长江流域片 2000－2015 年植被 NPP 时空特征及影响因子探测

冯 婉[1]，谢世友[1,2]

（1.西南大学 地理科学学院，重庆 400715；2.西南大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室，重庆 400715）

摘 要：植被净初级生产力对评价全球变化背景下植被生长状况、陆地生态系统质量、资源环境监测具有重要意义。基于 2000—2015 年的 MODIS NPP 产品 MOD17A3 数据，结合 DEM 数据、气象数据、土地利用数据，运用趋势分析、相关性分析、地理探测器等模型方法，探讨长江流域片植被 NPP 的时空特征，揭示了各驱动因子的贡献率。结果表明：(1) 16 a 间植被 NPP 均值在 478.4～547.4 gC/(m² · a)，平均值为 516.5 gC/(m² · a)，流域内 NPP 整体表现为缓慢上升趋势。(2) 流域内 NPP 空间分布格局为自东南向西北减少，16 a 间大部分地区 NPP 值基本不变，云南省迪庆州、贵州省毕节市西部增长最明显，下降区域多分布于贵州省东部。(3) 研究区内植被 NPP 与气温、降水均呈正相关；NPP 随海拔增加呈先增加后下降的趋势，2 000～3 500 m 海拔范围内植被 NPP 值最高，且集中于横断山区；坡度小于 15°的区域对整个研究区 NPP 值贡献最大；林地面积最大且 NPP 均值最大，对研究区的植被 NPP 值贡献最大。(4) 各因子对 NPP 的解释力排序为海拔＞气温＞降水＞土地利用类型＞坡度，单因子海拔对 NPP 的解释力最强，海拔与气温双因子交互作用对 NPP 的解释力最强。研究结果可为长江流域生态修复及可持续发展提供数据支持。

关键词：净初级生产力；长江流域片；驱动因子；地理探测器

中图分类号：Q948 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-3409(2022)01-0176-08

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2022.01.019

Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Vegetation NPP in the Yangtze River Basin from 2000 to 2015

FENG Wan[1], XIE Shiyou[1,2]

(1.*School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*; 2.*Key Laboratory of Eco-Environment in the Three-Gorge Reservoir Region, Ministry of Education, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*)

Abstract: Vegetation net primary productivity (NPP) plays an important role in evaluating vegetation growth, terrestrial ecosystem quality, and resource and environmental monitoring. Based on MODIS NPP data from 2000 to 2015 and together with DEM data, meteorological data and land use data, we examined the spatiotemporal characteristics of vegetation NPP in the Yangtze River Basin and explored the contribution rate of each driving factor by using trend analysis, correlation analysis and geographic detector modeling methods. The results indicate that: (1) the overall NPP of vegetation in the basin was increasing slowly with the range from 478.4 gC/(m² · a) to 547.4 gC/(m² · a) and an average of 516.5 gC/(m² · a); (2) the NPP value in the basin decreased from southeast to northwest and remained unchanged in most areas during the past 16 years, in which the obvious increase appeared in the western part of Diqing Prefecture of Yunnan Province and Bijie City of Guizhou Province, and the decrease mainly occurred in the eastern part of Guizhou Province; (3) NPP of vegetation in the study area was positively correlated with temperature and precipitation, and with increasing altitude, the NPP of vegetation increased initially and then started to a drop, reached to the summit in the altitude range of 2 000～3 500 m and concentrated in the Hengduan Mountain region; the contribution of NPP of the region with a slope less than 15 degrees to NPP value of this study area was the

收稿日期：2021-02-04 **修回日期**：2021-02-24

资助项目：国家科技支撑计划课题“喀斯特高原峡谷石漠化综合治理技术与示范”(2011BAC09B0116)

第一作者：冯婉(1997—)，女，四川达州人，硕士研究生，主要从事自然地理、水土保持、资源开发与区域可持续发展等方面的研究。E-mail：1710939095@qq.com

通信作者：谢世友(1960—)，男，江苏徐州人，教授，博士，主要从事自然地理、水土保持、资源开发与区域可持续发展等方面研究。E-mail：xiesy@swu.edu.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

highest; the area of forest land was the largest, and the average NPP of the forests was the highest; (4) the contribution of each factor to NPP decreased in the order: altitude>temperature>precipitation>land-use>slope; altitude as single factor had the greatest influence on NPP, while the interaction of altitude and temperature had even more significant effect. These results can provide data support for ecological restoration and help maintain sustainable development of the Yangtze River Basin.

Keywords: net primary productivity (NPP); Yangtze River Basin; driving factors; Geodetector

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指绿色植被在单位时间、面积通过光合作用产生的有机物质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分[1-2]。NPP 能直接反映地表植被在自然环境下的生产状况[3],研究 NPP 时空尺度的变化趋势,可以了解植被活动和陆地生态系统的质量状况,探究气候变化与人类活动等因素影响下陆地植被的响应机制。陆地生态系统对气候变化的响应成为热点研究议题,定量分析 NPP 时空动态变化特征和驱动因子,对评价全球变化背景下区域植被生长状况、陆地生态系统质量、资源环境监测提供科学依据。

国内外对 NPP 的研究主要经过了"站点实测——统计模型——机理模型"3 个阶段[4],站点实测为最早的测定方法,但受到诸多条件限制而不便于开展,目前较多的研究集中于利用遥感和地理信息技术手段采用不同模型估算陆地植被 NPP 值,研究区域也延伸到市域、省域、自然地理分区、全国乃至全球尺度。国内对 NPP 的研究,研究尺度多集中在省域、自然区划等,研究方法主要有 CASA 模型、Hurst 指数、趋势分析、变异系数等,研究内容多为时空特征、驱动因子等[5]。MODIS NPP 产品 MOD17A3 是基于 MODIS 遥感参数、参考 BIOME-BGC 模型与光能利用率模型模拟的 NPP 数据[6-7],目前已经广泛应用到诸多研究尺度。国内已有诸多学者利用 MOD17A3 产品针对不同区域、不同时间尺度进行了研究,潘洪义等[8]对岷江中下游地区植被 NPP 时空格局演变进行了研究;刘旻霞等[9]对青海省植被 NPP 时空格局变化及其驱动因素进行了研究;刘刚等[10]对 2001—2014 年中国植被 NPP 时空变化做了研究并探讨了与气象因子的关系。

长江流域片横跨我国东、中、西 3 个经济区,随着经济发展、气候变化及人类活动的影响,长江流域片面临生境退化、生物多样性减少、生态服务功能减弱等问题,上游区域草场退化、喀斯特山区石漠化、土壤侵蚀严重,中游湿地面积锐减、水环境恶化、灾害频发,下游水污染严重[11]。前人对长江流域中部分区域的植被 NPP 时空特征及气候因子进行了一定的研究[12-18],但基于 MOD17A3 数据对整个流域片 NPP 变化及自然、人为影响因子的定量研究较少,且尚未有人利用地理探测器针对长江流域片量化 NPP 各驱动因子贡献率、探讨最主要驱动因子及因子交互影响。鉴于此,本文利用 MODIS NPP 数据、土地利用数据、气象数据等,结合气象因子、海拔、土地利用变化对长江流域片近 16 a 的植被净初级生产力状况及驱动因子进行定量研究,以期在全球变化、可持续发展背景下,为长江流域片的生态环境监测及生态调控提供依据。

1　研究区概况

长江流域片是我国九大流域片之一,处于 24°—36°N,90°—122°E,自西向东横贯我国中部,流域片总面积约 180 万 km^2,约占全国陆域总面积的 1/5(图 1)。流域地势西高东低,跨我国地貌三大阶梯,地貌类型复杂多样,高原、山地、丘陵、盆地约占 85%,平原面积约占 11%,河流、湖泊、水库约占 4%,主要流经青藏高原、云贵高原、四川盆地、长江中下游平原大地形区。流域内气候类型多样,其中大部分地处亚热带季风气候区,流域内气温空间分布东南高、西北低,多年平均气温为 13.3°,降水呈东南向西北递减的趋势,平均年降水量 1 100 mm[19]。长江流域片是我国的经济战略枢纽,流域片内人口占我国总人口的 37%以上,近年来,流域片内长江经济带覆盖的 11 省(市)GDP 总量超过全国的 40%[11]。

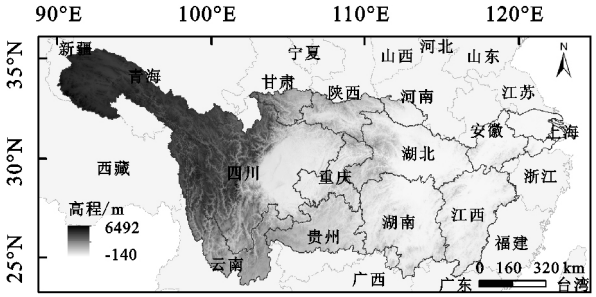

图 1　研究区概况

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源及处理

本文的 MODIS NPP 数据来源于美国国家航空航天局(NASA)最新的 MODIS(Moderate Resolu-

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

tion Imaging Spectroradiometer) C6 的 MOD17A3 产品，空间分辨率为 1 000 m，时间分辨率为 1 a，本文选择了 2000—2015 年的数据产品。利用 ArcGIS，对植被 NPP 进行空间计算和分析，获得多年平均 NPP 的空间分布图。长江流域片矢量边界、长江矢量线来自于中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/data.aspx)。气象数据来自于中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/data.aspx)，选取 2000—2015 年逐月平均气温和降水量数据，分辨率为 1 000 m，利用 ArcGIS 软件裁剪出研究区域的气象数据，利用 Matlab 软件计算其与 NPP 的偏相关系数。DEM 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/data.aspx)，分辨率为 250 m，利用 ArcGIS 软件进行坡度分析、高程分级。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/data.aspx)，利用 ArcGIS 软件进行土地利用类型重分类及像元统计。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析 计算 NPP 多年平均值，考察 NPP 空间分布情况，计算公式如下：

$$\overline{\mathrm{NPP}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\mathrm{NPP}_i}{n} \tag{1}$$

式中：n 为年数(研究时段为 2000—2015 年，则 $n=16$)；NPP_i 为某一像元第 i 年的 NPP 数值；$\overline{\mathrm{NPP}}$ 为某一像元 NPP 的多年平均值。

采用一元线性回归分析法计算长江流域片 2000—2015 年 NPP 变化斜率，考察 NPP 变化趋势，计算公式如下：

$$\theta_{\mathrm{slope}}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}(i\times\mathrm{NPP}_i)-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}\mathrm{NPP}_i}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-(\sum_{i=1}^{n}i)^2} \tag{2}$$

式中：θ_{slope} 为 NPP 变化斜率；n 为年数(研究时段为 2000—2015 年，则 $n=16$)；NPP_i 为某一像元第 i 年的 NPP 数值。当 $\theta_{\mathrm{slope}}>0$，则 NPP 为增加趋势，当 $\theta_{\mathrm{slope}}<0$，则 NPP 为减少趋势。利用 t 检验来验证显著性水平。

2.2.2 相关性分析

通常采用偏相关分析考察气温与 NPP、降水与 NPP 的相关关系。偏相关分析是在消除其他变量影响的前提下，计算某两个变量的关系性[20]。线性相关系数计算公式为：

$$R_{xy,z}=\frac{\sum_{i=1}^{n}[(x_i-\overline{x})(y_i-\overline{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\overline{y})^2}} \tag{3}$$

式中：$R_{xy,z}$ 为变量 x，y 的相关系数；x_i，y_i 为变量 x，y 在第 i 年的值；$\overline{x}$，$\overline{y}$ 为 x，y 在 n 年内的平均值。在线性相关系数计算结果的基础上，偏相关系数计算公式为：

$$R_{xy,z}=\frac{R_{xy}-R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^2)(1-R_{yz}^2)}} \tag{4}$$

式中：$R_{xy,z}$ 为固定自变量 z 值后；x，y 的偏相关系数。得到的偏相关系数进行显著性 t 检验，计算公式如下：

$$t=\frac{R_{xy,z}}{\sqrt{1-R_{xy,z}^2}}\sqrt{n-m-1} \tag{5}$$

式中：m 为自变量个数；n 为样本个数(研究时段为 2000—2015 年，则 $n=16$)。

2.2.3 地理探测器 地理探测器是探测空间分异性，以及揭示其主要驱动因子的一种新的统计学方法，地理探测器包括 4 个探测器：因子探测器、交互探测器、生态探测器和风险探测器[21]。因子探测用来定量判别单因子对 NPP 的贡献率，找出主要驱动因子；交互探测用来判别两因子共同作用下对 NPP 的贡献率；生态探测用来判别不同因子对 NPP 的影响是否具有显著性差异。计算公式如下：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2}=1-\frac{\mathrm{SSW}}{\mathrm{SST}}$$

$$\mathrm{SSW}=\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2;\qquad \mathrm{SST}=N\sigma^2 \tag{6}$$

式中：$h=1,2,\cdots,n$；L 为 X 或 Y 的分层或分区；N 全区的单元数；N_h 为层 h 的单元数；σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h、全区的 Y 值的方差；SSW，SST 为层内方差之和(Within Sum of Squares)，全区总方差(Total Sum of Squares)。q 值范围为 0 到 1，q 值越大，则因变量 y 的空间分异性越明显，自变量对因变量的解释力越强。

3 结果与分析

3.1 长江流域片植被 NPP 时间变化特征

长江流域片植被 NPP 年际间波动明显(图 2)，2000—2015 年各年均值在 478.4～547.4 gC/(m² · a)，16 a 间植被 NPP 平均值为 516.5 gC/(m² · a)，高于全国平均值 514.48 gC/(m² · a)[22]，经线性拟合，流域内 NPP 整体表现为缓慢上升趋势。2000—2002 年、2011—2013 年增长明显，2002 年达到研究时段内最高值 547.4 gC/(m² · a)。最低值出现在 2000 年，为 478.4 gC/(m² · a)，比多年平均值低 7%。这一结论与张凤英在基于遥感和 LPJ 模型模拟的长江流域植被净初级生产力格局及驱动力分析中的研究结果一致[23]。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

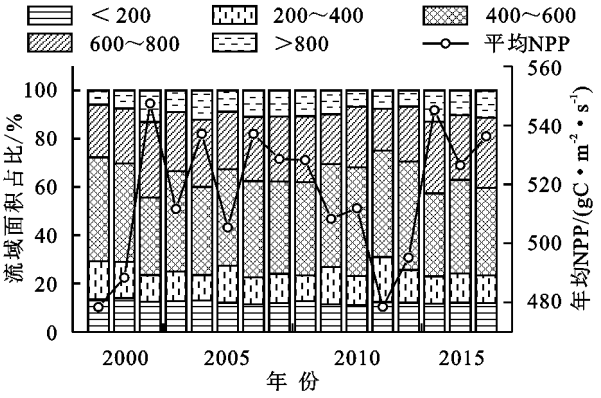

图 2　2000－2015 年长江流域片年均 NPP 年际变化及流域面积占比

3.2　长江流域片植被 NPP 空间变化特征

长江流域片 2000—2015 年 16 a 间的 NPP 平均值为 0.04～1 747.79 gC/(m² · a),受到气候、地形、植被等诸多因素影响,流域内 NPP 分布的空间差异显著,见图 3A。整体上,流域内 NPP 空间分布格局与气温、降水格局基本一致,为自东南向西北减少,其中北部、西北部低,西南部高,分布格局与刘刚等研究我国的 NPP 空间分布特征一致[10]。整个研究区域约 8.5%的区域 NPP 值高于 800 gC/(m² · a),主要分布在流域片西南部,包括云南省丽江、楚雄及四川省攀枝花、凉山;约 67.2%的区域 NPP 值介于 400～800 gC/(m² · a);约 24.3%的区域 NPP 值低于 400 gC/(m² · a),主要分布于青海南部、四川西北部、陕豫鄂交界区。

采用一元线性回归分析法计算出 NPP 变化斜率,见图 3B,θ_{slope} 值介于－70.1～49 gC/(m² · a)。其中呈增加趋势的区域约占流域面积的 14.3%,主要分布在横断山脉和秦岭、乌蒙山北段,增长趋势最明显的区域位于云南省迪庆州、贵州省毕节市西部。呈减少趋势的区域约占 6.7%,主要分布在流域片南部湘黔交界、长江三角洲及成都平原,但其中大多集中于贵州省东部。NPP 值基本不变的区域约占 79%,主要位于中部、东部和西北部,包括四川东部、重庆、湖北、湖南北部、江西北部及青海。

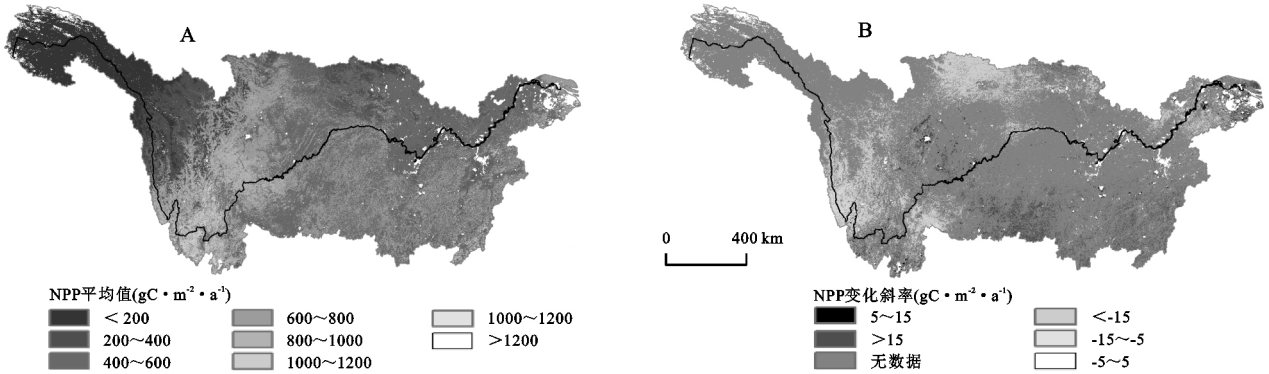

图 3　长江流域片 2000－2015 年 NPP 平均值、年际变化斜率分布格局

3.3　长江流域片植被 NPP 驱动因子

3.3.1　植被 NPP 与气候因子　气候因子是影响植被生长的重要因素,也是 NPP 值的重要影响因子,流域内 NPP 空间分布格局与气温、降水格局基本一致,为自东南向西北减少,在此基础上定量探究 NPP 与气候因子的相关性。由图 4 知,长江流域片 2000—2015 年 16 a 间年均温约 12.1°,2008 年最低,为 7.2°,其余年份年均温波动较小。16 a 间年均降水量约 1 107 mm。流域片内大部分地处亚热带季风气候区,受季风影响区域广大。

由图 5A 知,长江流域片植被 NPP 与气温的相关系数介于－0.93～0.99,NPP 与气温呈正相关的占 88%,分布面积较广,集中于中部和西部高原高山区;呈负相关的占 12%,主要分布在西南部、东南部;偏相关系数大于 0.6 的为极显著正相关,占比约 16%,集中于青海省、贵州省北部、湖南省和重庆;偏相关系数小于－0.6 的为极显著负相关,占比约 0.3%。研究区内通过显著性 0.05 检验的占 29%,其中,极显著正相关、极显著负相关均通过检验。由图 5B 知,长江流域片植被 NPP 与降水的相关系数介于－0.96—0.95,NPP 与降水呈正相关的占 67%,主要分布在横断山区和武夷山区以外的地区;呈负相关的占 33%,主要分布在横断山区且以四川省最为明显;偏相关系数大于 0.6 的为极显著正相关,占比约 10%,集中于青海省、湖南省、重庆市;偏相关系数小于－0.6 的为极显著负相关,占比约 3%,集中于四川省。研究区内通过显著性 0.05 检验的占 23%,其中,极显著正相关、极显著负相关均通过检验。

长江流域片植被 NPP 与气温、降水的相关性空间差异明显,整体上西部、中部受气温、降水影响都最为明显。整体而言,研究区内植被 NPP 与气温、降水均呈正相关。

3.3.2　植被 NPP 与地形　长江流域片跨三级阶梯,地形空间分异明显。不同海拔高度下气温、降水、土

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

壤组合不同，且植被类型也不同，因此海拔是影响生物环境的重要因子，不同海拔范围下 NPP 的分布不同(表 1)。根据 DEM 数据对长江流域片海拔范围分级，高程分级为 8 级，其中高山(3 500～5 000 m)、极高山(>5 000 m)分布在流域内西部的青藏高原区，其余地区多为中山(1 000～3 000 m)、低山(500～1 000 m)，区域内 54%区域海拔低于 1 000 m。由表 1 可知，流域内不同海拔范围植被 NPP 差异明显，总体上 NPP 随海拔增加呈先增加后下降的趋势；2 000～3 500 m 海拔范围内植被 NPP 值最高，约 720.07 gC/(m² · a)，主要位于流域内的一、二级阶梯交界处，集中于横断山区。海拔 3 500 m 以上的高山、极高山地区植被 NPP 值逐渐降低，尤其在 5 000 m 以上植被 NPP 值最低，只有 31.09 gC/(m² · a)。

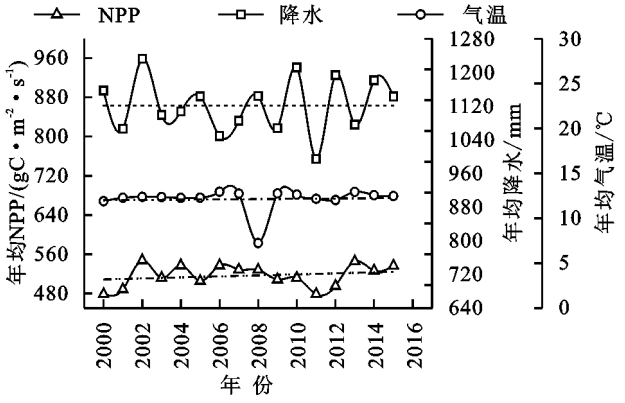

图 4 长江流域片 2000－2015 年 NPP、气温、降水年际变化

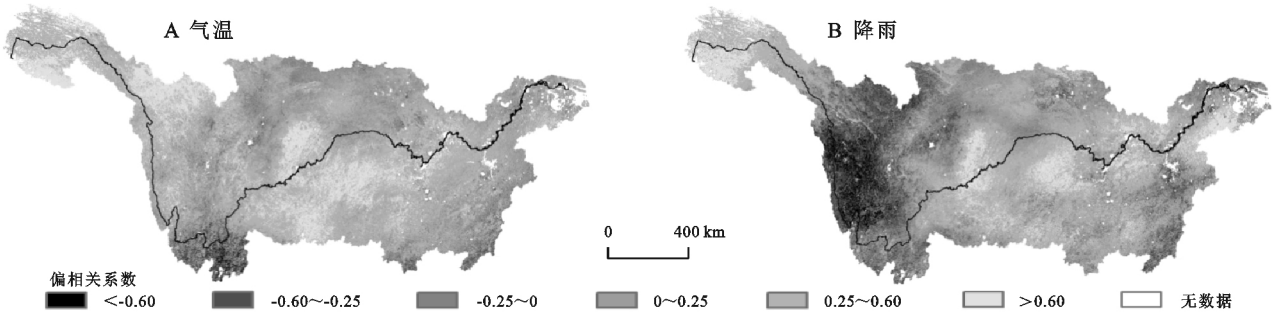

图 5 长江流域片植被 NPP 与气温、降水的偏相关系数

不同坡度下，会形成局地小气候的变化，也会影响地表径流、排水状况及水土的保持、流失，对植被生长吸收水分能力也有影响。

对 DEM 数据进行坡度分析，研究区内部分地区地势起伏大，坡度最高为 64.7°，根据长江流域片实际情况划分为 9 个等级(表 2)，坡度小于 15°的区域占流域片面积的 76%。总体趋势来看，长江流域片植被 NPP 随坡度呈增加趋势，但坡度大于 55°之后 NPP 值有所下降，这主要分布在一二级阶梯交界附近。坡度 15°以上的 NPP 均值虽高但所占面积很少，对整体 NPP 的贡献不大，坡度 2°以下的区域 NPP 值相对最低。综合来看，坡度小于 15°的区域 NPP 值并非最高，但占研究区面积最大，对整个研究区的 NPP 值贡献最大。

表 1 长江流域片高程区间的植被 NPP 比较

统计量	海拔/m							
	<200	200～500	500～1000	1000～2000	2000～3500	3500～4000	4000～5000	>5000
面积比/%	21	17	15	15	10	4	16	1
NPP 均值/(gC·m⁻²·a⁻¹)	524.86	596.22	590.25	597.94	720.07	497.94	176.31	31.09

表 2 长江流域片坡度区间的植被 NPP 比较

统计量	坡度/(°)								
	<2	2～5	5～15	15～25	25～35	35～40	40～50	50～55	>55
面积比/%	25.8	15.7	33.7	17.5	6.2	0.9	0.3	0.007	0.001
NPP 均值/(gC·m⁻²·a⁻¹)	475.83	505.00	527.58	537.20	569.22	601.95	620.44	642.19	638.28

3.3.3 植被 NPP 与土地利用 根据中科院资源环境数据云平台下载的 250 m 分辨率的全国土地利用数据，将其重分类为 6 类(耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地)。至 2015 年，长江流域片林地面积最大，耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地 6 类土地利用类型面积占比分别为 27%，41%，23%，3%，2%，4%。综合来看，长江流域片各土地利用类型中 NPP 值林地>耕地>建设用地>水域>草地>未利用土地(表 3)。2000—2015 年 16 a 间，各地类 NPP 值呈上升趋势，水域 NPP 均值增长率最大，为 15%，耕地、草地、未利用土地 NPP 均值增长率为 13%，林地为 12%，建设用地 NPP 均值增长最小，为 8%。

3.3.4 因子影响力探测 利用地理探测器评估自变量单因子对因变量空间分异的影响力，以及自变量因

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

子交互作用下对因变量的贡献率[24],选取 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年的气温、降水、海拔、坡度、土地利用五大因子与研究区植被 NPP 值进行空间探测分析,探讨影响研究区植被 NPP 变化的主要驱动因子。利用 ArcGIS 软件对研究区各类数据建立渔网选取采样点,避免随机选点带来的的误差,利用 GeoDetector 软件,输入自变量 x 和因变量 y,运行后得到 q 值,包括单因子 q 值和多因子叠加 q 值,q 值越大,则因变量 y 的空间分异性越明显,对因变量 y 的解释力越强。

表 3　长江流域片 2000－2015 年各土地利用类型 NPP 均值

gC/(m² · a)

年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
2000	524.2	565.1	333.3	351.6	468.1	89.3
2005	555.6	590.9	360.5	373.6	483.8	103.0
2010	546.9	605.3	370.4	383.2	483.3	116.9
2015	592.0	631.2	375.4	406.0	504.9	101.1

综合来看,长江流域片 5 个因子对 NPP 的解释力排序为海拔＞气温＞降水＞土地利用类型＞坡度,以 2015 年为例,海拔、气温、降水、土地利用类型、坡度 q 值分别为:0.468,0.438,0.336,0.255,0.026,表明海拔对 NPP 的解释力最强,是影响长江流域片植被 NPP 的最主要因子,气温居第二位,其解释力高于降水;坡度对 NPP 的解释力最小。2000—2015 年各影响因子中,其主要驱动因子海拔、气温的决定力 q 值呈下降趋势,表明未来海拔、气温对长江流域片植被 NPP 的影响力有下降可能。经交互探测可知,双因子交互作用下对 NPP 的解释力更高,呈非线性增强,2000—2015 年双因子交互作用中,海拔因子与其余因子两两交互的 q 值最高(表 4),其中 2000 年海拔与降水量双因子交互作用 q 值最高,但结合 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年四年的双因子交互作用综合来看,海拔和气温双因子交互作用 q 值对研究区 NPP 值的解释力更大。

表 4　植被 NPP 影响因子主导交互作用决定力(q)值

年份	海拔∩坡度	海拔∩降水量	海拔∩气温	海拔∩土地利用
2000	0.580	0.617	0.600	0.576
2005	0.506	0.534	0.570	0.536
2010	0.494	0.500	0.521	0.523
2015	0.496	0.522	0.542	0.519

4　讨论与结论

4.1　讨 论

基于 MOD17A3 产品 NPP 数据,得到 16 a 间 NPP 值在 478.4～547.4 gC/(m² · a),16 a 间植被 NPP 平均值为 516.5 gC/(m² · a),高于全国平均值 514.48 gC/(m² · a),总体呈缓慢上升趋势,与张凤英[23]、潘萌甜等[14]的研究结果一致,其增长趋势可能源于长江流域实施的退耕还林政策、防护林建设、自然保护区建设,使流域片内的植被尤其是林地有所增加。空间分布上,流域片内 NPP 空间分布格局与气温、降水格局基本一致,为自东南向西北减少,与刘刚[10]、李登科[25]等关于我国的 NPP 空间分布特征的研究结果一致;西南部横断山区植被 NPP 最高,因其水热条件良好,植被覆盖度高,且以林地为主,林地的最大光能利用率较高。青海南部、四川西北部因其处于青藏高原地区,海拔高,气温较其他地区低,植被类型较单一且稀少,多以草甸为主,植被 NPP 最低,生态环境脆弱。16 a 间长江流域片 79%的区域 NPP 值基本不变,NPP 值减少区域主要分布在南部湘黔交界、长江三角洲及成都平原,长江三角洲、成都平原因城市扩张、经济发展、建筑用地增加,人类对植被的干扰增大,NPP 下降明显;贵州东部下降明显与岩溶地区碳酸盐出露,植被覆盖度低有关。横断山脉、秦岭、乌蒙山北段 NPP 值呈增长趋势,与王强[26]、王娟[27]等的研究结果一致。

本文主要讨论了研究区植被 NPP 五大影响因子:气温、降水、海拔、坡度、土地利用。总体上,研究区 NPP 值与气温、降水均呈正相关,这与张凤英[23]的研究结果一致,与气温呈正相关的占 88%,与降水呈正相关的占 67%,表明研究区 NPP 值对气温变化的响应更为敏感,气温增加,植被积累养分的能力也会提高,NPP 值随之增大[28]。因研究区海拔跨度大,不同海拔范围植被 NPP 差异明显,总体上 NPP 随海拔增加呈先增加后下降的趋势,与刘恒[5]、赵晓[29]等的研究结果一致,2 000～3 500 m 海拔范围内植被 NPP 值最高,分布于一、二级阶梯交界处,集中于横断山区,因其多高山峡谷,植被覆盖度高且类型多样,人为干扰弱,NPP 值高;海拔 5 000 m 以上地区植被 NPP 值最低,集中于青海省,因其位于高海拔区,年均温较低,植被类型更单一,光合作用降低,植被养分积累受影响,故 NPP 值较低。研究区内植被 NPP 随坡度呈增加趋势,但坡度大于 55°之后 NPP 值有所下降,坡度 35°以上 NPP 值大但区域面积占比很小,因此对研究区整体 NPP 值贡献率不大,坡度小于 15°的区域 NPP 值虽并非最高,但占研究区面积却最大,这一坡度范围内,实施了退耕还林(草)、天然林保护等生态政策,是植被改善的最主要区域[30],因此对整个研究区的 NPP 值贡献更大。各土地利用类型中,长

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

江流域片林地面积最大，且林地最大光能利用率较高，其NPP均值较其余地类更大，因此林地对长江流域片的植被NPP值贡献最大，研究区是重要的农业生产基地，耕地面积广阔，作物光合效能较高，因此耕地NPP均值及增长幅度仅次于林地。NPP值往往受多因素共同影响。利用地理探测器方法，长江流域片5个因子对NPP的解释力排序为海拔>气温>降水>土地利用类型>坡度，16 a间单因子海拔对长江流域片植被NPP的解释力最强，海拔因素主要是海拔差异结合不同水热组合状况来影响气候垂直分带最终影响植被NPP[8]；气温的解释力居于第二位，海拔和气温双因子交互作用q值最大，对研究区NPP值的解释力更大，因长江流域片横跨三级阶梯，海拔梯度差异大，高低海拔间温度差异大，海拔、温度成为植被NPP的最大影响因素，但区域内整体降水充沛、土壤水分充沛，降水并非该区植被生长的限制性因子，这与前人诸多研究结果一致[19]。但据发展趋势看，主要驱动因子海拔、气温的决定力q值呈下降趋势，表明未来海拔、气温对长江流域片植被NPP的影响力有下降可能，长江流域片横跨我国东、中、西3个经济片区，许多研究表明人类活动对该区植被的影响持续增强，人为扰动对未来植被NPP的变动的影响可能增强，这也与潘洪义[8]的研究结果一致。长江流域片总体NPP虽呈缓慢增长趋势，但局部地区植被破坏仍然严重，NPP值下降明显，未来需增强对流域生态的动态监测，尤其是人类干扰频繁的城市周边的植被状况，健全生态补偿机制，遵循自然规律，恢复与保护为主。

目前，前人对长江流域植被NPP的研究主要集中于探讨NPP对气候变化的响应，很少对各因子的贡献率定量化研究，本文分别考虑了5个因子与NPP的关系，并利用地理探测器综合考察各因子对NPP的影响，通过空间探测分析，分析单因子贡献率及双因子交互贡献率，定量化指出最主要的驱动因子。本研究存在的不足主要有：(1) 时间尺度上：植被NPP变化规律的揭示需要基于长期的动态监测，本文研究时间段为2000—2015年，时间尺度不够长，在揭示NPP时空变化规律上受到制约；(2) 驱动因子上：植被NPP影响因子诸多，主要探讨了气候因子、地形因子、土地利用因子；气候因子中未考虑到地表蒸散发、太阳辐射等因素；随着经济发展和城市化进程加快，人类活动对NPP的影响越来越大，而人类影响的定量化较难，目前仅考虑到土地利用类型对NPP的影响，而人口密度、城市分布等也是重要的人为干扰因素，未来研究有望在此基础上将各类驱动因子探讨更全面。

4.2 结 论

(1) 长江流域片植被NPP在2000—2015年各年均值为478.4～547.4 gC/(m^2·a)，16 a间植被NPP平均值为516.5 gC/(m^2·a)，高于全国平均值，流域内NPP整体表现为缓慢上升趋势。

(2) 长江流域片2000—2015年16 a的NPP平均值为0.04～1 747.79 gC/(m^2·a)，流域内NPP分布空间差异显著。整体上，流域内NPP空间分布格局为自东南向西北减少，流域片西南部NPP值最高，青藏高原地区最低。16 a间大部分地区NPP值基本不变，云南省迪庆州、贵州省毕节市西部增长最明显，下降区域多分布于贵州省东部。

(3) 整体而言，研究区内植被NPP与气温、降水均呈正相关；总体上NPP随海拔增加呈先增加后下降的趋势，2 000～3 500 m海拔范围内植被NPP值最高，约720.07 gC/(m^2·a)，主要位于流域内的一、二级阶梯交界处，集中于横断山区，5 000 m以上植被NPP值最低；NPP随坡度呈增加趋势，但坡度小于15°的区域对研究区NPP值贡献最大；各土地利用类型中林地对研究区的植被NPP值贡献最大。

(4) 长江流域片5个因子对NPP的解释力排序为海拔>气温>降水>土地利用类型>坡度，海拔是影响长江流域片植被NPP的最主要因子，海拔与气温双因子交互作用下q值最大，对NPP的解释力最强，但未来海拔、气温对长江流域片植被NPP的影响力有下降趋势。

参考文献：

[1] Lieth H. Evapotranspiration and primary productivity: CW Thornthwaite memorial model[J]. Pub. in Climatology, 1972,25:37-46.

[2] 王耀斌，赵永华，韩磊，等.2000—2015年秦巴山区植被净初级生产力时空变化及其趋动因子[J]. 应用生态学报，2018,29(7):2373-2381.

[3] 朱文泉，潘耀忠，龙中华，等.基于GIS和RS的区域陆地植被NPP估算：以中国内蒙古为例[J].遥感学报，2005,2005(3):300-307.

[4] 李传华，韩海燕，范也平，等.基于Biome-BGC模型的青藏高原五道梁地区NPP变化及情景模拟[J].地理科学，2019,39(8):1330-1339.

[5] 刘恒，汤弟伟，宋鄂平，等.2000—2015年武陵山区植被净初级生产力的时空动态特征及其驱动因子[J].水土保持研究，2020,27(6):218-225.

[6] Zhao M, Heinsch F A, Nemani R R, et al. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set[J]. Remote Sensing of Environment, 2005,95(2):164-176.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[7] 焦翠翠,于贵瑞,展小云,等.全球森林生态系统净初级生产力的空间格局及其区域特征[J].第四纪研究,2014,34(4):699-709.
[8] 潘洪义,黄佩,徐婕.基于地理探测器的岷江中下游地区植被 NPP 时空格局演变及其驱动力研究[J].生态学报,2019,39(20):7621-7631.
[9] 刘旻霞,焦骄,潘竟虎,等.青海省植被净初级生产力(NPP)时空格局变化及其驱动因素[J].生态学报,2020,40(15):5306-5317.
[10] 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.
[11] 杜耘.保护长江生态环境,统筹流域绿色发展[J].长江流域资源与环境,2016,25(2):171-179.
[12] 柯金虎,朴世龙,方精云.长江流域植被净第一性生产力及其时空格局研究[J].植物生态学报,2003,2003(6):764-770.
[13] 王琳,景元书,张悦.基于 MODIS 的长江中下游地区植被净第一性生产力时空变化规律[J].浙江农林大学学报,2015,32(6):829-836.
[14] 潘萌甜,梁俊红,李佳,等.基于 LUE 模型的长江源流域 NPP 时空变化特征分析[J].西北林学院学报,2017,32(5):237-242.
[15] 苗茜,黄玫,李仁强.长江流域植被净初级生产力对未来气候变化的响应[J].自然资源学报,2010,25(8):1296-1305.
[16] 裴凤松,王坤,刘小平,等.长江三角洲城市化地区植被初级生产力的时空变化研究[J].地球信息科学学报,2018,20(6):862-870.
[17] 姚玉璧,杨金虎,王润元,等.50 年长江源区域植被净初级生产力及其影响因素变化特征[J].生态环境学报,2010,19(11):2521-2528.
[18] 苗茜,黄玫. 气候变化对长江流域陆地生态系统的影响研究[C]. 中国地理学会.中国地理学会百年庆典学术论文摘要集,2009.
[19] 袁喆,喻志强,冯兆洋,等.长江流域陆地生态系统 NDVI 时空变化特征及其对水热条件的响应[J].长江科学院院报,2019,36(11):7-15.
[20] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.
[21] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
[22] 仲晓春,陈雯,刘涛,等.2001—2010 年中国植被 NPP 的时空变化及其与气候的关系[J].中国农业资源与区划,2016,37(9):16-22.
[23] 张凤英.基于遥感和 LPJ 模型模拟的长江流域植被净初级生产力格局及驱动力分析[D].南京:南京林业大学,2020.
[24] 左丽媛,高江波.基于地理探测器的喀斯特植被 NPP 定量归因[J].生态环境学报,2020,29(4):686-694.
[25] 李登科,王钊.基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J].生态环境学报,2018,27(3):397-405.
[26] 王强,张廷斌,易桂花,等.横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子[J].生态学报,2017,37(9):3084-3095.
[27] 王娟,卓静,何慧娟,等.2000—2013 年秦岭林区植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J].西北林学院学报,2016,31(5):238-245.
[28] 陈福军,沈彦俊,李倩,等.中国陆地生态系统近 30 年 NPP 时空变化研究[J].地理科学,2011,31(11):1409-1414.
[29] 赵晓.2000—2015 年秦巴山区植被净初级生产力时空分异研究[D].重庆:西南大学,2019.
[30] 邓元杰,姚顺波,侯孟阳,等.长江流域中上游植被 NDVI 时空变化及其地形分异效应[J].长江流域资源与环境,2020,29(1):66-78.

(上接第 175 页)

[37] Wang R, Dong Z B, Zhou Z C. Changes in the depths of seasonal freezing and thawing and their effects on vegetation in the Three-River Headwater Region of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Mountain Science, 2019,16(12):2810-2827.
[38] 杨元合,朴世龙.青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J].植物生态学报,2006,30(1):1-8.
[39] 谢慧君,张廷斌,易桂花,等.川西高原植被 NDVI 动态变化特征及对气候因子的响应[J].水土保持通报,2020,40(4):286-294,328,2.
[40] 朱昌丽,张继飞,赵宇鸾,等.青藏高原东缘典型流域生态系统服务的地形梯度效应:以岷江上游为例[J].长江流域资源与环境,2017,26(10):1687-1699.
[41] 倪忠云,何政伟,赵银兵,等.汶川地震前后都江堰植被盖度变化的遥感研究[J].水土保持研究,2009,16(4):45-48.
[42] 杜华明,延军平.四川省气候变化特征与旱涝区域响应[J].资源科学,2013,35(12):2491-2500.
[43] 刘静,温仲明,刚成诚.黄土高原不同植被覆被类型 NDVI 对气候变化的响应[J].生态学报,2020,40(2):678-691.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net