

雷建成, 高孟潭, 吴健, 亢川川. 2010. 双场点地震危险性分析方法及其应用. 地震学报, 32(3): 310-319.  
Lei Jiancheng, Gao Mengtan, Wu Jian, Kang Chuanchuan. 2010. A bi-site seismic hazard analysis method and its application. *Acta Seismologica Sinica*, 32(3): 310-319.

# 双场点地震危险性分析方法及其应用<sup>\*</sup>

雷建成<sup>1,2),\*</sup> 高孟潭<sup>1)</sup> 吴 健<sup>1)</sup> 亢川川<sup>2)</sup>

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国成都 610041 四川省地震局

**摘要** 提出了双场点地震危险性分析方法, 用以计算在相同地震构造环境中, 相同地震作用下的相邻两个工程场点同时超越其给定地震动参数的概率. 该方法是确定系统的危险段落、场点遭受的附加地震危险的有效工具. 基于汶川  $M_s 8.0$  地震后大渡河干流及邻近地区的地震环境, 以大渡河干流梯级水电站系统为例, 确定了大渡河干流梯级水电站各个河段的地震危险性. 其中危险性最高的 3 个河段是: 龚嘴—铜街子河段、沙坪—龚嘴河段和大岗山—龙头石河段.

**关键词** 双场点 地震危险性分析 梯级水电站 河段地震危险性

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2010.03.006

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

## A bi-site seismic hazard analysis method and its application

Lei Jiancheng<sup>1,2),\*</sup> Gao Mengtan<sup>1)</sup> Wu Jian<sup>1)</sup> Kang Chuanchuan<sup>2)</sup>

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 10081, China

2) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

**Abstract:** A bi-site seismic hazard analysis method is proposed to calculate the acceleration exceedance probability of the two nearby sites located in the same seismo-tectonical region and suffered the shaking induced by the same potential earthquake. This method is an effective tool for determining the dangerous segment of a linear spread system and calculating the additional seismic hazard from its neighbor site for a given site. Basing on the new seismic background after Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake and taking the cascade hydropower stations in the trunk stream of Dadu River as a study case, the seismic hazard of each reach is determined. The study result indicates that the most dangerous reaches are Gongzui-Tongjiezi, Shaping-Gongzui and Dagangshan-Longtoushi.

**Key words:** bi-site; seismic hazard analysis; cascade hydropower stations; reach seismic hazard

<sup>\*</sup> 基金项目 国家科技支撑计划(2006BAC13B02-0107, 2006BAC13B01-0604)和中国地震局重点项目“中国地震区划图编制——川西重大工程集中地震区划图预编”联合资助.

收稿日期 2009-05-08 收到初稿, 2009-09-17 决定采用修改稿.

<sup>+</sup> 通讯作者 e-mail: jclei@126.com

## 引言

Cornell(1968)提出了概率性地震危险性分析方法,将地震构造条件和地震活动资料结合起来,以概率的方式表达给定场点的地震危险性,并将其应用于具体工程地震的地震危险性评价。经过 McGuire(1976)以及 Der Kiureghian 和 Ang(1977)的发展和完善,这种地震危险性分析方法在世界范围内得到了广泛应用,逐渐成为世界各国地震区划编图的主流方法(Algermissen, Perkins, 1976; Wesnousky *et al*, 1984; Basham *et al*, 1985; Working Group on California Earthquake Probabilities, 2003; Field, 2007; Petersen *et al*, 2008)。该方法最早由章在墉和陈达生(1982)引入我国,应用于工程场地的地震安全性评价中,后经高孟潭(1986, 1988)、时振梁等(1991)的改进和发展,形成了能够较好地反映我国地震活动时空不均匀性的地震危险性分析方法,成为我国 1990 年、2001 年颁布的地震区划图以及目前正在编制的新一代地震区划图的技术方法(国家地震局, 1996; 胡聿贤等, 2001; 高孟潭, 卢寿德, 2006)。20 多年来,在我国的工程场地地震安全性评价中,该方法得到了普遍地应用,并且成为国家标准《工程场地地震安全性评价(GB17741-2005)》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会, 2005)所规定使用的方法。

但是,当前国内外普遍采用的地震危险性分析方法,都是针对单一的、特定的场点进行的,我们将其称为单场点地震危险性分析方法。当需要对多个场点进行分析计算时,例如在地震区划图的计算编制中,仅仅是将多个场点逐个分解成单个的、独立的场点,分别进行计算。

对于长距离空间线性展布系统的地震安全性问题,高孟潭(1993)指出,系统作为一个整体所遭受的地震危险性与系统构成单元所遭受的地震危险性是有区别的,对于串联系统而言,系统的危险性大大高于各单元的危险性。该文还以我国西北某石油输油管线系统为例进行了对比分析。但是,该文中输油管线系统各单元的地震危险性仍然是基于单场点地震危险性分析方法分别得到的,没有考虑单元之间的相关性。

在实际的工程实践中,存在许多这样的长距离空间线性展布的工程系统:例如,由多个大坝构成的梯级水电站系统,由多个桥梁、隧道构成的公路(铁路)系统,由多个泵站构成的长输管线系统等。这些系统由一系列在空间上密集分布的工程场点组成,系统具有一定的物理结构和功能结构,系统的安全性取决于各个工程场点的安全性。同时,工程场点之间、尤其是相邻工程场点之间的安全性具有一定程度的相关性,一个工程场点的破坏失效,可能导致另一个工程场点的劣化或者破坏失效。在地震活动强烈的地区,空间距离较近的两个相邻工程场点,极有可能在相同的地震事件中同时遭遇到超过其设计地震动参数的地震影响,从而使两个相邻工程场点同时破坏失效,进而造成系统的破坏失效。对于这些系统的地震风险评估,传统的单场点地震危险性分析方法不能给出解答。为此,本文提出双场点地震危险性分析方法,用以计算在相同地震构造环境中,在相同的地震作用下,相邻两个工程场点同时超越其给定地震动参数的概率。文中还以大渡河干流梯级水电站系统为例,采用双场点地震危险性分析方法,两两逐个计算相邻大坝超越其设防地震动参数的概率,由此确定大渡河干流梯级水电站系统各个河段的地震危险性。

# 1 单场点地震危险性分析方法

## 1.1 计算目标

假设特定的一个场点,其地震动参数的给定值为 $a$ ,单场点地震危险性分析方法的目标,就是要计算在给定的地震环境下,场点遭遇的地震动参数 $A$ 超过 $a$ 的概率 $P(A \geq a)$ .

## 1.2 基本假定

按照反映我国地震活动时空不均匀性的地震危险性分析方法的技术思路(Cornell, 1968; 高孟潭, 1986, 1988; 时振梁等, 1991),单场点地震危险性分析方法有如下基本假定:

1) 地震带是在地震区内地震活动性与地质构造条件密切相关的地带,该区域的地震活动、地震类型、构造应力场、深部地球物理场背景、新构造运动、地质构造背景等多个方面具有较好的一致性.

2) 地震带既是确定地震活动性参数的统计单元,又是划分潜在震源区、确定地震空间分布函数的空间约束区域.

3) 地震带内地震发生次数符合泊松分布.地震带内小地震的比例关系用 $b$ 值来表示,遵从截断的指数分布.

4) 地震发生在潜在震源区内,并在潜在震源区内部均匀分布.

5) 通过地震空间分布函数,将地震带各震级档地震的年平均发生率分配到各个潜在震源区.

6) 地震动参数的衰减关系为震级、距离(震中距、震源距、断层距等)的函数.

## 1.3 计算原理

地震带内地震发生的时间过程符合分段泊松过程, $t$ 年内地震年平均发生率为 $v_t$ ,则地震带未来 $t$ 年内发生 $k$ 次地震的概率 $P_{kt}$ 为

$$P_{kt} = \frac{(v_t \cdot t)^k}{k!} \exp(-v_t \cdot t) \quad (1)$$

地震带内大小地震的比例关系符合修订的古登堡-里克特震级-频度关系,相应的震级概率函数为

$$f_m(m) = \frac{\beta \exp[-\beta(m - M_0)]}{1 - \exp[-\beta(M_{uc} - M_0)]} \quad (2)$$

其中, $\beta = b \ln 10$ ;  $M_0$  和  $M_{uc}$  分别为起算震级和震级上限.

取震级分档间隔为 $\Delta m$ ,将地震带内可能发生的地震震级区间分成若干震级档,则地震带发生的地震落在震级档 $m_j \pm \frac{1}{2} \Delta m$  内的概率 $P(m_j)$ 为

$$P(m_j) = \frac{2}{\beta} f_m(m_j) \operatorname{sh} \left( \frac{1}{2} \beta \Delta m \right) \quad (3)$$

在地震带中可根据地震活动性、地震地质、地球物理场等资料划分出若干不同震级上限的潜在震源区.从分段泊松模型和全概率定理可知,地震带内所发生的地震在场点所产生的地震动值( $A$ )超过给定值( $a$ )的概率为

$$P(A \geq a) = 1 - \exp \left\{ -v \sum_{j=1}^{N_m} \sum_{i=1}^{N_i} \iint \frac{1}{S_i} P(A \geq a | E_i) P(m_j) f_{i,m_j} f(\theta) dx dy d\theta \right\} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可得到某一地震带发生地震,在场点产生地震动的年超越概率为

$$P(A \geq a) = 1 -$$

$$\exp \left\{ -\frac{2v}{\beta} \sum_{j=1}^{N_m} \sum_{i=1}^{N_s} \iint \frac{1}{S_i} P(A \geq a | E_i) f_m(m_j) f_{i,m_j} f(\theta) \operatorname{sh} \left( \frac{1}{2} \beta \Delta m \right) dx dy d\theta \right\} \quad (5)$$

式中,  $N_m$  为震级分档个数,  $N_s$  为潜在震源区个数,  $\operatorname{sh}$  为双曲正弦函数,  $f(\theta)$  为破裂方向的概率密度函数,  $f_{i,m_j}$  为地震空间分布函数,  $v$  为 4.0 级以上地震的年平均发生率,  $S_i$  为地震带内第  $i$  个潜在震源区的面积,  $P(A \geq a | E_i)$  为地震带内第  $i$  个潜在震源区内发生某一特定地震事件  $E_i$  (震中  $(x, y)$ , 震级  $m_j \pm \frac{1}{2} \Delta m$ , 破裂方向  $f(\theta)$  确定) 时, 在场点产生的地震动值  $A$  超越  $a$  的概率。

采用国内外普遍使用的校正方法进行地震动衰减的不确定性校正, 即认为地震动衰减离散性符合正态分布或对数正态分布. 对地震动衰减关系的不确定性校正公式为

$$P(A \geq a) = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} P(A \geq a - \epsilon) f(\epsilon) d\epsilon \quad (6)$$

式中,  $P(A \geq a)$  是经校正的地震危险性,  $P(A \geq a - \epsilon)$  是未经校正的地震危险性,  $\epsilon$  为随机误差项,  $f(\epsilon)$  为其概率密度函数。

设有  $N_Z$  个地震带对场点的地震危险性有贡献, 相应于第  $i_Z$  个地震带对场点地震动的年超越概率为  $P_{i_Z}$ , 则场点总的地震动年超越概率  $P$  为

$$P = 1 - \prod_{i_Z=1}^{N_Z} (1 - P_{i_Z}) \quad i_Z = 1, 2, \dots, N_Z \quad (7)$$

## 2 双场点地震危险性分析方法

### 2.1 计算目标

给定相距一定距离的两个场点  $S_A$  和  $S_B$ , 其地震动参数的给定值分别为  $a_A$  和  $a_B$ . 双场点地震危险性分析方法的目标, 就是要计算在给定的地震环境下, 在相同的地震事件作用下, 场点  $S_A$  遭遇的地震动参数超过  $a_A$ , 并且场点  $S_B$  遭遇的地震动参数超过  $a_B$  的概率  $P(A \geq a_A | S_A \cap A \geq a_B | S_B)$ .

### 2.2 基本假定

与单场点地震危险性分析方法相同。

### 2.3 计算原理

根据基本假定, 式(1)~(3)依然成立. 将式(4)、(5)中的  $P(A \geq a | E_i)$  修改为  $P(A \geq a_A | S_A \cap A \geq a_B | S_B \parallel E_i)$ . 其物理含义为: 地震带内第  $i$  个潜在震源区内发生某一特定地震事件  $E_i$  (震中  $(x, y)$ , 震级  $m_j \pm \frac{1}{2} \Delta m$ , 破裂方向  $f(\theta)$  确定) 时, 场点  $S_A$  遭遇的地震动参数超过  $a_A$ , 并且场点  $S_B$  遭遇的地震动参数超过  $a_B$  的概率. 这时式(4)和式(5)分别修改为式(8)和式(9)

$$P(A \geq a_A | S_A \cap A \geq a_B | S_B) = 1 -$$

$$\exp \left\{ -v \sum_{j=1}^{N_m} \sum_{i=1}^{N_s} \iint \frac{1}{S_i} P(A \geq a_A | S_A \cap A \geq a_B | S_B \parallel E_i) P(m_j) f_{i,m_j} f(\theta) dx dy d\theta \right\} \quad (8)$$

$$P(A \geq a_A | S_A \cap A \geq a_B | S_B) = 1 - \exp \left\{ -\frac{2v}{\beta} \sum_{j=1}^{N_m} \sum_{i=1}^{N_s} \iiint \frac{1}{S_i} P(A \geq a_A | S_A \cap A \geq a_B | S_B \parallel E_i) \cdot f_m(m_j) f_{i,m_j} f(\theta) \operatorname{sh} \left( \frac{1}{2} \beta \Delta m \right) dx dy d\theta \right\} \quad (9)$$

采用式(6)的不确定性校正方法及式(7)的综合方法,可以计算出在给定的地震环境和相同的地震事件作用下,场点  $S_A$  遭遇的地震动参数超过  $a_A$ ,并且场点  $S_B$  遭遇的地震动参数超过  $a_B$  的概率。

按照式(1)—(9)所示原理,作者编制了相应的计算程序。

### 3 应用实例——大渡河干流梯级水电站系统的河段危险性分析

发展西部水电是国家能源发展战略和可持续发展战略的重要组成部分。在《四川省“十一五”及 2020 年能源发展规划》中,确定了流域综合开发原则,计划在雅砻江、金沙江和大渡河建设“三江”水电基地,重点涉及 66 条河流,共规划 375 个梯级水电站。但是,水工建筑具有一个重要特点,就是一旦失事、溃坝,抢险救灾难度巨大,可能会对下游产生严重的次生灾害,带来不可估量的损失。面对密集的流域式梯级水电开发,每个大坝以及梯级水电站系统的地震安全性,日益成为重要的公共安全问题。

由多个大坝构成的梯级水电站系统,可以简化成一个串联系统,系统内任一大坝的破坏失效,将导致整个系统的破坏失效,系统的地震安全性取决于各个大坝的地震安全性。对于梯级水电站系统,大坝的地震安全性之间又具有一定的相关性,这主要体现为:在同一次地震事件的作用下,上游大坝的破坏失效,会给相邻下游大坝带来一定的附加危险性。由于大坝是按照一定的设防参数进行抗震设计的,假设仅考虑地震因素,当地震作用达到其设计地震动参数时,每个大坝将处于承载能力极限状态;当地震作用超过其设计地震动参数时,地震将引起大坝失效。因此大坝的地震安全性主要由两部分构成:其一是大坝本身遭遇超过其设防参数的地震危险性;其二是相邻上游大坝和该大坝同时破坏失效时,相邻上游大坝传递给该大坝的附加危险性,也就是两个相邻大坝之间河段的地震危险性。前者可以由传统的单场点地震危险性分析方法得出,后者则必须采用本文提出的双场点地震危险性分析方法。

#### 3.1 大渡河干流梯级水电站基本情况

四川大渡河是长江流域岷江水系最大支流,位于青藏高原东南边缘向四川盆地西部过渡的地带,干流全长 1062 km,天然落差 4175 m,流域面积 7.74 万  $\text{km}^2$  (不包括青衣江),河口多年平均流量 1500  $\text{m}^3/\text{s}$ ,年径流量 470 亿  $\text{m}^3$ 。

根据《四川省大渡河干流水电规划调整报告》<sup>①</sup>,大渡河干流推荐以下尔呷、双江口、猴子岩、长河坝、大岗山、瀑布沟等形成主要梯级格局的 22 级开发方案(表 1,图 1),规划总装机容量 2340 万千瓦。在该开发方案中,至少有 16 个梯级水电站的库容在 1 亿  $\text{m}^3$  以上,其中库容超过 10 亿  $\text{m}^3$  的电站有 5 个,坝高超过 100 m 的高坝电站有 10 个。按照河道长度平均,每 48 km 就有一个梯级水电站,从梯级水电站之间的直线距离看,相邻梯级水电

① 国家电力公司成都勘测设计研究院. 2004. 四川省大渡河干流水电规划调整报告.

站的直线距离为 11—48 km，平均直线距离为 25 km.

3.2 大渡河干流及邻近地区地震环境

从地震构造环境看，大渡河干流及邻近地区的地震环境十分复杂、严峻(图 1)：大渡河干流位于鲜水河—安宁河断裂带与龙门山断裂带之间，二者均为我国大陆内部著名的强震构造带。前者是川滇块体的东边界断裂，发生过包括 1786 年康定—磨西 7¼ 地震在内的 7 次 7 级以上强震；后者是川青块体的东南边界断裂，发生过举世闻名的汶川 8.0 级地震。

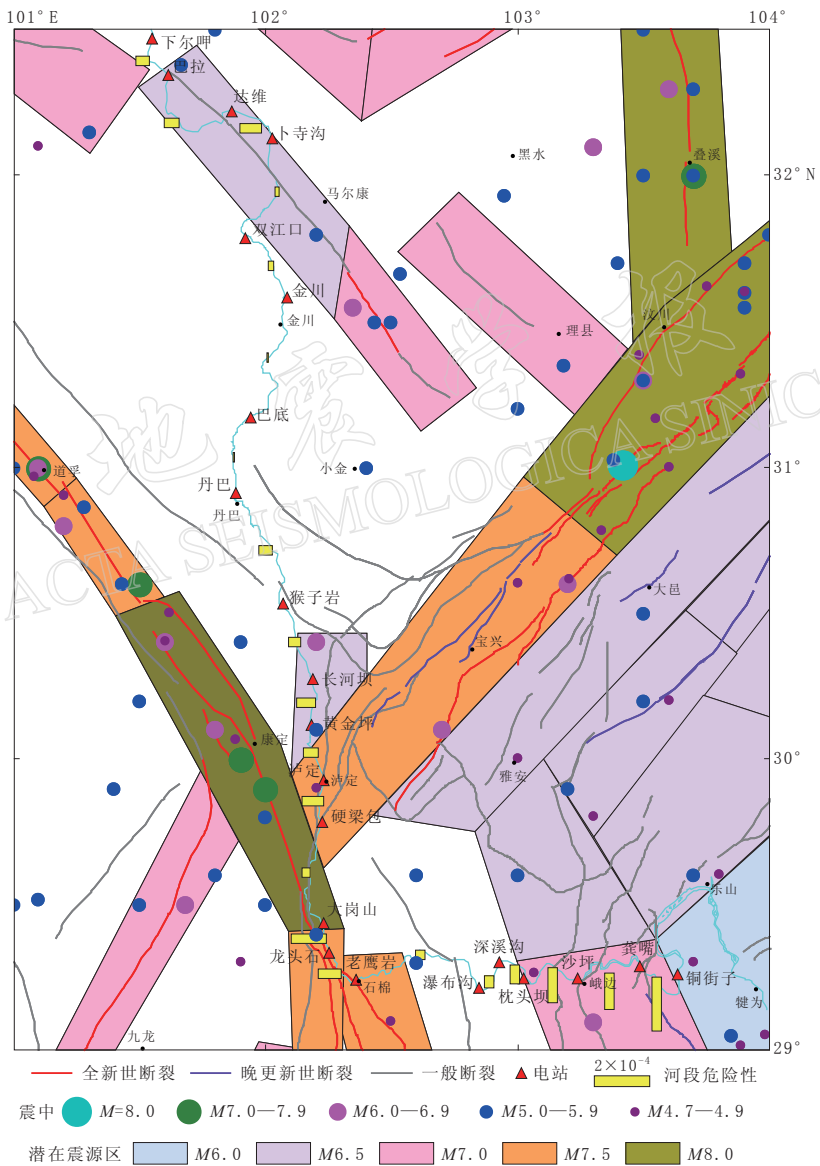


图 1 大渡河干流梯级水电站的地震环境与河段地震危险性分布

Fig.1 Seismic background around the cascade hydropower stations in the trunk stream of Dadu River and distribution of reach seismic hazards

依据对地震地质背景、地震活动性特征、深部地球物理特征的研究，考虑汶川 8.0 级地震对区域地震环境的作用和影响，雷建成等(2010)在大渡河干流及邻近地区划分出了甘

南川北地震带、川滇块体地震带和四川盆地地震带,统计确定了各地震带的地震活动性参数.研究表明,该地震带划分方案和确定的地震活动性参数,可以更加真实地反映区域的地震活动的水平,较好体现控制建筑物在地震作用下抗倒塌的水平.根据进一步研究结果,作者在上述 3 个地震带中划分出了 120 个不同震级上限的潜在震源区,大渡河干流梯级水电站与主要潜在震源区的关系见图 1.

3.3 大渡河干流梯级水电站的河段危险性分析

3.3.1 大渡河干流梯级水电站的抗震设防参数

表 1 大渡河干流梯级水电站抗震设防参数及河段危险性

Table 1 Seismic design accelerations for the cascade hydropower stations in the trunk stream of Dadu River and their reach seismic hazards

序号	梯级电站	地震评价单位	评价时间	评价方式	设防参数 /cm·s <sup>-2</sup>	河段危险性 /10 <sup>-5</sup>
1	下尔呷				199 *	
2	巴拉	四川省地震局	2008	地震安评	220	8.89
3	达维	四川省地震局	2009	地震安评	223	10.1
4	卜寺沟				221 *	13.8
5	双江口	中国地震局地质研究所	2004	地震安评	205	2.49
6	金川	中国地震局地壳应力研究所	2005	地震安评	253	3.45
7	巴底	中国地震局地壳应力研究所	2005	地震安评	300	0.0
8	丹巴				197 *	0.0209
9	猴子岩	中国地震局地质研究所 中国地震局地球物理研究所	2004	地震安评	297	8.87
10	长河坝	中国地震局地质研究所 中国地震局地球物理研究所	2004	地震安评	387	7.73
11	黄金坪	中国地震局地质研究所 中国地震局地球物理研究所	2004	地震安评	482	12.0
12	泸定	中国地震局地质研究所 中国地震局地球物理研究所	2004	地震安评	522	9.86
13	硬梁包	中国地震局地质研究所 中国地震局地球物理研究所	2004	地震安评	581	13.9
14	大岗山	四川省地震局 中国地震局地质研究所 中国地震局地球物理研究所	2004	地震安评	549	5.26
15	龙头石	中国地震局地质研究所 中国地震局地球物理研究所	2004	地震安评	479	22.9
16	老鹰岩	中国地震局地质研究所 中国地震局地球物理研究所	2004	地震安评	382	15.4
17	瀑布沟	中国地震局地质研究所 四川省地震局 中国地震局工程力学研究所	1985	烈度鉴定	200 * * *	6.25
18	深溪沟	四川省地震局	2004	地震安评	239	7.75
19	枕头坝	四川省地震局	2007	地震安评	221	12.6
20	沙坪	中国地震局地震预测研究所	2007	地震安评	207	22.2
21	龚嘴	四川省地震局	1978	烈度鉴定	200 * *	23.9
22	铜街子	四川省地震局	1975	烈度鉴定	200 * * *	34.9

注: \* 未进行地震安全性评价.按本文方案,采用单场点地震危险性分析,计算得出.

\* \* 地震基本烈度Ⅷ度,取 200 cm/s<sup>2</sup>.

\* \* \* 地震基本烈度Ⅷ度,提高 1 度设防,取 200 cm/s<sup>2</sup>.

从 1975—2009 年，在大渡河干流梯级水电站的规划、可行性研究、设计的不同阶段和不同时期，基于对大渡河流域及周边地震环境的不同资料程度和认识水平，中国地震局的多个直属研究所以及四川省地震局等多家单位曾经对其中 19 个梯级电站进行过地震烈度鉴定或地震安全性评价(表 1)，这些评价结果均经过中国地震局或四川省地震局审定批准，作为电站的抗震设防参数。对于暂未开展地震安全性评价的下尔呷、卜寺沟、丹巴电站的抗震设防参数，则根据本文确定的地震带、潜在震源区、地震活动性参数、地震动衰减关系，采用单场点地震危险性分析方法计算得出。

《水工建筑物抗震设计规范(DL5073-2000)》(中华人民共和国国家经济贸易委员会，2001)规定：工程设防类别为甲类的水工建筑物，可在基本烈度基础上提高 1 度作为设计烈度；凡进行过专门的地震危险性分析的工程，其设计地震加速度代表值的概率水准，对壅水建筑物应取基准期 100 年内超越概率  $P_{100}$  为 0.02。根据大渡河干流梯级水电站的工程规模和等级，按照地震安全性评价结果，我们取 100 年超越概率 0.02 的地震动参数值作为各个大坝的抗震设防参数，具体数值见表 1。

3.3.2 大渡河干流梯级水电站的河段危险性分析

基于汶川 8.0 级地震后大渡河干流及邻近地区的地震环境(雷建成等，2010)，利用西南地区地震动衰减关系(雷建成等，2007)，采用双场点地震危险性分析方法两两逐个计算，可以求出相邻大坝超越其设计地震动参数的概率，这就是大渡河干流各个河段的地震危险性(表 1)。图 1 展现了大渡河干流 22 个梯级水电站之间 21 个河段的地震危险性的平面分布情况，图 2 以剖面形式表现了河段危险性大小。从中可见，巴底电站场地本身不具备发生强震的构造条件，其地震作用全部来自周边强震的影响，但其地震安全性评价报告却给出了一个相当高的设防地震参数。计算表明，在当前的地震环境中，该设防地震参数被超越的概率趋近于零，因而与之相关的金川—巴底河段和巴底—丹巴河段的地震危险性最低。双场点地震危险性分析表明，大渡河干流梯级水电站系统中，危险性最高的 3 个河段是：龚嘴—铜街子河段、沙坪—龚嘴河段和大岗山—龙头石河段。从图 1 中还可发现，危险性较高的河段一般位于同一个潜在震源区中，且潜在震源区的震级上限较高。例如大岗山—龙头石河段，不仅位于 7.5 级潜在震源区中，还位于强烈活动的块体边界断裂带上。总体上看，河段危险性的平面分布特征符合该地区的地震环境。

4 讨论与结论

本文提出的双场点地震危险性分析方法，可以计算在相同地震构造环境中，在相同的地震作用下，相邻两个工程场点同时超越给定地震动参数的概率。对于由一系列在空间上

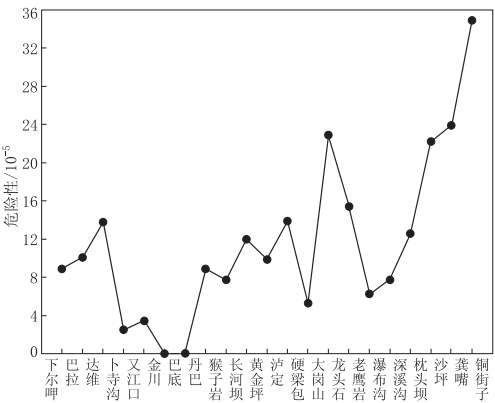


图 2 大渡河干流梯级水电站各河段的地震危险性

Fig.2 Reach seismic hazards of the cascade hydropower stations in the trunk stream of Dadu River



密集分布的工程场点组成的线性展布工程系统,当系统的安全性取决于各个工程场点的安全性,并且工程场点之间,尤其是相邻工程场点之间的安全性具有一定程度的相关性,一个工程场点的破坏失效,可能导致另一个工程场点的劣化或者破坏失效时,双场点地震危险性分析方法是分析系统的危险段落、场点遭受附加风险的有效工具。

在梯级水电站系统的地震危险性评价中(作者将另文论述),大坝的地震危险性主要包括两个方面:一是该大坝在周边地震环境作用下遭遇超过其抗震设防参数而失效破坏的概率;另一个是上游相邻大坝同时也遭受了超过上游大坝抗震设防参数而失效破坏的概率,也就是上游大坝对它的附加危险性,而这正是上面得出的该河段的危险性。危险河段的确定将有助于找出系统的薄弱环节,指出系统的优化方向;而河段的危险性作为大坝遭受的附加危险,将对全面评价大坝的危险性,进而评价梯级水电站系统整体的危险性发挥重要作用。

本文基于汶川 8.0 级地震后大渡河干流及邻近地区的地震环境,以大渡河干流梯级水电站系统为例,采用双场点地震危险性分析方法,求出了大渡河干流各个河段的地震危险性。其中危险性最低的河段是金川—巴底河段和巴底—丹巴河段;危险性最高的 3 个河段是:龚嘴—铜街子河段、沙坪—龚嘴河段和大岗山—龙头石河段。总体上看,河段危险性的平面分布特征符合该地区的地震环境。

在本文的研究中,作者与中国地震局地球物理研究所俞言祥研究员、刘爱文副研究员、胥广银副研究员进行过多次讨论,获益匪浅,在此表示衷心地感谢!另外感谢两位评审专家对本文初稿提出的宝贵意见和建议。

## 参 考 文 献

- 高孟潭. 1986. 地震危险性分析方法概述[J]. 国际地震动态, (11): 10-13.
- 高孟潭. 1988. 关于地震年平均发生率的探讨[J]. 国际地震动态, (1): 1-5.
- 高孟潭. 1993. 空间线性展布系统的地震危险性分析方法[J]. 地震学报, **15**(3): 347-452.
- 高孟潭, 卢寿德. 2006. 关于下一代地震区划图编图原则与关键技术的初步探讨[J]. 震灾防御技术, **1**(1): 1-6.
- 国家地震局. 1996. 中国地震烈度图(1990)概论[M]. 北京: 地震出版社: 11-16, 145-155.
- 胡聿贤, 高孟潭, 杜玮, 金严, 赵凤新, 邹其嘉, 陶裕录, 周本刚. 2001. GB18306-2001《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社: 1-15.
- 雷建成, 高孟潭, 俞言祥. 2007. 四川及邻区地震动衰减关系[J]. 地震学报, **29**(5): 500-511.
- 雷建成, 高孟潭, 吕红山, 亢川川, 陈鲲. 2010. 地震带划分方案对地震活动性参数的影响[J]. 地震学报, 待刊.
- 时振梁, 鄢家全, 高孟潭. 1991. 地震区划原则和方法研究: 以华北地区为例[J]. 地震学报, **13**(2): 179-189.
- 章在墉, 陈达生. 1982. 二滩水电站坝区场地地震危险性分析[J]. 地震工程与工程振动, **2**(3): 1-15.
- 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 2001. 水工建筑物抗震设计规范(DL5073-2000)[S]. 北京: 中国电力出版社: 2.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2005. 工程场地地震安全性评价(GB17741-2005)[S]. 北京: 中国标准出版社: 6-8.
- Algermissen S T, Perkins D M. 1976. A probabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the contiguous United States[R]. U. S. Geol. Surv. Open-File Report: 76-416.
- Basham P W, Weichert D H, Anglin F M, Berry M J. 1985. New probabilistic strong seismic ground motion maps of Canada[J]. Bull Seism Soc Amer, **75**(2): 563-595.
- Cornell C A. 1968. Engineering seismic risk analysis[J]. Bull Seism Soc Amer, **58**(5): 1583-1606.
- Der Kiureghian A, Ang A H-S. 1977. A fault-rupture model for seismic risk analysis[J]. Bull Seism Soc Amer, **67**(4):

1173-1194.

- Field E H. 2007. A summary of previous working groups on California earthquake probabilities[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **97**(4): 1033-1053.
- McGuire P K. 1976. EQRISK-evaluation of earthquake risk to site[R]. *U. S. Geol. Surv. Open-File Report*: 67-76.
- Petersen M D, Frankel A D, Harmsen S C, Mueller C S, Haller K M, Wheeler R L, Wesson R L, Zeng Y H, Boyd O S, Perkins D M, Luco N, Field E H, Wills C J, Rukstales K S. 2008. Documentation for the 2008 update of the United States national seismic hazard maps[R]. *U. S. Department of the Interior and U. S. Geol. Surv. Open-File Report* 2008-1128: 4-6
- Wesnousky S G, Scholz C H, Shimazaki K, Matsuda T. 1984. Integration of geological and seismological data for the analysis of seismic hazard: a case study of Japan[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **74**(2): 687-708.
- Working Group on California Earthquake Probabilities. 2003. Earthquake probabilities in the San Francisco Bay Region: 2002-2031[R]. *U. S. Geol. Surv. Open-File Report* 03-214: chap. 5: 1-21.

地震学报  
ACTA SEISMOLOGICA SINICA