Journal of Southwest University (Natural Science Edition)

DOI: 10.13718/j. cnki. xdzk. 2023. 09. 005

谭永滨,谢剑亮,冉江华,等. 基于 RUSLE 的鄱阳湖流域土壤侵蚀时空特征及影响因素分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版),2023,45(9):46-56.

# 基于 RUSLE 的鄱阳湖流域土壤侵蚀 时空特征及影响因素分析

谭永滨<sup>1,2,3</sup>, 谢剑亮<sup>3</sup>, 冉江华<sup>4</sup>, 王毓乾<sup>1,2,3</sup>, 艾金泉<sup>1,2,3</sup>, 唐瑶<sup>3</sup>, 王瑛<sup>3</sup>

1. 东华理工大学/自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室, 南昌 330013;

2. 东华理工大学 中核三维地理信息工程技术研究中心, 南昌 330013;

3. 东华理工大学 测绘与空间信息工程学院, 南昌 330013;

4. 中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司,昆明 650051

摘要:土壤侵蚀是当今全球面临的重要生态问题,也是全球水土流失研究的重要内容.以鄱阳湖流域为研究区,基于修正通用土壤流失方程(The Revised Universal Soil loss Equation, RUSLE)模型估算2000-2019年间5个时期研究区的土壤侵蚀强度,并分析各影响因子及土壤侵蚀强度的时空分布特征,以及研究区内地形因子对土壤侵蚀分布的影响.结果表明:①流域内降雨侵蚀因子R均值介于9549~15371(MJ·mm)/(hm²·h·a)之间,土壤可蚀性因子K均值为0.02922(t·km²·h)/(km²·MJ·mm),坡长坡度因子LS均值为3.91,植被覆盖与管理因子C均值介于0.081~0.094之间,水土保持措施因子P均值介于0.3781~0.3870之间;②鄱阳湖流域5个年度的平均土壤侵蚀模数分别为882.10,1244.32,1463.72,964.82,794.74t/(km²·a),流域内整体属于轻度侵蚀等级,土壤侵蚀状况在2015年、2019年得到很大好转;③研究区内土壤侵蚀强度在海拔及坡向上的分布具有一定的稳定性,[100,200)m区域是海拔900m以下土壤侵蚀强度最高的区域,在900m以上地区,侵蚀强度随海拔升高急剧增加,流域内朝向偏东北区域的土壤侵蚀强度大于朝向偏西南区域.总体上,流域内水土流失治理应重点关注极强烈及剧烈侵蚀地区、平原与丘陵交界地区、高海拔地区,应加强对朝向偏东北方向区域水土保持措施的实施.

关 键 词: RUSLE 模型; 都阳湖流域; 土壤侵蚀; 时空变化
 中图分类号: S157.1
 文献标志码: A

**文 章 编 号:** 1673-9868(2023)09-0046-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Analysis of Spatio-Temporal Change and Influencing Factors of Soil Erosion in Poyang Lake Basin Based on RUSLE

TAN Yongbin<sup>1,2,3</sup>, XIE Jianliang<sup>3</sup>, RAN Jianghua<sup>4</sup>, WANG Yuqian<sup>1,2,3</sup>, AI Jinquan<sup>1,2,3</sup>, TANG Yao<sup>3</sup>, WANG Ying<sup>3</sup>

收稿日期: 2022-07-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41861052);自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室开放基金项目(MEMI-2021-2022-24);江西省自然科学基金项目(20202BABL202045).

作者简介:谭永滨,博士,副教授,主要从事 GIS 与遥感结合的生态环境分析、位置服务、地理本体语义及文本位置提取研究. 通信作者:王毓乾,博士,副教授.

- 1. Key Laboratory of Mine Environmental Monitoring and Improving around Poyang Lake, Ministry of Natural Resources/ East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
- 2. CNNC Engineering Research Center of 3D Geographic Information, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
- 3. School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
- 4. China Energy Engineering Group Yunnan Electric Power Design Institute Co. Ltd., Kunming 650051, China

Abstract: Soil erosion is an important ecological problem worldwide today, and it is also an important content of global water and soil loss research. In order to macroscopically grasp the history and current situation of soil erosion in Poyang Lake Basin in the past 20 years from 2000 to 2019, based on GIS technology and RUSLE model, this paper uses rainfall data, soil datasets, DEM data, multi-period remote sensing images and land use data from multiple meteorological stations in the study area and surrounding areas to obtain five distribution map of soil erosion impact factors and soil erosion grade in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2019, made a quantitative study on the historical status of soil erosion in the basin, analyzed its temporal and spatial variation characteristics, as well as soil erosion distribution on elevation and aspect factors. The results show: ① The mean value of rainfall erosion factor R in the basin was between 9 549 and 15 371 (MJ  $\cdot$  mm)/(hm<sup>2</sup>  $\cdot$  h  $\cdot$  a), the mean value of soil erodibility factor K was 0.029 22 (t • km<sup>2</sup> • h)/(km<sup>2</sup> • MJ • mm), the mean value of slope length and slope steepness factor LS was 3.91, the mean value of vegetation cover and management factor C ranged from 0.081 to 0.094, the mean value of support practice factor P was between 0. 378 1 and 0. 387 0. 2) The five-year average soil erosion modulus of Poyang Lake Basin was 882. 10, 1 244. 32, 1 463. 72, 964. 82, 794. 74 t/(km<sup>2</sup> • a), respectively, the overall level of the basin was mild erosion, and the soil erosion situation had been greatly improved in 2015 and 2019. ③ The distribution of soil erosion intensity in elevation and slope upwards direction in the study area had a certain stability. The soil erosion intensity in the 100-200 m area was the highest in the area below 900m altitude. In the area above 900m, the soil erosion intensity increased sharply with the increase of elevation. The soil erosion intensity in the northeast region was greater than that in the southwest region. The control of soil and water loss in the basin should focus on extremely strong and severe erosion areas, the junction of plains and hills, and high-altitude areas, and strengthen the soil and water conservation measures in the northeast region.

Key words: RUSLE model; Poyang Lake Basin; soil erosion; spatio-temporal change

土壤侵蚀是一种常见的自然灾害,造成严重的土地退化、土壤肥力流失、河道湖泊淤积、洪涝灾害等一系 列的生态环境问题,不仅影响着生态环境的变化,更危及人类的生命财产安全,是全球性的重要生态环境问题 之一. 定量估算国家、地区、流域等大空间尺度上的土壤侵蚀量和分析土壤侵蚀的时空分布特征,是水土流失 治理和宏观水土保持决策的关键[1],同时,土壤侵蚀定量估算对小尺度区域的景观格局规划和科学选址起着 指导性作用<sup>[2]</sup>. 随着 RS 和 GIS 技术的出现和不断发展成熟,国内外学者在区域土壤侵蚀的定量监测和分析上 取得了诸多的研究成果,提出了包括通用土壤流失方程水蚀预报流域模型(Water Erosion Prediction Project, WEPP)<sup>[3-5]</sup>、通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)<sup>[6-8]</sup>、中国土壤流失方程(Chinese Soil Loss Equation, CSLE)<sup>[9-10]</sup>和修正通用土壤流失方程(The Revised Universal Soil loss Equation, RUSLE)<sup>[11-13]</sup>等 在内的众多土壤侵蚀计算模型.其中,RUSLE模型的应用最为广泛,李佳蕾等<sup>[14]</sup>基于 RUSLE 模型估算 2000,2005,2010,2015年中国的土壤侵蚀量,明确了全国尺度下土壤侵蚀强度大、明显恶化及有效改善区域的 划分,并阐明了其时空分异规律;Teng 等<sup>[15]</sup>利用 RUSLE 模型分析了澳大利亚土壤侵蚀的时空演变规律;Elnashar 等<sup>[16]</sup>采用 RUSLE 模型分析了蓝尼罗河流域不同侵蚀等级、不同土地覆盖类型和不同坡度下的土壤流 失率; Tsegaye 等<sup>[17]</sup>基于 GIS 和 RUSLE 的方法对位于埃塞俄比亚上的蓝尼罗河流域的 Anjeb 流域评估了土壤 侵蚀量、输沙比和产沙量;姚昆等<sup>[18]</sup>利用 RUSLE 模型对四川省凉山州 1990-2018 年情况进行时空变化规律 分析,并指出土壤侵蚀与坡度之间的紧密联系;周建华等<sup>119</sup>结合 RUSLE 计算的土壤侵蚀模数判断坡面建筑 长度与占地面积合理性;刘英等<sup>[20]</sup>结合 RUSLE 模型与地理探测器进行驱动力分析的研究方法来摸清矿区土

壤侵蚀变化规律以及矿井受采矿活动的干扰;张素等<sup>[21]</sup>基于 RUSLE 模型分析了凉山州孙水河流域不同土地 利用类型、海拔和坡度条件下土壤侵蚀强度的特征;钟旭珍等<sup>[22]</sup>基于 RUSLE 模型分析沱江不同功能生态区 内土壤侵蚀的分布特征及两者之间的关系;谢波等<sup>[23]</sup>基于 RUSLE 模型探讨贵州省黔中地区各类岩性下的土 壤侵蚀和土壤侵蚀等级之间的相关关系.上述研究表明,在进行不同空间尺度、不同环境以及不同区域的土壤 侵蚀研究时,RUSLE 模型发挥了重要的作用.

都阳湖流域是国际重要湿地,在生物多样性保护、确保地区生态安全以及国家水资源合理配置的实现 等方面具有十分重要的作用.但是随着全球气候的变化以及人类活动的加剧,都阳湖流域面临越来越严重 的生态问题,其中土壤侵蚀带来的危害是最直接和根本的.土壤侵蚀产生的水土流失造成土壤肥力和农业 生产力下降的同时,大量泥沙下泄造成了河道湖泊的淤积,从而导致鄱阳湖的调蓄能力降低,湖区洪灾多 发.本研究基于 RUSLE 模型,结合 2000-2019 年 5 个时期的地面及遥感监测数据,定量评估鄱阳湖流域 的土壤侵蚀强度,并分析其时空分布特征及与地形因素的相关性,研究成果可为鄱阳湖流域水土流失治理 及水土保持决策提供科学参考依据.

### 1 研究区概况

48

都阳湖位于长江下游南岸江西省北部,其经纬度范围为115°50′-116°44′E,28°25′-29°45′N,是长江 流域的一个重要湖泊. 鄱阳湖流域面积162 200 km²,其中96.6%位于江西省境内,其余3.3%分属广东、 福建、安徽、湖南等省份. 鄱阳湖流域主要由丘陵、山地和冲击平原构成,地势周高中低,东、南、西3面 为丘陵山地,中部为盆地、平原. 鄱阳湖流域属东南季风区的亚热带季风气候,全年降水丰富且强度大,易 发生土壤侵蚀,导致河道湖泊泥沙淤积引发洪灾. 鄱阳湖流域的空间范围如图1所示.



第9期

### 2 数据与研究方法

#### 2.1 数据来源

本研究的数据及来源如表1所示,包括各年份流域及周边气象站日降雨数据、土壤成分数据、DEM 数据、各期植被覆盖度数据和土地利用类型数据等.将所有数据重采样为1km,以便于进行土壤侵蚀模数的计算.

表1 基础数据及来派
------------

数据名称	来源
2000-2019年中国地面气象站日值数据集	中国气象网(http://data.cma.cn)
世界土壤数据库中国土壤数据集 HWSD	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)
数字高程模型 DEM(30 m)	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)
植被覆盖度(FVC)	GEE 处理 Landsat 系列遥感影像(https://code.earthengine.google.com/)
土地利用类型数据	武大开源数据集(https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810)

### 2.2 土壤侵蚀模型

本研究采用修正土壤流失方程(RUSLE)定量评估研究区的土壤侵蚀,计算公式为:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \tag{1}$$

式中: *A* 为土壤侵蚀模数, t/(km<sup>2</sup> • a); *R* 为降雨侵蚀力因子, (MJ • mm)/(hm<sup>2</sup> • h • a); *K* 为土壤可蚀 性因子, (t • km<sup>2</sup> • h)/(km<sup>2</sup> • MJ • mm); *LS* 为坡长坡度因子, 无量纲; *C* 为地表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.

2.2.1 降雨侵蚀力因子 R

降雨是土壤侵蚀的主要驱动因素之一.降雨侵蚀因子反映了降雨对土壤的潜在剥蚀能力.本研究采用 章文波等<sup>[24]</sup>提出的基于日降雨量的计算模型来估算降雨侵蚀力,计算公式如下:

$$R = \sum_{n=1}^{24} R_{\# \Pi}$$
(2)

$$R_{\# \exists} = \alpha \sum_{i=1}^{k} (P_i)^{\beta}$$
(3)

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \tag{4}$$

$$\beta = 0.836 \ 3 + \frac{18.177}{Pa_{12}} + \frac{24.455}{Pb_{12}} \tag{5}$$

式中: n 为1年中的第n个半月(每个月的前 15 d为1个半月,一年为 24个半月);  $R_{*}$ 为某半月的降雨 侵蚀力, (MJ•mm)/(km<sup>2</sup>•h•a); k 为半个月的天数;  $P_i$  为某个半月之中第i 天的降雨量(≥12 mm 的降雨具有侵蚀性);  $\alpha$ , $\beta$  为模型参数;  $Pa_{12}$ , $Pb_{12}$ 分别是一年中日降雨量≥12 mm 的日均降雨量、年均降雨量.

2.2.2 土壤可蚀性因子 K

不同地区的不同类型土壤的理化性质和质地构成均存在差异,*K* 值反映各土壤类型引起土壤侵蚀的大小差异.本研究采用 Sharpley 等<sup>[25]</sup>提出的 EPIC 模型对研究区的土壤可蚀性因子进行计算,公式如下:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp\left[-0.025 \ 6S\left(1 - \frac{F}{100}\right)\right] \right\} \times \left(\frac{F}{N - F}\right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25T}{T + \exp(3.75 - 2.95T)}\right) \times \left(1 - \frac{0.7Sn_1}{Sn_1 + \exp(-5.51 + 22.9Sn_1)}\right)$$
(6)

式中: K 为土壤可蚀性因子,  $(t \cdot acre \cdot h)/(100 \cdot acre \cdot ft \cdot tanf \cdot in)$ , 结果需乘以系数 0.131 7 获取 国际制单位 $(t \cdot km^2 \cdot h)/(km^2 \cdot MJ \cdot mm)$ ; S, F, N 和 T 分别为土壤中沙粒、粉粒、黏粒及碳的含 量(%),其中:

$$Sn_1 = 1 - S/100$$

2.2.3 坡长坡度因子 LS

坡长坡度因子是 RUSLE 模型估算土壤侵蚀模数的重要地形参数,坡长坡度越大,坡面径流对土 壤侵蚀能力越强,本研究采用牟金泽等<sup>[26]</sup>提出的计算模型完成该地区的坡长坡度因子计算,计算公 式如下,

$$LS = 1.02 \times \left(\frac{\lambda}{20}\right)^{0.2} \times \left(\frac{\theta}{5.07}\right)^{1.3} \tag{7}$$

式中: LS 为坡长坡度因子;  $\lambda$  为坡长, m;  $\theta$  为坡度, <sup>°</sup>. 其中, 输入的坡长参数  $\lambda$  是 DEM 数据基于 Arc-Map 经过填洼、流向、流量等水文分析得出的栅格累计坡长[27].

2.2.4 植被覆盖与管理因子 C

植被覆盖与管理因子反映地表植被和田间管理措施对水土流失的抑制程度,指在同等的条件下,有 植被覆盖或田间管理的地表土壤侵蚀量与裸露地表的土壤流失量之比,取值为0~1.本研究以在GEE 平台处理的 Landsat 系列影像获取的植被覆盖度为数据源,采用蔡崇法等<sup>[28]</sup>提出的方法进行 C 值的计 算,公式为:

$$\begin{cases} C = 1 & F = 0 \\ C = 0.650 \ 8 - 0.343 \ 6 \ \lg F & 0 < F < 78.3\% \\ C = 0 & F \ge 78.3\% \end{cases}$$
(8)

式中: C 为植被覆盖与管理因子: F 为植被覆盖度. 2.2.5 水土保持措施因子 P

水土保持措施因子是在有无采取水土保持措施下土壤流失量之比,取值为0~1,值越小表明水土保持 措施的水平越高. 国内尚未有 P 的赋值标准,本研究参考有关学者对相关地区的研究成果,基于流域内土 地利用类型对 P 进行赋值<sup>[29-32]</sup>,结果如表 2 所示.

表 2	不同土地利用类型」	Ρ值
-----	-----------	----

土地利用类型	林地	草地	耕地	裸土	水体	建筑用地
Р	0.5	0.55	0.2	1	0	0

#### 结果与分析 3

### 3.1 土壤侵蚀因子分布

基于修正土壤流失方程 RUSLE 的各因子算法,利用 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2019 年 5 个时期的数据,获得了鄱阳湖流域 1 km 分辨率 R,K,LS,C,P 因子分布图,如图 2 所示.

从图 2 可知, 鄱阳湖流域降雨侵蚀力因子 R 在 2010 年和 2015 年东部及东北部远大于其他 3 年, 2000 年 和 2005 年只有局部存在大降雨侵蚀力, 2019 年中部的降雨侵蚀力要大于北部及南部; 2000-2019 年流 域内降雨侵蚀力因子均值分别为 9 558,10 327,15 383,14 729,11 873 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a),其 中 2010 年标准差为 5 118 (MJ • mm)/(hm<sup>2</sup> • h • a),降雨空间分布差异最大,2000 年标准差为 2 175 (MJ•mm)/(hm<sup>2</sup>•h•a), 降雨空间分布最均匀.

流域内土壤可蚀性因子 K 值介于 0~0.048 84 (t•km<sup>2</sup>•h)/(km<sup>2</sup>•MJ•mm)之间, 均值为 0.029 22 (t•km<sup>2</sup>•h)/(km<sup>2</sup>•MJ•mm); 流域东北部的 K 值普遍较高, 低值区主要分布在流域的东部及东南部, 说明流域东北部的土壤类型较东部及东南部土壤类型更易发生土壤侵蚀.

利用 DEM 数据得到的鄱阳湖流域坡长坡度因子 LS 介于  $0 \sim 144.02$  之间,均值为 3.91;流域北部 及中部坡长坡度因子值较小,因为此处为鄱阳湖平原和吉泰盆地,地势较为平缓;流域的东部、西部及 南部的地区为丘陵山地,地势起伏大,因此坡长坡度因子值较大;坡长坡度因子与 DEM 的空间分布特 征基本一致.

流域内 5 个时期植被覆盖与管理因子 C 有着相同的空间分布特征,均为中间高,四周低,山地丘陵高, 平原盆地低,平均值分别为 0.087,0.094,0.092,0.081,0.083; C 值直接反映植被覆盖情况,与植被覆 盖度成反比,植被覆盖度越高,C 值越小,因此鄱阳湖流域表现为山地的植被覆盖情况比平原植被覆盖情 况好,整体上 2015 年植被覆盖度达到最高,2005 年植被覆盖度达到最低.流域 2000-2019 年 5 个时期水 土保持措施因子 P 的均值分别为 0.386 9,0.387 0,0.386 6,0.379 5,0.378 0.



图 2 鄱阳湖流域 5 个时期降土壤侵蚀因子分布图

利用 RUSLE 模型计算得到研究区 2000-2019 年 5 个时期的土壤侵蚀模数,根据水利部 2008 年发布的《土壤侵蚀分类分级标准》,得到研究区 5 个时期的微度、轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈 6 个侵蚀等级的土壤侵蚀分布图,如图 3 所示.





由图 3 得知,2000-2010 年各时期鄱阳湖流域西北部、东北部及南部山地丘陵地区发生较强的 土壤侵蚀,而且呈现增强的趋势,同时流域中部的平原盆地地区土壤侵蚀也在逐渐增强,分析其原因 可能是降雨侵蚀力的增加和逐年水土流失加剧导致的泥沙淤积,引发平原盆地地区发生洪涝灾害,反 作用于土壤侵蚀作用.2015 年与 2019 年流域中发生较强土壤侵蚀的地区的情况有所好转,但流域东 部地区土壤侵蚀依然较为严重.

### 3.2 土壤侵蚀强度时空分布特征

研究区 2000-2019 年 5 个时期的 平均土壤侵蚀如图 4 所示,呈现"增 加一减少"的趋势,根据国家标准,可 以判定鄱阳湖流域整体上的土壤侵蚀 强度为轻度,但相较南方红壤丘陵区 容许土壤流失量 500 t/(km<sup>2</sup> • a)的标 准,研究区内水土流失较为严重.另 外,2000-2019 年 5 个时期的平均降雨 侵蚀因子分别为 9 549,10 321,15 371, 14 729,11 876 (MJ • mm)/(hm<sup>2</sup> • h • a),





以 2010 年为界点也呈现"增加一减少"的趋势, 与各时期平均土壤侵蚀模数趋势具有较强的一致性, 可以判断降雨是发生土壤侵蚀的重要驱动力之一.

对比各侵蚀等级面积占比和土壤侵蚀总量占比(表4、表5)可以看出,各时期流域内的土壤侵蚀状况整体上以微度和轻度侵蚀为主,面积占比分别为91.12%,87.96%,86.99%,91.69%和92.84%,微度和轻度 土壤侵蚀总量占比较少,分别为16.68%,15.16%,12.53%,12.54%和13.88%,微度和轻度侵蚀面积及侵 蚀量占比均呈现"减少—增加"的趋势;相反地,流域内中度及以上侵蚀强度的面积和侵蚀量占比则呈现 "增加—减少"的趋势.

表 4	都阳湖流域 5	5个时期各土壤侵蚀强度等级面积统计

车 44	面积/km <sup>2</sup>				比例/%					
寸纵	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2019 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2019 年
微度	129 496	121 607	120 924	135 539	13 776	79.84	74.97	74.55	83.56	84.94
轻度	18 579	21 470	20 613	13 472	13 067	11.71	13.52	12.98	8.48	8.23
中度	6 438	8 189	8 313	5 049	4 507	4.05	5.16	5.24	3.18	2.84
强烈	3 177	4 225	4 415	2 717	2 377	2.00	2.66	2.78	1.71	1.5
极强烈	2 507	3 706	4 133	2 542	2 141	1.58	2.33	2.60	1.60	1.35
剧烈	1 985	3 003	3 797	2 881	2 332	1.25	1.89	2.39	1.81	1.47

表 5 鄱阳湖流域 5 个时期各土壤侵蚀强度等级侵蚀量统计

华尔	土壤侵蚀量/(10 <sup>4</sup> t・a <sup>-1</sup> )					比例/%				
寸纵	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2019 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2019 年
微度	373.30	376.75	297.53	261.06	270.26	2.62	1.88	1.26	1.68	2.12
轻度	1 999.10	2 663.56	2 657.17	1 682.72	1 501.96	14.06	13.28	11.27	10.86	11.76
中度	2 282.93	2 677.61	2 782.98	1 722.3	1 594.03	16.05	13.35	11.80	11.11	12.48
强烈	2 289.80	2 905.81	2 961.25	1 793.36	1 606.38	16.10	14.49	12.56	11.57	12.58
极强烈	2 700.50	4 006.32	4 485.23	2 773.14	2 317.69	18.99	19.98	19.02	17.90	18.15
剧烈	4 577.45	7 421.83	10 396.68	7 263.43	5 482.76	32.18	37.01	44.09	46.87	42.92

以上表明,在2000-2010年间,鄱阳湖流域土壤侵蚀强度不断增强,水土流失严重,加剧河流湖泊 淤积堵塞,持续大范围强降雨增多,极易引发洪涝灾害,带来生命财产安全问题,还会加剧水土流失的 发生;同时,2015年和2019年的降雨侵蚀力远大于2005年和2000年,而2015年和2019年的土壤侵 蚀量却远小于2005年和2000年,可以得出,在2010-2019年各个时期鄱阳湖流域内的水土保持措施 减缓了水土流失,水土流失治理得到较大成效,分析其原因可能是政府的调控力度加大以及人们对环境 保护意识的增强.

统计结果中,单独从侵蚀等级的面积和土壤侵蚀总量占比情况来看,流域内土壤侵蚀强度虽然以微 度和轻度侵蚀为主,但年土壤侵蚀量仅占总量的12.53%~16.68%;极强烈和剧烈侵蚀的面积占比仅 有2.82%~4.99%,但年土壤侵蚀量占比却高达51.17%~64.77%.依此判断,流域内的土壤侵蚀强 度两极分化严重,高侵蚀等级地区一直以来都是水土流失的主要发生地,在对水土流失治理时应重点关 注发生极强烈和剧烈侵蚀地区,这样才能够大大降低鄱阳湖流域土壤侵蚀强度,减缓水土流失现状.

整体上,鄱阳湖流域在 2000-2019 年各个时期微度及轻度侵蚀面积占比增加 1.72%,强烈及以上等 级侵蚀面积占比下降 0.51%; 2019 年流域土壤流失总量较 2000 年有所减少,但微度及轻度土壤侵蚀量占 比降低 2.80%,极强烈和剧烈土壤侵蚀量占比增加 9.90%.

### 3.3 土壤侵蚀强度影响因素相关性分析

3.3.1 土壤侵蚀与海拔的相关性

将鄱阳湖流域 DEM 数据按<100, [100, 200), [200, 300), [300, 400), [400, 500), [500, 700),

[700,900),[900,1 300), ≥1 300 m 9 个海拔等级划分,通 过分析研究区内不同海拔等级年 均土壤侵蚀模数的变化情况(图 5) 可知,在各个时期,不同海拔等级 内土壤侵蚀强度的变化趋势基本 一致,整体上处于微度及轻度侵蚀 的强度等级.从不同海拔等级来 看,[100,200) m 是低海拔地区里 土壤侵蚀强度最大的区域,平均侵 蚀模数达到了1 330.15 t/(km<sup>2</sup> • a); 随着海拔逐渐升高,土壤侵蚀强度 开始逐渐变小,其中 2005 年和 2010 年在[400,500) m 地区平均

54



侵蚀模数达到最低,其他时期在[700,900) m 地区达到最低;在>900 m 的高海拔地区,土壤侵蚀强度开始急剧增加,2010 年达到历史最高 2 913 t/(km<sup>2</sup> • a). 总体来说,鄱阳湖流域土壤侵蚀强度在<200 m 的 低海拔地区要远高于 200~900 m 的海拔地区,而>900 m 的高海拔地区土壤侵蚀强度会随着海拔的升高 快速增加.河水交汇的低海拔平原地区和高海拔地区是鄱阳湖流域土壤侵蚀防治的重点区域.

通过分析发现,产生上述空间分布差异的原因可能包括以下几个方面.① 海拔<200 m的区域大部 分为平原地区,在 200 m左右的地区主要是平原和丘陵的交界地带,其中河流汇流且多发,由于鄱阳湖 流域的季风气候特征,降水丰富,强度大,因此流域出口的流量中地面径流占比高于地下径流占比,在此 流量猛涨猛落的变化过程中,易形成洪水,进而发生水土流失现象.② 结合 DEM 数据和坡度数据统计可 知,海拔在 200~900 m之间的山地丘陵地区海拔变化小,坡度小,坡面径流较弱,对土壤剥蚀能力较小; 而在海拔>900 m 的地区,海拔变化大,坡度大,坡长坡度因子 LS 值大,坡面径流强,对土壤剥蚀能力 大.③ 不同海拔等级的土地利用类型也决定了土壤侵蚀强度空间分布差异,在平原地区大多为农田耕地, 而在海拔较高的山地丘陵多为灌木树林,后者的水土保持能力要远大于前者,因此在海拔<900 m 的地区, 高海拔发生的土壤侵蚀强度要比低海拔弱.

3.3.2 土壤侵蚀与坡向的相关性

坡向也是土壤侵蚀与地形因子关系研究中需要重 点分析的因素之一,通过计算,得出 2000-2019 年各 个时期研究区在不同坡向(北、东北、东、东南、南、西 南、西、西北)的平均土壤侵蚀模数,如图 6 所示.从各 个年份来看,不同坡向的平均侵蚀模数变化趋势从大到 小均为:2010 年、2005 年、2015 年、2000 年、2019 年, 表明在长时间内,不同坡向对土壤侵蚀的影响程度是持 续而稳定的.从各个坡向的平均侵蚀模数来看,各个时 期平均土壤侵蚀模数的最大值均为东北朝向的区域,平 均值为 1 279.92 t/(km<sup>2</sup> • a),最小值均为西南朝向的 区域,平均值为 910.76 t/(km<sup>2</sup> • a).

总体上看,研究区内偏东北朝向区域的侵蚀模数大 于偏西南朝向区域的侵蚀模数,可能是由降雨和地形因 素共同造成. 气候特点和海陆分布决定了我国降水从东



南沿海向西北内陆递减的特点,因此鄱阳湖流域内的降水量由东南逐渐向西北减少,同时受流域内的地形 影响,迎风坡比背风坡的降雨量大,导致山地丘陵的降雨量东南向比西北向大,而南高北低的地形,则有 利于水源向北汇聚,使流域内土壤侵蚀强度从单独坡向上表现为东北向侵蚀强度大于西南向,从多个坡向 上则表现为东北、东、东南向上的土壤侵蚀强度大于西北、西和西南向.更易发生土壤侵蚀则代表山体滑 坡和泥石流发生的可能性更大,因此,在山地水土流失的治理上要更加注重东北向地区的水土保持规划和 实施,对一些建筑进行更科学地选址,以免影响生命财产安全.

### 4 总结

本研究基于 RUSLE 模型和 GIS 对鄱阳湖流域的土壤侵蚀因子及土壤侵蚀模数空间分布进行了研究, 结果表明,① 2000-2010 年各个时期鄱阳湖流域西北部、东北部及南部山地丘陵地区发生较强的土壤侵 蚀,而且呈现增强的趋势,同时流域中部的平原盆地地区土壤侵蚀也在逐渐增强. 2015 年和 2019 年,鄱阳 湖流域土壤侵蚀情况好转,特别是流域西北部及赣南丘陵地区.② 2000-2019 年研究区内的土壤侵蚀状 况整体上以微度和轻度侵蚀为主,侵蚀面积及侵蚀量占比均呈现"减少一增加"的趋势;反之,中度及以上 强度的侵蚀面积占比及侵蚀量占比则均呈现"增加一减少"的趋势.流域内的土壤侵蚀强度两极分化严重, 在对水土流失治理时应更加重点关注发生极强烈和剧烈侵蚀的地区,能够大大降低鄱阳湖流域土壤侵蚀强 度.③ 研究区内的土壤侵蚀强度与海拔、坡向 2 个地形因子关系密切,且在海拔及坡向上的分布具有一定 的稳定性.在[100,200) m海拔区域平均土壤侵蚀模数最大,随海拔的升高土壤侵蚀强度逐渐减弱,并在 >900 m 的区域又急剧增加,这与区域内海拔及坡度变化强度、地表径流强度等因素相关;从坡向来看,研 究区内各时期的土壤侵蚀强度均表现为偏东北朝向区域的侵蚀强度大于偏西南朝向.日后应加强对鄱阳湖 流域平原与丘陵交界处及高海拔地区的治理,同时增强对山地丘陵偏东北向地区的水土保持措施.

### 参考文献:

- [1] 杨勤科,李锐,曹明明.区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展[J].地球科学进展,2006,21(8):849-856.
- [2] 苟民欣,徐捷. 基于生态观的山地城市公园水景规划设计 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2022, 47(5): 91-99.
- [3] 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.
- [4] 刘宝元,史培军. WEPP水蚀预报流域模型 [J]. 水土保持通报, 1998, 18(5): 6-12.
- [5] 郑粉莉,杨勤科,王占礼.水蚀预报模型研究[J].水土保持研究,2004,11(4):13-24.
- [6] WISCHMEIER W H, SMITH D. Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains [J]. Agricultural Handbook, 1965, 282: 1-12.
- [7] WISCHMEIER W, SMITH D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning [J]. Agricultural Handbook, 1978, 537: 1-16.
- [8] XIN Z Y, XIA J G. Soil Erosion Calculation in the Hydro-Fluctuation Belt by Adding Water Erosivity Factor in the USLE Model [J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(9): 2123-2135.
- [9] LIU B, ZHANG K, YUN X. An Empirical Soil Loss Equation [C] //Proceedings of the 12th International Soil Conservation Organization Conference, 2002.
- [10] 祝赢,章文波,刘素红,等.第一次全国水利普查侵蚀模数的批量计算方法:基于 CSLE 和 GIS 的土壤水蚀模数计算器 设计与应用 [J].水土保持通报,2012,32(5):291-295.
- [11] RENARD K G, FOSTER G R, WEESIES G A. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Washington, DC [J]. Agricultural Handbook, 1997, 403: 1-5.
- [12] GAYEN A, SAHA S, POURGHASEMI H R. Soil Erosion Assessment Using RUSLE Model and Its Validation by FR Probability Model [J]. Geocarto International, 2020, 35(15): 1750-1768.
- [13] BEHERA M, SENA D R, MANDAL U, et al. Integrated GIS-Based RUSLE Approach for Quantification of Potential Soil Erosion under Future Climate Change Scenarios [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(11):

1-18.

- [14] 李佳蕾,孙然好,熊木齐,等. 基于 RUSLE 模型的中国土壤水蚀时空规律研究 [J]. 生态学报,2020,40(10):3473-3485.
- [15] TENG H F, VISCARRA ROSSEL R A, SHI Z, et al. Assimilating Satellite Imagery and Visible-near Infrared Spectroscopy to Model and Map Soil Loss by Water Erosion in Australia [J]. Environmental Modelling and Software, 2016, 77(5): 156-167.
- [16] ELNASHAR A, ZENG H W, WU B F, et al. Soil Erosion Assessment in the Blue Nile Basin Driven by a Novel RU-SLE-GEE Framework [J]. Science of the Total Environment, 2021, 793: 1-17.
- [17] TSEGAYE L, BHARTI R. Soil Erosion and Sediment Yield Assessment Using RUSLE and GIS-Based Approach in Anjeb Watershed, Northwest Ethiopia [J]. SN Applied Sciences, 2021, 3(5): 1-19.
- [18] 姚昆,张存杰,何磊,等. 土壤侵蚀动态变化分析:以四川省凉山州为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版),2021, 43(7):36-44.
- [19] 周建华, 勾玲琳, 胡嘉诚. 基于水土保持的山地公园坡面建筑水平尺度控制 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(7): 207-216.
- [20] 刘英,魏嘉莉,岳辉,等. 神东矿区土壤侵蚀时空特征及驱动力分析 [J]. 测绘科学, 2022, 47(1): 142-153.
- [21] 张素,熊东红,吴汉,等. 基于 RUSLE 模型的孙水河流域土壤侵蚀空间分异特征 [J]. 水土保持学报,2021,35(5): 24-30.
- [22] 钟旭珍,刘馨悦,姚坤,等. 基于生态功能分区的沱江流域土壤侵蚀研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(12): 127-136.
- [23] 谢波,杨广斌,杨情琴,等. 黔中喀斯特地区岩性与土壤侵蚀空间分异研究 [J/OL]. 湖南师范大学(自然科学学报),
   2021: 1-11 [2023-09-12]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/43. 1542. N. 20210415. 1553. 002. html.
- [24] 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.
- [25] SHARPLEY A N, WILLIAMS J R. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Determination. US Department of Agriculture [J]. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture, 1990, 4(4): 206-207.
- [26] 牟金泽, 孟庆枚. 降雨侵蚀土壤流失预报方程的初步研究 [J]. 中国水土保持, 1983(6): 25-29.
- [27] 张宏鸣. 流域分布式土壤侵蚀学坡长提取与分析 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [28] 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.
- [29] 陈思旭,杨小唤,肖林林,等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究 [J]. 资源科学,2014,36(6):1288-1297.
- [30] 司志文. 修正 RUSLE 模型在江西省水土流失中的研究 [D]. 北京:中国地质大学(北京), 2021.
- [31] 陈红, 江旭聪, 任磊, 等. 基于 RUSLE 模型的淮河流域土壤侵蚀定量评价 [J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 165-176.
- [32] 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.

责任编辑 包颖

崔玉洁