

# 中国陆地植被净初级生产力遥感估算

朱文泉 潘耀忠 张锦水\*

(北京师范大学资源学院 环境演变与自然灾害教育部重点实验室 北京 100875)

**摘要** 该文在综合分析已有光能利用率模型的基础上,构建了一个净初级生产力(*NPP*)遥感估算模型,该模型体现了3方面的特色:1)将植被覆盖分类引入模型,并考虑植被覆盖分类精度对*NPP*估算的影响,由它们共同决定不同植被覆盖类型的归一化植被指数(*NDVI*)最大值;2)根据误差最小的原则,利用中国的*NPP*实测数据,模拟出各植被类型的最大光能利用率,使之更符合中国的实际情况;3)根据区域蒸散模型来模拟水分胁迫因子,与土壤水分子模型相比,这在一定程度上对有关参数实行了简化,使其实际的可操作性得到加强。模拟结果表明,1989~1993年中国陆地植被*NPP*平均值为 $3.12 \text{ Pg C} (1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g})$ ,*NPP*模拟值与观测值比较接近,690个实测点的平均相对误差为4.5%。进一步与其它模型模拟结果以及前人研究结果的比较表明,该文所构建的*NPP*遥感估算模型具有一定的可靠性,说明在区域及全球尺度上,利用地理信息系统技术将遥感数据和各种观测数据集成在一起,并对*NPP*模型进行参数校正,基本上可以实现全球范围不同生态系统*NPP*的动态监测。

**关键词** 生物量 遥感 模拟 *NPP* *NDVI* 中国

## ESTIMATION OF NET PRIMARY PRODUCTIVITY OF CHINESE TERRESTRIAL VEGETATION BASED ON REMOTE SENSING

ZHU Wen-Quan, PAN Yao-Zhong, and ZHANG Jin-Shui\*

Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract** *Aims* Net primary productivity (*NPP*) is a key component of the terrestrial carbon cycle. Model simulation is commonly used to estimate regional and global *NPP* given difficulties to directly measure *NPP* at such spatial scales. A number of *NPP* models have been developed in recent years as research issues related to food security and biotic response to climatic warming have become more compelling. However, large uncertainties still exist because of the complexity of ecosystems and difficulties in determining some key model parameters.

*Methods* We developed an estimation model of *NPP* based on geographic information system (GIS) and remote sensing (RS) technology. The vegetation types and their classification accuracy are simultaneously introduced to the computation of some key vegetation parameters, such as the maximum value of normalized difference vegetation index (*NDVI*) for different vegetation types. This can remove some noise from the remote sensing data and the statistical errors of vegetation classification. It also provides a basis for the sensitivity analysis of *NPP* on the classification accuracy. The maximum light use efficiency (*LUE*) for some typical vegetation types in China is simulated using a modified least squares function based on NOAA/AVHRR remote sensing data and field-observed *NPP* data. The simulated values of *LUE* are greater than the value used in the CASA model and less than the values simulated with the BIOME-BGC model. The computation of the water restriction factor is driven with ground meteorological data and remote sensing data, and complex soil parameters are avoided. Results are compared with other studies and models.

*Important findings* The simulated mean *NPP* in Chinese terrestrial vegetation from 1989–1993 is  $3.12 \text{ Pg C} (1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g})$ . The simulated *NPP* is close to the observed *NPP*, and the total mean relative error is 4.5% for 690 *NPP* observation stations distributed in the whole country. This illustrates the utility of the model for the estimation of terrestrial primary production over regional scales.

**Key words** biomass, remote sensing, simulation, *NPP*, *NDVI*, China

植被生产力是人类生活所需食物、原料及燃料的来源。植物通过光合作用将太阳能固定并转化为植物生物量。单位时间和单位面积上,绿色植物通过光合作用所产生的全部有机物同化量,即光合总量,叫总初级生产力( $GPP$ );净初级生产力( $NPP$ )则是从光合作用所产生的有机质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分。 $NPP$ 作为地表碳循环的重要组成部分,不仅直接反映了植被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,而且是判定生态系统碳源/汇和调节生态过程的主要因子(Field *et al.*, 1998),在全球变化及碳平衡中扮演着重要的作用。自20世纪60年代以来,各国学者对 $NPP$ 的研究倍受重视,国际生物学计划(International biological programme, IBP, 1965~1974)期间,曾进行了大量的植物 $NPP$ 的测定,并以测定资料为基础联系气候环境因子建立模型对植被 $NPP$ 的区域分布进行评估,如Miami模型、Thornthwaite纪念模型、Chikugo模型等(Lieth, 1975; Uchijima & Seino, 1985)。建立于1987年的国际地圈-生物圈计划(International geo-biosphere programme, IGBP)全球变化与陆地生态系统(Global change and terrestrial ecosystems, GCTE)和最近出台的京都协定(Kyoto protocol)均把植被的 $NPP$ 研究确定为核心内容之一。

早在20世纪70年代Monteith就发现 $NPP$ 和植被吸收的光合有效辐射( $APAR$ )之间存在着稳定的关系:当水分和肥料处在最适的条件下,农作物的 $NPP$ 与 $APAR$ 具有很强的线性相关(Monteith, 1972)。进一步的研究发现, $NPP$ 与 $APAR$ 的时间序列积分有较好的相关性(Landsberg, 1996),但是不同的植被类型,或者同一植被类型在不同的生长条件下,所获得的经验模型存在着差异,这就意味着植被的 $NPP$ 受植物本身及其生长环境的影响(Evans, 1989)。

尽管早期的一些科学家利用 $APAR-NPP$ 这一关系在小范围的实验点上开展植被 $NPP$ 估算,取得了一定的成功,但在区域及全球尺度上,由于气候类型和植被类型的多样,其应用受到了很大的限制,问题主要存在于一些参数的确定上,具体表现在以下几个方面:1)很多光能利用率模型本身考虑了不同的植被覆盖类型对 $NPP$ 估算结果的影响,但也仅仅是在光合有效辐射吸收比例( $FPAR$ )的估算过程中,根据不同的植被覆盖类型来确定比值植被指数最大值(Field *et al.*, 1995; 朴世龙等, 2001; 彭少麟等, 2000),没有考虑不同的植被覆盖分类精度对 $NPP$

估算结果的影响。2)全球植被最大光能利用率的取值对 $NPP$ 的估算结果影响很大。Monteith最初的“光能利用率”模型包含一个最大光能利用率( $\epsilon_{max}$ ),然后再根据不同的环境胁迫因子对其进行调整。早期的研究都是假设 $\epsilon_{max}$ 为一个不变的常量,如CASA模型就将全球最大光能利用率取值为 $0.389 \text{ g C} \cdot \text{MJ}^{-1}$ (Field *et al.*, 1995),后来的研究表明,月最大光能利用率的取值因不同的植被类型而有所不同(彭少麟等, 2000; Russell *et al.*, 1989),可能与自养呼吸耗减量的差异有关(Hunt, 1994)。3)光能利用率模型需要估算水分胁迫对植物的影响,在估算水分胁迫因子时,一般是用土壤水分子模型(Field *et al.*, 1995; 朴世龙等, 2001),其中涉及到大量的土壤参数,如田间持水量、萎蔫含水量、土壤粘粒和砂粒的百分比、土壤深度等,而通常情况下,这些土壤参数都是根据土壤类型来确定,其精度难以保证。

根据光能利用率模型的建模思路,本文所构建的 $NPP$ 遥感估算模型准备在以下3个方面作进一步的改进与完善:1)将植被覆盖分类引入模型,并考虑植被覆盖分类精度对 $NPP$ 估算的影响,由它们共同决定不同植被覆盖类型的 $NDVI$ 最大值,由此获得各植被覆盖类型的比值植被指数最大值,最后实现 $FPAR$ 的估算;2)根据误差最小的原则,利用中国的 $NPP$ 实测数据,模拟出各植被类型的最大光能利用率,使之更符合中国的实际情况;3)利用气象数据(温度、降水、太阳净辐射),结合已有的区域蒸散模型来实现水分胁迫因子的估算,这样一方面可以保证数据源的可靠性和可获得性,另一方面则在一定程度上对有关参数实行了简化,使其实际的可操作性得到加强。

## 1 数据来源与预处理

### 1.1 遥感数据

本研究所利用的气象卫星NOAA/AVHRR  $NDVI$ 数据来源于美国地球资源观测系统(Earth resources observation system, EROS)数据中心的探路者数据集(Pathfinder data set, PDS),图像空间分辨率为 $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ ,时间分辨率为月,时间序列为1989年1月~1993年12月。所有数据均进行了几何校正、大气纠正、去云处理以及传感器退化性能的订正(Los, 1993; Tucker *et al.*, 1994; Myneni *et al.*, 1998),使数据具有一致性和可比性。数据最后经投影变换处理,选取的投影方式为波尔伯斯等积圆锥投影(Al-

bers conical equal area projection )

1.2 气象数据

本研究所利用的气象数据来源于中国气象局 , 时间为 1989 年 1 月 ~ 1993 年 12 月 , 数据内容为月降水量、月平均气温、月总太阳辐射 , 以及各气象站点的经度、纬度和海拔高度 , 共涉及全国 726 个气象站点。模拟最大光利用率时需要栅格化的气象数据 , 并从空间上与遥感数据相匹配。利用 GIS 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 插值和基于 DEM 的插值( 潘耀忠等 2004 ) 获取像元大小与 NDVI 数据一致、投影相同的气象要素栅格图。

1.3 土地覆盖分类图

土地覆盖分类图来源于欧盟联合研究中心( The joint research centre , JRC ) 原始分类图像由中国科学院遥感应用研究所编译 , 分类用的遥感数据为 2000 年的 SPOT-VGT 1 km 数据 , 共分了 22 类( 表 1 ) 检验后的总体分类精度为 61.8%。

1.4 NPP 实测资料

NPP 实测数据来源于中国前林业部 1989 ~

1993 年的林业普查资料( Ni *et al.* , 2001 ) , 共包括中国 17 种森林类型 690 个观测站点的植被属性数据 , 数据内容为立木年龄、叶面积指数、总生物量和净初级生产力 , 以及各观测点的经度、纬度和海拔高度。净初级生产力的单位是干物质的重量 , 在转换成以碳为单位(  $\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  ) 时乘了一个 0.475 的系数( Scurlock *et al.* , 1999 )。

2 模型构建

NPP 估算模型的总体设计如图 1 所示。模型中所估算的 NPP 可以由植物吸收的光合有效辐射 ( APAR ) 和实际光能利用率 (  $\epsilon$  ) 两个因子来表示 , 其估算公式如下 :

$$NPP(x,t)=APAR(x,t)\times\epsilon(x,t)\tag{1}$$

式中 ,  $APAR(x,t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月吸收的光合有效辐射 (  $\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$  ) ,  $\epsilon(x,t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月的实际光能利用率 (  $\text{g C}\cdot\text{MJ}^{-1}$  )。

2.1 APAR 的估算

利用遥感数据估算光合有效辐射 ( PAR ) 中被植物叶子吸收的部分 ( APAR ) 是根据植被对红外和近

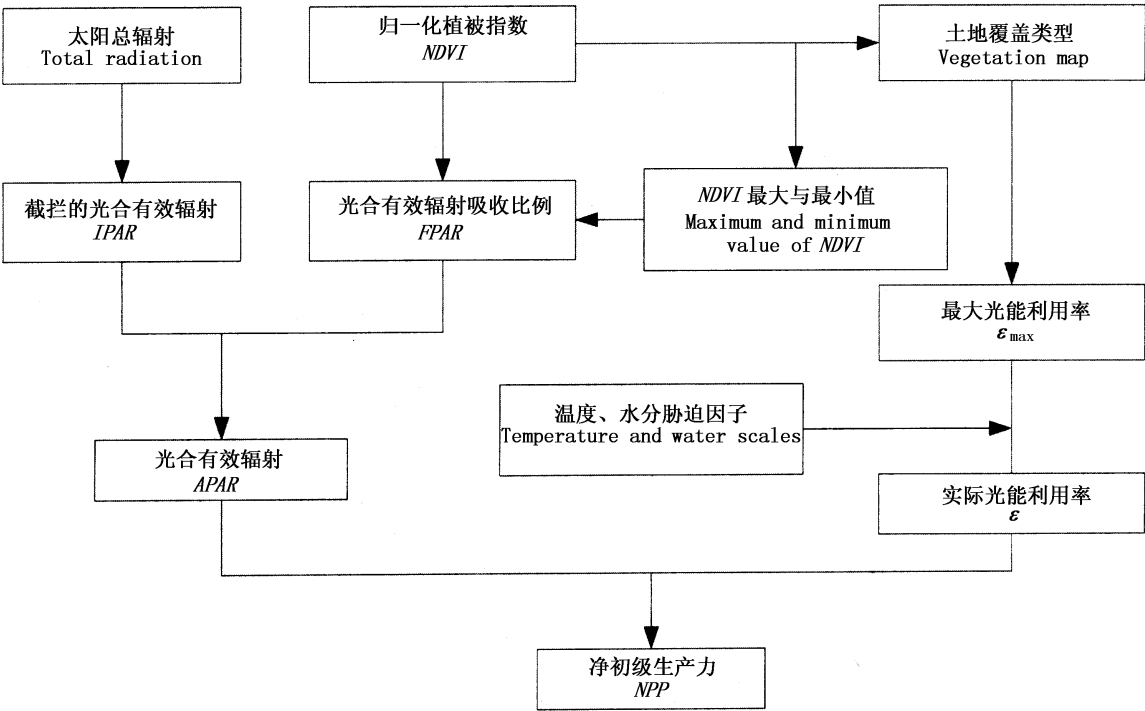


图 1 净初级生产力( NPP )估算模型总体框架

Fig.1 Frame of net primary productivity ( NPP ) Estimation Model  
NDVI : Normalized difference vegetation index IPAR : Intercepted photosynthetically active radiation FPAR : Fraction of photosynthetically active radiation  
APAR : Absorbed photosynthetically active radiation  $\epsilon_{\max}$  : Maximum light use efficiency  $\epsilon$  : Actual light use efficiency

红外波段的反射特征实现的。光合有效辐射(  $PAR$  ,  $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$  )是植物光合作用的驱动力 ,它与生物量有很强的相关性。植被吸收的光合有效辐射取决于太阳总辐射和植物本身的特征 ,可用公式( 2 )计算。

$APAR(x,t)=SOL(x,t)\times FPAR(x,t)\times 0.5$  ( 2 )  
式中 , $SOL(x,t)$ 表示  $t$  月在像元  $x$  处的太阳总辐射量(  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$  ) ,  $FPAR(x,t)$ 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占太阳总辐射的比例。

2.1.1  $FPAR$  的估算

在一定范围内 , $FPAR$  与  $NDVI$  之间存在着线性关系( Ruimy & Saugier , 1994 ) ,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 ,即 :

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

式中 , $NDVI_{i,max}$  和  $NDVI_{i,min}$  分别对应第  $i$  种植被类型的  $NDVI$  最大值和最小值( 表 1 )。

进一步的研究表明 , $FPAR$  与比值植被指数

(  $SR$  )也存在较好的线性关系( Field *et al.* , 1995 ;Los *et al.* , 1994 ) ,可由公式( 4 )表示 :

$$FPAR(x,t)=\frac{SR(x,t)-SR_{i,min}}{(SR_{i,max}-SR_{i,min})}\times(FPAR_{max}-FPAR_{min})+FPAR_{min}$$
 ( 4 )

式中 , $FPAR_{min}$  和  $FPAR_{max}$  的取值与植被类型无关 ,分别为 0.001 和 0.95 ; $SR_{i,max}$  和  $SR_{i,min}$  分别对应第  $i$  种植被类型  $NDVI$  的 95% 和 5% 下侧百分位数( 表 1 ) , $SR(x,t)$  由公式( 5 )确定 :

$$SR(x,t)=\frac{[1+NDVI(x,t)]}{[1-NDVI(x,t)]}$$
 ( 5 )

通过对  $FPAR$ - $NDVI$  和  $FPAR$ - $SR$  所估算结果的比较发现 ,由  $NDVI$  所估算的  $FPAR$  比实测值高 ,而由  $SR$  所估算的  $FPAR$  则低于实测值 ,但其误差小于直接由  $NDVI$  所估算的结果 ,考虑到这种情况 ,Los ( 1998 )将这两种方法结合起来 ,取其平均值作为  $FPAR$  的估算值 ,此时 ,估算的  $FPAR$  与实测值之间的误差达到最小。本研究最终将公式( 3 )和( 4 )组合起来 ,取其平均值作为  $FPAR$  的估算值 :

$$FPAR(x,t)=\alpha FPAR_{NDVI}+(1-\alpha)FPAR_{SR}$$
 ( 6 )

式中 , $FPAR_{NDVI}$  为公式( 3 )所估算的结果 ; $FPAR_{SR}$  为公式( 4 )所估算的结果 ; $\alpha$  为两种方法间的调整系

表 1 各植被类型  $NDVI$  和  $SR$  的最大值与最小值  
Table 1  $NDVI_{max}$  ,  $NDVI_{min}$  ,  $SR_{max}$  and  $SR_{min}$  of typical vegetation types in China

代码 Code	植被类型 Vegetation type	像元数 Pixels	$NDVI_{max}$	$NDVI_{min}$	$SR_{max}$	$SR_{min}$
1	落叶针叶林 Deciduous needle-leaf forest	4 339	0.738	0.023	6.63	1.05
2	常绿针叶林 Evergreen needle-leaf forest	15 104	0.647	0.023	4.67	1.05
3	常绿阔叶林 Evergreen broad-leaf forest	6 502	0.676	0.023	5.17	1.05
4	落叶阔叶林 Deciduous broad-leaf forest	8 690	0.747	0.023	6.91	1.05
5	灌丛 Bush	11 905	0.636	0.023	4.49	1.05
6	疏林 Sparse woods	958	0.636	0.023	4.49	1.05
7	海边湿地 Seaside wetlands	287	0.634	0.023	4.46	1.05
8	高山、亚高山草甸 Alpine and sub-alpine meadow	11 675	0.634	0.023	4.46	1.05
9	坡面草地 Slope grassland	4 364	0.634	0.023	4.46	1.05
10	平原草地 Plain grassland	7 940	0.634	0.023	4.46	1.05
11	荒漠草地 Desert grassland	10 184	0.634	0.023	4.46	1.05
12	草甸 Meadow	11 773	0.634	0.023	4.46	1.05
13	城市 City	65	0.634	0.023	4.46	1.05
14	河流 River	958	0.634	0.023	4.46	1.05
15	湖泊 Lake	1 240	0.634	0.023	4.46	1.05
16	沼泽 Swamp	1 015	0.634	0.023	4.46	1.05
17	冰川 Glacier	1 887	0.634	0.023	4.46	1.05
18	裸岩 Bare rocks	4 528	0.634	0.023	4.46	1.05
19	砾石 Gravels	13 657	0.634	0.023	4.46	1.05
20	荒漠 Desert	12 661	0.634	0.023	4.46	1.05
21	耕地 Farmland	30 046	0.634	0.023	4.46	1.05
22	高山、亚高山草地 Alpine and sub-alpine plain grassland	10 931	0.634	0.023	4.46	1.05

$NDVI$  : Normalized difference vegetation index  $SR$  : Simple ration

数,在本研究中统一为 0.5(取二者的平均值)。

2.1.2 NDVI 最大值与最小值的确定

本研究中,NDVI 最大值是指植被刚好达到全覆盖状态下的 NDVI 值,并不是指某一植被类型 NDVI 实际能达到的最大值,为了消除植被分类以及 NDVI 数据本身所固有的误差,本模型将植被分类精度引进来,使 NDVI 最大值随分类精度的变化而变化。详细的计算过程请参看文献(Zhu *et al.*, 2006),所确定的各植被类型的 NDVI 最大值与最小值如表 1 所示。

2.2 光能利用率的估算

光能利用率是在一定时期单位面积上生产的干物质中所包含的化学潜能与同一时间投射到该面积上的光合有效辐射能之比。环境因子如气温、土壤

水分状况以及大气水汽压差等会通过影响植物的光合能力而调节植被的 NPP。在遥感模型中,这些因子对 NPP 的调控是通过最大光能利用率进行调节而实现的。

光能利用率的估算流程如图 2 所示。Potter 等(1993)认为在理想条件下植被具有最大光能利用率,而在现实条件下的最大光能利用率主要受温度和水分的影响,其计算如公式(7)所示。

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

(7)

式中, $T_{\epsilon 1}(x,t)$ 和 $T_{\epsilon 2}(x,t)$ 表示低温和高温对光能利用率的胁迫作用; $W_{\epsilon}(x,t)$ 为水分胁迫影响系数,反映水分条件的影响; $\epsilon_{\max}$ 是理想条件下的最大光能利用率( $\text{g C} \cdot \text{MJ}^{-1}$ )。

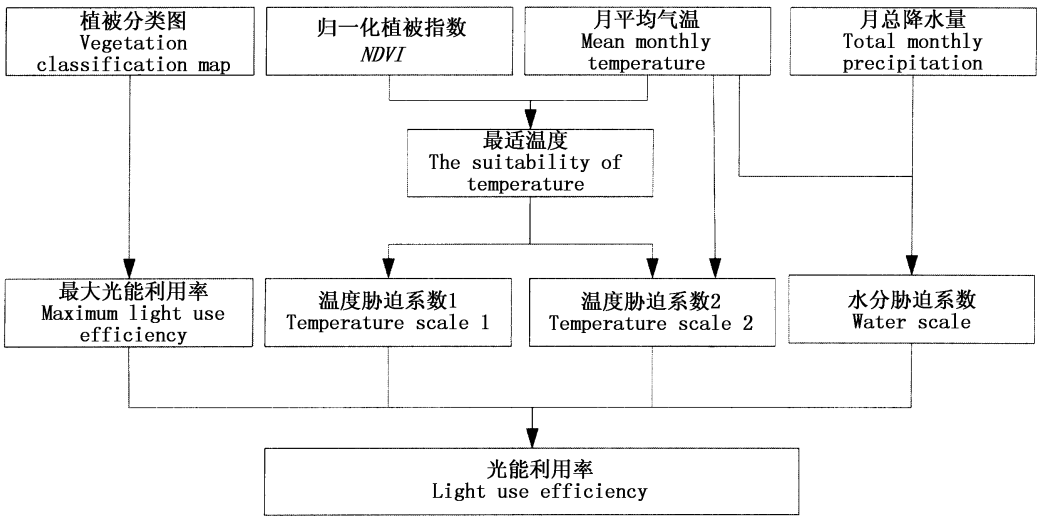


图 2 光能利用率估算流程图  
Fig.2 Flow chart of light use efficiency estimation

2.2.1 温度胁迫因子的估算

1) $T_{\epsilon 1}(x,t)$ 的估算: $T_{\epsilon 1}(x,t)$ 反映在低温和高温时植物内在的生化作用对光合的限制而降低净第一性生产力(Field *et al.*, 1995)。用公式(8)计算:

$$T_{\epsilon 1}(x,t) = 0.8 + 0.02 \times T_{\text{opt}}(x) - 0.0005 \times [T_{\text{opt}}(x)]^2$$

(8)

式中, $T_{\text{opt}}(x)$ 为植物生长的最适温度,定义为某一区域一年内 NDVI 值达到最高时的当月平均气温( $^{\circ}\text{C}$ );当某一月平均温度小于或等于 $-10^{\circ}\text{C}$ 时, $T_{\epsilon 1}(x,t)$ 取 0。

2) $T_{\epsilon 2}(x,t)$ 的估算: $T_{\epsilon 2}(x,t)$ 表示环境温度从最适温度 $T_{\text{opt}}(x)$ 向高温或低温变化时植物光能利

用率逐渐变小的趋势(Potter *et al.*, 1993; Field *et al.*, 1995)。这是因为低温和高温时高的呼吸消耗必将会降低光能利用率,生长在偏离最适温度的条件下,其光能利用率也一定会降低,用公式(9)计算:

$$T_{\epsilon 2}(x,t) = 1.184 / \{1 + \exp[0.2 \times (T_{\text{opt}}(x) - 10 - \pi(x,t))]\} \times 1 / \{1 + \exp[0.3 \times (-T_{\text{opt}}(x) - 10 + \pi(x,t))]\}$$

(9)

当某一月平均温度 $\pi(x,t)$ 比最适温度 $T_{\text{opt}}(x)$ 高 $10^{\circ}\text{C}$ 或低 $13^{\circ}\text{C}$ 时,该月的 $T_{\epsilon 2}(x,t)$ 值等于月平均温度 $\pi(x,t)$ 为最适温度 $T_{\text{opt}}(x)$ 时 $T_{\epsilon 2}(x,t)$ 值的一半。

2.2.2 水分胁迫因子的估算

地面干湿程度对于植物生长有着十分重要的作用。一般认为,土壤水分超过某一临界值时,蒸发速率不受土壤水分供应的限制,而只与气象条件有关;当土壤水分含量低于这一临界值时,蒸发速率除与气象条件有关外,还随土壤水分的有效性的降低而降低。因此,周广胜和张新时(1996a,1996b)用区域实际蒸散量与区域潜在蒸散量的比值来反映土壤水分干湿程度。

水分胁迫影响系数  $W_{\epsilon}(x,t)$  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,  $W_{\epsilon}(x,t)$  逐渐增大,它的取值范围为 0.5 (在极端干旱条件下)到 1 (非常湿润条件下)(朴世龙等,2001),由公式(10)计算:

$$W_{\epsilon}(x,t)=0.5+0.5\times E(x,t)/E_p(x,t) \quad (10)$$

式中,  $E(x,t)$  为区域实际蒸散量(mm),可根据周广胜和张新时(1995)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(张志明,1990;周广胜和张新时,1996a,1996b)。

2.2.3 最大光能利用率的确定

月最大光能利用率  $\epsilon_{\max}$  的取值因不同的植被类型而有所不同,由于全球最大光能利用率的取值对 *NPP* 的估算结果影响很大,人们对它的大小一直存在争议, Potter 等(1993)和 Field 等(1995,1998)认为全球植被的最大光能利用率为  $0.389\text{ g C}\cdot\text{MJ}^{-1}$ ;在没有气候和其它因素的限制时, Raymond 和 Hunt (1994)认为光能利用率的上限为  $3.5\text{ g C}\cdot\text{MJ}^{-1}$ ,而另外的研究结果则认为一些草本植物和其它植被的光能利用率在  $0.09\sim2.16\text{ g C}\cdot\text{MJ}^{-1}$  之间( Ruimy & Saugier, 1994; Paruelo *et al.*, 1997; McCrady & Jokela, 1998 ),彭少麟等(2000)利用 GIS 和 RS 估算了广东植被光能利用率,认为 CASA 模型中所使用的全球植被月最大光能利用率( $0.389\text{ g C}\cdot\text{MJ}^{-1}$ )对广东植被来讲偏低。

本文月最大光能利用率分 3 步来确定:首先计算所有像元的 *APAR*、温度和水分胁迫因子;然后,挑选研究区相同时间段的 *NPP* 实测数据;最后,根据误差最小的原则模拟出各植被类型的  $\epsilon_{\max}$ 。有关最大光能利用率的详细模拟过程和误差分析请参看文献( Zhu *et al.*, 2006 ),模拟结果见表 2。

表 2 中国典型植被类型的最大光能利用率(  $\epsilon_{\max}$  )  
Table 2 Maximum light use efficiency (  $\epsilon_{\max}$  ) of typical vegetation types in China

代码 Code	植被类型 Vegetation type	样本数 Samples	最小值	最大值	模拟值	<i>NPP</i> 实测 平均值	<i>NPP</i> 实测值 标准差	<i>NPP</i> 实测 值范围
			Min	Max	Simulated value	Observed <i>NPP</i>	<i>SE</i> of observed <i>NPP</i>	Range of observed <i>NPP</i>
			$\epsilon_{\max}(\text{ g C}\cdot\text{MJ}^{-1})$			$(\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$		$(\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$
1	落叶针叶林 Deciduous needle-leaf forest	39	0.159	2.453	0.485	490	160.9	179 ~ 824
2	常绿针叶林 Evergreen needle-leaf forest	110	0.204	2.553	0.389	396	121.2	179 ~ 806
3	落叶阔叶林 Deciduous broad-leaf forest	356	0.256	2.521	0.692	672	271.9	114 ~ 1 669
4	常绿阔叶林 Evergreen broad-leaf forest	142	0.407	2.194	0.985	1 017	278.9	407 ~ 1 913
5	针阔混交林 Needle and broad-leaf mixed forest	21	0.242	0.74	0.475	472	128.3	257 ~ 717
6	常绿、落叶阔叶混交林 Evergreen and deciduous broad-leaf mixed forest	22	0.461	1.295	0.768	723	141.4	414 ~ 1 098
7	灌丛 Bush	9			0.429	364		
8	草地 Grassland				0.542	231	64.9	
9	耕地 Farmland				0.542			
10	其它 Others				0.542			

*NPP* :净初级生产力 Net primary productivity

### 3 NPP 模型验证

#### 3.1 与实测数据的比较

1989~1993 年中国陆地生态系统平均 NPP 分布如图 3 所示,NPP 模拟值与实测值的比较见表 3 和图 4。总体来看,NPP 的空间分布趋势符合中国的实际情况,690 个点的 NPP 观测值与模拟值也比较接近,平均值都在  $650\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  左右,二者相差  $43\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,平均相对误差(即模拟值减去观测值,再除以观测值,然后乘以 100%)为 4.5%。模拟值所得到的总体标准差(259.2)低于观测值的标准差(313.9),说明模拟值的波动范围小于观测值,这主要有两方面的原因,一是因为最大光能利用率是通过模拟得到,最后应用到同一植被类型的所有像元,这在无形中对 NPP 模拟值作了一次平滑处理;二是因为大尺度的遥感数据本身可以反映植被

的渐变过程,而观测点的取样面积一般在数公顷左右,很难代表一个真实像元( $8\text{ km}\times 8\text{ km}$ )的植被状况,尤其是在取样不典型的情况下,同一类型的植被,它们本身的实测值也会差异很大。从不同的森林类型来看,NPP 的模拟值均落在观测值的范围之内,而且 NPP 的模拟平均值也基本上接近实测平均值。

从图 4 可以看出,成对的模拟值与实测值之间的相关性是比较低的, $R$  值仅为 0.49,考虑到生态环境、数据源及尺度转换上的差异,大尺度的 NPP 精度验证本身也存在着一定的不可比性,要想获得观测数据与大尺度模拟数据间的典型相关是不可能的,但在实测数据样方比较典型、面积足够大、数量足够多、抽样时间也比较一致的情况下,平均值之间还是存在一定的可比性。表 3 的数据表明,当样方数量较多时(如冷杉(*Abies*)-云杉(*Picea*)林、典型

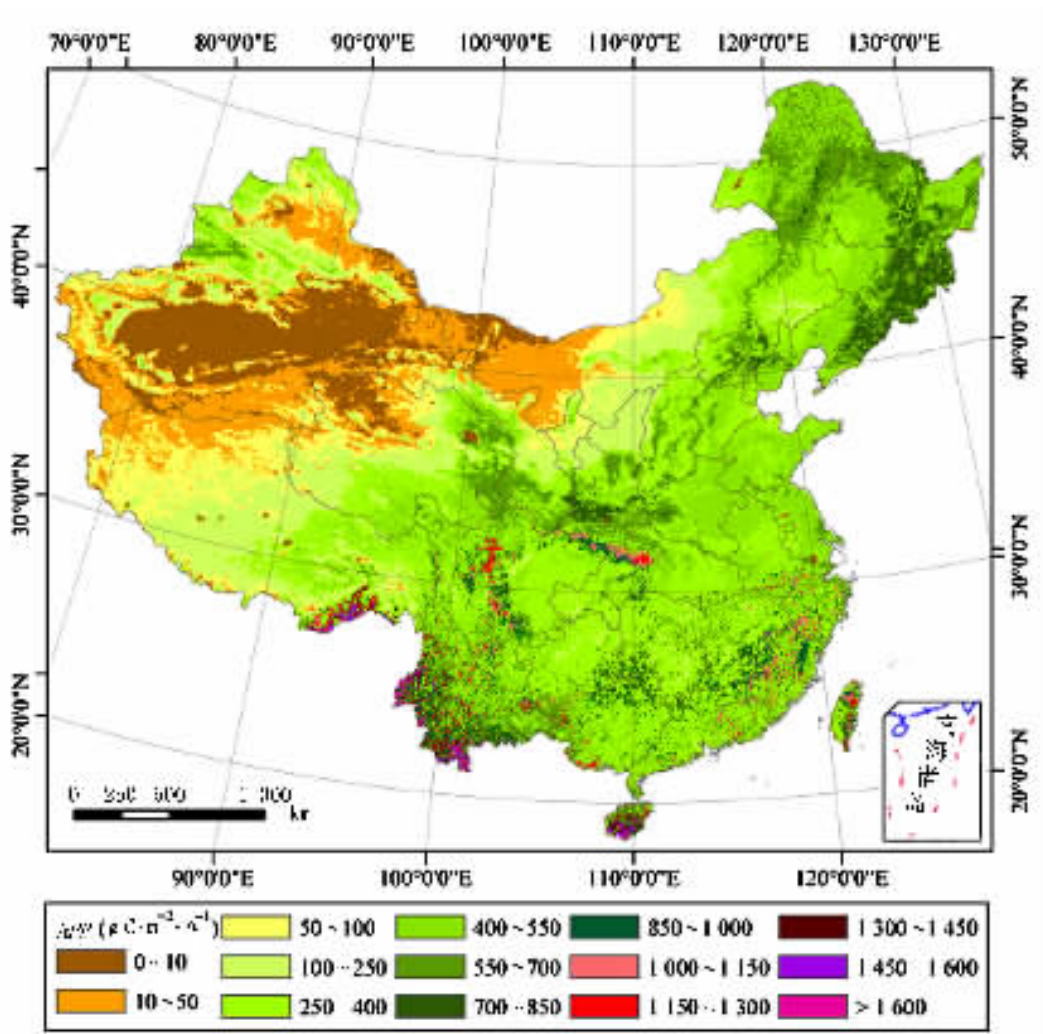


图 3 1989~1993 年中国陆地生态系统植被净初级生产力(NPP)平均值  
Fig.3 Spatial distribution of mean net primary productivity(NPP) in Chinese terrestrial ecosystem between 1989 and 1993

表 3 净初级生产力( *NPP* )模拟值与实测值的比较  
Table 3 Comparison of simulated net primary productivity( *NPP* ) and observed *NPP*

森林类型 Forest type	样本数 Samples	实测值( $\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )				模拟值( $\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )				平均相对误差( % ) Mean relative error
		Observed <i>NPP</i>				Simulated <i>NPP</i>				
		最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 SE	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 SE	
1 北方森林 Boreal forest										
落叶松 <i>Larix</i> forest	39	179	824	490	160.9	152	626	447	115.3	4.9
针阔混交林 Coniferous broad-leaf mixed forest	21	257	717	472	128.3	348	559	469	49.7	6.2
冷杉-云杉林 <i>Abies-Picea</i> forest	101	179	806	403	123.6	111	585	372	103.8	-0.2
山地杨桦林 Montane <i>Populus-Betula</i> forest	72	270	1 314	681	230.1	198	1 135	694	139.2	12.3
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest	9	258	387	317	37.1	48	425	354	116.9	13.1
2 落叶阔叶林 Deciduous broad-leaf forest										
典型落叶阔叶林 Typical deciduous broad-leaf forest	41	259	704	518	116.5	214	862	663	145.9	36.1
杜加依林 Tugai forest	8	114	430	259	118.3	186	426	270	88.9	19.6
3 常绿阔叶林 Evergreen broad-leaf forest										
典型常绿阔叶林 Typical evergreen broad-leaf forest	129	478	1 577	1 041	249.4	401	1 753	927	246.3	-5.0
常绿-落叶阔叶林 Evergreen-deciduous broad-leaf mixed forest	22	414	1 098	722	141.4	493	1 099	688	155.4	-1.2
硬叶常绿阔叶林 Sclerophyllous evergreen broad-leaf forest	9	407	651	542	73.3	401	1 221	872	297.8	59.3
4 热带雨林、季雨林 Rain forest and monsoon forest	4	904	1 913	1 287	435.4	1 471	1 770	1 628	128.8	36.5
5 温带针叶林 Temperate coniferous forest										
油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> forest	22	269	637	468	112.6	356	828	609	132.1	35.9
6 亚热带针叶林 Subtropical coniferous forest										
华山松与黄山松林 <i>Pinus armandi</i> , <i>P. taiwanensis</i> and <i>P. densata</i> forest	35	260	845	566	157	198	1136	649	201.2	23.7
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	86	328	1 669	791	339.9	401	1 115	608	136.8	-10.5
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forest	59	378	1 431	831	249.2	364	904	564	115.5	-27.2
云南松林 <i>Pinus yunnanensis</i> and <i>P. khasya</i> forest	19	395	773	604	117.8	425	1 225	836	195.4	44.8
柏林 <i>Cupressus</i> forest	14	342	1 023	587	200.7	198	1 136	611	240.6	13.4
合计 Total	690	114	1 913	684	313.9	48	1 770	641	259.2	4.5

常绿阔叶林),它们的相对误差较小,这在一定程度上说明了模拟结果的可靠性。Ni(2003)利用平均值法对中国森林清查的点数据进行尺度扩张,得到 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的栅格数据,并与机理模型LPJ-DGVM(The lund-potsdam-jena dynamic global vegetation model)的估算结果进行了比较。结果表明,尽管两套数据的*NPP*平均值和取值范围比较接近(实测数据的平均

值为 $567\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,范围在 $103.5\sim 1\,813.5\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间,模拟数据的平均值为 $606.3\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,范围在 $108.5\sim 1\,404.5\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间),但二者之间无明显相关性( $R^2=0.104$ )。这可能与4个方面的原因有关:*NPP*数据质量、模型本身的缺点、不同的空间尺度以及人类干扰(Ni,2003)。

3.2 与其它模型和研究结果的比较



自国际生物学计划( IBP )以来 ,许多学者结合 *NPP* 观测数据 ,建立了一系列的 *NPP* 估算模型。Ruimy 和 Saugier( 1994 )把这些模型概括为 3 类 ,即统计模型、参数模型和过程模型。统计模型也称为气候相关模型 ,以 Miami 模型( Lieth , 1972 ) Thornthwaite Memorial 模型( Lieth & Box , 1972 ) Chickugo 模型( Uchijima & Seino , 1985 )为代表 ,它们是利用气候因子( 温度、降水等 )来估算 *NPP* ,因此大部分统计模型估算的结果是潜在的植被生产力。参数模型结合植被吸收的光合有效辐射和光能利用率两个因子来估算 *NPP* ,其中把光能利用率看成是只取决于植被类型的变量。过程模型是在参数模型上的引申 ,其中最为普遍的处理方式是在参数模型基础上加上温度、水分及养分等参数 ,代表性的模型有 TEM( Terrestrial ecosystem model )模型( McGuire *et al.* , 1995 ) BIOME-BGC( Biome bio-geochemical cycles model )模型( Running & Hunt , 1993 ) CEVSA( Carbon exchange between vegetation , soil and atmosphere )模型( Woodward *et al.* , 1995 ; Cao & Woodward , 1998 )等。中国的一些学者利用上述模型对中国陆地生态系统 *NPP* 作了估算( 朴世龙等 , 2001 ;孙睿和朱启疆 , 2000 ;陈利军等 , 2001 ) ,平均值在 1.95 ~ 6.13 Pg C 之间。

通过采用全国 726 个气象站点的气象数据 ,利用 Miami 和 Thornthwaite 模型对中国陆地植被 *NPP* 进行了计算。从各植被类型的统计数据来看( 表 4 ) ,Miami 模型仅仅考虑了温度和降水对 *NPP* 的影响 ,估算结果与实测值偏差较大 ,估算的 1989 ~ 1993 年中国陆地生态系统 *NPP* 平均值为 3.91 Pg C ; Thornthwaite 模型因采用了实际蒸散量 ,而实际蒸散量取决于太阳辐射、温度、降水、气压和风速等多因子的影响 ,故估算的结果与实测值偏差较小 ,所估算的全国 *NPP* 为 3.71 Pg C ;本文模型所估算的全国 *NPP* 为 3.12 Pg C ,明显低于 Miami 模型和 Thornthwaite 模型的估算结果。由于这两个气候相关模型在计算时未考虑地表植被覆盖状况 ,所估计的是潜在的 *NPP* ,而本文则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现实 *NPP* ,故比它们的计算值偏小应属正常。

就全国尺度的 *NPP* 模拟结果与其它研究结果的比较来看 ,各植被类型间均存在一定的差异( 表 4 )。从全国 *NPP* 的总量来看 ,差别也比较大 :朴世龙等( 2001 )利用 CASA 模型对中国 1997 年的 *NPP* 进行了估算 ,总量为 1.95 Pg C ,由于所取的最大光

能利用率(  $0.389\text{ g C}\cdot\text{MJ}^{-1}$  )对中国某些植被来说有些偏低( 彭少麟等 , 2000 ) ,其估算结果明显偏小 ;陶波( 2003 )利用 CEVSA 模型估算的 1982 ~ 2000 年中国 *NPP* 总量在 3.06 ~ 3.61 Pg C 之间 ,平均为 3.27 Pg C ,而 1989 ~ 1993 年的平均值为 3.29 Pg C ;GLOPEM 估算的结果为 2.76 ~ 3.31 Pg C ,平均为 3.00 Pg C ;孙睿和朱启疆( 2000 )利用光能利用率模型估算 1993 ~ 1994 年中国的 *NPP* 为 2.645 Pg C ;陈利军等( 2001 )运用遥感手段估算了 1990 年中国陆地植被 *NPP* ,总量为 6.13 Pg C ,结果明显偏高 ,可能与用于计算的数据精度较粗有关。

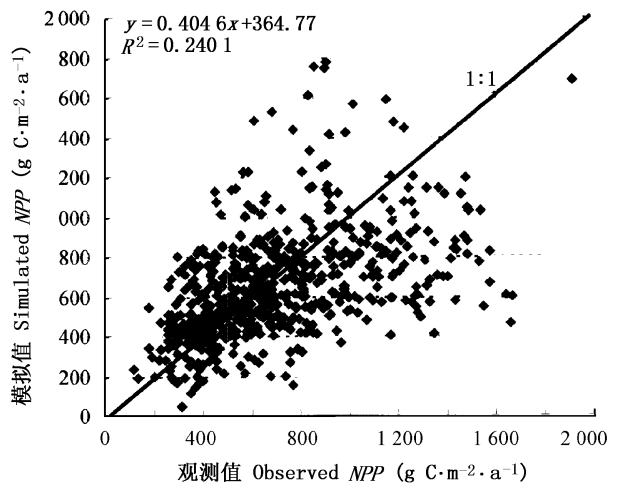


图 4 净初级生产力( *NPP* )模拟值与实测值的比较  
Fig.4 Comparison of simulated net primary productivity ( *NPP* ) and observed *NPP*

4 讨 论

值得注意的是 ,本文所估算的水体( 湖泊和河流 )、冰川、裸岩等无植被地带 ,其 *NPP* 值也比较高( 表 4 ) ,尤其是水体 ,而实际情况下 ,这些无植被地带的 *NPP* 应该为 0。这主要是由遥感数据本身的空间分辨率决定的 ,对于像元为  $8\text{ km}\times 8\text{ km}$  的 *NDVI* 数据和植被分类数据 ,一般的河流、湖泊以及小面积分布的冰川、裸岩等均因面积过小而无法反映出来 ,更何况还存在混合像元的问题 ,如果某个像元刚好跨在水域和植被上 ,当水域占的比例比较大时 ,在分类上有可能被分为水体 ,而实际上里面还包含有植被的成分 ,在遥感数据上则可能表现为一定的 *NDVI* 值。实际情况也是如此 ,在  $8\text{ km}$  的 *NDVI* 数据上 ,我们基本上分不出长江和黄河 ,即使在洞庭湖和鄱

表 4 本文 *NPP* 模型模拟值同其它模型及研究结果的比较, *NPP* 平均值单位为  $\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , *NPP* 总量单位为  $10^{12}\text{ g C}\cdot\text{a}^{-1}$

Table 4 Comparison of simulated *NPP* in this paper with that of other models, *NPP* mean unit:  $\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , *NPP* total unit:  $10^{12}\text{ g C}\cdot\text{a}^{-1}$

代码 Code	植被覆盖类型 Vegetation type	像元数 Pixels	模拟值 Simulated <i>NPP</i>		实测值 <sup>1) 2)</sup> Observed <i>NPP</i>		Miami 模型 Miami model		Thornthwaite 模型 Thornthwaite model		CASA 模型 <sup>3)</sup> CASA model	CEVSA 模型 <sup>4)</sup> CEVSA model	罗天祥 <sup>1)</sup>	刘明亮 (2001)	孙睿和 朱启疆 (2000)
			平均值 Mean	总和 Total	范围 Range	平均值 Mean	平均值 Mean	总和 Total	平均值 Mean	总和 Total	平均值 Mean	平均值 Mean	平均值 Mean	平均值 Mean	平均值 Mean
1	落叶针叶林 Deciduous needle-leaf forest	3 086	438.8	86.6	179 ~ 824	490.0	270.7	53.5	350.2	69.2	432	379.1	460	585	281.7
2	常绿针叶林 Evergreen needle-leaf forest	14 579	367.1	342.5	179 ~ 806	395.5	740.9	691.3	691.6	645.3	354	515.0	439	587	540.9
3	常绿阔叶林 Evergreen broad-leaf forest	6 375	985.8	402.2	407 ~ 1 913	1 016.5	809.5	330.3	749.6	305.8	525	721.0	945	945	987.4
4	落叶阔叶林 Deciduous broad-leaf forest	7 083	642.9	291.4	114 ~ 1 669	671.8	449.1	203.6	453.4	205.5	304	517.6	548	928	443.5
5	灌木 Bush	11 287	367.7	265.6		364.0	627.5	453.3	590.7	426.7	283	272.0			348.7
6	疏林地 Sparse woods	959	465.0	28.5			839.8	51.6	776.7	47.7		532.0			
7	海边湿地 Seaside wet lands	271	375.4	6.5			831.5	14.4	767.7	13.3					
8	高山亚高山草甸 Alpine and sub-alpine meadow	10 582	349.8	236.9			323.4	219.0	335.8	227.4					
9	坡面草地 Slope grassland	4 095	507.4	133.0			625.5	163.9	583.7	153.0					
10	平原草地 Plain grassland	6 595	226.2	95.5		230.6	232.8	98.2	220.5	93.1		414.6		271	221.1
11	荒漠草地 Desert grassland	8 744	103.4	57.9			168.8	94.5	150.7	84.3					
12	草甸 Meadow	9 363	382.8	229.4			282.2	169.1	284.7	170.6					
13	城市 City	63	347.1	1.4			628.5	2.5	585.8	2.4					
14	河流 River	869	371.4	20.7			603.1	33.5	564.7	31.4					
15	湖泊 Lake	1 140	236.8	17.3			568.5	41.5	526.7	38.4					
16	沼泽 Swamp	767	556.1	27.3			419.2	20.6	451.9	22.2					
17	冰川 Glacier	1 659	89.4	9.5			213.6	22.7	199.7	21.2					
18	裸岩 Bare rocks	3 908	80.9	20.2			150.4	37.6	135.2	33.8					
19	砾石 Gravels	11 301	36.5	26.4			94.6	68.4	74.1	53.6					
20	荒漠 Desert	10 767	21.8	15.0			73.8	50.9	51.9	35.8	14				20.8
21	耕地 Farmland	26 406	426.5	720.8	239 ~ 760	532.9	558.7	944.2	524.8	886.9	216	648.8		752	405.2
22	高山亚高山草地 Alpine and sub-alpine plain Grassland	10 103	131.7	85.2			220.1	142.3	209.7	135.6					
	总计 Total	150 000		3 119.8				3 906.8		3 703.0					

*NPP*: 净初级生产力 Net primary productivity 1)引自 Ni 等(2001) From Ni *et al.* (2001) 2)引自樊江文等(2003) From Fan *et al.* (2003) 3)引自朴世龙等(2001) From Piao *et al.* (2001) 4)引自陶波(2003) From Tao (2003)

阳湖的中心地带,也只有少数几个像元的 *NDVI* 值较低(略高于 0);但青海湖和塔克拉玛干沙漠就不一样,中心的 *NDVI* 值基本为 0,所估算的 *NPP* 也为 0。

比较而言,遥感模型利用了全覆盖的 *NDVI* 数据,能比较真实地反映陆地 *NPP* 分布的实际情况,这是气候模型所无法比拟的;同时,*NPP* 遥感模型在解决问题中也具有很大的潜力,它不仅能实现植被 *NPP* 的大范围快速监测,而且有助于将环境变量和植被联系起来,并利用 *NPP* 定量描述环境与植被间的相互作用。鉴于计算 *NPP* 需要时间系列的数据,高频采样的卫星数据是很理想的数据源。虽然多光谱辐射仪 AVHRR 系列从 1981 年 7 月起开始持续接受遥感数据,但替代 AVHRR 的 NOAA VIS、法国的 VEGETATION,特别是拥有 36 个波段的 EOS MODIS 将会为未来提供持续的、增强的遥感动态监测能力。在全球尺度上,利用地理信息系统技术将遥感数据和各种观测数据集成在一起,并对 *NPP* 模型进行参数校正,基本上可以实现全球范围不同生态系统 *NPP* 的动态监测(陈利军等,2001)。

## 参 考 文 献

- Cao MK, Woodward FI (1998). Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 393, 249 – 252.
- Chen LJ (陈利军), Liu GH (刘高焕), Feng XF (冯险峰) (2001). Estimation of net primary productivity of terrestrial vegetation in China by remote sensing. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 43, 1191 – 1198. (in Chinese with English abstract)
- Evans J (1989). Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of  $C_3$  plants. *Oecologia*, 78, 9 – 19.
- Fan JW (樊江文), Zhong HP (钟华平), Liang B (梁颢), Shi PL (石培礼), Yu GR (于贵瑞) (2003). Carbon stock in grassland ecosystem and its affecting factors. *Grassland of China* (中国草地), 25(6), 51 – 58. (in Chinese with English abstract)
- Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P (1998). Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281, 237 – 240.
- Field CB, Randerson JT, Malmström CM (1995). Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51, 74 – 88.
- Hunt EJ (1994). Relationship between woody biomass and *PAR* conversion efficiency for estimating net primary production from *NDVI*. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 1725 – 1730.
- Landsberg JJ, Prince SD, Jarvis PG, McMurtrie RE, Luxmore R, Medlyn BE (1996). Energy conversion and use in forests: an analysis of forest production in terms of radiation utilization efficiency. In: Gholz HL, Nakane K, Shimoda H eds. *The Use of Remote Sensing in the Modeling of Forest Productivity*. Kluwer Academic Press, London, 273 – 298.
- Lieth H (1972). Computer mapping of forest data. In: Lieth H ed. *Proceedings of 51 Annual Meeting of the Society of American Foresters*. Society of American Section, Washington DC, 53 – 79.
- Lieth H (1975). Historical survey of primary productivity research. In: Lieth H, Whittaker RH ed. *Primary Productivity of the Biosphere*. Springer-Verlag, New York, 7 – 16.
- Lieth H, Box E (1972). Evapotranspiration and primary productivity. In: Thornthwaite W ed. *Memorial Model*. Publications in Climatology, New Jersey, 37 – 46.
- Liu ML (刘明亮) (2001). *Study on Carbon Storage and Vegetation Productivity in Chinese Terrestrial Ecosystem* (中国土地利用/土地覆被变化与陆地生态系统植被碳库和生产力研究). PhD Dissertation, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences. (in Chinese with English abstract)
- Los SO (1993). Calibration adjustment of the NOAA-AVHRR normalized difference vegetation index without resource to component channels 1 and 2 data. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1907 – 1917.
- Los SO (1998). *Linkages Between Global Vegetation and Climate: an Analysis Based on NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer Data*. PhD dissertation. National Aeronautics and Space Administration (NASA).
- Los SO, Justice CO, Tucker CJ (1994). A global  $1^\circ$  by  $1^\circ$  *NDVI* dataset for climate studies derived from the GIMMS continental *NDVI* data. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3493 – 3518.
- McCrary RL, Jokela EJ (1998). Canopy dynamics, light interception, and radiation use efficiency of selected loblolly pine families. *Forest Science*, 44, 64 – 72.
- McGuire AD, Melillo JM, Kicklighter DW, Joyce LA (1995). Equilibrium responses of soil carbon to climate change—empirical and process-based estimates. *Journal of Biogeography*, 22, 785 – 796.
- Monteith JL (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9, 747 – 766.
- Myneni RB, Tucker CJ, Asrar G, Keeling CD (1998). Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research*, 103, 6145 – 6160.
- Ni J (2003). Net primary productivity in forests of China: scaling-up of national inventory data and comparison with model predictions. *Forest Ecology and Management*, 176, 485 – 495.
- Ni J, Zhang XS, Scurlock JMO (2001). *NPP Multi-Biome: Chinese Forests Data, 1989 – 1994*. Available on-line from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA. <http://www.daac.ornl.gov>.
- Pan YZ (潘耀忠), Gong DY (龚道溢), Deng L (邓磊), Li J (李京), Gao J (高静) (2004). Smart distance searching-

- based and DEM-informed interpolation of surface air temperature of climatology in China. *Acta Geographica Sinica*, 59, 366 – 374. (in Chinese with English abstract)
- Paruelo JM, Epstei HE, Lauenroth WK, Burke IC(1997). *ANPP* estimates from *NDVI* for the central grassland region of the United States. *Ecology*, 78, 953 – 958.
- Peng SL (彭少麟), Guo ZH (郭志华), Wang BS (王伯荪) (2000). Use of GIS and RS to estimate the light utilization efficiency of the vegetation in Guangdong, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 20, 903 – 909. (in Chinese with English abstract)
- Piao SL (朴世龙), Fang JY (方精云), Guo QH (郭庆华) (2001). Application of CASA Model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 25, 603 – 608. (in Chinese with English abstract)
- Potter CS, Randerson JT, Field CB, Matson PA, Vitousek PM, Mooney HA, Klooster SA(1993). Terrestrial ecosystem production—a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7, 811 – 841.
- Raymond E, Hunt JR (1994). Relationship between woody biomass and *PAR* conversion efficiency for estimating net primary production from *NDVI*. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 1725 – 1730.
- Ruimy A, Saugier B (1994). Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research*, 97, 18515 – 18521.
- Running SW, Hunt ER Jr (1993). Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. In: Ehleringer JR, Field CB eds. *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*. Academic Press, San Diego, 141 – 158.
- Russell GJ, Arvis P, Monteith JL (1989). Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: Russell G, Jarvis P, Monteith J eds. *Plant Canopies: Their Growth, Form and Function*. Cambridge University Press, Cambridge, 21 – 40.
- Scurlock JMO, Cramer W, Cramer W, Olson RJ, Parton WJ, Prince SD (1999). Terrestrial *NPP*: towards a consistent data set for global model evaluation. *Ecological Applications*, 9, 913 – 919.
- Sun R (孙睿), Zhu QJ (朱启疆) (2000). Distributional and seasonal change of net primary productivity in China from April, 1992 to March, 1993. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 55, 36 – 45. (in Chinese with English abstract)
- Tao B (陶波) (2003). *Study on the Simulation of Net Primary Productivity and Net Ecosystem Productivity in Chinese Terrestrial Ecosystem* (中国陆地生态系统净初级生产力与净生态系统生产力模拟研究). PhD Disertation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resurces Research, Chinese Academy of Sciences. (in Chinese with English abstract)
- Tucker CJ, Newcomb WW, Dregne HE(1994). AVHRR datasets for determination of desert spatial extent. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3547 – 3565.
- Uchijima Z, Seino H (1985). Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetation. (1) Chikugo model for evaluating productivity. *Journal of Agricultural Meteorology*, 40, 343 – 353.
- Woodward FI, Smith TM, William R, Emanuel WR (1995). A global land primary productivity and phytogeography model. *Global Biogeochemical Cycle*, 9, 471 – 490.
- Zhang ZM (张志明) (1990). *Theory and Methods About Computing Evapotranspiration* (计算蒸发量的原理与方法). Chengdu Science and Technology University Press, Chengdu, 216 – 223. (in Chinese)
- Zhu WQ, Pan YZ, He H, Yu DY, Hu HB (2006). Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China. *Chinese Science Bulletin*, 51, 457 – 463.
- Zhou GS (周广胜), Zhang XS (张新时) (1995). A natural vegetation *NPP* model. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 19, 193 – 200. (in Chinese with English abstract)
- Zhou GS (周广胜), Zhang XS (张新时) (1996a). Study on climate vegetation classification for global change in China. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 38, 8 – 17. (in Chinese with English abstract)
- Zhou GS (周广胜), Zhang XS (张新时) (1996b). The Study on the Chinese natural vegetation net primary productivity in the global change. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 20, 11 – 19. (in Chinese with English abstract)

责任编辑:周广胜 责任编辑:刘丽娟