

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201801011

引文格式: 梁爽, 张吴平, 毕如田, 等. 山西省植被 NPP 时空变化特征及其驱动力分析 [J]. 广西植物, 2018, 38(8): 1005–1014
LIANG S, ZHNAG WP, BI RT, et al. Variation characteristics of vegetation net primary productivity and its driving factors in Shanxi Province [J]. *Guihaia*, 2018, 38(8): 1005–1014

山西省植被 NPP 时空变化特征及其驱动力分析

梁爽, 张吴平*, 毕如田, 高培霞, 王国芳

(山西农业大学, 山西 太谷 030800)

摘要: 为科学有效地管理和调控植被资源, 解决水土流失、植被减少等生态问题, 该研究依据山西省 2005—2015 年 MOD17A3H 数据, 利用 ARCGIS、ENVI 等软件, 运用统计学分析方法, 揭示了山西省植被 NPP 时空分布变化规律及对气候、人为等影响因素的响应特征。结果表明: 山西省植被 NPP 平均值为 $326.5 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中草地、耕地、灌丛和林地的 NPP 多年平均值依次为 300.3、353.6、366.5 和 $390.1 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 植被 NPP 总体波动增大、变化为显著、极显著、显著增大区域面积比例达 56.33%, 集中在山西省西部; 植被 NPP 极显著、显著减小区域面积集中在山西省东南角, 占比为 2.22%; 草地 NPP 变化速率最大, 耕地大于灌丛, 林地最小; 植被 NPP 平均值和降水平均值之间表现为呈显著正相关。基于栅格单元值计算, 全省 17.01% 的区域植被 NPP 与降水之间表现为显著或极显著正相关, 集中在山西省北部; 全省 3.66% 的区域植被 NPP 与气温之间表现为显著或极显著负相关, 集中在山西省中部。这表明 2005—2015 年, 山西省植被 NPP 总体呈好转趋势; 不同植被对人类活动及环境变化的响应有所差异, 草地、耕地生态结构稳定性较弱, NPP 变化明显, 灌丛和林地稳定性较强, NPP 数值稳定; 植被 NPP 与降水之间呈显著正相关, 与气温之间呈负相关, 气候因子整体上促进植被 NPP 增大, 人为因素整体上抑制植被 NPP 增大。

关键词: 山西省, 植被净初级生产力, 土地利用类型, MODIS, 驱动力

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2018)08-1005-10

Variation characteristics of vegetation net primary productivity and its driving factors in Shanxi Province

LIANG Shuang, ZHNAG Wuping*, BI Rutian, GAO Peixia, Wang Guofang

(Shanxi Agricultural University, Taigu 030800, Shanxi, China)

Abstract: In order to solve the ecological problems like soil erosion, vegetation reduction by scientifically and effectively management of vegetation resources. In this paper, the data of MOD17A3H in Shanxi Province were used to analyze the temporal and spatial distribution of vegetation net primary productivity (NPP) in Shanxi Province during 2005—2015 by using the software such as ARCGIS and ENVI. The climate, land use types and elevation data were also used to analyze

收稿日期: 2018-04-14

基金项目: 国家国土资源部公益性行业项目(201411007) [Supported by Public Welfare Industry Program of Ministry of Land and Resources (201411007)]。

作者简介: 梁爽(1993-), 男, 安徽寿县人, 硕士研究生, 主要从事土地信息技术与遥感研究, (E-mail) liangs@126.com。

*通信作者: 张吴平, 博士, 教授, 主要从事资源环境和土地信息技术研究, (E-mail) zwping@126.com。

the response characteristics of vegetation NPP to climate and other influencing factors by using statistical method. The results were as follows: The average vegetation NPP of Shanxi Province during 2005—2015 was $326.5 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and the average NPP of grassland, farmland, shrubs and forestland during 2005—2015 were 300.3, 353.6, 366.5 and $390.1 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; The overall fluctuation of NPP in vegetation in Shanxi Province increased significantly with a significant or extremely significant increase in the proportion of regional area reached 56.33%, mainly concentrated in the western part of Shanxi Province; The significant or extremely significant reduction of vegetation NPP area was mainly concentrated in the southeastern corner of Shanxi Province, accounting for 2.22% of the total area; The rate of change of NPP in grassland was the largest, the farmland was greater than the shrub, and the forest land was the smallest; There was a significant positive correlation between the average of vegetation NPP and the average of precipitation in Shanxi Province. Based on calculated pixel value, the area of vegetation NPP and precipitation had significant or extremely significant positive relation in the total study area, accounting for 17.01%, mainly concentrated in northern Shanxi Province; The area of vegetation NPP and temperature had significant and extremely significant negative correlation relation in the total study area, accounting for 3.66%, mainly concentrated in central Shanxi Province. The results indicated that the vegetation NPP of Shanxi Province during 2005—2015 was improving; The response of different vegetation to human activities and environmental factors was different, the stability of grassland and farmland was weak, and the NPP changes obviously, the stability of shrub and forestland was strong, and NPP was stable; There was a significant positive correlation between vegetation NPP and precipitation, and a negative correlation between vegetation NPP and temperature, as a whole, the climate factor promotes the rise of NPP, while the human factor is mainly manifested as the inhibitory effect on NPP changes.

Key words: Shanxi Province, vegetation net primary productivity (NPP), land use type, MODIS, driving factor

植被净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 是指单位面积的植被在单位时间内凭借自身光合作用产生的有机物扣去自养呼吸消耗后余下的部分 (Lieth & Whittaker, 1975), 体现了植被将无机碳固定、转化为有机碳的效率。NPP 是植被自身和其他生物在生态系统中生存、发育及繁衍的物质基础, 它是植被自身和外界环境因素间相互作用、相互影响所产生的结果, 是评价生态环境优劣的重要指标之一。因此, 分析各种影响因素与植被 NPP 之间的相关性, 进而改善生态、推动可持续发展的研究在生态问题日益严峻的今天显得尤为重要。自 Ebermayer 于 1876 年开始研究植被初级净生产力以来, 不同国家的专家学者通过大量的实验研究, 提出了各种计算和测量植被 NPP 的方法, 在模型模拟植被 NPP 方面取得了一定成果。自 20 世纪 80 年代起, 专家们为了弥补植被 NPP 经验模型的缺陷, 研究出了基于植被生物特征的植被 NPP 过程模型。随着 3S (地理信息科学、全球定位系统、遥感) 技术的高速发展, 植被 NPP 过程模型得到了充分的普及与应用 (孙力炜,

2013); 20 世纪 90 年代后期, 以孙睿和朱启疆 (2001)、朴世龙等 (2001)、陈利军等 (2002) 为代表的国内学者们在 Landsat、MODIS 等数据大规模进入国内的基础上大力促进了国内关于植被 NPP 的分析研究。

随着技术日趋成熟、数据日益完善, 植被 NPP 的研究也日渐成熟, 在改善生态环境、推动可持续发展方面发挥着重要作用。山西省地处中国北部, 属温带大陆性季风气候, 是典型的黄土高原, 境内有吕梁、太行两座山脉, 植被类型丰富。山西省矿产资源丰富, 近年随着经济发展, 人类活动加强, 资源开采过度使得土壤污染、植被减少、水土流失等生态问题日益严峻, 潜在的资源得不到科学合理地开发利用, 经济可持续发展受到严重影响, 植被 NPP 作为评价生态系统的重要指标, 而对于山西省植被 NPP 状况的研究相对匮乏。因此, 本研究利用山西省 2005—2015 年 MO17A3H 数据, 综合气温、降水等数据, 运用统计学分析方法, 揭示山西省植被 NPP 时空分布格局及其变化规律, 分析植被 NPP 在不同环境条件 (区域、植被类

型、高程)下对气候变化及人类活动的响应特征,为山西省植被保护和合理开发利用提供科学依据。

1 研究区概况

山西省位于中国北部,总面积 15.67 万 km²,是典型的黄土高原地形,山区面积比例达到 80% 以上,地势上东北高西南低,境内大部分地区高程超过 1 500 m。山西省属于温带大陆性季风气候,年平均气温最低为 3 ℃,最高为 14 ℃,昼夜温度差异明显,南北温度差异明显。全省冬季日平均气温均在 0 ℃ 以下,夏季全省气温较高,7 月份日平均气温介于 21~26 ℃ 之间。全省年总降水量为 400~650 mm,降雨量不平均,6 月份至 8 月份雨多且集中,降水量达到全年总降水量的 60%,全省地形地貌复杂多变,山区众多,对降雨的影响很大,不同地区降水差异性显著。

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

NPP 数据为美国 NASA EOS/MODIS 2005—2015 年的 MOD17A3H 数据,其利用 MODIS 卫星数据结合模型运算出 NPP 数据,精度高、易操作,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 1 a。

高程数据来源于中国科学院地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 30 m。

土地利用类型数据为 2010 年美国 MODIS 的 MCD12Q1 数据,空间分辨率达到 500 m。

气象数据来自中国气象科学数据网 (<http://cdc.cma.gov.cn>),采用反距离权重法 (IDW) 对 2005—2015 年山西省及其周边省(市)30 个气象站点逐年的温度、降水数据进行插值运算。

为避免因数据之间坐标、分辨率等属性不同而导致误差,利用 ARCGIS 软件将所有数据统一转换为 WGS84/UTM 坐标系、500 m 分辨率后,由 ARCGIS 和 ENVI 软件进行后续的研究分析。

2.2 研究方法

2.2.1 植被 NPP 变化趋势研究 采用线性回归方

法研究 2005—2015 年山西省每个栅格单元内植被 NPP 随时间变化趋势(穆少杰等,2013;朱锋等,2010;吴珊珊等,2016)。

$$Slope = \frac{N \times \sum_{i=1}^N x_i t_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N t_i}{N \times \sum_{i=1}^N t_i^2 - (\sum_{i=1}^N t_i)^2} \quad (1)$$

变化速率 *Slope* 为正值区域,植被 NPP 随时间变化呈增大趋势,变化速率 *Slope* 为负值区域,植被 NPP 随时间变化呈减小趋势(李晓荣等,2017)。对植被 NPP 变化趋势进行 *F* 检验以验证其显著性。

$$F = (N - 2) \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{x}_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (2)$$

将检验结果分为 5 种类型:极显著减小、显著减小、变化不显著、显著增大和极显著增大(李晓荣等,2017)。

2.2.2 植被 NPP 与气候因素之间的相关性研究

利用栅格单元值运算得到的偏相关性系数研究植被 NPP 与降水、气温之间的相关性(穆少杰等,2013)。偏相关性系数由简单相关性系数运算得到。简单以及偏相关性系数算法如式(3)和式(4)所示:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

$$r_{ab,c} = \frac{r_{ab} - r_{ac}r_{bc}}{\sqrt{(1 - r_{ac}^2) + (1 - r_{bc}^2)}} \quad (4)$$

对偏相关性系数计算结果进行 *t* 检验,检验公式如下:

$$t = \frac{\sqrt{N - 2} \cdot r}{\sqrt{1 - r^2}} \quad (5)$$

将检验结果分为极显著负相关、显著负相关、相关性不显著、显著正相关和极显著正相关 5 种类型(李晓荣等,2017)。

2.2.3 植被 NPP 分区统计研究 基于高程数据将研究区域划分成不同梯度区域,结合土地利用类型和植被 NPP 年平均值的数据,对该区域植被 NPP 分类研究,分析高程梯度上植被 NPP 分布变

化特征及人为、气候等因素与植被 NPP 间的相关性。

3 结果与分析

3.1 NPP 空间分布特征

利用山西省 MOD17A3H 数据,根据土地利用类型数据进行分类研究,发现山西省植被 NPP 2005—2015 年间平均值为 $326.5 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中 93.53% 的区域植被 NPP 值在 $200 \sim 500 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,草地 NPP 平均值为 $300.3 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,耕地 NPP 平均值为 $353.6 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,灌丛 NPP 平均值为 $366.5 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,林地 NPP 平均值为 $390.1 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

从图 1 可以看出,山西省植被 NPP 空间分布整体上呈现北低南高,西低东高的特征。结合自然条件、地形地貌及人为活动等因素分析可知,山西省水热等自然条件自北向南、自西向东逐渐变好,境内吕梁、太行两座山脉主要分布在东部和南部,山区植被覆盖度高,受人为因素影响较小,植被 NPP 数值高;山西省煤炭资源丰富,境内矿区众多,而西部和北部矿区多为露天矿区,其开采方式会对植被造成一定程度的破坏,植被覆盖度较低,所以植被 NPP 值较低。因此山西省植被 NPP 总体上呈现北低南高,西低东高的分布特征。

3.2 植被 NPP 年际变化分析

从图 3 可以看出,2005—2015 年,山西省植被 NPP 总体波动增大,不同类型植被 NPP 的年际变化趋势和山西省植被 NPP 总体变化趋势大体相同,表明是某种大范围影响因素影响了山西省植被 NPP 总体变化趋势。

从图 4 可以看出,2005—2015 年,山西省 86.07% 的区域植被 NPP 年际变化率介于 $0 \sim 15 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,87.73% 的区域植被 NPP 年际变化率为正值,表明山西植被 NPP 总体呈增大趋势。山西省中西部地区植被 NPP 增大较快,植被 NPP 减小区域则集中分布在东南部。从图 5 可以看出,植被 NPP 整体显著改变,植被 NPP 显著增大及极显著增大区域面积占总面积的 56.33%,主要集中在山西省西部;植被 NPP 显著减小以及极

显著减小区域主要集中在山西省东南角。草地 NPP 显著或者极显著增大区域面积占草地区域总面积比例最大,为 69.20%,远高于其他类型植被;林地 NPP 显著或者极显著减小区域面积占林地区域总面积比例最大,为 7.56%。总体上林地和灌丛生态系统结构稳定,对环境变化响应不显著,而以草本科植物为主构成的草地、耕地生态系统结构相对简单,受环境变化影响显著,当环境变好之后 NPP 会显著增大。

从图 4 和图 5 可以看出,植被 NPP 快速增大的区域,其植被 NPP 多表现为显著或极显著增大,表明研究期间该区域植被状况明显好转;植被 NPP 减小的区域,其植被 NPP 多表现为变化不显著,表明研究期间植被 NPP 减小区域的植被无明显恶化。植被 NPP 显著或极显著增大区域以草地与耕地居多,而显著或极显著减小区域则以林地居多,NPP 减小区域大部分分布在太行山内,该区域内植被 NPP 较低且植被 NPP 变化速率也较小,表明该区域长期受到负面因素影响。植被 NPP 显著减小区域面积小、分布零散,而气候因素影响广泛,表明气候因素不是造成此部分植被变差的主要原因,结合太行山近些年开发历史分析,推测人为因素是部分植被 NPP 显著减小的重要原因之一。

3.3 植被 NPP 和气候因素之间相关性分析

基于研究区域平均值进行计算可知,2005—2015 年山西省降水与植被 NPP 之间表现为显著正相关关系($P < 0.05$),相关性系数为 0.366;气温与植被 NPP 相关性不显著,相关系数为 -0.223。结合图 6 和图 7 可以看出,降水与植被 NPP 之间多为体现为正相关性,其中 17.01% 的区域表现为显著或者极显著正相关,集中在山西省北部;气温与植被 NPP 之间多体现为负相关性,其中 3.66% 的区域表现为显著或者极显著负相关,集中在山西省中部;基于不同类型植被 NPP 与气候因素之间偏相关性系数显著性检验结果图(图 8),结合植被生态特征分析可知;不同类型植被 NPP 与降水、气温之间偏相关性的显著性检验结果和山西省整体检验结果大致相同,其中草地生态系统结构简单多变,对降水、温度,尤其对降水的变化响

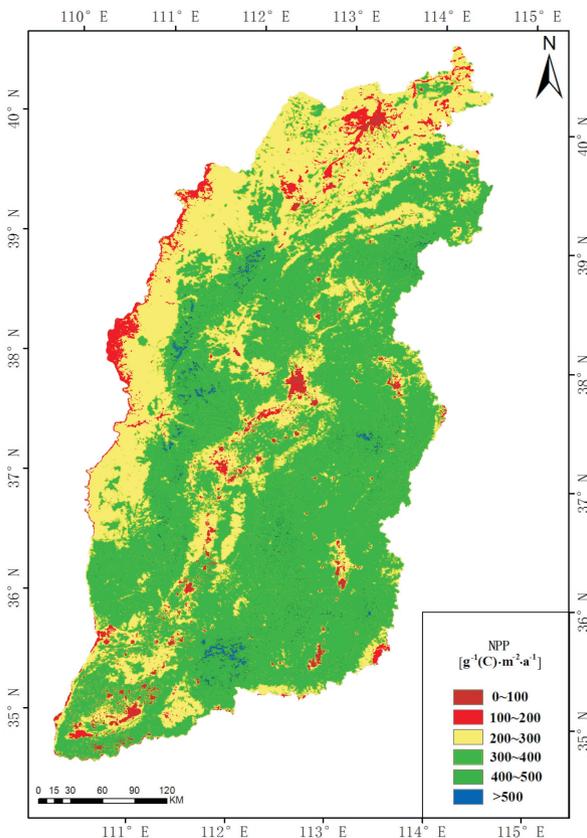


图 1 山西省 2005—2015 年植被 NPP 平均值空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of average annual vegetation NPP of Shanxi Province during 2005—2015

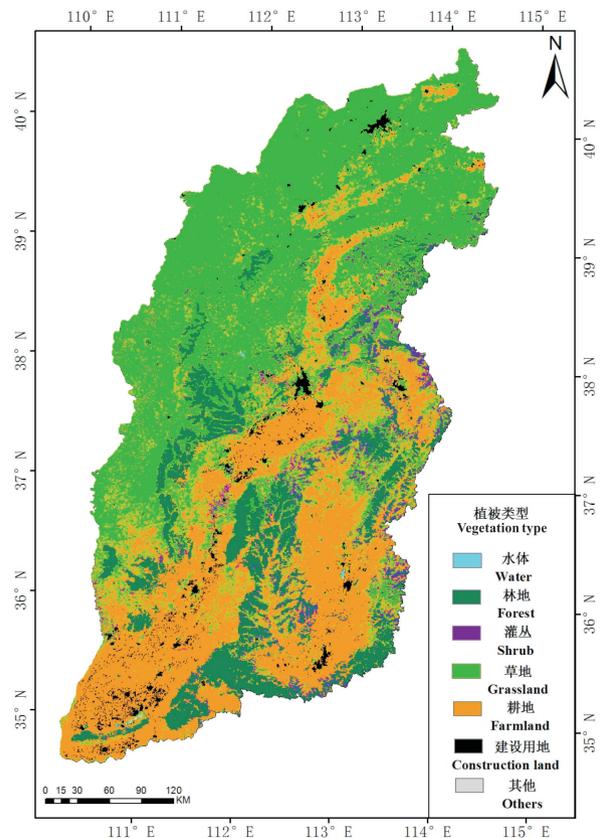


图 2 山西省 2010 年土地利用类型
Fig. 2 Vegetation cover type of Shanxi Province in 2010

应最为显著,林地生态系统结构稳定,对降水、温度的变化响应最不明显。结合植被 NPP 变化研究结果能够看出,部分植被 NPP 变化显著区域,其植被 NPP 与降水、气温之间多表现显著相关,表明气候因素是造成植被 NPP 显著变化的因素之一。

上述研究发现,降水多数促进植被 NPP 增大,而气温多数抑制植被 NPP 增大,这正是干旱胁迫现象的体现,表明干旱是抑制山西省植被 NPP 增加的重要因素之一(史海萍,2006)。但气温和降水仅在整体水平上显著影响植被 NPP 变化,通过逐象元研究分析发现,其对植被 NPP 显著影响的区域面积比例很低,表明气温和降水仅是影响山西省植被 NPP 变化的多种因素中的两种因素。

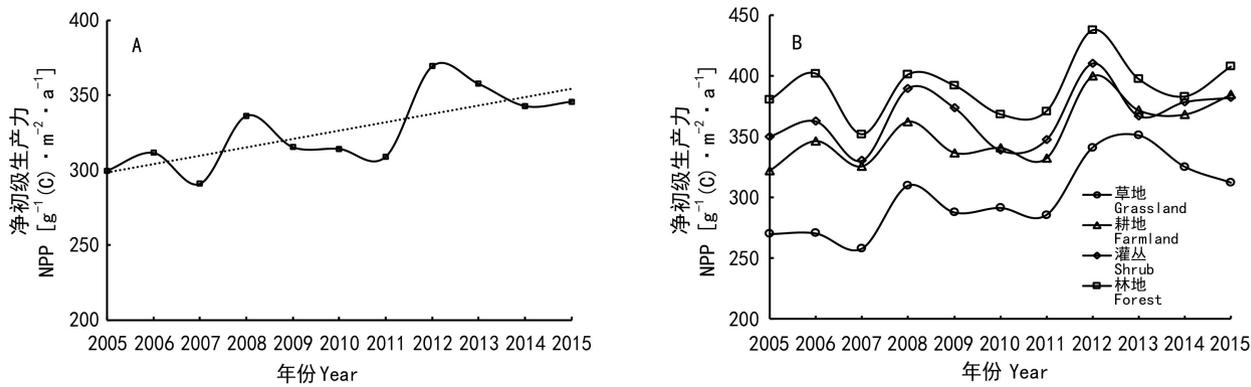
3.4 高程梯度上植被 NPP 变化特征

山西省境内山脉连绵起伏、沟壑纵横交错,全区高程梯度大,不同高程地区的环境及植被类型

差异显著。基于高程数据对山西省 2005—2015 年植被 NPP 数据进行分区统计。从图 9 可以看出,随着高程增加,年均植被 NPP 呈现波动增大,不同类型植被 NPP 随高程变化趋势和研究区域总体趋势大致相同,在高程介于 700~800 m 之间区域,研究区域整体植被 NPP 以及不同类型植被 NPP 都有一个明显减小的趋势,结土地利用类型数据分析,山西省中部城镇地区集中在高程 700~800 m 处,人类生产活动强烈,抑制了植被改善。

4 讨论与结论

本研究结果表明,山西省植被 NPP 的空间分布变化主要取决于空间位置、地形地貌、开发程度和人为管理等因素,这些因素通过控制水热、土壤等因子影响着植被 NPP 的空间分布以及变化特征,其中干旱是抑制植被 NPP 增加的重要因素之



注: A. 整体植被; B. 不同类型植被。
 Note: A. All vegetation; B. Different vegetation types.

图 3 山西省 2005—2015 年植被 NPP 年平均值变化趋势
 Fig. 3 Changes trend of average annual vegetation NPP of Shanxi Province during 2005—2015

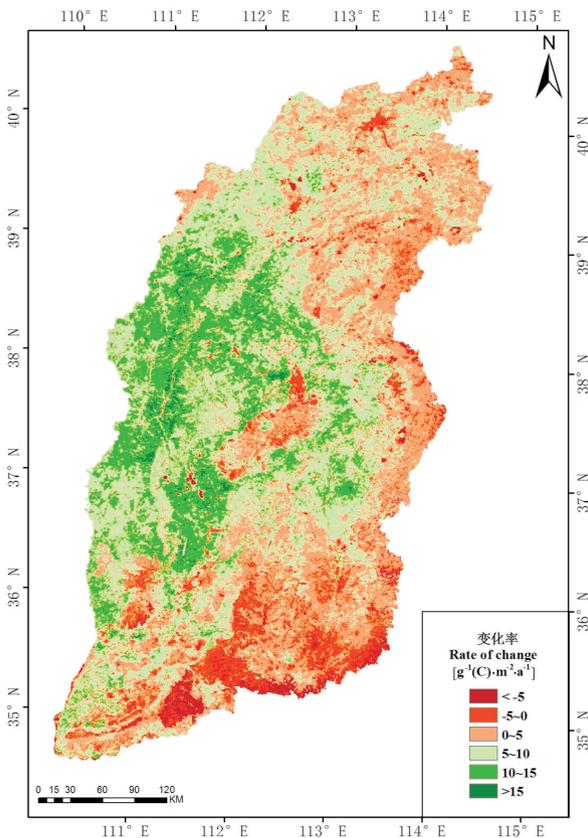


图 4 山西省 2005—2015 年植被 NPP 变化率空间分布
 Fig. 4 Spatial distribution of annual change rate of vegetation NPP of Shanxi Province during 2005—2015

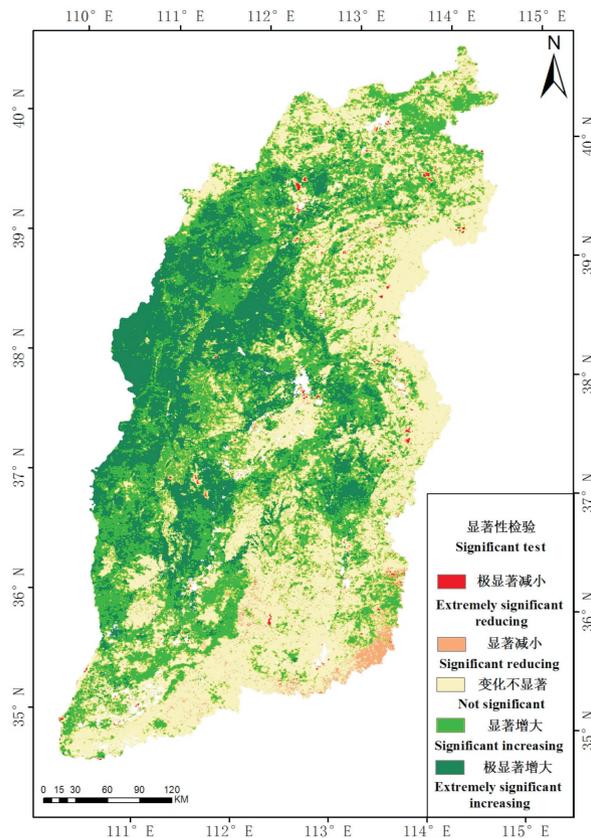
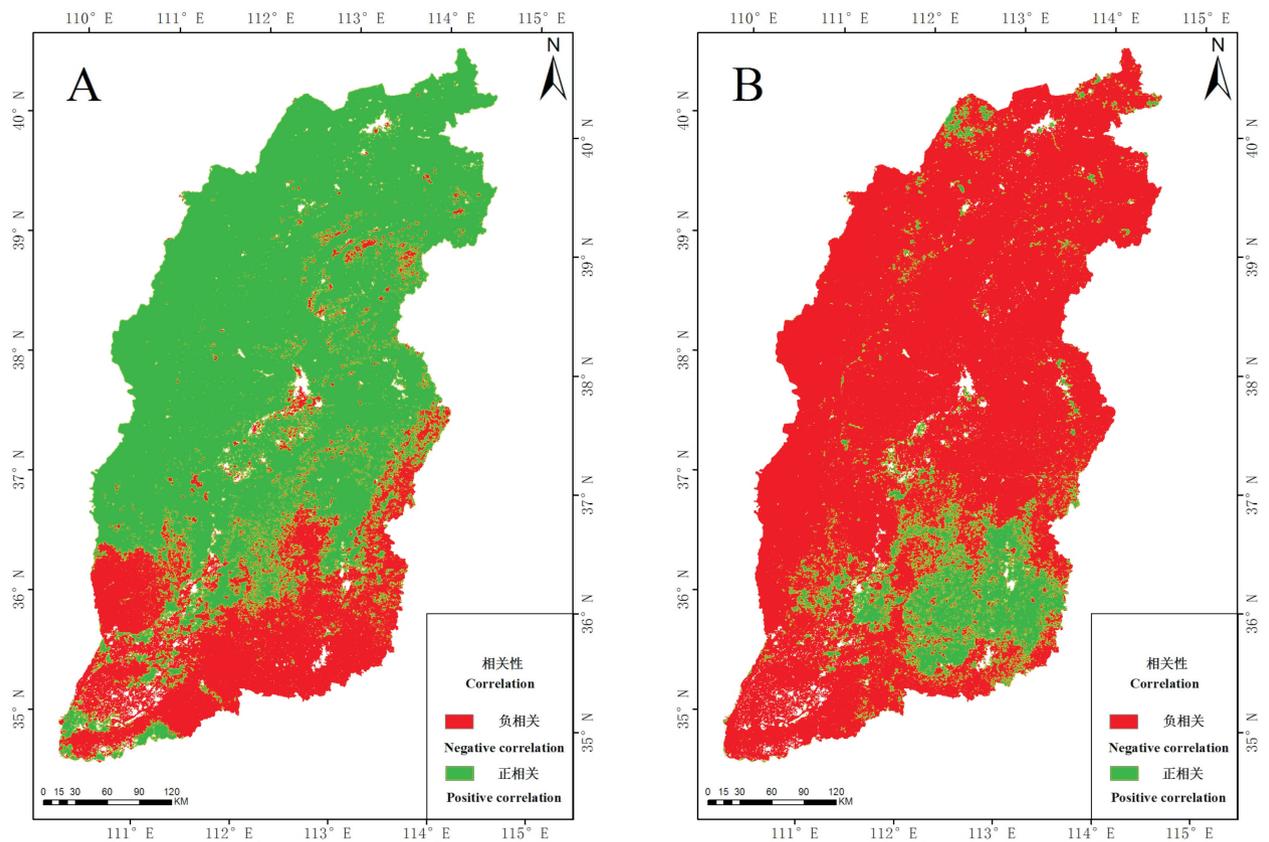


图 5 植被 NPP 变化显著性检验结果
 Fig. 5 Significant test result of vegetation NPP change

表 1 山西省 2005—2015 不同类型植被 NPP 变化显著性检验结果

Table 1 Significant test result of NPP changes of different vegetation types of Shanxi Province during 2005—2015

植被类型 Vegetation type	极显著减小 Extremely significant reducing (%)	显著减小 Significant reducing (%)	不显著 Not significant (%)	显著增大 Significant increasing (%)	极显著增大 Extremely significant increasing (%)
草地 Grassland	0.29	0.85	29.66	33.61	35.59
耕地 Farmland	0.19	1.09	45.02	35.13	18.57
灌丛 Shrub	1.22	5.10	60.96	17.92	14.80
林地 Forest	0.17	7.39	69.12	21.20	2.11
整体植被 All vegetation	0.27	1.95	41.44	31.97	24.36



注：A. 降水；B. 气温。下同。

Note: A. Precipitation; B. Temperature. The same below.

图 6 植被 NPP 与气象因素之间的简单相关系数分布

Fig. 6 Simple correlation coefficient between vegetation NPP and climate factors

一。受温带大陆季风性气候影响，山西省雨季和热季同期，但降水量远小于蒸发量，容易形成干旱胁迫现象，抑制植被 NPP 的增加；草地植被以及耕

地植被受人类影响较强，NPP 变化明显，林地多位于山区，受人类影响较小，NPP 数值较为稳定。

本研究中，山西省植被整体上呈好转趋势，与

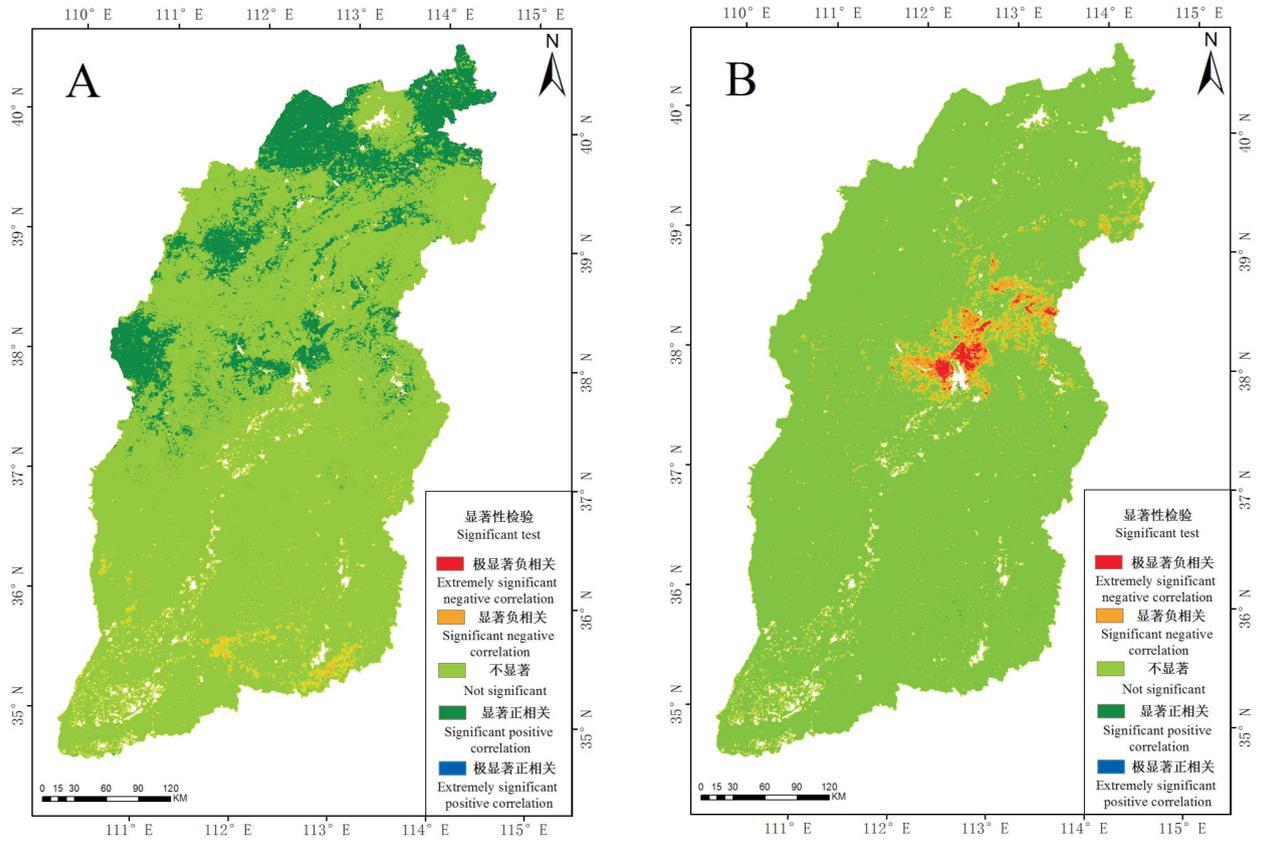


图 7 植被 NPP 与气候因素之间偏相关性系数显著性检验结果

Fig. 7 Significant test result of partial correlation coefficient between vegetation NPP and climate factors

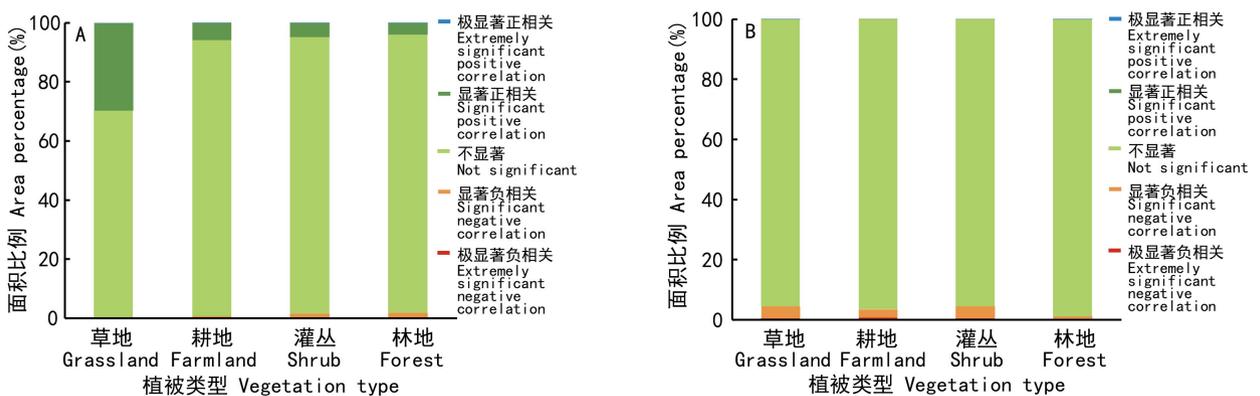
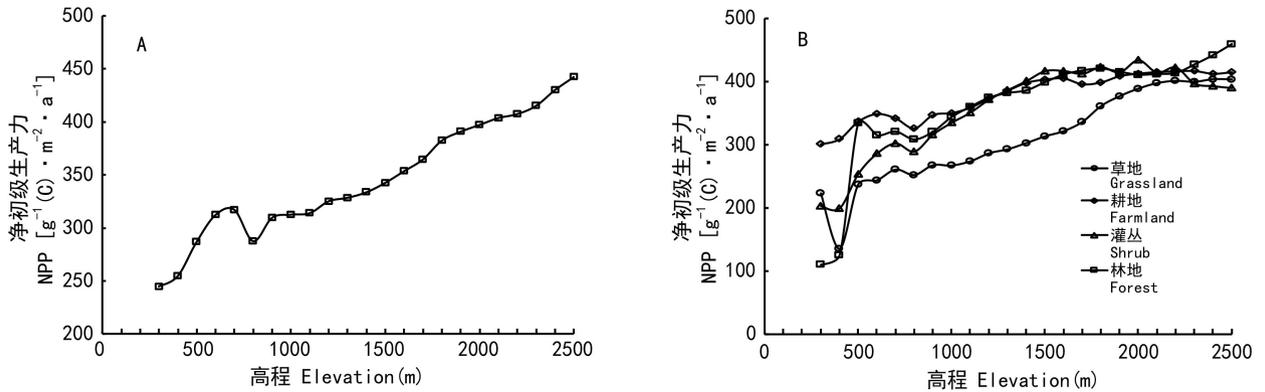


图 8 不同类型植被 NPP 与气候因素之间偏相关性系数显著性检验结果

Fig. 8 Significant test result of partial correlation coefficient between NPP of different vegetations and climate factors

国内许多专家学者的研究结果相同,党跃军等(2015)的研究发现山西省在 2003—2012 年 10 a 间植被呈好转趋势,草地、灌丛、林地均有改善。

武永利等(2008)对山西省植被指数时空变化特征的研究发现山西省近 25 a 间植被指数波动上升,植被总体呈好转趋势。杜加强等(2015)关于新疆



注: A. 整体植被; B. 不同类型植被。

Note: A. All vegetation; B. Different vegetation types.

图 9 植被 NPP 随高程变化

Fig. 9 Vegetation NPP changes with elevation

地区植被 NDVI 的研究得出植被从 1982—2012 年逐渐改善;李辉霞等(2011)对三江源区域 NDVI 的研究得出植被从 2000—2014 年逐渐变好;李晓荣等(2017)对太行山植被 NPP 的研究中,发现植被 NPP 在 2000—2014 年间呈好转趋势,但有些区域在研究期间植被并未得到改善。张莎(2015)基于长时间多系列遥感数据对河北植被 NPP 的研究得出河北省大部分区域植被 NPP 在 2000—2014 年间逐渐减小。为此阿多等(2017)提出,不同地区植被的变化规律之间存在明显的差异性,所以,不同区域的植被在面临相同的环境改变条件下,体现出的响应特征也会表现出较明显的差异。本研究目前仅对 MODIS NPP 数据进行了分析应用,缺少实地的考察认识,结合社会、人为、经济方面的研究还不够。对人类活动造成植被 NPP 变化的研究缺乏定量研究,实际的应用意义不大,这是在以后研究中需要改进完善的。MODIS 数据的精度还存在一定的问题,需要综合考虑多方面的影响因素,并且结合研究区域的具体情况,这样才能在本土化研究中取得更准确的研究结果。目前,不同植被 NPP 模型之间在精度和准度方面存在较大差异,其研究结果缺乏可比性;有学者认为综合多种算法的集合预估方法能够有效地提高模型模拟精度,其模拟结果明显好于单一算法,这将会是成为今后关于植被 NPP 研究的一个重要前进方向。

综上所述,得出结论如下:

(1)山西省植被 NPP 2005—2015 年间平均值为 $326.5 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中 93.53% 的区域植被 NPP 值在 $200 \sim 500 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,草地、耕地、灌丛和林地的 NPP 平均值分别为 300.3 、 353.6 、 366.5 、 $390.1 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。(2)2005—2015 年,山西省植被 NPP 整体波动增大、变化显著,显著增大及极显著增大区域面积比例达 56.33%,主要集中在山西省西部;植被 NPP 显著减小以及极显著减小区域主要分布于山西省东南角,占比仅为 2.22%。不同类型植被 NPP 的年际变化趋势与研究区域植被 NPP 总体变化趋势大致相同。(3)草地 NPP 变化速率最大,耕地大于灌丛,而林地 NPP 变化速率最小。林地生态结构稳定,NPP 变化稳定;草地生态系统结构简单,适应能力较强,对环境变化响应更迅速,NPP 变化明显。(4)山西省植被 NPP 与气温因素在整体水平上相关性不显著,在象元水平上表现为负相关性,其中 3.66% 的区域表现为显著或者极显著负相关,主要集中在山西省中部;山西省植被 NPP 与降水因素在整体水平上表现为显著正相关,在象元水平上表现为正相关性,其中 17.01% 的区域表现为显著或者极显著正相关,主要集中在山西省北部。(5)研究期间,气候因素整体上促进了山西省植被 NPP 上升,而人为因素主要抑制植被 NPP 上升。

参考文献:

- A D, ZHAO WJ, GONG ZN, et al, 2017. Temporal analysis of climate change and its relationship with vegetation cover on the North China plain from 1981 to 2013 [J]. *Acta Ecol Sin*, 37(2): 576-592. [阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 等, 2017. 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*, 37(2):576-592.]
- ANAYETI A, SHI QD, LIU M, et al, 2014. The vegetation cover changes of regress analysis on using time-serial images of remote sensing [J]. *J Xinjiang Univ (Nat Sci Ed)*, 34(3): 341-344. [阿斯姆古丽·阿纳耶提, 师庆东, 刘曼, 等, 2014. 长时间序列遥感数据回归分析支持下的植被变化分析 [J]. *新疆大学学报(自然科学版)*, 31(3):341-344.]
- CHEN LJ, LIU GH, LI HG, 2002. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation in China using remote sensing [J]. *J Remote Sens*, 6(2): 129-135. [陈利军, 刘高焕, 励惠国, 2002. 中国植被净第一性生产力遥感动态监测 [J]. *遥感学报*, 6(2):129-135.]
- DU JQ, AHATI J, ZHAO CX, et al, 2015. Dynamic changes in vegetation NDVI from 1982 to 2012 and its response to climate change and human activities in Xinjiang, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 26(12): 3567-3578. [杜加强, 贾尔恒·阿哈提, 赵晨曦, 等, 2015. 1982-2012 年新疆植被 NDVI 的动态变化及其对气候变化和人类活动的响应 [J]. *应用生态学报*, 26(12):3567-3578.]
- DANG YJ, WANG LX, YAN JX, 2015. Spatio-temporal dynamic of vegetation and its response to climatic factors in Shanxi Province from 2003 to 2012 [J]. *Res Soil Water Conserv*, 22(2): 235-240. [党跃军, 王礼霄, 严俊霞, 2015. 山西省 2003-2012 年植被时空变化格局及对气候因子的响应 [J]. *水土保持研究*, 22(2):235-240.]
- LIETH H, WHITTAKER RH, 1975. Primary Productivity of the Biosphere [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- LI HX, LIU GH, FU BJ, 2011. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region [J]. *Acta Ecol Sin*, 31(19): 5495-5504. [李辉霞, 刘国华, 傅伯杰, 2011. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究 [J]. *生态学报*, 31(19):5495-5504.]
- LI XR, GAO H, HAN LP, et al, 2017. Spatio-temporal variations NPP and the driving factors in Taihang Mountain Area [J]. *Chin J Ecol-Agric*, 25(4): 498-508. [李晓荣, 高会, 韩立朴, 等, 2017. 太行山植被 NPP 时空变化特征以及驱动力分析 [J]. *中国生态农业学报*, 25(4):498-508.]
- MU SJ, LI JL, ZHOU W, et al, 2013. Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010 [J]. *Acta Ecol Sin*, 33(12):3752-3764. [穆少杰, 李建龙, 周伟, 等, 2013. 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*, 33(12):3752-3764.]
- PIAO SL, FANG JY, GUO QY, 2001. Application of CASA model to the estimation on of Chinese terrestrial net primary productivity [J]. *Chin J Plant Ecol*, 25(5): 603-608. [朴世龙, 方精云, 郭庆华, 2001. 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*, 25(5):603-608.]
- SHI HP, 2006. Research of the climate of Shanxi Province and the impact on the vegetation ecosystems [D]. Lanzhou: Lanzhou University: 34-56. [史海萍, 2006. 山西气候变化及植被生态系统的响应研究 [D]. 兰州: 兰州大学:34-56.]
- SUN LW, 2013. Temporal and spatial variation of vegetable net primary productivity and influence of climate change and human activity in Qilian mountains [D]. Lanzhou: Northwest Normal University. [孙力炜, 2013. 祁连山区植被净第一性生产力的时空分布特征及气候变化和人类活动的影响 [D]. 兰州: 西北师范大学.]
- SUN R, ZHU QJ, 2001. Effect of climate of terrestrial net primary productivity in China [J]. *J Remote Sens*, 5(1): 58-61. [孙睿, 朱启疆, 2001. 气候变化对中国陆地植被净第一性生产力影响的初步研究 [J]. *遥感学报*, 5(1):58-61.]
- WU SS, YAO ZJ, JIANG LG, et al, 2016. The spatial-temporal variations and hydrological effects of vegetation NPP based on MODIS in the source of the Yangtze River [J]. *J Nat Resour*, 31(1): 39-51. [吴珊珊, 姚治君, 姜丽光, 等, 2016. 基于 MODIS 的长江源植被 NPP 时空变化特征及其水文效应 [J]. *自然资源学报*, 31(1):39-51.]
- WU YL, LUAN Q, ZHAO YQ, et al, 2008. Analyses on spatial-temporal change characteristics of NDVI during the past 25 years in Shanxi [J]. *Ecol Environ*, 17(6): 2330-2335. [武永利, 栾青, 赵永强, 等, 2008. 近 25 年山西植被指数时空变化特征分析 [J]. *生态环境*, 17(6):2330-2335.]
- YUAN W, CAI WW, LIU D, et al, 2014. Satellite-based vegetation production models of terrestrial ecosystem: An overview [J]. *Advan Earth Sci*, 29(5): 541-550. [袁文平, 蔡文文, 刘丹, 等, 2014. 陆地生态系统植被生产力遥感模型研究进展 [J]. *地球科学进展*, 29(5):541-550.]
- ZHANG S, 2015. Research on spatio-temporal distribution of vegetation net primary productivity in Hebei Province based on longtime-series multi-source remote sensing data [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University. [张莎, 2015. 基于长时间序列多源遥感数据的河北省植被 NPP 时空分布研究 [D]. 石家庄:河北师范大学.]
- ZHU F, LIU ZM, WANG ZM, et al, 2010. Temporal-spatial characteristic and factors influencing crop NPP across north-eastern China [J]. *Resour Sci*, 32(11): 2079-2084. [朱锋, 刘志明, 王宗明, 等, 2010. 东北地区农田净初级生产力时空特征及其影响因素分析 [J]. *资源科学*, 32(11):2079-2084.]
- ZHU WQ, PAN YZ, ZHANG JS, 2007. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. *Chin J Plant Ecol*, 31(3): 413-424. [朱文泉, 潘耀忠, 张锦水, 2007. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算 [J]. *植物生态学报*, 31(3):413-424.]