

# 广西特色药材薄叶红厚壳的构件生物量及其分配特征研究

韦丹丹<sup>1</sup>, 罗轶<sup>1\*</sup>, 马双成<sup>2</sup>, 郑健<sup>2</sup>, 林雀跃<sup>1\*</sup> (1. 广西壮族自治区食品药品检验所, 国家中药材质量监测与评价重点实验室, 南宁 530000; 2. 中国食品药品检定研究院, 北京 102629)

**摘要** 目的: 旨在探究广西特色药材薄叶红厚壳植株构件生物量及其分配特征, 深入了解植株生长特性, 以为后续规模化繁育提供理论依据。方法: 基于植物标本信息与相关文献资料查阅结果, 在广西境内设置10个调查点(遍及8个市县行政区)开展资源分布调查。每个调查点随机选取3个以上植株, 采用全株收获法, 获取植株生长指标及生物量数据, 对比野生植株与栽培植株的生长指标差异, 同时在个体水平上探究器官生物量分配及其与地理因子、生长指标间的关系。结果: 通过对资源调查数据进行统计分析, 发现野生薄叶红厚壳种群呈零星分布模式且多生长于林分下部; 与人工栽培的薄叶红厚壳相比, 野生薄叶红厚壳植株平均年龄为(14.47±1.74) a, 平均地径为(8.28±0.53) mm, 平均株高(75.68±5.10) cm, 平均总生物量(43.31±5.96) g, 上述生长指标远低于人工栽培植株; 就生物量分配特征而言, 各调查点植株茎生物量最大(56.48±18.79) g, 茎质比均超过35%, 而叶质比与根质比差异不明显; 通过分析地理环境因子及植株生长参数对生物量分配的影响, 发现根冠比与海拔呈显著正相关, 根质比与株高呈显著负相关, 茎质比与纬度、地径、株高、年龄均呈显著正相关, 叶质比与除海拔外的其余5种因子均呈显著负相关; 地理因子对其生物量分配的整体解释度为23.2%, 略高于生长参数(19.6%)。结论: 广西境内薄叶红厚壳植株分布广泛, 但资源总量逐渐减少, 植株生长状况稳定。构件生物量及其分配存在显著的空间地理差异, 除地理因子与生长因子外, 生物量分配还受到其他因素的影响。

**关键词:** 薄叶红厚壳; 资源分布; 生长特征; 生物量分配; 根冠比

中图分类号: R932 文献标识码: A 文章编号: 1002-7777(2024)06-0674-012

doi:10.16153/j.1002-7777.2024.06.009

## The Study on Component Biomass and Its Distribution Characteristics of Guangxi Unique Traditional Chinese Medicine *Calophyllum membranaceum*

Wei Dandan<sup>1</sup>, Luo Yi<sup>1\*</sup>, Ma Shuangcheng<sup>2</sup>, Zheng Jian<sup>2</sup>, Lin Queyue<sup>1\*</sup> (1. Guangxi Institute for Food and Drug Control, State Key Laboratory for Quality Monitoring and Evaluation of Traditional Chinese Medicine, Nanning 530000, China; 2. National Institutes for Food and Drug Control, Beijing 102629, China)

**Abstract Objective:** To investigate the component biomass and its distribution characteristics of *Calophyllum membranaceum*, a unique traditional Chinese medicine in Guangxi, and to deeply understand the growth

基金项目: 广西科技重大专项“80种桂产特色中药材配方颗粒制备工艺与质量标准及产品开发研究”(编号桂科AA22096019); 国家药品监督管理局药品注册司专项“特色民族药地桃花和横经席检验方法示范性研究”(编号NIFDC-TCM2021-047-MZY009)

作者简介: 韦丹丹 Tel: 19801330043; E-mail: 1294103847@qq.com

通信作者: 罗轶 Tel: (0771) 5719722; E-mail: luoyi20010211@163.com

林雀跃 Tel: (0771) 5828498; E-mail: linqueyue@163.com

characteristics of plants, so as to provide a theoretical basis for the subsequent large-scale breeding. **Methods:** Based on plant specimens information and relevant literature review, 10 survey points which covering 8 cities and counties were set up in Guangxi to conduct the resource distribution of *Calophyllum membranaceum*. In each survey point, more than 3 whole plants were randomly selected and whole-plant harvest method was used to obtain plant growth indexes and biomass data. The relationship between plant organ biomass distribution and geographical and growth factors was explored at the individual level, and the growth indexes differences between wild plants and cultivated plants were compared. **Results:** Statistical analysis of the data from the resource survey revealed that the wild populations of *Calophyllum membranaceum* showed a sporadic distribution pattern and mostly grew in the lower part of the forest stand; compared with the cultivated plants, the averaged age, averaged ground diameter, averaged plant height, averaged total biomass of *Calophyllum membranaceum* were respectively  $(14.47 \pm 1.74)$  a,  $(8.28 \pm 0.53)$  mm,  $(75.68 \pm 5.10)$  cm, and  $(43.31 \pm 5.96)$  g. The above growth indexes were much lower than those of the cultivated plants; in terms of biomass allocation characteristics, the plant stem biomass was the largest  $(56.48 \pm 18.79)$  g, and the stem mass ratio was more than 35%, while the difference between leaf mass ratio and root mass ratio was not significant. By analyzing the effects of geographic environmental factors and plant growth parameters on biomass allocation, it was found that the root shoot ratio was significantly positively correlated with altitude, the root biomass fraction was significantly negatively correlated with plant height, the stem biomass fraction was significantly positively correlated with latitude, ground diameter, plant height and age, and the leaf biomass fraction was significantly negatively correlated with the other five factors except altitude. The overall explanatory power of geographical factors on biomass allocation was 23.2%, slightly higher than growth parameters (19.6%). **Conclusion:** *Calophyllum membranaceum* populations are widely distributed in Guangxi, the plant growth is stable, but the total resources are gradually decreased. There are significant spatial geographical differences in component biomass and its allocation. The biomass allocation is influenced by others factors besides geographical factors and growth factors.

**Keywords:** *Calophyllum membranaceum*; biomass allocation; growing characteristics; resource distribution; root-shoot ratio

生物量是探究生态系统结构与功能的基本指标,反映植物对外界环境资源的利用能力<sup>[1]</sup>。植物生物量分配是植物不同器官生物量的相对值,反映植物面对不同环境资源压力产生的生活史对策。植物生物量分配模式一直是生物量分配理论的研究热点,目前解释植物生物量分配的假说主要有2种,即最优分配假说与异速分配假说<sup>[2]</sup>。最优分配假说认为,野生植物通常受到多种生物与非生物因子的共同制约,在不同的选择压力下,植物以权衡的方式将有限的资源合理地分配至不同的器官中,以维持最大的生长速率<sup>[3]</sup>。例如,当地下资源匮乏时(如土壤养分、水分),植物相对地将更多有机物质分配至根系;当地上资源受限(如光照、CO<sub>2</sub>)时,植物将更多有机物质分配至地上部分<sup>[4]</sup>。异速生长理论认为,个体大小决定植株生物量分配模式,植物体通过调整器官间的生物量分配,提高光

获取能力与资源运输能力,降低体内流体阻力与资源输送时间的方式保证资源利用最大化<sup>[5]</sup>。异速分配假说基于异速生长理论产生,多用于植物不同器官生物量间比例关系的预测。由于植物器官功能多样性(如茎兼具支持、输导、贮藏、繁殖、光合等多种作用)、个体遗传物质、生境的差异性,其生物量分配难以用简单的模型进行预测,因此两种假说间并不矛盾,在一定条件下可结合使用<sup>[5]</sup>。

横经席为藤黄科红厚壳属(*Calophyllum*)薄叶红厚壳(*Calophyllum membranaceum*)的干燥全株,又称为薄叶胡桐、跌打将军等,是常绿灌木或小乔木,主要分布于两广、海南等地。薄叶红厚壳具有良好的药用价值,是民间常用药材,在抗菌消炎、外伤出血、跌打损伤、风湿骨痛、活血化瘀等方面具有较好的药用功效。目前市场上野生薄叶红厚壳药材年需求量在1000吨以上,且市场需求量逐

年增加<sup>[6]</sup>。除药用价值外,红厚壳属植物还兼具良好的油用、观赏价值:红厚壳果仁含油量高达70%以上,是生物柴油的潜在原料<sup>[7-8]</sup>;其植株枝繁叶茂,花色艳丽,栽培管理简单,是良好的行道树及园林绿化树种。因此,薄叶红厚壳具有良好的开发前景。但是,近几十年广西大量种植速生桉,导致薄叶红厚壳生境受到严重破坏,在多重人为因素的干扰下,其野生资源急剧减少,已被《世界自然保护联盟红色名录》列为易危植物。

目前,有关红厚壳属植物的研究主要集中在植株内部化学成分及其药理活性。1993年,Patil<sup>[9]</sup>发现,从红厚壳(*Calophyllum inophyllum*)中提取出的香豆素类化合物Inophyllum B和Inophyllum P具有明显的抗艾滋病病毒活性的作用。至今,研究人员已从薄叶红厚壳各部位中提取出香豆素类、山萘酚类、黄酮类、萜类、咕吨酮类等多种化合物<sup>[10-14]</sup>。而薄叶红厚壳植物群落生态学的相关研究较少,仅有少数几篇关于种子萌发<sup>[6]</sup>、栽培技术<sup>[15]</sup>的文献资料。为此,本文拟对广西薄叶红厚壳居群开展野外资源分布及生长特征调查,旨在:(1)探明薄叶红厚壳种群的资源分布现状,揭示野生植株生长特征与生物量分配的空间差异;(2)对比野生植株与栽培植株生长特征差异;(3)分析地理因子与个体大小对生物量分配的潜在影响。本文试图揭示薄叶红厚壳的生态适应特性,丰富其生活史对策理论,以期为后续红厚壳属植物的资源保护及可持续

利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

广西位于中国南部(地理位置为东经104°29'~112°04',北纬20°54'~26.26),总面积23.67万平方公里,地处云贵高原东南边缘,整体地势表现为中南部为平地,四周多为山地,属山地丘陵性盆地地貌<sup>[16]</sup>。广西属亚热带季风气候区,气候温暖,热量丰富,年均日照时数为1827 h,年平均气温16~23℃,气温呈现出由南向北逐渐递减的趋势<sup>[17]</sup>。降水丰富,年降水量为1086~2755 mm,受冬、夏季风交替影响,全年降水量分布不均,干湿季明显,其中雨季集中于4~9月,雨季降雨量占全年降雨总量的70%以上,旱季为当年10月至次年3月,干旱少雨<sup>[18]</sup>。植被类型丰富,天然植被达722个群系,森林覆盖率达56.51%,森林面积与蓄积量位于国内前列<sup>[19]</sup>。土壤类型多样,主要包括砖红壤、赤红壤、红壤、石灰岩土、黄壤、紫色土、水稻土等<sup>[20]</sup>。

### 1.2 野外调查方法

在查阅植物标本及相关文献资料的基础上,确定薄叶红厚壳的分布区域,根据不同行政区域制定野外调查路线。于2021年7月开展薄叶红厚壳资源调查,共记录薄叶红厚壳种群分布样点10个(P1~P10,见图1)。

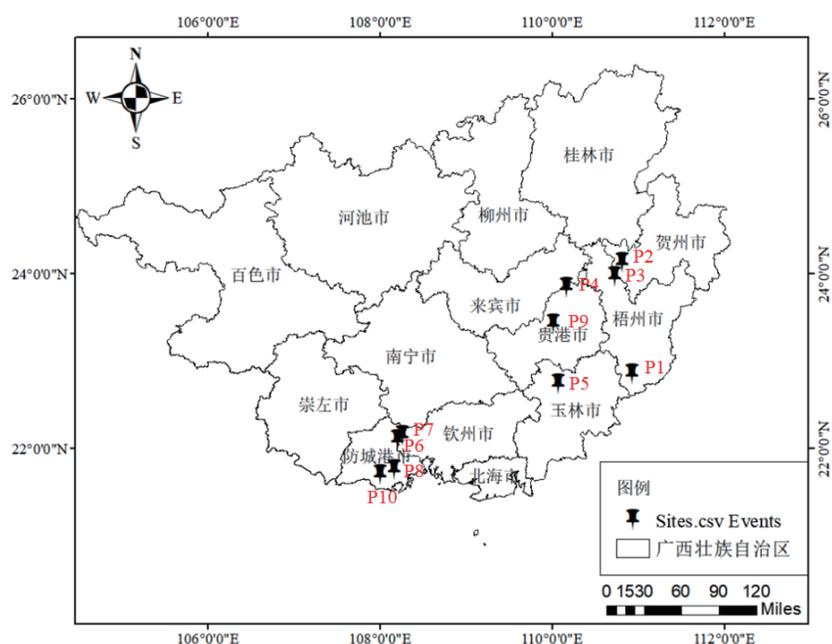


图1 薄叶红厚壳调查点

利用奥维互动地图进行样点定位，记录经度、纬度、海拔等地理信息。在各调查样点随机选取样株（≥3株），分别用游标卡尺、钢卷尺测量样株地径、高度等基础生长指标（P9、P10未获取样株）。采用全株收获法将样株全部挖出，挖取时确保根系完整。将收获的样株装入自封袋带回实验室，用枝剪在样株基径处剪出光滑斜截面，利用三目体视显微镜计数年轮确定年龄。单株植物生物量是指一定时间或单位面积内有机干物质的积累量，主要包括地上生物量与地下生物量，又可进一步细分为不同器官的生物量，通常以g或kg作为计量单位。将样株按照根、茎、叶等不同器官进行分类，在实验室烘箱65℃条件下烘干至恒重后用1/1000电子天平进行称量，获取样株各个器官生物量及总生物量数据，并计算各器官生物量分配比例。其中：

根质比=根系生物量/总生物量

茎质比=茎枝生物量/总生物量

叶质比=叶片生物量/总生物量

根冠比=根系生物量/地上生物量

地上生物量=茎枝生物量+叶片生物量

此外，在梧州市头垌村（地理位置为东经111.17°，北纬23.76°，海拔高度146 m）薄叶红厚壳人工种植基地分别测量20株5年生、2年生植株，获取地径、株高、冠幅等生长指标数据。

### 1.3 数据处理与统计分析

对各采样点薄叶红厚壳生长参数数据进行整理分析。数据分析前对地上生物量、根生物量、茎生物量、叶片生物量进行Sqrt数据转换，根冠比进行Ln数据转换，使得数据服从正态分布。采用ANOVA方差分析法分析不同采样点植株生长指标与生物量分配的空间差异，以最小显著差异（Least Significant Difference, LSD）法多重比较检

验各采样点的差异。采用ANOVA方差分析法研究野生薄叶红厚壳植株与栽培植株间的差异，Scheffe多重比较法检验组间差异。利用Pearson相关系数分析地理因子、生长指标与生物量分配间的相关关系（α=0.05），采用线性回归拟合生物量分配随地理因子与生长指标间变化趋势。通过方差分解分析（Variance Partitioning Analysis, VPA）探讨地理因子与生长指标对植株生物量分配的影响。

以上数据处理与统计分析均在Excel 2019及SPSS 24.0软件中进行，回归分析与图形绘制在Origin 2018软件中进行，方差分解分析在Canoco 5.0软件中进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 地理分布与生境特征

薄叶红厚壳野生资源在广西境内分布广泛（地理位置为东经108°0'~110°55'，北纬21°42'~24°7'，海拔高度56~609 m），遍及梧州、贺州、钦州、桂平、贵港、玉林、防城港、东兴等多个市（县）行政区域，但资源量较小，种群呈零星分布（见表1）。本次调查发现，薄叶红厚壳多生长于八角林、竹林、马尾松林、杂木林等疏林或密林中，位于林分中下层，常伴有芒萁（*Dicranopteris pedata*）、九节（*Psychotria asiatica*）、粗叶榕（*Ficus hirta*）、半边旗（*Pteris semipinnata*）、南方紫金牛（*Ardisia elliptica*）、石柑子（*Pothos chinensis*）、求米草（*Oplismenus undulatifolius*）、莎草属（*Cyperus sp.*）等植物。植株生长缓慢，呈低矮小灌木状，根为直根系，主根发达，须根少，在土层肥厚、疏松肥沃的壤土、砂壤土中生长较好，涝洼地或土壤贫瘠生境中生长不良。

表1 薄叶红厚壳调查分布点环境因子

样号	地点	经度	纬度	海拔 /m
P1	梧州岑溪市马路镇	110° 55' 12"	22° 51' 21"	267 ± 3
P2	贺州昭平县棋盘村	110° 48' 21"	24° 7' 51"	125 ± 6
P3	贺州昭平县义德村	110° 43' 29"	23° 58' 29"	210 ± 12
P4	贵港市平南县大鹏	110° 9' 28"	23° 50' 56"	402 ± 32
P5	玉林市兴业县暗地	110° 3' 46"	22° 44' 33"	342

续表 1

样号	地点	经度	纬度	海拔 /m
P6	防城港市上思县江那	108° 12' 11"	22° 6' 41"	86 ± 8
P7	钦州市钦北区米隆林场	108° 15' 30"	22° 9' 33"	78 ± 6
P8	防城港市防城区那梭镇	108° 10' 0"	21° 46' 8"	56 ± 8
P9	桂平西山镇白兰村	110° 0' 21"	23° 26' 7"	323 ± 32
P10	东兴市马路镇平丰村	108° 0' 6"	21° 42' 43"	609 ± 12

## 2.2 生长特征

### 2.2.1 野生薄叶红厚壳生长参数及其空间差异

对野生薄叶红厚壳地径、株高、年龄、总生物量等影响个体大小的生长参数进行统计分析,结果显示,地径均值为(8.28 ± 0.53) mm,平均株高为(75.68 ± 5.10) cm,平均年龄为(14.47 ± 1.14) a,总生物量均值为(43.31 ± 5.96) g,表明野生薄叶红厚壳植株年龄大,但植株个体较小(见表2)。

各生长参数表现出显著的空间差异( $P < 0.05$ ),整体而言,P2、P4的植株较其他调查点长势更好,P1、P5的植株长势较差。其中,P2植株的总生物量最大;P1植株的总生物量最小;P4植

株年龄最大,株高最高;P5植株的年龄、株高均最小(见表2、图2)。

### 2.2.2 薄叶红厚壳野生植株与栽培植株生长差异

本研究收获的野生薄叶红厚壳植株最小年龄为6年,与人工栽培5年、2年的植株进行基础生长指标的差异性检验。结果显示,薄叶红厚壳野生植株与栽培植株在株高、地径组间具有显著差异( $P < 0.01$ );其中5年生人工栽培植株地径、株高显著大于2年生人工栽培植株及野生植株;而野生植株与2年生人工栽培植株之间的地径无明显差异( $P = 0.389$ ),但野生植株的株高更高( $P < 0.01$ ), (见表3、图3)。

表2 薄叶红厚壳生长参数特征统计

样号	地径 /mm	株高 /cm	年龄 /a	地上总生物量 /g
P1	4.83 ± 0.60 <sup>c</sup>	43.00 ± 5.24 <sup>cd</sup>	10 ± 1.87 <sup>b</sup>	9.46 ± 4.93 <sup>c</sup>
P2	11.61 ± 2.13 <sup>a</sup>	82.67 ± 9.33 <sup>ab</sup>	21.67 ± 3.28 <sup>a</sup>	90.35 ± 29.58 <sup>a</sup>
P3	9.30 ± 0.80 <sup>ab</sup>	96.43 ± 10.09 <sup>ab</sup>	16.71 ± 1.39 <sup>ab</sup>	49.70 ± 10.10 <sup>abc</sup>
P4	11.55 ± 2.15 <sup>a</sup>	113.33 ± 16.91 <sup>a</sup>	22.00 ± 5.57 <sup>a</sup>	65.97 ± 19.79 <sup>ab</sup>
P5	5.76 ± 1.34 <sup>bc</sup>	42.80 ± 6.91 <sup>d</sup>	9.00 ± 3.58 <sup>b</sup>	19.38 ± 12.40 <sup>bc</sup>
P6	8.54 ± 1.09 <sup>abc</sup>	73.50 ± 13.11 <sup>bcd</sup>	14.75 ± 3.04 <sup>ab</sup>	34.73 ± 8.59 <sup>bc</sup>
P7	7.96 ± 1.03 <sup>abc</sup>	88.00 ± 5.12 <sup>ab</sup>	11.50 ± 2.06 <sup>b</sup>	56.50 ± 20.68 <sup>abc</sup>
P8	9.45 ± 0.15 <sup>ab</sup>	78.33 ± 2.40 <sup>abc</sup>	14.67 ± 0.67 <sup>ab</sup>	48.82 ± 5.75 <sup>abc</sup>
均值	8.28 ± 0.53	75.68 ± 5.10	14.47 ± 1.14	43.31 ± 5.96
F	4.134	6.699	2.917	3.11
P	0.004	0	0.022	0.016

注:平均值 ± 标准误,同列不同小写字母(如a、b、c、d)表示各调查点植株存在显著差异( $P < 0.05$ )。

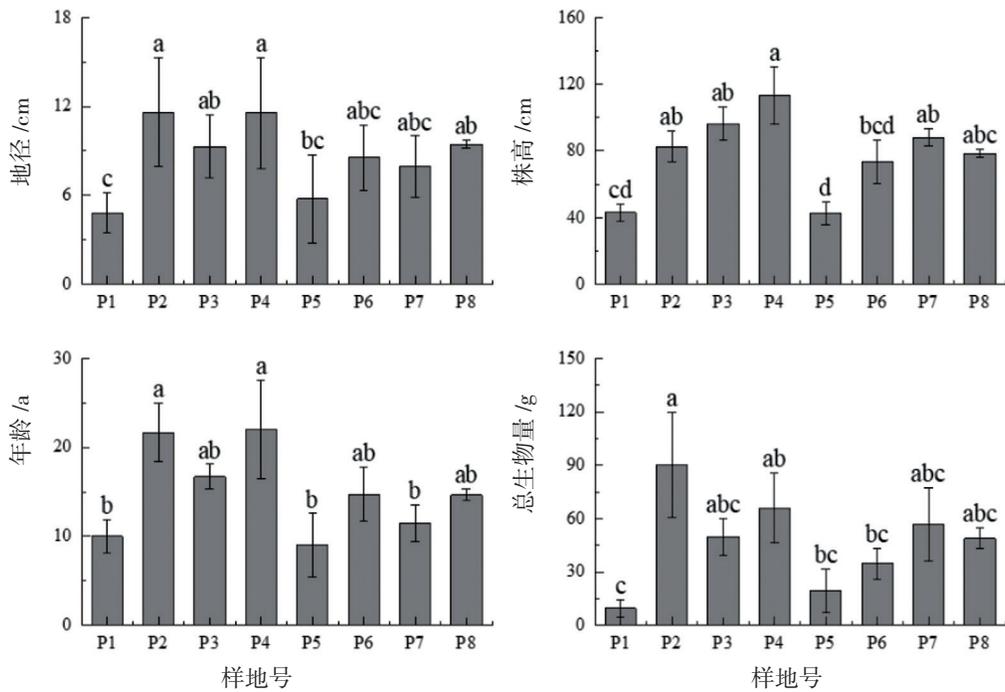
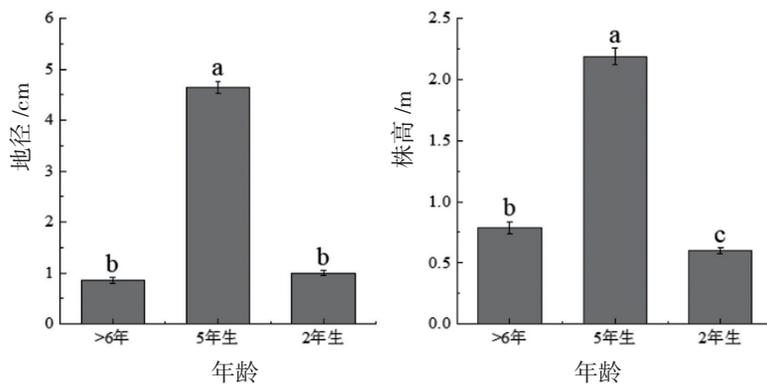


图2 薄叶红厚壳生长参数及其空间差异

表3 不同年龄薄叶红厚壳生长特征 (N=20 或 32)

项目	野生		栽培		F	P
	> 6年	5年	5年	2年		
地径	0.86 ± 0.05 <sup>b</sup>	4.64 ± 0.12 <sup>a</sup>	1.00 ± 0.04 <sup>b</sup>	1.00 ± 0.04 <sup>b</sup>	762.27	0.000
株高	0.79 ± 0.05 <sup>b</sup>	2.19 ± 0.07 <sup>a</sup>	0.60 ± 0.02 <sup>c</sup>	0.60 ± 0.02 <sup>c</sup>	247.76	0.000

注: 不同小写字母 (如 a、b、c) 表示存在显著差异 (P < 0.05)。



注: 不同小写字母 (如 a、b、c) 表示各调查点不同年龄植株的生长指标存在显著差异 (P < 0.05)。下同。

图3 薄叶红厚壳生长参数差异

### 2.3 薄叶红厚壳种群构件生物量及其分配比的空间差异

分析发现, 野生薄叶红厚壳各构件生物量及其分配比具有显著的空间差异性。其中, 叶片生物

量、根冠比、根质比、茎质比、叶质比的空间差异极显著 (P < 0.01), 地上生物量、枝茎生物量空间差异显著 (0.01 < P < 0.05), 植株地下生物量空间差异不显著 (P = 0.085) (见表4)。

对薄叶红厚壳各器官生物量进行分析发现, P2植株总生物量及各构件生物量最大, P1植株总生物量与各构件生物量最小, 但两地植株的茎质比无显著差异。对薄叶红厚壳根系、茎枝、叶片3种器官生物量占比进行分析发现, 各调查点植

株的茎生物量最大 ( $56.48 \pm 18.79$ ) g, 茎质比 ( $0.53 \pm 0.02$ ) 最高, 均超过了35%, 而叶生物量与根系生物量、叶质比与根质比差异不明显(见图4、图5)。

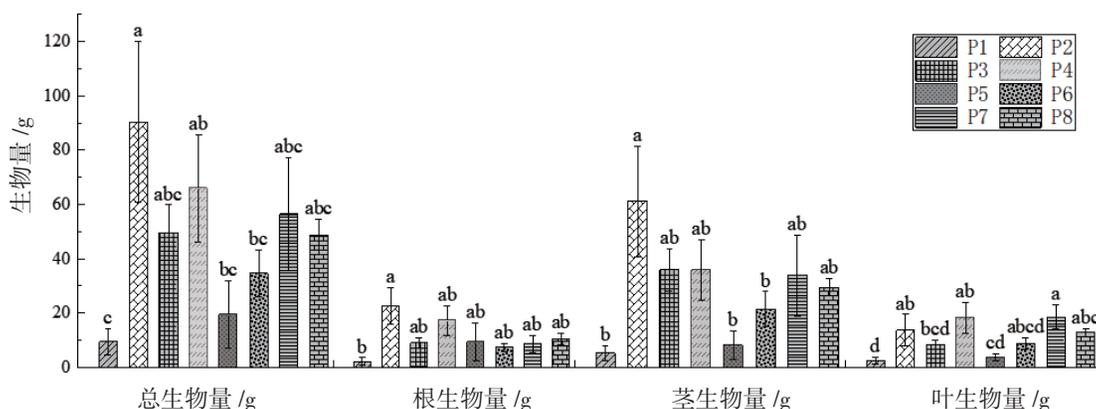


图4 薄叶红厚壳各构件生物量的空间差异

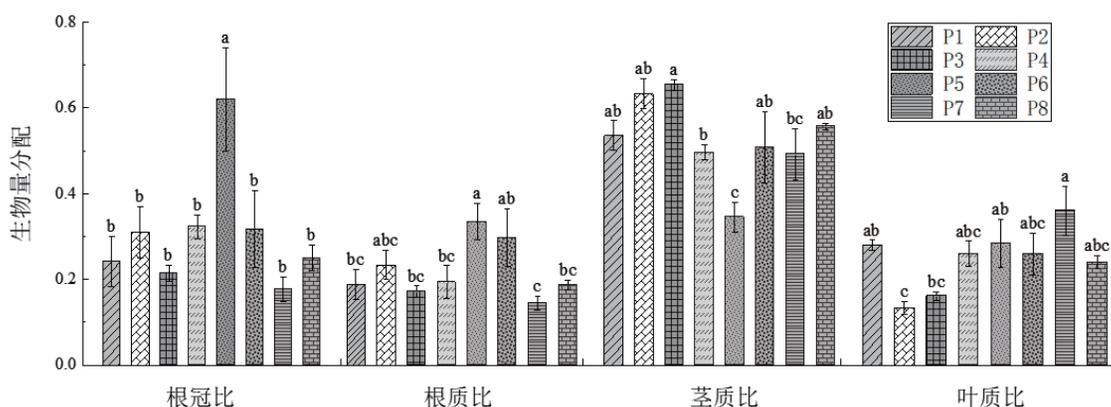


图5 薄叶红厚壳根冠比、根质比、茎质比、叶质比的空间差异

#### 2.4 地理因子、植株个体大小与薄叶红厚壳生物量分配比的关系

由表5、图6可知, 叶生物量 ( $R=-0.381$ ,  $P=0.024$ )、叶质比 ( $R=-0.386$ ,  $P=0.024$ ) 与经度呈显著负相关关系; 株高 ( $R=0.341$ ,  $P=0.049$ )、年龄 ( $R=0.416$ ,  $P=0.014$ )、茎质比 ( $R=0.418$ ,  $P=0.014$ ) 与纬度呈显著正相关关系; 叶质比 ( $R=-0.531$ ,  $P=0.001$ ) 与纬度呈极显著负相关关系; 地上生物量 ( $R=-0.342$ ,  $P=0.048$ ) 与海拔呈

显著负相关关系; 根冠比 ( $R=0.407$ ,  $P=0.017$ ) 与海拔呈显著正相关。其余生长指标与环境因子也表现出一定的相关性, 但不显著。

为进一步了解地理因子与生长因子对薄叶红厚壳生物量分配的作用, 对地理因子与生长因子进行方差分解分析。结果显示: 地理因子对薄叶红厚壳生物量分配的单独解释率为23.2%, 生长因子的单独显示率为19.6%, 二者的共同解释率为1.9% (见图7)。

表4 薄叶红厚壳构件生物量及其分配比例的统计分析

项目	地下生物量/g	地上生物量/g	茎生物量/g	叶片生物量/g	根冠比	根质比	茎质比	叶质比
P1	2.10 ± 1.23 <sup>b</sup>	7.41 ± 3.76 <sup>c</sup>	4.91 ± 2.55 <sup>b</sup>	2.47 ± 1.18 <sup>d</sup>	0.24 ± 0.06 <sup>b</sup>	0.19 ± 0.04 <sup>bc</sup>	0.54 ± 0.03 <sup>ab</sup>	0.28 ± 0.01 <sup>ab</sup>
P2	20.90 ± 6.29 <sup>a</sup>	69.53 ± 23.90 <sup>a</sup>	56.48 ± 18.79 <sup>a</sup>	12.68 ± 5.33 <sup>ab</sup>	0.31 ± 0.06 <sup>b</sup>	0.23 ± 0.03 <sup>abc</sup>	0.63 ± 0.05 <sup>ab</sup>	0.13 ± 0.01 <sup>c</sup>
P3	8.38 ± 1.62 <sup>ab</sup>	41.33 ± 8.58 <sup>abc</sup>	33.23 ± 7.24 <sup>ab</sup>	7.79 ± 1.41 <sup>abcd</sup>	0.21 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.17 ± 0.01 <sup>bc</sup>	0.65 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.16 ± 0.01 <sup>bc</sup>
P4	15.95 ± 4.97 <sup>ab</sup>	50.01 ± 15.10 <sup>ab</sup>	33.06 ± 10.42 <sup>ab</sup>	16.99 ± 5.27 <sup>ab</sup>	0.32 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.19 ± 0.04 <sup>bc</sup>	0.50 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.26 ± 0.03 <sup>abc</sup>
P5	8.62 ± 6.45 <sup>ab</sup>	10.74 ± 5.98 <sup>bc</sup>	7.41 ± 4.87 <sup>b</sup>	3.34 ± 1.18 <sup>cd</sup>	0.62 ± 0.12 <sup>a</sup>	0.33 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.35 ± 0.03 <sup>c</sup>	0.28 ± 0.06 <sup>ab</sup>
P6	6.93 ± 1.33 <sup>ab</sup>	27.85 ± 7.39 <sup>bc</sup>	19.77 ± 6.02 <sup>b</sup>	8.07 ± 1.94 <sup>abcd</sup>	0.32 ± 0.09 <sup>b</sup>	0.30 ± 0.07 <sup>ab</sup>	0.51 ± 0.08 <sup>ab</sup>	0.26 ± 0.05 <sup>abc</sup>
P7	8.08 ± 2.92 <sup>ab</sup>	48.48 ± 17.82 <sup>ab</sup>	31.32 ± 13.81 <sup>ab</sup>	17.20 ± 4.06 <sup>a</sup>	0.18 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.15 ± 0.02 <sup>c</sup>	0.49 ± 0.06 <sup>bc</sup>	0.36 ± 0.06 <sup>a</sup>
P8	9.77 ± 1.84 <sup>ab</sup>	39.01 ± 4.21 <sup>abc</sup>	27.19 ± 2.94 <sup>ab</sup>	11.82 ± 1.48 <sup>abc</sup>	0.25 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.19 ± 0.01 <sup>bc</sup>	0.56 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.24 ± 0.02 <sup>abc</sup>
均值	9.18 ± 1.44	34.15 ± 4.79	24.96 ± 3.76	9.09 ± 1.21	0.31 ± 0.03	0.22 ± 0.02	0.53 ± 0.02	0.25 ± 0.02
F	2.059	3.378	3.333	4.626	4.72	3.595	6.337	4.002
P	0.085	0.011	0.011	0.002	0.002	0.008	0.000	0.004

注：不同小写字母（如 a、b、c、d）表示各调查点植株的各项指标之间存在显著差异（ $P < 0.05$ ）。

表5 地理因子、生长因子与薄叶红厚壳器官生物量分配间的相关性

项目	地理因子				生长因子			
	经度	纬度	海拔	直径	株高	年龄	直径	株高
根冠比	0.076	-0.011	0.407 <sup>*</sup>	-0.096	-0.330	-0.103	-0.096	-0.330
根质比	-0.057	-0.146	0.181	-0.261	-0.406 <sup>*</sup>	-0.283	-0.261	-0.406 <sup>*</sup>
茎质比	0.236	0.418 <sup>*</sup>	-0.310	0.514 <sup>**</sup>	0.559 <sup>**</sup>	0.553 <sup>**</sup>	0.514 <sup>**</sup>	0.559 <sup>**</sup>
叶质比	-0.386 <sup>**</sup>	-0.531 <sup>**</sup>	0.019	-0.532 <sup>**</sup>	-0.383 <sup>*</sup>	-0.589 <sup>**</sup>	-0.532 <sup>**</sup>	-0.383 <sup>*</sup>

注：\*表示  $P < 0.05$ ，\*\*表示  $P < 0.01$ ，下同。

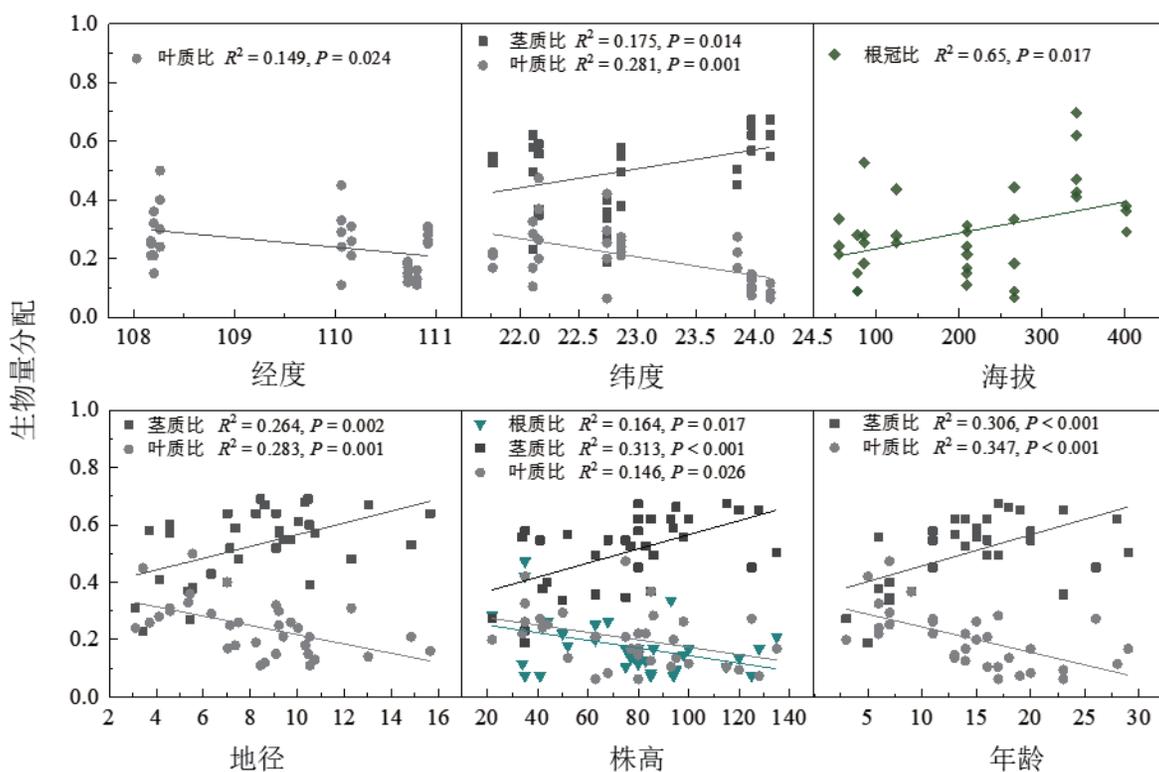


图6 薄叶红厚壳器官生物量分配与地理因子、生长因子间的线性回归

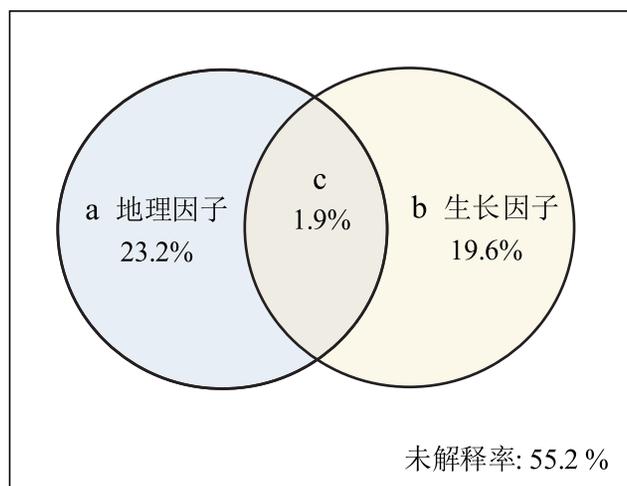


图7 地理因子与生长参数的方差分解分析

### 3 讨论

#### 3.1 薄叶红厚壳植株各构件生物量及其分配特征

生物量分配是植物应对环境资源压力产生的生长策略,通过协调各器官间的资源分配,从环境中获取更多的总资源,确保植株生长、繁殖、防御等功能的正常运行<sup>[21]</sup>。研究发现,不同植物生活型具有不同生物量分配策略,灌木植物具有发达

的根系,其根系生物量高于其他构件生物量<sup>[22]</sup>。与Chen等<sup>[22]</sup>的研究结果不同,罗永开等<sup>[23]</sup>在探究山西芦芽山14种常见灌木生物量分配模式时发现茎质比(0.48)最大。Song等<sup>[24]</sup>对13种灌木生物量分配进行研究时也发现,几乎所有灌木种的茎生物量高于根系生物量与叶片生物量,根质比、茎质比、叶质比分别为0.31、0.47、0.22。与前人研究结果相

似, 本研究也发现薄叶红厚壳茎质比(0.53)显著高于根质比(0.22)与叶质比(0.25)。这种资源分配模式可能受植株器官间不同更新速率调控, 与叶片和根系相比, 茎的更新速率更低, 保留更多的生物量资源<sup>[25]</sup>。同时, 本研究中薄叶红厚壳平均茎质比为0.53, 大于罗永开<sup>[23]</sup>与Song等<sup>[24]</sup>所研究的灌木中平均茎质比(0.47、0.48), 表明不同生活型(常绿与落叶)灌木种间资源分配策略也存在差异。本研究中薄叶红厚壳根冠比均值为0.31(见表4), 高于同处于亚热带季风气候区的乔木树种(0.22)<sup>[13]</sup>, 表明该气候区内, 灌木树种根系较乔木树种积累更多的有机物质。但是与同气候区的灌木树种(0.46)相比, 薄叶红厚壳根冠比较低, 也表明不同物种间资源分配存在一定差异<sup>[24]</sup>。

### 3.2 环境因子与个体大小对薄叶红厚壳生物量分配的影响

经度、纬度、海拔属于综合的环境因子, 可通过改变光照、温度、降水、土壤养分等多种因素而间接影响植物生物量。本研究发现, 薄叶红厚壳总生物量与地理因子间未表现出显著的相关性, 而叶质比随经度、纬度的升高而逐渐降低, 茎质比随纬度的升高而增大, 表明随经纬度的升高, 薄叶红厚壳生物量分配逐渐转向茎生物量。此结果可能与不同地理区域的光照强度有关, 随经纬度升高、光照强度下降。而调查中发现, 薄叶红厚壳多生长于林分中下层, 因此植株将更多的资源分配至茎枝中, 以获取更多的光照资源。此外, 方差分解法分析显示地理因子对生物量分配的单独解释度仅为23.2%, 表明除地理因子外, 薄叶红厚壳生物量分配策略可能还受气候状况、物种多样性、土壤质地、立地条件、人为干扰<sup>[26-27]</sup>等多种局部因素的共同影响。

根冠比是根系生物量与地上生物量的比值, 是反映植物生物量分配的重要指标, 被广泛应用于陆地生态系统碳循环的研究中。Qi等<sup>[28]</sup>在对全球不同植物群落的根冠比进行综合分析时发现, 根冠比与纬度和海拔呈显著的正相关关系。Xu等<sup>[29]</sup>在研究高山灌丛生物量分配的地理分布格局时也发现, 随海拔的升高, 地下生物量增大。本研究结果与前人研究结果相似。随纬度与海拔的升高及温度降低、降水减少, 植物将更多的有机物质分配至地下部分以维持正常生长发育, 因此, 植物生物量分配

模式呈现出一定的地理分布格局。

植物生物量分配存在个体发育漂变, 因此生物量分配的差异与个体大小有关<sup>[30]</sup>。本研究发现, 茎质比与地径、株高、年龄呈显著正相关, 而叶质比随地径、株高、年龄的升高而逐渐下降, 根质比仅与株高呈显著负相关, 此结果与Poorter<sup>[1]</sup>、Liu<sup>[31]</sup>、Song<sup>[24]</sup>的研究结果相似。个体大小对生物量分配的影响可能与植株不同的生长发育阶段的资源分配策略有关<sup>[32]</sup>。在生长初期, 植物内部资源分配倾向于叶片与根系, 以获取外部更多的光照与营养资源; 随着植物的生长, 植物内部有机物质逐渐从叶片、根系转移到茎枝, 以增强营养的输导与自身的支撑作用<sup>[33]</sup>。此外, 植物器官间不同的相对生长率也可能造成生物量分配差异, 如Niklas<sup>[34]</sup>发现, 植物器官年增长率表现为茎生物量>根生物量>叶生物量, 因此, 茎质比随植株个体的增大而增大。

### 3.3 野生植株与人工种植植株的生长差异

本研究发现, 野生薄叶红厚壳植株平均年龄为(14.47 ± 1.14) a, 但地径、株高明显小于5年生栽培植株, 表明野生薄叶红厚壳植株生长状况不良。此结果可能与多种因素有关: 首先, 人工栽培过程中会进行整地、除草等管理措施, 与其他植物的种间竞争减少, 栽培植株可从环境中获取更多的资源, 长势更好。其次, 施肥管理产生的土壤养分差异也是生长差异的关键影响因素。前人研究表明, 广西森林土壤总氮含量较高, 总钾含量中等, 总磷含量较低, 且北部区域土壤养分显著高于南部区域<sup>[35]</sup>。因此, 与栽培植株相比, 野生植株更易受到土壤养分的限制。此外, 光照、降水、立地条件、土壤微生物等多种因素均可对二者生长差异产生影响。由此可见, 野生植株与栽培植株的生长差异是多种因素共同作用的结果, 但是何种因素占主导作用仍需进一步研究。同时, 薄叶红厚壳栽培种长势较好, 可有效地缓解当前市场的需求压力, 但是栽培种是否与野生种具有相同的药用功效, 仍需深入研究。

## 4 结论

综上所述, 薄叶红厚壳在广西境内分布广泛, 但种群规模小, 呈零星分布, 植株长势较差, 受人为干扰、生境破坏等多种因素的影响, 野生资源逐渐匮乏; 薄叶红厚壳植株生长特征与生物量分配模式具有显著的空间差异性, 地理因子与植株个

体大小对生物量分配策略具有不同程度的影响；植株生物量分配模式表现为茎质比最大，根质比与叶质比无明显差异，表明其具有相对稳定的生存策略；栽培种长势显著优于野生植株，积极开展人工繁育研究工作，有利于满足药用市场需求，缓解其野生资源压力。

#### 参考文献：

- [1] Poorter H, Niklas KJ, Reich PB, et al. Biomass Allocation to Leaves, Stems and Roots: Meta-analyses of Interspecific Variation and Environmental Control[J]. *New Phytol*, 2012, 193 ( 1 ) : 30-50.
- [2] Lugli LF. Digging Deeper Biomass Allocation Patterns in Trees and Lianas in Tropical Seasonal Forests[J]. *New Phytol*, 2020, 226 ( 3 ) : 639-640.
- [3] Chave J, Rejou-Mechain M, Burquez A, et al. Improved Allometric Models to Estimate the Aboveground Biomass of Tropical Trees[J]. *Glob Change Biol*, 2014, 20 ( 10 ) : 3177-3190.
- [4] Xu B, Wang JN, Shi FS. Impacts of Ontogenetic and Altitudinal Changes on Morphological Traits and Biomass Allocation Patterns of *Fritillaria unibracteata*[J]. *J Mt Sci*, 2020, 17 ( 1 ) : 83-94.
- [5] McCarthy MC, Enquist BJ. Consistency Between an Allometric Approach and Optimal Partitioning Theory in Global Patterns of Plant Biomass Allocation[J]. *Funct Ecol*, 2007, 21 ( 4 ) : 713-720.
- [6] 郑志远, 余生, 黄演福, 等. 植物激素与超声波对横经席种子萌发的影响[J]. *贵州农业科学*, 2020, 48 ( 2 ) : 12-14.
- [7] Adenuga AA, Oyekunle J, Idowu OO. Pathway to Reduce Free Fatty Acid Formation in *Calophyllum inophyllum* Kernel Oil: A Renewable Feedstock for Biodiesel Production[J]. *J Clean Prod*, 2021, 316: 128222.
- [8] Aneeque M, Alshahrani S, Kareemullah M, et al. The Combined Effect of Alcohols and *Calophyllum inophyllum* Biodiesel Using Response Surface Methodology Optimization[J]. *Sustainability*, 2021, 13 ( 13 ) : 7345-7345.
- [9] Patil AD, Freyer AJ, Eggleston DS, et al. The Inophyllums, Novel Inhibitors of HIV-1 Reverse Transcriptase Isolated from the Malaysian Tree, *Calophyllum inophyllum* Linn[J]. *J Med Chem*, 1993, 36 ( 26 ) : 4131-4138.
- [10] Zou J, Jin DZ, Chen WL, et al. Selective Cyclooxygenase-2 Inhibitors from *Calophyllum membranaceum*[J]. *J Nat Prod*, 2005, 68 ( 10 ) : 1514-1518.
- [11] Chen GY, Zhu GY, Han CR, et al. A New Pyranoxanthone from the Stems of *Calophyllum membranaceum*[J]. *Arkivoc*, 2008, 41 ( 4 ) : 249-254.
- [12] 赵军, 蒋宗林, 虞俊, 等. 薄叶红厚壳根的化学成分研究[J]. *海南师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 22 ( 1 ) : 39-41.
- [13] Ming M, Zhang X, Chen HF, et al. RXR Alpha Transcriptional Inhibitors from the Stems of *Calophyllum membranaceum*[J]. *Fitoterapia*, 2016, 108: 66-72.
- [14] Zhu LJ, Yi S, Xue L, et al. C-glycosides from the Stems of *Calophyllum membranaceum*[J]. *J Asian Nat Prod Res*, 2018, 20 ( 1 ) : 49-54.
- [15] 刘丁广, 黄演福, 黎荣欣, 等. 横经席规范化栽培技术[J]. *现代农业科技*, 2016, 12: 102-103.
- [16] 杜虎, 曾馥平, 宋同清, 等. 广西主要森林土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2016, 40 ( 4 ) : 282-291.
- [17] 马华, 王云琦, 王力, 等. 近20年广西石漠化区植被覆盖度与气候变化和农村经济发展的耦合关系[J]. *山地学报*, 2014, 32 ( 1 ) : 38-45.
- [18] 覃卫坚, 李栋梁. 近50年来广西各级降水气候变化特征分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29 ( 4 ) : 666-676.
- [19] 温远光, 李治基, 李信贤, 等. 广西植被类型及其分类系统[J]. *广西科学*, 2014, 21 ( 5 ) : 484-513.
- [20] Yu GZ. Random Talk about Main Soils in Guangxi[J]. *Land Resour South China*, 2007, ( 3 ) : 39-40.
- [21] Dovrat G, Meron E, Shachak M, et al. Plant Size is Related to Biomass Partitioning and Stress Resistance in Water-Limited Annual Plant Communities[J]. *J Arid Environ*, 2019, 165: 1-9.
- [22] Chen R, Ran J, Huang H, et al. Life History Strategies Drive Size-Dependent Biomass Allocation Patterns of Dryland Ephemerals and Shrubs[J]. *Ecosphere*, 2019, 10 ( 4 ) : e02709.
- [23] 罗永开, 方精云, 胡会峰. 山西芦芽山14种常见灌木生物量模型及生物量分配[J]. *植物生态学报*, 2017, 41 ( 1 ) : 115-125.
- [24] Song SS, Leng HB, Feng SC, et al. Biomass Allocation

- Pattern of Urban Shrubs in the Yangtze River Delta Region, China—A Field Observation of 13 Shrub Species[J]. *Urban For Urban Green*, 2021, 63: 127228.
- [25] Reich PB, Luo Y, Bradford JB, et al. Temperature Drives Global Patterns in Forest Biomass Distribution in Leaves, Stems, and Roots[J]. *Proc Nat Acad Sci USA*, 2014, 111 (38): 13721–13726.
- [26] Wang LM, Li LH, Chen X, et al. Biomass Allocation Patterns Across China's Terrestrial Biomes[J]. *PLoS One*, 2014, 9 (4): e93566.
- [27] 许昊, 吴宏玥, 王占军, 等. 立地条件对宁夏中部干旱风沙区柠条生物量分配格局的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42 (12): 91–100.
- [28] Qi Y, Wei W, Chen C, et al. Plant Root–Shoot Biomass Allocation over Diverse Biomes: A Global Synthesis[J]. *Glob Ecol Conserv*, 2019, 18: e00606.
- [29] Xu MH, Zhang SX, Wen J, et al. Multiscale Spatial Patterns of Species Diversity and Biomass Together with Their Correlations Along Geographical Gradients in Subalpine Meadows[J]. *PLoS One*, 2019, 14 (2): e0211560.
- [30] 李鑫, 李昆, 段安安, 等. 不同地理种源云南松幼苗生物量分配及其异速生长[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41 (4): 41–50.
- [31] Liu R, Yang X, Gao R, et al. Allometry Rather than Abiotic Drivers Explains Biomass Allocation Among Leaves, Stems and Roots of *Artemisia* Across a Large Environmental Gradient in China[J]. *J of Ecol*, 2020, 109 (2): 1026–1040.
- [32] 潘瑞焱, 王晓菁, 李娘辉. *植物生理学*[M]. 北京: 北京高等教育出版社, 2017.
- [33] Poorter H, Jagodzinski AM, Ruiz–Peinado R, et al. How Does Biomass Distribution Change with Size and Differ Among Species an Analysis for 1200 Plant Species from Five Continents[J]. *New Phytol*, 2015, 208 (3): 736–749.
- [34] Niklas KJ, Enquist BJ. On the Vegetative Biomass Partitioning of Seed Plant Leaves, Stems, and Roots[J]. *Amer Naturalist*, 2002, 159 (5): 482–497.
- [35] 王淑彬, 徐慧芳, 宋同清, 等. 广西森林土壤主要养分的空间异质性[J]. *生态学报*, 2014, 34 (18): 5292–5299.

(收稿日期 2023年10月8日 编辑 郑丽娥)