

2000—2014年张家口市植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系

谢婷, 纪显德, 徐晓娜, 岳俊杰, 徐翔, 张化永* (华北电力大学工程生态学与非线性科学研究中心, 北京 102206)

摘要 植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是反映植被活动的关键变量之一, 研究其空间格局及其对气候因子的响应, 对于理解陆地生态系统的碳循环有着重要作用。利用 MOD17A3 和气象数据, 采用线性趋势分析等方法, 分析 2000—2014 年张家口市植被 NPP 的时空变化特征及其与气候因子的相关性。结果表明: 张家口市 NPP 的空间分布具有明显差异, 空间上呈现东南高、西北低的趋势, 且具有较明显的经向“条带”分布特征, 2000—2014 年张家口市植被 NPP 平均值为 $230.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。2000—2014 年, 张家口市 NPP 总体呈增长趋势, 年 NPP 最大值出现在 2004 年, 最小值出现在 2001 年。降水是植被 NPP 变化的主要影响因素, 张家口市植被 NPP 总体上与年降水的相关性更高, 呈正相关关系。该研究为冬奥会进行前张家口市的生态修复工作提供了科学依据。

关键词 净初级生产力(NPP); MOD17A3; 时空格局; 张家口市; 气候因子

中图分类号 Q 142 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)05-0068-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.05.019



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Spatio-temporal Pattern in Vegetation Net Primary Productivity and Its Relationship with Climate in Zhangjiakou from 2000 to 2014
XIE Ting, JI Xian-de, XU Xiao-na et al (Research Center for Engineering Ecology and Nonlinear Science, North China Electric Power University, Beijing 102206)

Abstract Net primary productivity (NPP) is one of the key variables to reflect the vegetation activity, thus studying the spatial pattern of NPP and its response to climatic factors plays an important role in understanding the carbon cycle of terrestrial ecosystems. MOD17A3 and meteorological data were used to analyze the spatio-temporal pattern of NPP and its correlation with climatic factors in Zhangjiakou from 2000 to 2014 by using linear trend analysis. The results showed that: There was a clear longitudinal gradient in the distribution of NPP in Zhangjiakou. NPP decreased from southeast to northwest in Zhangjiakou with an average value of $230.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ for the period of 2000–2014. The inter-annual variability of NPP showed an overall increase trend from 2000 to 2014. The maximum value of NPP appeared in 2004 while the minimum value appeared in 2001. There was a weak relationship between NPP and annual precipitation, and precipitation was a key influencing factor. This study provided a scientific basis for the ecological restoration in Zhangjiakou before the Winter Olympics Games.

Key words Net primary productivity (NPP); MOD17A3; Temporal and spatial pattern; Zhangjiakou; Climatic factors

随着全球气候变化的加剧, 陆地生态系统对气候变化的响应机制研究逐渐成为焦点之一, 其中, 植被可以最直观地体现气候变化^[1-4]。作为反映植被变化最有效的指标之一, 净初级生产力(net primary productivity, NPP)是指植被在单位时间、单位面积上积累的有机物质的总量, 其大小等于光合作用吸收的碳减去呼吸作用释放的碳^[5-8]。早在 19 世纪中期, 已有学者开始在多个不同的尺度上研究陆地生态系统的 NPP 格局, 但截至目前关于气候因子对 NPP 的影响问题仍未达成共识^[9-12]。

大尺度上, 刘刚等^[13]利用全球陆表特征数据集(global and surface satellite, GLASS)对 2001—2014 年中国植被 NPP 进行估算; 周伟等^[14]利用光能利用率模型(carnegie-ames-stanford approach, CASA)对 1982—2010 年中国草地 NPP 进行模拟, 并对其时空变化进行分析。小尺度上, 郑颖娟^[15]利用 CASA 模型对 2009 年河北省不同植被类型的 NPP 进行估算; 刘征等^[16]利用 CASA 模型对 2012 年河北省北部山区的 NPP 及其时空变化进行研究; 王雪等^[17]利用 CASA 模型对 2013—2015 年张家口市蔚县矿区的 NPP 进行估算。

MOD17A3 是基于中分辨率成像光谱仪 MODIS 的遥感参数, 通过 BIOME-BGC 模型对全球植被 NPP 进行计算的数据产品, 目前已在全球范围内的植被生物量估算、环境监测和全球变化等研究中得到验证和广泛应用^[18-19]。张莎等^[20]利用 MOD17A3 数据对 2001—2010 年河北省植被 NPP 的时空格局进行研究; Yuan 等^[21]利用遥感数据 FPAR (16-day MODIS fraction of photosynthetically active radiation absorbed by vegetation) 和 CASA 模型对 2001 年河北省北部的张家口市和承德市的 NPP 时空分布进行研究。

河北省农业资源丰富, 近年来经济和社会发展较为迅速, 全年生产总值目前位居全国第六, 其北部山区也由于丰富的植物资源而成为河北省重要的碳库, 具有巨大的生态及社会效益^[22]。张家口市地处河北省西北部, 以其“连接京津、沟通晋蒙”的交通枢纽位置和“现行长城最多地区”的文化底蕴, 成为整个冀西北地区的重要城市之一。作为 2022 年冬奥会的举办地, 张家口市的生态和社会环境引起了人们的重视。然而近半个世纪以来, 张家口市及整个河北省的山区植被发生了剧烈变化, 生态系统的平衡遭到破坏。NPP 是能有效反映生态系统变化的指标之一, 近年来已经有部分学者对河北省及张家口市蔚县的 NPP 及其时空变化进行研究^[15-17, 20-21], 但并没有对张家口市 NPP 的长期时空分布进行研究。目前, 基于 MOD17A3 数据对张家口市植被 NPP 的相关研究也未见报道。

应用 MOD17A3 遥感数据, 同时结合水系分布、土地利用和气象数据, 对 2000—2014 年张家口市植被 NPP 进行研究,

基金项目 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101002-01, 2015ZX07203-011, 2015ZX07204-007, 2009ZX07210-009)。

作者简介 谢婷(1995—), 女, 湖南湘潭人, 硕士研究生, 研究方向: 生物多样性。*通信作者, 教授, 博士, 博士生导师, 从事生态工程、恢复生态学、基础生态学、生态水力学、生态热力学、生态学中的非线性和复杂性、能源和污染控制生物学等方面研究。

收稿日期 2018-07-11; **修回日期** 2018-10-16

旨在揭示张家口市植被 NPP 的总体时空分布格局,气候因子对张家口市植被 NPP 的影响。这对研究张家口市的碳循环和碳收支具有重要的理论指导作用,同时也为冬奥会进行前张家口市的生态修复工作提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况 张家口市(113°82′~116°45′E,39°56′~42°17′N)位于我国河北省的西北部,地处华北平原,东部邻近河北省承德市,东南紧靠政治文化中心北京市,南部邻近河北省保定市,西、西南与山西省接壤,北、西北与内蒙古自治区交界,总面积 3.67 万 km²。该市下辖 16 个区县,主要分布有森林、草地和耕地三大土地利用类型。张家口市地势从西北向东南递低,且横向有阴山山脉连通东西,纵向有南部的太行山余脉,水资源分布集中在中北和东南的山地。因此虽然张家口市在气候上全部属于温带大陆性季风气候,但年均温呈现中部高、四周低的趋势,而年降水量则呈现从东南向西北递减的趋势。相应地,土地利用类型也从东南部的森林向西北部的耕地和草地过渡。

1.2 数据

1.2.1 NPP 数据。NPP 数据来源于 MOD17A3 (2000—2014)产品,其时间分辨率为 1 年,空间分辨率为 1 km。使用 ARCGIS 10.3 将下载的 MOD17A3 数据从 HDF 格式转换成 Grid 格式,接着对 Grid 格式下的图像进行空间拼接。最后利用张家口市行政区划图,截取张家口市 2000—2014 年的 NPP 栅格图像。

1.2.2 气象数据。气象数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),该研究下载了 2000—2011 年遍布于河北省的 21 个标准气象站点的月均温和月降水数据。然后使用 ArcGIS 10.3 将下载的气象数据根据其各自来源的气象站点的经纬度信息进行 Kriging 空间插值,从而得到与 NPP 数据像元大小能够完全重叠的气象栅格数据。通过数据掩膜,截取河北张家口市年均温和年降水的栅格图像。

1.3 研究方法

1.3.1 NPP 年际变化的趋势分析。采用简单插值法和一元线性回归分析法来定量描述 2000—2014 年逐像元 NPP 随时间尺度的变化趋势。简单差值法,是对单个像元不同时期的栅格进行相减,利用栅格之间的差值来衡量变化的大小^[22]:

$$D_{ij} = \text{NPP}_{ij}^{t_1} - \text{NPP}_{ij}^{t_2} \quad (1)$$

式中, D_{ij} 为第 i 行 j 列像元的差值; $\text{NPP}_{ij}^{t_1}$ 为第 i 行 j 列像元 t_1 时期的 NPP 值; $\text{NPP}_{ij}^{t_2}$ 为第 i 行 j 列像元 t_2 时期的 NPP 值。

简单差值法能够直接反映 15 年间张家口市不同地区 NPP 的变化特征,但由于其计算过程只考虑了端点年份的 NPP 栅格间的差异,所以其结果经常会被端点年份的特殊气候,比如极端天气所影响^[23]。而一元线性回归分析方法能够在一定程度上削减特殊年份极端天气造成的影响,所以这样能够更加真实地反映 NPP 在 15 年内的演变趋势。计算单个像元一元线性拟合方程的斜率^[24]:

$$\text{Slope} = \frac{\sum_{j=1}^n \text{NPP}_j t_j - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \text{NPP}_j \sum_{j=1}^n t_j}{\sum_{j=1}^n t_j^2 - \frac{1}{n} (\sum_{j=1}^n t_j)^2} \quad (2)$$

式中,Slope 为拟合方程的斜率; t 为年份; NPP_j 为第 j 年 NPP 值; n 为研究序列的长度,即 $n=15$ 。斜率为负表示下降,斜率为正表示上升。利用 NPP 序列与时间序列(年份)的 Pearson 相关关系的显著性来代表 NPP 年际间变化趋势的显著性,即表示变化趋势的可置信程度的高低,与变化快慢无关。结合一元拟合斜率和变化趋势的显著性检验,将 NPP 的年际变化趋势划分为以下 5 个等级:极显著减少 (Slope<0, $P<0.01$);显著减少 (Slope<0, $0.01<P<0.05$);变化不显著 ($P>0.05$);显著增加 (Slope>0, $0.01<P<0.05$);极显著增加 (Slope>0, $P<0.01$)。

1.3.2 NPP 年际变化的稳定性分析。计算 2000—2014 年单个像元 NPP 的变异系数,用来评估 NPP 在时间序列上的稳定性。变异系数的计算方式如下^[24]:

$$\text{CV} = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3)$$

式中,CV 为变异系数, \bar{x} 为平均值, σ 为标准差。CV 值越小,表示数据分布越集中,数据随时间序列波动越小,具有更好的稳定性;反之则表示数据分布越离散,数据随时间序列波动越大。

1.3.3 NPP 与气候因子的相关性分析。采用空间分析法进行逐像元的 NPP 分析,并探讨各气候因子(年均温和年降水)对 NPP 的影响,首先求出简单相关系数,然后求出偏相关系数^[25]。计算 NPP 和气候因子(年均温和年降水)间相关系数的计算方式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中, R_{xy} 为 x,y 两变量的相关系数, x_i 为第 i 年的 NPP, y_i 为第 i 年的温度或降水, \bar{x} 为多年 NPP 的平均值, \bar{y} 为多年温度或降水的平均值, n 为样本数。由于气候因子数据的时间跨度为 2000—2011 年,所以该分析中 $n=12$ 。

基于降水量的 NPP 与温度的偏相关系数,基于温度的 NPP 与降水量的偏相关系数计算方式如下:

$$r_{123} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1-r_{13}^2)}\sqrt{(1-r_{23}^2)}} \quad (5)$$

式中, r_{123} 为将变量 3 固定后变量 1 与变量 2 之间的偏相关系数, r_{12}, r_{23}, r_{13} 分别表示变量 1 与变量 2、变量 2 与变量 3、变量 1 与变量 3 的相关系数,偏相关系数是指当 2 个变量同时与第 3 个变量相关时,剔除第 3 个变量的影响之后的另 2 个变量的相关系数,更能反映单一气候因子对 NPP 的影响,因此该研究的相关分析均采用偏相关系数。

2 结果与分析

2.1 NPP 的空间分布格局 2000—2014 年,张家口市年均单位面积上的 NPP 分布总体呈现西低东高、北低南高的变化趋势,变化范围为 0~472.4 g/(m²·a),平均值为 230.5 g/(m²·a)(图 1)。张家口市 NPP 值随经度的增加而

增大,随纬度和海拔的增加而减小(图2)。年平均NPP呈现出较明显的经向地带性“条带”分布特征,即与经度呈显著正相关,相关系数为0.261($P < 0.01, n = 55\ 533$);与纬度和海拔都呈显著弱相关,相关系数分别为-0.047($P < 0.01, n = 55\ 533$)和-0.031($P < 0.01, n = 55\ 533$)。张家口市NPP低值区[$< 200\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]占其总面积的23.79%;大部分分布在 $200 \sim 300\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,占张家口市总面积的64.90%。张家口市NPP的高值区[$> 300\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]主要分布在张家口市东南地区,天然植被主要是温带落叶阔叶林。

2.2 NPP的年际变化格局 整体来看,15年间,张家口市年平均NPP都呈波动上升的趋势(图3)。张家口市年平均NPP最大值出现在2004年,为 $278.9\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,最小值出现在2001年,仅为 $182.6\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

对该研究始末时间端点2000年和2014年NPP图像进行简单差值法计算,生成张家口市植被NPP变化的空间分布图(图4)。对比2014年和2000年的图像,大部分区域的NPP增长,只有少部分区域的NPP减小。张家口市年NPP减少的面积占市总土地面积的3.9%;年NPP增加的面积占96.1%,其中增加 $0 \sim 50, 50 \sim 100, 100 \sim 150$ 和 $> 150\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的面积分别占2.2%、2.0%、2.6%和89.3%。

运用一元线性回归分析方法得到张家口市不同地区植被年均NPP在15年间的年际变化趋势及其显著性的空间分布图(图5),发生极显著减少、显著减少、变化不显著、显著增加和极显著增加的面积分别占张家口市总土地面积的

0.2%、0.2%、75.9%、14.5%和9.1%,年均NPP呈增加(极显著和显著)与减少(极显著和显著)的面积比率为50.2。说明2000—2014年张家口市年均NPP总体呈现增长趋势,其固碳能力增加。

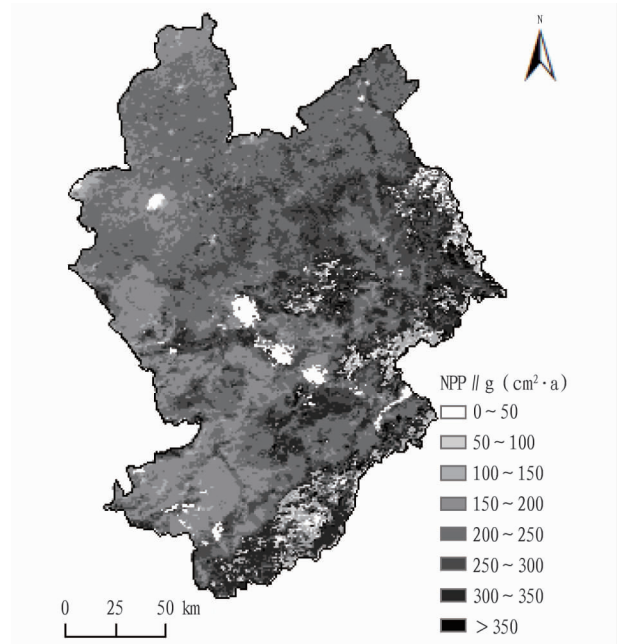
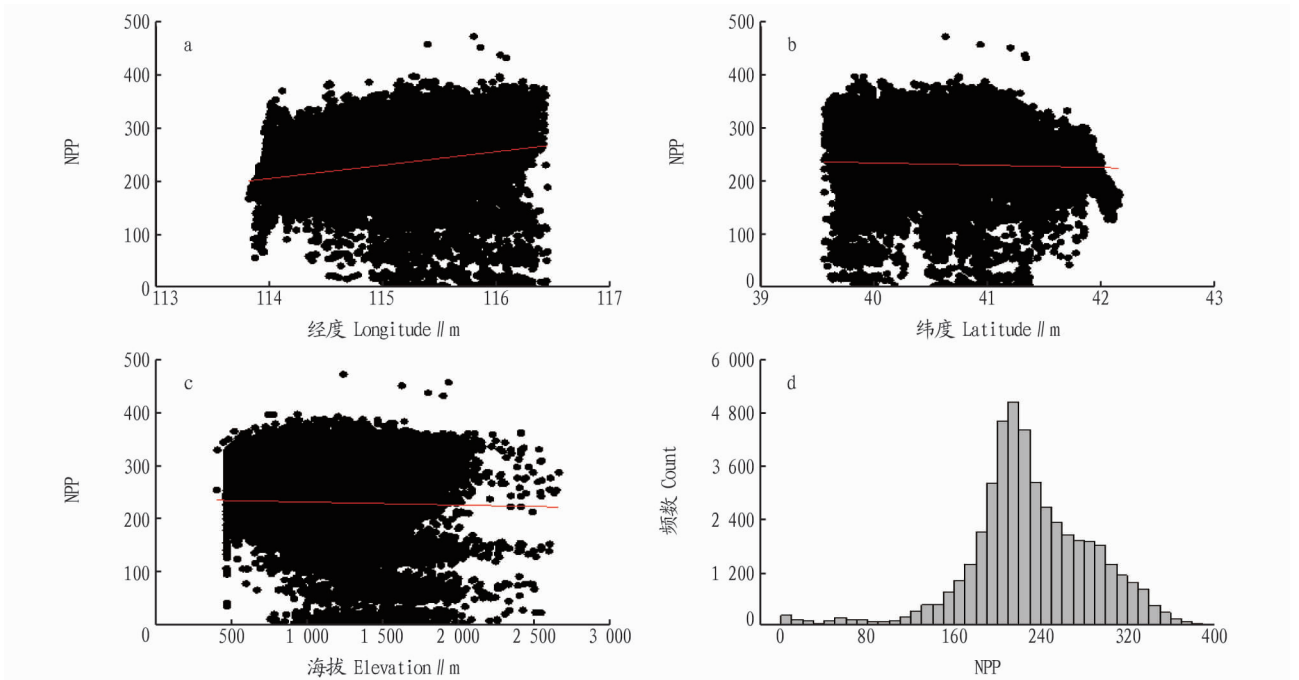


图1 2000—2014年张家口市NPP平均值的空间分布格局

Fig.1 Spatial pattern of mean annual NPP in Zhangjiakou from 2000 to 2014



注:a.沿经度梯度的空间格局,b.沿纬度梯度的空间格局,c.沿海拔梯度的空间格局,d.频度分布

Note:a. Longitudinal gradient,b. Latitudinal gradient,c. Elevational gradient,d. Frequency distribution of 15-year mean annual mean NPP by pixels in Zhangjiakou

图2 像元尺度上张家口市15年植被年平均NPP、空间格局和频度分布

Fig.2 Variation in 15-year mean annual NPP by pixels

15年间张家口市不同地区的年均NPP稳定性(由年均NPP变异系数度量)存在明显的空间差异(图6),高波动

($CV > 19.0\%$) 区域占张家口市总土地面积的 6.7%, 较高波动 ($CV: 16.0\% \sim 19.0\%$) 区域占 13.2%, 中等波动 ($CV: 13.0\% \sim 16.0\%$) 区域占 27.7%, 较低波动 ($CV: 10.0\% \sim 13.0\%$) 区域占 37.9%, 低波动 ($CV < 10.0\%$) 区域占 14.5%, 这说明张家口市植被年均 NPP 整体相对稳定。

2.3 NPP 对气候因子的响应 植被的生长与气候因素密切相关, 由图 7 可知, 以年为时间单位, 张家口市植被年均 NPP 与年降水和年均温的平均相关系数 (即以像元为基本单位计算平均相关系数) 分别为 0.299 和 -0.077, 平均偏相关系数分别为 0.321 和 0.091, 说明张家口市植被年均 NPP 总体上与年降水的相关性更高, 呈正相关关系。根据年均 NPP 与

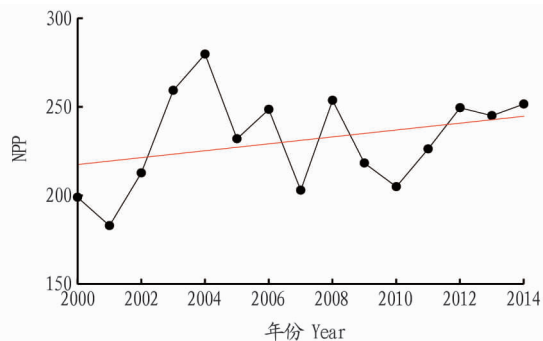


图 3 2000—2014 年张家口市年平均 NPP 变化动态

Fig. 3 Dynamics of mean annual NPP in Zhangjiakou during 2000—2014

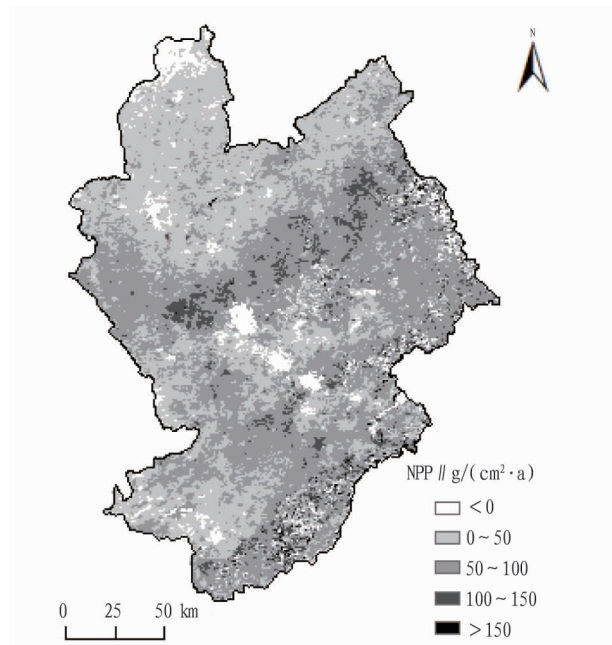


图 4 2014 年与 2000 年张家口市植被 NPP 差值的空间分布格局

Fig. 4 Difference of NPP in Zhangjiakou between 2014 and 2000

年降水和年均温的偏相关系数划分 4 个象限, 发现张家口市年均 NPP 主要受年降水的影响, 与年降水呈正相关的区域面积占张家口市总土地面积的 98.6%, 其中 68.2% 与年均温呈正相关, 30.4% 与年均温呈负相关。

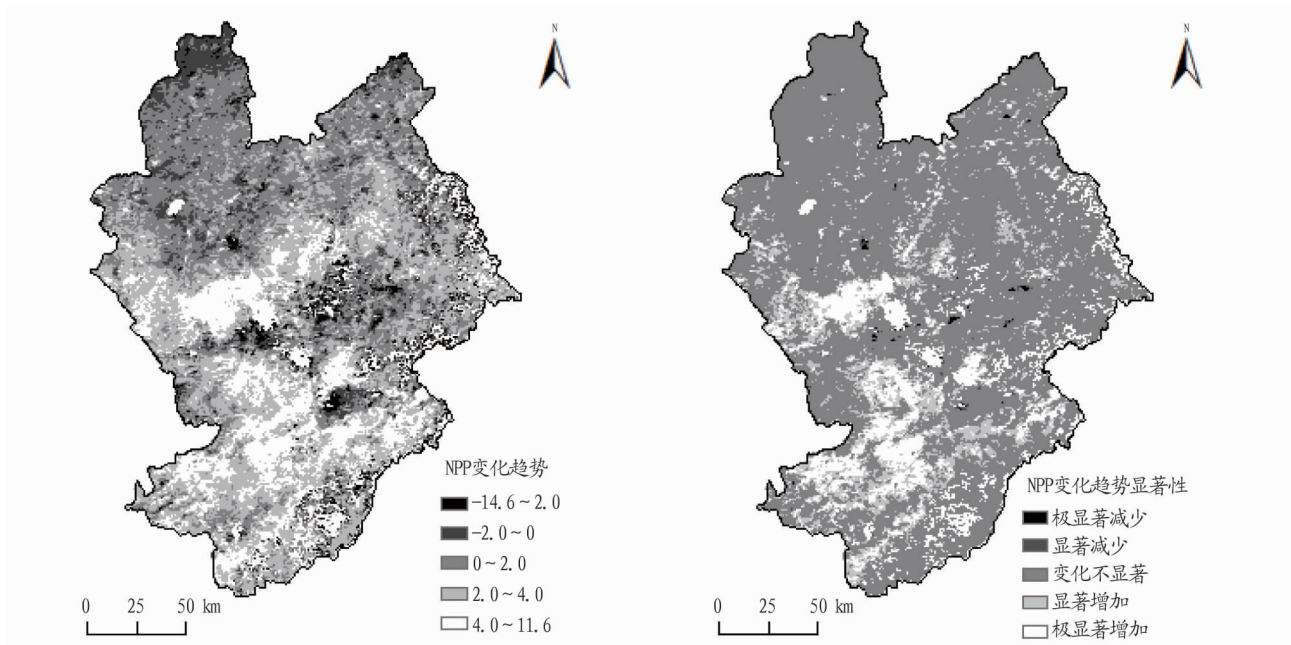


图 5 2000—2014 年张家口市年均 NPP 线性拟合斜率 (a) 和显著性 (b)

Fig. 5 Linear regression slope (a) and significance (b) of NPP in Zhangjiakou during 2000—2014

3 讨论

2000—2014 年, 张家口市植被 NPP 集中在 200 ~ 300 $g/(m^2 \cdot a)$, 其平均值为 230.5 $g/(m^2 \cdot a)$, 这和张莎等^[20]对 2001—2010 年整个河北省 NPP 的研究结果大致相同。张家口市 NPP 总体呈现西北低、东南高的分布趋势, 这和前人在河北省北部^[21,26]、整个河北省^[14]上的研究结果一致。这是由于

张家口市东南地区植被覆盖率较高, 植被类型以阔叶林为主, 光合作用比较强烈, 年均 NPP 的高值区 [$> 350 g/(m^2 \cdot a)$] 多出现在这些地方; 张家口市南部有太行山余脉, 该区多为基岩裸露的石质山地, 生境破碎, 植被覆盖率低, 降雨量少, 蒸发量大, 土壤瘠薄, 林木生长缓慢, 年均 NPP 大多在 50 ~ 150 $g/(m^2 \cdot a)$, 局部 $< 50 g/(m^2 \cdot a)$; 而 NPP 最小值主要位于

城市及其周边地区,这是由工业污染和城市化建设造成的。该研究还发现张家口市 NPP 值随经度的增加而增大,但随纬度和海拔的增加而减小。此外,张家口市年平均 NPP 呈现出较明显的经向地带性“条带”分布特征,这和前人在河北省的研究结果一致,可能是由于经向地带带有太行山脉分布的缘故^[16,20]。

根据简单差值和一元线性回归分析得知,15年来张家口市植被 NPP 总体上呈增长趋势,这符合中国植被的增长趋势^[13]。张莎等^[20]发现河北省 2001—2010 年植被 NPP 整体呈下降趋势,王雪等^[17]发现蔚县 2013—2015 年植被 NPP 整体也呈现下降趋势。而根据年际变化的稳定性分析,张家口市植被年均 NPP 整体相对稳定,大部分地区植被 NPP 的变化百分率大于 10%,说明张家口市整体上植被生长状况得到改善;植被 NPP 的变化百分率 $<-10\%$ 的植被主要分布在张家口市康保县、桥东区和桥西区,说明这些地区植被生长状况有所退化。此外,NPP 在 2001 年最低,在 2004 年最高,这也和前人的研究结果完全一致^[20],说明张家口市 NPP 在整个河北省内处于平均水平,且 2011—2014 年张家口市 NPP 没有发生突变。

为了研究张家口市 NPP 对气候因子的响应,根据河北

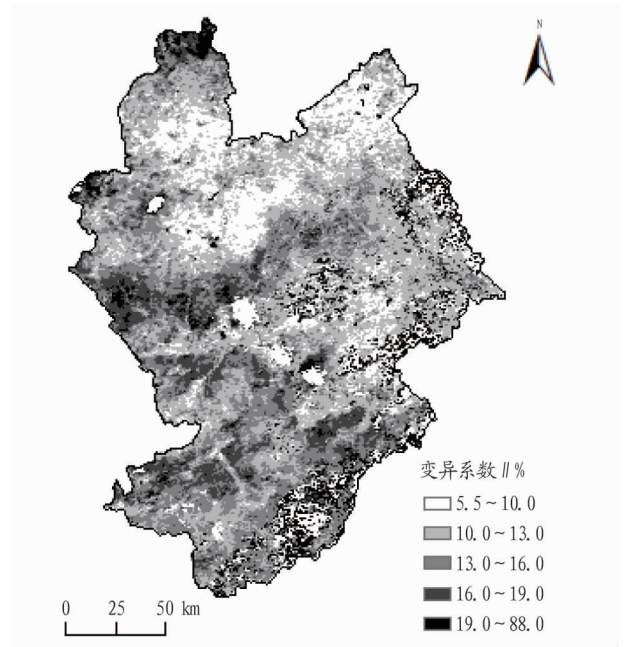


图 6 2000—2014 年张家口市年均 NPP 变化稳定程度

Fig. 6 Coefficient of variation of NPP in Zhangjiakou during 2000—2014

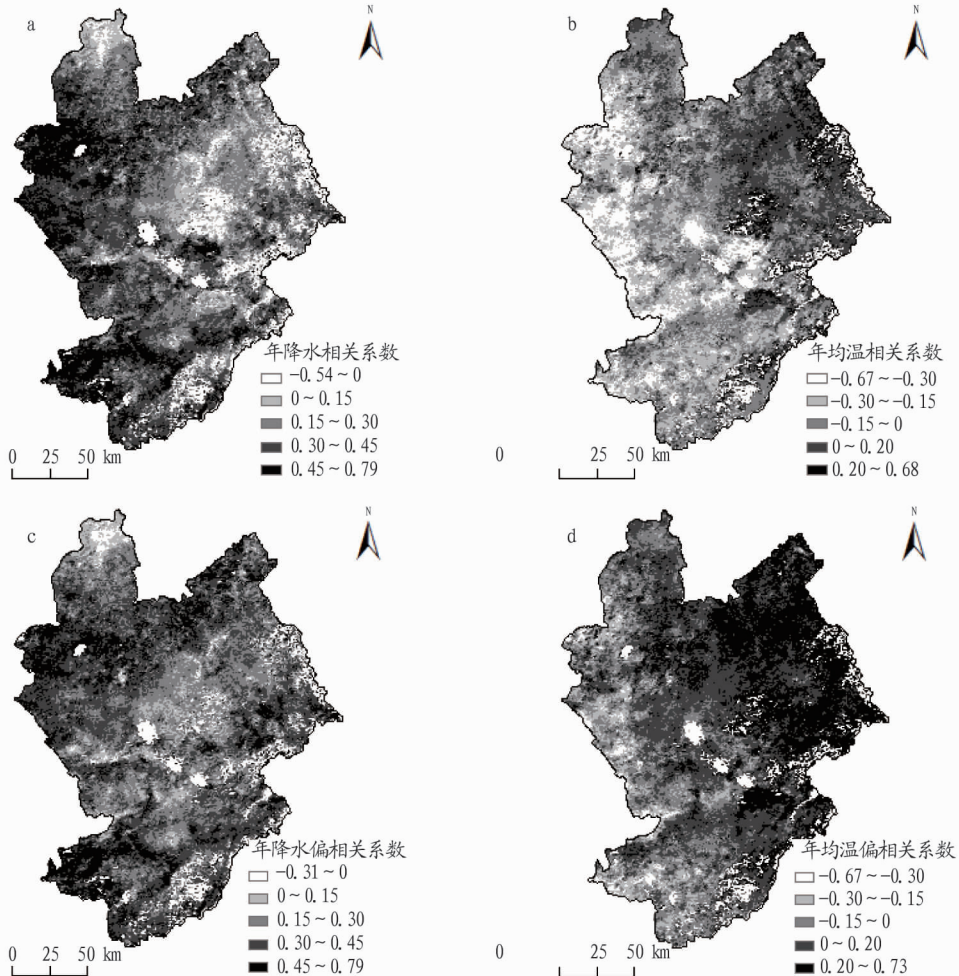


图 7 张家口市年 NPP 与年降水和年均温的相关系数及偏相关系数

Fig. 7 Correlation coefficient and partial correlation coefficient between annual NPP and annual precipitation and annual mean temperature in Zhangjiakou

省 21 个标准气象站点的逐年数据,分析 2000—2011 年河北省年降水和年均温的波动,发现气候呈现水热同增的趋势(图 8)。其中,年降水量呈现明显的增长趋势(图 8a),而年均温的增长速度较为缓慢(图 8b)。因此,2000—2011 年张家口市植被 NPP 的增长可能主要是由年降水的增加引起的,这与中国植被、中国草地、河北省和蔚县尺度上 NPP 的

部分研究结果一致^[13-15,17,20]。充足的降水提高了土壤中的水分含量,为植物在生长季节中所需的水分提供了保障,从而保证了生产力的增长趋势。同时,足够的温度给生长季节的植物提供了充足的热量,一定程度上提高光合作用速率,也有利于植被生产力的提高。

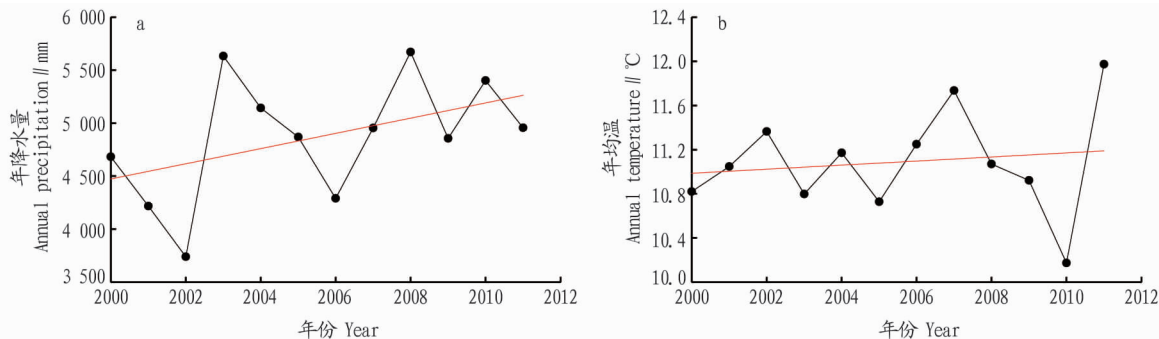


图 8 2000—2011 年河北省年降水量和年均温的变化

Fig. 8 Changes of annual precipitation and temperature in Hebei Province during 2000–2011

参考文献

- [1] FANG J Y, PIAO S L, TANG Z Y, et al. Interannual variability in net primary production and precipitation[J]. *Science*, 2001, 293(5536): 1723.
- [2] 孙艳玲, 延晓冬, 谢德体. 基于因子分析方法的 中国植被 NDVI 与气候关系研究[J]. *山地学报*, 2007, 25(1): 54–63.
- [3] PETTORELLI N, VIK J O, MYSTERUD A, et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change[J]. *Trends in ecology & evolution*, 2005, 20(9): 503–510.
- [4] 吕国旭, 陈艳梅, 邹长新, 等. 京津冀植被退化的空间格局及人为驱动因素分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(5): 417–425.
- [5] FIELD C B, RANDERSON J T, MALMSTRÖM C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing[J]. *Remote sensing of environment*, 1995, 51(1): 74–88.
- [6] CHURKINA G, RUNNING S W, SCHLOSS A L, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): The importance of water availability[J]. *Global change biology*, 1999, 5(S1): 46–55.
- [7] 荣检, 胡宝清, 闫妍. 广西西江流域植被净初级生产力时空分布特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(4): 1020–1028.
- [8] 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.
- [9] 吴正方. 东北地区净第一性生产力对气候变暖的响应研究[J]. *经济地理*, 1997, 17(4): 49–55.
- [10] 潘学虎, 冯朝阳, 刘乙淼. 呼伦贝尔森林草原交错区近 30 年 NPP 动态与气象因子的相关性研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(3): 103–107.
- [11] 潘学虎, 李真. 2001—2012 年西北干旱区植被净初级生产力时空变化[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3333–3340.
- [12] 陈艳梅, 高吉喜, 冯朝阳, 等. 1982—2010 年呼伦贝尔植被净初级生产力时空格局[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(6): 647–653.
- [13] 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.
- [14] 周伟, 牟凤云, 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.
- [15] 郑颖娟. 基于 CASA 模型的河北省净初级生产力遥感估算研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2013.
- [16] 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.
- [17] 王雪, 丁建伟, 谭琨, 等. 蔚县矿区植被净初级生产力时空变化特征及影响因素[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(2): 187–194.
- [18] 王新闯, 王世东, 张合兵. 基于 MOD17A3 的河南省 NPP 时空格局[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(10): 2797–2805.
- [19] TURNER D P, RIFTS W D, COHEN W B, et al. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes[J]. *Remote sensing of environment*, 2006, 102(3/4): 282–292.
- [20] 张莎, 袁金国, 张宇佳, 等. 河北省 2001—2010 年植被 NPP 时空变化及与气候因子相关性分析[J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2014, 34(5): 516–523.
- [21] YUAN J G, NIU Z, WANG C L. Vegetation NPP distribution based on MODIS data and CASA model: A case study of northern Hebei Province[J]. *Chinese geographical science*, 2006, 16(4): 334–341.
- [22] 张璐, 王静, 施润和. 2000—2010 年东北三省碳源汇时空动态遥感研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2015(4): 164–173.
- [23] 李登科, 范建忠, 王娟. 基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2776–2782.
- [24] 潘竟虎, 黄克军, 李真. 2001—2010 年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系[J]. *生态学报*, 2017, 37(6): 1888–1899.
- [25] 赵玉萍, 张宪洲, 王景升, 等. 1982 年至 2003 年藏北高原草地生态系统 NDVI 与气候因子的相关分析[J]. *资源科学*, 2009, 31(11): 1988–1998.
- [26] 田晶, 周彦丽. 1965—2014 年冀西北气候变化及其对气候生产力的影响[J]. *安徽农学通报*, 2015, 21(7): 144–147.