文章编号：1008－2786－(2010)2－177－06

金沙江其宗河段河谷演化及其工程效应

罗永红[1]，王运生[1]，王自高[2]，高 建[2]
（1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室，四川 成都 610059；
2. 中国水电顾问集团昆明水电勘测设计研究院，云南 昆明 650051）

摘 要：金沙江其宗河段实地调研揭示：该河段共发育Ⅳ级阶地，其中Ⅳ级阶地卵砾石比Ⅲ级阶地的风化程度强得多；测年显示Ⅳ级阶地形成年代距今约 80～90 ka，Ⅲ级阶地形成距今仅 40～50 ka，取自 zk204钻孔下部炭化木的^{14}C测年为 45 ka，这表明Ⅳ级阶地形成后，河谷一直下切到基覆界面，回填加积至现今Ⅲ级阶地的高度，然后又重新下切，形成Ⅲ级、Ⅱ级及Ⅰ级阶地，在形成程式上与川西河谷演化有较为明显的差异。由于河床覆盖层中、下部形成于晚更新世，具有超固结效果，不但承载力高而且不具有液化性。

关键词：金沙江；其宗河段；测年；河谷演化；工程效应
中图分类号：P642.2，P931 文献标识码：A

金沙江其宗河段（其宗水电站上下坝址区河段）位于青藏高原与云贵高原接壤的斜坡过渡地带，处于哈巴雪山与云岭之间的金沙江峡谷。该河段层状地貌发育，地质记录保存较全，研究该河段河谷演化特征，对探讨该河段河谷演化的形成过程，其与金沙江石鼓湖等河段发育及青藏高原的隆升关系，河谷演化对水电工程边坡、坝基稳定性及库岸稳定等具有十分重要的科学和实践意义。

1 层状地貌特征

根据杨嘉宝等研究表明，晚第三纪以来，滇西北地区经历了上新世末至早更新时期的一级夷平面作用，第四纪早更新世至晚更新世快速隆升导致的断块差异升降、统一高原面解体，以及中晚期更新世间歇性快速下切三个大的演化阶段[1,2]。

区域一级夷平面海拔 4 000 m左右[1]，随着河谷的下切，沿金沙江两岸发育多级剥夷面，如区内 3 800 m，3 200 m，2 700 m，2 300～2 400 m剥夷面及河流阶地（图 1）。其宗上下坝址河段内分布有四级河流阶地（图 2），其中Ⅰ、Ⅱ级阶地保留较完整，Ⅰ级阶地高出河面约 7～12 m，Ⅱ级阶地高出河面约 20 m，Ⅰ、Ⅱ级阶地宽 100～500 m，多为村镇、农田，如左岸的昌觉村、春独村，右岸的其宗村；Ⅲ级阶地拔河 30～35 m，分布于徐卡、外塔城，在小村上游侧也有局部残留，总体而言Ⅲ级阶地以卵砾石颗粒支撑为主，砂级充填物少，阶面多倾斜，破坏较为严重；Ⅳ阶地分布较为零星，仅在徐卡西侧见及，拔河 75～80 m，阶面倾斜，卵砾石及砂风化严重。

Ⅳ阶地与 2 300～2 400 m剥夷面之间在测区范围内未发现阶地，仅在其宗西陀螺顶（2 200 m）、龙渣阁（2 200～2 300 m）等见剥夷面（图 3、4）。

2 河谷演化

金沙江其宗河段河谷演化经历了上新世的准平原，第四纪早更新世断块的差异升降导致统一高原面解体、中晚期更新世的间歇性快速下切后形成现

收稿日期（Received date）：2009－01－11；改回日期（Accepted）：2009－09－01。
基金项目（Foundation item）：国家自然科学基金项目“中国西部深切河谷谷底卸荷松弛带形成机理及其工程效应研究”（编号：40472143/D0214）资助。[Sustentation fund: National Science Foundation of China: “Study on Genetic Mechanism and its Engineering Effects of Unbaded and Relaxed Zone in the deep Valley Bottom, West of China” (Number: 40472143/D0214).]
作者简介（Biography）：罗永红（1981－），男，四川广安人，在读博士研究生，地质工程专业。[Luo Yonghong (1981－), Male, Guangan city of Sichuan provice, Ph. D. on reading Geological Engineering] E-mail: lyh445890689@qq.com
© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

今河谷层状地貌[1—3]。

为了客观揭示其宗水电站坝址区河段河谷演化，对该河段层状地貌上的组成物质进行了系统取样，分别做了电镜扫描（表 1）及 ESR测年（表 2）。

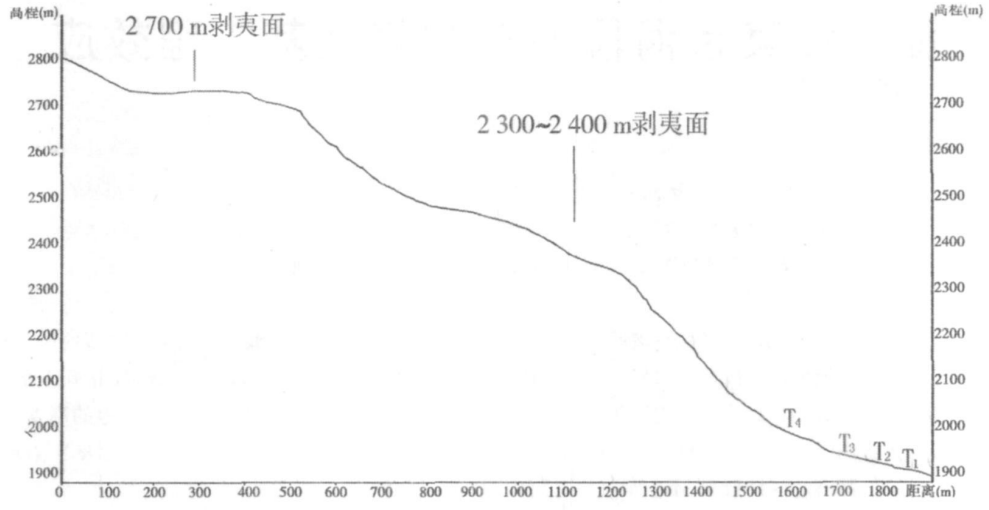


图 1 其宗河段右岸层状地貌

Fig. 1 Right bank step-ike landforms of Qizong river section

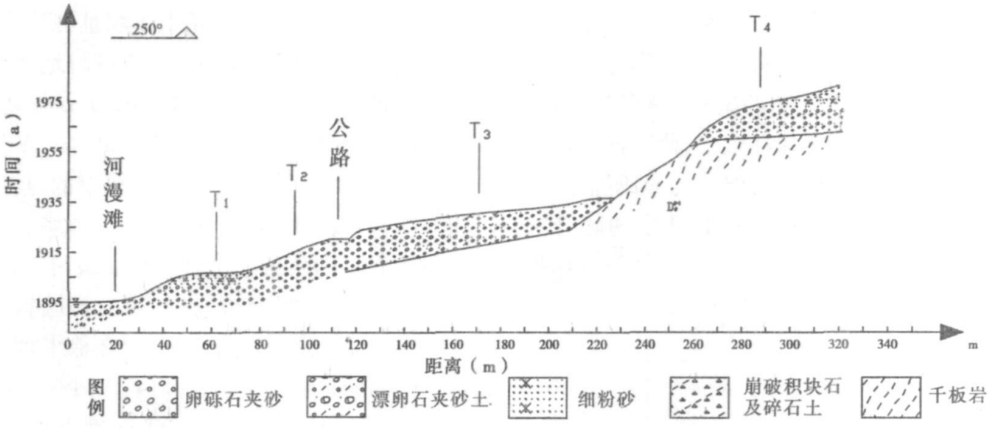


图 2 其宗徐卡实测阶地剖面

Fig. 2 Measured terrace profiles of Qizong xuka

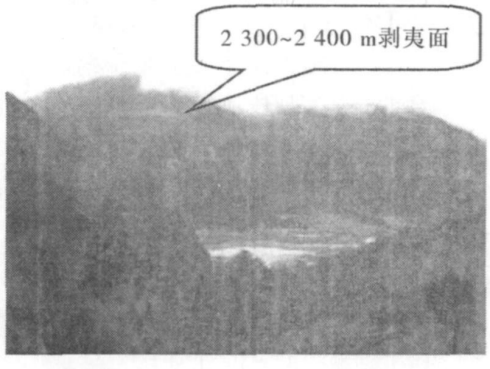


图 3 剥夷面远观

Fig. 3 Far viewing of the denudation-planation surface

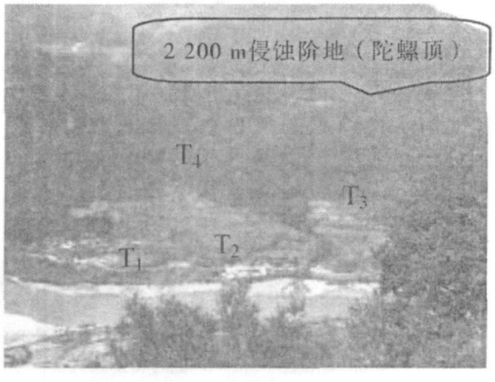


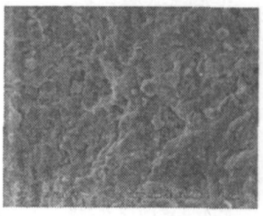
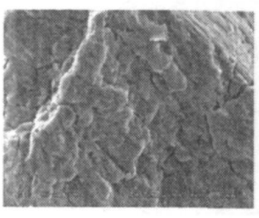
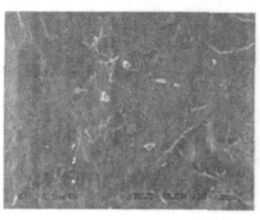
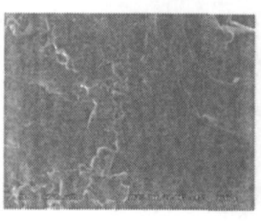
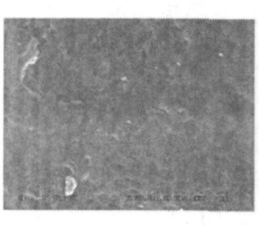
图 4 侵蚀阶地远观

Fig. 4 Far viewing of the erosional terrace

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　其宗河段石英砂电镜扫描成果

Table 1　Electron microscope scanning results of quartz sand of Qizong section

高程(m)	采样地点	石英颗粒表面特征频度统计		代表性电镜扫描图		相对年代
2 200	2 200 m 夷平面	桔皮	10	苔藓状结构		中更新世
		鱼鳞	5			
		苔藓	18			
		虫蛀	2			
2 000	Ⅳ级阶地	桔皮	9	苔藓状结构		晚更新世早期
		鱼鳞	3			
		苔藓	10			
1 925	Ⅲ级阶地	桔皮	2	鱼鳞状结构		晚更新世中晚期
		鱼鳞	4			
		苔藓	3			
1 910	Ⅱ级阶地	次贝壳	5	桔皮状结构		晚更新世末期
		桔皮	6			
		鱼鳞	4			
		苔藓	1			
1 905	Ⅰ级阶地	次贝壳	3	桔皮状结构		全新世
		桔皮	17			
		鱼鳞	3			
		苔藓	1			
1 900	河漫滩	次贝壳	1	次贝壳状结构		全新世
		桔皮	4			
		鱼鳞	8			

测试单位：地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 其宗河段剥夷面、阶地及河床覆盖层测年

Table 2 Denudation-planation surface, terrace and riverbed overburden dating of Qizong section

高程 (m)	取样位置说明		古剂量(Gy)	年剂量 (mGy)	年龄 ($\times 10^4$ a)
2 400	河段右岸 2 400 m高程平台处粘土样	16AB13	1 875.0	6.53	28.7±2.9
2 230	上坝址右岸垭口 2 230 m灰岩钙化物样	5AB2	531.3	3.73	14.2±1.4
2 200	河段 2 200 m高程平台处粘土样	15AB12	867.8	6.47	13.4±1.3
2 000	下坝址篮球场下游Ⅳ级阶地阶坎样	9AB6	658.5	7.22	9.1±1.0
1 925	上坝址右岸Ⅲ级阶地粉砂透镜体样	7AB4	317.9	6.99	4.5±0.4
	下坝址篮球场处Ⅲ级阶地最上层粉细砂样	6AB3	244.6	5.78	4.2±0.4
1 912	下坝址Ⅲ勘线 zk214钻孔右岸Ⅱ级阶地阶坎样	10AB7	136.8	5.44	2.5±0.3
1 905	下坝址Ⅰ勘线右岸Ⅰ级阶地卵砾石夹砂样	8AB5	58.5	5.32	1.1±0.1
	下坝址Ⅲ勘线 zk214钻孔右岸Ⅰ级阶地阶坎样	11AB8	57.1	5.21	1.1±0.1
1 857	下坝址 zk02钻孔 48 m细砂样	03A19	19.8	2.20	0.9±0.1
1 813	下坝址Ⅲ勘线 zk204钻孔 87 m粉细砂样	06A20	163.2	6.78	2.8±0.3
1 771	下坝址Ⅲ勘线 zk204钻孔 116.06~116.16 m样	12AB9	212.6	4.09	5.2±0.5
1 769	下坝址Ⅲ勘线 zk204钻孔 118.9~119.0 m样	13AB10	330.3	6.61	4.9±0.5

测试单位: 成都理工大学四川省"地学核技术"重点实验室 ESR测年

通过对其宗水电坝址区河段层状地貌的调研, 该河段河谷Ⅳ级阶地与Ⅲ级阶地风化程度差异大, Ⅳ级阶地的风化程度较Ⅲ级阶地要严重得多。从电镜扫描结果可以看出, 除Ⅰ级、Ⅱ级阶地及河漫滩石英颗粒形貌溶蚀相对较轻外, 其他样品普遍都有明显的溶蚀及结晶现象, 表明谷底堆积物、Ⅲ级及其以上阶地或层状地貌中石英经历了较长时间的风化作用, 应为晚更新世或中更新世晚期的堆积; ESR测年结果也有较大差别, Ⅳ级阶地形成年代约距今 80~90 ka, Ⅲ级阶地形成距今仅 40~50 ka, 下坝址Ⅲ勘线 zk204钻孔 116~119m距今为 49~52 ka, 对下坝址 zk204钻孔下部炭化木的 ^{14}C 测年为 45 ka 由以上测年表明, 河谷基覆界面附近覆盖层测定年龄早于Ⅲ级阶地, 而晚于Ⅳ级阶地, 由此说明其宗水电坝址河段河谷在Ⅳ级阶地形成后, 一直下切至基覆界面, 回填加积至Ⅲ级阶地的高度, 然后又重新下切, 形成现今Ⅲ级、Ⅱ级及Ⅰ级阶地地貌, 且河谷下切并未切穿回填加积层; 该河段在形成程式上与川西河谷在末次冰盛期堆积回填, 并在后期重新下切形成Ⅱ级、Ⅰ级及正常河床相堆积[5] 有较为明显的差异。

从下坝址 zk02、zk204钻孔样测年与下坝址右岸Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级阶地测年对比分析, 其宗坝段河床覆盖层形成具有不对称内叠阶地的特点, 即在下坝址具有从右岸到左岸, 从谷底到河面, 河床覆盖层形成从晚更新世→全新世, 逐渐变新。通过对河床钻孔覆盖层组成鉴别, 其组成成份较复杂, 分别堆积了冰水河床相、洪积、泥石流堆积、崩积、漫滩堆积、河床相堆积等物质, 其古气候环境也经历了末次冰期副冰期、间冰段、冰盛期到冰后期不同气候环境。

从本次在坝区河段采取的层状地貌测年 ESR及石英颗粒电镜扫描结果并结合区域研究成果综合分析可知, 第四纪初期开始 (距今约 2.4 Ma), 受印度板块的强烈推挤, 青藏高原缩短加剧, 内部块体开始差异抬升, 从而导致统一高原面解体, 进入差异抬升阶段。在滇西北地区的具体表现是众多的盆地如丽江—鹤庆盆地、大理盆地和较大规模的内流河形成, 在河流的谷坡形成多级剥夷面, 如区内 3 800 m、3 200 m及 2 700 m剥夷面。进入中更新世, 断块差异活动进一步加剧, 并形成一些新的湖盆, 红岩水电站坝址及龙坝水电坝址钻孔资料揭示, 河床覆盖层底部为山间盆地近源类磨拉石堆积与静水沉积, 由块碎石混杂粘土与粘土层构成, 在龙蟠一带该层被中更新世冰碛物覆盖, 表明石鼓古湖在中更新世早期雏形已经形成[5]。

文献[5] 研究揭示"在云南石鼓'长江第一湾'附近河段两岸发现了多处典型的第四纪湖相沉积物露头, 它们构成了金沙江第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级阶地的基座。热释光 (TL)和 U系法年龄测定及磁性地层学研究结果表明, 该套湖相沉积物中上部的年龄为 243.3

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

~88.0 kaBP, 属于中更新世晚期至晚更新世早期。从本次其宗河段层状地貌的测年成果来看, 老村以上金沙江宽谷谷底 (其宗一带海拔约为 2 400 m)形成于距今约 0.28 Ma, 估计当时宽谷谷底深度 1~3 km, 河流具有游荡性, 0.28 Ma以来进入峡谷期, 河流快速下切, 在 2 200 m有一次停息, 然后继续下切, 在下切过程中形成Ⅳ级、Ⅲ级、Ⅱ级及Ⅰ级阶地。与石鼓不同的是, 老村以上金沙江河段Ⅳ级、Ⅲ级、Ⅱ级阶地之下没有发现湖相堆积, 由此表明老村以上金沙江河段可能并不是石鼓古湖的一部分, 而是注入石鼓湖的上游河流。

从其宗河段层状地貌及阶地的级差、测年结果求得其宗段河流相对下切速率 (表 3): 从表可以看出, 宽谷期下切速率较慢, 进入峡谷期, 下切速率明显高于宽谷期, 下切速率大都大于 1 mm/a, 特别是 2 200 m平台至Ⅳ级阶地间下切速率达到 4 mm/a 以上, 在Ⅲ级阶地到Ⅱ级阶地后下切速率减缓。

表 3　其宗河段峡谷期河流相对下切速率

Table 3　River relative incision rate of Qizong river section of gorge stage

序号	样品说明	高程 (m)	年龄 ($\times 10^4$ a)	相对下切速率 (mm/a)
1	2 400 m高程平台处粘土样	2 400	28.7±2.9	1.31
2	2 200 m高程平台处粘土样	2 200	13.4±1.3	4.65
3	其宗水电下坝址篮球场下游Ⅳ级阶地阶坎样	2 000	9.1±1.0	1.52
4	其宗水电下坝址篮球场Ⅲ级阶地最上层粉细砂样	1 925	4.2±0.4	0.76
5	其宗水电下坝址右岸Ⅱ级阶地阶坎样	1 912	2.5±0.3	0.5
6	其宗水电下坝址右岸Ⅰ级阶地阶坎样	1 905	1.1±0.1	

注: 相对下切速率 =相对高程差 /相对年龄差

3　工程效应

河谷演化研究表明其宗河段在 2 400 m以下进入快速下切阶段, 快速下切作用导致岸坡岩体松弛明显, 而且较深。上坝址 PD6#等平硐揭露岸坡岩体卸荷松弛带发育在 33~35 m(图 5), 卸荷带张开宽 0.2~0.6 m, 无充填, 面较平直, 延伸数米, 卸荷面局部见锈染。

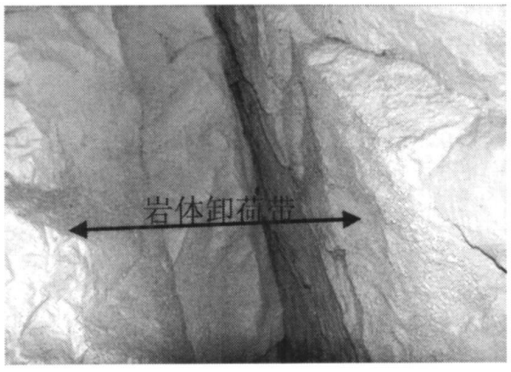


图 5　上坝址 PD6#平硐 33~35 m处卸荷带

Fig. 5　The unloaded zone from 33 m to 35 m of PD6# adit at upper dam site

河谷Ⅳ级阶地形成后一直下切至基覆面, 然后重新回填至Ⅲ级阶地高度, 通过钻孔揭示谷底深槽处高程约为 1 771.9 m, 而现今Ⅲ级阶地高程约为 1 925 m, 高差约为 150 m, 上覆物质的重力作用下使得河床中、下部覆盖层具有超固结效应。钻孔揭露河谷中、下部砂层及碎石土等呈柱状, 物探专项实验测得覆盖层剪切波速为 0.83~1.40 km/s, 由此说明其覆盖层承载力较高; 与此同时, 测年显示河床中下部砂层形成于晚更新世, 根据相关规范[6]其砂层不液化。

4　结 论

通过对金沙江其宗河段河谷层状地貌研究, 有以下几点认识: 1. 金沙江其宗水电坝址河段发育Ⅳ级阶地, Ⅳ级阶地形成距今 8~9$\times 10^4$ a, Ⅲ级阶地形成距今仅 4~5$\times 10^4$ a, 后者较前者更加强风化; zk204钻孔中炭化木的 ^{14}C测年为 4.5$\times 10^4$ a, 钻孔 116 m以下测年距今 4.9~5.2$\times 10^4$ a, 表明河床基覆界面形成晚于Ⅳ级阶地而早于Ⅲ级阶地, 而后回填加积物质重新下切形成现今Ⅲ级阶地地貌; 2. 通过对阶地及河床覆盖层系统测年对比研究, 其宗河

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

段河床覆盖层形成具有不对称内叠阶地的特点；3. 河谷层状阶地覆盖层工程地质性质较好，不易诱发库区塌岸等地质灾害，河床中、下部覆盖层承载力较高，且砂层形成于晚更新世不液化。

参考文献（References）

[1] Yang Baojia, Lü Wei. Moving features of new tectonic movement in three river area of northwest Yunnan[J]. Journal of Chengdu University(Natural Science) 2006, 25(3): 214~218[杨宝嘉，吕伟. 滇西北三江地区新构造运动特征[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2006, 25(3): 214~218]

[2] Fan Zhuguo, Li Feng, Tan Shucheng, et al. The characteristics and environmental effects of neotectontc movement in the Lijiang-Dali region[J]. Geotectonic et Metallogenia, 2002, 26(3): 6~9[范柱国，李锋，谈树成，等. 丽江—大理地区新构造运动特征及环境效应[J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26(3): 6~9]

[3] Wang Sui-ji, Wu Shao-hong, He Da-ming, et al. Geomorphological evolution similarity in northern three-river Longitudinal Range-Gorge landform parameters statistical of evidence and analysis[J]. Science Bulletin, 2006, 51: 32~39[王随继，吴绍洪，何大明，等. 纵向岭谷北部三江地貌演变的相似性—地貌参数统计关系证据及成因剖析[J]. 科学通报, 2006, 51: 32~39]

[4] Wang Yunsheng, Huang Runqiu, Peng Duanhai, et al. An intensive erosion event in the last glaciation in the west of China[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2006, 33(1): 73~76[王运生，黄润秋，段海澎，等. 中国西部末次冰期一次强烈的侵蚀事件[J]. 成都理工大学学报, 2006, 33(1): 73~76]

[5] Zhao Xitao, Qu Yongxia, Zhang Yongshuang, et al. Discovery of Shigu Paleolake in the Lijiang area, north-western Yunnan, China and its significance for the development of the modern Jinsha River valley[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(8): 960~969[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]

[6] Ministry of Construction P. R. China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering (GB50021~2001)[S]. China Architecture & Building Press, 2002[中华人民共和国建设部，国家质量监督检验检疫局. 岩土工程勘察规范(GB50021~2001)[S]. 中国建筑工业出版社, 2002]

A Study on Evolution and Engineering Effect of Qizong River Section Valley of Jinsha River

LUO Yonghong[1], WANG Yunsheng[1], WANG Zigao[2], GAO Jian[2]

(1. State Key Laboratory of Geological Hazards Prevention, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. Kunming Hydropower Institute of Exploration and Design, China Hydropower Consult Group, Kunming 650051, China)

Abstract: Through spot investigation of Qizong River Section of Jinsha River valley, four terraces were recognized. Great difference of weathering degree between the fourth terrace and the third terrace. The weathering degree of the former is more serious than the latter. Age determination shows that the formation age of the fourth terrace about 80~90 kilo-years before present, but the third terrace age is just about 40 kilo-years. ^{14}C age of the carbonized wood in zk204 drilling shows 45 kilo-years before the present. The age determinations results show that river incised the rock surface of the valley bottom after the formation of the fourth terrace, backfill and aggradation the height of present third terrace, then a new incision formed third terrace, second terrace and first terrace. The formation program with the evolution of western Sichuan valley have a more significant difference.

Of late Pleistocene, overburden in middle and lower of river bed has over-consolidated effect, which is not only high bearing capacity but also no liquefaction.

Key words: Jinsha River; Qizong River Section; time dating; evolution of valley; engineering effect

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net