三峡地区资源环境生态研究

DOI:10.11721/cqnuj20250309

1985—2020 年三峡库区沉积物连通性时空演变及驱动因素*

漆万渝[1,2,3]，谭　涛[4]，黄金夏[1,5]，汪皖渝[1,2,3]，马茂华[1]，吴胜军[1]

(1. 中国科学院 重庆绿色智能技术研究院，重庆 400714；2. 中国科学院大学 重庆学院，重庆 400714；
3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 重庆师范大学 数学科学学院，重庆 401331；5. 重庆交通大学 河海学院，重庆 400074)

摘要:为维护三峡库区生态环境稳定和推动库区社会经济可持续发展，采用沉积物连通性指数和冷热点分析阐明了1985—2020 年库区沉积物连通性的时空演变特征，并采用最优参数地理探测器模型揭示出其中的驱动因子。结果显示：1) 三峡库区沉积物连通性在上述 36 年间总体上呈下降趋势，沉积物连通性指数降幅为 4.40%，并呈现出明显东部普遍降低、西部普遍升高的空间分异格局；2) 1985—2000 年库区沉积物连通性变化冷热点区域范围较小，2000—2020 年库区沉积物连通性变化冷热点区域范围增大，其中热点区域主要集中在重庆市中心城区，冷点区域主要集中在渝东北地区的开州区、云阳县；3) 库区沉积物连通性空间分布受多种因素耦合影响，其中土壤可蚀性与植被覆盖是影响库区沉积物连通性时空变化的主要驱动因子。研究结果提示有效的植被恢复和气候变化应对策略有助于减少三峡库区水土流失，从而维持区域生态系统的健康和可持续发展。

关键词:三峡库区；沉积物；连通性指数；冷热点分析；最优参数地理探测器

中图分类号:P343.3　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1672-6693(2025)03-0065-12

“连通性”这一概念最初由 Chorley 等人提出，用于描述在不同时空尺度上物质与能量在系统不同组成部分之间的输移[1]。2007 年 Bracken 等人[2]将连通性分为了景观连通性、水文连通性和沉积物连通性，其中沉积物连通性是指系统中泥沙及附着污染物的输送过程[3]。为了量化沉积物连通性，Borselli 等人[4]基于 GIS 技术提出了用沉积物连通性指数(index of connectivity，IC)描述景观中沉积物潜在输移能力，它的时空变异性受到水文和非水文因素的影响。尽管该指数在多个研究中被用于分析自然和人工景观要素对沉积物连通性的影响，但这些研究多关注小流域，尤其是面积在 10～100 km^2 的子流域[5-7]，而基于区域系统整体视角的大尺度区域的沉积物连通性分析则相对较少[8]。

三峡工程的建成极大地推动了三峡库区的城镇化进程及经济成长，进而促进了整个长江经济带的发展[9]。然而，三峡工程在改善长江流域水资源调度和促进经济发展的同时，也对流域内沉积物的连通格局产生了深远影响。特别是在汛期，由于降雨和洪水的频繁发生，加上三峡大坝的人工调节，三峡库区内坡面系统的沉积物连通性受到很大影响。这不仅使水土流失、农业面源污染等生态环境问题进一步加剧，还对三峡库区生态环境的自我修复过程造成不利影响[10]。为此，有关部门在三峡库区实施了一系列生态恢复及保护工程，以确保三峡工程运行和库区周边居民安全，并减少了库区的水土流失[11]。

三峡库区消落带作为重要的生态功能区，不仅是长江上游的重要生态保护屏障，更是生态系统的脆弱过渡地带，在维护生态系统的动态平衡和可持续发展方面具有重要意义[12]。尽管三峡地区生态系统具有较高的生态价值，但自三峡工程开始建设以来，原生土地覆盖改变、气候变化等间接的人为影响和流量调节、渠道化、洪泛区排水、河岸放牧等直接的人为影响逐渐增大，库岸带生态系统结构发生改变，连通功能也出现退化[13-14]；特别是在干湿交替的三峡库区消落带，这种趋势尤为明显[15]。上述这些变化都极大影响了三峡库区沉积物的输移过程，而沉积物输移主要受水文因素和人为因素的控制，但因地质、构造、气候等水文地貌环境和沉积、侵蚀等流域尺度过程而有所差异[16]。因此，三峡库区内泥沙等沉积物的输移与周围景观之间存在着错综复杂的联系，并依

* **收稿日期**:2024-10-09　**修回日期**:2025-02-20　**网络出版时间**:2025-05-22T11:33

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 42371071)；重庆市水利局三峡后续科研项目(No. 5000002021BF40001)；重庆市科技创新与应用发展重点专项项目(No. CSTB2023TIAD-KPX0077)

第一作者简介:漆万渝，女，研究方向为水土保持，E-mail:qiwanyu@cigit.ac.cn；**通信作者简介**:马茂华，男，研究员，博士，E-mail:mamaohua@cigit.ac.cn

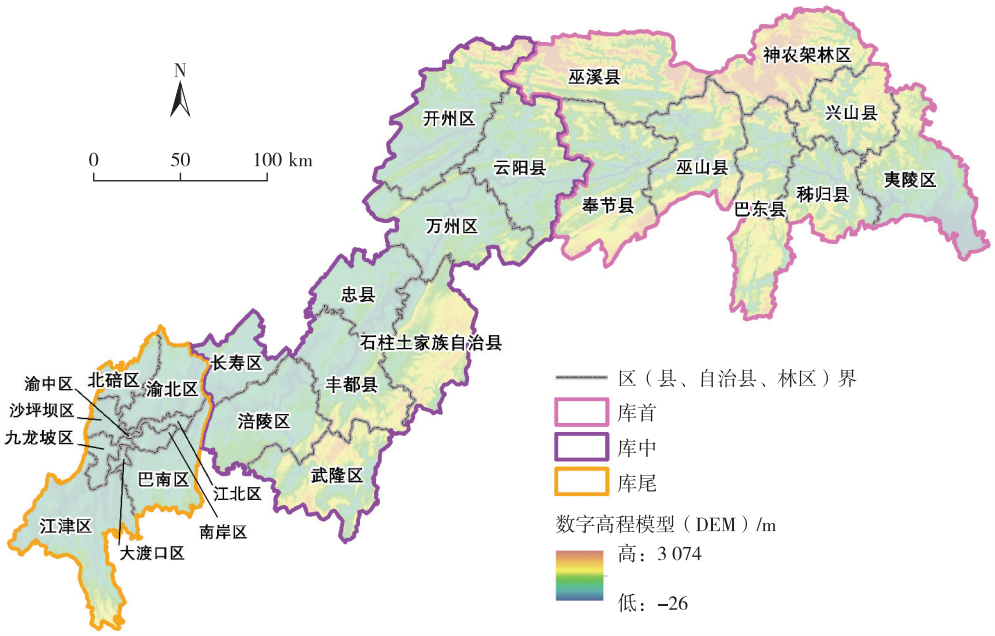
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.n.20250521.1744.002

赖于整个景观中水和沉积物通量的空间重新分布。

关于三峡库区的研究一直为人们所重视,特别是对库区消落带的研究;目前学者们主要关注库区土壤、植被、景观格局、水体环境、地形等方面的变化[17-19]。然而,三峡库区具有形状狭长、跨行政区域、水位反季节变化等特点,增加了相关数据获取的难度,以至于面向跨省市区域的库区水文和沉积物连通性研究较少。基于上述研究背景,本研究对1985—2020年三峡库区沉积物连通性的时空演变特征及相关驱动因素进行了探讨,以便为维护库区生态环境稳定和推动库区社会经济可持续发展提供科学依据与参考资料。

1 研究区概况

三峡库区地处中国西南,地理范围为东经105.816 667°~111.666 666°、北纬28.466 667°~31.733 333°,总面积约58 000 km^2[20];库区内地形复杂、地势起伏,以山地丘陵为主,北有大巴山屏障,南为七曜山,西为平行岭谷开阔地带,东有巫山阻隔;库区气候以亚热带季风气候为主,多年平均气温为18.2 ℃,多年平均降水量为1 200 mm;库区内的主要土壤类型为典型的侵蚀性土壤——紫色土;库区植被类型丰富,包括针叶林、阔叶林、灌丛、草地等。2023年,三峡库区所涵盖行政区的GDP总和达到20 816.35亿元,总人口约1 589万人。三峡库区内不同区域的资源禀赋不同,经济社会发展水平存在较大差异,可据此将库区分为库首、库中、库尾等3个部分:库首和库中以巫溪县、奉节县与开州区、云阳县之间的区(县)界为分界线,库中和库尾以长寿区、涪陵区与重庆市中心城区的区界为分界线。库首包括渝东北地区的巫溪县等3县以及湖北省的巴东县等5县(区、林区),总面积约22 478 km^2;库中包括重庆市开州区等9区(县、自治县),总面积约26 438 km^2;库尾包括由渝中区、江北区、渝北区、北碚区、沙坪坝区、九龙坡区、大渡口区、南岸区和巴南区组成的重庆市中心城区以及江津区共10区,总面积约8 679 km^2(图1)。



注:图中县级行政区边界线的矢量数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)。

图1 三峡库区概况

Fig. 1 The overview of the Three Gorges Reservoir Area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

气象数据源于国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn);30 m分辨率的DEM数据来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn);基于世界土壤数据库的中国土壤数据集以及30 m分辨率土地利用数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(http://www.ncdc.ac.cn);250 m分辨率归一化植被指数(NDVI)数据来源于国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn);100 m分辨率人口密度数据来源于GHS-POP人口数据(https://human-settlement.emergency.copernicus.eu);1 km分辨率夜间灯光数据来源于国家地球系统科

学数据中心(http://www.geodata.cn)；30 m 分辨率梯田数据来源于 ESSD 平台(https://www.earth-system-science-data.net/)。上述所获取的栅格数据经统一坐标系后，裁剪并重采样为 100 m 栅格数据。

2.2　研究方法

2.2.1　沉积物 IC

沉积物 IC 由水或沉积物从上坡区域移动到下坡区域的潜在输移能力(D_{up})和水或沉积物到达汇集区的潜在能力(D_{dn})计算得出[4]。本研究应用 Crema 等人[21]开发的 SenInConnect 工具对沉积物 IC 进行计算，相关计算公式如下：

$$I_C=\log_{10}\left(\frac{D_{up}}{D_{dn}}\right)=\frac{\overline{W}\times\overline{S}\times\sqrt{A}}{\sum_{i=1}^{m}\left[\frac{d_i}{(W_i\times S_i)}\right]},$$

$$C=\begin{cases}1, f\leqslant 0,\\ 0.650\ 8-0.343\ 6\log_{10} f, 0<f\leqslant 78.3\%,\\ 0, f>78.3\%。\end{cases}$$

其中：I_C 为沉积物 IC，取值范围为$(-\infty,+\infty)$，且值越大表示沉积物连通性越强、沉积物输移到河道的可能性也越大；A 为上坡贡献面积(单位：m^2)；$\overline{W}$ 为上坡贡献面积的平均权重因子(量纲为 1)；$\overline{S}$ 为上坡贡献面积的平均坡度(量纲为 1)；d_i 为 m 个单元中第 i 个单元沿下坡方向的流动路径长度(单位：m)；W_i 和 S_i 分别为第 i 个单元土地利用类型的权重因子和坡度(量纲均为 1)；C 为植被管理与覆盖因子，在本研究中代替林地与草地的权重因子，其他土地利用类型的权重采用分类赋值法进行估算[22]；f 的计算公式为 $f=\frac{I-I_{soil}}{I_{max}-I_{soil}}$，其中 I_{max} 是完全被植被覆盖像素的 NDVI 值(理论值应接近 1)，I_{soil} 是裸地或无植被覆盖区域的 NDVI 值(理论值应接近 0)，本研究中采用 5%置信度截取 NDVI 上下阈值分别作为 I_{max} 和 I_{soil}[23]。

2.2.2　冷热点分析

借助 ArcGIS 软件中的 Getis-OrdGi* 工具进行冷热点分析，根据输出结果，可以有效识别出在不同置信区间内三峡库区沉积物连通性变化统计特征明显的空间集聚区，其中高值区与低值区分别表现为空间变化集聚程度的热点和冷点[24]，相关计算公式为：

$$I_{Gi^*}=\frac{\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{Q}_{jk}-\overline{a}\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{Q}_{jk}}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}a_j^2}{n}-\frac{1}{a^2}}\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{Q}_{jk}^2-\left(\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{Q}_{jk}\right)^2}{n-1}}},$$

其中：I_{Gi^*} 为第 j 个栅格的集聚指数；a_j 为第 j 个栅格的沉积物 IC 值；$\boldsymbol{Q}_{jk}$ 为权重矩阵($k=1,\cdots,n$)；n 为总栅格个数；$\overline{a}$ 为所有栅格沉积物 IC 的平均值。

2.2.3　地理探测器

地理探测器模型是基于地理现象的空间分异定律来探测空间分异性，从而揭示背后驱动力的一组统计学方法[25]。本研究所采用的最优参数地理探测器(optimal parameters-based geographical detector，OPGD)模型是对地理探测器模型的改进，它的原理及计算公式与后者一致，改进之处在于连续数据的空间离散化[26]。本研究采用 OPGD 模型中的单因子探测和交互作用探测功能进一步探究海拔、坡度、气温、降水、植被、梯田分布、土壤可蚀性、人口密度与夜间灯光指数对三峡库区沉积物连通性空间分异的解释程度，其中土壤可蚀性因子的计算参考何君等人[27]的研究。

1) 单因子探测。通过 q 值来度量某驱动因子 X 对于因变量 Y 的解释力大小。q 值的范围为[0,1]，且值越大则表示 X 对 Y 的影响越强。q 值的具体计算公式为：

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

其中：$h=1,2,\cdots,L$ 表示 Y 或 X 的分层；N_h 和 N 分别为第 h 层和全区的单元数；σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 与全区 Y

的方差；$\sum_{h=1}^{L} N_h\sigma_h^2$ 与 $N\sigma^2$ 分别代表层类方差之和与全区总方差。

2）交互作用探测。设有2种驱动因子 X_1、X_2，探测它们的交互作用 $X_1 \cap X_2$ 对因变量 Y 的解释力，并通过与单因子探测时得到的 q 值进行比较，进而评估 $X_1 \cap X_2$ 对 Y 的解释力是否会增加或减弱，并将它分为5种情况：非线性减弱（$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$）、单因子非线性减弱（$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$）、双因子增强（$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$）、独立（$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$）和非线性增强（$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$）。

3）生态探测。衡量2种驱动因子 X_1、X_2 对因变量 Y 的影响是否存在统计学意义上的差异，其中 F 统计量计算方法如下：

$$F = \frac{N_{X_1}(N_{X_2} - 1)\sum_{h=1}^{L_1} N_h\sigma_h^2}{N_{X_2}(N_{X_1} - 1)\sum_{h=1}^{L_2} N_h\sigma_h^2},$$

其中：L_1 和 L_2 分别为 X_1 和 X_2 的层数；$\sum_{h=1}^{L_1} N_h\sigma_h^2$ 和 $\sum_{h=1}^{L_2} N_h\sigma_h^2$ 分别为 X_1 和 X_2 的分层、层内方差之和；N_{X_1} 与 N_{X_2} 分别为 X_1 和 X_2 的样本数目。

3 结果与分析

3.1 沉积物连通性变化特征

3.1.1 沉积物连通性时空分异特征

本研究选取了1985、1990、1995、2000、2005、2010、2015和2020年共8个时间截面，经计算得出1985—2020年三峡库区的沉积物IC平均值范围为−3.030～−2.906（图2）。由于沉积物IC值越低表明区域内沉积物传输越困难、越不易发生水土流失，因此三峡库区沉积物IC平均值为负值的结果说明库区沉积物输移潜力较弱。这可能是由于三峡库区地形较为复杂，而较高海拔地区植被覆盖度也较高，因而使得沉积物连通性较低。同时这一结果也表明，近些年来三峡库区内实施的退耕还林等以生态保护为主的植被恢复工程有效增强了地表阻隔能力，使沉积物在迁移过程中被有效滞留[28]。

由图2还可以看出，1985—2020年三峡库区沉积物IC平均值总体上呈下降趋势，降幅为4.40%，且在不同时期变化的幅度不同。1985—2000年三峡库区内沉积物连通性变化相对稳定，库区沉积物IC平均值变化较小，总体上仅降低了0.48%。具体而言，三峡库区沉积物IC平均值在1985—1990年降低了0.11%，在1990—1995年升高了0.45%，在1995—2000年降低了0.82%。自三峡工程开始修建以来，三峡库区内沉积物IC平均值明显下降，特别是在2000—2005年降幅最大，达到2.06%。三峡库区形成以来，在2000—2020年库区沉积物IC平均值下降了3.90%。

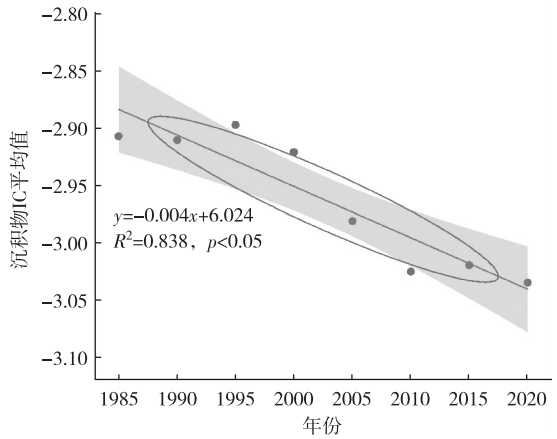


图2 1985—2020年三峡库区沉积物IC变化

Fig. 2 Changes of the sediment IC in the Three Gorges Reservoir Area from 1985 to 2020

图 3 显示：1985—2020 年三峡库区各区（县、自治县、林区）的沉积物 IC 变化有着较大差异，呈现出明显的中部、东部区域沉积物 IC 普遍降低而西部区域沉积物 IC 普遍升高的空间分异格局。在上述 36 年间，重庆市中心城区沉积物 IC 平均值升高了 0.116，升高量最大；其中渝中区沉积物 IC 平均值在重庆市中心城区所含 9 区中升高量最大，达 0.380。三峡库区内共有 9 区的沉积物 IC 平均值整体呈升高趋势，分别是渝中区、大渡口区、沙坪坝区、九龙坡区、江北区、北碚区、南岸区、武隆区和江津区。这与上述 36 年间重庆市中心城区的城镇化率较高相关，当地土地利用类型多为建筑用地，植被覆盖度较低；江津区和武隆区的沉积物 IC 平均值分别升高了 0.014 和 0.016，可能与这 2 区的地形地貌相关——区域内部海拔起伏度较高，土层较薄，植被覆盖度较低，导致沉积物连通性较高。此外，1985—2020 年三峡库区东部的云阳县和秭归县内沉积物 IC 下降区域较多，沉积物 IC 平均值分别下降了 0.350 和 0.294。

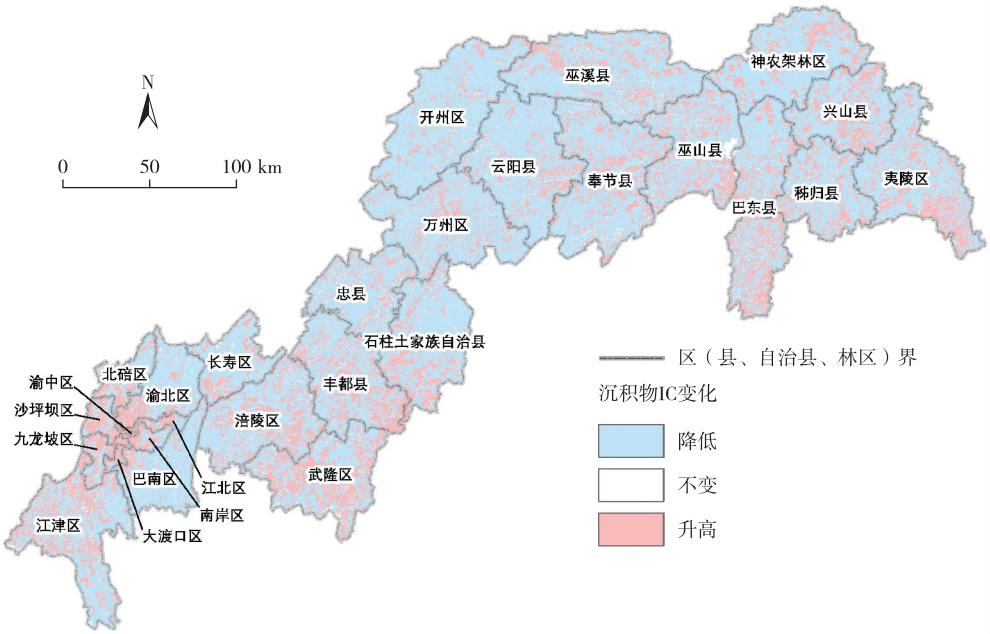


图 3　1985—2020 年三峡库区沉积物 IC 变化

Fig. 3　Changes of the sediment IC in the Three Gorges Reservoir Area from 1985 to 2020

图 4 显示：1985—2020 年三峡库区的库中沉积物 IC 平均值最高，为 −2.888，且在研究时段内降幅最大，达 6.01%；库首沉积物 IC 平均值最低，为 −3.043。库首和库中的沉积物 IC 在上述 36 年间总体上呈下降趋势，其中：库首沉积物 IC 平均值在 2000—2005 年降幅最大，为 3.348%；库中沉积物 IC 平均值在 2005—2010 年下降速率最快（降幅为 2.426%），在 1990—1995 年上升幅度最大（1.450%）；库尾沉积物 IC 变化相对稳定，在上述 36 年间有略微升高，升幅为 0.62%。

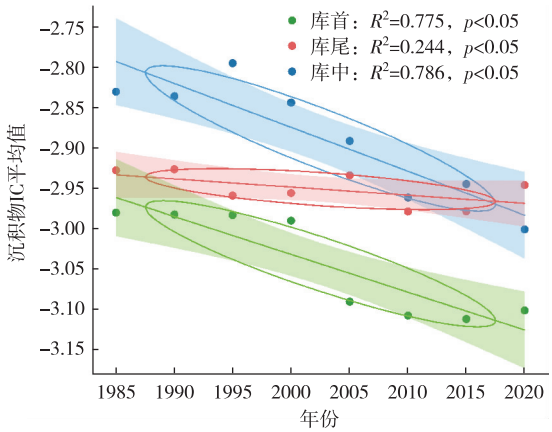


图 4　1985—2020 年三峡库区库首、库中和库尾沉积物 IC 变化

Fig. 4　Changes of the sediment IC at the head, middle, and tail of the Three Gorges Reservoir Area from 1985 to 2020

由图 5 可知,三峡库区沉积物连通性变化冷热点区域范围在 1985—2000 年较小,在 2000—2020 年较大。并且热点区域主要集中在重庆市中心城区,冷点区域主要集中在渝东北地区的开州区、云阳县。具体而言,三峡库区沉积物连通性变化冷、热点区域范围在 2015—2020 年最大,面积占比分别为 5.03%、4.08%;在 2010—2015 年,库区沉积物连通性变化冷点区域面积占比为 4.89%;在 1990—1995 年,库区沉积物连通性变化的热点区域主要位于库中的重庆市万州区,面积占比为 3.26%。此外在 1995 年以前,库区沉积物连通性变化冷热点区域相对集中,在此之后则相对分散。

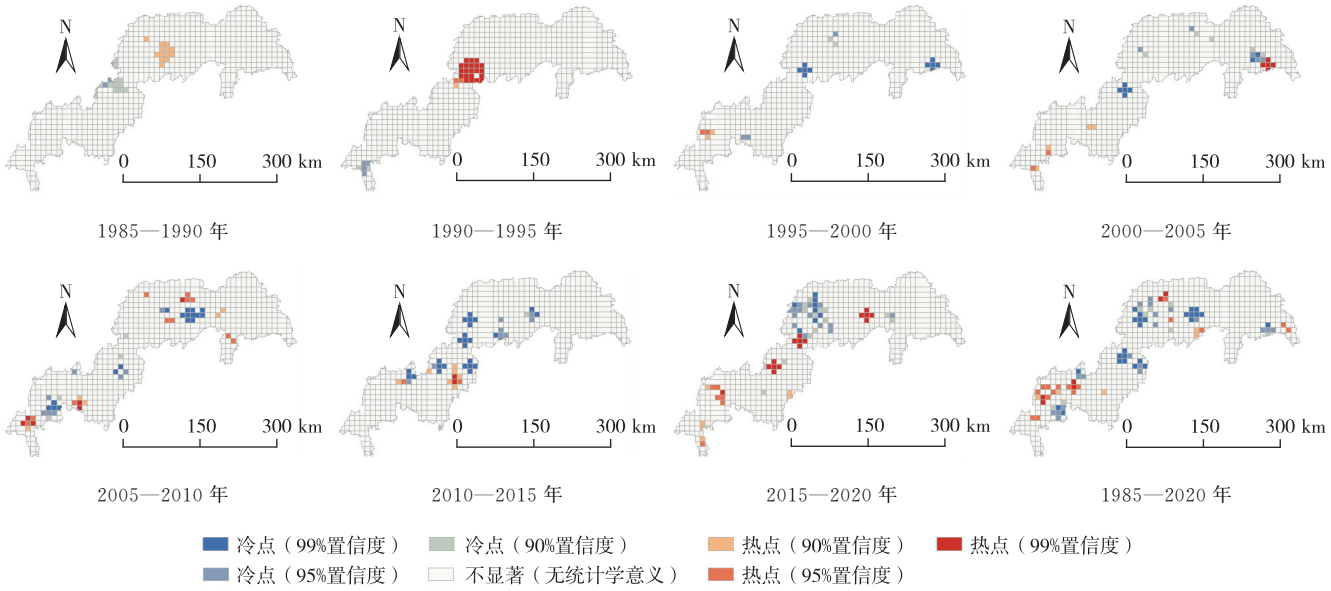


图 5　1985—2020 年三峡库区沉积物 IC 冷热点空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of cold and hot spots of the sediment IC in the Three Gorges Reservoir Area from 1985 to 2020

3.1.2　沉积物连通性与土地利用的关系

1985—2020 年三峡库区不同土地利用类型沉积物 IC 平均值变化趋势不同。由图 6 可知,三峡库区内耕地、林地、草地、灌木的沉积物 IC 值在−3.285～−2.663 之间,不透水面的沉积物 IC 值范围为−3.753～−3.266。通常植被能够有效固持土壤、减少侵蚀,降低沉积物连通性,但在三峡库区内植被覆盖区域的沉积物连通性相对较高。这可能与库区内草地与耕地的广泛分布及库区的特殊地形相关[29],例如库区内耕地主要分布在库中及库尾,分布面积大,并且由于库区独特的地形,耕地常以坡耕地的形式出现[30],从而导致它的沉积物连通性较高。此外,裸地沉积物 IC 平均值跨度最大,介于−7.436～−3.618 之间,这可能是由于三峡库区不同区域裸地所处土层性质的不同所致。

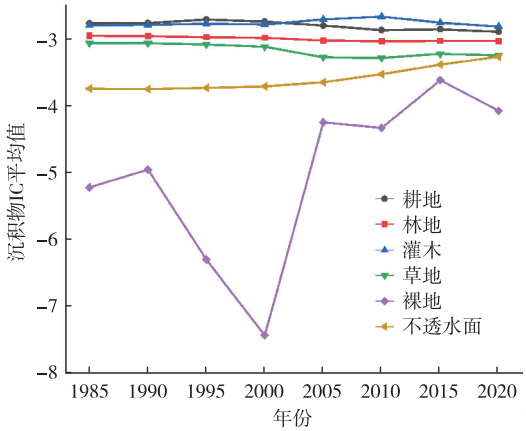


图 6　1985—2020 年三峡库区不同土地利用类型沉积物 IC 变化

Fig. 6　Changes of the sediment IC of different land use type in the Three Gorges Reservoir Area from 1985 to 2020

3.2　三峡库区沉积物连通性变化影响因素

本研究运用 OPGD 模型探究了 1985—2020 年三峡库区沉积物连通性时空变化的成因，并厘清其中驱动机制，各驱动因子分类结果如表 1 所示。

表 1　基于 OPGD 模型的驱动因素分类

Tab. 1　Driver classification based on OPGD model

类型	驱动因子	分类方法	最优分类等级	类型	驱动因子	分类方法	最优分类等级	类型	驱动因子	分类方法	最优分类等级
自然因素	海拔	几何间隔法	10	自然因素	多年平均降水	几何间隔法	10	人为因素	人口密度	标准差法	8
	坡度	几何间隔法	10		植被覆盖	分位数法	10		夜间灯光指数	标准差法	10
	多年平均气温	标准差法	10		土壤可蚀性	分位数法	10		梯田分布	几何间隔法	4

3.2.1　单因子探测分析

运用 OPGD 模型中的单因子探测公式计算各驱动因子对沉积物连通性的解释力的大小，并按对应的 q 值以从大到小的顺序对这些驱动因子进行排序，依次为：土壤可蚀性、植被覆盖、多年平均气温、坡度、多年平均降水、海拔、人口密度、夜间灯光指数、梯田分布（图 7）。从上述结果可知，土壤可蚀性与植被覆盖对 1985—2020 年三峡库区沉积物连通性的影响较大，而其余 7 个驱动因子的影响力则相对较小。

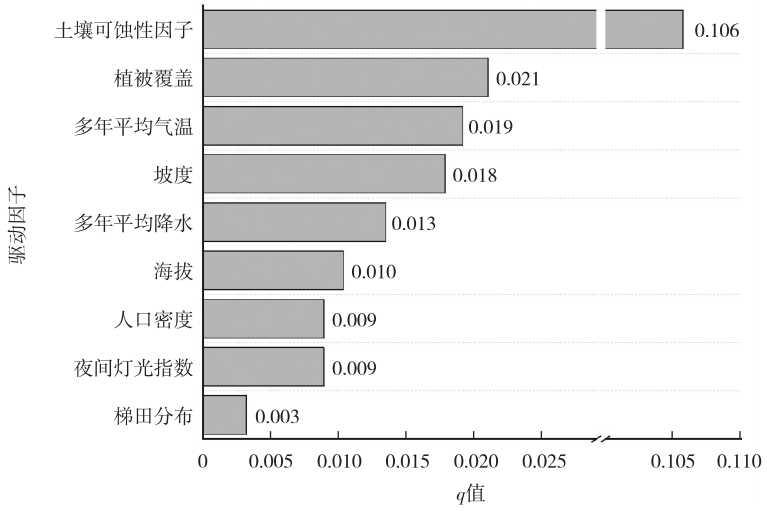


图 7　三峡库区沉积物 IC 变化的因子探测结果

Fig. 7　Factor detection results of the sediment IC change in the Three Gorges Reservoir Area

3.2.2　交互作用探测分析

单因子探测结果无法全面解释沉积物连通性空间变化，还需要考虑多种自然和人为因素的协同作用。OPGD 模型中的因子交互作用探测分析可以探测驱动因子的交互作用对沉积物连通性空间变化的解释力。由表 2 可知，除土壤可蚀性与其他因子的交互作用外，其他任意 2 个因子的交互作用对三峡库区沉积物连通性空间变化的解释力均呈非线性增强。植被覆盖与除土壤可蚀性以外其他因子的交互作用进一步增强了植被覆盖对三峡库区沉积物连通性变化的解释力，q 值均不低于 0.042 0，其中多年平均气温与植被覆盖的交互作用 q 值最大，为 0.109 1。这充分说明植被覆盖是三峡库区沉积物连通性变化的主要驱动因子之一。土壤可蚀性与其他因子的交互作用反而较土壤可蚀性对沉积物连通性的解释力更低，呈现单因子非线性减弱，因此土壤可蚀性对沉积物连通性的解释力被它与其他驱动因子的交互作用所削弱。

3.2.3　生态探测分析

表 3 显示：在 95%的置信水平上，除了夜间灯光指数与人口密度各自对三峡库区沉积物连通性变化的影响不存在统计学意义上的差异；而其余驱动因子两两比较结果均显示它们各自对库区沉积物连通性变化的影响存

在统计学意义上的差异。这一结果说明人口密度与夜间灯光指数对沉积物连通性变化的影响具有较相似的驱动机制和稳定性。

表2 交互探测结果

Tab.2 Results of interaction detection

驱动因子	海拔	人口密度	植被覆盖	夜间灯光指数	多年平均降水	坡度	多年平均气温	梯田分布
人口密度	0.033 8							
植被覆盖	0.058 9	0.042 0						
夜间灯光指数	0.040 4	0.038 2	0.049 9					
多年平均降水	0.051 5	0.037 7	0.070 8	0.057 1				
坡度	0.038 7	0.043 5	0.069 5	0.044 4	0.047 0			
多年平均气温	0.086 3	0.050 5	0.109 1	0.079 1	0.059 0	0.071 8		
梯田分布	0.058 8	0.020 8	0.066 6	0.051 4	0.045 4	0.089 1	0.053 5	
土壤可蚀性	0.028 5	0.021 9	0.040 4	0.025 3	0.027 7	0.027 5	0.037 0	0.018 6

表3 生态探测结果

Tab.3 Results of ecological detection

影响因子	海拔	人口密度	植被覆盖	夜间灯光指数	多年平均降水	坡度	多年平均气温	梯田分布
人口密度	Y							
植被覆盖	Y	Y						
夜间灯光指数	Y	N	Y					
多年平均降水	Y	Y	Y	Y				
坡度	Y	Y	Y	Y	Y			
多年平均气温	Y	Y	Y	Y	Y	Y		
梯田分布	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
土壤可蚀性	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y

注:“Y”“N”分别表示2个驱动因子对沉积物连通性变化的影响在95%置信水平存在、不存在统计学意义上的差异。

4 讨论

本研究发现,1985—2020年三峡库区沉积物连通性总体上呈下降趋势,沉积物IC平均值范围为−3.036～−2.906,库区沉积物连通性表现出明显的时空变化;土壤可蚀性与植被覆盖是影响库区沉积物连通性时空分异的主要因子。计算得到的沉积物IC数值范围与之前的研究结果相似[31],且再次证实植被覆盖状况和土壤可蚀性可对沉积物连通性的重要影响——已有研究发现沉积物IC值较低的区域以植被覆盖率低和缓坡为特征[32],本研究结果与之一致。

4.1 沉积物连通性的空间分异特征与影响因素

沉积物连通性的空间分异特征在三峡库区表现为明显的区域性差异。库尾沉积物IC平均值的升高可能与城镇化进程中土地利用变化、植被覆盖度降低有关。位于库首的云阳县和秭归县沉积物IC平均值的降低可能与当地较高的植被覆盖率和复杂的地形地貌有关,因为该区域具有高海拔和陡坡的特征。根据Zhou等人[33]的研究,陡坡会限制沉积物的移动,从而导致沉积物连通性降低。三峡库区不透水表面的沉积物连通性自2000年后开始增加,这种变化可能是由于2000年后三峡移民工作以及城镇化进程的推进改变了区域内的下垫面条件[34]。此外,本研究发现三峡库区沉积物连通性随时间变化而呈总体降低趋势,而因子分析结果也显示土壤可蚀性与植被覆盖是影响库区沉积物连通性变化的主要驱动因子,可以看出退耕还林等一系列生态保护和恢复措施起到了很好的效果,减少了库区的水土流失。

4.2　土壤可蚀性的单因子非线性削弱作用

土壤可蚀性是影响沉积物连通性的重要因素之一。在三峡库区的单因子探测分析中对沉积物连通性变化显示出较高的解释力，这与已有的研究结果一致，均突出了土壤可蚀性与沉积物连通性之间的密切联系[35]。但在与其他因子的交互作用中，该驱动因子的解释力反而降低，表现为单因子非线性削弱。这意味着在复杂的自然和人为环境中，土壤可蚀性对沉积物连通性的影响可能被其他因素所掩盖或削弱。研究发现，土壤可蚀性与其他因子的交互作用通常呈现出非线性增强效应，但在某些情况下，这种交互作用反而降低了土壤可蚀性的解释力[31]。这种现象可能与区域内的地形复杂性和土地利用变化有关。在高坡度和植被覆盖较高的区域，土壤可蚀性对沉积物连通性的影响可能被植被的固土作用所抵消。此外，城镇化进程中的土地利用变化也可能通过改变土壤结构和水文条件，进一步削弱土壤可蚀性的影响[36]。因此，理解土壤可蚀性在不同环境条件下的作用机制，对于制定有效的土壤和水资源管理策略至关重要。未来研究可进一步探讨土壤可蚀性与其他自然和人为因素的复杂交互作用，以便为三峡库区的生态保护和可持续发展提供科学依据。

5　结束语

本研究基于沉积物 IC 探讨了三峡库区内沉积物连通性的时空演变及驱动因素，有利于推动库区输沙机制的相关研究，并为库区内水土资源的可持续利用提供科学依据，主要结果如下：

1）1985—2020 年三峡库区沉积物 IC 平均值总体上呈下降趋势，降幅为 4.40%；在此期间，库区内沉积物连通性表现出明显的东部普遍降低、西部普遍升高的空间分异格局。

2）1985—2000 年三峡库区沉积物连通性变化冷热点区域范围较小；2000—2020 年库区沉积物连通性变化冷热点区域面积大幅度增加，其中热点区域主要集中在重庆市中心城区，冷点区域主要集中在渝东北地区的开州区、云阳县。

3）三峡库区沉积物连通性空间分布受多种因素共同影响。从单因子探测结果来看，土壤可蚀性与植被覆盖是主要驱动因子，多年平均气温、海拔、人口密度、夜间灯光指数、多年平均降水、坡度和梯田分布对三峡库区沉积物连通性变化的影响较小；在交互探测结果中，植被覆盖与多年平均气温交互作用对库区沉积物连通性变化的解释力最高，q 值为 0.109 1；在生态探测结果中，仅有夜间灯光指数与人口密度各自对库区沉积物连通性变化的影响不存在统计学意义上的差异。

本研究将三峡库区视为一个整体，发现土壤可蚀性与植被覆盖是区域内沉积物连通性的主要驱动因子，但对于小尺度区域，驱动因子可能具有尺度效应。后续研究将针对三峡库区内子流域沉积物连通性演变机制进行更详细的探究，并考虑数据分辨率和一致性问题对结果的影响。王阳阳等人[37]发现，IC 的平均值及中位数均与流域面积呈对数关系。这可能是因为小流域研究使用较高精度数据、受局部因素影响较多，而大范围区域输入数据虽精度受限但结果相对稳定。进一步研究生态工程等人类活动与自然因素之间的反馈作用，有助于全面理解库区生态系统演变规律，并为制定有效的环境管理策略提供科学支持。

由于三峡水库的蓄水运行对沉积物连通性有明显影响，建议根据三峡库区内各区域的具体情况，优化库区内及上游各梯级水库的调度方案，有效调节水流动力，以增强库区坡面系统沉积物的稳定性，减少淤积并维持河流的自然输沙能力；同时，对于库区内部一些城镇化率较高的区域，可通过生态工程提高区域的植被覆盖率，以增强区域土壤保持的能力，减少水土流失。由于三峡库区沉积物输移是一个跨区域过程，需要加强应对气候变化的跨区域合作，并且需要加强对库区上下游以及长江左右岸的合作与管理，共同制定和执行气候变化背景下沉积物管理策略，以保证库区乃至长江流域的生态环境的可持续发展。

参考文献：

[1] KEESSTRA S，NUNES J，NOVARA A，et al. The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services[J]. Science of the Total Environment，2018，610：997-1009.

[2] BRACKEN L J，CROKE J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems[J]. Hydrological Processes，2007，21(13)：1749-1763.

[3] 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.

[4] BORSELLI L,CASSI P,TORRI D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape:a GIS and field numerical assessment[J]. Catena,2008,75(3):268-277.

[5] KEESSTRA S D,DAVIS J,MASSELINK R H,et al. Coupling hysteresis analysis with sediment and hydrological connectivity in three agricultural catchments in Navarre,Spain[J]. Journal of Soils and Sediments,2019,19(3):1598-1612.

[6] ELTNER A,MAAS H G,FAUST D. Soil micro-topography change detection at hillslopes in fragile Mediterranean landscapes [J]. Geoderma,2018,313:217-232.

[7] CISLAGHI A,BISCHETTI G B. Source areas,connectivity,and delivery rate of sediments in mountainous-forested hillslopes:a probabilistic approach[J]. Science of The Total Environment,2019,652:1168-1186.

[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] 王清荣,李阳兵,赵雯欣,等. 近30年来三峡库区土地利用与生态环境效应研究热点演变及展望:基于Citespace的文献可视化分析[J]. 生态学报,2024,44(5):2159-2172.
WANG Q R,LI Y B,ZHAO W X,et al. Evolution and prospect of research hotspots on land use and eco-environmental effects in Three Gorges Reservoir Area in recent 30 years:based on citespace's literature visualization analysis[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(5):2159-2172.

[10] 杜逢彬,陈继平,石金胡. 三峡库区消落带环境问题及生态环境评价治理[J]. 城市勘测,2009(2):150-152.
DU F B,CHEN J P,SHI J H. Three Gorges Reservoir Area of the environment charged with evaluation and management of the ecological environment[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying,2009(2):150-152.

[11] 姚祖军,王娜娜,黄雪滢,等. 降雨和水保措施对三峡库区坡地水土流失的协同影响[J]. 长江流域资源与环境,2022,31(10):2272-2281.
YAO Z J,WANG N N,HUANG X Y,et al. Synergistic effects of rainfall and conservation practices on slope land soil and water loss in Three Gorges Reservoir Area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2022,31(10):2272-2281.

[12] ZENG C F,QI W Y,MAO Y Q,et al. Water conservation ecological service function and its value response mechanism in a nested water conservancy project area[J]. Frontiers in Environmental Science,2022,10:887040.

[13] ZEDLER J B,KERCHER S. WETLAND RESOURCES:status,trends,ecosystem services,and restorability[J]. Annual Review of Environment and Resources,2005,30:39-74.

[14] GRENFELL S,GRENFELL M,TOOTH S,et al. Wetlands in drylands:diverse perspectives for dynamic landscapes[J]. Wetlands Ecology and Management,2022,30(4):607-622.

[15] TOOTH S. The geomorphology of wetlands in drylands:resilience,nonresilience,or … ?[J]. Geomorphology,2018,305:33-48.

[16] ARIF M,ZHENG J,WOKADALA C,et al. Assessing riparian zone changes under the influence of stress factors in higher-order streams and tributaries:implications for the management of massive dams and reservoirs[J]. Science of The Total Environment,2021,776:146011.

[17] 李秋宏,王小国,刘祥龙. 蓄水对三峡库区消落带土壤和植被的影响研究进展[EB/OL]. (2024-07-19)[2024-10-09]. https://link.cnki.net/doi/10.15928/j.1674-3075.202303240079.
LI Q H,WANG X G,LIU X L. Progress of research of the effect of impounding on soil and vegetation in water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[EB/OL]. (2024-07-19)[2024-10-09]. https://link.cnki.net/doi/10.15928/j.1674-3075.202303240079.

[18] 王文静,赵旻,赵起超. 三峡水库干流含沙量对不同形态磷浓度的影响分析[J]. 人民长江,2024,55(10):68-76.
WANG W J,ZHAO M,ZHAO Q C. Influence of sediment concentration on different forms of phosphorus concentration in main stream of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River,2024,55(10):68-76.

[19] 赵灿,李毅,吴雷祥,等. 三峡库区多时空尺度土地利用和景观格局对水质的影响[J]. 水资源与水工程学报,2024,35(2):48-59.
ZHAO C,LI Y,WU L X,et al. Impact of land use and landscape pattern on water quality on multiple temporal and spatial scales in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2024,35(2):48-59.

[20] ZHANG F T,TAN H M,ZHAO P,et al. What was the spatiotemporal evolution characteristics of high-quality development in China? a case study of the Yangtze River economic belt based on the ICGOS-SBM model[J]. Ecological Indicators,2022,145:109593.

[21] CREMA S,CAVALLI M. SedInConnect:a stand-alone,free and open source tool for the assessment of sediment connectivity [J]. Computers & Geosciences,2018,111:39-45.

[22] 曾冰茹，李云良，谭志强. 基于连通性指数(IC)的近 30 年鄱阳湖流域水系结构与水文连通演变评估[J]. 湖泊科学，2023，35(5)：1796-1807.
ZENG B R，LI Y L，TAN Z Q. Assessment on the evolution of river structure characteristics and hydrological connectivity in Lake Poyang Basin based on index of connectivity (IC) during the past 30 years[J]. Journal of Lake Sciences，2023，35(5)：1796-1807.

[23] 刘时城. 延河流域不同尺度水文连通性研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2017.
LIU S C. Research on hydrological connectivity at different scales in Yanhe River Catchment[D]. Yangling：Northwest A & F University，2017.

[24] 韩雨非，刘艳中，陈勇，等. 碳排放视角下武汉市土地生态风险时空格局演变[J]. 水土保持研究，2024，31(2)：331-341.
HAN Y F，LIU Y Z，CHEN Y，et al. Spatiotemporal evolution of land ecological risk in Wuhan from the perspective of carbon emission[J]. Research of Soil and Water Conservation，2024，31(2)：331-341.

[25] WANG J F，et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region，China[J]. International Journal of Geographical Information Science，2010，24(1)：107-127.

[26] SONG Y Z，et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis：cases with different types of spatial data[J]. GIScience & Remote Sensing，2020，57(5)：593-610.

[27] 何君，李月臣，朱康文，等. 重庆市土壤侵蚀敏感性时空分异特征研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版)，2016，33(6)：45-53.
HE J，LI Y C，ZHU K W，et al. Temporal and spatial variation characteristics of sensitivity of soil erosion in Chongqing[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)，2016，33(6)：45-53.

[28] 徐昔保，杨桂山，李恒鹏，等. 三峡库区蓄水运行前后水土流失时空变化模拟及分析[J]. 湖泊科学，2011，23(3)：429-434.
XU X B，YANG G S，LI H P，et al. Simulation on the spatial-temporal changes of soil erosion in the Three Gorges Reservoir Area between the pre-and post-storage periods[J]. Journal of Lake Sciences，2011，23(3)：429-434.

[29] 许秋阳，吴乐知. 三峡库区近十年土地利用变化特征研究[J]. 湖北师范大学学报(自然科学版)，2023，43(2)：60-67.
XU Q Y，WU L Z. Research on the characteristics of land use change in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Hubei Normal University (Natural Science)，2023，43(2)：60-67.

[30] 李辉，孙少龙，贾玉婷，等. 三峡库区土地利用碳收支时空格局及碳平衡管理分区[J/OL]. 环境科学，2025：1-18. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202412063.
LI H，SUN S L，JIA Y T，et al. Spatial-temporal pattern of carbon budget in land use and zoning for carbon balance management in the Three Gorges Reservoir Region[J/OL]. Environmental Science，2025：1-18. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202412063.

[31] LIU S，WU L，GUO Z J，et al. Elucidating the response mechanisms of hydrological and sediment connectivity to the river network structure，vegetation，and topographic features in the Jinghe River Basin[J]. Land Degradation & Development，2024，35(5)：1699-1715.

[32] WU Z N，BAARTMAN J E M，PEDRO NUNES J，et al. Intra-annual sediment dynamic assessment in the Wei River Basin，China，using the AIC functional-structural connectivity index[J]. Ecological Indicators，2023，146：109775.

[33] ZOU Y W，HUANG X，HOU M T，et al. Linking watershed hydrologic processes to connectivity indices on the Loess Plateau，China[J]. Catena，2022，216：106341.

[34] 刘勇，王玉杰，王红霞，等. 长江三峡库区 6 种退耕还林模式涵养水源与保育土壤效益及其价值估算[J]. 中国水土保持科学，2014，12(6)：50-58.
LIU Y，WANG Y J，WANG H X，et al. Function and value assessment of soil and water conservation under six patterns of the Grain to Green Program in the Three Gorges Reservoir Area of the Yangtze River[J]. Science of Soil and Water Conservation，2014，12(6)：50-58.

[35] ALFONSO-TORREÑO A，SCHNABEL S，GÓMEZ-GUTIÉRREZ Á，et al. Effects of gully control measures on sediment yield and connectivity in wooded rangelands[J]. Catena，2022，214：106259.

[36] LIAO H，HE Y. The temporal variation of sediment connectivity from 1982 to 2020 in the Wei River Basin，China[J]. Hydrological Processes，2023，37(12)：e15042.

[37] 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.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Spatiotemporal Evolution of Sediment Connectivity and Its Driving Factors in the Three Gorges Reservoir Area from 1985 to 2020

QI Wanyu[1,2,3], TAN Tao[4], HUANG Jinxia[1,5], WANG Wanyu[1,2,3], MA Maohua[1], WU Shengjun[1]

(1. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714;
2. Chongqing College, University of Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;
4. College of Mathematical Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 401331;
5. College of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To maintain ecological stability and promote sustainable socioeconomic development in the Three Gorges Reservoir Area (TGRA), the sediment connectivity index and cold/hot spot analysis were employed to elucidate the spatiotemporal evolution characteristics of sediment connectivity from 1985 to 2020. The optimal parameters-based geographical detector model was used to identify the driving factors. Findings reveal that: 1) Reservoir sediment connectivity generally showed a declining trend over these 36 years, with the sediment connectivity index decreasing by 4.40%. A distinct spatial pattern emerged, characterized by a widespread decrease in the east and a widespread increase in the west. 2) During 1985—2000, the spatial extent of cold and hot spots indicating changes in sediment connectivity was relatively limited. Between 2000 and 2020, however, the extent of these cold and hot spot areas significantly expanded. Hot spots were primarily concentrated in the central urban area of Chongqing Municipality, while cold spots were mainly located in Kaizhou District and Yunyang County within northeastern Chongqing. 3) The spatial distribution of sediment connectivity in the reservoir area results from the coupling of multiple factors. Soil erodibility and vegetation coverage emerged as the primary drivers influencing its spatiotemporal changes. These findings indicate that effective vegetation restoration strategies and climate change adaptation measures can help reduce soil erosion within the reservoir area, thereby maintaining regional ecosystem health and supporting sustainable development.

Keywords: Three Gorges Reservoir Area; sediment; index of connectivity; the cold and hot spots analysis; the optimal parameter-based geographical detector

(责任编辑 方 兴)