

基于 GIS 和 CSLE 的山西省土壤侵蚀风险研究

何维灿^{1,2}, 赵尚民¹, 王睿博², 程维明^{2,3}

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 太原 030024; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所

资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

摘 要:以山西省为研究对象, 基于中国土壤流失方程(Chinese Soil Loss Equation)、遥感和 GIS 空间分析技术, 通过合理选择 CSLE 中各土壤侵蚀因子的数据来源和计算方法, 依据《土壤侵蚀分类分级标准》对 2000—2010 年山西省省市县 3 级行政体系的土壤侵蚀风险情况进行了分析, 并运用地理加权回归分析方法, 计算了土壤侵蚀模型中各因子对侵蚀量的贡献率。结果表明: (1) 山西省年均土壤侵蚀总量达 3.58×10^8 t, 平均土壤侵蚀模数为 $2\,287 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。若以土壤侵蚀强度高于微度为侵蚀风险地区, 则山西省存在水土流失风险的地区约占全省面积的 48%; (2) 11 个地级市中, 轻度侵蚀城市依次为长治、晋中、晋城、太原、大同、运城和朔州, 中度侵蚀依次为吕梁、临汾、阳泉和忻州。106 个县级行政区中, 微度侵蚀的县有 14 个, 轻度侵蚀的县有 61 个, 中度侵蚀的县有 27 个, 强度侵蚀的县有 4 个; (3) 地形因子对水力侵蚀引起的土壤侵蚀模数具有最高的贡献率, 而因子取得最值的位置并不与贡献率最值的位置相一致。

关键词:土壤侵蚀; CSLE; GIS; 地理加权回归(GWR); 多级行政单元

中图分类号:P208; S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)03-0058-07

Research on Soil Erosion Risk Based on GIS and CSLE in Shanxi Province

HE Weican^{1,2}, ZHAO Shangmin¹, WANG Ruibo², CHENG Weiming^{2,3}

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences

and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Jiangsu Center for

Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: We selected the Shanxi Province as the research region. Based on the Chinese Soil Loss Equation (CSLE), remote sensing and GIS spatial analysis technology, the each soil erosion factor in CSLE model was calculated through reasonable data sources and computing methods. Then, the erosion risk distribution characteristics of administrative units at multi-levels in Shanxi Province were assessed according to the classification criteria of soil erosion intensities (SL190—2007) in the period from 2000 to 2010. To determine the regression coefficients of the erosion factors in relation to erosion modules, GWR (Geographically Weighted Regression) was carried out. The results showed that: (1) the average annual amount of soil erosion in Shanxi Province from was about 3.58×10^8 t, the average erosion modules was $2\,287 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$. About 48% of the total area was found to present an erosion risk area if a surface erosion grade higher than tolerable was assumed to be equivalent to erosion risk; (2) among the 11 prefecture-level cities, medium erosion was observed in Lüliang City, Linfen City, Yangquan City and Xinzhou City, and slightly erosion was found in Changzhi City, Jinzhong City, Jincheng City, Taiyuan City, Datong City, Yuncheng City, the 106 counties of Shanxi Province can be classified as tolerable erosion, slightly erosion, medium erosion and strong erosion. There are 14 counties with tolerable erosion, 61 counties with slightly erosion, 27 counties with medium erosion and 4 counties with strong erosion; (3) it is found that the topographic factor has the highest contribution rate to the soil erosion modules, while the highest contribution rates of the erosion factors to the erosion modules and the largest values of the factors are not located in the same place.

Keywords: soil erosion risk; CSLE(Chinese Soil Loss Equation); GIS; geographically weighted regression; administrative units at multi-levels

收稿日期: 2015-10-27

修回日期: 2015-12-07

资助项目: 水科院山洪灾害项目(SHZH-IWHR-57); 科技基础性专项(2011FY110400-2); 测绘地理信息公益性行业科研专项(201512033); 国家自然科学基金面上基金(41301469, 411171332)

第一作者: 何维灿(1992—), 男, 广西玉林人, 硕士研究生, 研究方向为遥感与 GIS 空间数据分析。E-mail: hewc@reis.ac.cn

通信作者: 赵尚民(1982—), 男, 河南洛阳人, 博士, 讲师, 主要从事黄土高原数字地形地貌研究。E-mail: zhaoshangmin@tyut.edu.cn

土壤侵蚀是在各种内外营力的作用下,土壤物质被剥离、迁移、沉积的过程,是地表最普遍的自然地理过程^[1]。随着人类活动范围的增大和土地利用强度的提高,加剧了土壤侵蚀的过程,并引起了土地退化、河道淤塞、水体污染等一系列生态环境问题^[2]。

土壤侵蚀预报是监测水土流失和评价水土保持效益的有效手段,侵蚀模型则是土壤侵蚀预报评估的重要工具。国内外先后开发的土壤侵蚀模型有USLE, RUSLE/MUSLE, WEPP, SEMMED, CSLE等模型^[3]。其中CSLE模型与USLE具有相似的结构,且更适合于我国水土保持工作的实际情况,已广泛应用于我国土壤侵蚀预报和风险评估中^[4-5]。

山西省地处我国二、三级阶梯交界的过渡地带,人口密度大,经济结构单一,长期以来以资源消耗为主的经济增长方式,过度利用水土资源,对土壤条件和生态环境造成极其严重的破坏,导致土地利用过度,水土流失严重,严重制约着该省的可持续发展^[6]。

目前,国内有关土壤侵蚀量的研究,在研究区的选择上多以某一地区或流域区域及其子区域为对象,省域尺度上进行多级行政体系的土壤侵蚀状况分析的研究尚未开展^[4-5,7-10],不利于水保方案的实施和管理。在土壤侵蚀的空间分布特征上,多以不同土壤侵蚀程度在不同土地覆被类型、地形因子等上的比例或采用多元线性回归分析说明各因子对土壤侵蚀的影响^[7-10],这类方法只是土壤侵蚀影响因素的宏观表达,不能反映贡献率的空间分异特征,在因地制宜的水土保持工程建设中的参考价值不显著。因此,不同地域不同影响因子对土壤侵蚀的贡献进行制图分析显得尤为重要。

本文以山西省为研究对象,基于中国土壤流失方程(CSLE),综合多年数据,运用遥感和GIS空间分析方法,定量评价山西省、市、县3级行政区的土壤侵蚀定量,结合土壤侵蚀分类分级标准^[11],对山西省土壤侵蚀潜在风险评估与制图。引入地理加权回归模型进行各因子的土壤侵蚀贡献率计算和空间特征分析,以期山西省各地水保部门和环境研究人员进行土地利用规划、土地复垦方案设计,改进土地利用方式、实现水土流失预估、布设合理的水土保持措施提供参考和科学依据。

1 研究区概况

山西省位于我国中部(34°34'—40°44'N, 110°14'—114°33'E),是典型的黄土广泛覆盖的山地高原,也是黄河中游水土流失较为严重的省份之一。全省土地总面积约15.67万km²,黄土覆盖范围约占全省面积的2/3。其中山丘地区的黄土覆盖面积为7.9万km²,除去大盆

地中的冲积平原、土石丘陵和山地侵蚀露出的基岩部分,黄土覆盖面积与现有耕地面积相当,垦殖指数极高,境内有黄土分布的地区,基本都受到人类耕作等活动的影响。省年均降水量518mm,年际变化大,降水主要集中在6—9月,且多为暴雨,约为年雨量的20%。山西在植被分区中属于暖温带落叶阔叶林和温带半干旱草原区,植物资源丰富,但覆盖度低,且分布不均,质量较差。

2 数据源与研究方法

2.1 数据源

评估山西省土壤侵蚀风险所需要的数据包括:降水数据、土壤类型数据、土地覆被类型数据、数字高程模型(DEM)、植被覆盖数据、统计年鉴、参考文献等相关统计资料:(1)日降水数据下载自气象数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),包括覆盖山西省及其周边200km范围内41个气象站点2000—2010年的日降雨数据,其中17个为省内站点数据,24个为省外周边站点数据,用于计算降雨侵蚀因子 R ;(2)山西省土壤类型数据来自中国1:100万土壤类型数据库,用于计算土壤可蚀性因子 K ;(3)土地覆被类型数据来自“全国生态环境10年变化(2000—2010年)调查遥感评估”项目成果,分类精度可以达到86%以上,用于计算生物措施因子 B 和耕作措施因子 T ;(4)数字高程模型利用ICESat卫星的GLA14数据进行垂直方向上的精度校正后的30m ASTER GDEM,用于计算坡度 S 、坡长 L 和耕作措施因子 T 和浅沟侵蚀因子 G ;(5)植被覆盖度由NDVI数据计算得出,数据下载自地理空间数据云。选择2000—2010年7—9月,共计99期归一化植被指数(NDVI)旬合成数据,求取平均值,再次归一化得到植被覆盖度,用于计算生物措施因子 B ;(6)统计资料参考山西省相关统计年鉴和水土保持文献资料,计算工程措施因子 E 值。将上述数据参考系统一到WGS-84坐标系,采用Albers等面积割圆锥投影。

2.2 各因子计算方法

本研究采用刘宝元提出的适用于全国范围的中国土壤流失方程CSLE,并结合GIS和遥感技术,估算每个栅格单元的土壤侵蚀量,完成山西省的多级行政体系下土壤侵蚀风险评价和侵蚀因子贡献率的空间特征分析。CSLE方程式如下:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T \quad (1)$$

式中: A ——每个栅格单元的年均土壤侵蚀模数 $[t/(hm^2 \cdot a)]$, $1 t/(km^2 \cdot a) = 100 t/(hm^2 \cdot a)$; R ——降雨侵蚀力因子 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$; K ——土壤可蚀性因子 $[(t \cdot h)/(MJ \cdot mm)]$; L 、

S ——坡度和坡长因子; B, E, T ——生物措施因子、工程措施因子、耕作因子,均为无量纲因子系数,其中 B, E, T 范围为 $0\sim 1$ 。各因子的计算方法见如下:

(1) 降雨侵蚀力因子 R :利用 2000—2010 年覆盖山西省及周边的 41 个气象站点资料和章文波等^[12]的算法,计算山西省各站点降雨侵蚀力,用 IDW 插值得到降雨侵蚀力表面模型(附图 1A)。

(2) 土壤可蚀性因子 K :以 1:100 万土壤类型数据为基础,运用 EPIC 模型^[13],编制成土壤可侵蚀性专题图(附图 1B)。

表 1 山西省生物措施因子(B)

土地覆被类型	植被覆盖度/%	B	土地覆被类型	植被覆盖度/%	B	土地覆被类型	B
林地	0~20	0.10	草地	0~20	0.45	耕地	0.23
	20~40	0.08		20~40	0.24	水域	0.00
	40~60	0.06		40~60	0.15	建设用地	0.35
	60~80	0.04		60~80	0.09	未利用地	0.45
	80~100	0.02		80~100	0.043		

② 工程措施因子(E)参考相关研究中使用的方法^[17],结合公式(2)计算工程措施因子:

$$E=\left(1-\frac{S_t}{S_0}\cdot\gamma\right)\left(1-\frac{S_d}{S_0}\cdot\delta\right)\tag{2}$$

式中: S_t ——梯田面积; S_d ——淤地坝控制面积; S_0 ——土地总面积; γ, δ ——梯田和淤地坝的拦沙减沙系数, γ 和 δ 值分别为 0.763,1^[18]。淤地坝控制面积根据黄河中上游管理局《淤地坝设计》^[17,19]中的相关标准计算,采用各类型淤地坝控制面积范围内的均值,即小型、中型和大型控制面积分别为 0.5,2.0,5.5 km²。

③ 耕作措施因子(T)根据当地人耕作习惯调查和前人研究成果^[17-20],耕地按坡度进行分级赋值(表 2)。

3 结果与分析

3.1 山西省土壤侵蚀空间分布特征

基于 ArcGIS 软件,利用 python 脚本根据上述公式构建各因子计算模型,并结合 CSLE 模型得到各栅格单元上的土壤侵蚀模数和山西省水土流失总量。根据水利部《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007)^[11],得到山西省土壤侵蚀强度模数分级表(表 3)和土壤侵蚀等级图(附图 2)。

(1) 对栅格单元的土壤侵蚀情况进行了统计(表 3),结果表明山西省年侵蚀总量达 3.58×10⁸ t,平均土壤侵蚀模数为 2 287 t/(km²·a),总体上属于轻度侵蚀。山西省侵蚀等级比例最大的是微度侵蚀,占全省总面积 52.3%。中度及以下侵蚀面积占全省总面积的 85.91%,但土壤侵蚀的贡献量仅为侵蚀总量的 42.57%。强度、极强度和剧烈侵蚀仅占全省总面积的 14.7%,但土壤侵蚀的贡献量高达 57.23%,表明

(3) 地形因子(LS):首先利用 ArcGIS 提取坡度和坡长,坡度因子 S 分别利用 McCool 等的公式^[14]和 Liu 等^[15]公式计算缓坡和陡坡因子,然后利用坡长因子 L 和坡长的关系求取坡长因子^[16]。 L 和 S 乘积得到地形因子(附图 1C)。

(4) 水土保持措施因子(BET)(附图 1D):

① 生物措施因子(B)基于土地覆被类型数据和归一化植被指数 NDVI 进行计算,参考邻近区域已有研究成果^[6,17-18],赋予不同土地利用类型和不同植被盖度下的 B (表 1)。

局部地区水土流失十分严重。

由附图 2 可知,山西省土壤侵蚀以微度侵蚀为主,且主要分布在中部 5 大断陷盆地和其他小型盆地的平原之中,由于这些地区地形平缓,降雨侵蚀力和土壤可蚀性适中,所以土壤侵蚀程度很小。轻度侵蚀地区主要分布在盆地边缘等处的丘陵台地之中。中度及以上土壤侵蚀主要分布在两侧的吕梁山脉和太行山脉,其中以吕梁山西部临近黄河中游粗砂多沙区、太行山脉北部忻州境内五台山地区、东南部侵蚀最为严重,这是由于吕梁山西部尽管降雨侵蚀居中,但土壤可蚀性较强,地形坡面较多,植被覆盖和水土保持程度相对较低;太行山东南部土壤可蚀性较强、降雨侵蚀强,导致土壤侵蚀严重。太行山北部的五台地区,尽管该地区植被覆盖和水土保持措施较好,但地形陡峭、坡耕地较多、沟蚀作用强烈,导致土壤侵蚀仍然严重。

若以土壤侵蚀强度高于微度为侵蚀风险地区,则山西省约 48%的地区存在水土流失风险,需要加强水土保持工作。尽管耕地广泛分布于盆地平原,但是也有较大部分分布在倾斜台地、丘陵以及小起伏山地地区的坡耕地,如山西省西部黄河河谷平原、河漫滩、阶地等,坡耕地分布较多,水土流失严重,应当加强耕地水保措施如梯田修建和淤地坝工程建设。在耕地分布少、主要为林草分布的山地地区应当加大植树造林力度,在山间交通路线等地修建护坡工程,能有效降低在植被覆盖度低但暴雨频率较高地区的地质灾害发生频率。

(2) 将山西省土壤侵蚀风险图分别与地级市行政区边界图叠加,得到行政区各土壤侵蚀风险的等级和百分比以及平均土壤侵蚀模数(表 4)。

由表 4 可知,山西省 11 个地级市中,微度侵蚀的比例大于 50%的城市依次是朔州、运城、大同、晋城、太原、晋中和长治,比例低于 50%的依次为临汾、阳泉、忻州和吕梁。这些城市中,平均土壤侵蚀模数最高的是吕梁,高达 3 428 t/(km² · a),最低的是朔州,为 1 320 t/(km² · a)。按平均侵蚀模数可以分为轻度侵蚀和中度侵蚀两类,其中轻度侵蚀依次为朔州、运城、大同、太原、晋城、晋中和长治;中度侵蚀依次为忻州、阳泉、临汾和吕梁。

表 2 山西省不同地形条件下耕作措施因子

坡度/(°)	≤1	1~3	3~9	9~13	13~17	17~21	21~25	>25
<i>T</i>	0.54	0.59	0.60	0.62	0.68	0.75	0.80	0.92

表 3 山西省土壤侵蚀强度分级统计

侵蚀等级/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)	面积/ km ²	面积 百分比/%	年侵蚀 总量/万 t	年侵蚀总量 占比/%	平均模数/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)
微度(<1000)	81869.6	52.3	2503.12	7.0	306
轻度(1000~2500)	29759.8	19.0	4877.50	13.63	1639
中度(2500~5000)	21891.2	14.0	7852.34	21.94	3587
强度(5000~8000)	12194.8	7.8	7647.39	21.37	6271
极强度(8000~15000)	8919.7	5.7	9379.08	26.21	10515
剧烈(>15000)	1828.0	1.2	3523.30	9.8	19274
合计	156463.1	100.0	35782.70	100.0	2287

表 4 山西省不同地级市土壤侵蚀情况

项目		朔州	运城	大同	太原	晋城	晋中	长治	忻州	阳泉	临汾	吕梁
微度	比例/%	7139.8	9491.6	8524.8	4018.5	5354.1	9057.1	7453.7	10695.9	2039.6	9382.9	8448.1
	面积/km ²	67.4	67.7	61.3	57.9	57.9	55.6	53.1	42.6	44.6	46.1	40.1
轻度	比例/%	1782.6	2293.8	2493.9	1249.4	1962.9	3126.2	2948.4	5966.8	968.4	3392.6	3526.1
	面积/km ²	16.8	16.4	17.9	18.0	21.2	19.2	21.0	23.8	21.2	16.7	16.7
中度	比例/%	957.0	1050.3	1667.2	968.4	1077.4	2320.0	1970.5	4600.7	804.1	2860.6	3581.4
	面积/km ²	9.0	7.5	12.0	14.0	11.6	14.3	14.0	18.3	17.6	14.1	17.0
强度	比例/%	448.6	567.1	810.5	468.5	445.5	1031.7	877.8	2397.1	450.8	2094.8	2587.0
	面积/km ²	4.2	4.0	5.8	6.8	4.8	6.3	6.3	9.6	9.9	10.3	12.3
极强	比例/%	237.0	485.8	360.1	211.6	309.6	602.6	599.8	1259.2	255.8	2102.1	2488.5
	面积/km ²	2.2	3.5	2.6	3.1	3.3	3.7	4.3	5.0	5.6	10.3	11.8
剧烈	比例/%	32.9	126.3	60.0	20.1	104.4	141.6	178.5	163.4	51.0	507.9	439.8
	面积/km ²	0.3	0.9	0.4	0.3	1.1	0.9	1.3	0.7	1.1	2.5	2.1
平均模数/(t · km ⁻² · a ⁻¹)		1320	1489	1617	1742	1832	1952	2111	2457	2557	3147	3428

(3) 将山西省县级行政区边界数据与山西省土壤侵蚀分布图进行叠加,统计了山西省县域平均土壤侵蚀模数(表 5)。由表 5 可知,山西省 106 个县级行政区的土壤侵蚀程度可以分为微度、轻度、中度和强度侵蚀 4 类。其中,微度侵蚀的县有 14 个,临猗县的平均土壤侵蚀模数最小,为 365 t/(km² · a);最高的为侯马市,平均侵蚀模数为 881 t/(km² · a)。轻度侵蚀的县有 61 个,其中曲沃县的平均土壤侵蚀模数最小,为 1 016 t/(km² · a);最高的为临汾市区,达 2 489 t/(km² · a)。中度侵蚀的县有 27 个,最高的为临县,平均土壤侵蚀模数为 4 999 t/(km² · a),已接近强度侵蚀标准;最低的为静乐县和孟县,土壤侵蚀模数约为 2 523 t/(km² · a)。强度侵蚀的县有 4 个,平均土壤侵蚀模数由大到小依次为柳林县 6 710 t/(km² · a)、永和县 6 706 t/(km² · a)、石楼县 6 494 t/(km² · a)、大宁县 5 025 t/(km² · a)。可见,强度

侵蚀县,均分布在属于晋西黄土高原的吕梁和临汾的西部地区。此外,中度侵蚀县中,平均模数较高的县基本分布在晋西,如隰县、汾西县、保德县、兴县等,说明该区域土壤侵蚀风险高,水土保持措施亟待加强。山西省 92 个县的土壤侵蚀处于轻度及以上,占到全省县数的 87%。

3.2 土壤侵蚀因子贡献率

为了确定 CSLE 模型中的各因子对土壤侵蚀模数的贡献率,本文利用地理加权回归分析对土壤侵蚀模数和因子进行了回归分析。首先,在 ArcGIS 10.2 中随机生成 4 000 个采样点,利用采样点提取各因子 *R*,*K*,*L*,*S*,*B*,*E*,*T* 和土壤侵蚀模数(因变量)的值。随后,在 SPSS 20 中使用多元线性回归方法进行逐步回归和共线性诊断。结果表明 *L* 和 *S* 之间,*B* 和 *T* 之间具有多重共线性。为消除共线性,采用 LS 构建辅助变量地形因子,BET 构建辅助变量水土保持因

子,归一化为 0~1。最后,利用这些模型因子做地理加权回归(GWR)。各因子对土壤侵蚀量的回归系数,结果见附图 3—4。

从附图 3—4 中可以看出,尽管通常意义上降雨侵蚀对于土壤的水力侵蚀具有重要影响,但回归结果表明在山西省范围内地形因子对土壤侵蚀模数具有最高的贡献率。地形因子的回归系数在吕梁石楼县和与其接壤的临汾永和县境内达到最大值 2.763。降雨对土壤侵蚀仍然具有重要作用,其贡献率最值仅次于地形因子,分布在临汾吉县境内。在山西省内土壤可蚀性因子对土壤侵蚀模数的贡献最低,最大值仅为 0.583。

各土壤侵蚀因子虽然表现出空间分布差异性,但大部分地区体现了空间聚类特征。降雨侵蚀 R 的贡献率在吉县和乡宁县分布较高,但在五台、静月、汾阳

和古县也有相似水平的贡献率分布。土壤可蚀性 K 在襄汾、洪洞和介休市,对土壤侵蚀起到了重要作用。地形因子 LS 的贡献率较大值主要分布在吕梁西南部的石楼县和临汾西北部的永和县,北部大同境内的市区和左云县,朔州境内市区、右玉县等地。水土保持措施在临汾的大宁县、吉县和乡宁县显得格外重要,是水土保持措施分布最多的县。

通过地理加权回归分析,可以清晰地看到在山西省内地形因子对土壤侵蚀的贡献率最高。基于此,在水土保持工程项目建设的过程中,应当加强边坡治理措施。比较附图 2 和附图 3—4 可以发现,在各个因子贡献率最大处,其值并不一定最大。因此,如果确认区域有土壤侵蚀的风险,应当根据各土壤侵蚀因子在当地的贡献率制定相应的水土保持措施。

表 5 山西省不同县市区土壤侵蚀状况 t/(km²·a)

城市	县名	平均侵蚀模数	侵蚀等级	城市	县名	平均侵蚀模数	侵蚀等级	城市	县名	平均侵蚀模数	侵蚀等级
大同	市区	581	微度	临汾	吉县	3907	中度	忻州	原平市	2265	轻度
	大同县	629	微度		乡宁县	3981	中度		偏关县	2484	轻度
	左云县	642	微度		汾西县	4002	中度		静乐县	2524	中度
	阳高县	845	微度		隰县	4545	中度		河曲县	2819	中度
	天镇县	1612	轻度		大宁县	5025	强度		五台县	2982	中度
	广灵县	2481	轻度		永和县	6706	强度		代县	3367	中度
	浑源县	2644	中度		文水县	532	微度		繁峙县	3668	中度
	灵丘县	2812	中度		汾阳市	962	微度		保德县	3918	中度
晋城	高平市	1619	轻度	吕梁	交城县	1290	轻度	阳泉	市区	1936	轻度
	陵川县	1699	轻度		交口县	1927	轻度		盂县	2523	中度
	泽州县	1789	轻度		孝义市	1972	轻度		平定县	2949	中度
	阳城县	1932	轻度		岚县	2036	轻度	运城	临猗县	365	微度
	沁水县	1957	轻度		方山县	2355	轻度		永济市	704	微度
					中阳县	3008	中度		市区	720	微度
晋中	市区	1400	轻度		市区	3466	中度		万荣县	897	微度
	介休市	1542	轻度		兴县	4498	中度		新绛县	1020	轻度
	平遥县	1562	轻度		临县	4999	中度		稷山县	1223	轻度
	太谷县	1656	轻度		石楼县	6494	强度		绛县	1475	轻度
	祁县	1746	轻度		柳林县	6710	强度		河津市	1561	轻度
	和顺县	1761	轻度	朔州	怀仁县	411	微度		芮城县	1715	轻度
	寿阳县	1807	轻度		右玉县	840	微度		夏县	1755	轻度
	榆社县	1934	轻度		山阴县	1424	轻度		闻喜县	1854	轻度
	昔阳县	2288	轻度		市区	1528	轻度		垣曲县	2143	轻度
	左权县	2296	轻度		应县	1915	轻度		平陆县	3701	中度
	灵石县	3145	中度								
临汾	侯马市	881	微度	太原	清徐县	1107	轻度	长治	市区	577	微度
	曲沃县	1016	轻度		市区	1195	轻度		屯留县	1222	轻度
	襄汾县	1282	轻度		阳曲县	1275	轻度		长子县	1316	轻度
	安泽县	1367	轻度		古交市	2128	轻度		长治县	1362	轻度
	洪洞县	2005	轻度		娄烦县	2930	中度		沁源县	1389	轻度
	翼城县	2280	轻度	忻州	市区	1297	轻度		沁县	1563	轻度
	霍州市	2428	轻度		定襄县	1472	轻度		襄垣县	2208	轻度
	市区	2489	轻度		五寨县	1482	轻度		潞城县	2387	轻度
	蒲县	2690	中度		神池县	1596	轻度		武乡县	2431	轻度
	古县	2939	中度		岢岚县	1995	轻度		壶关县	2549	中度
	浮山县	3304	中度		宁武县	2018	轻度		黎城县	3510	中度
									平顺县	3791	中度

4 讨论与结论

4.1 讨论

山西省土壤侵蚀以水力侵蚀为主,占全省侵蚀面积的99.9%,故只考虑了水力侵蚀的情况。水利普查等资料对土壤侵蚀情况的描述虽然细化到县级,但对各级侵蚀强度仅进行面积统计。多级行政体系下的土壤侵蚀定量分析评价与制图,弥补了这一不足,也能为决策层更好地认识土壤侵蚀分布情况,科学制订相关政策并在基层能有效实施。与已有成果相比,本文计算的山西省土壤侵蚀空间分布与山西省范围内的1:100万土壤侵蚀分级图空间分布规律相似^[21]。中度、轻度土壤侵蚀面积,约占水蚀面积的70%,强度及以上水蚀面积占30%,与山西省第一次水利普查公告^[22]结果基本一致,在各等级的侵蚀面积上有一定的差异,可能是因为采用的数据源不同造成的。利用CSLE模型对山西进行土壤侵蚀的研究较少,与已有的部分地级市和县层面土壤侵蚀研究相比,发现与本文统计结果存在差异^[23-25],这是因为本文综合了2000—2010年的数据,而相关文献针对单一年度的土壤侵蚀进行计算,存在差异也是合理的。此外,CSLE模型只考虑了面蚀强度,无法反映沟蚀和重力侵蚀的影响,也没有考虑坡面侵蚀物质输移过程中的沉积,这是本研究和其他众多研究存在的共同问题^[4-5,7-9]。

在计算土壤侵蚀贡献率方面,本文使用了地理加权回归(GWR),由于考虑了变量间相互关系的空间非稳性,因此在应用于空间数据分析和制图方面较经典线性回归具有明显的优势^[26],且相对于地统计分析而言,考虑了残差数据之间的自相关性,使结果更为精确^[27]。回归分析成果以图件形式表现,可以方便地应用于当地水土保持工作中,显得直观且高效。

4.2 结论

(1) 2000—2010年山西省年均土壤侵蚀总量达 3.58×10^8 t,平均土壤侵蚀模数为 $2\ 287\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,总体上属于轻度侵蚀。若以土壤侵蚀强度高于微度为侵蚀风险地区,则山西省约44%的地区存在水土流失风险,需要加强水土保持工作。

(2) 山西省11个地级市,按平均侵蚀模数可以分为轻度和中度侵蚀两类,其中轻度侵蚀城市依次为长治、晋中、晋城、太原、大同、运城和朔州,中度侵蚀依次为吕梁、临汾、阳泉和忻州。106个县级行政区及市区的土壤侵蚀程度可以分为微度、轻度、中度和强度侵蚀4类。其中,微度侵蚀的县有14个,轻度侵蚀的县有61个,中度侵蚀的县有27个,强度侵蚀的县有4个。山西省具有土壤侵蚀风险的县占到全省

县数的87%。

(3) 地形因子对水力侵蚀引起的土壤侵蚀模数具有最高的贡献率,但因子取得最值处并不一定就是贡献率最值。这说明在土壤水蚀防治的过程中,边坡治理是最重要的一项任务。在规划实施水土保持工程建设时,需要参考不同地区的土壤侵蚀因子的贡献率及其分布状况,以达到最佳保护效果。

参考文献:

- [1] 李天杰,赵焯,张科利,等. 土壤地理学[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [2] Poesen J W A, Hooke J M. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe[J]. *Progress in Physical Geography*, 1997, 21(2): 157-199.
- [3] 谢红霞,郭丽英. 经验水蚀预报模型的国内外研究进展[J]. *中国农业资源与区划*, 2012, 33(2): 1-8.
- [4] 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.
- [5] 江青龙,谢永生,张应龙,等. 京津水源区小流域土壤侵蚀空间模拟[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(8): 1703-1711.
- [6] 焦有梅,张艳鹏. 低碳经济时代的山西转型跨越发展[J]. *能源与节能*, 2011(4): 23-25.
- [7] 孟凡影,付伟涛,杨欢,等. 基于GIS技术的古城小流域土壤侵蚀研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(5): 9-13.
- [8] 王凯,夏燕秋,马金辉,等. 基于CSLE和高分辨率航空影像的孤山川流域土壤侵蚀定量评价[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 26-32.
- [9] 孙禹,哈斯额尔敦,杜会石. 基于GIS的东北黑土区土壤侵蚀模数计算[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(1): 1-7.
- [10] 尚河英,尹忠东,张鹏. 川中不同类型小流域土壤侵蚀特征分析[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(5): 5-8.
- [11] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准(SL190—2007)[S]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [12] 章文波,刘宝元. 基于GIS的中国土壤侵蚀预报信息系统[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 89-92.
- [13] 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): 7-13.
- [14] McCool D K, Brown L C, Foster G R. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. *Transactions of the ASAE: American Society of Agricultural Engineers(USA)*, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [15] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [16] 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.

- [17] 谢红霞. 延河流域土壤侵蚀时空变化及水土保持环境效应评价研究[D]. 西安:陕西师范大学,2008.
- [18] Du H Q, Xue X, Wang T. Mapping the risk of water erosion in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia reach of the Yellow River, China [J]. *Journal of Mountain Science*,2015,12(1):70-84.
- [19] 黄河上中游管理局. 淤地坝设计[M]. 北京:中国计划出版社,2004.
- [20] 水利部水土保持监测中心. 西北黄土高原区土壤侵蚀预报模型开发项目研究成果报告[R]. 北京:水利部水土保持监测中心,2006.
- [21] 中华人民共和国水利部. 第三次全国水土流失遥感调查[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [22] 山西省水利厅,山西省统计局. 山西省第一次全国水利普查公报[J]. *山西水利*,2013(5):3-5.
- [23] 郭建军. 晋城市土壤侵蚀强度分级图编制[J]. *中国水土保持*,2007(12):20-22.
- [24] 魏信,乔玉良,王鹏. 自然生态环境遥感动态监测与GIS分析评价:以山西“煤田之乡”的乡宁矿区为例[J]. *地球信息科学学报*,2009,11(6):111-118.
- [25] 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.
- [26] 瞿明凯,李卫东,张传荣,等. 地理加权回归及其在土壤和环境科学上的应用前景[J]. *土壤*,2014,46(1):15-22.
- [27] 郭龙,张海涛,陈家赢,等. 基于协同克里格插值和地理加权回归模型的土壤属性空间预测比较[J]. *土壤学报*,2012,49(5):1037-1042.

~~~~~

(上接第57页)

- [5] 路鹏,黄道友,宋变兰,等. 亚热带红壤丘陵典型区土壤全氮的空间变异特征[J]. *农业工程学报*,2005,21(8):181-183.
- [6] 姜勇,张玉革,梁文举,等. 沈阳市郊耕地土壤交换性锰含量的空间变异性[J]. *土壤*,2004,36(1):61-64.
- [7] 杨美玲,王雪梅,罗梦媛. 基于GIS的库车县耕层土壤养分空间变异研究[J]. *水土保持研究*,2015,22(1):61-65.
- [8] 孙波,赵其国,闫国年. 低丘土壤肥力的空间变异[J]. *土壤学报*,2002,39(2):190-198.
- [9] Zhang S R, Sun B, Zhao Q G, et al. Temporal-spatial variability of soil organic carbon stocks in a rehabilitating ecosystem[J]. *Pedosphere*,2004,14(4):501-508.
- [10] 陈文辉,谢高地,卓庆卿. 农田基础环境信息空间变异性分析[J]. *生态学报*,2004,24(2):347-353.
- [11] 谢颂华,莫明浩,涂安国,等. 自然降雨条件下红壤坡面径流垂向分层输出特征[J]. *农业工程学报*,2014,30(19):132-138.
- [12] Mclay C D, Dragten R, Sparling G, et al. Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: a comparison of three approaches [J]. *Environmental Pollution*,2001,115(2):191-204.
- [13] Waddell J, Guffa S C, Moncrief J R, et al. Irrigation-and-nitrogen-management impacts on nitrate leaching under potato [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000,29(1):251-261.
- [14] Alberts E E, Moldenhauer W C. Nitrogen and phosphorus transported by eroded soil aggregates[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1981,45(2):391-396.
- [15] 谢小立,王凯荣. 红壤坡地雨水产流及其土壤流失的垫面反应[J]. *水土保持学报*,2002,16(4):37-40.
- [16] 刘洋,张展羽,张国华,等. 天然降雨条件下不同水土保持措施红壤坡地养分流失特征[J]. *中国水土保持*, 2007,20(12):14-16.
- [17] 李新虎,张展羽,杨洁,等. 红壤坡地不同生态措施地下径流养分流失研究[J]. *水资源与水工程学报*,2010,21(2):83-86.
- [18] Udom B E, Ogunwole J O. Soil organic carbon, nitrogen and phosphorus distribution in stable aggregates of an Ultisol under contrasting land use and management history[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*,2015,178(3):460-467.