

赣中亚热带森林植被碳储量

李海涛,王姗姗,高鲁鹏,于贵瑞

(中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘要 利用已发表的乔木生物量回归模型(乔木层)和样方收获法(灌木层、草本层),沿江西省泰和县灌溪乡千烟洲至井冈山市大井林场一线,采用样带法研究了赣中地区亚热带湿润气候下的植被群落碳储量及其分配规律。研究结果表明,群落碳储量绝大部分集中于乔木层。乔木层单位面积碳储量与乔木密度的幂指数为 -0.0756 。碳储量的空间变化规律表现为植被的碳密度与经度之间没有显著的相关性,而与纬度和海拔间均存在着显著的相关关系,表现为随着纬度和海拔增加植被碳密度递减。各层片的碳密度与其 Shannon-Wiener 物种多样性指数之间没有显著的相关关系。

关键词 亚热带,碳储量,物种多样性,千烟洲,井冈山

文章编号:1000-0933(2007)02-0693-12 中图分类号:Q145,Q948,S718.55 文献标识码:A

The carbon storage of the subtropical forest vegetation in central Jiangxi Province

LI Hai-Tao, WANG Shan-Na, GAO Lu-Peng, YU Gui-Rui

Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Acta Ecologica Sinica 2007, 27(2): 693~704.

Abstract: We investigated the vegetative carbon storage, its distributional pattern and relevant ecological issues in subtropical forests of the Central Jiangxi Province by transect-sampling method, with the help of the published allometric biomass models for trees and the harvesting method for shrubs and herbs. We sampled from the Qianyanzhou, Guanxi Village, Taihe County, Jiangxi Province to the Dajing Forestry Centre of the Jinggangshan City. The results showed that the most part of the carbon storage of a stand was allocated to tree layer and the carbon storage per unit area of tree layer scaled as the -0.0756 power of the tree density along the sampled transect. The carbon density of vegetation decreased linearly with increasing latitude, and so with increasing altitude in stands. There were no significant correlations between the carbon density and the Shannon-Wiener Species diversity index for each layer of stands.

Key Words: subtropical; carbon storage; species diversity; Qianyanzhou; Jinggangshan

2005 年 2 月 16 日,旨在限制全球二氧化碳排放的《京都议定书》正式生效,标志着国际社会在温室气体排放方面一个新时代的来临。《京都议定书》认可通过增加森林碳汇来履行温室气体减排义务,因此,对现有森林生态系统的碳蓄积加以细致研究的重要性和迫切性愈显彰。森林碳库占陆地表面碳库总量的 56%,在全球碳循环中具有重要作用^[1]。估算森林植被的碳储量,可以反映植被的光能利用,并衡量群落吸收大气中 CO₂ 的能力,是研究森林生态系统碳循环的基础^[2,3]。

基金项目:中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程主干科学计划资助项目(CX10G-E01-02-01)

收稿日期:2005-12-09;修订日期:2006-09-27

作者简介:李海涛(1968~),山东荣城人,博士,副研究员,主要从事生态系统生态学研究。E-mail:liht@igsnrr.ac.cn

Foundation item: This work was financially supported by the backbone project of knowledge innovation program of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences (No. CX10G-E01-02-01)

Received date 2005-12-09; **Accepted date** 2006-09-27

Biography: LI Hai-Tao, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in ecosystem ecology. E-mail: liht@igsnrr.ac.cn

在我国南方的亚热带红壤丘陵区,由于 20 世纪 60、70 年代人类不合理的土地利用,导致原有天然林面积大幅减少,水土流失严重,生态环境严重退化。自 20 世纪 80 年代初以来,为了重建日趋脆弱的自然生态系统,各地通过植树造林和封山育林使植被得以较快恢复。迄今为止一些学者从全国和区域尺度上的研究^[1-3]均表明,我国森林生态系统的碳储量和碳密度有很大的空间变异性,其中我国东部和东南部地区由于具有较高的人口密度表现出较小的碳储量和较低的碳密度^[1]。但目前在这一区域内部,反映森林生态系统植被碳储量的空间变化特征的细致案例研究,尚不多见。赣中属我国东部亚热带红壤区的典型区域,研究该区森林生态系统碳储量的空间变化及其生态学特点,有助于丰富对我国不同区域碳蓄积特征的认识,为森林生态系统的恢复和重建以及增加碳汇功能提供基础资料。

2004 年 8 月,沿江西省泰和县灌溪乡至井冈山市大井林场一线,采用样带调查方法均匀布点,研究了赣中亚热带红壤丘陵区植被群落碳储量及其分布特点,以及碳储量随经纬度、海拔等环境因子以及群落物种多样性的变化,现将此次调查结果整理成文。

1 测区概况

调查样带横跨江西省泰和县和井冈山市辖区,由灌溪乡中国科学院干烟洲站区至井冈山市大井林场(东经 114°06'39"~115°04'10",北纬 26°29'17"~26°51'49")。测区海拔从 83m 到 1041m,地形起伏,坡度以 15°~35°居多。林地土壤为红壤或红黄壤,土层厚度多在 50cm 以上,pH 值 4.45~5.45,有机质含量 0.67~1.93g/kg,土壤母质由白垩系红色、紫红色砾岩、砂岩和泥岩组成,岩层倾角不大。除少数丘顶和裸露地外,风化层一般厚度在 30~50cm 之间,属典型的亚热带红壤丘陵景观。

泰和县位于江西省中部的吉泰盆地南端,属中亚热带湿润气候区,气候温暖湿润,受季风影响明显,年均气温 18.6℃,极端最高温度 43.6℃,极端最低温度 -8.8℃,最热月(7 月份)平均气温 29.7℃,最冷月(1 月份)平均气温 6.6℃,年均相对湿度 83%,年均降雨量 1471.2mm,多年平均降雨日为 158d。降雨量丰富,但降雨季节分配不均匀,水热并不完全同期,3~6 月份多雨,7~10 月份干燥,其中 4~6 月份降雨量约占全年的一半,7~8 月份高温少雨,易出现伏旱。年日照时数 1327.6h,年太阳总辐射量 4349MJ·m⁻²。

井冈山与泰和县同属中亚热带湿润气候。根据位于茨坪的井冈山气象站(海拔 848m)的气象资料,年平均气温为 14.3℃,最热月(7 月份)平均气温为 24.0℃,极端最高气温 34.8℃;最冷月(1 月份)平均气温 3.4℃,极端最低气温 -11℃;平均年降雨量 1856.2mm,降雨日 214d;平均年雾日 87d;平均年日照时间 1500h,年均相对湿度 85%。

调查区内的地带性植被为亚热带常绿阔叶林,但原生植被已破坏殆尽,现有的森林植被多为当地在 20 世纪 80 年代初实行自然封育后形成,大部分森林林龄在 20 a 以内。为使不同样地之间的统计结果较具可比性,调查中尽可能选择封育期接近或一致的样地。样地中主要乔木树种有湿地松(*Pinus elliotii*)、木荷(*Schima superba*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)、闽粤栲(*Castanopsis fissa*)等;林下灌丛以胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、菝葜(*Smilax china*)、牡荊(*Vitex cannabifolia*)分布较多,草本层以莎草(*Cyperus rotundus*)、地捻(*Molastoma dodecandrum*)为代表类型。

2 研究方法

2.1 样地调查

用样带法总共调查了 25 个乔木样方、125 个灌木样方和 125 个草本样方。以乔木样方(20m×30m)为例,首先调查并记录样地的地点、经度、纬度、海拔、坡向和坡度。然后进行每木调查:对乔木编号,分别测量和记录乔木的树种、树高及胸径。最后在乔木样方内均匀布设 5 个 2m×2m 的灌木样方(图 1),灌木样方内再取 1m×1m 的草本植物样方,调查灌木与草本植物并记录

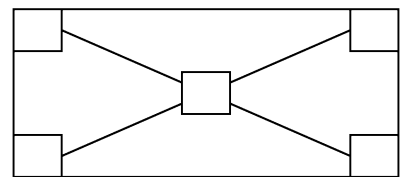


图 1 乔木样方及其灌木和草本样方配置示意图

Fig. 1 Diagram of layout for tree plot and its subplots for shrubs and herbs

物种、高度、盖度等。从而计算灌木和草本植物的生物量。

2.2 生物量测算

2.2.1 乔木层生物量

以往对亚热带森林生态系统样地生物量的研究,方法上大多采用相对生长法,即通过选择各径级标准木或有代表性的样木,砍伐称重,取样烘干,建立林木生物量与测树因子之间的相对生长关系式,然后根据样地密度或样地中林木测树因子的调查资料,估算林地的生物量^[4~9]。通过文献对比,可以得到适用于不同地区的大量乔木生长关系式,并根据经纬度、海拔等空间要素以及温度、降水等气候指标尽可能相似的原则,从中筛选出适用于本调查区的乔木生长关系式,用于对样地内各种乔木的生物量进行估算。各树种个体生物量估算的相对生长方程见表 1。

表 1 样地内主要树种生物量相对生长方程
Table 1 Allometric biomass equations for main tree species in plots

树种* Tree species	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	来源 Source
毛竹 1	$W = 213.4164D^{-0.5805}H^{2.3131}$	0.8321	[10]
马尾松 2	$W = 0.1309D^{2.4367}$	0.9753	[11]
杉木 3	$W = 0.005238(D^2H)^{1.156038}$	0.978	[12]
木荷 4	$W = 0.031103(D^2H)^{1.019796}$	0.979	[12]
湿地松 5	$W = 0.01007(D^2H)^{1.109621}$	0.988	[12]
甜槠 6	$W_{\text{干}} = 0.0169(D^2H)^{1.0001}$	>0.90	[12]
	$W_{\text{枝}} = 0.02639(D^2H)^{0.8584}$		
	$W_{\text{叶}} = 0.00496(D^2H)^{0.9504}$		
柳杉 7	$W = 0.2655(D^2H)^{0.7076}$	0.9928	[14]
樟树 8	$W = 0.175374(D^2H)^{0.819874}$	0.9934	[15]
枫香 9	$W_{\text{干}} = 0.0927(D^2H)^{0.8006}$	0.931	[16]
	$W_{\text{枝}} = 0.0825(D^2H)^{0.6491}$	0.989	
	$W_{\text{叶}} = 1.0836(D^2H)^{0.2166}$	0.694	
柏木 10	$W = 0.2045(D^2H)^{0.7499}$	0.97	[17]
闽粤栲 11	$W = 0.6131(-0.9678 + D)^2$	0.9952	[18]
盐肤木 12	$W = e^{4.3555}D^{2.4630}$	0.9954	[19]
拟赤杨 13	$W_{\text{干}} = 0.8003(D^2H)^{0.5276}$	0.995	[20]
	$W_{\text{枝}} = 0.1768(D^2H)^{0.5648}$	0.989	
	$W_{\text{叶}} = 0.6179(D^2H)^{0.3191}$	0.953	
黄毛青冈 14	$W = 2.3743 \times 10^{-4}(10.357 + D)^4$	0.9996	[21]
刨花楠 15	$W = e^{-3.055712}(D^2H)^{0.942929}$	0.9517	[22]
桤木 16	$W = 0.1565(D^2H)^{0.7388}$	0.99	[17]
檫木 17	$W = 0.0789D^{2.8276}$	0.9909	[23]
黄山松 18	$W = 0.55998(D^2H)^{0.5184059}$	0.9845	[24]

* 1. 毛竹 *Phyllostachys heterocycla* 2. 马尾松 *Pinus massoniana* 3. 杉木 *Cunninghamia lanceolata* 4. 木荷 *Schima superba* 5. 湿地松 *Pinus elliotii* 6. 甜槠 *Castanopsis eyrei* 7. 日本柳杉 *Cryptomeria japonica* 8. 樟树 *Cinnamomum camphora* 9. 枫香 *Liquidambar formosara* 10. 柏木 *Cupressus funebris* 11. 闽粤栲 *Castanopsis fissa* 12. 盐肤木 *Rhus chinensis* 13. 拟赤杨 *Alniphyllum fortunei* 14. 黄毛青冈 *Cyclobalanopsis delavayi* 15. 刨花楠 *Machilus pauhoi* 16. 桤木 *Alnus cremastogyne* 17. 檫木 *Sassafras tzumu* 18. 黄山松 *Pinus taiwanensis*

通过表 1 中的幂函数回归方程,计算各样方内所有乔木的单株生物量,加和后得到各样方的乔木总生物量,除以样方面积,得到乔木层单位面积上的生物量。

2.2.2 灌木层生物量

灌木与草本植物的生物量通过收获法获得^[1]。在林下设置 2m×2m 的灌木小样方和 1m×1m 的草本小样方。每个样地内分别设置灌木草本小样方 3~5 个。用收获法测定各样方样方内的全部灌木及草本植物,

对其进行分类,称其鲜重,烘干,最终得到样方内灌木和草本植物的生物量。

2.3 碳储量换算

乔木层和灌木层碳储量由生物量乘以 0.5 的碳转化系数计算^[3],草本层由生物量乘以 0.45 的碳转化系数计算^[25]。

2.4 统计分析方法

双变量数据的回归分析通常采用普通最小二乘法 (Ordinary least square, 简称为 OLS) 和降维分析 (Reduced major axis, 简称为 RMA) 两种方法。OLS 通常忽略自变量的度量误差,适用于自变量对因变量具有明显的依赖性的情形。RMA 则同时考虑自变量和因变量的度量误差。在本研究中,计算碳储量与密度、经度、纬度和海拔的回归关系时采用了 OLS 方法,计算碳储量与多样性指数的关系时,采用了 RMA 方法。OLS 分析通过 Stata8.0 统计分析软件进行,RMA 计算程序见 <http://www.bio.sdsu.edu/pub/andy/RMA.html>。

3 结果与分析

3.1 样带内碳储量测算的一般统计结果

表 2 千烟洲-井冈山样带森林植被单位面积碳储量 ($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 变化
Table 2 Per-unit-area carbon storage in forest vegetation along Qianyanzhou-Jinggangshan transect

测定项目 Item	平均值 Average	变化范围 Range	中值 Median	取样数 Sample size
各层总和 Total value	43.00	4.815 ~ 170.55	29.33	25
乔木层 Tree layer	42.56	4.162 ~ 170.35	28.87	25
灌木层 Shrub layer	8.731×10^{-2}	$4.976 \times 10^{-3} \sim 1.986 \times 10^{-1}$	7.735×10^{-2}	25
草本层 Herb layer	0.3535	$4.071 \times 10^{-2} \sim 8.419 \times 10^{-1}$	0.3382	25

表中可见,调查样带内各样方单位面积总植被碳储量的变化较大,最大值是最小值的近 40 倍。其中,乔木层和灌木层单位面积最大碳储量与最小碳储量之比约为 40,而草本层则为 20.7,表明草本层碳储量在样带上不同样地之间的变化比前两个层片为小。

3.2 样地不同层片碳储量的分配规律

表 3 可见,乔木层碳储量占了各样地总碳储量的绝大部分,比例均在 85% 以上,是调查样带内森林植被碳储量的主要来源。平均而言,草本层碳储量的分配比例 (1.835%) 高于灌木层 (0.4873%),但从变化范围来看,也有部分样地的灌木层碳储量的分配比例高于草本层。

表 3 千烟洲-井冈山样带植被碳储量在各层分配比例的变化 (%)
Table 3 Pattern of vegetative carbon allocation to different layers along Qianyanzhou-Jinggangshan transect (%)

层片 Layer	平均值 Average	标准差 Standard deviation	变化范围 Range	中值 Median	样地数 Sample size
乔木层 Tree layer	97.68	0.574	86.4 ~ 99.9	98.54	25
灌木层 Shrub layer	0.4873	0.1342	$6.305 \times 10^{-5} \sim 3.1$	0.25	25
草本层 Herb layer	1.835	0.4509	0.0754 ~ 10.43	1.20	25

3.3 样带内乔木层碳储量在不同树种之间的分配

图 2 是对调查样带中所有 25 个样地的综合统计结果。不同树种在乔木层中碳储量的分配比例不同。杉木、木荷、湿地松、马尾松为碳蓄积量较大的树种,占了乔木层碳蓄积总量的 71.7%。其中,杉木占乔木层碳储量的 25.06%,是显著的优势树种。总体而言,碳储量相对集中于少数优势树种。

3.4 样带内乔木层碳储量与乔木密度的关系

森林乔木层单株平均生物量 (M) 与密度 (N) 之间存在一定的幂函数关系, $M = aN^b$, 式中 a 为常数。其幂指数 b , 也即 M 对 N 双对数坐标图上的斜率,过去曾被作为生态学中的自疏定律的特征指数,被认为是 $-3/2$ ^[26~30], 近来又有人认为是 $-4/3$ ^[31~33]。通过简单的数学代换,可知单位面积乔木层碳储量与乔木密度

的幂指数作为上述定律 $M = aN^{-3/2}$ 成立的等价关系应当是 $-1/2$,而对应于 $-4/3$ 指数的等价关系应为 $-1/3$ 。图 3 给出的 -0.0756 的指数显然远大于 $-1/2$ 和 $-1/3$ 的预期。

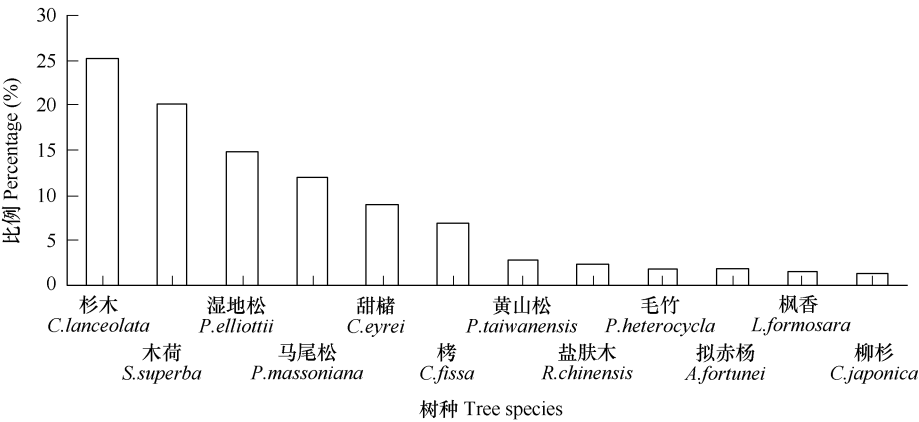


图 2 千烟洲-井冈山样带乔木层各树种的碳储量分配比例

Fig. 2 Partitioning of carbon storage among different tree species along Qianyanzhou-Jinggangshan transect

3.5 样带内植被碳储量与经度、纬度和海拔的关系

3.5.1 样带内植被碳储量与经度的关系

查相关系数检验表可知 R 临界值为 0.396 (独立自变量个数 = 1 ,剩余自由度 = $25 - 2 = 23$,显著性水平为 0.05) 则 R^2 临界值为 0.157。图 4a、图 5a 和图 6a 中 R^2 值均远小于临界值 且 P 值均大于 0.05 表明各层片的碳密度 (单位面积碳储量) 以及样地植被总体的碳密度与经度之间没有相关关系。这可能是由于此次调查的样带长度不超过 200km 经度没有超出 1° 的范围 ,水热因子在这样一个狭窄的经度范围内变化不大 ,因此无论对森林乔木层还是林下灌草层的碳蓄积过程的影响均不大。

3.5.2 样带内植被碳储量与纬度的关系

气温是随纬度而变化 ,纬度愈高 ,气温愈低 ,进而影响植物光合作用代谢过程以及植被碳储量的积累。因此推断碳密度与纬度之间存在显著的相关性。图 4b 和图 6b 分别给出了对乔木层碳密度和样地总体碳密度 (林下灌草层与乔木层碳密度的加和) 与纬度的回归结果 ,在 0.05 的显著性水平上 R^2 值均小于 R^2 临界值 0.157 ,印证了假设。图 4b 表明林下灌草层碳储量与纬度之间不具有显著的相关关系。

3.5.3 样带内植被碳储量与海拔的关系

气温亦随海拔而变化 ,海拔愈高 ,气温愈低。海拔高度每上升 100m ,气温下降约 $0.5 \sim 0.6^\circ\text{C}$,也影响着植物的碳固定。因此 ,也计算了碳密度与海拔之间的关系。图 4c、图 5c 和图 6c 显示的回归结果均表明 ,乔木层、林下灌草层以及样地植被总体碳密度与海拔存在着显著的相关性 ;其中 ,随海拔上升 ,乔木层碳密度增加 ,而林下灌草层的碳密度则减少 ,由于乔木层碳储量在调查样地中所占比例较大 (表 3) ,因此样地总体的碳密度值则仍随海拔上升而增加。

3.6 样带内不同层片碳储量与物种多样性指数的关系

物种多样性是对物种丰富程度及其分布均匀性的一个指数 ,是反映群落种类组成特征及其数量对比关系的一种综合定量指标。采用 Shannon-Wiener 指数公式 ,即 $H = - \sum P_i \ln P_i$,式中 $P_i = n_i / N$, n_i 为样方中第 i 种的个体数 , N 为所有种的个体数。 P_i 是第 i 种的个体数 n_i 与个体总数 N 的比例。根据公式对整个植被层分乔、

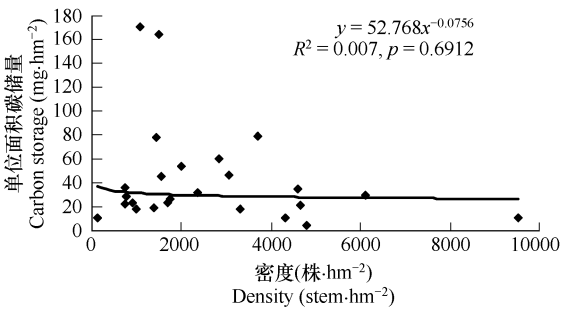


图 3 乔木层碳储量与乔木密度的关系

Fig. 3 Relationship between carbon storage per unit area and tree density in stands

灌、草 3 层计算各层的物种多样性指数及其与各自碳密度的关系。

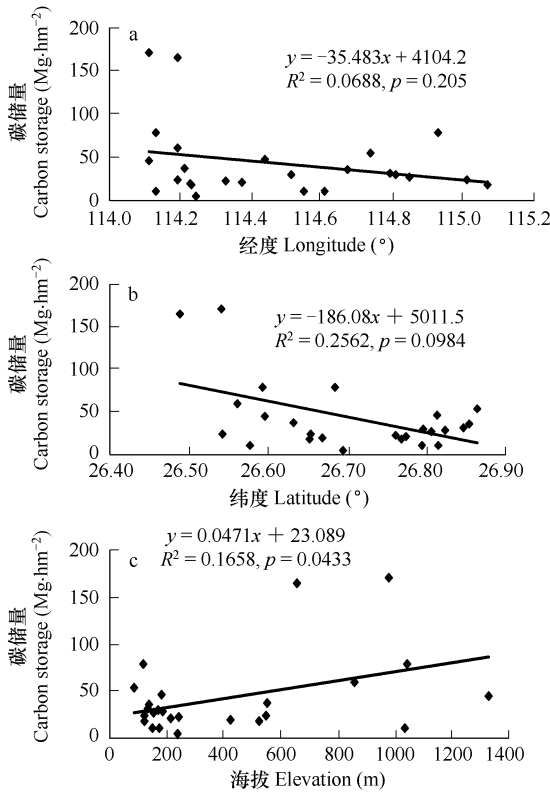


图 4 乔木碳储量与经度、纬度和海拔的关系
Fig. 4 Relationship between carbon storage for trees and geographical locations of plots

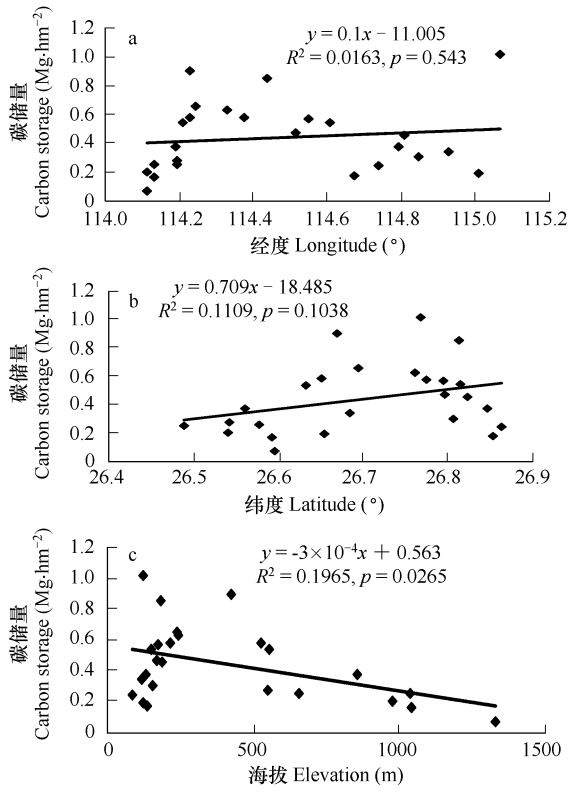


图 5 林下灌草层碳储量与经度、纬度和海拔的关系
Fig. 5 Relationship between carbon storage for shrubs and herbs and geographical locations of plots

图 7 表明各层片的碳密度与其物种多样性指数之间没有显著的相关关系。

4 讨论

森林植被碳蓄积的估算至今仍然存在较大的不确定性^[34]。本文所采用的测树学方法是目前国内外用来估计森林长期碳储量变化的普遍方法。然而,仍有一些因素导致了测定结果与真实值的偏离。虽然理论上说,彻底地收获样地中的所有活碳物质并加以称量将有可能获得最接近于真值的结果,但这实际上是无法实行的,只能在现有的知识和技术基础上对实际碳储量作尽可能的逼近。

具体而言,影响本文中样地中植被碳储量估算精度的因素主要有回归方程的可适用性和收获法取样的有偏性。前者影响乔木层碳储量的估计,后者影响灌草层碳储量的估计。在选择通过维度分析法建立的胸径-生物量回归方程时对各树种考虑了空间和气候条件尽可能相似的原则,但也不能全然替代在实际样地中伐取样木并就地建立回归方程的准确性。收获法取样测度灌草层生物量虽为在整个乔木样方面积内均匀布设小样方,将单位面积灌草层生物量与整个样方面积的乘积作为整个样方的灌草层总生物量,但这一常规方法的近似性所蕴涵的误差也是毋庸置疑的。使用测树学方法进行森林植被碳储量的样带调查是一项劳动密集型的研究,研究目的最终是为增进森林碳汇功能服务(伐木与之背道而驰),加之样带内林地的辖属关系各异,因此,如何尽可能减少对林地的破坏性和增强碳储量估算的准确性成为此类研究贯穿始终的一对矛盾。

根据冯宗炜等对亚热带东部常绿阔叶林的统计结果,典型常绿阔叶林中,乔木层生物量占群落总生物量的 80.2% ~ 98.8%,该比例与群落的发育和人为干扰影响有关^[1]。测定结果为 86.4% ~ 99.9%,基本与上述范围相吻合。下木层碳储量普遍较低,说明绝大多数群落的林下灌木发育较差。冯宗炜等人对亚热带东部常绿阔叶林下木层碳储量比例的统计结果为 0.6% 到 9.5%^[1],本研究结果在此范围之内。草本层的碳储量

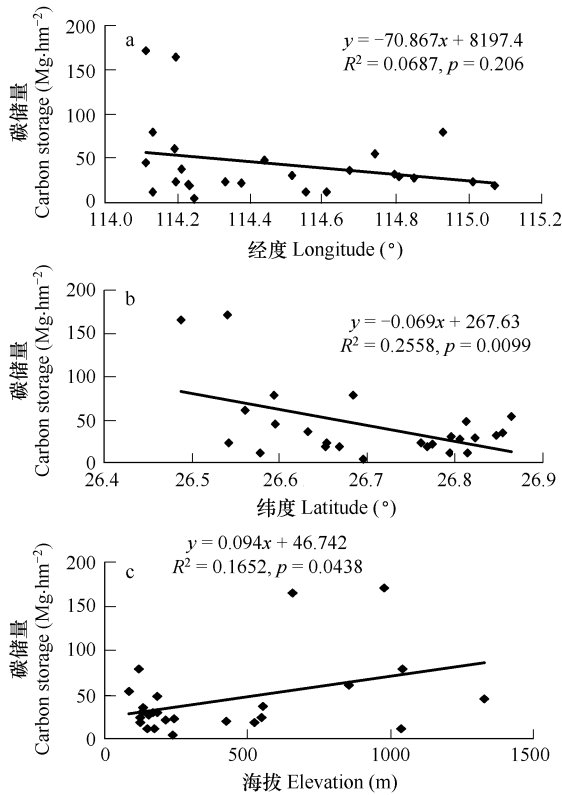


图6 样地各层片总碳储量与经度、纬度和海拔的关系
Fig 6 Relationship between integrated vegetative carbon storage from different layers and geographical locations of plots

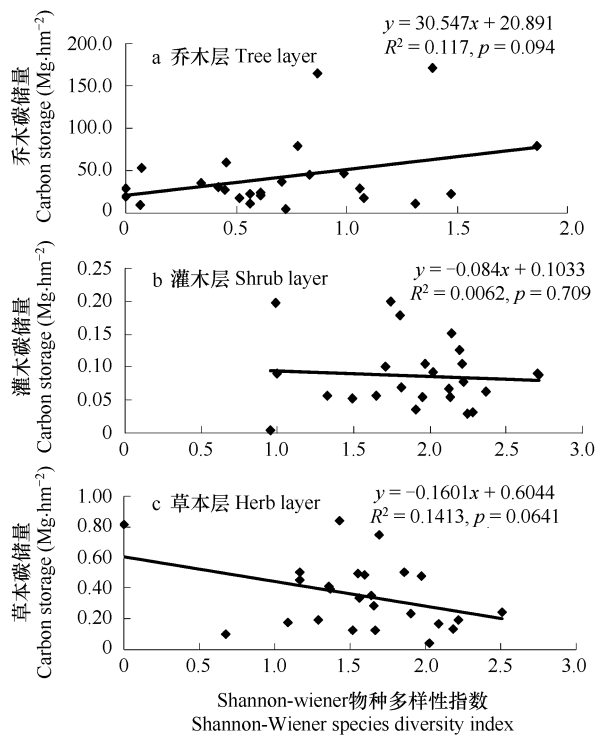


图7 各层片碳储量与物种多样性指数的关系
Fig. 7 The relationship between carbon storage of different layers and diversity index

与灌木层一样,与乔木层的发育关系比较密切,占了不足1%,亦与前述结果相一致。虽然调查的样带中湿地松(外来引进树种)、杉木、木荷等人工林组分较多(图2),建群种构成与冯等所统计的亚热带东部常绿阔叶林有所不同,后者以30~35a的青冈(*Castanopsis glauca*)、栲类(*Castanopsis fargesii*)和木荷等本地乡土种为主,而碳储量在不同层片间的分配规律却基本一致,因此,这可能表明在同一气候带不同的生态系统重建策略(引入外来树种还是利用乡土树种),对群落碳储量分配的垂直结构没有太大影响。

不同树种的乔木层碳储量分配比例是对研究区域内各样地碳蓄积状况的一个综合反映。少数几种优势树种集中了乔木层生物量和碳储量的绝大部分,这亦与冯等的研究结果相一致^[1]。

碳密度是单位面积的碳储量,其估算结果因森林植被碳储量和森林面积的估算值而异。Dixon等估计,中国森林生态系统的植被碳总量为17Pg^[35],王效科等据此估计我国森林的平均碳密度为114Mg hm⁻²并认为这一结果显著高估了我国森林的碳密度^[36]。汪业勋等估算中国森林的植被碳密度平均为41.938 Mg hm⁻²^[37],亚热带常绿阔叶林区域的植被碳密度为26.29 Mg hm⁻²^[1]。而根据Fang等的估算,中国森林的植被碳储量为4.75Pg,碳密度为44.91 Mg hm⁻²,本样带所在的中东部地区的碳密度为23~35 Mg hm⁻²,为目前最受公认的结果^[3]。本文对赣中亚热带森林样带的碳密度调查结果为43.0 Mg hm⁻²,高于汪业勋等和Fang等对该区域的估算结果,但低于Fang等对全国森林平均碳密度的估算结果。

乔木单株平均生物量(M)与密度(N)之间的幂指数关系,是一个长期以来颇负争议的问题。Yoda首次在单种群中发现了在单株生物量与密度之间的 $-3/2$ 幂指数关系,即 $M \propto N^{-3/2}$,而后几项早期的研究表明^[28~30, 38],当 N 从10变化到 10^7 , M 从10变化到 10^{10} 时,上述指数关系在不同种群中依然成立。 $M \propto N^{-3/2}$ 的一个数学上的恒等式是 $B \propto N^{-1/2}$,这里 B 为单位面积上的乔木总生物量。如果用于回归的原始数据是单株生物量 M 与密度 N ,而 M 是通过 B 除以 N 得来,则应当用 B 与 N 回归后求得 B 与 N 的关系,然后通过恒等

变换来计算 M 与 N 的关系。在此情形下 $B \propto N^{-1/2}$ 等价于 $M \propto N^{-3/2}$ [B9]。Gorham 通过对 65 个包括乔木、苔藓和蕨类的样地的 B 与 N 幂关系的研究,得到了一个 -0.49 的幂指数,被视为对 $M \propto N^{-3/2}$ 指数关系的著名证明实例 [B8]。 $-3/2$ 指数律一度被视为植物生态学的唯一法则 [40]。然而,后来 Weller、Zeide 和 Lonsdale 等研究者重新检验了许多曾被作为 $-3/2$ 法则的基本证据的研究结果,发现这些结果实际上并不能作为 $-3/2$ 指数律的充分证据,实际回归得到的指数经验值要比 $-3/2$ 的期望值分散得多,变动很大 [B9, 41~47]。例如, Weller 曾经计算了 75 个单种和多种种群以验证 $B \propto N^{-1/2}$ 的指数关系,发现实际指数值变动于 -0.204 到 -3.76 之间,平均值为 -0.804 ,远高于 -0.5 的期望值 [46]。20 世纪 90 年代末以来, Enquist 等整合了 Yoda、Gorham、Weller 以及 Lonsdale 等文献中的共 251 对数据,对 $M \propto N^{-4/3}$ 给出了经验证据,回归出来的指数值为 -1.341 ,与其理论预测 -1.333 相符合 [B3]。随后 Enquist and Niklas 和 Niklas 等通过不同数据相继对 M vs $N^{-4/3}$ 进行了验证 [B2, 48]。Enquist 等的一系列经验证据试图表明,在不同群落及种群中个体生物量与密度的相对生长关系的幂指数值,应当是由“基于资源限制的自疏理论” [49] 决定的 $-4/3$,而不是始自 Yoda 的“自疏法则” $-3/2$ 。然而,与传统的 $-3/2$ 指数律的遭遇类似, Enquist 等的 $-4/3$ 幂指数关系同样遭到了质疑 [50, 51],目前仍然需要更多的经验证据以验证其普适性。

这里之所以讨论 M 与 N 的指数关系,不仅是因为之前这种关系曾被期望成为生态学中为数不多的普适法则之一进行研究,也是因为不管 $M \propto N^{-3/2}$ 还是 $M \propto N^{-4/3}$ (对应于 $B \propto N^{-1/2}$ 和 $B \propto N^{-1/3}$) 是否有望成为一个生态学定律,这一规律实际上也可以说明群落内单株个体碳储量与密度之间的指数关系,或者单位面积上碳储量与密度之间的关系,因而对于森林生态系统的碳蓄积研究具有重要意义。图 3 是经过对数转换后的乔木单位面积碳储量和密度给出的分析结果,斜率为 -0.0756 ,与 $-1/2$ 和 $-1/3$ 的期望值相差极大。造成这种情形的可能原因是多方面的,一是在森林碳储量的估测上仍然有较大的不确定性,通过维量分析方法估计出的生物量本身与真值有一定误差。二是 $B \propto N^{-1/2}$ 或 $B \propto N^{-1/3}$ 这种关系的普适性仍然悬疑,计算结果是对这一可能的普适规律的一个反例。三是实际上无论 $M \propto N^{-3/2}$ 还是 $M \propto N^{-4/3}$ 对于具体样地而言究竟在何种情形下成立也一直充满争议。一些作者认为应当以个体之间的竞争效应是否达到了自疏状态,或者是否自疏作用已经产生了明显个体死亡,或者以林冠是否达到郁闭,或以叶面积指数是否达到最大为标准,而 Enquist 和 Brown 等则引入了一个极富想象力的概念,“平衡种群密度”,即资源的供给和利用之间达到平衡状态的密度,以此来说明上述关系的可适用性,但是在实践中很难具体判断某一样地是否达到了平衡状态,而且 Niklas 和 Enquist 使用了 Cannell 数据来对 $-4/3$ 幂指数关系进行验证,但是 Cannell 数据对所描述的样地是否达到了“平衡”状态和样地历史并无说明 [52],可以理解为任意发展阶段上的样地,与用样带上 25 个样方的检尺数据进行 $-4/3$ 指数规律验证的做法具有同样的合理性。

Enquist 和 Niklas 利用 Gentry 数据对乔木生物量与地理因子之间的关系进行了分析,通过 220 个数据点的回归结果,发现乔木单位面积总生物量与纬度之间存在显著的相关关系 ($n = 220$, $r^2 = 0.2570$, $P < 0.0001$),而与海拔之间没有相关关系 ($n = 141$, $r^2 = 0.0004$, $P = 0.820$) [B3]。结果显示乔木碳密度以及样地总体碳密度与纬度和海拔之间有显著的相关关系。由于碳密度只是单位面积生物量乘以常数而得到,因而可以和生物量的相关结果进行比较。在单位面积的乔木生物量或碳密度与海拔的关系上与 Enquist 和 Niklas 的结果有异。这可能是由于 Gentry 数据的地理跨度远大于所调查的样带的跨度所引起。Gentry 数据跨越 6 个大洲的热带和亚热带森林,纬度范围为 60.4°N 到 40.43°S ,海拔范围为 20m 到 3050m ,而本研究数据基本在 1 个纬度的范围内,因此,碳储量与纬度和海拔在不同空间尺度上可能具有不同的函数关系。

王效科等根据我国各省市自治区的资料,通过回归分析发现中国森林生态系统碳密度随人口密度增加而降低 [B6]。Fang 等也认为中东部地区的较低的碳密度与该区的人口密度有关 [B1]。森林的碳密度与人口密度之间的相互作用实际上反映了森林生态系统的碳蓄积过程受人为干扰的程度。本研究的调查范围只是赣中亚热带区域中的一个窄条,较难以统计森林生物量和人口密度的空间分布的细致情况,因而没有定量分析森林生态系统碳密度与人口密度的关系。但是,从样带调查过程中观察到的情形来定性分析,样带从海拔 100m

的丘陵农垦地区延伸到 1000m 的中山地带 ,低海拔地带的样地多位于农田和居民点附近 ,随着海拔的增高 ,居民点减少 ,样地多分布于人迹罕至之处 ,受到人为影响的几率减少 ,这一现象可以作为乔木层和样地总体的碳密度呈现随海拔增加而增加趋势的一个解释 (图 6)。

碳储量与植物物种多样性的关系 ,一直是被作为生物多样性与生态系统功能过程的关系中的一个问题而被加以讨论。碳储量或生物量的累积被视为体现生态系统功能的一个重要指标。虽然就多样性和生态系统功能间的关系曾有多种假说存在 ,如驼峰假说、非线性假说等^[54] ,但目前绝大多数研究证实 ,一般情况下植物多样性的减少意味着生态系统固定 CO₂ 的能力降低 ,植物多样性越少 ,碳储量越少 ,这已在许多发表在 Nature、Science 和 PNAS 等刊物上的有影响力的工作中达成了共识^[54~62]。例如 ,Reich 和 Knops^[63]以及 Reich 和 Tilman^[64]通过草地实验验证 ,不论在目前的大气 CO₂ 浓度和 N 沉积水平下 ,还是在未来大气 CO₂ 浓度提高或 N 沉积增加的情况下 ,总生物量或碳储量均与物种多样性之间呈现正相关关系 ,Hector 等对欧洲草地的研究也给出了同样的结论^[62]。2004 年美国生态学会委托 D. U. Hopper 和 F. S. Chapin , III 等全球 15 位著名生态学家总结了已往在多样性和生态系统功能间关系方面的研究结果 ,发表了一个研究报告 ,其给出的八大确定性结论中也涵盖了上述共识^[56]。由于草本植物等中观生物类群 (mesocosm) 为研究多样性与生态系统功能和过程间关系提供了实验上的便捷 ,因此关于碳储量或生物量与植物物种多样性之间正相关关系的证据主要在以草地生态系统为实验对象的工作中获得。即使对森林而言 ,物种多样性较高的热带森林比中高纬度的温带和寒带森林具有更高的单位面积生物量和碳储量也是不争的事实。然而 ,Enquist 和 Niklas 使用 Gentry 数据对 227 个样地的热带和亚热带森林生物量和物种数目进行回归 ,却发现碳储量与物种多样性之间没有显著的相关关系^[53] ,这一结果也在 Nature 上发表 ,但是显然遭到了质疑^[56 65]。例如 ,Hopper 和 Chapin 等的研究报告中认为 ,在 Enquist 和 Niklas 用于回归的 227 个样地的生物量数据中 ,不同样地单位面积生物量相差达 10 倍到 100 倍之多 ,这样大的变化范围暗示着其中不同种的功能差异以及其他的生态控制因子可能对样地的生物量也产生了显著影响 ,无疑会影响到他们的回归结论 ,需要研究群落动态、不同种的功能差异以及其他生态控制因子在多大程度上影响了生物量与多样性之间的功能关系^[56]。

回归结果表明 ,虽然乔木层碳密度与 Shannon-Wiener 物种多样性指数在 0.05 的置信水平上没有显著相关关系 ,但是如果置信水平降低到 0.1 时 ,可以认为其碳密度随物种多样性指数的增加而增加。乔木层碳储量占了整个样地总碳储量的 85.45% 到 99.88% (表 3) ,因而这一关系可以在相当程度上反映样地植被单位面积的总碳储量与物种多样性的关系。该结果和 Enquist 和 Niklas 的 Nature 论文的一个共同之处是均是通过样地测树数据 (即所谓 “survey data”) 获得 ,不是通过控制实验得出 ,又鉴于 Hopper 和 Chapin 等指出的问题 ,这种方法究竟能在多大程度上说明碳储量与多样性之间的功能关系 ,其中的不确定性 ,值得进一步研究。

- 5 结论
- (1) 乔木层碳储量占了各样地总碳储量的绝大部分 ,比例均在 85% 以上 ,是调查样地内森林植被碳储量的主要来源。
 - (2) 乔木层单位面积碳储量与乔木密度的幂指数为 -0.0756 ,远低于 -1/2 和 -1/3 的预期。
 - (3) 样地总体植被碳储量与经度之间没有显著的相关关系 ,而与纬度和海拔之间有显著的相关关系。
 - (4) 各层片的碳密度与其 Shannon-Wiener 物种多样性指数之间没有发现显著的相关关系。

References :

[1] Feng Z W , Wang X K , Wu G. The productivity and biomass of forest ecosystems in China. Beijing : Science Press , 1999.

[2] Fang J Y. Forest productivity in China and its response to global climate change. Acta Phytocologica Sinica , 2000. 24 (5) 513 — 517.

[3] Fang J Y , Chen A P , Peng C H , *et al.* Changes in Forest Biomass Carbon Storage in China Between 1949 and 1998. Science , 2001 , 292 : 2320 — 2322.

[4] Eamus D , McGuinness K , Burrows W. Review of Allometric Relationships for Estimating Woody Biomass for Queensland , the Northern Territory and Western Australia , in National Carbon Accounting System Technical Report No. 5A. Australian Greenhouse Office , 2000. 1 — 64.

- [5] Jenkins J C , Chojnacky D C , Heath L S , *et al.* National-Scale Biomass Estimators for United States Tree Species. *Forest Science* ,2003 ,49 (1) : 12 — 35.
- [6] Sato D , Tsutsumi T. Mass production of terrestrial plant communities. translated by Shaoquan , Nie & Baoyong Ding. Beijing : Science Press ,1986.
- [7] Kimura M. Measuring methods of production in terrestrial plant communities. translated by Shu Jiang. Beijing : Science Press ,1976.
- [8] Li Y D , Wu Z M , Fang J Y. CO₂ emission and carbon storage of tropical mountainous rainforest. In : Wang G C and Wen Y P eds. Concentration of green house gas ,its monitoring for emission and relevant processes. Beijing : China Environmental Science Press ,1996. 100 — 108.
- [9] Chen Z , Zhang H , Wang B. Study on biomass and allocation of evergreen broad-leaved forest in Heishiding of Guangdong. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* ,1993 ,17 (4) 289 — 298.
- [10] Chen H , Hong W , Lan B , *et al.* Study on biomass and productivity of *Phyllostachys Heterocycla* cv. *pubescens* forest in the north of Fujian. *Scientia Silvae Sinicae* ,1998 ,34 (Special issue 1) 60 — 64.
- [11] Wu S R , Yang H Q , Hong R , *et al.* Studies on the Biomass of *Pinus massoniana* Plantations and Its Structure. *Journal of Fujian Forestry Sci & Tech* ,1999 ,26 (1) 18 — 21.
- [12] Yang H , Zhan Y S , Zeng Z G , *et al.* A Study on the Biomass and Growth of Three Forestation Models in Jishui Region. *Acta Agriculurae Universitatis Jiangxiensis* ,2004 ,26 (2) 164 — 168.
- [13] Du G. Determination and analysis of aboveground biomass in main communities of secondary evergreen broad-leaved forest of North-western Zhejiang. *Zhejiang Forestry Science and Technology* ,1987 ,7 (5) 5 — 12.
- [14] Yi A. Study on biomass and productivity of the mixed artificial forest of *Cryptomeria japonica* and *Cunninghamia lanceolata*. *Sichun Forestry Survey and Design* ,1998 ,3 (3) 50 — 52.
- [15] Yao Y J , Kang W X , Tian D L. Study of the Biomass and Productivity of *Cinnamomum camphora* Plantation. *Journal of Central South Forestry University* ,2003 ,23 (1) 1 — 5.
- [16] Qian G Q. Studies on the Dynamic Change of the Net Production Quantity of *Liquidambar formosana* Plantation. *Acta Agriculurae Universitatis Jiangxiensis* ,2000 ,22 (3) 399 — 404.
- [17] Shi P L , Yang X , Zhong Z C. Dynamics of population biomass and its density-dependent regulation in alder and cypress mixed forest. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,1997 ,8 (4) 341 — 346.
- [18] Guan D Y , Huang G Q. Studies on the Biomass and Its Predictive Models of *Castanopsis fissa* Natural Forest. *Journal of Fujian Forestry Sci and Tech* ,2000 ,27 (2) 34 — 36.
- [19] Li J , Li H M , Chen G X , *et al.* A Study on the Biomass of the Young Plantation of *Rhus chinensis* and *R. punjabensis*. *Journal of Jishou University (Natural Science Edition)* ,2000 ,21 (1) 1 — 5.
- [20] Chen W R. Study on the net productivity dynamic changes of the above-ground portion of *alniphyllum fortunei* plantation. *Journal of Fujian Forestry Sci and Tech* ,2000 ,27 (3) 31 — 34.
- [21] Dang C L , Wu Z L , Zhang Z. Studies on the Biomass of *Cyclobalanopsis delavayi* Community. *Journal of Yunnan University* ,1994 ,16 (3) 205 — 209.
- [22] Zhong Q L , Zhang Z Y , Zhang C H , *et al.* The Dynamic Analysis of the Biomass and the Structure of *Machilus pauhoi*. *Acta Agriculurae Universitatis Jiangxiensis* ,2001 ,23 (4) 533 — 536.
- [23] Liu J , Hong W , Wu C Z , *et al.* Biomass Production and Productivity of Natural Regenerated *Sassafras tzumu* Trees. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* ,2002 ,10 (2) 105 — 110.
- [24] Hu D , Li Z , Xie X. Study of biomass and productivity of *Pinus taiwanensis* plantation. *Journal of Central South Forestry University* ,1998 ,18 (1) : 60 — 64.
- [25] Ajtay G L , Ketner P , Duvigneaud P. Terrestrial primary production and photomass. In : Bolin *et al.* , eds. The global Carbon Cycle . New York : John Wiley & Sons ,1979. 142.
- [26] Yoda K , Kira T , Ogawa H , *et al.* Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *Journal of Biology of Osaka City University* ,1963 ,14 :107 — 129.
- [27] Yoda K , Shinozaki K , Ogawa H , *et al.* Estimation of the total amount of respiration in woody organs of trees and forest communities. *Journal of Biology of Osaka City University* ,1965 ,16 :15 — 26.
- [28] White J. The allometric interpretation of the self-thinning rule. *Journal of Theoretical Biology* ,1981 ,89 :475 — 500.
- [29] White J. The thinning rule and its application to mixtures of plant populations. New York : Academic Press ,1985. 291 — 309.
- [30] Westoby M. The self-thinning rule. *Advances in Ecological Research* ,1984 ,14 :167 — 225.
- [31] Enquist B J. Universal scaling in tree and vascular plant allometry : toward a general quantitative theory linking plant form and function from cells

to ecosystems. *Tree Physiology*, 2002, 22: 1045—1064.

- [32] Niklas K J, Midgley J J, Enquist B J. A general model for mass-growth-density relations across tree-dominated communities. *Evolutionary Ecology Research*, 2003, 5: 459—468.
- [33] Enquist B J, Brown J H, West G B. Allometric scaling of plant energetics and population density. *Nature*, 1998, 395: 163—165.
- [34] Yu G Y, Li H T, Wang S Q. Global change, carbon cycle and storage in terrestrial ecosystem. Beijing: Meteorology Press, 2003.
- [35] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263: 185—190.
- [36] Wang X K, Feng Z W, Ouyang Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12 (1): 13—16.
- [37] Wang Y X. Study on regional carbon cycle of forest ecosystem in China. In: Collection of Ph. D. Theses of Committee of Synthesis Investigation of Natural Resources. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 1999. 123.
- [38] Gorham E. Shoot height, weight and standing crop in relation to density in monospecific plant stands. *Nature*, 1979, 279: 148—150.
- [39] Weller D E. A re-evaluation of the $-3/2$ power rule of plant self-thinning. *Ecological Monographs*, 1987, 57: 23—43.
- [40] Hutchings M. Ecology's law in search of a theory. *New Scientists*, 1983, 98: 765—767.
- [41] Zeide B. Analysis of the $3/2$ power law of self-thinning. *Forest Science*, 1987, 33: 517—537.
- [42] Weller D E. A mathematical and statistical analysis of the $-3/2$ power rule of self-thinning in even-aged plant populations. Knoxville, Tennessee, USA: University of Tennessee, 1985.
- [43] Weller D E. The interspecific size-density relationship among crowded plant stands and its implications for the $-3/2$ power rule of self-thinning. *American Naturalists*, 1989, 133: 20—41.
- [44] Zeide B. Self-thinning and stand density. *Forest Science*, 1991, 37: 517—523.
- [45] Lonsdale W M. The self-thinning rule: dead or alive? *Ecology*, 1990, 71: 1373—1388.
- [46] Weller D E. Will the real self-thinning rule please stand up? a reply to Osawa and Sugita. *Ecology*, 1990, 71: 1204—1207.
- [47] Weller D E. The self-thinning rule: dead or unsupported? a reply to Lonsdale. *Ecology*, 1991, 72: 747—750.
- [48] Enquist B J, Niklas K J. Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants. *Science*, 2002, 295: 1517—1520.
- [49] Brown J H, Gillooly J F, Allen A P, *et al.* Toward a metabolic theory of ecology. *Ecology*, 2004, 85: 1771—1789.
- [50] Torres J-L, Sosa V J, Equihua M, *et al.* On the conceptual basis of the self-thinning rule. *Oikos*, 2001, 95 (3): 544—548.
- [51] Roderick M L, Barnes B. Self-thinning of plant populations from a dynamic viewpoint. *Functional Ecology*, 2004, 18: 197—203.
- [52] Cannell M G R. World forest biomass and primary production data. London, New York: Academic Press, 1982.
- [53] Enquist B J, Niklas K J. Invariant scaling relations across tree-dominated communities. *Nature*, 2001, 410: 655—660.
- [54] Naeem S, Lawton J H, Thompson L J, *et al.* Biotic diversity and ecosystem processes: using the Ecotron to study a complex relationship. *Endeavour*, 1995, 19 (2): 58—63.
- [55] Tilman D, HilleRisLambers J, Harpole S, *et al.* Does metabolic theory apply to community ecology? It's a matter of scale. *Ecology*, 2004, 85 (7): 1797—799.
- [56] Hooper D U, Chapin I, F. S., Ewel J J, *et al.* Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 2005, 75 (1): 3—35.
- [57] Naeem S, Chapin III F S, Costanza R, *et al.* Biodiversity and Ecosystem Functioning: Maintaining Natural Life Support Processes, in *Issues in Ecology Series*. 1999. 1—11.
- [58] Loreau M. Biodiversity and ecosystem functioning: recent theoretical advances. *Oikos*, 2000, 91: 3—17.
- [59] Craine J M, Reich P B, Tilman D, *et al.* The role of plant species in biomass production and response to elevated CO₂ and N. *Ecology Letters*, 2003, 6: 623—630.
- [60] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, *et al.* Biodiversity and Ecosystem Functioning: Current Knowledge and Future Challenges. *Science*, 2001, 294: 804—808.
- [61] van Ruijven J, Berendse F. Diversity-productivity relationships: Initial effects, long-term patterns, and underlying mechanisms. *PNAS*, 2005, 102 (3): 695—700.
- [62] Hector A, Schmid B, Beierkuhnlein C, *et al.* Plant Diversity and Productivity Experiments in European Grasslands. *Science*, 1999, 286: 1123—1127.
- [63] Reich P B, Knops J, Tilman D, *et al.* Plant diversity enhances ecosystem responses to elevated CO₂ and nitrogen deposition. *Nature*, 2001, 410 (12): 809—812.
- [64] Reich P B, Tilman D, Naeem S, *et al.* Species and functional group diversity independently influence biomass accumulation and its response to CO₂ and N. *PNAS*, 2004, 101 (27): 10101—10106.

[65] Gotelli N J. Biodiversity in the scales. *Nature*, 2002, 419 (10) 575—576.

文参考文献：

- [1] 冯宗炜,王效科,吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京: 科学出版社, 1999.
- [6] 佐藤大七郎,堤利夫,聂绍荃,丁宝永译. 陆地植物群落的物质生产. 北京: 科学出版社, 1986: 201.
- [7] 木村允,姜恕译. 陆地植物群落的生产量测定法. 北京: 科学出版社, 1976.
- [8] 李意德,吴仲民,方精云. 热带山地雨林生态系统的碳库和 CO₂ 排放量,见:王庚辰,温玉璞主编. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 100~108.
- [9] 陈章和,张宏达,王伯荪. 广东黑石顶常绿阔叶林生物量及其分配的研究. *植物生态学与地植物学学报*, 1993, 17 (4) 289~298.
- [10] 陈辉,洪伟,兰斌,等. 闽北毛竹生物量与生产力的研究. *林业科学*, 1998, 34 (专刊 1) 60~64.
- [11] 吴守蓉,杨惠强,蓉洪,等. 马尾松林生物量及其结构的研究. *福建林业科技*, 1999, 26 (1) 18~21.
- [12] 杨桦,詹有生,曾志光,等. 吉水三种造林模式林分生物量及生长量研究. *江西农业大学学报*, 2004, 26 (2) 164~168.
- [13] 杜国坚. 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与分析. *浙江林业科技* 1987, 7 (5) 5~12.
- [14] 易爱云. 日本柳杉和杉木人工混交林生物量及生产力研究. *四川林勘设计*, 1998, (3) 50~52.
- [15] 姚迎九,康文星,田大伦. 18 年生樟树人工林生物量的结构与分布. *中南林学院学报*, 2003, 23 (1) 1~5.
- [16] 钱国钦. 枫香人工林净生产量动态变化研究. *江西农业大学学报*, 2000, 22 (3) 399~404.
- [17] 石培礼,杨修,钟章成. 桉柏混交林种群生物量动态与密度调节. *应用生态学报*, 1997, 8 (4) 341~346.
- [18] 管大跃,黄国泉. 闽粤栲天然林生物量及预测模型研究. *福建林业科技*, 2000, 27 (2) 34~36.
- [20] 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.
- [21] 党承林,吴兆录,张泽. 黄毛青冈群落的生物量研究. *云南大学学报*, 1994, 16, 205~209.
- [22] 钟全林,张振瀛,张春华,等. 刨花楠生物量及其结构动态分析. *江西农业大学学报*, 2001, 23, 533~536.
- [23] 柳江,洪伟,吴承祯,等. 天然更新的橡木林的生物量和生产力. *热带亚热带植物学报*, 2002, 10 (2) 105~110.
- [24] 胡道联,李志辉,谢旭东. 黄山松人工林生物产量及生产力的研究. *中南林学院学报*, 1998, 18 (1) 60~64.
- [34] 于贵瑞,李海涛,王绍强. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003.
- [36] 王效科,冯宗炜,欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. *应用生态学报* 2001, 12 (1) 13~16.
- [37] 汪业勳,中国森林生态系统区域碳循环研究. 见: 自然资源综合考察委员会博士论文文库. 北京: 中国科学院, 1999: 123.