

李 月,孙政国. 基于叶绿素荧光遥感监测的蒙古高原草地生产力时空动态分析[J]. 江苏农业科学,2021,49(13):219-226.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.13.042

# 基于叶绿素荧光遥感监测的蒙古高原草地 生产力时空动态分析

李 月,孙政国

(南京农业大学草业学院,江苏南京 210095)

**摘要:**蒙古高原草地是欧亚大陆草地重要的组成部分,其中草地生态系统生产力的核算和格局分析对畜牧业发展和生态功能保护均具有重要意义。为摸清蒙古高原草地生产力分布特征,在建立蒙古高原草地生长季节日光诱导的叶绿素荧光(SIF)与总初级生产力(GPP)之间关系的基础上,利用 2017 年 4—10 月轨道碳卫星(OCO-2)SIF 数据结合同时期 MOD17A2 产品,对蒙古高原草地 GPP 空间格局动态进行分析。结果表明,蒙古高原草地生长季 OCO-2 SIF 与 GPP 具有显著的相关关系( $P < 0.05$ ),且估算的 GPP 精度较高( $r^2 = 0.82$ )。高原草地 GPP 空间格局呈现出由蒙古高原草地北部及东北部向西南方向减少的趋势,总量为  $272.73 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,平均值为  $52.89 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ 。GPP 月际变化在  $5.83 \sim 104.59 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$  之间,5—8 月是高原草地主要生长时期,GPP 平均值为  $78.86 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ ,7 月是蒙古高原草地 GPP 最高的月份,GPP 平均值为  $104.59 \text{ g}/\text{m}^2$ 。本方法能够较为准确地估计蒙古高原草地生产力分布特征,对维持蒙古高原草地的可持续发展和畜牧业的稳定提供了数据支持。

**关键词:**蒙古高原;总初级生产力;叶绿素荧光;OCO-2

**中图分类号:** S812.29;S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)13-0219-08

草地生态系统是陆地生物圈与大气之间物质和能量交换面积最大的生态系统,覆盖着地表超过 25% 的土地面积<sup>[1]</sup>,具有提供畜牧业发展的饲草料、涵养水源、防风固沙等功能和作用。草地总初级生产力(gross primary productivity,GPP)是指单位时间单位面积上草地绿色植物通过光合作用所固定的有机碳总量,通常以  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$  为单位表示<sup>[2]</sup>。碳元素在植物-土壤-大气连续体内进行流动与循环,通过光合、呼吸等作用调控物质与能量的交换,是陆地生态系统中的一种重要的生物地球化学过程<sup>[3]</sup>,精确地掌握 GPP 的时空分布特征可以准确评估陆地生态系统的稳定性,保障草地的可持续发展。目前常用涡流协方差(eddy covariance,EC)通量观测塔作为计算 GPP 的工具<sup>[4]</sup>,但依然无法实现对 GPP 大尺度范围内的观测。

基于日光诱导的叶绿素荧光(solar-induced

chlorophyll fluorescence,SIF)遥感是一种能够在大尺度空间上快速、动态监测草地 GPP 的方法手段<sup>[5]</sup>。其基本原理:植物叶绿体内存在的光系统 I(PS I)在大约 740 nm 处,以及光系统 II(PS II)在 740 nm 和 685 nm 处能够释放出不同波长的叶绿素荧光(SIF)光子,反射较强的荧光信号<sup>[6]</sup>。较多的研究者利用 SIF 的近红外波段反射信息与 GPP 之间建立相关关系。研究表明,地面、机载和卫星传感器获取的 SIF 信号均与 GPP 有良好的相关性。Liu 等利用地面获取的 SIF 信号与 GPP 进行拟合计算,结果表明,C3 和 C4 作物的 SIF 数据均与 GPP 呈线性相关<sup>[7]</sup>。对机载 SIF 数据集分析表明,与植被指数相比,SIF 具有更好的 GPP 预测能力,在环境应力检测方面具有更大的潜力<sup>[8]</sup>。空间测量也证明现有的 GOSAT(greenhouse gases observing satellite)、GOME-2(global ozone monitoring experiment-2)和 OCO-2(orbiting carbon observatory-2)SIF 卫星产品与 FLUXCOM 和 MODIS GPP 数据集具有良好的相关性<sup>[9]</sup>。OCO-2 卫星于 2014 年 7 月 2 日发射,相较于其他监测 SIF 的卫星,它具有更高的测量频率和更精确的地面像素尺寸( $1.3 \text{ km} \times 2.25 \text{ km}$ )(GOME-2 为  $40 \text{ km} \times 80 \text{ km}$ ,Gosat 直径为 10 km),因此通过 OCO-2 SIF 计算 GPP 成为了一个监测生

收稿日期:2020-11-22

基金项目:中央高校基本科研业务费重点项目(编号:KYZ201758)。

作者简介:李 月(1996—),女,内蒙古呼伦贝尔人,硕士研究生,主要从事草地生态与生产力动态监测研究。E-mail:437254275@qq.com。

通信作者:孙政国,博士,副教授,主要从事草地遥感研究。E-mail:sunzg@njau.edu.cn。

态系统生产力的新途径,同时 SIF 757 nm 波段较 SIF 771 nm 波段具有更高的检索精度<sup>[10]</sup>。将 COO-2 SIF 与 GPP 建立模型,用以监测生产力的方法广泛应用于农田、森林及草地等生态系统中。相比于森林等生态系统,草地生态系统的结构较为单一,不必考虑冠层结构与其他部分光合作用的差异,更加有利于使用荧光监测其生产力。Wei 等以黑河流域的高寒草原和农田为研究对象,评价了 OCO-2 在估算 GPP 中的表现,结果表明,OCO-2 与 GPP 线性相关且  $GPP(OCO-2 \text{ SIF } 757) = 15.86 \times \text{SIF} + 0.69$ <sup>[11]</sup>。这种简单的线性模型十分有利于大尺度上监测 GPP 空间分布,并且 OCO-2 SIF 在预测 GPP 上的准确度较高,与通量塔实测 GPP 更加接近。

蒙古高原草地是欧亚大陆草地重要的组成部分,大部分天然草原区域由蒙古国草原和我国的内蒙古草原组成,主要为干旱半干旱生态系统,具有较高的碳周转率,所以研究普遍认为,蒙古高原草地是全球碳循环年际变化的重要驱动因素<sup>[12]</sup>。以往对于干旱半干旱地区的生态系统生产力研究往往选择的区域范围较小,不具有代表性。建立生产力模型时常与通量塔数据建立关系,但是通量塔测量范围有限且测量仪器本身存在系统误差,所以在大规模估算 GPP 时 EC 通量塔无法准确进行计算。因此,本研究以整个蒙古草原草地为研究区域,使用 OCO-2 SIF757 与 MOD17A2-GPP 数据建立关系,验证精度后进一步估算内蒙古与蒙古国总初级生产力并分析其空间分布特征,以期对蒙古高原大尺度范围内合理开发草地资源提供数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区

蒙古高原是欧亚大陆的重要组成部分,面积约为 260 万 km<sup>2</sup>,主要由蒙古国和我国内蒙古自治区组成。草地是其主要的生态系统类型,占区域总面积的 76.25%,其中内蒙古草地占全区面积的 66%,蒙古国草地占全国面积的 84%<sup>[13]</sup>。

蒙古国(87°47′~119°57′E,41°35′~52°06′N)区域面积为 156.65 万 km<sup>2</sup>,属大陆性温带草原气候,年均温自北向南由 -4℃ 递增至 4℃,年均降水量从 400 mm 减少至 50 mm,土地覆盖的空间格局也呈现出明显的区域过渡性,依次为裸地、荒漠草地、典型草地和森林<sup>[14]</sup>。

内蒙古自治区(97°12′~126°04′E,37°24′~

53°23′N)区域面积为 118.3 万 km<sup>2</sup>,自东北向西南年均气温从 -4℃ 增加至 10℃,降水量从 500 mm 减少至 50 mm,呈现出由东部季风性气候向西部大陆性气候过渡的气候特征,土地覆盖空间格局整体也呈现出明显的过渡性,从东向西依次分为森林、草甸草原、典型草原、荒漠草原和裸地<sup>[15]</sup>。

### 1.2 数据来源和处理

1.2.1 蒙古高原区划数据 蒙古高原的区划数据来自全球行政区划数据库(database of global administrative areas, GADM),下载网址为 <https://gadm.org/>,格式为 shapefile。

1.2.2 土地覆盖数据 采用欧洲航天局(European Space Agency, ESA)2017 年土地覆盖产品(Land Cover Maps-v2.0.7),时间分辨为年,空间分辨率为 300 m。参照联合国粮农组织(UNFAO)提出的方案将土地分为农田、森林、草地、湿地、定居点和其他类型等 6 个一级类型。

1.2.3 MOD17A2 数据 由美国蒙大拿大学数字陆地动态模拟小组(Numerical Terradynamic Simulation Group, NTSG)提供,下载网址为 <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>。数据年份为 2017 年,时间分辨为 8 d,空间分辨率为 0.05°,单位为  $g/(m^2 \cdot d^8)$ <sup>[16]</sup>。这是一款最早的全球尺度上陆地植被不间断连续监测初级生产力的产品,其理论基础是光能利用率理论。

1.2.4 OCO-2 数据 由于 OCO-2 SIF 为离散型数据,本研究使用 Yu 等通过人工神经网络(artificial neural network, ANN)建立的 OCO-2 格网数据<sup>[17]</sup>,该数据是通过已经训练好的 ANN 模型,基于 MODIS 反射率和土地覆盖产品,预测了 OCO-2 间隙区域的日平均 SIF [ $W/(m^2 \cdot mm \cdot sr)$ ]。空间分辨率为 0.05°,时间分辨率为 16 d。由于 2017 年 8 月及 9 月上半月机器故障,本研究以 2015—2016 年的 8—9 月平均值作为 2017 年 8—9 月数据。

### 1.3 实测数据

实测数据为野外测量数据,调查地区包括内蒙古自治区呼伦贝尔市海拉尔区、鄂伦春旗、鄂温克族自治旗、陈巴尔虎旗、新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗和牙克石,采样点共计 56 个,调查区域平均海拔 670 m。年降水量 350 mm,年均气温 -2.4℃,最高气温 36.17℃,最低气温 -48.5℃;≥10℃ 年积温 1 580~1 800℃,无霜期 110 d<sup>[18]</sup>。按照 OCO-2 覆盖的足迹点结合谷歌地球(Google Earth)高分辨率

遥感影像,较为精确地确定野外实测采样点的空间地理位置,选取 56 个样点,覆盖的草地类型为温性草原,草地群落主要物种为羊草(*Lepidum chinense*)和贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*),土壤类型为暗栗钙土。实地测量点分布如图 1 所示。试验过程中在每个测量点选择 3 个 1 m × 1 m 样方,将样方内草本

植物齐地面将地上部分全部剪下,去除杂质洗净后分别称质量,测其地上部分生物量。本试验采用温洛克国际 2005 年版的《陆地碳测量方法指南》<sup>[19]</sup>及张钊的研究结果<sup>[20]</sup>,将实测数据结果转化为总初级生产力。

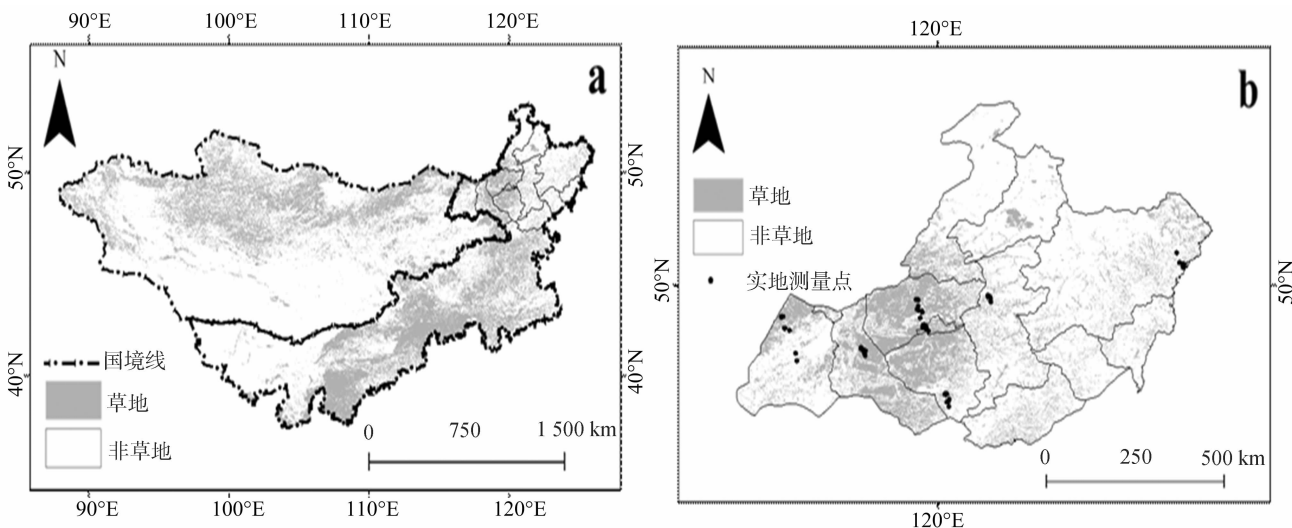


图1 研究区域(a)及实地测量点(b)分布图

#### 1.4 精度验证

本研究选取内蒙古呼伦贝尔市 56 个实测点的 OCO-2 SIF 及 GPP 模拟值和实测平均值对 GPP 结果进行精度验证,并使用确定系数( $r^2$ )、平均绝对误差(RMSE)、平均相对误差(REE)以及偏差(Bias)作为指标进一步验证模拟数据的精度。具体公式如下:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_i (Y_i - Y_i')^2}{\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2}; \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - Y_i')^2}{N}}; \quad (2)$$

$$REE = \sqrt{\frac{\sum [(Y_i - Y_i')/Y_i]^2}{N}}; \quad (3)$$

$$Bias = \frac{\sum_i (Y_i - Y_i')}{N}. \quad (4)$$

式中: $Y_i$  为实测值, $Y_i'$  为 OCO-2 SIF-GPP 的估算值, $N$  为样点数。

#### 1.5 基于 SIF 的 GPP 估算

首先将土地覆盖数据(300 m)重采样至 500 m 使其空间分辨率与 MOD17A2(500 m)相匹配,并提取蒙古高原草地覆盖数据。之后将 MODIS 及 SIF 数据进行拼接、剪裁、重投影并去除异常值等预处理后,利用校正系数恢复其原始真值,建立线性关

系并与实测 GPP 验证。最终将每半月 GPP 估计值合称为月数据后得到整个高原生长季节的 GPP 空间分布格局。

## 2 结果与分析

### 2.1 蒙古高原草地 OCO-2 SIF 与 GPP 的关系

使用 OCO-2 SIF 矢量数据提取 GPP 栅格数据,将二者建立关系。结果表明,蒙古高原草地生长季节(4—10 月)OCO-2 SIF 与 GPP 有显著相关关系( $P < 0.05$ ,样本数  $n = 56$ ),线性斜率和拟合程度在不同时期中有所不同,并且与草地生长状况密切相关,随着草地植物的生长,SIF 与 GPP 的拟合程度逐渐变高(图 2)。4 月及 9—10 月的拟合关系较差( $r^2$  为 0.18 ~ 0.28),5—8 月的拟合程度较高( $r^2$  为 0.47 ~ 0.72)。

### 2.2 精度验证

精度验证结果表明,使用 OCO-2 SIF 估计的 GPP 与实测 GPP 具有较高的相关性,显著性检验  $P < 0.01$ ,且平均绝对误差和平均相对误差分别为 4.55 和 0.17,误差在允许范围内(图 3),说明 OCO-2 SIF 可以用于后续对蒙古高原草地总初级生产力的估计以及时空变化分析。

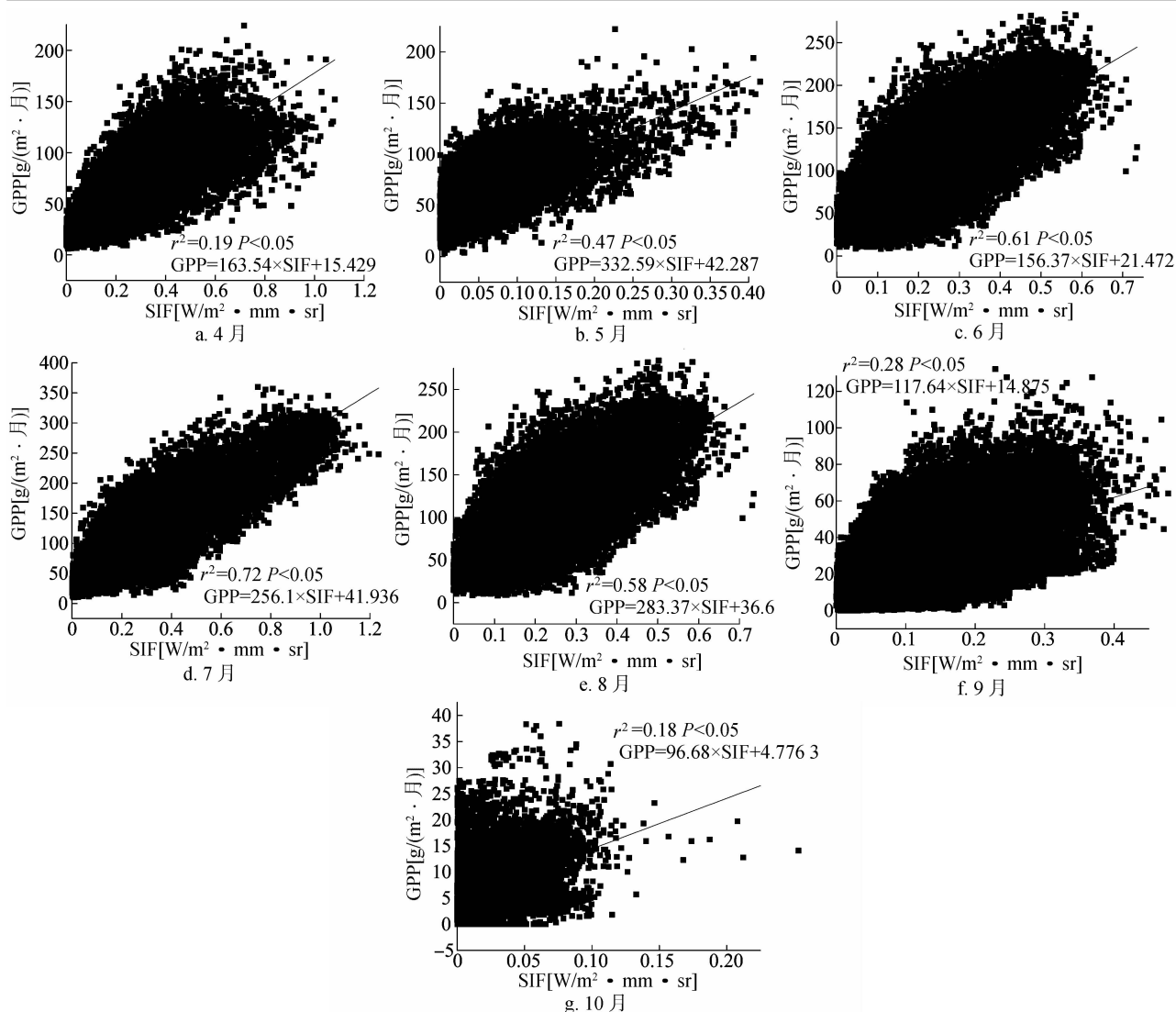


图2 蒙古高原草地 2017 年 OCO-2 SIF 与 GPP 的相关关系

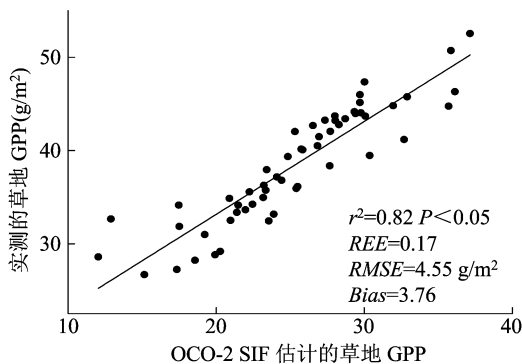


图3 OCO-2 SIF GPP 估测值与实测 GPP 精度验证图

### 2.3 GPP 空间分布动态

使用上述 OCO-2 SIF 和 GPP 的关系,对 2017 年蒙古高原草地生长季节的 GPP 空间分布特征进行了分析,结果表明,在研究时段内(4—10 月),随着蒙古高原草地湿度的区域性差异变化,整个高原

的草地生产力总体呈现出从蒙古高原草地北部的东北边缘向西南地区过渡的特点(图 4)。蒙古高原草地 GPP 总量为  $272.73 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,蒙古国、内蒙古分别为  $116.89$ 、 $155.84 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ;GPP 平均值为  $52.89 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ ,其中蒙古国、内蒙古分别为  $51.83$ 、 $53.96 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ 。

蒙古高原北部草地 GPP 平均值均大于  $120 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ ,并向南除杭爱山脉外逐渐减少至小于  $25 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ ;东北部以大兴安岭为界,以东区域 GPP 平均值均大于  $120 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ ,并向西递减至低于  $25 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ ,向西南逐步递减至  $25 \sim 50 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ ;整个高原 GPP 平均值最低的区域为高原西北部的包头市、乌兰察布市及锡林郭勒盟北部的草地,其 GPP 平均值为  $17.63 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ 。

蒙古高原草地 GPP 总量分布特征与平均值相

似。高原北部、杭爱山脉、大兴安岭以东以及内蒙古东南部兴安盟、赤峰市、通辽市部分区域草地在研究时段内的 GPP 总量均大于  $400 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ; GPP 总量自蒙古北部、东北部向南部、西南部逐步

递减至少于  $100 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ , GPP 总量最低的区域为高原西北部及内蒙古西南部草地, 其 GPP 总量分别为  $85.78$ 、 $76.61 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ 。

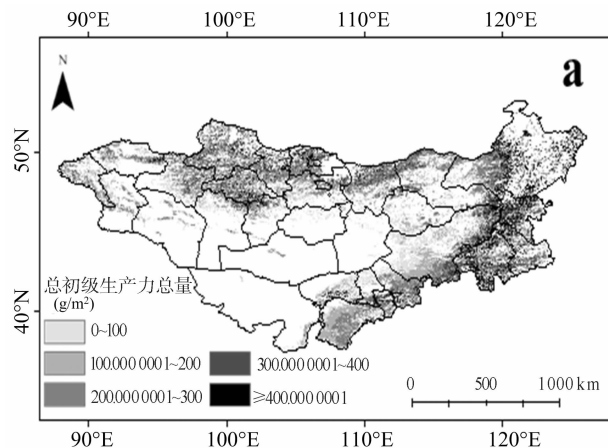
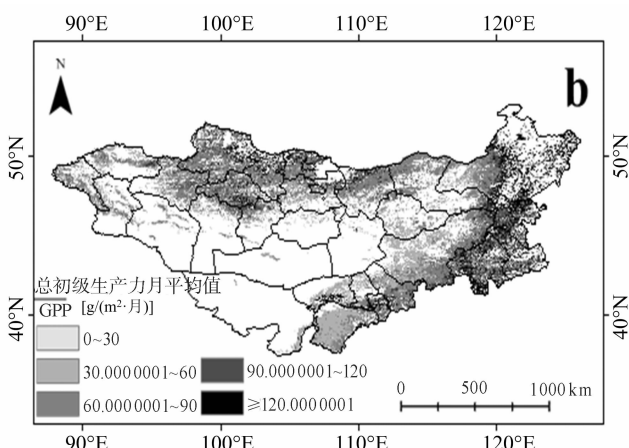


图4 蒙古高原草地 2017 年 4—10 月 GPP 总量(a)和平均值(b)空间分布

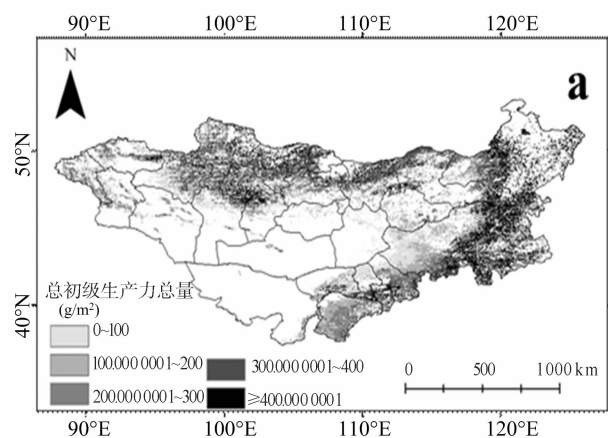


## 2.4 GPP 月际变化动态

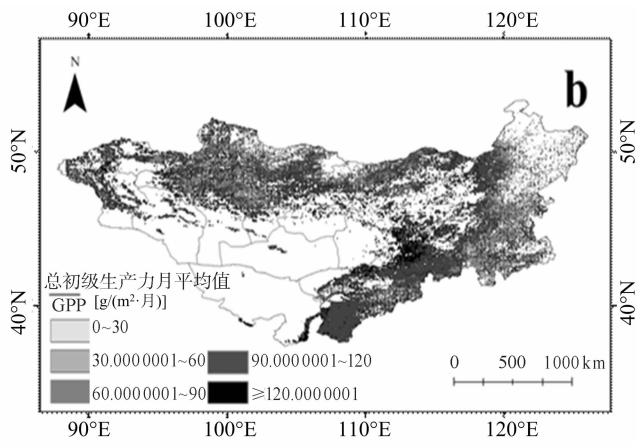
为突出研究时段内 GPP 的时间变化动态, 本研究将 GPP 产品合成为月际产品, 并逐月分析。研究表明, 蒙古高原草地生长集中于 4—10 月之间, 这与 Bao 等的研究结果<sup>[21]</sup> 基本一致。本研究以生长季开始时间(start of the growing season, SOS)、生长季结束时间(end of the growing season, EOS)以及

生长季长度(length of the growing season, LOS)<sup>[22]</sup> 来表征高原草地生长季动态。

在研究时段内, 蒙古高原草地 GPP 月际变化为  $5.83 \sim 104.59 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ , 7 月是蒙古高原草地 GPP 最高的月份, 整个高原 GPP 为  $104.59 \text{ g}/\text{m}^2$ , 10 月是 GPP 最低的月份为  $5.83 \text{ g}/\text{m}^2$  (图 5 和图 6)。



a. GPP 空间分布总量



b. GPP 空间分布平均值

图5 蒙古高原草地 2017 年 5—8 月 GPP 空间分布

蒙古高原草地 SOS 通常为 4 月, GPP 平均值为  $19.14 \text{ g}/\text{m}^2$ , 其中内蒙古草地为  $22.17 \text{ g}/\text{m}^2$ , 蒙古国为  $16.11 \text{ g}/\text{m}^2$ 。5—8 月是高原草地主要生长时期, 此时高原草地 GPP 平均值为  $78.86 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ , 其中内蒙古草地为  $77.51 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ , 蒙古国为  $80.22 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ 。蒙古高原北部和大兴安岭以东地区的草地 GPP 最高大于  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ , 杭爱山脉

以及东南部的赤峰市、通辽市及兴安盟地区 GPP 在  $90 \sim 120 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$  之间(图 5), 其中 7 月是 GPP 最高的月份, GPP 平均值为  $104.59 \text{ g}/\text{m}^2$ 。蒙古高原草地 EOS 集中于 9—10 月, 此时高原草地 GPP 为  $17.83 \text{ g}/\text{m}^2$ , 其中内蒙古草地为  $22.75 \text{ g}/\text{m}^2$ , 蒙古国为  $12.92 \text{ g}/\text{m}^2$ 。分析蒙古高原草地的 LOS 特征, 有助于监测高原草地的生长情况, 根据上述研究结果

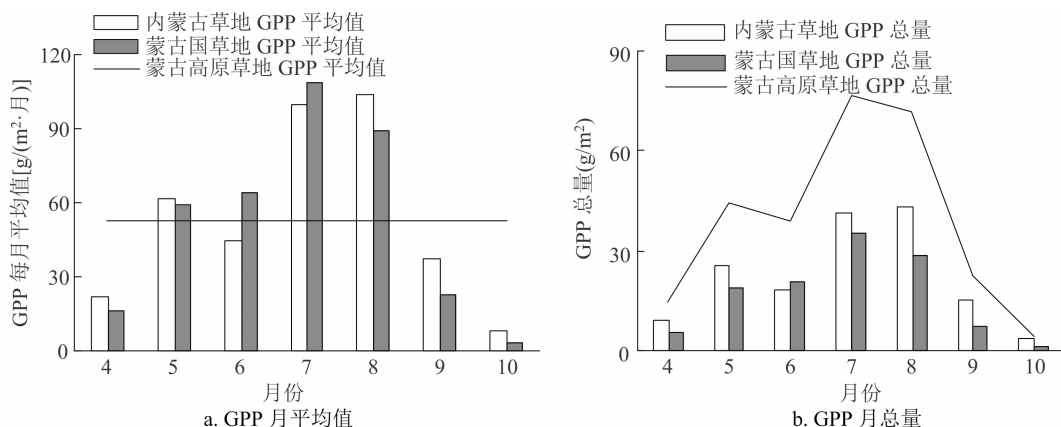


图6 蒙古高原草地 2017 年 4—10 月 GPP 月际变化

可以将高原草地的 LOS 分为 4 个部分。高原北部以及东北部大兴安岭以西地区 LOS 一般在 120 ~ 150 d 之间;大兴安岭以东以及高原南部地区 LOS 一般在 90 ~ 120 d 之间;东南部赤峰市、通辽市及兴安盟地区 LOS 一般在 140 ~ 160 d 之间;西部地区一般在 90 ~ 105 d 之间。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 蒙古高原草地 OCO-2 SIF 与 GPP 的关系

OCO-2 卫星较以往卫星具有更准确的测量精度,为利用叶绿素荧光估算草地生产力提供了更为精确的手段。研究表明,OCO-2 SIF 可以作为估算 GPP 的有效手段。Verma 等研究发现,尽管环境条件会对植物光合作用和叶绿素荧光之间的复杂关系产生重要影响,但是在不同的草原环境下,冠层尺度的 SIF 与 GPP 之间依旧存在着显著的线性相关关系,并且较基于过程的估算方法更加可靠<sup>[23]</sup>。本研究将 OCO-2 SIF 数据与 MODIS GPP 数据建立关系,研究表明,OCO-2 SIF 可以作为估算 GPP 的可靠数据来源,OCO-2 SIF 与 MODIS GPP 为显著线性关系 ( $P < 0.05$ ),这与 Sun 等的研究结果<sup>[24]</sup>相符。在本研究中,SIF 与 GPP 的拟合程度随着草地植物生长,拟合程度变高,在 7 月时达到最高。由于 OCO-2 SIF 产品的离散性<sup>[25]</sup>,会对精度产生影响,导致估算结果的不准确,但本研究表明蒙古高原 4—10 月的  $P$  值均小于 0.05,所以结果是可靠的。

#### 3.2 估算 GPP 的精度

本研究利用 OCO-2 SIF 估算的 GPP 与实测数据相比较,模拟精度较好,与刘建锋等的研究结果<sup>[26]</sup>相近。本研究估计值整体略低于模拟值,这可

能是由于本研究实地测量时间不及时,实测地点较少且主要分布于草地生长较好的内蒙古东部地区,而估算方程是将蒙古高原草地 OCO-2 SIF 与 MODIS GPP 建立关系,因此存在误差。与 Zhang 等的研究结果<sup>[27-28]</sup>相比,本研究的估计值偏高,造成差异的原因可能是由于 GPP 的估计方式以及研究时间内气温和降水不同所导致的。郝彦宾等利用涡度相关法分析了 2004 年和 2005—2006 年较为干旱年生长季节内蒙古典型草原 GPP,2004 年 GPP 为  $4.89 \text{ g/m}^2$ ,而在相对干旱的 2005—2006 年 GPP 则为  $1.53 \sim 3.01 \text{ g/m}^2$ <sup>[29]</sup>。该现象在其他生态系统也依旧存在,Yan 等研究发现,在同一农田观测点,2004 年农田生产力比 2003 年高出了近 1 倍<sup>[30]</sup>。同时,尽管 OCO-2 卫星的分辨率已经相对较高,但许多像素点依旧存在与其他土地类型混和的情况。Li 等研究发现,GPP-SIF 关系的斜率在 C4 生态系统要高于 C3 生态系统<sup>[31-32]</sup>。因此,在蒙古高原大范围内获得的 OCO-2 SIF-GPP 关系无法准确估计小范围内的 GPP 模拟值。另外,OCO-2 本身存在的误差也会对模拟结果产生影响,如 OCO-2 还存在像素瞬态伪影以及异常像素数量增加的问题<sup>[33]</sup>。

#### 3.3 蒙古高原草地 GPP 空间特征

GPP 是表示生态系统碳循环的重要指标,它能更为准确地掌握其空间分布特征,能够更加直观地反映生态系统的生产力水平。Ren 等利用修正的光能利用率模型模拟出青藏高原草地 GPP,为青藏高原高寒草地 GPP 的精确估算提供参考<sup>[34]</sup>;郭群等利用多通道自动原位监测箱系统,计算出内蒙古典型草原草地生态系统 GPP,为草原的可持续发展提供了理论基础<sup>[35]</sup>。本研究以蒙古高原草地为研究对象,得到了 2017 年生长季节的草地 GPP 时空分

布特征并分析造成差异的原因。结果表明,降水量和人为因素是造成蒙古高原草地 GPP 差异的主要原因。蒙古高原地处干旱与半干旱区<sup>[36]</sup>,随着降水量的变化,蒙古高原草地的整个生长季节内 GPP 的空间分布特征总体表现出由高原草地和东北部边缘至西南地区逐渐减少的特点,这与黄登成的研究结果<sup>[37]</sup>一致。蒙古国北部受到来自北冰洋的大量水汽<sup>[38]</sup>,气候湿润,利于草地植物的生长。东北部地区受到太平洋水汽影响在整个生长季都接近田间持水量,在温度适宜的条件下,显著提高了草地<sup>[39]</sup>对碳的吸收。而蒙古国南部草地和内蒙古西北部草地由于降水量减少和温度较高,草原类型以荒漠草原为主<sup>[40]</sup>,其生产力水平较低,全年平均值在  $30 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$  以下,总量在  $100 \text{ g}/\text{m}^2$  以下。蒙古高原草地 SOS、EOS 分别在 4 月和 9—10 月,其中 5—8 月占全年生产力总量的 85%。生产力的高低与草地生物量密切相关,内蒙古草地 GPP 平均值与蒙古国相近但总量高于蒙古国 25%,这主要是由于内蒙古近年来实施的“退耕还林还草”“禁牧”等保护草原的措施使草地覆盖度近年来整体提高。蒙古国西部和南部草地生物量减少可能是由于在蒙古国西部南部附近对煤矿、铜矿的开采使草地发生严重退化<sup>[41]</sup>。太阳诱导的叶绿素荧光已被较多应用于估算生态系统总初级生产力,本研究主要以草地生态系统为例,其冠层结构较为简单,但由于其他陆地生态系统复杂多样性加之现存观测叶绿素的卫星分辨率依旧较低,故无法使用统一的观测条件和试验方法。叶绿素荧光近年来也被应用于其他领域,如监测生态系统高温<sup>[42]</sup>等自然灾害。估算不同生态系统总初级生产力时考虑参数的不确定性依旧是今后研究的重点,同时将叶绿素荧光应用于生态系统的自然灾害监测也有待进一步的深入研究。

本研究基于 OCO-2-SIF757 数据、MOD17A2-GPP 产品、土地覆盖数据,利用 GIS 技术,在分析 GPP-SIF 之间关系的基础上模拟分析了 2017 年 4—10 月蒙古高原草地的 GPP 空间分布特征,研究发现,蒙古高原草地 OCO-2 SIF 与 MODIS GPP 具有显著的正相关关系 ( $P < 0.05$ ),本研究的模拟值具有较高精度 ( $r^2 = 0.82$ ),符合蒙古高原草地 GPP 空间分布特征。在空间特征上,蒙古高原草地 GPP 总量和平均值均与湿度密切相关,GPP 总量为  $272.73 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,平均值为  $52.89 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ 。

高原北部及大兴安岭以东区域 GPP 较高,平均值均大于  $120 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ ,GPP 总量均大于  $400 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,并由北部、东北部向南部、西南部递减至平均值低于  $30 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ ;总量低于  $100 \text{ g}/\text{m}^2$ 。时间特征上,蒙古高原草地 SOS 通常为 4 月,EOS 通常为 9—10 月,GPP 月际变化在  $5.83 \sim 104.59 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$  之间,5—8 月是高原草地主要生长时期,7 月是蒙古高原草地 GPP 最高的月份。蒙古高原草地 LOS 一般在 90~150 d 之间。大尺度范围的草原开发应利用遥感技术监测配合地面调查的方法,及时了解草原生境状况,因地制宜采取合理的方式开发草地。

#### 参考文献:

- [1] Wu X, Yao Z, Brüggemann N, et al. Effects of soil moisture and temperature on  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  soil-atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42(5): 773-787.
- [2] 关琳琳. 基于叶绿素荧光的植被总初级生产力估算[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.
- [3] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks[J]. Nature, 2008, 451(7176): 289-292.
- [4] 姜海梅, 张德广, 王若静, 等. 不同生态系统呼吸模型在半干旱草原生长季碳循环研究中的比较及应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(3): 593-604.
- [5] Li X, Xiao J, He B. Chlorophyll fluorescence observed by OCO-2 is strongly related to gross primary productivity estimated from flux towers in temperate forests[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 204: 659-671.
- [6] Pfündel E E, Klughammer C, Meister A. Deriving fluorometer-specific values of relative PSI fluorescence intensity from quenching of  $F_0$  fluorescence in leaves of *Arabidopsis thaliana* and *Zea mays* [J]. Photosynthesis Research, 2013, 114(3): 189-206.
- [7] Liu L, Liu X, Hu J, et al. Assessing the wavelength-dependent ability of solar-induced chlorophyll fluorescence to estimate the GPP of winter wheat at the canopy level[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(15/16): 4396-4417.
- [8] Walter-Shea E A, Privette J, Cornell D, et al. Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in alfalfa[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 61(1): 162-177.
- [9] Sun Y, Frankenberg C, Jung M, et al. Overview of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) from the orbiting carbon observatory-2: retrieval, cross-mission comparison, and global monitoring for GPP[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 209: 808-823.
- [10] Li X, Xiao J. A global, 0.05-degree product of solar-induced chlorophyll fluorescence derived from OCO-2, MODIS, and reanalysis data[J]. Remote Sensing, 2019, 11(5): 517-541.
- [11] Wei X, Wang X, Wei W, et al. Use of sun-induced chlorophyll fluorescence obtained by OCO-2 and GOME-2 for GPP estimates

- of the Heihe River Basin, China [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10 (12): 2039 – 2049.
- [12] Poulter B, Frank D C, Ciais P, et al. The contribution of semi – arid ecosystems to interannual global carbon cycle variability [J]. *Chest*, 1979, 76 (5): 601 – 603.
- [13] Angerer J, Han G, Fujisaki I, et al. Climate change and ecosystems of Asia with emphasis on Inner Mongolia and Mongolia [J]. *Rangelands*, 2008, 30 (3): 46 – 51.
- [14] 王卷乐, 程 凯, 祝俊祥, 等. 蒙古国 30 米分辨率土地覆盖产品研制与空间格局分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20 (9): 1263 – 1273.
- [15] 苗 澍, 张志斌, 李玉伟, 等. 内蒙古自治区降水特点分析 [J]. *内蒙古水利*, 2013 (5): 33 – 34.
- [16] Zhao M, Running S W. Response to comments on “Drought – induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009” [J]. *Science*, 2011, 333 (6046): 1093.
- [17] Yu L, Wen J, Chang C Y, et al. High – resolution global contiguous SIF of OCO – 2 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46: 1449 – 1458.
- [18] 许宏斌, 辛晓平, 宝音陶格涛, 等. 放牧对呼伦贝尔羊草草甸草原生物量分布的影响 [J]. *草地学报*, 2020, 28 (3): 768 – 774.
- [19] Brown S, Pearson T, Walker S M, et al. Methods manual for measuring terrestrial carbon [M]. Arlington: Winrock Znternational, 2005.
- [20] 张 钊. 呼伦贝尔草甸草原生态系统碳循环动态模拟与未来情景分析 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [21] Bao G, Qin Z, Bao Y, et al. NDVI – based long – term vegetation dynamics and its response to climatic change in the Mongolian Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6 (9): 8337 – 8358.
- [22] Jeong S J, Chang – Hoi H O, Gim H J, et al. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982 – 2008 [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17 (7): 2385 – 2399.
- [23] Verma M, Schimel D, Evans B, et al. Effect of environmental conditions on the relationship between solar – induced fluorescence and gross primary productivity at an OzFlux grassland site [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122 (3): 716 – 733.
- [24] Sun Y, Frankenberg C, Wood J D, et al. OCO – 2 advances photosynthesis observation from space via solar – induced chlorophyll fluorescence [J]. *Science*, 2017, 358 (6360): 5747 – 5747.
- [25] Wei J, Tang X, Gu Q, et al. Using solar – induced chlorophyll fluorescence observed by OCO – 2 to predict autumn crop production in China [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11 (14): 1715 – 1717.
- [26] Liu J F, Chen S P, Han X G. Modeling gross primary production of two steppes in Northern China using MODIS time series and climate data [J]. *Procedia Environmental Science*, 2012, 13: 742 – 754.
- [27] Zhang L, Zhou D, Fan J, et al. Contrasting the performance of eight satellite – based GPP models in water – limited and temperature – limited grassland ecosystems [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11 (11): 1333 – 1339.
- [28] Nakano T, Nemoto M, Shinoda M. Environmental controls on photosynthetic production and ecosystem respiration in semi – arid grasslands of Mongolia [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2008, 148 (10): 1456 – 1466.
- [29] 郝彦宾, 王艳芬, 崔晓勇. 干旱胁迫降低了内蒙古羊草草原的碳累积 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34 (8): 898 – 906.
- [30] 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 [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 129 (4): 391 – 400.
- [31] Li X, Xiao J, He B, et al. Solar – induced chlorophyll fluorescence is strongly correlated with terrestrial photosynthesis for a wide variety of biomes; first global analysis based on OCO – 2 and flux tower observations [J]. *Global change biology*, 2018, 24 (9): 3990 – 4008.
- [32] Wood J D, Griffis T J, Baker J M, et al. Multiscale analyses of solar – induced florescence and gross primary production [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44 (1): 533 – 541.
- [33] Crisp D, Pollock H R, Rosenberg R, et al. The on – orbit performance of the orbiting carbon observatory – 2 (OCO – 2) instrument and its radiometrically calibrated products [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10 (1): 59 – 81.
- [34] Xiaoli R, Honglin H E, Li Z, et al. Effects of diffuse radiation on estimation of gross primary production of alpine grasslands on the Tibetan Plateau [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30 (12): 1898 – 1907.
- [35] 郭 群, 李胜功, 胡中民, 等. 内蒙古温带草原典型草地生态系统生产力对水分在不同时间尺度上的响应 [J]. *中国沙漠*, 2015 (3): 98 – 105.
- [36] Liu W J, Li L F, Biederman J A, et al. Repackaging precipitation into fewer, larger storms reduces ecosystem exchanges of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in a semiarid steppe [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2017, 247: 356 – 364.
- [37] 黄登成. 基于 CASA 模型的蒙古高原植被净初级生产力遥感估算 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.
- [38] 王 菱, 甄 霖, 刘雪林, 等. 蒙古高原中部气候变化及影响因素比较研究 [J]. *地理研究*, 2008 (1): 173 – 182.
- [39] Jing Y, Wang A, Guan D, et al. Carbon dioxide fluxes over a temperate meadow in eastern Inner Mongolia, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72 (11): 4401 – 4411.
- [40] 高浩, 潘学标, 符瑜. 气候变化对内蒙古中部草原气候生产潜力的影响 [J]. *中国农业气象*, 2009 (3): 5 – 10.
- [41] McIntyre N, Bulovic N, Cane I, et al. A multi – disciplinary approach to understanding the impacts of mines on traditional uses of water in Northern Mongolia [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557 – 558: 404 – 414.
- [42] Song L, Guanter L, Guan K, et al. Satellite sun – induced chlorophyll fluorescence detects early response of winter wheat to heat stress in the Indian Indo – Gangetic Plains [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24 (9): 4023 – 4037.