

# 1998—2007年三峡库区(重庆段)植被净 第一性生产力及其时空特征\*

李月臣<sup>1,2,3</sup>, 简太敏<sup>1</sup>, 何志明<sup>1</sup>, 胡晓明<sup>1</sup>

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, GIS应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆400047;  
2. 重庆市气象科学研究所, 重庆401147; 3. 重庆交通大学土木建筑学院, 重庆400074)

**摘要:**基于CASA模型,利用SPOT/VGT NDVI数据、植被覆盖类型图、气象数据等,对三峡库区(重庆段)1998—2007年植被净第一性生产力(NPP)进行遥感估算,并对其时空特征进行了分析。研究结果表明:1)1998年到2007年各年植被NPP的变化整体呈现波动下降的趋势;2)1998—2007年研究区植被NPP在季节变化上由高到低依次为夏季( $675.705\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ )、春季( $368.2\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ )、秋季( $207.944\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ )、冬季( $49.495\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ )。夏季植被NPP最高值出现在2000年( $1\,022.173\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ ),最低值主要出现在2006年( $318.321\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ );3)1998—2007年,年均植被NPP值在 $184.8\sim 515.548\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间,高值主要出现在渝东北的巫溪县、巫山县、奉节县及渝东南的石柱县、武隆县等区域,低值主要在忠县、涪陵区及主城区大片区域;4)各年阔叶林单位面积生产力最高,其次为灌丛和灌草丛、针叶林、草甸、水生植被,水域生产力最低。

**关键词:**三峡库区(重庆段);植被净第一性生产力;时空特征

**中图分类号:**X171.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-6693(2012)03-0061-05

植被是陆地生态系统的重要组成部分,在区域气候变化和全球碳循环中扮演着重要的角色<sup>[1-3]</sup>。植被净第一性生产力(Net primary production, NPP)是指绿色植物在单位面积、单位时间内所累计的有机物数量,是由光合作用所产生的有机质总量中扣除呼吸消耗后的剩余部分<sup>[4-5]</sup>。作为地表碳循环的重要组成部分,NPP不仅直接反映了植被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,而且是判定生态系统碳汇和调节生态过程的主要因子<sup>[6]</sup>。掌握陆地NPP时空变化规律,对评价陆地生态系统的环境质量、调节生态过程以及估算陆地碳汇具有十分重要的意义。因此,国内外学者开展了大量的关于NPP的研究工作<sup>[7-9]</sup>。

三峡库区位于长江上游的末端,是长江流域生态屏障的咽喉,复杂的自然生态条件和社会经济特征决定了其重要的生态地理位置。本区是中国乃至世界最为特殊的生态功能区之一,也是关系到长江流域生态安全的重要生态屏障区。因此,这一区域NPP的

研究具有重要理论与实践意义。然而,目前对三峡库区植被生产力的研究大都集中在基于样方调查的点状研究方面,而很少涉及研究区植被生产力面域时空动态变化的研究。基于上述分析,为阐明三峡库区植被对全球变化的响应,本文应用目前国际上通用的CASA模型,对三峡库区1998—2007年的NPP进行反演,并对其时空动态特征进行分析。

## 1 研究区概况

三峡库区(重庆段)位于长江上游末端,地理范围在北纬 $28^{\circ}31'\sim 31^{\circ}44'$ 、东经 $105^{\circ}49'\sim 110^{\circ}12'$ 之间。东南、东北与鄂西交界,西南与川黔接壤,西北与川陕相邻,包括重庆市22个区、县,幅员面积 $46\,158.53\text{km}^2$ ,约占整个三峡库区面积的80%。2009年末户籍总人口为1 923.50万人,其中农业人口1 243.24万人。2009年重庆三峡库区农村各业总产值4 858 747万元,农民人均纯收入4 652元(含重庆市主城区)<sup>[10]</sup>。研究区属亚热带季风性湿润气候区,多年平均气温 $15\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,气

\* 收稿日期:2012-03-27 网络出版时间:2012-5-26 12:13

资助项目:重庆市气象局开放基金(No. kfj-201103);资源环境与生态建设重庆市高校创新团队基金(2010年);重庆市地理学重点学科基金(2011年)

作者简介:李月臣,男,教授,博士,研究方向为资源环境遥感与GIS。

网络出版地址:[http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20120526.1213.201203.61\\_012.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20120526.1213.201203.61_012.html)

温年较差和日较差大,具有冬暖春早、夏热秋迟的特点。多年平均降雨量为 1 150.26 mm,雨量充沛但空间分布不均匀。区内日照少,雾日多。三峡库区(重庆段)以山地、丘陵为主。全区土壤类型主要有紫色土、黄壤、黄棕壤、棕壤、石灰(岩)土、潮土、水稻土、粗骨土、新积土、山地草甸土等<sup>[11]</sup>。区域植被类型丰富,地带性植被以亚热带常绿阔叶林为主,森林覆盖率为 22.3%。在植物地理区划上本区属亚热带常绿阔叶林区,第四纪大陆冰期气候对本区的影响甚微,成为珍贵动植物的避难所,物种资源丰富。

## 2 数据获取与处理

本文所用数据主要有气象数据、遥感数据和植被覆盖分类数据 3 部分。气象数据,主要来源于重庆市 35 个气象站点的气温、降水月值数据和重庆市一个站点与周边 4 个站点的辐射数据;数据包含月总降水量、月平均气温、月总辐射数据、月净辐射数据以及高程和经纬度坐标,利用 ArcGIS 9.2 的插值工具,根据各气象站点的经纬度信息,通过对气象数据进行 Kriging 插值获取像元大小与 NDVI 数据一致、投影相同的气象要素栅格图。遥感数据主要来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn>)”,SPOT/VEGETATION S10 按旬合成的空间分辨率为 1 km 的东亚地区植被归一化指数产品,数据时间从 1998—2007 年;数据通过简单的几何校正后,在 ENVI4.7 中经过波段计算,求取 NDVI 月最大值、平均值及最小值,并通过掩膜处理获取重庆市数据。重庆市植被覆盖分类图数据,是通过扫描重庆市勘测院制作的《重庆市地图集》中的植被类型图,经过几何校正和配准后,矢量化得到的;对其所划分的 36 细类,做简单的合并处理,最终合并为 8 类。

## 3 研究方法

本研究所使用的 CASA 模型为生态过程模型。CASA 模型中的  $NPP$  主要由植物吸收的光和有效辐射( $APAR$ )和光能利用率( $\varepsilon$ )两个变量来确定

$$NPP(x,t) = APAR(x,t) \times \varepsilon(x,t) \quad (1)$$

式中, $t$  表示时间, $x$  表示空间位置, $APAR(x,t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月吸收的光合有效辐射, $\varepsilon(x,t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月的实际光能利用率。

### 3.1 $APAR$ 的估算

植被吸收的光合有效辐射( $APAR$ )取决于太阳

总辐射和植被对光合有效辐射的吸收比例( $FPAR$ ), $FPAR$  可以由归一化植被指数( $NDVI$ )和植被类型两个因子表示

$$APAR(x,t) = SOL(x,t) \times FPAR(x,t) \times 0.5 \quad (2)$$

式中, $SOL(x,t)$  表示  $t$  月在像元  $x$  处的太阳总辐射量; $FPAR(x,t)$  为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例;常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射(波长为 0.38 ~ 0.71  $\mu\text{m}$ )占太阳总辐射的比例。在一定范围内, $FPAR$  与  $NDVI$  之间存在着线性关系,这一关系可以根据某一植被类型  $NDVI$  的最大值和最小值以及所对应的  $FPAR$  最大值和最小值来确定<sup>[12]</sup>,即

$$FPAR(x,t) = \frac{NDVI(X,T) - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \times (FPAR_{\max} - FPAR_{\min}) + FPAR_{\min} \quad (3)$$

式中, $NDVI_{\min}$  和  $NDVI_{\max}$  分别对应第  $i$  种植被类型的  $NDVI$  最大值和最小值,可以通过 ENVI 软件进行波段运算获取。 $FPAR_{\min}$  和  $FPAR_{\max}$  的取值与植被类型无关,分别为 0.001 和 0.95<sup>[13]</sup>。

### 3.2 光能利用率的估算

光能利用率( $\varepsilon$ )的准确估算是利用 CASA 模型模拟生产力的关键因素之一,模型作者提出在理想状态下植被存在着最大光能利用率( $\varepsilon_{\max}$ ),但是不同植被类型的光能利用率存在着很大差异<sup>[14]</sup>,受到温度、水份、土壤、植物个体发育等因素的显著影响,把它作为一个常数在全球范围内使用是不科学的。本文利用 Running 等人<sup>[15]</sup>根据生态生理过程模型 BIOME-BGC 对 10 种植被类型所模拟的结果(如表 1),其他如水生植被、水体等生态系统取 CASA 模型所估算的全球月平均最大光利用率为 0.389  $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。

表 1 植被类型及其对应的最大光能利用率参数  
Tab.1 Vegetation types and corresponding parameters of the maximum light energy utilization

植被类型	最大光能利用率( $\varepsilon_{\max}$ ) /( $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ )
常绿针叶林	1.008
常绿阔叶林	1.259
落叶针叶林	1.103
落叶阔叶林	1.044
混交林	1.116
落叶灌丛及稀疏草原	0.768
稀疏灌木	0.774
矮林灌丛	0.888
草地	0.608
耕作植被	0.604

现实条件下,  $\varepsilon$  受温度和水分的影 响, 可以表示为

$$\varepsilon(x, t) = T_{e1}(x, t) \times T_{e2}(x, t) \times W_e(x, t) \times \varepsilon_{\max} \quad (4)$$

式中,  $T_{e1}(x, t)$  和  $T_{e2}(x, t)$  表示低温和高温对光能利用率的胁迫作用, 可采用 Potter 提出的方法<sup>[16]</sup> 基于最适温度和月均温进行估算。  $W_e(x, t)$  为水分胁迫影响系数, 反映植被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,  $W_e(x, t)$  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)。CASA 模型在求水分胁迫因子时, 所需参数较复杂, 不易求取。根据国内实际情况, 采用国内学者提出的实际蒸散和潜在蒸散的计算模型, 进行水分胁迫因子的模拟。计算公式如下<sup>[17]</sup>

$$\omega_e(x, t) = 0.5 + 0.5 \times EET(x, t) \div PET(x, t) \quad (5)$$

式中,  $EET(x, t)$  为实际蒸散量, 大多可根据周广胜等<sup>[16]</sup> 建立的区域实际蒸散模型, 应用月总降水量与月净辐射因子进行计算求得,  $PET(x, t)$  为潜在蒸散量, 用 Thornthwaite 法<sup>[18-19]</sup> 由月均日照时数与月均降水量等因子计算求得。

## 4 结果分析

### 4.1 NPP 的 年 际 变 化 特 征

1998—2007 年各年单位面积植被 NPP 的变化整体是呈现波动下降的趋势, 在 2000 年、2003 年、2005 年出现明显的峰值, 其平均 NPP 值分别为 356.083、357.163、445.234  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ , 其中以 2005 年达到多年间的最高值; 在 1999 年、2004 年、2006 年出现明显谷值, 其 NPP 平均值分别为 323.957、261.506、243.242  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ , 其中 2006 年为多年最低值。峰值主要是由于 2000 年、2003 年、2005 年没有特大气象灾害的发生, 年内光、热、水分配均匀, 达到了植物生长的最佳条件。谷值主要是由于研究区 1999 年出现洪涝灾害, 2004 年出现了 1982 年以来最强的一次暴雨及特大暴雨, 致使光、热、水未能达到植被的最佳生长需求, 从而制约到了植被 NPP 的生产力; 在 2006 年主要是研究区受到高温伏旱作用的影响。在高温伏旱的作用下, 降水量减少, 气温增高使得蒸散量增强, 从而也导致了植被 NPP 的降低。

### 4.2 NPP 的 季 节 变 化 特 征

由图 2 可见, 1998—2007 年研究区单位面积平均生产力在夏季(6~8 月)为 675.705  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ , 春季(3~5 月)为 368.2  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ , 秋季(9~11 月)为

207.944  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ , 冬季(1 月、2 月、12

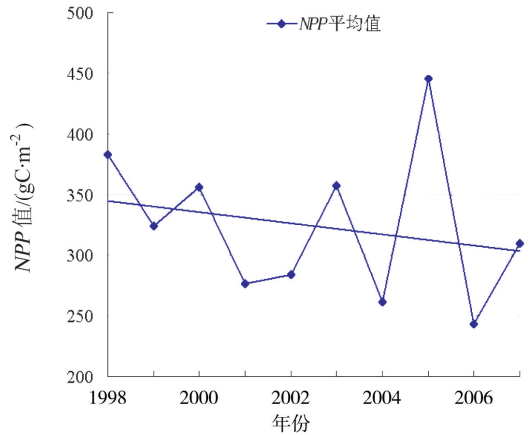


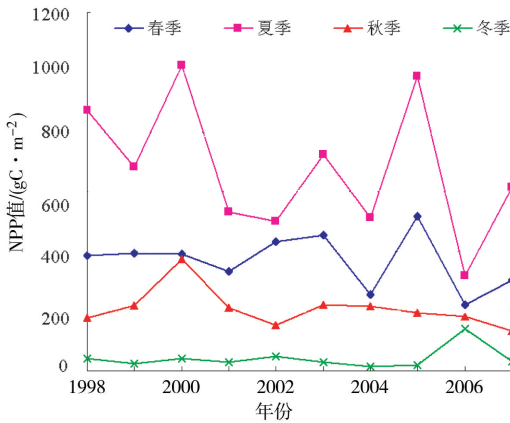
图 1 NPP 年际变化曲线图

Fig. 1 NPP annual variability

月)为 49.495  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ , 这主要是由于区内光、热、雨同期的因素, 致使估算 NPP 的气候因素如降雨、辐射、气温、光照等因子在夏季都达到最大、在冬季达到最小, 也因此影响到了 NPP 的季节分配。十年植被 NPP 的季相变化特征为: 夏季, 十年内植被 NPP 最高值体现在 2000 年, 值为 1 022.173  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 其次为 2005 年, 值为 985.491  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。最低值主要体现在 2006 年, 为 318.321  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ , 这主要是由于 2006 年重庆市高温伏旱致使光、热、水协调分配不均所致。春季波动变化规律与夏季相似, 但是波动幅度较小, 年际间差异不明显, 最高值出现在 2005 年, 为 516.306  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。2005 年春季的高值对当年 NPP 的平均值为十年间最高有重要的影响作用; 最低值出现在 2006 年, 为 221.827  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。秋季, 各年波动变化规律与春、夏季基本一致, 年际间没有较大的差异, 最高值出现在 2000 年, 为 374.585  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。冬季, 年际间没有较大的差异, 波动变化规律略有不同, 最高值出现在 2006 年, 为 140  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ , 这主要是由于 2006 年冬季高温伏旱结束, 降水对植被的补给, 促进了植被的生长, 在光、热、水的协同作用下使得植被 NPP 值增加。

### 4.3 NPP 的 空 间 分 异 特 征

根据 1998—2007 年植被年均 NPP, 统计出 NPP 各年年平均分布图、十年平均分布图、十年季相变化图。研究区 1998—2007 年年均植被 NPP 值在 184.8 ~ 515.548  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$  之间, 高值主要出现在渝东北的巫溪县、巫山县、奉节县及渝东南的石柱县、武隆县等区域, 与山地地区植被覆盖类型以及高植被覆盖度密有

图 2 *NPP* 季节变化曲线图Fig. 2 *NPP* seasonal variability

关; 低值主要在忠县、涪陵区及主城区大片区域, 而在忠县、涪陵区及主城区大片区域, 主要集中分布着大面积的耕地, 城市及建设用地, 致使 *NPP* 估算中影响很大的光能利用率值较低, 同时影响着 *NPP* 值, 使其较低。1998—2000 年高值区域主要在巫溪县及巫山县与奉节县, 低值区域集中在忠县和长寿区所在地区; 2001—2003 年高值区域在巫溪县、巫山县范围有所缩减, 在奉节县、云阳县、万州区、石柱县、武隆县都有增加, 在长江流域两岸出现明显的低值区域; 2004—2007 年巫溪县、巫山县、奉节县的高值区域在不断缩减, 在武隆、石柱县的高值区域不断增加, 低值区域从涪陵区、忠县区及武隆县部分区域

在不断的变化缩减。

#### 4.4 不同植被类型 *NPP* 的分异特征

研究区不同植被覆盖区域 *NPP* 值的变化情况如表 2 所示, 各年都以阔叶林植被单位面积生产力最高, 其次为灌丛和灌草丛植被、针叶林植被、草甸、水生植被, 水域生产力最低。阔叶林植被由于叶面积较大, 对光、热、水等因子的吸收力强, 因此单位面积 *NPP* 生产力最高; 灌丛和灌草丛由于枝叶茂盛, 对光照因子的吸收, 对水分的吸收利用都较强; 而针叶林植被虽然根系发达, 但是枝叶稀疏, 叶面积指数较低, 因此多种因子结合下针叶林植被的 *NPP* 估算值略低于灌丛和灌草丛植被估算值; 耕地与经济林木单位面积 *NPP* 生产能力都较低, 这主要是由于耕地作物的更替及根系、叶面积、枝干等结合人为因素共同作用产生, 但是由于耕地占研究区面积最大, 以至于耕地对研究区植被 *NPP* 总值的贡献率最高。此外, 水域的生产力也较低。同时, 8 类覆盖植被均在 2005 年出现十年内的最高值, 这反应了光、热、水协同条件最好的时候是各类覆盖植被的 *NPP* 最高的时候; 最低值都出现在 2006 年, 这主要是由于 2006 年出现的高温伏旱, 导致光、热、水协同条件受限, 从而出现了十年内的最低值; 而各类覆盖植被年际间变化规律基本一致, 只有在 2007 年水域的 *NPP* 值略高于水生植被。

表 2 1998—2007 年三峡库区(重庆段)植被 *NPP* 平均值

Tab. 2 Average productivity of vegetation classes in the Chongqing TGRA, 1998—2007

gC · m<sup>-2</sup>

	植被类型							
	水域	针叶林	阔叶林	灌丛和灌草丛	草甸	水生植被	耕地	经济林木
面积/km <sup>2</sup>	728	9897	4923	1448	1622	42	26911	590
1998	261.47	387.48	520.50	428.06	351.73	294.36	336.44	329.72
1999	219.95	331.87	445.12	355.02	311.06	249.93	283.30	273.05
2000	231.47	369.85	494.34	409.74	361.84	272.09	303.92	292.19
2001	194.50	295.25	393.27	317.17	277.33	210.20	248.74	249.16
2002	198.62	303.76	409.39	331.77	273.37	212.62	254.47	251.19
2003	234.22	385.17	509.34	423.70	370.89	289.10	318.67	319.11
2004	178.29	261.69	334.26	298.06	246.05	187.06	229.89	243.33
2005	294.48	463.86	594.01	474.64	444.41	322.95	387.81	380.19
2006	155.88	254.17	342.72	281.10	246.11	180.76	206.77	198.92
2007	213.58	323.53	455.98	343.11	284.16	202.17	267.15	261.25

## 5 结论与讨论

三峡库区(重庆段)具有重要的生态地理位置。这一区域的生态环境问题,直接关系到三峡工程的安全,更关系到整个长江流域的生态安全与区域社会经济的可持续发展。鉴于研究区重要的生态地理位置以及目前相关研究的局限性,本文基于 CASA 模型,运用遥感、气象等数据对研究区 1998—2007 年近十年来的植被 *NPP* 进行了估算,并定量揭示了研究区植被 *NPP* 的时空特征与规律。

研究表明:1) 1998—2007 年各年植被 *NPP* 的变化整体呈现波动下降趋势;2) 1998—2007 年研究区植被 *NPP* 在季节变化上由高到低依次为夏季 ( $675.705 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ )、春季 ( $368.2 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ )、秋季 ( $207.944 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ )、冬季 ( $49.495 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ )。夏季,植被 *NPP* 最高值出现在 2000 年 ( $1022.173 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ ),最低值主要出现在 2006 年 ( $318.321 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ );3) 研究区 1998—2007 年年均植被 *NPP* 值在  $184.8 \sim 515.548 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$  之间,高值主要出现在渝东北的巫溪县、巫山县、奉节县及渝东南的石柱县、武隆县等区域,低值主要在忠县、涪陵区及主城区大片区域;4) 各年阔叶林植被单位面积生产力最高,其次为灌丛和灌草丛、针叶林、草甸、水生植被,水域生产力最低。

需要说明的是,本文研究是基于现有的 CASA 模型,由于研究区复杂的地形与气候条件,其中部分参数的估算可能存在一定的误差;此外,本文研究时段仅为 10 年,略显不足。尽管如此,研究区植被 *NPP* 的地理空间格局及年际与季节特征仍然能够得以充分反映。改善 CASA 模型参数估算精度、延长时间序列,在此基础上,模拟和预测三峡库区植被生产力变化趋势,建立有效的生态环境保护机制,为提高三峡库区生态环境质量奠定基础是本文需要改进和下一步研究的重要方向。

### 参考文献:

[1] Braswell B H, Schimel D S, Linder E, et al. The response of global terrestrial ecosystems to inter-annual temperature variability[J]. *Science*, 1997, 278: 870-872.

[2] 曹明奎, 李克让. 陆地生态系统与气候相互作用的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2000, 14(4): 446-452.

[3] 侯英雨, 柳钦火, 延昊, 等. 我国陆地植被净初级生产力变化规律及其对气候的响应[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1546-1553.

[4] Walker B, Steffen W L. The terrestrial biosphere and global change: Implications for natural and managed ecosys-

tems: A synthesis of GCTE and related research [R]. Stockholm, Sweden: IGBP Book, 1997.

[5] 郑凌云, 张佳华. 草地净第一性生产力估算的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2007, (23): 280-283.

[6] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components[J]. *Science*, 1998, 281: 237-240.

[7] Cao M K, Prince S D, Small J, et al. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981-2000 [J]. *Ecosystems*, 2004, 7: 233-242.

[8] Ricotta C, Avena G, De Palma A. Mapping and monitoring net primary productivity with AVHRR NDVI time-series: statistical equivalence of cumulative vegetation indices [J]. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Journal of Photogrammetry, Remote Sensing*, 1999, 54(5/6): 325-331.

[9] 高志强, 刘纪远. 中国植被净生产力的比较研究[J]. *科学通报*, 2008, 53(3): 317-326.

[10] 重庆市统计局. 重庆统计年鉴(2010) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.

[11] 刘春霞, 李月臣, 杨华, 等. 三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价[J]. *地理学报*, 2011, 66(5): 631-642.

[12] 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.

[13] 董丹, 倪健. 利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力[J]. *生态学报*, 2011, 31(7): 1855-1866.

[14] 朱文泉, 陈云浩, 潘耀忠, 等. 基于 GIS 和 RS 的中国植被光利用率估算[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2004, 29(8): 694-698.

[15] Running S W, Thornton P E, Nemani R, et al. Global Terrestrial Gross and Net Primary Productivity from the Earth Observing System [C] // Sala O, Jackson R, Mooney H. *Methods in Ecosystem Science*. New York: Springer Verlag, 2000: 44-57.

[16] 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 Biogeochemical Cycles*, 1993, 7: 811-841.

[17] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 603-608.

[18] 张新时. 植被的 PEP(可能蒸散)指标与植被一气候分类(二)—几种主要方法与 PEP 程序介绍[J]. *植物生态学报*, 1989, 13(4): 197-207.

[19] 刘晓英, 李玉中, 王庆锁. 几种基于温度的参考作物蒸散量计算方法的评价[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 12-18.