

# 基于 RUSLE 模型的湟水流域土壤侵蚀时空变化

陈朝良<sup>1</sup>, 赵广举<sup>1,2</sup>, 穆兴民<sup>1,2</sup>, 田鹏<sup>3</sup>, 刘利昆<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;  
2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;3.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 研究黄河上游土壤侵蚀的时空变化对于维持黄河上游生态系统服务功能、保护黄河上游水塔具有重要意义。以黄河上游典型区域湟水流域为研究区,采用 RUSLE 模型定量评估了该流域 2000—2015 年土壤侵蚀的时空变化特征,并分析了有无梯田措施下土壤侵蚀的空间变化,从而量化了梯田建设对防治坡面土壤侵蚀的影响。结果表明:2000—2015 年,湟水流域的土壤侵蚀强度整体呈现减小趋势,侵蚀模数由 1 183 t/(km<sup>2</sup>·a)降低至 940 t/(km<sup>2</sup>·a),减少幅度为 20.54%。不同土地利用类型以及不同坡度下的土壤侵蚀强度均有所降低,其中耕地上的减幅最大为 20.58%。15°~20°坡度区间的侵蚀模数减幅最显著,为 23.11%。通过有无梯田措施情景模拟发现,湟水流域 2015 年土壤侵蚀模数由 940 t/(km<sup>2</sup>·a)降低至有梯田的 837 t/(km<sup>2</sup>·a),减少 11.00%。研究结果可为流域的水土流失防治和生态环境保护提供科学依据。

**关键词:** 土壤侵蚀; 土壤侵蚀模数; RUSLE 模型; 时空变化

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)04-0073-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.011

## Spatial-Temporal Change of Soil Erosion in Huangshui Watershed Based on RUSLE Model

CHEN Chaoliang<sup>1</sup>, ZHAO Guangju<sup>1,2</sup>, MU Xingmin<sup>1,2</sup>, TIAN Peng<sup>3</sup>, LIU Likun<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess

Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling,

Shaanxi 712100; 3.College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** The research on the temporal and spatial change of soil erosion in the upper reaches of the Yellow River is of great significance to maintain the ecosystem service function and protect the water tower in the upper reaches of the Yellow River. Taking Huangshui watershed in the upper reaches of the Yellow River as the research area, based on the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), the spatial and temporal variation of soil erosion in Huangshui watershed from 2000 to 2015 were quantitatively evaluated, and the spatial variation of soil erosion with or without terraced fields were analyzed, so as to quantify the impact of terrace construction on slope soil erosion. The results showed that from 2000 to 2015, the soil erosion intensity in the Huangshui watershed showed a decreasing trend, and the erosion modulus decreased from 1 183 t/(km<sup>2</sup>·a) to 940 t/(km<sup>2</sup>·a), with a decrease rate of 20.54%. The soil erosion intensities on different land use types and different slopes all decreased, among which the maximum reduction was 20.58% on cultivated land. The erosion modulus of the slope with 15° to 20° gradient decreased most significantly by 23.11%. Through scenario simulation with or without terrace measures, it was found that the soil erosion modulus in 2015 in the Huangshui watershed decreased from 940 t/(km<sup>2</sup>·a) to 837 t/(km<sup>2</sup>·a) with terraced fields, with a decrease of 11.00%. The research results could provide a scientific basis for the prevention and control of soil erosion and the protection of ecological environment of the basin.

**Keywords:** soil erosion; soil erosion modulus; RUSLE model; spatial-temporal change

土壤侵蚀已经成为制约生态文明建设和社会经济可持续发展的全球性环境问题<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀不仅

收稿日期: 2021-02-25

资助项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”(XDA20040202)

第一作者: 陈朝良(1996—),男,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: cc960204@gmail.com

通信作者: 赵广举(1980—),男,河南驻马店人,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: gjzhao@ms.iswc.ac.cn

造成土地退化,降低土地生产力,影响农业生产和粮食安全,而且还会造成江河湖库的堵塞、水质的污染、旱涝灾害的加剧等<sup>[2]</sup>,严重威胁人类的健康安全。开展流域尺度的土壤侵蚀评价是明确流域侵蚀产沙热点的基础,也是合理进行水土流失防治、布设水土保持措施的前提。

为了能够定量评估和预测土壤侵蚀,研究人员建立了大量经验统计模型和物理过程模型用于描述不同时空尺度的土壤侵蚀特征以及土壤侵蚀的发生发展过程。物理模型主要包括 WEPP 模型<sup>[3]</sup>、EUROSEM 模型<sup>[4]</sup>、LISEM 模型<sup>[5]</sup>等。相比于物理模型,经验统计模型具有结构简单、适用性强等特点,主要包括通用土壤流失方程(USLE)<sup>[6]</sup>和修正通用土壤流失方程(RUSLE)<sup>[7]</sup>,在国内外土壤侵蚀研究中得到了广泛的应用<sup>[8-10]</sup>。穆兴民等<sup>[11]</sup>通过分析比较 12 个土壤侵蚀模型在黄土高原不同尺度等的应用发现,经验统计模型可以快速评估土壤侵蚀量,物理模型则更适用于精细评估侵蚀过程和输沙过程,同时比较结果显示,RUSLE 模型在黄土高原的预测准确度较高。为了进一步提高 RUSLE 模型在我国的适用性,国内大量学者根据我国的实际情况对 RUSLE 模型进行了改进。如江忠善等<sup>[12]</sup>考虑到浅沟侵蚀对坡面土壤侵蚀的影响,引入浅沟侵蚀影响因子,建立坡面水蚀模型;刘宝元等<sup>[13]</sup>在 RUSLE 模型的基础上,改进了坡长坡度因子的计算公式,并引入耕作措施因子、生物措施因子、工程措施因子,建立了中国土壤流失方程 CSLE;田鹏等<sup>[14]</sup>在 RUSLE 模型中引入流域输沙模块,定量分析淤地坝的拦沙效益。这些研究为我国不同区域水土流失评价提供了有效的技术方法。

黄河上游土壤侵蚀主要发生在陡坡耕地与退化草地,实施有效的水土保持与生态恢复措施是控制坡面水土流失的主要途径,也是提升黄河上游生态系统服务功能的关键。湟水河是黄河的一级支流,是黄河上游水资源的重要来源。湟水流域拥有青海省 60% 的人口,由于过度放牧、垦殖等人类活动不断加剧,流域土壤侵蚀日趋严重。因此,研究湟水流域的土壤侵蚀时空变化对制定有针对性的水土保持措施和改善生态环境具有重要意义。目前对该研究区土壤侵蚀时空分布特征的研究较少,关于水土保持措施对土壤侵蚀变化影响的研究仍十分有限。本研究以湟水流域为研究区,采用 RUSLE 模型,评估该流域 2000—2015 年的土壤侵蚀空间特征与变化,对比分析 2015 年有无梯田措施情境下的土壤侵蚀特征,量化梯田建设对坡面土壤侵蚀的作用,为该区土壤侵蚀防治及水土保持措施的布设提供合理依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

湟水流域位于青海省东侧,属于青藏高原和黄土高原的过渡地带(图 1)。流域海拔 1 762~4 867 m,总面积约 1.53 万 km<sup>2</sup>。该流域农作物以大豆、青稞、土豆、小麦为主,主要的植被类型有云杉、油松、祁连圆柏、山杨、白桦等。湟水河发源于青海省的海晏县,是黄河上游重要的支流,流经海晏县、湟源县、湟中县、西宁市等 9 个县区,养育了青海省约 60% 的人口,被誉为是“青海的母亲河”。湟水流域属于典型的高原大陆性气候,多年平均气温为 0.6~7.9 °C,年均降水量 300~540 mm,日照时间和太阳辐射时间较长,昼夜温差大。该流域的土壤侵蚀形式以水力侵蚀为主,少部分地区存在重力侵蚀和风力侵蚀。

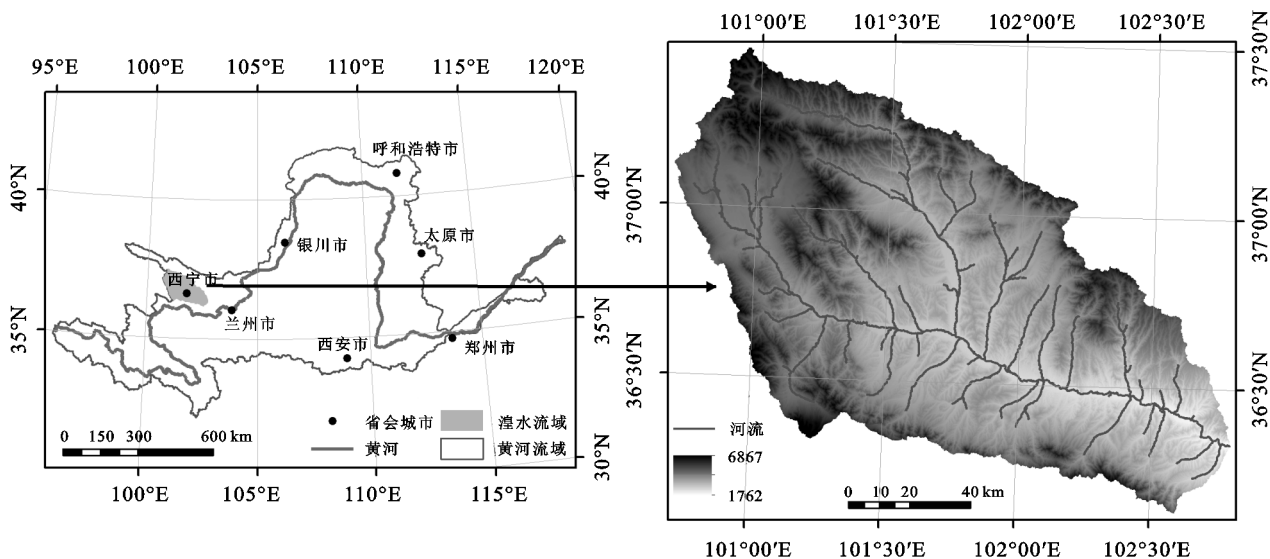


图 1 研究区概况

## 1.2 数据来源

本研究使用的数据主要包括:降雨数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)发布的“中国地面气候资料日数据集(V3.0)”,选取湟水流域及其临近的8个气象站点(门源、湟源、大通、互助、西宁、湟中、乐都、民和)1961—2016年的逐日降雨数据;土壤属性数据采用国家地球系统科学数据中心(<http://auth.geodata.cn/>)发布的中国土壤数据集,用于计算土壤可蚀性因子;DEM数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为30 m,用于获取地形参数;土地利用数据通过遥感影像提取,采用监督分类与人工判读相结合的方法进行解译,从而获取2000年和2015年2期的土地利用信息(数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心),空间分辨率为30 m。梯田数据采用人工目视解译 Google Earth 高分辨率影像且经过无人机验证平均精度达到90%的黄土高原梯田数据。

## 2 研究方法

### 2.1 土壤侵蚀模型

本研究采用修正通用土壤流失方程(RUSLE)估算湟水流域的侵蚀量,公式为:

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

式中: $A$ 为土壤侵蚀模数( $t/(km^2 \cdot a)$ ); $R$ 为降雨侵蚀力因子( $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ ); $K$ 为土壤可蚀性因子( $(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$ ); $L$ 为坡长因子; $S$ 为坡度因子; $C$ 为植被覆盖与作物管理因子; $P$ 为水土保持措施因子,其中 $L$ 、 $S$ 、 $C$ 、 $P$ 因子无量纲。

### 2.2 模型中各因子的计算

2.2.1 降雨侵蚀因子 降雨侵蚀力反映降雨引起土壤侵蚀的潜在能力。本研究以湟水流域及其周边共8个气象站点的日降雨数据为基础,采用章文波等<sup>[15]</sup>提出的日降雨量估算模型来计算降雨侵蚀力,具体公式为:

$$R = \sum_{n=1}^{24} R_{\text{半月}} \quad (2)$$

$$R_{\text{半月}} = \alpha \sum_{i=1}^k (P_i)^\beta \quad (3)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (4)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (5)$$

式中: $R$ 为年降雨侵蚀力( $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ ); $n$ 为1年中第 $n$ 个半月(此公式将1年划分为24个半月,以每月的15天为1个半月,该月内剩余天数为另1个半月); $R_{\text{半月}}$ 为半月降雨侵蚀力( $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ ); $k$ 为半月的天数; $P_i$ 为半月内第 $i$ 天的侵蚀性降雨量(规定日降雨量 $\geq 12$  mm的为侵蚀性降雨<sup>[16]</sup>,否则为0); $\alpha$ 、 $\beta$ 为回归系数; $P_{d12}$ 表

示日降雨量 $\geq 12$  mm的日平均降雨量; $P_{y12}$ 表示日降雨量 $\geq 12$  mm的年平均降雨量。

2.2.2 土壤可蚀性因子 本研究采用 Sharply 等<sup>[17]</sup>在 EPIC 模型提出的公式计算  $K$  值:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 S_a \left( 1 - \frac{s_i}{100} \right) \right] \right\} \left( \frac{s_i}{c_l + s_i} \right)^{0.3} \left[ 1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \left[ 1 - \frac{0.7 s_n}{s_n + \exp(-5.51 + 22.9 s_n)} \right] \quad (6)$$

式中: $s_n = 1 - \frac{s_a}{100}$ ;  $s_a$ 为砂粒(0.05~2 mm)含量(%); $s_i$ 为粉砂(0.002~0.05 mm)含量(%); $c_l$ 为黏粒( $< 0.002$  mm)含量(%); $C$ 为有机碳含量(%)。

2.2.3 坡长坡度因子 坡长和坡度因子是 RUSLE 模型估算土壤侵蚀量的重要地形参数,本研究采用刘宝元等<sup>[13]</sup>在 CSLE 模型中改进的坡长因子计算公式计算  $L$  因子值; $10^\circ$ 以下区域的坡度因子计算采用 McCool 等<sup>[18]</sup>的公式, $10^\circ$ 以上区域的坡度因子计算采用 Liu<sup>[19]</sup>根据黄土高原陡坡情况改进的公式。计算公式为:

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (7)$$

$$S = \begin{cases} 10.80 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.80 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.91 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (8)$$

式中: $L$ 为坡长因子; $\lambda$ 为从该流域 DEM 中提取的坡长; $m$ 为坡长指数,在黄土高原中一般取值0.5; $S$ 为坡度因子; $\theta$ 为坡度( $^\circ$ )。

2.2.4 植被覆盖与作物管理因子  $C$  因子与植被覆盖密切相关。土壤侵蚀与植被覆盖呈显著的负指数关系<sup>[20]</sup>,其拐点约在78.3%。蔡崇法等<sup>[21]</sup>通过在自然降雨和人工模拟降雨情况下观测试验小区内的植被覆盖情况提出1种新的计算方法来估算  $C$  因子,具体表达式为:

$$C = \begin{cases} 1 & f = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \ln f & 0 < f \leq 78.3\% \\ 0 & f > 78.3\% \end{cases} \quad (9)$$

式中: $C$ 为植被覆盖与作物管理因子; $f$ 为植被覆盖度。

通过多光谱影像提取植被覆盖度,可以很容易计算得到  $C$  因子。植被覆盖度  $f$  的计算公式为:

$$f = \frac{NDVI - NDVI_{\text{soil}}}{NDVI_{\text{veg}} - NDVI_{\text{soil}}} \quad (10)$$

式中: $NDVI$ 为研究区的  $NDVI$  值; $NDVI_{\text{soil}}$ 为研究区裸土或无植被覆盖区域的  $NDVI$  值; $NDVI_{\text{veg}}$ 为研究区中完全被植被所覆盖的像元的  $NDVI$  值。

2.2.5 水土保持措施因子 水土保持措施是防治土壤流失的有效方式,通常需经过实地考察等来确定不



同土地利用类型的  $P$  因子值,一般介于 0~1。本研究参考秦伟<sup>[22]</sup>、陈浩<sup>[23]</sup>的研究成果对不同的土地利用类型进行赋值,耕地、草地、林地、水域、建设用地、未利用地对应的  $P$  因子值分别为 0.30,0.16,0.05,1.00,1.00,1.00。根据吴发启等<sup>[24]</sup>的研究结果,水平梯田的平均蓄水保土效益为 86.70%,因此本研究将梯田的  $P$  因子值设为 0.13。

### 3 土壤侵蚀时空变化

#### 3.1 湟水流域土壤侵蚀强度变化

按照《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)中的分级标准<sup>[25]</sup>,将土壤侵蚀强度分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈,并根据不同时期土地利用分别计算相

应的土壤侵蚀强度(图 2)。湟水流域 2000 年和 2015 年的年均土壤侵蚀模数分别为 1 183,940 t/(km<sup>2</sup>·a),均属于轻度侵蚀,且土壤侵蚀强度减弱,减少 20.54%。由图 2 可知,湟水流域土壤侵蚀强度整体呈减小趋势,尤其是上游地区和中游地区变化比较明显,但是中游少部分地区侵蚀强度增加。

由表 1 可知,2 个年份中微度侵蚀所占面积比例最大,分别为 47.52%,51.66%;其次是轻度侵蚀,且微度和轻度侵蚀面积所占比例之和均在 90%左右。2000—2015 年,微度侵蚀面积所占比例由 47.52%增加到 51.66%,增幅为 4.14%,其他的侵蚀强度面积所占比例均减小,其中中度侵蚀减幅最大为 2.28%。

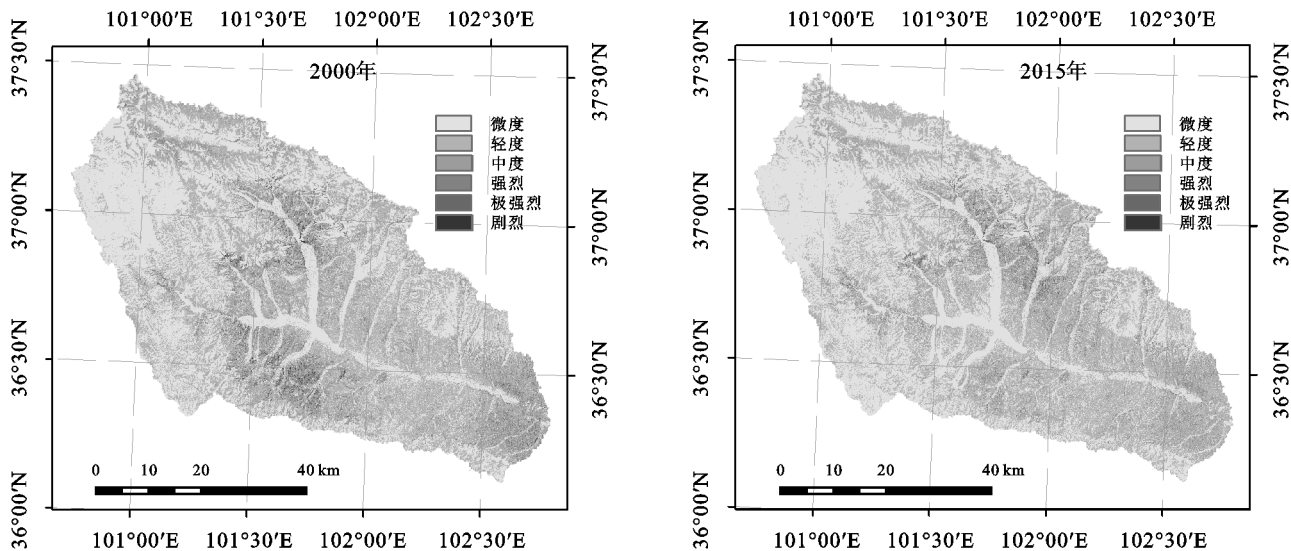


图 2 湟水流域 2000 年和 2015 年土壤侵蚀分级

表 1 湟水流域 2000 年和 2015 年土壤侵蚀强度分级和面积变化

侵蚀等级	侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	2000 年		2015 年		变化/ %
		面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	
微度	<500	7257.93	47.52	7889.84	51.66	4.14
轻度	500~2500	6005.01	39.32	5970.60	39.09	-0.23
中度	2500~5000	1404.02	9.19	1056.43	6.92	-2.28
强烈	5000~8000	401.05	2.63	261.16	1.71	-0.92
极强烈	8000~15000	172.68	1.13	88.79	0.58	-0.55
剧烈	>15000	32.39	0.21	6.25	0.04	-0.17

#### 3.2 湟水流域土壤侵蚀强度的空间变化

3.2.1 土壤侵蚀强度在不同土地利用类型的变化  
土地利用是人类影响土壤侵蚀最直接的方式,不同土地利用类型发生土壤侵蚀的方式不同,对于侵蚀的影响也有显著差异。湟水流域主要土地利用类型包括耕地、林地、草地、水体、建设用地以及未利用地(图 3)。其中草地面积最大,占比达到 50%以上,其次是耕地和林地均在 20%左右,这 3 种土地利用类型占据土地总面积的 90%以上。

由表 2 可知,2000 年和 2015 年不同土地类型中

土壤侵蚀最为强烈的是耕地,其次是草地;对土壤侵蚀量贡献最多的是草地,均在 58%左右。从 2000 年到 2015 年,耕地的侵蚀强度由中度侵蚀变为轻度侵蚀,年均侵蚀模数减幅为 20.58%,侵蚀量由 732.93 万 t 减至 578.9 万 t,减幅为 21.01%;林地的侵蚀模数减幅最大为 21.95%,侵蚀量由 10.64 万 t 减至 8.3 万 t,减少了 2.34 万 t;草地的侵蚀量减少最多,为 210.2 万 t,减幅为 22.03%,仍属于轻度侵蚀。

3.2.2 土壤侵蚀强度在不同坡度的变化  
坡度是影响土壤侵蚀的重要地形因子。湟水流域地形破碎、山高坡陡,坡度在 15°以上地区面积占流域总面积的 50%左右。对比不同坡度的土壤侵蚀强度分布(表 3)可知,2000 年和 2015 年土壤侵蚀强度变化趋势基本一致,总体表现为随着坡度的增加侵蚀模数先增加,在 20°~25°内侵蚀模数达到最大,然后开始减小;侵蚀量同样表现为先增加后减小,不同的是在 15°~20°内侵蚀量达到最大,占总侵蚀量的 22%左右。2000—2015 年,不同坡度下的侵蚀模数均呈减小趋势,其中 0~5°的减幅最大,由 190.51 t/(km<sup>2</sup>·a)减至 146.48 t/(km<sup>2</sup>·a),

减少 23.11%;15°~20°的侵蚀量减少最多,减少 81.43 万 t。从表 3 还可以看出,15°以上地区的土壤侵蚀模数均

在 1 000 t/(km<sup>2</sup>·a) 以上,属于轻度侵蚀,但土壤侵蚀量占总侵蚀量的 75%左右。

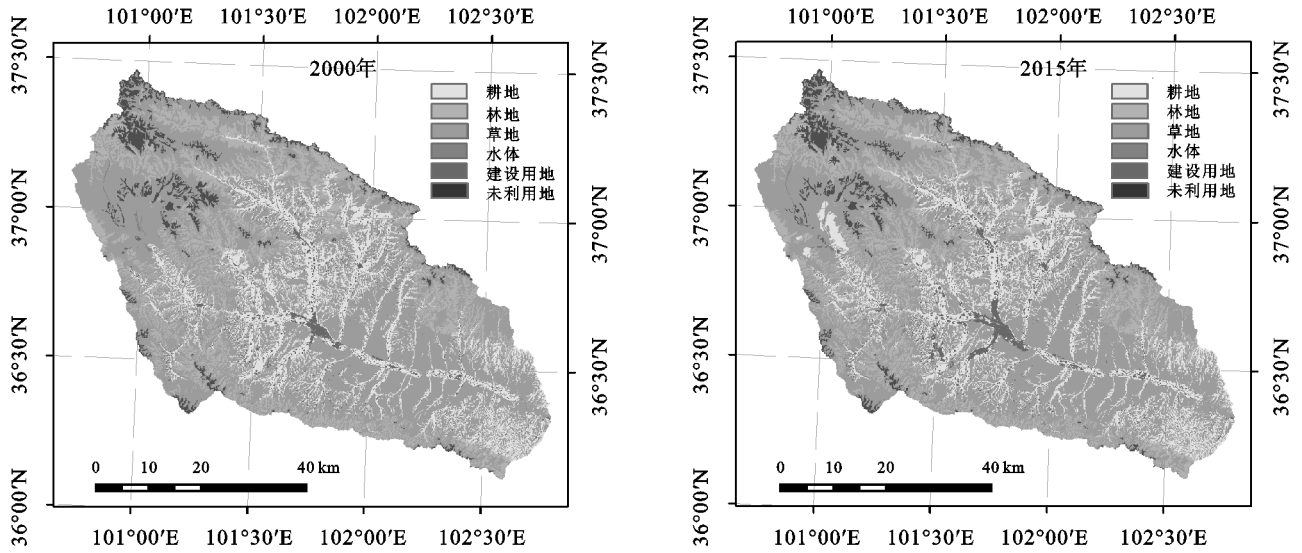


图 3 湟水流域 2000 年和 2015 年土地利用变化

表 2 湟水流域土壤侵蚀强度在不同土地利用类型下的变化

土地利用类型	土壤侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )			侵蚀量/10 <sup>4</sup> t			
	2000 年	2015 年	变化/%	2000 年	2000 年占比/%	2015 年	2015 年占比/%
耕地	2577.15	2046.67	-20.58	732.93	40.57	578.90	40.32
林地	38.54	30.08	-21.95	10.64	0.59	8.30	0.58
草地	1209.80	974.25	-19.47	1044.00	57.78	833.70	58.06
未利用地	325.92	259.84	-20.27	19.30	1.07	14.88	1.04

注:在计算土壤侵蚀模数时,判定水体和建设用地不发生侵蚀,故侵蚀量和侵蚀模数均为 0。

表 3 湟水流域土壤侵蚀强度在不同坡度下的变化

坡度/(°)	面积所占比例/%	土壤侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )			侵蚀量/10 <sup>4</sup> t			
		2000 年	2015 年	变化/%	2000 年	2000 年占比/%	2015 年	2015 年占比/%
0~5	15.86	190.51	146.48	-23.11	46.05	2.55	35.41	2.47
5~10	15.58	598.36	473.55	-20.86	142.01	7.88	112.39	7.85
10~15	17.09	1240.08	993.10	-19.92	322.93	17.92	258.61	18.05
15~20	16.41	1612.64	1286.99	-20.19	403.26	22.37	321.83	22.47
20~25	13.80	1733.72	1369.88	-20.99	364.55	20.22	288.04	20.11
25~30	10.55	1701.10	1339.66	-21.25	273.50	15.17	215.39	15.04
30~35	6.67	1569.63	1249.71	-20.38	159.60	8.85	127.07	8.87
>35	4.03	1477.41	1201.80	-18.66	90.62	5.03	73.71	5.15

### 3.3 梯田措施下土壤侵蚀强度的空间变化

梯田是防治坡耕地水土流失的有效措施之一,截至 2015 年湟水流域梯田建设面积达 1 163 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 7.60%,主要分布在支流两岸的坡耕地及部分退耕后的草地(图 4)。本研究以 2015 年的土地利用为基础,结合梯田分布数据,计算梯田措施下的土壤侵蚀强度(图 5)。通过对比有无梯田措施下土壤侵蚀强度的空间变化探明不同土地利用类型以及不同坡度等级下梯田措施的水土保持效果。结果表明,梯田能够很好地蓄水保土,减少土壤流失。在有梯田措施的情景下,湟水流域 2015 年的年均土壤侵蚀模数由 940 t/(km<sup>2</sup>·a)减少到 837 t/(km<sup>2</sup>·a),减少 11.00%。

3.3.1 土壤侵蚀强度在不同土地利用类型的变化 由表 4 可知,耕地中梯田面积为 412.1 km<sup>2</sup>,占梯田总面积的 35.43%,占耕地总面积的 14.4%,梯田措施下耕地的侵蚀模数减幅最大为 16.03%,侵蚀量减少 92.83 万 t。草地中含梯田措施(退耕梯田)的面积为 741.7 km<sup>2</sup>,占梯田总面积的 63.77%,占草地总面积的 8.66%,梯田措施下草地的侵蚀模数减幅为 6.84%,侵蚀量减少 57.06 万 t。尽管草地中梯田措施的面积比较高,但是含梯田措施的耕地蓄水保土效益更好。

3.3.2 土壤侵蚀强度在不同坡度的变化 通过分析不同坡度下的土壤侵蚀强度,量化梯田措施对土壤侵蚀的影响(表 5)发现,梯田集中分布在 5°~10°,10°~15°,

15°~20°3 个坡度区间内,占比达到 83.57%,面积分别为 335.83,405.75,231.06 km<sup>2</sup>。25°以上梯田的面积仅为 22.36 km<sup>2</sup>,仅占梯田总面积的 1.92%。梯田措施下 10°~15°的土壤侵蚀模数减幅最大为 19.06%,其次是 15°~20°坡度

区间减幅为 13.79%。尽管 5°~10°的梯田面积比 15°~20°坡度区间的面积多,但是减幅效果没有后者好。梯田措施下 10°~15°的侵蚀量减少最多为 49.3 万 t,其次是 15°~20°,减少 44.38 万 t。

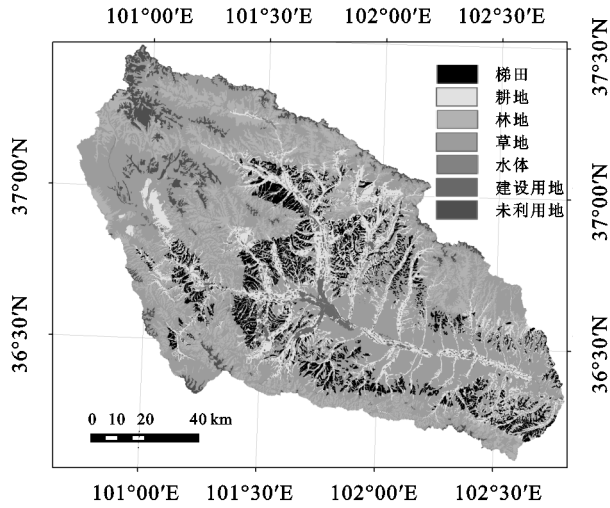


图 4 2015 年梯田分布

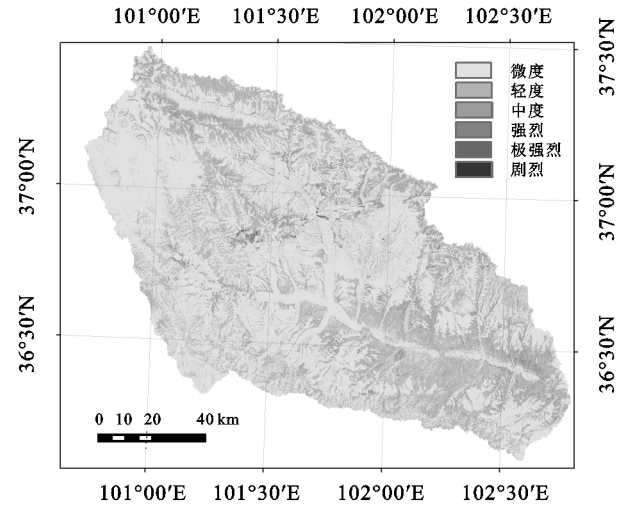


图 5 2015 年梯田措施下的土壤侵蚀强度

表 4 有无梯田下不同土地利用类型的土壤侵蚀强度的变化

土地利用类型	梯田		土壤侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )			侵蚀量/10 <sup>4</sup> t		
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	无梯田	有梯田	变化/%	无梯田	有梯田	变化量
耕地	412.10	35.43	2046.67	1718.52	16.03	578.97	486.14	-92.83
林地	9.00	0.77	30.08	29.87	0.70	8.30	8.24	-0.06
草地	741.70	63.77	974.25	907.57	6.84	833.73	776.67	-57.06
未利用地	0.20	0.02	259.84	243.36	6.34	14.88	13.94	-0.94

表 5 有无梯田下不同坡度的土壤侵蚀强度的变化

坡度/ (°)	梯田		土壤侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )			侵蚀量/10 <sup>4</sup> t		
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	无梯田	有梯田	变化/%	无梯田	有梯田	变化量
0~5	90.15	7.75	146.48	137.50	-6.13	35.41	33.24	-2.17
5~10	335.83	28.86	473.55	426.92	-9.85	112.39	101.32	-11.07
10~15	405.75	34.86	993.10	803.78	-19.06	258.61	209.31	-49.3
15~20	231.06	19.85	1286.99	1109.54	-13.79	321.83	277.45	-44.38
20~25	78.66	6.76	1369.88	1262.47	-7.84	288.04	265.46	-22.58
25~30	18.66	1.60	1339.66	1273.84	-4.91	215.39	204.81	-10.58
30~35	3.21	0.28	1249.71	1209.81	-3.19	127.07	123.01	-4.06
>35	0.50	0.04	1201.80	1187.81	-1.16	73.71	72.85	-0.86

## 4 结论

(1) 湟水流域 2000 年和 2015 年的年均侵蚀模数分别为 1 183,940 t/(km<sup>2</sup>·a),减少 20.54%,除中游部分地区土壤侵蚀强度增加外,整体呈减小趋势。侵蚀强度在不同的土地利用类型中均表现为减小趋势,其中耕地的侵蚀模数减幅最显著,为 20.58%,草地的侵蚀贡献最高,占总侵蚀量的 50%以上。

(2) 侵蚀模数和侵蚀量随着坡度的增加表现为先增大后减小,侵蚀模数在 15°~20°减幅最大,为 23.11%,侵蚀量在 20°~25°最大。2000—2015 不同坡度区间的侵蚀模数和侵蚀量均呈现不同程度的减小。

(3) 梯田集中分布在 5°~20°,占梯田总面积的 83.57%,其中 10°~15°的侵蚀模数减幅最大,为 19.06%,保持水土效果更好。对比有无梯田下的流域土壤侵蚀模数,湟水流域平均土壤侵蚀模数由 940 t/(km<sup>2</sup>·a)减至 837 t/(km<sup>2</sup>·a),减少 11.00%。梯田措施下耕地的土壤侵蚀模数减幅最大,为 16.03%,表明梯田具有良好的蓄水保土效益,能够减少水土流失。

### 参考文献:

- [1] Pimentel D, Kounang N. Ecology of soil erosion in ecosystems[J]. *Ecosystems*, 1998, 1(5): 416-426.
- [2] 王占礼. 中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J]. *农业*



- 工程学报, 2000, 16(4): 32-36.
- [3] Laffan J M, Lane L J, Foster G R, et al. WEPP: A new generation of erosion prediction technology[J]. The Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46(1): 34-38.
- [4] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(6): 527-544.
- [5] De Roo A P J. The LISEM project: An introduction[J]. Hydrological Processes, 1996, 10(8): 1021-1025.
- [6] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]. Washington, D. C.: U.S. Department of Agriculture, 1978.
- [7] Renard K G, Foster G R, Weeies G A, et al. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)[M]. Washington D. C.: U.S. Department of Agriculture, 1997.
- [8] Zhao G J, Mu X M, Wen Z, et al. Soil erosion, conservation and eco-environment changes in the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation and Development, 2013, 24(5): 499-510.
- [9] 刘宇林. 黄土高原土壤侵蚀对植被恢复的响应[D]. 陕西杨凌: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2020.
- [10] 陆建忠, 陈晓玲, 李辉, 等. 基于GIS/RS和USLE鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 337-344.
- [11] 穆兴民, 李朋飞, 高鹏, 等. 土壤侵蚀模型在黄土高原的应用述评[J]. 人民黄河, 2016, 38(10): 100-110.
- [12] 江忠善, 郑粉莉, 武敏. 中国坡面水蚀预报模型研究[J]. 泥沙研究, 2005(4): 1-6.
- [13] 刘宝元, 谢云, 张科利, 等. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [14] 田鹏, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于改进RUSLE模型的皇甫川流域土壤侵蚀产沙模拟研究[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 832-840.
- [15] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [16] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- [17] Sharply A N, Williams J R, Jones C A, et al. Erosion-productivity impact calculator EPIC: Model documentation[R]. Washington D. C.: USDA Technical Bulletin 1768, 1990.
- [18] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [19] Liu B Y. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [20] 王晗生, 刘国彬. 植被结构及其防止土壤侵蚀作用分析[J]. 干旱区资源与环境, 1999, 13(2): 63-69.
- [21] 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.
- [22] 秦伟. 北洛河上游土壤侵蚀特征及其对植被重建的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [23] 陈浩. 黄土高原退耕还林前后流域土壤侵蚀时空变化及驱动因素研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [24] 吴发启, 张玉斌, 王健. 黄土高原水平梯田的蓄水保土效益分析[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 34-37.
- [25] 中华人民共和国水利部. SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 3-12.
- (上接第72页)
- [16] 董正武, 赵英, 雷加强, 等. 塔克拉玛干沙漠不同区域柽柳沙包土壤盐分分布特征及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2018, 42(8): 873-884.
- [17] 丁改改, 蒋进, 宋春武, 等. 古尔班通古特沙漠人工梭梭林群落生态特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1423-1432.
- [18] 王瑞东, 高永, 党晓宏, 等. 近自然恢复状态下荒漠草原不同群落表土粒度特征研究[J]. 草地学报, 2019, 27(5): 1309-1316.
- [19] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27(1): 3-26.
- [20] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362-369.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] Lin Y C, Mu G J, Xu L S, et al. The origin of bimodal grain-size distribution for aeolian deposits[J]. Aeolian Research, 2016, 20: 80-88.
- [23] 李学斌, 张义凡, 陈林, 等. 荒漠草原典型群落土壤粒径和养分的分布特征及其关系研究[J]. 西北植物学报, 2017, 37(8): 1635-1644.
- [24] 李海东, 沈渭寿, 邹长新, 等. 雅鲁藏布江南宽谷风沙化土地土壤养分和粒径特征[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 4981-4992.
- [25] 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠4种草本植物叶片与土壤的化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 659-665.