

近 30 a 安吉县毛竹林动态遥感监测及碳储量变化

崔瑞蕊^{1,2}, 杜华强^{1,2}, 周国模^{1,2}, 徐小军^{1,2}, 董德进^{1,2}, 吕玉龙³

(1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300; 3. 浙江省安吉县林业局, 浙江 安吉 313300)

摘要: 通过最大似然分类法从不同时期陆地资源卫星 Landsat-5 TM 影像中提取毛竹 *Phyllostachys pubescens* 林信息, 利用变化幅度和动态度 2 个指标对浙江省安吉县近 30 a 毛竹林面积时空动态特征进行了监测、评价与分析, 并初步估算了各时期竹林地上总碳储量变化情况。结果表明: ①各个时期影像分类总体精度和毛竹林信息提取的精度比较好, 其中总体分类精度都在 85% 以上, 而毛竹林 Kappa 系数为 0.80 ~ 0.95。遥感估算的毛竹林面积与森林资源清查结果相吻合, 两者决定系数(R^2)达到 0.981; ②1986 - 2008 年期间, 除昆桐乡毛竹林面积呈负增长外(变化幅度为 -8.49%), 其他各乡镇的毛竹林面积呈上升趋势, 变化幅度为 14%~86%, 以孝丰镇增长幅度最大, 天荒坪镇增长幅度最小; ③针叶林、阔叶林以及农业用地的变化对毛竹林总面积增加的贡献最大; ④根据毛竹林动态监测结果和毛竹林地上碳密度($20.297 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)估算得到 1986, 1991, 1998, 2004 和 2008 年 5 个时期安吉县竹林地上碳储总量分别为 1.106, 1.213, 1.327, 1.413 和 1.466 Tg, 呈逐渐增加趋势。图 2 表 4 参 31

关键词: 森林生态学; 毛竹林; 遥感; 动态监测; 碳储量

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2011)03-0422-10

Remote sensing-based dynamic monitoring of moso bamboo forest and its carbon stock change in Anji County

CUI Rui-rui^{1,2}, DU Hua-qiang^{1,2}, ZHOU Guo-mo^{1,2}, XU Xiao-jun^{1,2}, DONG De-jin^{1,2}, LÜ Yu-long³

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Environmental Sciences and Resources, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 3. Forest Enterprise of Anji County, Anji 313300, Zhejiang, China)

Abstract: Maximum likelihood classification method was used to extract moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forest from multitemporal Landsat-5 Thematic Mapper (TM) images. The dynamic change of bamboo forest areas in Anji County, Zhejiang Province in the past 30 years was conducted. Meanwhile, total aboveground carbon stock of bamboo forest was estimated. The results showed that (1) overall classification accuracy for each TM image was over 85%, and Kappa coefficient for moso bamboo forest ranged from 0.80 to 0.95. The relationship between moso bamboo forest area estimated from remote sensing and the forest inventory data was significant with a R^2 value of 0.981; (2) during 1986 - 2008, bamboo forest areas were increased with highest rate of 86% in Xiaofeng and lowest rate of 14% in Tianhuangping, except Kuntong with decreased rate of 8.89%; (3) the increase of moso bamboo forest area in Anji County during the past 30 years was at the expense of conifer forest, broadleaf forest and farmland; (4) according to classification results and above-

收稿日期: 2010-09-19; 修回日期: 2010-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30700638, 31070564); 国家林业局引进国际先进农业科学技术计划 (“948” 计划)项目(2008-4-49); 浙江农林大学研究生科研创新基金资助项目(2112009042)

作者简介: 崔瑞蕊, 从事林业遥感、森林碳汇等研究。E-mail: crr841018@yahoo.com.cn。通信作者: 杜华强, 副教授, 博士, 从事林业遥感、森林碳汇遥感估算、空间统计在林业中的应用等研究。E-mail: dhqrs@126.com

ground carbon density of moso bamboo (i.e., $20.297 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$), the aboveground carbon stock was 1.106 Tg in 1986, 1.213 Tg in 1991, 1.327 Tg in 1998, 1.413 Tg in 2004 and 1.466 Tg in 2008, respectively. [Ch, 2 fig. 4 tab. 31 ref.]

Key words: forest ecology; moso bamboo forest; remote sensing; dynamic monitoring; carbon stock

毛竹 *Phyllostachys pubescens* 林是中国亚热带地区(如浙江、安徽、江西和福建等省)特殊的森林类型,是所有竹种中分布最广、面积最大的一种竹林^[1-2]。竹林速生丰产的特点使得竹林资源特别是经济价值较高的毛竹(占竹林总面积的 70%左右)、雷竹 *Phyllostachys praecox* 等成为区域经济的新的增长点^[3],竹林经营强度加大,面积不断扩大^[4-7]。作为单一物种,毛竹林对全球变化碳平衡的贡献开始受到关注^[8]。近年研究表明,竹林资源特别是毛竹林具有高效固碳能力,在森林生态系统二氧化碳减量及对全球碳平衡的贡献方面有重要作用^[1,8-11],特别是近 15 a 竹林碳储量增长最快,且随着竹林面积的持续增长,竹林碳储量仍将继续增加^[12],碳储量及时空分布也必然会发生相应的动态变化。因此,在全球森林面积逐年减少,竹林面积却日益扩大^[13]的情况下,如何正确评价竹林资源碳储量及动态对全球碳平衡的贡献和影响十分重要。林分类型的碳动态与其面积的变化、演替阶段、年龄组成以及人类干扰等因素密切相关^[14]。因此,通过对这些因素动态及变化特征的评价分析可以间接获得毛竹林地上碳储量的动态变化特征。毛竹林是完全异龄林,生长收获周期短,常处于动态平衡之中,因此,面积的动态变化是评价其碳储量动态变化的基础。传统的资源清查资料也可以实现竹林资源的监测及动态评价,但存在工作量大及耗时长缺点;遥感对地观测技术具有实时、动态、大面积同步监测和信息丰富的特点^[15],在森林碳储量定量估算中的作用和前景得到广泛的认可,是目前和未来森林碳估算及其动态变化规律研究的重要手段之一^[16-18]。利用遥感技术对竹林资源进行动态监测,不仅能快速精确地得到毛竹林长期的动态变化数据,而且在很大程度上能排除各种主观因素的干扰^[7]。本研究以中国重要的毛竹林产区浙江省安吉县为例,首先采用近 30 a 陆地资源卫星 Landsat TM 数据提取毛竹林专题信息,然后利用变化率指标分析、评价安吉县和乡镇单元毛竹林面积动态变化特征,最后根据毛竹林地上部分平均碳密度^[8,11]粗略评价安吉县近 30 a 碳储量的动态变化。研究结果将为深入研究毛竹林生态系统碳储量的空间分布、空间变异规律及对全球变化的贡献提供基础。

1 研究方法

1.1 研究区域

安吉县地处浙江省西北部,地理坐标为 $30^{\circ}23' \sim 30^{\circ}53' \text{N}$, $119^{\circ}14' \sim 119^{\circ}53' \text{E}$ 。东邻湖州市、德清县,南接余杭区和临安市,西与安徽省宁国市和广德县交界,北连长兴县。县界总长为 343.5 km,东西长 62.5 km,南北宽 55.3 km,行政辖区 $1\,886.45 \text{ km}^2$ 。全境覆盖 15 个乡镇,毛竹林面积占全县森林总面积的 37.8%,是全县森林资源的主体,素有“中国竹乡”之美誉。安吉县已建成材用竹林、竹笋两用林、笋用林基地近 $7\,000 \text{ hm}^2$,竹子加工已形成区域规模,全县现有竹木加工企业 1 600 家,竹加工有竹地板、竹胶板、竹丝、竹凉席和竹笋等,全县竹子产业销售收入 53.6 亿元 $\cdot \text{a}^{-1}$,出口 9 663 万美元 $\cdot \text{a}^{-1}$ 。竹产业已成为安吉县的支柱产业。

安吉县植被区划属亚热带东部常绿阔叶林亚区,中亚热带常绿阔叶林北部亚地带,植被类型和植物区系复杂。整个县区有山地、丘陵、岗地、平原 4 种地貌,海拔为 $4 \sim 1\,587 \text{ m}$,毛竹主要分布在 $50 \sim 800 \text{ m}$ 的区域。

1.2 遥感数据及预处理

本研究采用 2008 年 7 月 5 日,2004 年 7 月 26 日,1998 年 8 月 11 日,1991 年 7 月 23 日和 1986 年 7 月 25 日共 5 期、时间总跨度为 22 a 的 Landsat-5 TM 影像对竹林面积作动态监测。各期影像之间的时间间隔为 $4 \sim 7 \text{ a}$,影像的获取日期集中在 7-8 月,保证了毛竹的生长特性相一致。

采用 1:5 万地形图对遥感数据进行几何精校正,并用最近邻法将像元重采样到 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,各个时期校正精度均在 0.5 个像元左右,能保证不同时相影像的空间配准;为减少或消除大气的影

对影像进行地形校正,以减少坡度、坡向等地形因素对分类结果的影响。

对每个时期的影像,从经过预处理后的遥感影像中提取前3个主成分,并与原始6个波段(不包括热红外波段)一起作为分类特征波段,从中提取不同地物类别信息。

1.3 毛竹林遥感信息提取及精度评价

参照1999年12月的“安吉县森林资源调查及规划设计成果汇编”和2008年12月的“安吉县森林资源规划设计调查成果报告”,将研究区地面覆盖类型划分为城镇、阔叶林地(包括灌木林地)、针叶林地、水体、毛竹林地(包括少量杂竹)、裸地、农业用地等7个类别。在训练样本选择和分析的基础上采用最大似然法对影像进行分类,然后提取毛竹林专题信息。对分类后的结果用2种方法评价其精度:①利用256个随机点,采用混淆矩阵评价分类精度;②用安吉县清查资料中的竹林面积统计数据与分类结果进行对比,评价分类结果的可靠性。

1.4 毛竹林面积动态变化评价方法

结合各个时期毛竹林遥感信息提取结果,本研究主要从2个方面对毛竹林动态变化进行评价,即全县竹林面积的动态和以乡镇为单位竹林面积动态。

使用土地/覆盖类型的变化率指数来评价毛竹林面积在不同时期的变化幅度和变化速度。变化幅度也称变化率,它是土地利用类型的面积为基础,评价研究时间范围内土地利用类型面积变化的结果,可直观反映类型变化的幅度和速度^[21]。本研究中关注的地类为毛竹林,因此在一定时间范围内其数量变化情况(变化速度)又可用动态度来表示,即单一土地利用类型动态度^[22]。变化幅度和动态度的计算公式如下:

$$K_T = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times 100\% \quad (1)$$

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: K_T 是毛竹林面积在时间序列某阶段的变化率或变化幅度, U_b 和 U_a 分别是阶段末期和初期毛竹林面积; K 是毛竹林面积的动态度,即年平均变化率; T 是研究的时间间隔。

变化幅度大于0,则说明毛竹林面积呈现扩张趋势;反之,则说明毛竹林面积缩减。变化速度是在22 a时间序列中毛竹林面积的变化速率,绝对值越大,说明毛竹林面积在单位时间内变化的速率越快;变化速度大于0时表示毛竹林面积增长的速率,小于0时表示毛竹林面积减少的速率。

根据安吉县5期遥感影像土地利用分类结果,计算4个阶段(1986-1991年、1991-1998年、1998-2004年、2004-2008年)县级单位土地利用类型转移矩阵,并根据不同时期各地面覆盖类型对毛竹林的贡献率(即某地类转化为毛竹林的面积占所有地类转化为毛竹林总面积的比例),以此分析评价县级单位上不同土地利用类型对毛竹林面积动态的影响。

1.5 毛竹林地上部分碳储量动态变化

安吉县毛竹林地上部分平均碳密度为 $20.297 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[8],据此,结合毛竹林遥感动态监测结果,粗略地估算并分析安吉县近30 a碳储量的动态变化。

2 结果分析与讨论

2.1 分类结果及精度

利用256个随机点对分类结果(图1)进行精度评价,精度评价结果如表1所示。可以看出各期影像总体精度都在85%以上,Kappa系数范围为0.80~0.93;毛竹林Kappa系数范围为0.81~0.95。Kappa系数均大于0.8,根据Kappa的统计意义^[23]说明分类结果很好,且毛竹林信息提取精度达到满意程度。

因清查数据获取时间与遥感影像的时间不完全一致,为了更好地将5个时期遥感影像提取的毛竹林面积与资源清查数据相比较,且针对2组数据的近线性递增趋势,采用线性插值的方法^[21]得到时间序列中1 a的毛竹林面积,用相同年份的毛竹林面积验证分类的准确性。

通过比较插值后的分类结果与清查结果,发现2组数据的增长趋势极其相似。插值后各年份竹林面积的精度分别达到了99.51%,96.12%,95.61%,96.80%,97.00%和97.28%,在遥感信息提取过程中由于受Landsat TM影像空间分辨率的限制,且本研究中的毛竹类别中也包含有少量的杂竹类,因此与清

表 1 5 期遥感影像的分类精度

Table 1 Classification accuracy of five different Landsat TM images

遥感影像时期	总体精度		毛竹林		
	精度/%	Kappa 系数	生产精度/%	用户精度/%	Kappa 系数
1986-07-25	91.41	0.883 2	90.54	89.33	0.850 0
1991-07-23	88.67	0.852 5	87.30	87.30	0.831 6
1998-08-11	93.75	0.921 0	95.12	96.30	0.945 5
2004-07-26	85.94	0.805 4	87.50	91.52	0.863 9
2008-07-05	89.06	0.841 0	92.31	88.89	0.812 9

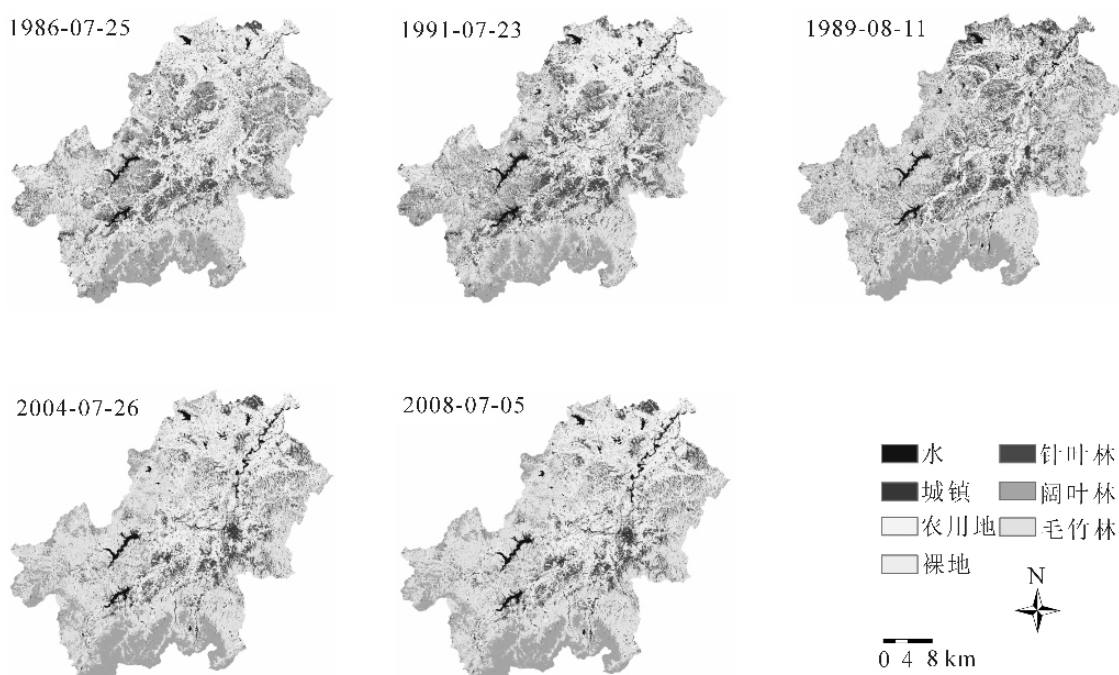


图 1 安吉县 5 个时期遥感影像分类图

Figure 1 Classification map of Anji County from 1986 to 2008

查结果相比较，除 1986 年以外的分类结果都较清查结果大。但两者的决定系数(R^2)为 0.981 4，说明影像分类得到的毛竹林面积与安吉县森林资源清查资料吻合。因此，毛竹林遥感信息提取精度能够很好地满足动态变化分析与评价。

2.2 毛竹林面积空间分布动态变化

2.2.1 毛竹林面积空间分布 以毛竹为主的竹林资源是安吉县森林资源最重要组成部分，全县的竹林面积占林业用地面积的一半。从分类图看(图 1)，全县毛竹林主要分布在西北、西南和东部低山丘陵地区。其中杭垓镇、递铺镇、孝丰镇、报福镇、章村镇、天荒坪镇、山川镇、昆铜乡、鄞吴镇、上墅乡和良朋镇等 11 个乡镇的竹林面积占全县竹林总面积的 94.61%，而北部的高禹镇、梅溪镇、溪龙乡和皈山乡等平原地区乡镇分布较少，仅占全县竹林总面积的 5.39% 左右。

2.2.2 毛竹林面积动态变化 对不同时期影像分类结果(图 1)的比较分析中发现，近 30 a 全县各种地面覆盖类型都处于动态变化中，其中毛竹林总面积呈现逐年增加的趋势，总体变化幅度达到 32.58%，年均变化率为 1.48%。其中在毛竹林分布较集中的 11 个乡镇中，孝丰镇、鄞吴镇、良朋镇竹林面积的变化幅度超过 70.00%，年变化率在 3.00% 以上；其次是杭垓镇、报福镇、山川镇，变化幅度为 25.00% ~ 44.00%，年变化率为 1.00 ~ 2.00%；章村镇、递铺镇、上墅乡、天荒坪镇的变化幅度为 14.00% ~ 21.00%，年变化率为 0.60% ~ 1.00%。而昆铜乡竹林面积的总减少幅度是 -8.49%，即以 $0.39\% \cdot a^{-1}$ 的速

率在减少(表2)。

表2 各乡镇22年生毛竹林面积的变化幅度和动态度

Table 2 Moso bamboo's rangeability and dynamical degree for different towns

乡镇	变化幅度/%	动态度/%	乡镇	变化幅度/%	动态度/%
杭垓镇	43.42	1.97	章村镇	20.42	0.93
递铺镇	17.48	0.79	良朋镇	72.88	3.33
孝丰镇	85.57	3.89	上墅乡	19.85	0.90
天荒坪镇	14.59	0.66	鄞吴镇	76.91	3.50
报福镇	34.32	1.60	山川镇	25.30	1.15
昆铜乡	- 8.49	- 0.39			

不同时间段毛竹林面积的空间动态变化可以更充分地体现遥感技术在空间动态方面的优势。图2是安吉县不同时间段毛竹林面积动态度空间分布情况,结合变化幅度和变化率2个指标得到4个连续时间段毛竹林面积的增长如表3所示,其中:1986-1991毛竹林面积的增加主要发生在水川镇、孝丰镇、鄞吴镇和昆铜乡,变化幅度分别达到38.08%,29.65%,29.09%和25.66%,年变化率分别为7.61%,5.93%,5.82%和5.13%。1991-1998年,毛竹林面积的增加主要发生在良朋镇和孝丰镇,变化幅度分别为35.24%和24.57%,年变化率分别为5.03%和3.51%。1998-2004年间毛竹林面积的增加主要发生在上墅乡、报福镇和杭垓镇,变化幅度分别为47.26%,34.56%和27.01%,年变化率分别是7.88%,5.76%和4.50%。2004-2008年毛竹林面积的增加主要发生在昆铜乡和鄞村镇,年变化幅度分别为47.42%和23.08%,年变化率分别为11.85%和5.77%。

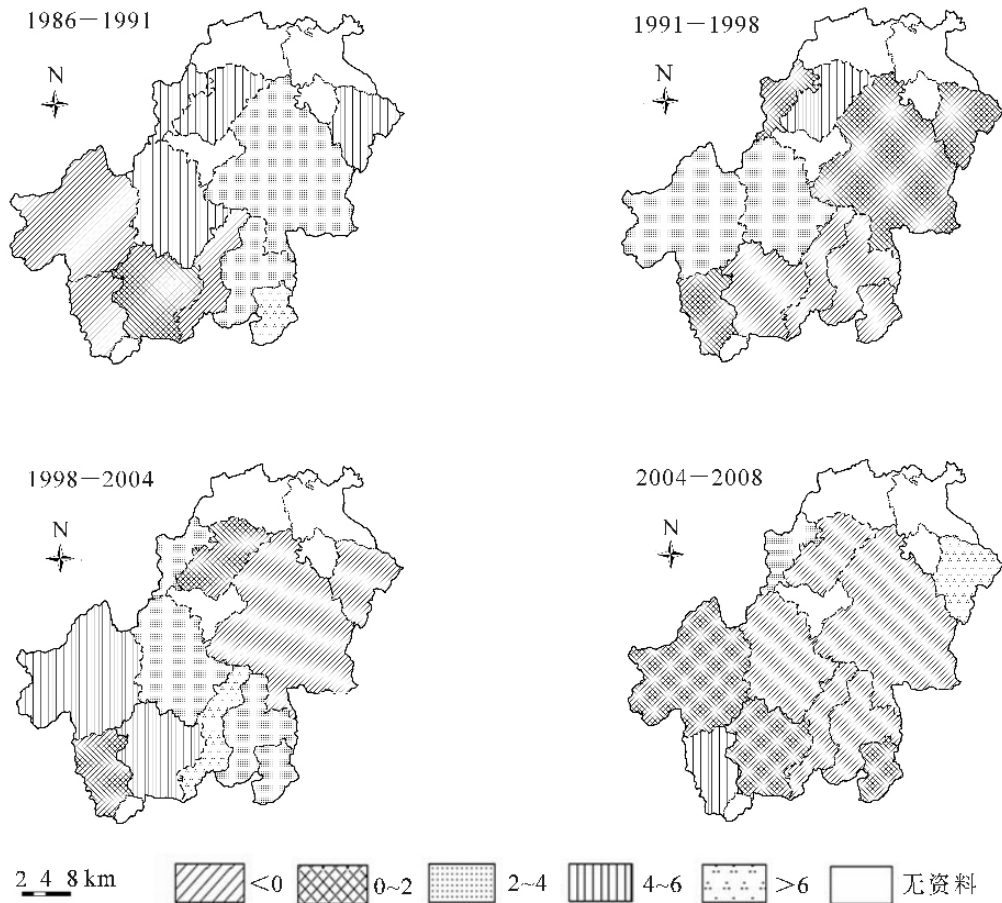


图2 近30a中4个时间段安吉县毛竹林动态度空间分布

Figure 2 Spatial distribution of dynamical degree of moso bamboo forest in the past 30 years

表 3 中也给出了不同阶段各乡镇毛竹林面积减少的幅度和动态度。1986 - 1991 年, 安吉县毛竹林面积的减少主要发生在西南部的章村镇、杭垓镇和上墅乡。1991 - 1998 年, 毛竹林面积的减少主要发生在东南部的山川镇和报福镇。1998 - 2004 年, 毛竹林面积的减少主要发生在东北部的昆铜乡和递铺镇。而 2004 - 2008 年, 毛竹林面积的减少主要发生在中部地区的上墅乡、天荒坪镇、孝丰镇、良朋镇和递铺镇。

表 3 各乡镇毛竹林面积在 4 个阶段的变化幅度和动态度

Table 3 Moso bamboo's rangeability and dynamical degree of the four different phases

乡镇	1986 - 1991		1991 - 1998		1998 - 2004		2004 - 2008	
	K_T	K	K_T	K	K_T	K	K_T	K
杭垓镇	- 7.65	- 1.53	15.08	2.15	27.01	4.50	6.25	1.56
递铺镇	14.93	2.99	13.53	1.93	- 5.92	- 0.99	- 4.29	- 1.07
孝丰镇	29.65	5.93	24.57	3.51	21.04	3.51	- 5.07	- 1.27
天荒坪镇	13.37	2.67	- 6.78	- 0.97	21.78	3.63	- 10.97	- 2.74
报福镇	6.45	1.29	- 12.10	- 1.73	34.56	5.76	6.68	1.67
昆铜乡	25.66	5.13	0.84	0.12	- 51.01	- 8.50	47.42	11.85
章村镇	- 15.20	- 3.04	7.92	1.13	6.90	1.15	23.08	5.77
良朋镇	21.46	4.29	35.24	5.03	10.45	1.74	- 4.71	- 1.18
上墅乡	- 5.82	- 1.16	- 1.97	- 0.28	47.26	7.88	- 11.85	- 2.96
鄞吴镇	29.09	5.82	5.19	0.74	12.93	2.16	15.36	3.84
山川镇	38.06	7.61	- 27.32	- 3.90	16.05	2.67	7.60	1.90

从以上结果中可看出: 各乡镇竹林面积在不同时间段的变化幅度和动态度均是不一致的, 个别乡镇或时期可能出现负值增长。但从整体来看, 安吉县毛竹林面积呈现出逐年增加的趋势。

安吉县毛竹林总面积随时间而增加主要有 2 个原因: 首先是毛竹特有的扩鞭繁殖方式。通过地下竹鞭繁育, 一个林分即为若干基株克隆的无性系种群, 在其成林后, 面积会随着时间的推移不断扩大。另外, 经济因素也极大的推动了安吉县毛竹林面积的增加。从 20 世纪 80 年代的贫困县到目前年均收入 781 美元·人⁻¹·a⁻¹, 安吉县约有 40% 的人拥有并从事竹林种植和经营管理^[24], 这与安吉县大力发展竹产业有很大关系。而对于昆铜乡在 1998 - 2004 年和 2004 - 2008 年 2 个时间段中较大的增减幅度, 可能是由以下原因共同造成的: ①分类过程中的误差。由于受遥感分辨率及地物光谱反射率的影响, 对遥感影像所做的一系列预处理难以完全消除“同物异谱, 同谱异物”现象, 在对各地物信息提取过程中存在误差是不可避免的。②自然灾害影响。近年来昆铜等地的篾竹、淡竹林竹象虫危害和黄古竹竹丛枝病危害, 都使得大片的竹林荒芜衰败。

2.2.3 土地利用类型转变对毛竹林面积动态的贡献 从安吉县 4 个时段土地利用转移矩阵(表 4)中发现, 在近 30 a 的时间序列中, 安吉县毛竹林总面积由 1986 年占全县总面积的 28.89% 增加到 2008 年的 38.48%, 其中针叶林、阔叶林以及农业用地的减少对毛竹林总面积增加的贡献最大。在近 30 a 内针叶林、阔叶林的总面积, 分别由 1986 年占全县总面积的 14.41% 和 20.52% 减少到 2008 年的 8.67% 和 12.50%。从 4 个阶段看: ①1986 - 1991 年间, 阔叶林地和针叶林地的面积分别变化了 4.47% 和 2.45%, 对毛竹林地面积扩张的贡献率分别为 57.84% 和 19.45%; ②1991 - 1998 年间, 这 2 种地类的面积变化与上一时间段基本一致, 分别为 4.97% 和 1.42%, 它们对毛竹林面积扩张的贡献率分别为 27.68% 和 40.83%; ③1998 - 2004 年间, 2 种地类的面积分别变化了 3.93% 和 6.06%, 阔叶林面积变化增幅比较大, 两者对毛竹林面积扩张的贡献率分别为 42.01% 和 28.27%; ④2004 - 2008 年间, 2 种地类的面积分别变化了 4.61% 和 0.71%, 对毛竹林地扩张的贡献率分别为 42.67% 和 22.51%。另外, 在近 30 a 年时间里, 由于毛竹林可观的经济效益, 大量农业用地转化为毛竹林地, 在 4 个时间段中这一类型的转换对毛竹林

扩张的贡献值分别为 21.56%、26.02%、15.65%和 30.52%。

土地利用变化对生态环境的影响也越来越受到人们的重视^[25-27]。有研究表明^[28]：改革开放初期，安吉县竹产区土地利用类型对当地生态环境带来一定的负面影响，特别是水土流失加剧，但到 20 世纪 90 年代中期随着退耕还林等林业工程的实施，这一状态有所转变，针阔叶林开始恢复。另一方面，竹林面积的扩大和经营强度的加强又使得竹林在 $r-k$ 对策(生物在生存竞争和进化过程中可能采取的 2 类基本的生态对策， r 表示内禀增长率， k 表示环境负载量)连续系统上具有 r -对策(r -strategistis，即繁殖对策属于有利于增大内禀增长率的选择的物种， r -对策以“量”取胜，而 k -对策以“质”取胜)的倾向或优势^[29-30]，竹林生态系统内物种多样性下降，大量壳斗科 Fagaceae，樟科 Lauraceae 和松科 Pinaceae 等乔木树种丧失，土壤健康恶化，水土流失增加，生态服务功能弱化^[7,13,30-31]。本研究 4 个阶段中，在 1986 - 1991 年阔叶林的变化对毛竹林面积增加贡献达到 57.84%，而 1991 - 1998 年针叶林的贡献最大达到 40.83%，因此，针、阔叶林的大量减少及毛竹林垦复等扩大经营可能造成了生态环境恶化和水土流失加剧。后 2 个阶段即 20 世纪 90 年代后期及 21 世纪初，两者对毛竹林面积扩张的贡献基本稳定，阔叶林保持在 42.00%左右，针叶林略有下降，从 1998 - 2004 年的 28.27%减少为 2004 - 2008 年的 22.51%。特别是在 2004 - 2008 阶段针叶林面积变化仅为 0.71%，这一点也验证了安吉县在兼顾经济和生态效益方面做出的努力。

表 4 安吉县近 30 a 中 4 个时段土地利用转移矩阵

Table 4 Transition matrix of land use type of Anji County in the past 30 years

年份	土地类型	水体	城镇	农地	裸地	针叶林	阔叶林	竹林	面积/%	贡献/%
1986 - 1991	水体	1 893.58	43.26	164.08	7.24	126.21	3.71	7.77	1.19	0.03
	城镇	48.79	960.34	464.27	115.29	66.26	14.72	31.88	0.90	0.14
	农地	603.42	1 971.26	40 403.98	4 993.54	5 771.78	2 178.55	5 012.07	32.23	21.56
	裸地	26.62	234.91	1 036.77	1 247.00	166.17	572.22	227.36	1.86	0.98
	针叶林	52.16	47.87	4 350.62	261.78	16 053.13	1 946.66	4 520.55	14.41	19.45
	阔叶林	14.32	33.32	2 916.75	602.03	3 364.39	18 423.07	13 443.82	20.52	57.84
	竹林	19.61	57.71	3 595.76	422.45	6 318.06	7 210.58	36 987.16	28.89	-
	面积/%	1.41	1.77	28.00	4.05	16.86	16.05	31.86	-	-
1991 - 1998	水体	1 611.69	110.87	143.33	334.67	246.87	92.94	118.20	1.41	0.43
	城镇	101.64	1018.39	649.92	716.22	383.39	218.40	260.45	1.77	0.94
	农地	551.27	1505.15	21 869.51	7 045.99	9 103.42	5 668.62	7 182.83	28.00	26.02
	裸地	92.13	399.15	1 477.89	1 696.74	1 308.50	1 546.69	1 127.98	4.05	4.09
	针叶林	334.93	253.49	4 066.10	1 995.41	10 515.19	3 430.35	11 270.40	16.86	40.83
	阔叶林	60.03	85.98	1 639.24	1 175.00	2 151.53	17 602.21	7 641.22	16.05	27.68
	竹林	131.47	238.90	2 327.38	2 519.03	5 475.56	11 198.31	38 340.22	31.86	-
	面积/%	1.53	1.91	17.02	8.19	15.44	21.03	34.88	-	-
1998 - 2004	水体	1 951.71	81.58	410.10	58.94	193.43	36.01	151.44	1.53	0.55
	城镇	157.03	1 503.16	1 308.07	184.81	120.73	77.79	260.38	1.91	0.95
	农地	219.69	1 246.59	21 631.88	1 239.35	1 201.41	2 351.05	4 282.77	17.02	15.65
	裸地	466.15	1 198.10	7 324.29	1 115.48	661.44	1 272.70	3 440.13	8.21	12.57
	针叶林	217.75	524.31	9 916.22	1 011.22	7 731.22	2 042.09	7 736.84	15.44	28.27
	阔叶林	144.44	319.78	5 549.86	739.96	1 457.04	20 063.38	11 495.59	21.04	42.01
	竹林	105.98	431.15	8 729.94	941.01	6 360.18	6 505.72	42 864.93	34.88	-
	面积/%	1.73	2.81	29.03	2.80	9.38	17.11	37.15	-	-

续表 4

年份	土地类型	水体	城镇	农地	裸地	针叶林	阔叶林	竹林	面积/%	贡献/%
2004 - 2008	水体	2313.66	39.96	648.26	45.42	134.59	27.56	53.43	1.73	0.22
	城镇	165.26	2 317.13	1 990.68	493.68	78.32	29.46	230.11	2.81	0.95
	农地	421.14	2 541.77	37 068.96	2 439.37	3 047.68	1 933.12	7 422.72	29.03	30.52
	裸地	119.98	614.23	2 518.23	818.80	173.07	284.01	762.91	2.80	3.14
	针叶林	172.66	134.22	3 614.24	358.28	7 363.07	609.59	5 473.15	9.38	22.51
	阔叶林	72.47	186.24	3 696.66	512.24	775.82	16 725.67	10 376.86	17.11	42.67
	竹林	65.65	286.57	11 955.59	662.02	4 817.10	4 012.72	48 430.54	37.15	-
	面积/%	1.76	3.24	32.53	2.82	8.67	12.50	38.48	-	-

说明：表中数据单位为 hm^2 。

2.3 安吉县近 30 a 毛竹林碳动态变化

安吉县毛竹林采伐方式为保留 3 度以下毛竹，所选影像的时间间隔平均 5 a 左右，因此，后一时期影像中的竹林中基本不存在前一影像时期的毛竹。根据安吉县毛竹林地上部分平均碳密度 $20.297 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [8] 及各时期毛竹林遥感监测结果，推算得到安吉县不同时期毛竹林地上总碳储量，分别为 1986 年 1.106 Tg，1991 年 1.213 Tg，1998 年 1.327 Tg，2004 年 1.413 Tg，2008 年 1.466 Tg，随毛竹林面积的增加而呈现逐渐增加的趋势。

利用同一碳密度值估算的碳储量结果是在没有考虑竹林内部结构的前提下得到的，而各时期毛竹林密度、管理强度等均有差别，估算结果会存在一定的误差。另外，由于本研究毛竹类别中包含有少量的杂竹类，因此，碳储总量的估算结果可能存在偏大的问题。如何充分结合现有调查样地数据及遥感数据准确推算过去不同时期毛竹林地上生物量碳储量还有待进一步深入研究。

3 结论

本研究利用安吉县近 30 a 的 Landsat TM 卫星数据和森林资源清查统计数据，通过对毛竹林动态变化分析得到：①近 30 a，安吉县竹林总面积以年均 1.48% 的速度在增加，总体增长幅度达到 32.58%。其中除昆铜乡毛竹林面积呈负增长外（变化幅度为 -8.49%），安吉县其他各乡镇的毛竹林面积呈上升趋势，变化幅度为 14.00% ~ 86.00%。②在这一时间段里，除去毛竹自然扩鞭和人工扩林的原因以外，针叶林、阔叶林以及农业用地的减少对毛竹林总面积增加的贡献最大。③利用同一碳密度值粗略计算 5 个时期毛竹林地上碳储量分别为 1.106，1.213，1.327，1.413 和 1.466 Tg，随面积的增加呈现逐渐增加的趋势。这一结论为评价安吉县竹林在区域森林生态系统中的地位和作用，为全球变化碳平衡的需求、生态系统健康的需求及区域经济增长的需求三者之间的协调提供一些指标；对安吉县竹林资源的生态功能、生态系统健康、生态环境评价以及竹林经营管理与多样性保护同样具有实践、理论价值和实际意义。

参考文献：

- [1] 王燕, 王兵, 赵广东, 等. 我国毛竹林生态系统碳平衡研究进展[J]. 林业科技开发, 2008, **22** (4): 9 - 12.
WANG Yan, WANG Bing, ZHAO Guangdong, *et al.* Review: carbon balance in bamboo forest ecosystem in China [J]. *China For Sci Technol*, 2008, **22** (4): 9 - 12.
- [2] 林华. 毛竹林生态系统生物量动态变化规律研究[J]. 林业科技开发, 2002, **16** (增刊): 26 - 27.
LIN Hua. Research on biomass dynamic change of bamboo forest ecosystem [J]. *China For Sci Technol*, 2002, **16** (supp): 26 - 27.
- [3] 吴鸿. “十五”浙江林业科技发展报告[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [4] 黄伯惠. 浙江省竹林概况及今后发展的建议[J]. 浙江林业科技, 1988, **8** (4): 47 - 52.
HUANG Bohui. Overview and proposals of bamboo for future development in Zhejiang Province [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 1988, **8** (4): 47 - 52.

- [5] 戚连忠, 朱杭瑞, 蔡琳, 等. 从文献分析看浙江省竹类研究进展[J]. 浙江林业科技, 2000, **20** (6): 68 – 72.
QI Lianzhong, ZHU Hangrui, CAI Lin, *et al.* Development of research on bamboo in Zhejiang Province [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2000, **20** (6): 68 – 72.
- [6] 朱永军, 程爱兴, 何钧潮. 临安竹产业实现跨越式发展的目标和对策[J]. 竹子研究汇刊, 2003, **22** (3): 8 – 12.
ZHU Yongjun, CHENG Aixing, HE Junchao. Aims and strategies to realize rapid development of bamboo industry in Lin'an [J]. *J Bamboo Res*, 2003, **22** (3): 8 – 12.
- [7] 丁丽霞, 王祖良, 周国模, 等. 天目山国家级自然保护区毛竹林扩张遥感监测[J]. 浙江林学院学报, 2006, **23** (3): 297 – 300.
DING Lixia, WANG Zuliang, ZHOU Guomo, *et al.* Monitoring *Phyllostachys pubescens* stands expansion in National Nature Reserve of Mount Tianmu by remote sensing [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2006, **23** (3): 297 – 300.
- [8] DU Huaqiang, ZHOU Guomo, FAN Wenyi, *et al.* Spatial heterogeneity and carbon contribution of aboveground biomass of moso bamboo by using geostatistical theory [J]. *Plant Ecol*, 2010, **207**: 131 – 139.
- [9] 李正才, 傅懋毅, 徐德应. 竹林生态系统与大气二氧化碳减量[J]. 竹子研究汇刊, 2003, **22** (4): 1 – 6.
LI Zhengcai, FU Maoyi, XU Deying. Bamboo ecosystem and carbon dioxide sequestration [J]. *J Bamboo Res*, 2003, **22** (4): 1 – 6.
- [10] 李惠敏, 陆帆, 唐仕敏, 等. 城市化过程中余杭市森林碳汇动态[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2004, **43** (6): 1044 – 1050.
LI Huimin, LU Fan, TANG Shimin, *et al.* Dynamic carbon sink of forests in Yuhang City with the development of urbanization [J]. *J Fudan Univ Nat Sci*, 2004, **43** (6): 1044 – 1050.
- [11] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布[J]. 林业科学, 2004, **40** (6): 20 – 24.
ZHOU Guomo, JIANG Peikun. Density, storage and spatial distribution of carbon in *Phyllostachys pubescens* forest [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40** (6): 20 – 24.
- [12] 陈先刚, 张一平, 张小全, 等. 过去 50 a 中国竹林碳储量变化[J]. 生态学报, 2008, **28** (11): 5218 – 5227.
CHEN Xiangang, ZHANG Yiping, ZHANG Xiaoquan, *et al.* Carbon stock changes in bamboo stands in china over the last 50 years [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (11): 5218 – 5227.
- [13] 李伟成, 盛海燕, 钟哲科. 竹林生态系统及其长期定位观测研究的重要性[J]. 林业科学, 2006, **42** (8): 95 – 101.
LI Weicheng, SHENG Haiyan, ZHONG Zheke. Importance of long-term location investigation for bamboo ecosystem [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42** (8): 95 – 101.
- [14] 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 Jingyun. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, **20** (5): 733 – 740.
- [15] 梅安新, 彭望琮, 秦其明. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [16] BROWN S, LUGO A E. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle [J]. *Biotropica*, 1982, **14**: 161 – 189.
- [17] 秦小光, 蔡炳贵, 张鹏, 等. 开展我国陆地生态系统碳循环的生物地球化学动态评估的思路与建议[J]. 科技导报, 2002 (8): 51 – 54.
QIN Xiaoguang, CAI Binggui, ZHANG Peng, *et al.* The strategic suggestions on remote sensing-based biogeochemical dynamic estimating of carbon-nitrogen cycles in terrestrial ecosystems of China [J]. *Technol Rev*, 2002 (8): 51 – 54.
- [18] 曹明奎, 于贵瑞, 刘纪远 等. 陆地生态系统碳循环的多尺度试验观测和跨尺度机理模拟[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, **34** (增刊 II): 1 – 14.
CAO Mingkui, YU Guirui, LIU Jiyan, *et al.* Multi-scale observation and cross-scale simulating on carbon cycles of terrestrial ecosystem [J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2004, **34** (supp II): 1 – 14.
- [19] 郑伟, 曾志远. 遥感图像大气校正方法综述[J]. 遥感信息, 2004 (4): 66 – 70.
ZHENG Wei, ZENG Zhiyuan. A review on methods of atmospheric correction for remote sensing image [J]. *Remote Sens Inform*, 2004 (4): 66 – 70.
- [20] 黄微. 一种改进的卫星影像地形校正算法[J]. 中国图象图形学报, 2005, **10** (9): 1124 – 1129.

- HUANG Wei. An improved topographic correction approach for satellite image [J]. *J Image Graph*, 2005, **10** (9): 1124 – 1129.
- [21] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报, 2003, **58** (5): 643 – 650.
ZHU Huiyi, LI Xiubin. Discussion on the index method of regional land use change [J]. *Acta Geogra Sin*, 2003, **58** (5): 643 – 650.
- [22] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1998, **18** (1): 81 – 87.
WANG Xiulan, BAO Yuhai. Study on the methods of land use dynamic change research [J]. *Prog Geogra*, 1998, **18** (1): 81 – 87.
- [23] 韦玉春, 汤国安, 杨昕, 等. 遥感数字图像处理教程[M]. 科学出版社, 北京, 2008.
- [24] ZHU Zhaohua, MAXIM L. *Vietnam-Laos Bamboo Sector Feasibility Study*[R]. Beijing: International Network for Bamboo and Rattan, 2006.
- [25] 邵景安, 芦清水, 张小咏. 近 30 a 青海三江源西部干旱区草地退化特征的遥感分析[J]. 自然资源学报, 2008, **23** (4): 643 – 656.
SHAO Jing'an, LU Qingshui, ZHANG Xiaoyong. Remote sensing-based characteristics of grassland degradation in the arid western three-river sources regions of Qinghai in the past 30 years [J]. *J Nat Resour*, 2008, **23** (4): 643 – 656.
- [26] 王宗明, 国志兴, 宋开山, 等. 2000 – 2005 年三江平原土地利用履被变化对植被净初级生产力的影响研究[J]. 自然资源学报, 2009, **24** (1): 136 – 146.
WANG Zongming, GUO Zhixing, SONG Kaishan, *et al.* Effects of land use/cover change on net primary productivity of Sanjiang plain during 2000 – 2005[J]. *J Nat Resour*, 2009, **24** (1): 136 – 146.
- [27] 苏海民, 何爱霞. 基于 RS 和地统计学的福州市土地利用分析[J]. 自然资源学报, 2010, **25** (1): 91 – 99.
SU Haimin, HE Aixia. Analysis of land use based on RS and geostatistics in Fuzhou City [J]. *J Nat Resour*, 2010, **25** (1): 91 – 99.
- [28] 谢锦忠. 中国不同竹产区土地利用变化对生态环境影响的比较研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.
XIE Jinzhong. *A Comparison Study on Land use Changes and Their Environment Influence in China Bamboo Producing Area Along an East-West Gradient* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2006.
- [29] 朱锦懋, 江训强, 黄儒珠, 等. 毛竹林物种多样性的初步分析[J]. 福建林学院学报, 1996, **16** (1): 5 – 8.
ZHU Jinmao, JIANG Xunqiang, HUANG Ruzhu, *et al.* A preliminary analysis on species diversity of *Phyllostachys pubescens* [J]. *J Fujian Coll For*, 1996, **16** (1): 5 – 8.
- [30] 余树全, 周国模, 李翠环. 雷竹林生态系统健康的研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, **25** (5): 15 – 19.
YU Shuquan, ZHOU Guomo, LI Cuihuan. Study on *Phyllostachys praecox* forest ecosystem health [J]. *J Beijing For Univ*, 2003, **25** (5): 15 – 19.
- [31] 郑成洋, 何建源, 罗春茂, 等. 不同经营强度条件下毛竹林植物物种多样性的变化[J]. 生态学杂志, 2003, **22** (6): 1 – 6.
ZHENG Chengyang, HE Jianyuan, LUO Chunmao, *et al.* Changes of species diversity at different cultivation intensities of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forest [J]. *Chin J Ecol*, 2003, **22** (6): 1 – 6.