

基于 MODIS 晴空数据的森林日净第一性 生产力估算

陈良富^{①②*} 高彦华^{①③} 李 丽^① 柳钦火^① 顾行发^{①②}

(① 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; ② 国家航天局航天遥感论证中心, 北京 100101; ③ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 基于光能利用率模型提出了一个基于 MODIS 数据参数反演的日净第一性生产力估算模型. 其中包括基于植被冠层叶面积指数和地表反照率的光合有效辐射比例能量平衡模型, 基于大气气溶胶光学厚度、水汽含量和 Bird 模型相结合的光合有效辐射计算模型. 日净第一性生产力模型所需的主要参数从 MODIS 数据反演获得. 为了验证净第一性生产力结果的估算精度, 用中国生态系统研究网络 2003 和 2004 年千烟洲和长白山观测站点的日净第一性生产力观测数据和模型估算结果对比, 结果表明两者具有较好的一致性. 同时也将同期 NASA 的净第一性生产力产品加以对比, 结果表明千烟洲站点上 2004 年的 NASA 产品低估了净第一性生产力值, 但长白山站则高估了净第一性生产力结果.

关键词 MODIS 净第一性生产力 光合有效辐射比率 光合有效辐射 叶面积指数

对于全球的碳丢失问题(the missing carbon sink problem)^[1,2], 陆地生态系统被认为是最大的未知领域^[3]. 因此, 在整个碳循环中确定陆地生态系统的作用, 了解其短期和长期的动态过程具有十分重要的实际价值和科学意义. 在区域和全球尺度净第一性生产力(Net Primary Production, NPP)估算中, 遥感技术已经越来越得到重视. 如从卫星图像反演获得的植被指数和叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)在陆地生态系统模型中作为重要的输入参数^[4~7], 同时由 Monteith 首先提出的光能利用率模型^[8]已经被广泛用于 NPP 的遥感估算中^[9~11]. 在这些模型中, NPP 可以表示为

$$NPP = \varepsilon_n \times FPAR \times Q_{PAR}, \quad (1)$$

这里 ε_n 是光能利用率, FPAR 是植被冠层吸收的光合有效辐射比率(the Fraction of Photosynthetically

Active Radiation Absorbed by vegetation, FPAR), Q_{PAR} 是光合有效辐射 (Photosynthetically Active Radiation, PAR).

Q_{PAR} 是波长 400~700 nm 范围内被大气吸收和散射等削弱后穿过大气到达地表的太阳辐射. 在上述陆地生态系统 NPP 遥感模型中, Q_{PAR} 被简化为气象站观测到的总太阳入射辐射的 43%~44%左右, 然后通过有限站点观测值的内插获得区域尺度的太阳光合有效辐射值^[6,11,12]. 对没有或者站点稀少的地区插值的做法会带来较大的误差. 实际上 Q_{PAR} 与太阳入射角度、大气状况尤其是大气的气溶胶和水汽有关, 所以 Q_{PAR} 的计算必须考虑实际大气的气溶胶和水汽状况.

FPAR 是 NPP 模型中非常重要的参数. 在现有的 NPP 遥感模型, Glo-PEM 模型中的 FPAR 主要是来源于归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation

收稿日期: 2007-07-04; 接受日期: 2007-09-19

国家重点基础研究发展计划(编号: 2002CB412506)和国家自然科学基金项目(批准号: 40471092)资助

* E-mail: Lfchen@irsa.ac.cn

Index, NDVI)^[9], VMP 模型中则源于增强植被指数 (Enhanced Vegetation Index, EVI)^[11]. 这样从植被指数获得的 FPAR 受植被指数的制约, 因为植被指数依赖于观测角度、传感器的波段, 并且 NDVI 在 LAI 达到 3 以后就趋于饱和. 而实际上 FPAR 只和太阳的观测角度, 以及冠层的参数有关.

基于上述考虑, 很有必要开发更好模型直接从遥感观测数据中获得 PAR 和 FPAR. 针对这些问题, MODIS 数据由于其数据质量好波段多而被用于我们的 NPP 模型研究, 并且 NASA 的 MODIS 数据中心具有的 NPP 产品也可以作为对比, 当然野外通量观测塔的 NPP 数据被作为标准值对模型结果进行验证.

1 基于 MODIS 数据的 NPP 模型及参数化

1.1 基于 MODIS 数据的 NPP 模型

基于 MODIS 数据的 NPP 模型的形式如方程(1), 该模型中最重要的是 FPAR 和 PAR 的模型算法. FPAR 被定义为冠层吸收的光合有效辐射的比率, 根据能量平衡原理 FPAR 可以表达为

$$\text{FPAR} = 1 - p_{\text{gap}} - \alpha, \quad (2)$$

这里 p_{gap} 是冠层的孔隙率, 与冠层参数和观测角度有关, 可以通过下式计算获得,

$$p_{\text{gap}} = \exp[-\text{LAI} \cdot \Omega(\theta_s) \cdot G(\theta_s) / \mu_s], \quad (3)$$

这里 $\Omega(\theta_s)$ 和 $G(\theta_s)$ 分别是冠层叶子的聚集指数和太阳天顶角方向 (θ_s) 的削弱系数. 对于叶子随机分布的冠层 $\Omega(\theta_s)$ 假设为 1, μ_s 是 θ_s 的余弦函数. (3) 式中的 α 是反照率, 包括植被冠层和背景的散射, 在 400~700 nm 范围内的积分值. (2) 式中的 FPAR 值被低估了, 因为其不包括背景散射的光合有效辐射又被植被冠层阻截的部分. 所以, (2) 式中的 FPAR 模型改进为如下形式

$$\text{FPAR} = 1 - p_{\text{gap}} - \alpha + p_{\text{gap}} \alpha_b (1 - K_{\text{open}}), \quad (4)$$

这里 α_b 代表 400~700 nm 波段范围的土壤和枯枝落叶等背景反照率, K_{open} 是植被冠层顶部的开放度, 其主要描述背景散射的 PAR 中穿过冠层到达顶部的量. 这里引入的冠层开放度 K_{open} 可以表达为^[13]

$$K_{\text{open}} = \int_0^{\pi/2} p_{\text{gap}}(\theta) \sin 2\theta \cdot d\theta, \quad (5)$$

遥感观测的 PAR 模型可以提供 1 km 分辨率分布的 PAR 值. 太阳入射总辐射包括两部分, 一是只考虑大

气吸收的太阳直接辐射, 即不考虑大气散射; 另一部分是散射辐射. 太阳入射辐射可以表达为

$$E(\lambda) = E_d(\lambda) + E_s(\lambda), \quad (6)$$

这里脚注 d 和 s 分别代表直接辐射和散射辐射部分. 在可见光-近红外波段的太阳入射辐射的削弱主要包括: 臭氧吸收, 混合气体吸收(主要是氧气吸收), 水汽吸收, 大气分子散射, 气溶胶散射. 大气中的水汽含量和气溶胶可以直接从 MODIS 数据中反演获得. 这里需要特别重视 PAR 算法中的散射辐射, 其可以表达为

$$E_s(\lambda) = I_r(\lambda) + I_a(\lambda) + I_g(\lambda), \quad (7)$$

上式中 I_r , I_a 和 I_g 分别表示 Rayleigh 散射、气溶胶散射和地气之间的多次散射辐射. 其中地气之间的多次散射辐射, 对于陆地地表这部分散射可以表达为

$$I_g = E_d \cdot \alpha_{\text{BSA}} \cdot r + (I_r + I_a) \cdot \alpha_{\text{WSA}} \cdot r + \frac{[E_d \cdot \alpha_{\text{BSA}} \cdot r + (I_r + I_a) \cdot \alpha_{\text{WSA}} \cdot r]}{1 - \alpha_{\text{WSA}} \cdot r}, \quad (8)$$

这里的 α_{BSA} 和 α_{WSA} 分别是黑半球和白半球的反照率, r 是大气底层的反照率.

由于 MODIS 数据中有 3 个波段介于 400~700 nm 波段范围, 即 459~479, 545~565 和 620~670 nm 可以用于 PAR 的计算. 其中瞬时光合有效辐射 (Instantaneous Photosynthetically Available Radiation, IPAR) 是这 3 个 MODIS 波段的权重和, 日 PAR 则是根据太阳辐射日变化特点对 IPAR 进行的积分. 这里大气顶层的太阳辐射光谱主要来源于世界辐射中心资料^[14].

方程(1)中的光能利用率 ϵ_n 可以表示为

$$\epsilon_n = \epsilon_0 \times f(T) \times f(W), \quad (9)$$

式中 ϵ_0 是最佳环境下的最大光能利用率, $f(T)$ 和 $f(W)$ 是光合作用中的大气温度与植被水分限制函数. ϵ_0 是重要参数, 本文主要引用 Glo-PEM 模型的 ϵ_0 值^[9]. (9) 式中的 T 是日平均温度, 光合作用的温度限制函数 $f(T)$ 引自 Biome-BGC 模型^[10], 该模型为

$$f(T) = \begin{cases} \frac{\log(T+1)}{\log(T_{\text{opt}}+1)} & T < T_{\text{opt}} \\ \cos\left(\frac{T-T_{\text{opt}}}{T_{\text{max}}-T_{\text{opt}}}\right) \times \frac{\pi}{2} & T \geq T_{\text{opt}} \\ 0 & T < 0 \end{cases}, \quad (10)$$

这里 T_{opt} 是植被生长的最佳温度, T_{max} 是植被光合作用的最高温度, 一般设 40°C . $f(W)$ 是水分对光合作用的限制函数, 引用 VMP 模型的 $f(W)$ 算法^[11]

$$f(W) = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{max}}, \quad (11)$$

这里 $LSWI$ 可以从下式计算获得,

$$LSWI = (\rho_{nir} - \rho_{swir}) / (\rho_{nir} + \rho_{swir}), \quad (12)$$

其中 ρ_{nir} 和 ρ_{swir} 是 MODIS 传感器近红外 841~875 nm 和 1628~1652 nm 波段的反射率, 方程(11)中的 $LSWI_{max}$ 是植被生长期间的最大水分指数.

1.2 基于 MODIS 数据 NPP 模型参数化方法

在基于 MODIS 数据的 NPP 模型中, 光能利用率、FPAR 和 PAR 等模型均依赖于地表反射特性和大气的吸收与散射过程. 所以, 很有必要对基于 MODIS 数据的 NPP 遥感估算模型进行参数化, 具体包括大气水汽和气溶胶光学厚度反演, 地表的二向反射率、地表反照率和叶面积指数的反演等. 这里将 NPP 遥感模型中需要的参数的反演算法进行简要介绍.

首先在 MODIS 数据中将无云区区分出来以后, 对无云的 MODIS 像元进行大气水汽含量和气溶胶光学厚度的反演. 大气总水汽含量主要利用 MODIS 水汽吸收波段和相邻的大气窗口波段反射率的比值来获得^[15]. 气溶胶光学厚度的反演方法参考了 NASA 的 MODIS 气溶胶光学厚度的暗目标算法, 并针对基于稀疏植被地表建立反射率模型从卫星探测信息中区分地表反射部分的贡献, 完善了气溶胶光学厚度反演方法, 基于 6S 模式^[16]建立查找表反演获得气溶胶光学厚度.

反照率定义为地表反射的下行辐射占总下行辐射的比例, 反照率主要依赖于地表反射特性本身, 本文的反照率反演主要利用核驱动算法. 典型的核驱动模型由描述几何光学表散射特征及辐射传输体散射特征的核函数的线性组合而成^[17]

$$BRDF = f_{iso} + f_{geo}k_{geo} + f_{vol}k_{vol}, \quad (13)$$

式中 k_{geo} , k_{vol} 分别为几何光学及辐射传输核函数. 它们都是太阳天顶角、太阳方位角和相对方位角的函数; f_{iso} , f_{geo} 和 f_{vol} 分别为朗伯特特性散射、表散射和体散射所占权重. 由于核驱动模型是线性的, 而各个核函数只是角度的函数, 反演的核心就是得到各个核的权

重系数. 权重值主要利用已有的观测数据拟合获得, 获得权重系数后就可得波段黑半球(方向-半球)和白半球(半球-半球)积分:

$$a_{BSA}(i) = \sum_n f_n(i)h_n(\theta), \quad (14)$$

$$a_{WSA}(i) = \sum_n f_n(i)H_n, \quad (15)$$

其中 $f_n(i)$ 表示朗伯特特性散射、表散射和体散射中第 n 散射类型第 i 波段的权重系数, 式中的 h_n 和 H_n 可以分别表示如下:

$$h_n(\theta) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} k_n(\theta, \vartheta, \phi) \sin(\vartheta) \cos(\vartheta) d\vartheta d\phi, \quad (16)$$

$$H_n = 2 \int_0^{\pi/2} h_k(\theta) \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta, \quad (17)$$

在此基础上, 宽波段黑半球反照率 α_{BSA} 和白半球反照率 α_{WSA} 的转换函数分别根据文献^[18]算法完成.

LAI 是植被冠层的重要结构参数, LAI 的一个简单的反演方法就是建立植被指数与 LAI 的关系^[19]. 归一化植被指数(NDVI)和比值植被指数(SR)是反演 LAI 中应用最广的植被指数^[4,10]. 对于连续植被冠层, 植被辐射传输等物理模型被用于冠层的反射率的模拟以便获得 LAI, 如 SAIL 模型^[20]. 在我们的基于 MODIS 数据的 NPP 模型中, 作物和草地的 LAI 主要利用 SAIL 模型反演获得, 但对森林生态系统, LAI 的反演则主要基于冠层植被指数与地面 LAI 测量值建立的相关关系.

基于 MODIS 数据的 NPP 模型技术流程见图 1.

2 实验场与数据处理

2.1 实验场简介

选择 2 个森林生态系统实验场来验证本文的 NPP 模型, 实验场属于中国生态系统研究网络 (Chinese Ecosystem Research Network, CERN) 的千烟洲生态实验站和长白山生态实验站.

千烟洲站位于中国亚热带中部红壤丘陵区 ($115^{\circ}04'E$, $26^{\circ}44'N$). 土地总面积 204 hm^2 , 海拔高度在 $60\sim 115 \text{ m}$ 之间, 相对高度 $20\sim 50 \text{ m}$. 具有典型的亚热带季风气候特征, 植被属中亚热带常绿阔叶林带, 但原生植被已破坏殆尽, 千烟洲实验站现有林分基本为 1985 年前后营造的人工针叶林, 主要树种有马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb)、湿地松 (*Pinus elliottii* Engelm)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata* Hook) 以及木

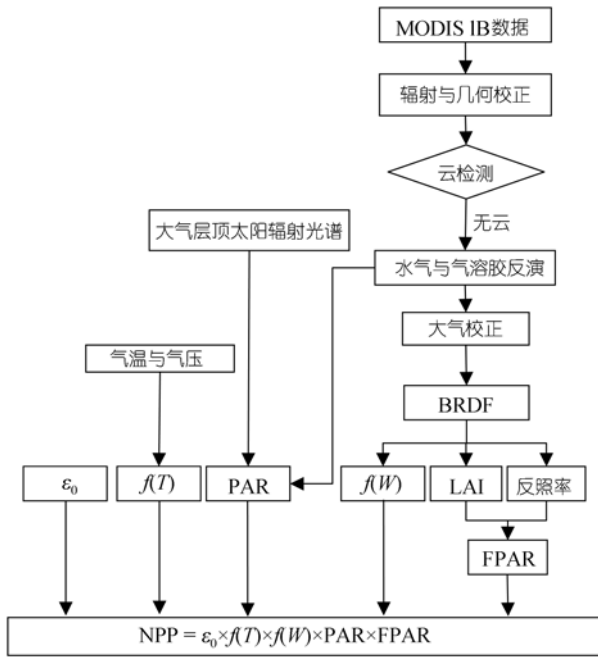


图 1 基于 MODIS 数据的 NPP 模型技术流程

其中 FPAR, PAR, $f(W)$, 大气水汽与气溶胶地表 BRDF 等均从 MODIS 数据中反演获得

荷(*Schima crenata* Korthals)、柑橘(*Citrus L*)等。长白山位于吉林省的东南部, 地处东经 $127^{\circ}42' \sim 128^{\circ}16'$, 北纬 $41^{\circ}41' \sim 42^{\circ}51'$, 属于受季风影响的大陆山地气候, 山顶海拔高度为 1340 m。长白山是一个以森林生态系统为主要保护对象的自然保护区, 森林覆盖率 87.9%, 长白山站位于长白山北坡。2 个生态站都建有通量观测塔, 塔上装有常规气象观测系统、涡动相关仪。涡动相关仪 LI-7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪是高速的、高精确性的、开路式的 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 气体分析仪, 能够在苛刻的空气环境中测量 CO_2 和 H_2O 的绝对浓度大小。在涡动相关的研究中, 这些数据和风速波动的数据相连, 可以确定 CO_2 和 H_2O 的流量大小。另外, 常规的气象观测系统中包括总辐射、净辐射、光合有效辐射表, 还有气温、气压, 以及土壤温度等测量传感器。有关通量塔的详细介绍和 CO_2 通量的算法见文献[21]。

2.2 MODIS 数据的获取与处理

MODIS 数据主要来自美国 NASA 的数据网站和作者单位的 MODIS 接收站获得的 L1B 格式数据。对千烟洲站主要获得了 2003 年和 2004 年 65 d 无云 MODIS1B 数据, 长白山站 2004 年 14 d 的无云数据。数据获得以后主要按照图 1 的技术流程进行一系列的数据处理, 为参数的进一步反演作好准备。

2.3 地基 LAI 测量和 MODIS 数据的 LAI 反演

在 3 天的时间里在千烟洲选择了 30 多个地面点, 进行了地面植被冠层 LAI 测量, 其中 13 个站点位于千烟洲实验站区域内, 其他点则沿两条线外延数公里分布。具体测量时间在 2003 年 11 月 27 日至 12 月 5 日期间, 由于丘陵地区很难沿一个山坡找到 100 m 长的平坦测量区, 所以选择 3 条并列间隔 5~10 m 左右的 40~60 m 测量线, 每条测量线与当时的太阳方位角相垂直。每个样区的 LAI 主要利用 TRAC 仪器[6,18]测量获得。并根据 TRAC 测量方法, 需要对测量植被的叶和束等参数进行测量, 对本区域的湿地松和马尾松等针叶林, 需要测量针叶和针叶束比参数进行测量。由于 TRAC 仪器比较适用于乔木和高灌木等, 所以在具有草冠分布的测量区中选择 2~3 个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方进行数字相机的拍照, 以进行草冠 LAI 的测量。对于每个测量区, 基于 TRAC 和草冠两个层次上的 LAI 测量结果之和, 就是测量样区的 LAI 值。在每个样区的 LAI 测量过程中, 在样区的中间点获得 GPS 定位数据, 以便在图像上为样区进行定位。为了建立地基测量获得的 LAI 与 MODIS 植被指数之间的关系, 利用了 30 m 空间分辨率的 Landsat TM 数据进行模型传递。从 1:50000 地形图和数字高程模型中获得 40 个地面控制点信息对 TM 影像进行几何校正, 几何校正精度在 ± 1 像元内, TM 影像采用 Gauss Kruger 20 投影。利用 TM 影像提供的辐射校正系数将灰度值转化为辐射值。TM 图像的大气校正选择能见度为 30 km 的乡村型气溶胶类型和中纬度冬季气大气模式利用 6S 软件[16]进行。

TM 影像经过校正后, 利用第 3 波段(红光波段), 第 4 波段(近红外波段)计算获得 SR 和 NDVI。

$$\text{LAI} = 0.50907 \times \text{SR} + 1.33445, \quad (18)$$

其中用于线性拟合的样本数为 29(见图 2)。对每个样区的 NDVI 和植被指数进行拟合分析, 发现在 LAI 达到 4 以后, NDVI 基本达到了饱和状况。为了使 LAI 与 SR 植被指数之间的关系能用于 MODIS 数据, 对每 33×33 矩阵的 30 m 分辨率 TM 红光和近红外波段反射率像元进行合并, 形成到 1 km 尺度的反射率。长白山的 LAI 获取使用了同样的方法, 这里我们直接引用文献[22]的结果。

2.4 气象参数

由于 NPP 遥感估算模型中的 PAR 计算, 除了需

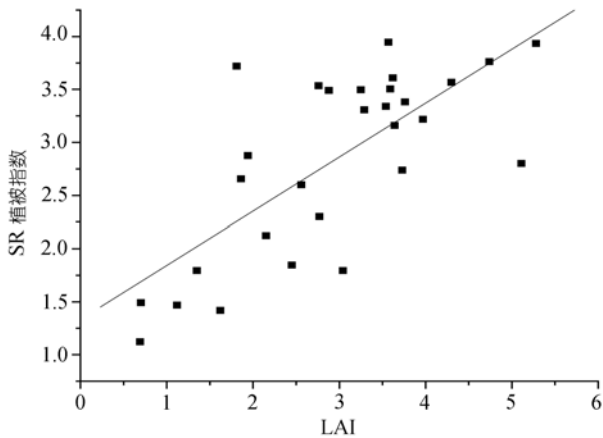


图 2 基于地面测量的 LAI 与 TM 影像获得的 SR 植被指数间建立的线性关系
 R^2 为 0.72, SD 为 0.60, $P < 0.0001$

要大气水汽和气溶胶外, 还需要几个气象参数, 如日均气温、气压, 相对湿度等. 这些数据主要直接来源于生态站通量塔上观测资料. 由于 NPP 遥感模型主要用于区域或全球尺度, 这几个气象参数则主要通过站点的插值获得.

2.5 利用 MODIS 数据估算 NPP 值

基于 NPP 估算的技术流程, MODIS 1B 经过辐射和几何校正后, 再经过云检测, 对无云像元进行大气水汽和气溶胶参数的反演, 并进而经过大气校正获得地表反射率和可见光波段的地表反照率, 其中包括黑半球反照率和白半球反照率. 基于地表反射率计算光合作用的水分限制函数值, 反演植被冠层 LAI. 同时, 基于大气水汽和气溶胶参数, 在气象参数的辅助下反演获得地表光合有效辐射值. 这样将上述各参数代入(1)式就可以得到 NPP 值. 为了验证遥感估算的 NPP 结果, 在 NPP 图像上将千烟洲和长白山通量塔位置像元的 NPP 值提取出来, 和点尺度的通量塔观测的 NPP 值进行对比.

3 结果

3.1 PAR 的反演结果与观测结果的比较

为了验证本文的地表反照率算法, 利用华北地区 16 天 MODIS 数据获得地表反照率, 并和 NASA 的反照率产品进行对比.

为了验证 PAR 算法, 将千烟洲 2003 年和 2004 年的无云 MODIS 数据进行了处理, 利用反演获得的

大气水汽含量和气溶胶参数结果, 结合气压等气象参数, 从 MODIS 数据终获得了 PAR 值. 将千烟洲通量观测塔获得的光合有效辐射数据, 和通量塔点地理位置对应像元的 PAR 值进行对比. 结果表明两者具有很好的一致性(图 3). 两者的线性相关系数达到 0.93, 平均误差在 8% 以内.

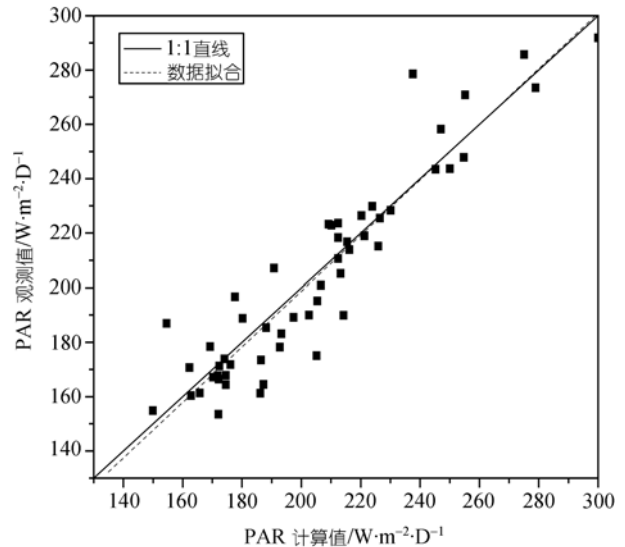


图 3

利用千烟洲通量观测塔获得的光合有效辐射值, 和基于 MODIS 无云数据反演得到的通量塔位置处的 PAR 值进行对比, 两者具有很好的线性关系. 该图中一共有 54 d 从 MODIS 数据反演得到的 PAR, 两者线性相关系数达到 0.93

3.2 基于 MODIS 的 NPP 估算

为了验证从 2003 年和 2004 年 MODIS 数据中估算的 NPP 结果, 千烟洲和长白山通量观测数据, 以及 NASA 的 NPP 产品结果被用来和模型计算结果进行比较. 在比较时, 提取模型计算结果中和通量塔地理位置对应的像元 NPP 值, 对 NASA 的 NPP 产品也同样提取相同位置的像元值. 从 MODIS 数据中估算的 NPP 值, 以及 NASA 的 NPP 产品在空间上是 1 km 尺度的, 虽然通量塔是点尺度的, 但可以反应该塔附近 1 km² 区域的值. 比较结果见图 4, 图中 7, 8 月的晴空卫星数据缺失较多, 但还是可以反应 NPP 的年变化趋势.

图 4(a)表明, 模型计算的 2003 年千烟洲 NPP 值和 NASA 的 NPP 产品具有较好的一致性, 但稍微比观测的日 NPP 值高些. 图 4(b)是 2004 年千烟洲通量塔处的 NPP 结果对比, 其中模型计算的 NPP 值和通

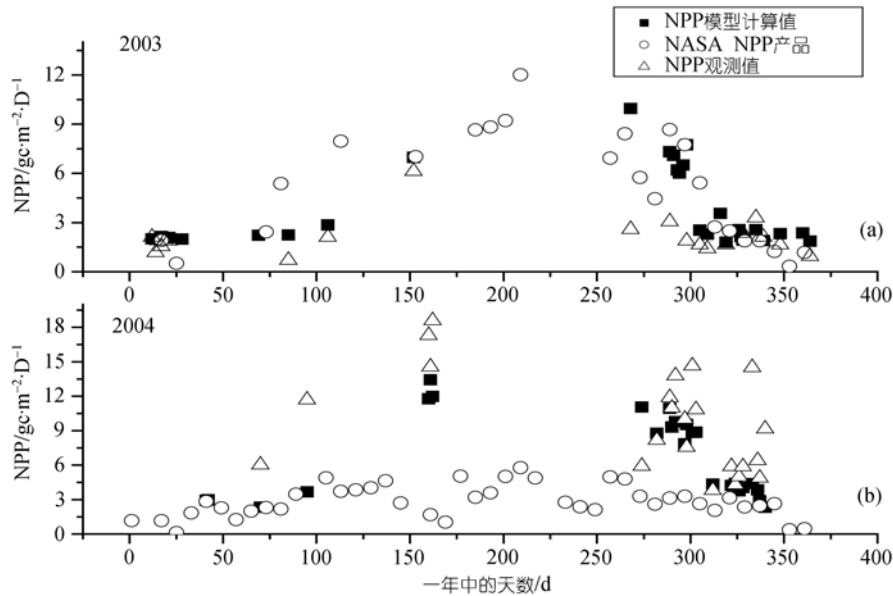


图 4 2003 年和 2004 年千烟洲通量塔处的 NPP 模型计算值和通量塔观测的 NPP 值、NASA 的 NPP 产品值对比结果

量塔观测的 NPP 具有很好的一致性, 但 NASA 的 NPP 产品值则没有夏季的峰值, 全年比较平缓. 2004 年 NASA 的 NPP 数据是 2006 年 3 月底从 NASA 网站 (<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>) 直接下载获得的.

图 5 表明, 模型计算的 2004 年长白山的 NPP 值和观测的 NPP 产品具有较好的一致性, 但 NASA 的 NPP 产品则在夏季明显偏高.

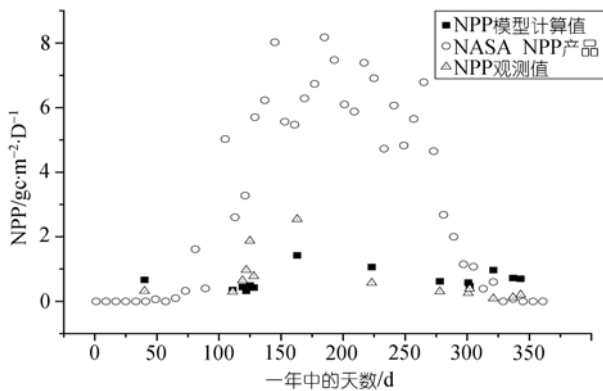


图 5

2004 年长白山通量塔处的 NPP 模型计算值, 和通量塔观测的 NPP 值、NASA 的 NPP 产品值对比结果

4 结论与讨论

总的来说, 通过利用 2003 年和 2004 年千烟洲和长白山通量观测塔的日 NPP 数据, 对基于 MODIS 数

据的 NPP 遥感模型估算结果进行对比, 该 NPP 遥感估算模型是可行的. 这个 NPP 估算模型的最大特点是可以获得具有区域分布的 1 km 分辨率 NPP 结果.

NPP 遥感模型中的 PAR 模型可以在无太阳辐射观测站点的广大区域获得 PAR 的分布, 可以减小这些地区因缺少站点的 PAR 插值带来的误差, 因为 PAR 模型考虑了实时大气水汽和气溶胶状况, 以及地表反照率等因素.

NPP 模型中的 FPAR 算法是基于植被冠层能量平衡原理的, 并且考虑地表反射辐射和植被冠层之间的多次散射辐射. MODIS 数据反演获得 LAI 和反照率值是模型的主要参数, 这两个参数结果与观测角度无关. (4) 式的 FPAR 模型避免了 Glo-PEM 模型^[9]和 VMP 模型^[11]中 FPAR 分别依赖于 NDVI 和 EVI 植被指数而受观测角度制约的不足.

NPP 模型在估算中存在一定的不确定性, 其主要表现在 NPP 与光能利用率、FPAR 和 PAR 之间成线性关系, FAPR 和 PAR 模型参数反演中存在的不足都会引起 NPP 的误差. 本文中 NPP 模型只关注了 PAR 和 FPAR 模型, 像元尺度的光能利用率模型研究将是下一步需要开展的工作.

NASA 的 NPP 产品被用来验证本文的 NPP 模型, 2004 年千烟洲站 NASA 的 NPP 结果对观测值明显偏小, 而长白山站 NPP 结果则明显偏大. 这可能与

NASA 的 NPP 产品关注的是全球尺度的大空间格局研究有关, 对区域尺度的 NPP 估算还需要进一步加以改进, 才能适应不同生态系统的 NPP 估算。

致谢 感谢中国生态系统研究网络 (CERN) 提供千烟洲站和长白山站的通量观测数据。

参 考 文 献

- 1 Broecker W S, Takahashi T, Simpson H H, et al. Fate of fossil fuel carbon dioxide and the global carbon budget. *Science*, 1979, (206): 409—418[DOI]
- 2 Tans P P, Fung I Y, Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, 1990, 247: 1431—1438[DOI]
- 3 Houghton R A. Terrestrial sources and sinks of carbon inferred from terrestrial data. *Tellus*, 1996, (48B): 420—432
- 4 Sellers P J, Meeson B W, F G Hall, et al. Remote sensing of the land surface for studies of global change: Models-Algorithms-Experiments. *Remote Sens Environ*, 1995, 51(1): 3—26[DOI]
- 5 Schimel D S. Terrestrial biogeochemical cycles: global estimates with remote sensing. *Remote Sens Environ*, 1995, 51(1): 49—56[DOI]
- 6 Chen J M, Liu J, Cihlar J, et al. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications. *Eco Model*, 1995, 124: 99—119[DOI]
- 7 Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393: 249—252[DOI]
- 8 Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J Appl Ecol*, 1972, 9: 747—766[DOI]
- 9 Prince S D, Goward S J. Global primary production: a remote sensing approach. *J Biogeograph*, 1995, 22: 815—835[DOI]
- 10 Running S W. Testing FOREST-BGC ecosystem process simulations across a climatic gradient in Oregon. *Ecol Appl*, 1994, 4(2): 238—247[DOI]
- 11 Xiao X, Hollinger D, Aber J. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needle leaf forest. *Remote Sens Environ*, 2004, 89: 519—534[DOI]
- 12 Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote Sens Environ*, 1997, 62: 158—175[DOI]
- 13 李小文, 王锦地. 植被光学遥感模型与植被结构参数化. 北京: 科学出版社, 1995
- 14 Bird R, Riordan C. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres. *Am Meteor Soc*, 1986, 25: 87—97
- 15 Kaufman Y J, Gao B C. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1992, 30: 871—884[DOI]
- 16 Tanre P Y, Deschamps C D, Herman M. Estimation of Sahran aerosol optical thickness from blurring effects in Thematic Mapper data. *J Geophys Res*, 1998, (93): 15955—15964
- 17 Gao F, Schaaf C, Strahler A H, et al. Using a multi-kernel least variance approach to retrieve and evaluate albedo from limited BRDF observations. *Remote Sens Environ*, 2001, 76: 57—66[DOI]
- 18 Liang S, Yu Y, Defelice T P. VIIRS narrowband to broadband land surface albedo conversion: formula and validation. *Int J Remote Sensing*, 2005, 26(5): 1019—1025[DOI]
- 19 Chen J M, Cihlar J. Retrieving leaf area index of boreal forests using Landsat TM images. *Remote Sens Environ*, 1996, 55: 153—162[DOI]
- 20 Verhoef. W Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sens Environ*, 1984, 16: 125—141[DOI]
- 21 刘允芬, 宋霞, 孙晓敏, 等. 千烟洲人工针叶林 CO₂ 通量季节变化及其环境因子的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 109—117
- 22 周宇宇, 唐世浩, 朱启疆, 等. 长白山自然保护区叶面积指数测量及结果. *资源科学*, 2003, 25(6): 38—42