

地震灾区植被净初级生产力恢复效应评价

李福根^{1,2}, 辛晓洲¹, 李小军^{1,2}

(1. 中国科学院 遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:地震等重大灾害的发生,对区域植被及生态环境造成了巨大破坏,植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)能够反映绿色植物的生长状况,进行地震灾区植被 NPP 恢复效应评价,对掌握震后植被恢复情况和变化趋势具有指导意义。以“5·12”汶川大地震的极重灾区为研究区,选择地震前后 3 个时期的 TM 及 MODIS 卫星遥感数据,结合气象资料等其他数据,利用改进的 CASA 模型估算了灾区前后三年植被 NPP。结果表明,灾后 2009 年植被 NPP 总量为 9.827 亿 gC/a,相比灾前 2007 年减少了 31.99%,2011 年恢复期相比 2009 年增长了 28.55%,但仍比 2007 年低 12.57%,震后两年,灾区植被净初级生产力有所恢复,但未达到震前水平;从植被 NPP 空间分布来看,离地震中心越近的地方,植被 NPP 受到的削减程度越大,其恢复能力越差;经验证分析,评价结果具有较高的可信度,可为相关部门制定灾区生态重建和生态恢复计划与实施提供科学依据。

关键词:NPP; 遥感; GIS; CASA 模型; 恢复效应

中图分类号:P237

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0139-08

Assessment of Restoration of Vegetation Net Primary Productivity in Earthquake Disaster Area

LI Fugen^{1,2}, XIN Xiaozhou¹, LI Xiaojun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The occurrence of major disasters such as earthquake has caused great damage to the vegetation and ecological environment. The net primary productivity (NPP) of vegetation can reflect the growth status of green plants, and evaluation on the effect of vegetation restoration on primary productivity in earthquake stricken areas is helpful to understand the situation and trend of vegetation restoration after earthquake. Based on the multi-phase remote sensing data (e. g. MODIS and TM), and combination of the meteorological information and other data as auxiliary data, by means of RS and GIS, we improved the CASA model and used it to estimate NPP of three years before and after the disaster area. Results show that the total vegetation NPP was 982.7 million gC/a after the disaster in 2009, decreased by 31.99 percent compared to the previous disaster in 2007, increased by 28.55% due to recovery in 2011 compared to 2009, but still 12.57% lower than in 2007, two years after the quake, vegetation net primary productivity of the disaster area recovered somewhat, but not reached the level before the earthquake; according to the spatial distribution of vegetation NPP, the closer to the center of the earthquake is, the greater the degree of vegetation NPP reduction is, the worse the recovery ability is. The comparison results show that the improved model has high reliability, which can provide scientific basis for the relevant departments to develop the ecological restoration and ecological restoration plan and implementation.

Keywords: NPP; remote sensing; GIS; CASA model; restoration

植被净初级生产力作为地表碳循环的重要组成部分,不仅反映了绿色植被在自然环境下的生产能

力,而且还是判定生态系统碳汇和调节生态过程的重要因子^[1],它是指植物单位时间和单位面积由光合作

用产生的有机物中扣除自养呼吸后的剩余部分^[2-5],表征了生态系统的质量状况。将GIS和RS技术与CASA模型相结合,对实现灾区植被净初级生产力恢复效应评价具有重要意义。2008年“5·12”汶川地震,引发了严重的生态系统损毁,大量的植被遭到破坏,导致环境恶化和自然灾害频发^[6],因而进行地震灾区植被净初级生产力恢复效应评价,掌握灾区植被恢复情况及变化趋势,是灾区环保部门和有关决策部门迫切需要掌握的重要信息。

近年来,国内外学者对植被NPP估算模型的研究层出不穷,从最初德国研究者Ebermayer提出的测定巴伐利亚丛林生产力的设想^[7]到Miami模型和Thorntwaite Memorial模型的建立,植被净初级生产力的研究逐渐得到全世界各国的高度关注。进入21世纪,随着“3S”技术的迅猛发展,尤其是遥感技术在获取地表植被动态变化过程中扮演着重要的角色,相对于原始的实地测定工作节约了大量的人力、财力和物力,使得利用遥感技术估算植被NPP成为现阶段研究的焦点。20世纪70年代我国植被NPP研究逐步展开,1988年国内建立了陆地生态系统的研究网络,为开展植被NPP估算和分析奠定了基础,在CASA模型的基础上,利用遥感数据和GIS技术,对不同区域的植被净初级生产力研究很多^[8-10],然而,对受地质灾害影响导致植被净初级生产力严重降低的灾区的研究尚为少见。

本研究通过对原CASA模型改进的基础上,结合GIS和RS技术,选择汶川地震极重灾区为研究区,以Landsat5 TM和MODIS数据作为遥感数据,结合气象资料等其他数据,定量估算了灾区2007年、2009年、2011年地震前后3个时段的植被净初级生产力NPP,揭示了地震灾区植被生产力功能恢复效果和变化趋势,为管理部门制定震后生态重建与恢复计划提供科学依据。

1 研究区概况

选择“5·12”汶川大地震中的汶川县、北川县等10个极重受灾行政区为研究区,其介于 $102^{\circ}51'46''$ — $105^{\circ}37'12''$ E和 $30^{\circ}48'8''$ — $33^{\circ}1'26''$ N,地理位置见图1,总面积达2.58万 km^2 ,地形复杂,气候温和,属于北亚热带山地湿润季风气候区,年降雨量为500~600 mm,年蒸发量为1 000~1 500 mm,具有降水次数多,强度小的特点。5—10月的降雨量占全年总降雨量的75%~90%之间。雨季正值植被生长季,雨水分配均匀,温度适中,十分有利于植被生长^[11],典型植被是由冷杉(*Abies fabri* (Mast.) Craib),云杉(*Picea asperata*

Mast.),松树(*Pinus*)等针叶树种所组成的纯林或混交林。植被分布呈现出明显的垂直地带性,在海拔1 300~2 200 m的河谷谷底,分布着干旱河谷灌丛;海拔1 600~2 000 m的河谷和阴坡,为壳斗科的常绿种类、樟科树种以及槭树(*Acer* spp.),落叶栎(*Quercus* spp.)等均构成落叶阔叶与山地常绿阔叶混交林;海拔2 200~3 800 m地带为亚高山暗针叶林;海拔3 800 m以上为高山草甸。本区地处长江上游,是长江中上游防护林体系工程建设、天然林资源保护工程等一系列大型生态建设工程的主体部分,这些大型工程建设体系形成了多样化的森林生态系统,分布有王朗、白水河、雪宝顶等众多国家级自然保护区,是研究植被NPP的天然实验室。

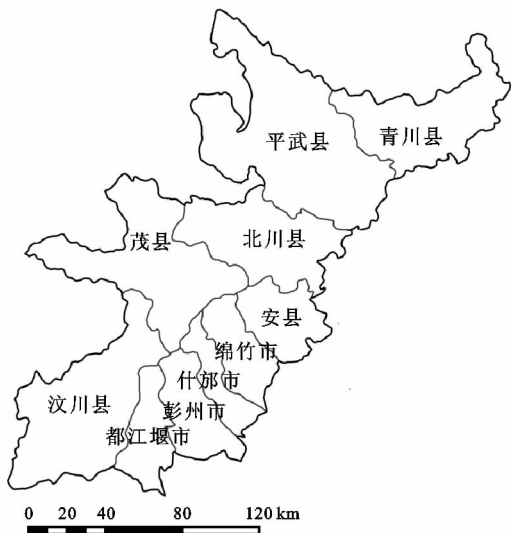


图1 研究区地理位置

2 数据获取与处理

2.1 遥感数据源

本研究所用的遥感数据主要有Landsat5 TM影像和MODIS数据。TM影像时间分辨率为16 d,可见光波段空间分辨率为30 m,要覆盖整个研究区范围每个年份需要6景影像,每一期数据均进行了几何校正、辐射定标、大气校正、镶嵌等预处理。MODIS数据是月合成的空间分辨率为1 km的MODIS植被指数产品,该产品已经过几何校正等预处理^[12],它包含增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)产品、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)产品、红光、近红外、中红外、蓝光等波段反射率以及其他辅助信息,具有较高的精度和应用价值^[13]。上述遥感数据最后经投影变换处理,选择的投影方式为通用横轴墨卡托投影(UTM),统一像元大小为100 m,使数据具有一致性和可比性。

鉴于研究的目的,需要建立研究区土地利用分类

体系,研究中采用最大似然分类算法对 Landsat5 TM 影像进行监督分类,参考国家颁布的“土地利用分类标准”^[14],并结合研究目的和研究区实际状况,

制定建设用地、乔木、灌丛、草地、园地、耕地、未利用地、水体 8 个类别的土地利用分类体系,不同类型地物的影像特征描述,见表 1。

表 1 TM 影像上不同类型地物特征描述

土地利用类型	特征描述	特征图斑	土地利用类型	特征描述	特征图斑
水体	蓝褐色,宽窄不一,色调不均匀,或蓝色色调较匀称,流线状弯曲		灌丛	棕红色或红褐色,或青灰色中带“红雾”色调不均匀,形状不规则	
耕地	红、黄、浅红等色小块相混杂,各小块内色调不均匀,形状规则		园地	红色、橘红色等,内部色调较匀称,形状不规则为多	
草地	红棕红等各种色调混杂,色调不均匀,边界不明显,形状不规则		建设用地	青灰、灰黑色,折线轮廓较明显,内部色调不均匀,形状有规则	
乔木	紫红、暗红色、内部色调较均匀,形状不规则或规则(人工林)		未利用地	白色、灰白色中带黄点内部色调不均匀,边界不明显,形状不规则	

注:特征描述是在 TM4,5,3 假彩色合成图像上的描述。

根据上述地物的影像光谱特征,结合野外实地观测资料,同时参考其他土地利用资料,在 TM 影像上进行样本训练,综合考虑分类时间和分类精度等因素,每类地物均在影像上均匀的选择 50 个感兴趣区,最后执行监督分类并对分类结果进行后处理和精度评定。本研究应用混淆矩阵的 Kappa 系数来进行分类精度的检验,它是 1960 年 Cohen 提出的^[15],之后有许多学者在其算法和应用方面做了大量工作,逐步发展成为遥感分类的主要精度评价方法,计算公式如下:

$$K = \frac{N \sum_i x_{ii} - \sum (x_{i+} \cdot x_{+i})}{N^2 - \sum (x_{i+} \cdot x_{+i})} \quad (1)$$

式中:K 是 Kappa 系数; r 是误差矩阵的行数; x_{ii} 是主对角线上的值; x_{i+} 和 x_{+i} 是第 i 行的和与第 i 列的和; N 是样点总数。Kappa 系数分析是评价分类精度的多元统计方法,它与分类精度的具体关系参考文献^[16]。本研究中得到的 3 个时段土地利用分类 Kappa 系数分别为 77.34%,82.59%,83.61%,分类精度均处于较好或之上,分类结果见附图 8。

2.2 非遥感数据源

本研究用到的非遥感数据源主要是由中国气象科学数据共享服务网(网址 <http://cdc.cma.gov.cn>)提供的气象资料,时间为 2007 年、2009 年、2011 年各个月份,数据内容有太阳总辐射月值数据、气温月值数据、降雨量月值数据以及各气象站的经纬度数据,受到条件限制,再考虑到尺度效应,这里获得的太阳总辐射月值数据仅是由研究区及周边 17 个太阳辐射气象站提供的。

而降水月值数据和气温月值数据是由研究区及其周边 31 个气象站提供,其空间位置分布见图 2。

计算光能利用率时需要有空间上能与遥感数据相匹配的栅格化数据。本研究利用 GIS 的空间插值方法,根据各气象站点的经纬度信息,通过对离散的气象数据进行克里金插值,获得空间上连续并且像元大小与遥感影像一致、投影相同的气象栅格图。以 2009 年 1 月平均气温为例,见图 3,同理,太阳辐射月值数据、降雨月值数据亦是如此。

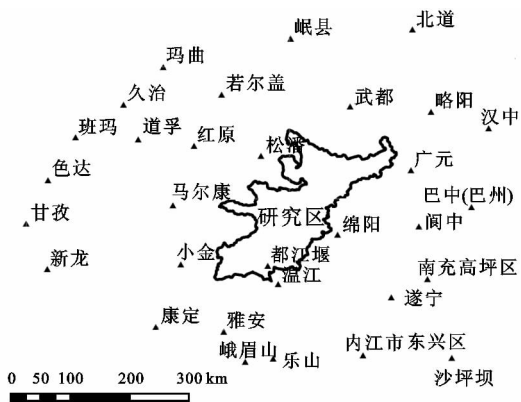


图 2 研究区及周边气象站位置分布

3 研究方法

研究中 NPP 估算方法是在 CASA (Carnegie Ames Stanford Approach) 模型改进的基础提出的,其总体技术路线见图 4。1993 年,Potter 等在前人的研究基础上建立了 CASA 模型^[17],该模型利用 NDVI 等遥感数据,实现了利用光能利用率原理的全球

陆地植被 NPP 估算,它是通过植被吸收的光合有效辐射(APAR)和光能利用率(ϵ)二者的乘积来计算植被 NPP 的。

$$NPP(x,t)=APAR(x,t)\times\epsilon(x,t)\tag{2}$$

式中: x 表示空间位置; t 表示时间。APAR(x,t)表示像元 x 在 t 月份吸收的光合有效辐射; $\epsilon(x,t)$ 表示像元 x 在 t 月份的实际光利用率。

总体技术路线可分为 3 个模块,数据收集、数据处理计算和结果与分析,按照公式(1),只要确定 3 个年份每个月的光合有效辐射(APAR)和实际光能利用率(ϵ),就能计算出每个月的植被 NPP 值,再累加各个月(1—12 月)的植被 NPP 得到不同年份植被 NPP 总量,路线中的关键点在于各个因子之间进行

计算时,需要统一像元大小和投影坐标。

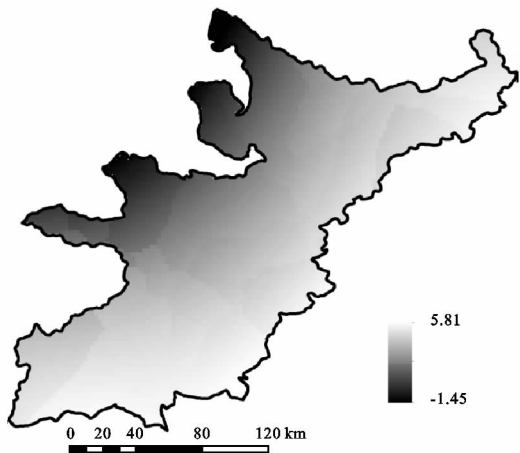


图 3 2009 年 1 月平均气温分布

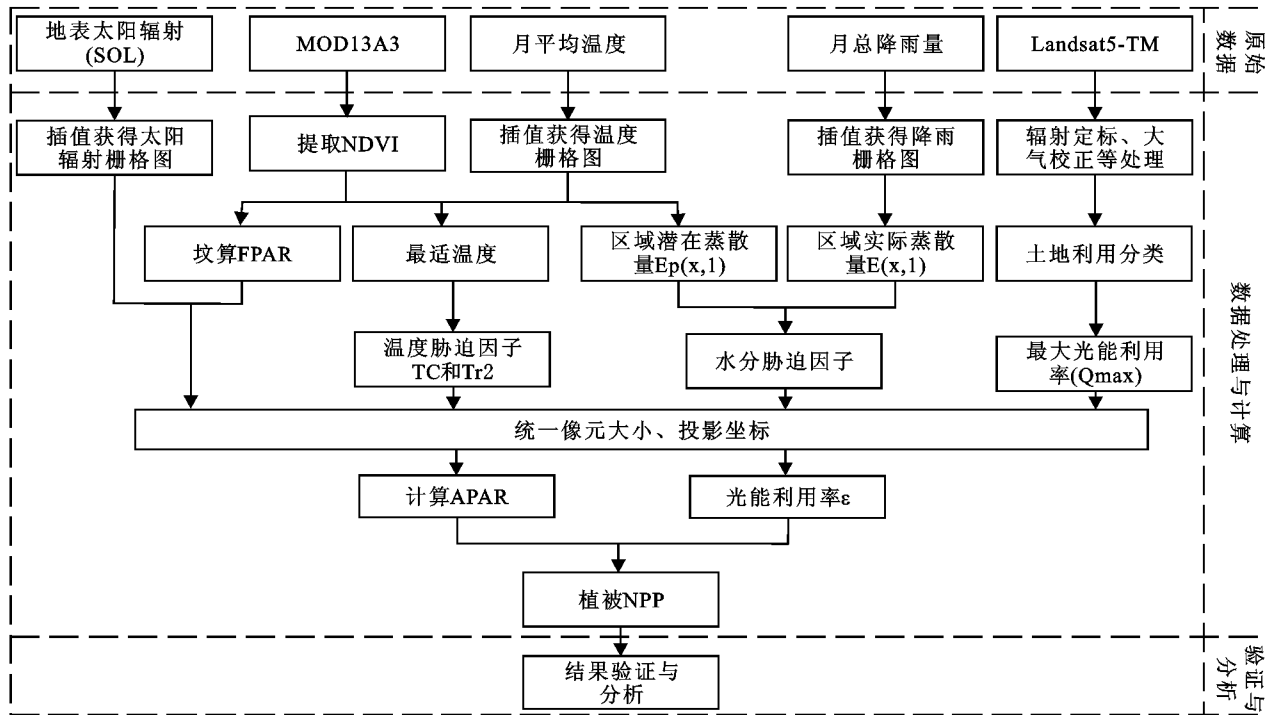


图 4 植被 NPP 估算总体技术路线

3.1 APAR 的估算

太阳辐射能是绿色植物进行光合作用的重要能量基础,植物吸收太阳辐射能并在光合作用下合成自身所需的有机物,这部分太阳辐射能称为光合有效辐射(APAR),它是波长范围处于可见光 380~710 nm 范围的太阳能。光合有效辐射是由植被层对入射光合有效辐射的吸收比例和太阳能辐射总量二者共同决定的。其计算公式如下:

$$APAR(x,t)=SOL(x,t)\times FPAR(x,t)\times 0.5\tag{3}$$

式中: $SOL(x,t)$ 表示 t 月在像元 x 处的太阳能辐射总量(MJ/m^2); $FPAR(x,t)$ 是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能有效辐射占太阳能总辐射的比例,FPAR 计算公式参考文献^[17]。 $SOL(x,t)$ 是由气象站提供的太阳总辐

射月值数据经过插值而获得的。

3.2 光能利用率 ϵ 的估算

光能利用率是进行植被 NPP 估算的 1 个重要参数,它是指在一定时间范围内植被单位面积上生产的干物质中所包含的化学潜能与同一时期投射到该面积上的光合有效辐射能之比^[18]。CASA 模型中认为,只有在理想条件下植被才具有最大光能利用率,而在实际情况下最大光能利用率主要受水分和温度的影响^[17],其计算公式如下:

$$\epsilon(x,t)=T_{\epsilon 1}(x,t)\times T_{\epsilon 2}(x,t)\times W_{\epsilon}(x,t)\times\epsilon_{\max}\tag{4}$$

式中: $T_{\epsilon 1}(x,t)$ 和 $T_{\epsilon 2}(x,t)$ 是温度胁迫因子,表示温度对光能利用率的胁迫作用; $W_{\epsilon}(x,t)$ 为水分胁迫因子,反映水分条件的影响; ϵ_{\max} 是理想条件下的最大光能利用率(gC/MJ),不同植被类型 ϵ_{\max} 的取值不同。

温度胁迫因子的确定方法参考文献^[17],水分胁迫因子 $W_e(x,t)$ 计算公式参考文献^[17,19-21]。CASA 模型中全球植被的最大光能转化率取值为 0.389 gC/MJ 。

3.3 CASA 模型的修订

CASA 模型是应用于全球尺度上的植被 NPP 估算,而本次研究的区域是汶川地震中的极重灾区,该研究区相对于全球范围来说为较小尺度,直接照搬原 CASA 模型将存在一些问题。另外,CASA 模型使用的遥感数据是 NOAA/AVHRR 数据,而本研究使用的遥感数据是 MODIS 数据,相比于 NOAA/AVHRR 数据,MODIS 数据具有更高的空间分辨率和数据质量^[22],因此在对地震灾区植被净初级生产力估算之前,要对 CASA 模型的一些参数以及计算方法进行进一步的修订,以便提高 CASA 模型在较小尺度应用的适应性以及植被 NPP 估算结果的准确性。研究中对以下参数进行了修订:

(1) 对 FPAR 进行修订。本研究采用 MODIS 数据产品 MOD15 的光合有效辐射算法中设计的 NDVI-FPAR 查找表法来计算植被层对入射光合有效辐射的吸收比例 FPAR,公式如下^[23]:

$$FPAR(x,t)=\begin{cases} 0 & NDVI(x,t)\leq 0.075 \\ \min\{1.16\times NDVI(x,t)-0.0439,0.9\} & NDVI(x,t)>0.075 \end{cases}$$

(5)

式中:FPAR(x,t)表示 t 月份像元 x 处的植被层对入射光合有效辐射的吸收比例;NVDI(x,t)表示 t 月份像元 x 处的 NDVI 值。

(2) 对 ϵ_{\max} 进行修订。 ϵ_{\max} 是估算植被 NPP 的 1 个重要影响因子,一直以来学者们对它的取值有很大争议,本研究采用朱文泉(2006 年)模拟的中国典型植被的 ϵ_{\max} 数据作为研究区主要类型植被的 ϵ_{\max} ^[24],其他类型地物的 ϵ_{\max} 仍采用 CASA 模型中 ϵ_{\max} 的固定值 0.389 gC/MJ ,从而确定地震灾区各种类型地物的 ϵ_{\max} 。

3.4 NPP 估算方法的验证

由于研究区内 NPP 实测数据甚少,因而将从以下方面对估算结果进行比较与验证:(1) 与其他人研究结果比较;(2) 与其他模型估算结果比较。首先,与其他人的研究结果进行比较。由于研究区域大小不一样,以及土地利用类型划分种类不一致,因而仅对主要植被类型的年平均 NPP 进行简单比较,见表 2。

从表中可以看出本研究估算的各种类型植被 NPP 年均值和其他研究者的估算值相差不大,其中,关于朱文泉的 CASA 模型、陶波的 CEVSA 模型的 NPP 估算数据都是全国尺度范围的数据,相对来说,本研究区尺度较小且不同区域植被类型和种类存在着明显差异,验证结果仅作为一个参考。进一步和刘

勇洪等人对于华北地区植被 NPP 估算结果进行对比,发现耕地和草地的 NPP 值略高,但耕地与朱文泉的研究结果较为接近,草地可能由于研究中将裸地归为草地,增大了草地的 NPP 值。另外,本研究估算的植被 NPP 均值与李贵才的估算均值最为接近,处在刘勇洪估算的植被 NPP 均值范围内,估算结果具有较高的准确性。

表 2 改进 CASA 模型与其他研究者估算结果的比较
gC/(m²·a)

植被类型	本研究改进 CASA	李贵才 CASA	刘勇洪 CASA	朱文泉 CASA	陶波 CEVSA
乔木	614	533	343~560		
灌丛	513	362	343~560	471	272
耕地	529		363~376	560	649
草地	481		97~278	504	
园地	464				
NPP 均值	498	493	17~545	466	512

数据来源:李贵才,中国地区^[25];刘勇洪,华北地区^[26];朱文泉,中国地区^[18];陶波,中国地区^[27]。

其次,与其他模型估算值比较。本研究通过将估算结果与气候相关性统计模型 Thornthwaite Memorial 模型和 Miami 模型的植被 NPP 估算值进行比较来对改进 CASA 模型进行验证,见表 3,两种模型的具体原理见参考文献^[28-29],结合表可以看出不同模型对灾区植被 NPP 的估算结果不同。整体而言,改进 CASA 模型估算的不同类型植被的 NPP 值小于 Miami 模型和 Thornthwaite Memorial 模型的估算结果,并且 Miami 模型和 Thornthwaite Memorial 模型估算的不同植被类型 NPP 之间也有差异,但 3 个模型的 NPP 均值却非常接近。

表 3 改进 CASA 模型与其他模型估算结果的比较
gC/(m²·a)

植被类型	Miami 模型	Thornthwaite Memorial 模型
乔木	634	624
灌丛	523	517
耕地	531	543
草地	491	493
园地	484	464
NPP 均值	536	539

通过研究区内均匀分布的样本点,还分别研究了改进 CASA 模型与 Thornthwaite Memorial 模型和 Miami 模型之间的相关性。结果表明,改进 CASA 模型与 Thornthwaite Memorial 模型估算的研究区 NPP 值具有良好的相关性,数据较为集中,相关系数达 $0.938\ 2$,而与 Miami 模型相关性稍差,估算结果整体较差,相关系数仅

为 0.694 3。这是因为 Miami 模型仅仅考虑了温度和降水对 NPP 的影响,而 Thornthwaite Memorial 模型和本

研究的 CASA 模型除了考虑了温度和降水外,还考虑了实际蒸散量,因而二者相关性较好(图 5)。

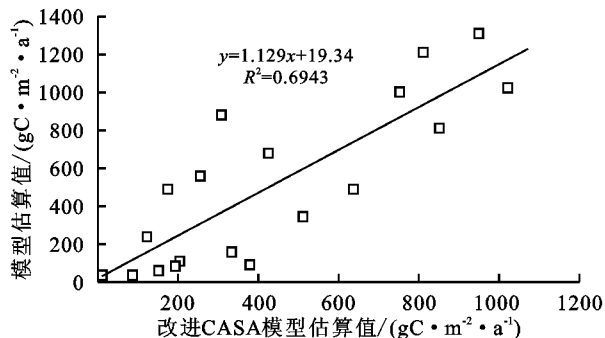
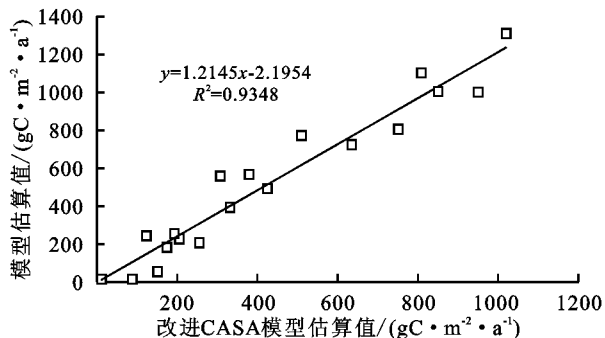


图 5 改进 CASA 模型与 Thornthwaite Memorial 模型或 Miami 模型的相关性分析

从以上结果可以看出,3 种不同模型估算的研究区 NPP 值之间均存在一定的差异。其原因如下:一是模型之间的自身差异。Miami 模型和 Thornthwaite Memorial 模型考虑的因子相对简单,生态理论基础相对薄弱,而本研究中改进的 CASA 模型为光能利用率模型,它是建立在植物光合作用过程和光能利用率的概念上,以植被光合作用机理作为基础,生态理论较强;二是不同模型所使用的参数存在差异。Miami 模型和 Thornthwaite Memorial 模型是植被生产力与环境因子的回归,忽略了植被覆盖类型等其他因子对 NPP 估算值的影响。而本研究采用的方法是在利用遥感数据提取地表植被覆盖信息的基础上计算的地震灾区植被 NPP,除了温度和降水外,同时

考虑了太阳辐射等众多因子对植被的影响,能比较真实地反映研究区植被 NPP 的时空分布状况,故更接近于实际的植被 NPP 值。

4 结果与分析

根据公式(5),分别计算不同年份 1—12 月植被层对入射光合有效辐射的吸收比例 FPAR,再由公式(3),(4)并结合文献^[21],计算不同年份各个月植被吸收的光合有效辐射 APAR 和实际光能利用率 ϵ ,按照公式(2)得到各个月的植被 NPP 值,最后将不同月份的植被 NPP 累加得震前 2007 年,震后 2009 年,恢复期 2011 年植被 NPP 总量,结果见图 6,其中黑色表示植被 NPP 值高,白色表示值低。

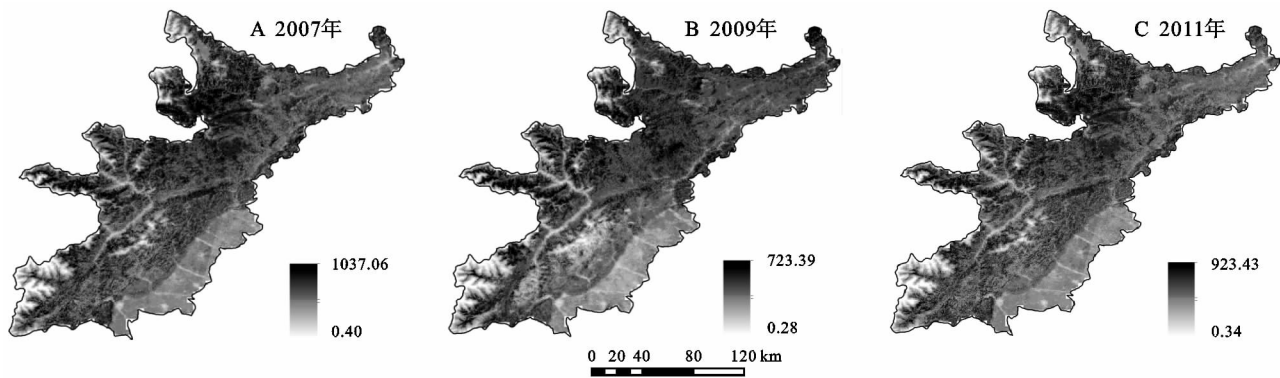


图 6 研究区植被 NPP 空间分布

由图简单计算看出,震前单位面积植被 NPP 最大值为 $1\,037.060\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,震后单位面积植被 NPP 最大值比震前减少 $313.672\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,而恢复期植被 NPP 单位面积最大值比震后增加 $200.041\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,但仍比震前低 $113.631\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,单从这一方面看,研究区地震前后植被 NPP 是处于先降低再上升这一状态;从植被 NPP 变化情况看,图(B)相比图(A),白色区域面积明显增加,表明汶川地震很大程度上降低了研究区植被 NPP,而图(C)较图(B)黑色区域面积有所增加,说明地震过后两年植被 NPP 有所增加。

对植被 NPP 估算结果进行统计分析,总面积 2.58 万 km^2 的研究区内,2007 年区域植被 NPP 平均值为 $581.873\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,年 NPP 总量为 14.452 亿 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;2009 年植被 NPP 平均值比 2007 年减少 $181.065\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,年 NPP 总量为 9.828 亿 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,减少了 31.99%;2011 年植被 NPP 平均值为 $510.585\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,相比 2009 年,植被 NPP 总量增加了 28.55%,但仍比 2007 年低 12.57%,植被 NPP 有所恢复,从灾区 3 个时间节点植被 NPP 标准差来看,地震导致区域植被 NPP 方差变小,经过两年恢复,植被 NPP 趋于稳定,见表 4。

表 4 地震前后 3 个时期植被 NPP

年份	植被净初级生产力				
	最小值/ ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	最大值/ ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	平均值/ ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	标准差/ ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	NPP 总和/ ($10^8 \text{gC} \cdot \text{a}^{-1}$)
2007	0.403	1037.873	581.873	183.684	14.452
2009	0.379	962.979	400.808	126.820	9.828
2011	0.387	1047.092	510.585	168.122	12.636

由于不同地区地理位置、地形地貌差异,加上降水、温度、太阳辐射等气象因素的影响,造就不同的区域环境,使得不同区域植被 NPP 值产生一定的空间差异性,按照研究区的行政区划统计植被 NPP 的空间分布情况,见表 5。

表 5 地震前后不同区域植被 NPP 贡献量统计

地区	2007 年		2009 年		2011 年	
	NPP 总量/ ($10^7 \text{gC} \cdot \text{a}^{-1}$)	所占 百分比/%	NPP 总量/ ($10^7 \text{gC} \cdot \text{a}^{-1}$)	所占 百分比/%	NPP 总量/ ($10^7 \text{gC} \cdot \text{a}^{-1}$)	所占 百分比/%
安县	7.011	4.851	4.645	4.726	6.149	4.866
北川县	18.437	12.757	12.948	13.175	16.352	12.941
都江堰市	6.328	4.379	3.934	4.003	5.099	4.035
茂县	22.012	15.231	15.05	15.314	18.984	15.024
绵竹市	6.532	4.52	3.966	4.035	5.314	4.205
平武县	36.598	25.323	25.186	25.627	34.818	27.555
青川县	15.699	10.863	12.365	12.582	14.197	11.235
什邡市	4.229	2.926	2.284	2.324	3.314	2.623
汶川县	20.968	14.509	13.804	14.046	16.705	13.22
彭州市	6.707	4.641	4.096	4.168	5.428	4.296
总和	144.521	100.000	98.278	100.000	126.360	100.000

从表 5 可以看出,3 个年份平武县植被 NPP 总量始终处于最高,各个年份均占到了研究区 NPP 总量的 25%以上;其次为茂县和汶川县,分别占到了研究区 NPP 总量的 15%和 13%左右;而占全区域 NPP 总量最少的是什邡市,仅占不到总量的 3%。地震灾区各行政区 NPP 分布格局主要是和植被分布有关,平武县,位于四川绵阳北部,其辖区内有王朗自然保护区、泗耳自然保护区、小河沟自然保护区、龙池坪森林公园等自然保护区,全县森林覆盖率达 40.6%,茂县和汶川县等地森林资源丰富,植被覆盖度高,而什邡市面积较小,并且大部分为城镇用地,植被分布较少,因而植被 NPP 较低。再者,2009 年各个地区 NPP 总量均低于 2007 年和 2011 年的 NPP 值,表明在遭遇强烈的地震灾害后,各个行政区植被均遭受一定程度上的破坏,并且可以得出在植被越密集的地区这种破坏表现的越发明显。而 2011 年各地区 NPP 总量虽高于 2009 年但仍然低于 2007 年的正常水平,这说明,灾区植被净初级生产力有所恢复但未达震前水平。

5 结论

(1) 灾后 2009 年植被 NPP 总量为 9.827 亿 gC/a ,相比灾前 2007 年减少了 31.99%,2011 年恢复期相比

2009 年增长了 28.55%,但仍比 2007 年低 12.57%,震后两年,灾区植被净初级生产力有所恢复,但未达到震前水平;

(2) 从不同区县的统计结果来看,离地震中心越近的地方,植被遭受的破坏程度越大,植被净初级生产力受到的削减程度越大,其恢复能力也越差,这与实际相符,因而,应当重点加强对震中及其周边地区的改善。

(3) 对比其他人的研究成果以及不同模型的估算结果,本研究提出的改进 CASA 模型在估算地震灾区植被 NPP 上,具有一定的可靠性。与传统方法相比较,基于 GIS 和 RS 的植被 NPP 估算方法具有省时、经济等特点,通过该种技术手段,结合遥感、气象等实测数据,本研究对由地质灾害诱发植被净初级生产力破坏极为严重的灾区进行了创新性研究,对比地震前后 3 个阶段,从理论层面估算了研究区植被净初级生产力恢复状况,并没有对估算结果进行实地考察验证,但本次研究的核心目标在于揭示研究区灾后植被净初级生产力恢复情况和变化趋势,为相关部门制定灾区生态重建和生态恢复计划提供科学依据,具有重要意义。

参考文献:

- [1] 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(5374): 237-240.
- [2] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(S1): 1-15.
- [3] Matsushita B, Tamura M. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 58-66.
- [4] Euskirchen E S, Chen J, Li H, et al. Modeling landscape net ecosystem productivity (LandNEP) under alternative management regimes[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 154(1): 75-91.
- [5] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D3): 5263-5283.
- [6] 董廷旭, 文星跃, 张新合, 等. 基于 GIS 的 5.12 地震北川县灾害区划研究[J]. *地域研究与开发*, 2011, 30(4): 135-140.
- [7] 埃瑟林顿 J R. 环境和植物生态学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [8] 李登科, 范建忠, 王娟. 基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2776-2782.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 刘世荣, 孙鹏森, 罗传文. 岷江上游生态水文研究图集[M]. 中国地图出版社, 2008.
- [12] 刘荣高, 刘洋, 刘纪远. MODIS 科学数据处理研究进展[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(2): 141-147.
- [13] 毕力格, 银山, 包玉龙, 等. 基于 TVDI 的内蒙古植被生长期干旱研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(10): 5945-5948.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 土地利用现状分类[S]. 北京: 中国标准出版社, GB/T21010—2007.
- [15] Cohen J. A coefficient of agreement for nominal scales [J]. *Educational and Psychological Measurement*, 1960, 20(1): 37-46.
- [16] Landis J R, Koch G G. An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers [J]. *Biometrics*, 1977: 363-374.
- [17] 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(4): 811-841.
- [18] 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.
- [19] Zhou G, Zhang X. Study on climate-vegetation classification for global change in China [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1995, 38(1): 8-17.
- [20] 张志明. 计算蒸发量的原理与方法[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1990.
- [21] Fang J, Yoda K. Climate and Vegetation in China III water balance and distribution of vegetation [J]. *Ecological Research*, 1990, 5(1): 9-23.
- [22] 刘闯, 葛成辉. 美国对地观测系统 (EOS) 中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 遥感数据的特点与应用 [J]. *遥感信息*, 2000(3): 45-48.
- [23] Myneni R B, Knyazikhin Y, Zhang Y, et al. MODIS leaf area index (LAI) and fraction of photosynthetically active radiation absorbed by vegetation (FPAR) product [J]. *Transactions of the Institute of Electronics Information & Communication Engineers B*, 1999, 84: 902-911.
- [24] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 中国典型植被最大光利用率模拟[J]. *科学通报*, 2006, 51(6): 700-706.
- [25] 李贵才. 基于 MODIS 数据和光能利用率模型的中国陆地净初级生产力估算研究[J]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- [26] 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.
- [27] 陶波, 李克让, 邵雪梅, 等. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟[J]. *地理学报*, 2003, 58(3): 372-380.
- [28] Lieth H. Modeling the primary productivity of the world [M] // *Primary Productivity of the Biosphere*. Springer Berlin Heidelberg, 1975: 237-263.
- [29] Lieth H, Box E. Evapotranspiration and primary productivity: CW Thornthwaite memorial model [J]. *Publications in Climatology*, 1972, 25(3): 37-46.