

# 贵州省煤矿区植被指数变化及其影响因子分析

李俊刚<sup>1</sup>, 闫庆武<sup>①</sup>, 熊集兵<sup>1,2,3</sup>, 黄园园<sup>1</sup> (1. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 国土环境与灾害监测国家测绘地理信息局重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 基于遥感和空间分析技术, 利用 MODIS 数据对 2000—2014 年贵州省煤炭资源开采对植被的影响进行监测分析。采用最大值合成、平均值和一元线性回归分析等方法研究贵州省煤矿区植被变化特征, 并运用地理探测器分析高程、坡度、坡向、土壤、多年平均降水量、多年平均气温和煤炭年产量对矿区植被变化的影响。结果表明, 贵州省煤矿区 NDVI 值均大于 0.77, 整体生长状况较好, 但低于全省平均水平, 其中大型煤矿植被指数均值明显低于中、小型煤矿; 在全省 NDVI 值处于上升趋势的情况下, 大多数矿区(79.22%) 植被也处于改善趋势, 依然有部分矿区(13.42%) 植被呈现退化趋势; 全省总体而言, 煤炭产量对矿区植被变化的解释力在 7 个因子中处于第 3 位, 在遵义、毕节和六盘水市, 其解释力分别排第 4、5 和 5 位, 对植被变化解释力最大的是自然环境因子中的降水、土壤和坡度。

**关键词:** 煤矿; 归一化植被指数; 地理探测器; 贵州省

中图分类号: P237; X835 文献标志码: A 文章编号: 1673-4831(2016)03-0374-05

DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2016.03.006

**Variation of Vegetation Index in Coal Mining Areas in Guizhou Province and Its Affecting Factors.** LI Jun-gang<sup>1</sup>, YAN Qing-wu<sup>1</sup>, XIONG Ji-bing<sup>1,2,3</sup>, HUANG Yuan-yuan<sup>1</sup> (1. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. National Administration of Surveying, Mapping and Geo-Information (NASG) Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring, Xuzhou 221116, China; 3. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Resources and Environment Information Engineering, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** With the aid of remote sensing and spatial analysis technology and MODIS data, impacts of coal mining activities on vegetation of Guizhou Province were analyzed. Variations of the vegetation in the coal mining areas of the province were analyzed and characterized with the maximum value composition, average and the unary linear regression analysis methods, and influences of elevation, aspect, slope, soil, mean annual precipitation of years and mean annual temperature of years and annual coal output on the vegetation in the coal mining areas of the province were explored. Results show that the NDVIs of all the coal mining areas of the province were higher than 0.77, which means the vegetation in the mining areas was pretty good in growth, but still poorer than the province's average. Among the mining areas, large-sized mining areas were obviously lower than medium- and small-sized ones in NDVI; The NDVI of the province on the whole was on a rising trend. In a large proportion (79.22%) of the coal mining areas vegetation was improving, but still in a small portion (13.42%) it was degenerating; Among the seven factors affecting NDVI, coal output ranked third in the province as a whole, but fourth, fifth, and fifth in Zunyi, Bijie and Liupanshui, respectively. The main factors affecting the vegetation in the area were environmental factors like precipitation, soil and slope.

**Key words:** coal mine; normalized difference vegetation index (NDVI); geographical detector; Guizhou Province

矿区植被变化是自然环境因素与人类生产活动共同作用的结果, 对矿区植被变化进行研究可以分析煤炭开采活动对矿区生态环境的影响。归一化植被指数(NDVI  $I_{NDV}$ ) 作为宏观反映煤矿区地表植被信息的重要信息源, 已被作为我国煤矿区植被覆盖及其生长活力定性和定量评价的重要指标之一<sup>[1]</sup>。已有诸多研究通过分析矿区植被指数的变化监测煤炭生产活动对矿区生态环境的影响<sup>[2-4]</sup>。

贵州省是我国西南地区重要煤炭基地, 该地区植被受气温、降水和地形等因子影响较大<sup>[5]</sup>, 同时与环境政策、农业政策和农村经济状况密切相关<sup>[6]</sup>, 植被生长具有明显的空间差异和季节性差异<sup>[7]</sup>, 植物类型较多, 恢复能力较强, 煤矿规模较小且位于山

收稿日期: 2015-11-11

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2014FY110800)

① 通信作者 E-mail: 3403175@163.com

区,煤炭开采活动对植被的影响未引起足够重视。笔者通过 NDVI 指数研究贵州省 610 个煤矿区植被生长情况及变化趋势,从而反映自然环境较好的中国西南地区煤炭资源开采对生态环境的影响。

## 1 研究区概况

贵州省位于中国西南地区东南部,地理坐标为北纬  $24^{\circ}37' \sim 29^{\circ}13'$ ,东经  $103^{\circ}36' \sim 109^{\circ}35'$ ,处于云贵高原东斜坡,地势西高东低,平均海拔 1 100 m 左右,以高原山地和丘陵为主,占土地总面积的 92.5%,岩溶地貌发育典型,喀斯特面积约 1 091 万  $\text{hm}^2$ ,占全省土地面积的 61.9%,气候温暖湿润,全省大部分地区平均气温  $15^{\circ}\text{C}$  左右,年均降水量 1 100~1 300 mm。矿产资源种类众多,分布广泛,门类齐全,储量丰富,全省已发现矿产资源 123 种,全省各类矿山企业总数为 7 461 个。按矿山规模划分,大型矿山 18 个,占矿山总数的 0.2%;中型矿山 99 个,占 1.3%;其余均为小型矿山,占 98.5%。煤矿矿山 1 975 个,其中大型 11 个,中型 25 个,小型 1 939 个。煤炭资源不仅储量大,而且煤种齐全,煤质优良,2005 年末保有量居全国第 2 位。

## 2 数据来源与处理

研究采用的数据为 2000、2002、2004、2006、2008、2010、2012 和 2014 年 6—9 月 MODIS 数据 (MOD13A3 和 MOD13Q) 数据格式为 EOS-HDF,空间分辨率为 1 和 0.25 km,地图投影格式为正弦曲线投影,使用美国国家航空航天局 (NASA) 提供的 MRT (MODIS Reprojection Tools) 软件对时间跨度为 15 a 的贵州省 NDVI 数据进行格式和地图投影转换,将 HDF 格式转化为 Tiff 格式,将 Sinusoidal 地图投影转换为 Albers Equal Area 投影。将贵州省国土资源厅提供的 1:50 万《贵州省矿产资源开发利用现状图》矢量化,得到 610 个煤矿区基本信息,包括煤炭年产量和开采规模等。土壤类型数据、年平均气温和多年平均降水量数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>),数字高程模型 (DEM) 来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 (<http://www.gscloud.cn>),并由 DEM 生成坡度和坡向数据。利用 ArcGIS 软件的空间分析模块提取煤矿区的植被指数、高程、坡度、坡向、土壤、多年平均降水和多年平均气温等信息,根据统计学原理以 610 个矿区作为样本分析贵州省煤炭开采对矿区植被的影响。贵

州省煤矿区分布示意图 1。

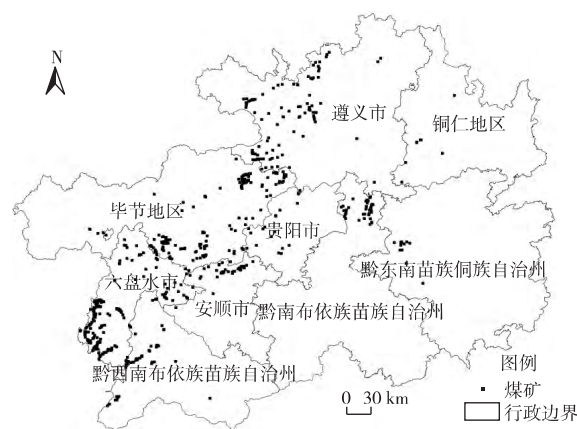


图 1 贵州省煤矿区分布示意

Fig. 1 Distribution of coal mining areas in Guizhou Province

## 3 研究方法

### 3.1 最大值合成法

MVC (maximum value composites) 能大限度地消除云等其他因素的影响,增加了对短期大气气溶胶、悬浮颗粒物和太阳天顶角等的校正<sup>[8]</sup>。根据贵州省植被生长的特点,利用该方法取 6—9 月 NDVI 最大值合成年最大值,可以减弱区域气候对植被生长周期的影响,计算公式为

$$M_{NDVI_i} = \max I_{NDV_{ij}} \quad (1)$$

式(1)中  $I_{NDV_{ij}}$  为  $i$  年  $j$  月的 NDVI 最大值;  $M_{NDVI_i}$  为第  $i$  年的 NDVI 最大值,是一年内植被生长最丰盛时期的 NDVI 值。

### 3.2 均值分析

根据煤矿生产规模可以划分为大型、中型和小型煤矿 3 类,研究不同类型煤矿的 NDVI 变化情况,计算公式为

$$E_{NDVI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_{NDVI_i} \quad (2)$$

式(2)中,  $E_{NDVI}$  为某生产规模类型中所有矿区  $M_{NDVI_i}$  平均值;  $n$  为该生产规模类型煤矿区总数。

### 3.3 趋势分析

一元线性回归可模拟植被的绿度变化率<sup>[8]</sup>,其值为某时间段内的季节合成 NDVI 年际变化的最小次方线性回归方程的斜率。采用该方法来模拟多年最大化 NDVI 的变化趋势,其计算公式为

$$S = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times M_{NDVI_i} - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n M_{NDVI_i}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (3)$$

式(3)中,  $S$  为模拟植被变化的一元线性回归方程的斜率;  $S < 0$  说明 2000—2014 年 NDVI 呈减少趋势, 反之则呈增加趋势。

### 3.4 地理探测器

为了分析贵州省煤矿区 NDVI 变化的主导因子, 利用地理探测器对高程、坡度、坡向、多年平均气温、多年平均降水量、土壤和煤炭开采量 7 个因子进行分析, 计算 7 个因子对煤矿区植被变化的影响。利用 NDVI 的一元线性回归系数作为煤矿区植被生长变化的表征指标, 利用地理探测器算法来研究自然因素(高程、坡度、坡向、土壤、年均降水量、年均气温)和人为因素(煤炭年产量)对煤矿区 NDVI 变化趋势的影响程度, 其模型为

$$P_{DH} = 1 - \frac{1}{n\sigma_H^2} \sum_{i=1}^m (n_{Di} \times \sigma_{H_{Di}}^2) \quad (4)$$

式(4)中  $P_{DH}$  为影响因子  $D$  对植被变化表征指标空间分布的解释力, 解释力越大, 说明该因子的影响越明显;  $n_{Di}$  为子区域  $i$  内煤矿区样本数;  $n$  为研究区域总样本数;  $\sigma_H^2$  为总区域的离散方差;  $\sigma_{H_{Di}}^2$  为子区域的离散方差。若  $D$  对植被变化指标具有解释力, 则  $\sigma_{H_{Di}}$  会很小。当  $\sigma_{H_{Di}} \rightarrow 0$ , 则接近植被变化趋势系数完全由该因子决定的理想状态, 此时  $P_{DH} = 1$ 。

## 4 结果与分析

### 4.1 贵州省与煤矿区 NDVI 均值变化

如图 2 所示, 煤矿区与贵州省 NDVI 年最大值的均值都大于 0.75, 说明植被生长状况良好。2000—2012 年煤矿区 NDVI 均值低于全省 NDVI 均值, 说明煤矿区植被生长状况低于全省平均水平, 但差距不大; 2012—2014 年煤矿区与全省 NDVI 均值持平或超过全省平均水平。

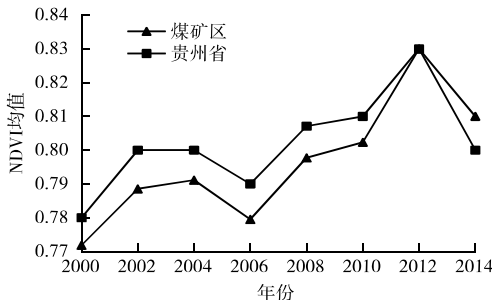


图 2 2000—2014 年贵州省和煤矿区 NDVI 均值曲线  
Fig. 2 Mean NDVI curves of Guizhou Province as a whole and coal mining areas in 2000—2014

从不同生产规模矿区植被变化曲线(图 3)可以

看出, 3 种类型煤矿区 NDVI 在 2000 年相差不多, 2002—2014 年大型煤矿区植被生长状况明显低于中、小型煤矿区, 而且中、小型煤矿区 NDVI 都呈现不同程度的上升趋势, 大型矿区在经过 2010 年的短暂上升后处于连续下降趋势。该现象的原因主要为: 2000—2014 年全省气候条件较好, NDVI 整体处于上升趋势, 同时全省范围内实施矿山复绿工程以及土地复垦重点工程, 对部分矿区土地进行修复, 将部分占用、损毁和受地质灾害破坏的土地复垦为耕地、林地和草地, 使煤矿区植被覆盖度有明显改善; 另一方面, 由于近几年贵州省开展矿业资源整合工作, 小型煤矿基本全部处于停产状态, 煤炭生产活动对矿区植被的影响减弱, 植被有一定程度的自我恢复能力, 而大型煤矿则承担了更多的煤炭生产任务, 导致大型煤矿区 NDVI 均值在 2014 年出现最小值。

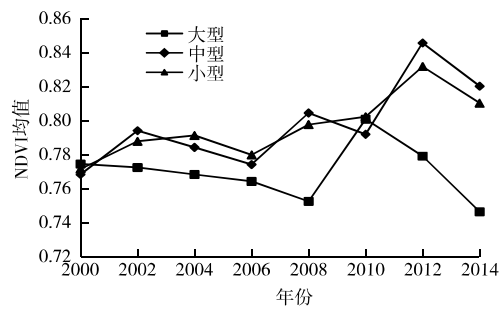


图 3 2000—2014 年不同生产规模煤矿区 NDVI 均值曲线  
Fig. 3 Mean NDVI curves of the coal mining areas different in size in 2000—2014

### 4.2 煤矿区植被变化趋势分析

用一元线性回归分析方法计算 610 个煤矿 15 a 内 NDVI 值变化趋势, 根据回归趋势线的斜率将煤矿区植被变化分为 7 个等级(表 1)。

表 1 NDVI 变化趋势分级标准<sup>[2]</sup>

Table 1 Standard for grading of NDVI variation trends

| 曲线斜率                       | 植被变化程度 |
|----------------------------|--------|
| $< -0.009 0$               | 严重退化   |
| $-0.009 0 \sim < -0.004 5$ | 中度退化   |
| $-0.004 5 \sim < -0.001 0$ | 轻微退化   |
| $-0.001 0 \sim < 0.001 0$  | 基本不变   |
| $0.001 0 \sim < 0.004 5$   | 轻微改善   |
| $0.004 5 \sim < 0.009 0$   | 中度改善   |
| $\geq 0.009 0$             | 明显改善   |

对植被指数回归趋势线斜率进行统计, 结果见表 2。从表 2 可知, 2000—2014 年贵州省煤矿区植

被生长趋势良好,研究矿区中有 79.22% 的煤矿区植被呈改善趋势,呈退化趋势的矿区占 13.42%。从矿山生产规模来看,大型煤矿区中植被退化较严

重的矿区所占比例较大,而中、小型煤矿中植被有所改善的矿区所占比例分别为 88.1% 和 79.3%,远大于植被退化的矿区。

表2 煤矿区 NDVI 变化趋势统计

Table 2 Statistics of NDVI variation trends in coal mining areas

| 煤矿规模 | 占煤矿区总数的比例/% |      |      |      |       |       |       |
|------|-------------|------|------|------|-------|-------|-------|
|      | 严重退化        | 中度退化 | 轻微退化 | 基本不变 | 轻微改善  | 中度改善  | 明显改善  |
| 大型   | 0.16        | 0.33 | 0.16 | 0    | 0.16  | 0.16  | 0.49  |
| 中型   | 0           | 0    | 0.33 | 0    | 0.33  | 0.65  | 1.47  |
| 小型   | 2.13        | 3.60 | 6.71 | 7.36 | 14.73 | 25.87 | 35.36 |
| 总计   | 2.29        | 3.93 | 7.20 | 7.36 | 15.22 | 26.68 | 37.32 |

### 4.3 地理探测器分析

将煤炭年开采量作为矿区生产活动的指标,高程、坡度、坡向、土壤、多年平均气温和多年平均降水作为自然环境因子指标,利用地理探测器分析人为因素和自然因素对矿区植被变化的影响。地理探测器是针对离散数据的算法,除土壤类型数据外,其他 6 个因子都是连续变量,需要对连续数据离散化。根据已有的研究成果,地理探测器算法中选择非监督分类的最优化结果对连续数据离散化,能够克服数据离散化过程中的任意性和主观性<sup>[9]</sup>。笔者采用等距离法(EI)、百分位数法(QV)、自然

断点法(NB)、几何间隔法(GI)和标准差法(SD)对数据进行分组,考虑到样本数量,使用前 4 种方法将样本分为 2~10 组,标准差分类采用 1 和 0.5 倍标准差进行分组;利用地理探测器计算各个分组的解释力大小,然后选择解释力最大的分类方法和组数作为该因子的最佳离散结果。以全省煤矿区多年平均气温为例(表 3),解释力最大的分组是采用百分数值法分 10 组,所以选择该组作多年平均气温的离散化方案,分组间断点为 11.3、12.2、12.4、13.1、13.5、14.0、14.3、14.5 和 14.8 °C,其解释力为 0.022。

表3 不同分组方法对多年平均气温的解释力

Table 3 Contribution of mean annual temperature of years to variation of vegetation in coal mining areas relative to sorting method

| 方法 | 2 组   | 3 组   | 4 组   | 5 组   | 6 组   | 7 组   | 8 组   | 9 组   | 10 组  | 11 组  |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| EI | 0.005 | 0.004 | 0.008 | 0.005 | 0.011 | 0.003 | 0.008 | 0.009 | 0.010 |       |
| QV | 0.006 | 0.004 | 0.016 | 0.009 | 0.012 | 0.013 | 0.015 | 0.019 | 0.022 |       |
| NB | 0.002 | 0.004 | 0.010 | 0.006 | 0.007 | 0.009 | 0.009 | 0.010 | 0.010 |       |
| GI | 0.005 | 0.004 | 0.006 | 0.015 | 0.008 | 0.010 | 0.012 | 0.015 | 0.015 |       |
| SD |       |       |       | 0.009 |       |       |       |       |       | 0.007 |

EI 为等距离法; QV 为百分位数法; NB 为自然断点法; GI 为几何间隔法; SD 为标准差法,1 倍和 0.5 倍标准差分别为 5 和 11 组。

采用以上方法分别对煤炭年产量、高程、坡度、坡向和多年平均降水量数据进行分组,同时选择煤矿数量较多的遵义市、毕节市和六盘水市作为研究单元,研究贵州全省以及不同地区煤炭开采量和自然环境因子对植被变化的影响程度(表 4)。从全省范围来看,影响矿区植被变化的主要因子从大到小依次为多年平均降水、坡度、煤炭年产量、多年平均气温、坡向、土壤和高程,煤炭年产量影响比较明显,但影响最大的是多年平均降水。不同地区影响矿区植被变化的主要因子各不相同,遵义市各因子解释力从大到小依次为土壤、坡度、坡向、煤炭年产量、高程、多年平均气温和多年平均降水,六盘水市

各因子解释力从大到小依次为坡度、多年平均气温、土壤、坡向、煤炭年产量、多年平均降水和高程,毕节市各因子解释力从大到小依次为土壤、多年平均降水、高程、多年平均气温、煤炭年产量、坡向和坡度,土壤类型对遵义市和毕节市煤矿区植被影响最大,对六盘水市煤矿区植被影响最大的因子则是坡度。就煤炭年产量因子而言,在全省范围内对矿区植被的解释力排在第 3 位,在遵义市、六盘水市和毕节市分别排在第 4、5 和 5 位。

由因子解释力排序可知,影响矿区植被变化的主要因子是自然环境因素,但煤炭开采活动对植被的影响也不容忽视。由于煤矿区分布范围比较广,

地形复杂,水热分布差异大,土壤类型多样,所以不同地区高程、坡度、坡向、降水、气温和土壤的解释力差异较大。煤炭年产量的解释力相对较弱,但其对 NDVI 变化的影响也比较明显。贵州省煤炭开采导致的植被破坏以岩体崩塌、滑坡和泥石流为主,

地质灾害对植被的损毁面积占矿区面积比例小,但破坏严重且恢复治理难度大。贵州省煤矿多位于山区且开采规模小,植被生长所需水分主要靠降水供给,因此由煤炭开采引起的地表沉陷变形和地下水水位变化对植被生长影响较小。

表 4 不同区域植被指数变化的影响因子解释力

Table 4 Contributions of various affecting factors to variation of NDVI relative to coal mining area

| 区域   | 煤炭年产量 | 高程    | 坡度    | 坡向    | 多年平均气温 | 多年平均降水 | 土壤    |
|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
| 贵州省  | 0.025 | 0.015 | 0.038 | 0.019 | 0.022  | 0.047  | 0.018 |
| 遵义市  | 0.116 | 0.075 | 0.179 | 0.132 | 0.070  | 0.042  | 0.497 |
| 六盘水市 | 0.071 | 0.051 | 0.193 | 0.104 | 0.136  | 0.055  | 0.104 |
| 毕节市  | 0.110 | 0.175 | 0.054 | 0.071 | 0.168  | 0.306  | 0.649 |

## 5 结论与建议

利用 MODIS 数据,以 610 个煤矿区为样本分析 2000—2014 年贵州省煤矿区植被指数变化的基本规律和特征,并对比分析煤炭年产量和自然环境因素对植被变化的影响作用,得出以下结论:(1) 煤矿区 NDVI 均值略低于全省 NDVI 均值,植被整体生长状况较好,与全省植被指数的上升趋势基本一致。植被的恢复和治理效果在中、小型煤矿区表现比较明显,大型煤矿区 NDVI 值在 2012 和 2014 年明显下降,应加强大型煤矿区的植被恢复治理工作。(2) 在 2000—2014 年全省 NDVI 值处于总体上升趋势的情况下,依然有约 13% 的煤矿区植被处于退化趋势。由煤矿区人为因素(煤炭年产量)与自然环境因素解释力的对比分析发现,自然环境因素是影响植被变化的主要因素,但不可忽视由煤炭开采活动引起的岩体崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害对植被的破坏。

基于以上结论,提出 3 点建议:(1) 贵州省气候适宜,降水充沛,应充分利用该地区良好的自然环境条件和植被的自我恢复能力,以较少的投资成本获得更好的环境效益;(2) 在煤炭开采的同时要加强对植被的保护,另外对岩体和边坡稳定的地质灾害点要及时开展治理工作,并对损毁的植被进行恢复治理;(3) 不同地区影响矿区植被变化的因子存在差异,针对不同的情况应制定差异化植被恢复方案,以便取得更好的效果。

## 参考文献:

- [1] 张宏斌,唐华俊,杨桂霞,等.2000—2008 年内蒙古草原 MODIS NDVI 时空特征变化[J].农业工程学报,2009,25(9):168-175.
- [2] 吴立新,马保东,刘善军.基于 SPOT 卫星 NDVI 数据的神东矿区植被覆盖动态变化分析[J].煤炭学报,2009,34(9):1217-1222.
- [3] 王广军,胡振琪,杜海清,等.采矿扰动下草地荒漠化的遥感分析:以霍林河露天煤矿区为例[J].遥感学报,2006,10(6):917-925.
- [4] 马超,张晓克,郭增长,等.半干旱山区采矿扰动植被指数时空变化规律[J].环境科学研究,2013,26(7):750-758.
- [5] 郑有飞,刘宏举,吴荣军,等.贵州省 NDVI 变化及其与主要气候因子的相关性[J].生态与农村环境学报,2009,25(1):12-17.
- [6] 黄雪峰,龚碧凯,黄海峰.基于 Landsat 的四川盆地 NDVI 变化研究:以眉山市东坡区和仁寿县为例[J].安徽农业科学,2009,37(7):3126-3128.
- [7] 高江波,吴绍洪,蔡运龙.区域植被覆盖的多尺度空间变异性:以贵州喀斯特高原为例[J].地理研究,2013,32(12):2179-2188.
- [8] 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.
- [9] CAO Feng, GE Yong, WANG Jin-feng. Optimal Discretization for Geographical Detectors: Based Risk Assessment[J]. GIScience & Remote Sensing, 2013, 50(1): 78-92.

作者简介:李俊刚(1990—),男,河南安阳人,硕士生,从事空间分析与矿区土地退化方面的研究。E-mail:13641532579@163.com

(责任编辑:许素)