

喀斯特高原山地贵阳市 2008—2018 年土壤侵蚀 时空特征与侵蚀热点变化分析

王志杰^{1,4}, 柳书俊², 苏媛³

(1.贵州大学生命科学学院,贵阳 550025; 2.贵州大学茶学院,贵阳 550025;
3.贵州大学林学院,贵阳 550025; 4.山地生态与农业生物工程协同创新中心,贵阳 550025)

摘要: 土壤侵蚀/石漠化是喀斯特地区的首要生态问题,是生态文明建设的最大障碍和威胁。研究以典型喀斯特高原山地贵阳市为对象,运用 RUSLE 模型,采用探索性空间数据分析(ESDA—GIS)的空间自相关和 Getis—Ord G_i^* 冷热点分析方法,评价了贵阳市 2008 年、2013 年和 2018 年土壤侵蚀状况,揭示了 10 年间贵阳市土壤侵蚀空间演变规律和侵蚀热点的分布特征,探讨了植被覆盖因子和降雨因子对土壤侵蚀变化的影响。结果表明:(1)2008—2018 年贵阳市土壤侵蚀状况得到有效控制,平均土壤侵蚀模数从 2008 年的 819.11 t/(km²·a)降至 2018 年的 70.14 t/(km²·a),现阶段土壤侵蚀强度以微度侵蚀为主,但 2013—2018 年土壤侵蚀有恶化趋势;(2)贵阳市土壤侵蚀的空间分布与演化具有明显的空间聚集效应,全局 Moran's I 指数介于 0.125~0.280,但聚集趋势呈“总体减弱、小幅扩散”的特征;侵蚀热点区主要集中分布在清镇市、花溪区、开阳县和修文县等县区,以及海拔 1 200~1 300 m 或坡度 8°~15°的区域。(3)植被覆盖因子对贵阳市近 10 年土壤侵蚀面积变化的贡献约 74%~92%,是土壤侵蚀变化的主导和控制因子;而降雨侵蚀力因子的贡献仅约为 7.5%~26.0%。研究结果可为新时期贵阳市土壤侵蚀/石漠化综合治理、国土空间优化和生态文明城市建设提供重要的科学依据。

关键词: RUSLE 模型; 土壤侵蚀热点; 探索性空间数据分析; 喀斯特高原山地; 贵阳市

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)05-0094-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.014

Spatial-Temporal Characteristics of Soil Erosion and Erosion Hotspots in Guiyang City of Karst Plateau Mountainous Region in 2008—2018

WANG Zhijie^{1,4}, LIU Shujun², SU Yuan³

(1.College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025;

2.College of Tea Science, Guizhou University, Guiyang 550025; 3.College of Forestry, Guizhou University,

Guiyang 550025; 4.Collaborative Innovation Center for Mountain Ecology & Agro-Bioengineering, Guiyang 550025)

Abstract: Soil erosion and its induced rocky desertification, as the most serious ecological problem in Karst Plateau, is the biggest obstacle and threat to the construction of ecological civilization. In this study, taking a typical karst plateau mountainous City, i.e. Guiyang City, as the object, using RUSLE model, adopting the global and local spatial autocorrelation, and Getis—Ord G_i^* methods based on Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA—GIS), the soil erosion of Guiyang City in 2008, 2013, and 2018 was assessed. The spatial-temporal distribution and changes were analyzed, and the impact of vegetation coverage factor and rainfall factor on the change of soil erosion was revealed. The results showed that: (1) The soil erosion of Guiyang City was effectively controlled from 2008 to 2018, and the average soil erosion modulus decreased from 819.11 t/(km²·a) in 2008 to 70.14 t/(km²·a) in 2018. The soil erosion intensity was mainly slight erosion at present, showing a deterioration trend in 2013—2018. (2) The spatial distribution and evolution of soil erosion in Guiyang City displayed an obvious spatial aggregation effect. The Global Moran's I index ranged from 0.125 to 0.280, but the aggregation trend was characterized by “overall weakening and small diffusion”. The erosion hotspots was mainly distributed in Qingzhen City, Huaxi District, Kaiyang County and Xiuwen County, as well as areas with an altitude of 1 200~1 300 m or a slope of 8°~15°. (3) The contribution of

收稿日期:2020-02-29

资助项目:国家自然科学基金项目(41701319);贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2018]2854);贵州省生物学一流学科建设项目(GNYL[2017]009)

第一作者:王志杰(1986—),男,博士,副教授,主要从事喀斯特山地景观与区域生态研究。E-mail:zjwang3@gzu.edu.cn

通信作者:王志杰(1986—),男,博士,副教授,主要从事喀斯特山地景观与区域生态研究。E-mail:zjwang3@gzu.edu.cn

vegetation cover factor to the changes of soil erosion area was about 74%~92%, which was the leading and controlling factor of soil erosion, while the contribution of rainfall erosivity factor was only about 7.5%~26.0%. This research could provide the important scientific basis for the comprehensive control of soil erosion and rock desertification, the optimization of land space, and the construction of ecological civilization city in the Karst region.

Keywords: RUSLE model; erosion hotspots; exploratory spatial data analysis (ESDA-GIS); karst plateau mountainous region; Guiyang City

土壤侵蚀及其导致的土地退化作为全球最严重的环境问题之一,严重影响着人类社会的可持续发展,已受到国际社会的广泛关注^[1]。中国是全球土壤侵蚀最严重的地区之一,土壤侵蚀面积达 $29.49 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占国土面积的 30.7%^[2]。以贵州为中心的中国南方喀斯特环境是自然环境中一种独特的地理景观,以地表—地下二元结构为基本特征,形成了脆弱的生态环境^[3]。长期以来,脆弱的喀斯特生态环境加上人类不合理地利用自然资源,使喀斯特地区土壤侵蚀严重、生态环境持续恶化^[4],由土壤侵蚀导致的石漠化问题正逐渐演化为我国第三大生态问题^[5]。近年来,喀斯特地区的石漠化问题逐步被重视,喀斯特地区的土壤侵蚀研究也得到学术界的广泛关注。国内外学者相继开展了喀斯特土壤侵蚀机理^[6]、格局特征^[7]及生态恢复^[8]研究,基本厘清了喀斯特地表土壤侵蚀发生、发展过程与影响因素和机制^[9]。此外,也有学者^[10-12]运用 RUSLE 模型、CSLE 模型、GWR 模型等开展了流域或区域尺度上喀斯特地区土壤侵蚀时空变化的评价,对该地区土壤侵蚀/石漠化治理提供了有益参考,但总体上流域或区域尺度喀斯特土壤侵蚀的相关研究还比较薄弱。对于土壤侵蚀空间演化与分布规律的研究大都是运用不同时期的土壤侵蚀分布图叠加统计相关的环境因子来表征,忽视了区域整体上不同土壤侵蚀类型在空间上的异质性和关联性。基于 GIS 技术的探索性空间数据分析 (Exploratory Spatial Data Analysis, ESDA-GIS) 作为一种可以对地理现象空间分布的关联性、聚集性和空间依赖性进行描述和可视化表达的空间分析方法,已被广泛应用于地理现象空间格局及演化特征的研究中^[13]。因此,运用 ESDA-GIS 方法分析区域内不同土壤侵蚀类型的空间异质性与关联性,研究土壤侵蚀的空间模式及相互作用机制,可以更加科学地揭示区域尺度土壤侵蚀的空间分布特征和演化规律。

贵阳市位于我国西南喀斯特岩溶区中心,生态环境脆弱,极易退化,灾变承受能力低,环境容量小^[14]。土壤侵蚀/石漠化问题已成为该地区的首要生态问题,不仅加剧生态环境恶化趋势,降低土地资源承载力,更是生态文明建设的最大障碍和威胁^[5]。2008 年国务院正式批准的《全国西南岩溶地区石漠化综合

治理规划大纲(2008—2015 年)》,将贵阳市土壤侵蚀/石漠化面积最大、危害最严重的息烽县、清镇市和开阳县列入全国 100 个石漠化综合治理试点县(市)。2011 年全市 10 个区(市、县)又全部被列为全国石漠化综合治理重点县,实施全覆盖的石漠化综合治理工程。在一系列土壤侵蚀/石漠化综合治理工程、生态修复与保护工程的实施后,喀斯特地区土壤侵蚀是否得到明显遏制?土壤侵蚀的时空格局发生什么变化?现阶段土壤侵蚀热点区以及今后土壤侵蚀治理的重点区域在哪里?这些科学问题鲜有研究报道。与此同时,随着贵阳市社会经济的发展,21 世纪以来,尤其是 2012 年以后贵阳市进入快速城市化发展阶段,城市建设用地面积激增,对脆弱的喀斯特生态环境带来巨大的压力^[15]。因此,在一系列生态修复/保护措施与快速城市化发展的双重影响背景下,如何有效防治土壤侵蚀、加强生态环境保护,并协调其与社会经济快速发展的关系,成为当前贵阳市全面治理土壤侵蚀/石漠化,建设生态文明示范城市亟待解决的科学和现实问题。

基于此,本研究以典型的喀斯特高原山地贵阳市为研究对象,以 2008 年全国石漠化综合治理试点为时间节点,运用 RUSLE 模型,在评价 2008 年、2013 年和 2018 年土壤侵蚀状况的基础上,采用 ESDA-GIS 空间分析方法,分析 2008—2018 年贵阳市土壤侵蚀的时空变化特征,剖析不同土壤侵蚀类型的空间相关性和演化规律,揭示土壤侵蚀热点的变化与分布,并解析降雨和植被对土壤侵蚀变化的影响,以期为新时期喀斯特地区土壤侵蚀/石漠化综合治理、国土空间优化和生态文明建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵阳市 ($106^{\circ}07' - 107^{\circ}17' \text{ E}$, $26^{\circ}11' - 27^{\circ}22' \text{ N}$) 地处黔中山原丘陵中部,长江与珠江分水岭地带,辖 6 区 1 市 3 县,4 个国家级开发区,国土面积 $8\,034 \text{ km}^2$ (图 1)。气候区划属亚热带季风湿润气候,年均气温 $15.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,年均降水量 $1\,197 \sim 1\,248 \text{ mm}$ 。地形地貌起伏大、地块破碎、切割纵深,喀斯特发育强烈,地表渗透性强,山地面积占 52.30%,平均海拔

1 100 m 左右,土壤类型以黄壤为主。森林覆盖面积达 43.2%。长期以来,由于自然条件和人类活动的双重作用,贵阳市水土流失严重,石漠化较为普遍^[16-17]。

1.2 数据源与数据处理

研究所使用的主要数据包括:2008 年、2013 年和 2018 年 Landsat TM/Landsat OLI 遥感影像、贵阳市数字高程模型(DEM)、贵阳市及周边 13 个气象站 2008 年、2013 年和 2018 年逐日降雨量数据,贵阳市 1:50 万土壤类型图及不同土壤类型的机械组成和有机质含量数据,以及贵阳市行政区划等。其中,Landsat TM/Landsat OLI 遥感影像数据来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>),影像时间为 7—10 月,每个景影像含云量均 $<5\%$,图像质量好,空间分辨率为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$;数字高程模型来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$;降雨数据来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>);不同土壤类型机械组成和有机质含量数据来源于中国土壤数据库(<http://vdb3.soil.csdb.cn/>)。

根据研究需要,首先基于 ENVI 5.3 遥感数字图像处理平台,对各景遥感影像运用研究区 1:1 万地形图和行政区划边界数据进行几何校正、图像裁剪、图像增强等处理;进而运用支持向量机监督分类方法,依据全国土地利用现状分类标准(GB/T 21010—2017)^[18],将 3 个时期土地利用类型分为耕地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地等 6 种类型,监督分类精度达 90%以上,Kappa 系数 >0.85 ,分类结果精度满足研究需要;同时运用像元二分模型,提取研究区 NDVI 指数,计算不同时期植被覆盖度。此外,由于各类数据来源、投影方式和比例尺等不同,在进行土壤侵蚀评价分析前,将所有空间数据统一重投影为 WGS_1984_UTM_Zone_48N 坐标系统,数据栅格大小重采样为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤侵蚀计算 基于 RUSLE 估算贵阳市 2008 年、2013 年和 2018 年土壤侵蚀模数及其空间分布,其表达式^[19]为:

$$A_i = R_i \cdot K \cdot LS \cdot C_i \cdot P_i \quad (1)$$

式中: A_i 为第 i 年土壤侵蚀量($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$); R_i 为第 i 年降雨侵蚀力因子($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$); K 为土壤可蚀性因子($\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$); LS 为坡长(无量纲)、坡度(无量纲)因子; C_i 为第 i 年覆盖与管理因子(无量纲); P_i 为第 i 年水土保持措施因子(无量纲); i 为研究时间,分别为 2008 年、2013 年和 2018 年。

R 因子采用章文波等^[20]提出的基于日降雨量数

据的半月逐日雨量模型,分别计算各气象站降雨侵蚀力,运用反距离加权插值(IDW)方法得到; K 因子采用 EPIC 模型^[21]中土壤可蚀性因子方法的计算; LS 因子采用 Zhang 等^[22]开发的 LS 因子计算工具提取; C 因子采用蔡崇法等^[23]提出 C 因子和植被覆盖度的回归方程的计算,植被覆盖度的计算利用 2008 年、2013 年和 2018 年 Landsat 遥感影像(影像时间为 7—10 月,均为同一季相),采用像元二分模型分别计算 NDVI 指数获取; P 因子参考相关研究结果,基于研究区不同时期土地利用类型图赋值所得^[24],林地和草地赋值为 1,耕地赋值为 0.5,其他土地利用类型赋值为 0。

1.3.2 探索性空间数据分析 探索性空间数据分析(Exploratory Spatial Data Analysis, ESDA)基于空间相关视角,结合 GIS 空间分析方法,以空间关联性检验为核心,通过全局空间自相关检验和局部空间自相关检验,可以描述地理现象在空间上的关联性和聚集性,揭示研究单元之间深层次的空间依赖性^[13]。本文从全局空间自相关、局部空间自相关和冷热点演化等方面揭示贵阳市土壤侵蚀时空分异演变的内在关系。

(1)全局空间自相关分析。全局空间自相关检验用于描述事物在整个区域的空间关联与差异程度,利用全局 Moran's I 指数测度不同土壤侵蚀强度之间的平均关联程度及其显著性^[13],计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (2)$$

式中: I 为全局 Moran's I 指数值; x_i 和 x_j 为第 i 和第 j 级土壤侵蚀强度面积; n 为土壤侵蚀强度等级数; \bar{x} 为土壤侵蚀强度面积的平均值; w_{ij} 为空间权重矩阵; S^2 为不同土壤侵蚀强度面积的总体方差。Moran's I 指数取值范围为 $[-1, 1]$,指数值越大代表区域空间相关性越大,Moran's I 指数 >0 表示土壤侵蚀强度在空间上呈正相关分析, <0 则相反,等于 0 表示土壤侵蚀呈完全随机状态,不存在空间相关性。Moran's I 指数的显著性检验通过标准化 Z 统计量判断,计算公式为:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{VAR}(I)}} \quad (3)$$

式中: Z 为标准差倍数; $E(I)$ 为 I 值的期望值; $\text{VAR}(I)$ 为 I 值的方差; I 为全局 Moran's I 指数值。在 0.05 的置信水平下,当 $|Z| > 1.96$ 时表明存在显著的空间自相关关系。

(2)局部空间自相关分析。局部空间自相关可以反映区域内不同土壤侵蚀强度之间的空间相关程度,

可以弥补全局空间自相关分析不能显示聚集或异常发生位置的不足^[13]。本文采用空间关联局域指标(LISA)揭示贵阳市不同土壤侵蚀强度之间局部空间相关性及其差异程度。计算公式为:

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (i \neq j) \quad (4)$$

式中: x_i 和 x_j 为第 i 和第 j 级土壤侵蚀强度面积; n 为土壤侵蚀强度等级数; \bar{x} 为土壤侵蚀强度面积的平均值; w_{ij} 为空间权重矩阵。 I_i 为LISA指数值,取值范围为 $[-1, 1]$,指标值的正负数判定与Moran's I 指数一致。

(3) 空间关联指数 Getis-Ord G_i^* 分析

Getis-Ord G_i^* 分析可以识别一定空间范围内高值空间聚集(热点区)和低值空间聚集(冷点区)的分布状况^[13]。计算公式为:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}(d) X_j}{\sum_{j=1}^n X_j} \quad (5)$$

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{Var}(G_i^*)}} \quad (6)$$

式中: $E(G_i^*)$ 为 $G_i^*(d)$ 的期望值; $\text{Var}(G_i^*)$ 为变异系数; $w_{ij}(d)$ 为空间权重矩阵; X_j 为第 j 级土壤侵蚀强度等级的面积; n 为土壤侵蚀强度等级数; $Z(G_i^*)$ 为 $G_i^*(d)$ 的标准化处理值,如 $Z(G_i^*)$ 为正值且通过某一置信水平的显著性检验,则说明位置 i 具有土壤侵蚀的高值,且邻近区域也为高值,属于土壤侵蚀高值空间聚集区(侵蚀热点区);反之,属于侵蚀冷点区。

1.3.3 降雨和植被因子对土壤侵蚀的影响分析 设置自然状态、C固定—R变化和R固定—C变化3种情景,分布计算不同情景下的土壤侵蚀模数,统计分析在C因子固定或R因子固定的情景下,平均土壤侵蚀强度和不同土壤侵蚀强度等级的面积变化,揭示降雨和植被因子对土壤侵蚀变化的贡献。计算公式为:

表1 贵阳市 2008—2018 年不同侵蚀强度面积比例

侵蚀强度	2008年		2013年		2018年		2008—2013年		2013—2018年		2008—2018年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积变化/km ²	年变化率/%	面积变化/km ²	年变化率/%	面积变化/km ²	年变化率/%
微度	1909.83	23.75	7605.57	94.56	6708.18	83.41	5695.74	59.65	-897.40	-2.36	4798.35	50.25
轻度	1536.92	19.11	329.24	4.09	753.23	9.37	-1207.68	-15.72	423.99	25.76	-783.69	-10.20
中度	3192.52	39.69	102.36	1.27	529.91	6.59	-3090.15	-19.36	427.54	83.53	-2662.61	-16.68
强烈	982.29	12.21	4.78	0.06	45.16	0.56	-977.50	-19.90	40.38	168.95	-937.13	-19.08
极强烈	372.02	4.63	0.73	0.01	6.08	0.08	-371.29	-19.96	5.35	146.02	-365.94	-19.67
剧烈	49.17	0.61	0.05	0	0.19	0	-49.12	-19.98	0.14	52.54	-48.98	-19.92
合计	8042.75	100.00	8042.75	100.00	8042.75	100.00						

进一步运用面积转移分析不同土壤侵蚀强度之间的时间变化特征,由表2可知,2008—2013年以微度侵蚀的大量转入和其他侵蚀强度等级的大量转出

自然状态情景: $Asp_i = R_i \times K \times LS \times C_i \times P_i$ (7)

C固定—R变化情景: $AR_j = R_j \times K \times LS \times C_i \times P_i$ (8)

R固定—C变化情景: $AC_j = R_i \times K \times LS \times C_j \times P_i$ (9)

式中: Asp_i 为自然状态下第 i 年土壤侵蚀模数; R_i 为第 i 年降雨侵蚀力因子; C_i 为第 i 年覆盖与管理因子; P_i 为第 i 年水土保持措施因子; AR_j 为R因子利用研究时段末期降雨侵蚀力因子,其他因子保持研究时段起始年因子不变,即C固定—R变化情景下的土壤侵蚀模数, AC_j 为C因子利用研究时段末期覆盖与管理因子,其他因子保持研究时段起始年因子不变,即R固定—C变化情景下的土壤侵蚀模数; K 为土壤可蚀性因子, LS 为地形因子;公式(8)和公式(9)中 i 为研究时段的起始年; j 为研究时段的结束年。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀时间变化特征

贵阳市 2008 年、2013 年和 2018 年的年均土壤侵蚀模数分别为 819.11, 14.66, 70.14 t/(km²·a),表现出“快速减小,小幅增长”的趋势,10 年间贵阳市土壤侵蚀状况整体得到明显控制,但 2013—2018 年期间土壤侵蚀又呈现恶化趋势。依据岩溶地区水土流失综合治理技术标准^[25],统计分析不同时期贵阳市土壤侵蚀强度面积比例,由表 1 可知,2008 年土壤侵蚀以中度和微度侵蚀为主,分别为 3 192.52, 1 909.83 km²,二者占总面积的 60%以上,其次为轻度侵蚀,占 19.11%;2013 年和 2018 年土壤侵蚀类型均以微度侵蚀为主,分别占 94.56%和 83.41%。并且除微度侵蚀外,其他各等级土壤侵蚀强度面积均呈现总体减小的先降后增趋势,2008—2013 年各侵蚀强度等级的年变化率(降幅)均在 15%~20%,而 2013—2018 年间,强烈和极强烈侵蚀增幅明显,分别增长 168.95%和 146.02%,轻度、中度和剧烈侵蚀的年变化率(增幅)也在 25%~84%。

为主要特征,其中,微度侵蚀共转入面积达 5 724.42 km²,转出面积仅 28.69 km²,且主要转出为轻度侵蚀(约 22.93 km²);其他土壤侵蚀强度等级均有 95%以

上转入微度侵蚀。而 2013—2018 年则表现出微度侵蚀的大量转出和其他侵蚀等级的不同程度转入特征。具体表现为:微度侵蚀转出面积 1 125.74 km², 并且主要转入轻度和中度侵蚀, 占微度侵蚀转出面积的 96.04%; 其他侵蚀强度等级的转出面积约 280.02 km², 且转出方向以向低等级侵蚀强度转化为主要特征, 约 235.77 km², 占各侵蚀强度等级转出面积的

80%以上; 然而, 除微度侵蚀外, 其他各土壤侵蚀强度面积均表现出净转入的特征, 共转入面积达 1 177.42 km², 并且以低等级向高等级侵蚀强度转化为主要趋势, 约 1 169.98 km², 占各侵蚀强度等级转入面积的 99%以上。总体上, 贵阳市土壤侵蚀特征在 2008—2013 年表现为全面好转, 而 2013—2018 年表现为“局部好转, 总体恶化”的趋势。

表 2 贵阳市 2008—2018 年不同土壤侵蚀强度面积转移矩阵

单位: km²

年份	侵蚀强度	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	总计
2008—2013	微度	1881.14	22.93	5.30	0.33	0.10	0.03	1909.83
	轻度	1391.24	141.92	3.76	0	0	0	1536.92
	中度	2974.03	154.28	63.04	1.07	0.09	0	3192.52
	强烈	950.08	8.62	21.51	1.84	0.24	0.01	982.29
	极强烈	362.36	1.28	7.00	1.14	0.22	0.01	372.02
	剧烈	46.71	0.22	1.76	0.40	0.07	0.01	49.17
	总计	7605.56	329.26	102.36	4.78	0.73	0.05	8042.75
2013—2018	微度	6479.83	628.57	452.58	39.27	5.15	0.17	7605.57
	轻度	172.42	118.00	38.39	0.42	0	0	329.24
	中度	52.43	6.65	38.21	4.59	0.47	0.01	102.36
	强烈	2.89	0.01	0.70	0.82	0.35	0.01	4.78
	极强烈	0.54	0	0.02	0.06	0.10	0.01	0.73
	剧烈	0.05	0	0	0	0	0	0.05
	总计	6708.16	753.23	529.90	45.16	6.08	0.19	8042.73

2.2 土壤侵蚀强度空间变化特征

2.2.1 全局自相关分析 贵阳市 2008—2018 年土壤侵蚀空间分布的全局自相关分析的 Moran's *I* 指数显示, 2008 年、2013 年和 2018 年全局 Moran's *I* 指数分别为 0.280, 0.101, 0.125, *Z* 值分别为 1 114.95, 237.564, 435.869, 且通过 5% 的显著性检验, 说明贵阳市土壤侵蚀变化具有一定的空间正相关性, 并存在明显的空间集聚性。10 年间 Moran's *I* 指数呈总体减小的先减后增特征, 2008—2013 年土壤侵蚀强度在空间聚集态势减弱, 空间自相关程度明显减小, 空间趋同性逐渐降低, 2013—2018 年情况与之相反, 贵阳市土壤侵蚀强度向聚集趋势发展。

2.2.2 局部自相关分析 利用 ArcGIS10.5 软件的 Anselin Local Moran's *I* 工具计算并绘制贵阳市 2008 年、2013 年和 2018 年土壤侵蚀强度局部空间自相关 LISA 聚集图, 探测不同土壤侵蚀强度聚集区的具体范围、位置和空间演化规律。由图 1 可知, 2008 年贵阳市土壤侵蚀强度的空间聚集状态表现出明显的“高一高”聚集特征, 面积约 136.26 km², 占研究区总面积的近 20%, 主要分布在清镇市西南部和东北部、修文县南部、息烽县中部、开阳县和花溪区南部等区域, 该时期研究区土壤侵蚀强度等级普遍较高, 且表现出明显的空间正相关关系; “低—高”“高一低”“低—低”聚集区散布在研究区境内, 主要集中在花溪区、修文县、息烽县和开阳县的部分区域。2013 年土壤

侵蚀强度的空间聚集状态以“低—低”聚集为主, 约占研究区总面积的 96%, 反映出研究区土壤侵蚀强度明显减弱, 全域土壤侵蚀得到全面遏制; “高一高”聚集区仅零星分布于清镇市、修文县、观山湖区、花溪区等部分县区。而 2018 年研究区土壤侵蚀强度的空间聚集则以无明显聚集状态为主(占研究区总面积的 91.28%), 并且“高一高”聚集区相较 2013 年有所扩大, 增幅达 467.59%, 但依然主要分布在清镇市、观山湖区、修文县和花溪区等 4 县区。总体上, 10 年间, 研究区土壤侵蚀强度的空间演化规律明显, “高一高”聚集的土壤侵蚀严重区面积显著减小, “低—低”聚集的土壤侵蚀强度弱的区域面积呈先激增后突减, 说明研究区土壤侵蚀总体上得到有效缓解, 但 2013 年之后又有所恶化, 进一步说明存在整体好转、局部恶化的现象。

2.2.3 侵蚀热点分布与变化分析 利用 ArcGIS 10.5 软件的空间关联指数 Getis-Ord G_i^* 分析 2008 年、2013 年和 2018 年贵阳市土壤侵蚀的冷热点空间分布及其演变, 从 90%, 95%, 99% 等 3 个置信水平判断土壤侵蚀强度的侵蚀冷热点特征, 重点分析侵蚀热点区分布与变化。由图 2 可知, 2008 年土壤侵蚀强度的热点区面积达 2 059.75 km², 占研究区总面积的 25.63%, 广泛分布于研究区境内, 尤以清镇市、花溪区、开阳县、乌当区、修文县等 5 县区最广。2013 年和 2018 年则主要以侵蚀冷点区为主, 分别占研究区总面积的 97.26% 和 90.05%, 侵蚀热点区明显减少,

分别仅为 100.82,305.21 km²,2013 年侵蚀热点零星分布于研究区内,2018 年侵蚀热点区较之 2013 年有

所扩大,且主要分布在清镇市、花溪区、开阳县和修文县等 4 个县区内,占热点区总面积 80%以上。

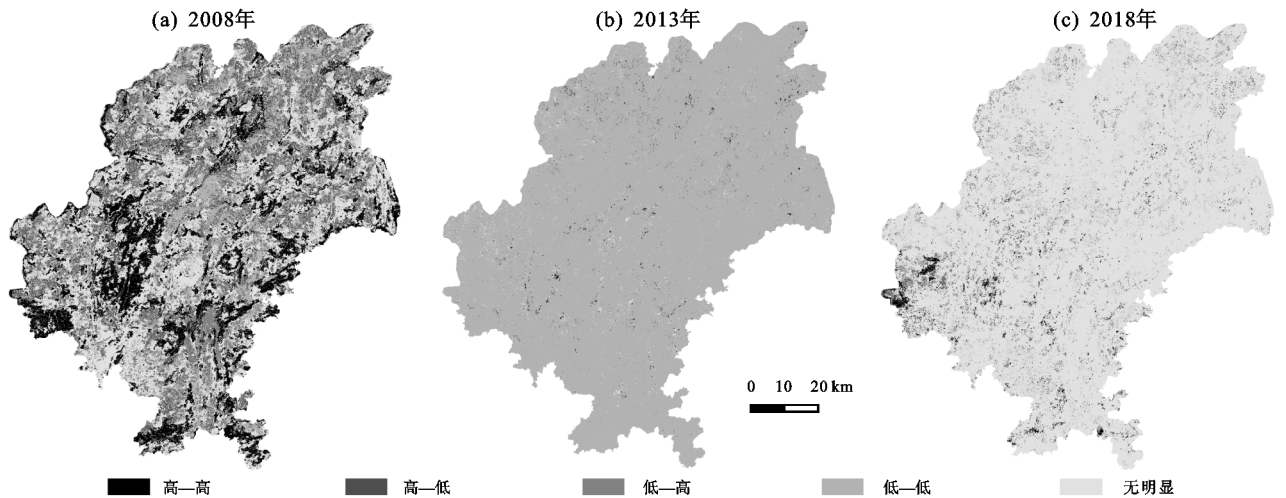


图 1 贵阳市 2008—2018 年不同土壤侵蚀强度局部空间自相关分析 LISA 聚集图

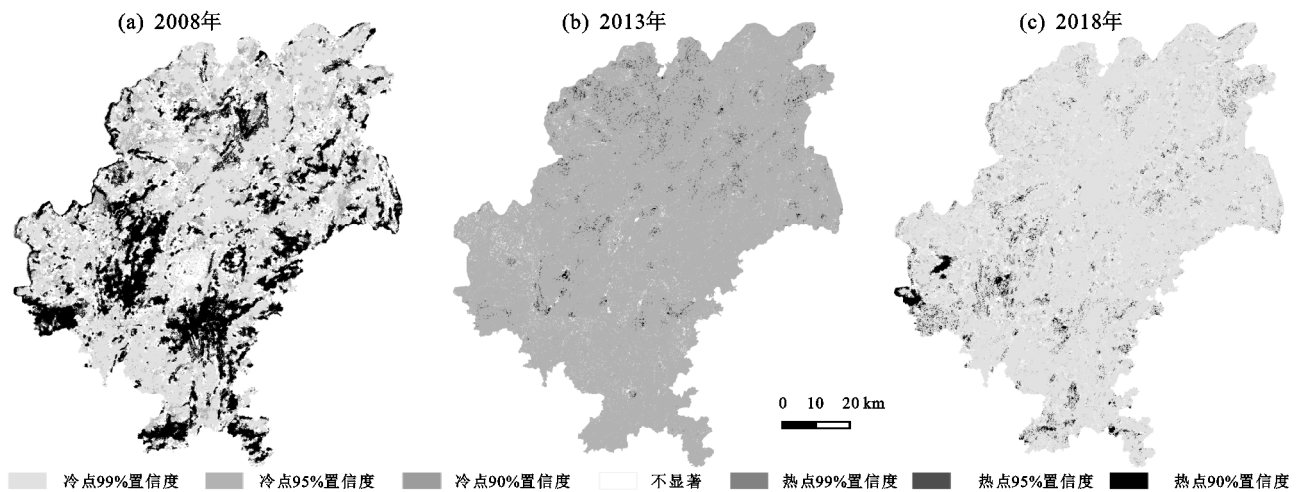


图 2 贵阳市 2008—2018 年不同土壤侵蚀强度热点和冷点空间分布

叠加分析 3 个时期侵蚀热点分布和研究区行政区划、坡度分级和海拔分级。由图 3 可知,在不同行政空间上,2008 年贵阳市土壤侵蚀热点区在 3 个置信水平上均主要集中在开阳县、清镇市、花溪区、修文县和乌当区,占全市侵蚀热点区总面积的 75%以上;2013 年侵蚀热点区有所缩减,主要分布在开阳县、清镇市、息烽县和修文县,占全市侵蚀热点区总面积的 87%以上,与 2008 年相比,花溪区侵蚀热点区面积快速减少,而息烽县土壤侵蚀有所恶化;2018 年侵蚀热点区进一步缩减,开阳县、清镇市和修文县等县区依然是侵蚀热点的集中分布区,占全市侵蚀热点区总面积的 65%以上,并且花溪区侵蚀热点区有所扩大,在 95%和 99%的置信水平上花溪区侵蚀热点面积分别占 13.79%和 15.61%,与 2008 年基本持平。息烽县侵蚀热点区有所减小,基本达到 2008 年的水平。研究区内其他县区的侵蚀热点区所占比例较小,且 10 年间变化不明显。

年侵蚀热点区的海拔梯度分布均呈现出单峰型特征,主要分布在 1 100~1 400 m,占各置信区间侵蚀热点区面积的 65%以上,尤以 1 200~1 300 m 海拔梯度内侵蚀热点分布最为广泛,约占 25%左右;2013 年侵蚀热点区的海拔梯度分布在 90%和 95%的置信水平上的趋势与 2008 年和 2018 年相似,呈单峰型,侵蚀热点区主要分布在 1 100~1 400 m,而在 99%的置信水平上则主要集中在 900~1 200 m,约占 57%,其中 1 000~1 100 m 梯度内侵蚀热点区面积最大,占 21.23%。

由图 5 可知,不同坡度梯度上,3 个时期土壤侵蚀热点区均主要分布在 8°~15°的坡度梯度上,约占各置信水平热点区面积的 35%~49%,其次为 15°~25°和 5°~8°坡度梯度,值得注意的是 2008 年和 2018 年侵蚀热点区在 15°~25°坡度区间内的分布仅次于 8°~15°,均占各置信水平热点区面积的 30%以上,而 2013 年的侵蚀热点区在该坡度梯度内的占比明显减少。此外,>25°和<8°坡度梯度内的侵蚀热点相对不明显。

由图 4 可知,不同海拔梯度上,2008 年和 2018

花溪区	12.2	13.42	15.86	15.30	2.50	0	0.88	0.84	7.52	13.79	15.61	14.6
白云区	5.05	2.72	1.59	1.98	0	0	0.58	0.42	2.26	2.46	1.27	1.53
观山湖区	4.49	4.25	6.10	5.76	0	5.38	1.75	2.32	2.26	2.46	3.90	3.55
开阳县	23.56	20.73	16.85	17.81	25.00	26.88	26.02	26.11	21.8	24.63	13.34	15.72
南明区	2.52	3.23	6.08	5.48	0	0	1.75	1.26	2.26	2.96	3.27	3.13
清镇市	21.04	16.99	20.24	19.91	20.00	22.58	10.23	13.47	30.08	24.14	45.19	40.82
乌当区	8.56	11.98	11.05	10.98	10.00	3.23	2.92	3.58	9.02	5.42	2.81	3.76
息烽县	8.70	8.33	6.11	6.57	12.50	23.66	38.01	33.05	8.27	5.42	4.72	5.15
修文县	12.90	16.99	12.09	12.74	30.00	17.20	16.67	17.89	13.53	15.76	8.44	9.94
云岩区	0.98	1.36	4.02	3.48	0	1.08	1.17	1.05	3.01	2.96	1.45	1.81
	90%置信度	95%置信度	99%置信度	90%~99%置信度	90%置信度	95%置信度	99%置信度	90%~99%置信度	90%置信度	95%置信度	99%置信度	90%~99%置信度

注:图中数据为热点区面积比例(%)。

图 3 贵阳市 2008—2018 年不同行政空间土壤侵蚀热点区面积分布比例

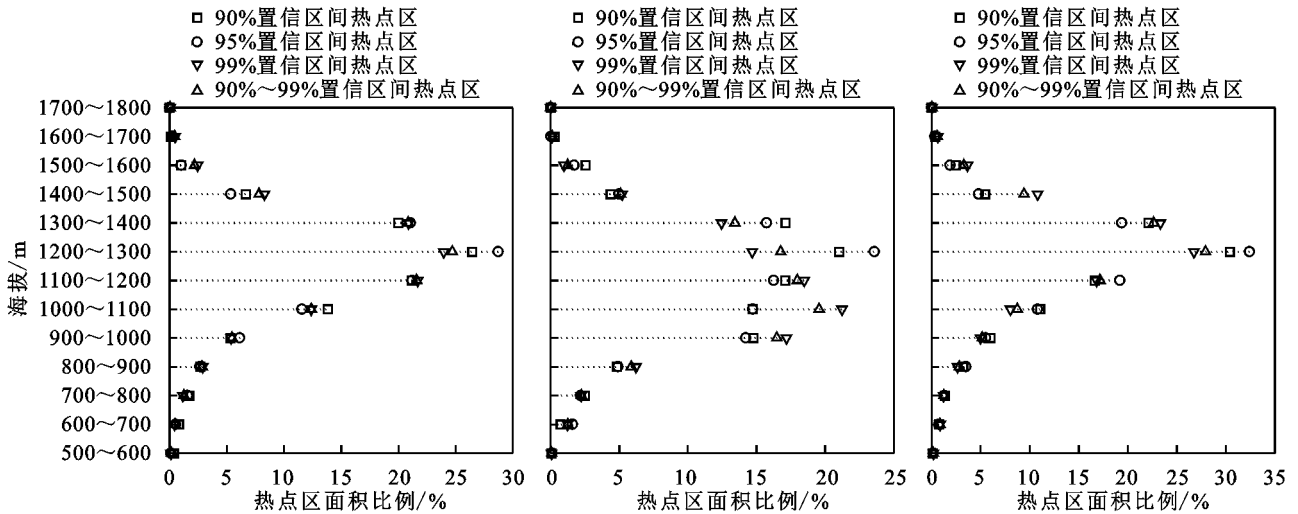


图 4 贵阳市 2008—2018 年不同海拔梯度土壤侵蚀热点区面积分布比例

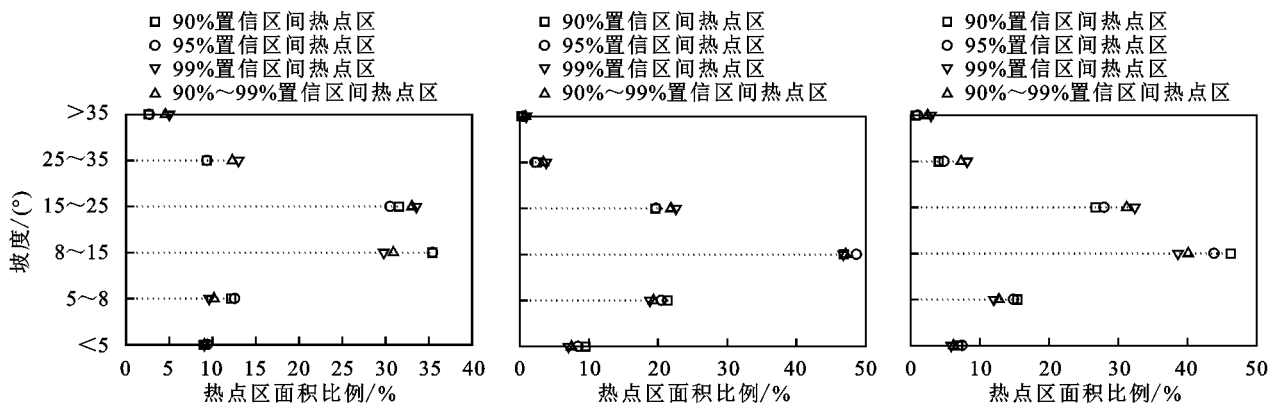


图 5 贵阳市 2008—2018 年不同坡度梯度土壤侵蚀热点区面积分布比例

2.3 降雨与植被对土壤侵蚀变化的影响

利用自然状态下和 C 固定—R 变化、R 固定—C 变化 2 种情景下,2008—2013 年、2013—2018 年和 2008—2018 年不同类型土壤侵蚀面积比例、变化速率,分析降雨因子和植被覆盖因子对土壤侵蚀变化的作用大小。由表 3 可知,3 个时期植被覆盖因子对贵阳市土壤侵蚀

面积比例及其变化速率的总体贡献分别为 92.33%、74.04%和 86.75%,并且 2008—2013 年和 2008—2018 年植被覆盖因子变化对不同土壤侵蚀强度的影响表现出相似的规律,即导致微度侵蚀面积比例分别增加 95.82%和 98.35%,均减小轻度及以上侵蚀强度面积比例约 71%~98%;2013—2018 年随着研究区土壤侵蚀恶化趋

势的影响,植被覆盖因子变化导致微度侵蚀面积比例减小 85.76%,其他侵蚀强度面积比例增加 52%~88%。3 个时期内降雨侵蚀力因子变化对土壤侵蚀

面积比例的贡献仅分别为 7.67%,25.96%,13.25%,并且不同时期降雨侵蚀力因子对不同土壤侵蚀强度等级面积比例增减的影响均在 30%以下。

表 3 贵阳市 2008—2013 年降水和植被对土壤侵蚀的影响

年份	侵蚀类型	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
2008—2013	微度	55.80	12.82	24.54	0.32	57.65	13.56	-1.85	-0.74	31.26	12.50	4.18	95.82
	轻度	11.60	-3.00	24.92	2.32	11.89	-2.89	-0.29	-0.12	-13.32	-5.33	-2.15	-97.85
	中度	20.48	-7.68	38.45	-0.50	21.48	-7.29	-1.00	-0.40	-17.97	-7.19	-5.28	-94.72
	强烈	6.14	-2.43	8.95	-1.31	6.30	-2.37	-0.16	-0.06	-2.81	-1.12	-5.43	-94.57
	极强烈	2.32	-0.92	2.81	-0.72	2.37	-0.90	-0.05	-0.02	-0.50	-0.20	-9.09	-90.91
	剧烈	0.31	-0.12	0.33	-0.11	0.31	-0.12	-0.01	0	-0.03	-0.01	-19.90	-80.10
2013—2018	微度	85.63	-0.89	90.96	1.25	83.78	-1.63	1.85	0.74	-5.34	-2.13	-14.24	-85.76
	轻度	6.73	1.05	4.13	0.02	3.64	-0.18	3.09	1.24	2.60	1.04	12.26	87.74
	中度	3.93	1.06	1.45	0.07	3.34	0.83	0.59	0.24	2.48	0.99	14.93	85.07
	强烈	0.31	0.10	0.08	0.01	1.33	0.51	-1.02	-0.41	0.23	0.09	27.12	72.88
	极强烈	0.04	0.01	0.01	0	1.27	0.50	-1.23	-0.49	0.03	0.01	39.24	60.76
	剧烈	0	0	0	0	3.28	1.31	-3.28	-1.31	0	0	47.99	52.01
2008—2018	微度	53.58	11.93	24.24	0.20	50.90	10.86	2.68	1.07	29.34	11.74	1.65	98.35
	轻度	14.24	-1.95	23.54	1.77	14.45	-1.86	-0.21	-0.09	-9.30	-3.72	14.30	-85.70
	中度	23.14	-6.62	39.03	-0.27	24.97	-5.89	-1.83	-0.73	-15.89	-6.36	-7.19	-92.81
	强烈	6.39	-2.33	9.79	-0.97	6.86	-2.14	-0.47	-0.19	-3.41	-1.36	-11.02	-88.98
	极强烈	2.35	-0.91	3.04	-0.63	2.50	-0.85	-0.15	-0.06	-0.69	-0.28	-17.14	-82.86
	剧烈	0.31	-0.12	0.35	-0.10	0.33	-0.11	-0.02	-0.01	-0.05	-0.02	-28.17	-71.83

注:A、C、E 分别为自然状态、C 固定-R 变化和 R 固定-C 变化情景下各研究时段不同土壤侵蚀强度等级的平均面积比例(%),即各研究时段初始年和结束年相应土壤侵蚀强度等级面积比例的平均值;B、D、F 分别为自然状态、C 固定-R 变化和 R 固定-C 变化情景下各研究时段不同土壤侵蚀强度等级的年均变化率(%/a),即各研究时段初始年和结束年相应的土壤侵蚀强度等级面积比例的年变化率。G 为降水作用下的平均面积比例(%), $G=A-E$;H 为降水作用下的变化速率(%/a), $H=B-F$;I 为植被覆盖因子作用下的平均面积比例(%), $I=A-C$;J 为植被覆盖因子作用下的变化速率(%/a), $J=B-D$;K 为降水作用对侵蚀强度的影响(%), $K=H/(|H|+|J|)\times 100\%$;L 为植被覆盖因子作用对侵蚀强度的影响(%), $L=J/(|H|+|J|)\times 100\%$ 。

3 讨论与结论

(1)2008—2018 年贵阳市土壤侵蚀得到有效控制,平均土壤侵蚀模数从 2008 年的 819.11 t/(km²·a)减小至 2018 年的 70.14 t/(km²·a),现阶段土壤侵蚀类型以微度侵蚀为主,这与操玥等^[26]的研究结果基本一致。贵阳市作为贵州省土壤侵蚀/石漠化较为严重的地区之一,自 2000 年以来相继开展了退耕还林还草、石漠化专项治理、天然林保护等系列生态修复工程,植被覆盖得到明显提升,土地利用格局发生重大变化,生态环境明显改善,土壤侵蚀状况持续好转^[15]。与 2005 年相比,2011 年贵阳市石漠化区域减少约 382 km²,生态修复和生态保护工程的加强与实施,有效地遏制了贵阳市土壤侵蚀状况。但值得注意的是,2013—2018 年贵阳市土壤侵蚀整体表现出恶化的趋势,这可能与该时段降雨侵蚀力的增加和贵阳市近年来的快速城市化进程有较大关系,本研究发现,虽然截止 2018 年研究区植被覆盖率达到 80%,较 2008 年的 67.5%有较大的提高,但贵阳市 2018 年平均降雨侵蚀力较 2013 年增大 17.38%,对各土壤侵

蚀强度等级面积比例的贡献较 2008—2013 年均增加 3~5 倍,一定程度上造成了 2013—2018 年贵阳市土壤侵蚀状况的小幅恶化;同时,有研究^[15]表明,2012 年以后,贵阳市城市建设用地面积激增,原有的脆弱喀斯特自然景观不断被蚕食破坏,城市化综合指数超过生态环境综合指数且差距逐渐增大,并且城市化快速发展给生态环境带来的促进作用有限,脆弱的喀斯特生态环境难以承受城市化快速发展带来的压力,由此导致贵阳市土壤侵蚀也呈现出恶化的趋势。因此,如何协调好生态环境保护与城市化发展的关系,在快速城市化发展的过程中,科学规划和合理利用脆弱的喀斯特生态环境资源,使来之不易的土壤侵蚀总体状况好转的趋势不反弹、不恶化,是今后贵阳市土壤侵蚀/石漠化治理亟待持续关注的方面。

(2)2008—2018 年贵阳市土壤侵蚀的空间分布与演化具有明显的空间聚集效应,全局 Moran's I 指数介于 0.125~0.280,但聚集趋势呈“总体减弱、小幅扩散”的特征;侵蚀热点区主要集中分布在清镇市、花溪区、开阳县和修文县等县区,以及海拔 1 200~1 300 m 或坡度 8°~15°的区域。“高一高”侵蚀热点

聚集区的行政空间变化一方面反映了贵阳市土壤侵蚀的本底特征,如 2008 年国家将贵阳市土壤侵蚀/石漠化危害最严重的息烽县、清镇市和开阳县列入全国 100 个石漠化综合治理试点县(市),经过 10 余年的生态修复/保护治理,研究区土壤侵蚀热点区面积显著减小,尤其是息烽县侵蚀热点区已不明显,但清镇市和开阳县依然是现阶段贵阳市土壤侵蚀热点的广布区,这与该区人口密度较大,不合理的农业耕作面积广,山高坡陡、土壤浅薄,土壤侵蚀治理的难度大息息相关^[7];另一方面城市化快速发展也是现阶段侵蚀热点区变化的因素之一,已有研究^[15]表明,花溪区是贵阳市城市化扩展的主要方向,2005—2015 年花溪区城镇建设用地大幅增加,导致区内生境退化严重,土壤侵蚀状况有相对恶化的趋势。而在不同地形空间上,虽然有研究^[8]认为,坡度越大、土壤侵蚀有越严重的特点,并且当坡度 $>15^\circ$ 时土壤侵蚀明显加剧;但贵阳市实施了 $>15^\circ$ 坡度的坡耕地退耕还林还草工程、坡改梯工程等土壤侵蚀/石漠化综合治理与生态修复措施,使研究区土壤侵蚀/石漠化的主要来源的坡耕地面积大量减少,不合理的人类活动干扰不断减弱,同时由于坡度陡峭区域的城市开发建设难度大,使得地形陡坡区域已不再是研究区的主要侵蚀热点区。相对应的当前人类活动强度较大的海拔 1 200~1 300 m 和坡度 $8^\circ\sim 15^\circ$ 的地形空间成为新时期贵阳市土壤侵蚀的热点聚集区。

(3) 植被覆盖因子对贵阳市近 10 年土壤侵蚀面积变化的贡献约 74%~92%,是贵阳市土壤侵蚀变化的主导和控制因子;而降雨侵蚀力因子的贡献仅约为 7.5%~26.0%,其增减会导致土壤侵蚀强度的增减变化,但其贡献不及植被覆盖因子。这与在我国黄土高原等地区的研究成果不同,王涛^[27]对黄土高原地区土壤侵蚀与植被覆盖和降雨的关系研究认为降雨是土壤侵蚀的主导和控制因子,对土壤侵蚀面积变化的贡献在 70%以上。诚然,在利用 RUSLE 模型进行土壤侵蚀评价研究中,土壤侵蚀的变化主要归因于暴雨、不合理的土地利用方式以及植被覆盖的退化(虽然土壤和地形对侵蚀影响较大,但在 RUSLE 模型中相对稳定)^[28],但降雨的侵蚀作用又往往取决于土地利用和植被条件,当植被密度大、植被覆盖度高的情况下,植被对雨滴的截留作用越小,降雨对土壤表面颗粒的影响随之减小^[28-29]。因此,有研究^[26]也认为,在某种程度上植被覆盖的作用大于降雨的影响,成为导致土壤侵蚀发生变化的关键因素^[30]。

总之,贵阳市在经过 10 年的土壤侵蚀/石漠化综合治理和一系列生态修复/保护工程的实施,土壤侵蚀总体上已得到有效控制,但随着快速城市化进程和

不合理人类活动的干扰,土壤侵蚀有开始恶化的趋势,土壤侵蚀热点空间也随之变化。因此,在今后的生态环境保护和治理与社会经济发展中,应重点关注清镇市、花溪区、开阳县和修文县等县区,以及当前人类活动干扰较大的海拔 1 200~1 300 m 和坡度 $8^\circ\sim 15^\circ$ 的区域,在进一步加强土壤侵蚀/石漠化综合治理的同时,合理规划土地利用空间格局,以期持续改善土壤侵蚀状况,遏制快速城市化和不合理人类活动对土壤侵蚀的恶化趋势。

参考文献:

- [1] Wang Z J, Jiao J Y, Su Y, et al. The efficiency of large-scale afforestation with fish-scale pits for revegetation and soil erosion control in the steppe zone on the hill-gully loess plateau [J]. *Catena*, 2014, 115: 159-167.
- [2] Fang G H, Yuan T, Zhang Y, et al. Integrated study on soil erosion using RUSLE and GIS in Yangtze River Basin of Jiangsu Province (China) [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(5): 173-185.
- [3] 龙健,江新荣,邓启琼,等. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究 [J]. *土壤学报*, 2005, 42(3): 419-427.
- [4] 杨长春. 喀斯特地区土壤侵蚀研究进展 [J]. *中国水土保持*, 2012(3): 15-17, 34.
- [5] Huang W, Ho H C, Peng Y Y, et al. Qualitative risk assessment of soil erosion for karst landforms in Chahe town, Southwest China: A hazard index approach [J]. *Catena*, 2016, 144: 184-193.
- [6] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失 [J]. *地球与环境*, 2007, 35(3): 202-206.
- [7] 许月卿,冯艳,周东,等. 贵州省猫跳河流域土壤侵蚀动态变化分析 [J]. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 186-190.
- [8] Cao J H, Yuan D X, Tong L Q, et al. An overview of karst ecosystem in Southwest China: Current state and future management [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2015, 6(4): 247-256.
- [9] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China [J]. *Catena*, 2012, 90: 53-62.
- [10] 许月卿,蔡运龙. 贵州省猫跳河流域土壤侵蚀量计算及其背景空间分析 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 50-54.
- [11] 高江波,王欢. 基于 GWR 模型的喀斯特地区产流量与土壤侵蚀权衡的时空特征:以贵州省三岔河流域为例 [J]. *山地学报*, 2019, 37(4): 518-527.
- [12] 魏梦瑶,张卓栋,刘瑛娜,等. 基于 CSLE 模型的广西土壤侵蚀规律 [J]. *水土保持研究*, 2020, 27(1): 15-20.
- [13] 周筱雅,刘志强,王俊帝,等. 中国建制市人均公园绿地面积的探索性空间数据分析 [J]. *生态经济*, 2019, 35(10): 86-93.

- 植模式下土壤磷素流失特征[J].应用生态学报,2013,24(11):146-152.
- [9] 鄯瑞卿,孙彦君,王继红,等.不同利用方式及施肥对黑土地表磷素养分流失的影响[J].土壤通报,2006,37(4):701-705.
- [10] 刘娟,张淑香,宁东卫,等.3种耕作土壤随地表径流流失的特征及影响因素[J].生态与农村环境学报,2019,35(10):1346-1352.
- [11] 国家环境保护局.GB 11893-89 水质总磷的测定钼酸铵分光光度法[S].北京:国家环境保护局,1989.
- [12] 徐红娇,包立,张乃明,等.滇池流域不同利用方式红壤渗滤液的磷素形态变化[J].水土保持学报,2015,29(3):267-271.
- [13] 夏运生,李阳红,史静,等.滇池宝象河流域土壤磷的累积及吸附特征研究[J].土壤学报,2010,47(2):325-333.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:12-180.
- [15] Li Y Y, Gao R, Yang R, et al. Using a simple soil column method to evaluate soil phosphorus leaching risk[J].Clean-Soil, Air, Water,2013,41(11):1100-1107.
- [16] 全国土壤普查办公室.全国第二次土壤普查暂行技术规范[M].北京:中国农业出版社,1979.
- [17] 国家环境保护总局.GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S].北京:国家环境保护总局科技标准司,2002:1-9.
- [18] 彭宏佳,吴起鑫,任斐鹏,等.喀斯特地区坡面不同土地利用方式水土流失及磷素输出对次降雨特征的响应[J].农业环境科学学报,2018,37(4):756-765.
- [19] 聂敏,肖和艾,廖敦秀,等.亚热带可变电荷土壤磷素淋失临界点及其与土壤特性的关系[J].环境科学学报,2013,33(2):579-586.
- [20] 左继超,郑海金,奚同行,等.自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征[J].环境科学,2017,38(10):4178-4186.
- [21] 曹雪艳,李永梅,张怀志,等.滇池流域原位模拟降雨条件下不同土壤质地磷素流失差异研究[J].水土保持学报,2010,24(3):13-17.
- [22] 秦红灵,全智,刘新亮,等.长沙市郊不同种植年限菜地土壤磷状况及淋失风险分析[J].中国农业科学,2010,43(9):1843-1851.
- [23] 席雪琴.土壤磷素环境阈值与农学阈值研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [24] 叶会财,李大明,柳开楼,等.不同有机培肥方式对红壤性水稻土磷素的影响[J].土壤通报,2019,50(2):374-380.
- (下转第 102 页)
- [14] Chen P, Lian Y Q. Modeling of soil loss and its impact factors in the Guijiang Karst River Basin in Southern China[J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(4):352-365.
- [15] 任红玉,周旭,张迪,等.快速城市化过程中喀斯特山区城镇生态风险变化:以贵阳市花溪区为例[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2018,36(5):16-23.
- [16] 蒙吉军,王雅,王晓东,等.基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J].长江流域资源与环境,2016,25(7):1052-1061.
- [17] 姚岚,吴次芳,陆张维.喀斯特地区城镇化质量与土地利用系统健康协同演化关系研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(4):768-778.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 21010-2017 土地利用现状分类[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [19] Wischmeier W, Smith D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning agricultural handbook[M]. USA: Department of Agriculture,1978.
- [20] 章文波,谢云,刘宝元.中国降雨侵蚀力空间变化特征[J].山地学报,2003,21(1):33-40.
- [21] Williams J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case-history[J].Philosophical Transactions of the Royal Society B,1990,329(1255):421-428.
- [22] Zhang H M, Yang Q K, Li R, et al. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor[J]. Computers and Geosciences,2013,52:177-188.
- [23] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
- [24] 苏娜,王志杰,杨瑞,等.基于 RUSLE 的陕南地区土壤侵蚀时空变化特征[J].水土保持研究,2018,25(5):1-11.
- [25] 中华人民共和国水利部.SL 461-2009 岩溶地区水土流失综合治理技术标准[S].北京:中国水利水电出版社,2010:3-4.
- [26] 操玥,王世杰,白晓永,等.喀斯特槽谷区土壤侵蚀时空演变及未来情景模拟[J].生态学报,2019,39(16):6061-6071.
- [27] 王涛.基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀影响因素定量评估:以陕北洛河流域为例[J].环境科学与技术,2018,41(8):170-177.
- [28] Mohammad A G, Adam M. A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses[J].Catena,2010,81:97-103.
- [29] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. Water erosion response to rainfall and land use in different drought-level years in a loess hilly area of China[J].Catena,2010,81:24-31.
- [30] Kosmas C, Danalatos N, Cammeraat L H, et al. The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions[J].Catena,1997,29:45-59.