

邓远立, 何萍. 广东新丰江水库区地震活动  $b$  值时空分布特征研究[J]. 华南地震, 2016, 36(3): 61–67. [DENG Yuanli, HE Ping. Study on the Spatiotemporal Pattern of  $b$  Value in Xinfengjiang Reservoir Area in Guangdong Province[J]. South china journal of seismology, 2016, 36(3): 61–67.]

# 广东新丰江水库区地震活动 $b$ 值时空分布特征研究

邓远立<sup>1, 2</sup>, 何萍<sup>1</sup>

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 中山大学, 广州 510275)

**摘要:** 广东省新丰江水库是中国发生过最大水库诱发地震的地方, 近几年地震活动频度和强度再次增强, 引起了广泛的关注。本研究系统分析了水库区 2010—2015 年地震活动  $b$  值时空分布特征, 结果表明: 新丰江水库区  $b$  值随深度增加而降低; 库尾区和大坝区  $b$  值较低, 坝下区和库中区  $b$  值较高; 中等以上地震活动与  $b$  值变化关系密切, 2010 年以来库区所有  $M_L$  4.0 级以上以及广东其它地区的绝大多数  $M_L$  4.0 级以上地震都是发生在新丰江水库区  $b$  值处于相对低值的时段, 说明新丰江水库区 2012 年以来的地震活动增强是区域构造活动强化的表现。

**关键词:** 地震;  $b$  值; 新丰江水库

中图分类号: P315.2 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2016) 03-0061-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2016.03.009

## Study on the Spatiotemporal Pattern of $b$ Value in Xinfengjiang Reservoir Area in Guangdong Province

DENG Yuanli<sup>1, 2</sup>, HE Ping<sup>1</sup>

(1. Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China;

2. Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Xinfengjiang reservoir in Guangdong province is the area where the largest reservoir induced earthquake occurred in China. In recent years, the frequency and intensity of seismic activity enhanced again, which has attracted widely attention. This study systematically analyzes the spatiotemporal pattern of  $b$  Value in Xinfengjiang reservoir area from 2010 to 2015. It is found that the  $b$  Value of Xinfengjiang reservoir area decreases with the increase of depth; the  $b$  Value in the reservoir tail area and the dam area is lower, and the  $b$  value in the reservoir middle area and downstream division is higher; the medium and strong earthquakes are closely related to the change of  $b$  value. Since 2010, all earthquakes with  $M_L \geq 4.0$  in reservoir area and the most of earthquakes with  $M_L \geq 4.0$  in other region of Guangdong province occurred during the period with a relatively

收稿日期: 2015-10-06

基金项目: 广东省省级科技计划项目(2013B020200010)

作者简介: 邓远立 (1989-), 助理工程师, 主要从事地震信息与灾害研究工作。

E-mail: 1989dyl@163.com

lower  $b$  value in Xinfengjiang reservoir area, which shows that the enhancement of seismic activity in Xinfengjiang reservoir area since 2012 is resulted from the regional tectonic activity.

**Keywords:** Earthquake;  $b$  Value; Xinfengjiang reservoir

## 0 引言

广东省新丰江水库从 1959 年水库蓄水开始,在水库及附近地区地震活动强度和频度不断增加,于 1962 年 3 月 19 日发生了一次 6.4 级地震,震中强烈度达到 8 度,是我国至今发生的最大水库诱发地震,也是全球已知 4 次 6 级以上水库诱发地震之一。此后,中小地震活动频繁,目前仍是广东地区地震活动水平最高的地区之一。2008 年之后,新丰江水库区地震活动水平一度明显降低,但从 2012 年开始,地震活动频度和强度再次增强,到目前为止,已经发生  $M_L$  4.0 级以上地震 7 次,平均每年超过 1 次,引起了广泛的关注,加强对其地震活动规律的研究具有重要的理论和现实意义。

古登堡和里克特(C.F.Rich-ter)在 1944 年首先提出了使用震级-频度的经验公式来描述世界各地地震活动性的差异:

$$\lg N(M) = a - bM \quad (1)$$

式(1)中  $M$  为地震震级;  $N(M)$  是指在一定时间内发生的  $M - \Delta M < M < M + \Delta M$  的地震次数;  $a$  和  $b$  是常数,  $a$  表征在统计时间和区域内的地震活动水平,  $b$  值表示该统计区域大小地震数的比例关系,大地震次数相对多时,  $b$  值就减小。 $b$  值的大小与统计区域的应力大小和介质强度有关<sup>[1-3]</sup>。

古登堡等对全球地震统计分析发现:在环太平洋岛弧地带,  $a$  和  $b$  值都较高;而在大陆内部,  $a$ 、 $b$  值则较低。Gupta 等<sup>[4]</sup>对全世界典型震例的地震序列特征进行了系统的分析研究,结果发现:水库诱发的前震  $b$  值大于余震  $b$  值,并且二者都大于当地天然地震  $b$  值。Kishor 等<sup>[5]</sup>的研究也得到相似结论:与区域地震活动相比,水库诱发地震的  $b$  值明显偏高。我国地震工作者对新丰江水库  $b$  值研究也得到很多有参考价值的结果。罗振暖等<sup>[6]</sup>研究发现,  $b$  值变化在不同部位存在差异,在 1962 年新丰江水库 6.1 级地震前 2 个月,以震源为中心的长方体(14×14×8 km)内  $b$  值稳定,但在 14×14 km 范围之外,  $b$  值变化显著。万永芳等<sup>[7]</sup>通过分析新丰江水库区 1961—2009 年的地震活动资料,发现低  $b$  值时段与大区域地震活动的增强存在一定的相关性,余震活动在一定程度上具有华南地区

地震活动“窗口”的作用。

本研究是在前人工作的基础上,结合新丰江水库近期地震活动状况,选取水库周边台站记录到的 2010 年以来数字地震资料,研究水库区不同深度、不同区域  $b$  值空间分布以及时间过程,分析  $b$  值变化与中等以上地震活动的关系,并与广东其它地区  $b$  值动态进行比较分析,为水库区地震活动规律研究和广东地区当前地震活动状态分析提供素材。

## 1 资料和方法

广东省地震观测台网从 1970 年开始布设,“十五”期间建成的广东数字地震台网的台站数增加到了 44 个,新丰江水库周边的测震台站已达 14 个。数字地震台网对广东全省陆区和近岸可以比较完整地观测到  $M_L$  2.0 级以上地震,对新丰江水库区的地震监控能力可达到  $M_L$  1.0 级(图 1)。

自 2010 年至 2015 年,新丰江水库周边 14 个台站共记录到库区  $M_L \geq 0.0$  级地震 14 692 次地震。其中,  $M_L \geq 4.0$  级 7 次(2 次为余震),  $4.0 > M_L \geq 3.0$  级 21 次,  $3.0 > M_L \geq 2.0$  级 271 次,  $2.0 > M_L \geq 1.0$  级 2 043 次,  $M_L < 1.0$  级 12 350 次。图 2 是  $M_L \geq 1.0$  级地震震级-频度关系  $\lg N-M$  图,总体上表现出比较好的线性关系,说明新丰江水库区  $M_L$  1.0 级的监测能力是充分的。

本研究的  $b$  值是采用最大拟然法进行分析计算:

$$b = \frac{\log_{10} e}{\bar{M} - M_0} \quad (2)$$

式(2)中,  $\bar{M}$  为平均震级,  $M_0$  为起始震级。

为了避免统计结果受到资料选取的影响,保证数据的完整性和可靠性,综合考虑上述监测能力和震级-频度  $\lg N-M$  关系,本研究选定起始震级为  $M_L$  1.0 级,满足震级  $M_L \geq M_0$  条件的数据共 2 342 次地震。

## 2 库区地震 $b$ 值随深度变化特征

选取新丰江水库区震级  $M_L \geq 1.0$  级的地震事件,共 2 342 次,进行分析计算,最终得到新丰江

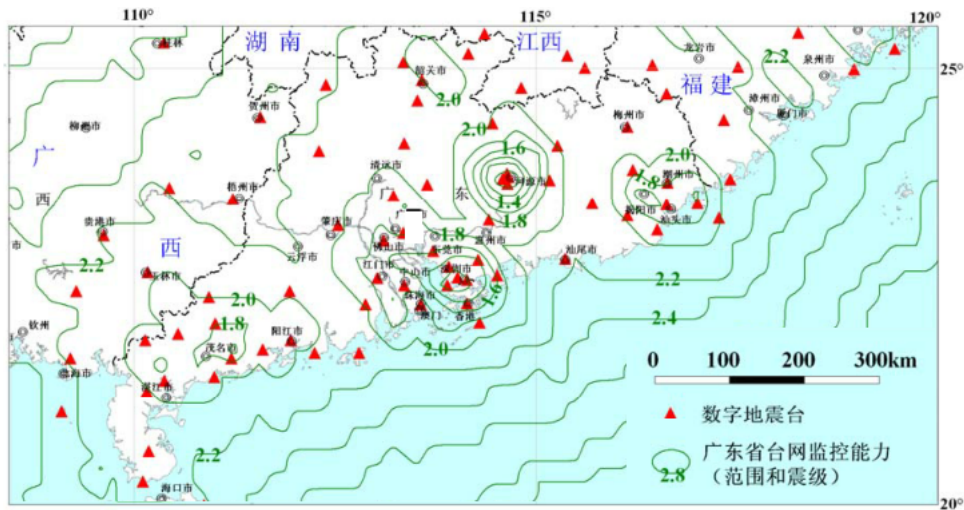


图 1 广东省数字地震台网监测能力分布图<sup>①</sup>

Fig.1 Map of monitoring ability of digital seismic network in Guangdong province

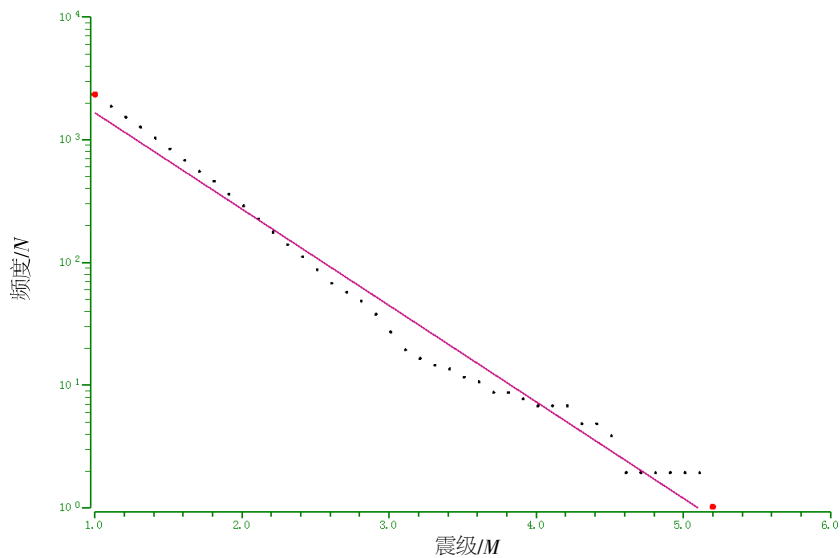


图 2 新丰江水库区震级-频度关系  $\lg N-M$  图(2010~2015 年)

Fig.2 The  $\lg N-M$  (frequency-magnitude) map in Xinfengjiang reservoir area(2010-2015)

水库区的平均  $b$  值为 0.785 6。为了更详细分析  $b$  值随深度的变化规律,作者将  $b$  值在深度上变化的计算结果展示如下(表 1、图 3)。从图中可以看出,  $b$  值随震源深度增加而逐渐减小,在近地表 2 km 深度  $b$  值取得最大值 1.976 7,在有资料的最深 13 km 处  $b$  值取得最小值 0.505 3;在地壳 8 km 以内  $b$  值较大,都大于 1.0;在 8~13 km 范围内  $b$  值都小于 0.9,且随深度增加逐渐减小。这一结果与前人研究得到的天然地震  $b$  值随深度增加而减小的结果一致<sup>[2,7-8]</sup>。

许多研究认为,引起  $b$  值变化的主要因素包

表 1 新丰江水库区地震  $b$  值随深度变化表  
Table 1 The variation of  $b$  value with the depth in Xinfengjiang reservoir area

深度/km	$b$ 值	深度/km	$b$ 值
2	1.976 7	8	1.235 0
3	1.466 8	9	0.836 0
4	1.690 6	10	0.667 9
5	1.442 9	11	0.594 5
6	1.305 2	12	0.579 8
7	1.313 4	13	0.505 3

① 广东省工程防震研究院. 人民日报中山传媒大厦工程场地地震安全性评价报告, 2015.

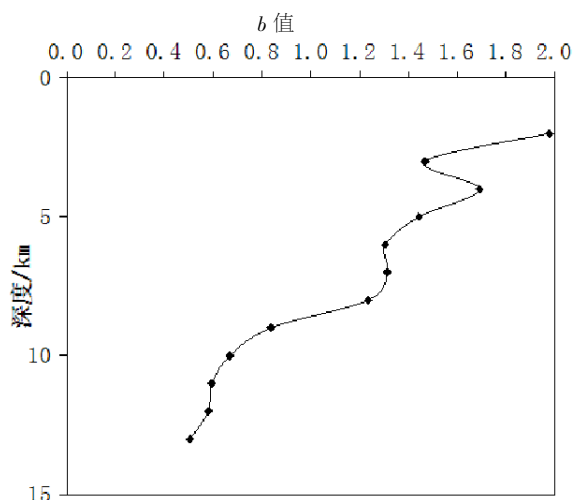


图3 新丰江水库区地震  $b$  值随深度变化图

Fig.3 The variation of  $b$  value with the depth in Xinfengjiang reservoir area

括物质复杂程度、温度和有效应力等<sup>[2,7]</sup>。在地壳浅部,温度较低,有效应力较小,岩石破碎强烈,物质复杂程度较大, $b$ 值也较大;在地壳深处,温度较高,有效应力增加,介质的复杂程度减小, $b$ 值降低。因此,对地震数据统计分析结果表现出 $b$ 值随深度增加而减小的现象。

强震主要发生在地壳介质相对均匀、岩石静压力较高的深处<sup>[2,7-8]</sup>。这与新丰江水库区的观测结果是一致的,2010年以来新丰江水库区发生的 $M_L \geq 4.0$ 级地震,其震源深度都大于9 km。对于水

库区来说,水库诱发作用对 $b$ 值影响很大,在浅部水库诱发作用较强, $b$ 值较高,在深部水库诱发作用减弱, $b$ 值降低,这与分析结果也是一致的。

### 3 库区地震 $b$ 值分区特征

根据新丰江水库区地质构造和地震活动分布特点,可将研究区进一步划分为4个小区(图4):分别为坝下区A(包含河源-邵武断裂 $F_1$ 及其以东地区)、大坝区B(包含人字石断裂 $F_2$ 和发生1962年6.1级地震的石角-新港-白田断裂 $F_5$ 等)、库中区C(包含灯塔-客家水断裂 $F_3$ )和库尾区D(2012年以来的地震活动主体区域)。

本研究首先把库区震级 $M_L \geq 1.0$ 级的2342次地震事件,按4个分区分别筛选出来,然后再分两种情况计算各分区 $b$ 值:一种情况是包含所有 $M_L \geq 1.0$ 级地震,另一种情况是去除发生 $M_L \geq 4.0$ 级地震当天主震和余震数据(避免主震和余震对结果产生太大的影响)。 $b$ 值计算采用最大似然法,计算结果见表2。从表中结果可见,坝尾区 $b$ 值最小,大坝区次之,坝下区 $b$ 值最高。在坝下区和库中区两种情况计算的 $b$ 值相同或相近,在大坝区和坝尾区第一种情况计算的 $b$ 值小于第二种情况计算的结果,这是因为近几年 $M_L \geq 4.0$ 级地震都发生在这两个区域。坝下区和坝中区在两种情况计算的 $b$ 值都大于1.0,说明对水库诱发作用的响应

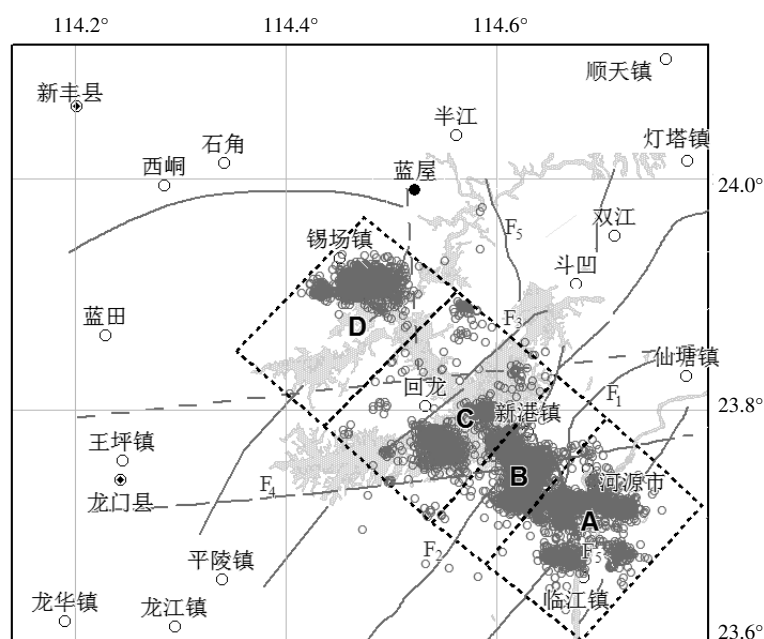


图4 新丰江水库地震活动分区

Fig.4 Division of seismic activity in Xinfengjiang reservoir

可能较强;坝尾区在两种情况计算的 $b$ 值都小于0.9,说明对构造应力作用影响可能较强;大坝区在第一种情况计算的 $b$ 值小于0.9,在第二种情况计算的 $b$ 值大于1.0,但都介于坝尾区最小 $b$ 值和坝下区最大 $b$ 值之间,说明该区在1962年6.1级地震后对水库诱发作用的响应可能在减弱。

表2 新丰江水库各分区 $b$ 值计算结果  
Table 2 Calculation results of  $b$  Value in each division of Xinfengjiang reservoir

分区	地震数量	含主震当天 $b$ 值	去主震当天 $b$ 值
坝下区 A	456	1.146 3	1.141 0
大坝区 B	818	0.870 7	1.019 2
库中区 C	354	1.003 9	1.003 9
库尾区 D	713	0.643 2	0.838 9

4 库区地震 $b$ 值时间演化特征

为了追踪新丰江水库区地震 $b$ 值的时间过程,本研究以1天为步长3个月为窗长逐日计算了 $b$ 值,得到了 $b$ 值的时间过程曲线(图5)。从图中可见,从2010年至2015年,新丰江水库区 $b$ 值变化介于0.7~1.4之间,平均0.95,2012年至2014年9月和2015年下半年 $b$ 值较低,其余时间 $b$ 值较高。进一步分析结果表明,2010年以来新丰江水库区所有 $M_L$ 4.0级以上地震(图中红色实线箭头)都发生在相对低 $b$ 值的时段(小于平均值0.95)(图5,表3),广东省其它地区的 $M_L$ 4.0级以上地震(图中黑色虚线箭头)大多数也发生在新丰江水库区相对低 $b$ 值的时段,仅2014年10月23日肇庆怀集 $M_L$ 4.1级地震为例外( $b$ 值1.087,大于



(图中红色实线箭头指示新丰江水库区的 $M_L$ 4.0级以上地震,黑色虚线箭头指示广东省其它地区的 $M_L$ 4.0级以上地震)

图5 新丰江水库区 $b$ 值时间过程曲线(2010-2015)

Fig.5 Temporal curve of  $b$  Value in Xinfengjiang reservoir area(2010-2015)

表3 广东地区 $M_L$ 4.0级以上地震前新丰江水库区 $b$ 值  
Table 3 The  $b$  Value of Xinfengjiang reservoir area before the earthquakes with  $M_L \geq 4.0$  in Guangdong province

时间/年-月-日	纬度/(°)	经度/(°)	深度/km	震级/ $M_L$	库区 $b$ 值	发震地区
2012-02-16	23.906	114.473	10.3	5.2	0.906 1	广东东源
2012-08-31	23.752	114.635	12.3	4.5	0.769 6	广东河源
2013-02-22	23.904	114.481	11.4	5.1	0.841 0	广东东源
2013-12-06	22.171	111.013	12.6	4.2	0.790 5	广东高州
2014-04-25	23.908	114.476	9.9	4.4	0.838 9	广东东源
2014-07-11	23.901	114.465	10.2	4.6	0.840 6	广东东源
2014-10-23	23.990	112.344	10.7	4.1	1.087 1	广东怀集
2015-09-24	23.038	115.701	13.8	4.3	0.785 2	广东陆丰
2015-11-22	20.422	110.387	10.8	4.2	0.831 9	广东徐闻

平均值)。这些结果说明,新丰江水库区近几年地震活动增强是区域构造活动强化的结果。同时也反映了在新丰江水库区 $b$ 值相对大小不仅是该水

库区地震活动状态的指标,也是广东地区的地震活动分析的重要参量。这一认识与国内外的研究结果是一致的<sup>[1-2,5-6,9-11]</sup>。

在 2014 年 10 月 23 日肇庆怀集  $M_L$  4.1 级地震前, 新丰江水库区相对高  $b$  值可能反映了粤西廉江-信宜断裂之西地区的地震活动与我国西南地区的地震活动关系更密切, 而与新丰江水库的动力学关系较弱。

对广东省除新丰江水库区之外地区的地震目录以 1 天为步长 3 个月为窗长逐日计算  $b$  值, 并与新丰江水库区  $b$  值的时间过程曲线进行对比, 结果表明, 广东省除新丰江水库区之外地区的  $b$  值平均值为 0.83, 明显低于新丰江水库区  $b$  值平均值 0.95; 在大多数时段新丰江水库区  $b$  值高于广东省其它地区  $b$  值(图 6)。这一结果与前人有关水库地震的  $b$  值通常高于天然地震的研究结果一致<sup>[3-4]</sup>。说明新丰江水库区可能仍然存在水库诱发地震的因素, 水在地震孕育和发生过程中的作用仍然不可忽略。

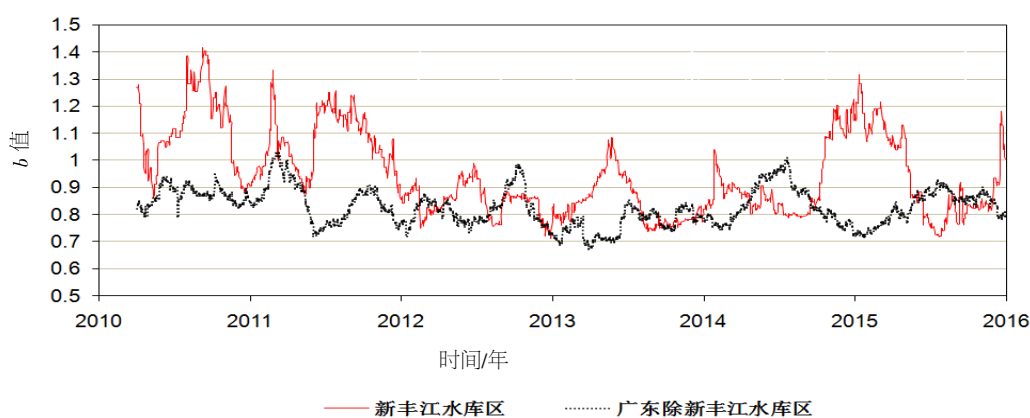
另一方面, 从图中还可以看到, 新丰江水库区  $b$  值与广东省其它地区  $b$  值在 2012 年之前差异较大, 变化关系也比较复杂, 有时同向升降, 有时反向变化; 从 2012 年开始, 水库区内外  $b$  值大小差异减少(2014 年 10 月至 2015 年上半年除

外), 并出现了趋势变化互补(近同步反向变化)的现象。变化的转折点(2012 年)对应了广东地区地震活动由弱转强的时间节点。发生这种转变的可能原因有:

(1) 在 2012 年之前, 区域构造应力作用较弱, 各区域之间构造应力联系不强, 表现出各地区的差异活动特点, 并以微震活动为主。水库区水体的渗透和蚀变作用可能大于构造应力变化的作用, 并诱发微震活动,  $b$  值较高。非水库区缺少水库诱发的因素, 地震活动的动力仍以构造变形为主,  $b$  值变化不大。

(2) 从 2012 年开始, 广东地区地震活动水平显著升高, 区域应力作用增强, 在水库区与非水库区都是以构造应力占主导, 即使在水库区的地震活动也以构造地震为主,  $b$  值较低, 震源深度较大(表 3)。

在区域动力作用增强的背景下, 各区域之间应力联系和构造变形也更加紧密, 表现为地震活动的整体增强, 各区域之间可能存在协同作用, 地震活动此起彼伏, 构成互补关系。具体机理需



(红色实线为新丰江水库区  $b$  值, 黑色虚线为广东省其它地区  $b$  值)

图 6 新丰江水库区与广东省其它地区  $b$  值时间过程曲线对比(2010-2015)

Fig.6 Comparison of  $b$  value temporal curves of Xinfengjiang reservoir area and other regions of Guangdong province (2010-2015)

要将来进一步深入研究。

## 4 结语

综上所述, 可以得出如下几点初步认识:

(1) 新丰江水库区  $b$  值随深度增加变小, 可能是随深度增加, 静岩压力增加, 地壳介质复杂程度降低, 水库诱发作用减弱, 构造作用增加所致。

(2) 新丰江水库区不同区域  $b$  值存在差异, 坝下区和坝中区  $b$  值较高, 坝尾区  $b$  值最小, 大

坝区次之, 可能与各区对构造作用和水库诱发作用响应的强弱有关。

(3) 新丰江水库区中等以上地震活动与  $b$  值变化关系密切, 2010 年以来库区所有  $M_L$  4.0 级以上以及广东其它地区的绝大多数  $M_L$  4.0 级以上都是发生在新丰江水库区  $b$  值处于相对低值的时段, 说明新丰江水库区 2012 年以来的地震活动增强是构造活动强化的表现。

由于时间、资料 and 水平等的限制, 有些问题分析不够充分, 例如, 地震活动分区的合理性、



水库区  $b$  值与广东其它地区  $b$  值关系协同变化机理等问题仍有待将来进一步研究。

### 参考文献:

- [1] Scholz, C.H. The frequency-magnitude relation of micro fracturing in rock and its relation to earthquakes. Bull. Seismol. Soc. Am., 1968, 58: 399-415.
- [2] Mori J, Abercrombie R E. Depth dependence of earthquake frequency-magnitude distributions in California: Implications for the rupture initiation [J]. Geophys Res, 1977, 102: 15 801-15 090.
- [3] Gupta H K, Rastogi B K, Narain H. 1972. Common features of the reservoir associated seismic activities [J] . Bull. Seismol. Soc. Am., 62: 481-492.
- [4] Kishor J.R. Sinha. Probabilistic Seismic-Hazard Estimation for Peninsular India [J]. BSSA, 2007, 97 (1B): 318-330.
- [5] 罗振暖, 谢明富. 新丰江水库地区  $b$  值的研究[J]. 华南地震, 1989, 17 (3): 79-88.
- [6] 万永芳, 杨马陵. 新丰江水库地震序列的分段研究[J]. 华北地震科学, 2011, 29 (4): 28-33.
- [7] Gerstenberger M, Wiemer S, Giardini D, et al. A systematic test of the hypothesis that the  $b$  value varies with depth in California [J] . Geophys Res Lett, 2001, 28: 57-60.
- [8] 张洪艳, 卢燕红, 康建红, 张宇, 蔡宏雷, 高金哲. 吉林前郭震群  $b$  值的深度变化特征分析[J]. 华南地震, 2015, 35 (2): 96-99.
- [9] 河北省地震局. 一九六六年邢台地震[M]. 北京: 地震出版社, 1986: 10-57.
- [10] 陈长云. 张家口-渤海断裂带分段运动变形特征分析[J]. 地震, 2016, 36 (1): 1-11.
- [11] 陈长云, 贺建明. 西秦岭北缘断裂分段运动变形特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36 (9): 787-788.