

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.047.

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): 27-36.

ZHANG Zhongyang, LYU Mingxia, WANG Yibo, et al. Simulation and Space Driving Force Analysis of Soil Erosion and Sediment Production in Taohe Source Area Based on WaTEM/SEDEM Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 27-36.

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

张忠扬¹, 吕明侠¹, 王一博^{1,2}, 马章怀¹, 高泽永²

(1.兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000;

2.中国科学院 西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要:[目的]全面认识长时间尺度的土壤侵蚀时空变化及其影响因素对土壤侵蚀治理具有重要意义。探究流域 1998—2018 年土壤侵蚀和产沙时空变化特征及其空间驱动力因子,为洮河源区流域的水土治理提供科学理论依据。[方法]以洮河源区流域为研究区,基于碌曲站实测输沙数据以及植被 NDVI 数据,通过 WaTEM/SEDEM 模型结合重心模型分析流域侵蚀产沙时空变化特征,进一步采用地理探测器方法探究其空间驱动力因子。[结果]洮河源区的土壤产沙模数由 1998 年的 33.81 t/(hm²·a)增加至 2018 年的 48.59 t/(hm²·a);土壤侵蚀强度主要以微度侵蚀为主,其次是极强侵蚀和轻度侵蚀,剧烈、强烈和中度侵蚀占比最小。侵蚀较强区域分布在高山地带;侵蚀较微弱的区域分布在中部的河谷地区和海拔较低的区域。流域内地形等级和植被覆盖度对土壤侵蚀影响最大, q 值分别为 0.359, 0.183,流域侵蚀模数随地形等级增大而增大,随植被覆盖度的增大而减少。1998—2003 年和 2008—2013 年这两个时段,土壤侵蚀重心向东南方向移动,2003—2008 年侵蚀重心向西北方向移动,而 2013—2018 年则向北方移动。[结论] 1998—2018 年洮河源区流域的侵蚀整体呈现恶化趋势,其空间驱动力主要为地形位指数和植被覆盖度因子,研究结果表明未来应大力发展退牧还草项目,积极进行生态植被建设。

关键词:土壤侵蚀; WaTEM/SEDEM 模型; 地理探测器; 重心模型; 洮河源区

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)03-0027-10

Simulation and Space Driving Force Analysis of Soil Erosion and Sediment Production in Taohe Source Area Based on WaTEM/SEDEM Model

ZHANG Zhongyang¹, LYU Mingxia¹, WANG Yibo^{1,2}, MA Zhanghuai¹, GAO Zeyong²

(1.College of Earth and Environment Science, Lanzhou University,

Lanzhou 730000, China; 2.State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest

Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract:[Objective] A comprehensive understanding of the spatial and temporal changes of soil erosion at long time scales and its influencing factors is of great significance to soil erosion management. The spatial and temporal change characteristics of soil erosion and sediment production in the watershed from 1998 to 2018 and their spatial driving factors were explored to provide scientific theoretical basis for the soil and water management in the Taohe River source area watershed. [Methods] The Taohe River source area watershed was taken as the study area. Based on the measured sediment transport data from Luqu station and vegetation NDVI data, the spatial and temporal variation characteristics of watershed erosion and sediment production

收稿日期:2022-04-19

修回日期:2022-05-14

资助项目:国家自然科学基金项目(41877149);中国科学院冻土工程国家重点实验室开放资助项目(SKLFSE201911)

第一作者:张忠扬(1998—),男,湖北襄阳人,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:zhangzhy21@lzu.edu.cn

通信作者:王一博(1970—),男,甘肃会宁人,博士,教授,主要从事水文学与水资源研究。E-mail:wangyib@lzu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

were analyzed by the WaTEM/SEDEM model in combination with the center of gravity model, and the spatial driving factors were further explored by using the geographic detector. [Results] The sediment production modulus in the source area of the Taohe River increased from 33.81 t/(hm² · a) in 1998 to 48.59 t/(hm² · a) in 2018. The soil erosion intensity was dominated by slight erosion, followed by extreme intensity and mild erosion, and the proportion of severe, intense and moderate erosion was the smallest. The areas with stronger erosion distributed in the alpine zone. The areas with weaker erosion distributed in the central valley area and the lower elevation area. Topographic grade and vegetation cover within the watershed had the greatest impact on soil erosion, with q values of 0.359 and 0.183, respectively. The erosion modulus of the watershed increased with the increase of the topographic level and decreased with the increase of vegetation cover. In the two periods of 1998—2003 and 2008—2013, the soil erosion gravity center moved to the south-east, in 2003—2008, the erosion gravity center moved to the northwest, and in 2013—2018, it moved to the north. [Conclusion] The erosion of the Taohe River source area watershed as a whole showed a deterioration trend from 1998 to 2018, and its spatial driving forces were mainly the topographic position index and vegetation cover factor. The results of the study indicate that the projects of returning pasture to grass should be vigorously developed and ecological vegetation construction should be actively carried out in the future.

Keywords: soil erosion; WaTEM/SEDEM model; geographic detector; center of gravity model; source area of Taohe River

土壤侵蚀是造成区域土地退化的主要因素之一,土壤侵蚀会降低土壤肥力,进而加重土壤贫瘠化、荒漠化和沙化过程,对陆地水文生态环境和粮食生产安全造成了威胁,是全球性生态环境灾害问题之一^[1-2]。土壤侵蚀是一个非常复杂的自然地理现象,不仅受降水、地形、植被的影响,还受人类活动的影响,是自然因素和人为因素共同作用的结果^[3]。我国的土壤侵蚀问题十分严峻,全国风蚀和水蚀面积所占比重高达总面积的37.1%^[4]。尤其随着全球变化及人类活动的增强,在广大干旱半干旱的地区土壤侵蚀越来越严重^[5-6]。近年来,由于长期的植被生态系统的破坏加之恶劣的气候条件和长期的冻融作用变化,使得青藏高原以及周边甘南地区的土壤侵蚀和水土流失不断加剧,给当地的社会经济及生态环境造成了严重的影响^[7-8]。

目前,针对土壤侵蚀的研究主要在土壤侵蚀的时空变化规律、土壤侵蚀过程及机理、土壤侵蚀影响因素及驱动力分析、土壤侵蚀预报模型等领域内开展,在众多研究中土壤侵蚀预报模型由于能够定量化的模拟侵蚀的空间分布状况而被广泛运用,通常可分为经验模型、物理过程模型和分布式模型^[9]。经验模型以 RUSLE 为代表,由于参数简单而被众多学者使用,但是该模型本身在构造上存在不足,各因子的模拟估算较差且没有考虑流域侵蚀的变异性特征而无法适用于所有区域;物理模型如 WEPP 等虽然从侵蚀产沙机理过程的角度来考量土壤侵蚀产沙关系,其模拟结果相对准确,但对输入数据要求较为严格而无法适用于研究资料稀缺的地区^[10-12]。WaTEM/SEDEM 模型是由鲁汶大学

自然地理研究小组提出的一种空间分布式模型,其结构简单、校正参数较少并且能充分考虑区域土地利用对产沙的影响以及土壤侵蚀、泥沙运移情况,能够很好地模拟流域内侵蚀产沙的空间分布情况,被广泛用于流域尺度侵蚀产沙的量化研究^[12-14]。

洮河作为黄河上游的第二大支流,是甘肃省中部干旱地区最重要的水源区,而洮河源区所处甘南地区,是西北高原的生态脆弱区,对气候响应和人类干扰较为敏感^[7,15]。近年来,在气候变化和人类活动下,流域的生态环境问题日益凸显,虽然政府积极开展水土保持措施并取得一定效果,但仍然存在“局部恶化的情况”^[7,16]。因此探究洮河源区的水土流失问题有利于推进该地区生态文明建设,具有理论和实践双重意义。本文通过 WaTEM/SEDEM 模型对洮河上游碌曲以上流域洮河源区的土壤侵蚀及产沙过程进行模拟研究,拟验证 WaTEM/SEDEM 模型在洮河源区的适用性,同时揭示该流域土壤侵蚀在 1998—2018 年期间的时空变化规律,并探讨土壤侵蚀和产沙的影响因子和驱动要素分析,为洮河上游地区的水土流失治理提供科学依据。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况

洮河是黄河上游的一级支流,位于青藏高原的东北部。发源于青海省河南蒙古族自治县的西倾山东麓,由西向东流经碌曲、临潭、夏河等县并在岷县境内折向北流,最终在永靖县汇入黄河刘家峡水库,其干流河

道全长 673 km。洮河流域的地理位置介于 $101^{\circ}36'$ — $104^{\circ}20'E$, $34^{\circ}03'$ — $36^{\circ}01'N$, 流域面积为 $25\,527\text{ km}^2$, 海拔 $1\,748\sim 4\,569\text{ m}$, 流域因受青藏高原和蒙古高原的影响, 大部分地区属于湿润多雨地区, 年平均气温为 7°C , 年平均径流量为 53 亿 m^3 [15]。

本研究选取洮河上游碌曲水文站以上的洮河源区为研究区, 流域横跨青海省的库泽县、河南蒙古自治县和甘肃省的碌曲县、夏河县和玛曲县, 流域面积为 $5\,198.57\text{ km}^2$ 。其中, 由南向北流动的周科河和由北向南的科才河于碌曲县境内汇入洮河, 地形总体趋势为西高东低, 海拔 $3\,146\sim 4\,486\text{ m}$, 气候属青藏高原大陆性季风气候, 光照丰富, 气温偏低 [17]。

1.2 数据来源

本研究所用基础数据如下: (1) 研究区数字高程模型数据 (DEM) 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$; (2) 1997—2018 年洮河源区及周边共 22 个水文站点的降雨数据来源于中国气象数据网; (3) 研究区 1997—1999 年、2007—2009 年、2013—2016 年以及 2003 年、2008 年、2018 年的中国年度植被指数 (NDVI) 空间分布数据集来自中国科学院资源环境科学中心 (<https://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为 1 km ; (4) 土地利用数据来源于杨杰等发布的 1990—2020 年中国 30 m 土地覆被数据集 (<https://zenodo.org/>), 所用年份与 NDVI 一致; (5) 研究区的土壤基础数据来源于世界土壤数据库 (HWSD); (6) 洮河源区 1997—2016 年的输沙数据来源于碌曲水文站。

1.3 WaTEM/SEDEM 模型构建与参数校正

1.3.1 模型结构与算法 WaTEM/SEDEM 模型是以 RUSLE 为基础, 由 WaTEM 和 SEDEM 两个模型整合而成的空间分布式土壤侵蚀模型, 该模型基于栅格计算, 同时考虑了土地利用格局对土壤侵蚀的拦截作用和泥沙的运移过程, 可用于模拟年均土壤侵蚀率和沉积强度, 模型的基本结构包括 3 个部分: 年均土壤侵蚀模块、预测年均输沙能力、泥沙流动模拟 [12, 18]。

(1) 年均土壤侵蚀模块。年均土壤侵蚀率以通用土壤侵蚀方程 RUSLE 为依据, 其公式为:

$$A = R \cdot K \cdot LS_{2D} \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中: A 为土壤侵蚀模数 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]; R 为降雨侵蚀力因子 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; K 为土壤可蚀性因子 [$\text{kg} \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm})$]; C 为覆盖管理因子; P 为水土保持措施因子; LS_{2D} 因子为二维地形因子, 不同于原来的 RUSLE 方程, 为了能使其反映水流特征, 该模型在计算坡长时将 RUSLE 修正到二维景观上, 用上游汇水面积代替坡长, 计算公式为 [19]:

$$L_{i,j} = \frac{(A_{i,j} + D^2)^{m+1} - A_{i,j}^{m+1}}{D^{m+2} \cdot x_{i,j}^m \cdot (22.13)^m} \quad (2)$$

$$x_{i,j} = \sin \alpha_{i,j} + \cos \alpha_{i,j} \quad (3)$$

式中: $L_{i,j}$ 是坐标为 (i, j) 的栅格单元坡长因子; $A_{i,j}$ 为栅格单元上游汇流面积 (m^2); D 是栅格边长 (m); $\alpha_{i,j}$ 是栅格单元坡向; m 是坡长指数; 22.13 是 RUSLE 采用的标准小区坡长。

(2) 预测年均输沙能力。年均输沙能力是栅格单元内相对于下坡方向的单位长度最大土壤流出量, 采用 Desmet 等 [20] 和 Van Oost 等 [21] 提出的公式:

$$TC = K_{TC} \cdot R \cdot K \cdot (LS - 4.12S^{0.8}) \quad (4)$$

式中: TC 是年均输沙能力 [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{a})$]; K_{TC} 是输沙能力系数 (m), 通过模型校正取值; R, K, LS 含义与前面一致; S 为坡度 (m/m)。

(3) 泥沙流动模拟。泥沙的流动模拟过程通过多重流算法计算获得, 根据汇流方向变化实现泥沙从高到低汇入河流的过程, 模拟泥沙到达河网的路径, 如果栅格中的泥沙输入量加上侵蚀量小于输沙能力时, 则会产生侵蚀, 此时泥沙会向较低的相邻点移动; 反之, 会有部分泥沙产生沉积 [12, 20-21]。

1.3.2 模型数据的输入 模型计算所需的 DEM 图通过 ArcGIS 由研究区轮廓剪裁得到; parcel 图由土地利用图重分类得到; R 值利用 Wischmeier 模型 [22] 进行计算并经过 Kriging 插值法生成 R 因子图层; K 值采用 EPIC 模型 [16] 进行计算得到; River 图由 DEM 经过 ArcGIS 的水文分析模块提取得到; C 值使用蔡崇法等 [23] 用植被覆盖度计算得到, 而植被覆盖度则采用像元二分模型 [24] 计算得到; p 值依据甘南地区的水土保持情况并结合前人的研究成果对不同土地类型进行赋值得到, 其中草地和湿地为 0.7, 耕地为 0.3, 林地和未利用土地为 1, 水体和建设用地为 0 [25]; Pond 图中的拦沙计算采用 Brune 拦沙率 [26] 进行计算得到。以上图层数据的分辨率均为 100×100 , 且为具有相同空间分布范围和投影的 .rst 格式。

1.3.3 模型的校正与验证 纳什效率系数 (NS) 广泛用于 WaTEM/SEDEM 模型的有效性评价, 其计算公式为 [12, 14]:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{\text{mean}})^2} \quad (5)$$

式中: NS 为纳什效率系数; n 为观测次数; O_i 为观测值; P_i 为预测值; O_{mean} 为观测值平均值。NS 的范围为 $-\infty \sim 1$, 数值越接近 1 表明模型模拟的效果越好。一般情况下, $NS > 0.5$ 说明模型可用于进行模拟。

WaTEM/SEDEM 模型需要校正输沙能力系数

$K_{TC-high}$ 和 K_{TC-low} , 其中 K_{TC-low} 为植被覆盖较好森林的最小运输系数, $K_{TC-high}$ 为耕地土地利用下的最大运输系数。本研究利用碌曲水文站 1997 年、1998 年、1999 年的实测输沙数据对模型进行校准, 采用试错法在预期范围内手动调试输沙能力系数的最大值和最小值, 将模拟出的输沙量与实测值进行对比, 并通过式(5)计算出纳什效率系数 NS 的值, NS 最大值相对应的一组 K_{TC} 值即为最佳组合。

1.4 地形位指数

地形位指数是将高程和坡度进行综合考虑的地理因子, 能很好地反映高程和坡度的分异性, 高程越高, 坡度越大, 地形位指数则越大, 本研究引入地形位指数作为影响洮河源区侵蚀空间分异性的一个影响因素, 能够很好地探究地形因子对侵蚀强度的综合影响, 其公式为^[14, 27]:

$$T = \lg \left[\left(\frac{E}{\bar{E}} + 1 \right) \times \left(\frac{S}{\bar{S}} + 1 \right) \right] \quad (6)$$

式中: T 为地形位指数; E 和 \bar{E} 分别为研究区任意一点的高程值和该点所在区域内的平均高程; S 和 \bar{S} 分别为研究区任意一点的坡度值和该点所在区域内的平均坡度, 计算结果用相等间隔分级法分为 6 个等级: 1 级(0.27~0.40), 2 级(0.40~0.51), 3 级(0.51~0.60), 4 级(0.60~0.69), 5 级(0.69~0.79), 6 级(0.79~1.09), 见图 1。

1.5 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性并揭示其背后驱动力的一组统计学方法, 其核心理论是探测自变量与因变量的空间分布是否具有相似性, 以此来度量自变量对因变量空间异质性的解释程度, 其包括因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测 4 个探测器, 本研究采用因子探测和交互探测来分析各影响因素对洮河源区侵蚀空间分异性的影响^[28-29]。

1.5.1 地理探测器介绍

(1) 因子探测。因子探测器主要用于探测 Y 的

空间分异性以及各个自变量 X 单独对因变量 Y 的空间异质性的解释程度, 一般用 q 值进行表征^[28-29]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (7)$$

$$SSW = SST = N \sigma^2 \quad (8)$$

式中: $h=1, \dots, L$ 为变量 Y 或因子 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 和全区的 Y 值的方差; SSW 和 SST 分别为层内方程之和与全区总方差; q 的值域为 $[0, 1]$, q 值越大表明该因子对 Y 的影响力越强^[28]。

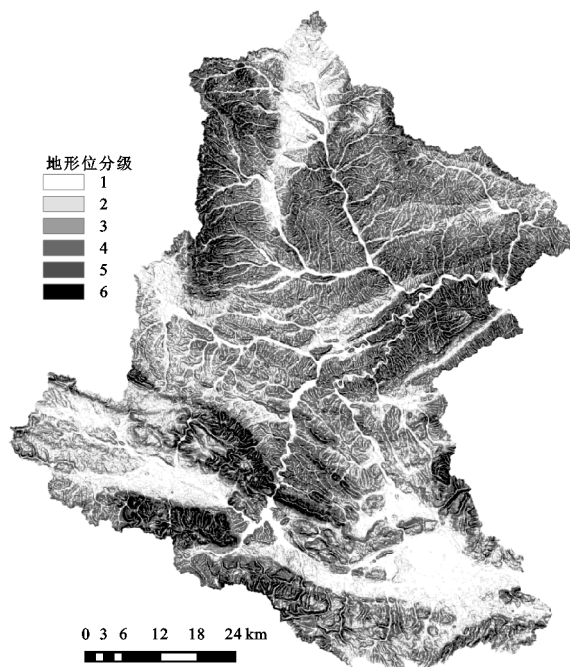


图 1 洮河源区地形位指数等级分布

(2) 交互探测。交互探测是用于探测两因子共同作用时是否会增强或减弱对因变量 Y 的解释强度, 评估方法为分别计算 X_1 和 X_2 对 Y 的解释力 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$, 然后再计算 $q(X_1 \cap X_2)$, 将这 3 个变量进行比较来判定其交互作用的影响^[28-29], 如表 1 所示。

表 1 交互作用探测

判定依据	解释
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	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

1.5.2 数据预处理 本研究选取地形位指数(X_1)、植被覆盖度(X_2)、多年平均降雨量(X_3)、土地利用类型(X_4)共 4 个因子作为自变量, 将多年平均土壤侵蚀模数作为因变量 Y , 根据王劲峰等^[28]提出的数据离散化和前人研究成果的基础上^[24, 27], 用“自然间断点分级”的方法将地形位指数和多年平均降雨量均

分为 6 类和 9 类; 多年平均植被覆盖度则按照极低覆盖度($fc < 10\%$)、低覆盖度($10\% \leq fc < 35\%$)、中覆盖度($35\% < fc < 55\%$)、中高覆盖度($55\% \leq fc \leq 75\%$)、高覆盖度($fc > 75\%$)分为 5 类; 土地利用类型按照耕地、林地、草地、水体、建设用地、未利用土地分为 6 类; 并将 X_1-X_4 各因子进行分辨率为 1 km 的重采样, 最后

通过 ArcGIS 创建渔网,间隔为 1 km×1 km,并进行提取分析得到离散后的数据。

1.6 重心模型

重心是指物体各个部分受到重力作用点,研究流域的侵蚀重心在时间上的变化能够更好地分析区域侵蚀的发展趋势和变化程度,其公式如下^[30]:

$$\overline{X} = \overline{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i Z_i}{\sum_{i=1}^n Z_i} \tag{9}$$

式中: $\overline{X}, \overline{Y}$ 为重心坐标; X_i, Y_i 为研究区第 i 个栅格的经纬度坐标; Z_i 为研究区第 i 个栅格的侵蚀模数 $t/(hm^2 \cdot a)$ 。

1.7 趋势分析法

一元线性回归分析法通过模拟每个像元的变化趋势来反映其在区域内的变化特征,本研究通过该方法实现逐像元的侵蚀模数和植被覆盖度随时间的变化分析,公式如下^[24,31]:

$$K = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times X_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n X_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \tag{10}$$

式中: K 为斜率; n 为年份; X_i 为第 i 年的侵蚀强度等级或植被覆盖度;当 $K < 0$ 时,表明土壤侵蚀状况向坏的趋势发展或植被覆盖趋于恶化, $K > 0$ 时,表明土壤侵蚀状况向好的趋势发展或植被覆盖趋于发展, $K = 0$ 则不变。

2 结果与分析

2.1 WaTEM/SEDEM 模型的校正与验证结果分析

通过试错法和公式(5)的计算可得出结果,当 K_{TC-low} 和 $K_{TC-high}$ 分别取 23 m 和 32 m 时,此时 NS 系数达到 0.966 9(表 2),模拟精度最高,效果最好。根据前人研究可知, K_{TC-low} 和 $K_{TC-high}$ 最佳组合在不同研究中会存在差异,其原因一方面是在校准过程中所采用的不同方法及实测数据,或者使用了不同栅格的图层数据^[18]。另一方面, K_{TC-low} 和 $K_{TC-high}$ 的取值也会受不同区域,不同植被覆盖导致的侵蚀量差异的影响^[32]。如在西班牙比利牛斯山脉流域中取值为 7 m 和 23 m^[33],在我国双枫潭流域取值为 10 m 和 16 m^[34],在比利时南部佛兰德斯 21 个集水区取值为 75 m 和 250 m^[35],在东北黑土区小流域取值为 0.4 m 和 0.8 m^[36]。

表 2 模型参数校正

项目	1997	1998	1999	NS
实测数据/万 t	11	10.4	14.3	0.9669
模拟数据/万 t	10.506	10.591	14.306	

为了进一步验证模型的精确度,使用 K_{TC} 的最佳组合以及相关数据模拟洮河源区 2007 年、2008 年、

2009 年、2013 年、2014 年、2015 年、2016 年共 7 年的输沙量以及 1995—1999 年和 2012—2016 年的平均输沙量,模拟平均输沙量时 R 图和 C 图用多年平均值,parcel 图则用中间年份的土地利用重分类得到。将模拟出的值与实测值进行对比,得到校正后模型模拟的精度。结果显示(图 2),模拟结果与观测数据之间的相关系数 $R^2 = 0.8812$,且拟合线的斜率接近 1,说明模型的模拟效果较好,校正后的结果能够反映洮河源区流域的侵蚀产沙情况。

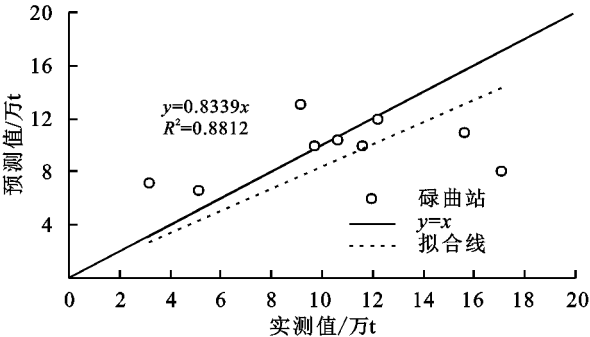


图 2 模型精度验证

2.2 洮河源区 1998—2018 年土壤侵蚀时空变化分析

将 K_{TC} 最佳组合输入 WaTEM/SEDEM 模型中,模拟得到 1998—2018 年洮河源区流域内的总产沙量、产沙模数(表 3),依据水利部颁发的土壤水力侵蚀强度分级标准(SL190—2007),将其划分为剧烈侵蚀[$< -150 t/(hm^2 \cdot a)$]、极强烈侵蚀[$-150 t/(hm^2 \cdot a) \sim -80 t/(hm^2 \cdot a)$]、强烈侵蚀[$-80 t/(hm^2 \cdot a) \sim -50 t/(hm^2 \cdot a)$]、中度侵蚀[$-50 t/(hm^2 \cdot a) \sim -25 t/(hm^2 \cdot a)$]、轻度侵蚀[$-25 t/(hm^2 \cdot a) \sim -2 t/(hm^2 \cdot a)$]、微度侵蚀[$-2 t/(hm^2 \cdot a) \sim 0 t/(hm^2 \cdot a)$]、沉积[$> 0 t/(hm^2 \cdot a)$]共 7 个等级(图 3),统计各年份不同侵蚀强度的面积及所占比例(表 4),通过公式(10)计算得到该流域的侵蚀等级(剧烈—轻度划分为 1—6 级)斜率,并经过重分类得到流域侵蚀变化情况。

由模型模拟结果和表 3 可知洮河源区流域 1998—2018 年的多年平均土壤产沙量为 1 936.22 万 t,总产沙量仅在 2008 年有较大幅度的下降,为 1 196.09 万 t;其余年份均较之前有一定幅度的增加,整体呈现上升趋势,2018 年总产沙量达到最大,为 2 526.19 万 t。流域平均产沙模数的变化规律与产沙量变化趋势基本相同,整体呈上升趋势,2008 年最小,为 23.01 $t/(hm^2 \cdot a)$;2018 年最大,为 48.59 $t/(hm^2 \cdot a)$ 。

由表 4 可知,洮河源区流域主要以侵蚀为主,侵蚀面积为 84.79%,沉积面积仅占 15.21%。侵蚀中,微度侵蚀面积占比最多,达到 50.93%,其次是极强烈侵蚀和轻度侵蚀,占比为 7%~9%,剧烈侵蚀、强烈侵蚀和中度侵蚀的占比最小,仅为 5%左右。从时间变化分析,流域内

面积占比近 31%的土地在 1998—2018 年之间呈现侵蚀加剧的状况,仅 2%的土地存在好转情况。微度侵蚀和剧烈侵蚀的面积整体呈现增加趋势,2018 年较 1998 年面积分别增加 3.94%和 5.58%;极强烈侵蚀、强烈侵蚀、中度侵蚀和轻度侵蚀面积整体为下降趋势,侵蚀面积较 1998 年下降 1%~3%,其中土壤侵蚀呈现加剧趋势的区域基本位于流域南部和西北部的高山地带,土壤侵蚀等级无变化区域主要位于中部的河谷

地区,而土壤侵蚀趋于好转的区域则主要位于研究区的东部,靠近碌曲县城一带。从空间变化分析(图 3),土壤侵蚀较为严重的区域基本分布在研究区西北、西南以及东北部的高山地带,主要分布在西倾山一带,其高程大多在 3 900 m 以上,地形起伏较大;土壤侵蚀较微弱的区域遍布研究区,主要分布在中部洮河的河谷地区以及东南部海拔相对较低区域;沉积则分布在山脚和河谷地带。

表 3 1998—2018 洮河源区流域总产沙量及平均产沙模数

指标	1998 年	2003 年	2008 年	2013 年	2018 年	多年平均
总产沙量/万 t	1757.41	2307.99	1196.09	1893.41	2526.19	1936.22
平均产沙模数/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	33.81	44.40	23.01	36.42	48.59	37.25

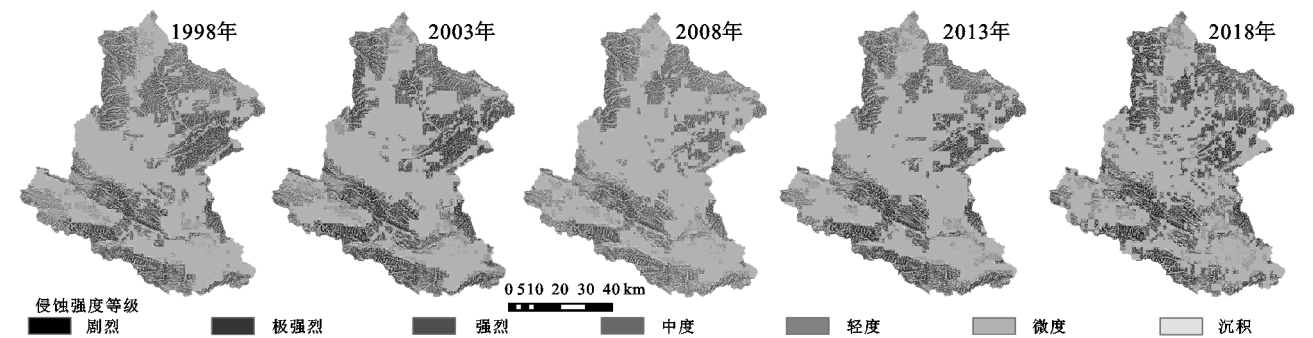


图 3 1998—2018 年洮河源区流域土壤侵蚀强度空间分布

表 4 1998—2018 洮河源区侵蚀强度/沉积面积及所占比例

侵蚀强度	1998 年		2003 年		2008 年		2013 年		2018 年		多年平均	
	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%
剧烈侵蚀	21109	4.06	41478	7.98	7351	1.41	29485	5.67	50124	9.64	29909	5.75
极强烈侵蚀	49247	9.47	48441	9.32	35078	6.75	42612	8.2	44057	8.47	43887	8.45
强烈侵蚀	36579	7.04	28740	5.53	34286	6.60	27540	5.30	24978	4.80	30425	5.85
中度侵蚀	36880	7.09	27773	5.34	39127	7.53	27255	5.24	23745	4.57	30956	5.95
轻度侵蚀	46729	8.99	38289	7.37	50474	9.71	35882	6.90	33002	6.35	40875	7.86
微度侵蚀	243372	46.82	253192	48.70	278406	53.55	284925	54.81	263856	50.76	264750	50.93
沉积	85941	16.53	81944	15.76	75135	14.45	72158	13.88	80095	15.41	79055	15.21

2.3 土壤侵蚀驱动因子分析

2.3.1 因子探测结果 由因子探测器结果可知(表 5),不同因子对研究区土壤侵蚀的空间异质性存在不同的影响程度,其影响强度从大到小依次是:地形位指数>植被覆盖度>土地利用类型>多年平均降雨,其中地形位指数的 q 值最大为 0.359,说明该因子对研究区土壤侵蚀具有主导性的影响,其次是植被覆盖度, q 值为 0.183。多年平均降雨的 q 值最小为 0.025,说明该因子对研究区土壤侵蚀的驱动力相较于其他因子弱。通过对比发现,地形位指数和植被覆盖度的 q 值均远大于其余两个因子,结合洮河源区的实际情况可知,整个流域基本处于西倾山脉一带,流域的西南、西北以及东北部为海拔较高的山区,而中部是河谷和海拔相对较低的山区,区域最大高差可达到 1 340 m,地形起伏较大,这样的地形地貌在宏

观上会导致不同等级侵蚀的发生与发展,从而产生区域侵蚀空间上的差异,其次,洮河源区流域主要以草地和林地这两类土地利用类型为主,其占地面积占比约 99%,因此植被覆盖度的高低对土壤侵蚀的影响起到重要抑制作用,从而影响流域土壤侵蚀的空间分布格局,由此可得自然因子是研究区土壤侵蚀空间变化的主导驱动力因素。

表 5 驱动因子探测结果

项目	地形位指数	植被覆盖度	多年平均降雨	土地利用类型
q 值	0.359	0.183	0.025	0.026
p 值	0	0	0	0

2.3.2 交互探测结果 通过交互探测器可以得到洮河源区与各因子的交互探测结果,由表 6 可知,地形位指数与其他因子相互作用时均呈现双因子增强现

象,且 q 值较大,均在 0.38 以上,说明地形为研究区侵蚀空间异质性的主导因素,其余因子与地形相互作用时,其影响力都会更大,其中地形位指数与植被覆盖度交互作用时对研究区土壤侵蚀的空间异质性影响控制程度最大,交互 q 值为 0.542,表明在流域中不同地形条件和不同植被覆盖度条件下,土壤侵蚀会有很大差异。植被覆盖度、多年平均降雨、土地利用类型这 3 类因子产生交互关系时,交互协同作用对土壤侵蚀分布格局变化产生的影响作用为非线性增强。综上所述,研究区各因子不存在相互独立作用,任意两个因子的交互作用对土壤侵蚀空间异质性的解释程度均大于单因子,显示为增强现象。

表 6 因子交互探测结果

q_1 (因子 1)	q_2 (因子 2)	q (两因子交互)	q_1+q_2	结果判定
$X_1=0.359$	$X_2=0.183$	$x_1 \cap x_2=0.434$	0.542	双因子增强
$X_1=0.359$	$X_3=0.025$	$x_1 \cap x_3=0.381$	0.384	双因子增强
$X_1=0.359$	$X_4=0.026$	$x_1 \cap x_4=0.362$	0.385	双因子增强
$X_2=0.183$	$X_3=0.025$	$x_2 \cap x_3=0.212$	0.208	非线性增强
$X_2=0.183$	$X_4=0.026$	$x_2 \cap x_4=0.211$	0.209	非线性增强
$X_3=0.025$	$X_4=0.026$	$x_3 \cap x_4=0.053$	0.051	非线性增强

2.4 洮河源区侵蚀重心的时空迁移特征

通过重心模型可以准确分析流域侵蚀发展趋势(图 4),分析结果显示,在 1998—2003 年,2008—2013 年这两个时间段内,土壤侵蚀强度重心均向东南方向移动,说明研究区东南方向的土壤侵蚀增长速度和增量高于其他地区,这是由于流域东南方向的碌曲县和玛曲县在这两个时段内因过度放牧等人类活动较强使植被生态系统遭到破坏,盖度降低造成的;2003—2008 年这一时间段土壤侵蚀强度重心向西北方向移动,说明在该时段研究区西北方向的土壤侵蚀加重,同时东南方向的土壤侵蚀强度有所降低,这归因于退牧还草的政策使玛曲和碌曲县境内的草地植被有所恢复,且 2008 年洮河源区全流域降雨量普遍较小(表 7),从而土壤受到水力侵蚀的影响降低。2013—2018 年土壤侵蚀强度变化中心大幅度向研究区北方向转移,说明流域北边的土壤侵蚀增长速度和增量大于其他方向的地区,这一现象的发生可能与流域降水的空间异质性有关,1998 年、2003 年、2013 年这 3 个年份内位于流域北边的库泽、夏河两县与南边的若尔盖和玛曲相比,降水差异较大,基本在 100 mm 以上;而 2008 年和 2018 年这两个年份内,库泽、夏河与若尔盖、玛曲的降水差异性较小,基本在 60 mm 以下,流域降雨量南北差异变小说明北边降雨量的增长幅度大于南边,因此研究区北边土壤侵蚀的增长速度大于南边,进而土壤侵蚀前度变化重心向北偏移。

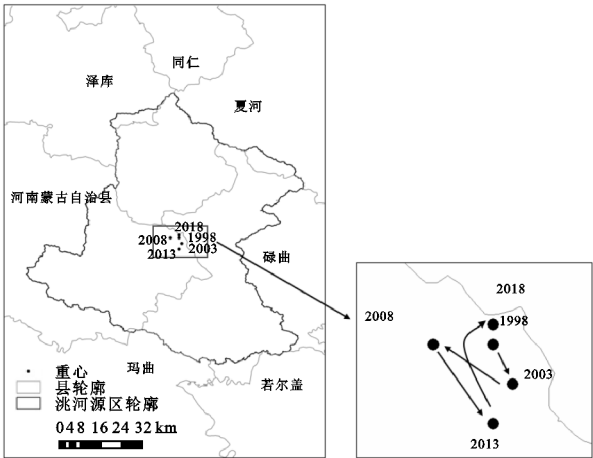


图 4 1998—2018 年洮河源区侵蚀重心移动轨迹

表 7 流域所包含的各区域部分 1998—2018 年年平均降水

地区	mm				
	1998 年	2003 年	2008 年	2013 年	2018 年
若尔盖县	678.23	729.56	532.53	602.08	787.04
玛曲县	628.59	704.95	554.00	523.71	779.16
碌曲县	620.47	701.48	544.01	547.76	777.77
夏河县	526.46	633.02	539.70	484.02	747.27
泽库县	462.01	577.15	523.81	432.20	718.24
河南蒙古族自治县	580.05	666.42	554.55	506.88	761.50
平均降雨量	582.64	668.76	541.43	516.11	761.83

3 讨论

3.1 洮河源区土壤侵蚀空间主导驱动因子分析

土壤侵蚀是造成土壤退化和水土流失的主要因素,造成土壤侵蚀强度增加的影响因素很多,有气候因素、地理位置、降水、融雪、冻融作用等因素^[37]。本研究的洮河源区属于西北内陆干旱地区。研究区属于草原—森林区,土壤侵蚀存在空间的异质性。有研究结果表明,地形位指数和植被覆盖度是洮河源区土壤侵蚀的主要驱动力因子,即两者对流域土壤侵蚀空间异质性的解释程度最大,通过 ArcGIS 的叠加分析功能对两类驱动力因子与土壤侵蚀进行叠加,进一步分析这两个因子与土壤侵蚀之间存在的关系(图 5,图 6)。

地形位分级由地形位指数通过自然间断点法分级得到,洮河源区的高等级地形位主要分布于西北、东北以及西南部的高山带,而较低等级的地形位则分布在中部的洮河河谷区以及东南部的杂海湿地(图 1),流域 1998—2018 年的平均侵蚀模数整体上呈现出随地形位等级的增加而增大的趋势(图 5),1 级地形位平均侵蚀模数最小[1 t/(hm²·a)]左右,为微度侵蚀,6 级地形位平均侵蚀模数最大,基本 100 t/(hm²·a)以上为极强度侵蚀,这与流域侵蚀的空间分布规律一致。流域 1998—2018 年的平均侵蚀模数整体上呈现随植被覆盖度增大

而减少的趋势(图6),当流域呈现极低植被覆盖度时,此时平均侵蚀模数最大,基本在 $80 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 左右,为极强烈侵蚀,当流域呈现高植被覆盖度时,此时平均侵蚀模数最小,基本在 $2.0 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 左右,为微度侵蚀。产生以上规律的原因是当研究区地形位等级较低时,坡度较缓,地形起伏不大,植被生长条件好,植被覆盖度较高(图7),因此土壤的抗蚀能力较强,能够有效减少侵蚀的发生与发展。随着流域地形位等级增大,一方面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,另一方面洮河源区属于高山流域,是高海拔寒区,高程越大,气温越低,植被的生长条件越差,因此较高等级的地形位植被覆盖度较差(图7),而且长期受到冻融作用,会使

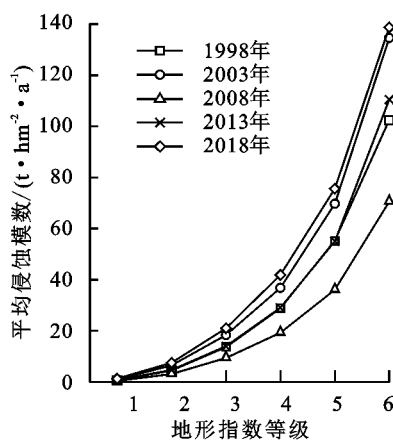


图5 洮河源区流域不同地形位分级的年均侵蚀模数

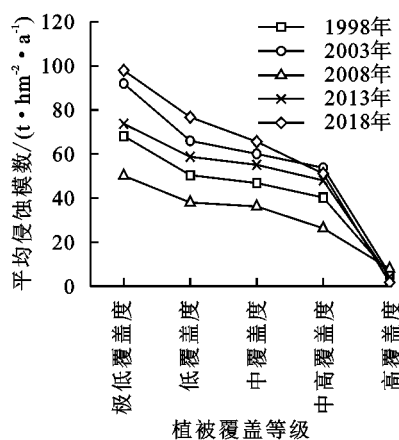


图6 洮河源区流域不同植被覆盖等级的年均侵蚀模数

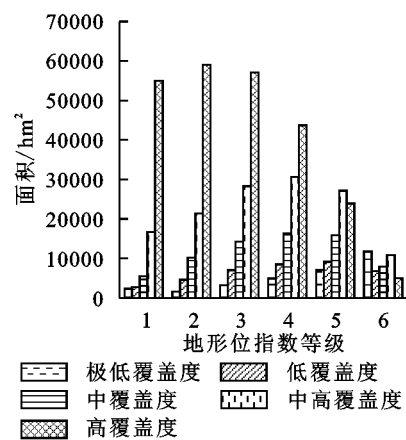


图7 洮河源区流域1998—2018年各地形位等级的植被覆盖情况

3.2 洮河源区土壤侵蚀评价

本研究运用 WaTEM/SEDEM 模型对洮河源区1998—2018年的土壤侵蚀计算分析,并通过重心模型分析其土壤侵蚀发展趋势,综合分析可知,洮河源区在这20年里,土壤侵蚀加剧的面积远大于好转面积,除2008年土壤侵蚀有大幅度的下降外,其余年份土壤侵蚀面积均呈现上升趋势,即研究区的土壤侵蚀整体呈现恶化的趋势。

洮河源区在2003年起实施了退牧还草工程,退牧还草工程的实施短期内提高了洮河源区的植被覆盖度(图8),有效防治了土壤侵蚀的进一步发展,因此2008年洮河源区的土壤侵蚀强度和面积较2003年和1998年出现了大幅度下降趋势^[42]。虽然,退牧还草工程短期内取得了明显成效,但是从长期发展趋势分析,研究区草原生态系统的总体恶化趋势仍没有得到彻底改善,由公式(10)可以得到研究区1998—2018年植被覆盖度斜率空间分布以及变化情况(图9),由图9可知,1998—2018年研究区近48%的草地其植被覆盖呈现降低的趋势,且通过相关学者研究也表明,2013—

区域内土体结构发生破坏,降低土壤团聚体的稳定性,为其他外营力破坏提供了充足的基础^[38]。植被的生长在高山流域和寒区与高程有着密切的联系,在海拔较高的山区由于地形等原因不利于土壤的水土保持,且气温普遍较低以及有着强烈的冻融作用,在这种地形区域中,植被的适应性较为脆弱,加之高海拔地区有积雪覆盖,一定程度上使无植被覆盖面积增加^[39-41]。因此流域内侵蚀等级微弱的地区多在中部低海拔处,而侵蚀严重区基本在高山地带,这也解释了流域地形位指数与植被覆盖度交互作用对研究区土壤侵蚀空间异质性的解释度最大。综上所述,洮河源区高海拔地区是水土流失的重点发生区,相关部门应针对该区域开展相应的水土保持措施。

2018年黄河流域甘肃段的植被覆盖度呈现波动减少的趋势,植被覆盖度减少的区域主要在甘南州一带,呈现恶化趋势的草地大都分布在玛曲县和碌曲县^[24,43-44]。这是因为退牧还草工程前后研究区农牧家庭的产业结构并未发生改变,仍以畜牧业为主,而禁牧休牧后缺乏饲料来源和舍饲圈养条件,因此随着牲畜的数量不断增加,当地牧民又会以放牧为主,长此以往,草场严重超载放牧,致使草地植被恶化,导致洮河源区的土壤侵蚀出现波动性增强过程,河道的产沙量呈现增加趋势^[45]。

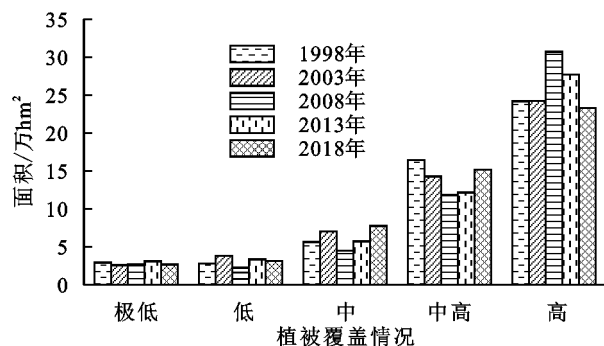


图8 1998—2018年不同植被覆盖情况的面积

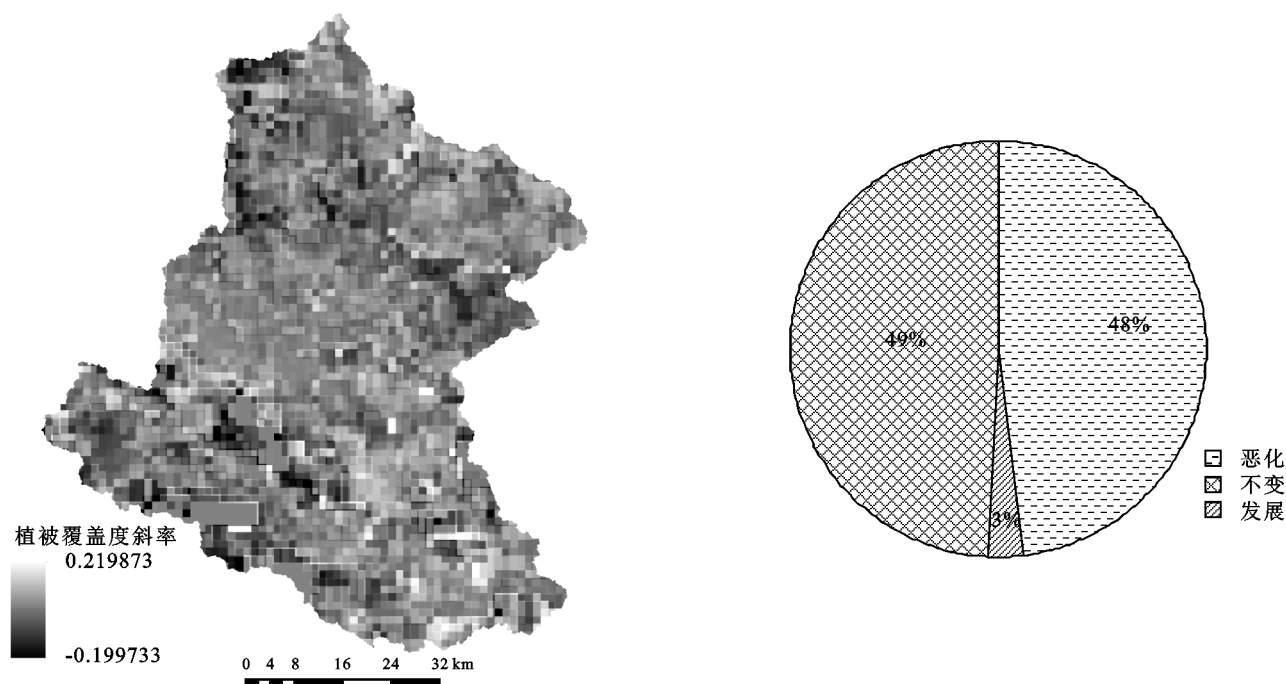


图9 洮河源区1998—2018年植被覆盖度斜率空间分布及变化情况

4 结论

(1) WaTEM/SEDEM 模型在输沙能力系数分别为 23 m 和 32 m 时, NS 系数最大为 0.966 9, 此时模拟效果达到最优。对模型的精度进行验证发现该模型在洮河源区中具有很好的适用性。

(2) 1998—2018 年, 洮河流域的总产沙量整体呈现上升趋势, 从 1998 年的 1 757.41 万 t 增加至 2018 年的 2 526.19 万 t。在时间上, 除 2008 年侵蚀有大幅度的下降外, 其余年份均呈现上升趋势, 2018 年平均产沙模数达到最大为 48.59 t/(hm²·a)。在空间上, 流域主要以微蚀为主, 侵蚀微弱的区域主要分布在中部河谷区和东南部沼泽湿地一带。侵蚀严重的区域主要分布在西北、西南以及东北部的高山地带。

(3) 研究选取的因子对洮河流域土壤侵蚀空间异质性的解释程度各有不同, 其从大到小依次为地形位指数>植被覆盖度>土地利用类型>多年平均降雨, 其中地形位指数和植被覆盖度的解释度远大于其余各因子, q 值分别为 0.359, 0.183; 说明在进行洮河源区土壤侵蚀的空间归因性分析时, 应首要考虑自然因素。

(4) 流域土壤侵蚀强度重心在 1998—2003 年, 2008—2013 年这两个时间段内, 均向东南方向移动, 在 2003—2008 年向西北方向移动, 在 2013—2018 年则向北方向移动, 侵蚀力重心的这种迁移特征展示了流域侵蚀年内变化特征和发展趋势。

(5) 综合对洮河源区的土壤侵蚀时空分析和主要空间驱动力分析可知, 流域侵蚀模数随地形位等级

的增大而增大, 随植被覆盖度的增加而减小。因此应该对流域大力发展退牧还草的项目尤其是对流域内的高海拔地区进行重点治理, 积极进行植被恢复建设; 对当地牧民则应该优化其收入结构, 不再以畜牧业为主并配套建设舍饲棚圈和人工饲草地, 减轻草地的载畜量。

参考文献:

- [1] 陈正发, 龚爱民, 宁东卫, 等. 基于 RUSLE 模型的云南省土壤侵蚀和养分流失特征分析[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 7-14.
- [2] Wuepper D, Borrelli P, Finger R. Countries and the global rate of soil erosion[J]. Nat Sustain, 2020(3): 51-55.
- [3] 黄晨璐. 近 40 年黄土高原土壤侵蚀时空变化及其主控因子研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- [4] 张兴昌, 高照良, 彭珂珊. 中国特色的水土保持成就和治理措施[J]. 自然杂志, 2008, 30(1): 17-22, 38.
- [5] 刘燕青, 王计磊, 李子忠. 秸秆覆盖对土壤水分和侵蚀的影响研究进展[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 429-436.
- [6] Massimo P, Paolo T, Artemi C. Mulching practices for reducing soil water erosion: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 161: 191-203.
- [7] 马悦. 基于土壤侵蚀的甘南州生态脆弱性评价[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [8] 陈同德, 焦菊英, 王颢霖, 等. 青藏高原土壤侵蚀研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 547-564.
- [9] 张启旺, 安俊珍, 王霞, 等. 中国土壤侵蚀相关模型研究进展[J]. 中国水土保持, 2014, 35(1): 43-46, 69.
- [10] 石兴旺. 三峡库区典型小流域侵蚀产沙模拟研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.

- [11] 刘小梅,李勇,黄智刚,等.基于 RUSLE 的蔗区小流域土壤侵蚀特征研究[J].水土保持通报,2022,42(3):1-8.
- [12] 盛美玲,方海燕. WaTEM/SEDEM 模型及其应用研究进展与展望[J].地理科学进展,2014,33(1):85-91.
- [13] Liu Y, Fu B. Assessing sedimentological connectivity using WATEM/SEDEM model in a hilly and gully watershed of the Loess Plateau[J]. China Ecological indicators, 2016(66):259-268.
- [14] 李子君,许燕琳,王海军,等.基于 WaTEM/SEDEM 模型的沂河流域土壤侵蚀产沙模拟[J].地理研究,2021,40(8):2380-2396.
- [15] 刘酌希,陈鑫,管晓祥,等.变化环境下洮河流域径流变化归因[J].水土保持研究,2020,27(5):87-92,100.
- [16] 魏健美,李常斌,武磊,等.基于 USLE 的甘南川西北土壤侵蚀研究[J].水土保持学报,2021,35(2):31-37,46.
- [17] 安若琪.对洮河源区域碌曲县生态环境保护的认识和思考[J].甘肃林业,2019,35(1):42-43.
- [18] 白云鹏.黄土丘陵沟壑区土地利用格局变化对小流域土壤侵蚀的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [19] Desmet P J J, Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996,51(9):427-433.
- [20] Desmet P J J, Govers G. GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape: A comparison of model results with soil map information[J]. Catena, 1995(25):389-401.
- [21] Van Oost K, Govers G, Desmet P. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage[J]. Landscape Ecology, 2000,15(6):577-589.
- [22] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971,26(5):189-193.
- [23] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持科学,2000,14(2):19-24.
- [24] 陆荫,张强,李晓红,等.黄河流域甘肃段植被覆盖度时空变化及对气候因子的响应[J].水土保持通报,2020,40(2):232-238.
- [25] 王莉娜,李文龙,王素芳,等.基于遥感和 USLE 模型的 2000—2010 年甘肃省土壤侵蚀变化评价[J].草业科学,2016,33(2):176-183.
- [26] 李海彬,张小峰,许全喜.长江三峡上游大型水库群拦沙效应预测[J].武汉大学学报:工学版,2011,44(5):604-607,612.
- [27] 徐州,林孝松,何浪.基于地形梯度的巫山县土地利用空间分布特征研究[J].中国农机化学报,2019,40(10):193-199.
- [28] 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.
- [29] 钟旭珍,张素,吴瑞娟,等.沱江流域土壤侵蚀动态变化及驱动力分析[J].水土保持研究,2022,29(2):43-49,56.
- [30] Wu H, Guo B, Xue H, et al. What are the dominant influencing factors on the soil erosion evolution process in the Yellow River Basin? [J]. Earth Sci. Inform, 2021:1899-1915.
- [31] 姚昆,周兵,何磊,等.基于地理探测器的岷江上游地区土壤侵蚀变化[J].水土保持研究,2022,29(2):85-91.
- [32] Luo Y, Wang H, Meersmans J, et al. Modeling soil erosion between 1985 and 2014 in three watersheds on the carbonate-rock dominated Guizhou Plateau, SW China, using WaTEM/SEDEM[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2021,45(1):53-81.
- [33] Alatorre LC, Beguería S, García-Ruiz J M. Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: A case study in the Barasona Reservoir watershed (Spain) using WATEM/SEDEM[J]. Journal of Hydrology, 2010,391(1/2):109-123.
- [34] 方海燕,孙莉英,聂斌斌,等.基于 WaTEM/SEDEM 模型的双枫潭流域侵蚀产沙模拟[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2014,42(1):92-97.
- [35] Verstraeten G. Regional scale modelling of hillslope sediment delivery with SRTM elevation data[J]. Geomorphology, 2006(81):128-140.
- [36] 盛美玲,方海燕,郭敏.东北黑土区小流域侵蚀产沙 WaTEM/SEDEM 模型模拟[J].资源科学,2015,37(4):815-822.
- [37] 郭岩松,毕曼.土壤侵蚀影响因素研究进展[J].河南科技,2021,40(20):136-140.
- [38] Zhang L, Ren F, Li H, et al. The influence mechanism of freeze-thaw on soil erosion: A review[J]. Water, 2021,13(8):1010.
- [39] 吴志俊,王永强,鄢波,等.巴勒更河流域植被覆盖度时空变化及其与地形因子的关系[J].水电能源科学,2021,39(7):24-27,75.
- [40] 熊巧利,何云玲,李同艳,等.西南地区生长季植被覆盖时空变化特征及其对气候与地形因子的响应[J].水土保持研究,2019,26(6):259-266.
- [41] 邹德富,冯琦胜,梁天刚.甘南地区植被类型及其 NPP 研究[J].遥感技术与应用,2011,26(5):577-583.
- [42] 闫旭文.退牧还草工程对甘肃省碌曲县草地畜牧业的影响[D].兰州:兰州大学,2012.
- [43] 陆荫,杨淑霞,李晓红.甘南州高寒天然草地生长状况遥感监测[J].草业科学,2021,38(1):32-43.
- [44] 梁芸,王大为.2000 年以来甘南植被变化趋势及原因分析[J].草业科学,2016,33(6):1102-1111.
- [45] 朱军强.国家退牧还草工程出台新政策[J].中国产业,2011,23(10):18-19.