

引用格式: 李伯祥, 胡春生, 何成邦, 高运, 刘婉婷. 基于 SPIM 模型参数 $\chi-k_{sn}$ 值综合分析的河流袭夺现象快速识别方法: 以江西庐山典型山地河流为例[J]. 山地学报, 2025, 43(3): 469-481.

LI Boxiang, HU Chunsheng, HE Chengbang, GAO Yun, LIU Wanting. Rapid identification for river capture phenomena based on integrated analysis of SPIM model parameters $\chi-k_{sn}$ values: A case study of typical mountain rivers in the Lushan Mountain, Jiangxi Province, China [J]. Mountain Research, 2025, 43(3): 469-481.

基于 SPIM 模型参数 $\chi-k_{sn}$ 值综合分析的河流袭夺现象快速识别方法: 以江西庐山典型山地河流为例

李伯祥, 胡春生*, 何成邦, 高运, 刘婉婷

(安徽师范大学 a. 地理与旅游学院; b. 江淮流域地表过程与区域响应安徽省重点实验室, 安徽 芜湖 241002)

摘要: 河流袭夺现象是揭示构造-气候-地表过程耦合效应的关键地貌过程。传统研究方法依赖高成本的野外勘查与实验分析, 成本高、周期长, 亟需发展高效的识别技术。江西庐山处于长江中游典型构造-气候耦合作用活跃区, 其密集的水网系统频繁受控于构造运动与侵蚀基准面变化, 为河流袭夺现象的研究提供了丰富的样本空间。本研究基于 12.5 m 分辨率 DEM 数据, 集成水力侵蚀模型 (Stream-Power Incision Model, SPIM) 的衍生参数——河道面积积分 χ 值与河道陡峭指数 k_{sn} , 构建 $\chi-k_{sn}$ 参数值综合分析河流袭夺的识别方法, 对江西庐山大校场、锦绣谷两个典型流域内的河流袭夺现象开展验证, 评估该方法在复杂地貌背景下的适用性与识别效率。研究表明: (1) 运用 $\chi-k_{sn}$ 值进行河流袭夺现象快速识别, 该方法具有高效性与可靠性, 成果与区域地质记录及历史水文记录高度吻合。(2) 在技术操作上, 选用 0.45 作为参考凹度值时, $\chi-k_{sn}$ 值分析可显著提升河流网络识别灵敏度, 其生成的高程-面积关系 (χ -plot) 图呈现更优的对称性、更清晰的凸型轮廓特征, 且相较于其他值图像离散度可降低约 28.57%, 更契合庐山陡峭山地河流的袭夺判别需求。(3) 对庐山两个典型流域进行案例验证发现: 根据 χ 值分析, 大校场流域内大校场河与长冲河中下游段、锦绣谷流域内西谷河上游与锦绣谷河干流 2 处 χ 值差异相较于流域其他区域更高, 据此在两流域各锁定 1 处可疑袭夺区; 陡峭指数 k_{sn} 分析进一步揭示, 大校场河流域芦林湖大坝附近河段 k_{sn} 异常峰值, 达 $92.92 \text{ m}^{0.9}$, 较流域其他河段均值高约 2.5 倍; 锦绣谷河流域如琴湖大坝区域 k_{sn} 出现异常峰值, 达 $269.44 \text{ m}^{0.9}$, 较流域其他河段高约 5.45 倍, 据此可精确标定两处具体袭夺点。本研究构建的 $\chi-k_{sn}$ 值综合分析方法框架为快速解译复杂水系演化过程提供了可推广的量化工具, 对深化构造-地貌-气候耦合机制研究具有重要方法论价值。

关键词: 河流袭夺; SPIM 模型; χ 值; k_{sn} 值; 庐山

中图分类号: P931.1

文献标志码: A

河流袭夺引发的分水岭迁移和河道系统移位现象, 能够深刻地塑造流域地貌的格局。河流袭夺是流域水系演化的关键过程之一^[1], 是反演构造-气候-地表过程耦合效应的重要切入点^[2]。尽管河流袭夺

现象的前期相关研究在袭夺湾形态解析^[3]、河流阶地年代学测定^[4-7]、沉积物地球化学示踪^[8]及流域地质结构分析^[9]等方面取得了系列进展, 但这些方法依赖大量野外勘查与实验分析, 存在瓶颈, 成本高、周期

收稿日期 (Received date): 2024-10-17; 改回日期 (Accepted date): 2025-06-18

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (42471011); 安徽省自然科学基金 (2108085MD127)。[National Natural Science Foundation of China (42471011); Natural Science Foundation of Anhui Province (2108085MD127)]

作者简介 (Biography): 李伯祥 (2000-), 男, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 河流地貌与河流演化。[LI Boxiang (2000-), male, born in Yangzhou, Jiangsu Province, M. Sc. candidate, research on fluvial geomorphology and river evolution] E-mail: 1300257660@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 胡春生 (1978-), 男, 安徽无为, 博士, 副教授, 主要研究方向: 河流地貌、河流演化与第四纪环境。[HU Chunsheng (1978-), male, born in Wuwei, Anhui Province, Ph. D., associate professor, specialized in fluvial geomorphology, river evolution and quaternary environment] E-mail: huchsh03@ahnu.edu.cn

长,因此亟需发展一种快速高效的识别技术。

数字地貌分析为河流袭夺现象的识别提供了新思路。基于数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的分水岭迁移轨迹解译^[10]、河谷形态分析^[11]及河流裂点识别^[12-13],可在野外勘察与实验分析受限条件下实现河流袭夺现象的快速识别。

水力侵蚀模型(Stream-Power Incision Model, SPIM)是一种模拟河流侵蚀过程和地貌演化的数字地貌分析工具,其通过量化河道构造抬升-下切侵蚀的动力学平衡关系^[14],可找出河流地貌参数中的异常值。从该模型衍生出河道面积积分(χ 值)指数,其构建的高程-面积关系曲线(χ -plot)^[15]能够直观呈现分水岭迁移动态,精准定位可疑的河流袭夺区^[16-17]。当小流域内出现 χ 值差值变大的现象^[2]、存在多条支流汇流时^[18],该流域内河流袭夺发生的可能性较大。此外,SPIM模型中的河道陡峭指数 k_{sn} ,常用于对比分析不同河道的地貌变化特征,以评估河流的袭夺能力^[19]。而利用 k_{sn} 值在较大范围流域内分析河道剖面特征时,会因河道空间异质性较大导致应用局限^[20-21]。因此,通过集成 χ 值(分水岭迁移指示器)与 k_{sn} 值(河道溯源侵蚀势能标尺),利用高精度DEM开展数字地貌分析的方

法^[22],可构建河流袭夺现象的双参数识别框架。

江西庐山处于长江中游典型构造-气候耦合作用区,其亚热带季风气候条件下活跃的构造抬升与流水侵蚀作用,造就了高度动态的流域分水岭系统,为验证上述双参数识别框架适用性提供了理想样本。本研究基于庐山地区12.5 m分辨率的DEM数据,集成SPIM模型衍生的河道面积积分 χ 值与河道陡峭指数 k_{sn} 值,识别与验证庐山典型山地河流的河流袭夺现象,并评估该方法在复杂地貌背景下的适用性与识别效率。本研究所构建的双参数快速识别河流袭夺的技术流程,可为复杂地貌区的河流演化研究提供方法参考。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区域概况

庐山坐落于江西省九江市境内,北接长江、东临鄱阳湖,经纬度为29°26'N ~ 29°41'N、115°52'E ~ 116°8'E,主峰汉阳峰海拔为1474 m^[23]。庐山位于扬子板块东段,是一座呈NE—SW向的地垒式褶皱断块山,地层发育较齐全,山体褶皱、断裂较明显,具有短轴复背斜构造特征(图1)。研究区属于亚热带

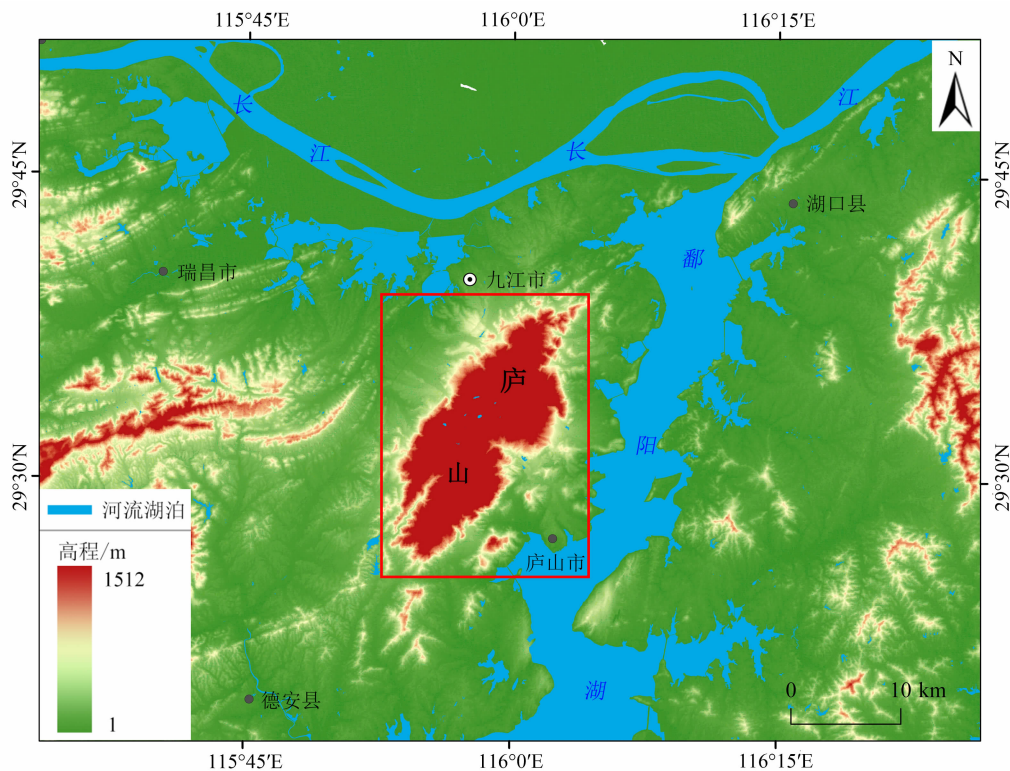


图1 研究区概况图

Fig.1 Overview of the study area

季风气候区,降水丰富,低海拔地区年均降水量约 1300 mm^[24],高海拔地区年均降水量最大可达约 1833.5 mm^[25-26]。

庐山地区河流较多,常循构造线发育,形成了密集分布的山地河流流域。流域内,干流多呈 NE 或 SW 流向,支流多呈 NW 或 SE 流向,组成了格子状或平行状的水网系统。该系统频繁受到构造运动与侵蚀基准面变化的影响,赋予了河流较强的溯源侵蚀能力,继而引发河流袭夺,导致流域形态极易改变。例如:长冲河支流在芦林湖袭夺了大校场河;锦绣谷河在如琴湖袭夺了西谷河^[27]。本研究拟以大校场流域、锦绣谷流域为研究样本,开展山地河流袭夺现象的快速识别研究。

1.2 流域和河网提取方法

DEM 数据是当前流域地貌学研究的重要数据源^[28],较高分辨率的 DEM 数据更加适用于面积较小流域的精细分析^[29-30]。本研究利用 12.5 m 较高分辨率的 DEM 数据提取庐山地区的栅格数据,并使用 ArcSWAT 模型提取大校场流域、锦绣谷流域及其内部河网,以研究庐山地区的典型河流袭夺现象

(图 2)。

1.3 χ 值和 k_{sn} 值计算方法

χ 值和 k_{sn} 值可利用 SPIM 模型计算^[26]。由于河流不断侵蚀河道,而构造运动又通过塑造地形改变河道高程,因此随着时间推移,流域形态和水系格局会发生不同程度的变化。SPIM 模型的公式表达为:

$$E = KA^m S^n \quad (1)$$

根据式(1)改写的运动波方程^[31-33]为:

$$\frac{\partial z(t,x)}{\partial t} = U(t,x) - KA^m \left[\frac{\partial z(t,x)}{\partial x} \right]^n \quad (2)$$

式中, E 为河道的下切侵蚀; K 为可侵蚀系数; A 为流域面积; m 为面积指数; S 为河道坡度; n 为坡度指数; z 为河道关于溯源侵蚀距离(x)和时间(t)的高程。

处于稳态的河道剖面(即河流的构造抬升与下切侵蚀处于平衡态),可以用河水动力方程表示,而其偏导数方程可简化为:

$$\left| \frac{\partial z}{\partial x} \right| = k_s A(x)^\theta \quad (3)$$

$$\theta = -\frac{m}{n} \quad (4)$$

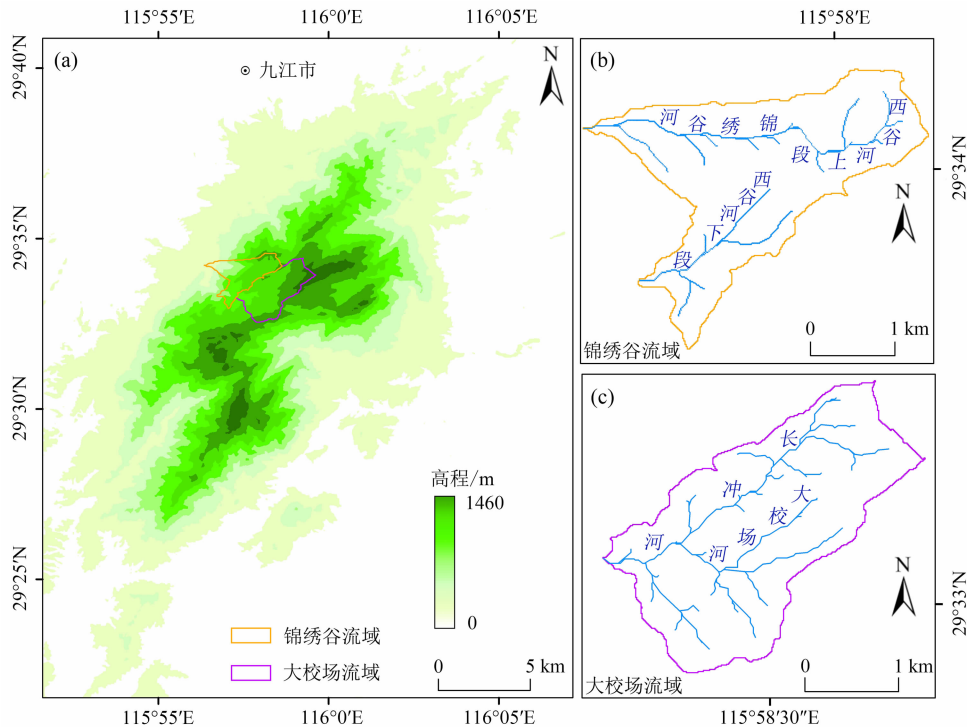


图 2 庐山大校场流域、锦绣谷流域位置及其内部河网:

(a) 流域位置;(b) 锦绣谷流域河网;(c) 大校场流域河网

Fig. 2 Location and river network of the Daxiaochanghe River basin and the Jinxiuguhe River basin in the Lushan Mountain:

(a) location of the river basins; (b) river network of the Jinxiuguhe River basin; (c) river network of the Daxiaochanghe River basin

$$k_s = \left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

式中, θ 为凹度; k_s 为陡峭指数。

基于式(3), 在河道上任意定义一点 x_b , 向河流源头方向积分, 得到该点关于河道纵向距离的积分方程式为:

$$z(x) = z(x_b) + \int_{x_b}^x \left(\frac{U(x)}{k(x) \cdot A(x)^m}\right)^{\frac{1}{n}} dx \quad (6)$$

在河流处于稳定状态下 (U, K 二参数恒定), 式(6)可简化为:

$$z(x) = z(x_b) + \left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \int_{x_b}^x \frac{dx}{A(x)^{\frac{m}{n}}} \quad (7)$$

为了创建在两条坐标轴上都有长度单位转换的剖面, 引入参考流域 A_0 (面积校准因子), 使上式中尾项的系数和被积项无量纲化。计算式(7)的解析解, 并利用积分法将该方程以一元方程的形式输出^[15,34], 可得:

$$z(x) = z_b + \left(\frac{U}{KA_0^m}\right)^{\frac{1}{n}} \chi \quad (8)$$

式中, χ 为流域面积关于高程的代数。将式(8)计算结果放入坐标系得到 $\chi-z$ 的关系图像, 即为 χ -plot (χ 图或 χ 值图)。该图通过解析解得到表达流域面积与河道高程关系的方程, 能够更加直观地对比分析河流地貌变化的前后形态。

此外, 当 θ 确定为某单一值 θ_{ref} (参考凹度值)

时, k_s 转变为 k_{sn} (标准陡峭指数)^[19]:

$$z(x) = z_b + \left(\frac{k_{sn}}{A^{\theta_{ref}}}\right)^{\frac{1}{n}} \chi \quad (9)$$

1.4 河流袭夺识别相关技术流程

基于 SPIM 模型参数 $\chi-k_{sn}$ 值识别河流袭夺现象, 首先需要确定计算该参数的 θ_{ref} 。 θ_{ref} 可防止同一流域同一河段分析结果出现较大差异, 对 $\chi-k_{sn}$ 值参数的计算有至关重要的影响, 因此 θ_{ref} 是进行河流袭夺识别之前必须确定的重要度量指标。不同 θ_{ref} 取值结果图像生成的图像 (χ -plot) 形态不同, 已有研究^[20-21,35] 表明其值多在 0.3 ~ 0.6 范围内波动, 可根据提取的大校场流域、锦绣谷流域以及其河网计算并确定。

确定 θ_{ref} 后, 使用 Topotoolbox^[36-37] 封装 χ 值、 k_{sn} 值的计算函数, 并生成流域的 χ 值和 k_{sn} 值分布图, 以便在流域内定位 χ 值相差较大和 k_{sn} 值异常的区域, 分别用以确定可疑袭夺区和可疑袭夺点。本研究参考文献^[38], 利用 Chipfiler 工具生成研究河道的纵剖面、 χ -plot、 k_{sn} 值拟合图, 从数值层面上开展剖面分析, 以标定具体袭夺点。本研究的技术流程如图 3 所示。

2 结果分析

2.1 流域 θ_{ref}

由于大校场流域和锦绣谷流域内河流较少, 基

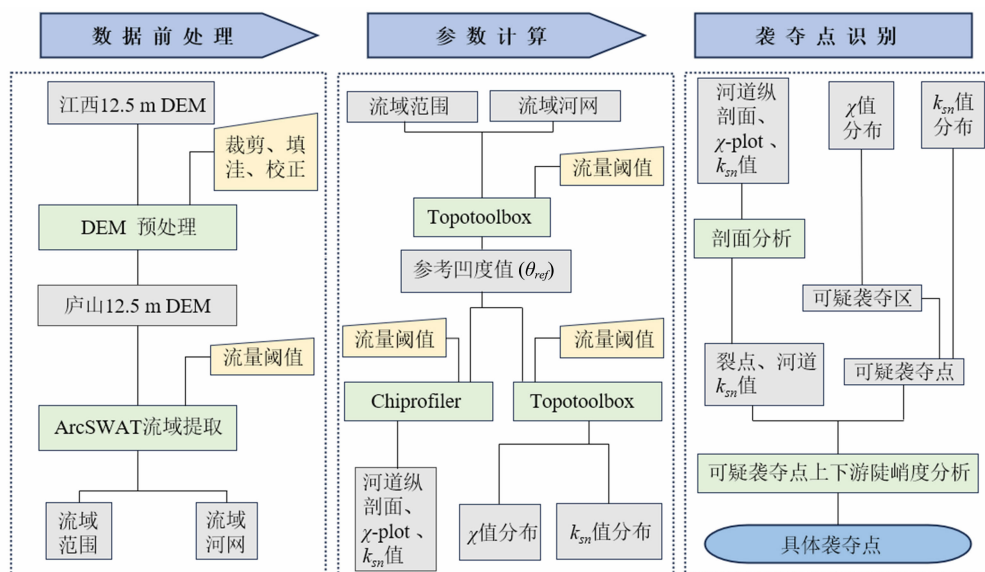


图 3 技术流程图

Fig. 3 Technique flow chart

于两流域内河道得到的 χ -plot 难以有效展示河道在庐山区域内的完整形态,本研究利用提取小流域所用的汇流累积量阈值 3000,并在 0.25 ~ 0.75 范围内以 0.1 为等间隔取 6 个 θ_{ref} ,进而生成庐山区域所有河道的 χ -plot 的形态图(图 4)。当 θ_{ref} 取值为 0.25、0.35 时,河道图像呈先平缓后陡峭的凹形轮廓(图 4a、4b);当 θ_{ref} 取值为 0.45 及以上时,河道图像呈先陡峭后平缓的凸型轮廓,且变化幅度随 θ_{ref} 取值增加而增加,同时在对应该 θ_{ref} 取值下识别到的河流数量亦随其值增加而增加(图 4c ~ 4f)。

河道的离散化可以用图像最大高程与最大 χ 值之间的比值反映,其值越小则图像的离散化越大。上述比值随 θ_{ref} 取值增大,由约 127 增加至约 140(图 4a、4c),随后随 θ_{ref} 取值增大而逐渐减小直至约 100(图 4d、4f),图像的离散化呈现先变小后变大的特征,离散度最多降低约 28.57%。

此外,河道分布的对称性也有一定差异,图像越向 θ_{ref} 取值区间的中间值靠近对称性越高,且能够使 χ -plot 尾端呈现关于理想河道剖面对称分布的形态特征(图 4c、4d)。

相关研究^[17]认为,使 χ -plot 呈现凸形轮廓、图像离散化最小且对称分布的 θ_{ref} 能更好地反映地貌的变化,而通过目视若难以判别图像之间的差异,则

取离散化较小且 θ_{ref} 取值更高的图像。通过目视判别,当 θ_{ref} 取值为 0.45 或 0.55 时更有优势。但当 θ_{ref} 取值为 0.45 时反映 χ -plot 离散化的比值可达 140,相较于 θ_{ref} 取值为 0.55 时离散化的比值 127 更大,河道图像的离散度降低约 10.24%。因此本研究认为,当 θ_{ref} 取值为 0.45 更适合开展庐山河流袭夺现象研究。

2.2 可疑河流袭夺区、袭夺点识别

由图 5a 可知,大校场流域内 χ 值呈现东高西低、北高南低的分布格局,大致契合流域海拔由高向低变化的趋势。流域内,长冲河 χ 值在 NE—SW 向逐渐降低,大校场河在流经出山口时急转 NW 向汇入长冲河,在该路径中河流的 χ 值呈现线性变化的特征。长冲河的河谷和大校场河上段河谷大致平行分布,在平行段大校场河的 χ 值高于长冲河;若将大校场河沿原始河谷方向延伸,其 χ 值亦高于长冲河,但在大校场河跨越河谷段 χ 值急剧降低,并逐渐接近长冲河下段的 χ 值。由图 5b 可知,锦绣谷流域内 χ 值呈现东高西低、北高南低的分布格局。西谷河下段的 χ 值在 NE—SW 向逐渐降低,变化程度较小;西谷河上段流经如琴湖异常转向 WN 方向跨越分水岭并汇入锦绣谷河,该路径中河流的 χ 值呈现线性降低的特征。此外,由于分流于两处河谷的西谷河

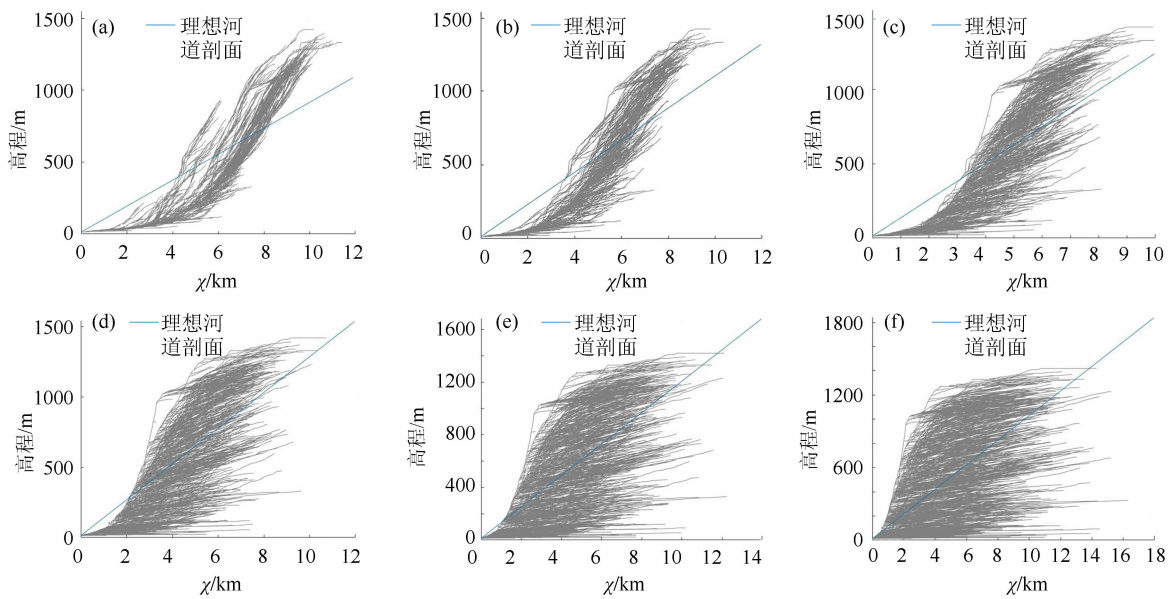


图 4 θ_{ref} 为 0.25 ~ 0.75 的 χ -plot 形态:

(a) $\theta_{ref} = 0.25$; (b) $\theta_{ref} = 0.35$; (c) $\theta_{ref} = 0.45$; (d) $\theta_{ref} = 0.55$; (e) $\theta_{ref} = 0.65$; (f) $\theta_{ref} = 0.75$

Fig. 4 Shapes of χ -plot based on θ_{ref} values between 0.25 and 0.75:

(a) $\theta_{ref} = 0.25$; (b) $\theta_{ref} = 0.35$; (c) $\theta_{ref} = 0.45$; (d) $\theta_{ref} = 0.55$; (e) $\theta_{ref} = 0.65$; (f) $\theta_{ref} = 0.75$

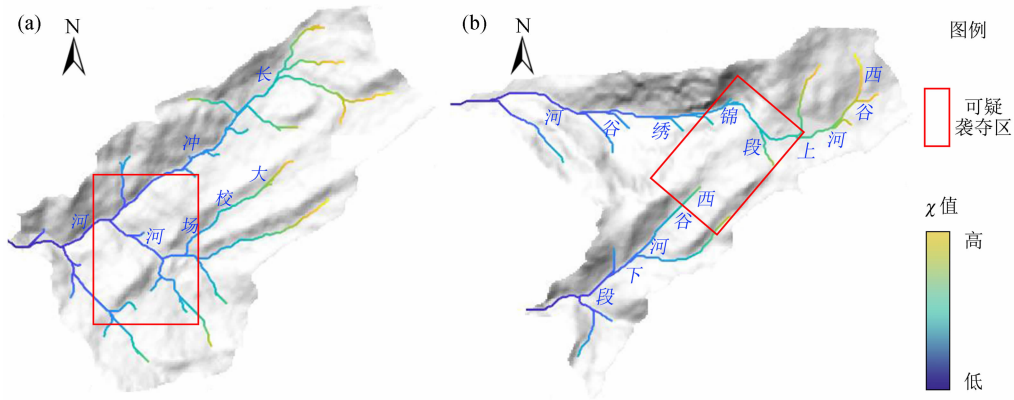


图5 χ 值计算结果:(a)大校场流域;(b)锦绣谷流域

Fig. 5 Calculation results of χ value: (a) the Daxiaochanghe River basin; (b) the Jinxiuguhe River basin

下段和锦绣谷河两河段的 χ 值差极小,而锦绣谷河更靠近西谷河上段,如琴湖附近发生河流袭夺的可能性较大。根据上述两个流域 χ 值的分析结果,识别出2处可疑的河流袭夺区域,即芦林湖附近、如琴湖附近。

由图6a可知,大校场河与长冲河的汇入点附近的三条河段 k_{sn} 值相较其他河段异常偏高,河道陡峭度变化幅度大。基于该特征沿河流流向在大校场流域中共找到3处 k_{sn} 值异常变化点,标记为点A、点B、点C。由图6b可知,西谷河上段和锦绣谷河 k_{sn} 值差异极大:西谷河上段的 k_{sn} 值变化幅度较小,而锦绣谷河的 k_{sn} 值一直处于高值,直至流域边缘才有所降低。西谷河下段的 k_{sn} 值变化也较小,呈现与西谷河上段的 k_{sn} 值变化趋势一致的特征。基于该特征,在锦绣谷流域内找到1处 k_{sn} 值异常变化点,标记为点D。根据上述两流域 k_{sn} 值的分析结果,找到

4处可疑袭夺点:大校场流域存在3处、锦绣谷流域存在1处。

2.3 河流袭夺点确定

河流溯源侵蚀能力的强弱是河流袭夺发生的重要原因之一,而通过河道剖面与 χ -plot进一步找到河道裂点,并研究其上下游的陡峭度差异,能有效反映河流溯源侵蚀能力。因此 k_{sn} 值的差异是河流袭夺发生的有力证明,且差异变化最大的点基本是河流袭夺点。

2.3.1 大校场流域河流袭夺点确定

由图7a、8a可知,在长冲河纵剖面上存在2处较为明显的裂点,大校场河纵剖面上存在1处明显裂点,即图6a中的可疑袭夺点,用点A、点B、点C表示。三处可疑袭夺点将两条河流分为5个河段,通过高程对比发现大校场河汇入长冲河的河段,在约0.5 km距离内海拔降低约100 m,河流比降远大

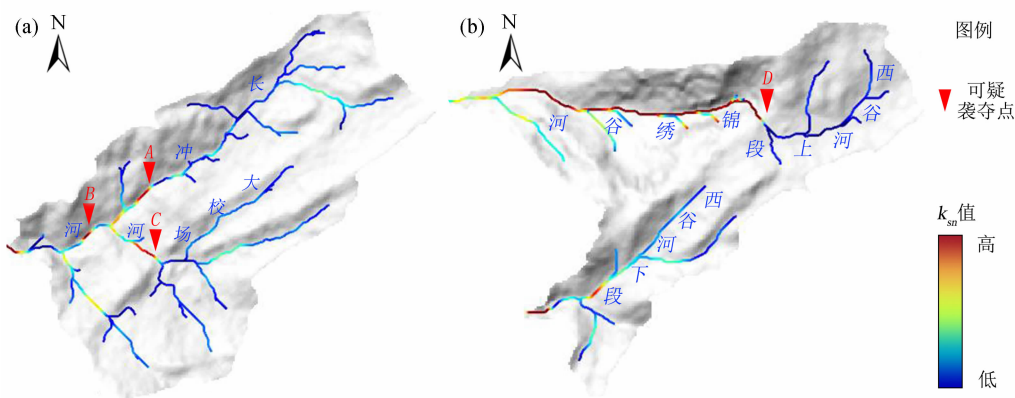


图6 k_{sn} 值计算结果:(a)大校场流域;(b)锦绣谷流域

Fig. 6 Calculation results of k_{sn} value: (a) the Daxiaochanghe River basin; (b) the Jinxiuguhe River basin

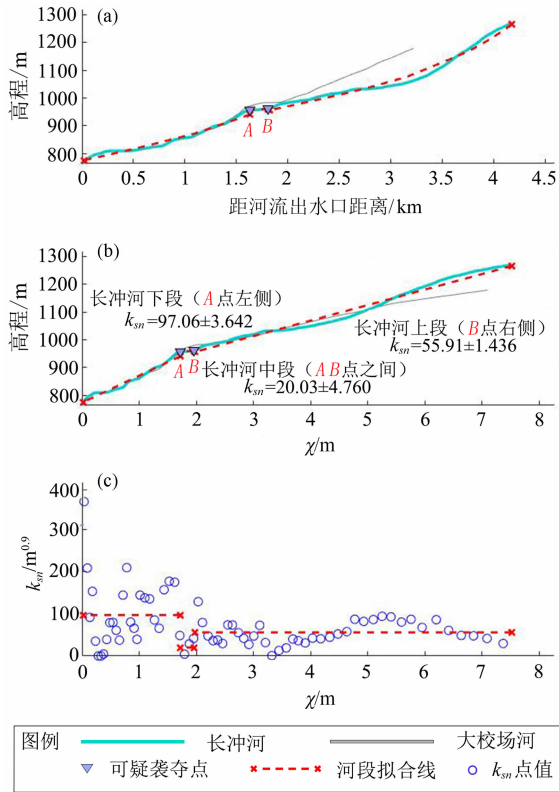


图7 长冲河纵剖面 χ 值、 k_{sn} 值分布:

(a) 纵剖面; (b) χ -plot; (c) k_{sn} 值分布

Fig. 7 Distribution of χ and k_{sn} values in longitudinal profile of the Changchong River;

(a) longitudinal profile; (b) χ -plot; (c) k_{sn} value's distribution

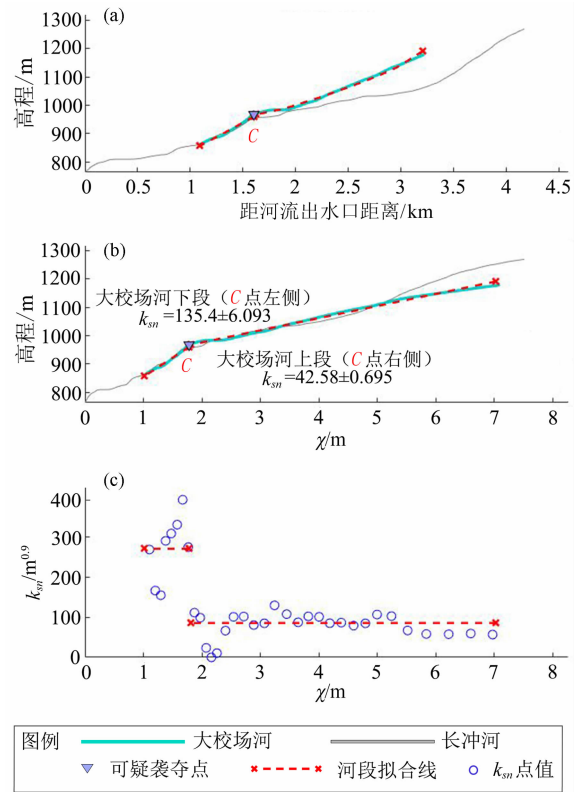


图8 大校场河纵剖面 χ 值、 k_{sn} 值分布:

(a) 纵剖面; (b) χ -plot; (c) k_{sn} 值分布

Fig. 8 Distribution of χ and k_{sn} values in longitudinal profile of the Daxiaochanghe River;

(a) longitudinal profile; (b) χ -plot; (c) k_{sn} value's distribution

于两条河流的其他河段。

由图 7b、8b 可知,长冲河上段、中段、下段的 k_{sn} 值分别约为 $55.91 \text{ m}^{0.9}$ 、 $20.03 \text{ m}^{0.9}$ 、 $97.06 \text{ m}^{0.9}$;大校场河下段、上段 k_{sn} 值分别约为 $42.48 \text{ m}^{0.9}$ 、 $135.4 \text{ m}^{0.9}$ 。分析可疑袭夺点上下游河段的 k_{sn} 值差值,长冲河在可疑袭夺点 A 处的差值约为 $77.03 \text{ m}^{0.9}$,大校场河在可疑袭夺点 C 处的差值约为 $92.92 \text{ m}^{0.9}$,可疑袭夺点 C 处上下游河段的 k_{sn} 值变化幅度远大于同一流域其他河道。

由图 7c、8c 可知,两条河流各个河段的 k_{sn} 值均呈现下段高于本河流其他河段的特征;并且在长校场河汇入长冲河的河段,其 k_{sn} 差值远高于其他河段 k_{sn} 值之间差值。

根据上述分析,大校场河汇入长冲河的河段拥有更大比降、更高的 k_{sn} 值且可与长冲河高 k_{sn} 值的河段顺接,因此溯源侵蚀能力更强,可以改变原始的河流走向,进而确定可疑袭夺点 C 为具体袭夺点。此

处河流发生袭夺后,袭夺点逐渐演变为现今的芦林湖,而原始大校场河的下游则因缺少补给水源,成为一条断头的支流河。

2.3.2 锦绣谷流域河流袭夺点确定

由图 9a、10a 可知,在袭夺河(西谷河上段和锦绣谷河)纵剖面上存在 1 处较为明显的裂点,即图 6b 中的可疑袭夺点,用点 D 表示。通过高程对比发现袭夺河在距河流出水口约 2.5 km 处的海拔和被袭夺河(西谷河下段)上游相近,随后两河段在相同溯源距离处的高程差稳定在约 400 m,因此本流域内河流袭夺现象的识别只需分析高程在约 600 m 以上的河段。

由图 9b、10b 可知,袭夺河上段(西谷河上段)、下段(锦绣谷河)的 k_{sn} 值分别约为 $9.558 \text{ m}^{0.9}$ 、 $278 \text{ m}^{0.9}$;被袭夺河的 k_{sn} 值约为 $51.8 \text{ m}^{0.9}$ 。分析可疑袭夺点上下游河段的 k_{sn} 值差值,可疑袭夺点 D 上下游河段的 k_{sn} 值差值约为 $269.442 \text{ m}^{0.9}$,远大于同

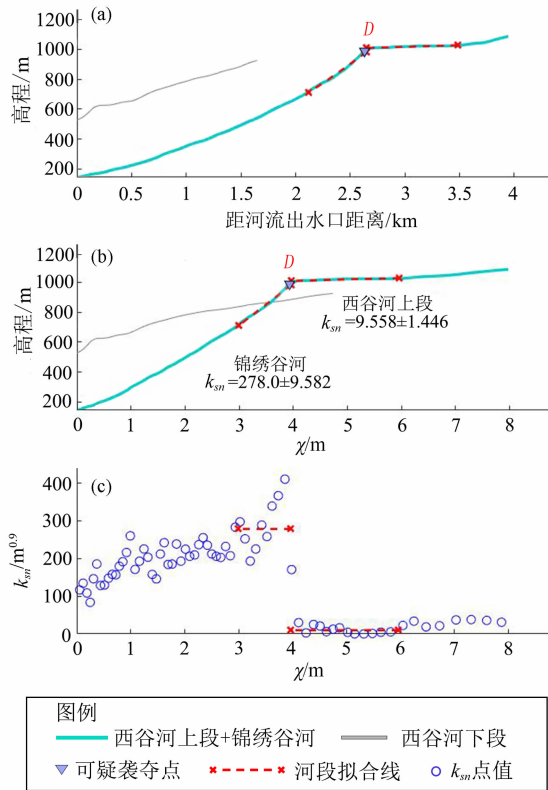


图9 袭夺河(西谷河上段+锦绣谷河)纵剖面 χ 值、 k_{sn} 值分布:

(a)纵剖面;(b) χ -plot;(c) k_{sn} 值分布

Fig.9 Distribution of χ and k_{sn} values in longitudinal profile of capturing river (the Jinxiuguhe River and the upper section of the Xigu River):

(a) longitudinal profile; (b) χ -plot;
(c) k_{sn} value's distribution

一流域的其他河道。

由图9c、10c可知,袭夺河上段和被袭夺河在过去为同一河谷内的一条完整河流,且 k_{sn} 值自上游向下游逐渐变大,导致了袭夺河上段发生异常转向。

根据上述分析,袭夺河下段(锦绣谷河)比降更大、 k_{sn} 值更高,拥有更强的溯源侵蚀能力,可以改变原始的河流走向,进而确定点D为具体袭夺点。此处河流发生袭夺后,袭夺点逐渐演变为现今的如琴湖,而原始西谷河下段则因缺少补给水源,成为一条断头河。

3 讨论

河流袭夺是反演构造-气候-地表过程耦合的重要切入点,往往会引发分水岭迁移和河道位移。利用基于SPIM模型确定的 θ_{ref} 值构建 χ - k_{sn} 值参数,其

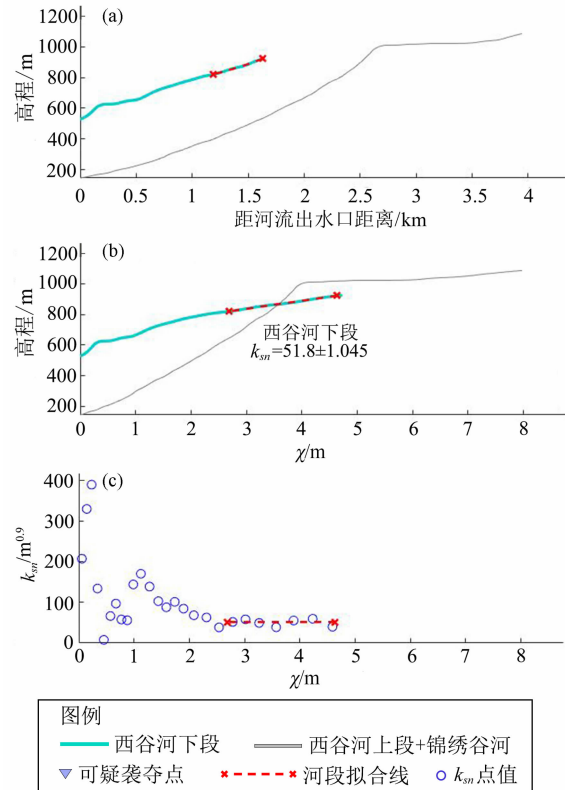


图10 被袭夺河(西谷河下段)纵剖面 χ 值、 k_{sn} 值分布:

(a)纵剖面;(b) χ -plot;(c) k_{sn} 值分布

Fig.10 Distribution of χ and k_{sn} values in longitudinal profile of pirated river (the lower section of the Xigu River):

(a) longitudinal profile; (b) χ -plot;
(c) k_{sn} value's distribution

中 χ 值的差值能够帮助定位可疑袭夺区,而 k_{sn} 值的差值可帮助标定可疑袭夺点,从而有效地识别到河流袭夺现象。本研究基于上述方法,识别到了在庐山大校场流域、锦绣谷流域内发生的河流袭夺现象,并进一步定位到了具体的河流袭夺点。

在大校场流域内,大校场河和长冲河之间 χ 值差值相较于其他河道更大,能够帮助锁定可疑袭夺区;结合 k_{sn} 值差值和河道裂点分析,能够在可疑袭夺区内标定3处可疑袭夺点,而位于芦林湖大坝附近的可疑袭夺点上下游 k_{sn} 值差值异常偏高,可达约 $92.92 \text{ m}^{0.9}$,是流域内其他河段的均值约2.5倍,因此可识别为大校场流域河流袭夺点。在锦绣谷流域内西谷河上段异常转向跨越分水岭汇入锦绣谷河过程中, χ 值的改变相较顺接现有西谷河下段时更大,能够帮助锁定可疑袭夺区;结合 k_{sn} 值差值和河道裂点分析标记的1处可疑袭夺点上下游的 k_{sn} 值差值

异常偏高,可达约 $269.44 \text{ m}^{0.9}$,超过流域内其他河段的均值约 5.45 倍,因此该点可识别为锦绣谷流域河流袭夺点。

计算现有河道参数 $\chi-k_m$,能够较为准确地反映河流袭夺的过程(图 11)。大校场流域河流袭夺发生前,大校场河与长冲河大致呈平行分布。随着长冲河下段溯源侵蚀能力增强并超过大校场河下段,大校场河中部河流异常转向并切穿分水岭汇入长冲河下段,并于异常转向处形成袭夺湾,后随修建庐林大桥拦水筑坝形成芦林湖,而原始大校场河下段的上游被袭夺后,河道缩短成为一条断头河。类似大校场流域,锦绣谷流域内河流袭夺发生前,锦绣谷河与西谷河亦大致呈平行分布。由于锦绣谷河的溯源侵蚀能力大于西谷河下段的溯源侵蚀能力,西谷河上段异常转向被切穿分水岭的锦绣谷河袭夺,西谷河下段因此成为断头河,并于河流异常转向处形成一处深谷,此后经由人工修筑堤坝蓄水形成

如今的如琴湖。

综上所述,本研究所构建的双参数快速识别河流袭夺现象的技术流程,相较传统研究方法成本低、周期短,识别结果与区域地质记录及历史水文记录高度吻合,可达到快速高效地识别河流袭夺现象的效果。

受到 θ_{ref} 取值的影响,生成河道 χ -plot 的坐标轴单元长度不一,无法通过目视识别的方法来判断 χ -plot 的离散度。因此本研究利用 χ -plot 最大高程和最大 χ 值对应点的近似坐标与原点坐标(0,0)连线求导的方法,能够在一定程度上给出离散度的量化表达以便对比分析,后续可深入研究图像离散度的精细化识别方法。此外,在 DEM 数据的精度、研究方法的普适性等问题限制下,本文后续仍有深入研究的价值,探索出更加便捷的河流袭夺现象快速识别方法。

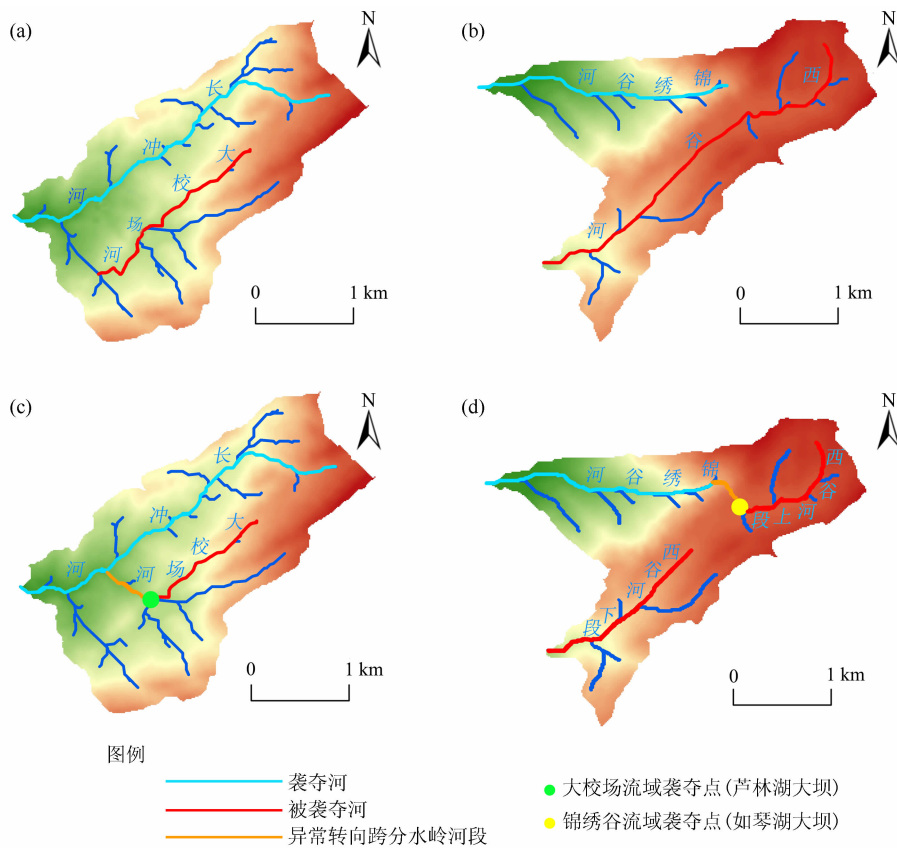


图 11 河流袭夺过程:

(a) 大校场流域(袭夺前);(b) 锦绣谷流域(袭夺前);(c) 大校场流域(袭夺后);(d) 大校场流域(袭夺后)

Fig. 11 River capture processes:

(a) the Daxiaochanghe River basin before river capture; (b) the Jinxiuguhe River basin before river capture;

(c) the Daxiaochanghe River basin after river capture; (d) the Jinxiuguhe River basin after river capture

4 结 论

(1)取6个等间距 θ_{ref} 值生成庐山地区内河流的 χ -plot,更大的 θ_{ref} 值生成 χ -plot的凸型轮廓更明显,能够识别到更多的河流;而适中的 θ_{ref} 值生成的 χ -plot则更加对称,因此 θ_{ref} 取值为0.45和0.55更佳。利用相同高程与该高程下河道 χ 值对应的比值反映 χ -plot的离散度,相较其他值, θ_{ref} 取值为0.45时离散度可降低约28.57%。因此选用0.45作为 θ_{ref} 更加适合庐山山地河流袭夺识别分析。

(2)大校场流域和锦绣谷流域的 χ 值大致呈现东高西低、南高北低的分布格局。大校场流域内大校场河、长冲河平行段之间河道的 χ 值差异较大;锦绣谷流域内西谷河上段汇入锦绣谷河附近与西谷河下段之间 χ 值差异较大,表明这两处河流袭夺现象发生的可能性较大,可识别为可疑袭夺区。

(3)大校场流域可疑袭夺区内存在3处 k_{sn} 值异常变化的可疑袭夺点,其中大校场河芦林湖大坝附近可疑袭夺点上下游河段 k_{sn} 值差值异常偏高,可达约 $92.92\text{ m}^{0.9}$,是流域内其他河段均值约2.5倍;锦绣谷流域可疑袭夺区内存在1处 k_{sn} 值异常变化的可疑袭夺点,位于如琴湖大坝附近,该点上下游河段 k_{sn} 值差值异常偏高,可达约 $269.44\text{ m}^{0.9}$,是流域内其他河段均值约5.45倍。由此可确定大校场流域的具体袭夺点位于芦林湖大坝、锦绣谷流域的具体袭夺点位于如琴湖大坝。

(4)本研究揭示了河流袭夺发生的过程。大校场流域内长冲河下段的跨分水岭支流(现大校场河下段)在芦林湖大坝袭夺了大校场河上段,原始大校场河下段成为断头河;锦绣谷流域内锦绣谷河跨越分水岭在如琴湖大坝袭夺了西谷河上段,西谷河下段成为断头河,且两处河流袭夺现象均能高度吻合区域地质记录和历史水文记录。

参考文献 (References)

- [1] 宋春青. 中国中学教学百科全书·地理卷[M]. 沈阳: 沈阳出版社, 1990: 92. [SONG Chunqing. Encyclopedia of middle school teaching in China·Geography volume [M]. Shenyang: Shenyang Press, 1990: 92]
- [2] VACHERAT A, BONNET S, MOUTHEREAU F. Drainage reorganization and divide migration induced by the excavation of the Ebro basin (NE Spain) [J]. Earth Surface Dynamics, 2018, 6 (2): 369–387. DOI: 10.5194/esurf-6-369-2018
- [3] 于广科, 褚忠信, 朱晓洁, 等. 河流袭夺地质遗迹与资源评价——以山东沂源柴汶河上游为例[J]. 海洋湖沼通报(中英文), 2024, 46(6): 131–138. [YU Guangke, CHU Zhongxin, ZHU Xiaojie, et al. Geological relics and resource evaluation of river capture: Take the upper reaches of the Chaiwen river in Yiyuan, Shandong province as an example [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2024, 46(6): 131–138] DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2024.06.017
- [4] NGAMA E M, SABABA E, BAYIGA E C, et al. Mineralogical and geochemical characterization of the unconsolidated sands from the Mefou River terrace, Yaoundé area, Southern Cameroon [J]. Journal of African Earth Sciences, 2019, 159: 103570. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2019.103570
- [5] KONOPLEVA E S, BOLOTOV I N, VIKHREV I V, et al. A freshwater mussel species reflects a Miocene stream capture between the Mekong Basin and East Asian rivers [J]. Zoosystematics and Evolution, 2023, 99(1): 29–43. DOI: 10.3897/zse.99.90784
- [6] REPKIN R V, LYUBESHEVA A V, PRONINA E L. Basin approach in geomorphological studies of Klyazma River basin structure [C]//Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” (ISEES 2018), November 11–16, 2018, Grozny, Russia. DOI: 10.2991/isees-18.2018.99
- [7] BENDER A M, LEASE R O, CORBETT L B, et al. Late Cenozoic climate change paces landscape adjustments to Yukong River capture [J]. Nature Geoscience, 2020, 13(8): 571–575. DOI: 10.1038/s41561-020-0611-4
- [8] 吴鹏, 谢远云, 康春国, 等. 早更新世晚期松花江水系袭夺: 地球化学和沉积学记录[J]. 地质学报, 2020, 94(10): 3144–3160. [WU Peng, XIE Yuanyun, KANG Chunguo, et al. The capture of the Songhua River system in the late Early Pleistocene: Geochemical and sedimentological records [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(10): 3144–3160] DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020037
- [9] 王晶, 徐亚东, 林晓, 等. 湘江沟头地表和深部地质约束的水系侵蚀能力差异及袭夺预测分析[J]. 地质科技通报, 2022, 41(4): 234–240. [WANG Jing, XU Yadong, LIN Xiao, et al. Analysis on difference of erosion capacity and river capture prediction in the head of Xiangjiang tributary constrained by surface and deep geological information [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(4): 234–240] DOI: 10.19509/j.cnki.dzqk.2022.0127
- [10] 曾洵. 分水岭迁移对构造活动的响应研究——以龙门山、阿尔金山和秦岭为例[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2023: 18. [ZENG Xun. Drainage divide migration in response to tectonic activities: Examples from Longmen Shan, Altyn Tagh, and Qinling mountains [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2023: 18] DOI: 10.27489/d.cnki.gzdds.2023.

- 000011
- [11] XIE Wanting, WANG Xianyan, ZHANG Hanzhi, et al. Drainage evolution in intermontane basins at the Qinling-Daba Mountains [J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, **64** (11): 1949 – 1968. DOI: 10.1007/s11430-020-9820-y
- [12] MA Qiyuan, LI Anbo, WANG Ping. Automatic detection of river capture based on planform pattern and Chi-plot of the stream network [J]. *Geomorphology*, 2023, **425**: 108587. DOI: 10.1016/J.GEOMORPH.2023.108587
- [13] 何成邦, 胡春生, 田景梅, 等. 大别山东南缘河流裂点成因及其地貌演化意义[J]. *山地学报*, 2023, **41** (3): 322 – 334. [HE Chengbang, HU Chunsheng, TIAN Jingmei, et al. Origin and geomorphological evolution of river knickpoints in the southeast edge of the Dabie Mountains, China [J]. *Mountain Research*, 2023, **41** (3): 322 – 334] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000751
- [14] FLINT J J. Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge [J]. *Water Resources Research*, 1974, **10** (5): 969 – 973. DOI: 10.1029/WR010i005p00969
- [15] PERRON J T, ROYDEN L. An integral approach to bedrock river profile analysis [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, **38** (6): 570 – 576. DOI: 10.1002/esp.3302
- [16] FAN Niannian, CHU Zhongxin, JIANG Luguang, et al. Abrupt drainage basin reorganization following a Pleistocene river capture [J]. *Nature Communications*, 2018, **9** (1): 3756. DOI: 10.1038/s41467-018-06238-6
- [17] WILLETT S D, MCCOY S W, PERRON J T, et al. Dynamic reorganization of river basins [J]. *Science*, 2014, **343** (6175): 1248765. DOI: 10.1126/science.124876
- [18] YANG Rong, WILLETT S D, GOREN L. In situ low-relief landscape formation as a result of river network disruption [J]. *Nature*, 2015, **520** (7548): 526 – 529. DOI: 10.1038/nature14354
- [19] GODARD V, HIPPOLYTE J C, CUSHING E, et al. Hillslope denudation and morphologic response to a rock uplift gradient [J]. *Earth Surface Dynamics*, 2020, **8** (2): 221 – 243. DOI: 10.5194/esurf-8-221-2020
- [20] WOBUS C, WHIPPLE K X, KIRBY E, et al. Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls [J]. *Geological Society of America Special Paper*, 2006, **398** (4): 55 – 74. DOI: 10.1130/2006.2398(04)
- [21] KIRBY E, WHIPPLE K X, TANG Wenqing, et al. Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from bedrock channel longitudinal profiles [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, **108** (B4): 2217. DOI: 10.1029/2001JB000861
- [22] MONTGOMERY D R, FOUFOULA - GEORGIU E. Channel network source representation using digital elevation models [J]. *Water Resources Research*, 1993, **29** (12): 3925 – 3934. DOI: 10.1029/93WR02463
- [23] 施雅风, 崔之久, 李吉均, 等. 中国东部第四纪冰川与环境问题[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 133 – 137. [SHI Yafeng, CUI Zhijiu, LI Jijun, et al. The problems of quaternary glacier and environment in the east China [M]. Beijing: Science Press, 1989: 133 – 137]
- [24] 张根寿, 林爱文, 王新生, 等. 庐山地理调查[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004: 7. [ZHANG Genshou, LIN Aiwen, WANG Xinsheng, et al. Geographic survey of Mount. Lu [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004: 7]
- [25] 杨俊. 基于 GIS 和 RS 的庐山风景区山洪灾害调查与风险区划研究[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2018: 7 – 8. [YANG Jun. Investigation and risk division of mountain torrents disaster study based on GIS and RS in Mount. Lu scenic area [D]. Nanchang: Nanchang Institute of Technology, 2018: 7 – 8]
- [26] 江辉, 杨俊, 詹旺林, 等. 基于 GIS 的山地旅游景区山洪灾害风险区划——以庐山风景区为例[J]. *江西水利科技*, 2021, **47** (3): 190 – 198. [JIANG Hui, YANG Jun, ZHAN Wanglin, et al. Regionalization of mountain flood disaster risk for mountain tourism destination based on GIS: A case of Lushan Mountain [J]. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2021, **47** (3): 190 – 198] DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2021.03-07
- [27] 陶佳. 基于 DEM 的庐山河流袭夺演变研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013: 25 – 45. [TAO Jia. Research of Lushan river capture based on DEM [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013: 25 – 45]
- [28] 严步青, 毛成阳, 龚康, 等. 基于 DEM 的高原湖泊班公湖流域数字河网提取分析[J]. *地理空间信息*, 2023, **21** (12): 97 – 99. [YAN Buqing, MAO Chengyang, GONG Kang, et al. Extraction analysis of digital river network in plateau Pangong Lake watershed based on DEM [J]. *Geospatial Information*, 2023, **21** (12): 97 – 99] DOI: 10.3969/j.issn.1672-4623.2023.12.023
- [29] 宋瑞明, 宁亚伟, 李敬茹. 基于 DEM 的中小流域数字河网提取与分析[J]. *中国水利*, 2022 (12): 61 – 64. [SONG Ruiming, NING Yawei, LI Jingru. DEM-based extraction and analysis of digital river network in small and medium-sized basins [J]. *China Water Resources*, 2022 (12): 61 – 64] DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2022.12.033
- [30] 何成邦, 胡春生, 赵婷婷, 等. DEM 分辨率对山地河流形态提取的影响[J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2023, **46** (6): 555 – 563. [HE Chengbang, HU Chunsheng, ZHAO Tingting, et al. Effect of DEM resolution on morphology extraction of mountain rivers [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2023, **46** (6): 555 – 563] DOI: 10.14182/J.cnki.1001-2443.2023.06.008
- [31] HOWARD A D, KERBY G. Channel changes in badlands [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1983, **94** (6): 739 – 752. DOI: 10.1130/0016-7606(1983)94<739:CCIB>2.0.CO;2

- [32] WHIPPLE K X, TUCKER G E. Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, **104**(B8): 17661–17674. DOI: 10.1029/1999JB900120
- [33] KIRBY E, WHIPPLE K X. Expression of active tectonics in erosional landscapes [J]. *Journal of Structural Geology*, 2012, **44**: 54–75. DOI: 10.1016/j.jsg.2012.07.009
- [34] LI Zhengchen, WANG Xianyan, YU Yang, et al. The impacts of base level and lithology on fluvial geomorphic evolution at the tectonically active Laohu and Hasi Mountains, northeastern Tibetan Plateau [J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, **64**(6): 906–919. DOI: 10.1007/s11430-020-9743-1
- [35] WANG Yizhou, ZHENG Dewen, ZHANG Huiping. The methods and program implementation for river longitudinal profile analysis—RiverProAnalysis, a set of open-source functions based on the Matlab platform [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, **65**(9): 1788–1809, DOI: 10.1007/s11430-021-9938-x
- [36] SCHWANGHART W, KUHN N J. TopoToolbox: A set of Matlab functions for topographic analysis [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, **25**(6): 770–781. DOI: 10.1016/j.envsoft.2009.12.002
- [37] SCHWANGHART W, SCHERLER D. Short communication: TopoToolbox 2-MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in earth surface sciences [J]. *Earth Surface Dynamics*, 2018, **2**(1): 1–7. DOI: 10.5194/esurf-2-1-2014
- [38] GALLEN S F, WEGMANN K W. River profile response to normal fault growth and linkage: An example from the Hellenic forearc of south-central Crete, Greece [J]. *Earth Surface Dynamics*, 2017, **5**(1): 161–186. DOI: 10.5194/esurf-5-161-2017

Rapid Identification for River Capture Phenomena Based on Integrated Analysis of SPIM Model Parameters χ - k_{sn} Values: A Case Study of Typical Mountain Rivers in the Lushan Mountain, Jiangxi Province, China

LI Boxiang, HU Chunsheng*, HE Chengbang, GAO Yun, LIU Wanting

(a. School of Geography and Tourism; b. Anhui Provincial Key Laboratory of Earth Surface Processes and Regional Response in the Yangtze-Huaihe River Basin, Anhui Normal University, Wuhu 241002, Anhui, China)

Abstract: River capture is a critical geomorphic carrier revealing tectonic-climate-surface process coupling. Recognition of river capture traditionally requires field surveys and laboratory works, which are costly and time-consuming, necessitating developing high-efficiency identification techniques.

The Lushan Mountain in Jiangxi Province of China, situating in the active tectonic-climate coupling zone of the middle reaches of the Yangtze River, features dense river networks and erosion-base level changes influenced frequently by tectonic movements, providing rich samples for case study of river capture.

In this study, it developed an efficient identification method by integrating two parameters, the channel-integrated χ index (integral of drainage area) and the normalized channel steepness index (k_{sn}), which derived from Stream Power Incision Model (SPIM), using 12.5 m resolution DEM data. Verification was conducted in two typical basins—the Daxiaochanghe River basin and the Jinxiuguhe River basin in the Lushan Mountain area to evaluate applicability and recognition efficiency, particularly in complex geomorphic settings. It has following findings as listed as below.

(1) The χ - k_{sn} integration method achieved high efficiency and reliability in river capture identification, validated against regional geological records.

(2) At a reference concavity (θ_{ref}) of 0.45, χ -plots (elevation-area relationship) exhibited optimal symmetry (scatter reduced by 28.57%) and convexity, enhancing identification sensitivity in steep mountainous rivers.

(3) χ anomalies indicated two potential capture zones in the Daxiaochanghe River basin (the mid-lower reaches of the Daxiaochanghe River and the Changchong River) and the Jinxiuguhe River basin (the upper Xigu River and the Jinxiuguhe River mainstream). k_{sn} peaks further located the two capture points in the vicinity of the Lulin Dam ($k_{sn} = 92.92 \text{ m}^{0.9}$, ~ 2.5 times higher than basin averages) and the Ruqin Dam ($k_{sn} = 269.44 \text{ m}^{0.9}$, ~ 5.45 times higher than basin averages), indicating intense headward erosion driving river capture development.

This χ - k_{sn} integration analysis framework provides a quantifiable, scalable tool for rapidly decoding complex fluvial evolution, offering significant methodological value for advancing research on tectonic-geomorphic-climatic coupling mechanisms.

Key words: river capture; SPIM; χ index; k_{sn} index; the Lushan Mountain

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)