

浙江省森林碳分布与地形的相关性

杜 群, 徐 军, 王剑武, 张 峰, 季碧勇

(浙江省森林资源监测中心, 浙江 杭州 310020)

摘要: 浙江森林资源的空间分布与地形关系密切。研究森林碳分布与地形的关系, 可以进一步认识浙江省森林碳分布的空间特征。利用基于浙江省 2009 年森林资源连续清查(CFI)固定样地数据和地统计学方法获得的全省森林碳空间分布信息, 对森林碳分布与地形相关性进行了定量研究。结果显示: 全省森林碳密度与地形主要因子海拔、坡度的二元二次多项式的复相关系数为 0.71 左右, 说明森林碳分布与地形密切相关, 即与地形的分布基本一致, 随着海拔的升高和坡度的增大森林碳密度增大, 尤其在海拔 0~200 m 到 200~400 m, 坡度从平坡到缓坡, 碳密度上升最快。图 2 表 4 参 20

关键词: 森林生态学; 森林碳空间分布; 地统计学; 海拔; 坡度; 森林碳密度

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2013)03-0330-06

Correlation between forest carbon distribution and terrain elements of altitude and slope

DU Qun, XU Jun, WANG Jianwu, ZHANG Feng, JI Biyong

(Monitoring Center for Forest Resources in Zhejiang Province, Hangzhou 310020, Zhejiang, China)

Abstract: To better understand the forest carbon spatial distribution characteristics in Zhejiang Province, the relationship between forest carbon distribution and terrain (altitude and slope) was studied. This paper employed the Carbon Farming Initiative (CFI) dataset collected in 2009 and the forest carbon spatial distribution information for the whole province along with geostatistical techniques to quantitatively determine the correlation of forest carbon distribution and terrain. Multiple correlation coefficients of the binary quadratic multinomial were formed for the province's forest carbon density versus terrain altitude and gradient. Results indicated that the multiple correlation coefficients of the binary quadratic multinomial were about $r = 0.71$. For altitudes of 0 – 400 m and a gradient of $0^\circ - 5^\circ$, forest carbon density increased fastest. This showed that forest carbon distribution was closely related to terrain and corresponded to the terrain distribution rule that forest carbon density increased with an increase in altitude and in gradient. [Ch, 2 fig. 4 tab. 20 ref.]

Key words: forest ecology; forest carbon spatial distribution; geostatistics; altitude; gradient; forest carbon density

森林碳汇功能在缓解气候变暖方面具有重要作用^[1], 能显著改变自然界的碳循环, 是维系大气中碳平衡的重要杠杆。森林生态系统碳储量的变动会对大气中二氧化碳含量产生重要且深远的影响^[2-3]。森林生态系统由于具有巨大的吸收二氧化碳和储藏碳的能力, 被人类寄予降低大气二氧化碳浓度和缓解全球气候变暖问题的厚望^[4-5]。目前, 很多研究是有关不同尺度森林生态系统碳储量、碳密度的^[6-16]。森林碳空间分布的研究也受到了重视, 但大多属于以下 2 种情况: 一种是基于严密的地统计学理论和地面网格样地数据的, 但通常尺度较小如县级等^[9,11,16]; 另一种是尺度较大如省级, 但通常未利用地统计学理论^[13-15,20]。作者曾基于森林资源连续清查(CFI)固定样地数据和地统计学方法研究了浙江省森林碳空间分

收稿日期: 2012-08-09; 修回日期: 2012-09-26

基金项目: 浙江省林业厅专项资金资助项目(335006-2010-0002)

作者简介: 杜群, 高级工程师, 从事森林资源调查监测研究。E-mail: duqun@126.com

布^[17]，但本研究不直接讨论这方面内容，而是讨论在这个研究基础之上的森林碳分布与地形相关性的定量研究。浙江省“七山一水二分田”，森林资源丰富。凭直观，森林资源多分布在山地上，与浙江省的地形大致一致，两者之间应该具有一定的相关性，但到目前为止，还未见这方面的专门研究，本研究以森林碳密度为对象，定量地研究这种相关性。地形具有稳定性，森林与地形的关系也有相对的稳定性，定量研究森林碳密度与地形的相关性，可以更直接地表达森林碳密度的空间分布特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

浙江省地理坐标为 27°01′~31°10′N，118°01′~123°08′E，地处亚热带季风气候区，四季分明，光照较多，雨水充沛，年平均气温为 15~18℃。全省陆地面积为 10.18×10⁴ km²，地理地貌特征丰富，地势从西南向东北呈阶梯下降趋势，从南部山区，到东部沿海丘陵，到北部冲积平原，另有舟山市海岛地貌。植被区域属亚热带常绿阔叶林区域、东部(湿润)常绿阔叶林亚区域、中亚热带常绿阔叶林地带，有以常绿阔叶和落叶混交林为主的常绿阔叶林，还有针叶林、落叶阔叶林、竹林、灌木等多种植被类型^[18]。根据2009年森林资源连续清查结果，森林覆盖率为 60.58%。

1.2 研究数据

在浙江省 2009 年森林资源连续清查固定样地森林碳储量数据基础上，用地统计学方法计算得到的全省森林碳密度空间分布数据。固定样地覆盖全省，共 4 252 个，样地间隔为 4 km × 6 km，样地面积 0.08 hm²。乔木及竹子生物量根据样地每木检尺数据和单株生物量模型计算，模型分为松，杉，硬阔 1，硬阔 2，软阔和竹子等 6 个树种组，由总量、树干、树冠、树根模型组成，灌木和草本的生物量根据样方数据和模型计算^[19]。碳储量数据由生物量数据乘以相应含碳系数而得。

从网络免费下载的分辨率 30 m 的浙江省数字高程模型数据，用于提取样点位置的海拔和坡度。

1.3 碳密度与海拔、坡度的回归分析

碳密度是指单位面积的有机碳储量。统一以地统计学模拟获得的碳密度数据为因变量，海拔、坡度等为自变量建立回归模型，进而评估碳密度分布与主要地形因子海拔、坡度的相关程度。

利用 Erdas 从数字高程模型数据中提取海拔和坡度数据，再借助 ArcGIS 按系统抽样法以 1 倍(即浙江省森林资源连续清查固定样地数的 1 倍，与地面重合)、2 倍(原基础上加密，下同)、4 倍、8 倍、16 倍的抽样密度提取海拔、坡度与碳密度数据，将海拔(x_1)，坡度(x_2)，海拔平方(x_3)，坡度平方(x_4)和海拔坡度(x_5)作为自变量，碳密度作为因变量 y ，分析不同抽样密度条件下，这些因子与森林碳密度的相关情况。

1.4 碳密度与海拔、坡度等级分析

按照浙江省特有的地形特征，以 200 m 为 1 个等级，将海拔分为 9 个等级(0~200，200~400，400~600，600~800，800~1 000，1 000~1 200，1 200~1 400，1 400~1 600，1 600~1800 m)。按照国家标准将坡度分为 5 个等级：平坡(0°~5°)，缓坡(6°~15°)，斜坡(16°~25°)，陡坡(26°~35°)和急坡(36°~45°)，统计对应海拔和坡度等级的样点数及碳密度平均值，分析碳密度随海拔高度、坡度的不同梯度而变化的情况。

2 结果与分析

2.1 碳密度与海拔、坡度的相关性

建立线性回归方程(相对于原始海拔、坡度数据为二元二次多项式回归)： $y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_3+a_4x_4+a_5x_5+\varepsilon$ 。利用 SPSS 软件进行线性回归系数估计，获得模型参数和相关系数(表 1)。表 1 中碳密度数据是用地统计学方法模拟的，海拔、坡度数据是根据数字高程模型数据推算的。

据表 1：从 1 倍到 2 倍，相关系数有微小增大，从 2 倍到 16 倍，基本稳定在 0.71 左右。碳密度与海拔、坡度为正相关，这与事实相符。因为，浙江省的森林主要分布于山区，而山区多为海拔较高、坡度较大的地区。而与海拔的平方和坡度的平方成负相关，但其系数很小，说明这种负相关只是一种修正。而海拔与坡度的乘积则有正有负，说明它与碳密度关系不密切。

表 1 碳密度数据与海拔、坡度回归结果

Table 1 Regression result between carbon density and terrain elements altitude and slope

倍数(点数)	a_0	a_1 (海拔)	a_2 (坡度)	a_3 (海拔平方)	a_4 (坡度平方)	a_5 (海拔×坡度)	R	R^2
1 (4 252)	-0.007	0.018 0	1.952	-0.000 009 4	-0.038 0	0.001 000	0.701	0.504
2 (8 504)	-0.020	0.023 0	1.883	-0.000 009 1	-0.035 0	0.000 299	0.713	0.507
4 (17 008)	-0.146	0.023 6	1.917	-0.000 019 9	-0.037 0	-0.000 389	0.711	0.506
8 (34 016)	-0.175	0.025 0	1.928	-0.000 010 0	-0.037 0	-0.000 278	0.713	0.508
16 (68 032)	-0.258	0.025 0	1.950	-0.000 010 6	-0.038 0	-0.000 296	0.712	0.507

表 1 中的数据是根据原始变量计算的,而原始变量不在一个数量等级上,所以系数的大小及正负不能完全说明变量的重要性。为此在变量标准化基础上重新拟合公式 1,结果见表 2。表 2 中可以看出,坡度的系数最大,可以认为坡度最为重要,海拔次之。海拔平方与坡度平方都是负的,其绝对值较之海拔与坡度都明显偏小,说明这种负相关还是一种修正。海拔×坡度是正的,但绝对值较小,还是一种修正。

表 2 碳密度数据与标准化后的海拔、坡度数据回归结果

Table 2 Regression result between carbon density and the terrain elements altitude and slope after standardization

倍数(点数)	a_0	a_1 (海拔)	a_2 (坡度)	a_3 (海拔平方)	a_4 (坡度平方)	a_5 (海拔×坡度)	R	R^2
1 (4 252)	23.369	5.385	18.805	-2.817	-10.953	4.396	0.701	0.504
2 (8 504)	23.026	6.971	18.252	-2.706	-9.899	2.198	0.713	0.507
4 (17 008)	22.939	7.032	18.617	-3.282	-10.564	2.866	0.711	0.506
8 (34 016)	22.869	7.309	18.767	-2.985	-10.451	2.047	0.713	0.508
16 (68 032)	22.832	7.468	18.983	-3.137	-10.872	2.177	0.712	0.507

表 3 为碳密度与单项因子的简相关关系。可以看出,与海拔、坡度单项的相关系数均在 0.60 以上,与海拔平方的相关系数在 0.47 以上,与坡度平方的相关系数接近 0.60,与海拔、坡度乘积的相关系数也接近 0.60,其中以坡度的相关系数最高。

表 3 碳密度与海拔、坡度的单项因子相关关系

Table 3 Correlation between carbon density and altitude or slope

抽样点数	海拔	坡度	海拔平方	坡度平方	海拔×坡度
4 252	0.606***	0.670***	0.479*	0.602***	0.607**
8 504	0.610***	0.669***	0.477***	0.597***	0.603*
31 008	0.607***	0.669***	0.473***	0.597***	0.601***
34 016	0.607***	0.669***	0.472***	0.595***	0.598***
68 032	0.608***	0.666***	0.472***	0.591***	0.597***

说明: * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$ 。

无论从复相关系数还是简相关系数,都表明浙江省的森林碳分布与浙江省的地形密切相关,即与地形的分布基本一致。

2.2 森林碳密度分布特征

根据抽取的 68 032 个样点的模拟碳密度数据,按海拔、坡度统计,结果见表 4。森林碳密度随海拔因子变化为:海拔小于 200 m 等级内碳密度最少,平均碳密度仅为 $10.27 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与其他等级碳密度相差较大,分析原因:此类地区包含了很多城市用地、水体、农地等非森林区域。海拔 200~1 800 m,随着海拔的升高,平均碳密度规律性提高,其中海拔小于 1 000 m 的区域,等级间碳密度差距较小且稳定,大于 1 000 m 的森林区域,随着海拔继续升高,碳密度差距随之拉大,其中碳密度最大值位于海拔 1 600~1 800 m。随着海拔的逐渐升高,样点数随之减少,海拔到达 1 000 m 后,虽然样点碳密度普遍

较大，但数量极其稀少，1 600~1 800 m 间样点数仅为 21 个，这也符合浙江省地形特征，山区多，但海拔大都不高，200 m 以下的样点数接近 50%。就是说，浙江省接近一半的土地海拔在 200 m 以下。

统计坡度等级的样点数和碳密度平均值见表 4。由表 4 可知：斜坡样地最多，其次是平坡与缓坡，斜坡和缓坡共占总样地的 56.87%，陡坡和急坡样点数最少，为总样地的 11.85%。碳密度变化为急坡(44.35 Mg·hm⁻²)>陡坡(40.08 Mg·hm⁻²)>斜坡(33.9 Mg·hm⁻²)>缓坡(23.6 Mg·hm⁻²)>平坡(3.44 Mg·hm⁻²)。碳密度变化趋势与海拔分析结果接近，随着坡度的增加，样地数量减少，碳密度逐渐变大。

表 4 森林碳密度分布与地形因子的关系

Table 4 The relationship of forest carbon density distribution and terrain

海拔/m	点数	百分数/%	累积百分数/%	碳密度/(Mg·hm ⁻²)	坡度/(°)	点数	百分数/%	累积百分数/%	碳密度/(Mg·hm ⁻²)
0~200	33 946	49.897	49.897	10.27	0~5	21 206	31.171	31.171	3.440
200~400	13 531	19.889	69.786	31.14	6~15	15 281	22.461	53.632	23.60
400~600	9 533	14.013	83.799	35.27	16~25	23 486	34.522	88.154	33.90
600~800	5 837	8.580	92.379	37.99	26~35	7	11.555	99.709	40.08
800~1000	3 061	4.500	96.878	40.81	36~45	198	0.291	100	44.35
1000~1200	1 528	2.246	99.124	45.47					
1200~1400	485	0.713	99.837	50.32					
1400~1600	90	0.132	99.969	57.92					
1600~1800	21	0.031	100	66.21					
合计/均值	68 032			22.83	合计/均值	68 032			22.83

海拔高度与森林面积百分数的关系见图 1A，可见随着海拔的升高森林面积比例迅速下降。坡度与面积百分数的关系见图 1B，可见斜坡比例最大，平坡次之，作为平坡与斜坡之间过渡的缓坡居于第 3 位，陡坡大幅下降，急坡只占很少一部分。海拔高度与碳密度的关系见图 2A，可见 200~400 m 上升很

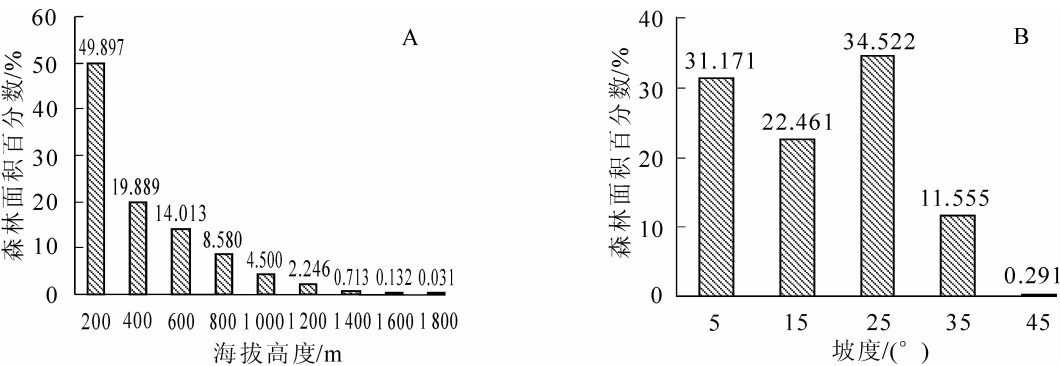


图 1 海拔高度(A),坡度(B)和森林面积百分数的关系
Figure 1 Relation between altitude (A), slope (B) and forest area

快，其后就缓慢上升。坡度与碳密度的关系见图 2B，可见随着坡度增加碳密度增加，尤其平坡到缓坡增加迅速。

3 结论与讨论

本研究基于浙江省 2009 年森林资源连续清查(CFI)固定样地森林植被碳密度数据，利用地统计学方法获得的全省森林碳空间分布数据，网上下载的 30 m × 30 m 的浙江省数字高程模型数据，对浙江省森林碳分布与主要地形因子海拔、坡度的相关关系进行了定量研究。结果表明，全省森林碳密度与海拔、坡度的二元二次多项式的复相关系数为 0.71 左右，说明森林碳分布与地形密切相关，即与浙江省地形的分布规律基本一致。

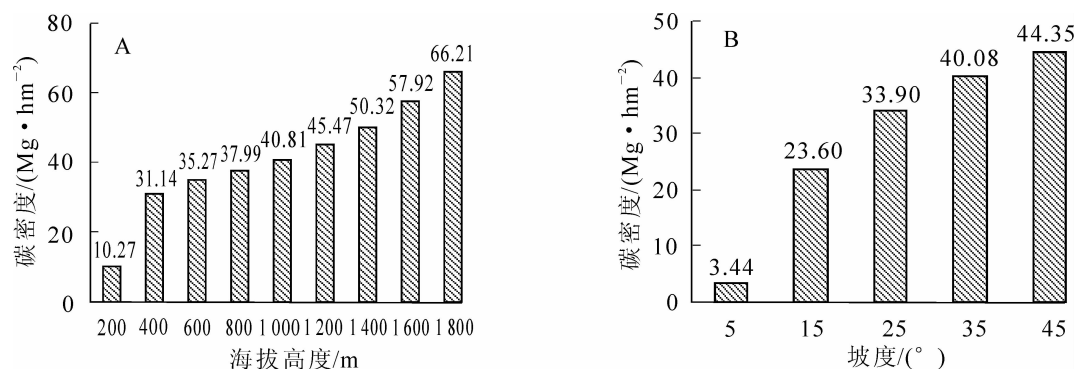


图2 海拔高度(A), 坡度(B)与碳密度的关系

Figure 2 Relation between altitude (A), slope (B) and carbon density

浙江“七山一水二分田”，海拔高度在 200 m 以下的国土面积接近 50%，随着海拔高度的增加，比例迅速下降。坡度方面，斜坡(16°~25°)比例最大，平坡(0°~5°)次之，作为平坡与斜坡之间过渡的缓坡(6°~15°)居于第 3 位，陡坡(26°~35°)大幅下降，急坡(36°~45°)只占很少一部分。随着海拔的增高和坡度的增加，碳密度呈现明显的上升趋势。尤其在海拔 0~200 m 到 200~400 m，坡度从平坡到缓坡，碳密度上升最快，主要原因是此类地区城市用地、农地、水体等非森林区域比例大。森林植被碳密度在海拔、坡度上表现出的空间分布趋势主要原因为，浙江森林属南方集体林区，在高海拔、坡度较陡的区域，外界干扰因素较少，森林覆盖率高，蓄积量大，所以碳密度普遍较高；在低海拔、平坡及中部、东部平原等地区，主要为城市居民区、工业区、农业区等，碳密度较低。近年来，平原绿化进程较快，在低海拔、低坡度区域人工造林较多，但由于新造林地普遍存在树龄小，碳密度低，随着这部分森林的成长，低海拔、低坡度地区的碳密度将有所提高。

参考文献:

- [1] 闫德仁, 闫婷. 内蒙古森林碳储量估算及其变化特征[J]. 林业资源管理, 2010, **32** (3): 31 – 33.
YAN Deren, YAN Ting. Forest carbon storage and changes in Inner Mongolia [J]. *For Resour Manage*, 2010, **32** (3): 31 – 33.
- [2] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳储量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, **24** (5): 518 – 522.
ZHOU Yurong, YU Zhenliang, ZHAO Shidong. Carbon storage and budget of major Chinese forest types [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2010, **24** (5): 518 – 522.
- [3] 赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 基于 FORCCHN 的未来东北森林生态系统碳储量模拟[J]. 地理科学, 2009, **29** (5): 690 – 696.
ZHAO Junfang, YAN Xiaodong, JIA Gensuo. Simulation of carbon stocks of forest ecosystems under the future climatic scenario in northeast China based on FORCCHN [J]. *Sci Geogr Sin*, 2009, **29** (5): 690 – 696.
- [4] 查同刚, 张志强, 朱金兆, 等. 森林生态系统碳蓄积与碳循环[J]. 中国水土保持科学, 2008, **6** (6): 112 – 119.
ZHA Tonggang, ZHANG Zhiqiang, ZHU Jinzhao, *et al.* Carbon storage and carbon cycle in forest ecosystem [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2008, **6** (6): 112 – 119.
- [5] YU Guirui, LI Xuanran, WANG Qinfeng, *et al.* Carbon storage and its spatial pattern of terrestrial ecosystem in China [J]. *J Resour Ecol*, 2010, **1** (2): 97 – 109.
- [6] 吕超群, 孙书存. 陆地生态系统碳密度格局研究概述[J]. 植物生态学报, 2004, **28** (5): 692 – 703.
LÜ Chaoqun, SUN Shuchun. A review on the distribution patterns of carbon density in terrestrial ecosystems [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2004, **28** (5): 692 – 703.
- [7] SCHIMEL D S. Terrestrial ecosystem and the carbon cycle [J]. *Global Change Biol*, 1995, **1**: 77 – 81.
- [8] 赵敏, 周广胜. 基于森林资源清查资料的生物量估算模式及其发展趋势[J]. 应用生态学报, 2004, **15** (8): 1468 – 1472.
ZHAO Min, ZHOU Guangsheng. Forest inventory data (FID)-based biomass models and their prospects [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15** (8): 1468 – 1472.

- [9] 刘晓梅, 布仁仓, 邓华卫, 等. 基于地统计学丰林自然保护区森林生物量估测及空间格局分析 [J]. 生态学报, 2011, **31** (16): 4783 – 4790.
- LIU Xiaomei, BU Rencang, DENG Huawei, *et al.* Estimation and spatial pattern analysis of forest biomass in Fenglin Nature Reserve based on geostatistics [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31** (16): 4783 – 4790.
- [10] 焦燕, 胡海清. 黑龙江省森林植被碳储量及其动态变化[J]. 应用生态学报, 2005, **16** (12): 2248 – 2252.
- JIAO Yan, HU Haiqing. Carbon storage and its dynamics of forest vegetations in Heilongjiang Province [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, **16** (12): 2248 – 2252.
- [11] 张茂震, 王广兴, 周国模, 等. 基于森林资源清查、卫星影像数据与随机协同模拟尺度转换方法的森林碳制图 [J]. 生态学报, 2009, **29** (6): 2919 – 2928.
- ZHANG Maozhen, WANG Guangxing, ZHOU Guomo, *et al.* Mapping of forest carbon by combining forest inventory data and satellite images with co-simulation based up-scaling method [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (6): 2919 – 2928.
- [12] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, **20** (5): 733 – 740.
- LIU Guohua, FU Bojie, FANG Jingyu. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, **20** (5): 733 – 740.
- [13] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 四川省森林植被碳储量的空间分异特征[J]. 生态学报, 2009, **29** (9): 5115 – 5121.
- HUANG Congde, ZHANG Jian, YANG Wanqin, *et al.* Spatial differentiation characteristics of forest vegetation carbon stock in Sichuan Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (9): 5115 – 5121.
- [14] 张亮, 林文欢, 王正, 等. 广东省森林植被碳储量空间分布格局[J]. 生态环境学报, 2010, **19** (6): 1295 – 1299.
- ZHANG Liang, LIN Wenhuan, WANG Zheng, *et al.* Spatial distribution pattern of carbon storage in forest vegetation of Guangdong Province [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19** (6): 1295 – 1299.
- [15] 骆宗诗, 文吉富, 王国良, 等. 四川森林碳储量现状及其空间分布[J]. 四川林业科技, 2009, **30** (2): 13 – 18.
- LUO Zongshi, WENG Jifu, WANG Guoliang, *et al.* The present situation and spatial distribution of forest carbon storage in Sichuan Province, China [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2009, **30** (2): 13 – 18.
- [16] 沈希, 张茂震, 祁祥斌. 基于回归与随机模拟的区域森林碳分布估计方法比较[J]. 林业科学, 2011, **47** (6): 1 – 8.
- SHEN Xi, ZHANG Maozhen, QI Xiangbin. Comparison of regional forest carbon estimation methods based on regression and stochastic simulation [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47** (6): 1 – 8.
- [17] 张峰, 杜群, 葛宏立, 等. 基于地统计学和 CFI 样地的浙江省森林碳空间分布研究[J]. 生态学报, 2012, **32** (16): 5275 – 5286.
- ZHANG Feng, DU Qun, GE Hongli, *et al.* Spatial distribution of forest carbon in Zhejiang Province with geostatistics based on CFI sample plots [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32** (16): 5275 – 5286.
- [18] 俞新妥. 杉木栽培学[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1997: 19 – 21.
- [19] 袁位高, 江波, 葛永金, 等. 浙江省重点公益林生物量模型研究[J]. 浙江林业科技, 2009, **29** (2): 1 – 5.
- YUAN Weigao, JIANG Bo, GE Yongjin, *et al.* Study on biomass model of key ecological forest in Zhejiang Province [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2009, **29** (2): 1 – 5.
- [20] 季碧勇, 陶吉兴, 张国江, 等. 高精度保证下的浙江省森林植被生物量评估[J]. 浙江农林大学学报, 2012, **29** (3): 328 – 334.
- JI Biyong, TAO Jixing, ZHANG Guojiang, *et al.* Zhejiang Province's forest vegetation biomass assessment for guaranteed accuracy [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2012, **29** (3): 328 – 334.