

DOI: 10.5846/stxb201903040403

刘旻霞, 焦骄, 潘竟虎, 宋佳颖, 车应弟, 李俐蓉. 青海省植被净初级生产力 (NPP) 时空格局变化及其驱动因素. 生态学报, 2020, 40(15): 5306-5317.

Liu M X, Jiao J, Pan J H, Song J Y, Che Y D, Li L R. Spatial and temporal patterns of planting NPP and its driving factors in Qinghai Province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5306-5317.

青海省植被净初级生产力 (NPP) 时空格局变化及其驱动因素

刘旻霞*, 焦 骄, 潘竟虎, 宋佳颖, 车应弟, 李俐蓉

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要: 植被净初级生产力 (NPP) 作为陆地生态过程的关键参数, 不仅用以估算地球支持能力和评价陆地生态系统的可持续发展, 也是全球碳循环的重要组成部分和关键环节。基于 2000—2014 年 MOD17A3 年均 NPP 数据和气象站点气温、降水资料, 采用简单差值、趋势分析、相关性分析和 Hurst 指数等方法, 分析了青海省 NPP 的时空变化特征及其与气候因子的关系。结果表明: ①青海省植被年均 NPP 在 2000—2014 年间整体分布呈现由南到北、由东到西递减的趋势, 各生态区的空间存在显著差异, 表现为 II 区 > I 区 > III 区 > IV 区 > V 区。②2000—2014 年, 青海省 NPP 变化趋势由北到南、由西到东呈现逐渐增加趋势, 平均趋势系数为 0.61, NPP 值增加的区域占总面积的 15%, 其中显著增加区域为 2.8%, 轻度增加区域为 12.2%。③青海省 NPP 值的 Hurst 的取值范围为 0—0.39, 均值为 0.12, 除了河流湖泊, 建筑用地和未利用土地, 青海省 NPP 变化特征为反持续性特征。④气候因子 (年平均降水量和年均气温) 对年均 NPP 的分布有影响, 海拔的高低造成气温、降水和土壤的差异, 间接影响植被 NPP, 15 年土地利用/覆被变化 (LUCC) 表现为草地面积减少最多, 这是导致 NPP 减少的主要原因。

关键词: 净初级生产力 (NPP); 时空变化; MOD17A3; 青海省

Spatial and temporal patterns of planting NPP and its driving factors in Qinghai Province

LIU Minxia*, JIAO Jiao, PAN Jinghu, SONG Jiaying, CHE Yingdi, LI Lirong

College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: As a key parameter of terrestrial ecological process, NPP can not only estimate the earth's supporting capacity and evaluate the sustainable development of terrestrial ecosystem, but also an important part and key link of global carbon cycle. Based on the MOD17A3 annual net primary productivity data and the meteorological site temperature and precipitation data from 2000 to 2014, the temporal and spatial characteristics of NPP in Qinghai Province and its correlation with climatic factors were analyzed by means of simple difference, trend analysis correlation analysis, and Hurst index. The results showed that the average annual NPP of vegetation in Qinghai Province gradually decreased from south to north and from east to west over the period 2000 to 2014, and that there were significant differences in the spatial distribution of each ecological region, as follows: area II > area I > area III > area IV > area V. From 2000—2014, the trends of NPP in Qinghai Province changed from north to south and from west to east, and the average trend coefficient was 15% of the total area, with a notable increase of 2.8% and a slight increase of 12.2% in the area of 0.61, NPP. The range of the Hurst index of NPP values in Qinghai Province was 0—0.39 and the mean value was 0.12; in addition to rivers and lakes, building land,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31760135, 31360114)

收稿日期: 2019-03-04; 修订日期: 2020-06-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaminl@163.com

and unused soil, the characteristics of NPP change in Qinghai Province were the characteristics of anti-persistence. Climatic factors (annual average precipitation and annual average temperature) had an impact on the distribution of the annual average NPP. The elevation results in differences in temperature, precipitation and soil, and indirectly affects vegetation NPP. Land use and cover change (LUCC) in 15 years showed that grassland area decreased the most, which was the main reason for the decrease in NPP.

Key Words: net primary productivity (NPP); temporal and spatial variation; MOD17A3; Qinghai Province

植被净初级生产力(Net Primary Production, NPP)是指植被地上部分在单位时间,单位面积上所积累的有机物的数量。植被净初级生产力(NPP)作为陆地生态过程的关键参数,不仅用以估算地球支持能力和评价陆地生态系统的可持续发展,也是全球碳循环的重要组成部分和关键环节。掌握陆地植被 NPP 的变化趋势,对于理解全球气候变化对陆地生态系统植被变化过程的作用机制具有重要的理论和实际意义。MOD17A3 是基于 MODIS(TERRA 卫星)遥感参数,通过 BIOME-BGC 计算出全球陆地植被 NPP 年际变化的资料,目前已在全球不同区域对植被生长状况、生物量的估算,环境监测和全球变化等研究中得到验证和广泛应用。

实地测量是 NPP 最早的测定方法,主要方法包括收割法、生物量调查法、光合测定法、值测定法、放射测定法、叶绿素测定法和原料消耗测定法等^[1-4],但是受很多因素的限制,不利于开展,后来,学者又提出了气候统计模型估测、生理生态过程模型、光能利用率模型、多模型交互应用等方法^[5-9],早在 19 世纪 80 年代, Ebermayer 用基本的实地测量方法对巴伐利亚森林进行了 NPP 的测定;1932 年丹麦科学家 Boysen-Jensen P 出版了《植物的物质生产》一书,第一次明确的提出了总生产量(Gross production)和净生产量(Net production)的概念和它们的计算公式^[10];之后又以英国 Watson 为代表提出了著名的 Watson 法则,日本生态学家门司和佐伯提出了群落光合作用理论^[11]。到 21 世纪之后,我国学者用光能利用率模型(CASA)来研究陆地生态系统碳循环和 NPP。潘竟虎和李真^[12]利用改进的 CASA 模型估算 2001—2012 年西北干旱区陆地生态系统的净第一性生产力(NPP),结果 NPP 表现出很强的季节性变化规律^[13];高原利用 MOD17A3 数据研究新疆 2000—2010 年 NPP 时空变化特征,研究显示不同生态功能区和市、县行政区 NPP 存在区域差异^[14];江源通分析了 2000—2010 年湘江流域植被 NPP 的空间格局变化特征,得到了气候变化和土地利用与湘江流域植被 NPP 的关系。

对于 NPP 变化驱动因子的研究,之前大多局限于气候因子的研究,特别针对海拔和人为因素没有定量研究 NPP 的变化。本文以此为出发点,用气候因子结合海拔和土地利用分析了 NPP 的变化关系,研究 2000—2014 年青海省 NPP 时空分布变化及其与驱动因子的关系,同时,青海省是三江源的发源地,也是我国重要的生态屏障区^[15-16],近 15 年来植被 NPP 发生很大变化,对该地区 NPP 时空变化特征进行定量分析,以便为青海省资源环境监测提供重要依据,以期为区域生态环境和植被碳源/汇评价、经济社会的可持续发展规划提供科学依据和参考背景。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

青海省地处青藏高原东北部,介于 89°35′—103°04′E,31°40′—39°19′N 之间(图 1)。海拔在 3000—5000 m 之间,气候区域分布差异大,冬季寒冷,夏半年凉爽,雨热同期。草原分为 9 个草地类 7 个草地亚类 28 个草地组 173 个草地型,是青海天然草原的主体。

1.2 数据来源

植被 NPP 数据来源于美国 NASA EOS/MODIS 的 2000—2014 年的 MOD17A3 数据(<http://reverb.echo>。

nasa.gov),空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 1 a;气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>);土地利用数据来源于中国科学院寒旱区科学数据中心;DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>);青海省主要农作物的产量和播种面积数据来源于青海省统计年鉴;中国土地利用数据来源于中国西部环境与生态科学数据中(<http://westdc.westgis.ac.cn>)的 WESTDC,根据中科院土地利用/覆盖分类体系(LUCC 分类体系)将地表覆盖类型主要分为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地 6 种类型(表 1)。

1.3 数据处理

本文选用 h25v05、h26v05 这 2 幅数据。首先利用 MRT 对 MOD17A3 数据进行拼接和投影转换,然后利用 ENVI 4.3 以青海省行政区划图为基础进行裁剪,提取青海省的 NPP 数据。利用 ArcGIS 10.0 采用掩膜法扣除 NPP 数据中的水体及建设用地,并得到不同土地利用类型的 NPP 值。气象数据为与遥感数据进行匹配,在 ArcGIS 10.0 中,采用三角网插值方法将站点气候数据插值成空间分辨率为 1000 m×1000 m 地理投影的栅格数据。

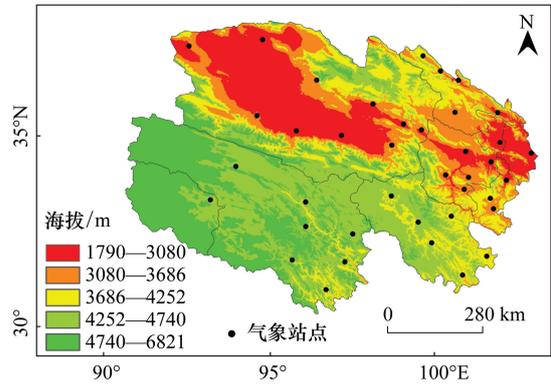


图 1 研究区概况及气象站点的空间分布

Fig.1 Study area and the spatial distribution of meteorological stations

表 1 土地利用分类及编号

Table 1 Land use classification and coding

一级分类及编号 First class classification and number	二级分类及编号 Secondary classification and number
1 耕地 Plough	11 水田、12 旱地
2 林地 Forestry	21 有林地、22 灌林地、23 疏林地、24 其他林地
3 草地 Meadow	31 高覆盖草地、32 中覆盖草地、33 低覆盖草地
4 水体 Wave	41 河渠、42 湖泊、43 水库坑塘、44 永久性冰川雪地、45 滩涂、46 滩地
5 建设用地 Construction	51 城镇用地、52 农村居民点、53 其他建设用地
6 未利用地 Untreated	61 沙地、62 戈壁、63 盐碱地、64 沼泽地、65 裸土地、66 裸岩石质山地、67 其他未利用地(包括高寒荒漠、苔原等)

1.4 NPP 数据验证

由于 NPP 的实测数据难以测得,本文利用作物产量估算 NPP 值和其他学者结合 NPP 观测数据估算的 NPP 值来进行验证。

1.4.1 根据统计数据中作物产量估算 NPP 的方法

农业统计中的产量、面积等资料估算 NPP 是根据不同作物的收获部分的含水量和收获指数(经济产量与作物地上部分干重的比值)将农业统计数据的产量转换成植被碳储量。从主要作物县级统计收获数据到县级平均 NPP 的转换方法可以用下面公式表达^[17]:

$$NPP = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i \times (1 - MC_i) \times 0.45 \frac{gC}{g}}{HI_i \times 0.9} / \sum_{i=1}^n A_i$$

式中, Y_i 是统计数据中作物 i 的产量, MC_i 是作物收获部分的含水量, HI_i 是作物 i 的收获指数, A_i 是作物收获面积。式中的作物产量和收获面积分别来自于中国自然资源网提供的中国农业统计数据中的 8 大类主要农作物的产量和播种面积,作物收获部分的含水量和收获指数^[18](表 2)。

图 2 表明,作物产量估算的 NPP 值与 MOD17A3 值呈显著的正相关关系($P < 0.01$),且相关系数达到 0.77,均值的标准误差是 3.95,说明 MOD17A3 来估算青海省的 NPP 值是可靠的。

1.4.2 本文 NPP 值与其他学者模型对比

由表 3 可以看出,不同的植被类型中本文年平均 NPP 与其他模型 NPP 的值趋势大致相同,整体比较接近,变化在一定的范围之内,对比估算精度在 79%左右,所以 MOD17A3 值具有一定的可靠性。

表 2 主要农作物的收获指数及含水量

Table 2 Harvest index and moisture content of major crops

作物 Crop	作物收获部分 的含水量/% MC(Moisture content)	收获指数 HI(Harvest index)	作物 Crop	作物收获部分 的含水量/% MC(Moisture content)	收获指数 HI(Harvest index)
稻谷 Paddy	14	0.38—0.51	薯类 Tuber	80	0.5
小麦 Wheat	12.5	0.28—0.46	棉花 Cotton	8.3	0.3—0.4
玉米 Corn	13—14	0.45—0.53	油菜 Rape	9—18	0.21—0.3
豆类 Pulse	12—13	0.2—0.3	糖料(甜菜) Sugar	85	0.4

表 3 不同植被类型 NPP 值与其他模型对比/($gC\ m^{-2}\ a^{-1}$)

Table 3 This paper compares the NPP values of different vegetation types with other model

土地利用类型 Land use type	数据范围 Data range	Miami 模型 ^[19-20] Miami model	CASA 模型 ^[21-23] CASA model	Thornthwaite 模型 ^[24] Thornthwaite model	CEVSA 模型 ^[25] CEVSA model
耕地 Plough	239—760	558.7	524.8	216	648.8
林地 Forestry	114—1913	3737.5	3612.2	1898	2936.1
草地 Meadow	364—3187	2684.3	2552.8	—	414.6
水体 Wave	256—943	1171.6	1091.4	—	—
建设用地 Construction	56—972	628.5	585.8	—	—
未利用地 Untreated	82—725.6	951.6	912.8	14	—

2 研究方法

2.1 简单差值法

简单差值法是对相同地区不同时相的图像进行相减运算,利用图像之间的差值来衡量 NPP 年际间变化的趋势以及大,其公式为^[6]:

$$D_{ij} = NPP_{ij}^{t_1} - NPP_{ij}^{t_2}$$

式中, D_{ij} 为第 i 行 j 列像素的差值; $NPP_{ij}^{t_1}$ 为时相 t_1 第 i 行 j 列像素的 NPP 值; t_1 、 t_2 为时相; i 、 j 为第 i 行 j 列像素的位置。

2.2 趋势分析法

一元线性回归分析法是分析了 15 年间 NPP 值的趋势倾向率,综合表征一定时间序列的区域格局演变规律,其公式为^[26]:

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

式中,Slope 是线性拟合方程的斜率; NPP_i 是第 i 年通过最大值合成法得到的 NPP 值, n 为研究时段的长度,

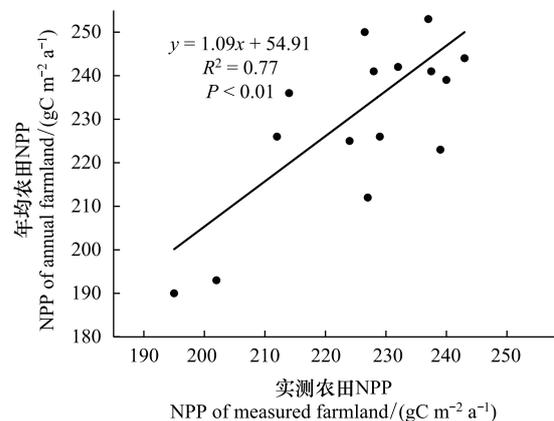


图 2 NPP 实测值与年均 NPP 结果比较

Fig.2 Comparison between measured and estimated NPP

Slope 大于 0, 表示 15 年间 NPP 值增加, 反之减少。

2.3 Hurst 指数

Hurst 指数的估算方法很多, 本文采用 R/S 分析法来分析 NPP 的持续性特征, 其公式为^[27-28]:

NPP 的时间序列 $NPP_i, i=1, 2, 3, 4, \dots, n$, 对于任意正整数 m , 定义该时间序列的均值序列:

$$\overline{NPP(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m NPP_i \quad (m=1, 2, 3, 4, \dots, n)$$

$$\text{累计离差: } X(t) = \sum_{i=1}^m (NPP_i - \overline{NPP(m)}) \quad (1 < t < m)$$

$$\text{极差: } R(m) = \max_{1 < m < n} X(t) - \min_{1 < m < n} X(t) \quad (m=1, 2, 3, 4, \dots, n)$$

$$\text{标准差: } S(m) = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (NPP_i - \overline{NPP(m)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (m=1, 2, 3, 4, \dots, n)$$

比值 $R(m)/S(m)$ 即 $R/S, R/S \propto m^H$, 则 H 就是 Hurst 指数, H 值可以根据 m 和对应计算得 R/S 值, 在双对数坐标系 ($\ln m, \ln R/S$) 中用最小二乘法拟合得到, 如果 $0.5 < H < 1$, 表明是 NPP_{*i*} 是一个持续性序列, 如果 $H = 0.5$, 则说明 NPP_{*i*} 为随机序列, 如果 $0 < H < 0.5$, 则表明 NPP_{*i*} 具有反持续性。

2.4 相关分析法

本文采用 Pearson 相关系数分析法, 对每一个像元相应的年均植被 NPP 与降雨因子和温度因子进行相关性分析, 以此分析植被 NPP 与气候因子之间的响应关系, 其计算公式为^[29-30]:

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

式中, R 为 x, y 两个变量的相关系数, n 为研究时间的年数, x_i 为第 i 年的植被 NPP, y_i 为第 i 年的年均气候因子 (降水、温度) 值。

3 结果与分析

3.1 青海省植被 NPP 的空间分布特征

3.1.1 2000—2014 年青海省 NPP 空间变化特征

青海省年均 NPP 值的分布与区域海拔的高低分布大体一致, 受到地区的差异, 呈现由南到北、由东到西递减的趋势, 其中, 柴达木盆地和唐古拉山环绕的海西州, 受地形的影响, 东部年均 NPP 值高于西部, 且为 $26.14 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 海北州以高山草甸和山地草甸为主, 年均 NPP 值为 $212.04 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 西宁市、海东市和海南州居于青海省东部, 气温高, 降水也相对较多, 年均 NPP 值较高, 分别为 $285.67 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $277.48 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $299.95 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 海南州四面环山, 盆地居中, 年均 NPP 值达到 $155.86 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 果洛州海拔西北高, 东南低, 年均 NPP 值随着海拔的降低在变大, 且为 $160.80 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 格尔木市和玉树州处于西北部, 境内雪峰连绵, 沼泽众多, 年均 NPP 值较低, 分别为 $17.74 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $55.49 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (图 3)。

3.1.2 不同生态功能区 2000—2014 年青海省 NPP 空间变化特征

图 4 表明, 各生态区的空间差异显著, 表现为 II 区 > I 区 > III 区 > IV 区 > V 区。其中, 青海东部农牧生态区 (II 区) 植被 NPP 最大, 为 $187.45 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 其次为祁连山针叶林-高寒草甸生态区 (I 区), 为 $165.94 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 柴达木盆地荒漠—盐壳生态区 (IV 区) 和北羌塘高原半荒漠—荒漠生态区 (V 区) 植被 NPP 最小, 分别 $17.10 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $7.96 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。因为 II 区有青海省最优质的天然草原和一部分农田, 植被的覆盖率高, NPP 较大, 柴达木盆地荒漠—盐壳生态区和北羌塘高原半荒漠—荒漠生态区都是以荒漠草甸, 冰雪为主, 限制了植物的生长, 导致 NPP 较低。

3.1.3 不同行政区 2000—2014 年青海省 NPP 空间变化特征

黄南藏族自治州的年均 NPP 最高,为 $300.27 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中在 2005 年、2006 年、2007 年、2008 年、2009 年、2010 年 2012 年和 2013 年年均 NPP 都大于 $300 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,这是因为该区域是在黄河、隆务河流域等高山峡谷地带种植很多云杉,降水较多和植被生长较好的区域,灌溉农业和天然草场较多,植被覆盖率高,导致 NPP 较高;西宁市 NPP 仅次于黄南藏族自治州,为 $285.91 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,位于湟水中游河谷盆地,草原面积为 3644.94 万公顷,占全省面积的 53.6% ,气候宜人,适宜植物的生长;海东市居第三,年均 NPP 为 $277.56 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,气候属于半干旱大陆性气候,水能资源丰富,人口相对集中,经济较为发达,是青海重要的农牧业经济区较发达地区之一;海北藏族自治州居第四,年均 NPP 为 $212.29 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,雨热同季,无绝对无霜期,植被以高

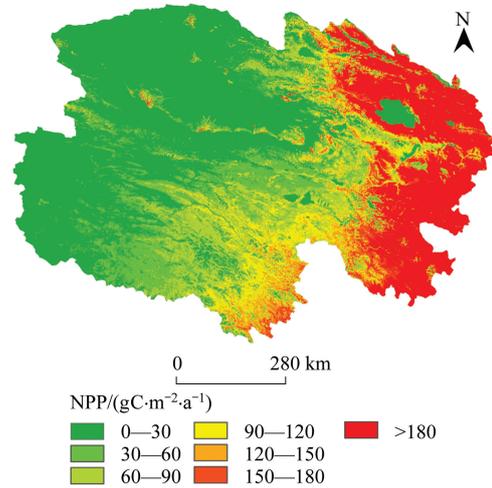


图 3 2000—2014 年青海省 NPP 平均值的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of average NPP in Qinghai Province from 2000 to 2014



图 4 青海省生态功能区划图
Fig.4 Eco-function regionalization of Qinghai Province

寒草甸土为主,并且有黑钙土、栗钙土、灰褐土等,有机质含量丰富,有利于农作物和牧草的生长;果洛藏族自治州和海南藏族自治州年均 NPP 基本持平,分别为 $160.91 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $156.28 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,海南州和果洛州主要以山地为主,地势复杂多样,不适合植被的生长;海西藏族自治州、玉树藏族自治州和格尔木市年均 NPP 低于 $100 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,分别为 $26.17 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $55.49 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $17.72 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,位于青海省的西部,荒漠较多,常年干旱少雨多风,气候独特,四季不分明,不利于植被的生长,覆盖率较低,NPP 较小(表 4)。

3.2 青海省植被 NPP 年际变化特征

3.2.1 年均值 NPP 年际变化特征

图 5 显示 NPP 值的波动范围集中在 $68.83—92.07 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,平均值 $79.05 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中 2001 年出现

3.3 NPP 空间变化特征

3.3.1 2000 年与 2014 年 NPP 空间变化

图 7 表明,青海省大部分地区 NPP 值是增加的,在海东市、西宁市、海南州的北部和黄南州北部地区 NPP 的增加值大于 $90 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 占总面积的 0.8%, 海北州的东北部、海南州南部地区 NPP 的增加值为 $60\text{--}90 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 占总面积 1.6%, 黄南州南部、果洛州南部地区 NPP 的增加值 $30\text{--}60 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 占总面积的 5.6% 格尔木市、玉树州、果洛的中部和北部、海南州的东南部、海北州的西北部地区 NPP 的增加值为 $0\text{--}30 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 占总面积的 42.4%, 海西州的绝大部分区域 NPP 的增加值为 $-30\text{--}0 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 占总面积的 49.1%。

3.3.2 2000—2014 年 NPP 总体趋势

青海省 15 年间 NPP 由北到南、由西到东呈现逐渐增加趋势, 平均趋势系数为 0.61, NPP 增加的区域占总面积的 15%, 其中显著增加区域为 2.8%, 轻度增加区域为 12.2%, 主要分布在海东市大部分区域、海北州南部、海南州北部、黄南州北部地区, 基本不变区域占总面积的 22.3%, 主要分布在海北州中部和西北部、海西州东部、玉树州东南部、果洛州北部区域, NPP 减少的区域占总面积的 62.6%, 其中显著减少占 1.8%, 轻度减少占 60.8%, 主要分布在格尔木市、玉树州的西北部、海西州的中部及以西的地区(图 8)。

3.3.3 NPP 变化的未来趋势预测

图 9 表明, Hurst 的值域范围为 $0\text{--}0.39$, 均值为 0.12, 除了河流湖泊, 建筑用地和未利用土地, 青海省 NPP 变化特征为反持续性特征, 将 Hurst 指数划分为弱、中、强 3 个反持续性类型, 其阈值分别为: <0.1 , $0.1\text{--}0.15$ 和 >0.15 。从弱、中、强的程度来看, 强反持续性占流域面积的 13.87%, 中反持续性占流域面积的 19.66%, 弱反持续性占流域面积的 20.73%, 说明青海省有五分之一的地区未来 NPP 变化与过去 NPP 的变化一致, 但这种持续性表现得不够明显, 三分之一地区未来 NPP 的变化与过去 NPP 变化有较强的相关性。

4 青海省 NPP 主要影响因素

4.1 气候因子对 NPP 的影响

4.1.1 2000—2010 年研究区气温和降水变化趋势

IPCC 第五次评估报告指出, 全球气候正在变暖, 而且气候变暖与碳循环存在显著的正相关关系, 但是不同地区的气候因子对 NPP 积累的作用也不尽相同, 表现为促进或者抑制, 由此表明, 植被 NPP 对降水和气温的反应较为强烈。由图 10 可知, 近 15 年青海省降水的波动幅度明显大于气温的波动幅度, 但除了特殊年份, 降水和气候总体均趋于增加的趋势, 气候也是趋于暖湿化, 降水从 2000 年到 2005 年处于缓慢增加, 2006 年降低, 之后又处于上升阶段, 直到 2013 年急速下降, 在 2001 年, 年平均降水最低为 254.5 mm ; 气温从 2000 年

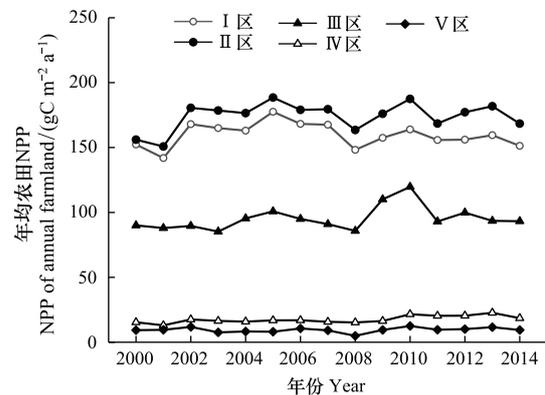


图 6 分生态功能区植被 NPP 变化趋势

Fig.6 Variation trend of vegetation NPP in different ecological function areas

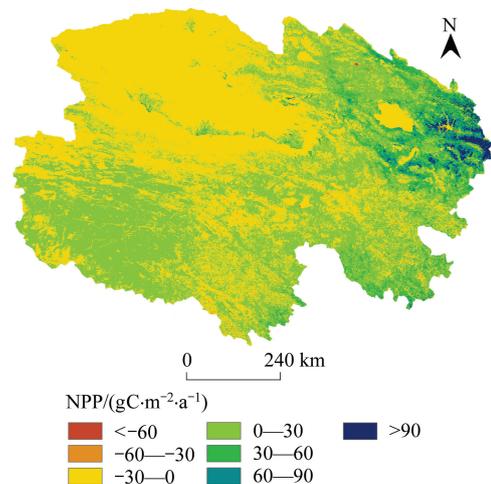


图 7 2000 与 2014 年青海省 NPP 空间变化图

Fig.7 Spatial change map of NPP in Qinghai Province in 2000 and 2014

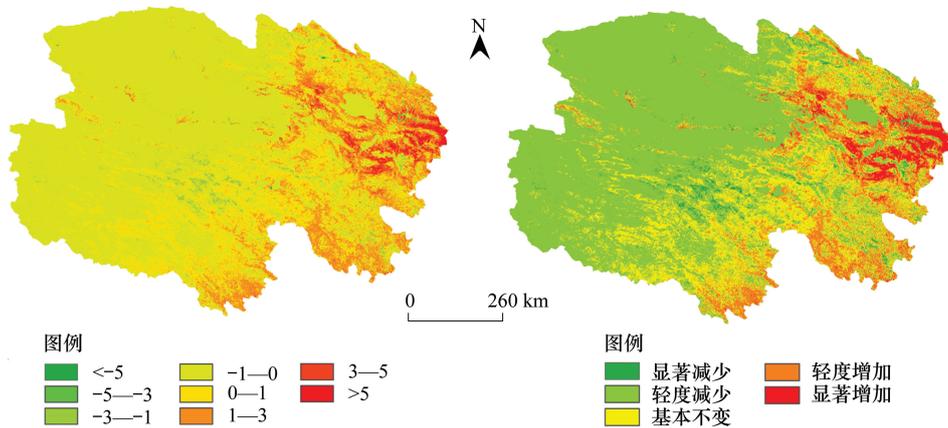


图8 2000—2014年青海省NPP线性变化趋势图

Fig.8 Distribution of linear trend of annual NPP changes in the Qinghai Province from 2000 to 2014

到2015年基本上波动上升,在2004年,气温迅速骤降,2012年出现缓慢下降状态,2000年的年平均气温最低,为 $1.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4.1.2 2000—2010年气温、降水的相关性分析对NPP的影响

由图11可知,青海省年平均降水量与年均NPP的相关系数为0.21,从降水逐像元来看,局部地区相关性较强,在青海省西南部和中部地区呈正相关关系,分别在格尔木市、玉树州和果洛州的南部,海南州和黄南州的北部,海西州东部,海东市西部以及西宁市。玉树州中西部、果洛州北部、海南州和黄南州南部呈负相关关系。从全省来看,年平均气温与年均NPP的相关系数为0.006,整体的相关性较弱,对气温进行逐像元分析,局部地区相关性较强,在玉树州和海东市东部、黄南州中北部、海北州和海南州南部和西宁市呈正相关关系,

在果洛州和格尔木市大部分区域、玉树州的西南部呈负相关关系。总体来说,气温相关系数分布与降雨相关系数分布具有很好的互补性,在气温相关程度高的地区,降雨相关程度低,反之亦然。

4.2 海拔高度对NPP的影响

由于研究区海拔从1719 m上升到6595 m,落差达到4874 m,造成地貌类型复杂多样,而不同的海拔高度因为水热条件组合差异,形成了显著的垂直自然分异,进而又影响NPP大小。图12表明,随着海拔的增加,植被NPP总体表现出缓慢增加之后迅速下降,出现低峰,又开始迅速上升,之后开始下降到0,且不同海拔高度上植被NPP差异明显,具有双峰值特征,当海拔从1719 m上升到2400 m时,植被NPP缓慢增加,研究发现该海拔范围正处于西宁市、海东市、黄南州的北部,植物种类丰富多样,以农田为主,是重要的农牧业经济区,NPP值较大,当海拔从2400 m上升到3200 m时,NPP值呈现下降趋势,出现一个低峰值,为 $35.65\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,此海拔范围正处于海南州的共和县、青海湖范围、格尔木市、海西州的柴达木盆地,这些区域是沙地和盐碱地带,受地形、水分和土质条件的限制,雨水较少,荒漠化程度较大,NPP值小,当海拔从3200 m上升到4000 m时,NPP值呈现上升趋势,出现一个高峰值,为 $167.31\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,此海拔范围正处于海南州的日月山、海北州的大坂山和果洛州的大武镇,草原面积广阔,山地森林发育较好,温度和水分条件适宜,NPP值达到较

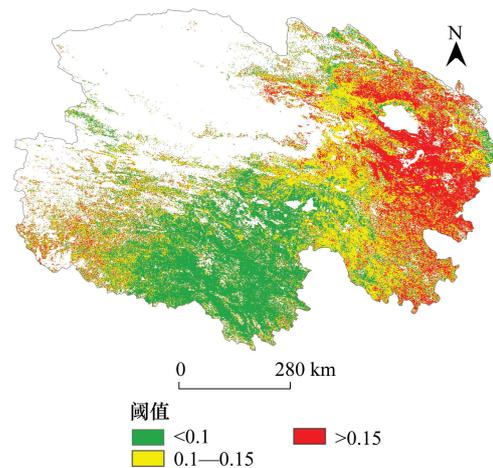


图9 NPP未来趋势预测图

Fig.9 NPP future trend forecast

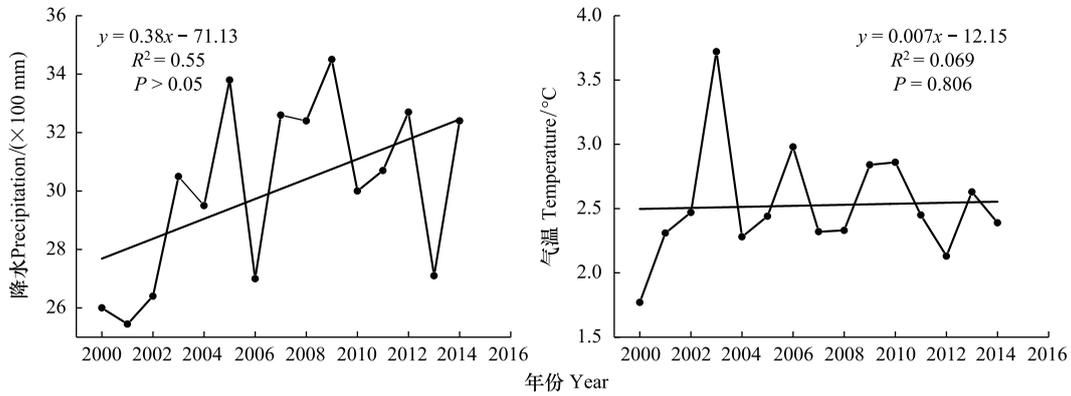


图 10 2000—2014 年降水与气温年际变化

Fig.10 Changes of annual temperature and precipitation from 2000 to 2014

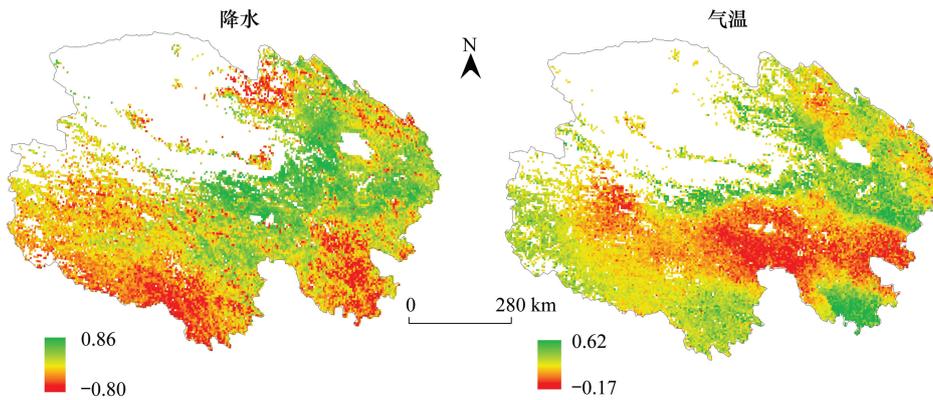


图 11 年均 NPP 与年降水和年气温的相关系数示意图

Fig.11 Correlation relationship between yearly NPP and yearly precipitation and yearly mean temperature

大,当海拔超过 4000 m 时,NPP 值持续减小,主要以裸岩、冰川覆盖为主,受人类的活动影响极小,高寒的环境植被的生产力受到限制,所以 NPP 值均低于 50 gC m⁻² a⁻¹。

4.3 土地利用/覆被变化(LUCC)对 NPP 的影响

土地利用变化是人类活动在地理环境空间上强度大小的直观变现,为了研究青海省土地利用动态变化的时空特征,考虑到获取数据的可行性,故选取中国科学院资源环境数据云平台的 2000 年、2015 年分辨率 1000 m 的全国土地利用数据,结合青海省实际情况,故将其土地利用类型数据合并成 6 种土地利用类型(即耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地),用以表征 2000 至 2015 年来青海省土地利用的类型变化特征(表 5、图 13)。

(1)近 15 年来耕地面积减少最少,面积减少了 14 km²,其变化率为-0.17%,由于国家实施退耕还林政策,导致耕地面积有所减少。

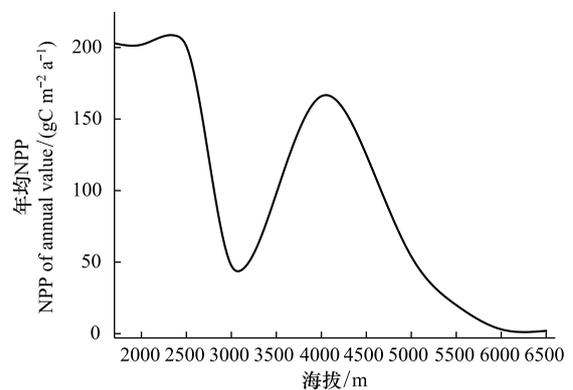


图 12 不同海拔高度 15 年平均 NPP 变化

Fig.12 Impact of elevation on average annual NPP from 2000 to 2014

(2) 林地面积减少了 76 km², 变化率为 -0.27%, 受到气温、降水、海拔的影响, 林地面积有一定的退化。

(3) 15 年来草地面积减少最多, 减少了 1260 km², 变化率为 -0.33%, 由于青海省过度的放牧, 导致草地面积减少较多。

(4) 水域面积增加最为明显, 增加了 1500 km², 变化率为 5.40%, 主要是由于青海省是三江源的发源地, 受降水、冰川融化等影响, 青海湖的面积也不断扩大。

(5) 城镇用地增加较多, 增加了 763 km², 变化率为 77.15%, 15 年来青海省经历了大规模的城镇扩张及城市化进程, 一些草地和林地都转化为建设用地。

(6) 未利用地面积减少较多, 减少了 913 km², 变化率为 0.33%, 该土地类型变化幅度较大。

表 5 2000、2015 年青海省各土地利用类型面积及变化率

Table 5 The areas and percentage of land cover in Qinghai Province during 2000 and 2015

土地利用类型 Land use type	2000 年		2015 年		2000—2015 变化	
	面积/km ²	%	面积/km ²	%	面积/km ²	%
耕地 Plough	8254	1.15	8240	1.14	-14	-0.17
林地 Forestry	28367	3.96	28291	3.95	-76	-0.27
草地 Meadow	377246	52.64	375986	52.46	-1260	-0.33
水体 Wave	27765	3.87	29265	4.08	1500	5.40
建设用地 Construction	989	0.14	1752	0.24	763	77.15
未利用地 Untreated	274043	38.24	273130	38.11	-913	-0.33

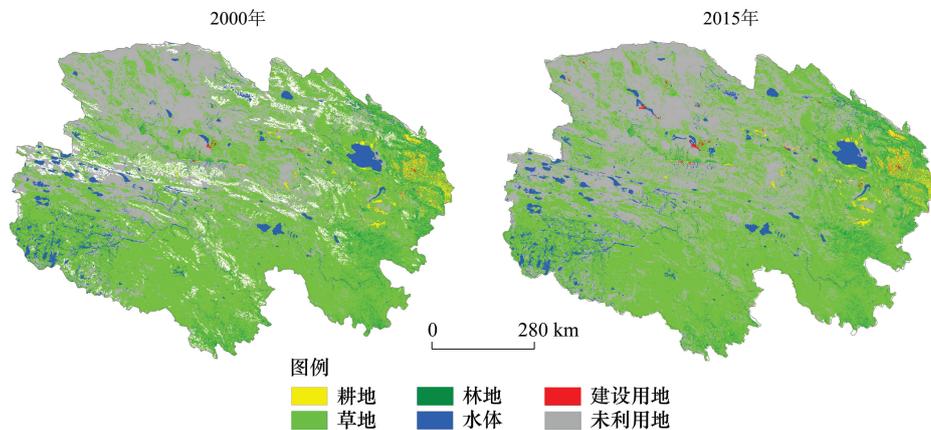


图 13 2000 年和 2015 年青海省土地利用现状图

Fig.13 The map of land use in Qinghai Province in 2000 and 2015

5 结论

本文利用 2000—2014 年 MOD17A3 数据集的年均 NPP 数据和青海省 39 个气象站点资料, 通过 GIS 空间分析法和数理统计方法分析了青海省植被 NPP 的时空变化特征及气候因子的相关性, 结果表明:

(1) 青海省植被年均 NPP 在 2000—2014 年间整体分布与区域海拔的高低分布大体致, 受到地区的差异, 呈现由南到北、由东到西递减的趋势; 从生态功能区看, 各生态区的空间差异显著, 表现为 II 区 > I 区 > III 区 > IV 区 > V 区, 从行政区划来看, 黄南藏族自治州的年均 NPP 最高, 为 300.27 gC m⁻² a⁻¹, 西宁市 NPP 仅次于黄南藏族自治州, 为 285.91 gC m⁻² a⁻¹, 海北藏族自治州居第四, 年均 NPP 为 212.29 gC m⁻² a⁻¹, 海西藏族自治州、玉树藏族自治州和格尔木市年均 NPP 低于 100 gC m⁻² a⁻¹, 分别为 26.17 gC m⁻² a⁻¹、55.49 gC m⁻² a⁻¹ 和 17.72 gC m⁻² a⁻¹。

(2)从年际变化来看,NPP 值的波动范围集中在 68.83—92.07 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$,平均值 79.05 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$,其中 2001 年出现最小值,为 68.83 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$,2004 年出现最大值,为 92.07 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$,整体上看,IV 区和 V 区的变化趋势不大,基本上是持平状态,其他生态区的年际变化基本一致,均表现出降-升-降-升-降-升-降-升-降的波动状态。

(3)青海省在 2014 年与 2000 年间大部分地区 NPP 值增加,由南到北、由东到西递减,2000—2014 年青海省 NPP 变化趋势由北到南、由西到东呈现逐渐增加趋势,平均趋势系数为 0.61,NPP 值增加的区域占总面积的 15%,其中显著增加区域为 2.8%,轻度增加区域为 12.2%,青海省 NPP 值的 Hurst 的值域范围为 0—0.39,均值为 0.12,除了河流湖泊,建筑用地和未利用土地,青海省 NPP 变化特征为反持续性特征。

(4)气候因子(年平均降水量和年均气温)对年均 NPP 的分布有影响,海拔的高低造成气温、降水和土壤的差异,间接影响植被 NPP,15 年土地利用/覆被变化(LUCC)表现为草地面积减少最多,这是导致 NPP 减少的主要原因。

参考文献(References):

- [1] 李博. 生态学. 北京: 高等教育出版社, 2000: 213-214.
- [2] 李高飞, 任海, 李岩, 柳江. 植被净第一性生产力研究回顾与发展趋势. 生态科学, 2003, 22(4): 360-365.
- [3] 吴家兵, 张玉书, 关德新. 森林生态系统 CO_2 通量研究方法进展. 东北林业大学学报, 2003, 31(6): 49-51.
- [4] Clark D A, Brown S, Kicklighter D W, Chambers J Q, Thomlinson J R, Ni J. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. *Ecological Applications*, 2001, 11(2): 356-370.
- [5] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 李京. 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.
- [6] 朱文泉. 中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2005.
- [7] 赵俊芳, 延晓冬, 朱玉洁. 陆地植被净初级生产力研究进展. 中国沙漠, 2007, 27(5): 780-786.
- [8] 王莺, 夏文韬, 梁天刚. 陆地生态系统净初级生产力的时空动态模拟研究进展. 草业科学, 2010, 27(2): 77-88.
- [9] 孙金伟, 关德新, 吴家兵, 金昌杰, 袁凤辉. 陆地植被净初级生产力研究进展. 世界林业研究, 2012, 25(1): 1-6.
- [10] Boysen J P. Die Stoffproduktion der pflanzen. 1932.
- [11] Monsi M, Saeki T. Uber den lichtfaktor in den pflanzenesell schaften und seine bedeutung fur die stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*, 1953, 14:22-52.
- [12] 潘竟虎, 李真. 2001—2012 年西北干旱区植被净初级生产力时空变化. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3333-3340.
- [13] 高原. 基于遥感的新疆 NPP 时空变化特征及其影响因素分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2015.
- [14] 江源通. 湘江流域植被 NPP 时空动态及影响因素分析[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2015.
- [15] Lobell D B, Hicke J A, Asner G P, Field C B, Tucker C J, Los S O. Satellite estimates of productivity and light use efficiency in United States agriculture, 1982-1998. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 722-735.
- [16] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄, 王庚辰, 温玉璞. 中国陆地生态系统的碳库. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 109-128.
- [17] 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, 31(3): 413-424.
- [18] Tao B, Li K R, Shao X M, Cao M K. The temporal and spatial patterns of terrestrial net primary productivity in China. *Journal of Geographical Science*, 2003, 13(2): 163-171.
- [19] 陈晓玲, 曾永年. 亚热带山地丘陵区植被 NPP 时空变化及其与气候因子的关系——以湖南省为例. 地理学报, 2016, 71(1): 35-48.
- [20] 仓生海. 青海省天然草地植被净初级生产力分析—基于 Miami 模型. 安徽农业科学, 2011, 39(11): 6409-6410.
- [21] 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, 31(3): 413-424.
- [22] 范娜, 谢高地, 张昌顺, 陈龙, 李文华, 成升魁. 2001 年至 2010 年澜沧江流域植被覆盖动态变化分析. 资源科学, 2012, 34(7): 1222-1231.
- [23] 潘竟虎, 徐柏翠. 中国潜在植被 NPP 的空间分布模拟. 生态学杂志, 2020, 39(03): 1001-1012.
- [24] 王亚慧, 李致家, 黄鹏年, 戴金旺. Thornthwaite 经验公式在降雨径流模拟中的适用性研究. 水电能源科学, 2019, 37(12): 6-9.
- [25] 李洁, 张远东, 顾峰雪, 黄玫, 郭瑞, 郝卫平, 夏旭. 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态. 生态学报, 2014, 34(06): 1490-1502.
- [26] 冯磊, 杨东, 黄悦悦. 2000—2017 年川渝地区植被 NDVI 特征及其对极端气候的响应. 生态学杂志: 1-12[2020-05-26]. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202007.028>
- [27] 赵瑞东. 气候变化和人类活动对黄土高原植被 NDVI 的影响研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2018.
- [28] 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. 生态学报, 2017, (6): 1-12.
- [29] 刘旻霞, 赵瑞东, 邵鹏, 焦骄, 李俐蓉, 车应弟. 近 15 a 黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析. 干旱区地理, 2018, 41(01): 99-108.
- [30] 李金珂, 杨玉婷, 张会茹, 黄铝文, 高义民. 秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析. 生态学报, 2019, 39(22): 8504-8515.