

文章编号: 1000-5641(2018)01-0163-08

北京市门头沟区 2003—2014 年植被初级生产力 时空变化

王九中¹, 邬明权²

(1. 北京林业大学 林学院, 北京 100083;
2. 中国科学院 遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 采用 CASA 模型和 30 m 分辨率 Landsat 数据生成了门头沟区 2003—2014 年的植被净初级生产力 (NPP) 产品, 分析了门头沟区 NPP 的空间分异特征, 基于 MODIS 年 NPP 产品分析了门头沟区 2003—2014 年 NPP 的年际变化特征, 基于 MODIS 植被总初级生产力 (GPP) 时间序列数据分析了门头沟区典型年份的年内 GPP 变化特征。结果表明: 2003—2014 年门头沟区 NPP 受地形及人为因素影响, 低值区主要沿河流谷地及东部河流出山口处分布, 在整体区域上呈现四周高、中间低的特征; 自 2005 年以来年际 NPP 总体平稳, 没有明显的增加或减少趋势; GPP 年内波动明显, 5—9 月 GPP/NPP 的差异对不同年份间 GPP/NPP 差异的贡献最大。

关键词: 植被净初级生产力; CASA 模型; Landsat; MODIS; EVI

中图分类号: Q948 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2018.01.016

Spatio-temporal analysis about the primary productivity of Mentougou District in Beijing from 2003 to 2014

WANG Jiu-zhong¹, WU Ming-quan²

(1. The College of Forestry of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote
Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Ten years NPP products of Mentougou District from 2003 to 2014 are generated using CASA model and Landsat remote sensing data. It is used to show the spatial distribution characteristic about Mentougou District' NPP. Inter-annual variability characteristic about Mentougou District' annual amount NPP is analyzed using MODIS17A3 products from 2003 to 2014. The intra-annual variability characteristic about Mentougou District' GPP was analyzed based on MODIS17A2 product in some typical years (namely 2004, 2007, 2008, 2009, 2011, 2012). The results show that the NPP of

收稿日期: 2017-03-31

基金项目: 中国科学院青年创新促进会资助(2017089)

第一作者: 王九中, 男, 博士研究生. 研究方向为生态遥感、生态学.

E-mail: wangjiuzhong0103@163.com.

通信作者: 邬明权, 男, 副教授, 研究方向为生态遥感. E-mail: wumq@radi.ac.cn.

Mentougou District has a significant spatial differentiation characteristic that the value of NPP is low on median and it is high on other region. The NPP value is very low distributed along the river valleys. The annual amount NPP has no significant increasing or decreasing trend from 2005. GPP fluctuated significantly during the year. The differences in GPP / NPP between May and September contributed the most to the differences in GPP / NPP among different years.

Key words: NPP; CASA model; landsat; MODIS; EVI

0 引言

在陆地生态系统中,植被初级生产力包括植被总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)和植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP). GPP 指绿色植物在单位时间单位面积上由光合作用产生的有机物质总量, NPP 指 GPP 中扣除自养呼吸后的剩余部分^[1-2]. GPP/NPP 作为陆地生态系统的关键参数^[3-4], 在预测未来大气中 CO₂ 和其他温室气体含量、认识大气圈与生物圈的相互作用等科学问题研究上发挥着重要作用, 在全球碳循环过程中扮演着重要角色^[5-7].

随着全球气候变化和生态环境恶化,自 20 世纪 70 年代起, NPP 成为国际生态学和地学领域的研究热点之一,国内外学者提出了多种 NPP 估算模型^[8-11]. 在众多 NPP 估算模型中, Carnegie Ames Stanford Approach(CASA) 遥感过程模型是基于光能利用率和遥感数据来估算 NPP 的过程模型, 在全球和区域植被NPP的估算研究中有着十分广泛的应用^[12]. 例如, 董丹和倪健^[13]利用 CASA 遥感模型和空间分辨率为 1 km 的 SPOT NDVI 遥感数据估算了中国西南喀斯特地区 1999—2003 年的植被 NNP, 指出了该地区植被 NPP 的时空变化特征; 张镱锂等^[14]利用 CASA 遥感模型和空间分辨率为 8 km 的 GIMMS 遥感数据研究了 1982—2009 年青藏高原高寒草地 NPP 的时空分异特征; 李秀芬等^[15]利用 CASA 遥感模型和空间分辨率为 1km 的 MODIS 遥感数据研究了 2006 年黑龙江省森林 NPP 的季节性变化规律. 对于小区域尺度的 NPP 估算而言, 空间分辨率为 1km 的遥感数据因空间分辨率太低而不能发现 NPP 在区域细节上的变化; Landsat TM(Thematic Mapper) 和 OLI(Operational Land Imager) 数据的空间分辨率为 30 m, 有利于提高小区域尺度 NPP 估算的空间分布精度. 如管小彬等^[16]基于 Landsat 影像监测了武汉市冬季 NPP 及其时空变化分析; 韩艳飞等^[17]分析了近 30 年中关村经济区植被净初级生产力对土地利用变化的动态响应; 袁甲等^[18]分析了皖江城市带土地利用/覆被变化对区域净初级生产力的影响.

然而, 目前的研究主要利用单传感器反演的 NPP 来分析区域生态环境. 由于 MODIS 数据和 Landsat TM、OLI 数据各自在空间分辨率和时间分辨率方面的不足, 导致基于 MODIS 数据生产的 NPP 产品难以适用于 NPP 空间分布规律的分析, 而基于 Landsat 数据生产的 NPP 则难以适用于 NPP 时间变化特征的分析. 针对这一问题, 本研究提出了一种综合 MODIS 和 Landsat 的 NPP 产品进行小区域 NPP 时空变化特征分析的方法. 门头沟区是北京市的生态涵养区之一, 具有重要的生态功能, 研究该区的 NPP 时空变化特征, 可为评价该区乃至北京的生态可持续发展系统提供一个重要生态指标. 本文以门头沟区为研究区, 采用 CASA 遥感模型, 基于 30 m 空间分辨率的 Landsat TM 和 OLI 数据生产门头沟区 2003—2014 年每年中某一天的 NPP 产品, 用于分析门头沟区 NPP 的空间分布研究; 基于 2003—2014 年 MODIS17A3 产品(年 NPP 总量产品)和 MODIS17A2 产品(8 天合成的 GPP 产品)开展门头沟

区 NPP 的年际变化和 GPP 年内变化特征研究及驱动因素分析.

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

门头沟区是北京市下辖的市辖区, 地处北京西部山区, 位于东经 $115^{\circ}25'00''$ 至 $116^{\circ}10'07''$, 北纬 $39^{\circ}48'34''$ 至 $40^{\circ}10'37''$ 之间. 东西长约 62 km, 南北宽约 34 km, 总面积 1455 km^2 . 门头沟区地处华北平原向蒙古高原过渡地带, 地势西北高, 东南低, 山地面积占门头沟区总面积的 98.5%, 是北京市唯一的纯山区, 也是北京市西部重要的生态环境屏障, 具有十分重要的生态意义.

1.2 数据来源与预处理

本文选取 2003—2014 年每年一期无云的 Landsat 数据. 数据选取规则是: ①由于 8 月份植被状况较快, 且有无云 Landsat 数据的年份较多, 首选每年 8 月份的数据; ②如果当年没有 8 月份的数据, 则选择距离 8 月份时间最短的数据; ③如果两期数据距离 8 月份时间相同, 则选择植被状况最好的数据. 选取具体数据的日期见表 1.

表 1 选用 Landsat 数据的获取日期以及传感器类型

Tab. 1 The date and the sensor type of Landsat data

序号	影像获取日期	传感器类型	序号	影像获取日期	传感器类型
1	2003-05-24	TM	6	2008-09-10	TM
2	2004-06-11	TM	7	2009-08-12	TM
3	2005-06-30	TM	8	2010-08-15	TM
4	2006-06-17	TM	9	2013-08-23	OLI
5	2007-09-24	TM	10	2014-08-26	OLI

Landsat TM 和 OLI 影像来自 <https://earthexplorer.usgs.gov/>, 预处理主要包括辐射定标, 大气校正、几何校正、投影转换(即将影像原始的 UTM 投影转成 Albers 等积投影)、数据拼接、裁剪等.

MODIS17A2/3 产品来自 <https://earthexplorer.usgs.gov/>, 数据预处理主要包括投影转换(即将影像原始投影转成 Albers 等积投影)、数据拼接、裁剪、降噪等. 受云雨天气条件(或其他因素)的影响, 数据存在异常值. 例如, 受云的阴影的遮挡, NDVI 值会严重偏低, 进而影响 GPP 值严重偏低. 对这些异常值删除后, 采用等距插值方法进行填充.

气象数据为斋堂气象观测站 2003—2014 年的观测数据, 包括年平均气温和年降水量, 以及对应 Landsat 影像获取日期的日平均气温. 斋堂气象观测站位于门头沟山区, 观测数据几乎不受人为因素的干扰, 能够代表门头沟山区的气候特征.

2 方法和技术路线

2.1 GPP/NPP 估算方法

基于 Landsat 数据和光能利用率原理建立 NPP 的模型如下公式所述^[19]:

$$\text{NPP} = \text{PAR} \times \text{FPAR} \times \varepsilon^* \times F(w) \times F(T) - R_\alpha. \quad (1)$$

其中: PAR 为光合有效辐射, 单位为 MJ/m^2 ; FPAR 为植被层对入射光合有效辐射的吸收分量, 无单位; ε^* 最大光能利用率, 单位为 gC/MJ ; $F(w)$ 为水分对光能利用率的影响因子, 无单位; $F(T)$ 为温度对光能利用率的影响因子, 无单位; R_α 是植被自养呼吸量, 单位为 gC/m^2 .

2.2 估算关键参数遥感反演

按照光能利用率模型, 根据门头沟区的实际辐射、气温、降水、植被指数、植被类型等实际数据反演了 NPP 模型的各输入参数. 各参数的具体计算方法如下.

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, 其值占入射到地表的太阳总辐射 (R_s , MJ/(m²·d)) 的 50% 左右, 所以 PAR 可表示为

$$PAR = R_s \times 0.5, \quad (2)$$

$$R_s = R_a \times (a_s + b_s \times n/N), \quad (3)$$

$$N = 24 \times \omega_s / \pi. \quad (4)$$

式中, n 表示实际日照时数, 可由气象站数据插值得到. N 表示最大日照时数. a_s 表示阴天 ($n = 0$) 时大气外界辐射到达地面的分量, b_s 表示晴天 ($n = N$) 时大气外界辐射到达地面的分量, 其中 a_s 和 b_s 的取值可以利用模型所推荐的经验参数, 即 $a_s = 0.25$, $b_s = 0.5$. R_a 为大气上界太阳辐射 (MJ/(m²·d)), 可由以下公式计算得到:

$$R_a = \frac{24 \times 60 \times G_{sc}}{\pi} \times d_r \times (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s), \quad (5)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \times \cos(2\pi J/365), \quad (6)$$

$$\delta = 0.409 \times \sin(2\pi J/365 - 1.39), \quad (7)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta). \quad (8)$$

式中, G_{sc} 为太阳常数, 取 0.082 MJ/(m²·min), d_r 为日地相对距离的倒数, δ 为太阳赤纬(弧度), ω_s 为日落时角(弧度), ϕ 为地理纬度(弧度), J 为某一天在一年中的排序数.

$FAPAR$ 是基于 Enhanced Vegetation Index(EVI) 的线性方程来估算^[19]:

$$FAPAR = EVI = 2.5 \times \left(\frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + 6 \times \rho_{red} - 7.5 \times \rho_{blue} + 1} \right). \quad (9)$$

式中, ρ_{nir} 是近红外波段的地表反射率, ρ_{red} 是红波段的地表反射率, ρ_{blue} 是蓝波段的地表反射率.

水分限制因子 $F(w)$ 可以表示为^[20]:

$$F(w) = (1 + LSWI) / (1 + LSWI_{max}), \quad (10)$$

$$LSWI = (\rho_{nir} - \rho_{swir}) / (\rho_{nir} + \rho_{swir}). \quad (11)$$

式中, $LSWI$ 为陆表水分指数, $LSWI_{max}$ 是植被在生长季内的最大 $LSWI$, ρ_{nir} 、 ρ_{swir} 分别为近红外和短波红外波段反射率.

本模型 $F(T)$ 按 Raich 等^[21]建立的陆地生态模型中的方法来计算:

$$F(T) = \frac{(T - T_{min}) \times (T - T_{max})}{(T - T_{min}) \times (T - T_{max}) - (T - T_{opt})^2}. \quad (12)$$

式中, T 为大气温度, T_{min} 、 T_{opt} 和 T_{max} 分别为光合作用的最低、最适和最高温度. 门头沟区以 C4 植物为主, 对 C4 植物, 将 T_{min} 和 T_{max} 分别定义为 0°C 和 50°C. 假设植物已经适应了其所生长的温度环境的情况下, 最适温度可定义为生长季的长期平均温度.

最大光合利用率基于 BGC 模型进行模拟, 初始化为 MOD17 NPP 产品采用的取值. 对于 C4 植物来说, 最大光合利用率 ε^* 为一个常数 2.76 g·(MJ)⁻¹.

自养呼吸量 (R_α) 可基于植物地上生物量 (Above-ground Biomass, Bag, kg/ha) 采用半经验公式计算^[19,22]:

$$R_\alpha = \left(0.53 \times \frac{\text{Bag}}{\text{Bag} + 50} \right) \times e^{\left(\frac{T_c - T_a}{50} \right)}. \quad (13)$$

式中, T_c 是植物光合作用的平均气温 (°C), T_a 是实测气温 (°C), Bag 为实测地上生物量 (g/m²).

3 结果分析

3.1 NPP 时空分异

3.1.1 NPP 的空间分布

根据上文的反演方法, 得到 2003—2014 年门头沟区 NPP(30 m 分辨率)空间分布图, 如图 1 所示. 受 Landsat 数据源限制, 每年尽量选择 1 景夏季(或接近夏季)的质量较好的影像进行 NPP 生产, 其中 2011 年和 2012 年 Landsat 数据缺失. 对图 1(a)–(j) 逐像元计算平均值, 得到近 10 年门头沟平均 NPP 的空间分布特征, 结果如图 1(k) 所示.

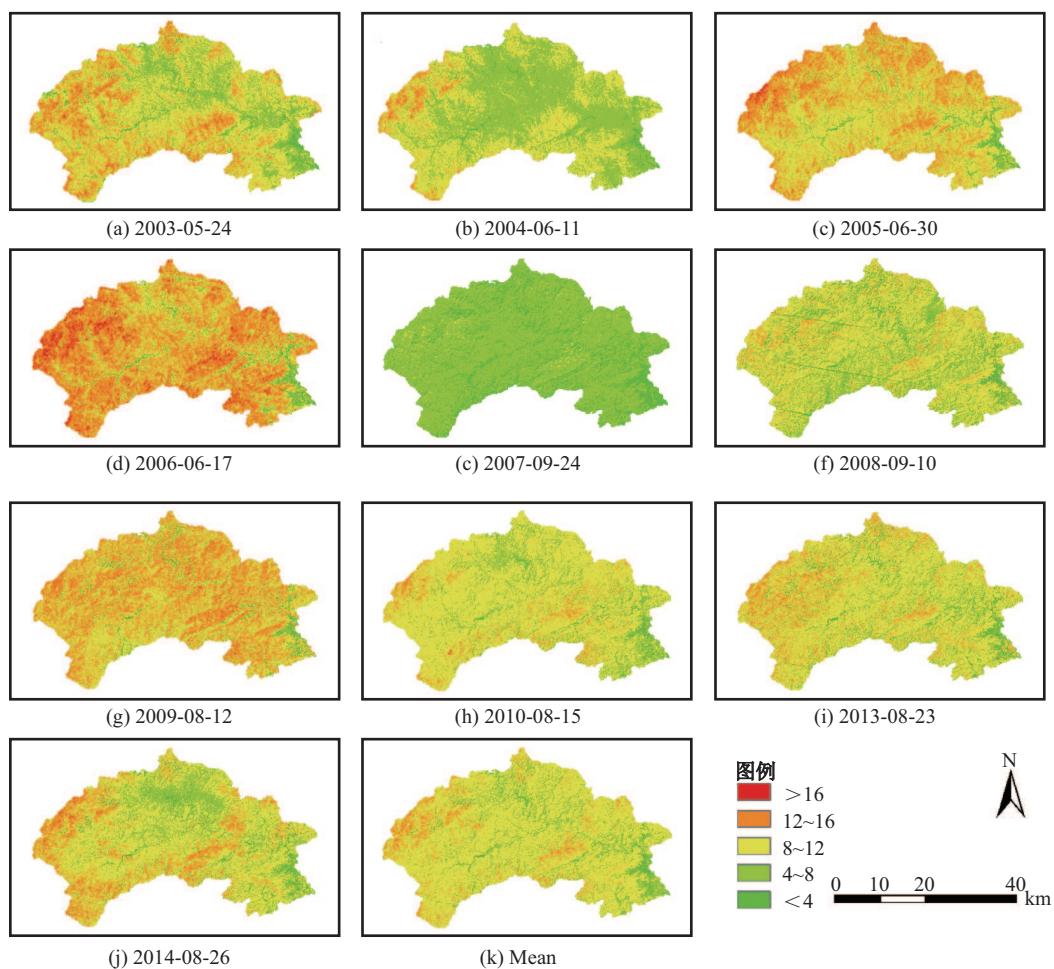


图 1 门头沟区 Landsat NPP 空间分布(单位 gC·m⁻²·d⁻¹)

Fig. 1 Spatial distribution of Landsat NPP in Mentougou region (unit gC·m⁻²·d⁻¹)

分析图 1, 门头沟区 NPP 在空间分布上的空间分异特征显著, 西北部山区和北部及南部部分山区单位面积上的 NPP 值最高, 面积占研究区总面积的 7.15%; 东部平原区上的 NPP 值最

低, 面积占研究区总面积的 1.68%, 主要是因为平原地区建设用地多, 植被稀疏; 研究区中部为山涧河谷地区, 植被较为稀疏, 面积占研究区总面积的 18.36%; 其他区域面积占研究区总面积的 72.81%. 如图 1(k) 中, 西北部山区和北部及南部部分山区 NPP 值在 $12 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上, 东部平原区 NPP 为 $4 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 以下; 中部山涧河谷地区 NPP 值在 $4 \sim 8 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间; 其他区域 NPP 值分布在 $8 \sim 12 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$.

总体上门头沟区 NPP 在空间上呈现四周高、中间低的分异特征, 受地形及人为因素影响, 极低值区主要沿河流谷地及东部河流出山口处分布, 呈现平放的“Y”型特征.

3.1.2 NPP 的年际变化

MOD17A3 产品为一年内 NPP 总量产品, 统计门头沟区 2003—2014 年每年的 NPP 均值, 结果如图 2 所示. 据图 2 分析, 门头沟区 2004 年的 NPP 值为 2003—2014 年的最大值, 为 $308 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 自 2005 年以来, 总体呈现平稳态势, 没有明显的增加或降低趋势. 但年际变化较大, 2008 年和 2012 年为两次峰值, 2010 年为低谷. 较 2005 年以来的均值 $184 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 而言, 2008 年和 2012 年 NPP 的增幅分别为 21% 和 25%, 2010 年 NPP 的降幅为 23%, 其他年份的波动幅度在 10% 以内. 从周期的角度分析, NPP 的峰值出现的周期为 4 年, 这一规律的内在原因有待结合其他相关数据进一步研究.

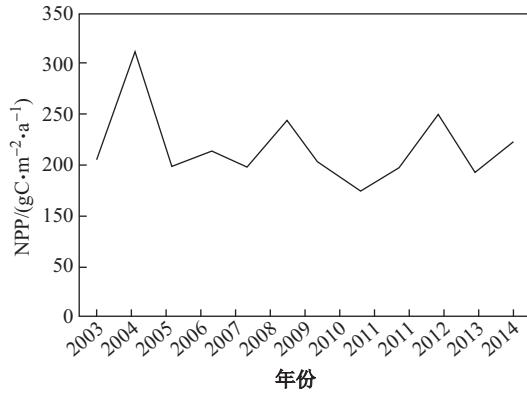


图 2 2003—2014 年门头沟区年 NPP 变化趋势 (MODIS17A3 产品)

Fig. 2 Variation trend of NPP in Mentougou region from 2003 to 2014(MODIS17A3 production)

3.2 GPP 年内变化

由 3.1 节分析得知, 门头沟 2004、2008 和 2012 年的年 NPP 高于历史平均水平, 2010 年的年 NPP 为历史最低水平, 其余年份为正常年. 随机选择 2007 年和 2011 年作为正常年份的代表年. 受 MODIS GPP 数据处理难度的影响, 本文只分析这 6 年的年内 GPP 变化特征(其中 2004、2008 和 2012 年代表了 GPP 的高值年份, 2010 年代表了 GPP 的低值年份, 2007 和 2011 年代表了 GPP 的正常年份), 以期分析不同年份 GPP 的年内变化特征. GPP 年内变化特征如图 3 所示.

2004、2008 和 2012 年 GPP 年内变化呈现正态分布, 其余 3 年的 GPP 年内变化呈现偏态分布. 第 1—121 天和 265—365 天的时期内, 图 3 中 6 个年份 GPP 的年内变化趋势基本一致, 第 121—265 天这一时期内 GPP 呈现较大的分异特征, 表现为极高、较高、正常、较低四种特征.

因此, 年际 GPP 的差异主要来源于年内第 121—265 天之间的 GPP 差异.

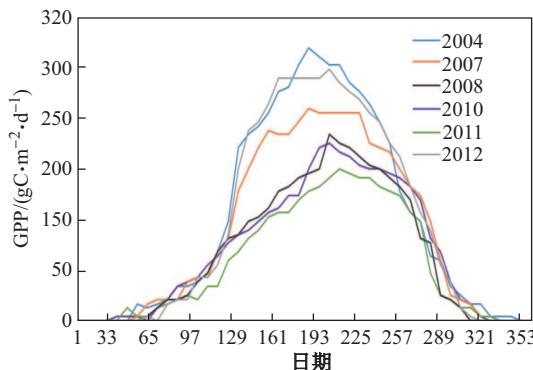


图 3 门头沟年内 GPP 变化趋势图

Fig. 3 GPP trend of Mentougou region

4 讨论与结论

本研究利用 30 m Landsat TM 和 OLI 影像反演 NPP 产品, 分析了门头沟区 NPP 的空间变化特征, 利用 MODIS GPP 时间序列产品分析了门头沟区的时间变化特征(年际变化和年内变化特征), 为评估该区域生态环境变化提供了数据基础. 实验结果表明: ①门头沟区 2003—2014 年的 NPP 存在四周高、中间低的空间分异特征; ②自 2005 年以来 NPP 总体平稳, 没有明显的增加或减少趋势; ③5—9 月 GPP/NPP 的差异对不同年份间 GPP/NPP 差异的贡献最大.

由于缺少高时空分辨率的 NPP 产品, 本研究利用 30 m Landsat NPP 日产品进行 NPP 的空间分布特征分析, 使用 MODIS NPP 年产品进行 NPP 年际变化分析, 各年 Landsat 数据时相的差异会对分析结果产生干扰, 采用多源遥感数据时空融合模型来获得同一天的多年 Landsat NPP 产品是未来解决该问题的方法之一^[23-24]. 地表环境参数遥感反演精度会影响 NPP 和 GPP 的反演精度, 如植被指数在叶面积指数大于 3 的地区存在饱和现象, 这将增加 FPAR 反演的不确定性.

本文方法存在以下不足: ①本文分析了 NPP 的时空变化特征, 但由于 NPP 受多重因素影响, 且各因素间相互影响机理复杂^[19], 本文没有进一步分析 NPP 时空变化的影响机理, 需要进一步加强相关方面的研究; ②由于 Landsat 数据的缺失, 本文采用 MODIS GPP/NPP 产品进行了门头沟地区的 GPP/NPP 时间变化特征分析, MODIS 的空间分辨率较低, 其大部分像元是混合像元, 这会降低 MODIS GPP/NPP 产品的精度.

[参 考 文 献]

- [1] SCURLOCK J, JOHNSON K, OLSON R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements [J]. Global Change Biology, 2002, 8(8): 736-753.
- [2] 赵军, 师银芳, 王大为. 基于的内蒙古潜在植被空间分布特征研究 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(11):1870-1880.
- [3] ZHANG R, HUANG C, ZHAN X, et al. Development and validation of the global surface type data product from S-NPP VIIRS [J]. Remote Sensing Letters, 2016, 7(1): 51-60.
- [4] 蒋蕊竹, 李秀启, 朱永安, 等. 基于黄河三角洲湿地与相关性的时空变化特征 [J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6708-6716.
- [5] WANG H, LIU G, LI Z, et al. Impacts of climate change on net primary productivity in arid and semiarid regions of China [J]. Chinese Geographical Science, 2016, 26(1): 35-47.
- [6] ZHANG Y, HU Z, QI W, et al. Assessment of effectiveness of nature reserves on the Tibetan Plateau based on net primary production and the large sample comparison method [J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(1): 27-44.

- [7] POVAROV V P, BAKIROV M B. Analysis of the reasons for damage in the welded assembly joining the hot collector of first-loop coolant to the Du 1200 tube of the steam generators in no5 unit of the novovoronezh NPP [J]. *Atomic Energy*, 2016, 119(3): 153-162.
- [8] KICKLIGHTER D W, BONDEAU A, SCHLOSS A L, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Global pattern and differentiation by major biomes [J]. *Global Change Biology*, 1999, 51(5): 16-24.
- [9] CRAMER W, FIELD C B. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Introduction [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(51): III-IV.
- [10] 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, 51(5): 1-15.
- [11] 陈福军, 沈彦俊, 李倩, 等. 中国陆地生态系统近年时空变化研究 [J]. *地理科学*, 2011, 31(11): 1409-1414.
- [12] 刘军会, 高吉喜. 气候和土地利用变化对北方农牧交错带植被变化的影响 [J]. *资源科学*, 2009, 31(3): 493-500.
- [13] 董丹, 倪健. 利用模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力 [J]. *生态学报*, 2011, 31(7): 1855-1866.
- [14] 张德利, 祁威, 周才平, 等. 青藏高原高寒草地净初级生产力时空分异 [J]. *地理学报*, 2014, 24(2): 269-287.
- [15] 李秀芬, 郑有飞, 王晨铁, 等. 黑龙江省森林的遥感反演 [J]. *中国农业气象*, 2009, 31(1): 88-92.
- [16] 管小彬, 沈焕峰, 甘文霞, 等. 基于 Landsat TM/ETM+ 影像的武汉市冬季 NPP 估算及其时空变化分析 [J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(5): 884-890.
- [17] 韩艳飞, 柯长青, 李晶. 近 30 年关天经济区植被净初级生产力对土地利用变化的动态响应 [J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(6): 68-74.
- [18] 袁甲, 沈非, 王甜甜, 等. 2000-2010 年皖江城市带土地利用/覆被变化对区域净初级生产力的影响 [J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 245-250.
- [19] 李世华. 基于数据-模型融合方法植被初级生产力遥感监测研究 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2007.
- [20] XIAO X, ZHANG Q, BOLES S, et al. Mapping snow cover in the pan-Arctic zone, using multi-year (1998-2001) images from optical VEGETATION sensor [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(24): 5731-5744.
- [21] RAICH J, CASINOS A. Limb proportions in terrestrial mammals [J]. *Belgian Journal of Zoology*, 1991, 121(2): 295-314.
- [22] SCHUBERT S D, ROOD R B, PFAENDTNER J. An assimilated dataset for earth science applications [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(12): 2331-2342.
- [23] WU M, WU C, HUANG W, et al. An improved high spatial and temporal data fusion approach for combining Landsat and MODIS data to generate daily synthetic Landsat imagery [J]. *Information Fusion*, 2016, 31: 14-25.
- [24] WU M, NIU Z, WANG C, et al. Use of MODIS and Landsat time series data to generate high-resolution temporal synthetic Landsat data using a spatial and temporal reflectance fusion model [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6(6): 1-8.

(责任编辑: 李万会)

(上接第 153 页)

- [6] YUAN Y C, SU J L. A two-layer circulation model of the East China Sea [C]//Proceedings of International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf, With Special Reference to the East China Sea. Beijing: Ocean Press, 1983: 364-374.
- [7] 袁耀初, 管秉贤. 中国近海及其附近海域若干涡旋研究综述 II: 东海和琉球群岛以东海域[J]. *海洋学报*, 2007, 29(2): 1-17.
- [8] 乔方利. 中国区域海洋学——物理海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 281-287.
- [9] BANZON V, SMITH T M, CHIN T M, et al. A long-term record of blended satellite and in situ sea-surface temperature for climate monitoring, modeling and environmental studies[J]. *Earth System Science Data*, 2016, 8(1): 165-176.
- [10] REYNOLDS R W, SMITH T M, LIU C, et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(22): 5473-5496.
- [11] 赵保仁. 渤、黄海及东海北部强温跃层的基本特征及形成机制的研究[J]. *海洋学报*, 1989, 11(4): 401-410.
- [12] 赵保仁. 黄海冷水团锋面与潮混合[J]. *海洋与湖沼*, 1985, 16(6): 451-460.

(责任编辑: 李万会)