

# 荆州市农田植被净初级生产力时空特征分析

黄端<sup>1, 2</sup> 池泓<sup>1, 3</sup> 朱浪<sup>3, 4</sup> 邓艳君<sup>3, 4</sup> 夏智宏<sup>3, 4</sup>

(1 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077; 2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025; 4 荆州市气象局, 荆州 434020)

**摘要:** 基于MODIS数据和光能利用率模型估算的植被净初级生产力(NPP)数据, 辅以气候和土地利用数据, 利用趋势分析、GIS分析和统计分析方法, 探讨了2000—2015年荆州农田NPP的时空特征。结果表明: 1) 2000—2015年荆州农田年NPP均值略有下降趋势, 但整体上趋于平稳。年NPP总量呈增加趋势, 2000—2005年呈增加趋势, 2005—2009年呈波动性下降趋势, 2009—2016年呈增加趋势。2) 空间分布上, 2000—2015年荆州市农田NPP存在时空异质性, NPP年均最大值为江陵县, 最低的地区是沙市区和洪湖市。3) 荆州农田NPP有64.32%为无显著变化, 显著上升和显著下降区域分别为3.82%和31.86%。农田NPP呈显著上升的区域主要分布在江陵县、沙市区、监利县以及零星分布在洪湖市和松滋市, 农田NPP呈显著下降的区域主要分布在荆州市西南部的松滋市、公安县和石首市, 东北部的洪湖市, 以及西北部的荆州区。

**关键词:** 荆州, 农田, 植被净初级生产力, 时空特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.016

## Space-Time Characteristics of Net Primary Productivity of Farmland Vegetation in Jingzhou City

Huang Duan<sup>1, 2</sup>, Chi Hong<sup>1, 3</sup>, Zhu Lang<sup>3, 4</sup>, Deng Yanjun<sup>3, 4</sup>, Xia Zhihong<sup>3, 4</sup>

(1 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077 2 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 3 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jiangnan Plain, Jingzhou 434025 4 Jingzhou Meteorological Bureau, Jingzhou 434020)

**Abstract:** Based on MODIS data and light energy utilization rate model to estimate NPP data, supplemented by climate and land use data, by using the trend analysis, GIS analysis and statistical analysis method, we here discusses the space-time characteristics of vegetation net primary productivity of farmland in Jingzhou City for 2000 - 2015. The results show that: (1) the annual average NPP of farmland in Jingzhou decreased slightly, but the overall trend was stable during the period from 2000 to 2015. The total amount of NPP increased in 2000-2005, the volatility decreased in 2005-2009 while increased in 2009-2016; (2) in terms of spatial distribution, there are spatial and temporal heterogeneity in farmland NPP of Jingzhou city for 2000 - 2015. The annual maximum NPP was in Jiangling County, while the lowest area was in Shashi District and Honghu City; (3) there was no significant change in the NPP being about 64.32% of the Jingzhou farmland, while the areas with significant rise and fall were of 3.82% and 31.86% of the farmland, respectively. The areas with significant increase of farmland NPP are mainly distributed in Jiangling County, Shashi district, Jianli County and scattered in Honghu City and Songzi City. The areas with significant decrease of farmland NPP are mainly distributed in in Songzi City, public security county and Shishou City, the southwest of the Jingzhou City, Honghu City; in the northeast, named as Honghu City and in the northwest, i.e. Jingzhou District.

**Keywords:** Jingzhou, farmland, vegetation net primary productivity, space-time characteristics

### 0 引言

净初级生产力(NPP)是指绿色植被在单位时间、单位面积内所累积的有机干物质总量,它能够以统一的标准尺度来衡量生态系统生产力,可以避免以作物产量来衡量农田生产力时由于农业结构调整、农

作物种植品种的改变等干扰,直接反映耕地的现实生产能力,是很好的农田生产力衡量指标<sup>[1]</sup>。遥感科学与地理信息系统以及基于遥感观测的植物生理生态理论研究的迅速发展,为区域甚至全国尺度的生态系统生产力的实时、连续、长时间序列的时空变化特征的探测提供了大尺度、高精度、高时间分辨率的数据与方法<sup>[1-2]</sup>。

MODIS遥感卫星数据自2000年投入使用以来,其高时间分辨率的优势,在农业监测方面得到广泛的应

收稿日期: 2018年6月21日; 修回日期: 2018年9月3日  
第一作者: 黄端(1990—), Email: huangduan@asch.whigg.ac.cn  
通信作者: 朱浪(1989—), Email: 1010405827@qq.com

用。已经对玉米、小麦和大豆等植物进行遥感监测以及在三江平原、华北平原以及黄淮海地区等不同的地区进行了农田生产力的估算。基于遥感估算的NPP已经成为农田生产力监测的一个重要指标。王宗明等<sup>[3]</sup>在三江平原研究了土地利用变化对农田NPP的影响研究；赵晶晶等<sup>[4]</sup>在华北平原基于NPP评估了冬小麦总初级生产力；Yan等<sup>[5]</sup>基于VPM模型在禹城通量站点模拟2003—2004年的冬小麦-夏玉米轮作农田的NPP，结果表明模拟结果和实测具有很好的一致性；Wang等<sup>[6]</sup>在通榆农田生态系统，利用VPM模型对玉米进行了模拟和评估，估算和实测值 $R^2$ 达到0.7984。Doughty等<sup>[7]</sup>在美国俄克拉荷马州基于VPM模型估算NPP，研究了在洪涝干旱条件下对农田NPP的影响。VPM模型是一种光能利用率模型，相比于其他NPP估算模型，其具有输入参数简洁、精度高、计算快等优势。自2004年VPM模型建模以来，已经在农田生态系统上开展了一系列的模型验证工作，具有很好的模拟能力。因此，基于VPM模型对荆州市进行NPP模拟，分析荆州市的NPP时空分布特征以及变化趋势特征，可以清晰地了解荆州市农田生产力的分布特征。

荆州地处长江中游，居长江经济带发展的重要区域位置，是湖北省重要的粮食生产基地，同时也是长江中下游地区重要的粮食主产区。因此，基于MODIS遥感数据和VPM光能利用率模型估算2000—2015年农田NPP，运用趋势分析、GIS分析和数理统计方法，对荆州农田NPP时间变化趋势、空间分布特征和空间趋势特征进行分析。有助于了解荆州农田生产力特征，对促进农业自然资源合理利用、区域农田科学管理、区域农业决策与规划具有重要意义。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

荆州市（图1）地处长江中游、湖北省南部地

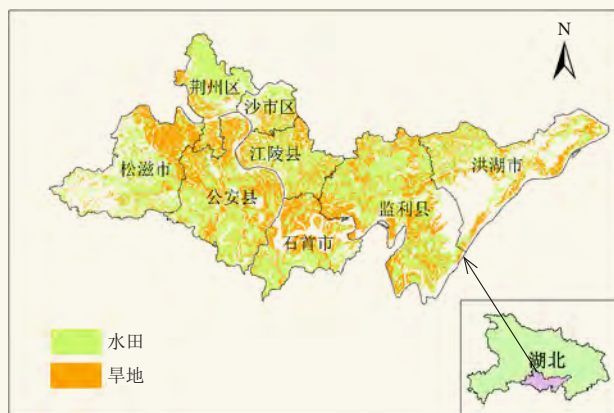


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

区，位于沃野千里的江汉平原腹地<sup>[8]</sup>。荆州市主要包括洪湖市、监利县、石首市、江陵县、松滋市、公安县、沙市区、荆州区等8个行政区，2015年末常住人口570.59万人，国土面积约为14067 km<sup>2</sup>，国民生产总值为1590.5亿元<sup>[9]</sup>。荆州是中国重要的“鱼米之乡”，2015年末常用耕地面积4693.9 km<sup>2</sup>，其中水田为3489.2 km<sup>2</sup>，旱地为1204.7 km<sup>2</sup>；粮食作物主要以种植水稻、小麦和大豆为主，是湖北省重要的粮食生产基地。

## 1.2 数据

### 1.2.1 遥感数据

VPM模型估算NPP输入的遥感数据主要包括增强型植被指数（EVI）、地表水分指数（LSWI），可以利用MODIS数据（MOD09A1）500 m空间分辨率、8 d时间分辨率的地表反射率数据计算而来。MOD09A1是由MOD09GA逐日产品最大值合成，最大值合成可以有效降低云雨天气对遥感影像数据质量的影响。其中

$$EVI = G \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + (C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue}) + L}, \quad (1)$$

式中， $L=1$ ， $C_1=6$ ， $C_2=7.5$ ， $G=2.5$ ； $\rho_{nir}$ 、 $\rho_{red}$ 和 $\rho_{blue}$ 分别为遥感数据的近红外波段、红波段和蓝波段的地表反射率。

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}}, \quad (2)$$

式中， $\rho_{nir}$ 和 $\rho_{swir}$ 分别为遥感数据的近红外波段和短波红外波段的地表反射率。

### 1.2.2 气象数据

气象数据来源于荆州市气象局，包括每日平均气温、降水量、日照时数等要素数据。NPP估算中应用的温度数据采用ANUSPLIN4.3软件中的样条插值方法进行插值，获取每天的500 m分辨率的气温栅格数据，然后采用ArcGIS10.4软件计算为8 d平均栅格气温数据。

### 1.2.3 土地利用与土壤数据

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心的2000—2015年1：10万土地利用现状分类数据。荆州市农田主要是土地利用分类中的耕地，包括水田和旱地两类。

## 2 原理与方法

### 2.1 基于VPM模型的NPP模拟

NPP是通过VPM光能利用率模型计算得到<sup>[10-13]</sup>，模型已经在中国农田生态系统进行验证<sup>[14]</sup>。VPM模型是基于植被叶片和冠层可以分为叶绿素部分和非叶

绿素部分的概念, 植被冠层吸收光合有效辐射比例分为叶绿素吸收部分 ( $FPAR_{chl}$ ) 和非光合植被吸收部分 ( $FPAR_{npv}$ ), 只有叶绿素吸收部分用于光合作用。因此, VPM模型的表达如下形式

$$GPP = \varepsilon_g \cdot FPAR_{chl} \cdot PAR, \quad (3)$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon_0 \cdot T_{scalar} \cdot W_{scalar} \cdot P_{scalar}, \quad (4)$$

$$NPP = s \cdot GPP, \quad (5)$$

式中,  $\varepsilon_g$  为光能利用率 (g/MJ);  $PAR$  为光合有效辐射 ( $MJ/m^2$ );  $FPAR_{chl}$  为植被光合作用吸收的光合有效辐射比;  $\varepsilon_0$  值表示为最大光能利用率 (g/MJ);  $s$  为呼吸消耗与GPP的比例系数;  $T_{scalar}$ 、 $W_{scalar}$  和  $P_{scalar}$  分别为温度、水分和作物物候对最大光能利用率的调节系数。

在VPM模型中,  $PAR$  由MODIS数据产品计算得到。

$FPAR_{chl}$  被近似的用增强型植被指数EVI来表达

$$FPAR_{chl} = a \cdot EVI, \quad (6)$$

式中,  $a$  为经验系数, 一般取值为1<sup>[10-11]</sup>。

$T_{scalar}$  表达温度对作物光合作用的影响, 采用陆地生态系统模型的算法<sup>[15]</sup>

$$T_{scalar} = \frac{(T - T_{min})(T - T_{max})}{(T - T_{min}) \cdot (T - T_{max}) - (T - T_{opt})^2}, \quad (7)$$

式中,  $T_{min}$ 、 $T_{max}$  和  $T_{opt}$  分别为农作物进行光合作用时的最低、最高和最适温度 ( $^{\circ}C$ )<sup>[16]</sup>。当空气温度小于光合作用最低温度时,  $T_{scalar}$  设置为0。

$W_{scalar}$  表达了水分因素对农作物光合作用的影响。模型中, 使用对水分敏感的陆地水分指数 (LSWI) 进行计算。水分因素的计算公式如下

$$W_{scalar} = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{max}}, \quad (8)$$

式中,  $LSWI_{max}$  为每个栅格像元内农作物生长季的最大LSWI。

$P_{scalar}$  表示植被叶龄对作物冠层尺度上光合作用的影响。 $P_{scalar}$  的计算主要取决于叶的寿命, 对于经历出牙、舒展、枯萎和凋落的植被, 分两个阶段计算, 叶出现到也充分舒展阶段计算公式如下

$$P_{scalar} = \frac{1 + LSWI}{2}, \quad (9)$$

叶片完全舒展后的  $P_{scalar}$  设置为1。

VPM模型输入数据的步长周期为8 d, 首先计算8 d周期内的NPP, 然后年NPP为计算的全年8 d NPP数据的累加之和。其中, 输入参数中:  $PAR$  光合有效辐射为8 d的累加和, 温度为8 d的均值。

## 2.2 趋势分析

荆州农田NPP的变化趋势采用Sen趋势分析方

法<sup>[17]</sup>, 并用Mann-Kendall统计检验方法对NPP变化趋势进行显著性检验。Sen趋势分析方法的优势在于不要求数据具有一定的分布形态, 避免时间序列数据缺失的影响, 同时可以剔除异常值对时间序列分析的干扰。计算公式如下

$$Sen_{slope} = median\left(\frac{NPP_j - NPP_i}{j - i}\right), \forall j > i, \quad (10)$$

式中,  $Sen_{slope}$  为NPP变化趋势;  $i, j$  为时间序列数;  $NPP_i$  和  $NPP_j$  分别为第  $i, j$  时间的NPP的值。当  $Sen_{slope} > 0$  表明NPP呈上升趋势; 当  $Sen_{slope} < 0$  表明NPP呈下降趋势。

非参数统计检验Mann-Kendall方法对时间序列数据正态性不要求, 适合非线性趋势检验。计算公式如下

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{v}}, & s > 0 \\ 0, & s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{v}}, & s < 0 \end{cases}, \quad (11)$$

$$s = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sign}(NPP_j - NPP_i), \quad (12)$$

$$\text{sign}(NPP_j - NPP_i) = \begin{cases} 1, & NPP_j - NPP_i > 0 \\ 0, & NPP_j - NPP_i = 0 \\ -1, & NPP_j - NPP_i < 0 \end{cases}, \quad (13)$$

$$v = n(n-1)(2n+5)/18, \quad (14)$$

式中,  $NPP_i$  和  $NPP_j$  分别为第  $i$  年和第  $j$  年的NPP的值;  $n$  为时间序列的长度;  $\text{sign}$  为符号函数;  $s$  为检验统计量;  $v$  为方差;  $Z$  为正态分布的统计量。在给置信度  $\alpha$  水平下, 当  $|Z| > u_{1-\alpha/2}$  时, 表示时间序列NPP值在  $\alpha$  水平下具有显著性。

## 3 时空格局

### 3.1 时间变化特征

荆州市NPP年均值, 2000—2004年呈增加趋势, 2004—2006年出现下降趋势, 2006—2009年中除2007年有所回升外持续下降, 2009—2015年呈增加趋势(图2)。农田NPP年均值变化范围是715.5~879.08 gC/( $m^2 \cdot a$ ), 平均值为786.2 gC/( $m^2 \cdot a$ ), 最大值是2004年, 最小值是2009年; 其中水田、旱地与农田的年际变化趋势一致, 且2000—2008年水田NPP年均值略高于旱地NPP年均值, 2009—2016年旱地NPP年均值略高于水田NPP年均值。

### 3.2 空间分布特征

2000—2015年荆州市各县(市、区)NPP年均值如图

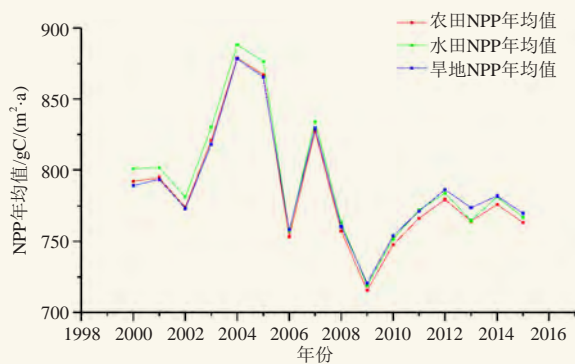


图2 2000—2015年荆州农田年NPP均值变化趋势  
Fig. 2 Variations of annual NPP in Jingzhou farmland during the period from 2000 to 2015

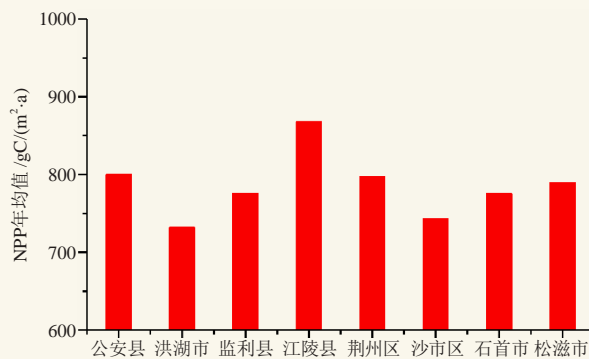


图3 2000—2015年荆州市各县市区NPP年均值  
Fig. 3 Averaged annual NPP for each county or district in the Jingzhou City during the period from 2000 to 2015

3所示,江陵县NPP年均值最大,为867.7 gC/(m<sup>2</sup>·a);其次为公安县799.8 gC/(m<sup>2</sup>·a);沙市区和洪湖市的NPP年均值最小,分别为742.8和731.7 gC/(m<sup>2</sup>·a)。

2000—2015年荆州市各县(市、区)每年的NPP值如图4所示。荆州市各县(市、区)同一年份不同地区和同一地区不同年份NPP值均存在不同的差异,说明荆州市农田NPP存在时空异质性。

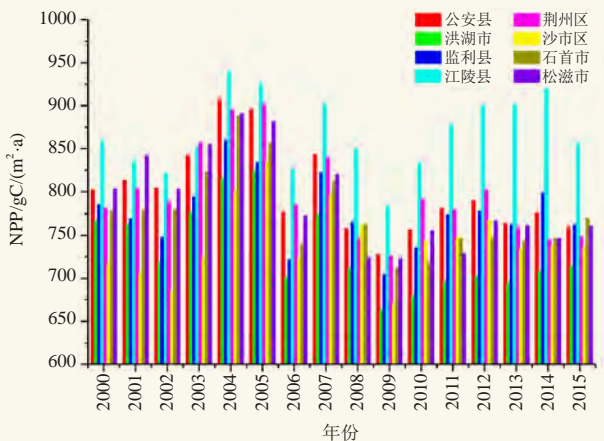


图4 2000—2015年荆州市各县(市、区)NPP分布  
Fig. 4 Variations of annual NPP for each county or district in the Jingzhou City during the period from 2000 to 2015

### 3.3 空间趋势特征

为监测荆州市农田NPP变化趋势,计算了2000—2015年农田NPP的Sen趋势度,并进行Mann-Kendall检验,将结果划分为无显著变化和显著变化( $P < 0.05$ )两个等级(图5)。结果表明,荆州市农田NPP有64.32%为无显著变化区域,显著上升和显著下降区域分别为3.82%和31.86%;2000—2015年农田NPP呈显著上升的区域主要分布在江陵县、沙市区、监利县以及零星分布在洪湖市和松滋市,农田NPP呈显著下降的区域主要分布在荆州市西南部的松

滋市、公安县和石首市,东北部的洪湖市,以及西北部的荆州区。

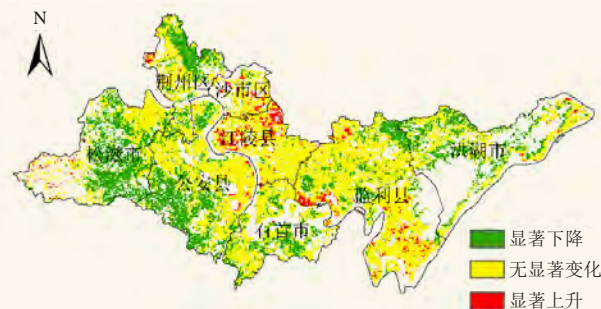


图5 2000—2015年荆州市农田NPP变化趋势与显著性  
Fig. 5 Map of change trend and significance of NPP in Jingzhou farmland during the period from 2000 to 2015

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

基于MODIS数据和光能利用率模型估算的NPP数据,辅以气象和土地利用数据,利用趋势分析和统计分析方法,对2000—2015年荆州市农田NPP的时间变化趋势、空间分布特征和空间趋势特征进行分析。有以下结论:

1) 时间趋势上,荆州市NPP年均值2000—2004年呈增加趋势,2004—2006年出现下降趋势,2006—2009年(除2007年有所回升外)持续下降,2009—2015年呈增加趋势。

2) 空间分布上,2000—2015年荆州市农田NPP存在空间和时空异质性。NPP年均最大值为江陵县,最小的地区是沙市区和洪湖市。

3) 空间趋势性上,荆州市农田NPP有64.32%为无显著变化,显著上升和显著下降区域分别为3.82%和31.86%;农田NPP呈显著上升的区域主要分布在江陵县、沙市区、监利县以及零星分布在洪湖市和松滋

市, 农田NPP呈显著下降的区域主要分布在荆州市西南部的松滋市、公安县和石首市, 东北部的洪湖市, 以及西北部的荆州区。

## 4.2 讨论

农田NPP时空分布与变化特征是由多因素共同作用而形成的, 包括气候因素、土壤、地形以及人类活动因素。气候因素上, 荆州市NPP主要受太阳辐射、气温和降水的影响。荆州地处南方, 日照充足, 农作物光合有效辐射较强, 对NPP的累积有很大的促进作用, 适宜的温度和降水对NPP也具有促进作用, 而气温的升高有时候会超过作物适宜的生长温度, 尤其南方夏季容易出现高温和多雨天气, 对植物生长和NPP的累加具有抑制作用。荆州市土壤质地主要以水稻土和潮土两种为主, 水稻土和潮土中的粉沙土和黏土含量较高, 保肥能力很好, 有机质含量高, 因此对于NPP的增加具有重要的作用。地形对农田NPP具有重要的影响。荆州市由于地形条件属于“涝渍相随, 旱涝并存”, 对农业生态环境造成影响, 比如洪湖市地势较低, 容易涝渍, 因此涝渍对于NPP有一定的影响。人类活动也是农田NPP变化的最重要的因素。

### 参考文献

- [1] 闫慧敏, 刘纪远, 曹明奎. 中国农田生产力变化的空间格局及地形控制作用. 地理学报, 2007, (2): 171-180.
- [2] 袁甲, 沈非, 王甜甜, 等. 安徽省农田净初级生产力时空变化特征及影响因素——基于MOD17A3的研究. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2016, (6): 568-574.
- [3] 王宗明, 国志兴, 宋开山, 等. 2000—2005年三江平原土地利用/覆被变化对植被净初级生产力的影响研究. 自然资源学报, 2009, 24(1): 136-146.
- [4] 赵晶晶, 刘良云, 徐自为, 等. 华北平原冬小麦总初级生产力的遥感监测. 农业工程学报, 2011, 27(s1): 346-351.
- [5] Yan H, Fu Y, Xiao X, et al. Modeling gross primary productivity for winter wheat-maize double cropping system using MODIS time series and CO<sub>2</sub>, eddy flux tower data. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 129(4): 391-400.
- [6] Zheng W, Xiao X, Yan X. Modeling gross primary production of maize cropland and degraded grassland in northeastern China. Agricultural & Forest Meteorology, 2010, 150(9): 1160-1167.
- [7] Doughty R, Xiao X, Wu X, et al. Responses of gross primary production of grasslands and croplands under drought, pluvial, and irrigation conditions during 2010–2016, Oklahoma, USA. Agricultural Water Management, 2018, 204: 47-59.
- [8] 许倍慎. 江汉平原土地利用景观格局演变及生态安全评价. 武汉: 华中师范大学博士学位论文, 2012.
- [9] 湖北省统计局, 国家统计局湖北调查总队. 湖北统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [10] Xiao X, Hollinger D, Aber J, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. Remote sensing of environment, 2004, 89(4): 519-534.
- [11] Xiao X, Zhang Q, Braswell B, et al. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(2): 256-270.
- [12] Xiao X, Zhang Q, Hollinger D, et al. Modeling gross primary production of an evergreen needleleaf forest using MODIS and climate data. Ecological Applications, 2005, 15(3): 954-969.
- [13] Xiao X, Zhang Q, Saleska S, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(1): 105-122.
- [14] 牛忠恩, 闫慧敏, 黄玫, 等. 基于MODIS-OLI遥感数据融合技术的农田生产力估算. 自然资源学报, 2016, 31(5): 875-885.
- [15] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, et al. Potential Net Primary Productivity in South America: Application of a Global Model. Ecological Applications, 1991, 1(4): 399-429.
- [16] 陈静清, 闫慧敏, 王绍强, 等. 中国陆地生态系统总初级生产力VPM遥感模型估算. 第四纪研究, 2014, 34(4): 732-742.
- [17] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000–2014年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因. 地理学报, 2015, 70(5): 705-716.

(上接95页)

在着多种藻类和其他污染, 具有不同的光谱特征, 需利用高光谱波段数据进一步区分; 2) 蓝藻的卫星遥感与地面光谱仪测量得到的光谱特征需要进一步拟合分析; 3) 水质数据应用和实地测量验证需要进一步完善。

### 参考文献

- [1] 杨柳燕, 肖琳. 湖泊蓝藻水华暴发、危害与控制. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] Hoge F E, Swift R N. Airborne simultaneous spectroscopic detection of laser-induced water Raman backscatter and fluorescence from chlorophyll a and other naturally occurring pigments. Applied Optics, 1981, 20: 3197-205.
- [3] Hoge F E, Swift R N. Photosynthetic accessory pigments: Evidence for the influence of phycoerythrin on the submarine light field. Remote Sensing of Environment, 1990, 34(1): 19-35.
- [4] C.T Wezernak, Tanis F.J, C.A. Baiza Trophic state analysis of inland lakes. Remote Sensing of Environment, 1976(5): 147-165.
- [5] 疏小舟, 尹球, 匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系. 遥感学报, 2000, 4(1): 41-45.
- [6] 段洪涛, 张寿选, 张渊智. 太湖蓝藻水华遥感监测方法. 湖泊科学, 2008, 20(2): 145-152.
- [7] 徐京萍, 张柏等. 基于MODIS数据的大湖蓝藻水体识别模式. 湖泊科学, 2008, 20(2): 191-195
- [8] Morel A, Prieur L. Analysis of variation in ocean color. Limnology Oceanography, 1997, 22: 709-722
- [9] 王嘉楠, 叶勤, 林怡. 不同大气校正方法对中小湖泊蓝藻遥感动态监测的影响. 遥感技术与应用, 2013, 28(1): 157-164.
- [10] 林怡, 潘琛, 陈映鹰, 等. 基于遥感影像光谱分析的蓝藻水华识别方法. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(8): 1247-1252.
- [11] Liu H Q, Huete A R. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. IEEE Tans Geosci Remote Sens, 1995, 33: 457-465.