

汾河源头地区土壤侵蚀时空变化及其空间自相关分析

冯凌, 张红, 刘光磊, 申小雨

(山西大学 环境与资源学院, 山西 太原 030006)

摘要: [目的] 汾河源头地区是山西省重要的水源涵养地和供水区, 土壤流失严重。研究该区域土壤侵蚀时空变化的目的在于为该流域的水土保持工作提出科学依据。[方法] 采用 2004 和 2009 年 9 月的 SPOT 影像作为数据源, 将 GIS 和 USLE 结合对汾河源头地区土壤侵蚀的时空变化进行研究, 并借助 GeoDa 软件分析了研究区 2009 年土壤侵蚀的空间自相关性。[结果] (1) 从时间变化来看, 2009 年汾河源头地区土壤侵蚀模数较 2004 年有所增加, 中度以上侵蚀的面积占总侵蚀面积的比例也相应增大, 且以极强度侵蚀和剧烈侵蚀增加为主; (2) 从空间上看, 土壤侵蚀程度高的区域分布在流域的东南部, 土壤侵蚀程度低的区域分布在流域的西北部; (3) 降雨和植被覆盖是影响汾河源头地区土壤侵蚀的 2 个主要因子; (4) 除了微度侵蚀和剧烈侵蚀外, 其他侵蚀强度类型向更高层次的侵蚀强度类型转移的面积都远大于向低程度的侵蚀强度类型转移的面积; (5) 空间自相关分析表明, 研究区土壤侵蚀存在一定的正相关和空间集聚, 主要表现为高值与高值集聚, 低值与低值集聚。[结论] 研究区内土壤侵蚀现象不断加剧, 应加强土壤侵蚀治理力度。

关键词: 通用土壤流失方程; 汾河源头地区; 土壤侵蚀; 空间自相关

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)01-0093-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 冯凌, 张红, 刘光磊, 等. 汾河源头地区土壤侵蚀时空变化及其空间自相关分析[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 93-99. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.017

Spatio-temporal Variations of Soil Erosion and Its Spatial Autocorrelation Analysis in Source Area of Fenhe River

FENG Ling, ZHANG Hong, LIU Guanglei, SHEN Xiaoyu

(College of Environment and Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: [Objective] The source area of Fenhe river is one of the most important water source area in Shanxi Province, but soil erosion in this area is severe. The objective of this study is to investigate the spatio-temporal variations of soil erosion in order to provide basis for soil and water conservation in this region. [Methods] We used the SPOT images (September in 2004 and 2009) as data sources, explored the spatio-temporal variations of soil erosion in the source area of Fenhe river based on GIS and USLE. The spatial autocorrelation of soil erosion in 2009 was analyzed by using GeoDa software. [Results] (1) The modulus of soil erosion showed an increasing trend from 2004 to 2009 in the source area of Fenhe river. The eroded land above moderate erosion increased as well, especially, the strong erosion and the severe erosion; (2) Spatially, severe soil erosion distributed in the southeast of the area, while slight soil erosion distributed in the northwest of the area; (3) Rainfall and vegetation cover were the most important factors that influence soil erosion in the area; (4) Except for the slight and severe erosion, the area transformed from the low to high level soil erosion was much larger than the area transformed from the high to low level soil erosion; (5) Spatial autocorrelation analysis revealed that soil erosion in the study area was spatially positive autocorrelated and spatial concentrated. [Conclusion] Soil erosion intensified continuously in the source area of Fenhe river, and soil erosion regulation should be strengthened.

Keywords: universal soil loss equation; source area of Fenhe river; soil erosion; spatial autocorrelation

收稿日期: 2015-01-16

修回日期: 2015-03-26

资助项目: 山西省自然科学基金项目“近 50 年来汾河上游输沙时空变化及成因探索”(2013021031-3); 山西省“十二五”科技重大专项“晋北沙化土地防治的关键技术研究 with 试验示范”(20121101011)

第一作者: 冯凌(1989—), 女(汉族), 山西省柳林县人, 硕士研究生, 研究方向为 GIS 和 RS 应用方面。E-mail: 352391058@qq.com。

通讯作者: 张红(1972—), 女(汉族), 山西省阳泉市人, 博士, 教授, 主要从事区域环境规划与评价。E-mail: zhanghong@sxu.edu.cn。

土壤侵蚀是全球最严重的环境问题之一,严重的土壤侵蚀会引起土壤退化、土地生产力降低、泥石流等山地灾害以及河道淤积而导致洪涝灾害等,严重制约了全球的可持续发展。据估算,全球的土壤侵蚀面积大约为 $1.64 \times 10^7 \text{ km}^2$, 占地球总陆地面积的 10.95%^[1]。20 世纪 70 年代,美国学者 Wischmeier 提出了通用土壤流失方程 USLE(universal soil loss equation),该方程囊括了与土壤侵蚀相关的主要因子,包括降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、地形因子、植被覆盖因子和水土保持措施因子,所以该方程在世界范围内被广泛应用。但需注意的是,对各地区应用该方程时需要对方程中的各因子做本地化修正,这样才可使结果更精确和可信。

中国在土壤侵蚀方面有很多研究,尤其是在 20 世纪 70 年代末以后发展特别迅速。傅伯杰等^[2]将景观生态学的理论与土壤侵蚀过程相结合,提出了多尺度土壤侵蚀评价指数。李月臣等^[3]利用 GIS 和 USLE 分析了土壤侵蚀各因子对三峡库区(重庆段)土壤侵蚀敏感性的影响程度,并进行了综合评价。邱阳等^[4]采用土壤侵蚀模型 LISEM(limburg soil erosion model)模拟计算了黄土丘陵区大南沟小流域的土壤侵蚀量,进而分析了土壤侵蚀与各环境因子的相关性。李爱农等^[5]运用 3S 技术和 RUSLE 计算了岷江上游 2000,2005,2010 年的土壤侵蚀量,并分析了土壤侵蚀的空间分布。李阳兵等^[6]采用 RS 和 GIS,分析了重庆市主城区不同地质条件下的土壤侵蚀时空变异特征。这些研究都在不同尺度、不同区域探讨了土壤侵蚀的应用。

汾河源头地区位于中国土壤侵蚀严重的黄土高原,大部分属土石山区,山高坡陡,沟深滩窄,耕地奇缺,人们为求生存,不得不过度开垦,给这一地区的生态环境造成了极大破坏,也对人类的生存构成严重威胁。基于此,本研究拟对该流域 2004,2009 年两期的土壤侵蚀量进行评估,得到研究区土壤侵蚀量的空间分布,并对两期的土壤侵蚀强度的时空变化进行分析,并采用空间自相关分析,检验某一区域单元土壤侵蚀与邻近区域单元土壤侵蚀的相关性,以期揭示各区域单元土壤侵蚀的空间联系,为有效地推进该流域的水土保持和生态环境治理工作提出科学依据。

1 研究区概况

汾河位于山西省境内,是黄河的第 2 大支流,全长 716 km,流经山西 19 个县市,全流域面积 39 471 km², 占全省总面积的 1/4^[7]。汾河发源于山西省宁武县东寨镇管峪山南麓,流经东寨镇,入静乐县境,流经太原市、介休市、灵石县、霍州市、临汾市、河津市等地^[8]。

汾河源头地区在东经 111°50′—112°28′,北纬 38°28′—38°59′,总面积为 1 701.60 km²。涉及宁武、神池及静乐 3 个县,属于山西省忻州市行政管辖范围。该地区地势西北高,东南低,以山地丘陵为主,气候为温带半干旱大陆性季风气候区,降水的年度及年内分布不均,主要分布在 7,8,9 月,也是暴雨最为频繁的时段,容易引发土壤侵蚀。研究区 DEM 如图 1 所示。

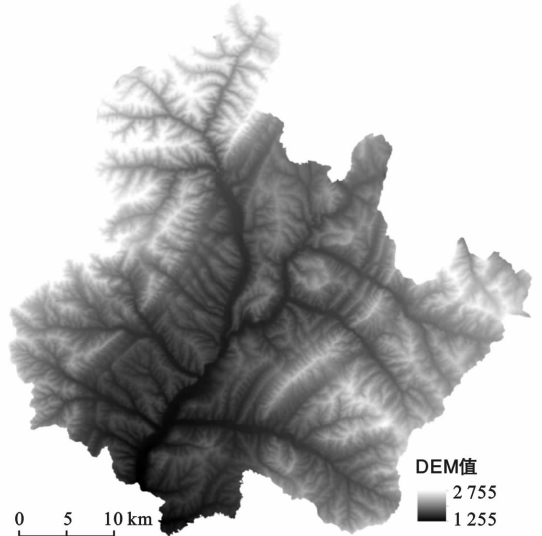


图 1 汾河源头地区 DEM 数据

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

本文主要采用研究区 2004 和 2009 年 9 月的 SPOT 遥感影像,空间分辨率为 2.5 m,由山西省林业调查规划院提供,在 ArcGIS 10 支持下,将矢量图转为栅格图,对研究区进行了土壤侵蚀模数计算与分析;辅助数据有研究区的 DEM(栅格大小为 27.66 m)、1:50 000 的流域土地利用图、研究区 2004 和 2009 年的森林 II 类清查资料、2004 和 2009 年的土壤类型图、2011 年的水文站点图、研究区 2004 和 2009 年的水文站年降雨数据、2004 和 2009 年的水土保持措施资料、2004 和 2009 年的社会经济资料等。

土地利用数据是根据研究区的区域特点,对研究区 2004 和 2009 年 2 期的 SPOT 遥感影像进行监督分类解译得到,分为有林地、灌木林地、其他林地、草地、裸地、耕地、水域、居民用地和工矿用地等。经验证,其分类精度可达 90%以上。DEM 是由 1:50 000 的地形图等高线数字化插值而来。

2.2 研究方法

2.2.1 通用土壤流失方程 对国内外土壤侵蚀模型分析和比较的基础上,采用在世界范围内广泛应用的通用土壤流失方程 USLE,并对方程中各因子进行本

地化修正,建立了汾河源头地区的土壤侵蚀估算模型。其基本形式为^[9-10]:

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

式中: A ——年平均土壤侵蚀量 $[t/(km^2 \cdot a)]$;
 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 $[(t \cdot h)/(MJ \cdot mm)]$;
 LS ——地形因子(坡长、坡度因子);
 C ——植被覆盖因子;
 P ——水土保持措施因子^[11-12]。各因子的计算方法见下。

(1) 降雨侵蚀力因子 R 。降雨侵蚀力因子 R 是表征降雨侵蚀作用能力大小的指标,一般由降雨量、降雨强度等计算得出^[13-14]。本研究采用马志尊^[15]在海河流域太行山区 R 值的计算公式:

$$K = [0.2 + 0.3e^{-0.256S_a(1-\frac{S_i}{100})}] \left(\frac{S_i}{C_i + S_i}\right)^{0.3} \left(1.0 - \frac{0.25C}{C + e^{3.72 - 2.96C}}\right) \left[1.0 - \frac{0.7\left(1 - \frac{S_a}{100}\right)}{\left(1 - \frac{S_a}{100}\right) + e^{-5.51 + 22.9\left(1 - \frac{S_a}{100}\right)}}\right] \quad (3)$$

式中: S_a ——沙粒含量(%); S_i ——粉砂含量(%);
 C_i ——黏粒含量(%); C ——有机碳含量(%)。

在 ArcMap 软件中将相应属性值带入公式进行字段计算,或者将相应属性分别导出成单一栅格图层,最后在栅格计算器(raster calculator)中使用公式

表 1 汾河源头地区不同土壤类型下土壤可蚀性因子 K 值均值

土壤类型	棕壤	栗钙土	褐土	亚高山草甸土	风沙土	粗骨土	黄绵土
K 值	0.1	0.4	0.2	0.2	0.9	0.6	0.7

(3) 地形因子 LS 。坡长和坡度是地表形态的 2 个重要要素,土壤侵蚀量与它们都呈幂函数关系,可采用下式计算^[18]:

$$LS = (L/22.1)^m (65.41 \sin 2\theta + 4.56 \sin \theta + 0.065) \quad (4)$$

式中: L ——坡长(m); θ ——坡度角(以弧度表示);
 m ——坡度指数,当 $\theta > 5\%$ 时, $m = 0.5$; 当 $\theta > 3.0\%$ 时, $m = 0.4$; 当 $\theta > 1.0\%$ 时, $m = 0.3$; 当 $\theta < 1.0\%$ 时, $m = 0.2$ ^[19]。

(4) 植被覆盖因子 C 。植被覆盖因子 C 的大小可以直接反映地表植被覆盖与土壤侵蚀的关系。当地表植被覆盖率几乎为零时, C 值为 1; 当地表植被覆盖率很高时, C 值为 0, 所以 C 在 0~1 取值。植被覆盖因子 C 一般与土地利用类型和植被覆盖率有关^[20], 因此在土地利用的基础上, 结合植被覆盖率, 确定 C 因子的取值。

本文运用 ArcMap 软件进行图像处理, 获取植被 NDVI 影像图, 进而计算植被覆盖度。由于大部分植被覆盖类型是不同植被类型的混合体, 所以不能采用固定的 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 值, 通常根据 NDVI 的频

$$R = 1.2157 \times \sum_{i=1}^{12} 10 \left(1.5 \times \lg \frac{P_i^2}{P} - 0.8188 \right) \quad (2)$$

式中: P_i ——某水文站年内第 i 月多年平均月降雨量(mm); P ——多年平均年降雨量(mm)。

根据研究区 7 个水文站点 2004 和 2009 年的年降雨量数据, 得到各站点的降雨侵蚀力因子 R 。

(2) 土壤可蚀性因子 K 。土壤可蚀性因子 K 是指标准小区上单位降雨侵蚀指标的土壤侵蚀率^[16], 是 USLE 方程中必不可少的因子。在土壤侵蚀过程中, 土壤的理化性质对土壤侵蚀的发生有着非常重要的影响。 K 值的获取有很多种方法, 本文采用 Williams 等^[17] EPIC(erosion productivity impact calculator)模型中使用的计算公式:

进行栅格图层运算, 生成所需的 K 值栅格图。最后, 按最大最小值法将所得的 K 值栅格图层归一化到 0~1, 得到模型计算所需的最终栅格图层。将该图层与土壤类型图叠加, 计算各土壤类型对应的 K 值均值, 结果如表 1 所示。

率统计表, 计算 NDVI 的频率累积值, 累积频率为 2% 的 NDVI 值为 $NDVI_{soil}$, 累积频率为 98% 的 NDVI 值为 $NDVI_{veg}$ 。

$$C_i = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (5)$$

式中: $NDVI$ ——植被覆盖指数; $NDVI_{veg}$ ——完全植被覆盖地表所贡献的信息; $NDVI_{soil}$ ——无植被覆盖地表所贡献的信息^[17]。

将 C 图层与土地利用类型图叠加, 分别计算各土地利用类型对应的 C 值均值, 并进行归一化, 结果如表 2 所示。

表 2 汾河源头地区不同土地利用类型植被覆盖因子 C 值均值

土地利用类型	C 值	土地利用类型	C 值
丘陵区水田	0.350	稀林地	0.080
山区旱地	0.160	其他林地	0.100
平原旱地	0.350	中覆盖度草地	0.150
丘陵区旱地	0.220	低覆盖度草地	0.240
有林地	0.004	工矿/建设用地	0.200
灌林地	0.060	水域	0.000

(5) 水土保持措施因子 P 。水土保持措施因子 P 是指在其他条件不变的情况下,采取特定保持措施后的土壤侵蚀量与标准小区上的土壤侵蚀量之比^[21-22]。水土保持措施因子可以得出流域内水土保持对土壤侵蚀的影响,一般无任何水土保持措施的土地 P 值为 1,其他情况在 0~1 取值。减少土壤侵蚀的农田管理措施主要有 3 类:一是改变农田的微地形;二是增加农田的地面覆盖;三是改变土壤的物理性状^[23]。

水土保持措施因子 P 与土地利用类型有较大的关系。根据研究区 2004 和 2009 年的水土保持措施资料,并结合实际情况,通过赋值法和归一化处理得到研究区不同土地利用类型的 P 值^[24]。其中按土地利用类型划分,草地、水域和建设用地未采取水土保持措施,故赋值为 1;园地和林地的植被覆盖率高,故赋值为 0.9;旱地的植被覆盖率较低,故赋值为 0.8。通过对研究区的 SPOT 遥感影像进行监督分类,得到研究区的土地利用类型图,经验证,其分类精度可达 90% 以上。然后将相应的 P 值赋给不同的土地利用类型,得到水土保持措施因子 P 值(见表 3)。

表 3 汾河源头地区不同土地利用类型 P 值

土地利用类型	旱地	园地	林地	草地	水域	建设用地
P 值	0.8	0.9	0.9	1	1	1

2.2.2 全局空间自相关 Moran 指数是一种用来度量空间自相关的全局指标,它反映的是空间邻接或空间邻近的区域单元属性值的相似程度。全局 Moran 指数 I 的计算公式如下^[25]:

$$I = \frac{n}{S_0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中: n ——位置的个数; x_i, x_j ——位置 i 和 j 的观测值; \bar{x} ——均值; W_{ij} ——位置 i 和 j 的临近关系,它通过邻接标准或距离标准来度量。

全局 Moran 指数 I 的取值一般为 -1~1,小于 0 表示负相关,等于 0 表示不相关,大于 0 表示正相关。

对于 Moran 指数,可以用标准化统计量 Z 来检验 n 个区域是否存在空间自相关关系, Z 的计算公式为^[25]:

$$Z = \frac{I - E_I}{\sqrt{\text{var}(I)}} \quad (7)$$

式中: $E_I, \text{var}(I)$ ——Moran 指数 I 的均值和方差。当 Z 值为正且显著时,表现为正相关,也就是说相似的观测值(高值或低值)趋于空间集聚;当 Z 值为负且

显著时,表现为负相关,也就是说相似的观测值趋于分散分布;当 Z 值为零时,观测值呈独立随机分布。

2.2.3 局部空间自相关 如果想要知道观测值的局部空间集聚性,或者局部对全局的贡献大小,以及全局评估在多大程度上掩盖了反常的局部状况或小范围的局部不稳定性时,就需要进行局部空间自相关分析^[26]。通常用空间联系的局部指标 LISA(local indicators of spatial association)来揭示空间自相关的空间异质性,而局部 Moran 指数又是其中最常使用的一种指标,其计算公式如下^[25]:

$$I_i = z_i' \sum_j W_{ij} z_j' \quad (8)$$

式中: z_i', z_j' ——经过标准差标准化的观测值。

3 结果与分析

3.1 研究区 2004、2009 年土壤侵蚀总体概况

根据通用土壤流失方程,将影响土壤侵蚀的各因子进行栅格化和空间化后,进行代数运算 $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$,计算得到研究区 2004 和 2009 年的土壤侵蚀模数 A 以及 A 的分布图,并计算得到相应的栅格数和面积。研究区 2004、2009 年土壤侵蚀模数分布见附图 1。2004 年土壤侵蚀模数为 0~68 358 t/(km²·a),2009 年的土壤侵蚀模数为 0~223 957 t/(km²·a),表明 2009 年土壤侵蚀强度高于 2004 年。从空间上来看,土壤侵蚀模数 A 值高的区域分布在汾河源头地区的东南部,土壤侵蚀模数 A 值低的区域分布在汾河源头地区的西北部,且有从东南向西北递减的趋势。

通过把土壤侵蚀模数与研究区汛期的土壤侵蚀数据进行了对比,基本一致,可以为有关部门管理决策提供依据。

根据《土壤侵蚀强度分级标准表》(SL190-96)^[27-28],采用平均侵蚀模数作为侵蚀强度的分级标准。其中微度、轻度、中度、强度、极强度和剧烈侵蚀的标准分别为 <1 000,1 000~2 500,2 500~5 000,5 000~8 000,8 000~15 000 和 >15 000 t/(km²·a)^[29]。将研究区的土壤侵蚀情况定量地分为 6 级,计算得到土壤侵蚀面积及比例(见表 4)。

根据附图 1 及表 4 可以得出以下结果:对汾河源头地区土壤侵蚀模数图的统计结果表明(表 4),汾河源头地区 2004 年土壤侵蚀程度为微度侵蚀的有 97 566.35 hm²,占总侵蚀面积的比重最大,达到 57.34%;土壤侵蚀程度为剧烈侵蚀的有 3 051.71 hm²,占总侵蚀面积的比重最小,只有 1.79%。汾河源头地区 2009 年土壤侵蚀程度为微度侵蚀的有 77 899.76 hm²,占总侵蚀面积的比重最大,达到

45.78%;土壤侵蚀程度为强度侵蚀的有 14 776.97 hm², 占总侵蚀面积的比重最小,为 8.68%。另外,除微度

侵蚀和轻度侵蚀的面积减少外,中度侵蚀、强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀的面积均有不同程度的增加。

表 4 汾河源头地区土壤侵蚀面积及比例

年份	项目	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀	剧烈侵蚀
2004	侵蚀面积/hm ²	97 566.35	33 593.41	19 877.90	9 066.68	6 992.89	3 051.71
	占总面积比例/%	57.34	19.74	11.68	5.33	4.11	1.79
2009	侵蚀面积/hm ²	77 899.76	23 543.89	22 757.62	14 776.97	15 681.18	15 489.53
	占总面积比例/%	45.78	13.84	13.38	8.68	9.22	9.10
2004—2009	变化量/hm ²	-19 666.59	-10 049.52	2 879.72	5 710.29	8 688.29	12 437.82
	变化率/%	-0.20	-0.30	0.14	0.63	1.24	4.08

因此,2009 年土壤侵蚀严重程度要明显高于 2004 年,这主要是由于 2009 年的降水要远远高于 2004 年,而其他侵蚀因子 2 a 变化程度较小。

3.2 研究区 2004、2009 年土壤侵蚀强度的时空变化

通过对各侵蚀强度等级进行统计分析,得到了研究区 2004—2009 年的土壤侵蚀强度转移矩阵(表 5)。由表 5 可知,各侵蚀强度都是既有其他强度类型转移来的部分,也有转移为其他强度类型的部分。2004—2009 年研究区微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀的稳定面积分别为 70 616.93,5 071.45,2 221.21,663.42,894.38,2 874.80 hm²。其中,微度侵蚀中有 26 949.42 hm² 转为更高程度的侵蚀强度类型;轻度侵蚀中有 4 191.81 hm² 转为微度侵蚀,24 330.16 hm² 转为更高程度的

侵蚀强度类型;中度侵蚀中有 2 201.56 hm² 转为低程度的侵蚀强度类型,15 455.14 hm² 转为更高程度的侵蚀强度类型;强度侵蚀中有 864.90 hm² 转为低程度的侵蚀强度类型,7 538.37 hm² 转为更高程度的侵蚀强度类型;极强度侵蚀中有 486.50 hm² 转为低程度的侵蚀强度类型,5 612.01 hm² 转为更高程度的侵蚀强度类型;剧烈侵蚀中有 176.91 hm² 转为低程度的侵蚀强度类型。因此,除了微度侵蚀和剧烈侵蚀外,其他侵蚀强度类型向更高程度的侵蚀强度类型转移的面积都远大于向低程度的侵蚀强度类型转移的面积。由此也表明,2009 年土壤侵蚀严重程度要明显高于 2004 年,说明研究区的水土保持和生态环境治理工作还需加大力度,以保证该流域的可持续发展,使其最大限度地减少土壤侵蚀^[30]。

表 5 汾河源头地区 2004—2009 年土壤侵蚀强度转移矩阵

2004 年	2009 年					
	微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈
微度	70 616.93	18 089.14	5 700.46	1 046.72	968.10	1 145.01
轻度	4 191.81	5 071.45	14 693.43	7 381.12	2 162.24	93.37
中度	2 039.39	162.17	2 221.21	5 646.41	7 897.11	1 911.62
强度	683.07	113.03	68.80	663.42	3 685.64	3 852.73
极强度	309.59	83.54	68.80	24.57	894.38	5 612.01
剧烈	58.97	24.57	4.91	14.74	73.71	2 874.80

3.3 研究区土壤侵蚀的空间自相关分析

进一步对土壤侵蚀的空间相关性进行分析,2004 与 2009 年的结果变化不大,以 2009 年的分析结果来说明研究区的空间特征。基于 GeoDa 软件得到研究区土壤侵蚀的全局 Moran 指数 I 为 0.215 3,在 $\alpha=0.05$ 的水平上显著。这说明,研究区土壤侵蚀程度的区域分布存在一定的正相关和空间集聚。

但是,空间自相关的全局评估往往会掩盖反常的局部状况或小范围的局部不稳定性,因此本文又计算

了研究区土壤侵蚀的局部空间自相关指标,得到了土壤侵蚀的 Moran 散点图,再将 Moran 散点图与 LISA 显著性水平相结合,得到了土壤侵蚀的 LISA 集聚图与显著性水平分布图(图 2)^[25]。

由图 2 的 LISA 集聚图可知,白色区域表示空间自相关不显著,除此之外,高值与高值集聚的区域主要分布在汾河源头地区的东南部,低值与低值集聚的区域主要分布在汾河源头地区的西北部,而高值与低

值集聚的区域和低值与高值集聚的区域则在研究区零散分布。这说明,绝大部分土壤侵蚀程度在空间上表现出较强的空间关联性,且其空间自相关方式,主

要是高值与高值集聚,低值与低值集聚。由图 2 的显著性水平分布图可知,除了灰度最低部分不显著外,其他区域都达到了 5% 的显著性水平。

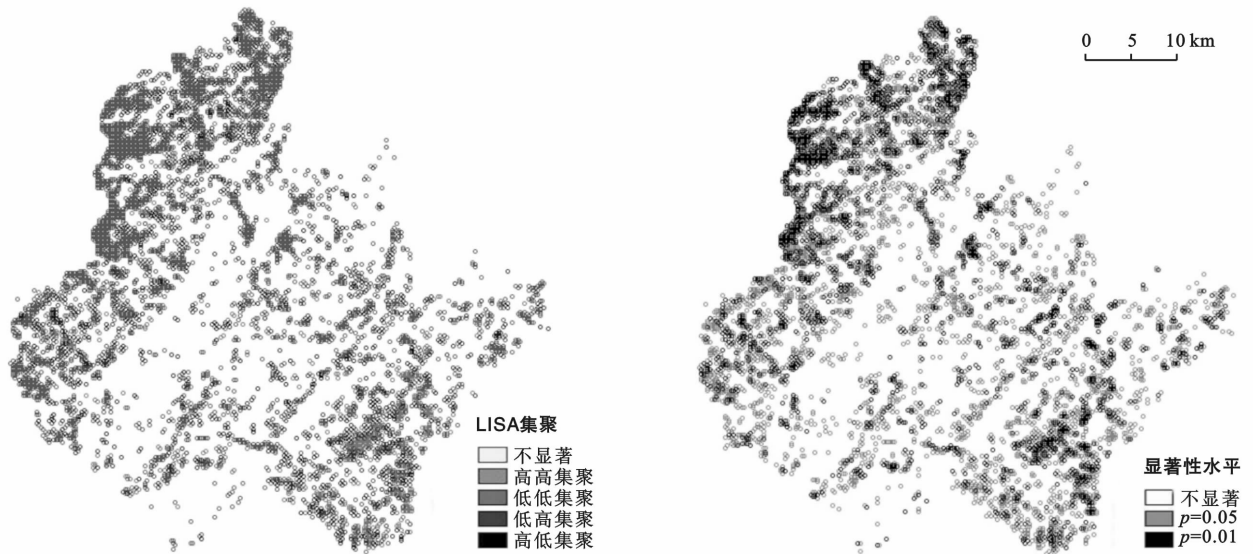


图 2 汾河源头地区 2009 年土壤侵蚀的 LISA 集聚图与显著性水平分布

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 从时间上来看,2009 土壤侵蚀的严重程度要明显高于 2004 年,且以极强度侵蚀和剧烈侵蚀增加为主。从空间上来看,土壤侵蚀模数 A 值高的区域分布在汾河源头地区的东南部,土壤侵蚀模数 A 值低的区域分布在汾河源头地区的西北部。

(2) 在通用土壤流失方程的各因子中,土壤可蚀性因子 K 、地形因子 LS 和水土保持措施因子 P 在 5 a 间变化不明显,因而降雨和植被覆盖成为影响汾河源头地区土壤侵蚀的 2 个主要因子。

(3) 除了微度侵蚀和剧烈侵蚀外,其他侵蚀强度类型向更高层次的侵蚀强度类型转移的面积都远大于向低程度的侵蚀强度类型转移的面积。由此也表明,2009 年土壤侵蚀严重程度要明显高于 2004 年,主要是由于 2009 年的降雨远大于 2004 年,从而加剧了土壤侵蚀。

(4) 研究区 2009 年的土壤侵蚀存在一定的正相关和空间集聚,其中,高值与高值集聚的区域主要分布在汾河源头地区的东南部,低值与低值集聚的区域主要分布在汾河源头地区的西北部。

(5) 土壤侵蚀程度高和低的区域分布与空间自相关分析得到的集聚分布是一致的,表明空间自相关得到的结果与汾河源头地区的土壤侵蚀现状基本一致,因此,本文的研究方法能够真实地反映研究区土

壤侵蚀的空间分布,为今后的水土保持工作提供依据。

4.2 讨论

2004—2009 年,汾河源头地区的土壤侵蚀加剧,且以极强度侵蚀和剧烈侵蚀增加为主,因此,加大汾河源头地区的土壤侵蚀治理工作是该研究区的重中之重。在土壤侵蚀严重的东南部山区,降雨量大,地势高,坡度大,应加强植树造林工程的实施,增加植被覆盖度,减少土壤侵蚀的发生。

另外,本研究也存在以下需要改进的地方:

(1) 水土保持措施因子 P 主要是根据土地利用类型确定的,如果结合实际水保措施如梯田、坡耕地、水田等,对土地利用类型进一步细化,可以得到更符合实际的结果;

(2) 土壤侵蚀的发生是有一定时空特征的,本文没有考虑空间自相关的时间滞后性;此外空间自相关与栅格大小也有一定的关系,这将在以后的研究中积极探索^[25]。

[参 考 文 献]

- [1] 张艳玲,张红. 通用土壤流失方程研究进展[J]. 山西水土保持科技,2013(2):12-15.
- [2] 傅伯杰,赵文武,陈利顶,等. 多尺度土壤侵蚀评价指数[J]. 科学通报,2006,51(16):1936-1943.
- [3] 李月臣,刘春霞,赵纯勇,等. 三峡库区(重庆段)土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异特征[J]. 生态学报,2009,29(2):788-796.

- [4] 邱阳,傅伯杰,王军,等. 黄土丘陵小流域土壤侵蚀的时空变异及其影响因子[J]. 生态学报,2004,24(9):1871-1877.
- [5] 姜琳,边金虎,李爱农,等. 岷江上游2000—2010年土壤侵蚀时空格局动态变化[J]. 水土保持学报,2014,28(1):18-25.
- [6] 冯永丽,李阳兵,程晓丽,等. 重庆市主城区不同地质条件下土壤侵蚀时空分异特征[J]. 水土保持学报,2011,25(5):30-34.
- [7] 杨瑞芳,段妍,王鹏杰. 汾河太原段纳污能力计算[J]. 山西建筑,2014,40(1):225-226.
- [8] 王言荣,刘洁. 汾河源头区土地利用的遥感解译研究[J]. 安徽农业科学,2009,37(5):2296-2297.
- [9] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall-erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains. Washinhton[M]. Agricultural Handbook, Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1965.
- [10] Wischmeier W, Smith D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning[M]. Agriculture Handbook 537. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1978.
- [11] 齐述华,蒋梅鑫,于秀波. 基于遥感和USLE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.
- [12] 孙文义,邵全琴,刘纪远. 黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J]. 自然资源学报,2014,29(3):365-376.
- [13] 谢云,章文波,刘宝元. 用日雨量和雨强计算降雨侵蚀力[J]. 水土保持通报,2001,21(6):53-56.
- [14] 章文波,付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学,2003,25(1):35-41.
- [15] 马志尊. 应用卫星影像估算通用土壤流失方程各因子值方法的探讨[J]. 中国水土保持,1989(3):24-27.
- [16] 张科利,蔡永明,刘宝元,等. 黄土高原地区土壤可蚀性及其应用研究[J]. 生态学报,2001,21(10):1687-1695.
- [17] 郭兵,陶和平,刘斌涛,等. 基于GIS和USLE的汶川地震后理县土壤侵蚀特征及分析[J]. 农业工程学报,2012,28(14):118-126.
- [18] 刘琦,明博. GIS支持下生态系统土壤保持生态价值评估:以太原市城区及近郊区为例[J]. 土壤通报,2011,42(2):456-460.
- [19] 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.
- [20] 刘洋,王桂晨. 岷江源头植被景观与土壤侵蚀强度相关性研究[J]. 人民长江,2008,39(12):25-28.
- [21] 郭宏忠,赵廷宁,李孝广,等. 接坝山地土壤水蚀、风蚀预报模型及强度分级研究[J]. 水土保持研究,2004,11(3):66-70.
- [22] 于洋,王晓燕,欧洋. 基于GIS的RUSLE模型在密云水库流域的应用[J]. 首都师范大学学报:自然科学版,2009,30(4):63-68.
- [23] 王龙昌,邹聪明,张云兰,等. 西南“早三熟”地区不同保护性耕作措施对农田土壤生态效应及生产效益的影响[J]. 作物学报,2013,39(10):1880-1890.
- [24] 鹿晨昱,张琳,薛冰,等. 基于GIS的太原市土壤侵蚀定量研究[J]. 水土保持通报,2013,33(6):247-251.
- [25] 邹金浪,谢花林,杨子生,等. 基于USLE的土壤侵蚀敏感性评价及其空间自相关分析[J]. 农业现代化研究,2011,32(6):761-765.
- [26] 谷国锋,张秀英. 地理信息系统在区域经济差异研究中的应用[J]. 情报科学,2009,27(9):1418-1423.
- [27] 水利部. (SL190-96)土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京:中国水利水电出版社,1997.
- [28] 张岩,刘宪春,李智广,等. 利用侵蚀模型普查黄土高原土壤侵蚀状况[J]. 农业工程学报,2012,28(10):165-171.
- [29] 陈渠昌,张如生. 水土保持综合效益定量分析方法及指标体系研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2007,5(2):95-104.
- [30] 王硕,肖玉,谢高地,等. 成渝经济区土壤侵蚀的时空变化[J]. 生态学杂志,2014,33(11):3043-3052.