

2005—2014 年重庆石漠化地区 NDVI 的时空变化及其与气候因子相关性分析

王家录^{1,2}, 李维杰², 王勇², 任娟², 高敏²

(1.安顺学院 资源与环境工程学院, 贵州 安顺 561000;

2.西南大学 地理科学学院/岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 为了了解重庆石漠化地区植被恢复以及生态环境治理状况, 选取重庆石漠化地区归一化植被指数(NDVI)及气象数据, 利用趋势分析、变异系数分析以及偏相关分析等方法, 重点探讨了重庆石漠化地区 2005—2014 年 NDVI 的时空变化特征, 并分析了 NDVI 变化与气候因子之间的相关性。结果表明: (1) 重庆石漠化地区 NDVI 年际变化总体上呈增加趋势, 增加速率为 0.08/10 a, 其中渝东北地区增长速率相对较高, 达 0.09/10 a, 而 NDVI 季节变化存在一定差异性, 春季增长最为显著, 主要分布于渝东北、渝中和渝西地区; (2) 渝东北石漠化地区 NDVI 呈增加趋势的区域范围较大, 这对于三峡库区生态环境改善以及水土保持起着至关重要的作用; 渝东南、渝中和渝西石漠化地区 NDVI 整体保持不变, 而 NDVI 呈减小趋势的区域主要分布于乌江流域; (3) 重庆石漠化地区 2005—2014 年 NDVI 变异系数相对较低, 以稳定为主; (4) 重庆石漠化地区降水和气温分别与 NDVI 之间正相关性都大于负相关性。总体上降水量的增加一定程度促进了三峡库区植被的生长, 而温度的降低一定程度上抑制了乌江流域植被的生长。

关键词: NDVI 时空变化; 气候因子; 石漠化; 重庆

中图分类号: P951

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)02-0217-07

Spatial-Temporal Variation of NDVI and Its Responses to Hydrothermal Condition in Rocky Desertification Area of Chongqing City from 2005 to 2014

WANG Jialu^{1,2}, LI Weijie², WANG Yong², REN Juan², GAO Min²

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Anshun University, Anshun, Guizhou 561000, China; 2.Chongqing Key Laboratory of Karst Environment/School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to understand the restoration of vegetation and the treatment of ecological environment in rocky desertification areas of Chongqing City, NDVI and meteorological data from 2005 to 2014 in rocky desertification areas of Chongqing City were selected, and trend analysis, variation coefficient analysis, partial correlation analysis and other methods to focus on the spatial-temporal variation of NDVI in the rocky desertification areas of Chongqing City over the past 10 years were used, and the correlations between the NDVI and climatic factors were analyzed. The results show that: (1) the interannual variation of NDVI shows an overall increasing trend in rocky desertification areas of Chongqing City, with an increasing rate of 0.08/10 a. Among them, the growth rate in northeast Chongqing City is relatively high, up to 0.09/10 a, and the seasonal variation of NDVI has some differences, and the spring growth is the most significant, mainly distributed in the northeast, central and western regions of Chongqing City; (2) the area with increasing NDVI in the northeastern Chongqing has a large area, which plays a crucial role in improving the ecological environment and soil and water conservation in the Three Gorges reservoir area; the NDVI in the rocky desertification regions of southeastern and mid-west Chongqing City remained as a whole, but the areas with decreasing NDVI were mainly distributed in the Wujiang River Basin; (3) the coefficient of variation of NDVI in rock desertification of Chongqing City from

收稿日期: 2020-05-20

修回日期: 2020-06-05

资助项目: 贵州省科技合作计划项目(黔科合 LH 字[2017]7059 号); 重庆市发展和改革委员会学术委员会研究课题(4080491)

第一作者: 王家录(1969—), 男, 贵州织金人, 博士, 副教授, 主要从事岩溶环境与全球变化研究。E-mail: lu226@163.com

通信作者: 王勇(1975—), 男, 山西吕梁人, 博士, 副教授, 主要从事地表环境与应用地理研究。E-mail: 190966549@qq.com

2005 to 2014 was relatively low, and the degree of variation was mainly stable; (4) the positive correlation between precipitation and NDVI in rocky desertification areas of Chongqing City is larger than that of negative correlation, the same to the positive correlation between temperature and NDVI. In general, high-humidity environment promoted the growth of vegetation in the Three Gorges reservoir area to a certain extent, while the low-temperature environment has inhibited the growth of vegetation in the Wujiang River Basin.

Keywords: spatial temporal variation of NDVI; climate data; in rocky desertification area; Chongqing City

石漠化是指在亚热带湿润与半湿润气候条件下,受自然以及人为因素的干扰,地表植被逐渐破坏,土壤受到严重侵蚀,大量的碳酸盐岩裸露于地表,呈现出类似于荒漠化的土地退化现象^[1]。石漠化的形成主要受自然和人为因素的影响,其中人为因素的影响占主导。我国石漠化地区主要分布于南方的岩溶山区,集中分布于西南地区,其中贵州、云南以及广西地区为重度石漠化连片区域,同时也是贫困主要的发生地,其次为重庆、四川以及湖南等地区,石漠化面积占国土面积的23%,严重影响了当地人民的生活水平以及经济发展。石漠化地区地表植被覆盖相对较少,保水能力相对下降,水土流失逐渐加剧导致居民生产与生活用水严重短缺,已成为石漠化地区贫困加剧的主要原因^[2-3]。

依据《重庆市岩溶地区石漠化综合治理工程规划》(2006—2020年),重庆石漠化地区达9 256 km²,占全市国土面积的11.23%。其主要分布于渝东北、渝东南低山丘陵地区,渝中以及渝西地区分布相对较少。不同地区石漠化发生率以及程度存在一定差异,其中三峡库区是重庆石漠化主要集中区,面积达5 285 km²,占全市石漠化土地的57.11%,生态环境相对脆弱,水土流失较为严重^[4-6]。总的趋势为渝东北、渝东南地区石漠化相对严重,渝中以及渝西地区石漠化相对较轻。基于此,重庆市自2005—2014年开展了一系列石漠化地区综合治理工作,不同地区石漠化治理技术以及方法存在一定差异,其主要包括生物技术、工程技术、农业技术以及退化地开发技术等治理方法,旨在解决石漠化地区生态环境恶劣问题,并逐步提高石漠化发生地及其周边居民的生活水平^[7-9]。

2014年重庆市石漠化治理工作全面结束,为了较为科学以及准确地分析石漠化地区治理以来的植被恢复情况,本文主要采用2005—2014年植被归一化指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)分析重庆石漠化地区植被的变化趋势以及生态环境状况,同时采用重庆及其周边地区气象监测站点的气温和降水数据分析不同地区植被变化成因。因此本文通过MODIS NDVI产品和气象监测站点

的监测数据,采用趋势分析、变异系数分析以及与气象因子之间的相关性等分析方法对重庆石漠化地区植被时空变化情况进行深入研究,分析植被恢复情况,为下一步石漠化地区治理工作提出合理意见以及相关依据,逐步提升地区的生态环境质量^[5-6]。

1 研究概况

重庆市位于四川盆地东部边缘,南部与云贵高原相连,北部依靠大巴山,东部与武陵山相依,位于28°10′—32°13′N, 105°17′—110°11′E(图1)。长江与嘉陵江贯穿而过,地区为亚热带季风性湿润性气候,年均降水量约1 154 mm,主要集中于4—10月,其雨季的降水量占全年降水量的75%,年均温度为17.2℃,夏季温度最高达40℃,素有“火炉”之称。重庆地质构造为褶皱山系,地形相对复杂,渝东南与渝东北为中高山地区,海拔为1 000~2 500 m,渝西主要为中低山丘陵,海拔为200~600 m,渝中为平行岭谷地区,海拔约1 200 m。渝东北与渝东南地区生态环境较好,其中武陵山区为我国重点生态功能区,动植物种类多样;同时水力资源也相对丰富,三峡库区作为我国水土保持重点生态功能区对于维护地区生物多样性以及提升长江下游地区水环境质量均起着至关重要的作用,而这些地区同时也是石漠化的主要发生地,生态环境敏感性较强,如何合理保护以及动态监测地区植被变化情况已成为石漠化治理的关键因素^[7-8]。

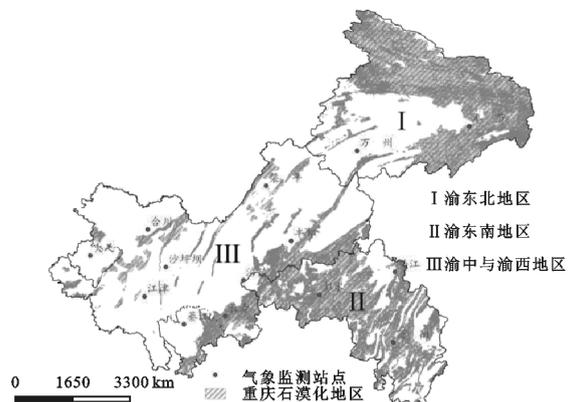


图1 重庆市监测站点以及石漠化地区分布

2 数据与方法

2.1 数据来源及其处理

本文遥感数据来自于美国国家航天局 NASA 的 EOS/MODIS 数据(<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/ims/welcome/>),选取 2005—2014 年的 MODIS/MODNDIM 的月合成数据产品,空间分辨率为 500 m×500 m。下载的 NDVI—月合成数据已经过辐射校正、大气校正以及几何校正等预处理,同时通过 MRT(MODIS Reprojection Tools)软件对 NDVI 数据进行分析之前的重投影、拼接以及格式的转换等预处理,将原始的 HDF 格式转化为 ArcGIS 可以编辑的 tiff 格式,并定义其坐标系以及投影,利用最大合成法(MVC)得到重庆地区的年 NDVI 数据^[9-10]。NDVI 数据分析主要通过 ArcGIS 软件进行,气象数据插值采用统计学 Kriging 插值法,同时分析前已将各年、月 NDVI 产品以及气象数据的空间分辨率保持一致,并利用重庆《重庆市岩溶地区石漠化综合治理工程规划》(2006—2020 年)中提供的石漠化边界裁剪得到 2005—2014 年重庆石漠化地区 NDVI 逐年、月栅格图像^[11-12]。根据重庆石漠化发生的面积以及程度将其划分为 3 个研究区域,分别为渝东南、渝东北以及渝中和渝西地区(图 1)。

本文的气象数据来自于“中国气象数据网”(<http://data.cma.cn/site/index.html>),包括 2005—2014 年重庆市及其周边地区 29 个气象站点的逐日降雨量数据、气温数据、经纬度以及站点海拔。每个站点的监测时长均超过 40 a,同时数据缺失占比不到 5%。重庆市内气象站点为 14 个(表 1),分布相对均匀,同时取了周边 4 个省份 15 个气象站点,保证气象数据插值的准确性。本文将 12 月—次年 2 月划分为冬,3—5 月划分为春季,6—8 月划分为夏季,9—11 月划分为秋季。

表 1 重庆市气象监测站点

站点	监测年限	纬度 N/(°)	经度 E/(°)	海拔/m
奉节	1954—2014	31.02	109.53	299.80
梁平	1954—2014	30.41	107.48	454.50
万州	1957—2014	30.77	108.40	186.70
沙坪坝	1957—2014	29.58	106.47	259.10
酉阳	1951—2014	28.82	108.77	826.50
大足	1956—2014	29.70	105.70	394.70
合川	1954—2014	29.97	106.28	230.60
江津	1957—2014	29.28	106.25	261.40
长寿	1956—2014	29.08	107.07	377.60
丰都	1955—2014	29.85	107.73	290.50
黔江	1951—2014	29.53	108.78	607.30
綦江	1957—2014	29.00	106.65	474.70
彭水	1957—2014	29.30	108.02	322.20
涪陵	1955—2014	29.45	107.25	273.50

2.2 研究方法

本文通过趋势分析法分析重庆石漠化地区 10 a 间植被恢复以及生态环境状况^[13],利用变异系数法分析重庆石漠化地区植被多年以来的变化以及稳定程度^[14],采用相关性分析法探讨重庆石漠化地区植被与气象影响之间的关系^[15]。旨在深入研究石漠化地区植被的生长状况以及时空变化特征,为石漠化综合治理以及提升区域生态环境质量提供一定理论依据,具体的计算公式如下:

(1) 趋势分析法

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

式中:趋势分析法的本质为一元线性回归分析的基础上建立的, n 为研究时间序列的长度(如本文时间段 2005—2014 年共 10 a); i 为研究时间段内的第 i 年; NDVI_i 为研究时段内第 i 年的 NDVI 值; slope 为斜率,当 $\text{slope} > 0$ 时,表明 NDVI 值呈上升趋势,而 $\text{slope} < 0$ 时,表明 NDVI 值呈下降趋势;为了更好地分析石漠化地区植被趋势变化情况,本文将趋势变化划分为 5 个等级,分别为明显减小($\text{slope} \leq -0.005$)、轻度减小($-0.005 < \text{slope} \leq -0.002$)、基本不变($-0.002 < \text{slope} \leq 0.002$)、轻度增加($0.002 < \text{slope} \leq 0.005$)、显著增加($\text{slope} > 0.005$)^[4]。

(2) 变异系数

$$C_v = \frac{SD_{\text{NDVI}}}{\bar{M}_{\text{NDVI}}} \quad (2)$$

式中:变异系数可以一定程度上反映地区植被的变异状况,为标准差与均值的比值; SD_{NDVI} 为地区逐年 NDVI 平均值的标准差; \bar{M}_{NDVI} 为地区逐年 NDVI 平均值; C_v 值越大表明变异程度较高, C_v 值越小表明变异程度较低;为了较好地分析 10 a 间重庆石漠化地区植被的变异程度,本文将其划分为 4 个等级,分别为非常稳定($C_v \leq 0.04$)、稳定($0.04 < C_v \leq 0.08$)、变异较小($0.08 < C_v \leq 0.12$)、变异剧烈($C_v > 0.12$)^[4]。

(3) NDVI 与气候因子之间的相关性

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

式中: R_{xy} 为两个研究变量之间的相关系数; X_i 为研究时段内第 i 年的 NDVI; Y_i 为研究时段内第 i 年的气温或降水量; \bar{x} 为研究时段内 NDVI 多年均值; \bar{y} 为研究时段内气温或降水量多年均值。

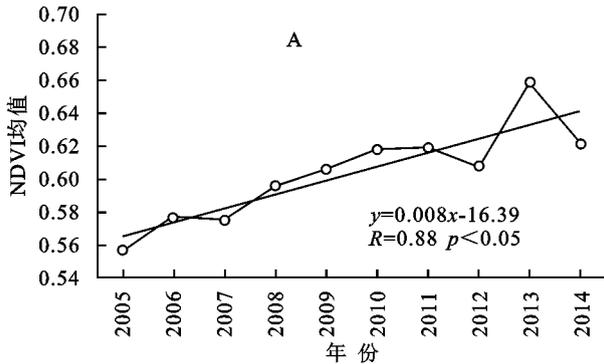
$$r_{123} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1-r_{13}^2)(1-r_{23}^2)}} \quad (4)$$

式中： r_{123} 为将 3 变量固定后研究变量 1 与变量 2 直接的相关性；1,2,3 分别为 NDVI、气温以及降水量； r_{12} 为 NDVI 与气温的偏相关； r_{13} 为 NDVI 与降水量的偏相关； r_{23} 为降水量与气温的偏相关。

3 结果与分析

3.1 重庆石漠化地区 NDVI 时间变化特征

为了分析重庆石漠化地区 2005—2014 年植被的变化趋势情况,本文采用趋势分析法 slope 对重庆整个石漠化地区及其分区分别进行研究,并对其显著性进行检验。通过分析表明重庆石漠化地区 10 a 间 NDVI 整体呈增加趋势,并通过了 0.05 显著性检验,增加速率



为 0.08/10 a,表明 2005 年石漠化综合治理工程以来地区植被生长状况有所好转,效果显著(图 2)。各分区石漠化地区 NDVI 变化情况有所差异,各区域石漠化面积所占比重从大到小依次为渝东北、渝东南以及渝中与渝西地区,分别为 46.01%,31.32%,22.69%;各分区石漠化地区 10 a 间 NDVI 整体均呈增加趋势,而每 10 a 增加的速率却各不相同,各分区增加速率从大到小依次为渝东北、渝中与渝西以及渝东南地区,分别为 0.09,0.03,0.02,渝东北石漠化地区 NDVI 增速显著,并通过了 0.01 显著性检验,其他地区均未通过显著性检验,表明 10 a 间三峡库区植被恢复以及水土保持工作成效显著,生态环境逐渐趋良。

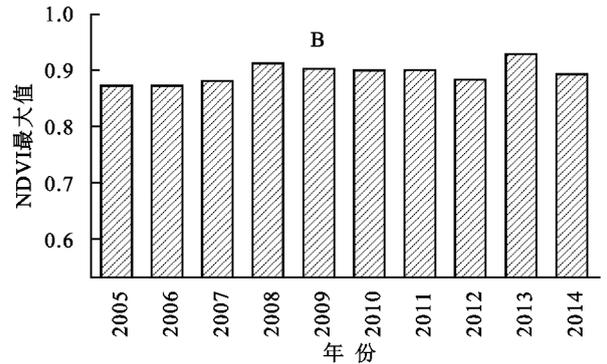


图 2 2005—2014 年重庆石漠化地区 NDVI 变化趋势

重庆石漠化地区不同季节 NDVI 变化趋势也存在一定差异(表 2),重庆石漠化地区在季节变化上整体呈增加趋势,春季增加速率最为显著,相关系数为 0.65,通过了 0.01 显著性检验,其他季节均通过显著性检验;各分区不同季节 NDVI 变化也有所差异,渝东南石漠化地区四季 NDVI 变化呈不显著增加趋势,均未通过显著性检验;渝东北石漠化地区春冬季节呈显著增加趋势,相关系数均在 0.60 以上,分别通过了 0.01,0.05 显著性检验,夏秋季节呈不显著增加;渝中与渝西石漠化地区春季 NDVI 呈显著增加趋势,相关系数为 0.59,通过了 0.05 显著性检验,其他季节呈不显著增加。表明整体上重庆石漠化地区 NDVI 在春季增长最为显著,主要分布于渝东北、渝中和渝西地区。

表 2 重庆石漠化地区不同季节 NDVI 变化趋势特征

地区	春季	夏季	秋季	冬季
渝东南	0.48	0.14	0.15	0.36
渝东北	0.69**	0.23	0.29	0.60*
渝中与渝西	0.59*	0.13	0.04	0.32
全部	0.65**	0.24	0.22	0.51

注: * 表示 0.05 显著性水平, ** 表示 0.01 显著性水平。

3.2 重庆石漠化地区 NDVI 空间变化特征

3.2.1 NDVI 空间趋势变化分析 重庆石漠化地区 NDVI 在空间变化上也存在显著差异(附图 3),

2005—2014 年重庆石漠化地区 NDVI 整体上呈轻度增加趋势的面积占比相对较大,同时呈增加趋势的面积占比大于下降趋势的面积占比。NDVI 呈明显减小的区域主要分布于武隆区以及乌江流域,面积占比为 1.73%;NDVI 呈轻度减小的区域主要分布于渝东南彭水地区以及渝中和渝西平行岭谷地带,面积占比为 7.03%;NDVI 保持基本不变的区域主要分布于渝东北地区北部以及渝东南地区西北部,面积占比为 31.18%;NDVI 呈轻度增加的区域主要分布于渝东南地区中南部以及渝东北地区大部,面积占比达 36.04%;NDVI 呈显著增加的区域主要分布于渝东北三峡库区周边以及渝东南零星地带,面积占比为 20.99%。

各分区石漠化地区 NDVI 变化情况也有所差异(表 3),渝东北石漠化地区 NDVI 呈轻度增加趋势的面积占比相对较大,达 42.68%,呈显著增加和基本不变的区域面积占比分别为 35.41%,20.66%,呈减小的区域面积占比为 1.24%;渝东南石漠化地区 NDVI 保持基本不变的区域面积占比相对较大,达 44.35%,呈显著增加和轻度增加的区域面积占比分别为 11.55%,31.34%,而呈减小的区域面积为 12.75%;渝中与渝西石漠化地区 NDVI 保持基本不变的区域面积占比相对较大,达 48.18%,呈显著增加和轻度增加的区域面积占比分别为 4.71%,28.54%,而呈减小的区域面积为 18.57%。

表 3 重庆石漠化地区 NDVI 变化趋势统计结果

趋势分级	变化等级	全部		渝东北		渝东南		渝中与渝西	
		面积/km ²	比例/%						
<-0.005	显著减小	26.89	1.73	0.52	0.07	14.79	3.06	11.73	3.38
(-0.005,-0.002]	轻度减小	107.71	7.03	8.21	1.17	46.80	9.69	52.66	15.19
(-0.002,0.002]	基本不变	523.61	31.18	145.52	20.66	214.22	44.35	167.05	48.18
(0.002,0.005]	轻度增加	551.94	36.04	299.99	42.68	151.39	31.34	98.95	28.54
>0.005	显著增加	321.45	20.99	248.91	35.41	55.81	11.55	16.34	4.71
总计		1531.60	100.00	702.85	100.00	483.01	100.00	346.73	100.00

总体上,重庆石漠化地区 10 a 间 NDVI 呈增加趋势的区域面积占比较大,其中渝东北石漠化地区 NDVI 增加区域面积最为显著,达 548.9 km²,这对于三峡库区生态环境改善以及水土保持起着至关重要的作用;渝东南、渝中和渝西石漠化地区 NDVI 整体上呈保持不变的区域面积占比较大,而其中 NDVI 呈减小趋势的区域也主要集中于这两个地区,其面积占总减小面积的 93.59%。

3.2.2 NDVI 空间变异系数分析 重庆石漠化地区 NDVI 10 a 间整体上变异程度相对较低,处于非常稳定和稳定的区域占比达 96.18%(附图 4)。NDVI 变异非常稳定的区域主要分布于渝东北地区北部以及渝东南西北部零星地区,面积占比为 11.39%;NDVI 变异稳定的区域分布较为广泛,各地区均有分布,面积占比达 84.79%;NDVI 变异较小的区域主要分布

于三峡库区周边以及乌江流域,面积占比为 3.86%;NDVI 变异剧烈的区域分布相对较小,主要集中于璧南河上游地区,面积占比 0.07%。

各分区石漠化地区 NDVI 变异程度总体上以稳定为主(表 4),渝东南石漠化地区 NDVI 变异非常稳定的区域占比为 3.48%,NDVI 变异稳定的区域范围较大,占比达 90.44%,NDVI 变异较小的区域占比为 5.18%,NDVI 变异剧烈的区域范围较小,占比仅 0.03%;渝东北石漠化地区 NDVI 变异非常稳定的区域占比为 18.36%,NDVI 变异稳定的区域占比达 78.85%,NDVI 变异较小的区域占比为 2.84%,NDVI 变异剧烈的区域范围较小,占比仅 0.06%;渝中与渝西石漠化地区 NDVI 变异非常稳定的区域占比为 8.04%,NDVI 变异稳定的区域范围占比达 87.94%,NDVI 变异较小的区域占比为 4.05%,NDVI 变异剧烈的区域范占比为 0.13%。

表 4 重庆石漠化地区 NDVI 变异系数统计结果

变异系数	变化等级	全部		渝东南		渝东北		渝中与渝西	
		面积/km ²	比例/%						
<0.04	非常稳定	174.43	11.39	16.83	3.48	129.02	18.36	27.88	8.04
0.04~0.08	稳定	1298.73	84.79	436.86	90.44	554.19	78.85	304.92	87.94
0.08~0.12	变异较小	59.12	3.86	25.01	5.18	19.98	2.84	14.03	4.05
>0.12	变异剧烈	1.03	0.07	0.16	0.03	0.42	0.06	0.45	0.13
总计		1531.60	100.00	483.01	100.00	702.85	100.00	346.73	100.00

总体上,重庆石漠化地区 2005—2014 年 NDVI 变异系数相对较低,变异程度以稳定为主,其中渝东南地区 NDVI 变异稳定区域相对较大,生态环境优良;而渝东北、渝中与渝西地区 NDVI 变异剧烈区域相对较大,其面积占总变异剧烈区域的 84.47%。

3.3 NDVI 与气候因子之间的关系

3.3.1 重庆石漠化地区气温与降水量空间分布特征

重庆石漠化地区 2005—2014 年降水量降低区域略小于增加区域(附图 5),呈降低区域的面积为 616.01 km²,占比为 40.22%,其中降水量降低幅度最大达 6.51 mm/a,渝东北和渝东南地区大部分降水量均呈下降趋势,其中以三峡库区周边以及乌江流域下降最为显著。而渝中与渝西平行岭谷地区大部分降雨量呈上升趋势,呈上升区域的面积为 915.59 km²,占比为 59.78%,其中上升幅度最大达 7.69 mm/a,总

体上降水量呈增加的区域主要分布于平行岭谷地区,呈下降的区域主要集中于山高谷深的流域地区;重庆石漠化地区气温年变化率空间变化情况有所差异,气温增加区域大于下降区域(附图 6),呈增加区域的面积为 1 077.94 km²,占比达 70.38%,其中气温增加幅度最大达 0.03℃/a,渝东北、渝中与渝西地区气温大部分均呈上升趋势。而渝东南西北部地区气温呈增加趋势,面积为 453.66 km²,占比为 29.62%,温度下降幅度最大达 0.24℃/a,其主要集中于乌江流域地区。

3.3.2 重庆石漠化地区 NDVI 与温度和降水的关系

重庆石漠化地区降水与 NDVI 之间正相关性略大于负相关性(附图 7),所占面积比例分别为 55.25%,44.75%,降水量的多少一定程度决定了植被生长状况,降水与 NDVI 呈正相关性的区域主要分布于渝东北大

部以及渝中与渝西平行岭谷地带,其中渝东北地区降水与 NDVI 呈正相关区域占比达 75.03%(表 5), $p < 0.01$;

而降水与 NDVI 呈负相关性的区域主要分布于渝东南地区,其面积占比达 71.19%, $p > 0.05$ 。

表 5 NDVI 与降雨量之间偏相关系数统计

R	全部		渝东南		渝东北		渝西与渝中	
	面积/km ²	比例/%						
≥0	846.21	55.25	139.12	28.81	527.37	75.03	178.84	51.58
<0	685.39	44.75	343.89	71.19	157.48	24.97	167.89	48.42
合计	1531.60	100.00	483.01	100.00	702.85	100.00	346.73	100.00

重庆石漠化地区气温与 NDVI 之间的正相关性大于负相关性(附图 8),所占面积比例分别为 78.14%, 21.86%,温度对于植被的生长起着促进作用,气温与 NDVI 呈正相关性的区域主要分布于渝东北北部以及渝东南大部分地区,其中渝东南地区气温与 NDVI 呈正相关区域占比达 82.17%(表 6), $p < 0.01$,而气温与 NDVI 呈负相关性的区域主要分布于渝东北三峡库区以及渝中岭谷地区,其面积占比达 79.12%, $p < 0.05$ 。

4 讨论

重庆石漠化地区 2005—2014 年 NDVI 变化总体上呈上升趋势,不同分区 NDVI 变化特征差异较为明显,渝东北地区 NDVI 呈增加趋势的区域相对较大,变异相对稳定,其中 NDVI 显著增加的区域主要集中于三峡库区周边,这主要由于气候因子之间存在着一定相关性,2005—2014 年三峡库区气温呈显著上升趋势,而降雨量呈轻微上升趋势,通过分析气候因子与 NDVI 之间的偏相关性,表明降雨量成为影

响 NDVI 变化的关键性因子^[4];其可能原因为三峡库区周边常年温度相对较高,植物生长所需要的热量较为充足,然而三峡库区周边多为中度及以上石漠化地区,地表保水与持水能力相对较低,不能满足植物生长所需要的水分条件,一定程度上抑制了植物的生长,地表覆盖度逐渐相对较低,近年来随着石漠化治理工程的实施,区域生态环境的改善以及降水量的增加一定程度促进了库区植被的生长^[6-8]。

渝东南地区 NDVI 总体上保持基本不变,但存在一定程度的下降区域,变异系数相对较大,其中显著下降的区域主要集中于乌江流域周边,这主要与 2005—2014 年地区气温和降雨量下降幅度较大有关,通过分析气候因子与 NDVI 之间的偏相关性,表明温度成为影响 NDVI 变化的关键性因子^[5];其可能原因为乌江流域位于渝东南湿润地区,植物生长的水分条件基本可以满足,然而温度的显著性降低导致植物生长所需要的热量相对缺乏,一定程度抑制了地区植被的生长^[7]。

表 6 NDVI 与气温之间偏相关系数统计

R	全部		渝东南		渝东北		渝西与渝中	
	面积/km ²	比例/%						
≥0	1196.83	78.14	396.90	82.17	521.17	74.15	277.56	80.05
<0	344.77	21.86	86.11	17.82	186.68	25.85	69.17	19.95
合计	1531.60	100.00	483.01	100.00	702.85	100.00	346.73	100.00

响中渝西地区 NDVI 总体保持不变,变异系数较为稳定,2005—2014 年地区气温和降雨量均呈不同程度的上升趋势,其中降雨量上升最为明显,通过分析气候因子与 NDVI 之间的偏相关性,表明气温与降雨量共同影响地区 NDVI 变化^[6];其可能原因为渝中与渝西石漠化多分布于岩溶槽谷地区,降水量相对丰富,随着近几年降雨量的显著性增加,一定程度上造成植物光照条件下降,减弱了光合作用,从而阻碍植被的发育^[9]。

5 结论

(1) 重庆石漠化地区 2005—2014 年 NDVI 呈增加趋势的区域面积占比较大,其中渝东北石漠化地区增加区域面积最为显著,这对于三峡库区生态环境改善以及水土保持起着至关重要的作用;渝东南、渝中

和渝西石漠化地区整体上呈保持不变的区域面积占比较大,而呈减小趋势的区域也主要集中于这两个地区,其中乌江流域减小最为显著,其面积占总减小面积的 93.59%。同时重庆石漠化地区 NDVI 季节变化存在一定差异性,春季增长最为显著,主要分布于以渝东北、渝中和渝西地区。

(2) 重庆石漠化地区 2005—2014 年 NDVI 变异系数相对较低,以稳定为主。渝东南地区变异稳定区域占比相对较大,生态环境优良;而变异相对剧烈的区域主要分布于渝东北、渝中与渝西地区。

(3) 重庆石漠化地区降水与 NDVI 之间正相关性略大于负相关性,降水与 NDVI 呈正相关性的区域主要分布于渝东北大部以及渝中与渝西平行岭谷地带,而降水与 NDVI 呈负相关性的区域主要分布于渝东南地区;

气温与 NDVI 之间的正相关性大于负相关性,气温与 NDVI 呈正相关的区域主要分布于渝东北北部以及渝东南大部分地区,而气温与 NDVI 呈负相关性的区域主要分布于渝东北三峡库区以及渝中岭谷地区。

参考文献:

- [1] 马士彬,安裕伦,杨广斌,等.喀斯特不同植被类型 NDVI 变化及驱动因素分析:以贵州为例[J].生态环境学报,2016,25(7):1106-1114.
- [2] 熊康宁,李晋,龙明忠.典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J].地理学报,2012,67(7):878-888.
- [3] Wu X Q, Liu H M, Huang X L, et al. Human driving forces: Analysis of rocky desertification in karst region in Guanling County, Guizhou Province[J].Chinese Geographical Science, 2011, 21(5): 600-608.
- [4] 李学梅,任志远.近十年来重庆市 NDVI 变化及对气温降水的旬响应特征分析[J].长江流域资源与环境,2014,23(1):101-108.
- [5] 罗敏,古丽·加帕尔,郭浩,等.2000—2013 年塔里木河流域生长季 NDVI 时空变化特征及其影响因素分析[J].自然资源学报,2017,32(1):50-63.
- [6] 朴世龙,方精云.最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化[J].第四纪研究,2001,21(4):294-302.
- [7] 汪言在,苟诗薇.重庆市降雨侵蚀力空间格局及其变化[J].地理科学,2013,33(1):116-122.
- [8] 周梦甜,李军,朱康文.近 15 a 新疆不同类型植被 NDVI 时空动态变化及对气候变化的响应[J].干旱区地理,2015,38(4):779-787.
- [9] 孟丹,李小娟,宫辉力,等.京津冀地区 NDVI 变化及气候因子驱动分析[J].地球信息科学学报,2015,17(8):1001-1007.
- [10] 李辉霞,刘国华,傅伯杰.基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J].生态学报,2011,31(19):5495-5504.
- [11] 张艳楠,牛建明,张庆,等.植被指数在典型草原生物量遥感估测应用中的问题探讨[J].草业学报,2012,21(1):229-238.
- [12] 宫攀,陈仲新.基于 MODIS 数据的东北地区植被物候参数提取[J].土壤通报,2009,40(2):213-217.
- [13] 张戈丽,徐兴良,周才平,等.近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J].地理学报,2011,66(1):47-58.
- [14] 张宝庆,吴普特,赵西宁.近 30 a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J].农业工程学报,2011,27(4):287-293,400.
- [15] 甘春英,王兮之,李保生,等.连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析[J].地理科学,2011,31(8):1019-1024.
- [7] 朱艳欣,桑燕芳.青藏高原降水季节分配的空间变化特征[J].地理科学进展,2018,37(11):1533-1544.
- [8] 李双双,芦佳玉,延军平,等.1970—2015 年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义[J].地理学报,2018,73(1):13-24.
- [9] 王根绪,程根伟,刘巧,等.全球变化下的山地表生环境过程:认知与挑战:中国科学院贡嘎山高山生态系统观测试验站建站 30 周年回顾与展望[J].山地学报,2017,35(5):605-621.
- [10] 贾仰文,郝春洋,牛存稳,等.典型山地降水径流时空演变及“水—热—人—地”匹配性分析[J].地理学报,2019,74(11):1-15.
- [11] 李沁汶,王玉宽,徐佩,等.未来气候变化情景下横断山北部灾害易发区极端降水时空特征[J].山地学报,2019,37(3):400-408.
- [12] 周旗,卞娟娟,郑景云.秦岭南北 1951—2009 年的气温与热量资源变化[J].地理学报,2011,66(9):1211-1218.
- [13] 刘引鸽,葛永刚,周旗.秦岭以南地区降水量变化及其灾害效应研究[J].干旱区地理,2008,31(1):50-55.
- [14] 王钊,罗慧,李亚丽,等.近 50 年秦岭南北不均匀增温及对城市化响应[J].应用气象学报,2016,27(1):85-94.
- [15] 邓晨晖,白红英,高山,等.秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应[J].自然资源学报,2018,33(3):425-438.
- [16] 赵芳,张百平,朱连奇,等.秦巴山地垂直带谱结构的空间分异与暖温带—亚热带界线问题[J].地理学报,2019,74(5):889-901.
- [17] 李军,游松财,黄敬峰.中国 1961—2000 年月平均气温空间插值方法与空间分布[J].生态环境,2006,15(1):109-114.
- [18] 郑小波,罗宇翔,于飞,等.西南复杂山地农业气候要素空间插值方法比较[J].中国农业气象,2008,29(4):458-462.
- [19] 徐翔,许瑶,孙青青,等.复杂山地环境下气候要素的空间插值方法比较研究[J].华中师范大学学报:自然科学版,2018,52(1):122-129.
- [20] 王少鹏,王志恒,朴世龙,等.我国 40 年来增温时间存在显著的区域差异[J].科学通报,2010,55(16):1538-1543.
- [21] 丁一汇,柳艳菊,梁苏洁,等.东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系[J].气象学报,2014,72(5):835-852.
- [22] 邓晨晖.气候变化背景下秦岭山地物候时空变化及其响应[D].西安:西北大学,2018.
- [23] 马佳宁,高艳红.近 50 年黄河上游流域年均降水与极端降水变化分析[J].高原气象,2019,38(1):124-135.
- [24] 李森,夏军,陈社明,等.北京地区近 300 年降水变化的小波分析[J].自然资源学报,2011,26(6):1001-1011.

(上接第 216 页)