DOI: 10.5846/stxb201812282832
程东亚,李旭东,杨江州.西南山地流域 NDVI 变化特征及降水敏感性——以贵州沅江流域为例.生态学报,2020,40(4):1161-1174.
Cheng D Y, Li X D, Yang J Z. Research on NDVI variation characteristics and precipitation sensitivity of the Yuanjiang River Basin in Guizhou Province. Acta Ecologica Sinica,2020,40(4):1161-1174.

西南山地流域 NDVI 变化特征及降水敏感性
——以贵州沅江流域为例

程东亚,李旭东*,杨江州
贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550025

摘要:归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)是反映植被生长的重要指标,探究其时空变化特征,对生态保护、退耕还林和灾害防治具有重要意义。选取 2000—2015 年贵州沅江流域典型年份 NDVI,采用重心分析、标准差椭圆、地理加权回归等方法,从干旱视角探究流域 NDVI 变化和降水敏感性。得出以下结论:(1)2000—2015 年贵州沅江流域 NDVI 总体处于上升趋势,植被正在改善,期间西部植被改善最为明显,退耕还林还草取得较好成果。(2)2000—2015 年贵州沅江流域干旱年与正常年 NDVI 空间变化趋势不一致,干旱程度对植被影响具有区域差异。(3)贵州沅江流域 NDVI 与降水总体正相关,空间敏感性自西向东递增,降水对流域西部喀斯特山区 NDVI 影响更明显。(4)2000—2015 年贵州沅江流域 NDVI 时段变化与降水主要为负相关,降水越多 NDVI 时段变化敏感性越弱,退耕还林还草工程应重点放在负敏感区。研究结果可为退耕还林还草和干旱灾害防治提供科学参考。

关键词:归一化植被指数;旱灾;降水敏感性;地理加权回归;重心;贵州沅江流域;西南山地流域

Research on NDVI variation characteristics and precipitation sensitivity of the Yuanjiang River Basin in Guizhou Province

CHENG Dongya, LI Xudong*, YANG Jiangzhou
School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, *China*

Abstract: Normalized difference vegetation index (NDVI) is an important indicator reflecting the growth of vegetation. Exploring its temporal and spatial variation characteristics is of great significance for ecological protection, returning the grain plots to forestry and grassland and disaster prevention. NDVI characteristics of the Yuanjiang River Basin of Guizhou Province were studied for the period 2000—2015. The study used methods of center of gravity analysis, standard deviation ellipse and geographic weighted regression to explore the NDVI changes and precipitation sensitivity in the basin. The study draws the following conclusions: (1) From 2000 to 2015, the NDVI in the Yuanjiang River Basin is generally on an upward trend, and the vegetation is improving. During the period, the improvement of vegetation in the western region is the most obvious, and the returning the grain plots to forestry and grassland has achieved good results. (2) The spatial variation trend of NDVI between the drought years and the normal years in the Yuanjiang River Basin from 2000 to 2015 is inconsistent, and the degree of drought has regional differences in vegetation impact. (3) The NDVI in the Yuanjiang River Basin is negatively correlated with precipitation, and the spatial sensitivity increases from west to east. The influence of precipitation on NDVI in the western Karst mountainous area is more obvious. (4) Between 2000 and 2015, the NDVI change in the Yuanjiang River Basin was mainly negatively correlated with precipitation. The more precipitation, the weaker

基金项目:国家自然科学基金项目(41261039)
收稿日期:2018-12-28; **网络出版日期**:2019-11-20
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: 616507732@qq.com

the NDVI change sensitivity. The results provide scientific support for identification of farmland areas that could be reforested and where grasslands could be restored.

Key Words: normalized difference vegetation index; drought; precipitation sensitivity; geographically weighted regression; center of gravity; Yuanjiang River Basin in Guizhou Province; Southwest Mountain Basin

植被生长是生态变化的指示器。NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)称归一化植被指数,是测度植被生长的重要指标[1-3]。随着生态保护意识的增强,植被保护、生态涵养愈发受到重视[4-6]。生态环境保护中,植被恢复是最重要措施之一。影响植被恢复和生长的因素中,气候因素是基础。近年来,西南地区气象灾害时有发生,对植被恢复和退耕还林产生重要影响。探究干旱背景下植被变化及其气候影响,对生态保护和灾害防治具有一定意义。

NDVI 与气候关系是当前研究的热点。从研究区域来看,NDVI 与气候因子关系多为行政区划尺度探究,如韩雅等[7]、刘少华等[8]对国家尺度的研究,何月等[9]、蒲蕾等[10]对省域尺度的研究,王卫等[11]、拉巴等[12]对县域尺度的研究。在行政区尺度 NDVI 与气候关系研究中,仍以省域以上尺度为主要切入方向。在自然区域尺度 NDVI 与气候关系研究中,多涉及山地、流域 NDVI 与气候关系研究。如流域研究对象中,王丽霞等[13]对渭河流域的研究;张景华等[14]对澜沧江流域的研究等。山地研究对象中,如张艺成等[15]对九万山自然保护区的研究,侯光雷等[16]对长白山区的研究。整体研究对象来看,社会区划研究文献相对较多,自然区划研究需要进一步加强。在生态保护大背景下,典型生态区 NDVI 与气候研究成为重要分支,如黄土高原[17]、青藏高原[18-19]等都是较为热门的研究区域。当前研究中,深刻揭示了 NDVI 与气候因子的关系,并阐明了不同区域背景下气候因子对植被影响程度。但当前研究中更多是宏观探究气温降水与 NDVI 关系,气象灾害影响下 NDVI 特征与气候关系研究相对较少。气象灾害对植被(NDVI)具有明显影响[20-21],影响方式具有差异。因此,寻求典型气象灾害影响下,探究 NDVI 变化特征是较有意义的方向。

贵州沅江流域是中国西南代表性山地流域之一。气候立体性、人口山地性、地貌复杂性是西南山地流域基本特征。山地多、地形起伏大,降水分布具有复杂性、特殊性、区域性,深刻影响植被生长。同时,沅江流域西部、北部喀斯特分布广泛,旱灾时常发生,降水对水土流失、灾害预警、喀斯特石漠化治理产生直接影响。因此文章结合干旱特征,探究流域 NDVI 变化和降水影响,期望研究结果能为植被恢复与干旱灾害防治提供科学参考。

1 研究区概况、数据与方法

1.1 研究区概况

沅江是洞庭湖流域支流,流经湖南、贵州、重庆等省区(图 1)。贵州境内沅江流域主要位于贵州东部,流经黔南州、黔东南州、铜仁市等市州,干流长度 1028 km,面积 30269 km^2[22-23]。流域海拔大致呈现西高东低特点。西部海拔在 1500 m 左右,东部海拔 1000 m 以下。流域南部和北部高海拔地区属于梵净山和雷公山,是著名旅游胜地。流域属亚热带季风气候,降水丰沛、气温适宜。西部和北部多喀斯特分布,南部多非喀斯特。境内河流呈现平行分布特征,降水局部差异明显。

1.2 数据来源与处理

DEM 和 NDVI 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)。DEM 数据分辨率为 90 m,NDVI 数据为 7 月月合成产品,可以反映植被生长季节,数据分辨率为 500 m。气温降水来源于国家气象信息中心(中国气象局气象数据中心/国家气象科学数据服务共享平台)(http://data.cma.cn),中国地面累年值年值数据集(1981—2010 年)。

流域属贵州中东部,多发旱灾,该特征对植被影响明显。据资料显示[24](以及其他相关资料整理),2006、

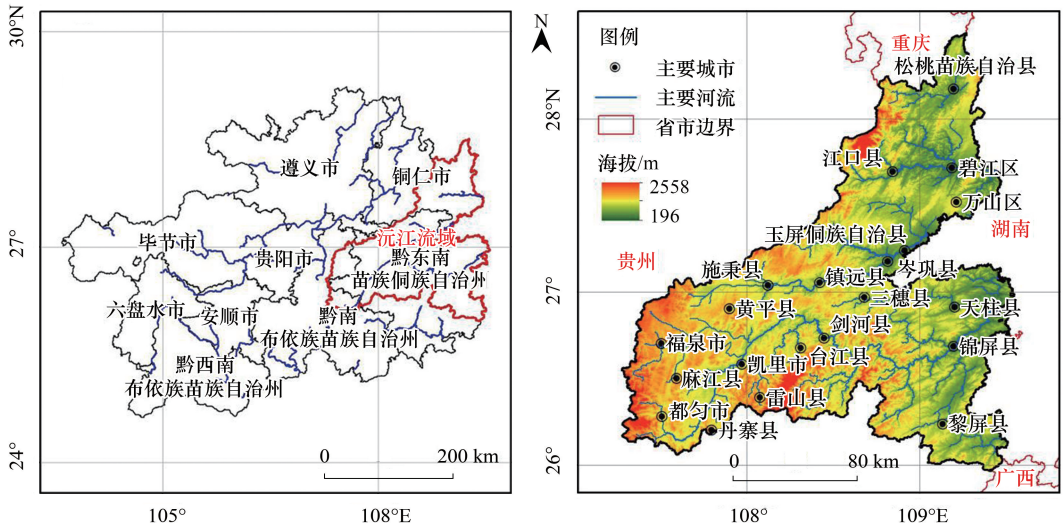


图 1　贵州沅江流域位置、海拔和主要城市

Fig.1　Location, elevation and major cities of the Yuanjiang River Basin in Guizhou Province

2009、2011、2013 年均为流域旱灾年。考虑到该特征,合理选取代表性阶段,分析植被变化内在机理更重要。经多次调整,选 3 年断点。6 期数据中,3 年(2000、2003、2015)为正常植被生长期,包括研究初末期,能反映植被变化整体趋势。2 年(2006、2009)为代表性干旱连续期,能反映降水少和干旱条件下变化特征。1 年为(2012)过渡期,该年能反映干旱前后 NDVI 转折特征。计算标准差椭圆和重心,采取栅格转点。不考虑城市与大范围居民点,NDVI 与降水具有空间趋势。故将流域均匀创建渔网,获取 266 个点(剔除无效点后),每点代表 100—120 km^{2}降水、NDVI(平均值)、NDVI 时段变化,后进行地理加权回归。

1.3　研究方法

(1)重心。重心又称加权平均重心[25],文中重心主要包括点地理坐标系、NDVI、NDVI 时段变化值,表达式为[25]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i}^{j} m_i x_i}{\sum_{i}^{j} m_i} \qquad \bar{y} = \frac{\sum_{i}^{j} m_i y_i}{\sum_{i}^{j} m_i} \tag{1}$$

式中,j 表示点个数,(x_i, y_i)表示 i 点中心坐标,m_i表示 i 点 NDVI 值或 NDVI 时段变化值,$(\bar{x}, \bar{y})$表示重心坐标。

(2)标准差椭圆。标准差椭圆是空间统计方法中能揭示地理要素空间分布特征的方法,它能反映点主导方向和总体特征[26-27]。表达式为[26-27]:

$$a_i = m_i - m_j; b_i = n_i - n_j \tag{2}$$

$$\tan\partial = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} w_i^{\,2} a_i^{\,2} - \sum_{i=1}^{n} w_i^{\,2} b_i^{\,2}\right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} w_i^{\,2} a_i^{\,2} - \sum_{i=1}^{n} w_i^{\,2} b_i^{\,2}\right) + 4\left(\sum_{i=1}^{n} w_i^{\,2} a_i b_i\right)^2}}{2\sum_{i=1}^{n} w_i^{\,2} m_i^{\,2} y_i^{\,2}} \tag{3}$$

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (w_i a_i \cos\partial - w_i b_i \sin\partial)^2}{\sum_{i=1}^{n} w_i^{\,2}}}, \delta_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (w_i a_i \sin\partial - w_i b_i \cos\partial)^2}{\sum_{i=1}^{n} w_i^{\,2}}} \tag{4}$$

式中，(m_i, n_i)为(m_j, n_j)的平均中心，w_i为 NDVI 或 NDVI 时段变化值，(a_i, b_i)为点距离中心相对坐标，$\delta_x\delta_y$为 x 轴、y 轴方向标准差。

(3)克里金插值。克里金插值是空间插值常用方法之一，表达式为[28-29]：

$$z_b = \sum_{i=1}^{s} z_n w_n \tag{5}$$

式中，z_b为待估计值，z_n为已知值，w_n为权重，s 为估算样本点数目。

(4)样条函数插值。以薄板样条函数为例，表达式为[30]：

$$Q(m,n) = \sum_{i=1}^{j} a_i d^2 \log d_i + a + bm + cn \tag{6}$$

式中，m、n 为待插值点坐标，$d_i = (m - m_i)^2 + (n - n_i)^2$，$m_i$和 n_i是相应控制点坐标。

(5)地理加权回归(GWR)。表达式为[31-32]：

$$y = b_0(u_i, v_i) + \sum_{i=1}^{k} b_i(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i \tag{7}$$

式中，(u_i, v_i)为某区域地理坐标中心，b_0为常数，b_1为自变量回归系数，x_{ij}为自变量。

2 植被覆盖度时空变化特征

2.1 NDVI 空间分布特征

2000—2015 年流域 NDVI 总体西低东高(图 2)，NDVI 呈上升—下降—上升特征(图 3)。期间流域植被

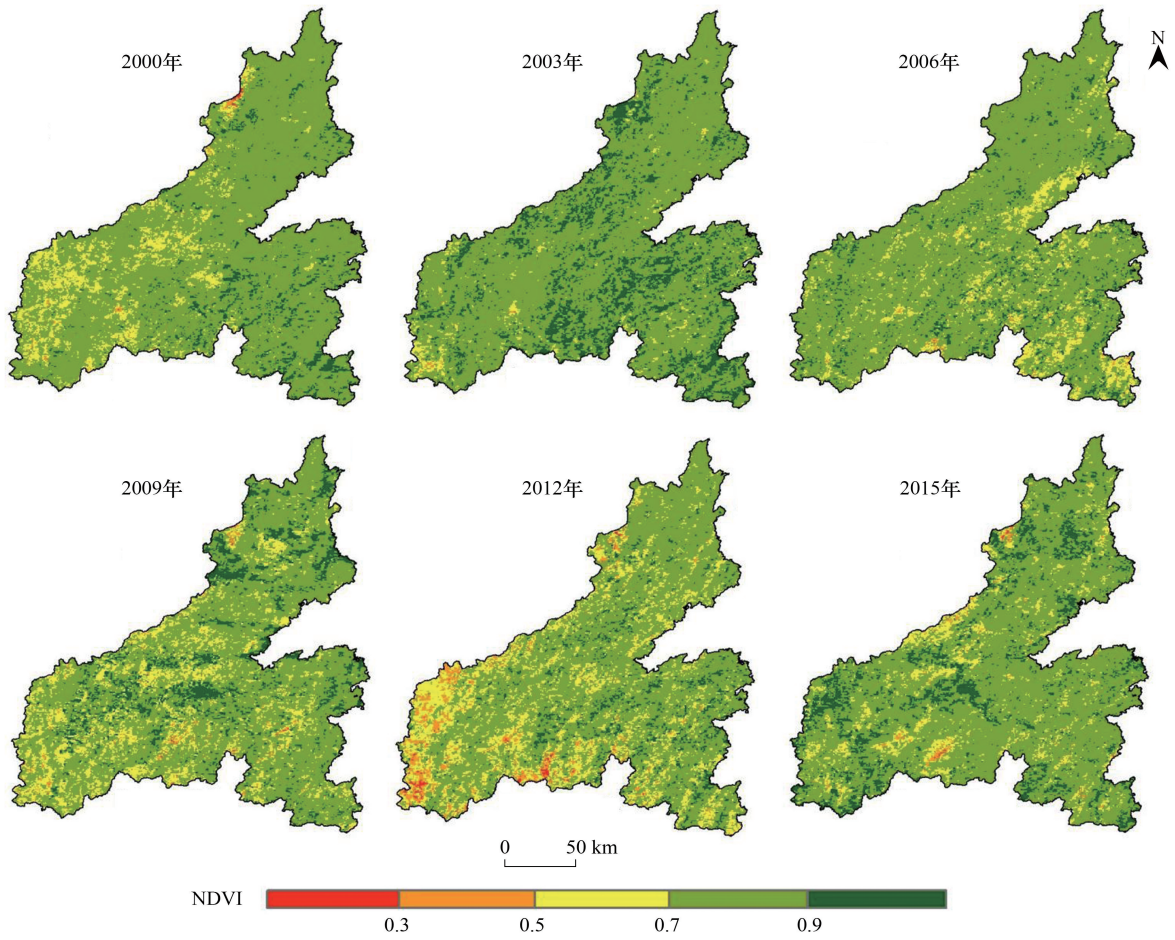


图 2 2000—2015 年贵州沅江流域 NDVI 空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution characteristics of NDVI of the Yuanjiang River Basin in Guizhou Province during 2000—2015

整体改善,下降趋势主要为干旱年。2000 和 2003 年由西向东 NDVI 总体逐渐升高,中部 0.7 过渡,东部达 0.9 以上。2003 年流域 NDVI 整体上升,西部低值散落,主要是城市活动影响。2009 年 NDVI 小于 0.7 多分布中东部河谷,可能是干旱初期影响。2012 年南部部分区域 NDVI0.5 以下,东北、东南、中部部分地区大于0.9。2006、2009、2012 年均为干旱和过渡干旱代表年,植被生长差,NDVI 呈下降趋势且空间差异明显。2015 年 NDVI 小于 0.7 范围缩小,大于 0.9 范围扩大,说明期间植被较大改善,西部改善最明显。总体看,2006、2009 年旱灾年 NDVI 下降。2012 年属灾害过渡期,NDVI 下降却最明显,可能是连续干旱期影响。

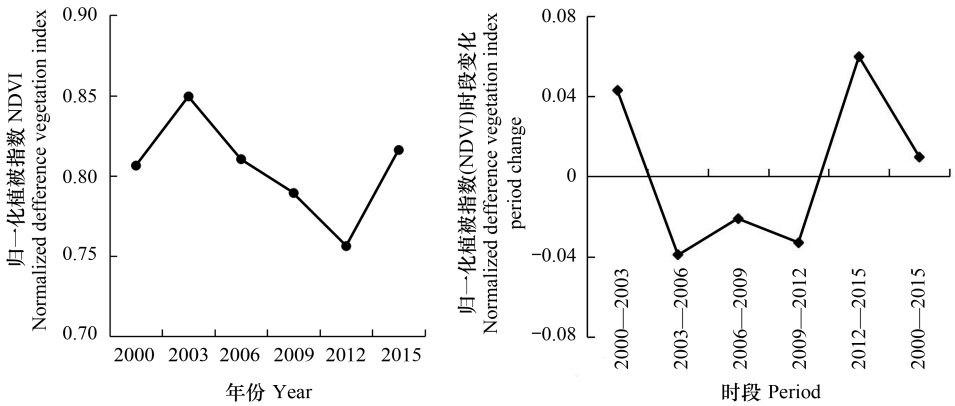


图 3　2000—2015 年贵州沅江流域 NDVI 变化趋势

Fig.3　Trends of NDVI of the Yuanjiang River Basin in Guizhou Province during 2000—2015

2.2　NDVI 时段变化空间分布特征

2000—2003 年流域 NDVI 下降少,仅西部和东南零星分布(图 4)。2003 年 NDVI 上升,流域植被改善最明显在西部。2003—2006 年流域 NDVI 下降区主要在中部和东南,其他区基本稳定。2006—2009 年流域 NDVI 升降并存,整体下降为主。2006—2009 年流域 NDVI 上升多分布中部、东北、东南,空间分布不均。2006—2009 年均为旱灾年,旱灾年 NDVI 空间局部差异明显,可能 2009 年旱灾在 7 月以后更加严重导致。2009—2012 年 NDVI 西部下降多,东部下降少且局部上升。2009—2012 年下降区 NDVI 有明显特征,多分布在高山高海拔区,旱灾可能对高海拔区影响深刻。2012—2015 年 NDVI 上升为主,西部上升多 0.3 以上,东部多上升不足 0.1。2012 年为旱灾过渡年,NDVI 属于研究期最低,2012—2015 年上升值可能被高估。2000—2015 年 NDVI 整阶段变化看,微小上升为主,期间 NDVI 上升多 0.1 左右,仅西部少量上升 0.2 以上。整阶段 NDVI 虽改善,但局部仍存在下降,局部下降与城市扩张有关。变化初末期看,流域 NDVI 处于改善趋势,植被恢复良好。

2.3　分阶段 NDVI 变化特征

2000—2015 年流域 NDVI 小于 0.3 占比低,期间 NDVI0.3—0.4 占比最高 2012 年(1.45%),最低 2003 年(0.03%)(表 1)。2000—2015 年 0.5—0.6 占比小幅提高,多年占比超 1%。旱灾年 NDVI0.6 以下明显上升,干旱期植被生长受限。2000—2015 年 NDVI0.6—0.7 占比提高,最高 2012 年 13.23%,最低 2003 年 2.13%,其他年约 10%。2012 年属干旱过渡年,也是旱灾严重年份之一。可能是整阶段干旱,短期内植被难以恢复到正常水平。2000—2015 年 NDVI0.8—0.9 占比高,多年超 50%,如 2000 年、2003 年,正常年份植被均处于改善趋势。2000—2015 年累计占比看,干旱年低值增加,增加程度可间接反映植被变化。干旱年 NDVI 大于 0.9 均 10%左右,干旱对植被影响较大。

2000—2003 年 NDVI 小幅上升,流域 NDVI 上升稳定,即植被恢复稳定。2000—2003 年 NDVI 时段变化小于 0 占比 26.32%,NDVI 微小上升。2003—2006 年 NDVI 时段变化小于 0 累计占比 68.54%,NDVI 下降明显。2003 年属研究期 NDVI 最高阶段,2006 年属干旱年,故 2003—2006 年 NDVI 下降明显。2006—2009 年

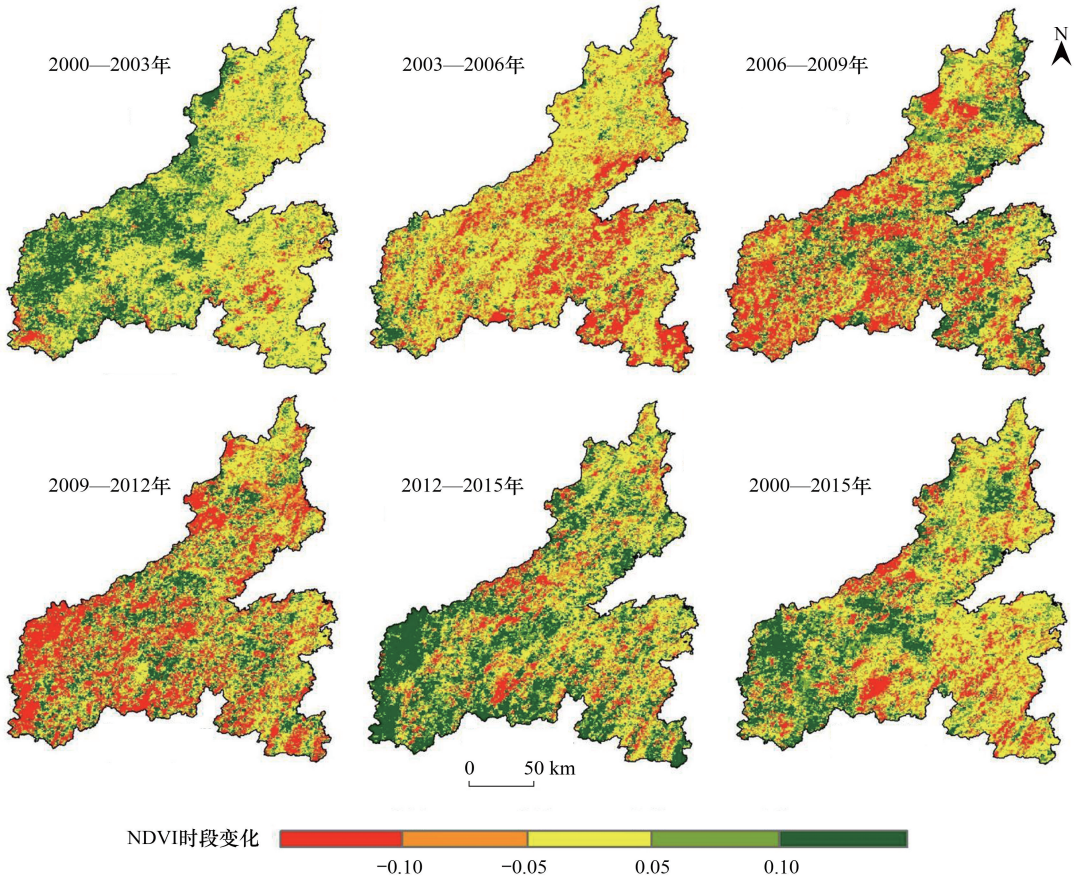


图 4 2000—2015 年贵州沅江流域 NDVI 时段变化空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution characteristics of NDVI stage variation of the Yuanjiang River Watered in Guizhou Province during 2000—2015

NDVI 明显不同于 2003—2006 年,植被阶段变化均衡。2009—2012 年 NDVI 时段变化小于 0 占比继续降低。2012—2015 年 NDVI 小于 0 占比不足 40%,NDVI 正变化。2000—2015 年累计变化看,小于 0 占比仅 47.05%,大于 0 占比 52.95%。2000—2015 年 NDVI 时段变化小幅上升,整体不明显。植被正常生长年份,NDVI 增加多 0—0.1,干旱年下降-0.1—0,干旱对植被影响表现下降趋势。干旱时 NDVI 部分阶段增长,可能存在局部小气候影响。

2.4 NDVI 重心偏移特征

2000—2015 年流域 NDVI 重心迂回,植被空间变化不稳定(图 5)。2003 年 NDVI 重心西移,正常年份 NDVI 西部较快增长,植被恢复好。2006 年 NDVI 重心西移,距离略小于 2003 年。2009 年流域 NDVI 重心东移,偏移距离长。2012 年流域 NDVI 重心继续东移,2012 年为最东点。2003—2012 年流域 NDVI 重心持续东移,东部 NDVI 更高(或下降更少)。2003—2012 年干旱期,重心东移是干旱带来的异常现象。2015 年 NDVI 重心迅速西移,呈迂回特征。2000—2015 年整阶段 NDVI 重心西移,西部 NDVI 增长较快,植被恢复较好。2000—2003 年 NDVI 时段变化重心总体位于西部,2003—2006 年时段变化重心东移,2006—2009 年继续东移。表明 2003—2009 年流域东部 NDVI 高(或下降更少),即干旱期东部 NDVI 下降少。干旱年 NDVI 时段变化重心主要在东部,可能干旱对东部植被影响更小。正常年 NDVI 均在西侧,也在一定程度反映西部 NDVI 增长更快。期间,NDVI 增加处于不稳定趋势,NDVI 时段变化在干旱年向东偏移。

表 1　2000—2015 年贵州沅江流域分阶段 NDVI 特征/%

Table 1　Staged NDVI characteristics of the Yuanjiang River Basin in Guizhou Province during 2000—2015

	2000 年		2003 年		2006 年		2009 年		2012 年		2015 年	
	占比 Proportion	累计 Grand total	占比 Proportion	累计 Grand total	占比 Proportion	累计 Grand total	占比 Proportion	累计 Grand total	占比 Proportion	累计 Grand total	占比 Proportion	累计 Grand total
小于 0.3	0.07	0.07	0.00	0.00	0.01	0.01	0.05	0.05	0.45	0.45	0.06	0.06
0.3—0.4	0.10	0.17	0.03	0.04	0.12	0.13	0.24	0.29	1.45	1.90	0.24	0.30
0.4—0.5	0.38	0.55	0.12	0.16	0.51	0.64	1.06	1.35	3.41	5.31	0.86	1.16
0.5—0.6	1.72	2.27	0.44	0.60	2.17	2.81	3.78	5.14	6.97	12.28	2.33	3.49
0.6—0.7	7.89	10.16	2.13	2.73	7.71	10.52	12.54	17.68	13.23	25.50	6.61	10.10
0.7—0.8	27.77	37.93	14.40	17.13	23.27	33.80	31.58	49.26	29.39	54.89	22.81	32.91
0.8—0.9	55.88	93.81	64.62	81.75	59.17	92.97	38.58	87.85	38.99	93.89	53.36	86.27
大于 0.9	6.19	100.00	18.25	100.00	7.03	100.00	12.15	100.00	6.11	100.00	13.73	100.00
	2000—2003 年		2003—2006 年		2006—2009 年		2009—2012 年		2012—2015 年		2000—2015 年	
小于-0.4	0.04	0.04	0.41	0.41	0.59	0.59	1.43	1.43	0.16	0.16	0.38	0.38
-0.4—-0.3	0.11	0.15	1.28	1.69	1.56	2.15	3.12	4.56	0.57	0.74	0.87	1.26
-0.3—-0.2	0.57	0.72	4.32	6.01	5.40	7.54	7.29	11.84	1.84	2.58	2.60	3.86
-0.2—-0.1	2.85	3.57	12.75	18.76	16.38	23.92	16.10	27.95	6.34	8.92	8.31	12.17
-0.1—0	22.75	26.32	49.78	68.54	33.45	57.37	28.90	56.85	27.01	35.94	34.88	47.05
0—0.1	54.38	80.70	27.00	95.55	27.38	84.75	27.87	84.72	31.64	67.58	34.91	81.96
0.1—0.2	14.51	95.21	3.52	99.06	11.11	95.87	11.26	95.98	17.19	84.77	13.28	95.24
0.2—0.3	3.76	98.97	0.72	99.78	3.10	98.96	3.12	99.10	8.56	93.33	3.77	99.01
0.3—0.4	0.76	99.73	0.17	99.95	0.80	99.76	0.69	99.79	3.99	97.32	0.76	99.77
大于 0.4	0.27	100.00	0.05	100.00	0.24	100.00	0.21	100.00	2.68	100.00	0.23	100.00

http://www.ecologica.cn

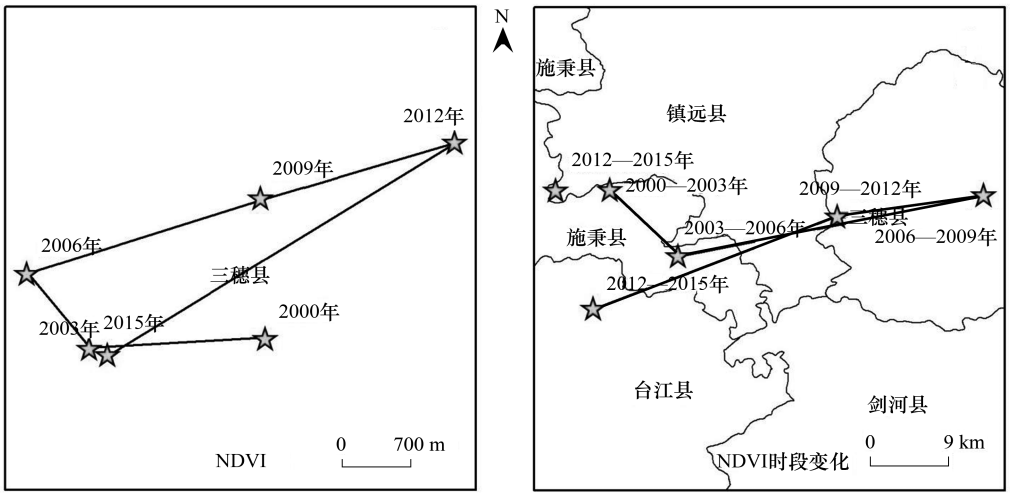


图 5 2000—2015 年贵州沅江流域 NDVI 重心迁移图

Fig.5 Center of gravity of NDVI migration of the Yuanjiang River Basin in Guizhou Province during 2000—2015

2.5 NDVI 标准差椭圆特征

标准差椭圆反映 NDVI 空间集中程度和方向特征(图 6)。2000—2015 年流域 NDVI 标准差椭圆差异小。虽期间存在干旱等情况,但 NDVI 标准差椭圆总体稳定,说明无论是正常植被生长年,还是异常气象灾害年,NDVI 总体空间动态平衡。2000—2015 年 NDVI 时段变化标准差椭圆靠西且扁平,西部 NDVI 上升多且集中。旱灾年 NDVI 时段变化差异小,2006—2009 年空间差异小,旱灾对 NDVI 影响具有普遍性,即旱灾往往影响整个流域植被生长。空间标准差椭圆仅反映基本特征,细微变化需通过长短轴、倾斜方向等探究(表 2)。2000—2015 年 NDVI 标准差椭圆周长差异不足 10 km,面积相差不足 1000 km^2。说明无论是正常还是异常年,流域 NDVI 增长平衡。2000—2015 年 NDVI 时段变化标准差椭圆差异悬殊,灾害年标准差椭圆变化较小,NDVI 干旱期普遍下降。标准差椭圆 2012—2015 年变化差异大,这种差异是极端情况导致。2012 年 NDVI 空间分布也最低,2015 年 NDVI 最高,导致标准差椭圆空间差异明显。

表 2 2000—2015 年贵州沅江流域 NDVI 标准差椭圆信息

Table 2 NDVI standard deviation ellipse information of the Yuanjiang River Basin in Guizhou Province during 2000—2015

年份 Years	周长/km Perimeter	面积/km^2 Area	半短轴/km Semi-short axis	半长轴/km Semi-major axis	半长短轴差/km Half axis difference	倾斜方向/(°) Tilt direction
2000 年	534.15	21583.63	68.90	99.71	30.81	35.89
2003 年	534.43	21604.30	68.92	99.78	30.86	36.56
2006 年	538.00	21767.59	68.47	101.20	32.74	37.20
2009 年	537.16	21765.90	68.84	100.65	31.81	35.98
2012 年	532.12	21369.12	68.26	99.65	31.39	34.47
2015 年	538.77	21879.00	68.92	101.06	32.15	37.37
2000—2003 年	490.74	17612.28	58.92	95.15	36.23	41.48
2003—2006 年	597.39	25102.84	66.83	119.58	52.76	48.94
2006—2009 年	511.70	20301.44	70.45	91.73	21.28	24.08
2009—2012 年	493.08	18585.51	65.26	90.66	25.40	36.52
2012—2015 年	541.09	22036.87	68.99	101.68	32.68	51.58
2000—2015 年	519.37	18376.09	55.11	106.15	51.04	43.35

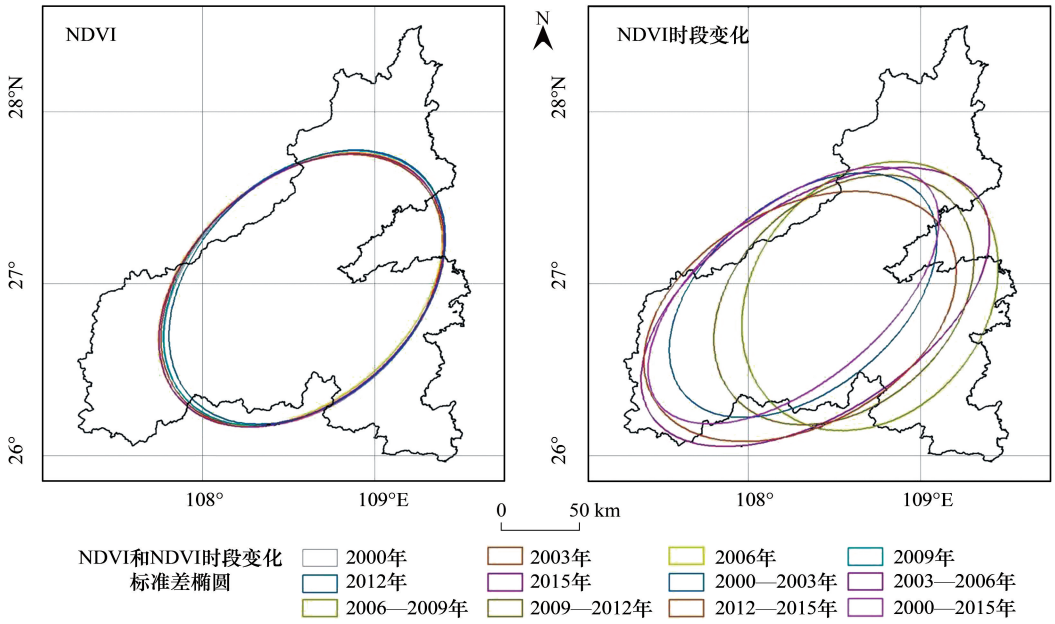


图 6　2000—2015 年贵州沅江流域 NDVI 标准差椭圆空间特征

Fig.6　Characteristics of NDVI standard elliptical space of the Yuanjiang River Basin in Guizhou Province during 2000—2015

3　NDVI 降水敏感性特征

3.1　降水空间分布特征

文章采用两种方法分析降水特征及与 NDVI 关系,避免空间插值产生较大偏差。Kriging 显示(图 7),流域西部降水多 1300 mm 以上。Spline 显示,流域南部、东部降水多,降水量多在 1300 mm 以上。降水量大于 1300 mm 对比,Spline 范围大于 Kriging。流域降水较少位于中部,多在 1200 mm 以下。Spline 和 Kriging 在 1200 mm 附近插值相似。降水 1350 mm 差异明显,Spline 范围大,Kriging 范围略小。整体看流域中部降水少,

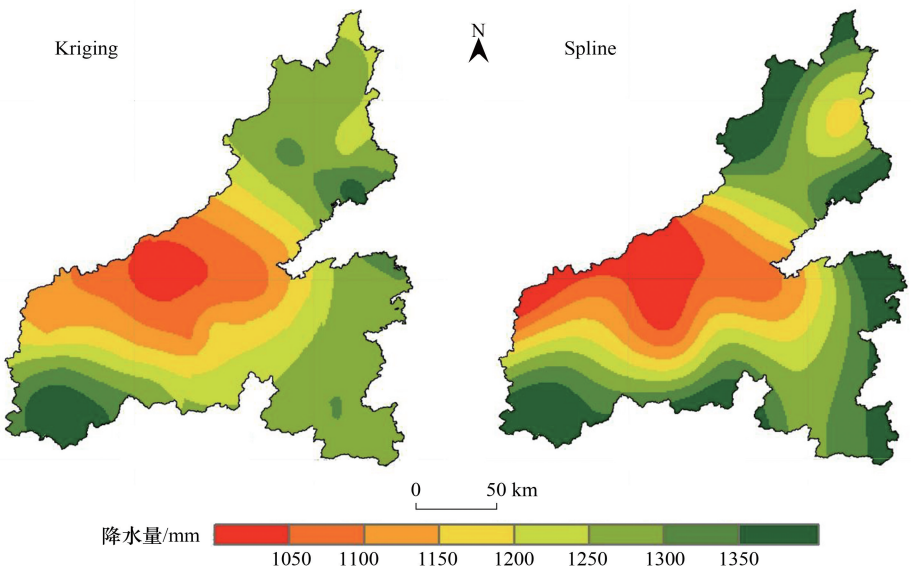


图 7　贵州沅江流域降水空间分布特征

Fig.7　Spatial distribution characteristics of precipitation of the Yuanjiang River Basin in Guizhou Province

西部、南部、东部降水多。

3.2 降水与 NDVI 相关分析

随降水增加,NDVI 呈现上升趋势(图 8)。Spline、Kriging 对 NDVI 模拟中,Spline 线性模拟斜率高,空间趋势明晰。但两种模拟方式空间趋势一致,随降水增加,NDVI 处于上升趋势。Spline、Kriging 对 NDVI 时段变化模拟,无明显斜率差异。降水与 NDVI 时段变化呈负相关。Spline 降水与 NDVI 显著正相关(表 3),相关系数 0.163,显著性 0.008。Spline 降水与 NDVI 时段变化不显著负相关,相关系数-0.117,显著性 0.057。Kriging 降水与 NDVI 时段变化不显著正相关,相关系数 0.084。Kriging 降水与 NDVI 时段变化显著负相关,相关系数-0.153,显著性 0.013。结合简单空间趋势模拟和相关分析,可基本得出:降水与 NDVI 存在关系。NDVI 总体特征来看,降水越多,NDVI 应该越高,NDVI 时段变化相对越小。

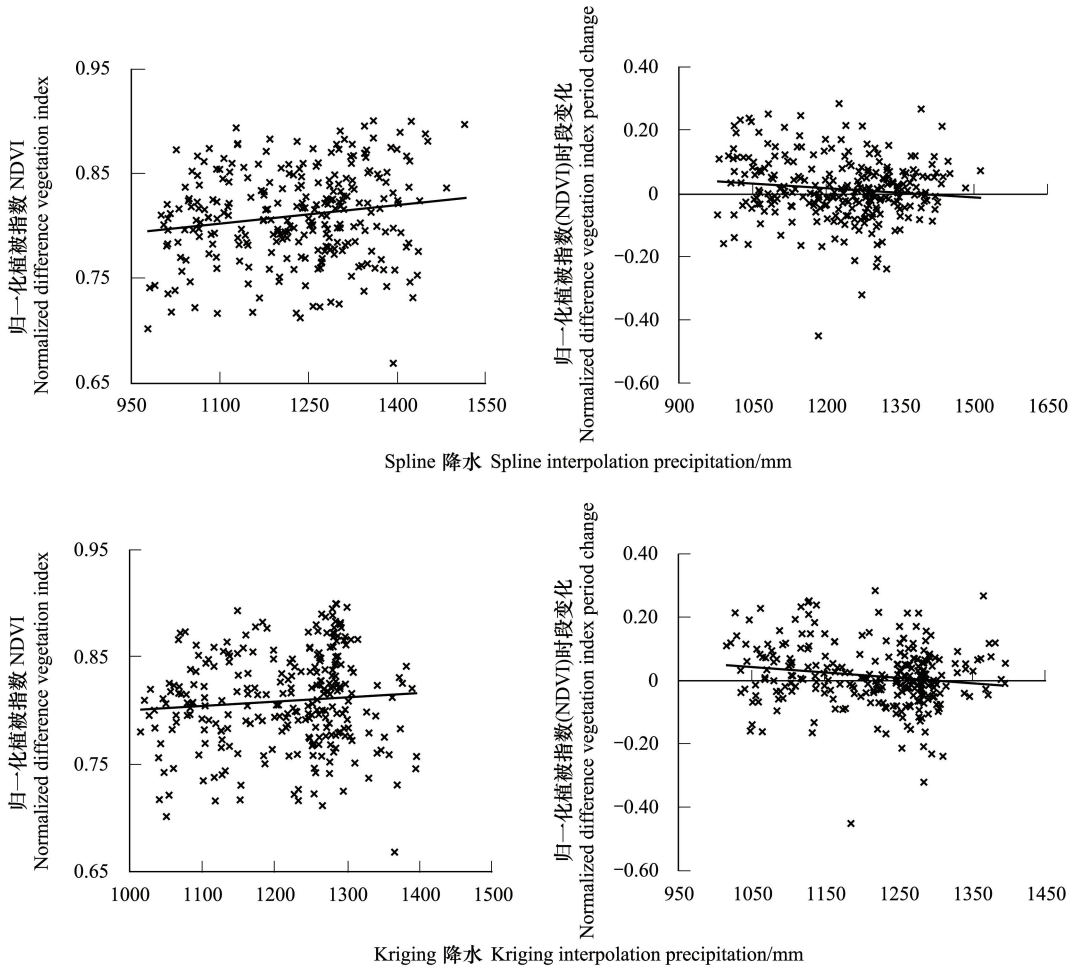


图 8 贵州沅江流域降水与 NDVI 基本线性趋势

Fig.8 Precipitation and NDVI basic linear trend of the Yuanjiang River Basin in Guizhou Province

3.3 地理加权回归参数检验

地理加权回归(GWR)模拟降水对 NDVI 影响,结果显示 Kriging 降水对 NDVI 敏感性模拟效果差,R^2 为 0.09,R^2 adjusted 为 0.08(表 4)。Spline 降水对 NDVI 敏感性模拟较好,其 Bandwidth 为 93593.52,Residual squares 为 0.42,拟合优度 R^2 为 0.18,R^2 adjusted 为 0.16,模拟效果可反映降水对 NDVI 影响。Kriging 对 NDVI 时段变化模拟不如 Spline。NDVI 时段变化模拟中,Kriging 拟合优度 R^2 为 0.06,调整后 0.05。NDVI 时段变化敏感性模拟中,Spline 拟合优度 R^2 和 R^2 adjusted 为 0.09、0.07。采用 GWR 探究降水对 NDVI 敏感性,Spline 效果更好。因此,文章重点探究 Spline 插值降水产生的 NDVI 敏感性。

表 3　贵州沅江流域降水与 NDVI 相关分析

Table 3　Correlation analysis between precipitation and NDVI of the Yuanjiang River Basin in Guizhou Province

插值方式 Interpolation method	相关系数与显著性 Correlation coefficient and significance	归一化植被指数(NDVI) Normalized difference vegetation index	归一化植被指数(NDVI)时段变化 Normalized difference vegetation index period change
Spline 降水	相关性	0.163**	−0.117
Spline interpolation precipitation	显著性	0.008	0.057
Kriging 降水	相关性	0.084	−0.153*
Kriging interpolation precipitation	显著性	0.174	0.013

* * 在置信度(双侧)为 0.01 时,相关性是显著的; * 在置信度 (双侧)0.05 时,相关性是显著的

表 4　降水与 NDVI 关系的 GWR 回归参数检验

Table 4　GWR regression parameter test of precipitation and NDVI relationship

	归一化植被指数(NDVI) Normalized difference vegetation index		归一化植被指数(NDVI)时段变化 Normalized difference vegetation index period change	
	Kriging	Spline	Kriging	Spline
Bandwidth	169312.15	93593.52	169312.15	93593.52
Residual squares	0.47	0.42	2.41	2.32
Effective number	3.51	6.68	3.51	6.68
Sigma	0.04	0.04	0.10	0.09
AICc	−924.47	−945.72	−488.31	−493.89
R^2	0.09	0.18	0.06	0.09
R^2 adjusted	0.08	0.16	0.05	0.07

3.4　NDVI 降水敏感性特征

Spline、Kriging 对 NDVI 降水敏感性空间模拟趋势一致,敏感性西南—东北递增(图 9)。流域西部降水与 NDVI 呈负相关,东北正相关。主要是以下原因:流域西部城市密集,人口多,人类活动对 NDVI 影响大,敏感程度高。流域西部降水多,但不是 NDVI 高值集中区。文中 NDVI 为多年均值,降水敏感性反映多年平均状

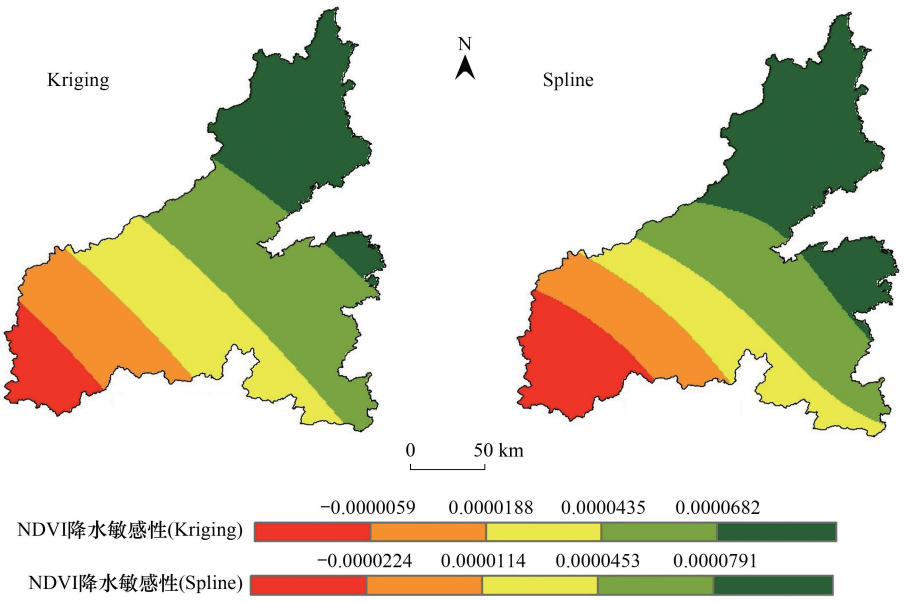


图 9　贵州沅流域 NDVI 降水敏感性空间分布特征

Fig.9　Spatial distribution characteristics of NDVI precipitation sensitivity of the Yuanjiang River Basin in Guizhou Province

况。模拟结果显示,Spline 模拟 NDVI 敏感性空间差异大,Kriging 空间敏感性差异小。模拟 NDVI 降水敏感性空间变化特征看,Spline 模拟有空间弯曲,Kriging 近似直线减少。无论何方式,NDVI 降水敏感性呈西南—东北递增。

3.5 NDVI 时段变化降水敏感性特征

Kriging、Spline 对 NDVI 时段变化敏感性空间模拟差异大(图 10)。Kriging-NDVI 时段变化敏感性大致从西向东降低。Kriging 中,降水对 NDVI 时段变化敏感性为负回归系数。Spline-NDVI 时段变化空间敏感性模拟大致从中部向四周递增。Spline 插值,NDVI 时段变化敏感性正负均有。Spline 插值,降水对 NDVI 时段变化敏感性正回归系数主要在东南、东北,敏感性负回归系数主要在西部。

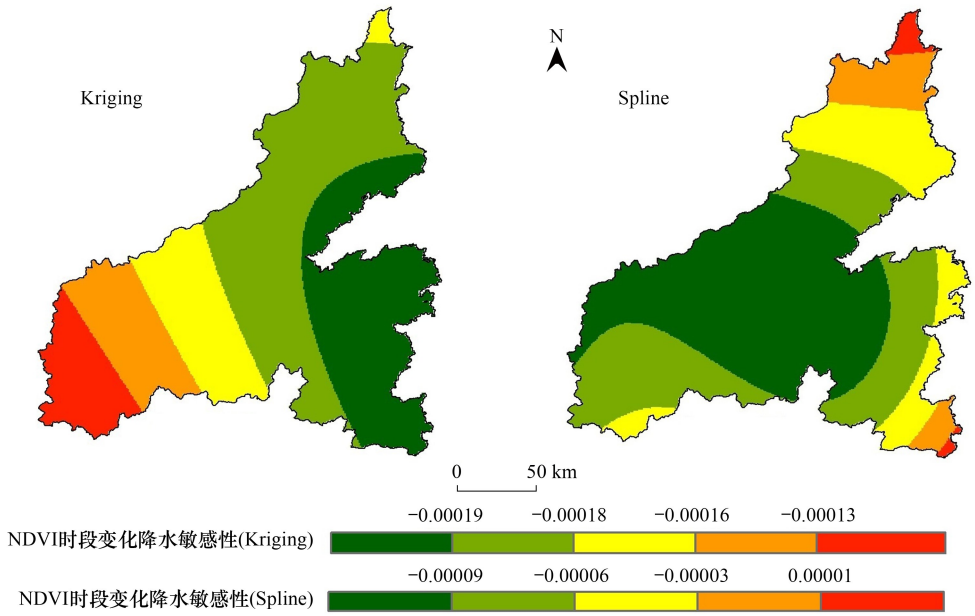


图 10 贵州沅江流域 NDVI 时段变化降水敏感性空间分布特征

Fig.10 Spatial distribution characteristics of precipitation variation in stage variation of the Yuanjiang River Basin in Guizhou Province

4 讨论

4.1 关于植被变化与干旱影响

文章分析了 2000—2015 年贵州沅江流域 NDVI 时段变化特征,结果表明流域 NDVI 处于上升趋势,说明退耕还林还草等植被恢复取得较好结果。马士彬等[33]在贵州喀斯特地区 NDVI 研究中,2006—2010 年贵州 NDVI 处于较低下降水平,这与本文 2006—2012 年结果基本一致。同时,该文[33]2000—2013 年沅江流域西部 NDVI 属于显著上升趋势,也与本文研究结果一致,即西部地区植被恢复较好。许玉凤等[34]对贵州 2000—2014 年植被覆盖度研究中,大致呈现流域西部及附近植被覆盖度有所提升,亦与本文结果基本一致。研究结果可以反映植被逐渐好转趋势,特别是西部植被恢复好转趋势。

王兆礼等[35]在对中国流域尺度气象灾害与植被关系研究中发现,大尺度干旱灾害对干旱和半干旱地区影响更明显。2009 和 2012 年沅江流域 NDVI 却呈西部降低特征,该特征是区域较为独特的现象。马志婷等[36]在华北地区干旱与植被关系研究中认为:干旱程度加深,NDVI 下降在逐渐加快。流域 2006—2012 年 NDVI 都属于低值区,可在一定程度反映干旱对植被影响,但流域 2012 年 NDVI 属于最低水平,是否属于流域干旱最剧烈年份尚且不明确。刘大川等[37]研究干旱对 NDVI 影响,其结果亦与马志婷等[36]相似。

4.2 关于流域植被分布特征

2000—2015 年多年 NDVI 表现为西低东高,但局部也有差异。流域西部城市活动密集,人类活动频繁,

NDVI 总体较低。2006 年 NDVI 空间趋势明显不一致,东北和东南较低,文章认为可能有如下原因:2006 年是干旱年,干旱对 NDVI 影响大,东部植被茂盛区明显。2000—2015 年南部雷山附近始终存在 NDVI 低值区,此低值与城市密切相关。2000—2015 年 NDVI 始终保持较高,主要分布北部梵净山附近,此区较高有以下原因:(1)梵净山周边海拔高,人类活动相对较少。(2)梵净山附近是自然保护区,对植被保护有积极影响[38]。2000—2015 年流域 NDVI 增长最高主要位于西部,西部城市和人口密集。贵州退耕还林耕还草的实施,西部 NDVI 较快上升。2006—2009 年、2009—2012 年流域 NDVI 时段变化呈西部下降快,东部下降慢。2006、2009、2012 年为旱灾年,正常年 NDVI 西部增长,异常年下降,两者相反。流域 NDVI 整体西低东高。发生气象灾害时,植被覆盖较低区对灾害抵抗能力弱。东部植被生长好于西部,植被本身具有涵养水源和抵抗灾害功能[39]。植被茂密区,局部环境更湿润,有利于减轻灾害影响。地表特征也影响气象灾害。流域西部多喀斯特,属工程性缺水区[40]。发生干旱气象灾害时,缺水更严重,进而影响植被生长。人类和城市活动对 NDVI 干旱期影响突出。西部人口城市密集,干旱期人口植被争水,进一步加剧干旱。NDVI 平均值变化可能说明干旱程度。如 2006—2009 年 NDVI 下降没有 2009—2012 年多,是否可以说明 2012 年干旱过渡期气象灾害影响更明显,仍不得而知。

NDVI 空间标准差椭圆总体稳定。这种稳定特征与流域多因素密切相关:流域人口西多东少,但相对于全省仍属人口较稀疏区,人口空间稳定,对植被影响较稳定。贵州东部多旱灾,沅江流域也属旱灾侵扰区[24,41]。但流域大致呈正三角形,气象灾害空间影响具有稳定性。重心总迁移特征看,正常年 NDVI 重心较稳定,如 2000、2003、2015 年。干旱时段 NDVI 重心不稳定,气象灾害严重干扰植被生长。NDVI 降水敏感性中,降水敏感程度自西向东逐渐升高。主要包括以下原因:西部人类活动较强,植被覆盖较低。在降水影响相近情况下,影响可能越大(由于为负回归系数,系数越小,实际影响越强)。地理条件差异一定程度影响降水敏感性。流域西部属喀斯特分布区,植被覆盖稀疏,石漠化严重[42]。NDVI 时段变化对降水敏感性空间影响多为负向,周边高山高海拔区正敏感区,表明高山区植被生长好,人类干扰弱。

4.3　关于本文的不足

文章基于 2000—2015 年 6 年代表性 NDVI,深入分析其特征和变化趋势。结果可基本反映植被转好趋势,也可反映部分干旱对 NDVI 影响。文章采用分阶段数据虽可基本反映空间趋势,但年际(本文均为 7 月数据)连贯性缺乏,是本文不足之处。选取地理加权分析降水敏感性,是基于点求取空间趋势,虽能反映空间影响整体,但局部影响表现不明显。2012 年属气象灾害过渡异常年,NDVI 最低,是否存在长时间干旱影响,文章尚且没有更多资料进行充分评估。因此,本文以下方面需进一步探究:(1)探究长时间序列沅江流域 NDVI 时段变化。(2)寻找足够资料,评估连续干旱时期,流域 NDVI 变化内在机制和灾害影响程度。(3)选择精准方法探究局部 NDVI 降水敏感性。

5　结论

文章选取 2000—2015 年贵州沅江流域典型年份 NDVI,采用重心分析、标准差椭圆、地理加权回归等方法,探究流域 NDVI 变化和降水敏感性,研究结果可为退耕还林还草和干旱灾害防治提供科学参考。文章初步得出以下主要结论:

(1)2000—2015 年贵州沅江流域 NDVI 总体处于上升趋势,植被正在改善,期间西部植被改善最为明显,退耕还林还草取得较好成果。

(2)2000—2015 年贵州沅江流域干旱年与正常年 NDVI 空间变化趋势不一致,干旱程度对植被影响具有区域差异。

(3)贵州沅江流域 NDVI 与降水总体正相关,空间敏感性自西向东递增,降水对流域西部喀斯特山区 NDVI 影响更明显。

(4)2000—2015 年贵州沅江流域 NDVI 时段变化与降水主要为负相关,降水越多 NDVI 时段变化敏感性

越弱,退耕还林还草工程应重点放在负敏感区。

参考文献(References):

[1] 代子俊, 赵霞, 李冠稳, 王兴春, 庞龙辉. 基于 GIMMS NDVI 3g.v1 的近 34 年青海省植被生长季 NDVI 时空变化特征. 草业科学, 2018, 35(4): 713-725.

[2] Gamon J A, Huemmrich K F, Stone R S, Tweedie C E. Spatial and temporal variation in primary productivity (NDVI) of coastal Alaskan tundra: decreased vegetation growth following earlier snowmelt. Remote Sensing of Environment, 2013, 129: 144-153.

[3] 吴端耀, 罗娅, 王青, 杨抒, 董元媛. 2001—2014 年贵州省林草植被覆盖度时空变化及其与气温降水变化的关系. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2017, 35(1): 1-7, 29-29.

[4] 何兴元, 贾明明, 王宗明, 任春颖, 郑海峰, 郭跃东, 张新厚, 辛晓平. 基于遥感的三江平原湿地保护工程成效初步评估. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 3-10.

[5] 李云燕. 北京市生态涵养区生态补偿机制的实施途径与政策措施. 中央财经大学学报, 2011 (12): 75-80.

[6] 任荣胜, 扶志宏, 王撼, 刘良才, 尹学明. 四川矿区植被保护与生态恢复工程的现状与措施. 四川林勘设计, 2008, (3): 11-14.

[7] 韩雅, 朱文博, 李双成. 基于 GWR 模型的中国 NDVI 与气候因子的相关分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2016, 52(6): 1125-1133.

[8] 刘少华, 严登华, 史晓亮, 袁喆. 中国植被 NDVI 与气候因子的年际变化及相关性研究. 干旱区地理, 2014, 37(3): 480-489.

[9] 何月, 樊高峰, 张小伟, 柳苗, 高大伟. 浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应. 生态学报, 2012, 32(14): 4352-4362.

[10] 蒲蕾, 任志远. 陕西省不同地区 NDVI 变化与气候因子的关系及响应研究. 水土保持通报, 2013, 33(2): 265-269, 275-275.

[11] 王卫, 陈健飞. 广东省封开县 NDVI 变化对气候因子的响应. 热带地理, 2010, 30(2): 151-155.

[12] 拉巴, 艾俊峰, 拉巴次仁, 卫东. 藏北当雄县区草原 NDVI 变化及其与主要气候因子的关系. 西藏科技, 2011, (6): 62-63, 67-67.

[13] 王丽霞, 余东洋, 刘招, 张双成, 杨耘. 渭河流域 NDVI 与气候因子时空变化及相关性研究. 水土保持研究, 2019, 26(2): 249-254.

[14] 张景华, 封志明, 姜鲁光, 杨艳昭. 澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析. 自然资源学报, 2015, 30(9): 1425-1435.

[15] 张艺成, 王光军, 朱玉林. 九万山近 14 年植被变化与气候因子的相关关系. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(7): 81-88.

[16] 侯光雷, 张洪岩, 郭聃, 郭笑怡. 长白山区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候因子敏感性. 地理科学进展, 2012, 31(3): 285-292.

[17] 王宇航, 赵鸣飞, 康慕谊, 左婉怡. 黄土高原地区 NDVI 与气候因子空间尺度依存性及非平稳性研究. 地理研究, 2016, 35(3): 493-503.

[18] 孟梦, 牛铮, 马超, 田海峰, 裴杰. 青藏高原 NDVI 变化趋势及其对气候的响应. 水土保持研究, 2018, 25(3): 360-365, 372-372.

[19] 王青霞, 吕世华, 鲍艳, 马迪, 李瑞青. 青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析. 高原气象, 2014, 33(2): 301-312.

[20] 范文婷. 基于 NDVI 的农业灾害监测方法与应用——以呼伦贝尔市东部为例[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.

[21] 程红霞, 林粤江, 汪权方, 梁凤超, 武鹏飞. 南疆西部不同植被类型 NDVI 对风沙灾害的响应. 生态环境学报, 2013, 22(11): 1763-1768.

[22] 赵连友. 贵州省沅江流域生态红线划分研究. 贵阳: 贵州师范大学, 2017.

[23] 黄斌, 孙蕾, 万小卓,刘剑伟, 魏先勋. 沅江干流水质变化时空规律及五强溪水库库区总磷预测. 安全与环境学报, 2005 (6): 96-99.

[24] 贵阳都市报数字报. 未来 10 年贵州更多干旱[EB/OL]. 贵阳都市报, 2013-11-25 (A03 版) [2019-06-17]. http://dsb.gzdsw.com/html/2013-11/25/content_240142.htm.

[25] 李在军, 管卫华, 柯文前. 中国区域消费与经济、人口重心演变的时间多尺度研究. 经济地理, 2014, 34(1): 7-14.

[26] 赵璐, 赵作权, 王伟. 中国东部沿海地区经济空间格局变化. 经济地理, 2014, 34(2): 14-18, 27-27.

[27] 蒋金亮, 徐建刚, 吴文佳, 周亮, 孙东琪. 中国人-地碳源汇系统空间格局演变及其特征分析. 自然资源学报, 2014, 29(5): 757-768.

[28] 张云傲, 任俊儒, 孙立新. 沉降监测数据插值方法选取与精度分析. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(6): 214-217, 221-221, 224-224.

[29] 张绍伙, 彭贤伟. 基于 Kriging 方法和 GIS 技术的城市房价空间分异研究——以贵阳市城区为例. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2010, 28(1): 27-31.

[30] 赵冰雪, 王雷, 程东亚. 安徽省气象数据空间插值方法比较与分布特征. 水土保持研究, 2017, 24(3): 141-145.

[31] 叶显严. 基于地理加权回归的城市出租车客流影响因素分析及建模[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

[32] 孙倩, 汤放华. 基于空间扩展模型和地理加权回归模型的城市住房价格空间分异比较. 地理研究, 2015, 34(7): 1343-1351.

[33] 马士彬, 安裕伦, 杨广斌, 张勇荣. 喀斯特地区不同植被类型 NDVI 变化及驱动因素分析——以贵州为例. 生态环境学报, 2016, 25(7): 1106-1114.

[34] 许玉凤, 陈发辉, 傅良同. 近 15 年贵州高原植被变化时空格局分析. 西部林业科学, 2019, 48(1): 1-6.

[35] 王兆礼, 黄泽勤, 李军, 钟睿达, 黄文炜. 基于 SPEI 和 NDVI 的中国流域尺度气象干旱及植被分布时空演变. 农业工程学报, 2016, 32(14): 177-186.

[36] 马志婷, 武志涛, 卫洁. 京津风沙源区干旱时空特征及对植被变化的影响. 山地学报, 2018, 36(4): 536-546.

[37] 刘大川, 周磊, 武建军. 干旱对华北地区植被变化的影响. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2017, 53(2): 222-228.

[38] 张珍珍, 熊康宁, 黄登红. 近 30 年来梵净山植被覆盖时空变化及影响因素分析. 水土保持研究, 2018, 25(2): 183-189.

[39] 张根梅, 张亚民. 郑州市森林植被涵养水源价值分析. 上海农业科技, 2018, (2): 82-83, 104-104.

[40] 贺卫, 李坡. 喀斯特峡谷区工程性缺水原因及解决途径——以贵州省花江峡谷示范区为例. 资源开发与市场, 2010, 26(2): 129-131, 134-134.

[41] 付芳婧, 谷晓平, 罗曦. 贵州近年旱灾频发的原因探析. 农业灾害研究, 2012, 2(4): 58-60.

[42] 张信宝, 王世杰, 白晓永, 陈伟燕, 张思屿. 贵州石漠化空间分布与喀斯特地貌、岩性、降水和人口密度的关系. 地球与环境, 2013, 41(1): 1-6.