

文章编号: 1008-2786-(2015)3-331-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000042

雅鲁藏布大峡谷水电开发对边坡稳定性的影响

李志威¹ 王兆印^{1*} 余国安² 王旭昭³ 张晨笛¹

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 北京矿产地质研究院, 北京 100012)

摘 要: 雅鲁藏布大峡谷蕴藏着十分丰富的水能资源, 未来水电开发对满足国内能源需求和应对气候变暖都具有重要的战略意义, 但可能对其边坡稳定性产生不利影响。野外调查发现, 基岩河床下切促使大峡谷内崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害频繁发生, 大峡谷内巨大水流能量与河床结构消能保持微弱的临界平衡状况, 河床结构(瀑布和阶梯深潭系统)的消能作用对维持边坡稳定性起至关重要作用。针对梯级高坝和引水隧洞的两种水电开发方案分析表明, 两种方案对边坡稳定性均会产生不利影响, 且前一种方案的影响更强烈。只有充分认识未来水电开发对大峡谷边坡的影响, 才能将水电工程的不利影响减少到最小。

关键词: 雅鲁藏布大峡谷; 水电开发; 边坡稳定性; 河床结构; 消能

中图分类号: P642, TV213.2, X141

文献标志码: A

雅鲁藏布江(简称雅江)是西藏高原自西向东流淌的一条巨川,发源于喜马拉雅山北麓的杰马央宗冰川。雅江的干流大致处在印度板块和欧亚板块的缝合带上,其下游切开喜马拉雅山东段,围绕南迦巴瓦峰呈近似 180°马蹄形大拐弯,经论证雅鲁藏布大峡谷平均深度约 5 000 m,是世界上最深的大峡谷^[1]。雅江在我国境内全长 2 057 km,流域面积约 $24 \times 10^4 \text{ km}^2$,多年平均径流量约 $1\,654 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。雅江大峡谷汇集尼洋河后年径流量为 $601 \times 10^8 \text{ m}^3$,大峡谷在扎曲与帕隆藏布汇合后,其中帕隆藏布与其支流易贡藏布的流域面积达 $2.89 \times 10^4 \text{ km}^2$,年径流量 $372 \times 10^8 \text{ m}^3$,出境处(墨脱县巴昔卡)年径流量达 $1\,654 \times 10^8 \text{ m}^3$,巴昔卡以下流入印度国境,改名布拉马普特拉河(简称布河),最后流入孟加拉国,再改名贾木纳河,与印度恒河相汇后注入印度洋^[2]。

雅江蕴藏十分丰富的水力资源。根据 2003 年全国水电资源复查,雅江(我国境内)水能理论蕴藏量为 $11\,389.2 \times 10^4 \text{ kW}$,仅次于长江,居全国第 2 位。雅江大峡谷段平均流量达 $4\,425 \text{ m}^3/\text{s}$,最高流速可达 16 m/s ,且雅江的水力资源约 2/3 集中于大峡谷内^[3]。雅江干流从林芝县派乡(海拔 2 900 m)到墨脱县背崩河段(海拔 680 m)的大拐弯,河道曲线长度为 250 km,两端直线长度仅 39 km,落差达 2 200 m,年径流量 $1\,300 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。若从派乡至背崩开凿长距离隧洞,利用南侧的山谷地形走势,20 km 截弯取直可获得 2 200 m 的水力落差,若引流量 $2\,000 \text{ m}^3/\text{s}$,可兴建装机容量达 $4\,000 \times 10^4 \sim 4\,500 \times 10^4 \text{ kW}$ 的巨型水电站,年发电量近 $3\,000 \times 10^8 \text{ kWh}$ (相当于 3 个长江三峡水电站)^[4]。尽管雅江大峡谷具有惊人的水力资源,但大峡谷地质构造活

收稿日期(Received date): 2014-03-03; 改回日期(Accepted): 2014-04-11。

基金项目(Foundation item): 水洲科学与水利水电工程国家重点实验室项目(No. SKLHSE-2010-KY-01); 科技部国际科技合作计划资助项目(No. 2011DFG93160); 清华大学自主科研课题(No. 20121080027)。[Project of state key Laboratory of Hydrosience and Engineering (No. SKLHSE-2014-KY-01); International Science & Technology Cooperation Program of China (No. 2011DFA20820), Tsinghua University (No. 20121080027).]

作者简介(Biography): 李志威(1984-),男,湖北云梦人,博士,主要从事河流动力学研究。[Li Zhiwei(1984), male, doctor, mainly study on river dynamics.] E-mail: lizw@mail.tsinghua.edu.cn

* 通信作者(Corresponding author): 王兆印(1951-),男,教授,主要从事河流动力学研究。[Wang Zhaoyin(1951-), male, professor, specialized in river dynamics.] E-mail: zywang@mail.tsinghua.edu.cn

跃、地形复杂、交通不便和生态脆弱,特别是其位于印度-欧亚板块碰撞的缝合带上,至今大峡谷地区的抬升速率约 $5 \sim 10 \text{ mm/a}$,成为地球上地壳抬升最快的地区之一^[5]。相比国内正修建的高库大坝如溪洛渡、小湾、锦屏一级等大型拱坝,大峡谷水电遇到的特殊客观因素使得其开发技术难度更大,也是至今未明确开发日程的重要原因之一。

作者于 2011 和 2012 年对大峡谷扎曲段和墨脱段的野外调查表明,大峡谷处在脆弱的临界平衡状态,其特殊地质构造和深切峡谷地貌,给未来巨型水电站开发的安全性提出了新挑战,对大峡谷的天然消能系统和边坡长期稳定性提出了新课题。本文将综述大峡谷研究概况、未来水电开发的必要性、论述大峡谷内河床结构消能作用和大峡谷水电开发对边坡稳定性的潜在危险,这些初步的概念性探索对大峡谷水电开发战略具有前瞻性意义。

1 大峡谷研究概况

雅鲁藏布大峡谷的神秘面貌是最近 40 a 才逐渐清晰的,从 1973—1998 年中国科学家曾多次进入大峡谷进行地理探险和科学考察,取得了丰硕的科学成果和第一手观测资料,由此拉开研究大峡谷的序幕。经过杨逸畴等学者的多次考察和论证,我国于 1998 年对外公布雅江连续垂向切割在青藏高原东南斜面上,长达 496.3 km,最深达 5 382 m,是世界上名符其实的第一大峡谷(图 1)。目前,大峡谷的成因尚存在学术争议,如杨逸畴认为大峡谷是适应不同方向断裂构造发育的先成河,大峡谷不是布河的袭夺弯^[6];李建清等^[7]认为大峡谷是地帽上涌体作用于岩石圈和地表的效应;王二七等^[8]认为大峡谷可能是布河向北袭夺形成;陈建军等^[9]认为帕隆藏布支流扎曲-直白河段溯源侵蚀袭夺古雅江水系是大峡谷形成的原因。值得关注的是,高登义^[10]研究表明,大峡谷是印度洋水汽进入青藏高原的最大通道,造就世界第二大降水带,水汽输送量达到 $500 \sim 1\,000 \text{ g/cm/s}$,比整个青藏高原四周其他路径向高原输送的水汽大 1~10 倍,正因为如此巨大水汽通道存在,造就了大峡谷亚热带雨林气候,这个认识解释了雅江大峡谷拥有丰富水力资源的主要原因。

大峡谷处在印度板块和欧亚板块之间的缝合带的东喜马拉雅构造结上,同时受到两大板块挤压,新构造活动强烈,是全球抬升速率最高的地区之一。

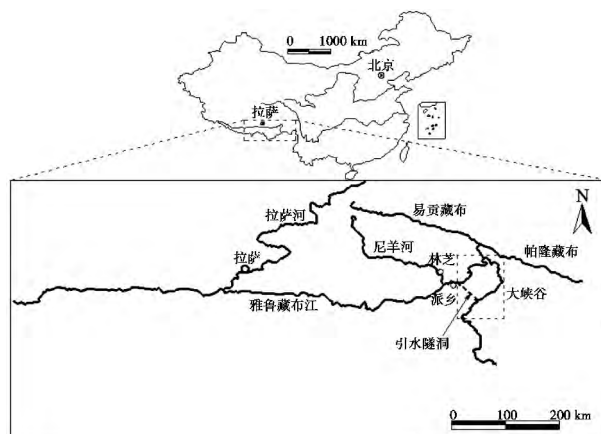


图 1 雅鲁藏布江大峡谷位置

Fig. 1 The Yarlung Zangbo River main tributaries and Grand Canyon

丁林等^[5]通过对东喜马拉雅构造结的不同海拔花岗岩的裂变径迹测年表明,本地区快速抬升始于约 3 Ma 前,1 Ma 以来该地区抬升速率达 $5 \sim 10 \text{ mm/a}$,至今保持 10 mm/a 。雷永良等^[11]对南迦巴瓦地区那木拉峰的片麻岩裂变径迹取样分析,揭示本地区在更新世有 2 种抬升-剥蚀事件的记录,时间分别为 $1.10 \pm 0.24 \text{ Ma}$ 和 $0.65 \pm 0.08 \text{ Ma}$,并推算 1 Ma 以来平均剥蚀速率约为 $2.43 \sim 3.24 \text{ mm/a}$ 。于祥江等^[12]对多雄拉-背崩剖面上海拔分布在 4 210~710 m 之间 11 个基岩样品的裂变径迹测年表明,以降水为主的气候因素在大峡谷快速地壳剥蚀冷却过程中占据主导地位。龚俊峰等^[13]通过大峡谷地区 20 件矿物样品的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究表明,本地区在上新世中期和更新世早期均经历快速冷却抬升事件,估算本地区最近 3 Ma 以来的冷却速率达 $120 \sim 240 \text{ }^{\circ}\text{C/Ma}$,岩体抬升速率达 $3.4 \sim 6.9 \text{ mm/a}$,这个结果与丁林等的结果相近。

大峡谷周边地区快速抬升,河床坡降加大,同时大峡谷是青藏高原最大的水汽通道,降雨充沛,河道径流量大。构造抬升和气候双重因素,促成大峡谷持续河床下切。河床下切和侧蚀使得河谷边坡趋向陡峭,两岸滑坡、崩塌的重力势能不断积聚,大峡谷每年发生无数小规模崩塌,河床演变剧烈^[14-16]。大峡谷拐弯段的支流易贡藏布曾于 1900 年发生一次巨型崩滑,易贡藏布于 2000-04-09 再次发生巨大的山体高速崩滑,堆积体完全堵塞易贡藏布,形成长 2.5 km,宽 2.5 km,平均厚度 6 m,体积约 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的天然坝^[17]。大峡谷地区构造活动强烈,是大地震易发区,如 1950 年墨脱发生 $M_s 8.5$ 级大地震,触发巨大山崩形成堰塞湖,江水断流 7 d。

大峡谷巨大的水流能量驱动来自大峡谷河段及支流的推移质运动,不断地磨蚀基岩河床,河床下切的速率非常之快。Stewart 等^[18]通过大峡谷地区的锆石裂变径迹和 U-Pb 测年分析表明,河床快速下切影响了布拉马普特拉河的泥沙通量,该河近 50% 的泥沙源于大峡谷地区,河床缺乏大峡谷中上游的河床泥沙。大峡谷的卵石磨蚀河床,降低侵蚀基准面,引起周边支流向高原深处发育,切割青藏高原边缘,并输送大量泥沙进入大峡谷,对大峡谷的稳定性更为不利。众所周知,大峡谷的稳定对雅鲁藏布江流域中上游起着至关重要的保护作用,对于大峡谷的稳定性和控制河床下切,引起国内外学者不断提出新的观点。Korup 和 Montgomery^[19]通过野外调查和 DEM 解译,获取多达 900 个冰碛坝和崩塌、滑坡体,认为冰川运动和崩塌、滑坡形成冰碛坝和堰塞坝阻止了大峡谷中上游的冲积下切,堰塞坝抑制基岩河床下切和延缓裂点向源头迁移,堰塞坝与上游干旱效应和局部地壳抬升三者共同维持西藏高原的稳定性。Korup 等^[20]再次提出大峡谷及周边支流数千年发生的大量崩塌、滑坡形成裂点,阻止上游的河道下切,崩塌、滑坡作为河床下切的反馈机制,对大峡谷的稳定性起着重要作用。

2 大峡谷水电开发的必要性

当前,中国经济正处在高速发展期,能源短缺是制约经济发展的一个瓶颈,同时为了应对气候变化、化石能源枯竭和核电安全性问题,大力开发清洁的水能资源势在必行^[21]。众所周知,我国水能资源居世界第一,理论蕴藏量达 6.94×10^8 kWh,其中技术可开发装机容量为 5.42×10^8 kWh、年发电量为 2.47×10^{12} kWh,以 2014 年装机容量为 2.8×10^8 kW 计算,水电开发利用率只有 51.7%,仍低于发达国家 60%~70% 的平均水平^[22]。由于中国煤的储量和产量均世界第一,现在的能源结构主要依赖煤电。煤电长期占据能源消费的 70% 左右(图 2),给煤炭开采、运输、环境恶化、大气污染(雾霾)等造成严重不利影响。积极有序开发水电能源,是当前我国调整能源结构和应对气候变化的必由选择。

为了减缓气候变暖和保护环境,在 2009 年哥本哈根世界气候大会上,我国政府郑重承诺:到 2020 单位 GDP 的 CO₂ 排放量在 2005 年的基础上减少 40%~45%,非化石能源占一次能源消费的比

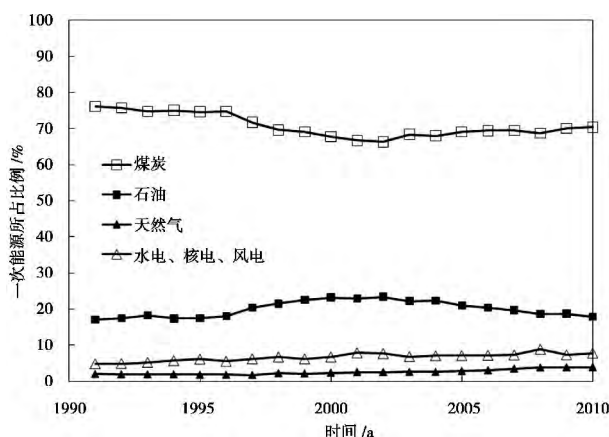


图2 1991—2010年中国能源消费结构图^[23]

Fig.2 Chinese energy consumption chart in 1991—2010^[23]

例达到 15% (图 2)。要实现上述艰巨目标,在 2015 年之前开工建设至少 1×10^8 kW 水电装机容量,到 2020 年水电装机容量要达到 3.8×10^8 kW 以上,其中抽水蓄能电站为 $5\,000 \times 10^4$ kW,核电投入运行装机容量要达到 $7\,000 \times 10^4$ kW 以上,风电、太阳能及其他可再生能源利用量要达到 1.5×10^8 t 标准煤当量以上^[22]。然而,2010 年日本福岛核电站事故后,中国核电发展面临较大阻力,加之我国核资源贫乏,使得发展核电的减排预期有所降低。积极有序开发现在条件成熟的西南大江大河(如金沙江、怒江、澜沧江、大渡河等)的水能资源是我国履行 2020 年减排承诺的最可行选择。2020 年以后,我国继续面临严峻的减排任务和巨大的能源需求,提前规划和论证开发雅江大峡谷的巨大水电资源是必要的。

过去 60 多年,我国水能开发取得举世瞩目的成就(图 3)。据新闻报告,截至 2014 年 2 月中国水电装机容量已达 2.8×10^8 kW。然则,距离 2020 年只有不到 6 a 时间,仍有 1×10^8 kW 水电装机容量需要建设与投产。当前水电开发也遇到了生态环境保护 and 移民方面的阻力,但为了改善我国严重依赖煤电的能源格局,满足日益增长的电力需求,积极有序开发剩余大江大河的水能资源是当前发展经济和减缓气候变暖的重要举措之一。

2020 年以后,中国能源的刚性需求仍将节节攀升,节能减排的任务要更趋严重。水力发电作为技术最成熟、环境污染最小和可持续的清洁能源,是应对调整能源结构和节能减排的主力军。雅江作为中国水电开发的最后一块尚未大规模开发的河流,其水能资源极其丰富,资源蕴藏量为 1.13×10^8 kW,占全国的 17%,其中大峡谷处储量为 0.45×10^8

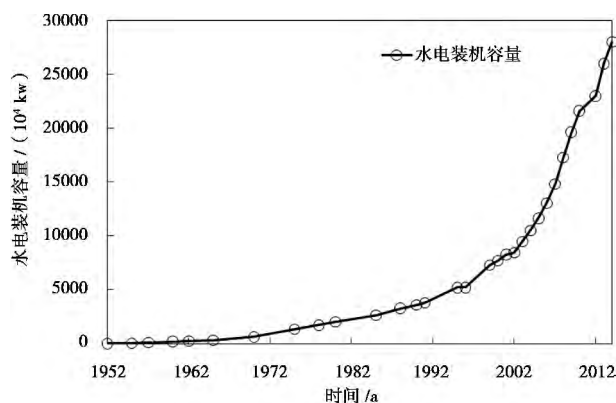


图3 1952—2012年中国水电装机容量^[22-23]

Fig. 3 China installed capacity of hydropower^[22-23]

kW, 占全国的 6.77%。2010—2020 年, 中国水电开发正在金沙江中游、怒江、澜沧江等西南大河如火如荼开展。可预见从 2020 年后, 雅江水电大开发将迎来新的黄金时期, 也将为我国 2020—2050 年调整能源消能结构和应对气候变化做出巨大贡献。

雅江支流上已建和在建 50 多座小型水电站和 3 座中型水电站。2010-09-27, 雅江中游的第一座水电站——藏木水电站正式动工兴建, 同时中游干流将开工兴建 4 座河床式水电站, 从而拉开雅江干流水电大开发序幕^[4]。对于雅江大峡谷的水电开发, 目前主要有 2 种方案^[4]: 一种方案是两级开发方案, 一级林芝水电站为龙头电站, 修建 150 ~ 200 m 大坝, 装机 360×10^4 kW, 年发电量 150×10^8 kWh; 二级为大拐弯电站, 开凿隧道引水发电, 在大峡谷内建设一系列巨型电站, 二级电站的装机容量为 $4\,000 \times 10^4 \sim 4\,500 \times 10^4$ kW。另一种方案为多级开发方案, 在大拐弯尼洋河口下游 20 km 的德阳建设低坝, 开凿 4 ~ 6 个约 20 km 长的隧洞引水发电, 利用峡谷自身落差, 建设 9 座总落差 2 200 m 的梯级电站, 可以安装 70 台 70×10^4 kW 水轮发电机组, 总装机容量 $4\,900 \times 10^4$ kW, 年发电量约 $3\,000 \times 10^8$ kWh。不管雅江大峡谷最终采取哪种开发形式, 雅江如此巨大的水电开发前景对缓解国内电力紧缺和应对气候变暖都具有重要能源战略意义, 同时巨型水电工程的安全性和对边坡稳定性提出科学和技术挑战。

3 大峡谷的水流能量及消能结构

雅江大峡谷巨大的水流流量和陡坡降, 水流挟带推移质磨蚀基岩河床, 河床下切可能引起两岸崩

塌、滑坡、泥石流频发, 如 1900 年和 2000 年的大峡谷支流贡藏布发生巨型大滑坡。刘宇平等^[16]认为第四纪期间, 大峡谷入口处的则隆弄冰川发生多次的快速前进和阻塞雅江事件, 冰川堰塞坝的溃决释放突发性巨大洪水对河床下切和河岸侧蚀产生重要影响, 突发性溃坝洪水, 释放出巨量的洪水引起大峡谷的崩塌、滑坡。然而, 大峡谷并未因水流能量的下切作用而溯源传递到西藏高原深处, 而是保持着相对稳定状态, 这里因为大峡谷内发育众多天然消能结构(如裂点), 有效地耗散水流能量和抑制河床快速下切。

裂点(knickpoint), 也称尼克点, 是指山区河流纵剖面上大小不一的台阶状突起, 即缓坡段向陡坡段的突然转折。基岩河床的裂点往往形成瀑布或瀑布群, 大峡谷内发生四大河床瀑布已为我国科学考察所证实^[24]。卵石河床的裂点多数由崩塌、滑坡形成堰塞坝后自然发育而成, 这种裂点在局部地形都有阶梯-深潭系统组成。阶梯-深潭系统由一段陡坡和一段缓坡加上深潭相间连接而成, 沿河道纵向呈现一系列阶梯状。室内和野外试验结果表明, 山区河流中自然形成的阶梯-深潭系统能够最大限度地增加水流阻力、形成水跃消能、控制下切、稳定河床和岸坡。许多学者认为, 阶梯-深潭系统使得水流阻力最大化, 消耗水流能量, 促使河床达到最稳定状态^[25]。大部分裂点都是阶梯-深潭系统延展一定长度的河段, 裂点的存在消耗水流能量, 抵抗冲刷下切, 对山区河流稳定起到关键作用^[26]。裂点实质上是增加了峡谷内形成水跃消能和跌水形成水体大量掺气消能, 从而减小水流流速, 降低推移质输运速率和磨蚀强度。

雅江大峡谷本身就是一个巨大的尼克带(knickzone)(图4), 使得大峡谷入口以上宽谷河段及支流(日喀则-林芝)沉积的巨量卵石进不了大峡谷。假若尼克带的内部河床结构遭到破坏, 大量卵石将进入大峡谷。由于大峡谷水流能量极其巨大, 卵石不能形成保护层, 反而会发生锯齿效应, 即河床和边坡会被卵石快速磨蚀, 河床下切速率加大, 处于临界状态的两岸岩体将会发生超乎想象的大规模崩塌, 也可能发生巨大滑坡, 对大峡谷的稳定性造成极大危险。

当前, 大峡谷尼克带内天然河床结构的消能系统由三部分组成, 一是落差达 2 000 m 的世界上第一大尼克带及其内部的裂点; 二是阶梯-深潭系统;

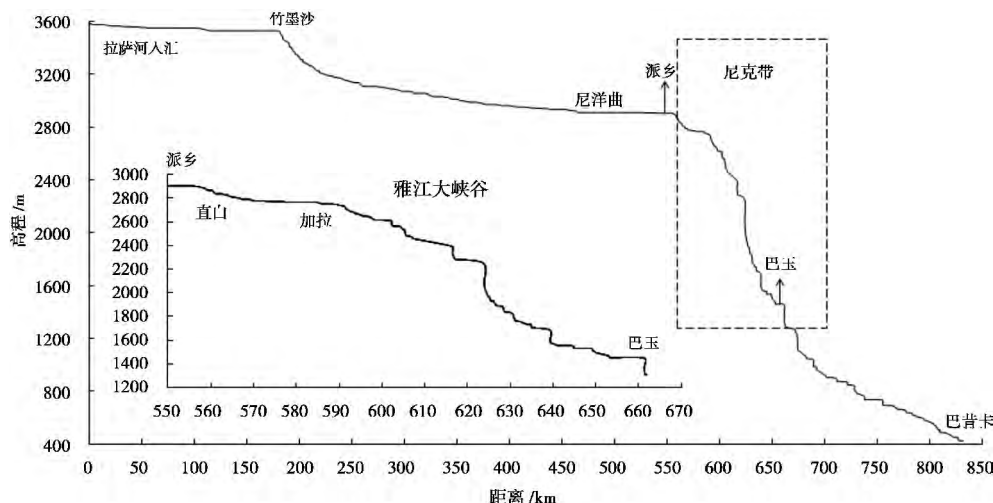


图4 雅江大峡谷纵剖面及尼克带

Fig. 4 The longitudinal profile and knickzone of Yarlung Zangbo Grand Canyon

三是岸石结构。第一大尼克带作为雅江中上游的侵蚀基准面,稳定上游河床,阻止中上游的宽谷河段卵石推移质进入大峡谷,真正有效抑制大峡谷河床磨蚀。大峡谷内一系列的阶梯-深潭系统,促成水流形成一系列的水跃和跌水消能,沿程逐级消耗水流能量,直接降低水流冲刷力,抑制河床下切速率。岸石结构不仅加大水流阻力,形成大量漩涡消能,而且起到了保护河岸边坡稳定性的作用。尼克带及裂点、阶梯-深潭系统和岸石结构等共同组成一套的天然消能系统,消耗水流能量,是维持大峡谷的稳定性最重要的条件。

大峡谷两岸崩塌、滑坡、泥石流的大量物质进入河道形成不同程度的堰塞坝,部分堰塞坝可能稳定下来形成裂点,及其基岩本身的跌坎也是天然的裂点。裂点上游回水淹没和泥沙淤积,在一定程度上可以抑制上游河床下切和减少崩塌、滑坡发生,起到了负反馈作用。1998年我国科学家首次徒步穿越和全程考察大峡谷,发现了四大河床瀑布群,认为巨大的水流能量造就了河床强烈起伏,形成的瀑布群具有群体性、多变性和年青性的基本特点^[24]。由于强烈的新构造运动、高山峡谷、降雨量集中等因素,雅鲁藏布大拐弯北段形成和分布以崩塌、滑坡、泥石流和溜砂坡为主的地质灾害,不仅严重危险川藏公路通行^[14],而且强烈影响大峡谷的裂点发育和河床下切。

大峡谷内不仅有基岩急剧起伏形成的裂点瀑布消能,而且有由崩塌、滑坡形成的大量阶梯-深潭系统,包括单个或多个巨石形成的壅水和跌水消能作

用。岸石结构的凸凹不平极大地增大河床阻力。大峡谷内天然尼克带及其沿程一系列裂点、大量阶梯-深潭系统、孤立或簇集的巨石结构和岸石结构共同增加河床阻力、消能水流能量和抑制河床下切速率,有效地维持大峡谷以至西藏高原的稳定。

4 未来水电开发对边坡稳定性的影响

雅江大峡谷既蕴藏着巨大水能资源,也有潜在的开发风险和技术挑战。大峡谷入口处的派镇(海拔约2900 m),其上游40 km是支流尼羊河三角洲,是林芝地区重镇八一镇(海拔2980 m),其周围也缺乏平坦地方可供搬迁和移民,故大峡谷入口处不宜建设高坝,只能设低坝。目前,大峡谷水电开发主要有两种可选方案^[4](表1),第一种方案是在大峡谷内修建若干座300 m级高坝大库,梯级开发水能资源。第一种方案的技术困难涉及高坝的坝工技术、交通不便、峡谷内地质灾害和大坝抗震等。第二种方案在尼洋河口下游20 km的德阳建设低坝,开凿4~6个约20 km超长的隧洞引水发电(图1),将隧洞的出口引入山南的某条深切山谷中,利用山谷的自然走势汇入大峡谷下游,在山谷内设置多座阶梯水电站,可根据技术难度和开发周期进行串联开发或并联开发^[3]。对于第二种方案,水电站建设的技术挑战主要体现在高海拔缺氧带来的恶劣环境、地形复杂、交通不便、预防高烈度区地震、大埋深特长引水隧洞的开挖与运行管理等。同时,对于处在临界平衡状态的大峡谷,水电开发对其稳定性将产

表 1 两种开发方案的利弊比较

Table 1 Comparison of advantage and disadvantage between two main development schemes

开发方案 Development program	优点 Advantage	弊端 Disadvantage	对大峡谷稳定的影响 Effects on stability of the Grand Canyon
300 m 级高坝大库	可梯级开发,减少前期投资,水库淤积较小	水库淹没,破坏河床结构,加速河床下切、山体崩塌滑坡、生态环境破坏,可能诱发地震	影响较大
超长隧洞引水发电	减少对大峡谷内部的施工干扰,水库淹没较小	低坝的水库淤积,下游山谷地形复杂,交通更为不便	影响较小,但影响帕隆藏布和易贡藏布的稳定性



图 5 帕隆藏布大峡谷的崩塌滑坡(拍摄于 2011-05-09)

Fig. 5 Avalanches and landslides of Palong Zangbo Grand Canyon (May 9, 2011)

生诸多不利影响,需要引起足够的重视,前提做好基础性研究。

毫无疑问,雅江大峡谷建设巨型水电站,很可能对大峡谷天然消能系统、生态环境及边坡稳定性产生深远影响。大峡谷处在印度板块与欧亚板块的缝合带和东喜马拉雅山构造结上,新构造运动极其活跃,目前仍每年以约 5~10 mm 的速率抬升^[5]。野外调查发现,深切的大峡谷边坡陡峭,倾角多处在 30°~60°,局部河段甚至接近 70°~80°,两侧边坡蕴藏着巨大的崩塌、滑坡势能。天然消能系统(尼克带及裂点、阶梯-深潭系统和岸石结构)是维持大峡谷脆弱平衡的关键(图 4)。第一种大峡谷内建设多个梯级高坝大库,水电开发的工程建设可能破坏当前尼克带内的河床结构,打破当前脆弱平衡状态,加速河床下切和山体崩塌、滑坡,不仅严重危害水电工程的安全,而且对大峡谷的稳定性和区域生态环境可能产生灾难性影响。

第二种开发方案以引水隧洞在山谷内修建梯级电站,避免了在大峡谷内修建工程,对大峡谷的稳定性是有利的。研究报道表明,大峡谷地区的侵蚀产沙量相当之大,而雅江中游的泥沙沉积量也相当惊人。大峡谷地区以其占雅江全流域 2% 的流域面

积,大量崩塌、滑坡、泥石流和侵蚀作用产生的泥沙量,占布拉马普特拉河 50% 的泥沙通量^[18]。由于大峡谷尼克带的阻挡作用,雅江中游宽谷段淤积多达 $0.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的泥沙^[27]。在大峡谷入口处的派镇修建低坝,上游的来沙量会引起水库的快速淤积,水库需要修建若干底孔排沙。每次底孔排沙都会带来粗沙和卵砾石集中磨蚀大峡谷内河床,破坏既有的河床结构,使得消能效率降低,强化河床下切速率,引起大峡谷的崩塌、滑坡增加,在较小程度上影响了大峡谷的稳定性。由于采用引水隧洞发电,大部分水量不经过大峡谷,使得帕隆藏布入汇雅鲁藏布处的水深下降幅度很大,帕隆藏布和易贡藏布沿程的河床坡降将加大。帕隆藏布本身也是一条长达 76 km 大峡谷^[28],流量大,水流湍急,沿程地质灾害频发,其河床坡降加大,增加了水流冲刷下切能力,使得帕隆藏布和易贡藏布的稳定性受到影响。

2011 年 5 月和 2012 年 10 月,课题组全程考察了从帕隆藏布上游的然乌湖到入汇雅江大峡谷,包括易贡藏布大滑坡,帕隆藏布沿程的边坡陡立,新近发生的大小规模滑坡和崩塌随处可见(图 5)。试想,大峡谷流量大幅下降后,帕隆藏布比降随之加大,下切速率势必增加,随之带来的大滑坡和大崩塌

均有可能,如著名的易贡大滑坡,形成堰塞坝,溃决后不仅对大峡谷下游的水电工程造成巨大危险,也会直接影响大峡谷的稳定性,触发更多的次生地质灾害。

可见,无论第一种梯级开发方案还是第二种引水隧洞方案的大峡谷水电开发,均会对大峡谷的稳定性产生负面影响,只是第二种方案的不利影响要小。

5 结论

雅鲁藏布大峡谷以其得天独厚的地理位置和地质构造,既是青藏高原地球科学的研究热点,也将是2020年以后中国水电开发的重点区域。大峡谷蕴藏着丰富水能资源对于调整我国能源结构、缓解电力紧张、应对气候变暖和区域经济发展均具有重要的战略意义。未来大峡谷的水电工程将可能直接或间接破坏着大峡谷的尼克带内河床结构,打破大峡谷水流能量与河床结构消能之间的微弱平衡状况,对大峡谷的稳定性产生不利影响。为了既合理地开发大峡谷水能资源,又不破坏大峡谷的自然景观和保证水电开发安全性,需要在规划和可行性论证阶段慎重考虑水电开发方案和装机规模。只有充分认识水电开发对边坡稳定性的影响,做好前期的基础性研究探索,才能在未来大峡谷水电规划、设计、施工和运行管理过程中将不利影响降低到最小。

参考文献(References)

- [1] Yang Yichou, Gao Dengyi, Li Bosheng. A great geographical discovery in the end of 20th century - Demonstration on the Yarlung Zangbo River valley as the grandest canyon in the world [J]. Geographical Research, 1996, 15(4): 1-9 [杨逸畴, 高登义, 李渤生. 20世纪末的一次重大地理发现 - 雅鲁藏布大峡谷为世界之最的论证[J]. 地理研究, 1996, 15(4): 1-9]
- [2] Guan Zhihua. The water resources exploration of Yarlung Zangbo Grand Canyon, Chinese Water Resources, 1996, (4): 41-43 [关志华. 雅鲁藏布大峡谷水资源探秘[J]. 中国水利, 1996, (4): 41-43]
- [3] Xu Damao, Chen Chuanyou, Liang Weiyan. Hydropower development at the Yalu Tsangpo River [J]. Engineering Science, 2002, 4(12): 47-52 [徐大懋, 陈传友, 梁维燕. 雅鲁藏布江水电开发[J]. 中国工程科学, 2002, 4(12): 47-52]
- [4] Dai Qinzong, Yu Xiaobo, Yu Kun. Low carbon economy thrived and expanding industrial situation: Chinese hydropower assumes the task of clean energy [J]. Oriental Motor, 2010, (6): 1-22 [戴庆忠, 余小波, 吕坤. 低碳经济风生水起, 产业拓展审时度势 - 担纲清洁能源的中国水电[J]. 东方电机, 2010, (6): 1-22]
- [5] Ding Ling, Zhong Dalai, Pan Yusheng, et al. FT evidence for rapid uplift since Pliocene from the east Himalayas [J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(16): 1497-1500 [丁林, 钟大赉, 潘裕生, 等. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据[J]. 科学通报, 1995, 40(16): 1497-1500]
- [6] Yang Yichou. The topographic features and the origin of the great bendvalley at the Yarlung Zangbo River in Tibet [J]. Geographical Research, 1982, 1(1): 40-48 [杨逸畴. 雅鲁藏布江大拐弯峡谷的地貌特征和成因[J]. 地理研究, 1982, 1(1): 40-48]
- [7] Ji Jianqing, Zhong Dalai, Ding Lin, et al. Genesis and scientific significance of the Yarlung Zangbo Canyon [J]. Earth Science frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 1999, 6(4): 231-235 [季建清, 钟大赉, 丁林, 等. 雅鲁藏布大峡谷的地质成因[J]. 地学科缘, 1999, 6(4): 231-235]
- [8] Wang Erchie, Chen Lianzhong, Chen Zhiliang. Tectonic and climatic element-controlled evolution of the Yalung Zangbu River in southern Tibet [J]. Quaternary Sciences, 2002, 22(4): 365-373 [王二七, 陈良忠, 陈智樑. 在构造和气候因素制约下的雅鲁藏布江的演化[J]. 第四纪研究, 2002, 22(4): 365-373]
- [9] Chen Jianjun, Ji Jianqing, Gong Junfeng. Formation of the Yarlung Zangbo Grand Canyon, Tibet, China [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(4): 491-499 [陈建军, 季建清, 龚俊峰, 等. 雅鲁藏布大峡谷的形成[J]. 地质通报, 2008, 27(4): 491-499]
- [10] Gao Dengyi. Expeditionary studies on the moisture passage of the Yarlung Zangbo River [J]. Journal of Nature, 2008, 30(5): 301-303 [高登义. 雅鲁藏布江水汽通道考察研究[J]. 自然杂志, 2008, 30(5): 301-303]
- [11] Lei Yongliang, Zhong Dalai, Ji Jianqing, et al. Fission Track evidence for two Pleistocene uplift-exhumation events in the eastern Himalayan Syntaxis [J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(4): 584-590 [雷永良, 钟大赉, 季建清, 等. 东喜马拉雅构造结更新世两期抬升 - 剥露事件的裂变径迹证据[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 584-590]
- [12] Yu Xiangjing, Ji Jianqing, Gong Junfeng, et al. Evidences of rapid erosion driven by climate in the Yarlung Zangbo Great Canyon, the eastern Himalayan syntaxis [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(10): 765-773 [于祥江, 季建清, 龚俊峰, 等. 雅鲁藏布大峡谷气候因素引起地壳剥蚀冷却的证据[J]. 科学通报, 2011, 56(10): 765-773]
- [13] Gong Junfeng, Ji Jianqing, Chen Jianjun, et al. 40Ar/39Ar geochronology studies of rocks in eastern Himalaya syntaxis [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(10): 2255-2272. [龚俊峰, 季建清, 陈建军, 等. 东喜马拉雅构造结岩体冷却的40Ar/39Ar年代学研究[J]. 岩石学报, 2008, 24(10): 2255-2272]
- [14] Shang Yanjun, Yang Zhifa, Liao Qiulin, et al. Geological hazard distribution and prevention in North of Yalu Canyon, Tibet [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2001, 12(4): 30-40 [尚彦军, 杨志法, 廖秋林, 等. 雅鲁藏布江大拐弯北段地质灾害分布规律与防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(4): 30-40]
- [15] Jiang ZhongXin. Differential distribution regularity of collapse-landslides and debris flows along Palong Zangbu River valley in Tibet [J]. Geographical Research, 2002, 21(4): 495-463 [蒋忠信. 西藏帕隆藏布河谷崩塌滑坡、泥石流分布规律[J]. 地理

- 研究, 2002, 21(4): 495–463]
- [16] Liu Yuping, Montgomery D R, Hallet B, et al. Quaternary glacier blocking events at the entrance of Yarlung Zangbo Great Canyon, Southeast Tibet[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(1): 52–62 [刘宇平, Montgomery D R, Hallet B, 等. 西藏东南雅鲁藏布大峡谷入口处第四纪多次冰川阻江事件[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(1): 52–62]
- [17] Lv Jietang, Wang, Zhihua, Zhou Chenghu. Discussion on the occurrence of Yigong landslide in Tibet[J]. *Earth Science – Journal of China University of Geosciences*, 2003, 28(1): 107–110 [吕杰堂, 王治华, 周成虎. 西藏易贡大滑坡成因探讨[J]. *地球科学*, 2003, 28(1): 107–110]
- [18] Stewart R J, Hallet B, Zeitler P K, et al. Brahmaputra sediment flux dominated by highly localized rapid erosion from the easternmost Himalaya [J]. *Geology*, 2008, 36(9): 711–714
- [19] Korup O, Montgomery D R. Tibetan plateau river incision inhibited by glacial stabilization of the Tsangpo gorge [J]. *Nature*, 2008, 456: 786–789
- [20] Korup O, Montgomery D R, Hewitt K. Glacier and landslide feedbacks to topographic relief in the Himalayan syntaxes [J]. *PANS*, 2010, 107: 5317–5322
- [21] Jia Jingsheng, Ma Jing, Zhang Zhihui. Vigorously develop hydropower to response climate change [J]. *Chinese Hydropower and Electrification*, 2010, 1(2): 8–12 [贾金生, 马静, 张志会. 应对气候变化必须大力发展水电[J]. *中国水能及电气化*, 2010, 1(2): 8–12]
- [22] Chen Fei. Innovation and scientific development of China hydropower[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(4): 1–5 [陈飞. 解放思想, 推动中国水电事业科学发展[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(4): 1–5]
- [23] National Bureau of Statistics of People's Republic of China. China Statistical Year Book, 1990–2013 [R] [中华人民共和国国家统计局. *中国统计年鉴* [R]. 1990–2013]
- [24] Yang Yichou. The discovery of Yalu Zangbo Great Canyon and the researches on its characteristics and the cause of its formation [J]. *Geographical Research*, 1999, 18(4): 342–348 [杨逸畴. 雅鲁藏布大峡谷河床瀑布的发现及其特征和成因[J]. *地理研究*, 1999, 18(4): 342–348]
- [25] Abrahams A D, Li G, Atkinson J F. Step-pool stream: adjustment to maximum flow resistance [J]. *Water Resources Research*, 1995, 10: 2593–2602
- [26] Wang Zhaoyin, Xu Jiang, Li Changzhi. Development of step-pool sequence and its effects in resistance and stream bed stability [J]. *International Journal of Sediment Research* 2004, 19(5): 161–171
- [27] Yu Guoan, Wang Zhaoyin, Liu Le, et al. Drainage network and fluvial morphology features of Yarlung Tsangpo River under the impact of neotectonic movement [J]. *Advances in Water Science* 2012, 23(2): 163–169 [余国安, 王兆印, 刘乐, 等. 新构造运动影响下的雅鲁藏布江水系发育和河流地貌特征[J]. *水科学进展*, 2012, 23(2): 163–169]
- [28] Zhang Wenjing, Yang Yichou. A new discovery-the great Polungtsangpo Canyon [J]. *Mountain Research*, 1999, 17(2): 97–98 [杨文敬, 杨逸畴. 青藏高原考察新发现—帕隆藏布大峡谷[J]. *山地学报*, 1999, 17(2): 97–98]

Effects on Slope Stability of the Yarlung Tsangbu Grand Canyon under Future Hydropower Development

LI Zhiwei¹, WANG Zhaoyin¹, YU Guoan², WANG Xuzhao³, ZHANG Chendi¹

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China;

3. Beijing Institute of Geology for Mineral Resource, Beijing 100012, China)

Abstracts: Yarlung Tsangbo Grand Canyon in southeastern Tibet of China possesses very abundant hydropower resources, where future hydropower development is of strategic importance to meet domestic energy demand and response climate warming, but may adversely affect the slope stability of the canyon. Field investigations indicate that bedrock incision of river bed prompted too many avalanches, landslides and debris flow occurring frequently in the canyon. The interaction between huge flow energy and riverbed structures (e. g. cascades and step-pool system) maintains the weak critical balance to hold the stability of the canyon. Two hydropower development schemes which include several steps hydropower plants and long distance diversion tunnels may have direct adverse effects on the canyon stability. Only fully understanding the impact of future hydropower development on the slope stability of the canyon, the adverse effects of the hydropower projects can be reduced to a minimum.

Key words: Yarlung Tsangbu Grand Canyon; hydropower development; slope stability; river bed structure; energy expenditure