

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201912014

郑英茂, 刘立斌, 李成惠, 等. 我国亚热带次生林乔木地上生物量估算的适宜样地面积初探 [J]. 广西植物, 2021, 41(3): 456-463.

ZHENG YM, LIU LB, LI CH, et al. Appropriate plot areas of secondary forests in subtropical China based on tree aboveground biomass data [J]. *Guihaia*, 2021, 41(3): 456-463.



我国亚热带次生林乔木地上生物量估算的适宜样地面积初探

郑英茂¹, 刘立斌², 李成惠¹, 韦博良³, 倪健², 于明坚³, 刘菊莲^{1*}

(1. 浙江九龙山国家级自然保护区管理局, 浙江 遂昌 323300; 2. 浙江师范大学 化学与生命科学学院, 浙江 金华 321004; 3. 浙江大学 生命科学学院, 杭州 310058)

摘要: 我国亚热带森林生物量估算研究常基于 400~900 m² 的小面积样地, 但到底多大面积样地才较为适宜却鲜有探究。该文以浙江九龙山国家级自然保护区内三个 1 hm² 样地亚热带次生林为研究对象, 利用生物量回归方程估算木本植物(胸径 ≥ 1 cm) 的地上生物量, 分析地上生物量的空间分布格局, 并利用移动窗口法探讨三个次生林地上生物量估算的适宜样地面积。结果表明: (1) 三个次生林木本植物的地上生物量分别为 63.75 Mg · hm⁻² (大岩前)、84.70 Mg · hm⁻² (八通岭) 和 128.20 Mg · hm⁻² (屁股窟), 地上生物量集中分配在个体数量较少的大径级个体; 屁股窟次生林的地上生物量空间变异程度高于大岩前和八通岭次生林。(2) 利用移动窗口法确定的三个次生林木本植物地上生物量估算的适宜样地面积分别为 2 025 m² (大岩前)、2 500 m² (八通岭) 和 3 600 m² (屁股窟), 森林地上生物量越高且空间变异程度越高, 所需调查的样地面积越大。该研究结果可为我国亚热带森林地上生物量估算的样地面积设置提供证据, 并为该区域森林生物量与碳储量的估算提供基础数据。

关键词: 地上生物量, 样地面积, 空间变异, 移动窗口法, 亚热带森林, 碳储量

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2021)03-0456-08

Appropriate plot areas of secondary forests in subtropical China based on tree aboveground biomass data

ZHENG Yingmao¹, LIU Libin², LI Chenghui¹, WEI Boliang³,
NI Jian², YU Mingjian³, LIU Julian^{1*}

(1. Administration Bureau of Jiulong Mountain National Nature Reserve, Suichang 323300, Zhejiang, China; 2. College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang, China; 3. College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Biomass estimation studies of subtropical forests in China are often based on small plots ranging from 400 to 900 m². However, what is the appropriate sample area remains unknown. In the present study, aboveground biomass

收稿日期: 2020-01-14

基金项目: 遂昌县科技计划项目(遂科【2019】1号); 国家重点研发计划项目(2018YFC0507203); 国家自然科学基金面上项目(31870462) [Supported by Science and Technology Planning Program of Suichang County (【2019】No. 1); the National Key Research and Development Program of China(2018YFC0507203); the National Natural Science Foundation of China(31870462)].

作者简介: 郑英茂(1965-), 工程师, 研究方向为自然资源保护和研究, (E-mail) 542421963@qq.com。

*通信作者: 刘菊莲, 硕士, 高级工程师, 研究方向为生物多样性保护和研究, (E-mail) Ljulian2006@126.com。

(AGB) and its spatial distribution pattern of woody plants with diameter at breast height (DBH) ≥ 1 cm in three subtropical secondary forests in Jiulong Mountain National Nature Reserve, Zhejiang Province, East China were analyzed, and the appropriate sample areas for the AGB survey of the three secondary forests were explored by moving window method. The results were as follows: (1) The AGB of woody plants in the three secondary forests were 63.75 (Dayanqian site), 84.70 (Batongling site) and 128.20 (Piguku site) $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. AGB was concentrated in plants with large DBH but with a small individual number. The spatial variation degree of secondary forest AGB at the Piguku site was higher than those at the Dayanqian and Batongling sites. (2) The appropriate sample areas of the three secondary forests based on AGB data were 2 025 (Dayanqian site), 2 500 (Batongling site) and 3 600 (Piguku site) m^2 , respectively. The higher the forest AGB and its spatial variation degree were, the larger sample area was required. The present study provides evidence for sample area setting of AGB survey in subtropical forests, and provides basic data for regional forest biomass and carbon storage estimations.

Key words: aboveground biomass, plot area, spatial variation, moving window method, subtropical forest, carbon storage

森林生物量作为森林生态系统最基本的特征数据和功能指标之一,是研究森林生态系统结构和功能的基础和评价森林生态系统服务功能的基本参数(Leith & Whittaker, 1975; West, 2009)。在 20 世纪 60 年代中期国际生物学计划和人与生物圈计划、80 年代后期开始的全球碳循环研究热潮、以及 21 世纪初期全球森林碳平衡再评估活动的促使下,森林生物量研究一直受到全球植物生态学家的高度重视(Leith & Whittaker, 1975; Olson et al., 1985; Scurlock et al., 1999; Pan et al., 2011; Falster et al., 2015)。森林地上生物量(包括乔木、灌木、藤本和草本植物的干、枝、叶、花、果,地衣和苔藓的生物量,以及凋落物和木质残体的死生物量)在森林总生物量中占有较高比重,且估算相对容易,因其常被用作反映森林碳循环的重要指标而被广泛研究(Dixon et al., 1994; Fahey et al., 2010; Liu et al., 2016a)。

源于青藏高原的隆起,我国具有十分广阔的亚热带区域,面积约占我国国土面积的四分之一(Kira, 1991; 中国科学院中国植被图编辑委员会, 2007),其中分布的亚热带森林对全球生物多样性和区域环境至关重要(宋永昌等, 2005),在区域和全球碳循环中也发挥着举足轻重的作用(Fang et al., 2001; Zhang et al., 2007; Piao et al., 2009; Pan et al., 2011; Liu et al., 2016b)。利用野外样地每木调查数据,结合生物量回归方程和小样方收获法估算亚热带的生物量是该区域植被碳储量研

究中的重要内容。多年来,大量学者对我国广东鼎湖山(温达志等, 1997)、云南西双版纳(李冬, 2006)、哀牢山(谢寿昌等, 1996)和浙江天童山(杨同辉等, 2005; 郭纯子等, 2014)、古田山(芦伟, 2015),以及其他地区(陈启瑞和沈琪, 1993; 张林等, 2004; 张秋根等, 2018)典型亚热带森林的生物量特征进行了研究。然而,这些研究多数设置的样地面积较小,一般在 400~900 m^2 之间,只有少量研究基于较大面积样地开展(陈启瑞和沈琪, 1993; 温达志等, 1997)。研究表明,亚热带森林生物量的空间变异较大,森林的海拔、坡向、坡度、土壤、物种组成和物种丰富度等均会对其生物量产生影响(芦伟, 2015)。那么,在估算亚热带森林生物量时,基于多大面积的样地才是合适的? 若设置的样地太小,不能反映森林生物量的真实情况; 而若设置的样地太大,又耗费多余的人力和时间。因此,我国亚热带森林生物量估算的适宜样地面积研究非常必要且紧迫。

本研究以浙江九龙山国家级自然保护区三个 1 hm^2 样地内亚热带森林为研究对象,利用生物量回归方程估算了森林的地上生物量,分析了地上生物量的空间分布格局,并利用移动窗口法探讨了亚热带森林地上生物量估算的适宜样地面积,为亚热带森林地上生物量准确估算提供参考,亦可为我国东部地区亚热带森林生物量和碳储量的估算提供基础数据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

九龙山国家级自然保护区地处浙江省西南部的丽水市遂昌县境内,地理位置为 $118^{\circ}49' - 118^{\circ}55' E$ 、 $28^{\circ}19' - 28^{\circ}24' N$,保护区总面积 55.25 km^2 。其所在的浙江、福建、江西三省交界地带,是全球 25 个生物多样性优先重点保护地区之一。属中亚热带季风湿润气候,多年平均气温 $16.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$,极端高温和极端低温分别为 $36.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-10.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$;多年平均降水量 1856 mm ,相对湿度 80% ;年日照时数 1925 h 。

1.2 研究方法

1.2.1 林分调查与地上生物量估算 在对整个九龙山国家级自然保护区进行植被踏查后,根据生物多样性森林永久监测样地建设的技术规范 (Condit, 1995),分别于 2012 年在屁股窟[以木荷 (*Schima superba*)、小果冬青 (*Ilex micrococca*) 和青

冈 (*Cyclobalanopsis glauca*) 为优势种的常绿阔叶林],和 2017 年在大岩前[以青榨槭 (*Acer davidii*) 为优势种的落叶阔叶林]和八通岭[以杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、赤杨叶 (*Alniphyllum fortunei*) 和木荷为优势种的针阔叶混交林],各建设了 1 个面积 1 hm^2 的永久监测样地,样地内植被均为皆伐或杉木人工林自然恢复的 35~55 a 的次生林,物种组成丰富,土壤类型为红壤(屁股窟和八通岭)或黄壤(大岩前),三个样地的其他基本情况见表 1。在对样地进行调查时,首先将 1 hm^2 的样地划分成 25 个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的样方,在每个样方的 4 个角和中央测量坡度、土层厚度和估算 1 m^2 面积内的岩石裸露率。然后将每个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的样方进一步划分为 16 个 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的小样方,对每个小样方内胸径 (D) $\geq 1 \text{ cm}$ 的木本植物进行标记、挂牌和定位,并记录其物种名、 D 和高度等信息。屁股窟样地于 2017 年进行首次复查,本研究所使用的数据(物种丰富度、林分密度、 D 、树高和地上生物量)为 2017 年复查时数据。

表 1 浙江三个次生林样地的基本信息

Table 1 Basic information of three secondary forest plots in Zhejiang Province

| 项目 Item | 大岩前 Dayanqian | 八通岭 Batongling | 屁股窟 Piguku |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 经纬度 Location | $118^{\circ}54' E, 28^{\circ}22' N$ | $118^{\circ}51' E, 28^{\circ}23' N$ | $118^{\circ}53' E, 28^{\circ}23' N$ |
| 海拔 Elevation (m) | 971 | 585 | 747 |
| 坡向和坡度 Aspect and slope ($^{\circ}$) | 东北 Northeast, 27.48 | 东南 Southeast, 33.64 | 东南 Southeast, 32.77 |
| 岩石裸露率 Rock uncoverage rate (%) | 92 | 15.74 | 27.33 |
| 土层厚度 Soil thickness (cm) | 5.74 | 49.13 | 15.94 |
| 物种丰富度 Species richness | 116 | 124 | 130 |
| 林分密度 Stand density ($\text{ind.} \cdot \text{hm}^{-2}$) | 5464 | 13709 | 7191 |
| 平均胸径 Average diameter at breast height (cm) | 4.29 | 2.63 | 5.86 |
| 乔木层高度 Height of tree layer (m) | 10~12 | 7~10 | 10~13 |

样地内木本植物的地上生物量利用生物量回归方程计算得到(表 2)。因九龙山国家级自然保护区已被当地政府保护,不能采取破坏性标准木砍伐方式构建各物种的地上生物量回归方程,故本研究采用前人在研究浙江省内亚热带森林获得的地上生物量回归方程。其中,优势树种的地上生物量利用单种生物量方程计算,其他物种的地上生物量则

利用不分物种的通用生物量方程计算。

1.2.2 地上生物量估算的适宜样地面积 移动窗口法最早是 Whittaker 在研究植被沿水分梯度变化时提出的(Whittaker, 1960),后来被广泛应用于分析景观异质性(McDonnell & Piekett, 1990;李栋科等, 2014)。近年来有学者利用此方法来研究森林物种多样性,以确定种-面积关系,进而确定森林

表 2 浙江次生林的地上生物量方程

Table 2 Aboveground biomass regression equations of secondary forests in Zhejiang Province

| 物种 Species | 回归方程 Regression equation | R^2 | 参考文献 Reference |
|-----------------------------------|--|--|--------------------|
| 木荷 <i>Schima superba</i> | $AGB = 0.071\ 03(D^2H)^{0.91}$ | 0.96 ** | Zhang et al., 2007 |
| 青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> | $AGB = 0.085\ 42(D^2H)^{0.91}$ | 0.93 ** | Zhang et al., 2007 |
| 杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> | $AGB = 0.115\ 84(D^2H)^{0.75}$ | 0.94 ** | Zhang et al., 2007 |
| 小果冬青 <i>Ilex micrococca</i> | $AGB = 0.101\ 9\exp(0.138\ 7D) + 0.035\ 8D^{2.455\ 6} + 0.315\ 2D^{2.016}$ | 0.96 ** | Yang et al., 2010 |
| 赤杨叶 <i>Alniphyllum fortunei</i> | $AGB = 0.800\ 3(D^2H)^{0.5276} + 0.176\ 8(D^2H)^{0.5648} + 0.564(D^2H)^{0.3191}$ | 0.95 ** | 陈文荣, 2000 |
| 青榨槭 <i>Acer davidii</i> | $Bs = 0.065(D^2H)^{0.84}$ $Bbr = 1.59(D^2H)^{0.38}$ $Bl = 0.008\ 77D^{2.44}$ | 0.993 3 ** 0.914 3 ** 0.975 6 ** | 王向雨等, 2007 |
| 其他物种 Other species | $AGB = 0.094\ 59(D^2H)^{0.87}$ | 0.91 ** | Zhang et al., 2007 |

注: **AGB**. 地上生物量 (kg); **Bs**. 干生物量 (kg); **Bbr**. 枝生物量 (kg); **Bl**. 叶生物量 (kg); **D**. 胸径 (cm); **H**. 高度 (m); ** . $P < 0.01$.

Note: **AGB**. Aboveground biomass (kg); **Bs**. Stem biomass (kg); **Bbr**. Branch biomass (kg); **Bl**. Leaf biomass (kg); **D**. Diameter at breast height (cm); **H**. Height (m); ** . $P < 0.01$.

物种多样性研究的最小面积(王睿智和国庆喜, 2016)。本研究借鉴此方法来确定亚热带森林地上生物量估算的适宜样地面积。具体步骤如下:先在样地左下角设置 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的搜索窗口,统计窗口内木本植物的地上生物量;再将整个窗口依次向右或向上移动 5 m ,每次移动后再次统计窗口内木本植物的地上生物量,从而遍历整个 1 hm^2 样地,计算所有这一面积样方内木本植物地上生物量的平均值、标准差和变异系数;然后每次增加 5 m 的样方边长而增大样方(搜索窗口)面积,那么样方面积依次为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ (窗口数 289 个)、 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ (256 个)、 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ (225 个)、...、 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ (1 个),用同样的窗口移动方法遍历整个样地,计算各个面积窗口下所有这一面积样方内木本植物地上生物量的平均值、标准差和变异系数;最后将变异系数开始小于 10%(弱变异)时的样方面积确定为亚热带森林地上生物量估算的适宜样地面积。

2 结果与分析

2.1 地上生物量及其空间分布

根据三个样地的每木调查数据,利用表 2 所列出的地上生物量回归方程,计算得到三个样地木本植物的地上生物量分别为 $63.75\text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (大岩

前)、 $84.70\text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (八通岭)和 $128.20\text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (屁股窟)。三个样地中:小径级($D < 5\text{ cm}$)个体均较多,但其占有的地上生物量比例却较低(表 3);中径级($5 \leq D < 10\text{ cm}$)、大径级($D \geq 10\text{ cm}$)的个体虽然不多,但其占有的地上生物量比例却较高(表 3)。

单个样方(面积为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$)木本植物的地上生物量存在一定差异。其中:大岩前样地的地上生物量在 $1.05 \sim 5.08\text{ Mg}$ 之间,平均为 $(2.55 \pm 0.83)\text{ Mg}$;超过一半(13 个)的样方地上生物量在 $2 \sim 3\text{ Mg}$ 之间;地上生物量最高的样方位于样地的下部,最低的则位于样地的中部(图 1:A)。八通岭样地的地上生物量在 $1.47 \sim 4.44\text{ Mg}$ 之间,平均为 $(3.39 \pm 0.58)\text{ Mg}$;大部分样方(19 个)的地上生物量在 $3 \sim 4\text{ Mg}$ 之间;地上生物量最高和最低的样方均位于样地的中下部(图 1:B)。屁股窟样地的地上生物量在 $2.05 \sim 8.02\text{ Mg}$ 之间,平均为 $(5.13 \pm 1.74)\text{ Mg}$;样方地上生物量差异最大,除了 $< 2\text{ Mg}$ 区间外,其他地上生物量区间均存在一定数量的样方;高生物量样方分布在样地的中上部,低生物量样方则分布在样地的中下部(图 1:C)。

2.2 地上生物量估算的适宜样地面积

亚热带次生林木本植物地上生物量的变异系数随着样方面积的增大而降低,起初降低较快,以后逐渐缓慢(图 2)。当样方面积为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 时,三个样地次生林木本植物地上生物量的变异

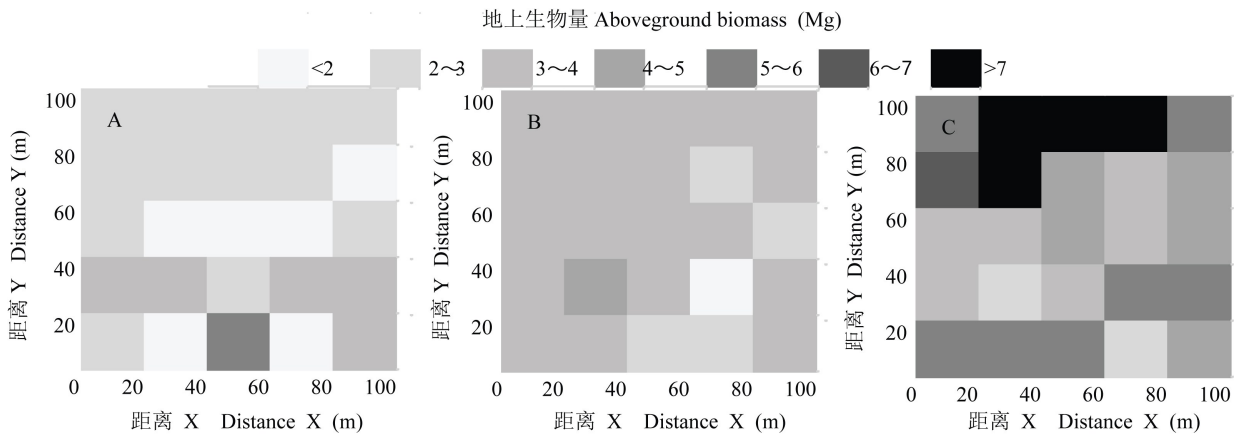
表 3 浙江三个次生林地上生物量的径级分配

Table 3 Distribution of aboveground biomass among diameter classes of three secondary forests in Zhejiang Province

| 径级 <i>D</i> Class <i>D</i> (cm) | 大岩前 Dayanqian | | 八通岭 Batongling | | 屁股窟 Piguku | |
|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| | 株数 Individual number | 地上生物量 Aboveground biomass (Mg) | 株数 Individual number | 地上生物量 Aboveground biomass (Mg) | 株数 Individual number | 地上生物量 Aboveground biomass (Mg) |
| $D < 5$ | 4 028 (73.72) | 6.06 (9.50) | 10 583 (77.20) | 20.18 (23.83) | 4 848 (67.42) | 9.31 (7.26) |
| $5 \leq D < 10$ | 768 (14.06) | 9.78 (15.34) | 1 960 (14.30) | 21.69 (25.61) | 1 204 (16.74) | 12.05 (9.40) |
| $D \geq 10$ | 668 (12.22) | 47.91 (75.16) | 1 166 (8.50) | 42.83 (50.56) | 1 139 (15.84) | 106.85 (83.34) |
| 合计 Total | 5 464 (100) | 63.75 (100) | 13 709 (100) | 84.70 (100) | 7 191 (100) | 128.20 (100) |

注: *D*. 胸径; 括号内数值为百分比。

Note: *D*. Diameter at breast height; Percentage of total in parenthesis.



A. 大岩前; B. 八通岭; C. 屁股窟; 距离 X. 样地自左下向右下距离; 距离 Y. 样地自下向上距离。

A. Dayanqian; B. Batongling; C. Piguku; Distance X. Distance from left bottom to right bottom of the plot; Distance Y. Distance from bottom to top of the plot.

图 1 浙江三个次生林地上生物量空间分布格局

Fig. 1 Spatial distribution patterns of aboveground biomass in three secondary forests of Zhejiang Province

系数均较高,分别为 22.97% (大岩前)、17.39% (八通岭) 和 33.21% (屁股窟)。当面积增大到 45 m × 45 m 时,大岩前样地次生林木本植物地上生物量的变异系数开始低于 10% (9.13%);当面积增大到 50 m × 50 m 时,八通岭样地次生林木本植物地上生物量的变异系数开始低于 10% (9.02%);当面积增大到 60 m × 60 m 时,屁股窟样地次生林木本植物地上生物量的变异系数开始低于 10% (9.99%)。最后,确定三个样地次生林木本植物地上生物量估算的适宜面积分别为 2 025、2 500、3 600 m²,并且森林生物量越高,所需调查的样地面积越大。

3 讨论

我国亚热带森林区域面积广阔,气候和地貌类型各异,森林类型亦多样,自 20 世纪 80 年代以来,大量学者对我国南方各省份天然林、次生林和人工林的生物量特征进行了研究(张祝平和彭绍麟,1989;党承林和吴兆录,1992;陈章和等,1993; Xiang et al., 2011; Liu et al., 2016a)。但是,很多研究的样地面积是根据生物多样性研究的种-面积曲线法简单确定为 400 m²(宋永昌,2001)。而有学者在研究森林物种多样性的尺度效应时提出,

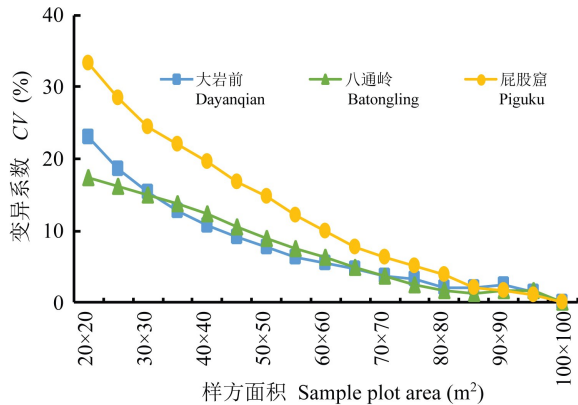


图2 浙江三个次生林地上生物量变异系数与样方面积的关系

Fig. 2 Relationship between coefficient of variation (CV) of aboveground biomass and sample plot areas in three secondary forests of Zhejiang Province

应适当扩大样地面积才能反映出森林物种多样性的真实情况 (Bellehumeur et al., 1997; 王睿智和国庆喜, 2016)。本研究在研究亚热带次生林地上生物量的空间变异时发现, 同为 400 m^2 的样方地上生物量可以相差数倍, 所以仅基于 400 m^2 样地面积估算的森林生物量结果显然存在较大的不确定性, 而基于三个 1 hm^2 样地估算的我国东部浙江省次生林地上生物量的结果则相对准确。但是在估算地上生物量时也存在一定的不足。因为九龙山国家级自然保护区禁止任何形式的采伐, 无法建立当地树种地上生物量回归方程, 所以, 用于计算地上生物量的生物量回归方程是前人在浙江省内其他森林获得的, 并且只有优势树种的地上生物量方程, 其他物种的地上生物量则用不分物种的通用生物量方程计算。这样, 会对非优势物种的生物量估算产生一定误差, 但对优势树种和整个样地尺度的生物量估算影响不大。

本研究调查的三个样地是九龙山国家级自然保护区三种主要的次生林类型, 虽然气候条件接近, 但它们的生境存在较大差异, 从而导致这三个样地次生林在物种组成和地上生物量特征上也反映出较大差异。大岩前样地生境极为严酷, 其位于半阴坡, 岩石裸露率高达 92%, 平均土层厚度仅有 5.74 cm, 因此, 该样地次生林的地上生物量最

低, 是当地生境较差的次生林代表。八通岭次生针阔叶混交林样地生境较好, 其位于半阳坡, 土壤覆盖率较高, 土层较厚, 但其林龄相对较小, 小径级个体最多, 从而导致其目前的地上生物量要低于生境条件相对较差的屁股窟次生常绿阔叶林样地。

亚热带次生林木本植物的空间分布与林下生境的异质性密切相关, 但木本植物地上生物量的空间分布不是简单取决于植物个体的空间分布, 而更多取决于大树 (胸径较大、树高较高) 的空间分布情况, 因此, 地上生物量较高的样方往往生长有胸径较大、树高较高的树木 (Liu et al., 2016a)。

本研究利用移动窗口法确定的三个亚热带次生林地上生物量估算的适宜样地面积分别为 $2\ 025$ 、 $2\ 500$ 、 $3\ 600 \text{ m}^2$, 均远大于在亚热带森林生物量调查时基于种-面积曲线法确定的 $400 \sim 900 \text{ m}^2$, 并且样地的生物量越高, 生物量的变异就越大, 所需的调查样地面积就越大。由此可见, 调查该区域生物量更高的顶极常绿阔叶林时, 适宜样地面积应该更大。另外, 在未来研究中, 可考虑利用移动窗口法基于物种多样性确定这三个次生林样地的最小面积 (已有学者利用此方法来确定中国其他森林类型的最小面积 (王睿智和国庆喜, 2016)), 综合考虑物种多样性和生物量来确定亚热带森林调查的适宜样地面积。

森林是陆地生态系统的主体, 其通过光合作用将大气当中的 CO_2 固定于森林植物活体的各个器官、凋落物、木质残体以及土壤当中, 是地球上最大的碳库, 对全球陆地碳循环和缓解全球环境变化意义重大 (McGuire et al., 1993; Melillo et al., 1993; Woodward et al., 1995; Schimel et al., 2001; Stocker et al., 2013; Liu et al., 2016a)。我国东部地区经济发达, 人口密度极大, 人为干扰极为强烈, 再加上长期以来人们对亚热带森林在陆地生态系统碳循环和生物多样性方面的重要性认识不足, 导致亚热带天然森林退化严重, 原生性甚至次生性森林仅零星分布在一些自然保护区或偏远山区。但该区域水热条件十分优越, 经人为破坏形成的碳储量较低的退化植被, 如次生小乔木林、灌丛和灌草丛, 在干扰停止后, 可逐渐得以恢复 (宋

永昌,2013)。因此,保护亚热带森林区域现存植被,促进退化植被恢复,利用移动窗口法确定区域内植被的适宜调查面积,以最少的时间和人力成本较准确地估算该区域的植被生物量,可为我国东部亚热带区域植被生物量和碳储量的估算和植被恢复提供基础数据。

4 结论

该文基于三个 1 hm²样地,分析了浙江九龙山国家级自然保护区三种类型亚热带次生林的地上生物量特征,并利用移动窗口法首次探究了亚热带次生林地上生物量估算的适宜样地面积。这三个亚热带次生林的地上生物量在 63.75~128.20 Mg·hm⁻²之间,地上生物量调查的适宜样地面积在 2 025~3 600 m²之间,森林地上生物量越高且空间变异程度越高,适宜样地面积越大。

参考文献:

- BELLEHUMEUR C, LEGENDRE P, MARCOTTE D, 1997. Variance and spatial scales in a tropical rain forest: Changing the size of sampling units [J]. *Plant Ecol*, 130 (1): 89-98.
- Chinese Vegetation Map Editorial Board of Chinese Academy of Sciences, 2007. *Vegetation Map of the People's Republic of China (1:1 000 000)* [M]. Xi'an: Geological Publishing House. [中国科学院中国植被图编辑委员会,2007. 中华人民共和国植被图(1:1 000 000) [M]. 西安:地质出版社.]
- CHEN QC, SHEN Q, 1993. Studies on the biomass models of the tree stratum of secondary *Cyclobalanopsis glauca* forest in Zhejiang [J]. *Acta Phytocool Geobot Sin*, 17(1): 38-47. [陈启瑞,沈琪,1993. 浙江次生青冈林林木层的生物量模型及其分析 [J]. *植物生态学与地植物学学报*, 17(1): 38-47.]
- CHEN WR, 2000. Study on the net productivity dynamic changes of the above-ground portion of *Alniphyllum fortunei* plantation [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 27(3): 31-34. [陈文荣,2000. 拟赤杨人工林地上部分净生产力动态变化研究 [J]. *福建林业科技*, 27(3): 31-34.]
- CHEN ZH, ZHANG HD, WANG BS, 1993. Studies on biomass and its allocation of the evergreen broad-leaved forest in Heishiding, Guangdong [J]. *Chin J Plant Ecol*, 17(4): 289-298. [陈章和,张宏达,王伯荪,1993. 广东黑石顶常绿阔叶林生物量及其分配的研究[J]. *植物生态学与地植物学学报*, 17(4): 289-298.]
- CONDIT R, 1995. Research in large, long-term tropical forest plot [J]. *Trends Ecol Evol*, 10: 18-22.
- DANG CL, WU ZL, 1992. Studies on the biomass for *Castanopsis echidnocarp* community of monsoon evergreen broad-leaved forest [J]. *J Yunnan Univ (Nat Sci Ed)*, 14(2): 95-107. [党承林,吴兆录,1992. 季风常绿阔叶林短刺栲群落的生物量研究 [J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 14(2): 95-107.]
- DIXON RK, SOLOMON AM, BROWN S, et al., 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystem [J]. *Science*, 263 (5144): 185-190.
- FAHEY TJ, WOODBURY PB, BATTLES JJ, et al., 2010. Forest carbon storage: Ecology, management, and policy [J]. *Front Ecol Environ*, 8(5): 245-252.
- FALSTER DS, DUURSMA RA, ISHIHARA MI, et al., 2015. BAAD: A biomass and allometry database for woody plants [J]. *Ecology*, 96(5): 1445-1445.
- FANG JY, CHEN AP, PENG CH, et al., 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 292: 2320-2322.
- GUO CZ, WU YY, NI J, 2014. Estimation for vegetation carbon storage in Tiantong National Forest Park [J]. *Chin J Appl Ecol*, 25(11): 3099-3109. [郭纯子,吴洋洋,倪健,2014. 天童国家森林公园植被碳储量估算 [J]. *应用生态学报*, 25(11): 3099-3109.]
- KIRA T, 1991. Forest ecosystems of East and Southeast Asia in a global perspective [J]. *Ecol Res*, 6(2): 185-200.
- LEITH H, WHITTAKER RH, 1975. Primary productivity of the biosphere [M]. Berlin: Springer-Verlag.
- LI D, 2006. Study on carbon storage and allocation of the monsoonal evergreen broad-leaved forest in Xishuangbanna [D]. Yunnan: Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences. [李冬,2006. 西双版纳季风常绿阔叶林的碳储量及其分配特征 [D]. 云南:中国科学院西双版纳热带植物园.]
- LI DK, DING SY, LIANG GF, 2014. Landscape heterogeneity of mountainous and hilly area in the western Henan Province based on moving window method [J]. *Acta Ecol Sin*, 34(12): 3414-3424. [李栋科,丁彦彦,梁国付,等,2014. 基于移动窗口法的豫西山地区景观异质性分析 [J]. *生态学报*, 34(12): 3414-3424.]
- LIU LB, WU YY, HU G, et al., 2016a. Biomass of karst evergreen and deciduous broadleaved mixed forest in central Guizhou Province, southwestern China: A comprehensive inventory of a 2 ha plot [J]. *Silv Fenn*, 50(3): 1492.
- LIU LB, YANG HM, XU Y, et al., 2016b. Forest biomass and net primary productivity in southwestern China: A meta-analysis focusing on environmental driving factors [J]. *Forests*, 7(8): 173.
- LU W, 2015. Spatial pattern of aboveground biomass and its influencing factors in subtropical evergreen broad-leaved forest in Gutian Mountain [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University. [芦伟,2015. 古田山中亚热带常绿阔叶林地上生物量空间格局及其影响因子 [D]. 金华:浙江师范大学.]
- MCDONNELL MJ, PIEKETT STA, 1990. Ecosystem structure

- and function along urban-rural gradients: An unexpected opportunity for ecology [J]. *Ecology*, 71(4): 1231-1237.
- MCGUIRE AD, JOYCE LA, KICKLIGHTER DW, et al., 1993. Productivity responses of climax temperate forests to elevated temperature and carbon dioxide: A north American comparison between two global models [J]. *Clim Change*, 24: 287-310.
- MELILLO JM, MCGUIRE AD, KICKLIGHTER DW, et al., 1993. Global climate change and terrestrial net primary production [J]. *Nature*, 363(6426): 234-240.
- OLSON JS, WATTS JA, ALLISON LJ, 1985. Major world ecosystems ranked by carbon in live vegetation: A database [M]. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory.
- PAN YD, BIRDSEY RA, FANG JY, et al., 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. *Science*, 333(6045): 988-993.
- PIAO SL, FANG JY, CIAIS P, et al., 2009. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. *Nature*, 458: 1009-1013.
- SCHIMEL DS, HOUSE JI, HIBBARD KA, et al., 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems [J]. *Nature*, 414: 169-172.
- SCURLOCK JMO, CRAMER W, OLSON RJ, et al., 1999. Terrestrial NPP: Toward a consistent data set for global model evaluation [J]. *Ecol Appl*, 9(3): 913-919.
- SONG YC, 2001. Vegetation ecology [M]. Shanghai: East China Normal University Press. [宋永昌, 2001. 植被生态学 [M]. 上海: 华东师范大学出版社.]
- SONG YC, 2013. Chinese evergreen broad-leaved forest: Classification, ecology, conservation [M]. 1st ed. Beijing: Science Press. [宋永昌, 2013. 中国常绿阔叶林: 分类、生态、保育 [M]. 1 版. 北京: 科学出版社.]
- SONG YC, CHEN XY, WANG XH, 2005. Studies on evergreen broad-leaved forest of China: A retrospect and prospect [J]. *J East Chin Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 1(1): 1-8. [宋永昌, 陈小勇, 王希华, 2005. 中国常绿阔叶林研究的回顾与展望 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1(1): 1-8.]
- STOCKER TF, QIN D, PLATTNER GK, et al., 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group I Contribution to IPCC Fifth Assessment Report (AR5) [M]. New York: Cambridge University Press.
- WANG RZ, GUO QX, 2016. Woody plants species-area relationships in a broad-leaved Korean pine forest in the Xiaoxing'an Mountains [J]. *Acta Ecol Sin*, 36(13): 4091-4098. [王睿智, 国庆喜, 2016. 小兴安岭阔叶红松林木本植物物种-面积关系 [J]. 生态学报, 36(13): 4091-4098.]
- WANG XD, HU D, HE JS, 2007. Biomass research of *Fagus engleriana* and *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest in Shennongjia Forest District [J]. *J Capit Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 28(2): 62-67. [王向雨, 胡东, 贺金生, 2007. 神农架地区米心水青冈林和锐齿槲栎林生物量的研究 [J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 28(2): 62-67.]
- WEN DZ, WEI P, KONG GH, et al., 1997. Biomass study of the community of *Castanopsis chinensis* + *Cryptocarya concinna* + *Schima superba* in a southern China reserve [J]. *Acta Ecol Sin*, 17(5): 497-504. [温达志, 魏平, 孔国辉, 等, 1997. 鼎湖山锥栗+黄果厚壳桂+荷木群落生物量及其特征 [J]. 生态学报, 17(5): 497-504.]
- WEST PW, 2009. Tree and forest measurement [M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag.
- WHITTAKER RH, 1960. Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California [M]. New York: Ecological Society of America, 30(4): 407.
- WOODWARD FI, SMITH TM, EMANUEL WR, 1995. A global land primary productivity and phytogeography model [J]. *Global Biogeochem Cy*, 9: 471-490.
- XIANG WH, LIU SH, DENG XW, et al., 2011. General allometric equations and biomass allocation of *Pinus massoniana* trees on a regional scale in southern China [J]. *Ecol Res*, 26: 697-711.
- XIE SC, LIU WY, LI SC, et al., 1996. Preliminary studies on the biomass of middle-mountain moist evergreen broadleaved forests in Ailao Mountain, Yunnan [J]. *Chin J Plant Ecol*, 20(2): 167-176. [谢寿昌, 刘文耀, 李寿昌, 等, 1996. 云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林生物量的初步研究 [J]. 植物生态学报, 20(2): 167-176.]
- YANG TH, DA LJ, SONG YC, et al., 2005. Biomass of evergreen broad-leaved forest in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province (I) Community structure and fresh weight biomass of main tree species [J]. *J Zhejiang For Coll*, 22(4): 363-369. [杨同辉, 达良俊, 宋永昌, 等, 2005. 浙江天童国家森林公园常绿阔叶林生物量研究 (I) 群落结构及主要组成树种生物量特征 [J]. 浙江林学院学报, 22(4): 363-369.]
- YANG TH, SONG K, DA LJ, et al., 2010. The biomass and aboveground net primary productivity of *Schima superba* - *Castanopsis carlesii* forests in east China [J]. *Sci Chin Life Sci*, 53(7): 811-821.
- ZHANG J, GE Y, CHANG J, et al., 2007. Carbon storage by ecological service forests in Zhejiang Province, subtropical China [J]. *For Ecol Manag*, 245: 64-75.
- ZHANG L, LUO TX, DENG KM, et al., 2004. Biomass and net primary productivity of secondary evergreen broadleaved forest in Huangmian Forest Farm [J]. *Chin J Appl Ecol*, 15(11): 2029-2033. [张林, 罗天祥, 邓坤枚, 等, 2004. 广西黄冕林场次生常绿阔叶林生物量及净第一性生产力 [J]. 应用生态学报, 15(11): 2029-2033.]
- ZHANG QG, WANG SQ, DING Y, et al., 2018. Carbon storage and carbon density of subtropical evergreen broad-leaved forests in Jiulianshan Nature Reserve [J]. *E Chin For Manag*, 32(2): 1-6. [张秋根, 王苏琴, 丁园, 等, 2018. 九连山自然保护区亚热带常绿阔叶林碳储量与碳密度 [J]. 华东森林经理, 32(2): 1-6.]
- ZHANG ZP, PENG SL, 1989. Preliminary study on biomass and primary productivity of forest communities in Dinghushan [J]. *Trop Subtrop For Ecosyst Res*, 5: 63-73. [张祝平, 彭少麟, 1989. 鼎湖山森林群落生物量和第一性生产力的初步研究 [J]. 热带亚热带森林生态系统研究, 5: 63-73.]