

基于 RUSLE 的北洛河上游流域侵蚀产沙模拟研究

闫瑞, 张晓萍, 李够霞, 陈浩

(西北农林科技大学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)

摘要: 以 RS、GIS 和 RUSLE 模型结合 SEDD 模型, 分析了退耕还林前后北洛河上游流域 1990 年、2000 年和 2010 年土壤侵蚀强度和产沙量的时空变化特征。结果表明: 3 个时期年平均土壤侵蚀模数分别为 18 189.72, 7 408.93, 2 857.76 t/(km² · a), 年均输沙模数分别为 14 093.31, 5 997.65, 2 394.37 t/(km² · a), 均呈减小趋势。3 个时期的土壤侵蚀量在地形上的分布表现出趋同性, 即高程上均在 1 475~1 575 m 内平均侵蚀模数和侵蚀量表现出最大值。随着坡度增加, 平均侵蚀模数增加, 流域内 75% 以上的侵蚀量均来自于坡度 >15° 区域。3 个时期平均侵蚀模数均遵循阳坡 > 半阳坡 > 半阴坡 > 阴坡的规律。研究为该区域生态环境建设效益评价及水土资源合理利用提供有益信息。

关键词: 土壤通用流失方程; 泥沙输移分布模型; 侵蚀产沙; 地形分布; 黄土高原

中图分类号:S157 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2017)04-0032-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.04.006

Soil Erosion and Sediment Yield Assessment Based on RUSLE in Beiluo River on the Loess Plateau, China

YAN Rui, ZHANG Xiaoping, LI Gouxia, CHEN Hao

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming in Loess Plateau,
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Under the background of the “Grain for Green” program to control severe soil loss from human activities, the soil erosion and sediment yield were estimated based on the sediment delivery distributed model (SEDD) and the revised universal soil loss equation (RUSLE) in the upper reaches of the Beiluo River on China’s Loess Plateau. The model was used to simulated the spatial variations of soil erosion intensity and sediment yield in 1990, 2000 and 2010. The results show that the average soil erosion modulus were 18 189.72 t/(km² · a), 7 408.93 t/(km² · a) and 2 857.76 t/(km² · a), respectively, and the average annual sediment yield were 14 093.31 t/(km² · a), 5 997.65 t/(km² · a) and 2 394.37 t/(km² · a), respectively in 1990, 2000 and 2010. Besides, the average soil erosion modulus gradually decreased with the increasing vegetation coverage. The results also showed that both the soil erosion modulus and sediment yield were the highest in the altitude of 1 475~1 575 m. The average soil erosion modulus gradually increased with the increasing slope gradient, and with 75% of soil erosion was ascribed to the region with slope >15°. Moreover, the ranking of the average soil erosion modulus from high to low was: sunny slope > half-sunny slope > half-shady slope > shady slope. This results provide an useful reference for the rational utilization of water and soil resources and offer a technical basis for using RUSLE to estimate the soil erosion on the Loess Plateau of China.

Keywords: RUSLE; SEDD; soil erosion and sediment yield; topography; Loess Plateau

土壤侵蚀造成的土地资源退化、土地生产力降低、河床提高、河道淤积和洪涝干旱等一系列的生态环境问题, 一直都是国内外学者研究的重要课题^[1-2]。地貌破碎、土质疏松、暴雨历时短、强度大等特点以及

不合理的人类活动, 使得黄土高原成为我国乃至世界水土流失最为严重的区域之一^[3]。为了遏制严重的水土流失, 黄土高原内实施了退耕还林还草政策, 使得生态环境发生了巨大的变化, 黄土高原地区流域产流量和

输沙量均显著减少^[4],然而土壤侵蚀现状如何,退耕还林前后表现出什么特征等问题不是十分清晰。因此,有必要在崭新的生态环境下对黄土高原典型流域的土壤侵蚀产沙特征进行分析、对比和评价。

土壤侵蚀模型是估算土壤侵蚀量的重要手段,也是定量评价土壤侵蚀进行水土保持措施效益评价的技术工具。由于因素考虑全面、参数少、易获取、精度高等特点,美国通用土壤侵蚀模型 USLE 和改进版的通用土壤侵蚀模型 RUSLE 在国内外被广泛接受和使用。将 RUSLE 与 GIS 结合定量估算土壤侵蚀,已成为合理评估、规划、利用水土资源的有效手段^[5-6]。

北洛河流域位于黄土高原中南部,其上游地区为典型丘陵沟壑区,也是黄河粗泥沙主要来源区。在退耕还林的政策影响下,流域土地利用属性发生了巨大变化。根据 Chen 等^[7]和闫瑞等^[8]对 Landsat TM 影像分析表明,本研究区植被覆盖从 1986 年 12.4% 增长到 2014 年的 51.2%;蔺鹏飞等^[9]、刘二佳等^[10]、Zhang 等^[11]以吴起站实测水文资料为基础,发现退耕背景下北洛河上游流域年产流、产沙,尤其洪水产流产沙均呈极显著减少趋势。总体上,北洛河上游地区关于土壤侵蚀的研究多以水文站资料为基础的“黑箱”或“灰箱”分析居多,退耕背景下随着生态环境改善,对侵蚀输沙的空间分析较少,仍需要进行深入研究。本文采用 RUSLE 模型结合泥沙输移分布模型 SEDD(sediment distributed model)定量分析北洛河上游流域 1990 年、2000 年和 2010 年的土壤侵蚀量、产沙量及在地形上的分布趋势,有助于理解植被恢复下的生态水文过程,为区域水土保持规划和相应决策提供科学参考。

1 研究区概况与数据收集

1.1 研究区概况

北洛河流域发源于陕西省定边县草梁山,流经陕、甘两省 5 地(市)18 县(区),其上游吴旗水文站控制部分(图 1),位于东经 107°38'57"–108°32'49",北纬 36°33'33"–37°24'27",流域总面积 3 408 km²。多年平均降雨量 418 mm(1963—2009 年)。降水空间分布不均,由东南向西北逐渐递减,汛期 5—9 月降雨量占全年降雨量的 76.2%。流域内土层深厚,抗蚀性较差,是黄河中游粗泥沙的主要来源地区。自 1997 年国家实行退耕还林(草)政策以来,流域内吴起县积极响应号召,大力推行退耕还林(草)政策,取得了极为显著的效果,拥有“全国退耕还林第一县”的美誉。

1.2 数据收集及处理

(1) 北洛河上游流域水文数据采用了吴起控制站 1990—2010 年输沙量数据;气象数据采用了研究区内及周边分布相对均匀的 5 个气象站(吴旗、定边、靖

边、环县、华池)1990—2010 年的日降雨数据。逐站估算年降雨侵蚀力,然后采用克里金法进行空间插值,获取北洛河上游的年降雨侵蚀力的空间分布均值。

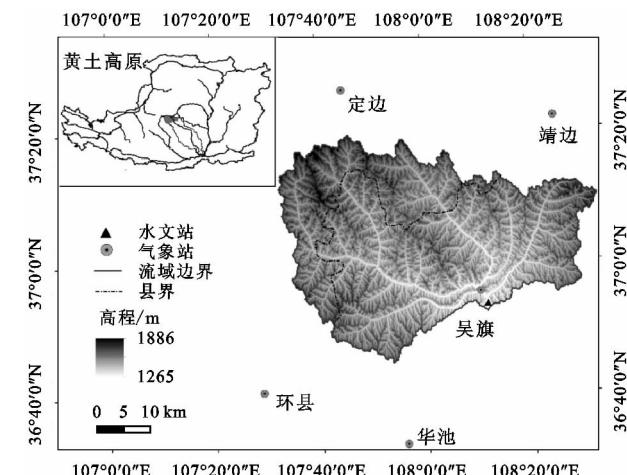


图 1 北洛河上游区位

(2) 研究区采用分辨率为 30 m 的 DEM 数据,来源于国际科学数据服务平台 (<http://datamirror.csdb.cn/>)。基于 DEM 数据,提取空间分辨率为 30 m 的坡度、坡长因子;提取流域的河网,通过确定流域最小子流域面积(临界面积),编辑河网节点,划分子流域,最终将研究流域划分为 52 个子流域。

(3) 1:50 万的土壤属性空间分布图来源与黄土高原科学数据中心(<http://loess.data.ac.cn/>)。研究区共有 4 种土种,分别为:黄绵土、黑垆土、红土和新积土。其对应的理化性质数据来源于《陕西土壤》^[12]。

(4) 1990 年和 2010 年土地利用现状数据是通过解译 Landsat TM5 影像并与同时期土地利用信息加以校正获取,2000 年土地利用现状数据来源与黄土高原科学数据中心。土地利用分类系统为耕地、林地、草地、居民地和水域五大类。同时采用了 2000—2010 年 MODIS-NDVI 数据,下载于国际科学数据服务平台,用于估算 RUSLE 中植被覆盖因子(C)。

2 研究方法

本研究采用 RUSLE 模型和 SEDD 模型来分析北洛河上游流域的土壤侵蚀量和产沙量。

$$SY_i = A_i \times SDR_i \times a_i \quad (1)$$

式中: A_i 为栅格 i 的土壤侵蚀量($t/(hm^2 \cdot a)$); SDR_i 为栅格 i 的泥沙输移比; a_i 为栅格单元面积(hm^2); SY_i 为流域内总产沙量(t)。

2.1 土壤通用流失方程

土壤通用流失方程定义为:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2)$$

式中: A 为年均土壤流失量($t/(hm^2 \cdot a)$); R 为降雨侵蚀力因子($MJ/(hm^2 \cdot a)$); K 为土壤可蚀性因子($t/(h \cdot MJ \cdot mm)$); L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子。

(1) 降雨侵蚀力采用章文波等^[13]的基于日降雨资料的年降雨侵蚀力算法进行计算。

(2) 本研究中土壤可蚀性 K 值的计算采用 Williams^[14]在 EPIC 模型中提出的计算方法, 该方法简单便捷, 得到广泛应用。

(3) 在计算坡度坡长因子时, 考虑黄土高原地形破碎的实际情况, 采用刘宝元提出的坡度坡长因子计算法, 具体计算过程见符素华等^[15]的 LS 计算程序。

(4) 植被覆盖因子。本研究采用蔡崇法等^[16]提出的植被覆盖度与 C 因子的计算关系式来计算 C 值。该方法在黄土高原地区的研究中也有比较好的应用^[17], 其中植被覆盖度数据通过 NDVI 公式进行推算^[18]。

(5) 水土保持措施因子 P 值。RUSLE 模型中, P 因子表示了水土保持措施对侵蚀动力的抑制作用。范围为 0~1, 值越小说明水土保持措施对土壤侵蚀的抑制作用越明显。本研究中参考前人研究成果^[3,13]将耕地、林地和草地的 P 值确定为 0.31, 0.05, 0.12, 其余土地利用类型的 P 值为 1, 并将其分别赋给 3 个年份的土地利用, 得到相应的 P 值因子图。

经过上述方法确定因子采用 RUSLE 模型估算流域土壤侵蚀量的空间分布, 见图 2(a)至图 2(e)。

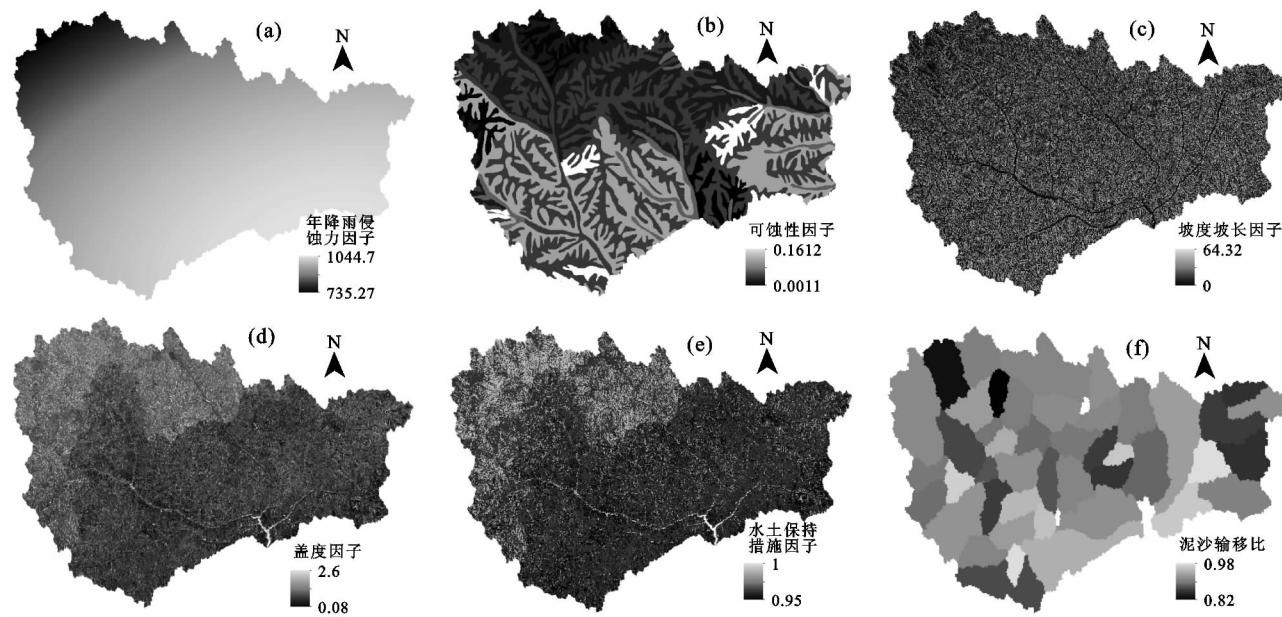


图 2 北洛河上游流域 RUSLE 模型所需各因子和 SDR 空间分布

2.3 模型的验证

由于植被覆盖度因子获取时需要以 NDVI 数据为基础, 考虑到数据的连续性与获取难度, 本研究利用 2000—2010 年数据进行模型的率定和验证。采用 Nash-Sutcliffe(ENS) 效率系数和确定性系数 R^2 对模型的精度进行评价。将产沙量模拟值与实测值进行对比分析(表 1), 模拟结果可以接受。并利用验证好的模型对流域 1990 年、2000 年和 2010 年 3 年的土壤侵蚀量和产沙量的空间分布进行模拟分析。

2.2 泥沙输移分布模型

泥沙输移分布方程定义为:

$$SDR_i = \exp(-\beta \times t_i) = \exp(-\beta \times \sum_{j=1}^N \frac{l_{ij}}{v_{ij}}) \quad (3)$$

式中: SDR_i 表示第 i 个栅格的泥沙输移比; β 是一个与流域形态有关的参数^[19]; t_i 表示该栅格的泥沙输移至最近河道的时间, 它与水流流经的距离和流速有关; l_{ij} 表示水流从栅格 i 流入河道前经过的第 j 个栅格的距离(m); v_{ij} 为水流流经第 j 个栅格时的流速(m/s), 其计算公式为:

$$v_i = k_i \sqrt{S_i} \quad (4)$$

式中: S_i 是第 i 个栅格的坡度($m \cdot m^{-1}$); k 为系数, 它与流域内不同土地利用类型和地表粗糙度有关, 本研究中 k 值的确定参考 Ferro 等^[20]的取值标准, 耕地、林地、草地、居民点和水域的 k 值分别为 2.62, 0.75, 2.13, 5.41, 4.91。本研究中根据前人研究成果^[19], 将 β 取值设为 0.2。在计算 SDR 时, 水流流速 v_{ij} 不能为 0, 因此将坡降的最小值设为 0.3%。利用 ArcGIS 下的 FLOWLENGTH 命令计算泥沙从流域内的栅格至流域出口的距离。根据公式(3)计算出流域的泥沙输移比空间分布, 见图 2(f)。

表 1 研究区模型模拟的率定和验证

阶段	R^2	ENS
率定期(2000—2005 年)	0.89	0.49
验证期(2006—2010 年)	0.83	0.45

3 结果与分析

3.1 北洛河上游 1990—2010 年土地利用变化分析

从表 2 可以看出, 1990 年北洛河上游流域内以耕地和草地为主, 其面积分别占总面积的 46.79% 和 49.94%, 呈现出以农、牧地为主的土地利用结构特

征;2000年,耕地和草地为主要用地类型的格局没有变化,耕地面积稍有减少,仍占流域面积的42.69%,草地面积稍有增加,占流域面积的54.20%,林地面积比例增加了0.14%;2010年,农、林、草用地格局发生根本变化,流域为林、草地主要用地类型的景观格局。耕地面积比例锐减至14.59%,林、草地用地面积比例迅猛增加至20.95%,63.43%,表现出与退耕还林的政策下植被恢复背景的一致性特征。

表2 1990—2010年北洛河上游流域不同土地利用类型变化

土地利用	1990年		2000年		2010年		
	类型	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	1594.75	46.79		1454.88	42.69	497.25	14.59
草地	1701.92	49.94		1847.14	54.20	2161.60	63.43
林地	95.32	2.80		100.20	2.94	714.12	20.95
居民地	12.14	0.36		2.83	0.08	17.76	0.52
水域	3.87	0.11		3.07	0.09	17.26	0.51

3.2 北洛河上游流域土壤侵蚀与空间分布

本文运用RUSLE模型和SEDD模型,获取了北洛河流域上游1990年、2000年和2010年土壤侵蚀量和产沙量及其空间分布(图3)。1990年、2000年到2010年,研究区域的土壤侵蚀量和产沙量逐渐呈减少趋势,

年流域平均土壤侵蚀模数依次为18.189.72,7.408.93,2.857.76 t/(km²·a),年流域输沙模数分别为14.093.31,5.997.65,2.394.37 t/(km²·a)。1990—2000年间,流域产沙量的下降率为2.80 t/a;而2000—2010年间流域出口产沙量的下降率为1.23 t/a,说明退耕还林还草政策的实施对流域内土壤侵蚀的减少起到了积极作用,各个子流域内的产沙量也逐渐减少。1990年,52条子流域产沙量的范围为7184.76~24323.06 t/(km²·a);2000年,子流域产沙量范围减少为4176.18~7772.47 t/(km²·a);至2010年,子流域内产沙量范围则分别为1318.08~6833.10 t/(km²·a)。

根据水利部行业标准划分等级^[21],将土壤侵蚀量分为6级,统计结果见表3。1990—2010年,微度、轻度和中度侵蚀逐渐呈增加趋势,强烈、极强烈和剧烈侵蚀逐渐呈减少趋势。而强烈和极强烈侵蚀从1990—2000年逐渐呈增加趋势,至2010年又呈减少趋势,原因可能是因为1990年的剧烈侵蚀面积至2000年逐渐转为强烈和极强烈侵蚀,而2000—2010年,强烈和极强烈侵蚀的面积又逐渐转为中度、轻度和微度侵蚀,使得面积减少。

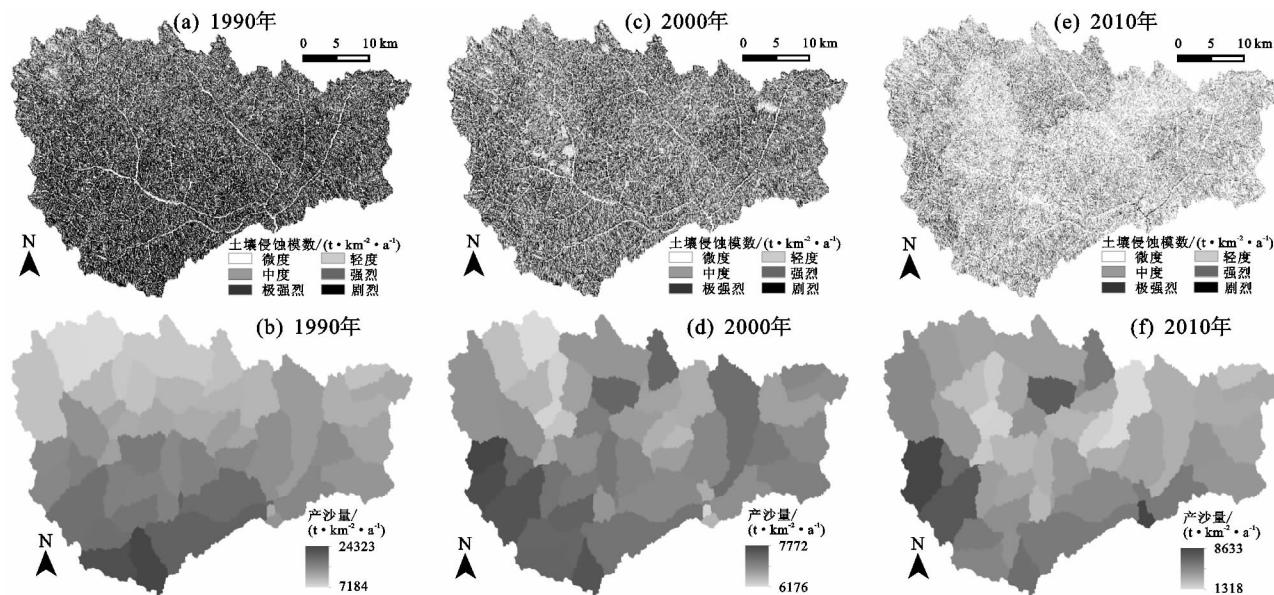


图3 北洛河上游流域1990年、2000年和2010年的土壤侵蚀量和产沙量空间分布

表3 1990—2010年北洛河上游流域土壤侵蚀强度分级及相应面积

土壤侵蚀 分级	1990年		2000年		2010年	
	所占 面积/km ²	所占 比例/%	所占 面积/km ²	所占 比例/%	所占 面积/km ²	所占 比例/%
微度	727.76	21.15	836.82	24.55	1483.06	43.52
轻度	203.68	5.90	374.98	11.00	760.47	22.31
中度	305.58	9.28	586.35	17.21	703.44	20.64
强烈	332.29	10.31	594.64	17.45	269.62	7.91
极强烈	656.83	19.28	609.99	17.90	135.75	3.98
剧烈	1181.85	33.68	405.23	11.89	55.66	1.63

通过将植被分级数据与土壤侵蚀空间分布数据

进行叠加,分析不同时段不同级别植被覆盖度下的土壤侵蚀强度的变化趋势(表4)。1990年、2000年和2010年3个时期不同植被覆盖度级别内平均土壤侵蚀模数和总侵蚀量都呈逐渐减少趋势。一方面植被覆盖度越大,抗蚀作用越强,平均侵蚀模数越低;另一方面,随着植被覆盖度的级别逐渐增加,它所占流域总面积的比例也逐渐减小,该区域内侵蚀量占总侵蚀量也相对较少。同一覆盖度级别内,从1990—2010年间,平均侵蚀模数也呈逐渐减小趋势,是因为该级别的平均植被覆盖度呈增加趋势。

表 4 研究流域 1990 年、2000 年和 2010 年不同植被覆盖度级别的土壤侵蚀

覆盖度 / %	1990 年			2000 年			2010 年		
	面积 / km ²	侵蚀模数 / (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀量 / 10 ³ t	面积 / km ²	侵蚀模数 / (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀量 / 10 ³ t	面积 / km ²	侵蚀模数 / (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀量 / 10 ³ t
<20	1841.68	15926.57	41474.77	625.02	6921.56	13753.34	408.96	5731.14	2075.41
20~40	1384.33	12890.46	10196.77	2643.63	5883.86	7817.22	787.93	2668.48	5070.61
40~60	157.79	6473.98	191.38	8.26	4677.94	463.58	941.29	1557.00	1591.75
60~80	22.15	3013.94	7.15	123.42	2428.60	19.13	750.44	674.57	95.36
>80	2.04	1461.90	0.01	7.67	1005.63	0.17	519.38	225.73	0.21

3.3 流域土壤侵蚀变化的地貌分布特征

3.3.1 不同海拔高度下的土壤侵蚀 将流域地形图与 1990 年、2000 年和 2010 年侵蚀量图叠加, 分析不同海拔高度下侵蚀量分布状况(表 5)。随流域内海拔逐渐升高, 不同高程带内平均侵蚀模数均呈先增加再减少的趋势; 在同一高程带内, 随时期演进平均侵蚀模数大幅减小。其中, 在 1 475~1 575 m 高程带

内, 3 时期平均侵蚀模数最大, 侵蚀量分别占相应时期总侵蚀量的 49.7%、46.6% 和 44.4%。分析其原因可能是该区域面积所占流域总面积比例较大, 相应的流域内坡度较陡、侵蚀剧烈区域所占比例也较大, 而坡度较大的区域, 不易储存水分, 无法提供植被生长所需的条件, 植被覆盖度较低, 侵蚀较剧烈, 使得该区域内的平均侵蚀模数也呈最大值。

表 5 研究流域 1990 年、2000 年和 2010 年不同高程下的土壤侵蚀

海拔 / m	1990 年			2000 年			2010 年		
	面积 / km ²	平均侵蚀模数 / (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀量 / 10 ⁵ t	面积 / km ²	平均侵蚀模数 / (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀量 / 10 ⁵ t	面积 / km ²	平均侵蚀模数 / (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀量 / 10 ⁵ t
<1375	73.9	11516.84	7.97	3663.11	2.53	1218.87	2.79		
1375~1475	631.6	16384.85	103.96	5448.41	34.58	2109.90	13.41		
1475~1575	1498.4	16997.37	257.56	6846.14	102.74	2730.36	39.26		
1575~1675	1021.1	13042.46	134.31	6780.94	70.36	2586.31	28.16		
1675~1775	164.5	8609.55	14.05	6004.73	9.63	2685.28	4.39		
>1775	18.8	5951.03	0.86	4909.09	0.68	2260.51	0.33		

3.3.2 不同坡度下的土壤侵蚀 将 1990 年、2000 年和 2010 年土壤侵蚀量图与坡度等级图叠加, 分析不同坡度级别下的侵蚀强度和侵蚀量变化(表 6), 表明 1990—2010 年, 随着坡度逐渐增加, 不同坡度级别的平均侵蚀模数均呈增加趋势, 表现出侵蚀过程以及侵蚀量在地形上的累积作用和汇聚效应。由于分布面积差异, 在坡

度级别上, 土壤侵蚀量则先增加, 15°~25° 后减少。同一坡度等级内, 随时期演进平均土壤侵蚀模数和土壤侵蚀量大幅降低。分析发现, <15° 的 3 个坡度带内平均侵蚀强度均小于流域平均侵蚀模数; 而 >15° 的 3 个坡度级别内平均侵蚀强度均高于流域的平均值; 坡度越陡, 侵蚀能量越强, 侵蚀越严重。

表 6 研究流域 1990 年、2000 年和 2010 年不同坡度下的土壤侵蚀

坡度 / (°)	面积 / km ²	1990 年		2000 年		2010 年	
		平均侵蚀模数 / (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀量 / 10 ⁵ t	平均侵蚀模数 / (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀量 / 10 ⁵ t	平均侵蚀模数 / (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀量 / 10 ⁵ t
0~5	335.3	3654.58	12.23	1469.12	4.89	719.13	2.41
5~8	294.1	5853.81	17.37	2655.53	7.84	1212.18	3.60
8~15	1040.7	9780.65	102.34	4600.78	47.98	2002.53	20.95
15~25	1338.2	19196.16	258.97	8145.82	109.69	3227.62	43.55
25~35	380.0	31505.67	119.97	12380.80	47.09	4387.66	16.71
>35	20.2	39147.46	7.83	15201.57	3.04	5597.47	1.12

3.3.3 不同坡向下的土壤侵蚀 将 1990 年、2000 年和 2010 年土壤侵蚀图与坡向图叠加, 分析不同坡向下土壤侵蚀强度和侵蚀量的变化趋势(表 7), 1990 年、2000 年和 2010 年 3 个时期流域内不同坡向的平均侵蚀模数均呈现出阳坡>半阳坡>半阴坡>阴坡趋势, 而侵蚀总量均呈现出半阳坡>阳坡>半阴坡>阴坡趋势。1990—2010 年, 半阳坡、阳坡、半阴坡和阴坡, 其侵蚀总量占流域总侵蚀量的比值分别为

30.20%、25.37%、24.61% 和 19.82%。半阳坡的侵蚀总量大于阳坡的侵蚀总量, 是因为半阳坡所占流域面积要大于阳坡的面积。3 个时期同一坡向内, 平均侵蚀模数和总侵蚀量都逐渐呈大幅减少趋势。在研究区, 水分是植被生长的限制因子, 水分的多少决定了植被生长状况的好坏。阳坡相对阴坡来说, 光照时间长, 水分蒸发量大, 植被生长缓慢, 地表覆盖度低, 更容易发生土壤侵蚀。

表 7 研究流域 1990 年、2000 年和 2010 年不同坡向下的土壤侵蚀

坡度/ (°)	面积/ km ²	1990 年		2000 年		2010 年	
		平均侵蚀模数/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀量/ 10 ⁵ t	平均侵蚀模数/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀量/ 10 ⁵ t	平均侵蚀模数/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀量/ 10 ⁵ t
阳坡	803.12	18607.75	127.91	7285.42	56.26	2790.85	22.91
半阳坡	891.66	16138.29	174.46	6972.33	64.60	2756.02	24.45
半阴坡	890.58	15247.32	127.41	6320.27	54.35	2597.00	21.76
阴坡	822.94	12051.88	88.93	5455.83	45.32	2374.91	19.21

4 结论

(1) 3 个时期流域土地利用变化显著,耕地呈现出先缓慢减少后迅速减少的趋势,林、草则为先缓慢增加后迅猛增加态势。较 1990 年比,2010 年耕地减少 7 成(68.8%),草地增加 3 成(27.0%),林地增加了 6.5 倍。

(2) 侵蚀输沙量呈逐渐下降趋势。1990 年、2000 年到 2010 年,土壤侵蚀总量分别为 51.87×10^6 , 22.05×10^6 , 8.83×10^6 t,产沙量分别为 48.03×10^6 , 20.44×10^6 , 8.16×10^6 t。随时期变化,不同植被覆盖度级别的平均土壤侵蚀模数都逐渐呈减少趋势,植被覆盖度级别越高,平均土壤侵蚀模数越小。

(3) 在不同高程带内,平均侵蚀模数都呈现出随时期变化逐渐减小态势。不同高程带间的对比,则表现出 1 475~1 575 m 高程内侵蚀输沙占时期总侵蚀量保持最大的特征。3 时期均表现出随坡度增加,平均侵蚀模数增加,而侵蚀量先增加后减少的态势。同一坡度级别的平均侵蚀模数和侵蚀量随时期呈减少态势,但流域内 77.6%~76.1% 的侵蚀量来自于坡度 $>15^\circ$ 的区域。3 时期流域不同坡向的平均侵蚀模数都在降低,但均表现出阳坡 $>$ 半阳坡 $>$ 半阴坡 $>$ 阴坡,而侵蚀总量分布则表现出半阳坡 $>$ 阳坡 $>$ 半阴坡 $>$ 阴坡的特征。

参考文献:

- [1] Dotterweich M. The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation- a global synopsis[J]. *Geomorphology*, 2013, 201(2):1-34.
- [2] 秦伟,朱清科,张岩. 基于 GIS 和 RUSLE 的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(8):157-203.
- [3] Zhao G J, Kondolf G M, Mu X M, et al. Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2016, 148(2):126-137.
- [4] Fu B J, Liu Y, He C S, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [5] 杨冉冉,徐涵秋,林娜,等. 基于 RUSLE 的福建省长汀县河田盆地区土壤侵蚀定量研究[J]. *生态学报*, 2013, 33(10):2974-2982.
- [6] 乌玲瑛,严力蛟. 基于 GIS 和 RUSLE 模型对土壤侵蚀格局的影响研究:以浙江省杭金衢高速诸暨段为例[J]. *生态学报*, 2014, 34(19):5659-5669.
- [7] Chen N, Ma T Y, Zhang X P. Response of soil erosion processes to land cover changes in the Loess Plateau of China: A case study on the Beiluo River basin[J]. *Catena*, 2016, 136(1):118-127.
- [8] 闫瑞,张晓萍,闫胜军,等. 1995—2014 年北洛河流域植被恢复的地形分布特征[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(11):1598-1603.
- [9] 蔺鹏飞,张晓萍,刘二佳. 黄土高原典型流域水沙关系对退耕还林(草)的响应[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1):2-6.
- [10] 刘二佳,张晓萍,谢名礼,等. 生态恢复对流域水沙演变趋势的影响:以北洛河上游为例[J]. *生态学报*, 2015, 35(3):623-628.
- [11] Zhang J J, Zhang T T, Zhang X P, et al. Streamflow regime variations following ecological management on the Loess Plateau, China[J]. *Forests*, 2016, 7(1):1-6.
- [12] 郭兆元. 陕西土壤[M]. 北京:科学出版社, 1992:47-220.
- [13] 章文波,付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. *资源科学*, 2003, 25(1):35-41.
- [14] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC-A new method for assessing erosion effect on soil productivity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38(5):381-383.
- [15] 符素华,刘宝元,周贵云. 坡长坡度因子计算工具[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5):106-120.
- [16] 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):20-25.
- [17] 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[J]. *Catena*, 2014, 121(1): 151-163.
- [18] 焦菊英,景可,李林育. 应用输沙量推演流域侵蚀量的方法探讨[J]. *泥沙研究*, 2007(4):1-7.
- [19] Jain M K, Kothyari U C. Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2000, 45(5):771-786.
- [20] Ferro V, Porto P. Sediment delivery distributed (SEDD) model[J]. *Journal of Hydrology Engineering*, 2000, 5(4): 411-422.
- [21] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2008.