



亚热带常绿阔叶林群落结构的 空间变异及其 对取样设计的启示

林敦梅^{①②}, 赖江山^①, 米湘成^①, 任海保^①, 马克平^{①*}

① 中国科学院植物研究所, 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;

② 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: kpma@ibcas.ac.cn

2012-07-09 收稿, 2012-09-24 接受

中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-430)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050204)资助

摘要 基于 24 hm² 森林监测样地的全面调查数据, 评估了亚热带常绿阔叶林胸径截面积和地上生物量的空间变异性, 并用计算机模拟不同面积的样方进行随机取样, 计算了估计值有 95% 的概率落在实际值 20% ($\pm 10\%$) 的误差范围内所需要的最少样方个数和总取样面积. 结果表明: (1) 胸径截面积和地上生物量均表现出显著的空间变异性, 基于 600 个 20 m $\times$ 20 m 网格样方, 胸径截面积和地上生物量的变异系数分别为 27% 和 31%; (2) 计算机模拟取样发现随着样方面积的增大, 两者的变异性都逐渐减小. 满足特定精度所需的最少样方个数随着样方面积的增大而减少, 但是总取样面积不断增加, 这意味着达到相同的精度, 采用满足一定数量的小样方进行取样的效率要高于采用少量的大样方. 本研究结果可以为评估过去在中国亚热带森林开展的相关研究以及今后野外调查的取样设计提供参考.

关键词

空间变异
胸径截面积
地上生物量
样方大小
取样个数

森林是陆地上最重要的生态系统之一, 它为人类提供食物、药品、各种原材料, 同时森林在调节气候、涵养水源、维持环境等方面均扮演着重要的角色^[1]. 正因为森林对人类社会的重要作用, 森林成为人类科学研究的重要对象. 随着物种丧失和全球气候变化等环境问题的加剧, 森林生物多样性的维持机制和森林生态系统在全球碳循环中所起的作用成为当前生态研究的热点^[2,3]. 近些年, 生态学家基于大量的调查和实验研究提出了许多科学假说. 例如, 通过长期监测发现在过去的几十年热带老龄林的生物量显著的增加^[4,5]. 据此一些学者提出原始林或老龄林仍可能是碳汇的假说^[5], 这对传统的观点“成熟林的群落结构与功能趋于动态平衡^[6]”提出了挑战. 由于森林干扰历史数据的缺乏, 这些结论引起了较大的争议^[7]. 开展进一步研究来验证假说或提出新假说是未来的发展趋势.

取样调查是进行森林生态学研究的重要手段, 许多经验和理论的得出与验证都是基于对样方调查数据的分析^[8]. 由于受到环境、群落过程和自然或人为干扰等因素的影响, 群落结构往往具有很大的空间变异性. 例如, 受到地形、土壤养分、光照条件、干扰等因素的影响, 巴拿马 Barro Colorado 岛上热带森林地上生物量的空间分布表现出显著的变异性^[9,10]. 群落结构的空间变异给群落调查带来较大的困难. 群落调查能否准确地反映群落结构的真实特征取决于所选择的样方面积和样方个数是否具有代表性. 在实际调查中人们常常会偏向于选择生长良好或者没有受到干扰的森林作为调查对象, 这往往给调查结果带来较大的偏差^[11]. 理想状态下, 取样的样方面积越大, 样方个数越多, 越能够反应群落的真实特征. 但是受到经费和调查时间的制约, 理想状态无法实现. 因此, 设计合适的样方面积和样方个数以满足在

引用格式: 林敦梅, 赖江山, 米湘成, 等. 亚热带常绿阔叶林群落结构的
空间变异及其对取样设计的启示. 科学通报, 2013, 58: 69–74

英文版见: Lin D M, Lai J S, Mi X C, et al. Spatial variation in community structure of a subtropical evergreen broad-leaved forest: Implications for sampling design. Chin Sci Bull, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-012-5586-0

最节省经费和时间的情况下获取最具代表性的群落调查数据是非常必要的^[12]. 在群落调查的取样设计方面, 国外学者在热带雨林^[8,9,13-15]和温带森林^[16,17]都开展过较多的研究. 然而, 虽然亚热带常绿阔叶林广泛地分布于中国^[18], 而且在过去的几十年, 国内学者对亚热带常绿阔叶林的群落结构也开展了大量的研究工作(表 S1), 但是, 很少有基于全面的调查数据来探讨如何进行取样设计的研究. 过去开展的很多研究是基于对 1 个固定的小样地或者少数几个样方的调查(表 S1). 例如, 杨同辉等人^[19]基于 5 个 20 m×20 m 样方的调查数据估算了浙江天童山 52 年生木荷-米槠林的总生物量为 $225.3 \pm 30.1 \text{ Mg/hm}^2$, 这个估算值可靠性如何? 基于 5 个 20 m×20 m 样方的调查结果是否能真实地反映该群落真实的生物量? 到目前没有一个较为可靠的评估依据.

古田山 24 hm^2 大型森林动态监测样地建立于 2005 年, 群落类型为典型的亚热带常绿阔叶林, 样地内所有胸径 $\geq 1 \text{ cm}$ 的木本植物的生活状态、胸径大小、空间位置等信息都有详细的记录^[20]. 本研究通过计算机模拟使用不同面积的样方进行随机取样, 以胸径截面积和目前备受关注的森林地上生物量为研究对象, 分析使用不同面积的样方进行随机取样时它们的空间变异性, 希望为评估过去的研究结果和今后的调查研究提供参考. 本文要讨论的 2 个具体问题是: (1) 评估群落结构(胸径截面积和地上生物量)空间变异性的变化; (2) 计算使用不同大小的样方进行随机取样时结果满足特定精度要求所需的最少样方个数.

1 材料与方法

(i) 样地概况. 古田山国家级自然保护区位于浙江省开化县苏庄镇境内($29^\circ 10' 19.4'' \sim 29^\circ 17' 41.4'' \text{N}$, $118^\circ 03' 49.7'' \sim 118^\circ 11' 12.2'' \text{E}$), 与江西省婺源县和德兴市毗邻, 总面积大约 8000 hm^2 . 该地区地处我国中亚热带湿润气候区, 受季风的影响, 四季分明, 雨量充沛, 年降水量约为 1960 mm , 有明显的季节降水之分; 年均温度 15.3°C . 土壤类型主要有红壤、黄红壤、红黄壤和沼泽土, 分布在不同海拔地区; 土壤偏酸性, pH 在 5.5~6.5 之间^[21]. 保护区内物种丰富, 自然分布的种子植物有 149 科 648 属, 1426 种^[22]. 常绿阔叶林广泛分布于海拔 350~800 m 的山坡和山麓, 是保护区内最常见的植被类型, 其他植被类型还有马尾松(*Pinus massoniana*)林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)

林和黄山松(*Pinus taiwanensis*)林等; 常见的优势阔叶树种主要有甜槠(*Castanopsis eyrei*)、木荷(*Schima superba*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)等^[21].

2005 年, 中国科学院植物研究所联合浙江大学、古田山国家级自然保护区管理局等单位在该自然保护区选择典型的地带性植被甜槠-木荷林建立了一个面积为 24 hm^2 的大型森林动态监测样地(图 1). 该样地为中国森林生物多样性监测网络的重要组成部分. 整个样地用全站仪(total station)划分成 600 个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的样方, 并用 651 个水泥桩永久标记样方. 2005 年, 一批经过严格培训的调查队开始对样地进行调查, 样地内胸径 $\geq 1 \text{ cm}$ 的所有木本植物鉴定到种、挂牌、记录在样地内的空间位置、测量胸径大小并在测量胸径处涂上标记. 此次调查总共发现样地内有种子植物 159 个种, 分属于 49 个科 104 个属^[20].

(ii) 研究对象选择. 本研究选择胸径截面积和地上生物量为模拟取样研究的对象. 胸径截面积即 1.3 m 高度的横断面面积; 地上生物量采用异速生长方程进行估算(表 S2). 异速生长方程主要来自自己发表的文献, 选择的标准是尽可能选择在离我们样地位置近的地方构建的异速生长方程^[23]. 本研究中我们选择了 11 个物种水平和 1 个属水平的异速生长方程(包含了样地内所有优势树种), 剩余的物种我们采用张林等人^[24]在浙江地区构建的多物种综合方程进行估算. 大多数异速生长方程要用到树高参数, 我们采用在样地内实测的 1069 棵树高数据, 构建了 47 个样地内常见物种的树高-胸径关系方程, 剩余的物种我们利用所有实测数据构建的群落水平的树高-胸径关系方程来估算树高(表 S3).

(iii) 模拟取样. 为了使模拟结果尽可能地包括

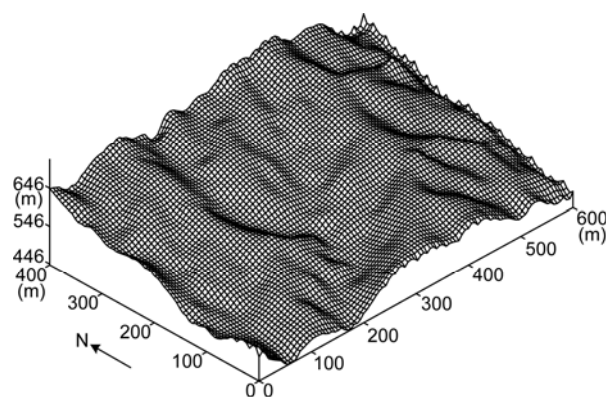


图 1 古田山 24 hm^2 常绿阔叶林监测样地地形三维模拟图

各种可能的变异值,我们采用的取样方法为:从24 hm²样地中随机选取一个点,以该点为中心向外扩展至特定边长的样方,计算该样方包含的每棵树所对应的胸径截面积和地上生物量,最后相加分别求出该样方胸径截面积和地上生物量的总和,并换算成单位面积所对应的值.此结果即为此次取样得出的结果.针对每种样方边长重复上述过程10000次.本研究中模拟取样样方的边长设置为:10, 20, 30, 40, 50, 80, 100, 150和200 m,即最小样方面积为0.01 hm²,最大样方面积为4 hm².模拟取样时根据样方的边长在24 hm²样地边缘设定相应长度的缓冲区以防止模拟取样时样方落在样地外,如当样方边长为10 m时,缓冲区的宽度设为5 m.

(iv) 数据分析. 整个样地胸径截面积和地上生物量的实际值通过计算整个样地的总和除以样地总面积(24 hm²)得到.我们将24 hm²样地划分成600个20 m×20 m网格来评估它们的空间变异性,并用变异系数(coefficients of variation)来代表空间变异性的 大小.

我们分别计算了9种不同面积的样方10000次随机取样所得到的胸径截面积和地上生物量的均值、标准差、最大值、最小值和变异系数,并用线性回归分析变异系数与取样样方面积之间的关系.

利用10000次模拟取样得到的数据集,我们计算了估计值有95%的概率落在实际值20%(±10%)的误差范围内所需要的最少样方个数,计算公式^[8]为:

$$n = \left[\frac{st_{0.05}}{d} \right]^2, \quad (1)$$

式中, n 为最少样方个数; s 为随机取样分布的标准差; $t_{0.05}$ 为学生氏 t 值,设为1.96^[25](不考虑 t 值的变化); d 值为整个样地水平的实际值×10%.此外,我们根据(1)式计算了使用过去研究中经常使用的20 m×20 m和30 m×30 m样方分别随机抽取2, 4和6个样方时,估计值有95%的概率落入的误差范围.模拟取样程序以及后续的分析均使用R(version 2.12.1)^[26]软件来编写与计算.模拟取样程序见补充材料(文本S1).

2 结果

2.1 胸径截面积和地上生物量的变异

如图2所示,基于600个20 m×20 m的网格样方,胸径截面积和地上生物量均表现出显著的空间变异性.胸径截面积和地上生物量的最大值分别约为最

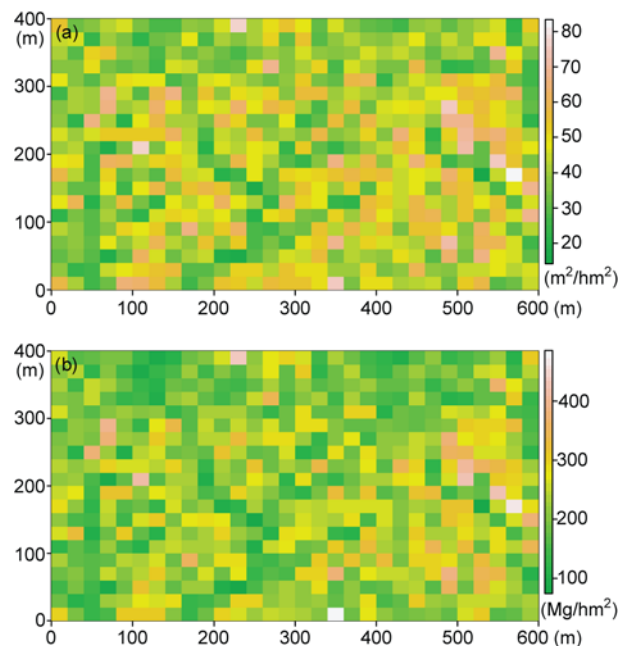


图2 基于600个20 m×20 m网格样方胸径截面积(a)和地上生物量(b)的空间分布

小值的5.9和6.5倍,地上生物量的变异性大于胸径截面积的变异性(表1).

从模拟取样的计算结果来看,与实际值的空间分布一样,胸径截面积和地上生物量均表现出很大的变异性(图3).从图3还可以看出随着取样样方面积的增大,它们的变异性逐渐减小;变异系数与取样样方面积之间的显著负相关也表明使用大样方进行取样时它们的变异性相对较小(图4).本研究中,当样方面积设置为10 m×10 m时它们的变异性最大,胸径截面积和地上生物量的变异系数分别是47.2%和52.7%.虽然使用较大的样方面积进行取样时明显地减小了变异性(图3),但是,它们的变异性仍是不可忽略的.例如,当样方面积设置为1 hm²时,胸径截面积的变化范围为34.8~57.1 m²/hm²,地上生物量的变化范围为156.3~307.8 Mg/hm².因此,设置一个1 hm²的调查样方未必就能很好地代表所调查群落

表1 基于600个20 m×20 m网格样方胸径截面积和地上生物量的变异

研究对象	均值	最大值	最小值	变异系数 (%)
胸径截面积(m ² /hm ²)	43.47	83.38	14.25	27
地上生物量(Mg/hm ²)	223.02	490.69	75.60	31

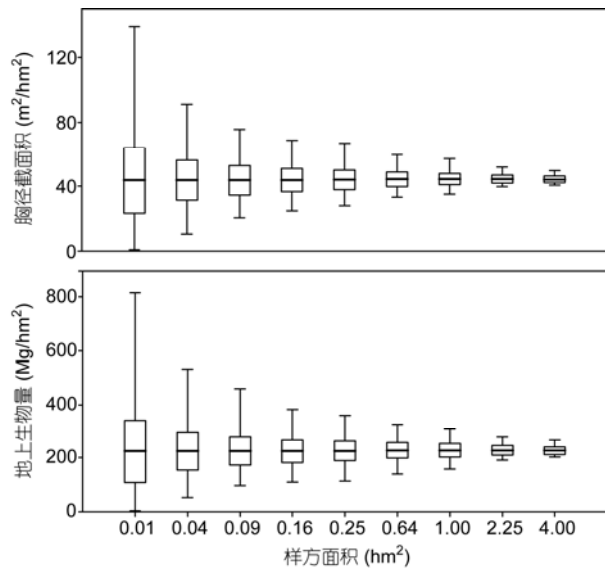


图 3 使用不同面积的样方进行随机取样, 胸径截面积和地上生物量的变异
箱图中间粗线代表均值, 方框代表 $\pm$ 标准差; 箱图上下两端的触须分别表示最大值与最小值

的真实特征.

2.2 最少样方个数估算

根据式(1), 我们估算了用不同面积的样方进行

随机取样, 估计值有 95% 的概率落在实际值 20% ($\pm 10\%$) 的误差范围内所需要的最少样方个数(表 2), 同时也计算了使用 20 m $\times$ 20 m 和 30 m $\times$ 30 m 样方分别随机抽取 2, 4 和 6 个样方时, 估计值有 95% 的概率落入的误差范围(表 3). 从表 2 可以看出, 随着样方面积的不断增大, 所需的样方个数逐渐减少, 但所需的总取样面积呈增大的趋势. 例如, 当用 10 m $\times$ 10 m 样方进行取样估算地上生物量, 所需的样方个数为 101 个, 总面积为 1.01 hm²; 而用 100 m $\times$ 100 m 样方进行取样时, 虽然所需的样方数仅为 4 个, 但是总取样面积达到了 4 hm² (表 2). 仅设计一个样方时, 要想满足同样的精度, 对胸径截面积需要的样方面积为 2.25 hm², 地上生物量需要的样方面积为 4 hm². 因此, 虽然以小样方进行取样时, 空间变异性要大于使用大样方进行取样(图 3), 且所需要的样方个数要多于使用大样方进行取样, 但是从总的取样面积来看, 采用一定数量的小样方进行取样的效率更高(表 2). 从表 3 可以看出, 当我们使用 20 m $\times$ 20 m 和 30 m $\times$ 30 m 样方分别随机抽取 2, 4 和 6 个样方时, 估计值将存在较大的偏差. 例如, 当使用 2 个 20 m $\times$ 20 m 样方进行生物量估算时, 偏差可能达到 $\pm 43.7\%$. 即生物量的估计值可能在 125.57~320.49 Mg/hm² 之间, 即使随机抽取 6 个样方, 偏差也可能达到 $\pm 25.2\%$ (表 3).

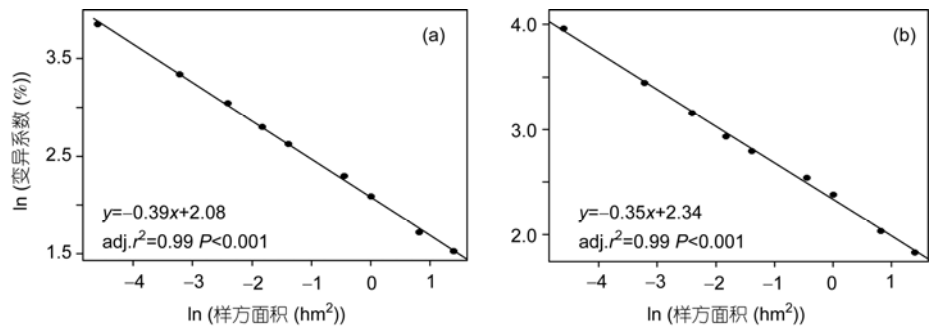


图 4 变异系数与取样的样方面积的相关性
(a) 胸径截面积; (b) 地上生物量

表 2 使用不同面积的样方随机取样, 估计值有 95% 的概率落在实际值 20% ($\pm 10\%$) 的误差范围内所需要的最少样方个数和总取样面积

单位样方面积(hm ²)		0.01	0.04	0.09	0.16	0.25	0.64	1	2.25	4
胸径截面积	样方个数	86	31	17	11	7	4	3	1	1
	总面积(hm ²)	0.86	1.24	1.53	1.76	1.75	2.56	3	2.25	4
地上生物量	样方个数	101	36	20	13	10	6	4	2	1
	总面积(hm ²)	1.01	1.44	1.80	2.08	2.50	3.84	4	4.50	4

表 3 使用 20 m×20 m 和 30 m×30 m 样方分别随机抽取 2, 4 和 6 个样方, 估计值有 95% 的概率落入的误差范围

研究对象	单位样方面积 (hm ²)	样方个数(%)		
		2 个	4 个	6 个
胸径截面积	0.04	±39.4	±27.9	±22.8
	0.09	±29.3	±20.7	±16.9
地上生物量	0.04	±43.7	±30.9	±25.2
	0.09	±32.9	±23.2	±19.0

3 讨论

本研究以典型的亚热带常绿阔叶林为对象, 详细分析了群落结构(胸径截面积和地上生物量)的空间变异性, 并估算了取样结果符合一定精度时所需要的最少样方个数. 我们的分析发现群落结构具有很大的变异性(表 1; 图 2); 随机取样结果的变异性随着调查样方面积的增大而变小(图 3 和 4), 这些结果与在热带和温带地区开展的研究一致^[9,13,16]. 虽然人们很早就认识到群落结构的变异性及取样设计的重要性^[27,28], 但是由于经费、工作量等原因, 在过去的很多研究中这些问题并没有得到重视, 很多的研究仅仅选择了少数几个样方或者一个较大的样地(如 1 hm²)进行研究(表 S1). 基于本研究结果, 过去的一些研究

结果可能存在较大的偏差(表 2 和 3). 因此, 在进行调查研究时充分考虑群落结构的空间变异性是非常必要的, 采用一定数量小样方进行取样的效率往往要高于采用少量的大样方(表 2).

当然, 本研究也存在一定的局限性. 首先, 本研究的模拟取样仅仅基于对一个地点, 覆盖面积为 24 hm² 的亚热带常绿阔叶林进行的, 而群落结构的空间变异是环境、群落过程、人为或自然干扰等因素相互作用的结果. 不同气候类型、不同地形条件、不同干扰程度等均能引起群落结构的差异^[29-31]. 因此, 在不同地点开展相应的研究可以进一步提高研究结果的普适性. 其次, 本研究的对象(胸径截面积和地上生物量)都是群落结构的静态参数, 没有涉及到群落的动态参数, 如生长、死亡、更新等. 对这些动态参数的监测是研究群落物种共存机制和森林生态系统响应气候变化机制的重要手段. 过去的一些研究表明, 与群落结构的静态参数相比群落动态参数往往表现出更大的变异性^[8,9]. 中国生物多样性监测网络在不断地扩大, 目前已在全国不同的地点建成 5~25 hm² 的森林动态监测样地近 20 个, 并进行每 5 年一次的复查^[32], 无疑这些调查结果都将为开展取样设计相关的研究提供良好的数据支持.

致谢 感谢样地建设和调查时各位老师、同学及工人师傅的辛勤劳动.

参考文献

- 1 Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320: 1444–1449
- 2 Wright S J. Plant diversity in tropical forests: A review of mechanisms of species coexistence. *Oecologia*, 2002, 130: 1–14
- 3 Malhi Y, Meir P, Brown S. Forest, carbon and global climate. *Phil Trans R Soc Lond A*, 2002, 360: 1567–1591
- 4 Baker T R, Phillips O L, Malhi Y, et al. Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2004, 359: 353–365
- 5 Lewis S L, Lopez-Gonzalez G, Sonke B, et al. Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature*, 2009, 457: 1003–1006
- 6 Odum E P. The strategy of ecosystem development. *Science*, 1969, 164: 262–270
- 7 Wright S J. Tropical forests in a changing environment. *Trends Ecol Evol*, 2005, 20: 553–560
- 8 Wagner F, Rutishauser E, Blanc L, et al. Effects of plot size and census interval on descriptors of forest structure. *Biotropica*, 2010, 42: 664–671
- 9 Chave J, Condit R, Lao S, et al. Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: Results from a large census plot in Panama. *J Ecol*, 2003, 91: 240–252
- 10 Mascaro J, Asner G P, Muller-Landau H C, et al. Controls over aboveground forest biomass density on Barro Colorado Island, Panama. *Biogeosciences*, 2011, 8: 1615–1629
- 11 Chave J, Condit R, Aguilar S, et al. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2004, 359: 409–420
- 12 Evans T D, Viengkham O V. Inventory time-cost and statistical power: A case study of a Lao rattan. *For Ecol Manage*, 2001, 150: 313–322

- 13 Keller M, Palace M, Hurtt G. Biomass estimation in the Tapajos National Forest, Brazil: Examination of sampling and allometric uncertainties. For Ecol Manage, 2001, 154: 371–382
- 14 Pyle E H, Santoni G W, Nascimento H E M, et al. Dynamics of carbon, biomass, and structure in two Amazonian forests. J Geophys Res, 113, G00B08, doi: 10.1029/2007JG000592
- 15 Laumonier Y, Edin A, Kanninen M, et al. Landscape-scale variation in the structure and biomass of the hill dipterocarp forest of Sumatra: Implications for carbon stock assessments. For Ecol Manage, 2010, 259: 505–513
- 16 Kral K, Janik D, Vrska T, et al. Local variability of stand structural features in beech dominated natural forests of Central Europe: Implications for sampling. For Ecol Manage, 2010, 260: 2196–2203
- 17 Bradford J B, Weishampel P, Smith M, et al. Carbon pools and fluxes in small temperate forest landscapes: Variability and implications for sampling design. For Ecol Manage, 2010, 259: 1245–1254
- 18 Wang X H, Kent M, Fang X F. Evergreen broad-leaved forest in Eastern China: Its ecology and conservation and the importance of re-sprouting in forest restoration. For Ecol Manage, 2007, 245: 76–87
- 19 杨同辉, 宋坤, 达良俊, 等. 中国东部木荷-米槠林的生物量和地上净初级生产力. 中国科学: 生命科学, 2010, 40: 610–619
- 20 陈彬, 米湘成, 方腾, 等. 浙江古田山森林——树种及其分布格局. 北京: 中国林业出版社, 2009
- 21 胡正华, 于明坚, 丁炳扬, 等. 古田山国家级自然保护区常绿阔叶林类型及群落物种多样性研究. 应用与环境生物学报, 2003, 9: 341–345
- 22 楼炉焕, 金水虎. 浙江古田山自然保护区种子植物区系分析. 北京林业大学学报, 2000, 22: 33–39
- 23 Brown S. Measuring carbon in forests: Current status and future challenges. Environ Pollut, 2002, 116: 363–372
- 24 Zhang J, Chang J, Ge Y, et al. Carbon storage by ecological service forests in Zhejiang Province, subtropical China. For Ecol Manage, 2007, 245: 64–75
- 25 李春喜, 姜丽娜, 邵云, 等. 生物统计学. 第 3 版. 北京: 科学出版社, 2005
- 26 R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, 2010, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>
- 27 何妙光. 亚热带山地常绿阔叶林和针叶林的样地面积大小的初步研究. 植物生态学报, 1964, 2: 118–127
- 28 宋永昌, 张绅, 史家梁. 关于亚热带山地次生灌丛和幼年林的取样问题. 植物生态学报, 1965, 3: 247–263
- 29 DeWalt S J. Structure and biomass of four lowland neotropical forests. Biotropica, 2004, 36: 7–19
- 30 Stegen J C, Swenson N G, Enquist B J, et al. Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients. Global Ecol Biogeogr, 2011, 20: 744–754
- 31 McEwan R W, Lin Y, Sun I, et al. Topographic and biotic regulation of aboveground carbon storage in subtropical broad-leaved forests of Taiwan. For Ecol Manage, 2011, 262: 1817–1825
- 32 马克平. 监测是评估生物多样性保护进展的有效途径. 生物多样性, 2011, 19: 125–126

补充材料

表 S1 在亚热带常绿阔叶林开展的涉及胸径截面积和(或)生物量研究的调查取样设计

表 S2 估算地上生物量所用的异速生长方程

表 S3 胸径-树高关系曲线方程

文本 S1 模拟取样 R 语言程序

本文的以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.



表 S1 在亚热带常绿阔叶林开展的涉及胸径截面积和(或)生物量研究的调查取样设计

研究地点	群落类型	取样方法	样方面积 (hm^2)	样方个数	总取样面积 (hm^2)	参考文献
福建武夷山	甜槠群落	随机取样	0.01	3	0.03	林益明等(1996)
河南宝天曼	栓皮栎群落	人为选择样地	0.04	1	0.04	刘玉萃等(1998)
河南宝天曼	锐齿栎群落	人为选择样地	0.04	1	0.04	刘玉萃等(2001)
广西黄冕林场	木荷群落	人为选择样地	0.04	1	0.04	张林等(2004)
广东阳山县	任豆群落	人为选择样地	0.04	1	0.04	张祝平等(1996)
云南普洱县	短刺栲群落	人为选择样地	0.07	1	0.07	党承林等(1992)
广东鼎湖山	马尾松-木荷群落	随机取样	0.01	8	0.08	方运霆等(2003)
广东黑石顶	粘木群落	人为选择样地	0.1	1	0.1	杨清培等(2003)
湖南鹰嘴界	栲树-杜英-刨花楠群落	随机取样	0.04	3	0.12	宫超等(2011)
江西九连山	栲类+南酸枣群落	随机取样	0.04	3	0.12	邸月宝等(2012)
云南哀牢山	红木荷-高山栲-密花树群落	分层取样	0.04	3	0.12	宋亮等(2011)
广东鼎湖山	格木群落	人为选择样地	0.16	1	0.16	蚁伟民等(2000)
江西九连山	栲类群落	随机取样	0.04	4	0.16	邸月宝等(2012)
云南普洱县	短刺栲群落	人为选择样地	0.2	1	0.2	党承林等(1992)
广东鼎湖山	锥栗-黄果厚壳桂-木荷群落	随机取样	0.01	20	0.2	彭少麟等(1994)
浙江天童山	木荷-米槠群落	随机取样	0.04	5	0.2	杨同辉等(2010)
湖南会同	红栲-青冈-刨花楠群落	随机取样	0.025	10	0.25	邓仕坚等(2000)
江西大岗山	栲树群落	人为选择样地	0.25	1	0.25	王兵等(2011)
广东鼎湖山	黄果厚壳桂群落	人为选择样地	0.13	2	0.26	张祝平等(1996)
云南哀牢山	木果石栎群落	人为选择样地	0.25	2	0.5	Liu 等(2002)
江西九连山	拟赤杨-木荷群落	随机取样	0.01	75	0.75	简敏菲等(2008)
广东鼎湖山	锥栗-黄果厚壳桂-木荷群落	人为选择样地	1	1	1	温达志等(1997)
云南楚雄	元江栲-滇石栎-银木荷群落	随机取样	0.05	20	1	施济普等(2011)
云南哀牢山	硬壳柯群落	人为选择样地	6	1	6	巩合德等(2011)
广东鼎湖山	锥栗-木荷-黄杞群落	人为选择样地	20	1	20	叶万辉等(2008)
浙江天童山	南酸枣-云山青冈-长叶石栎群落	人为选择样地	20	1	20	杨庆松等(2011)
浙江古田山	甜槠-木荷群落	人为选择样地	24	1	24	祝燕等(2008)

表 S2 估算地上生物量所用的异速生长方程

物种	异速生长方程	R^2	参考文献
木荷(<i>Schima superba</i>)	$\text{AGB}=0.07103 \times (D^2 \times H)^{0.91}$	0.96	Zhang 等(2007)
马尾松(<i>Pinus massoniana</i>)	$\text{AGB}=0.13529 \times (D^2 \times H)^{0.79}$	0.91	Zhang 等(2007)
青冈(<i>Cyclobalanopsis glauca</i>)	$\text{AGB}=0.08542 \times (D^2 \times H)^{0.91}$	0.93	Zhang 等(2007)
甜槠(<i>Castanopsis eyrei</i>)	$\text{AGB}=0.06491 \times (D^2 \times H)^{0.92}$	0.98	杜国坚等(1987)
石栎(<i>Lithocarpus glaber</i>)	$\text{AGB}=0.04268 \times (D^2 \times H)^{0.98}$	0.99	杜国坚等(1987)
米槠(<i>Castanopsis carlesii</i>)	$\text{AGB}=0.0453 \times D^{1.716} + 0.037 \times D^{2.4599} + 0.1565 \times D^{2.2772}$	>0.98	杨同辉等(2010)
青栲(<i>Cyclobalanopsis myrsinaefolia</i>)	$\text{AGB}=0.1019 \times \exp(0.1387 \times D) + 0.0358 \times D^{2.4556} + 0.3152 \times D^{2.016}$	>0.96	杨同辉等(2010)
栎属(<i>Quercus</i> spp.)	$\text{AGB}=0.1199 \times (D^2 \times H)^{0.8509}$	0.99	陈启常等(1993)
拟赤杨(<i>Alniphyllum fortunei</i>)	$\text{AGB}=0.8003 \times (D^2 \times H)^{0.5276} + 0.1768 \times (D^2 \times H)^{0.5648} + 0.564 \times (D^2 \times H)^{0.3191}$	>0.95	陈文荣(2000)
欆木(<i>Loropetalum chinense</i>)	$\text{AGB}=0.1599 \times D^{2.35119}$	0.99	林敦梅 (未发表数据)
马银花(<i>Rhododendron ovatum</i>)	$\text{AGB}=0.3323 \times D^{1.7874}$	0.96	林敦梅 (未发表数据)
鹿角杜鹃(<i>Rhododendron latoucheae</i>)	$\text{AGB}=0.2212 \times D^{1.9932}$	0.92	林敦梅 (未发表数据)
其他物种	$\text{AGB}=0.09459 \times (D^2 \times H)^{0.87}$	0.91	Zhang 等(2007)

AGB 为地上生物量(Kg); D 为胸径(cm); H 为树高(m).

表 S3 胸径-树高关系曲线方程

中文名	拉丁名	生活型	<i>a</i>	<i>b</i>	Adj. <i>r</i> ²	最小胸径	最大胸径	<i>CF</i>	样本量
马尾松	<i>Pinus massoniana</i>	T	2.31514	0.56458	0.9118	3.7	80	1.010182	44
杨梅	<i>Myrica rubra</i>	T	1.914162	0.54332	0.9466	1.9	41	1.007604	18
米槠	<i>Castanopsis carlesii</i>	T	2.56075	0.5631	0.9232	1.3	42.5	1.015439	18
甜槠	<i>Castanopsis eyrei</i>	T	2.240076	0.53683	0.9153	1.4	68.5	1.014401	58
栲树	<i>Castanopsis fargesii</i>	T	1.714755	0.67197	0.9355	1.3	50.9	1.014428	22
钩栲	<i>Castanopsis tibetana</i>	T	1.888325	0.6062	0.9457	1.5	43	1.015120	10
青冈	<i>Cyclobalanopsis glauca</i>	T	2.31646	0.56941	0.933	1.2	37.9	1.015987	17
细叶青冈	<i>Cyclobalanopsis myrsinaefolia</i>	T	3.068657	0.47664	0.9466	1.8	67.8	1.009587	13
石栎	<i>Lithocarpus glaber</i>	T	2.420659	0.60426	0.9242	1	22.9	1.014613	20
短柄枹	<i>Quercus serrata</i> var. <i>brevipetiolata</i>	T	2.566133	0.51193	0.8361	1.6	31.9	1.012184	52
野含笑	<i>Michelia skinneriana</i>	T	1.97157	0.60472	0.9377	1.5	18.7	1.004472	21
柳叶蜡梅	<i>Chimonanthus salicifolius</i>	S	2.664216	0.55184	0.931	1.1	4.9	1.002477	12
浙江樟	<i>Cinnamomum chekiangense</i>	T	1.711329	0.83537	0.9787	1.6	13.5	1.004013	10
香桂	<i>Cinnamomum subavenium</i>	T	2.153146	0.63481	0.9464	1.3	24.5	1.010018	19
豹皮樟	<i>Litsea coreana</i> var. <i>sinensis</i>	T	2.85628	0.55018	0.9417	1.5	20.3	1.005465	11
黄楸楠	<i>Machilus grijsii</i>	U	2.41406	0.54758	0.8517	1.8	8.2	1.00806	7
红楠	<i>Machilus thunbergii</i>	T	1.858835	0.67325	0.9425	2.4	34.5	1.01258	14
浙江新木姜子	<i>Neolitsea aurata</i> var. <i>chekiangensis</i>	U	2.158298	0.69026	0.9558	1.1	14.4	1.006635	25
灰白蜡瓣花	<i>Corylopsis glandulifera</i> var. <i>hypoglauca</i>	U	2.265714	0.6837	0.9213	1.1	7.4	1.0049535	18
杨梅叶蚊母树	<i>Distylium myricoides</i>	T	2.632937	0.5521	0.9003	1	25.5	1.014236	28
欆木	<i>Loropetalum chinense</i>	U	3.038093	0.48234	0.8905	1.1	21.5	1.006925	24
石灰花楸	<i>Sorbus folgeri</i>	T	3.149362	0.4941	0.9209	1.5	22	1.008834	15
虎皮楠	<i>Daphniphyllum oldhamii</i>	T	2.267913	0.58382	0.9195	1.1	30.2	1.01025	20
野漆树	<i>Toxicodendron succedaneum</i>	T	2.627282	0.56553	0.9444	1.7	35.3	1.008738	11
榕叶冬青	<i>Ilex dlmerrilliana</i>	T	2.243192	0.5951	0.9801	1.7	15.8	1.003303	6
木姜叶冬青	<i>Ilex litseaefolia</i>	U	2.398587	0.51503	0.9105	1.7	14	1.006217	15
冬青	<i>Ilex chinensis</i>	T	3.3253	0.46954	0.8977	1.9	26.3	1.006158	12
铁冬青	<i>Ilex rotunda</i>	T	2.131146	0.61152	0.9559	1.3	19	1.004018	13
紫果槭	<i>Acer cordatum</i>	T	3.084162	0.45554	0.9133	1	10.7	1.004765	12
红枝柴	<i>Meliosma oldhamii</i>	T	2.883544	0.52441	0.8364	1.2	40.7	1.015099	27
杜英	<i>Elaeocarpus decipiens</i>	T	2.088947	0.61295	0.9593	1.1	27.4	1.00709	17
薯豆	<i>Elaeocarpus japonicus</i>	T	2.236227	0.61798	0.872	1.9	23.5	1.018784	10
黄瑞木	<i>Adinandra millettii</i>	T	2.280307	0.56137	0.909	1.6	18.3	1.007145	21
毛花连蕊茶	<i>Camellia fraterna</i>	S	2.030943	0.66278	0.9036	1.1	7.1	1.009085	10
红淡比	<i>Cleyera japonica</i>	U	1.572128	0.69064	0.9472	1.6	21.7	1.00927	19
隔药铃	<i>Eurya muricata</i>	U	2.304284	0.59205	0.854	1.6	14.6	1.011274	39
木荷	<i>Schima superba</i>	T	2.271976	0.57008	0.9416	1.2	55.5	1.007927	63
厚皮香	<i>Ternstroemia gymnanthera</i>	T	1.972773	0.63868	0.9384	1.3	30.8	1.012066	26
赤楠	<i>Syzygium buxifolium</i>	U	2.41708	0.5279	0.9152	1.1	19.3	1.006852	23
毛果南烛	<i>Lyonia ovalifolia</i> var. <i>hebecarpa</i>	U	2.368413	0.4898	0.8528	1.6	7.6	1.006769	7
鹿角杜鹃	<i>Rhododendron latoucheae</i>	U	1.98165	0.56991	0.8869	1.5	10.2	1.010166	12
马银花	<i>Rhododendron ovatum</i>	U	2.183218	0.5757	0.9084	1	13.6	1.008847	26
乌饭树	<i>Vaccinium bracteatum</i>	U	1.873147	0.67845	0.9421	1.4	11.6	1.004564	9
江南越桔	<i>Vaccinium mandarinorum</i>	U	2.234506	0.62323	0.9264	1.5	4.3	1.001825	7
老鼠矢	<i>Symplocos stellaris</i>	U	2.217898	0.59648	0.9303	1.4	12.1	1.006267	16
拟赤杨	<i>Alniphyllum fortunei</i>	T	2.750162	0.59079	0.9008	1.5	41.2	1.017559	15
郁香野茉莉	<i>Styrax odoratissimus</i>	U	3.220092	0.45692	0.8936	1.9	16.3	1.004416	10
其他物种	—	—	2.353706	0.564976	0.9148	1	80	1.015602	1066

$H=CF \times aD^b$; *H* 为树高(m); *D* 为胸径(cm); *CF* 为校正系数(Sprugel 1983); 所有回归方程均通过统计显著性检验($P<0.001$); 生活型包括林冠层树种(T), 林下层树种(U)和灌木(S).

文本 S1 随机取样 R 语言程序

```
#-----
#定义模拟取样函数 sam
#参数说明:
#length 样地的长度; width 样地的宽度;
#DATA 样地的调查数据, 列必须包含每棵树的坐标(gx, gy, 单位为 m)以及计算好的胸径截面积(ba, 单位为 m2)和地上生物量(agb, 单位为 Kg);
#num 随机取样的次数; type 随机取样时的样方边长, 本研究中分别设置为 10,20,30,40,50,80,100,150, 200 m
#<star>
sam=function(length=600, width=400, DATA, num=10000, type)
{
  x=runif(num, min=type/2, max=length-type/2); y=runif(num, min=type/2, max=width-type/2)
  biomass=vector(); basal_area=vector()
  for (j in 1:num)
  {
    a=subset(DATA, gx<=x[j]+type/2); b=subset(a, gx>=x[j]-type/2); d=subset(b, gy<=y[j]+type/2);
    e=subset(d, gy>=y[j]-type/2)
    biomass[j]=round(sum(e$agb)/((type^2)*0.1), 3)
    basal_area[j]=round(sum(e$ba)/type^2, 2)
  }
  bio_mean=mean(biomass); ba_mean=mean(basal_area)
  bio_sd=sd(biomass); ba_sd=sd(basal_area)
  bio_cv=sd(biomass)*100/mean(biomass); ba_cv=sd(basal_area)*100/mean(basal_area)
  bio_max=max(biomass); ba_max=max(basal_area)
  bio_min=min(biomass); ba_min=min(basal_area)
  return(data.frame(bio_mean, bio_max, bio_min, bio_sd, bio_cv, ba_mean, ba_max, ba_min, ba_sd,
    ba_cv))
}
#<end>
#-----
```

参考文献

- 1 陈启常, 沈琪. 浙江次生青冈林林木层的生物量模型及其分析. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 17: 38–47
- 2 陈文荣. 拟赤杨人工林地上部分净生产力动态变化研究. 福建林业科技, 2000, 27: 31–34
- 3 党承林, 吴兆录. 季风常绿阔叶林短刺栲群落的生物量研究. 云南大学学报(自然科学版), 1992, 14: 95–107
- 4 邓仕坚, 廖利平, 汪思龙, 等. 湖南会同红栲-青冈-刨花楠群落生物生产力的研究. 应用生态学报, 2000, 11: 651–654
- 5 邸月宝, 王辉民, 马泽清, 等. 亚热带森林生态系统不同重建方式下碳储量及其分配格局. 科学通报, 2012, 57: 1553–1561
- 6 杜国坚, 洪利兴, 姚国兴. 浙江西北部次生常绿阔叶林主要群落类型地上部分生物量的测定和分析. 浙江林业科技, 1987, 7: 5–12
- 7 方运霆, 莫江明, 彭少麟, 等. 森林演替在南亚热带森林生态系统碳吸存中的作用. 生态学报, 2003, 23: 1686–1694
- 8 宫超, 汪思龙, 曾掌权, 等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段碳储量与格局特征. 生态学杂志, 2011, 30: 1935–1941
- 9 巩合德, 杨国平, 鲁志云, 等. 哀牢山常绿阔叶林树种多样性及空间分布格局. 生物多样性, 2011, 19: 143–150
- 10 简敏菲, 刘琪璟, 梁跃龙, 等. 九连山常绿阔叶林群落的结构与种类数量特征. 浙江林学院学报, 2008, 25: 458–463
- 11 林益明, 林鹏, 李振基, 等. 武夷山甜槠群落的生物量和生产力. 厦门大学学报(自然科学版), 1996, 35: 267–275
- 12 刘玉萃, 吴明作, 郭宗民, 等. 宝天曼自然保护区栓皮栎林生物量和净生产力研究. 应用生态学报, 1998, 9: 569–574
- 13 刘玉萃, 吴明作, 郭宗民, 等. 内乡宝天曼自然保护区锐齿栎林生物量和净生产力研究. 生态学报, 2001, 21: 1451–1456
- 14 彭少麟, 张祝平. 鼎湖山地带性植被生物量, 生产力和光能利用效率. 中国科学(B 辑), 1994, 24: 497–502
- 15 施济普, 常艳芬, 徐成东, 等. 楚雄花椒园半湿润常绿阔叶林的群落生态学特征. 广西植物, 2011, 31: 204–207

- 16 宋亮, 刘文耀, 马文章, 等. 云南哀牢山西麓季风常绿阔叶林级思茅松林的群落学特征. 山地学报, 2011, 29: 164–172
- 17 叶万辉, 曹洪麟, 黄忠良, 等. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林 20 公顷样地群落特征研究. 植物生态学报, 2008, 32: 274–286
- 18 杨清培, 李鸣光, 王伯荪, 等. 粤西南亚热带森林演替过程中的生物量与净第一性生产力动态. 应用生态学报, 2003, 14: 2136–2140
- 19 杨庆松, 马遵平, 谢玉彬, 等. 浙江天童 20 ha 常绿阔叶林动态监测样地的群落特征. 生物多样性, 2011, 19: 215–223
- 20 杨同辉, 宋坤, 达良俊, 等. 中国东部木荷-米槠林的生物量和地上净初级生产力. 中国科学: 生命科学, 2010, 40: 610–619
- 21 蚁伟民, 张祝平, 丁明懋, 等. 鼎湖山格木群落的生物量和光能利用效率. 生态学报, 2000, 20: 397–403
- 22 王兵, 杨清培, 郭起荣, 等. 大岗山毛竹林与常绿阔叶林碳储量及分配格局. 广西植物, 2011, 31: 342–348
- 23 温达志, 魏平, 孔国辉, 等. 鼎湖山锥栗+黄果厚壳桂+荷木群落生物量及其特征. 生态学报, 1997, 17: 497–504
- 24 张林, 罗天洋, 邓坤枚, 等. 广西黄冕林场次生常绿阔叶林生物量及净第一性生产力. 应用生态学报, 2004, 15: 2029–2033
- 25 张祝平, 丁明懋. 鼎湖山亚热带季风常绿阔叶林的生物量和光能利用效率. 生态学报, 1996, 16: 525–534
- 26 张祝平, 何道泉, 敖惠修. 任豆林的生物量和光能利用效率. 植物生态学报, 1996, 20: 502–509
- 27 祝燕, 赵谷风, 张俪文, 等. 古田山中亚热带常绿阔叶林动态监测样地——群落组成与结构. 植物生态学报, 2008, 32: 262–273
- 28 Liu WY, Fox JED, Xu ZF. Biomass and nutrient accumulation in montane evergreen broad-leaved forest (*Lithocarpus xylocarpus* type) in Ailao Mountains, SW China. Forest Ecology and Management, 2002, 158, 223–235.
- 29 Sprugel DG. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. Ecology, 1983, 64: 209–210