

基于气候信息的喀斯特地区植被 EVI 模拟

陈燕丽^{1,2,3}, 莫伟华^{1,2*}, 罗永明^{1,2}, 莫建飞^{1,2}, 黄永璘^{1,2}, 丁美花^{1,2}

(1. 广西壮族自治区气象减灾研究所/国家卫星气象中心遥感应用试验基地, 南宁 530022; 2. 气象 GIS 应用联合实验室, 南宁 530022; 3. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 该研究以喀斯特地区植被为研究对象, 分析各种气候因子与植被指数的相关性及作用机制, 在此基础上建立基于气候因子的植被 EVI 拟合模型, 为定量分析气候条件对植被的综合影响奠定基础。结果表明: 气候因子对喀斯特地区植被 EVI 影响显著, 植被 EVI 与水汽压、平均气温、露点温度、最低气温、最高气温的相关性均大于 0.8 且空间一致性好。除日照时数和风速外, 该地区植被 EVI 对其他气候因子的响应均存在显著滞后性, 滞后期约 16 d。对植被 EVI 起直接作用的主要是温度类气候因子, 水分类气候因子对植被 EVI 的直接作用不明显, 但通过其他气象因子起了较强的间接作用。根据该地区植被与气候因子的关系建立了 2 个 EVI 拟合模型, 其中基于同期气候因子的同期模型中入选的气候因子为水汽压 (0 期)、日照时数 (0 期)、露点温度 (0 期), 基于同期、前期气候因子的混合模型入选气候因子为水汽压 (-1 期)、最高气温 (-1 期)、降水量 (-1 期)、露点温度 (-1 期)、日照时数 (0 期)。分别利用 2001—2010 年建模数据和 2011 年非建模数据对 2 个模型进行了单站点和片区两种尺度的精度验证。验证结果表明, 2 个模型对整个片区植被 EVI 的拟合精度高于单站点, 且混合模型的拟合精度高于同期模型。2001—2010 年同期模型和混合模型的片区拟合 R^2 分别为 0.843、0.892, 站点拟合 R^2 分别为 0.765 ± 0.033 、 0.801 ± 0.021 。2011 年 2 个模型的片区拟合 R^2 分别为 0.797、0.873, 站点拟合 R^2 分别为 0.716 ± 0.073 、 0.746 ± 0.064 。对大多数站点而言, 混合模型的拟合精度较高, 但是由于 2 个模型的建模气候因子不同及各个站点植被的 EVI 与气候因子的综合响应也存在较大差异, 同期模型对部分站点植被 EVI 拟合精度高于混合模型。

关键词: 植被; 模型; 气候变化; 喀斯特地区; 增强型植被指数 EVI

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.029

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-09-0187-08

陈燕丽, 莫伟华, 罗永明, 等. 基于气候信息的喀斯特地区植被 EVI 模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 187—194.
Chen Yanli, Mo Weihua, Luo Yongming, et al. EVI simulation of vegetation in Karst rocky area using climatic factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 187—194. (in Chinese with English abstract)

0 引言

气候变化与植被变化的相关性^[1-8]及滞后性^[9-14]已在全球和区域尺度上得到了验证。中国西南喀斯特区地处热带和亚热带之间, 其特殊的地质构造连同该地区雨热同季的特点, 植被生境脆弱且极易导致土地石漠化, 进而对生态环境、经济发展和人们生活造成诸多负面影响。王世杰^[15]、苏维词等^[16]认为, 西南亚热带高温多雨的气候环境为喀斯特发育、水土流失、石漠化提供了强大动力。相关学者开展了喀斯特地区植被变化与气候变化的研究, 蒙古军等^[17]利用 GIMMS NDVI 和 NPP 数据集研究西南喀斯特地区植被变化对气候变化的响应, 结果表明气温变化对植被变化的影响高于降水量对其影响。郑有飞等^[18]利用 1982—2003 年 GIMMS NDVI 数据集和相

应的气候资料, 通过对逐像元信息的提取和分析, 运用回归和相关性分析的方法, 研究了贵州植被覆盖变化及其与主要气候因子的关系。发现植被 NDVI 与温度的年际变化趋势具有同步性, 与降水量存在一定滞后性。吴良林等^[19]分析了桂西北喀斯特山区 2008 年石漠化数据与气候空间分布数据的相关性, 研究发现土地石漠化发生率随年均气温升高呈平缓增大, 并随年均降水量增大呈快速增大态势。已有的喀斯特地区植被-气候相关性研究中多采用 NDVI 表征植被, 气候因子也仅以气温和降水作为代表, 然而气候对植被的影响具有强烈的综合性。目前, 鲜见多气候因子对喀斯特地区植被影响的研究报道。此外, 利用归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 序列已在多种植被类型和气候带开展了植被-气候相关性研究^[20-29], 增强型植被指数 (enhanced vegetation index, EVI) 继承了广泛使用的 NDVI 的优点并对其缺点进行了改进, 但利用 EVI 序列开展植被与气候相关性研究较少^[25]。陈燕丽等比较了 NDVI 和 EVI 在喀斯特地区植被监测的敏感性, 研究发现由于 EVI 在指数构造中考虑了土壤背景的影响, 在反映该地区植被特征时更具客观性^[30-31]。

本文以喀斯特地区植被为研究载体, 利用 2001—

收稿日期: 2015-03-05 修订日期: 2015-04-23

基金项目: 中国气象局气候变化专项 (CCSF201308); 广西自然科学基金项目 (桂科自 0991207); 广西自然科学基金项目 (2013GXNSFAA019283)。

作者简介: 陈燕丽, 女, 广西柳州人, 高级工程师, 博士生, 主要从事气象与遥感应用研究, 南宁 广西气象减灾研究所, 530022。Email: cyl0505@sina.com
*通信作者: 莫伟华, 女, 广西宾阳人, 高级工程师, 主要从事生态气象和环境遥感研究。南宁 广西气象减灾研究所, 530022。Email: mwh-0419@163.com

2010 年 10 a 的 MODIS EVI 序列和气候资料, 分析植被 EVI 与同期及前 1—4 期水汽压、降水量、相对湿度、最高气温、最低气温、平均气温、露点温度、风速、日照时数多个气候因子的相关性及滞后性, 并利用通径分析方法分析各种气候因子对植被 EVI 的作用大小。最后, 筛选气候因子采用逐步回归方法建立植被 EVI 拟合模型, 并对模型进行了单站点和片区 2 种尺度的精度验证。研究喀斯特地区植被对气候变化的响应将会增进对影响喀斯特生态系统稳定性的自然过程的认识^[32], 依据两者之间的相关关系建立的表征其植被状态的植被指数拟合模型, 可为定量分析气候条件对植被的综合影响奠定基础, 进而为喀斯特生态系统的科学管理提供依据。

1 数据与方法

1.1 研究区域

广西壮族自治区地处中国南部, 位于 104°26′~112°04′E, 20°54′~26°24′N, 北回归线横贯中部。南濒热带海洋, 北接南岭山地, 西延云贵高原, 具有周高中低、形似盆地, 山地多、平原少的地形特点, 其中喀斯特地貌区面积占 37.8%, 山多地少, 土地贫瘠, 生态环境恶劣, 石漠化现象突出, 自然灾害严重, 严重制约了当地经济社会发展, 属于全国贫困落后地区。研究选取列入全国 14 个连片特困地区之一的“广西石漠化片区”(以下简称片区)作为研究区域, 包括 6 个地级市: 南宁、柳州、百色、河池、来宾、崇左, 共 25 个县(图 1)。

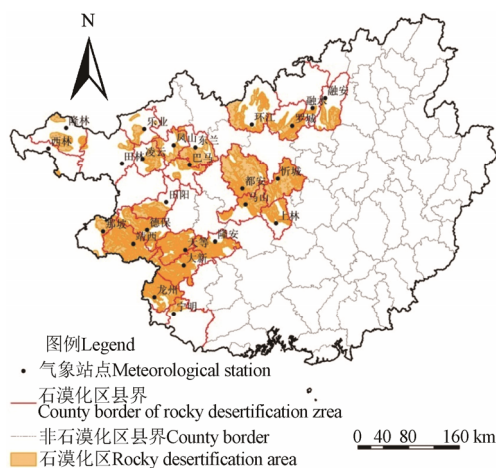


图 1 广西石漠化片区示意图

Fig.1 Schematic diagram of Guangxi Karst rocky area

1.2 数据来源和预处理

1.2.1 EVI 数据

EVI 数据为 NASA MODIS 陆地产品组根据统计算法开发的 MODIS 植被指数产品 MOD13Q1, 即全球 250 m 分辨率 16 d 合成的植被指数产品, 数据版本为 V005。MODIS 植被指数产品是在已有的植被指数的基础上改进设计的, 包括 NDVI 和 EVI 2 种植被指数产品。MODIS NDVI 是已有 20 a 积累的 NOAA NDVI 系列的延续, 可以为业务监测和研究提供长期数据。EVI 利用了 MODIS 辐射计的优点, 订正地表反射率以提高对高生物量区的

敏感性, 并通过叶冠背景信号的耦合和减少大气影响来提高植被监测精度。

所用的 EVI 数据采用了国际通用的最大值合成 MVC (Maximum Value Composites) 法获得。该法可以进一步消除云、大气、太阳高度角等的部分干扰。

$$EVI_{mi} = \max(EVI_{ij}) \quad (1)$$

式中: EVI_{mi} 代表第 i 个 16 d 周期的 EVI 最大化合成值; EVI_{ij} 代表第 i 个 16 d 周期内第 j 天的 EVI 值。

对所获得的 MOD13Q1 遥感数据集进行子集提取、图像镶嵌、数据格式转换、投影转换及质量检验等预处理, 经以上处理得到质量可靠的 EVI 数据集。

1.2.2 气象数据

气象数据为广西气象信息中心提供的 25 个气象站点 2000—2010 年逐日的水汽压、降水量、相对湿度、最高气温、最低气温、平均气温、露点温度、风速、日照时数。分别计算各个气候因子与 EVI 对应时段(包括同期及前期)16 d 的统计值, 其中降水量、日照时数为时段内累积值, 其余气候因子为时段内平均值。其中同期和前期含义为: 由公式(1)得知, 1 期为 16 d, 一年共有 23 期(第 23 期以到年底为计, 闰年 14 d, 平年 13 d)。同期表示为 0 期, 前期用负值表示, -1 期即为前 1 期, -2 期即为前 2 期。以 2001 年为例, 1 月 1—16 日的 EVI 合成值与 1—16 日对应气候因子的统计值为同期序列, 而 2000 年第 23 期气候因子的统计值则为 2001 年 EVI 第 1 期的前 1 期(-1 期), 2000 年第 22 期气候因子的统计值为 2001 年第 1 期 EVI 的前 2 期(-2 期), 以此类推。

1.2.3 地理信息数据

地理信息数据包括片区 25 个县行政边界, 广西喀斯特地区矢量边界, 广西气象站点经纬度信息。

1.3 研究方法

1.3.1 均值法

在统计某一区域的 EVI 值时, 采用均值法进行计算, 即统计区域内所有像元的 EVI 值的平均。公式如下:

$$EVI_{aM} = \sum EVI_{x,y} / n \quad (2)$$

式中: EVI_{aM} 是某一区域的 EVI 平均值; M 为区域代码; x 为统计区域像元行数; y 为统计区域内像元列数; n 为统计区域内像元总数。研究中以县为单位, 计算与气象站点对应的县域内石漠化区植被 EVI 均值。

1.3.2 统计方法

本文利用相关分析和通径分析方法分析 MODIS EVI 与同期、前期多个气候因子的相关性、筛选对植被 EVI 影响作用较大的气候因子, 采用逐步回归方法建立 EVI 拟合模型。相关系数反应了变量之间的总体相关程度, 通径系数可进一步反映变量之间的相互作用及其对因变量的直接、间接作用大小, 逐步回归分析是根据多个自变量的最优组合建立回归方程来预测因变量, 且回归方程中包含所有对因变量影响显著的自变量而不包含影响不显著的自变量。对各个相关系数及回归方程均进行了显著性水平检验。

2 结果与分析

2.1 相关分析

利用 2001—2010 年 MOD13Q1 提取 25 个监测县喀

斯特地区植被逐 16 d EVI 序列，分析各监测县域内 EVI 均值序列与同期、前 1—4 期水汽压、降水量、相对湿度、最高气温、最低气温、平均气温、露点、风速、日照时数 9 个气候因子的相关性（表 1）。

表 1 2001—2010 年 16d EVI 序列与同期及前 1—4 期气候因子相关系数
Table 1 Correlation analysis between completed EVI series and climate variables during 2001-2010

期号 Stage No.	V	T _{mean}	D	T _{max}	T _{min}	S	P	R	W
0 期 0 stage	0.86±0.04**	0.84±0.03**	0.84±0.04**	0.83±0.04**	0.84±0.03**	0.57±0.10**	0.54±0.10**	0.30±0.17	-0.17±0.17
-1 期 -1 stage	0.89±0.02**	0.87±0.02**	0.88±0.03**	0.85±0.02**	0.88±0.02**	0.50±0.08**	0.59±0.08**	0.33±0.12	-0.10±0.19
-2 期 -2 stage	0.86±0.02**	0.84±0.02**	0.85±0.02**	0.81±0.02**	0.85±0.02**	0.43±0.07*	0.59±0.06**	0.32±0.10	-0.01±0.23
-3 期 -3 stage	0.76±0.03**	0.76±0.03**	0.76±0.03**	0.71±0.04**	0.77±0.03**	0.32±0.09	0.57±0.03**	0.30±0.15	0.07±0.24
-4 期 -4 stage	0.61±0.05**	0.61±0.05**	0.61±0.05**	0.56±0.05**	0.62±0.05**	0.18±0.12	0.50±0.03**	0.23±0.21	0.14±0.25
滞后期 Lag time	1(16 d)	1(16 d)	2(32 d)	1(16 d)	2(32 d)	0	3(48 d)	2(32 d)	0

注：25 站点相关系数平均值±标准差；**通过 0.01 显著性检验；*通过 0.05 显著性检验。V 为水汽压；T_{mean} 为平均气温；D 为露点温度；T_{max} 为最高气温；T_{min} 最低气温；S 日照时数；P 降雨量；R 相对湿度；W 风速。下同。
Note: Correlation coefficient mean values of 25 meteorological stations ±standard deviation; **means pass the significant test of 0.01, *means pass the significant test of 0.01. V is vapor pressure; T_{mean} is mean temperature; D is dew point; T_{max} is maximum temperature; T_{min} is minimum temperature; S is sunshine hours; P is precipitation; R is relative humidity; W is wind speed. The same as below.

植被 EVI 与各气候因子的同期相关性从大到小排序为：水汽压、平均气温、露点、最低气温、最高气温、日照时数、降水、相对湿度、风速，其与水汽压、平均气温、露点、最低气温及最高气温的相关系数均大于 0.8。EVI 与气候因子的相关性在大多数站点均通过了显著性检验，但与相对湿度有 3 个站点、与风速有近一半站点不能通过显著性检验。各站点植被 EVI 与大多数气候因子的相关性具有较好的一致性，离散系数多小于 20%，且与水汽压、平均气温、最低气温、最高气温、露点温度小于 5%(水汽压 4.2%，平均气温 3.5%，最低气温 3.6%，最高气温 4.6%，露点温度 4.4%)。但 EVI 与相对湿度和风速的站点一致性较差，离散系数均大于 50%。

植被生长对气候因子的响应存在一定的滞后效应。计算监测县域内各个站点植被 EVI 均值与前 1—4 期气候因子的相关系数，前期相关系数高于同期即表示为滞后，如滞后期为 2，即表示-1、-2 期的相关系数均高于 0 期。植被 EVI 对降水量、相对湿度、水汽压响应的滞后期分别为 3、2、1 期（48、32 和 16 d），其相关系数最高时期均出现在-1 期（降水量-1、-2 期相关系数相同）。降水量对植被生长影响的持续时间最长，相对湿度次之，水汽压最短，然而，各站点植被 EVI 对不同时期水汽压的响应具有较好的一致性，前 4 期至 0 期相关系数标准差最大仅为 0.05，降水量次之，对相对湿度的响应差异最大。植被 EVI 对温度的响应也存在明显的滞后性，其对平均气温、最高气温、最低气温、露点温度响应的滞后期分别为 1、1、2、2 期（16、16、32 和 32 d），其相

关系数最高时期均出现在-1 期，此外，各站点植被 EVI 对不同时期的温度响应均具有较好的一致性。植被 EVI 对日照时数、风速的响应无滞后，各站点 EVI 对不同时期日照时数的响应具有较好的一致性，但其与风速的相关性站点差异较大。

2.2 通径分析

利用通径分析方法进一步分析各气候因子对植被 EVI 的影响（表 2），表中为各气候因子对植被 EVI 影响的通径系数（path coefficient, pc），直接通径系数表示直接作用，间接通径系数表示间接作用。各气候因子影响的直接作用大小为平均气温>最低气温>最高气温>露点>水汽压>日照时数>相对湿度>风速>降水量，其中平均气温、相对湿度、风速为负效应，其余气候因子为正效应。最低气温的直接正作用最大（pc=3.70），其次为最高气温（pc=1.38），日照时数（pc=0.34）和降雨量（pc=0.17）的直接正作用不明显。平均气温对植被 EVI 没有直接正作用，它主要通过影响最低气温和最高气温起到了重要的间接正作用。此外，水分类气候因子（水汽压、降水、相对湿度）也起到了较大的间接正作用。多个气候因子均通过最低气温、最高气温起到了较强的间接正作用，通过平均气温起到了较强的间接负作用。综合分析得出，对植被 EVI 起直接正作用的主要气候因子为最低气温和最高气温，起直接负作用的主要因子为平均气温。水分类气候因子对植被 EVI 的直接作用不明显，但通过其它气象因子起了较大的间接作用，各个气象因子主要通过影响最低、最高及平均气温起到了较强的间接作用。

表 2 气候因子对植被 EVI 影响的通径分析
Table 2 Impact of climatic factors on vegetation EVI using path analysis

作用因子 Factors	直接作用 Direct action	间接作用 Indirect action								
		水汽压 V	降水量 P	相对湿度 R	平均气温 T_{mean}	最高气温 T_{max}	最低气温 T_{min}	日照时数 S	风速 W	露点 D
水汽压 V	0.40		0.12	-0.17	-5.13	1.29	3.63	0.19	0.02	0.52
降水量 P	0.17	0.30		-0.20	-3.29	0.77	2.45	0.06	0.03	0.37
相对湿度 R	-0.31	0.22	0.11		-1.98	0.39	1.64	-0.04	0.06	0.28
平均气温 T_{mean}	-5.28	0.39	0.10	-0.11		1.36	3.67	0.22	0.01	0.52
最高气温 T_{max}	1.38	0.38	0.09	-0.09	-5.20		3.55	0.26	0.02	0.50
最低气温 T_{min}	3.70	0.39	0.11	-0.14	-5.24	1.32		0.19	0.01	0.52
日照时数 S	0.34	0.23	0.03	0.04	-3.47	1.04	2.12		0.04	0.30
风速 W	-0.19	-0.05	-0.03	0.09	0.29	-0.13	-0.14	-0.06		-0.05
露点温度 D	0.53	0.40	0.12	-0.16	-5.19	1.31	3.66	0.19	0.02	

2.3 植被 EVI 拟合模型

2.3.1 模型构建

由喀斯特地区植被 EVI 与各期气候因子的相关性分析得知, EVI 与大多数气候因子相关性显著且对其响应存在较强滞后性。因此, 综合利用同期及前期气候因子所构建植被 EVI 拟合模型, 将具有更好的模拟效果。

由上述分析得知, 片区多数站点植被 EVI 与风速、相对湿度相关性较低且对二者的响应一致性较差 (表 1), 因此在模型构建中将其排除。为了验证前期气候因子对植被 EVI 拟合的优势, 分别利用同期及混合 (同期+前期) 气候因子构建植被 EVI 拟合模型, 分别称为同期模型和混合模型。其中, 同期模型待选的气候因子包括: 水汽压、降水量、平均气温、最高气温、最低气温、露点温度、日照时数; 混合模型待选的气候因子包括: 日照时数 (0 期)、水汽压 (-1 期)、平均气温 (-1 期)、最高气温 (-1 期)、最低气温 (-1 期)、平均气温 (-1 期)、露点温度 (-1 期)、降水 (-1 期)。采用逐步回归法建立广西石漠化片区 EVI 拟合模型, EVI 同期模型中入选的气候因子为水汽压、日照时数、露点温度, 构建方程如下:

$$y_M = 0.052 + 0.023V + 0.001S / 0.012T_d \quad (1)$$

式中: y_M 为区域 M 的 EVI 拟合值; M 为区域代码; V 为水汽压; S 为日照时数; T_d 为露点温度。

EVI 混合模型入选气候因子为水汽压 (-1 期)、最高气温 (-1 期)、降水量 (-1 期)、露点温度 (-1 期)、日照时数 (0 期), 构建方程如下:

$$y_M = 0.014 + 0.016V + 0.001S + 0.009T_{\max} + 0.0003R / 0.013T_d \quad (2)$$

式中: T_{\max} 为最高气温; R 为降水量。两模型的方差分析结果表明, 当模型包含不同气候因子时, 其显著性概率均小于 0.001。

2.3.2 模型拟合效果评价

同期模型和混合模型是基于 2001—2010 年广西石漠化片区 25 个站点的气象数据平均值及其植被 EVI 均值建立的, 即利用所有站点植被 EVI 与气候因子的共性规律建立针对整个大片区的植被 EVI 拟合模型, 而不是针对单个站点。为了更有效地评价模型的拟合效果, 对其进行了单站点和片区 2 种尺度的精度验证。验证的数据序列包括 2001—2010 年建模数据和 2011 年非建模数据, 其中建模数据旨在评价模型拟合精度, 而非建模数据可进一步评价模型的预测能力。

利用同期模型和混合模型拟合片区 2001—2010 年、2011 年 25 个站点植被 EVI, 并与遥感观测 EVI 值进行比较, 利用决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 评价模型模拟效果 (表 3)。

表 3 广西石漠化片区 25 个站点植被 EVI 拟合效果评价

Table 3 Simulation efficiency evaluation of EVI models of 25 stations of Guangxi rocky desertification area

站点 Meteorological station	同期模型 Same-time model				混合模型 Mixed-time model			
	2000—2010 年		2011 年		2000—2010 年		2011 年	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
57947	0.802	0.062	0.630	0.069	0.819	0.056	0.722	0.068
57948	0.740	0.063	0.543	0.082	0.798	0.063	0.673	0.079
59001	0.810	0.082	0.761	0.113	0.793	0.063	0.628	0.115
59004	0.768	0.091	0.67	0.128	0.751	0.071	0.547	0.13
59012	0.762	0.063	0.802	0.082	0.793	0.077	0.713	0.083
59015	0.750	0.072	0.771	0.087	0.795	0.054	0.796	0.089
59017	0.810	0.075	0.796	0.1	0.828	0.06	0.776	0.101
59021	0.764	0.055	0.772	0.063	0.818	0.058	0.815	0.064
59025	0.775	0.066	0.723	0.07	0.796	0.054	0.802	0.072
59027	0.76	0.078	0.761	0.077	0.783	0.060	0.822	0.079
59031	0.784	0.060	0.638	0.067	0.802	0.054	0.719	0.068
59033	0.770	0.055	0.607	0.064	0.799	0.060	0.734	0.062
59037	0.780	0.085	0.790	0.08	0.794	0.062	0.76	0.082
59038	0.814	0.066	0.750	0.06	0.832	0.053	0.784	0.059
59209	0.709	0.050	0.675	0.062	0.807	0.068	0.718	0.063
59213	0.780	0.082	0.792	0.07	0.841	0.07	0.828	0.072
59215	0.755	0.054	0.755	0.057	0.813	0.053	0.796	0.059
59218	0.712	0.046	0.611	0.053	0.819	0.059	0.748	0.053
59227	0.782	0.070	0.737	0.071	0.809	0.055	0.769	0.073
59229	0.787	0.077	0.699	0.075	0.817	0.063	0.746	0.076
59230	0.761	0.094	0.779	0.072	0.793	0.068	0.785	0.073
59235	0.806	0.083	0.800	0.076	0.804	0.064	0.802	0.077
59417	0.701	0.063	0.651	0.059	0.786	0.064	0.745	0.059
59421	0.730	0.061	0.667	0.07	0.79	0.057	0.708	0.070
59427	0.707	0.072	0.724	0.068	0.75	0.066	0.723	0.069
平均值 Mean	0.765	0.069	0.716	0.075	0.801	0.061	0.746	0.076
最大值 Maximum	0.814	0.094	0.802	0.128	0.841	0.077	0.828	0.130
最小值 Minimum	0.701	0.046	0.607	0.053	0.749	0.053	0.547	0.053
标准差 Standard deviation	0.033	0.013	0.073	0.017	0.021	0.006	0.064	0.018
变异系数 Coefficient of variation/%	4	19	10	23	3	10	9	23

2001—2010 年同期模型和混合模型 R^2 的平均值 ± 标准差、变异系数分别为 0.765 ± 0.033 、4% 和 0.801 ± 0.021 、3%; 两者的 RMSE 平均值分别为 0.069、0.061; 此外, 同期模型拟合结果中 R^2 大于 0.8 的站点有 5/25 个, 而混合模型有 11/25 个 2011 年同期模型和混合模型的 R^2 平均

值 ± 标准差、变异系数分别为 0.716 ± 0.073 、10% 和 0.746 ± 0.064 、9%, 两者的 RMSE 平均值分别为 0.075、0.076。此外, 同期模型拟合结果中 R^2 大于 0.8 的站点有 2/25 个, 而混合模型有 5/25 个。

进一步利用同期模型和混合模型拟合整个片区 2001—

2010 年、2011 年植被 EVI，同样与遥感观测 EVI 值进行比较。2001—2010 年同期模型（图 2a）和混合模型（图 2b）的 R^2 平均值分别为 0.843、0.892；两者的 RMSE 平均值分别为 0.044、0.053。2011 年同期模型（图 3a）和混合模型（图 3b）的 R^2 平均值分别为 0.797、0.873；两者的 RMSE 平均值分别为 0.049、0.055。

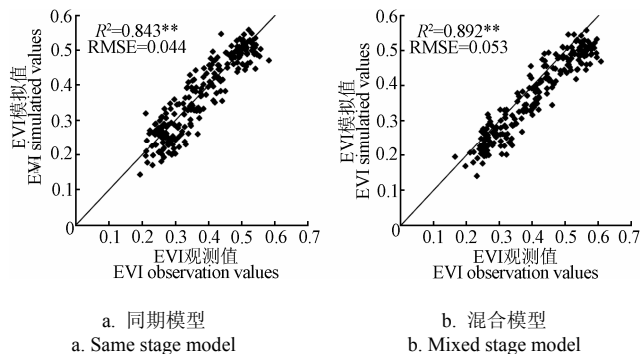


图 2 2000—2010 年广西石漠化片区全区植被 EVI 拟合值与遥感观测值比较

Fig.2 Comparison of EVI observed values and fitted values of Total Guangxi Karst rocky area during 2000-2010

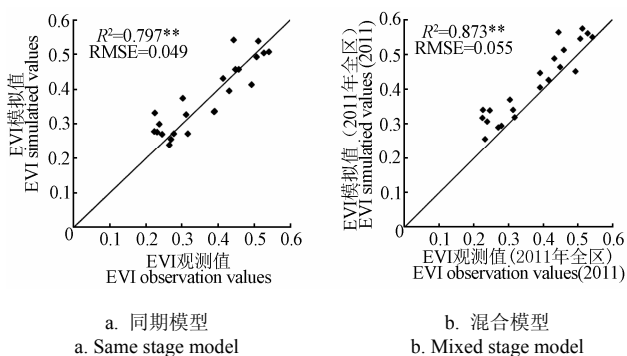


图 3 2011 年广西石漠化片区全区植被 EVI 拟合值与遥感观测值比较

Fig.3 Comparison of EVI observed values and fitted values of Total Guangxi Karst rocky area in 2011

由于模型本身是针对全区而建立的，2 个模型对整个片区植被 EVI 的拟合精度高于单站点，且混合模型的拟合精度高于同期模型。对大多数站点而言，混合模型的拟合精度较高，但是由于 2 个模型的建模气候因子不同，各个站点植被的 EVI 与气候因子的综合响应也存在较大差异，因此，对于某些站点（如 59001），同期模型拟合的植被 EVI 精度高于混合模型。混合模型更限度地考虑了对片区植被 EVI 起直接作用的气候因子（最高气温、降雨量），因而具有较强的解释性。

3 讨论

喀斯特地区植被对气候的响应具有特殊性，该地区存在不同程度的石漠化，基岩裸露率较大，导致土层浅薄且多为石缝石槽土，其植被群落改善小气候能力差。由于岩石比热容小，在缺乏上层植被缓冲的情况下，白天增温高，夜间散热快，导致该地区气温、湿度、地表温度变化速率快，温差变化幅度大。对该区植被与气候

因子的相关性分析结果表明，喀斯特地区植被对温度类气候因子的响应很敏感且站点差异最小，通径分析结果也表明对植被 EVI 起直接正作用的主要气候因子为最低气温和最高气温。广西地区降雨存在较大的时空变异，且不同地区由于其所生长的灌草、灌木、乔木且所占比例不同，植被郁闭度差异较大。对于植被稀疏地区，其保水能力较差，过于集中的降水并不利于植被生长甚至会加重水土流失，但对于郁闭程度较高的喀斯特地区，其土层积累较厚，保水能力强，降雨将促进其植被生长。因此，降水量与该地区植被的相关性并不高，站点平均为 0.539，远低于温度类气象因子（大于 0.8），此外，各站点与降水量相关性的一致程度也低于温度类气候因子。尽管各站点植被 EVI 与降水量的相关性差异较大，但其与水汽压的相关性较高且一致性较强，说明湿润的环境更利于其植被生长。通径分析表明，水分类气候因子对植被 EVI 的直接作用不明显，但通过其他气象因子起了较大的间接作用。

本研究中所建立的 EVI 气候因子拟合模型，包括全部基于同期气候因子的同期模型和基于同期、前期气候因子的混合模型都是针对全区而建立的，因而 2 个模型对整个石漠化片区植被 EVI 拟合的精度均高于单站点，且站点拟合精度存在一定的空间差异。由于喀斯特地区气象条件的再分配差异较大，在进一步的研究中可建立气候因子空间拟合模型，推算精细格点尺度上的气象条件再分配结果，便于更客观地分析植被与气候的相关性。此外，植被生长还受到土壤类型、岩性等诸多因素的影响，在模型的优化中有待于深入研究。

4 结论

气候因子对喀斯特地区植被 EVI 影响显著，植被 EVI 与水汽压、平均气温、露点温度、最低气温、最高气温的相关性均大于 0.8 且空间一致性好。除日照时数和风速外，该地区植被 EVI 对其他气候因子的响应均存在显著滞后性，滞后期多为 1 期约 16 d。对植被 EVI 起直接作用的主要是温度类气候因子，水分类气候因子对植被 EVI 的直接作用不明显，但通过其它气象因子起了较强的间接作用。

根据该地区植被与气候的关系建立了 2 个 EVI 拟合模型，基于同期气候因子的同期模型中入选的气候因子为水汽压（0 期）、日照时数（0 期）、露点温度（0 期），基于同期、前期气候因子的混合模型入选气候因子为水汽压（-1 期）、最高气温（-1 期）、降水量（-1 期）、露点温度（-1 期）、日照时数（0 期）。分别利用 2001—2010 年建模数据和 2011 年非建模数据对 2 个模型进行了单站点和片区两种尺度的精度验证。验证结果表明，2 个模型对整个片区植被 EVI 的拟合精度高于单站点，且混合模型的拟合精度高于同期模型。对大多数站点而言，混合模型的拟合精度较高，但是由于 2 个模型的建模气候因子不同及各个站点植被的 EVI 与气候因子的综合响应也存在较大差异，因此，同期模型对部分站点植被 EVI 拟合精度高于混合模型。

[参 考 文 献]

- [1] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production[J]. *Nature*, 1993, 363(6426): 234—240.
- [2] Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements[J]. *Nature*, 1996, 382(6587): 146—149.
- [3] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components[J]. *Science*, 1998, 281(5374): 237—240.
- [4] Knapp A K, Smith M D. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production[J]. *Science*, 2001, 291(5503): 481—484.
- [5] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. *Science*, 2003, 300(5625): 1560—1563.
- [6] Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S, et al. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation[J]. *Bioscience*, 2003, 53(10): 941—952.
- [7] 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究[J]. *植物生态学报*, 1996, 20(1): 11—19.
Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi. Study on NPP natural vegetation in China under global climate change[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(1): 11—19. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张清雨, 吴绍洪, 赵东升, 等. 内蒙古草地生长季制备变化对气候因子的响应[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(5): 754—764.
Zhang Qingyu, Wu Shaohong, Zhao Dongsheng, et al. Responses of growing season vegetation changes to climatic factors in Inner Mongolia grassland[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(5): 754—764. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘成林, 樊任华, 武建军, 等. 锡林郭勒草原植被生长对降水响应的滞后性研究[J]. *干旱区地理*, 2009, 32(4): 512—518.
Liu Chenlin, Fan Renhua, Wu Jianjun, et al. Temporal lag of grassland vegetation growth response to precipitation in Xilinguolemeng[J]. *Arid Land Geography*, 2009, 32(4): 512—518. (in Chinese with English abstract)
- [10] 侯光雷, 刘德赢, 张正祥, 等. 松嫩平原不同气候区植被 NDVI 对气候变化的响应[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(2): 271—277.
Hou Guanglei, Liu Deying, Zhang Zhengxiang, et al. Response of NDVI in different climatic zone to climate change in Songnen plain[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(2): 271—277. (in Chinese with English abstract)
- [11] 韦石. 辽河流域 NDVI 变化及其对气候因子的响应[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
Wei Shi. Change of NDVI and the Response to Climate in the Liaohe Basin[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [12] 郭军, 李明财, 刘德义. 天津地区归一化植被指数时间动态及其与气候因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(6): 1055—1059.
Guo Jun, Li Mingcai, Liu Deyi. Temporal variation of vegetation NDVI and its relations to climate factors in Tianjin area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(6): 1055—1059. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王桂钢, 周可法, 孙莉, 等. 天山山区草地变化与气候要素的时滞效应分析[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(2): 317—324.
Wang Guigang, Zhou Kefa, Sun Li, et al. Temporal responses of NDVI to climate factors in Tianshan mountainous area[J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(2): 317—324. (in Chinese with English abstract)
- [14] 于海达, 杨秀春, 徐斌, 等. 10 年来锡林郭勒盟草原植被长势变化及其影响因子分析[J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(2): 270—279.
Yu Haida, Yang Xiuchun, Xu Bin, et al. Changes of grassland vegetation growth in Xinlin Gol League over 10 years and analysis on the influence factors[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(2): 270—279. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 657—666.
Wang Shijie, Li Yangbing, Li Ruiling. Karst rocky desertification: Formation background, evolution and comprehensive taming[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 657—666. (in Chinese with English abstract)
- [16] 苏维词, 杨华, 李晴, 等. 我国西南喀斯特山区土地石漠化成因及防治[J]. *土壤通报*, 2006, 37(3): 447—451.
Su Weici, Yang Hua, Li Qing, et al. Rocky land desertification and its controlling measurements in the Karst mountainous region, Southwest of China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(3): 447—451. (in Chinese with English abstract)
- [17] 蒙古军, 王钧. 20 世纪 80 年代以来西南喀斯特地区植被变化对气候变化的响应[J]. *地理研究*, 2007, 26(5): 857—865.
Meng Jijun, Wang Jun. The response of vegetation dynamics to climate change in the southwestern karst region of China since the early 1980s[J]. *Geographical Research*, 2007, 26(5): 857—865. (in Chinese with English abstract)
- [18] 郑有飞, 牛鲁燕, 吴荣军, 等. 1982—2003 年贵州省植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(9): 1773—1778.
Zheng Youfei, Niu Luyan, Wu Rongjun, et al. Vegetation

- cover change in Guizhou of Southwest China in 1982—2003 in response to climate change[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(9): 1773—1778. (in Chinese with English abstract)
- [19] 吴良林, 周世武, 郑士科. GIS 支持下的土地石漠化与山地气候空间相关性分析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(23): 11787—11790.
- Wu Lianglin, Zhou Shiwu, Zheng Shike. Study on spatial relations between rocky desertification and mountain climate in northwest Guangxi province based on GIS technology[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(23): 11787—11790. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈燕丽, 龙步菊, 潘学标, 等. MODIS NDVI 和 AVHRR NDVI 对草原植被变化监测差异[J]. 遥感学报, 2011, 15(4): 831—845.
- Chen Yanli, Long Bujun, Pan Xuebiao, et al. Differences between MODIS NDVI and AVHRR NDVI in monitoring grasslands change[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(4): 831—845. (in Chinese with English abstract)
- [21] 赵文武, 吕一河, 郭雯雯, 等. 陕北黄土丘陵沟壑区 NDVI 与气象因子的相关性分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 112—114.
- Zhao Wenwu, Lü Yihe, Guo Wenwen, et al. The correlations between climatic factors and NDVI in hilly and gully area of loess plateau in northern shaanxi[J]. Research of Soil and water conservation, 2006, 13(2): 112—114. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张生军, 王涛, 王天明, 等. 新疆不同植被 NDVI 的变化及其与气候因子的关系[J]. 草业科学, 2009, 26(5): 26—31.
- Zhang Shengjun, Wang Tao, Wang Tianming, et al. The variations in NDVI of different vegetation types in Xinjiang and its relation to climate factors[J]. Pratacultural Science, 2009, 26(5): 26—31. (in Chinese with English abstract)
- [23] 付新峰, 杨胜天, 刘昌明. 雅鲁藏布江流域 NDVI 时空分布及与站点气候因子的关系[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 229—232.
- Fu Xinfeng, Yang Shengtian, Liu Changming. Spatial-temporal changes of NDVI and their relations with principal climatic factors in Yarlung Tsangpo river basin's stations[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(3): 229—232. (in Chinese with English abstract)
- [24] 陈燕丽, 龙步菊, 潘学标, 等. 基于 MODIS NDVI 和气候信息的草原植被变化监测[J]. 应用气象学报, 2010, 21(2): 229—236.
- Chen Yanli, Long Bujun, Pan Xuebiao, et al. Grassland vegetation change based on MODIS NDVI data and climate information[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(2): 229—236. (in Chinese with English abstract)
- [25] 南颖, 刘志锋, 董叶辉, 等. 2000—2008 年长白山地区植被覆盖变化对气候的响应研究[J]. 地理科学, 2010(6): 921—928.
- Nan Ying, Liu Zhifeng, Dong Yehui, et al. The responses of vegetaton cover to climate change in the Changbai mountain area from 2000 to 2008[J]. Scientia Geographica Sinica, 2010(6): 921—928. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李秀花, 师庆东, 常顺利, 等. 中国西北干旱区 1981—2001 年 NDVI 对气候变化的响应分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(2): 12—16.
- Li Xiuhua, Shi Qingdong, Chang Shunli, et al. The response of NDVI to climate variability in northwest arid area of China from 1981 to 2001[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(2): 12—16. (in Chinese with English abstract)
- [27] 严晓瑜. 不同时间尺度若尔盖湿地植被变化及其与气候的关系[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2007.
- Yan Xiaoyu. The Variation of NDVI and Its Relationship with Climate Factors in Ruogai Wetland at Different Time Scales[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Science, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [28] 郭妮. 植被指数及其研究进展[J]. 干旱气象, 2003, 21(4): 71—75.
- Guo Ni. Vegetation index and its advances[J]. Arid Meteorology, 2003, 21(4): 71—75. (in Chinese with English abstract)
- [29] 彭代亮, 黄敬峰, 王秀珍. 基于 MODIS-EVI 区域植被季节变化与气象因子的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(5): 983—989.
- Peng Dailiang, Huang Jingfeng, Wang Xiuzhen. Correlation analysis of regional vegetation seasonal fluctuation and climate factors based on MODIS-EVI[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(5): 983—989. (in Chinese with English abstract)
- [30] 陈燕丽, 莫伟华, 莫建飞, 等. 不同等级石漠化区 MODIS-NDVI 与 MODIS-EVI 对比分析[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(6): 943—948.
- Chen Yanli, Mo Weihua, Mo Jianfei, et al. Comparison between MODIS-NDVI and MODIS-EVI in Karst rocky desertification area[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(6): 943—948. (in Chinese with English abstract)
- [31] 陈燕丽, 罗永明, 莫伟华, 等. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 对气候因子响应差异[J]. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1802—1812.
- Chen Yanli, Luo Yongmin, Mo Weihua, et al. Differences between MODIS NDVI and MODIS EVI in response to climatic factors[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(10): 1802—1812. (in Chinese with English abstract)
- [32] 熊康宁, 黎平, 周忠发, 等. 喀斯特石漠化的遥感——GIS 典型研究[M]. 北京: 地质出版社, 2002.

EVI simulation of vegetation in Karst rocky area using climatic factors

Chen Yanli^{1,2,3}, Mo Weihua^{1,2*}, Luo Yongming^{1,2}, Mo Jianfei^{1,2}, Huang Yonglin^{1,2}, Ding Meihua^{1,2}

(1. Guangxi Meteorological Disaster Mitigation Institute/Remote Sensing Application and Validation Base of NSMC, Nanning 530022, China;

2. Joint Laboratory for GIS Application, Nanning 530022, China;

3. College of Resources and Environment, China Agriculture University, Beijing 100193, China)

Abstract: In this paper, taking the vegetation in Karst rocky area as the research subject, MODIS enhanced vegetation index (EVI) series and climatic information during 2001-2010 are used to analyze the relationship between vegetation and climate factors. Vapor pressure, precipitation, relative humidity, maximum temperature, minimum temperature, mean temperature, dew point temperature, wind speed and sunshine hours are taken as climatic variables to explore their relationships with EVI series in different stages using correlation analysis method and path analysis method. Then, climatic factors are selected to establish EVI simulation models of Karst vegetation by stepwise regression analysis method. The results show that: There are significant positive correlations between EVI of Karst vegetation and most climatic factors. The correlation coefficients between EVI and the climatic factors including vapor pressure, mean temperature, dew point temperature, minimum and maximum temperature are higher and show better consistency than other factors, and all the values are over 0.8. The response of EVI to climatic factors has obvious hysteresis nature except sunshine hours and wind speed. The lag time is about 16 days for most climatic factors. Minimum and maximum temperature and mean temperature play a most significant direct effect on vegetation EVI; vapor pressure, precipitation and relative humidity play a significant indirect effect on EVI although their direct effect are not obvious. According to the correlations between EVI and climatic factors, 2 EVI simulation models are established including the same-time model and mixed-time model. The same-time model means the stages of the climatic factor series used in the model are the same to the EVI series. But, in the mixed-time model, climatic factors and EVI series in different stages are used. Vapor pressure, sunshine hours and dew point temperature are used to build the same-time model, and vapor pressure (one stage before), maximum temperature (one stage before), precipitation (one stage before), dew point temperature (one stage before) and sunshine hours (same stage) are used to build the mixed-time model. Two models' efficiencies in total Guangxi Karst area and single station are tested using data series from 2000 to 2010 and data in 2011. The simulation precisions for total Guangxi Karst area are higher than each single station for both models. From 2000 to 2010, the R^2 of the same-time model and the mixed-time model are 0.843 and 0.892, respectively, while 0.765 ± 0.033 , 0.801 ± 0.021 , respectively for single station. Meanwhile, in the year of 2011, the R^2 of the same-time model and the mixed-time model are 0.797 and 0.873 while 0.716 ± 0.073 , 0.746 ± 0.064 for single station respectively. For most stations, the efficiency of mixed-time model is higher than the same-time model. As the climatic factors used in the model are different and the relationships between climatic factors and vegetation vary among the stations, the efficiency of the same-time model for some stations is higher than the mixed-time model's.

Key words: vegetation; models; climate change; Karst area; enhanced vegetation index (EVI)