

引用格式：顾畛逵，姚鑫，李凌婧，等，2023. 河流功率梯度在泥石流空间易发程度调查中的应用：以金沙江流域为例 [J]. 地质力学学报, 29 (1) : 87–98. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2022022](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2022022)

Citation: GU Z K, YAO X, LI L J, et al., 2023. Applying stream power gradient in the investigation on spatial susceptibility of debris flow: A case of the Jinsha River Basin, China [J]. Journal of Geomechanics, 29 (1) : 87–98. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2022022](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2022022)

河流功率梯度在泥石流空间易发程度调查中的应用：以金沙江流域为例

顾畛逵^{1,2,3}, 姚 鑫^{1,2,3}, 李凌婧^{1,2,3}, 陶 涛^{1,2,3,4}
GU Zhenkui^{1,2,3}, YAO Xin^{1,2,3}, LI Lingjing^{1,2,3}, TAO Tao^{1,2,3,4}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
 2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
 3. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100083;
 4. 中国地质大学(武汉), 工程学院, 湖北 武汉 430074
1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*;
 2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China*;
 3. *Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100083, China*;
 4. *Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China*

Applying stream power gradient in the investigation on spatial susceptibility of debris flow: A case of the Jinsha River Basin, China

Abstract: Investigation of spatial susceptibility of debris flow is a basis for carrying out geological hazard prevention and developing ecological restoration plans. It is difficult to efficiently and accurately identify potential debris flow gullies on a large spatial scale simply by relying on field surveys combined with remote sensing observations or debris flow simulations with small watersheds as units. Taking the Jinsha River Basin of China as an example, we propose a quantitative scheme to describe the intensity of extrinsic forces by calculating the stream power gradient (ω). We extracted gullies prone to debris flow, assuming that there is no spatial heterogeneity in the provenance supply conditions based on the fundamental understanding that debris flow is a high-energy gravity flow. In the situation where the threshold ($\omega=1\times10^{-4}$ W/m²) is the mutational site of the gradient change trend of the relation curve between the number of debris flow gullies and ω value, a total of about 32 thousand debris flow gullies with lengths of more than 200 m were found. In the middle and lower reaches of the basin, these gullies are located within a 30-kilometer buffer zone along the Jinsha and Yalong Rivers, and there is a power function relationship between the number of debris flow gullies and the width of a buffer zone. However, extreme weather events are likely to increase in the future under global warming, and these areas should be the critical prevention areas of debris flow disasters, especially the cascade reservoir area. The results of this study provide a lattice data set of spatial locations of the gullies prone to debris flow and the stream power gradients in the Jinsha River basin, which can be used to retrieve the exact location of the high-energy gullies and can also be used as the basic data for the study of related geological hazards and surface processes in general.

基金项目：国家自然科学基金项目（42107218）；中国地质调查局地质调查项目（DD20221738-2）；中国长江三峡集团有限公司项目（Y MJ(XLD)(19)110）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant 42107218), the Geological Survey Program of China Geological Survey (Grant DD20221738-2), and the Project of Three Gorges Corporation (Grant Y MJ(XLD)(19)110).

第一作者：顾畛逵（1987—），男，博士，副研究员，从事地貌发育与地质灾害研究工作。E-mail: bygzk853@126.com

通讯作者：姚鑫（1978—），男，博士，研究员，从事InSAR观测与地质灾害研究工作。E-mail: yaoxinphd@163.com

收稿日期：2022-02-24；修回日期：2022-08-12；责任编辑：吴芳

Keywords: debris flow; stream power; external force; high-energy valley; Jinsha River; geohazards

摘要: 泥石流空间易发程度调查是开展地质灾害防范和制定生态修复计划的基础之一。目前单纯依靠野外调查并结合遥感观测,或以小流域为单元的泥石流模拟,均难以在大空间范围内高效、准确地识别潜在泥石流沟。鉴于泥石流是一种高能重力流,此次研究以金沙江流域为例,在假定物源供给无差异条件下,提出通过求算河流功率梯度(ω)来实现地表外动力活动强度定量刻画和泥石流空间易发程度调查的新方案,并将泥石流沟验证点数与 ω 值关系曲线的比降趋势突变位置作为阈值($1 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$),提取出大约3.2万条长度超过200 m的高能河谷或泥石流易发沟谷。这些沟谷基本位于金沙江和雅鲁江干流中下游,在大约30 km距离的缓冲区范围内密集分布,其数量与缓冲区宽度存在乘幂函数关系。在全球变暖背景下,未来发生极端气象事件可能性趋于增加,这些地带,尤其是梯级库区河段应做为泥石流灾害的重点防范区。研究的最终结果提供了金沙江流域泥石流易发沟谷的空间位置及 ω 值的点阵数据集,可供检索高能河谷的准确位置,也可作为相关地质灾害与地表过程研究的基础数据和资料。

关键词: 泥石流; 河流功率; 外动力; 高能河谷; 金沙江; 地质灾害

中图分类号: P694,P642.23 文献标识码: A 文章编号: 1006-6616 (2023) 01-0087-12

DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20220202](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20220202)

0 引言

泥石流广泛发生在径流侵蚀活跃的山区及冰雪覆盖的高原边缘地带(Zhang et al., 2004; Qiu et al., 2022)。浅层的滑坡、松散堆积物的径流渗入、溃坝和冰雪消融都有可能诱发泥石流(Hürlimann et al., 2019; Wang et al., 2021),其消能过程的破坏性强,被视为一种不良地质现象,是地质灾害的重要表现形式之一(Qin et al., 2021)。目前在全球气候变化背景下,极端天气事件频繁出现,泥石流对生物生存的潜在危害日益突出(Gao et al., 2017; 鲁建莹等, 2021; Zhao et al., 2021),对区域安全和重大工程设施威胁度增加。长期以来,准确识别泥石流暴发的潜在时空区间,是许多研究机构持续关注的科学问题(Li et al., 2022)。

典型的泥石流以非牛顿流体行为、较强的泥沙携带能力和高运动速度为特征,本质上是一种水流参与下的高能重力流。在强降雨来临时,不稳定边坡广泛分布的高山峡谷地带极易成为泥石流暴发区(Zhang et al., 2004; Long et al., 2020; Tsunetaka et al., 2021)。多年来,全球许多机构通过建立野外观测站的方式对降雨量、泥石流初始特征(滑坡、流量、表面流速、孔隙流体压力)以及泥石流发生过程中伴随的声波、次声波和地震等方面的特征开展过长期观测,一些重要的关于泥石流特征的经验关系式得以建立,包括降雨量与泥石流强度的幂函数关系(Coe et al., 2008; Badoux et al., 2009; Nikolopoulos et al., 2014;

Hürlimann et al., 2019; Oorthuis et al., 2021),前缘流速与深度的线性关系(Mccoy et al., 2011)等。此外,对泥石流运动学不确定性(Wu and Lan, 2020)以及泥石流暴发的降水量阈值(Li et al., 2022)等特征的研究进一步加深了对泥石流发育机制的认识。随着认识不断深入以及灾害形势变化,如何定量刻画外动力环境变化这一问题已成为区域地质安全风险管理与流域生态修复计划制定过程中更为紧迫和显要的研究方向,具体来讲,在大空间范围内简单而有效地识别出潜在泥石流沟并估算其能量属性是一种实际的防灾需求。

由于泥石流触发因素多,地质与地貌条件空间异质性强,传统通过野外调查而绘制的泥石流分布图受工作比例尺限制,存在大量泥石流沟被遗漏或属性刻画不准确的问题(中国地质环境监测院, 2018)。在大空间尺度上快速判断泥石流易发程度方面,目前缺乏有效方法,广泛的研究报道均以单个泥石流沟或其集水流域为研究对象(Wang et al., 2016; Cheng et al., 2022; Qiu et al., 2022; Zhou et al., 2022)。近年随着高分辨率遥感影像采集周期的缩短,采用光学-地形影像解译并结合野外调查进行定性验证是一种可行方案(Hu et al., 2017; Lyu et al., 2022),但过程缓慢且受主观因素干扰(Crowley et al., 2003),缺少能量特征值;借助机器学习模型对典型泥石流沟地质-地貌要素的定量参数进行训练来实现对潜在泥石流沟的识别(Zhao et al., 2020; Qiu et al., 2022),或者通过构建多元函数和逻辑回归等模型来判断泥石流沟分布(Di et al., 2008; Gao and Sang,

2017; Wu et al., 2019), 在一定程度上考虑到了泥石流形成的复杂性, 但这方面已有研究案例对坡度、坡向、高差、岩性、地震和断层密度等参数的提取往往以面状地貌单元(子流域)为信息提取单元(Wang et al., 2016; Qiu et al., 2022), 忽视了泥石流沿沟谷即线状地貌发育这一基本规则, 引入了不必要的非谷底信息。由于泥石流多由强降水导致, 按照流体性质可分为稀性和黏性, 容重一般在 $1.3\sim 1.6 \text{ t/m}^3$ (稀性)和 $1.6\sim 2.3 \text{ t/m}^3$ (黏性)之间, 其中稀性泥石流活动性表现为固体物质易出、易纳, 紊流特征明显; 黏性泥石流则具有较高托举力, 层流特征明显(中华人民共和国国土资源部, 2006)。鉴于河流功率是河道水体重力势能转变为动能的速率(Bagnold, 1960; Pérez-Peña et al., 2009), 而其梯度值的正负变化指示了径流侵蚀力的增减以及谷底与侧岸侵蚀、淤积现象的发生(Bagnold, 1960; Lea and Legleiter, 2016), 因此可反映泥石流活动性强弱在空间上的变化。

金沙江流域的泥石流灾害数量占中国泥石流灾害总量的13%(Hu et al., 2020), 是中国西南地区典型的灾害高发区, 内-外动力作用的耦合机制复杂, 而且由于居住区分散、重大工程远景布设密度高, 防灾压力大, 因此研究以金沙江流域为例, 在假定物

源供给无空间异质性的条件下, 提出了一种新的针对高能河谷的能量等级刻画方案, 可用于泥石流易发程度的调查, 生产的数据集可直接展示流域内各级河谷底侵蚀动力在空间上的分布规律。与灾害风险评估的相关方法相比, 该方案有望实现对不同空间尺度流域内谷底外动力环境的定量刻画, 特征值严格按照河网结构分布, 可用于地表过程研究中不同流域之间分水岭变迁趋势判断、当前沟道内侵蚀与淤积位置的确定、高能河谷位置的检索以及不同河谷间下切速率比较, 对铁路、公路、桥梁和淤地坝等永久性工程设施选址等工作也具有参考价值。

1 研究区概况

金沙江是长江的重要组成部分, 发源于青海省唐古拉山, 流经青藏高原东部、云贵高原西北部、四川盆地西南部等多个自然带(图1), 干流全长约2316 km, 河道平均比降约为1.48%, 多年平均流量约为 $4750 \text{ m}^3/\text{s}$, 流域面积约 $50\times 10^4 \text{ km}^2$ (Li et al., 2018)。流域上游的地势较为平坦, 地表覆盖以荒漠草甸为主, 基底为古生代形成和再循环的大陆地壳, 河谷宽浅, 流速缓慢; 中游进入印支褶皱带, 为中一新生

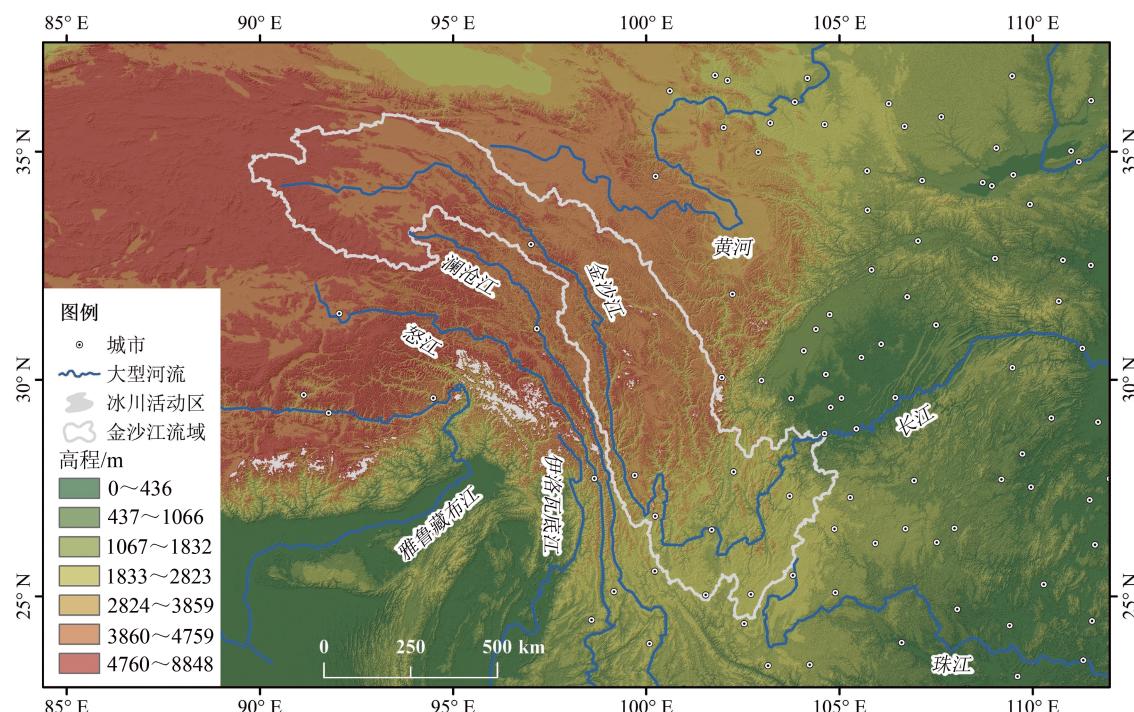


图1 金沙江流域地形与周围主要大河分布

Fig. 1 Topography of the Jinsha River Basin and the distribution of major rivers around it

代形成的陆壳,河床比降大,水流湍急;下游基底则为古老的前寒武陆壳(Ma, 2002),流域整体上处在强震区,新构造运动强烈,断裂发育,由于受快速构造隆升和河流下蚀作用影响,谷深大于1000 m的峡谷型地貌极为发育。流域内的季风性气候特征明显,每年5~10月受西南季风和东南季风影响,极端降水主要出现在6~8月,年平均降水量632 mm,海拔4000 m以上区域年降水量仅344 mm(Liu et al., 2016),受全球气温转暖及冰雪消融等因素影响,近60年来的流量总体呈增加趋势。由于内-外动力的不平衡性,地貌演变处于瞬态阶段,河流系统长期处于向稳态的调整之中,谷坡残留堰塞湖沉积较为常见,加之降水、物源供给以及地形条件充足,是滑坡、泥石流灾害频发区(Liu et al., 2018)。例如,在金沙江下游,1988年8月6日发生在海子沟、1999年7月5日发生在大寨沟与白鹤滩沟、2012年6月28日发生在矮子沟-延吉沟-大凉水沟-牛路沟-大石垴沟-蔡家坪沟的群发性泥石流灾害事件均对区域地质安全造成了不同程度的破坏(Hu et al., 2014)。

2 研究方法

2.1 基础理论

河流功率的概念最初由Bagnold提出,并将其与河宽的比值(ω , W/m²)综合用来刻画径流对单位河床的作用强度(Bagnold, 1960),即径流对沟谷的侵蚀强度。该比值小于0时指示消能过程,沙石会发生堆积,而数值大于0时,径流下蚀强度及搬运力沿程增加,对沟谷形态的塑造力也会增加(Lea and Legleiter, 2016)。然而,由于平缓地带的河宽变化比河床比降变化更明显,因此该方案实际上更适于描述平坦地带的侵蚀动力。与平缓地带相比,峡谷山区由于地形起伏度大,比降的变化远比谷底宽度的变化更明显,而且在实际数据处理中,长度参数比宽度参数更易于提取,故将描述河流功率沿程变化的方法修改为其与沟长的比值(Gu et al., 2019),即:

$$\omega = Q/L \quad (1)$$

其中 ω 为河流功率梯度(W/m²); L 为沟长变量(m); Q 为河流功率(W/m)。

由于河流功率为流量(Q , m³/s)和坡度(S , %)的函数,即 $Q=QS$ (Summerfield, 1991),而流量又可以表示为汇流面积(A , m²)的乘幂函数形式(Montgomery

and Gran, 2001; Finlayson and Montgomery, 2003),则 ω 可以表示为,

$$\omega = \frac{\gamma a A^b S}{L} \quad (2)$$

公式(2)中, $\gamma=9800$ N/m³,表示单位长度内水的单位重量; a 和 b 为常量,可以借助已知的流量和流域面积值的拟合函数确定,不同的流域降水量、下垫面渗水和产流系数等特征不同, a 值和 b 值也不尽相同。

2.2 实施方法

为计算 ω 值,需在ArcGIS软件平台下根据数字高程模型数据(DEM; <https://srtm.csi.cgiar.org/>)对流域进行水文特征分析。一般认为汇流面积小于1 km²的区域内的地貌特征及地表过程主要受滑坡作用控制(Struth et al., 2019)。此次研究以1 km²为产流阈值提取沟谷汇流面积与纵剖面,并对每条沟谷进行编号,以便估算坡度。由于DEM栅格点之间的距离介于90~90 $\sqrt{2}$ m之间(文中采用90 m分辨率DEM),将栅格平均长度110 m作为2个栅格之间的距离。坡度计算采用最小二乘法进行一次线性函数拟合,线性系数即为坡度(%).在计算获得各栅格点 ω 值之后,通过统计已有的野外泥石流调查点位置的 ω 值来确定泥石流易发沟的划分阈值。这需要首先在ArcGIS软件平台下对1:500万中国崩塌滑坡泥石流分布图(中国地质环境监测院, 2018)进行图像数字化、投影(WGS 1984)和坐标校正,并提取泥石流分布点;然后,再根据河流功率梯度的空间插值结果提取野外调查点的 ω 值。 a 值和 b 值的获取通过金沙江流域内若干站点的多年流量平均值及其所控制的汇流面积值进行函数拟合确定。研究实施过程如图2所示。

3 沟谷比降与侵蚀动力强度空间特征

比降是径流侵蚀活跃性和泥石流启动的重要影响因素。文章对金沙江流域内汇流面积大于1 km²的所有沟谷的比降进行了计算,其总长度约为3.7×10⁵ km。根据计算结果,大约60%长度的沟谷比降小于0.1%,在流域的上游、中游和下游区域均有分布,而高比降河谷基本上分布在金沙江与雅砻江中下游河段两岸50 km距离范围内(图3a)。流域沟谷纵剖面的分段线性拟合结果显示出大约80%长度的河谷纵剖面线性特征明显,线性拟合度R²普遍大于0.9(图3b)。从理想条件下纵剖面侵蚀演变

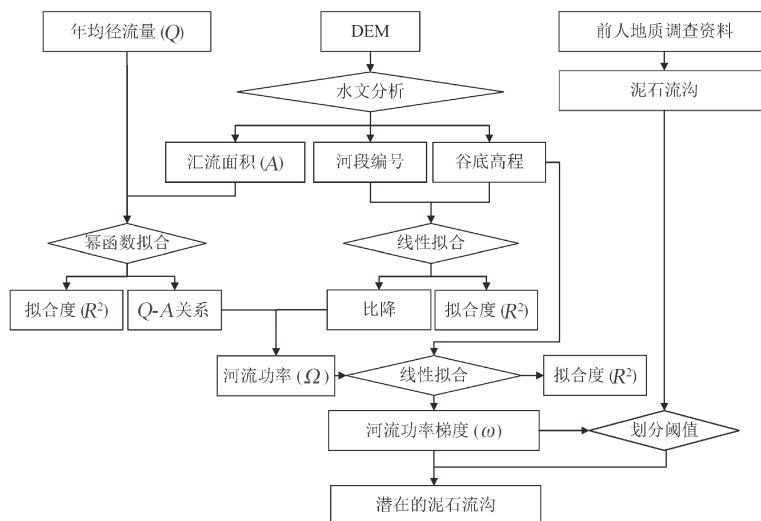


图 2 研究技术路线

Fig. 2 Implementation roadmap of the study

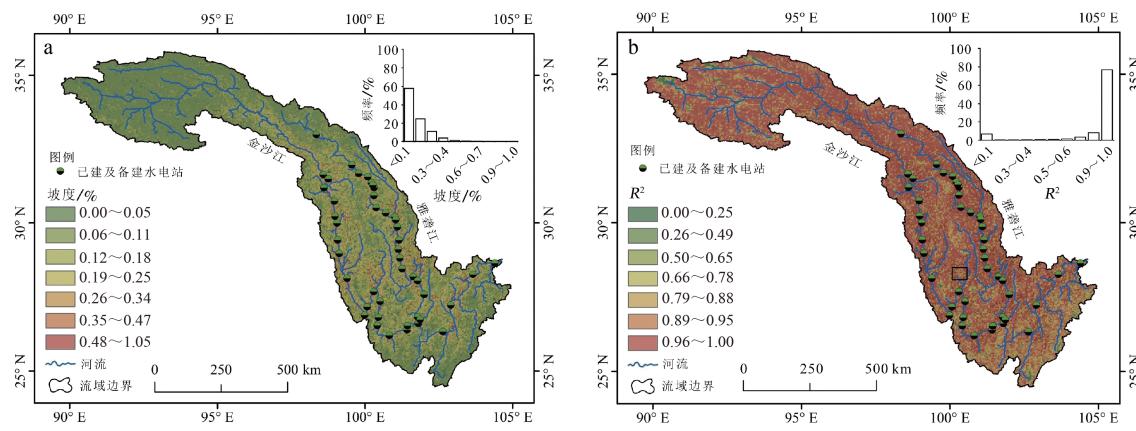
a—沟谷比降的空间插值; b—沟谷比降线性拟合度空间插值(R^2)

图 3 沟谷比降及其线性拟合度的空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of the gradient and its linear fitting degree

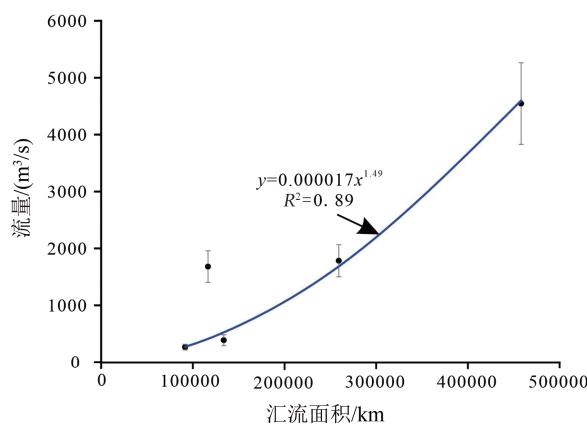
(a) Spatial interpolation of the gradients; (b) Spatial interpolation of the linear fit degrees (R^2)

遵循的“线性-指数-对数-乘幂”函数形态顺序看(Ohmori, 1991; Ohmori and Saito, 1993; Radoane et al., 2003), 这类沟谷对隆升活动的响应尚处于演变初期。通过金沙江流域内部分水文站监测的多年平均流量值及其汇流面积值的拟合函数关系, 可求算出公式(2)中常量参数 a 和 b 分别为 1.7×10^{-5} 和 1.49(图 4)。借此可根据河流功率值的定义公式, 对整个流域内不同河段河流功率值的计算与绘制结果如图 5a 所示。公式(2)的计算结果(图 5b), 反映出金沙江流域的中游区域, 地理坐标大概在 $27^{\circ}\text{N} \sim 32^{\circ}\text{N}$ 之间沟谷的侵蚀活动性较强, 应当是泥石流沟分布的主要区间。图 5b 中局部区域沟谷中 ω 值的细节特征见图 5c。根据野外调查拾取的泥石流分

布点(中国地质环境监测院, 2018), 该区域内存在大量的 ω 值大于这些泥石流的沟谷, 属于高能环境河段, 其中还分布着很多特征非常突出的裂点(图 5c)。金沙江干流上的侵蚀河段和淤积河段的长度及其空间分布见图 5d、5e。

4 泥石流易发程度划分的 ω 阈值

根据图 5, ω 值普遍大于 0, 说明活跃侵蚀在流域空间具有普遍性, 但由于泥石流多发生在高能河段, 故需要确定 ω 阈值以区分一般径流活动区间与泥石流易发区间。为此首先对不同 ω 值区间的泥石流沟调查点的数量进行了统计(图 6), 发现 ω 值



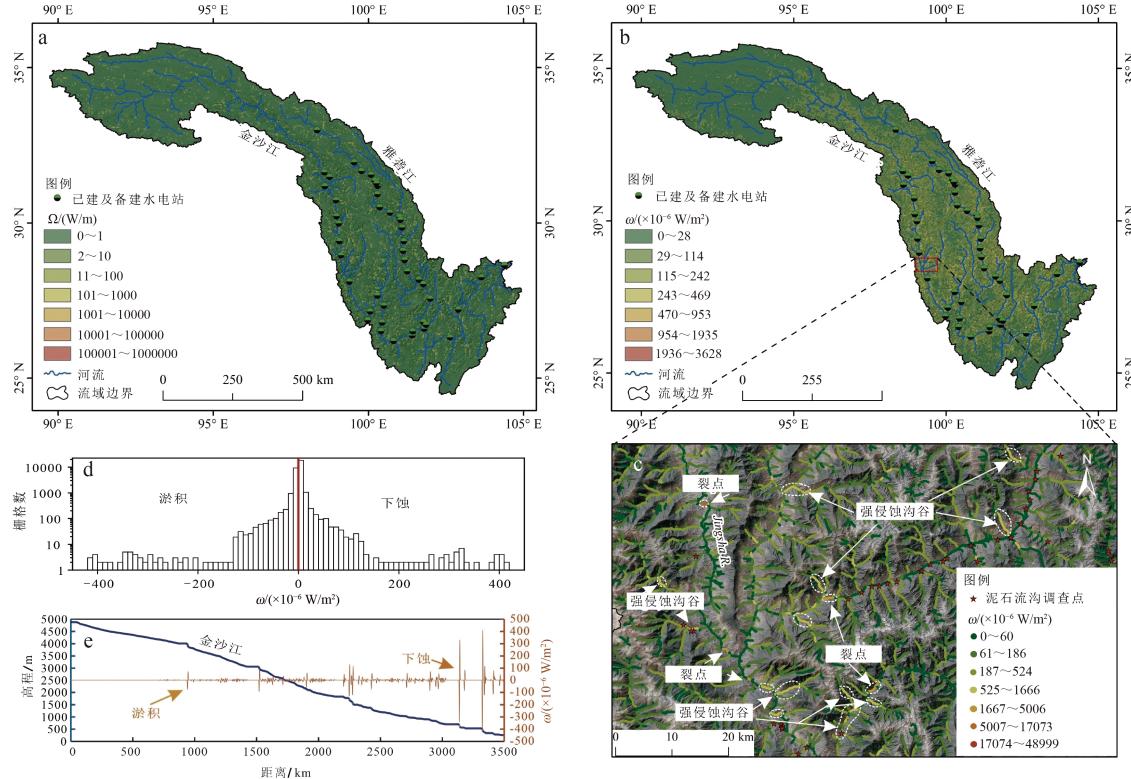
流量数据为攀枝花、直门达、甘孜、小得石、屏山水文站多年记录的平均值(卓嘎等, 2011; 赵文焕和高袁, 2011)

图 4 汇流面积与流量关系

Fig. 4 Relation between catchment area and discharge

Note: The discharge values are the mean values of the years recorded at Panzhihua, Zhimenda, Ganzi, Xiaodeshi and Pingshan hydrology stations (Zhuo et al., 2011; Zhao and Gao, 2011)

与调查点数量遵循显著的指数函数关系。由于确定 ω 阈值的作用在于区分绝大多数的低能级的沟谷和少数的高能沟谷,因此指数函数值变化的拐点可作为潜在的阈值选项。与此同时,需要注意的是在对纸质泥石流调查点资料进行坐标校正与提取的过程中存在不可避免的误差,即部分调查点数字化过程中并非完全与沟谷中央对应的栅格重叠,而是分布在沟谷两侧,导致相应的 ω 值偏小,不宜选择过小的值作为阈值。事实上,由于地下水补给、地表植被水分涵养等因素的空间差异,径流、泥石流等一系列活动性流体的产流阈值往往具有模糊性,即具体数值是不明确的,但它处在一个较为明确的数值区间之内。阈值选择的特殊性在于可以根据侵蚀力等级任意确定,在实际应用中选择合理值即可。因此,可先考虑将确定数值区间中的一个较小的 ω 值作为阈值,如果该数值相对应的沟谷存在相关的泥石流地貌、沉积标志,那么就可以认为大于该值的沟谷具有足够的高能特征,即为泥石流



a—河流功率(Ω); b—河流功率梯度(ω); c—图 b 中的局部 ω 特征示例; d—金沙江干流侵蚀与淤积河段栅格数; e—金沙江高程剖面及侵蚀—淤积沿程变化

图 5 河流功率与河流功率梯度值的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of stream power and stream power gradient

(a) Stream power(Ω); (b) Stream power gradient(ω); (c) ω values in the local regions of the valleys shown in Fig. 5b; (d) Frequencies of sedimentation and runoff incision; (e) Jinsha River profile and distribution of areas of sedimentation and erosion

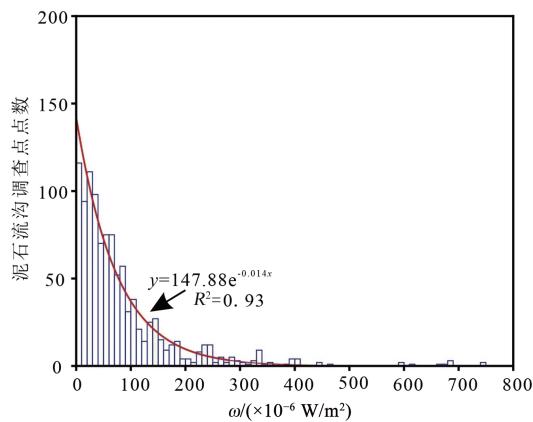
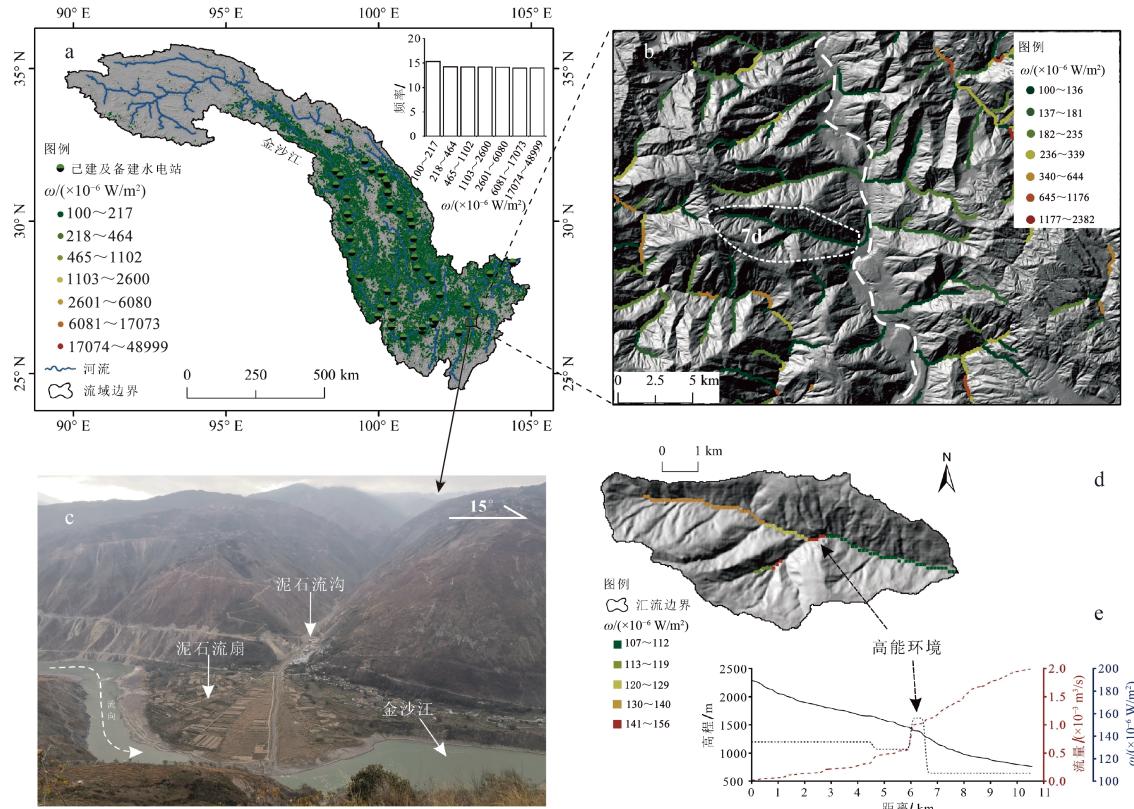


图 6 不同河流功率梯度值区间内的泥石流调查点数
Fig. 6 Debris flow investigation points in various stream power gradient intervals

易发沟谷。结合图 6 中泥石流沟验证点数与 ω 值关系曲线的比降变化, 将 $\omega=1 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ 作为潜在泥石流沟划分阈值, 最终筛选出的高能泥石流沟分布如



a—河流功率梯度值(ω)及潜在泥石流沟; b—泥石流沟局部特征; c—典型泥石流沟; d—泥石流沟发育动力; e—流量、 ω 在该泥石流沟纵剖面上的分布

图 7 金沙江流域潜在泥石流沟

Fig. 7 Debris flow valleys in the Jinsha River Basin

(a) Distribution of debris flow valleys and their stream power gradients; (b) Debris flow valleys shown in detail; (c) A typical debris flow valley; (d) Spatial variation of erosion dynamics in a typical debris flow valley corresponding to (c); (e) Variation of discharge and stream power gradient in a valley profile

图 7a 所示。在图 7 中显示有明显泥石流扇地貌标志性特征的河谷, 与该阈值相对应(图 7d、7e)。这些筛选出来的潜在泥石流沟的 ω 值多分布在 $1 \times 10^{-4} \sim 1.1 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ 之间, 基本沿着金沙江和雅砻江中下游呈密集态, 超过 200 m 长度的泥石流沟约 3.2 万条, 数量与缓冲区距离存在乘幂函数关系(图 8)。

5 相关问题讨论

5.1 降水变化下的泥石流风险

金沙江流域由于受青藏高原快速隆升影响而广泛发育的断裂以及由此而导致的岩体破坏等现象为加速风化和重力侵蚀提供了充足的碎屑条件(Yang et al., 2006; Li et al., 2020; Zhu et al., 2021), 形成的高梯度地形环境也为泥石流发育提供了能量来源。目前仍能从谷坡上发现诸多保留下来的晚更

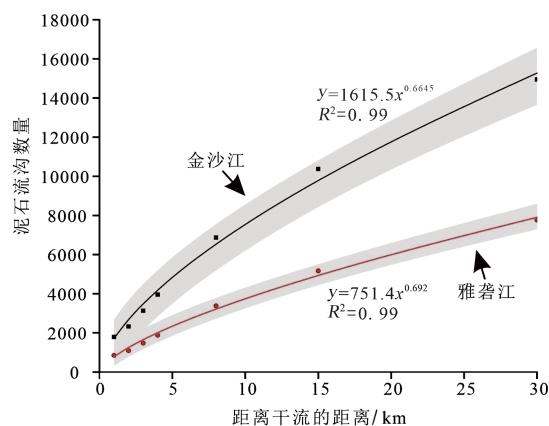


图 8 不同距离的缓冲区范围内潜在泥石流沟数量
Fig. 8 Number of potential debris flow gullies within the buffer zone at different distances

新世以来的明显的泥石流堆积(Chen et al., 2008),反映出该区域的外动力侵蚀活动在历史上即具有巨大活跃性。相关资料显示,2000—2015年间,中国共发生泥石流灾害10927起,造成的伤亡人数占地质灾害死亡人数的36.14%(Zhang et al., 2018; Wei et al., 2021),其中金沙江流域灾害数量占总泥石流灾害的13%(Hu et al., 2020)。然而,由于该流域跨越多个自然带,泥石流发育的气候条件差异巨大,在全球气候加速变化背景下可能发生风险的空间与频率增大(Wei et al., 2021)。根据IPCC第5次评估报告,1880—2012年间全球地表平均气温大约上升了0.85℃,北半球增温幅度最明显(IPCC, 2014)。这种变化会引起水文循环的变化,导致水资源时空分布的重新分配和总量改变(Wu et al., 2020),引起极端气候及水文事件频率和强度的增加,使灾患沟谷更易成灾。在这种大背景下,金沙江流域局部区域也出现相关复杂响应,降雨量呈现出空间不一致的升降变化(图9a、9b)和整体上的增加趋势(图9c);与之对应,1972—2017年间流域径流整体上也是增加的,主要来自冰雪融水和降水贡献,其中流量从每年5—6月开始急剧增加,7月达到峰值(Wu et al., 2020),因此这一时期是防范泥石流灾害风险的时段。近年来,针对雅砻江流域未来气温增加场景下的降水模拟结果表明,流域在未来可能会面对更多的极端降水事件,尤其是上游区域(Zhao et al., 2021),这恰恰是诱发泥石流的关键因素,金沙江流域泥石流风险在未来不容乐观。

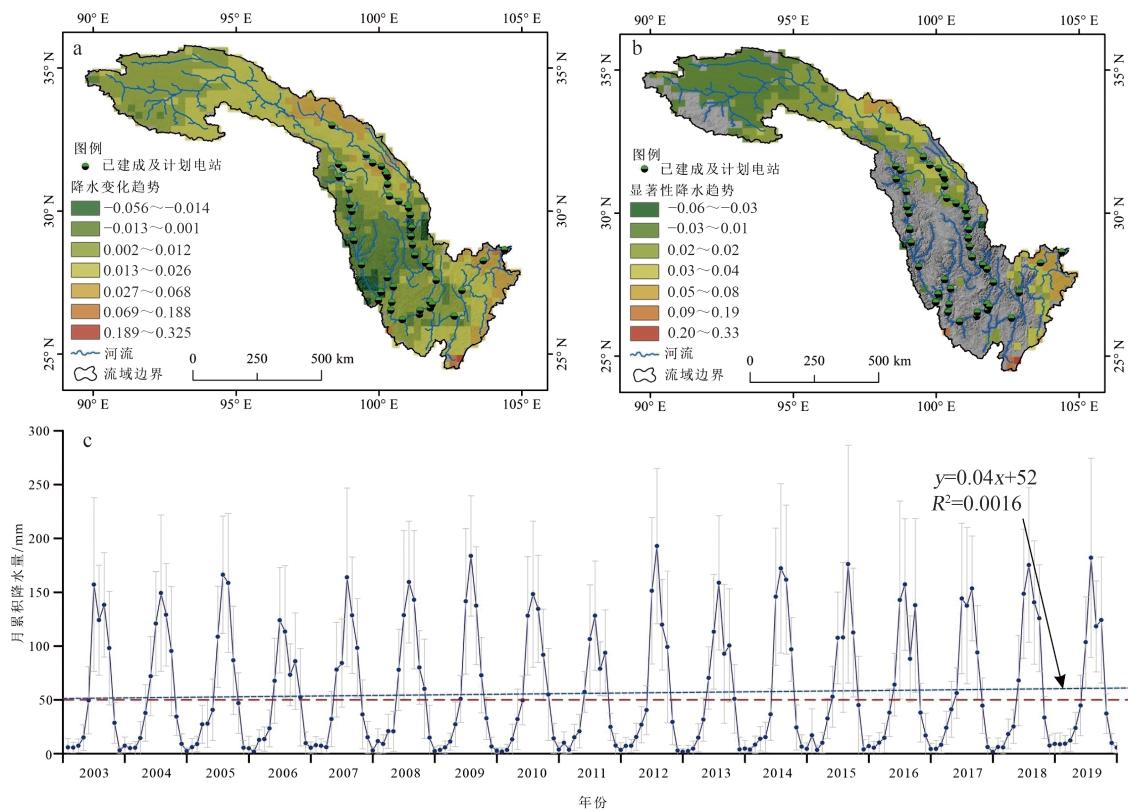
5.2 水电开发与泥石流间的互馈

水电开发活动与地貌发育之间的互馈作用具有

时间长效性,随着大型库区数量增加或逐步演变为区域性的环境问题(Wen et al., 2020)。金沙江流域水能资源丰富,可开发水能资源约为 1.1×10^8 KW,目前是中国具有重要战略地位的水电基地之一,已经建成多座大型水电站。例如,乌东德(坝高270 m)、白鹤滩(坝高289 m)、溪洛渡(坝高285.5 m)、向家坝(坝高88.2 m)等水电站的总装机容量 $> 4.2 \times 10^6$ KW(Hu et al., 2020)。除此之外,还有一些规模较小的水电站也依次分布在金沙江与雅砻江干流上,或处于筹建阶段(图3)。水电开发使原本以径流下蚀作用为主的河谷地貌景观转变为一个个长达几十、上百千米的水库。在这一过程中,库区水体变化与泥石流发育存在着互馈效应:一方面,大坝的出现会显著抬高水位,导致侵蚀基准面抬升,沿金沙江干流库区两侧沟谷的溯源侵蚀速率将发生减缓,泥石流所携带的泥沙淤积在库区,发挥出一定的水土保持功能,与农业活动中的土地开垦和滑坡现象相比,可在短时间尺度上降低泥沙通量(Schmidt et al., 2019),拦截长江中71.4%的泥沙(Lu et al., 2019),并影响水库的使用寿命;另一方面,泥石流沿沟谷的剧烈消能过程可能在雨季导致库区出现涌浪现象(Liu et al., 2009; Imaizumi et al., 2019),增加灾害风险的发生。此次研究在筛查泥石流沟的过程中发现,这些水库区均分布在泥石流密集地带(图7a),这种互馈作用对区域地质-地貌-水文相关环境的改变将十分突出。根据泥石流沟的数量与其距干流河道距离的乘幂函数关系,在近库区5 km范围附近存在一个明显的趋势变化(图8),该区间泥石流沟分布相对密集,是水库-泥石流的交互作用区间。

5.3 泥石流易发沟的调查与应对

金沙江中下游的潜在泥石流沟分布较为密集(图7a),而目前随着气候变化及各类工程设施的开展,泥石流灾害应对的压力也将会不断增加。例如,1996年8月11日,大寨沟泥石流造成3人死亡或失踪;2012年6月28日,白鹤滩水电站上游发生泥石流,致使矮子沟等10条沟发生泥石流,造成41人死亡、失踪;2012年8月29日,凉山水电站泥石流灾害造成25人死亡(Hu et al., 2017)。目前以实现生态修复为目标对流域开展科学管理已经成为构建区域安全的重要环节,对泥石流采取的应对措施必须充分考虑地貌-地质环境的自然演变规律,各类工程和计划的制定越来越需要以科学数据为支撑,对泥石流沟的空间分布与能量属性的准确



a—降水变化趋势; b—通过了显著性检验的降水变化趋势(空值表示未通过显著性检验); c—降水量的月均变化

注: 降水数据为日分辨率 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission, <http://mirador.gsfc.nasa.gov>), 空间分辨率为 0.25° ; 趋势分析方法采用曼-肯德尔法 (Mann-Kendall), 负值表示降低, 正值表示增加。

图 9 金沙江流域降水量变化

Fig. 9 Precipitation trend in the Jinsha River Basin

(a) Precipitation trend; (b) Precipitation trend that has passed the significance test (A null value indicates that the significance test was not passed); (c) Monthly mean of precipitation

Note: The precipitation data is the 0.25° resolution TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission, <http://mirador.gsfc.nasa.gov>); The trend analysis adopts the Mann-Kendall method, where negative value means decrease and positive value means increase.

性要求提高, 定性描述资料越来越难以满足分析要求, 定量方式表达的数据产品正成为灾害调查结果的主要形式。从已报道的案例来看, 对重要工程设施、居住区安全等存在潜在影响的泥石流沟常采用拦蓄坝工程、生态工程和相关管理办法, 如在泥石流的沟口布设淤地坝或疏浚渠道, 在集水区内修建梯田和开展植树造林活动, 在人员密集区安置监测预警设备等(Xiong et al., 2016)。在淤地坝筑坝过程中, 构筑物的尺寸一般必须要与泥石流的峰值流量相匹配。然而, 对于绝大多数泥石流沟而言, 由于缺乏足够观测数据, 工程设计过程中所需要的相关泥石流参数主要基于行业标准公式, 而这些公式易受区域限制。此次研究提供了金沙江流域内泥石流易发沟谷的空间分布位置及年均流量条件下的

ω 值, 可从中直接检索高能沟谷的准确位置, 拦蓄坝、淤地坝可直接布设在沟谷内的高能环境河段(图 7e)以充分发挥其消能作用, 便于开展针对性的监测和治理。

6 结束语

潜在泥石流沟的准确筛查是开展地质灾害防治和制定相关生态修复计划的基础。近 20 年来对泥石流触发机制的研究加深了对其发育过程的认识, 如针对大空间范围的泥石流沟筛查的科学性与效率有待提高。鉴于泥石流是一种高能重力流, 文章在假定物源供给条件相同的情况下, 提出通过求算山谷的 ω 值并结合阈值来识别泥石流易发沟的定量方案。据此, 对金沙江流域的侵蚀动力条件进行

了估计,筛查出3.2万条长度超过200 m的泥石流沟。这些泥石流沟基本上集中分布在沿金沙江和雅鲁藏布江中下游干流的30 km距离的缓冲区范围内,数量与距干流距离存在乘幂函数关系。现有及在建大型水库区基本分布在泥石流密集区,泥石流发育与库区的互馈效应可能成为该区域未来环境变化的一个重要因素。目前在气温增加趋势下,流域未来发生极端气候的可能性增加,泥石流风险不容乐观。采用该方案提供的泥石流易发沟谷的空间位置及年均流量条件下的 ω 值,可检索高能沟谷的准确位置,便于开展针对性监测和治理。此外,该指标的改进和应用也将为地质学及地表过程研究中如何表征外动力提供有效定量手段。

References

- BADOUX A, GRAF C, RHYNER J, et al., 2009. A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance[J]. *Natural Hazards*, 49(3): 517-539.
- BAGNOLD R A, 1960. Sediment discharge and stream power: A preliminary announcement[R]. Reston: U. S. Geological Survey.
- CHEN J, DAI F C, YAO X, 2008. Holocene debris-flow deposits and their implications on the climate in the upper Jinsha River valley, China[J]. *Geomorphology*, 93(3-4): 493-500.
- CHENG H L, HUANG Y, ZHANG W J, et al., 2022. Physical process-based runoff modeling and hazard assessment of catastrophic debris flow using SPH incorporated with ArcGIS: a case study of the Hongchun gully[J]. *CATENA*, 212: 106052.
- China Academy of Geological Environment Monitoring, 2018. Distribution map of collapse, landslide and debris flow in China[M]. Beijing: Geology Press.
- China Institute of Geological Environment Monitoring, 2018. Distribution map of collapses, landslides and debris flows in China[M]//. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- COE J A, KINNER D A, GODT J W, 2008. Initiation conditions for debris flows generated by runoff at Chalk Cliffs, central Colorado[J]. *Geomorphology*, 96(3-4): 270-297.
- CROWLEY J K, HUBBARD B E, MARS J C, 2003. Analysis of potential debris flow source areas on Mount Shasta, California, by using airborne and satellite remote sensing data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 87(2-3): 345-358.
- DI B F, CHEN N S, CUI P, et al., 2008. GIS-based risk analysis of debris flow: an application in Sichuan, southwest China[J]. *International Journal of Sediment Research*, 23(2): 138-148.
- FINLAYSON D P, MONTGOMERY D R, 2003. Modeling large-scale fluvial erosion in geographic information systems[J]. *Geomorphology*, 53(1-2): 147-164.
- GAO J M, SANG Y H, 2017. Identification and estimation of landslide-debris flow disaster risk in primary and middle school campuses in a mountainous area of Southwest China[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 25: 60-71.
- GAO Y, LI B, FENG Z, et al., 2017. Global climate change and geological disaster response analysis[J]. *Journal of Geomechanics*, 23(1): 65-77. (in Chinese with English abstract)
- GU Z K, SHI C X, PEN J, 2019. Evolutionary dynamics of the main-stem longitudinal profiles of ten kongdui basins within Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 29(3): 417-431.
- HU G S, CHEN N S, LI J, et al., 2014. Research on dynamic characteristics and development tendency of debris flow near field region in Baihetan Hydropower station, Jinshajiang River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 21(2): 238-245. (in Chinese with English abstract)
- HU G S, CHEN N S, TANOLI J I, et al., 2017. Debris flow susceptibility analysis based on the combined impacts of antecedent earthquakes and droughts: a case study for cascade hydropower stations in the upper Yangtze River, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 14(9): 1712-1727.
- HU G S, TIAN S F, CHEN N S, et al., 2020. An effectiveness evaluation method for debris flow control engineering for cascading hydropower stations along the Jinsha River, China[J]. *Engineering Geology*, 266: 105472.
- HÜRLIMANN M, COVIELLO V, BEL C, et al., 2019. Debris-flow monitoring and warning: review and examples[J]. *Earth-Science Reviews*, 199: 102981.
- IMAIZUMI F, MASUI T, YOKOTA Y, et al., 2019. Initiation and runout characteristics of debris flow surges in Ohya landslide scar, Japan[J]. *Geomorphology*, 339: 58-69.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability: Part A: global and sectoral aspects[R]. Cambridge: Cambridge University Press.
- LEA D M, LEGLEITER C J, 2016. Mapping spatial patterns of stream power and channel change along a gravel-bed river in northern Yellowstone[J]. *Geomorphology*, 252: 66-79.
- LI D F, LU X X, YANG X K, et al., 2018. Sediment load responses to climate variation and cascade reservoirs in the Yangtze River: a case study of the Jinsha River[J]. *Geomorphology*, 322: 41-52.
- LI W L, ZHU J, GONG Y H, et al., 2022. An optimal selection method for debris flow scene symbols considering public cognition differences[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 68: 102698.
- LI Y C, CHEN J P, ZHOU F J, et al., 2020. Identification of ancient river-blocking events and analysis of the mechanisms for the formation of landslide dams in the Suwalong section of the upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau[J]. *Geomorphology*, 368: 107351.
- LIU J J, LI Y, SU P C, et al., 2009. Temporal variation of intermittent surges of debris flow[J]. *Journal of Hydrology*, 365(3-4): 322-328.
- LIU M, CHEN N S, ZHAO C Y, 2018. Influence of fault structure on debris flow in Qiaojia and Menggu section of the Jinsha River[J]. *Journal of Natural Disasters*, 27(3): 136-143. (in Chinese with English abstract)
- LIU X W, XU J J, HAN Z M, 2016. Analysis on spatial-temporal distribution of precipitation in Jinsha River Basin and variation trend[J]. *Yangtze River*, 47(15): 36-44. (in Chinese with English abstract)
- LONG K, ZHANG S J, WEI F Q, et al., 2020. A hydrology-process based

- method for correlating debris flow density to rainfall parameters and its application on debris flow prediction[J]. *Journal of Hydrology*, 589: 125124.
- LU C H, DONG X Y, TANG J L, et al., 2019. Spatio-temporal trends and causes of variations in runoff and sediment load of the Jinsha River in China[J]. *Journal of Mountain Science*, 16(10): 2361-2378.
- LU J Y, YU G A, HUANG H Q, 2021. Research and prospect on formation mechanism of debris flows in high mountains under the influence of climate change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 43(2): 555-567. (in Chinese with English abstract)
- LYU L, XU M Z, WANG Z Y, et al., 2022. A field investigation on debris flows in the incised Tongde sedimentary basin on the northeastern edge of the Tibetan Plateau[J]. *CATENA*, 208: 105727.
- MA L F, 2002. Geological atlas of China[M]. Beijing: Geology Press.
- MCCOY S W, COE J A, KEAN J W, et al., 2011. Observations of debris flows at Chalk Cliffs, Colorado, USA: Part 1, in-situ measurements of flow dynamics, tracer particle movement and video imagery from the summer of 2009[J]. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 759-768.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2006. Specification of geological investigation for debris flow stabilization: DZ/T 0220-2006[S]. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese)
- MONTGOMERY D R, GRAN K B, 2001. Downstream variations in the width of bedrock channels[J]. *Water Resources Research*, 37(6): 1841-1846.
- NIKOLOPOULOS E I, CREMA S, MARCHI L, et al., 2014. Impact of uncertainty in rainfall estimation on the identification of rainfall thresholds for debris flow occurrence[J]. *Geomorphology*, 221: 286-297.
- OHMORI H, 1991. Change in the mathematical function type describing the longitudinal profile of a river through an evolutionary process[J]. *The Journal of Geology*, 99(1): 97-110.
- OHMORI H, SAITO K, 1993. Morphological development of longitudinal profiles of rivers in Japan and Taiwan[J]. Bulletin of the Department of Geography, University of Tokyo(25): 29-41.
- OORTHUIS R, HÜRLIMANN M, ABANCÓ C, et al., 2021. Monitoring of rainfall and soil moisture at the rebaixader catchment (Central Pyrenees)[J]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 27(2): 221-229.
- PÉREZ-PEÑA J V, AZAÑÓN J M, AZOR A, et al., 2009. Spatial analysis of stream power using GIS: SLK anomaly maps[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(1): 16-25.
- QIN Y L, WU J L, ZHAN H Y, et al., 2021. Discussion on the correlation between active fault and geological disaster distribution in the Ganzi area, western Sichuan province, China[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(3): 463-474. (in Chinese with English abstract)
- QIU C C, SU L J, ZOU Q, et al., 2022. A hybrid machine-learning model to map glacier-related debris flow susceptibility along Gyirong Zangbo watershed under the changing climate[J]. *Science of the Total Environment*, 818: 151752.
- RÄDOANE M, RÄDOANE N, DUMITRIU D, 2003. Geomorphological evolution of longitudinal river profiles in the Carpathians[J]. *Geomorphology*, 50(4): 293-306.
- SCHMIDT A H, DENN A R, HIDY A J, et al., 2019. Human and natural controls on erosion in the Lower Jinsha River, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 170: 351-359.
- STRUTH L, GARCIA-CASTELLANOS D, VIAPLANA-MUZAS M, et al., 2019. Drainage network dynamics and knickpoint evolution in the Ebro and Duero basins: from endorheism to exorheism[J]. *Geomorphology*, 327: 554-571.
- SUMMERFIELD M A, 1991. Global Geomorphology[M]. London: Routledge.
- TSUNETAKA H, HOTT A, IMAIZUMI F, et al., 2021. Variation in rainfall patterns triggering debris flow in the initiation zone of the Ichino-sawa torrent, Ohya landslide, Japan[J]. *Geomorphology*, 375: 107529.
- WANG Q, KONG Y Y, ZHANG W, et al., 2016. Regional debris flow susceptibility analysis based on principal component analysis and self-organizing map: a case study in Southwest China[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(18): 718.
- WANG Z B, WANG J Y, HE L L, et al., 2021. Characteristics and evolution process of the ridge-groove sequence of the Jiulongtan glacial accumulation in Mengshan, Shandong: with the discussion on the difference of accumulation sequence of glacier and debris flow[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(1): 105-116. (in Chinese with English abstract)
- WEI L, HU K H, LIU S, 2021. Spatial distribution of debris flow-prone catchments in Hengduan mountainous area in southwestern China[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(23): 2650.
- WEN L, WEI P F, LI X M, et al., 2020. Study on the river network, geomorphological features and tectonic activity in the Danjiangkou reservoir and its surrounding areas[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(2): 252-262. (in Chinese with English abstract)
- WU S E, CHEN J, ZHOU W, et al., 2019. A modified Logit model for assessment and validation of debris-flow susceptibility[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(6): 4421-4438.
- WU Y M, LAN H X, 2020. Debris flow analyst (DA): a debris flow model considering kinematic uncertainties and using a GIS platform[J]. *Engineering Geology*, 279: 105877.
- WU Y Y, FANG H W, HUANG L, et al., 2020. Changing runoff due to temperature and precipitation variations in the dammed Jinsha River[J]. *Journal of Hydrology*, 582: 124500.
- XIONG M Q, MENG X M, WANG S Y, et al., 2016. Effectiveness of debris flow mitigation strategies in mountainous regions[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 40(6): 768-793.
- YANG W M, WU S R, ZHANG Y S, et al., 2006. Formation conditions of slope type mudflow in Ningshaan county, southern Shaanxi, and its inducing mechanism[J]. *Journal of Geomechanics*, 12(2): 219-227. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C S, ZHANG Y C, ZHANG L H, 2004. Danger assessment of collapses, landslides and debris flows of geological hazards in China[J]. *Journal of Geomechanics*, 10(1): 27-32. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG N, FANG Z W, HAN X, et al., 2018. The study on temporal and spatial distribution law and cause of debris flow disaster in China in recent years[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(2): 299-308.
- ZHAO W H, GAO Y, 2011. Analysis on annual and decadal runoff variation

- characteristics of Jinsha River Basin[J]. *Yangtze River*, 42(6): 98-100.
- ZHAO Y, MENG X M, QI T J, et al., 2020. AI-based identification of low-frequency debris flow catchments in the Bailong River basin, China[J]. *Geomorphology*, 359: 107125.
- ZHAO Y M, DONG N P, LI Z S, et al., 2021. Future precipitation, hydrology and hydropower generation in the Yalong River Basin: projections and analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 602: 126738.
- ZHOU W Q, QIU H J, WANG L Y, et al., 2022. Combining rainfall-induced shallow landslides and subsequent debris flows for hazard chain prediction[J]. *CATENA*, 213: 106199.
- ZHU L, HE S M, QIN H K, et al., 2021. Analyzing the multi-hazard chain induced by a debris flow in Xiaoajinchuan River, Sichuan, China[J]. *Engineering Geology*, 293: 106280.
- ZHUO G, JIAN J, BIANBA C R, 2011. Runoff of the Jinsha River: characteristics and its response to climate change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 33(2): 405-415. (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 高杨,李滨,冯振,等,2017.全球气候变化与地质灾害响应分析[J].
地质力学学报,23(1): 65-77.
- 胡桂胜,陈宁生,李俊,等,2014.金沙江白鹤滩水电站坝址近场区泥石流运动特征与发展趋势分析[J].
水土保持研究,21(2): 238-245.
- 刘美,陈宁生,赵春瑶,2018.断裂构造对金沙江巧家至蒙姑段泥石流发育影响研究[J].
自然灾害学报,27(3): 136-143.
- 刘晓婉,许继军,韩志明,2016.金沙江流域降水空间分布特征及变
化趋势分析[J].
人民长江,47(15): 36-44.
- 鲁建莹,余国安,黄河清,2021.气候变化影响下高山区泥石流形成
机制研究及展望[J].
冰川冻土,43(2): 555-567.
- 秦宇龙,吴建亮,詹涵钰,等,2021.川西甘孜地区活动断裂与地质灾
害分布相关性探讨[J].
地质力学学报,27(3): 463-474.
- 王照波,王江月,何乐龙,等,2021.山东蒙山九龙潭冰川堆积“垄槽
序列”的特征及演化过程研究:兼论冰川、泥石流堆积序列的
差异性[J].
地质力学学报,27(1): 105-116.
- 文力,魏鹏飞,李学敏,等,2020.丹江口水库库区及周边地区河网形
态、地貌特征及构造活动性意义[J].
地质力学学报,26(2): 252-262.
- 杨为民,吴树仁,张永双,等,2006.陕西宁陕县城坡面型泥石流形成
条件及其诱发机制[J].
地质力学学报,12(2): 219-227.
- 张春山,张业成,张立海,2004.中国崩塌、滑坡、泥石流灾害危险性
评价[J].
地质力学学报,10(1): 27-32.
- 张楠,方志伟,韩笑,等,2018.近年来我国泥石流灾害时空分布规律
及成因分析[J].
地学前缘,25(2): 299-308.
- 赵文焕,高袁,2011.金沙江流域径流年代际变化特性分析[J].
*人民
长江*,42(6): 98-100.
- 中国地质环境监测院,2018.中国崩塌滑坡泥石流分布图[M].北京:
地质出版社.
- 中华人民共和国国土资源部,2006.泥石流灾害防治工程勘查规范:
DZ/T 0220-2006[S].北京:中国标准出版社.
- 卓嘎,建军,边巴次仁,2011.1960-2004年金沙江径流量特征及其对
气候变化的响应[J].
冰川冻土,33(2): 405-415.