

小尺度林分碳密度与碳储量研究

李静鹏¹, 徐明锋¹, 苏志尧¹, 柯炳钗¹, 周毅^{1,2}

(1 华南农业大学 林学院, 广东 广州 510642; 2 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要:在数字化长潭自然保护区地图的基础上,均匀设置 66 个标准样地进行群落调查,根据调查数据进行双向指示种分析 (Two-way indicator species analysis, TWINSpan). 结果表明:保护区内主要包括常绿阔叶林、杉木林、针阔混交林、以及杉木-马尾松共优针叶林 4 种群落类型;每种类型按树种组分别计算其蓄积量、生物量和碳储量,并与面积加权后得出该群落的碳密度(单位面积碳储量);4 种群落碳密度依次为 33.94、34.70、51.00 和 42.05 t·hm⁻²;长潭自然保护区碳储量总计为 2.265×10⁵ t,平均碳密度为 44.77 t·hm⁻²,远大于广东省乔木林平均碳密度(25.47 t·hm⁻²). 相关分析表明,碳密度主要受树高、胸径和群落演替时间的影响,与海拔、坡度等地形因子和林木密度没有明显的相关关系 ($P>0.05$).

关键词:碳汇;蓄积量;生物量;碳密度;群落分类;双向指示种分析(TWINSpan);长潭自然保护区
中图分类号:S718.56 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-411X(2013)02-0213-06

Small-Scale Estimation of Carbon Density and Carbon Storage of Forest Stands

LI Jingpeng¹, XU Mingfeng¹, SU Zhiyao¹, KE Xiandong¹, ZHOU Yi^{1,2}

(1 College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2 Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China)

Abstract:Sixty-six sample plots were evenly laid out in Changtan Nature Reserve using a digitized topographic map for pant inventory. Two-way indicator species analysis (TWINSpan) of the sample data categorized the vegetation of the nature reserve into 4 community types, i. e., evergreen broad-leaved forest (EB), *Cunninghamia lanceolata* forest (CL), coniferous and broad-leaved mixed forest (CB), and coniferous forest dominated by *C. lanceolata* and *Pinus massoniana* (CP). Stand volume, biomass, and carbon storage were first calculated by tree species group, and then weighted for area to obtain carbon density of a certain community type. Carbon density for each of the 4 community types, i. e., EB, CL, CB, and CP, was 33.94, 34.70, 51.00 and 42.05 t·hm⁻², respectively. The forest vegetation in the nature reserve had a total carbon storage of 2.265×10⁵ t, and an average carbon density of 44.77 t·hm⁻², much greater than the average value of Guangdong. Correlation analysis indicated that the major determinants for carbon density were tree height, diameter at breast height (DBH), and succession time of communities, while slope, elevation and stand density had no significant relations with carbon density.

Key words:carbon sink; stand volume; biomass; carbon density; community classification; two-way indicator species analysis(TWINSpan); Changtan Natural Reserve

随着全球气候变化问题的加剧和国际谈判的进行,碳汇问题引起了人们广泛的关注. 清洁发展机制 (Clean development mechanism, CDM) 是《京都议定书》中唯一一个与发展中国家相关的履约新机制. CDM 促使发达国家和发展中国家合作完成有助于减缓气候变化的碳减排和增汇项目^[1]. 这一举措使传统林业拥有了新的生态经济内涵,同时也使森林碳汇问题愈加凸显^[2]. 20 世纪 90 年代以来,诸多学者就森林生态系统的碳储量和碳密度问题展开了广泛的研究^[3-7]. 但这些研究多在国家、省或区域尺度上进行^[5-15],研究多集中在树种组成较为简单的各种人工纯林,或把群落结构复杂的天然林简单地按其优势树种纯林来计算^[16-20]. 在相对较小的尺度上,对林型结构复杂的天然林进行碳储量的准确评估还存在一定的难度. 许多学者认为将遥感数据与森林资源清查资料结合起来能增加研究结果的准确性^[21],因为它能综合遥感数据的空间定位准确和地面资料定量准确的优势^[22]. 结合两方面数据利用降尺度技术来进行估算已经在欧美等地得到了较好的应用,但即便这样,其估算的尺度也是以 km 为基本单位^[21-22],在小尺度的碳储量估算中很难运用.

森林碳密度的研究中,有众多的生物量计算方法^[23],包括植物生物量调查^[22]、生态系统通量观测、卫星遥感、大气 CO₂ 浓度反演以及生态系统模型模拟等^[24,10],由于每种方法均有各自优缺点,导致了不同尺度的研究结果有极大的不确定性^[21]. 森林蓄积量包含了林龄、立地条件、林分密度等诸多因素,其中,转换因子连续函数法在由蓄积量推算生物量的过程中可以消除以上因素的影响^[5],并且否定了生物量与蓄积量之比为恒定常数的假定^[25],因此,尽管其简单的线性关系和样本量稍显不足的问题饱受争议^[26-28],但在目前的研究工作中该方法的使用仍最为广泛^[3,6,14,29]. 该方法提高了大尺度上碳储量的估算精度^[6],然而对具体的经营单位进行碳储量的评估时,简单套用该方法可能会有较大的误差存在. 基于此,本文以广东省长潭自然保护区为例,试图在小尺度上对拥有复杂群落结构的森林生态系统进行碳储量的研究,并进一步探究影响碳密度的诸多因素,为碳汇林营造和地区森林生态效益评估提供一定的参考依据.

1 研究区概况

长潭自然保护区位于广东省东北部(116°03′ ~ 116°08′ E, 24°41′ ~ 24°49′ N),蕉岭县西北部,石窟

河的上游,总面积共 5 585. 72 hm²,其中陆地面积 5 059. 1 hm²,水面积 526. 6 hm². 保护区年平均气温为 20. 9 ℃,年平均降雨量为 1 657. 8 mm,最小年降雨量为 1 265. 8 mm;地势由东北向西南倾斜;地貌以丘陵山地为主,占保护区面积的 70% 以上,山地坡度多在 25° ~ 45°. 保护区内的土壤主要以红壤为主,北部为中土层红壤,南部为厚土层红壤,红壤占保护区面积的 85% 以上,土层深厚、疏松、土质较肥沃;海拔 500. 0 ~ 767. 7 m,低山,相对湿度较大,为红黄壤过渡地带,养分中等^[30]. 长潭自然保护区地处北回归线以北,南岭山地以南,地势起伏大,地层古老,地形复杂,形成了多样性的生态环境和植被类型,区内地带性的植被为亚热带常绿阔叶林. 保护区以保护亚热带常绿阔叶林和珍稀濒危野生动植物及其栖息地为主,森林覆盖率达 86% 以上.

2 研究方法

2.1 调查方法

采用 DMAP 制图软件制作长潭自然保护区的数字矢量地图,将保护区划分为 66 个 UTM 千米网格. 为避免随机误差,66 个样地均匀分布在每个网格. 每个样地取代表性群落设置 500 m² 的调查样方,共计调查面积 33 000 m². 每个样方用 GPS 精确定位,记录其坐标、海拔和坡度等数据;进行每木调查,记录所有胸径 ≥ 3 cm 的乔木树高、胸径和冠幅;对林下凋落物取样,并进行小样方 (1 m × 1 m) 调查.

2.2 植被数据分析及群落分类

由每木调查数据得到种 - 面积曲线和多度序位图;并经双向指示种分析 (Two-way indicator species analysis, TWINSpan) 将群落进行分类,得到不同的群落类型划分;计算各群落类型中各树种的相对基盖度和相对多度,按照优势树种对群落进行命名;同时计算每个样方中的林下植被盖度和郁闭度. 以上相关分析经软件 PC-ORD 6. 0 处理.

2.3 林分碳储量计算

2.3.1 林分蓄积量 采用广东省林业局和广东省林业调查规划院 2009 年编制的“广东省主要树种二元立木材积表”来计算各林分蓄积量.

马尾松 *Pinus massoniana* 二元立木材积式为:

$$V = 0.000\ 079\ 852\ 4D^{1.742\ 20}H^{1.011\ 98}, \tag{1}$$

杉木 *Cunninghamia lanceolata* 二元立木材积式为:

$$V = 0.0000\ 697\ 483D^{1.815\ 83}H^{0.996\ 10}, \tag{2}$$

黎蒴 *Castanopsis fissa* 二元立木材积式为:

$$V = 0.000\ 062\ 969\ 2D^{1.812\ 96}H^{1.015\ 45}, \tag{3}$$

硬阔类树二元立木材积式为:

$$V=0.000\ 060\ 122\ 8D^{1.875\ 50}H^{0.984\ 96},\quad (4)$$

式中: V 表示单株蓄积量/ m^3 ; D 表示从地径起 1.3 m 处的树干直径/cm; H 表示树高/m. 将 4 种林分调查所得的所有立木胸径和树高值代入相应的二元立木材积式, 求算单株立木蓄积量. 将林地内所有单株立木蓄积量累加即得林分蓄积量.

2.3.2 生物量计算 采用方精云等^[5]的生物量转换因子连续函数法来估算生物量, 即:

$$Y=aX+b,\quad (5)$$

式中: Y 表示林分生物量/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$; X 表示林分蓄积量密度/ $(\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2})$; a 和 b 均为常数蓄积量. 生物量-蓄积量回归方程优先选用和本研究区地域或气候带相近的研究区研究结果(表 1), 竹的生物量按 22.5 kg/株进行计算^[14].

表 1 各林分类型的生物量-蓄积量回归方程

Tab. 1 Regression equation between biomass and volume of different forest types

林分类型	回归方程 ¹⁾	样本数 (N)	相关系数 (R^2)
常绿阔叶林 ^[3]	$Y=0.743\ 7X+30.524\ 5$	28	0.998
针阔混交林 ^[3]	$Y=0.742\ 0X+15.133\ 3$	15	0.995
针叶混交林 ^[31]	$Y=0.589\ 4X+24.515\ 1$		
杉木林 ^[32]	$Y=0.399\ 9X+22.541\ 0$	56	0.95
马尾松林 ^[32]	$Y=0.510\ 1X+1.045\ 1$	12	0.92
硬阔林 ^[32]	$Y=0.756\ 4X+8.310\ 1$	11	0.98

1) Y 为生物量, X 为蓄积量.

2.3.3 林分全干生物量密度 林分全干生物量是指含水率为 0 时的生物量干质量, 根据平井信二^[33]和白石则彦^[34]的研究结果可知, 各树种全干生物量密度与生物量密度之间满足以下公式:

$$B_0=B-0.04V',\quad (6)$$

式中: B_0 表示单位面积全干生物量, 即全干生物量密度/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$; B 表示单位面积生物量, 即生物量密度/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$; V' 为单位面积蓄积量/ m^3 .

2.4 林分碳密度

2.4.1 林分碳密度计算 林分碳密度用下式计算:

$$c_{\text{林分}}=B_0\times F_{\text{C}},\quad (7)$$

式中: $c_{\text{林分}}$ 为林分碳密度, 即某一树种或森林类型的单位面积碳储量/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$; F_{C} 为含碳系数. 不同树种或森林类型的 F_{C} 值分别为马尾松 0.46、杉木 0.52、硬阔林 0.48、针叶混交林 0.50、竹林 0.50^[35].

2.4.2 2 种计算群落碳密度的方法 方法 1: 计算每种群落类型的平均蓄积量密度/ $(\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2})$ (不

含竹), 按照群落类型直接使用生物量-蓄积量回归方程计算生物量, 由公式 (6) 计算全干生物量密度, 加上竹的全干生物量密度得某一群落类型的全干生物量密度. 该群落碳密度按下式计算:

$$c_{\text{群落}}=B_{0\text{乔}}\times F_{\text{C}}+B_{0\text{竹}}\times F_{\text{C竹}},\quad (8)$$

式中: $c_{\text{群落}}$ 为该群落碳密度/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$; $B_{0\text{乔}}$ 为该群落所有乔木的全干生物量密度/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$; F_{C} 为该群落类型的含碳系数; $B_{0\text{竹}}$ 为该群落类型中竹的全干生物量密度/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$; $F_{\text{C竹}}$ 为竹的含碳系数.

方法 2: 计算每种群落类型的平均蓄积量密度/ $(\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2})$ (不含竹), 由于群落中马尾松、杉木和硬阔各自占有一定比例, 将每种群落按蓄积量权重细分为马尾松、杉木和硬阔 3 种组分, 按各自的生物量-蓄积量回归方程和公式 (6) 分别求算其单位面积生物量和全干生物量密度. 按下式计算该群落碳密度.

$$c_{\text{群落}}=\sum B_{0i}F_{\text{Ci}}+B_{0\text{竹}}\times F_{\text{C竹}},\quad (9)$$

式中: B_{0i} 为该群落某一组分(马尾松、杉木或硬阔)的全干生物量密度/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$, F_{Ci} 为该组分的含碳系数.

碳储量由 2 种方法得出的碳密度分别计算.

2.5 群落因子与碳密度的相关关系

据群落分类结果计算每个样地内蓄积量和碳储量, 并与面积加权计算其碳密度. 经软件 SASTISTICA 8.0 进行每个样地内海拔、坡向、郁闭度、林下植被盖度、平均树高、平均胸径、蓄积量、立木密度和胸高断面面积等 9 个群落指标与碳密度的 Pearson 相关分析, 并进行 Kruskal-Wallis 检验, 探讨影响碳密度的群落因子.

3 结果与分析

3.1 群落树种组成与 TWINSpan 分类

群落调查的结果显示, 66 个样地中共累计出现 135 种乔木树种, 种面积曲线开始趋于平缓, 对数模拟曲线的 R^2 高达 0.911 7(图 1), 表明调查样地内群落的大部分乔木树种种类组成和一般结构特征能够得以充分体现. 所有调查到种类中仅出现 1 株和 2 株的树种数分别为 25 和 14 种, 共占有树种比例的 28.89%; 在调查样地中出现株数大于 100 ($\lg$ 丰富度 >2) 的树种依次为杉木 *Cunninghamia lanceolata*、木荷 *Schima superba*、马尾松 *Pinus massoniana*、青皮竹 *Bambusa textilis*、毛竹 *Phyllostachys heterocycla*、黎蒴 *Castanopsis fissa*、黄樟 *Cinnamomum porrectum*、石栎 *Lithocarpus glaber*、杨桐 *Adinandra millettii*、罗浮柿

Diospyros morrisiana、山乌柏 *Sapium discolor* 和红背椎 *Castanopsis fargesii*, 共计 12 种, 占总树种的 8.89%; 多度居于中等的树种占总树种的 62.22%, 且物种序位-多度曲线平缓下降, 未呈几何级数分布模型, 表明整个调查样地内生境条件较好, 物种较为丰富.

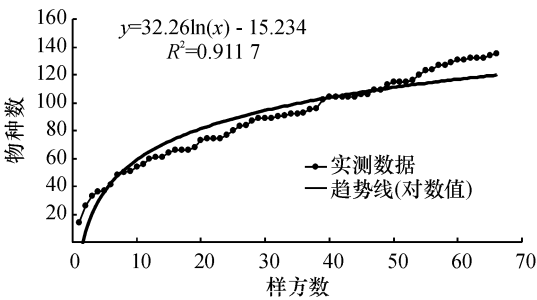


图 1 种-面积曲线
Fig. 1 Species-area curve

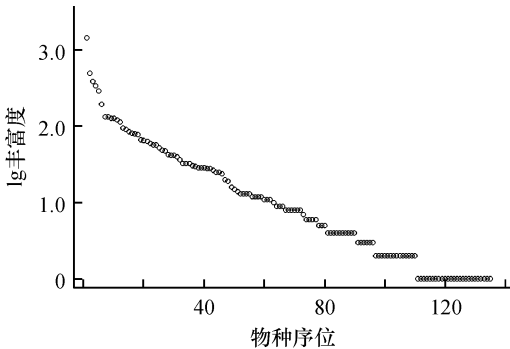


图 2 物种序位-多度曲线
Fig. 2 Species rank-abundance curve

基于样方-树种矩阵的 TWINSpan 分类结果, 对所有调查样地内的群落进行分类, 结果表明 66 个样地内森林群落可划分为 4 个类型. 由于蓄积量的计算与立木数和立木体积关系密切, 与频度关系不大, 因此选用相对多度和相对显著度 2 个指标来确定 4 个群落中的优势树种, 并以优势树种来命名 4 个群落类型. 4 个群落类型中针阔混交林面积最大, 占 66 个样方中的 34 个, 丰富度为 112; 其余依次为杉木-马尾松共优针叶林、常绿阔叶林和杉木纯林, 分别有样方数 16、9 和 7 个, 丰富度分别为 70、54 和 30(表 2).

3.2 生物量密度与碳密度

4 种群落类型中除去杉木和马尾松等针叶树种外, 其余阔叶树种中硬阔类树种占绝对优势, 因此各群落阔叶树种蓄积量及碳储量计算中均使用硬阔指标及公式. 按照碳密度计算方法 2 分别求算每种群落类型中各组分(杉木、马尾松、硬阔和竹)的蓄积量、生物量密度及全干生物量密度(表 3), 其中常绿阔叶林中只有硬阔 1 种组分.

表 2 基于 TWINSpan 分类的群落划分

Tab. 2 Community classification based on TWINSpan					
群落(样方数/ 丰富度)	优势树种	立木数	相对 多度/%	相对显 著度/%	
针阔混交林 (34/112)	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	676	19.89	13.36	
	木荷 <i>Schima superba</i>	308	9.06	18.16	
	毛竹 <i>Phyllostachys heterocycla</i>	264	7.77	4.91	
	青皮竹 <i>Bambusa textilis</i>	345	10.15	2.30	
	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	77	2.27	9.30	
	黎蒴 <i>Castanopsis fissa</i>	196	5.77	5.69	
	细柄蕈树 <i>Altingia gracilipes</i>	43	1.27	6.00	
	红背椎 <i>Castanopsis fargesii</i>	114	3.35	3.61	
	小计	2 023	59.52	63.33	
杉木-马尾 松共优针叶 林 (16/70)	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	542	35.33	37.86	
	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	304	19.82	29.94	
	木荷 <i>Schima superba</i>	141	9.19	6.11	
	石栎 <i>Lithocarpus glaber</i>	49	3.19	3.17	
	绿竹 <i>Dendrocalamopsis oldhami</i>	80	5.22	0.89	
	石斑木 <i>Raphiolepis indica</i>	35	2.28	1.38	
	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	15	0.98	2.29	
	吊皮锥 <i>Castanopsis kawakamii</i>	27	1.76	1.48	
	小计	1 193	77.77	83.11	
常绿阔叶林 (9/54)	石栗 <i>Aleurites moluccana</i>	30	4.30	12.28	
	木荷 <i>Schima superba</i>	48	6.89	8.90	
	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	17	2.44	9.86	
	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	38	5.45	6.52	
	华润楠 <i>Machilus chinensis</i>	44	6.31	5.45	
	水杨梅 <i>Adina rubella</i>	61	8.75	2.92	
	千年桐 <i>Aleurites montana</i>	23	3.30	8.02	
	杨桐 <i>Adinandra millettii</i>	47	6.74	3.68	
	小计	308	44.19	57.62	
杉木林 (7/30)	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	223	49.45	48.02	
	千年桐 <i>Aleurites montana</i>	50	11.09	14.79	
	野鸦椿 <i>Euscaphis japonica</i>	31	6.87	4.81	
	泡桐 <i>Poulounia fortunei</i>	15	3.33	6.46	
	毛竹 <i>Phyllostachys heterocycla</i>	30	6.65	2.19	
	八角枫 <i>Alangium chinense</i>	11	2.44	5.33	
	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	6	1.33	5.13	
	黄杞 <i>Engelhardtia roxburghiana</i>	11	2.44	2.91	
	小计	377	83.59	89.65	

表 3 4 种群落类型的蓄积量与生物量密度

Tab. 3 Stand volume and biomass density of the four communities					
群落类型	面积/hm ²	组分	蓄积 量/m ³	生物量密度/ (t·hm ⁻²)	全干生物量密度/ (t·hm ⁻²)
常绿阔叶林	0.45	硬阔	57.10	72.99	70.71
		针阔混交林	1.70	杉木	19.44
针阔混交林	1.70	马尾松	24.33	8.34	7.77
		硬阔	144.20	72.47	69.08
杉木林	0.35	竹			0.81
		杉木	12.40	36.71	35.30
杉木-马尾松	0.80	硬阔	13.19	36.82	35.31
		竹			0.19
共优针叶林	0.80	杉木	31.34	38.21	36.64
		马尾松	25.21	17.12	15.86
共优针叶林	0.80	硬阔	26.99	33.83	32.48
		竹			0.23

平均蓄积量由各组分和面积加权后得到(不包括竹),针阔混交林的平均蓄积量密度($110.57\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)>杉木-马尾松共优针叶林($104.43\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)>杉木林($73.14\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)>常绿阔叶林($57.10\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$).2种方法进行的碳密度计算中,方法1的计算结果均小于方法2,其中针阔混交林的差额为 $4.12\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,杉木-马尾松共优

针叶林的差额为 $0.99\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,杉木林的差额为 $7.67\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表4).方法1计算的长潭自然保护区的碳储量共计 $209\,904.01\text{ t}$,方法2为 $226\,513.75\text{ t}$ (表4),差额为 $16\,609.71\text{ t}$,平均少 $3.28\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (扣除区内水体部分,并考虑到边界部分的网格为非完整的正方形,区内陆地面积为 $5\,059.1\text{ hm}^2$).

表4 长潭自然保护区4种群落类型的碳密度与碳储量

Tab.4 Carbon density and Carbon storage of the four communities in Changtan Nature Reserve

群落类型	面积/ hm^2	平均蓄积量	全干生物量密度/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$		碳密度/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$		碳储量/ t	
		密度/ $(\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2})$	方法1	方法2	方法1	方法2	方法1	方法2
针阔混交林	2 606.20	110.57	93.34	104.31	46.67	51.00	121 633.16	132 907.02
杉木-马尾松共优针叶林	1 226.45	104.43	82.11	85.21	41.06	42.05	50 354.67	51 575.82
杉木林	536.57	73.14	51.98	70.80	27.03	34.70	14 501.84	18 616.57
常绿阔叶林	689.88	57.10	70.71	70.71	33.94	33.94	23 414.34	23 414.34

3.3 碳密度影响因素

相关分析的结果(表5)表明,坡度和海拔与碳密度并没有显著相关性($P>0.05$),表明这两个地形因子对碳密度没有明显影响作用.郁闭度和立木密度与碳密度也没有显著相关性($P>0.05$),而林下植被盖度却与碳密度有中等强度的负相关($r=-0.343$, $P<0.01$),可能因为演替初期的群落通常拥有较高的地下植被盖度,而演替初期的群落一般树龄较小,发育不够成熟,因此碳密度不会很大.碳密度与平均树高、平均胸径、胸高断面积和蓄积量均有极显著正相关($P<0.001$),且相关系数逐渐增大(r 依次为 0.606 、 0.708 、 0.884 和 0.988),表明碳密度受群落平均树高和胸径的影响作用明显,胸高断面积直接决定林分蓄积量,进而决定碳密度的大小.

表5 各群落因子与碳密度的相关关系

Tab.5 Correlations of community factors to carbon density

因子	碳密度		因子	碳密度	
	相关系数(r)	P		相关系数(r)	P
林下植被盖度	-0.343	0.005	凋落物厚度	-0.012	0.921
平均胸径	0.708	0.000	立木密度	0.068	0.590
胸高断面积	0.884	0.000	郁闭度	0.046	0.714
蓄积量	0.988	0.000	坡度	-0.019	0.877
平均树高	0.606	0.000	海拔	-0.095	0.450

4 讨论与结论

4.1 基于群落分析的小尺度林分碳储量评估

大尺度的森林碳汇评估中,某省或区域内的数据常是按照一定地域内各种森林群落的面积来收集,这些群落分别由各自优势树种来命名,碳密度计算便是基于这些优势树种而进行^[16-20].这种碳储量

估算方法对大尺度的碳储量研究比较适用,但在具体某一地区的森林碳储量评估中,如果简单按照优势种的纯林来进行该群落的碳密度计算,显然是有偏差的,因为随着演替的发展,许多初始的次生纯林(多为针叶树种)可能已经发育成针阔林或阔叶林,即便仍然是初始优势树种占有明显优势,但其森林组分已经发生显著变化;在初始为人工纯林的群落中,这种森林组分发生显著变化的情况也广泛存在,所以小尺度的碳储量估算过程中,如果直接套用转换因子连续函数法,可能会造成碳储量估算过程中出现较大的偏差.因此,在小尺度的具体经营单位,基于样地每木调查对森林群落进行分类,继而对群落各组分的蓄积量和碳密度分别加以计算,再加权求该群落的碳密度和碳储量会更为精确.

4.2 长潭自然保护区的碳储量

本研究中,杉木林如果按照杉木纯林来进行计算(方法1),其碳密度比分树种组别计算(方法2)少 $7.67\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,针阔混交林少 $4.12\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,杉木-马尾松共优针叶林少 $0.99\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,准确地评估一个地区的森林碳储量在生态补偿和未来的碳汇贸易中具有积极的意义.方法2的结果显示,杉木林的碳密度为 $34.70\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,针阔混交林为 $51.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,杉木-马尾松共优针叶林为 $42.05\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,常绿阔叶林为 $33.94\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,长潭自然保护区碳储量总计为 $2.265\times10^5\text{ t}$,平均碳密度为 $44.77\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,大于全国乔木林平均碳密度($41.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)和全球中高纬度地区的平均碳密度($43.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)^[7],也远大于广东的乔木林平均碳密度($25.47\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),与福建的 $44.83\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 几乎持平,但小于西南地区的平均碳密度($59.95\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),表明长潭自然保护区

的森林群落在广东省范围内相对发育较为成熟,但其固碳潜力还有待进一步提高。

2种方法计算结果的差异表明了简单套用转换因子连续函数法在小尺度碳储量估算中的误差所在,如杉木林中杉木为建群种,但也包括了一定比例的阔叶树种,由于阔叶林乔木层地上部分的固碳速率与持续固碳时间均大于针叶林,固碳潜力也高于后者^[22],所以分树种组分计算碳储量的结果要明显大于按照杉木纯林进行计算的结果。同理,小尺度中以群落调查为基础,基于群落分析对各组分碳储量分别进行计算,按照权重求和得该群落的最终碳储量和碳密度,这种方法可能更加准确与适用。

4.3 碳密度与群落因子间的关系

研究认为森林的碳积累速率随林龄的增加而增加,并且对于同一林龄组,阔叶林的碳积累速率大于针叶林^[22],这表明森林碳储量主要受森林演替时间的影响,因为随着森林演替时间的增加,树高、胸径和蓄积量都不断增加,针叶纯林也逐渐向阔叶林方向演替,因此,森林碳密度和碳储量不断增加。在本文的研究中,相关分析的结果显示碳密度与平均树高、平均胸径、胸高断面积和蓄积量均有极显著正相关,与林下植被盖度呈极显著负相关,但与海拔和坡度这2个地形因子以及立木密度、凋落物厚度和郁闭度并没有明显的相关关系,表明森林碳密度主要受森林演替时间的影响,林龄和群落类型可能是影响森林碳储量和碳密度的关键因素。

参考文献:

- [1] 王耀华. 森林碳汇市场构建和运行机制研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
- [2] 王冬至, 张秋良, 张冬燕. 大青山乔木林碳汇效益计量 [J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2010, 41(4): 522-526.
- [3] 杨昆, 管东生. 珠江三角洲地区森林生物量及其动态 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 705-712.
- [4] 张林, 罗天祥, 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 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2029-2033.
- [5] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量 [J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [6] 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 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13-16.
- [7] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981~2000年中国陆地植被碳汇的估算 [J]. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804-812.
- [8] 杨昆, 管东生, 周春华. 潭江流域森林碳储量及其动态变化 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1579-1582.
- [9] 田秀玲, 夏婧, 夏焕柏, 等. 贵州省森林生物量及其空间格局 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 287-294.
- [10] 徐冰, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 2000~2050年中国森林生物量碳库: 基于生物量密度与林龄关系的预测 [J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 587-594.
- [11] 马晓哲, 王铮. 中国分省区森林碳汇量的一个估计 [J]. 科学通报, 2011, 56(6): 433-441.
- [12] 茹正忠, 陈启基, 潘文, 等. 广东省湿地松二元材积表及林分蓄积量方程 [J]. 广东林业科技, 1995, 11(4): 46-48.
- [13] 吕劲文, 乐群, 王铮, 等. 福建省森林生态系统碳汇潜力 [J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2188-2196.
- [14] 张茂震, 王广兴. 浙江省森林生物量动态 [J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5665-5674.
- [15] 刘慧雅, 王铮, 马晓哲. 排放与森林碳汇作用下云南省碳净排放量估计 [J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4405-4414.
- [16] 杨超, 田大伦, 胡曰利, 等. 连栽杉木林林下植被生物量动态格局 [J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2737-2747.
- [17] 彭守璋, 赵传燕, 郑祥霖, 等. 祁连山青海云杉林生物量和碳储量空间分布特征 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1689-1694.
- [18] 李轩然, 刘琪璟, 陈永瑞, 等. 千烟洲人工林主要树种地上生物量的估算 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1382-1388.
- [19] 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 [J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 11-16.
- [20] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 等. 毛竹 (*Phyllostachy pubescens*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林生态系统碳贮量及其分配特征 [J]. 生态学报, 2007, 27(7): 2794-2801.
- [21] LIU S N, ZHOU T, WEI L Y, et al. The spatial distribution of forest carbon sinks and sources in China [J]. Chin Sci Bull, 2012, 57(14): 1699-1707.
- [22] 陈青青, 徐伟强, 李胜功, 等. 中国南方4种林型乔木层地上生物量及其碳汇潜力 [J]. 科学通报, 2012, 57(13): 1119-1125.
- [23] 曹吉鑫, 田赞, 王小平, 等. 森林碳汇的估算方法及其发展趋势 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 2001-2005.
- [24] PIAO Shilony, FANG Jingyun, CIAIS P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. Nature, 2009, 458: 1009-1013.
- [25] FANG Jingyun, WANG G G, LIU Guohua. Forest biomass of China: An estimate based on the biomass-volume relationship [J]. Ecol Applic, 1998, 8(4): 1084-1091.

role in soil acidification[J]. *Sci Total Environ*,2004, 330 (1/3): 187-198.

[17] SYKORA K V, VAN DEN BOGERT J C J M, BERENDSE F. Changes in soil and vegetation during dune slack succession[J]. *J Veg Sci*,2004, 15(2): 209-218.

[18] 安宗胜,詹婧,孙庆业. 自然植物群落形成过程中铜尾矿废弃地氮素组分的变化[J]. *生态学报*,2010, 30 (21): 5958-5966.

[19] DANA E D, MOTA J F. Vegetation and soil recovery on gypsum outcrops in semi-arid Spain[J]. *J Arid Environ*, 2006, 65(3): 444-459.

[20] 洪坚平,谢英荷,孔令节,等. 矿山复垦区土壤微生物及其生化特性研究[J]. *生态学报*, 2000, 20(4): 669-672.

[21] 刘鸿雁,邢丹,肖玖军,等. 铅锌矿渣场植被自然演替与基质的交互效应[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3217-3224.

[22] 王友保,黄永杰,甄泉,等. 铜尾矿库区狗牙根根际土壤铜的形态变化[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1341-1345.

[23] 李影,陈明林. 节节草生长对铜尾矿砂重金属形态转化和土壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(21): 5949-5957.

[24] 尚文勤,朱利平,孙庆业,等. 自然生态恢复过程中尾矿废弃地土壤微生物变化[J]. *生态环境*, 2008, 17(2): 713-717.

[25] 王莉晶,高晓蓉,吕军,等. 解磷真菌 C2' 的分离鉴定及其在土壤中实际解磷效果的研究[J]. *土壤通报*, 2009, 40(4): 771-775.

[26] 张崇邦,王江,柯世省,等. 五节芒定居对尾矿砂重金属形态、微生物群落功能及多样性的影响[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 629-637.

[27] MUMMEY D L, STAHL P D, BUYER J S. Microbial bio-markers as an indicator of ecosystem recovery following surface mine reclamation[J]. *Applied Soil Ecol*, 2002, 21(3): 251-259.

[28] 郑红丽,周晓荣,樊明寿. 燕麦根际有机磷细菌的分离及其有关生理特性的研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(5): 1-6.

[29] MOLLA M A Z, CHOWDHURY A A, ISLAM A, et al. Microbial mineralization of organic phosphate in soil[J]. *Plant and Soil*,1984, 3(78): 393-399.

[30] 龙健,黄昌勇,滕应,等. 矿区废弃地土壤微生物及其生化活性[J]. *生态学报*, 2003, 23(3): 496-503.

[31] CHEN C L, LIAO N M, HUANG C Y. Effect of combined pollution by heavy metals on soil enzymatic activities in areas polluted by tailings from Pb-Zn-Ag mine[J]. *J Environ Sci*, 2005, 17(4): 637-640.

【责任编辑 李晓卉】

(上接第218页)

[26] ZHAO Min, ZHOU Guangsheng. Estimation of biomass and net primary productivity of major planted forests in China based on forest inventory data[J]. *Forest Ecol Management*, 2005, 207(3): 295-313.

[27] ZHOU Guangsheng, WANG Yuhui, JIANG Yanling, et al. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: A case study of China's *Larix* forests[J]. *Forest Ecol Management*, 2002, 169(1/2): 149-157.

[28] 罗云建,张小全,王效科,等. 森林生物量的估算方法及其研究进展[J]. *林业科学*, 2009, 45(8): 129-134.

[29] 张乐勤. 安徽池州森林植被碳储量调查及分析[J]. *植物学报*, 2011, 46(5): 544-551.

[30] 林义辉,张苏峻. 广东省蕉岭长潭省级自然保护区森林土壤持水性的垂直空间格局研究[J]. *华南农业大学学报*, 2011, 32(4): 78-81.

[31] 曾伟生. 云南省森林生物量与生产力研究[J]. *中南林业调查规划*, 2005, 24(4): 3-5.

[32] FANG Jingyun, CHEN Anping, PENG Changhui, et al. Changes in forest biomass storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.

[33] 平井信二. 木の大百科[M]. 东京:朝书店,1996: 34-67.

[34] 白石则彦. 东京大学千叶演习林における炭素蓄積量の推定[J]. 东京大学农学部演习林报告, 2004, 112: 11-34.

[35] 李海奎,雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估. 北京:中国林业出版社, 2010: 12-48.

【责任编辑 李晓卉】