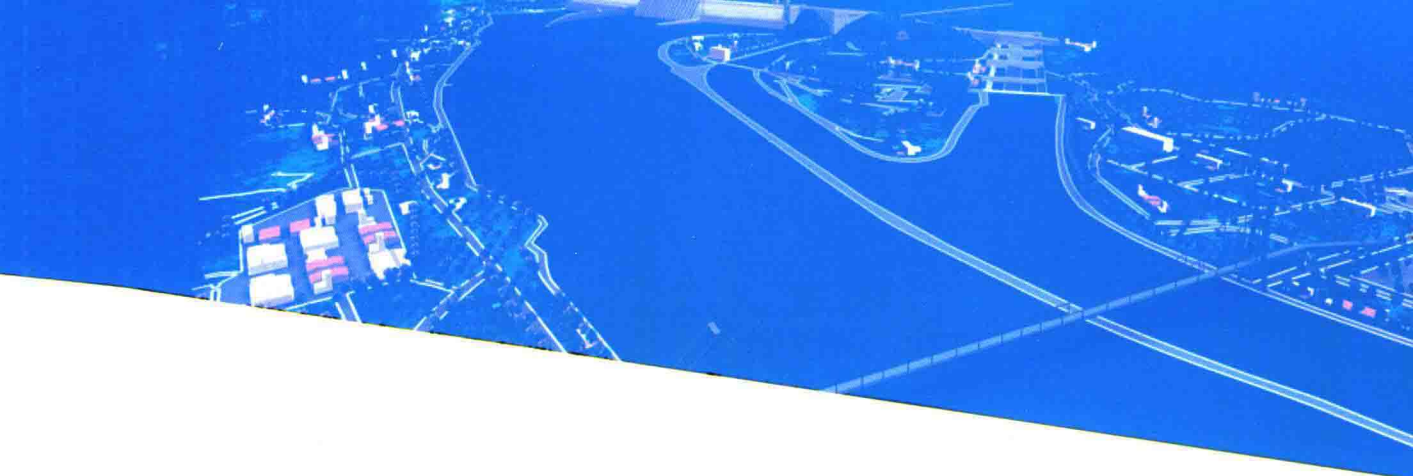
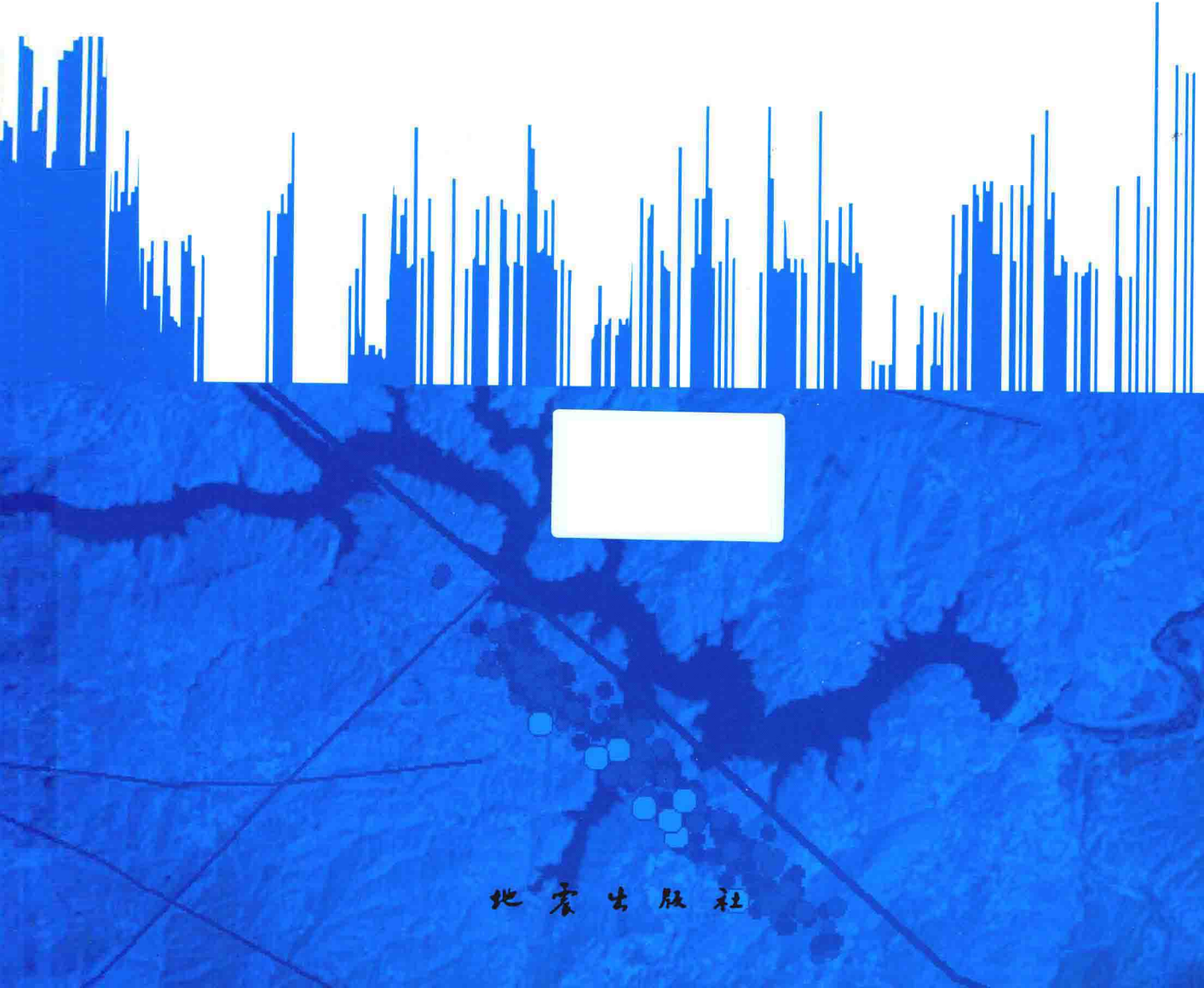




# 中国大陆水库地震 统计特征及预测方法研究

蒋海昆 张晓东 单新建 等 著



地震出版社

# 中国大陆水库地震

## 统计特征及预测方法研究

蒋海昆 张晓东 单新建 等 著

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

中国大陆水库地震统计特征及预测方法研究 / 蒋海昆等著.

—北京: 地震出版社, 2014. 1

ISBN 978-7-5028-4280-2

I. ①中… II. ①蒋… III. ①水库地震—地震预测—研究—中国

IV. ①P315. 72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 101005 号

地震版 XM2391

中国大陆水库地震统计特征及预测方法研究

蒋海昆 张晓东 单新建 等 著

责任编辑: 王秋月

责任校对: 庞亚萍

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68455221

专业部: 68467982 68721991

<http://www.dzpress.com.cn>

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

版 (印) 次: 2014 年 1 月第一版 2014 年 1 月第一次印刷

开本: 889×1194 1/16

字数: 605 千字

印张: 20

印数: 0001~1000

书号: ISBN 978-7-5028-4280-2/P (4968)

定价: 80.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

# 目 录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 第1章 引 言 .....                    | 1  |
| 第2章 中国大陆水库地震基本统计特征 .....         | 3  |
| 2.1 水库地震研究现状 .....               | 3  |
| 2.2 中国大陆水库地震基本资料 .....           | 6  |
| 2.3 中国大陆水库地震活动基本特征 .....         | 8  |
| 2.3.1 水库诱发地震空间分布 .....           | 9  |
| 2.3.2 水库诱发地震时间分布 .....           | 9  |
| 2.3.3 水库诱发地震的深度分布 .....          | 12 |
| 2.3.4 水库诱发地震的库区岩性分布 .....        | 15 |
| 2.3.5 水库诱发地震响应类型 .....           | 16 |
| 2.3.6 水库诱发地震与库水位的关系 .....        | 17 |
| 2.3.7 水库地震空间分布与水库构造环境 .....      | 18 |
| 2.3.8 水库诱发地震的强度分布特征 .....        | 20 |
| 2.3.9 最大地震的响应时间 .....            | 20 |
| 2.3.10 水库诱发地震的序列类型 .....         | 20 |
| 2.3.11 最大地震发生时间与水位变化 .....       | 22 |
| 2.3.12 较大地震前的增强型“前震”活动特征 .....   | 22 |
| 2.3.13 震源深度变化与最大地震发生时间 .....     | 25 |
| 2.4 震群型水库地震的参数识别 .....           | 26 |
| 2.4.1 序列定义 .....                 | 26 |
| 2.4.2 序列参数计算 .....               | 27 |
| 2.4.3 序列参数的差异性检验 .....           | 27 |
| 2.4.4 序列参数差异性检验结论 .....          | 27 |
| 2.5 水库地震序列类型的综合判别 .....          | 37 |
| 2.5.1 水库地震序列与天然构造地震序列的综合判别 ..... | 37 |
| 2.5.2 水库地震序列类型的综合判别 .....        | 38 |
| 2.6 小 结 .....                    | 39 |
| 参考文献 .....                       | 40 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 第3章 水库地震最大震级与水库基本属性之间的统计关系 ..... | 41  |
| 3.1 资 料 .....                    | 41  |
| 3.2 水库地震震级与水库基本属性之间统计特征分析 .....  | 41  |
| 3.2.1 库区岩性特征 .....               | 41  |
| 3.2.2 坝高、库容与水库地震之间的定性关系 .....    | 49  |
| 3.2.3 水库区区域应力状态 .....            | 50  |
| 3.3 水库地震震级与坝高和库容之间统计关系 .....     | 50  |
| 3.4 水库地震最大震级的多因素综合预测 .....       | 51  |
| 3.5 最大地震震级分布区间的费舍尔判别 .....       | 55  |
| 3.6 小 结 .....                    | 59  |
| 参考文献 .....                       | 59  |
| 第4章 水库地震与区域应力场扰动之间的关系研究 .....    | 61  |
| 4.1 库水位变化对地震活动的影响 .....          | 61  |
| 4.2 引潮力对水库地震的影响 .....            | 65  |
| 4.2.1 水库地震与引潮力之间关系的统计特征 .....    | 66  |
| 4.2.2 垂向引潮力对新丰江水库地震的调制作用 .....   | 69  |
| 4.2.3 引潮力水口水库地震的调制作用 .....       | 72  |
| 4.2.4 引潮力对珊溪水库地震的调制作用 .....      | 78  |
| 4.3 远场强震对水库地震的库仑破裂应力触发 .....     | 80  |
| 4.4 水库地震阶段性特征及主要影响因素 .....       | 85  |
| 4.4.1 水库地震地质环境 .....             | 85  |
| 4.4.2 水库地震阶段性特征 .....            | 86  |
| 4.4.3 水库地震的主要影响因素 .....          | 101 |
| 4.5 小 结 .....                    | 102 |
| 参考文献 .....                       | 103 |
| 第5章 典型水库地震重新定位及波速结构反演 .....      | 105 |
| 5.1 紫坪铺水库 .....                  | 105 |
| 5.1.1 研究区域概况 .....               | 105 |
| 5.1.2 地震台网与速度模型 .....            | 105 |
| 5.1.3 双差法重新定位 .....              | 106 |
| 5.1.4 紫坪铺水库三维速度结构 .....          | 108 |
| 5.2 龙滩水库 .....                   | 111 |
| 5.2.1 研究区域概述 .....               | 111 |
| 5.2.2 龙滩水库地震台网 .....             | 111 |
| 5.2.3 双差法重新定位 .....              | 112 |
| 5.2.4 龙滩水库三维速度结构 .....           | 114 |

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| 5.3 珊溪水库 .....                             | 115 |
| 5.3.1 研究区域概述 .....                         | 115 |
| 5.3.2 珊溪水库地震重新定位 .....                     | 116 |
| 5.3.3 珊溪的库区三维速度结构 .....                    | 118 |
| 参考文献 .....                                 | 119 |
| <br>第6章 典型水库地震震源及介质参数研究 .....              | 121 |
| 6.1 紫坪铺水库 .....                            | 121 |
| 6.1.1 震源参数 .....                           | 121 |
| 6.1.2 震源机制 .....                           | 125 |
| 6.2 龙滩水库 .....                             | 128 |
| 6.2.1 震源参数 .....                           | 128 |
| 6.2.2 震源机制及应力场特征 .....                     | 132 |
| 6.3 珊溪水库 .....                             | 135 |
| 6.3.1 珊溪水库地震小震震源谱参数计算和分析 .....             | 135 |
| 6.3.2 珊溪水库地震与构造地震应力参数对比 .....              | 137 |
| 参考文献 .....                                 | 138 |
| <br>第7章 典型水库地震时空分布与水库加卸载及渗透过程关系的初步研究 ..... | 141 |
| 7.1 紫坪铺水库蓄水前后不同区域的地震活动 .....               | 141 |
| 7.2 紫坪铺水库区域地震剪切波分裂 .....                   | 143 |
| 7.3 紫坪铺水库区域地壳 $Q_s$ 成像及其与流体渗透关系 .....      | 145 |
| 7.3.1 方法原理 .....                           | 145 |
| 7.3.2 紫坪铺水库区域 S 波 $Q$ 值成像 .....            | 147 |
| 7.3.3 库区地层渗透情况分析 .....                     | 151 |
| 7.3.4 紫坪铺水库区域 $Q_s$ 和介质物性变化讨论 .....        | 151 |
| 参考文献 .....                                 | 152 |
| <br>第8章 水库诱发(触发)地震活动强度检测及可能机理研究 .....      | 156 |
| 8.1 引 言 .....                              | 156 |
| 8.2 ETAS 模型及模型参数求解算法的优化 .....              | 158 |
| 8.2.1 ETAS 模型 .....                        | 158 |
| 8.2.2 ETAS 模型参数的 MLE 求解方法 .....            | 159 |
| 8.2.3 ETAS 模型参数的 GA+MLE 求解方法 .....         | 159 |
| 8.2.4 最优 ETAS 模型参数确定 .....                 | 163 |
| 8.3 水库诱发(触发)微震活动的定量检测 .....                | 165 |
| 8.3.1 三峡水库 .....                           | 165 |
| 8.3.2 龙滩水库 .....                           | 172 |

|             |                                             |            |
|-------------|---------------------------------------------|------------|
| 8.3.3       | 水口水库及佛子岭水库 .....                            | 174        |
| 8.3.4       | 珊溪水库 .....                                  | 176        |
| 8.3.5       | 紫坪铺水库 .....                                 | 179        |
| 8.3.6       | 新丰江水库 .....                                 | 182        |
| 8.4         | 不同阶段水库地震主要影响因素讨论                            |            |
|             | ——以三峡水库及附近区域地震活动为例 .....                    | 185        |
| 8.4.1       | 观测事实 .....                                  | 185        |
| 8.4.2       | 流体渗透及加卸载过程的可能影响 .....                       | 186        |
| 8.4.3       | 流体“诱发”、“触发”微震活动讨论 .....                     | 190        |
| 8.5         | 流体触发微震活动定量检测方法的应用实例                         |            |
|             | ——暴雨诱发（触发）2010年6月广西凌云-凤山交界3级震群活动的初步研究 ..... | 192        |
| 8.5.1       | 降雨过程 .....                                  | 193        |
| 8.5.2       | 凌云-凤山震群及与降雨过程的关系 .....                      | 194        |
| 8.5.3       | 构造环境、微震分布及破裂特征 .....                        | 195        |
| 8.5.4       | 流体触发强度检测及孔隙压力变化模拟 .....                     | 201        |
| 8.6         | 小结及讨论 .....                                 | 203        |
|             | 参考文献 .....                                  | 207        |
| <b>第9章</b>  | <b>水库地震活动主要影响因素的数值模拟 .....</b>              | <b>211</b> |
| 9.1         | 水库地震类型、主要影响因素讨论 .....                       | 211        |
| 9.1.1       | 水库地震活动类型与力学机制 .....                         | 211        |
| 9.1.2       | 水库地震活动主要影响因素讨论 .....                        | 213        |
| 9.2         | 水库地震主要影响因素的模型化定量研究 .....                    | 219        |
| 9.2.1       | 库水渗透-孔隙压力对原地应力场的改造 .....                    | 219        |
| 9.2.2       | 基于流耦合理论的水库地震定量预测模型 .....                    | 220        |
| 9.3         | 简化模型条件下水库地震典型算例分析 .....                     | 222        |
| 9.3.1       | 模型与工况设计 .....                               | 222        |
| 9.3.2       | 数值模拟算例 .....                                | 223        |
| 9.4         | 水库地震主要影响因素 .....                            | 236        |
| 9.5         | 主要结论 .....                                  | 236        |
|             | 参考文献 .....                                  | 237        |
| <b>第10章</b> | <b>典型水库流-固耦合条件下水库诱发地震活动及动态响应机制研究 .....</b>  | <b>238</b> |
| 10.1        | 紫坪铺库区地质构造、水文地质条件及二维地质模型建立 .....             | 238        |
| 10.1.1      | 地质构造概况 .....                                | 238        |
| 10.1.2      | 地层发育及岩体渗透稳定性 .....                          | 239        |
| 10.1.3      | 断裂构造特征及渗透结构 .....                           | 240        |
| 10.1.4      | 紫坪铺库区二维地质构造与水文地质结构模型 .....                  | 240        |

|               |                                                 |            |
|---------------|-------------------------------------------------|------------|
| 10.2          | 水库诱发地震时空演化特征及其与地质构造及岩体渗透稳定性的关系                  | 241        |
| 10.3          | 水库诱发地震时空演化数值模拟分析                                | 243        |
| 10.3.1        | 地质模型、介质参数及边界条件                                  | 244        |
| 10.3.2        | 结果分析                                            | 245        |
| 10.4          | 水库诱发地震时空演化与库水加卸载及渗过过程的动态响应关系                    | 249        |
| 10.5          | 利用数值模拟探索库水加卸载及渗过过程中库区地球物理场变化                    | 249        |
| 10.5.1        | 岩石弹性波速变化规律                                      | 250        |
| 10.5.2        | 波速回归模型                                          | 250        |
| 10.5.3        | 数值模拟及结果分析                                       | 250        |
|               | 参考文献                                            | 255        |
| <b>第 11 章</b> | <b>龙滩水库 CR/PS-InSAR 时序形变场监测及与水库加卸载及渗过过程关系研究</b> | <b>257</b> |
| 11.1          | InSAR 技术与龙滩水库形变监测                               | 257        |
| 11.1.1        | InSAR 技术概述                                      | 257        |
| 11.1.2        | 龙滩水库形变监测                                        | 258        |
| 11.2          | 人工角反射器的野外架设、标定和图像识别                             | 259        |
| 11.2.1        | 人工角反射器的设计、安装和标定                                 | 259        |
| 11.2.2        | 人工角反射器在雷达图像上的识别                                 | 263        |
| 11.3          | CR/PS-InSAR 算法流程设计                              | 266        |
| 11.3.1        | PS-InSAR 技术原理                                   | 266        |
| 11.3.2        | CR/PS-InSAR 算法流程                                | 268        |
| 11.4          | 龙滩库区 ASAR 数据 CR/PS-InSAR 形变场演化历史获取              | 269        |
| 11.4.1        | 库区背景及 ASAR 数据情况                                 | 269        |
| 11.4.2        | 平均速率场                                           | 270        |
| 11.4.3        | 龙滩水库区域形变场演化历史分析                                 | 270        |
| 11.4.4        | 形变统计分析                                          | 273        |
| 11.5          | 龙滩库区 ALSO 数据 CR/PS-InSAR 形变场演化历史获取              | 277        |
| 11.6          | 常规 D-InSAR 获取某一时间段内水库区域内的形变场                    | 283        |
|               | 参考文献                                            | 286        |
| <b>第 12 章</b> | <b>龙滩水库极低频电磁观测与水库加卸载及渗过过程关系研究</b>               | <b>289</b> |
| 12.1          | 广西龙滩库区基本情况、区域地质构造和电磁剖面位置                        | 290        |
| 12.1.1        | 龙滩库区基本情况                                        | 290        |
| 12.1.2        | 龙滩库区地质构造、大地电磁探测剖面位置和电磁定点位置                      | 291        |
| 12.2          | 龙滩库区深部电性结构探测                                    | 291        |
| 12.2.1        | 资料野外观测和处理分析                                     | 293        |
| 12.2.2        | 区域电性构造走向、维数特征和视电阻率曲线分析                          | 293        |
| 12.2.3        | 二维反演和深部电性结构特征                                   | 295        |

|               |                             |            |
|---------------|-----------------------------|------------|
| 12.3          | 库水加卸载及渗透过程电磁定点观测 .....      | 298        |
| 12.3.1        | 5 期次电磁定点观测时段 .....          | 298        |
| 12.3.2        | 野外观测、处理和结果分析 .....          | 299        |
| 12.4          | 结论和讨论 .....                 | 302        |
| 12.4.1        | 库区断裂和区域深部电性结构特征 .....       | 302        |
| 12.4.2        | 库水加卸载过程中的深部电阻率变化特征 .....    | 302        |
| 12.4.3        | 龙滩库区地震丛集区的深部孕震结构和地震类型 ..... | 304        |
| 12.4.4        | 结语 .....                    | 306        |
|               | 参考文献 .....                  | 306        |
| <b>第 13 章</b> | <b>水库地震预测方案 .....</b>       | <b>309</b> |
| 13.1          | 流体诱发（触发）地震活动的定量检测 .....     | 309        |
| 13.2          | 水库地震序列类型判定 .....            | 309        |
| 13.3          | 水库地震最大震级估计 .....            | 310        |
| 13.4          | 水库最大诱发（触发）地震可能发震时间估计 .....  | 311        |
| 13.5          | 水库地震预测流程简图 .....            | 312        |

# 第 1 章 引 言

本书为国家“十一·五”科技攻关计划项目“水库地震监测与预测技术研究”第三课题“水库地震预测方法研究(2008BAC38B03)”的部分成果。

“水库地震预测方法研究”课题的主要目标是,根据水库地震及其灾害特点,研究水库加卸载及流体渗透作用下,水库地震活动及库区地球物理场变化,初步提出 1~2 项物理意义较明确的水库地震预测方法及相应判据,为做好水库地震监测预报工作、减轻水库地震灾害提供科技支撑。

为实现上述目标,“水库地震预测方法研究”课题分为相互关联的 4 个专题:

(1) 水库地震序列统计特征与水库加卸载关系研究

负责人:蒋海昆,中国地震台网中心

(2) 水库地震空间演化与水库加卸载及流体渗透过程关系研究

负责人:张晓东,中国地震台网中心

(3) 龙滩水库库区地球物理场综合观测与水库加卸载及流体渗透过程关系研究

负责人:单新建,中国地震局地质研究所

(4) 三峡水库库区形变场观测与水库加卸载关系研究

负责人:杜瑞林,中国地震局武汉地震研究所

经过四年多的努力,课题组在全面完成各项预定研究任务的同时,在水库地震研究相关领域也取得了诸多进展。

本书是这些进展的集中体现。考虑到三峡地区已开展了较长期期的水库地震研究,诸多成果业已发表,本书内容主要包括上述所述。主要来自于前三个专题的研究成果。

本书共 12 章。

第 1 章简单介绍了本书的编撰目的、主要内容及其产出来源。

第 2 章基于最新收集、整理的中国大陆水库地震资料(截止到 2011 年底),对中国大陆水库地震基本统计特征进行了系统归纳及表述,有利于对中国大陆地区水库地震活动概况及其统计特征的全面了解。

第 3 章在以往研究基础上,基于国内外水库地震资料,考虑到水库发生部位及深度分布,统计研究最大水库诱发地震震级、发生时间与水库基本属性(坝高、库长、库深、库面积、库容等)、区域介质及构造状况(库区岩性、主体断裂构造类型、背景地震活动水平、区域应力状态等)的关系。利用已收集到的水库诱发地震资料,选取库深、库容、震中区岩性、库坝区的基本烈度、区域应力状况等五个基本因素,通过构建单因素对水库发生地震震级的隶属度函数,定量刻画每个因素对水库发震的贡献大小,开展水库诱发地震最大震级的多因素综合预测,提供水库诱发地震震级上限判定的统计依据。

第 4 章以几个微震资料较为完备的典型水库为例,从地震活动的角度,结合库水位变化及外因调制因素,开展水库地震与区域应力场扰动之间的关系研究,主要涉及库水位变化、引潮力变化及远场强震等对水库地震活动的影响,结合构造环境定性讨论了水库地震可能的主要影响因素。

第 5、6、7 章主要以紫坪铺、龙滩及珊溪水库为例,基于数字地震记录资料,通过地震重新定位、波速及衰减结构反演、震源机制、震源参数计算等,力图讨论水库地震时空分布与水库加卸载及渗透

过程关系的关系。

第8章首先针对已有ETAS模型参数估计MLE算法中的初值敏感性问题,提出GA+MLE算法。基于ETAS模型,针对当前水库区几种典型的中小地震活动类型,开展流体触发微震活动强度的定量检测,研究流体诱发(触发)、地震自激发及序列衰减与加卸载过程及流体渗透过程的关系研究。在上述研究基础上,以三峡地区微震活动为例,通过流体渗透的一维扩散模型,讨论了不同蓄水时期微震活动的最重要影响因素(渗透或加卸载),进而讨论了“诱发”及“触发”水库区微震活动的物理实质及差异。作为一次典型的应用实践,基于上述理论及方法,以2010年6月27~30日广西西北部大暴雨诱发的震群活动为例,在国内首次系统研究了大暴雨诱发的震群活动,初步提出凌云-凤山震群可能的发震机理。

第9章主要基于库水渗流与断层稳定性耦合理论,以模型化的方法研究水库地震诱发/触发机制。基于断层内库水流动(扩散)与断层稳定性耦合作用机制,建立了量化评价水库诱发地震活动的力学模型方程,将库仑应力CFS作为断层稳定性关键指标参数。设计了一系列工况模型,分别定量模拟构造力变化、断层导流能力(渗透率)、地层非均匀性、断层构造(产状、组合)、地层水化软化等主要因素的影响,通过比对各种工况下的断层挤压正应力、剪切应力、库仑应力CFS等力学参数的时空变化,量化评价水库地震活动的主要影响因素。在简化的条件下,为筛选水库地震活动关键影响因素提供理论依据。

第10章在精细地质建模的基础上,考虑流体的裂隙及孔隙渗透,在流-固耦合条件下,通过有限元方法详细研究了紫坪铺水库蓄排水过程在地下不同深度断层引起的弹性附加应力场、有效附加应力场、孔隙压力和断层稳定性的动态变化,研究水库地震时空演化与库水加卸载及渗透过程的动态响应关系,重点讨论紫坪铺水库不同时期流体可能的最大影响深度问题。

第11、12章分别描述了在龙滩水库区所开展的影像大地测量方法(InSAR技术)对地形起伏较大、植被覆盖密集的水库区域进行的大面积地表形变观测和研究,以及电磁方法对水库区深部孕震结构、库水加卸载及渗透过程进行的静态和动态联合探测研究,该项初次的探索性工作,在水库地震研究工作中尚属首次。

第13章在上述研究的基础上,初步提出“理想化”的水库地震预测方案,主要涉及流体诱发(触发)地震检测、序列类型判定、最大震级估计及优势发震时段判定等四个方面。

需要说明的是,尽管我们付出了巨大的努力,但由于水平所限及时间仓促,该书与预先的设想仍有较大差距。尽管书名叫《中国大陆水库地震统计特征及预测方法研究》,但所述内容并未能涵盖水库地震及水库地震预测的各个方面。正是基于这一考虑,书名中包含“研究”二字,因为“研究”深度可深可浅、“研究”领域可宽可窄,这样的处理方式,给作者留有了余地,也避免给读者以“名不副实”之感。

还需指出的是,本书不同章节部分结果或认识之间本身也存在矛盾,或与其他作者之间存在矛盾,但由于各位研究者均是基于观测事实或计算结果来讨论问题,因而本书并未打算掩盖或调和这一矛盾。矛盾的解决以及不同认识观点的统一,有赖于研究的深入。

各章节执笔作者列于当页脚注。但参与研究者今后绝不仅限于此,限于篇幅,所有研究者不能一一列出,在此一并致谢!

限于水平,不妥之处在所难免,敬请批评指正。

## 第2章 中国大陆水库地震基本统计特征\*

### 2.1 水库地震研究现状

截止到20世纪90年代,世界上报道的具有较大影响的水库诱发地震约有120例 (Coates, D. R, 1981; H. KGupta, 1990; Guha and Patil, 1992; 胡毓良, 1994; 世界水库诱发地震讨论会, ISORIS, 1995), 分布在29个国家, 其中中国22例, 美国18例, 印度12例。超过6.0级的4次水库诱发地震是中国新丰江(1962年3月19日, 6.1级), 赞比亚-津巴布韦边界 Kariba (1963年9月23日 6.1级), 希腊 Kremasta (1965年2月5日, 6.2级), 印度 Koyna (1967年12月10日, 6.3级), 超过5.0级的也不多, Guha and Patil (1989) 统计为12例, 大部分水库诱发地震是小于5.0级的中小地震, 约占90%。不同学者由于认识及所接触的资料不同, 统计结果略有差异。根据本研究的统计, 迄今为止国内明确报道的水库地震震例已达40多例。

国际上已有的水库诱发地震的研究主要集中于四个方面: ①水库诱发地震的地质学研究, 主要研究库区及周围构造、断层、地震带以及水文地质、岩性、地应力场等, 希望总结出易于诱发地震的库区环境地质条件; ②水库诱发地震的地球物理学研究, 主要内容为地震序列分析、震源机制、库区介质特征等, 其目的是加深对水库诱发地震机理与天然地震异同的认识; ③水库诱发地震的物理机制研究, 包括物理概念模型、数学模型及库水作用过程的数值模拟研究等内容; ④水库诱发地震危险性评价研究。

以往水库地震研究更多的是考虑大坝自身的安全性问题, 因而场地安全性评价是其最重要的研究内容及研究目的。到目前为止, 国内外直接针对水库诱发地震预测的研究涉及不多, 但上述四个方面的研究成果是水库地震预测方法研究的重要基础。本小节将围绕上述四个方面, 就此前已有的、与本研究有关的国内外水库地震研究现状作简要叙述。

(1) 关于水库诱发地震库区地质环境条件的研究, 大多认为先存裂隙是水库诱发地震的先决条件 (Card, 1970), 裂隙化岩体、块体构造、非均质岩体易于诱发地震 (Rothe, 1970), 而软性土质、均匀岩体和缺少裂隙等不利于蓄水后的应力集中, 不易诱发地震。在地壳应变的积累区域, 库水沿裂隙渗透, 在构造作用“临界带”触发能量释放 (N. I. Nikolaev, 1974)。D. W. Simpson (1976) 归纳了影响水库诱发地震的3种主要因素: ①先存应力状态, 包括区域构造应力状态、初始应力大小与应变积累量; ②地质和水文地质条件, 包括断层产状与断层渗透性、岩体水力学参数 (如岩性、裂隙发育程度、孔隙度、渗透率) 以及地下水系统与库水的连通性及储水性; ③水库特征, 包括库深 (水压)、体积 (载荷)、形状等及水位波动速率。他特别指出, 正断层、走滑断层环境, 中等应变积累的库区易于诱发地震。通过对印度地盾边缘诸水库诱发地震特征的分析, C. Lomnitz (1974) 指出水库诱发地震易发生于地块边缘地形梯度大、地应力集中、区域上具有温泉分布或其他新生代火山活动遗迹的地区。但 Gupta 等 (1989) 报道, Koyna 水库带状分布温泉群的流量和温度与地震活动没有明显的相关

\* 杨马陵、蒋海昆、吴时平、宋金、万永芳执笔。

性。Gupta (1989) 在总结水库诱发地震的一般特征时指出, 有利于水库诱发强震的地质环境是正断层环境, 库体位于断层下降盘, 区域上曾经有火山活动, 存在灰岩等易溶岩类。Roelofs (1988) 研究了 4 种走向与库体平行的断层在蓄水条件下的稳定性, 认为垂直走滑断层趋于稳定, 低角度 ( $20^\circ$ ) 逆掩断层和高角度 ( $60^\circ$ ) 逆断层除库底边缘小部分区域外, 也趋于稳定, 正断层在深度等于或大于库宽范围趋于失稳。

(2) 在水库诱发地震的物理机制研究方面, 目前主要涉及库水载荷及流体作用两方面。关于库体载荷, 一般认为除在最大主应力垂直区域外, 载荷作用基本上起稳定作用 (W. Gough 和 D. I. Gough, 1970; Snow, 1972; Beck, 1976; Withers 和 Nyland, 1978)。这首先是由于在中等主应力和最小主应力垂直的区域, 库水载荷并不明显增大库区断层的剪应力, 而即使在最大主应力垂直的区域, 库水载荷所产生的应力增量也很小, 例如世界上最大的人工湖 Koyna 水库, 其库水载荷产生的最大剪应力增量仅为 2.1 bar, 而 Oroville 水库深度是 Koyna 的 2 倍, 其所产生的应力增量也仅为 3.4 bar。由库体载荷产生的剪应力一般不可能大于 5 bar, 而据 Nikolaev (1974) 的研究, 地壳剪应力在新构造不活跃区是  $(100 \pm 50) \text{ kg/cm}^2$ , 在活跃区是  $750 \pm 350 \sim 1000 \pm 500 \text{ kg/cm}^2$ , 比较而言, 水体重力产生的附加剪应力太小。因此许多研究认为, 只有在最大主应力垂直且蓄水前库区地应力已处于临界状态的情况下, 水库蓄水才可能诱发地震。这一认识可由 S. Husen 等 (2005) 报道的降雨触发地震活动的例子予以旁证。

水库蓄水后, 两种作用引起库基岩体孔隙压力升高。一是岩体的压缩变形, 这使岩体受压、孔隙度降低, 从而导致孔隙压增高, 这大多发生于蓄水初期, 其持续时间决定于岩体结构和渗透性; 二是库水在岩体中渗流, 引起流体压力的扩散。Talwani 和 Acree (1985) 对美国卡罗来纳州一系列水库诱发地震震例进行了研究, 认为地震是由于孔隙水压力扩散使水压力峰面达到震源处而发生。Bell 和 Nur (1978) 用 Boit 饱和水多孔介质线性准静态弹性理论, 研究二维半空间均匀介质和含断层介质在荷载作用下的强度变化, 发现渗透性均匀的介质出现一弱化带, 而在有高渗透断层带分布的介质中, 弱化带的宽度加大, 强度显著下降。Li yingshen 和 Bao Qichang (1995) 用同一理论计算了新丰江水库诱发地震, 认为诱发地震主要是应力-孔隙压耦合作用的结果。Liang Qinhuai 等 (1995) 采用应力场-渗流场耦合的方法, 研究了理想条件下水库蓄水应力场和渗流场的变化特征, 讨论了断层带、蓄水速率等对诱发地震的影响。

在流体作用方面, 已有的研究大多认为, 孔隙中的流体一方面影响岩体的变形特征, 另一方面影响岩体强度。关于孔隙压力对岩体强度的影响, 目前普遍应用有效压力定律来解释。在水库诱发地震研究中, 目前大多数采用 Boit 固结理论, 没有考虑岩体各向异性对孔隙压力系数的影响, 而实际上, 孔隙压力系数对岩体强度有重要影响。

在水库诱发地震的机理讨论中, 大多涉及水对介质的“弱化”作用, 即饱和水岩石的强度降低和断层摩擦强度的降低, 众多室内实验结果支持这一观点。据 Talwani 和 Steve Acree (1985) 对 Monticello 水库诱发地震的计算, 断层摩擦系数为 0.2~0.4, 而不是地质学中常采用的 0.6~0.8, 并认为这可能是库水渗入导致摩擦系数降低的结果。Talwani 等认为水库地震主要由于孔隙水压力扩散引起, 并利用震中面积的扩大和发震时间的滞后估算地震的水力扩散系数 (1981, 1985)。Simpson 等根据蓄水与发震的时间关系, 把水库地震分为“快速反应型”和“滞后反应型”两类, 前者由于水体载荷的弹性应力使库底岩石孔隙压缩, 导致孔隙压力升高、岩石强度降低而产生, 后者的活动性和滞后时间则与孔隙水压力的扩散有关 (1986, 1988)。

(3) 水库诱发地震潜在危险性评价, 相当于地震的长期预测, 其关注焦点在于诱发地震的可能性和最大震级评估。总体而言, 目前尚无预测潜在危险性的成熟方法 (胡毓良, 1994, 夏其发, 2000)。胡毓良等提出根据岩性、渗透条件和岩体稳定性评价诱发地震的可能性 (1979), 随后提出根据水库规模、岩性、地质条件、渗透条件、应力状态和区域地震活动水平进行综合评价的原则。夏其发

(2000)以工程地质学理论为基础,总结了针对构造断裂型、地表卸荷型和岩溶塌陷型三种类型水库诱发地震的判据。还有一些基于统计模型的水库诱发地震危险性评价方法,这类方法所得结果与统计样本数量和质量密切相关。考虑到统计的不确定性,Allen等(1979)提出水深超过80~100 m的水库,都应按库区附近可能发生6.5级地震来进行设防。

基于对水库诱发地震机理研究的危险性评价方法,以一定的力学模型为基础。模型包括岩体本构关系、屈服或破坏准则以及岩体的物理力学参数。该类方法实际应用较少,这一方面是由于对诱发地震机理的认识尚不清晰,另一方面是因为在把地质模型概化为力学模型的过程中,岩体力学参数的精确性受到质疑,屈服或破坏准则难于确定。但需要指出的是,该类研究对了解水库诱发地震机理有十分重要的意义,也是各国科学家努力的方向。

(4)已有关于水库地震序列的研究结果,大多关注序列时空特征及库区构造环境条件的描述,具体到水库地震预测的研究尚不多见。其中,Gupta(1989)提出可根据水位变化幅度与地震的关系预测较大余震;冯德益等(1993)报告了水库地震前的波速比变化;Jain等(2004)通过对1994年至今印度Koyna和Wana水库周围5次4.1~4.7级地震前后小震震源参数的计算,发现主震前应力降和拐角频率均发生显著的变化;Kishor J.等(2007)发现与区域地震活动相比,水库诱发地震的 $b$ 值明显偏高;刘文龙等(2006)、钟羽云等(2007)还进行了水库地震序列的预测实践。上述工作为从水库载荷变化、水库地震序列特征以及震源和介质参数等的变化找寻水库地震前兆提供了线索。

(5)在水库蓄水后的变形监测研究方面已得到一些初步结果,例如对卡里巴、柯伊纳、米德湖、亨德里克维尔沃德等水库地区变形的模拟计算和水准观测(Gupta, Gough, 1969, 1970, 1989)表明,大约可以较好地分辨200 km深度的岩石圈流变结构(Kaufman & Amelung, 2000)。由于水库蓄水负荷的可控性以及水库地区构造环境的稳定性等特点,可以对其变形响应模式开展较为充分的研究。在国内,长江三峡水库于2003年第一次蓄水,水位达到139 m,此后再经2006年和2008年的两次蓄水过程,水位分别达到156 m和175 m,最终库容达到 $393 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这样巨大的载荷无疑将产生可观的地表变形(Wang, 2000, 2002; J. P. Boy & Chao, 2003)。而大地测量观测已检测到第一期蓄水引起的地表弹性变形达3~4 cm(Du等, 2004)。有关估算还表明,这样的响应可显著地传递至莫霍面以下、甚至100 km的深度范围,引起下地壳和上地幔应力集中,最后松弛流变,在地表表现为进一步的位移沉降,产生有可能被大地测量所观测到的时变信号。InSAR对水库垂直变形监测具有一定的优势,2004年NPA在伦敦西部Wraysbury水库周边护堤上架设6个CR,通过采用相隔24天(一个重访周期)的RadarSat SAR资料,检测出水库护堤达到毫米量级的位移量;德国GFZ利用CR-InSAR技术,分别对中国三峡库区的滑坡和德国图林根洲开展形变监测研究。在三峡新滩滑坡上安置了四个CR,利用2003年8月11日到2004年5月17日的ERS SAR数据,得到新滩滑坡具有4 mm左右的年平均滑动量,实现了在植被茂密地区的InSAR形变监测(Xia Y, 1996; 2002; 2004)。

(6)地震的孕育和发生,与深部流体的存在和迁移有着密切关系(徐常芳, 1996a; 1998),而流体的存在和运移可以引起地壳内部和断裂带内的岩体电导率的大幅度增加(徐常芳, 1996b; 1997)。已有关于震中附近地区存在明显低阻异常体的报道,诸如1999年台湾集集7.3级地震(Chow-Son Chen, et al., 2000; Chien-Chih Chen, et al., 2002)、2004年日本6.8级新潟-神户地震(Makoto Uyeshima, et al., 2005);部分震例报道了震前地下电性结构的变化,如1986年前苏联伏龙芝地震(Velikhov, E. P., et al., 1993)、1998中国张北6.2级地震(汤吉等, 1998)。但迄今为止未见到水库蓄水引起地下电性结构变化的报道。

综上所述,国内外已有关于水库诱发地震的研究主要集中于库区构造和地质环境、水库诱发地震机理及诱发地震危险性评价等方面。水库诱发地震的地质学研究,主要研究库区及周围构造、断层、地震带以及水文地质、岩性、地应力场等,希望总结出易于诱发地震的库区环境地质条件;水库诱发

地震的地球物理学研究，主要内容为地震序列分析、震源机制、库区介质特征等，其目的是加深对水库诱发地震机理与天然地震异同的认识；水库诱发地震机理的研究，主要包括物理概念模型、数学模型及库水作用过程的数值模拟研究等内容；水库诱发地震危险性评价主要涉及水库及大坝建设的安全性问题。

尽管国内外直接针对水库诱发地震预测的研究尚不多见，但上述诸方面的研究成果，为思考水库地震前兆机理、研究水库地震预测方法，提供了重要的科学思路。

2.2 中国大陆水库地震基本资料

本研究共收集 43 个国内已发生的水库地震震例。其中包括这 43 个水库的基本数据（库容、坝高、蓄水时间、开始地震时间、已发生的最大地震时间、库区地质与构造条件、地震基本烈度），42 个水库地震序列和 30 个水库的水位数据（表 2.1）。

表 2.1 水库地震数据表

| 库 名  | 参窝 | 东江 | 南水 | 拓林 | 黄石 | 三峡 | 龙滩 | 乐滩 | 岩滩 | 大化 | 水口 | 大桥 | 二滩 | 珊瑚溪 | 漫湾 | 云鹏 | 南冲 | 皎口 | 光照 | 小湾 | 石泉 |
|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| 地震序列 | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √   | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  |
| 水位序列 | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √   | √  | √  |    |    |    |    |    |

| 库 名  | 铜街子 | 瓦屋山 | 克孜尔 | 丹江口 | 天生桥 | 隔河岩 | 乌江渡 | 紫坪铺 | 佛子岭 | 乌溪江 | 恰普其海 | 新丰江 | 鲁布革 | 龙羊峡 | 前进 | 盛家峡 | 小浪底 | 邓家桥 | 新店 | 瀑布沟 | 新湖 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|----|
| 地震序列 | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √    | √   | √   | √   | √  | √   | √   | √   | √  | √   | √  |
| 水位序列 | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √    | √   | √   | √   |    |     |     |     |    |     |    |

上述数据中，库容、坝高、蓄水时间、库区地质与构造条件、地震基本烈度等基础数据主要来源于《中国水利百科全书（第二版）(2006)》，其余来自公开发行的文献，少量来自网络的有关信息。地震序列及水位等数据中，从各省、市自治区地震局收集得到的水库地震序列约占 1/2、水位序列约占 2/5；在相关文献中得到的序列目录，通常只有序列中稍大震级的地震，且延续时间较短；少数序列目录来源于全国  $M_L2$  级地震目录或各省目录，通过 google 地图选取震中位于水库及距库区 20 km 内的地震构成；部分水位数据来源于相关文献中水位序列图件的数字化，每个具体的数据可能有误差，但总体形态和趋势可保持一致。

上述水库地震数据中，地震序列目录的长短和资料的完整性差别较大，地震目录持续时间最长的有 50 多年，5 万多条地震目录（新丰江水库），持续时间最短的 1~2 年，10 多条地震记录。

表 2.2 给出 43 个水库诱发地震有关参数。目前对个别震例是否为水库诱发地震仍存在争议，如安徽佛子岭水库、广东新湖水库等。此外，少数震例的最大诱发地震究竟是水库诱发还是构造地震也还存在一定的争议，如铜街子水库蓄水后 3 年，在其南部 20 km 处发生的 3 次  $M_L5.0$  级地震；2005 年克孜尔水库下游发生的  $M_L5.2$  级地震等。

表 2.2 中国大陆地区水库地震信息表

| 序号 | 库名  | 坝高/<br>m | 库容/<br>$10^8 \text{ m}^3$ | 岩性       | 蓄水时间<br>(年-月-日) | 初震时间<br>(年-月-日)       | 已诱发最大<br>地震时间            | $M_L$      | 注      |
|----|-----|----------|---------------------------|----------|-----------------|-----------------------|--------------------------|------------|--------|
| 1  | 佛子岭 | 74.0     | 4.70                      | 花岗岩      | 1954-06         | 1954-12<br>1954-06-17 | 1973-03-11<br>1954-06-17 | 4.9<br>5.6 | #<br># |
| 2  | 新丰江 | 105.0    | 115.00                    | 花岗岩      | 1959-10-20      | 1960-05-13            | 1962-03-19               | 6.4        |        |
| 3  | 丹江口 | 97.0     | 208.90                    | 碳酸盐岩、变质岩 | 1967-11-05      | 1970-01-15            | 1973-11-29               | 5.1        |        |
| 4  | 南水  | 81.5     | 3.70                      | 碳酸盐      | 1969-02-13      | 1970-01-07            | 1970-02-24<br>1998-01-03 | 3.1<br>3.7 | *      |
| 5  | 南冲  | 41.0     | 0.16                      | 碳酸盐      | 1969-05-15      | 1970-05-09            | 1974-07-25               | 3.4        |        |
| 6  | 黄石  | 40.4     | 6.12                      | 碳酸盐      | 1970-03-15      | 1973-05-01            | 1974-09-21               | 3.0        |        |
| 7  | 前进  | 50.0     | 0.20                      | 碳酸盐      | 1970-05-15      | 1971-10-18            | 1971-10-20               | 3.6        |        |
| 8  | 拓林  | 63.5     | 79.20                     | 碳酸盐      | 1972-01-31      | 1972-05-26            | 1972-10-14               | 3.8        |        |
| 9  | 参窝  | 50.3     | 5.47                      | 碳酸盐      | 1972-11-01      | 1973-02-15            | 1974-12-22               | 5.2        |        |
| 10 | 石泉  | 65.0     | 4.70                      | 花岗岩      | 1973-12-10      | 1974-12-07            | 1976-10-13               | 3.3        |        |
| 11 | 新店  | 28.1     | 0.29                      | 碳酸盐      | 1974-04-15      | 1974-07-15            | 1979-09-15               | 4.7        |        |
| 12 | 皎口  | 67.4     | 1.20                      | 凝灰岩      | 1975-01-15      | 1993-02-18            | 1994-09-07               | 4.7        |        |
| 13 | 乌溪江 | 129.0    | 20.30                     | 火山岩      | 1979-01-12      | 1979-05-15            | 1979-10-07               | 3.4        |        |
| 14 | 乌江渡 | 165.0    | 21.00                     | 碳酸盐      | 1979-11-20      | 1980-03-15            | 1982-05-21<br>1992-05-20 | 2.1<br>3.3 |        |
| 15 | 邓家桥 | 13.0     | 0.04                      | 碳酸盐      | 1979-12-15      | 1980-08-01            | 1983-10-03               | 2.9        |        |
| 16 | 盛家峡 | 35.0     | 0.05                      | 花岗岩      | 1980-11-15      | 1981-05-15            | 1984-03-07               | 3.6        |        |
| 17 | 大化  | 74.5     | 4.20                      | 碳酸盐      | 1982-05-27      | 1982-06-04            | 1987-06-24<br>1993-02-10 | 2.5<br>4.9 | *      |
| 18 | 东江  | 157.0    | 81.20                     | 碳酸盐      | 1986-08-02      | 1987-11-15            | 1991-07-02               | 3.2        |        |
| 19 | 龙羊峡 | 178.0    | 247.00                    | 花岗闪长岩    | 1986-10-15      | 1986-11-24            | 1987-02-22<br>1996-12-19 | 3.4<br>4.9 |        |
| 20 | 鲁布革 | 103.8    | 1.11                      | 碳酸盐      | 1988-11-21      | 1988-11-24            | 1988-12-17               | 3.4        |        |
| 21 | 克孜尔 | 41.6     | 6.40                      | 泥岩、砂岩    | 1991-08-01      | 1991-09-20            | 1993-11-22<br>2005-09-23 | 4.4<br>5.3 | *      |
| 22 | 岩滩  | 110.0    | 33.80                     | 碳酸盐      | 1992-03-19      | 1992-03-29            | 1997-03-24               | 3.9        |        |

续表

| 序号 | 库名    | 坝高/<br>m | 库容/<br>10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> | 岩性      | 蓄水时间<br>(年-月-日) | 初震时间<br>(年-月-日) | 已诱发最大<br>地震时间            | M <sub>L</sub> | 注 |
|----|-------|----------|---------------------------------------|---------|-----------------|-----------------|--------------------------|----------------|---|
| 23 | 铜街子   | 81.0     | 10.50                                 | 碳酸盐     | 1992-04-05      | 1992-04-06      | 1992-07-17<br>1994-12-30 | 2.8<br>5.7     | * |
| 24 | 漫湾    | 132.0    | 10.60                                 | 花岗岩     | 1993-03-15      | 1993-09-21      | 1994-11-05               | 4.2            |   |
| 25 | 水口    | 100.0    | 23.40                                 | 花岗岩     | 1993-03-31      | 1993-05-23      | 1996-04-21<br>2008-03-06 | 4.1<br>4.8     | * |
| 26 | 隔河岩   | 151.0    | 34.40                                 | 碳酸盐     | 1993-04-10      | 1993-04-15      | 1993-05-30               | 3.3            |   |
| 27 | 东风    | 173.0    | 10.16                                 | 碳酸盐     | 1994-04-06      | 1994-05-15      | 1995-03-31<br>2006-08-02 | 2.5<br>2.9     | * |
| 28 | 二滩    | 240.0    | 58.00                                 | 玄武岩     | 1998-05-01      | 1998-06-17      | 1999-05-31<br>2008-07-01 | 3.1<br>3.3     |   |
| 29 | 天生桥一级 | 178.0    | 102.57                                |         | 1998-06-18      | 1998-08-06      | 2000-08-13               | 3.9            |   |
| 30 | 大桥    | 92.0     | 6.58                                  | 花岗岩、流纹岩 | 1999-05-20      | 1999-11-04      | 2002-03-03               | 4.4            |   |
| 31 | 小浪底   | 154.0    | 127.50                                | 砂岩、粉砂岩  | 1999-10-25      | 2000-03-10      | 2003-06-08               | 3.6            |   |
| 32 | 珊溪    | 132.5    | 18.24                                 | 凝灰岩、流纹岩 | 2000-05-12      | 2002-07-28      | 2006-02-09               | 4.6            |   |
| 33 | 三峡    | 181.0    | 393.00                                | 花岗岩     | 2003-05-19      | 2003-06-07      | 2008-11-22               | 4.5            |   |
| 34 | 恰普其海  | 108.0    | 19.61                                 | 凝灰岩、砂岩  | 2005-06-25      | 2005-07-06      | 2006-11-01               | 4.6            |   |
| 35 | 紫坪铺   | 156.0    | 11.12                                 | 砂页岩、泥岩  | 2005-09-30      | 2005-11-06      | 2008-02-14               | 3.7            |   |
| 36 | 乐滩    | 63.0     | 9.50                                  | 碳酸盐     | 2006-01-07      | 2006-05-28      | 2007-08-03               | 3.8            |   |
| 37 | 龙滩    | 216.5    | 272.70                                | 碳酸盐     | 2006-09-30      | 2006-10-02      | 2010-09-18               | 4.8            |   |
| 38 | 云鹏    | 96.5     | 3.70                                  | 碳酸盐     | 2006-12-03      | 2007-03-25      | 2007-09-11               | 3.6            |   |
| 39 | 瓦屋山   | 142.6    | 5.84                                  | 碳酸盐     | 2007-04-10      | 2007-04-25      | 2009-03-29               | 3.2            |   |
| 40 | 光照    | 200.5    | 32.45                                 | 碳酸盐     | 2007-12-30      | 2008-03-05      | 2008-10-04               | 3.4            |   |
| 41 | 小湾    | 292.0    | 149.10                                | 花岗片麻岩   | 2008-12-16      | 2008-12-31      | 2009-08-06               | 3.5            |   |
| 42 | 瀑布沟   | 186.0    | 53.90                                 | 花岗岩     | 2009-11-01      | 2009-11-14      | 2010-11-18               | 2.3            |   |
| 43 | 新湖    |          | 0.37                                  | 花岗岩     | 1963-12-01      | 2007-11-18      | 2007-12-04               | 4.5            |   |

注：# 有争议的水库地震；\* 相隔 10 年后在库区内发生的晚期最大诱发地震。

需要指出的是，在地震活动背景较强的地区（如四川、云南、新疆等），如何准确区分哪些（尤其是哪一个）是水库诱发地震，哪些是天然地震，目前来看仍相当困难。

2.3 中国大陆水库地震活动基本特征

中国是世界上水库数量最多的国家，截至 2006 年底已建成各类水库 85 874 座，总库容达到 5 974×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。特别是上世纪 90 年代以来，随着经济建设的快速发展和对电力资源的需求，我国进入了高坝、大库容水库（水电站）的建设高峰期。小湾（坝高 292 m）、水布垭（坝高 233 m）、龙滩（坝高