

ArcGIS平台下乌江流域河流地貌参数与构造活动关联性探讨

易定鑫 王丽艳 张 萌
贵州省地震局 贵州贵阳 550001

摘要: 乌江流域位于中国西南喀斯特地貌区,受新生代构造活动强烈影响,本研究以ArcGIS为平台,利用SRTM30mDEM数据提取河流地貌参数包括河道坡降、弯曲度、凹点、谷底坡度指数和 χ 值,并结合2000–2023年中国地震台网及USGS地震数据,分析其与构造活动及地震事件空间关系。结果表明,在断裂带附近坡降、凹点存在明显异常,与地震活动分布的相关系数为0.65,说明构造抬升、断层活动控制了河流地貌。本研究为区域地质灾害评估及流域地貌演化研究提供理论依据。

关键词: 乌江流域; 河流地貌参数; ArcGIS; 构造活动; 空间分析

引言

乌江流域属于长江上游的重要支流,跨越贵州、重庆以及湖南三地,位于扬子地块与青藏高原的交接地带,地貌复杂并且构造活动比较频繁。河流地貌参数属于研究流域地貌改变与构造活动交互状况的关键工具,可以显示构造提升,断层运动以及侵蚀过程的动态和谐。已有研究显示河道坡降、凹点、谷底坡度指数等参数与区域构造活动相关联,而地震作为构造活动最直接的表现,会在地貌参数的空间分布中留下痕迹。ArcGIS平台利用自己的空间分析以及可视化优势,对地貌参数进行有效的提取与分析。

国内外学者在构造地貌学方面取得一定成果。Kirby和Whipple(2012)运用河流纵剖面分析喜马拉雅地区构造抬升的动态过程;Burbank和Anderson(2011)指出地震对河流地貌存在短期扰动。然而乌江流域属于喀斯特地貌和构造活动叠加影响的地区,这方面的研究比较少,缺少基于地震数据的地貌参数联系分析。本研究借助ArcGIS平台,依照公开的SRTM30mDEM数据以及2000–2023年中国地震台网(CENC)和USGS地震目录,获取乌江流域主要河流地貌参数,系统剖析这些参数

同构造活动、地震事件的空间联系,从而探寻流域地貌发展的机理,给地质灾害评价与流域规划给予科学依据。

一、乌江流域地质构造背景

(一) 流域概况

乌江起源于贵州威宁县的乌蒙山,海拔高度约为2200米,河道长度大约为1037千米,流域面积达到8.79万平方千米,在贵州,重庆,湖南等地流淌过后,会最终在重庆涪陵汇入长江^[1]。流域地势西高东低,平均坡度约0.015,气候属亚热带季风性湿润气候。年降水量1000–1400mm。主要支流包括六冲河、鸭池河、清水江,河网密度约0.35km/km²。流域喀斯特地貌发育,地形切割强烈,河谷纵剖面多呈阶梯状,表明有若干次构造抬升及河流下切事件^[2]。

(二) 构造特征

乌江流域属扬子地块东南缘,受新生代喜马拉雅运动影响,构造活跃。主要断裂有遵义–思南、綦江–习水、清镇–贵阳断裂,呈NE–SW呈向布置。这些断层大多属于逆冲型,有的还带些走滑特性,掌控着流域的地貌状况,且遵义–思南断裂带的活动比较强烈,近10年来发生的小震和中震次数较多^[3]。根据中国地震台网(CENC)2000–2023年M \geq 3.0地震年平均统计可知流域内主要集中在断裂带10km范围内,发生次数为15次。

(三) 地貌类型

乌江流域以喀斯特地貌为主,为峰丛洼地、溶洞、地下河,伴随深切的河谷与多级阶地。干流上游(威宁段)河谷狭窄,坡降陡峻,一般为0.02–0.03;中下游(遵义–涪陵段)河谷开阔,有阶地分布,坡降变小

基金项目:

- 1.贵州省地震局地震科技基金项目资助,编号:GZSDZJDKJJ202104;
- 2.贵州省地震局2024年青年课题项目资助。

作者简介: 易定鑫(1993.12–),男,汉族,贵州省遵义市,硕士研究生,工程师,研究方向:构造地质、地震地质。

至0.01-0.015。凹多分布于断裂带交汇区,显示构造抬升与河流下切交织,阶地记载表明,晚更新世之后流域抬升速率大约是0.5-1.0mm/a,某些地方比如遵义段达到1.2mm/a。

二、河流地貌参数的概念及提取方法

(一) 主要河流地貌参数

河流地貌参数是开展构造-地貌研究的重要指标,能反映流域对构造活动的动态响应。笔者在本文的研究中选择这些参数进行全面的分析以全面了解乌江流域地貌特征与地质构造活动之间的关系。

河道坡降是河流纵剖面上陡峭程度的直接表现,一般和构造抬升速率及侵蚀能力相关联。坡降较大之处常常对应着构造活跃区,而坡降较小的地方或许显示出长时间内处于侵蚀均衡状态^[4]。河道弯曲度被定义为河道实际长度与直线距离之比,它表现了河道受到断层、岩性差异或者地形限制的反应情况,高弯曲度往往表示局部构造影响。凹点指的是河道纵剖面当中出现的坡度陡变点,一般都会同断层活动或者岩性边界的出现、侵蚀速度的变化这类情况紧密挂钩,在构造地貌交互方面是有着关键价值的研究标本。谷底坡度指数(k_s),表示河流的侵蚀能力与构造抬升之间的关系,其计算公式为 $S=ksA^{-\theta}$,其中 S 代表坡降, A 代表上游集水面积, θ 代表凹度指数,一般取值为0.45(Wobus et al., 2006)。 χ 值是针对河网动态的调整情况,其计算公式是 $\chi = \int (A_0/A)^{\theta} dx$,其中, A_0 是基准集水面积,异常的 χ 值则显示河流的捕获或构造的调整。

(二) ArcGIS平台数据提取方法

本研究以SRTM30mDEM数据(由USGS公开获取,分辨率为30m,覆盖乌江流域全境)为基准数据,在ArcGIS10.8中开展参数提取,整个流程设计严格,保证可复现。下面进行详细提取步骤。

首先进行数据预处理。采用ArcGIS“填注”工具(Fill)对DEM数据的噪声加以消除,保障高程数据连续。然后利用“流向分析”(Flow Direction)获取水流方向,再根据“流量累积”(Flow Accumulation)绘制流域水系分布图。为得到河网,把流量累积阈值设为1000,生成矢量河网图,包含乌江干流和六冲河、鸭池河这些主要支流。

参数计算如下,河道坡降利用Slope(坡度分析)工具获取,产生栅格图,分辨率为30m,坡降值无量纲。河道弯曲度采用“测量工具”,计算河段实际长度与直线长度之比,分别对干流、支流分段统计。凹点识别采

用“纵剖面分析”工具,提取河道纵剖面曲线,利用坡度突变点检测算法(二阶导数),找到凹点位置,并结合DEM高程数据验证其正确性。谷底坡度指数 k_s 和 χ 值使用ArcPy脚本完成,根据 $S=ksA^{-\theta}$ 、 $\chi = \int (A_0/A)^{\theta} dx$ 计算,其中 A 由流量累积图获得, θ 取0.45, A_0 取 1km^2 。河流宽度比用“缓冲区分析”工具来量取河谷宽度,再同河道宽度算一算,河道侵蚀系数按照坡降和集水面积的幂律关系估出来,就是 $E=kA^mS^n$ 这种公式, k 、 m 、 n 是经验常数(Hack, 1957)。

(三) 参数地质意义

各河流地貌参数在地质环境中具有特定指示意义,坡降、 k_s 值高代表构造抬升强的区域,暗示河流对地壳上升快速反应。凹点多与断层活动、岩性变化或者局部水文条件突变有关,是构造活动在地貌上直接留下的痕迹。弯曲度异常表示河道被断层或者岩性约束而偏转,像高弯曲度就表明存在断层侧向位移之类的状况。 χ 值异常区常对应河流捕获或者河网重组,体现构造调整的过程,河流宽度比高的地方也许显示构造挤压较轻,河谷宽广;低的地方大概表示构造挤压厉害或者侵蚀受约束。侵蚀系将河流的下切能力量化,与构造抬升速率和岩性硬度相关^[5]。

三、河流地貌参数与构造活动的关系研究

(一) 空间分布特征

经ArcGIS空间分析得出乌江流域地貌参数有明显空间异质性,干流上游威宁段坡降较高 k_s 值为150-200 $\text{m}^{0.9}$ 、平均坡降0.02-0.03,构造抬升强烈;中下游如遵义-涪陵段坡降渐低 k_s 值为80-100 $\text{m}^{0.9}$ 、平均坡降0.01-0.015,抬升强度减弱。凹点主要集中在遵义-思南断裂带和綦江-习水断裂带周围,通过缓冲区分析发现有80%的凹点分布在断裂带5km范围内,说明断层活动导致河道纵剖面改变。弯曲度上来看,支流,像六冲河,平均1.5-2.0比干流的1.2-1.4大一些,说明支流受局部断层影响更多些。 χ 值异常区如乌江、綦江-习水断裂交汇处占比20%有河流捕获痕迹,表明近期构造活动。河流宽度比上游小(0.5-1.0),中下游大(1.5-2.5),地形约束变化。侵蚀系数在断裂带附近值较大(0.8-1.2),下切强烈。

通过地震数据分析发现地貌参数与构造活动存在相关性,由CENC、USGS数据可知2000-2023年乌江流域 $ML \geq 3.0$ 地震共发生264次,平均每年约11次,震中大多位于断裂带10km范围内,震源深度多以5-15km为主。ArcGIS空间自相关分析(Moran's I)发现坡降高值区与

表1 乌江流域地貌参数与地震数据空间分布特征

地貌参数	上游(威宁段)	中游(遵义段)	下游(涪陵段)	地震相关性 (Moran' sI)	地震缓冲区重叠度 (5km)
坡降	0.02-0.03	0.015-0.02	0.01-0.015	0.70	75%
弯曲度	1.2-1.5	1.3-1.6	1.2-1.4	0.45	50%
凹点(个/km)	0.8-1.2	1.0-1.5	0.5-0.8	0.65	80%
ks (m ^{0.9})	150-200	100-150	80-100	0.68	72%
χ 值异常区(%)	15%	25%	10%	0.60	65%
河流宽度比	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.5	0.50	55%
侵蚀系数	0.8-1.2	0.6-0.9	0.4-0.6	0.62	60%
地震频次(次/年/100km ²)	0.6	0.5	0.3	-	-

地震高发区重合70%，凹点密集区与地震点的相关性为0.65，ks值高值区与地震点的相关性是0.68。从缓冲区分析可知，有80%的地震点落在凹点5km范围内，说明了地震与地貌参数异常相关。

(二) 典型案例对比

乌江干流与支流的对比分析显示，干流坡降平缓，平均0.015，凹点较少，平均每公里0.5-0.8个，ks值较低(80-120m^{0.9})，反映长期侵蚀平衡；支流(如六冲河)坡降陡峭，平均0.02-0.025，凹点密集，平均每公里1.0-1.5个，ks值较高(120-150m^{0.9})，指示近期断层活动。地震数据叠置分析表明，支流区域地震频次(年均0.5次

/100km²)高于干流(0.3次/100km²)，与凹点分布高度一致。遵义段的2017年M4.2地震(CENG数据，震中位置：27.8° N, 107.4° E, 震源深度10km)位于凹点密集区，5km缓冲区内坡降值(0.025)高于区域平均值(0.015)，ks值达140m^{0.9}，提示地震活动加剧河道纵剖面突变。

与邻近流域对比，乌江流域ks值(平均120m^{0.9})高于嘉陵江(90m^{0.9})，凹点密度(1.0个/km)高于嘉陵江(0.8个/km)，表明构造抬升更强烈。地震活动对比显示，乌江流域年均地震次数(15次，M ≥ 3.0)略高于嘉陵江(12次)，震源深度以5-15km为主，嘉陵江则以10-20km为主。表2进一步比较了两流域的地貌参数和地震特征。

表2 乌江流域与嘉陵江流域地貌参数及地震活动对比

流域	平均坡降	平均ks (m ^{0.9})	凹点密度 (个/km)	河流宽度比	侵蚀系数	年均地震次数 (M ≥ 3.0)	地震与凹点相关性
乌江流域	0.018	120	1.0	1.5	0.8	15	0.65
嘉陵江流域	0.015	90	0.8	1.8	0.6	12	0.58

结论

乌江流域河流地貌参数与构造活动及地震事件存在明显空间联系，坡降、凹点、ks值在断裂带附近出现异常，与地震活动分布相关系数为0.65，说明构造抬升、断层活动控制了河流地貌。ArcGIS平台的空间分析功能，揭示了构造-地貌的互动规律，对地质灾害防治以及流域地貌演变的研究提供了依据。以后还可以通过更精准的数据，动态监测。

参考文献

[1] 张子浩, 孙健, 韩凯, 等. 多源数据融合的辫状河流水貌演变研究[J]. 水力发电学报, 2025, 44(06): 1-11.

[2] 王翠芳, 杨向阳, 熊璨, 等. 构造-地貌耦合视角下川东分水岭迁移动力学机制——以磨刀溪-龙河流域为例[J]. 山地学报, 2025, 43(01): 13-27.

[3] 申凯楠, 董绍鹏, 王一舟. 基于地貌参数的色尔腾山山前断裂相对构造活动性研究[J]. 地震工程学报, 2024, 46(06): 1446-1461.

[4] 巨大立, 杨钊, 史小辉, 等. 河流地貌演化研究进展[J]. 地质科学, 2023, 58(03): 1063-1090.

[5] 康文东, 倪福全, 邓玉, 等. 利用SWAT模型分析乌江流域蓝绿水时空分布特征[J]. 中国农业气象, 2023, 44(06): 469-478.