

DOI: 10.16843/j.sswc.2023099

引用格式: 程露, 黎丽莉, 毛智慧. 基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀时空变化及其影响因子: 以粤港澳大湾区为例 [J]. 中国水土保持科学, 2025, 23(3): 62–72. CHENG Lu, LI Lili, MAO Zhihui. Spatio-temporal variation of soil erosion and its influencing factors based on RUSLE model: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(3): 62–72.

# 基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀时空变化 及其影响因子 ——以粤港澳大湾区为例

程露<sup>1,2</sup>, 黎丽莉<sup>1,2†</sup>, 毛智慧<sup>1,2</sup>

(1. 仲恺农业工程学院资源与环境学院, 510225, 广州; 2. 广东省农业产地环境污染防控工程技术研究中心, 510225, 广州)

**摘要:** 深入了解区域的土壤侵蚀时空演变特征, 可为该地区水土保持的开展提供参考。使用修正的通用土壤流失方程模型, 估算粤港澳大湾区 2010 和 2020 年的土壤侵蚀模数, 探讨土壤侵蚀的时空变化特征及其影响因素。结果表明: 1) 粤港澳大湾区 2010 和 2020 年土壤侵蚀模数分别为 13.24 和 8.74 t/(hm<sup>2</sup>·a), 10 a 间土壤侵蚀模数减少 34%, 土壤侵蚀呈好转趋势。2) 大湾区的土壤侵蚀呈现中部侵蚀强度低、周围地区侵蚀剧烈的空间特征。2010—2020 年大湾区土壤侵蚀强度等级较为稳定, 88.2% 的地区未出现侵蚀强度等级变化。土壤侵蚀加剧的区域主要集中在大湾区北部、西南部及东部沿海区域。3) 土壤侵蚀模数随海拔的增加先降低再升高, 海拔 > 1 000 m 的地区侵蚀模数最大; 坡度越陡, 侵蚀强度越大; 草地和耕地是土壤侵蚀严重的区域, 侵蚀模数分别为 13.96 和 13.43 t/(hm<sup>2</sup>·a)。研究表明, 大湾区的土壤侵蚀治理措施较为有效, 未来需要进一步关注陡坡、高海拔、草地及耕地等区域的土壤侵蚀防治。

**关键词:** 土壤侵蚀; RUSLE 模型; 时空特征; 影响因素; 粤港澳大湾区

中图分类号: S157.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-2673(2025)03-0062-11

## Spatio-temporal variation of soil erosion and its influencing factors based on RUSLE model:

A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

CHENG Lu<sup>1,2</sup>, LI Lili<sup>1,2</sup>, MAO Zhihui<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 510225, Guangzhou, China; 2. Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center for Agricultural Land Pollution Prevention and Control, 510225, Guangzhou, China)

**Abstract:** [Background] Soil erosion causes a serious threat to agricultural production and ecosystems. As one of China's fastest growing urban agglomerations, the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (the GBA) has experienced serious soil erosion and significant reduction in land resources in recent years with the expansion of urban land. A deep understanding of the spatial and temporal variation of regional soil erosion may provide theoretical support for the rational development

收稿日期: 2023-06-20 修回日期: 2024-07-26

项目名称: 国家自然科学基金面上项目“水稻物候特征对气溶胶直接辐射效应的动态反馈机制研究”(42277263); 广东省自然科学基金面上项目“广东省水稻关键生长期的遥感精准识别技术研究”(2022A1515011077)

第一作者简介: 程露(1997—), 女, 硕士研究生。主要研究方向: 3S 技术在农业中的应用。E-mail: chenglu0825@163.com

†通信作者简介: 黎丽莉(1989—), 女, 博士, 副教授。主要研究方向: 农业遥感。E-mail: lilili@gig.ac.cn

of ecological protection, and soil and water conservation. [Methods] Supported by normalized difference vegetation index (NDVI), precipitation data, land cover products and digital elevation model (DEM), the soil erosion modulus in the GBA in 2010 and 2020 were calculated based on the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model. Localization and modification of the calculation method for each factor have been conducted to obtain accurate soil erosion results in 2010 and 2020. Spatio-temporal variation of soil erosion were analyzed by layer overlay and change matrix, and the relationship between soil erosion and elevation, slope gradient, land use type were explored by statistical analysis. [Results] 1) The soil erosion modulus of the GBA in 2010 and 2020 were 13.24 and 8.74 t/(hm<sup>2</sup>·a), respectively, showing a notably decreasing trend with a percentage of 34% in recent 10 years. The soil erosion intensity in 2020 showed a continuous increasing trend in slight and light erosion, and soil erosion showed an improving trend. 2) Soil erosion in the GBA demonstrated spatial characteristics of low erosion intensity in the central region, and severe erosion in the surrounding areas. From 2010 to 2020, the soil erosion intensity in the GBA was relatively stable, with 88.2% of the areas showing no changes in erosion intensity. The areas with worse soil erosion were mainly concentrated in the northern, southwestern and eastern coastal areas of the GBA. 3) Soil erosion modulus firstly decreased and then increased with the increase of elevation, and the most severe soil erosion occurred in areas with altitudes greater than 1 000 m. The steeper the slope, the greater the erosion intensity. Grass land and cultivated land were severely eroded land use types, with soil erosion modulus of 13.96 and 13.43 t/(hm<sup>2</sup>·a), respectively. [Conclusions] Long-term control measures to soil erosion in the GBA have been effective in the past decade, and further attention needs to be paid to the soil erosion prevention and control in areas with steep slope, high elevation, grass land and cultivated land.

**Keywords:** soil erosion; Reversed Universal Soil Loss Equation (RUSLE); spatio-temporal variation; influencing factors; the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

土壤侵蚀是土壤或土壤母质在外力作用下被破坏和剥蚀的过程<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀不仅严重破坏土壤资源,对生态系统带来严重危害,并且使农作物生产受限,阻碍了区域的社会经济发展。水利部发布的《中国水土保持公报》指出,2021年全国水土流失面积 267.42 万 km<sup>2</sup>, 占国土面积的 27.96%; 南方红壤区水土流失面积 13.07 万 km<sup>2</sup>, 占土地总面积的 10.06%。因此,研究土壤侵蚀的时空变化特征及其影响因子,可为区域制定水土流失的防治措施提供理论支撑。

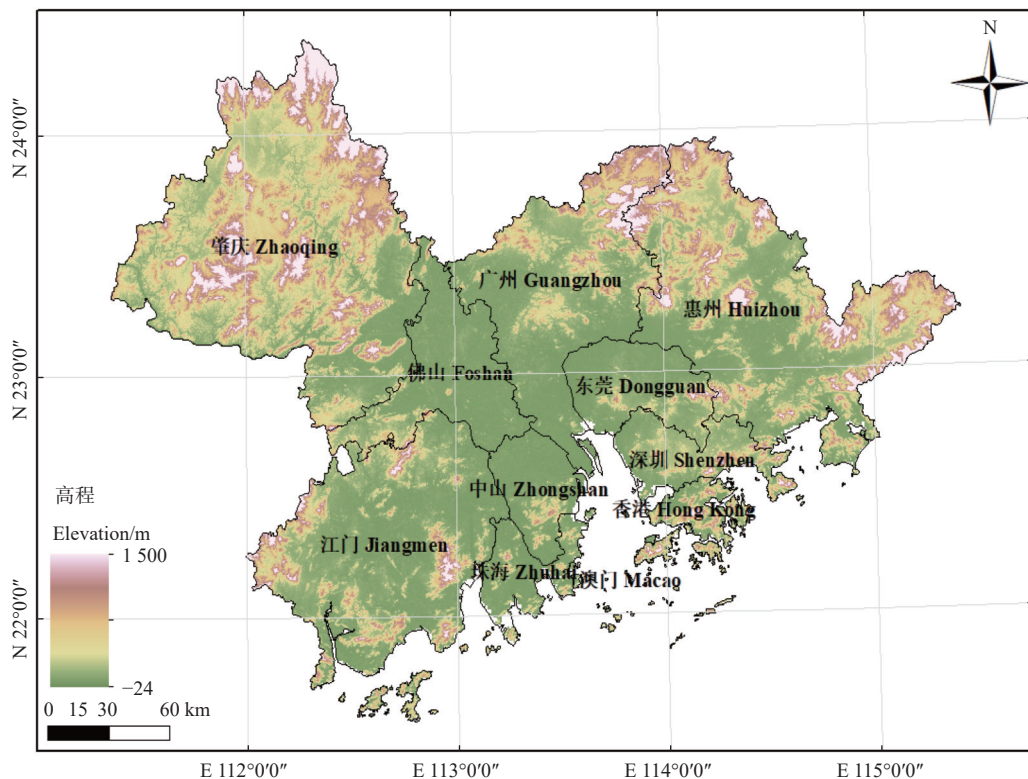
修正土壤通用流失方程模型借助地理信息系统和遥感技术的优势,基于降雨侵蚀力、土壤可蚀性、地形、植被管理和保护措施等因子估算土壤侵蚀模数,能准确反映研究区土壤侵蚀状态及变化趋势<sup>[2]</sup>。目前基于 RUSLE 模型对土壤侵蚀的研究主要分为 2 方面:一是土壤侵蚀估算及其时空变化特征,在不同区域尺度上取得了较多成果<sup>[3-7]</sup>;另一方面是对土壤侵蚀状况进行驱动因素及风险分析,揭示影响土壤侵蚀的主要因素,明确治理方向<sup>[8-10]</sup>。

粤港澳大湾区是中国经济发展速度最快的地区

之一。近年来随着城市群规模的急剧增长,大量耕地和草地转化为建设用地,造成土地资源大幅骤减和严重的水土流失<sup>[11]</sup>。对此区域的土壤侵蚀进行动态监测,有助于准确掌握大湾区水土流失动态变化情况,为合理的水土保持政策提供数据支撑。大湾区土壤侵蚀的研究多集中在时空变化特征上<sup>[12-13]</sup>,对大湾区近 10 年土壤侵蚀和其影响因素则关注较少。因此本研究以粤港澳大湾区为研究区,基于 RUSLE 模型估算研究区 2010 和 2020 年的土壤侵蚀状况,并分析时空变化特征,探究其影响因素,以期准确了解区域水土流失现状,为大湾区的土壤侵蚀监测和水土保持提供科学理论支撑依据。

## 1 研究区概况

粤港澳大湾区是由广东省九市和香港、澳门 2 个特别行政区组成的城市群(E 111°12' ~ 115°35', N 21°25' ~ 24°30'),地处珠江下游,“三面环山,三江聚汇”,占地面积约 5.6 万 km<sup>2</sup>。地势起伏较大,呈现中部低、四周高的特点(图 1)。气候类型为南亚热带海洋性季风气候,年平均温度 22 ℃,年降水量



该图基于国家地理信息公共服务平台上的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作。This map is based on the standard map with the approval number GS (2024) 0650 on the National Geographic Information Public Service Platform.

图 1 粤港澳大湾区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA)

1 500 ~ 2 500 mm, 夏季降水最多。典型地带性土壤为红壤、赤红壤和砖红壤, 极易造成水土流失。大湾区人口的快速增长和高强度的发展给大湾区的土壤带来了严重的生态退化和污染问题, 造成了土地资源退化、土壤养分流失等, 给生态保护和高质量发展造成巨大阻力。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与预处理

本研究使用的数据包括: 1) 来自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>) 的 30 m 分辨率 DEM 数据; 2) 来自国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn>) 的 1 km 分辨率逐月降水量数据集<sup>[14]</sup>; 3) 来自世界土壤数据库 (<https://iiasa.ac.at/models-tools-data/hwsd>) 的 1 : 1 000 000 土壤数据; 4) 来自国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>) 的 1 km 分辨率 NDVI 月均值数据集; 5) 来自资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/DOI>) 的 1 km 分辨率土地利用数据集, 包括耕地、林地、草地、水体、未利用地及建设用地 6 类, 分类精度达 94.3% 以上<sup>[15]</sup>。

基于数据的可靠性和计算可行性, 各数据在 ArcGIS 进行预处理后, 统一成投影坐标为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_49N、分辨率为 30 m 的数据集。

### 2.2 研究方法

采用修正的通用土壤流失方程 RUSLE 模型对大湾区的土壤侵蚀进行评估, 式为:

$$A = RKLSCP. \quad (1)$$

式中:  $A$  为单位面积的年土壤侵蚀量,  $t/(hm^2 \cdot a)$ ;  $R$  为降雨侵蚀力因子,  $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ ;  $K$  为土壤可侵蚀性因子,  $t \cdot hm^2 \cdot h/(MJ \cdot mm \cdot hm^2)$ ;  $LS$  为坡长坡度因子, 量纲为 1;  $C$  为地表植被覆盖和管理因子, 量纲为 1;  $P$  为水土保持措施因子, 量纲为 1。

1) 降雨侵蚀力因子  $R$ 。采用月降水量进行  $R$  因子计算<sup>[16]</sup>, 公式如下:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-1.15527 + 1.729p_i). \quad (2)$$

式中  $p_i$  为第  $i$  月降水量, mm。

2) 土壤可侵蚀性因子  $K$ 。取决于土壤类型, 在侵蚀土地生产力影响评价模型 (erosion-productivity impact calculator, EPIC) 中使用砂粒、粉粒和黏粒的质量分数以及有机碳含量等数据计算得到<sup>[17]</sup>, 并利

用张科利等提出的中国区域可蚀性因子修正算法进行修正<sup>[18]</sup>。

3) 坡度坡长因子 *LS*。坡长因子 (*L*) 采用 Liu 等<sup>[19]</sup> 提出的方法进行计算; 坡度因子 (*S*) 根据对不同坡度区间进行计算。

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\alpha + 0.03 & (\alpha < 5^\circ) \\ 16.8\sin\alpha - 0.05 & (5^\circ \leq \alpha \leq 14^\circ) \\ 21.9\sin\alpha - 0.96 & (14^\circ < \alpha \leq 18^\circ) \\ 65.41\sin^2(\alpha + 0.01745) + 4.56\sin(\alpha + 0.01745) + 0.065 & (\alpha > 18^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为坡度, ( $^\circ$ )。

4) 地表植被覆盖和管理因子 *C*。基于归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI), 采用马超飞等<sup>[20]</sup> 提出的公式计算得到。

5) 水土保持措施因子 *P*。采用 Renard<sup>[2]</sup> 提出的方法, 当坡度 (%) 为 0 ~ 1、> 1 ~ 3、> 3 ~ 5、> 5 ~ 10、> 10 ~ 15 和 > 15 ~ 35 时, *P* 分别赋值为 0.6、

0.6、0.5、0.5、0.7 和 1.0。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤侵蚀的时间变化特征

3.1.1 土壤侵蚀模数的时间变化 将 5 种因子进行叠加相乘, 依据 SL190—2007《土壤侵蚀分类分级标准》, 得到 2010 和 2020 年大湾区土壤侵蚀强度等级面积及比例 (表 1)。2010 和 2020 年大湾区的土壤侵蚀模数分别为 13.24 和 8.74 t/(hm<sup>2</sup>·a), 10 a 间土壤侵蚀模数减少 34.00%, 土壤侵蚀得到大大改善。2010 和 2020 年的土壤侵蚀强度均以微度为主, 分别占总面积的 63.67% 和 66.53%。2010 年中度及以上侵蚀强度侵蚀面积为 7 275.03 km<sup>2</sup>, 至 2020 年下降至 5 051.71 km<sup>2</sup>, 微度侵蚀和轻度侵蚀面积则呈增长趋势, 到 2020 年分别增长 1 601.32 和 622 km<sup>2</sup>。

表 1 2010 和 2020 年不同侵蚀强度的面积及比例

Tab. 1 Areas and percentages of different erosion intensities in 2010 and 2020

土壤侵蚀等级 Erosion intensity	土壤侵蚀模数 Soil erosion modulus/ (t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	2010		2020		变化面积 Changed area/km <sup>2</sup>
		面积 Area/km <sup>2</sup>	比例 Percentage/%	面积 Area/km <sup>2</sup>	比例 Percentage/%	
微度 Slight	< 5	35 635.80	63.67	37 237.12	66.53	1 601.32
轻度 Light	5 ~ < 25	13 059.02	23.33	13 681.02	24.44	622.00
中度 Moderate	25 ~ < 50	2 425.78	4.33	1 220.26	2.18	-1 205.52
强烈 Intense	50 ~ < 80	2 470.11	4.41	1 998.23	3.57	-471.88
极强烈 Extreme	80 ~ ≤ 150	1 289.64	2.30	801.63	1.43	-488.01
剧烈 Severe	> 150	1 089.50	1.95	1 031.59	1.84	-57.91

选取 2020 年《广东省水土保持公报》公布的年降雨量在 1 500 mm 左右的径流观测场观测数据, 与本研究结果进行对比 (表 2), 平均精度为 88.27%、均方根误差值 RMSE 为 6.11。计算结果与实际观测数据存在一定差异, 原因是, 模型使用的卫星遥感数据仅对上层树冠反应较明显, 不能准确反应近地表的植被状况<sup>[21]</sup>; 另一方面, RUSLE 模型使用数据的来源和分辨率差异, 会给结果带来误差。本研究结果与其他学者研究成果的对比如表 3 所示,

数据较为一致, 证明研究结果可靠, 且 RUSLE 模型在研究区具有较好的适用性。

3.1.2 土壤侵蚀强度的时间变化 将 2010 和 2020 年大湾区各侵蚀强度等级数据进行叠加, 得到 2010—2020 年内不同等级侵蚀强度的转移情况, 并通过数据透视表最终得到各侵蚀强度转移矩阵 (表 4)。相较于 2010 年, 2020 年大湾区微度和轻度土壤侵蚀呈持续增加趋势, 其他等级的侵蚀均表现为减小趋势。转化总面积为 5 659.07 km<sup>2</sup>, 微度

表 2 监测站数据

Tab. 2 Data in monitoring stations

监测站名称 Name of monitoring station	侵蚀模数 Soil erosion modulus/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	土壤类型 Soil type
茂名市电白区小良小流域综合观测站	3.10	红壤 Red soil
Xiaoliang Small Watershed Comprehensive Observation Station, Dianbai district, Maoming city	4.86	红壤 Red soil
	3.10	红壤 Red soil

续表 2 Continued to Tab. 2

监测站名称 Name of monitoring station	侵蚀模数 Soil erosion modulus/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	土壤类型 Soil type
	15.15	红壤 Red soil
	15.15	红壤 Red soil
和平县和平坡面径流观测场	14.81	红壤 Red soil
Heping Slope Runoff Observation Field, Heping county	17.41	红壤 Red soil
	12.48	红壤 Red soil
	7.19	红壤 Red soil
	24.13	红壤 Red soil
	15.69	红壤 Red soil
东源县大坑坡面径流观测场	3.41	红壤 Red soil
Dakeng Slope Runoff Observation Field, Dongyuan county	6.61	红壤 Red soil
	3.47	红壤 Red soil
连州市星子坡面径流观测场	7.46	红壤 Red soil
Xingzi Slope Runoff Observation Field, Lianzhou city	6.41	红壤 Red soil
	15.74	红壤 Red soil
台山市塘田坡面径流观测场	6.59	红壤 Red soil
Tangtian Slope Runoff Observation Field, Taishan city	4.92	红壤 Red soil

表 3 本研究结果与相关研究成果的对比

Tab. 3 Comparison of the results between this study and relevant studies

研究区域 Study area	本研究 This study		相关成果 Relevant studies		来源 Source
	每km <sup>2</sup> 侵蚀模数 Soil erosion modulus per km <sup>2</sup> /(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	年份 Year	每km <sup>2</sup> 侵蚀模数 Soil erosion modulus per km <sup>2</sup> /(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	年份 Year	
大湾区 The GBA	0.016	2020	0.014 30	2018	[13]
广东 Guangdong	0.020	2010	0.012 15	2009	[22]
广东 Guangdong	0.020	2010	0.012 75	2012	[23]

表 4 2010—2020 年土壤侵蚀强度转移矩阵统计表

Tab. 4 Transfer matrix of soil erosion intensity from 2010 to 2020

2010	2020						转出总面积 Transfer-out area
	微度 Slight	轻度 Light	中度 Moderate	强度 Intense	极强烈 Extreme	剧烈 Severe	
微度 Slight	31 708.23	257.65	170.33	108.12	0	0	536.12
轻度 Light	852.41	7 604.27	56.20	39.84	121.02	0	1 069.47
中度 Moderate	577.94	1 142.82	3 901.89	95.42	24.06	0	1 840.24
强度 Intense	349.29	148.96	388.24	1 038.92	12.58	9.29	908.36
极强烈 Extreme	241.34	98.42	16.68	170.68	1 379.48	355.29	882.41
剧烈 Severe	116.44	43.62	3.27	22.42	236.74	1 131.42	422.49
转入总面积 Transfer-in area	2 137.42	1 691.47	634.72	436.48	394.40	364.58	5 659.07

侵蚀共转入 2 137.42 km<sup>2</sup>, 其中由轻度侵蚀转化而来的面积最大为 852.41 km<sup>2</sup>。中度、强烈、极强烈和剧烈侵蚀转出的面积分别为 1 840.24、908.36、882.41 和 422.49 km<sup>2</sup>, 都呈现出向更低等级强度转

移的特征。整体上, 2010—2020 年大湾区的土壤侵蚀呈好转趋势, 整体侵蚀强度向低等级转移。原因可能是, 大湾区植被覆盖率增加<sup>[24]</sup>, 土壤侵蚀呈减少趋势; 此外, 人类活动对大湾区土壤侵蚀起到了

控制作用,人们重视生态环境保护,侵蚀状况得到改善。

### 3.2 土壤侵蚀的空间变化特征

3.2.1 土壤侵蚀强度的空间分布 图 2 分别为 2010 和 2020 年大湾区土壤侵蚀强度的空间分布图。由

图可知,整个大湾区均有不同程度的土壤侵蚀,呈现中部侵蚀强度低、周围地区侵蚀剧烈的特征。2 个时期土壤侵蚀强度的空间格局基本相似,呈现出片状分布和点状分布相结合的特点,但幅度有所变化。微度和轻度侵蚀散布于全区范围;中度和强

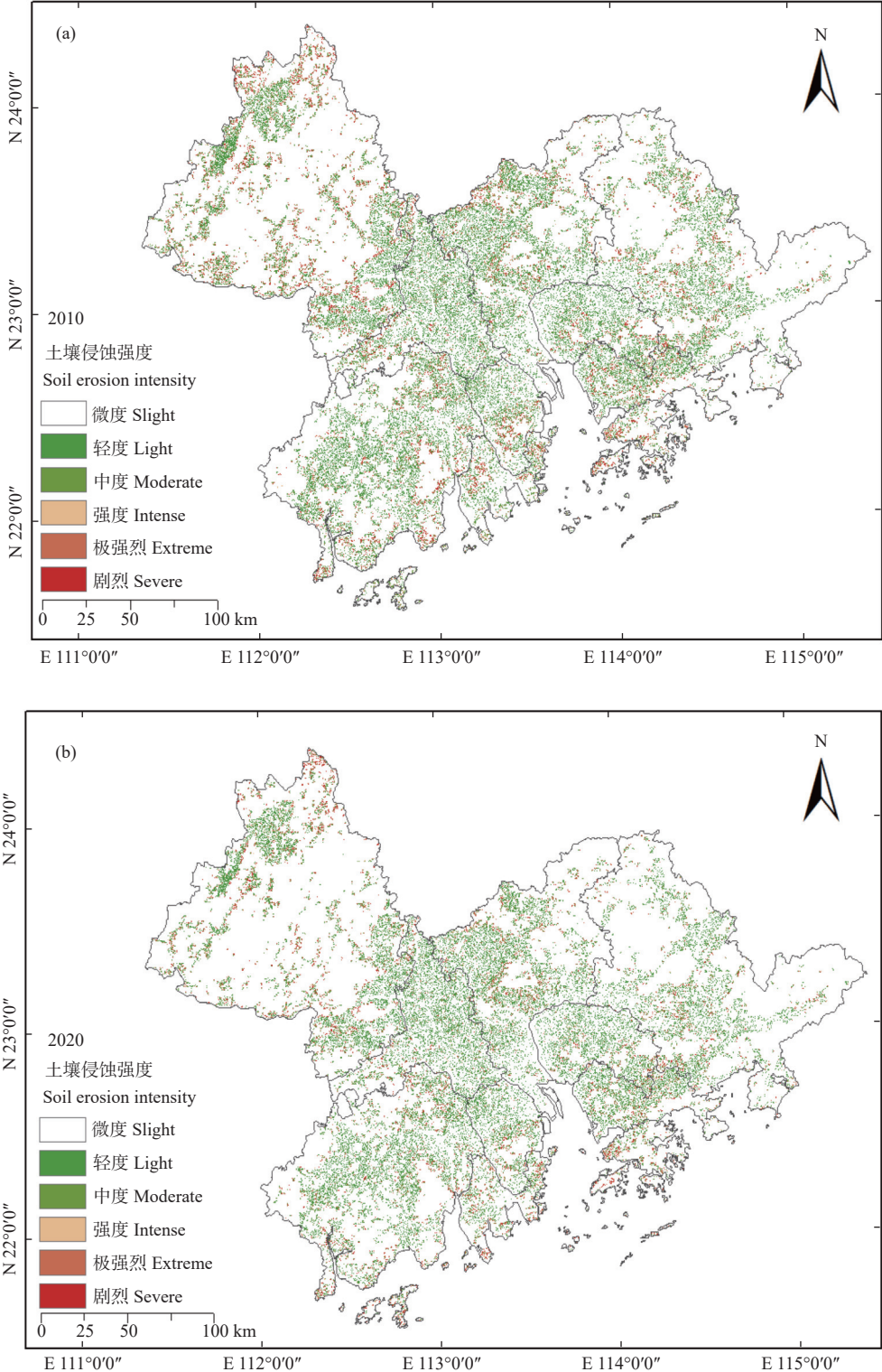


图 2 2010 和 2020 年大湾区土壤侵蚀强度空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of soil erosion intensity in the GBA in 2010 and 2020

度侵蚀呈点状密集分布在大湾区南部、中部以及东南部；极强烈与剧烈侵蚀除大湾区中部外都有涉及。大湾区南部及东南部土壤侵蚀量较大，是因为这些区域降雨量较大，较强的径流冲刷力导致土壤侵蚀较为严重。大湾区北部大多为山地丘陵地区，由于山地海拔较大、坡度较陡，土壤较多裸露，不宜种植作物，而且大湾区降雨量猛烈，造成严重的水土流失。

**3.2.2 土壤侵蚀强度的空间变化** 对 2010 和 2020 年各侵蚀强度赋值后进行叠加运算，得到大湾区 2010—2020 年期间土壤侵蚀空间变化图(图 3)。结果表明：大湾区土壤侵蚀较为稳定的区域占总面积的 88.2%，原因是研究区植被覆盖茂密，对防治水土流失具有积极作用，为稳定的生态环境提供良好的条件<sup>[24]</sup>。大湾区土壤侵蚀加剧区域成散点状分布，主要集中在大湾区北部、西南部及东部沿海区域，北部及西南部为丘陵地区海拔较高，东部沿海地区降雨量大，都为土壤侵蚀提供了条件。10 年来，大湾区土壤侵蚀情况整体有所好转，侵蚀改善区域面积大于侵蚀加剧区域的面积。

### 3.3 影响因子

**3.3.1 土壤侵蚀与海拔的关系** 借鉴张园眼等<sup>[25]</sup> 的研究将大湾区 DEM 数据在 ArcGIS 中进行重分类为 5 类(表 5)，通过分区统计得到土壤侵蚀的垂直

空间分布表。可以发现，海拔  $\leq 200$  m 的区域侵蚀模数较大，为  $14.32 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，此区域是人类活动最频繁地区，人类活动是引起土壤侵蚀的最主要原因，且与工程建设、不合理的耕作活动等密切相关，侵蚀面积占区域总侵蚀面积的 74.67%，侵蚀量为总侵蚀量的 86.11%；随着海拔的增加，侵蚀模数逐渐减小，海拔在  $> 400 \sim 600$  m 侵蚀模数最小，为  $5.73 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，属于轻度侵蚀，此区域人类活动与耕作活动降低，侵蚀模数相较于低海拔区域较小。海拔  $> 1000$  m 时，海拔越高，植被覆盖度越小，坡度越陡，土壤越易被侵蚀，土壤侵蚀模数越大，因此海拔  $> 1000$  m 的区域侵蚀模数最大，为  $46.93 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。整体来看，随着海拔变大，侵蚀模数呈现先减小后增大的趋势。

**3.3.2 土壤侵蚀与坡度的关系** 大湾区不同坡度的土壤侵蚀模数统计结果如表 6 所示。坡度在  $0 \sim 5^\circ$  时侵蚀模数最小，但侵蚀面积最大，占整个区域侵蚀面积 43.15%； $> 35^\circ \sim 40^\circ$  时侵蚀模数最大，约为  $36.77 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，是重点需要关注和治理的区域。此区域土壤流失超过南方红壤丘陵区允许的土壤流失量，坡面侵蚀产沙量大；当坡度  $> 40^\circ$  时，侵蚀模数并未继续增大，说明存在临界坡度，超过临界坡度，侵蚀模数不会随着坡度增加而增大。总体上，侵蚀模数随着坡度增加逐渐增大，坡度越大受到更高等

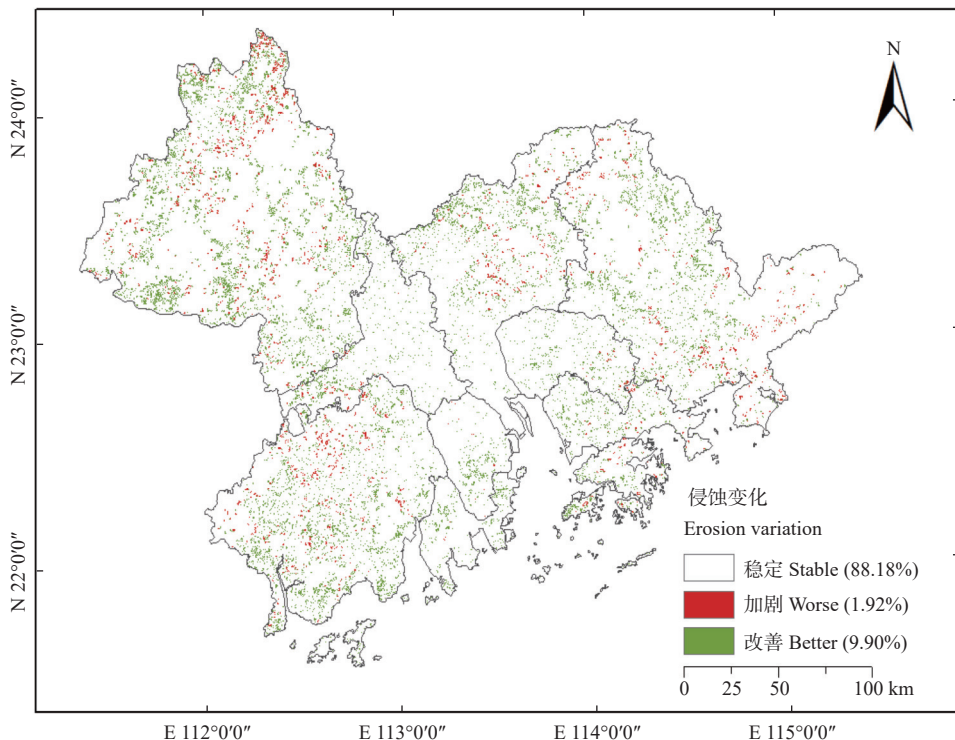


图 3 2010—2020 年大湾区土壤侵蚀变化空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil erosion variation in the GBA from 2010 to 2020

表 5 海拔和土壤侵蚀的关系

Tab. 5 Relationship between elevation and soil erosion

海拔 Elevation/m	侵蚀模数 Soil erosion modulus/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	侵蚀面积 Erosion area/km <sup>2</sup>	面积比例 Percentage of area/%	侵蚀量比例 Percentage of soil loss/%
≤ 200	14.32	41 795.33	74.67	86.11
> 200 ~ 400	6.02	9 463.54	16.91	8.20
> 400 ~ 600	5.73	3 123.55	5.58	2.58
> 600 ~ 800	8.42	1 078.96	1.93	1.31
> 800 ~ 1 000	15.77	362.40	0.65	0.82
> 1 000	46.93	146.07	0.26	0.99

表 6 不同坡度的土壤侵蚀特征

Tab. 6 Characteristics of soil erosion on different slope gradients

坡度 Slope gradient/ (°)	侵蚀模数 Soil erosion modulus/ (t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	侵蚀面积 Erosion area/ km <sup>2</sup>	面积比例 Percentage of area/ %
0 ~ 5	4.17	24 150.45	43.15
> 5 ~ 10	13.75	8 844.65	15.80
> 10 ~ 15	18.94	6 657.00	11.89
> 15 ~ 20	24.62	5 787.40	10.34
> 20 ~ 25	30.35	4 649.58	8.31
> 25 ~ 30	32.31	3 113.86	5.56
> 30 ~ 35	33.03	1 696.08	3.03
> 35 ~ 40	36.77	732.09	1.31
> 40 ~ 45	35.89	251.24	0.45
> 45 ~ 50	35.77	69.06	0.12
> 50	36.03	18.44	0.03

表 7 不同土地利用类型的土壤侵蚀状况

Tab. 7 Soil erosion under different land use type

土地利用类型 Land use type	侵蚀模数 Soil erosion modulus/ (t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	侵蚀面积 Erosion area/ km <sup>2</sup>
耕地 Cultivated land	13.43	12 301.09
林地 Forest land	8.81	27 618.11
草地 Grass land	13.96	1 213.11
水域 Waters	—	—
城乡用地 Urban land	11.97	8 296.56
未利用土地 Unused land	5.12	7.39

注：—表示该土地利用类型无土壤侵蚀。Notes: — indicates that there is no soil erosion for this land use type.

级侵蚀的概率更大，原因是，坡度的增大使土体重力产生的下滑力增大，更容易造成土壤侵蚀的发生，并且坡度越大，植被覆盖度较弱，且陡坡不易储存水分导致土壤养分流失量较大<sup>[26]</sup>。

3.3.3 土壤侵蚀与土地利用的关系 将 2020 年大湾区的土地利用类型与土壤侵蚀模数在 ArcGIS 中进行叠加分析，得到不同土地利用类型的土壤侵蚀模数和侵蚀面积(表 7)。耕地和草地土壤侵蚀模数较大。原因主要有：耕地和草地相较于林地，海拔和坡度都较低。人类活动频繁，长期的耕作活动会导致土壤结构松散、水稳性团聚体破碎、土壤有机质含量降低及土壤机械组成发生改变，增加土壤可蚀性，易造成较为严重的水土流失<sup>[27]</sup>。侵蚀模数次高的为城乡和居民用地，侵蚀模数为 11.97 t/(hm<sup>2</sup>·a)，此区域由于土壤缺少植被保护，没有水土保持能力，且存在较大的人为因素<sup>[26]</sup>。与耕地和草地相

比，林地侵蚀模数较小为 8.81 t/(hm<sup>2</sup>·a)。一方面是因为林地植被覆盖度高，对土壤的固定能力较强，另一方面林地结构较为稳定，可以截留降水，减弱降雨对土壤的冲刷。因此，耕地和草地是大湾区需要重点治理的区域，需减弱人为因素的影响，根据需求正确施用农药及化肥，防止生态退化。

## 4 讨论

本研究显示 2010—2020 年粤港澳大湾区的土壤侵蚀呈下降趋势。这与廖小龙等<sup>[13]</sup>得到的结果一致。造成这种趋势的主要原因是：1) 植被覆盖率的增加对此区域的土壤保持起到积极作用，从而也减缓了土壤侵蚀的加剧<sup>[28]</sup>。2) 近年来政府推行了一系列增绿造林的措施来扩大林地规模。2011 年《广东省应对气候变化方案》中表明要积极发展林业，大力开展植树造林；2013 年，政府提出共同推动山水林田湖草系统治理和 6 大建设任务；2018 年珠三角地区初步构建了森林生态屏障。2010—2020 年大湾区的土地利用变化主要为大量耕地和草地转变为建设用地，林地为增加趋势<sup>[29]</sup>，对大湾

区的生态恢复具有显著效果。3)农民意识到传统耕作对于水蚀具有加剧作用,开始采取了保护性耕作方式,减弱了大湾区的土壤侵蚀。

虽然模拟结果与相关研究区的结果较为一致,但受到数据精度的影响,结果仍存在不确定性。首先,RUSLE 模型使用的数据来源不同,空间分辨率也存在差异,统一重采样至 30 m 分辨率后,会产生光谱失真和形变效应等现象,给地物边界和形状识别带来误差。其次,土壤侵蚀模型结果与实测数据的差异主要来源于 *LS* 因子和 *C* 因子。相关研究表明,土壤侵蚀会随着 DEM 分辨率的降低而侵蚀。使用高分辨率 DEM 数据进行计算,*S* 值更高<sup>[30]</sup>。并且,RUSLE 计算的是整个研究区域面状和细沟侵蚀的长时期平均土壤侵蚀模数<sup>[31]</sup>,因此模型的模拟结果会高于实测值。Bircher 等<sup>[32]</sup>指出,侵蚀较轻的地区侵蚀状况往往被高估,而侵蚀较剧烈的地区估算结果与实测结果的差异较小。

## 5 结论

1)2010 和 2020 年大湾区土壤侵蚀模数分别为 13.24 和 8.74 t/(hm<sup>2</sup>·a),下降 34%,呈明显减小趋势。土壤侵蚀强度面积变化明显,2010—2020 年大湾区土壤侵蚀整体呈现向低等级转移的特点,轻度及以上侵蚀强度都为减小趋势。

2)粤港澳大湾区的土壤侵蚀呈现中部侵蚀强度低、周围地区侵蚀剧烈的空间特征。2010—2020 年期间土壤侵蚀强度较为稳定的区域占总面积的 88.2%,土壤侵蚀加剧的区域主要集中在大湾区北部、西南部及东部沿海地区。这些区域海拔较高,降雨量大,人类活动频繁,加速了土壤侵蚀。

3)土壤侵蚀模数随海拔的升高整体呈现先减小后增加的规律,高海拔地区是大湾区土壤侵蚀防治工作的重点。土壤侵蚀模数随坡度增加而增大,0~5°区域侵蚀模数最小,>35°~40°时侵蚀模数最大,为临界坡度。耕地和草地的土壤侵蚀模数最大,为 13.43 和 13.96 t/(hm<sup>2</sup>·a),是土壤侵蚀防治的重点关注区域。

## 6 参考文献

- [1] WUEPPER D, BORRELLI P, FINGER R. Countries and the global rate of soil erosion[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(1): 51.
- [2] RENARD K G. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[R]. Washington: United States Department of Agriculture, 1997: 1.
- [3] 李佳蕾, 孙然好, 熊木齐, 等. 基于 RUSLE 模型的中国土壤水蚀时空规律研究 [J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3473.  
LI Jialei, SUN Ranhao, XIONG Muqi, et al. Estimation of soil erosion based on the RUSLE model in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10): 3473.
- [4] MELESE T, SENAMAW A, BELAY T, et al. The spatiotemporal dynamics of land use land cover change, and its impact on soil erosion in Tagaw Watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia[J]. *Global Challenges*, 2021, 5(7): 2000109.
- [5] ISLAM R, JAAFAR W Z W, HIN L S, et al. Development of an erosion model for Langat River Basin, Malaysia, adapting GIS and RS in RUSLE[J]. *Applied Water Science*, 2020, 10(7): 165.
- [6] 梁石正雄, 方海燕. 2006—2015 年钱塘江流域土壤侵蚀动态变化 [J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(6): 33.  
LIANGSHI Zhengxiong, FANG Haiyan. Dynamic changes of soil erosion in Qiantang River Catchment from 2006 to 2015[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(6): 33.
- [7] 刘小梅, 李勇, 黄智刚, 等. 广西集约化甘蔗种植小流域土壤侵蚀及养分流失时空特征 [J]. *中国水土保持科学*, 2022, 20(5): 75.  
LIU Xiaomei, LI Yong, HUANG Zhigang, et al. Temporal and spatial characteristics of soil erosion and nutrient loss in small watershed of intensive sugarcane cultivation in Guangxi[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(5): 75.
- [8] HOSSAIN F, KAMAL A S M M, SADEAK S, et al. Quantitative soil erosion risk assessment due to rapid urbanization in the Cox's Bazar district and Rohingya refugee camps in Bangladesh[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2023, 37(3): 989.
- [9] 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.  
MU Xingmin, LI Pengfei, LIU Bintao, 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.
- [10] 田宇, 朱建华, 李奇, 等. 三峡库区土壤保持时空分布特征及其驱动力 [J]. *生态学杂志*, 2020, 39(4): 1164.  
TIAN Yu, ZHU Jianhua, LI Qi, et al. Spatial and temporal distribution of soil conservation and its driving forces in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Chinese*

- Journal of Ecology, 2020, 39(4): 1164.
- [11] 冯舒, 唐正宇, 俞露, 等. 城市群生态网络协同构建场景要素与路径分析: 以粤港澳大湾区为例 [J]. 生态学报, 2022, 42(20): 8223.
- FENG Shu, TANG Zhengyu, YU Lu, et al. Collaborative construction of ecological network in urban agglomerations: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8223.
- [12] 江伟康. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的粤港澳大湾区生态系统服务评估研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021: 61.
- JIANG Weikang. Spatial-temporal evolution of ecosystem services in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on CA-Markov and InVEST models [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021: 61.
- [13] 廖小龙, 姜欣彤, 李金明, 等. 基于 RS+GIS 的粤港澳大湾区水土流失时空演变分析 [J]. 中国水土保持, 2022(1): 62.
- LIAO Xiaolong, JIANG Xintong, LI Jinming, et al. Spatial and temporal evolution of soil and water loss in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on RS+GIS [J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(1): 62.
- [14] PENG Shouzhong, DINGYongxia, LIU Wenzhao, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [DS]. Earth System Science Data, 2019, 11: 1931–1946. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1931-2019>.
- [15] 徐新良, 刘纪远, 张树文等. 中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC) [DS]. 资源环境科学数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. DOI: 10.12078/2018070201.
- XU Xinliang, LIU Jiyuan, ZHANG Shuwen, et al. China Multi-period Land Use Land Cover Data Set (CNLUCC) [DS]. Resource and Environmental Science Data Registry and Publishing System (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. DOI: 10.12078/2018070201.
- [16] 周伏建, 陈明华, 林福兴, 等. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值 [J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 13.
- ZHOU Fujian, CHEN Minghua, LIN Fuxing, et al. The rainfall erosivity index in Fujian province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(1): 13.
- [17] WILLIAMS J R, RENARD K G, DYKE P T. EPIC: a new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38(5): 381.
- [18] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算 [J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 7.
- ZHANG Keli, PENG Wenying, YANG Hongli. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 7.
- [19] LIU Baoyuan, NEARING M A, SHI Peijun, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1759.
- [20] 马超飞, 马建文, 布和敖斯尔. USLE 模型中植被覆盖因子的遥感数据定量估算 [J]. 水土保持通报, 2001, 21(4): 6.
- MA Chaofei, MA Jianwen, AOSAIER B. Quantitative assessment of vegetation coverage factor in USLE model using remote sensing data [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(4): 6.
- [21] SEPÚLVEDA R B, CARRILLO A A. Soil erosion and erosion thresholds in an agroforestry system of coffee (*Coffea arabica*) and mixed shade trees (*Inga* spp and *Musa* spp) in Northern Nicaragua [J]. agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 210: 25.
- [22] LI Lili, WANG Yunpeng, LIU Cang. Effects of land use changes on soil erosion in a fast developing area [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2014, 11(6): 1549.
- [23] GAO Feng, WANG Yunpeng, YANG Jingxue. Assessing soil erosion using USLE model and MODIS data in the Guangdong, China [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 74(1): 012007.
- [24] 王思, 张路路, 林伟彪, 等. 基于 MODIS-归一化植被指数的广东省植被覆盖与土地利用变化研究 [J]. 生态学报, 2022, 42(6): 2149.
- WANG Si, ZHANG Lulu, LIN Weibiao, et al. Study on vegetation coverage and land-use change of Guangdong province based on MODIS-NDVI [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2149.
- [25] 张园眼, 李天宏. 基于 GIS 和 RUSLE 模型的深圳市土壤侵蚀研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(6): 1189.
- ZHANG Yuanyan, LI Tianhong. Soil erosion in Shenzhen city based on GIS and RUSLE model [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(6): 1189.
- [26] 张忠扬, 吕明侠, 王一博, 等. 基于 WaTEM/SEDEM 模型的洮河源区土壤侵蚀产沙模拟及其空间驱动力分析 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 27.
- ZHANG Zhongyang, LÜ Mingxia, WANG Yibo,

et al. Simulation and space driving force analysis of soil erosion and sediment production in Taohé Source area based on WaTEM/SEDEM model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(3): 27.

- [27] 王雅, 蒙吉军. 黑河中游土地利用变化对生态系统服务的影响 [J]. *干旱区研究*, 2017, 34(1): 200.  
WANG Ya, MENG Jijun. Effects of land use change on ecosystem services in the middle reaches of the Heihe River Basin [J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(1): 200.
- [28] 李娜, 王新军, 卢刚, 等. 2000—2017 年天山北坡西白杨沟流域土壤侵蚀时空变化分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(3): 73.  
LI Na, WANG Xinjun, LU Gang, et al. Temporal and spatial changes of soil erosion in Xibaiyanggou watershed on the northern slope of Tianshan mountains from 2000 to 2017 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(3): 73.
- [29] 柯钦华, 周俏薇, 孙传璋, 等. 基于生态系统服务权衡的粤港澳大湾区土地利用冲突识别研究 [J]. *热带*

*地理*, 2023, 43(7): 1426.

- KE Qinhua, ZHOU Qiaowei, SUN Chuanzhun, et al. Identifying land use conflict based on ecosystem service trade-offs in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China [J]. *Tropical Geography*, 2023, 43(7): 1426.
- [30] BIRCHER P, LINIGER H P, PRASUHN V. Comparing different multiple flow algorithms to calculate RUSLE factors of slope length ( $L$ ) and slope steepness ( $S$ ) in Switzerland [J]. *Geomorphology*, 2019, 346: 106850.
- [31] QIN Wei, GUO Qiankun, CAO Wenhong, et al. A new RUSLE slope length factor and its application to soil erosion assessment in a Loess Plateau watershed [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 182: 10.
- [32] BIRCHER P, LINIGER H P, PRASUHN V. Comparison of long-term field-measured and RUSLE-based modelled soil loss in Switzerland [J]. *Geoderma Regional*, 2022, 31: e00595.