

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第7期 Vol.32 No.7 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 7 期

2012 年 4 月 (半月刊)

目次

城市生态景观研究的基础理论框架与技术构架	孙然好, 许忠良, 陈利顶, 等 (1979)
拟南芥芥子酸酯对 UV-B 辐射的响应	李 敏, 王 垠, 牟晓飞, 等 (1987)
蛋白核小球藻对 Pb(II) 和 Cd(II) 的生物吸附及其影响因素	姜 晶, 李 亮, 李海鹏, 等 (1995)
梨枣在果实生长期对土壤水势的响应	韩立新, 汪有科, 张琳琳 (2004)
产业生态系统资源代谢分析方法	施晓清, 杨建新, 王如松, 等 (2012)
基于物质流和生态足迹的可持续发展指标体系构建——以安徽省铜陵市为例	 赵卉卉, 王 远, 谷学明, 等 (2025)
河北省县域农田生态系统供给功能的健康评价	白琳红, 王 卫, 张 玉 (2033)
温郁金内生真菌 <i>Chaetomium globosum</i> L18 对植物病原菌的抑菌谱及拮抗机理	 王艳红, 吴晓民, 朱艳萍, 等 (2040)
基于稳定碳同位素技术的华北低丘山区核桃-小麦复合系统种间水分利用研究	 何春霞, 孟 平, 张劲松, 等 (2047)
云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量 C、N、P 空间分布	张利青, 彭晚霞, 宋同清, 等 (2056)
水稻根系通气组织与根系泌氧及根际硝化作用的关系	李奕林 (2066)
苹果绵蚜对不同苹果品种春梢生长期生理指标的影响	王西存, 于 毅, 周洪旭, 等 (2075)
磷高效转基因大豆对根际微生物群落的影响	金凌波, 周 峰, 姚 涓, 等 (2082)
基于 MODIS-EVI 数据和 Symlet11 小波识别东北地区水稻主要物候期	 徐岩岩, 张佳华, YANG Limin (2091)
基于降水利用比较分析的四川省种植制度优化	王明田, 曲辉辉, 杨晓光, 等 (2099)
气候变暖对东北玉米低温冷害分布规律的影响	高晓容, 王春乙, 张继权 (2110)
施肥对巢湖流域稻季氨挥发损失的影响	朱小红, 马中文, 马友华, 等 (2119)
丛枝菌根真菌对积根净离子流及锌污染下积苗矿质营养的影响	肖家欣, 杨 慧, 张绍铃 (2127)
不同 R:FR 值对菊花叶片气孔特征和气孔导度的影响	杨再强, 张 静, 江晓东, 等 (2135)
神农架海拔梯度上 4 种典型森林凋落物现存量及其养分循环动态	刘 蕾, 申国珍, 陈芳清, 等 (2142)
黄土高原刺槐人工林地表凋落物对土壤呼吸的贡献	周小刚, 郭胜利, 车升国, 等 (2150)
贵州雷公山秃杉种群生活史特征与空间分布格局	陈志阳, 杨 宁, 姚先铭, 等 (2158)
LAS 测算森林冠层上方温度结构参数的可行性	郑 宁, 张劲松, 孟 平, 等 (2166)
基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究	 徐少君, 曾 波, 苏晓磊, 等 (2174)

模拟氮沉降增加对寒温带针叶林土壤 CO₂ 排放的初期影响 温都如娜,方华军,于贵瑞,等 (2185)

桂江流域附生硅藻群落特征及影响因素..... 邓培雁,雷远达,刘 威,等 (2196)

小浪底水库排沙对黄河鲤鱼的急性胁迫..... 孙麓垠,白音包力皋,牛翠娟,等 (2204)

上海池塘养殖环境成本——基于双边界二分式 CVM 法的实证研究 唐克勇,杨正勇,杨怀宇,等 (2212)

稻纵卷叶螟绒茧蜂对寄主的搜索行为 周 慧,张 扬,吴伟坚 (2223)

农林复合系统中灌木篱墙对异色瓢虫种群分布的影响..... 严 飞,周在豹,王 朔,等 (2230)

苹果脱乙酰几丁质发酵液诱导苹果叶片对斑点落叶病的早期抗性反应.....
..... 王荣娟,姚允聪,戚亚平,等 (2239)

专论与综述

气候变化影响下海岸带脆弱性评估研究进展..... 王 宁,张利权,袁 琳,等 (2248)

外来红树植物无瓣海桑引种及其生态影响 彭友贵,徐正春,刘敏超 (2259)

问题讨论

城市污泥生物好氧发酵对有机污染物的降解及其影响因素..... 余 杰,郑国砥,高 定,等 (2271)

4 种绿化树种盆栽土壤微生物对柴油污染响应及对 PAHs 的修复 闫文德,梁小翠,郑 威,等 (2279)

研究简报

云南会泽铅锌矿废弃矿渣堆常见植物内生真菌多样性..... 李东伟,徐红梅,梅 涛,等 (2288)

南方根结线虫对不同砧木嫁接番茄苗活性氧清除系统的影响 梁 朋,陈振德,罗庆熙 (2294)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 322 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-04



封面图说: 站立的仓鼠——仓鼠为小型啮齿类动物,栖息于荒漠、荒漠草原等地带的洞穴之中。白天他们往往会躲在洞穴中睡觉和休息,以避开天敌的攻击,偶尔也会出来走动,站立起来警惕地四处张望。喜欢把食物藏在腮的两边,然后再走到安全的地方吐出来,由此得仓鼠之名。它们的门齿会不停的生长,所以它们的上下门齿必须不断啃食硬东西来磨牙,一方面避免门齿长得太长,妨碍咀嚼,一方面保持门牙的锐利。仓鼠以杂草种子、昆虫等为食。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201108021134

徐少君, 曾波, 苏晓磊, 类淑桐, 刘建辉. 基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究. 生态学报, 2012, 32(7): 2174-2184.

Xu S J, Zeng B, Su X L, Lei S T, Liu J H. Spatial distribution of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Nature Reserve based on RS/GIS. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2174-2184.

基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被 及碳储量密度空间分布研究

徐少君, 曾波*, 苏晓磊, 类淑桐, 刘建辉

(三峡库区生态环境教育部重点实验室, 三峡库区植物生态与资源重庆市重点实验室, 西南大学生命科学学院, 重庆 400715)

摘要:对森林植被类型和碳储量密度空间分布的研究, 可以为森林生态系统服务功能和价值的提高、充分发挥“增汇减排”的碳库经营和管理工作提供重要的基础数据。利用缙云山高分辨率影像(WorldView-2)解译植被专题图和 1:10 000 地形图生成数字高程模型, 结合野外样方调查、文献中植被生物量回归(经验)模型和碳含量数据资料, 在 ArcGIS 支持下对缙云山自然保护区植被和碳储量密度空间分布进行研究。研究显示, 缙云山植被以针叶林为主(30%), 人为干扰程度较高的灌木林也占有相当大的比例(21%), 地带性顶级植被——常绿阔叶林面积较小(6%); 碳储量密度为针阔混交林(74.23 Mg/hm²) > 针叶林(62.97 Mg/hm²) > 常绿阔叶林(62.65 Mg/hm²) > 针竹混交林(59.84 Mg/hm²) > 慈竹林(48.72 Mg/hm²) > 毛竹林(47.88 Mg/hm²) > 灌木林(10.66 Mg/hm²), 平均碳储量密度高于全国和同地区的平均值, 达到了 50.45 Mg/hm²; 在空间分布上, 针叶林在中高海拔(>500 m)和斜坡(>15°)以上优势明显, 灌木林则相反, 针阔混交林、常绿阔叶林的优势随着海拔升高或坡度增大而增加, 植被的碳储量密度也随海拔的增高或坡度增大而增势明显。结果表明缙云山积累和存贮了较多的碳, “库”的功能强; 而处于演替阶段初期的针叶林及灌木林明显占优, 表明其在碳的积累上还有很大的提升空间, 具有“汇”的潜能。此外, 在较高海拔和较大坡度上的高碳储量密度, 与人类的活动频度较小和对植被干扰较轻相关。因此可以推测, 随着自然演替和保护区的封育改造、退耕还林及择伐补阔等森林管理措施的进行, 将利于森林植被的保护、发育和更新, 促使缙云山森林生态系统的碳储量密度进一步增大, 碳“汇”潜能进一步增强, 生态服务功能和价值得到进一步提高。

关键词: RS/GIS; 碳储量密度; 碳汇; 生物量; 缙云山

Spatial distribution of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Nature Reserve based on RS/GIS

XU Shaojun, ZENG Bo*, SU Xiaolei, LEI Shutong, LIU Jianhui

Key Laboratory of Eco-environments of Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education); Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region; School of Life Science; Southwest University; Chongqing 400715, China

Abstract: Forest ecosystem, as a major body of terrestrial ecosystem, holding 85% of terrestrial biomass plays an irreplaceable role in the global carbon cycle and consequently in global climate change. Although China has the smallest forest area among mid-latitude nations, it contains a relatively large forest vegetation carbon pool and high forest carbon density as a result of intensive forestation programs and forest managements. Thus, natural reserves are the most effective areas for forest management, and they often complement some environmental goals including protection of carbon sink, and should not be ignored in regional carbon researches. In former studies, the capability, distribution and changing of carbon

基金项目:国家自然科学基金项目(31070474); 西南大学研究生科技创新基金项目(KB2010010)

收稿日期:2011-08-02; **修订日期:**2012-01-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bzeng@swu.edu.cn

resource and sink are basic scientific issues in regional carbon sequestration researches, and these issues are closely related to vegetation distribution, composition, carbon density and other forest statuses. Jinyun Mountain is one of the national natural reserves in China. As the mountain holds well-protected subtropical evergreen broad-leaved forest (EBF) accompanied by coniferous forest (CF), mixed coniferous and evergreen broad-leaved forest (MCB), etc., it has been concerned by many researchers. Consequently, studying the spatial distribution of vegetation and carbon density of Jinyun Mountain Nature Reserve can provide important basic data for forest ecosystem operation, carbon pool management and even regional carbon sequestration researches.

In this study, high-resolution remote sensing image and 1:10 000 relief maps were used to generate Jinyun vegetation map and digital elevation model respectively, combining with non-destructive method to acquire forest biomass by field investigation and the data of carbon content and biomass regression models from the published papers. And then, the spatial characteristics of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Natural Reserve were analyzed by ArcGIS. The results showed that CF was the dominating forest stand, followed by SH (shrub). The vegetation area ranged as CF (30%) > SH (21%) > MCB (16%) > NS (neoinocalsms stand, 11%) > EBF (6%) > MCN (mixed coniferous and neoinocalsms stand, 5%) > MBS (moso bamboo stand, 4%). The average vegetation carbon density in Jinyun Mountain was 50.45 Mg/hm², which was higher than the average level in China, ranged as MCB (74.23 Mg/hm²) > CF (62.97 Mg/hm²) > EBF (62.65 Mg/hm²) > MCN (59.84 Mg/hm²) > NS (48.72 Mg/hm²) > MBS (47.88 Mg/hm²) > SH (10.66 Mg/hm²). Moreover, vegetation and carbon density had clear spatial variations with altitude, slope and aspect. CF dominated in altitude higher than 500 m and slope > 15°, but the shrub was the other way around. The carbon density of MCB and EBF increased with the increasing of altitude and slope. EBF had a large area in the northwest aspect, and MCB had a large distribution in the north, northwest, east and southeast aspects. NS and MCN were the dominating forest stand in the south relatively. CF, dominated with *Pinus lanceolata*, and SH were at primary stage of forest recovery succession in the Jinyun Mountain. The results indicate that the actual carbon sequestration of Jinyun Mountain is still much lower than the potential value of the zonal climax vegetation in this subtropical area. As we find the carbon storage and density are negatively correlated with human disturbance, forest reserve managements, such as enclosure of forest region, might contribute to conserve and sequester carbon in Jinyun Mountain.

Key Words: RS/GIS; carbon density; carbon sink; biomass; Jinyun Mountain

森林生态系统在维护区域生态环境和全球碳平衡方面均起着极其重要和不可替代的作用^[1-2]。作为陆地生态系统的最大碳库,森林生态系统在全球碳循环中扮演着源、库、汇的作用,其碳蓄积量的任何增减都可能影响到大气 CO₂ 浓度的变化^[3-5]。作为一个动态的碳库,森林储存碳的能力不仅取决于构成森林生态系统的植被类型和面积,而且还取决于森林的质量——碳储量密度,即单位面积的森林碳储量^[3]。因此,研究植被及其碳储量密度的空间分布特征,对于以“减排增汇”为目标的森林生态系统碳库管理及减缓全球气候变化均有十分重要的意义^[6]。

迄今为止,有关全球水平和区域水平陆地生态系统碳储量密度格局的研究报道很多^[7-9]。我国学者也在近几十年使用森林清查数据,利用生物量与森林蓄积量之间的关系,围绕着森林碳储量、碳储量密度和碳汇功能进行了大量和持续性的研究工作^[1, 10-11]。由于我国幅员辽阔,植被类型多样,不同区域选择的研究方法不同,导致不同区域、不同森林类型的碳储量和碳储量密度相差很大,给全国或全球森林生态系统碳循环估测的精确性和可信度增加了困难,因而许多学者对不同区域的植被分别加以研究,以便提高碳储量的估算精度^[11-14]。然而这些研究大部分都是基于森林资源清查数据资料,难于及时地反映现状,随着 3S 技术的发展,特别是高分辨率卫星影像的使用,使山地植被空间分布特征的时效性与精确性定量研究成为可能,为区域性碳汇研究工作带来了便利^[15-18],但针对植被资源丰富、人工干预和管理较强的自然保护区碳储量研究却鲜有

报道^[19-20]。位于重庆市嘉陵江温塘峡南岸的缙云山,由于其自然环境多样,植物种类丰富,拥有长江中上游保存较为完好的亚热带常绿阔叶林和植物种质库,并伴有针阔混交林、针叶林、竹林等植被类型而成为众多学者关注的区域^[21-23]。因此,本研究以重庆缙云山为研究对象,通过解译高分辨遥感影像数据获取植被类型分布和面积特征,利用已有文献的生物量回归(经验)模型和不同林木碳含量数据,配合野外样地调查得到不同植被类型的碳储量密度,使用 1:10000 地形图生成的数字高程模型,在 ArcGIS 的空间分析模块中,明确缙云山不同植被和碳储量密度的空间分布特点,分析其碳汇价值和增汇潜能,为自然保护区森林生态系统管理策略和生态环境规划提供基础数据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

缙云山位于重庆市中心区以北,水平距离约 32.5 km,海拔(嘉陵江边)175—951 m,气候属典型亚热带季风湿润气候,年平均气温 13.6 °C,年平均降水量 1 143 mm。本研究区北起北碚区的嘉陵江温塘峡南岸,南至壁山县阳龙山和北碚区歇马镇马鞍山(106°20′—106°25′E, 29°47′—29°52′N),包括居民区、居民区用地和缙云山自然保护区核心区、缓冲区和实验区等,总面积约 3 468.41 hm²。

1.2 数据获取与处理

首先将缙云山 2010 年 9 月 19 日的 WorldView-2 影像(红、绿、蓝、近红外和全色波段)进行预处理,包括图像融合、镶嵌、几何校正、裁剪及增强处理等,生成研究区分辨率为 0.6 m 的影像数据。然后根据缙云山植被和影像的特点,将研究区域植被分为常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林、毛竹林、慈竹林、针竹(慈竹)混交林及灌木林 7 种植被类型,其中水体、道路和房屋等为非植被,使用 ENVI EX 中面向对象的分类方法,建立规则对影像进行解译。最后将解译结果在 ArcGIS 中进行修正和拓扑处理,最终生成分辨率为 0.6 m 的缙云山植被类型分布专题图(图 1)。此外,将研究区域所在的 5 幅 1:10 000 的地形图进行扫描、拼接和空间校正,在

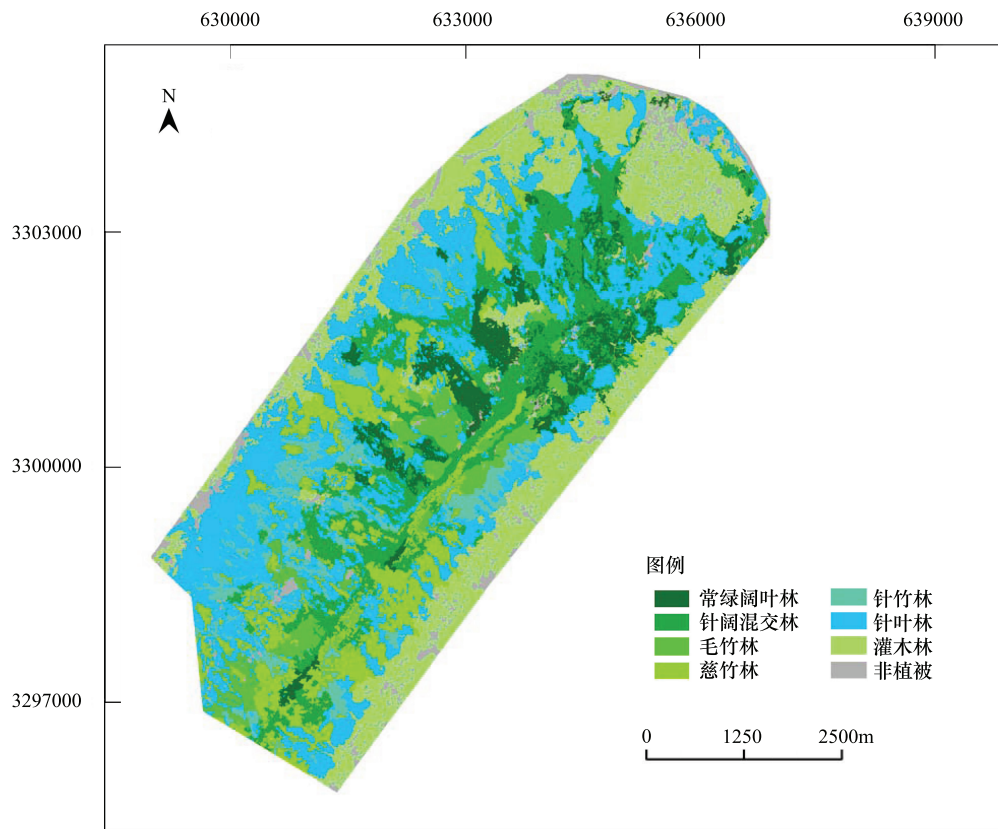


图 1 缙云山植被分类图

Fig. 1 The vegetation classification map in Jinyun Mountain

R2V 中进行数字化处理,再将数字化后的图像在 ArcGIS 中进行拓扑处理,并最终生分辨率为 5 m 的数字高程模型。

1.3 野外植被调查

兼顾不同高程和不同植被类型,设置 60 个调查样地,在 2011 年 4—6 月对样地的常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林、毛竹林、针竹混交林、慈竹林和灌木林 7 种类型进行调查,记录群落类型、海拔、GPS、坡度、坡向、立地情况等基础信息。缙云山的灌木林主要分布在居民居住区附近,多为柑橘林、李树林等果园,并与居民用地交错,还有一部分为撂荒的柑橘、枇杷林和居民用地,居民区的房前屋后也多为一些果树和庭园物种,因此本研究中将这些类型统一归为灌木林。常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林和针竹混交林的标准样地面积为 30 m × 30 m,每木检尺,胸径 5 cm 以上的测胸径和树高,胸径 5 cm 以下的测地径和株高,并记录种名和数量。对于特殊地形不能获取标准样地的,以 20 m × 30 m 或 20 m × 20 m 样地面积调查,草本层调查平均高和盖度。毛竹林和慈竹林以 15 m × 15 m 为标准样方,调查每株(木)胸径、株高和株数,记录种名与株数。灌木林以 15 m × 15 m 为标准样地,调查方法同常绿阔叶林等样地。调查的样地类型、数量及主要林分组成见表 1。

表 1 缙云山植被类型组成、面积和碳储量密度

Table 1 The composition, area and carbon density of seven type forest stands in Jinyun Mountain

植被类型*	主要建群种和优势种*	面积	占总面积的百分比	碳储量密度
Type of forest stands	Edificator/dominant species	Areas /hm ²	The percent of total area/%	Carbon density / (Mg/hm ²)
EBL (n=14)	四川山矾、大头茶、栲树、黄牛奶树、香樟	219.04	6	62.65 (28.46) **
MCB (n=14)	马尾松、杉木、四川山矾、薯豆、川杨桐	537.26	16	74.23 (24.67)
CF (n=10)	马尾松、杉木	1 048.56	30	62.97 (22.77)
MBS (n=4)	毛竹	139.64	4	47.88 (6.08)
MCN (n=5)	慈竹、杉木、马尾松	158.84	5	59.84 (13.52)
NS (n=6)	慈竹	393.12	11	48.72 (17.28)
SH (n=7)	柑橘、盐肤木	729.64	21	10.66 (5.06)
平均 Mean	—	—	—	50.45

* EBL:常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest; MCB:针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaved forest; CF 针叶林 Coniferous forest; MBS:毛竹林 Moso bamboo stand; MCN:针竹林 Mixed coniferous and neosinocalamus stand; NS:慈竹林 Neosinocalamus stand; SH:灌木林 Shrub; ** 括号内为标准误

1.4 不同植被类型碳储量密度计算

本研究通过生物量(经验)回归模型^[13]间接计算碳储量密度。样地中单木的生物量与其含碳量相乘得到单木碳储量,所有单木碳储量相加得到样地碳储量,样地碳储量与样地面积的比值即为样地碳储量密度,相同植被类型碳储量密度的均值即为该类型的碳储量密度,缙云山植被平均碳储量密度等于总碳储量与总植被面积比。而单木的生物量由生物量(经验)回归模型获得:

$$W = a(D^2H)^b \text{ 或 } W = aD^bH^c$$

式中, W 为单木生物量(kg), D 为树木胸径或地径(cm), H 为树高或灌木的株高(m), a 、 b 和 c 为不同树种的参数值;草本层的生物量则采用平均高(cm)和盖度来计算,方程和参数从文献中获取(表 2)。

1.5 数据空间分析方法

利用植被专题图和数字高程模型叠加的方式,使用 ArcGIS 中的空间分析模块,从高程、坡向和坡度 3 方面对缙云山植被和碳储量密度空间分布进行分析。高程以 50 m 为一个等级,坡向为无坡向和东(67.5—112.5°)、东南(112.5—157.5°)、南(157.5—202.5°)、西南(202.5—247.5°)、西(247.5—292.5°)、西北(292.5—337.5°)、北(0—22.5°,337.5—360°)和东北(22.5—67.5°),即平坡、半阴坡、半阳坡、阳坡、阳坡、半阳坡、半阴坡、阴坡和阴坡。坡度的等级为平坡(0—5°)、缓坡(5—15°)、斜坡(15—25°)、陡坡(25—35°)、急坡(35—45°)和险坡(45—90°)。

表 2 单木的生物量回归模型和 C 含量

Table 2 Biomass regression models and carbon content in some species

物种 Species *	生物量回归模型 Biomass regression models	碳含量 C content
马尾松	$W = (1 + 1/6.23) \times 0.071556 (D^2H)^{0.857209} [13]$	0.5144 ^[14]
杉木	$W = 0.073429 (D^2H)^{0.86262} + 0.013775 (D^2H)^{0.84463} + 0.000482 (D^2H)^{1.23314} + 0.019638 (D^2H)^{0.78969} + 0.04305 (D^2H)^{0.7358} [13]$	0.5365 ^[13]
毛竹	$W = 0.04056 (D^2H)^{0.8897} [24]$	0.50 ^[13]
栲树	$W = 4.1741 \ln D - 3.3449 + 52.7863 \ln D - 43.6809 + 0.1392 D^{2.1917} + 0.0481 D^{2.1506} [25]$	—
桤木	$W = 0.1565 (D^2H)^{0.7388} [26]$	0.5005 ^[14]
枫香	$W = 0.034514 (D^2H)^{1.0037} [27]$	—
其它硬阔	$W = 0.094594 (D^2H)^{0.8666} [27]$	0.4834 ^[14]
灌木	$W = 0.409759 D^{1.0615} H^{0.5427} [28]$	0.50 ^[13]
草本层	$W = 0.05492 H^{0.8030} G^{1.0877} [28]$	0.45 ^[29]
水杉	—	0.5489 ^[14]
桐	—	0.4695 ^[13]
香樟	$W = 0.145305 (D^2H)^{0.774251} [12]$	0.4914 ^[14]
大头茶	$W = [0.4601 (D^2H)^{0.9541} + 0.0607 (D^2H)^{0.9677} + 0.0008 (D^2H)^{1.2389} + 0.1787 (D^2H)^{0.9241}] / 1000 [21]$	—
慈竹	$W = 1.2893 + 0.0113 (D^2H)^{[23]}$	0.50 ^[13]
灯台树	$W = 0.065 (D^2H)^{0.84} + 1.59 (D^2H)^{0.38} + 0.218 (D^2H)^{0.34} + 0.291 (D^2H)^{0.55} [30]$	—
木荷	$W = 0.071029 (D^2H)^{0.9117} [27]$	—
榿木	$W = 0.13618 (D^2H)^{0.7617} [31]$	—
其它软阔	$W = (1 + 1/3.85) \times 0.0495502 (D^2H)^{0.952453} [13]$	0.4956 ^[13]
桦	$W = (1 + 1/2.89) \times 0.0278601 (D^2H)^{0.993386} [13]$	0.4938 ^[14]
栎类	—	0.4832 ^[14]
楠木	—	0.5030 ^[13]
润楠	—	0.5050 ^[14]

* 马尾松 *Pinus massoniana*, 杉木 *Cunninghamia lanceolata*, 毛竹 *Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens*, 栲树 *Castanopsis fargesii*, 桤木 *Alnus cremastogyne*, 枫香 *Liquidambar formosana*, 硬阔 *Quercus* and *hardwood*, 灌木 *Shrub*, 草本层 *Herbaceous layer*, 水杉 *Metasequoia glyptostroboides*, 桐 *Mallotus*, 香樟 *Cinnamomum camphora*, 大头茶 *Gordonia acumenata*, 慈竹 *Neosinocalamus affinis*, 灯台树 *Cornus controversa*, 木荷 *Schima superba*, 榿木 *Loropetalum chinense*, 软阔 *Softwood*, 桦 *Betula*, 栎类 *Quercus* spp, 楠木 *Phoebe zhennan*, 润楠 *Machilus nanmu*

2 结果与分析

2.1 缙云山植被分布与碳储量密度

缙云山为东北-西南走向, 东南较陡峭, 西北较平缓。植被有较为明显的分带现象, 其中针叶林是缙云山的主要植被, 占研究区域的 30%, 面积为 1 048.56 hm², 主要分布在缙云山的西部和中北部; 灌木林和非植被占到了 28%, 集中在西南的山麓和北部, 针阔混交林的面积也较大, 达到了 537.26 hm², 占总面积的 16%, 在中北部和中南分布较多, 慈竹林为 393.12 hm², 占 11%, 集中在中西部和南部, 常绿阔叶林、针竹混交林和毛竹林的面积较为接近, 分别为 6%、5% 和 4%, 常绿阔叶林集中在中部, 在中东偏北有散状分布, 毛竹林在中偏东较为集中, 针竹林主要集中在南部 (图 1, 表 1)。

植被中针阔混交林的碳储量密度最高, 为 74.23 Mg/hm², 其次为常绿阔叶林和针叶林, 分别为 62.65 Mg/hm² 和 62.97 Mg/hm², 针竹林为 59.84 Mg/hm², 毛竹林和慈竹林的碳储量密度较为接近, 分别为 47.88 Mg/hm² 和 48.72 Mg/hm², 灌木林的最低, 仅为 10.66 Mg/hm²。碳储量密度趋势为: 针阔混交林 > 针叶林 > 常绿阔叶林 > 针竹林 > 慈竹林 > 毛竹林 > 灌木林 (表 1)。

2.2 缙云山植被与碳储量密度的海拔梯度变化特点

植被的分布有较强海拔梯度现象。针阔混交林、常绿阔叶林的比例均随着海拔升高而增加, 在最高海拔处分别达到了 45.89% 和 18.09%; 灌木林随着海拔升高而降低, 但在 350—450 m 处呈陡增的现象; 针叶林则呈现出双峰曲线的特点, 其峰值分别在 300—350 m 和 500—550 m 处, 分别占该海拔植被的 47.87% 和

49.13%;慈竹林随着海拔有增加的趋势,但在海拔最高处有所下降,针竹混交林有单峰的特点,峰值出现在海拔 500—550 m,毛竹林在 650—800 m 处分布较多(图 2)。

缙云山植被的碳储量密度在海拔梯度上也有明显特点,550—600 m 处有较高的碳储量密度,为 62.00 Mg/hm²,在 350—400 m 处值最小,为 31.99 Mg/hm²,从整体趋势上看,植被的碳储量密度随着海拔高度的增加而增大,在海拔最高处达到 65.46 Mg/hm²(图 2)。

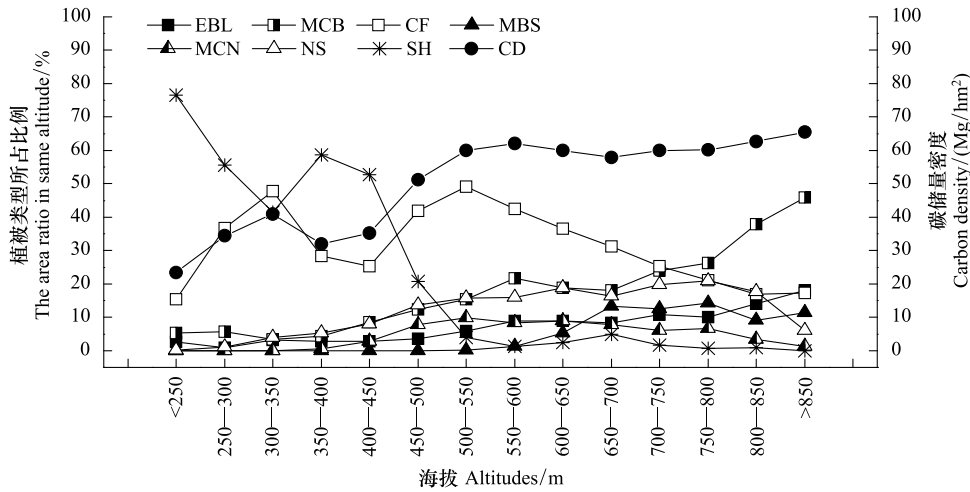


图 2 缙云山不同海拔梯度上的植被和碳储量密度

Fig. 2 The vegetation and carbon density of different altitudes in Jinyun Mountain

CD: 碳储量密度 Carbon density

2.3 缙云山植被与碳储量密度在坡向上的分布特点

常绿阔叶林较多的分布在西北坡,面积为 45.19 hm²,北坡和东坡也分布较多,而在西南坡向上分布最少,仅为 5.29 hm²;针阔混交林呈现西、西北和东、东南对称方向上分布较多的特点,均在 80 hm² 以上;针叶林也在西北坡和西坡向上有较多的分布,面积分别为 302.03 hm² 和 194.91 hm²,毛竹林除在西南坡分布较多外,在东南和西坡向占优,针竹林和慈竹林在各坡向上分布面积相对接近(表 3)。在每一坡向上,针叶林的比

表 3 缙云山不同坡向上的植被类型和碳储量密度

Table 3 The vegetation and carbon density of different aspects in Jinyun Mountain

坡向 Aspect	EBL /hm ²	MCB /hm ²	CF /hm ²	MBS /hm ²	MCN /hm ²	NS /hm ²	SH /hm ²	CD /(Mg/hm ²)
平坡 Flat	1.05 (3.01) *	8.12 (23.30)	6.40 (18.36)	1.95 (5.60)	0.76 (2.18)	1.64 (4.71)	14.93 (42.84)	40.00
阴坡 North	39.79 (8.98)	61.54 (13.90)	143.12 (32.31)	14.27 (3.22)	13.39 (3.02)	43.29 (9.77)	127.51 (28.79)	44.15
阴坡 Northeast	18.32 (5.52)	57.26 (17.25)	107.87 (32.50)	9.07 (2.73)	11.46 (3.45)	38.91 (11.72)	88.99 (26.81)	44.69
半阴坡 East	36.32 (8.92)	81.16 (19.93)	93.96 (23.07)	13.54 (3.32)	18.49 (4.54)	43.83 (10.76)	119.97 (29.46)	43.94
半阳坡 Southeast	33.54 (8.89)	83.04 (22.00)	70.23 (18.61)	20.63 (5.47)	17.45 (4.62)	63.39 (16.80)	89.11 (23.61)	44.00
阳坡 South	15.91 (6.42)	39.49 (15.94)	53.89 (21.75)	4.84 (1.95)	16.68 (6.73)	46.51 (18.77)	70.44 (28.43)	40.31
阳坡 Southwest	5.29 (2.42)	38.18 (17.49)	76.15 (34.88)	7.77 (3.56)	22.65 (10.37)	32.46 (14.86)	35.85 (16.42)	48.31
半阳坡 West	23.68 (5.20)	82.18 (18.04)	194.91 (42.79)	17.78 (3.90)	29.06 (6.38)	56.04 (12.30)	51.55 (11.32)	52.33
半阴坡 Northwest	45.19 (6.36)	86.35 (12.15)	302.03 (42.51)	49.80 (7.01)	28.77 (4.04)	66.98 (9.43)	131.40 (18.49)	48.91

括号内的值为植被占同坡向植被总面积的百分比(%)

例都有明显的优势,特别是在西北和西坡向上,占到同坡向植被的 42.51% 和 42.79%;慈竹林在东南、南、和西南三个坡向的植被中,所占的比例较高,分别是 16.80%、18.77%、14.86%;针竹林在南坡植被中为 10.37%。在平坡上灌木林分布最多,比例为 42.84% (表 3)。

植被的碳储量密度在西坡向上最高,达到了 52.33 Mg/hm^2 ,其次为西北和西南,均在 48 Mg/hm^2 以上,南坡和平地最低,在 40 Mg/hm^2 左右(表 3)。

2.4 缙云山植被与碳储量密度在不同坡度上的分布特点

植被在不同坡度分布的特点十分明显。常绿阔叶林除缓坡外,随坡度的增大而增加,在险坡上达到了 9.68%,针阔混交林随坡度先减小后增加,在斜坡以上随坡度的增加较为明显,险坡上占到 27.58%,针叶林在陡坡上呈现峰值,达到了 41.33%,慈竹林随坡度的增大增势明显,在险坡所占比例与针叶林和针阔混交林接近,为 24.25%;针竹林在急坡上达到最大值,为 7.23%,毛竹林总体呈递减趋势,在险坡上仅占 0.94%,灌木林平坡和缓坡的值最大,然后急剧下降,在险坡中比例仅为 5.12%。植被碳储量密度的坡度变化趋势也较明显,从平坡的 41.08 Mg/hm^2 、缓坡的 39.05 Mg/hm^2 逐渐上升到险坡的 59.62 Mg/hm^2 (图 3)。

3 结论与讨论

3.1 缙云山植被分布、碳储量密度与碳汇功能

森林植被的组成、空间分布及结构能够反映生境特点,决定着森林碳存储的能力,是研究森林生态系统及其碳汇能力的基础^[32-34]。缙云山的顶级地带性植被是常绿阔叶林,演替方向是灌草丛—马尾松林—针阔混交林—常绿阔叶林,马尾松林也是该地区的先锋种之一^[21-22]。从研究结果看,缙云山的植被以马尾松林为主,分布广,面积大,碳储量密度高,因此对缙云山碳储量和碳储量密度贡献也最大,是重要的碳库,这也意味着做为缙云山演替的先锋植被,已经吸收、转化和积累了较多的 CO_2 ,表明过去有着重要的碳“汇”功能。本研究中的灌木林,包含了柑橘林、李子林、耕地,随着以

保护缙云山森林生态系统为目的的住户外迁和退耕还林等策略的进一步实施,会使其自然演替,碳储量会逐渐增加。缙云山针叶林和灌木林总面积目前占整个缙云山森林植被的一半,随着演替的进行,会逐渐更新为碳密度更高的植被类型,因此缙云山的增“汇”空间很大。通常认为,竹林生境下的物种丰富度较低,竹林的存在对群落的演替和更新起负面影响^[35],然而竹林具有很高净生产力和重要经济实用价值,合理的经营和管理,能显著提高竹林的生产力^[36]。本研究中,缙云山的竹林也是主要的植被类型,包括半人工的毛竹林和慈竹林,具有相对较低的碳储量密度,如果能合理地管理和采伐,充分利用其经济价值,又能促进群落向高级类型演替,则能有效地增加碳汇功能。由上可知,缙云山较大面积的植被离发育和演替成地带性顶级植被——常绿阔叶林还相差甚远,而未发育成熟和受人为干扰的植被生物量也总比潜在生物量低^[37],因此可以推测,缙云山森林植被在未来的发育和演替中,具有较大的增“汇”空间,能起到碳“汇”的功能。

根据 Dixon 等人的估计,中国森林生态系统的植被碳总量为 17 Pg,王效科等据此推测我国森林的平均碳密度为 114 Mg/hm^2 ,并认为这一结果显著高估了我国森林的碳密度^[2, 38],而根据 Fang 等的估算,中国森林的植被碳储量为 4.75 Pg,碳密度为 44.91 Mg/hm^2 ,是目前最受公认的结果^[11]。汪业勋等估算亚热带常绿阔叶林区域的植被碳密度为仅为 26.29 Mg/hm^2 ,而李海涛的研究结果显示,赣中亚热带森林样带的碳密度为 43.0 Mg/hm^2 ^[39]。黄从德等人研究了四川省不同森林植被类型的碳密度,结果显示四川地区平均碳密度 38.04 Mg/hm^2 ,其中硬阔类植被为 44.95 Mg/hm^2 ^[40]。而本研究中缙云山碳储量的平均密度为 50.45 Mg/hm^2 ,低于王效科的推测,但均高于 Fang 等对全国森林平均碳密度的估算结果以及亚热带森林样带的碳密度调查结果,

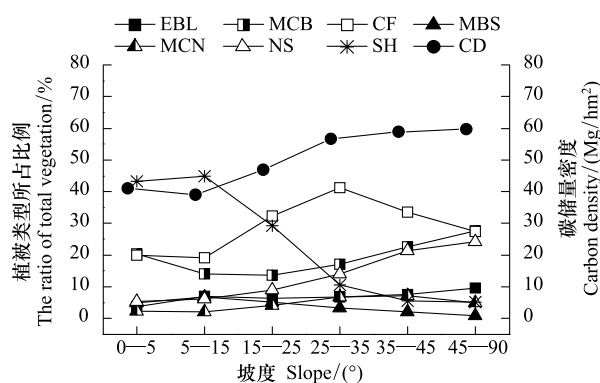


图 3 缙云山不同坡度植被和碳储量密度

Fig. 3 The vegetation and carbon density of different slopes in Jinyun Mountain

和黄从德研究的四川西北高山峡谷区的碳储量密度 50.52 Mg/hm^2 ^[40] 最为接近,这也充分说明缙云山是一个重要的碳库。本研究中缙云山的常绿阔叶林碳储量密度低于针阔混交林,和针叶林接近,这与其他学者研究的成果^[29, 41] 不大一致,主要原因是缙云山常绿阔叶林中的一部分是人工和人工抚育林,其生长发育年限有限,处于低龄阶段^[21],因此使常绿阔叶林的平均碳储量密度有所降低,这也充分说明,随着群落的进一步发育成熟,缙云山碳储量还会进一步增加,碳“汇”的功能还会进一步提高。

森林植被碳蓄积的估算至今仍然存在较大的不确定性^[29],在对碳储量与植物物种多样性的关系研究中,Reich 等研究显示总生物量或碳储量均与物种多样性之间呈现正相关关系,植物多样性的减少意味着生态系统固定 CO_2 的能力降低,植物多样性越少,碳储量越少,这一观点已经在国际学术领域中达成了共识^[42-44]。就全球尺度上的森林生态系统而言,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生物量或碳储量密度也是公认的事实。缙云山作为确立和发展较早的自然森林保护区,其生物多样性是得到学术界一致认可的^[21],因此其碳储量密度较高也是合理的。另一方面,王效科等认为中国森林生态系统碳密度随人口密度增加而降低^[37],Fang 等也证实中国中东部地区较低的碳密度与该区的人口密度有关^[11]。森林的碳密度与人口密度之间的相互关系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。本研究范围尽管只是亚热带区域中的一座山脉,没有统计森林生物量和人口密度的空间分布关系,但作为国家级森林自然保护区,人为负面的干扰程度肯定是较低的,这也是缙云山碳储量密度较高的另一主要原因。

3.2 缙云山植被与碳储量密度的垂直分异

森林生态系统具有明显的垂直地带性,这主要与温度和水分密切相关,另一方面,海拔越高人为干扰的程度越低,这就共同决定了碳储量密度也具有明显的垂直分异特征^[8],本研究的结果也显示了这样的特点。缙云山山麓以灌木林为主,半山以针叶林、竹林和针阔混交林为主,山顶以针阔混交林、常绿阔叶林和针叶林为主,所以植被的碳储量密度随着海拔的升高而增大,这也和多数研究者结果相一致^[8, 40]。本研究中,灌木林与人为活动密切相关,集中在海拔在 350—450 m 区域,也是居民活动最频繁的居住区,所以导致这一区域的碳密度出现谷值。灌木林随着海拔高度而降低的趋势表明了海拔越高,人为影响的程度越小,这也是碳储量密度呈现随海拔升高而增加趋势的一个原因(图 3)。可见,海拔和人类干扰程度是影响缙云山森林植被和碳储量空间分异特征的重要因素。

3.3 植被与碳储量密度的坡度/坡向差异

坡向和坡度主要影响到物质和能量的分配,也影响着土壤水热动态,进而调控着森林植被和碳储量密度分布。有研究者认为,森林碳密度的空间变异性在区域尺度上取决于水热因子的分布状况,特别是降雨和温度的作用,此外地形对森林植物及碳密度的分布也有较大的影响^[29]。本研究中慈竹林及针(慈)竹林主要分布在阳坡,常绿阔叶林主要分布在阴坡和半阴坡,针叶林在半阴坡和半阳坡分布的较为集中。从整个缙云山的地形看,南坡总体上较为陡峭,水分和土壤条件较差可能限制了植被的生长,而竹林的存在又对森林的演替起负面影响^[35],这可能是竹林在南坡分布较多而常绿阔叶林和针阔混交林分布相对较少的主要原因。碳密度表现为半阴坡和半阳坡略大于阳坡和阴坡,无坡向最小,也可能受慈竹林分布的影响。坡度在一定程度上也反映了人为干扰的强度,坡度越小,人为干扰的程度越大,开垦成农田和果园的机率就越大,随着坡度的增大,受人为干扰的机会和程度越小,植被多保持自然状态,植被生长时间长,生物量和丰富度大,因而碳储量密度高。本研究中,人为干扰形成的灌木林主要分布在坡度较小的区域,坡度较大的区域主要是发育良好的针叶林、针阔混交林和竹林,常绿阔叶林也是随着坡度增加而比例增大,这也是森林植被碳密度随着坡度的增加而增大的关键原因。

3.4 森林植被管理与碳“汇”功能

全球变化和人类活动改变了陆地生态系统生产力,影响了陆地生态系统的碳固定,最终会造成陆地生态系统碳“源”/“汇”格局的重新分布,反之,人类通过植树造林和提高森林生态系统的经营管理质量,重塑良好的陆地生态系统碳“源”/“汇”的新格局,已经成为增加碳汇、减缓全球变化最有希望的“双赢策略”^[4, 45]。中

国的森林植被自 20 世纪 70 年代以来,一直起着碳“汇”的作用,对减缓全球变化具有积极的贡献,特别是东北和西南地区,贡献能力在持续增强^[11, 13-14]。作为森林植被保护较好,多样性较高的缙云山,是重庆及西南地区众多自然森林保护区和植被良好的亚热带林区之一,因此加强保护区和区域性植被的碳储量研究,对于提高森林植被的科学经营管理及精确估测西南及全国或全球森林生态系统碳循环有着重要的实际意义。本研究的结果也显示,缙云山有着很高的碳储量密度,具有重要的碳库作用,意味着是过去重要的碳“汇”区。缙云山植被和碳储量密度空间分布的特点显示,植被碳储量主要集中在演替早期的林型,常绿阔叶林中也有正在发育的人工和人工抚育林,居民区的存在对森林植被有着较强的人为干扰,这些因素都会使森林的实际生物量远低于其潜在生物量^[37],但随着缙云山植被的自然演替和管理措施的进一步实施,植被会逐渐发育成生物量更高的林型,人为的负面影响也会逐渐降低,森林生态系统的储碳能力还将继续提高、碳“汇”作用也会得到增强。这也意味着缙云山自然保护区在重庆地区,甚至西南地区森林碳储量和森林碳汇功能的提高方面将起着重要的贡献作用。

致谢:重庆缙云山国家级自然保护区管理局科技处邓先宝处长为本研究的数据资料和外业调查提供帮助;周光林、陈龙、袁慎鸿、王玉平、杨浩、袁志等研究生参与外业工作。

References:

- [1] Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 733-740.
- [2] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [3] Hu H F, Liu G H. Roles of forest management in global carbon dioxide mitigation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(4): 709-714.
- [4] Tian H Q, Wan S Q, Ma K P. Global ecology: global change and terrestrial ecosystem. *Journal of Plant Ecology (Chinese version)*, 2007, 31(2): 173-174.
- [5] Fu B J, Niu D, Zhao S D. Study on global change and terrestrial ecosystems: history and prospect. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(5): 556-560.
- [6] Yu X X, Lu S W, Jin F, Chen L H, Rao L Y, Lu G Q. The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2096-2102.
- [7] Fang J Y, Guo Z D, Pu S L, Cheng A P. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981—2000. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2007, 50(9): 1341-1350.
- [8] Huang C D, Zhang J, Yang W Q, Tang X, Zhang G Q. Spatial differentiation characteristics of forest vegetation carbon stock in Sichuan province. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 5115-5121.
- [9] Fang J Y, Chen A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(9): 967-973.
- [10] Fang J Y, Cheng P A, Zhao S Q, Ci L J. Estimating biomass carbon of China's forests: supplementary notes on report published in science (291: 2320-2322) by Fang et al. (2001). *Acta phytocologica Sinica*, 2002, 26(2): 243-249.
- [11] Fang J Y, Cheng A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [12] Feng Z W, Wang X K, Wu G. *Biomass and Productivity of Forest Ecosystem in China*. Beijing: Science Press, 1999.
- [13] Li H K, Lei Y C. *Assessment of Forest Biomass and Carbon Stocks in China*. Beijing: Chinese Forestry Press, 2010.
- [14] Huang C D, Zhang J, Yang W Q, Tang X, Zhao A J. Dynamics on forest carbon stock in Sichuan province and Chongqing City. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 966-975.
- [15] Li J Y, Wu B F, Wu Y M, Zhang L. Biomass estimation in Three Gorges region with remote sensing. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, 24(6): 784-787.
- [16] Chen Q, Chen Y F. Monitoring vegetation coverage degree of forestland converted from cropland by applying high resolution satellite image. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(Supplement 1): 5-9.
- [17] Dong J R, Kaufmann R K, Myneni R B, Tucker C J, Kauppi P E, Liski J, Buermann W, Alexeyev V, Hughes M K. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(3): 393-410.
- [18] Boyd D S, Foody G M. An overview of recent remote sensing and GIS based research in ecological informatics. *Ecological Informatics*, 2011, 6(1): 25-36.
- [19] Li H T, Yang L C, Yang M C, Dong X B, Hu D, Zhang Z X, Du H T. Valuation and dynamic modeling of the biomass of forest vegetation in the

- Jigongshan Mountain Natural Reserve. Resources Science, 2005, 27(4): 154-159.
- [20] Chen Z H, Zhang H D, Wang B S. Studies on biomass and production of the lower subtropical evergreen broad-leaved forest in Heishiding Natural Reserve—biomass increment and net primary production. Acta Ecologica Sinica, 1992, 12(4): 377-386.
- [21] Zhong Z C. Ecological Studies on Evergreen Broad-leaved Forest. Chongqing: Southwest Normal University Press, 1988.
- [22] Zhong Z C. Advances in Plant Ecology — Selected Papers. Chongqing: Southwest Normal University Press, 1997.
- [23] Su Z X, Zhong Z C. Studies on the biomass structure of *neosinocalamus affinis* population in Jinyun Mountain. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica, 1991, 15(3): 240-252.
- [24] Li X. The Biomass of *Phyllostachys pubescens*, *Bambusa rigida* and *Bambusa gibba* in Southern Jiangxi Province [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007.
- [25] Yang T H, Song K, Da L J, Li X P, Wu J P. The biomass and aboveground net primary productivity of *schima superba-castanopsis carlesii* forests in east China. Science China Life Sciences, 2010, 53(7): 811-821.
- [26] Shi P L, Zhong Z C, Li X G. A study on the biomass of *Alder* and *Cypress artificial* mixed forest in Sichuan. Acta Phytocologica Sinica, 1996, 20(6): 524-533.
- [27] Liu Q X, Chang J, Jiang B, Yuang W G, Qi L Z, Zhu J R, Ge Y, Shen Q. The biomass of the evergreen broad-leaved ecological public-welfare forests in Zhejiang, East China. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(9): 2139-2144.
- [28] Yuang W G, Jiang B, Ge Y J, Zhu J R, Shen A H. Study on biomass model of key ecological forest in Zhejiang province. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2009, 29(2): 1-5.
- [29] Yu G R, Li H T, Wang S Q. Global Change, Carbon Cycle and Storage in Terrestrial Ecosystem. Beijing: Meteorology Press, 2003.
- [30] Wang X Y, Hu D, He J S. Biomass research of *Fagus engleriana* and *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest in Shennongjia forest district. Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition, 2007, 28(2): 62-67.
- [31] Chen Q C, Shen Q. Studies on the biomass models of the tree stratum of secondary *Cyclobalanopsis glauca* forest in Zhejiang. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica, 1993, 17(1): 38-47.
- [32] Carmel Y, Kadmon R. Effects of grazing and topography on long-term vegetation changes in a Mediterranean ecosystem in Israel. Plant Ecology, 1999, 145(2): 243-254.
- [33] Wang P C, Yao J, Xiao W F, Zhang S G, Huang Z L, Zeng L X, Pan L. Topography differentiation characteristics of forest vegetation distribution in the three Gorges reservoir area. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(6): 528-534.
- [34] Florinsky I V, Kuryakova G A. Influence of topography on some vegetation cover properties. Catena, 1996, 27(2): 123-141.
- [35] Wang Y J, Tao J P, Li Y, Yu X H, Xi Y. Effects of *Fargesia nitida* on species diversity and trees regeneration in different forest cycles of Subalpine forest in Wolong Nature Reserve. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(2): 1-7.
- [36] Cheng H, Hong W, Lan B, Zheng Y S, He D J. Study on biomass and productivity of *Phyllostachys heterocycla* cv. *Pubescens* forest in the north of Fujian. Scientia Silvae Sinicae, 1998, 34(S1): 60-64.
- [37] Iverson L R, Brown S, Grainger A, Prasad A, Liu D. Carbon sequestration in tropical Asia: an assessment of technically suitable forest lands using geographical information systems analysis. Climate Research, 1993, 3: 23-38.
- [38] 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.
- [39] Li H T, Wang N N, Gao L P, Yu G R. The carbon storage of the subtropical forest vegetation in central Jiangxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 693-704.
- [40] Huang C D, Zhang J, Yang W Q, Tang X. Spatiotemporal variation of carbon storage in forest vegetation in Sichuan Province. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12): 2687-2692.
- [41] Fang Y T, Mo J M, Peng S L, Li D J. Role of forest succession on carbon sequestration of forest ecosystems in lower subtropical china. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(9): 1685-1694.
- [42] Peter B R, Knops J, Tilman D, Craine J, Ellsworth D, Tjoelker M, Lee T, Wedin D, Naeem S, Bahaeddin D, Hendrey G, Jose S, Wragge K, Goth J, Bengtson W. Plant diversity enhances ecosystem responses to elevated CO₂ and nitrogen deposition. Nature, 2001, 410(6830): 809-810.
- [43] Reich P B, Tilman D, Naeem S, Ellsworth D S, Knops J, Craine J, Wedin D, Trost J. Species and functional group diversity independently influence biomass accumulation and its response to CO₂ and N. Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 2004, 101(27): 10101-10106.
- [44] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime J P, Hector A, Hooper D U, Huston M A, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D, Wardle D A. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. Science, 2001, 294(5543): 804-808.
- [45] IGBP, Terrestrial Carbon Working Group. CLIMATE: the terrestrial carbon cycle: implications for the Kyoto Protocol. Science, 1998, 280(5368): 1393-1394.

参考文献:

- [1] 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. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.

- [3] 胡会峰, 刘国华. 森林管理在全球 CO₂ 减排中的作用. 应用生态学报, 2006, 17(4): 709-714.
- [4] 田汉勤, 万师强, 马克平. 全球变化生态学: 全球变化与陆地生态系统. 植物生态学报, 2007, 31(2): 173-174.
- [5] 傅伯杰, 牛栋, 赵士洞. 全球变化与陆地生态系统研究: 回顾与展望. 地球科学进展, 2005, 20(5): 556-560.
- [6] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 陈丽华, 饶良懿, 陆贵巧. 中国森林生态系统服务功能价值评估. 生态学报, 2005, 25(8): 2096-2102.
- [8] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵, 张国庆. 四川省森林植被碳储量的空间分异特征. 生态学报, 2009, 29(9): 5115-5121.
- [9] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.
- [10] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 慈龙骏. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文 (Science, 2001, 291: 2320-2322) 的若干说明. 植物生态学报, 2002, 26(2): 243-249.
- [12] 冯宗伟, 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.
- [13] 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.
- [14] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵, 赵安玖. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. 生态学报, 2008, 28(3): 966-975.
- [15] 李锦业, 吴炳方, 周月敏, 张磊. 三峡库区植被生物量遥感估算方法研究. 遥感技术与应用, 2009, 24(6): 784-787.
- [16] 陈巧, 陈永富. 应用高分辨率卫星影像监测退耕地植被的覆盖度. 林业科学, 2006, 42(Z1): 5-9.
- [19] 李海涛, 杨柳春, 严茂超, 董孝斌, 胡聘, 张照喜, 杜化堂. 鸡公山自然保护区森林生物量动态模拟及其宏观价值评估. 资源科学, 2005, 27(4): 154-159.
- [20] 陈章和, 张宏达, 王伯荪. 黑石顶自然保护区南亚热带常绿阔叶林生物量与生产量研究——生物量增量及第一性生产量. 生态学报, 1992, 12(4): 377-386.
- [21] 钟章成. 常绿阔叶林生态学研究. 重庆: 西南师范大学出版社, 1988.
- [22] 钟章成. 植物生态学研究进展——钟章成论文选. 重庆: 西南师范大学出版社, 1997.
- [23] 苏智先, 钟章成. 缙云山慈竹种群生物量结构研究. 植物生态学与地植物学学报, 1991, 15(3): 240-252.
- [24] 黎曦. 赣南毛竹、硬头黄竹、坭竹等竹林生物量的研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
- [25] 杨同辉, 宋坤, 达良俊, 李修鹏, 吴健平. 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(7): 610-619.
- [26] 石培礼, 钟章成, 李旭光. 四川桉柏混交林生物量的研究. 植物生态学报, 1996, 20(6): 524-533.
- [27] 刘其霞, 常杰, 江波, 袁位高, 戚连忠, 朱锦茹, 葛滢, 沈琪. 浙江省常绿阔叶生态公益林生物量. 生态学报, 2005, 25(9): 2139-2144.
- [28] 袁位高, 江波, 葛永金, 朱锦茹, 沈爱华. 浙江省重点公益林生物量模型研究. 浙江林业科技, 2009, 29(2): 1-5.
- [29] 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.
- [30] 王向雨, 胡东, 贺金生. 神农架地区米心水青冈林和锐齿槲栎林生物量的研究. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2007, 28(2): 62-67.
- [31] 陈启瑞, 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(1): 38-47.
- [33] 王鹏程, 姚婧, 肖文发, 张守攻, 黄志霖, 曾立雄, 潘磊. 三峡库区森林植被分布的地形分异特征. 长江流域资源与环境, 2009, 18(6): 528-534.
- [35] 王永健, 陶建平, 李媛, 余小红, 席一. 华西箭竹对卧龙亚高山森林不同演替阶段物种多样性与乔木更新的影响. 林业科学, 2007, 43(2): 1-7.
- [36] 陈辉, 洪伟, 兰斌, 郑郁善, 何东进. 闽北毛竹生物量与生产力的研究. 林业科学, 1998, 34(S1): 60-64.
- [38] 王效科, 冯宗伟, 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.
- [39] 李海涛, 王姗姗, 高鲁鹏, 于贵瑞. 赣中亚热带森林植被碳储量. 生态学报, 2007, 27(2): 693-704.
- [40] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵. 四川森林植被碳储量的时空变化. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2687-2692.
- [41] 方运霆, 莫江明, 彭少麟, 李德军. 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(9): 1685-1694.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 7 April, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Theoretical framework and key techniques of urban ecological landscape research	SUN Ranhao, XU Zhongliang, CHEN Liding, et al (1979)
Response of sinapate esters in <i>Arabidopsis thaliana</i> to UV-B radiation	LI Min, WANG Yin, MU Xiaofei, et al (1987)
Biosorption of lead (II) and cadmium (II) from aqueous solution by <i>Chlorella pyrenoidsa</i> and its influential factors	JIANG Jing, LI Liang, LI Haipeng, et al (1995)
Response of pear jujube trees on fruit development period to different soil water potential levels	HAN Lixin, WANG Youke, ZHANG Linlin (2004)
An approach for analyzing resources metabolism of industrial ecosystems	SHI Xiaoqing, YANG Jianxin, WANG Rusong, et al (2012)
Establishment of environmental sustainability assessment indicators based on material flow and ecological footprint model in Tongling City of Anhui Province	ZHAO Huihui, WANG Yuan, GU Xueming, et al (2025)
Health status evaluation of the farmland supply function at county level in Hebei Province	BAI Linhong, WANG Wei, ZHANG Yu (2033)
Inhibition effects and mechanisms of the endophytic fungus <i>Chaetomium globosum</i> L18 from <i>Curcuma wenyujin</i>	WANG Yanhong, WU Xiaomin, ZHU Yanping, et al (2040)
Water use of walnut-wheat intercropping system based on stable carbon isotope technique in the low hilly area of North China	HE Chunxia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (2047)
Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in sloping farmland in a karst region on the Yunnan-Guizhou Plateau	ZHANG Liqing, PENG Wanxia, SONG Tongqing, et al (2056)
Relationship among rice root aerenchyma, root radial oxygen loss and rhizosphere nitrification	LI Yilin (2066)
Effects of <i>Eriosoma lanigerum</i> (Hausmann) on physiological indices of different apple cultivars	WANG Xicun, YU Yi, ZHOU Hongxu, et al (2075)
Effects of P-efficient transgenic soybean on rhizosphere microbial community	JIN Lingbo, ZHOU Feng, YAO Juan, et al (2082)
Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China	XU Yanyan, ZHANG Jiahua, YANG Limin (2091)
Cropping system optimization based on the comparative analysis of precipitation utilization in Sichuan Province	WANG Mingtian, QU Huihui, YANG Xiaoguang, et al (2099)
The impacts of global climatic change on chilling damage distributions of maize in Northeast China	GAO Xiaorong, WANG Chunyi, ZHANG Jiquan (2110)
Effect of fertilization on ammonia volatilization from paddy fields in Chao Lake Basin	ZHU Xiaohong, MA Zhongwen, MA Youhua, et al (2119)
Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on net ion fluxes in the roots of trifoliate orange (<i>Poncirus trifoliata</i>) and mineral nutrition in seedlings under zinc contamination	XIAO Jiaxin, YANG Hui, ZHANG Shaoling (2127)
The effect of red:far red ratio on the stomata characters and stomata conductance of <i>Chrysanthemum</i> leaves	YANG Zaiqiang, ZHANG Jing, JIANG Xiaodong, et al (2135)
Dynamic characteristics of litterfall and nutrient return of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia, China	LIU Lei, SHEN Guozhen, CHEN Fangqing, et al (2142)
Aboveground litter contribution to soil respiration in a black locust plantation in the Loess Plateau	ZHOU Xiaogang, GUO Shenli, CHE Shengguo, et al (2150)
Life history and spatial distribution of a <i>Taiwania flousiana</i> population in Leigong Mountain, Guizhou Province, China	CHEN Zhiyang, YANG Ning, YAO Xianming, et al (2158)
The feasibility of using LAS measurements of the turbulence structure parameters of temperature above a forest canopy	ZHENG Ning, ZHANG Jinsong, MENG Ping, et al (2166)
Spatial distribution of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Nature Reserve based on RS/GIS	XU Shaojun, ZENG Bo, SU Xiaolei, et al (2174)
Early nitrogen deposition effects on CO ₂ efflux from a cold-temperate coniferous forest soil	WENDU Runa, FANG Huajun, YU Guirui, et al (2185)
Epilithic diatom assemblages distribution in Gui River basin, in relation to chemical and physiographical factors	DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (2196)
Acute stress caused by sand discharging on Yellow River Carp (<i>Cyprinus carpio</i>) in Xiaolangdi Reservoir	SUN Luyin, Baiyinbaoligao, NIU Cuijuan, et al (2204)
Environmental cost of pond aquaculture in Shanghai: an empirical analysis based on double-bounded dichotomous CVM method	TANG Keyong, YANG Zhengyong, YANG Huaiyu, et al (2212)
Host searching behaviour of <i>Apanteles cypris</i> Nixon (Hymenoptera: Braconidae) ...	ZHOU Hui, ZHANG Yang, WU Weijian (2223)
The effect of hedgerows on the distribution of <i>Harmonia axyridis</i> Pallas in agroforestry systems	YAN Fei, ZHOU Zaibao, WANG Shuo, et al (2230)
Induction of early resistance response to <i>Alternaria alternata</i> f. sp. <i>mali</i> in apple leaves with apple and chitosan fermentation broth ...	WANG Rongjuan, YAO Yuncong, QI Yaping, et al (2239)
Review and Monograph	
Research into vulnerability assessment for coastal zones in the context of climate change	WANG Ning, ZHANG Liquan, YUAN Lin, et al (2248)
Introduction and ecological effects of an exotic mangrove species <i>Sonneratia apetala</i>	PENG Yougui, XU Zhengchun, LIU Minchao (2259)
Discussion	
Degradation of organic contaminants with biological aerobic fermentation in sewage sludge dewatering and its influencing factors	YU Jie, ZHENG Guodi, GAO Ding, et al (2271)
Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using four greening tree species	YAN Wende, LIANG Xiaocui, ZHENG Wei, et al (2279)
Scientific Note	
Diversity of endophytic fungi from six dominant plant species in a Pb-Zn mine wasteland in China	LI Dongwei, XU Hongmei, MEI Tao, et al (2288)
Effects of <i>Meloidogyne incognita</i> on scavenging system of reactive oxygen species in tomato seedlings grafted with different rootstocks ...	LIANG Peng, CHEN Zhende, LUO Qingxi (2294)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 7 期 (2012 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 7 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元