

赵 婷,赵 伟,张 义,等. 2001—2015 年北方草地净初级生产力动态及其与气候因子的关系[J]. 江苏农业科学,2018,46(10):243–248.  
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2018.10.061

# 2001—2015 年北方草地净初级生产力动态 及其与气候因子的关系

赵 婷<sup>1</sup>, 赵 伟<sup>1</sup>, 张 义<sup>2,3</sup>, 程 帅<sup>1</sup>, 刚成诚<sup>2,3</sup>, 程积民<sup>1,2,3</sup>

(1. 西北农林科技大学动物科技学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;  
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:**植被净初级生产力(NPP)是衡量植被在自然环境条件下生产能力的重要指标,能够反映生态系统对气候环境的响应程度。本研究利用光能利用率模型(CASA 模型),结合 NDVI 数据和同期的温度与降水量数据,分析 2001—2015 年中国北方草地 NPP 年际动态变化特征及其与气候因子的响应关系。结果表明:(1)我国北方的草地总面积为  $(182.51 \pm 0.85)$  万  $\text{km}^2$ ,且在 2001—2015 年间呈增加趋势,年均速率为 0.19 万  $\text{km}^2/\text{年}$ ,其中青海省的草地面积增加最多,为 0.8 万  $\text{km}^2$ ;(2)近 15 年来,北方草地总 NPP 为  $(300.45 \pm 20.71)$  Tg/年,且随时间变化呈现波动式增加趋势,增加速率为 20.03 Tg/年,草地平均 NPP 变化趋势与总 NPP 相同,增加速率为  $10.97 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ;从空间上来看,近 15 年间,草地 NPP 呈显著增加和显著减少(置信区间 95% 和 99%)的地区分别占草地总面积的 23.5% 和 1.48%;(3)草地 NPP 与降水量的相关性大于与温度的相关性,其中呈显著相关性的面积分别占草地总面积的 56.19% 和 4.36% (置信区间在 95% 和 99%),表明降水量是北方草地 NPP 的主要限制性气候因子。

**关键词:**土地利用与变化;净初级生产力;CASA 模型;气候因子;时空动态

**中图分类号:** S812.29      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002–1302(2018)10–0243–06

草地生态系统是陆地的重要组成部分,具有水源涵养、防风固沙、水土保持及调节气候等生态功能,是最大的天然屏障,也是陆地生态系统最大的碳储存库<sup>[1–4]</sup>。由于草地主要分布在干旱和半干旱地区,受气候变化及长期人类活动的影响强烈,气候变暖、人类过度开垦、放牧等活动使草地面积逐年减少且退化严重,生态环境日益恶化,对我国农牧业的发展及生态环境已构成了严重威胁<sup>[5]</sup>。自 20 世纪末开始,为了遏制这一现象,我国先后实施了一系列生态恢复工程措施,如退耕还林还草、封育禁牧、三北防护林等。生态工程实施以来,我国草地土壤有机质含量增加、植被盖度增加、固碳能力增强,生态环境明显改善<sup>[6–8]</sup>。

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是指绿色植物在单位时间、单位面积上由光合作用所产生的有机干物质总量中扣除呼吸作用后的剩余部分<sup>[9]</sup>。NPP 不仅可以反映植物群落在自然环境条件下的生产能力,表征生态系统对环境因子的响应程度,也是判定生态系统碳汇和调节生态

过程的主要因子,在全球变化及碳循环中扮演着重要的角色<sup>[10–12]</sup>。近年来,随着对全球变化和草地碳循环的深入研究,NPP 的估算备受学者的重视,国际地圈–生物圈计划(IGBP)、全球变化与陆地生态系统(GCTE)和京都协定书都把 NPP 确定为核心研究内容之一<sup>[13]</sup>。目前草地 NPP 的研究方法很多,基于站点实测估算草地 NPP 是最传统的一种方法,但由于实测法费时费力,并且不适于区域或全球尺度 NPP 的估算<sup>[14]</sup>,因而利用数学模型估算草地 NPP 已被广泛接受<sup>[15]</sup>。如相关气候统计模型、生态系统过程模型、生态遥感耦合模型及光能利用率模型,其中光能利用率模型(CASA)能较好地模拟众多不同区域尺度的空间分布及变化特征而被广泛应用于各种规模的 NPP 估算<sup>[16–17]</sup>。目前关于基于 CASA 模型对植被 NPP 的模拟及其对气候变化的响应研究很多,张峰等对内蒙古典型草原区近 15 年的草地 NPP 进行了模拟,结果表明,草地 NPP 呈增加趋势,且草地 NPP 受降水量的影响较大<sup>[18–19]</sup>。史晓亮等对黄土高原生态脆弱区 1982—2014 年的植被 NPP 模拟结果表明,不同植被类型 NPP 有较大差异,空间分布表现出南高北低的特点,且降水量是影响 NPP 变化的主要因素<sup>[20]</sup>。Piao 等利用 1982—1999 年的遥感数据,通过 CASA 模型模拟了青藏高原 NPP 的时空变化特征,结果表明,草地 NPP 由西北向东南逐渐增加,不同草地类型的 NPP 变化趋势一致<sup>[21]</sup>。定量分析草地 NPP 的时空动态及其与气候变化的响应关系,对合理利用草地资源、发挥草地的生产潜力有重要意义<sup>[22]</sup>。

我国天然草地的面积约为 4 亿  $\text{hm}^2$ ,约占我国国土面积的 41.7%,主要分布在东北平原、内蒙古高原、黄土高原、青藏高原及新疆山地等地区,是重要的生态脆弱区,对气候环境

收稿日期:2017–11–16

基金项目:国家重点专项宁夏农牧交错区侵蚀草地治理模式与示范项目(编号:2016YFC050700);国家自然科学基金(编号:31602004、41601586);中国科学院“西部之光”人才培养引进计划(编号:XAB2016B05);中央高校基本科研业务费(编号:2452017184)。

作者简介:赵 婷(1993—),女,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事旱区草地生态研究。E-mail:zt465801995@163.com。

通信作者:程积民,研究员,主要从事旱区草地生态研究,E-mail:gyzcjm@ms.iswc.ac.cn;刚成诚,博士,副研究员,主要从事生态系统遥感研究,E-mail:gangcheng024@gmail.com。

及人类活动的敏感程度较高<sup>[23]</sup>。近年来,针对北方草地 NPP 变化及其与气象因子的关系已开展了广泛研究。任璇等研究了新疆不同时空格局下气候变化对植被 NPP 的影响,表明植被 NPP 各年呈北高南低的空间格局,且随时间变化总体呈波动下降趋势,与气候因子密切相关<sup>[24]</sup>。穆少杰等基于 CASA 模型研究了内蒙古 2001—2010 年草地 NPP 的时空变化,表明 NPP 总体呈上升趋势,降水量是典型草原和荒漠草原 NPP 的主要影响因素<sup>[25]</sup>。韦莉等对 2003 年黄土高原地区草地 NPP 进行了估算,结果表明黄土高原 NPP 空间分布以西部和南部较高,然后以东南西北方向为轴心逐渐向内陆中心递减<sup>[26]</sup>。本研究基于遥感数据及气象数据,利用 CASA 模型研究了 2001—2015 年我国北方草地 NPP 时空分布及其动态变化特征,在此基础上分析了草地 NPP 与温度和降水量之间的耦合程度,旨在探讨在大时空尺度下气候变化对草地生长的影响机制,以为未来北方地区草地生态系统研究和草地资源保护提供理论参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

选取中国北方 6 省(区),即陕西省、甘肃省、青海省、宁夏、新疆、内蒙古(73°29′~123°27′E,31°36′~49°36′N)作为研究区域(图 1)。该区年均温度约 0~13.5℃,年总降水量为 400~800 mm,且降水量分布自东向西、自南向北依次递减,主要集中在夏秋 2 季。光热资源丰富、蒸发强烈、干燥少雨且昼夜温差较大,大部分地区属于温带大陆性干旱、半干旱性气候。地形以高原、平原和盆地为主,包括部分青藏高原、黄土高原、塔里木盆地、柴达木盆地、河西平原及天山等<sup>[27]</sup>。植被类型自东向西以耕地、草原、荒漠草原、荒漠和高原为主。

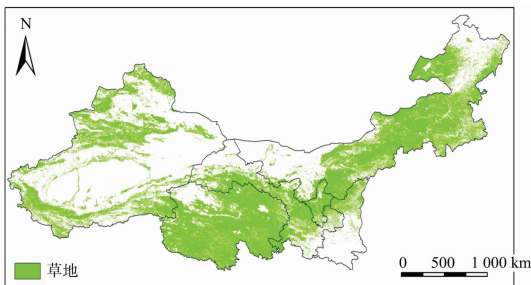


图1 研究区位置和草地分布

### 1.2 数据来源与预处理

**1.2.1 土地利用数据的获取** 土地利用数据主要来源于 European Space Agency,时间序列为 15 年,利用 GIS 空间分析功能,进行空间格式转换、重投影、重分类计算得到研究区 15 年间我国北方草地的面积变化情况。

**1.2.2 NDVI 数据的获取** 数据来自美国 NASA 的 EOS/MODIS NDVI 数据中 MOD13A2 级数据集,空间分辨率为 1 km×1 km,时间分辨率为 16 d,序列为 2001—2015 年,利用 MODIS 网站提供的专业处理软件 MRT TOOLS 对数据进行格式转换、投影转换、拼接、裁切等处理,将 HDF 格式文件转换为后缀名为 .tif 的格式文件。将 16 d 的 MODIS-NDVI 数据采用最大值合成法消除云、大气、太阳高度角的部分干扰,得到每月的 NDVI 数据。

**1.2.3 气象数据获取** 采用中国气象科学数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供的 2001—2015 年研究区标准气象站点的月平均温度和降水量资料。利用 ArcGIS 软件的 Geostatistical Analyst 模块对气象数据进行 Kriging 空间插值,使其大小与 NDVI 数据分辨率大小一致、投影系统相同,并且通过数据掩膜,得到月平均温度和降水量的栅格图像。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 草地 NPP 计算** CASA 模型是当前 NPP 模拟估算模型之一,已广泛应用于我国主要的生态系统,经检验有较好的模拟结果<sup>[28-29]</sup>。在 CASA 模型中植被 NPP 主要由植被所吸收的光合有效辐射 (APAR) 和光能转化率 ( $\epsilon$ ) 来确定<sup>[16]</sup>。

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t). \quad (1)$$

式中: $NPP(x, t)$ 、 $APAR(x, t)$ 、 $\epsilon(x, t)$  分别代表空间位置  $x$  上的植被在  $t$  月内的 NPP、吸收的光合有效辐射和光能转化率。

$$APAR(x, t) = Lso(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5. \quad (2)$$

式中: $Lso(x, t)$  为  $t$  月空间位置  $x$  上的太阳总辐射量,通过时长推算得到月总辐射量; $FPAR(x, t)$  为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例,由归一化植被指数和植被类型决定;常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例。

$$\epsilon(x, t) = T_1(x, t) \times T_2 \times W_e(x, t) \times \epsilon^*. \quad (3)$$

式中: $T_1(x, t)$ 、 $T_2$  分别为低温和高温对光能转化率的影响; $W_e(x, t)$  为水分胁迫影响系数,反映水分条件的影响; $\epsilon^*$  为理想条件下的最大光能转化率,一般为 0.389 g/MJ,本研究中采用朱文泉等研究所得的全国不同植被类型的光能利用率估算值<sup>[13]</sup>。

**1.3.2 草地 NPP 年际变化率的计算** 对 2001—2015 年草地 NPP 年际变化趋势进行分析,年际变化趋势以各栅格多年数值回归方程的斜率表示,回归方程用最小二乘法获得,计算公式如下:

$$slope = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times M_{NPP,i}) - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n M_{NPP,i})}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}. \quad (4)$$

式中: $n$  为 15,  $M_{NPP,i}$  为第  $i$  年的 NPP。利用多年植被 NPP 序列和时间序列的相关关系来判断 NPP 年际间变化的显著性,当  $slope > 0$  时,说明 NPP 在年际间是增加的;反之  $slope < 0$ ,则降低。变化趋势的显著性检验采用  $F$  检验,显著性仅代表趋势变化可置信程度,与变化速度无关,计算公式为:

$$F = U \times \frac{n-1}{Q}. \quad (5)$$

式中: $U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ ,为回归平方和; $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ ,为剩余平方和; $y_i$  是第  $i$  年 NPP 值; $\hat{y}$  为其回归值; $\bar{y}$  为 15 年的 NPP 平均值。根据  $F$  检验结果将草地 NPP 变化趋势分为 6 个等级:极显著增加 ( $slope > 0, P < 0.01$ );显著增加 ( $slope > 0, P < 0.05$ );不显著增加 ( $slope > 0, P > 0.05$ );不显著减少 ( $slope < 0, P > 0.05$ );显著减少 ( $slope < 0, P < 0.05$ );极显著减少 ( $slope < 0, P < 0.01$ )。

**1.3.3 草地 NPP 与气候因子相关性计算** 采用基于象元的空间分析方法分析草地 NPP 与各气候因子的相关性,草地 NPP 与温度或降水量的相关系数计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6)$$

式中:  $R_{xy}$  为  $x$ 、 $y$  两变量的相关系数;  $x_i$  为  $i$  年的草地 NPP;  $y_i$  为第  $i$  年的温度或降水量;  $\bar{x}$  为多年草地 NPP 的平均值;  $\bar{y}$  为多年温度或降水量的平均值;  $i$  为样本数。其中, 温度为生长季平均温度, 降水量为生长季总降水量。

## 2 结果与分析

### 2.1 北方 6 省(区)草地面积时空动态变化

2001—2015 年我国北方草地总面积为  $(182.51 \pm 0.85)$  万  $\text{km}^2$ , 占 6 省(区)陆地总面积的 44.37%。其中, 内蒙古草地面积最大, 为 59.33 万  $\text{km}^2$ , 宁夏草地面积最小, 为 3.95 万  $\text{km}^2$ , 青海省、新疆、甘肃省、陕西省的草地面积分别

为 52.67 万、43.21 万、18.93 万、4.42 万  $\text{km}^2$ 。近 15 年来研究区草地总面积呈总体增加的趋势, 年均增加速率为 0.19 万  $\text{km}^2/\text{年}$ , 其中青海省的草地面积增加最多, 陕西省的草地面积增加最少, 分别增加了 0.8 万、0.01 万  $\text{km}^2$ , 其余各省份草地面积也呈增加趋势(图 2)。

从空间上来看, 近 15 年来我国北方新增草地面积为 5.27 万  $\text{km}^2$ , 其中农田、林地和其他类型用地转化为草地的面积分别占草地增加总面积的 1.93%、3.41%、94.66%, 由于土地利用变化而减少的草地面积为 2.52 万  $\text{km}^2$ , 其中草地转化为农田、林地和其他类型用地的面积分别占草地减少总面积的 25.81%、17.99%、56.20%。新增加的草地主要分布在青海、甘肃和新疆等地区, 损失的草地主要分布在陕西、宁夏和内蒙古地区(图 3)。

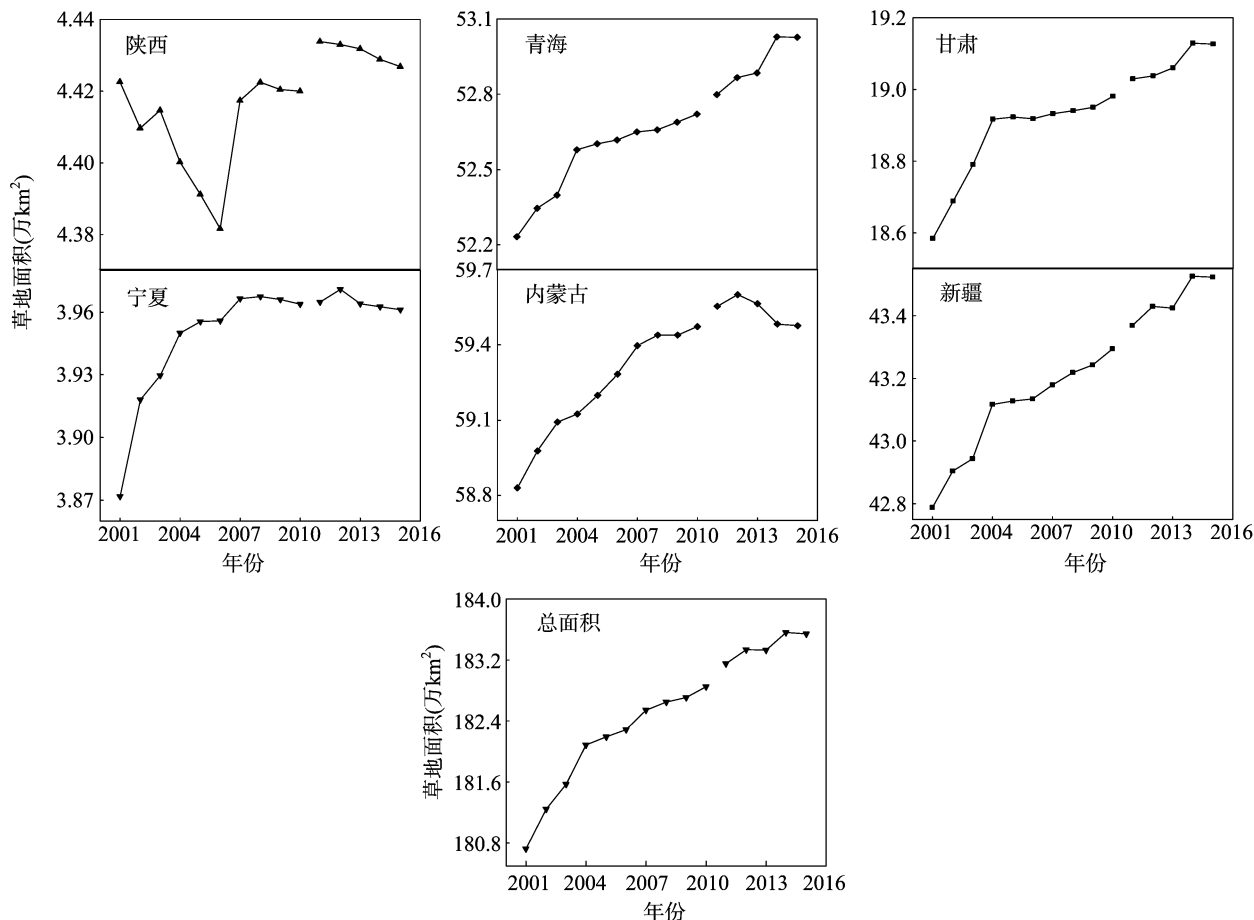


图2 2001—2015年不同省份及研究区草地面积变化

### 2.2 草地 NPP 时空动态变化

2001—2015 年间, 我国北方草地平均 NPP 和总 NPP 分别为  $(164.58 \pm 10.87) \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$  和  $(300.45 \pm 20.71) \text{Tg}/\text{年}$ , 且两者均随时间的延长呈现波动式增加的趋势, 平均变化率分别为  $10.97 \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$  和  $20.03 \text{Tg}/\text{年}$ 。其中, 草地年均 NPP 在 2001—2003 年增幅最大, 2004—2011 年呈波动降低趋势, 2011 年以后呈波动增加趋势, 最大值  $[180.89 \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})]$  和最小值  $[138.99 \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})]$  分别出现在 2012 年和 2001 年; 草地总 NPP 变化趋势与年均 NPP 变化趋势一致, 最大值出现在 2013 年, 达到 333.44  $\text{Tg}/\text{年}$ , 最

小值则出现在 2001 年, 为 251.20  $\text{Tg}/\text{年}$ (图 4)。

从空间分布来看, 草地 NPP 呈增加趋势的面积占草地总面积的 81.34%, 其中呈极显著增加(置信区间 99%)的区域占草地总面积的 11.82%, 集中在内蒙古的呼伦贝尔高原、乌兰浩特地区、甘肃东部、陕西北部及宁夏部分地区; 呈现显著增加(置信区间 95%)的区域占草地总面积的 11.68%, 主要分布在内蒙古呼伦贝尔以西部分地区、青海东北部及甘肃和宁夏部分地区。草地 NPP 呈现极显著减少(置信区间 99%)的区域占草地总面积的 0.51%, 集中在天山中部、昆仑山部分地区, 呈显著减少(置信区间 95%)的区域占草地总面积的

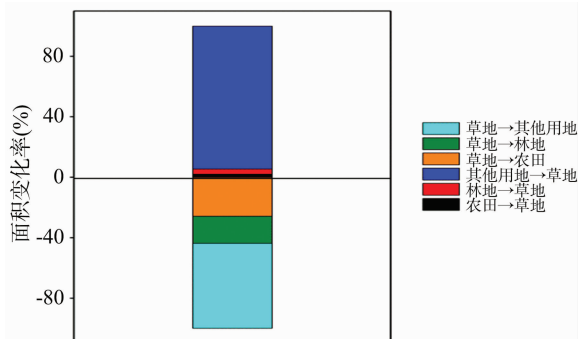


图3 2001—2015年间不同土地利用类型转化

0.97%，主要分布在天山以南地区、青海西部、祁连山中部及内蒙古东北地区(图5)。

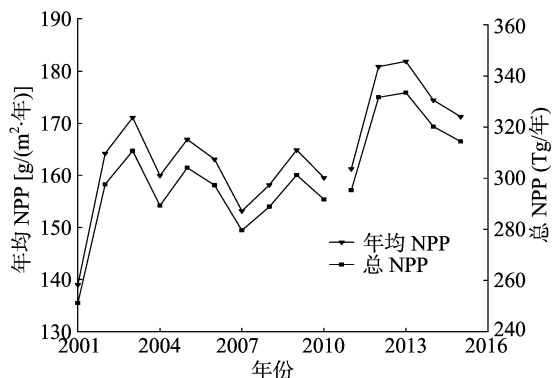


图4 2001—2015年北方草地年均NPP和总NPP的变化趋势

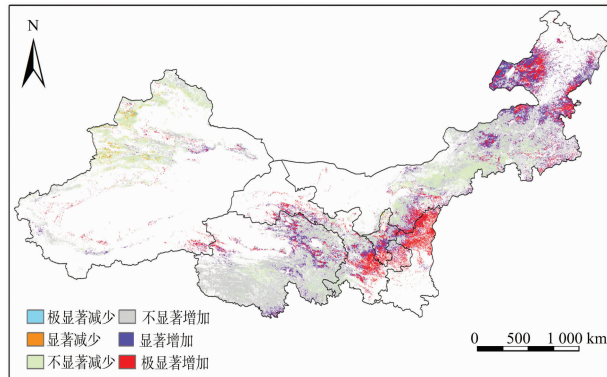


图5 2001—2015年北方草地NPP空间变化趋势

## 2.3 草地NPP年际变化与气温、降水量变化的相关性分析

2001—2015年间,北方草地分布区气温总体呈微弱下降趋势,平均速率为 $-0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 。其中,56.58%的草地分布区气温呈下降趋势,主要分布在内蒙古呼伦贝尔高原、呼兰浩特地区、青海西南和东南地区、甘肃东部及天山西南等地区;43.42%的草地分布地区气温呈增加趋势,主要分布在新疆的阿勒泰山、天山西部、昆仑山地区、青海大部分地区 and 甘肃河西走廊等地区(图6-a)。80.76%的草地分布区降水量呈增加趋势,平均速率为 $2.62\text{ mm}/\text{年}$ ,其中内蒙古呼伦贝尔、呼兰浩特地区、青海大部分地区、河西走廊中部、阿尔泰山、天山及塔克拉玛干沙漠西部地区降水量增加趋势明显,而天山、昆仑山南部及内蒙古中东部等地区气温降低,降水量也呈减少趋势,冷干化趋势明显(图6-b)。

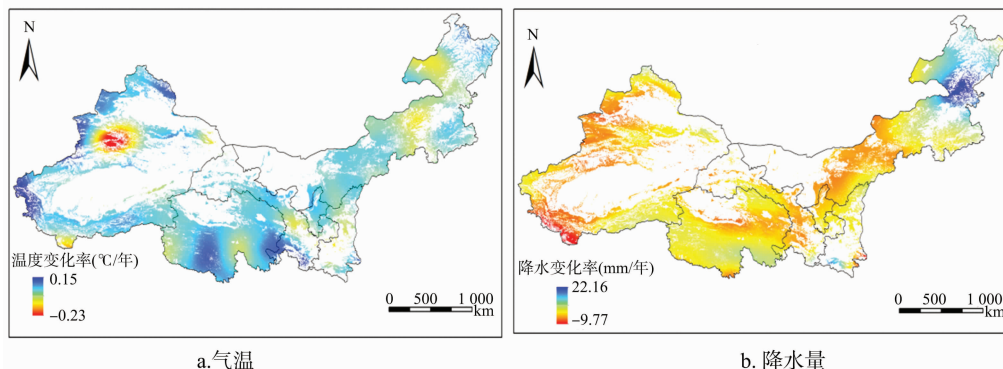


图6 2001—2015年北方草地生长季气温和降水量变化率

草地NPP与气温和降水量的相关性分析结果表明,45.03%的草地NPP与温度呈正相关关系。其中,呈现极显著正相关(置信区间99%)的区域占草地总面积的3.31%,集中在青海南部和天山以南部分地区;呈现显著正相关(置信区间95%)的区域占草地总面积1.05%,主要分布在青海的玉树地区、天山南部和东部部分地区。而呈现极显著和显著负相关(置信区间99%和95%)的区域占草地总面积的1.19%,主要分布在内蒙古的呼伦贝尔、浑善达克沙地、甘肃东部及天山部分地区(图7-a)。相比之下,草地NPP与降水量总体呈正相关关系区域占草地总面积的88.10%。其中,呈极显著正相关(置信区间99%)的区域占草地总面积的19.84%,集中在内蒙古的中部和东部地区、青海东部以及天山西部等地区;呈现显著正相关(置信区间95%)的区域占草地总面积的36.35%,主要分布在内蒙古东部、青海中东部

区、天山西部、昆仑山及陕甘宁交界处的毛乌素沙地等地区。11.90%的草地NPP分布地区与降水量呈负相关关系,其中呈极显著和显著负相关(置信区间99%和95%)的区域占草地总面积的0.19%(图7-b)。以上结果表明,降水量是限制我国北方草地生长的主要影响因子。

## 3 结论与讨论

### 3.1 气候变化对草地NPP的影响

草地NPP变化与气候变化有极为紧密的联系<sup>[30]</sup>。本研究,45.03%的草地NPP分布区与温度呈正相关关系,且集中分布在天山南坡、青海南部及内蒙古东南部等地区,这些区域大部分处于高海拔地区,冰川融雪保证了植被生长所需的水分条件,热量成为限制植被生长的主要影响因子。然而在阿尔泰山、天山、青海东部及内蒙古中部等地区草地NPP变



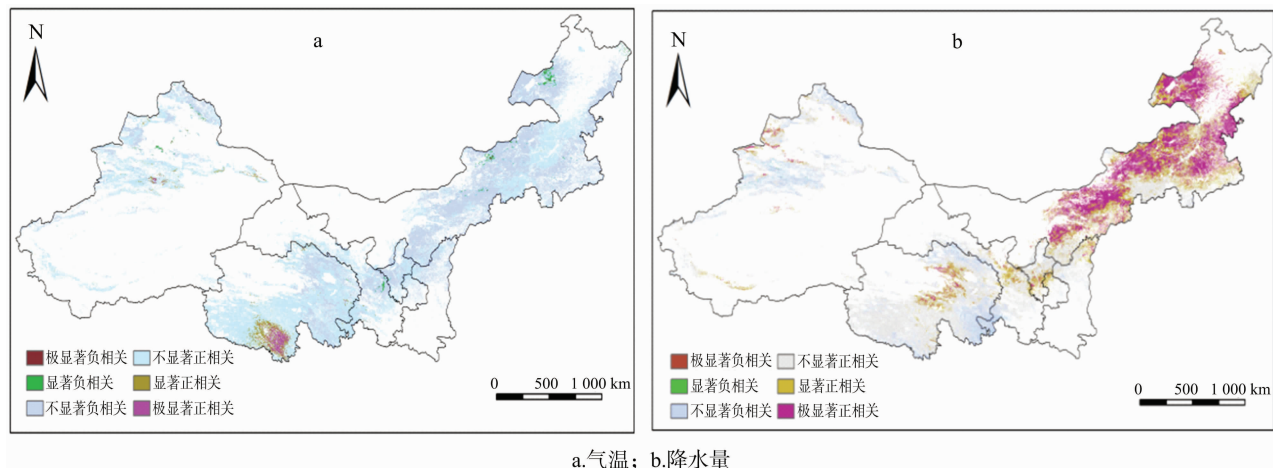


图7 草地 NPP 与生长季气温和降水量的相关性

化与温度呈负相关关系,植被生长具有温度三基点,适温有利于植被的生长,温度过高或过低则会抑制其生长,随着温度的升高,地表水分蒸散加强,土壤变干,植被由短期的干旱演变为长期的生理缺水,导致植被覆盖度降低,生产力下降<sup>[31]</sup>。2001—2015 年间,我国北方 80.76% 的草地分布区降水量呈增加趋势,平均增加速率为 2.62 mm/年,其中 88.10% 的草地 NPP 分布区与降水量呈正相关,主要分布在新疆西南地区、青海大部分地区以及内蒙古中部及东北等地区。这些地区植被类型以荒漠草地为主,常年高温少雨,水分成为限制该地区植被生长的主要因素。草地 NPP 变化与降水量的相关性大于与温度的相关性,穆少杰等对内蒙古近 10 年草地 NPP 的时空变化<sup>[25]</sup>、魏靖琼等对甘肃省草地 NPP 对气候因子的响应<sup>[32]</sup>研究均表明,草地 NPP 变化对降水量的敏感程度高于温度,且相关性程度也比温度高。我国北方大部分地区属于干旱半干旱区,在全球气温逐渐升高的大环境下,受高温和不均匀的降水所致,植被生长对降水量的反应更为敏感,降水量成为限制北方草地 NPP 的关键因子<sup>[2]</sup>。

### 3.2 人类活动对草地 NPP 的影响

草地 NPP 变化不仅受气候条件的影响,而且与日益加剧的人类活动密不可分,如过度放牧、开垦及不合理的农耕措施均会导致植被 NPP 下降<sup>[33-34]</sup>。Zhao 等研究认为,超载过牧会导致植被 NPP 下降而发生退化<sup>[35]</sup>。蒋德明等对科尔沁沙地生态环境的研究表明,人为大面积的垦荒是导致草地 NPP 减少的主要原因之一<sup>[34]</sup>。生态工程的实施,对草地植被的恢复起到了积极作用<sup>[36-37]</sup>。研究表明,黄土高原从 1999 年开始大规模实施退耕还林(草)以来,植被覆盖度呈显著上升趋势,退耕还林区 NPP 增加区域面积达到 98.9%<sup>[7,38]</sup>;孙银良等对西藏高寒草地实施退牧还草工程后 NPP 的变化研究表明,近 12 年退牧围栏区草地 NPP 呈增加趋势,平均增长 23.84 g/(m<sup>2</sup>·年),退牧还草工程有利于退化草地的恢复与保护<sup>[39]</sup>。王玮等对内蒙古典型草原的土壤固碳能力研究表明,围栏封育后,退化草地恢复到典型草原代表植被类型后,地上生物量显著增加,地表盖度提高,土壤风蚀有效减缓,土壤有机碳的积累加强<sup>[8]</sup>。实施植被生态恢复措施后,随着环境条件的改善,土壤有机质含量增加、地被盖度增大、物种多样性增加,植被生产力提高,在本研究中草地 NPP 增加的区

域主要分布在内蒙古的呼伦贝尔高原、新疆西部、青海东北部及陕甘宁部分地区,这与周伟等对中国近 30 年的草地 NPP 时空动态研究结果<sup>[40]</sup>一致。因此,要将人类活动作为研究草地 NPP 变化的重要影响因素之一。

### 3.3 主要结论

本研究结果表明,我国北方草地总面积为(182.51 ± 0.85)万 km<sup>2</sup>,其中内蒙古地区草地面积最大,宁夏地区草地面积最小。2001—2015 年间,北方草地面积整体呈现增加趋势,增加速率为 0.19 万 km<sup>2</sup>/年,其中青海省的草地面积增加最多,为 0.8 万 km<sup>2</sup>。2001—2015 年间,北方草地年均 NPP 和总 NPP 分别为(164.58 ± 10.87)g/(m<sup>2</sup>·年)和(300.45 ± 20.71)Tg/年,且两者均呈现波动式上升的趋势,增加率分别为 10.97 g/(m<sup>2</sup>·年)和 20.03 Tg/年。从空间分布上来看,草地 NPP 呈增加趋势的地区占草地总面积的 81.34%,主要分布在内蒙古东部、新疆阿尔泰山、天山及昆仑山部分地区、青海及陕甘宁部分地区,NPP 下降的地区主要分布在新疆的西北地区、青海大部分地区、祁连山中部、宁夏北部和内蒙古毛乌素沙地等地区。北方草地 NPP 与降水量呈显著相关(置信区间在 95% 和 99%)的地区占草地总面积的 56.19%,主要分布在内蒙古中东地区、青海东部、天山西部及陕甘宁交界处的毛乌素沙地等地区;与温度呈显著相关的面积占草地总面积的 4.36% (置信区间在 95% 和 99%),主要分布在青海南部、天山南部及内蒙古东部等地区,表明降水量是影响我国北方地区草地 NPP 的主要限制性气候因子。

### 参考文献:

- [1] 周伟,刚成诚,李建龙,等. 1982—2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应[J]. 地理学报,2014,69(1):15-30.
- [2] 刚成诚,王钊钊,杨悦,等. 近百年全球草地生态系统净初级生产力时空动态对气候变化的响应[J]. 草业学报,2016,25(11):1-14.
- [3] 李学斌,樊瑞霞,刘学东. 中国草地生态系统碳储量及碳过程研究进展[J]. 生态环境学报,2014,23(11):1845-1851.
- [4] Scurlock J O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements[J]. Global Change Biology,2002,8(8):736-753.

- [5] 杨 静, 黄秉光, 黄 玫, 等. 近 55 年新疆净生态系统生产力对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 1054–1060.
- [6] Tian G, Qiao Z. Assessing the impact of the urbanization process on net primary productivity in China in 1989—2000[J]. Environmental Pollution, 2014, 184(S1): 320–326.
- [7] 高海东, 庞国伟, 李占斌, 等. 黄土高原植被恢复潜力研究[J]. 地理学报, 2017, 72(5): 863–874.
- [8] 王 玮, 邬建国, 韩兴国. 内蒙古典型草原土壤固碳潜力及其不确定性的估算[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 29–37.
- [9] Field C B, Randerson J T, Malmstrom C M. Global net primary production – combining ecology and remote – sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(1): 74–88.
- [10] Piao S, Fang J, Zhou L, et al. Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(2): 253–267.
- [11] Haberl H, Erb K H, Krausmann F, et al. Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(31): 12942–12947.
- [12] 陈利军, 刘高焕, 冯险峰. 遥感在植被净第一性生产力研究中的应用[J]. 生态学杂志, 2002, 21(2): 53–57.
- [13] 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[J]. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296–300.
- [14] 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(1): 1–15.
- [15] 张美玲, 蒋文兰, 陈全功, 等. 草地净第一性生产力估算模型研究进展[J]. 草地学报, 2011, 19(2): 356–366.
- [16] Potter C. Predicting climate change effects on vegetation, soil thermal dynamics, and carbon cycling in ecosystems of interior Alaska[J]. Ecological Modelling, 2004, 175(1): 1–24.
- [17] 贾 瓌, 祁正鹏. 草地净初级生产力对气候变化的响应[J]. 畜牧兽医学杂志, 2016, 35(6): 87–89.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 史晓亮, 杨志勇, 王馨爽, 等. 黄土高原植被净初级生产力的时空变化及其与气候因子的关系[J]. 中国农业气象, 2016, 37(4): 445–453.
- [21] Piao S L, Fang J Y, He J S. Variations in vegetation net primary production in the Qinghai – Xizang plateau, China, from 1982 to 1999[J]. Climatic Change, 2006, 74(1/2/3): 253–267.
- [22] Tan K, Piao S L, Peng C H, et al. Satellite – based estimation of biomass carbon stocks for northeast China's forests between 1982 and 1999[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 240(1/2/3): 114–121.
- [23] 方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化[J]. 中国科学(生命科学), 2010, 40(7): 566–576.
- [24] 任 璇, 郑江华, 穆 晨, 等. 新疆近 15 年草地 NPP 动态变化与气象因子的相关性研究[J]. 生态科学, 2017, 36(3): 43–51.
- [25] 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.
- [26] 韦 莉, 赵 军, 潘竟虎, 等. 基于 MODIS 数据的黄土高原草地净初级生产力的估算研究[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(5): 660–664, 图版 V.
- [27] 韦振锋, 王德光, 张 翀, 等. 1999—2010 年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的响应[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1665–1670.
- [28] Tao F, Yokozawa M, Zhang Z, et al. Remote sensing of crop production in China by production efficiency models: models comparisons, estimates and uncertainties[J]. Ecological Modelling, 2005, 183(4): 385–396.
- [29] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603–608.
- [30] 罗 玲, 王宗明, 毛德华, 等. 松嫩平原西部草地净初级生产力对气候变化及人类活动的响应[J]. 生态学杂志, 2012, 31(6): 1533–1540.
- [31] 郑凌云. 基于卫星遥感与 BEPS 生态模式的藏北草地变化及 NPP 动态研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2006: 1–74.
- [32] 魏靖琼, 柳小妮, 任正超, 等. 区域尺度下气候因子的插值优化及其与草地 NPP 的相关性[J]. 草业科学, 2012, 29(12): 1842–1848.
- [33] 耿元波, 董云社, 齐玉春. 草地生态系统碳循环研究评述[J]. 地理科学进展, 2004, 23(3): 74–81.
- [34] 蒋德明, 刘志民, 寇振武, 等. 科尔沁沙地生态环境及其可持续管理——科尔沁沙地生态考察报告[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 179–185.
- [35] Zhao M, Running S W. Drought – induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009[J]. Science, 2010, 329(5994): 940–943.
- [36] Yu D Y, Shao H B, Shi P J, et al. How does the conversion of land cover to urban use affect net primary productivity? A case study in Shenzhen city, China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(11): 2054–2060.
- [37] 王 静, 郭 锐, 蔡迪花, 等. 玛曲县草地退牧还草工程效果评价[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1276–1284.
- [38] 张 琨, 吕一河, 傅伯杰. 黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(1): 23–31.
- [39] 孙银良, 周才平, 石培礼, 等. 西藏高寒草地净初级生产力变化及其对退牧还草工程的响应[J]. 中国草地学报, 2014, 36(4): 5–12.
- [40] 周 伟, 牟风云, 刚成诚, 等. 1982—2010 年中国草地净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 4335–4345.