

基于 InVEST 模型的森林碳储量动态监测

何涛^{1,2}, 孙玉军¹

(1. 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 2. 浙江农林大学 浙江省林业智能监测与信息技术研究重点实验室, 浙江 临安 311300)

摘要: 森林碳储量主要通过地面调查数据来估算, 存在着统计工作量大, 建模复杂度高、难点。如何快捷、准确地估测森林碳储量一直是国内外林业领域研究的热点和难题。结合遥感图像监测尺度大和 InVEST 模型输入参数少的特点, 提出一种基于 InVEST 模型结合遥感图像估测森林碳储量的方法。该方法根据森林类型碳储量信息和相应的栅格数据, 利用 InVEST 模型估测区域森林碳储量, 然后通过对比对多期遥感数据估测出的碳储量得出该区域碳储量变化, 从而实现森林碳储量的动态监测。对浙江省庆元县 2009 年的碳储量进行了估算和绘图, 根据行政区划图可估算出乡(镇)和村级的碳储量。实验分别对坑西村 2009 年和 2014 年的碳储量进行了估算, 根据基于碳库差别的方法实现了碳储量动态监测。实验结果表明: ①庆元县 2009 年的森林碳储量为 3.2743×10^7 Mg; ②坑西村 2009 年到 2014 年碳储量增加了 1.7803×10^4 Mg。相比不对森林类型进行细分的森林平均碳密度, 将各森林类型平均碳储量和森林类型年度碳汇量引入到森林碳储量监测中, 使得森林碳储量的估测精度得到了提升。另外, 提出的森林碳储量动态监测可实现对县、乡(镇)和村级的监测, 具有模型输入数据量少和输出结果可视化的优点, 以及监测手段简单便捷, 操作性强等特点。图 5 表 4 参 32

关键词: 森林生态学; 森林碳储量; 遥感数据; InVEST; 动态监测

中图分类号: S758.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2016)03-0377-07

Dynamic monitoring of forest carbon stocks based on the InVEST model

HE Tao^{1,2}, SUN Yujun¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Forestry Intelligent Monitoring and Information Technology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Forest carbon storage is almost estimated by the ground survey data, there is a difficulty of huge statistical work and modeling complexity. To calculate forest carbon stocks in a quick and accurate way, which has been the current research focus in forestry both inside and outside of China. A new method is proposed by combining a little input parameters of the InVEST model with a large monitoring scale of remote sensing data. First, InVEST model was used to estimate regional carbon stocks according to forest type carbon data and according to raster data. Then this data was compared to the multistage carbon data from remote sensing data to achieve a dynamic monitoring of forest carbon stocks. This paper estimated and mapped carbon stock of the Qingyuan (a county) in 2009, according to the administrative division map can estimate the carbon storage of the scale of town and village. After estimated carbon reserves of Kengxi (a village) in 2009 and 2014, carbon difference method was adopted to dynamic monitoring of carbon sink. Results showed that the carbon sink estimated with the new method for Qiyuan(a county), Zhejiang, China was 3.2743×10^7 Mg in 2009. Also, the car-

收稿日期: 2015-06-08; 修回日期: 2015-09-09

基金项目: 国家林业局引进国际先进农业科学技术计划(“948”计划)项目推广项目([2014]26号); 浙江省林业智能监测与信息技术研究重点实验室开放基金

作者简介: 何涛, 实验师, 博士, 从事森林资源监测等研究。E-mail: hetao758@126.com。通信作者: 孙玉军, 教授, 博士生导师, 从事森林资源监测与模型等研究。E-mail: sunyj@bjfu.edu.cn

bon stock for Kengxi (a village) increased $1.780\ 3\times 10^4$ Mg from 2009 to 2014. Compared to forest average carbon density, adding forest species average carbon storage and carbon sinks to forest carbon stock monitoring improved estimation precision of forest carbon stocks. This dynamic multi-dimensional method for monitoring forest carbon sinks being simple, convenient, user-friendly, and advantageous because it used less data input and visual output in the model, could be used in the county, township (town) and village forest carbon monitoring. [Ch, 5 fig. 4 tab. 32 ref.]

Key words: forest ecology; forest carbon stock; remote sensing data; InVEST; dynamic monitoring

森林是陆地生态系统的主体,在调控全球碳循环和气候变化中扮演着重要的角色^[1-4]。2000年,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发表报告指出,森林面积占全球陆地面积的27.6%,森林植被的碳储量约占全球植被碳储量的77.0%,森林土壤的碳储量约占全球土壤碳储量的39.0%,整个森林生态系统碳储量占陆地生态系统碳储量的57.0%^[5]。因此,森林生态系统是地球上最大的碳储库和最经济的吸碳器^[6],在调节全球气候、维持全球碳平衡中具有重大作用,森林碳储量的监测对于全球气候变化等问题的预测也有着十分重要的意义。迄今为止,森林碳储量的监测是一项耗时耗力耗财的工作,如何快速准确估测森林碳储量仍是亟待解决的一个问题。森林碳储量计量方法主要有以下3类:①利用微气象原理和技术测定二氧化碳通量的方法;②基于生物量估算法;③遥感信息模型法^[7]。上述3种计量方法中,第1种方法获得的碳储量数据最为准确^[8],但成本也最高^[9],只适合在较小尺度范围监测碳储量。基于生物量的方法较适合大尺度范围的计量,但这种方法需要大量的地面调查,整理汇总数据的内业耗时间也多。上述2种方法均无法计算出森林植被的空间位置和碳储量的定量分布^[10]。森林碳储量的动态监测主要方法^[11-12]有:①基于增加或损失的方法;②基于库的替代方法。为了减少外业调查工作量,本研究结合遥感数据获取信息便捷、数据成本低和InVEST(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型碳储量模块输入数据量少、输出结果可视化的特点,提出了一种基于InVEST模型结合遥感数据实现县、镇(乡)、村庄等多尺度森林碳储量估测和动态监测的方法。该方法可快速便捷地得出区域森林碳储量并实现动态监测。

1 研究区概况

庆元县,位于浙江省西南部,27°25′~27°51′N,118°50′~119°30′E,北面与浙江省龙泉市、景宁畲族自治县接壤,东、西、南面与福建省寿宁、松溪、政和等3县交界。县城所在地松源镇距丽水市233 km,距杭州市532 km。全县南北长49 km,东西宽67 km,总面积为1 898 km²^[13]。

庆元县自然资源十分丰富,在全县1.897 6×10⁵ hm²土地面积中,林业用地1.623 3×10⁵ hm²,占85.5%;农业耕地1.070 7×10⁴ hm²,占5.6%;河流2.300 0×10³ hm²,占1.2%;房屋、道路及其他用地1.442 0×10⁴ hm²,占7.7%,全县森林覆盖率达到86%^[14]。2003年通过国家级生态示范区创建验收,2004年成为“中国生态环境第一县”。

2 模型和数据

2.1 模型概况

InVEST模型由美国斯坦福大学、世界自然基金会和大自然保护协会联合开发,主要用于生态系统服务功能评估的模型系统,旨在通过模拟预测不同土地利用情景下生态系统服务功能物质量和价值量的变化,为决策者权衡人类活动的效益和影响提供科学依据^[15]。InVEST模型实现碳储量动态监测的方法是基于库的替代方法,主要根据土地利用分类现状、木材采伐率、植被降解率和4个碳库的碳储量来计量出某一区域的碳储量现状和预测该区域未来的碳储量。区域内的碳储量主要取决于4个碳库的碳储量,分别为地上生物量、地下生物量、土壤碳储量和死亡有机物的碳储量^[16]。

碳储量模块运行基于地理信息系统(GIS)栅格数据的网格地图,每个栅格数据都代表一种土地利用和土地覆盖类型,如森林、牧场或农业用地等。对于每种土地类型,模型至少需要上述4个碳库中的1个碳库的碳储量才能运行,当然如果能够提供更多碳库,那么模型的结果也将更完善、更准确。

模型运行的基本输入数据必须有以下 2 项：①栅格数据集，每个栅格单元都代表 1 种土地利用分类图的代码；②存储每个土地利用分类图的 4 个碳库的数据表。模型输出值表示每个网格单元的碳储量，默认单位为 t，也可以将单位换算成美元，即表示每个网格单元碳储量的经济价值。

为了估算碳储量的动态变化情况，模型主要对 2 期地图以上的像元进行简单的差值运算。如果有多个未来土地利用分类图，那么每个未来土地利用分类图都可以和现在的土地利用图进行比对，得到一个时间段内碳储量的动态变化。

2.2 遥感数据源

本研究所用的遥感数据主要是从中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>)中下载，覆盖研究区的陆地卫星 TM5 和陆地卫星 TM8 数据都为条带号 119，行编号 41 的遥感数据。由于该区域的森林植被在每年的七八月达到生长最旺季，为了更好地目视判别该区域的植被，选取该时间段的遥感数据是最佳的，且遥感数据中的总云量应小于 5%。最终采集的遥感数据集信息如表 1 所示。

表 1 遥感数据集

遥感数据源	日期	含云量/%
Landsat-5 TM	2009-06-06	0.01
Landsat-8 OLI_TIRS	2014-07-22	4.02

2.3 地面调查数据

将收集到的 2008 年的研究区森林资源二类调查数据落到 2009 年的 TM 遥感卫星图像上并进行栅格化，文件格式采用标准 GIS 栅格文件，每个栅格表示森林类型编码（例如，1 代表杉柏林，3 代表松树林等）。研究使用的数据集投影坐标单位为米，大地坐标系采用西安 80 坐标系。具体的调查地类和小班数详见表 2。

表 2 研究区森林类型数据调查表

Table 2 Survey of forest class data in the study area

编码	森林类型	小班数/个	编码	森林类型	小班数/个
1	杉柏林	6 342	7	未成林	176
2	阔叶林	4 791	8	灌木林	139
3	松树林	3 911	9	茶园	110
4	竹林	3 394	10	火烧迹地	27
5	经济林	817	11	其他林地	17
6	非林地	351			

2.4 各森林类型的碳储量密度

通过查阅文献资料，整理得出研究区内 11 种森林类型的平均碳储量密度。根据 IPCC(2006)资料：当研究区域生物量小于 $125.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时，地下生物量根据地上生物量折算的时候，一般采用的根茎比为 0.20^[17]。因此，本研究的地下碳储量都是通过地上碳储量乘以 0.20 的根茎比系数折算得出。由于 InVEST 模型里没有单独计算枯死木碳库，因此枯死木碳库在本研究中计算到凋落物碳库中。非林地和火烧迹地在本文研究中只计算土壤碳储量。最终得出研究区内各森林类型的 4 大碳库的碳储量如表 3 所示。从表 3 中可看出：各森林类型的土壤碳储量差别明显，0~1.0 m 深的土壤碳储量在 $88.60\sim 166.93 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，这与相关研究得出的全国土壤平均碳密度 $105.30 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 相符合^[18]。在各碳池中，阔叶林类型包含最大的碳储总量，为 $225.10 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，非林地和火烧迹地碳储量最小，只有 $88.60 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。研究区的各森林类型的总碳储量低于相关研究中中国森林生态系统碳密度 $258.83 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的平均水平^[19]。

3 研究方法

实验的主要步骤为：①结合 2008 年的森林资源二类调查数据，分别在 2009 年 TM5 和 2014 年 TM8 遥感底图上勾勒出森林类型矢量图，根据遥感图像的目视判别，对地面调查时森林类型不准确的区域，进行森林类型校正勾画，然后根据勾勒出的矢量图得出各自的森林类型栅格文件；②在 InVEST 模型碳储量模块中输入 2 个时期的栅格数据和碳储量数据，得出 2 个时期的森林碳储量；③在 ArcGIS 10.0 中利用 ArcToolbox 中 Spatial Analyst Tool 下的 Map Algebra 用 2014 年的碳储量减去 2009 年的碳储量，即得到了该区域 2009 年到 2014 年的碳储量动态变化信息。

通过 InVEST 模型碳储量模块进行森林碳储量监测的主要流程图如图 1 所示。

表3 研究区各地类碳储量调查表

Table 3 Survey carbon data of land classes in the study area

地类代码	地类名称	地上碳密度/ (Mg·hm ⁻²)	地下碳密度/ (Mg·hm ⁻²)	土壤碳密度/ (Mg·hm ⁻²)	凋落物碳密度/ (Mg·hm ⁻²)	总碳密度/ (Mg·hm ⁻²)	文献出处
1	杉柏林	26.83	5.37	159.77	1.52	193.49	[20]
2	阔叶林	44.59	8.92	166.93	4.66	225.10	[20]
3	松树林	25.62	5.12	119.47	2.72	152.93	[20]
4	竹林	23.09	4.61	110.10	0.66	138.46	[21, 22]
5	经济林	8.70	1.64	101.23	1.20	112.77	[23, 24]
6	非林地	0	0	88.60	0	88.60	[18]
7	未成林	8.10	1.62	91.70	3.48	104.90	参考灌木林
8	灌木林	8.10	1.62	91.70	3.48	104.90	[25, 26]
9	茶园	21.21	4.24	137.50	4.91	167.86	[27]
10	火烧迹地	0	0	88.60	0	88.60	参考非林地
11	其他林地	35.03	7.01	142.58	3.75	188.37	[20]

4 结果与分析

4.1 不同尺度区域碳储量估算

根据研究区 2008 年的地面调查数据和 2009 年的遥感数据, 利用 InVEST 模型碳储量模块对研究区的不同尺度区域的碳储量估算结果如下: 庆元县的碳储量为 3.274×10^7 Mg; 松源镇的碳储量为 2.138×10^6 Mg; 坑西村的碳储量为 1.716×10^5 Mg。它们各自的碳储量空间分布如图 2, 图 3 和图 4 所示。

4.2 同一区域不同时期碳储量动态监测

通过 InVEST 模型, 如果对于同一研究区域有 2 期或者 2 期以上的土地利用分类数据, 那么就可根据同一区域的 2 期碳储量比实现对对该区域碳储量的动态监测。同时, 根据树种的年度碳储量增长和树木腐烂速率, InVEST 模型也可以估算出若干年后该区域的碳储量以及碳储量增加或者减少的数量和空间分

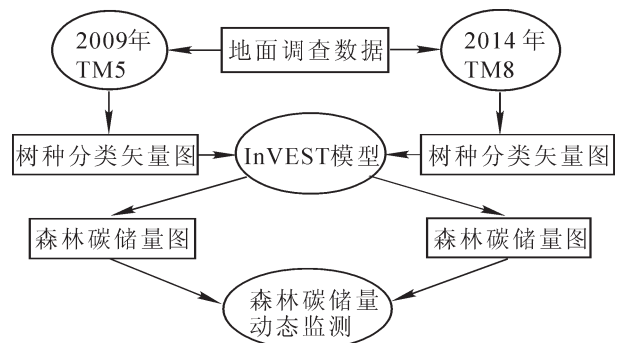
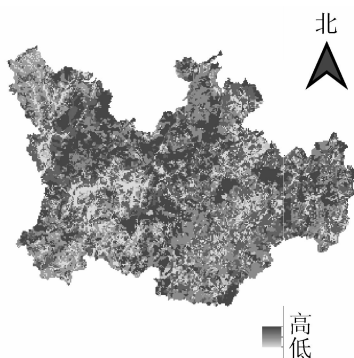


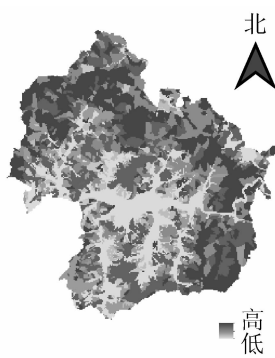
图1 主要流程图

Figure 1 The main scheme



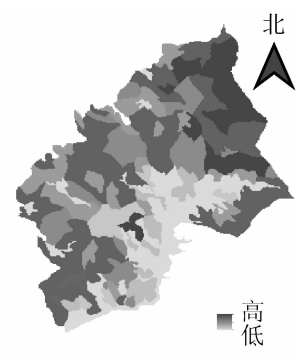
庆元县碳储量/(Mg·像元⁻¹)
高: 874.894 0
低: 344.361 0

图2 庆元县碳储量空间分布图
Figure 2 Carbon distribution map of Qingyuan County



松源镇碳储量/(Mg·像元⁻¹)
高: 75.730 9
低: 29.807 9

图3 松源镇碳储量空间分布图
Figure 3 Carbon distribution map of Songyuan Town



坑西村碳储量/(Mg·像元⁻¹)
高: 6.697 9
低: 2.636 3

图4 坑西村碳储量空间分布图
Figure 4 Carbon distribution map of Kengxi Village

布状况。因搜集到的地面调查数据有限，本研究并没有收集到完全覆盖整个研究区 2 期或者以上的土地利用分类地面数据，但收集到 2 期以上的遥感数据，分别为 2009 年 6 月 6 日和 2014 年 7 月 22 日。考虑到遥感数据目视判别森林类型的工作量和难度，本研究没有选择整个研究区进行目视判别，只对研究区中的坑西村的 2 期遥感数据进行遥感目视判别地类。对 2 期遥感数据的目视判别主要是对林地和非林地的变更进行判别，其他林种分布基本按照 2008 年的地面调查数据进行分类。各地类年度碳汇量(碳储量增加或者减少量)如表 4 所示。

表 4 研究区各地类年度碳汇量

Table 4 Survey of land class data in the study area

地类代码	地类名称	年度碳汇量/(Mg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	文献出处	地类代码	地类名称	年度碳汇量/(Mg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	文献出处
1	杉柏林	3.47	[28]	7	未成林	1.63	参考灌木林
2	阔叶林	1.11	[20]	8	灌木林	1.63	[30]
3	松树林	2.82	[28]	9	茶园	1.10	[31]
4	竹林	5.09	[29]	10	火烧迹地	0	
5	经济林	1.62	[30]	11	其他林地	0.31	[32]
6	非林地	0					

根据模型得出：坑西村 2009 年的碳储量为 1.7169×10^5 Mg，2014 年的碳储量为 1.8949×10^5 Mg，5 a 间的碳汇量达到 1.7803×10^4 Mg，5 a 间坑西村的碳储量空间动态分布图如图 5 所示。图 5 中，最大减少碳储量的值为 $3.1210 \text{ Mg} \cdot \text{像元}^{-1}$ ；增加碳储量的值为 $3.0148 \text{ Mg} \cdot \text{像元}^{-1}$ 。

5 结论与讨论

本研究主要根据遥感图像数据结合森林资源地面调查数据，利用 InVEST 模型对研究区不同空间尺度[县、乡(镇)、村级]的森林碳储量进行了量化，估算了同一区域不同时期碳储量的变化值，同时绘制出了森林碳储量的空间分布状态图。主要结论如下：①目前，InVEST 模型在森林碳储量动态监测方面的应用还较少。通过将遥感图像数据和森林资源地面调查数据作为 InVEST 模型的土地利用类型输入数据源，可实现区域森林碳储量的估测，监测方法简便，可操作性强。②InVEST 模型需要录入的数据量较少，只需要输入土地利用类型和土地利用类型的碳储量数据表，大大降低了地面调查和室内汇总整理工作。同时，结合遥感图像数据可提高碳储量估算结果的准确性。③利用 InVEST 模型不仅可以通过估算出某区域 2 个以上时期碳储量数据实现对该区域森林碳储量的动态监测，获得树种的年度碳储量增长量，还可预测若干年后该区域的碳储量变化和空间分布状况。这对地方政府和林业主管部门制定相关方针政策有着十分重要的参考价值。同时，利用 InVEST 模型可将量化的数据直观地反映在研究区森林碳储量分布状况图上，方便地方政府和林业主管部门直观理解碳储量薄弱区域。

今后，如果输入模型的数据采用更为详细的土地利用/土地覆盖图和更为精准的碳储量数据表，那么将会提升模型的精度和准度。国内外也有相当多的研究集中在如何建立遥感图像与森林碳储量之间的模型，因此，如果建立起区域碳储量与遥感图像的模型，而不是输入森林类型的平均碳储量，那么森林碳储量监测精度将会更高，且可提高工作效率，减少目视判别工作量。以上这些方面都是今后的研究方向和研究重点。

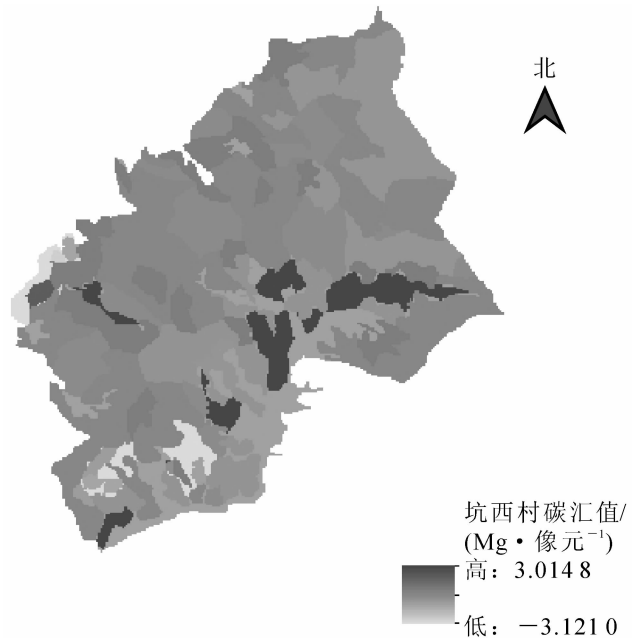


图 5 坑西村碳储量空间动态分布图

Figure 5 Carbon distribution map of Kengxi Village

6 参考文献

- [1] 石洪华, 王晓丽, 王媛, 等. 北长山岛森林乔木层碳储量及其影响因子[J]. 生态学报, 2013, **33**(19): 6363 – 6372.
SHI Honghua, WANG Xiaoli, WANG Ai, *et al.* Storage and drivers of forests carbon on the Beichangshan Island of Miaodao Archipelago [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(19): 6363 – 6372.
- [2] LORENZ K, LAL R. *Carbon Sequestration in Forest Ecosystems* [M]. New York: Springer, 2010.
- [3] DIXON R K K, SOLOMON A M, BROWN S, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, **263**(5144): 185 – 190.
- [4] HOUGHTON R A. Balancing the global carbon budget [J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2007, **35**: 313 – 347.
- [5] BOUSQUET P, PEYLIN P, CIAIS P, *et al.* Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980 [J]. *Science*, 2000, **290**(5495): 1342 – 1346.
- [6] 吴胜男, 李岩泉, 于大炮, 等. 基于 VAR 模型的森林植被碳储量影响因素分析: 以陕西省为例[J]. 生态学报, 2015, **35**(1): 196 – 203.
WU Shengnan, LI Yanquan, YU Dapao, *et al.* Analysis of factors that influence forest vegetation carbon storage by using the VAR model: a case study in Shanxi Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(1): 196 – 203.
- [7] 赵林, 殷鸣放, 陈晓非, 等. 森林碳汇研究的计量方法及研究现状综述[J]. 西北林学院学报, 2008, **23**(1): 59 – 63.
ZHAO Lin, YIN Mingfang, CHEN Xiaofei, *et al.* Summary of the research methods of forest carbon sink accounting [J]. *J Northwest For Univ*, 2008, **23**(1): 59 – 63.
- [8] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [9] 王秀云, 孙玉军. 森林生态系统碳储量估测方法及其研究进展[J]. 世界林业研究, 2008, **21**(5): 24 – 29.
WANG Xiuyun, SUN Yujun. Review on research and estimation methods of carbon storage in forest ecosystem [J]. *World For Res*, 2008, **21**(5): 24 – 29.
- [10] WANG Guangxing, OYANA T, ZHANG Maozhen, *et al.* Mapping and spatial uncertainty analysis of forest vegetation carbon by combining national forest inventory data and satellite images [J]. *For Ecol Manage*, 2009, **258**(7): 1275 – 1283.
- [11] 王鹏程, 邢乐杰, 肖文发, 等. 三峡库区森林生态系统有机碳密度及碳储量[J]. 生态学报, 2009, **29**(1): 97 – 107.
WANG Pengcheng, XING Lejie, XIAO Wenfa, *et al.* Organic carbon density and storage of forest ecosystems in Three Reservoir Area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(1): 97 – 107.
- [12] 义白璐, 韩骥, 周翔, 等. 区域碳源碳汇的时空格局: 以长三角地区为例[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(4): 973 – 980.
YI Bailu, HAN Ji, ZHOU Xiang, *et al.* Spatiotemporal pattern of carbon sources and sinks in Yangtze Rivers Delta region, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, **26**(4): 973 – 980.
- [13] 陈观贵. 庆元县公益林森林生态系统服务功能评价研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
CHEN Guangui. *Study on Evaluation for Forest Ecological System Service Function of Public Welfare Forests in Qinyuan County* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [14] 庆元县财政局课题组. 欠发达地区推进生态文明建设的财税对策研究[EB/OL]. 2014-03-21[2015-03-12]. http://czj.lishui.gov.cn/csy/nbkwl/syj_41/t20140321_964273.htm.
- [15] 城市与区域生态国家重点实验室. 斯坦福大学 Driss Ennaanay 博士应邀开展 InVEST 模型培训[EB/OL]. 2010-10-13[2015-03-12]. http://www.rcees.ac.cn/gjil/hzjl/201010/t20101013_2986155.html.
- [16] NEWELL R G, STAVINS R N. Climate change and forest sinks: factors affecting the costs of carbon sequestration [J]. *J Environ Econ Manage*, 2000, **40**(3): 211 – 235.
- [17] MOKANY K, RAISON, J R, PROKUSHKIN A S. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes [J]. *Glob Change Biol*, 2006, **12**(1): 84 – 96.
- [18] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, **55**(5): 533 – 544.
WANG Shaoqiang, ZHOU Chenghu, LI Kerang, *et al.* Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic

- carbon reservoir in China [J]. *Acta Geogr Sin*, 2000, **55**(5): 533 – 544.
- [19] 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*, 2000, **24**(5): 518 – 522.
- [20] 张骏, 袁位高, 葛滢, 等. 浙江省生态公益林碳储量和固碳现状及潜力[J]. 生态学报, 2010, **30**(14): 3839 – 3848.
ZHANG Jun, YUAN Weigao, GE Ying, *et al.* Carbon storage and its sequestration potential by ecological service forest in Zhejiang [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(14): 3839 – 3848.
- [21] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳储量及其空间分布[J]. 林业科学, 2004, **40**(6): 20 – 24.
ZHOU Guomo, JIANG Peikun. Density, storage and distribution of carbon in *Phyllostachy pubescens* forest [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40**(6): 20 – 24.
- [22] 叶玲燕. 浙江省森林土壤有机碳空间变异及影响因子研究[D]. 临安: 浙江农林大学, 2012.
YE Lingyan. *The Study of Forest Organic Carbon Spatial Variation and Impact Factors in Zhejiang Province* [D]. Lin'an: Zhejiang A & F University, 2012.
- [23] 田勇燕, 秦飞, 关庆伟. 江苏徐州市果树经济林的碳储量估算[J]. 中国园艺文摘, 2014(5): 50 – 52.
TIAN Yongyan, QIN Fei, GUAN Qingwei. Estimation of carbon storage of fruit tree economic forest in Xuzhou City [J]. *Chin Hortic Abstract*, 2014(5): 50 – 52.
- [24] 郭雪艳, 蔡婷, 段秀文, 等. 上海主要经果林生态系统碳储量及其分布格局[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(11): 2881 – 2885.
GUO Xueyan, CAI Ting, DUAN Xiuwen, *et al.* Carbon storage and distribution pattern in main economic fruit forest ecosystems in Shanghai, East China [J]. *Chin J Ecol*, 2013, **32**(11): 2881 – 2885.
- [25] 宁晨, 闫文德, 宁晓波, 等. 贵阳市区灌木林生态系统生物量及碳储量[J]. 生态学报, 2015, **35**(8): 2555 – 2563.
NING Chen, YAN Wende, NING Xiaobo, *et al.* Biomass and carbon storage of shrub forests ecosystem in karst city [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(8): 2555 – 2563.
- [26] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, **41**(1): 35 – 43.
XIE Xianli, SUN Bo, ZHOU Huizhen. Organic carbon density and storage in soils of china and spatial analysis [J]. *Acta Pedol Sin*, 2004, **41**(1): 35 – 43.
- [27] LI Shiyu, WU Xu, XUE Hui, *et al.* Quantifying carbon storage for tea plantations in China [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2011, **141**(3/4): 390 – 398.
- [28] 黄丽媛. 森林碳汇经济效益研究: 以福建省永安市为例[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
HUANG Liyuan. *Study on Economic Benefits of Forest Carbon Sinks: A Case Study in Fujian Yong'an* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011.
- [29] 李长灿. 一公顷毛竹年吸收二氧化碳 5.09 吨[N]. 杭州日报, 2012-03-12(7).
- [30] 王兵, 魏江生, 俞社保, 等. 广西壮族自治区森林生态系统服务功能研究[J]. 广西植物, 2013, **33**(1): 46 – 51.
WANG Bing, WEI Jiangsheng, YU Shebao, *et al.* Research on forest ecosystem services in Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. *Guihaia*, 2013, **33**(1): 46 – 51.
- [31] 刘亮, 赵光洁, 薛菲. AR-CDM 项目方法学应用在油茶生物质能源林中的论证研究[J]. 山西林业科技, 2011, **40**(1): 31 – 35.
LIU Liang, ZHAO Guangjie, XUE Fei. A study on application of A/R CDM methodology in oil-bearing energy forest of Camellia [J]. *J Shanxi For Sci Technol*, 2011, **40**(1): 31 – 35.
- [32] 沈沉沉, 尹俊光, 张净, 等. 宁波市镇海区生态公益林生态系统服务价值评估[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2012(4): 120 – 130.
SHEN Chenchen, YIN Junguang, ZHANG Jing, *et al.* Evaluation of ecological forest ecosystem services in Zhenhai District, Ningbo [J]. *J East China Norm Univ Nat Sci*, 2012(4): 120 – 130.