



移动阅读

张慈, 赵银兵, 欧阳渊, 等, 2023. 青藏高原东缘地质环境对植被覆盖度的影响研究: 以冕宁县为例[J]. 沉积与特提斯地质, 43(3): 604–614. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03010](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03010)

ZHANG C, ZHAO Y B, OU Y Y, et al., 2023. Influence of Geological Environment on Vegetation Coverage in the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau: A case study of Mianning[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(3): 604–614. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03010](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03010)

青藏高原东缘地质环境对植被覆盖度的影响研究： 以冕宁县为例

张慈¹, 赵银兵^{1,2,4*}, 欧阳渊^{2,3}, 倪忠云², 刘洪^{2,3}, 李樋^{2,3}

(1. 成都理工大学旅游与城乡规划学院, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 3. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610218; 4. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 研究地质环境对植被覆盖度的影响, 有利于认识地质本底对生态环境的影响, 促进生态保护与修复。本文选择2003—2018年的MODIS归一化植被指数(NDVI)与增强型植被指数(EVI)的多年平均值与年际变化率作为植被覆盖度的静态和动态刻画指标, 应用Pearson相关性统计揭示地质因素、地形因素、气象因素和人类活动因素对植被指数的静态相关影响, 使用地理加权回归模型(GWR)分析影响因子与植被覆盖度在空间尺度的回归关系。研究结果表明: 高程、年均气温和年蒸散发在Pearson分析中对NDVI/EVI平均值有较强相关性, 而起伏度、年均气温、年蒸散发和地质复杂度等因子对NDVI/EVI年际变化率有较好的解释作用; GWR分析显示, 靠近断层的位置有利于植被发育和改善; 当地质复杂度处于中等水平时, 更易形成中高植被覆盖, 同时利于植被覆盖度提高, 当地质复杂度过高时植被覆盖度更易出现中低值; 海拔较低、地势平坦和阴坡等地形条件利于植被发育和植被覆盖度升高。

关键词: 地质环境; 植被覆盖度; 地理加权回归模型; 时空效应; 青藏高原东缘

中图分类号: Q948

文献标识码: A

Influence of Geological Environment on Vegetation Coverage in the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau: A case study of Mianning

ZHANG Ci¹, ZHAO Yinbing^{1,2,4*}, OUYANG Yuan^{2,3}, NI Zhongyun², LIU Hong^{2,3}, LI Tong^{2,3}

(1. College of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Chengdu Center, China Geological Survey(Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China; 4. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Studying the influence of the geological environment on vegetation coverage is conducive to understand the effect of geological background on ecological environment and promote ecological protection and restoration. The multi-year mean of MODIS-

收稿日期: 2020-11-12; 改回日期: 2021-03-09; 责任编辑: 黄春梅

作者简介: 张慈(1995—), 女, 硕士研究生, 从事城乡规划与人居环境研究, E-mail: 1083437500@qq.com

通讯作者: 赵银兵(1978—), 男, 副教授, 从事城市与区域生态、国土空间规划、遥感与GIS工程应用研究, E-mail: zhaoyinbing06@cdut.cn

资助项目: 中国地质调查项目(DD20190542); 城市与区域生态国家重点实验室开放基金(SKLURE2022-2-6); 青藏高原及其东缘人文地理研究中心开放课题(RWDL2021-ZD002、RWDL2022-ZD002)

Normalized Vegetation Index (NDVI) and Enhanced Vegetation Index (EVI) from 2003 to 2018 was selected as the static indicator of vegetation coverage, while the inter-annual variation rate was used as the dynamic index. Pearson correlation statistics were used to reveal the static correlation effects of geological factors, topographic factors, meteorological factors and human activities on vegetation index, as well as the regression relationship between influencing factors and vegetation coverage in spatial scale were obtained by geographic weighted regression (GWR). The results showed that elevation, annual average temperature and annual evapotranspiration were of great significance to the multi-year mean of NDVI / EVI, and the factors such as relief, annual average temperature, annual evapotranspiration and geological complexity performed quite well in explanation for the inter-annual variation rate of NDVI / EVI in Pearson analysis. GWR analysis indicated that the location closed to the fault is conducive to the development and improvement of vegetation. The geological complexity in the middle level was prone to form medium and high vegetation coverage, at the same time, it was in favor of increasing vegetation coverage. When the geological complexity was high, the vegetation coverage was probable to middle and low value. Low altitude, flat terrain and shady slope were favorable for vegetation development and increasing vegetation coverage.

Key words: Geological environment; Vegetation coverage; Geographically Weighted Regression; Time-space effect; Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau

0 引言

地质环境是具有空间范围、随时间变化的大气圈、生物圈、水圈和岩石圈相互作用的地表岩石圈部分(张宗祜, 2005)。地质环境作为生态环境形成和演变的物质基础(曹建华, 2004), 是对生态环境的本底产生一定控制作用的“载体”(李贵仁和曾玉清, 2005), 地质环境包含的地质构造、地形、地层等因素的性质、结构和规模影响着生态环境质量(杨群兴等, 2006)。将生态与地质二者结合的生态地质研究是环境地质工作的重要领域(张丽君等, 1999), 植被作为生态环境的重要组成部分, 对生态环境影响反应敏感(孟丹等, 2015), 它与气候、地质环境、土壤(成土母质)条件具有密切联系(Ferguson, 2003; 赵法锁等, 2006; 张腾蛟等, 2020), 地质构造对生态环境的整体结构与功能影响深远(黄建军, 2015)。地形地貌是地质构造作用的重要响应(张会平等, 2006), 高程、坡度等地形因子直接影响着植被的分布(崔步礼等, 2011), 山区的地形也与气候的空间分布紧密相关(李宗省等, 2010), 前人对植被覆盖度的研究多考虑植被变化特征及其对气候变化的响应(Mao et al., 2012; Zhang et al., 2013; 倪向南和郭伟, 2013), 大多未考虑地质环境影响, 而地质环境、地形与植被存在内在联系(刘洪等, 2020), 导致在地质环境较为复杂的区域对植被变化的成因机制研究存在缺失。冕宁县位于青藏高原东缘, 受攀西大裂谷等南北向断裂带控制(许向宁等, 2004), 地质环境本底复杂, 以县域尺度为研究单元, 可以在有效考虑人类活动影响的基础

上, 更加有效地研究地质环境及其衍生地形、人文环境和气候环境对植被的综合影响。结合前人对生态地质的调查(张景华等, 2020), 对冕宁县的研究结果可以为青藏高原东缘的生态保护与修复、国土空间规划提供一定的参考。

1 研究区概况

冕宁县位于青藏高原东缘的横断山脉北东段, 四川省凉山彝族自治州西北部, 地理范围: 东经 $101^{\circ}38' \sim 102^{\circ}25'$, 北纬 $28^{\circ}05' \sim 29^{\circ}02'$, 东西宽约 75 km, 南北长约 106 km, 面积约为 4420 km^2 。研究区隶属川滇构造带北部, 呈南北向分布, 主要包括西侧的小金河断裂、金河-程海断裂、东侧的安宁河断裂, 境内主要出露元古界、古生界、中生界和新生界地层, 三级地层分属于德格-中甸(香格里拉)地层分区、丽江地层分区和康定-西昌地层分区; 区内岩浆侵入活动从青白口纪—白垩纪均不同程度发生(图 1)。

县内以山地地貌为主, 地势北高南低, 平均海拔为 2737 m, 平均起伏度为 251 m; 属亚热带季风气候, 具有气候温和、雨热同季、立体差异明显等气候特点, 年降水为 834 mm, 年均气温为 8.11°C ; 蒸发量具有北部高山拦阻湿气形成雨屏的北多南少特征。冕宁植物区系属于横断山脉省, 为中亚热带湿润山地植被类型, 以高山松、云南松和多种冷杉林为代表, 分为锦屏、牦牛山冷杉林、小相岭冷杉林和安宁河宽谷盆地云南松林三个州。县内人类活动主要分布在安宁河的河谷区, 县域社会经济发展存在较大的东西分异。

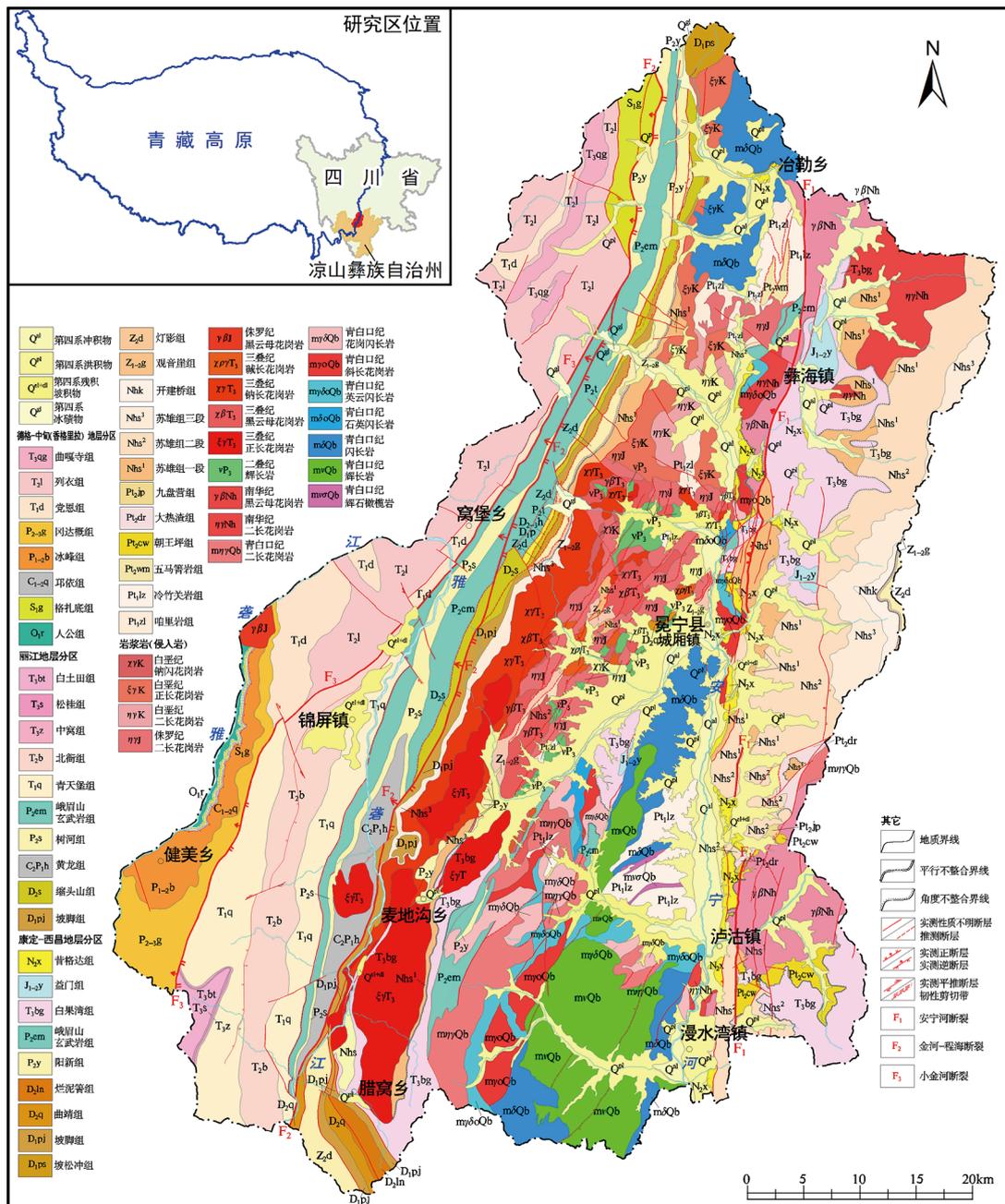


图1 冕宁县地质图

Fig. 1 Geological map of Mianning

2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

研究数据分为植被覆盖度数据、地质数据、气象数据和夜间灯光数据。选择归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 与增强型植被指数 (Enhanced Vegetation Index, EVI) 两类数据表征植被覆盖度特征, 数据来自 2003—2018 年的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) MYD13A3

月合成产品 (<https://lpdaac.usgs.gov/>), 空间分辨率为 1 km。地质数据包括地质构造和地形两类, 地质构造数据根据 1 : 25 万地质调查成果综合整理, 地形数据下载自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 气象数据中, 气温、降水数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所, 空间分辨率为 1 km, 蒸散发数据来源于全球陆地信息模型 (Global Land Data Assimilation System, GLDAS)。DMSP/OLS 夜间灯光数据由美国国家地球物理数据中心

(<https://www.ngdc.noaa.gov/>)提供下载。

应用 MRT 工具对 MODIS 数据进行批量处理, 得到 NDVI/EVI 月数据, 通过 SG 滤波降低数据中非物候的噪音影响, 采用最大值合成法获取研究区 NDVI/EVI 年数据。利用地质构造分析统计得到断层欧氏距离(图 2a)和地质复杂度, 地质复杂度计算借鉴赵鹏大等(1995)提出的方法, 统计 5 km×5 km 窗口内的地质体数量, 采用克里金方法插值生成地质复杂度图(图 2b)。地形是影响植被空间分异的重要因素(Matsushita et al., 2007), 分别从宏观和微观两个尺度选择高程(图 2c)、坡度(图 2d)、坡向(图 2e)、坡位(图 2f)以及起伏度(图 2g) 5 个因素表征地形因子影响(吴婧等, 2020)。年降水(图 2h)、年均气温(图 2i)与年蒸散发(图 2j)数

据将逐月数据合成年数据。人类活动以夜间灯光强度表征, 该指标能够有效反映出城市化的水平(肖建勇等, 2018), 该数据产品由逐年全球夜间灯光时间序列数据合成, 通过研究区范围裁剪以及最小二乘法计算得到夜间灯光强度(图 2k)。

在进行植被覆盖度影响分析时, 为了降低不同空间分辨率数据的影响, 将所有数据统一重采样为 500 m 的空间分辨率。

2.2 研究方法

2.2.1 Pearson 相关性分析

利用 Pearson 相关系数进行两组线性数据一同变化的趋势分析(张宇镭等, 2005), 用以描述植被覆盖度(y)与影响因子(x)的相关程度, 两变量间的 Pearson 相关系数计算公式如下:

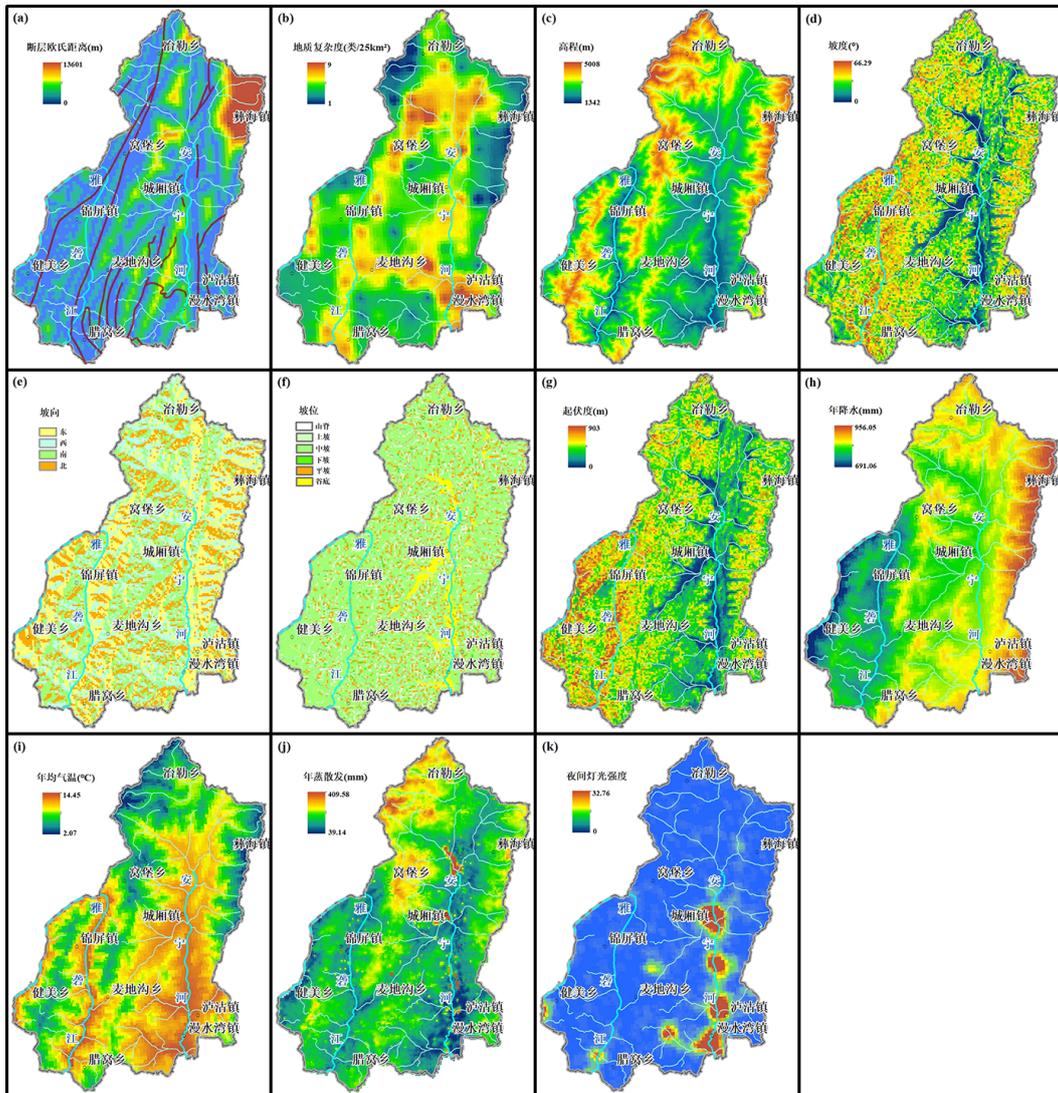


图 2 影响因子空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of impact factors

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中, n 为变量数, x_i 和 y_i 表示变量的观测值, \bar{x} 和 \bar{y} 为变量的平均值, 相关系数越接近于 1 或 -1, 相关度越强, 相关系数越接近于 0, 相关度越弱。Pearson 相关系数的有效性由双尾显著性检验来控制, 一般要求显著水平 (p 值) ≤ 0.05 , 表明两变量相关程度显著。

2.2.2 地理加权回归分析

地理加权回归模型 (Geographically weighted regression, GWR) 可表征地质、气象和人类活动在不同空间位置对植被覆盖度的影响。该模型是对传统回归分析的扩展, 通过计算局部回归参数, 解决模型的空间非平稳性, 以地理要素的位置与空间变化来进行模型构建, 从而提高模型拟合优度 (Lu et al., 2017)。Brunsdon 在总结前人研究的基础上, 提出将数据的地理位置作为参数加入运算的地理加权回归模型 (Brunsdon et al., 2002), 计算公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中, (u_i, v_i) 为第 i 个采样点的地理坐标, $\beta_0(u_i, v_i)$ 和 $\beta_k(u_i, v_i) x_{ik}$ 分别代表 i 点上的常数值和第 k 个的局部估计系数, 其中 β_k 越大则代表影响因子在该点位的作用越大, P 为自变量的个数, ε_i 为残差。

3 结果与分析

3.1 Pearson 相关性计算结果与分析

Pearson 相关性分析显示 (表 1), 11 个影响因子与植被覆盖度多年平均值的相关性统计显示高

程、年均气温和年蒸散发对 NDVI 与 EVI 的影响较显著; 植被覆盖度年际变化率相关性统计显示高程、起伏度以及年均气温对 NDVI_slope 影响较大, 起伏度、年蒸散发和地质复杂度对 EVI_slope 影响较大。

综合 Pearson 相关性系数, 发现 EVI 表征植被覆盖度的计算结果较 NDVI 更加显著。以 4 类植被指数的相关系数绝对值计算得出, NDVI_mean、NDVI_slope、EVI_mean 和 EVI_slope 平均相关系数分别为 0.196 8、0.135 4、0.224 3 和 0.152 9, 通过对比得出 EVI 较 NDVI 的 Pearson 相关性结果更显著, 且 EVI 在饱和度等方面较 NDVI 有所改进 (王正兴等, 2006), 因此选取 EVI 表征冕宁县植被覆盖度, 进一步研究植被的发育和变化机制。

3.2 GWR 计算结果与分析

3.2.1 植被覆盖度多年平均值与年际变化率的空间分布特征

冕宁县 2003—2018 年 EVI_mean 呈南北向纵列分布 (图 3a)。利用 MODIS-EVI 年数据, 计算可知, 16 年植被覆盖度平均值为 0.4, 高植被覆盖度主要集中分布在安宁河和雅砻江流域的河谷地区, 平均植被覆盖度为 0.53, 最高值为 0.58; 低植被覆盖度主要分布在区内西北部和东北部一带, 平均植被覆盖度为 0.21。

冕宁县植被覆盖度在 16 年间有小幅增加趋势。采用最小二乘法拟合 EVI 像元在 16 年间的变化趋势, 结果表明, EVI_slope 在空间分布上具有异质性 (图 3b), 正值表示植被改善, 占比 76.4%, 呈连片分

表 1 植被指数与影响因子的 Pearson 相关性统计结果

Table 1 Pearson correlation coefficients of vegetation indexes and impact factors

因子类别	因子名称	NDVI_mean	NDVI_slope	EVI_mean	EVI_slope
地质	断层欧氏距离	-0.060 9**	-0.101 2**	-0.160 3**	-0.205 0**
	地质复杂度	0.170 3**	0.165 1**	0.281 3**	0.232 6**
	高程	-0.389 8**	-0.226 2**	-0.700 1**	-0.320 7**
	起伏度	0.118 5**	-0.221 5**	-0.168 4**	-0.262 3**
	坡度	0.123 1**	-0.163 3**	-0.116 9**	-0.195 5**
	坡向	0.041 8**	-0.024 4**	-0.042 8**	-0.015 0*
	坡位	-0.097 2**	0.038 3**	0.069 0**	0.076 1**
气象	年降水	-0.302 1**	0.019 1*	-0.271 8**	-0.028 1**
	年均气温	0.408 9**	0.247 0**	0.050 5**	0.018 7**
	年蒸散发	-0.352 4**	-0.159 5**	-0.538 5**	-0.241 2**
人类活动	夜间灯光强度	-0.099 9**	0.123 6**	0.067 5**	0.086 3**

注: *在 0.05 级别 (双尾), **在 0.01 级别 (双尾), 相关性显著。

布,主要分布于冕宁县东南部的漫水湾镇和泸沽镇,平均变化率为0.0052/a;负值表示植被退化,占比23.6%,呈散状分布,主要分布在冶勒乡、彝海镇和麦地沟乡的部分区域,平均变化率为-0.003/a。

3.2.2 植被覆盖度 GWR 估计系数总体特征

植被覆盖度对影响因子的响应有正负两种形式(表2)。GWR模型的评价结果通过估计系数的大小表示,EVI_mean、EVI_slope的正值(正相关)分别代表植被更易发育、在2003—2018年更容易表现为改善,EVI_mean、EVI_slope的负值(负相关)代表植被不发育、在2003—2018年更容易表现出退化。

EVI_mean影响因子的GWR分析显示年降水和高程占主导作用,按照影响作用的大小,依次为年降水>高程>年均气温>地质复杂度>年蒸散发>坡度>夜间灯光强度>断层欧氏距离>坡向>坡度>起伏度,其中断层欧氏距离、地质复杂度和坡度3

个因子总体表现为正相关,其他8个因子表现为负相关。

EVI_slope的影响因子分析结果显示年降水和年均气温占据主体,全部因子作用大小依次为:年降水>年均气温>高程>起伏度>断层欧氏距离>年蒸散发>地质复杂度>坡向>夜间灯光强度>坡位>坡度,其中地质复杂度、坡度、年降水、年均气温和夜间灯光强度总体表现为正相关,其他6个因子总体表现为负相关。

3.2.3 植被覆盖度多年平均值及年际变化率的影响因素分析

(1)地质构造影响分析

地质构造影响地貌宏观格局,区域性断层分布的地区常易形成负地形。冕宁县以断块差异升降活动为主要特征,地质构造对EVI_mean的影响在空间上存在分异,断层欧氏距离的GWR估计系数区间为-0.1~0.09(图4a),就正相关来看,地质构造

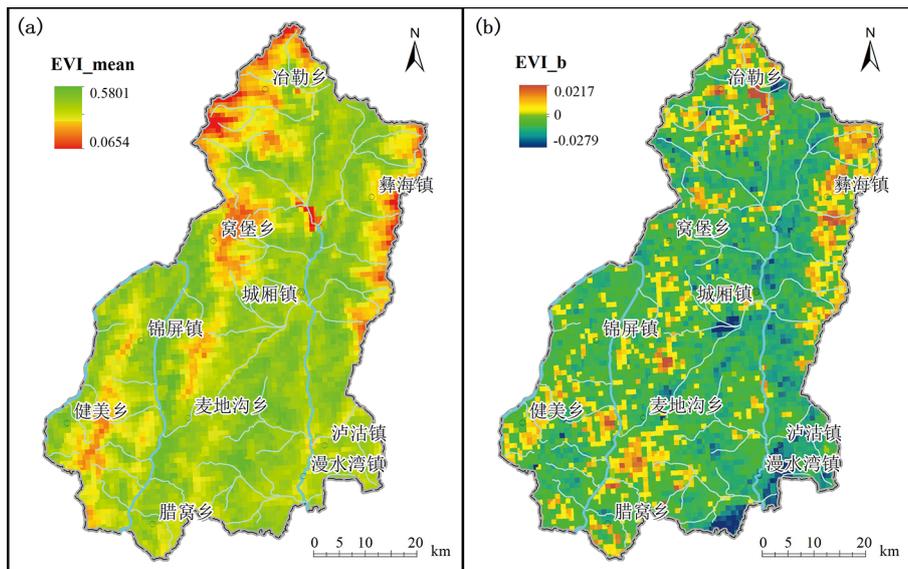


图3 EVI 多年平均值 (a) 与 EVI 年际变化率 (b) 空间分布图
Fig. 3 Spatial distribution of EVI_mean (a) and EVI_slope (b)

表2 EVI 多年平均值与 EVI 年际变化率的 GWR 估计系数均值
Table 2 Estimated coefficients mean of EVI_mean and EVI_slope

因子名称	EVI_mean	EVI_slope	因子名称	EVI_mean	EVI_slope
断层欧氏距离	0.0017	-0.00017	起伏度	-0.0004	-0.00020
地质复杂度	0.0054	0.00005	年降水	-0.0497	0.00286
高程	-0.0295	-0.00043	年均气温	-0.0154	0.00123
坡度	0.0009	0.00000	年蒸散发	-0.0047	-0.00015
坡向	-0.0017	-0.00003	夜间灯光强度	-0.0037	0.00003
坡位	-0.0038	-0.00003			

对 EVI_mean 的影响在距断裂 8 km 处有明显的拐点, 在 <3 km 范围内对植被发育作用较为稳定, 3~8 km 内地质构造促进植被发育的作用逐步增强, 在 8 km 处对植被发育作用较为显著。究其原因, 距断层距离较远, 地质作用趋于稳定, 利于植被发育, 距断层距离 >8 km 时, 区域地质构造的作用逐渐减弱。从负相关来看, 断层欧氏距离的作用拐点在 3 km 处, <3 km 范围内植被覆盖受到断裂带活动、岩体结构面发育的作用逐渐增加(Wang et al., 2017), 造成植被难以发育, 而 >3 km 的地区受地质构造抑制作用逐步降低。

断层欧氏距离与 EVI_slope 的 GWR 估计系数区间为 -0.013~0.008, 地质构造在正负作用中的变

化出现明显分异(图 5a)。在距断层 <2 km 范围内影响作用较显著, 植被容易发生改变, 2~4 km 影响作用呈逐步下降的趋势, >4 km 的区域促进作用保持在较低影响水平。负相关的拐点在 4~5 km 处, 其中 3~4 km 的区域受地质构造影响的抑制作用较强烈, 这些区域表现为陡峭的切割地形, 植被覆盖度常表现为降低, 而 >5 km 区域的地质构造抑制作用逐步降低。

(2)地质复杂度影响分析

地质复杂度与 EVI 平均值的 GWR 估计系数区间为 -0.14~0.28(图 4b), 地质复杂度在 1~6 类时与 EVI_mean 空间相关性表现出规律性。在正相关中, 地质复杂度为 2 类/25 km² 时对植被发育的

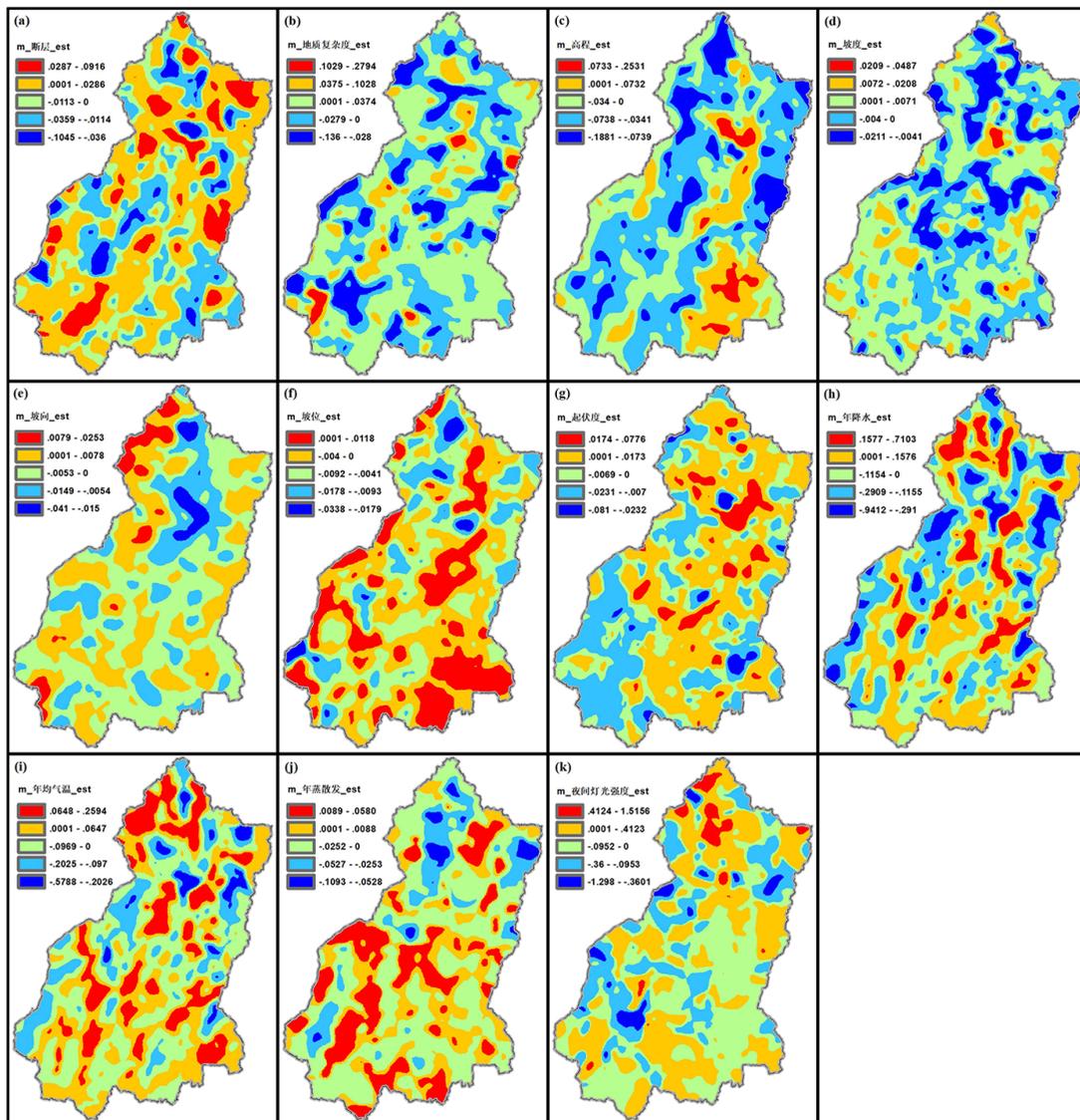


图 4 影响因子的 GWR 估计系数 (EVI 多年平均值)

Fig. 4 GWR estimated coefficients of impact factors (EVI_mean)

影响较强;在 1~2 类/25 km² 时,影响增强;在 2~6 类/25 km² 时,影响又逐步减弱。在负相关中,作用强度的拐点出现在 5 类/25 km² 处,对植被发育的抑制作用较为显著;当地质复杂度为 1~5 类/25 km²,抑制作用逐步增强,5~7 类/25 km² 时抑制作用逐渐减弱。

地质复杂度对 EVI_slope 的影响在正负作用中呈现出有规律的增强或减弱,地质复杂度的 GWR 估计系数区间为-0.03~0.02(图 5b)。地质复杂度为 2 类/25 km² 时对促进植被覆盖度提高的作用较为显著,在 1~2 类/25 km²、2.5~4 类/25 km²、4.2~5 类/25 km² 三个范围内促进作用呈现逐步上升的趋势,5~7 类的区域促进作用显著下降。负相

关影响作用的拐点出现在地质复杂度为 5 类/25 km² 时,在 1~5 类/25 km² 时内,受地质复杂度的作用逐渐增强,但增加幅度较小;当地质复杂度为 5—7 类/25 km² 时,地质复杂度对植被覆盖度的影响作用逐渐降低。

(3)地形因子影响分析

在地质背景及相关因素作用下衍生的地形因素对植被环境有重要的作用。高程是影响植被覆盖度的重要因素之一,高程对植被生长的影响主要体现在温度、湿度、光照等方面,且高程与植被覆盖度的关系表现为较强的负相关(李恒凯等,2014)。从地形对 EVI_mean 的影响来看,高程在全区 80.32% 的面积中呈负相关(图 4c),高海拔地区植

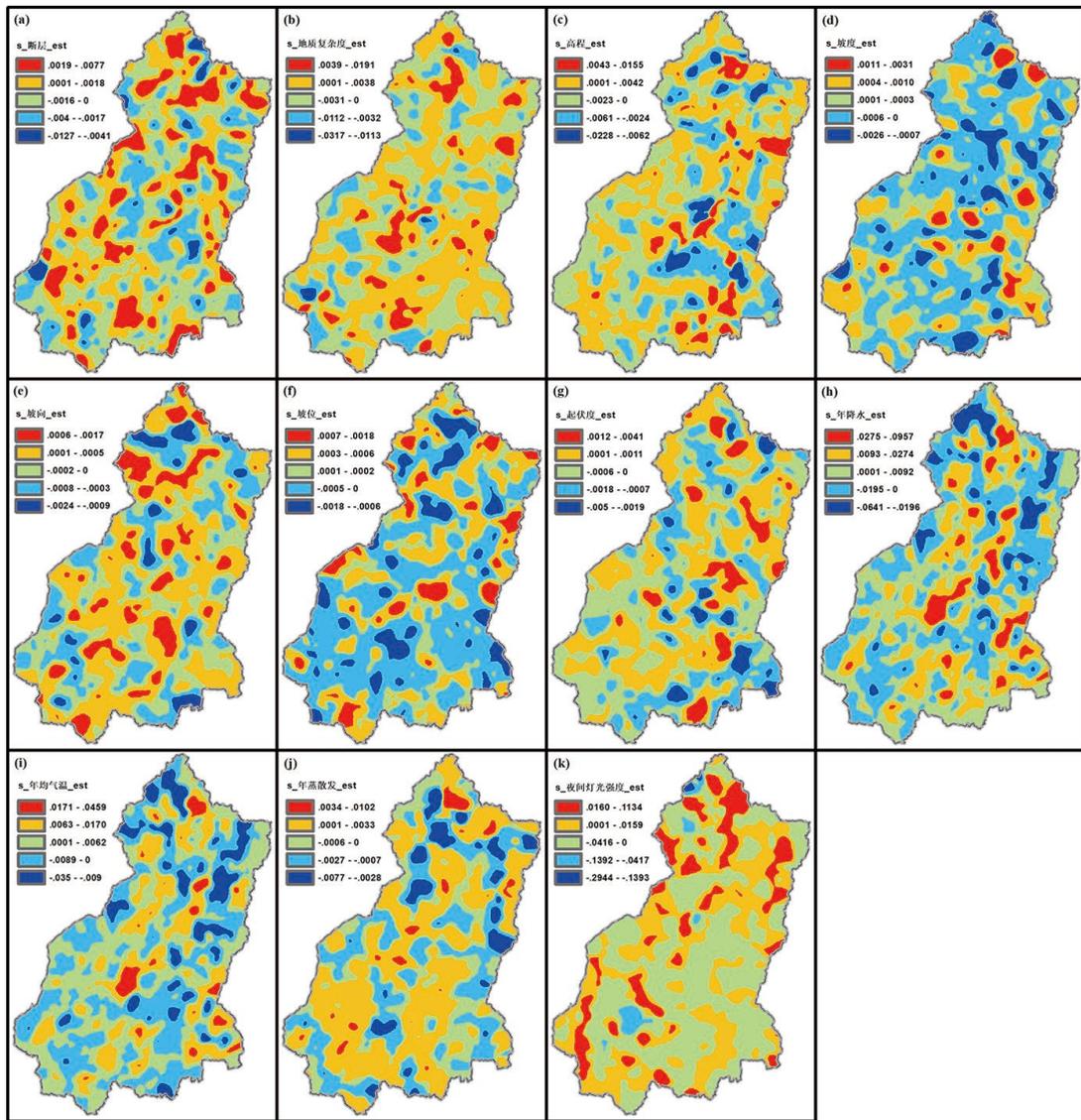


图 5 影响因子的 GWR 估计系数 (EVI 年际变化率)
Fig. 5 GWR estimated coefficients of impact factors (EVI_slope)

被发育的难度增加,这类区域分布在沙坝镇和大桥镇等地,平均高程 1 903 m。坡度的正相关的主体区域集中分布在曹古乡、锦屏镇的大部分区域(图 4d),平均坡度 23.78°,坡度较大区域的退耕及自然恢复/修复利于高植被覆盖区的集中分布(李石华等,2017)。坡向决定各个坡面太阳辐射与水热环境,从而影响植被覆盖度(位宏等,2018)。南坡的阳坡特征利于植被发育而形成中高植被覆盖区(图 4e)。坡位负相关主体区域主要分布在冶勒乡、拖乌乡等中坡区,由于水文条件较差制约植被发育(图 4f),但整体影响较小。地形起伏度以负相关为主(图 4g),随着起伏度的增大,地表稳定性减弱,土层变薄,不利于中高植被覆盖的形成(倪猛等,2007)。

从地形因子对 EVI_slope 的影响来看,高程主体呈现负相关(图 5c),林地和草地分布在中高海拔区(杨洁和王朝辉,2014),高程对其多产生抑制作用。坡度正相关主体区域主要分布于 <20°地区(图 5d),缓坡对植被覆盖度提高的促进作用较为显著。山地的方位对日照时数和太阳辐射强度有影响。坡向的负相关主体区域主要分布在冕宁县北部,该区域的北坡在日照时数等影响下植被生长缓慢且变化较小(图 5e)。坡位的负相关主体区域主要以平坡为主(图 5f),稳定的地表环境利于植被覆盖度提高。起伏度负相关主体区域集中分布在泸沽镇与漫水湾镇等地(图 5g),地形起伏变化较小的区域易受人类活动影响,在 2003—2018 年多表现为此类区域的植被覆盖度不变或者降低。

(4) 气象与人类活动因子影响分析

植被覆盖度对气候的响应主要体现在气温与降水两个方面(Nemani et al., 2003),降水量是影响植被生长的直接原因(张岩等,2002),山区具有因地势条件而决定的环境梯度特征,植被对热量条件敏感程度较高(陈超男等,2019)。从对 EVI_mean 的影响来看,年均气温的负相关主体区域与年降水的分布有相似性,年降水与年均气温的负相关主体区域集中分布在窝堡乡、彝海镇等山区(图 4h、i),此类区域年降水为 827.11 mm,年均气温 7.72℃,平均植被覆盖度为 0.41,整体覆盖率较低。蒸散发反映着植被水分与地表土壤水分的高低状况(温媛媛等,2020),年蒸散发的负相关的主体区域集中分布在冶勒乡、彝海镇以北的大部分地区(图 4j),该区域的年蒸散发较高,植被发育受到抑制。夜间灯

光强度主体呈现负相关关系,分布在以河谷乡镇为主的城厢镇至漫水湾镇一带,人类活动导致植被覆盖度处于全县的中低水平(图 4k)。

从对 EVI_slope 的影响来看,年均气温和年降水表现为正相关关系,主要分布于冶勒乡、麦地沟乡以北等地势较平缓的部分地区(图 5h,图 5i),高程较低地区热量条件较好、降水量充沛,利于植被改善。年蒸散发的负相关主体区域主要集中分布于冶勒乡中部(图 5j),年蒸散发较大的区域植被长势弱,易导致植被覆盖度降低。夜间灯光强度主体正相关区域主要分布在冕宁县的北部和西部部分河谷地区(图 5k),人类活动带来的土地利用方式改变都造成一定程度的植被减少(李学梅等,2013)。

4 结论

基于 GWR 模型对冕宁县植被覆盖度的变化特征与地质环境进行定量化的分析,结果显示, EVI 平均值与 EVI 年际变化率的分布具有时空分异性。在空间上, EVI 高值主要分布于河谷地区;在时间上, EVI 年际变化率显示植被覆盖度主要以小幅度增长为主。GWR 模型分析结果显示,主导因素是气象因子和地质因子,以年降水、高程和年均气温等指标为代表,地质构造和地质复杂度对 EVI_mean 和 EVI_slope 正负影响的空间分布格局具有规律性,靠近断层的植被生长受到抑制作用较为显著,植被覆盖度的稳定性较差,地质复杂度在 1-2 类时,植被覆盖度较易提高。

地质环境产生较长的时间效应和较大的空间效应,植被覆盖度及其变化对应的是较短的时间效应,空间尺度上受气候等其他因素的影响,与地质环境分异可能并未完全相同,且地质要素内部之间也存在差异。因此选择 16 年为研究时限,可在一定程度上回答地质与植被要素之间的作用,结合其他要素的敏感性,可为植被环境保护和治理提供依据。

研究中,在选取与植被覆盖度相关性的地质因子方面有待改进,其中地形因子的影响较为显著,且地形因子与地质环境之间存在复杂的空间耦合,可将其作为影响植被覆盖度变化的间接乃至直接因子;地理加权回归模型作为一种空间分析方法,有其在判定空间拟合优度的优势,可结合样地观测和野外植被梯度调查来检验地质环境的影响,以弥补现有统计方法在实地调研上的不足。

References

- Brunsdon C, Fotheringham S, Charlton M, 2002. Geographically Weighted Regression[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 47 (3) : 431 – 443 .
- Cao J H, Yuan D X, ZHANG C, et al., 2004. Karst ecosystem constrained by geological conditions in Southwest China[J]. *Earth and Environment*, 32 (1) : 1 – 8 (in Chinese with English abstract).
- Chen C N, Zhu L Q, Tian L, et al., 2019. Spatial-temporal changes in vegetation characteristics and climate in the Qinling-Daba Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39 (9) : 3257 – 3266 (in Chinese with English abstract).
- Cui B L, Li X Y, Jiang G H, et al., 2011. Study on land use/cover in mountain area based on the DEM—taking the Qinghai Lake Basin as an example[J]. *Journal of Natural Resources*, 26 (5) : 871 – 880 (in Chinese with English abstract).
- Ferguson D K, 2003. *Geology and Plant Life: The Effects of Landforms and Rock Types on Plants*[J]. 28 (4) : 808.
- Huang J J, 2015. Study on the coupling relation between eco-environment and geotectonic[J]. *Journal of Earth Environment*, 6 (4) : 231 – 237 (in Chinese with English abstract).
- Li G R, Zeng Y Q, 2005. A discussion on geological environment and ecological environment[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 16 (1) : 45 – 48 (in Chinese with English abstract).
- Li H K, Liu X S, Li B, et al., 2014. Vegetation coverage variations and correlation with geomorphologic factors in Red Soil Region: a case in South Jiangxi Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 34 (1) : 103 – 109 (in Chinese with English abstract).
- Li S H, Jin B X, Zhou J S, et al., 2017. Spatio-temporal variations of fractional vegetation cover and correlation with slope in Fuxian Lake Watershed[J]. *Areal Research and Development*, 36 (3) : 165 – 170 (in Chinese with English abstract).
- Li X M, Ren Z Y, Zhang C, 2013. Spatial-temporal variations of vegetation cover in Chongqing City (1999-2010) : impacts of climate factors and human activities[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 33 (11) : 1390 – 1394 (in Chinese with English abstract).
- Li Z X, He Y Q, Xin H J, et al., 2010. Spatio-temporal variations of temperature and precipitation in Mts. Hengduan Region during 1960-2008[J]. *Acta Geographica Sinica*, 65 (5) : 563 – 579 (in Chinese with English abstract).
- Liu H, Huang H X, Ouyang Y, et al., 2020. Soil's geologic investigation in Daliangshan, Xichang, Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (1) : 91 – 105 (in Chinese with English abstract).
- Lu B, Brunsdon C, Charlton M, et al., 2017. Geographically weighted regression with parameter-specific distance metrics[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 31 (5) : 982 – 998 .
- Mao D, Wang Z, Luo L, et al., 2012. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18: 528 – 536 .
- Matsushita B, Yang W, Chen J, et al., 2007. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to topographic effects: A case study in high-density cypress forest[J]. *Sensors*, 7 (11) : 2636 – 2651 .
- Meng D, Li X J, Gong H L, et al., 2015. Analysis of spatial-temporal change of NDVI and its climatic driving factors in Beijing-Tianjin-Hebei Metropolis Circle from 2001 to 2013[J]. *Journal of Geo-information Science*, 17 (8) : 1001 – 1007 (in Chinese with English abstract).
- Nemani R R, Keeling C D, Hirofumi H, et al., 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. *Science*, 300 (5625) : 1560 – 1563 .
- Ni M, Chen B, Yue J H, et al., 2007. Estimating evaporation in Luo River Basin using remote sensing and analyzing correlation between evaporation and various parameters[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 23 (6) : 34 – 37 (in Chinese with English abstract).
- Ni X N, Guo W, 2013. Spatial variations of vegetation change in Qinghai Lake Basin during 2001-2010[J]. *Journal of Earth Environment*, 4 (4) : 1363 – 1370 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Bo Z, Jia L, 2017. Mechanism of the catastrophic June 2017 landslide at Xinmo Village, Songping River, Sichuan Province, China[J]. *Landslides*, 15 (4) : 1 – 13 .
- Wang Z X, Liu C, Chen W B, et al., 2006. Mining weights of land evaluation factors based on cloud model and correlation analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 31 (5) : 407 – 410 (in Chinese with English abstract).
- Wei H, Xu L P, Li X L, et al., 2018. Variation characteristics of vegetation coverage based on terrain factors in the Manas River Basin[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 39 (12) : 814 – 824 (in Chinese with English abstract).
- Wen Y Y, Zhao J, Wang Y Q, et al., 2020. Spatiotemporal variation characteristics of surface evapotranspiration in Shanxi Province based on MOD16[J]. *Progress in Geography*, 39 (2) : 255 – 264 (in Chinese with English abstract).
- Wu J, Liang Q, Tong X H, et al., 2020. Study on the influence of topographic factors on the distribution and yield of rice in Guangxi[J]. *Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition)*, 36 (6) : 85 – 92 (in Chinese with English abstract).
- Xiao J Y, Wang S J, Bai X Y, et al., 2018. Determinants and spatial-temporal evolution of vegetation coverage in the karst critical zone of South China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38 (24) : 8799 – 8812 (in Chinese with English abstract).
- Xu X N, Wang W J, Huang R Q, 2004. Evaluation of eco-environmental geological quality in Anning River area based on GIS technology[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31 (3) : 25 – 30 (in Chinese with English abstract).
- Yang J, Wang Z H, 2014. Analysis of spatial distribution characteristics of vegetation cover types on elevation: 2014 Academic Annual Meeting of Jiangsu Society for Geodesy Photogrammetry and Cartography[C], Nanjing, Jiangsu, China.
- Yang Q X, Zeng T R, Wu H Y, 2006. Analysis the impacts of geological factors on the ecological environment[J]. *Guangdong*

- Geology, 19 (2) : 35 – 40 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H P, Yang N, Zhang Y Q, et al., 2006. Geomorphology of the Min Jiang drainage system (Sichuan, China) and its structural implications[J]. Quaternary Sciences, 26 (1) : 126 – 135 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J H, Ouyang Y, Liu H, et al., 2020. Ecological geological characteristics and vulnerability assessment of Xichang City[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1 – 153.
- Zhang L J, Jia Y M, Liu M H, 1999. Main trends in environmental geology research and work abroad[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, (6) : 1 – 5 (in Chinese with English abstract).
- Zhang T J, Liu H, Ouyang Y, et al., 2020. A preliminary discussion on the physical and chemical characteristics and main controlling factors of soil and parent material in the middle and high mountain area —Take Xichang as an example[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 40 (1) : 106 – 114 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Zhang Q C, Liu B Y, 2002. Study on vegetative coverage and height variation in Northern Loess Plateau[J]. Advance in Earth Sciences, 17 (2) : 268 – 272 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y L, Dang Y, He P A, 2005. Quantitative analysis of the relationship of biology species using Pearson correlation coefficient[J]. Computer Engineering and Applications, 41 (33) : 83 – 86 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Gao J, Liu L, et al., 2013. NDVI-based vegetation changes and their responses to climate change from 1982 to 2011: A case study in the Koshi River Basin in the middle Himalayas[J]. Global & Planetary Change, 108: 139 – 148.
- Zhang Z H, 2005. Environmental geology and geological hazard [J]. Quaternary Sciences, 25 (1) : 1 – 5 (in Chinese with English abstract).
- Zhao F S, Song F, Wang Y T, et al., 2006. Geoenvironmental Quality Assessment of Lueyang County based on GIS[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 28 (1) : 88 – 91 (in Chinese with English abstract).
- Zhao P D, Wang J G, Rao M H, et al., 1995. Geologic anomaly of China[J]. Earth Science, 20 (2) : 117 – 127 (in Chinese with English abstract).
- 曹建华, 袁道先, 章程, 等, 2004. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. 地球与环境, 32 (1) : 1 – 8.
- 陈超男, 朱连奇, 田莉, 等, 2019. 秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J]. 生态学报, 39 (9) : 3257 – 3266.
- 崔步礼, 李小雁, 姜广辉, 等, 2011. 基于 DEM 的山地丘陵区土地利用/覆被研究——以青海湖流域为例[J]. 自然资源学报, 26 (5) : 871 – 880.
- 黄建军, 2015. 生态环境与地质构造的耦合关系研究[J]. 地球环境学报, 6 (4) : 231 – 237.
- 李贵仁, 曾玉清, 2005. 地质环境与生态环境杂论[J]. 地质灾害与环境, 16 (1) : 45 – 48.
- 李恒凯, 刘小生, 李博, 等, 2014. 红壤区植被覆盖变化及与地貌因子关系——以赣南地区为例[J]. 地理科学, 34 (1) : 103 – 109.
- 李石华, 金宝轩, 周峻松, 等, 2017. 抚仙湖流域植被覆盖度时空分异及其与坡度的关系[J]. 地域研究与开发, 36 (3) : 165 – 170.
- 李学梅, 任志远, 张翀, 2013. 气候因子和人类活动对重庆市植被覆盖变化的影响分析[J]. 地理科学, 33 (11) : 1390 – 1394.
- 李宗省, 何元庆, 辛惠娟, 等, 2010. 我国横断山区 1960-2008 年气温和降水时空变化特征[J]. 地理学报, 65 (5) : 563 – 579.
- 刘洪, 黄瀚霄, 欧阳渊, 等, 2020. 基于地质建造的土壤地质调查及应用前景分析——以大凉山地区西昌市为例[J]. 沉积与特提斯地质, 40 (1) : 91 – 105.
- 孟丹, 李小娟, 宫辉力, 等, 2015. 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, 17 (8) : 1001 – 1007.
- 倪猛, 陈波, 岳建华, 等, 2007. 洛河流域蒸散发遥感反演及其与各参数的相关性分析[J]. 地理与地理信息科学, 23 (6) : 34 – 37.
- 倪向南, 郭伟, 2013. 2001-2010 年青海湖流域植被覆盖时空变化特征[J]. 地球环境学报, 4 (4) : 1363 – 1370.
- 王正兴, 刘闯, 陈文波, 等, 2006. MODIS 增强型植被指数 EVI 与 NDVI 初步比较[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 31 (5) : 407 – 410.
- 位宏, 徐丽萍, 李晓蕾, 等, 2018. 玛纳斯河流域植被覆盖度随地形因子的变化特征[J]. 中国农业气象, 39 (12) : 814 – 824.
- 温媛媛, 赵军, 王炎强, 等, 2020. 基于 MOD16 的山西省地表蒸散发时空变化特征分析[J]. 地理科学进展, 39 (2) : 255 – 264.
- 吴婧, 梁巧, 童新华, 2020. 地形因素对广西水稻分布和产量的影响研究[J]. 陕西理工大学学报 (自然科学版), 36 (6) : 85 – 92.
- 肖建勇, 王世杰, 白晓永, 等, 2018. 喀斯特关键带植被时空变化及其驱动因素[J]. 生态学报, 38 (24) : 8799 – 8812.
- 许向宁, 王文俊, 黄润秋, 2004. 基于 GIS 的安宁河流域生态环境地质质量评价[J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 31 (3) : 25 – 30.
- 杨洁, 王朝辉, 2014. 植被覆盖类型在高程上的空间分布特征分析: 江苏省测绘地理信息学会 2014 年学术年会[C], 中国江苏南京.
- 杨群兴, 曾土荣, 吴海燕, 2006. 浅析地质因素对生态环境的影响[J]. 广东地质, 19 (2) : 35 – 40.
- 张会平, 杨农, 张岳桥, 等, 2006. 岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义[J]. 第四纪研究, 26 (1) : 126 – 135.
- 张景华, 欧阳渊, 刘洪, 等, 2020. 西昌市生态地质特征与脆弱性评价[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1 – 153.
- 张丽君, 贾跃明, 刘明辉, 1999. 国外环境地质研究和工作的主要态势[J]. 水文地质工程地质, (6) : 1 – 5.
- 张腾蛟, 刘洪, 欧阳渊, 等, 2020. 中高山区土壤成土母质理化特征及主控因素初探——以西昌市为例[J]. 沉积与特提斯地质, 40 (1) : 106 – 114.
- 张岩, 张清春, 刘宝元, 2002. 降水变化对陕北黄土高原植被覆盖度和高度的影响[J]. 地球科学进展, 17 (2) : 268 – 272.
- 张宇镭, 党琰, 贺平安, 2005. 利用 Pearson 相关系数定量分析生物亲缘关系[J]. 计算机工程与应用, 41 (33) : 83 – 86.
- 张宗祜, 2005. 环境地质与地质灾害[J]. 第四纪研究, 25 (1) : 1 – 5.
- 赵法锁, 宋飞, 王艳婷, 等, 2006. 基于 GIS 的略阳县地质环境质量评价[J]. 地球科学与环境学报, 28 (1) : 88 – 91.
- 赵鹏大, 王京贵, 饶明辉, 等, 1995. 中国地质异常[J]. 地球科学, 20 (2) : 117 – 127.

附中文参考文献