

引用格式: 崔晓薇, 张喜风, 梁水明. 祁连山综合土壤可蚀性指数与环境因子的关联性[J]. 山地学报, 2024, 42(1): 14-26.

CUI Xiaowei, ZHANG Xifeng, LIANG Shuiming. Correlation between comprehensive soil erodibility index and environmental factors in the Qilian Mountains, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(1): 14-26.

祁连山综合土壤可蚀性指数与环境因子的关联性

崔晓薇, 张喜风*, 梁水明

(西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 土壤可蚀性是估算土壤侵蚀量和评价水土保持功能的关键参数。鉴于国家级水土保持重点预防区——祁连山区的土壤可蚀度研究仍处于碎片化状态, 本文以水土保持区划为基础, 综合考虑水力和风力侵蚀因子, 运用空间分析和地理探测器方法, 探究祁连山区综合土壤可蚀性指数(Comprehensive Soil Erodibility Index, CSEI)分布特征及其驱动因子。结果表明: (1) 祁连山区域 CSEI 值为 0.16~0.54, 中值区(0.20~0.40)占地最大, 大多位于研究区东部和中北部, 少数位于西部。(2) 坡度、年降水量和 NDVI 对 CSEI 空间分异影响显著。(3) 双驱动因子对 CSEI 的解释力均高于单因子, 呈非线性或双因子增强, 各区驱动因子差异显著, 陇中丘陵沟壑蓄水保土区(I区)为年均风速 \cap NDVI($q=0.95$), 河西走廊农田防护防风区(II区)和祁连山山地水源涵养保土区(III区)为年降水量 \cap NDVI($q=0.73$ 和 0.63), 柴达木盆地农田防护防风区(IV区)为土地利用 \cap 年均温度($q=0.37$), 青海湖高原山地生态维护保土区(V区)为土地利用 \cap NDVI($q=0.65$), 柴达木盆地农田防护防风区(VI区)为年降水量 \cap 年均风速($q=0.17$)。综合分析得出, 祁连山西部地区降水少、风速强、土壤可蚀度较高; 东部地区降水量相对较多, 植被覆盖度高, 土壤可蚀度低。研究结果可为祁连山区开展山水林田湖草沙生态保护工程、因地制宜制定修复政策提供理论依据。

关键词: CSEI; 地理探测器; 水土保持; 祁连山

中图分类号: X171.1

文献标志码: A

土壤侵蚀是土壤及其母质在多种外营力作用下, 被剥蚀、搬运和沉积的过程^[1]。土壤侵蚀引发生产力下降、河道淤积、水体污染等一系列经济与生态环境问题^[2], 影响区域可持续发展^[3]。土壤水蚀可蚀性因子(K)可表征土壤侵蚀性敏感程度, 但其只反映了土壤可蚀性的一个方面^[4], 适用范围有限。有学者^[5]在 K 值的基础上, 结合土壤内聚力、饱和电导率、土壤渗透阻力(PR, Penetration Resistance)等指标, 提出了综合土壤可蚀性指数 CSEI(Comprehensive Soil Erodibility Index)。CSEI 通过对多个可蚀性指

标进行权重分析, 综合评价土壤可蚀性, 是估算土壤侵蚀量和评价水土保持效益的关键参数^[4]。CSEI 方法适用性较好, 已被广泛应用于三峡库区^[6]、东北丘陵小流域^[7]、滇东海峰岩溶盆地地表-地下复合系统^[8]、黄土高原坡面^[9]、沟道系统^[10]等不同地理环境下, 定量分析水位波动、喀斯特地貌、黄土高原沟壑区/东北丘陵区不同地貌部位、不同植被恢复策略^[11]下土壤可蚀性的变化特征。

前人在研究土壤可蚀性与环境因子的关联性时, 多采用回归^[12]、趋势^[13]和相关性分析^[14]等统

收稿日期(Received date): 2023-10-19; 改回日期(Accepted date): 2024-02-18

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41701321); 甘肃省教育科技创新项目(2023A-004)。[National Natural Science Foundation of China (41701321); Education Technology Innovation Project in Gansu Province (2023A-004)]

作者简介(Biography): 崔晓薇(1999-), 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 自然灾害防治。[CUI Xiaowei (1999-), female, born in Cangzhou, Hebei province, M. Sc. candidate, research on natural disaster prevention and control] E-mail: 2021212806@nwnu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 张喜风(1986-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 流域生态水文/水土流失过程。[ZHANG Xifeng (1986-), female, Ph. D., associate professor, research on watershed ecological hydrology/soil erosion processes] E-mail: zhangxifeng@nwnu.edu.cn

计分析方法,强调单因子对可蚀性的影响,缺乏对环境要素之间及变量组合的比较^[15]。由于传统的统计分析无法解析环境因子间存在的高度自相关关系,导致模型难以准确估计^[13],而地理探测器^[12]在计算驱动因子的解释力时,可分析地理现象的空间分层异质性^[15],定量化获得影响因子对土壤可蚀性的作用程度,避免多重共线性问题,其结果较为准确^[16]。

祁连山是国家级水土保持重点预防区,管控水土流失对区域水源涵养、水质维护、生态维护、防风固沙、农田防护等功能的维护和提高具有重要意义^[17]。然而,学者们仅对祁连山东部的抗蚀性^[18]和北坡或南坡等部分区域的土壤侵蚀^[19-21]展开分析,缺乏对祁连山全区土壤可蚀性的研究。本文选取4400 m以下的区域为研究区,采用气候、地形、土地利用类型和 NDVI(Normalized Vegetation Index)要素,运用空间分析和地理探测器方法,研究祁连山 CSEI 的分布特征及其驱动因子,以期对祁连山水土保持功能的预防和维护提供参考。

1 研究区概况

祁连山(94°10'E ~ 103°04'E、35°50'N ~ 39°19'N)位于中国青海省东北部与甘肃省西部边境,呈西北至东南走向,西与阿尔金山脉相连,东与秦岭、六盘山相接,南临柴达木盆地,北接河西走廊^[22](图1)。该区平均海拔3700 m以上,年均温度低于

4℃,年均降水量约301.9 mm^[23]。海拔高度4400 m以上区域受冰川作用明显,发育了石羊河、黑河、疏勒河三大内陆河^[24]。复杂的地形结构、明显的海拔高差变化、巨大的东西气候差异,使得区内植被垂直分异显著,生物资源极其丰富,具有重要的水土保持功能。然而,受全球气候变暖和放牧超载的影响,祁连山区冰雪及多年冻土显著退化^[25],土地旱化,林地、草场急剧退化^[26],导致水土保持能力大幅下降,区域土壤侵蚀加剧^[27-28]。

2 数据与方法

2.1 数据源

由于祁连山高海拔地区环境复杂且侵蚀多样,4400 m以上存在冰川^[29-30],因此本文所用数据均为4400 m以下数据。土壤数据源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)和寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>);DEM源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>);土地利用类型和 NDVI 源于中国科学院地理科学与资源研究所(<http://www.resdc.cn/>);气象数据源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)(表1)。

2.2 研究方法

2.2.1 CSEI 计算方法

区域尺度的K值空间分布规律相对稳定^[31],侵

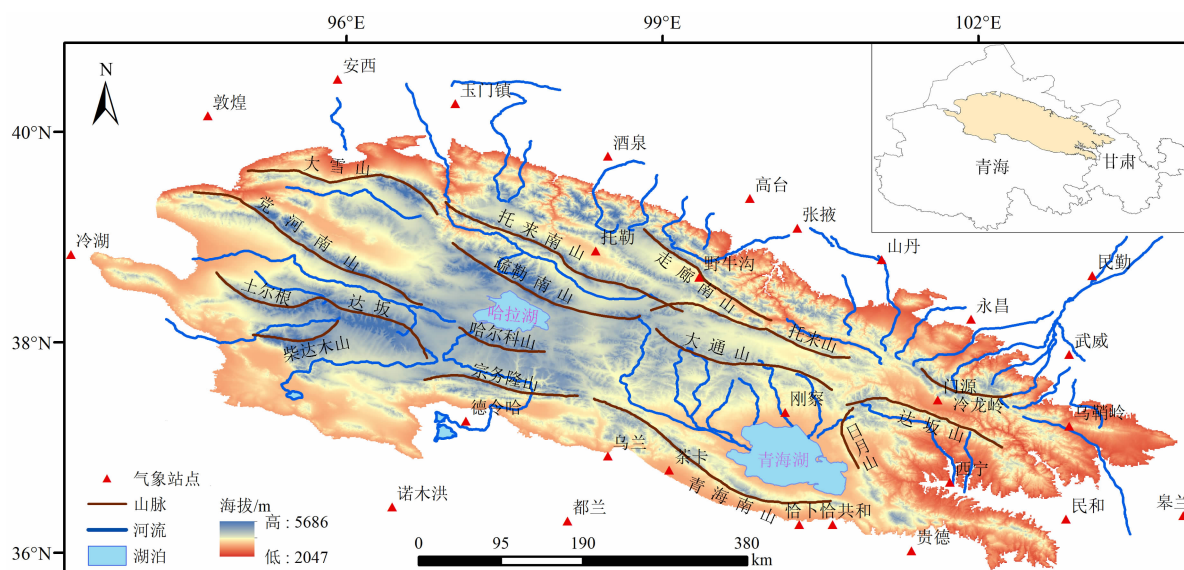


图1 祁连山位置图

Fig. 1 Location of the Qilian Mountains

表 1 研究数据来源

Tab. 1 Data sources of the research

数据集	时间序列	分辨率	来源
土壤理化性质数据集	2010—2018 年, 1995 年	1 km	国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn) 寒区旱区科学数据中心 (http://westdc.westgis.ac.cn)
DEM	—	30 m	地理空间数据云平台 (http://www.gscloud.cn)
土地利用类型	2018 年	30 m	中国科学院地理科学与资源研究所 (http://www.resdc.cn/)
NDVI	2018 年	1 km	中国科学院地理科学与资源研究所 (http://www.resdc.cn/)
气象数据	2010—2017 年	—	中国气象科学数据共享服务网 (http://cdc.cma.gov.cn)

注:在土壤理化性质数据集中,2010—2018 年的数据为土壤粉粒、砂粒、黏粒含量,1995 年的数据为土壤有机碳含量。

蚀生产力影响计算器 (Erosion productivity Impact Calculator, EPIC) 模型在国内应用广泛,因此选用 EPIC 模型^[32]中的 K 值估算模型,计算公式为:

$$K = \{0.2 + 0.3 \times \exp[-0.0256SAN \times (1 - \frac{SIL}{100})]\} \times (\frac{SIL}{CLA + SIL})^{0.3} \times [1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}] \times [1.0 - \frac{0.7SN1}{SN1 + \exp(-5.51 + 22.9SN1)}] \quad (1)$$

$$SN1 = 1 - SAN/100 \quad (2)$$

式中, SAN 、 SIL 、 CLA 和 C 分别为砂粒、粉粒、黏粒和有机碳含量,单位均为%。

为全面评价土壤可蚀性,本研究综合风力、水力侵蚀,采用加权求和法计算 CSEI (式 3),具体步骤为:(1)将土壤风蚀可蚀性因子(EF)、 K 、土壤容重、土壤有机质(SOM)和土壤结构稳定性指数(SSSI) (图 2)作为计算 CSEI 的指标,运用 ArcGIS 软件将指标投影重采样,以便计算;(2)利用渔网随机采样工具,创建采样点并提取指标值,剔除异常值后生成

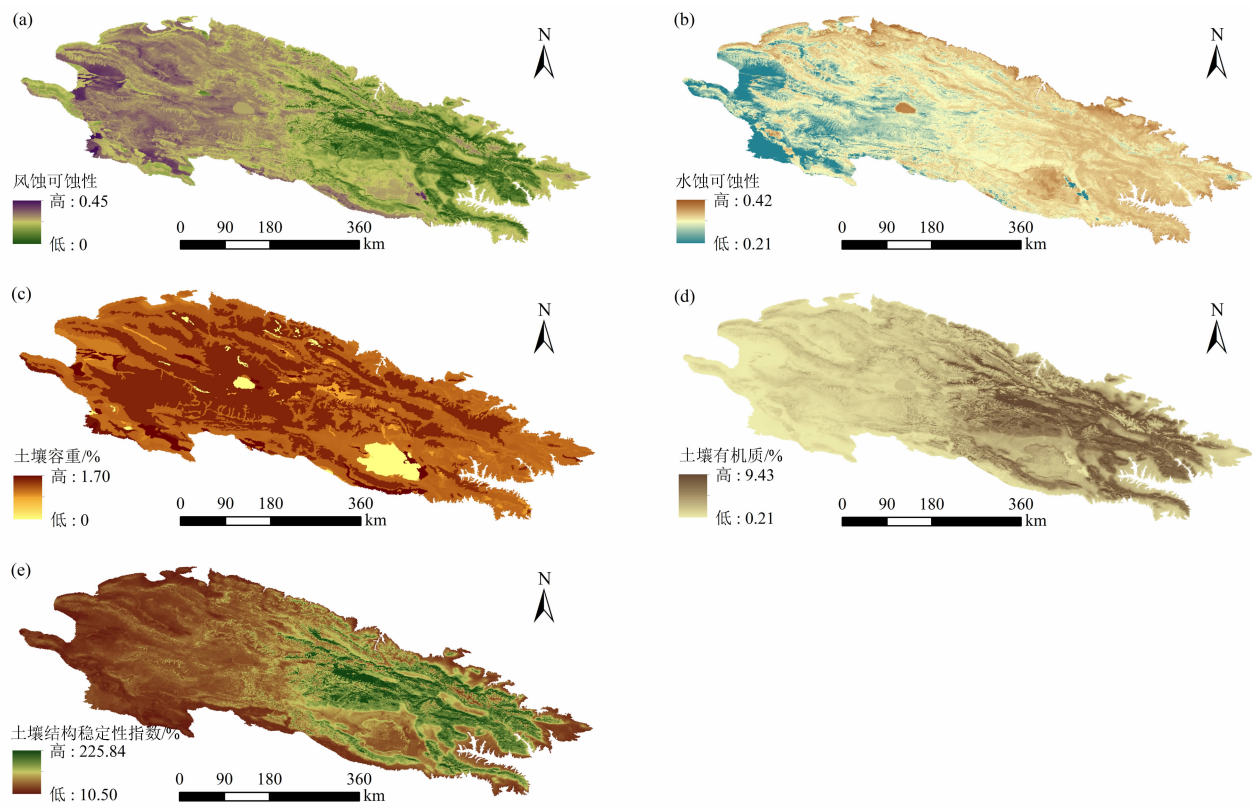


图 2 可蚀性指标分布图

Fig. 2 Distribution of corrosibility indicators

3398 个采样点;(3)运用主成分分析将每个指标的公因子方差所占百分比作为指标权重(C_i)^[33](即 $EF:0.63;K:0.22$;土壤容重: 0.12 ;SOM: 0.02 ;SSSI: 0.01);(4)将每个指标的最大值(b)或最小值(a)输入公式计算隶属度值(E_i), EF 、 K 、土壤容重与可蚀性呈正相关^[6, 33],用式(7)计算;而 SOM、SSSI 与可蚀性呈负相关^[8],用式(8)计算。

$$CSEI = \sum_i^n E_i \times C_i \tag{3}$$

式中, $CSEI$ 为 $[0,1]$; E_i 和 C_i 分别为第 i 个指标的隶属度值和权重; i 为可蚀性指标个数; n 为评价指标个数。

EF ^[34]、 SOM 和 $SSSI$ ^[8]的计算公式为:

$$EF = \frac{29.09 + 0.31SAN + 0.17SIL + 0.33SAN/CLA - 2.59SOM - 0.95CaCO_3}{100} \tag{4}$$

$$SOM = 1.724C \tag{5}$$

$$SSSI = SOM/(CLA + SIL) \times 100\% \tag{6}$$

式中, C 和 $CaCO_3$ 分别为有机碳和碳酸钙含量。

$$u(x) = \begin{cases} 1 & x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \leq a \end{cases} \tag{7}$$

$$u(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ \frac{x-b}{a-b} & a < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \tag{8}$$

式中, $u(x)$ 为隶属函数; x 为 $CSEI$ 指标值; a 和 b 分别为指标的下限和上限。

根据前人研究结果,将 $CSEI$ 划分 5 个等级^[35]表征土壤易被侵蚀的程度(表 2)。

表 2 CSEI 等级划分

Tab. 2 CSEI level classification

评价等级	CSEI
难	0 ~ 0.20
较难	0.20 ~ 0.40
中等	0.40 ~ 0.60
较易	0.60 ~ 0.80
易	0.80 ~ 1.00

2.2.2 环境因子的选取与分级

由于祁连山区域环境复杂,土壤可蚀度受多种因素影响^[36],依据科学性、可量化性和可得性原则,选取坡度、土地利用、年均温度、年降水量、年均风速、NDVI 6 个环境因子探究 $CSEI$ 的驱动因素(表 3)。基于田培^[37]等的研究和自然断点法^[38],将坡度和土地利用分为 6 个等级,其余环境因子分为 8 个等级(表 4)。

表 3 环境因子选择

Tab. 3 Selection of environmental factors

类型	因子	单位	分辨率
地形	坡度	(°)	30 m
土地利用	土地利用	—	30 m
气象	年均温度	℃	—
	年降水量	mm	
	年均风速	$m \cdot s^{-1}$	
植被	NDVI	—	1 km

2.2.3 地理探测器

地理探测器是检测空间分层异质性^[39],揭示其

表 4 环境因子分级

Tab. 4 Classification of environmental factors

等级	坡度/(°)	土地利用	年均温度/℃	年降水量/mm	年均风速/($m \cdot s^{-1}$)	NDVI
1	0~5	耕地	2.91~3.95	25.65~96.90	1.12~1.75	0~0.12
2	5~8	林地	3.95~5.00	96.90~152.20	1.75~2.10	0.12~0.22
3	8~15	草地	5.00~6.00	152.20~218.55	2.10~2.30	0.22~0.33
4	15~20	水域	6.00~6.90	218.55~283.55	2.30~2.50	0.33~0.45
5	20~25	居民用地	6.90~8.20	283.55~338.60	2.50~2.65	0.45~0.58
6	25~35	未利用地	8.20~9.90	338.60~388.25	2.65~3.10	0.58~0.71
7	—	—	9.90~11.60	388.25~433.05	3.10~3.80	0.71~0.82
8	—	—	11.60~13.73	433.05~522.70	3.80~4.89	0.82~0.92

背后驱动力的统计方法^[40],其核心是:若自变量 X 对因变量 Y 影响显著,则 X 和 Y 的空间分布具有较强一致性^[41]。本文采用地理探测器中的因子分析和交互式分析度量 Y 对 X 的解释力,因子分析可以探测 Y 的空间分异性,也可检测 X 对 Y 空间分异的解释程度;影响因子共同作用时,交互式分析可评估 Y 解释力的增减^[42](表 5)。根据环境因子分级,将其等级和 CSEI 值输入地理探测器,依次获得各分区 CSEI 与环境因子的空间关联性。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (9)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SST = N \sigma^2 \quad (10)$$

式中, $h=1, \cdots, L$ 为变量 Y 或 X 的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区 Y 值的方差。 SSW 和 SST 分别为层内方差之和与全区总方差。

表 5 两个变量对 CSEI 的交互作用类型

Tab.5 Type of interaction between two variables on CSEI

判据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子 非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

注: $\min(q(X_1), q(X_2))$ 表示 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 之间的最小值; $q(X_1 \cap X_2)$ 表示 X_1 与 X_2 两者交互作用; $\max(q(X_1), q(X_2))$ 表示 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 之间的最大值; $q(X_1) + q(X_2)$ 表示 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 两者求和。

2.2.4 分区

依据《全国水土保持区划》将祁连山划分为 6

个子区域(I ~ VI 区),分析不同环境条件下 CSEI 与环境因子的关联性(图 3)。

3 结果与分析

3.1 CSEI 空间分布

祁连山区域 CSEI 值为 0.16 ~ 0.54,均值为 0.38,变异系数(CV, Coefficient of Variation)为 15.79%(表 6),西高东低,具有空间异质性(图 4)。根据表 2,将 CSEI 划分为三个等级(难、较难、中等)并进行重命名(弱、中、强),以便感知土壤可蚀度情况(图 4)。由图 5 可知,CSEI 以中等级为主,主要位于 I、IV 区和 II、III、V 区的东部,占总面积的 61.22%;强等级次之,主要位于 II、III、V 区的西部和 VI 区,占总面积的 38.55%;弱等级占比最小,零散分布在 V 区东南部,占总面积的 0.23%。强等级面积占比弱于中等级,但其对水土流失的影响不容忽视,在 III 区和 VI 区占比分别为 50.91% 和 55.14%,土壤可蚀度较其他区严重。

表 6 CSEI 基本统计学特征

Tab.6 Basic statistical characteristics of CSEI

平均值	最大值	最小值	标准差	CV/%
0.38	0.54	0.16	0.06	15.79

3.2 环境因子对 CSEI 空间分布的影响

各环境因子中 CSEI 的均值变化如图 6 所示。图 6a 中 CSEI 均值随坡度的增加而增加,高值区位于 25° ~ 35°(等级 6),低值区位于 5° ~ 15°(等级 2、3),该趋势与已有研究结果^[43]一致。受年均温度影响,CSEI 均值变化趋势与已有研究结果^[44](温度升至一定程度,土壤可蚀度随着土壤湿度和温度的变

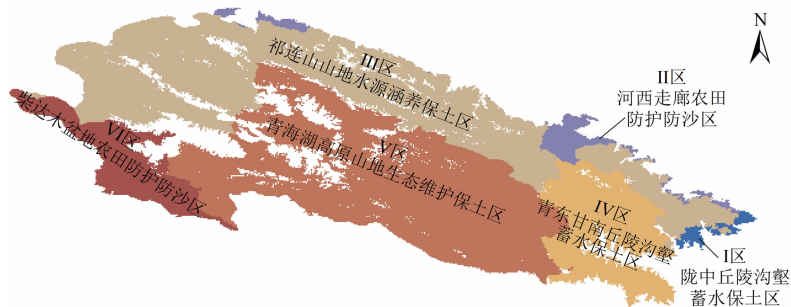


图 3 祁连山水土保持区划分布图

Fig.3 Distribution of soil and water conservation zoning in the Qilian Mountains

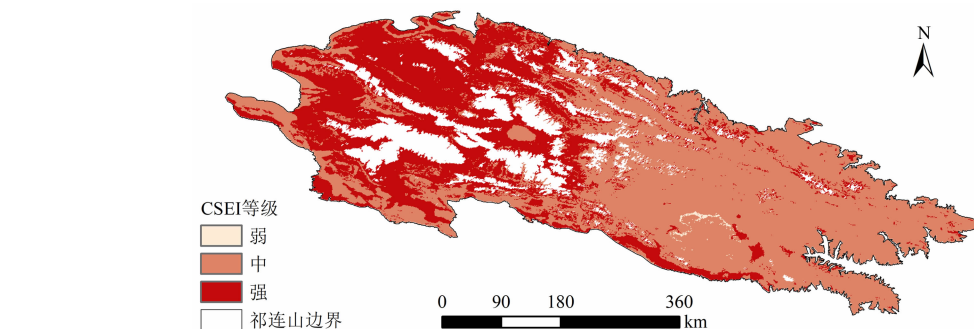


图4 CSEI 等级分布图

Fig. 4 Distribution of CSEI level

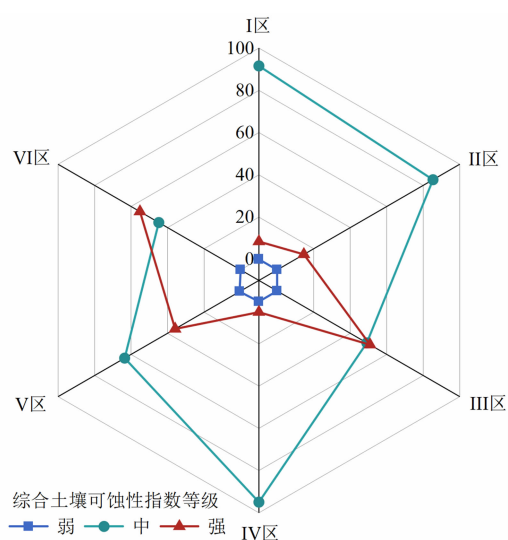


图5 CSEI 等级面积比例

Fig. 5 Ratio of CSEI level area

化而不断降低)相似。受降水和风的直接影响,均值随年降水量、年均风速的增加分别呈减小和先增后减的变化趋势,高值区位于年降水量 96.90 ~ 152.20 mm (等级 2) 和年均风速 2.30 ~ 2.65 m/s (等级 4,5),低值区位于 388.25 ~ 522.70 mm (等级 7,8) 和 1.12 ~ 1.75、3.80 ~ 4.89 m/s (等级 1,8),这可能与特殊地理位置、地形起伏等因素有关。植被覆盖方面,均值随 NDVI 增加而减小的趋势与牛丽楠^[45]等的研究结论一致。受地形、土壤等因素影响,未利用地的 CSEI 均值最高,水域的 CSEI 均值最低(图 6b),表明各土地利用类型的均值区别显著。

3.3 CSEI 影响因子的显著性研究

3.3.1 单因子对 CSEI 的驱动研究

由图 7 可知:在不同水土保持分区下,影响 CSEI 的驱动因子及其解释力存在显著差异。例如,

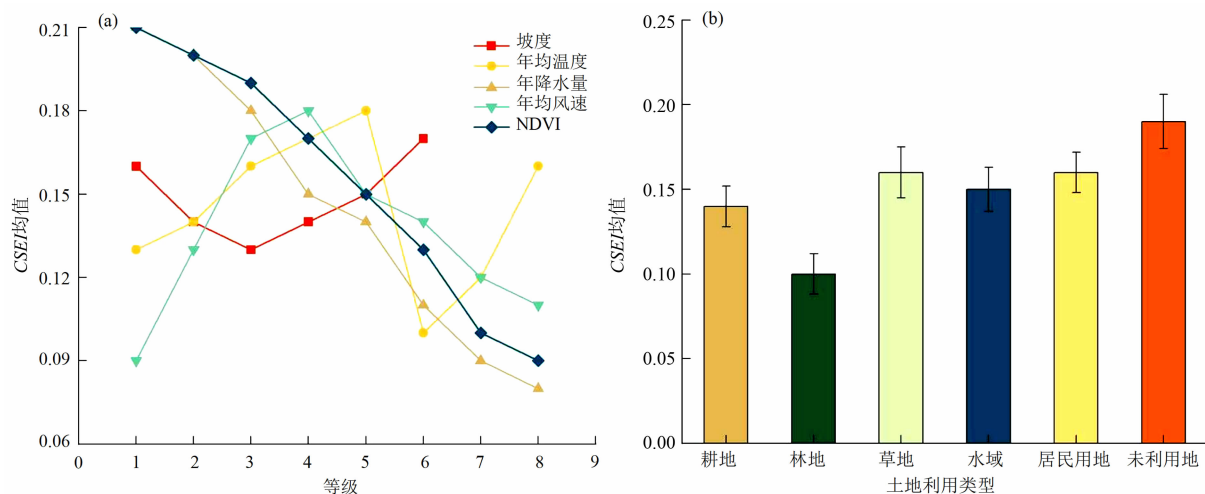
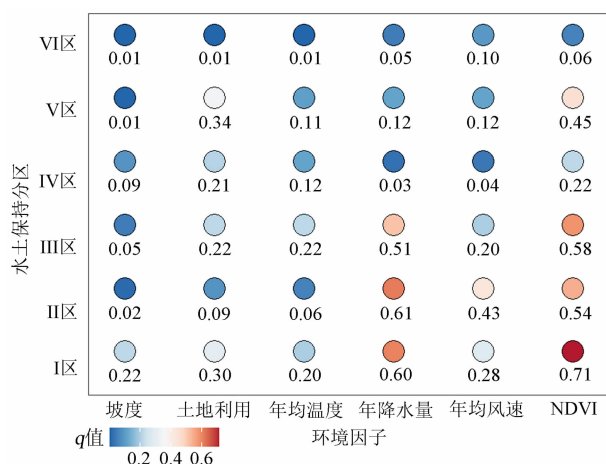


图6 各环境因子中 CSEI 均值变化:(a)数值型环境因子;(b)一级土地利用类型

Fig. 6 Changes in the mean value of CSEI among various environmental factors: (a) numerical environmental factors; (b) primary land use type

注:图中等级划分见表 4。

图7 环境因子对 CSEI 空间分布的解释力 q 值Fig. 7 Explanatory power q value of environmental factors on the spatial distribution of CSEI

对于 I、III、IV、V 区, NDVI 的解释力显著高于其他影响因子, 其数值均达 0.22 以上, 在 I 区甚至高达 0.71; 而对于 II 区, 年降水量的解释力最高, 达到 0.61; 对于 VI 区, 年均风速的解释力最高, 达到 0.10。鉴于 NDVI 在 I、III、IV、V 区的影响显著, 并且覆盖全区面积的 89.38%, 因此可认为 NDVI 是全区主要驱动因子。

3.3.2 双因子对 CSEI 的驱动研究

鉴于地理过程的复杂性会导致影响因素的共同作用^[46], 本文以单因子分析为基础, 探讨影响因子的交互作用及其规律。结果表明: 区域主导交互作用的类型差异显著, 为双因子增强和非线性增强(图 8), 说明两因子叠加对 CSEI 空间分布的解释力远大于单因子。

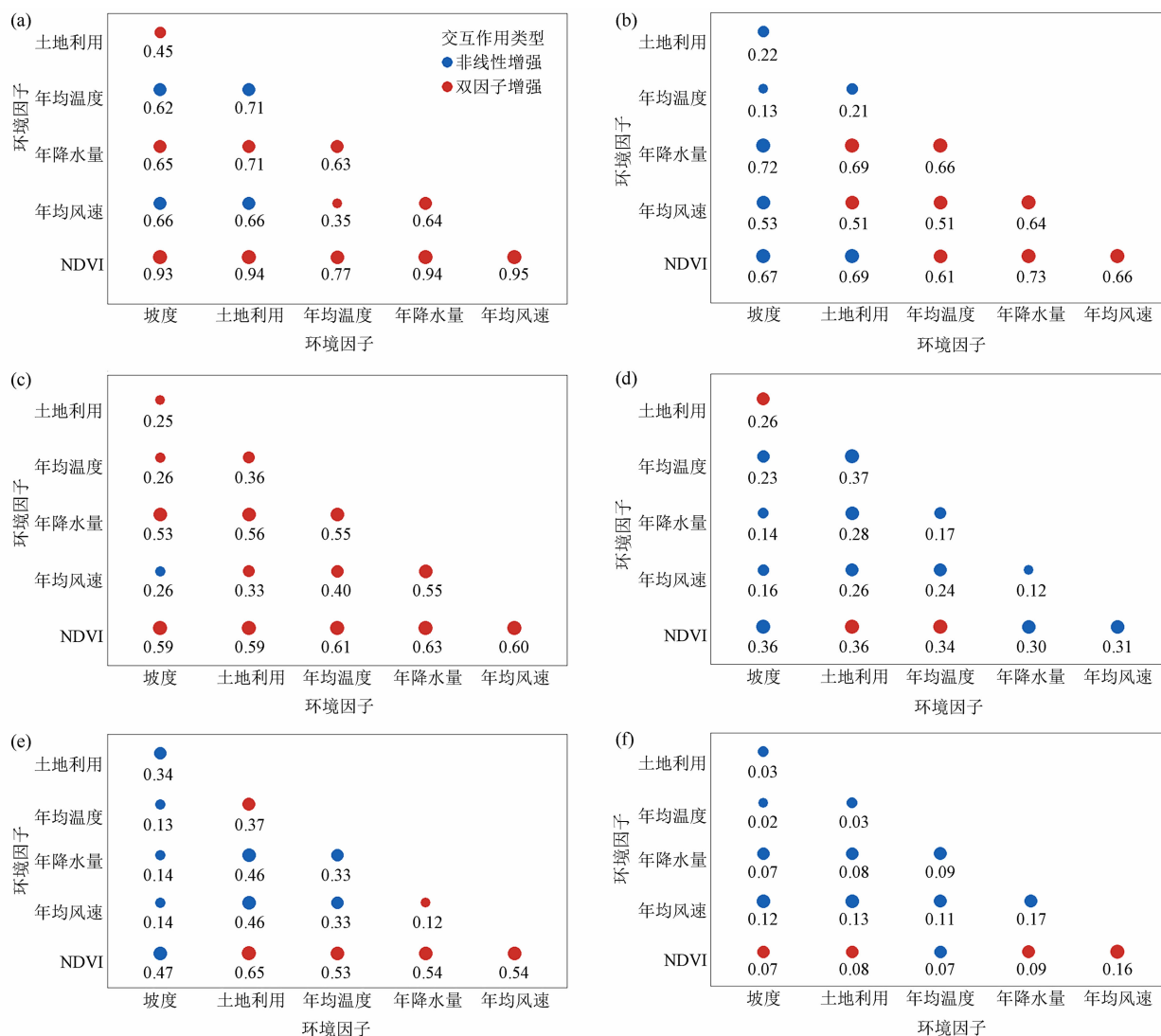


图8 交互式分析结果:(a)~(f)分别为 I~VI 区

Fig. 8 Results of interactive analysis: (a)~(f) are zones I~VI, respectively

总体来看,不同分区主导的交互因子及其 q 值差异显著。在各分区分别为年均风速 \cap NDVI (I 区, $q = 0.95$)、年降水量 \cap NDVI (II 区, $q = 0.73$; III 区, $q = 0.63$)、土地利用 \cap 年均温度 (IV 区, $q = 0.37$)、土地利用 \cap NDVI (V 区, $q = 0.65$)、年降水量 \cap 年均风速 (VI 区, $q = 0.17$)。

3.4 建议

不同分区的地貌形态导致层间 CSEI 的影响因子区别显著,因此应因地制宜地制定政策。根据上述驱动因子提出一些建议: I 区可种植提高土壤稳定性,减缓水土流失的乔木、灌木等植被^[47]; II、III 区降水较多,需合理利用水资源,培育林草资源,实行天然林保护和森林经营等措施,改善生态环境^[48]; IV 区需采取人工治理与自然修复相结合的方式,优化草地植被,增加水分入渗,减少太阳辐射,降低水分蒸发量,促进生态系统恢复^[49]; V 区采用草原围栏、灌溉、退田还湿等措施,减少人类活动,提高植被覆盖度,涵养水源^[47]; 鉴于 VI 区砾石较多、降水较少,合理调配水资源并利用土壤基质修复技术,可提升生态屏障功能^[50]。

4 讨论

4.1 CSEI 的空间异质性

鉴于区域环境差异和计算方法不同,土壤可蚀性亦不同。本文得出的 CSEI 值低于学者们^[33, 51]在黄土高原沟壑区得到的结果 (0.451 ~ 0.801 和 0.203 ~ 0.889), 这一差异可能归因于区域气温偏低、降水不足等因素。此外,祁连山西部 CSEI 较中东部严重,这可能与土地利用、地形等多种因素差异有关。受研究区域气象、植被等因素水平分异显著的影响,土壤结构稳定性和抗侵蚀能力降低,导致可蚀度差异较大,局部存在显著水土流失现象。

4.2 CSEI 的影响因素

综上所述,不同区域的环境因子与 CSEI 的空间关联性存在显著差异。在因子分析时,鉴于区域人为干预程度较低 (I、III 区) 以及地形起伏大、气温高等情况 (IV、V 区), 导致 NDVI 对 CSEI 解释力较大^[52]; 而 II 区受地理位置影响, 主要位于蒸散发较大的山丹县和永昌县, 使得年降水量对 CSEI 解释力较大; 由于 VI 区内部相对高差较大且西邻风力强盛的柴达木盆地, 并以未利用地和低覆盖草地为主, 使

得年均风速对区域影响显著。在交互式分析时, 由于 I 区以耕地、草地为主, 植被低矮且防风能力弱, 导致土壤抗侵蚀能力减弱、可蚀度增强^[53]; 对 II 区的人为干预, 促进了降水增加和植被生长, 从而提高了土壤结构稳定性, 减缓了土壤可蚀度; III 区受地形影响, 降水和植被均呈东南至西北减少, 导致水土流失加剧^[54]; 随着暖湿化加剧, IV 区草地可蚀度升高, 林地可蚀度降低, 可见区域受土地利用和年均温度影响较大^[33]; V 区植被覆盖度西北低东南高, 以草地和未利用地为主, 土壤可蚀度受植被覆盖和土地利用的影响, 呈西北高东南低的分布趋势; VI 区地势高、降水少、植被覆盖度低, 导致风速增大, 土壤可蚀度加剧。

4.3 展望

尽管有研究针对祁连山部分区域的土壤可蚀度进行定量估算、机制剖析, 但多为单个侵蚀类型, 对多个侵蚀类型之间的可蚀度研究亟须加强。本文仅考虑从风力、水力侵蚀模拟土壤可蚀度, 利用地理探测器模拟环境因素与可蚀度的关系, 针对冻融侵蚀对环境因素与可蚀度关系的探究仍需加强。

5 结论

利用空间分析和地理探测器方法, 探究祁连山 4400 m 以下 CSEI 的空间分布特征和关键驱动因子, 主要结论如下:

(1) CSEI 值为 0.16 ~ 0.54, 均值为 0.38, 变异系数为 15.79%, 西高东低。以中等级为主, 强等级次之, 弱等级占比最小。

(2) 坡度、年降水量和 NDVI 对 CSEI 空间分异影响显著。

(3) NDVI 对 CSEI 的空间分布影响显著, 是 89.38% 区域的主要驱动因子; 双驱动因子类型差异较大, 在各分区分别为年均风速 \cap NDVI (I 区, $q = 0.95$)、年降水量 \cap NDVI (II 区, $q = 0.73$; III 区, $q = 0.63$)、土地利用 \cap 年均温度 (IV 区, $q = 0.37$)、土地利用 \cap NDVI (V 区, $q = 0.65$)、年降水量 \cap 年均风速 (VI 区, $q = 0.17$)。

综上所述, 祁连山区域西部的可蚀度较高, 气象、植被对其影响较大。研究结果可为祁连山区开展山水林田湖草沙生态保护工程、因地制宜地制定修复政策提供理论依据。

参考文献 (References)

- [1] 何茂林, 张玉珊, 高家勇, 等. 喀斯特区土壤侵蚀与石漠化协同演变及交互关系[J]. 水土保持学报, 2023, **37**(1): 140 – 150. [HE Maolin, ZHANG Yushan, GAO Jiayong, et al. Synergistic evolution and interaction of soil erosion and rocky desertification in karst areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, **37**(1): 140 – 150] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.01.020
- [2] ZHANG Guanghui, TANG Mingke, ZHANG X C. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the Loess Plateau of China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, **34**(9): 1302 – 1309. DOI: 10.1002/esp.1827
- [3] ZHAO Guangju, MU Xingmin, WEN Zhongming, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China [J]. Land Degradation and Development, 2013, **24**(5): 499 – 510. DOI: 10.1002/ldr.2246
- [4] DONG Lingbo, LI Jiwei, ZHANG Yu, et al. Effects of vegetation restoration types on soil nutrients and soil erodibility regulated by slope positions on the Loess Plateau [J]. Journal of Environmental Management, 2022, **302**: 113985. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113985
- [5] WANG Hao, ZHANG Guanghui, LI Ningning, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China [J]. Geoderma, 2018, **325**: 18 – 27. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.03.037
- [6] CHEN Shiqi, ZHANG Guanghui, LUO Yifeng, et al. Soil erodibility indicators as affected by water level fluctuations in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. Catena, 2021, **207**: 105692. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105692
- [7] CHEN Shiqi, ZHANG Guanghui, ZHU Pingzong, et al. Impact of land use type on soil erodibility in a small watershed of rolling hill northeast China [J]. Soil and Tillage Research, 2023, **227**: 105597. DOI: 10.1016/j.still.2022.105597
- [8] 綦臻, 范弢, 陈进豪. 滇东岩溶断陷盆地地表/地下不同侵蚀场土壤的可蚀性[J]. 水土保持学报, 2022, **36**(5): 66 – 74. [QI Can, FAN Tao, CHEN Jinhao. Soil erodibility of different surface and underground erosion fields in Karst Rift Basin of eastern Yunnan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, **36**(5): 66 – 74] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.05.010
- [9] GUO Mingming, CHEN Zhouxin, WANG Wenlong, et al. Revegetation induced change in soil erodibility as influenced by slope situation on the Loess Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2021, **772**: 145540. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145540
- [10] WANG Hao, WANG Jian, ZHANG Guanghui. Impact of landscape positions on soil erodibility indices in typical vegetation-restored slope-gully systems on the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2021, **201**: 105235. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105235
- [11] WANG Hao, ZHANG Guanghui, LI Ningning, et al. Soil erodibility as impacted by vegetation restoration strategies on the Loess Plateau of China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, **44**(3): 796 – 807. DOI: 10.1002/esp.4531
- [12] WANG Jinfeng, LI Xinhui, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, **24**(1): 107 – 127. DOI: 10.1080/13658810802443457
- [13] 陈玉兰, 焦菊英, 田红卫, 等. 黄土高原归一化植被指数与自然环境因子的空间关联性——基于地理探测器[J]. 生态学报, 2022, **42**(9): 3569 – 3580. [CHEN Yulan, JIAO Juying, TIAN Hongwei, et al. Spatial correlation analysis between vegetation NDVI and natural environmental factors based on geographical detector on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(9): 3569 – 3580] DOI: 10.5846/stxb202012013070
- [14] 赵恒策. 青海省江河源区草地土壤可蚀性关键因子研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019: 27 – 34. [ZHAO Hengce. Study on key factors of soil erodibility of grassland in the source area of the Yangtz and Yellow River in Qinghai province [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019: 27 – 34]
- [15] 王欢, 高江波, 侯文娟. 基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J]. 地理学报, 2018, **73**(9): 1674 – 1686. [WANG Huan, GAO Jiangbo, HOU Wenjuan. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different morphological types of geomorphology in karst areas: Based on the geographical detector method [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, **73**(9): 1674 – 1686] DOI: 10.11821/dlxb201809005
- [16] WANG Jinfeng, HU Yi. Environmental health risk detection with GeogDetector [J]. Environmental Modelling and Software, 2012 (33): 114 – 115. DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.01.015
- [17] 水利部. 全国水土保持区划(试行)(办水保[2012]512号)[R]. 北京: 水利部, 2012: 1 – 30. [Ministry of Water Resources. National water and soil conservation zoning (trial) (Water Protection Office [2012] No. 512) [R]. Beijing: Ministry of Water Resources, 2012: 1 – 30]
- [18] 赵锦梅, 徐长林, 马瑞, 等. 东祁连山不同高寒灌丛草地土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(5): 119 – 123. [ZHAO Jinmei, XU Changlin, MA Rui, et al. Study on soil anti-erodibility of different alpine shrub grassland in eastern Qilian Mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(5): 119 – 123] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2016.05.020
- [19] 陈豪, 丁文广, TANJIA B Z. 基于 USLE 模型的祁连山国家公园土壤水力侵蚀评价[J]. 中国水土保持科学, 2020, **18**(4): 38 – 44. [CHEN Hao, DING Wenguang, TANJIA B Z. Evaluation of soil water erosion in Qilian Mountain National Park based on USLE model [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, **18**(4): 38 – 44] DOI: 10.16843/j.sswc.2020.04.005

- [20] 陆惠萍, 陈杰, 吕文强, 等. 近 20 a 祁连山北坡水沙变化及土壤侵蚀特征[J]. 中国水土保持科学, 2022, **20**(4): 91–100. [LU Huiping, CHEN Jie, LYU Wenqiang, et al. Changes of water and sediment and soil erosion characteristics on the northern slope of Qilian Mountains in recent 20 years [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, **20**(4): 91–100] DOI: 10.16843/j. sswc. 2022. 04. 012
- [21] 童珊, 曹广超, 闫欣, 等. 祁连山南坡土壤侵蚀定量研究与影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2022, **29**(5): 100–107. [TONG Shan, CAO Guangchao, YAN Xin, et al. Quantitative study on soil erosion and its influencing factors on the south slope of Qilian Mountain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, **29**(5): 100–107] DOI: 10.13869/j. cnki. rswc. 2022. 05. 027
- [22] 周雪如, 李育. 千百年尺度祁连山地区干湿变化对暖期的响应[J]. 地理学报, 2022, **77**(5): 1138–1152. [ZHOU Xueru, LI Yu. Response of dry-wet change to millennial and centennial warm periods in the Qilian Mountains [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, **77**(5): 1138–1152] DOI: 10.11821/dlxb202205007
- [23] WANG Lei, CHEN Rensheng, HAN Chuntan, et al. Change characteristics of precipitation and temperature in the Qilian Mountains and Hexi Oasis, Northwestern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, **78**: 284. DOI: 10.1007/s12665-019-8289-x
- [24] 付建新, 曹广超, 郭文炯. 祁连山区风速和风向时空变化特征[J]. 山地学报, 2020, **38**(4): 495–506. [FU Jianxin, CAO Guangchao, GUO Wenjiong. Temporal and spatial variation characteristics of average wind speed and direction in the Qilian Mountains, China [J]. Mountain Research, 2020, **38**(4): 495–506] DOI: 10.16089/j. cnki. 1008-2786. 000528
- [25] 欧安锋, 柯贤敏, 梁成成, 等. 祁连山区 1961—2014 年冻融指数时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2023, **45**(1): 153–164. [OU Anfeng, KE Xianmin, LIANG Chengcheng, et al. Spatial and temporal characteristics of freezing and thawing index in the Qilian Mountains from 1961 to 2014 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, **45**(1): 153–164] DOI: 10.7522/j. issn. 1000-0240. 2023. 0011
- [26] 王晓琪, 赵雪雁. 人类活动对国家公园生态系统服务的影响——以祁连山国家公园为例[J]. 自然资源学报, 2023, **38**(4): 966–982. [WANG Xiaqi, ZHAO Xueyan. Impacts of human activities on ecosystem services in national parks: A case study of Qilian Mountain National Park [J]. Journal of Natural Resources, 2023, **38**(4): 966–982] DOI: 10.31497/zrzyxb. 20230409
- [27] 赵琛, 张兰慧, 李金麟, 等. 黑河上游土壤含水量的空间分布与环境因子的关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, **50**(3): 338–347. [ZHAO Chen, ZHANG Lanhui, LI Jinlin, et al. Analysis of the relationships between the spatial variations of soil moisture and the environmental factors in the upstream of the Heihe River watershed [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, **50**(3): 338–347] DOI: 10.13885/j. issn. 0455-2059. 2014. 03. 008
- [28] 付建新, 曹广超, 郭文炯. 1980—2018 年祁连山南坡土地利用地形梯度变化及其地形因子地理探测[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(6): 371–381. [FU Jianxin, CAO Guangchao, GUO Wenjiong. Terrain gradient change of land use and its geographical detector of terrain factors on the south-facing slope of Qilianshan Mountains from 1980 to 2018 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(6): 371–381] DOI: 10.13869/j. cnki. rswc. 2021. 06. 030
- [29] 曹泊. 祁连山东段冷龙岭现代冰川变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013: 26–34. [CAO Bo. Glacier changes in the Lenglongling Mountain, Eastern Qilian Shan [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013: 26–34]
- [30] 赵军, 黄永生, 师银芳, 等. 2000—2012 年祁连山中段雪线与气候变化关系[J]. 山地学报, 2015, **33**(6): 683–689. [ZHAO Jun, HUANG Yongsheng, SHI Yinfang, et al. Relationship between snow line change and climate change in the middle of Qilian Mountains during 2000–2012 [J]. Mountain Research, 2015, **33**(6): 683–689] DOI: 10.16089/j. cnki. 1008-2786. 000082
- [31] 刘斌涛, 陶和平, 史展, 等. 青藏高原土壤可蚀性 K 值的空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2014, **34**(4): 11–16. [LIU Binta, TAO Heping, SHI Zhan, et al. Spatial distribution characteristics of soil erodibility K value in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, **34**(4): 11–16] DOI: 10.13961/j. cnki. stbctb. 2014. 04. 017
- [32] WILLIAMS J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case history [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 1990, **329**(1255): 421–428. DOI: 10.1098/rstb. 1990. 0184
- [33] 陈卓鑫, 王文龙, 郭明明, 等. 黄土高塬沟壑区植被恢复对不同地貌部位土壤可蚀性的影响[J]. 自然资源学报, 2020, **35**(2): 387–398. [CHEN Zhuoxin, WANG Wenlong, GUO Mingming, et al. Effects of vegetation restoration on soil erodibility on different geomorphological locations in the loess tableland and gully region of the Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2020, **35**(2): 387–398] DOI: 10.31497/zrzyxb. 20200211
- [34] FRYREAR D W, BILBRO J D, SALEH A, et al. RWEQ: Improved wind erosion technology [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, **55**(2): 183–189. DOI: 10.2489/jswc. 55. 2. 183
- [35] 陈正发, 史东梅, 金慧芳, 等. 基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(3): 256–267. [CHEN Zhengfa, SHI Dongmei, JIN Huihang, et al. Evaluation on cultivated-layer soil quality of sloping farmland in

- Yunnan based on soil management assessment framework [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(3): 256–267] DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.03.032
- [36] PENG Qing, WANG Ranghui, JIANG Yelin, et al. Soil erosion in Qilian Mountain National Park: Dynamics and driving mechanisms [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, **42**: 101144. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101144
- [37] 田培, 贾婷惠, 平耀东, 等. 基于 RUSLE 和地理探测器的鄂西北土壤侵蚀时空分异与归因[J]. 热带地理, 2023, **43**(11): 2216–2228. [TIAN Pei, JIA Tinghui, PING Yaodong, et al. Spatial-temporal differentiation and attribution of soil erosion in northwestern Hubei based on RUSLE and geographic detector [J]. Tropical Geography, 2023, **43**(11): 2216–2228] DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003728
- [38] 刘彦随, 李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策[J]. 地理学报, 2017, **72**(1): 161–173. [LIU Yansui, LI Jintao. Geographic detection and optimizing decision of the differentiation mechanism of rural poverty in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(1): 161–173] DOI: 10.11821/dlxb201701013
- [39] 童珊, 曹广超, 闫欣, 等. 祁连山南坡 2000—2020 年植被覆盖时空演变及其驱动因素分析[J]. 山地学报, 2022, **40**(4): 491–503. [TONG Shan, CAO Guangchao, YAN Xin, et al. Spatial-temporalevolution of vegetation cover changes and its driving factors of vegetation cover on the south slope of the Qilian Mountains, China from 2000 to 2020 [J]. Mountain Research, 2022, **40**(4): 491–503] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000688
- [40] 朱柏露, 杨奇勇, 谢运球, 等. 漓江流域土地石漠化空间分布及驱动因子分析[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2021, **39**(3): 139–150. [ZHU Bailu, YANG Qiyong, XIE Yunqiu, et al. Spatial distribution and driving factors of karst rocky desertification in Lijiang River basin [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2021, **39**(3): 139–150] DOI: 10.16088/j.issn.1001-6600.2020052702
- [41] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, **72**(1): 116–134. [WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(1): 116–134] DOI: 10.11821/dlxb201701010
- [42] 马永桃, 任孝宗, 胡慧芳, 等. 基于地理探测器的浑善达克沙地植被变化定量归因[J]. 中国沙漠, 2021, **41**(4): 195–204. [MA Yongtao, REN Xiaozong, HU Huifang, et al. Vegetation dynamics and its driving force in Otindag sandy land based on Geodetector [J]. Journal of Desert Research, 2021, **41**(4): 195–204] DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00066
- [43] 李子君, 王硕, 林锦阔, 等. 沂河流域土壤可蚀性空间变异研究[J]. 土壤通报, 2019, **50**(1): 45–51. [LI Zijun, WANG Shuo, LIN Jinkuo, et al. Spatial variability of soil erodibility in the Yihe River basin [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, **50**(1): 45–51] DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2019.01.07
- [44] 魏慧, 赵文武, 王晶. 土壤可蚀性研究述评[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(8): 2749–2759. [WEI Hui, ZHAO Wenwu, WANG Jing. Research progress on soil erodibility [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(8): 2749–2759] DOI: 10.13287/j.1001-9332.201708.011
- [45] 牛丽楠, 邵全琴, 刘国波, 等. 六盘水市土壤侵蚀时空特征及影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, **21**(11): 1755–1767. [NIU Linan, SHAO Quanqin, LIU Guobo, et al. Analysis on spatiotemporal characteristics and factors of soil erosion in Liupanshui city [J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, **21**(11): 1755–1767] DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180447
- [46] 常亚斌, 朱睿, 肖生春, 等. 1980—2015 年阿拉善盟沙地面积变化及其驱动因子[J]. 中国沙漠, 2020, **40**(6): 82–90. [CHANG Yabin, ZHU Rui, XIAO Shengchun, et al. Sandy land change from 1980 to 2015 in Alxa League, China and its driving factors [J]. Journal of Desert Research, 2020, **40**(6): 82–90] DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00074
- [47] 邹长新, 王燕, 王文林, 等. 山水林田湖草系统原理与生态保护修复研究[J]. 生态与农村环境学报, 2018, **34**(11): 961–967. [ZOU Changxin, WANG Yan, WANG Wenlin, et al. Theory of Mountain-River-Forest-Farmland-Lake-Grass system and ecological protection and restoration research [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, **34**(11): 961–967] DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2018.11.001
- [48] 杨永春, 张薇, 曹宛鹏, 等. 国家安全视角下的我国西部国土空间规划: 体系完善与基本导向[J]. 自然资源学报, 2021, **36**(9): 2264–2280. [YANG Yongchun, ZHANG Wei, CAO Wanpeng, et al. Territory spatial planning of western China from the perspective of national security: Perfect system and basic orientation [J]. Journal of Natural Resources, 2021, **36**(9): 2264–2280] DOI: 10.31497/zrzyxb.20210907
- [49] 刘祥宏, 尹勤瑞, 辛建宝, 等. 生态植被自然修复及其人工促进技术研究进展与展望[J]. 生态环境学报, 2022, **31**(7): 1476–1488. [LIU Xianghong, YIN Qinrui, XIN Jianbao, et al. Technology research progress and prospects of natural vegetation restoration and its artificial promotion [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, **31**(7): 1476–1488] DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.07.021
- [50] 王涛, 高峰, 王宝, 等. 祁连山生态保护与修复的现状问题与建议[J]. 冰川冻土, 2017, **39**(2): 229–234. [WANG Tao, GAO Feng, WANG Bao, et al. Status and suggestions on ecological protection and restoration of Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, **39**(2): 229–234] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0026

- [51] WANG Hao, ZHANG Guanghui, LI Ningning, et al. Variation in soil erodibility under five typical land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2019, **174**: 24 – 35. DOI: 10.1016/j.catena.2018.11.003
- [52] 邹雅婧, 闫庆武, 谭学玲, 等. 渭北矿区土壤侵蚀评估及驱动因素分析[J]. *干旱区地理*, 2019, **42**(6): 1387 – 1394. [ZOU Yajing, YAN Qingwu, TAN Xueling, et al. Evaluation of soil erosion and driving factors analysis in Weibei mining area [J]. *Arid Land Geography*, 2019, **42**(6): 1387 – 1394] DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2019.06.18
- [53] 王涛. 陕北洛河流域降水和植被变化对土壤侵蚀的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, **46**(20): 295 – 300. [WANG Tao. Impact of precipitation and vegetation change on soil erosion in the Luohe River basin in northern Shaanxi province [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, **46**(20): 295 – 300] DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2018.20.074
- [54] 王玮, 冯琦胜, 郭锐, 等. 基于长时间序列 NDVI 资料的我国西北干旱区植被覆盖动态监测[J]. *草业科学*, 2015, **32**(12): 1969 – 1979. [WANG Wei, FENG Qisheng, GUO Ni, et al. Dynamic monitoring of vegetation coverage based on long time-series NDVI data sets in northwest arid region of China [J]. *Pratacultural Science*, 2015, **32**(12): 1969 – 1979] DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2015-0459

Correlation between Comprehensive Soil Erodibility Index and Environmental Factors in the Qilian Mountains, China

CUI Xiaowei, ZHANG Xifeng*, LIANG Shuiming

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The Qilian Mountains area is a national key conservation and prevention zone for soil-water loss in China. Soil erodibility index is a key parameter for estimating soil erosion and evaluating soil-water conservation benefits, but the specific knowledge of soil erodibility in the Qilian Mountains area was in a fragmented state, far from application. In this study, it explored the distribution characteristics of Comprehensive Soil Erodibility Index (CSEI) in the Qilian Mountains area and its driving factors using spatial analysis and Geodetector methods based on the National Water and Soil Conservation Zoning (NWSCZ) issued in 2012 by Ministry of Water Resources of China.

It found that (1) in the Qilian Mountains area, CSEI value ranged from 0.16 to 0.54, with an average of 0.38. The areas with low-value CSEI (0 to 0.20) occupied the smallest lands, primarily in the southeast of the Qinghai Lake Plateau mountain ecological conservation area (Zone V). The median-value areas (0.20 to 0.40) covered the largest area, mainly in the Longzhong Hills Gully water storage conservation area (Zone I) and in the Qingdong-Gannan Hills Gully water storage conservation area (Zone IV), the farmland protection and sand prevention area in Hexi Corridor (Zone II), the mountain water conservation and soil conservation area in the Qilian Mountains (Zone III), and the east of Zone V. The high-value area (0.40 to 0.60) covered a large area, mainly in the west of Zone II, III, V and the farmland protection and sand prevention area of the Qaidam Basin (Zone VI). (2) Slope, annual precipitation and normalized vegetation index (NDVI) had a significant impact on CSEI spatial differentiation. (3) NDVI expressed strong explanatory power concerning the spatial distribution of CSEI and was the primary driving factor for 89.38% area of the study area. There was a considerable difference in the types of dual driving factors. The driving factor was the average annual wind speed \cap NDVI ($q=0.95$) in Zone I, the annual precipitation \cap NDVI ($q=0.73$ and 0.63) in Zone II and Zone III, the land use \cap average annual temperature ($q=0.37$) in Zone IV, the land use \cap NDVI in Zone V ($q=0.65$), and the annual precipitation \cap

average annual wind speed ($q=0.17$) in Zone VI.

According to comprehensive analysis, the western Qilian Mountains has less precipitation, strong wind speed and higher soil erodibility. In the eastern region, precipitation is relatively high, vegetation coverage is high, and soil erodibility is low. The research can provide a theoretical basis for implementing of ecological protection projects in the Qilian Mountains, and formulating of policy-making.

Key words: CSEI; Geodetector; soil and water conservation; the Qilian Mountains

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)

重庆黔江金洞乡凤台村——具有代表性的土家族聚落

(徐辉,重庆交通大学建筑与城市规划学院)

巴渝地区多样性与异质性的地理环境孕育了极具特色的传统聚落空间。

凤台村位于重庆市黔江区金洞乡东南部,与武陵山片区原始森林相连。凤台村保存了较为完好的土家族聚落民俗文化,其历史可以追溯至明清时期,伴随历史变迁与社会发展,在此聚族而居的土家族先民由最初的几户人家逐步发展成一个近 10 km^2 的特色民族聚落。2018年,凤台村被列入第五批中国传统村落名录。

凤台村聚落建筑分散于“细沙河”两岸的山谷浅丘之间,形成“两山夹一河,一谷多平坝”的山水格局,以及“鱼骨式”的街巷空间结构。凤台村的空间形态、形制格局、类型特征及演进规律具有环境适应性。

详见本期《丘陵谷地传统聚落空间形态及其环境适应性解析——以重庆黔江凤台村为例》一文。