

DOI: 10.5846/stxb202011283050

孙从建, 乔鹏, 王佳瑞, 王红阳, 孙九林. 2000 年来吕梁连片贫困区植被净初级生产力时空变化特征. 生态学报, 2022, 42(1): 277-286.

Sun C J, Qiao P, Wang J R, Wang H Y, Sun J L. Spatio-temporal variation characteristics of net primary productivity in Lvliang contiguous poverty areas since 2000. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 277-286.

# 2000 年来吕梁连片贫困区植被净初级生产力时空变化特征

孙从建<sup>1,\*</sup>, 乔 鹏<sup>1</sup>, 王佳瑞<sup>1</sup>, 王红阳<sup>1</sup>, 孙九林<sup>2</sup>

1 山西师范大学地理科学学院, 临汾 041000

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

**摘要:**多年来吕梁连片贫困区实施的生态恢复措施对其生态环境产生了较大影响,为掌握该区域在生态恢复措施实施(2000 年)以来植被净初级生产力的变化状况,利用 2000—2018 年时序的遥感数据和基于光能利用率 CASA 模型对其进行了模拟,并分析了导致其变化的主要控制因素,结果显示:(1)2000 年以来吕梁连片贫困区 NPP 整体上升,其中 93.46% 的区域 NPP 呈增长状态,6.54% 的区域呈减少状态,2010—2015 年区域 NPP 出现下降。(2)受人类活动影响,过去 18 年来区域土地利用类型变化较为显著,耕地面积缩减,草地面积基本保持稳定,林地与城镇面积增加且城镇面积扩张迅速,不同土地利用下的 NPP 特征差异显著,耕地 NPP 年均值增长最为迅速,为  $5.9 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,林地最为平稳,为  $1.32 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。(3)研究区降水量波动对区域 NPP 的变化影响显著,未来气候变化中降水量的变化可能对区域 NPP 产生直接影响。研究结果将为区域生态恢复、精准扶贫及黄河中游地区的经济发展提供重要的理论支撑。

**关键词:**连片贫困区; 净初级生产力(NPP); CASA 模型; 时空变化

## Spatio-temporal variation characteristics of net primary productivity in Lvliang contiguous poverty areas since 2000

SUN Congjian<sup>1,\*</sup>, QIAO Peng<sup>1</sup>, WANG Jiarui<sup>1</sup>, WANG Hongyang<sup>1</sup>, SUN Jiulin<sup>2</sup>

1 Shanxi Normal University, School of Geographical Sciences, Linfen 041000, China

2 Institute of geographic sciences and natural resources research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** Over the years, the ecological restoration measures implemented in Lvliang contiguous poverty area have had a great impact on its ecological environment. In order to grasp the change of net primary productivity of vegetation in this area since the implementation of ecological restoration measures (2000), this study used the remote sensing data of 2000—2018 and the CASA model based on the utilization rate of light energy to simulate it, and analyzed the main control factors leading to its change. The results showed that: (1) net primary productivity (NPP) in Lvliang contiguous poverty area increased as a whole since 2000, of which 93.46% of the regional NPP increased, 6.54% of the regional NPP decreased, and the regional NPP decreased from 2010 to 2015. (2) Affected by human activities, in the past 18 years, the regional land use type changed significantly, the cultivated land area decreased, the grassland area remained basically stable, the woodland and urban area increased, and the urban area expanded rapidly. The NPP characteristics under different land use types were significantly different. The annually average NPP of the cultivated land increased most rapidly, which was  $5.9 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , and the forest land was the most stable, which was  $1.32 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ . (3) The fluctuation of precipitation in the study area

基金项目:山西省回国留学人员科研资助项目(2020-092);山西师范大学研究生双语课程建设计划项目(YJSSY201904)

收稿日期:2020-11-28; 网络出版日期:2021-08-17

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: suncongjian@sina.com

had a significant impact on the change of regional NPP. The change of precipitation in the future climate change may have direct impact on regional NPP. The results will provide importantly theoretical support for regional ecological restoration, targeted poverty alleviation and economic development in the middle reaches of the Yellow River.

**Key Words:** contiguous poverty area; NPP; CASA model; temporal and spatial changes

当前碳循环已经成为评价全球气候变化影响的重要指标<sup>[1]</sup>,而植被净初级生产力(NPP)作为陆地碳循环的重要组成部分,可有效的量化陆地生态系统的生产能力,是全球碳循环研究的热点问题<sup>[2]</sup>。随着气候变化加剧,区域 NPP 的定量化研究受到越来越多研究者的关注,已成为众多国际间合作研究计划(如国际地圈-生物圈计划(IGBP)、京都协定(KP))的核心内容之一<sup>[3]</sup>。而生态脆弱区碳循环对全球气候变化响应十分敏感,定量评估 NPP 可为生态脆弱区实现“碳达峰”、“碳中和”提供理论支撑,为应对气候变化、区域生态环境保护作出重要指导。

传统的 NPP 估算方法包含直接观测法和间接估算法<sup>[4]</sup>两种,其中直接观测法精度较高,但因其适用区间较小,难以大范围推广<sup>[5]</sup>。间接估算法包括模型法(统计模型、参数模型)和遥感反演法,模型法由于其精度不高、涉及参数多、数据获取困难等缺点,误差往往难以控制。遥感反演法集遥感数据、地理信息系统(GIS)、模型模拟三者优势于一体,在全球及区域 NPP 的估算中得到了广泛应用。其中之一的 CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型具有模型简单、参数较少、多时相数据获取便捷等优势<sup>[6]</sup>,是目前区域 NPP 估算中应用较广的方法。利用 CASA 模型,部分研究者开展了诸多典型区域的 NPP 定量化研究,如欧洲地中海流域<sup>[7]</sup>、非洲萨赫勒草原<sup>[8]</sup>、北美平原区<sup>[9]</sup>、澳大利亚<sup>[10]</sup>、亚洲的伊朗半干旱牧区<sup>[11]</sup>以及国内的东北平原<sup>[12]</sup>、西北干旱区<sup>[13]</sup>、青藏高寒区<sup>[14]</sup>、陕西甘肃地区<sup>[15]</sup>等区域,获得了许多区域 NPP 的重要信息,为区域碳循环及气候变化研究提供了重要支撑。此外,亦有研究者对传统的 CASA 模型进行改进,通过修正原模型的植被光能利用率<sup>[16]</sup>、水分胁迫系数<sup>[17]</sup>、下垫面参数<sup>[18]</sup>等参数以提高模型在各区域 NPP 估算过程中的适用性,取得了众多研究成果。

吕梁连片贫困区地处黄河中游,是我国半干旱和半湿润区域的过渡地带,生态环境极为脆弱<sup>[19]</sup>。自改革开放之后,该区域对煤、铁、铝等资源的大规模无序开发导致了植被破坏,水土流失日趋严重,生态环境日益恶化。2000 年以来,此区域开展了一系列生态恢复工程(国家实施的三北防护林工程(4、5 期)、退耕还林还草工程以及山西省实施的吕梁山生态脆弱区林业生态建设工程等),在此影响下区域植被覆盖度得到了一定提高<sup>[20]</sup>,但上述措施是否带来了区域 NPP 的变化,目前尚不清晰,因此亟需开展吕梁连片贫困区在大规模生态恢复措施背景下的 NPP 定量评估。基于此,本文选取吕梁连片贫困区生态恢复措施实施以来(2000 年)的多期 MODIS 遥感数据、气象数据和土地利用类型数据,利用 CASA 模型定量评估了区域 NPP 时空分布变化特征,系统分析了不同土地利用类型下 NPP 的变化状况。研究结果将有利于增加气候变化下对区域碳循环过程的认识,同时也为区域生态环境恢复、吕梁山区精准扶贫、黄河流域高效开发利用等提供重要的理论依据。

## 1 研究区概况

如图 1 所示,本文研究区地处黄土高原东部,西隔黄河与陕西相望,位于东经 110°22′—112°37′,北纬 35°53′—39°24′之间,总面积约为 3.3 万 km<sup>2</sup>,海拔在 400—2800 m 之间,包括神池县、五寨县、岢岚县、静乐县、兴县、临县、石楼县、岚县、吉县、大宁县、隰县、永和县、汾西县等 13 个国家级贫困县<sup>[21]</sup>。研究区气候属于温带大陆性季风气候,雨热同期,降水较少(300—700 mm)且集中于 7—8 月份,年内气温为-6—24℃,潜在蒸散发为 1000—1400 mm。地形以山地、丘陵为主,地表沟壑纵横分布,崎岖不平。区域内部水土流失严重,植被稀少,天然植被以侧柏、刺槐及小灌木为主,是我国半湿润半干旱地区过渡地带以及农牧交错带<sup>[22]</sup>;境内水系主要为黄河水系,重要的河流包括汾河、昕水河、三川河、岚漪河、蔚汾河、湫水河等,区域水资源相对匮乏,生

态系统脆弱,环境承载力低下<sup>[23]</sup>。作为我国革命老区,该区域贫困程度较深、脱贫攻坚难度较大。区域交通不便,城镇化水平处于起步发展阶段,经济社会发展较为落后。区域日益恶化的生态环境引起了政府部门的高度重视。

自 2000 年以来,为解决区域水土流失及生态环境退化等问题,此地先后开展了一系列生态恢复工程。国家级工程有三北防护林工程(4、5 期)、天然林保护、退耕还林还草等林业重点工程;省级工程有 2013 年开始实施的吕梁山生态脆弱区林业生态建设工程、2018 年开始实施的太行山吕梁山生态系统保护和修复重大工程;在地市级层面,临汾市采取多种措施创建生态经济型三北防护林工程,具体有吉县留村 800 hm<sup>2</sup>的黄土高原综合治理林业示范建设项目工程、乡宁县堡子村 933.33 hm<sup>2</sup>的三北造林示范工程等,吕梁市也实施了离石区可视范围山体绿化工程建设项目等生态恢复措施。

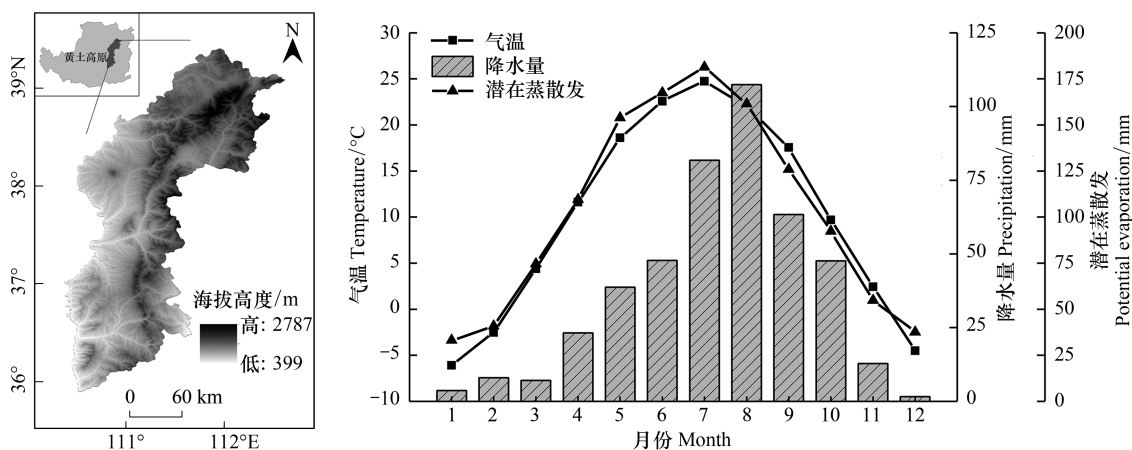


图 1 研究区地理位置示意及气象因子变化图

Fig.1 The geographic location of the study area and the change of meteorological factors

## 2 数据来源与分析方法

### 2.1 数据来源

本文主要应用气象数据(下载自中国气象局国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/site/index.html>))、土地利用类型数据(下载自欧洲航天局(<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>))及遥感影像数据(来源于美国 LAADS 网站(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>))发布的空间分辨率为 1 km 的 MODIS 数据 MOD13A3 数据集)三种数据(表 1)。气象数据包含该区 11 个站点的月均温度(°C)、月均最低最高温度(°C)、月降水量(mm)、月均日照时长(h)、月均风速(m/s)、月均水汽压(kPa)和相对湿度(%)等。土地利用类型数据为研究时段内空间分辨率为 1 km 的土地利用类型数据,本文将将其分为耕地、林地、草地、居民地、水域和未利用土地 6 个一级类型。遥感影像数据主要为 5 个时段内 60 景的月合成 MODIS 数据,并使用 MRT 软件将 HDF 格式文件转换为 TIFF 文件,投影转换为 WGS84/Albers Equal Area Conic 投影,最终经掩膜处理获得研究时段内逐月标准化 NDVI 数据。

### 2.2 研究方法

本研究选用基于光能利用率的 CASA 模型估算吕梁连片贫困区 2000—2018 年 NPP,其结构如下所示:

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

式中,  $NPP(x, t)$  表示  $t$  月份单位像元  $x$  内的植被净初级生产力( $\text{gC m}^{-2}$ ),  $APAR$  表示植物所吸收的光合有效辐射( $\text{MJ/m}^2$ ),  $\varepsilon$  表示光能利用效率,  $t$  表示时间,  $x$  表示空间位置<sup>[24]</sup>。

表 1 本研究研究数据信息统计表

Table 1 Statistical table of research data in this study

数据类型 Data type	数据内容 Data content	数据时间 Data time	数据范围 Data range
气象数据 Meteorological data	月均温度、月均最低最高温度、月降水量、月均日照时长、月均风速、月均水汽压、相对湿度等	2000 年 2005 年	兴县、五寨、隰县、离石、河曲、临汾、原平、介休、右玉、太原、侯马
遥感数据 Remote sensing data	NDVI 值	2010 年 2015 年	研究区域全域
土地利用类型数据 Land use type data	土地利用类型分布状况	2018 年	研究区域全域

其中 APAR 参数由下式求得:

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

式中,  $\text{SOL}(x, t)$  表示  $t$  月份像元  $x$  处的太阳总辐射量;  $\text{FPAR}(x, t)$  表示植被层对入射光合有效辐射 (PAR) 的吸收比例; 常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射 (波长为 0.38—0.71  $\mu\text{m}$ ) 占太阳总辐射的比例。

SOL 采用经验公式进行计算, 由大气上界太阳辐射量和日照百分率计算得出<sup>[25]</sup>。

由前人研究可知, FPAR 与归一化植被指数 (NDVI) 和比值植被指数 (SR) 都存在一定的线性关系, 结合两者进行计算可提高计算精度, 故参考陈福军等人<sup>[26—27]</sup>的研究计算像元 FPAR 值。

模型中光能利用效率  $\varepsilon$  是指植物把吸收的光合有效辐射 (PAR) 转化为有机碳的效率。由下式求得:

$$\varepsilon(x, t) = T_{e1}(x, t) \times T_{e2}(x, t) \times W_e(x, t) \times \varepsilon^* \quad (3)$$

式中,  $T_{e1}(x, t)$  表示在低温和高温环境下植物自身生理作用对光合作用产生限制而降低其净初级生产力的程度;  $T_{e2}(x, t)$  表示植物在生长最适温度向高温和低温转变时光能利用率逐渐变小的趋势;  $W_e(x, t)$  表示水分状况对光能利用效率的限制程度;  $\varepsilon^*$  表示理想条件下的最大光能利用率, 本研究采用前人研究成果, 取 0.389  $\text{gC}/\text{MJ}$ 。

$T_{e1}(x, t)$  和  $T_{e2}(x, t)$  的计算过程见参考文献<sup>[28]</sup>。水分胁迫系数  $W_e(x, t)$  在环境影响下取值在 0.5 (极干旱) 到 1 (极湿润) 之间波动, 计算公式如下:

$$W_e(x, t) = 0.5 + 0.5 \times \frac{E(x, t)}{E_p(x, t)} \quad (4)$$

式中,  $E(x, t)$  为区域实际蒸散发,  $E_p(x, t)$  为区域潜在蒸散发。潜在蒸散发采用 Penman-Monteith 模型<sup>[25]</sup>进行计算; 实际蒸散发由于数据难以获取, 故采用周广胜张新时模型<sup>[29]</sup>进行模拟。

### 3 结果与分析

#### 3.1 研究区 NPP 变化特征分析

##### 3.1.1 区域 NPP 的年际变化

图 2 为 2000—2018 年间研究区 NPP 年均值空间分布特征图, 该区年均 NPP 值介于 241.24—331.70  $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$  之间, 与黄土高原其他区域<sup>[30—31]</sup>相比处于中等水平, 表明该区域植被整体生产能力一般, 生态环境条件不是十分优越。研究区 NPP 空间分布整体呈“中部高、四周低”的变化趋势, 中部高值区为吕梁山山地, 西部为黄河河谷, 东部为汾河谷地, 中部 NPP 年均值较高与该区域植被覆盖较好有一定关联性。

2000—2018 年间区域 NPP 年均值整体呈波动上升趋势, 其变化大致可分为“上升-下降-上升”三个阶段。其中 2000—2010 年研究区 NPP 年均值呈稳定上升趋势, 区域年均 NPP 值由 2000 年的 241.24  $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$  上升至 2010 年的 303.81  $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ , 年增速为 6.26  $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。2010—2015 年间, 研究区 NPP 年均值呈整体下降趋势, 由 2010 年的 303.81  $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$  降低至 2015 年的 258.49  $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ , 年降速为 9.1  $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。2015—2018 年间, 区域 NPP 年均值再次快速上升, 由 2015 年的 258.49  $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$  升至 2018 年的 331.7  $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ , 增



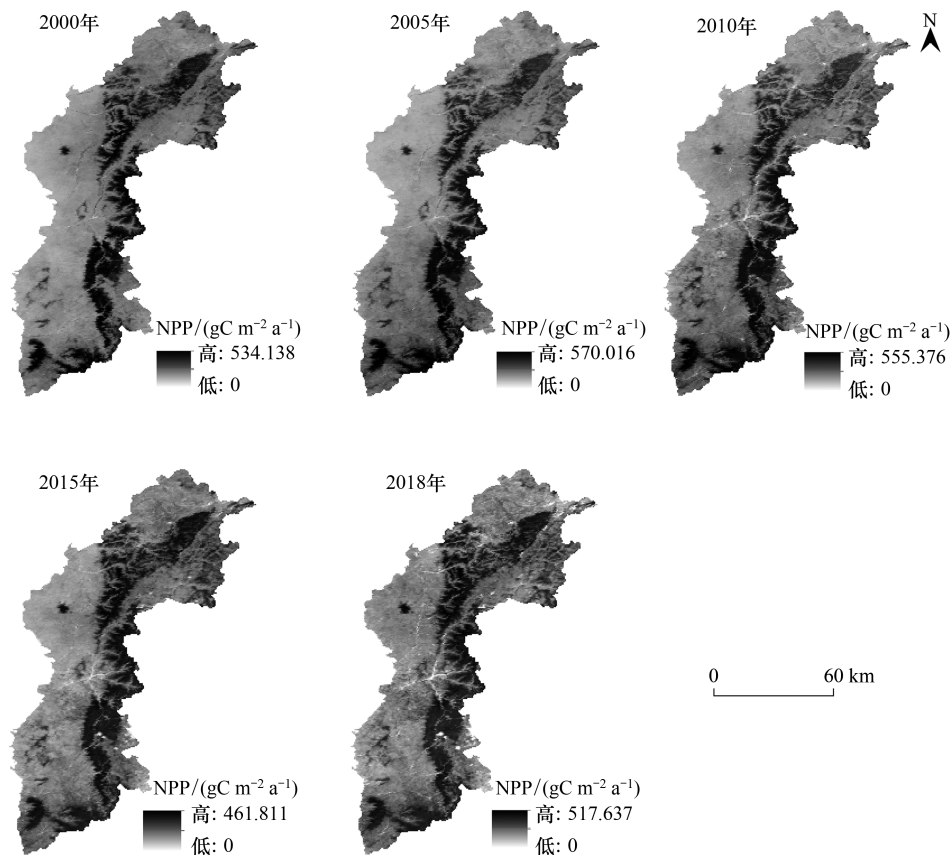


图2 研究时段内吕梁连片贫困区 NPP 变化图

Fig.2 NPP changes in the Lvliang contiguous poverty area during the study period

NPP: 植被净初级生产力 Net Primary Productivity

长速率为  $24.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

### 3.1.2 NPP 的月际变化

NPP 的月际变化反映了植物在年内净初级生产力的变化状况,吕梁连片贫困区 NPP 逐月(月均)NPP 分布特征如图 3 所示:

由图 3 可知,各年内月均 NPP 值均呈现先上升后下降的整体趋势,春季 NPP 多年平均值为  $48.38 \text{ gC m}^{-2} \text{ 季}^{-1}$ ,夏季 NPP 多年平均值为  $158.1 \text{ gC m}^{-2} \text{ 季}^{-1}$ ,秋季 NPP 多年平均值为  $62.85 \text{ gC m}^{-2} \text{ 季}^{-1}$ ,冬季 NPP 多年平均值为  $10.94 \text{ gC m}^{-2} \text{ 季}^{-1}$ 。各月 NPP 均值以 7、8 两月为最高,多年平均值分别为  $53.26 \text{ gC m}^{-2} \text{ 月}^{-1}$  和  $65.41 \text{ gC m}^{-2} \text{ 月}^{-1}$ ;冬季的 1、12 两月的 NPP 多年均值最低,分别为  $3.65 \text{ gC m}^{-2} \text{ 月}^{-1}$  和  $3.59 \text{ gC m}^{-2} \text{ 月}^{-1}$ 。各月间 NPP 增长速率最高时段为 6—7 月,增长速率达到  $28.86 \text{ gC m}^{-2} \text{ 月}^{-1}$ ;下降速率最高时段为 8—9 月,下降速率达到  $52.39 \text{ gC m}^{-2} \text{ 月}^{-1}$ 。这些变化与研究区绿色植被的生长规律一致,冬季地表植被光合作用微弱,此时区域 NPP 处于全年的低值时段,自春季开始,作物萌芽生长,

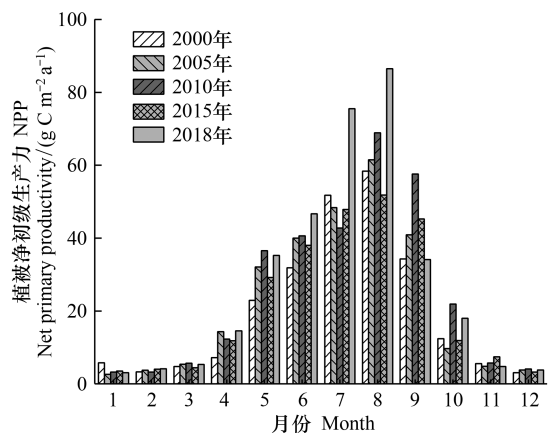


图3 吕梁连片贫困区 NPP 逐月变化图

Fig.3 Monthly change chart of NPP in Lvliang contiguous poverty area

5 月开始植物生理过程变得活跃,进入快速生长季,NPP 开始显著增加,区域 NPP 的变化也是该区域物候特征直接反映。研究区地处温带大陆性季风气候区,雨热同期且集中于夏季,水热组合条件为一年中最适宜植物生长阶段,故 NPP 值在 8 月达到峰值;秋季开始,植物生长速度减缓,进入凋落季,农作物亦大量收割,NPP 下降迅速;至冬季植物枯萎殆尽,生命活动基本停止,故冬季为一年中 NPP 最低时期。

### 3.2 研究区 NPP 变化率空间分布特征

为了清晰地揭示研究区 NPP 值变化的空间分布特征,根据以往研究<sup>[32]</sup>,本研究将 5 个时段的 NPP 变化状况以显著减少( $<-20\%$ )、微弱减少( $-20\%—0$ )、稳定增长( $0—20\%$ )和显著增长( $>20\%$ )进行了划分。结果如图 4 所示:

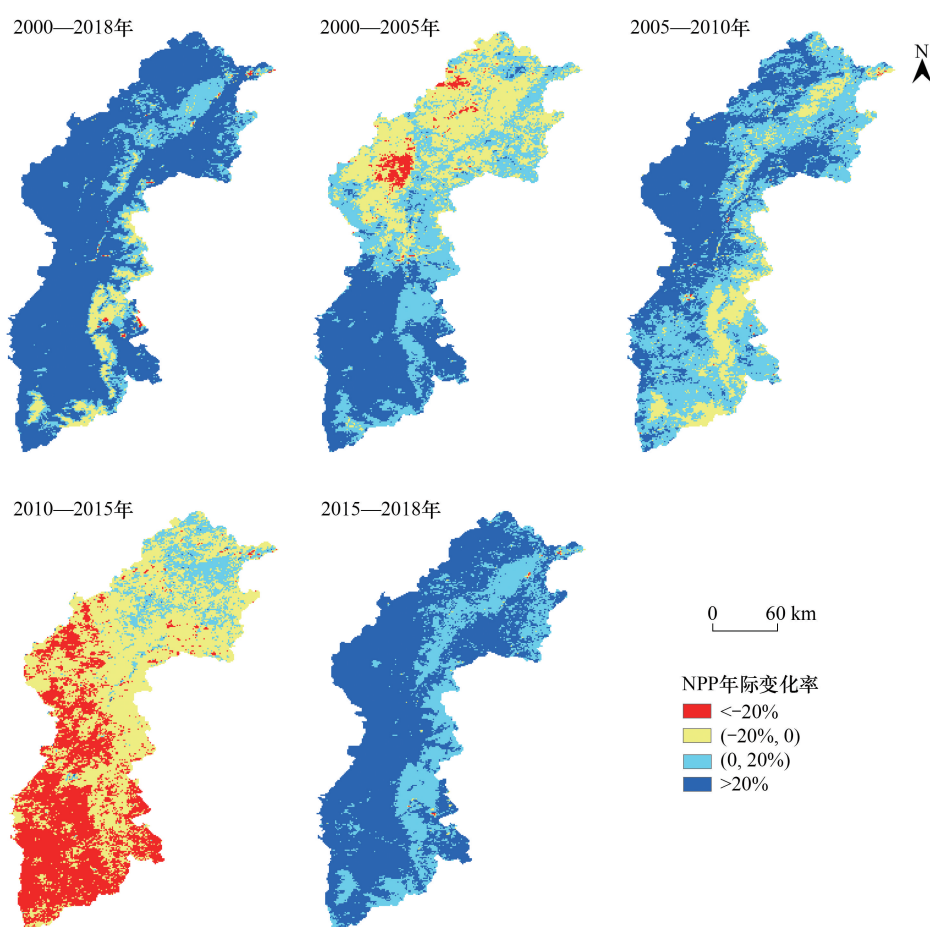


图 4 研究时段内 NPP 年际变化率空间分布图

Fig.4 Spatial distribution map of NPP interannual rate of change during the study period

结果表明:2000—2018 年区域 NPP 整体呈上升趋势,只有吕梁山东南部呈轻微下降趋势,NPP 呈增长状态的区域占研究区的 93.46%,呈减少状态的仅为 6.54%。2000—2005 年区域北部 NPP 整体呈微弱下降趋势,兴县、临县交界处以及岢岚县和五寨县的局部区域是发生下降的主要地区,中南部呈上升趋势,NPP 呈增长状态的区域占总面积的 66.06%。2005—2010 年间,区域 NPP 值在研究区中北部发生显著变化,由轻微下降变为显著上升,其中有 86.5%的区域 NPP 呈增长状态,呈减少状态的仅为 13.5%。在 2010—2015 年间,研究区 NPP 整体下降,这与其它几个研究时段截然不同,其中以中南部下降最为显著;这一时期,NPP 呈减少状态的区域达到了 88.95%,生态环境在这一时期出现退化。近几年来(2015—2018 年),区域 NPP 整体呈显著上升趋势,说明区域生态环境整体改善,植被覆被度以及 NPP 稳定提高,这一时期 NPP 呈增长状态的区域占比为 99.65%。

### 3.3 不同土地利用下的区域 NPP 时空分布特征

根据以往研究,LUCC 变化对区域 NPP 的空间分布规律具有显著影响<sup>[33]</sup>,2000 年以来在人类活动影响下研究区土地利用和覆被类型发生显著变化。为揭示不同土地利用方式下 NPP 的变化特征,本文对比分析了不同时间段四种土地利用类型(耕地、林地、草地、城镇)下的 NPP 时空变化特征,如图 5 所示:

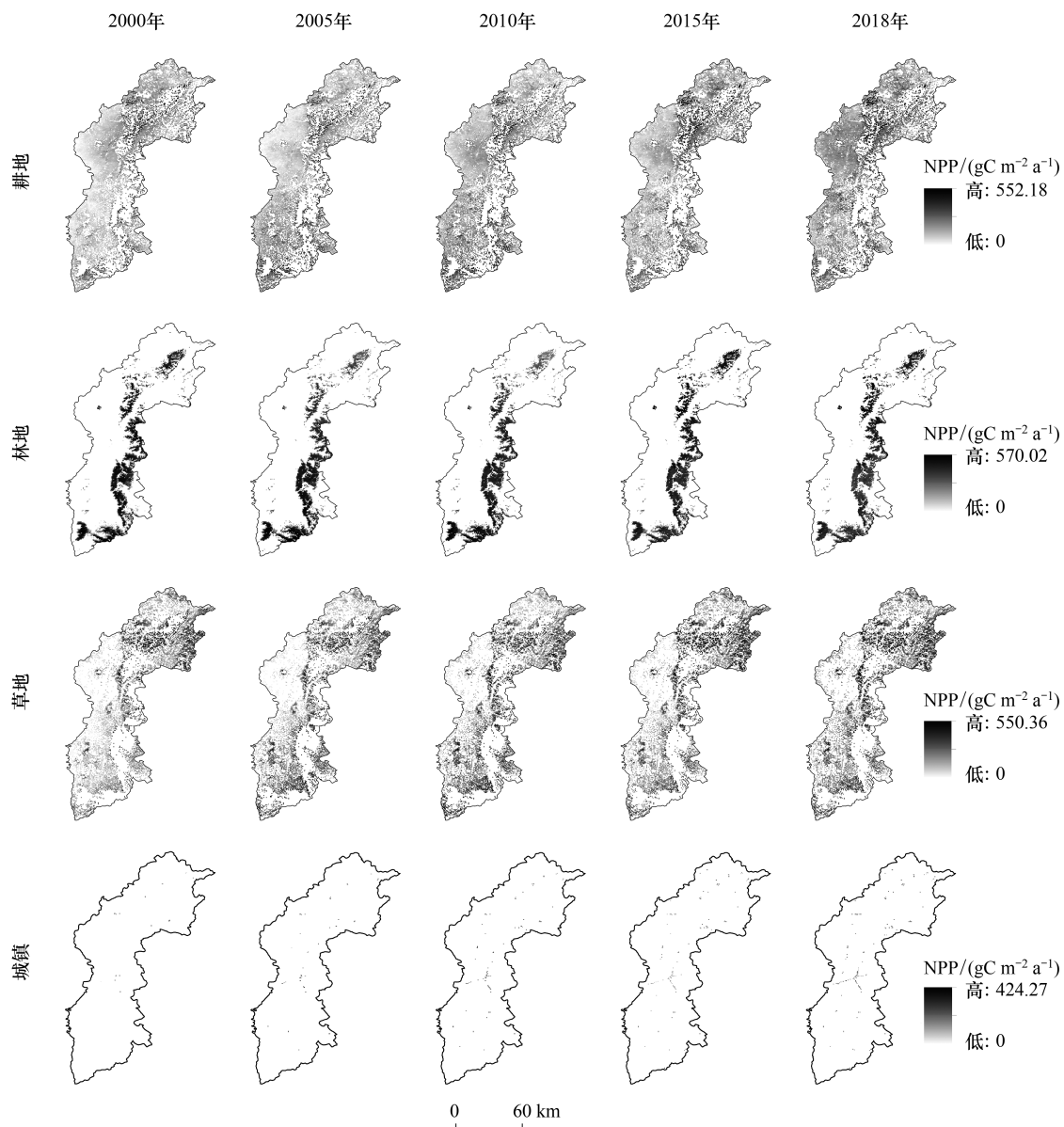


图 5 不同土地利用类型下的 NPP 变化图

Fig.5 NPP change charts for different land use types

研究区耕地区域 NPP 值时空分布如图 5 所示,耕地 NPP 均值整体呈波动上升趋势,多年平均值为  $243.31 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,最大值出现在 2018 年,为  $305.89 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,最小值出现在 2000 年,为  $199.74 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。耕地土地利用类型变动广泛存在于各县市之中,在研究时段内其面积缩减了 2.42%,主要转化为林地和草地,总体保持平稳。耕地转出为林地的区域主要集中在吕梁山中部(方山县、临县、兴县交界处,中阳县)以及大宁县、吉县交界处,耕地转化为草地的区域主要集中在研究区的东北角、西南角以及中部区域。

过去 18 年来,研究区林地区域 NPP 变化整体呈波动上升趋势(图 5),多年平均值为  $425.09 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,

最大值出现在 2005 年,为  $451.74 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,最小值出现在 2015 年,为  $379.51 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。林地土地利用类型变化以转入为主,面积在研究时段内增长了 6.84%,整体变化呈现稳定上升趋势。变化以中北部最为明显,增长源主要来自于耕地以及草地。草地转化为林地的主要集中于吕梁山中部的离石区、中阳县以及方山县、临县、兴县交界处。

研究区草地 NPP 变化整体呈波动上升趋势(图 5),其中研究区中部变化最为显著,其多年平均值为  $272.55 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,最大值出现在 2018 年,为  $326.1 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,最小值出现在 2000 年,为  $226.71 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。草地利用类型在研究时段内整体变动较大,转入和转出都较为明显,草地转出为耕地的区域主要集中在岢岚县、五寨县交界处、石楼县、交口县交界处以及蒲县,以蒲县最为明显;草地转出为城镇用地的区域主要集中在各县市城区,其中以离石区、柳林县、中阳县最为明显。草地面积整体较为平稳,在研究时段内下降了 0.7%。

区域城镇化一直是影响地表 NPP 变化的重要因素,随着近年来吕梁连片贫困区城镇化迅速推进,区域城镇建筑面积增加显著(图 5),城镇土地利用类型变化明显的区域主要位于各县市城区地带,面积在研究时段内增加了 609.14%,其中 47.42%来源于耕地,52.2%来源于草地。而城镇区域的 NPP 值呈波动上升趋势,多年平均值为  $179.78 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,最大值出现在 2018 年,为  $229.26 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,最小值出现在 2005 年,为  $149.43 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

### 3.4 区域 NPP 变化与主要气象因子的相关性分析

先前研究表明气象因子是影响区域 NPP 值的重要因素<sup>[34—37]</sup>,为进一步分析研究区 NPP 与主要气象因子(气温、降水、潜在蒸散发)的关系,本研究将月均 NPP 值与气象因子月均值进行 Pearson 双侧相关检验以及偏相关检验,结果如表 2 所示。由表可知,吕梁连片贫困区月均 NPP 值与月均气温、月均降水量、月均潜在蒸散发的平均相关系数分别为 0.897,0.962,0.897,均在 0.01 的置信水平上达到显著水平;平均偏相关系数为 -0.387,0.887,0.523。这说明吕梁连片贫困区 NPP 变化受到气温、降水以及潜在蒸散发共同控制且影响程度均达到极显著水平,其中 NPP 与降水量相关程度最高,表明研究区内降水量的变化是影响区域 NPP 变化的最主要因素;在进行偏相关分析以消除另外两个气象因子的影响时,温度与 NPP 呈负相关关系但相关程度不高,潜在蒸散发与 NPP 呈正相关关系但相关程度不高,只有降水量依然与 NPP 显著相关,表明在吕梁连片贫困区降水量为区域 NPP 在月尺度变化的主要影响因子。

表 2 区域 NPP 与气象因子相关系数表

Table 2 Table of correlation coefficients between NPP and meteorological factors

	指标 Index	气温 Temperature	降水 Precipitation	潜在蒸散发 Potential evaporation
NPP	双变量相关	0.897 **	0.962 **	0.897 **
	偏相关	-0.387	0.887	0.523

\*\* : 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

## 4 讨论

2000—2010 年是“三北防护林”第二阶段第四期工程实施阶段,吕梁连片贫困区与吕梁山生态脆弱区高度重合,是该工程的重点实施区域,期间该区域 NPP 呈现显著的上升趋势,这表明生态恢复工程对植被净初级生产力具有明显的促进作用。2010—2015 年间 NPP 出现下降趋势,可能与区域城镇化快速推进带来的负面影响有关,根据山西省统计年鉴(<http://www.shanxi.gov.cn/sj/tjnj/>)可知,研究区城镇人口占总人口比重由 2000 年的 14.31% 上升至 2018 年的 47.79%,增长了 234.05%。建筑的增加及路面硬化致使绿地(其中以草地与耕地为主)面积减少,间接导致了区域水土流失及生态退化,环境条件变得脆弱,是 2015 年 NPP 出现低值的原因之一;加之 2015 年发生了历史上第二强的厄尔尼诺气候事件,导致了明显的气候异常。据研究表明,华北地区雨季开始晚、结束早,降水量为近 13 年来次少,NPP 累积最重要的季节——夏季降水异常偏少。根



据表 2 可知,研究区 NPP 变化与降水量变化呈正相关关系,降水的减少直接导致了 NPP 的降低,在图 3 上有较为直观的反映。人类活动和气候变化共同导致了 2015 年的 NPP 低值,致使这一时段 NPP 年均值呈现下降趋势。2015—2018 年间,区域 NPP 年均值再次快速上升,由 2015 年的  $258.49 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  升至 2018 年的  $331.7 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,增长速率为  $24.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。2015 年起吕梁山生态脆弱区林业生态建设工程被列入国家级工程,区域生态环境恢复得到国家的高度重视以及政策的倾斜支持,加之 2018 年气象条件较 2015 年好,促使这一时期区域 NPP 呈上升趋势。

近年来,部分学者研究了许多典型区域 NPP 的动态变化特征、探讨了其与各影响因子(降水量、温度、干旱指数、潜在蒸散发等)间的相关性等<sup>[34—37]</sup>,如张懿铨<sup>[34]</sup>等发现青藏高原高寒草地 NPP 在空间上呈现由东南向西北逐渐递减趋势,且在研究时段内呈波动上升趋势。秦景秀<sup>[35]</sup>等发现新疆地区的 NPP 也呈现明显的上升趋势,人类活动是影响新疆植被恢复和退化的主要原因。陈杰等<sup>[36]</sup>发现川西地区大面积区域 NPP 呈显著上升,且不同土地利用及植被类型的 NPP 差异较大,海拔与研究区 NPP 相关性非常显著,人类活动对地区 NPP 变化的负干扰明显。这些研究结果对于区域碳循环研究、环境保护、经济可持续发展等具有重要科学价值。在黄土高原地区,谢宝妮<sup>[37]</sup>等证实黄土高原中东部 NPP 在过去 20 年亦呈现增加趋势,与本研究的结论较为相似。人类活动对于吕梁连片贫困区 NPP 的干扰也十分显著,2000 年以来该区域开展生态治理恢复工程,三北防护林布设,天然林保护、退耕还林还草等措施的实施取得了显著成果,区域绿地面积不断增加,生态环境治理效果显著。但同时人类活动的负干扰在该地区 NPP 的变化中也得到了明显的体现,如 2010—2015 年间区域 NPP 整体呈下降趋势,这与区域该时期人口的增长、城镇化水平的快速上升有直接关系,这种负干扰作用与前人在川西生态脆弱区的研究结果较为相似<sup>[36]</sup>,警示了人们在进行生产生活的同时必须注重对生态环境进行保护。

## 5 结论

本文以 2000—2018 年为研究时段,基于 MODIS 遥感数据、土地利用类型数据以及气象数据等,利用 CASA 模型对吕梁连片贫困区 NPP 值进行估算并分析得出以下结论:

(1) 自 2000 年以来,吕梁连片贫困区 NPP 年均值呈波动上升趋势,93.46% 的区域 NPP 呈增长状态,仅有 6.54% 的区域呈减少状态。

(2) 研究时段内耕地面积缩减,草地面积基本保持稳定,林地、城镇面积增加且城镇面积扩张迅速;各土地利用类型 NPP 年均值增长以耕地最为迅速,达  $5.9 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,林地最为平稳,为  $1.32 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

(3) 影响区域 NPP 变化的气象因子中,与 NPP 的相关关系从大到小依次为降水量、潜在蒸散发、气温,降水量为影响 NPP 变化的最主要气象因子。

## 参考文献(References):

- [1] 巢清尘,张永香,高翔,王谋. 巴黎协定—全球气候治理的新起点. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 61-67.
- [2] 戴尔阜,黄宇,吴卓,赵东升. 内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系. 地理学报, 2016, 71(1): 21-34.
- [3] 吴晓全,王让会,李成,蒋烨林,彭擎,李焱. 天山植被 NPP 时空特征及其对气候要素的响应. 生态环境学报, 2016, 25(11): 1848-1855.
- [4] 张芳,熊黑钢,冯娟,许仲林. 基于遥感的新疆人工绿洲扩张中植被净初级生产力动态变化. 农业工程学报, 2017, 33(12): 194-200.
- [5] 刘洋洋,王倩,杨悦,刚成诚,章钊颖,同琳静,李建龙. 黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2309-2319.
- [6] 王莺,夏文韬,梁天刚. 基于 CASA 模型的甘南地区草地净初级生产力时空动态遥感模拟. 草业学报, 2011, 20(4): 316-324.
- [7] Donmez C, Berberoglu S, Curran P J. Modelling the current and future spatial distribution of NPP in a Mediterranean watershed. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(3): 336-345.
- [8] Seaquist J W, Olsson L, Ardo J. A remote sensing-based primary production model for grassland biomes. Ecological Modelling, 2003, 169(1): 131-155.

- [9] Imhoff M L, Bounoua L, DeFries R, Lawrence W T, Stutzer D, Tucker C J, Ricketts T. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 434-443.
- [10] Haverd V, Raupach M R, Briggs P R, Canadell J G, Davis S J, Law R M, Meyer C P, Peters G P, Pickett-Heaps C, Sherman B. The Australian terrestrial carbon budget. *Biogeosciences*, 2013, 10(2): 851-869.
- [11] Hadian F, Jafari R, Bashari H, Tartesh M, Clarke K D. Estimation of spatial and temporal changes in net primary production based on Carnegie Ames Stanford Approach (CASA) model in semi-arid rangelands of Semirrom County, Iran. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(4): 477-494.
- [12] 程春晓, 徐宗学, 王志慧, 刘昌明. 2001—2010 年东北三省植被净初级生产力模拟与时空变化分析. *资源科学*, 2014, 36(11): 2401-2412.
- [13] 同琳静, 刘洋洋, 王倩, 杨悦, 李建龙. 西北植被净初级生产力时空变化及其驱动因素. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 367-374.
- [14] 孙庆龄, 李宝林, 李飞, 张志军, 丁玲玲, 张涛, 许丽丽. 三江源植被净初级生产力估算研究进展. *地理学报*, 2016, 71(9): 1596-1612.
- [15] 潘竞虎, 冯娅娅. 甘肃省潜在生态承载力估算. *生态学杂志*, 2017, 36(3): 800-808.
- [16] 刘真真, 张喜旺, 陈云生, 张传才, 秦奋, 曾红伟. 基于 CASA 模型的区域冬小麦生物量遥感估算. *农业工程学报*, 2017, 33(4): 225-233.
- [17] 李传华, 曹红娟, 范也平, 韩海燕, 孙皓, 王玉涛. 基于校正的 CASA 模型 NPP 遥感估算及分析——以河西走廊为例. *生态学报*, 2019, 39(5): 1616-1626.
- [18] 王静, 王克林, 张明阳, 章春华. 南方丘陵山地植被净第一性生产力时空动态特征. *生态学报*, 2015, 35(11): 3722-3732.
- [19] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 李琰, 赵文武, 李长嘉. 旱区人地耦合系统水-粮食-生态关联研究述评. *地理研究*, 2021, 40(2): 541-555.
- [20] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 尹礼唱, 于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. *地理学报*, 2020, 75(5): 949-960.
- [21] 孙从建, 李晓明, 张文强, 陈伟, 王佳瑞. 基于遥感信息的吕梁山贫困区生态安全评价. *中国环境科学*, 2019, 39(12): 5352-5360.
- [22] 何航, 张勃, 侯启, 李帅, 马彬, 马尚谦. 1982—2015 年中国北方归一化植被指数 (NDVI) 变化特征及对气候变化的响应. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1): 70-80.
- [23] 杨冬, 曾以禹, 熊晓斐. 加强林业扶贫是深度贫困地区实现脱贫攻坚的有效途径——晋、陕两省吕梁山区林业扶贫调研报告. *林业经济*, 2017, 39(8): 21-26, 41-41.
- [24] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [25] 孙从建, 郑振婧, 李伟, 杨伟, 侯慧新. 1964—2017 年山西省潜在蒸发量时空变化及其影响因素分析. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 229-235.
- [26] 陈福军, 沈彦俊, 李倩, 郭英, 徐丽梅. 中国陆地生态系统近 30 年 NPP 时空变化研究. *地理科学*, 2011, 31(11): 1409-1414.
- [27] 杨晗, 周伟, 石佩琪, 黄露. 内蒙古草地 NPP 时空变化格局及其与水热因子耦合关系. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 234-240.
- [28] 朱玉果, 杜灵通, 谢应忠, 刘可, 宫菲, 丹杨, 王乐, 郑琪琪. 2000—2015 年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应. *生态学报*, 2019, 39(2): 518-529.
- [29] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探. *植物生态学报*, 1995, 19(3): 193-200.
- [30] 刘芳, 闫慧敏, 顾峰雪, 牛忠恩, 黄玫. 退耕还林工程以来黄土高原植被 NPP 增长明显(英文). *资源与生态学报: 英文版*, 2017, 8(4): 413-421.
- [31] 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. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(1): 23-31.
- [32] 杨红飞, 刚成诚, 穆少杰, 章超斌, 周伟, 李建龙. 近 10 年新疆草地生态系统净初级生产力及其时空格局变化研究. *草业学报*, 2014, 23(3): 39-50.
- [33] 姜春, 吴志峰, 程炯, 钱乐祥. 广东省土地覆盖变化对植被净初级生产力的影响分析. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 961-972.
- [34] 张懿铨, 祁威, 周才平, 丁明军, 刘林山, 高俊刚, 摆万奇, 王兆锋, 郑度. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异. *地理学报*, 2013, 68(9): 1197-1211.
- [35] 秦景秀, 郝兴明, 张颖, 花顶. 气候变化和人类活动对干旱区植被生产力的影响. *干旱区地理*, 2020, 43(1): 117-125.
- [36] 陈杰, 仙巍, 陈春容. 2000—2015 年川西地区植被 NPP 时空动态及驱动因子. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 137-143.
- [37] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 常庆瑞. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 244-253.