北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

鄱阳湖流域泥沙连通性时空变化及其驱动因素

李嘉睿 李乐 张兆鹏 郝泽周 高丙涛 裴男才

Spatiotemporal changes and driving forces of sediment connectivity in the Poyang Lake Basin

Li Jiarui, Li Le, Zhang Zhaopeng, Hao Zezhou, Gao Bingtao, Pei Nancai

引用本文:
李嘉睿, 李乐, 张兆鹏, 郝泽周, 高丙涛, 裴男才. 鄱阳湖流域泥沙连通性时空变化及其驱动因素[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(4):23–35. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250312
Li Jiarui, Li Le, Zhang Zhaopeng, Hao Zezhou, Gao Bingtao, Pei Nancai. Spatiotemporal changes and driving forces of sediment connectivity in the Poyang Lake Basin[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4):23–35. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250312

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250312

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滦河流域水文连通性

Hydrological connectivity of the Luanhe River Basin in northern China

北京林业大学学报, 2023, 45(11): 119–127. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220485

黄土高原青藏高原过渡带植被NPP时空变化及其驱动力

Spatiotemporal changes and driving forces of vegetation NPP in transition zone between the Loess Plateau and Qinghai Tibet Plateau: a case study of Datong County, Qinghai Province of northwestern China

北京林业大学学报, 2025, 47(1): 39–50. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240193

基于土地利用变化的陕北地区生境质量时空演变及其驱动因素

Spatial–temporal evolution of habitat quality in northern Shaanxi Province of northwestern China based on land use change and its driving factors

北京林业大学学报, 2022, 44(6): 85–95. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210437

黄河流域生态系统服务价值时空异质性及驱动因素分析

Spatiotemporal heterogeneity and driving factors of ecosystem service value in the Yellow River Basin

北京林业大学学报, 2024, 46(6): 70–81. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230226

土地利用转型背景下海南岛景观格局演变与生态安全评价

Landscape pattern evolution and ecological security evaluation of Hainan Island, southern China under background of land use transformation

北京林业大学学报, 2025, 47(6): 43–54. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240408

北洛河上游县域土地利用时空变化及其对水沙的影响

Spatiotemporal variation of land use in counties of the upper reaches of the Beiluo River and its impact on runoff and sediment

北京林业大学学报, 2024, 46(2): 95–104. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230121

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250312

鄱阳湖流域泥沙连通性时空变化及其驱动因素

李嘉睿[1]　李　乐[1]　张兆鹏[2]　郝泽周[1]　高丙涛[1]　裴男才[1]
（1. 中国林业科学研究院热带林业研究所，广东 广州 510520；2. 自然资源部第一大地测量队，陕西 西安 710054）

摘要:【目的】分析泥沙连通性时空格局演变趋势，研究气候、地形及人类活动对泥沙连通性的影响，为解析南方低山丘陵区水沙过程和优化区域水土保持策略提供科学依据。**【方法】**以鄱阳湖流域为研究区，采用泥沙连通性指数模型（IC），结合 XGboost-SHAP 模型和地理探测器，分析 2000—2020 年流域不同坡度梯度下泥沙连通性的时空变化及其驱动因素。**【结果】**（1）2000—2020 年鄱阳湖流域 IC 的均值为−9.24，整体表现出先下降后上升的变化趋势。54.49% 的区域 IC 呈现上升趋势，其中 12.92% 的区域 IC 显著增加，主要分布于河谷、洪泛平原等平坦地区，相比之下，只有 5.44% 的区域显著降低。（2）研究期内，流域耕地和建设用地面积分别增加 1 694.88 和 2 633.40 km^2，林地面积减少 3 866.52 km^2。不同土地利用类型的 IC 差异显著（$p < 0.01$），各土地利用类型 IC 大小顺序依次为水体 < 林地 < 灌木 < 草地 < 耕地 < 裸地 < 建设用地。（3）影响泥沙连通性因子的重要性排序为坡度（29.3%）、高程（23.8%）、降水（15.7%）、人类活动（12.3%）、温度（7.7%）、土壤湿度（7.4%）和潜在蒸散发（3.7%）。与单因素相比，因子间交互作用对 IC 的解释力呈现双因子或非线性增强效应，平原地区交互作用较弱（< 20%），缓坡上与人类活动相关的交互作用较强，中等坡与陡坡地区降水和高程交互作用的解释力最高。**【结论】**鄱阳湖流域泥沙连通性呈现“谷高坡低”的分布特征。2000—2020 年间，耕地和建设用地面积持续扩张导致中游和下游河谷以及湖泊附近洪泛平原的泥沙连通性显著增加，不同坡度梯度下泥沙连通性变化的主导因子与交互作用存在显著差异。研究强调，在气候变化和人类活动双重影响下，未来流域水土保持工作需针对不同地形实施精准化的管理策略，以应对区域泥沙连通性的复杂变化。

关键词：泥沙连通性；时空特征；鄱阳湖流域；土地利用；气候变化；驱动因素
中图分类号：S157；P941.78　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)04−0023−13
引文格式：李嘉睿，李乐，张兆鹏，等. 鄱阳湖流域泥沙连通性时空变化及其驱动因素［J］. 北京林业大学学报，2026，48(4)：23−35. Li Jiarui, Li Le, Zhang Zhaopeng, et al. Spatiotemporal changes and driving forces of sediment connectivity in the Poyang Lake Basin［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4): 23−35.

Spatiotemporal changes and driving forces of sediment connectivity in the Poyang Lake Basin

Li Jiarui[1]　Li Le[1]　Zhang Zhaopeng[2]　Hao Zezhou[1]　Gao Bingtao[1]　Pei Nancai[1]
(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China;
2. The First Geodetic Surveying Brigade of MNR, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract:［**Objective**］This study investigated the spatiotemporal evolution of sediment connectivity and quantified the influence of land use, climate, and topography. The objective is to provide a scientific basis for elucidating hydro-sedimentary processes and enhancing soil and water conservation strategies in the low-mountain and hilly regions of southern China.［**Method**］Using the Index of Connectivity (IC), combined with the XGBoost-SHAP model and Geodetector, this study analysed the spatiotemporal dynamics and key drivers of sediment connectivity at different slope gradients within the Poyang Lake Basin for the period

收稿日期: 2025−08−15　**修回日期:** 2025−10−24
基金项目: 国家重点研发计划课题（2022YFF1303004），国家自然科学基金项目（32301669）。
第一作者: 李嘉睿。主要研究方向：生态水文。Email: 18648590326@163.com　地址：510520 广东省广州市天河区广汕一路 682 号中国林业科学研究院热带林业研究所。
责任作者: 李乐，副研究员。主要研究方向：景观格局与生态过程耦合。Email: zglkylile@163.com　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

2000–2020. [**Result**] (1) From 2000 to 2020, the mean IC value in the Poyang Lake Basin was −9.24, exhibiting an overall trend of initial decline followed by subsequent increase. In total, 54.49% of the areas displayed an upward trend in IC, among which 12.92% showed significant increases, primarily distributed in flat regions such as river valleys and floodplains. In contrast, only 5.44% of the areas exhibited significant decreases. (2) During the study period, the areas of cropland and impervious surface in the basin increased by 1 694.88 km^2 and 2 633.40 km^2, respectively, while the area of forest decreased by 3 866.52 km^2. Significant variations in the IC were discerned among different land use types ($p < 0.01$), with the IC values ordered as follows: water < forest < shrub < grassland < cropland < barren < construction land. (3) The importance ranking of factors affecting sediment connectivity was: slope (29.3%), elevation (23.8%), precipitation (15.7%), human activities (12.3%), temperature (7.7%), soil moisture (7.4%), and potential evapotranspiration (3.7%). The interaction among factors exhibited a bivariate or non-linear enhancement effect, meaning their combined explanatory power for IC was greater than that of individual factors. While this interaction effect was relatively weak in flatlands (explaining < 20% of the variance), interactions involving human activities became significantly stronger on gentle slopes. On moderate and steep slopes, the interaction between precipitation and elevation was the most dominant. [**Conclusion**] Sediment connectivity exhibited a distinct distribution pattern, with elevated values concentrated in valleys and lower values on hillslopes. The continued expansion of cropland and impervious surface led to a significant increase in sediment connectivity in the mid- and downstream valleys and floodplains. The dominant factors and interactions between factors affecting sediment connectivity changes were significantly different under different slope gradients. The study emphasizes that under the dual influences of climate change and human activities, future watershed soil and water conservation efforts must implement precise management strategies tailored to different terrains to address the complex changes in regional sediment connectivity.

Key words: sediment connectivity; spatiotemporal characteristics; Poyang Lake Basin; land use; climate change; driving factors

土壤侵蚀导致土壤中碳、氮等营养元素的流失，进而引起土壤质量下降，并与河流演变、水库沉积与水污染等密切相关，是土地与生态退化的重要驱动力，制约区域可持续发展[1]。近年来，在气候变化与人为干扰增强的共同作用下，全球多地流域输沙量发生显著变化[2−4]。传统研究多集中于流域出口泥沙监测，可反映流域整体上的泥沙产量和土壤侵蚀状况，但是忽略了流域内部下垫面景观的多样性和复杂性，无法完全描述泥沙的发生、输移过程以及源−汇分布[5−6]。

泥沙连通性用于表征流域内不同地貌和景观单元间泥沙输移的难易程度，能够反映泥沙从源向汇转移的途径、过程和可能性。由 Borselli 等[7]提出的连通性指数（the index of connectivity, IC）在评估泥沙连通性变化上得到了广泛的应用。Mishra 等[8]对上科西河流域泥沙连通性与流域出口处泥沙负荷进行了比较，结果表明连通性高的子流域贡献了大量泥沙。李家卫等[9]对建里水小流域侵蚀产沙特征的研究指出，高侵蚀−高连通区域向下游贡献了高比例的泥沙，是土壤侵蚀的热点区域。由此可见，泥沙连通性与流域土壤侵蚀、泥沙生成和运输密切相关，是衡量流域土壤侵蚀过程和潜力的有效指标。因此，为进一步阐明流域泥沙输运的过程、机制及其时空变化，识别产沙输沙的关键源区，有必要从泥沙连通性的角度展开研究。

泥沙连通性受到自然与人类因素共同影响[10−11]。对于特定流域，地貌特征在一定时间内相对稳定，主要影响泥沙连通性的空间分布格局，而气候、植被覆盖和人类活动可能在季节或年际尺度上产生显著变化，从而驱动泥沙连通性的时间波动[12]。一般而言，气候是影响泥沙连通性的重要因素。降水产生的径流和壤中流为土壤侵蚀提供了外营力，尤其是全球气候变暖引起的极端降水事件，能够在短时间内形成高强度的地表径流，造成严重面蚀或汇聚形成沟状侵蚀，携带更多泥沙迁移，显著增强泥沙连通性。潜在蒸散发通过改变土壤水分影响降水转化为地表径流的比例，从而对泥沙输移过程产生影响[13]。植被覆盖在拦沙减沙中起关键作用，植被冠层能够缓冲雨滴击溅对土壤结构的破坏，根系能够固持土壤并增加入渗，通过减少泥沙来源和减缓径流降低泥沙连通性。自然和人为因子综合影响土地覆被变化，土地覆盖管理和水土保持措施主要体现在土地利用

变化中，分析不同土地利用转变类型下泥沙连通性的变化有助于深入理解土地演化对泥沙连通性的影响[13]，如梯田或农林草复合结构能够显著降低泥沙连通性[14−15]。此外，城市和道路中的不透水表面改变了泥沙从源到汇的路径[16]。上述因素共同影响泥沙连通性的时空变化特征，深入了解其背后的驱动机制，准确识别关键影响因素及其作用方式，能够为差异化调控水土流失提供科学依据，对变化环境下的土壤侵蚀治理具有重要意义。

我国南方低山丘陵区地形起伏、降水丰沛且时空集中，人类开发强度高，是受水土流失影响显著的生态脆弱地区之一[17]。过去 20 年间，气候变化、生态工程、农业开发和城市化共同重塑了该区下垫面，从而改变了泥沙连通性的空间格局。例如，汀江流域植被显著恢复使泥沙连通性大幅降低[17]，濂水流域大规模发展果园引起泥沙连通性热点区域显著扩张[18]。然而，以往研究多集中于覆被变化对泥沙连通性的影响，对其背后地貌背景、气候变化和人类活动驱动南方低山丘陵区泥沙连通性空间分异仍缺乏系统认识。鉴于此，本文以鄱阳湖流域这一典型南方低山丘陵区为研究对象，基于流域内气候、地形、土地利用和人类活动等数据，应用 López-Vicente 等[19]改进的泥沙连通性指数（IC）模型，探究 2000—2020 年泥沙连通性的年际时空变化，对比分析不同土地利用变化下泥沙连通性的分布，并通过 XGboost-SHAP 模型和地理探测器确定影响流域泥沙连通性空间分异的主导因素，以期为南方低山丘陵区土地利用规划与精细化水沙治理提供科学依据。

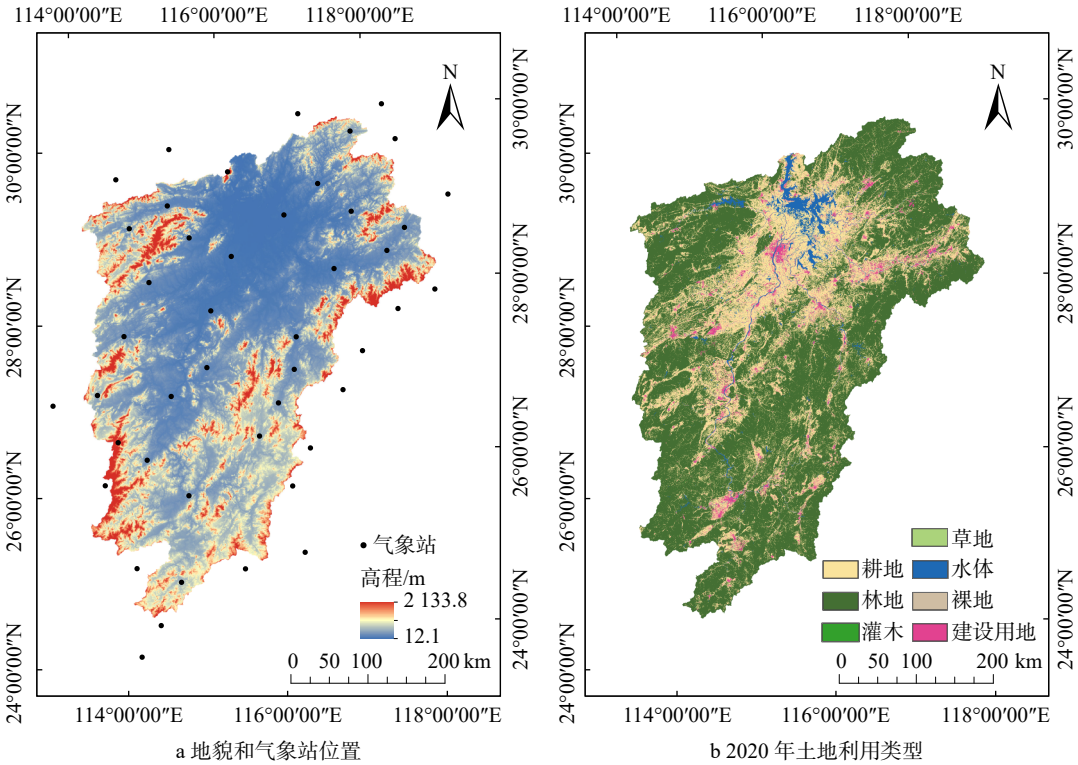
1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

鄱阳湖流域位于中国东南部（24°29′ ~ 30°04′N，113°34′ ~ 118°28′E），总面积 16.22 万 km^2（图 1），包括赣江、抚河、信江、饶河、修水五大河流及各级支流，是长江流域的重要组成部分。流域属亚热带季风气候，年平均降水量约 1 664 mm，主要集中在 4—6 月，3 个月总降水量约 700 ~ 900 mm。流域内地势总体南高北低，低山丘陵地貌广布（约占 78%）。主要土壤类型包括红壤、黄壤、紫色土、水稻土等，其中红壤分布最广，占流域总面积的 46%[20]，保水保肥能力相对较差，易发生水土流失。截至 2020 年，流域水力侵蚀面积约 23 613.50 km^2（约占 14.13%），输入鄱阳湖的总泥沙量约 664 万 t，水土流失总体好转与局部恶化现象并存，水土保持工作仍然艰巨。

1.2　数据来源及预处理

本研究使用的主要数据包括土地利用/覆被、归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）、数字高程模型（digital elevation model，DEM）、气象、人类活动、土壤湿度、土壤属性及农作物统计数据（表 1）。所有数据通过 ArcGIS 平台投影至同一



a 地貌和气象站位置　　b 2020 年土地利用类型

图 1　鄱阳湖流域概况

Fig. 1　Overview of the Poyang Lake basin

表 1 数据来源

Tab. 1 Source of data

数据	空间分辨率	数据来源
逐日降水、气温数据		国家气象科学数据中心(https://data.cma.cn)
逐月潜在蒸散发数据	1 km	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)
逐日土壤湿度数据	1 km	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)
DEM	30 m	欧洲航天局(https://www.esa.int/)
土地利用数据	30 m	中国年度土地覆盖数据集(https://zenodo.org/)
NDVI	30 m	Landsat TM/ETM + /OLI卫星遥感数据
人类足迹数据	1 km	人类足迹年度动态数据集(https://www.nature.com/sdata/)
农作物数据		国家统计局(https://www.stats.gov.cn/)
土壤数据	90 m	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)

坐标系，并重采样至 30 m 分辨率。NDVI 使用最大值合成法提取，并用于后续植被管理因子的计算；DEM 用于提取地形变量。土壤数据(容重、粒径组成等)用于计算土壤渗透系数；气象站数据(降水、气温)采用克里金法插值。采用 Mu 等[21]开发的人类足迹年度动态数据集表征人类活动。为分析泥沙连通性对不同土地类型转换的响应，本研究将每 10 年(2000—2010 年、2010—2020 年)的土地利用变化分为两大类：植被恢复(耕地、裸地或建设用地转变为林地、灌木、草地或水体)和人为改造(林地、灌木、草地、水体或裸地转变为耕地或建设用地)，并统计不同转换类型下的 IC 年均值。

1.3 泥沙连通性指数（IC）

采用 López-Vicente 等[19]改进的 IC 指数表征泥沙连通性，该指数同时考虑了降雨、地形、土壤物理特征和土地利用/覆被的空间异质性，计算公式如下。

$$\mathrm{IC} = \log_{10}\frac{D_{\mathrm{up}}}{D_{\mathrm{dn}}} = \log_{10}\frac{\overline{W}\,\overline{S}\,\sqrt{A}}{\sum_i \frac{d_i}{W_i S_i}} \tag{1}$$

式中：D_{up} 为上坡分量，表示上坡泥沙向下输移的可能性；D_{dn} 为下坡分量，表示泥沙沿径流路径到达汇的概率；A 为上坡贡献面积(m^2)；$\overline{S}$ 为上坡区域平均坡度(m/m)；$\overline{W}$ 为上坡区域平均权重因子(无量纲)；d_i 为第 i 个单元到出口的径流路径长度(m)；W_i 和 S_i 分别为第 i 个单元的权重和坡度。

权重因子 W 计算公式如下。

$$W = RR_{\mathrm{T}}CK_{\mathrm{p}} \tag{2}$$

式中：R 为降雨侵蚀力((MJ·mm)/(hm^2·h·a))，R_{T} 为地形粗糙度，C 为 RUSLE 模型中的植被管理因子，K_{p} 为土壤渗透系数。所有因子最终归一化至 0.001 ~ 1.000 之间，其中 R_{T} 和 K_{p} 为取逆归一化值。R 因子基于鄱阳湖流域及其周边 45 个国家级标准气象站和章文波模型计算。R_{T} 采用坡度梯度标准差代替。K_{p} 为土壤厚度与土壤饱和导水率乘积的自然对数，其中土壤饱和导水率通过土壤传递函数计算[22]。

C 因子参考 Borrelli 等[7]的方法，结合中国实际土地覆盖类型和农作物种类进行计算。对于非耕地(C_{N})中不同植被类型的 C 值计算，公式如下。

$$C_{\mathrm{N}} = C_{\mathrm{min}} + C_{\mathrm{range}}(1 - C_{\mathrm{FV}}) \tag{3}$$

式中：C_{min} 为各种植被覆盖类型 C 值取值范围的最小值；C_{range} 为 C 值取值范围之差；C_{FV} 为植被覆盖度，基于年度 NDVI 采用像元二分模型计算；不同植被类型 C 值见参考文献 [23]。

耕地(C_{F})因子结合农作物种类和播种面积计算，参考李佳蕾等[23]的方法将区域内农作物归为 10 类，播种面积来自国家统计局。计算公式如下。

$$C_{\mathrm{F}} = \sum_{n}^{10} C_n P_n \tag{4}$$

式中：C_n 为第 n 种农作物的 C 值，P_n 为第 n 种农作物的占比。

1.4 趋势分析

采用 Theil–Sen 方法和 Mann-Kendall 检验进行趋势计算，并检查数据波动情况。该方法的优点在于无需样本遵循特定分布，结果不受少数异常值影响，因此成为分析长时间序列数据的理想工具。

$$S_{\mathrm{IC}} = \mathrm{mean}\left(\frac{\mathrm{IC}_j - \mathrm{IC}_i}{j - i}\right),\quad 2\,000 \leqslant i \leqslant j \leqslant 2\,020 \tag{5}$$

标准化检验统计量 Z 的计算公式为

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \tag{6}$$

方差变量 S 可表示为

$$\mathrm{var}(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{7}$$

在本研究中，IC 趋势的显著性以 $p<0.05$ 的置信水平评估。根据标准化检验统计量 Z 的值，将结果分为显著变化（$Z\geqslant 1.96$ 或 $Z\leqslant -1.96$）和不显著变化（$-1.96<Z<1.96$）。进一步将结果细分为显著增加（$S_{IC}\geqslant 0.000\ 5$、$Z\geqslant 1.96$）、轻微增加（$S_{IC}\geqslant 0.000\ 5$、$-1.96<Z<1.96$）、无变化（$-0.000\ 5<S_{IC}<0.000\ 5$）、轻微减少（$S_{IC}\leqslant -0.000\ 5$、$-1.96<Z<1.96$）、显著减少（$S_{IC}\leqslant -0.000\ 5$、$Z\leqslant -1.96$）5 个等级。

1.5　XGboost-SHAP 模型

为量化驱动因子与 IC 的统计关联，采用 XGboost 建模。XGboost 是一种基于梯度提升决策树的机器学习算法，通过迭代训练决策树模型以优化预测性能。与其他传统机器学习算法相比，其在处理大型数据集时表现出更高的效率和准确性[24]。本研究选取地形（坡度、高程）、气候（降雨量、温度、潜在蒸散发）、土壤湿度和人类活动共 7 个影响因素，基于 1 km × 1 km 渔网点采样提取数据。通过调整 5 个关键超参数（n_estimators、max_depth、learning_rate、gamma 和 subsample）和 5 折交叉验证，优化模型性能并提高预测精度。为增强 XGboost 模型的可解释性和透明度，引入 SHAP 值[25]量化各因子对模型预测结果的贡献，并揭示影响因子与预测结果之间的关系。

1.6　地理探测器

为进一步揭示各影响因子在空间上的相互作用及其对泥沙连通性空间格局分异的驱动机制，本研究引入交互作用探测器[26]，研究气候、地形和人类活动等多因素之间的交互作用对鄱阳湖流域泥沙连通性的影响。

地理探测器通过 q 值确定因子的重要性。

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{8}$$

式中：$h=1,2,\cdots,L$，L 为子区域的数量；N 和 N_h 分别为整个区域和子区域样本单元的数量；σ_h^2 和 σ^2 分别为 h 个子区域和全区 IC 的方差。交互作用检测通过比较 $q(X_1\cap X_2)$ 与 $q(X_1)$、$q(X_2)$ 的值，评估不同因素之间的交互作用，即 X_1 和 X_2 的交互作用是否会增强或削弱对 IC 的解释力，从而直观说明交互作用类型与解释力程度。

2　结果与分析

2.1　鄱阳湖流域泥沙连通性的时空变化

2000—2020 年，鄱阳湖流域的 IC 平均值为 −9.24，整体呈现不显著上升趋势，最高值出现在 2019 年（−8.81），最低值出现在 2005 年（−9.78）。分阶段看，2000—2010 年平均 IC 为−9.32，整体呈下降趋势，下降速率为 0.006 9 a^{-1}；2010—2020 年 IC 均值为−9.22，整体呈上升趋势，以 0.02 a^{-1} 的速率增加。后一时期 IC 标准差（0.25）高于前一时期（0.21），表明泥沙连通性的离散度和变异性逐渐增大（图 2a）。根据水文频率法将研究时期划分为丰水年、平水年和枯水年，不同降水年型的 IC 值表现为丰水年（−9.21）> 枯水年（−9.31）> 平水年（−9.33），表明降水量的增加不一定导致 IC 的增加，还受到降水年内分配、其他气候因子、地貌和人类活动等多因素的共同作用（图 2a）。根据临界坡度分级法[27]，将研究区地形分为平原（0 ~ 3°）、缓坡（3° ~ 15°）、中等坡（15° ~ 25°）和陡坡（ > 25°）。不同坡度梯度下 IC 均值表现为平原（−8.07）> 缓坡（−9.12）> 陡坡（−10.11）> 中等坡（−10.20），呈现出“谷高坡低”的分布特征（图 2b）。IC 均值的空间分布图也表明，连通性较高的区域主要位于河谷和鄱阳湖附近的洪泛平原（图 3a）。

采用 Theil-Sen 中位数趋势分析和 Mann-Kendall 检验，确定 2000—2020 年的年际 IC 变化趋势。结果表明，鄱阳湖流域 54.49% 的区域 IC 呈现上升趋势，其中显著增加的区域占 12.92%；相比之下，只有 5.44% 的地区显著降低。IC 增大的区域主要集中

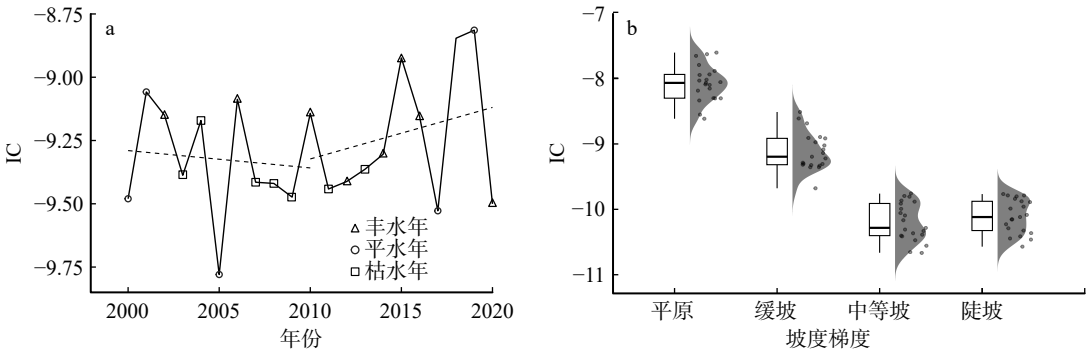


图 2　2000—2020 年研究区 IC 年际变化（a）及不同坡度梯度下 IC（b）

Fig. 2　Interannual variations in IC (a) and IC under different slope gradients (b) in the study area from 2000 to 2020

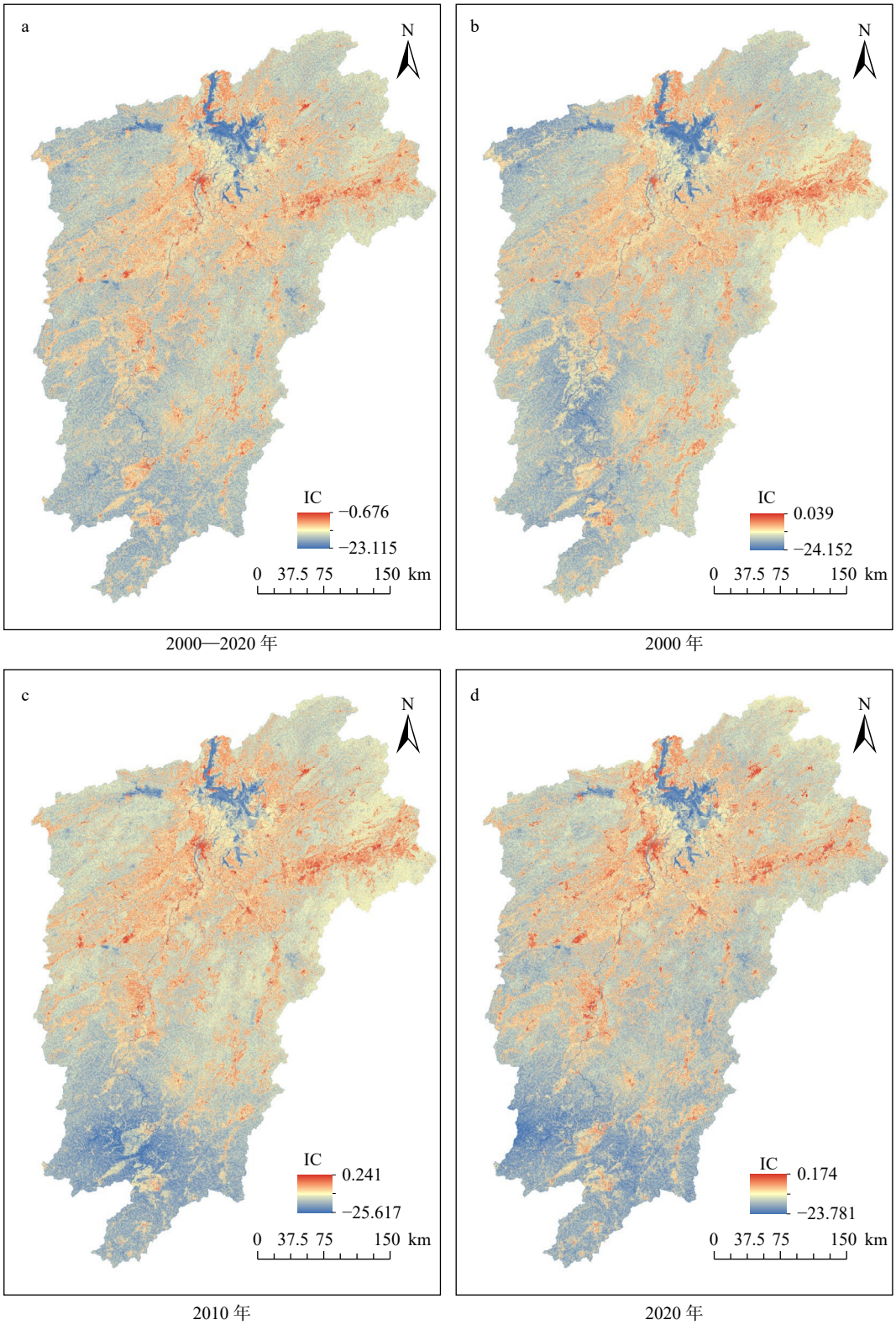


图 3 研究区 IC 的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of IC in the study area

在流域的中游和下游(图 4)。约 20.89% 的平原和 15.34% 的缓坡表现出 IC 的显著上升趋势，相反，中等坡与陡坡地区的 IC 主要表现出降低趋势，面积占比均约 60%。

2.2 泥沙连通性与土地利用变化的关系

基于 2000、2010、2020 年土地利用类型组成与分布分析了研究区土地利用变化过程。鄱阳湖流域的土地利用类型以林地为主(65.85%)，其次为耕地(27.92%)，水体(3.25%)，建设用地(2.87%)，研究区内灌木、草地和裸地面积所占比例极低(< 0.1%)。耕地是平原地区最主要的土地利用方式，约占平原总面积的 69.54%。随着坡度增大，林地逐渐成为主

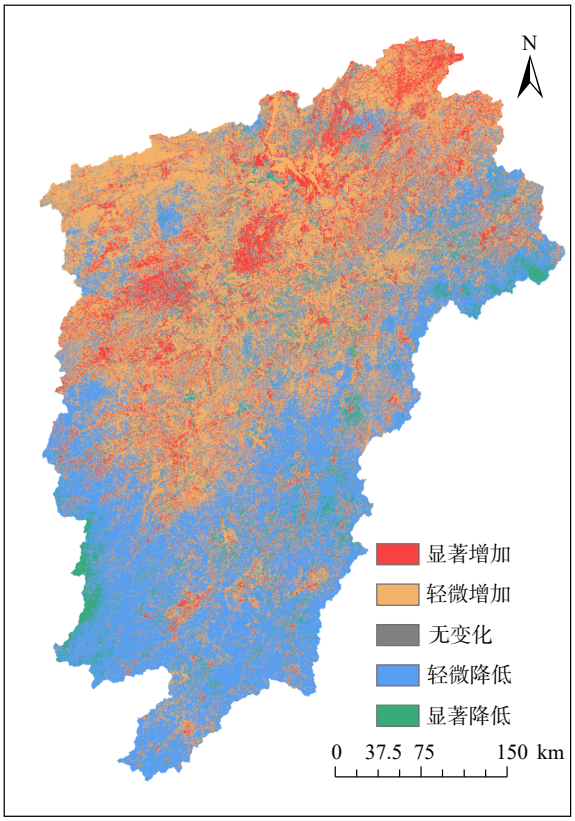


图 4　2000—2020 年研究区 IC 变化趋势的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of IC change trends in the study area from 2000 to 2020

要的土地利用类型，71.15% 的缓坡地区为林地，耕地面积占 25.73%，中等坡和陡坡地区林地面积占比均为 98% 以上(表 2)。近 20 年来，鄱阳湖流域耕地和建设用地的面积显著增加，相比 2000 年面积分别增加了 1 694.88 km^2 和 2 633.40 km^2，林地面积减少 3 866.52 km^2。具体而言，2000—2010 年，建设用地的增加占主导地位，主要来源为耕地。2010 年后，建设用地持续增加，大面积林地转化为耕地，其他土地类型的面积比较稳定(图 5a)。

为探讨不同土地类型及不同土地转换模式下泥沙连通性分布情况，分析了不同土地覆盖类型下的 IC 分布及不同土地转换类型下的 IC 变化。Welch 方差分析表明，不同土地利用类型下的 IC 具有显著差异($p < 0.01$)。建设用地的 IC 值最高(−4.75)，其次为裸地(−7.28)和耕地(−7.34)，而水体和林地的 IC 值较低，分别为−11.49 和−10.12(图 5b)。图 5c 的结果显示，在 95% 置信区间内，植被恢复情境下两个时期的 IC 分别以−0.145 a^{-1} 和−0.157 a^{-1} 的速率显著下降；人为改造情境下，2000—2010 年 IC 以 0.182 a^{-1} 的速率显著增加，2010—2020 年上升趋势不显著。耕地和建设用地的泥沙连通性较高，是研究区内土壤侵蚀的主要源区，土地利用的人为改造转化是鄱阳湖流域平原和缓坡地区 IC 增大的重要原因。

2.3　泥沙连通性的影响因素

土地利用类型对 IC 具有显著影响，其本身又是气候、地形及人类活动等多因子综合作用下下垫面的直接变化。为定量揭示驱动 IC 空间分异的主导因素及其交互作用，选取 2000、2010、2020 年为代表年份，分别建立 XGBoost-SHAP 模型和交互探测器。结果表明，影响鄱阳湖流域泥沙连通性的因子重要性排序为坡度、高程、降水、人类活动、温度、土壤湿度和潜在蒸散发。地形是泥沙连通性的主要驱动因素，坡度与高程的解释力分别占比 29.3% 和 23.8%。高程对 IC 呈现负向贡献，高海拔地区虽然重力势能较高，但土地利用类型主要以林地为主，且径流路径较长，大大增加了泥沙中途被拦截的可能性。气候因子中降水为主要影响因素，占比 15.7%，与 IC 呈正相关关系。2000—2020 年，人类活动的重要性逐渐增强，平均解释力为 12.3%。温度(7.7%)、土壤湿度(7.4%)和潜在蒸散发(3.7%)对 IC 变化的贡献较弱(图 6a ~ c)。

随着坡度梯度的变化，驱动因子对 IC 的影响效应也有所不同。在地形较为平坦的区域(如平原和缓坡)，IC 对坡度的变化较为敏感，人类活动的影响随时间逐渐增强。3 个时期中，平原地区人类活动因子

表 2　不同坡度梯度下土地利用类型占比

Tab. 2　Proportion of land use types under different slope gradients　%

土地利用类型	平原			缓坡			中等坡			陡坡		
	2000年	2010年	2020年	2000年	2010年	2020年	2000年	2010年	2020年	2000年	2010年	2020年
耕地	70.59	69.61	68.43	24.81	24.00	28.38	0.99	0.90	2.18	0.11	0.13	0.37
林地	11.68	11.68	10.46	72.62	72.99	67.84	98.85	98.93	97.62	99.73	99.70	99.43
灌木	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.10	0.09	0.08
草地	0.12	0.14	0.03	0.14	0.11	0.03	0.07	0.04	0.02	0.04	0.04	0.04
水体	12.27	11.35	11.56	0.48	0.47	0.46	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
裸地	0.07	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
建设用地	5.28	7.17	9.49	1.94	2.41	3.28	0.05	0.08	0.15	0.01	0.03	0.08

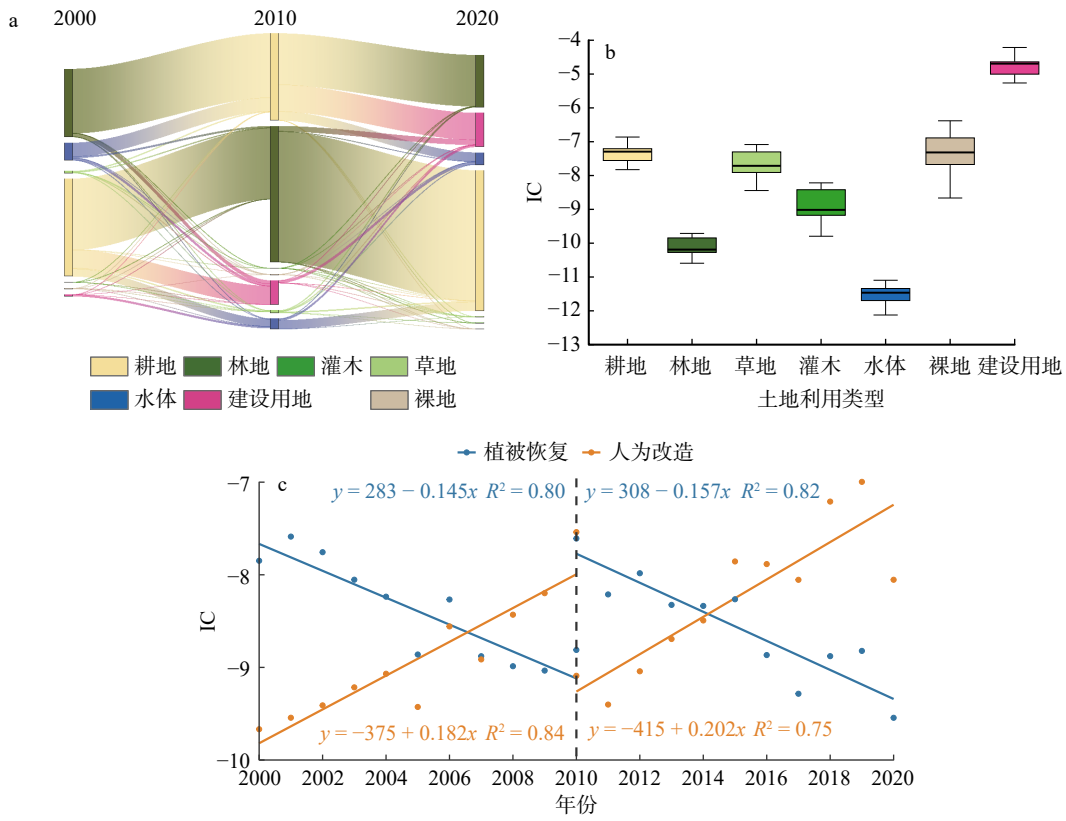


图 5 土地利用转移桑基图(a)、不同土地利用类型的 IC 年均值(b)以及不同时期不同土地利用转移类型下 IC 年均值(c)的变化

Fig. 5 Sankey map of land-use conversions (a), annual average IC under different land-use type (b) changes in annual average IC under different land-use transformation types at different time periods (c)

对 IC 的解释力分别为 8.4%、14.6% 和 18.6%，缓坡地区分别为 14.4%、15.4% 和 17.4%。坡度对平原地区 IC 呈现正向贡献(28.1%)，而在缓坡地区则表现为负向贡献(20.9%)。在对整个研究区进行的 XGBoost-SHAP 分析中，也发现了与之对应的现象，部分低坡度样本点倾向于降低 IC，而另一部分则促进 IC 的增加。这可能是由于在平原地区，坡度从无到有的变化为径流和泥沙的运移提供了基础地理条件；而在缓坡地区，低坡度样本点的土地利用类型主要为 IC 值较大的耕地，这在一定程度上改变了坡度对泥沙连通性的影响(图 6d ~ i)。当坡度超过一定临界值后，中等坡与陡坡地区坡度的重要性显著降低(< 5%)，泥沙运移的限制因子从坡度转变为水动力，因此降水成为 IC 最重要的驱动因素，其解释力水平分别达到 33.4% 和 38.6%(图 6j ~ o)。

为了评估影响因子之间的关系，本研究使用地理探测器分析了因子之间交互作用对 IC 的解释力。如图 7 所示，与单个因子的解释力相比，因子间交互作用对 IC 的解释力呈现双因子或非线性增强效应。2010 年坡度和降水交互作用的解释力最高(43%)，而 2000 和 2020 年坡度与人类活动交互作用的解释力最高(分别为 36% 和 40%)。平原地区各因子间交互作用的 q 值普遍低于 0.15，交互作用较弱。缓坡地区同时具备泥沙运移的地理条件和高强度的人类活动干扰，气候、地形与人类活动因子之间表现出复杂的交互作用，尤其是人类活动∩地形、人类活动∩降水的解释力最高(> 25%)。在中等坡与陡坡地区，人类活动强度减弱，降水与地形之间的交互作用占据主导地位。

3 讨 论

研究结果表明，平原和缓坡地区土地利用的人为改造显著增加了泥沙连通性，耕地和建设用地是鄱阳湖流域泥沙的主要来源[15, 28]。耕地的表层土壤在非种植期或休耕期裸露松散，极易因降水引发水土流失[18]；建设用地的开发则增加了流域内的不透水面积，增强了径流和泥沙的输送能力，从而加剧了土壤侵蚀。21 世纪以来，在农业开发和城市扩张的影响下，鄱阳湖流域下垫面状况发生了显著变化。人口增长、工业化和城市化发展推动了建设用地需求，大量城郊耕地被侵占，同时为了保障粮食安全与经济发展，大面积林地被开垦为农用地。河谷与鄱阳湖洪泛平原的优渥水文地理条件使其成为人类聚居和发展农业的理想区域，农业和建设用地的侵占是这些地区生态系统多样性丧失和泥沙连通风险增大的主要原因[29]。得益于“退耕还林”和“天然林保

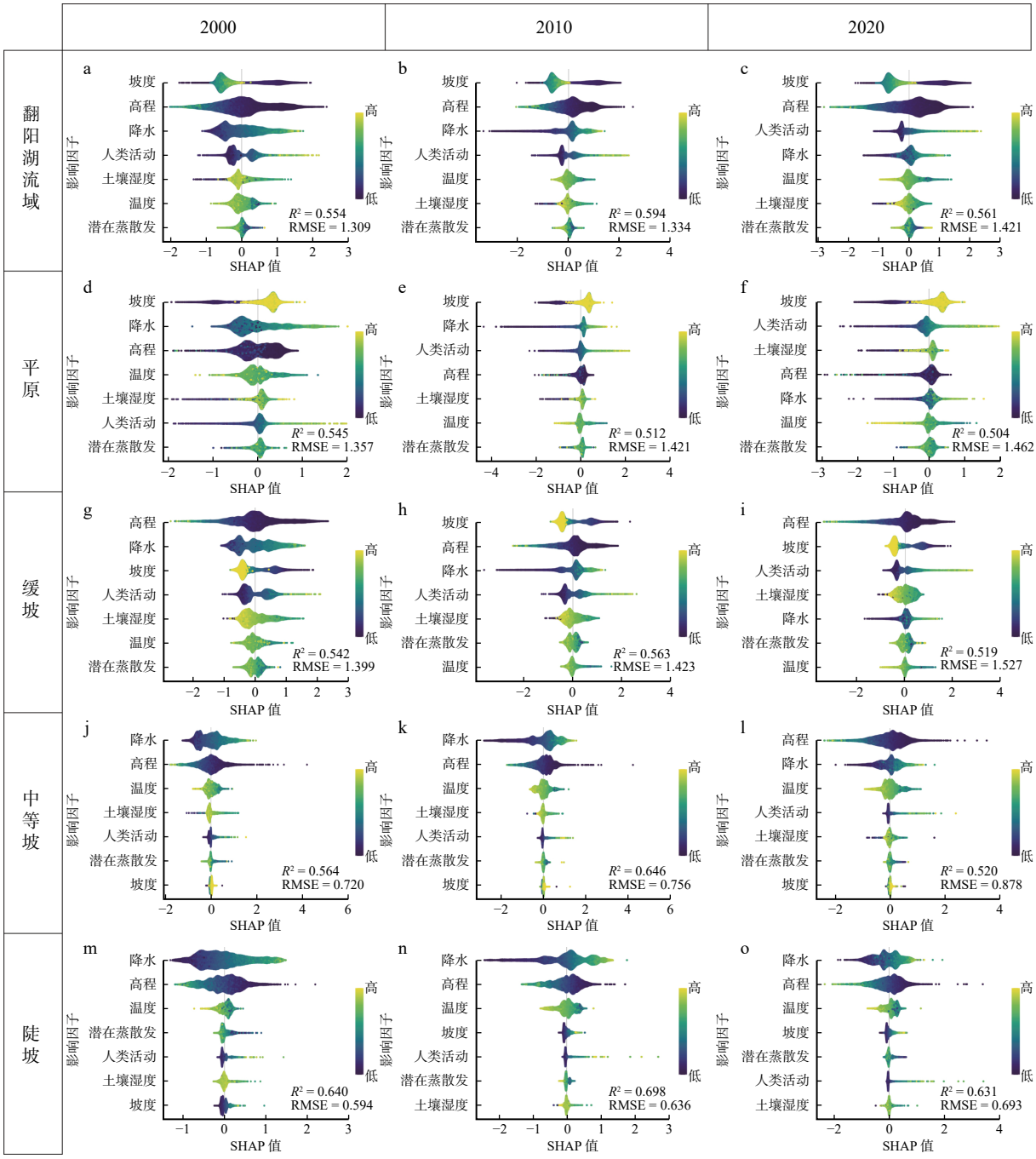
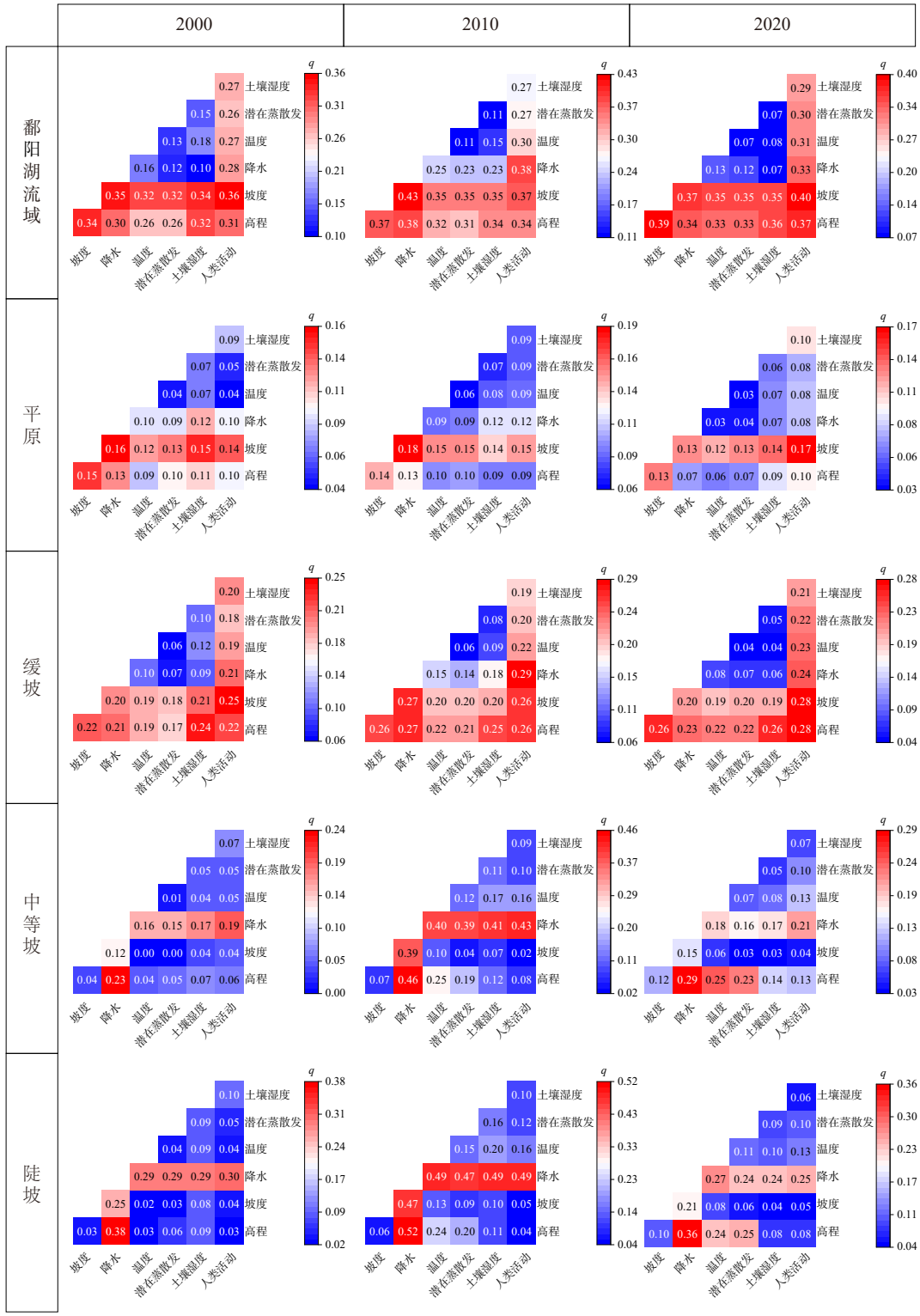


图 6　2000、2010 和 2020 年各影响因子对 IC 的贡献

Fig. 6　Contribution of each impact factor to IC in 2000, 2010 and 2020

护”等生态工程，中等坡与陡坡地区的生态环境得到了全面保护与系统修复，98% 以上的区域覆被类型为林地。一方面，乔木的冠层和树干改变了雨滴的落地方式和降水的二次分配，枯枝落叶增加了地表粗糙程度，减缓了地表径流[30]；另一方面，植被的根系网络包裹土壤，根系分泌物促进土壤团聚体的形成，进一步降低土壤分离能力[31]，显著降低了坡地的泥沙连通性。因此，与 Wang 等[11]在东北黑土区的研究结果不同，鄱阳湖流域在中等坡与陡坡地区的泥沙连通性反而较小，流域泥沙连通性的分布和趋势呈现“谷高坡低”的特点，这与前人在中国南方其他流域的研究结果一致[17, 32]。因此，未来水土保持工作的重心应转向平原及缓坡农田水土流失的治理。然而，鄱阳湖流域人地矛盾突出，在平坦地区进一步实施退耕还林的成效有限且不利于保障粮食安全。因此，应综合考虑成本效益、经济效益与生态效益，建设生态沟、淤地坝、果园、经济林等中小型水土保持生态工程，以加强径流蓄排效率，改善耕地保水保土能力。此外，在缓坡地区，与人类活动相关的交互作用对泥沙连通性产生了复杂而深刻的影响[9]。坡地果园和经济林虽然增加了植被覆盖，但施肥、除草、灌溉和摘果等管理措施极大地扰动了地表土壤[33]，



q 为因子重要性。

图 7 2000、2010 和 2020 年各影响因子间交互作用对 IC 的贡献

Fig. 7 Contribution of interactions between impact factors to IC in 2000, 2010 and 2020

某些果园顺坡净耕的经营方式也加剧了水土流失[34]；缓坡梯田在常态降水事件中多作为泥沙的“汇”，然而在极端降水的冲刷下可能发生滑坡或崩塌，转变为泥沙的“源”[15]。因此，还需进一步结合气候与地形因素，分别研究不同水土保持措施对泥沙连通性的影响。

气候变化对泥沙连通性的影响日益显著，Michalek 等[35]研究表明，气候变化预计将在 21 世纪末导致全球 IC 高达 4% 的变化。本研究结果表明，降水是中等坡与陡坡地区泥沙连通性变化的主要驱动因子，并强调了降水与地形之间的交互作用，这与南方低山丘陵区室内模拟降雨实验中次降雨产沙量

随降雨强度和坡度增大而增加、且降雨强度影响强于坡度的研究结果一致[36]。鄱阳湖流域深厚的花岗岩风化壳在极端降水条件下容易形成沟状侵蚀，甚至在水力与重力的双重作用下发生崩岗侵蚀，引发严重水土流失。此外，尽管植被覆盖度较高，但人工林多为中、幼年林和低质低效林，林下植被稀疏，在强降水条件下仍存在潜在的林下水土流失风险[37]。因此，这些地区应继续保持封山育林，在自然恢复的同时辅以人工措施，形成立体治理模式。坡顶营造水源涵养林，最大化拦截降水，促进雨水就地入渗；坡面沿等高线建造水平阶、鱼鳞坑等微地形改造措施，或种植灌草植物形成植物篱笆[38]，减缓径流速度，防止径流汇集形成冲沟，促进泥沙沉积；坡底和沟道修建谷坊、拦沙坝，防止进一步下切和侧向侵蚀，抬高侵蚀基准面，为植被恢复提供条件[39]。

本研究聚焦于年际尺度上泥沙连通性的时空变化，揭示了泥沙输移的源–汇过程及其驱动因素。但研究也存在一定局限性。对于鄱阳湖流域这样季节性降水特征差异显著的区域，分析年内泥沙连通性与降水之间的关系，对于寻找季节性土壤侵蚀热点区域和迁移路径具有重要意义[40]。此外，以小流域为基本单元开展治理是中国水土流失治理工作的基本思路，在小流域或图斑尺度上进行泥沙连通性研究，有助于实现水土流失动态的精确监测和治理措施的精准落地[41]。因此，未来应在多时空尺度上进一步研究泥沙连通性的格局及其驱动因素。

4　结　　论

（1）2000—2020 年，鄱阳湖流域的 IC 平均值为 −9.24，高连通性区域主要分布于流域上、中游的河谷和流域下游，整体呈现先下降后上升的变化趋势，且变异性逐渐增大。54.49% 区域 IC 呈现上升趋势，其中显著增加的区域占 12.92%，仅有 5.44% 的区域表现出显著下降趋势。约 20.89% 的平原和 15.34% 的缓坡地区表现出 IC 的显著上升趋势，而中等坡与陡坡地区的 IC 主要呈现出下降趋势。

（2）研究期间，共有 2 205.26 km^2 的耕地转化为建设用地，9 538.33 km^2 的林地被开垦为农用地，总体上研究区内林地面积减少，耕地和建设用地面积增加。不同土地利用类型以及土地利用转化模式之间的泥沙连通性存在显著差异（$p < 0.01$），IC 从高到低依次为建设用地（−4.75）、裸地（−7.28）、耕地（−7.34）、草地（−7.67）、灌木（−8.94）、林地（−10.12）、水体（−11.49）。人为改造显著增加了流域泥沙连通性。

（3）泥沙连通性驱动因素的解释力排名为：坡度（29.3%）、高程（23.8%）、降水（15.7%）、人类活动（12.3%）、温度（7.7%）、土壤湿度（7.4%）和潜在蒸散发（3.7%）。地形比气候更能解释泥沙连通性的空间变化。在平原和缓坡地区，IC 对坡度的变化较为敏感，人类活动的影响随时间逐渐增强；当坡度增大到中等坡与陡坡时，降水成为主导因素。各因子间交互作用的解释力表现出双因子或非线性增加效应，且随着坡度梯度的变化存在明显差异。总体上，坡度与降水、人类活动的交互作用解释力最高（> 35%）。

参　考　文　献

[1] 蒋勇军, 田兴. 西南岩溶区土壤侵蚀研究进展与展望 [J]. 四川师范大学学报 (自然科学版), 2025, 48(3): 341−352, 282.
Jiang Y J, Tian X. Research progress and prospect of soil erosion in karst area of southwest China [J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2025, 48(3): 341−352, 282.

[2] Milliman J D, Farnsworth K L, Jones P D, et al. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000 [J]. Global and Planetary Change, 2008, 62(3): 187−194.

[3] Tian X, Zhao G, Mu X, et al. Decoupling effects of driving factors on sediment yield in the Chinese Loess Plateau [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11(1): 60−74.

[4] 李嘉宁, 张红丽, 田昌园, 等. 长冲河小流域土壤侵蚀与水文泥沙连通性分布特征及耦合关系分析 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 79−88.
Li J N, Zhang H L, Tian C Y, et al. Distribution characteristics and coupling relationship between soil erosion and hydrologic and sediment connectivity in Changchong River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 79−88.

[5] 严晰芹, 焦菊英, 唐柄哲, 等. 泥沙连通性研究方法进展 [J]. 泥沙研究, 2021, 46(2): 59−65.
Yan X Q, Jiao J Y, Tang B Z, et al. Review on study approaches of sediment connectivity [J]. Journal of Sediment Research, 2021, 46(2): 59−65.

[6] Shi C, Liang Y, Qin W, et al. Review of sediment connectivity: Conceptual connotations, characterization indicators, and their relationships with soil erosion and sediment yield [J]. Earth-Science Reviews, 2025, 264: 105091.

[7] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 2013.

[8] Mishra K, Sinha R, Jain V, et al. Towards the assessment of sediment connectivity in a large Himalayan river basin [J]. Science of the Total Environment, 2019, 661: 251−265.

[9] 李家卫, 黄光灵, 徐勤学, 等. 结合 GeoWEPP 模型与泥沙连通性分析小流域侵蚀产沙特征 [J]. 农业工程学报, 2025, 41(8): 109−117.
Li J W, Huang G L, Xu Q X, et al. Erosion and sediment yield characteristics in small watershed based on GeoWEPP model and sediment connectivity [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(8): 109−117.

[10] Rodríguez Flores S, Muñoz-Robles C, Ortíz-Rodríguez A J, et al. Historical and projected changes in hydrological and sediment connectivity under climate change in a tropical catchment of Mexico [J]. Science of the Total Environment, 2022, 848: 157731.

[11] Wang N N, Fan H M , Jia Y F. Spatial variation characteristics and influencing factors of sediment connectivity in the black soil region of northeast China [J]. Geoderma, 2024, 446: 116895.

[12] Cheng S, Yu X, Li Z, et al. Annual variation in sediment connectivity in karst watersheds of southwest China [J]. Catena, 2025, 257: 109173.

[13] Liu C, Chen Y, Fang G, et al. Impact of climatic and geomorphologic drivers on sediment connectivity in the Tarim River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2024, 643: 132027.

[14] Llena M, Vericat D, Cavalli M, et al. The effects of land use and topographic changes on sediment connectivity in mountain catchments [J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 899−912.

[15] 梁越, 秦伟, 张勤, 等. 多时间尺度小流域侵蚀产沙对土地利用/覆被格局的变化响应 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 155−166.
Liang Y, Qin W, Zhang Q, et al. Response of sediment yield under different temporal scales to land use/cover pattern changes in typical watershed of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(8): 155−166.

[16] 郝宗宇, 郝芮, 操云飞, 等. 南方丘陵区小流域沟塘−道路系统对汇流网络及水沙输移的影响 [J]. 生态学报, 2025, 45(21): 1−12.
Hao Z Y, Hao R, Cao Y F, et al. Influence of gully-pond-road system on confluence network and water and sediment transport in small watershed in southern hilly region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(21): 1−12.

[17] Wang H, Li S, Wu J, et al. Structural sediment connectivity dynamics in a representative watershed of the southern China's red soil region: Response to land use/cover changes [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 59: 102407.

[18] Sheng F, Yi T, Wang Y, et al. Changes in sediment connectivity and its impact on sediment transport in a typical watershed of Southern Jiangxi Province, China [J]. Ecological Indicators, 2025, 171: 113204.

[19] López-Vicente M, Ben-Salem N. Computing structural and functional flow and sediment connectivity with a new aggregated index: a case study in a large Mediterranean catchment [J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 179−191.

[20] 曾冰茹, 李云良, 谭志强. 鄱阳湖流域水文连通性的影响因素和环境效应 [J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(12): 2718−2728.
Zeng B R, Li Y L, Tan Z Q. Influential factors and environmental effects of hydrological connectivity in the Poyang Lake Catchment [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(12): 2718−2728.

[21] Mu H, Li X, Wen Y, et al. A global record of annual terrestrial Human Footprint dataset from 2000 to 2018 [J]. Scientific Data, 2022, 9(1): 176.

[22] Wösten J H M, Lilly A, Nemes A, et al. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils [J]. Geoderma, 1999, 90(3): 169−185.

[23] 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.
Li J L, Sun R H, Xiong M Q, et al. Estimation of soil erosion based on the RUSLE model in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3473−3485.

[24] Ma M, Zhao G, He B, et al. XGBoost-based method for flash flood risk assessment [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126382.

[25] 刘东岳, 董文卓, 勾容, 等. 基于 InVEST 模型和 XGBoost-SHAP 的重庆市生态系统服务供需时空演变及驱动因素分析 [J/OL]. 环境科学, 2025: 1−17 [2025−08−03]. https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkx.202504257.
Liu D Y, Dong W Z, Gou R, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors of supply and demand of ecosystem services in Chongqing based on InVEST model and XGBoost-SHAP [J/OL]. Environmental Science, 2025: 1−17 [2025−08−03]. https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkx.202504257.

[26] 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 J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116−134.

[27] 汤国安, 宋佳. 基于 DEM 坡度图制图中坡度分级方法的比较研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 157−160, 192.
Tang G A, Song J. Comparison of slope classification methods in slope mapping from DEMs [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2): 157−160, 192.

[28] Das A, Remesan R, Chakraborty S, et al. Investigation of human-induced land use dynamics in a representative catchment on the Chota Nagpur Plateau, India: a spatiotemporal application of soil erosion modeling with connectivity index studies [J]. Catena, 2022, 217: 106524.

[29] Liu Y, Liu J, Yin X, et al. Human activities and ecosystem health: a historical analysis of Poyang Lake [J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112446.

[30] 王晶, 赵文武, 刘月, 等. 植物功能性状对土壤保持的影响研究述评 [J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3355−3364.
Wang J, Zhao W W, Liu Y, et al. Effects of plant functional traits on soil conservation: a review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): 3355−3364.

[31] 吴洁玲, 周琴, 林强, 等. 红壤丘陵区植被恢复对土壤分离能力的影响及机制 [J/OL]. 水土保持学报, 2025 [2025−08−04]. https://link.cnki.net/doi/10.13870/j.cnki.stbcxb.2025.06.012.
Wu J L, Zhou Q, Lin Q, et al. Influence and mechanisms of vegetation restoration on soil detachment capacity in red soil hilly regions [J/OL]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025 [2025−08−04]. https://link.cnki.net/doi/10.13870/j.cnki.stbcxb.2025.06.012.

[32] 王阳阳, 张杰铭, 余新晓, 等. 滦河流域水文连通性 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(11): 119−127.
Wang Y Y, Zhang J M, Yu X X, et al. Hydrological connectivity

of the Luanhe River Basin in northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(11): 119−127.

[33] Guo Q K, Shan Z J, Lu W, et al. Fingerprinting sediment sources in two typical watersheds in the dry-hot valleys of Southwest China: The role of gully and orchard land [J]. Catena, 2023, 233: 107479.

[34] 宋淑钧, 杨荣, 王鸿, 等. 基于 WEPP 模型的黄土旱塬区果园生草的水土流失效应评估 [J]. 水土保持研究, 2025, 32(5): 111−121.
Song S J, Yang R, Wang H, et al. Evaluation of soil erosion effects of orchard grass based on WEPP model in the Loess Plateau dryland areas [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(5): 111−121.

[35] Michalek A T, Villarini G, Husic A. Climate change projected to impact structural hillslope connectivity at the global scale [J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 6788.

[36] 常志勇, 杨以翠, 卢宝鹏, 等. 模拟降雨条件下坡度和降雨强度对桂南崩积体侵蚀产沙的影响 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 118−125.
Chang Z Y, Yang Y C, Lu B P, et al. Effects of slope gradient and rainfall intensity on sediment yield in the colluvial deposits of southern Guangxi under simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 118−125.

[37] 陈洋, 张海东, 于东升, 等. 南方红壤区植被结构类型与降雨模式对林下水土流失的影响 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 150−157.
Chen Y, Zhang H D, Yu D S, et al. Effects of vegetation structure types and rainfall patterns on soil and water loss of understory vegetation in red soil areas of South China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(5): 150−157.

[38] 袁再健, 马东方, 聂小东, 等. 南方红壤丘陵区林下水土流失防治研究进展 [J]. 土壤学报, 2019, 57(1): 12-21.
Yuan Z J, Ma D F, Nie X D, et al. Progress in research on prevention and control of soil erosion under forest in red soil hilly region of South China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(1): 12−21.

[39] 邓羽松, 蔡崇法. 红壤丘陵区崩岗侵蚀调查与监测防治技术进展 [J]. 土壤学报, 2025, 62(2): 322−333.
Deng Y S, Cai C F. Progress of survey, monitoring, and control technology of Benggang erosion in red soil hilly area [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(2): 322−333.

[40] 万赐航, 周慧平, 王强, 等. 植被覆盖度和降雨侵蚀力变化对小流域泥沙连通性的影响 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 127−134.
Wan C H, Zhou H P, Wang Q, et al. Effects of vegetation coverage and rainfall erosivity changes on sediment connectivity in small watersheds [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(12): 127−134.

[41] 王娟, 刘晓林, 亢庆, 等. “县−小流域−图斑”多层级水土流失治理策略 [J]. 农业工程学报, 2025, 41(7): 136−144.
Wang J, Liu X L, Kang Q, et al. Multi-level controlling of the soil erosion for counties, small watersheds, and plots [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(7): 136−144.

（责任编辑　范　娟
责任编委　余新晓）