

基于 MODIS 和 Landsat 数据的湟水河流域 土壤侵蚀时空变化研究

杜梅^{1,2}, 赵健赞¹, 杨静^{2,3}, 丁圆圆¹, 刘文惠¹, 李国荣¹, 王祖顺⁴, 赵利江⁴

(1.青海大学 地质工程系, 青海 西宁 810016; 2.青海省刚察县气象站, 青海 刚察 812300;

3.甘肃省祁连山生态环境研究中心, 甘肃 兰州 730000; 4.青海省基础测绘院, 青海 西宁 810001)

摘要: [目的] 明确湟水河流域土壤侵蚀时空分布与变化特征, 为黄河上游地区的水土保持与防治工作提供数据基础与决策依据。[方法] 基于湟水河流域 2000 年和 2018 年的 MODIS, Landsat, 降雨、人口密度、经济等数据, 利用低空无人机遥感、RUSLE 模型和地统计等方法, 开展湟水河流域土壤侵蚀模型计算、验证与时空变化分析。[结果] ①2000 年湟水河流域土壤侵蚀模数均值为 477.81 t/(km² · a), 微度侵蚀面积比例为 72.06%, 中度、强烈和剧烈侵蚀面积比例合计为 3.46%, 轻度、中度侵蚀主要分布在北部祁连山、中部达坂山及南部拉脊山海拔较高、植被覆盖少的山地、荒地; ②2018 年湟水河流域土壤侵蚀模数均值为 1 625.30 t/(km² · a), 微度侵蚀面积比例为 55.38%, 中度、强烈和剧烈侵蚀面积比例合计为 21.26%。中度侵蚀主要分布在研究区东南部城镇居民聚集地带与河流滩地; 强烈侵蚀和极强烈侵蚀零散分布于祁连山、达坂山等高山、秃岭裸地; ③2000—2018 年, 微度侵蚀面积比例减少 16.68%, 中度侵蚀面积比例增加 8.15%, 强烈侵蚀面积比例增加 5.60%, 剧烈侵蚀面积比例增加 4.05%, 而侵蚀面积增加的区域主要分布在高山裸地和城镇地区。[结论] 低空无人机遥感技术能够有效地验证区域土壤侵蚀模型计算结果, 湟水河流域土壤侵蚀整体趋于严重且存在空间差异性。在祁连山、达坂山、沿湟水河干流等地区, 土壤侵蚀强度存在从微度、轻度向中度侵蚀演变的趋势, 而这种演变过程与气候暖湿化、人类活动强度增加存在一定的关系。

关键词: RUSLE 模型; 土壤侵蚀; 时空变化; 无人机遥感; 湟水河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)03-0131-08

中图分类号: S157.1

文献参数: 杜梅, 赵健赞, 杨静, 等. 基于 MODIS 和 Landsat 数据的湟水河流域土壤侵蚀时空变化研究 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 131-138. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.018; Du Mei, Zhao Jianyun, Yang Jing, et al. Soil erosion and spatio-temporal variations in Huangshui River basin based on MODIS and Landsat data [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 131-138.

Soil Erosion and Spatio-temporal Variations in Huangshui River Basin Based on MODIS and Landsat Data

Du Mei^{1,2}, Zhao Jianyun¹, Yang Jing^{2,3},

Ding Yuanyuan¹, Liu Wenhui¹, Li Guorong¹, Wang Zushun⁴, Zhao Lijiang⁴

(1. Geological Engineering Department of Qinghai University, Xining, Qinghai

810016, China; 2. Meteorological Station of Gangcha County, Gangcha, Qinghai 812300,

China; 3. Qilian Mountains Eco-environment Research Center in Gansu Province, Lanzhou, Gansu

730000, China; 4. Qinghai Basic Surveying and Mapping Institute, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: [Objective] The spatio-temporal distribution and variation characteristics of soil erosion in the Huangshui River basin in the upstream region of the Yellow River were analyzed in order to provide basic data and a basis for decision-making in relation to soil and water conservation and erosion prevention. [Methods] Based on MODIS and Landsat images, precipitation, population density, and the economy in

收稿日期: 2021-04-07

修回日期: 2021-10-09

资助项目: 青海省科技厅项目“黄河源区极端气候变化对高寒草地生态系统的影响机制研究”(2021-ZJ-743); 国家自然科学基金项目“多维立体观测下黄河源鼠兔干扰与高寒草甸退化的耦合关系研究”(42161068); 甘肃省祁连山生态环境研究中心开放资助项目“基于多源数据的青海湖沙流河流域植被时空变化特征研究”(QLS202007)

第一作者: 杜梅(1995—), 女(汉族), 青海省西宁市人, 硕士研究生, 研究方向为地质资源环境演变。Email: zjyunh@163.com。

通信作者: 赵健赞(1981—), 男(汉族), 甘肃省民乐县人, 博士, 副教授, 主要从事遥感与地质资源环境研究。Email: zhaojianyun1981@163.com。

2000 and 2018, we used low altitude UAV remote sensing, the RUSLE model, and geostatistics to calculate, validate, and analyze the spatio-temporal variability of a soil erosion model in the Huangshui River basin. [Results] ① The average soil erosion modulus of Huangshui River basin in 2000 was $477.81 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{yr})$, and the percentage of the area with slight erosion was 72.06%. The percentage of area with moderate, strong, and severe erosion was 3.46%. Mild and moderate erosion areas were mainly located in the mountains and wastelands in the Northern Qilian Mountains, the Central Daban Mountains, and the Southern Laji Mountains, with high altitude and low vegetation coverage. ② In 2018, the average soil erosion modulus of the Huangshui River basin was $1\ 625.30 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{yr})$. The percentage of area with mild erosion was 55.38%, and the percentage of area with moderate, strong, and severe erosion was 21.26%. The area of moderate erosion was mainly located in the urban agglomeration area and where river beaches were located in the southeast part of the study area. The strong erosion and extra-strong erosion areas were sporadically distributed in bare areas in the Qilian Mountains and the Daban Mountains. ③ From 2000 to 2018, the area of slight erosion decreased by 16.68%, the area of moderate erosion increased by 8.15%, the area of strong erosion increased by 5.60%, and the area of severe erosion increased by 4.05%. The region with increasing erosion was mainly located in the bare mountains and urban areas. [Conclusion] Low-altitude UAV remote sensing technology can effectively validate the calculation results of the regional soil erosion model. Soil erosion in the Huangshui River basin has be accelerated over time, and showed great spatial differences. The spatial pattern of soil erosion intensity has evolved from mild, slight to moderate in the Qilian Mountains and the Daban Mountains. This evolution tendency is related to the warmer-wetter climate and intensified human activity.

Keywords: RUSLE; soil erosion; spatio-temporal variability; UAV remote sensing; Huangshui River basin

土壤侵蚀是土体在特定时间和空间条件下的迁移过程,是最重要的土地退化问题,它直接影响水、土资源的利用与保护,危害区域生态环境,妨碍区域社会经济和可持续发展,是区域水土保持、荒漠化防治以及生态保护领域的关键科学问题之一^[1]。在全球范围内,因水力剥蚀、搬运作用形成的水蚀面积达 $1.09 \times 10^8 \text{ km}^2$,因气流冲击、风力剥蚀形成的风蚀侵蚀面积近 $5.78 \times 10^7 \text{ km}^2$,不考虑冻融侵蚀以及其他形式的侵蚀,全球土壤侵蚀面积已达 $1.64 \times 10^8 \text{ km}^2$,而中国因各种因素造成不同形式的土壤侵蚀遍布全国、态势严重^[2]。湟水河流域作为黄河源区重要的生态屏障,地处高寒生态脆弱区^[3],随着全球气候及环境变化,流域内土壤出现了不同程度的退化及侵蚀现象。因此,开展湟水河流域尺度的土壤侵蚀时空变化研究,对黄河上游地区水土流失治理具有重要的意义。

近几十年来,国内外学者在土壤侵蚀方面发展了通用土壤流失方程 USLE(universal soil loss equation)、分布式土壤水力侵蚀预报模型 WEPP(water erosion prediction project)等区域土壤侵蚀定量分析方法,在不同地区开展了土壤侵蚀调查、评估、预测等方面的研究^[4-6];同时,在土壤侵蚀动力机制与过程模拟,土壤侵蚀与物质迁移,土壤侵蚀与气候变化等方面取得了进展^[7-9],发现气候变化可通过改变降水径流、地表植被覆盖度以及人类活动影响侵蚀过程,未

来土壤侵蚀的变化可通过气候变化模式与土壤侵蚀模型的耦合来进行预测^[10-11],而在激光雷达和高时空分辨率遥感等技术的支持下,能够将地表信息精细化表达,进一步增强土壤侵蚀的模拟^[12]。另外,为适应不同区域、不同尺度的土壤侵蚀预报,构建了中国土壤流失方程 CSLE(Chinese soil loss equation)^[13]、AGNPS(agricultural non-point source)模型^[14]和坡面尺度的水蚀预报模型^[15],等。修正的通用土壤流失方程 RUSLE(revised universal soil loss equation)在不同地区土壤侵蚀研究中也有应用,开展了诸如土壤侵蚀量估算、土壤侵蚀强度分析、土壤侵蚀时空演变及其空间分异特征等方面的研究^[16-18]。但是,在土壤侵蚀模型模拟结果的检验、土壤侵蚀动力机制等方面,特别是应用先进的对地观测技术开展实地调查与验证工作有待深入研究。本研究基于 2000 年和 2018 年的 MODIS, Landsat,降雨、人口密度、经济等多源数据,利用修正的通用土壤流失方程 RUSLE,分析湟水河流域土壤侵蚀的特点与时空变化规律,并基于无人机遥感技术对结果进行实地验证与评价,以进一步明确湟水河流域近 20 a 来的土壤侵蚀时空变化特征及驱动因素,以期为黄河上游地区的水土保持与防治工作提供数据基础与决策依据。

1 研究区概况

湟水河是黄河流域重要的水源地之一,也是黄河

上游最大的一级支流,处于青藏高原与黄土高原的交错地带,位于北纬 $36^{\circ}05' - 38^{\circ}30'$,东经 $99^{\circ}00' - 103^{\circ}43'$,海拔 $1\,545 \sim 5\,232\text{ m}$,年均气温 $5.2 \sim 6.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 $350 \sim 550\text{ mm}$,属高海拔半干旱地区,地貌过渡性和复杂性明显,流域水系呈树叶状分布,干流南北两岸支流发育^[19]。湟水河源区多沼泽湿地,流经地区多峡谷、盆地相间分布,存在高寒草甸地貌,分布优良牧场和良好草地;中游一带平坦开阔,存在有较大面积的灌溉农田和非灌溉农田分布;中下游主要为石林山区、土石山区、黄土丘陵沟壑区;流域东南部多分布寒钙土、新积土和冷钙土。流域西部的山地以灰褐土和黑钙土为主,流域中部的中高山地以黑钙土、黄土和壤土为主。研究区总人口约为 3.30×10^7 人,农田耕地超过 $3.00 \times 10^6\text{ hm}^2$,是青海省主要的人口居住区和产粮区^[20-21]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究主要使用 MODIS, Landsat, 数字高程数据 DEM、降雨、人口密度和经济等数据(产品)。

MODIS 数据来源于美国航空航天局数据中心 (<https://www.earthdata.nasa.gov/>), 选用 2000, 2018 年行列号为 h26 v05 和 h25 v05 的 MODIS MOD13Q1 产品数据, 空间分辨率为 250 m , 采用最大值合成法获得两个年度的 NDVI 数据;

Landsat 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 选取 2000, 2018 年 4 月至 10 月轨道号为 131—134, 行编号为 33—35, 且云量小于 5% 的 7 幅影像, 空间分辨率为 30 m , 对其进行辐射定标、几何纠正、镶嵌、分类等处理, 获得两个年度的土地覆盖数据; DEM 数据来源地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为 30 m , 对该数据进行流域分析, 获得研究区流域边界与河网

信息; 2000, 2018 年研究区的降雨数据来源于中国气象数据网 (<http://www.data.cma.cn>), 人口密度和经济数据来源于中国资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 对上述数据进行投影转换, 并利用流域边界数据对其进行裁切, 获得研究区土壤侵蚀分析的数据集;

无人机遥感数据是利用大疆精灵 4 RTK 于 2019 年 8 月分别在研究区现场采集, 设置航向重叠为 80%, 旁向重叠为 70%, 航高为 120 m 。将上述数据的空间分辨率统一重采样至 250 m , 均使用 Albers Conical Equal Area 投影。

2.2 研究方法

2.2.1 土壤侵蚀模型 本研究选用修正的通用土壤流失方程 RUSLE 计算研究区土壤侵蚀模数, 公式如下^[22]:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

式中: A 为年均土壤侵蚀模数 [$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; R 为降雨侵蚀力因子 [$(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; K 为土壤可蚀性因子 [$(\text{t} \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{mm})$]; LS 为地形(坡长坡度)因子, 无量纲; C 为植被覆盖和作物管理因子, 无量纲; P 为水土保持措施因子, 无量纲。

2.2.2 降雨侵蚀力因子 R 值的确定 根据已有湟水河流域地区月度气象数据资料和模型的适用性, 本研究采用 Wischmeier 等^[23]提出的 R 值计算方法, 公式如下:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{[1.5 \lg \frac{P_i^2}{P} - 0.8188]} \quad (2)$$

式中: R 为降雨侵蚀力值; P_i 为月均降雨量 (mm); P 为年均降雨量。

根据青海省 2000 年和 2018 年 22 个气象站点的降雨数据, 计算得到各个气象站的 R 值, 经克里金空间插值计算得到研究区降雨侵蚀力因子 R 值分布, 见图 1。

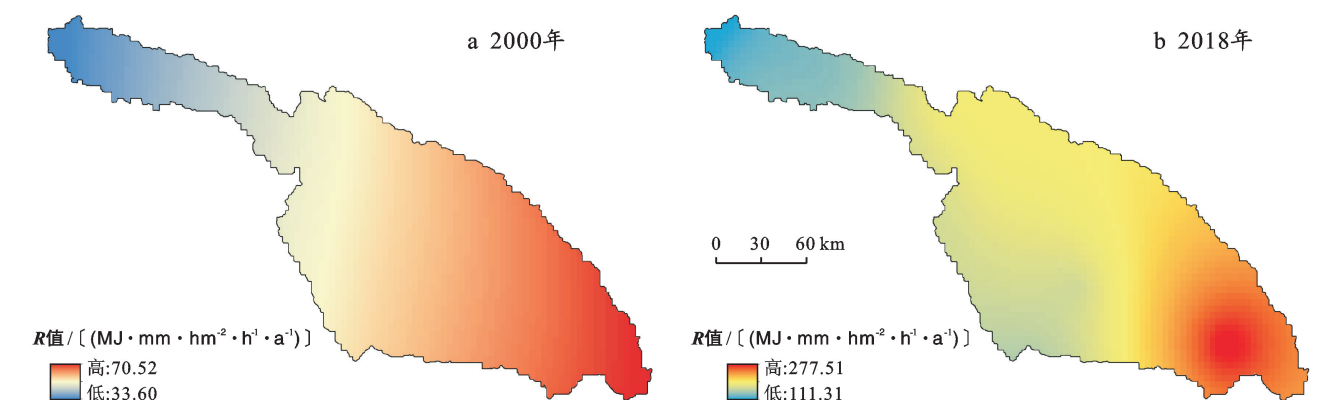


图 1 湟水河流域 2000, 2018 年降水侵蚀力因子 R 值空间分布

2.2.3 土壤可蚀性因子 K 值的确定 土壤可蚀性因子 K 与土壤粉粒、黏粒等含量有关,其计算方法如下^[24]:

$$K_a = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.025 \text{ SAN} \times \left(1 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \times \left[1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[1.0 - \frac{0.7 \times \text{SN}_1}{\text{SN}_1 + \exp(-5.51 + 22.9 \times \text{SN}_1)} \right] \quad (3)$$

其中:

$$\text{SN}_1 = 1 - \frac{\text{SAN}}{100} \quad (4)$$

式中:SAN 为砂粒含量(%);SIL 为粉粒含量(%);CLA 为黏粒含量(%);C 为土壤有机碳含量(%); K_a 为土壤可蚀性因子。利用上述公式计算获得研究区土壤可蚀性因子的空间分布(图 2)。

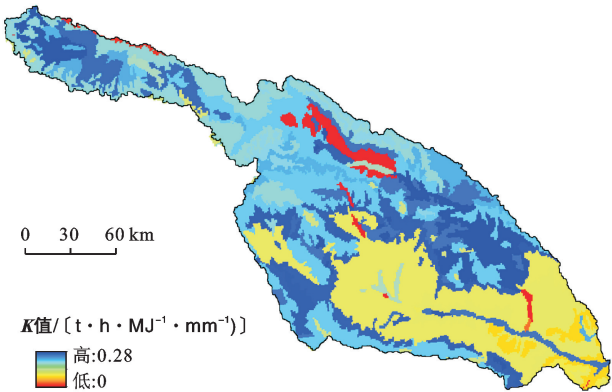


图 2 湟水河流域土壤可蚀性因子 K 值的空间分布

2.2.4 坡度坡长因子 LS 值的确定 基于 DEM 数据计算研究区坡度、坡长数据,进而通过分段函数计算坡度因子 S 值和坡长因子 L 值,进而计算坡度坡长因子 LS ,公式如下^[2]:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (5)$$

$$m = \begin{cases} 0.5 & (S \geq 5\%) \\ 0.4 & (3\% < S < 5\%) \\ 0.3 & (1\% < S < 3\%) \\ 0.2 & (S \leq 1\%) \end{cases} \quad (6)$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & (5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ) \\ 21.91 \sin \theta - 0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

$$LS = L \times S \quad (8)$$

式中: λ 为坡长(m); θ 为倾斜角($^\circ$); S 为百分比坡度(%).利用上述公式计算获得研究区坡度坡长因子 LS 值的空间分布(图 3)。

2.2.5 植被覆盖与作物管理因子 C 值的确定 以获得的研究区 NDVI 数据为基础,经处理得到植被覆盖度后^[22],由蔡崇法等^[25]提出的植被覆盖度 F_c 与

作物管理因子的转换公式计算 C 值:

$$C = \begin{cases} 1 & (F_c \leq 10\%) \\ 0.6508 - 0.3436 \lg F_c & (10\% < F_c < 78.3\%) \\ 0 & (F_c \geq 78.3\%) \end{cases} \quad (9)$$

式中: C 为植被覆盖与作物管理因子; F_c 为植被覆盖度,其计算方法如下:

$$F_c = \frac{N - N_{\text{soil}}}{N_{\text{veg}} - N_{\text{soil}}} \quad (10)$$

式中: F_c 为年作物生长期的植被覆盖度; N 为像元 NDVI 值; N_{soil} 为裸地像元 NDVI 值; N_{veg} 为纯植被覆盖像元 NDVI 值; N_{veg} 和 N_{soil} 分别为 NDVI 统计结果在累积概率为 95% 和 5% 时的取值。利用上述公式计算获得研究区 2000,2018 年植被覆盖与作物管理因子 C 值的空间分布(图 4)。

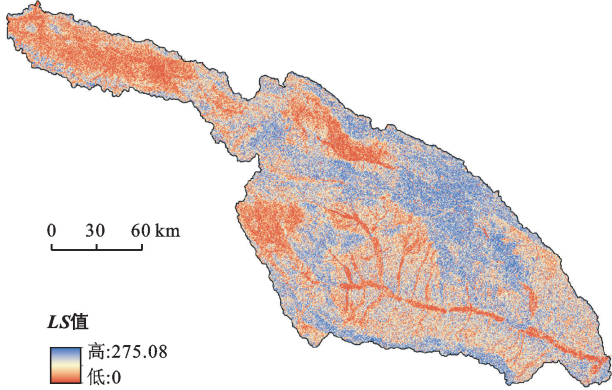


图 3 湟水河流域坡度坡长因子 LS 值的空间分布

2.2.6 水土保持措施因子 p 值的确定 采用 Lufafa 等^[6]提出的方法计算水土保持措施因子 p 值,公式如下:

$$P = 0.2 + 0.03 \times \theta \quad (11)$$

式中: θ 为坡度,由此计算获得研究区水土保持措施因子 p 值的空间分布(图 5)。

2.2.7 土壤侵蚀强度的验证 在土壤侵蚀典型区域选择实地调查样地进行模型模拟结果的验证,无人机数据空间分辨率优于 0.05 m 的影像数据,以 250 m 的格网为单元通过目视解译法解译调查样地的土地利用^[26]、水土保持措施,并计算植被覆盖度和坡度,依据《水土保持遥感监测技术规范(SL592-2012)》《土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)》确定土壤侵蚀强度,计算总体精度^[2]:

$$P=\left[\left(1-\frac{\sum_{i=1}^n\left|\mathrm{SE}_i-\mathrm{SE}_i^*\right|}{n}\right)\right]\times 100 \% \quad (12)$$

式中: P 为土壤侵蚀总体精度; SE_i 为模型模拟土壤

侵蚀强度等级; SE_i^* 为无人机地面调查的土壤侵蚀强度等级; n 为调查验证的总格网数。 P 值越接近 100%表示模型计算的结果越准确。

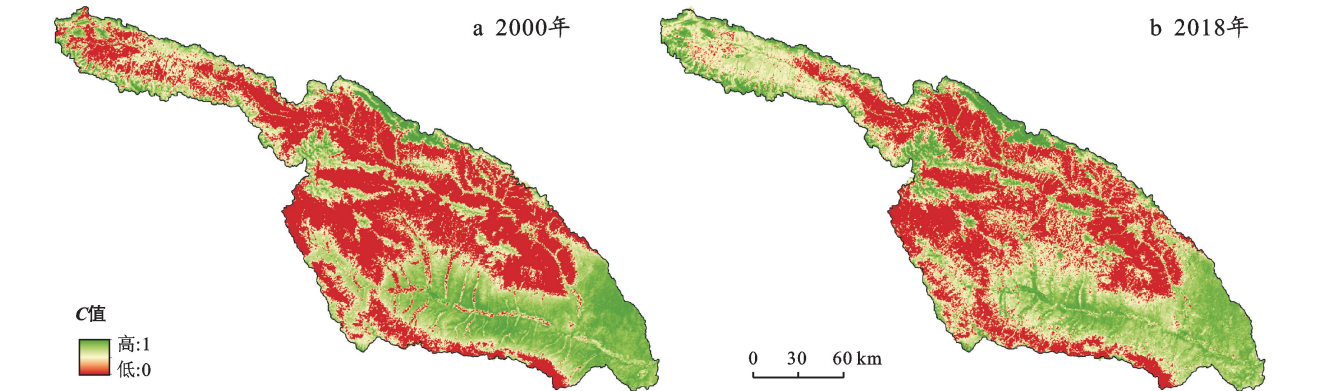


图 4 湟水河流域 2000,2018 年植被覆盖与作物管理因子 C 值空间分布

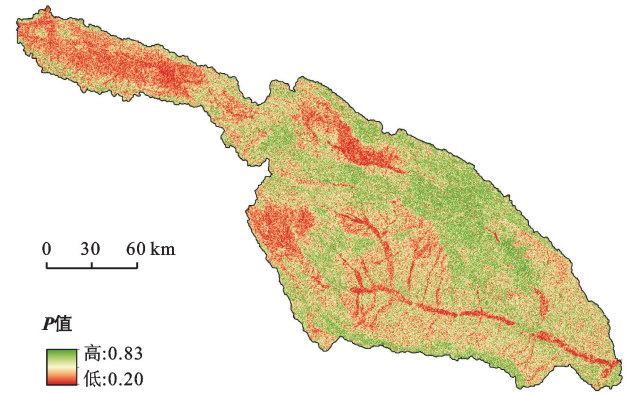


图 5 湟水河流域水土保持措施因子 P 值空间分布

3 结果与分析

3.1 2000 年土壤侵蚀模型计算分析

基于 2000 年土壤侵蚀模型因子计算结果,利用式(1)计算获得研究区 2000 年土壤侵蚀模数,其最大值为 15 706.50 t/(km² · a),均值为 477.81 t/(km² · a)。依据《土壤侵蚀分类分级标准》和祁连山地区土壤侵蚀的相关研究结果^[27],利用表 1 对计算获得的土壤侵蚀模数结果进行等级划分,结果见图 6。

表 1 土壤侵蚀强度等级划分

土壤侵蚀模数/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀级别	平均流失厚度/ (mm · a ⁻¹)
<500	微 度	<0.15
500~2 500	轻 度	0.15~0.74
2 500~5 000	中 度	0.74~1.90
5 000~8 000	强 烈	1.90~3.70
8 000~15 000	极 强 烈	3.70~5.90
>15 000	剧 烈	>5.90

由图 6 可知,2000 年研究区整体土壤侵蚀强度不大,微度侵蚀主要分布在湟水河源区及山间河谷地区的耕地和高植被覆盖度的草地、有林地;轻度、中度侵蚀主要分布在海拔较高、植被覆盖少的山地、荒地。

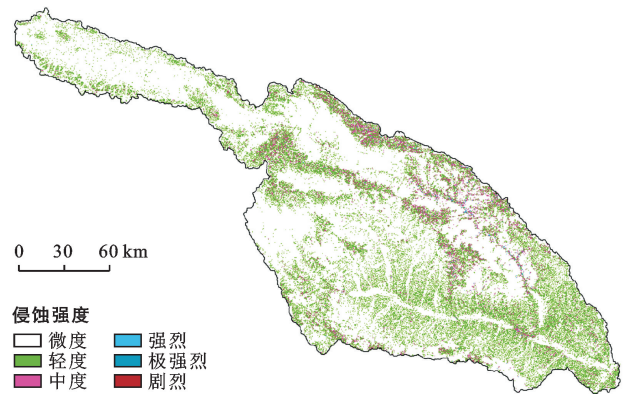


图 6 2000 年湟水河流域土壤侵蚀强度分布

3.2 2018 年土壤侵蚀模型计算分析

基于 2018 年土壤侵蚀模型因子计算结果,利用式(1)计算获得研究区 2018 年土壤侵蚀模数,其最大值为 32 653.50 t/(km² · a),均值为 1 625.30 t/(km² · a),利用表 1 对计算获得的土壤侵蚀模数结果进行等级划分,结果见图 7。

由图 7 可知,2018 年研究区主要以微度侵蚀为主,分布在湟水河源区、高山之间的河谷盆地地区,轻度侵蚀主要分布在山区及其周围的耕地、坡耕地等区域,中度侵蚀主要分布在研究区东南部城镇居民聚集地带与河流滩地,强烈侵蚀和极强烈侵蚀零散分布于祁连山、达坂山等高山、秃岭裸地地区。

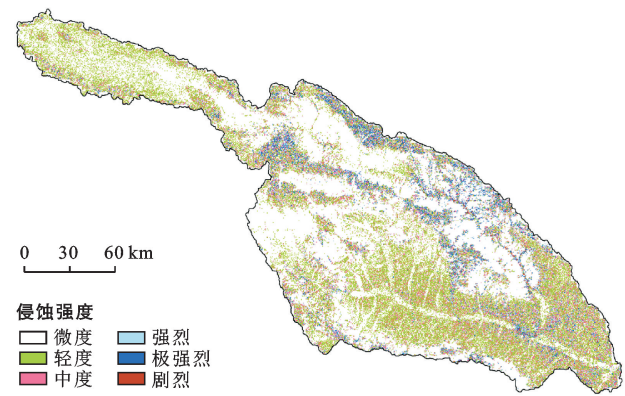


图 7 2018 年湟水河流域土壤侵蚀强度分布

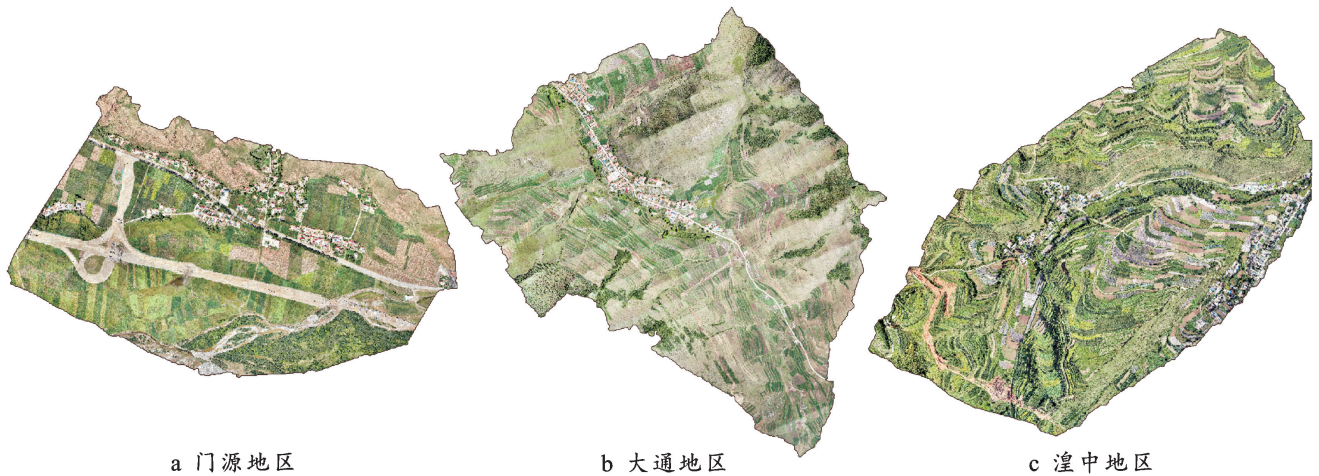


图 8 湟水河流域土壤侵蚀强度无人机高分辨率验证数据

依据解译标志和土壤侵蚀强度验证方法获得 49 个格网的侵蚀强度,并依据公式(12)计算土壤侵蚀验证总体精度 P 为 91.8%,表明模型计算的研究区土壤侵蚀强度可靠。

3.4 土壤侵蚀强度时空变化分析

统计研究区 2000 年和 2018 年各个侵蚀强度等级的面积,绘制变化对比图(图 9),发现微度侵蚀面积比例显著减少,中度、强烈、极强烈侵蚀面积显著增加,而轻度、剧烈侵蚀的面积虽有增加,但幅度不大,表明研究区土壤侵蚀面积有向中度、强烈和极强烈变化的趋势。对 2000 年和 2018 年研究区土壤侵蚀强度进行逐像元求差,得到 0,1,2,4 的运算结果,分别代表未发生变化、微度、中度和剧烈变化像元,空间分布如图 10 所示。

由图 10 可知,在湟水河源区、祁连山与达坂山之间的支流大通河谷地等区域土壤侵蚀强度未发生明显变化,在沿湟水河干流中下游的城镇居民聚集地带存在土壤侵蚀强度微度变化,面积约占 28.12%;在祁连山、达坂山的高山裸地、秃岭地区存在土壤侵蚀强度中度变化,面积约占 8.91%,而土壤侵蚀强度剧烈变化区域则零散分布在高山裸地及城镇地带。

3.3 土壤侵蚀模型的验证分析

由以上获得的研究区土壤侵蚀各个模型因子计算结果可知,降水侵蚀力因子 R 值呈东北低西南高的特点,土壤可蚀性因子 K 值较大区域分布在湟水河源区 and 中部河流两侧地区,而坡度坡长因子 LS 值在中部及中部偏北地区较高,植被覆盖与作物管理因子 C 值东南高西北低,水土保持措施因子 P 值在湟水河源区普遍较低,在北部祁连山脉、中部达坂山和南部拉脊山一带较高。因此,分别在研究区北部的门源、中部的大通和南部的湟中选择总面积约 3 km² 的样地,采集的无人机高分辨率影像数据(见图 8),建立解译标志。

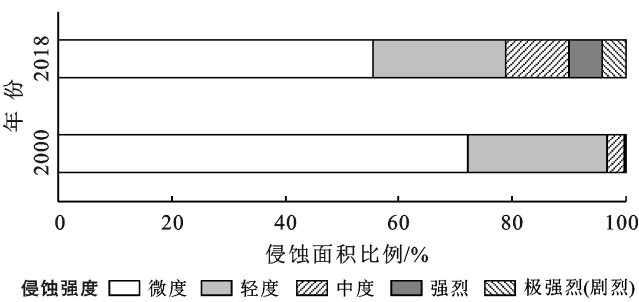


图 9 2000—2018 年湟水河流域各土壤侵蚀强度等级面积变化

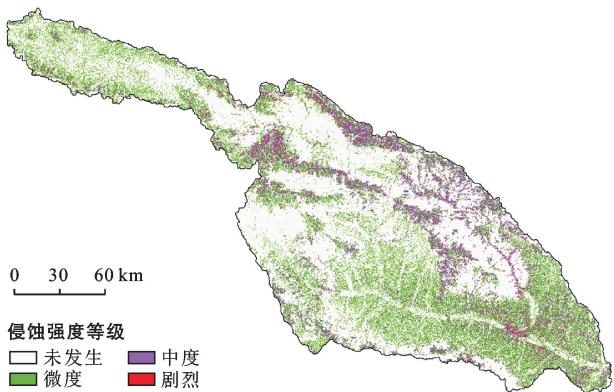


图 10 2000—2018 年湟水河流域土壤侵蚀强度空间变化

4 讨论与结论

4.1 讨论

针对湟水河流域及其周边地区的土壤侵蚀过程与机制问题,已有学者开展了一定程度的研究。如王雪璐^[28]利用 RUSLE 模型估算青藏高原三江源区多年平均侵蚀量为 3.10×10^9 t/a;陈豪等^[24]利用 USLE 模型对祁连山公园的土壤侵蚀进行了模拟计算,得到 2015 年和 2019 年的平均侵蚀模数为 $1\,063$ t/(km²·a) 和 $1\,068$ t/(km²·a);徐进等^[29]对湟水河(西宁段)流域的土壤侵蚀危险性进行了综合评价,发现土壤侵蚀危险性较高的地方主要集中在城镇居民地聚集的市区及湟水河河谷地带;魏素娟等^[1]基于 USLE 模型对湟水流域土壤侵蚀进行了评估,得到湟水流域土壤侵蚀模数为 523.8 t/(km²·a),年侵蚀总量为 8.37×10^7 t/a。这些结果与本研究得到的湟水河流域土壤侵蚀模数和土壤侵蚀量基本一致,结果可靠。同时,本研究还利用低空无人机遥感技术对模型计算的土壤侵蚀强度结果进行了定量评价,具有一定的创新。

2000—2018 年,研究区土壤侵蚀量增加,发生中、重度变化的区域主要集中在祁连山、达坂山的高山裸地、秃岭地区,沿湟水河干流的城镇居民地聚集地带的侵蚀强度也存在加剧的趋势。从本研究采用的 RUSLE 模型来看,土壤侵蚀过程是气候、植被覆盖等相对动态因子和地形、土壤等相对静态因子共同驱动的结果。相对静态因子主要控制土壤侵蚀的空间分布,不同的土壤类型孕育不同的植被,形成地域性特征;而相对动态因子控制土壤侵蚀的时空变化,即植被、气候等因子对土壤侵蚀起降低或加剧作用。根据研究区气象、人口、经济等数据,发现 19 a 来研究区平均降水量增加了 113.12 mm,建设用地增加了 5.25 km²,人口密度增加了 30 人/km²,而人口密度和建设用地的增加在一定程度上影响了地表植被覆盖度,再加上气候因子的持续性改变,导致相对动态因子逐步驱动研究区土壤侵蚀强度加剧。由此表明,研究区土壤侵蚀强度的增加,与气候暖湿化、人类活动强度增加存在一定的关系。

2000—2018 年,湟水河源区、大通河谷地等区域土壤侵蚀强度未发生明显变化,在中下游城镇居民聚集地带发生微度变化,而高山裸地、秃岭地区土壤侵蚀强度发生中度、强烈的变化,存在显著的空间差异性。未发生明显变化的区域人口密度低、人类活动以放牧为主,植被覆盖稳定,植被控制由于降雨量增加侵蚀强度变大的作用显著;位于研究区中下游的城镇居民区聚集有青海省 60% 的人口,但在生态工程建

设的有效驱动下,增加了地表的植被覆盖度和水土保持功能,在一定程度上阻滞了由于人类活动加剧和气候变化带来的侵蚀强度增大;而裸地、秃岭地区由于缺乏有针对性的水保措施,土壤与植被相互影响和作用,出现侵蚀加剧与覆盖度逐步降低的不良循环。

由于数据源时空分辨率的差异,导致模型计算结果的空间分辨率较低,且气象站数据较少造成降雨侵蚀力因子的精度也不高,下一步将结合土壤侵蚀定位观测试验进行更加精细的研究,并开展湟水河流域土壤侵蚀驱动机制等方面的研究。

4.2 结论

(1) 2000 年研究区整体土壤侵蚀强度不大,以微度侵蚀为主,在祁连山、达坂山及拉脊山海拔较高、植被覆盖较少的地区存在中度侵蚀;2018 年研究区中度侵蚀主要分布在研究区东南部城镇居民聚集地带与河流滩地,强烈侵蚀和极强烈侵蚀主要分布在祁连山、达坂山等高山、秃岭裸地地区。

(2) 2000—2018 年,平均土壤侵蚀模数存在增加的趋势,轻度侵蚀量占比显著减少,强烈、极强烈和剧烈侵蚀量占比显著增加,这与研究区气候暖湿化、人类活动强度增加存在一定的关系。19 a 间,湟水河源区、大通河谷地等区域土壤侵蚀强度未发生明显变化,祁连山、达坂山的高山裸地、秃岭地区的土壤侵蚀发生中、重度变化,沿湟水河干流的城镇居民地聚集地带的侵蚀强度也存在加剧的趋势,存在较为明显的空间差异性。这种差异性受区域人类活动特点、植被覆盖情况、生态工程建设、自然地理特性等因素的影响。

[参 考 文 献]

- [1] 魏素娟,宋强,张亚群,等.湟水流域土壤侵蚀评估[J].甘肃科技,2018,34(24):39-41.
- [2] 张洪江.土壤侵蚀原理(第四版)[M].北京:科学出版社,2019.
- [3] 陈琼,张懿锂,刘峰贵,等.黄河流域河源区土地利用变化及其影响研究综述[J].资源科学,2020,42(3):446-459.
- [4] Hartanto H, Prabhu R, Widayat A S E, et al. Factors affecting runoff and soil erosion: Plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management [J]. Forest Ecology and Management, 2003,180 (1/2/3):361-374.
- [5] Lee S. Soil erosion assessment and its verification using the Universal Soil Loss Equation and Geographic Information System: A case study at Boun, Korea [J]. Environmental Geology,2004,45(4):457-465.
- [6] Lufafa A, Tenywa M M, Isabirye M, et al. Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a

- GIS-based Universal Soil Loss model [J]. *Agricultural Systems*, 2003, 76(3): 883-894.
- [7] Shi Pu, Schulin R. Erosion-induced losses of carbon, nitrogen, phosphorus and heavy metals from agricultural soils of contrasting organic matter management [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 210-218.
- [8] Wang L, Shi Z H, Wang J, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 512: 168-176.
- [9] Worrall F, Burt T P, Howden N J K. The fluvial flux of particulate organic matter from the UK: The emission factor of soil erosion [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(1): 61-71.
- [10] Deng Lei, Liu Guobin, Shanguan Zhouping. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: A synthesis [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3544-3556.
- [11] Mullan D. Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems [J]. *Catena*, 2013, 109: 234-246.
- [12] Croke J, Todd P, Thompson C, et al. The use of multi temporal LiDAR to assess basin-scale erosion and deposition following the catastrophic January 2011 Lockyer flood, SE Queensland, Australia [J]. *Geomorphology*, 2013, 184: 111-126.
- [13] 刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤预报模型[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [14] 张玉斌, 郑粉莉. AGNPS 模型及其应用[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(4): 124-127.
- [15] 江忠善, 郑粉莉. 坡面水蚀预报模型研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 66-69.
- [16] 陈峰, 李红波. 基于 GIS 和 RUSLE 的滇南山区土壤侵蚀时空演变: 以云南省元阳县为例[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 629-637.
- [17] 陈红, 江旭聪, 任磊, 等. 基于 RUSLE 模型的淮河流域土壤侵蚀定量评价[J]. *土壤通报*, 2021, 52(1): 165-176.
- [18] 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): 3473-3485.
- [19] 韩有香, 刘彩红, 李国山. 青海高原典型生态区域未来气候变化趋势预估[J]. *草业科学*, 2019, 36(6): 1518-1530.
- [20] 陈有禄. 湟水河干流沿线耕地撂荒原因解释[D]. 青海西宁: 青海师范大学, 2018.
- [21] 李宁, 杨春江, 孙瑜暘, 等. 青海湟水河大型底栖动物群落结构及生态系统健康评价[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(35): 141-148.
- [22] 吴昌广, 李生, 任华东, 等. USLE/RUSLE 模型中植被覆盖管理因子的遥感定量估算研究进展[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1728-1732.
- [23] Wischmeier W H, Smith D D. A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning [J]. *Transactions International Congress of Soil Science*, 1960, 1: 418-425.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 朱梦阳, 杨勤科, 王春梅, 等. 区域土壤侵蚀遥感抽样调查方法[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 64-71.
- [27] 陈豪. 基于 USLE 模型的祁连山国家公园土壤水力侵蚀动态分析[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2020.
- [28] 王雪璐. 青藏高原三江源高寒草地生态系统土壤侵蚀研究[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2016.
- [29] 徐进, 赫晓慧, 王芳, 等. 基于 GIS 的湟水河(西宁段)流域土壤侵蚀危险性评价[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(5): 57-59.