云南景洪电站水库库区断层与地震危险性分析*

李志祥[1,2]，毛玉平[2]，谢建斌[3]，肖海滨[3]，李茂仙[2]

（1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院，合肥 230026；2. 云南省地震局，昆明 650224；
3. 云南华能澜沧江水电有限公司，昆明 650214）

摘要：通过对景洪电站水库周围区域地震地质环境，包括主要活动断裂、库区周围地震活动、库区断层性质及其与水库关系的分析，认为景洪电站水库地震地质环境复杂，水库周围地区不仅发育有澜沧江断裂带、澜沧—勐遮断裂带、无量山断裂带等规模较大的活动断裂，而且位于耿马—澜沧地震带、思茅—普洱地震带之间；库区发育一系列 NW向断层，主要包括澜沧江断裂、酒房断裂、白马山断裂、打洛断裂、勐养河断裂、大水缸—茨通断裂、安马山断裂、三达山断裂、育种队断裂等，这些断层形成一条以水库为中心的 10～20 km宽的 NW向断层带。因此，景洪电站水库具备发生水库诱发地震的基本条件，发生水库诱发地震危险性较大的是澜沧江断裂近坝址段、安马山断裂南段、白马山断裂。

关键词：景洪水电站；水库诱发地震；断层特性；云南

中图分类号：P315.72+8 文献标志码：A 文章编号：1000－0666(2008)02－0174－06

0 引言

景洪电站水库北起糯扎渡，南至景洪曼勉大寨，主库沿橄榄坝、景洪一线的澜沧江河谷呈 NW向分布，库长 106 km；除主库外，沿大中河、南昆河、南果河等支流还形成支库。

景洪电站水库坝高 110 m，设计正常蓄水水位 602 m，库容 11.39亿立方米。根据水库规模与水库诱发地震关系统计分析结果（胡毓良，1983），景洪电站水库诱发地震的可能性较大，根据已有研究，其诱发地震的最大震级为 5.1（张立人等，1994）。

景洪电站库区地震地质环境比较复杂，库区及其周围断层发育，地震活动性强。1973年 3月 22日在坝址以东 15 km的勐养一带发生 5.5级地震，1923年 7月 1日和 1943年 2月 24日在坝址以西 28 km的曼扭一带分别发生 6.5级和 5.8级地震。

由于观测资料还不够丰富，目前对水库诱发地震的孕育过程及其机理认识尚处于探讨阶段，但普遍认为水库诱发地震活动主要与水库容量、蓄水时间、地壳应力、地形起伏、重力异常、库基岩石不均匀性、库区活动断层等因素有密切联系，其中地质构造及其有关的因素，如库区断层及其活动、活动断层引起的非均匀地壳应力场等，是水库诱发地震活动的主要因素（毛玉平，2007）。就断层而言，水库诱发地震并不一定和大断层有关（胡毓良，1983），绝大多数水库诱发地震与库区特别是靠近水库边缘的浅层断层密切相关；库基中大小不等的断裂不仅是产生水库诱发地震的震源破裂的因素，也是库水渗透扩散的基本条件（丁原章，1989）。断层力学环境也与水库诱发地震有密切联系，有人认为正断层环境下的水库较逆断层环境更容易发生诱发地震（Simpson，1976；Jacob，1979），但也有统计认为，逆断层环境下发生诱发地震的数量与正断层环境下的诱发地震数量几乎相等（Marcelo，2002），逆断层机制可能也是水库诱发地震的一种重要错动机制（胡毓良，1983）。

景洪电站水库即将蓄水，根据景洪电站库区复杂的地震地质环境和目前对水库诱发地震机理的认识水平，为了便于对景洪电站水库诱发地震进行观测与研究，笔者分析了景洪电站水库周围区域地震地质环境，包括主要活动断裂、库区周围地震活动性，库区断层性质及其与水库关系，指出了最有可能发生较大水库诱发地震的断层。

*收稿日期：2007－09－27.
基金项目：云南省重点科技攻关课题（2006SG01）资助.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　区域地震地质环境

1.1　主要活动断裂

根据滇西南地区活动构造特点（毛玉平，2003），景洪水电站库区及其周围的活动断裂主要有水库西侧的澜沧江断裂带、澜沧—勐遮断裂带，水库东侧的无量山断裂带及库区以南的打洛断裂（图 1）。

（1）澜沧江断裂带

澜沧江断裂带是通过水电站库区的一条巨型断裂带，沿景洪水库西侧发育，在库区内走向 NW，倾向 SW。澜沧江断裂是第四纪活动断裂，根据水系、冲沟和阶地的综合分析以及山脊的错动情况，其右旋水平活动速度为 0.7 mm/年（毛玉平，2004）。澜沧江断裂带同时又是滇西南地区新构造运动的分区界线，自 1520年以来，澜沧江断裂带内多次发生破坏性地震。

（2）澜沧—勐遮断裂带

该断裂带北端在石张营附近与 NW向的木戛断裂斜交，往南经大塘子、竹塘、澜沧、勐满、勐遮和勐混盆地后与 NE向的打洛断裂相交，最终消失于勐海花岗岩体中。断裂全长 160余千米，总体走向 N35°W，倾向 SW，局部地段倾向 NE，倾角较陡，一般为 60°～80°。断层破碎带宽数十米至数百米，发育构造角砾岩、糜棱岩及挤压片理化带，具多期活动特征。沿断裂有大量热泉成群、带分布，勐满和澜沧是两个高温地热异常区，泉水温度高达 104℃和 99℃。沿该断裂地震活动频繁，1941年 12月 26日曾发生 7级地震，1988年 11月 6日发生澜沧—耿马 7.6、7.2级地震，其 6.7级强余震发生在断裂北段哈卜妈至主募乃间，断裂现代小震活动频繁，是一条至今仍在活动的全新世活动断裂。

（3）无量山断裂带

无量山断裂带北起无量山北麓，向南东经镇源、普洱、漫汤，顺营盘山入老挝，总体走向 NNW—SSE，云南境内长 220 km以上，主要由以下 3条断裂组成：

① 磨黑断裂：由两条相向倾斜的次级张扭性断层组成：东面的一条倾向西，倾角 60°～70°；西面的一条倾向东，倾角 50°～80°，两条断层之间为磨黑—勐岩地堑式槽地。该断裂为第四纪活动断裂，在磨黑、整董两地分别发生过 6.8级与 6.0级地震。

② 普洱断裂：由 2～3条次级断裂组成地垒式的逆冲断层带，倾向东或西，倾角西缓东陡，西侧断裂倾角为 25°～40°，东侧断裂倾角达 60°～70°。该断裂在思茅—普洱地段多被 NE向的横断层切错，共同构成类棋盘格式构造。该段在 1884～1993年间，共发生过 8次 6级以上地震。

③ 普文断裂：该断裂由景谷盆地南端开始，呈略向西突出的弧形向南延伸，经思茅西侧、普文，至勐醒后转为近 SN向延伸至勐腊北。该断裂为第四纪活动断裂，普文一带曾发生过 5.9级地震。

（4）打洛断裂

断裂由打洛往 SW方向延入缅甸境内，往 NE方向经勐板、曼各一直延伸到景洪盆地，全长 150余千米，走向 N70°E左右，总体倾向 NW，局部倾向 SE，倾角较陡，具压扭性特征。该断裂控制了打洛、勐板、曼各、景洪等第四纪盆地的发育，左旋错断南披河水系，表明该断裂自晚第四纪以来具左旋水平运动特征。1950年 2月 3日勐海西南中缅边境曾发生 7级地震，可能与该断裂的活动有关。近年来沿断裂带小震活动成带分布，该断裂可能是全新世活动断裂。

1.2　库区周围地震活动

景洪电站水库周围地震活动强烈，强震主要集中在库区以西的澜沧、勐海和库区以东的思茅、普洱一带，他们分别属耿马—澜沧地震带和思茅—普洱地震带。

（1）耿马—澜沧地震带

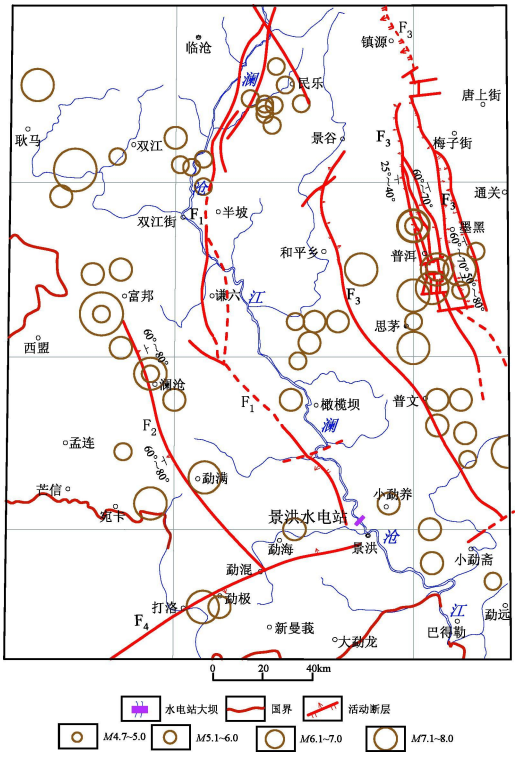
该地震带北以南汀河断裂为界，向南东延至中、缅边界一带，总体呈 N25°W方向展布，南北长约 250 km，东西宽约 70 km，距库区近 50 km。该地震带 1935年始有地震记载，至 2001年 12月，共发生 $M_L \geq 4.7$地震 51次（含 1988年澜沧—耿马 7.6、7.2级大地震的强余震），其中 6.0～6.9级 10次，7级以上 5次，最强为 7.6级。木戛断裂、澜沧—勐遮断裂、孟连断裂、打洛断裂是该地震带的主要地震构造。

（2）思茅—普洱地震带

该地震带北起普洱以北，向南经过思茅、普文、曼洪、勐腊，延伸至老挝境内。为一长约 200余千米、宽约 70 km的 NW向条带，距库区约 60 km。自 1884年有地震记载至 2001年 12月，共发生 $M_L \geq 4.7$地震 43次（含勐腊南老挝境内的 1次 6.0级与 1次

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

6[3/]级地震），其中 5.0～5.9级 20次，6.0～6.9级 12次，以 1979年 3月 15日普洱磨黑 6.8级地震最强。无量山断裂带为其主要地震构造。

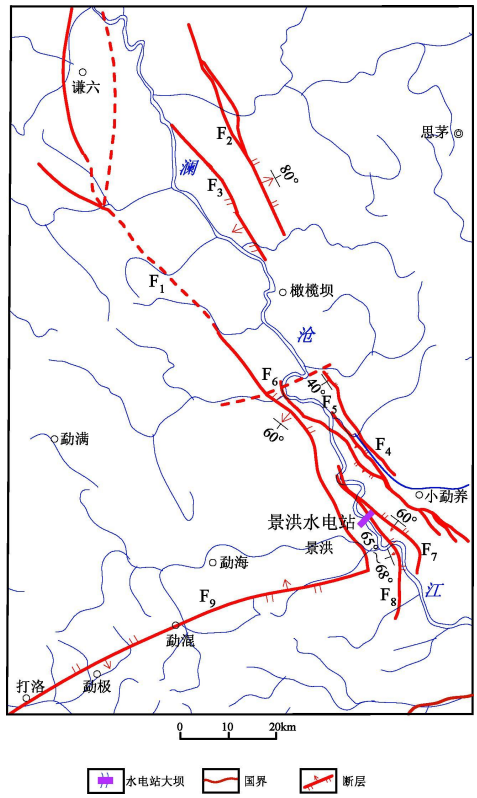


F_1：澜沧江断裂； F_2：澜沧—勐遮断裂；
F_3：无量山断裂； F_4：打洛断裂

图 1 景洪水电站库区及其周边活动断裂与地震震中分布图（$M \geq 4.7$）

2 库区断层特性

绝大多数水库诱发地震发生在距库岸 25～30 km范围内（Simpson，1976）。根据景洪电站地震安全性评价工作的成果（国家地震局分析预报中心，1994），在总体呈 NW向展布的景洪电站库区 30 km范围内，发育 NW向断裂，主要包括澜沧江断裂、酒房断裂、白马山断裂、打洛断裂、勐养河断裂、大水缸—茨通断裂、安马山断裂、三达山断裂、育种队断裂等，这些断裂形成一条以水库为中心的 10～20 km宽的 NW向断层带。这些断层在库区范围内的展布见图 2，其力学性状及其与水库的位置关系见表 1。



F_1：澜沧江断裂； F_2：酒房断裂； F_3：白马山断裂；
F_4：勐养断裂； F_5：大水缸—茨通断裂； F_6：安马山断裂；
F_7：三达山断裂； F_8：育种队断裂； F_9：打洛断裂

图 2 景洪水电站库区范围内断层展布图

表 1 景洪水电站库区断层及其特性统计表

断层名称	产状 走向/倾向/倾角	力学性质	最晚活动时代	规模 长度/km	规模 宽度/m	距水库中心线距离/km
澜沧江断裂	NW/SW/60°	北段为正断，南段为逆断	Q3	数百千米		4～15
酒房断裂	NW/NE/80°	正断	Q2	50		0～10
白马山断裂	NW/SW	正断	Q2	35		0～5
勐养河断裂	NW/SW/40°	逆断	Q3	50		2～6
大水缸—茨通断裂	NW/SW/	逆断	Q1—Q2	100		0～4
安马山断裂	340°/SW	正断	前 Q	46		0～4
三达山断裂	310°/SW/60°	逆断	Q1	30		0～3
育种队断裂	335°/SW/65°～68°	逆断	Q3	40	50	0～2
打洛断裂	N70°E 直立	逆断	Q4	＞75	300	10

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　景洪坝址附近微型断层及其特性统计表

断层	产状 走向/倾向/倾角	力学性质	最晚活动时代	规模 长度/km	规模 宽度/m	距水库中心线距离/km
F_1	315°/NE/75°~80°	逆断	Q2中晚期	5	40	0
F_2	340°/SW/60°~90°	逆断	Q2晚期	3.5	35	0
F_3						
F_4	NS/E, W/85°~90°			0.6	20	0
F_5	325°/SW/65°~90°	逆断	Q2晚期	3.8	50	0
F_6						

注：由于取样和平硐探测方面的原因，F_3、F_4、F_6断层的特性参数不知或不全。

坝址枢纽区附近还发育一系列 NW向断层、挤压带（图 3），其力学性状及其与水库的位置关系见表 2。

3　水库诱发地震的断层条件分析

库水渗透和库水载荷会对水库周围一定范围产生一个附加应力，这一应力作用导致断层错动，这就是水库地震发生的重要机理（Jacob等，1979；Shirley，1980），同时断层的分布和产状对水库地震的形成有一定影响（丁原章，1989）。为了分析景洪电站库区各断层的地震危险性，表 3给出了库区各断层性质、与水库的位置关系、被库水淹没的情况，其中，断层与水库位置关系分析是为了判断库水载荷力与断层性质所反映的构造力之间是否存在共合关系，如果水库位于断层下降盘，则认为水载荷力与断层性质所反映的构造力之间存在共合关系，断层则容易在水库蓄水后发生错动而诱发地震，如果这样的断层被库水淹没，则发生地震的危险性更大。其可能的发震区域如图 4中阴影所示。

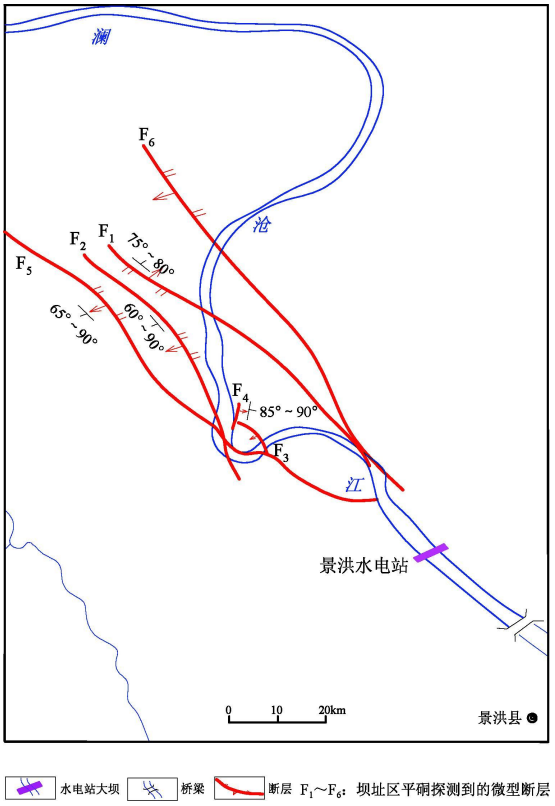
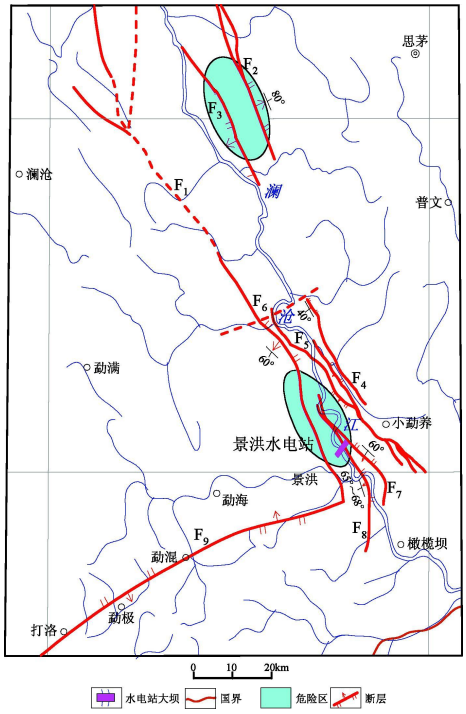


图 3　景洪水电站坝址区微型断层展布图

表 3　景洪水电站库区断层特性及其与水库的关系统计表

断层	力学性质	倾角/(°)	距水库中心线距离/km	距坝址距离/km	水库与断层的构造关系	库水淹没段可能长度/km
澜沧江断裂	正断、逆断	30~60	4~15	5	水库位于断层下降盘	0
白马山断裂	正断	55~60	0~5	58	水库位于断层下降盘	8
酒房断层	正断	80	0~15	52	水库位于断层上升盘	库宽
勐养河断裂	逆冲	40	2~6	10	水库位于断层上升盘	0
大水缸—茨通断裂	逆断	40~45	0~4	21	水库位于断层南段上升盘	6
安马山断裂	正断	20	0~4	18	水库位于断层下降盘	2
三达山断裂	逆断	60	0~3	10	断层两侧均有库段分布	1
育种队断裂	逆断	65~68	0~2	7	断层两侧均有库段分布	1
打洛断裂	逆断	60~70	10	10	水库位于断层上升盘	0

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



F_1：澜沧江断裂； F_2：酒房断裂； F_3：白马山断裂；
F_4：勐养河断裂； F_5：大水缸—茨通断裂；
F_6：安马山断裂； F_7：三达山断裂； F_8：育种队断裂；
F_9：打洛断裂

图 4 景洪水电站库区范围内断层展布图

4 结论

（1）景洪电站位于地质构造环境比较复杂的地区，库区及其周围邻近地区活动断裂发育，地震活动强烈，地壳活动水平和岩石应力应变水平较高，具备水库地震发生的基本条件。

（2）尽管景洪电站水库区断层发育较多，根据水库地震机理中断裂构造的作用分析，发生水库地震危险性较大的是澜沧江断裂近坝址段、安马山断裂南段和白马山断裂。

参考文献：

丁原章，常宝琦，肖安予，等．1989. 水库诱发地震 [M]．北京：地震出版社．

胡毓良．1983. 水库地震研究的新进展 [J]．地震地质译丛，3：1—44.

毛玉平，王洋龙，李朝才．2004. 澜沧江中段重大水利枢纽工程区地震地质环境研究 [J]．地震研究，27（增刊）：63—69.

毛玉平，王洋龙，李朝才．2004. 小湾库区水库诱发地震环境分析 [J]．地震研究．27（4）：339—343.

毛玉平，韩新民，谷一山，等．2004. 云南地区强震（M≥6级）研究 [M]．昆明：云南科技出版社．

毛玉平，艾永平，邵德晟，等．2007. 水库地震安全问题分析 [J]．地震研究，30（3）：253—259.

张立人．1994. 澜沧江景洪水电站地震安全性评价报告 [R]．北京：国家地震局分析预报中心．

中华人民共和国国家电力公司昆明勘测设计研究院．2000. 景洪水电站可行性研究最终报告 [R]．昆明：中华人民共和国国家电力公司昆明勘测设计研究院．

Marcelo A, Vastle M, Lucas B, et al. 2002. Reservoir-induced seismicity in Brazil[J]. Pure and Applied Geophysics, 159: 597—617.

Jacob K H, Pennington W D, Armbruster J, et al. 1979. Tarbela Reservoir Pakistan: a region of compressional tectonics with reduced seismicity upon initial reservoir filling [J]. BSSA, 69: 175—1192.

Shirley J E. 1980. Tasmanian seismicity— natural and reservoir-induced [J]. BSSA, 70: 2203—2220.

Simpson D W. 1976. Seismicity changes associated with reservoir loading [J]. Eng Geol, 10: 123—150.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Faults in the Reservoir Area of Jinghong, Yunnan, Hydropower Station and the Risk of Reservoir-induced Seismicity

LI ZHI-xiang[1,2], MAO Yu-ping[2], XIE Jian-bin[3], XIAO Hai-bin[3], LI Mao-xian[2]
(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)
(2. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)
(3. Yunnan Lancang River Hydropower Development Co., LTD, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

The seismogeologic environment around Jinghong, Yunnan, Hydropower Station Reservoir including major active faults, seismicity, faults' feature and the relation between them and the reservoir were comprehensively studied. It is thought that the seismogeologic environment around the Jinghong reservoir is complicated. Because the Lancangjiang, Lancang-Mengzhe and Wuliangshan faults not only develop in the reservoir area, but also lie between Lancang-Gengma Earthquake Belt and Simao-Puer Earthquake Belt. Besides, a series of NW-trending faults, Lancangjiang, Jufang, Baimashan, Daluo, Mengyanghe, Dashuigang-Citong, Anmashan, Sandashan, Yuzhongdui faults, form a 10- to 20-km-wide NW-trending fault belt in the reservoir area. So the Jinghong reservoir has basic condition of inducing seismicity, and the more dangerous areas are the near-dam segment of the Lancangjiang fault, the south segment of Anmashan fault, and the Baimashan fault.

Key words: Jinghong hydropower station; reservoir-induced earthquake; fault feature; Yunnan

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



毛先进　云南省地震局正研级高级工程师。1997年毕业于中南工业大学地质系应用地球物理专业，获博士学位。主要从事工程地球物理勘探及地震电磁学研究。



Kamal Abdel-Rahman El-Sayed 埃及国家天文和地球物理研究所地震学室副研究员。分别于1999、1994、1990年毕业于 Zagazig 大学，并获工程地震学博士学位、地质学硕士学位和地球物理学学士学位。现主要从事场地效应评估、地震灾害评估和强震动数据的工程应用研究。



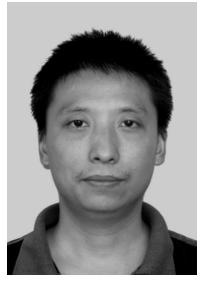
李志祥　云南省地震局地震工程研究院高级工程师。1991年毕业于北京大学地震地质专业。现主要从事建筑工程检测及水库地震监测台网建设工程设计工作，承担“复杂构造区水库地震监测预警研究”运用方面的子课题研究工作。



王　琼　新疆维吾尔自治区地震局副研究员。1997年毕业于新疆师范大学地理专业，获学士学位；2000年毕业于中国地震局兰州地震研究所固体地球物理专业，获硕士学位。主要从事地震预报和应力触发等方面的研究。



张卫东　广州航海高等专科学校交通建筑工程系副教授，一级注册结构工程师。2001年毕业于哈尔滨工业大学结构工程专业，获硕士学位。主要从事土—结构相互作用，工程结构抗震、隔震，差异沉降对上部结构的影响及防控等方面的研究及土木工程的教学工作。



皇　民　河南工程学院讲师。1996年毕业于西安矿业学院建筑工程系，获学士学位；现为西南交通大学土木学院博士研究生。研究方向为地下结构动力分析及抗减震研究。



王曰风　河北省地震局张家口中心台工程师。1999年毕业于石家庄经济学院（原河北地质学院）水文地质与工程地质专业，获学士学位；现为中国科学技术大学固体地球物理专业在读硕士研究生。主要从事地震观测与地震分析预报工作。



史　榕　2005年毕业于吉林大学地球探测科学与技术学院，获硕士学位；现为同济大学海洋与地球科学学院固体地球物理专业在读博士研究生。主要从事 GPS与遥感图像处理方面的工作。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net