

2000—2015 年典型山地区域净初级生产力时空分布特征

谭 淼¹, 周启刚^{1,2,3}

(1.重庆工商大学 环境与资源学院, 重庆 400067; 2.重庆工商大学 旅游与国土资源学院, 重庆 400067; 3.重庆市生态环境规划空间信息管理与决策支持重点实验室, 重庆 400067)

摘 要:为了明确区域植被固碳能力与地形因子的关系以及掌握区域长时间序列下净初级生产力(NPP)的时空分布特征,以 2000—2015 年 MOD17A3 的植被 NPP 数据及地形因子 DEM 数据为基础,辅以回归分析及分级统计等方法,利用 GIS 技术定量剖析了重庆市作为典型山地区域近 16 年植被 NPP 的时空变化特征,研究了地形因子(高程、坡度)与植被 NPP 的相关性。结果表明:(1) 2000—2015 年重庆市植被 NPP 整体呈东南部高,西北部低的分布态势,其中,长江以南区域植被 NPP 差异明显,由南向北递减,总体高于长江以北的区域。(2) 16 年间,重庆市植被 NPP 年际均值在 481.512~658.557 g C/(m²·a)浮动,其中,处于 500~600 g C/(m²·a)的占比最大,其次是 600~700 g C/(m²·a)。2000 年与 2015 年相比,整体呈正增长的变化趋势。(3) 分别对高程和坡度进行了等级划分,分析可得重庆市平均植被 NPP 随海拔和坡度的升高有明显的先升高后降低的趋势,在高程 500~1 000 m、坡度 15°~25°的区域 NPP 达到峰值。(4) 植被 NPP 先增后减的倒“V”型变化模式在一定程度上反映了高程、坡度处于某临界点时,气候、降水、植被分布、坡面侵蚀强度等因素对植被 NPP 影响更加显著。研究结果可为重庆地区植被碳储量状况以及生态环境调节与修复提供理论与数据支持。

关键词:山地区域; 净初级生产力; MOD17A3; 地形因子

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0339-08

Characteristics of Spatial and Temporal Distribution of Net Primary Productivity in Typical Mountain Regions from 2000 to 2015

TAN Miao¹, ZHOU Qigang^{1,2,3}

(1.College of Environment and Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 2.School of Tourism and Land Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 3.Chongqing Key Laboratory of Spatial Data Mining and Big Data Integration for Ecology and Environment, Chongqing 400067, China)

Abstract: In order to clarify the relationship between carbon sequestration capacity of regional vegetation and topographic factors, and to grasp the spatial and temporal distribution characteristics of primary productivity through regional long time series, based on the vegetation NPP data of MOD17A3 and DEM data of topographic factors from 2000 to 2015, with the help of regression analysis and grading statistics, the spatial and temporal variation characteristics of vegetation NPP in Chongqing City as a typical mountainous area in recent 16 years were analyzed quantitatively by using GIS technology, and the correlation between topographic factors (elevation, slope) and vegetation NPP was studied. The results showed that: (1) from 2000 to 2015, the vegetation NPP in Chongqing City was high in the southeast and low in the northwest; the difference of vegetation NPP in the south of the Yangtze River was obvious, and it decreased from south to north, which was higher than that in the north of the Yangtze River; (2) during 16 years, the annual mean NPP of vegetation in Chongqing City fluctuated between 481.512~658.557 g C/(m²·a), of which 500~600

收稿日期:2019-01-04

修回日期:2019-02-20

资助项目:重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjA90010);重庆市教委科技技术研究项目(KJ1500612);重庆工商大学创新团队项目(CJSYTD201708);重庆市研究生创新型科研项目(CYS19343);重庆市社科联项目(2017YBGL161)

第一作者:谭淼(1995—),女,四川广安人,硕士研究生,研究方向为环境规划与管理。E-mail:48724238@qq.com

通信作者:周启刚(1976—),男,重庆铜梁人,博士,教授,主要从事 3S 理论与土地利用研究。E-mail:zqg1050@126.com

$\text{g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ accounted for the largest proportion, followed by $600 \sim 700 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, compared with 2015 and 2000, the annual mean NPP of vegetation presented the increasing trend; (3) the elevation and slope were classified, and the analysis showed that the average vegetation NPP in Chongqing City increased firstly and then decreased with the increase of elevation and slope, and reached the peak value in the areas with elevations of $500 \sim 1000 \text{ m}$ and slopes with $15^\circ \sim 25^\circ$; (4) the inverted 'V' pattern of vegetation NPP with increase first and then decrease to some extent reflects that when elevation and slope are at a critical point, climate, precipitation, vegetation distribution, slope erosion intensity and other factors have more significant impacts on vegetation NPP. These results can provide theoretical and data support for the status of vegetation carbon storage and the regulation and restoration of ecological environment in Chongqing City.

Keywords: mountain area; net primary productivity; MOD17A3; terrain factor

植被的净初级生产力(NPP)是指植物在单位时间内单位面积上由光合作用所产生的有机物质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分^[1],反映植物对自然资源的利用能力,是生态系统中其他生物成员生存和繁衍的物质基础,也是生物地球化学碳循环的关键环节^[2-3]。植被净初级生产力直接或间接反映出区域生态系统碳源/汇潜力,进而影响区域乃至全球的生态系统碳循环及可持续发展^[4-5],因此区域净初级生产力的动态变化时空分布特征已成为区域生态环境评价中的重要研究内容。

目前对区域植被净初级生产力的研究主要集中于通过生产潜力模型、生态系统过程模型以及光能利用率模型等对区域植被 NPP 进行测度估算^[6]。随着遥感技术的发展及其在多学科领域的应用,近年来利用遥感卫星 MOD17A3 数据来反映植被净初级生产力状况的研究受到国内外学者广泛关注。其中陈雅如^[7]通过 BIOME-BGC 模型对研究区的植被 NPP 进行测算,并将测算值、实测值以及 MOD17A3 值三者进行对比,验证了 MOD17A3 数据的可靠性。MOD17A3 数据被大量运用于不同区域、不同尺度下,净初级生产力长时间序列的时空分布特征研究^[8-10],但大多数学者的研究主要集中于特定某自然地理单元以及单一用地类型,例如,朱玉果等^[11]对宁夏草地的净初级生产力进行了时空分析;王亚林等^[12]展开了对 2001—2013 年中国灌木生态系统净初级生产力的时空变化特征及其对气候变化的响应研究;荣检等^[13]通过对广西西江流域植被 NPP 进行估算,并分析其时空格局及其影响因素。对于地形地貌特征明显、生态系统敏感、生态环境复杂的典型山地区域的植被 NPP 研究相对缺乏。影响植被 NPP 的因子复杂多样,经对众多相关研究进行分析总结,可将影响因子大致归纳为 4 大类:(1) 植物特征因子,如植被叶片氮含量、维持呼吸系数等生理生态属性以及叶面积指数、FPAR 等生物物理特征^[14]。(2) 土地利用因子,

土地利用的变化直接引起了区域植被净初级生产力(NPP)的变化^[15-16],植被净初级生产力也是对土地利用变化的响应。赵晓等^[17]从景观生态学的角度探讨土地利用变化对区域植被 NPP 的影响。(3) 气候因子,植被 NPP 与气候的响应研究成果相对较多,涉及的指标主要有太阳辐射、降雨量、气温等因素^[18-20]。陈晓玲等^[21]对不同土地覆盖类型中植被 NPP 与气候因子的相关性进行了量化分析,其中包括了平均太阳总辐射、降水量、温度数据。(4) 地形因子,包括海拔、坡度、坡向等。目前,针对植被净初级生产力与地形因子相关性的研究较少,然而在特殊地形条件下,探索地形因子对 NPP 的影响不可忽视。

重庆市是中国西部地区唯一的直辖市,位于长江上游地区,在国家生态保护方面担任着重要的地位。重庆多以山地、丘陵为主,水土流失较为严重,自然生态环境相较脆弱。加强重庆市植被净初级生产力的时空分布特征研究,将直接体现重庆地区植被碳储量动态变化状况,为区域生态环境调节与修复,使其充分发挥生态屏障功能提供重要依据。

基于以上分析,本文基于 EOS/MODIS(对地观测系统/中分辨率成像光谱仪)遥感数据(MOD17A3),利用 ArcGIS 软件对 2000—2015 年重庆植被 NPP 进行定量处理及时空变化特征分析,运用数学计算模型对植被 NPP 动态变化规律及影响因子相关性进行测算。研究结果以期为重庆地区植被碳储量的变化及地形因子对植被的影响提供理论支撑,并为重庆市生态环境质量评估、自然资源管理、生态环境调节与修复提供参考价值。

1 研究区概况

重庆市位于中国西南部($105^\circ 11' \sim 110^\circ 11' \text{ E}$, $28^\circ 10' \sim 32^\circ 13' \text{ N}$),东邻湖北省、湖南省,南靠贵州省,西接四川省,北连陕西省,幅员面积 $82\,430 \text{ km}^2$ (图 1),辖 26 个市辖区,12 个县(自治县)。重庆作为典型的山地区

域,地势呈南北向长江河谷逐级降低,西北部和中部以丘陵、低山为主,东南部靠大巴山和武陵山两座大山脉。重庆属亚热带季风性湿润气候,气候受峡谷地形环境的影响,气候特征明显,冬暖夏热,年平均温度在 $16\sim 18^{\circ}\text{C}$,受太阳辐射弱,降水充沛,常年降雨量在 $1\,000\sim 1\,450\text{ mm}$ 。重庆境内江河纵横,水资源丰富,流经重庆的主要河流有长江、嘉陵江、乌江、涪江、綦江等。重庆市作为全国生态文明建设保护重点区域之一,其中包括三峡库区水土保持生态功能区、秦巴生物多样性生态功能区以及武陵山区生物多样性与水土保持生态功能区这 3 个国家重点功能生态区。研究区内自然资源丰富,植被类型多样,森林覆盖率达到 45% ,但生态脆弱、水土流失等问题任然存在。

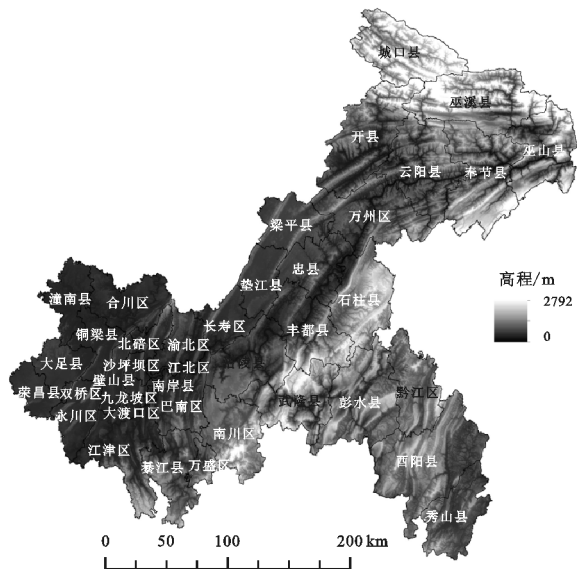


图 1 研究区地理位置及高程

2 研究方法

2.1 数据预处理

植被 NPP 数据使用 NASA EOS/MODIS 提供的 2000—2015 年 1 km 分辨率的 MOD17A3 产品(<http://landsweb.nascom.nasa.gov/>),该数据是美国航空航天局(NASA)基于遥感数据,利用 BIOME—BGC 模型计算出的全球陆地植被年净第一性生产力产品,通过全年每日净光合作用(即每日 GPP 中扣除叶和细根的维持呼吸后剩余的部分)的累积和减去茎的年维持呼吸,以及所有组分的年生长呼吸而得来。该数据空间分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$,比例因子为 0.000 1,选取研究区范围内的植被 NPP 并进行单位换算处理。

地形数据来源于中国科学院计算机网络信息中心科学数据中心的“地理空间数据云平台”(<http://www.gscloud.cn>)。本研究只选取基本地形因子(高程和坡度)来研讨其与植被 NPP 间的关系。高程数

据使用平台提供的 SRTM 90 m 分辨率的 DEM 产品。坡度数据是在高程数据产品的基础上通过 ArcGIS 的空间分析模块运算得到的,空间分辨率同样为 90 m 。通过拼接、格式转换、投影转换、重采样和裁剪等预处理将地形数据与 NPP 数据的空间分辨率统一,以解决边界不重合的问题。

2.2 植被 NPP 的时空变化计算

采用简单差值法比较分析 NPP 的年际间差异。差值法是将同一地区不同时间的图像相减,利用图像之间的差值来衡量年际间变化的大小,可表示为:

$$D_{ij} = \text{NPP}_{ij}^{t_2} - \text{NPP}_{ij}^{t_1} \quad (1)$$

式中: D_{ij} 为第 i 行第 j 列像素的差值; $\text{NPP}_{ij}^{t_1}$, $\text{NPP}_{ij}^{t_2}$ 为时相 t_1 , t_2 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。

采用最小二乘法分析 NPP 在像元上的趋势变化,计算其变化斜率,实现每个像元上的线性变化趋势分析,计算公式如下:

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

式中: n 为年数; NPP_i 为第 i 年的 NPP 值($i=1, \dots, n$); θ 为 NPP 在单个像元水平上的变化斜率,若 $\theta > 0$ 说明呈增大趋势,值越大,表明增加趋势越明显, $\theta < 0$ 则说明为下降趋势,值越小,表明减少趋势越明显。

10 年间 NPP 的变化程度用百分比表示,其公式为:

$$\text{NPP}_{\text{change}} = \frac{\theta}{\text{NPP}} \times n \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\text{NPP}_{\text{change}}$ 为 NPP 值的变化百分比; θ 为由公式(2)计算得出的 NPP 变化斜率; NPP 为 16 a 的平均 NPP 值; n 为研究时间段内总年数,文中 $n=16$ 。

2.3 植被 NPP 与地形因子的相关性分析

植被 NPP 与高程和坡度的相关性分析,根据研究区高程和坡度的划分标准(表 1),计算各高程和坡度分级内植被 NPP 的平均值、总量和标准差。不同分级下的 NPP 平均值计算公式如下。

$$\overline{\text{ANPP}_i} = \frac{\sum_{j=1}^n \overline{\text{ANPP}_{ji}}}{n} \quad (4)$$

在此基础上,通上式可进一步计算得到各分级内植被 NPP 的标准差。

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\overline{\text{ANPP}_{ji}} - \overline{\text{ANPP}_i})^2}{n-1}} \quad (5)$$

式中: i 为高程或坡度的第 i 个分级; n 为该分级的像

元数目; $ANPP_{ji}$ 为第 i 个分级中第 j 个像元对应的多年平均 NPP 值。

表 1 典型山地区域(重庆市)高程及坡度的区间划分

地形因子	区间划分	划定名称	划分依据
高程	$\leq 200\text{ m}$	平原地区	根据文献的高程分级标准,结合研究区进行微调
	200~500 m	丘陵地区	
	500~1000 m	低山地区	
	1000~1500 m	中山地区	
	$>1500\text{ m}$	高山地区	
坡度	$\leq 2^\circ$	平原至微倾斜平原	根据国际地理学会地貌调查与制图委员会的坡度分级标准,结合研究区进行微调
	$2^\circ\sim5^\circ$	缓坡地区	
	$5^\circ\sim15^\circ$	斜坡地区	
	$15^\circ\sim25^\circ$	陡坡地区	
	$25^\circ\sim35^\circ$	急坡地区	
	$35^\circ\sim50^\circ$	急陡坡地区	
	$>50^\circ$	垂直坡地区	

3 结果与分析

3.1 年均植被 NPP 的空间分布特征

根据重庆市 2000—2015 年的 MOD17A3 数据,利用 ArcGIS 10.1 统计测算得到各栅格在 16 年间的年均值 NPP 的空间分布图(图 2)。在植被 NPP 年均值的基础上,结合重庆市各区县行政区的 SHP 数据,通过统计、裁剪等方式得到重庆市各区县植被 NPP 年均值见表 2。

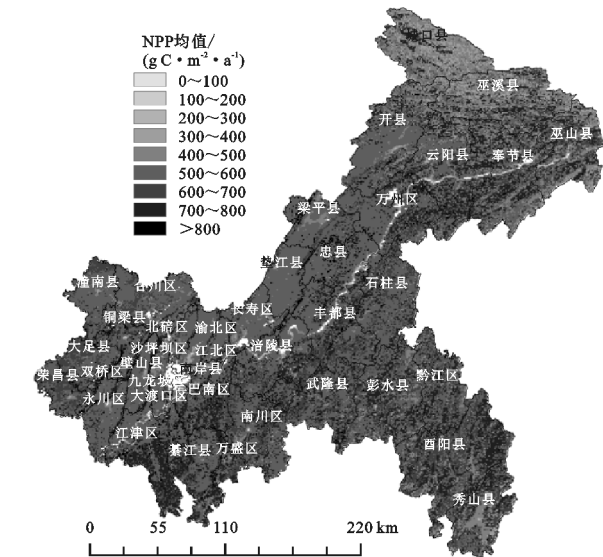


图 2 2000—2015 年重庆市植被 NPP 均值空间分布

重庆市境内由长江自西向东贯穿,具体分析可知,2000—2015 年植被 NPP 在空间差异上较为明显,整体呈现出以长江为界的东南部高、西北部低的分布态势,位于长江以北区域也呈现出西高东低,中部均衡的分布形式,这也与各区县的城市发展状况相对吻合,其中主城区的部分幅员区域下的植被 NPP

达到最低,相对偏远欠发展地区的植被 NPP 相对较高。位于东北部的城口县以及巫溪县的年均 NPP 呈现出较低的程度,这主要归结于该地区显著的地理特征,纬度较高,海拔也明显高于其他区域,山地特征明显。植被 NPP 与城市发展和人类活动的关系密不可分,但最重要的原因是受到了经纬度地带性、植被覆盖、气候、地形等因素的综合影响。

表 2 2000—2015 年重庆市各区县植被 NPP 年均值

g C/(m ² · a)			
行政区名称	NPP 均值	行政区名称	NPP 均值
渝中区	0.000	云阳县	591.204
大渡口区	340.877	奉节县	582.927
江北区	289.806	万州区	598.487
南岸区	507.313	梁平县	596.232
沙坪坝区	492.939	忠县	602.381
九龙坡区	485.386	石柱县	588.026
北碚区	562.996	垫江县	569.807
渝北区	557.145	丰都县	602.058
巴南区	591.543	彭水县	601.017
城口县	473.901	黔江区	600.785
巫溪县	536.531	酉阳县	611.731
巫山县	560.592	秀山县	600.236
开州区	564.89	长寿区	561.362
		涪陵区	599.897
		武隆县	616.657
		南川区	620.881
		綦江区	637.693
		江津区	622.680
		永川区	600.274
		荣昌区	603.174
		大足区	616.814
		铜梁县	612.428
		璧山区	593.053
		潼南县	589.902
		合川区	579.136
		万盛区	623.522

从表 2 中可以看出,2000—2015 年重庆市植被 NPP 均值在 600 g C/(m² · a)以上、500~600 g C/(m² · a)的区县分别达到了 15 及 18 个,400~500 g C/(m² · a)以及 400 g C/(m² · a)的区域都仅有 3 个。主城 9 区的年均植被 NPP 总体偏低,其中渝中区最低,趋近为 0 g C/(m² · a),其次是江北区和大渡口区,分别是 289.806,340.877 g C/(m² · a),其余 6 区的 NPP 均值介于 400~600 g C/(m² · a),巴南区最高,达到 591.543 g C/(m² · a)。在重庆市全部区县中,綦江区、万盛区、江津区、南川区的年均 NPP 在研究区内优势明显,均在 620 g C/(m² · a)以上,分别为 637.693,623.522,622.68,620.881 g C/(m² · a),4 大区成片分布在重庆市南部,均属于亚热带湿润季风气候,具备自然资源丰富、植被覆盖率高的先天优势。

3.2 植被 NPP 年际变化特征

为研究重庆市植被 NPP 在 2000—2015 年的流向以及变化趋势,基于 GRGIS 10.1 求出重庆市总体植被 NPP 在 2000—2015 年各年份的年际变化以及各区间下的面积占比情况,将 2010 年与 2015 年的植被 NPP 进行差值以及变化率的空间变化分析,具体结果如图 3—5 所示。

从图 3 可以看出,重庆市在 2000—2015 年这 16 年间的 NPP 均值具有明显的波动,先增后趋于平稳,再减后增,其中 2002 年、2013 年出现峰值,分别为

658.557,652.769 g C/(m² · a),在 2011 年出现最低值 481.512 g C/(m² · a)。在面积占比中,400~800 g C/(m² · a)区间的 NPP 均值占比最大,仅 2011 年占比在 77.09%,其余年份均在 80%以上,甚至有 9 a 达到了 90%以上,其中 500~600 g C/(m² · a),600~700 g C/(m² · a)的占比相对较大,达到 19.79%~44.96%以及 19.28~37.25 g C/(m² · a)。植被 NPP 均值在 0~100 g C/(m² · a)的面积占比最低,均在 1%以下,其次是 0~200 g C/(m² · a)和 200~300 g C/(m² · a),占比为 0.05%~1.60%,0.26%~5.27%。

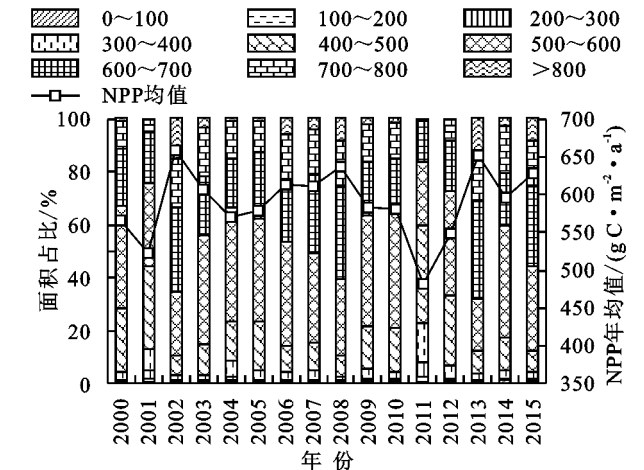


图 3 2000—2015 年重庆市植被 NPP 均值变化及面积占比

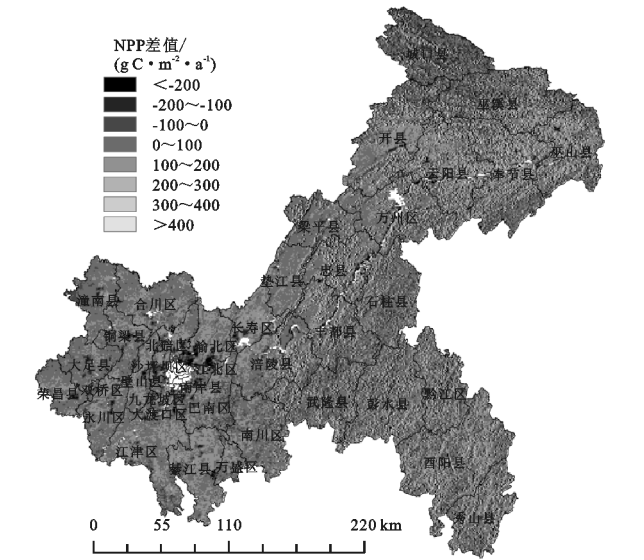


图 4 2000—2015 年重庆市植被 NPP 差值

利用简单差值法和最小二乘法计算出 2000—2015 年重庆市植被 NPP 差值以及变化斜率,进而得到植被 NPP 差值及变化百分率的空间分布图,如图 4—5 所示,2000—2015 年出现负增长的栅格占比约为 22.872%,主要零星分布在东南部地区和以及中部的主城 9 区内,以渝中区为中心的部分主城区内以及主要河流区域的植被 NPP 在 16 年间均趋于 0。差值在 -100~0 g C/(m² · a)的占比为 14.486%,

-200~-100 g C/(m² · a)的百分比为 6.158%。正增长的栅格数高达 62 598 个,约占整个区域栅格总数的 77.128%,在空间分布中主要处于中西部地区,其中,0~100 g C/(m² · a),100~200 g C/(m² · a)的占比最为突出,分别为 44.031%,24.204%,变化幅度在 400 g C/(m² · a)以上的栅格占比仅为 0.928%。从 2000—2015 年的植被 NPP 变化百分比中,变化率在 0~30%的栅格占比最大,约有 60.572%(0~15%约为 43.227%,15%~30%约为 17.345%),负增长中,-15%~0 的占比最大,达到 20.717%。由此可知,相较于 2000 年的植被 NPP 值,到 2015 年呈现整体上增长的趋势,大部分区域都有所提升。

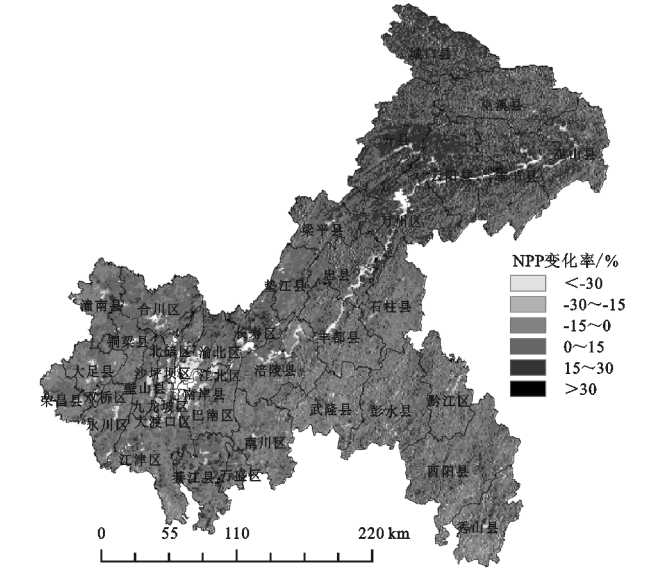


图 5 2000—2015 年重庆市植被 NPP 变化百分率

3.3 植被 NPP 与地形因子间的相关性分析

基于 DEM 数据求算重庆市高程与坡度,根据研究区高程和坡度的划分标准,得到重庆市高程、坡度分级情况的时空分布图(图 6—7)。在此基础上,通过 ArcGIS 软件按公式(4—5)方式进一步计算得到各分级内植被 NPP 的年均值、总值及标准差(表 3—4),通过栅格数据数目的占比情况得到各级区域面积占研究区所辖总范围的比例(图 8—9)。

从图 6—7 可以看出,重庆市坡度与高程的分级情况在空间上的分布局势较为相似,整体上高海拔、高坡度地区主要集中在东南部,并逐渐向西北方向递减,其中,最北端的城口县以及巫溪县的部分区域高程最高、坡度最大,重庆市多为丘陵以及低山地区,分别占比 37.750%,37.208%,其次是中山地区 16.225%,高山地区 7.077%,属于平原的区域极少,占比仅有 1.740%,大多分布在长江河流沿岸。从坡度分级图可以看出,重庆市属于典型的坡地城市,其中斜坡、陡坡、急坡地区占比最大,依次为 30.313%,33.327%,22.599%。

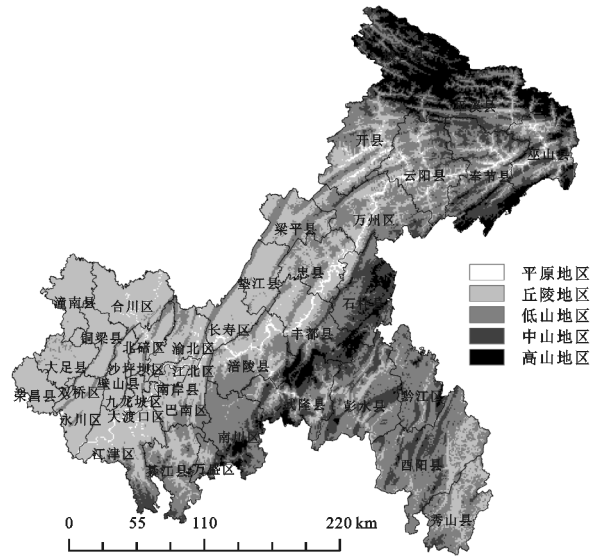


图 6 重庆市高程分级分布

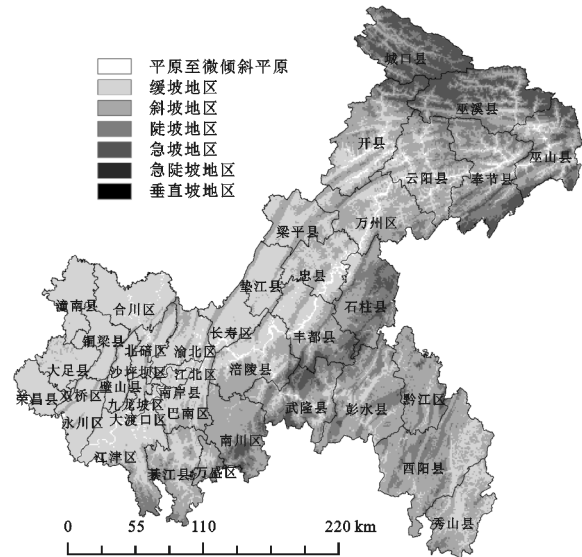


图 7 重庆市坡度分级分布

通过对栅格数据进行处理, 求出重庆市 2000—2015 年植被 NPP 各像元在 16 a 间高程、坡度各级别下的平均植被 NPP 均值以及像元数目的占比情况(图 8—9)。

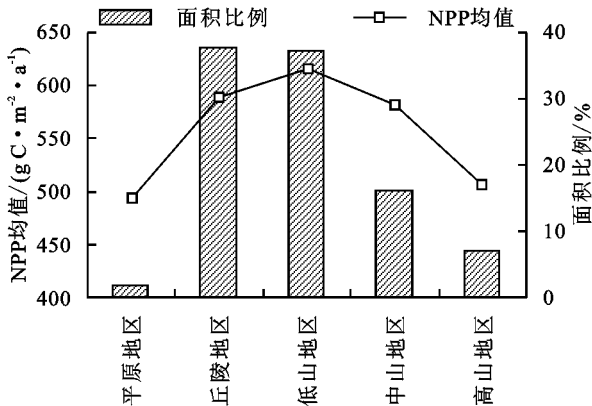


图 8 重庆市各级高程地区植被 NPP 均值及面积占比
分析得出, 随着高程的增加植被 NPP 均值呈现

出先增后减的趋势, 其中平原地区最低, 植被 NPP 仅为 $493.841 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 当海拔高度上升到丘陵地区, 植被 NPP 增加了 $94.529 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 当海拔高度处于低山地区时植被 NPP 达到了最高点, 为 $615.616 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 在低山地区和高山地区阶段, 随着海拔的增高, 植被 NPP 持续下降, 中山地区和高山地区分别下降至 $582.454, 506.824 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。NPP 均值在不同的坡度分级中, 变化幅度在 $553.683 \sim 602.321 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 波动程度较为平缓。其中, 陡坡地区最高, 为 $602.321 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 急坡和斜坡地区其次, 分别为 $595.755, 591.444 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 整体变化上从陡坡地区向两端减少的趋势, 并且有对称变化的特征, 垂直坡地区和平原至微倾斜平原地区为 $556.975, 553.682 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 缓坡地区和急陡坡地区的植被 NPP 均值分别是 $571.338, 570.330 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

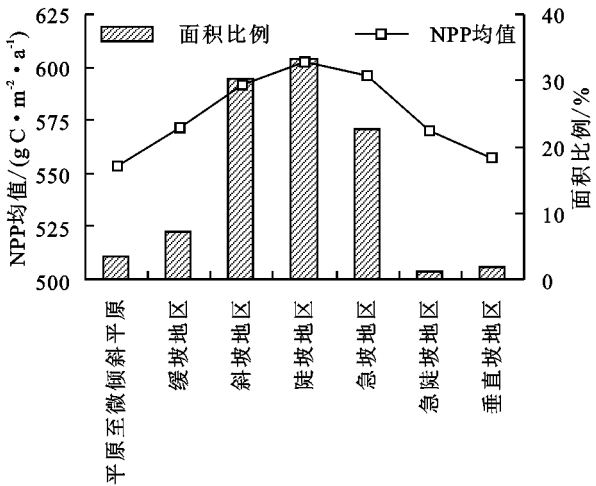


图 9 重庆市各级坡度地区植被 NPP 均值及面积占比

由表 3—4 可知, 从总量上可以看出在高程 $200 \sim 500 \text{ m}$, $500 \sim 1\,000 \text{ m}$ 区间 NPP 总量最大, 分别为 $17.901, 18.461 \text{ mg C/a}$, 由于面积占比以及 NPP 均值都较小的原因, 在高程 $\leq 200 \text{ m}$ 以及 $> 1500 \text{ m}$ 的地区, NPP 总量和也仅只有 3.583 mg C/a 。通过公式(4—5)公式计算得到的标准差分析可知, 标准差的变化表现出与 NPP 均值相似的增减趋势, 在 $0 \sim 500 \text{ m}$ 范围内, 主要是由于像元数据的巨大差异而导致标准差从 $147.807 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 增加到 $207.196 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 而高程在 $500 \sim 1\,000 \text{ m}$ 区间标准差为 $272.725 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 更大程度上是受到人类活动的影响。随着像元数目的减少, 高程在 $1\,000 \sim 1\,500 \text{ m}$ 范围内标准差逐渐降低, 经试验分析, $1\,500 \text{ m}$ 以上的植被 NPP 变化受到气候、温度的变化变大, 并且更大程度上受到了地形地貌以及植被分布的限制。

植被 NPP 总量变化幅度出现端点骤变趋势, 在低坡度的 $\leq 2^\circ, 2^\circ \sim 5^\circ$ 以及高坡度 $35^\circ \sim 50^\circ, > 50^\circ$ 的

坡度分类中,由于面积占比的原因,NPP 总量与 5°~35°相比急剧下降,分别只有 1.392,3.002,0.524,0.704 mg C/a,坡度在 15°~25°区间的 NPP 总量最高,其次是 5°~15°和 25°~35°,最高值为 14.517 mg

表 3 2000—2015 年各级高程地区植被 NPP 及标准差

统计量	高程				
	≤200 m	200~500 m	500~1000 m	1000~1500 m	>1500 m
NPP 均值/(g C·m ⁻² ·a ⁻¹)	493.841	588.370	615.616	582.454	506.824
NPP 总量/(mg C·a ⁻¹)	0.692	17.901	18.461	7.617	2.891
标准差	147.807	207.196	272.725	202.170	156.715

表 4 2000—2015 年各级坡度地区植被 NPP 及标准差

统计量	坡度/(°)						
	≤2	2~5	5~15	15~25	25~35	35~50	>50
NPP 均值/(g C·m ⁻² ·a ⁻¹)	553.682	571.338	591.444	602.321	595.755	570.330	556.975
NPP 总量/(mg C·a ⁻¹)	1.392	3.002	12.965	14.517	9.736	0.524	0.704
标准差	115.871	119.749	194.313	232.331	219.477	193.823	131.647

4 结 论

(1) 重庆市植被 NPP 呈东南部高,西北部低的分布态势。在长江以南的区域植被 NPP 明显高于长江以北的区域,植被 NPP 均在 600 g C/(m²·a)以上。长江以北的植被 NPP 空间分布差异较大,从南向北植被 NPP 逐渐降低,南部地区的大足县、荣昌县以及铜梁县均在 600~620 g C/(m²·a),渝中区、大渡口区以及北碚区更是低于 350 g C/(m²·a),中部区域大部分处于 500~600 g C/(m²·a),处于最北处的城口县降至 473.901 g C/(m²·a)。

(2) 文章利用 ArcGIS 的空间分析技术对 MOD17A3 数据进行栅格的裁剪、计算等处理得到各年份的年际均值以及不同植被 NPP 区间范围内面积占比。分析可得,2000—2015 年,重庆市植被 NPP 年际均值在 481.512~658.557 g C/(m²·a)浮动,其中,2002 年、2013 年达到峰值,2001 年、2011 年处于低谷。在研究期 16 年间,植被年均 NPP 处于 500~600 g C/(m²·a)的占比最大,其次是 600~700 g C/(m²·a)。

(3) 文章利用简单差值法计算分析 2000 年与 2015 年植被 NPP 的变化情况。结果显示,植被 NPP 整体上呈正增长的变化趋势。年均值从 566.199 g C/(m²·a)上升到 628.853 g C/(m²·a),正向增加的栅格比例占 77.128%。植被 NPP 的正向变化率中,变化率在 0~15%的栅格占比最大,约为 43.227%,其次是 15%~30%,约占 17.345%。

(4) 重庆市作为典型的山地区域,整体上高海拔地区主要集中在东南部,并逐渐向西北方向递减,植被 NPP 随着高程的增加呈现出先增后减的趋势。其中,丘陵、低山地区占全市所辖范围的比例最大,平原

C/a。同样受到各级内像元数的影响,标准差呈现了与像元数增减相似的变化趋势。坡度是决定坡面侵蚀强度的关键因子,因此当坡度在 25°后持续增加时,植被 NPP 均值反而有所下降。

地区最低。从植被 NPP 数值的分析可知,当海拔高度从 200~500 m 上升到 500~1 000 m 时,植被 NPP 增加了 94.529 g C/(m²·a),当海拔高度达到 500~1 000 m 植被 NPP 增加到 615.616 g C/(m²·a),随着高程的继续增加,植被 NPP 持续下降,下降至 506.824 g C/(m²·a)。

(5) 从坡度划分角度上,整体的植被 NPP 变化表现为陡坡地区最高,达到 602.321 g C/(m²·a),并向两端减少的趋势,呈对称变化的特征。垂直坡地区和平原至微倾斜平原地区为 556.975,553.682 g C/(m²·a),缓坡地区和急陡坡地区的植被 NPP 均值分别是 571.338,570.330 g C/(m²·a)。这种先增后减的倒“V”型变化模式在一定程度上反映了坡度处于某临界点时,坡面侵蚀强度对植被 NPP 影响更加显著。

文章利用 MOD17A3 数据分析重庆市植被净初级生产力的时空分布特征,虽然在一定程度上反映出典型山地区域的植被碳储量以及区域生态环境质量状况,但仍然存在一定的不足。在分析区域植被 NPP 时,限于区域尺度较大的限制,缺少对全国其他省份以及相似山地地区的比较分析;由于植被净初级生产力受到人类活动以及自然条件以外的众多因素影响,而单只研究与地形因子的影响与实际情况存在一定差距。因此,探究多种因素对植被 NPP 变化的综合影响将是未来研究的重要课题。

参考文献:

[1] 朱志辉.我国自然植被生产力功能和地带性结构的气候耦合[J].地理学报,1996,63(S1):66-72.
[2] Cramer W, Kicklighter D, Bondeau A, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results[J]. Global Change

- Biology, 1999, 5(S1): 46-55.
- [3] 陶波, 李克让, 邵雪梅, 等. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟[J]. 地理学报, 2003, 58(3): 372-380.
- [4] 崔林丽, 杜华强, 史军, 等. 中国东南部植被 NPP 的时空格局变化及其与气候的关系研究[J]. 地理科学, 2016, 36(5): 787-793.
- [5] 戴尔阜, 黄宇, 吴卓, 等. 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[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 21-34.
- [6] 王新闯, 王世东, 张合兵. 基于 MOD17A3 的河南省 NPP 时空格局[J]. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2797-2805.
- [7] 陈雅如. 三峡库区森林生产力与碳储量对景观格局变化的响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [8] 雷延鹏, 孙智辉, 蒋小莉, 等. 基于 MOD17A3 的陕北植被净初级生产力变化特征研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(36): 55-57.
- [9] 王轶虹, 史学正, 王美艳, 等. 2001—2010 年中国农田生态系统 NPP 的时空演变特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 319-326.
- [10] 吴珊珊, 姚治君, 姜丽光. 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, 2016, 31(1): 39-51.
- [11] 朱玉果, 杜灵通, 谢应忠, 等. 2000—2015 年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应[J]. 人生态学报, 2019, 39(2): 1-12.
- [12] 王亚林, 龚容, 吴凤敏, 等. 2001—2013 年中国灌木生态系统净初级生产力的时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2017, 41(9): 925-937.
- [13] 荣检, 胡宝清, 闫妍, 等. 广西西江流域植被净初级生产力时空分布特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2017, 36(4): 1020-1028.
- [14] 孙庆龄, 冯险峰, 肖潇. 武陵山区植被净第一性生产力的时空格局及其与地形因子的关系[J]. 地球信息科学学报, 2014, 138(4): 140-145.
- [15] 姜春, 吴志峰, 程炯, 等. 广东省土地覆盖变化对植被净初级生产力的影响分析[J]. 自然资源学报, 2014, 16(6): 915-924.
- [16] Pei F, Li X, Liu X, et al. Assessing the differences in net primary productivity between pre- and post-urban land development in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 171/172(Complete): 174-186.
- [17] 赵晓, 周文佐, 田罗, 等. 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[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 1-11.
- [18] 朱玉果, 杜灵通, 谢应忠, 等. 2000—2015 年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 1-12.
- [19] 王亚林, 龚容, 吴凤敏, 等. 2001—2013 年中国灌木生态系统净初级生产力的时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2017, 41(9): 925-937.
- [20] 吴晓全, 王让会, 李成, 等. 天山植被 NPP 时空特征及其对气候要素的响应[J]. 生态环境学报, 2016, 25(11): 1848-1855.
- [21] 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[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 35-48.

~~~~~

(上接第 338 页)

- [15] 张荣天, 张小林. 镇江市丘陵区乡村聚落空间格局特征及其影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(3): 272-278.
- [16] 王叶峰, 蒋巍. 如皋市农村居民点空间分布特征分析[J]. 江西农业学报, 2015, 27(8): 120-126.
- [17] 李翔, 张毓涛, 王慧杰, 等. 泽普县农村居民点空间格局演变及其影响因素[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(4): 108-116.
- [18] 李学东, 杨玥, 杨波, 等. 基于耕作半径分析的山区农村居民点布局优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 275-281.
- [19] 赵元, 胡月明, 张新长, 等. 农村居民点耕作距离空间分布特征估测分析[J]. 地理科学, 2016, 36(5): 760-765.
- [20] 石诗源, 鲍志良, 张小林. 村域农村居民点景观格局及其影响因素分析: 以宜兴市 8 个村为例[J]. 中国农学通报, 2010, 26(8): 290-293.
- [21] 谢玲, 李孝坤, 余婷. 基于 GIS 的三峡库区低山丘陵区乡村聚落空间分布研究: 以忠县涂井乡、石宝镇为例[J]. 水土保持研究, 2014, 21(2): 217-222.