

黄土高原小流域植被恢复的土壤侵蚀效应评估

赵文启^{1,2}, 刘宇³, 罗明良¹, 汪亚峰², 吕一河²

(1. 西华师范大学国土资源学院, 四川南充 637002; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 植被建设是治理土壤侵蚀的重要途径, 特别是坡面土壤侵蚀。退耕还林还草是黄土高原乃至全国最大规模的植被建设工程, 黄土高原是该工程的重点地区之一。小流域是土壤侵蚀综合治理的基本单元。通过退耕还林工程实施前后小流域土壤侵蚀的模拟和分析, 可以为植被建设成效评估和调整治理策略提供参考。运用修正土壤流失方程 RUSLE, 在 ARCGIS10.2 平台下模拟了羊圈沟小流域 1984 年、1996 年、2006 年、2012 年和 2014 年 5 个年份的土壤侵蚀, 评估了退耕还林前后黄土高原小流域植被恢复对土壤侵蚀的影响。降雨侵蚀力 R 利用延安气象站 30 年(1984—2014 年, 除 1999 年外)的日降雨数据计算, LS 因子利用将矢量化的 1:5 000 地形图插值生成 DEM 提取; 土壤可蚀性 K 因子利用 2006 年实测土壤理化数据计算, 总结概括前人研究成果获取 C 、 P 因子值。研究结果表明: (1) 各坡度带侵蚀都显著减弱, $15^\circ \sim 25^\circ$ 、 $25^\circ \sim 35^\circ$ 和 $>35^\circ$ 坡度带是中度以上侵蚀发生的主要区域。1984—2014 年 3 种坡度带的侵蚀面积之和分别占总面积的 44.93%、42.65%、35.78%、23.23% 和 22.98%; (2) 退耕还林前后相比, 土壤侵蚀强度显著降低: 中度以上侵蚀面积急剧减少, 土壤侵蚀转变为以微度、轻度和中度侵蚀为主, 3 类侵蚀面积之和在 2006 年、2012 年和 2014 年分别占总侵蚀面积的 26.53%、44.24% 和 43.47%; (3) 土壤侵蚀模数呈现减小的趋势, 从 1984 年到 2014 年, 土壤侵蚀强度从 $15\,327.57\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 降至 $3\,270.19\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 降低 70% 以上。总体上, 土壤侵蚀明显降低, 表明植被建设有效遏制了土壤侵蚀, 退耕还林工程对水土保持和治理土壤侵蚀起到了显著的效果。

关键词: 植被恢复; 土壤侵蚀; 退耕还林; 黄土高原

中图分类号: S157.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2016)05-0089-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.05.015

Effect of Revegetation on Soil Erosion in Small Watershed of the Loess Plateau

ZHAO Wenqi^{1,2}, LIU Yu³, LUO Mingliang¹, WANG Yafeng², LÜ Yihe²

(1. School of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637002;

2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Centre for Eco-environmental Sciences, Beijing 100085; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101)

Abstract: Vegetation construction was an important approach to control soil erosion, especially in the slope soil erosion. Converting cropland to forest and grassland was a largest vegetation construction project in Loess Plateau and even the whole country. In this study, the effects of revegetation on soil erosion under implementation of the Grain for Green Project were evaluated for five single years (1984, 1996, 2006, 2012 and 2014) using the revised universal soil loss equation (RUSLE) supported by ARCGIS 10.2. Daily rainfall data of three decades (from 1984 to 2014, excluding 1999) of Yan'an weather station was used to calculate the rainfall erodibility (R). Values of topographical factor (LS) were extracted from digital elevation model, which was generated by applying interpolation based on topographic map with a scale of 1:5 000. The K factor was obtained using physical and chemical properties of soil samples of study area, in 2006. C and P factors were generally derived from previous studies on the Loess Plateau. Results showed that areas of moderate high, high and very high erosion declined sharply, and most of them transferred to very low, low and moderate. The average soil erosion rate decreased from $15\,327.57\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ in 1984 to $3\,270.19\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ in 2014. Slope belts of $15^\circ \sim 25^\circ$, $25^\circ \sim 35^\circ$ and $>35^\circ$ were the main areas of severe soil erosion. These

收稿日期: 2016-04-21

资助项目: 国家自然科学基金(41390464, 41301032, 41501284); 中国科学院青年创新促进会

第一作者: 赵文启(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事 GIS 和水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: zhwq0618@163.com

通信作者: 汪亚峰(1978—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事坝系流域土壤侵蚀与碳关系, 土地利用变化的生态环境效应研究。E-mail: yfwang@rcees.ac.cn

three slope belts accounted for 44.93%, 42.65%, 35.78%, 23.23% and 22.98% of total study area from 1984 to 2014. Furthermore, the areas with very low, low and moderate erosion occupied 26.53%, 44.24% and 43.47% of the total area of the watershed in 2006, 2012 and 2014, respectively. Generally, the soil erosion in Yangjuangou watershed reduced significantly. It was indicated that revegetation had positive effects on soil and water conservation and soil erosion, and the Grain for Green Project led to a success in soil erosion control.

Keywords: vegetation restoration; soil erosion; Grain for Green Project; Loess Plateau

土壤侵蚀是一个严重而复杂、遍及全球的生态环境问题^[1-2],它直接导致土壤退化和降低土地生产力^[1]。土壤侵蚀还造成河道、库塘淤塞,加重洪涝和干旱灾害,因而备受关注。在黄土高原,20世纪80年代以后,尤其是1999年以后,在退耕还林政策的推动下土壤侵蚀变化最为明显^[2]。植被恢复是抑制和改善区域尺度土壤侵蚀的主要措施之一。植被通过冠层减小雨滴动能来降低降雨侵蚀力,通过根茎固结土壤而增强土壤抗蚀性,而枯枝落叶则通过截流降低地表径流侵蚀力调控土壤侵蚀^[3]。在干旱半干旱的黄土高原区,植被恢复取得显著成效。评估植被恢复对情势的影响对区域水土保持和植被建设具有重要的理论意义和实践意义。

20世纪60年代W. H. Wischmeier和D. Smith在对美国30个州的观测资料进行分析的基础上建立了土壤流失方程(Universal Soil Loess Equation, USLE)。随后,该方法广泛应用于土壤侵蚀研究。我国学者^[4-6]鉴于我国的地形特征和地域特征并对其进行修正来研究我国的土壤侵蚀问题,并且对部分参数本地化,建立适合模拟我国土壤侵蚀的RUSLE,并广泛应用到侵蚀模拟中^[5,7-9]。本研究基于RUSLE模型和GIS技术,模拟退耕还林政策实施前后黄土高原小流域的土壤侵蚀,以评估植被恢复以来土壤侵蚀的变化,揭示植被恢复的土壤侵蚀效应。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究选择黄河一级支流延河流域的羊圈沟小流域为研究区。羊圈沟是延河的二级支流,位于距离延安市东北14 km处(36°42'N, 109°31'E),流域总面积2.02 km²^[10]。该区地处黄土高原丘陵区,沟壑纵横交错,密度达2.74 km/km²^[10],海拔高度大约1 049~1 295 m,为温带季风大陆性气候区,多年平均降水量508.45 mm,雨季集中于每年的7—9月,降水年际变率大。土壤以黄绵土为主,结构疏松,抗蚀性差。退耕还林前(1999年前)多年平均降雨侵蚀力为1 755.83 (MJ·mm)/(hm²·h),退耕还林后多年平均降雨侵蚀力2 155.71 (MJ·mm)/(hm²·h)。目前,该流域的土地类型主要为森林、灌丛、草地、坡耕地、梯田、居民地、水域等。

1.2 研究方法

1.2.1 数据采集 本研究采用的延安气象站日降水量数据来自中国气象局数据网,时间范围为1984—2014年。土地利用数据通过航片和高分辨率遥感影像解译获取,共分11种类型,即坝地、坡耕地、梯田、森林、灌丛、草地、水域、居民地、道路、油田和其他裸地。土壤质地通过Master-size 2000测得的土壤粒径。由于黄土性质变化微小,所以选用2006年的实测土壤质地计算的可蚀性数据作为模型的土壤可蚀性参数。DEM通过1:5 000的地形图^[10]在Arcgis10.2中矢量化,并利用插值生成5 m分辨率的DEM。通过Excel2013和Arcgis10.2平台里进行数据处理分析各年份土地利用空间变化特征和面积计算。

1.2.2 计算方法 RUSLE包括降雨量、土壤可蚀性、地形因子、作物因子、水土保持措施5个因子,方程式如下:

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

式中: A 为年平均土壤侵蚀量[t/(hm²·a)]; R 为降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(hm²·h·a)]; K 为土壤可蚀性因子,即单位降水侵蚀产生的土壤侵蚀量[(t·hm²·h)/(MJ·hm²·mm)]; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施。

(1) 降雨侵蚀力 R

降雨侵蚀力的计算方法如下:

$$R=\alpha P^{\beta} \quad (2)$$

式中: P 为年平均降水量(mm), R 为年平均降水侵蚀力; α, β 是模型参数。章文波等^[6]通过研究得出逐年降水量侵蚀力的简易算法可表示为:

$$R_j=\alpha P_j^{\beta} \quad (3)$$

式中: R_j 为第 j 年降水侵蚀力[(MJ·mm)/(hm²·h·a)]; P_j 为第 j 年的年降水量; α 和 β 是模型参数。

(2) 土壤可蚀性因子 K

目前,获取土壤可蚀性的主要途径是在野外设立观测站,监测不同地形不同土壤类型的可蚀性。本研究主要采用EPIC模型中的计算方法估算羊圈沟的土壤可蚀性。计算表达式如下:

$$K=0.1317 \times \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 \text{SAN}_i \left(1 - \frac{\text{SIL}_i}{100} \right) \right] \right\} \times \left[\frac{\text{SIL}_i}{\text{CLA}_i - \text{SIL}_i} \right]^{0.3} \\ \times \left\{ 1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right\} \times \left[1.0 - \frac{0.7\text{SN}_1}{\text{SN}_1 + \exp(-5.51 + 22.9\text{SN}_1)} \right] \quad (4)$$

式中: SAN_i 为砂粒含量(%); SIL_i 为粉粒含量(%); CLA_i 为黏粒含量(%); C 为有机质含量(%); $\text{SN}_1 = 1 - \text{SAN}/100$ 。

(3) 地形因子(LS)

坡度的陡缓和坡度的长短是影响土壤侵蚀量大小的重要因素,在 RUSLE 中用坡长(L)和坡度(S)因子表达。本研究中采用 Wischmeier 和 Smith 提出的经验公式提取坡长。根据黄土高原的地形特征采用刘宝元等^[11]提出的坡度公式提取坡度。

(4) 植被覆盖因子 C 和水土保持措施因子 P

植被在坡面土壤侵蚀中有决定性的作用^[8]。在植被覆盖度大的地区土壤流失要比植被覆盖度小的地区小^[8]。在黄土高原地区,由于黄土的易蚀性,在裸露的地区极易发生土壤流失。所以,植被覆盖成为预测和评价土壤流失的重要因子^[8]。本研究根据马超飞等^[7]和蔡崇法等^[5]计算获得的成果。汇总黄土高原各类土地植被覆盖度,如下:坝地为 0.31,坡耕地为 0.31,梯田为 0.31,森林为 0.006,果园 0.05,灌丛为 0.017,草地 0.06,居民地为 0.2,其他用地为 0.06,水域、道路和油田均为 0。

P 因子是对某一种土地类型实行的水土保持措施,如通过改变土地利用结构,调整耕作方式,增加保持水土措施的多样性(种植树、人工草、撂荒)。Wischmeier 和 Smith 研究表明 P 值在 0~1 之间, P 值为 0 表示不发生侵蚀, P 值为 1 表示未采取任何水保措施。本研究采用 RUSLE 模型的计算方法,总结前人的研究成果,并参照钟德燕^[8]和刘宝元等^[12]《中国土壤侵蚀模型》中的 P 值对羊圈沟小流域的各类土地的水保措施进行赋值。汇总各类土地利用的 P 值,如下:坝地、水域、道路和油田为 0,坡耕地、居民地和其他用地为 1,梯田为 0.35,森林为 0.7,果园和灌丛为 0.8,草地为 0.9。

2 结果与分析

2.1 降雨侵蚀力 R 的变化

在水蚀区,降雨是土壤侵蚀的主要外营力。通常情况下,年降雨量越大其侵蚀能量也随之增大,加剧地区内的土壤侵蚀。降雨的特征包括雨强、雨滴大小及雨型,不同的雨强、雨滴大小和降雨类型产生不同的径流,所以其侵蚀大小也不同。本研究以 1999 年为分界线,统计计算 1984—2014 年多年平均降雨量

(见图 1)。结果显示,退耕还林前后,年平均降雨量分别为 508.45 mm 和 547.74 mm。通过用章文波等人的研究方法,计算得出退耕还林前后年平均降雨侵蚀力 R 值分别为 1 755.83 (MJ·mm)/(hm²·h·a) 和 2 155.71 (MJ·mm)/(hm²·h·a)。

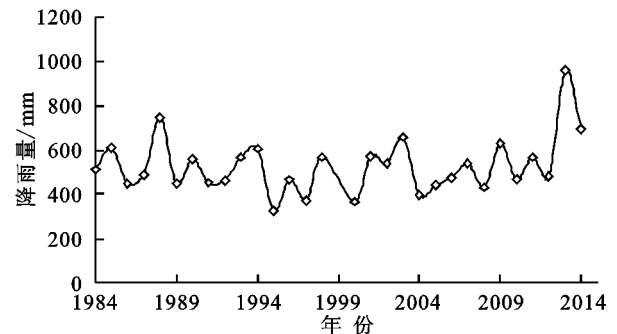


图 1 退耕还林前后年降雨量的变化

2.2 土壤侵蚀强度的变化

土壤侵蚀强度是受外营力而使单位面积内的土壤及土壤母质发生分离和位移。根据 RUSLE 方法,通过 Arcgis10.2 平台,得到 1984 年、1996 年、2006 年、2012 年和 2014 年的土壤侵蚀强度图(见图 2)。按照中华人民共和国水利行业标准《土壤侵蚀分类级别标准》对该流域侵蚀强度进行分级,最终得到 1984 年、1996 年、2006 年、2012 年和 2014 年的平均侵蚀模数,分别为 15 327.57, 12 266.3, 7 219.5, 3 309.14, 3 270.19 t/(km²·a)。结果与汪亚峰等^[13]和冯晓明等^[14]的研究结果相近。

从图 2 中可以看出,退耕还林前后各类侵蚀强度空间变化明显。微度、轻度和中度侵蚀的面积总体上呈现增大趋势;强度、极强度、剧烈侵蚀面积呈减小趋势。从图 3 可看出,该流域在退耕还林以前是以强度、极强度和剧烈侵蚀为主,1984 年和 1996 年 3 类侵蚀强度面积之和分别占总面积的 44.93% 和 39.54%。2006 年由于退耕还林工程初步实施,对土地进行开垦,强度、极强度和剧烈侵蚀占总面积的 32.2%。从 1984—2014 年,微度、轻度、中度侵蚀的面积逐年增加,3 类侵蚀强度比例之和分别占总面积的 13.8%, 18.97%, 26.54%, 44.24% 和 43.47%。整体上,侵蚀强度从强度、极强度、剧烈侵蚀转换为微度、轻度、中度侵蚀,退耕还林工程的实施使该流域的土壤侵蚀得到了很大的改善。

2.3 土地利用类型间土壤侵蚀强度分异

为揭示退耕还林对地区性的土壤侵蚀变化,基于 Arcgis10.2 的空间叠加分析,对羊圈沟 1984 年、1996 年、2006 年、2012 年和 2014 年的土壤侵蚀强度栅格图和土地利用栅格图进行叠加分析,得到土地利用类型的侵蚀空间变化图(见图 2),通过统计侵蚀变化得到各土地利用类型侵蚀面积统计图(图 4)。

退耕还林前即 1984 年和 1996 年各土地利用类型侵蚀强度空间变化如图 2。退耕还林前,流域内主要以强度、极强度和剧烈侵蚀为主(图 3),1984 年和 1996 年的侵蚀面积分别占总面积的 57.21%和 50.16%。退耕还林后,即 2006 年、2012 年和 2014 年的土地利用侵蚀强度空间变化(图 2)显示,土地利用侵蚀空间发生了明显的变化,土壤侵蚀以微度、轻度和中度侵蚀为主。土地利用侵蚀强度范围在 2006

年明显减少,但主要发生强度、极强度和剧烈侵蚀区为侵蚀冲沟分布区。从图 4 中可以看出:在 2006 年,主要的土壤侵蚀区土地利用类型以森林、灌丛和草地为主,3 种土地的侵蚀面积占总面积的 47.66%。到 2012 年和 2014 年,侵蚀强度范围进一步减小,侵蚀强度较大的地区主要分布森林、灌丛、草地和梯田,这两年 4 种土地类型的侵蚀面积之和分别占总面积的 58.76%和 57.09%。

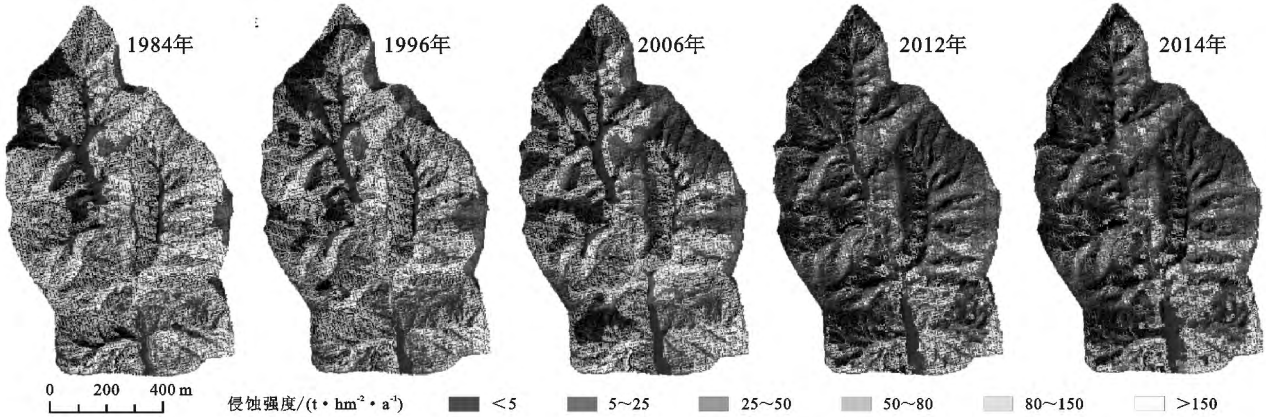


图 2 1984 年、1996 年、2006 年、2012 年、2014 年土地类型侵蚀强度分布

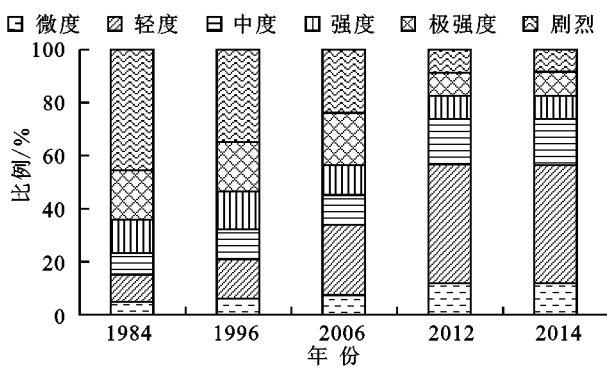


图 3 各级土壤侵蚀强度面积比例

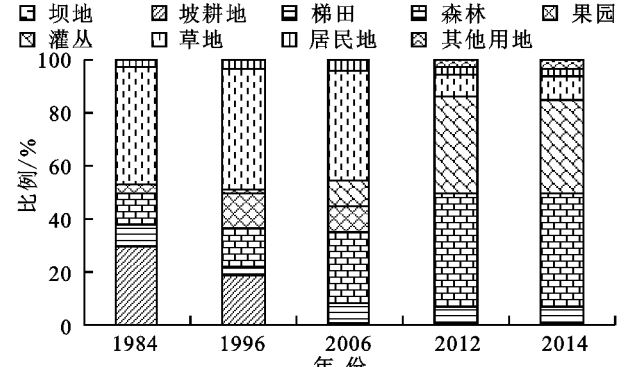


图 4 各土地利用类型侵蚀面积比例

从图 4 中可看出,退耕还林前后羊圈沟小流域的土壤侵蚀变化明显,其特征为:(1)退耕还林前,土地侵蚀以坡耕地、梯田、森林和草地为主。1984 年 4 类土地的侵蚀面积占总土地利用面积的 57.21%;(2)退耕还林以后,土地侵蚀以森林、灌丛和草地侵蚀为主 2006 年,2012 年和 2014 年 3 类土地的侵蚀面积之和分别占总土地利用面积的 47.66%,54.86%和 53.31%。

坡耕地的侵蚀面积从 1984—2014 年明显减少,各年的侵蚀面积分别占总土地利用面积的 18.12%,11.31%,0.09%,0.36%和 0.36%。从 1984—2014 年梯田的侵蚀面积缓慢减少。森林和灌丛的侵蚀面积逐渐增大,1984—2014 年两种土地类型的侵蚀面积之和分别占总土地利用面积的 6.93%,9.35%,22.15%,49.54%和 48%;草地的侵蚀面积逐年减小,在 1984 年草地的侵蚀面积占总土地利用面积的 26.99%,到 2014 年草地的侵蚀面积比例减少到 5.31%,净减小面积比例(1984 年的侵蚀面积比例—2014 年的侵蚀面积比例)为 21.68%。

果园、居民地、其他用地等占总面积的比例较小,且数据资料不完整,所以不做分析。

2.4 土壤侵蚀强度的坡度分异

土地利用和坡度等是决定土壤侵蚀的重要因子,综合汤国安等^[15]和周启鸣等^[16]的研究成果及《土壤侵蚀分类级别标准》的坡度级别对该地区的坡度进行分级,分为<15°,15°~25°,25°~35°, >35°的坡度带。对研究区 5 个年份的土壤侵蚀强度图分别与坡度分级图及 5 个年份的土地利用图进行叠加得到各类土地利用和不同坡度的土壤侵蚀强度分级图,采用 zonal statistics as table 工具分析各类别的土壤侵蚀强度面积,统计计算得到表 1 的结果。

从不同坡度对该区的侵蚀强度变化(表 1)分析,退耕还林前后不同坡度的侵蚀特征表现为:(1)退耕还林前以强度、极强度和剧烈侵蚀为主,且发生侵蚀的区域在 15°~25°,25°~35°和 >35°的坡度带,<15°的坡度带以轻度和中度侵蚀为主;(2)退耕还

林以后以微度、轻度和中度侵蚀为主,侵蚀区域主要在15°~25°,25°~35°和>35°的坡度带;<15°和15°~25°坡度带的侵蚀面积增大,主要以微度和轻度侵蚀为主。

表 1 1984—2014 年不同坡度带的侵蚀强度面积比例

年份	坡度/(°)	侵蚀强度区面积比/%					
		微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈
1984	<15	1.15	2.20	1.68	1.20	1.68	2.45
	15~25	1.06	1.38	2.24	1.99	2.52	8.27
	25~35	0.75	1.45	0.99	2.54	2.70	9.32
	>35	0.08	1.25	0.15	1.86	4.61	7.74
1996	<15	1.31	3.10	1.63	0.96	1.21	1.79
	15~25	1.35	2.23	3.25	2.20	2.65	5.76
	25~35	1.03	1.90	1.70	3.21	2.94	7.17
	>35	0.10	1.76	0.40	2.33	4.54	6.51
2006	<15	1.89	3.03	1.61	0.92	0.95	1.18
	15~25	1.90	4.41	2.93	2.27	2.68	3.38
	25~35	0.82	5.32	1.33	2.78	3.34	4.80
	>35	0	3.33	1.06	0.91	4.97	5.34
2012	<15	3.27	3.42	1.32	0.85	0.78	0.78
	15~25	2.95	8.04	2.48	1.41	1.41	1.62
	25~35	1.22	9.60	2.71	1.74	1.58	1.59
	>35	0	6.87	4.18	1.32	1.85	1.35
2014	<15	3.18	3.33	1.34	0.84	0.67	0.70
	15~25	2.91	7.78	2.45	1.46	1.50	1.52
	25~35	1.24	9.31	2.71	1.70	1.50	1.61
	>35	0	6.96	4.05	1.30	1.80	1.37

3 讨论

3.1 降雨变化和侵蚀的关系

降雨是影响土壤侵蚀的重要因素,根据图 1 的结果和章文波等^[6]的方法,降雨侵蚀力随着降雨量的增大而增大。在降雨过程中雨滴对地表击溅破坏土壤表层,而且在连续降雨的作用下坡面上产生径流冲刷破坏地表。因此,降雨在土壤侵蚀过程中起着决定性的作用^[17]。从图 5 可看出,延安近 30 年年降雨量呈增长趋势。在统计 30 年的降雨量过程中发现,1995 年的降雨量最小,年降雨量为 327 mm,2013 年的降雨量最大,年降雨量为 959.1 mm。从对年平均降雨量来看,退耕还林前后延安地区的降雨量变化明显。从图 5 可以发现,1984—2014 年,延安气象站观测的降雨量呈波动变化趋势,通过线拟合发现,总体上该地区的降雨呈增加趋势。根据计算结果可以判断,伴随着该地区降雨的增多降雨侵蚀力是不断增大的,但是羊圈沟流域的土壤侵蚀强度并没有与降雨一致波动变化,土壤侵蚀强度呈现下降趋势,可以看出降雨对土壤侵蚀的贡献较小。该流域的土壤侵蚀量降低的主要原因是植被覆盖度的增加,植被覆盖度的增加有效的降低了雨滴的击溅作用,同时林草植被的增加可以对坡面径流截留下渗,降低径流对地表的冲刷^[18],提高了土壤的抗冲性^[19]。

3.2 土地利用变化与土壤侵蚀

1984—2014 年,羊圈沟土壤侵蚀强度 15 327.57~3 270.19 t/(km²·a)。可以看出,退耕还林工程对

土壤侵蚀治理起到显著效果,退耕还林前侵蚀强度以剧烈侵蚀为主,到 2012 年和 2014 年侵蚀强度总体上转为中度侵蚀。退耕还林工程使该流域的土地利用结构发生明显的变化,坡耕地面积逐年减小,羊圈沟流域土壤侵蚀主要是发生于多分布冲沟的坡耕地区域^[14]。冯晓明等^[14]研究发现 1984—1996 年土地利用结构发生了明显的变化,其中坡耕地转变为草地(19%)、灌丛(13%)、梯田(7%)和森林(5%)。谢红霞等^[18]研究发现,土地转化为草地对土壤侵蚀的阻碍贡献更大,而且随着土地形态的变化和继军等^[20]对坡面整地研究发现梯田和水平条可以有效的蓄水保土,同时从坡向上分析发现阴坡水土保持效益优于阳坡。从本研究的计算结果可以看出,通过土地利用结构优化转变对保持水土的影响效果显著。

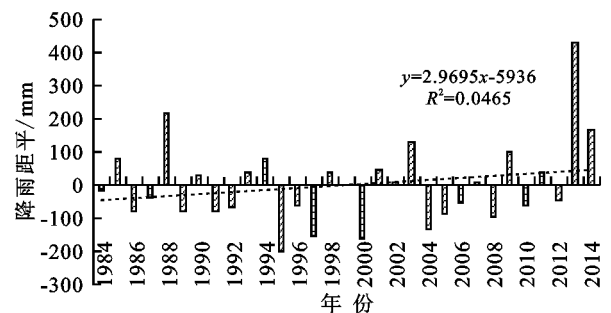


图 5 1984—2014 年降雨距平

3.3 侵蚀量估算的不确定性分析

首先,不同坡度范围的侵蚀类型和侵蚀量不同:在陡坡地带,土壤侵蚀以重力侵蚀为主,在缓坡地带以面蚀为主。黄土高原丘陵区沟壑纵横,侵蚀冲沟较

多。程琳等^[21]研究发现不同地形特征下会造成侵蚀量的不同。李勇等^[22]研究发现冲沟的土壤侵蚀量比其他植被覆盖下的土地侵蚀量大。其次,DEM 分辨率的高低对计算过程的影响:低分辨的数字地形在像元计算的过程中把坡度接近垂直面的地区忽略或合并到其他地形类别中,不能够准确计算土壤侵蚀量。而高分辨率的数字地形可以更准确地计算土壤侵蚀量。最后,人类活动对地表面的影响较大,如修筑梯田、建造淤地坝和其他工程措施。RUSLE 模型对这些因素造成的侵蚀难以完美刻画。

此外,土壤侵蚀的各影响因素其本身错综复杂,在监测和预测土壤侵蚀过程中获得准确的土壤侵蚀量比较困难,在计算和预测地区土壤侵蚀量时具有不确定性。

4 结论

基于 GIS 技术和实测羊圈沟土壤可蚀性数据及土地利用资料,运用修正土壤流失方程(RUSLE)对羊圈沟小流域退耕还林前后植被恢复的土壤侵蚀效应进行了评估。计算得到退耕还林前后羊圈沟的土壤侵蚀模数,分析了退耕还林前后该流域的不同土地利用下和不同坡度下的土壤侵蚀强度的变化。结果显示:1984—2014 年,流域侵蚀强度显著降低,侵蚀模数从 15 327.57 t/(km²·a)降到 3 270.19 t/(km²·a);各类侵蚀强度级别变化明显:侵蚀强度从强度、极强度和剧烈侵蚀转变为微度、轻度和中度侵蚀;不同坡度下的土壤侵蚀强度变化明显:退耕还林前以极强度和剧烈侵蚀为主;退耕还林后以微度、轻度和中度侵蚀为主;不同土地利用类型下土壤侵蚀变化显著:退耕还林前土壤侵蚀主要发生在坡耕地、梯田、森林和草地,空间上侵蚀覆盖整个流域且以强度、极强度和剧烈侵蚀为主;退耕还林后土壤侵蚀主要发生在森林、灌丛和草地,侵蚀强度范围进一步减小,且以微度、轻度和中度侵蚀为主。

本研究的不足点:首先,土地利用资料的不完整。例如,果园的土地资料在 2012 年以后没有详细的记录,所以在预测整个流域的土壤侵蚀时带来一定的影响。其次,植被因子 C 、水土保持因子 P 在赋值的时候参考前人研究成果,在今后通过实测数据来确定黄土高原小流域植被因子和水土保持因子的值。

参考文献:

- [1] Portenga E W, Bierman P R. Understanding Earth's eroding surface with ¹⁰Be[J]. *GSA Today*, 2011, 21(8): 4-10.
- [2] Zhou J, Fu B J, Gao G Y, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2016, 137(2): 1-11.
- [3] Mohammad A G, Adam M A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses[J]. *Catena*, 2010, 81(2): 97-103.
- [4] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1759-1763.
- [5] 蔡崇法, 丁树文. 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.
- [6] 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.
- [7] 马超飞, 马建文, 布和敖斯尔, 等. USLE 模型中植被覆盖因子的遥感数据定量估算[J]. *水土保持通报*, 2001, 21(4): 6-9.
- [8] 钟德燕. 基于 USLE 模型的黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀研究: 吴起县为例[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [9] 高峰, 华瑾, 卢远, 等. 基于 GIS 和 USLE 的钦江流域土壤侵蚀评估[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(1): 18-22.
- [10] 汪亚峰, 傅伯杰, 侯繁荣, 等. 基于差分 GPS 技术的淤地坝泥沙淤积量估算[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 79-83.
- [11] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation[C]// *Proceedings 12th international soil conservation organization conference*. Beijing, 2002, 2: 15.
- [12] 刘宝元, 谢云, 张科利, 等. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京: 科学技术出版社, 2001: 15-20.
- [13] 汪亚峰, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 黄土丘陵小流域土地利用变化的土壤侵蚀效应: 基于 ¹³⁷Cs 示踪的定量评价[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1571-1576.
- [14] Feng X M, Wang Y F, Chen L D, et al. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau[J]. *Geomorphology*, 2010, 118(3): 239-248.
- [15] 汤国安, 宋佳. 基于 DEM 坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 157-160, 192.
- [16] 周启鸣, 刘学军. 数字地形分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 45-47.
- [17] 李素清, 李斌, 张金屯. 不同降雨量下的黄土高原土壤侵蚀特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(1): 94-97.
- [18] 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[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 569-576.
- [19] 李占斌, 朱冰冰, 李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 802-809.
- [20] 和继军, 蔡强国, 路炳军, 等. 密云水库上游石匣小流域水土流失综合治理措施研究[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(3): 375-382.
- [21] 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[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 61-66.
- [22] Li Y, Poesen J, Yang J, et al. Evaluating gully erosion using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb/¹³⁷Cs ratio in a reservoir catchment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 69(1): 107-115.