

# 植被净初级生产力的遥感模型在武汉地区的应用

岑 奕<sup>1</sup>, 张良培<sup>1</sup>, 李平湘<sup>1</sup>, 村松加奈子<sup>2</sup>

(1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079;

2. 奈良女子大学理学部情报学科, 日本 奈良 63028506)

**摘要:** 卫星遥感成为观测和估算地面植被净初级生产力的一种极其有利的工具, 其原因不仅仅在于它将人们从繁重的地面实验中解放出来, 同时也因为它能够实现对大范围区域的植被净初级生产力进行实时监测。为了更加充分有效地利用卫星数据获取植被信息, 我们在模式分解方法的基础上, 建立了一种新的植被指数(VIPD)。根据地面实验建立的相应光合成曲线估算模型, 估算武汉地区地域性植被净初级生产力(NPP), 研究该地区植被生长年间变化状况。并通过和不同方法估算结果及地面调查结果进行比较, 检验模型对该地区的适用情况, 为该地区植被 NPP 长期监测研究提供可靠依据。

**关 键 词:** 植被净初级生产力; 模式分解方法; 植被指数; Landsat ETM

**中图分类号:** TP 79      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2008)01-0012-05

## 1 引 言

近年来, 全球环境以前所未有的速度发生变化, 全球变化作为 20 世纪 80 年代开始形成的新兴科学领域, 是当前发展最为迅速、活跃的前沿科学领域之一。陆地生态系统的碳循环是全球变化研究的核心内容之一<sup>[1]</sup>。植被净初级生产力指绿色植物在单位时间和单位面积上所积累的有机干物质总量, 它不仅是碳循环的原动力, 而且是判定生态系统碳汇和调节生态过程的主要因子<sup>[2~5]</sup>。国际地圈—生物圈计划(GBP)、全球变化与陆地生态系统(GCTE)和京都协定(Kyoto Protocol)等都把植被的 NPP 研究确定为核心内容之一<sup>[6,7]</sup>。

在现有的植被净初级生产力估算模型中, 光能利用率模型直接利用遥感数据和方法<sup>[8,9]</sup>。遥感周期性强和观测面广等特点, 极大地提高了该类模型的时空分辨率, 使大范围的 NPP 估算及其时空动态监测成为可能<sup>[10]</sup>。Monteith<sup>[11,12]</sup> 1972 年提出了光能利用效率模型概念 Production Efficiency Model (PEM), 基于植被所吸收的光合有效辐射和光能转化效率来计算作物的净初级生产力。Runyon (1993)<sup>[13]</sup>、Running (1993)<sup>[14]</sup> 等从不同角度对光能

利用率模型进行了研究。在此基础上, Awaya (2004)<sup>[15]</sup> 提出结合 Chikugo 模型估算植被净初级生产力。Furumi(2005)<sup>[16]</sup> 通过实际室内植被光合成作用实验, 根据有效光合成辐射与标准植被光合成量之间的曲线关系建立函数模型, 即植被净初级生产力光合成曲线估算模型。

本研究将使用武汉地区 2001 年 12 月、2002 年 3 月、2002 年 7 月、2002 年 10 月和 2003 年 1 月共 5 个月份的 Landsat ETM 数据, 估算该地区的月均植被 NPP 及 2002 年年度 NPP, 为该地区的植被年间生长状况调查研究提供一定依据。同时, 通过和光能利用效率模型估算结果以及地面调查结果的比较, 对光合成曲线估算模型在该地区的适用情况进行检验。

## 2 卫星数据

本文研究中利用了 2001 年 12 月、2002 年 3 月、2002 年 7 月、2002 年 10 月以及 2003 年 1 月共 5 幅 Landsat-ETM 影像对武汉地区的植被净初级生产力进行了分析研究。研究使用波段为 Landsat-ETM 的 1、2、3、4、5、7 共 6 个波段, 空间分辨率为 30 m。影像实验区域范围为 104. 82 km × 96. 54 km。通过在影像的东南西北 4 个角选取共 50 个控

制点,以 2002 年 7 月的影像数据为依据,对其余 4 幅卫星影像进行影像配准。同时,对卫星影像进行反射率转换,并利用 6 s 模型对其进行大气校正。

### 3 解析方法

#### 3.1 模式分解方法(PDM)

模式分解方法(PDM)提取地面要素信息,将多波段数据信息压缩为 3 个波段信息。这种方法建立在 3 种典型地物反射率的基础上:水体、植被以及土壤光谱曲线。在此方法中,卫星数据中的数值通过大气校正等变换被转化为反射率,表示为  $A_i$  ( $i$ : 波段数)。它通过模式分解方法被表示为 3 种典型地物反射率光谱值  $P_w$ ,  $P_v$  和  $P_s$ ,以及模式分解系数  $C_w$ ,  $C_v$  和  $C_s$  的卷积(其中  $w$  代表水,  $v$  代表植被,  $s$  代表土壤):

$$A_i = C_w \times P_{wi} + C_v \times P_{vi} + C_s \times P_{si} + R_i \quad (1)$$

其中:模式分解系数  $P_w$ ,  $P_v$  和  $P_s$  在每个波段中值的总和为 1;而  $C_w$ ,  $C_v$  和  $C_s$  的值不小于 0。 $R_i$  为  $i$  波段的残差。

在模式分解方法的基础上,我们建立了一种新的植被指数模型(VIPD),表示为:

$$VIPD = \frac{\left[ C_v - C_s - \frac{S_s}{\sum A_i} \times C_w + S_s \right]}{S_v + S_s} \quad (2)$$

$S_v$  和  $S_s$  为定值,表示标准植被以及土壤反射率光谱各波段值的总和。对 Landsat-ETM 数据而言, $S_v$  的值为 1.6,  $S_s$  的值为 1.0。作为植被指数,VIPD 的值随着植被活性度的强弱,在 0 到 1 之间变化<sup>[17]</sup>。

#### 3.2 植被净初级生产力(NPP)估算模型

##### 3.2.1 光合成曲线模型

为进一步研究植被净初级生产力(NPP),我们在研究中引入相关植被指数 VIPD,并通过地面实验建立地物反射率和植被净初级生产力的关系模型,以通过 VIPD 和影像反射率值估算较大区域范围内的 NPP 值。在光合成作用过程中,植被将光能转换成可以被生物机体吸收的化学能量。这些能量中的一部分在呼吸作用的过程中被消耗掉,另一部分用于植物生长。这一过程,表示为公式(3):

$$GPP = NPP + R_s \quad (3)$$

其中:GPP 为光合成作用所产生的总化学能, NPP 是植被用于自身生长的那一部分,相应  $R_s$  则是呼吸作用消耗掉的部分。

本研究中,我们采用温度  $T$  的函数估算  $R_s$  的值,关系式如(4)所示<sup>[18]</sup>:

$$R_s = \frac{7.825 + 1.145T}{100} \times GPP \quad (4)$$

由此,通过地面反射率实验,我们可以推导得到 NPP 估算模型为式(5):

$$\begin{aligned} NPP &= \int \left( 1 - \frac{7.825 + 1.145T(t)}{100} \right) \times GPP \\ &= \int \left( 1 - \frac{7.825 + 1.145T(t)}{100} \right) \frac{VIPD}{VIPD_{std}} \times \\ &\quad \left( 1 + 0.17 \times \frac{VIPD - VIPD_{std}}{VIPD_{std}} \right) \times \\ &\quad P_{std}(PAR(t)) dt \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $T$  表示温度,  $t$  表示时间,并且通过地面实验,估算到  $VIPD_{std}$  为 0.561。式(5)中标准有效光合成辐射的函数  $P_{std}(PAR(t))$  定义如下式:

$$P_{std}(PAR(t)) = \frac{P_{max} \times 0.027 \times PAR}{1 + 0.027 \times PAR} \quad (6)$$

$P_{max}$  为植被在可能范围内最大光合成量,通过实验估算大约为 0.53 mg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/s。该估算模型的误差约为 26%<sup>[19]</sup>。

##### 3.2.2 光能利用率模型

Monteith 于 1972 年提出了光能利用效率模型概念 Production Efficiency Model(PEM)<sup>[11]</sup>。光能利用率 LUE(Light Use Efficiency)是在一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叶片的光合成能力调节植被的 NPP。在 PEM 模型中,考虑环境压力对 NPP 的影响, NPP 估算模型可表示为式(7):

$$NPP = f(\text{temperature, water stress, etc.}) \times \epsilon \times fAPAR \times PAR \quad (7)$$

光量子通量密度  $fAPAR$  为光合有效辐射吸收系数,表示植冠可吸收的光合作用有效辐射比例,一般采用遥感植被指数推算。利用 NDVI 与  $fAPAR$  之间的关系,且在亚热带林地区可忽略水环境压力,由此,我们可得到式(8)<sup>[15]</sup>:

$$NPP = \sum (f(T) \times 0.494 \times NDVI \times S) \quad (8)$$

其中:0.494 是利用 Chikugo 模型通过地面实验得到的。而温度的相关式子可表示为式(9):

$$f(T) = \exp(-1/8 \times ((T - OTMP)/10)^4) \quad (9)$$

OTMP 为全年超过 10℃ 以上温度的总和。

### 4 结果与讨论

NPP 的估算,归一化植被指数(NDVI)经常用到。NDVI 是针对 Landsat 卫星数据建立的植被指数,主要使用红外以及近红外两个波段的卫星数据,

无法充分利用目前多光谱遥感的有效数据信息。因此,我们在模式分解方法的基础上,建立了模式分解植被指数,并通过该指数估算纪伊半岛地区的植被净初级生产力。

4.1 纪伊半岛地区估算参数

通过模式分解方法中所列出的 VIPD 估算式(2)和 NDVI 的求解公式,利用已知数据,我们可以得到 2001 年 12 月、2002 年 3 月、2002 年 7 月、2002 年 10 月以及 2003 年 1 月共 5 幅影像的 VIPD 值与

NDVI 值。  
同时,我们在武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室楼顶、奈良女子大学教学楼顶、奈良县有林区以及奈良四乡小学 3 地设立地面观测点,依据所获取日射量值和光量子值建立两者相关模型,得到式(10):

$$PAR = 0.39 \times R_s \tag{10}$$

根据我们所收集的数据,2001 年度温度、光合成有效辐射量和月均日照量被罗列于表(1)。

表 1 月均温度、光合成有效辐射量和日长时间  
Table 1 Temperature, PAR and day-length of research area

日期	2001 年 12 月	2002 年 1 月	2002 年 2 月	2002 年 3 月	2002 年 4 月	2002 年 5 月	2002 年 6 月
光合成有效辐射量(W/m <sup>2</sup> /day)	135.9	201.0	178.5	183.8	134.1	185.8	309.1
气温(℃)	4.5	7.3	10.0	14.0	17.4	20.7	18.4
日长时间(hour/day)	5.1	5.4	5.8	8.0	10.3	8.9	6.5
日期	2002 年 7 月	2002 年 8 月	2002 年 9 月	2002 年 10 月	2002 年 11 月	2002 年 12 月	2003 年 1 月
光合成有效辐射量(W/m <sup>2</sup> /day)	216.0	207.8	226.5	201.9	202.0	130.1	192.0
气温(℃)	19.1	27.8	24.4	19.3	12.6	5.4	5.2
日长时间(hour/day)	9.5	9.5	8.5	7.6	5.3	4.8	5.3

4.2 NPP 估算结果

使用模式分解方法,通过方程(5)和以上相关参数,我们可估算出 2001 年 12 月、2002 年 3 月、2002 年 7 月、2002 年 10 月以及 2003 年 1 月各月份武汉地区 NPP 值图如图 1(见图版Ⅲ、Ⅳ)。

由图 1 可知,武汉市城市中心地带(图 1c 左图所示白圈范围),年中各月份月均 NPP 值变化趋势并不十分明显。而中心地带以外区域,年中各月份月均 NPP 值,变化显著。且从 2001 年 12 月到 2002 年 7 月呈现上升趋势,而从 2002 年 7 月到 2003 年 1 月呈下降趋势,其中以 7 月的月均 NPP 值为 5 个月中最高。这是由于城市中心地带相对周边地域,植被较少,且往往以观赏性常绿植被为主,一年四季植被生长状况并不明显;而周边

区域的植被主要以农作物和自然生亚热带落叶植被为主,植被的四季生长状况较为明显。NPP 值图的变化充分反映了武汉市地区植被生长状况的变化。

4.3 结果验证

为了对卫星解析结果进行更进一步的地面验证,依据武汉大学校内植被调查报告<sup>[20]</sup>以及地面 GPS 定位,选择武大校园珞珈山区域的亚热带常绿阔叶林种像元点(图 1c 右图所示红圈处)。由卫星数据解析得到该像元点的 2001 年 12 月、2002 年 3 月、2002 年 7 月、2002 年 10 月以及 2003 年 1 月月均植被指数。利用植被生长月份的气温及降水量与植被生长状况间的关系,我们内插得到各月份植被指数值,如图 2 所示。

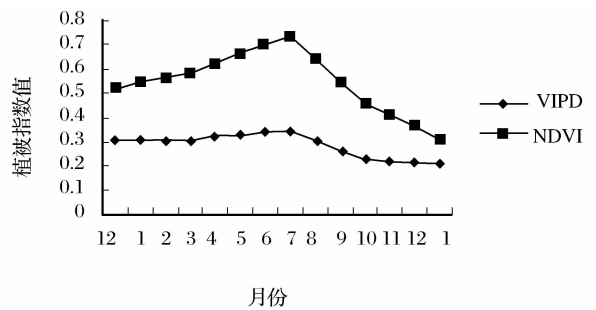


图 2 使用内插法求得中间月份的植被指数值  
Fig. 2 Values of VIPD and NDVI of each month, where the lateral axis shows month and the vertical axis shows the value

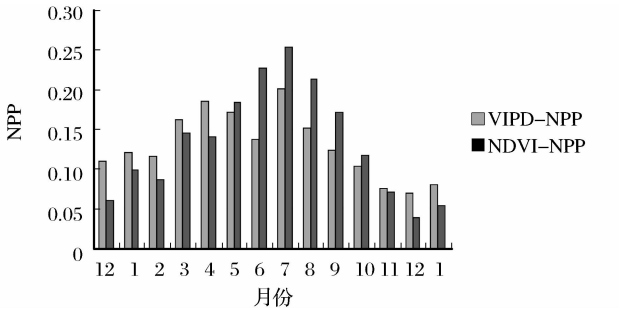


图 3 基于植被指数估算得到的月 NPP 值  
Fig. 3 NPP estimation of each month using VIPD and NDVI, where the lateral axis shows month, and the vertical axis shows the value of NPP, and the unit is [KgCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup> · month)]

利用已知植被指数以及其它估算参数,利用植被净初级生产力的估算模型,我们得到各月份月均 NPP 值,并将卫星结果与地面调查数据<sup>[21]</sup> 进行比较。

由 VIPD 推算得到的武汉地区亚热带常绿阔叶林年均 NPP 值为  $1.445 \pm 0.38$  [ $\text{kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$ ];由 NDVI 推算得到的年均 NPP 值  $1.642$  [ $\text{kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$ ];由地面 18 个采样点得到的亚热带常绿阔叶林年均 NPP 均值  $1.532$  [ $\text{kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$ ]<sup>[21]</sup>。在模型的误差范围内,由 VIPD 推算得到的年均 NPP 值与地面实测采样结果相一致,因此,本研究模型可适用于亚热带常绿阔叶林区域,如武汉等。

通过对植被指数进行内插,我们可以计算得到武汉市 2001 年年均 NPP 值图(图 4 见图版)。

## 5 结 语

在本研究中,通过实际室内植被光合成作用实验,根据有效光合辐射与标准植被光合成量之间的曲线关系建立的光合成曲线估算模型,利用武汉市 2001 年前后 Landsat 卫星影像数据,估算武汉市 2001 年均植被净初级生产力。比较估算得到武汉地区亚热带常绿阔叶林年均 NPP 值  $1.445 \pm 0.38$  [ $\text{kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$ ]及由地面 18 个采样点得到的亚热带常绿阔叶林年均 NPP 均值  $1.532$  [ $\text{kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$ ],在模型的误差范围内结果一致。实验证明本模型能够适用于亚热带常绿阔叶植被地区,如武汉市等。

## 参考文献:

- [1] Qu H. The Evaluation of Vegetation NPP in the North China Plain Using Remote Sensing Data of MODIS[D]. Master Thesis of Jilin University, 2004. [曲辉. 应用 MODIS 遥感信息评估华北平原植被净第一性生产力(NPP)[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2004.]
- [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: 1-15.
- [3] Field C B, Randerson J T, Malmstrom C M. Global Net Primary Production of the Biosphere: Combining Ecology and Remote Sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51: 74-88.
- [4] Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. Increased Activity of Northern Vegetation Inferred from Atmospheric  $\text{CO}_2$  Measurements[J]. *Nature*, 1996, 382: 146-149.
- [5] Ruimy A, Kergoat L, Bondeau A. Comparing Global Models of Terrestrial Net Primary Productivity (NPP): Analysis of Differences in Light Absorption and Light-use Efficiency[J]. *Global Change Biology*, 1999, 5: 56-64.
- [6] Li S H, Niu Z, Li B C. Study on Remote Sensing Driving Factors of NPP Process Model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(3): 120-122. [李世华, 牛铮, 李壁成. NPP 过程模型遥感驱动因子分析[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(3): 120-122.]
- [7] Zhu W Q, Chen Y H, Xu D, *et al.* Advances in Terrestrial Net Primary Productivity (NPP) Estimation Models[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(3): 296-300. [朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究发展[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(3): 296-300.]
- [8] Sun R, Zhu Q J. Net Primary Productivity of Terrestrial Vegetation—A Review on Related Researches[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(6): 757-760. [孙睿, 朱启疆. 陆地植被净第一性生产力的研究[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(6): 757-760.]
- [9] Chen L J, Liu G H, Feng X F. Advances in Study on Net Primary Productivity of Vegetation Using Remote Sensing[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21(2): 53-57. [陈利军, 刘高焕, 冯险峰. 遥感在植被净第一性生产力研究中的应用[J]. *生态学杂志*, 2002, 21(2): 53-57.]
- [10] Lu L, Li X, Veroustraete F. Terrestrial Net Primary Productivity and Its Spatial-temporal Variability in Western China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1026-1033. [卢玲, 李新, Veroustraete F. 中国西部地区植被净初级生产力的时空格局[J]. *生态学报*, 2005, 25(5): 1026-1033.]
- [11] Monteith J L. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems[J]. *Journal of Application Ecology*, 1972, 9: 747-766.
- [12] Monteith J L. Climate and Efficiency of Crop Production in Britain[J]. *Phil. Trans. Royal Society. London, B*, 1977, 281: 277-294.
- [13] Runyon J, Waring R H, Goward S N, *et al.* Environmental Limits on Net Primary Production and Light-use Efficiency Across the Oregon Transect[J]. *Appl. Ecol*, 1993, 4: 226-237.
- [14] Running S W, Hunt E R. Generalization of a Forest Ecosystem Process Model for Other Biomes, BIOME-BGC, and an Application for Global-scale Models[A]. In: *Scaling Processes between Leaf and Landscape Levels*[C]. San Diego: Academic Press, 1993: 141-158.
- [15] Awaya Y, Kodani E, Tanaka K, *et al.* Estimation of the Global Net Primary Productivity Using NOAA Images and Meteorological Data: Changes between 1988 and 1993[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(9): 1597-1613.
- [16] Furumi S, Muramatsu K, Ono A, *et al.* Development of Estimation Model for Net Primary Production by Vegetation[J]. *Adv. Space Res.* 2002, 30(11): 2517-2522.
- [17] Furumi S, Hayashi A, Muramatsu K, *et al.* Relation between Vegetation Vigor and a New Vegetation Index Based on Pat-

tern Decomposition Method[J]. Journal of Remote Sensing Society of Japan,1998,18(3):17-34.

[18] Goward S N,Dye D G. Evaluating North American Net Primary Productivity with Satellite Observations[J]. Advances in Space Research,1987,7(11):165-174.

[19] Furumi S,Xiong Y,Fujiwara N. Establishment of an Algorithm to Estimate Vegetation Photosynthesis by Pattern Decomposition Using Multi-spectral Data[J]. Journal of the Remote Sensing Society of Japan,2005,25(1):47-59.

[20] Zhou J,Liu G H,Pan M Q,*et al.* Study on Vegetation and Its Succession on Luojia Hill, Wuchang, Wuhan-I. Status Quo of Vegetation[J]. Journal of Wuhan Botanical Research,1999,17(3):231-238. [周进,刘贵华,潘明清,等. 武昌珞珈山植被及其演替研究[J]. 武汉植物学研究,1999,17(3):231-238.]

[21] Peng S L,Zhao P,Ren H,*et al.* The Possible Heat-driven Pattern Variation of Zonal Vegetation and Agricultural Ecosystems along the North-south Transect of China under the Global Change[J]. Earth Science Frontiers,2002,9(1):217-226. [彭少麟,赵平,任海,等. 全球变化压力下中国东部样带植被与农业生态系统格局的可能性变化[J]. 地学前锋,2002,9(1):217-226.]

# Study on Zonal Net Primary Production Estimation Model Using Landsat Data

CEN Yi<sup>1</sup>,ZHANG Liang-pei<sup>1</sup>,LI Ping-xiang<sup>1</sup>,MURAMATSU Kanako<sup>2</sup>

(1. *State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China*; 2. *KYOUSEI Science Center for Life and Nature, Nara Women's University, Nara 63028506, Japan*)

**Abstract:** Remote sensing was used as a powerful approach to estimate and supervise net primary productivity of terrestrial vegetation, for it is free from hard field works and realizes the estimation of NPP in a large region. A new vegetation index was developed based on pattern decomposition method and light-use efficiency model was taken to estimate NPP of Wuhan (mostly subtropical evergreen-deciduous forests) using Landsat-ETM data. The result was compared with the ones obtained by LUE model and other field investigation.

**Key words:** NPP; PDM; VIPD; Landsat ETM