

DOI: 10.5846/stxb202009122381

洪辛茜, 黄勇, 孙涛. 我国西南喀斯特地区 2001—2018 年植被净初级生产力时空演变. 生态学报, 2021, 41(24): 9836-9846.

Hong X Q, Huang Y, Sun T. Spatiotemporal evolution of vegetation net primary productivity in the karst region of southwest China from 2001 to 2018. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9836-9846.

我国西南喀斯特地区 2001—2018 年植被净初级生产力 时空演变

洪辛茜^{1,2}, 黄 勇¹, 孙 涛^{2,*}

1 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 植被净初级生产力 (Net primary productivity, NPP) 是陆地生态系统碳循环的重要指标, 定量评价 NPP 的变化规律是碳循环机理的主要研究内容之一。以我国西南地区为研究区域, 基于土地覆盖和 NPP 产品分析了 2001—2018 年西南地区 NPP 的时空变化特征, 利用土地转移矩阵和统计分析方法, 定量描述了土地覆盖类型变化导致的 NPP 变化量, 对 NPP 变化的主要原因进行分析。结果表明: (1) 2001—2018 年, 西南地区 NPP 均值呈波动上升趋势。(2) NPP 变化趋势在空间分布上呈南高北低, NPP 呈增长趋势主要集中在四川的中东部、重庆、贵州西部和云南东部; NPP 呈减少趋势出现在云南、四川中西部和贵州东部。(3) 森林、草地和耕地转灌丛以及灌丛转森林是对 NPP 变化量影响较大的土地覆盖类型转变, 土地类型转变导致的 NPP 净增量为 20.643 TgC。(4) 降水与 NPP 相关性低, 气温与 NPP 有一定相关性, 植被叶面积指数与 NPP 有显著相关关系, 表明气候因子对 NPP 的影响较小, 植被生长密度对 NPP 有显著影响。退耕还林还草等生态工程实施, 导致耕地面积减少和森林面积大量增加, 是西南地区 NPP 上升的主导因素, 因此生态工程的实施是西南地区 NPP 增加的重要影响因素。研究可为生态工程实施背景下 NPP 的变化机理研究提供参考。

关键词: 植被净初级生产力; 西南地区; 喀斯特; 生态工程

Spatiotemporal evolution of vegetation net primary productivity in the karst region of southwest China from 2001 to 2018

HONG Xinqian^{1,2}, HUANG Yong¹, SUN Tao^{2,*}

1 Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Net primary productivity (NPP) of vegetation is an important indicator of the carbon cycle of terrestrial ecosystems. Quantitative evaluation of the changing law of NPP is one of the main research contents of carbon cycle mechanism. This article analyzes the spatiotemporal changes of NPP in southwest China from 2001 to 2018 based on land cover and NPP products. We use land transfer matrix and statistical analysis methods to quantitatively describe the amount of NPP change caused by land cover changes and analyze the main reasons for the NPP changes. The results showed that: (1) from 2001 to 2018, the average value of the NPP in the southwest China presented a fluctuating upward trend. (2) The spatial distribution of NPP showed a high in the south and a low in the north. NPP showed a growing trend, mainly in the central and eastern parts of Sichuan, Chongqing, western Guizhou, and eastern Yunnan; NPP indicated a decreasing trend in Yunnan, central and western Sichuan and eastern Guizhou. (3) The conversion of forests, grasslands, and the cultivated land to shrubs and shrubs to forests were land cover types that had a greater impact on the amount of NPP

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41901217)

收稿日期: 2020-09-12; 网络出版日期: 2021-08-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: taosun@rcees.ac.cn

changes. The net increase in NPP caused by land type conversions is 20.643 TgC. (4) The correlation between precipitation and NPP is low. There is some correlation between air temperature and NPP and the vegetation leaf area index has a significant correlation with NPP, indicating that climatic factors have a small impact on NPP, and vegetation growth density has a significant impact on NPP. The implementation of ecological projects such as returning farmland to forest and grassland has led to a decrease in cultivated land and a substantial increase in forest area, which is the leading factor in the NPP increase. This study can provide a reference for the change mechanism of NPP under the background of ecological engineering implementation.

Key Words: net primary productivity of vegetation; southwest region; karst; ecological project

植被净初级生产力(Net Primary Production, NPP)是绿色植物在光合作用下吸收大气中的二氧化碳产生的有机干物质总量去除其自身呼吸作用耗费量的剩余有机物质^[1]。植被净初级生产力是陆地生态系统碳循环的重要指标,能够有效反映陆地土地覆盖情况、碳储备和生态环境质量等^[2-3]。探究 NPP 的时空动态变化机理对定量评估陆地生态系统的健康状况与区域可持续发展具有重要意义^[4]。

目前,NPP 相关研究主要包括两个方面,一是基于过程和遥感模型模拟估算 NPP 时空变化来评估研究区域陆地生态系统碳循环规律;二是分析 NPP 时空变化的驱动因素。气候变化和人类活动是引起 NPP 变化的主要因素^[5]。其中,快速城市化导致的土地覆盖变化和生态工程、毁林开垦、森林砍伐等人类活动引起 NPP 变化^[6-8]。城市扩张占用耕地、草地等生态用地,是造成 NPP 下降的原因之一^[9-10]。而国家大力推行的植树造林和退耕还林还草等生态工程有效提高植被覆盖度以及改善生态环境,是 NPP 增加的重要原因^[11]。

我国西南地区是中国喀斯特地貌的主要分布区,山体陡峭且基岩多裸露,水土流失较为严重,植被一旦遭到破坏恢复难度大,生态环境脆弱,人类活动对该地区易产生影响^[12-13]。20 世纪 80 年代起,国家高度重视林业发展,在重点区域实施一系列生态工程。西南地区以喀斯特地貌为主,典型的生态脆弱区,长防林工程、天保工程和坡耕地退耕等一系列国家大型生态工程在西南地区从试点到逐步推广^[7,12]。2007 年,有研究显示非喀斯特地区的 NPP 高于喀斯特地区^[14]。据《中国林业年鉴》统计数据,自 2001 年到 2018 年,西南地区的营造林总面积达到 3437.71 万 hm^2 ,这一系列生态工程对西南地区的植被绿度和覆盖度增长起到重要作用。有学者利用时间序列卫星遥感数据探究西南部分喀斯特区域大规模植树造林等生态工程对陆地生物碳的影响,认为生态工程实施后,云贵大部分地区生物碳呈上升趋势,起到有效固碳作用^[7]。植被叶面积指数、生长季植被归一化差值植被指数等相关植被指数经常被用来研究西南喀斯特地区生态工程的实施对其生态脆弱性的影响^[7,12,15]。研究表明多年来植树造林、坡耕地退耕等生态工程在西南喀斯特地区实施,喀斯特石漠化面积大幅度降低,植被生物量大幅度提升,贡献大量区域碳汇^[12,16-18],生态工程对西南喀斯特地区植被恢复起到重要作用^[16,19]。

从土地覆盖变化的角度,目前基于土地转移矩阵描述 NPP 变化的研究较多^[20-22],但进一步讨论由土地类型间相互转化而导致 NPP 的净变化研究尚不充分,土地类型间的相互转换对区域 NPP 的贡献仍缺乏定量研究。近年来在生态工程和气候变化背景下,区域气候因子和植被生长密度与区域 NPP 变化的关联性也需要重新评估。因此,本文选取我国西南的云贵川渝为研究区,分析西南地区 2001—2018 年以土地覆盖变化为驱动导致的 NPP 时空分布差异和 NPP 变化量,探究 NPP 变化主要受哪些土地类型转变影响。通过定量描述土地覆盖类型、降水、气温以及植被密度变化对区域 NPP 变化量的影响,有助于明晰生态工程实施以来西南地区的 NPP 变化影响机理。

1 研究方法

1.1 研究区概况与数据来源

1.1.1 研究区概况

本文选取我国西南地区的云南省、贵州省、四川省和重庆市作为研究区,该区域是我国喀斯特地貌的主要

分布区。西南地区有着丰富的林业资源,如下图 1 所示,其土地覆盖类型主要以灌丛、森林、草地、和耕地为主。灌丛多分布于贵州、重庆和四川东部,森林集中分布于云南中西部和四川中部,草地主要分布于四川西北,耕地分布于云南、贵州西部和四川中部。该区以亚热带季风气候为主,降水丰富,雨热同期,地形复杂,植被类型丰富^[23]。该地区具有大量的碳酸盐岩等易在流水不断溶蚀作用下形成喀斯特地貌的岩石^[24],水土流失和石漠化不断加剧并侵占着人类的生存空间成为西南地区严重的生态环境问题^[17,25]。

1.1.2 数据来源及处理

本研究采用中分辨率 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 平台 2001—2018 年的土地覆盖 (MCD12Q1)、植被净初级生产力 NPP (MOD17A3HGF) 和叶面积指数 LAI (Leaf Area Index) 产品 (MOD15A2H), 均为年度合成数据且空间分辨率为 500 m, NPP 和 LAI 产品时间分辨率为 8 d。降水数据为 Global Precipitation Measurement (GPM) V6 版本的月度合成产品, 其空间分辨率为 0.1°; 气温数据为 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) 第五代全球气候大气再分析的月平均气温产品 (2 m), 空间分辨率 0.25°×0.25°。除气温数据从 Google Earth Engine 云平台获取, 其他遥感数据来自美国国家航空航天局 EarthData 网站 (<https://earthdata.nasa.gov>)。2001—2018 年生态工程营造林数据来自 2002 年至 2019 年《中国林业年鉴》。

数据处理方面, 利用 Arcpy 模块 (基于 ArcGIS 10.3) 将遥感产品数据进行格式转换和投影变换, 利用西南四省的行政区矢量边界裁剪出研究区土地覆盖和 NPP 数据。根据国际通用的 International Geosphere—Biosphere Programme (IGBP) 分类标准, 研究提取了森林、灌丛、草地、耕地、建成区、裸地和水体 7 个地物类别。叶面积指数与产品比例因子 0.1 相乘后, 同降水、气温产品分别求取整个研究区和研究区各省的年均值。MOD17A3HGF 产品在 ArcGIS 中去除异常值, 与 MOD17 操作手册第六版中的 MOD17A3HGF 产品比例因子 0.0001 相乘后获取各年份 NPP 的值, 将 NPP 单位转换成 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。由于裸地和水体的 NPP 总量和 NPP 数值小, 与其他类型转换少, 本文主要分析森林、灌丛、草地、耕地和建成区五种类型之间的 NPP 转移变化。

1.2 研究方法

1.2.1 趋势分析和显著性检验

线性回归是描述趋势增减的经典方法, 公式如下^[26]:

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

式中, δ_{slope} 表示 18 年来各像元 NPP 的变化趋势, $i = 1, 2, 3 \dots n$ 表示年份, NPP_i 是第 i 年的植被净初级生产力年际均值, 若 $\delta_{\text{slope}} > 0$, 表明 NPP 呈现上升趋势, 反之则是下降^[27]。对 NPP 多年变化趋势进行逐像元显著性检验, 若 $P < 0.05$, 表明变化趋势通过显著性检验, 反之则未通过显著性检验。

1.2.2 相关性分析

降水、气温等气候因子会对植被净初级生产力产生影响, 同时, 植被叶面积指数能够有效指示植被生长叶

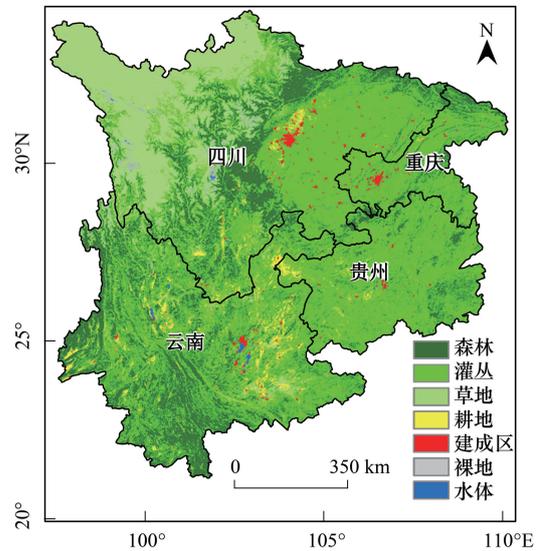


图 1 西南地区土地覆盖概况 (基于 2018 年 MCD12Q1 的 IGBP 分类)

Fig.1 Overview of land use in Southwest China (based on the IGBP classification of MCD12Q1 in 2018)

IGBP: 国际地圈-生物圈研发计划 International geosphere-biosphere programme

片密度,对 NPP 有一定的影响。通过对降水、气温、LAI 与 NPP 进行相关性分析,揭示降水、气温、LAI 与 NPP 的相关关系^[26],计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(X_i - X_a)(Y_i - Y_a)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - X_a)^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_a)^2}} \quad (2)$$

式中, R 是降水、气温、LAI 与 NPP 的相关系数, X_i 为第 i 年的年降水量、年均气温或年均叶面积指数, Y_i 为第 i 年的 NPP 年均值, X_a 是变量 X 的平均值, Y_a 是变量 Y 的平均值。决定系数 R^2 也称为拟合优度,是相关系数的平方。

1.2.3 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵是分析土地类型转移的有效工具,能获取各土地类型转变的定量数据^[28],本文将 2001 和 2018 年的土地覆盖分类图在 ENVI 软件中进行土地覆盖变化计算,获取 2001—2018 时间段的土地利用转移矩阵,通过土地利用转移矩阵分析研究区各土地覆盖类型之间的转移量,为之后的土地类型转变导致的 NPP 变化量提供基础数据。

1.2.4 土地覆盖类型变化导致的 NPP 变化

在土地利用转移矩阵的基础上,以 2018 年各土地覆盖类型的 NPP 均值为基准计算不同土地覆盖类型相互转换导致的 NPP 变化量。计算方法为将某一土地类型转入其他类型产生的 NPP 量减去该类型转移区域原有的 NPP 量^[29]。公式如下:

$$\Delta NPP = NPP_{out} - NPP_{former} \quad (3)$$

式中, ΔNPP 表示某一土地类型转为其他类型导致的 NPP 转移量, NPP_{out} 表示某一土地类型转入其他类型产生的 NPP 量, NPP_{former} 表示该类型转移区域原有的 NPP 量。

之后,计算单一土地类型转入和转出导致的本类型 NPP 净变化量,将转入某一土地类型的 NPP 转入总量减去该类型 NPP 的转出总量得到该类型的 NPP 净变化量。

2 结果

2.1 植被净初级生产力年际变化

对西南地区 2001—2018 年的植被 NPP 年均值进行统计分析,其 NPP 年均值在 668.21—752.55 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 上下波动。NPP 年均值最高值出现在 2015 年,为 752.55 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$,最低值出现在 2004 年,为 668.21 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$,多年 NPP 平均值为 710.44 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。由 2001—2018 年 NPP 年均值变化趋势来看(图 2),自 2001 年以来,研究区这 18 年间 NPP 年均值整体趋势呈显著性水平波动上升($P < 0.01$),其变化率为 3.17 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。

对西南地区 2001—2018 年森林、灌丛、草地、耕地和建成区逐年 NPP 总量变化进行统计,结果如图 3 所示。总体来看,耕地和草地的 NPP 总量呈下降趋势,其他类型呈波动上升趋势。其中,森林的 NPP 总量增长速率最快,增长斜率为 2.545 TgC/a ,灌丛次之(1.719 TgC/a),建成区增长最慢(0.056 TgC/a);耕地的 NPP 总量下降速率比草地快,耕地变化速率为 -0.631 TgC/a ,草地为 -0.422 TgC/a 。不同土地覆盖类型的 NPP 总

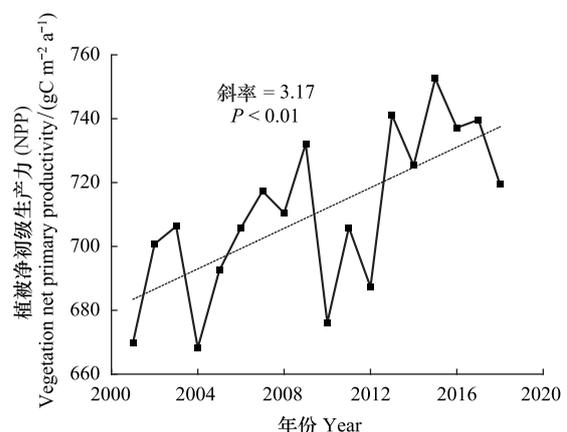


图 2 2001—2018 年西南地区 NPP 均值年际变化

Fig.2 Inter-annual change of the mean value of NPP of southwest China from 2001 to 2018

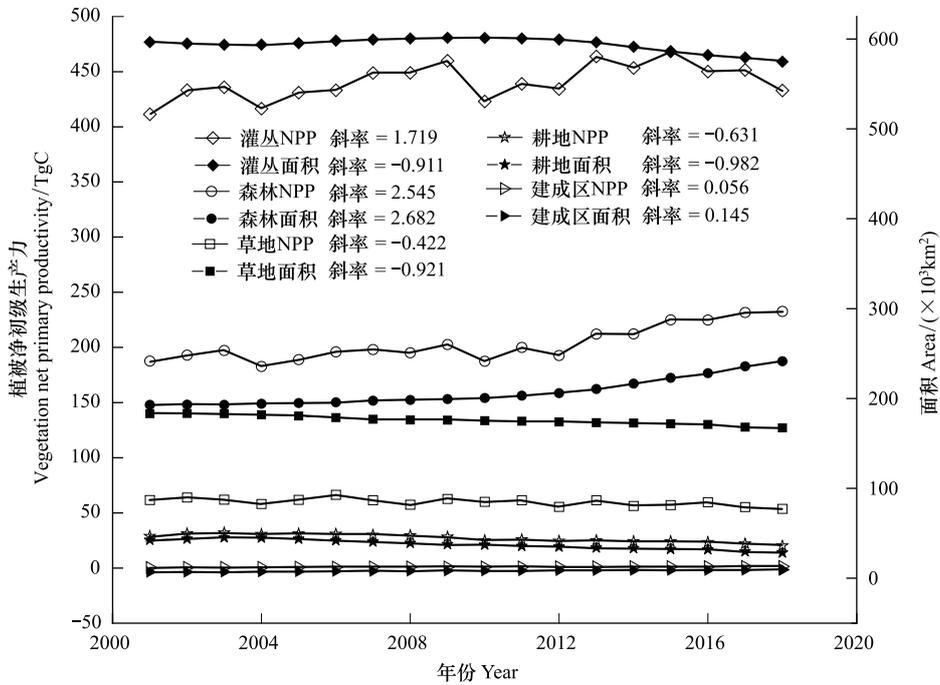


图3 不同地类逐年份 NPP 总量和面积变化

Fig.3 Changes in total NPP and area of different land types year by year

量年均值差异明显,灌丛(440.770 TgC/a)>森林(203.313 TgC/a)>草地(59.757 TgC/a)>耕地(26.964 TgC/a)>建成区(0.953 TgC/a)。不同土地覆盖类型 NPP 总量和增长速率差异与各类型的面积有密切关系。2001—2018 年间,灌丛、森林和草地分布较多,灌丛占有面积最大,多年均值为 $593.60 \times 10^3 \text{ km}^2/\text{a}$,灌丛($593.60 \times 10^3 \text{ km}^2/\text{a}$)>森林($206.91 \times 10^3 \text{ km}^2/\text{a}$)>草地($176.02 \times 10^3 \text{ km}^2/\text{a}$)>耕地($37.60 \times 10^3 \text{ km}^2/\text{a}$)>建成区($8.19 \times 10^3 \text{ km}^2/\text{a}$)。在土地覆盖面积变化方面,灌丛、草地和耕地面积呈现减少趋势,分别为 -0.911 、 -0.921 、 $-0.982 \text{ km}^2/\text{a}$;森林和建成区面积呈现增加趋势,森林面积增长速率为 $2.682 \text{ km}^2/\text{a}$,建成区增长速率仅 $0.145 \text{ km}^2/\text{a}$ 。

2.2 植被净初级生产力空间分布差异

2001—2018 年,西南地区 NPP 平均值空间分布呈现南高北低的现象,云南省西南方向 NPP 均值最高;低值区域主要在四川省的东西两侧和重庆市的西部。对研究区域 NPP 均值进行统计,NPP 均值范围在 $0-1943.43 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 间波动,平均值为 $710.44 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,不同省域 NPP 均值差异较大,云南($989.63 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)>贵州($773.00 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)>重庆($597.20 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)>四川($496.27 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。

2001—2018 年西南地区 NPP 变化速率为 $-92.12-114.88 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。经统计,NPP 变化趋势为正的区域占研究区面积的 73.62%,表明研究时段内大部分区域 NPP 呈增加趋势(图 4)。增加明显的地区主要分布在

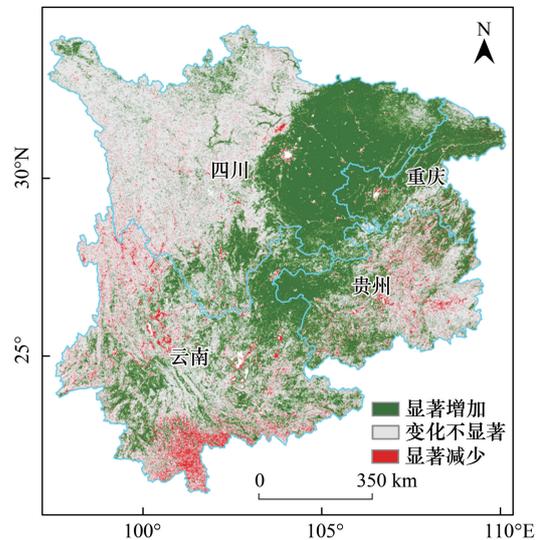


图4 2001—2018 年西南地区 NPP 平均值线性变化趋势显著性图

Fig.4 Significance of the linear change trend of the average value of NPP in Southwest China from 2001 to 2018

四川的中东部、重庆、贵州西部和云南东部,显著增加区域占比为 35.69%。仅 4.4% 的区域显著减少,分布在云南和四川中西部和贵州东部。变化不显著区域占 59.91%,主要出现在四川和云南中西部和贵州中东部。

2.3 NPP 变化的驱动因子分析

我国西南喀斯特地区是一个生态脆弱区,植被净初级生产力变化受到气候因子和人类活动等因素的共同作用。气候因子会影响植被的生长发育进而影响 NPP^[26];叶面积指数能反映植被生长密度,植被的生长密度和覆盖面积会对 NPP 产生影响^[7]。因此,本研究考虑降水、气温、叶面积指数和土地覆盖类型转变对 NPP 的影响。

2.3.1 降水、气温和叶面积指数与 NPP 的相关关系

从整体上看,西南地区 2001—2018 年 NPP 年均值变化与年降水量没有显著的相关关系,与年均气温有较显著相关关系, R^2 为 0.45;与植被叶面积指数显著相关, R^2 为 0.67(图 5)。从西南各省的 LAI、年降水量、年均气温与 NPP 年均值的关系来看(图 6),各省的 LAI 与 NPP 年均值都显著相关,年降水量与 NPP 相关性低,年均温与 NPP 相关性在不同省份差异较大。其中,云南省的 LAI 和 NPP 年均值相关性最高, R^2 为 0.56,重庆市和四川省为 0.53,贵州省为 0.48。在年降水量与 NPP 年均值的相关性方面,西南地区各省的年降水量与 NPP 年均值的相关性都较低,最高的为重庆,线性回归 R^2 为 0.27。在年平均气温与 NPP 年均值的相关性方面,仅四川和贵州省的年均气温与 NPP 年均值相关性较高, R^2 分别为 0.41 和 0.37。这表明在西南地区气候因子对 NPP 的影响相对较弱,与 NPP 有显著关联的是植被生长密度。

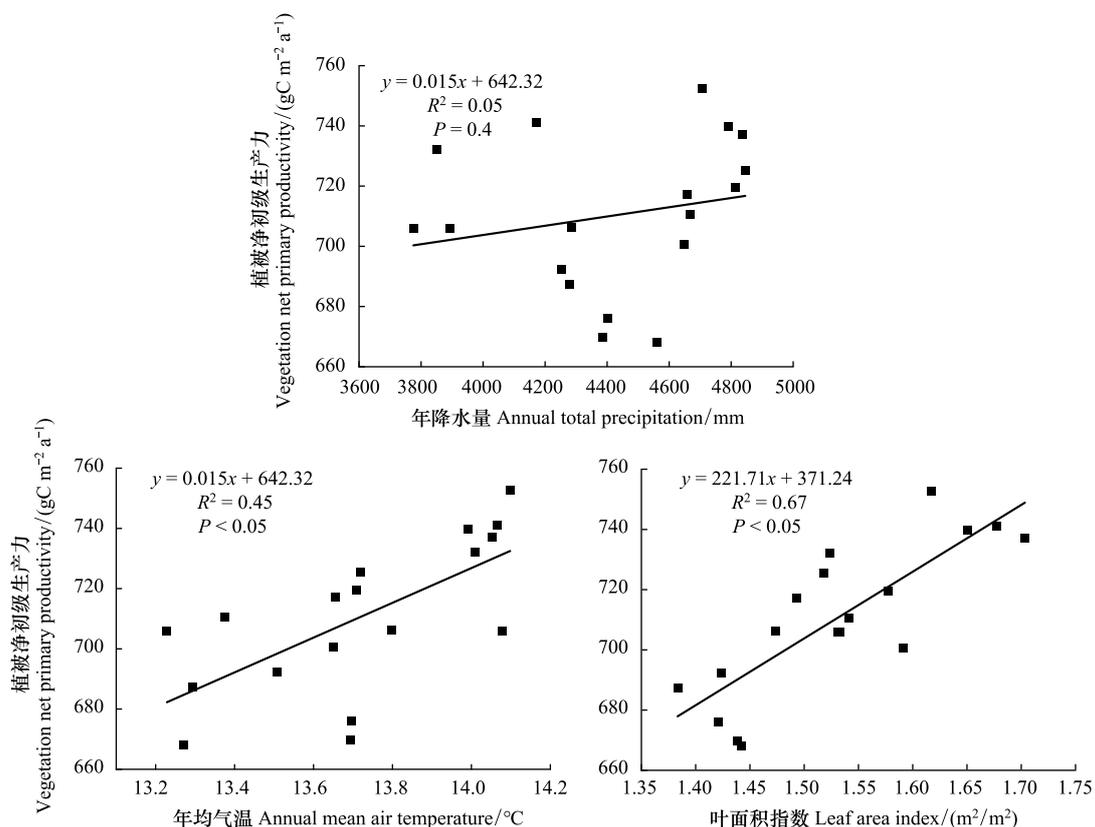


图 5 2001—2018 年西南地区 NPP 年均值与 LAI 年均值和区域气候因子的关系

Fig.5 The relationship between the annual average value of NPP and the annual average value of LAI and climatic factors in the southwest region from 2001 to 2018

2.3.2 土地覆盖类型转换对 NPP 的影响

利用研究区 2001 和 2018 年的土地覆盖分类图计算得到 2001—2018 年的土地利用转移矩阵,结果表明

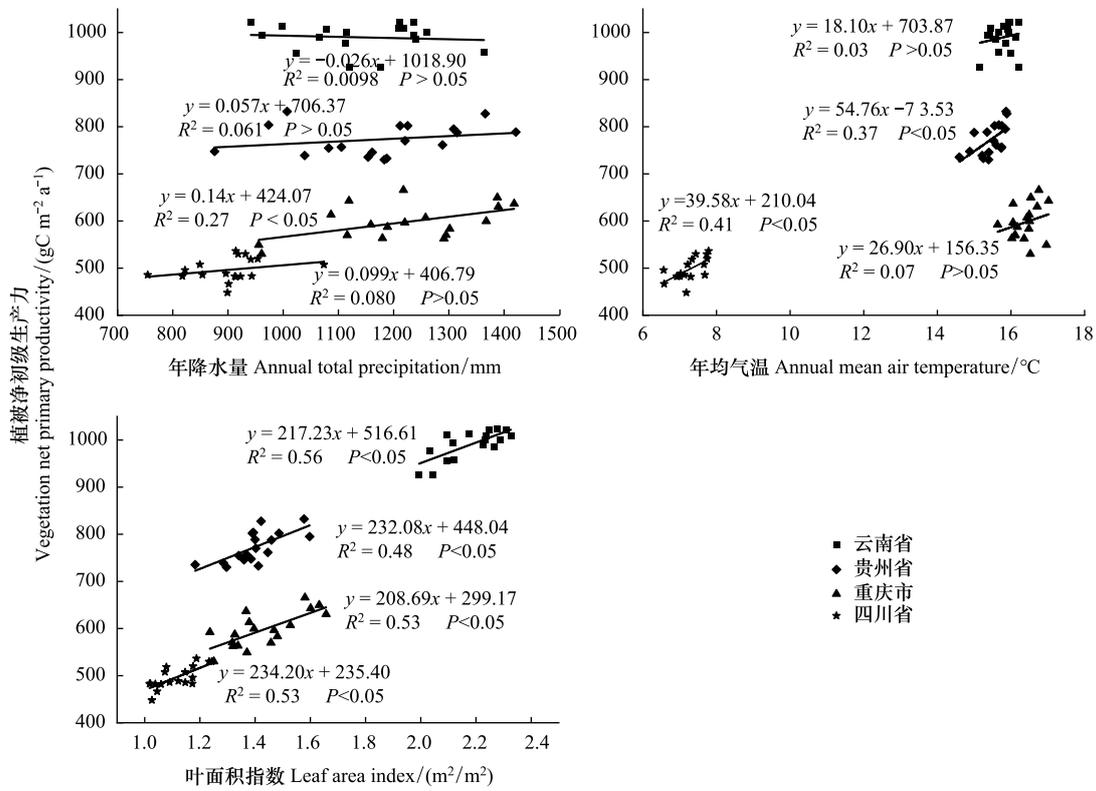


图6 2001—2018年西南各省NPP年均值与LAI年均值和气候因子的关系

Fig.6 Relationship between annual mean value of NPP and annual mean value of LAI and climatic factors in southwest Provinces from 2001 to 2018

研究区以灌丛、森林、草地、耕地和建成区的转变为主(图7)。2001—2018年,各类土地覆盖转移总面积为153648.5 km²。转出最多的地类是灌丛,转出83291.75 km²,主要转为森林(66059.25 km²)。灌丛转森林主要分布于云南、贵州、重庆以及四川中部,占灌丛转出总面积的79.31%。草地、耕地和森林转出总面积分别为28619.75 km²、22096.5 km²和18003.75 km²,多数都转为灌丛。其中,森林转灌丛主要出现在云南、四川中西部和贵州东部,草地转灌丛分布于云南西北和东部、四川中西部和贵州南部,耕地转灌丛分布于云南、贵州西部和四川中部部分地区。

不同土地类型的NPP均值差异较大,森林(963.864 gC m⁻² a⁻¹)>灌丛(753.314 gC m⁻² a⁻¹)>耕地(712.688 gC m⁻² a⁻¹)>草地(320.173 gC m⁻² a⁻¹)>建成区(156.773 gC m⁻² a⁻¹)。森林的NPP均值最高,因此,森林转为其他类型导致NPP减少,低生产力土地类型向灌丛和森林等高生产力类型转变导致NPP增加。

利用土地利用转移矩阵,计算土地类型转变导致的NPP转移量(表1)。土地覆盖类型转换对NPP的影响主要是两类情形:一是灌丛转为森林以及耕地、草地转

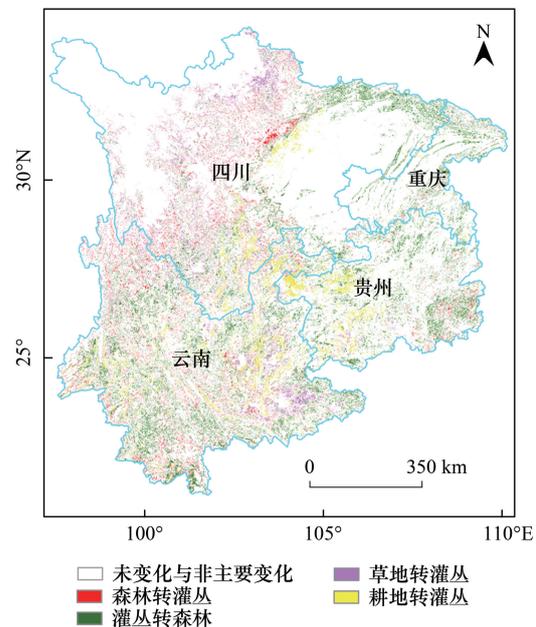


图7 2001—2018年西南地区土地覆盖类型转变空间分布
Fig.7 Spatial distribution of land use type transition in Southwest China from 2001 to 2018

为灌丛导致 NPP 增加;二是森林转为灌丛以及灌丛转为草地、建成区导致 NPP 减少。灌丛转入森林,NPP 增加 13.909 TgC,草地转入灌丛,NPP 增加 10.647 TgC,耕地转入灌丛时,NPP 增加 3.075 TgC。森林转为灌丛,NPP 净减少 3.708 TgC,灌丛转草地、建成区分别净减少 3.812 TgC 和 1.165 TgC。森林的转入总量最多,增加了 14.198 TgC,灌丛的转入总量增加了 10.014 TgC,草地转入总量减少 5.007 TgC。森林 NPP 转出总量减少 3.944 TgC,灌丛、草地和耕地的转出 NPP 分别增加了 8.695、11.728、1.787 TgC,由于森林的 NPP 均值最高,无论转成何种类型,其 NPP 总量都是减少的。而灌丛、草地和耕地的转出大多是以转入森林为最终方向,故转出 NPP 总量为增加。建设用地没有转出,转出 NPP 为 0。

表 1 2001—2018 年西南地区土地覆盖类型变化过程中的 NPP 转移量/(TgC)

Table 1 The amount of NPP transferred during the change of land use types in Southwest China from 2001 to 2018

| 2001 年 | 2018 年 | | | | | 转出总量 Total transfer out |
|------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|
| | 林地 Forest land | 灌丛 Shrubland | 草地 Grassland | 耕地 Cultivated land | 建成区 Built up area | |
| 林地 Forest land | — | -3.708 | -0.229 | -0.005 | -0.002 | -3.944 |
| 灌丛 Shrubland | 13.909 | — | -3.812 | -0.237 | -1.165 | 8.695 |
| 草地 Grassland | 0.275 | 10.647 | — | 0.815 | -0.009 | 11.728 |
| 耕地 Cultivated land | 0.014 | 3.075 | -0.966 | — | -0.336 | 1.787 |
| 建成区 Built up area | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | — | 0.000 |
| 转入总量 Total transfer in | 14.198 | 10.014 | -5.007 | 0.573 | -1.512 | — |

为了更深入探讨土地覆盖类型转换对研究区 NPP 的影响,本文基于 2018 年各土地覆盖类型 NPP 均值计算净转入和转出量,分析各类型转入转出的 NPP 净变化值,如表 2 所示。结果表明,各土地覆盖类型的 NPP 净变化值合计增加 20.643 TgC,森林转入的 NPP 净增量起到重要作用,不仅弥补灌丛、草地和耕地的 NPP 净减,而且使区域 NPP 有所增长。森林 NPP 转入总量为 64.136 TgC,转出总量为 17.337 TgC,净增加 46.799 TgC。森林转入面积(66548 km²)远多于转出面积(18003.75 km²),其中灌丛转入森林 66059.25 km²,转入量达土地类型转移总面积的 54.21%,因此,森林 NPP 增加量远大于减少量。灌丛转出总面积(83291.75 km²)多于草地(24581.5 km²)和耕地(18922.25 km²)转入灌丛的面积,故灌丛的转入总量(46.038 TgC)低于转出总量(62.251 TgC)。耕地 NPP 净减少 10.063 TgC,耕地多数转入灌丛和草地,少部分转为森林和建设用地,转出面积(22096.5 km²)多于转入面积(7928.5 km²)。西南地区森林面积的大幅度增加和耕地面积的减少,国家的退耕还林工程和防护林等生态工程起到重要作用,2001—2018 年西南地区各省生态工程造林情况如表 3 所示。从 2001 年到 2018 年以来,西南四省开展了诸如退耕还林还草工程、天然林资源保护、珠江防护林工程和天保工程等一系列生态工程,造林成效显著,总计新增营造林达 3437.71 万 hm²。其中,四川省和云南省的营造林数目较多,分别为 1426 万 hm²和 950.78 万 hm²,是重庆市和贵州省的两倍之多。

表 2 2001—2018 年西南地区各土地覆盖类型 NPP 净变化量/TgC

Table 2 The net change in NPP of land use types in Southwest China from 2001 to 2018

| | 森林 Forest land | 灌丛 Shrubland | 草地 Grassland | 耕地 Cultivated land | 建成区 Built up area |
|---------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|----------------------|
| 转入总量 Total transfer in | 64.136 | 46.038 | 8.4 | 5.645 | 0.41 |
| 转出总量 Total transfer out | 17.337 | 62.251 | 8.69 | 15.708 | 0 |
| 转入-转出 Transfer in- transfer out | 46.799 | -16.213 | -0.29 | -10.063 | 0.41 |
| 合计 Total | | | 20.643 | | |

3 讨论与结论

3.1 讨论

植被净初级生产力是陆地生态系统中生态功能和碳循环的重要指标,探究 NPP 时空变化和驱动因子具

有重要意义^[30-31]。本研究分析了西南地区 2001—2018 年 NPP 时空演变差异,在此基础上分析了 NPP 变化机理。时间趋势上,2001—2018 年西南地区 NPP 均值呈显著性波动上升,草地、耕地转入灌丛以及灌丛转入森林起到重要作用。空间上,西南地区大部分区域 NPP 呈增加趋势,占比达 73.62%,主要集中在四川的中东部、重庆和云贵边界附近区域(图 4)。将年降水量、年均气温、植被叶面积指数与 NPP 年均值进行回归分析显示,年降水量与 NPP 年均值相关性低;年均气温与 NPP 年均值相关性较强,在不同省份相关性差异大;叶面积指数与 NPP 年均值呈显著相关。表明气候因子对 NPP 的影响较弱,NPP 增长与植被生长密度增加有显著相关关系。截至 2018 年,西南地区生态工程营造林总计达 3437.71 万 hm^2 ,植被覆盖面积大量增加。2001—2018 年,西南地区森林净转入面积 48544.25 km^2 ,NPP 净增长 48.799 TgC ,土地类型转换导致森林面积的大量增长,提升了区域 NPP 总量。这表明人类活动对西南地区植被净初级生产力有着极大影响,这与西南地区开展的一系列诸如退耕还林(草)和人工造林等生态工程有很大关系^[12]。

表 3 2001—2018 年西南地区各省生态工程造林情况/ $(\times 10^4 \text{ hm}^2)$
Table 3 Afforestation by ecological projects in all provinces of southwest China from 2001 to 2018

| 营造林 Afforestation | 云南省 Yunnan Province | 重庆市 Chongqing | 贵州省 Guizhou Province | 四川省 Sichuan Province |
|----------------------|------------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|
| 2001—2005 | 267.41 | 131.79 | 197.64 | 617.32 |
| 2006—2010 | 260.23 | 132.08 | 106.42 | 278.66 |
| 2011—2015 | 286.21 | 128.21 | 165.82 | 295.69 |
| 2016—2018 | 136.93 | 80.3 | 118.67 | 234.33 |
| 总计 Total | 950.78 | 472.38 | 588.55 | 1426 |
| | | 3437.71 | | |

土地覆盖类型转变对西南地区 NPP 有着重要影响。本研究表明,在 2001—2018 年间,草地、耕地转为灌丛以及灌丛转为森林对 NPP 变化有较大影响。耕地转出面积合计 22096.5 km^2 ,远高于转入(7928.5 km^2);森林转入面积高达 66548 km^2 ,远多于转出的 18003.75 km^2 。耕地的转出主要以转入灌丛(18922.25 km^2)和草地(2460.25 km^2)为主,这符合国家 2000 年来在西南地区实施的退耕还林还草工程。宜林荒山造林、抚育中幼林、改造低产低效林和封山育林等生态工程措施使得西南地区营造林数量大幅度提升,对 NPP 的提升起到极大的促进作用,四川和云南尤为显著。66059.25 km^2 灌丛转为森林,NPP 增长 13.909 TgC 。森林的转入面积远大于转出面积,森林的 NPP 值高,其他低生产力类型转为森林会导致 NPP 增加,因此森林 NPP 净增长 46.799 TgC 。草地和耕地面积均呈减少趋势,NPP 总量呈现下降趋势,NPP 分别净减少 0.29 TgC 和 10.063 TgC 。草地和耕地主要转为灌丛,这弥补了一部分灌丛大量转出损失的 NPP。灌丛大量面积转入森林,耕地和草地转入灌丛少于灌丛转为森林,灌丛转出的面积比转入的面积多,造成对其单一类型而言 NPP 净减少 16.213 TgC 。西南地区实施的封山育林措施和低效林改造等生态工程有效提升了植被生长密度,促使灌丛朝着生产力高的森林生长,有助于灌丛自身的 NPP 含量提升。且灌丛的占有面积是所有土地覆盖类型中最多的,多年平均面积 593.60 $\times 10^3 \text{ km}^2$,占研究区面积的 58.06%。因此,灌丛 NPP 总量呈增加趋势。这在童晓伟等学者对中国南方森林 2002—2017 年带来大量的碳汇研究中得到验证^[18]。

综上所述,西南地区土地覆盖类型转换是 NPP 变化的重要影响因素,退耕还林和植树造林等生态工程的实施是植被净初级生产力呈增加趋势的重要原因^[7]。本文主要探讨西南地区由于土地覆盖类型转变导致的 NPP 变化,气候因子仅考虑了降水和气温,并未考虑其他气候因子,今后还需要考虑更多的气候因子对植被净初级生产力的影响。生态工程造林成效主要基于省域尺度数据,今后应进一步提高数据精度,以便将来更好的探究生态工程对西南地区植被净初级生产力的影响。

3.2 结论

本文基于遥感数据,分析了我国西南喀斯特地区 2001—2018 年的 NPP 时空变化,计算了森林、灌丛、耕地、草地和建成区相互转换导致的 NPP 变化量,分析了降水、气温和植被密度与 NPP 变化的关联性。结果表

明:(1)2001—2018 年,西南地区 NPP 均值呈现显著性波动上升,变化率为 $3.17 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。灌丛、草地和耕地面积呈减少趋势,耕地面积减少率最高,森林和建成区面积呈增加趋势。森林、灌丛和建成区 NPP 总量呈增加趋势,其中森林增长率最高,草地和耕地的 NPP 总量呈减少趋势。(2)NPP 平均值表现为南高北低,高值区以云南省为主。多数区域 NPP 呈增加趋势,集中分布于四川的中东部、重庆、贵州西部和云南东部;NPP 减少主要出现在云南、四川中西部和贵州东部。(3)灌丛转为森林以及森林、草地和耕地转为灌丛对研究区 NPP 有较大影响。森林转灌丛,NPP 减少 3.708 TgC ;草地和耕地转灌丛,NPP 分别增加 10.647 TgC 和 3.075 TgC ;灌丛转森林,NPP 增加 13.909 TgC 。土地类型转换导致 NPP 净增加 20.643 TgC ,主要由于森林的净转入量大大高于转出量,弥补了灌丛、草地和耕地的 NPP 净减。(4)总体上,西南地区降水与 NPP 变化的相关性不大,气温与 NPP 有一定相关性,而植被密度与 NPP 有显著相关关系。封山育林、宜林荒山造林等生态工程极大提高了植被生长密度和覆盖度,是 NPP 增加的主要驱动因子。

参考文献 (References):

- [1] Foley J A. Net primary productivity in the terrestrial biosphere: the application of a global model. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99 (D10): 20773-20783.
- [2] 刘洋洋, 章钊颖, 同琳静, 王倩, 周伟, 王振乾, 李建龙. 中国草地净初级生产力时空格局及其影响因素. *生态学杂志*, 2020, 39(2): 349-363.
- [3] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [4] 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.
- [5] Teng M J, Zeng L X, Hu W J, Wang P C, Yan Z G, He W, Zhang Y, Huang Z L, Xiao W F. The impacts of climate changes and human activities on net primary productivity vary across an ecotone zone in Northwest China. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136691.
- [6] Guan X B, Shen H F, Li X H, Gan W X, Zhang L P. A long-term and comprehensive assessment of the urbanization-induced impacts on vegetation net primary productivity. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 342-352.
- [7] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Horion S, Wang K L, de Keersmaecker W, Tian F, Schurgers G, Xiao X M, Luo Y Q, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H S, Fensholt R. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. *Nature Sustainability*, 2018, 1 (1): 44-50.
- [8] 裴凤松, 王坤, 刘小平, 吴长江, 周义, 刘利安. 长江三角洲城市化地区植被初级生产力的时空变化研究. *地球信息科学学报*, 2018, 20 (6): 862-870.
- [9] 袁甲, 沈非, 王甜甜, 罗小瑞. 2000-2010 年皖江城市带土地利用/覆被变化对区域净初级生产力的影响. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 245-250.
- [10] Liu X P, Pei F S, Wen Y Y, Li X, Wang S J, Wu C J, Cai Y L, Wu J G, Chen J, Feng K S, Liu J G, Hubacek K, Davis S J, Yuan W P, Yu L, Liu Z. Global urban expansion offsets climate-driven increases in terrestrial net primary productivity. *Nature Communications*, 2019, 10 (1): 5558.
- [11] Du J Q, Quan Z J, Fang S F, Liu C C, Wu J H, Fu Q. Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its causes in China since the Chinese economic reform. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(1): 1144-1159.
- [12] 吕妍, 张黎, 闫慧敏, 任小丽, 王军邦, 牛忠恩, 顾峰雪, 何洪林. 中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及其成因. *生态学报*, 2018, 38 (24): 8774-8786.
- [13] 董丹, 倪健. 利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力. *生态学报*, 2011, 31(7): 1855-1866.
- [14] 王冰, 杨胜天, 王玉娟. 贵州省喀斯特地区植被净第一性生产力的估算. *中国岩溶*, 2007, 26(2): 98-104.
- [15] 张雪梅, 王克林, 岳跃民, 童晓伟, 廖楚杰, 张明阳, 姜岩. 生态工程背景下西南喀斯特植被变化主导因素及其空间非平稳性. *生态学报*, 2017, 37(12): 4008-4018.
- [16] 史晨璐, 吴秀芹. 喀斯特断陷盆地土地利用对生态系统生产力的影响. *北京大学学报: 自然科学版*, 2020, 56(2): 341-351.
- [17] 何霄嘉, 王磊, 柯兵, 岳跃民, 王克林, 曹建华, 熊康宁. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展. *生态学报*, 2019, 39(18): 6577-6585.
- [18] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Ciaia P, Jepsen M R, Penuelas J, Wigneron J P, Xiao X M, Song X P, Horion S, Rasmussen K, Saatchi S, Fan L, Wang K L, Zhang B, Chen Z C, Wang Y H, Li X J, Fensholt R. Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 129.
- [19] 冯国艳, 马明国. 西南地区 2001—2014 年植被变化时空格局. *中国岩溶*, 2018, 37(6): 866-874.

- [20] 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.
- [21] 赵晓, 周文佐, 田罗, 何万华, 章金城, 刘东红, 杨帆. 土地利用变化对三峡库区重庆段植被净初级生产力的影响. 生态学报, 2018, 38(21): 7658-7668.
- [22] 黄露, 周伟, 李浩然, 周富春, 杨晗. 土地利用/覆被变化对鄂尔多斯市草地生态系统净初级生产力的影响. 水土保持通报, 2018, 38(4): 46-52, 59-59.
- [23] 黄晓云, 林德根, 王静爱, 常晟. 气候变化背景下中国南方喀斯特地区 NPP 时空变化. 林业科学, 2013, 49(5): 10-16.
- [24] 蓝安军, 熊康宁, 安裕伦. 喀斯特石漠化的驱动因子分析——以贵州省为例. 水土保持通报, 2001, 21(6): 19-23.
- [25] 王俊丽, 张忠华, 胡刚, 付瑞玉, 周元慧, 陶旺兰. 基于文献计量分析的喀斯特植被生态学研究态势. 生态学报, 2020, 40(3): 1113-1124.
- [26] 熊小菊, 廖春贵, 胡宝清, 陈月连, 朱海珍. 基于 MODIS 的广西植被 NPP 时空分异及驱动力分析. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2019, 37(3): 187-195.
- [27] 乌尼图, 刘桂香, 刘爱军, 白海花, 朝鲁孟其其格. 天然草原净初级生产力变化监测与驱动力分析——以锡林郭勒草原为例. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1233-1240.
- [28] 陈探, 刘森, 胡远满, 吕久俊, 马俊, 孙风云, 宫继萍. 沈阳经济区土地利用和净初级生产力变化. 生态学报, 2015, 35(24): 8231-8240.
- [29] 孙涛, 孙然好, 陈利顶. 京津冀城市群土地利用转化对植被净生产力的影响模式研究. 环境生态学, 2020, 2(4): 1-8, 17-17.
- [30] Li C, Wang R H, Tan M L. Spatio-temporal changes in vegetation net primary productivity and its responses to climatic factors in Jiangsu province, eastern China. Sains Malaysiana, 2019, 48(11): 2317-2324.
- [31] 高艳妮, 于贵瑞, 张黎, 刘敏, 黄玫, 王秋风. 中国陆地生态系统净初级生产力变化特征——基于过程模型和遥感模型的评估结果. 地理科学进展, 2012, 31(01): 109-117.