

基于 RUSLE 的引黄入晋北干线沿线 地区土壤侵蚀定量研究

郭子萍¹, 王乃昂¹, 屈志勇²

(1. 兰州大学 资源环境学院/干旱区与沙漠研究中心, 甘肃 兰州 730000; 2. 山西省气象信息中心, 山西 太原 030000)

摘要: [目的] 分析引黄入晋北干线沿线地区土壤侵蚀时空分布特征及其主控因子, 为当地水土保持和生态环境建设提供科学的理论依据。[方法] 以引黄入晋北干线沿线地区为研究区, 基于 GIS 和 RS 技术, 利用 2005, 2010, 2015 年 3 期 Landsat 遥感影像, DEM, LUCC, 月降水资料, 计算土壤侵蚀模数, 并分析研究区土壤侵蚀强度的时空变化特征及与主控因子间的关系。[结果] 2005, 2015 年为轻度侵蚀, 2010 年为中度侵蚀, 从 2005—2010 年土壤侵蚀模数增长 80.91%, 2010—2015 年土壤侵蚀模数降低 47.87%, 呈先增后减, 总体减小的趋势; 以北干线为界, 界线两侧土壤侵蚀差异显著, 朔州市辖区的土壤侵蚀面积和土壤侵蚀量最大。R 因子与土壤侵蚀呈正相关, 当土壤类型为栗褐土, 坡度为 8°~15°, 土地利用类型为耕地时土壤侵蚀面积最大, 当坡度大于 25°, 土地利用类型为草地和林地时土壤侵蚀量最高。[结论] 引黄入晋北干线的施工加剧了沿线地区土壤侵蚀, 降雨、土壤类型、坡度、土地利用类型作为主控因子与该地的土壤侵蚀分布联系紧密。因此应确定水土保持重点区域, 有针对性地制定水土流失防治措施, 改善生态环境。

关键词: 引黄入晋北干线; RS/GIS; RUSLE; 土壤侵蚀模数; 时空分布特征

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2018)03-0180-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 郭子萍, 王乃昂, 屈志勇. 基于 RUSLE 的引黄入晋北干线沿线地区土壤侵蚀定量研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3):180-186. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.029. Guo Ziping, Wang Naiang, Qu Zhiyong. Quantitative study on soil erosion along area of north main line of drawing water from Yellow River to Shanxi Province based on RUSLE[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3):180-186.

Quantitative Study on Soil Erosion Along Area of North Main Line of Drawing Water From Yellow River to Shanxi Province Based on RUSLE

GUO Ziping¹, WANG Naiang¹, QU Zhiyong²

(1. College of Earth and Environmental Sciences/Research Center for Arid Area and Desert, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Meteorological Information Center of Shanxi Province, Taiyuan, Gansu 030000, China)

Abstract: [Objective] This study investigated the spatial and temporal variations of soil erosion and its causes in a stretch of north main line of drawing water from the Yellow River to Shanxi Province in order to provide basis for ecological management and soil erosion control. [Methods] Using LUCC, digital elevation model (DEM) and Landsat TM4-5 imagery, coupled with monthly precipitation data from 2005, 2010 and 2015, the temporal and spatial characteristics of soil erosion intensity were derived. [Results] Soil erosion in the year of 2005 and 2015 was slight, but moderate in the year of 2010. From 2005 to 2010, soil erosion increased by 80.91%, followed by a decrease of 47.87% from 2010 to 2015. Taking the north main line as the boundary, the differences of soil erosion on both sides of the boundary was significant. The most severe soil erosion occurred near to Shuozhou City. R factor was positively correlated with soil erosion. The largest erosion area occurred when the soil type was chestnut soil, slope was 8°~15°, and land use type was cultivated land. Most serious erosion occurred in forestland and grassland with slope more than 25°. [Conclusion] The

收稿日期: 2017-11-07

修回日期: 2017-12-12

资助项目: 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2016-267)

第一作者: 郭子萍(1994—), 女(汉族), 山西省阳泉市人, 硕士生, 研究方向为气候变化与水循环。E-mail: guozp17@lzu.edu.cn.

通讯作者: 王乃昂(1962—), 男(汉族), 山东省郓城县人, 博士, 教授, 主要从事气候变化与水循环、沙漠环境与沙漠化研究。E-mail: wangna@lzu.edu.cn.

construction of the water diversion project has exacerbated soil erosion along the reach. Main controlling factors such as rainfall, soil type, slope, and land use type are closely related to the soil erosion distribution in the study area. Therefore, priority areas of water and soil conservation should be determined, and regulations should be made to prevent soil erosion and to protect local environment.

Keywords: north main line of drawing water from the Yellow River to Shanxi Province; RS/GIS; RUSLE; soil erosion modulus; temporal and spatial distribution characteristics

土壤侵蚀是当今人类面临的一种最普遍、持续性最强的地质灾害^[1-3],会引起土地退化、土壤肥力下降、水环境恶化,从而影响生态安全和人类的可持续发展。黄土高原是中国水土流失最严重的地区^[4],而土壤侵蚀是黄土高原河流泥沙的主要来源^[5],因此,定量计算土壤侵蚀量、土壤侵蚀强度,评价水土流失时空分布特征,对该地区水土保持及土地的合理利用具有重要的意义。土壤侵蚀模型是土壤侵蚀量定量评价和预报的重要方法。国内外已经研究开发出许多实用的模型,其中修正的通用土壤流失方程(RUSLE)应用最为广泛^[6-8]。

自20世纪90年代以来,在GIS和RS技术的支持下,中国学者利用RUSLE模型开展了广泛的土壤侵蚀研究,其中黄土高原作为研究的热点区域受到了广泛的关注,但相关研究大都集中于对侵蚀面积、侵蚀总量、空间分布的分析,对与影响因子的关系以及对人为因素作用日渐增强的地区关注度不够。引黄入晋工程是为促进地区经济发展,满足能源基地供水而建设的水利工程,对煤电基地建设、提高人民生活质量具有重要意义,但也不可避免的加重了水土流失问题。目前对于该工程的研究主要集中在在水价分析^[9-10]和社会经济影响评价研究^[11]等社会经济领域;抗震性分析^[12]、泥质膨胀岩工程地质研究^[13]等工程地质领域;环境保护设计^[14]等环境工程领域,针对土壤侵蚀的研究较少,几乎没有涉及。

本研究拟采用RUSLE模型计算引黄入晋北干线2005,2010,2015年3a土壤侵蚀模数,分析土壤侵蚀时空变化特征,以期为当地水土保持和生态环境建设提供科学理论依据。

1 研究区概况与数据收集

1.1 研究区概况

山西省万家寨引黄工程位于山西省西北部,北干线主要任务是自万家寨水库引水,向山西北部的大同、平朔等能源基地供水,年引水量 $2.96 \times 10^8 \text{ m}^3$,供水区总供水面积 $5\,273 \text{ km}^2$ ^[14]。研究区属温带大陆性季风气候,年均气温 $5.7 \sim 7.9 \text{ }^\circ\text{C}$,年平均降水量 $380 \sim 440 \text{ mm}$,降水季节分配不均,降水变率大。研究区海拔为

859~2 405 m,地形起伏变化较大^[15]。该工程北干线2009年2月开始实施,2011年9月16日竣工。

1.2 数据来源

本研究所使用的数据包括:①朔州市市辖区、山阴县、怀仁县、大同市市辖区2005,2010,2015年月降水量数据,来源为山西省气象信息中心。②研究区GDEM V230 M分辨率数字高程模型数据以及研究区2005,2010,2015年Landsat TM4-5遥感影像图,均来源于地理空间数据云。③研究区2005,2010,2015年土地利用图、研究区土壤类型图,来源于中国科学院资源环境科学数据中心。

2 研究方法

2.1 修正的通用土壤流失方程

修正的通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)作为估算年均土壤流失量的方法,需要考虑降水(月降水量)、土壤类型、坡度因子、坡长因子、植被覆盖与管理因子、水土保持措施管理因子6大主要因子,方程定义为^[16]:

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

式中: A ——土壤侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$; R ——降雨侵蚀力因子 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$; K ——土壤可蚀性因子 $[\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$; L ——坡长因子(无量纲); S ——坡度因子(无量纲); C ——植被覆盖与管理因子(无量纲); P ——水土保持措施因子(无量纲)。

2.1.1 降雨侵蚀力因子 R 降雨侵蚀力因子是预测预报土壤侵蚀模型中的重要因子,本研究采用 Wischmeier 等^[17]提出并经 Arnoldus 修改的比较适用于黄土高原地区且广泛应用的经验公式(2)来计算研究区2005,2010,2015年的 R 值。

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^4 \left[(1.5 \times \frac{P_i^2}{P}) - 0.8188 \right] \quad (2)$$

式中: P ——年降水量(mm); P_i ——第 i 月降水量(mm)^[17]。

利用2005,2010,2015年北干线沿线完整且均匀分布的4个气象站点的气象数据,根据公式(1)计算得到研究区3a的 R 值,利用ArcGIS工具连接功能将 R 值赋给各站点,并利用空间插值对 R 值进行空

间化处理。研究采用普通克里格方法,半变异模型选用球形函数模型,进行研究区 R 值空间插值,生成研究区 3 a 的 R 值空间分布。

2.1.2 土壤可蚀性因子 K 土壤可蚀性因子 K (soil erodibility) 是土壤抵抗侵蚀能力的综合体现,影响因素有:土壤结构、土壤质地、土壤渗透率、紧实

$$K_{\text{epic}} = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 \text{SAN}(1 - \text{SIL}/100)]\} \times \left[\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right]^{0.3} \times \left[1.0 - \frac{0.25c}{c + \exp(3.72 - 0.95c)} \right] \times \left[1.0 - \frac{0.7\text{SN1}}{\text{SN1} + \exp(-5.51 + 22.9\text{N1})} \right] \quad (3)$$

式中:SAN——砂粒含量(%);SIL——粉砂含量(%);CLA——黏粒含量(%);C——有机碳含量(%),SN1=1-SAN/100。

张科利等^[20]的研究指出,与美国相比,中国土壤可蚀性 K 值普遍偏小,用 EPIC 模型所建立的公式计算的可蚀性 K 值,通过公式(4)进行修正转换,方可用于中国的土壤可蚀性估算。

$$K = 0.01383 + 0.51575 \quad (4)$$

利用公式(3),(4)计算的研究区 K 值,并在 ArcGIS 中生成 K 值分布。

2.1.3 坡度因子 S 通用土壤流失方程中允许计算的最大坡度为 18%(10°),研究区位于黄土高原,这样的条件不适用于研究区丘陵沟壑中的陡坡地形(>10°),因此,在利用 DEM 提取坡度以后,要分段对坡度因子 S 进行计算,缓坡采用 McCool 坡度公式,陡坡采用刘宝元^[21]提出的黄土高原 S 因子计算公式(5)。

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8 \sin \theta - 0.50 & (5^\circ \leq \theta < 14^\circ) \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & (\theta \geq 14^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

式中: S ——坡度因子; θ ——坡度。

2.1.4 坡长因子 L 采用 Hickey 提出的非累计流

度、含水率以及黏土矿物性质等^[18],根据中国科学院资源环境科学数据中心公布的土壤类型数据,获得研究区土壤类型,以及《山西土壤》^[19]中记载的关于各种土壤类型典型剖面的理化性质,采用 Wischmeier 等^[7]于 1990 年在 EPIC 模型中建立的计算公式(3)计算研究区各土壤类型的 K 值。

量直接计算法估算坡长,坡长因子 L 的提取采用 Wischmeier 提出的坡长因子计算公式(6):

$$L = (\lambda/22.13)^m \quad (6)$$

$$m = \beta / (1 - \beta)$$

$$\beta = (\sin \theta / 0.0896) / [3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56]$$

式中: λ ——水平坡长(m); m ——坡长指数;22.13——标准径流小区坡长(m); β ——细沟侵蚀与面蚀的比率; θ ——利用 DEM 提取的坡度。ArcGIS 计算的坡度以度为单位,要转换为弧度表示,即乘以 $\pi/180$ 。

2.1.5 植被覆盖与管理因子 C NDVI 是估算 C 因子最普遍应用的数据^[22]。以经过辐射定标和大气校正的 TM 影像为数据,在 ENVI 5.1 中计算归一化植被指数 NDVI,在提取 NDVI 之后,根据像元二分模型原理^[23],计算研究区的植被覆盖度 F ,公式为:

$$F = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) / (\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) \quad (7)$$

式中: F ——有植被覆盖的面积比例,即像元的植被覆盖度; NDVI_{veg} ——纯植被覆盖像元的 NDVI 值; $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ ——无植被覆盖像元的 NDVI 值。在求解植被覆盖度 F 后,参考有关研究成果,赋予了研究区不同土地利用类型和不同植被覆盖度下的 C 值(见表 1)。

表 1 研究区不同土地利用类型和不同植被覆盖度下的 C 值

土地利用类型	植被覆盖度/%					
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	
林地	0.10	0.08	0.06	0.02	0.004	—
草地	0.45	0.24	0.15	0.09	0.043	—
耕地	—	—	—	—	—	0.23
未利用土地	—	—	—	—	—	0.45
建设用地	—	—	—	—	—	0.90
水体	—	—	—	—	—	1.00

2.1.6 水土保持措施因子 P p 值介于 0~1 之间,0 代表根本不会发生土壤侵蚀的地区,1 代表未采取任何水土保持措施的地区。国内学者根据区域特点对不同的土地利用方式进行赋值,本研究区位于黄土

高原,参照前人有关研究成果^[24-25]赋值 P ,将水体、林地、草地、建筑用地、未利用地赋值为 1,对于耕地,通常坡度越大,水土保持措施的作用越突出,因此耕地依据表 2 按照坡度范围进行赋值。

表2 不同坡度范围内耕地的 p 值

坡度范围	$\leq 5^\circ$	$5^\circ \sim 10^\circ$	$10^\circ \sim 15^\circ$	$15^\circ \sim 20^\circ$	$20^\circ \sim 25^\circ$	$> 25^\circ$
p 值	0.100	0.221	0.305	0.575	0.705	0.800

2.2 土壤侵蚀量估算

将上述各因子图层栅格单元统一为 $1\ 000\ m \times 1\ 000\ m$, 并标准化为相同的投影坐标系统 WGS1984_UTM_zone_49 N, 地理坐标系 GCS_WGS_1984, 在 ArcGIS 软件的栅格计算器工具中将每个网格(Grid)中各因子连乘, 得到研究区 3 期土壤侵蚀模数。RUSLE 计算的土壤流失量默认单位是美制单位 $[\text{ton}/(\text{area} \cdot \text{a})]$, 要将结果乘以 224.2 得到中国常用的公制单位 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀强度分级

在 ArcGIS 中根据水利部《土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)》, 对研究区土壤侵蚀模数进行重分类, 得到 3 期土壤侵蚀强度图如附图 2 所示。

3.2 土壤侵蚀强度时空动态变化

由表 3 可知, 从土壤侵蚀模数看, 研究区 2005, 2015 年的土壤侵蚀模数均在 $500 \sim 2\ 500\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 之间, 属于轻度侵蚀, 而 2010 年土壤侵蚀模数为 $3\ 340.41\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 属于中度侵蚀。

表3 研究区土壤侵蚀变化统计

年份	土壤侵蚀量/ ($10^4\ \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)	平均土壤侵蚀模数/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	强度分级
2005	1 559	1 846.37	轻度侵蚀
2010	2 821	3 340.41	中度侵蚀
2015	1 471	1 741.12	轻度侵蚀

从 2005—2010 年, 土壤侵蚀模数增长了 80.91%; 从 2010—2015 年下降了 47.87%。3 a 的土壤侵蚀模数呈先增后减, 总体减小的趋势。但 3 a 中土壤侵蚀模数均大于水利部公布的黄土高原土壤允许流失量 $1\ 000\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的标准。这说明研究区土壤侵蚀程度严重, 应重点给予关注。引黄入晋北干线 2009 年 2 月实施, 2011 年 9 月竣工, 2010 年土壤侵蚀模数骤增与该工程的实施关系密切。工程建成后, 为了区域的生态安全和经济的可持续发展, 实施了一系列生物措施和工程措施, 产生了良好的水土保持效果, 因此 2015 年土壤侵蚀模数减小。

从图 1 中可以看出, 2005, 2015 年均以微度侵蚀所占的面积最大, 其次为轻度、中度、强度、极强度、剧

烈侵蚀, 土壤侵蚀面积随着侵蚀强度的增加而逐渐减小。与 2005 年相比, 2010 年由微度侵蚀转移到中度以上侵蚀的面积高达 11.75%。中度以上侵蚀强度所占面积增大, 无疑会加重土壤侵蚀。2015 与 2010 年相比, 微度、轻度侵蚀面积增加, 中度以上侵蚀所占面积减小 12.63%, 侵蚀状况明显好转, 且各侵蚀强度所占的面积与 2005 年基本相同。

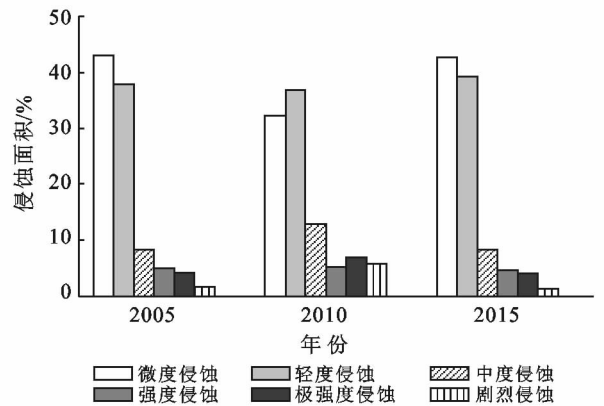


图1 引黄入晋北干线沿线地区不同年份各侵蚀强度所占面积比

由表 4 可知, 从空间上看, 研究区土壤侵蚀呈块状侵蚀和点状侵蚀相间分布的特点。3 a 中土壤侵蚀面积均为朔州市市辖区最大, 块状侵蚀分布较多, 其次是大同市辖区、山阴、怀仁, 且 3 a 中土壤侵蚀量也均为朔州市辖区最大。从土壤侵蚀模数看, 4 个地区土壤侵蚀模数从 2005—2015 年均呈先增后减的趋势, 在 2010 年处达到峰值, 因此每个地区的土壤侵蚀模数与总的土壤侵蚀模数分布特点一致。

由附图 2 可以看出, 以北干线为界, 线上方土壤侵蚀明显高于线下方, 两侧侵蚀状况差异显著, 这种趋势在 2010 年尤为明显。土壤侵蚀的空间分布与研究区的 DEM 也有较高的吻合度, 分析研究区 DEM 可以明显看出, 研究区分为 2 个地貌单元, 分别为侵蚀中低山区和冲洪积平原区^[15], 侵蚀中低山区土壤侵蚀明显比冲洪积平原侵蚀严重。

3.3 土壤侵蚀主控因子分析

3.3.1 土壤侵蚀与降雨 从图 2 可以看出, 研究区不同地域单位 R 因子均在 2010 年处达到最大值, 而折线图显示, 土壤侵蚀模数也在 2010 年处达到峰值。

在其他因素不变的情况下,降雨侵蚀力因子 R 是土壤侵蚀的加速因子。因此,当 R 因子的值增大时,土壤侵蚀模数也会相应的增大。分析所获得的降水数据,研究区 2005 年年降水量为 367.73 mm,2010 年为 423.5 mm,2015 年为 380 mm,由此可以看出 2010 年降水量显著增大是导致 R 因子值增大的直接原因, R 因子与土壤侵蚀模数呈明显正相关。

3.3.2 土壤侵蚀与土壤类型 由表 5 可以看出,栗褐土所占的土壤侵蚀面积最大,为 4 199 km²,栗褐土的土壤侵蚀量也最高。从研究区土壤类型分布图中,我们可以清楚的看到,研究区栗褐土的面积占 46.36%,栗褐土区为半干旱一年一熟旱作区,分布有大量的耕地,但是耕地的质量较差,绝大部分为坡耕地,且坡度大的耕地占很大比例,耕地的输出少,只用不养,导致农田生态恶化,土壤干旱、贫瘠,侵蚀严重,

再生能力低。因此在栗褐土分布区,应重点防范水土流失。

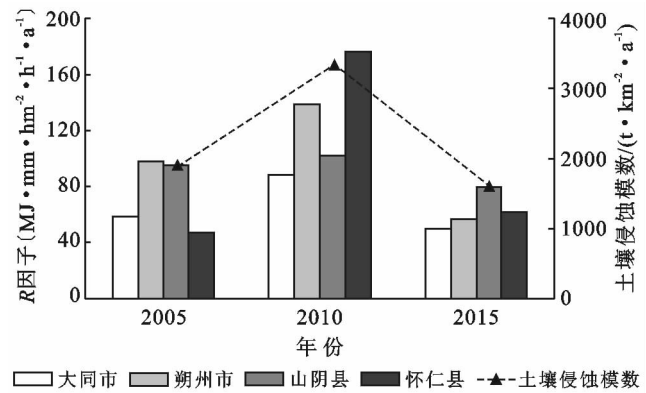


图 2 引黄入晋北干线沿线地区各年份 R 因子值与土壤侵蚀模数

表 4 引黄入晋北干线沿线地区各年份不同地域土壤侵蚀变化统计

地区	面积/ km ²	2005 年		2010 年		2015 年	
		侵蚀量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	平均侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	平均侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	平均侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)
大同市辖区	2 056	165.34	804.20	416.02	2 023.42	182.76	888.93
怀仁县	1 263	124.18	983.25	339.08	2 684.71	158.80	1 257.34
朔州市辖区	4 107	913.63	2 224.57	1 525.18	3 713.62	804.17	1 958.04
山阴县	1 651	353.19	2 139.23	549.62	3 329.01	338.04	2 047.51

表 5 引黄入晋北干线沿线地区各年份不同土壤类型土壤侵蚀变化统计

土壤类型	面积/ km ²	2005 年		2010 年		2015 年	
		侵蚀量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	平均侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	平均侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	平均侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)
风沙土	98.00	1.59	162.01	2.98	303.78	1.58	161.73
山地土	30.00	0.14	45.51	3.35	1 116.67	0.14	46.67
石质土	248.00	31.58	1 273.24	88.19	3 556.04	33.19	1 338.28
粗骨土	177.00	25.52	1 441.74	55.33	3 125.96	25.38	1 434.12
新积土	34.00	6.46	1 959.03	9.46	2 866.71	4.79	1 450.71
黄绵土	1 039.00	110.55	1 063.96	247.41	2 381.23	114.32	1 100.30
栗褐土	4 199.00	1 124.18	2 677.25	1 943.50	4 628.49	1 015.93	2 419.46
潮土	1 671.00	133.15	796.84	199.27	1 192.51	138.22	827.20
褐土	66.00	8.38	1 270.04	28.08	4 254.50	8.23	1 247.17
黄棕壤	3.00	0.54	1 830.15	1.10	3 677.26	0.34	1 152.11
红黏土	9.00	1.57	1 743.15	1.87	2 075.74	1.13	1 254.85
盐土	95.00	11.10	1 168.11	19.64	2 067.42	11.83	1 245.52
栗钙土	1 388.00	124.79	899.04	247.11	1 780.31	133.21	959.70

3.3.3 土壤侵蚀与坡度 以全国《土壤侵蚀强度划分标准(SL190-2007)》为坡度分类标准,将坡度重分类为 6 类: <5°, 5°~8°, 8°~15°, 15°~25°, 25°~35°, >35°。据相关文献可知,地表类型按坡度可以分为平坡(0°~5°)、缓坡(5°~15°)、斜坡(15°~25°)、陡坡(25°~35°)、急坡(35°~45°)、险坡(≥45°)^[26],根据面

积分布情况,可以看出,研究区以平坡和缓坡为主,斜坡为辅,急坡和险坡占很小比重。为了进一步探讨坡度与土壤侵蚀量之间的关系,利用空间叠加工具将坡度图层与侵蚀模数图层叠加,计算研究区 2005, 2010, 2015 年 6 类坡度下的土壤侵蚀量模数及土壤侵蚀量比如表 6 所示。

表 6 引黄入晋北干线沿线地区各年份不同坡度土壤侵蚀变化统计

坡度/ (°)	面积/ km ²	2005 年		2010 年		2015 年	
		侵蚀量/ (10 ³ t · a ⁻¹)	平均侵蚀模数/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀量/ (10 ⁴ t · a ⁻¹)	平均侵蚀模数/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀量/ (10 ³ t · a ⁻¹)	平均侵蚀模数/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)
<5°	2 376	153.86	647.56	266.59	1 121.99	1 479	630.11
5°~8°	1 879	198.67	1 057.32	353.23	1 879.87	1 276	1 009.87
8°~15°	2 816	428.76	1 522.58	752.49	2 672.18	2 281	1 439.35
15°~25°	1 454	496.21	3 412.70	928.68	6 387.07	1 436	3 161.66
25°~35°	435	224.32	5 156.82	401.52	9 230.30	477	4 866.10
>35°	113	80.64	7 135.91	143.91	12 735.04	128	6 892.60

从表 6 中可以看出,2005,2010,2015 年在不同坡度上的土壤侵蚀格局变化不大,不同坡度与土壤侵蚀关系密切。

从侵蚀面积来看,8°~15°坡度带最大,这主要与研究区缓坡分布面积大有关。从平均侵蚀模数看,当坡度大于 25°时土壤侵蚀模数较高,尽管此带的分布面积小,但侵蚀量大,因此侵蚀模数高,侵蚀级别 2005,2015 年达到强度侵蚀,2010 年为极强度侵蚀,主要是因为北方,25°以下的区域属于缓坡区域,退耕还林工程的实施使得该区域成为人工林和梯田改

造后的农田,土壤侵蚀状况稍有改善,因此低于 25°以上的区域的土壤侵蚀模数。从各坡度带的土壤侵蚀模数看,在 3 a 中各坡度带的值均为 2010 年最大,并且,在每 1 a 中,坡度小于 35°时,随着坡度的增加,土壤侵蚀模数增大。总体而言,25°以上的坡度带应成为重点预防和治理的区域。

3.3.4 土壤侵蚀与土地利用类型 从土地利用类型可以看出,研究区大部分地区分布着耕地、林地和草地,将土地利用类型与土壤侵蚀强度进行叠加可以得出如表 7 所示结果。

表 7 引黄入晋北干线沿线地区各年份不同土地利用类型土壤侵蚀变化统计

土地利用 类型	2005 年			2010 年			2015 年		
	面积/ km ²	侵蚀量/ (10 ⁴ t · a ⁻¹)	平均侵蚀模数/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)	面积/ km ²	侵蚀量/ (10 ⁴ t · a ⁻¹)	平均侵蚀模数/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)	面积/ km ²	侵蚀量/ (10 ⁴ t · a ⁻¹)	平均侵蚀模数/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)
耕地	4 515	614.88	1 361.86	4 388	997.18	2 272.52	4 364	567.76	1 301.00
林地	1 557	306.79	1 970.39	1 670	661.05	3 958.36	1 667	305.21	1 830.92
草地	2 449	567.65	2 317.89	2 426	1 031.09	4 250.15	2 413	520.46	2 156.92
水体	108	7.63	706.48	108	10.48	970.37	111	7.78	700.90
建筑用地	427	35.38	828.52	464	73.99	1 594.53	503	44.38	882.27
未利用土地	21	2.31	1 100.23	21	3.69	1 757.75	19	2.33	1 224.66

(1) 不同土地利用类型之间,土壤侵蚀状况差异显著,3 a 中土壤侵蚀面积均为耕地最大,其次为草地、林地、建筑用地、水体、未利用土地。耕地以轻度侵蚀为主,这是因为陡坡的耕地面积大,在黄土高原地区,耕地一般沿着等高线带状耕作^[4],耕作方式比较粗放,缺少水土保持的措施,加之人类活动频繁干扰,导致耕地侵蚀。

(2) 林地和草地以轻度和中度侵蚀为主,这是因为林地和草地大都分布在海拔 1 000 m 以上的山区,林地被人为毁林开荒,草地基本为自然草地,当降雨发生时,这些未采取水保措施的区域,在降雨和陡坡的作用下,会不同程度的产生土壤侵蚀。

(3) 建筑用地的水土保持良好,而水体基本无土可蚀,未利用土地所占面积虽小,但土壤侵蚀强度高,

在山阴县南部和怀仁县北部,有部分区域地表裸露,无植被覆盖且坡度大,土壤侵蚀严重。

由以上分析可知,区域内耕地的侵蚀面积大,林地、草地、未利用土地的侵蚀级别高,因此应加强以上土地利用类型的合理利用和管理规划,制定相应的水土保持措施,改善区域内的环境状况。

3.4 土壤侵蚀的人为因素作用

2005—2010 年土壤侵蚀模数增长将近 1 倍主要是由于工程建设时期的一系列施工活动会对地表进行开挖、扰动、再塑,还会损毁水土保持设施,造成大面积的土地裸露,加重水土流失。具体到各因子中主要表现为:①施工过程中,对地表的扰动再塑,会形成大量的人工坡面和悬空面,在短期内坡度、坡长等地形因子会发生剧烈的变化;②项目建设过程中会

产生大量的弃土弃渣,这些物质稳定性差,在无植被覆盖的情况下,极易产生风蚀和水蚀;③对地表覆盖物(林地、草地)的清除或砍伐,会使得防风固沙的能力下降,极易引起风力侵蚀,并且大量的土地直接裸露,土壤直接遭受雨滴击溅和冲刷,极易引起水力侵蚀。

2010—2015 年土壤侵蚀模数下降主要是由于工程建成后,实行了一系列的工程措施和生物措施来恢复该地的生态环境。如坡面绿化、库岸治理护岸、道路护坡固土、整地措施、抗旱造林措施、拦截措施等有效的减缓了水土流失^[15]。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究仍存在一定的不足:本文的研究结果仍需水文站实测的泥沙数据进行验证,各因子的数据精度不一,难免在栅格计算过程中产生误差,例如降雨侵蚀力的计算只采用了 4 个雨量站点的数据,如果采用更多的雨量站点数据,可以进一步提高计算精度。 P 因子的赋值不确定性因素较高,如有定量计算 P 因子的方法,计算的结果将更为客观。未来的研究将根据研究区背景特征修正模型中因子的参数,结合土壤允许流失量的阈值来对研究区土壤侵蚀风险进行评估。

4.2 结论

(1) 2005—2015 年,引黄入晋北干线所经地区土壤侵蚀模数呈先增后减,总体减小的趋势。2005, 2015 年属于轻度侵蚀,而 2010 年属于中度侵蚀,大于水利部公布的黄土高原土壤允许流失量 1 000 t/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)的标准。引黄入晋北干线的实施是 2010 年土壤侵蚀模数增长近 1 倍的重要原因,表明人类活动的影响在土壤侵蚀的研究中不可忽视。

(2) 研究区土壤侵蚀呈块状侵蚀和点状侵蚀相间分布的特点。以北干线为界界线两侧土壤侵蚀差异显著。土壤侵蚀的空间分布与研究区的地貌单元关系密切,侵蚀中低山区高,冲洪积平原低。朔州市辖区的土壤侵蚀面积和土壤侵蚀量最大,朔州市辖区、山阴、怀仁、大同市辖区的土壤侵蚀模数均与总的土壤侵蚀模数分布特点一致。

(3) 各因子中, R 因子与土壤侵蚀模数呈明显正相关,当土壤类型为栗褐土、坡度为 $8^\circ \sim 15^\circ$ 、土地利用类型为耕地时土壤侵蚀面积最大,当坡度大于 25° 、土地利用类型为草地和林地时土壤侵蚀量最高。

28-38.

- [2] 齐述华,蒋梅鑫,于秀波. 基于遥感和 ULSE 模型评价 1995—2005 年江西土壤侵蚀[J]. 中国环境科学, 2011, 31(7): 1197-1203.
- [3] 查良松,邓国徽,谷家川. 1992—2013 年巢湖流域土壤侵蚀动态变化[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1708-1719.
- [4] 孟庆香,刘国彬,杨勤科. 黄土高原土壤侵蚀时空动态分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 20-22.
- [5] 信忠保,许炯心,余新晓. 近 50 a 黄土高原水土流失的时空变化[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1129-1139.
- [6] 符素华,刘宝元. 土壤侵蚀量预报模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 78-84.
- [7] 王晓慧,陈永富,陈尔学,等. 基于遥感和 GIS 的黄土高原中阳县土壤侵蚀评价[J]. 山地学报, 2011, 29(4): 442-448.
- [8] 陈云明,刘国彬,郑粉莉,等. RUSLE 侵蚀模型的应用及进展[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 80-83.
- [9] 刘贵良. 万家寨引黄入晋工程(一期)水价分析[J]. 水利经济, 2001, 23(6): 36-37.
- [10] 黄河. 引黄入晋工程太原供水区水价问题的思考[J]. 中国水利, 2002(5): 22-24.
- [11] 袁志红. 引黄入晋工程社会经济影响评价研究[D]. 太原:中北大学, 2008.
- [12] 崔阿李. 万家寨引黄入晋工程 PCCP 管抗震性能分析[J]. 人民黄河, 2009, 31(8): 78-78.
- [13] 宋岳,徐建闽. 万家寨引黄入晋工程泥质膨胀岩工程地质研究[C]. 北京:中国水利学会勘测专业委员会 2000 年学术研讨会论文集, 2000.
- [14] 刘卫. 万家寨引黄入晋工程北干线环境保护设计[J]. 水利水电工程设计, 2009, 28(3): 31-34.
- [15] 金中彦. 引黄入晋北干线工程水土保持生物措施研究[J]. 山西农业大学学报:自然科学版, 2011, 31(6): 537-540.
- [16] Yoder D, Lown J. The future of RUSLE: Inside the new revised universal soil loss equation[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1995, 50(5): 484-489.
- [17] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1971, 26(5): 189-193.
- [18] 陈明华,黄炎和. 土壤可蚀性因子的研究[J]. 水土保持学报, 1995, 7(1): 19-24.
- [19] 刘耀宗,张经元. 山西土壤[M]. 北京:科学出版社, 1992: 68-219.
- [20] 张科利,彭文英,杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 9-15.
- [21] Liu Baoyuan, Nearing M A, Shi Peijun, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1759-1763.

[参 考 文 献]

[1] 赵明松,李德成,张甘霖,等. 基于 RUSLE 模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估[J]. 土壤学报, 2016, 53(1):

(下转第 192 页)

