



农业资源与环境学报

Journal of Agricultural Resources and Environment

ISSN 1005-4944, CN 12-1437/S

《农业资源与环境学报》网络首发论文

题目： 河南省近十年来土壤侵蚀时空变化分析
作者： 黄硕文, 李健, 张欣佳, 邓联文, 张金萍
DOI: 10.13254/j.jare.2020.0258
收稿日期: 2020-05-15
网络首发日期: 2020-07-16
引用格式: 黄硕文, 李健, 张欣佳, 邓联文, 张金萍. 河南省近十年来土壤侵蚀时空变化分析. 农业资源与环境学报. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0258>



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。

河南省近十年来土壤侵蚀时空变化分析

黄硕文¹, 李健^{1*}, 张欣佳¹, 邓联文², 张金萍²

(1.郑州大学地球科学与技术学院,郑州 450001; 2.郑州大学水利科学与工程学院, 郑州 450001)

摘要: 为定量评价河南省土壤侵蚀状况, 实现河南省农业高质量发展, 本文以 RUSLE 模型为基础, 利用多源遥感数据、数字高程模型、水文统计数据、气象数据等, 系统分析了河南省近 10 年来土壤侵蚀的时空变迁, 并结合地理探测器方法探讨了研究区土壤侵蚀可能的驱动因素。研究表明: 2008—2018 年河南省土壤侵蚀以微度侵蚀为主, 其面积占全省 95% 以上且逐年递增, 轻度侵蚀区面积逐年递减, 中度及以上侵蚀区域面积无明显变化; 河南省西部、西南部及南部地区的土壤侵蚀状况近年来有明显改善, 而西北部及北部黄河流域的土壤侵蚀模数维持相对较高状态; 坡度对土壤侵蚀的解释力最强, 且与其他因子有强交互作用, 是影响河南省土壤侵蚀的主要因素。本研究可以为河南省生态治理及环境保护政策制定提供科学依据, 促进黄河流域的绿色健康发展。

关键词: 河南省; 土壤侵蚀; 定量; RUSLE 模型

中国分类号:S157.1

doi: 10.13254/j.jare.2020.0258

Analysis of spatial and temporal changes in soil erosion in Henan province over the last ten years

HUANG Shuo-wen¹, LI Jian^{1*}, ZHANG Xin-jia¹, DENG Lian-wen², ZHANG Jin-ping²

(1.School of Earth Science and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2.School of Water Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This study systematically analyzed the spatial and temporal changes in soil erosion over the past 10 years in Henan province, using the RUSLE model, to quantitatively evaluate the soil erosion status and achieve high-quality agricultural development there. The possible factors driving soil erosion were discussed with a method using geographic detectors. The results show that soil erosion in Henan province was dominated by “slight erosion” over more than 95% of the province and that this increased year by year from 2008 to 2018. The area of “light erosion” decreased year by year while the area of “moderate and above erosion” showed no obvious change trend. The soil erosion situation in the western, southwestern, and southern regions of Henan province improved significantly in recent years, while the soil erosion modulus in the northwestern and northern Yellow River basins has remained relatively high. The slope is the main factor affecting soil erosion due to its strong interpretation of and interaction with the former. This research can provide a scientific basis for the formulation of ecological governance and environmental protection policies to promote green and healthy development of the Yellow River Basin.

Keywords: Henan Province; soil erosion; quantitative; RUSLE model

收稿日期: 2020-05-15

作者简介: 黄硕文(1997--), 男, 广西梧州人, 硕士研究生, 从事土壤侵蚀和地理信息系统方向研究。E-mail: 609852505@qq.com

*通信作者: 李健 E-mail: jianli@zzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51739009); 国家重点研发计划(2018YFC0406501)

Project supported: The Key Program of the National Natural Science Foundation of China(51739009); The National Key Research and Development Project of China (2018YFC0406501)

2019年9月,黄河流域生态保护和高质量发展被列为重大国家战略,水土流失相关研究是生态保护的重要组成部分。河南省处于黄河中下游,是农业大省和粮食主产区,但部分地区在气候、地形等因素的综合作用下极易形成土壤侵蚀,对耕地产生破坏,直接影响粮食作物的产量。为了更好的保护有限的耕地资源,实现区域高质量发展,有必要对河南省土壤侵蚀状况进行定量评价,分析其时空变化情况,探究引发土壤侵蚀的主导因素,并制定相关的保护措施。

对土壤侵蚀进行评价主要有实地观测和建立土壤侵蚀模型两种方法。在实际应用中,由于某些地区的客观条件限制难以进行实地观测,建立土壤侵蚀模型进行侵蚀量预报是常用的方法。根据建立的方法用途和所模拟的侵蚀过程可以将土壤侵蚀模型分为经验模型、物理模型和分布模型^[1]。代表性的物理模型有水蚀预报模型 WEPP^[2]、欧洲土壤侵蚀预报模型 EUROSEM^[3]、非点源地区流域环境反应模型 ANSWERS^[4]等,分布模型以 ABBOTT M B 提出的 SHE^[5]模型最为典型,物理模型和分布模型由于面向过程建模,所需的资料和参数设置过多,难以在特定区域外进行推广。土壤侵蚀经验模型基于大量实测数据进行统计分析,结合土壤侵蚀过程的机理认识建立,国际上应用较广的主要有通用水土流失方程 USLE 和其修正形式 RUSLE。RUSLE 对 USLE 中各因子含义及计算方法进行了必要的修正,增加了复杂坡度下土壤流失量的计算方法,具有结构简明、计算因子含义明显的特点,且容易与 GIS 结合进行分析。其在国内外土壤侵蚀定量评价中具有广泛的应用^{[6][7][8][9]}。土壤侵蚀过程中同时受到多种因素的影响,因此分析其内在驱动力对于水土保持政策的制定至关重要,地理探测器可用于分析不同自变量对于因变量的解释能力,在土壤侵蚀领域的应用也得到了学者们的认可^{[10][11]}。

本文利用 RUSLE 模型与 GIS 技术相结合,对河南省全境土壤侵蚀强度进行定量评价,分析其时空变化情况,并利用地理探测器分析土壤侵蚀影响因素,为河南省水土流失防治重点保护区的划定和生态环境恢复保护工作提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河南省地处中原(31°23'~36°22'N, 110°21'-116°39'E),是国家重要的粮食生产基地(图1),由于季风气候的影响以及跨海河、黄河、淮河、长江四大水系的地理位置,研究区内常常出现局部土壤强侵蚀,对生态环境造成破坏,但近几年河南加强了有关水土保持措施的建设,水土流失情况得到了一定改善。

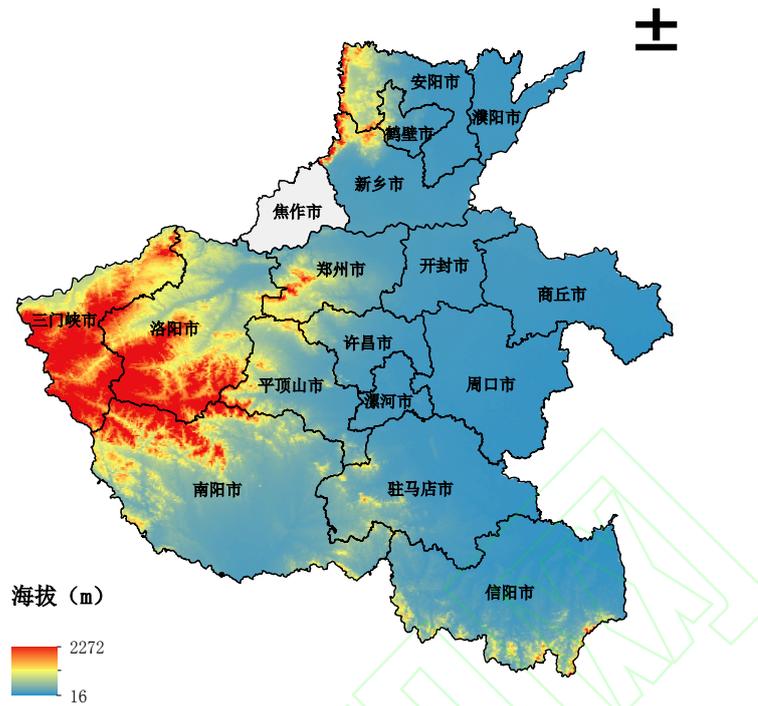


图 1 河南省行政区划及数字高程模型

Fig.1 Administrative division and digital elevation model of Henan province

1.2 数据来源

文中所选用的数据为河南省行政区划图、降雨数据（2008、2013、2018）、ETM+卫星遥感数据、数字高程模型（DEM）数据、地貌类型数据和土壤数据。其中降雨数据为中国气象数据网

（<http://data.cma.cn>）的中国地面气候资料日值数据集；土壤数据（质地、有机质等）来源于黑河计划数据管理中心（<http://westdc.westgis.ac.cn>）的“基于世界土壤数据库的中国土壤数据集 (v1.1)”，从中截取了河南省地区数据；DEM 90m 分辨率原始高程数据和 ETM+ 卫星遥感影像来源于地理空间数据云平台（<http://www.gscloud.cn>）；地貌形态类型数据来源于中国科学院资源环境数据中心

（<http://www.resdc.cn>）。将各个因子数据坐标系转化为高斯-克吕格投影坐标系，栅格数据分辨率统一为 90m*90m。

1.3 RUSLE 模型

RUSLE 模型充分考虑了影响土壤侵蚀的多个因子，对复杂、分布广泛的土壤侵蚀及模型参数变异性等问题均提出较好的解决方案，具有广泛的应用。基本公式形式为：

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

式中，A 为模型计算得到的土壤侵蚀模数，单位为 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ；R 为降雨侵蚀力因子；K 为土壤可侵蚀性因子；L 为坡长因子；S 为坡度因子；C 为作物覆盖和管理因子；P 为水土保持措施因子^[12]。RUSLE 模型通过计算各个因子的指标值对土壤侵蚀强度进行定量评价。

降雨侵蚀力因子 (R)：降雨通过对土壤进行冲击引发水力侵蚀，是进行土壤侵蚀预报的重要原因之一。本研究采用基于月平均降雨量和年平均降雨量数据的 Wischmeier 公式^[13]进行降雨侵蚀力的计算，公式形式如下：

$$R = \sum_{1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \lg \frac{P_i}{P})^{0.8188}} \quad (2)$$

式中，R 为年降雨侵蚀力，单位为 $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ； P_i 、P 分别为月平均、年平均降雨量（mm）。

土壤可蚀性因子（K）：土壤可蚀性因子反映了土壤自身理化性质对于土壤侵蚀的抵抗能力。同等条件下，K 值越大，土壤被冲蚀的可能性就越大。本研究根据已有参数采用 Williams 等在 EPIC 模型^[14]中提出的算法，利用土壤机械组成和土壤有机质进行 K 值计算。具体计算公式为：

$$K = \{0.2 + 0.3 \times e^{-0.0256 \times S_d \times (1 - \frac{S_i}{100})}\} \times (\frac{S_i}{C_1 + S_i}) \times (1.0 - \frac{0.25 C}{C + e^{3.72 - 2.95 C}}) \times (1.0 - \frac{0.7 S_n}{S_n + e^{-5.51 + 22.9 S_n}}) \quad (3)$$

式中， $S_n = 1 - S_d / 100$ ； S_d 为砂粒含量（%）； S_i 为粉粒含量（%）； C_1 为粘粒含量（%）；C 为有机质含量（%）。

地形因子（LS）：地形因子直接影响着坡面侵蚀的速率，是土壤侵蚀的动力因子。在 RUSLE 模型中通常将坡长 L 因子与坡度 S 因子合并为 LS 地形因子进行计算。国内学者基于不同地貌类型区和径流小区的实测数据对模型中地形因子计算参数进行了修正^[15]，本文采用第四次土壤侵蚀普查算法^[16]计算 LS 因子，形式如下：

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^m \times \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03, & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5, & 5^\circ < \theta \leq 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96, & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (4)$$

$$m = \begin{cases} 0.5, & \theta > 5^\circ \\ 0.4, & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.3, & 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.2, & \theta \leq 1^\circ \end{cases}$$

式中 λ 为坡长， θ 为坡度，m 为坡长系数。

植被覆盖和管理因子（C）：植被覆盖与管理因子（ $0 \leq C \leq 1$ ）反映了植被覆盖对土壤侵蚀的抑制作用，为无量纲数，其值越大则植被发挥减蚀的作用越小。C 因子的值通常通过植被覆盖度计算，本文使用归一化植被指数 NDVI 来计算地表植被覆盖度 c，计算公式如下：

$$c = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (5)$$

C 因子计算采用蔡崇法^[17]算法的修正形式，避免了当 c 值在 0-0.1 之间时异常值（ $C > 1$ ）的出现，如式（6）所示：

$$C = \begin{cases} 1, & 0 \leq c \leq 9.6\% \\ 0.6508 - 0.3436c, & 9.6\% < c \leq 78.3\% \\ 0, & c \geq 78.3\% \end{cases} \quad (6)$$

水土保持因子（P）水土保持措施因子 P（ $0 \leq P \leq 1$ ），其值越小代表水土保持措施越好，土壤侵蚀越不易发生。目前 P 因子的赋值主要由实地考察资料结合经验决定，本文参照了美国农业部手册 537 号^[18]和覃杰香等^[19]的相关研究，对不同土地利用类型区域和不同坡度的耕地分别按表 1 和表 2 进行赋值。

表 1 不同土地利用类型的 P 值

Table 1 P value of different land use types

土地利用类型	林地	草地	水域	居民用地	建筑用地	未利用地
Land use types	Woodland	Grass	Water	Residential	Building land	Unused land

	land					
P	1	1	0	0	0	1

表 2 不同坡度耕地的 P 值

Table 2 P value of cultivated land on different slopes

坡度/° Slope	P
0-5	0.100
5-10	0.221
10-15	0.305
15-20	0.575
20-25	0.705
>25	0.800

1.4 地理探测器

地理探测器由因子探测器、风险探测器、生态探测器和交互作用探测器四部分组成。它通过探测要素的空间分层异质性来揭示其背后驱动力^[20]。

因子探测器可用于探测某个因素 X 在多大程度上能够解释因变量 Y 的分布，其大小可用 q 值来度量 ($0 \leq q \leq 1$)，其值越大表示自变量 X 对因变量 Y 的解释力越强^[20]。以此可以识别出影响土壤侵蚀的主导因素。

交互探测器用于识别不同自变量因子之间的交互作用^[20]，其交互方式可见表 3。

表 3 自变量对因变量的交互作用方式

Table 3 Types of interaction between two covariates

判据 Criterion	交互作用 Interaction
$q(X1 \cap X2) < \min(q(X1), q(X2))$	非线性减弱
$\min(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \max(q(X1), q(X2))$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \max(q(X1), q(X2))$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

生态探测器可以对两个因子进行比较，判断它们的空间分布影响是否有显著差异^[20]。风险探测器判断单个影响因子不同层间属性是否有显著差异，可用于识别土壤侵蚀高风险区。

本文选取土壤侵蚀强度作为因变量，坡度、海拔、年平均降雨量、植被覆盖度、土地利用类型、地形地貌作为土壤侵蚀的影响因子，并对六类因子进行离散化处理。多年平均降雨量等间距分成 9 类，植被覆盖度分为 8 类 (<0.3 、 $0.3 \sim 0.4$ 、 $0.4 \sim 0.5$ 、 $0.5 \sim 0.6$ 、 $0.6 \sim 0.7$ 、 $0.7 \sim 0.8$ 、 $0.8 \sim 0.9$ 、 $0.9 \sim 1$)，坡度分为 8 类 ($<5^\circ$ 、 $5^\circ \sim 10^\circ$ 、 $10^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 25^\circ$ 、 $25^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 35^\circ$ 、 $>35^\circ$)，海拔分为 4 类 (<500 、 $500 \sim 1000$ 、 $1000 \sim 1500$ 、 >1500)，土地利用类型分为林地、草地、水域、居民用地、建筑用地、未利用地 6 个类别，地形地貌数据使用《中华人民共和国地貌图集 (1: 100 万)》中的类别编号。然后以河南省为范围进行随机采样，共选取 10000 个样本点，每个样本点赋予以上各类属性值作为地理探测器的输入数据。

2 结果与讨论

2.1 RUSLE 模型土壤侵蚀分布计算结果

RUSLE 模型所需各因子计算结果如图 2-6 所示：

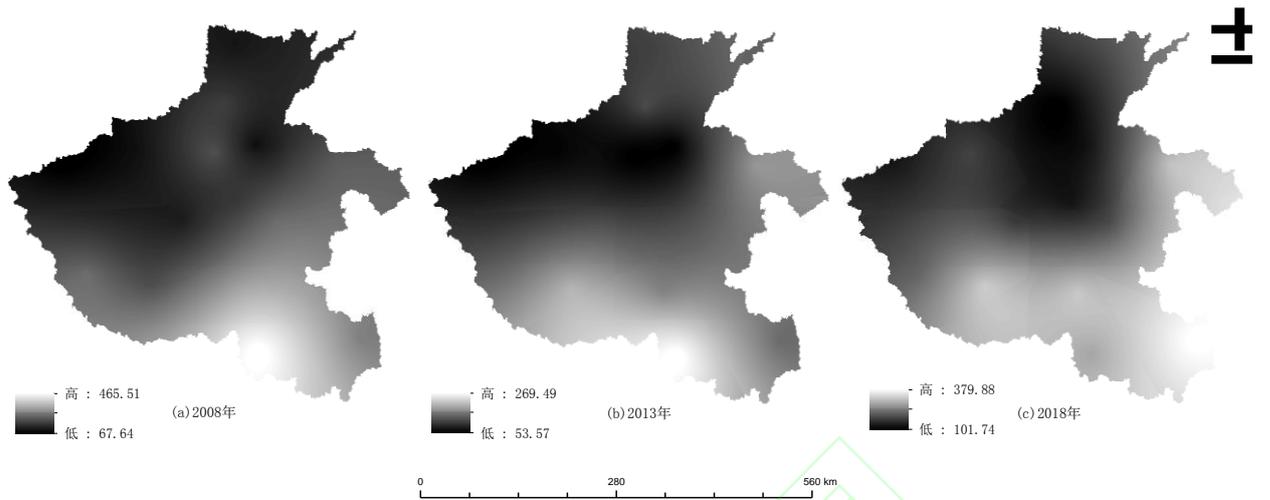


图 2 河南省 2008—2018 年降雨侵蚀力因子分布图

Fig.2 Distribution of rainfall erosivity factors in Henan province from 2008 to 2018

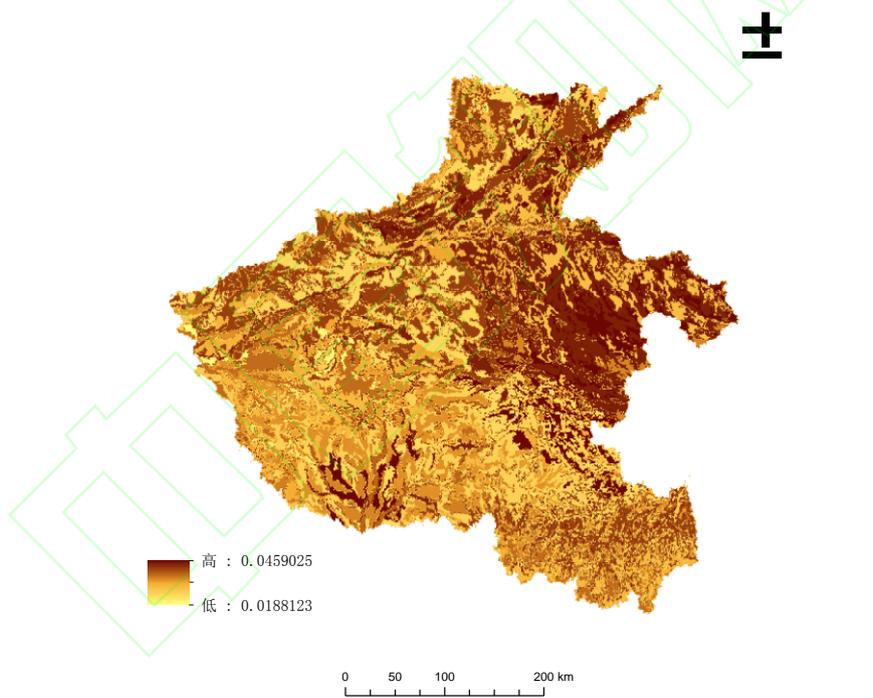


图 3 河南省土壤可侵蚀性因子分布图

Fig.3 Distribution of soil erodibility factors in Henan province

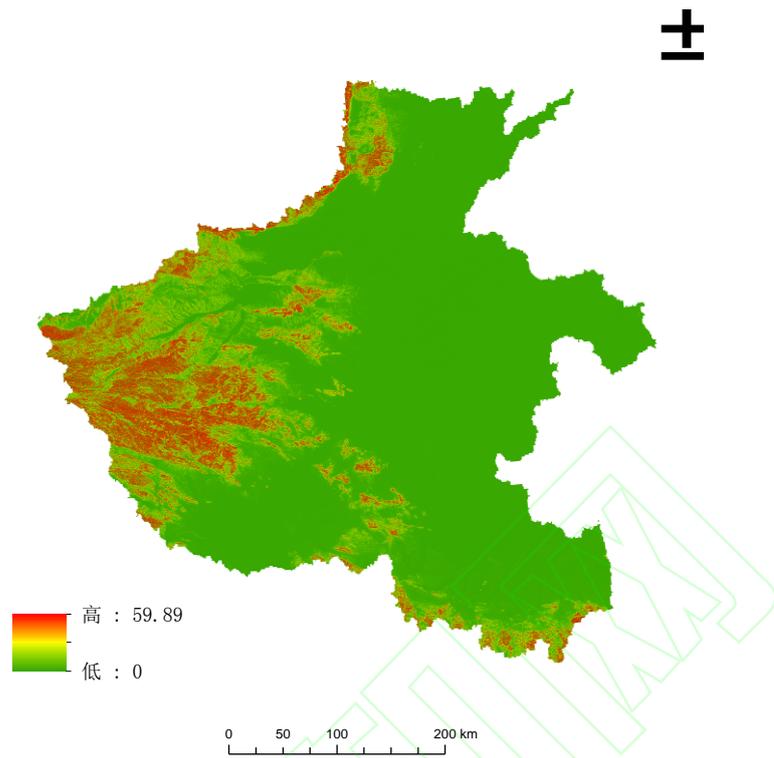


图 4 河南省地形因子分布图

Fig.4 Distribution of topographic factors in Henan province

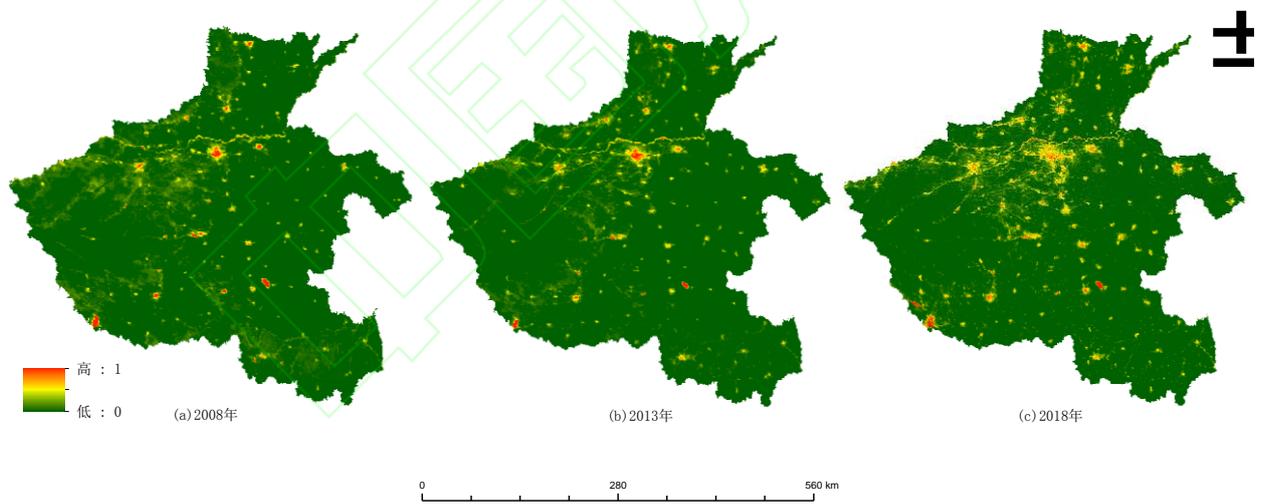


图 5 河南省 2008—2018 年植被覆盖与管理因子分布图

Fig.5 Distribution of cover and management factors in Henan province from 2008 to 2018

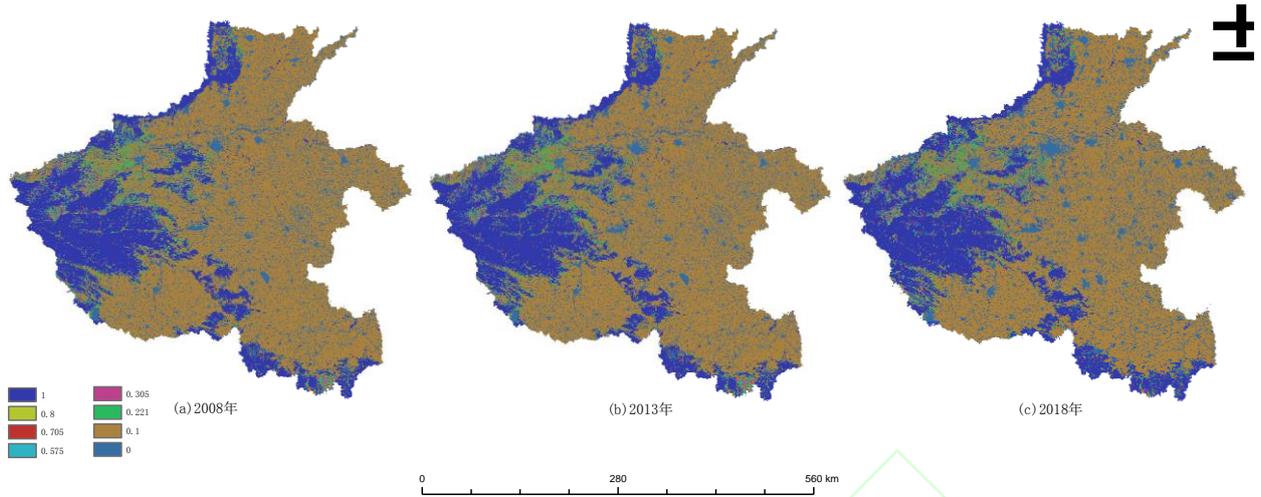


图6 河南省 2008—2018 年水土保持因子分布图

Fig.6 Distribution of soil and water conservation factors in Henan province from 2008 to 2018

将以上各因子结果相乘，得到河南省 2008—2018 年的土壤侵蚀分布情况（图 7）。

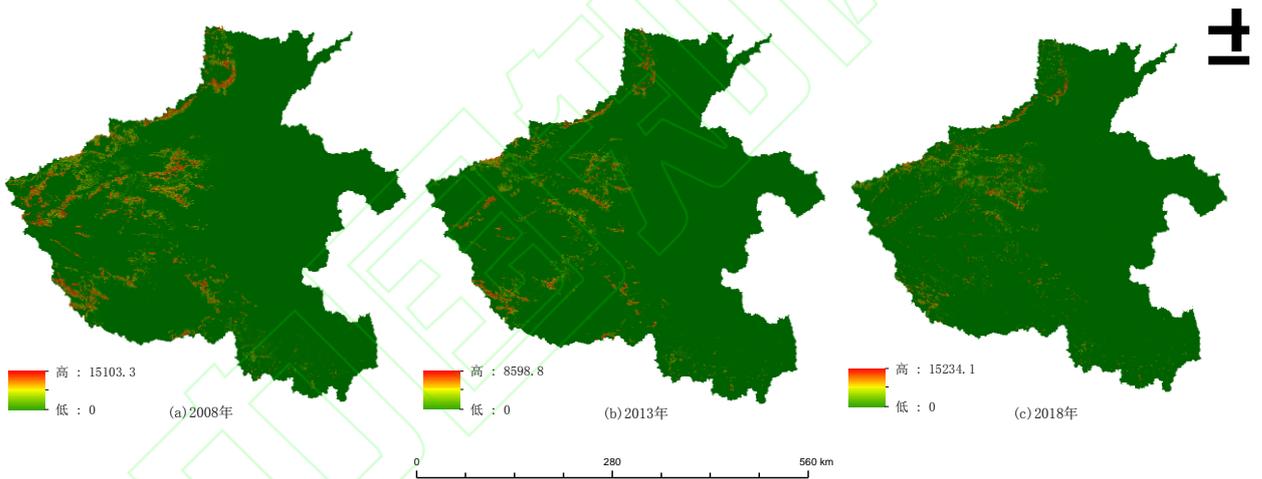


图7 河南省 2008—2018 年土壤侵蚀模数分布图

Fig.7 Distribution of soil erosion modulus in Henan province from 2008 to 2018

2.2 土壤侵蚀时空变化特征

根据国家水利部 2008 年发布的 SL190-207《土壤侵蚀分类分级标准》^[21]并结合河南省土壤侵蚀量实际分布情况对研究区土壤侵蚀强度进行分级：平均侵蚀模数 $0\sim 500\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 划分为微度侵蚀区、平均侵蚀模数 $500\sim 2500\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 划分为轻度侵蚀区、平均侵蚀模数 $2500\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上区域统一划分为中度及以上侵蚀区。表 4 展示了各类侵蚀区的面积占比。

表 4 2008—2018 年河南省不同土壤侵蚀等级面积比例

Table 4 Proportion of area of different soil erosion levels in Henan province from 2008 to 2018

侵蚀等级	2008	2013	2018
Erosion level			
微度侵蚀/%	95.53	96.45	97.14
轻度侵蚀/%	2.81	2.51	1.04
中度及以上侵蚀/%	1.66	1.05	1.81

图 7、表 4 显示，河南省近十年来土壤侵蚀分布广、程度低：整体以微度侵蚀为主，其面积占比在 95% 以上且 2008 年以来逐年递增，分布在东部及中部冲击平原区；轻度侵蚀地区主要分布在西、南部山区及中部风沙平原区，其面积占比呈逐年下降趋势，从图 7 可以看出豫西部地区下降尤为显著；中度及以上侵蚀区域集中在西北及北部黄河流域，多年来总体变化不大。

对各年份土壤侵蚀分级图进行叠加分析并得到 2008—2013、2013—2018 年两个阶段的土壤侵蚀强度转移矩阵和转移图（表 5、表 6、图 8）。

表 5 河南省 2008—2013 年土壤侵蚀强度转移矩阵

Table 5 Transfer matrix of soil erosion intensity in Henan province from 2008 to 2013

2008 年土壤侵蚀面积 Soil erosion area in 2008	2013 年土壤侵蚀面积 (km ²) Soil erosion area in 2013		
	微度 Slight	轻度 Mild	中度及以上 Moderate and above
微度	158496.04	225.40	17.61
轻度	2324.77	840.99	0.87
中度及以上	295.03	118.21	55.93

表 6 河南省 2013—2018 年土壤侵蚀强度转移矩阵

Table 6 Transfer matrix of soil erosion intensity in Henan province from 2013 to 2018

2013 年土壤侵蚀面积 Soil erosion area in 2013	2018 年土壤侵蚀面积 (km ²) Soil erosion area in 2018		
	微度 Slight	轻度 Mild	中度及以上 Moderate and above
微度	160230.19	737.79	58.27
轻度	887.15	248.82	47.83
中度及以上	57.23	2.19	14.97

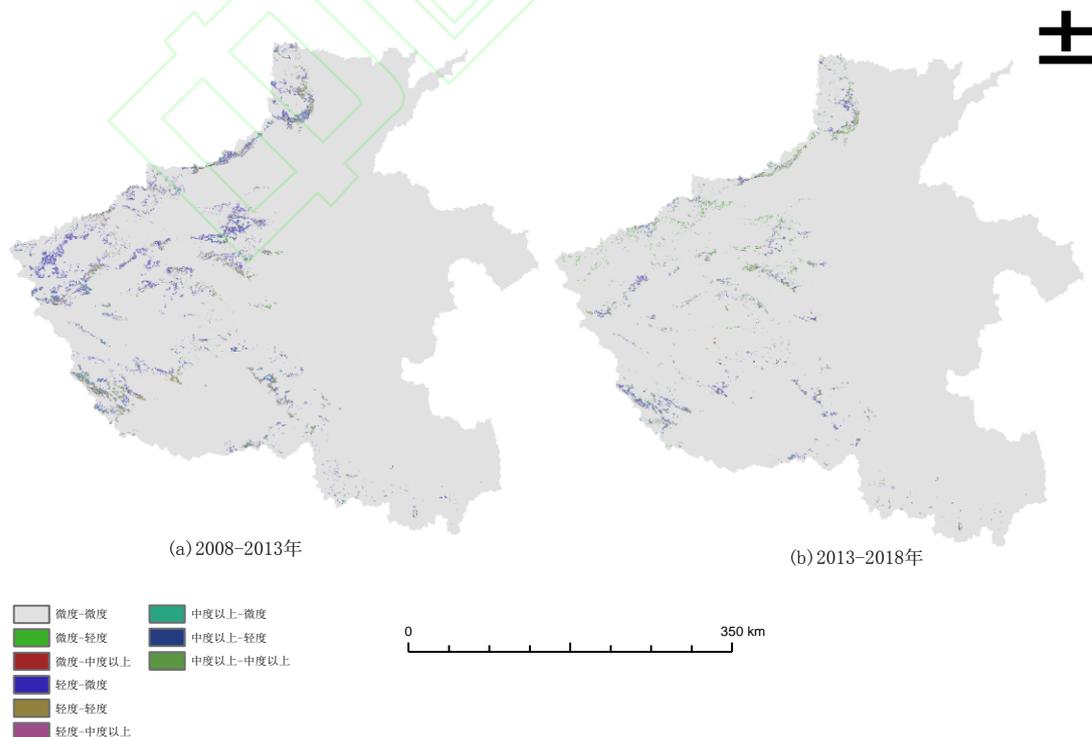


图 8 土壤侵蚀动态转移分布图

Fig.8 Dynamic transfer map of soil erosion

根据图表显示，2008—2013 年河南省共有 2739.01 km² 地区土壤侵蚀强度降低，243.88 km² 侵蚀强度增加。侵蚀强度降低主要集中在轻度转化为微度，转化面积达 2324.77 km²。从前文分析可知侵蚀下降主要集中在西部地区，这与河南省近年来在西部山地生态区实施的一系列保护性措施有关。这些措施增加了植被面积，有效抑制了土壤侵蚀。侵蚀强度增加主要集中在微度侵蚀增强为轻度，总面积与降低部分相比并不显著，主要是因为豫西北地区以山地为主，同时受河流侵蚀及耕地分布不合理等自然及人为因素的共同影响，治理难度较大。

2013—2018 年河南省共有 946.57 km² 地区土壤侵蚀强度减小，843.89 km² 地区侵蚀强度加大。与上一阶段相比，侵蚀增强明显加强。这可能是由于 2018 年河南省降雨量明显增加，水力侵蚀增强。

2.3 土壤侵蚀影响因素分析

前述研究结果为我们揭示了河南省土壤侵蚀的时空演变特征，借助地理探测器，接下来将探讨其驱动因子。

地理探测器中因子探测器结果如表 7 所示，不同影响因子对土壤侵蚀强度的解释力有明显差异，排序为坡度因子>土地利用类型因子>地貌类型因子>年平均降雨量因子>海拔因子>植被覆盖度因子。其中坡度对土壤侵蚀强度的解释力最强，高达 39.63%，可以看作是影响河南省土壤侵蚀的主导因子；其次是土地利用类型，解释力为 11.27%；植被覆盖度的 q 值最小，解释力不足 1%，单因子作用下对土壤侵蚀的影响并不显著。

表 7 土壤侵蚀影响因子的 p 值和 q 值

Table 7 The q value and p value of influencing factors of soil erosion

因子 Factor	年平均降雨量 Average annual rainfall	坡度 Slope	植被覆盖度 Vegetation coverage	土地利用类型 Land use type	地貌类型 Landform type	海拔 Altitude
q 值	0.0449	0.3963	0.0031	0.1127	0.0541	0.0143
p 值	0.0000	0.0000	0.0388	0.00000	0.0000	0.0000

根据交互探测器结果（表 8）不同影响因子通过交互作用对土壤侵蚀空间分布的解释力远大于单因子。坡度与其它因子的交互作用明显大于剩余因子间的交互作用，其中与土地利用类型的协同作用是显著控制因子，高达 57.14%，明显高于坡度的单因子作用。此外，植被覆盖度与其它因子的叠加作用大大增强了单因子对土壤侵蚀的解释力，特别是与坡度因子的组合作用，p 值增幅极大，说明了在地形起伏较大的地区有必要加强植被建设，通过因子间交互作用抑制土壤侵蚀的发生。

表 8 土壤侵蚀影响因素交互作用下 q 值

Table 8 The q values of dominant interactions between soil erosion influencing factor

	年平均降雨量 Average annual rainfall	坡度 Slope	植被覆盖度 Vegetation coverage	土地利用类型 Land use type	地貌类型 Landform type	海拔 Altitude
年平均降雨量	0.0449	0.4988	0.0672	0.1533	0.1197	0.0616
坡度		0.3963	0.4235	0.5714	0.4269	0.4035
植被覆盖度			0.0031	0.1247	0.0827	0.0195
土地利用类型				0.1127	0.1587	0.1276

地貌类型	0.0541	0.0627
海拔		0.0143

通过风险探测器对不同影响因子各分层的土壤侵蚀平均强度进行统计，识别出高风险区，结果（表9）表明坡度>35°区域发生土壤侵蚀的风险最高。河南省土壤侵蚀强度随着坡度等级的增加而增大，坡度范围为0~25°时增长缓慢，大于25°时土壤侵蚀强度剧烈增加，这部分区域主要分布在河南省西部的三门峡以及南阳市，土地利用类型以耕地为主，植被覆盖度较低，极易构成水土流失。降雨量和地貌类型因子不同层间平均土壤侵蚀强度无显著差异，植被覆盖度的高风险区分布在0~0.3区间中，且随着植被覆盖度的升高，土壤侵蚀强度明显降低，说明植被对研究区土壤侵蚀有重要影响。当海拔大于1500米时，侵蚀强度对比前3个分层有明显提升，通过与降雨量图层的叠置分析，发现这些区域也对应着强降雨区，两因子间协同作用造成了强烈的侵蚀。

表9 各影响因子侵蚀高风险区域及土壤侵蚀强度平均值

Table 9 High risk areas of soil erosion and its mean value of each influencing factor

	年平均降雨量	坡度	植被覆盖度	土地利用类型	地貌类型	海拔
	Average annual rainfall	Slope	Vegetation coverage	Land use type	Landform type	Altitude
高风险区	11249~12325	>35°	0~0.3	未利用地	大起伏山区	>1500
平均土壤侵蚀强度	1849.12	4498.62	1854.61	1720.24	1792.55	2486.44

生态探测器结果表明，降雨和坡度、降雨和土地利用类型、植被覆盖度和土地利用类型这三对因子对土壤侵蚀的空间分布影响具有显著差异，与前面分析相结合，可以推断出坡度、土地利用类型、植被覆盖度和降雨量这几个因子对河南省土壤侵蚀具有主导作用，影响着土壤侵蚀空间分布格局。

总体来说，影响河南省土壤侵蚀的因素多种多样。河南地形复杂，虽大部分属于平原地区，但北部、西部、南部分别与太行山脉、秦岭余脉和大别山脉相接，这些区域多为丘陵和山地地貌，坡度变化幅度大，降雨频繁且集中，两者间的协同作用加速了土壤侵蚀的过程。此外，河南作为农业大省，土地类型多为旱地，林地和草地则占比较少，植被可以有效降低雨滴的动能，减少雨水的冲刷作用，避免对土壤的破坏，如果不注重耕作区的造林防护，势必会造成生态系统的破坏。为了推动黄河流域高质量发展，有必要转变土地利用方式，对坡耕地加强退耕还林还草工程建设，提高植被覆盖率；对于暴雨易发地区应设立监测站进行预警，避免由局部强降雨而引发的土壤侵蚀恶性循环；对于西部黄河流经的黄土区，可考虑建设大型的拦泥蓄水工程，可控制泥沙下泄，同时又为耕作区提供水源保证。

3 结论

(1) 河南省土壤侵蚀以微度侵蚀为主，且呈逐年递增趋势，轻度侵蚀区域面积逐年递减，中度及以上侵蚀区域随年降雨量小幅变化。整体土壤侵蚀状况呈改善趋势，其原因是河南省今年来积极实施一系列水土整治措施，取得了良好的成效。

(2) 2008-2018年河南省侵蚀分布主要由轻度侵蚀转变为微度侵蚀，地区主要集中在西部地区，山地地区土壤侵蚀得到抑制，但仍需注意由于局部强降雨而引发的水土流失。

(3) 各因子解释量大小为：坡度因子>土地利用类型因子>地貌类型因子>年平均降雨量因子>海拔因子>植被覆盖度因子。其中坡度的q值最高，与其它因子的交互作用明显，是影响土壤侵蚀空间格局分布的主要因素，因此有必要加强对地形复杂地区的水土治理工作，积极扩大森林面积，恢复生态平衡，从而实现高质量发展。

参考文献：

[1] 汪东川, 卢玉东. 国外土壤侵蚀模型发展概述[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(2): 35-40.

- WANG Dong-chuan, LU Dong-yu. Development of Soil Erosion Models Abroad[J].*Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2 (2): 35-40.
- [2] Laflen J M, Lane L J, Foster G R. WEPP: A new generation of erosion prediction technology[J].*Journal of Soil & Water Conservation*, 1991, 46(1): 34-38.
- [3] 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 & Landforms*, 23(6):527-544.
- [4] Beasley D B , Huggins L F , Monke E J . ANSWERS: A Model for Watershed Planning[J]. *Transactions of the ASAE*, 1980, 23(4):0938-0944.
- [5] Bathurst J C , O'Connell P E . Future of distributed modelling: The Système Hydrologique Européen[J]. *Hydrological Processes*, 1992, 6(3):265-277.
- [6] 赵明松,李德成,张甘霖,等.基于 RUSLE 模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估[J].*土壤学报*,2016,53(1):28-38.
ZHAO Ming-song, LI De-cheng,ZHANG Gan-ling,et al.Evaluation of soil erosion and soil nutrient loss in Anhui Province based on RUSLE model [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016,53 (1) : 28-38.
- [7] 杨冉冉,徐涵秋,林娜,等.基于 RUSLE 的福建省长汀县河田盆地区土壤侵蚀定量研究[J].*生态学报*, 2013, 33(10): 2974-2982.
YANG Ran-ran,XU Han-qiu,LI Na,et al.RUSLE-based quantitative study on the soil erosion of the Hetian basin area in County Changting, Fujian Province, China[J].*Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (10): 2974-2982.
- [8] Mohammad Zare, Ali Akbar Nazari Samani, Majid Mohammady, et al. Simulation of soil erosion under the influence of climate change scenarios[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(21):1405.
- [9] Yang X H, Gray J, Chapman G, et al. Digital mapping of soil erodibility for water erosion in New South Wales, Australia[J]. *Soil Research*, 2018, 56(2): 158-170.
- [10] 陈锐银,严冬春,文安邦,等.基于 GIS/CSLE 的四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀研究[J].*水土保持学报*, 2020, 34(1):17-26.
CHEN Rui-yin,YAN Dong-chun,WEN An-bang,et al.Research on Soil Erosion in Key Prevention and Control Region of Soil and Water Loss Based on GIS/CSLE in Sichuan Province [J].*Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (1): 17-26.
- [11] 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.
WANG Huan,GAO Jiang-bo,HOU Wen-juan.Quantitative attribution analysis of soil erosion in different morphological types of geomorphology in karst areas: Based on the geographical detector method[J].*Acta Geographica Sinica*, 2008,73(9):1674-1686.
- [12] 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).[J]. *Agricultural Handbook*, 1997.
- [13] Wischmeier W H . Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountain[J]. *Agriculture Handbook*, 1965, 282.
- [14] Williams J R , Jones C A , Dyke P T . A Modeling Approach to Determining the Relationship Between Erosion and Soil Productivity[J]. *Transactions of the ASAE*, 1984, 27(1):0129-0144.
- [15] 梁晓珍,符素华,丁琳.地形因子计算方法对土壤侵蚀评价的影响[J].*水土保持学报*,2019,33(6):21-26.
LIANG Xiao-zhen,FU Su-hua,DING Lin.The Influence of Terrain Factors' Calculation Methods on Soil Erosion Evaluation[J].*Journal of water and soil conservation*, 2019,33(6) : 21-26.
- [16] 刘新华,杨勤科,汤国安.中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用[J].*水土保持通报*, 2001, 21(I):57-59.
LIU Xin-hua,YANG Qin-ke,TANG Guo-an.Extraction and Application of Relief of China Based on DEM and GIS Method [J].*Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(I):57-59.

- [17] 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, 2016, 14(2): 19-24.
CAI Chong-fa,DING Shu-wen,SHI Zhi-hua,et al.Study of Applying USLE and Geographical Information System IDRISI to Predict Soil Erosion in Small Watershed[J].*Journal of water and soil conservation*, 2016, 14 (2): 19-24.
- [18] Wischmeier, W.H, Smith, D.D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [USA][J]. *Agric Handbook*, 1978, 537.
- [19] 覃杰香, 王兆礼. 基于GIS和RUSLE的从化市土壤侵蚀量预测研究[J]. 人民珠江, 2011, 32(2):37-41.
QIN Jie-xiang,WANG Zhao-li.Study on Conghua Soil Erosion Volume Prediction with GIS and RUSLE[J].*Pearl River* , 2011, 32 (2) : 37-41.
- [20] 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.
WANG Jing-feng,XU Cheng-dong.Geodetector: Principle and prospective[J].*Acta Geographica Sinica*, 2017,72 (1) : 116-134.
- [21] 中华人民共和国水利部. SL 190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社, 2008: 1-20.
Ministry of water resources. SL 190-2007 Soil erosion classification and classification standard[S]. Beijing: China water resources and hydropower press, 2008: 1-20.