

# 基于地理探测器的江苏省沿江地区土壤侵蚀定量分析

吴镇宇<sup>1</sup>, 罗梦琦<sup>1</sup>, 郭红丽<sup>2</sup>, 吴芳<sup>2</sup>, 黄昱楠<sup>1</sup>, 戴玉婷<sup>1</sup>, 刘霞<sup>1</sup>

(1.南京林业大学 南方现代林业协同创新中心 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 江苏 南京 210037; 2.江苏省水文水资源勘测, 江苏 南京 210029)

**摘要:** [目的] 研究江苏省沿海地区土壤侵蚀空间分布特征, 识别主要影响因素并开展驱动力因子定量归因, 为该区域水土流失防治与生态环境建设提供科学指导。[方法] 以江苏沿江地区为对象, 基于高分辨率遥感影像、数字高程模型和长系列降雨等数据, 采用中国土壤流失方程、地理探测器等方法, 探索土壤侵蚀空间分异性的主导影响因子及其交互作用影响程度, 识别土壤侵蚀高风险区域。[结果] ①平原区与山丘区土壤侵蚀均以坡度与土地利用类型为主导因素。茶园的土壤侵蚀以植被覆盖度为主导, 其他类型土地的土壤侵蚀均以坡度为主导因子。②土壤侵蚀的主导交互作用为坡度叠加土地利用类型。茶园与草地主导交互作用因子为坡度叠加植被覆盖度, 其他类型土地的土壤侵蚀主导交互作用因子为坡度叠加降雨量。③果园、茶园、林地与生产建设活动扰动地的土壤侵蚀高风险区域位于坡度 $>20^\circ$ , 降雨量1 300~1 400 mm, 植被高覆盖度的丘陵山区。[结论] 地理探测器操作简便, 结果包括单因子影响、两因子交互作用及风险区域分析。江苏省生产建设活动扰动地、园地的水土流失问题应引起密切关注。

**关键词:** 水土流失空间分异性; 土壤侵蚀驱动力因子; 地理探测器

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)02-0184-05

中图分类号: S157.1, P208

**文献参数:** 吴镇宇, 罗梦琦, 郭红丽, 等. 基于地理探测器的江苏省沿江地区土壤侵蚀定量分析[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 184-188. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.025; Wu Zhenyu, Luo Mengqi, Guo Hongli, et al. Quantitative analysis of soil erosion along Yangtze River in Jiangsu Province based on geographic detector [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 184-188.

## Quantitative Analysis of Soil Erosion Along Yangtze River in Jiangsu Province Based on Geographic Detector

Wu Zhenyu<sup>1</sup>, Luo Mengqi<sup>1</sup>, Guo Hongli<sup>2</sup>, Wu Fang<sup>2</sup>, Huang Yunan<sup>1</sup>, Dai Yuting<sup>1</sup>, Liu Xia<sup>1</sup>

(1. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China of Jiangsu Province,

Nanjing Forestry University, Jiangsu Provincial Key Lab of Soil Erosion and Ecological Restoration, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 2. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial distribution characteristics of soil erosion was explored, the main influencing factors were identified and quantitative attribution of driving force factors were carried out, in order to guide regional soil erosion control and ecological environment construction. [Methods] Taking the area along the Yangtze River in Jiangsu Province as the research object, based on high-resolution remote sensing images, digital elevation models, and long series of rainfall data, the methods of Chinese soil loess equation (CSLE) and geographic detectors were used to explore the dominant influencing factors and interactions of the spatial variability of soil erosion, to identify areas with high risk of soil erosion. [Results] ① Slope and land use types dominated soil erosion in plain and hilly areas. The soil erosion of tea gardens was dominated by vegetation coverage, and soil erosion of other types of land use was dominated by slope. ② The dominant interaction of soil erosion was slope superimposition of land use types. The dominant interaction factors between tea

收稿日期: 2021-07-06

修回日期: 2021-11-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“坡式经济林地土壤水分运移动态及内在机理”(32071840); 江苏省“333工程”科研项目(BRA2019069); 江苏省水利厅项目“江苏省降雨侵蚀力与植被覆盖因子研究”(2020002)

第一作者: 吴镇宇(1996—), 男(汉族), 广东省湛江市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持监测与评价。Email: 1289797249@qq.com。

通讯作者: 刘霞(1971—), 女(汉族), 山东省菏泽市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持监测与评价方面的研究。Email: liuxia@njfu.edu.cn。

garden and grassland were slope and vegetation coverage, and the dominant interaction factors for soil erosion of other types were slope and rainfall. ③ High-risk areas of soil erosion in orchards, tea gardens, woodlands and areas disturbed by production and construction activities were located in hilly mountainous areas with slopes  $> 20^\circ$ , rainfall of 1300 ~ 1 400 mm, and high vegetation coverage. [Conclusion] The geo-detector is easy to operate. The results include single factor influence, two factor interaction and risk area analysis. Close attention should be paid to the problems of soil erosion in areas disturbed by production and construction activities and garden plots in Jiangsu Province.

**Keywords: spatial heterogeneity of soil erosion; driving force factors of soil erosion; geodetector**

长江经济带发展是国家《促进中部地区崛起“十三五”规划》中“三大战略”之一。水土资源是制约长江经济带经济社会发展的主要因素之一,根据水利部发布的 2019 年中国水土保持公报<sup>[1]</sup>,长江经济带水土流失面积  $3.95 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占区域土地总面积 19.18%。在“以生态优先、绿色发展为引领,依托长江黄金水道,推动长江上中下游地区协调发展和沿江地区高质量发展”总体要求下<sup>[2]</sup>,区域资源环境承载力、水土流失综合整治以及生态环境保护任务更加紧迫。研究区域土壤侵蚀空间分布特征、识别土壤侵蚀的主要影响因素对指导区域水土流失综合防治具有重要的意义。任乐萌、王慧琴<sup>[3-4]</sup>分别采用地理加权回归模型、灰色关联度判定、相关性分析等方法开展丹江口库区、华北北部区域土壤侵蚀驱动因子识别及影响程度分析。何琪琳等<sup>[5]</sup>采用聚类分析与回归分析进行东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响因素识别。传统的回归分析、相关系数分析等方法可以进行土壤侵蚀驱动力因子识别及影响评价,但难以定量分析多个变量间的耦合作用及对土壤侵蚀空间分异的影响<sup>[6-7]</sup>。地理探测器是一种可探测变量空间分异性及其驱动力的统计学方法,既能探测单个自变量对因变量的影响程度,也能判断两两因子交互作用的强弱与类型,并进行风险区域识别<sup>[8]</sup>。目前,地理探测器在喀斯特地貌类型区<sup>[9-11]</sup>、陕北黄土丘陵沟壑区已有探索<sup>[8]</sup>,但在江苏沿江地区未见研究与实践。江苏沿江地区是长江经济带的重要组成部分,区域经济发达,开发利用程度高,人口密度大,人为活动强烈,经济社会发展需求与水土资源承载能力的矛盾比较突出。为此,本文以江苏沿江地区为研究区域,基于地理探测器对区域土壤侵蚀状况与驱动力的多因子耦合影响进行定量归因,为区域生态环境保护及社会经济可持续发展提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

江苏沿江地区位于江苏省南部(118°12'—122°0'E, 30°45'—33°14'N),包括南京市、镇江市、常州市、无

锡市、苏州市、扬州市、泰州市和南通市 8 市 59 个县市市区,土地面积  $5.10 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占江苏省土地总面积的 47.57%。研究区地势平缓,主要地貌类型为平原、丘陵山区、河湖水域,高程一般在 200 m 以下,分布有老山山脉、宁镇山脉、茅山山脉和宜溧山脉,主要河流水系有长江与太湖水系;属亚热带季风气候,多年平均降雨量 1 147.19 mm;以棕壤土、潮土、水稻土、褐土等为主;地带性植被为亚热带常绿阔叶林,主要树种香樟(*Cinnamomum bodinieri*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)等。研究区人口密度 983 人/ $\text{km}^2$ ,区域生产总值  $7.30 \times 10^{12}$  元,占江苏省的 78.83%。

### 1.2 研究方法

1.2.1 数据源与处理 基于 2 m 分辨率 GF-1 与 ZY-3 遥感影像(2017 年 3—11 月,2018 年 1—6 月),结合野外调查,通过人机交互解译获取土地利用数据。采用 250 m 空间分辨率 MODIS 植被指数产品计算标准植被指数(NDVI)与植被覆盖度(FVC)。采用 5 m 分辨率数字高程模型(DEM)提取坡度、坡长。采用 1981—2017 年研究区 188 个站点逐日降雨量数据计算多年平均降雨量及降雨侵蚀力。土壤可蚀性因子数据来源于第一次全国水利普查成果<sup>[9]</sup>。

1.2.2 中国土壤流失方程 采用中国土壤流失方程(CSLE)计算土壤侵蚀模数,计算公式为:

$$A = RKLSBET \quad (1)$$

式中:A 为土壤流失量 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ;R 为降雨侵蚀力因子 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ;K 为土壤可蚀性因子 $[(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$ ;L 为坡长因子(无量纲);S 为坡度因子(无量纲);B 为植被覆盖与生物管理措施因子(无量纲);E 为工程措施因子(无量纲);T 为耕作措施因子(无量纲)。模型各因子计算方法参照文献《中国水力侵蚀抽样调查》<sup>[10]</sup>。

1.2.3 地理探测器原理及应用 地理探测器法是通过探测要素空间异质性来揭示其驱动力的空间统计学方法,包括 4 个模块<sup>[7]</sup>,采用解释力( $q$  值)度量自

变量对因变量空间分异性的影响程度。本文以地貌形态类型、坡度、植被覆盖度、多年平均降雨量、土地利用类型为自变量,土壤侵蚀模数为因变量,采用因子探测器、交互作用探测器对土壤侵蚀影响因素的定量归因进行探索,采用风险探测器识别土壤侵蚀风险区域。

根据地理探测器要求,需要对土壤侵蚀影响因子数据进行离散化处理<sup>[7]</sup>。结合研究区特征,将地貌形态类型划分为平原区、丘陵山区与水域 3 类;坡度分为  $<2^\circ$ ,  $2^\circ\sim 5^\circ$ ,  $5^\circ\sim 10^\circ$ ,  $10^\circ\sim 15^\circ$ ,  $15^\circ\sim 20^\circ$ ,  $20^\circ\sim 25^\circ$ ,  $25^\circ\sim 30^\circ$ ,  $30^\circ\sim 35^\circ$ ,  $>35^\circ$  共 9 个等级;植被覆盖度以 0.1 为步长,将区间范围 0~1 按等距法分为 10 个等级;多年平均降雨量以 50 mm 为步长,将区间范围 993.04~1 452.55 mm 按等距法分为 10 个等级;土地利用类型划分水田、旱地、果园、茶园、林地、草地、城镇村建设用地、生产建设活动扰动、交通运输用地、水域及水利设施用地 10 个类型。通过对数据重采样及坐标系转换,在研究区范围内采用行列数均为 300 的渔网均匀布设 17 492 个样点,提取各影响因子基础信息,作为地理探测器运行数据。各因子如附图 1—5 所示。

## 2 结果与分析

### 2.1 区域水土流失状况

2.1.1 水土流失空间分异性 研究区水土流失面积 823.93 km<sup>2</sup>,占土地总面积 1.62%,空间分异性明显,主要分布在区域西南部,以南京、镇江、常州、无锡为主(附图 6)。侵蚀强度以轻度为主,占水土流失面积的 77.1%;中度及其以上侵蚀强度面积占比较小。

2.1.2 不同地貌形态类型下水土流失特征 研究区平原区占总面积的 70.2%;丘陵山区占 17.96%,主要分布于区域西南部;水域占 11.84%。水土流失面积丘陵山区占 91.73%;平原区占 8.27%。

2.1.3 不同土地利用类型下水土流失特征 研究区水田占总面积的 33.77%,水域及水利设施用地占 27.53%,城镇村建设用地占 18.43%,林地与交通运输用地分别占 8.76%,7.06%,果园、茶园、旱地等仅占 4.45%。水土流失主要分布于林地、生产建设活动扰动、果园等土地利用类型,分别占水土流失面积的 51.1%,17.28%和 13.33%,均以轻度侵蚀为主;旱地、茶园、草地、城镇村建设用地与交通运输用的水土流失面积较少,共占 18.29%;中度及其以上强度侵蚀集中分布于生产建设活动扰动。但从水土流失与土地利用类型面积占比看,生产建设活动扰动、果园、茶园水土流失占该土地利用类型面积的比例均在

10%以上,说明这 3 类是区域内容易发生水土流失的土地利用类型。

### 2.2 土壤侵蚀影响因子显著性研究

以地貌形态类型与土地利用类型为切入点,运行因子探测器对区域土壤侵蚀状况进行分类分区定量归因。考虑水域地貌形态类型无侵蚀、水田与水域及水利设施用地土地利用类型无侵蚀,本文仅围绕平原区与丘陵山区,对 8 个土地利用类型开展分析。

2.2.1 不同地貌形态类型下土壤侵蚀影响因子显著性 不同地貌形态类型下研究区土壤侵蚀的主导影响因子均为土地利用类型和坡度,但解释力  $q$  值有差异(表 1)。平原区以坡度为主导因子(0.055 1),其次是土地利用类型(0.013 0),由于平原区土壤侵蚀的空间分异性较小,各影响因子的解释力均较小;丘陵山区则以土地利用类型为主导因子(0.112 6),其次是坡度(0.036 8)。在丘陵山区,除坡度因子外,其余因子解释力均高于平原区;可能因为丘陵山区地形较为复杂,导致植被覆盖、土地利用的空间差异性增大,多重因素组合对土壤侵蚀产生影响,增加了土地利用、植被覆盖、降雨量同土壤侵蚀模数空间变异的相似性。

表 1 不同地貌形态类型影响因子显著性

地貌形态类型	土地利用类型	坡度	植被覆盖度	降雨量
平原区	0.013 0	0.055 1	0	0.002 7
丘陵山区	0.112 6	0.036 8	0.001 4	0.005 3

2.2.2 不同土地利用类型下土壤侵蚀影响因子显著性 不同土地利用类型下研究区土壤侵蚀的主导影响因子及解释力  $q$  值有显著差异(表 2)。茶园以植被覆盖度为主导因子,除茶园外的其他类型土地均以坡度为主导因子。从不同影响因子来看,坡度对果园、生产建设活动扰动的影响最大,解释力分别为 0.607 1和 0.590 4,其次为草地和城镇村建设用地,茶园和林地解释力在 0.1 以下;地貌形态类型对草地、生产建设活动扰动的影响最大,解释力分别为 0.131 2和 0.109 2,其余土地利用类型解释力均在 0.1 以下;降雨量对果园的影响最大,为 0.167,其余土地利用类型解释力均在 0.1 以下。林地各影响因子解释力均在 0.1 以下,与各因子的空间相似性都较低有关,可能是因为其层次结构比较复杂,受林下灌草和枯落物影响较大。

### 2.3 土壤侵蚀影响因子交互作用研究

2.3.1 不同地貌形态类型下土壤侵蚀影响因子交互作用 采用交互探测器可知,不同地貌形态类型下,

土壤侵蚀影响因子两两交互作用均呈现非线性增强的趋势,以坡度与土地利用类型的协同作用为首位,远高于其他交互作用(表 3)。由表 3 可知,平原区主导交互作用解释力(0.700 6)明显高于丘陵山区主导交互作用(0.484 9),说明平原区更易受坡度和土地利用类型的影响,与平原区水土流失主要位于生产建设活动扰动有关。平原区土壤侵蚀的交互作用前 3 位以坡度为核心叠加其他因子,表明在地势相对平坦的区域,坡度是土壤侵蚀的主导影响因子。丘陵山区土壤侵蚀的交互作用前 3 三位以土地利用类型为核心叠加其他因子,可能因为丘陵山区地形复杂,土地利用类型的空间差异性增大,与坡度、降雨量、

植被覆盖因子叠加增加了与土壤侵蚀空间变异的相似性。

表 2 不同土地利用类型影响因子显著性

土地利用类型	坡度	植被覆盖度	地貌形态类型	降雨量
旱地	0.150 0	—	0.013 2	0.015 7
果园	0.607 1	0.059 8	0.065 3	0.167 0
茶园	0.086 7	0.867 1	0.001 5	0.031 7
林地	0.037 7	0.005 5	0.016 0	0.008 9
草地	0.359 4	0.048 5	0.131 2	0.039 5
城镇村建设用地	0.327 9	—	0.001 9	0.017 9
生产建设活动扰动	0.590 4	—	0.109 2	0.066 8
交通运输用地	0.255 5	—	0.056 0	0.038 7

表 3 不同地貌形态类型土壤侵蚀影响因子交互作用及其解释力( $q$ )

地貌形态类型	交互作用 1	交互作用 2	交互作用 3
平原区	坡度 $\cap$ 土地利用类型	坡度 $\cap$ 植被覆盖度	坡度 $\cap$ 降雨量
$q$ 值	0.700 6	0.181 9	0.160 5
丘陵山区	坡度 $\cap$ 土地利用类型	土地利用类型 $\cap$ 降雨量	土地利用类型 $\cap$ 植被覆盖度
$q$ 值	0.484 9	0.166 2	0.146 2

2.3.2 不同土地利用类型下土壤侵蚀影响因子交互作用 不同土地利用类型下,土壤侵蚀影响因子交互作用呈现非线性增强和双因子增强趋势,排在前三位的交互作用详见表 4。由表 4 可知,城镇村建设用地、果园、生产建设活动扰动、交通运输用地、旱地、林地的交互作用排在第一位的均为坡度  $\cap$  降雨量,城镇村建设用地与果园解释力最高,分别为 0.959 4 和 0.766 8;

茶园与草地的交互作用排在第一位的均为坡度  $\cap$  植被覆盖度,解释力分别为 0.919 1 和 0.725 8。除果园、茶园、林地与草地外,其他土地利用类型排在第二位的交互作用均为坡度  $\cap$  地貌形态类型。果园、茶园排在前三位的交互作用解释力较强,均在 0.6 以上;林地的交互作用解释力均低于 0.3,与林地各影响因子空间差异性较小有关。

表 4 不同土地利用类型土壤侵蚀影响因子交互作用及其解释力( $q$ )

土地利用类型	交互作用 1	交互作用 2	交互作用 3
旱地	坡度 $\cap$ 降雨量	坡度 $\cap$ 地貌形态类型	降雨量 $\cap$ 地貌形态类型
$q$ 值	0.228 4	0.181 1	0.049 2
果园	坡度 $\cap$ 降雨量	坡度 $\cap$ 植被覆盖度	坡度 $\cap$ 地貌形态类型
$q$ 值	0.766 8	0.717 9	0.609 4
茶园	坡度 $\cap$ 植被覆盖度	植被覆盖度 $\cap$ 降雨量	植被覆盖度 $\cap$ 地貌形态类型
$q$ 值	0.919 1	0.902 5	0.868 5
林地	坡度 $\cap$ 降雨量	坡度 $\cap$ 植被覆盖度	降雨量 $\cap$ 植被覆盖度
$q$ 值	0.226 8	0.095 2	0.046 9
草地	坡度 $\cap$ 植被覆盖度	坡度 $\cap$ 降雨量	坡度 $\cap$ 地貌形态类型
$q$ 值	0.725 8	0.511 2	0.391 9
城镇村建设用地	坡度 $\cap$ 降雨量	坡度 $\cap$ 地貌形态类型	降雨量 $\cap$ 地貌形态类型
$q$ 值	0.959 4	0.328	0.032 8
生产建设活动扰动	坡度 $\cap$ 降雨量	坡度 $\cap$ 地貌形态类型	降雨量 $\cap$ 地貌形态类型
$q$ 值	0.561 2	0.540 7	0.133 9
交通运输用地	坡度 $\cap$ 降雨量	坡度 $\cap$ 地貌形态类型	降雨量 $\cap$ 地貌形态类型
$q$ 值	0.433 1	0.267 1	0.09

## 2.4 土壤侵蚀高风险区域识别

采用风险探测器对研究区水土流失集中分布的果

园、茶园、林地与生产建设活动扰动等土地利用类型进行高风险区域识别。果园、茶园、林地的土壤侵蚀高风

险区域均位于坡度 $>20^\circ$ ,降雨量 1 300~1 400 mm、植被高覆盖度的丘陵山区。其原因如下:①由于这些区域植被覆盖度虽高,但林下盖度较低,林分结构相对单一,林下灌草与枯落物少;②由于果园、林地土壤侵蚀为坡度主导,茶园为坡度 $\cap$ 植被覆盖度主导,丘陵山区坡度较大导致土壤侵蚀风险较高。生产建设活动扰动的土壤侵蚀高风险区域位于坡度 $25^\circ\sim 30^\circ$ ,降雨量 1 300~1 400 mm 的丘陵山区。

### 3 结论

(1) 根据因子探测器结果,平原区土壤侵蚀以坡度为主导因子,但解释力不高(0.055 1);丘陵山区土壤侵蚀以土地利用类型为主导因子,解释力为 0.112 6。不同土地利用类型土壤侵蚀影响因子的层间差异显著。茶园土壤侵蚀以植被覆盖度为主导因子,解释力高达 0.867 1;除茶园外的其他类型土地的土壤侵蚀以坡度为主导因子,解释力范围为 0.037 7~0.607 1。

(2) 两两因子交互作用均能增强对土壤侵蚀的解释力。平原区与丘陵山区主导交互作用的因子为坡度叠加土地利用类型,解释力分别为 0.700 6 和 0.484 9,且显著高于其他交互作用。不同土地利用类型的主导交互作用的因子主要为坡度叠加降雨量,对城镇村建设用地与果园影响较大,解释力分别为 0.959 4 和 0.766 8;其次为坡度叠加植被覆盖度,对茶园、草地影响较大,解释力分别为 0.919 1 和 0.725 8。

(3) 不同土地利用类型土壤侵蚀高风险区域均位于坡度 $>20^\circ$ ,降雨量 1 300~1 400 mm,植被高覆盖度的丘陵山区。

### 4 讨论

对土壤侵蚀影响因子进行定量归因,有助于开展区域水土流失综合防治工作。但土壤侵蚀是由多因子耦合影响的。目前研究土壤侵蚀影响因素主要采用多元回归分析、相关分析、主成分分析、灰色关联度等方法。上述方法对数据有限制,且仅能分析自变量对因变量的影响,难以反映其耦合影响和空间分异情

况。本文使用的地理探测器对自变量与因变量无需假设与限定,可探测数据型数据与定性数据。该方法操作简便,结果包括单因子影响、两因子交互作用及风险区域分析。目前已在西部喀斯特地貌类型区、黄土丘陵沟壑区有过尝试,在东部江苏沿江地区进行探索十分必要。本文仅从区域层面分析土壤侵蚀影响因子,但江苏沿江地区的平原沙土区地貌以及生产建设项目密集的特征,同时也是该区域土壤侵蚀关注的重点,可作为下一步的研究方向,结合地理探测器进行研究和探索。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 水利部.《中华人民共和国水利部公报》简介[J].中华人民共和国水利部公报,2009(1):49.
- [2] 中共中央,国务院,中央军委.《关于经济建设和国防建设融合发展的意见》和《长江经济带发展规划纲要》[J].中国纪检监察,2016(7):6.
- [3] 任乐萌.顾及尺度效应的丹江口库区土壤侵蚀时空分异特征及驱动力研究[D].湖北 武汉:武汉理工大学,2018.
- [4] 王慧琴.华北北部区域土壤侵蚀时空演变与驱动力分析[D].北京:北京林业大学,2020.
- [5] 何琪琳,李斌斌,张凤宝,等.东北黑土区坡耕地土壤侵蚀对影响因素响应的定量分析[J].地理学报,2021,76(5):1218-1230.
- [6] 吴思佳,吴伟,陈文惠,等.基于地理探测器的闽三角城市群植被覆盖时空变化及影响因素研究[J].福建师范大学学报(自然科学版),2019,35(5):81-88.
- [7] 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.
- [8] 侯瑞.陕北黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀驱动机制分析及其稳定性评价[D].陕西 西安:长安大学,2019.
- [9] 齐斐,苏新宇,黎家作,等.沂蒙山区不同抽样密度对土壤侵蚀因子估算精度的影响[J].水土保持通报,2019,39(2):179-183.
- [10] 刘宝元,郭索彦,李智广,等.中国水力侵蚀抽样调查[J].中国水土保持,2013(10):26-34.
- [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.