

DOI: 10.11686/cyxb2019543

http://cyxb.magtech.com.cn

乌尼图, 刘桂香, 杨勇, 等. 基于光能利用率模型的内蒙古天然草原植被净初级生产力动态监测与气候因子的响应. 草业学报, 2020, 29(11): 1—10.

Wu N T, Liu G X, Yang Y, et al. Dynamic monitoring of net primary productivity and its response to climate factors in native grassland in Inner Mongolia using a light-use efficiency model. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 1—10.

基于光能利用率模型的内蒙古天然草原植被净初级生产力动态监测与气候因子的响应

乌尼图^{1,2}, 刘桂香^{1*}, 杨勇³, 宋向阳³, 白海花¹

(1. 中国农业科学院草原研究所, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081;

3. 内蒙古自治区草原勘察规划院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:利用光能利用率模型和 MODIS 数据对内蒙古天然草原 2000—2018 年植被生长期草原净初级生产力进行连续动态监测,并在像元尺度利用最小二乘法分析了近 20 年植被净初级生产力(NPP)时空变化规律。结果表明:近 20 年中,内蒙古天然草原 NPP 在空间上呈由西向东递增分布规律,年均 NPP 为 $198.04 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,潜在草地退化面积 16.22 万 km^2 ,其中重度、较重度面积分别为 0.20 万 和 1.11 万 km^2 ,主要分布于人类活动密集区域,如矿区、建设用地及周边;在草地类型上,温性草原、温性草甸草原、温性荒漠以及温性荒漠草原潜在退化面积分别为 5.22 万 、 1.40 万 、 4.04 万 和 2.21 万 km^2 。通过分析 NPP 与气候因子的相关性表明:近 20 年,内蒙古草原 NPP 与降水具有显著相关性,与温度无相关性;温性草甸草原 NPP 对降水的响应最敏感,温性荒漠草原其次,温性草原对降水响应最低。研究还根据上述结果,围绕草地生态保护提出了建议。

关键词:光能利用率模型;MODIS;草地净初级生产力;气候因子

Dynamic monitoring of net primary productivity and its response to climate factors in native grassland in Inner Mongolia using a light-use efficiency model

WU Ni-tu^{1,2}, LIU Gui-xiang^{1*}, YANG Yong³, SONG Xiang-yang³, BAI Hai-hua¹

1. Grassland Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010010, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Grassland Investigation and Planning Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010051, China

Abstract: Based on a light-use efficiency model and MODIS data, the net primary productivity (NPP) of grassland during the growing seasons from 2000 to 2018 in native grassland in Inner Mongolia was continuously estimated, and the spatial-temporal change trend of NPP over the past 20 years was also analyzed using a least square method at pixel scale to determine the degree of grassland degradation. It was found that NPP increased from west to east across Inner Mongolia, with an annual average of $198.04 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$. An area of potential grassland degradation of 162200 km^2 was identified. The areas of severely and heavily degraded grassland identified were 2000 and 11100 km^2 , respectively. The latter were mainly distributed in areas with intensive human activities, such as mining areas, or construction land and its surrounding areas. In terms of grassland

收稿日期:2019-12-10;改回日期:2020-04-23

基金项目:中国农业科学院草原研究所科技创新工程“中蒙俄草原火灾联合监测防控研究”项目和内蒙古自治区科技计划项目(2060399-273)资助。

作者简介:乌尼图(1988-),男,蒙古族,内蒙古锡林浩特人,在读博士。E-mail: unteecaas@outlook.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: liugx804@163.com

types, the potentially degraded areas of temperate steppe, temperate meadow, temperate desert and temperate desert-steppe were 52200, 14000, 40400 and 22100 km² respectively. Through analyzing the correlation between NPP and climate factors in the last two decades, it was found that NPP is significantly correlated with precipitation, but has no correlation with temperature. The response of NPP to precipitation was the most sensitive in temperate meadow, that of temperate desert steppe was the second, and that of temperate steppe was the lowest. Based on the above results, this paper puts forward some suggestions for grassland ecological protection.

Key words: light-use efficiency model; MODIS; net primary productivity of grassland; climate factors

草地是陆地最大的生态系统之一,不仅是承载人类活动重要的“场所”,而且具有很高的生态服务价值^[1]。据联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)最新统计表明,世界草地面积约为 0.35 亿 km²,占世界陆地面积的 26%,占世界农业总面积的 70%,是发展畜牧业经济的载体^[2]。近些年,受过度开发利用以及气候变化的影响,草地减产、草地退化现象日益严重,成为制约经济可持续发展,威胁区域生态安全的主要障碍^[3]。我国草地面积约为 393 万 km²,约占国土面积的 40%,天然牧草种类达 5000 多种,位居世界第一位,但受人类活动和气候的影响,我国近 90%的天然草原出现了不同程度的退化^[1,3]。

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是植被通过光合作用所同化的有机物量中扣除自养呼吸后的剩余部分^[4]。NPP 作为地表碳循环的重要组成部分,不仅直接反映了植被群落在自然环境条件下的生产能力,而且还是判定生态系统健康状况的重要指标^[5]。自 20 世纪 60 年代以来,遥感技术的发展为宏观尺度草地生产力监测提供了技术支撑,尤其自多光谱影像问世以来,国内外学者围绕植被光学遥感开展了大量研究,发展了大量可实施的 NPP 估算模型方法^[6-7]。早期的模型主要利用植被指数结合实测数据进行 NPP 的修正和模拟^[8],近年来则将生态系统碳循环过程与遥感技术结合,建立碳通量过程的遥感模型,具代表性的有 GLO-PEM^[9]、VPM^[10]、EC-LUE^[11]和 CASA^[12]等,由于这类模型具有模拟生态过程、易获取基础参数等优势,被广泛应用于植被 NPP 的计算中。但在区域尺度应用上述模型还需在关键参数上进行修正,以确保模型精度^[8]。针对我国植被特点,国内一批学者^[13-15]通过构建基于光能利用率的 NPP 估算模型,取得了较好的模拟精度。

内蒙古草原是我国北方天然草原的重要组成部分,在宏观尺度下研究草地 NPP 的空间变化规律,以及 NPP 与水热条件的响应规律对于合理利用草地资源具有重要意义。近年来,大批学者针对内蒙古草地 NPP 开展了遥感监测研究^[16-20],从不同侧面增强了对内蒙古草原生态的了解,也为本研究开展大尺度草地遥感监测提供了宝贵经验。本研究在学习和借鉴上述研究方法的基础上,利用 MODIS 作为数据源,以朱文泉等^[14]构建的光能利用率模型作为 NPP 估测模型,在 1 km×1 km 栅格像元尺度分析内蒙古天然草原植被 NPP 在近 20 年的时空变化规律,并结合气象数据分析草地 NPP 对水热供给的响应关系,为草原生态修复以及区域生态规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古自治区地处中国北部边疆(E 97°12′-126°04′,N 37°24′-53°23′),东西直线跨度达 2400 km,土地面积 118.3 万 km²,其中天然草原面积达 78.6 万 km²,占自治区总面积的 66.4%^[21]。内蒙古地形条件复杂,平均海拔 900~1300 m,主要由内蒙古高原、鄂尔多斯高原、大兴安岭山地、阴山山地、贺兰山山地、河套平原等地貌单元构成。内蒙古属于干旱大陆性气候,年均气温由东北向西南递升,由低温区年均-3~-5℃上升至高温区年均 8~9℃,具有冬季寒冷,夏季温热,有效积温多等特点;年降水量自东南向西北递减,由大兴安岭山地年降水 450 mm 递减至贺兰山以西年降水 150~250 mm,具有冬春少雨雪,夏季多雨,降水变率大,保证率低等特点;全区年太阳总辐射在 0.50~0.70 MJ·cm⁻²,由东向西递增,年日照时数在 2600~3400 h,自东北向西南递增^[17-18,21]。内蒙古土壤类型主要以草原土为主,自东向西依次分布黑土带-黑钙土带-栗钙土带-棕钙土带-漠钙土带-灰棕钙土带^[21]。根据第一次全国草地资源普查和《中国草地分类原则与分类系统》,内蒙古天然草原

可划分为温性草甸草原类、温性草原类、温性荒漠草原类、温性草原化荒漠类、温性荒漠类、低地草甸类、山地草甸类和沼泽类 8 个大类、21 个亚类以及 476 个草地型^[21](图 1)。

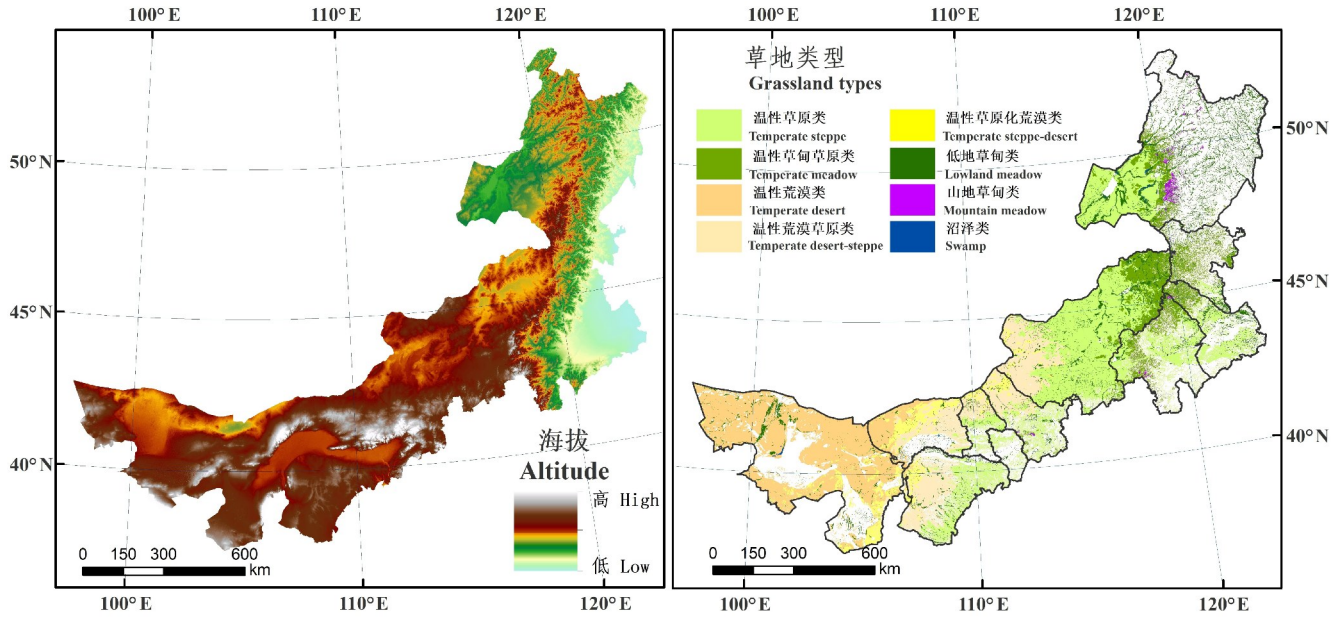


图 1 研究区概况

Fig. 1 Map of study area

1.2 数据来源与处理

本研究数据资料包括遥感数据、气象数据、样地实测数据和地图界限数据。由于研究区属于干旱与半干旱地区,草地植被生长期主要集中于 4 月初—9 月底,因此,遥感影像选取 2000—2018 年 4—9 月 MOD13A3,数据来源于美国地质勘探局数据共享中心(<http://www.usgs.gov>);气象数据选取 2000—2018 年 4—9 月内蒙古及周边 8 个省区市 94 个气象站点月均温、月降水以及全国 677 个气象站点月日照数据,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>);样地实测数据为研究区固定监测点历年监测数据;研究区地图界限数据来源于全国地理信息资源目录服务系统中《1:100 万全国基础地理数据库》(<http://www.webmap.cn>)。遥感数据的投影、拼接、裁剪和格式转化等预处理工作在 ENVI 和 ArcGIS 上进行,气象数据在 ANUSPLIN 上进行插值,NPP 利用朱文泉等^[14]开发的光能利用率模型插件进行估算。

1.3 草地净初级生产力计算

朱文泉等^[14-15]根据中国植被实测数据,在已有模型基础上,修正了各植被类型最大光能利用率,构建了新的光能利用率模型,该模型具有符合中国植被实际情况、模型因子获取简单、可操作性强等特点,具有较高的应用价值。本研究基于朱文泉等^[14]构建的光能利用率模型估算草地净初级生产力,公式如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t)$$

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5$$

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

式中:APAR(absorbed photosynthetic active radiation)为植被光合有效辐射; ϵ 为光能利用率;SOL(solar radiation)为太阳总辐射,由气象数据插值获得;FPAR(fraction of photosynthetically active radiation)为植被冠层对入射 APAR 的吸收比,可通过归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和比值植被指数(simple ratio index, SR)的线性关系获得;0.5 为植被所吸收的太阳有效辐射分量占 SOL 的比例系数; $T_{e1}(x, t)$ 和 $W_{\epsilon}(x, t)$ 分别为温度因子和水胁迫因子,均由气象数据插值获得。

FPAR 计算公示如下:

$$FPAR = \frac{[NDVI(x,t) - NDVI_{\min}](FPAR_{\max} - FPAR_{\min})}{(NDVI_{\max} - NDVI_{\min}) + FPAR_{\min}}$$

$$FPAR = \frac{[SR(x,t) - SR_{\min}](FPAR_{\max} - FPAR_{\min})}{(SR_{\max} - SR_{\min}) + FPAR_{\min}}$$

内蒙古草原 NDVI、SR 的最大值和最小值由 2000—2018 年 MODIS—NDVI 平均值和草地类型界限数据裁剪并统计得出(表 1)。

表 1 内蒙古各草地类型 NDVI、SR 指数最大值和最小值

Table 1 Maximum and minimum values of NDVI and SR of each grassland type in Inner Mongolia

序号 Number	草地类型 Grassland types	NDVI _{max}	NDVI _{min}	SR _{max}	SR _{min}	ε _{max}
1	温性草原类 Temperate steppe	0.914	0.107	22.25	1.23	0.542
2	温性草甸类 Temperate meadow	0.931	0.223	27.98	1.57	0.542
3	温性荒漠类 Temperate desert	0.681	0.029	5.11	1.05	0.542
4	温性草原化荒漠类 Temperate steppe-desert	0.703	0.073	5.73	1.15	0.542
5	温性荒漠草原类 Temperate desert-steppe	0.751	0.084	7.03	1.18	0.542
6	低地草甸类 Lowland meadow	0.929	0.034	27.17	1.07	0.542
7	山地草甸类 Mountain meadow	0.929	0.257	27.17	1.69	0.542
8	沼泽类 Swamp	0.634	0.023	4.46	1.05	0.542

注:ε_{max}参照朱文泉等^[14]的研究成果。

Note: ε_{max} refer to the research results of Zhu *et al*^[14].

1.4 模型验证

选取研究区 2017 年 8 月固定监测点(均匀分布于研究区各草地类型)实测产量数据对模型估算 NPP 值进行验证。由于实测产量数据单位是干物质重量,在转换成以碳为单位重量时需乘以 0.45 的系数^[22]。

1.5 NPP 变化趋势

采用基于最小二乘法的一元线性公式对研究区 NPP 数据集进行趋势分析,公式如下:

$$TREND = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NPP_i - \left(\sum_{i=1}^n i\right) \left(\sum_{i=1}^n NPP_i\right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2}$$

式中:TREND 代表趋势大小,若 TREND>0,则表示 NPP 增加,且数值越大,NPP 增加越大;TREND<0,表示 NPP 下降,且数值越小,NPP 下降越快。*i* 代表第几年度(1 代表 2000 年,2 代表 2001 年,⋯,19 代表 2018 年),NPP_{*i*} 表示第 *i* 年的 NPP 值。

为直观体现草地生产力退化程度,将研究区 NPP 下降趋势栅格像元(TREND<0)结合土地利用现状数据和实地调查资料,制定了包括重度、较重度、中度、轻度 4 个级别的退化分级标准(表 2)。

1.6 NPP 与气候因子的相关分析

本研究基于像元尺度研究近 20 年内蒙古草地 NPP 与气候因子(年均温度和年降水)的相关性。为消除 NPP 与气候因子间的潜在控制变量的影响,本研究采用偏相关分析法,公式如下:

$$r_{XY \cdot Z} = \frac{r_{XY} - r_{XZ} \times r_{YZ}}{\sqrt{(1 - r_{XZ}^2)} \sqrt{(1 - r_{YZ}^2)}}$$

式中:*r*_{XY·Z} 为以 *Z* 为控制变量的变量 *X* 与变量 *Y* 的偏相关系数;*r*_{XY}、*r*_{XZ}、*r*_{YZ} 分别为变量 *X* 与 *Y*、*X* 与 *Z*、*Y* 与 *Z* 之间的相关系数。由于草地 NPP、年降水和年均温度都是连续型数据,本研究采用皮尔森相关系数来反映各变量之间的相关系数,公式如下:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中： r_{XY} 为变量 X 与 Y 间的皮尔森相关系数； x_i 为变量 X 观测值， y_i 为变量 Y 观测值， \bar{x} 为变量 X 多年观测平均值， \bar{y} 为变量 Y 多年观测平均值。

表 2 内蒙古草地生产力退化程度分级

Table 2 Grassland degradation level in Inner Mongolia

序号 Number	退化程度 Degradation level	趋势度 Trend ($\times 10^{-2}$)	说明 Description
1	轻度 Slightly	0~31.80	草地生产力下降、群落结构未变。The productivity of grassland decreased and community structure remained unchanged.
2	中度 Moderate	31.80~83.46	草地生产力连续下降,有土地贫瘠现象。The productivity of grassland is continuously decreasing, and the land is barren.
3	较重度 Heavily	83.46~110.77	草地沙化、盐渍化现象明显。The desertification and salinization of grassland are obvious.
4	重度 Severe	>110.77	草地完全沙化或被改造利用。Grasslands are completely sandy or changed.

2 结果与分析

2.1 模型精度分析

通过 NPP 模拟值与 NPP 实测值的相关分析表明,模拟值与实测值之间的相关性达到显著水平($P < 0.05, n = 786$)(图 2),可以认为,基于 MODIS 数据和光能利用率模型的研究区草地植被 NPP 估算符合研究要求精度。

2.2 草原植被 NPP 空间分布规律

2000—2018 年内蒙古天然草地 NPP 在空间上呈由西向东递增分布规律(图 3),年均 NPP 为 $198.04 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中内蒙古东部大兴安岭山地段森林、杂类草地区年均 NPP 呈最高,均值高于 $350 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;呼伦贝尔东部丘陵平原线叶菊(*Filifolium sibiricum*)、贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)草地片区以及乌珠穆沁丘陵平原贝加尔针茅、羊草(*Leymus chinensis*)、杂类草地区年均 NPP 其次,均值在 $300 \sim 350 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;锡林郭勒中部高平原大针茅(*Stipa grandis*)、隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)草地片区以及通辽市南部草地年均 NPP 在 $200 \sim 300 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。随着经度的西移,在大尺度上内蒙古中西部草地 NPP 均值在 $100 \sim 250 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;西部干旱荒漠区,草地 NPP 年均值在 $50 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下,尤其在阿拉善极干旱荒漠地区,草地 NPP 年均值不到 $10 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

在草地类型上,近 20 年山地草甸和低地草甸年均 NPP 较高,分别达 410.48 和 $441.56 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;温性草甸、温性草原、温性荒漠草原类年均 NPP 分别为 416.84 、 257.00 、 $140.68 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;温性草原化荒漠、温性荒漠年均 NPP 分别为 92.76 和 $31.28 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.3 草原植被 NPP 时间变化规律

在 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 像元尺度对研究区草原植被 NPP 变化趋势分析发现,自 2000 年以来,潜在退化草地总面积为 16.22 万 km^2 ,约占全区总草地面积的 20%,分布于全区草地大部,在呼伦贝尔草原东部、锡林郭勒草原大部

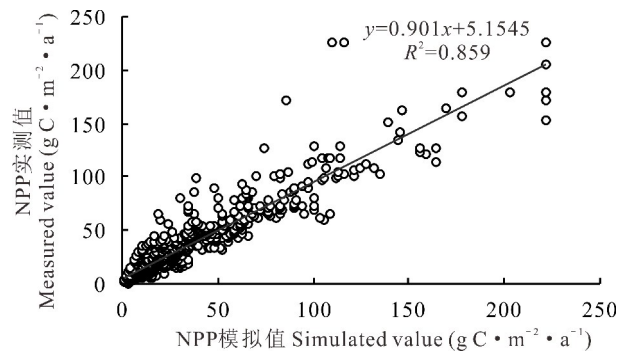


图 2 研究区 NPP 模拟值与实测值线性回归分析

Fig. 2 Linear regression analysis of simulated and measured values of NPP in the study area

以及阿拉善西部分布较为集中(图 4)。其中全区重度退化草原面积约为 0.20 万 km^2 , 较重度退化面积 1.11 万 km^2 , 中度退化面积为 3.45 万 km^2 , 轻度退化面积为 11.46 万 km^2 ; 研究区近 20 年草地生产力恢复面积为 16.96 万 km^2 , 约占全区总草地面积的 21%, 主要分布于鄂尔多斯市大部、锡林郭勒中东部及呼伦贝尔草原西部; 近 20 年来 NPP 变化基本趋于稳定的草地面积为 40.88 万 km^2 , 分布于全区大部。

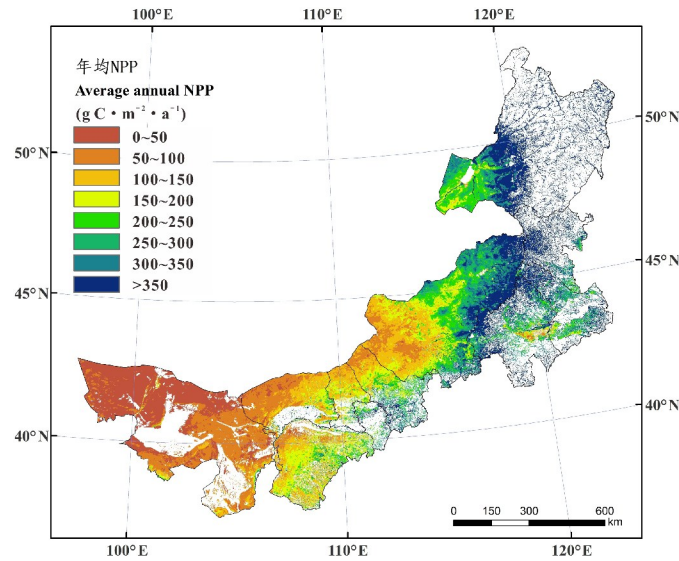


图 3 近 20 年内蒙古天然草地 NPP 空间分布规律

Fig. 3 Spatial distribution of NPP in Inner Mongolia native grassland in recent 20 years

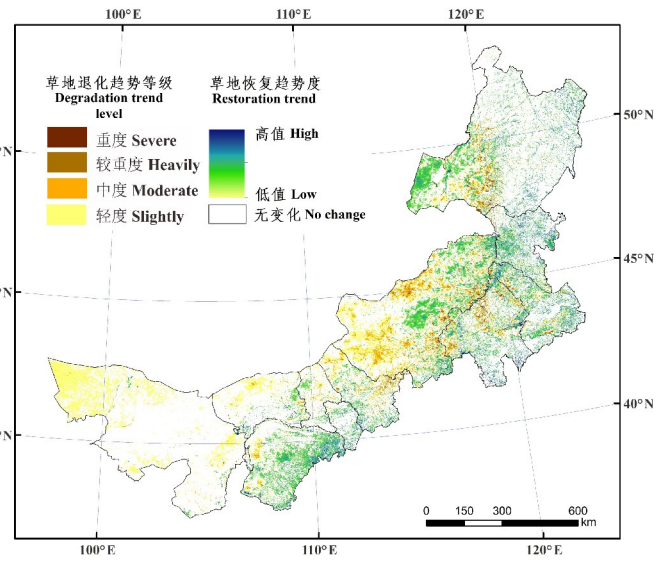


图 4 近 20 年内蒙古天然草原 NPP 变化趋势

Fig. 4 The variation trend of NPP in Inner Mongolia native grassland in recent 20 years

从草地类型上来看, 在近 20 年中, 内蒙古温性草原、温性草甸草原、温性荒漠以及温性荒漠草原潜在退化面积分别为 5.22 万、1.40 万、4.04 万和 2.21 万 km^2 , 草地生产力恢复面积分别为 8.16 万、3.51 万、0.15 万和 1.59 万 km^2 (图 5)。

2.4 草原植被 NPP 对气候因子的响应

水热是植被赖以生存的必要条件, 水热供给不足会导致植被长势的下降以及植被种群退化^[23]。通过研究区 2000—2018 年草地 NPP 栅格数据集与同期年均温度和年降水栅格数据集的偏相关分析得出, NPP 与年降水相关系数明显高于 NPP 与年均温度相关系数, 且以正相关为主, 数值在 0.3~0.8; NPP 与年均温度相关系数则在不同草地类型、不同空间分布上明显不同(图 6)。

由于相关系数是由样本数据计算出来的, 要得到研究区草地 NPP 与气候因子是否显著相关, 则需要对

相关系数进行统计检验。分别对草地 NPP 与年降水、年均温度的相关性进行置信度 95% 的 t 检验(零假设: $r_0 = 0$, 即 NPP 与气候因子不相关)得出(图 7), 在置信度为 95% 的置信区间, 研究区绝大多数草地 NPP 与年降水具有显著相关性($P < 0.05$, $n = 19$), 但在呼伦贝尔低地草甸草原类、锡林郭勒中部温性草原类、鄂尔多斯温性草原类以及阿拉善温性荒漠类等个别像元斑块草地 NPP 与年降水不具有相关性; 在草地 NPP 与年均温度方面, 除锡林郭勒西部温性荒漠草原类型 NPP 与年均温度具有显著负相关外($P < 0.05$, $n = 19$), 其余均无相关性。

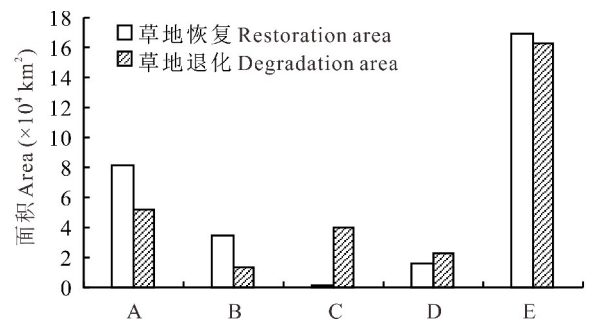


图 5 近 20 年内蒙古主要草地类型潜在草地退化面积和草地 NPP 恢复面积

Fig. 5 Potential grassland degradation area and restoration area of main grassland types in Inner Mongolia in recent 20 years

A: 温性草原 Temperate steppe; B: 温性草甸草原 Temperate meadow; C: 温性荒漠 Temperate desert; D: 温性荒漠草原 Temperate desert-steppe; E: 全区草地 Grassland of Inner Mongolia.

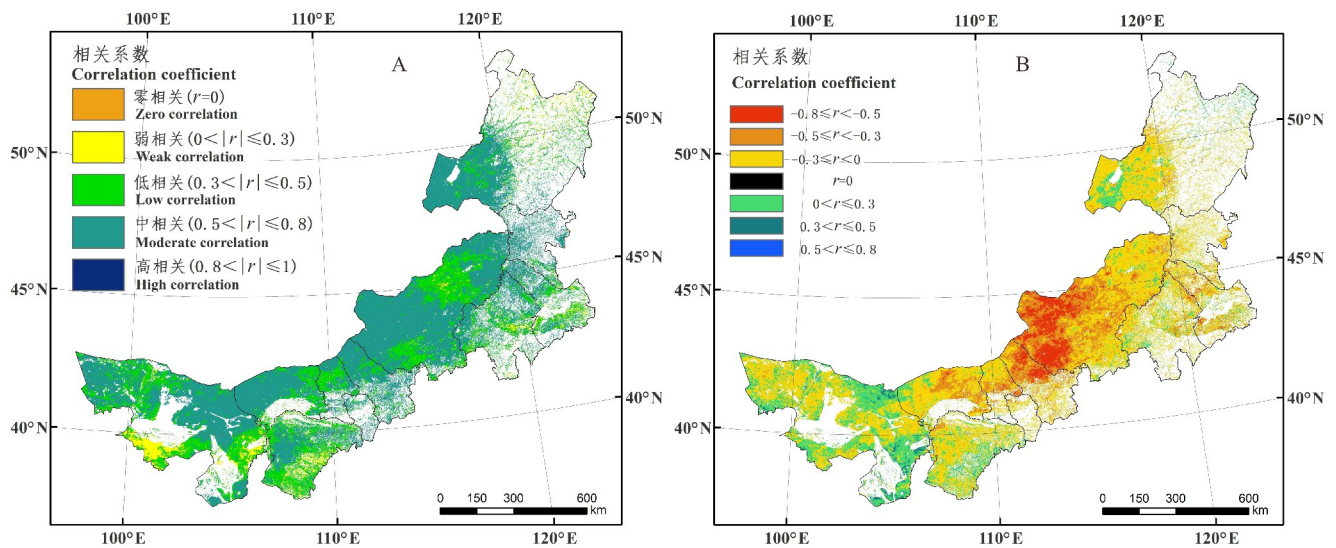


图 6 近 20 年内蒙古天然草原 NPP 与降水(A)和温度(B)的响应关系

Fig. 6 Response of NPP and precipitation (A) and temperature (B) in Inner Mongolia native grassland in recent 20 years

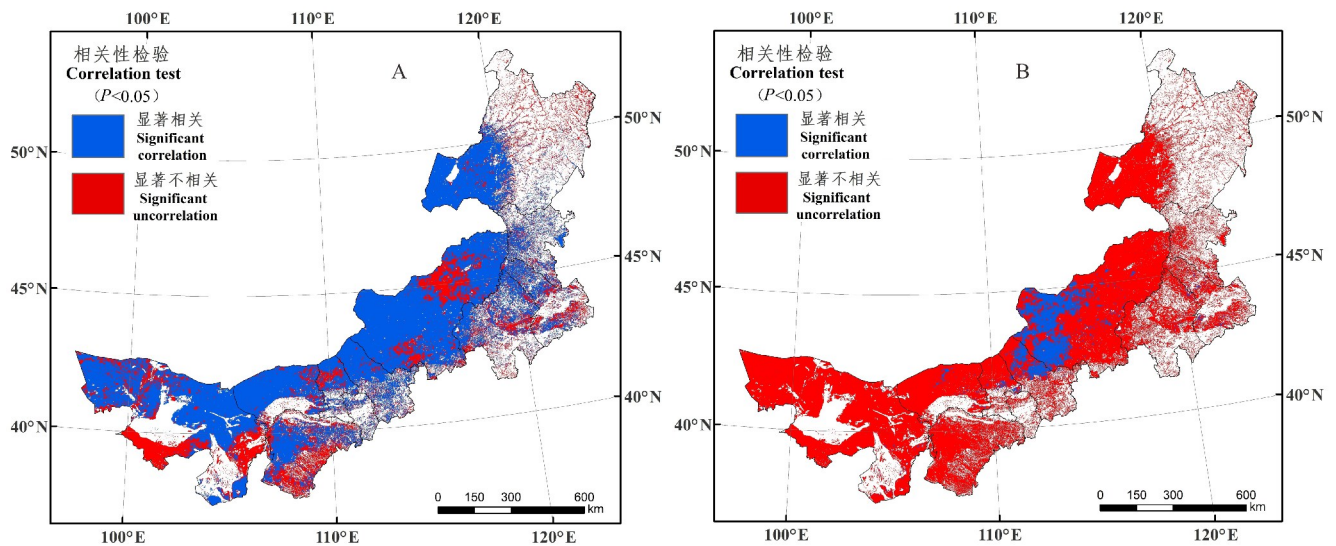


图 7 近 20 年内蒙古天然草原 NPP 与降水(A)、温度(B)的相关性检验

Fig. 7 Correlation test of NPP with precipitation (A) and temperature (B) in Inner Mongolia native grassland in recent 20 years

通过提取 2000—2018 年研究区草地 NPP 与降水相关性在草地类型上的分布面积可知,近 20 年内蒙古温性草甸草原 NPP 与降水的相关性最高,即对降水的响应最敏感,在置信度为 95%和 99%的置信区间,显著相关面积占该类型总面积的 83.21%和 48.74%,温性荒漠草原类型其次,达 81.14%和 40.96%,温性草原类型对降水的响应最低,达 73.41%和 33.77%(表 3)。

3 讨论

植被 NPP 对于反映植被群落功能完整性,评价生态系统健康具有重要意义,被众多学者喻为研究植被生态的“黄金指标”。本研究在借鉴李刚等^[4]、朱文泉等^[14]的 NPP 估算模型的基础上,针对内蒙古天然草原特点,对各草地类型 NDVI、SR 最大值和最小值进行了修正,使模型更加准确的模拟研究区草地 NPP。结果也表明,NPP 模拟值与实测值线性相关性达到显著性水平($P < 0.05$)。同时,对比其他研究结果,虽然研究时段和研究范围有所不同,但大多数基于光能利用率模型计算的内蒙古草地 NPP 均值在 $(290 \pm 55) \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,例如,穆少杰

等^[16]利用改进的 CASA 模型模拟的 2001—2010 年内蒙古草地 NPP 均值为 $281.3 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 杨晗等^[17]利用改进的 CASA 模型模拟的 2001—2016 年内蒙古草地 NPP 均值为 $343.46 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 朱文泉等^[20]利用光能利用率模型计算的 2002 年内蒙古草地 NPP 为 $259.9 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。同样, 本研究在不考虑荒漠类型的内蒙古草地 NPP 均值为 $293.22 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 数值上与其他研究出入较小, 可以认为修正后的模型可以较好地反映研究区草地 NPP 空间分布规律。

表 3 近 20 年内蒙古各草地类型 NPP 与降水的相关性面积

Table 3 The correlation area between NPP and precipitation of grassland types in Inner Mongolia in recent 20 years ($\times 10^4 \text{ km}^2$)

项目 Item	温性草原类 Temperate steppe	温性草甸类 Temperate meadow	温性荒漠草原类 Temperate desert-steppe	温性荒漠类 Temperate desert
显著相关 Significant correlation ($P < 0.05$)	19.24	6.59	8.65	12.44
不相关 Zero correlation ($P > 0.05$)	6.97	1.33	2.01	4.32
显著相关 Significant correlation ($P < 0.01$)	8.85	3.86	4.35	5.79
不相关 Zero correlation ($P > 0.01$)	17.36	4.06	6.30	10.98

本研究通过内蒙古草地 NPP 与气候因子的偏相关分析表明, 近 20 年草地 NPP 与水分条件的相关性要远高于 NPP 与温度的相关性, 温度对 NPP 的作用主要来源于水分的“桥梁作用”, 通过偏相关可消除。通过相关性检验可知, 除个别地区外, 内蒙古大部分草地 NPP 与年降水具有显著相关性, 而与年均温度无显著性相关性。表明在 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 像元尺度, 水分条件越好, 其对应草地产量越高, 因此在水分条件的限制作用下, 在大尺度上形成了内蒙古天然草地 NPP 由西向东递增的分布规律。在草地类型上, 温性草甸草原 NPP 对降水的响应最为敏感, 温性荒漠草原其次, 温性草原则最低。内蒙古温性草甸草原集中分布于大兴安岭山地及其岭西、岭东的高平原、低山丘陵地上, 年降水充沛, 导致牧草抗旱性普遍较差, 长势易受降水影响, 对水分的依赖性较强。温性荒漠草原类型主要以旱生、多年生丛生禾草为建群种, 但在多雨年份, 一年生夏雨型植被, 如狗尾草 (*Setaria viridis*)、冠芒草 (*Nepogon borealis*)、猪毛菜 (*Salsola collina*) 等很容易形成优势层片, 对提高草地群落产量具有积极作用, 在干旱年份, 又由于得不到充足的水分而影响整体群落产量, 所以温性荒漠草原一年生草种对降水的响应较为敏感。导致温性草原对降水响应较低的原因很可能与人类活动有关。内蒙古温性草原面积大, 分布广, 承载人类活动集中, 是发展畜牧业的主要物质来源地。自 2000 年以来, 过度放牧, 能源开发利用等现象频繁, 导致在雨水充沛年份, 牧草年均 NPP 受人类活动影响得不到有效递增, 使得 NPP 与降水相关性降低。由草地 NPP 与温度的相关性分析结果可知, 内蒙古中部温性荒漠草原以及部分温性草原产量与温度呈显著负相关性, 这与温性荒漠草原植被水热特点有关外, 还可能与插值栅格数据的自身误差有关, 有待于今后进一步研究分析。

在像元尺度提取研究区天然草地 NPP 近 20 年的变化趋势发现, 内蒙古天然草地退化趋势严峻, 约占全区总草地面积的 20%, 其中重度、较重度退化草地斑块在呼伦贝尔市和锡林郭勒盟分布较为密集。自 2000 年以来, 地方政府以能源发展为导向, 开发建立了一批规模以上矿产企业, 这无疑对当地生态环境带来一定影响。通过进一步分析发现, 退化趋势值较高的像元主要出现在矿区及周边, 而且这些像元周边一定范围内的像元也具有不同程度的退化趋势值, 表明开采是短时间导致草地退化的主要因素之一。此外, 在实施草原生态保护补助奖励政策之前, 超载过牧等不合理利用现象严重, 不少地方载畜量长期高于牧草理论载畜量, 导致草地大面积退化和沙化^[24-26]。通过结合草地 NPP 与降水的响应关系发现, 局部地区草地与降水具有较低相关性, 尤其是锡林郭勒中部温性草原区以及西南部温性荒漠草原 NPP 与降水呈显著不相关, 即在水热条件良好的情况下, 草地 NPP 具有下降趋势, 表明近 20 年来受人类活动影响, 草地退化趋势明显。因此, 严禁草地非法征用和开采行为, 制定科学合理的载畜率, 严禁超载过牧和无序打草, 继续实施草原生态保护补助奖励政策是保护草地生态, 坚持可持续发展的重要措施。

4 结论

本研究基于光能利用率模型结合 MODIS 数据,在像元尺度分析了 2000—2018 年内蒙古天然草原 NPP 变化趋势及与降水和温度的响应规律,得出了如下结论:1)内蒙古天然草原在空间上呈由西向东递增分布规律,年均 NPP 为 $198.04 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;2)内蒙古草地退化趋势严峻,潜在退化草地总面积为 16.22 万 km^2 ,约占全区总草地面积的 1/5,同时草地生产力恢复面积为 16.96 万 km^2 ,约占全区总草地面积的 21%。3)人类活动,尤其是开采利用是短时间导致草地退化的主要因素,应严禁草地非法征用和开采行为。4)近 20 年,总体上内蒙古草原 NPP 与降水具有显著相关性,与温度无相关性。5)近 20 年,内蒙古温性草甸草原 NPP 对降水的响应最敏感,温性荒漠草原其次,温性草原类型由于受人类活动影响对降水响应最低。

参考文献 References:

- [1] Ye X, Zhou H K, Zhao X Q, *et al.* Review on grassland ecosystem health. *Pratacultural Science*, 2011, 28(4): 549—560.
叶鑫, 周华坤, 赵新全, 等. 草地生态系统健康研究述评. *草业科学*, 2011, 28(4): 549—560.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Are grasslands under threat? (2019-10-27)[2020-04-23]. http://www.fao.org/uploads/media/grass_stats_1.pdf.
- [3] Liu H L, Lu W H, Chen C. Research progress of grassland degraded succession and diagnosis. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(5): 865—871.
刘洪来, 鲁为华, 陈超. 草地退化演替过程及诊断研究进展. *草地学报*, 2011, 19(5): 865—871.
- [4] Li G, Xin X P, Wang D L, *et al.* Application of improved CASA model in productivity evaluation of grassland in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2100—2106.
李刚, 辛晓平, 王道龙, 等. 改进 CASA 模型在内蒙古草地生产力估算中的应用. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2100—2106.
- [5] Yang Y, Li L H, Wang B L, *et al.* Simulation of net primary productivity by a satellite data-driven improved CASA model in Xilingol grassland. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(8): 2344—2352.
杨勇, 李兰花, 王保林, 等. 基于改进的 CASA 模型模拟锡林郭勒草原植被净初级生产力. *生态学杂志*, 2015, 34(8): 2344—2352.
- [6] Wei Y X, Wang L W. A review on researching scale effect of net primary productivity based on remote sensing. *Progress in Geography*, 2010, 29(4): 471—477.
卫亚星, 王莉雯. 应用遥感技术模拟净初级生产力的尺度效应研究进展. *地理科学进展*, 2010, 29(4): 471—477.
- [7] Chen S R, Wang S X, Zhou Y. Estimation of Chinese grassland productivity using remote sensing. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(1): 208—212.
陈世荣, 王世新, 周艺. 基于遥感的中国草地生产力初步计算. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 208—212.
- [8] Liang S L, Li X W, Wang J D, *et al.* Quantitative remote sensing theory and algorithm. Beijing: Science Press, 2013: 470—490.
梁顺林, 李小文, 王锦地, 等. 定量遥感理论与算法. 北京: 科学出版社, 2013: 470—490.
- [9] Prince S D, Goward S J. Global primary production: A remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(4): 815—835.
- [10] Xiao X, Zhang Q, Hollinger D, *et al.* Modeling seasonal dynamics of gross primary production of evergreen needleleaf forest using MODIS images and climate data. *Ecological Applications*, 2005, 15(3): 954—969.
- [11] Yuan W P, Liu S G, Zhou G S, *et al.* Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 143(3/4): 189—207.
- [12] Potter C S, Randerson J T, Field C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811—841.
- [13] Sun C M, Sun Z G, Liu T, *et al.* Comprehensive estimation model of grassland NPP based on MODIS in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(4): 1079—1085.
孙成明, 孙政国, 刘涛, 等. 基于 MODIS 的中国草地 NPP 综合估算模型. *生态学报*, 2015, 35(4): 1079—1085.
- [14] Zhu W Q, Pan Y Z, Zhang J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 413—424.
朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, (3): 413—424.
- [15] Zhu W Q, Chen Y H, Xu D, *et al.* Advances in terrestrial net primary productivity (NPP) estimation models. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(3): 296—300.

- 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296—300.
- [16] Mu S J, Li J L, Yang H F, *et al.* Spatio-temporal variation analysis of grassland net primary productivity and its relationship with climate over the past 10 years in Inner Mongolia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(3): 6—15.
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. 草业学报, 2013, 22(3): 6—15.
- [17] Yang H, Zhou W, Shi P Q, *et al.* Analysis of temporal-spatial variations of NPP and coupling relationship with hydrothermal factors in grasslands of Inner Mongolia. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(2): 238—244.
杨哈, 周伟, 石佩琪, 等. 内蒙古草地 NPP 时空变化格局及其与水热因子耦合关系. 水土保持研究, 2019, 26(02): 238—244.
- [18] Dai E F, Huang Y, Wu Z, *et al.* Spatial-temporal features of carbon source-sink and its relationship with climate factors in Inner Mongolia grassland ecosystem. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 21—34.
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. 地理学报, 2016, 71(1): 21—34.
- [19] Li G, Zhou L, Wang D L, *et al.* Variation of net primary productivity of grassland and its response to climate in Inner Mongolia. *Ecology and Environment*, 2008, (5): 236—243.
李刚, 周磊, 王道龙, 等. 内蒙古草地 NPP 变化及其对气候的响应. 生态环境, 2008, (5): 236—243.
- [20] Zhu W Q, Pan Y Z, Long Z H, *et al.* Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation based on remote sensing: A case study in Inner Mongolia, China. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(3): 300—307.
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. 遥感学报, 2005, 9(3): 300—307.
- [21] Editorial Committee of Inner Mongolia Grassland Resources. *Inner Mongolia grassland resources*. Hohhot: Inner Mongolia People's Press, 1990: 10—75.
内蒙古草地资源编委会. 内蒙古草地资源. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1990: 10—75.
- [22] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 497—508.
方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 1996, 16(5): 497—508.
- [23] Li B, Yang C, Lin P. *Ecology*. Beijing: Higher Education Press, 2000: 13—21.
李博, 杨持, 林鹏. 生态学. 北京: 高等教育出版社, 2000: 13—21.
- [24] Wei Q, Hou X Y. Reflections on establishing a long-term mechanism of grassland ecological compensation in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(18): 3719—3726.
魏琦, 侯向阳. 建立中国草原生态补偿长效机制的思考. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3719—3726.
- [25] Hoffmann C, Giese M, Dickhoefer U, *et al.* Effects of grazing and climate variability on grassland ecosystem functions in Inner Mongolia: Synthesis of a 6-year grazing experiment. *Journal of Arid Environments*, 2016, 135: 50—63.
- [26] Liu X J, Dong L, Zhao J, *et al.* Dynamic state of desert vegetation productivity and its relationship with water-heat factors in China. *Arid Zone Research*, 2019, 36(2): 459—466.
刘雪佳, 董璐, 赵杰, 等. 我国荒漠植被生产力动态及其与水热因子的关系. 干旱区研究, 2019, 36(2): 459—466.