

青藏高原土壤侵蚀对气候变化和生态政策的非线性响应

刘悦俊^{1,2}, 程江浩^{1,2}, 张燕杰^{1,2}

(1.大理大学 农学与生物科学学院, 云南 大理 671003;

2.苍山洱海一体化保护与流域绿色发展云南省高校协同创新中心 大理大学, 云南 大理 671003)

摘要: [目的] 评估土壤侵蚀的时空变化趋势, 揭示驱动因素对其贡献, 阐明生态恢复政策对其产生的影响, 为青藏高原土壤侵蚀治理提供科学依据。[方法] 评估青藏高原 1990—2020 年土壤水力侵蚀量, 分析其时空变化趋势, 并基于随机森林回归模型探讨气候、人为和地形因素对土壤侵蚀的影响。[结果] (1) 1990—2020 年青藏高原平均土壤侵蚀模数为 305.78 t/km², 80% 以上的区域属于轻度侵蚀。土壤侵蚀的年际变化呈现先减后增的趋势, 1990—2010 年青藏高原的土壤侵蚀有所改善, 2010—2020 年的土壤侵蚀状况有所加重, 呈非线性变化。(2) 气候因素对土壤侵蚀的影响超过了人为因素, 年降水量是青藏高原土壤侵蚀的主要驱动因素。此外, 2010 年后人为因素对土壤侵蚀的影响逐渐增加。[结论] 气候因素是青藏高原土壤侵蚀的主要驱动因素, 2010 年后青藏高原实施的生态恢复政策初见成效, 且随机森林回归可以很好地进行土壤侵蚀驱动因素的探究。

关键词: 土壤侵蚀; 气候变化; 人类活动; 随机森林回归模型; 青藏高原

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0126-09

Nonlinear Response of Soil Erosion in the Tibetan Plateau to Climate Change and Ecological Policies

Liu Yuejun^{1,2}, Cheng Jianghao^{1,2}, Zhang Yanjie^{1,2}

(1.College of Agricultural and Biological Sciences, Dali University, Dali, Yunnan 671003,

China; 2.Co-Innovation Center for Cangshan Mountain and Erhai Lake Integrated Protect and

Green Development of Yunnan Province, Dali University, Dali, Yunnan 671003, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to evaluate the spatiotemporal trends of soil erosion, to reveal the contributions of driving factors, to elucidate the impacts of ecological restoration policies, and to provide a scientific basis for the management of soil erosion on the Tibetan Plateau. [Methods] This study assessed the temporal and spatial characteristics of soil erosion by water on the Tibetan Plateau from 1990 to 2020, and identified the contribution of climatic, anthropogenic and topographic factors to soil erosion by Random Forest Regression. [Results] (1) The average soil erosion rate on the Tibetan Plateau was 305.78 t/km², and more than 80% of the area was slightly erosion during 1990—2020. Soil erosion decreased before 2010 and increased after 2010, showing a nonlinear variation. (2) Climate factors had a greater impact on soil erosion than anthropogenic factors in the Tibetan Plateau, and annual precipitation was the main factor on soil erosion. In addition, since 2010, the influence of anthropogenic factors on soil erosion gradually increased. [Conclusion] Climate factors are the primary driving force inducing soil erosion in the Tibetan Plateau. The ecological restoration policies implemented in the Tibetan Plateau have initially achieved results, but the impact of climate change on soil erosion is more significant. Additionally, Random Forest

收稿日期: 2023-06-08

修回日期: 2023-09-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(项目号: 42101292); 大理大学博士科研启动费项目(项目号: KYBS2021071)

第一作者: 刘悦俊(1998—), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统服务。E-mail: lyj@stu.dali.edu.com

通信作者: 张燕杰(1985—), 女, 内蒙古赤峰人, 博士, 副教授, 研究方向为人类活动对生态系统的影响。E-mail: zhangyj.16b@igsrr.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

Regression is effective for exploring the driving factors on soil erosion.

Keywords: soil erosion; climate change; human activities; Random Forest Regression model; Tibetan Plateau

由于气候变化和人类活动的影响,水土流失问题日益严峻,并逐渐演变为全球性的环境威胁^[1]。这种现象会对生态系统和社会经济的可持续性造成影响^[2]。此外,在水力作用下,土壤侵蚀会导致养分损失,从而降低土壤生产力,是农业和生产力可持续发展的主要环境威胁^[3]。土壤中流失的养分进入水文生态系统,会改变河流和海洋的养分循环,对水体造成污染^[4],进而影响生态系统中的物质循环。为了全面评估土壤侵蚀对社会经济和环境的深远影响,迫切需要明确土壤侵蚀变化的驱动因素。因此,量化土壤侵蚀程度及其驱动因素尤为重要,也是理解生态系统可持续性的关键。

对于土壤侵蚀这一全球性的重大环境问题,国内外学者自 19 世纪就开始展开研究^[5],随着研究的深入,修正通用土壤侵蚀方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)因其简单的建模过程、数据简洁、与遥感和地理信息系统技术兼容,并能将信息整合到一个比较的理论框架中,已被广泛用于土壤侵蚀的量化^[6]。此外,土壤侵蚀受到许多因素的影响,包括气候、地形、植被覆盖、土壤性质和土地管理做法等^[7-9]。为了区分这些因素的影响,迄今为止,研究者们已采用地理加权回归、普通最小二乘法、冗余分析、双累积曲线和多元线性回归等方法对土壤侵蚀的驱动因素进行深入分析^[10-11]。随机森林回归作为机器学习的算法之一,其具有良好的性能、优异的稳定性以及同时处理分类和数值特征的能力,因此被应用于各大领域,但很少应用于土壤侵蚀因素分析。因此本研究创建随机森林回归模型量化气候、人为和地形因素对不同等级土壤侵蚀的影响。

青藏高原是中国西部的生态屏障,被称为“世界第三极”^[12],对全球气候变化高度敏感;又因其是诸多河流的发源地被称为“亚洲水塔”^[13]。在过去的几十年里,由于过度放牧和气候暖干化的双重作用,导致青藏高原出现大面积草地退化^[14],草地的退化加速了土壤侵蚀过程。为了应对这一环境变化,青藏高原从 1998 年启动天然林保护工程^[15],2000 年后实施轮牧和草场轮作^[16],2003 年后实施了禁牧^[17],2000—2010 年实施植树造林、植草封沙和建设水土保持设施等项目^[18],2008 年实施生态付费项目以及建立生态保护区等一系列生态恢复政策^[19-20]。然而,这些政策对青藏高原土壤侵蚀的具体影响仍然不清楚。尽管青藏高原土壤侵蚀这一重大环境问题引起

了众多学者的重视^[21-24],但是现有研究主要关注土壤侵蚀的量化及时空变化分析,气候、人类活动和地形因素对土壤侵蚀的影响仍没有得到充分研究。因此,仍需进一步深入研究,以全面理解其根本原因和趋势。基于以上背景,本研究旨在:(1) 分析 1990—2020 年青藏高原土壤侵蚀的时空变化趋势。(2) 基于随机森林回归模型,探讨气候变化和生态政策下,气候、地形和人为因素对土壤侵蚀的影响。本研究应用机器学习算法来量化驱动力对不同等级和时期土壤侵蚀变化的贡献,以填补以往研究的不足之处。旨在为青藏高原的资源管理、土地开发战略和生态恢复措施的实施提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

青藏高原位于北纬 26°00′—39°47′,东经 73°19′—104°47′,面积约 250 万 km²^[25],位于中国的西南部。其地形和景观呈现出多样性的变化,海拔高度差异显著,介于 85~8 191 m(图 1)。其独特的地理位置,形成了明显的环境梯度,年均气温为-5.6~3.8℃,年均降水量 262.2~772.8 mm,年均蒸散量为 730~1 700 mm 并且由东南向西北递减^[26]。主要生态系统类型包括高寒草甸生态系统、高寒草原生态系统、森林生态系统以及稀疏植被生态系统^[27]。青藏高原主要土壤类型有:高山草甸土、亚高山草甸土、高山草原土、山地草甸土、亚高山草原土和草甸土。由于其独特的水热条件和环境特点,青藏高原在战略、生态和发展等方面具有重要的地位。

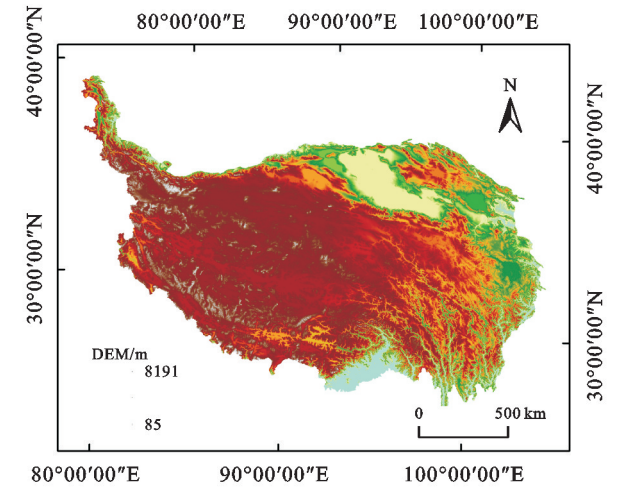


图 1 研究区概况

Fig. 1 Study area

1.2 研究方法

InVEST 模型土壤侵蚀模块基于通用土壤侵蚀方程,考虑土地利用类型,计算土壤侵蚀量,方程如下:

$$SE=R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中:SE 表示土壤侵蚀量(t/km^2); R 为降雨侵蚀力因子 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$; K 为土壤可蚀性因子; LS 为坡长和坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子。

InVEST 模型土壤侵蚀模块使用的输入数据及处理见表 1,包括:数字高程模型(DEM)(用于计算坡长和坡度因子 LS)、降雨侵蚀力因子(R)、土壤可蚀性因子(K)和土地利用/覆被、一级流域、次级流域以及生物物理系数表(包括土地利用类型代码、植被覆盖因子 C 和水土保持措施因子 P)。其中,本研究水土保持因子 P 采用了模型的默认值。

降雨侵蚀力因子(R)。降雨侵蚀力表示由降雨引起的土壤侵蚀的潜在能力,反映了降雨对土壤分离和搬运运动的强度。本研究运用月降雨量和年降雨量计算降雨侵蚀力^[28]:

$$R=0.264F^{1.50} \quad (2)$$

$$F=\sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \quad (3)$$

式中: P 为年降雨量(mm); P_i 为第 i 月降雨量(mm)。

土壤可蚀性因子(K)。通用土壤侵蚀方程中的土

壤可蚀性因子反映不同土壤质地与土壤剖面特征对土壤侵蚀的影响程度。本研究运用 Sharpley and Williams^[29] 的土壤可蚀性因子估算方法,计算公式如下:

$$K=\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.0256 \cdot S_a \cdot \left(1-\frac{S_i}{100}\right)\right]\right\} \cdot \left(\frac{S_i}{C_i+S_i}\right)^{0.3} \cdot \left[1.0-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-2.95C)}\right] \cdot \left(1.0-\frac{0.7S_n}{S_n-\exp(-5.51+22.9S_n)}\right) \quad (4)$$

式中: S_a 为土壤砂粒含量; S_i 为土壤粉粒含量; S_l 为土壤黏粒含量; C 为土壤有机碳含量; $S_n=1-S_a/100$ 。

植被覆盖因子(C)。本研究基于归一化植被指数(NDVI)运用像元二分法计算植被覆盖度。公式如下:

$$f=\frac{(NDVI-NDVI_{soil})}{(NDVI_{max}-NDVI_{soil})} \quad (5)$$

式中: f 为植被覆盖度; $NDVI_{soil}$ 为裸地 NDVI 值; $NDVI_{max}$ 为研究区域内 NDVI 最高值。

在植被覆盖度 f 的基础上,运用以下公式计算植被覆盖因子 C :

$$C=\begin{cases} 1 & f=0 \\ 0.6508-0.3436\lg f & 0<f\leq 78.3 \\ 0 & f>78.3 \end{cases} \quad (6)$$

式中: C 为植被覆盖因子; f 为植被覆盖度(%)。

表 1 数据来源及处理

Table 1 Data and sources

数据	来源及处理	时期
年降水量/年均气温	中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn);运用软件 ANUSPLIN 进行插值	1990—2020
年蒸散	运用 Priestley-Taylor 模型计算	1990—2020
植物可利用水量	世界和谐土壤数据库(http://www.geodata.cn/)	1990—2020
土壤数据	世界和谐土壤数据库(http://www.geodata.cn/)	1990—2020
土地利用/覆盖		
国内生产总值(GDP)		
人口密度(POP)	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)	1990—2020
DEM		
NDVI	GIMMS(https://www.nasa.gov/nex)	1990—1999
	MOD13A2(https://lpdaac.usgs.gov/get_data)	2000—2020

1.3 数据分析

随机森林回归模型(Random Forest Regression, RFR)是一种基于决策树的集成学习算法。通过 Bootstrap 抽样方式,在给定的 m 个样本数据集中,进行 m 次随机采样,得到含 m 个训练样本的采样集,然后基于每个采样集进行训练构建决策树,将每棵决策树输出的均值作为最终结果(图 2)。随机森林回归能够高效处理高维数据,并且模型中需要调整的参数较少,只需设置两个参数:生成的决策树数

量(Ntree)和决策树生长分裂时选择用于测试的特征数目(Mtry),因此,被应用于多个研究领域^[30-31]。

土壤侵蚀是一个复杂的过程,受多方面因素影响,为了深入研究土壤侵蚀驱动因素的差异,本研究引入随机森林回归模型,来解释驱动因素与土壤侵蚀变化之间的综合定量关系。基于 1990—2010 年、2010—2020 年土壤侵蚀变化(自变量),将气候因素(年降水量、年均气温和年蒸散)、人为因素(GDP、人口密度和 NDVI)、地形因素(海拔、坡度和土壤可蚀

性)作为驱动因素(因变量),建立随机森林回归模型。经过调试最终选定参数 $Ntree = 100, Mtry = 3$, 采样率为 0.01, 其余参数采用默认值。运算多次并取其均值为最终结果。

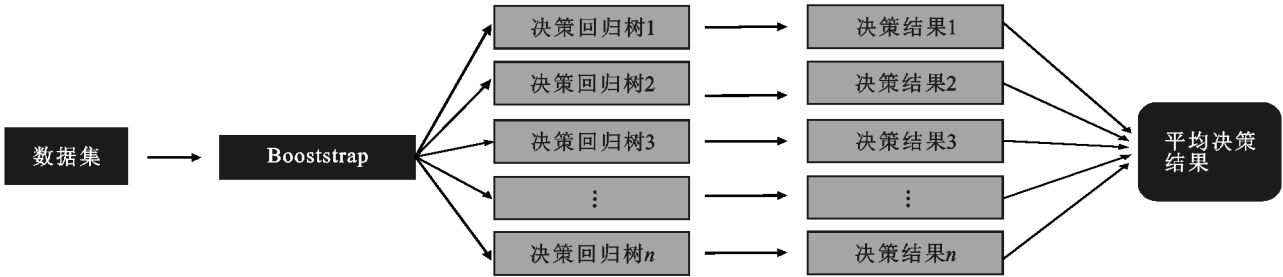


图 2 随机森林回归模型流程图

Fig. 2 Flow chart of random forest regression

2 结果与分析

2.1 青藏高原土壤侵蚀的时空变化趋势

在 1990—2020 年期间,青藏高原平均单位面积土壤侵蚀模数为 305.78 t/km^2 (图 3), 1994 年的土壤侵蚀平均模数最低, 为 101.58 t/km^2 , 而 2016 年土壤侵蚀模数最高, 达到 650.07 t/km^2 。在 1990—2010 年期间, 土壤侵蚀年际变化呈现减少趋势, 减少速率为 3.37 t/km^2 ; 而在 2010—2020 年期间, 土壤侵蚀呈现明显的增加趋势, 增加速率为 41.043 t/km^2 。可见, 2010 年为土壤侵蚀的转折点。

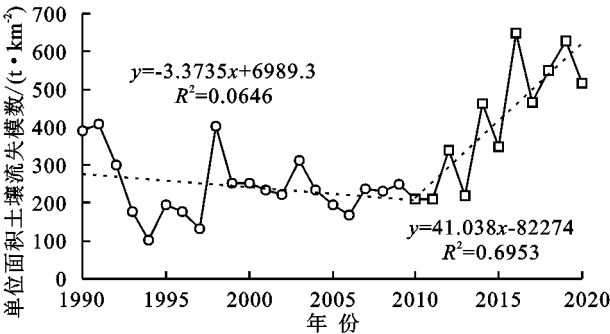


图 3 1990—2020 年青藏高原土壤侵蚀模数及其变化趋势

Fig. 3 Soil erosion of the Tibetan Plateau from 1990—2020

按照水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007), 本研究将青藏高原 1990 年、2010 年、2020 年的土壤侵蚀评价结果划分为 6 个土壤侵蚀强度级别, 并对土壤侵蚀面积和侵蚀量进行了统计分析(表 2)。青藏高原的土壤侵蚀呈现明显的空间异质性, 由西北向东南逐渐加剧(图 4)。在 1990 年、2010 年、2020 年, 不同土壤侵蚀强度级别的空间分布存在差异, 整个研究区超过 80% 的区域属于微度侵蚀, 主要分布在西北地区。尽管剧烈侵蚀的面积最小, 但造成的侵蚀量最大, 超过侵蚀总量的 30%(表 2)。青藏高原东南部的强度侵蚀、极强侵蚀和剧烈侵蚀的总面积不到青藏高原总面积的 5%, 但是造成了约 60% 土壤侵蚀。可见, 青藏高原东南部的土壤侵蚀存在较大

的潜在风险, 因此加强土壤侵蚀治理尤为重要。

研究期间, 土壤侵蚀面积的变化以微度、轻度和中度侵蚀为主, 主要分布在青藏高原西南和东南(图 5)。1990—2010 年青藏高原的微度和轻度侵蚀面积分别增加了 0.34%, 0.64%, 对应的侵蚀总量增加 2.62% 和 2.27%。中度侵蚀面积减少了 0.22%, 但是土壤侵蚀量增加了 0.62%; 而强度、极强烈和剧烈侵蚀面积分别减少了 0.23%, 0.27% 和 0.06%, 对应的土壤侵蚀总量减少了 0.31%, 1.43% 和 3.75%。由于强度、极强烈和剧烈侵蚀造成的土壤侵蚀量减少, 青藏高原在 1990—2010 年的土壤侵蚀状况有所改善。2010—2020 年青藏高原的微度侵蚀面积增加了 2.56%, 但是土壤侵蚀量减少了 0.85%; 随着轻度和剧烈侵蚀面积比例的减少(分别为 1.68% 和 0.12%), 土壤侵蚀量也随之减少, 分别减少为 0.34% 和 1.58%。而中度、强度和极强烈土壤侵蚀面积减少 0.52%, 0.14%, 0.1%, 但是土壤侵蚀量却分别增加了 0.62%, 0.9% 和 1.25%。因此, 2010—2020 年的土壤侵蚀状况有所加重。因此, 分析不同等级土壤侵蚀的驱动因素对更好地理解青藏高原土壤侵蚀变化的原因具有重要意义。

2.2 青藏高原土壤侵蚀及其驱动因素

1990—2010 年各因素对土壤侵蚀变化的贡献度从大到小依次是: 年降水量 > 人口密度 > 坡度 > 海拔 > GDP > 年均气温 > 年蒸散 > NDVI > 土壤可蚀性。而 2010—2020 年各因素对土壤侵蚀变化的贡献度从大到小依次是: 年降水量 > 人口密度 > 坡度 > GDP > 海拔 > 年蒸散 > 年均气温 > NDVI > 土壤可蚀性(表 3)。这表明, 年降水量、人口密度和坡度是影响土壤侵蚀的主要因素, 而土壤可蚀性的影响最小。年降水量对土壤侵蚀变化的解释力最强(表 3), 是揭示土壤侵蚀变化的最主要的因素。

不同时期和不同等级的土壤侵蚀变化的主要驱动因素不同(图 6)。在 1990—2010 年期间, 微度侵

蚀变化的主要驱动力为人为因素和气候因素,其中人口密度、年降水量和 GDP 的贡献度分别为 15.61%, 15.22%和 12.77%。轻度侵蚀的主要受气候影响,其中年降水量的贡献度为 16.16%。对于中度侵蚀,气候、地形(除土壤可蚀性外)和人为因素的贡献较为均衡。强度、极强烈和剧烈侵蚀主要由气候因素影响,其中坡度对强度侵蚀影响显著,贡献度为 14.61%。对于极强侵蚀,年降水量的影响更为显著,贡献度为 14.77%。

海拔对剧烈侵蚀的贡献度明显增加,为 15.21%。而在 2010—2020 年期间,微度、轻度和中度侵蚀变化的主导因素为气候和人为因素。年降水量对轻度侵蚀变化的贡献度最大,年降水量和人口密度对轻度和中度侵蚀的影响较大。年降水量对强度侵蚀变化的影响较其他因素显著,贡献度为 13.33%;而极强侵蚀受坡度的影响更大,贡献度为 15.33%;坡度和年降水量对剧烈侵蚀的贡献度分别为 14.75%和 13.85%。

表 2 土壤侵蚀级别分类及其面积和占比

Table 2 Classification of soil erosion and current statistics

侵蚀级别	侵蚀模数/ ($t \cdot km^{-2}$)	1990 年		2010 年		2020 年	
		侵蚀面积/ $10^3 km^2$	侵蚀总量/ ($10^3 t \cdot km^{-2}$)	侵蚀面积/ $10^3 km^2$	侵蚀总量/ ($10^3 t \cdot km^{-2}$)	侵蚀面积/ $10^3 km^2$	侵蚀总量/ ($10^3 t \cdot km^{-2}$)
微度侵蚀	<1000	2113(82%)	3241(11%)	2122(83%)	3601(14%)	2186(85%)	2849(13%)
轻度侵蚀	1000~2500	223(9%)	3541(12%)	239(9%)	3782(15%)	196(8%)	3110(14%)
中度侵蚀	2500~5000	112(4%)	3947(14%)	107(4%)	3725(15%)	93(4%)	3271(15%)
强度侵蚀	5000~8000	49(2%)	3066(11%)	43(2%)	2689(10%)	39(2%)	2459(11%)
极强侵蚀	8000~15000	40(2%)	4269(15%)	33(1%)	3488(14%)	30(1%)	3207(15%)
剧烈侵蚀	>15000	31(1%)	10370(36%)	24(1%)	8405(33%)	21(1%)	6735(31%)

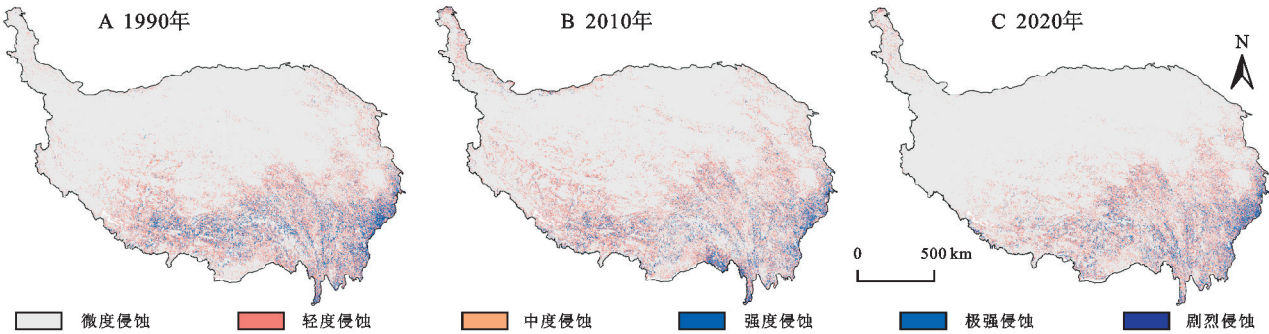


图 4 1990 年、2010 年、2020 年青藏高原土壤侵蚀的空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of soil erosion

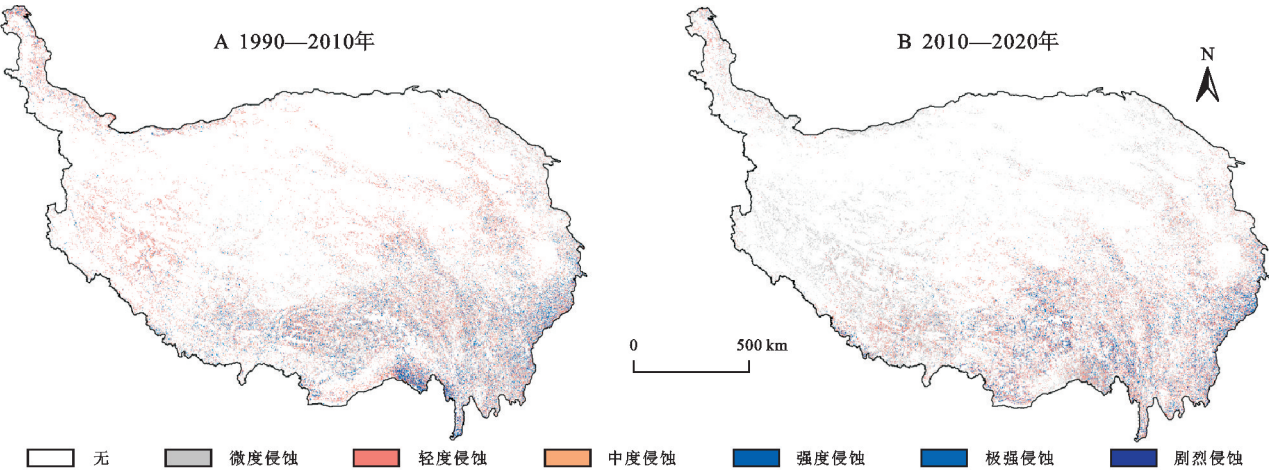


图 5 1990—2010、2010—2020 年青藏高原土壤侵蚀变化的分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of soil erosion change in the Tibetan Plateau

土壤侵蚀的变化是气候、人为和地形因素共同作用的结果,其中气候因素的影响较为突出。在气候和地形因素相对稳定的背景下,通过控制人为因素对土

地覆被的干扰,可以有效增加土地的水土保持能力,减少土壤侵蚀程度。此外,尽管 2010 年后,植被和年降水量对土壤侵蚀的影响增大,但土壤侵蚀加剧更加

印证了年降水量对土壤侵蚀影响的重要性。

2.3 青藏高原土壤侵蚀主导因素及空间异质性

研究期间,土壤侵蚀的变化在青藏高原西南和东南部发生了显著变化。不同时期和地区的土壤侵蚀变化的主导因素不同(图 7)。在西南部,土壤侵蚀变化的主要驱动因素为年降水量和坡度。然而,1990—2010 年坡度的影响比年降水量要大,而 2010—2020 年年降水量的影响比坡度要大。相比之下,在东南部,土壤侵蚀变化的主要驱动因素为年降水量、坡度

和人口密度,1990—2010 年人口密度和坡度的影响较为突出,而年降水量的作用较弱,而在 2010—2020 年期间,年降水量的影响显著增强。总而言之,2010 年后,年降水量对土壤侵蚀的影响变大。因此,青藏高原西南和东南部是土壤侵蚀的重点治理区域,且东南部的土壤侵蚀会导致更多的土壤侵蚀量。在这些区域加强土壤侵蚀治理尤为迫切。特别是加强降雨对土壤侵蚀的治理,因为降水是土壤侵蚀的主导因素。

表 3 1990—2010,2010—2020 年土壤侵蚀变化的驱动因素及其贡献度
Table 3 Driving factors of soil erosion and their contribution form 1990—2020

%

1990—2010 年	气候因素			人为因素			地形因素		
	年降水量	年均气温	年蒸散	GDP	POP	NDVI	高程	坡度	土壤可蚀性
微度侵蚀	15.22	9.58	8.16	12.77	15.61	10.52	11.37	9.68	7.09
轻度侵蚀	16.16	11.64	9.32	11.51	12.68	9.48	10.28	12.82	6.09
中度侵蚀	11.45	9.59	10.84	12.27	12.60	9.82	12.12	14.20	7.12
强度侵蚀	11.90	11.91	10.70	11.14	11.79	9.59	12.88	14.61	5.47
极强侵蚀	14.77	12.13	11.83	10.64	11.32	8.70	13.07	12.47	5.07
剧烈侵蚀	14.69	10.62	9.52	9.49	11.65	11.87	15.21	11.30	5.65

2010—2020 年	气候因素			人为因素			地形因素		
	年降水量	年均气温	年蒸散	GDP	POP	NDVI	高程	坡度	土壤可蚀性
微度侵蚀	18.66	8.90	8.62	11.07	13.55	10.24	10.43	5.43	13.11
轻度侵蚀	14.19	9.73	10.03	11.05	13.34	11.97	11.25	12.59	5.85
中度侵蚀	13.25	10.88	10.94	12.86	13.75	10.20	9.14	13.82	5.16
强度侵蚀	13.33	10.71	11.04	10.86	12.45	10.63	11.43	10.99	8.56
极强侵蚀	11.24	13.72	10.08	10.57	12.02	10.01	9.75	15.33	7.26
剧烈侵蚀	13.85	8.85	13.31	10.40	9.01	9.12	12.30	14.75	8.41

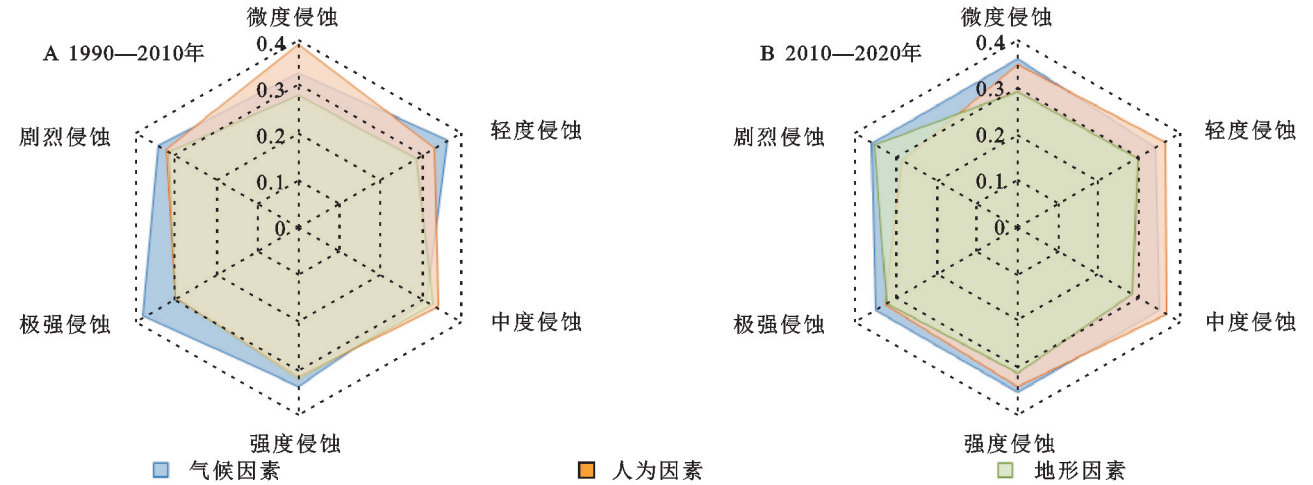


图 6 气候、人为和地形因素对不同土壤侵蚀等级的影响的贡献度

Fig. 6 The contribution of climatic, anthropogenic and topography factors of soil erosion

3 讨论

土壤侵蚀是多种驱动因素共同作用的结果,定量地从多尺度确定各个因素对土壤侵蚀的影响仍然是一个具有挑战性的难题^[32]。现有研究中的大多数针对青藏高原土壤侵蚀驱动因素的研究依然没有解决这一难题^[21-23]。本研究基于 InVEST 模型,定量评

估了 1990—2020 年青藏高原土壤侵蚀的时空变化趋势,并利用随机森林回归识别各个因素对不同等级的土壤侵蚀扩张的贡献度,填补了以往研究的不足之处。此外,我们从不同土壤侵蚀级别变化进行分析,使土壤侵蚀情况在空间上的反映更为直观,有助于人们更好地理解青藏高原土壤侵蚀的时空变化及其驱动因素。

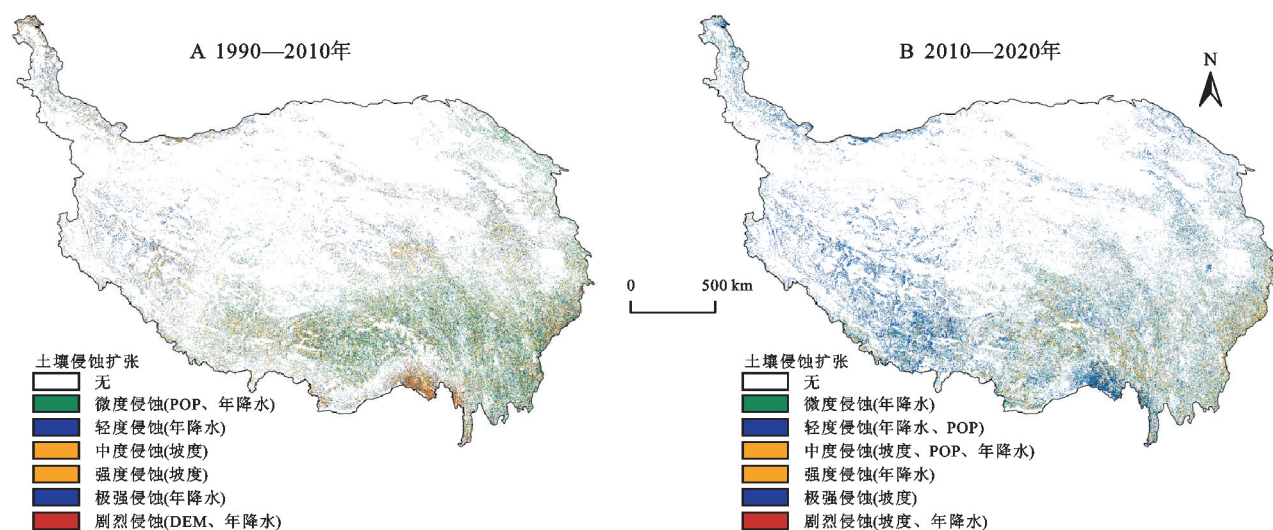


图 7 不同等级土壤侵蚀强度变化及其主导因素

Fig. 7 Change of soil erosion intensity and dominant factors

有研究结果表明 USLE 模型模拟的土壤侵蚀与各省的土壤侵蚀观测值高度一致($R^2 = 0.953$, $N = 18$, $p < 0.0001$)^[33],而基于 USLE 改良的 RUSLE 对土壤侵蚀的预测优于 USLE,因此,RUSLE 模型可以准确反映并用于评估青藏高原的土壤侵蚀。此外,康琳琦等的研究基于 RUSLE 模型评估青藏高原的土壤侵蚀^[21],其土壤侵蚀的逐年变化趋势与本研究的结果几乎一致。另外,青藏高原的土壤侵蚀空间格局呈现出明显的区域异质性,从东南到西北递减,这与前人的研究结果^[22]一致。总之,这些研究表明 RUSLE 模型在评估青藏高原的土壤侵蚀方面具有较高的准确性。

青藏高原的土壤侵蚀由东南向西北递增,这与年降水量的空间分布格局一致,且年降水量对土壤侵蚀变化的解释力最。此外,青藏高原的土壤侵蚀的年际变化呈现先减后增的趋势,与年降水量的变化一致。降水通过增加地表径流造成土壤侵蚀,同时也会改善植被,从而减少侵蚀。因此,降水是土壤侵蚀的主要驱动因素。另外,相对平坦的地形通常伴随较低的土壤侵蚀,因此地形因素也会对土壤侵蚀产生显著影响。同时,经济发展和人类活动会影响土地覆被,进而影响土壤侵蚀。综合而言,土壤侵蚀的变化是气候、人为和地形因素综合作用的结果。

随着城市化进程的迅速推进,人类活动会对气候和土地覆被造成影响,进而导致土壤侵蚀发生变化^[34]。我国政府实施的天然林保护工程、植树造林、生态付费项目、轮牧、禁牧和建立生态保护区等一系列生态恢复政策^[15-20]。因此,在生态政策的干预下,2010 年后青藏高原高原植被有所改善,植被的改善对土壤侵蚀起到了积极影响。自 2010 年以后,人为因素对轻度、中度和强度侵蚀的影响增强,人口密度

的贡献度减少,而 NDVI 贡献增加。我们的研究结果证明,政府对青藏高原实施的生态保护措施初见成效。尽管植被的改善对土壤侵蚀产生了积极影响,但是,整体来说,青藏高原气候对土壤侵蚀的影响显著。由于 2010 年后降雨增多,特别是在陡峭的东南部,导致了更多的侵蚀量,因此 2010 年后土壤侵蚀有所增加。此外,青藏高原东南部的强度和极强侵蚀会导致更多侵蚀量。因此,青藏高原东南部是土壤侵蚀治理的重点区域,有必要采取相应的水土保持控制措施。在气候和地形因素相对稳定的前提下,调节人为因素对土壤侵蚀治理尤为重要。例如,在青藏高原东南部实施水土保持措施时,应优先考虑减少降水造成侵蚀,比如植树造林增加覆被等。

青藏高原地形地貌复杂、气候多变并且土壤脆弱。改善青藏高原的土壤侵蚀,有助于推进高原生态屏障区生态保护和恢复工作。青藏高原不同区域的土壤侵蚀的驱动因素不同,明确不同区域土壤侵蚀的原因,对制定有针对性的水土流失防治方案具有重大意义。因地制宜建设生态保护和恢复工程至关重要。例如在草原退化严重的三江源地区,对草原进行差别化治理是必要的,禁牧的同时需开展草原抚育和退化草地修复,以期改善土壤侵蚀状况。

尽管模型模拟的结果存在一定的不确定性,并且无法完全模拟土壤侵蚀的过程,但在本研究中,我们侧重于探讨土壤侵蚀的时空变化趋势。因此,本研究的结果可以在总体上反映出各因素与土壤侵蚀的关系。这有助于人们理解土壤侵蚀变化的机制,并可为青藏高原土地资源管理提供科学依据。

4 结论

本研究应用 InVEST 模型,评估 1990—2020 年

青藏高原土壤侵蚀的时空变化趋势,并基于随机森林回归模型,探讨了气候、人为和地形因素对土壤侵蚀的影响,结论如下:

(1) 1990—2020年,青藏高原平均土壤侵蚀模数为305.78 t/km²。空间上呈现由东南向西北递减的趋势;土壤侵蚀的年际变化呈现先减后增的趋势。1990—2010年青藏高原的土壤侵蚀有所改善;2010—2020年的土壤侵蚀状况有所加重,呈现非线性变化。青藏高原超过80%的区域属于微度侵蚀,东南部的强度、极强烈、剧烈侵蚀所占面积最少,但导致了较多的侵蚀量,因此东南部是土壤侵蚀治理的重点区域。

(2) 年降水量是影响青藏高原土壤侵蚀的主要因素,气候对土壤侵蚀的影响显著大于人为因素。不同时期土壤侵蚀的主导驱动因素不同。西南部土壤侵蚀变化的主要驱动因素为年降水量和坡度,2010年后坡度的影响比年降水量更为显著。东南部的土壤侵蚀扩张的主要驱动因素为年降水量、坡度和人口密度,1990—2010年人口密度和坡度的影响较为显著,2010年后,年降水的影响显著增强。2010年后,NDVI和年降水量对土壤侵蚀的影响增加,可见,青藏高原实施的生态恢复政策初见成效,然而水土流失的加剧凸显了气候的主导作用。

参考文献(References):

- [1] Yang D W, Kanae S, Oki T, et al. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes [J]. *Hydrological Processes*, 2003,17(14):2913-2928.
- [2] 季翔林,阎跃观,郭伟,等.耦合遥感生态指数模型的山西省及规划矿区生态环境评价[J].*煤田地质与勘探*, 2023,51(3):103-112.
Ji X L, Yan Y G, Guo W, et al. Ecological environment assessment of Shanxi Province and planned mining area based on coupling Remote Sensing Ecological Index (RSEI) model[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(3):103-112.
- [3] Bauer J E, Cai W J, Raymond P A, et al. The changing carbon cycle of the coastal ocean[J]. *Nature*, 2013,504: 61-70.
- [4] 张兴昌,邵明安.水蚀条件下不同土壤氮素和有机质流失规律[J].*应用生态学报*, 2000,11(2):231-234.
Zhang X C, Shao M A. Soil nitrogen and organic matter losses under water erosion[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 231-234.
- [5] Nearing M A, Romkens M J M, Norton L D, et al. Measurements and models of soil loss rates[J]. *Science*, 2000,290(5495):1300-1301.
- [6] Pinson A O, AuBuchon J S. A new method for calculating C factor when projecting future soil loss using the Revised Universal soil loss equation (RUSLE) in semi-arid environments[J]. *CATENA*, 2023,226:107067.
- [7] 张艳,史飞航,张悦,等.黄河中游土壤侵蚀时空变化及驱动因素[J].*水土保持研究*, 2023,30(5):1-12.
Zhang Y, Shi F H, Zhang Y, et al. Temporal and spatial changes and driving factors of soil erosion in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(5):1-12.
- [8] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. *Transactions of the ASAE*, 1994,37(6):1835-1840.
- [9] 张秋菊,傅伯杰,陈利顶,等.黄土丘陵沟壑区县域耕地变化驱动要素研究:以安塞县为例[J].*水土保持学报*, 2003,17(4):146-148,152.
Zhang Q J, Fu B J, Chen L D, et al. Arable land use changes at county level in hilly area of Loess Plateau China: A case study of Ansai County[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2003,17(4):146-148,152.
- [10] 穆兴民,李朋飞,刘斌涛,等.1901—2016年黄土高原土壤侵蚀格局演变及其驱动机制[J].*人民黄河*, 2022,44(9):36-45.
Mu X M, Li P F, Liu B T, et al. Spatial-temporal development and driving mechanisms of erosion on the Chinese Loess Plateau between 1901 and 2016[J]. *Yellow River*, 2022,44(9):36-45.
- [11] 郭震,黄贤金,章波,等.江西红壤区农户水土保持行为机理:以兴国县为例[J].*南京大学学报:自然科学版*, 2004,40(3):370-377.
Wu Z, Huang X J, Zhang B, et al. Studies on the mechanism of farmers' water and soil conservation in Jiangxi red soil region[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2004,40(3):370-377.
- [12] 姚檀栋,陈发虎,崔鹏,等.从青藏高原到第三极和泛第三极[J].*中国科学院院刊*, 2017,32(9):924-931.
Yao T D, Chen F H, Cui P, et al. From Tibetan Plateau to third pole and pan-third pole[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017,32(9):924-931.
- [13] Qu B, Zhang Y L, Kang S C, et al. Water quality in the Tibetan Plateau: Major ions and trace elements in rivers of the "Water Tower of Asia"[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019,649:571-581.
- [14] Wang W Y, Wang Q J, Wang H C. The effect of land management on plant community composition, species diversity, and productivity of alpine Kobersia steppe meadow[J]. *Ecological Research*, 2006,21(2):181-187.
- [15] Yan K, Wang W F, Li Y H, et al. Identifying priority conservation areas based on ecosystem services change driven by Natural Forest Protection Project in Qinghai Province, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022,362:132453.
- [16] Zhang N N, Sun G, Zhong B, et al. Impacts of wise grazing on physicochemical and biological features of soil in

- a sandy grassland on the Tibetan Plateau[J]. *Land Degradation & Development*, 2019,30(7):719-729.
- [17] 杨振安,姜林,徐颖怡,等.青藏高原高寒草甸植被和土壤对短期禁牧的响应[J].*生态学报*, 2017, 37(23): 7903-7911.
- Yang Z A, Jiang L, Xu Y Y, et al. Responses of vegetation and soil of alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau to short-term grazing prohibition [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(23):7903-7911.
- [18] Liu X Y, Xin L J, Lu Y H. National scale assessment of the soil erosion and conservation function of terraces in China[J]. *Ecological Indicators*, 2021,129:107940.
- [19] Huang L, Shao Q Q, Liu J Y, et al. Improving ecological conservation and restoration through payment for ecosystem services in Northeastern Tibetan Plateau, China[J]. *Ecosystem Services*, 2018,31:181-193.
- [20] 秦乐,朱彦鹏,任月恒,等.青藏高原国家级自然保护区管理能力差异及其对保护成效的影响[J].*生物多样性*, 2022,30(11):183-191.
- Qin L, Zhu Y P, Ren Y H, et al. Differences in management capacity of national nature reserves on the Qinghai-Tibet Plateau and the impact on conservation effectiveness[J]. *Biodiversity Science*, 2022, 30(11): 183-191.
- [21] 康琳琦,周天财,干友民,等.1984—2013年青藏高原土壤侵蚀时空变化特征[J].*应用与环境生物学报*, 2018, 24(2):245-253.
- Kang L Q, Zhou T C, Gan Y M, et al. Spatial and temporal patterns of soil erosion in the Tibetan Plateau from 1984 to 2013[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018,24(2):245-253.
- [22] Teng H F, Liang Z Z, Chen S C, et al. Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018,635:673-686.
- [23] 李元寿,王根绪,王军德,等.¹³⁷Cs示踪法研究青藏高原草甸土的土壤侵蚀[J].*山地学报*, 2007,25(1):114-121.
- Li Y S, Wang G X, Wang J D, et al. ¹³⁷Cs trace technique to study soil erosion at alpine meadow of Tibetan Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2007,25(1): 114-121.
- [24] 张鹏,格桑卓玛,范建容,等.西藏“一江两河”地区土壤侵蚀现状及分布特征[J].*水土保持研究*, 2017, 24(1): 49-53.
- Zhang P, Gesangzhuoma, Fan J R, et al. Soil erosion status and distribution characteristics in the ‘one river and two streams’ region in Tibet[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017,24(1):49-53.
- [25] 鄂竟平.中国水土流失与生态安全综合科学考察总结报告[J].*中国水土保持*, 2008(12):3-7.
- E J P. Summary report on comprehensive scientific investigation of soil erosion and ecological security in China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2008(12): 3-7.
- [26] Song L L, Zhuang Q L, Yin Y H, et al. Spatio-temporal dynamics of evapotranspiration on the Tibetan Plateau from 2000 to 2010[J]. *Environmental Research Letters*, 2017,12(1):014011.
- [27] Sun J, Qin X J, Yang J. The response of vegetation dynamics of the different alpine grassland types to temperature and precipitation on the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015,188(1):20.
- [28] Efthimiou N. Evaluating the performance of different empirical rainfall erosivity (R) factor formulas using sediment yield measurements[J]. *Catena*, 2018,169: 195-208.
- [29] Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator:1. Model documentation. [J]. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture, 1990,4(4): 206-207.
- [30] 邢晓语,杨秀春,徐斌,等.基于随机森林算法的草原地上生物量遥感估算方法研究[J].*地球信息科学学报*, 2021,23(7):1312-1324.
- Xing X Y, Yang X C, Xu B, et al. Remote sensing estimation of grassland aboveground biomass based on random forest[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021,23(7):1312-1324.
- [31] 李雪柔,陈飞燕,林爱文,等.基于随机森林回归的茶园扩张驱动机制分析[J].*生态与农村环境学报*, 2020,36(1):44-52.
- Li X R, Chen F Y, Lin A W, et al. Driving mechanism of tea plantation expansion using a random forest regression model[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020,36(1):44-52.
- [32] 常梦迪,王新军,李娜,等.基于CSLE模型的天山北坡中段山区水力侵蚀时空变化特征及影响因素研究[J].*干旱区研究*, 2021,38(4):939-949.
- Chang M D, Wang X J, Li N, et al. Study on temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of hydraulic erosion in the middle of the northern slope of Tianshan Mountains based on CSLE model[J]. *Arid Zone Research*, 2021,38(4):939-949.
- [33] Rao E M, Xiao Y, Ouyang Z Y, et al. National assessment of soil erosion and its spatial patterns in China[J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2015,1(4):1-10.
- [34] Zhang S W, Wang Y, Li C R, et al. The response of rocky desertification to the development of road networks in Karst ecologically fragile areas[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023,20(4):3130.