

应用 CASA 模型估算浙江省植被净初级生产力

俞静芳¹, 余树全^{1,2}, 张超¹, 李土生³

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江 临安 311300; 3. 浙江省林业厅 生态中心, 浙江 杭州 310020)

摘要: 自然植被和生产力的变化是表征区域生态环境质量变化的重要指标, 利用 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型对浙江省植被净初级生产力 (NPP) 进行估算, 分析了净初级生产力的时空分布变化及受土地利用变化影响的特点。结果表明: ① 2006 年浙江省净初级生产力平均为 $625.68 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 空间上, 呈现出随着海拔的增高而增大的趋势; 时间上, 各土地利用类型的净初级生产力均表现出一致而明显的季相变化, 不同土地利用类型之间的净初级生产力高低差异明显; ② 全年净初级生产力总量为 $6\,451.24 \text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$, 林地和耕地是净初级生产力总量的主要构成部分, 占净初级生产力年总量的 70% 以上; 其中, 丽水市净初级生产力年总量最高, 为 $1\,336.05 \text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$, 舟山市最低, 为 $47.18 \text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$; 生态公益林的净初级生产力均值为 $815.28 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 固碳能力明显优于其他林地; ③ 相比 1996 年, 2006 年浙江省净初级生产力年总量因土地利用类型的变化增加了 $52.96 \text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$, 净初级生产力年总量保持着相对稳定的态势。有效提升浙江省植被净初级生产力途径主要有: 在平原地区构建森林网络体系, 在山区积极实施阔叶林化改造工程, 以及对竹林进行科学集约化经营。图 2 表 3 参 19

关键词: 森林生态学; 净初级生产力; 空间分布; 季相变化; 土地利用; 浙江省

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2012)04-0473-09

Net primary productivity estimates for Zhejiang Province based on the CASA model

YU Jing-fang¹, YU Shu-quan^{1,2}, ZHANG Chao¹, LI Tu-sheng³

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Forestry Ecological Engineering Administration, Hangzhou 310020, Zhejiang, China)

Abstract: Changes in vegetation and net primary productivity (NPP) are important indicators representing regional ecological qualitative changes. To examine NPP vegetative seasonal variation, spatial patterns, and land use change that affected variation, an NPP simulation was performed for Zhejiang Province in 2006 based on the Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) model with results further analyzed by Geographic Information System (GIS)-based software. Results showed that (1) average annual NPP was about $625.68 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. NPP also showed a spatial heterogeneity which lying down within the relief over the study area. NPP differed with land use type, but there seems to be a similar seasonal change which increased fast in Feb. to May and peaked in July and Aug. (2) Total NPP in 2006 was about $6\,451.2 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ with more than 70% found mainly in forest and cropland near each city in Zhejiang Province. Total NPP of Lishui City was highest ($1\,336.05 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$); whereas Zhoushan City was lowest ($47.18 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$). For the Ecological Service Forests, the average annual NPP was about $815.28 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ which was higher than the mean values of forests. (3) Compared to 1996, total NPP in 2006 increased about $52.96 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ due to land use type change. Thus, to effectively enhance

收稿日期: 2011-09-19; 修回日期: 2011-11-30

基金项目: 浙江省科学技术重大项目(2006C12060)

作者简介: 俞静芳, 从事生态规划研究。E-mail: yjfx@126.com。通信作者: 余树全, 教授, 博士, 从事生态系统生态、群落生态和生态规划等研究。E-mail: yushq@zafu.edu.cn

vegetation NPP for Zhejiang Province, a forest network system should be built in the plains areas, the project accelerating the succession of coniferous forest into broadleaf forest should be conducted in mountain areas, and an intensive management for bamboo stands should be undertaken. [Ch, 2 fig. 3 tab. 19 ref.]

Key words: forest ecology; net primary productivity (NPP); spatial analysis; seasonal change; land use; Zhejiang Province

植被的净初级生产力(NPP, net primary productivity)是指植物在单位时间、单位面积上由光合作用产生的有机物质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分,它是地表碳循环的重要组成部分,直接反映了植物群落在自然环境条件下的生产能力,表征陆地生态系统的质量状况,是评价生态系统结构与功能协调性,以及生物圈人口承载力的重要指标^[1],因此,开展区域尺度上生态系统净初级生产力的研究具有十分重要的意义。传统上对于植被净初级生产力的估算常采用抽样调查和定点观测的方法,但是由于调查成本和观测范围的限制,很难开展大尺度、动态的净初级生产力研究。因此,利用模型估计陆地植被的生产力已经成为一种重要且被广泛接受的研究方法^[2-3]。目前,基于资源平衡理论的以CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型为代表的光能利用率模型因涉及参数相对简单且与遥感技术紧密联系,已成为净初级生产力模型研究的一个主要发展方向^[4-6]。CASA模型考虑了气温、降水、太阳辐射、土壤蒸发等因素,并通过遥感途径获取所需的植被吸收的光合有效辐射参数,已被广泛用于区域陆地净初级生产力及全球碳循环的评估研究。陈正华等^[7]利用CASA模型,结合多光谱遥感数据和气候数据,模拟了干旱半干旱典型区黑河流域1998-2002年植被净初级生产力的时空分布,并分析和探讨了上、中、下游净初级生产力的驱动因子;刘勇洪等^[8]在CASA模型的基础上,建立了利用NOAA/AVHRR 1B卫星资料和气象资料估算植被净初级生产力的技术方法,并利用该方法对2007年华北地区的净初级生产力分布格局进行了分析;宋国宝等^[9]利用CASA模型对北京范围内的植被净初级生产力进行了模拟,并对其季节性变化和空间格局进行了分析。浙江省作为中国的经济强省,自20世纪90年代以来,快速的城市化进程将城市周边的耕地、草地以及未利用地等土地利用类型转化为城市建筑用地,其中耕地的大面积衰减是建筑用地的主要来源。而另一方面,浙江省又非常重视林业建设及保育工作,经过几十年来的封山育林及近10年的生态公益林建设工作,该省的森林覆盖率已达60.92%,位居全国前列。耕地资源的衰减和林地资源的增加,无疑对浙江省植被净初级生产力产生了一系列的影响,目前这类研究尚未见报道。本研究以中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据和气象数据为基础,采用CASA模型估算浙江省植被NPP情况,并对浙江省净初级生产力的时空分布以及土地利用类型的净初级生产力差异等方面进行了研究。

1 研究区域概况

浙江省位于中国东部,处于欧亚大陆与西北太平洋的过渡地带,属典型的亚热带季风气候区。地势由西南向东北倾斜,西南、西北部地区群山峻岭,中部、东南地区以丘陵和盆地为主,东北地区地势较低,以平原为主。受东亚季风影响,四季分明,气温适中,光照较多,雨水丰沛,空气湿润,雨热季节变化同步。年平均气温为15.0~18.0℃,平均降水量为980~2000mm,平均日照时数为1710~2100h。土壤类型主要为红壤、红黄壤和黄壤。原生植被为亚热带常绿阔叶林,历史上经多次破坏及近几十年的天然更新和人工更新后,现在的植被为人工植被和天然次生植被的混合体,主要类型有常绿阔叶林、常绿阔叶混交林、针阔混交林、松林和竹林等。

2 基本理论与研究方法

2.1 CASA模型

CASA模型中净初级生产力(P_{NP})主要由植被所吸收的光合有效辐射(P_{AR})和光能利用率(ϵ)这2个变量来确定,而这2个变量又分别通过太阳辐射,归一化植被指数(I_{NDV}),土壤水分,降水量以及平均气温等指标来体现。其估算公式如下:

$$P_{NP}(x,t)=P_{AR}(x,t)\times\epsilon(x,t)。(1)$$

式(1)中: x 表示具体空间位置, t 表示时间。

$$P_{AR}(x,t)=S_{OL}(x,t)\times F_{PAR}\times 0.5。 \quad (2)$$

式(2)中: S_{OL} 为月太阳总辐射($MJ\cdot m^{-2}$), 常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例, F_{PAR} 为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例, 取决于植被类型和植被覆盖状况。本研究采用朱文泉等提出的利用归一化植被指数和比值植被指数的方法来估算 F_{PAR} , 具体算法详见文献[5]。

$$\varepsilon(x,t)=T_{\varepsilon_1}(x,t)\times T_{\varepsilon_2}(x,t)\times W_{\varepsilon}(x,t)\times \varepsilon_{max}。 \quad (3)$$

式(3)中: $T_{\varepsilon_1}(x,t)$ 和 $T_{\varepsilon_2}(x,t)$ 均为温度对光能利用率的胁迫系数, 可采用 Potter 等^[10]提出的方法进行估算。最大光能利用率 ε_{max} 的取值因不同的植被类型而有所不同, 对净初级生产力的估算结果影响很大。本研究利用了朱文泉等^[5]确定的中国典型植被类型的最大光能利用率模拟结果。 $W_{\varepsilon}(x,t)$ 为水分胁迫系数, 反映了植物所能利用的有效水分条件对光能利用率的影响, 随着环境中有效水分的增加, $W_{\varepsilon}(x,t)$ 逐渐增大, 它的取值范围为 0.5(在极端干旱条件下)~1(非常湿润条件下), 其估算公式为:

$$W_{\varepsilon}(x,t)=0.5+0.5\times E(x,t)/E_p(x,t)。 \quad (4)$$

式(4)中: $E(x,t)$ 为区域实际蒸散量, 可根据周广胜等^[11]建立的区域实际蒸散模型求取, $E_p(x,t)$ 为区域潜在蒸散量(mm), 可根据 Boucher 提出的互补关系求取^[12]。

2.2 数据资料及其预处理

归一化植被指数数据来源于 2006 年 16 d 合成的 MODIS 植被指数产品 MOD13Q1(分辨率 250 m)数据集。该数据集统一采用 SIN GRID 投影并已进行去云、辐射校正、大气校正等处理, 共计 23 个时相的数据, 利用 MODLAND 提供的 MRT (MODIS REPROJECTION TOOL) 投影转换工具, 对数据进行拼接和投影转换, 转换为等经纬度坐标投影, 基准面为 WGS-84 坐标系, 最终利用最大值合成法(MVC)生成 12 个波段逐月最大 NDVI 值数据。气象数据来自国家气象局, 选择浙江省及其周边地区共计 32 个气象台站观测得到的 2006 年逐月平均气温、降水量和日照时数资料。由于浙江省进行太阳辐射长期观测的台站只有 2 个, 太阳辐射资料远远不能满足科研需要, 因此, 我们使用经验公式进行估算^[13]:

$$Q=Q_0(a+bs)。 \quad (5)$$

式(5)中: Q 为实际总辐射($MJ\cdot m^{-2}$), Q_0 为天文总辐射($MJ\cdot m^{-2}$), s 为日照百分率, a 和 b 为经验系数, 根据李梦洁等^[14]的研究结论, 取 a 为 0.14, b 为 0.59, Q_0 的计算详见文献^[15]。使用 ArcGIS 软件对各月太阳总辐射量、月均气温、月均降水量进行 Kriging 空间插值, 获取像元大小与 MODIS 数据一致、投影相同的栅格数据。另外, 本研究使用的植被分类图来自中国科学院植物研究所编制的 1:100 万植被图(中国科学院中国植被图编辑委员会, 2001); 1996 年和 2005 年 1:25 万浙江省土地利用数据来源于浙江省国土资源厅。因 2006 年与 2005 年间隔较短, 我们将 2006 年土地利用情况等同于 2005 年进行分析。

2.3 研究流程与方法

①使用 IDL 编程计算浙江省 2006 年植被净初级生产力数据; ②利用土地利用数据与净初级生产力时间序列进行空间分析, 研究不同土地利用类型的净初级生产力季节变化规律; ③以浙江省 11 个地市为统计单位, 对净初级生产力年总量、不同土地利用类型的净初级生产力贡献率及差异进行分析; ④分析浙江省各地市生态公益林的净初级生产力分布特征; ⑤分析 1996-2006 年间浙江省林地及耕地面积变化对净初级生产力年总量的影响。

3 结果与分析

3.1 净初级生产力时空分布特征分析

3.1.1 净初级生产力空间分布格局 估算结果表明: 2006 年浙江省植被净生产力平均约为 $625.68 g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$ 。如图 1 所示: 浙江省植被净初级生产力总体上呈现出随着海拔的增高而逐渐增大的分布趋势, 即从水域到城市地区, 再从平原农田区到山体地区, 净初级生产力逐渐增大。综合来看, 千岛湖、各江河入海口和泥质滩地等水系周边区域植被净初级生产力最低值区, 净初级生产力值大部分在 $200 g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$ 以下; 城市建成区由于不透水面比例较高, 绿地面积相对较低, 成为净初级生产力中低值区域, 净初级生产力值为 $200\sim 300 g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$; 杭嘉湖平原、宁绍平原、温黄平原以及金衢盆地等农田区为净初级生产力中高值区, 净初级生产力值多集中在 $460 g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$ 左右; 浙西北、浙西南山地以及浙东南低山地林区是浙江省林木资源最为丰富, 植被覆盖度相对较高的区域, 整个地区净初级生产力值较高, 大于 $600 g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$ 。

3.1.2 净初级生产力季相变化特征 总体来看,浙江省植被净初级生产力季相变化明显,月均净初级生产力为 $19.33 \sim 100.93 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。浙江省地处亚热带季风气候区,季风交替规律显著。冬季气温偏低,降水量偏少,植物的光合作用受到限制,植被的净初级生产力也偏小,1月和2月的平均净初级生产力较小,分别为 19.33 和 $20.13 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ 。从3月初春开始至8月末,气温升高,降水量以及太阳辐射强度逐渐增加,从而有利于植物的生长和有机物的积累,期间由于6-7月持续性的阴雨天气降低了太阳有效辐射,影响植物的光合作用,因此净初级生产力最大值出现在8月,为 $100.93 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ 。

另外,根据2006年植被净初级生产力月统计数据 and 土地利用数据,对林地、耕地、水域、城镇用地、其他用地等5种用地类型的净初级生产力进行逐月统计,比较了不同土地利用类型净初级生产力的季节变化特点。从图2中可以看出:各土地利用类型的净初级生产力季相变化趋势都与全省净初级生产力变化类似,而不同土地利用类型之间的净初级生产力存在明显的差异,其中以林地净初级生产力最高,约为 $25.0 \sim 113.57 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$,耕地次之,约为 $11.13 \sim 76.29 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$,水域最低,约为 $2.79 \sim 21.06 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ 。综合来看,2006年不同土地利用类型的年净初级生产力大小依次为林地($764.10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) > 耕地($468.47 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) > 其他用地($444.52 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) > 城镇用地($279.58 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) > 水域($128.32 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。

3.2 不同土地利用类型对净初级生产力贡献率分析

不同的土地利用类型具有不同的植被类型、植被组成及植被覆盖度,因此也就具有不同的光能利用率,进而影响到净初级生产力的估算。如表1所示,浙江省2006年植被净初级生产力年总量为 $6\,451.24 \text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$,林地和耕地净初级生产力占全省年总量的 88.86% ,其中林地面积约为 $619.96 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其净初级生产力年总量为 $4\,763.27 \text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$,占全省年总量的 73.83% ;耕地面积约为 187.54 万 hm^2 ,其净初级生产力年总量为 $969.17 \text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$,占全省年总量的 15.02% ;城镇用地、水域以及其他用地类型面积约为 223.59 万 hm^2 ,其净初级生产力年总量为 $718.80 \text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$,占全省年总量的 11.14% 。

3.2.1 各地市土地利用及净初级生产力贡献率分析 ①以11个地市净初级生产力均值为统计单位,使用欧氏距离-组间连接法进行聚类分析,将其分为5类。第1类为丽水市($790.68 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),第2类包括杭州市、温州市、衢州市和湖州市等地(平均值为 $663.35 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),第3类包括金华市、台州市、绍兴市和宁波市等地(平均值为 $564.75 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),第4类为舟山市($353.78 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),第5类为嘉兴市($279.53 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。②以11个地市净初级生产力年总量为统计单位,使用欧氏距离-组间连接法进行聚类分析,将其分为5类。第1类为丽水市($1\,336.05 \text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$),第2类为杭州市($1\,094.38 \text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$),第3类包括金华市、温州市和衢州市等地(平均值为 $683.45 \text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$),第4类包括台州市、宁波市、绍兴市和湖州市等地(平均值为 $453.38 \text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$),第5类包括嘉兴市和舟山市等地(平均值为 $78.47 \text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$)。



图1 2006年浙江省净初级生产力空间分布

Figure 1 Spatial distribution of NPP of Zhejiang in 2006

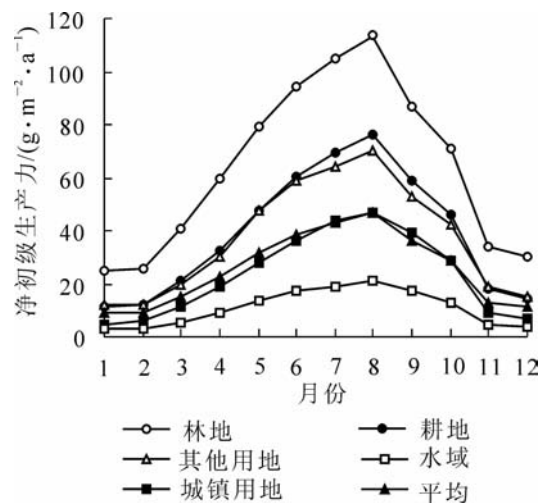


图2 2006浙江省不同土地利用类型净初级生产力月动态变化

Figure 2 Monthly change of NPP in different land use of Zhejiang in 2006

结合前文可知：林地和耕地对净初级生产力具有较高的贡献率，如表 1 所示。与浙江省平均水平相比，丽水市、杭州市和衢州市等地林地净初级生产力年总量所占比例较高，分别为 86.79%，78.34% 和 78.15%，合计 2 513.14 万 $t \cdot a^{-1}$ ；舟山市因面积较小，且受人为活动及海洋环境影响较大，虽然林地净初级生产力年总量所占比例为 57.40%，但也仅有 27.08 万 $t \cdot a^{-1}$ ；嘉兴市林地净初级生产力年总量全省最低，为 14.56 万 $t \cdot a^{-1}$ ，占该市净初级生产力年总量的 13.27%，不过其耕地净初级生产力总量所占比例全

表 1 2006 年浙江省及各地市土地利用及净初级生产力贡献率

Table 1 Land use and contribution for NPP between each city and Zhejiang Province in 2006

土地 利用 类型	浙江				杭州			
	面积/万 hm^2	面积比/%	净初级生产力年 总量/(万 $t \cdot a^{-1}$)	净初级生产 力百分比/%	面积/万 hm^2	面积比/%	净初级生产力年 总量/(万 $t \cdot a^{-1}$)	净初级生产 力百分比/%
林地	619.96	60.13	4 763.27	73.83	109.62	66.44	857.36	78.34
耕地	187.54	18.19	969.17	15.02	21.41	12.98	132.90	12.14
水域	83.46	8.09	258.72	4.01	13.49	8.18	40.31	3.68
城镇用地	83.75	8.12	291.73	4.52	13.01	7.89	44.99	4.11
其他用地	56.38	5.47	168.35	2.61	7.44	4.51	18.83	1.72
总计	1 031.08	100	6 451.24	100	164.98	100	1 094.38	100
土地 利用 类型	宁波				温州			
	面积/万 hm^2	面积比/%	净初级生产力年 总量/(万 $t \cdot a^{-1}$)	净初级生产 力百分比/%	面积/万 hm^2	面积比/%	净初级生产力年 总量/(万 $t \cdot a^{-1}$)	净初级生产 力百分比/%
林地	41.57	43.78	281.75	61.12	66.68	55.60	509.91	72.06
耕地	20.23	21.31	88.84	19.27	23.03	19.20	118.00	16.67
水域	14.51	15.28	32.30	7.01	12.85	10.71	21.46	3.03
城镇用地	12.48	13.14	28.15	6.11	7.68	6.40	42.69	6.03
其他用地	6.15	6.48	29.93	6.49	9.69	8.08	15.59	2.2
总计	94.95	100	460.97	100	119.93	100	707.65	100
土地 利用 类型	嘉兴				湖州			
	面积/万 hm^2	面积比/%	净初级生产力年 总量/(万 $t \cdot a^{-1}$)	净初级生产 力百分比/%	面积/万 hm^2	面积比/%	净初级生产力年 总量/(万 $t \cdot a^{-1}$)	净初级生产 力百分比/%
林地	4.14	10.55	14.56	13.27	27.58	48.56	228.66	64.74
耕地	20.47	52.14	66.46	60.56	14.56	25.64	79.84	22.61
水域	4.80	12.23	22.15	20.19	6.75	11.89	20.59	5.83
城镇用地	7.92	20.17	3.21	2.92	6.59	11.60	8.82	2.50
其他用地	1.94	4.94	3.36	3.07	1.32	2.32	15.27	4.32
总计	39.26	100	109.75	100	56.79	100	353.19	100
土地 利用 类型	绍兴				金华			
	面积/万 hm^2	面积比/%	净初级生产力年 总量/(万 $t \cdot a^{-1}$)	净初级生产 力百分比/%	面积/万 hm^2	面积比/%	净初级生产力年 总量/(万 $t \cdot a^{-1}$)	净初级生产 力百分比/%
林地	41.77	51.88	285.6	63.63	65.64	61.50	504.77	71.31
耕地	18.62	23.13	92.24	20.55	21.96	20.58	115.53	16.32
水域	6.80	8.45	27.02	6.02	4.33	4.06	32.01	4.52
城镇用地	8.42	10.46	24.09	5.37	9.34	8.75	39.51	5.58
其他用地	4.91	6.10	19.90	4.43	5.46	5.12	16.03	2.27
总计	80.51	100	448.85	100	106.73	100	707.85	100

表 1(续)

土地利用类型	衢州				舟山			
	面积/万 hm ²	面积比/%	净初级生产力年总量/(万 t·a ⁻¹)	净初级生产力百分比/%	面积/万 hm ²	面积比/%	净初级生产力年总量/(万 t·a ⁻¹)	净初级生产力百分比/%
林地	60.78	70.08	496.16	78.15	5.38	40.33	27.08	57.40
耕地	12.95	14.93	76.99	12.13	2.24	16.79	8.86	18.78
水域	3.39	3.91	17.06	2.69	1.78	13.34	6.78	14.36
城镇用地	4.68	5.40	31.07	4.89	2.18	16.34	2.12	4.49
其他用地	4.93	5.68	13.59	2.14	1.76	13.19	2.35	4.98
总计	86.73	100	634.86	100	13.34	100	47.18	100

土地利用类型	台州				丽水			
	面积/万 hm ²	面积比/%	净初级生产力年总量/(万 t·a ⁻¹)	净初级生产力百分比/%	面积/万 hm ²	面积比/%	净初级生产力年总量/(万 t·a ⁻¹)	净初级生产力百分比/%
林地	56.06	56.69	397.80	72.26	140.75	83.29	1159.62	86.79
耕地	18.10	18.30	93.24	16.94	13.97	8.27	96.25	7.20
水域	11.13	11.25	24.51	4.45	3.62	2.14	14.54	1.09
城镇用地	7.83	7.92	15.58	2.83	3.62	2.14	51.51	3.86
其他用地	5.78	5.84	19.36	3.52	7.01	4.15	14.13	1.06
总计	98.89	100	550.51	100	168.98	100	1336.05	100

省最高，为 60.56%。

3.2.2 生态公益林净初级生产力贡献率分析 生态公益林有维护国土生态安全、生物多样性和经济社会可持续发展的重要作用，包括以提供森林生态和社会服务产品为主要经营目的的防护林和特种用途林。浙江省人民政府自 1999 年开始，先行在江河源头、重点林区的 21 个县(市、区)开展了生态公益林建设试点。在此基础上，2001 年开始全面实施 200 万 hm² 重点公益林建设，并于 2004 年完成了《浙江省国家级重点公益林区划界定成果报告》，对浙江省森林植被的恢复起到较大的促进作用。如表 2 所示：2006 年浙江省生态公益林面积约为 200 万 hm²，占浙江省林地面积的 31.46%，生态公益林净初级生产力年总量为 1 590.23 万 t·a⁻¹，占浙江省植被净初级生产力年总量的 24.65%，其净初级生产力均值为 815.28 g·m⁻²·a⁻¹，高于浙江省林地净初级生产力平均水平 (625.68 g·m⁻²·a⁻¹)，体现了与其他林地相比生态公益林在固碳方面的优势。综合来看，丽水市和杭州市的生态公益林面积较大，其净初级生产力年总量也较高，分别为 334.28 万 t·a⁻¹ 和 315.49 万 t·a⁻¹，湖州市、舟山市和嘉兴市的生态公益林面积较小，其净初级生产力年总量也较低，分别为 67.00，25.24，和 3.68 万 t·a⁻¹。经统计，各地市植被净初级生产力年总量与其生态公益林净初级生产力年总量呈极显著正相关 (相关系数为 0.991， $P < 0.01$)。

表 2 2006 年浙江省各地市生态公益林面积及净初级生产力统计

Table 2 Statistics of NPP and area of ecological service forests of each city in Zhejiang Province in 2006

地区	面积/万 hm ²	占林地面积比例/%	净初级生产力均值/(g·m ⁻² ·a ⁻¹)	净初级生产力年总量/(万 t·a ⁻¹)
浙江	195.05	31.46	815.29	1 590.23
杭州	36.57	33.36	862.70	315.49
宁波	14.62	35.16	798.29	116.71
温州	21.71	32.57	798.48	173.35
嘉兴	0.57	13.80	645.61	3.68
湖州	6.96	25.23	962.64	67.00
绍兴	13.32	31.90	762.54	101.57
金华	19.77	30.12	785.84	155.36
衢州	18.50	30.44	851.73	157.57
舟山	4.54	84.36	555.95	25.24
台州	18.78	33.50	748.30	140.53
丽水	39.71	28.21	841.80	334.28

3.3 1996 – 2006 年林地及耕地净初级生产力变化分析

随着浙江省针对山地陡坡地区开展的退耕还林工程，以及杭嘉湖平原和宁绍平原地区城镇化进程的加快，1996 – 2006 年间浙江省林地增加了 18.89 万 hm^2 ，耕地减少了 20.50 万 hm^2 ，建设用地增加了 19.00 万 hm^2 ，2006 年林地的净初级生产力平均值为 $768.32 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，耕地的净初级生产力平均值为 $516.78 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。按此标准计算，相比 1996 年，2006 年浙江省因林地面积增加导致净初级生产力年总量提高了 145.14 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ，耕地面积减少导致净初级生产力年总量降低了 105.92 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

如表 3 所示：就林地的变换情况来看，台州市、丽水市和宁波市的林地净初级生产力年总量增长较大，分别为 42.47，33.47，和 25.60 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ；嘉兴市和湖州市的林地面积有所降低，其净初级生产力年总量分别减少了 8.92 和 4.98 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。就耕地的变化情况来看，除湖州市耕地净初级生产力年总量增加了 1.06 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 外，其他 10 个地市的耕地净初级生产力年总量均有不同程度的降低，其中宁波市和杭州市的耕地净初级生产力年总量减少较多，分别为 24.82 和 17.57 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。综合来看，土地利用类型的变化导致 10 a 间浙江省植被净初级生产力年总量增加了 52.96 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ，由此可知：浙江省植被净初级生产力年总量基本保持了相对稳定的态势。

表 3 1996 – 2006 年浙江省各地市土地利用面积及净初级生产力年总量变化统计

Table 3 Statistics of land use and NPP yearly change of each city in Zhejiang between 1996 – 2006

地区	林地		耕地		水域		城镇用地		其他用地	
	面积/ 万 hm^2	净初级生产 力年总量/ (万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)	面积/ 万 hm^2	净初级生产 力年总量/ (万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)	面积/ 万 hm^2	净初级生产 力年总量/ (万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)	面积/ 万 hm^2	净初级生产 力年总量/ (万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)	面积/ 万 hm^2	净初级生产 力年总量/ (万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)
浙江	18.89	145.14	-20.50	-105.92	-5.46	-16.92	19.00	66.18	-11.90	-35.52
杭州	2.09	16.08	-3.40	-17.57	-0.77	-2.39	3.18	11.08	-0.88	-2.63
宁波	3.33	25.60	-4.80	-24.82	-1.00	-3.09	3.24	11.29	-0.66	-1.98
温州	2.80	21.48	-2.40	-12.42	-0.34	-1.06	1.42	4.96	-1.44	-4.29
嘉兴	-1.16	-8.92	-1.00	-5.16	-0.84	-2.61	1.35	4.71	1.75	5.23
湖州	-0.65	-4.98	0.21	1.06	0.04	0.12	1.28	4.45	-1.01	-3.01
绍兴	1.58	12.12	-2.08	-10.77	-0.98	-3.05	2.26	7.88	-1.03	-3.07
金华	0.18	1.38	-1.66	-8.59	-0.84	-2.60	2.98	10.38	-0.82	-2.44
衢州	0.53	4.06	-0.95	-4.90	-0.22	-0.69	0.81	2.82	0.08	0.23
舟山	0.31	2.37	-0.58	-2.98	-0.18	-0.56	0.29	1.00	0.01	0.02
台州	5.53	42.47	-2.19	-11.32	-0.42	-1.30	1.74	6.07	-4.41	-13.16
丽水	4.36	33.47	-1.63	-8.44	0.10	0.31	0.44	1.54	-3.49	-10.41

4 结论和展望

4.1 结论

本研究以中分辨率成像光谱仪遥感数据和气象数据为基础，采用 CASA 模型估算浙江省植被净初级生产力情况，并对浙江省净初级生产力的空间分布格局、季相变化以及土地利用类型对净初级生产力差异的影响等方面进行了研究。结果表明：①2006 年浙江省净初级生产力平均约为 $625.68 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ；全省植被净初级生产生产力空间分异明显，总体上呈现出随着海拔的增高而逐渐增大的分布趋势；净初级生产力季节变化明显，月平均净初级生产力为 $11.13\sim 65.59 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ ；所有时相，不同土地利用类型的植被净初级生产力同样存在差异，其中林地净初级生产力最高，为 $25.0\sim 113.57 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，耕地次之，为 $11.13\sim 76.29 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，水域周边最低，为 $2.79\sim 21.06 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，各土地利用类型植被净初级生产力的季相变化趋势较为一致，1 月为最低值，8 月达最高值。②浙江省全年净初级生产力总量为 6 451.24 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ，林地和耕地净初级生产力占全省年总量的 88.86%，其中林地净初级生产力年总量为 4 763.27 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ，

占全省年总量的 73.83%。以 11 个地市为统计单位,就净初级生产力年总量来看,丽水市最高,为 1 336.05 万 $t \cdot a^{-1}$,舟山市最低,为 47.18 万 $t \cdot a^{-1}$ 。生态公益林净初级生产力年总量为 1 590.23 万 $t \cdot a^{-1}$,占浙江省植被净初级生产力年总量的 24.65%,其净初级生产力均值为 815.28 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,高于浙江省林地净初级生产力平均水平(764.10 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$),体现了与其他林型相比生态公益林在固碳方面的优势。③相比 1996 年,2006 年浙江省因林地面积增加导致净初级生产力年总量提高了 145.14 万 $t \cdot a^{-1}$,耕地面积减少导致净初级生产力年总量降低了 105.92 万 $t \cdot a^{-1}$ 。土地利用类型的变化导致 10 a 间浙江省植被净初级生产力年总量增加了 52.96 万 $t \cdot a^{-1}$,由此可知:浙江省植被净初级生产力年总量基本保持了相对稳定的态势。

4.2 存在问题、展望与建议

快速的城镇化进程及工业建设导致以嘉兴市、宁波市为中心的杭嘉湖平原和宁绍平原等地植被覆盖状况出现衰退现象^[16],植被净初级生产力年总量大幅下降。对于浙江省来说平原地区土地极其宝贵,在经济发展的背景下,能够做到“加强耕地资源保护,严格控制耕地转为非耕地”已实属不易,更不要奢望将现有农田或草地转为林业用地,建设大面积人工林的做法。因此,加强城镇林网化建设,提升农田林网建设密度及规模,依托现有快速干道两侧林带构建贯通性主干森林廊道,建立以核心片林为节点,农田林网、道路林网以及河道林网为主体的森林网络结构,是提升浙江省平原地区植被净初级生产力的有效措施。

针叶林是浙江省森林中面积最大、分布最广的植被类型,总面积 238.9 万 hm^2 ,其中,马尾松 *Pinus massoniana* 林与杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林面积约占全省乔木林面积的一半以上,且多为层次单一的常绿针叶纯林。自 20 世纪 70 年代大规模造林至今,许多针叶林面临着林分结构单一、林木老化、生态多样性降低的问题,树势较弱,病虫害危害较严重。根据刘其霞等^[17]的研究,浙江省生态公益林常绿阔叶林乔木层生物量最大值接近中国亚热带东部成熟常绿阔叶林乔木层生物量的一半,常绿阔叶林作为高碳储量森林,将会是浙江省甚至整个亚热带东部地区的森林碳储量的主要贡献者。而沈琪等^[18]的研究表明,浙江省常绿阔叶林恢复可以不必经历松林阶段,在生境条件较好的地方通过封育改造、择伐补阔、以灌促阔等人工管理干预措施,加速常绿阔叶林恢复。因此,通过阔叶林化改造工程,形成异龄、复层、混交的健康森林,是提升浙江省山区植被净初级生产力的有效途径。

以安吉、临安等地为代表的浙西北山地是中国著名的竹产业基地,发展笋竹两用林,具有较高的经济效益。虽然竹林净初级生产力高于常绿阔叶林^[1,19],但由于经营强度较大,常年的松土施肥作业,势必会造成一定的水土流失现象,因此,要选择缓坡深土地段实行小块状整地的集约经营方式,对坡度较大的竹林一定要放弃深挖垦翻的管理方式,从而实现竹林资源的可持续利用。

参考文献:

- [1] 江洪,汪小钦,孙为静.福建省森林生态系统 NPP 的遥感模拟与分析[J].地球信息科学学报,2010,12(4): 580 - 586.
JIANG Hong, WANG Xiaoqin, SUN Weijing. Simulation by remote sensing and temporal-spatial analysis of forest ecosystem net primary productivity in Fujian Province, China [J]. *J Geo-Inf Sci*, 2010, 12(4): 580 - 586.
- [2] RUI MY A, SAUGIER B. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data [J]. *J Geophys Res*, 1994, 99: 5263 - 5283.
- [3] 陈波. 陆地植被净第一性生产力对全球气候变化响应研究的进展[J]. 浙江林学院学报, 2001, 18(4): 445 - 449.
CHEN Bo. Progress in the response of net primary productivity of terrestrial vegetations to global climate changes [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2001, 18(4): 445 - 449.
- [4] FIELD C B, RANDERSON J T, MALMSTR6M C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing [J]. *Remote Sensing Environ*, 1995, 51: 74 - 88.
- [5] 朱文泉,潘耀忠,张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413 - 424.
ZHU Wenquan, PAN Yaozhong, ZHANG Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. *J Plant Ecol*, 2007, 31(3): 413 - 424.
- [6] LOBELL D B, HICKE J A, ASNER G P, et al. Satellite estimates of productivity and light use efficiency in the U-

- nited States agriculture, 1982–1998 [J]. *Global Change Biol*, 2002, **8**: 722 – 735.
- [7] 陈正华, 麻清源, 王建, 等. 利用 CASA 模型估算黑河流域净第一性生产力[J]. 自然资源学报, 2008, **23** (2): 263 – 273.
CHEN Zhenghua, MA Qingyuan, WANG Jian, *et al.* Estimation of Heihe Basin net primary productivity using the CASA model [J]. *J Nat Resour*, 2008, **23** (2): 263 – 273.
- [8] 刘勇洪, 权维俊, 高燕虎. 华北植被的净初级生产力研究及其时空格局分析[J]. 自然资源学报, 2010, **25** (4): 564 – 573.
LIU Yonghong, QUAN Weijun, GAO Yanhu. Net primary production and its spatio-temporal pattern in North China [J]. *J Nat Resour*, 2010, **25** (4): 564 – 573.
- [9] 宋国宝, 潘耀忠, 张树深, 等. 北京市植被净生产力遥感测量与分析[J]. 资源科学, 2009, **31** (9): 1568 – 1572.
SONG Guobao, PAN Yaozhong, ZHANG Shushen, *et al.* Measurement and analysis for the net primary productivity from remote sensing in Beijing City [J]. *Resour Sci*, 2009, **31** (9): 1568 – 1572.
- [10] POTTER C S, RANDERSON J T, FIELD C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1993, **7** (4): 811 – 841.
- [11] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探[J]. 植物生态学报, 1995, **19** (3): 193 – 200.
ZHOU Guangsheng, ZHANG Xinshi. A natural vegetation NPP model [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1995, **19** (3): 193 – 200.
- [12] 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究[J]. 植物生态学报, 1996, **20** (1): 11 – 19.
ZHOU Guangsheng, ZHANG Xinshi. Study on NPP of natural vegetation in China under global climate change [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1996, **20** (1): 11 – 19.
- [13] 宋富强, 康慕谊, 陈雅如, 等. 陕北黄土高原植被净初级生产力的估算[J]. 生态学杂志, 2009, **28** (11): 2311 – 2318.
SONG Fuqiang, KANG Muyi, CHEN Yaru, *et al.* Estimation of vegetation net primary productivity on North Shaanxi Loess Plateau [J]. *Chin J Ecol*, 2009, **28** (11): 2311 – 2318.
- [14] 李梦洁, 郑建飞, 曾燕, 等. 浙江省高分辨率太阳直接辐射图的计算和绘制[J]. 地球科学进展, 2008, **23** (3): 299 – 305.
LI Mengjie, ZHENG Jianfei, ZENG Yan, *et al.* Distributed modeling of direct solar radiation over rugged terrains of Zhejiang Province [J]. *Adv Earth Sci*, 2008, **23** (3): 299 – 305.
- [15] 李秀芬, 郑有飞, 王晨轶, 等. 黑龙江省森林 NPP 的遥感反演[J]. 中国农业气象, 2010, **31** (1): 88 – 92.
LI Xiufen, ZHENG Youfei, WANG Chenyi, *et al.* Retrieval of forest NPP by remote sensing in Heilongjiang Province [J]. *Chin J Agrometeorol*, 2010, **31** (1): 88 – 92.
- [16] 高大伟, 张小伟, 蔡菊珍, 等. 浙江省植被覆盖时空动态及其与生态气候指标的关系[J]. 应用生态学报, 2010, **21** (6): 1518 – 1522.
GAO Dawei, ZHANG Xiaowei, CAI Juzhen, *et al.* Spatiotemporal variations of vegetation cover in Zhejiang Province and their relations to eco-climatic indices [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21** (6): 1518 – 1522.
- [17] 刘其霞, 常杰, 江波, 等. 浙江省常绿阔叶生态公益林生物量[J]. 生态学报, 2005, **25** (9): 2139 – 2144.
LIU Qixia, CHANG Jie, JIANG Bo, *et al.* The biomass of the evergreen broad-leaved ecological public-welfare forests in Zhejiang, East China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25** (9): 2139 – 2144.
- [18] 沈琪, 张骏, 朱锦茹, 等. 浙江省生态公益林植被恢复过程中物种组成及多样性的变化[J]. 生态学报, 2005, **25** (9): 2131 – 2138.
SHEN Qi, ZHANG Jun, ZHU Jinru, *et al.* Changes of species composition and diversity in the restoration processes of ecological public-welfare forests in Zhejiang, East China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25** (9): 2131 – 2138.
- [19] 曾立雄, 王鹏程, 肖文发, 等. 三峡库区植被生物量和生产力的估算及分布格局[J]. 生态学报, 2008, **28** (8): 3808 – 3816.
ZENG Lixiong, WANG Pengcheng, XIAO Wenfa, *et al.* Estimating vegetation biomass and productivity and their distribution patterns in the Three Gorges Reservoir region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (8): 3808 – 3816.