

基于 GIS 的泾河北洛河上游重点治理区 土壤侵蚀潜在危险度评价

王凯¹, 马金辉¹, 夏燕秋¹, 党俊肖^{1,2}, 刘飞¹

(1. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 西安通信学院, 陕西 西安 710106)

摘要: [目的] 对泾河北洛河上游重点治理区土壤侵蚀潜在危险度进行评价, 为该区土壤侵蚀研究提供参考。[方法] 在 GIS 支持下, 利用高分辨率遥感影像土地利用解译结果, 采用中国土壤流失方程(CSLE)与抗蚀年限法相结合, 同时利用土壤侵蚀潜在危险度指数(SEPDI)对不同坡度地区或地类土壤侵蚀潜在危险度的大小进行评价。[结果] 利用 CSLE 定量计算得到陕西省吴起县的年均侵蚀模数为 $1\ 317.5\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 属轻度侵蚀, 其土壤侵蚀潜在危险度也较小, 以无险型和轻险型为主, 平均 SEPDI 值为 1.25。[结论] 研究区内大于 25° 的坡度范围将是今后重点治理的区域; 另外研究区内人为水土流失比较严重, 建议适当减少工矿用地以及建筑用地的开挖量。

关键词: 高分辨率遥感影像; 土壤侵蚀; 危险度评价; 抗蚀年限; 空间分析; 土壤侵蚀潜在危险度指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)02-0343-06

中图分类号: S157.1

文献参数: 王凯, 马金辉, 夏燕秋, 等. 基于 GIS 的泾河北洛河上游重点治理区土壤侵蚀潜在危险度评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 343-348. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.063

Evaluation of Potential Soil Erosion Risk in Key Harnessing Areas of Jinghe and Beiluo River Upstream Based on GIS

WANG Kai¹, MA Jinhui¹, XIA Yanqiu¹, DANG Junxiao^{1,2}, LIU Fei¹

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Xi'an Communication College, Xi'an, Shaanxi 710106, China)

Abstract: [Objective] The potential soil erosion risk in the key harnessing areas of Jinghe and Beiluo River upstream was assessed to provide references for soil erosion researches. [Methods] Based on the interpretation results of high-resolution remote sensing images and the assistant of GIS, the Chinese soil loss equation and the method of soil anti-erosion years were used to assess the potential risk of lands with different slope gradient and land use type by SPEDI index. [Results] The average soil erosion modules of Wuqi County was $1\ 317.5\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, which belonged to slight erosion level. The risk was assessed at slight or no danger level, and the average SPEDI is 1.25. [Conclusion] In some districts, soil erosion might be serious especially when the slope is larger than 25 degrees, and these districts need to be intensively harnessed in the future. In addition, the excavation work of mine and construction of land were proposed to be diminished because most serious soil erosion was caused by human.

Keywords: high-resolution remote sensing images; soil erosion; potential hazard degree evaluation; anti-erosion years; spatial analysis; soil potential erosion danger index

土壤侵蚀潜在危险度是指生态系统失衡后出现的土壤侵蚀危险程度^[1], 主要指有效土层厚度完全被侵蚀掉所需时间的危险程度分级, 有效土层越薄, 抗蚀年限越短, 土壤潜在危险度越大。根据水利部《土

壤侵蚀分类分级标准(2007年)》规定, 评估和预测在无明显土壤侵蚀发生地区发生侵蚀以及在已经发生土壤侵蚀的地区侵蚀加剧的可能性大小是土壤侵蚀危险度评价的主要目的。从这个概念可以看出, 土壤

收稿日期: 2014-06-11

修回日期: 2014-09-27

资助项目: 国家国际科技合作专项“基于干涉测量和物联网技术的甘肃南部地质灾害监测预警”(2013DFE23030); 甘肃省民生科技计划项目“天水南部山区地质灾害监测预警、生态—经济发展研究与集成示范”(1503FCME006)

第一作者: 王凯(1990—), 男(汉族), 湖北省黄冈市人, 硕士研究生, 研究方向为环境定量遥感。E-mail: 350698431@qq.com。

通信作者: 马金辉(1964—), 男(回族), 甘肃省天水市人, 博士, 副教授, 主要从事环境建模方面的研究。E-mail: majh@lzu.edu.cn。

侵蚀危险程度实际上包含了土壤侵蚀的现状危险度和潜在危险度两层含义。利用土壤侵蚀潜在危险度对区域进行评估与预测,不仅对保护土地资源及环境系统,同时对土地经营、农业开发及经济建设都具有预防预警的重大意义^[2]。国内外土壤侵蚀潜在危险度的研究大多集中在土壤侵蚀强度和土壤侵蚀潜在危险度方面,在这些研究中方法各有不同。国外主要采用专家评分法和基于模型的方法进行研究^[3-5]。而国内常用的方法包括抗蚀年限法和侵蚀因子权重评价法(后者包括基于 USLE 的评价方法、模糊综合评价法、层次分析及改进的层次分析法、加权重叠排序方法以及灰度关联度分析法)^[6-8]。但目前国内大多主要是基于通用土壤流失方程(USLE)以及中低分辨率遥感影像进行土壤侵蚀及其潜在危险度评价,评价结果可靠度相对不高。因此,本研究基于前人的研究基础上,以泾河北洛河上游治理区的陕西省吴起县为例,尝试利用高分辨率遥感影像,并结合适用于中国实际的中国土壤流失方程(CSLE)与抗蚀年限法,以达到更准确、更可靠的评价与分析;其准确性和可靠性主要表现在 4 个方面:(1)利用 CSLE 模型与高分辨率遥感影像结合进行土壤侵蚀定量估算,充分考虑了生物措施、工程措施和耕作措施对土壤侵蚀和水土流失过程 and 结果的影响;(2)考虑到我国地形地貌和美国的差异,CSLE 对陡坡地形因子的改进,使 LS 因子更能充分反映中国实际;(3)另外,国外土壤可蚀性实测值与中国实测值之间存在着明显的差异,本文对可蚀性因子进行了修正,使模型更适合中国实际;(4)就土壤侵蚀潜在危险度计算方法相比较而言,侵蚀因子权重评价法具有一定的主观任意性,而抗蚀年限法评价过程相对较简单且评价结果直观、可信度高^[9]。

1 研究区概况

吴起县位于陕西省延安市西北部,位于东经 107°38′57″—108°32′49″,北纬 36°33′33″—37°24′27″之间,海拔高度在 1 233~1 809 m 之间,总土地面积为 3 791.5 km²。研究区内地面主要组成物质为黄土,机械成份比较均一,以粉砂为主,且黏力较低。区内土壤类型主要有黄绵土、淤土等,其中黄绵土面积占 90%以上,是主要的耕种和被侵蚀的主体,其发育在黄土母质上,但因其母质易分散,水土流失严重。该县多年平均降水量为 441.0 mm,最大年降水量 787.5 mm(1964 年),最小年降水量 278.1 mm(1965 年);降水年际变化大,且年内分配极不均匀,汛期 7—9 月占全年降水量的 70%,且多以暴雨形式出现,

是形成高含沙洪水和产生水土流失的主要原因。吴起县地处于山区与黄土丘陵沟壑区的交接地带,境内地貌复杂,地形破碎,水土流失严重;境内水土流失以水蚀为主,风蚀次之。该县是一个自然灾害多发的县,恶劣的自然条件和严重的水土流失使该县自然灾害种类多,出现频率高,严重影响了县域社会经济的发展。

2 研究方法

2.1 数据来源

采用的数据及数据来源主要包括:(1)吴起县及其周边 30 km 范围内的 29 个气象站点,每个站点包含有从 1952—2013 年(62 a)期间的年、月降雨数据。(2)2012 年 12 月拍摄的 2.1 m 高分辨率航天遥感影像(资源 3 号卫星)和 5 m 分辨率 DEM 数据(均来源于全国水土流失动态监测与公告项目)。(3)联合国粮农组织(FAO)、国际应用系统分析研究所(IIASA)、荷兰 ISRIC-World Soil Information、中国科学院南京土壤研究所(ISSCAS)、欧洲委员会联合研究中心(JRC)于 2009 年 3 月共同发布的 1:500 万比例尺的 1 km 格网世界土壤数据库(简称 HWSD)土壤类型图、土层厚度及土壤容重数据。

2.2 土壤侵蚀潜在危险度计算

抗蚀年限法是根据受蚀土壤扣除临界土层的有效厚度和平均侵蚀深度的比值,计算出该土壤表层所能承受侵蚀的年限,再根据水利部颁布的土壤侵蚀危险度分级标准,按照土壤的抗蚀年限将土壤侵蚀危险度划分等级。抗蚀年限法主要包括 3 个步骤:土壤侵蚀模数的计算、土壤抗蚀年限的估算、土壤侵蚀危险度分级以及土壤侵蚀潜在危险度指数的计算。

2.2.1 土壤侵蚀量的计算 研究区内主要以水蚀为主,对土壤侵蚀量的计算采用的是中国土壤流失方程 CSLE(Chinese soil loss equation),模型公式为:

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

式中:A——年单位面积的土壤侵蚀模数[t/(hm²·a)];R——降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm²·h·a)];K——土壤可蚀性因子[t·h/(MJ·mm)];L——坡长因子;S——坡度因子;B——生物措施因子;E——工程措施因子;T——耕作措施因子。依据 DEM 的分辨率大小,将上述各因子均重采样成 5 m 栅格图进行叠加分析得到土壤侵蚀空间分布结果图。

(1)降雨侵蚀力因子(R)。采用 Wischmeier^[10]提出的基于多年的月平均降雨量和多年的年平均降雨量经验公式,得到研究区及周边各气象站点的降雨侵蚀力因子 R 值,并利用反距离加权内插法生成研究区降雨侵蚀力 R 值图。

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \lg \frac{(\rho_{m_i})^2}{\rho_m} - 0.8188)} \quad (2)$$

式中: ρ_m ——多年的月平均降雨量(mm); ρ_{m_i} ——多年的年均降雨量(mm)。

(2) 土壤可蚀性因子(K)。K 是一项评估土壤

$$K_{EPIC} = \{0.2 + 0.3 \exp[0.0256 S_{AN} (1 - \frac{S_{IL}}{100})]\} \times (\frac{S_{IL}}{C_{LA} + S_{IL}})^{0.3} \times \dots, \\ \left[1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}\right] \times \left[1.0 - \frac{0.7SN_1}{SN_1 + \exp(-5.51 + 22.9SN_1)}\right] \quad (3)$$

式中: S_{AN} , S_{IL} , C_{LA} , C ——砂粒、粉粒、黏粒和有机碳含量(%), 其中 $SN_1 = 1 - S_{AN}/100$ 。

由于国外土壤可蚀性实测值与中国实测值之间存在着明显的差异, 国外关于土壤可蚀性估算的研究成果不能直接在中国使用。根据张科利等^[12]通过在全国建立的 6 个测点(其中包括西北黄土高原的陕西绥德), 对实测值与观测值进行比较得出估算值明显大于实测值, 同时还得出实测值与观测值之间有着良好的线性关系, 为此提出了针对国外各模型的观测值的订正模型, 采用 EPIC 修订模型对上述模型的估算值进行修订, 得到修订后 K 值图。

$$K = -0.01386 + 0.51575 K_{EPIC} \quad (4)$$

(3) 地形因子(LS)。地形因子是指坡度因子(S)与坡长因子(L)。本研究在坡度因子(S)的提取中, 当坡度 θ 小于等于 5° 时, 采用 McCool 等^[13]提出的坡度因子公式, 当坡度 θ 不小于 5° 时, 采用的是刘宝元^[14]在黄土高原建立的坡度坡长因子计算方法, 对于坡长因子(L)的计算, 采用的是维希迈尔和史密斯^[10]提出的经验公式。

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.3 \quad (0 \leq \theta < 5^\circ) \quad (5)$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.05 \quad (5^\circ \leq \theta < 10^\circ) \quad (6)$$

$$S = 21.9 \sin \theta - 0.96 \quad (\theta \geq 10^\circ) \quad (7)$$

表 1 不同水土保持措施耕作因子 T 值

土地利用类型	梯田	鱼鳞坑	水浇地及早地	坝滩地	林灌草	果园	苗圃
T 因子值	0.123	0.187	0.03	0.3	1.0	0.7	0.5
土地利用类型	农村居民地	城镇居民地	商服及公共用地	铁路及公路用地	水工建筑用地	其他水域及水利设施	裸地及沙地
T 因子值	1.0	0	0	0.3	1.0	0	1.0

2.2.2 土壤抗蚀年限的估算 土壤抗蚀年限是受蚀土壤扣除临界土层的有效土层厚度与年均侵蚀深度的比值, 即:

$$Y_c = l_0^i \times (H - 10) \times \frac{D}{A} \quad (9)$$

式中: Y_c ——土壤抗蚀年限(a); H ——土层厚度(cm); D ——土壤容重(g/cm^3); A ——年侵蚀模数 [$t/(km^2 \cdot a)$]; l_0^i ——单位换算系数; 10——临界土层厚度(cm)。

2.2.3 土壤侵蚀潜在危险度分级 根据水利部制定

遭受侵蚀敏感程度的指标。首先以世界土壤数据库(简称 HWSD)中的土壤类型图为数据基础, 运用 Williams 等^[11]在 EPIC 模型中发展的土壤可蚀性因子估算方法, 得到研究区内不同土壤类型的可蚀性因子估算值 K_{EPIC} 。

$$L = (\frac{\gamma}{22.13})^m \quad (8)$$

式中: γ ——坡长; m ——可变的坡长指数, 其取值参考郭建英等退耕还林工程建设对吴起县土地利用/覆被变化及其土壤侵蚀的影响: 当坡度小于 0.57° 时, 取 0.2; 大于等于 0.57° , 小于 1.72° 时, 取 0.3; 大于等于 1.72° , 小于 5.14° 时, 取 0.4; 大于等于 5.14° 时, 取 $0.5^{[15]}$ 。

(4) 水土保持因子(BET)。CSLE 模型将水土保持因子区分为生物措施因子(B)、工程措施因子(E)以及耕作措施因子(T)。

生物措施因子(B)和工程措施因子(E)的计算方法均参考谢红霞等^[16]对黄土高原的研究, 利用遥感影像解译出的土地利用类型图(经过外业实地调绘成果)和基于归一化植被指数 NDVI 反演出的植被盖度图, 赋予不同土地利用类型和不同植被盖度下的 B 值, 得到研究区 B 值分布图, 并根据解译出的工程措施类型面积计算出研究区的 E 因子值; 同时综合前人研究结果^[17-19], 对水土保持措施的耕作因子 T 赋值, 没有耕作措施的地方赋值为 1, 得到研究区 T 值分布图(表 1)。最后通过地图代数计算出研究区水土保持因子(BET)值分布图。

标准, 土壤侵蚀潜在危险度分为 5 级, 即无险型、轻险型、危险型、极险型和毁坏型(表 2)。

表 2 水蚀区危险度分级

级别	类型	临界土层的抗蚀年限/a
I	无险型	>1 000
II	轻险型	100~1 000
III	危险型	20~100
IV	极险型	<20
V	毁灭性	裸岩、明沙、土层不足 10 cm

2.2.4 土壤侵蚀潜在危险度指数 土壤侵蚀潜在危险度指数(index of soil erosion potent danger, SEPDI)是为了表明某一地区或地类土壤侵蚀潜在危险性的大小,根据该地区或地类土壤侵蚀潜在危险度不同等级面积的加权法进行综合评价,其计算方法为:

$$SPEDI = (M_1 + 2M_2 + 3M_3 + 6M_4 + 9M_5) / (M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5) \quad (10)$$

式中: M_1 ——无险型(I)的面积; M_2 ——轻险型(II)的面积; M_3 ——危险型(III)的面积; M_4 ——极险型

(IV)的面积; M_5 ——毁坏型(V)的面积。

SEPDI 值范围为 1~9,其值越大表明该区域或地类土壤侵蚀潜在危险性越大。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀计算结果

通过 CSLE 模型,根据上述各因子的计算方法,均重采样得到吴起县各因子值的 5 m 分辨率栅格分布图,其各因子值的分布范围及均值详见表 3。

表 3 吴起县土壤侵蚀各因子值范围分布

CSLE 因子	降雨侵蚀力因子 $R/$ ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	土壤可蚀性因子 $K/$ ($\text{t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)	地形因子 LS	水保措施因子 BET
分布范围	1 824.0~2 552.5	0.015 4~0.076 5	0.02~180.41	0.000 86~0.959 2
平均值	2 369.2	0.038 5	12.59	0.157

根据计算出的吴起县各因子栅格分布图,利用 CSLE 模型计算出研究区 2012 年 5 m 分辨率的土壤侵蚀现状分布图(图 1)。吴起县 2012 年总侵蚀量为 $5.00 \times 10^6 \text{ t}$,年均侵蚀模数为 $1 317.5 \text{ t}/\text{km}^2$ 。依据土壤侵蚀分类分级标准进行分级,其中微度侵蚀年侵蚀总量 $7.35 \times 10^5 \text{ t}$,年均侵蚀模数为 $272.6 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;轻度侵蚀年侵蚀总量 $9.46 \times 10^5 \text{ t}$,年均侵蚀模数为 $1 574.1 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;中度侵蚀年侵蚀总量 $9.74 \times 10^5 \text{ t}$,年均侵蚀模数为 $3 486.7 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;强烈侵蚀年侵蚀总量 $6.71 \times 10^5 \text{ t}$,年均侵蚀模数为 $6 248.5 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;极强烈侵蚀年侵蚀总量 $7.93 \times 10^5 \text{ t}$,年均侵蚀模数为 $10 661.8 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;剧烈侵蚀年侵蚀总量 $8.76 \times 10^5 \text{ t}$,年均侵蚀模数为 $24 815.9 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。整体而言,研究区内以微度和轻度侵蚀为主(图 2)。

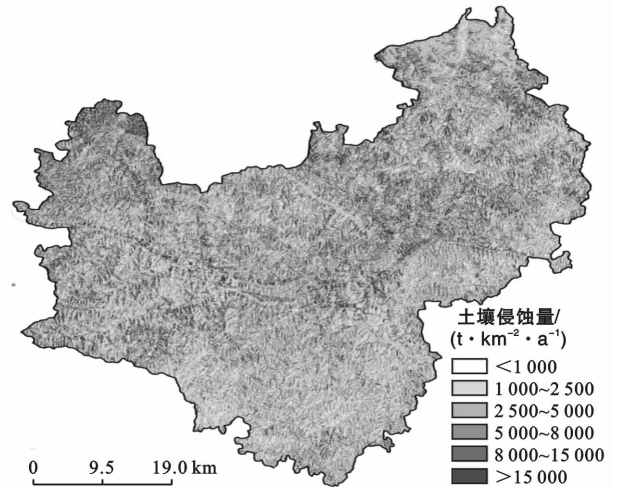


图 1 泾河北洛河上游重点治理区吴起县 2012 年土壤侵蚀现状

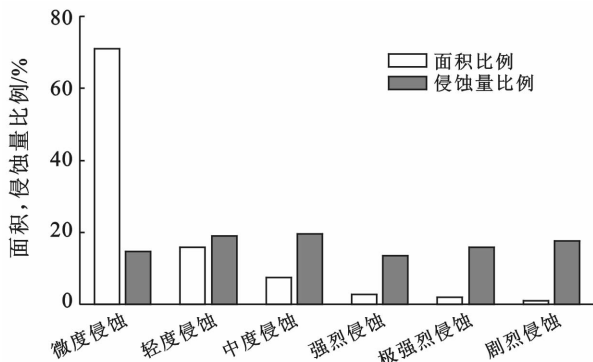
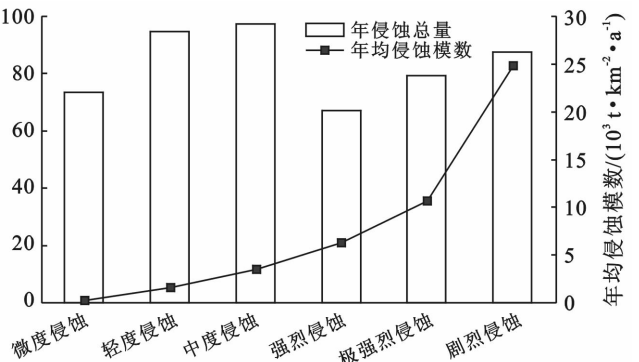


图 2 吴起县 2012 年土壤侵蚀分布情况

3.2 土壤侵蚀潜在危险度计算结果

在计算土壤侵蚀结果的基础上,结合土壤类型图属性表中的土壤有效厚度和土壤容重数据,根据土壤



抗蚀年限估算方法,估算出吴起县抗蚀年限分布,按水利部标准(表 2)将土壤侵蚀潜在危险度分为 4 级(即无险型、轻险型、危险型以及极险型,该区域裸岩、

明沙较少,基本没有毁坏型),生成土壤侵蚀潜在危险度分级图(图 3)。由图 3 可以看出,整个区域的土壤侵蚀潜在危险性比较小,以无险型和轻险型为主。其中无险型占总面积的 76.47%,轻险型占总面积的 22.36%,危险型占总面积的 1.16%,极险型占总面积的 0.01%。依据 3.2.4 节计算出吴起县土壤侵蚀潜在危险度指数为 1.25,也就表明该区域总危险度不大。

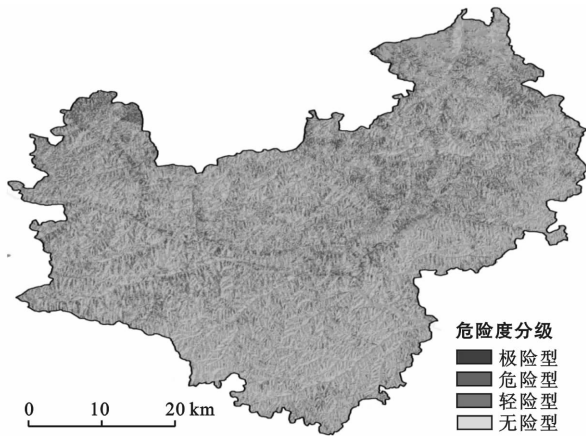


图 3 泾河北洛河上游重点治理区吴起县 2012 年土壤侵蚀潜在危险度分级

3.3 土壤侵蚀潜在危险度分析

3.3.1 不同坡度的土壤侵蚀潜在危险度分析 先对研究区坡度图进行坡度分级得到坡度分级图,然后与抗蚀年限图进行叠加分析,得出各个坡度级别的土壤侵蚀潜在危险度分布(图 4)。由图 4 可得,随着坡度的增加,其土壤侵蚀潜在危险性指数增大;其中坡度在 0~25° 范围带内,土壤侵蚀潜在危险性指数小于研究区平均危险指数(1.25),坡度大于 25° 时,其土壤侵蚀潜在危险度指数为达 1.33,高于整个研究区的平均危险指数。所以在今后的水土流失治理过程中,应着重对坡度大于 25° 的裸地等土地利用类型进行综合治理,以减少其土壤侵蚀潜在危险性。

3.3.2 不同土地利用类型土壤侵蚀潜在危险度分析 将吴起县土地利用现状图与土壤侵蚀潜在危险度分级结果进行叠加分析,得出各土地利用类型的土壤侵蚀潜在危险度分布(图 5)。由图 5 可得,吴起县各土地利用类型为土壤侵蚀潜在危险度指数依次表现为:裸地>居民点及交通工矿用地>荒草地>坡耕地>平均值(1.25),其中裸地的危险指数高达 2.068 而水浇地、水域及水利设施、旱地、鱼鳞坑及梯田等的潜在危险性比较小。梯田的 SPEDI 值仅为 1.012,而坡耕地的 SPEDI 值为 1.428,对比可见坡改梯措施对于减弱土壤侵蚀潜在危险性将具有明显的作用;其次林

地(包括乔木林、灌木林、疏林地以及鱼鳞坑)的 SPEDI 值也较小,间接说明了该区域近年来实施的退耕还林政策也取得了良好的效果;另外居民点及交通工矿用地的潜在危险性比较大,由此可见研究区内人为水土流失比较严重。

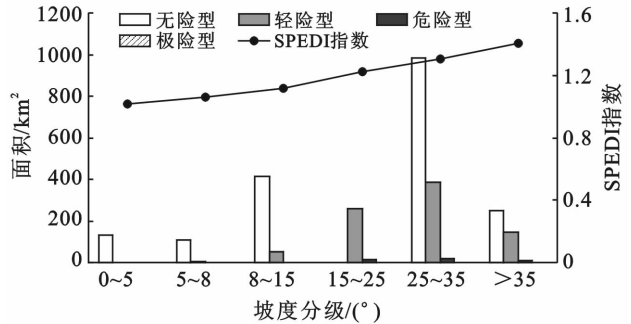


图 4 吴起县各个坡度等级土壤侵蚀潜在危险度分布

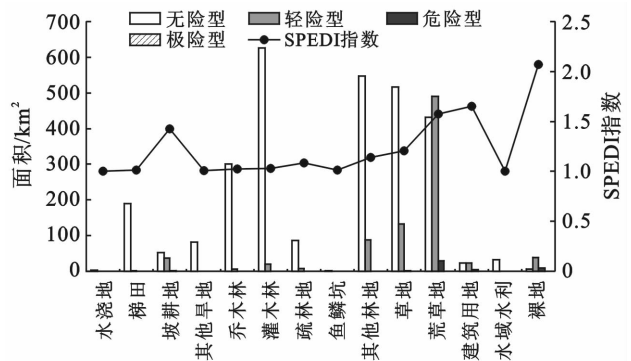


图 5 吴起县不同土地利用土壤侵蚀潜在危险度分布

4 结论

(1) 本研究采用的数据有高分辨率遥感影像以及时序性较强的多站点降雨数据等,精度比较高,为 CSLE 模型中相应因子的计算精度提供了一定的保障;其次所采用的方法在分级(水利部颁布的水土流失分类分级标准)上比较科学,没有人为定级的主观性;另外借助 GIS 丰富的空间分析功能可以快速有效地进行数据处理、计算和分析,评价过程简单且评价结果直观。

(2) 研究区内土壤侵蚀的年均侵蚀模数为 1 317.5 t/(km² · a),属轻度侵蚀范畴;其土壤侵蚀潜在危险性也较小,以无险型和轻险型为主;

(3) 退耕还林以及“坡改梯”政策对于减弱研究区的水土流失具有明显的作用,研究区内可继续加强这两项政策的实施;

(4) 研究区内大于 25° 的坡度范围将是今后重点治理的区域;另外研究区内人为水土流失比较严重,建议适当减少工矿用地以及建筑用地的开挖工作。

[参 考 文 献]

- [1] 孙希华, 闫业超. 济南市土壤侵蚀潜在危险度分级及侵蚀背景的空间分析[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 80-83.
- [2] 闵婕, 杨华, 赵纯勇. GIS 支持下的土壤侵蚀潜在危险度分级方法研究及应用[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4): 61-64.
- [3] Zuidam R A V, Zuidam-Cancelado F I V. Terrain Analysis and Classification Using Aerial Photographs: A Geomorphological Approach [M]. International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITC), 1979.
- [4] CORINE. Soil Erosion Risk and Important Land Resources in the Southern Regions of the European Community[R]. Luxembourg: EUR13233, 1992.
- [5] Jong S M D, Paracchini M L, Bertolo F, et al. Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data[J]. Catena, 1999, 37(3/4): 291-308.
- [6] 郭志民, 陈志伟. 应用 GIS 方法对土壤侵蚀潜在危险性进行评价及其时空分布特征研究[J]. 福建水土保持, 1999, 11(4): 40-45.
- [7] 史志华, 蔡崇法, 蔡强国, 等. GIS 支持下土壤侵蚀潜在危险度的分级研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 11(2): 190-193.
- [8] 万军, 蔡运龙, 路云阁, 等. 喀斯特地区土壤侵蚀风险评价: 以贵州省关岭布依族苗族自治县为例[J]. 水土保持研究, 2003, 10(3): 148-153.
- [9] 黄金, 蔡强国, 陈浩, 等. 土壤侵蚀危险度评价方法研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(2): 143-147.
- [10] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning [M]. US Washington D C: Agriculture Handbook No 537, 1978.
- [11] Peele T C. The relation of certain physical characteristics to the erodibility of soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1938(S): 97-100.
- [12] 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.
- [13] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. 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.
- [14] Liu Baoyuan, 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.
- [15] 郭建英, 李锦荣, 刘铁军, 等. 退耕还林工程建设对吴起县土地利用/覆被变化及其土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 1-6.
- [16] 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]. 陕西 西安: 陕西师范大学, 2008.
- [17] 李勋贵, 魏霞. 区域土壤侵蚀演化风险分析: 以泾河流域为例[J]. 地理研究, 2011, 30(8): 1361-1369.
- [18] 石生新, 蒋定生. 几种水土保持措施对强化降水入渗和减沙的影响试验研究[J]. 水土保持研究, 1994, 9(1): 82-88.
- [19] 李斌兵, 郑粉莉, 龙栋材, 等. 基于 GIS 纸坊沟小流域土壤侵蚀强度空间分布[J]. 地理科学, 2009, 29(1): 105-110.
- [20] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269-273.
- [21] 渠慎宁, 杨丹辉. 中国废弃物温室气体排放及其峰值测算[J]. 中国工业经济, 2011(11): 37-47.
- [22] 田云, 张俊飏, 李波. 基于投入角度的农业碳排放时空特征及因素分解研究: 以湖北省为例[J]. 农业现代化研究, 2011(6): 752-755.
- [23] Wang Mingxin, Dai Aiguo, Shen Renxin. CH₄ emission from a Chinese rice paddy field[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1990, 4(2): 265-275.
- [24] Cao, M K, Dent J B, Heal O W. Methane emissions from China's paddy land[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1995, 55(1): 129-137.
- [25] Matthews E, Fung I, Lerner J. Methane emission from rice cultivation geographic and seasonal distribution of cultivated areas and emissions[J]. Global Biogeochemistry Cycles, 1991, 5(1): 3-24.
- [26] 田云, 张俊飏, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2097-2105.
- [27] 华坚, 任俊, 徐敏, 等. 基于三阶段 DEA 的中国区域二氧化碳排放绩效评价研究[J]. 资源科学, 2013, 35(7): 1447-1454.
- [28] 马海良, 黄德春, 姚惠泽. 中国三大经济区域全要素能源效率研究: 基于超效率 DEA 模型和 Malmquist 指数[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(11): 38-43.

(上接第 342 页)