

崇礼清水河流域土壤侵蚀空间格局及其影响因素研究

丁杰¹, 杨新兵¹, 朱辰光¹, 谢建治², 文宏达²

(1. 河北农业大学林学院, 河北省林木种质资源与森林保护重点实验室, 河北 保定 071000;

2. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071000)

摘要: 基于 DEM 数字高程模型并结合 RUSLE 模型应用 GIS、GeoDa、GS+ 等软件分析了河北省张家口市崇礼区 25 年间土壤侵蚀空间格局演变及影响因素。结果表明: (1) 1990—2015 年, 研究区中部、西部和西南部土壤侵蚀较严重, 土壤侵蚀强度以轻度、中度为主, 土壤侵蚀量呈先减少后增加的趋势。 (2) 1990—2000 年, 土壤侵蚀强度转变以轻度侵蚀转入为主, 土壤侵蚀状况减轻; 2000—2010 年, 土壤侵蚀由微度侵蚀转为高级别侵蚀, 侵蚀程度呈严重趋势; 2010—2015 年, 总体表现为微度侵蚀、轻度侵蚀转向高级别侵蚀, 但侵蚀增加面积有所减少, 侵蚀状况稍有改善。 (3) 土壤侵蚀 Moran's $I > 0$, 空间分布呈正相关性, 表现为聚集状态, 以高高型聚集为主, 主要集中在崇礼区中西部和西南部。土壤侵蚀模数符合指数模型和球状模型, R^2 为 0.943~0.979。变程 A 先由 3 870 m 减小到 860 m 再增加至 1 470 m, 表明 1990—2015 年土壤侵蚀变化先快后慢, 空间相关性分布范围由小变大, 空间异质性呈先增强后减弱趋势。分形维数 (F_D) 介于 1.922~1.971, 在区域较小空间尺度下, 土壤侵蚀空间异质性主要是由植被覆盖、土地利用类型、水土保持措施等随机因子引起的。 (4) 土壤侵蚀影响因子中前 3 个主成分贡献率占到 89.215 0%。在第 1 主成分载荷中, 植被覆盖因子向量投影长度最大, 为 0.976 4。在第 2, 3 主成分载荷中, 水土保持措施因子、土壤可蚀性因子向量投影长度较大。因此, 崇礼区土壤侵蚀影响因素大小依次为植被覆盖因子 (C)、水土保持措施因子 (P)、土壤可蚀性因子 (K)、降雨侵蚀力因子 (R)、坡长坡度因子 (LS)。研究结果可为崇礼区清水河流域水土综合治理和可持续发展提供理论依据。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE 模型; Markov 模型; 空间分析; 影响因素

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0073-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.04.012

Spatial Pattern and Influence Factors of Soil Erosion of Qingshui River Basin in Chongli

DING Jie¹, YANG Xinbing¹, ZHU Chenguang¹, XIE Jianzhi², WEN Hongda²

(1. College of Forestry, Hebei Agricultural University, Key Laboratory

Genetic Resources of Forest and Forest Protection of Hebei, Baoding, Hebei 071000;

2. College of Resources and Environment Science, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000)

Abstract: Based on DEM digital elevation model, RUSLE model combined with GIS, GeoDa, GS+ and other software, the evolution of spatial pattern of soil erosion and its influencing factors in 25 years in Chongli District, Zhangjiakou City, Hebei Province were analyzed. The results showed that: (1) From 1990 to 2015, the soil erosion was severe in the central, western, and southwestern regions of the study area. The intensity of soil erosion was mainly mild and moderate. The amount of soil erosion firstly decreased and then increased. (2) From 1990 to 2000, the change of soil erosion intensity was dominated by mild transformation. Soil erosion was alleviated. From 2000 to 2010, it was mainly slight erosion turning to high-level erosion, and showed aggravate trend. From 2010 to 2015, the overall transformation was in the form of slight erosion, mild erosion turned to high erosion levels, but the area of increased erosion decreased, and the erosion slightly improved. (3) Soil erosion's Moran's $I > 0$, the spatial distribution was positive correlation, showing aggregation state, with high-level aggregation mainly in central and western and southwest. Soil erosion

收稿日期: 2018-03-06

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项“海河北系永定河—洋河段水污染控制与水质改善技术集成与综合示范”(2015ZX07203-005)子课题“关键支流清水河水环境保护与防治技术集成与示范(2015ZX07203-005-02)”

第一作者: 丁杰(1992—), 女, 河北固安人, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: yixuandj@163.com

通信作者: 杨新兵(1978—), 男, 河北涉县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持与森林生态研究。E-mail: yangxinbing2001@126.com

modulus met index model and spherical model, R^2 was 0.943~0.979. The range of soil erosion reduced from 3 870 m to 860 m and then increased to 1 470 m, indicating that the change of soil erosion was firstly fast and then slow down from 1990 to 2015, the spatial distribution of spatial correlation expanded and the spatial heterogeneity increased firstly and then decreased. The fractal dimension of soil erosion ranged from 1.922 to 1.971. Spatial heterogeneity of soil erosion was mainly caused by stochastic factors such as vegetation cover, land use types, and water and soil conservation measures in a small spatial scale. (4) The contribution rate of the first, second, and third principal components to the soil erosion factors accounted for 89.215 0%. In the first principal component load, the projection length of vegetation cover factor was the largest, which was 0.976 4. In the second and third principal component loads, the projection length of soil and water conservation measures factor and soil erodibility factor were large. Therefore, the influencing factors of soil erosion in Chongli District were in order of vegetation cover factor, soil and water conservation measures factor, soil erodibility factor, rainfall erosivity factor, and slope length slope factor. The results can provide theoretical basis for soil and water management and sustainable development of Qingshui River Basin in Chongli District.

Keywords: soil erosion; RUSLE; Markov; space analysis; influence factors

土壤侵蚀是土壤及其母质在地壳运动、岩浆活动、地震等内营力和风力、水力、重力、冻融等外营力共同作用下,发生风化、剥蚀、搬运和堆积的过程^[1]。正常侵蚀不至于对土地资源造成危害,而加速侵蚀则是人类不合理活动使土壤侵蚀速率加快,造成土地资源的损失和破坏、河床淤积、加剧旱涝,还会使土壤养分流失、农作物减产、水体污染等。土壤侵蚀不仅限制了农业、社会、经济的发展,而且对水文系统等生态环境造成威胁,影响水土资源的开发、利用和保护等可持续发展^[2-3],已成为全球普遍关注的生态环境问题之一^[4]。据第一次全国水利普查结果显示^[5],我国土壤侵蚀总面积达到 294.91 万 km^2 ,约占普查总面积的 31.12%,土壤侵蚀状况严重。因此,定量评析区域土壤侵蚀、揭示其时空动态演变特征是水土治理和水土保持建设的基础。开展土壤侵蚀研究的常用方法是运用模型。1978 年美国学者 Wischmeier 等^[6]建立了经验型的通用土壤流失方程 USLE(Universal Soil Loss Equation)。ANSWERS 模型、SHE 模型、LISEM 模型是可以说明土壤侵蚀的分布式模型^[7-8]。EUROSEM 模型、水蚀预报模型 WEPP^[9]、次降雨侵蚀产沙物理模型 GUEST^[10]描述的是土壤侵蚀物理过程。修正通用土壤流失方程 RUSLE(Reversed Universal Soil Loss Equation)模型^[11]是对 USLE 模型的修正,其与 USLE 模型所需参数在实际应用中较易获取,所以得到了广泛的应用^[12]。随后,许多学者^[13-14]将 USLE/RUSLE 模型与地理信息系统(GIS)技术和数字高程模型(Digital Elevation Models, DEM)相结合对土壤侵蚀进行了评估和分析。崇礼区属清水河流域,为海河流域永定河水系洋河段的源头之一,水力侵蚀较严重,同时作为 2022 年冬奥会雪上项目的主赛场,其土壤侵蚀造成的一系列

问题解决以及生态环境治理显得尤为重要。鉴于此,本研究基于 DEM 应用 RUSLE 模型并借助 GIS、GeoDa、GS+ 等空间分析方法对崇礼区 1990 年、2000 年、2010 年和 2015 年土壤侵蚀空间格局演变及其影响因素进行定量评价,以期为清水河流域水土保持措施制定、生态环境恢复以及提高流域短缺水资源的利用效率和效益等提供决策性依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

崇礼区位于河北省西北部,隶属张家口市,地处华北平原与内蒙古高原过渡地带($40^{\circ}47'—41^{\circ}17'N$, $114^{\circ}17'—115^{\circ}34'E$),总面积 2 334 km^2 。海拔 813~2 174 m,气候类型为东亚大陆性季风气候中温带亚干旱区,年均气温 3.3 $^{\circ}\text{C}$ 。年均降水量 465.4 mm,降水分布不均,6—9 月降水量占全年的 75%~80%。年均日照时间 2 708.4 h,日照率 61%。境内清水河为海河流域永定河水系洋河段的源头之一,年径流总量 1.006 9 亿 m^3 。土壤类型以栗褐土、棕壤、栗钙土、褐土为主。植被类型有阔叶林、针阔混交林、落叶针叶林、常绿针叶林、灌丛、草甸等,主要分布白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Pobulus davidiana*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、毛榛(*Corylus mandshurica maxim*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等。

1.2 数据来源

(1)DEM 数据。DEM 数据为空间分辨率 30 m 的数字高程模型(DEM),用以计算坡长 L 、坡度 S 因子。

(2)降水数据。降水数据选取国家气象观测站的 1990 年、2000 年、2010 年、2015 年崇礼区及其周边 6 个气象站点的日降水量数据,用以计算降雨侵蚀力因

子 R 。气象站点名称分别为崇礼站、赤城站、沽源站、康保站、宣化站、张北站和张家口站。

(3) 土壤数据。土壤数据源于崇礼区土壤普查数据和中国土壤数据库,得到土壤类型分布和各类土壤粉粒、黏粒、沙粒和有机质含量等数据,用来计算土壤可蚀性因子 K 。

(4) 土地利用类型数据。土地利用类型数据基于地理空间数据云(www.gscloud.cn)分辨率 30 m 的 1990 年、2000 年、2010 年、2015 年 4 期 7—8 月云量较少的 Landsat 影像数据,进行植被覆盖因子 C 的分析和对水土保持措施因子 P 的换算。

(5) 崇礼区行政边界矢量数据。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤侵蚀定量估算 选用修正的通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)进行土壤侵蚀量的估算。RUSLE 模型的数学表达式^[11]为:

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

式中: A 为年均土壤侵蚀模数,应用美制单位 ($t/(hm^2 \cdot a)$); R 为降雨侵蚀力因子,采用国际单位制 ($MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$); K 为土壤可蚀性因子,应用国际单位制 ($t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$); LS 为坡长坡度因子,常数因子(无量纲); C 为植被覆盖因子,常数因子,取值范围 0~1(无量纲); P 为水土保持措施因子,常数因子,值域范围 0~1(无量纲)。 P 值参照滕洪芬^[15]研究,结合崇礼区实际情况根据土地利用类型进行赋值,赋值分别为林地 0.7,草地 1,坡耕地 0.5,旱地 0.3,水域 0,建设用地及居民区 0,未利用地 1。

1.3.2 土壤侵蚀强度转变 土壤侵蚀强度转变应用 Markov 模型,转移概率矩阵的数学表达式^[16]为:

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdots & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & \cdots & T_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{n1} & T_{n2} & \cdots & T_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: T_{ij} 为土壤侵蚀强度 i 转变为 j 的概率, $0 \leq T_{ij} \leq 1$, $\sum_{j=1}^n T_{ij} = 1$, 其中 $i, j = 0, 1, 2, 3, \dots, n$, 各行元素和为 1。

1.3.3 土壤侵蚀空间结构分析

(1) 土壤侵蚀研究尺度选择。土壤侵蚀研究最优尺度采用局部方差法(local variance)确定,局部方差最大时的空间分辨率为最优尺度。使用最近邻法对原始图像重采样来绘制局部方差图,应用滑动窗口计算不同空间分辨率图像中像素单元及其邻域所组成的窗口中所有像元的方差。窗口尺寸为 $(2m+1)$ 和 $(2n+1)$ 的局部方差法的数学公式为:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [G(i, j) - \mu_{ij}]^2}{MN} \quad (3)$$

式中: S^2 为图像的局部方差值; M 和 N 为图像行列数; $G(i, j)$ 为图像中第 i 行 j 列的像元灰度值; μ_{ij} 为该窗口内所有像元的灰度均值。

(2) 全局空间自相关。全局 Moran's I 数学公式^[17]为:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w(i, j)} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w(i, j) (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中: n 为总栅格个数; x_i 为栅格 i 的土壤侵蚀量; $\bar{x}$ 为土壤侵蚀量均值; $w(i, j)$ 为衡量空间邻接关系的权重矩阵。空间权重矩阵应用 Rook 邻接权重矩阵:

$$w(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{区域 } i \text{ 和 } j \text{ 不相邻} \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

(3) 局部空间自相关。局部 Local Moran's I 数学公式^[17]为:

$$I_i = \sum_{j=1}^n w(i, j) (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) \quad (6)$$

将基于局部 Moran's I 的 LISA 分析结果划分成 4 类, HH 型(高高型)表示该区域与周边区域土壤侵蚀状况均较严重; HL 型(高低型)表示该区域土壤侵蚀状况严重,周边区域土壤侵蚀状况轻微; LL 型(低低型)表示该区域与周边区域土壤侵蚀状况均较轻微; LH 型(低高型)表示该区域土壤侵蚀状况轻微,周边区域土壤侵蚀状况严重。

(4) 半变异函数。半变异函数也称为半方差函数,其数学公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2 \quad (7)$$

式中: $\gamma(h)$ 为半变异函数; h 为步长,也称样本距,是样点之间的距离; $N(h)$ 为空间上样本距为 h 时的离散点对数; $z(x_i)$ 和 $z(x_i + h)$ 分别为变量 Z 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的值。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀分布特征

根据中国水利部 2008 年颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)^[18],将崇礼区土壤侵蚀划分为微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀 6 个级别,经 RUSLE 模型估算得到崇礼区土壤侵蚀分级图(图 1)。1990 年、2010 年和 2015 年土壤侵蚀严重区主要集中在崇礼区中部、西部和西南部的红旗营乡、驿马图乡、石嘴子乡、高家营镇。2000 年土壤侵蚀呈分散状态,全区各乡镇分布较均匀。

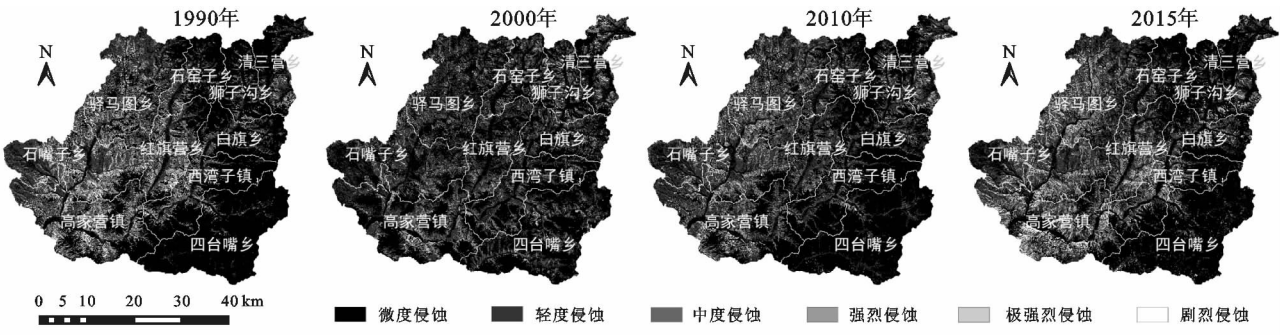


图 1 1990—2015 年崇礼区土壤侵蚀分级分布

各土壤侵蚀级别所占面积见表 1。由于微度侵蚀为容许土壤流失量,所以研究区内 1990—2015 年以轻度侵蚀和中度侵蚀为主,占土壤侵蚀的 69.59%~86.16%。1990 年与 2015 年各类侵蚀级别面积和所占比例相似,而 2000 年与 2010 年相差不大,侵蚀较 1990 年、2015 年轻。1990 年和 2015 年强烈侵蚀、极强烈侵蚀面积增加,所占比例由 2000 年、2010 年的 4.52%~9.37% 增大到 9.95%~14.86%。1990 年、2000 年、2010 年、2015 年强烈侵蚀总量分别为 8.690×10^5 、 5.054×10^5 、 5.834×10^5 、 8.930×10^5 t,极强烈侵蚀总量分别为 10.583×10^5 、 4.489×10^5 、 5.851×10^5 、 10.716×10^5 t,轻度侵蚀面积减少,占侵蚀总面积的比重自 2000 年、2010 年的 61.33%~62.60% 下降至 1990 年、2015 年的 44.96%~49.39%。1990 年、2000 年、2010 年、2015 年轻度侵蚀总量分别为 4.943×10^5 、 6.988×10^5 、 6.705×10^5 、 5.966×10^5 t。总体而言,1990—2015 年,土壤侵蚀总量整体表现为先下降后上升的变化趋势。

1990 年、2000 年、2010 年、2015 年轻度侵蚀总量分别为 4.943×10^5 、 6.988×10^5 、 6.705×10^5 、 5.966×10^5 t。总体而言,1990—2015 年,土壤侵蚀总量整体表现为先下降后上升的变化趋势。

表 1 1990—2015 年崇礼区土壤侵蚀强度分级面积

侵蚀级别	平均侵蚀模数/ ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)	平均流失厚度/ ($mm \cdot a^{-1}$)	1990 年 面积/ km^2	占比/ %	2000 年 面积/ km^2	占比/ %	2010 年 面积/ km^2	占比/ %	2015 年 面积/ km^2	占比/ %
微度侵蚀	<2	<0.15	1406.04	60.24	1379.83	59.12	1334.10	57.16	1314.67	56.32
轻度侵蚀	2~25	0.15~1.90	417.28	17.88	597.36	25.59	613.30	26.28	503.47	21.57
中度侵蚀	25~50	1.90~3.70	228.53	9.79	224.82	9.63	225.77	9.67	245.53	10.52
强烈侵蚀	50~80	3.70~5.90	137.88	5.91	81.34	3.48	93.67	4.01	141.61	6.07
极强烈侵蚀	80~150	5.90~11.10	99.61	4.27	43.14	1.85	55.68	2.39	101.39	4.34
剧烈侵蚀	>150	>11.10	44.75	1.92	7.61	0.33	11.57	0.50	27.43	1.18

2.2 RUSLE 模型估算结果检验

根据 2013 年度河北省水土保持监测公报(以下简称公报)提供的数据结果与 RUSLE 模型估算出的 2010 年土壤侵蚀强度面积进行对比(图 2),RUSLE 模型估算的土壤侵蚀总面积($999.99 km^2$)是公报数据($747.56 km^2$)的 133.77%。区域内以轻度侵蚀为主,RUSLE 模型估算的轻度侵蚀面积($613.30 km^2$)是公报数据($602.43 km^2$)的 101.80%。二者的结果相一致。

2000 年,未发生土壤侵蚀转移面积为 $1 282.60 km^2$,发生侵蚀面积为 $1 051.50 km^2$,占研究区总面积的 45.05%。土壤侵蚀减弱面积 $638.29 km^2$,减弱面积分别为中度侵蚀 $188.76 km^2$;轻度侵蚀 $188.38 km^2$,强烈侵蚀 $127.14 km^2$,极强烈侵蚀 $92.82 km^2$,剧烈侵蚀 $41.20 km^2$ 。土壤侵蚀增强面积 $413.21 km^2$,分别为微度侵蚀 $402.45 km^2$,轻度侵蚀 $6.42 km^2$,中度侵蚀 $3.01 km^2$,强烈侵蚀 $1.16 km^2$,极强烈侵蚀 $0.17 km^2$ 。总体来讲,1990—2000 年间以轻度侵蚀转变为主,净转入面积 $180.07 km^2$,土壤侵蚀面积总共减少了 $225.08 km^2$,存在好转趋势。

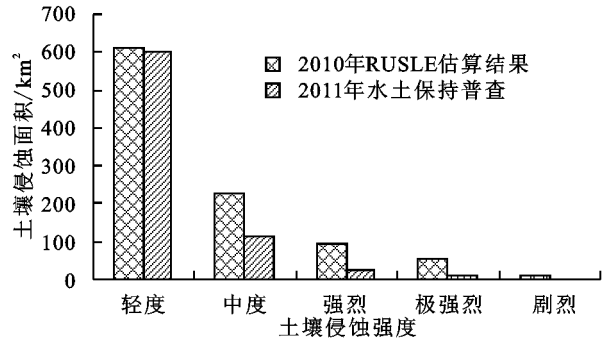


图 2 RUSLE 模型估算与河北省水土保持普查结果比较

2.3 土壤侵蚀强度转变特征

2.3.1 1990—2000 年转移矩阵 由表 2 可知,1990—

表 2 1990—2000 年土壤侵蚀强度转移矩阵

单位: km^2						
侵蚀级别	微度 侵蚀	轻度 侵蚀	中度 侵蚀	强烈 侵蚀	极强烈 侵蚀	剧烈 侵蚀
微度侵蚀	1003.59	234.00	101.00	41.22	22.38	3.86
轻度侵蚀	188.38	222.49	6.17	0.24	0.00	0.00
中度侵蚀	76.65	112.11	36.76	2.60	0.41	0.00
强烈侵蚀	49.34	24.65	53.15	9.58	1.13	0.03
极强烈侵蚀	40.74	4.00	26.27	21.81	6.62	0.17
剧烈侵蚀	21.14	0.10	1.48	5.88	12.59	3.55

2.3.2 2000—2010 年转移矩阵 在 2000—2010 年期间,土壤侵蚀发生面积变化情况见表 3。发生土壤侵蚀转变的面积为 899.01 km²,占研究区面积的 38.52%。土壤侵蚀增加面积为 494.86 km²,减小面积为 404.15 km²,与 1990—2000 年相比,土壤侵蚀面积多增加了 81.65 km²,少减小了 234.14 km²,以微度侵蚀转出成其他级别侵蚀为主,净转出面积为 45.72 km²,土壤侵蚀存在加剧的趋势问题。在增加的面积中,分别增加了微度侵蚀 406.95 km²,轻度侵蚀 49.07 km²,中度侵蚀 25.18 km²,强烈侵蚀 10.59 km²,极强烈侵蚀 3.06 km²。在减小的面积中,分别减小了轻度侵蚀 212.15 km²,中度侵蚀 113.32 km²,强烈侵蚀 48.35 km²,极强烈侵蚀 25.41 km²,剧烈侵蚀 4.92 km²。土壤侵蚀转变以微度侵蚀、轻度侵蚀和中度侵蚀转变为主。

表 3 2000—2010 年土壤侵蚀强度转移矩阵

侵蚀级别	单位:km ²					
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强烈侵蚀	剧烈侵蚀
微度侵蚀	972.88	250.29	83.17	41.66	26.20	5.63
轻度侵蚀	212.15	336.14	45.45	3.18	0.44	0.00
中度侵蚀	89.34	23.98	86.31	22.72	2.42	0.04
强烈侵蚀	36.68	2.74	8.93	22.40	10.45	0.14
极强烈侵蚀	19.76	0.15	1.88	3.62	14.67	3.06
剧烈侵蚀	3.28	0.00	0.04	0.09	1.50	2.70

2.3.3 2010—2015 年转移矩阵 与前 20 年相比,2010—2015 年间(表 4),土壤侵蚀增加面积相差不多,但比 2000—2010 年增加面积有所减少,为 438.98 km²,减少了 55.87 km²。土壤侵蚀总共减少面积 340.56 km²,各土壤侵蚀级别转出面积依次为轻度侵蚀(203.53 km²)、中度侵蚀(76.15 km²)、强烈侵蚀(35.75 km²)、极强烈侵蚀(21.27 km²)、剧烈侵蚀(3.86 km²)。未发生土壤侵蚀面积为 1 554.56 km²,发生面积为 779.54 km²,占研究区面积的 33.40%。研究区内土壤侵蚀转变主要以轻度侵蚀转变幅度最大,且多转向于微度侵蚀。轻度侵蚀净转出 109.83 km²,微度侵蚀净转出 19.43 km²。其他高级别侵蚀面积表现为净转入,顺序为强烈侵蚀 47.94 km²,极强烈侵蚀 45.71 km²,中度侵蚀 19.76 km²,剧烈侵蚀 15.86 km²。总体来看,虽然土壤侵蚀高级别侵蚀面积均有不同程度的增加,但是土壤侵蚀总体增加面积减少,土壤侵蚀状况稍有改善。

2.4 土壤侵蚀空间结构特征

2.4.1 研究尺度选择 对崇礼区 1990—2015 年土壤侵蚀栅格数据进行空间分辨率间隔为 30 m 的重

采样,利用窗口尺寸 3 m×3 m 的局部方差法得到研究区不同空间分辨率下的局部方差(图 3)。1990 年、2000 年、2010 年和 2015 年土壤侵蚀最大平均局部方差值均出现在空间分辨率为 90 m 处。因此,选取 90 m 作为研究区土壤侵蚀空间格局的研究尺度。

表 4 2010—2015 年土壤侵蚀强度转移矩阵

侵蚀级别	单位:km ²					
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强烈侵蚀	剧烈侵蚀
微度侵蚀	1032.10	123.06	68.59	53.89	44.77	11.69
轻度侵蚀	203.53	343.60	56.73	8.04	1.40	0.00
中度侵蚀	45.52	30.63	105.50	36.65	7.18	0.29
强烈侵蚀	19.21	5.74	10.81	38.16	18.96	0.80
极强烈侵蚀	12.33	0.44	3.81	4.69	27.48	6.93
剧烈侵蚀	1.99	0.00	0.08	0.18	1.61	7.71

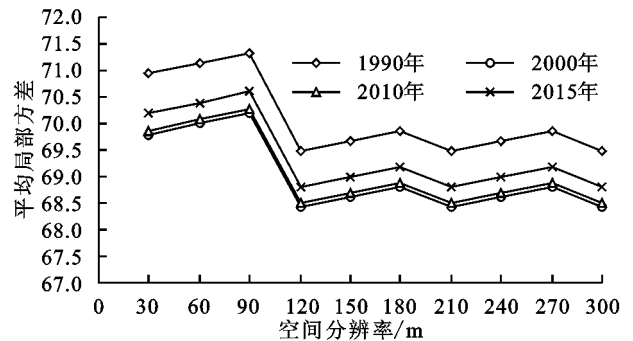
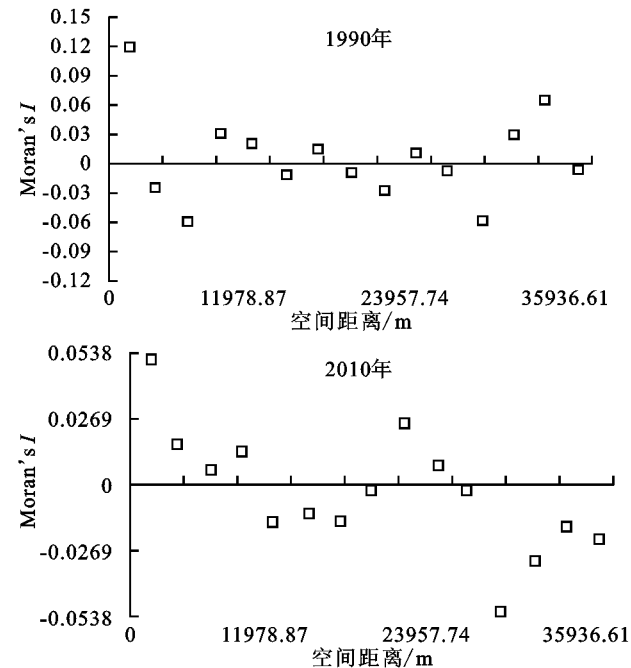


图 3 1990—2015 年崇礼区土壤侵蚀平均局部方差

2.4.2 全局自相关分析 在空间分辨率 90 m 尺度下,崇礼区 1990 年、2000 年、2010 年和 2015 年土壤侵蚀全局莫兰指数分别为 0.434 6,0.427 9,0.466 9,0.514 7,Moran's $I>0$ 说明土壤侵蚀空间分布呈正相关性,表现出聚集的状态。1990—2015 年间,Moran's I 值先下降后持续上升,表明土壤侵蚀空间分布由聚集状态先向分散状态转变而后再向聚集状态发展。图 4 表明,崇礼区土壤侵蚀 Moran's I 系数在 0 上下范围内浮动,尺度效应明显,空间依赖性较小。1990—2015 年,Moran's I 整体呈现出随研究尺度增大而减小的变化趋势,均约在 11 978.87 m 处接近于 0,即当空间距离 $>11\,978.87$ m 时,土壤侵蚀空间分布差异性呈现增加趋势,当空间距离 $<11\,978.87$ m 时,土壤侵蚀空间分布相关性增强。

2.4.3 局部自相关分析 崇礼区 1990 年、2000 年、2010 年和 2015 年土壤侵蚀基于局部 Moran's I 的 LISA 分布见图 5。 z 值检验($\alpha=0.05$)结果显著。崇礼区土壤侵蚀状况以 HH 型聚集为主,LL 型聚集、LH 型聚集和 HL 型聚集主要分布在边界处。1990 年高聚集区主要分布在崇礼区的中部和西部;到了 2000 年,高聚集区在全区内均有分布,但主要集中在

西南部和东北部;2010 年高聚集区向西部集中,东北部有些许分布;直到 2015 年,高聚集区往西南部和中



部移动,空间分布较集中。1990—2015 年,中西部、西南部土壤侵蚀较严重。

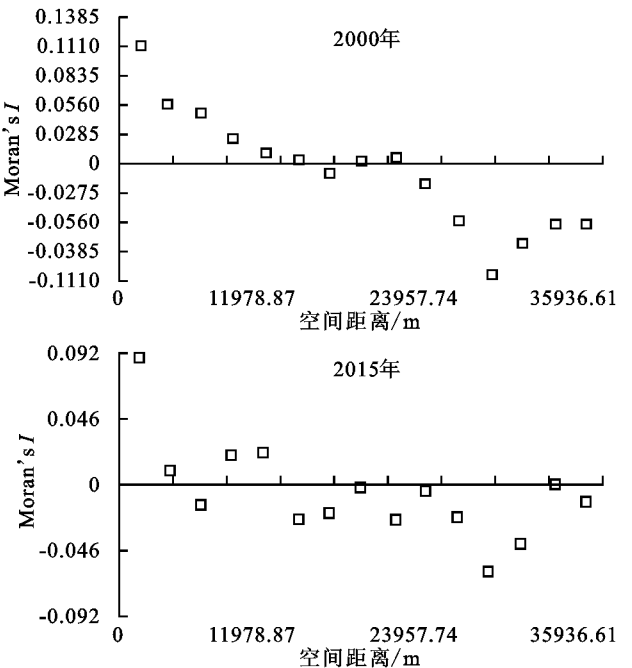


图 4 1990—2015 年崇礼区土壤侵蚀全局莫兰指数

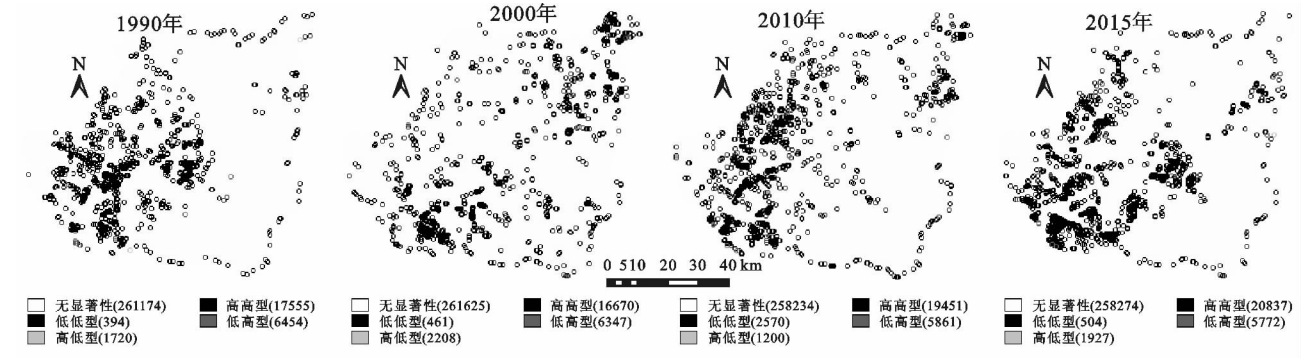


图 5 1990—2015 年崇礼区土壤侵蚀 LISA 分布

2.4.4 空间变异性分析 土壤侵蚀模数数据经过对数转换后满足正态分布,在 $0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}, 135^{\circ}$ 方向上进行变异性分析,土壤侵蚀具有等方性,半方差函数的理论模型拟合和相关参数见表 5。1990 年、2000 年、2015 年土壤侵蚀与指数模型拟合较好, R^2 分别为 0.979, 0.966, 0.958。2010 年的土壤侵蚀与球状模型拟合较好, R^2 为 0.943。崇礼区土壤侵蚀空间相关性较强。1990—2015 年,结构方差 C 先升高后降低,表明变程内变异幅度呈先增大后减小趋势。 $C_0 + C$ 呈波动变化,空间异质性表现为先减弱后增强再减

弱的变化规律。 A 值由 3 870 m 缩短到 860 m 后又延长至 1 470 m,说明土壤侵蚀变化先加快后放缓,空间分布相关性范围由小变大,各向异性先增强后减弱。分形维数 F_D 反映出空间异质性程度,取值范围 $(1, 2]$, F_D 越大,较小尺度随机因子变异越大,结构因子变异越小,空间异质性越小^[19]。1990—2015 年, F_D 值介于 1.922~1.971, 相对较大,表明在较小空间尺度下土壤侵蚀由随机因子(植被覆盖、土地利用类型、水土保持措施等)引起的空间异质性占大部分。

表 5 1990—2015 年崇礼区土壤侵蚀半方差函数相关参数

年份	模型	块金值 C_0	结构 方差 C	基台值 $C_0 + C$	空间相关性 $C / (C_0 + C)$	块金效应 $C_0 / (C_0 + C)$	变程 A/m	残差平方 和 RSS	分形 维数 F_D	决定 系数 R^2
1990	指数模型	0.849	0.850	1.699	0.500	0.500	3870	6.071E-03	1.922	0.979
2000	指数模型	0.239	1.340	1.579	0.849	0.151	1320	4.195E-03	1.944	0.966
2010	球状模型	0.131	1.735	1.866	0.930	0.070	860	4.590E-03	1.971	0.943
2015	指数模型	0.254	1.604	1.858	0.863	0.137	1470	9.339E-03	1.932	0.958

2.5 影响因素分析

由表 6 可知,第 1 主成分贡献率为 56.915 0%,其次为第 2,3 主成分贡献率,前 3 个主成分贡献率达到 89.215 0%,占土壤侵蚀影响因子信息的绝大部分。在第 1 主成分载荷中,*C* 值向量投影长度最大

(0.976 4)。*P* 值在第 2 主成分载荷中向量投影长度最大,*K* 值则在第 3 主成分载荷中向量投影长度最大,所以对土壤侵蚀影响大小依次为植被覆盖因子 *C*、水土保持措施因子 *P*、土壤可蚀性因子 *K*、降雨侵蚀力因子 *R*、坡长坡度因子 *LS*。

表 6 主成分特征值和载荷矩阵

主成分	特征值	贡献率/ %	累计 贡献率/%	影响 因子	第 1 主成分 载荷	第 2 主成分 载荷	第 3 主成分 载荷	第 4 主成分 载荷	第 5 主成分 载荷
1	0.1003	56.9150	56.9150	<i>R</i>	0.0750	−0.0146	0.2749	0.2675	0.0910
2	0.0377	21.2900	78.2050	<i>K</i>	0.0644	−0.1279	0.6314	0.6449	0.0160
3	0.0194	11.0100	89.2150	<i>LS</i>	−0.0585	0.0929	0.0081	0.0959	0.0071
4	0.0135	7.6325	96.8475	<i>C</i>	0.9764	−0.1118	−0.0985	−0.0324	0.0022
5	0.0056	3.1525	100.0000	<i>P</i>	0.1313	0.9645	0.1783	−0.0218	0.0048

3 讨论

针对崇礼清水河流域水土流失造成的生态恶化和淤积河床等问题,本研究基于 GIS 结合清水河流域山区地形坡度、植被覆盖、降雨、土壤条件等因素,分析了该流域山区 1990—2015 年土壤侵蚀的时空分布特征,筛选出土壤侵蚀的主要成因,旨在为水土保持关键措施的制定和水土流失的综合治理以及保障河道基本生态基流提供依据。1990—2015 年,清水河流域土壤侵蚀强度以轻度侵蚀和中度侵蚀为主,这一结论与李夫星^[20]得出的结果相同。除 2000 年土壤侵蚀分布较分散外,1990 年、2010 年和 2015 年土壤侵蚀严重区大部分集中在崇礼区中部、西部和西南部的红旗营乡、驿马图乡、石嘴子乡、高家营镇。土壤侵蚀全局莫兰指数为 0.427 9~0.514 7,空间分布正相关性较强,呈聚集状态,聚集状态以高高型为主。崇礼境内分布有东沟河、太子城河、正沟河和西沟河,河流走向沿东北—西南方向,土壤侵蚀严重区域沿河流分布,且多发生在河流中下游地带。这一结果与蒋好忱^[21]的研究相似。25 年间,土壤侵蚀发生面积由 1 051.50 km² 逐渐减少至 779.54 km²,所占比重由 45.05%降到 33.40%,结构方差 *C* 先升后降,土壤侵蚀变化幅度有所下降。1990—2000 年,土壤侵蚀以轻度侵蚀转移为主,净增加面积 180.07 km²,土壤侵蚀状况有所缓解。这一时期处于经济发展的初期,旅游业等新经济增长点刚刚起步,所以对生态环境造成的压力不是很大,土壤侵蚀状况较好。2000—2010 年,土壤侵蚀增加面积 494.86 km²,比前 10 年多增加 81.65 km²。减小面积为 404.15 km²,少减小了 234.14 km²。土壤侵蚀转变以微度侵蚀转出为主,转出面积 45.72 km²,土壤侵蚀存在严重趋势。这一现象主要是由于经济社会和人口因素造成的,大力发

展产业,忽视了林业的经营管理,加之,随着人口增长和城镇化进程加快,建筑用地、耕地需求变大,植被覆盖逐渐降低,土壤侵蚀加剧。到了 2010—2015 年土壤侵蚀增加面积比 2000—2010 年减少了 55.87 km²,土壤侵蚀转变以轻度侵蚀转向微度侵蚀为主,土壤侵蚀稍有改善,主要是由于政府对经济结构的战略性调整以及京津风沙源治理二期工程水利项目、退耕还林荒山荒地造林、塞北林场和生态修复等一系列小流域综合治理起到了效果,但土壤侵蚀面积少减少了 63.59 km²,土壤侵蚀情况依旧不容乐观。1990—2015 年,土壤侵蚀变程 *A* 值由 3 870 m 变为 860 m 再至 1 470 m,空间分布相关性范围有增加趋势,空间异质性呈减弱趋势。分形维数 *F_D* 值依然较大,介于 1.922~1.971,崇礼区土壤侵蚀在较短空间距离内主要是由于植被覆盖、土地利用类型、水土保持措施等随机因子引起的。这一结论与赵串串等^[22]和邬铃莉等^[23]的研究结果相同。因此,崇礼区清水河流域进行小流域综合治理时应注重植被覆盖率的提高、土地利用类型的使用情况以及实施合理的水土保持措施进行生态修复。

4 结论

- (1)1990—2015 年,清水河流域土壤侵蚀严重区域主要集中在崇礼区中部、西部和西南部的红旗营乡、驿马图乡、石嘴子乡、高家营镇。全区内以轻度侵蚀和中度侵蚀为主,土壤侵蚀总体呈先下降后上升的变化趋势。
- (2)1990—2000 年,土壤侵蚀以高级别侵蚀向轻度侵蚀转变为主,土壤侵蚀状况减轻。2000—2010 年,则以微度侵蚀转向高级别侵蚀为主,土壤侵蚀存在加剧趋势。2010—2015 年,研究区内土壤侵蚀转变主要以轻度侵蚀转变为主,与前 10 年相比,土壤侵

蚀稍有减轻。

(3)土壤侵蚀空间分布表现为聚集状态,并以高型聚集为主,主要分布在崇礼区的中西部 and 西南部。1990—2015 年,土壤侵蚀变化先快后缓,空间分布相关性范围先小后大,空间异质性先强后弱。植被覆盖、土地利用类型、水土保持措施等随机因子在空间短距离内导致较大的空间异质性。

(4)植被覆盖是引起土壤侵蚀的主要因子,其次为水土保持措施。土壤条件、降雨和坡长坡度等自然因素相对于前两者而言对土壤侵蚀影响较小。

参考文献:

- [1] 余新晓,毕华兴. 水土保持学[M]. 3 版. 北京:中国林业出版社,2013.
- [2] 张洪江,程金花. 土壤侵蚀原理[M]. 3 版. 北京:科学出版社,2014.
- [3] 俱战省,安邦,严冬春,等. 三峡库区小流域修正通用土壤流失方程适用性分析[J]. 农业工程学报,2015,31(5):121-131.
- [4] Cerdà A, Jordán A, Zavala L, et al. The contribution of mulches to control high soil erosion rates in vineyards in Eastern Spain [J]. EGU General Assembly Conference Abstracts,2014,16:16127.
- [5] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[J]. 中国水土保持,2013(10):2-3.
- [6] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses : A guide to conservation planning [J]. United States, dept. of Agriculture, agriculture Handbook, 1978:537.
- [7] De Roo A P J, Offermans R J E, Cremers N H D T. Lisem: A single-event, physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. ii: Sensitivity analysis, validation and application[J]. Hydrological Processes,2015,10(8):1119-1126.
- [8] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2015,23(6):527-544.
- [9] Laflen J M, Lane L J, Foster G R. WEPP: A new generation of erosion prediction technology[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1991,46(1):34-38.
- [10] Zokaib S, Naser G. Impacts of land uses on runoff and soil erosion: A case study in Hilkot watershed Pakistan[J]. International Journal of Sediment Research, 2011,26(3):343-352.
- [11] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. Washington DC: Agriculture Handbook, 1997.
- [12] 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.
- [13] Farhan Y, Zregat D, Farhan I. Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE approach, RS, and GIS techniques: A case study of Kufranja watershed, northern Jordan[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2013,5(12):1247-1261.
- [14] 徐亚莉,罗明良,梁倍瑜,等. DEM 空间插值方法对土壤侵蚀模拟的影响研究:以 USPED 分析干热河谷典型冲沟为例[J]. 地理科学进展,2016,35(7):870-877.
- [15] 滕洪芬. 基于多源信息的潜在土壤侵蚀估算与数字制图研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.
- [16] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,1996.
- [17] Anselin L. Local indicators of spatial association: LISA [J]. Geographical Analysis,1995,27(2):93-115.
- [18] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)[S]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [19] 张法升,刘作新. 分形理论及其在土壤空间变异研究中的应用[J]. 应用生态学报,2011,22(5):1351-1358.
- [20] 李夫星. 基于 USLE 模型的河北省土壤侵蚀评价研究[D]. 石家庄:河北师范大学,2013.
- [21] 蒋好忱. 流域土壤侵蚀评价中的河流拓扑分析[D]. 西安:西北大学,2014.
- [22] 赵串串,杨晶晶,刘龙,等. 青海省黄土丘陵区沟壑侵蚀影响因子与侵蚀量的相关性分析[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(4):22-27.
- [23] 郭铃莉,杨文涛,王云琦,等. 基于 WEPP 模型的水土保持措施因子与侵蚀量关系研究[J]. 土壤通报,2017,48(4):955-960.