

# 内蒙古草地 NPP 时空变化格局及其与水热因子耦合关系

杨 晗, 周 伟, 石佩琪, 黄 露

(重庆交通大学 建筑与城市规划学院 地理与国土资源系, 重庆 400074)

**摘 要:**选取内蒙古作为研究区,基于卫星遥感数据、地面气象观测数据及其他统计资料,利用 CASA 模型估算了内蒙古草地净初级生产力(NPP),分析了 2001—2016 年内蒙古草地 NPP 的时空变化格局及其与水热因子的耦合关系,结果表明:2001—2016 年内蒙古草地 NPP 多年平均值为  $343.46 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,总体上呈现由东北至西南逐渐递减的分布格局;年均 NPP 总值约为  $0.218 \text{ Pg C}$ ,16 年共计  $3.483 \text{ Pg C}$ 。大部分地区草地 NPP 呈波动上升趋势,年均增长率约为  $4.27 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。内蒙古草地 NPP 与年均温的偏相关系数为 0.306,与年总降水量的偏相关系数为 0.622;大部分地区草地 NPP 与年总降水量呈显著的正相关关系,而与年均温无显著相关。

**关键词:**CASA 模型;草地 NPP;水热因子;内蒙古

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)02-0234-07

## Analysis of Temporal-Spatial Variations of NPP and Coupling Relationship with Hydrothermal Factors in Grasslands of Inner Mongolia

YANG Han, ZHOU Wei, SHI Peiqi, HUANG Lu

(Department of Geography and Land Resources, College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:**Based on satellite remote sensing data, ground meteorological observation data and other statistical data, the CASA model was used to estimate NPP of grassland in Inner Mongolia, and to analyze the temporal-spatial variation of NPP and its coupling with hydrothermal factors. The results showed that the average annual NPP of grassland in Inner Mongolia was  $343.46 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  from 2001 to 2016, and the distribution of NPP was characterized as increase from northeast to southwest; the average annual NPP value was about  $0.218 \text{ Pg C}$  and the total value was  $3.483 \text{ Pg C}$  in 16 years. In most districts, grassland NPP fluctuated upward with an average annual growth rate of  $4.27 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ . The partial correlation coefficient between the NPP of grassland and annual mean temperature in Inner Mongolia was 0.306, the partial correlation coefficient between the NPP of grassland and annual total precipitation was 0.622; the NPP of grassland had the significant positive correlation with annual total precipitation in most areas, but not significantly related with the annual mean temperature.

**Keywords:**CASA model; the NPP of grassland; hydrothermal factors; Inner Mongolia

草地是陆地生态系统中一个巨大的碳库,具有水源涵养、水土保持、防风固沙和生物多样性保护等多种重要的生态功能<sup>[1-3]</sup>。植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指在单位时间内,单位面积绿色植物所积累的有机物数量,即由植物光合作用固定的有机质总量(Gross primary productivity,

GPP)中扣除自养呼吸(Autotrophic respiration,  $R_a$ )消耗掉的有机质后的剩余部分,它代表从空气中进入植被的纯碳量,是表征植被生理生态过程和陆地生态系统碳循环的关键参数<sup>[4]</sup>。

在 NPP 研究起步阶段,由于资料的欠缺和技术落后,许多学者普遍选择以 Miami 模型<sup>[5]</sup>和

收稿日期:2018-04-12

修回日期:2018-04-28

资助项目:国家自然科学基金(41501575);重庆市科委基础科学与前沿技术项目(cstc2016jcyjA1540);大学生创新创业训练计划项目(201810618027);重庆市教委基础科研项目(KJQN201800702)

第一作者:杨晗(1995—),女,重庆人,硕士生,研究方向为生态环境遥感监测和 3S 技术。E-mail:yangh7791@163.com

通信作者:周伟(1984—),女,山东泰安人,博士,副教授,主要从事生态环境遥感监测和 3S 技术研究。E-mail:zhouw866@163.com

Thornthwaite Memorial 模型<sup>[6]</sup>等为代表的较为简单的统计学方法。在全球生物学计划(IBP)的推动下,国内外关于 NPP 的研究从理论、方法及模型的应用上得到了飞速发展。1985 年日本学者提出 Chikugo 模型,该模型是植被生态生理学和统计学方法相结合的产物<sup>[7]</sup>;后来朱志辉<sup>[8]</sup>、周广胜<sup>[9-10]</sup>等在此基础上进行了改进。生态学过程模型包括 TEM 模型<sup>[11-12]</sup>、CENTURY 模型<sup>[13]</sup>、BIOME-BGC 模型<sup>[14-17]</sup>等,此类模型结合植被的生物学特征和生态系统的功能与动态变化,来模拟生态系统尺度上的植被生产力。CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型是基于光能利用率原理的过程模型<sup>[18]</sup>,且已得到全球 1 900 多个实测站点的校准,该模型在生态系统生产力模拟中得到了广泛应用。

内蒙古位于 IGBP 全球变化研究典型陆地样带中国东北陆地样带之内,是全球变化最为敏感的区域<sup>[19]</sup>,生态环境十分脆弱。近年来,又由于人类活动的干扰,内蒙古草地退化严重,草地生产力大幅降低,因此,准确地估算内蒙古草地净初级生产力 NPP 对于建设美丽中国和国家绿色生态屏障具有重要意义。本研究选取内蒙古作为研究区,在国内外相关研究成果的基础上,基于卫星遥感数据、地面气象观测数据及其他统计资料,利用 CASA 模型模拟内蒙古草地净初级生产力 NPP,并结合气象数据来分析 2001—2016 年内蒙古草地 NPP 与水热因子的耦合关系。

## 1 研究区概况、数据来源与方法

### 1.1 研究区概况

内蒙古自治区(37°24′—53°23′N, 97°12′—126°04′E)位于中国北部边疆,由东北向西南方向倾斜伸展,整体呈狭长的带状分布,南北纵跨 1 700 km,东西跨越 2 400 km;幅员面积 118.3 万 km<sup>2</sup>,约占中国土地总面积的 12.3%。由于大部分地区都受到东亚季风的影响,形成以温带大陆性季风气候为主的复合型气候;地形多以高原为主,具有气温变化剧烈、冷热悬殊甚大、降水量少且不均匀等典型特征。

内蒙古草地总面积约为 8 666.7 万 hm<sup>2</sup>,约占全区土地总面积的 60%,占全国草地总面积的 1/4 以上,其中可利用草场面积 6 818 万 hm<sup>2</sup>(图 1)。内蒙古天然草原退牧还草工程于 2002 年开始试点,2003 年正式启动。据监测显示,2015 年内蒙古自治区草地覆盖度达 43.8%,比 2010 年提高了 6.7%,比 2000 年提高了 13.8%;草原“三化”面积比 2010 年减少 44.75 万 hm<sup>2</sup>,比 2000 年减少 255.73 万 hm<sup>2</sup>,其

中重度退化面积减少了 203.2 万 hm<sup>2</sup>,退牧还草措施有效遏制了草原生态系统的总体恶化趋势。

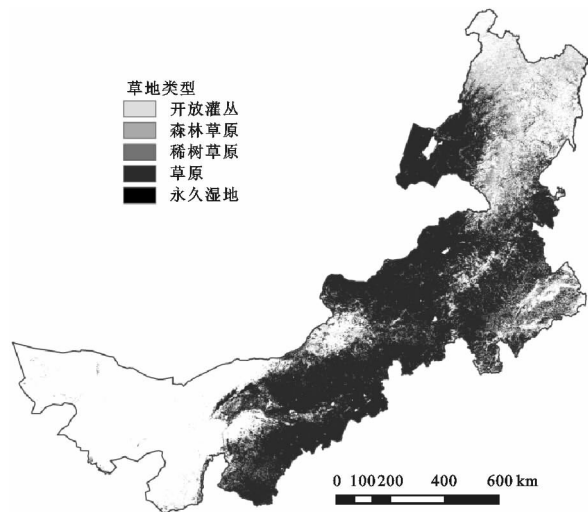


图 1 内蒙古草地分布

### 1.2 数据来源及预处理

1.2.1 MODIS NDVI 数据 采用 NASA 的 MODIS NDVI 数据中的 MOD13A1 级数据产品,时间序列为 2001—2016 年,时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 500 m×500 m。应用 MODIS Reprojection Tools (MRT) 软件对下载的数据进行格式转换与影像拼接。利用最大值合成法减少云、大气和太阳高度角等因素对 NDVI 影像的影响,使用 ArcGIS 10.2 软件对影像进行投影转换和裁剪,并统一采用 WGS\_1984 地理坐标系统的 Albers Equal-Area Conic 投影。

1.2.2 气象数据 利用中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供的 2001—2016 年内蒙古及其周边 94 个标准气象站点的月平均温度、月总降水量及月总太阳辐射数据,并根据各气象站点的高程及经纬度信息,运用 ArcGIS 10.2 软件将各站点的气象数据进行 Kriging 空间插值,得到的栅格影像要与 NDVI 数据的投影系统和空间分辨率保持一致。

1.2.3 植被类型数据 本研究所需要的土地利用覆盖数据采用 2001 年、2008 年、2013 年的 MCD12Q1 产品,空间分辨率为 500 m×500 m。MCD12Q1 产品的 IGBP 分类法在全球范围内的分类精度达到 74.8%,其中 72.3%~77.4% 的区域达到 95% 的置信区间<sup>[20]</sup>,IGBP 分类系统下内蒙古地区各种主要土地覆盖类型的分类精度为:草地为 66%,农田为 58%,稀疏灌丛为 85%,混交林为 65%,荒漠为 74.5%,城市为 93%<sup>[21]</sup>。该数据产品采用 IGBP 分类标准将全球的土地覆被分成 17 种类型,本研究将其重分类为与 NRED(中国科学院资源环境数据中心)分类标准相

对应的 6 类,并将开放灌丛、草原、森林草原、稀树草原和永久湿地合并为草地。

### 1.3 研究方法

1.3.1 草地 NPP 的估算 CASA 模型所估算的植被 NPP 可通过植被所吸收的光合有效辐射 (APAR) 和光能利用率 ( $\epsilon$ ) 2 个变量确定,其估算公式为:

$$\text{NPP}(x, t) = \text{APAR}(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (1)$$

式中:  $\text{APAR}(x, t)$  表示在  $t$  月份内  $x$  像元吸收的光合有效辐射 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ );  $\epsilon(x, t)$  代表其对应的实际光能利用率 ( $\text{g C}/\text{MJ}$ )。

(1) APAR 的估算。光合有效辐射 (PAR) 是驱动植被进行光合作用的动力,植被所吸收的 (APAR) 取决于太阳总辐射与植被对入射的光合有效辐射的吸收比重,计量公式为:

$$\text{APAR}(x, t) = \text{SOL}(x, t) \times \text{FPAR}(x, t) \times 0.5 \quad (2)$$

式中:  $\text{APAR}(x, t)$  表示在  $t$  月份内  $x$  像元的太阳总辐射 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ); 常数 0.5 表示由植被所吸收的 APAR (400~700 nm) 在太阳总辐射中的占比;  $\text{FPAR}(x, t)$  指的是植被对入射的光合有效辐射 (PAR) 的吸收比例。

(2) 光能转化率 ( $\epsilon$ ) 的估算。光能转化率 ( $\epsilon$ ) 主要受水热因子的限制,表示植被将其所吸收的光合有效辐射 (PAR) 转化为有机碳的效率,用公式 (3) 计算:

$$\epsilon(x, t) = T_{e1}(x, t) \times T_{e2}(x, t) \times W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon_{\max} \quad (3)$$

式中:  $T_{e1}(x, t)$  表示在低温或高温时植被体内在的生化反应限制其光合作用的程度,从而影响植被 NPP 的大小;  $T_{e2}(x, t)$  表示环境温度从最适宜温度向高温或低温转化时逐渐降低植物光能转化率的趋势;  $W_{\epsilon}(x, t)$  表示植被所能利用的有效水分条件对光能转化率的影响;  $\epsilon_{\max}$  (0.09~2.16) 指的是植被在理想状态下的最大光能利用率,不同植被类型对应的取值有所不同。本文  $\epsilon_{\max}$  的取值参照朱文泉等<sup>[22]</sup>的研究成果,其中草地的  $\epsilon_{\max}$  模拟值为 0.542 g C/MJ。CASA 模型中;  $T_{e1}(x, t)$  和  $T_{e2}(x, t)$  的具体运算过程也参考朱文泉<sup>[23]</sup>的研究结果。

1.3.2 CASA 模型精度验证与参数评价分析 由于无法获得与遥感数据空间分辨率一致的大尺度范围的地面实测数据,但考虑到样方比较典型、数量较多且抽样时间比较一致,在一定程度上 NPP 的模拟值可以代表内蒙古草原实测净初级生产力。本研究利用 2008 年 7 月、8 月份实测得到的 30 块内蒙古草原样地的生物量数据,根据马文红等<sup>[24]</sup>的相关研究,将内蒙古草原地上和地下生物量近似分配比取为 1:5.73,并根据碳转化率 (0.475) 计算得到草地实测 NPP;再将 CASA 模型模拟得到的 NPP 与实测 NPP 在空间位置上一一对应,进行模型精度验证。样地选

取时,需选择地势平坦且牧草生长较为均匀的地块,每个样地设置 5 个  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  的样方。齐地切割样地地上部分的牧草后,将其放至  $70^\circ\text{C}$  的恒温烘箱内烘干至恒重后称取干重。模型精度验证结果 (图 2) 显示内蒙古草地 NPP 的实测值与模拟值呈显著相关关系 ( $R^2=0.501$ ,  $p<0.001$ )。

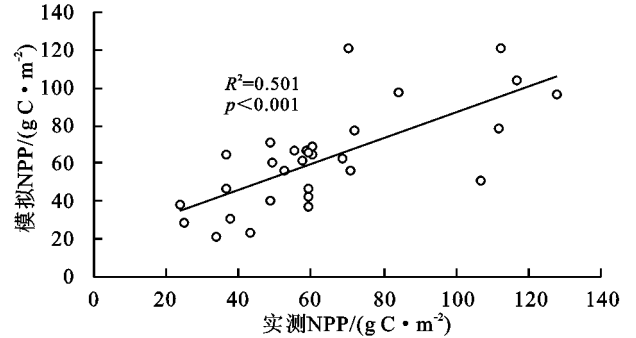


图 2 内蒙古草地模拟 NPP 与实测 NPP 的对比

1.3.3 年际变化趋势计算 基于像元的一元线性回归分析,模拟 2001—2016 年内蒙古草地 NPP 的年际变化趋势,其计算公式为:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NPP}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NPP}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (4)$$

式中:  $\theta_{\text{slope}}$  表示年际趋势变化率;  $n$  为监测年数 ( $n=16$ ),  $\text{NPP}_i$  表示第  $i$  年的草地 NPP。若  $\theta_{\text{slope}}$  为负,则表示草地 NPP 下降,反之则表示草地 NPP 上升。采用  $F$  检验对草地 NPP 的年际变化趋势进行显著性检验,并将其结果划分为 6 个变化等级。计算公式为:

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (5)$$

式中:  $U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ ,  $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$  分别表示回归平方和与剩余平方和;  $y_i$  是第  $i$  年草地 NPP 值;  $\hat{y}_i$ ,  $\bar{y}$  分别表示草地 NPP 回归值与年际平均值;  $n=16$  (监测年数)。

1.3.4 与水热因子相关性的计算 运用基于栅格像元的空间分析方法,计算内蒙古草地 NPP 与水热因子的偏相关性,计算公式<sup>[25]</sup>如下:

$$R_{xy \cdot z} = \frac{R_{xy} - R_{xz} \cdot R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^2)(1-R_{yz}^2)}} \quad (6)$$

式中:  $R_{xy \cdot z}$  代表  $x, y, z$  变量间的偏相关系数;  $R_{xy}$ ,  $R_{xz}$ ,  $R_{yz}$  表示草地 NPP 与温度、降水量两两之间的简单相关系数。

采用  $t$  检验对草地 NPP 与水热因子的偏相关性进行检验,计算公式如下:

$$t = \frac{R_{xy \cdot z}}{\sqrt{1-R_{xy \cdot z}^2}} \cdot \sqrt{n-3-1} \quad (7)$$

式中:  $n$  表示监测年数 ( $n=16$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 草地 NPP 的空间分布格局

2001—2016 年内蒙古草地 NPP 呈由东北至西南逐渐递减的总体分布格局(图 3),且具有明显的经向地带性和空间异质性,其中东北部草原 NPP 最大,中部典型草原 NPP 次之,西部荒漠草原 NPP 最低。研究区 16 a 来草地 NPP 平均值介于  $0.55 \sim 788 \text{ g C/m}^2$  之间,年际平均值为  $343.46 \text{ g C/(m}^2 \cdot \text{a)}$ ;年均 NPP 主要集中在  $100 \sim 400 \text{ g C/m}^2$  之间,占内蒙古草地总面积的 60% 以上;年均 NPP 总量约为  $0.218 \text{ Pg C}$ ,16 a 共计  $3.483 \text{ Pg C}$ 。

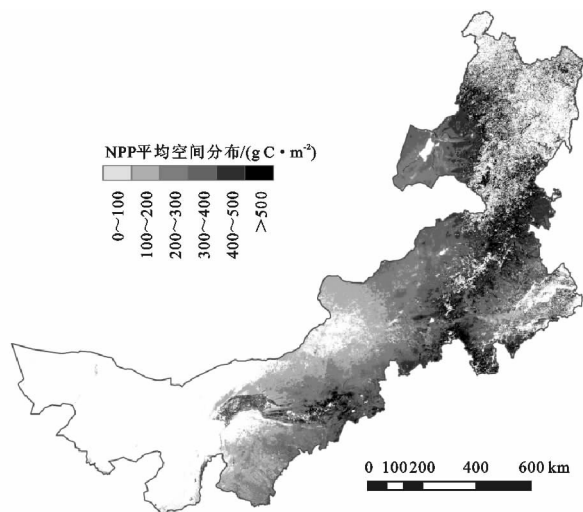


图 3 2001—2016 年内蒙古草地 NPP 平均空间分布

MCD12Q1 产品采用 IGBP 分类系统将全球分成 17 种土地覆盖类型,本研究将开放灌丛、森林草原、稀树草原、草原和永久湿地合并为草地,各草地类型覆盖面积比例分别为 2.06%,4.14%,0.71%,93.08%,0.01%。不同草地类型的多年平均 NPP 有较大差异,各草地类型年际平均 NPP 依次为 167.95,583.49,592.73,334.73,514.04  $\text{g C/m}^2$ 。其中草原 NPP( $334.73 \text{ g C/m}^2$ )与草地 NPP 的年际平均值最吻合,森林草原、稀树草原和永久湿地主要分布在东北部水热条件较好的地带,使得其草地生产力高于全区平均值。

### 2.2 草地 NPP 的时间变化特征

2001—2016 年内蒙古草地 NPP 总体呈波动上升趋势(图 4),从 2001 年( $293.46 \text{ g C/m}^2$ )到 2016 年( $379.63 \text{ g C/m}^2$ )增加了  $86.17 \text{ g C/m}^2$ ,增幅为 29.36%;2011 年( $253.71 \text{ g C/m}^2$ )出现明显的波谷,2012—2014 年出现明显回升,且内蒙古草地 NPP 于 2012 年达到最大值( $410.05 \text{ g C/m}^2$ )。2011 年与 2012 年内蒙古草地 NPP 差异最大,处于两个极端值,主要是因为 2011 年该区年均温最低仅  $3.1^\circ\text{C}$ ,且年总降水量( $301 \text{ mm}$ )也小于平均水平,总体水热条件较低;而

2012 年平均气温虽稍有上升,但年总降水量( $441 \text{ mm}$ )达到 16 a 最大,为内蒙古草原植被的生长提供了充沛有利的水分条件,因而使得 2012 年该区草地 NPP 达到最大值。16 a 来全区草地 NPP 在呼伦贝尔草原区、大兴安岭北段西侧和松辽平原中部的森林草原区增长趋势最为明显;而西辽河平原草原区、大兴安岭南段草原区和内蒙古东部草原减少趋势最为明显。

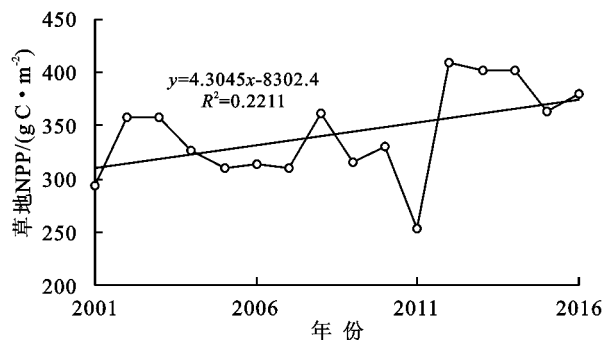


图 4 2001—2016 年内蒙古草地 NPP 年际变化

利用趋势分析法对 2001—2016 年内蒙古草地 NPP 年际变化趋势进行分析(图 5),全区草地 NPP 年平均值在  $253.71 \sim 410.05 \text{ g C/m}^2$  之间波动,大部分地区草地 NPP 呈增长趋势,16 a 平均增长率约为  $4.27 \text{ g C/(m}^2 \cdot \text{a)}$ 。16 a 草地 NPP 随时间变化趋势的显著性检验结果(图 6)表明:草地 NPP 呈增长趋势的面积为  $68.69 \text{ 万 km}^2$ ,占内蒙古草地总面积的 79.26%;其中呈不显著增加、显著增加和极显著增加的比例分别为 58.60%,8.92%,11.74%;草地 NPP 呈减少趋势的面积为  $17.97 \text{ 万 km}^2$ ,占内蒙古草地总面积的 20.74%,其中呈不显著减少、显著减少和极显著减少的比例分别为 19.15%,0.92%,0.67%。

### 2.3 草地 NPP 与温度的耦合关系

16 a 间内蒙古气温空间差异明显,年均温介于  $-3.50 \sim 9.89^\circ\text{C}$  之间,且总体上呈现出由西南向东北方向逐渐递减的趋势(图 7)。内蒙古草地 NPP 与年均温的偏相关系数为 0.306,显著性检验结果表明内蒙古大部分地区草地 NPP 与年均温呈不显著相关关系。统计发现,全区草地 NPP 与年均温呈极显著正相关的草地面积为  $9.84 \text{ 万 km}^2$ ,占草地总面积的 11.35%,主要分布于大兴安岭北段山地草原区、松辽平原东部山前台地和中部草原区;呈显著正相关的草地面积为  $9.23 \text{ 万 km}^2$ ,占草地总面积的 10.65%。内蒙古草地 NPP 与年均温呈显著负相关和极显著负相关的草地共占 0.013%,说明这两类地区草地 NPP 随年均温升高而降低。从显著性检验的分布结果(图 8)可以看出, $67.59 \text{ 万 km}^2$  的草地 NPP 与年均温呈

不显著相关,占全区草地总面积的 77.99%,因此年均温并不是影响内蒙古草地 NPP 的主要气候因子。

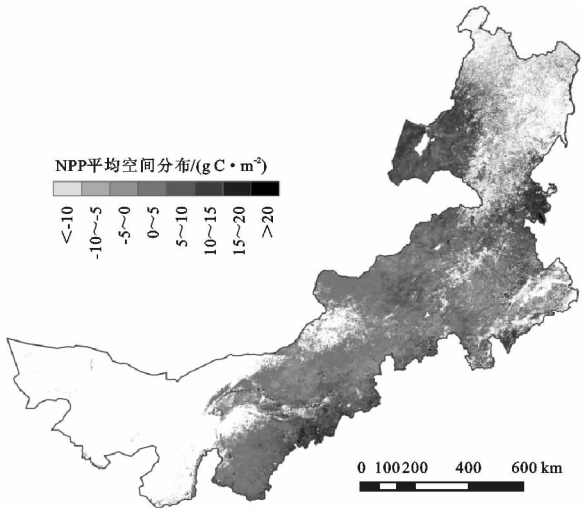


图 5 2001—2016 年内蒙古草地 NPP 年际趋势变化

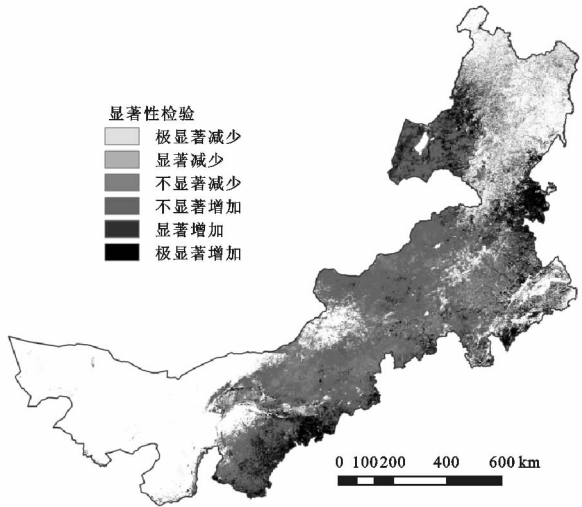


图 6 2001—2016 年内蒙古草地 NPP 显著性检验

2.4 与年总降水量的耦合关系

2001—2016 年内蒙古草地生态系统年总降水量(图 9)介于 65.97~532.93 mm 之间,年际平均值为 329 mm。草地 NPP 与年总降水量的平均偏相关系数为 0.622,显著性检验结果表明内蒙古大部分地区草地 NPP 与年总降水量呈显著正相关。统计发现,全区草地 NPP 与年总降水量呈极显著正相关的草地面积为 44.65 万 km<sup>2</sup>,占草地总面积的 51.52%,集中分布在松辽平原东部山前台地草原、中部森林草原和东北部的大兴安岭北段山地草原等湿润区(图 10);呈显著正相关的草地面积为 19.44 万 km<sup>2</sup>,其比例为 22.43%。呈极显著负相关和显著负相关的草地面积比例之和为 0.035%;呈不显著相关的草地面积为 22.55 万 km<sup>2</sup>,其比例为 26.02%,主要集中在西辽河平原草原区、鄂尔多斯草原区等半干旱区。因此,降水量是影响内蒙古草地 NPP 的主要气候因子。

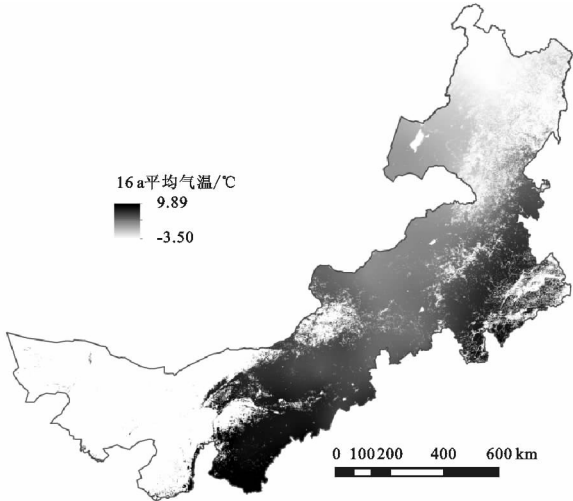


图 7 2001—2016 年内蒙古平均年气温

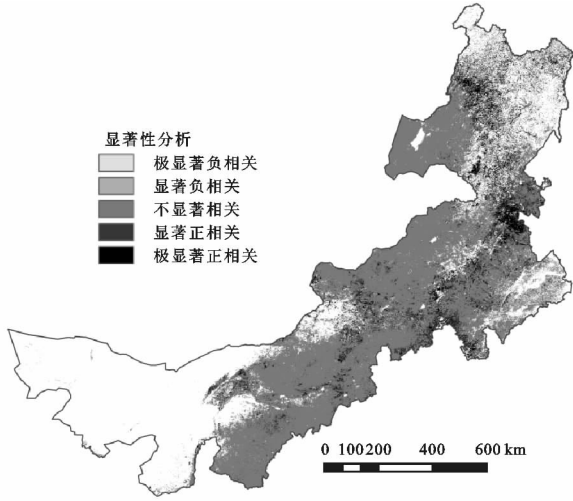


图 8 内蒙古草地 NPP 与年均温的显著性关系

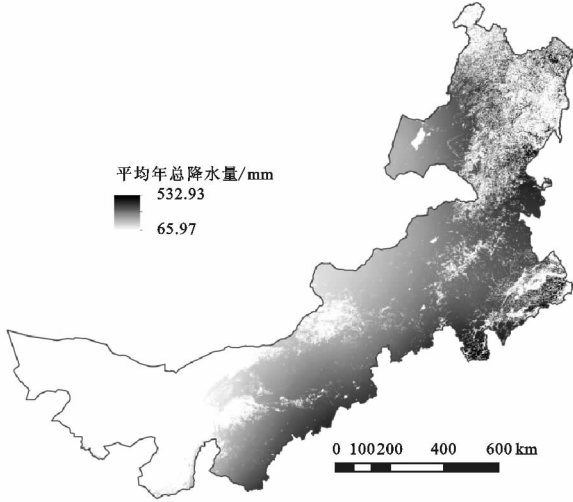


图 9 2001—2016 年内蒙古平均年总降水量

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 内蒙古草地 NPP 模拟结果对比 本研究利用基于光能利用率原理的 CASA 模型模拟内蒙古草

地 NPP, 得到 2001—2016 年的内蒙古草地年际平均 NPP 为  $343.46 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。与以往研究对比发现, 张峰等<sup>[26]</sup>对 1982—2002 年内蒙古典典型草原的年平均 NPP 估算值为  $290.23 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ; 龙慧灵等<sup>[27]</sup>对 1982—2006 年内蒙古草原区 NPP 的估算平均值为  $299.8 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ; 穆少杰等<sup>[28]</sup>对 2001—2010 年内蒙古草地平均 NPP 的估算值为  $281.3 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。以上研究均利用 CASA 模型对内蒙古草地 NPP 进行模拟, 但由于研究时段、模型参数设置、草地覆盖分类数据来源的差异, 王国成<sup>[29]</sup>、穆少杰<sup>[28]</sup>等将内蒙古草地划分为草甸草原、典型草原和荒漠草原 3 类, 西部荒漠也被划分为草地, 而本研究将 MCD12Q1 产品重分类为与 NRED(中国科学院资源环境数据中心)分类标准相对应的 6 类, 其中内蒙古西北荒漠地区草地覆盖较少, 使得草地 NPP 模拟结果的平均值高于以往研究结果。除此之外, 模型中输入的气象栅格数据是利用气象站点的观测值通过 Kriging 空间插值得到的, 空间插值过程会造成一定的偏差, 也会影响区域植被 NPP 的估算精度。

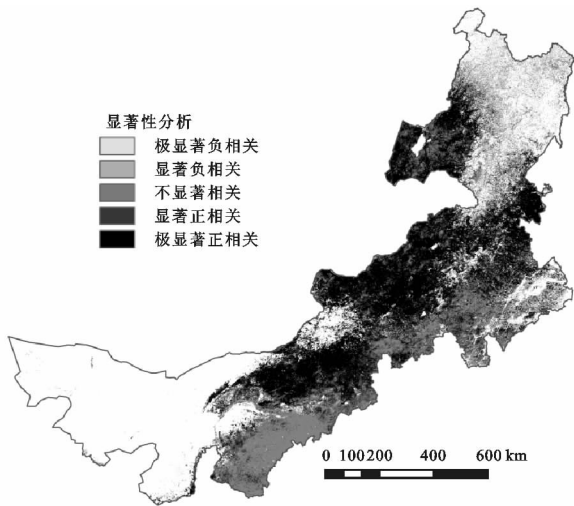


图 10 内蒙古草地 NPP 与年总降水量的显著性关系

3.1.2 水热因子对内蒙古草地 NPP 的影响 内蒙古东北部草原区降雨量充沛, 年均温较高, 草原植被长势较好; 而西部荒漠区水热因子组合失衡, 影响了草原植被的正常生长, 引起牧草产量和质量下降, 在一定程度上导致荒漠草原退化。内蒙古草地 NPP 与水热因子的耦合关系分析结果表明: 内蒙古大部分地区草地 NPP 与年总降水量呈显著正相关, 而与年均温呈无显著相关, 表明降水量是内蒙古草地 NPP 的主要气候限制因子, 导致草地 NPP 总体上也呈现出由东北至西南逐渐递减的空间分布格局。戴尔阜<sup>[30]</sup>、李刚<sup>[31]</sup>、赵军<sup>[32]</sup>等研究表明, 合理的水热条件

配置更有利于草原植被的生长, 降水量是影响内蒙古草地净初级生产力的主要气候限制因子, 而草地 NPP 与温度呈较弱的负相关。

### 3.2 结论

在空间分布上, 2001—2016 年内蒙古草地 NPP 总体呈现由东北至西南逐渐递减的分布格局, 且具有明显的经向地带性和空间异质性; 草地年均 NPP 介于  $0.55 \sim 788 \text{ g C}/\text{m}^2$  之间, 年际平均值为  $343.46 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 但主要集中在  $100 \sim 400 \text{ g C}/\text{m}^2$ , 占内蒙古草地总面积的 60% 以上; 草地年均 NPP 总量约为  $0.218 \text{ Pg C}$ , 16 a 共计  $3.483 \text{ Pg C}$ 。在年际趋势变化上, 16 a 来内蒙古草地 NPP 总体呈波动上升趋势, 从 2001 年 ( $293.46 \text{ g C}/\text{m}^2$ ) 到 2016 年 ( $379.63 \text{ g C}/\text{m}^2$ ) 增加了  $86.17 \text{ g C}/\text{m}^2$ , 增幅为 29.36%; 全区草地 NPP 年平均值在  $253.71 \sim 410.05 \text{ g C}/\text{m}^2$  之间波动, 大部分地区草地 NPP 呈增长趋势, 16 a 平均增长率约为  $4.27 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

西部荒漠区与东北部草原区相比, 水热条件明显失衡, 导致草原植被无法正常生长, 引起草原荒漠化甚至呈退化状态; 而森林草原、稀树草原和永久湿地主要分布在东北部水热条件较好的地带, 使得其草地生产力高于全区平均值。且内蒙古草地 NPP 在 2011 年 ( $253.71 \text{ g C}/\text{m}^2$ ) 与 2012 年 ( $410.05 \text{ g C}/\text{m}^2$ ) 处于两个极端值, 分析其水热条件我们不难看出, 在低温情况下, 降水量的大小更容易影响内蒙古草原植被的生长。内蒙古草地 NPP 与年均温的偏相关系数为 0.306, 与年总降水量的偏相关系数为 0.622; 大部分地区草地 NPP 与年总降水量呈显著正相关关系, 而与年均温无显著相关。因而对内蒙古草地 NPP 与水热因子耦合关系分析可以得到: 降水量是影响内蒙古草地 NPP 的主要气候因子。

### 参考文献:

- [1] Zhao T, Ouyang Z, Jia L, et al. Ecosystem services and their valuation of China grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1101-1110.
- [2] Adams J M, Faure H, Faure-Denard L, et al. Increases in terrestrial carbon storage from the Last Glacial Maximum to the present[J]. Nature, 1990, 348(6303): 711.
- [3] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective [J]. Global Change Biology, 1998, 4(2): 229-233.
- [4] 方精云, 唐艳鸿, 林俊达. 全球生态学: 气候变化与生态响应[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [5] Hansen M H, Hahn J T. Computer corner: Database

- management provides easy access to forest inventory data[J]. Northern Journal of Applied Forestry, 1988, 5(1): 8-11.
- [6] Lieth H, Whittaker R H. Primary productivity of the biosphere[J]. Kew Bulletin, 1975, 32(1): 274.
- [7] Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 1985, 40(4): 343-352.
- [8] 朱志辉. 自然植被净第一性生产力估计模型[J]. 科学通报, 1993, 38(15): 1422-1426.
- [9] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探[J]. 植物生态学报, 1995, 19(3): 193-200.
- [10] 周广胜, 郑元润, 陈四清, 等. 自然植被净第一性生产力模型及其应用[J]. 林业科学, 1998, 34(5): 2-11.
- [11] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, et al. Potential net primary productivity in South America: application of a global model[J]. Ecological Applications, 1991, 1(4): 399-429.
- [12] McGuire A D, Melillo J M, Joyce L A, et al. Interactions between carbon and nitrogen dynamics in estimating net primary productivity for potential vegetation in North America[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1992, 6(2): 101-124.
- [13] Parton W J, Stewart J W B, Cole C V. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model[J]. Biogeochemistry, 1988, 5(1): 109-131.
- [14] Running S W, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes[J]. Ecological Modelling, 1988, 42(2): 125-154.
- [15] Running S W, Nemani R R. Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forests in different climates[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 24(2): 347-367.
- [16] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production[J]. Nature, 1993, 363(6426): 234-240.
- [17] Running S W. Testing FOREST-BGC ecosystem process simulations across a climatic gradient in Oregon[J]. Ecological Applications, 1994, 4(2): 238-247.
- [18] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
- [19] 董云社, 陈佐忠. 内蒙古典型草地  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  通量的同时观测及其日变化[J]. 科学通报, 2000, 45(3): 318-322.
- [20] Friedl M A, Sulla-Menashe D, Tan B, et al. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(1): 168-182.
- [21] John R, Chen J, Lu N, et al. Land cover/land use change in semi-arid Inner Mongolia: 1992—2004[J]. Environmental Research Letters, 2009, 4(4): 45010-45019.
- [22] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 等. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算: 以中国内蒙古为例[J]. 遥感学报, 2005, 9(3): 300-307.
- [23] 朱文泉. 中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2005.
- [24] 马文红, 杨元合, 贺金生, 等. 内蒙古温带草地生物量及其与环境因子的关系[J]. 中国科学: 生命科学, 2008, 38(1): 84-92.
- [25] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 等. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3752-3764.
- [26] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟[J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 786-797.
- [27] 龙慧灵, 李晓兵, 王宏, 等. 内蒙古草原区植被净初级生产力及其与气候的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1367-1378.
- [28] 穆少杰, 李建龙, 杨红飞, 等. 内蒙古草地生态系统近 10 年 NPP 时空变化及其与气候的关系[J]. 草业学报, 2013, 22(3): 6-15.
- [29] 王国成, 张稳, 黄耀. 1981—2001 年内蒙古草地净初级生产力时空变化特征[J]. 草业科学, 2011, 28(11): 2016-2025.
- [30] 戴尔阜, 黄宇, 吴卓, 等. 内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 21-34.
- [31] 李刚, 周磊, 王道龙, 等. 内蒙古草地 NPP 变化及其对气候的响应[J]. 生态环境学报, 2008, 17(5): 1948-1955.
- [32] 赵军, 师银芳, 王大为. 基于 IOCS 的内蒙古潜在植被 NPP 空间分布特征研究[J]. 自然资源学报, 2012, 27(11): 1870-1880.