

# 西北植被净初级生产力时空变化及其驱动因素

同琳静<sup>1</sup>, 刘洋洋<sup>1</sup>, 王倩<sup>1</sup>, 杨悦<sup>1,2</sup>, 李建龙<sup>1</sup>

(1. 南京大学 生命科学院, 南京 210093; 2. 环境保护部 南京环境科学研究所, 南京 210042)

**摘要:** 利用 CASA 模型模拟了西北植被净初级生产力(NPP)值,并结合地统计学理论,利用趋势分析及相关性分析研究了西北地区 2000—2013 年植被 NPP 时空变化特征,并结合气象数据探究了其对气候变化的响应。结果表明:(1)西北地区植被 NPP 在研究年限内呈现波动增加趋势,线性增加趋势达到极显著水平( $p < 0.01$ )。(2)植被 NPP 分布具有明显的空间异质性,整体呈现由东向西递减的趋势,除新疆外,其余省份也总体上表现为南高北低的分布格局。植被 NPP 呈现增加趋势的面积占总面积的 85.97%,主要集中在陕西北部、宁夏南部、甘肃东部、青海的东部及南部和新疆西部部分地区,呈现减少趋势主要集中在新疆西部;不同植被类型 NPP 的均值呈现明显的差异,具体表现为:草地[262.16 g C/(m<sup>2</sup>·a)]>灌丛[66.51 g C/(m<sup>2</sup>·a)]>农田[45.90 g C/(m<sup>2</sup>·a)]>森林[14.36 g C/(m<sup>2</sup>·a)]。2000—2013 年草地、农田及灌丛的 NPP 均呈现极显著增加趋势( $p < 0.01$ ),而森林 NPP 的增加趋势不显著( $p > 0.05$ )。(3)总体上,西北地区植被 NPP 与气温、降水呈正相关,其对降水响应较为敏感,降水是限制西北地区植被 NPP 增加的主要因素。

**关键词:** 净初级生产力(NPP); CASA 模型; 时空动态; 气候变化

**中图分类号:** Q948

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2019)04-0367-08

## Spatial and Temporal Dynamics of Net Primary Productivity and Its Driving Factors in Northwest China

TONG Linjing<sup>1</sup>, LIU Yangyang<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>, YANG Yue<sup>1,2</sup>, LI Jianlong<sup>1</sup>

(1. School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** Based on the Carnegie-Ames-Stanford approach (CASA) model, the temporal and spatial variations of vegetation NPP in northwest China during the period 2000—2013 were analyzed by combining with geo-statistics theory and using trend and correlation analysis. Meanwhile, the relationships between vegetation NPP and climate change were also examined by using the meteorological data. The results showed that: (1) The vegetation NPP in northwest China presented the fluctuating increase trend which reached an extremely significant level ( $p < 0.01$ ); (2) The distribution of vegetation NPP had obvious spatial heterogeneity, which generally presented the decreasing trend from east to west; Except for Xinjiang, the other provinces also showed the low state in the north; the area with increasing vegetation NPP accounted for 85.97% of the total area, and mainly distributed in northern Shaanxi, southern Ningxia, eastern Gansu, eastern and southern parts of Qinghai, and parts of western Xinjiang, while the NPP presented the decreasing trend in west of Xinjiang; The average NPP values of different vegetation types showed significant differences, and followed an order of: grassland [262.16 g C/(m<sup>2</sup>·a)]>shrub [66.51 g C/(m<sup>2</sup>·a)]>farmland [45.90 g C/(m<sup>2</sup>·a)]>forest [14.36 g C/(m<sup>2</sup>·a)]; The NPP of grassland, farmland, and shrub all showed the extremely significant increase( $p < 0.01$ ), but the increase of forests was not obvious( $p > 0.05$ ); (3) In general, vegetation NPP was positively correlated with temperature and precipitation, and was more sensitive to precipitation; Therefore, precipitation was the main factor limiting the increase of vegetation NPP in this area.

收稿日期: 2018-10-18

修回日期: 2018-11-05

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800201); 国际 APN 全球变化项目(ARCP2015-03CMY-Li); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB950702)

第一作者: 同琳静(1995—), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生, 研究方向为生态遥感及陆地生态系统碳循环。E-mail: TLJ1654@163.com

通信作者: 李建龙(1962—), 男, 吉林长春人, 教授, 博导, 国家长江学者讲座教授, 主要从事全球变化及陆地生态系统碳循环研究。

E-mail: jlli2008@nju.edu.cn

**Keywords:** NPP; Carnegie-Ames-Stanford approach model; spatiotemporal dynamics; climate change

陆地净初级生产力(Net Primary Production, NPP)是指单位时间、单位面积上植被固定的有机干物质的总量<sup>[1]</sup>。在当前全球气候变化的复杂形式下, NPP 数据可用于研究土地利用变化、自然资源管理、生态系统碳循环和碳扰动,是评价地表生态系统健康和可持续发展的关键指标<sup>[2]</sup>。因此,开展不同时空尺度的 NPP 动态监测已成为目前研究中的重点问题,同时对于维护气候稳定、缓解温室效应和调节碳平衡都具有重要意义<sup>[3]</sup>。

早期的 NPP 研究主要通过站点数据的测量来进行估算,再通过小范围扩大到整个区域,技术较为匮乏。近年来,随着现代卫星遥感技术和地理信息系统的不断发展,利用模型对植被第一生产力进行模拟的方法已经被广泛利用。各国学者根据数据来源、研究尺度和研究基础建立了不同植被的 NPP 估算模型,其中主要包括气候生产力模型、光能利用率模型、生理生态过程模型以及生态遥感耦合模型<sup>[4]</sup>。本研究中采用的 CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型属于光能利用率模型,该模型综合考虑了不同的自然因素对植被 NPP 的影响,现已被全球 1 900 多个实测站点校正,广泛应用于全球陆地生态系统 NPP 的研究<sup>[5]</sup>。

近年来,众多学者已利用遥感数据对不同区域和时空尺度的生态系统 NPP 进行了研究。Gang 等<sup>[6]</sup>基于 MODIS NPP 数据对比研究了中国、北美洲和澳大利亚的草地生产力对气候变化的响应。李登科等<sup>[2]</sup>对 2000—2015 年中国植被 NPP 进行研究,发现全国平均植被 NPP 呈现西北低东南高、北方低南方高的分布格局;刘刚等<sup>[7]</sup>结合全球陆表特征数据集(GLASS)估算了 2001—2014 年全国的植被 NPP,并分析了 NPP 与气温、降水之间的关系。

我国西北地区气候干旱,生态环境较为脆弱,植被对气候变化响应较为敏感<sup>[8]</sup>。前人在西北各省的植被 NPP 时空变化都进行了一定研究<sup>[9-13]</sup>,但针对西北地区植被 NPP 的整体性及系统研究报道较少。鉴于此,本研究基于 2000—2013 年的遥感和气象数据,探究西北植被 NPP 的动态变化特征,及其对气候变化的响应,以期对未来西北地区生态保护和生态建设提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本文研究区域选取的西北地区(73°41′—111°15′E, 31°39′—49°33′N)属于中国七大地区分区之一,主要包括

甘肃省、陕西省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区,该区域属于温带大陆性气候,冬季寒冷干燥,夏季高温,降水较少,气温日较差和年较差大,蒸发较为强烈。该地区具有山盆相间的地貌特征,以及特殊的土壤环境,加上气候干旱,水资源较为匮乏,众多原因导致植被覆盖率低,生态环境脆弱<sup>[14]</sup>。

### 1.2 数据来源及方法

#### 1.2.1 数据及处理

(1) NDVI 数据采用美国国家航空航天局(NASA)提供的 EOS/MODIS 数据,下载网址为:<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>。本研究选用 2000—2013 年的 MOD13A1 产品,该数据集的空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 16 d。使用 MRT(MODIS Reprojection Tools)工具对下载的 NDVI 数据进行格式转化和重投影,将 HDF 格式转化成 TIFF 格式,并将投影转换为 WGS84/Albers Equal Area Conic 投影,同时完成数据的拼接与重采样。采用最大合成法(max Value Composite, MVC)对 16 d 的 MODIS-NDVI 数据进行合成,得到月 NDVI 数据集,并利用西北地区边界裁剪出西北地区 2000—2013 年逐月的 NDVI 栅格图像<sup>[15]</sup>。

(2) 气象数据采用中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供的 2000—2013 年全国月平均气温、降水与太阳总辐射资料。结合气象站点的经纬度,利用 ArcGIS 10.3 软件的 Geostatistical Analyst 模块进行气象因子 Kriging 空间插值,利用西北地区边界进行数据掩膜,得到西北地区的气象数据栅格影像,该数据与 NDVI 数据的像元大小和投影都相同<sup>[16]</sup>。

(3) 土地覆被数据利用 NASA MODIS 网站(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>)提供的 2013 年土地覆盖数据 MCD12Q1,该数据的空间分辨率为 500 m。同样利用 MRT 进行格式转换、投影与重采样。地表数据类型分类采用 IGBP(International Geosphere-Biosphere Program)的方案数据,该方案共划分为 17 种,3 种为无植物生长,3 种为土地镶嵌和土地利用,11 种为自然植被<sup>[2]</sup>。本文根据研究目的,对 17 种植被类型进行合并,重新划分为森林、水域、草地、灌丛、城镇、农田和裸地及荒漠 7 种,其中将重点研究灌丛、森林、农田和草地 4 种覆被类型的 NPP 时空变化特征。

#### 1.2.2 研究方法

(1) 草地 NPP 的估算本研究使用的 CASA 模型主要涉及植物吸收的有效辐射(APAR)和光能利用率( $\epsilon$ )两个变量,其公式如下:

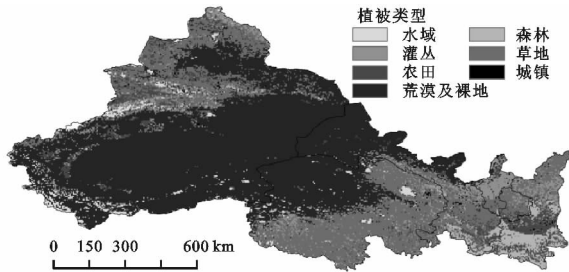


图1 西北土地利用及植被类型分布

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

式中:  $NPP(x, t)$ ,  $APAR(x, t)$  和  $\epsilon(x, t)$  分别表示  $t$  月份像元  $x$  内的植被 NPP [ $\text{g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ], 吸收的光合有效辐射 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) 及光能转换率 ( $\text{g C}/\text{MJ}$ )。

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

式中:  $SOL(x, t)$  为  $t$  月份像元  $x$  内的太阳总辐射量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ); 常数 0.5 代表植被所利用有效辐射 (0.4~0.76  $\mu\text{m}$ ) 占太阳总辐射的比例;  $FPAR(x, t)$  为植被对入射光合有效辐射 (PAR) 的吸收比例。

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

式中:  $T_{e1}(x, t)$  和  $T_{e2}(x, t)$  分别为低温和高温对光能利用率造成的影响;  $W_e(x, t)$  为水分条件对其的影响;  $\epsilon_{\max}$  为理想状态下光能转化率。传统的 CASA 模型中应用的  $\epsilon_{\max}$  的值一般为 0.389  $\text{g C}/\text{MJ}$ , 许多学者在实际应用中根据研究区内的具体植被状况对其进行了修正。本研究中不同植被  $\epsilon_{\max}$  取值分别为: 常绿针叶林 0.389  $\text{g C}/\text{MJ}$ , 落叶针叶林 0.485  $\text{g C}/\text{MJ}$ , 常绿阔叶林 0.985  $\text{g C}/\text{MJ}$ , 落叶阔叶林 0.692  $\text{g C}/\text{MJ}$ , 常绿、落叶阔叶混交林 0.768  $\text{g C}/\text{MJ}$ , 灌丛 0.429  $\text{g C}/\text{MJ}$ , 针阔混交林 0.475  $\text{g C}/\text{MJ}$ , 草地、农田及其他 0.542  $\text{g C}/\text{MJ}$  [15, 17]。此外,  $FPAR(x, t)$ ,  $T_{e1}(x, t)$  和  $T_{e2}(x, t)$  的计算可参照文献 [15]。

(2) 趋势分析采用一元线性回归分析 2000—2013 年西北植被 NPP 及气象因子的变化趋势, 计算公式为:

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

式中: slope 为变化斜率;  $n$  代表研究年限 14 a (2000—2013 年);  $i$  为第几年;  $\text{var}_i$  为第  $i$  年的变化量。若  $\text{slope} > 0$ , 表示变量呈增加趋势;  $\text{slope} < 0$ , 表示变量呈减少趋势 [18]; 若  $\text{slope} = 0$ , 说明 NPP 没有变化。

对植被 NPP 进行显著性检验 (F 检验), 计算公式为:

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

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (6)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

式中:  $U$  为误差平方和;  $Q$  为回归平方和;  $\hat{y}_i$  为其回归值,  $\bar{y}$  为 14 a 植被 NPP 平均值;  $y_i$  表示第  $i$  年的植被 NPP;  $n$  表示研究年数 14 a。通过  $F$  检验将植被 NPP 的变化趋势划分为以下 6 个等级: 极显著增加 ( $\text{slope} > 0, p < 0.01$ ), 显著增加 ( $\text{slope} > 0, 0.01 \leq p < 0.05$ ), 不显著增加 ( $\text{slope} > 0, p \geq 0.05$ ); 不显著减少 ( $\text{slope} < 0, p \geq 0.05$ ); 显著减少 ( $\text{slope} < 0, 0.01 \leq p < 0.05$ ), 极显著减少 ( $\text{slope} < 0, p < 0.01$ )。

(3) 植被 NPP 与气象因子的相关性可以通过基于像元的空间分析法分析, NPP 与气温、降水的相关性的计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (x_i \times y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \times \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \quad (8)$$

式中:  $r_{xy}$  为植被 NPP 与气象因子的相关系数;  $n$  为研究年限 14 a (2000—2013 年);  $x_i$  为第  $i$  年的 NPP;  $y_i$  为第  $i$  年的平均气温或降水 [19]。

对所得的相关性系数进行显著性检验 ( $t$  检验), 计算公式如下 [20]:

$$t = \frac{R \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}} \quad (9)$$

式中:  $R$  表示相关系数;  $n$  为研究年数 14 a。根据  $t$  检验结果将显著性水平划分为以下 6 类: 极显著正相关 ( $R > 0, p < 0.01$ ), 显著正相关 ( $R > 0, 0.01 \leq p < 0.05$ ), 不显著正相关 ( $R > 0, p \geq 0.05$ ), 不显著负相关 ( $R < 0, p \geq 0.05$ ), 显著负相关 ( $R < 0, 0.01 \leq p < 0.05$ ) 和极显著负相关 ( $R < 0, p < 0.01$ )。当  $R = 0$  时, 说明两变量间无相关性。

### 1.3 模型验证

实测 NPP 的获取较难, 因此一般通过生物量换算的 NPP 替代实测数据来进行模型验证。本研究于 2009 年 7 月、8 月在研究区选取了 50 块草地样地进行取样, 样地大小为 10 m × 10 m, 样方面积为 1 m × 1 m, 每块样地内选取 5 个重复。对地上部分进行齐地刈割, 在 70℃ 内烘箱内烘干至恒重, 然后根据根冠比换算地下生物量, 取碳转化效率 0.475, 计算得到实测 NPP [16]。然后进行模型模拟的 NPP 与实测 NPP 的比较, 经计算发现两者的相关性较强 ( $R = 0.94, p < 0.01$ ) (图 2), 说明 CASA 模型模拟的 NPP 数据精度较高, 可用于西北地区 NPP 的估算。

## 2 结果与分析

### 2.1 西北植被 NPP 年际变化特征

在研究年限内对西北年植被 NPP 进行统计分析

可得,其值在 358.57~360.40 g C/(m<sup>2</sup>·a) 范围内波动,其中,在 2001 年出现最小值,2013 年达到最大值,14 a 的平均值为 359.48 g C/(m<sup>2</sup>·a)。由 2000—2013 年西北植被 NPP 的动态变化可知(图 3),14 a 内年植被 NPP 整体呈现波动增加趋势,变化百分率为 0.46%,变化斜率为 0.09 g C/(m<sup>2</sup>·a),线性增加趋势达到极显著水平( $p<0.01$ )。

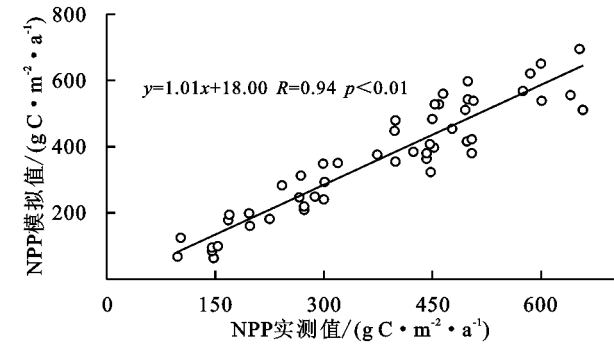


图 2 西北植被 NPP 实测值和模拟值的比较

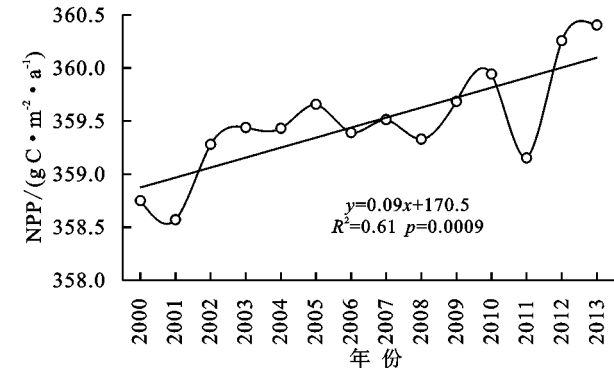


图 3 2000—2013 年西北地区植被 NPP 年际变化

2.2 西北植被平均 NPP 空间分布

图 4 为西北地区 2000—2013 年植被平均 NPP 的空间分布特征。受植被、地形因素、气候和经度地带性、纬度地带性等综合作用的影响,西北植被 NPP 表现出明显的空间异质性,整体呈现由东向西递减的趋势,除新疆外,其余省份也表现为南高北低的基本格局。具体分析可得,NPP 小于 50 g C/(m<sup>2</sup>·a) 的地区占总面积的 58.10%,该类型在西北地区所占比例最大,主要集中在新疆大部分地区、青海西部与北部和甘肃中西部,该区域气候干旱,属于西北荒漠,几乎无植被覆盖。平均 NPP 为 50~100 g C/(m<sup>2</sup>·a) 的地区,主要包括青海、宁夏和新疆部分地区,占总面积的 6.83%。新疆西北部、青海西南部、甘肃及宁夏中部和陕西最北部 NPP 集中在 100~150 g C/(m<sup>2</sup>·a),占总面积的 6.05%,该区域的主要植被为草地和灌丛。新疆西北部、青海东部、甘肃中南部、宁夏北部与南部和陕西大部分地区 NPP 集中在 150~500 g C/(m<sup>2</sup>·a),所占面积达到总面积的 20.44%。NPP 大于 500 g C/(m<sup>2</sup>·a) 的地区占总面积的 8.57%,主

要集中在新疆西部、青海湖流域、甘肃最南部和陕西中南部,另在各省零星分布(表 1)。

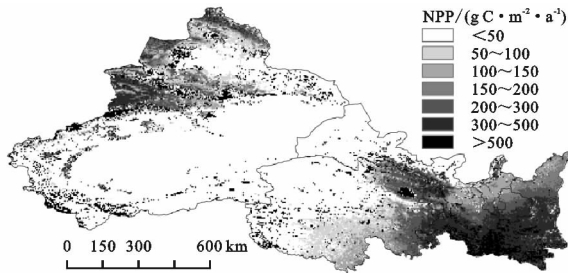


图 4 2000—2013 年西北植被平均 NPP 空间分布

表 1 西北地区植被平均 NPP 分级

植被 NPP (g C · m <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )	所占面积比例/%
<50	58.10
50~100	6.83
100~150	6.05
150~200	5.25
200~300	7.52
300~500	7.67
>500	8.58

2.3 西北植被 NPP 时空动态特征

由图 5A 可知,2000—2013 年西北植被 NPP 变化率为-20.13~24.87 g C/(m<sup>2</sup>·a)。其中,植被 NPP 呈增加趋势区域面积较大,主要分布在陕西大部分地区、宁夏南部和甘肃东部,同时,在新疆和青海也有零星分布。有减少趋势的区域较少,主要出现在新疆,其余零星分布在另外 4 省。对西北植被 NPP 变化进行显著性检验,并将其分为 6 类,对每类所占比例进行统计,具体可见图 5B 和表 2。极显著减少和显著减少区域分别占总面积的 0.59%,0.90%,主要出现在新疆的西北部。极显著和显著增加的区域所占比例较大,分别为 20.84%,18.34%,主要集中在陕西中北部、宁夏南部、甘肃东部,其余在青海东部与西部和新疆也有分布。未显著减少与增加区域所占比例分别为 12.55%,46.79%,其中未显著减少的只分布在新疆西北部,而未显著增加区域分布较广,主要出现在陕西南部、宁夏中部、甘肃中部与南部、青海东部与南部,其余在新疆零星分布。结合植被类型分布分析,NPP 增加区域的植被类型主要为草地和森林(图 1)。

2.4 不同植被类型 NPP 的动态变化

对西北不同植被类型的年平均 NPP 进行统计分析可得,14 年间不同植被 NPP 的均值呈现明显的差异,具体表现为:草地[262.16 g C/(m<sup>2</sup>·a)]>灌丛[66.51 g C/(m<sup>2</sup>·a)]>农田[45.90 g C/(m<sup>2</sup>·a)]>森林[14.36 g C/(m<sup>2</sup>·a)],该结果表明,草地的年平均 NPP 最高,因该区域森林面积较少,其平均 NPP 也相对较低。图 6 为 2000—2013 年不同植被类型 NPP 的年际变化,对其统计分析可得,不同植被类型 NPP 均出现波动,

但整体呈现增加趋势,草地、灌丛、农田的增加趋势达到极显著水平( $p<0.01$ ),但森林的变化趋势未通过显著水平检验( $p>0.05$ )。表 3 对不同植被类型显著性变化的面积进行了统计,具体分析可得,草地中极显著和显著减少的区域分别占总面积的 0.45%,0.72%,极显著和显著增加的比例分别为 21.52%,20.50%,除此之外,西北地区 56.80% 草地的 NPP 变化并未达到显著水平。灌丛中极显著和显著减少的面积占灌丛总面积的 0.32%,0.53%,极显著和显

著增加的比例分别为 22.25%,19.11%,而总计 57.80% 的灌丛 NPP 变化不显著。就农田而言,其极显著减少、显著减少、极显著增加、显著增加的面积占总面积的比例分别为 1.36%,2.04%,26.73%,13.99%,未出现显著变化的农田面积占总面积的 55.88%。森林中,极显著减少、显著减少、极显著增加、显著增加的面积占总面积的比例分别是 0.08%,0.46%,7.84%,11.04%,此外,80.58% 的森林 NPP 变化未达到显著水平。

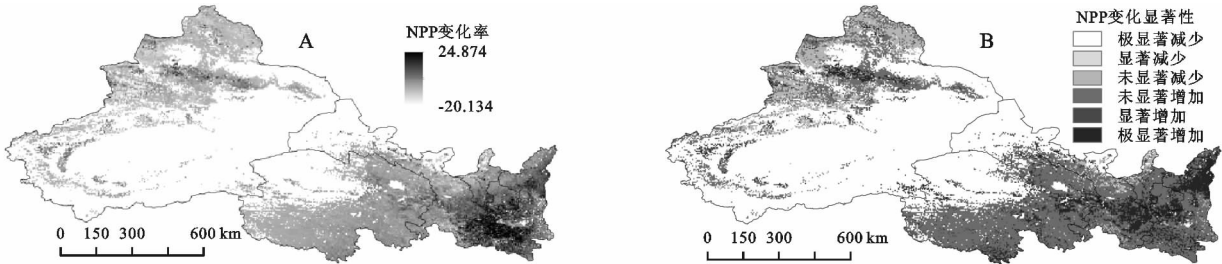


图 5 2000—2013 年西北地区 NPP 的变化速率及其显著性

表 2 NPP 变化所占面积百分比统计

斜率及显著性	变化趋势	所占面积百分比/%
$\text{slope}<0, p<0.01$	极显著减少	0.59
$\text{slope}<0, 0.01\leq p<0.05$	显著减少	0.90
$\text{slope}<0, p\geq 0.05$	未显著减少	12.55
$\text{slope}>0, p\geq 0.05$	未显著增加	46.79
$\text{slope}>0, 0.01\leq p<0.05$	显著增加	18.34
$\text{slope}>0, p<0.01$	极显著增加	20.84

2.5 植被 NPP 与气象因子的关系

从空间上进行分析,研究年限内西北大部分地区气温呈现增加趋势,气温减少区域所占面积较少,主要集中在甘肃中部与东部和青海的东部地区(图 7A)。由图 7C 可知,2000—2013 年西北地区气温呈现波动降低趋

势,减少速率为  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ ,但变化趋势未达到显著水平( $p<0.05$ )。14 年间气温的平均值为  $4.89\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在 2007 年达到最大值  $5.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,2012 年出现最小值  $4.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从空间上对降水变化进行研究发现,西北地区降水明显减少的区域集中在青海和新疆南部,降水明显增加的区域主要包括陕西南部、甘肃南部和新疆西北部(图 7B)。对 2000—2013 年西北地区降水的变化趋势分析可得,降水整体呈现波动增加趋势,增加速率为  $0.79\text{ mm/a}$ ,但增加趋势不明显。对 2000—2013 年西北地区年降水量统计可得,14 a 降水的平均值为  $210.00\text{ mm}$ ,年降水量为  $180.10\sim 247.00\text{ mm}$ ,其中 2001 年出现最小值,2003 年出现最大值(图 7C)。

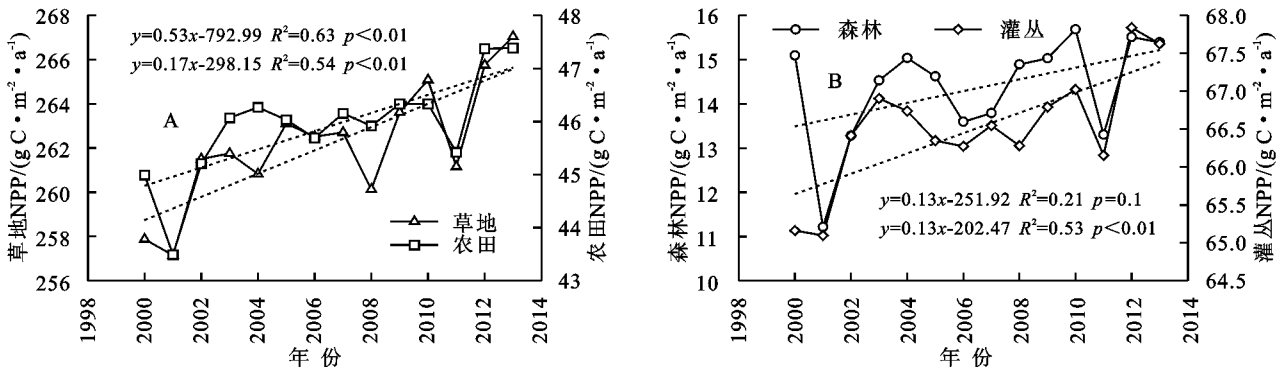


图 6 2000—2013 年不同植被类型 NPP 年际变化

植被 NPP 不仅受植被本身理化性质的影响,同时也易受气候变化的影响。本研究对 2000—2013 年的植被 NPP 像元与降水气温像元进行相关性分析并对相关系数空间化显示,进一步分析气候因素对植被 NPP 的影响。由图 8A 可知,植被 NPP 与气温呈极显著和显著负相关的区域主要集中在陕西中南部、甘

肃南部和青海东部,两种类型面积分别占西北植被总面积的 2.92%,6.74%。负相关关系不显著的区域主要分布在青海的东南部,其余包括陕西中南部、甘肃南部、青海东部与西部和新疆的小部分地区,该类型面积占西北植被总面积的 7.91%。植被 NPP 与气温呈极显著和显著正相关的区域主要分布在青海

的东南部,在新疆北部也有零星分布,两种类型所占比例分别为 3.92%,2.09%。正相关关系不显著面积占西北植被总面积的 76.42%,该类型所占比例最大,在西北每个省份都有分布。由图 8B 可知,植被 NPP 与降水呈负相关关系所占的比例较少,其面积占西北植被总面积的 1.40%。与降水呈正相关关系的地区在西北地区分布较广,其中植被 NPP 与降水呈极显著和显著正相关的比例分别为 7.27%,6.60%,主要分布在陕西北部、宁夏大部分地区、甘肃中部、青海的东北部和新疆西部。植被 NPP 与降水正相关关系不显著的区域在每个省份所占比例较大,其面积占西北植被总面积的 66.00%。综上分析,因气温与降水和植被 NPP 呈正相关的比例均大于呈负相关的比例,所以总体上植被 NPP 与气温、降水呈正相关。植被 NPP 与气温呈显著和极显著相关的面积比例少于 NPP 与年降水量显著和极显著相关的比例,表明西北地区植被 NPP 对降水变化响应较为敏感。

表 3 不同植被类型 NPP 变化显著性统计

百分比/%	草地	灌丛	农田	森林
极显著减少	0.45	0.32	1.36	0.08
显著减少	0.72	0.53	2.04	0.46
不显著减少	11.83	11.62	18.60	8.07
不显著增加	44.97	46.18	37.28	72.51
显著增加	20.50	19.11	13.99	11.04
极显著增加	21.52	22.25	26.73	7.84

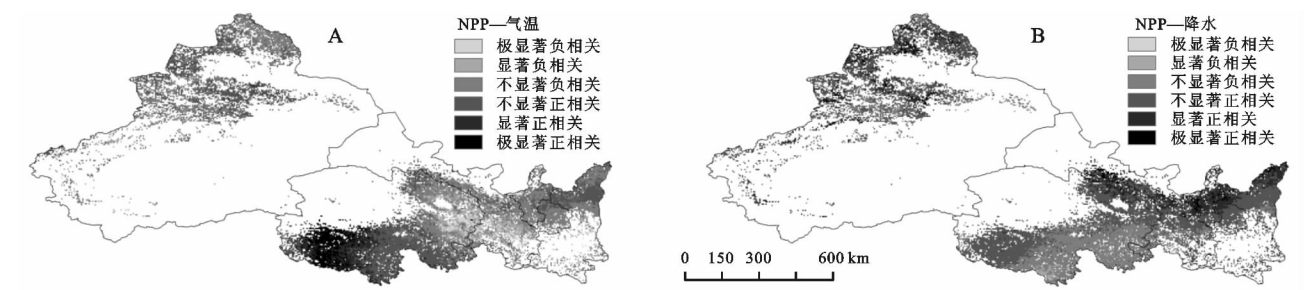


图 8 植被 NPP 与气温、降水的相关性

3 讨论

植被 NPP 是估算地球承载能力、评价生态系统可持续性、探究生态系统碳循环的重要指标,监测其动态特征对研究生态环境和自然资源变化具有重要意义<sup>[6]</sup>。时间上,西北地区植被 NPP 呈现逐年增加趋势,该结果与前人所得结果相一致<sup>[21]</sup>。空间上,2000—2013 年西北地区植被 NPP 呈现增加趋势的区域所占比例较大,其面积占该区总面积的 85.97% (表 2),主要集中陕西北部、宁夏南部、甘肃东部、青海的东部和南部、新疆西部部分地区(图 4)。该结果说明西北地区近年来植被覆盖度增加、生态环境得到明显

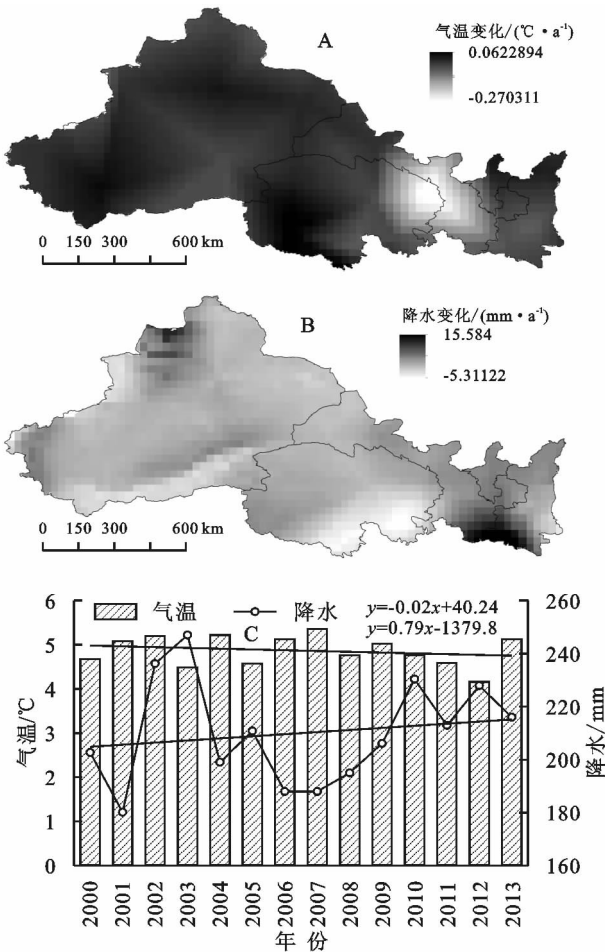


图 7 2000—2013 年西北地区气温、降水变化速率和  
年际变化趋势

改善,该变化可能与我国近年来实行的退耕还林、退耕还草和一系列生态环境保护措施的实施有关<sup>[22]</sup>。同时,本研究表明草地 NPP 要远大于灌丛、农田、森林 3 种植被类型(图 6),一方面可能由于面积差异导致,草地总面积占西北地区总面积的 27.56%,比灌丛(6.72%)、农田(5.89%)、森林(2.84%)所占比例要大(图 1)。此外,森林和灌丛等树干中存在较大的水体阻力,草地与之不同,因此光合效率较高;不同植被类型的生长季也有差异,以及其自身不同的生物学及生态学特性均会影响植被的固碳能力及效率,进而使得 NPP 在不同植被类型间产生差异<sup>[23]</sup>。

不同的水热组合条件将导致植被 NPP 在空间分

布和动态变化上存在分异性。时间变化上,2001年植被 NPP 出现最小值,可能由该年气温的急剧下降造成,而 2013 年 NPP 达到最大值,可归因于降水量的增加。总体上,2000—2013 年我国西北地区植被 NPP 的波动与气温、降水的波动相吻合,研究年限内气温降低及降水减少会造成植被 NPP 降低(图 3,图 7C)。空间变化上,西北地区植被 NPP 与气温、降水主要呈现正相关关系(图 8),且对降水响应比较敏感。部分学者也得到一致结论,王耀斌等<sup>[24]</sup>基于 MOD17A3 数据研究秦巴山区植被 NPP 及其驱动因素,认为总体上植被 NPP 与气温、降水具有正相关关系;仲晓春等<sup>[25]</sup>在全国植被 NPP 研究中也得到相同结论。Guo 等<sup>[26]</sup>对中国北方植被 ANPP 与降水的时空关系进行研究,表明降水是影响草地生长及 NPP 变化的主要因素,且在干旱地区这一特征会更加明显,充足的降水可为植物生长带来良好的水分条件,从而增强植被光合效率,增加其有机干物质的积累。气温对植被 NPP 的作用受到降水的调节,并在不同区域及不同植被类型间出现差异,研究区内对温度响应比较敏感的地区植被类型多为草地,主要在于草地生态系统结构较为简单,易受气候因素影响(图 1,图 8)<sup>[18]</sup>。焦伟等<sup>[21]</sup>对西北干旱区的植被净初级生产力时空格局的影响因素研究发现,研究区内大部分地区植被 NPP 与降水具有显著的正相关关系,植被 NPP 与气温在海拔较高、降水较多地区呈现弱相关性,但在低海拔的大部分地区,气温与植被 NPP 呈负相关关系。该研究与我们的研究结论有所差异,主要归因于其探讨了海拔因素对植被 NPP 的影响,并且数据来源、研究年限和研究方法存在差异,而我们的研究则重点揭示西北地区植被 NPP 对气候变化的响应特征。

综上所述,植被 NPP 的影响因素众多。同时,研究发现不同植被的需水要求、植被的地带性差异、水热状况、海拔高度和人类活动等都会对植被 NPP 造成影响<sup>[9]</sup>。本研究仅仅探讨了西北地区植被 NPP 对气候变化的响应特征,其他因素的影响还需进行进一步探究,但本研究结论对于西北地区气候变化预测和生态保护政策的制定具有一定的指导性意义。

## 4 结论

(1) 西北地区植被 NPP 在研究年限内呈现波动增加趋势,具体表现为平均变化率为  $0.09 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,线性增加趋势达到极显著水平。在 2001 年出现最小值  $358.57 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,2013 年达到最大值  $360.40 \text{ g C}/$

$(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,14 a 的平均值为  $359.48 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

(2) 植被 NPP 分布具有明显的空间异质性,整体呈现由东到西递减的趋势,除新疆外,其余省份也表现为南高北低的基本格局。其中,植被 NPP 小于  $50 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的区域所占比例最大(58.10%),植被 NPP 呈现增加趋势的面积占总面积的 85.97%,主要集中在陕西北部、宁夏南部、甘肃东部、青海的东部和南部、新疆西部部分地区。呈现减少趋势的面积占总面积的 14.03%,主要集中在新疆的西部地区,其余在各省零星分布。另外,不同植被 NPP 的均值呈现明显的差异,具体表现为:草地 $[262.16 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ >灌丛 $[66.51 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ >农田 $[45.90 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ >森林 $[14.36 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ ,草地、农田及灌丛的 NPP 均呈现极显著增加趋势,而森林的增加趋势不显著。

(3) 总体上,西北地区植被 NPP 与气温、降水均呈正相关关系,然而植被 NPP 对降水响应较为敏感,降水是西北地区植被 NPP 增加的主导因素。

### 参考文献:

- [1] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. science, 2003,300(5625):1560-1563.
- [2] 李登科,王钊. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J]. 生态环境学报,2018,27(3):397-405.
- [3] 刘征,赵旭阳,米林迪. 基于 3S 技术的河北省山区植被净初级生产力估算及空间格局研究[J]. 水土保持研究,2014,21(4):143-147.
- [4] Alexandrov G A, Oikawa T, Yamagata Y. The scheme for globalization of a process-based model explaining gradations in terrestrial NPP and its application[J]. Ecological Modelling, 2002,148(3):293-306.
- [5] 张永领,郝成元. 基于遥感和 CASA 模型的西江流域 NPP 时空分布特征研究[J]. 水土保持研究,2010,17(5):101-104.
- [6] Gang C, Zhou W, Wang Z, et al. Comparative assessment of grassland NPP dynamics in response to climate change in china, North America, Europe and Australia from 1981 to 2010[J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2015,201(1):57-68.
- [7] 刘刚,孙睿,肖志强,等. 2001—2014 年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系[J]. 生态学报,2017,37(15):4936-4945.
- [8] 周梦甜,李军,朱康文. 西北地区 NDVI 变化与气候因子的响应关系研究[J]. 水土保持研究,2015,22(3):182-187.

- [9] 王钊,李登科. 2000—2015 年陕西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1876-1884.
- [10] 冯益明,姚爱冬,姜丽娜. CASA 模型的改进及在干旱区生态系统 NPP 估算中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(8): 39-43.
- [11] 汪青春,秦宁生,唐红玉,等. 青海高原近 44 年来气候变化的事实及其特征[J]. 干旱区研究, 2007, 24(2): 234-239.
- [12] 王云霓,熊伟,王彦辉,等. 宁夏六盘山 3 种针叶林初级净生产力年际变化及其气象因子响应[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4002-4010.
- [13] 张仁平. 新疆地区草地 NPP 和物候对气候变化的响应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [14] 丁文广,魏银丽,牛贺文. 西北干旱区植被恢复的土壤养分效应[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2568-2573.
- [15] 穆少杰,周可新,齐杨,等. 内蒙古植被降水利用效率的时空格局及其驱动因素[J]. 植物生态学报, 2014, 38(1): 1-16.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 刘海江,尹思阳,孙聪,等. 2000—2010 年锡林郭勒草原 NPP 时空变化及其气候响应[J]. 草业科学, 2015, 32(11): 1709-1720.
- [20] 阿多,赵文吉,宫兆宁,等. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 576-592.
- [21] 焦伟,陈亚宁,李稚. 西北干旱区植被净初级生产力的遥感估算及时空差异原因[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 181-189.
- [22] 彭珂珊,王继军. 中国退耕还林(草)的发展历史阶段与对策探讨[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1): 106-109.
- [23] Iersel M W V. Carbon use efficiency depends on growth respiration, maintenance respiration, and relative growth rate: A case study with lettuce[J]. Plant Cell & Environment, 2010, 26(9): 1441-1449.
- [24] 王耀斌,赵永华,韩磊,等. 2000—2015 年秦巴山区植被净初级生产力时空变化及其趋动因子[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2373-2381.
- [25] 仲晓春,陈雯,刘涛,等. 2001—2010 年中国植被 NPP 的时空变化及其与气候的关系[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(9): 16-22.
- [26] Guo R, Wang X K, Ouyang Z Y, et al. Spatial and temporal relationships between precipitation and ANPP of four types of grasslands in northern China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(5): 1024-1030.

(上接第 366 页)

- [5] 康春国. 承德避暑山庄木兰围场地理及植物分析[J]. 森林工程, 2003, 19(3): 7-8.
- [6] 赵建成,孔照普. 河北木兰围场植物志[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [7] 张建华. 木兰围场国有林区历史沿革及其丰富的植物资源[J]. 河北林业科技, 2007(S7): 192-194.
- [8] 张佳音. 木兰林场北沟林场森林生态系统健康评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [9] 黄从德,张健,杨万勤. 四川省森林植被碳储量的空间分异特征[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 5115-5121.
- [10] 李斌,方晰,项文化,等. 湖南省杉木林植被碳贮量、碳密度及碳吸存潜力[J]. 林业科学, 2013, 49(3): 25-32.
- [11] 胡海清,罗碧珍,魏书精,等. 小兴安岭 7 种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力[J]. 植物生态学报, 2015, 39(2): 140-158.
- [12] 刘亚茜. 河北地区华北落叶松、杨树单木生物量、碳贮量及其分配规律[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2012.
- [13] 方精云,陈安平,赵淑清,等. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文(Science, 2001, 291: 2320~2322)的若干说明[J]. 植物生态学报, 2002, 26(2): 243-249.