

# 佳芦河流域 1988—2013 年土壤侵蚀时空变化特征

杨波<sup>1,2</sup>, 王全九<sup>1</sup>, 郝姗姗<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2. 咸阳师范学院资源环境与历史文化学院, 陕西 咸阳 712000; 3. 宁夏大学资源环境学院, 银川 750021)

**摘要:** 为了研究陕北风沙区近 26 年来的土壤侵蚀变化特征, 利用中国坡面水蚀预报模型结合 GIS 和 RS 技术, 定量估算了 1988—1996, 1997—2004, 2005—2013 年 3 个时段陕北佳芦河流域土壤平均侵蚀量, 分析了不同植被覆盖条件下和不同土地利用类型下的土壤侵蚀时空变化特征。结果表明: (1) 中国坡面水蚀预报模型适用于该地区; (2) 土壤侵蚀等级和降雨侵蚀力, 地貌和土地利用类型关系密切; (3) 将 26 年划分为 3 个时段, 第 1 时段 1988—1996 年、第 2 时段 1997—2004 年和第 3 时段 2005—2013 年。多年平均降雨侵蚀力分别为 923.09, 1 010.75, 1 551.40 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h), 对应土壤侵蚀模数分别为 4 513, 5 855, 3 556 t/(km<sup>2</sup>·a)。第 1 时段和第 3 时段总侵蚀量分别为 5.10×10<sup>6</sup>, 4.02×10<sup>6</sup> t, 相比减少了 21.18%。还林还草工程后, 流域内土地利用发生较大变化, 耕地所占比重由 53.38% 减少到 25.87%, 草地所占比重由 38.64% 增加到 69.64%, 不同土地利用类型的水土保持效益从大到小分别是未利用土地, 草地, 林地和耕地。说明当还林还草工程后, 佳芦河流域土壤侵蚀呈现总量减少, 强度降低的趋势, 表明还林还草工程取得了明显的水土保持效益。

**关键词:** 土壤侵蚀; 中国坡面水蚀预报模型; ArcGIS 9.3; 佳芦河流域

**中图分类号:** S157.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2017)05-0087-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.05.014

## The Characteristic of Temporal and Spatial Variation of Soil Erosion Change in Jialu River Watershed from 1988 to 2013

YANG Bo<sup>1,2</sup>, WANG Quanjiu<sup>1</sup>, HAO Shanshan<sup>3</sup>

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering of Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2. Institute of Natural Resources Environment and Historical Culture of Xian Yang Normal University, Xianyang, Shaanxi 712000; 3. College of Resources and Environmental Science of Ningxia University, Yinchuan 750021)

**Abstract:** In order to characterize the soil erosion change in windy desert region of northern Shaanxi Province in the last 26 years, the Chinese Water Erosion on Hillslopes Model was combined with GIS and RS technic to assess the average erosion amount of Jialu River watershed in 3 period years (1988—1996, 1997—2004 and 2005—2013), and analyze temporal and spatial variation characteristics of soil erosion under different vegetation coverage and different land use patterns. The results showed that (1) the Chinese Water Erosion on Hillslopes Model is suitable to predict erosion in the study area; (2) Soil erosion intensity was closely related to the spatial distribution of rainfall erosivity ( $R$ ), topography and land use patterns; (3) 26 years were divided into three periods, the first period of 1988—1996, the second period of 1997—2004 and the third period of 2005—2013, the corresponding mean annual  $R$  factor were 923.09, 1 010.75 and 1 551.40 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h). The soil erosion modulus were 4 513, 5 855 and 3 556 t/(km<sup>2</sup>·a). The total soil loss of the first and third periods respectively were 5.10×10<sup>6</sup> t and 4.02×10<sup>6</sup> t, reduced by 21.18%. The land use patterns greatly changed in the watershed after Green for Grain Project. The area of cultivated land decreased from 53.38% to 25.87%, while the grassland increased from 38.64% to 69.64%. The descending order of soil erosion intensity in different land use was unused land, grassland, forestland and cropland, so the benefit of soil and water conservation was the most obvious in unused land and grassland. So Green for Grain Project has already obtained obvious benefit of water and soil conservation.

**Keywords:** soil erosion; Chinese model of water erosion on hillslopes; ArcGIS 9.3; Jialu river watershed

收稿日期: 2017-04-27

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(51239009); 陕西省教育厅项目(14JZ063, 16JZ089); 咸阳师范学院重点学科项目(Szxky1409)

第一作者: 杨波(1979—), 男, 博士, 主要从事农业水土资源方面研究。E-mail: 326274340@qq.com

通信作者: 王全九(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源和土壤物理方面研究。E-mail: wquanjiu@163.com

陕北风沙区位于毛乌素沙漠和黄土高原的过渡地带,是黄河粗泥沙集中来源地,输沙模数大于  $5\ 000\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ <sup>[1]</sup>,水土流失极为严重。佳芦河流域就是典型代表之一,1960 年以来流域内最大输沙模数甚至达到  $1.54\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ <sup>[2]</sup>,生态高度脆弱<sup>[3]</sup>。还林还草工程施行后,神木县林地增加  $53\ 333\ \text{hm}^2$ <sup>[4]</sup>。风沙区土壤侵蚀受到气候、地貌、植被等自然条件和人类活动的共同影响。笔者尝试利用 GIS 和 RS 技术结合中国坡面土壤侵蚀模型研究 1988—2013 年佳芦河流域的土壤侵蚀时空变化特征,并评估退耕还林还草工程在该区域的效益,为该地区下一步的水土保持措施提供参考。

土壤侵蚀物理模型预测精度高,但在黄土高原地区大量参数需要修正,应用受到限制<sup>[5-6]</sup>。RUSLE 经验模型需要数据较少,目前已经和 GIS、RS 融合。学者们在黄土高原用该模型在不同尺度下对土壤侵蚀进行了深入研究。黄土高原大尺度下<sup>[7-8]</sup>,约  $600\ 000\ \text{km}^2$ ;在延河流域<sup>[5-6,9]</sup>中尺度下约  $7\ 725\ \text{km}^2$ ;在小尺度下的阳沟小流域<sup>[10]</sup>约  $47.9\ \text{km}^2$ ,王家沟小流域<sup>[11]</sup>约  $2.813\ \text{km}^2$ ,羊圈沟流域<sup>[12]</sup>约  $2.02\ \text{km}^2$ ,结果可信。由于黄土高原地区土质疏松,沟壑纵横,夏季又多暴雨等原因,导致细沟侵蚀严重。RUSLE 模型估算细沟侵蚀不适用于该地区<sup>[13]</sup>,预测值小于真实值<sup>[5-6]</sup>。为了提高 RUSLE 模型在黄土高原地区的评估精度,江忠善等<sup>[14]</sup>将浅沟侵蚀因子加入到 RUSLE 模型中,并在黄土高原地区进行了试验对比,结果较好,将修正后的 RUSLE 模型称为中国坡面水蚀预报模型,公式为:

$$A=R \cdot L \cdot S \cdot K \cdot C \cdot P \cdot G \quad (1)$$

式中: $A$  为土壤流失量; $R$  为降雨侵蚀力因子; $L$  为坡长因子; $S$  为坡度因子; $K$  为土壤可蚀性因子; $C$  为植被覆盖和管理因子; $P$  为水土保持措施因子; $G$  为无量纲的浅沟侵蚀影响因子。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

佳芦河位于黄河中游河龙区间,毛乌素沙漠南缘,陕北黄土高原北段,属于黄土高原沟壑区,整个流域属黄土丘陵沟壑区地貌类型,境内梁峁起伏,沟壑密度  $3.24\ \text{km}/\text{km}^2$ 。河流发源于榆阳区双山乡断桥村,由西北向东南,至佳县佳芦镇木厂湾村注入黄河。河流全长  $93\ \text{km}$ ,流域面积  $1\ 134\ \text{km}^2$ ,平均比降  $6.28\%$ 。出口控制站申家湾水文站,控制面积  $1\ 121\ \text{km}^2$ ,流域多年平均降雨  $400.23\ \text{mm}$  左右。沟壑纵横流域内面积大于  $50\ \text{km}^2$  的沟道有 4 条,面积大于  $10\ \text{km}^2$  的沟道有 25 条,流域海拔高度  $699\sim 1\ 374\ \text{m}$ 。(图 1)<sup>[15]</sup>。

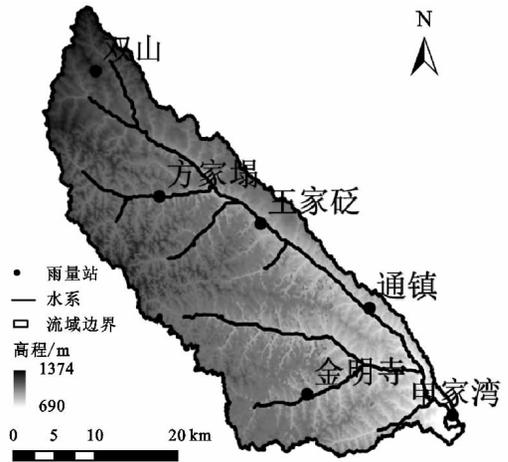


图 1 佳芦河流域

### 1.2 数据来源

本文研究使用的数据有:(1)1988 年 8 月 29 日,2000 年 8 月 24 日的 landsat 5 的 TM 影像,2013 年 8 月 6 日 landsat 8 的 TM 影像,空间分辨率为  $30\ \text{m}$ ,来源于中科院遥感与地球研究所下载地址(<http://ids.ceode.ac.cn/Index.aspx>);(2)土壤数据来源于陕西省第二次土壤普查数据集、陕西土壤和世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1),来源于(<http://westdc.westgis.ac.cn/>);(3)1:50 000 DEM 数据;(4)双山站、方家塌站、申家湾、通镇等 6 个气象站日降雨资料来源于黄土高原科学数据中心(<http://loess.data.ac.cn>)。

### 1.3 中国坡面水蚀预报模型各因子的计算方法

中国坡面水蚀预报模型涉及到  $R$  降雨侵蚀力因子、 $L$  坡长因子、 $S$  坡度因子、 $K$  土壤可蚀性因子、 $C$  植被覆盖和管理因子、 $P$  水土保持措施因子和  $G$  浅沟侵蚀影响因子。降雨侵蚀力  $R$  因子,参照谢云等<sup>[16]</sup>和章文波等<sup>[17]</sup>研究成果。 $LS$  因子是地形对土壤侵蚀的影响,参照张宏鸣等<sup>[18]</sup>基于 DEM 的优化算法提取  $LS$  因子值。Wang 等<sup>[19]</sup>认为几何平均粒径结合有机质模型计算的  $K$  值最接近黄土高原地区真实值,故土壤可蚀性  $K$  因子计算参考其参照研究成果。植被覆盖和管理  $C$  因子反映了植被、作物等覆盖与管理措施对土壤侵蚀的影响, $C$  取值范围为  $[0, 1]$ 。归一化植被指数(NDVI)是能够很好反映植被、作物覆盖度的指数,参照蔡崇法等<sup>[20]</sup>研究基于 NDVI 植被指数计算  $C$  因子成果。文中  $P$  因子的取值主要参照 Fu 等<sup>[9]</sup>对黄土高原地区的研究成果。浅沟侵蚀  $G$  因子,黄土高原地区在无植被覆盖的黄土陡坡条件下,浅沟发生的临界坡度为  $15^\circ$ 。坡面大于  $15^\circ$  的浅沟侵蚀因子  $G$  计算模型参照江忠善等<sup>[14]</sup>的研究成果。文中所采用的各因子计算公式在相关参考文献中均有详细描述。

## 2 结果与分析

### 2.1 主要因子结果

2.1.1 降雨侵蚀力动态变化分析 利用气象站点的日降雨数值,计算得到的佳芦河 1988—2013 年的降雨侵蚀力,然后在 ArcGIS 9.3 中进行插值运算,结果统计如图 2 所示。由于计算结果受降雨影响较大,为了提高估算精确度,将 1988—2013 年分为 3 个时段计算平均降雨侵蚀力:第 1 时段是 1988—1996 年,第 2 时段为 1997—2004 年,第 3 时段为 2005—2013 年,其平均降雨侵蚀力分别为 923.09,1 010.75,1 551.40 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h)。综合 3 个时段的均降雨侵蚀力数据,近 26 年来降雨侵蚀力呈现增长趋势。

2.1.2 植被覆盖因子分析 佳芦河流域 1998,2000,2013 年平均 NDVI 分别是 0.14,0.12,0.26,还林荒草工

程效益体现在 C 因子上。26 年来,NDVI 值由 0.15 增长到 0.26,增加了 0.11;利用蔡崇法公式计算的 C 因子 1988,2000,2013 年的值分别为 0.23,0.26,0.08,26 年来由 0.23 降低到 0.08,减少了 0.15(表 1)。

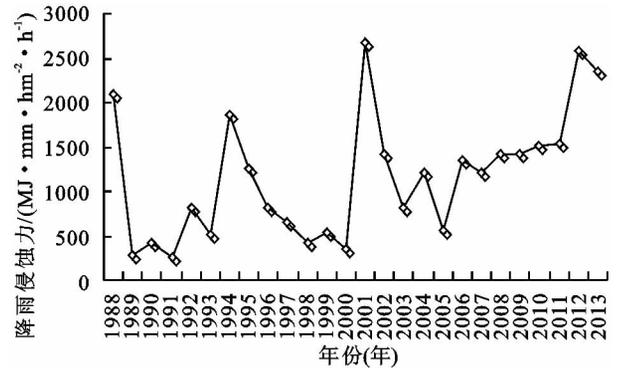


图 2 1988—2013 年降雨侵蚀力

表 1 1988,2000,2013 年 C 因子统计

指标	1998 年			2000 年			2013 年		
	NDVI	植被覆盖度	C	NDVI	植被覆盖度	C	NDVI	植被覆盖度	C
最小	-1	0	0	-0.508	0	0	-0.238	0	0
最大	0.683	100	1	0.743	100	1	0.546	100	1
平均	0.144	21.54	0.226	0.123	16.73	0.257	0.256	46.96	0.078

### 2.2 流域内土壤侵蚀时空变化分析

用中国坡面水蚀预报模型计算 A 值,将最终得到的土壤侵蚀强度划分为微度(0<A≤500)、轻度(500<A≤2 500)、中度(2 500<A≤5 000)、强烈(5 000<A≤8 000)、极强烈(8 000<A≤15 000)和剧烈(A>15 000)6 级<sup>[21]</sup>,单位为 t/(km<sup>2</sup>·a)。各级侵蚀面积占佳芦河流域面积的百分比见表 2。

表 2 1988,2000,2013 年土壤侵蚀指标

指标	1988 年	2000 年	2013 年
微度侵蚀	24.05	20.88	24.18
轻度侵蚀	29.03	25.33	28.19
中度侵蚀	16.11	16.54	19.97
强烈侵蚀	10.67	11.10	13.59
极强烈侵蚀	11.97	13.80	10.51
剧烈侵蚀	8.17	12.36	3.56
侵蚀模数	4512.81	5854.79	3556.01
降雨侵蚀力	923.09	1010.75	1551.40
总侵蚀量	5.10	6.61	4.02

注:降雨侵蚀力单位为 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h);侵蚀模数单位为 t/(km<sup>2</sup>·a);总侵蚀量单位为 10<sup>6</sup>t;侵蚀面积占比单位为%。

第 1 时段 1988—1996 年、第 2 时段 1997—2004 年和第 3 时段 2005—2013 年均降雨侵蚀力分别为 923.09,1 010.75,1 551.40 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h),对应的土壤侵蚀模数为 4 513,5 855,3 556 t/(km<sup>2</sup>·a)。从土壤侵蚀的空间分布来看(图 3),第 1 时段流域内中度以上侵蚀占 30.81%,约 349.39 km<sup>2</sup>,在整个流域内呈现面状连续分布。第 2 时段流域内中度以上侵蚀占 37.26%,约 422.53 km<sup>2</sup>,在整个流域内依然呈现面状连续分布,土壤侵蚀有加重趋势,此时

正是还林还草工程开展初期。第 3 时段流域内中度以上侵蚀占到 27.66%,约 313.66 km<sup>2</sup>,中度及以上侵蚀呈现线状分布。总侵蚀量第 1 时段和第 3 时段分别为 5.10×10<sup>6</sup>,4.02×10<sup>6</sup>t,还林还草以来该流域土壤侵蚀无论从面积还是强度上都有大幅下降。将第 1 时段和第 3 时段的土壤侵蚀强度等级图做差运算后,土壤侵蚀模数减少 957 t/(km<sup>2</sup>·a),总侵蚀量减少 1.08×10<sup>6</sup>t,约 21.18%。

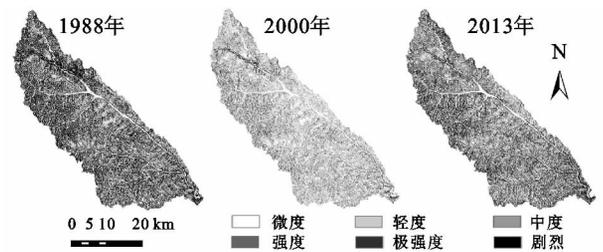


图 3 1988,2000,2013 年土壤侵蚀等级分布

为了进一步分析佳芦河流域上中下游的土壤侵蚀变化情况,在 ArcGIS 水文分析模块中,将佳芦河进一步细分为 17 个子流域(图 4)。1988 年流域内编号为 1,3,4,7,14,16 的子流域是强烈侵蚀,其余子流域均为中度侵蚀;2000 年流域内编号为 1,2,3,5,9,11,12,14,15,16,17 的流域是强烈侵蚀,编号为 4,7 的流域是极强烈侵蚀,其余子流域均为中度侵蚀;2013 年流域内编号为 6,8 的子流域为轻度侵蚀,编号为 4,7,16 的子流域为强烈侵蚀,其余子流域均为中度侵蚀。流域内 26 年土壤侵蚀强度变化特征呈现出先加重后减轻的特征。



壤侵蚀增加,各级侵蚀均呈现加重趋势,总侵蚀量由  $5.1 \times 10^6$  t 增加到  $8.6 \times 10^6$  t,约增加 40.70%。将第 1 时段的降雨模拟到第 3 时段,可以看出,在该种情况下,土壤侵蚀程度降低,且中度以上侵蚀均呈现减弱趋势,总侵蚀量由  $4.02 \times 10^6$  t 减少为  $2.41 \times 10^6$  t,约减少 40%。

#### 2.4 流域不同土地利用类型下土壤侵蚀变化分析

为了分析土壤侵蚀强度的空间变化特征,特运用 GIS 空间叠加分析来研究第 1 时段 1988—1996 年,第 2 时段 1997—2004 年和第 3 时段 2005—2013 年的土壤侵蚀强度的空间变化(表 7)。

1988 年以来,土地利用类型发生了较大的变化,尤其是还林还草工程后,耕地减少明显,草地增加显著。由表 7 可知,第 1 时段至第 2 时段耕地的土壤侵蚀模数由  $2146 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  增加到  $3052 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,流失量增加 42.31%,约  $0.55 \times 10^6$  t,占总流失量的百分比由 25.49% 增加到 27.99%;林地的土壤侵蚀模数由  $5428 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  增加到  $6915 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,流失量增加 30%,约  $0.03 \times 10^6$  t;草地面积增加了 2.98%,土壤侵蚀模数由  $7412 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  增加为

表 7 1988—2013 年不同土地利用类型下的土壤侵蚀变化

土地利用类型	面积比			总侵蚀量			土壤侵蚀模数		
	1988 年	2000 年	2013 年	1988 年	2000 年	2013 年	1988 年	2000 年	2013 年
耕地	53.38	53.37	25.87	1.30	1.85	0.40	2146	3052	1358
林地	1.63	1.66	1.03	0.10	0.13	0.04	5428	6915	3785
草地	38.64	41.62	69.64	3.25	4.36	3.50	7412	9241	4430
水域	0.20	0.21	0.11	0	0	0	0	0	0
建设用地	0.15	0.17	0.23	0	0	0	0	0	0
未利用土地	5.99	2.97	3.12	0.53	0.39	0.16	7824	11574	4381

注:总侵蚀量单位为  $10^6$  t;侵蚀模数单位为  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ;面积比单位为 %。

第 2 时段至第 3 时段耕地土壤侵蚀模数由  $3052 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  减少到  $1358 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,流失量减少 78.38%,约  $1.45 \times 10^6$  t,占总流失量的百分比由 27.99% 减少到 9.95%;林地土壤侵蚀模数由  $6915 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  减少为  $3785 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,流失量减少 69.23%,约  $0.09 \times 10^6$  t,占总流失量的百分比由 1.97% 减少到 1.00%;草地土壤侵蚀由  $9241 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  减少到  $4430 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,流失量减少 19.72%,约  $0.86 \times 10^6$  t,占总流失量的百分比由 65.96% 增加到 87.06%。未利用土地中土壤侵蚀模数由  $11574 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  减少到  $4381 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,流失量减少,58.97%,约  $0.23 \times 10^6$  t,占总流失量的百分比有 5.90% 减少到 3.98%。水域和建设用为 0。不同土地利用类型都有向减轻的趋势发展,土壤侵蚀程度也得到了明显改善。

### 3 讨论与结论

利用中国坡面土壤侵蚀模型,估算出 1988—

$9241 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,流失量增加 34.15%,约  $1.11 \times 10^6$  t,占总流失量的百分比由 63.73% 增加到 65.96%;未利用土地的面积减少了 3.02%,土壤侵蚀模数由  $7824 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  增加到  $11574 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,流失量减少了 26.42%,约  $0.14 \times 10^6$  t,占总流失量的百分比由 10.39% 减少为 5.90%。

表 6 模拟降雨下的土壤侵蚀对比

指标	第 1 时段	第 1 时段	第 3 时段	第 3 时段
	实际	(第 3 时段 R 模拟)	实际	(第 1 时段 R 模拟)
微度侵蚀	24.05	19.09	24.18	30.82
轻度侵蚀	29.03	22.43	28.19	36.08
中度侵蚀	16.11	15.62	19.97	20.21
强烈侵蚀	10.67	10.94	13.59	8.19
极强烈侵蚀	11.97	14.22	10.51	3.97
剧烈侵蚀	8.17	17.70	3.56	0.73
侵蚀模数	4512.81	7582.85	3556.01	2126.45
降雨侵蚀力	923.09	1010.75	1551.40	923.09
总侵蚀量	5.10	8.60	4.02	2.41

注:降雨侵蚀力单位为  $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ;侵蚀模数单位为  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ;总侵蚀量单位为  $10^6$  t;侵蚀面积占比单位为 %。

2013 年佳芦河流域土壤侵蚀和时空变化特征。结果表明,多年平均降雨侵蚀力呈增加趋势。土壤侵蚀转移矩阵表明,侵蚀等级呈现先增加后减少的特征。还林还草工程后,耕地减少明显,草地增加显著。其中,耕地、林地、草地的土壤侵蚀模数均有所降低,草地的水土保持效益最为明显,实际总侵蚀量减少了  $1.08 \times 10^6$  t,水土保持效益明显。

在还林还草工程实施前,土壤侵蚀治理以淤地坝拦截为主,佳芦河流域平均拦截率效率为 23.3%<sup>[22]</sup>。相关研究表明,修建淤地坝对泥沙的拦截效果最好,其次是梯田、林地和草地<sup>[23]</sup>。截至 2012 年底佳芦河流域,累计建设淤地坝 3913 座,控制面积比(骨干坝控制面积之和/流域水土流失面积  $\times 100\%$ )为 10.7%,总库容  $0.339 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,植被措施降低土壤侵蚀比例仅次于淤地坝<sup>[24]</sup>。因为缺乏流域内淤地坝资料,故未做淤地坝泥沙拦截效益分析,田鹏等<sup>[25]</sup>评估了临近的皇甫川

流域淤地坝泥沙拦截效益,认为淤地坝平均年拦蓄泥沙和多年平均输沙量相当。1957—2010 年佳芦河流域年径流及年输沙量均呈现减少趋势<sup>[15]</sup>,在还林还草工程后,流域内植被在生长过程中消耗大量水分,是径流减少的一个重要原因。近 50 年来黄土高原地区降雨有明显减少趋势<sup>[26]</sup>,是径流减少的另一个重要原因。降雨的减少可以降低土壤侵蚀,气候变化和还林还草对土壤侵蚀的贡献率在不同地区存在明显差异<sup>[7]</sup>。杨波等<sup>[27]</sup>认为榆林地区总体退耕还林的水土保持效益约为 40%~50%。但还林还草后土壤侵蚀减少的物理过程、泥沙、径流之间的内在反馈机理还需进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 胡建军,赵力毅,冯光成.黄河粗泥沙集中来源区输沙模数研究[J].人民黄河,2013,35(6):87-89.
- [2] 田永宏,张庆伟.佳芦河流域水土保持措施减水减沙效益分析[J].中国水土保持,1996(6):22-25.
- [3] 张鑫,杜朝阳,蔡焕杰.黄河中游区佳芦河流域生态脆弱性评价[J].中国人口资源与环境,2010,20(115):155-158.
- [4] 王爱平,刘娟,刘美利.关于神木县退耕还林还草工程实施情况现状调查及探讨[J].农民致富之友,2015(20):142-143.
- [5] 李天宏,郑丽娜.基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2013 年土壤侵蚀动态变化[J].自然资源学报,2012,27(7):1164-1175.
- [6] Wu L, Liu X, Ma X Y. Tracking soil erosion changes in an easily-eroded watershed of the Chinese Loess Plateau[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2016, 25(1):351-363.
- [7] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, et al. Soil erosion and its response to the changes of precipitation and vegetation cover on the Loess Plateau [J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(6):1091-1106.
- [8] 胡克志.黄土高原不同生物气候区土壤侵蚀动态变化研究[J].人民长江,2016,47(13):16-23.
- [9] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, et al. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation and Development, 2005, 16(1):73-85.
- [10] Tang Q, Xu Y, Bennett S J, et al. Assessment of soil erosion using RUSLE and GIS: A case study of the Yangou watershed in the Loess Plateau, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(4):1715-1724.
- [11] Liu Y S, Guo Y J, Li Y R, et al. GIS-based effect assessment of soil erosion before and after gully land consolidation: A case study of Wangjiagou project region, Loess Plateau [J]. Chinese Geographical Science, 2015, 25(2): 137-146.
- [12] 赵文启,刘宇,罗明良,等.黄土高原小流域植被恢复的土壤侵蚀效应评估[J].水土保持学报,2016,30(5):89-94.
- [13] 刘森,杨明义,张凤宝.黄土坡面细沟发育及细沟与细沟间侵蚀比率研究[J].水土保持学报,2015,29(1):12-16.
- [14] 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.
- [15] 俞奇骏,张洪波,陈克宇,等.佳芦河流域水沙演变及其驱动因素分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(3):151-156.
- [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] 章文波,谢云,刘宝元,等.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.
- [18] 张宏鸣,杨勤科,刘晴蕊,等.基于 GIS 的区域坡度坡长因子提取算法[J].计算机工程,2010,36(9):246-248.
- [19] Wang B, Zheng F L, Mathias J M, et al. Comparison of soil erodibility factors in USLE, RUSLE2, EPIC and Dg models based on a Chinese soil erodibility database [J]. Soil and Plant Science, 2013, 63(1):69-79.
- [20] 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.
- [21] 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,2017:8.
- [22] 焦菊英,王万忠,李靖,等.黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的淤地拦沙效益分析[J].农业工程学报,2003,19(6):302-306.
- [23] 刘卉芳,曹文洪,秦伟,等.淤地坝在流域水土保持措施中的贡献研究[J].中国农村水利水电,2011(1):55-64.
- [24] 冉大川,齐斌,肖培青,等.佳芦河流域特大暴雨洪水对下垫面治理的响应[J].水土保持研究,2015,22(6):7-13.
- [25] 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.
- [26] 段建军,王小利,高照良,等.黄土高原地区 50 年降水时空动态与趋势分析[J].水土保持学报,2009,23(5):143-146.
- [27] 杨波,王全九.退耕还林后榆林市土壤侵蚀和养分流失功效研究[J].水土保持学报,2016,30(4):57-63.