

文章编号: 1008-2786-(2020)4-520-12

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000530

1982—2016 年广西 NDVI 时空变化及其影响因素

韦小茶,周秋文*,张继,唐欣,彭正,林丽,杨江州

(贵州师范大学 地理与环境科学学院,贵阳 550025)

摘 要: 植被变化及其与驱动因素的关系研究是开展大规模植被恢复效益评估以及进一步生态建设的重要基础,而目前对喀斯特地区植被时空变化及其影响因素的认识仍不明晰。以广西为例,基于 NDVI、气温、降雨和 DEM 数据,利用最大值合成、线性趋势分析、统计降尺度和偏相关分析法,对 1982—2016 年广西 NDVI 时空变化及其影响因素进行分析。结果表明:(1)1982—2016 年广西多年平均 NDVI 为 0.53,年 NDVI 呈波动增长趋势,变化率为 0.013/10a。广西植被覆盖呈南部、东部向中部、西部和西北部递减的空间分异特征,非喀斯特区的植被覆盖高于峰丛洼地和峰林平原区,高海拔地区的植被覆盖低于低海拔地区,高植被覆盖主要分布在坡度为 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 、 $>40^{\circ}$ 的南坡和东南坡;(2)非喀斯特区的 NDVI 增加趋势明显,峰林平原的 NDVI 出现下降趋势。随着坡度的增加,植被改善越明显。不同坡度和坡向的植被覆盖变化存在差异,但植被改善区所占面积比例均大于退化区;(3)广西多年平均气温为 20°C ,变化率为 $0.255^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,呈南向北递减的空间分布特征。多年平均降雨量为 1508 mm,变化率为 $22.43\text{ mm}/10\text{a}$,呈南部、东部向西北部递减的空间分布特征。NDVI、降雨量和气温在不同季节均表现为:夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季;(4)NDVI 受气温的影响程度强于降雨,尤其与冬季气温具有较强的正相关关系,与夏季降雨具有不显著的负相关关系。峰丛洼地的 NDVI 与降雨呈明显的负相关,峰林平原的 NDVI 与气温呈明显的正相关。研究结果为喀斯特地区生态环境建设和植被恢复提供理论基础和科学依据。

关键词: NDVI;时空变化;气候;地形;广西

中图分类号: K903

文献标志码: A

植被是陆地生态系统的重要组成部分,植被动态变化的监测对区域生态环境保护具有重要的意义^[1-3]。近年来,在全球气候变化和人类活动的影响下,陆地植被发生着不同程度和方式的变化^[4]。植被变化及其影响因素是当前全球变化研究的重要方向,已有大量学者从不同时间和空间尺度上展开研究,并指出基于高空间分辨率和长时间序列的遥感数据对植被时空变化特征及其与影响因素关系的认识具有极其重要的作用^[5-7]。

中国西南喀斯特是世界喀斯特分布面积最大、最集中和发育最典型的地区,脆弱而敏感的喀斯特背景下出现的生态环境与社会经济发展问题在全国乃至全世界都有一定的代表性^[8-9]。通过积极响应国家退耕还林还草、石漠化综合治理等大量工程措施,近年来,中国西南喀斯特地区的植被覆盖呈明显的增加趋势,且受气候变化和地形条件的影响显著^[10-13]。其中,有研究指出,广西的植被恢复效益最为明显,其次为贵州,云南较低^[14-16]。广西地处

收稿日期(Received date):2019-04-30;改回日期(Accepted date):2020-05-19

基金项目(Foundation item):国家自然科学基金项目(41761003);贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2017]2855);贵州省基础研究计划项目(黔科合基础[2017]1195)。[National Natural Science Foundation of China (41761003); Science and Technology Support Program of Guizhou Province (Qiankehe Zhicheng No. [2017]2855); Basic Research Program of Guizhou Province (Qiankehe Jichu No. [2017]1195)]

作者简介(Biography):韦小茶(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向:喀斯特生态水文。[WEI Xiaocha (1995-), female, M. Sc. candidate, specialized in ecological hydrology in karst areas]E-mail: xiaocha_wei@163.com

* 通讯作者(Corresponding author):周秋文(1986-),男,博士,教授,主要研究方向:喀斯特生态水文。[ZHOU Qiuwen (1986-), male, Ph. D., professor, specialized in ecological hydrology in karst areas]E-mail: zouqiuwen@163.com

亚热带湿润季风气候区,地形特征差异显著,属于典型的喀斯特地区。复杂的喀斯特地形会影响太阳辐射和降雨的空间再分配,从而对植被变化产生重要影响。前人研究发现,广西NDVI与前3个月降雨量和温度相关系数的最大值及其对应的滞后期^[17];此外,有学者对比分析广西不同植被类型、土壤类型、海拔高度和不同地质类型的NDVI变化特征及其对气候的响应^[18]。总体而言,广西植被变化主要受气候、地形等因素的影响^[19-25]。但已有的关于广西植被变化及其影响因素研究中,主要采取简单的线性趋势及相关分析方法,研究时段均较短且NDVI数据的空间分辨率较低,难以准确评估地形复杂的喀斯特区植被覆盖变化及其对气候的响应。因此,获取长时序、高分辨率NDVI数据,开展不同地形条件下植被变化及其对气候的响应规律研究,对广西生态效益的合理、准确评估以及进一步的植被建设等具有重要的理论与实践意义。

本文基于1982—2015年8 km分辨率的GIMMS NDVI和2000—2016年1 km分辨率的MODIS NDVI数据,通过统计降尺度的方法,获得1982—2016年1 km分辨率的长时间序列NDVI数据。结合DEM、气温和降雨数据,通过最大合成法、趋势分析和偏相关分析法,分析广西1982—2016年不同地貌单元和不同海拔、坡度和坡向条件下的NDVI时空变化特征,及其对气温和降雨的响应规律。以期为区域的生态环境建设效益评估等政策实施提供参考,对喀斯特地区的石漠化治理、水土保持等植被恢复提供理论基础和科学依据。

1 研究区概况

广西壮族自治区位于云贵高原东南边缘,地势自西北向东南倾斜,海拔范围为0~2124 m。区内地貌类型复杂多样,山多平地少。碳酸盐岩出露面积占广西总面积的40.9%,喀斯特地貌分布广泛。年降雨量为1000~2800 mm,年均温为19~21℃,太阳年总辐射量达90~100 J/(cm²·a),≥10℃积温为5000~8300℃,持续日数为240~358 d。本文参考国家相关部委编制的《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015年)》和童晓伟等人的研究^[14],将广西划分为峰丛洼地、峰林平原和非喀斯特三个地貌单元(图1)。

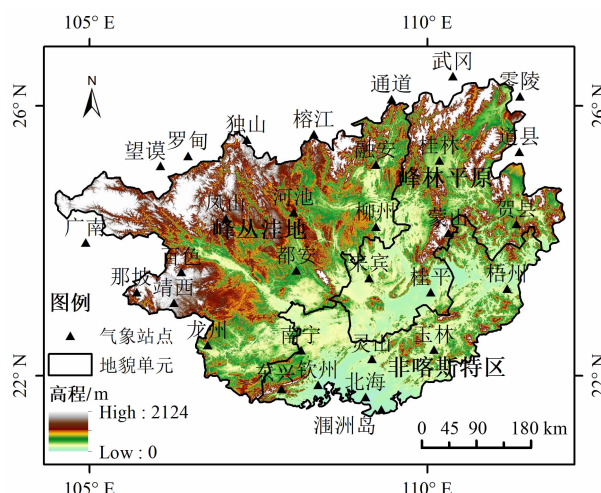


图1 广西地理位置

Fig. 1 Location of Guangxi, China

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 NDVI数据获取与统计降尺度

本文所用的GIMMS NDVI为美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发布的包含1981—2015年的15天最大合成先进型分辨率辐射仪的归一化植被指数AVHRR GIMMS NDVI3g.v1数据集(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1/>),空间分辨率为8 km × 8 km,其中1981年数据从7月开始。本研究所用的数据时间段为1982—2015年,是目前覆盖时段最长的全球连续植被指数数据集。利用Matlab编程语言对GIMMS NDVI3g.v1原始产品转换为Geotiff格式,采用WGS_1984地理坐标和Albers Equal-Area Conic投影。MODIS NDVI是来源于NASA提供的包含2000—2016年MOD13A3产品(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/1>),空间分辨率为1 km × 1 km。利用MODIS Reprojection Tools(MRT)软件对数据进行投影转换、数据拼接等预处理,采用与GIMMS NDVI数据一致的地理坐标和投影。两种数据都通过IDL编程语言实现影像批量裁剪、像元亮度值(Digital Number, DN)转化,采用最大值合成法MVC(Maximum Value Composites)将NDVI旬、月数据逐像元最大值合成年数据^[25]。

利用1982—2015年GIMMS NDVI和2000—

2016 年 MODIS NDVI 重叠的 2001—2015 年数据进行回归分析,建立两种数据间的回归方程,回归方程表达式如下:

$$GV_i = a \times MV_i + b + \varepsilon_i \quad (1)$$

MV_i 代表第 i 月或年的 MODIS NDVI, GV_i 代表第 i 月或年的 GIMMS NDVI, a 和 b 为常数, ε 为回归方程的残差^[26]。然后,将 1982—2000 年 GIMMS NDVI 代入以上方程中,得出 1982—2000 年 1 km 分辨率的 NDVI 数据。为对降尺度进行精度验证,以降尺度后的 2000 年 NDVI 与未参与回归分析的 2000 年 GIMMS NDVI 进行逐像元相关分析,并进行显著性检验。若通过显著性检验,进而可将 2000—2016 年的 MODIS NDVI 进行延伸,最后得到 1982—2016 年 1 km 分辨率的 NDVI 数据。

2.1.2 气象数据

气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的气象观测月值数据集,采用 1982—2016 年广西及周边省份共 35 个标准气象站点(如图 1 所示)的月均温和月降雨量数据,在 Arc GIS 中选用常用的反距离权重内插法(Inverse Distance Weighted, IDW)进行空间插值,并通过投影转换和重采样的处理,使插值后的气温、降雨和 NDVI 具有一致的坐标系统和空间分辨率。

2.2 研究方法

2.2.1 线性趋势分析

通过 IDL 编程语言实现 NDVI 单因素逐像元一元线性回归趋势分析,以线性方程的斜率和相关系数来反映 NDVI 随时间的变化特征^[27]。若斜率大于 0,说明该像元的 NDVI 值在研究时间序列内呈上

升趋势;若斜率小于 0,则说明该像元的 NDVI 值在研究期间呈下降趋势;而斜率等于 0,则说明该像元的 NDVI 值未发生变化。

2.2.2 偏相关分析

偏相关分析可解决地理系统中某一要素的变化影响其他要素与因变量关系的问题,即当两个变量同时与第三个变量相关时,只分析另外两个变量间相关程度的过程^[27-28]。本文基于偏相关分析法分析 NDVI 与气温和降雨间的相关关系。

3 结果与分析

3.1 NDVI 时空变化特征

通过对 1982—2015 年 GIMMS NDVI 和 2000—2016 年 MODIS NDVI 重叠的 2001—2015 年数据进行回归分析,回归方程为 $Y_M = 0.8566X_G - 0.0408$, 相关系数 $R = 0.48$, 在 0.05 显著性水平上通过检验。基于以上回归方程,将 1982—2000 年的 GIMMS NDVI 降尺度得到 1982—2000 年 1 km 的 NDVI 数据。以降尺度后的 2000 年 NDVI 与原始的 2000 年 GIMMS NDVI 进行逐像元相关分析,结果在 0.01 水平上显著相关,表明降尺度的 NDVI 数据通过验证。1982—2016 年广西多年年均 NDVI 为 0.53,变化率为 0.013/10a,总体呈波动增长趋势。年均 NDVI 最低值出现在 2000 年,在 2013 年达到最高值,尤其是 2006—2016 年的 NDVI 较高,为 0.54 ~ 0.58(图 2a)。广西年内各月 NDVI 差异明显,夏季各月 NDVI 高,春秋次之,冬季最低(图 2b)。

为更加直观地反映植被变化趋势的规律性,将

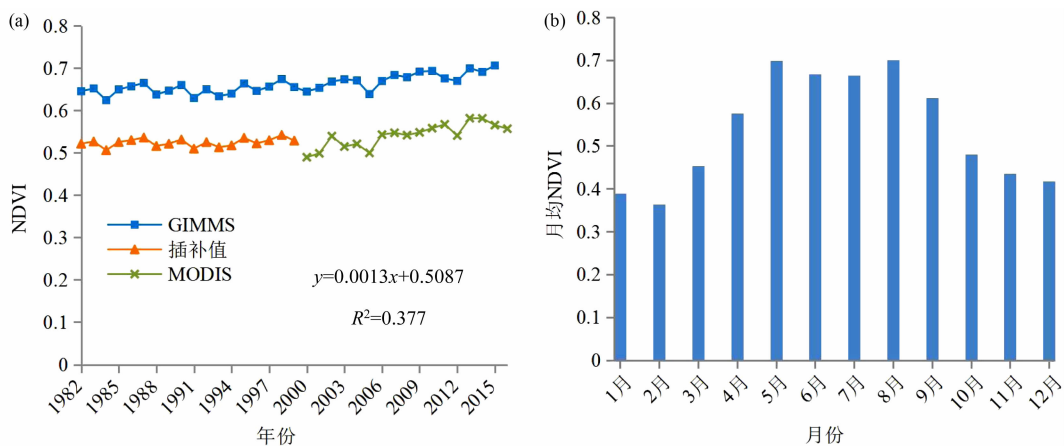


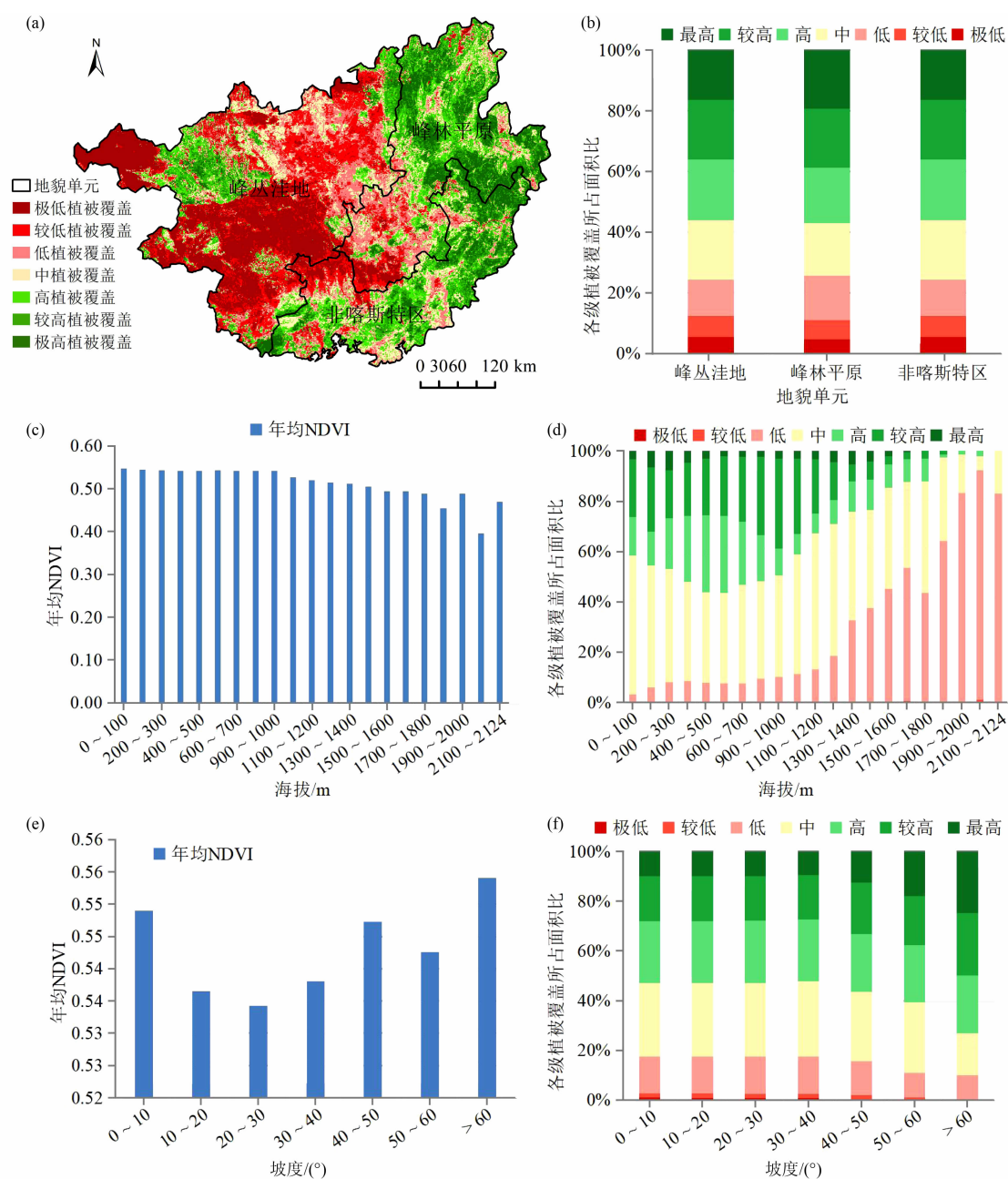
图 2 广西 1982—2016 年 NDVI 变化:(a) 年 NDVI; (b) 月 NDVI

Fig. 2 Temporal variation of NDVI in Guangxi during 1982—2016: (a) annual NDVI; (b) monthly NDVI

NDVI 分为七个等级,分别为:极低植被覆盖($0 < \text{NDVI} \leq 0.1$)、较低植被覆盖($0.1 < \text{NDVI} \leq 0.25$)、低植被覆盖($0.25 < \text{NDVI} \leq 0.4$)、中植被覆盖($0.4 < \text{NDVI} \leq 0.55$)、高植被覆盖($0.55 < \text{NDVI} \leq 0.7$)、较高植被覆盖($0.7 < \text{NDVI} \leq 0.85$)和极高植被覆盖($0.85 < \text{NDVI} \leq 1$)。如图 3a 所示,广西植被覆盖的空间差异明显,呈南部、东部向中部、西部和西北部递减的规律。中、高和较高 NDVI 占研究区的大部分面积,在各 NDVI 低值区域中,峰林平原所占的面积比较大,峰丛洼地次之,非喀斯特最低(图 3b)。而在各 NDVI 高值区域中,峰丛洼地所占面积比最大,非喀斯特区次之,峰林平原最低。随着海拔的升

高,年均 NDVI 呈现缓慢下降的趋势,中、高、较高和最高所占面积比逐渐下降,而极低、较低和低植被覆盖所占面积比有所上升(图 3c、图 3d)。在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 和 $>40^\circ$ 的坡度条件下,NDVI 较高,而在 $10^\circ \sim 40^\circ$ 的中坡度条件下,NDVI 较低。在不同坡度和坡向的地形条件下,不同等级植被覆盖所占的面积比例存在差异。平地、南坡、东南坡、西南坡、东北坡和北坡的 NDVI 值比其他坡向的 NDVI 高,最高、较高和高级植被覆盖主要分布在平地、南坡和东南坡。

广西植被高度、中度、轻微改善和稳定趋势占大部分面积,严重、中度退化和轻微退化所占面积比例较低,总体呈改善状态(图 4a、图 4b)。峰丛洼地和



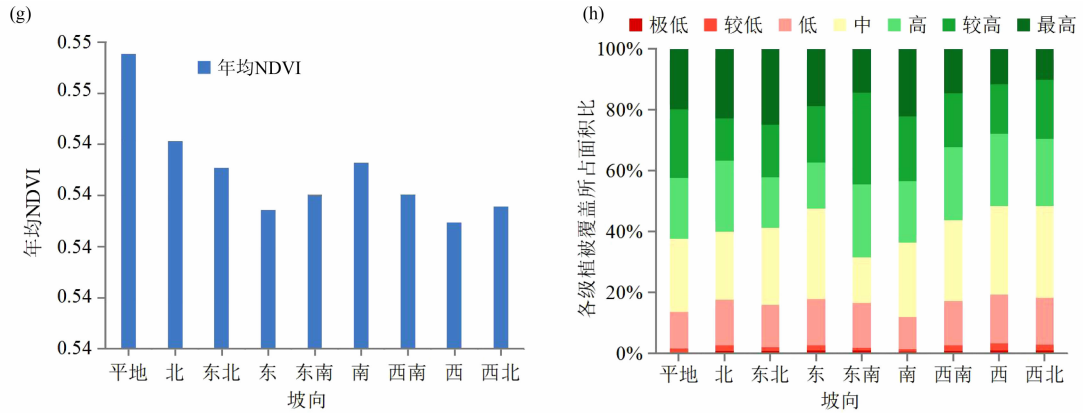
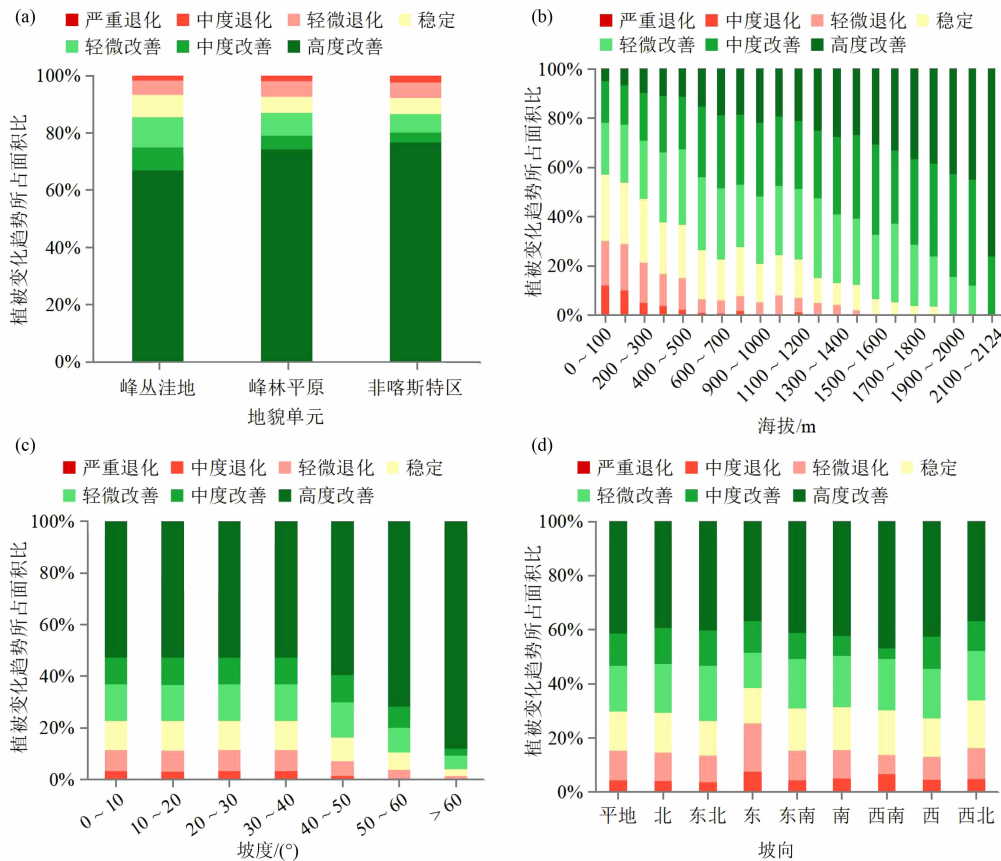


图3 广西 1982—2016 年 NDVI 空间分布特征:

(a) 研究区年均 NDVI 空间分布; (b) 不同地貌单元各级植被覆盖所占面积比; (c) 和 (d) 分别为年均 NDVI 和各等级植被覆盖随海拔的变化特征; (e) 和 (f) 分别为年均 NDVI 和各等级植被覆盖随坡度的变化特征; (g) 和 (h) 分别为年均 NDVI 和各等级植被覆盖随坡向的变化特征

Fig. 3 Spatial variation characteristics of annual NDVI in Guangxi during 1982—2016:

(a) spatial distribution of annual NDVI; (b) area proportion of annual NDVI in different geographic units; (c), (d) annual NDVI variation and area proportion variation of each vegetation cover grade with elevation, respectively; (e), (f) annual NDVI variation and area proportion variation of each vegetation cover grade with slope gradient, respectively; (g), (h) annual NDVI variation and area proportion variation of each vegetation cover grade with slope aspect



注: 严重退化 $-0.0021 < S < 0.0004$; 中度退化 $0.0004 < S < 0.0011$; 轻微退化 $0.0011 < S < 0.0017$; 稳定 $0.0017 < S < 0.0023$; 轻微改善 $0.0023 < S < 0.003$; 中度改善 $0.003 < S < 0.0054$; 高度改善 $0.0054 < S < 0.0227^{[34]}$; S 表示 NDVI 变化的斜率。

图4 广西 1982—2016 年 NDVI 变化趋势: (a) 不同地貌单元; (b) 不同海拔; (c) 不同坡度; (d) 不同坡向

Fig. 4 Variation characteristics of annual NDVI in Guangxi during 1982—2016:

(a) in different geographic units; (b) at different elevation; (c) under different slope gradient; (d) in different slope aspect

峰林平原的严重、中度和轻微退化所占面积比例高,而非喀斯特区在稳定、轻微、中度和高度改善所占面积比例较高。随着海拔的升高,轻微、中度和高度改善所占面积比例逐渐上升,低海拔地区植被退化所占面积比例逐渐下降,低海拔地区植被退化现象较为明显。随着坡度的增加,植被改善所占的面积比例逐渐增加(图 4c、图 4d)。

3.2 气温和降雨的时空变化特征

1982—2016 年广西多年平均气温为 19.99℃,2015 年的年均温最高(20.65℃),1984 年的年均温最低(18.98℃),温差达 1.67℃(图 5a)。研究期间的温度变化曲线呈波动上升趋势,变化率为 0.255℃/10a。1982—2016 年广西年均降雨量为 1508.44 mm,随时间的变化率为 22.43 mm/10a。年降雨量较高的年份出现在 1994 年、2002 年和 2015 年,较低年降雨量出现在 2007 年、2009 年和 2011 年,最高和最低降雨量相差达 789.35 mm(图 5b)。年均温呈南部向北部递减的规律,高温区主要分布在广西南部的非喀斯特区,峰丛洼地和峰林平原区的南缘有少量的高温区分布,低温区主要分布在峰丛洼地和峰林平原的北缘(图 5c)。年降雨呈南部、东部向西北部递减的空间分布特征,南部的防城港市、钦州市和北海地区,东北部的桂林和融安地区存在局部的高降雨区,百色及其以西地区的降雨量较低(图 5d)。多年月均温表现为 5—9 月较高,3 月、4 月、10 月和 11 月较低,1 月、2 月和 12 月最低。月降雨量表现为 5—8 月较高,3 月、4 月、9 月和 11 月较低,1 月、2 月和 12 月最低,主要呈雨热同期的分配特征(图 9c、图 9d)。

3.3 NDVI 变化对气温、降雨的响应特征

1982—2016 年广西 1—3 月月均 NDVI 与月均温的皮尔逊相关系数较大,分别为 0.45、0.33、和 0.37,在其他月份的相关系数较小,其中 5 月、9 月和 11 月的相关系数为负值,年均 NDVI 与年均温的相关系数高达 0.65,在 0.01 水平上显著正相关(表 1)。月均 NDVI 与月降雨量的相关系数均小于 0,在 6 月的相关系数为 -0.39($P < 0.05$),在 7 月的相关系数为 -0.43($P < 0.01$),NDVI 与年降雨量的相关系数为 -0.01。NDVI 与温度在 1—3 月的正相关关系较强,在 6 月、7 月与降雨量的负相关关系较强。综合分析,广西植被生长受冬季气温的正相关作用较大,受夏季降雨量的负相关作用较大。

表 1 广西 1982—2016 年各月 NDVI 和年 NDVI 与气温和降雨量的偏相关关系

Tab. 1 Partial correlation between annual/monthly NDVI and temperature/precipitation in Guangxi during 1982—2016

月份	$R_{\text{ndvi}-t}$	$R_{\text{ndvi}-p}$
1 月	0.45***	-0.22
2 月	0.33**	-0.31
3 月	0.37**	-0.22
4 月	0.20	0.15
5 月	-0.01	-0.25
6 月	0.30	-0.39***
7 月	0.25	-0.43***
8 月	0.17	-0.13
9 月	-0.15	-0.24
10 月	0.05	-0.24
11 月	-0.14	-0.08
12 月	0.0003	-0.10
全年	0.65***	-0.01

注:**表示在 0.05 水平上显著相关;***表示在 0.01 水平上显著相关。 $R_{\text{ndvi}-t}$ 为 NDVI 与气温的偏相关系数; $R_{\text{ndvi}-p}$ 为 NDVI 与降雨量的偏相关系数。

不同地貌单元年均 NDVI 与年均温主要呈正相关关系,所占面积比表现为:峰林平原 > 非喀斯特区 > 峰丛洼地(图 6a)。随着海拔的上升,NDVI 与年均温的负相关程度呈现先上升后下降再上升的趋势,正相关一直占据主要的面积比(图 6b)。NDVI 与降雨量的正相关所占面积比在不同地貌单元表现为:峰林平原 > 非喀斯特区 > 峰丛洼地(图 6c),峰丛洼地 NDVI 与降雨量的负相关作用最强。随着海拔的升高,NDVI 与降雨量的负相关作用逐渐增强,正相关作用逐渐减弱(图 6d)。NDVI 主要受气温的正相关作用和降雨量的负相关作用。

4 讨论

(1)广西地处云贵高原,地表崎岖且多云雨雾天气,覆盖该区的 Landsat、SPOT、AVHRR 等遥感数据云量较多,影像质量较差,难以获取长时间序列高空间分辨率的 NDVI 数据^[26]。本文通过统计降尺度方法,基于 1982—2015 年 8 km 分辨率的 GIMMS NDVI,将 2000—2016 年 1 km 分辨率的 MODIS

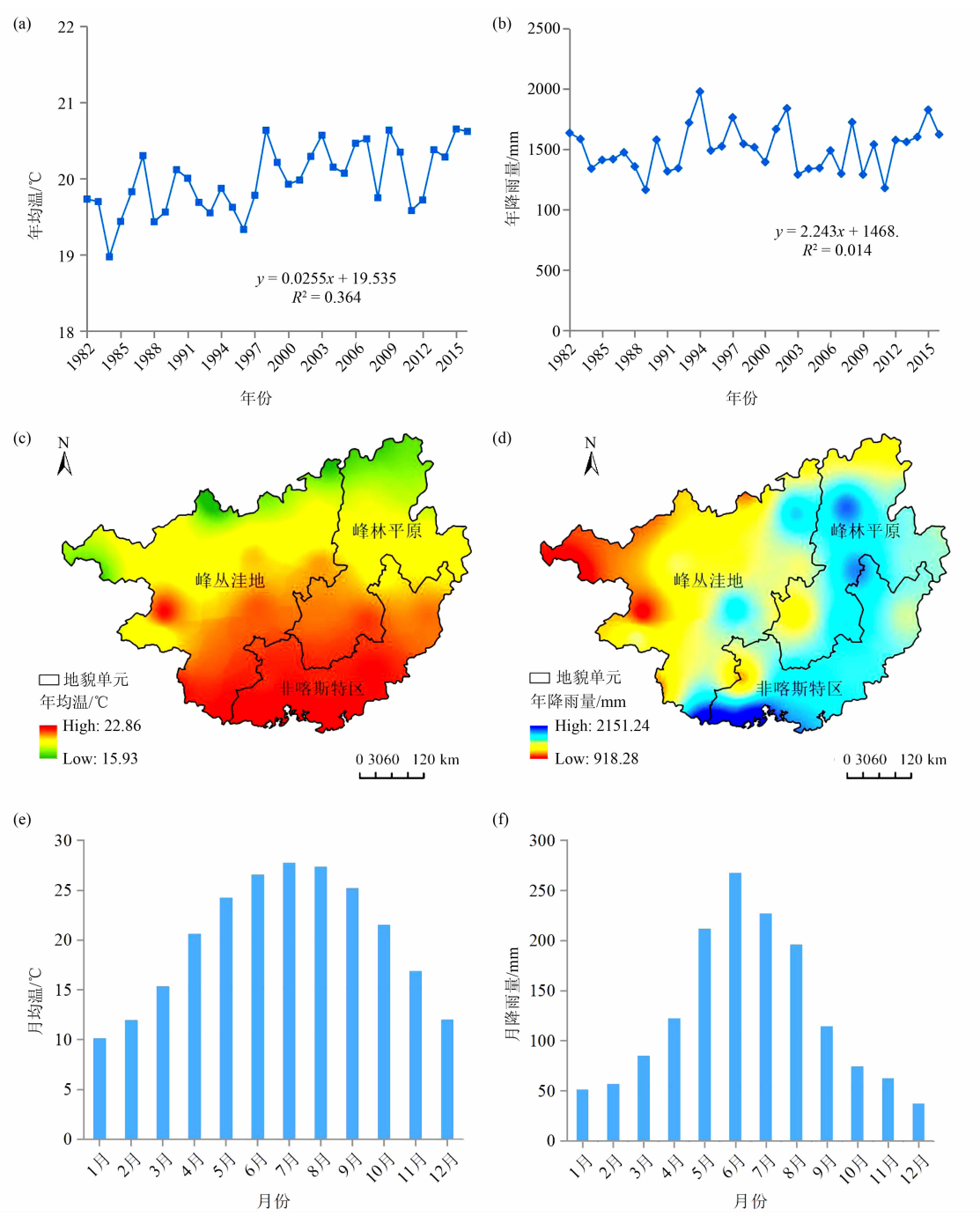


图 5 广西 1982—2016 年气温和降雨的时空变化特征：

(a) 气温的年际变化；(b) 降雨量的年际变化；(c) 多年平均气温的空间分布；

(d) 多年平均降雨的空间分布；(e) 多年平均各月气温的变化；(f) 多年平均各月降雨的变化

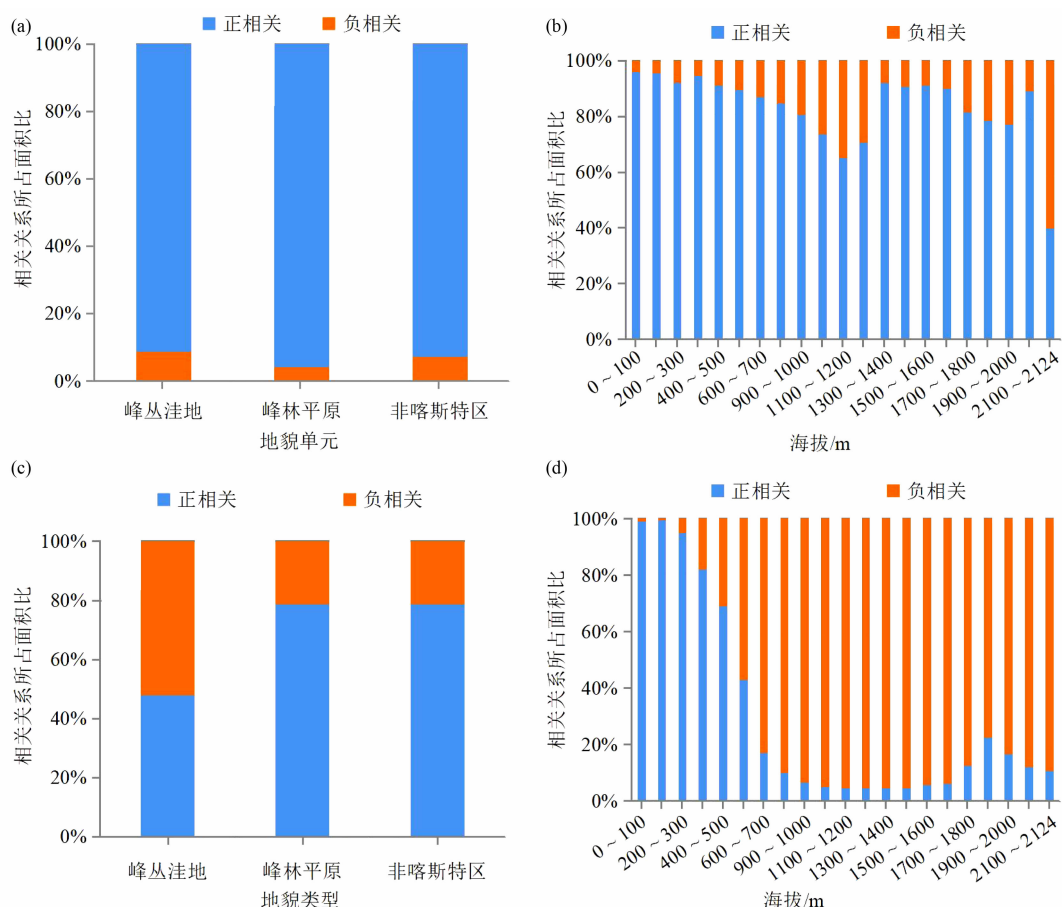
Fig. 5 Temporal variation and spatial distribution of temperature and precipitation in Guangxi during 1982—2016:

(a) temporal variation of temperature; (b) temporal variation of precipitation; (c) spatial distribution of temperature;

(d) spatial distribution of precipitation; (e) monthly temperature; (f) monthly precipitation

NDVI 数据插补延长得到 1982—2016 年 1 km 的长时间序列 NDVI 数据。通过该方法获取更长时间序列且更高分辨率的 NDVI 数据,对揭示 NDVI 时空变化规律及其与气候因子的响应特征具有重要意义。本

文基于建立两种 NDVI 数据间像元尺度上的统计关系,通过统计降尺度和延长插补从而获取长时间序列高空间分辨率数据的方法,可在植被时空变化特征的相关研究中推广,尤其对地形条件复杂的西南



注:负相关($R < 0$);正相关($R > 0$)。

图6 广西1982—2016年NDVI与气候的相关关系:

(a) 年均NDVI与年均温在不同地貌单元的相关关系;(b) 年均NDVI与年降雨量在不同海拔条件下的相关关系;
(c) 年均NDVI与年均温在不同地貌单元的相关关系;(d) 年均NDVI与年降雨量在不同海拔条件下的相关关系

Fig. 6 Correlation between NDVI and meteorological factors in Guangxi during 1982—2016:

(a) correlation between NDVI and temperature in different geographic units; (b) correlation between NDVI and precipitation at different elevation; (c) correlation between NDVI and precipitation in different geographic units; (d) correlation between NDVI and precipitation at different elevation

喀斯特地区、青藏高原等地开展相关研究具有重要的参考价值。

(2)图3d结果显示,随着海拔的升高,NDVI高值区所占面积比下降而NDVI低值区有所上升。同时,结合图6b、图6d分析可知,高海拔地区($DEM > 1000\text{ m}$)的NDVI与气温呈正相关作用所占面积比例为74%,与降雨量呈负相关作用所占面积比例为96%。原因可能是在高海拔地区的气温较低,植物生长所需的光温热条件受到限制,较大的降雨反而抑制植物的生长,因此NDVI较低。且随着海拔的升高,植被退化区域所占面积比不断下降,改善区域所占面积呈逐渐上升趋势,但是在平地至500 m的

较低海拔地区,尤其是峰林平原的低海拔地区的植被退化所占面积比例较大。在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 的低坡度和 $>40^\circ$ 的高坡度条件下,NDVI较高(图3e),最高和较高植被覆盖主要分布在坡度 $>40^\circ$ 的区域。且随着坡度的增加,植被改善所占的面积比逐渐增加(图4c),说明这些地区的植被建设取得成效,尤其是高坡度区域的退耕还林和植树种草等生态建设已取得的效益明显。在平地、南坡、东北坡和北坡的NDVI较高,可能是这些区域的太阳辐射和水分条件较好,有利于植被的生长。而在 $10^\circ \sim 40^\circ$ 的中坡度条件下,主要分布较低和低等级植被覆盖,主要原因可能是广西近几年的快速城市化进程对植被建设

造成了一定的负面影响,今后应特别注重这些地区的植被建设。

(3)广西不同地貌单元的 NDVI 变化及其对气候条件的响应特征存在明显的空间差异性。喀斯特峰丛洼地与降雨的负相关所占整个研究区的面积比例为 0.52(图 6c),可能是该区山体坡度较大且石质裸露或有薄的土层,洼地底部发育溶蚀漏斗,较大的降雨量使得水土渗漏流失,不利于植被生长。广西峰林平原的气温与 NDVI 呈较强的正相关关系且比峰丛洼地和非喀斯特区强,可能是因为在地势较为平坦和土层较厚的条件下,有利的气温条件能促进植被的生长。峰丛洼地 NDVI 与降雨呈负相关关系,可能是由于峰丛洼地的多数山体较陡,强降雨不利于水土保持。总体上,广西 NDVI 受气温的影响程度高于降雨量,植被生长受冬季气温的正作用较大。原因可能是在冬季气温较低的条件下,植物生长所需的光温热条件受到限制,在降雨条件较好的条件下,气温是植被生长过程中的一个重要因子,温度升高会使得植被的光合作用增强,从而促进植物的生长。

(4)研究表明,广西植被变化受地形地貌、气温、降雨和人类活动等驱动因素的影响作用差异显著。因此,在石漠化治理、退耕还林还草等生态环境建设中,应根据不同环境因素特点采取不同的生态建设措施。喀斯特地区自然环境的空间异质性较强,地面气象观测站点数据缺乏,植被生长受自然和人为因素的影响机理复杂,今后可增加土壤、植被类型和土地利用等更多环境因素的高分辨率遥感数据和地面实测数据,在不同流域、区域等空间尺度开展植被变化及其驱动因素的对比研究,为喀斯特生态环境建设和可持续发展提供更科学的数据基础和合理的决策依据。

5 结论

本文基于 1982—2016 年 NDVI、气温、降雨和 DEM 数据,采用利用最大值合成、线性趋势分析、统计降尺度和偏相关分析等方法,对广西 NDVI 时空变化特征及其与影响因素的关系进行分析,得出以下主要结论:

(1) 1982—2016 年广西多年平均 NDVI 为 0.53,年 NDVI 呈波动增长趋势,变化率为 0.013/

10a。广西植被覆盖呈南部、东部向中部、西部和西北部递减的空间分异特征,非喀斯特区的植被覆盖高于峰丛洼地和峰林平原区,高海拔地区的植被覆盖低于低海拔地区,高植被覆盖主要分布在坡度为 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 、 $> 40^{\circ}$ 的南坡和东南坡。

(2)非喀斯特区的 NDVI 增加趋势明显,峰林平原的 NDVI 出现下降趋势。随海拔的升高,植被退化区域所占面积比有所下降,而改善区域所占面积比上升的趋势。随着坡度的增加,植被改善越明显。不同坡度和坡向的植被覆盖变化存在差异,但植被改善区所占面积比例均大于退化区。

(3)广西多年平均气温为 20°C ,变化率为 $0.255^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,呈南向北递减的空间分布特征。多年平均降雨量为 1508 mm,变化率为 $22.43\text{ mm}/10\text{a}$,呈南部、东部向西北部递减的空间分布特征;NDVI 受气温的影响程度强于降雨,尤其与冬季气温具有较强的正相关关系,与夏季降雨具有不显著的负相关关系。峰丛洼地的 NDVI 与降雨呈明显的负相关,峰林平原的 NDVI 与气温呈明显的正相关。

参考文献 (References)

- [1] 赵平伟,李宏波,郭萍,等. 滇西南地区 NDVI 变化及其对不同时间尺度干湿变化的响应 [J]. 山地学报, 2018, 36(2): 61–70. [ZHAO Pingwei, LI Hongbo, GUO Ping, et al. Changes in NDVI and its response to changes in dry and wet weather at different time scales in the Southwestern Yunnan, China [J]. Mountain Research, 2018, 36(2): 61–70]
- [2] YIN Gang, HU Zengyun, CHEN Xi, et al. Vegetation dynamics and its response to climate change in Central Asia [J]. Journal of Arid Land, 2015, 8(3): 375–388.
- [3] 拉巴,拉珍,拉巴卓玛,等. 2000—2018 年那曲市植被 NDVI 变化及气候变化响应 [J]. 山地学报, 2019, 37(4): 499–507. [LA Ba, LA Zhen, LA Ba Droma, et al. NDVI change and its response to climate change in Nag Qu City during 2000—2018 [J]. Mountain Research, 2019, 37(4): 499–507]
- [4] 邓兴耀,姚俊强,刘志辉. 基于 GIMMSNDVI 的中亚干旱区植被覆盖时空变化 [J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 10–19. [DENG Xingyao, YAO Junqiang, LIU Zhihui. Spatiotemporal dynamic change of vegetation coverage in arid regions in Central Asia based on GIMMSNDVI [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 10–19]
- [5] 殷刚,孟现勇,王浩,等. 1982—2012 年中亚地区植被时空变化特征及其与气候变化的相关分析 [J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3149–3163. [YIN Gang, MENG Xianyong, WANG Hao, et al. Spatial-temporal variation of vegetation and its correlation with

- climate change in Central Asia during the period of 1982 – 2012 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(9): 3149 – 3163]
- [6] 彭睿文, 罗娅, 余军林, 等. 中国西南地区 2009 ~ 2015 年植被覆盖度变化及其与降雨的关系[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2017, **35**(5): 15 – 23. [PENG Ruiwen, LUO Ya, YU Junlin, et al. Vegetation cover change and its relationship with rainfall in Southwest of China during 2009 ~ 2015 [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2017, **35**(5): 15 – 23]
- [7] 杨钰杰, 白晓永, 谭秋, 等. 1982—2015 年“一带一路”地区 NDVI 时空演变规律及其影响因素[J]. 山地学报, 2020, **38**(2): 252 – 264. [YANG Yujie, BAI Xiaoyong, TAN Qiu., et al. Analysis of the spatiotemporal evolution of NDVI and its influencing factors in the “Belt and Road” region from 1982 to 2015 [J]. *Mountain Research*, 2020, **38**(2): 252 – 264]
- [8] 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. [XIONG Kangning, LI Jin, LONG Mingzhong. Features of soil and water loss and key issues in demonstration areas for combating karst rocky desertification [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(7): 878 – 888]
- [9] 张殿发, 欧阳志远, 王世杰. 中国西南喀斯特地区人口、资源、环境与可持续发展[J]. 中国人口、资源与环境, 2001, **11**(1): 78 – 82. [ZHANG Dianfa, OUYANG Zhiyuan, WANG Shijie. Population researches environment and sustainable development in the karst region of southwest China [J]. *China Population, Researches and Environment*, 2001, **11**(1): 78 – 82]
- [10] CHEN Chi, Taejin Park, WANG Xuhui, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management [J]. *Nature Sustainability*, 2019, **2**: 122 – 129.
- [11] TONG Xiaowei, Martin Brandt, YUE Yuemin, et al. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering [J]. *Nature Sustainability*, 2018, **1**: 44 – 50.
- [12] 吕妍, 张黎, 闫慧敏, 等. 中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及其成因[J]. 生态学报, 2018, **38**(24): 8774 – 8786. [LÜ Yan, ZHANG Li, YAN Huimin, et al. Spatial and temporal patterns of changing vegetation and the influence of environmental factors in the karst region of Southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(24): 8774 – 8786]
- [13] 张凯选, 范鹏鹏, 王军邦, 等. 西南喀斯特地区植被变化及其与气候因子关系研究[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(6): 1080 – 1091. [ZHANG Kaixuan, FAN Pengpeng, WANG Junbang, et al. Study on vegetation changes and climate factors in a karst region of southwest China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(6): 1080 – 1091]
- [14] TONG, Xiaowei., WANG, Kelin., YUE Yueming, et al. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of southwest China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, **54**: 105 – 113.
- [15] TIAN Yichao, BAI Xiaoyong, WANG Shijie, et al. Spatial-temporal changes of vegetation cover in Guizhou province. *Southern China [J]. Chinese Geographical Science*, 2017, **27**(1): 25-38.
- [16] GAO Jiangbo, LI Shuangcheng, ZHAO Zhiqiang, et al. Investigating spatial variation in the relationships between NDVI and environmental factors at multi-scales; a case study of Guizhou Karst Plateau, China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, **33**(7): 2112 – 2129.
- [17] 王永锋, 靖娟利. 广西近 15 年植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J]. 农业现代化研究, 2017, **38**(6): 1086 – 1096. [WANG Yongfeng, JING Juanli. Spatial-temporal variations of vegetation cover and its response to climate factors in Guangxi over the past 15 Years [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2017, **38**(6): 1086 – 1096]
- [18] 廖春贵, 陈月连, 熊小菊, 等. 2007—2016 年广西植被覆盖时空分布特征及其驱动因素[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2018, **36**(2): 118 – 127. [LIAO Chungui, CHEN Yuelian, XIONG Xiaojie, et al. Changes of vegetation NDVI and its driving factors from 2007 to 2016 in Guangxi, China [J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2018, **36**(2): 118 – 127]
- [19] 喻素芳, 余光辉, 罗叶红, 等. 基于 MODIS-NDVI 数据广西植被覆盖变化特征分析[J]. 湖北农业科学, 2015, **54**(2): 321 – 325. [YU Sufang, SHE Guanghui, LUO Yehong, et al. Analysis of characteristics of vegetation cover change in Guangxi Province based on MODIS-NDVI [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, **54**(2): 321 – 325]
- [20] 韦振锋, 任志远, 张翀. 近 12 年广西植被覆盖与降雨和气温的时空响应特征[J]. 水土保持研究, 2013, **20**(5): 33 – 38 + 44. [WEI Zhenfeng, REN Zhiyuan, Zhang Chong, Research on vegetation response to temperature and precipitation in Guangxi recent 12 years [J]. *Research of soil and water conservation*, 2013, **20**(5): 33 – 38 + 44]
- [21] 汪明冲, 王兮之, 梁钊雄, 等. 喀斯特与非喀斯特区域植被覆盖变化景观分析——以广西壮族河池市为例[J]. 生态学报, 2014, **34**(12): 3435 – 3443. [WANG Mingchong, WANG Xizhi, LIANG Zhaoxiong, et al. Landscape pattern analysis on change of fractional vegetation cover between karst and no-karst areas: a case study in Hechi District, Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(12): 3435 – 3443]
- [22] 王永锋, 靖娟利. 基于 SPOT NDVI 的广西植被变化趋势分析[J]. 桂林理工大学学报, 2015, **35**(2): 335 – 339. [WANG Yongfeng, JING Juanli. Vegetation coverage trend analysis in Guangxi from 1998 to 2012 [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2015, **35**(2): 335 – 339]
- [23] 马华, 王云琦, 王力, 等. 近 20a 广西石漠化区植被覆盖度与气候变化和农村经济发展的耦合关系[J]. 山地学报, 2014,

- 32(1): 38 – 45. [MA Hua, WANG Yunqi, WANG Li, et al. Vegetation cover and climate change and rural economic development in relations during last 20 years in karst region of Guangxi, China [J]. Mountain Research, 2014, 32(1): 38 – 45]
- [24] 梁钊雄, 王兮之, 魏兴琥, 等. 基于 TM 影像的广西河池市岩溶地区植被覆盖度的动态变化研究 [J]. 中国岩溶, 2014, 33(2): 208 – 215. [LIANG Zhaoxiong, WANG Xizhi, WEI Xinghu, et al. Study of dynamic changes in fractional vegetation coverage in Hechi City in Guangxi karst regions based on TM images [J]. Carsologica sinica, 2014, 33(2): 208 – 215]
- [25] 宋怡, 马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析 [J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 89 – 93 + 173. [SONG Yi, MAMingguo. Study on vegetation cover change in Northwest China based on SPOT VEGETATION Data [J]. Journal of desert research, 2007, 27(1): 89 – 93 + 173]
- [26] 杨江州. 喀斯特小流域植被变化对径流的影响研究——以贵州修文河流域为例 [D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2019. [YANG Jiangzhou. The influence of vegetation changes on Runoff in Karst small watershed—A case study of Xiuwen River Basin in Guizhou Province [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2019]
- [27] 邱海军, 曹明明. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国植被覆盖时空变化分析 [J]. 资源科学, 2011, 33(2): 335 – 340. [QIU Haijun, CAO Mingming. Spatial and temporal variations in vegetation cover in China based on SPOT vegetation data [J]. Resources Science, 2011, 33(2): 335 – 340]
- [28] 毛德华, 王宗明, 罗玲, 等. 基于 MODIS 和 AVHRR 数据源的东北地区植被 NDVI 变化及其与气温和降雨间的相关分析 [J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(1): 77 – 85. [MAO Dehua, WANG Zongming, LUO Ling, et al. Correlation analysis between NDVI and climate in northeast China based on AVHRR and GIMMS data resources [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(1): 77 – 85]

Spatial-Temporal Changes of NDVI and Its Influence Factors in Guangxi, China During 1982—2016

WEI Xiaocha, ZHOU Qiuwen*, ZHANG Ji, TANG Xin, PENG Zheng, LIN Li, YANG Jiangzhou

(School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Research on the relationship of vegetation changes and its driving factors is vital for evaluating the effects of large scale vegetation restoration and ecological construction. However, this relationship is still unclear in the karst region. Based on long time series of NDVI data, temperature, precipitation and DEM data, the methods of maximum synthesis, linear regression analysis, statistical down-scaling and partial correlation analysis method were used to analyze the spatial-temporal changes of NDVI and its influence factors in Guangxi during 1982—2016. The results indicate that: (1) The annual NDVI was 0.53, with an increasing rate of 0.013/10a. The vegetation cover showed a high spatial variation in the study area, decreasing from the south and the east areas to the middle, the west and the northwest areas. In addition, the vegetation cover was slightly higher in the non-karst region than that in the peak cluster depression and peak forest plain, and it decreased from high elevation area to low elevation area. High vegetation cover area was mainly distributed in the south slope and southeast slope of $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ and $> 40^{\circ}$. (2) The NDVI increased obviously in non-karst, while it decreased in the peak-forest plain. With the increase of slope gradient, the increasing trend of vegetation cover became more obvious. There were differences in vegetation cover with different slope and aspect, but overall the vegetation improvement areas were larger than the degradation ones. (3) The annual average temperature was 20°C , with a variation rate of $0.255^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ during 1982—2016. The annual temperature showed a high spatial variation, generally decreasing from the south area to the north area. The annual average precipitation was 1508 mm, with a variation rate of $22.43\text{ mm}/10\text{a}$ during

1982—2016. The annual average precipitation generally decreased from the south and east area to the north and west area. For different seasons, the NDVI, temperature and precipitation generally followed an order as: summer > spring > autumn > winter; (4) NDVI was more affected by temperature than precipitation, especially strong positive correlation with temperature in winter and no significant negative correlation with precipitation in summer. The NDVI was negatively correlated with precipitation in the peak cluster depression, and was positively correlated with temperature in the peak forest plain. The results of this study can provide theoretical and scientific basis for ecological environmental construction and vegetation restoration in karst areas.

Key words: NDVI; spatial-temporal change; climate; topography; Guangxi

泥石流次声实验水槽装置图

(胡至华,中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所)

泥石流流体在快速运动过程中,颗粒与颗粒间、颗粒与流体间的碰撞,会与空气耦合在低频范围($< 20\text{Hz}$)内发射次声波。次声具有较长的警报提前量、无接触、仪器不易受损等优点,可用于泥石流的监测预警。利用泥石流水槽模型装置来采集所需的次声及泥石流数据。实验装置主要由水槽、料斗、尾料池、次声采集系统等四部分组成。实验主要测量泥石流流速、流量、容重、级配等特征参数及次声声压及频率。最终通过采集的次声特征指标进行无接触辨识泥石流类型,为次声自动识别、监测和预警泥石流灾害做积极探索。

详见本期《基于 EEMD 分形和 LS-SVM 的次声信号识别泥石流类型》一文。