

武汉地区植被 NPP 动态监测研究

王伦澈¹ 龚 威¹ 张 森¹ 马盈盈¹

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:通过建立、比较多种区域性光合有效辐射(PAR)估算模型,对比分析了 NDVI、EVI 与光合有效辐射吸收系数(fPAR)之间的关系,根据不同植被最大光能利用率的不同,改进了植被净初级生产力(NPP)模拟算法。利用 MODIS、气象辐射数据等,研究了武汉市 2001~2011 年间植被 NPP 季节、年际变化特征。结果表明,NPP 季节变化明显,夏季高,春秋次之,冬季低,七月中旬最高,达到 $85\text{ gCm}^{-2}\text{ month}^{-1}$;年平均 NPP 呈现出一定的增长趋势,2008 年最高 $562\text{ gCm}^{-2}\text{ a}^{-1}$;不同类型植被 NPP 差异较大,常绿阔叶植被年平均值最大 $1\,028\text{ gCm}^{-2}\text{ a}^{-1}$,每年生阔叶植被 NPP 最低 $410\text{ gCm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。

关键词:净初级生产力;光合有效辐射;中分辨率成像光谱仪;增强植被指数;光能利用率

中图法分类号:TP751

在全球气候变化背景下,陆地生态系统碳循环已成为地球信息科学研究的热点^[1]。作为光合作用过程中植物所吸收碳和自养呼吸释放碳的差值,NPP 直接反映了植被在自然环境条件下的生产能力,还是判定生态系统碳源/汇过程的主要因子,在全球变化及碳平衡中扮演着重要的作用,成为资源与环境遥感研究的重要方向^[2-3]。

新型资源环境卫星数据极大地提高了 NPP 估算的时空分辨率,使大范围的 NPP 模拟及其时空动态监测成为可能,各国学者对植被 NPP 进行了大量的估算研究^[4]。Running 等^[5]利用 BIOME-BGC 模拟了全球植被 NPP 分布形式。方精云^[6]用 CASA 研究了我国 1982~1999 年 NPP 时空变化的影响因子。然而,这些参数、过程模型都是基于特定的气候条件和植被状况建立起来的,因此,模型的修正与优化是其得以推广的必然要求^[7-8]。

目前,对武汉地区进行系统的植被 NPP 相关研究相对较少,有必要对本区植被 NPP 进行长期的动态监测研究。本文通过建立 PAR 与总辐射、净辐射、水平面直接辐射、散射辐射的相互关系,获取高精度的 PAR 数据。利用 EVI 减少大气气溶胶、土壤、枯枝等对地表植被信息的影响,精确的模拟 fPAR。同时,根据植物最大光能利

用率的差异,引入植被类型分类以及温度、水分等胁迫因子,获取植被实际的光能利用率。最后,利用改进的 NPP 估算模型对武汉地区 2001~2011 年间植被 NPP 进行了时空变化分析。

1 NPP 模拟方法

1.1 数据源及预处理

本文以武汉地区为研究区域,所用气象数据包括 2001~2011 年气温、降水、总辐射、净辐射、散射辐射等,2009~2012 年每日 PAR 通过 Kipp&Zonen 辐射测量系统获得。MOD13Q1 植被指数产品空间分辨率为 250m,MOD12Q1 土地覆盖类型数据时间分辨率为 1 a。将 NDVI、EVI、Landcover 数据转换成相同的投影方式,所有气象辐射数据、植被指数数据时间分辨率为 16 d。根据 NASA 提供的植被分类方案,将武汉地区植被划分为以下 6 种:常绿针叶植被(ENF)、常绿阔叶植被(EBV)、落叶针叶植被(DNF)、落叶阔叶植被(DEV)、一年生阔叶植被(ABV)、一年生草本植被(AGV)。

根据生理生态过程,NPP 主要由植物吸收的光合有效辐射(APAR)和实际光能利用率(ϵ)决定^[9-10]:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (1)$$
$$APAR(x, t) = PAR(x, t) \times fPAR(x, t) \quad (2)$$
由上可知,PAR、 $fPAR$ 和 ϵ 是 NPP 估算过程中的 3 个关键参数,本文将通过改进以上参数模拟方法,建立精确的区域性 NPP 估算模型。

1.2 PAR 估算

PAR 是地表植物进行光合作用的能量来源。目前,全国范围的 PAR 观测网还未完全建立起来,植被建模中一般用 $1/2$ 总辐射值代替,然而,PAR 系数随着时空、天气条件变化很大^[11-12]。PAR 的估算直接影响了各种生态模型的精确性,因此,在区域尺度上必须要通过各种方式来建立和检验 PAR 模拟的精度。本文通过 2009~2012 年共 1 000 d 实测 PAR 数据,建立其与总辐射、水平面直接辐射、散射辐射、净辐射的关系,从而模拟得到武汉地区长期的 PAR 估算值,所得公式如下:

$$PAR_1 = 0.42 \times Q_g + 1.5 \quad (W/m^2) \quad (3)$$
$$PAR_2 = \begin{cases} 0.44Q_D + 0.23Q_H + 1.46, & Q_g < 120 \text{ W/m}^2 \\ 0.55Q_D + 0.46Q_H - 11.87, & Q_g > 120 \text{ W/m}^2 \end{cases} \quad (4)$$
$$PAR_3 = \begin{cases} 0.39Q_D + 0.27Q_H + 0.13Q_N + 2.75, & Q_g < 120 \text{ W/m}^2 \\ 0.26Q_D + 0.28Q_H + 0.25Q_N + 5.06, & Q_g > 120 \text{ W/m}^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中, Q_g 是日总辐射; Q_D 是散射辐射; Q_H 是水平面直接辐射,可由 $Q_H = Q_R \times \sin h$ 计算得到(Q_R 表示太阳直接辐射, h 是太阳高度角); Q_N 是地表净辐射,通过 $Q_N = Q_g + Q_{\downarrow} - Q_{\uparrow} - Q_{\text{ref}}$ 获得(Q_{\downarrow} , Q_{\uparrow} , Q_{ref} 分别表示下行长波、上行短波和反射短波辐射)。比较各种估算模型与 $Q_g/2$ 及实测值之间的误差大小,如图 1、图 2 所示。

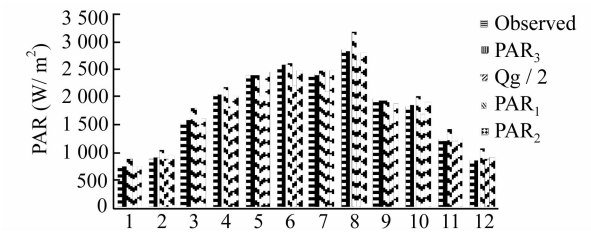


图 1 2010 年不同模型 PAR 估算值

Fig. 1 PAR Estimated from Different Models in 2010

由图 1、图 2 可知,各月实测 PAR 都比 $Q_g/2$ 相对较小,新模拟的 3 个公式能精确地估算出每日 PAR 大小,且 PAR_3 与实测值相关性达到 0.982,误差最小,故本文采用式(3)~式(5)计算 2001~2011 年每天 PAR 值。

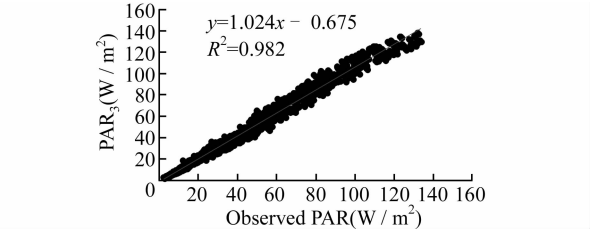


图 2 PAR_3 模型估算值与实测值相关性

Fig. 2 Correlation of Modeled and Measured PAR

1.3 $fPAR$ 模拟

$fPAR$ 是光合作用过程中植物吸收 400~700 nm 太阳辐射能的比例系数,是反映植被生长过程的重要生理参数^[13]。基于遥感的估算是获取区域乃至全球尺度 $fPAR$ 的最有效方法,主要是通过与植被指数之间建立起物理统计模型进行模拟获得,目前使用广泛的 MODIS NDVI- $fPAR$ 关系如下^[14]:

$$fPAR = \begin{cases} 0, & NDVI < 0.075 \\ \min\{1.163 \times NDVI - 0.043\}, & NDVI > 0.075 \end{cases} \quad (6)$$

然而,NDVI 比较容易饱和(红光波段容易饱和),不能有效地反映地表植被覆盖较高区域或多层郁闭冠层植被信息^[15];由于受到大气气溶胶、土壤背景噪声等的影响,反演的 NDVI 也不能精确地表达地表植被状况^[16];同时,植物冠层分为光合有效部分 PAV(绿叶等)和非光合有效部分 NPV(树枝、枯叶等),因此也要除去 NPV 对 $fPAR$ 的影响^[17]。增强植被指数 EVI 在 NDVI 等植被指数的基础上增加了一个蓝光波段,用于对大气分子、气溶胶、薄云、臭氧的大气校正;采用抗大气植被指数对残留气溶胶做进一步的处理;采用土壤调节植被指数减弱了树冠背景土壤变化对植被指数的影响,以便获取相对真实的地表植被信息^[18-19]。

$$EVI = G \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + (C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue}) + L} \quad (7)$$

式中, $G=2.5$,是光路辐射订正系数; C_1 、 C_2 表示通过蓝光波段来修正大气对红光的影响参数,分别为 6.0、7.5; $L=1$ 是土壤调节参数。

研究证明,EVI 对植物冠层变化十分敏感,且与绿色叶面积指数有较好的线性关系,Xiao 等人进一步研究 $fPAR$ 与 EVI 的联系,发展了 GPP/NPP 估算的 VPM 模型,该模型已经成功用于北美、南美、东亚地区生物量的估算,故本文采取其 $fPAR$ 与 EVI 之间的函数关系计算武汉地

区植被 NPP^[19,20]:

$$fPAR_{PAV} = \alpha \times EVI \tag{8}$$

式中, α 是调节系数。

1.4 实际光能利用率(ϵ)的计算

光能利用率是指植被把所吸收的光合有效辐射(APAR)转化为有机碳的效率,在很多生态模型中, ϵ_{\max} 取值唯一,没有考虑植物种类的差异,但是植被最大光能利用率主要取决于植被内在的生物学机制和生理属性,所以不同地区、不同植被类型的 ϵ_{\max} 值应不同,因此,本文采用朱文泉等根据实测数据模拟的中国典型植被 ϵ_{\max} ^[21]。

理想条件下植被具有最大光能利用率,环境因子如气温、土壤水分状况以及水汽压等通过光合作用过程对植物最大光能利用率的影响而调节植被生长^[22]。

$$\epsilon(x, t) = T_1(x, t) \times T_2(x, t) \times W(x, t) \times \epsilon_{\max} \tag{9}$$

式中, T_1 、 T_2 为温度胁迫因子,分别表示高低温对植物光合过程的影响; $W(x, t)$ 为水分胁迫因子; ϵ_{\max} 为植物的最大光能转化效率。

表 1 不同类型植被的最大光能利用率

Tab.1 The Maximum Light Utilization Efficiency for Different Vegetation Types

类型	ENV	EBV	DNV	DBV	ABV	AGV
$\epsilon_{\max} / (\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1})$	0.389	0.985	0.485	0.692	0.429	0.542

2 结果与分析

2.1 模型的验证与比较

将模拟的 NPP 值与其他学者模型结果及实测值进行比较,以验证本文模型的精确性,如表 2 所示,模拟结果在实测值范围内,且与其他研究成果很接近,特别是张娜关于武汉地区 2009 年模拟值^[11]。本文模拟的各种类型植被 NPP 比其他模型值稍低,这是由于首次考虑了土壤、树枝、枯枝对实际 $fPAR$ 的影响,扣除了 $fPAR_{NPV}$ 对 NPP 的作用,得模拟得到的 NPP 值有所减小,因此,通

表 2 不同模型模拟的 NPP 值

Tab.2 NPP Values from Different Models/($\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$)

	文献[4]	文献[8]	文献[11]	实测值	本文模型
ENV	587	692	582.4	179~806	569.6
EBV	945	986	1 014.3	407~1 913	1 004.2
DNV	585	649	595.5	179~824	548.5
DBV	928	663~986	913.4	114~1 669	919.3
ABV	494 ^[3]	469~559	458.1	121~612	419.7
AGV	441 ^[3]	427	422.7	239~760	423.8

过模型的改进能够较好地反映武汉地区植被生产力状况,以便进一步研究分析其变化形式。

2.2 NPP 的季节变化

太阳辐射是地表植被生长的根本源动力, PAR、植物光能利用率等都具有明显的季节变化形式,因而,不同时期、不同类型植被的固碳能力必然有所差异。本文通过 2001~2011 年 6 种典型植被 (ENV, EBV, DNV, DBV, ABV, AGV) 16 d 的植被信息,来揭示 NPP 季节变化的普遍形式,如图 3 所示。

不同物种的植被内在生理机制(叶形、羧化酶含量等)及外界环境条件对光合速率的改变对光能利用率的影响差异较大,因此,不同植被 NPP 也差别较大,一般如图 3 所示。 $NPP_{EBV} > NPP_{DBV} > NPP_{GV} > NPP_{DNV} > NPP_{ENV} > NPP_{AGV} > NPP_{ABV}$ 。同时,各种植被呈现出相同的变化形式:冬季普遍低于 $10 \text{ gCm}^{-2} \text{ month}^{-1}$,春秋时期也低于 $75 \text{ gCm}^{-2} \text{ month}^{-1}$,夏季最大,大多都高于 $100 \text{ gCm}^{-2} \text{ month}^{-1}$,占全年 NPP 总值的 62%,EBV 最大值达到 $223.3 \text{ gCm}^{-2} \text{ month}^{-1}$ (7 月),这种显著的季节变化形式是 PAR、 $fPAR$ 和植物实际的光能转化效率在不同时期综合作用的结果。

2.3 NPP 的年变化

利用改进的 NPP 估算模型对武汉地区进行长期的动态变化监测,有利于了解和应对本区生态环境质量的变化。

由图 4 可知,EBV、DBV 年 NPP 高于其他类型植被 ($700 \text{ gCm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上),最大达 $1\ 300 \text{ gCm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,这主要是因为其叶片面积大,生长周期较长,光能利用率高(表 1),吸收更多的辐射能转化成了植物生长的内能。其他类型植被年 NPP 差别较小,在 $400 \sim 600 \text{ gCm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 范围内,平均为 $520 \text{ gCm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。同时,11 a 年间 NPP 有微量的增长趋势($R^2 = 0.72$),且 2008 年各种植被 NPP 值最高, NPP_{EBV} 、 NPP_{DBV} 、 NPP_{DNV} 、 NPP_{ENV} 、 NPP_{AGV} 、 NPP_{ABV} 分别达到 772.4、1 312.3、624.4、1 152.5、445.2 和 $531.2 \text{ gCm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

2.4 NPP 的空间变化

NPP 的空间分布基本上由城市中心向四周增加,其与植被覆盖类型紧密相关。武昌、洪山区是城市建设区,湖泊、长江、汉江沿岸植被覆盖度低,年 NPP 基本都在 $100 \text{ gCm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以下;黄陂区西北部有大面积的阔叶林,NPP 常年最高,年平均值达到 $1\ 100 \text{ gCm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 左右;新洲区东南和汉南南部等地区落叶针叶混交林覆盖率较高,年

NPP 也多在 $900\text{ gCm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 以上;由于分布最多的植被类型是 AGV, 积累光合辐射能较少, 整个

武汉地区年平均 NPP 产量为 $520.2\text{ gCm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。

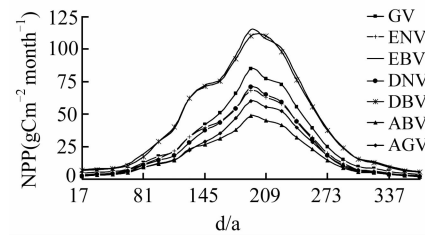


图 3 不同类型植被 NPP 的季节变化
Fig. 3 Seasonal NPP for Different Vegetation Types

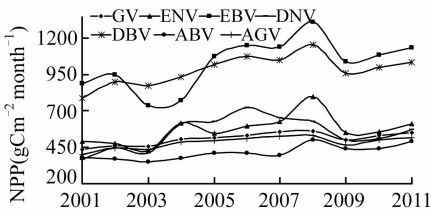


图 4 不同类型植被 NPP 的年际变化
Fig. 4 Annual NPP for Different Vegetation Types

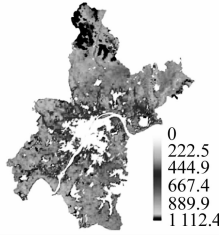


图 5 武汉市年平均 NPP 空间分布格局
Fig. 5 Spatial Distribution of Mean Annual NPP

3 结 语

本文通过建立光合有效辐射与多种辐射通量间的函数关系, 获得精确的区域 PAR 估算模型。基于当前植被指数存在的缺陷, 利用 EVI 描述地表植被冠层信息, 进一步估算出植物所吸收的辐射能量。同时, 考虑温度、水分等环境胁迫因子对最大光能利用率的限制, 计算出 6 种典型植被的实际光能利用率。根据改进的模型对武汉地区 2001~2011 年植被 NPP 季节、年际变化和空间分布进行了系统的分析研究, 得以下结论。

1) 不同类型植被同一时段 NPP 差异明显, 表现为 $NPP_{EBV} > NPP_{DBV} > NPP_{DNV} > NPP_{ENV} > NPP_{AGV} > NPP_{ABV}$ 。

2) NPP 季节变化显著, 冬季低于 $10\text{ gCm}^{-2}\text{ month}^{-1}$, 夏季普遍高于 $100\text{ gCm}^{-2}\text{ month}^{-1}$; 从 2001 到 2011 年各种植被 NPP 整体上呈增长趋势, 2008 年最高。

3) 植被类型和覆盖度一定程度上决定了 NPP 空间分布形式, 黄陂区 NPP 最高, 达到 $1\,000\text{ gCm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 以上, 武汉市平均年 NPP 在 $460\sim560\text{ gCm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 范围内。

本文较精确地反映了武汉市植被 NPP 变化状况, 为进一步开展碳循环研究奠定了基础。同时, 应进一步深入植物生态机理过程分析, 结合遥感等地理信息技术揭示更大范围、更为普遍的生态环境变化规律。

参 考 文 献

[1] 李德仁, 王长委, 胡月明, 等. 遥感技术估算森林生物量的研究进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(6): 631-635
[2] Zhang Junhui, Hu Yanling, Xiao Xiangming, et al. Satellite-based Estimation of Evapotranspiration of an

Old-growth Temperate Mixed Forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(11): 976-984
[3] Gong Wei, Wang Lunche, Lin Aiwen, et al. Evaluating the Monthly and Interannual Variation of Net Primary Production in Response to Climate in Wuhan During 2001 to 2010[J]. Geosciences Journal, 2012, 16(3): 347-355
[4] 刘良明. 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[D]. 武汉: 武汉大学, 2001
[5] Running S W, Ramakrishna R, Nemani F, et al. A Continuous Satellite-derived Measure of Global Terrestrial Primary Production[J]. BioScience, 2004, 54(13): 547-560
[6] Fang Jingyun, Piao Shilong, Tang Zhiyao, et al. Interannual Variability in Net Primary Production and Precipitation[J]. Science, 2001, 293: 1723
[7] Beer C, Reichstein M. Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Covariation with Climate[J]. Science, 2010, 329: 834-835
[8] 朱文泉, 潘耀忠, 阳小琼, 等. 气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析[J]. 科学通报, 2007, 52(23): 3 253-3 260
[9] Donmez C, Berberoglu S, Curran P. Modeling the Current and Future Spatial Distribution of NPP in a Mediterranean Watershed[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(25): 336-345
[10] Hu Bo, Wang Yuesi, Liu Guangren. Spatiotemporal Characteristics of Photosynthetically Active Radiation in China[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112, D14106, doi: 10. 1029/2006JD007965
[11] 张娜, 毛飞跃, 龚威. 2009 年武汉市植被净初级生产力估算[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(12): 1 447-1 450
[12] Lobell D B, Hicke J A, Asner G P, et al. Satellite Estimates of Productivity and Light Use Efficiency

in United States Agriculture, 1982 ~ 1998 [J]. Global Change Biology, 2002, 8(8): 722-735

[13] Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, et al. Global Products of Vegetation Leaf Area and Fraction Absorbed PAR from Year One of MODIS Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82: 214-231

[14] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83: 195-213

[15] Hilker T, Coops N C. The Use of Remote Sensing in Light Use Efficiency Based Models of Gross Primary Production: A Review of Current Status and Future Requirements[J]. Science of Total Environment, 2008, 404(17): 411-423

[16] Xiao Xiangming, Hollinger D. Satellite-based Modeling of Gross Primary Production in an Evergreen Needleleaf Forest[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89 (4): 519-534

[17] Huete A R, Liu H Q. A Comparison of Vegetation Indices Global Set of TM Images for EOS-MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 59 (20): 440-451

[18] Chen Jingming, Sun Liqun. Using MODIS EVI to Detect Vegetation Damage Caused by the 2008 Ice and Snow Storms in South China[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115, G00H04, doi:10.1029/2009JG001246

[19] Xiao Xiangming, Zhang Qingyuan, Saleska S, et al. Satellite-based Modeling of Gross Primary Production in a Seasonally Moist Tropical Evergreen Forest[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94 (1): 105-122

[20] Xiao Xiangming, Boles S. Mapping Paddy Rice Agriculture in South and Southeast Asia Using Multi-temporal MODIS Images [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(13): 95-113

[21] 朱文泉, 潘耀忠. 中国典型植被最大光利用率模拟 [J]. 科学通报, 2006, 51(6): 700-706

[22] Huemmrich K F, Gamon J A. Remote Sensing of Tundra Tross Ecosystem Productivity and Light Use Efficiency Under Varying Temperature and Moisture Conditions[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(9): 481-489

第一作者简介: 王伦澈, 博士生, 现主要从事大气辐射与环境遥感研究。
E-mail: LuncheWang@whu.edu.cn

Dynamic Monitoring of Vegetation NPP in
Wuhan Based on MODIS

WANG Lunche¹ GONG Wei¹ ZHANG Miao¹ MA Yingying¹

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,
Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: The net primary production (NPP) model was improved by developing and comparing different regional photosynthetically active radiation (PAR) models, studying the relationships between fraction of PAR and NDVI and EVI, and considering the difference in maximum light use efficiencies for different vegetation types. The seasonal and interannual variation patterns of vegetation NPP in Wuhan was studied with MODIS data and climatic materials. It is indicated that NPP changed greatly with seasons, high in summer, then the spring and autumn, low in winter, and the highest NPP value appeared in Mid-July with about 85gCm⁻²month⁻¹. There was an increasing trend in annual NPP from 2001 to 2011 for all kinds of vegetation, and the maximum value was observed in 2008 with 562gCm⁻²a⁻¹. It was also found that NPP values of different vegetation types varied greatly at the same study period, evergreen broadleaf vegetation showed the highest annual NPP value, and the annual broadleaf vegetation displayed the smallest value due to the difference in light use efficiencies.

Key words: NPP; PAR; MODIS; EVI; light use efficiency

About the first author: WANG Lunche, Ph.D candidate, concentrated on research in atmospheric radiation and remote sensing of environment.
E-mail: LuncheWang@whu.edu.cn