DW (2017) Research on phenotypic plasticity in plants: An overview of history, current status, and development trends. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 8161–8169. (in Chinese with English abstract) [王姝, 周道玮 (2017) 植物表型可塑性研究进展. 生态学报, 37, 8161–8169.]

Xiong B, Yao L, Yi YM, Wang BQ, Fan SH (2009) Research on growth of the *Metasequoia glyptostroboides* mother trees. *Journal of Hubei University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 27, 439–442. (in Chinese with English abstract) [熊彪, 姚兰, 易咏梅, 王柏泉, 范深厚 (2009) 水杉原生母树生长势调查研究. 湖北民族学院学报(自然科学版), 27, 439–442.]

Zhai SH, Wang P, Sheng LX (2017) Phenotypic plasticity of plant functional traits in competition environments. *Journal of Beihua University (Natural Science)*, 18, 538–546. (in Chinese with English abstract) [翟偲涵, 王平, 盛连喜 (2017) 竞争条件下植物功能性状的表型可塑性研究进展. 北华大学学报(自然科学版), 18, 538–546.]

(责任编辑: 臧润国 责任编辑: 黄祥忠)