

水利水电技术  
*Water Resources and Hydropower Engineering*  
ISSN 1000-0860, CN 11-1757/TV

## 《水利水电技术》网络首发论文

题目：鲁中山区不同地貌类型土壤侵蚀定量归因  
作者：李翠艳，孙希华，刘曰庆  
收稿日期：2019-12-20  
网络首发日期：2020-05-13  
引用格式：李翠艳，孙希华，刘曰庆. 鲁中山区不同地貌类型土壤侵蚀定量归因. 水利水电技术. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1757.TV.20200512.2059.012.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 鲁中山区不同地貌类型土壤侵蚀定量归因

李翠艳, 孙希华, 刘曰庆

(山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358)

**摘要:** 土壤侵蚀是世界上最严重的环境问题之一, 研究土壤侵蚀强度空间格局及其影响因子相互作用对于缓解土壤侵蚀具有重要意义。基于 RUSLE 模型对鲁中山区 2005 年、2015 年土壤侵蚀进行评估, 综合土地利用、降雨量、坡度、植被覆盖度、高程、土壤类型、流域等影响因子, 应用地理探测器方法对不同地貌类型上的土壤侵蚀进行定量归因, 并提出了相应的水土保持措施。结果表明: (1) 2005 年鲁中山区土壤侵蚀模数为  $1273\text{t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ , 年土壤流失量为 1561.36 万 t; 2015 年鲁中山区土壤侵蚀模数为  $1039\text{t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ; 年土壤流失量为 1274.35 万 t。(2) 鲁中山区土壤侵蚀强度以轻度、中度侵蚀为主, 土壤侵蚀主要集中在北部和西北部的山地丘陵区。2005—2015 年鲁中山区土壤侵蚀逐渐改善, 土壤侵蚀强度主要由轻度侵蚀以上向微度侵蚀转化。(3) 在各种影响因子中, 坡度与植被覆盖度是决定土壤侵蚀空间异质的主导因子, 其次是土地利用类型。但随着海拔升高, 在低、中山区坡度的解释力降低, 植被覆盖度的解释力明显增强。(4) 双因子交互作用有助于增强土壤侵蚀的解释力。坡度与植被覆盖度的协同作用大大增加了单因子对土壤侵蚀的解释力。因此, 禁止陡坡耕地及退耕还林对减缓鲁中山区土壤侵蚀是非常必要的。

**关键词:** 土壤侵蚀; RUSLE 模型; 地理探测器; 鲁中山区; 人类活动; 泥沙; 降水

中文图类号: S157

中图分类号: A



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Quantitative attribution of soil erosion for different geomorphological types in

收稿日期: 2019-12-20

基金项目: 山东水土保持学会重点领域创新资助项目(sdsbxh20181105); 国家自然科学基金项目(41871121)

作者简介: 李翠艳(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事 GIS 技术应用与水土保持研究。E-mail: 2839379587@qq.com

通信作者: 孙希华(1963-), 男, 教授, 硕士, 主要从事水土保持和 GIS 应用研究。E-mail: sunxhsd@sina.com

# mountainous area of Mid-Shandong

LI Cuiyan, SUN Xihua, LIU Yueqing

(College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, Shandong China)

**Abstract:** Soil erosion is one of the most serious environmental problems in the world. It is of great significance to study the spatial pattern of soil erosion intensity and the interaction of its influencing factors to alleviate soil erosion. Based on RUSLE model, soil erosions in 2005 and 2015 in the mountainous area of Mid-Shandong are evaluated, and then the quantitative attribution of the soil erosion is made on different geomorphological types with the geodetector method through integrating the influencing factors, i.e. land-use; rainfall, slope gradient, vegetation coverage, elevation, soil type, watershed, etc., while the corresponding soil and water conservation measures are put forward as well. The result shows that (1) in 2005, the soil erosion modulus in the mountainous area of Mid-Shandong is  $1273\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$  with the annual soil loss of 15.6136 million t in 2005, while the soil erosion modulus is  $1039\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$  with the annual soil loss of 12.7435 million t therein in 2015; (2) the intensities of the soil erosions in the mountainous area of Mid-Shandong are mainly mild and moderate erosions, while the soil erosions are mainly concentrated within the northern and northwestern mountain-hilly areas. The soil erosions therein are gradually improved along with the conversion of the soil erosion intensity from the erosion above the mild-level to the micro-level erosion from 2005 to 2015; (3) Among various influencing factors, the dominant factors for determining the spatial heterogeneity of soil erosion are the slope gradient and the vegetation coverage, while the next is the land-use type. However, the explanatory power of the slope gradient is decreased and the explanatory power of the vegetation coverage is obviously increased in the lower-mid mountainous areas along with the rise of the altitude; (4) dual-factor interaction is helpful to enhance the explanatory power of the soil erosion, while the synergistic effect between the slope gradient and the vegetation coverage largely increases the explanatory power from a single factor on the soil erosion. Therefore, prohibiting the cultivation on steep slope and returning farmland to forest are necessary for alleviating the soil erosion in the mountainous area of Mid-Shandong.

**Key words:** soil erosion; RUSLE model; geodetector; mountainous area of Mid-Shandong; human activities; sediment; precipitation

## 0 引言

中国是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀造成有机物损失, 导致土地生产力下降。此外, 由于携带氮、磷等营养物质进入河流系统, 使生态环境恶化, 严重限制生态文明战略的实施。目前, 土壤侵蚀已经成为全球危害, 严重威胁人类的生存和社会可持续发展。据我国 2017 年生态环境状况统计, 我国土壤侵蚀面积为 294.9 万  $\text{km}^2$ , 占总面积的 30.7%。因此土壤侵蚀研究一直是学者们关注的重要课题。与传统的土壤侵蚀调查方法相比, 基于 RS 和 GIS 技术进行土壤侵蚀研究提高了工作效率, 具有更高的准确性。目前, 土壤侵蚀模型是土壤侵蚀定量研究的有效手段。由 WISCHMEIER 等<sup>[2]</sup>提出的 RUSLE 模型, 考虑了各种影响土壤侵蚀的因素, 可以灵活地模拟土壤侵蚀, 且易于与地理信息系统集成进行空间分析, 在世界范围内不同的气候、地质和土地利用情景中得到广泛应用。国内学者周璟等<sup>[3]</sup>基于 GIS 和 RUSLE 模型对六盘水市土壤侵蚀现状及空间分布特征进行研究; 李天宏等<sup>[4]</sup>基于 RUSLE 模型对延河流域土壤侵蚀动态变化特征进行分析, 并用实测的泥沙数据进行验证, 证明 RUSLE 模型模拟土壤侵蚀具有一定的准确性; 尹璐等<sup>[5]</sup>运用 RUSLE 模型对六盘水市

土壤侵蚀进行评价，为六盘市防治土壤侵蚀和区域管理规划决策提供相应参考。

近十年来，土壤侵蚀研究由土壤侵蚀评价与治理方法逐渐发展为生态建设和可持续发展为核心的问题导向研究<sup>[6]</sup>。基于 RS 和 GIS 对土壤侵蚀的空间分布特征与影响因素研究有了很大的进展。明晰土壤侵蚀强度的空间格局、科学的认识和评估地理因子及人类活动对土壤侵蚀的影响对于促进土壤生态治理和可持续利用土地资源有重要意义。国内学者马骞等<sup>[7]</sup>采用统计分析方法研究坡度、土壤、降雨、植被覆盖和土地利用等因子对土壤侵蚀的影响。钟莉娜等<sup>[8]</sup>采用土壤侵蚀评价指数分析了多流域降雨和土地利用格局对土壤侵蚀的影响。目前，土壤侵蚀研究大都以 RUSLE 等模型为主，更注重土地利用、坡度等影响因素与土壤侵蚀的关系。邹雅婧等<sup>[9]</sup>基于 RUSLE 模型分析土地利用类型、坡度、煤炭年产量等影响因子对渭北矿区土壤侵蚀的影响。曹巍等<sup>[10]</sup>基于 RUSLE 模型采用分析了降雨侵蚀力、植被覆盖度等因素对三江源区土壤侵蚀的影响。郝姗姗等<sup>[11]</sup>基于 RUSLE 模型预测黄土丘陵区降雨侵蚀力、坡度坡长等 5 个土壤侵蚀影响因子对土壤侵蚀的显著性，可为小流域综合治理提供科学依据。

鲁中山区位于山东省中部，是山东省海拔最高的地方，这里有泰山、沂山、鲁山等中低山，是沂河、牟汶河、弥河、玉符河等众多河流的发源地；地势高坡度大，地表物质疏松，夏季降雨较多且集中，加上人类不合理的农作物耕作方式，破坏了地面的植被和地貌，导致鲁中山山区河流含沙量大，水土流失较为严重，生态环境较为脆弱，严重阻碍区域的可持续发展。因此，研究鲁中山区土壤侵蚀状况对区域水土保持、生态环境恢复以及合理的土地利用具有重要意义。目前，一些有关小流域坡面土壤侵蚀的研究在该地区开展<sup>[12-14]</sup>，但多局限在流域尺度，跨地区较大空间范围的定量分析研究很少。近些年来，学者们多通过相关性分析、回归统计等常规方法对土壤侵蚀归因分析<sup>[15-16]</sup>，只是分析自变量对因变量的单一影响，不能解释多个影响因子之间的相互作用。但鲜有学者将地理探测器方法与土壤侵蚀相结合，从多种因素综合作用的角度对不同地貌类型土壤侵蚀定量归因<sup>[17]</sup>。地理探测器不仅能探测影响因子的解释力度，还能解释多因子之间的交互作用，而且不需要考虑因子间多重共线性的问题，能够更好的解释空间异质性<sup>[18]</sup>。本文在前人研究成果基础上，基于 GIS 空间分析和 RUSLE 模型，借助地理探测器方法对 2005 年、2015 年鲁中山区不同地貌类型土壤侵蚀定量归因，以期甄别该地区土壤侵蚀的主导影响因子，分析各影响因子间的协同作用，为该区域生态环境脆弱背景下的水土保持和生态环境建设提供科学依据<sup>[19]</sup>。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

鲁中山区位于山东省中部，介于 116°34'—118°56'E，35°22'—36°48'N 之间，面积为 12265.20km<sup>2</sup>，占山东省总面积的 7.78%（见图 1），包括泰安市、临沂市、济南市、莱芜市、淄博市、潍坊市、日照市部分地区，有泰山、鲁山、沂山、徂徕山等众多山脉，是弥河、沂河、沭河、玉符河、巴漏河、孝妇河、淄女河、潍河、牟汶河的发源地。鲁中山区地势西高东低，总体上由西北向东南倾斜，东西两侧隆起，中间低陷<sup>[20]</sup>。地形复杂，地貌类型以山地、丘陵为主；土壤以棕壤、褐土为主；气候属暖温带大陆性季风气候，降水主要集中在夏

季,夏季暴雨易使地表植被遭到破坏,造成严重的水土流失。水土流失导致该地区土地退化,生态环境恶劣,成为限制区域经济发展的重要因素。

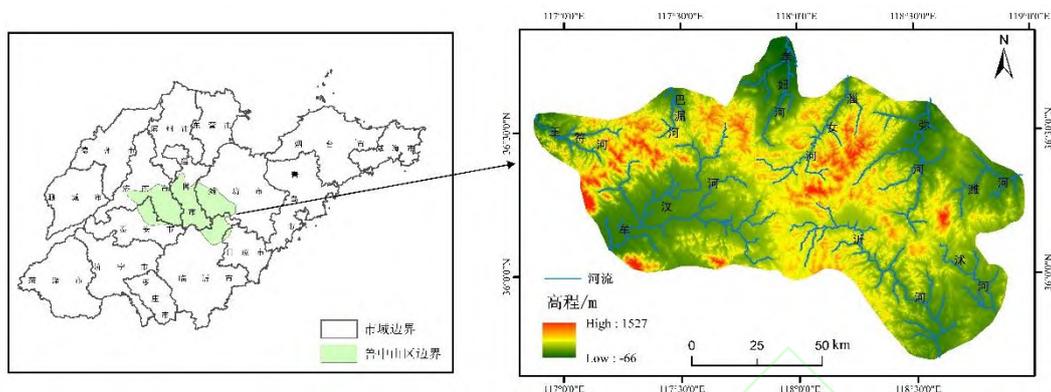


图1 鲁中山区地理位置及河流水系

## 1.2 数据来源

本研究使用数据包括: (1) 遥感影像来自地理空间数据云获得的 Landsat 8 OLI 传感器卫星。(2) 研究区及周边 42 个气象站日降雨量观测数据, 来源于中国科学院资源环境数据中心 (<http://www.resdc.cn>); (3) 土壤类型数据来源于南京地理所建立的土壤数据库、山东省农业厅第二次土壤普查数据, 比例尺为 1: 50 万; (4) 2005—2015 年土地利用数据, 参考土地利用现状分类标准, 并结合研究区实际情况, 经过遥感影像预处理(辐射定标、大气校正、拼接、裁剪等)采用目视解译方法将 2005、2015 年研究区进行土地利用分类; (5) 数字高程 (DEM) 数据来源于地理空间数据云(分辨率 30m); (6) 植被覆盖数据经 Landsat 遥感影像(分辨率为 30m) 波段运算求得。选取的影响因子主要有: 降雨量、坡度、土地利用类型、植被覆盖度、海拔、流域。

## 2 研究过程与方法

RUSLE 模型是目前研究土壤侵蚀使用最广泛的土壤侵蚀模型之一, 具有其他模型不可比拟的优势, 更能反映土壤侵蚀空间分布特征。其数学表达式为

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

式中,  $A$  为单位面积土壤侵蚀量 ( $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ );  $R$  为降雨侵蚀力因子 ( $MJ \cdot mm \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$ );  $K$  为土壤可蚀性因子 ( $t \cdot hm^2 \cdot h \cdot hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ );  $L$ 、 $S$  为坡长、坡度因子 (无量纲);  $C$  为植被覆盖与管理因子 (无量纲);  $P$  为水土保持措施因子 (无量纲)。

### 2.1 降雨侵蚀力因子 $R$

降雨侵蚀力是土壤侵蚀的主要驱动因子<sup>[21]</sup>, 在一定程度上直接影响土壤侵蚀的空间分布特征。由章文波等<sup>[22]</sup> 提出的基于日降雨的降雨侵蚀力模型精度较高, 且资料易获取, 因此选用章文波提出的全国日降雨量拟合模型来估算降雨侵蚀力, 其公式如下

$$M_i = \alpha \sum_{j=1}^k D_j^\beta \quad (2)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (3)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (4)$$

式中,  $M_i$  为第  $i$  个半月的降雨侵蚀力值 ( $\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$ );  $D_j$  为半月时段内第  $j$  天的侵蚀性日雨量 (要求  $D_j \geq 12\text{mm}$ , 否则记为 0);  $k$  为半月时段的天数, 全年共划分 24 个时段;  $\alpha$ 、 $\beta$  为模型待定参数;  $P_{d12}$  为日雨量 12mm 及以上的日平均雨量;  $P_{y12}$  为日雨量 12mm 及以上的年均雨量。利用 2000—2015 年鲁中山区及周边 42 个气象站日降雨量观测数据求出各个站点的  $R$  值, 利用 Kriging 插值法生成 2000—2015 年鲁中山区平均降雨侵蚀力  $R$  空间分布图 (见图 2)。

## 2.2 土壤可蚀性 $K$

$K$  因子反映了土壤性质对土壤侵蚀的敏感性,  $K$  值大小在一定程度上影响了土壤受侵蚀潜在危险度<sup>[23]</sup>。  $K$  因子估算公式有很多种, 选用 WILLIAMS 等<sup>[24]</sup>提出的 EPIC 模型计算各类型土壤  $K$  值, 计算公式如下

$$K = [0.2 + 0.3e^{-0.0256SAN(1-\frac{SIL}{100})}] [(\frac{SIL}{CLA+SIL})^{0.3}] [(1.0 - \frac{0.25OC}{OC+e^{3.27-2.95OC}})(1.0 - \frac{0.7SNI}{SNI+e^{-5.51+22.9SNI}})] \quad (4)$$

式中,  $K$  为土壤可蚀性因子 ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ), 由美制单位乘以转换系数 0.1317 计算得来;  $SAN$ 、 $SIL$ 、 $CLA$ 、 $OC$  分别为土壤质地中的砂粒、粉粒、黏粒和土壤有机碳含量 (%); 其中  $SNI = 1 - SAN/100$ ;  $OC$  可由土壤有机质含量  $OM$  (%) 计算得来, 公式为:  $OC = OM/1.724$ ; 鲁中山区  $K$  因子空间分布如图 3 所示。

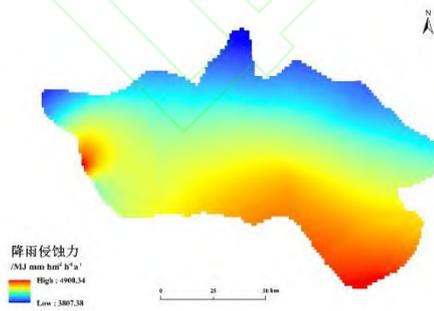


图 2 鲁中山区降雨侵蚀力  $R$  空间分布图

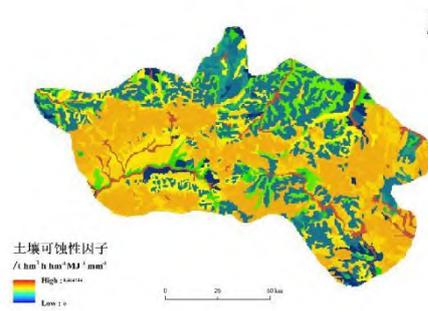


图 3 鲁中山区土壤可蚀性因子  $K$  空间分布

## 2.3 坡长因子 $L$ 和坡度因子 $S$

地形是影响土壤侵蚀最基本的地理特征因子<sup>[25]</sup>, 坡长坡度因子直接影响着土壤侵蚀。  $L$  和  $S$  的计算采用 WISCHMEIER 等<sup>[2]</sup>、BESKOW 等<sup>[26]</sup> 提出的修正公式

$$L = (\lambda/22.13)^\alpha \quad \alpha = \beta + 1 \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\frac{\sin\theta}{0.0896}}{3 \times (\sin\theta)^{0.8} + 0.56} \quad (6)$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \times \sin\theta + 0.03, & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \times \sin\theta - 0.5, & 5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ \\ 21.91 \times \sin\theta - 0.96, & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (7)$$

式中， $\lambda$ 为坡长（m），可利用 ArcGIS 中的 Flow Accumulation 工具计算汇流量，以汇流量与栅格分辨率的乘积表示获得； $\alpha$ 为坡长效应指数； $\beta$ 为细沟侵蚀与面蚀的比值； $S$ 为标准小区坡长； $\theta$ 为利用 DEM 提取的坡度。

#### 2.4 植被覆盖和管理因子 C

植被覆盖和管理因子与植被覆盖度密切相关，是影响土壤侵蚀最敏感的因子。其值介于 0~1 之间。采用蔡崇法等<sup>[27]</sup>提出的方法计算 C 值，计算公式如下

$$f = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (8)$$

$$C = \begin{cases} 1, & f = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f, & 0 < f \leq 78.3\% \\ 0, & f > 78.3\% \end{cases} \quad (9)$$

式中， $f$ 为植被覆盖度(%)； $C$ 为植被覆盖和管理因子； $NDVI$ 为归一化植被指数， $NDVI_{min}$ 为纯裸土象元的  $NDVI$  值； $NDVI_{max}$ 为纯植被象元的  $NDVI$  值。可根据 ENVI5.3 软件通过波段计算求得,根据累计像元值的 95%和 5%分别记为 $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 。利用 Arcgis 中的栅格计算器根据公式求得植被覆盖与管理因子 C 值（见图 4）。

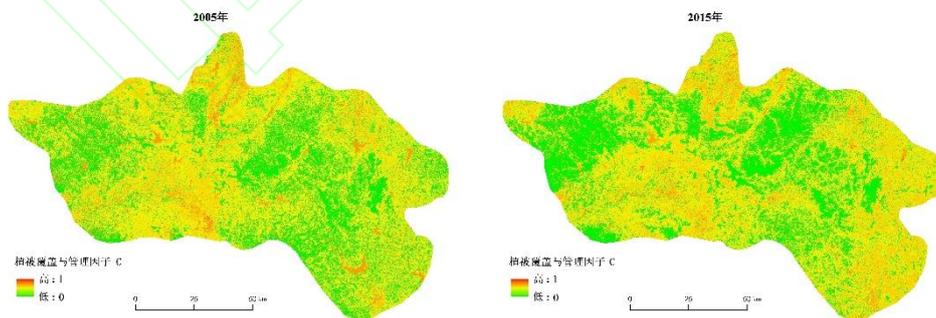


图 4 鲁中山区植被覆盖与管理因子 C 空间分布

#### 2.5 水土保持措施因子 P

水土保持措施因子  $P$  为实施水土保持措施后，土壤流失量与顺坡种植时土壤流失量比值，其值介于 0~1。由于目前对于水土保持措施的标准和观测方法还没有统一，缺少一个

完整的水土保持措施因子赋值标准。水土保持措施主要通过改变地形和汇流方式减少，因此土地利用信息可以很好地表示水土保持措施，鲁中山区用于减少耕地土壤侵蚀的水土保持措施主要有等高耕作和梯田等。对 2005 年、2015 年的遥感影像进行分类，得到研究区不同土地利用类型的空间分布（见图 6），结合相关学者研究成果<sup>[28-29]</sup>和鲁中山区土地利用及农事活动情况，得到鲁中山区不同土地利用下的水土保持措施因子  $P$  值（见表 1）。

表 1 鲁中山区不同土地利用下的水土保持措施因子  $P$  值

项目	土地利用类型							
	有林地	灌木林疏林地	其他林地	高覆盖草地	中、低覆盖草地	水域	建设用地	未利用地
$P$ 值	1.00	0.70	0.50	1.00	0.65	0.00	0.00	1.00

注：耕地  $P$  值，另外单独处理

参考水利部 1997 年公布的土壤侵蚀潜在危险度评级标准，结合鲁中山区实际情况，将耕地根据不同坡度及地形条件，将坡度分成 6 个区间。通过以下公式对坡度因子进行标准化处理，计算不同坡度条件下的耕地  $P$  因子值（见表 2）。公式如下

$$P_{\text{耕}} = a + \frac{X - X_{ab\min}}{X_{ab\max} - X_{ab\min}} \times (b - a) \quad (10)$$

式中， $P_{\text{耕}}$  为标准化坡度的  $P$  因子值； $X$  表示坡度的初始值； $X_{ab\max}$ 、 $X_{ab\min}$  表示坡度所在分级区间的最大值和最小值； $a$  和  $b$  分别表示赋值标准在分级区间内的最小值和最大值。

表 2 不同坡度条件下的耕地  $P$  因子值

坡度分级	0°~5°	5°~10°	10°~15°	15°~20°	20°~25°	25°~90°
赋值标准	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.7	0.7~0.9	0.9~1.0

## 2.6 地理探测器的原理与方法

地理探测器是一种通过检测空间分异性来揭示背后驱动因子的一种新统计方法，通过  $q$  统计量来度量空间的分异性，探测解释因子、分析变量之间的交互关系<sup>[18]</sup>。计算公式如下

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (11)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2 \quad (12)$$

式中， $h=1, 2, \dots, L$  为自变量  $X$  的分层； $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  和全区的单元数； $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别



异常值，最终提取 12040 个有效点，作为地理探测器运行数据。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤侵蚀空间分布及地理环境因子统计

2005 年鲁中山区土壤侵蚀模数为  $1273\text{t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ，年土壤流失量为 1561.36 万 t；2015 年鲁中山区土壤侵蚀模数为  $1039\text{t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ；年土壤流失量为 1274.35 万 t。2005—2015 年研究区土壤侵蚀模数总体呈下降趋势。将计算的土壤侵蚀模数依据《北方土石山区水土流失综合治理技术标准》（SL665—2014）分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀 6 个等级。从 2005 年、2015 年土壤侵蚀强度空间分布（见图 6）可以看出：土壤侵蚀主要集中在研究区北部及西北部；在各土地利用类型中，土壤侵蚀主要发生在地形起伏度较大的山区林地、其次为植被覆盖度较低的草地，以及坡耕地区。

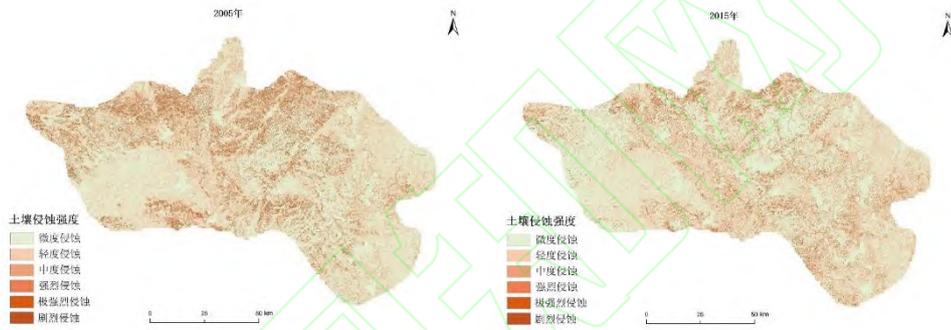


图 6 鲁中山区土壤侵蚀强度空间分布

根据土壤侵蚀模数分布栅格数据，求出研究区不同土壤侵蚀强度所占的面积及其百分比（见表 3），由此看出，2005—2015 年土壤侵蚀有所改善，2005 年微度侵蚀面积占总面积的 66.75%，轻度侵蚀及以上面积占总面积的 33.25%；2015 年微度侵蚀面积占总面积的 69.60%，轻度侵蚀及以上面积占总面积的 30.40%。与 2005 年相比，2015 年轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀面积都有不同程度减小，土壤侵蚀强度主要是由轻度侵蚀以上向微度侵蚀转化。

表 3 2005 年和 2015 年鲁中山区土壤侵蚀强度面积比较

土壤侵蚀模数 $\text{t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$	土壤侵蚀强度	面积/ $\text{km}^2$		所占百分比/%	
		2005 年	2015 年	2005 年	2015 年
<200	微度侵蚀	8062.72	8406.88	66.75	69.60
200~1000	轻度侵蚀	1287.52	1379.65	10.66	11.42
1000~2500	中度侵蚀	1024.89	1068.65	8.49	8.85

2500~4000	强烈侵蚀	515.1	469.49	4.26	3.89
4000~6000	极强烈侵蚀	418.57	325.53	3.47	2.70
> 6000	剧烈侵蚀	769.55	428.17	6.37	3.54
轻度侵蚀以上		4015.63	3671.49	33.25	30.40

土壤侵蚀在不同地貌类型上具有空间异质性（见表 4、表 5）。受坡度、植被覆盖度等影响，土壤侵蚀主要集中在海拔较高的山地丘陵以及山前坡耕地。这是由于山地丘陵区，起伏度大，地形复杂，生态较为脆弱，土壤侵蚀较为严重；坡耕地尤其是未采取任何水土保持措施的坡耕地，坡度较大，坡面土壤的不稳定性愈大，在外力作用下发生下移的可能性就愈大<sup>[30]</sup>，土壤侵蚀也就越强；由表看出：各地形以微度侵蚀为主，平原、台地地区的平均土壤侵蚀模数最小，低山、中山的土壤侵蚀模数最大。2015 年较 2005 年微度侵蚀所占面积都有所增加，而轻度及以上侵蚀面积有所减少，尤其在中山区，2015 年微度侵蚀面积比例达到 95%以上；主要是由于 2005—2015 年水土保持措施越来越好，植被覆盖度也越高，土壤侵蚀有所减缓。

表 4 2005 年鲁中山区不同地貌类型平均土壤侵蚀模数和土壤侵蚀强度面积平均比例比较

地形	平均土壤侵蚀模数		平均比例/%				
	/t km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	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
平原	189	69.57	18.15	7.25	1.79	0.81	0.81
台地	175	64.02	12.37	10.83	4.60	3.05	3.86
低丘	698	63.22	4.45	8.11	6.20	5.79	10.97
高丘	1238	63.22	4.45	8.11	6.20	5.79	10.97
低山	3365	69.39	1.04	3.30	4.09	5.37	15.84
中山	2865	75.43	0.24	0.86	1.59	2.94	16.69

表 5 2015 年鲁中山区不同地貌类型平均土壤侵蚀模数和土壤侵蚀强度面积平均比例比较

地形	平均土壤侵蚀模数		平均比例/%				
	/t km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	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
平原	123	68.99	14.94	10.41	3.04	1.36	1.26
台地	168	68.53	19.62	8.08	2.00	0.90	0.87

低丘	586	63.39	13.78	12.01	4.76	2.91	3.14
高丘	1325	71.44	4.85	7.98	5.23	4.26	6.24
低山	2534	86.22	0.90	2.44	2.53	2.78	5.13
中山	2268	95.61	0.11	0.29	0.50	0.76	2.70

### 3.2 基于地理探测器的不同地貌类型区土壤侵蚀定量归因

#### 3.2.1 土壤侵蚀影响因子的显著性分析

因子探测器的运行结果表明，各环境因子对土壤侵蚀空间分布的解释力有显著差异<sup>[17]</sup>。

2005 年土壤侵蚀影响因子  $q$  值大小依次为：坡度 (0.240) > 土地利用类型 (0.123) > 植被覆盖度 (0.098) > 海拔 (0.095) > 土壤类型 (0.087) > 流域 (0.053) > 降雨量 (0.027)；2015 年土壤侵蚀影响因子  $q$  值大小依次为：植被覆盖度 (0.107) > 坡度 (0.078) > 土地利用类型 (0.071) > 土壤类型 (0.065) > 海拔 (0.031) > 流域 (0.025) > 降雨量 (0.014)。坡度、植被覆盖度、土地利用类型对土壤侵蚀解释力最高。分析 2005 年、2015 年鲁中山区不同地貌类型影响因子  $q$  值 (见表 6、表 7)，由此看出：影响土壤侵蚀环境因子的显著性受到地貌类型区内部特征影响，海拔在平原地区解释力不显著，而在中山地区较为显著；坡度随着海拔的升高解释力逐渐增强，在低、中山区解释力逐渐减弱；主要是由于山区地形复杂，植被覆盖度较高，坡度对土壤侵蚀的影响力降低。在地形较为平坦的平原、台地地区，2005 年坡度对土壤侵蚀的影响比 2015 年大，主要是由于 2005—2015 年耕地水土保持措施越来越好，坡度对土壤侵蚀的影响力逐渐降低。王欢等<sup>[31]</sup>对喀斯特不同地貌类型区土壤侵蚀研究中得出坡度对土壤侵蚀解释力在中海拔平原、丘陵、台地等地形平坦区显著大于中、小起伏中山区。与本文结果较为接近。植被覆盖度在中山区解释力最强，2005、2015 年分别高达 54.3%，54.4%。2005 年降雨量在中山区解释力达到 18.2%，主要是由于 2005 年年平均降雨量大，高海拔地区遇到强降雨容易发生水力侵蚀、加速水土流失。

表 6 2005 年鲁中山区不同地貌类型影响因子  $q$  值统计

地貌类型	海拔	土地利用	坡度	降雨	土壤类型	植被覆盖度	流域
平原	-	0.108	0.244	0.027	0.084	0.041	-
台地	0.000	0.115	0.199	0.044	0.074	0.047	0.062
低丘	0.022	0.102	0.244	0.039	0.068	0.090	0.057
高丘	0.005	0.057	0.267	0.069	0.106	0.210	0.024
低山	0.000	0.014	0.102	0.040	0.084	0.417	0.030

中山	0.017	0.080	0.158	0.182	0.121	0.643	0.048
----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

表 7 2015 年鲁中山区不同地貌类型影响因子  $q$  值统计

地貌类型	海拔	土地利用	坡度	降雨	土壤类型	植被覆盖度	流域
平原	-	0.132	0.174	0.014	0.066	0.048	0.002
台地	0.001	0.137	0.195	0.035	0.076	0.040	0.064
低丘	0.025	0.075	0.215	0.020	0.055	0.068	0.032
高丘	0.012	0.035	0.276	0.023	0.075	0.229	0.018
低山	0.007	0.053	0.167	0.014	0.072	0.552	0.037
中山	0.042	0.405	0.169	0.097	0.506	0.846	0.033

注：“-”表示  $q$  值未通过显著性检验

### 3.2.2 土壤侵蚀影响因子交互探测研究

土壤侵蚀的空间分布是由多种影响因子共同作用的结果，利用交互探测器可以探测多种影响因子对土壤侵蚀空间分布变化的交互作用。通过分析 2005、2015 年不同地貌类型影响因子的交互作用（见表 8、表 9），可以看出：影响因子的两两交互作用均会增强土壤侵蚀的解释力。按照交互作用主导性前三位进行统计：2005 年主导交互作用排在第一位的是坡度与其他环境因子的叠加作用，这表明坡度是土壤侵蚀发生的基础。在平原、台地等地形相对平坦的地区，坡度与土地利用类型的协同作用增加了对土壤侵蚀的解释力。主要是由于不同坡度的土地利用类型的土壤侵蚀是有差异的。在坡耕地上，尤其是没有采取水土保持措施的坡耕地，坡度为控制土壤侵蚀的主导因素。因此这证明了禁止陡坡耕地的必要性。在丘陵山地区，主导交互作用前三位均为植被覆盖度与其他因子的叠加作用，这表明差异较大的植被覆盖度的土壤侵蚀差异较大，在中山区尤为显著，2005、2015 年植被覆盖度与坡度的主导作用达到了 70% 以上。因此这也证明了退耕还林还草的必要性。在地形起伏度较大的中山区，坡度与降雨量的协同作用大大增强了对土壤侵蚀的解释力，陡坡处遇到强降雨会增加侵蚀量，加速水土流失。通过拦截降雨等措施降低降雨侵蚀潜在能力，提高土壤抗侵蚀能力 [32]。

表 8 2005 年鲁中山区不同地貌类型区土壤侵蚀影响因子交互作用探测

地貌类型	主导交互作用 1 ( $q$ )	主导交互作用 2 ( $q$ )	主导交互作用 3 ( $q$ )
平原	坡度 $\cap$ 土地利用类型 (0.32)	坡度 $\cap$ 土壤类型 (0.30)	土地利用类型 $\cap$ 土壤类型 (0.29)
台地	坡度 $\cap$ 土壤类型 (0.38)	坡度 $\cap$ 土地利用类型 (0.36)	土地利用类型 $\cap$ 土壤类型 (0.32)

低丘	坡度∩植被覆盖度 (0.44)	坡度∩土壤类型 (0.34)	坡度∩土地利用类型 (0.33)
高丘	坡度∩植被覆盖度 (0.47)	坡度∩土壤类型 (0.35)	坡度∩土地利用类型 (0.34)
低山	坡度∩植被覆盖度 (0.57)	植被覆盖度∩土地利用类型 (0.54)	植被覆盖度∩土壤类型 (0.42)
中山	坡度∩植被覆盖度 (0.70)	植被覆盖度∩降雨量 (0.66)	植被覆盖度∩土地利用类型 (0.52)

表9 2015年鲁中山区不同地貌类型区土壤侵蚀影响因子交互作用探测

地貌类型	主导交互作用 1 ( $q$ )	主导交互作用 2 ( $q$ )	主导交互作用 3 ( $q$ )
平原	坡度∩植被覆盖度 (0.31)	坡度∩土壤类型 (0.27)	植被覆盖度∩土壤类型 (0.26)
台地	坡度∩土壤类型 (0.40)	坡度∩土地利用类型 (0.35)	土地利用类型∩土壤类型 (0.34)
低丘	植被覆盖度∩坡度 (0.33)	坡度∩土壤类型 (0.22)	土地利用类型∩植被覆盖度 (0.21)
高丘	植被覆盖度∩坡度 (0.42)	坡度∩土壤类型 (0.35)	植被覆盖度∩土地利用类型 (0.34)
低山	植被覆盖度∩坡度 (0.46)	植被覆盖度∩土壤类型 (0.43)	植被覆盖度∩流域 (0.40)
中山	植被覆盖度∩土地利用类型 (0.97)	植被覆盖度∩土壤类型 (0.87)	植被覆盖度∩降雨量 (0.74)

#### 4 讨论

土壤侵蚀一直是当前关注的一个热点,通过地理探测器方法对鲁中山区不同地貌类型土壤侵蚀进行定量归因分析,较好地展示了土壤侵蚀空间分异的主导因子及因子交互特点。

据 2012 年第一次全国水利普查水土保持情况公报,山东省水力侵蚀面积为 27.25km<sup>2</sup>。其中,轻度侵蚀面积最大,中度侵蚀面积次之,分别为 54.77%和 24.34%。鲁中山区土壤侵蚀强度以轻度、中度侵蚀为主,2005 年鲁中山区微度、轻度、中度侵蚀面积分别占总面积的 66.75%, 10.66%和 8.49%; 2015 年鲁中山区微度、轻度、中度侵蚀面积分别占总面积的 69.60%, 11.42%和 8.85%。相比较而言,鲁中山区土壤侵蚀强度较为接近山东省平均水平。

鲁中山区土壤侵蚀在不同地貌类型区存在显著差异。坡度、植被覆盖度对土壤侵蚀解释力最高。坡度随着海拔的升高解释力逐渐增强,在地形复杂的中低山区解释力逐渐降低,植被覆盖度的解释力逐渐增强。刘致远<sup>[33]</sup>用地理探测器方法分析滇中地区土壤侵蚀得出土壤侵蚀强度空间分布与植被覆盖度、坡度具有较高的相关性。但由于使用 30m 分辨率 DEM 用于 RUSLE 模型,提取的坡度、坡长因子在一定程度上影响鲁中山区土壤侵蚀量的估算精度,因此提高 DEM 分辨率是今后研究的一个重点。其次,随着经济的不断发展,人类对土壤侵蚀的干扰日益增强,本研究主要考虑自然环境因子对土壤侵蚀的解释力,并没有考虑人类社会经济因素。在实际应用中,人类经济活动对土壤侵蚀具有重要影响,今后还需进一步分析社会经济活动对研究区土壤侵蚀的影响机理。

本文基于 RUSLE 模型和地理探测器方法分析 2005 年、2015 年鲁中山区土壤侵蚀强度空间布局及各影响因子在不同地貌类型对土壤侵蚀的解释力。能够通过地理探测器的交互作用分析多种影响因子对土壤侵蚀的影响力,但由于 RUSLE 模型各因子的数据精度不一,在模型计算过程中可能会出现误差;水土保持措施因子是根据土地利用类型赋值的方式进行计算,主观性较强,对模型的精度会有一定的影响。但耕地根据坡度及地形条件进行水土保持措施因子改进,提高了 P 因子计算精度。今后应考虑对其他土地利用类型的水土保持措施因子进行改进以提高模型的精度。

## 5 结论

以鲁中山区为研究区,研究 2005 年、2015 年鲁中山区土壤侵蚀空间分布状况。基于地理探测器揭示不同地貌类型鲁中山区土壤侵蚀空间分异机制。得出如下结论。

(1)2005 年鲁中山区土壤侵蚀模数为  $1273\text{t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ,年土壤流失量为 1561.36 万 t;2015 年鲁中山区土壤侵蚀模数为  $1039\text{t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ;年土壤流失量为 1274.35 万 t。2005—2015 年鲁中山区土壤侵蚀状况有所改善,土壤侵蚀总体呈下降趋势。

(2)选择 7 个影响因子对鲁中山区土壤侵蚀空间分异特征的解释力不同。其中,坡度和植被覆盖度对鲁中山区土壤侵蚀空间分异的解释力最高。坡度随着海拔的升高解释力逐渐增强,在低、中山区解释力逐渐减弱,而植被覆盖度解释力增强。不同影响因子在不同地貌类型区对土壤侵蚀影响有显著差异。

(3)交互探测器可以探测各种影响因子对土壤侵蚀空间分布变化的交互作用,坡度与植被覆盖度的协同作用大大增加了对土壤侵蚀的解释力,因此需注重农作物的田间管理和增加植被覆盖度<sup>[34]</sup>。坡度与降雨的叠加大大增加土壤侵蚀的解释力,降雨在陡坡处侵蚀更为严重,因此,加强对陡坡耕地及沟壑的治理,对强降雨陡坡处采取必要的防范措施。

(4)在坡耕地上,尤其是没有采取水土保持措施的坡耕地,坡度为控制土壤侵蚀的主导因素。该区域应以小流域为治理单元,强化坡面防护体系、径流调控体系和沟道防护体系,加大林草植被建设和梯田整修改造力度,涵养水源,减少水土流失。同时,该地区应以可持续发展为目的,实施退耕还林还草政策,加强重点区域的水土流失治理,共同提高生态修复力度。

本次研究所选择的方法和研究成果能比较真实的反映鲁中山区土壤侵蚀现状,并能较为准确的分析影响土壤侵蚀的主导因子。但研究过程中仍存在一些不足之处,如模型中各因子精度有待于进一步提高,水土保持措施因子的设置具有一定的主观性等;这些均需在在今后的工作中进一步完善。

## 参考文献:

[1] 郑粉莉,王占礼,杨勤科.我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望[J].自然杂志,2008,30(1):12-16.

[2] WISCHMEIER W H, SMITH D. Prediction rainfall erosion losses: a guide to conservation planning science

[M]. Washington D C: USDA, 1978.

[3]周璟,张旭东,何丹,等.基于 GIS 与 RUSLE 的武陵山区小流域土壤侵蚀评价研究[J].长江流域资源与环境,2011,20(4):468-474.

[4]李天宏,郑丽娜.基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J].自然资源学报,2012,27(7):1164-1175.

[5]尹璐,闫庆武,卞正富.基于 RUSLE 模型的六盘水市土壤侵蚀评价[J].生态与农村环境学报,2016,32(3):389-396.

[6]张宇婷,肖海兵,聂小东,等.基于文献计量分析的近 30 年国内外土壤侵蚀研究进展[J/OL].土壤学报,2019:1-19 [2020-03-05].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20191029.1608.012.html>.

[7]马骞,于兴修,刘前进,等.沂蒙山区土壤侵蚀空间分布及其影响因素动态变化[J].中国农业科学,2010,43(22):4652-4662.

[8]钟莉娜,王军,赵文武.多流域降雨和土地利用格局对土壤侵蚀影响的比较分析——以陕北黄土丘陵沟壑区为例[J].地理学报,2017,72(3):432-443.00

[9]邹雅婧,闫庆武,谭学玲,等.渭北矿区土壤侵蚀评估及驱动因素分析[J].干旱区地理,2019,42(6):1387-1394.

[10]曹巍,刘璐璐,吴丹.三江源区土壤侵蚀变化及驱动因素分析[J].草业学报,2018,27(6):10-22.

[11]郝姗姗,李梦华,马永强,等.黄土丘陵区土壤侵蚀因子敏感性分析[J].中国水土保持科学,2019,17(2):77-86.

[12]董元杰,付伟章,陈为峰,等.鲁中山区小流域坡面土壤侵蚀产流、产沙及侵蚀方式变化过程的研究[J].土壤通报,2010,41(1):185-188.

[13]王艳华,董元杰,张民,等.鲁中山区小流域坡面侵蚀土壤养分空间分异特征研究[J].土壤,2011,43(2):179-183.

[14]胡国庆,董元杰,邱现奎,等.鲁中山区小流域坡面土壤侵蚀的磁性示踪法研究[J].水土保持学报,2010,24(5):169-173.

[15]周来,张博,陈丽萍,等.基于 GIS 的福建省将乐县土壤侵蚀及保持定量分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(6):23-30.

[16]王涛.陕北洛河流域降水和植被变化对土壤侵蚀的影响[J].江苏农业科学,2018,46(20):295-300.

[17] WANG Huan, GAO Jiangbo, HOU Wenjuan. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different geomorphological types in karst areas: Based on the geodetector method [J]. Journal of Geographical Sciences,2019,29(2):271-286.

[18] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

- [19] 胡先培,曾成,钱庆欢,等.基于RUSLE模型的铜仁地区1987—2015年土壤侵蚀时空特征[J].生态与农村环境学报,2019,35(2):158-166.
- [20] 徐萍,刘霞,张光灿,等.鲁中山区小流域不同土地利用类型的土壤分形及水分入渗特征[J].中国水土保持科学,2013,11(5):89-95.
- [21] 刘文超,刘纪远,匡文慧.陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征[J].地理学报:2019,74(9):1-18.
- [22] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
- [23] 李恒凯,吴立新,熊云飞,等.基于RUSLE模型的离子稀土矿区土壤侵蚀时空演变分析—以岭北矿区为例[J].稀土,2016,37(4):35-44.
- [24] WILLIAMS J R, RENARD K G, DYKE P T. EPIC, Method for assessing erosion's effects on soil productivity[J]. Soil Water Conservation,1983,38:381-393.
- [25] 王晓瑞,隋雪艳,林晨,等.长江中下游低山丘陵区土地整治对区域水土流失变化的影响机制研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(4):893-902.
- [26] BESKOW S, MELLO C R, NORTON L D, et al. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling[J]. Catena, 2009, 79:49-59.
- [27] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
- [28] 游松财,李文卿.GIS支持下的土壤侵蚀量估算——以江西省泰和县灌溪乡为例[J].自然资源学报,1999,14(1):62-68.
- [29] 许月卿,邵晓梅.基于GIS和RUSLE的土壤侵蚀量计算——以贵州省猫跳河流域为例[J].北京林业大学学报,2006,28(4):67-71.
- [30] 苟照君,李英年,刘峰贵,等.黄河上游高寒草地土壤全氮含量分布特征及其影响因素[J].生态学杂志,2019,38(9):2585-2594.
- [31] 王欢,高江波,侯文娟.基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J].地理学报,2018,73(9):1674-1686.
- [32] 肖继兵,孙占祥,刘志,等.降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(22):159-166.
- [33] 刘致远. 基于遥感和GIS技术的滇中地区土壤侵蚀研究[D].昆明: 云南师范大学,2019.
- [34] 吴淑芳,吴普特.水土保持及土壤侵蚀动态机制研究现状及存在问题[J].水土保持研究,2010,17(2):37-40.