

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.015.

澹腾辉, 焦雄, 平原, 等. 基于土壤侵蚀时空演变的县域生态承载力评价[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 210-216.

TAN Tenghui, JIAO Xiong, PING Yuan, et al. Ecological Carrying Capacity Evaluation Based on Spatial and Temporal Evolution of Soil Erosion at County Scale[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 210-216.

# 基于土壤侵蚀时空演变的县域生态承载力评价

澹腾辉, 焦雄, 平原, 李雨晨, 郭忠录

(华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070)

**摘要:** [目的] 探究土地类型变化背景下土壤侵蚀和生态承载力的时空演变及相关关系, 对提高生态承载力水平、优化土地利用结构和水土保持措施配置具有重要意义。[方法] 以江西省宁都县为研究区域, 基于自然资源和社会经济数据, 运用 InVEST 模型与空间主成分方法, 分析了土壤侵蚀变化对生态承载力的影响。[结果] (1) 宁都县主要土地利用类型为林地、耕地和草地, 9 年来土壤侵蚀程度 2010 年 > 2015 年 > 2018 年, 分别为 597.42, 591.29, 583.51 t/(km<sup>2</sup> · a), 侵蚀类型以微度为主, 在中部、西北部和东南部等地区, 建设用地和耕地土壤侵蚀程度严重。(2) 宁都县生态承载力西南低、东北高, 9 年来生态承载力整体上略有好转; 三期土壤侵蚀程度严重的区域, 生态承载力水平低。(3) 2010—2018 年, 宁都县开展规模化整地, 使林地、荒地(未利用地)转为园地、耕地, 增加了土地覆被度, 加之降雨量减小, 径流冲刷减弱, 侵蚀模数大幅降低, 分别减少了 178.19, 876.32, 2 205.07 t/(km<sup>2</sup> · a), 其他土地利用类型侵蚀模数变化较小, 总体来看土壤侵蚀模数变化的主要原因是耕地、园地和未利用地的转化。[结论] 宁都县不同土地利用方式下土壤侵蚀强度不同, 且对区域承载力有较大影响, 未来应加强人类活动对侵蚀及生态承载力的影响研究。

**关键词:** 土地利用变化; InVEST 模型; 土壤侵蚀程度; 生态承载力; 宁都县

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0210-07

## Ecological Carrying Capacity Evaluation Based on Spatial and Temporal Evolution of Soil Erosion at County Scale

TAN Tenghui, JIAO Xiong, PING Yuan, LI Yuchen, GUO Zhonglu

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** [Objective] In order to explore the spatiotemporal evolution and correlation of soil erosion and ecological carrying capacity in the context of land type changes, it is of great significance to improve the level of ecological carrying capacity, optimize land use structure and configure soil and water conservation measures. [Methods] This paper takes Ningdu County, Jiangxi Province as the research area, based on natural resource and socio-economic data, uses InVEST model and spatial principal component method to analyze the impact of soil erosion changes on ecological carrying capacity. [Results] (1) The main types of land use in Ningdu County were forest land, arable land and grassland. The degree of soil erosion in the past 9 years showed the order: 597.42 t/(km<sup>2</sup> · a) in 2010 > 591.29 t/(km<sup>2</sup> · a) in 2015 > 583.51 t/(km<sup>2</sup> · a) in 2018. The type of erosion was predominantly slight. In areas such as the central, northwestern and southeastern regions, the degree of soil erosion on construction land and cultivated land was serious. (2) Ningdu County's ecological carrying capacity was low in the southwest and high in the northeast. In the past 9 years, the ecological carrying capacity had improved slightly. In areas with severe soil erosion in the third stage, the level of ecological carrying capacity was low. (3) From 2010 to 2018, Ningdu County had carried out large-scale land

收稿日期: 2022-06-24

修回日期: 2022-07-13

资助项目: 国家自然科学基金(42077066); 国家重点研发计划课题(2017YFC0505405)

第一作者: 澹腾辉(1997—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与 GIS 空间分析。E-mail: 2277612833@qq.com

通信作者: 郭忠录(1980—), 男, 山西忻州人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zgzhongzau@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

preparation, converting forest land and wasteland (unused land) into garden land and cultivated land, increasing the land cover. Coupled with the decrease in rainfall, the runoff erosion was weakened, and the erosion modulus significantly reduced, which reduced by  $178.19 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,  $876.32 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , and  $2\,205.07 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , respectively. Other land use types had less variation in erosion modulus. In general, the main reason for the change in soil erosion modulus was the conversion of arable land, garden land and unused land. [Conclusion] Soil erosion intensity varies under different land use methods in Ningdu County and has a large impact on the regional carrying capacity. Future research on the impact of human activities on erosion as well as ecological carrying capacity should be strengthened.

**Keywords:** land use change; InVEST model; degree of soil erosion; ecological carrying capacity; Ningdu County

土地利用类型变化又称为覆被类型变化,本质是区域生态环境与景观功能的演变,而景观变化对区域内物质流、能量流的转变起决定性作用,同时也会引发一系列自然现象及过程演变,如土壤侵蚀、生态赤字等<sup>[1]</sup>。我国是世界上土壤侵蚀最为严重的国家之一,水土流失遍及全国各地,流失面积约  $3.56 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占国土总面积的 37%。影响土壤侵蚀的因素主要包括自然条件和不合理的人为活动,土壤侵蚀会破坏地表植被,导致河湖频发洪涝灾害,对社会的发展以及人民的生产生活造成重大影响<sup>[2]</sup>。区域内自然资源和生态环境的最大承载力,是区域人口和经济发展的阈值,也是衡量区域可持续发展的重要指标之一。不合理的人类活动对地表景观格局的构成和演变影响强烈,造成土壤质量下降、土壤养分及组成物质流失,加剧土壤侵蚀<sup>[3]</sup>,并使得土壤水源涵养能力降低,水土流失量持续增大,改变区域生态承载力。当出现生态赤字即生态足迹大于生态承载力时,区域生态保护功能下降,社会经济发展将受到阻碍<sup>[4]</sup>,因此针对区域的生态承载力进行评估迫在眉睫。

关于对土壤侵蚀和生态承载力之间关系的研究结果较为丰富,如陈樟昊等<sup>[5]</sup>研究表明不同土壤侵蚀程度的变化对生态脆弱性的演化具有协同效应;冉涛等<sup>[6]</sup>分析得出生态脆弱地区水土流失较为严重,侵蚀敏感性强;潘竞虎等<sup>[7]</sup>构建景观生态脆弱模型发现景观脆弱破碎度与土壤侵蚀存在明显的正相关关系;康惠惠等<sup>[8]</sup>发现三江源生态系统的退化和恢复导致土地植被覆盖度发生变化,进而造成土壤保持能力的变化。从诸多研究结果可以看出,土壤侵蚀与生态承载力之间存在密切的联系,土壤侵蚀程度的缓解对提高生态承载力有积极的影响。但基于县域尺度探究土壤侵蚀对生态承载力的影响研究成果尚不充分<sup>[9-10]</sup>。因此本文基于自然因素和人类活动因素两个影响因子,以南方红壤区宁都县为研究对象,利用 InVEST 模型对区域土壤侵蚀状况进行评价,划分水土流失严

重的区域,然后结合人类活动下的社会经济指标,基于空间主成分法 (SPCA) 对区域的生态承载力进行综合评价,探讨生态承载力与土壤侵蚀之间的关系,为实现区域水土流失治理和可持续发展提供参考。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区概况

研究区位于江西省赣州市辖县的宁都县( $26^{\circ}05'18''$ — $27^{\circ}08'13'' \text{ N}$ ,  $115^{\circ}40'20''$ — $116^{\circ}17'15'' \text{ E}$ ), 总面积  $4\,053.16 \text{ km}^2$ , 为中亚热带季风湿润气候区,日照充足,年平均气温为  $14 \sim 19^{\circ}\text{C}$ , 北部山区低,南部丘陵、河谷地区高。年降水量为  $1\,500 \sim 1\,700 \text{ mm}$ , 东北部降雨多,西南部降雨少。土地利用类型以耕地、林地和草地为主,植被种类主要有银钟树 (*Halesia macgregorii*)、银杏 (*Ginkgo biloba* L.)、香果树 (*Emmenopterys henryi*)、三叶木通 (*Akebia trifoliata*)、红楝子 (*Toona ciliata*)、益母草 (*Leonurus japonicus* Houtt.)、天南星 [*Arisaema erubescens* (Wall.) Schott]、花榈木 (*Ormosia henryi* Prain) 等,植被覆盖度较高,植物种类多,生物多样性丰富。由于宁都县地属南方红壤区,土壤类型复杂多样,以地带性红壤为主,同时还存在山地黄壤、黄棕壤、紫色土、潮砂土、石灰土、黄泥土和水稻土等土壤类型。但宁都县低山和丘陵交错,地形破碎,加之区域人口稠密,近些年土地开发强度大,尤其是各种工业生产项目和农业资源开发导致土地的不合理利用情况剧增,区域出现了一系列生态环境问题如水土流失和生态承载力赤字等,严重制约地区社会、经济、生态等产业的可持续发展。

### 1.2 数据来源

本研究中气象数据源于江西省气象局和中国气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/>), 包括 2010—2018 年研究区气象站点的气温、降雨和日照数据;土地利用数据来源于美国地质调查局 USGS

(<https://glovis.usgs.gov/>), 包括 2010 年、2015 年、2018 年共 3 期, 空间分辨率  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  的栅格数据, 并将其划分为耕地、林地、草地、建设用地、园地、水域、未利用地 7 大类土地利用类型; DEM 数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  的栅格数据; 土壤数据包括 1:100 万的土壤类型图和土壤属性数据, 来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>); 社会经济数据源自宁都县政府信息公开专栏(<http://xxgk.ningdu.gov.cn/>)。

## 2 研究方法

### 2.1 土壤侵蚀量估算

InVEST 模型中的水土保持 SDR 模块用于描述坡面土壤侵蚀和流域输沙空间过程, 常用于集水区保土保沙生态系统服务功能方面的研究<sup>[11]</sup>, 模块首先计算潜在土壤侵蚀, 然后使用修订的通用土壤流失方程 USLE 计算有植被覆盖与人为措施条件下的实际土壤侵蚀量。

$$USLE = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

式中: USLE 为年均单位面积上的土壤流失量  $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ;  $R$  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;  $S$  为坡度因子;  $C$  为植被覆盖因子;  $P$  为水土保持措施因子。

降雨侵蚀力( $R$ )是引起水土流失最直接的因素之一, 本文采用月尺度经验模型进行计算出来后通过 Kriging 插值得到<sup>[12]</sup>:

$$R = \sum_{i=1}^{12} [1.735 \times 10^{(1.5 \lg P_i - 0.8188)}] \times 17.02 \quad (2)$$

式中:  $P$  为年平均降雨量( $\text{mm}$ );  $P_i$  为月降雨量( $\text{mm}$ )。式中  $R$  单位是  $100\text{ ft} \cdot \text{t} \cdot \text{in}/(\text{ac} \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ , 转换成国际单位  $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm} \cdot \text{h} \cdot \text{a})$  需乘以系数 17.02。

土壤可蚀性( $K$ )能够反映土壤的侵蚀敏感程度大小<sup>[13]</sup>, 本文基于土壤数据库, 根据 EPIC 模型进行计算:

$$K = 0.1317 \left\{ 0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 S_{AN} (1 - \frac{S_{IL}}{100})] \right\} \times \left( \frac{S_{IL}}{C_{LA} + S_{IL}} \right) \left[ 1.0 - \frac{0.25D}{D + \exp(3.72 - 2.95D)} \right] \times \left[ 1.0 - \frac{0.75SN_1}{SN_1 + \exp(-5.51 + 22.9SN_1)} \right] \quad (3)$$

式中:  $S_{AN}$  为砂粒含量(%);  $S_{IL}$  为粉砂含量(%);  $C_{LA}$  为黏粒含量(%);  $D$  为有机质含量(%);  $SN_1 = 1 - S_{AN}/100$ , 0.1317 为美国制单位向国际制单位转换系数。

$L, S$  因子通过 CSLE 模型由符素华等<sup>[14]</sup>建立的地形因子算法计算得出; 植被覆盖与作物因子  $C$  的计算采用蔡崇法等<sup>[15]</sup>在三峡库区建立的关系式:

$$\begin{cases} C=1 & c=0 \\ C=0.6508-0.3436\lg c & 0 < c < 78.3\% \\ C=0 & c \geq 78.3\% \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $c$  为某生长季节作物或植物的覆盖度(%)。

水土保持措施因子  $P$  参考 Invest 手册以及相关研究<sup>[16]</sup>, 结合当地土地利用及水保措施情况确定。

### 2.2 生态承载力评估

生态承载力是区域生态环境中各种自然因素长期交互的结果, 是形成区域生态环境本底条件的基础<sup>[17]</sup>。根据全面性、科学性等原则, 综合考虑宁都县不同海拔的植被差异、气候、资源、经济、社会及水土流失状况, 从自然环境、社会经济两个维度<sup>[18]</sup>, 遴选出 12 项便于衡量的指标(表 1)来构建宁都县生态承载力的评价体系。

表 1 宁都县生态承载力评价指标体系

目标层	准则层	指标层
生态承载力	自然环境压力	年降雨量、日照数、平均气温、植被覆盖度、土壤侵蚀模数、高程、坡度
	社会经济压力	人口密度、经济密度、人均耕地、林地、园地面积

由于评价生态承载力的不同指标具有不同的性质和量纲, 因此本文采用极差标准化法<sup>[19]</sup>, 按照各级指标对生态环境的影响, 把指标分为对环境生态有着积极作用的正向指标, 其值越高代表生态承载力越高和与之相反的负向指标。正向指标选取日照数、平均气温、植被覆盖度、高程、坡度、人均林地面积、人均耕地面积; 负向指标选取年降雨量、土壤侵蚀模数、人口密度、经济密度、人均园地面积。计算公式如下:

正向指标:

$$R_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (5)$$

负向指标:

$$R_i = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (6)$$

式中:  $R_i$  为第  $i$  指标的标准化值;  $X_i$  为第  $i$  指标的原始值;  $X_{\max}$  和  $X_{\min}$  为各指标原始值的最大值和最小值。

在生态环境脆弱性的评价方法中, 空间主成分分析法(spatial principal component analysis, SPCA)是基于主成分分析法原理和 GIS 空间分析技术, 按照数据信息损失最小的原则, 通过对原始空间坐标轴旋转, 将相关的多变量指标转化为少数几个不相关的综合指标<sup>[20]</sup>。本研究基于 ArcGIS 10.6, 将指标层中标准化后的 5 个评价指标进行空间主成分分析, 计算出区域生态承载力。计算公式如下<sup>[21]</sup>:

$$ECC = \sum_{i=1}^n r_i Y_i \quad (7)$$

式中: ECC 为生态承载力指数;  $r_i$  为第  $i$  个主成分;  $Y_i$  为第  $i$  个主成分的贡献率。

当累计贡献率大于或等于 85% 时,就能代表绝大多数原始数据的有关信息。为了便于不同年份生态承载力的对比分析,因此对 ECC 进行标准化处理,计算公式如下:

$$SECC = (ECC_i - ECC_{min}) / (ECC_{max} - ECC_{min}) \quad (8)$$

式中:SECC 为生态承载力指数的标准化值,范围为 0~1;ECC<sub>i</sub> 为生态承载力指数的实际值;ECC<sub>min</sub> 和 ECC<sub>max</sub> 分别为生态承载力指数的最小值和最大值。

从表 2 可以直接观察到,2010—2018 年前 5 个

主成分因子的累计贡献率均达到 85% 以上,因此根据公式(7),将前 5 个主成分因子进行加权叠加计算 2010—2018 年宁都县生态承载力,计算公式如下:

$$\begin{aligned} ECC_{2010} &= 42.837Y_1 + 16.684Y_2 + 14.551Y_3 + \\ &\quad 9.021Y_4 + 4.815Y_5 \\ ECC_{2015} &= 39.572Y_1 + 17.965Y_2 + 14.848Y_3 + \\ &\quad 10.096Y_4 + 5.023Y_5 \\ ECC_{2018} &= 36.536Y_1 + 19.574Y_2 + 13.925Y_3 + \\ &\quad 9.594Y_4 + 6.783Y_5 \end{aligned} \quad (9)$$

表 2 空间主成分分析结果

主成分 因子	特征值			贡献率/%			累计贡献率/%		
	2010 年	2015 年	2018 年	2010 年	2015 年	2018 年	2010 年	2015 年	2018 年
Y <sub>1</sub>	0.134	0.118	0.112	42.837	39.572	36.536	42.837	39.572	36.536
Y <sub>2</sub>	0.052	0.054	0.060	16.684	17.965	19.574	59.521	57.538	56.110
Y <sub>3</sub>	0.046	0.044	0.043	14.551	14.848	13.925	74.072	72.385	70.035
Y <sub>4</sub>	0.028	0.030	0.029	9.021	10.096	9.594	83.093	82.481	79.628
Y <sub>5</sub>	0.015	0.015	0.021	4.815	5.023	6.783	87.908	87.504	86.412

3 结果与分析

3.1 土地利用动态变化

通过对 2010—2018 年土地利用类型转移矩阵分析可知(表 3),林地、耕地面积比例基本保持不变,占比分别为 88.04%,58.84%,林地转为耕地面积为 209.99 km<sup>2</sup>,耕地转为林地面积为 246.39 km<sup>2</sup>,主要原因是为了弥补城镇化发展占用的耕地,大量的林地在此期间转为耕地,同时,由于生态环境保护工程和

退耕还林政策的实施,耕地又大量地转为林地;园地增加的面积比例为 1.53%,与农村经济快速发展、农业结构的调整、新农村发展经济果园有关;草地和水域面积有所减少,减少的面积占比分别为 1.58%,0.51%,其中草地转化为面积较大的是林地,面积为 128.79 km<sup>2</sup>;建设用地面积增加了 21.3 km<sup>2</sup>(占比为 0.53%)。地类的相互转化导致了土地利用类型的破碎程度增大,聚集程度减小,加之区域受人为干扰较大,多样性和均衡程度有所下降。

表 3 2010—2018 年土地利用类型面积转移矩阵

km<sup>2</sup>

年份	土地利用 类型	2010 年						
		园地	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2018 年	园地	6.06	25.17	47.30	11.38	2.99	0.88	0.00
	耕地	16.90	451.71	209.99	7.23	13.44	25.22	0.00
	林地	7.10	246.39	2577.00	128.79	8.80	3.57	0.00
	草地	1.23	10.54	71.94	64.43	0.19	0.21	0.00
	水域	0.05	5.52	5.94	0.20	21.43	0.28	0.00
	建设用地	0.45	32.63	13.84	0.58	3.97	14.01	0.02
	未利用地	0.01	1.77	1.16	0.01	3.31	0.01	0.00

3.2 土壤侵蚀状况

3.2.1 土壤侵蚀时空变化 2010—2018 年宁都县土壤侵蚀模数呈逐年减小趋势,分别为 597.42,591.29,583.51 t/(km<sup>2</sup>·a)。从不同侵蚀程度来看,2010 年、2015 年、2018 年宁都县土壤侵蚀类型以微度和轻度为主,其中微度侵蚀面积占比最大,分别为 79.59%,79.25%,80.71%;强度及以上土壤侵蚀面积占比呈下降趋势,减少率分别为 39.51%,53.24%,64.65%。这与当地实施的退耕还林还草工程等政策密切相关,

与易文明等<sup>[22]</sup>研究退耕还林能有效治理极端降雨导致的土壤侵蚀的结果一致。

由图 1 可知,在空间分布上宁都县土壤侵蚀强度有明显差异,强度及以上土壤侵蚀类型主要分布在中部、西北部以及东南部等地区,由于该区域分布着大量建设用地和耕地,人口密集,植被覆盖度低,抗冲刷能力弱,从而导致了土壤侵蚀。2010—2018 年宁都县土壤侵蚀总体得到改善,微度侵蚀面积增加了 45.59 km<sup>2</sup>,而轻度侵蚀分布范围破碎化程度降低,沿



流域聚集;竹竿乡、固厚乡以及田埠乡等乡镇强度及以上土壤侵蚀状况得到明显改善。总体来看,中度及以上的土壤侵蚀强度是造成土壤侵蚀的主要来源。

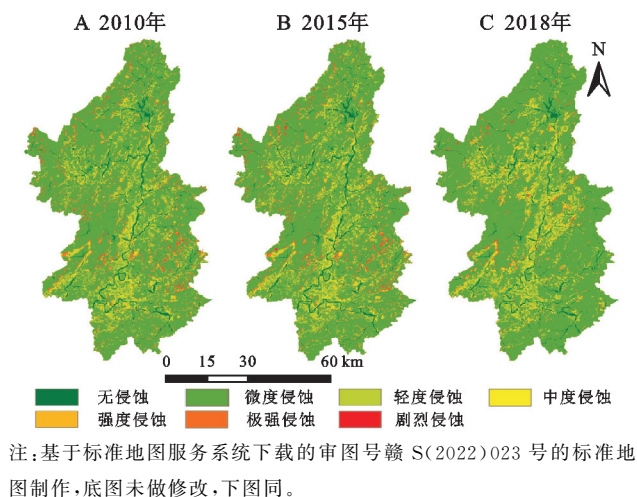


图1 土壤侵蚀分级

3.2.2 不同土地利用类型下土壤侵蚀特征 不同时期在不同土地利用类型下,土壤侵蚀模数存在显著差异,未利用地与其他类型相比土壤侵蚀模数较高,园地、耕地的侵蚀模数呈先增后减的状态,原因是随着经济社会的高速发展,政府将疏林地和荒草地北部整改为茶园及中部、南部整改为柑橘园,加之水土流失防治措施未得到有效实施,整改后园地植被覆盖度下降,生态群落结构不稳定,侵蚀模数大幅度增加,导致局部区域侵蚀量大,这与郭云<sup>[23]</sup>、杨君<sup>[24]</sup>等分析洞庭湖区域不同土地利用类型变化对生态服务功能的影响研究结果相符。2010—2015年,耕地、园地和未利用地的侵蚀模数增幅较大,分别增加了 102.58, 198.05, 1 442.03 t/(km<sup>2</sup>·a),原因是宁都县为了响应国家土地利用总体规划政策,改善土地景观破碎化程度,导致林地、草地植被覆盖度降低,再加上 2012 年和 2015 年是典型的丰水年,降雨量较大,径流冲刷能力较强,从而加大了侵蚀模数,与姚华荣等<sup>[25]</sup>研究发现澜沧江流域土地利用变化对土壤侵蚀造成强烈影响的研究结果一致。2018 年,政府为应对宁都县人口总量的快速增长,实施了林草地转为耕地、园地的结构优化措施,使得草地、园地、耕地和未利用地侵蚀模数大幅下降,减幅分别是 175.99, 376.25, 978.91, 3 647.11 t/(km<sup>2</sup>·a)。总体来看 2010—2018 年,耕地、园地和未利用地的转化是导致土壤侵蚀模数变化的主要原因,研究结果与实际相符合,毁林造田和退耕还林措施都会加重土壤侵蚀,应加强植被保护力度,防止林草地退化。

### 3.3 生态承载力

3.3.1 生态承载力时空分析 由图 2 可知,2010—

2015 年宁都县呈现生态承载力由低等级向高等级转换的趋势,以低生态承载力下降,中等生态承载力增幅为主,面积分别变化了 365.09, 675.55 km<sup>2</sup>,中低和高生态承载力小幅度降低,分别减少了 17.75%, 29.26%,这与宁都县响应国家 2011 年“十二五”环境保护法规,实施退耕还林生态环境保护措施,改善土壤结构和质量,提高植被覆盖度有关<sup>[26]</sup>;相对 2015 年,2018 年由于城镇化进程速度加快导致中等生态承载力往中低生态承载力转移,面积为 288.11 km<sup>2</sup>,中高以上生态承载力的面积增加 277.26 km<sup>2</sup>,整体而言该区域生态承载力在时间尺度上有轻微好转。

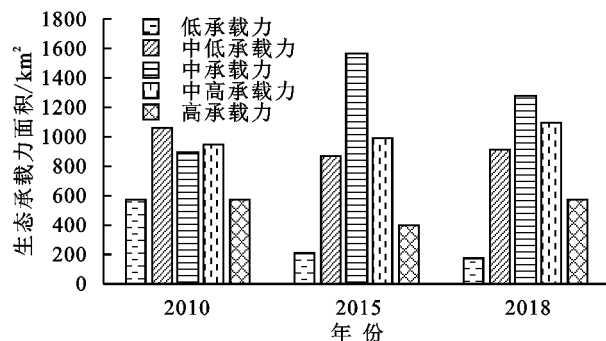
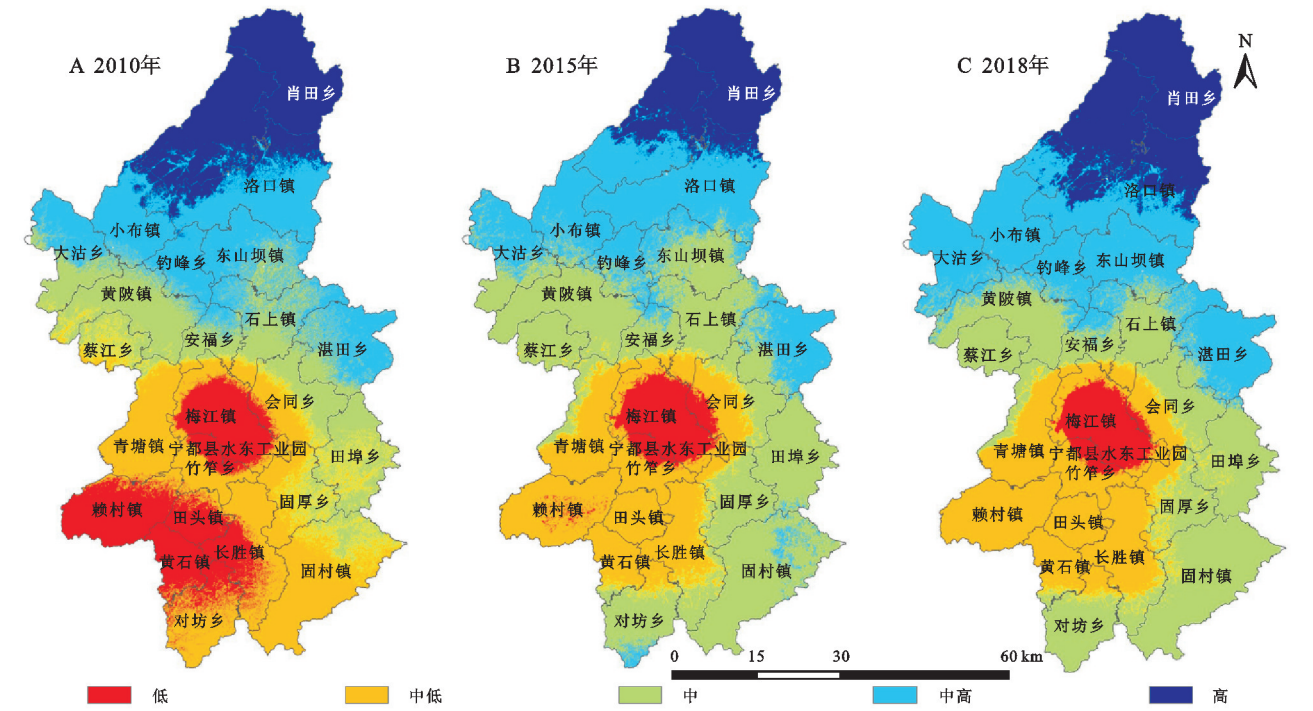


图2 2010—2018 年各等级生态承载力面积对比

由图 3 可知,2010—2018 年宁都县生态承载力较高的地区主要分布于北部、东部的部分山区,这与北部山区多,植被覆盖度高,水土保持效益较高有关;而中部和西南部由于人口密集、建设用地占比高、土地开发强度较大而导致生态承载力较低。2015 年赖村镇、田头镇、长胜镇等乡镇生态承载力由低水平转化为中低水平,比 2010 年有明显改善;2018 年宁都县部分乡镇由中水平转化为中高水平(新增面积 102.65 km<sup>2</sup>),北部地区生态承载力由中高水平转化为高水平(新增面积 174.62 km<sup>2</sup>),生态承载力整体上有所好转,这与姚雄等<sup>[27]</sup>研究发现合理优化土地空间结构可提高植被覆盖度,增强生态环境承载能力的研究结果相似。

3.3.2 生态承载力与土壤侵蚀关系研究 不同土壤侵蚀程度的生态承载力差异较大,2010 年中度及以下侵蚀强度中,生态承载水平主要为中等及以上,面积占比分别为 30.27%, 17.42%, 7.27%;在强度侵蚀、极强侵蚀和剧烈侵蚀条件下,生态承载力以低和中低水平为主,面积占比分别为 2.28%, 1.19%, 1.74%;2015 年与 2010 年情况相似,随着侵蚀强度降低,区域的生态承载力水平呈上升趋势。2018 年微度侵蚀区域中,中低及以上生态承载力占主要部分,其中中和中高承载力占比为 66.45%;在中等及以上侵蚀等级下,区域生态承载力以中低、中、中高承载力为主,其中中低生态承载力面积大于中、中高生态承载力面积,可以看

出 2018 年研究区侵蚀强度较往年有明显下降,生态承载水平明显提高,这与荣月静等<sup>[28]</sup>分析结果相同,也与刘慧芳<sup>[29]</sup>分析其汾河上游流域水土流失对承载力的影响结果一致。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号赣 S(2022)023 号的标准地图制作,底图未做修改。

图 3 2010—2018 年宁都县生态承载力

由土壤侵蚀与生态承载力相关性雷达图(图 4)可知,9 年来不同土壤侵蚀等级发生改变时,区域生态承载力也随着发生变化,其中微度侵蚀变化 846.95 km<sup>2</sup>和剧烈侵蚀变化变化 249.6 km<sup>2</sup>时分别对中生态承载力、低生态承载力影响最为显著;轻度及中度侵蚀对不同生态承载力影响较为均衡;除高生态承载力

外,强度侵蚀和极强侵蚀对其他承载力的影响均较为显著。不同侵蚀强度面积变化对不同生态承载力面积具有不同的响应关系,侵蚀和承载力等级降低的面积明显大于增加的面积,这与荣月静等<sup>[30]</sup>研究发现土壤侵蚀程度的减弱有利于生态承载力的恢复和改善结果一致。

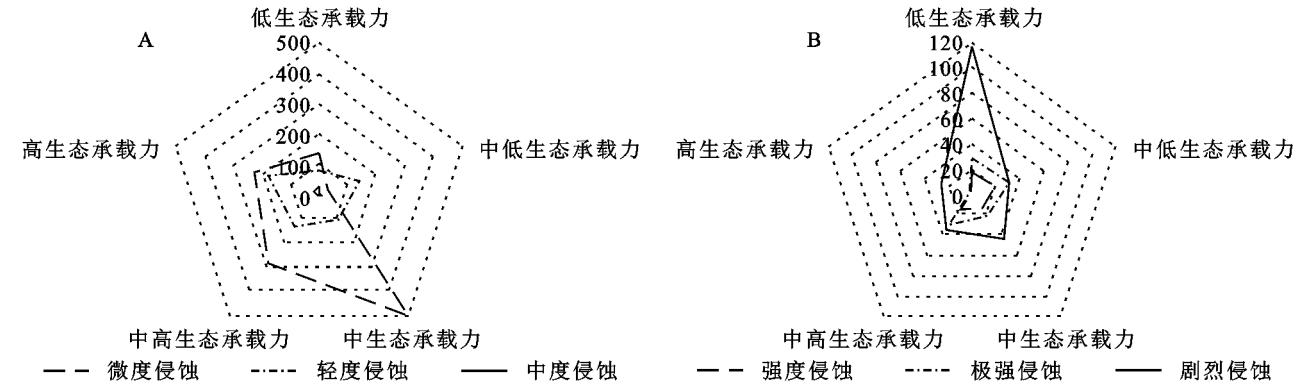


图 4 土壤侵蚀与生态承载力相关性雷达图

4 结论

(1) 林地、耕地和草地为宁都县主要地类,9 年来土地利用类型破碎程度 2018 年>2015 年>2010 年,这主要是由于人类活动对林地和草地的影响程度较高,在经济和城镇化高速发展中被占用开发转化为园地和建设用地,集中布局被打破,导致景观聚集程度不断减小。

(2) 整体上看宁都县生态承载力东北部大于西南部,其中承载力增强的区域占 29.9%。近年来虽然局部地区生态承载力有所好转,但由于土地过度开发,导致土壤侵蚀相对严重,生态承载力仍维持在较低水平。

(3) 3 期土壤侵蚀模数呈逐年减小趋势,土壤侵蚀总量减少了 2.452×10<sup>6</sup> t;从平均侵蚀模数来看,2010—2018 年各土地利用类型下侵蚀模数:未利用地>耕地>园地>草地>林地>建设用地>水域,其中因宁都县开

展规模化整地,使林地、荒地(未利用地)转为园地、耕地,整治前期水土保持生态防护措施未得到贯彻和实施,植被覆盖度降低,从而导致土壤侵蚀模数增加,因此在今后的治理需多加关注和预警。

#### 参考文献:

- [1] 韩文权,常禹,胡远满,等.景观格局优化研究进展[J].生态学杂志,2005,24(12):1487-1492.
- [2] 张鹏宇,王全九,周蓓蓓.陕西省耕地土壤可蚀性因子[J].水土保持通报,2016,36(5):100-106.
- [3] 朱连奇,许立民.全球变化对陆地生态系统的影响研究[J].地域研究与开发,2011,30(2):161-165.
- [4] 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(1):57-59,62.
- [5] 陈樟昊,姚雄,余坤勇,等.南方典型红壤区生态脆弱性与土壤侵蚀的演化关系[J].西南林业大学学报:自然科学版,2017,37(4):82-90.
- [6] 冉涛,邓伟.北方生态脆弱区土壤侵蚀敏感性空间分异[J].水土保持研究,2017,24(4):182-186,190.
- [7] 潘竞虎,任梓菡.基于景观格局和土壤侵蚀敏感性的兰州市生态脆弱性评价[J].土壤,2012,44(6):1015-1020.
- [8] 康惠惠,潘韬,盖艾鸿,等.生态退化与恢复对三江源区水土保持功能的影响[J].水土保持通报,2017,37(3):7-14.
- [9] 王静,周伟奇,许开鹏,等.京津冀地区的生态质量定量评价[J].应用生态学报,2017,28(8):2667-2676.
- [10] 廖炜,李璐,吴宜进,等.丹江口库区土地利用变化与生态环境脆弱性评价[J].自然资源学报,2011,26(11):1879-1889.
- [11] 何莎莎,朱文博,崔耀平,等.基于 InVEST 模型的太行山淇河流域土壤侵蚀特征研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):426-439.
- [12] 黄瑶.基于 CSLE 模型土壤侵蚀及水土保持情景分析研究[D].福州:福建师范大学,2017.
- [13] 黄金良,洪华生,张路平,等.基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J].水土保持学报,2004,18(5):75-79.
- [14] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].中国水土保持科学,2015,13(5):105-110.
- [15] 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.
- [16] 高峰,华瑾,卢远,等.基于 GIS 和 USLE 的钦江流域土壤侵蚀评估[J].水土保持研究,2014,21(1):18-22,28.
- [17] 潘美慧,伍永秋,任斐鹏,等.基于 USLE 的东江流域土壤侵蚀量估算[J].自然资源学报,2010,25(12):2154-2164.
- [18] 纪学朋,白永平,杜海波,等.甘肃省生态承载力空间定量评价及耦合协调性[J].生态学报,2017,37(17):5861-5870.
- [19] 周文英,何彬彬.四川省若尔盖县生态环境质量评价[J].地球信息科学学报,2014,16(2):314-319.
- [20] 郭泽呈,魏伟,庞素菲,等.基于 SPCA 和遥感指数的干旱内陆河流域生态脆弱性时空演变及动因分析:以石羊河流域为例[J].生态学报,2019,39(7):2558-2572.
- [21] 张学渊,魏伟,颀斌斌,等.西北干旱区生态承载力监测及安全格局构建[J].自然资源学报,2019,4(11):2389-2402.
- [22] 易文明,李正南.湘中丘陵区典型小流域治理前期水土流失规律研究[J].中国水土保持,2002(5):18-20.
- [23] 郭云,李鹏,程维金,等.洞庭湖土地利用和生态服务功能时空变化及其耦合效应分析[J].环境科学学报,2022,42(1):121-130.
- [24] 杨君,周鹏全,袁淑君,等.基于 InVEST 模型的洞庭湖生态经济区生态系统服务功能研究[J].水土保持通报,2022,42(1):267-272,282.
- [25] 姚华荣,崔保山.澜沧江流域云南段土地利用及其变化对土壤侵蚀的影响[J].环境科学学报,2006,26(8):1362-1371.
- [26] 胡文浩,张晓婧,陈雅杰,等.坝上地区不同年代退耕还林生境的草本层植物多样性及影响因子[J].生态学报,2021,41(3):1116-1126.
- [27] 姚雄,余坤勇,刘健,等.南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变[J].应用生态学报,2016,27(3):735-745.
- [28] 荣月静,郭新亚,杜世勋,等.基于生态系统服务功能及生态敏感性与 PSR 模型的生态承载力空间分析[J].水土保持研究,2019,26(1):323-329.
- [29] 刘慧芳.汾河上游流域水土资源服务功能及承载力耦合研究[D].太原:山西大学,2019.
- [30] 荣月静,郭新亚,杜世勋,等.基于生态系统服务功能及生态敏感性与 PSR 模型的生态承载力空间分析[J].水土保持研究,2019,26(1):323-329.