

Research Progress of Landslide Dam Events of Jinsha River and Its Geomorphologic and Environmental Effects*

Lizeng Duan^{1,2,3}, Qingzhong Ming^{1,2,3}, Hucai Zhang^{1,2,3}, Huayong Li^{1,2,3}, Ziqiang Zhang^{1,2,3}

¹School of Tourism Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming;

²Laboratory of Plateau lake Ecology & Global Change, Kunming

³Yunnan Provincial Key Laboratory of Plateau Geographic Process and Environment Changes, Kunming

Email: duanlizeng00@163.com

Received: Dec. 7th, 2012; revised: Dec. 16th, 2012; accepted: Dec. 25th, 2012

Abstract: Strong neotectonic movements and regional landscape conditions result in landslide damming events, which widely exist in Jinsha River valley. Through summarizing the study results by other researchers and the our field investigations, the development processes of the landslide damming of Jinsha River and its effects on the evolution of landscape can be described as following sequences: strong neotectonic activities and climatic anomaly events → the occurrence of landslide blocking river → landslide dam (dammed lakes) formation → landslide dam (dammed lakes) broken/collapse → river re-shaping the valley geomorphology and environments → Modern Jinsha River valley landscape formation. It is clear that most of the damming occurred in the places with developed fault structures, rich in broken matters, with step and narrow valleys, high frequency earthquakes and climate abnormal. Even most of the landslides damming events occur suddenly and without any sign and are unpredictable, but after the damming and broken of the dams, the local, even the regional landscapes, environments, climate, ecology and the geomorphological processes, geological stabilities changed completely. The mechanisms and frequencies of landslide damming are unpredictable till now, together with the damage of the existed damming relics, it is difficult to get a complete and clear picture of the landslide damming history of the river system and makes more complex and difficult to conduct a study. Therefore, a comprehensive study planning is necessary to improve our understanding of the system, as there are a lot of aspects on how, when and why the landslide damming events happen in the area need to be investigated.

Keywords: Landslide Damming Events; Evolution of Rivers Valley; Geomorphologic and Environmental Effects; Advance; Jinsha River

金沙江堵江堰塞事件及其地貌环境效应研究进展*

段立曾^{1,2,3}, 明庆忠^{1,2,3}, 张虎才^{1,2,3}, 李华勇^{1,2,3}, 张自强^{1,2,3}

¹云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明

²高原湖泊生态与全球变化实验室, 昆明

³高原地理过程与环境云南省重点实验室, 昆明

Email: duanlizeng00@163.com

收稿日期: 2012年12月7日; 修回日期: 2012年12月16日; 录用日期: 2012年12月25日

摘要: 强烈的新构造运动和区域地质地貌条件使得堵江堰塞事件在金沙江河谷广泛发育, 通过总结前人研究与笔者野外考察和分析研究后认为, 堵江堰塞事件发育对金沙江河谷演化的作用与影响大致为以下次序: 构造活动及气候异常事件→发生滑坡堵江事件→形成堰塞坝(湖)→堰塞坝(湖)解体消亡→河谷地貌及环境变化→现代金沙江河谷地貌的形成。同时, 堵江堰塞现象有在地质构造破碎带、河谷纵比降变化、构造运动活跃和异常气候事件高发期高频发育之规律和具有突发性、短暂性等显著特点; 堵江堰塞造成区域沉积过程和河流下切动力过程的快速改变以及水文、局域气候、地质稳定性、河谷地貌和生态环境的快速变化。堵江堰塞事件在各河

*基金资助: 国家自然科学基金重点项目(U0933604, 40872118)和云南省中青年学术带头人基金、云南省科技发展计划2009年重点发展项目, 教育部科学技术研究重点项目(207102)资助。

段的发生形式、发育年代和机制、期次及次生地貌环境效应表现各异，加上后期侵蚀及堵江过程对于前期遗迹的破坏作用使得其研究变得十分复杂而困难。因此，在其系统研究、年代的确定、堰塞坝(湖)的识别、堰塞湖钻探采样及其沉积物信息提取研究等方面还有更大的深入探讨和提升空间。

关键词：堵江堰塞事件；河谷演化；地貌环境效应；进展；金沙江

1. 引言

河谷发育过程中，随着河流不断下切，边坡失稳，在地震和强暴雨事件的诱发下，造成滑坡或崩塌堵江，在堰塞坝长期稳定条件下，堰塞湖发育；随着堰塞湖水位的不断增高和堰塞坝稳定性的破坏，会出现溃坝并形成破坏性洪水事件。这一过程，会极大地影响河谷地貌环境演化的强度和方向。青藏高原的持续隆升导致高原边缘地带河流及其支流呈不对称分布状态^[1]，中国西南地区的大江大河底蚀作用强烈，河谷深切，区域构造运动强烈，使得该区域的崩塌、滑坡和泥石流的发育具备了优势动力及地貌条件。金沙江流经山高谷深的横断山区，处于古特提斯北域的次级断裂、三江并流断裂及金沙江断裂等多个构造断裂带范围内，活跃的断块相互挤压、差异性升降和断裂走滑等活动导致堵江堰塞事件频发，对其河谷地貌演化产生了巨大的作用与影响，使得金沙江河谷地貌演化研究更加复杂化。众多学者通过野外考察和室内分析，对堵江堰塞残留进行堰塞坝及堵江规模识别、堰塞湖沉积物的判别、沉积物进行测年以及其他指标的测定，并结合区域构造活动重构地质时期的堵江堰塞事件，探讨其对金沙江河谷地貌演化的作用与影响，成果颇多。本文在总结前人研究成果的基础上，对研究中存在的不足加以分析，以期推动金沙江堵江事件及其环境效应的研究。

2. 堵江事件及堰塞坝(湖)研究概况

河谷斜坡或边坡岩土体因崩塌、滑坡及其直接转化成的泥石流造成的江河堵塞与回水现象，统称为滑坡堵江事件^[2]。在过去的 100 多年中，世界范围内的众多山区包括欧洲的阿尔卑斯山、喜马拉雅山、中亚山地，中国青藏高原边缘区和北美的安第斯山等，都发生了许多由滑坡崩塌坝导致的堵江事件。目前国外对滑坡堵江事件的研究主要集中在滑坡堵江的识别、天然堆石坝的形成特征、溃坝最大洪水量估算、滑坡

堵江的危害及治理等方面。Kirschdaum^[3]等通过对全球滑坡目录中记录的热带降雨记录卫星数据和滑坡堵江数据进行分析，发现喜马拉雅、中美洲及中国中西部省份的降雨季节性变化和空间分布于滑坡堵江事件的发育具有良好的相关关系。Lashermes et al. (2007), Galewsky et al. (2006), Singhroy et al. (2002), Petley et al. (2002)运用遥感方法对崩滑堵江规模、发育数量及趋势、倾斜地形的发育规律和潜在的危害进行了研究。Yilmaz et al. (2010)研究发现，可利用降雨多重采样分析法对诸如洪水等灾害事件进行预测，并进行水文动力模型模拟，进而对崩滑堵江事件进行科学预测。G. Evans et al. (2011)对 100 多年来全球范山区尤其是阿尔卑斯山、喜马拉雅山、中亚山地、中国青藏高原边缘区和北美安第斯山等地区及周边的崩滑和堵江事件进行了详尽的阐述，着重对其诱发的自然或人为机制、工程性防治措施、发育特征和规律、滑坡坝稳定性等进行深入分析，并对各地典型崩滑及堵江事件进行分类和剖析^[4]。

我国是一个堵江现象众多、潜在危险性巨大的地区(图 1)。虽在这方面的研究起步较晚，但成果显著。柴贺军等^[5-7]根据滑坡堵江发育的自然环境、地层岩性、诱发因素和堵江类型将中国堵江分布划分为青藏高原东南部、横断山区、川-鄂山区、秦岭大巴山区、西北高原和台湾山区等六个典型区。通过对收集到的 147 起滑坡堵江事件按斜坡破坏机制、滑坡物质组成、滑坡体的体积等对滑坡堵江进行了分类，发现其中滑坡堵江(70.0%)、崩塌堵江(17.1%)、泥石流堵江(12.9%)，提出了完全堵江和不完全堵江等四种基本模式，通过研究堵江滑坡在空间上、时间上发育的规律，认为其发育与我国的降雨分布、地质地貌、断裂分布、地震活动和地层岩性的分布密切相关。晏鄂川等^[8]对茂汶-汶川段岷江两岸滑坡的发育及分布规律进行了研究，分析了滑坡发育及河谷之间的关系，认为地层岩性、地质构造和地貌是控制滑坡发育的主要三大

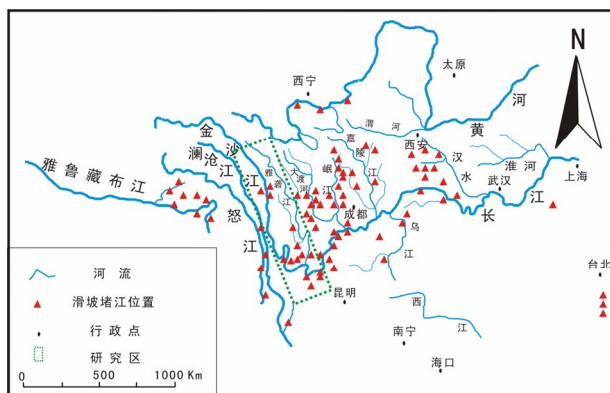


Figure 1. The distribution of landslide damming in China (modified after Chai Hejun et al.^[5])

图 1. 中国滑坡堵江分布图(据柴贺军等^[5]修改)

因素。胡卸文等^[9]则将滑坡堵江机制归纳为滑坡下滑速度、主河道水流量与速度和主河道宽度等三点。

崩滑堵江堰塞事件在受到众多不同领域学者的青睐的同时，忽视了其在河谷水系发育和演化中的地貌动力过程之重要角色，其是河流地貌研究的重点之一，也是集区域地质构造活动、气候环境变化、地质和气象灾害事件等个要素的地貌表征之一。另一个方面就是人们注重灾害事件发生后的研究，缺乏对人口聚集区潜在滑坡堵江事件发生及其预警的超前研究工作和应急处理工作。随着全球变化速率的加剧、不稳定气象气候事件发生频率的增高、地壳运动活动期的到来，加强其预测研究、气候突变事件与堵江事件相关性研究、短时间内天然水库的利用及潜在灾害评估、区域对比及典型区域内周期性发育等方面的深入研究迫在眉睫，应作为以后研究的重点。

3. 金沙江河谷堵江事件研究

3.1. 堵江事件发育机制研究

塑造金沙江地貌的内营力为普遍的强烈隆起和局部断陷，以及由此引起的地震和山崩。山崩大多发育在深切的高山或中山的谷坡部分，沿岩石的层面、分化裂隙或节理崩落，崩塌的岩块大者可达 4000~5000 m³。金沙江中游较大的崩塌现象见于白车村、宋那、拖顶、格浪水、洼卡、王大龙、松木达等地(图 2)，大多在石灰岩与片岩和大理岩互层分布地区^[10]。如图 1 示，其堵江堰塞事件主要分布于下游段及各支流，此外，崔杰等^[11]对金沙江中游乌东德电站附近的一处古滑坡体进行了成因分析和稳定性评价，认

为该滑坡体造成了一次大规模的堵江事件；许述礼^[12]在进行昔格达层变形特征及其成因时发现，其湖相沉积特征明显，在金沙江中游的华坪-渡口段广泛发育；李乾坤(2011)在昔格达地层研究时发现，昔格达组地层分布区内滑坡坝普遍，有昔格达组分布的河流都有堵江事件发生，其中岷江 15 个，雅砻江 8 个，大渡河 9 个，金沙江干流 21 个，金沙江其他支流 12 个^[13]。

统计发现，超过 90%的堰塞湖都是因地震导致的快速滑坡而塑造^[14-16](表 1)。区域构造运动如地震是造成的滑坡等是堵江事件的重要机制之一，金沙江流域是新构造运动强烈上升的地区，地震活动频发(图 3)，其在近代历史时期发生了众多地震、崩塌和叠加了暴雨的滑坡和泥石流，进而诱发堵江堰塞事件。昔格达层覆盖的活动性断裂地段，出现的地震裂隙(包括古地震的裂隙)和分布在完整基岩上的昔格达层中的地震裂缝(包括古地震裂缝)，为古地震的产物，有地震堰塞迹象^[12]；此外，汶川“5.12”大地震不仅在地震区内产生大量的崩塌、滑坡等地质灾害，截止到 2008

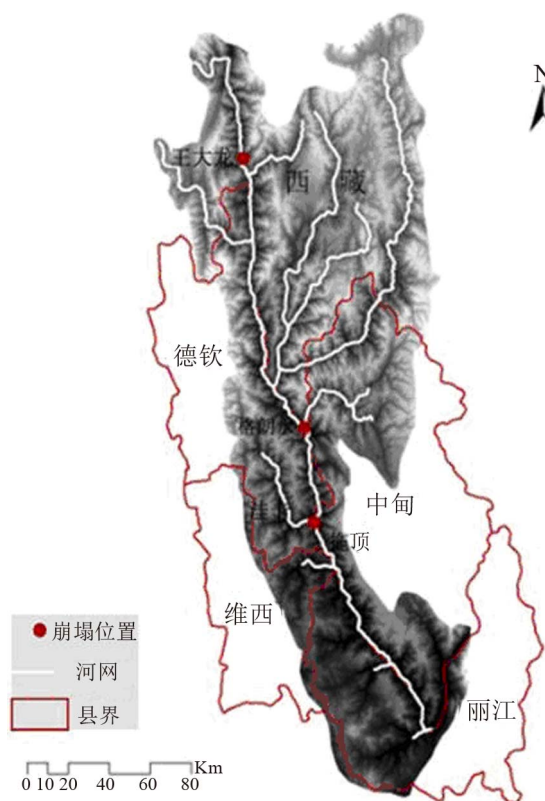


Figure 2. The shadowgraph of the landslide damming concentration areas in the middle of Jinsha River
图 2. 金沙江中游崩塌多发区位置影像图

Table 1. Statistical table of landslide damming events induced by the earthquakes in China (modified after Chai Hejun^[5], Nie Gaozhong^[17])
表 1. 中国地震诱发堵江事件统计表(据柴贺军^[5], 聂高众等^[17])

滑坡名称	地点	时间	所堵江河	诱发因素
小南海	四川黔江	1856	长江右岸支流老窑溪	地震(M=6.4)
叠溪(小桥)	四川茂县	1933.08.25	岷江	地震(M=7.5)
叠溪(小梅子)	四川茂县	1933.08.25	岷江	地震(M=7.5)
叠溪(大梅子)	四川茂县	1933.08.25	岷江	地震(M=7.5)
花红园	四川茂县	1713	岷江	地震(M=6.5)
公棚	四川茂县	1933.08.25	岷江支流松坪沟	地震(M=7.5)
阿旺村	云南东川	1733	小江	地震
曲溪	云南建水	1970.01.05	元江	地震(M=7.7)
海口、马颈子	云南永善	1974.05.11	金沙江支流小河	地震(M=7.1)
北关河	云南	1917.07.31	北关河	地震(M=6.7)
磨西面	四川泸定	1786.06	大渡河	地震(M=7.5)
摩岗岭	四川泸定	1786.06	大渡河	地震(M=7.5)
翠华山	陕西长安	731	渭河支流	地震
桃岭	中国台湾	1941.12.07	清水溪	地震(M=7.1)
唐家坝	四川汶川	2008.05.12	涧河	地震(M=8.0)
二坪	湖北咸丰	1856.06.10	蛇盘溪	地震(M=6.5)
-	台湾台南	1986.06.07	清水溪	地震(M=6.75)
黄金坝	云南大关	1917.07.31	回龙溪	地震(M=6.75)
-	台湾嘉义	1941.12.17	阿里山溪	地震(M=7)
-	宁夏海原	1920.12.16	响河、长源河、散渡河	地震(M=8.5)
额阿曲	西藏墨脱	1950.08.15	雅鲁藏布江	地震(M=8.6)
-	云南通海	1970.01.05	曲江	地震(M=7.7)
草塘坝	台湾南投	1999.09.21	涩子坑溪	地震(M=7.7)

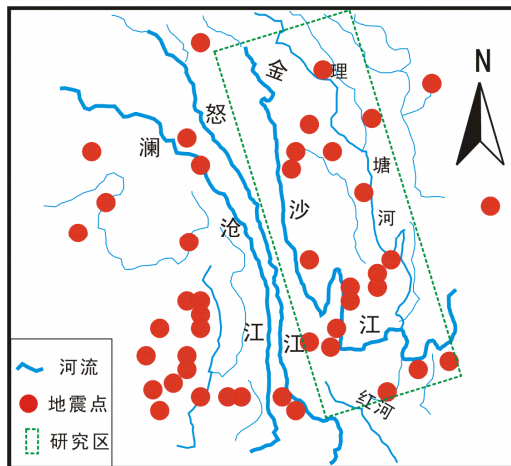


Figure 3. The earthquakes occurred along the Jinsha River and its tributaries (modified after Anne Socquet, Manuel Pubellier, 2005)
图 3. 金沙江及其支流地震发育点分布图(据 Anne Socquet, Manuel Pubellier 修订, 2005)

年 8 月 22 日, 其整个核心区内形成了 104 处滑坡堵江导致的堰塞湖。

堵江事件多与地震关联, 就目前水平而言, 地震还是一个不可预知和有效预防的地质灾害, 因此我们认为, 加强对滑坡泥石流发生其它条件和潜在危险性研究, 系统评估堵江事件及其危害, 进而提出预防的可行方案是应当加强对产生堵江灾害发生的自然条件进行研究, 进行灾害危险区域的划分并提出有效预警。

3.2. 堰塞坝(湖)及其沉积物研究

河流岸坡失稳及堵江事件在山区流域十分常见, 快速堵江成坝, 随之成湖, 但作为天然坝类型之一的滑坡坝无法保持长时间^[18], 能够稳定一年以上并形成

堰塞湖沉积的滑坡坝相对较少^[19]。

金沙江河谷发育众多堰塞湖并引起学者们的关注,施雅风等^[20]将分布于金沙江与龙川江交汇处的龙街粉砂层辨别为堰塞湖的快速沉积物,认为在第四纪晚期,龙街以下的金沙江某段的高山深谷间因地震、泥石流或其它原因,曾发生了大规模的山崩,阻塞了金沙江的通道,使之成为堰塞湖。程捷(1994)探讨了奔子栏到金江街之间的金沙江发育,认为金江吊桥一带粘土发育水平层理是由于程海断裂活动产生的局部积水而形成的^[21]。赵希涛等(2006, 2007)在对大具盆地砾石层进行考察研究过程中,目睹了位于虎跳峡口西北岸滑石板处的山崩导致金沙江短暂的堰塞成湖,并在云南石鼓“长江第一湾”附近发现了10余处典型的第四纪湖相沉积物露头^[22,23]。张永双等(2007)在德钦奔子栏一带的金沙江河谷两岸发现了发育于第四纪阶地之下的湖相纹层状粘土层,认为该湖相层为滑坡碎屑堵江所形成^[24]。李乾坤等(2011)在丽江永胜南部的金沙江右岸发现了大型古滑坡体和沿江分布的长达46 km的堰塞湖沉积物,认为该古滑坡体造成了严重堵江事件并形成堰塞湖^[25]。

年代学是地貌环境演化研究的关键之一,众多学者将堰塞湖的沉积物残留作为研究对象,对其形成时代、过程及古气候环境的恢复进行深入研究,尤其对龙街粉砂层的形成时代进行了讨论,卞美年(1940)将其年代定为晚更新世^[26,27];钱方、浦庆余等(1977)的研究认为其形成于大理冰期^[28];黄万波等(1978)认为晚更新世晚期^[29];闵隆瑞等(1990)依据元谋组与龙街粉砂层局部连续沉积关系,并采用¹⁴C方法确定其形成时代的上限和下限分别定为10000a BP和0.85 Ma BP左右^[30];吕金福等(1992)根据研究中未发现龙街粉砂层中有孢粉和动物化石、地层接触关系和测年等认为其下限为中更新世末期或晚更新世初期,而将其上限定为晚更新世晚期^[31];李朝柱等(2011)通过钻探获取了完整的龙街粉砂地层序列,并采用OSL测年确定该地层形成与150~30 ka BP^[32];赵希涛等(2007年)对石鼓古湖的研究中发现十多处典型第四纪湖相沉积物露头,构成了金沙江的第二、三、四级阶地,其沉积物上部年代为243.3~88.0 ka BP的中更新世至晚更新世早期,上覆的第四纪阶地沉积物年代为88.0~80.9 ka BP^[23];张永双等(2007)利用U系法测得德钦-奔子栏段的金沙江右岸湖相粘土层上部和下部年龄分别

为55.4 ka ± 3.5 ka BP和82.1 ka ± 6.6 ka BP,左岸为122.0 ka ± 12.4 ka BP,并认为该堰塞湖形成于晚更新世早中期^[24];物崔杰,王兰生(2008)采用¹⁴C测年法对金沙江中游乌东德段巨厚堆积体进行测年,显示滑坡发生时代约在19,000a BP^[11];李乾坤(2011)通过ESR年代测定法对丽江永胜新庄、朵美渡口处的堰塞湖沉积进行了测定,并通过年龄分析和对比,认为新庄一带为最新堰塞湖沉积,朵美渡口一带年龄较老,为堰塞湖沉积的末端,同时通过和文献对比,推知寨子村滑坡堵江形成堰塞湖发生于约260 ka BP^[13]。

4. 堵江事件对金沙江河谷演化的影响研究

4.1. 堰塞(坝)湖的地貌环境效应

崩塌滑坡堰塞坝(湖)具有显著的地貌环境效应,其对地貌形态和过程的影响,国际减灾战略机构(The International Strategy of Disaster Reduction, ISDR)认为体现在以下三个方面^[33]: 1) 湖泊相沉积、河流相冲积和三角洲泥沙沉积引起的河流坡度、地貌形态和坝上游河道地质过程变化; 2) 堰塞坝破坏过程中坝体及湖相沉积物受到水流侵蚀冲刷形成高强度输沙,引起坝体下游河道淤积抬升,趋于游荡; 3) 堰塞体壅水和溃决引起的水流快速泄降易导致周边岸坡发生次生崩塌和滑坡。如果滑坡坝能够稳定存在数百、数千甚至更长时间,滑坡坝、坝前堰塞湖及堰塞湖沉积对岸坡夷平与河流下切进程的影响,尤其是对所在区域地貌演化的影响就可能是显著的、深远的^[34]。

柴贺军(1995)在研究1933年叠溪地震滑坡堵江事件时对堵江对河床及边坡的影响进行了分析^[35]; Hasbargen, Paola (2000)研究发现,堰塞体形成之初,大量泥沙堆积,抬高局部河谷谷底,增加谷底宽度,改变河谷形态,并可能促进河谷的侧向侵蚀^[36]。而坝体溃决所引发的高强度输沙导致下游河道和红泛区严重淤积,强烈影响河流地貌的中长期演变过程及其稳定性^[37,38]。余国安等(2010)系统分析了崩滑堰塞坝(湖)的地貌环境效应,将其时间尺度上分为短期和长期两种,并分别对堰塞体快速溃决和长期稳定存在两种模式的地貌环境效应进行了研究,认为堰塞坝(湖)是河床持续下切、岸坡失稳而自然反馈形成的裂点,能增加河流阻力,控制河床下切,如能长期维持是河流健康稳定的促进因素^[39]。近年国内外的研究较多涉

及青藏高原及喜马拉雅山脉区域,分析其对河流泥沙淤积和侵蚀作用的持续影响^[40-42]。

4.2. 堵江事件及堰塞坝(湖)对金沙江河谷地貌发育环境效应研究

由滑坡堵江造成的不良地质环境,滑坡运动造成的破坏,入江时形成的涌浪、滩险,堰塞湖的淹没及水位升降变化引起的岸坡变形破坏和天然坝突然溃决导致的次生洪灾及冲刷、淤积等对生态、环境的影响等,统称之为滑坡堵江事件的环境效应^[2]。在漫长的地质历史时期中,金沙江发育的众多堵江事件并对其河谷形态、地貌发育及生态环境产生了重大影响。由于堰塞坝(湖)的存在,河床侵蚀基准抬高,并常常在河床形成显著裂点,河流阻力增大,上游河床下切受到控制,岸坡变缓,趋于稳定,这一点对喜马拉雅山及青藏高原边缘的众多河流如印度河、雅鲁藏布江、大渡河、岷江、金沙江等尤为突出^[43]。

在金沙江河谷演化研究中,很多学者对长江第一湾成因及年代各抒己见,其中有典型代表的观点为袭夺说和非袭夺说,支持河流袭夺说的学者包括丁文江、李春昱、G. B. 巴而博、P. 米士、任美镠、杨达源、明庆忠等。以任美镠为代表,他 1959 年在对白汉场-剑川宽谷的实地考察后认为河流袭夺的证据有:宽广的古谷地、明显的阶地和一系列的盆地和湖泊^[44]。而以沈玉昌等为代表的非袭夺说认为,石鼓附近金沙江大拐弯乃构造弯而非袭夺弯,在鸿文村与玉龙山之间也没有袭夺的痕迹,古宽谷中没有发现河流相沉积物。这其中也包含了众多关于堰塞湖及其对金沙江河谷地貌发育的影响与作用研究。赵希涛等(2007)在石鼓附近的“长江第一湾”段发现了多处因冰川堰塞而形成的石鼓古湖沉积,并初步研究了其与现代金沙江河谷发育的关系,并认为其发育与第四纪以前^[23];明庆忠等(2007)在对长江第一湾形成时代研究过程中,通过探讨云南高原地貌发育及区域构造运动的影响,认为长江第一湾形成于中更新世晚期^[45],而这一时期也正是金沙江堵江事件多发的时代,构造活动导致的崩塌滑坡等地质活动频繁,成为了堵江堰塞的重要机制之一。

金沙江其它河段河谷演化过程及机制各异,这点很早便引起了众多学者的关注,李会中等(2006)对坪子滑坡形成机制与金沙江河谷地貌演化的地质进行

了研究,认为发生在 170 ka BP 的滑坡堵江事件形成了堰塞湖,而后期堰塞坝逐渐解体,现代金沙江河谷地貌雏形显现,随后,虽然当多、金坪子缓坡后缘平台后侧仍有少量崩塌事件发生,但金坪子滑坡地貌改造的主体却发生在金坪子缓坡平台前缘斜坡下游侧缘一带^[46]。在河谷地貌演化过程研究方面,赵希涛等(2007)在对小中甸古湖形成演化与金沙江河谷发育关系研究时,认为上新世晚期至早更新世广泛发育的断陷活动并不影响金沙江的流动^[23,47],因为早在上新世早中期,金沙江就在其现在的位置上存在,而中更新世时期,金沙江河谷不同地段可因冰川、冰水、崩塌、滑坡或泥石流等堆积物的堰塞而形成湖泊,邻近的石鼓古湖则在 8 万多年前被金沙江再次贯通而消失;程捷(1994)在探讨金沙江奔子栏-金江街发育史时,对丽江-鹤庆谷地的沉积结构等进行了研究,认为早更新世时,该谷地就有一定范围的湖泊发育,到了中更新世,由于新构造运动加剧,致使该带强烈抬升,湖泊消失、谷地解体^[21];孔屏(2009)通过宇宙成因核素和昔格达古湖对长江中游演化研究时发现,对于沿长江中游冲积砾石上方的湖泊沉积物的形成有两种可能性:一是长江最初向东流,下游河道被山体滑坡或冰碛物所破坏;二是由于原来的河流通道堵塞事件触发了水流重组。进而导致湖泊的发育,最终穿过新的溢洪道,形成了一个新的流向东部的河道^[48]。在颇具争议的金沙江雅砻江河口-金坪子段发育研究中,胥勤勉等(2011)通过详细的区域地貌、地层对比研究,将该段河谷发育归纳为高原河流发育、高原湖泊和盆地形成、古雅砻江和古金沙江以及金沙江贯通东流等四个时期^[49]。李乾坤等(2011)在永胜寨子村金沙江滑坡堵江的研究中,探讨了堰塞湖沉积对地貌演变的影响,认为其在河流上具有溯源追踪,在支流上仍会发现湖相沉积,具有“树枝状”分布的特征,而不同堰塞湖相沉积的平面形态也会随滑坡坝在河流中位置的变化而变化,其剖面分布特征主要体现在于河流相砂卵石层的叠置关系上^[25],这就为堵江及堰塞湖的多期发育、过程和机制、河水动力条件及其金沙江河谷地貌演化的关系研究提供了证据。

4.3. 昔格达组地层及其与金沙江河谷发育关系研究

金沙江水系中的大部分主、支流最初都是沿着断

裂带发育的,金沙江水系的发育和演化过程从本质上反映了青藏高原东南缘的构造活动及梯度的形成,而梯度的形成反映了青藏高原的隆升过程。被学者关注的昔格达组地层广泛分布在中国西南地区,被认为是该区晚新生代古大湖期沉积。而昔格达组地层的沉积环境主要是不同序列河流岸坡失稳形成的滑坡坝堰塞湖,其次为沿断裂带发育的河流局部下陷演变而来的过水断陷湖泊^[50],施雅凤等(1985)认为昔格达古湖的消亡同金沙江的河流下切有关^[51]。陈智梁等(2004)通过研究指出,以泸定昔格达组堰塞湖沉积为代表的一系列滑塌-堰塞-沉积事件,是在青藏高原东部显著隆升和新构造活动增强的背景下发生的^[52],并认为在昔格达组沉积前,古大渡河经石棉往南沿现今安宁河谷注入古金沙江,由于河床崩塌等原因在泸定地区形成堰塞湖,非大区域沉积作用形成昔格达组。昔格达组沉积前宽谷地貌由河流作用形成观点得到张岳桥等^[53,54]的支持。孔屏(2009)通过对金沙江的主支流河谷保存着大量的湖相沉积-昔格达层的研究,测得其年代为 1.58~1.34 Ma^[55],认为在昔格达古湖形成之前攀枝花至涛源河流流向为自东向西,与现流向相反,伴随着昔格达古湖的形成与切穿,攀枝花至涛源一带的水流开始自西向东,金沙江从此开始向东流去。郑勇等^[56](2009)对昔格达组湖相沉积与其下伏河流相砾石的不同物源特征进行研究,认为伴随着昔格达古湖的形成,金沙江河流经历了演化史上的巨变,即在昔格达古湖形成之前,雅砻江在攀枝花地区流向为自东向西,随着昔格达古湖的形成,金沙江上游被袭夺,金沙江与雅砻江在攀枝花汇合。

5. 讨论与展望

5.1. 填补研究中的空白

在堵江堰塞事件宏观尺度研究成果日益丰富的基础上,应以金沙江等河流作为研究载体,运用 GIS、RS、GPS(3S)等新技术手段对金沙江河谷崩滑堵江堰塞事件的分布进行深入研究;通过区域航片的像对,将地形逐点数字化,并建立数字化高程模型(Digital Elevation Model, 简称 DEM),通过 DEM 进一步派生出坡向、坡度、坡长、坡型、流域分水线、水系及水系密度、切割深度、落差、流域形态参数、流域面积、河道长度等许多定量要素,阐明堵江堰塞事件在金沙

江各河段分布特征和发育机制的差异性。

而在精细的 DEM 图中,可以准确地求出流域的实际面积,并结合区域气象监测资料,选取金沙江流域不同地段如奔子栏、长江第一湾附近地区、元谋江边、乌东德和巧家等典型崩滑堵江事件多发区进行深入剖析,对其流域内水量变化导致的河谷边坡水-岩相互作用等河谷地貌演化的外动力过程变化特征进行定量研究,绘制流域内潜在堵江堰塞事件发育等级图。此外,对堵江堰塞事件进行动态模拟,摸清其发育过程,对河谷岸坡裂点等进行工程性措施的防护,宣传堵江堰塞事件的安全科普知识,将灾害减到最小。

5.2. 突破性的研究成果迫在眉睫

金沙江及其流域因其独特的地理位置和自然环境特征,蕴含巨大的生物资源和水能资源。长期以来我国对金沙江流域的综合研究较少,缺乏突破性的成果,尤其是在地震断裂带、河谷地质灾害等方面。而在这样的研究状态下,正在金沙江各河段集群式的展开大规模水电站建设,现今已有向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德、观音岩、鲁地拉、龙开口、金安桥等已建、在建和筹建过程中(图 4),在不久的将来,超过二十座比降和间距几乎不到 200 m 和 100 km 就有水电站坐落于金沙江。

众多水电站的建设,在其经济效益背后,将对原本生态脆弱的金沙江在区域地质、水安全和生态环境等方面产生巨大的影响,从某种意义上说其就是人为的堵江工程。电站大坝改变了河流水力条件及河床水-岩相互作用,诱发更多山体滑坡等地质灾害,甚至导致下游地区洪水的发生。因此,只有在建站之前进行深入研究和科学评估,在区域地质、构造活动历史

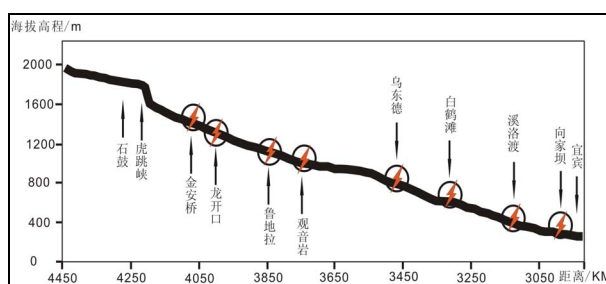


Figure 4. The sketch map of planned hydropower stations along Jinsha River (after Yang Dayuan et al., 2006)
图 4. 金沙江河段水电站分布示意图(据杨达源等, 2006)

及其周期等方面取得突破性成果,才能将金沙江河段开发的经济效益、社会效益和生态效益相统一,在河谷自然演化和人类科学开发利用过程中真正做到人地和谐共生。

5.3. 加强系统综合研究

众多学者虽通过不同的研究方法和角度对金沙江堰塞事件及其堰塞湖沉积进行了深入研究和探讨,并得到了许多重要的发现和结论,但无一例外均是从金沙江某一段河谷或区域进行堵江及堰塞湖的研究,分析其堵江机制、过程、时代等问题,较少进行整个金沙江流域的系统研究,加之后期侵蚀及堰塞事件对前期堵江堰塞残留的严重破坏使得研究更加复杂和困难,至今尚未寻求到其发生的普遍性和规律性认识。因此笔者认为,应结合前人的研究成果,扩大研究的时空尺度,在构造活动及高原隆升、地质历史过程和局部偶然性等因子融入到研究范畴,进行综合研究,深入探讨金沙江及其流域的堵江事件、其堰塞坝(湖)沉积物及其地貌环境效应。

5.4. 提升研究的社会服务功能

工业革命以来人类活动的不断增强,导致气候的稳定性受到破坏,并诱发突发性的气象灾害事件。云南省在西南季风的强烈影响下,近年来降雨等发生巨大波动(图5),在年际变化较大的基础上总体年均降雨量偏低,并出现如2009至2011年的旱灾等灾害性事件,区域生产生活受到严重影响。金沙江河流落差大,纵比降大者达3000余米,流域气候特征差异性大,在典型干热河谷环境背景下,下游到上游河段随海拔高度的增加,年均降雨量递减,导致河水流量的年际变化。此外,区域突发性异常气候事件,诱发流域内堵江堰塞事件的发生,进一步引发次生灾害事件。

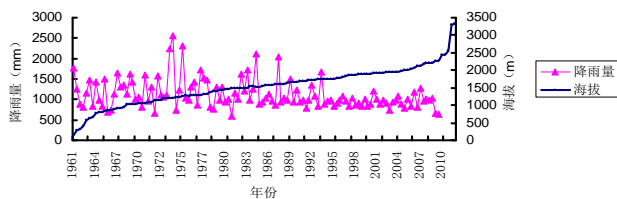


Figure 5. 50 years' variation trend of annual rainfall and its relationship with elevation in Yunnan (after Hu Xiongqiang, Tan Shucheng et al., 2012)

图5. 50年来云南省年均降雨量变化及其与海拔高度之间的关系(据虎雄岗、谈树成等, 2012)

此外,随着人类活动强度的加大和气候变暖导致上游水源区雪线下降,水源区补给减少,河流水动力模式发生变化,金沙江流域堵江堰塞事件与区域气候环境变化之间关系的更加紧张,堵江堰塞事件的发育及其堰塞坝的溃决,都有其自身的规律和特点,深入研究和估算其最大蓄水量、滑坡地质稳定性、洪灾危险性预算、上下游河段堵江堰塞事件的次生灾害预测等,并将其纳入灾害预报体系中,真正做到科学研究和社会服务的良好结合。

5.5. 堵江堰塞事件非确定性的研究

从地质历史时期到现在,金沙江河谷及其支流发育了众多堵江堰塞事件已是不争的事实。现今遗存的古堰塞坝(湖)是优良的研究载体,其发育特征及规律是作为现代河谷演化过程中潜在崩滑堵江堰塞事件发育预测的有力佐证之一,而其研究方法和手段的不断更新也将对现代堵江堰塞事件的研究奠定良好的基础。

但是,现今研究的大都是通过对现代金沙江水系形成之后所遗留的堰塞坝(湖)进行堰塞坝识别、堰塞湖沉积物各项环境代用指标及年代的测定等进行分析。埋藏堰塞坝(湖)及其沉积物往往被人们所忽视,而且在地表所发现的堰塞坝(湖)及其沉积物也遭受后期的强烈侵蚀,即研究对象也并非其本来面貌,所以只能人为地进行对堵江堰塞事件规模、期次及过程的推断,这就导致了研究结果的科学性降低。加强钻探取样的应用和动态模型模拟不应忽视,这样才能使得金沙江堰塞事件研究向更长时间尺度和更高精度的方向发展。另外,我们必须面对现实,对于如地震及其诱发堵江事件这样目前还不可准确预测的地质现象,应当加强对滑坡泥石流堵江事件发生潜在危险级别的区分、危险影响程度的划分和二次灾害危险的评价,避免灾后重建中或重建后不久再次受到灾害危及,这方面,我们有极其深刻的经验教训。

5.6. 突破年代确定及统一这一难点

在金沙江河谷水系发育演化研究中,年代的确定是基础和关键,没有精确的年代数据,其研究结果在一定程度上也就缺乏说服力。随着地学测年手段的不断进步, ^{14}C 放射测年、光释光、ESR、U系测年和宇宙成因核素测年等一系列方法的发展和不断完善,不

但使测年样品更加多样性,测年精度和可靠性也逐步提高,造就了金沙江堵江事件及其堰塞湖沉积物研究取得了大批成果。但另一方面,正是由于测年手段的更新及样品的多元化,在金沙江河谷很多相似或相同河段,便出现了不一致的测年结果,尤其是在诸如昔格达组地层等的成因及年代学上颇具争议。在年代问题上的统一成为金沙江河谷地貌演化历史的探索中的重点及难点。

20世纪70年代以来,树木年轮作为优良的研究载体,被广泛地应用于气候学、考古学、水文及生态学等领域。树木年轮的分支学科之一树轮地貌学,是以植物生理学为基础,以树木年轮生长特征为依据,地貌过程对年轮生长的影响或是从年轮特征的变化来反演地貌演化过程中的隐藏信息^[57]。因此可以在金沙江流域堵江地段选取优良的树轮样品,根据其根茎细胞解剖机构及组合特征变化中提取金沙江地貌过程信息,进而反演现代地貌过程,这已经越来越广泛地应用于雪崩、火山爆发、地震、山体滑坡及泥石流等灾害性和突发性地貌事件的研究中,并极大地推动了地貌研究的新进展。

此外,根据堵江发育机制深入剖析,可借助气候模型和水文模型对未来水资源的可能变化和气候变化对流域径流量的影响,结合区域地质构造特征,可以更加精确地评估崩滑堵江事件的发育规律,在完善堵江事件发育预测方面研究的同时,减少崩滑堵江事件对区域经济社会的影响。

参考文献 (References)

- [1] Z. Y. Wang, G. A. Yu, G. Brierley, et al. Stream network and knickpoints in the Sanjiangyuan Region. *Annals of Warsaw University of Life Sciences, Land Reclamation*, 2010, 42(1): 79-90.
- [2] 柴贺军. 大型天然水体的环境效应研究[J]. *地质灾害与环境*, 1998, 9(2): 7-12.
- [3] D. Kirschbaum, R. Adler, D. Adler, C. Peters-Lidard, et al. Global distribution of extreme precipitation and high-impact landslides in 2010 related to previous years. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(5): 1536-1550.
- [4] S. G. Evans, R. L. Hermanns, A. Strom, et al. *Natural and artificial rockslide dams*. Berlin: Springer, 2011: 1-231.
- [5] 柴贺军, 刘汉超, 张俦元. 中国滑坡堵江事件目录[J]. *地质灾害与环境*, 1995, 6(4): 1-9.
- [6] 柴贺军, 刘汉超, 张俦元. 中国滑坡堵江的类型及其特点[J]. *成都理工学院学报*, 1998, 25(3): 411-416.
- [7] 柴贺军, 刘汉超, 张俦元. 中国堵江滑坡发育分布特征[J]. *山地学报*, 2000, 18(增刊): 51-54.
- [8] 晏鄂川, 刘汉超, 张俦元. 茂汶-汶川段岷江两岸滑坡分布规律[J]. *山地研究*, 1998, 1(2): 109-113.
- [9] 胡卸文, 黄润秋, 施裕兵等. 唐家山滑坡堵江机制及堰塞湖溃坝模式分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(1): 181-189.
- [10] 沈玉昌. 长江上游河谷地貌长江河谷地貌[M]. 北京: 科学出版社, 1965: 24-84.
- [11] 崔杰, 王兰生, 徐进等. 金沙江中游滑坡堵江事件及古滑坡体稳定性分析[J]. *工程地质学报*, 2008, 16(1): 6-10.
- [12] 许述礼. 昔格达层变形特征及其成因[J]. *四川地震*, 1990, 3: 63-64.
- [13] 李乾坤. 金沙江寨子村滑坡及其堰塞湖沉积[D]. 云南: 昆明理工大学, 2011.
- [14] R. L. Schuster, J. E. Costa. Effects of landslide damming on hydroelectric project. *Proceedings of the International Association of Engineering Geology by International Association of Engineering Geology*, 1986: 1295-1307.
- [15] N. D. Perrin, G. T. Hancox. Landslide-dammed lakes in New Zealand-preliminary studies on their distribution causes and effects. *Landslide*, 1990, 22(3): 1457-1465.
- [16] M. D. Picard. Cannon landslide dam, the Abruzzi, East-Central Italy. *Journal of Geological Education*, 1991, 39(5): 428-431.
- [17] 聂高众, 高建国, 邓砚. 地震诱发的堰塞湖初步研究[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(3): 293-300.
- [18] J. E. Costa, R. L. Schuster. The formation and failure of natural dams. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, 100(7): 1054-1068.
- [19] M. Antognini, R. Volpers. A late Pleistocene age for the Chironco rockslide (Central Alps, Ticino, Switzerland). *Bulletin for Applied Geology*, 2002, 7(2): 113-125.
- [20] 施雅风, 崔久之, 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: 209-212.
- [21] 程捷. 金沙江奔子栏-金江街段发育史探讨[J]. *华东地质学院学报*, 1994, 17(3): 234-240.
- [22] 赵希涛, 张永双, 胡道功等. 云南丽江地区大具盆地早更新世金沙江砾石层的发现及意义[J]. *地质通报*, 2006, 25(12): 1381-1386.
- [23] 赵希涛, 曲永新, 张永双等. 滇西北丽江地区石鼓古湖的发现及其在现代金沙江河谷发育中的意义[J]. *地质通报*, 2007, 26(8): 960-969.
- [24] 张永双, 赵希涛, 胡道功. 滇西北德钦地区金沙江奔子栏古堰塞湖的发现及意义[J]. *地质通报*, 2007, 26(8): 970-975.
- [25] 李乾坤, 徐则民, 张家明. 永胜金沙江寨子村古滑坡和古堰塞湖的发现[J]. *山地学报*, 2011, 29(6): 729-737.
- [26] 姜年. 云南元谋盆地地质[J]. *中国地质学会杂志*, 1940, 20(1): 23-33.
- [27] 卞美年. 云南新生代地质初步观察[J]. *地质评论*, 1940, 20(1): 179-205.
- [28] 钱方, 浦庆余等. 云南元谋盆地第四纪冰期与地层[A]. 中国地质科学院. 中国第四纪冰川地质文集[C]. 北京: 地质出版社, 1977: 55-81.
- [29] 黄万波, 王景文, 崔人杰等. 元谋组、龙街组及昔格达组的时代对比[A]. 中国地层古生物论文集(第七辑)[C]. 北京: 地质出版社, 1978: 30-39.
- [30] 闵隆瑞, 尹占国, 张金起. 龙街粉砂层形成时代及其古环境[J]. *第四纪研究*, 1990, 4: 354-361.
- [31] 吕金福, 曹家欣. 云南龙街盆地第四纪沉积及环境演化[J]. *第四纪研究*, 1992, 3: 216-222.
- [32] 李朝柱, 蒋复初, 傅建利等. 云南元谋龙街粉砂层的形成时代研究[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(5): 933-934.
- [33] D. Alford, R. Schuster. *Usui landslide Dam and Lake Sarez: An assessment of hazard and risk in the Pamir Mountains, Tajikistan*. New York and Geneva: ISDR Prevention Series No. 1. United Nations, 2000.
- [34] 徐则民. 金沙江寨子村滑坡坝堰塞湖沉积及其对昔格达组地层成因的启示[J]. *地质评论*, 2011, 57(5): 675-686.

- [35] 柴贺军, 刘汉超, 张俦元. 一九三三年叠溪地震滑坡堵江事件及其环境效应[J]. 地质灾害与环境保护, 1995, 6(1): 7-17.
- [36] L. Hasbargen, C. Paola. Landscape in stability in an experimental drainage basin. *Geology*, 2000, 28 (12): 1067-1070.
- [37] P. Jordan. Impacts of mass movement events on rivers in the southern coast mountains, British Columbia. *Water Research Branch Summary Report*, Ottawa: Environment Canada, 1987.
- [38] J. C. Bathurst, M. Ashiq. Dambreak flood impact on mountain stream bedload transport after 13 years. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23: 643-649.
- [39] 余国安, 王兆印, 黄河清等. 崩滑堰塞(坝)湖的地貌环境效应[J]. 地球科学进展, 2010, 25(9): 934-937.
- [40] K. Hewitt. Catastrophic landslides and their effects on the Upper Indus streams, Karakorum Himalaya, northern Pakistan. *Geomorphology*, 1998, 26: 47-80.
- [41] K. Hewitt. Disturbance regime landscapes mountain drainage systems interrupted by large rockslides. *Progress in Physical Geography*, 2006, 30(3): 365-393.
- [42] W. B. Ouinet, K. X. Whipple, L. H. Royden, et al. The influence of large landslides on river incision in a transient landscape. Eastern margin of the Tibetan Plateau (Sichuan, China). *CSA Bulletin*, 2007, 119(11-12): 1462-1467.
- [43] D. W. Burbank, J. Leland, E. Fielding, et al. Bedrock incision rock uplift and threshold hillslopes in the northwestern Himalayas. *Nature*, 1996, 379: 505-510.
- [44] 任美镠, 包浩生, 韩同春等. 云南西北部金沙江河谷地貌与河流袭夺问题[J]. 地理学报, 1959, 25(2): 135-155.
- [45] 明庆忠, 史正涛, 董铭. 长江第一湾成因及形成时代探讨[J]. 地理科学进展, 2007, 26(3): 119-126.
- [46] 李会中, 王团乐, 段伟锋等. 金坪子滑坡形成机制分析与河段河谷地貌演化地质研究[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(4): 17-22.
- [47] 赵希涛, 郑绵平, 李道明. 云南迪庆小中甸古湖的形成演化及其与石鼓古湖和金沙江河谷发育的关系[J]. 地质学报, 2007, 81(12): 1645-1650.
- [48] 孔屏. 宇宙核素埋藏年代和昔格达古湖泊起源: 解释长江中游的演化[J]. 科学中国人, 2009, 9: 67.
- [49] 胥勤勉, 杨达源, 葛兆帅. 金沙江雅砻江河口 - 金坪子段贯通过程[J]. 地质力学学报, 2011, 17(2): 187-199.
- [50] 徐则明, 刘文连. 昔格达组地层研究中需要注意的若干关键问题[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 257-270.
- [51] 施雅风, 李吉均, 李炳元. 青藏高原晚新生代隆起与环境变化[M]. 广州: 广东科技出版社, 1985.
- [52] 陈智梁, 孙志明, L. H. Royden 等. 四川泸定昔格达组的堰塞湖成因及意义[J]. 第四纪研究, 2004, 24(6): 614-620.
- [53] 张岳桥, 杨农, 陈文等. 中国东西部地貌边界晚新生代构造变形史与青藏高原东缘隆升过程初步研究[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 599-612.
- [54] 张岳桥, 杨农, 孟晖等. 四川攀西地区晚新生代构造变形历史与隆升过程初步研究[J]. 中国地质, 2004, 31(1): 23-33.
- [55] 孔屏. 金沙江何时开始向东流[J]. 地质科学, 2009, 4: 1256-1262.
- [56] 郑勇, 王亚军, 孔屏. 四川攀枝花昔格达组及其下伏河流砾石的地球化学特征以及对物源的制约[J]. 地质科学, 2009, 44(3): 1036-1051.
- [57] J. Alestalo. Dendrochronological interpretation of geomorphic process. *Fennia*, 1971, 105: 1-140.