

# 不同种源麻竹表型多样性及其与环境因子的相关性

李东宝<sup>a</sup>, 吴敏<sup>a</sup>, 余蓉<sup>a</sup>, 何天友<sup>b</sup>, 荣俊冬<sup>a</sup>, 郑郁善<sup>a,b</sup>, 陈礼光<sup>a</sup>

[福建农林大学: a. 林学院(碳中和学院), b. 风景园林与艺术学院, 福建 福州 350002]

**摘要:** 以来自福建省、四川省、重庆市、云南省、广西壮族自治区、广东省、贵州省、浙江省和江西省的 20 个麻竹 (*Dendrocalamus latiflorus* Munro) 种源为研究对象, 采用 Duncan's 多重比较、巢式方差分析、相关性分析和聚类分析等方法, 研究不同种源麻竹表型多样性及其与环境因子的关系。结果表明: 四川富顺种源的株高、胸径和分枝角度最大, 云南绥江种源的最长节间长、总节数和胸高处节间长最大, 贵州望谟种源的枝下节数、枝下高和丛内株数最大, 浙江苍南种源的分枝数最大, 广东仁化种源的最长枝长和冠幅最大, 广西兴宁种源的叶长、叶宽和叶面积最大, 浙江苍南种源的叶厚最大, 四川东坡种源的叶长宽比最大; 除叶厚外, 其余 16 个表型性状在种源内和种源间均存在极显著差异, 麻竹表型存在较为丰富的变异。麻竹各表型性状的变异系数均值在 13.64%~67.91% 之间, 其中, 枝下高的变异系数均值最大, 最长节间长的变异系数均值最小; 不同种源麻竹表型性状的变异系数均值在 14.21%~43.93% 之间, 其中, 云南陇川种源的变异系数均值最大, 广东仁化种源的变异系数均值最小。麻竹种源内变异(方差分量百分比均值为 44.48%) 大于种源间变异(方差分量百分比均值为 37.25%), 表型分化系数均值为 41.61%, 其中, 株高、丛内株数和冠幅的表型分化系数较高, 分别为 77.47%、76.63% 和 71.98%。聚类分析结果显示: 在欧氏距离 6.8 处, 20 个种源可分为 3 类, 即云贵川渝地区一类(包括 9 个种源)、东南沿海地区一类(包括 9 个种源)和粤桂地区一类(包括 2 个种源)。相关性分析结果显示: 麻竹多数表型性状与经度、纬度、年均温、年均降水量、极端最高温和年均日照时数呈显著或极显著相关。综上所述, 不同种源麻竹表型多样性丰富, 种源内变异是麻竹表型变异的主要来源; 不同种源麻竹并没有严格依据地理位置聚类, 麻竹表型性状变异存在片段性和不连续性。麻竹表型性状与环境因子间的相关性揭示了麻竹东西分布较广、南北分布狭窄的原因。

**关键词:** 麻竹; 表型性状; 变异系数; 表型分化; 环境因子

中图分类号: Q944; Q948.11; S682.36 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2023)05-0039-12

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2023.05.04

## Phenotypic diversity of *Dendrocalamus latiflorus* from different provenances and its correlations

with environmental factors LI Dongbao<sup>a</sup>, WU Min<sup>a</sup>, YU Rong<sup>a</sup>, HE Tianyou<sup>b</sup>, RONG Jundong<sup>a</sup>, ZHENG Yushan<sup>a,b</sup>, CHEN Liguang<sup>a</sup> [Fujian Agriculture and Forestry University: a. Forestry College (College of Carbon Neutrality), b. College of Landscape Architecture and Art, Fuzhou 350002, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2023, 32(5): 39-50

**Abstract:** Taking 20 *Dendrocalamus latiflorus* Munro provenances from Fujian Province, Sichuan Municipality, Chongqing Municipality, Yunnan Province, Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guangdong Province, Guizhou Province, Zhejiang Province, and Jiangxi Province as research objects, the phenotypic diversity of *D. latiflorus* from different provenances and its relationship with environmental factors were investigated by using Duncan's multiple comparisons, nested variance analysis, correlation analysis, and cluster analysis, etc. The results show that height, diameter at breast height, and branching angle of provenance from Fushun of Sichuan are the largest, the longest internode length, total number of nodes, and internode length at breast height of provenance from Suijiang of Yunnan are the

收稿日期: 2023-05-09

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2021YFD2200501); 福建省科技创新团队项目(No.2018[49])

作者简介: 李东宝(1996—), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生, 主要从事竹类培育方面的研究。

通信作者 E-mail: clguang\_cn@163.com

引用格式: 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.

largest, number of nodes under branch, height under branch, and number of plants in the cluster of provenance from Wangmo of Guizhou are the largest, number of branches of provenance from Cangnan of Zhejiang is the largest, the longest branch length and crown diameter of provenance from Renhua of Guangdong are the largest, leaf length, leaf width, and leaf area of provenance from Xingning of Guangxi are the largest, leaf thickness of provenance from Cangnan of Zhejiang is the largest, and ratio of leaf length to leaf width of provenance from Dongpo of Sichuan is the largest; except for leaf thickness, there are extremely significant differences in the other 16 phenotypic traits both within and among provenances, and there are relatively abundant variations in phenotypes of *D. latiflorus*. The average of coefficient of variation of each phenotypic trait of *D. latiflorus* is within the range of 13.64%–67.91%, in which, the average of coefficient of variation of height under branch is the largest, that of the longest internode length is the smallest; the average of coefficients of variation of phenotypic traits among *D. latiflorus* from different provenances are within the range of 14.21%–43.93%, in which, the average of coefficient of variation of provenance from Longchuan of Yunnan is the largest, and that of provenance from Renhua of Guangdong is the smallest. The variation within provenance of *D. latiflorus* (the average of percentage of variance component is 44.48%) is greater than that among provenances (the average of percentage of variance component is 37.25%), and the average of phenotypic differentiation coefficients is 41.61%, in which, the phenotypic differentiation coefficients of height, number of plants in the cluster, and crown diameter are relatively high, which are 77.47%, 76.63%, and 71.98% respectively. The cluster analysis result shows that at Euclidean distance of 6.8, 20 provenances can be divided into three groups namely Yunnan, Guizhou, Sichuan and Chongqing region group (containing 9 provenances), southeast coast region group (containing 9 provenances), and Guangdong and Guangxi region group (containing 2 provenances). The correlation analysis result shows that most phenotypic traits of *D. latiflorus* show significant or extremely significant correlations with longitude, latitude, annual mean temperature, annual mean precipitation, the extreme maximum temperature, and annual mean sunshine hours. In conclusion, the phenotypic diversity of *D. latiflorus* from different provenances is abundant, and the variation within provenance is the major source of phenotypic variations of *D. latiflorus*; *D. latiflorus* from different provenances are not strictly clustered according to geographical locations, and there are fragmentation and discontinuity in phenotypic trait variations of *D. latiflorus*. The correlations between phenotypic traits of *D. latiflorus* and environmental factors reveal the reason why the distribution of *D. latiflorus* is relatively wide from east to west and narrow from north to south.

**Key words:** *Dendrocalamus latiflorus* Munro; phenotypic trait; coefficient of variation; phenotypic differentiation; environmental factor

植物表型多样性普遍认为是遗传多样性和环境多样性相互作用的结果<sup>[1-3]</sup>,其中遗传多样性是一个物种所涵盖的群体间和群体内个体间的遗传变异的总和,包括表型、细胞学、生化和分子等方面的遗传变异<sup>[4-5]</sup>。植物表型是遗传多样性的直观体现,利用表型间的差异对遗传多样性进行研究能够直观地揭示种群的遗传结构和变异程度,是进行遗传育种的基础工作。目前,已有学者对箭竹(*Fargesia spathacea* Franch.)<sup>[6]</sup>、绿竹(*Bambusa oldhamii* Munro)<sup>[7]</sup>、圣音竹[*Phyllostachys edulis* f. *tubaeformis* (S. Y. Wang) Ohrnb.]<sup>[8]</sup>、毛竹[*Phyllostachys edulis* (Carriere) J. Houzeau]<sup>[9]</sup>、糙花少穗竹[*Oligostachyum scabriflorum* (McClure) Z. P. Wang et G. H. Ye]<sup>[10]</sup>和粉单竹(*Bambusa chungii* McClure)<sup>[11]</sup>等竹种进行了表型研究,为相关竹种的资源保护和遗传改良奠定了基础。

麻竹(*Dendrocalamus latiflorus* Munro)为禾本科(Poaceae)牡竹属(*Dendrocalamus* Benth.)一种大型合轴丛生竹,为中国南方栽种范围最广的牡竹属竹种<sup>[12]</sup>。当前,对于麻竹的研究多数集中在笋芽萌发<sup>[13]</sup>、竹笋离体繁殖<sup>[14]</sup>、环境胁迫响应机制<sup>[15]</sup>和竹笋增产<sup>[16]</sup>等方面,而有关麻竹表型多样性的研究虽有初步报道<sup>[17]21-48</sup>,但调查的种源地较少,对种源的分布及其遗传丰富度、种源间和种源内的变异、种源的地理变异格局等均不明确,不利于麻竹遗传育种工作的进一步开展。鉴于此,本研究对20个麻竹种源进行调查、收集,系统测定了麻竹17个表型性状,研究不同种源麻竹表型性状的地理变异规律及其与环境因子的相关性,探索麻竹生长对异质性环境的响应模式以及麻竹的地理变异水平和规律,以期对麻竹遗传改良提供理论基础和数据支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

于2023年3月至4月在麻竹分布区选取具有代表性的种源地<sup>[18]7-9</sup>,包括福建省(永泰县、漳平市、福安县、永安市和华安县)、四川省(东坡县和富顺县)、重庆市(荣昌县和涪陵区)、云南省(陇川县和绥江县)、广西壮族自治区(兴宁区、永福县和西乡塘区)、广东省(揭东县和仁化县)、贵州省(兴义县和望谟县)、浙江省(苍南县)和江西省(章贡区),共20个种源地,种源地基本情况见表1,经度、纬度和海拔通过手

持GPS仪测量,降水量和温度等气象数据来自中国气象数据中心(<https://www.date.cma.cn/>),为当地近30年的平均值。

由于选取麻竹天然更新林较为困难,在调查前咨询当地相关林业部门和农户,调查的麻竹基本上引种超过20年。每个种源设置1个面积20 m×20 m的样地,参考邱尔发<sup>[18]7-8</sup>和熊文愈等<sup>[19]</sup>的方法判别株龄,对样地内株龄1、2和3 a麻竹进行每木检尺,使用围径尺(精确0.1 cm)测量胸径,根据各龄级麻竹平均胸径确定各龄级的样株。每个种源每个龄级5个重复,即取株龄1、2和3 a麻竹各5株,自基部伐倒,调查麻竹的表型性状。

表1 不同麻竹种源地的基本情况<sup>1)</sup>

Table 1 Basic situation of different provenance locations of *Dendrocalamus latiflorus* Munro<sup>1)</sup>

种源 Provenance	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	$T_a/^\circ\text{C}$	$P_a/\text{mm}$	$T_{\min}/^\circ\text{C}$	$T_{\max}/^\circ\text{C}$	AMSH/h	FP/d
福建永泰 Yongtai of Fujian	E119°03'58"	N25°52'43"	20.0	20.3	1 572.0	-4.8	41.1	1 736.4	300
福建漳平 Zhangping of Fujian	E117°28'35"	N25°02'16"	360.3	21.0	1 567.1	-5.4	40.2	1 689.9	305
福建福安 Fu'an of Fujian	E119°48'36"	N26°51'36"	23.0	20.0	1 705.6	-4.3	41.9	1 706.7	268
福建永安 Yong'an of Fujian	E117°22'09"	N25°55'36"	190.7	20.1	1 586.7	-5.6	40.1	1 683.4	310
福建华安 Hua'an of Fujian	E117°33'07"	N25°01'54"	110.8	21.1	1 700.4	-2.4	41.2	1 833.9	347
四川东坡 Dongpo of Sichuan	E103°43'05"	N30°12'21"	459.2	17.7	971.4	-3.6	39.2	966.0	310
四川富顺 Fushun of Sichuan	E104°50'03"	N29°05'57"	305.5	18.4	1 013.0	-1.4	41.5	1 142.1	330
重庆荣昌 Rongchang of Chongqing	E105°35'25"	N29°17'32"	85.9	18.3	1 138.6	-1.3	43.5	1 133.1	317
重庆涪陵 Fuling of Chongqing	E107°30'32"	N29°52'23"	322.5	17.9	1 084.6	-1.7	42.0	1 036.8	335
云南陇川 Longchuan of Yunnan	E97°55'12"	N24°16'48"	982.4	19.2	1 527.4	-2.1	34.9	2 330.5	292
云南绥江 Suijiang of Yunnan	E104°01'22"	N28°37'12"	434.3	18.1	962.6	-1.2	40.6	971.1	281
广西兴宁 Xingning of Guangxi	E108°21'01"	N22°57'38"	209.2	21.5	1 526.8	-3.5	39.3	1 980.7	365
广西永福 Yongfu of Guangxi	E109°58'48"	N24°56'18"	136.6	19.4	2 192.9	-2.9	39.4	1 417.0	300
广西西乡塘 Xixiangtang of Guangxi	E107°59'26"	N22°46'54"	126.8	21.9	1 318.9	-1.9	38.9	1 554.6	365
广东揭东 Jiedong of Guangdong	E116°20'16"	N23°39'03"	102.5	22.7	1 770.4	0.2	39.7	1 899.3	355
广东仁化 Renhua of Guangdong	E113°34'14"	N25°04'56"	120.4	20.1	1 750.4	-4.8	40.9	1 761.4	308
贵州兴义 Xingyi of Guizhou	E104°59'38"	N24°51'38"	817.9	16.7	1 461.4	-3.3	36.5	1 611.5	330
贵州望谟 Wangmo of Guizhou	E106°09'22"	N25°19'31"	579.9	19.9	1 278.8	-2.5	40.0	1 480.8	340
浙江苍南 Cangnan of Zhejiang	E120°16'12"	N27°16'32"	11.8	18.3	1 841.9	-6.2	40.4	1 802.5	257
江西章贡 Zhanggong of Jiangxi	E114°58'27"	N25°47'21"	155.6	20.0	1 500.3	-3.9	40.1	1 807.1	286

<sup>1)</sup>  $T_a$ : 年均温 Annual mean temperature;  $P_a$ : 年均降水量 Annual mean precipitation;  $T_{\min}$ : 极端最低温 The extreme minimum temperature;  $T_{\max}$ : 极端最高温 The extreme maximum temperature; AMSH: 年均日照时数 Annual mean sunshine hours; FP: 无霜期 Frostless period.

### 1.2 表型性状的选取和测定

参考张闻博等<sup>[9]</sup>和邢新婷<sup>[17]21-24</sup>的方法选取样株的17个测量指标。总节数、枝下节数(第1个分枝以下节数)、分枝数和丛内株数(样竹所在丛内含有的株数)直接观测计数;使用卷尺(精度0.1 cm)分别测量株龄1、2和3 a麻竹的株高、最长节间长、枝下高(第1个分枝以下高度)、最长枝长、冠幅(南北方向的最大宽度)、胸高处节间长、叶长、叶宽,并计算

叶长宽比;使用围径尺测量胸径;使用Peacock G型厚度计(日本Peacock公司,精度0.1 mm)测量叶厚(叶片的上、中、下部厚度的均值);使用Epson V700扫描仪(日本Epson公司)扫描叶片,并使用Image J软件计算叶面积;使用卡西洛双臂量角器(河南省邦特工量具有限公司,精度0.1°)测量分枝角度(具有明显侧枝的5个分枝角度的均值)。其中,叶片的选取为随机分别摘取株龄1、2和3 a样株上、中、下部

的30枚成熟叶片,结果取平均值。

### 1.3 数据处理和分析

使用 EXCEL 2010 软件对获得的实验数据进行整理,并计算表型性状的平均值、标准差、变异系数和表型分化系数;其中,变异系数的计算公式为变异系数=标准差/平均值,表型分化系数的计算公式为表型分化系数= $\delta_{i/s}^2/(\delta_{i/s}^2+\delta_s^2)$ ,式中, $\delta_{i/s}$ 和 $\delta_s$ 分别为种源间和种源内的方差分量<sup>[20]</sup>。使用 SPSS 22.0 软件对麻竹 17 个表型性状进行 Duncan's 多重比较、巢式方差分析<sup>[21-22]</sup>和相关性分析,并基于欧氏距离进行聚类分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同种源麻竹表型性状的比较和变异分析

2.1.1 不同种源麻竹表型性状的比较 不同种源麻竹 17 个表型性状的比较见表 2。结果显示:四川富顺种源的株高、胸径和分枝角度最大,分别为 19.39 m、11.74 cm 和 87.23°,总体显著高于其他种源;贵州兴义种源的株高和胸径最小,云南陇川种源的分枝角度最小,分别为 6.74 m、4.61 cm 和 30.73°。云南绥江种源的最长节间长、总节数和胸高处节间长最大,分

别为 60.33 cm、39.0 和 41.40 cm,总体显著高于其他种源;重庆涪陵种源的最长节间长和总节数最小,福建永泰种源的胸高处节间长最小,分别为 35.91 cm、13.0 和 29.90 cm。贵州望谟种源的枝下节数、枝下高和丛内株数最大,分别为 22.0、7.63 m 和 34.0,显著高于其他种源;四川东坡、广西永福和浙江苍南种源的枝下节数均最小(3.0),浙江苍南种源的枝下高最小(0.63 m),重庆荣昌种源的丛内株数最小(2.0)。浙江苍南种源的分枝数最大(29.0),总体显著高于其他种源;贵州望谟种源的分枝数最小(4.0)。广东仁化种源的最长枝长和冠幅最大,分别为 6.85 m 和 6.57 m,总体显著高于其他种源;重庆涪陵种源的最长枝长和四川东坡种源的冠幅最小,分别为 0.78 m 和 0.46 m。广西兴宁种源的叶长、叶宽和叶面积最大,分别为 43.60 cm、8.58 cm 和 240.38 cm<sup>2</sup>,总体显著高于其他种源;福建漳平种源的叶长、四川东坡种源的叶宽和广东仁化种源的叶面积最小,分别为 24.46 cm、4.33 cm 和 80.64 cm<sup>2</sup>。浙江苍南种源的叶厚最大(0.26 mm),总体显著高于其他种源;福建永泰种源的叶厚最小(0.15 mm)。四川东坡种源的叶长宽比最大(7.36),显著高于其他种源;福建漳平种源的叶长宽比最小(4.23)。

表 2 不同种源麻竹 17 个表型性状的比较( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison on 17 phenotypic traits of *Dendrocalamus latiflorus* Munro from different provenances ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

种源 Provenance	$h_1/m$	DBH/cm	$l_1/cm$	$n_1$	$n_2$	$h_2/m$
福建永泰 Yongtai of Fujian	8.73±2.64hi	7.78±1.22c	36.83±7.27g	32.0±6.9bede	10.0±3.9bc	2.93±1.25bcd
福建漳平 Zhangping of Fujian	10.15±2.94fgh	5.08±2.21ef	48.12±6.50bcd	28.0±8.6def	8.0±3.1bcd	2.95±1.44bcd
福建福安 Fu'an of Fujian	13.93±3.45cd	10.62±2.43ab	49.60±7.80bc	33.0±8.9abcd	10.0±4.9bc	3.65±1.86bc
福建永安 Yong'an of Fujian	11.53±2.51ef	7.86±2.44c	47.33±10.98bcd	32.0±7.2bcde	13.0±3.9b	4.55±2.06b
福建华安 Hua'an of Fujian	10.91±1.52efg	6.48±1.41cde	49.20±3.08bc	37.0±3.8ab	8.0±3.2bcd	2.72±0.96bcde
四川东坡 Dongpo of Sichuan	17.28±2.15b	7.70±1.26c	39.77±3.17fg	22.0±2.7h	3.0±3.8de	0.95±1.09de
四川富顺 Fushun of Sichuan	19.39±4.36a	11.74±1.89a	40.89±9.62efg	25.0±3.4fgh	10.0±10.5bc	4.46±5.54b
重庆荣昌 Rongchang of Chongqing	10.98±2.83efg	7.71±3.21c	43.18±5.18def	21.0±3.1h	5.0±3.6cde	1.74±1.95cde
重庆涪陵 Fuling of Chongqing	7.31±2.85ij	6.81±2.85cd	35.91±4.77g	13.0±4.3i	5.0±1.5cde	1.02±0.61de
云南陇川 Longchuan of Yunnan	12.35±1.96de	7.49±1.35c	49.07±5.20bc	38.0±8.5a	13.0±14.8b	4.09±4.41b
云南绥江 Suijiang of Yunnan	14.74±2.43c	9.42±1.15b	60.33±9.75a	39.0±6.4a	10.0±10.8bc	3.64±3.95bc
广西兴宁 Xingning of Guangxi	10.42±1.69efgh	6.50±1.03cde	45.53±6.22cde	35.0±6.8abc	4.0±2.0de	1.14±0.71de
广西永福 Yongfu of Guangxi	7.05±1.86ij	5.41±0.94def	45.40±3.96cde	31.0±5.1cde	3.0±2.1de	0.84±0.79de
广西西乡塘 Xixiangtang of Guangxi	11.59±1.88ef	7.31±1.32c	47.87±4.05bcd	35.0±2.4abc	6.0±1.2cde	1.84±0.54cde
广东揭东 Jiedong of Guangdong	11.63±1.47ef	6.74±1.19cd	46.43±3.36bcde	34.0±7.2abc	7.0±1.5bcd	1.87±0.59cde
广东仁化 Renhua of Guangdong	11.32±0.50efg	6.64±0.76cd	41.00±3.57efg	33.0±2.2abcd	6.0±1.0cde	2.47±0.45bcde
贵州兴义 Xingyi of Guizhou	6.74±1.13j	4.61±0.91f	39.17±5.31fg	23.0±8.2gh	4.0±4.5de	1.18±1.53de
贵州望谟 Wangmo of Guizhou	11.35±0.92efg	7.59±1.71c	51.37±6.44b	37.0±2.4ab	22.0±12.5a	7.63±4.41a
浙江苍南 Cangnan of Zhejiang	10.60±2.87efgh	9.33±1.49b	42.75±11.09def	31.0±3.0cde	3.0±1.3de	0.63±0.30e
江西章贡 Zhanggong of Jiangxi	9.39±1.12gh	5.61±0.99def	47.00±5.64bcd	28.0±6.7def	8.0±2.1bcd	2.83±1.08bcd
均值 Average	11.40±3.85	7.35±2.42	45.44±8.34	30.0±8.8	8.0±7.5	2.73±2.83

续表2 Table 2 (Continued)

种源 Provenance	$n_3$	$l_2/m$	$D/m$	$\theta/(\circ)$	$l_3/cm$	$n_4$
福建永泰 Yongtai of Fujian	19.0±6.3cde	4.36±2.03bcde	4.59±0.51bc	48.11±10.27cde	29.90±5.28f	14.0±4.7cd
福建漳平 Zhangping of Fujian	19.0±6.9cde	2.37±1.71fghi	2.45±0.69ef	52.82±13.64cd	37.38±3.58abc	12.0±4.0de
福建福安 Fu'an of Fujian	17.0±8.1def	5.15±4.37bc	2.28±0.93f	53.00±8.62cd	39.89±4.99ab	13.0±4.1de
福建永安 Yong'an of Fujian	17.0±3.8def	1.93±0.79ghi	1.68±0.69fg	45.05±12.78def	32.97±6.72ef	12.0±5.0de
福建华安 Hua'an of Fujian	7.0±2.2hij	2.71±2.13efgh	2.25±1.34f	34.33±5.94i	39.47±6.60ab	18.0±4.6cd
四川东坡 Dongpo of Sichuan	10.0±7.9ghij	0.85±0.73i	0.46±0.45h	55.33±40.97cd	35.09±5.35bcd	3.0±0.7h
四川富顺 Fushun of Sichuan	12.0±6.1fgh	1.12±0.64hi	0.91±0.54gh	87.23±13.87a	37.13±6.62abc	5.0±2.3gh
重庆荣昌 Rongchang of Chongqing	14.0±4.3efg	1.24±0.64hi	0.80±0.65gh	53.43±16.43cd	37.28±7.46abc	2.0±0.5h
重庆涪陵 Fuling of Chongqing	9.0±3.8ghij	0.78±0.53i	0.55±0.43h	59.20±20.22bcd	32.95±4.72ef	3.0±1.6h
云南陇川 Longchuan of Yunnan	22.0±16.3bc	3.96±3.27cdef	3.52±3.10de	30.73±21.49j	39.53±5.36ab	14.0±6.5cd
云南绥江 Suijiang of Yunnan	28.0±13.8a	3.23±2.70defg	2.17±2.14f	49.93±17.21cde	41.40±4.52a	11.0±5.1def
广西兴宁 Xingning of Guangxi	7.0±3.3hij	3.59±1.81cdefg	2.85±1.34ef	43.00±11.92efg	33.93±3.13de	10.0±3.4def
广西永福 Yongfu of Guangxi	10.0±1.8ghij	2.49±2.13fghi	2.63±1.83ef	35.33±3.99hi	34.93±5.79cd	11.0±1.3def
广西西乡塘 Xixiangtang of Guangxi	7.0±3.2hij	4.70±2.25bcd	4.17±1.61cd	37.33±6.23gh	38.29±2.64abc	6.0±1.3gh
广东揭东 Jiedong of Guangdong	25.0±4.2ab	5.67±1.60ab	5.44±0.92b	42.27±9.35fgh	33.83±4.35de	5.0±2.5gh
广东仁化 Renhua of Guangdong	24.0±2.5abc	6.85±0.52a	6.57±0.29a	57.25±14.59bc	34.13±3.54de	4.0±1.5gh
贵州兴义 Xingyi of Guizhou	5.0±1.9ij	2.20±1.22ghi	2.02±0.86f	51.13±17.92cde	33.43±4.61de	21.0±10.4b
贵州望谟 Wangmo of Guizhou	4.0±2.9j	2.08±0.89ghi	2.20±1.10f	70.13±8.06bc	35.97±6.74bcd	34.0±17.7a
浙江苍南 Cangnan of Zhejiang	29.0±3.8a	4.40±0.66bcd	5.53±1.21b	62.25±8.42bc	33.50±6.86de	9.0±2.5ef
江西章贡 Zhanggong of Jiangxi	19.0±5.8cde	2.06±1.75ghi	1.82±1.33fg	48.93±7.62cde	39.53±6.09ab	6.0±0.7gh
均值 Average	15.0±9.8	3.04±2.51	2.64±2.05	50.41±19.90	36.12±5.96	10.0±9.4
种源 Provenance	$l_4/cm$	$b/cm$	LT/mm	$l_4/b$	$A/cm^2$	
福建永泰 Yongtai of Fujian	34.98±6.84cd	6.40±1.45efg	1.51±0.25g	5.58±1.07bcd	150.25±62.72def	
福建漳平 Zhangping of Fujian	24.46±3.46i	5.79±0.57hi	1.71±0.19ef	4.23±0.40g	82.82±17.37i	
福建福安 Fu'an of Fujian	33.38±5.72de	5.68±1.08ij	1.92±0.28bc	6.01±1.22bc	126.02±40.74fg	
福建永安 Yong'an of Fujian	32.46±4.76de	6.16±0.86fgh	1.86±0.22bc	5.29±0.56de	110.22±32.94gh	
福建华安 Hua'an of Fujian	32.40±4.28de	6.29±1.03fgh	1.94±0.30bc	5.27±1.00de	126.30±29.80fg	
四川东坡 Dongpo of Sichuan	31.12±3.78ef	4.33±0.80l	1.65±0.20fg	7.36±1.25a	91.50±20.86hi	
四川富顺 Fushun of Sichuan	33.69±2.69de	5.76±1.23hi	1.82±0.21cd	6.06±1.12b	126.32±32.63fg	
重庆荣昌 Rongchang of Chongqing	33.70±4.96de	6.70±1.33de	2.04±0.27bc	5.16±1.05de	145.17±40.99ef	
重庆涪陵 Fuling of Chongqing	33.16±3.77de	6.51±1.04ef	2.20±0.28ab	5.19±0.84de	145.37±29.65ef	
云南陇川 Longchuan of Yunnan	38.48±4.64b	7.00±1.14cd	1.86±0.29bc	5.65±1.17bcd	176.76±34.77c	
云南绥江 Suijiang of Yunnan	38.44±5.50b	7.50±1.11bc	2.02±0.44bc	5.18±0.72de	187.98±44.83c	
广西兴宁 Xingning of Guangxi	43.60±5.09a	8.58±1.65a	2.10±0.31b	5.19±0.80de	240.38±65.60a	
广西永福 Yongfu of Guangxi	36.49±4.90bc	7.26±0.82bcd	1.77±0.22cd	5.07±0.78def	170.76±32.84cd	
广西西乡塘 Xixiangtang of Guangxi	41.65±5.80a	7.89±1.36b	1.77±0.39cd	5.36±0.75de	212.38±59.92b	
广东揭东 Jiedong of Guangdong	31.45±5.67e	6.01±1.13ghi	1.70±0.27ef	5.30±0.80de	99.04±42.60hi	
广东仁化 Renhua of Guangdong	25.76±4.08hi	5.34±0.75jk	1.80±0.20cd	4.86±0.71ef	80.64±24.20i	
贵州兴义 Xingyi of Guizhou	38.63±3.50b	6.75±1.37de	2.46±0.56a	5.95±1.26bc	175.69±37.57c	
贵州望谟 Wangmo of Guizhou	28.73±4.55fg	5.21±1.18k	1.86±0.29bc	5.66±1.02bcd	89.50±32.80hi	
浙江苍南 Cangnan of Zhejiang	31.97±6.65e	7.19±1.88cd	2.57±0.69a	4.57±0.74fg	143.75±60.97ef	
江西章贡 Zhanggong of Jiangxi	27.24±6.93gh	5.11±0.99k	1.66±0.34fg	5.45±1.54cde	81.73±32.01i	
均值 Average	33.62±6.92	6.37±1.53	1.91±0.31	5.43±1.15	138.35±60.07	

<sup>1)</sup>  $h_1$ : 株高 Height; DBH: 胸径 Diameter at breast height;  $l_1$ : 最长节间长 The longest internode length;  $n_1$ : 总节数 Total number of nodes;  $n_2$ : 枝下节数 Number of nodes under branch;  $h_2$ : 枝下高 Height under branch;  $n_3$ : 分枝数 Number of branches;  $l_2$ : 最长枝长 The longest branch length;  $D$ : 冠幅 Crown diameter;  $\theta$ : 分枝角度 Branching angle;  $l_3$ : 胸高处节间长 Internode length at breast height;  $n_4$ : 丛内株数 Number of plants in the cluster;  $l_4$ : 叶长 Leaf length;  $b$ : 叶宽 Leaf width; LT: 叶厚 Leaf thickness;  $l_4/b$ : 叶长宽比 Ratio of leaf length to leaf width;  $A$ : 叶面积 Leaf area. 同列中不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant ( $P<0.05$ ) differences.

方差分析结果(表 3)显示:不同种源麻竹的叶厚在种源间存在极显著差异,其他 16 个表型性状在种

源内和种源间均存在极显著差异。说明麻竹表型存在较为丰富的变异。

2.1.2 不同种源麻竹表型性状的变异分析 不同种源麻竹 17 个表型性状的变异系数见表 4。结果显示:麻竹各表型性状的变异系数均值在 13.64% ~ 67.91%之间,其中,枝下高的变异系数均值最大,枝

表 3 不同种源麻竹 17 个表型性状的方差分析<sup>1)</sup>

Table 3 Variance analysis on 17 phenotypic traits of *Dendrocalamus latiflorus* Munro from different provenances<sup>1)</sup>

表型性状 Phenotypic trait	均方 Mean square			F 值 F value	
	P <sub>W</sub>	P <sub>A</sub>	E <sub>R</sub>	P <sub>W</sub>	P <sub>A</sub>
株高 Height	5.364	148.896	0.227	23.630 **	27.763 **
胸径 Diameter at breast height	3.010	45.948	0.142	21.197 **	15.265 **
最长节间长 The longest internode length	40.747	478.183	0.491	82.988 **	11.736 **
总节数 Total number of nodes	35.434	662.380	0.515	68.804 **	18.696 **
枝下节数 Number of nodes under branch	38.814	298.380	0.440	88.214 **	7.681 **
枝下高 Height under branch	5.640	41.289	0.166	33.976 **	7.323 **
分枝数 Number of branches	44.749	829.717	0.578	77.420 **	18.544 **
最长枝长 The longest branch length	3.752	42.281	0.148	25.351 **	11.278 **
冠幅 Crown diameter	1.659	40.025	0.120	13.825 **	24.121 **
分枝角度 Branching angle	251.337	2 490.383	1.175	213.904 **	9.911 **
胸高处节间长 Internode length at breast height	28.594	133.772	0.351	81.464 **	4.683 **
丛内株数 Number of plants in the cluster	32.402	879.112	0.553	58.593 **	27.135 **
叶长 Leaf length	25.013	732.479	0.285	87.765 **	29.285 **
叶宽 Leaf width	1.389	31.307	0.063	22.048 **	22.551 **
叶厚 Leaf thickness	0.001	0.019	0.002	0.500	17.227 **
叶长宽比 Ratio of leaf length to leaf width	0.964	12.205	0.047	20.511 **	12.659 **
叶面积 Leaf area	1 683.730	61 237.560	2.475	680.295 **	36.372 **

<sup>1)</sup> P<sub>W</sub>: 种源内 Within provenance; P<sub>A</sub>: 种源间 Among provenances; E<sub>R</sub>: 随机误差 Random error. \*\*: P<0.01.

表 4 不同种源麻竹 17 个表型性状的变异系数

Table 4 Coefficients of variation of 17 phenotypic traits of *Dendrocalamus latiflorus* Munro from different provenances

种源 Provenance	各表型性状的变异系数/% <sup>1)</sup> Coefficient of variation of each phenotypic trait <sup>1)</sup>								
	<i>h</i> <sub>1</sub>	DBH	<i>l</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>h</i> <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>l</i> <sub>2</sub>	<i>D</i>
福建永泰 Yongtai of Fujian	30.29	15.65	19.74	21.82	38.92	42.73	33.92	46.60	30.29
福建漳平 Zhangping of Fujian	28.96	43.49	13.52	30.61	36.50	48.70	37.01	72.06	28.96
福建福安 Fu'an of Fujian	24.78	22.91	15.72	26.80	50.61	50.92	46.95	84.76	24.78
福建永安 Yong'an of Fujian	21.76	30.98	23.19	22.30	30.67	45.39	21.70	40.86	21.76
福建华安 Hua'an of Fujian	13.91	21.72	6.25	8.51	41.74	35.43	34.16	78.63	13.91
四川东坡 Dongpo of Sichuan	12.47	16.39	7.97	12.51	117.64	114.93	79.10	85.96	12.47
四川富顺 Fushun of Sichuan	22.47	16.10	23.54	13.79	109.94	124.42	51.54	56.68	22.47
重庆荣昌 Rongchang of Chongqing	25.81	41.62	12.00	14.52	77.43	112.35	29.90	51.90	25.81
重庆涪陵 Fuling of Chongqing	38.99	41.82	13.28	32.54	33.21	59.45	44.02	68.67	38.99
云南陇川 Longchuan of Yunnan	15.91	18.05	10.60	22.59	113.49	107.91	72.51	82.65	15.91
云南绥江 Suijiang of Yunnan	16.49	12.23	16.16	16.50	111.36	108.41	48.90	83.37	16.49
广西兴宁 Xingning of Guangxi	16.18	15.84	13.66	19.42	55.19	62.28	50.72	50.43	16.18
广西永福 Yongfu of Guangxi	26.32	17.39	8.71	16.27	72.28	94.26	18.96	85.53	26.32
广西西乡塘 Xixiangtang of Guangxi	16.17	18.09	8.45	6.94	21.46	29.40	44.91	47.87	16.17
广东揭东 Jiedong of Guangdong	12.65	17.66	7.24	21.11	22.44	31.41	16.98	28.30	12.65
广东仁化 Renhua of Guangdong	4.42	11.51	8.70	6.77	15.32	18.05	10.37	7.63	4.42
贵州兴义 Xingyi of Guizhou	16.81	19.75	13.56	35.82	103.08	129.31	42.54	55.33	16.81
贵州望谟 Wangmo of Guizhou	8.10	22.55	12.53	6.46	56.80	57.79	75.88	43.01	8.10
浙江苍南 Cangnan of Zhejiang	27.08	16.01	25.93	9.56	51.64	46.98	13.13	15.08	27.08
江西章贡 Zhanggong of Jiangxi	11.95	17.64	12.01	24.28	27.42	38.14	30.94	84.81	11.95
均值 Average	19.58	21.87	13.64	18.46	59.36	67.91	40.21	58.51	19.58

续表4 Table 4 (Continued)

种源 Provenance	各表型性状的变异系数/% <sup>1)</sup> Coefficient of variation of each phenotypic trait <sup>1)</sup>								
	$\theta$	$l_3$	$n_4$	$l_4$	$b$	LT	$l_4/b$	A	均值 Average
福建永泰 Yongtai of Fujian	21.36	17.64	33.39	19.55	22.61	16.53	19.12	41.74	26.63
福建漳平 Zhangping of Fujian	25.83	9.58	33.18	14.15	9.85	11.30	9.56	20.97	27.84
福建福安 Fu'an of Fujian	16.26	12.50	31.85	17.14	19.04	14.76	20.35	32.33	31.10
福建永安 Yong'an of Fujian	28.36	20.38	41.43	14.67	13.94	11.95	10.62	29.88	26.42
福建华安 Hua'an of Fujian	17.29	16.72	25.46	13.20	16.37	15.39	18.93	23.59	26.27
四川东坡 Dongpo of Sichuan	74.04	15.25	29.34	12.14	18.59	11.88	17.02	22.80	43.85
四川富顺 Fushun of Sichuan	15.90	17.82	50.62	7.99	21.42	11.40	18.44	25.83	38.04
重庆荣昌 Rongchang of Chongqing	30.76	20.01	26.73	14.72	19.78	13.23	20.32	28.24	36.52
重庆涪陵 Fuling of Chongqing	34.16	14.33	55.37	11.35	16.02	12.56	16.23	20.40	34.78
云南陇川 Longchuan of Yunnan	69.92	13.55	47.02	12.05	16.26	15.79	20.69	19.67	43.93
云南绥江 Suijiang of Yunnan	34.48	10.91	45.43	14.31	14.74	21.79	13.92	23.85	40.68
广西兴宁 Xingning of Guangxi	27.73	9.22	32.26	11.68	19.25	14.99	15.49	27.29	28.74
广西永福 Yongfu of Guangxi	11.30	16.58	11.92	13.44	11.35	12.56	15.44	19.23	30.65
广西西乡塘 Xixiangtang of Guangxi	16.69	6.90	23.18	13.92	17.21	22.11	14.05	28.21	22.01
广东揭东 Jiedong of Guangdong	22.13	12.86	53.84	18.03	18.78	15.73	15.15	43.02	22.02
广东仁化 Renhua of Guangdong	25.49	10.38	33.05	15.85	14.13	10.82	14.67	30.01	14.21
贵州兴义 Xingyi of Guizhou	35.05	13.80	49.32	9.05	20.34	22.55	21.12	21.38	38.32
贵州望谟 Wangmo of Guizhou	11.49	18.75	51.36	15.85	22.65	15.60	18.02	36.65	30.79
浙江苍南 Cangnan of Zhejiang	13.53	20.46	28.57	20.79	26.17	26.71	16.19	42.41	24.83
江西章贡 Zhanggong of Jiangxi	15.57	15.41	11.43	25.42	19.47	20.23	28.22	39.17	29.12
均值 Average	27.37	14.65	35.74	14.77	17.90	15.89	17.18	28.83	30.84

<sup>1)</sup>  $h_1$ : 株高 Height; DBH: 胸径 Diameter at breast height;  $l_1$ : 最长节间长 The longest internode length;  $n_1$ : 总节数 Total number of nodes;  $n_2$ : 枝下节数 Number of nodes under branch;  $h_2$ : 枝下高 Height under branch;  $n_3$ : 分枝数 Number of branches;  $l_2$ : 最长枝长 The longest branch length;  $D$ : 冠幅 Crown diameter;  $\theta$ : 分枝角度 Branching angle;  $l_3$ : 胸高处节间长 Internode length at breast height;  $n_4$ : 丛内株数 Number of plants in the cluster;  $l_4$ : 叶长 Leaf length;  $b$ : 叶宽 Leaf width; LT: 叶厚 Leaf thickness;  $l_4/b$ : 叶长宽比 Ratio of leaf length to leaf width; A: 叶面积 Leaf area.

下节数(59.36%)次之,最长节间长的变异系数均值最小。从不同种源地来看,不同种源麻竹表型性状的变异系数均值在14.21%~43.93%之间,其中,云南陇川种源的变异系数均值最大,明显高于其他种源,四川东坡种源(43.85%)次之,广东仁化种源的变异系数均值最小。总体上看,20个种源麻竹17个表型性状的变异系数均值为30.84%,其中,云贵川渝地区种源表型性状的变异系数均值较大,东南沿海地区种源居中,广东和广西地区种源表型性状的变异系数均值较小。

## 2.2 不同种源麻竹表型性状的分化分析

不同种源麻竹17个表型性状的方差分量和表型分化系数见表5。结果显示:麻竹17个表型性状种源间的表型分化系数在6.10%~77.47%之间,均值为41.61%,其中,株高、丛内株数和冠幅的表型分化系数较高,分别为77.47%、76.63%和71.98%;种源内17个表型性状的方差分量百分比在7.14%~74.11%之间,均值为44.48%,而种源间17个表型性状的方差

分量百分比在3.57%~59.43%之间,均值为37.25%,说明麻竹表型性状在种源间和种源内均存在不同程度的变异,且种源内变异大于种源间变异。

## 2.3 不同种源麻竹表型性状的聚类分析

基于麻竹17个表型性状,对20个种源进行聚类分析(图1)。结果显示:在欧氏距离6.8处,20个种源可分为3类:第1类包括福建永泰、四川东坡、重庆荣昌、重庆涪陵、四川富顺、云南陇川、云南绥江、广西永福和贵州兴义的种源;第2类包括福建漳平、江西章贡、广东仁化、浙江苍南、福建福安、福建华安、福建永安、广西兴宁和贵州望谟的种源;第3类包括广东揭东和广西西乡塘的种源。总体上看,20个麻竹种源并没有严格依据地理位置聚类,可分为云贵川渝地区一类、东南沿海地区一类和粤桂地区一类。说明麻竹表型变异存在片段性和不连续性,与麻竹表型性状的区域化变异情况基本一致。

## 2.4 麻竹表型性状与环境因子的相关性分析

将不同种源麻竹17个表型性状与环境因子进行

表 5 不同种源麻竹 17 个表型性状的方差分量和表型分化系数

Table 5 Variance components and phenotypic differentiation coefficients of 17 phenotypic traits of *Dendrocalamus latiflorus* Munro from different provenances

表型性状 Phenotypic trait	方差分量 Variance component			方差分量百分比/% Percentage of variance component			表型分化系数/% Phenotypic differentiation coefficient
	种源内 Within provenance	种源间 Among provenances	随机误差 Random error	种源内 Within provenance	种源间 Among provenances	随机误差 Random error	
株高 Height	5.364	9.947	3.153	29.05	53.87	17.08	77.47
胸径 Diameter at breast height	3.010	2.976	1.725	39.04	38.59	22.37	49.43
最长节间长 The longest internode length	40.747	30.316	5.506	53.22	39.59	7.19	35.63
总节数 Total number of nodes	35.434	43.450	6.592	41.45	50.83	7.71	60.06
枝下节数 Number of nodes under branch	38.814	17.989	4.241	63.58	29.47	6.95	17.68
枝下高 Height under branch	5.640	2.471	1.572	58.25	25.52	16.23	16.10
分枝数 Number of branches	44.749	54.402	7.376	42.01	51.07	6.92	59.64
最长枝长 The longest branch length	3.752	2.670	1.634	46.57	33.14	20.28	33.62
冠幅 Crown diameter	1.659	2.659	1.631	27.89	44.70	27.42	71.98
分枝角度 Branching angle	251.337	155.176	12.457	59.99	37.04	2.97	27.60
胸高处节间长 Internode length at breast height	28.594	7.289	2.700	74.11	18.89	7.00	6.10
丛内株数 Number of plants in the cluster	32.402	58.681	7.660	32.81	59.43	7.76	76.63
叶长 Leaf length	25.013	24.024	4.901	46.37	44.54	9.09	47.98
叶宽 Leaf width	1.389	1.016	1.008	40.70	29.77	29.53	34.85
叶厚 Leaf thickness	0.002	0.001	0.025	7.14	3.57	89.29	20.00
叶长宽比 Ratio of leaf length to leaf width	0.964	0.381	0.618	49.11	19.41	31.48	13.51
叶面积 Leaf area	1 683.719	2 022.361	44.971	44.89	53.91	1.20	59.06
均值 Average				44.48	37.25	18.27	41.61

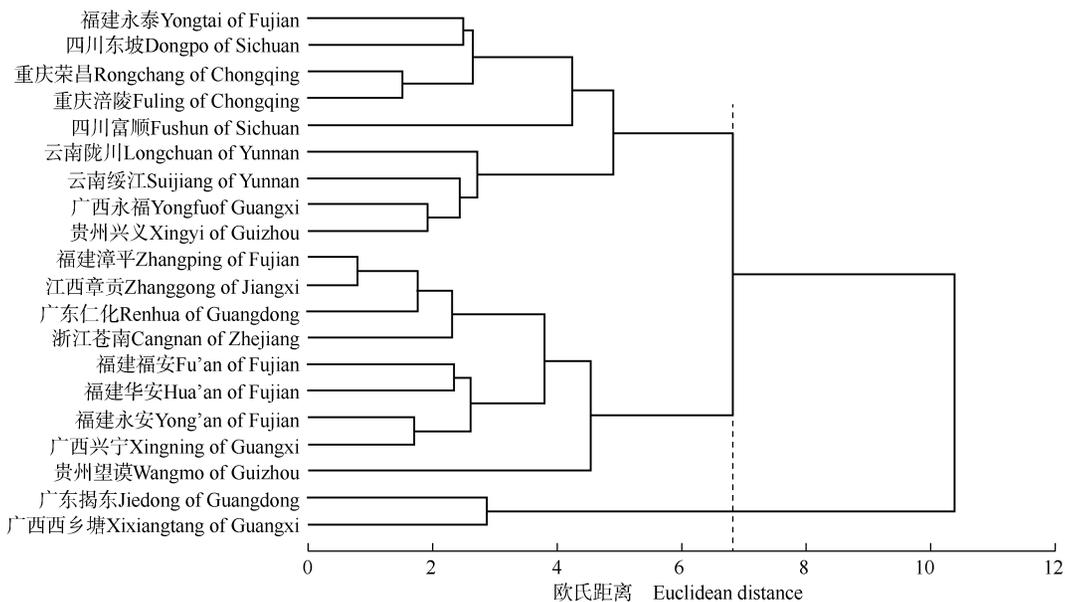


图 1 基于 17 个表型性状的 20 个麻竹种源的聚类图  
Fig. 1 Cluster dendrogram of 20 *Dendrocalamus latiflorus* Munro provenances based on 17 phenotypic traits

相关性分析,结果见表 6。结果显示:麻竹大多数表型性状与除海拔外的环境因子间呈显著或极显著相关;仅枝下节数、枝下高、最长枝长和冠幅受海拔影响

较大,与海拔呈显著或极显著相关。株高与经度、纬度和年均降水量呈极显著负相关,与年均温、极端最低温和极端最高温呈极显著正相关;胸径、最长节间

长和总节数与经度、纬度、极端最低温和无霜期呈显著或极显著负相关,与年均温和极端最高温呈极显著正相关;枝下节数和枝下高与海拔和极端最高温呈显著或极显著正相关;分枝数与经度、年均降水量和年均日照时数呈极显著正相关,与年均温和无霜期呈极显著负相关;最长枝长和冠幅与除极端最低温和无霜期外的所有环境因子呈极显著相关;胸高处节间长与年均温、年均降水量和无霜期呈极显著负相关,与年

均日照时数呈极显著正相关;丛内株数、叶长、叶宽和叶面积与经度和纬度呈显著或极显著负相关,叶长、叶宽、叶厚和叶面积与年均温、年均降水量、极端最低温、极端最高温、年均日照时数和无霜期总体呈显著或极显著相关。总体上看,麻竹表型性状受到多个环境因子的综合影响,其中,经纬度、温度和降水量对麻竹主要生长指标有明显的影响,且相较于极端最低温,极端最高温对麻竹生长的影响更大。

表6 不同种源麻竹17个表型性状与环境因子的相关性分析

Table 6 Correlation analysis on 17 phenotypic traits of *Dendrocalamus latiflorus* Munro from different provenances with environmental factors

表型性状 Phenotypic trait	与环境因子的相关系数 <sup>1)</sup> Correlation coefficient with environmental factors <sup>1)</sup>								
	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude	$T_a$	$P_a$	$T_{\min}$	$T_{\max}$	AMSH	FP
株高 Height	-0.167 **	-0.315 **	0.025	0.216 **	-0.422 **	0.194 **	0.177 **	-0.101	-0.095
胸径 Diameter at breast height	-0.281 **	-0.325 **	-0.104	0.241 **	-0.376 *	-0.100 **	0.265 **	-0.081	-0.179 **
最长节间长 The longest internode length	-0.240 **	-0.147 *	0.052	0.173 **	0.014	-0.165 **	0.165 **	0.414 **	-0.138 *
总节数 Total number of nodes	-0.152 **	-0.498 **	-0.019	0.153 **	0.313 **	-0.278 **	0.323 **	0.511 **	-0.014 **
枝下节数 Number of nodes under branch	-0.007	-0.065	0.185 **	-0.016	-0.069	0.072	0.216 **	0.109	-0.066
枝下高 Height under branch	-0.001	-0.021	0.142 *	-0.052	-0.142 *	0.070	0.144 *	0.084	0.080
分枝数 Number of branches	0.183 **	0.055	-0.088	-0.216 **	0.221 **	0.026	-0.039	0.382 **	-0.447 **
最长枝长 The longest branch length	0.254 **	-0.396 **	-0.183 **	0.222 **	0.407 **	0.064	-0.166 **	0.305 **	-0.031
冠幅 Crown diameter	0.267 **	-0.530 **	-0.172 **	0.342 **	0.571 **	0.064	-0.252 **	0.327 **	0.050
分枝角度 Branching angle	-0.093	0.363 **	0.019	-0.211 **	-0.405 **	-0.147 **	0.222 **	-0.378 **	-0.020
胸高处节间长 Internode length at breast height	0.063	0.044	0.054	-0.188 **	-0.157 **	0.101	-0.051	0.219 **	-0.150 **
丛内株数 Number of plants in the cluster	-0.122 **	-0.257 **	0.049	0.012	0.109	0.089	-0.473 **	0.110	0.040
叶长 Leaf length	-0.303 **	-0.172 **	0.021	0.202 **	0.150 **	-0.130 **	-0.215 **	0.117 **	0.210 **
叶宽 Leaf width	-0.100 *	-0.246 **	0.027	0.123 **	0.126 **	-0.103 *	0.144 *	0.213 *	0.141 **
叶厚 Leaf thickness	0.032	0.013	0.032	0.039	0.108 **	-0.172 **	-0.225 **	0.097 *	-0.171 **
叶长宽比 Ratio of leaf length to leaf width	-0.227 **	0.178 **	0.018	0.013	-0.194 **	0.026	-0.018	-0.186 **	0.036
叶面积 Leaf area	-0.273 **	-0.198 **	0.015	0.338 **	0.230 **	-0.165 **	0.189 **	0.156 **	0.184 **

<sup>1)</sup>  $T_a$ : 年均温 Annual mean temperature;  $P_a$ : 年均降水量 Annual mean precipitation;  $T_{\min}$ : 极端最低温 The extreme minimum temperature;  $T_{\max}$ : 极端最高温 The extreme maximum temperature; AMSH: 年均日照时数 Annual mean sunshine hours; FP: 无霜期 Frostless period. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

### 3 讨 论

受自身遗传和环境的综合影响,植物在表型形态特征及生理特性等方面会产生一系列变化<sup>[23]</sup>。表型变异广泛存在于不同植物之间,如油松(*Pinus tabulaeformis* Carriere)<sup>[24]</sup>、无患子(*Sapindus saponaria* Linn.)<sup>[25]</sup>和蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.)<sup>[26]</sup>。本研究中,麻竹表型性状在种源内和种源间总体上存在极显著差异,说明麻竹表型性状的变异较为丰富,这与邢新婷<sup>[17]</sup>25-29在麻竹的遗传育种中得到的结果相似。已有研究表明:株高和胸径是

竹类经济性状,是反映竹类生物量及生长情况的重要指标<sup>[27]</sup>。本研究中,四川富顺种源的株高和胸径最大,可以作为材用竹的选育目标。从叶片角度看,叶的大小与叶的能量平衡有关,一般认为植物在资源丰富的生境中,往往具有较大的叶面积<sup>[28-29]</sup>。本研究中,广西兴宁的年均降水量较多、年均日照时数较长,该地的麻竹叶长、叶宽、叶面积均最大,说明广西兴宁的麻竹生长在资源较为丰富的环境中。此外,也有研究认为生长在水分匮乏生境下的植物叶片一般较厚<sup>[30]</sup>,与本研究中的结果不同,浙江苍南属东南沿海地区,降水较多,但该种源地的麻竹叶较厚,这可能是为了适应风力较大的环境。

表型变异系数能直观反应植物表型变异的程度,变异系数越大,植物多样性越丰富,植物对环境变化的适应力越强<sup>[31]</sup>。本研究结果显示:20个种源麻竹17个表型性状总体的变异系数均值为30.84%,变异水平高于文冠果(*Xanthoceras sorbifolium* Bunge)<sup>[32]</sup>、珙桐(*Davidia involucrata* Baill.)<sup>[33]</sup>和槐[*Styphnolobium japonicum* (Linn.) Schott]<sup>[34]</sup>,变异系数均值分别为11.72%、16.22%和9.40%,说明麻竹表型多样性丰富,反映出在长时间的地理隔离中,不同种源麻竹之间的基因交流可能受到了严重的阻碍<sup>[35]</sup>。本文中20个麻竹种源总体表现为云贵川渝地区的种源表型变异较大,东南沿海地区居中,粤桂地区的种源表型变异较小。产生这种变异规律的原因可能有以下几个方面:1)空间地理限制,由于麻竹天然林为零星分散,基本上都是栽培类型,麻竹自然分布区内少见成片的天然林分<sup>[17]22</sup>,其地理分布区基本上是当地相关林业部门或农户从附近麻竹分布区引种而来,这种引种方式使麻竹基因仅能在一定地理范围内进行交流,从而使得各种源间的变异幅度区域化;2)在遇到严峻的环境胁迫时,植物会发生更大程度的表型变异以适应外部环境的改变,由于云贵川渝地区海拔较高、东南沿海地区风力较大和雨水冲刷较强等原因,这些种源地的麻竹受到的生态环境压力较大,因而导致云贵川渝地区和东南沿海地区的种源表型变异较大;3)由于麻竹属于笋材两用竹,在麻竹自然分布区存在一些人为干预现象,在一定程度上影响了麻竹表型性状的分化方向。相关研究结果表明:环境的改变会造成植物株高和叶片大小等营养性状的改变,但繁殖器官在经历复杂的进化之后,变异程度较低,环境的差异是造成营养器官变异的重要原因之一<sup>[36]</sup>。本研究结果显示:枝下高、枝下节数和最长枝长等营养性状的变异系数总体在10%以上,而麻竹天然结实量较少,导致种子取样极为困难,因此对麻竹营养性状与繁殖器官的变异程度比较还有待进一步的研究和探索。

本研究选取的20个麻竹种源地基本上涵盖了全部的麻竹地理分布区,能较好地反映麻竹表型性状的变异特征。方差分析结果表明:麻竹种源内各表型性状的方差分量百分比均值(44.48%)大于种源间各表型性状的方差分量百分比均值(37.25%),表型分化系数均值为41.61%,说明麻竹表型性状差异的主要来源是种源内变异,但种源间仍有一定程度的表型分

化,这反映出麻竹遗传与环境互作的复杂性,同时也是麻竹对不同环境适应的结果。产生这种结果的原因可能是:一方面,麻竹的繁殖方式多为无性繁殖,种源间基因交流困难,从而有利于种源间的遗传分化,且麻竹为丛生竹,同一丛内不同个体发育程度不同,差异明显,导致种源内的表型多样性高于种源间;另一方面麻竹种源的地理隔离和生境的片段化,进一步促进了麻竹种源间的表型分化<sup>[37]</sup>。与其他植物相比,麻竹的表型分化水平高于马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)<sup>[22]</sup>、川西云杉(*Picea likiangensis* var. *rubescens* Rehder et E. H. Wilson)<sup>[38]</sup>和麻栎(*Quercus acutissima* Carr.)<sup>[39]</sup>,表型分化系数均值分别为6.64%、36.53%和23.98%;而低于云南黄连(*Coptis teeta* Wall.)<sup>[40]</sup>、苦楝(*Melia azedarach* Linn.)<sup>[41]</sup>和石斛(*Dendrobium nobile* Lindl.)<sup>[42]</sup>,表型分化系数均值分别为74.41%、54.47%和65.80%,表明麻竹表型分化位于中等水平。此外,本研究发现丛内株数的表型分化系数(76.63%)较大,这是因为丛内株数影响麻竹对养分吸收,当同一丛内有较多株时,可能会出现养分供应不足的情况,进而影响麻竹生长,而丛内株数的分化有利于麻竹对不同环境中养分的适应。野外调查发现,长势较好的麻竹大多同一丛内株数较少,这种丛内株数的高水平分化现象体现了麻竹对环境中养分变化的高度适应性。

不同植物对环境的适应性和敏感性存在差异,进而使植物表现出不同的地理变异格局<sup>[38]</sup>。聚类分析结果表明:20个麻竹种源的聚类并不完全受地理位置限制,这是因为麻竹多为栽培种,花粉和种子在种源间传播较为困难,即使地理位置较近的种源间也很少有基因交流的机会。这在青海野生中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)资源表型性状多样性研究<sup>[43]</sup>中也得到了类似的结果。此外,柳江群等<sup>[44]</sup>对长柄扁桃(*Prunus pedunculata* Pall.)天然种群表型变异的研究发现,相似的生境是植物严格按照地理位置聚类的关键,而麻竹所处的环境和局部小气候相对独立,导致供试种源没有严格按照地理位置聚类。影响植物表型变异的因子有很多,其变异规律十分复杂,是遗传和环境共同作用的结果。例如:五角枫[*Acer pictum* subsp. *mono* (Maxim.) H. Ohashi]表型性状呈现以经度和纬度并存的变异规律<sup>[45]</sup>,浙江楠(*Phoebe chekiangensis* C. B. Shang)表型性状呈现以海拔为主的变异规律<sup>[37]</sup>,而山苍子[*Litsea cubeba* (Lour.)

Pers.)表型性状则呈现以年均降水量和海拔为主的变异规律<sup>[46]</sup>。本研究发现,麻竹的多数表型性状与经度、纬度、年均温、年均降水量、极端最高温和年均日照时数呈显著或极显著相关,这与麻竹生态习性及其分布范围呈现东西较广、南北狭窄的特征有关<sup>[17]32</sup>。姬明飞等<sup>[24]</sup>的研究结果表明:树种分布的范围是影响树木与环境因子相关性的重要因子,一般来说,树种分布区越大、相关性也较大,分布区越小、相关性也较小。20个麻竹种源地分布范围的東西跨度较大,经度在东经97°55′12″~120°16′12″之间,年均温、年均降水量、年均日照时数和极端最高温等环境因子也各不相同,导致表型性状与环境因子相关性较高。同时,麻竹为阳性植物,喜高温、向阳的环境,而纬度越低的地区气温越高,这也是导致麻竹主要生长性状株高、胸径、最长节间长和总节数与极端最高温呈极显著正相关,与纬度呈显著或极显著负相关的主要原因。与海拔的相关性分析结果显示:仅枝下节数、枝下高、最长枝长和冠幅4个表型性状与海拔呈显著或极显著相关,其原因可能是相较于海拔,经度和纬度对麻竹表型性状的影响更大,也可能与没有在同一纬度上调查不同海拔的种源差异有关。另外,受调查因子的限制,本研究并没有考虑种源地的土壤状况、坡度和坡向等因子,因此,本研究仅为不同种源麻竹表型性状与环境因子相关性的初步报道,今后将开展进一步的深入研究。

## 4 结 论

不同种源麻竹表型性状存在丰富的变异性,除叶厚外,其余16个表型性状在不同种源内和种源间均存在极显著差异,变异系数均值在13.64%~67.91%之间,其中枝下高的变异系数均值最大,最长节间长的变异系数均值最小。麻竹种源内变异大于种源间,表型性状差异的主要来源是种源内变异;麻竹的表型分化位于中等水平,表型分化系数均值为41.61%。总体上看,麻竹种源并没有严格依据地理位置聚类,可分为云贵川渝地区一类、东南沿海地区一类和粤桂地区一类,其中,云贵川渝地区的种源表型变异较大,东南沿海地区居中,粤桂地区的种源表型变异较小。麻竹大多数表型性状与除海拔外的环境因子间呈显著或极显著相关,这种变异规律揭示了麻竹东西分布较广、南北分布狭窄的原因。

## 参考文献:

- [1] GARCÍA-VERDUGO C, MÉNDEZ M, VELÁZQUEZ-ROSAS N, et al. Contrasting patterns of morphological and physiological differentiation across insular environments: phenotypic variation and heritability of light-related traits in *Olea europaea* [J]. *Oecologia*, 2010, 164: 647-655.
- [2] GARCÍA-VERDUGO C, FAY M F, GRANADO-YELA C, et al. Genetic diversity and differentiation processes in the ploidy series of *Olea europaea* L.: a multiscale approach from subspecies to insular populations [J]. *Molecular Ecology*, 2009, 18: 454-467.
- [3] MITCHELL-OLDS T, WILLIS J H, GOLDSTEIN D B. Which evolutionary processes influence natural genetic variation for phenotypic traits [J]. *Nature Reviews Genetics*, 2007, 8: 845-856.
- [4] JOHANNSEN W. The genotype conception of heredity [J]. *International Journal of Epidemiology*, 2014, 43(4): 989-1000.
- [5] 王欢利, 严灵君, 黄 犀, 等. 南京椴群体遗传多样性和遗传结构分析 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(1): 145-153.
- [6] YE X Y, MA P F, YANG G Q, et al. Rapid diversification of alpine bamboos associated with the uplift of the Hengduan Mountains [J]. *Journal of Biogeography*, 2019, 46(12): 2678-2689.
- [7] JIAO Y L, ZENG H, XIA H T, et al. RNA-seq and phytohormone analysis reveals the culm color variation of *Bambusa oldhamii* Munro [J]. *PeerJ*, 2022, 10: e12796.
- [8] 岳晋军. 圣音竹秆型变化的调控研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017: 27-36.
- [9] 张闻博, 费本华, 田根林, 等. 不同地区毛竹生长和表型性状的比较 [J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47(1): 1-5.
- [10] 杨志坚, 陈 辉, 陈世品, 等. 糙花少穗竹天然居群表型变异 [J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2008, 37(6): 592-596.
- [11] 杨秀艳. 粉单竹遗传多样性和麻竹种内杂交子代遗传变异研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007: 16-27.
- [12] 邱尔发, 洪 伟, 郑郁善, 等. 麻竹山地笋用林笋期叶片光合及呼吸性状研究 [J]. *林业科学*, 2001, 37(1): 148-153.
- [13] FAN L L, LI B J, HAN Y Z, et al. Lower light intensities increase shoot germination with improved leaf biosynthesis in Ma bamboo (*Dendrocalamus latiflorus* Munro) [J]. *Forests*, 2022, 13(10): 1723.
- [14] LEIMAPOKPAM T, ABHIJIT D, IMLITOSHI J, et al. Cytokinin influence on *in vitro* shoot induction and genetic stability assessment of *Dendrocalamus latiflorus* Munro: a commercially important bamboo in Manipur, North-East India [J]. *Vegetos*, 2022, 35(4): 1085-1095.
- [15] XIANG M Q, DING W S, WU C, et al. Production of purple Ma bamboo (*Dendrocalamus latiflorus* Munro) with enhanced drought and cold stress tolerance by engineering anthocyanin biosynthesis [J]. *Planta*, 2021, 254: 50.
- [16] 邱尔发, 洪 伟, 郑郁善, 等. 麻竹山地林配方施肥及生长调节剂对竹笋产量影响 [J]. *林业科学*, 2005, 41(6): 78-84.

- [17] 邢新婷. 麻竹不同地理群体遗传变异分析及良种选育研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2003.
- [18] 邱尔发. 麻竹山地笋用林[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [19] 熊文愈, 周芳纯, 胡长龙. 毛竹竹株年龄的确定方法[J]. 林业科学, 1965, 10(2): 197-198.
- [20] 葛 颂, 王明麻, 陈岳武. 用同工酶研究马尾松群体的遗传结构[J]. 林业科学, 1988, 24(4): 399-409.
- [21] 李 斌, 顾万春, 卢宝明. 白皮松天然群体种实性状表型多样性研究[J]. 生物多样性, 2002, 10(2): 181-188.
- [22] PIGLIUCCI M, MURREN C J, SCHLICHTING C D. Phenotypic plasticity and evolution by genetic assimilation[J]. The Journal of Experimental Biology, 2006, 209: 2362-2367.
- [23] LI Y, LI S, LU X H, et al. Leaf phenotypic variation of endangered plant *Tetracentron sinense* Oliv. and influence of geographical and climatic factors[J]. Journal of Forestry Research, 2021, 32: 623-636.
- [24] 姬明飞, 张晓玮, 韩 瑾, 等. 油松天然群体的种实性状表型多样性研究[J]. 西北植物学报, 2013, 33(9): 1898-1905.
- [25] 刁松锋, 邵文豪, 姜景民, 等. 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1451-1460.
- [26] 李文英, 顾万春. 蒙古栎天然群体表型多样性研究[J]. 林业科学, 2005, 41(1): 49-56.
- [27] 陈双林. 海拔对毛竹林结构及生理生态学特性的影响研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009: 50-52.
- [28] NIINEMETS Ü, PORTSMOUTH A, TOBIAS M. Leaf size modifies support biomass distribution among stems, petioles and mid-ribs in temperate plants[J]. New Phytologist, 2006, 171: 91-104.
- [29] 孙 梅, 田 昆, 张 贇, 等. 植物叶片功能性状及其环境适应研究[J]. 植物科学学报, 2017, 35(6): 940-949.
- [30] 余 华, 钟全林, 黄云波, 等. 不同种源刨花楠林下幼苗叶功能性状与地理环境的关系[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 449-458.
- [31] 王娅丽, 李 毅. 祁连山青海云杉天然群体的种实性状表型多样性[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 355-362.
- [32] 刘 莉, 王 磊, 吴 丹, 等. 不同种源文冠果种子的表型变异[J]. 经济林研究, 2021, 39(4): 97-105.
- [33] 张腾驹, 陈小红, 康喜坤, 等. 四川省珙桐天然种群叶表型多样性[J]. 生态学杂志, 2019, 38(1): 35-43.
- [34] 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.
- [35] 徐嘉娟, 陈婷敬, 谢 涛, 等. 山桐子天然居群果实表型多样性分析及综合评价[J]. 种子, 2021, 40(9): 64-71.
- [36] HAMRICK J L, GODT M J W, SHERMAN-BROYLES S L. Factors influencing levels of genetic diversity in woody plant species[J]. New Forests, 1992, 6(1): 95-124.
- [37] 李因刚, 柳新红, 马俊伟, 等. 浙江楠种源表型变异[J]. 植物生态学报, 2014, 38(12): 1315-1324.
- [38] 辜云杰, 罗建勋, 吴远伟, 等. 川西云杉天然种群表型多样性[J]. 植物生态学报, 2009, 33(2): 291-301.
- [39] 张元燕, 虞木奎, 方炎明. 麻栎不同种源的表型性状变异分析[J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(3): 36-44.
- [40] 杨维泽, 金 航, 李晚谊, 等. 濒危植物云南黄连不同居群表型多样性研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2013, 35(5): 719-726.
- [41] 程诗明. 苦楝聚合群体遗传多样性研究与核心种质构建[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2005: 27-61.
- [42] 何 涛, 樊小莉, 鲁 璐, 等. 不同种源石斛表型性状多样性及其与地理因子的相关性[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(2): 1-11.
- [43] 刘青青, 李雄杰, 马亚琼, 等. 青海野生中国沙棘资源表型性状多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2023, 24(4): 1057-1064.
- [44] 柳江群, 尹明宇, 左丝雨, 等. 长柄扁桃天然种群表型变异[J]. 植物生态学报, 2017, 41(10): 1091-1102.
- [45] 张翠琴, 姬志峰, 林丽丽, 等. 五角枫种源表型多样性[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5343-5352.
- [46] 田胜平, 汪阳东, 陈益存, 等. 山苍子天然种源叶片和种实性状的表型多样性[J]. 生态学杂志, 2012, 31(7): 1665-1672.

(责任编辑: 郭严冬)