

# UC Berkeley

## UC Berkeley Previously Published Works

### Title

Dynamic characteristics and its influencing factors of the volatile carbon content of *Pinus koraiensis* at different diameter classes

### Permalink

<https://escholarship.org/uc/item/29m015bk>

### Journal

Beijing Linye Daxue Xuebao/Journal of Beijing Forestry University, 41(1)

### ISSN

1000-1522

### Authors

Zhu, Y  
Gao, L  
Jia, B  
et al.

### Publication Date

2019

### DOI

10.13332/j.1000-1522.20180289

### Copyright Information

This work is made available under the terms of a Creative Commons Attribution License, available at

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Peer reviewed

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20180289

# 不同径级红松挥发性碳贡献变化特征及其影响因子分析

朱一泓 高露双 贾勃 张平瑞 王寅鹏 欧礼金

(北京林业大学林学院,北京林业大学森林资源和环境管理国家林业和草原局重点开放性实验室,  
国家林业和草原局森林经营工程技术研究中心,北京 100083)

**摘要:**【目的】植物含碳率是研究森林碳储量的关键因素之一,精确测定含碳率及其影响因子有利于提高森林碳储量的预测准确率。【方法】以吉林蛟河阔叶红松成熟林固定样地内红松为研究对象,获取冷冻干燥、自然干燥和烘干干燥3种处理方式下的红松茎干连年含碳率,对比分析3种处理方式下不同径级红松含碳率年际变化特征。发现自然干燥含碳率波动较大,因此本文的挥发性碳贡献由冷冻干燥含碳率和烘干干燥含碳率来量化。通过比较大径级红松挥发性碳贡献年际变化特征,分析其在时间尺度上的差异与稳定性,并构建挥发性碳贡献与气候因子和生长量等因子的相关关系,揭示影响挥发性碳贡献的主要因子。【结果】(1)不同干燥方式仅对大径级红松的含碳率的测定结果有显著影响( $P < 0.05$ ),而3种干燥方式下小径级红松含碳率不存在显著差异。(2)红松挥发性碳贡献有一定阶段性。小径级红松挥发性碳贡献较大径级波动更大,小径级红松挥发性碳贡献最高和最低值分别为24.46%和0.03%,大径级红松挥发性碳贡献最高和最低值则为9.72%和1.18%,同时大径级红松挥发性碳贡献存在明显的滞后现象。(3)红松挥发性碳贡献主要受到冬季温度的影响,其中小径级红松挥发性碳贡献仅与当年12月的温度呈现显著负相关( $P < 0.05$ ),而大径级红松则与上一年12月的温度呈显著负相关( $P < 0.05$ )。(4)当年1月降水对大径级红松挥发性碳贡献有促进作用( $P < 0.05$ ),而当年6月的干旱指数对小径级红松挥发性碳贡献有促进作用( $P < 0.05$ )。推测挥发性碳可能与树木非生长季的生理活动有关。【结论】在评价森林碳储量时要考虑挥发性碳贡献,同时不能忽视径级差异的影响及挥发性碳的时间稳定性,从而实现对不同特征林分碳储量的精确估算。

**关键词:**挥发性碳;红松;径级;气候因子

**中图分类号:**S718.55+6;S791.247 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2019)01-0010-09

**引文格式:**朱一泓,高露双,贾勃,等.不同径级红松挥发性碳贡献变化特征及其影响因子分析[J].北京林业大学学报,2019,41(1):10-18. Zhu Yihong, Gao Lushuang, Jia Bo, et al. Dynamic characteristics and its influencing factors of the volatile carbon content of *Pinus koraiensis* at different diameter classes [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(1): 10-18.

## Dynamic characteristics and its influencing factors of the volatile carbon content of *Pinus koraiensis* at different diameter classes

Zhu Yihong Gao Lushuang Jia Bo Zhang Pingrui Wang Yinpeng Ou Lijin

(College of Forestry, Key Laboratory of Forest Resources &amp; Environmental Management of State Forestry and Grassland Administration, Research Center of Forest Management Engineering of State Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] Carbon content is one of the key factors when estimating carbon storage. Accurate measurement of carbon content and finding its influencing factors can improve the accuracy of

收稿日期:2018-09-14 修回日期:2018-11-27

基金项目:国家自然科学基金项目(31600509),北京市级大学生创新创业训练项目(S201710022002)。

第一作者:朱一泓。主要研究方向:森林经理学。Email:a20090439@163.com 地址:100083北京市海淀区清华东路35号北京林业大学117信箱。

责任作者:高露双,博士,副教授。主要研究方向:树木生长过程模拟。Email:gaolushuang@bjfu.edu.cn 地址:同上。

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

the prediction of carbon storage. [ **Method** ] Tree cores collected in the plots of mature forests in the broadleaved Korean pine forest of Jiaohe, northeastern China were taken as samples in this study. Carbon content of frozen, oven-dried and natural air drying samples of *Pinus koraiensis* from 1987 to 2016 were attained in order to qualify the volatile carbon content and to compare the characteristics of the interannual variation of the carbon content attained by different drying methods. In this passage, volatile carbon content was qualified with frozen and oven-dried carbon content considering the relative stability of them. The relationship between volatile carbon content and three climate factors as well as size class and annual growth was developed. [ **Result** ] (1) The results showed that significant difference among carbon content of different drying methods was only found in trees of large diameter class. (2) The fluctuation characteristics of volatile carbon contribution differed in small and large class and the interannual variations were more remarkable in small class. The volatile carbon contribution reached 24.46% in small class and 9.72% in large class. Also, the volatile carbon contribution in large class lagged behind that of small class. (3) The volatile carbon contribution was mainly limited by the temperature in winter. In small class, the volatile carbon contribution showed negative response to temperature in December of that very year, while in large class, it responded negatively to the temperature in last December. (4) The precipitation of this January had positive influence in volatile carbon contribution of large class and the volatile carbon contribution of small class showed positive response to PDSI of this June, which inspired us that the effect of volatile carbon may be related to trees' dormancy or other defensive mechanisms. [ **Conclusion** ] Therefore, it is necessary to take volatile carbon content into account while estimating the forest carbon storage without ignoring the influence of size class. It is also necessary to make a deep analysis of the influencing factors of volatile carbon contribution.

**Key words:** volatile carbon; *Pinus koraiensis*; diameter class; climate factor

植物含碳率是评估森林碳储量的基础数据<sup>[1]</sup>。目前主要采用湿烧法和干烧法来测定植物有机碳含量<sup>[1-4]</sup>。干烧法通过烘干的方式排除样芯中残留的水分对测定结果的影响,精度远高于湿烧法且利用更为广泛,先后应用到巴拿马柚木(*Tectona grandis*)<sup>[5]</sup>、土耳其西北部欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)林<sup>[6]</sup>和东北林区不同尺度森林<sup>[4]</sup>含碳率的相关研究。然而,采用干烧法时不同的干燥方式将影响含碳率数据的准确性。Lamlom等<sup>[7]</sup>对北美41个树种样本分别采用自然干燥和烘干干燥两种处理方式后发现烘干所得的含碳率显著低于自然干燥处理方式下测得的含碳率。Martin等<sup>[8]</sup>采用冷冻干燥和烘干干燥两种处理后测得的含碳率也存在显著差异,并提出挥发性碳的存在。

挥发性碳被认为是造成树木间总含碳量差异的主要原因<sup>[9]</sup>,不同树种和器官挥发性碳含量差异显著。在中国东北地区,3种被子植物的挥发性碳平均占比1.77%,而黄花落叶松(*Larix olgensis*)的挥发性碳平均占比3.47%<sup>[10]</sup>,树皮的挥发性碳含量高于茎干,其中树皮的挥发性碳含量平均5.8%,茎干为3.0%<sup>[11]</sup>。已有研究表明,若忽略挥发性碳贡献,会对巴拿马地区森林碳储量的估测造成 $2.48\% \pm 1.28\%$  (SD)的偏低误差<sup>[8]</sup>。长白山地区不同树种碳挥发平均达到2.2%,忽视碳挥发将导致中国东

北部森林碳储量的估算出现4%~6%的误差<sup>[9]</sup>,挥发性碳是评估碳储量时不容忽视的部分,因此有必要进一步量化挥发性碳贡献。森林生态系统碳储量和碳密度的变化受到气候因子的影响<sup>[11]</sup>,近年来东北地区温度显著升高<sup>[12]</sup>,然而前人的研究中缺少挥发性碳与气候因子相关关系的研究,且较少涉及年际变化。本文拟以长白山地区主要优势树种红松(*Pinus koraiensis*)为例,对比分析冷冻干燥、自然干燥和烘干干燥3种处理方式下不同径级红松含碳率年际变化特征,量化挥发性碳贡献及其在时间尺度上的稳定性,通过构建不同径级挥发性碳贡献与气候因子和生长量的相关关系,以期揭示阔叶红松林大小径级红松挥发性碳贡献的变化特征及其影响因子,为精确预估森林碳储量提供理论依据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况及样本采集

研究区位于吉林省蛟河林业实验区管理局(43°57'~43°58'N、127°44'~127°45'E),海拔300~517 m,该区域属于受季风影响的温带大陆性山地气候,年平均气温为3.8℃,最热月7月平均气温为21.7℃,最冷月1月平均气温为-18.6℃,年均降水量为700~800 mm。土壤为山地暗棕色森林土壤,土层

平均厚度为 20 ~ 100 cm。该区原始植被属于北温带植物区系的针阔混交林,植物种类多样,分布复杂。主要乔木树种有红松、沙松(*Abies holophylla*)、千金榆(*Carpinus cordata*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、白牛槭(*Acer mandshuricum*)、色木槭(*Acer mono*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、大青杨(*Populus ussuriensis*)、春榆(*Ulmus davidiana* var. *japonica*)、裂叶榆(*Ulmus laciniata*)和山槐(*Maackia amurensis*)等<sup>[13]</sup>。

2017年夏季在吉林省蛟河实验林场阔叶红松林成熟林设置面积约为 0.1 hm<sup>2</sup>的样圆,进行样地基础调查后,对胸径 ≥ 5 cm 的红松进行取样。每株树北向取 3 个样,其中一个采集后即置于冰袋保存。共取得大径级样芯 30 根(35 ~ 60 cm)和小径级 27 根(10 ~ 20 cm)。除冰袋中的样芯放入冰柜中保存,其余野外取得的树芯带回实验室自然风干后,用乳白胶固定并进行标号。样芯处理结束后进行标点,便于进行年轮宽度的测定和交叉定年。为避免样品污染,所有年份标注在木槽上进行。运用 WinDendro 软件和 LinTab 5 树轮宽度测量仪器测量树轮宽度,测量精度达到 0.01 mm 水平,待年轮宽度测量完毕后,利用 COFECHA 软件对样本序列进行相关性检验,以保证定年与测量的准确,最终选择相关性高且年轮较为清晰的成熟林大径级样芯 21 根(胸径(47.14 ± 5.75) cm)和小径级样芯 14 根(胸径(13.13 ± 4.47) cm)进行含碳率测定。

## 1.2 含碳率测定方法

将从同一棵树取得的 3 根样芯定年后分别采用烘干法、自然干燥法和冷冻法干燥。烘干法干燥的样芯在 85 °C 的烘箱中烘干至恒质量。冷冻法干燥在小型真空冷冻干燥机 BiLon (FD-1A-5D) 中进行。自然干燥即为自然风干干燥。对干燥后的样芯自外向内依次在显微镜下用手术刀逐轮剥离。为防止碳源污染,样品在玻璃垫板上切割。将相同年份的样品混合后用锡杯盛装,每份燃烧样品质量控制在 2 ~ 3 mg。含碳率测定通过 PE2400 SERIES II 分析仪进行,在纯度为 99.99% 高纯氧环境下,样品在 1 200 °C 的燃烧炉中充分燃烧,分析燃烧过程中释放的 CO<sub>2</sub> 量,推算样品中的含碳百分比。每个样品的测量时间为 5 min,整个测量过程由电脑自动记录测量数据。

## 1.3 挥发性碳贡献的计算

利用冷冻干燥含碳率和烘干干燥含碳率来量化挥发性碳的贡献,挥发性碳贡献计算公式如下:

$$P_{\text{vol}} = \frac{C_{\text{vol}}}{C_{\text{f}}} = \frac{C_{\text{f}} - C_{\text{h}}}{C_{\text{f}}}$$

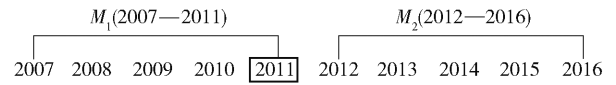
式中: $P_{\text{vol}}$  为挥发性碳贡献, $C_{\text{vol}}$  为挥发性碳含碳率, $C_{\text{f}}$  为冰冻干燥含碳率, $C_{\text{h}}$  为烘干干燥含碳率。若计算得到的  $P_{\text{vol}}$  为负值则记为 0,即挥发性碳贡献为 0。

## 1.4 生长变化百分率

本文采用平均值法计算生长变化百分率:

$$G = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100\%$$

式中: $G$  是生长释放百分率, $M_1$  和  $M_2$  分别是前 5 年和随后 5 年年轮宽度的平均值<sup>[14]</sup>。例如 2011 年的生长变化值计算见图 1。



2011 年的生长变化值为  $(M_2 - M_1) / M_1$ , 其中  $M_1$ 、 $M_2$  分别为前 5 年和后 5 年年轮宽度的平均值。Growth change in 2011 is  $(M_2 - M_1) / M_1$ , where  $M_1$ ,  $M_2$  refer to the mean ring width of the last five years and the after five years.

图 1 生长变化值计算方法

Fig. 1 Calculation methods of growth change

生长变化百分率可以反映树木生长的释放( $G > 0$ )或抑制情况( $G < 0$ )。为进一步突出抑制(释放)现象,本文将绝对值小于 20% 的生长变化百分率值进行了剔除,认为大于 20% 的值才具有抑制(释放)潜能,将 20% ~ 25% 定义为轻度抑制(释放),25% ~ 50% 为中度抑制(释放),大于 50% 为主要抑制(释放)。

## 1.5 气候数据来源

本文所用气候数据均从皇家荷兰气候研究协会网站(<https://climexp.knmi.nl>)获取,为 CRU TS401 0.5xp.knm 的格点数据(43°48' ~ 44°18' N, 127°30' ~ 128°E)。鉴于气候因子影响的滞后性,本研究选取上一年和当年的降水、温度和帕默尔干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)等共计 1 170 个气候指标进行相关性分析。

所有数据经 Excel 处理后,采用 R 软件进行非参数检验(Kruskal-Wallis 检验),分别比较 3 种处理下不同径级红松含碳率的差异,并建立与气候因子、生长量等因子的相关关系,利用 5 年滑动标准差(Moving standard deviation, MSD)来检验红松含碳率的时间尺度稳定性,采用 R 3.4.1 完成统计分析并绘制相关图形。

## 2 结果与分析

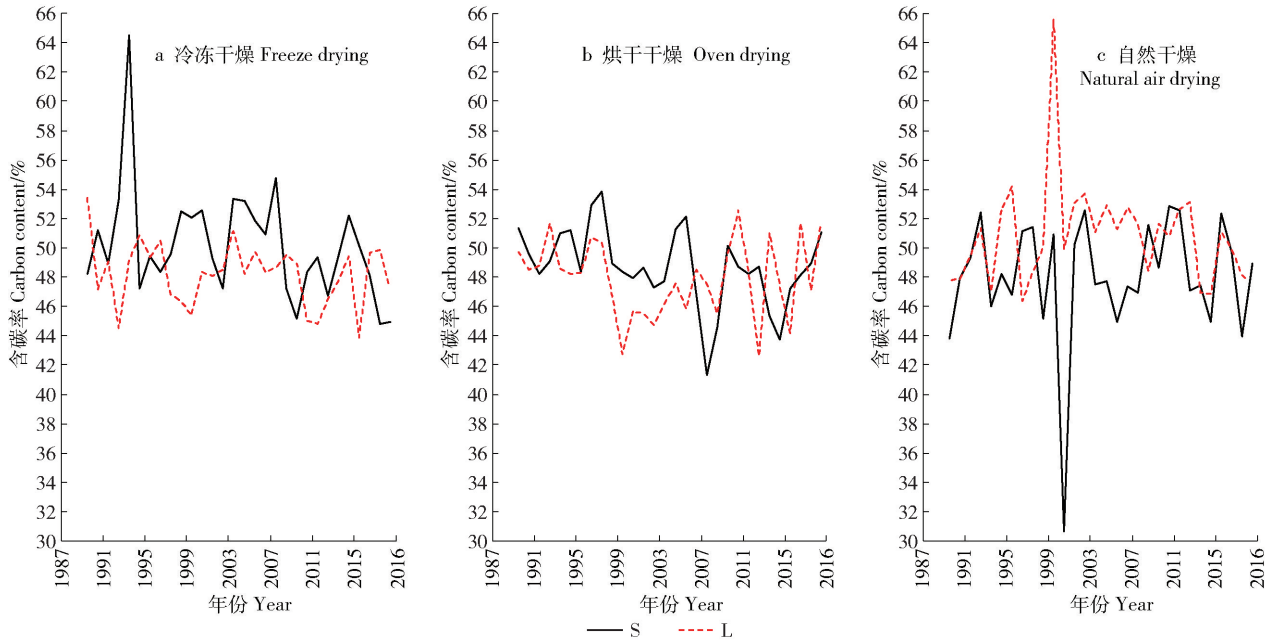
### 2.1 不同干燥方式对大小径级红松含碳率测定结果的影响

成熟林不同干燥方式下大径级红松的含碳率差异显著( $P < 0.05$ ),自然干燥含碳率 > 冷冻干燥含碳率 > 烘干干燥含碳率,而 3 种干燥方式下小径级

红松含碳率不存在显著差异。

3 种干燥方式下含碳率在时间尺度上的稳定性也有所不同。自然干燥处理下的含碳率波动最大, 小径级  $2.26 < MSD < 8.86$ , 大径级  $1.31 < MSD <$

7.00。冷冻干燥和烘干干燥处理下测得的含碳率相对较稳定, 除小径级冷冻干燥含碳率在 1991—1993 年间  $MSD > 4.5$ , 1994 年后大小径级红松的冷冻及烘干含碳率  $1.09 < MSD < 4.03$  (图 3)。



S 代表小径级, L 代表大径级。下同。S means small diameter class, L means large diameter class. The same below.

图 2 不同干燥方式下大小径级红松含碳率年际变化

Fig. 2 Interannual dynamics of carbon content of *Pinus koraiensis* at different diameter classes under different drying methods

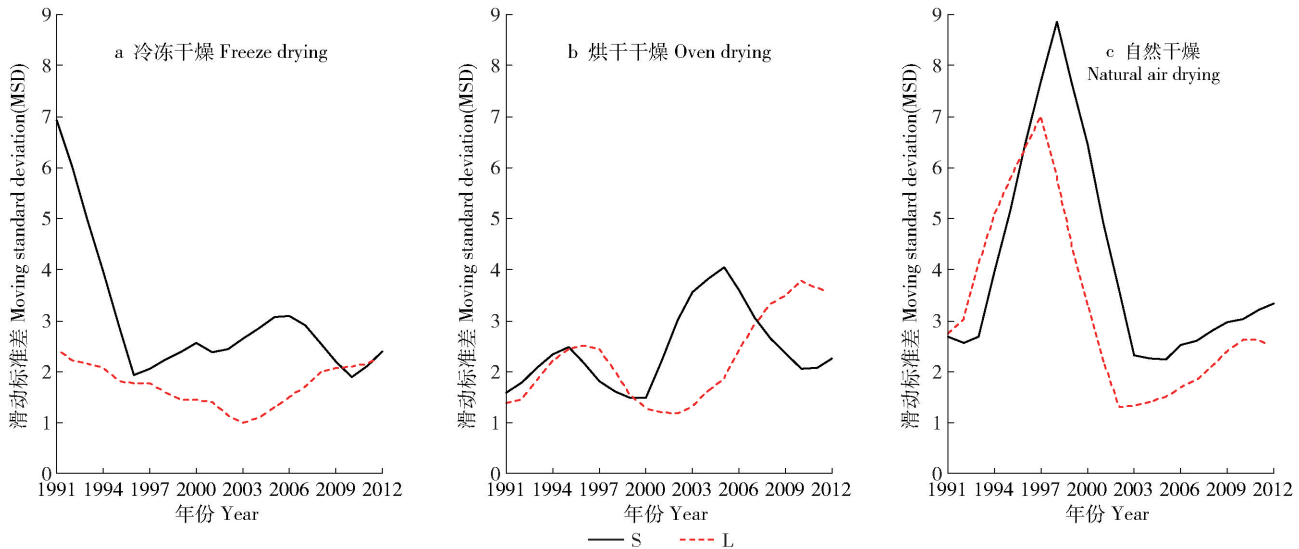


图 3 不同干燥方式下大小径级红松含碳率滑动标准差变化

Fig. 3 Moving standard deviation of annual carbon content of *Pinus koraiensis* at different diameter classes under different drying methods

## 2.2 不同径级红松挥发性碳贡献年际变化特征

由于自然干燥含碳率波动较大, 本文选取冷冻干燥含碳率和烘干干燥含碳率来量化挥发性碳的贡献。挥发性碳贡献的年际变化具有一定阶段性, 分别在 1989—1994 年间, 2004—2007 年间和 2010—2014 年间挥发性碳贡献达到峰值, 其中大径级挥发性碳贡献存在明显的滞后现象。例如在 1991、2005 和 2009 年小径级挥发性碳贡献达到峰值, 大径级挥

发性碳贡献则在后一年达到峰值。小径级红松挥发性碳贡献较大径级波动更大, 小径级红松挥发性碳贡献最高和最低值分别为 24.46% 和 0.03%, 先后在 1991、2005 和 2012 年达到了 20.93%、24.46%、16.24%, 大径级红松挥发性碳贡献最高和最低值则为 9.72% 和 1.18% (图 4)。小径级挥发性碳贡献年际变化更为显著 ( $0.018 < MSD < 0.060$ , 图 5), 较大径级红松 ( $0.021 < MSD < 0.040$ , 图 5) 的波动幅

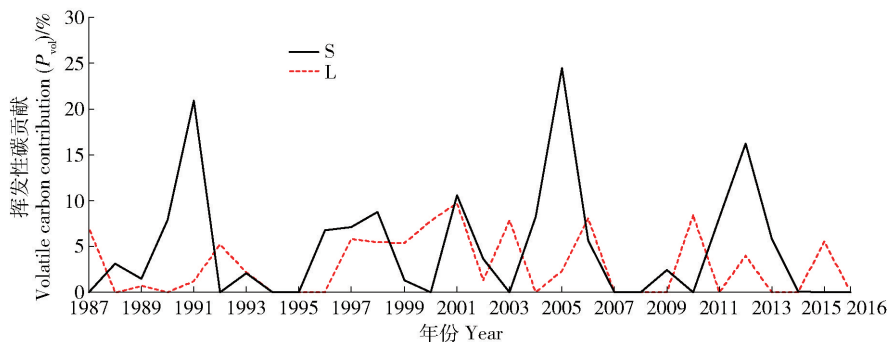


图4 大小径级红松挥发性碳贡献年际变化

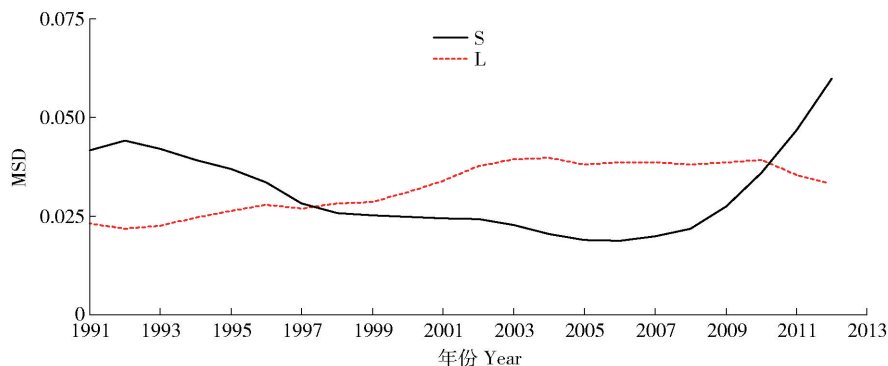
Fig. 4 Interannual dynamics of volatile carbon contribution of *Pinus koraiensis* at different diameter classes

图5 大小径级红松挥发性碳贡献滑动标准差变化

Fig. 5 Moving standard deviation of annual contribution of volatile carbon content of *Pinus koraiensis* at different diameter classes

度更明显。

### 2.3 红松挥发性碳贡献的影响因子分析

#### 2.3.1 挥发性碳贡献与气候因子的相关关系

红松的挥发性碳贡献对冬季气候因子较为敏感。大小径级红松挥发性碳贡献均受到冬季温度的抑制作用,大径级红松挥发性碳贡献与上一年12月的温度呈显著负相关( $P < 0.05$ ),小径级红松则与当年12月的温度呈现显著负相关( $P < 0.05$ ) (表1)。冬季降水仅对大径级红松挥发性碳贡献存在显著影响,当年1月的降水对大径级红松挥发性碳有促进作用( $P < 0.05$ ),对小径级红松的挥发性碳贡献影响则不显著(表2)。除了冬季气候因子,当年6月的PDSI对小径级红松挥发性碳贡献有促进作用( $P < 0.05$ ) (表3)。然而,在极端气候条件下,大小径级红松挥发性碳含量都有显著提升,2001年和2012年分别出现极端低温事件和干旱事件,挥发性碳含量分别达到了9.72%和3.99% (大径级),10.56%和16.24% (小径级) (图4)。

#### 2.3.2 生长量与红松挥发性碳贡献的关系

红松挥发性碳贡献与生长量的相关关系不显著,其中当年和上一年生长量对红松挥发性碳贡献的影响均未达到显著性水平,生长变化率也未和挥发性碳贡献表现出显著相关关系(表4)。小径级红

松在1991—2002年间呈现中度抑制,在2000年发生轻度抑制(-24%);大径级在2001—2003、1993—1996年间均出现中度抑制,1992年呈现轻度抑制(-24.67%),仅在2007年发生生长释放现象(3.73%,图6)。在发生生长抑制(释放)的年份及发生生长抑制(释放)后一年,大小径级红松挥发性碳贡献均未表现出明显波动。

## 3 讨论

精确测定树木含碳率对于准确评估森林碳储量是非常重要的。对比3种干燥处理下测得的红松含碳率发现,干燥方式仅对大径级红松的含碳率测定结果有显著影响( $P < 0.05$ ),自然干燥下大径级红松含碳率显著高于烘干和冷冻干燥方式( $P < 0.05$ ),这与Lamlom等<sup>[7]</sup>的研究结果相同。这可能是由于木材中包含很多小分子有机物,如醇类、醛类、酮类、酚类、呋喃、萜类、类异戊二烯等,因此高温烘干样本的过程中会造成一定的碳损失<sup>[9]</sup>。自然干燥样芯中残留的不定量的水分会影响元素分析仪对含碳率的测定,导致自然干燥含碳率的稳定性最差(图3),因此在以后的实验中应尽可能避免采用自然干燥法。另外,尽管小径级红松的挥发性碳贡献波动更大,不同干燥方式下小径级红松的含碳率

表 1 大小径级红松挥发性碳贡献与温度的相关关系

Tab. 1 Correlations between volatile carbon contribution and temperature for *P. koraiensis* of large and small diameter classes

月份 Month	大径级 Large diameter class				小径级 Small diameter class			
	当年温度 Temperature in the very year		上一年温度 Temperature in the previous year		当年温度 Temperature in the very year		上一年温度 Temperature in the previous year	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
1 月 January	-0.27	0.150 7	0.01	0.958 9	-0.32	0.085 4	-0.26	0.172 0
2 月 February	-0.21	0.256 7	-0.02	0.902 0	-0.36	0.050 1	0.01	0.977 2
3 月 March	-0.22	0.246 3	0.05	0.797 8	-0.17	0.381 2	0.13	0.499 7
4 月 April	-0.10	0.615 3	0.26	0.175 8	-0.02	0.930 5	-0.04	0.841 2
5 月 May	0.22	0.253 0	0.17	0.373 2	0.09	0.643 7	-0.08	0.666 3
6 月 June	0.13	0.489 5	-0.06	0.771 0	-0.01	0.977 6	0.31	0.104 7
7 月 July	0.18	0.335 0	0.20	0.286 3	-0.15	0.432 2	0.01	0.961 7
8 月 August	-0.05	0.773 4	0.03	0.870 9	0.05	0.808 5	0.07	0.701 7
9 月 September	0.13	0.506 9	0.09	0.643 0	0.11	0.552 5	-0.04	0.828 2
10 月 October	-0.05	0.787 3	-0.30	0.110 5	0.18	0.330 6	0.20	0.300 3
11 月 November	-0.18	0.339 5	-0.34	0.070 5	0.29	0.116 4	0.33	0.083 2
12 月 December	-0.06	0.768 6	-0.46	0.012 4 *	-0.39	0.032 5 *	-0.17	0.367 4
年平均 Annual mean	-0.22	0.235 7	-0.22	0.257 5	-0.27	0.146 3	-0.04	0.822 6

注: \*  $P < 0.05$  相关性显著。下同。Notes: \* represents significant correlation at  $P < 0.05$  level. The same below.

表 2 大小径级红松挥发性碳贡献与降水的相关关系

Tab. 2 Correlations between volatile carbon contribution and precipitation for *P. koraiensis* of large and small diameter classes

月份 Month	大径级 Large diameter class				小径级 Small diameter class			
	当年降水 Precipitation in the very year		上一年降水 Precipitation in the previous year		当年降水 Precipitation in the very year		上一年降水 Precipitation in the previous year	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
1 月 January	0.38	0.039 8 *	0.32	0.095 8	-0.10	0.590 8	-0.18	0.357 0
2 月 February	-0.05	0.773 2	-0.23	0.230 8	-0.02	0.921 3	0.32	0.088 8
3 月 March	0.11	0.546 7	-0.14	0.475 3	-0.08	0.673 9	-0.05	0.801 2
4 月 April	-0.10	0.585 4	0.19	0.317 7	0.31	0.099 3	-0.14	0.476 9
5 月 May	-0.08	0.669 8	-0.16	0.396 3	-0.01	0.942 4	0.20	0.288 5
6 月 June	-0.20	0.299 6	0.22	0.256 2	0.28	0.129 4	-0.27	0.155 1
7 月 July	-0.06	0.765 5	-0.27	0.159 0	0.17	0.380 7	0.03	0.891 8
8 月 August	0.32	0.084 7	-0.07	0.714 6	-0.07	0.713 8	-0.19	0.326 4
9 月 September	-0.10	0.600 2	-0.17	0.386 6	-0.14	0.468 0	-0.09	0.645 9
10 月 October	0.25	0.182 2	-0.16	0.417 7	-0.23	0.216 2	-0.34	0.072 7
11 月 November	0.09	0.633 2	-0.25	0.193 9	-0.08	0.670 8	0.09	0.633 9
12 月 December	-0.06	0.759 3	-0.04	0.851 9	-0.24	0.199 9	0.22	0.248 6
年平均 Annual mean	0.03	0.892 3	-0.23	0.225 7	0.12	0.528 8	-0.18	0.363 6

并未表现出显著差异,说明干燥方式对小径级红松含碳率测定带来的影响较小,在估算小径级红松的碳储量时冷冻干燥和烘干干燥 2 种处理方式可通用,但在研究小径级红松含碳率年际变化时仍需要

考虑挥发性碳贡献对含碳率测定结果带来的影响。

阔叶红松林成熟林小径级红松中挥发性碳贡献达 20% 以上,其中 2005 年小径级红松挥发性碳贡献高达 24.46%,大径级红松挥发性碳贡献也达到 9% 以上,说明挥发性碳对于茎干总含碳率的贡献不容忽视。本文研究结果进一步证明了挥发性碳的重要性<sup>[8-10]</sup>,且指出随着径级增加,红松挥发性碳贡献年际变化规律存在差异,大径级挥发性碳贡献较为

表3 大小径级红松挥发性碳贡献与 PDSI 的相关关系

Tab. 3 Correlations between volatile carbon contribution and PDSI for *P. koraiensis* of large and small diameter classes

月份 Month	大径级 Large diameter class				小径级 Small diameter class			
	当年 PDSI		上一年 PDSI		当年 PDSI		上一年 PDSI	
	PDSI in the very year		PDSI in the previous year		PDSI in the very year		PDSI in the previous year	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
1月 January	-0.03	0.890 2	-0.06	0.776 5	0.04	0.849 9	0.21	0.278 7
2月 February	-0.02	0.927 9	-0.08	0.681 9	0.03	0.892 2	0.26	0.175 4
3月 March	0.03	0.876 5	-0.13	0.516 7	0.03	0.885 0	0.24	0.204 2
4月 April	0.04	0.831 0	-0.06	0.755 9	0.11	0.577 0	0.15	0.439 0
5月 May	-0.03	0.866 6	-0.17	0.379 4	0.15	0.414 2	0.21	0.264 3
6月 June	-0.09	0.653 8	-0.06	0.749 1	0.37	0.041 2*	0.07	0.708 4
7月 July	0.00	0.986 2	-0.08	0.665 1	0.36	0.054 1	0.10	0.595 4
8月 August	0.08	0.689 5	-0.11	0.555 8	0.22	0.232 7	0.07	0.710 2
9月 September	0.08	0.663 7	-0.18	0.348 9	0.09	0.618 5	0.04	0.830 9
10月 October	0.16	0.396 6	-0.16	0.409 5	0.07	0.698 0	0.03	0.876 5
11月 November	0.17	0.378 2	-0.17	0.364 9	0.07	0.714 1	0.07	0.720 6
12月 December	0.15	0.433 1	-0.12	0.520 1	0.05	0.809 5	0.05	0.807 9
年平均 Annual mean	0.06	0.762 5	-0.14	0.480 8	0.15	0.436 1	0.14	0.460 6

表4 大小径级红松挥发性碳贡献与生长量及生长变化率相关关系

Tab. 4 Correlations between volatile carbon contribution and tree ring growth and growth rate of *Pinus koraiensis* at different diameter classes

项目 Item	当年生长量 Increment		上一年生长量 Increment		当年生长变化率 Growth		上一年生长变化率 Growth	
	in the very year		in the previous year		change rate in the very year		change rate in the previous year	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
大径级 Large diameter class	-0.10	0.612 8	-0.13	0.504 4	0.04	0.879 4	0.08	0.723 7
小径级 Small diameter class	-0.04	0.836 2	0.02	0.906 4	0.10	0.681 9	0.13	0.596 2

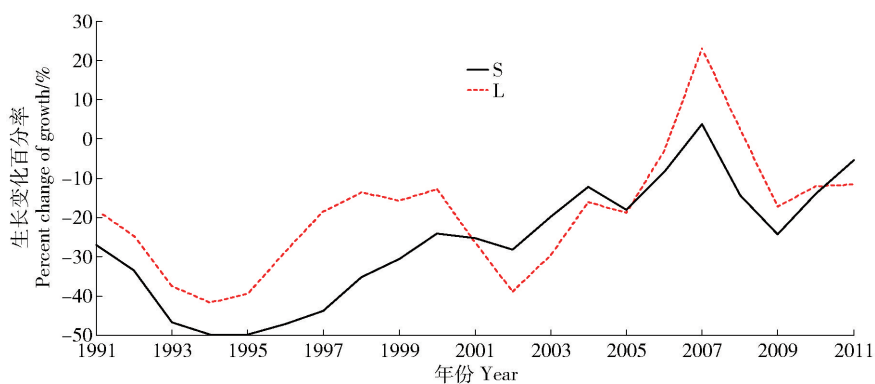


图6 大小径级红松生长变化百分率

Fig. 6 Percent change of growth of *Pinus koraiensis* at different diameter classes

稳定,并且与小径级红松挥发性碳贡献的变化相比存在一定滞后性。Kerrie 等<sup>[16]</sup>发现在一定的光照条件下,幼苗的每日净固碳量(Net daily carbon gain)会随着径级增大显著下降。Martin<sup>[17]</sup>等也发现树木含碳率随径级增大而下降,随着树木的生长,原本用于合成木质素的能量转而用于合成次挥发性碳物质,从而导致烘干含碳率的下降和挥发性碳

贡献的提高,即幼苗长成大树的过程中降低的木质素含量会被挥发性碳或其他含碳有机物含量的增高所补偿,最终造成不同径级树木挥发性碳贡献差异。含碳率在时间尺度上的差异与稳定性有利于了解不同树种应对不良环境时生活史策略的差异<sup>[8,15]</sup>,是预估森林碳储量动态的关键因素之一。评估阔叶红松林森林碳储量时需重视长白山地区红松挥发性碳



贡献,忽略径级差异对挥发性碳贡献的影响及其时间稳定性将导致森林碳储量被低估。

通常认为非生长季树木生长停滞,树干中碳储量基本固定,但除小径级挥发性碳与当年6月PDSI呈显著相关外(表3),挥发性碳贡献主要与非生长季气候因子呈现显著相关(表1、2),且不同径级红松挥发性碳贡献对气候因子的响应存在差异。当年1月的降水对大径级红松挥发性碳贡献有促进作用( $P < 0.05$ ),这可能是由于冬季深厚的积雪是非生长季红松获得生理活动必需的水分和其他营养元素来维持非生长季水分代谢的基本途径之一<sup>[18]</sup>。但对小径级红松而言,当年6月的PDSI是影响挥发性碳贡献的主要因素( $P < 0.05$ )。PDSI综合考虑了水分亏缺量和持续时间对于干旱程度的影响,具有较好的时空比较性,能更好的评估干旱程度<sup>[19]</sup>,因此尽管小径级挥发性碳贡献并没有表现出与降水的显著相关,却和6月的PDSI呈现显著相关,干旱能促进小径级红松挥发性碳贡献的积累,挥发性碳贡献可能与小径级红松的抗旱机理有关。在非生长季,森林主要生理活动从光合吸收转变为呼吸释放,但吴家兵等<sup>[20]</sup>对长白山红松针阔混交林非生长季的CO<sub>2</sub>通量进行连续监测后,发现当温度低于生物学最低温度时林分仍有数小时表现为CO<sub>2</sub>吸收,由此推断红松在低温时可能仍进行着微弱的光合作用。但红松挥发性碳贡献并未像光合作用速率一样与温度呈现正相关,相反大小径级红松的挥发性碳贡献均与冬季温度呈负相关。考虑到在出现低温、干旱等极端气候事件的年份,挥发性碳贡献都出现了显著提升,这意味着挥发性碳的存在可能与树木休眠等对抗不良环境的生理反应有关。越冬常绿植物需在冬季维持正的碳收益来维持生长和存活,常绿植物光合作用如何适应冬季低温是森林生态学一直以来的研究热点之一<sup>[21]</sup>,探究挥发性碳的成分组成将有利于我们理解植物应对冬季低温高光胁迫的策略。综上,推测挥发性碳贡献也许与树木在非生长季的生理活动有关,并和植物抗逆性密切联系,但挥发性碳贡献是否可作为衡量不同树种抗逆性的指标还有待进一步验证。

本文虽未发现生长对不同径级红松挥发性碳贡献存在显著影响,但烘干干燥下的小径级红松含碳率表现出了与生长抑制的显著负相关关系( $P < 0.05$ ),在成熟林大径级内却没有表现出显著关系。林内不同径级树木之间非对称竞争下资源分配不均很可能是导致小个体含碳率受到生长抑制影响的主要因素<sup>[22]</sup>,而挥发性碳贡献并未表现出与生长抑制的显著相关关系,可能是由于所选成熟林林分在过

去30年中大多呈现轻度抑制,生长抑制(释放)对挥发性碳贡献的影响无从体现,因此,有必要就非对称竞争下挥发性碳贡献差异进行深入研究。

**致谢** 感谢工学院张扬老师提供冷冻干燥机器保证本实验可顺利进行,感谢黄思琪学姐、唐睿琳学姐和郝珉辉学长在冷冻干燥机和元素分析仪使用方面上的耐心指导与帮助。

## 参 考 文 献

- [1] 樊星,田大伦,樊巍,等. 黄淮海平原主要农林复合树种的含碳率研究[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(6):85-87,93.  
Fan X, Tian D L, Fan W, et al. Carbon content of main agroforestry tree species in the North China Plain [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34(6): 85-87, 93.
- [2] 刘维,张晓丽,马菁. 鹞峰国家森林公园主要乔木树种含碳率分析[J]. 西北林学院学报,2011,26(5):214-218.  
Liu W, Zhang X L, Ma J. Carbon content rate analysis on the main arbor species in Jiufeng National Forest Park [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(5): 214-218.
- [3] 季波,何建龙,李娜,等. 宁夏贺兰山主要森林树种含碳率分析[J]. 水土保持通报,2015,35(2):332-335.  
Ji B, He J L, Li N, et al. Carbon content rate analysis in main tree species of forest in Helan Mountain of Ningxia Area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2): 332-335.
- [4] 于颖,范文义,李明泽. 东北林区不同尺度森林的含碳率[J]. 应用生态学报,2012,23(2):341-346.  
Yu Y, Fan W Y, Li M Z. Forest carbon rates at different scales in Northeast China forest area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(2): 341-346.
- [5] Margat K, Alvaro C, Tim M, et al. Carbon storage of harvest-age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panama [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 173: 213-225.
- [6] Doganay T. Carbon concentrations of tree components, forest floor and understorey in young *Pinus sylvestris* stands in north-western Turkey [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2009, 24: 394-402.
- [7] Lamlo S H, Savidge R A. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species [J]. Biomass & Bioenergy, 2003, 25: 381-388.
- [8] Martin A R, Thomas S C. A reassessment of carbon content in tropical trees [J/OL]. PLoS One, 2011, 6(8): e23533 [2017-11-10]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023533>.
- [9] Gao B L, Anthony R T, Han Y H, et al. Variation in total and volatile carbon concentration among the major tree species of the boreal forest [J]. Forest Ecology and Management, 2016, 375: 191-199.
- [10] Thomas S C, Malczewski G. Wood carbon content of tree species in Eastern China: interspecific variability and the importance of the volatile fraction [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85: 659-662.
- [11] 范春楠. 吉林省森林植被碳估算及其分布特征 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.  
Fan C N. The carbon distribution characteristic and storage of

- forest vegetation in Jilin Province [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [12] 刘实, 闫敏华, 隋波. 东北三省冬季气温变化的有关研究进展 [J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(6): 357-361  
Liu S, Yan M H, Sui B. Advances in the research of winter air temperature variation of three Provinces in Northeast China [J]. Advances in Climate Change Research, 2009, 5(6): 357-361.
- [13] 李建, 彭鹏, 何怀江, 等. 采伐对吉林蛟河针阔混交林空间结构的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 37(9): 48-57.  
Li J, Peng P, He H J, et al. Effects of thinning intensity on spatial structure of multi-species temperate forest at Jiaohe in Jilin Province, northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(9): 48-57.
- [14] 王晓春, 赵玉芳. 黑河胜山自然保护区红松和红皮云杉生长释放判定及解释 [J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1230-1239.  
Wang X C, Zhao Y F. Determination and explanation of the growth and release of Korean pine and *Picea koraiensis* in the Heishan National Nature Reserve of Heihe [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(5): 1230-1239.
- [15] Martin A R, Thomas S C. Size-development changes in leaf and wood chemical traits in two Caribbean rainforest trees [J]. The Physiology Advance Access, 2013, 33(12): 1-13.
- [16] Kerrie M S, Peter B R, Christopher H L. Size-related shifts in carbon gain and growth responses to light differ among rainforest evergreens of contrasting shade tolerance [J]. Oecologia, 2018, 187: 609-623.
- [17] Martin A R, Thomas S C, Zhao Y. Size-dependent changes in wood chemical traits: a comparison of neotropical saplings and large trees [J]. AoB Plants, 2013, 5: 1-14.
- [18] 张慧东, 李军, 赵俊卉, 等. 寒温带非生长季环境气象要素对兴安落叶松影响分析 [J]. 内蒙古农业大学学报, 2007, 28(4): 79-84.  
Zhang H D, Li J, Zhao J H, et al. Analysis of meteorological elements on dahurian larch (*Larix gmelinii*) forest in non-cropping season in cold-temperate zone [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2007, 28(4): 79-84.
- [19] 张宁, 李宝富, 徐彤彤, 等. 1960—2012 年全球胡杨分布区干旱指数时空变化特征 [J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(7): 121-126.  
Zhang N, Li B F, Xu T T, et al. Spatiotemporal variations of drought index in *Populus euphratica* global distribution area during the past 50 years (1960-2012) [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(7): 121-126.
- [20] 吴家兵, 关德新, 施婷婷, 等. 非生长季长白山红松针阔混交林 CO<sub>2</sub> 通量特征 [J]. 林业科学, 2006, 4(9): 1-6.  
Wu J B, Guan D X, Shi T T, et al. Non-growing seasons CO<sub>2</sub> flux of a broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 4(9): 1-6.
- [21] 张强, 郭传友, 张兴旺, 等. 基于光合作用和抗氧化机制的南方铁杉和褐叶青冈越冬策略研究 [J]. 植物研究, 2015, 35(2): 200-207.  
Zhang Q, Guo C Y, Zhang X W, et al. Photosynthesis and antioxidant defense strategies in overwintering plants of *Tsuga chinensis* and *Cyclobalanopsis stewardiana* [J]. Bulletin of Botanical Research, 2015, 35(2): 200-207.
- [22] 范春雨, 张春雨, 赵秀海. 择伐对吉林蛟河阔叶红松林群落结构及动态的影响 [J]. 生态学报, 2017, 37(20): 6668-6678.  
Fan C Y, Zhang C Y, Zhao X H, et al. Effects of selective harvest on community structure and dynamics in a mixed broad-leaved Korean pine forest in Jiaohe, Jilin Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(20): 6668-6678.

(责任编辑 赵勃  
责任编辑 郭忠玲)

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20180165

# 贵州赤水桫欏国家级自然保护区植物群落特征

刘 钦<sup>1</sup> 邓洪平<sup>1</sup> 李宗峰<sup>1</sup> 梁 盛<sup>2</sup> 李丘霖<sup>1</sup> 倪东萍<sup>1</sup>

(1. 西南大学生命科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 赤水桫欏国家级自然保护区管理局, 贵州 赤水 564700)

**摘要:**【目的】本研究以贵州赤水桫欏国家级自然保护区为研究地, 通过分析比较不同植物群落特征, 为有效地保护珍稀濒危植物以及典型的中亚热带常绿阔叶林森林生态系统提供科学依据。【方法】在研究区建立 73 个样地, 通过样方调查, 从物种组成、区系特征、生活型及群落结构等方面对植物群落特征进行分析。【结果】结果表明: (1) 研究区内共计维管植物 91 科 180 属 251 种, 其中蕨类植物 16 科 21 属 25 种, 重要值前 3 位的物种分别为芭蕉、毛竹和桫欏。(2) 群落种子植物区系成分以热带为主, 包含一定比例的温带成分; 生活型以小高位芽植物为主, 1 年生植物最少。(3) 群落垂直结构可分为乔木层、亚乔木层、灌木层和草本层 4 个层次, 高层建群种主要为毛竹、杉木、亮叶桦和川钓樟等, 中层主要为芭蕉、粗糠柴、罗伞和脚骨脆等, 低层主要为柃木、红果黄肉楠和金珠柳等; 桫欏平均高度为 3.58 m, 在灌木层中优势地位明显, 年龄结构稳定。(4) 乔木层植物胸径以 2~8 cm 为主, 灌木层以 < 3 cm 为主; 平均胸径 > 9 cm 的物种主要有芭蕉、杉木、亮叶桦和桫欏等, 平均胸径 < 5 cm 的物种有柃木、红果黄肉楠和金珠柳等; 桫欏径级结构合理, 平均胸径为 12.20 cm。(5) 73 个调查样地被聚为 14 类, 分属于 10 个群系, 分别为毛竹林、芭蕉灌草丛、桫欏-芭蕉-罗伞灌草丛、马尾松林、楠木林、杉木林、亮叶桦林、枫香-四川大头茶混交林、楠木-灯台树-毛脉南酸枣林和灯台树林; 各群落植物多样性和均匀度随海拔升高而增加, 桫欏-芭蕉-罗伞灌草丛径级分布最不均匀。【结论】保护区不同群落植物多样性和结构差异明显; 海拔是影响群落空间分布的主要环境因子, 较高海拔区多为山地常绿阔叶混交林和典型阔叶林, 群落稳定性较高; 沟谷低海拔区域多为南亚热带常绿阔叶灌草丛, 以芭蕉和毛竹为代表的优势种突出, 群落物种组成和结构单一, 是桫欏种群的主要生长环境, 其生境范围相对狭窄。

**关键词:** 赤水桫欏保护区; 群落结构; 植物多样性; 聚类分析

中图分类号: S759.94 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2019)01-0019-13

**引文格式:** 刘钦, 邓洪平, 李宗峰, 等. 贵州赤水桫欏国家级自然保护区植物群落特征[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(1): 19-31. Liu Qin, Deng Hongping, Li Zongfeng, et al. Characteristics of plant community in the Guizhou Chishui *Alsophila spinulata* National Nature Reserve, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(1): 19-31.

## Characteristics of plant community in the Guizhou Chishui *Alsophila spinulata* National Nature Reserve, southwestern China

Liu Qin<sup>1</sup> Deng Hongping<sup>1</sup> Li Zongfeng<sup>1</sup> Liang Sheng<sup>2</sup> Li Qiulin<sup>1</sup> Ni Dongping<sup>1</sup>

(1. School of Life Sciences, Southwest University, Key Laboratory of the Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region of Ministry of Education, Chongqing 400715, China;

2. Chishui *Alsophila spinulata* National Nature Reserve Administration, Chishui 564700, Guizhou, China)

**Abstract:** [Objective] In this study, the Guizhou Chishui *Alsophila spinulata* National Nature Reserve was taken as the research site, and the characteristics of different plant communities were analyzed and

收稿日期: 2018-05-23 修回日期: 2018-06-19

**基金项目:** 科技部国家科技基础平台国家标本平台-教学标本子平台运行服务资助项目(2005DKA21403-JK), 环保部生物多样性保护及监测项目“赤水桫欏国家级自然保护区生物多样性野外监测示范”(2015)。

**第一作者:** 刘钦。主要研究方向: 植物系统进化与保护生物学。Email: liuqinyou211@163.com 地址: 400715 重庆市北碚区天生路 2 号西南大学生命科学学院。

**责任作者:** 邓洪平, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 植物系统进化与保护生物学。Email: denghp@swu.edu.cn 地址: 同上。

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