

黄土高原典型小流域土壤侵蚀时空演变

石学瑾^{1,2}, 张彪¹, 郭家龙¹, 冯浩^{1,2}, 吴淑芳^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水研究院, 杨凌 712100)

摘要: 土壤侵蚀受土地利用、气候变化等多种因素的综合影响。王茂沟流域作为黄土高原丘陵沟壑区的典型治理小区, 从20世纪开始实行了退耕还林等一系列水土保持措施。本文基于CSLE模型评估流域内2010年、2015年和2020年土壤侵蚀强度及时空演变特征, 并结合土地利用/覆被变化(LUCC)探究不同时段其土地利用空间分布格局与土壤侵蚀的响应规律, 以此验证水土保持成效。结果表明: 2010—2020年王茂沟流域年均土壤侵蚀模数下降 $0.11 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 整体土壤侵蚀状况略有改善, 但微度侵蚀占比减少5.56%, 极强烈侵蚀增加4.02%, 侵蚀严重区域主要分布在流域北部、中部及西北部; 由于降雨减少以及植被恢复, 2015年流域土壤侵蚀状况较2010年得到极大缓解, 而极端降雨的发生和植被覆盖质量下降又使得2020年土壤侵蚀模数出现回弹; 2010—2020年间流域北部及东北部草地与耕地间转化极为明显, 草地质量下降致使其土壤侵蚀模数均值较耕地更大, 分别为 $13.69 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 与 $12.99 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。研究成果有助于厘清黄土高原典型小流域土壤侵蚀与极端气候和土地利用变化间的响应关系, 为未来提高水土保持效益与降低水土流失风险提供科学的数据支持。

关键词: 土壤侵蚀; CSLE模型; LUCC; 黄土高原

DOI: 10.11821/dlxb202407010

1 引言

土壤侵蚀是世界范围内最典型的土地退化形式之一^[1], 它会降低土壤养分含量, 降解土壤结构, 导致土地生产力下降, 被它输送的沉积物还会造成江河湖库堵塞, 并对下游水质产生长期影响, 对粮食安全、农业生产和生态系统造成威胁, 制约社会经济和环境的可持续发展^[2-6]。黄土高原地处黄河中游的中国五省, 面积约64万 km^2 , 是世界上面积最大的黄土堆积区, 土质疏松, 抗蚀性差^[7]。作为全球侵蚀最强烈的地区之一, 黄土高原生态极其脆弱, 其中土壤侵蚀模数最高为皇甫川流域, 接近 $250 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 水土流失问题成为限制黄土高原发展的重要因素, 开展流域尺度的土壤侵蚀评价是合理进行水土流失防治的前提^[4, 6, 8]。土壤侵蚀模型可被有效地用于评估土壤流失, 并设置相应水土保持措施。在过去的几十年里, 许多物理成因模型和经验统计模型被开发应用于预测土壤侵蚀。基于物理过程的模型包括WEPP^[9]、SWAT^[10]和LISEM^[11]等, 他们具有不同的复杂机理, 需要大量的参数输入; 与物理成因模型相比, 经验统计模型具有适用性强、结构简单、输入

收稿日期: 2023-07-10; 修订日期: 2024-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671276) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41671276]

作者简介: 石学瑾(2000-), 女, 湖南常德人, 硕士生, 主要从事土壤侵蚀过程研究。E-mail: shixuejin13@163.com

通信作者: 吴淑芳(1977-), 女, 宁夏吴忠人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事黄土高原土壤侵蚀过程及水土保持生态功能研究。E-mail: wsfsj@163.com

参数少等优点,在世界范围内得到了广泛应用。USLE和RUSLE是经验模型的两个典型代表^[5, 12-13],但USLE和RUSLE是为缓坡($<18^\circ$)设计的,应用于黄土高原陡坡时会出现相当大的误差。因此,Liu等^[14]基于USLE开发了中国土壤流失方程(CSLE),当坡度 $>10^\circ$ 时,使用Liu等^[15]建立的方程计算边坡陡度系数更为准确。模型还考虑了中国水土保持的3类措施(生物控制、工程控制和耕作实践),已被广泛地用于预测和评估中国的水土流失^[1-2, 4]。Li等^[16]采用CSLE模型验证了不同精度DEM对坡长、坡度因子(L 、 S)会产生不同影响。Wu等^[17]利用CSLE模型研究了在不同降雨事件和水文年份下,沟壑土地整理项目在减少土壤侵蚀和截留泥沙方面的效率。Chen等^[18]分析了CSLE模型中水土保持工程措施、耕作措施因子(E 、 T)在中国不同地区的分布差异,为准确评估土壤侵蚀模数提供了参考依据。

为控制黄土高原水土流失,中国政府从20世纪50年代开始采取了一系列治理措施^[19]。20世纪80年代末以来,黄土高原的土地利用/土地覆盖发生了巨大变化。特别是1999年开始实施退耕还林工程(Grain for Green Project, GGP)后,到2013年黄土高原的植被覆盖率几乎增长了一倍,到2018年植被覆盖率增长到近70%。有研究指出GGP实施后,2008年黄土丘陵沟壑区所有流域单元的输沙模数平均降低54%,且当GGP面积每增加1%,河流含沙量每 1 m^3 减少 1.894 kg ^[20-22]。据统计,黄土高原现已建成约 5.9×10^4 座淤堤坝和 $5.5\times 10^4\text{ km}^2$ 梯田,黄土高原河口至龙门区间的年均输沙量从20世纪60—70年代的9.3亿t下降到2000—2017年的1.03亿t^[23]。胡建等^[24]通过整合黄土高原2000—2020年间野外径流实验小区的个案研究,探讨了区域内土地利用与年径流产沙的关系,得出合适类型植被的恢复能有效保持区域水土。何佳瑛等^[25]在RUSLE模型的基础上构建了土壤侵蚀强度对土地利用/覆被变化(Land Use/Cover Change, LUCC)的响应模型,发现不同时期由于延河流域受不同社会因素的影响,LUCC会影响土壤侵蚀和土壤保持效应。随着人类不合理土地利用的活动强度增加,土壤特性的恶化加剧了土壤侵蚀,土壤侵蚀的加剧又限制了土地利用的结构方式,致使土地生产力退化,人地矛盾进一步激化^[26-27]。故探讨流域2010—2020年间在LUCC背景下土壤侵蚀变化及其与LUCC的响应机制,对于研究流域土壤侵蚀治理效果以及今后的水土保持治理措施和土地利用政策调整具有十分重要的意义。

基于上述分析,本文选取黄土高原典型小流域——王茂沟流域,利用CSLE模型计算2010—2020年的土壤侵蚀量,分析CSLE模型因子的时空变化,并探究土地利用空间分布格局与土壤侵蚀响应规律,分析土壤侵蚀的时空演变特征,以期为流域土地利用政策调整和水土保持精细布局提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

王茂沟流域($37^\circ34'\text{N}\sim37^\circ36'\text{N}$, $110^\circ20'\text{E}\sim110^\circ22'\text{E}$)位于陕西省榆林市绥德县境内,面积 5.89 km^2 ,海拔 $908\sim1164\text{ m}$,属于温带半干旱大陆性季风气候,季节分明温差较大,2000—2014年年平均气温为 $10.2\text{ }^\circ\text{C}$,年平均降水量约 435.7 mm (图1)。王茂沟流域地质构造较为单一,渗透性高,流域内黄土的厚度一般在 160 m 以上,地貌支离破碎,沟壑纵横,沟壑密度为 4.3 km/km^2 。研究区主要土地利用类型为林地、草地、坡耕地和灌丛。为改善黄土丘陵区水土流失问题,黄河水利委员会于1953年成立了绥德试验站,王茂沟流域是中国也是绥德水土保持站最早开始治理的黄土丘陵沟壑典型小流域之一。

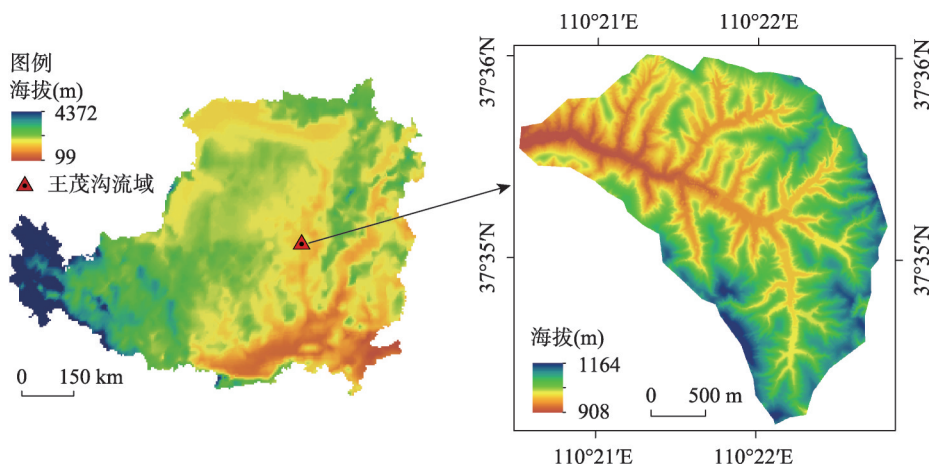


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

2.2 数据来源与处理

由国家气象科学数据中心 (<https://data.cma.cn/>) 获取王茂沟流域附近站点2010年、2015年、2020年降水资料, 采用章文波等^[28]提出的基于日降雨量的公式计算并通过克里金插值获得流域降雨侵蚀力空间分布, 流域的土壤理化性质来自联合国粮农组织 (FAO) 250 m土壤质地数据 (<https://solg.rids.org/>)。利用大疆4精灵RTK无人机航拍得到的2021年DEM (0.05 m) 提取流域地形因子, 同时使用地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>) 下载的Landsat系列影像数据 (30 m) 在ENVI中监督分类生成3期土地利用类型图, 并基于上述影像获得王茂沟流域的植被覆盖情况, 然后利用谷歌历史影像 (0.6 m) (<https://earth.google.com/>) 目视解译获得3期的水土保持工程分布, 最后将所有栅格数据统一为10 m分辨率, 并全部投影至WGS_1984_UTM_Zone_49N坐标系中。

2.3 研究方法

本文利用刘宝元等^[14]基于USLE模型研发的CSLE模型开展流域土壤侵蚀模数计算, CSLE模型公式如下:

$$A = R \times K \times LS \times B \times E \times T \quad (1)$$

式中: A 为多年平均土壤流失量 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); R 为降雨侵蚀力因子 ($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子 ($\text{t hm}^2 \text{h hm}^{-2} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$); LS 为地形因子; B 为植被覆盖度与生物措施因子; E 为工程措施因子; T 为耕作措施因子。 LS 、 B 、 E 、 T 均无量纲。

R 因子采用章文波等^[28]提出的基于日降雨量的计算公式:

$$R_{\text{半月}i} = \alpha \sum_{k=1}^m P_k^\beta \quad (2)$$

$$R_{\text{年}} = \sum_{i=1}^{24} R_{\text{半月}i} \quad (3)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d_{12}}} + \frac{24.455}{P_{y_{12}}} \quad (4)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (5)$$

式中: $R_{\text{半月}i}$ 为第*i*个半月时段的侵蚀力值 ($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1}$); α 与 β 为模型参数; m 为该半月时段内的天数; P_k 为半月时段内第*k*天的日雨量, 要求日雨量 ≥ 12 mm, 不足的按0计算; $P_{d_{12}}$ 为日雨量 ≥ 12 mm的日平均降雨量; $P_{y_{12}}$ 为日雨量 ≥ 12 mm的年平均降雨量。

土壤可蚀性反映不同土壤抵抗侵蚀能力大小，与土壤理化性质密切相关，我们利用EPIC模型^[29]计算K因子，其具体形式如下：

$$K=0.1317\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.0256S_a\left(1-\frac{S_i}{100}\right)\right]\right\}\left(\frac{S_i}{S_i+C_i}\right)^{0.3}$$
$$\left[1-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-2.95C)}\right]\left[1-\frac{0.70S_{nl}}{S_{nl}+\exp(-5.51+22.9S_{nl})}\right]$$
$$S_{nl}=1-\frac{S_a}{100}$$

(6)

(7)

式中： S_a 为砂粒含量（%）； S_i 为粉粒含量（%）； C_i 为黏粒含量（%）； C 为有机碳含量（%）；0.1317为美国制单位向国际制单位转化系数。

张宏鸣等^[30]结合UCA算法和LS-TOOLSFD算法的优点，开发了一种基于GIS的坡长坡度算法。本文利用张宏鸣团队研发的LS_TOOL坡长坡度因子计算软件，通过刘宝元等^[14]提出的算法完成地形因子的计算：

$$S=\begin{cases}10.8\sin\theta+0.03, & \theta<5^\circ \\ 16.8\sin\theta-0.50, & 5^\circ\leq\theta<10^\circ \\ 21.9\sin\theta-0.96, & \theta\geq10^\circ\end{cases}$$

(8)

$$L_i=\frac{\lambda_i^{m+1}-\lambda_{i-1}^{m+1}}{22.13^m(\lambda_i-\lambda_{i-1})}$$

(9)

$$m=\begin{cases}0.2, & \theta<1^\circ \\ 0.3, & 1^\circ\leq\theta<3^\circ \\ 0.4, & 3^\circ\leq\theta<5^\circ \\ 0.5, & \theta\geq5^\circ\end{cases}$$

(10)

式中： λ_i 和 λ_{i-1} 为第*i*个与第*i-1*为个坡段中的坡长（m）； m 为可变坡长指数； θ 为坡角。

植被覆盖与生物措施因子*B*反映了植被覆盖对土壤侵蚀的影响，采用针对不同土地利用类型和植被覆盖度进行赋值的方法确定*B*值，同时以年内逐月降雨量作为权重计算年平均*B*值，充分考虑了降雨量对于*B*值的影响^[31-33]。不同土地利用类型和不同植被覆盖度组合下的*B*值如表1所示。

表 1 不同土地利用类型和不同植被覆盖度组合下的*B*值

Tab. 1 *B* value under different combinations of land use types and different vegetation cover

不同植被覆盖度(%)	林地	草地	建设用地	耕地	裸地
0~20	0.100	0.450			
20~40	0.080	0.240			
40~60	0.060	0.150	0.025	0.230	0.800
60~80	0.020	0.090			
80~100	0.004	0.043			

研究用Landsat系列遥感影像进行土地利用类型解译，采取游松财等^[34]的改进公式（11）计算2010年、2015年和2020年的年平均植被覆盖度（FVC），公式如下：

$$FVC_{year}=\left(\sum_{i=O}^Mj_i^2/J\times FVC_1+\sum_{i=A}^{J_n}j_i^2/J\times FVC_2+\sum_{i=J_l}^Sj_i^2/J\times FVC_3\right)/\sum_{i=J}^Dj_i^2/J$$

(11)

式中： FVC_{year} 代表年均FVC； FVC_1 为3月FVC； FVC_2 为7月FVC； FVC_3 为10月FVC； j_i 为流域月均降水量（mm）； J 为年降水（mm）； O 、 M 、 A 、 J_n 、 J_l 、 S 、 J 和 D 分别代表10月、3月、4月、6月、7月、1月和12月。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \tag{12}$$

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \tag{13}$$

根据谷歌历史影像在ArcGIS 10.7软件中目视解译获得王茂沟流域水土保持工程措施分布情况，然后根据水利部办公厅印发的《区域水土流失动态监测技术规定（试行）》（<http://www.swcc.org.cn/uploads/soft/190121/1-1Z121130325.pdf>）中的工程措施因子（*E*因子）赋值表进行赋值。该流域中的主要工程措施包括水平梯田、坡式梯田、淤地坝等，淤地坝属于沟道治理措施，本文中暂不考虑，依据居民区、不同梯田在谷歌历史影像中的不同结构纹理特征进行区分，进行目视解译获得流域2010年、2015年和2020年水平梯田、坡式梯田和居民区的分布情况。最后利用王茂沟流域DEM数据以坡度分级法确定水土保持耕作措施*T*因子值，如表2所示^[35]。

表2 不同坡度条件下的*T*值
Tab. 2 *T* values under different slope conditions

坡度分级(°)	≤5	5~10	10~15	15~20	20~25	>25
<i>T</i> 值	0.100	0.221	0.305	0.575	0.735	0.800

3 结果分析

3.1 CSLE模型因子时空变化

使用ArcGIS及ENVI软件对原始数据进行处理，得到CSLE模型的土壤侵蚀因子，其中*K*、*LS*、*T*因子因研究年限较短认为在研究期间没有变化（图2）：*K*因子由北到南呈现递减趋势；*LS*因子与DEM数据息息相关，高值均沿流域山脉分布；由*T*因子分布可见，流域区域内坡度以15°~20°居多。*R*、*B*、*E*因子受气候、土地利用、当地政策等的影响，在2010—2020年3期中均存在不同程度的变化。

由克里金插值法计算得到的王茂沟降雨侵蚀力因子*R*如图3a~3c所示。2010年与2015年流域内年均降雨侵蚀力由西北到东南呈现递减分布，而2020年由东北到西南呈现递减分布，3个时期降雨侵蚀力均值分别为1294.89 MJ mm hm⁻² h⁻¹ a⁻¹、807.41 MJ mm hm⁻² h⁻¹ a⁻¹和1257.20 MJ mm hm⁻² h⁻¹ a⁻¹。从数值上可看出，2015年的降雨侵蚀力最小，2010年和2020年分别约为它的1.60倍和1.56倍。计算得到的2010年、2015年、2020年3 a的植被覆盖措施因子*B*如图3d~3f所示，其均值总体变化较小，分别为0.14、0.13与0.15。就空间分布而言，较大*B*值在流域北部及中部较为集中，流域南部的*B*值普遍偏小，植被覆盖条件

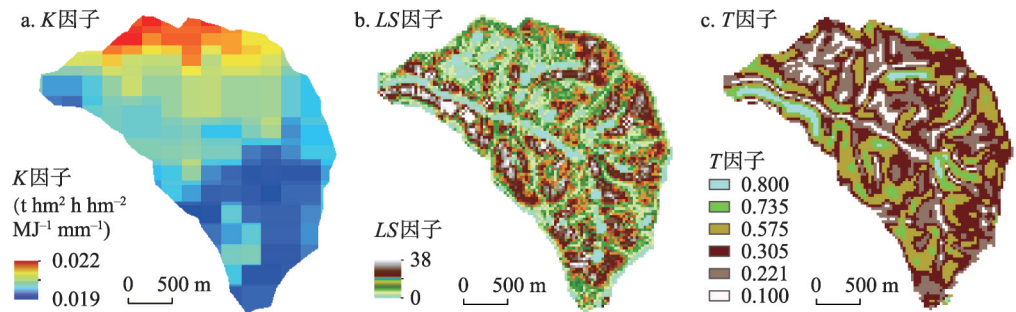


图2 2010—2020年王茂沟流域*K*、*LS*和*T*因子分布

Fig. 2 Distribution of *K*, *LS* and *T* factors in the Wangmaogou watershed from 2010 to 2020

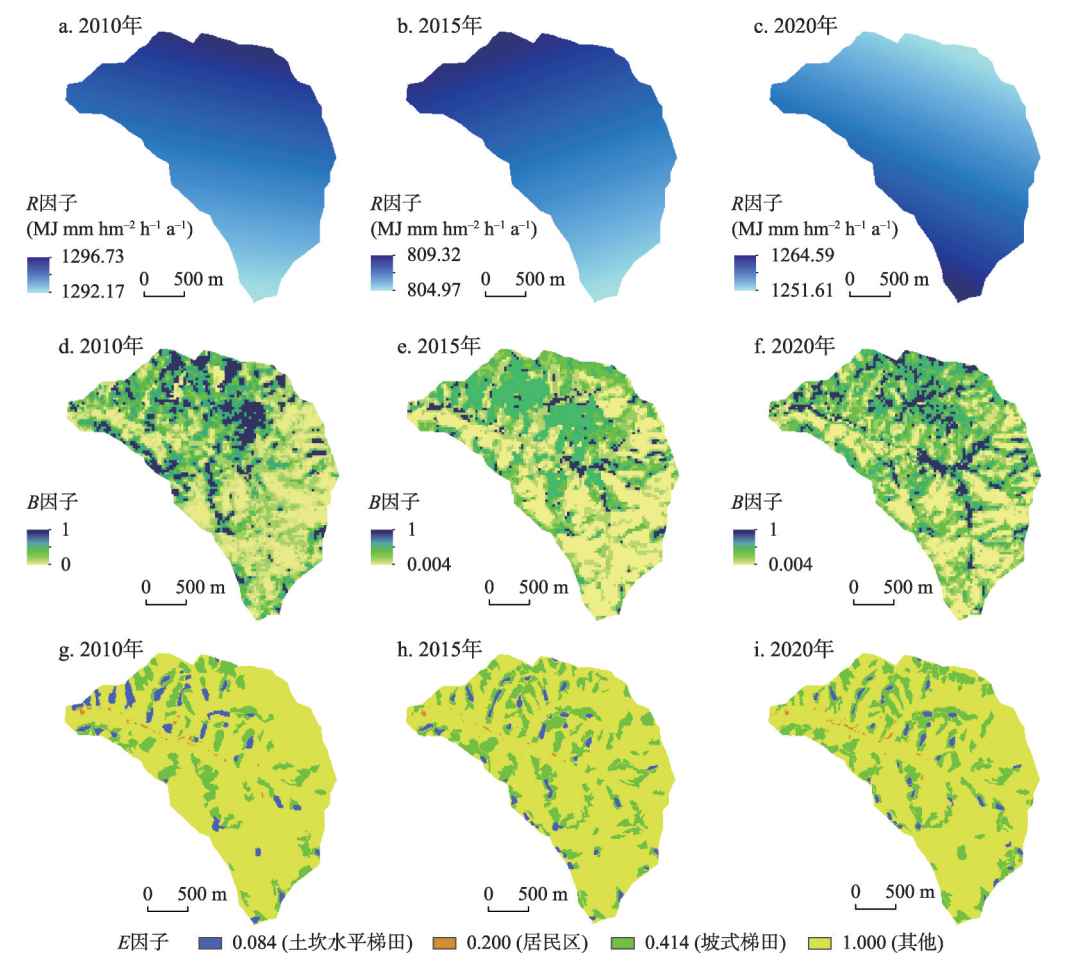


图3 2010—2020年王茂沟流域 R 、 B 、 E 因子分布
Fig. 3 Distribution of R , B and E factors in the Wangmaogou watershed from 2010 to 2020

更好；从时间序列而言，较小的 B 值（0~0.25）区域占比由2010年的86.61%增大到2020年的89.32%，且在2015年产生了峰值95.07%，说明流域内整体植被覆盖情况有好转趋势。

通过目视解译给流域内的水土保持工程措施赋值得到 E 因子，并统计目视解译后坡式梯田和土坎水平梯田的面积，由图3g~3i可知，2010—2020年居民区沿着王茂沟流域的主要道路规则分布，并越来越集中于西北东南向的主干道上，从整体上看梯田的面积在王茂沟流域的东北部和南部有所增长。2010—2020年土坎水平梯田的面积呈现递减趋势（表3），10年间减少了13.18 hm²，而坡式梯田面积呈现递增趋势，10年间增加了38.28 hm²。由目视解译过程可以了解到，坡式梯田中包含了撂荒梯田，在2010—2020年一定数目的土坎水平梯田被荒废，撂荒梯田数目增多，同时由于退耕还林政策的实施，坡式梯田上的植被覆盖显著改善。

3.2 土地利用格局时空变化

图4为2010—2020年王茂沟流域3年的土地利用类型，主要包括耕地、林地、草地、建设用地和水体。流域内土地利用类型主要

表3 王茂沟流域不同类型梯田面积变化
Tab. 3 Variations in the area of different types of terraced fields in the Wangmaogou watershed

梯田面积(hm ²)	2010年	2015年	2020年
土坎水平梯田	27.78	20.04	14.60
坡式梯田	85.04	121.43	123.32
总计	112.83	141.47	137.93

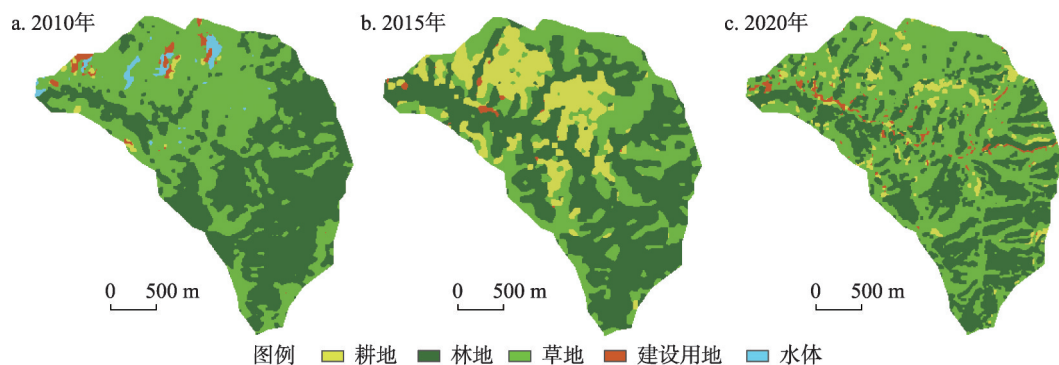


图4 2010—2020年王茂沟流域土地利用类型

Fig. 4 Land use types of the Wangmaogou watershed from 2010 to 2020

为林地 (45.44%) 和草地 (44.89%), 其次是耕地、建设用地和水体。林地与草地沿王茂沟流域山脊相间分布, 林地多分布在流域南部; 耕地年际变化较大, 2015年较2010年耕地面积显著增加, 集中在流域的北部及中部, 2020年较2015年又明显减少; 建筑用地多分布在流域西北部且较为分散。

由2010—2020年王茂沟流域LUCC可以看出 (图5), 2010—2015年35.87%的草地、71.45%的林地和62.35%的耕地相对于2010年未发生变化, 36.43%的耕地变成草地, 30.39%的草地变成林地; 2015—2020年73.93%的草地和57.46%的林地相对于2015年没有发生变动, 69.12%的耕地变成草地, 19.40%的草地变成林地。此外, 2010—2015年变幅较大的土地利用类型是草地和耕地, 草地减少了100.28 hm^2 , 耕地增加了102.25 hm^2 , 且有32.96%的草地变成耕地; 2015—2020年仍是草地与耕地占地面积变动显著, 草地增加了143.12 hm^2 , 耕地减少了76.06 hm^2 , 且有39.37%的林地变成草地。

3.3 土壤侵蚀时空演变

依据CSLE模型计算王茂沟流域2010年、2015年、2020年的土壤侵蚀模数, 分别为11.71 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 、6.09 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和11.60 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$, 并以中华人民共和国水利部发布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007) 为依据, 将流域内的土壤侵蚀划分为6个等级, 0~5 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 为微度侵蚀、5~25 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 为轻度侵蚀、25~50 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 为中度侵蚀、50~

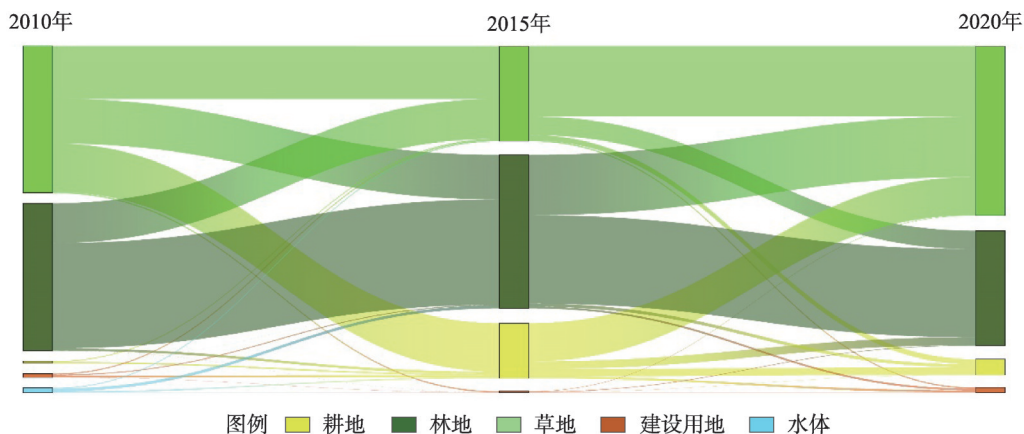


图5 2010—2020年王茂沟流域土地利用/覆被变化

Fig. 5 Land use/cover change in the Wangmaogou watershed from 2010 to 2020

80 t hm⁻² a⁻¹为强烈侵蚀、80~150 t hm⁻² a⁻¹为极强烈侵蚀以及 >150 t hm⁻² a⁻¹为剧烈侵蚀，由此得到2010—2020年的土壤侵蚀分级图（图6）。从空间分布上看，3个时期的流域侵蚀均匀分布在主干道两侧，其中北部、中部及西北部土壤侵蚀较为严重；从时间跨度上看，2010—2015年微度土壤侵蚀在流域南部、西北部增加明显，中部及北部的剧烈土壤侵蚀显著减小，2015—2020年流域内土壤侵蚀程度加剧，南部微度及轻度土壤侵蚀显著减少，流域内土壤侵蚀程度年际变化较为明显。与2010年相比，2020年土壤侵蚀程度没有显著变化，但总体侵蚀状况略有改善。

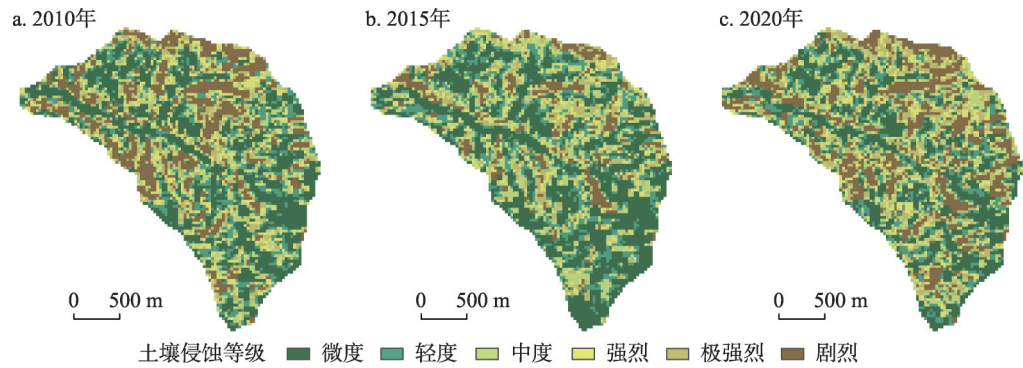


图6 2010—2020年王茂沟流域土壤侵蚀强度分布
Fig. 6 Distribution of soil erosion intensity for the Wangmaogou watershed from 2010 to 2020

2010—2020年3个时期王茂沟流域主要土壤侵蚀强度类型为微度侵蚀，其次为剧烈侵蚀（表4）。2010年和2020年侵蚀程度较严重，剧烈侵蚀占比仅次于微度侵蚀，分别占20.09%和21.99%，其他侵蚀强度等级占比较为均衡；2015年侵蚀程度较轻，以微度（38.66%）、轻度（17.62%）和中度（16.09%）土壤侵蚀居多，剧烈土壤侵蚀占比最小，仅为9.40%。2015年相比2010年微度土壤侵蚀面积增加42.93 hm²，剧烈土壤侵蚀面积减少59.85 hm²；2015—2020年微度土壤侵蚀面积减少74.07 hm²，剧烈土壤侵蚀面积增加70.47 hm²，其余侵蚀强度类型随相近的侵蚀等级做同向变化。

由土壤侵蚀分级面积转移矩阵可以看出（表5），2010—2020年60.44%的微度侵蚀等级和61.65%的剧烈侵蚀等级没有改变。轻度（70.93%）、中度（76.45%）、强烈（85.22%）和极强烈（72.05%）侵蚀等级变动较大，其中16.20%和12.72%的微度侵蚀向轻度和中度侵蚀转移，19.78%和9.45%的剧烈侵蚀向极强烈和强烈侵蚀转移，由微度和轻度向剧烈土壤侵蚀的转移量为原等级的2.75%和7.24%，由剧烈和极强烈转移到微度土壤侵蚀的为

表4 2010—2020年王茂沟流域土壤侵蚀分级面积占比						
Tab. 4 Proportion of soil erosion classification area in the Wangmaogou watershed from 2010 to 2020						
侵蚀等级	2010年		2015年		2020年	
	面积(hm ²)	比例(%)	面积(hm ²)	比例(%)	面积(hm ²)	比例(%)
微度	173.34	30.98	216.27	38.66	142.20	25.42
轻度	84.51	15.11	98.55	17.62	81.27	14.53
中度	74.52	13.32	90.00	16.09	76.86	13.74
强烈	58.95	10.54	46.44	8.30	57.87	10.34
极强烈	55.71	9.96	55.62	9.94	78.21	13.98
剧烈	112.41	20.09	52.56	9.40	123.03	21.99
总计	559.44	100.00	559.44	100.00	559.44	100.00

表 5 2010—2020 年王茂沟流域土壤侵蚀分级面积转移矩阵(hm²)

Tab. 5 Transfer matrix of soil erosion classification area for the Wangmaogou watershed from 2010 to 2020 (hm ²)							
侵蚀等级	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	2010年总计
微度	104.76	28.08	22.05	7.47	6.21	4.77	173.34
轻度	19.17	24.57	13.41	10.62	10.62	6.12	84.51
中度	11.34	11.34	17.55	10.08	13.86	10.35	74.52
强烈	3.42	10.35	9.45	11.07	9.72	14.94	58.95
极强烈	1.98	4.41	8.19	8.01	15.57	17.55	55.71
剧烈	1.53	2.52	6.21	10.62	22.23	69.30	112.41
2020年总计	142.20	81.27	76.86	57.87	78.21	123.03	559.44

注：主对角线元素代表各侵蚀等级中没有发生变化的面积。

原等级的1.36%和3.55%；22.68%的轻度侵蚀转化为微度侵蚀，31.50%的极强烈侵蚀转化为剧烈侵蚀。

3.4 基于LUCC的土壤侵蚀时空演变

为进一步研究王茂沟流域土壤侵蚀对不同土地利用类型的响应，统计了2010—2020年各地类土壤侵蚀模数（图7）。2010年有草地>耕地>林地>建设用地，2015年有耕地>草地>林地>建设用地，2020年有耕地>草地>建设用地>林地。3个时期内草地和耕地的土壤侵蚀模数均值较大，分别为13.69 t hm⁻² a⁻¹和12.99 t hm⁻² a⁻¹，林地和建筑用地的均值较小，分别为5.27 t hm⁻² a⁻¹和5.57 t hm⁻² a⁻¹；从年际的角度观察，能看到各地类3期中2015年的侵蚀程度最轻，2010—2020年林地、建筑用地、耕地的土壤侵蚀模数分别增加了1.33 t hm⁻² a⁻¹、6.85 t hm⁻² a⁻¹和6.96 t hm⁻² a⁻¹，而草地土壤侵蚀模数减少4.20 t hm⁻² a⁻¹，其中建设用地2020年的侵蚀模数增加到2010年的2.89倍。

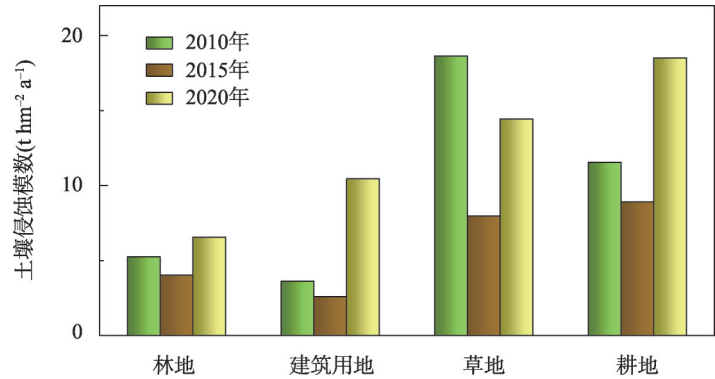


图 7 2010—2020 年王茂沟流域不同土地利用类型土壤侵蚀模数变化

Fig. 7 Changes in soil erosion modulus of different land use types in the Wangmaogou watershed from 2010 to 2020

对王茂沟流域各土地利用类型的不同侵蚀等级面积进行统计（表6），在2010年和2020年草地的极强烈和剧烈侵蚀面积占比高达48.27%和46.57%，但在2015年草地的各侵蚀等级分布较为均匀，微度侵蚀占比较大；林地在3期中由弱侵蚀到严重侵蚀的占比呈现递减的趋势，且微度和轻度侵蚀总和分别占林地面积的61.81%、71.85%和57.93%，侵蚀状况良好；耕地3期的侵蚀等级变化幅度较大，2010年与2015年微度侵蚀最多，分别占耕地面积的34.88%和27.07%，2020年微度侵蚀的占比并不突出，仅为16.83%，与此同时，耕地的极强烈和剧烈侵蚀占比呈现递增趋势，3期占比分别为18.60%、31.12%和48.87%；建

表6 2010—2020年王茂沟流域各土地利用类型不同侵蚀等级面积(hm²)

Tab. 6 Areas of different erosion classification for various land use types in the Wangmaogou watershed from 2010 to 2020 (hm²)

侵蚀等级	2010年				2015年				2020年			
	草地	林地	耕地	建设用地	草地	林地	耕地	建设用地	草地	林地	耕地	建设用地
微度	49.23	113.13	1.35	3.33	32.85	152.90	28.26	2.25	51.21	82.35	4.68	3.96
轻度	27.99	54.09	0.90	1.26	28.98	51.03	18.27	0.27	35.64	40.23	3.60	1.80
中度	33.48	40.05	0.27	0.54	29.97	43.47	16.38	0.18	41.85	30.24	3.60	1.17
强烈	29.34	28.26	0.63	0.36	22.86	14.49	9.00	0.09	36.81	18.18	2.34	0.54
极强烈	36.00	18.54	0.18	0.09	25.56	13.23	16.65	0.18	53.46	19.26	4.77	0.72
剧烈	94.68	16.47	0.54	0.54	25.83	10.71	15.84	0.18	90.81	21.33	8.82	2.07

设用地的侵蚀程度与林地类似，侵蚀状况良好，但2020年剧烈侵蚀占比较前两期变幅较大，为20.18%（2010年占8.82%，2015年占5.71%）。

4 讨论

4.1 CSLE模型精度验证

本文使用的CSLE模型在黄土高原地区土壤侵蚀研究方面已有广泛应用，过去学者们通常将模型模拟结果与区域实测数据、水利普查抽样单元数据或是前人相同区域研究结果等对比进行土壤侵蚀模型的校验^[36-39]。由于王茂沟流域土壤侵蚀模数实测数据难以获取，且较少学者专门针对王茂沟流域作土壤侵蚀研究，本文利用国家地球系统科学数据中心——黄土高原分中心内杨勤科^[40]提供的基于CSLE模型获得的2010年陕西省50 m分辨率土壤侵蚀模数图，提取出研究流域的土壤侵蚀强度等级图与本文模拟得到的2010年流域土壤侵蚀强度等级面积进行对比，从而验证模型的可靠性。

由图8可知，整体侵蚀等级面积分布存在差异，虽然微度、强烈与极强烈侵蚀等级偏差较大，但轻度、中度和剧烈侵蚀较为接近（MRE=18.46%）。尽管两种方法均采用CSLE模型模拟，但个别因子计算方法仍存在明显差距：① 本文中的 E 因子先采取目视解译获取水土保持措施区块，再依据《区域水土流失动态监测技术规范（试行）》中 E 因子赋值表进行赋值，而杨勤科等学者则先以县区为单位获取梯田、淤地坝等工程措施数据后采取 E 因子公式法计算^[41]，本文所得 E 因子值偏小；② 虽然 T 因子的计算两者均采用了坡度分级的计算方法，但具体分级指标有明显区别，本文采取的是西北黄土高原坡度分级指标，杨勤科^[40]则采取了陕西省坡度分级指标，本文所得 T 因子值偏小。综上，二者所得土壤侵蚀模数存在相应差异，但根据查阅大量2010年前后榆林市、绥德县境内以及王茂沟流域的土壤侵蚀资料^[42-44]，发现本文中土壤侵蚀强度的分布规律符合王茂沟流域实际土壤侵蚀情况，因此CSLE模型对于王茂沟流域的土壤侵蚀模数计算结果是可信的。

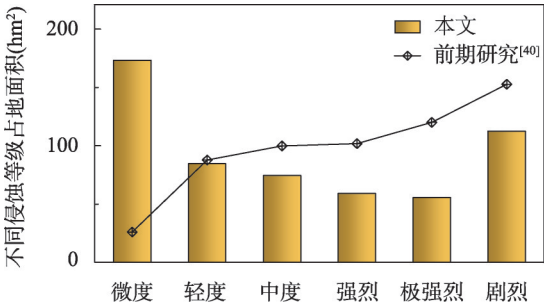


图8 前期研究^[40]与本文2010年土壤侵蚀统计比较

Fig. 8 Comparison of soil erosion statistics in 2010 between the previous study^[40] and the current study

4.2 降雨对流域土壤侵蚀时空分布的影响

由CSLE模型模拟结果可知,从数据表现上看,王茂沟流域2010年、2015年、2020年土壤侵蚀模数分别为 $11.71 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $6.09 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $11.60 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中主要影响因子 R 在3期的年平均值为 $1294.89 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 、 $807.41 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 和 $1257.20 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$,与土壤侵蚀模数呈现先减少后增加的同向变化趋势;从空间分布来看,土壤侵蚀严重程度较高的区域多分布在流域中北部,与较大的 R 因子值分布相重合。经查阅中国气象局公布的2015年主要气象灾害及特征气象灾害情况(https://www.gov.cn/xinwen/2016-01/03/content_5030386.htm),可知该年8—10月中旬的夏季时期,陕西地区出现了一定程度的气象干旱。流域附近气象站点数据资料显示,最高月降雨量仅有74.58 mm(9月),而2010年和2020年的最高月降雨量分别为98.80 mm(8月)、149.99 mm(8月)。2017年7月26—27日无定河流域下游发生了一次200 a一遇的极端降雨,据调查风暴中心最大降雨量为252.3 mm,平均雨强23.3 mm/h。小黎河流域李家河和李小河雨量站的降雨强度分别达到72.4 mm/h和79 mm/h,玉林地区的子州县和绥德县也发生了灾难性的洪水,造成人员伤亡和居民损失,以及降雨区域内的严重滑坡事件和道路侵蚀^[45-47]。上述资料表明,降水量的减少是导致2015年土壤侵蚀模数较2010年大幅下降的主要因素,而极端降雨的发生又导致2020年土壤侵蚀模数较2015年激增。

随着全球气候变暖,水文循环的加速致使极端降雨更加频繁,时短量大的极端降雨往往更具侵蚀性。以黄土高原为例,一次大暴雨所造成的侵蚀量可达全年侵蚀量的40%~90%^[48-49]。Jia等^[50]基于黄土高原17个流域的日降水数据计算了1965—2019年的降雨侵蚀力,得出输沙量随降雨侵蚀力增大而增大的结论。Yuan等^[46]以无定河流域24个地点的369个小集水区为研究对象探究了山坡降雨与沟壑侵蚀的关系,发现从降雨外围到风暴中心,随着降雨梯度的增大沟壑侵蚀强度和沟壑数量显著增加。不仅如此,极端降雨在流域地表下垫面产生的破坏还会对未来普通降雨年的土壤侵蚀模数产生较大影响。其中主要原因:① 极端降水将改变流域土壤抗蚀性。强降雨产生的冲刷会使地表植被覆盖率迅速下降,尤其在坡面,当植被覆盖率下降,土壤孔隙度、紧实度等物理性质都会发生一定改变,内部剪应力变小导致土壤结构稳定性下降,致使土壤抗蚀性及径流截流效果减弱,在同等降雨强度下比未受过暴雨冲刷的土壤更易发生沟蚀、洞蚀等过程,地表破碎程度加剧^[51-54]。② 极端降雨对水土保持措施的破坏短时间内难以恢复。当极端降雨产生的径流量超出梯田、淤地坝等的排水泄洪能力时会产生级联效应,改变的径流路径增加了下游排水系统被破坏与侵蚀的可能,对该流域未来土壤侵蚀风险产生较大影响^[55-56]。③ 相较于耕地和人为管理区域,撂荒地(植被覆盖度 $\leq 15\%$)等无人看管区域发生的侵蚀没有人工填平,且在短时间内难以自然恢复,抗侵蚀能力显著下降。Tang等^[57]在极端降雨事件发生2 a后对流域侵蚀情况进行调查,发现撂荒地相比耕地侵蚀程度更为剧烈,调查的撂荒地沟蚀持续下切深度达1.22 m,相当于暴雨时下切深度的70%。正因为极端气候的发生,本文流域的水土保持措施也受到了相应破坏,土壤侵蚀模数在短时期内出现大幅反弹。若未来极端天气发生更加频繁,需对水土保持措施做出相应改善,以此加强土壤侵蚀控制,如增加消耗更少水分植被的覆盖面、雨水捕获工程措施等^[45]。

4.3 土壤侵蚀模数对LUCC的响应

以前众多研究表明,土地利用类型的变化对改善土壤侵蚀有着不可忽视的积极或消极影响^[21-22, 58-61]。当土壤植被覆盖发生变化,土壤的水力肥力以及有机质含量都会相应发生改变,影响土壤结构的稳定性,从而影响流域的水土流失。黄土高原GGP的实施,使区域内土壤侵蚀被显著抑制。Yu等^[58]研究指出由于黄土高原植被覆盖情况好转,1990—

2015年总潜在土壤流失量减少了约41.3%，黄土高原水土保持和生态恢复有了极大改善。He等^[21]对延河流域的研究表明，由于退耕还林后植被覆盖因子成为主导驱动力，2005—2015年流域平均土壤侵蚀模数下降了81.3%，土壤侵蚀呈现明显的减弱趋势。本文基于不同土地利用类型对王茂沟流域做土壤侵蚀的时空演变分析，探究不同土地利用类型下土壤侵蚀的规律。研究结果发现，由于流域内不同的人类活动，草地与耕地之间转化明显。2010—2015年耕地面积增加102.25 hm²，草地面积减少约100 hm²，其中有93.46 hm²的耕地由草地转化而来，且2010年不同地类土壤侵蚀模数呈现草地（18.65 t hm⁻² a⁻¹）大于耕地（11.55 t hm⁻² a⁻¹）的情况，但2015年流域平均土壤侵蚀模数并没有增加，反而降低了5.62 t hm⁻² a⁻¹，与前人得出的平均土壤侵蚀模数下降趋势一致；2015—2020年耕地面积减少76.06 hm²，其中有73.50 hm²又转变回了草地，同期草地面积增加了143.12 hm²，流域平均土壤侵蚀模数反增加了5.51 t hm⁻² a⁻¹。

对于2015—2020年流域中出现的由农田向草地转换加剧土壤侵蚀的现象，Zhang^[20]团队在黄土高原的董志塬区域研究土壤侵蚀对土地利用的响应时，发现退耕还草增加了土壤侵蚀，考虑为土地利用不当所致；Wen^[59]通过空间关系评估GGP对陕北土壤侵蚀的影响，研究结果显示裸地土壤侵蚀量最大，其次是稀疏草地和农田，2015年稀疏草地占地14.6%，其中极强烈和剧烈侵蚀部分占稀疏草地的90%，仅占耕地的56%。根据前人观点对研究区域进行分析，讨论有以下两个存在的原因：① 研究区内植被覆盖质量较差所致；② 研究区内极端气候对土壤侵蚀的影响。草地覆盖面积的增长在改善黄土高原水保效益方面功不可没，但随着近年来的深入研究发现，草地疏密程度、草地类型以及草地生长环境均对抑制土壤侵蚀的效果有一定影响。若草地生长茂盛，根系密度大，则能更好地固持土壤，增加土壤孔隙度，改善土壤结构，且根系有更好的截流作用；反之若草地稀疏，则固持水土功效不足，同等降雨条件下比密草地更易发生水土流失^[52, 62-63]。还有研究表明，人工种植草地比野生草地有更好的根密度，水土保持效果更好^[64-65]。王茂沟流域的草地面积在十年间变动幅度较大，草地的植被质量较差，植被覆盖度大多是中低等级，中稀疏草地的侵蚀模数往往会高于其他土地利用类型，同时可能还存在休耕和过度放牧的情况，对土壤结构稳定性的保持以及地表径流截流的效果减弱。Huang等^[60]在探究黄土高原韭园沟流域的土壤侵蚀对土地利用和坡度的响应时，认为流域内草地的植被覆盖度大多为中低等级是草地成为主要土壤侵蚀地类的重要原因。Sun等^[63]估算2000—2010年间黄土高原土壤侵蚀模数时发现中疏草地的土壤侵蚀模数（21.03 t hm⁻² a⁻¹）与坡耕地接近，约为密草地的2倍。同时由于研究区内“7·26”极端降雨事件发生，对流域下垫面造成了部分不可逆转的破坏，对流域未来土壤固持有极大负面影响，侵蚀风险增加。因此当地在扩大植被覆盖面积的同时，还需注重植被尤其是草地的生长质量，同时将禁牧政策合理化，提高植被水土保持效益，降低水土流失风险。

5 结论

本文基于CSLE模型估算了2010—2020年王茂沟流域土壤侵蚀强度，并结合土地利用/覆被变化分析不同时段内土壤侵蚀的时空动态演变特征，主要结论为：

（1）2010年、2015年和2020年王茂沟流域年平均土壤侵蚀模数分别为11.71 t hm⁻² a⁻¹、6.09 t hm⁻² a⁻¹与11.60 t hm⁻² a⁻¹，整体减少0.94%，其中微度侵蚀为首要侵蚀等级，剧烈侵蚀次之。2010—2020年微度侵蚀减少31.14 hm²，主要转化为轻度与中度侵蚀，剧烈侵蚀增加10.62 hm²，主要由中度和强烈侵蚀转化而成，表明土壤侵蚀的加剧是循序渐进的。

(2) 相较于2010年的充沛降雨, 2015年陕西省大范围干旱导致 R 因子减少了487.48 $\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。同时, 2015年流域 B 因子值较2010年降低0.01, 说明植被覆盖条件有所改善。作为影响土壤侵蚀的主导因素, R 与 B 因子的变化促使2015年土壤侵蚀模数较2010年降低5.62 $\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

(3) 2010年、2015年和2020年王茂沟流域土地利用类型主要为林地和草地, 各类型3期的平均土壤侵蚀模数依次为草地>耕地>建筑用地>林地。由于人类驱动力与自然驱动力因素影响, 2010—2020年流域土地利用格局变化剧烈, 其中草地与耕地的相互转化最为明显, 草地与林地的相互转化次之, 加之草地植被覆盖质量较差, 致使剧烈侵蚀成为草地的主要侵蚀类型。

(4) 2015年的少雨天气与植被恢复在一定程度上缓解了王茂沟流域的土壤侵蚀状况, 但由于极端降雨事件的发生, 植被覆盖质量整体较差, 土壤侵蚀在2020年出现反弹情况, 流域的水土保持治理工作仍需科学推进和持续开展。该研究结果可为流域未来的土地利用规划, 以及水土保持治理提供科学的参考依据。

参考文献(References)

- [1] Liu J, Liu H H. Soil erosion changes during the last 30 years and contributions of gully erosion to sediment yield in a small catchment, southern China. *Geomorphology*, 2020, 368: 107357. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107357.
- [2] Duan X W, Bai Z W, Rong L, et al. Investigation method for regional soil erosion based on the Chinese Soil Loss Equation and high-resolution spatial data: Case study on the mountainous Yunnan province, China. *CATENA*, 2020, 184: 104237. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104237.
- [3] Gao H D, Li Z B, Jia L L, et al. Capacity of soil loss control in the Loess Plateau based on soil erosion control degree. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(4): 457-472.
- [4] Shi W H, Huang M B, Barbour S L. Storm-based CSLE that incorporates the estimated runoff for soil loss prediction on the Chinese Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*, 2018, 180: 137-147.
- [5] Chu L, Sun T C, Wang T W, et al. Temporal and spatial heterogeneity of soil erosion and a quantitative analysis of its determinants in the Three Gorges Reservoir Area, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(22): 8486. DOI: 10.3390/ijerph17228486.
- [6] Chen Chaoliang, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Spatial-temporal change of soil erosion in Huangshui watershed based on RUSLE model. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 73-79. [陈朝良, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于RUSLE模型的湟水流域土壤侵蚀时空变化. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 73-79.]
- [7] Liu Wenchao, Liu Jiuyan, Kuang Wenhui. Spatiotemporal patterns of soil protection effect of the Grain for Green Project in northern Shaanxi. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9): 1835-1852. [刘文超, 刘纪远, 匡文慧. 陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征. *地理学报*, 2019, 74(9): 1835-1852.]
- [8] Zhang Guanghui. Research contents of soil erosion under the background of vegetation restoration. *Soil and Water Conservation in China*, 2020(9): 76-79. [张光辉. 植被恢复背景下土壤侵蚀研究需要加强的内容. *中国水土保持*, 2020(9): 76-79.]
- [9] Laflen J M, Lane L J, Foster G R. WEPP: A new generation of erosion prediction technology. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46(1): 34-38.
- [10] Shen Z Y, Gong Y W, Li Y H, et al. A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong watershed in the Three Gorges Reservoir area. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(10): 1435-1442.
- [11] De Roo A P J. The LISEM project: An introduction. *Hydrological Processes*, 1996, 10(8): 1021-1025.
- [12] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington D C: US Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978. <https://purl.fdlp.gov/GPO/gpo31516>.
- [13] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington DC: US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1997.
- [14] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation//Proceedings 12th International Soil Conservation Organization

- Conference. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 21-25.
- [15] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [16] Li A, Zhang X C, Liu B Y. Effects of DEM resolutions on soil erosion prediction using Chinese Soil Loss Equation. *Geomorphology*, 2021, 384: 107706. DOI: 10.1016/j.geomorph.2021.107706.
- [17] Wu G, Fu S H, Zhou G Y, et al. Effects of the Gully Land Consolidation Project on soil erosion and sediment yield on the Loess Plateau, China. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(5): 1464-1476.
- [18] Chen R Y, Yan D C, Wen A B, et al. The regional difference in engineering-control and tillage factors of Chinese Soil Loss Equation. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(3): 658-670.
- [19] Tang QiuHong, Xu Ximeng, He Li, et al. Development of an eco-hydrological model for flood and drought risk assessment under a changing environment in the middle reaches of the Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(7): 1666-1676. [汤秋鸿, 徐锡蒙, 贺莉, 等. 黄河中游生态水文模型及洪旱灾害风险评估. *地理学报*, 2023, 78(7): 1666-1676.]
- [20] Zhang J X, Wang N A, Wang Y F, et al. Responses of soil erosion to land-use changes in the largest tableland of the Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(13): 3598-3613.
- [21] He J Y, Jiang X H, Lei Y X, et al. Temporal and spatial variation and driving forces of soil erosion on the Loess Plateau before and after the implementation of the Grain-for-Green Project: A case study in the Yanhe River Basin, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(14): 8446. DOI: 10.3390/ijerph19148446.
- [22] Zhu Qing, Zhou Zixiang, Liu Ting, et al. Vegetation restoration and ecosystem soil conservation service value increment in Yanhe watershed, Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(7): 2557-2570. [朱青, 周自翔, 刘婷, 等. 黄土高原植被恢复与生态系统土壤保持服务价值增益研究: 以延河流域为例. *生态学报*, 2021, 41(7): 2557-2570.]
- [23] Gao Haidong, Liu Han, Jia Lianlian, et al. Attribution analysis of precipitous decrease of sediment loads in the Hekou-Longmen section of Yellow River since 2000. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9): 1745-1757. [高海东, 刘晗, 贾莲莲, 等. 2000—2017年河龙区间输沙量锐减归因分析. *地理学报*, 2019, 74(9): 1745-1757.]
- [24] Hu Jian, Hu Jinjiao, Lv Yihe. Spatial variation of the relationship between annual runoff and sediment yield and land uses based on the regional critical zone differentiation in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(16): 6417-6429. [胡健, 胡金娇, 吕一河. 基于黄土高原关键带类型的土地利用与年径流产沙关系空间分异研究. *生态学报*, 2021, 41(16): 6417-6429.]
- [25] He Jiaying, Ren Liqing, Jiang Xiaohui, et al. Response of soil erosion to LUCC and driving forces in Yanhe River Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 184-191, 206. [何佳瑛, 任立清, 蒋晓辉, 等. 延河流域土壤侵蚀对LUCC的响应及驱动力. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 184-191, 206.]
- [26] Li J Y, Zhou Y, Li Q, et al. Exploring the effects of land use changes on the landscape pattern and soil erosion of western Hubei province from 2000 to 2020. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(3): 1571. DOI: 10.3390/ijerph19031571.
- [27] Li Ting, Liu Kang, Ma Liyang, et al. Evaluation on soil erosion effects driven by land use changes over Danjiang River Basin of Qinling Mountain. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(4): 583-595. [李婷, 刘康, 马力阳, 等. 秦岭山地丹江流域土地利用变化的土壤侵蚀效应评价. *自然资源学报*, 2016, 31(4): 583-595.]
- [28] Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Spatial distribution of rainfall erosivity in China. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(1): 33-40. [章文波, 谢云, 刘宝元. 中国降雨侵蚀力空间变化特征. *山地学报*, 2003, 21(1): 33-40.]
- [29] Williams J R, Dyke P T, Jones C A. Epic - a model for assessing the effects of erosion on soil productivity. *Developments in Environmental Modelling*, 1983, 5: 553-572.
- [30] Zhang H M, Wei J C, Yang Q K, et al. An improved method for calculating slope length (λ) and the LS parameters of the Revised Universal Soil Loss Equation for large watersheds. *Geoderma*, 2017, 308: 36-45.
- [31] Zhang Yan, Yuan Jianping, Liu Baoyuan. Advance in researches on vegetation cover and management factor in the soil erosion prediction model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(8): 1033-1036. [张岩, 袁建平, 刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 1033-1036.]
- [32] Jiang Zhongshan, Wang Zhiqiang, Liu Zhi. Quantitative study on spatial variation of soil erosion in a small watershed in the loess hilly region. *Journal of Soil Erosion and Water Conservation*, 1996, 2(1): 1-9. [江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(1): 1-9.]
- [33] Feng Qiang, Zhao Wenwu. The study on cover-management factor in USLE and RUSLE: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(16): 4461-4472. [冯强, 赵文武. USLE/RUSLE中植被覆盖与管理因子研究进展. *生态学报*, 2014, 34

- (16): 4461-4472.]
- [34] You Songcai, Li Wenqing. Estimation of soil erosion supported by GIS: A case study in Guanxi township, Taihe county, Jiangxi province. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(1): 62-68. [游松财, 李文卿. GIS支持下的土壤侵蚀量估算: 以江西省泰和县灌溪乡为例. *自然资源学报*, 1999, 14(1): 62-68.]
- [35] Huang Xiaofang, Lin Lirong, Gao Chao, et al. Soil and water conservation tillage measure factor T in the CSLE model: A method review. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(5): 142-152. [黄小芳, 林丽蓉, 高超, 等. CSLE模型中水土保持耕作措施因子研究进展. *中国水土保持科学(中英文)*, 2021, 19(5): 142-152.]
- [36] Li C J, Lu T, Wang S, et al. Coupled thorens and soil conservation service models for soil erosion assessment in a Loess Plateau Watershed, China. *Remote Sensing*, 2023, 15(3): 803. DOI: 10.3390/rs15030803.
- [37] Dapin I G, Ella V B. GIS-Based soil erosion risk assessment in the watersheds of Bukidnon, Philippines using the RUSLE model. *Sustainability*, 2023, 15(4): 3325. DOI: 10.3390/su15043325.
- [38] Feng Junxin, Chen Guokun, Zuo Lijun, et al. Quantitative evaluation and characteristic analysis of cultivated land erosion in mountain area using GF-6 WFV and CSLE model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(21): 169-179. [冯俊鑫, 陈国坤, 左丽君, 等. 基于GF-6 WFV影像和CSLE模型的山区耕地侵蚀定量评价及特征分析. *农业工程学报*, 2022, 38(21): 169-179.]
- [39] Yu Wanyang, Zhao Longshan, Zhang Jinsong, et al. Quantitative attribution analysis of driving factors of soil erosion in Xiaolangdi Reservoir area of the Yellow River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3): 155-163, 171. [余万洋, 赵龙山, 张劲松, 等. 黄河小浪底库区土壤侵蚀驱动因子定量归因分析. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 155-163, 171.]
- [40] Yang Qinke. Graphs of soil erosion modulus with 90m resolution in Shaanxi province (2010). *Data Sharing Infrastructure of Earth System Science: Data Sharing Infrastructure of Loess Plateau*. 2014. [杨勤科. 陕西省50 m分辨率土壤侵蚀模数图(2010年). *地球系统科学数据共享平台: 黄土高原科学数据共享平台*. 2014.]
- [41] Xie Hongxia, Li Rui, Yang Qinke, et al. Effect of Returning Farmland to Forest (Pasture) and changes of precipitation on soil erosion in the Yanhe Basin. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 569-576. [谢红霞, 李锐, 杨勤科, 等. 退耕还林(草)和降雨变化对延河流域土壤侵蚀的影响. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 569-576.]
- [42] Cheng Lin, Yang Qinke, Xie Hongxia, et al. GIS and CSLE based quantitative assessment of soil erosion in Shaanxi, China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5): 61-66. [程琳, 杨勤科, 谢红霞, 等. 基于GIS和CSLE的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 61-66.]
- [43] Li Kui, Yue Dapeng, Liu Peng, et al. Spatial distribution of soil erosion analyzed based on GIS and RUSLE in Yulin city. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(6): 172-178, 371. [李奎, 岳大鹏, 刘鹏, 等. 基于GIS与RUSLE的榆林市土壤侵蚀空间分布研究. *水土保持通报*, 2014, 34(6): 172-178, 371.]
- [44] Liu Lifeng, Jin Suiqing, Fu Mingsheng, et al. Characteristics of erosion and sediment yield in a watershed based on sediment deposition information in dam areas. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, 2015(1): 10-13. [刘立峰, 金绥庆, 付明胜, 等. 基于坝地泥沙淤积信息的流域侵蚀产沙特征研究. *山西水土保持科技*, 2015(1): 10-13.]
- [45] Yang B, Wang W L, Guo M M, et al. Soil erosion of unpaved loess roads subjected to an extreme rainstorm event: A case study of the Jiuyuanguou watershed on the Loess Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(6): 1396-1407.
- [46] Yuan M T, Zhang Y, Zhao Y Y, et al. Effect of rainfall gradient and vegetation restoration on gully initiation under a large-scale extreme rainfall event on the hilly Loess Plateau: A case study from the Wuding River Basin, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 140066. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140066.
- [47] Zhang Y, Zhao Y Y, Liu B Y, et al. Rill and gully erosion on unpaved roads under heavy rainfall in agricultural watersheds on China's Loess Plateau. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 284: 106580. DOI: 10.1016/j.agee.2019.106580.
- [48] Wang N, Jiao J Y, Bai L C, et al. Magnitude of soil erosion in small catchments with different land use patterns under an extreme rainstorm event over the northern Loess Plateau, China. *CATENA*, 2020, 195: 104780. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104780.
- [49] Zhang J P, Ren Y L, Jiao P, et al. Changes in rainfall erosivity from combined effects of multiple factors in China's Loess Plateau. *CATENA*, 2022, 216: 106373. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106373.
- [50] Jia L, Yu K X, Li Z B, et al. Temporal and spatial variation of rainfall erosivity in the Loess Plateau of China and its impact on sediment load. *CATENA*, 2022, 210(1/2): 105931. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105931.
- [51] Li J G, Wang Y, Liu L L, et al. Characteristics and trends of rainstorm activities and their impacts on seasonal vegetation

- variations in coastal China. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108851. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108851.
- [52] Fan C C, Lai Y F. Influence of the spatial layout of vegetation on the stability of slopes. *Plant and Soil*, 2014, 377: 83-95.
- [53] Feng Q, Guo X D, Zhao W W, et al. A comparative analysis of runoff and soil loss characteristics between "extreme precipitation year" and "normal precipitation year" at the plot scale: A case study in the Loess Plateau in China. *Water*, 2015, 7(7): 3343-3366.
- [54] Li P F, Chen J N, Zhao G J, et al. Determining the drivers and rates of soil erosion on the Loess Plateau since 1901. *Science of the Total Environment*, 2022, 823: 153674. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153674.
- [55] Chen Y X, Vanmaercke M, Jiao J Y, et al. Quantifying the importance of different erosion processes and soil and water conservation measure collapses following an extreme rainstorm in the Chinese Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(2): 403-422.
- [56] Dang Weiqin, Hao Ludong, Gao Jianjian, et al. Roles of silt retention dam in rainstorm flood disaster on July 26. *China Water Resources*, 2019(8): 52-55. [党维勤, 郝鲁东, 高健健, 等. 基于“7·26”暴雨洪水灾害的淤地坝作用分析与思考. *中国水利*, 2019(8): 52-55.]
- [57] Tang B Z, Jiao J Y, Zhang Y F, et al. The magnitude of soil erosion on hillslopes with different land use patterns under an extreme rainstorm on the northern Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Research*, 2020, 204: 104716. DOI: 10.1016/j.still.2020.104716.
- [58] Yu Z Y, Deng X Z, Cheshmehzangi A. The Grain for Green Program enhanced synergies between ecosystem regulating services in Loess Plateau, China. *Remote Sensing*, 2022, 14(23): 5940. DOI: 10.3390/rs14235940.
- [59] Wen X. Temporal and spatial relationships between soil erosion and ecological restoration in semi-arid regions: A case study in northern Shaanxi, China. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(4): 572-590.
- [60] Huang C L, Yang Q K, Cao X Y, et al. Assessment of the soil erosion response to land use and slope in the Loess Plateau: A Case study of Jiuyuanguou. *Water*, 2020, 12(2): 529. DOI: 10.3390/w12020529.
- [61] Wang Zeyu, Chen Xuyang, Ma Caishi, et al. Changes of soil erosion and ecological service value before and after implementing the project of Returning Farmland to Forest in Yulin of northern Shaanxi. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36(3): 59-67. [王泽宇, 陈旭阳, 马彩诗, 等. 陕北榆林市退耕还林前后土壤侵蚀及生态服务价值变化. *西北林学院学报*, 2021, 36(3): 59-67.]
- [62] Xia L, Bi R T, Song X Y, et al. Dynamic changes in soil erosion risk and its driving mechanism: A case study in the Loess Plateau of China. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72(3): 1312-1331.
- [63] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China. *CATENA*, 2014, 121: 151-163.
- [64] Zhu Ruipeng, Liu Dianjun, Zhang Shihao, et al. Characteristics of runoff and sediment yield in different land use types in hilly and gully region of the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 10-17. [朱锐鹏, 刘殿君, 张世豪, 等. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型水土流失效应. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 10-17.]
- [65] Guo M M, Wang W L, Shi Q H, et al. An experimental study on the effects of grass root density on gully headcut erosion in the gully region of China's Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(17): 2107-2125.

Spatial-temporal evolution of soil erosion in a typical watershed of the Loess Plateau

SHI Xuejin^{1,2}, ZHANG Biao¹, GUO Jialong¹, FENG Hao^{1,2}, WU Shufang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Soil erosion is influenced by various factors, such as land use and climate change. The Wangmaogou watershed, as a typical area for soil and water conservation in the hilly and gully regions of the Loess Plateau, has implemented a series of measures since the 20th century, including the Grain for Green Project. This study evaluated the spatial and temporal evolution characteristics of soil erosion intensity in the watershed in the years of 2010, 2015, and 2020 using the CSLE model. It also studied the situation of land use/cover change (LUCC) to analyze the spatial distribution patterns of land use and the responses of soil erosion in different time periods, thereby verifying the effectiveness of the soil and water conservation measures. The results revealed that from 2010 to 2020, the annual average soil erosion modulus in the study area decreased by $0.11 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, indicating a slight improvement in overall soil erosion conditions. However, the proportion of slight erosion decreased by 5.56%, while severe erosion increased by 4.02%, with the higher erosion zone mainly distributed in the northern, central, and northwestern parts of the watershed. Compared to the year 2010, soil erosion conditions in the watershed were greatly relieved in 2015 due to the decrease of rainfall and restoration of vegetation, but rebounded in 2020 resulting from the extreme rainfall events and declining vegetation cover quality. From 2010 to 2020, there were significant conversions between grassland and farmland in the northern and northeastern parts of the watershed. The decline in grassland quality resulted in a higher average soil erosion modulus compared to farmland, at $13.69 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and $12.99 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectively. This study would contribute to figuring out the relationship between soil erosion in typical small watersheds of the Loess Plateau, extreme climatic events, and land use changes, providing scientific data support for future efforts to improve soil and water conservation benefits and mitigate soil erosion risks.

Keywords: soil erosion; CSLE model; LUCC; Loess Plateau