

刁守中, 李霞, 王志才, 等. 西太平洋火山带大喷发与中国大陆东部强震的相关性[J]. 华南地震, 2023, 43(2): 1-10. [DIAO Shouzhong, LI Xia, WANG Zhicai, et al. Correlation Between Large Eruptions in the Western Pacific Volcanic Belt and Strong Earthquakes in Eastern China[J]. South China journal of seismology, 2023, 43(2): 1-10]

西太平洋火山带大喷发与中国大陆 东部强震的相关性

刁守中, 李霞, 王志才, 崔华伟

(山东省地震局, 济南 250014)

摘要: 对1586年以来的西太平洋火山带 $VEI \geq 5$ 级火山大喷发与中国大陆东部 $M \geq 6$ 强震的相关性进行了分析, 结果表明, 随着西太平洋火山带大喷发, 大陆东部一般滞后半年至5年开始强震丛集, 且火山连续性大喷发后大陆东部可能出现强震活动高潮或丛集活动时间增长及频度增加现象; 强震平静时段一般在火山间歇期内, 且强震最长平静期与火山最长间歇期同步。由此认为, 火山的大喷发——间歇性活动, 显示了西太平洋火山带相关板块运动及上地幔热对流的微动态(10~20年左右尺度)的韵律性活动过程, 这可能是大陆东部强震韵律性活动的“节拍器”, 西太平洋火山带大喷发是大陆东部强震丛集活动的警报“哨声”, 但不是“触发”或“诱发”了大陆东部的强震丛集活动。对火山带大喷发后强震丛集活动预测方法进行了探索, 估计了2022年1月15日汤加火山 VEI 5级大喷发后中国大陆东部强震活动趋势。

关键词: 西太平洋火山带; 大喷发; 中国大陆东部地区; 强震丛集; “哨声”

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)02-0001-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.02.01

Correlation Between Large Eruptions in the Western Pacific Volcanic Belt and Strong Earthquakes in Eastern China

DIAO Shouzhong, LI Xia, WANG Zhicai, CUI Huawei

(Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, China)

Abstract: The correlation between the large volcanic eruptions with $VEI \geq 5$ in the western Pacific volcanic belt since 1586 and strong earthquakes with $M \geq 6$ in the eastern China was analyzed. The results show that with the large eruption of the western Pacific volcanic belt, the strong earthquake clustering in eastern China generally lags behind half a year to five years, and after the continuous large eruption of the volcano, there may be a climax of strong seismicity or an increase in time and frequency of cluster activity in eastern China. The quiet period of strong earthquakes is generally in the volcanic interval, and the longest quiet period of strong earthquakes is synchronized

收稿日期: 2022-05-10

基金项目: 中国地震局老专家科研基金(201908)

作者简介: 刁守中(1945-), 男, 研究员, 主要从事地震活动性、历史地震研究等。

E-mail: Diaoting321@163.com

with the longest volcanic interval. It is believed that the large eruption–intermittent activity of the volcano shows the rhythmic activity process of the related plate movement and the micro–dynamic (about 10–20 years scale) of the upper mantle thermal convection in the western Pacific volcanic belt, which may be the “metronome” of the rhythmic activity of strong earthquakes in eastern China. The large eruption of the western Pacific volcanic belt is the alarm “whistle” of the strong earthquake cluster activity in eastern China, rather than “trigger” or “induce” the strong earthquake cluster activity in eastern China. The prediction method of strong earthquake cluster activity after the large eruption of volcanic belt is explored, and the trend of strong seismicity in eastern China after the Tonga VEI 5 volcanic eruption on January 15th, 2022 is estimated.

Keywords: Western Pacific volcanic belt; Large eruptions; Eastern China; Strong earthquake cluster; “Whistle”

0 引言

2022年1月15日(北京时间)位于西南太平洋的汤加王国洪阿汤加哈阿帕伊岛(Hunga Tonga–Hunga Ha’apai)海底火山(以下对汤加王国域内及附近的火山简称汤加火山)发生喷发指数VEI为5级的大喷发^[1–2]。火山引发越洋海啸,影响到太平洋沿岸广大地区,中国东南沿海14个验潮站于16日凌晨监测到海啸波,最大波幅为宁波石浦验潮站记录的20 cm^[3–4]。距离汤加火山口约8700~12700 km的中国大陆广大区域分布的近200个地应变台站,自15日20~24 h记录到汤加火山大喷发激发的大气重力波所引起的短时地表应变变化,地表面应变平均变幅达 1.86×10^{-8} ^[5]。这次火山大喷发是1991年菲律宾皮纳图博火山VEI 6级特大喷发以来30年全球最强烈的一次火山喷发,对地球上地幔至电离层等多个圈层及广大区域都产生一定影响,引起火山、海洋、气象、地质、地震及遥感等多个学科的密切关注^[6–12]。

汤加火山群位于巨大的西太平洋火山带的南部,在全球第二深度的汤加海沟(长1375 km,最深10882 m)西侧岛弧地带,其火山喷发主要与西太平洋板块俯冲活动和上地幔热物资运移有关^[6–10]。这次汤加火山大喷发是西太平洋火山带板块运动和上地幔热对流微动态增强活动的显示。西太平洋火山带是太平洋板块、菲律宾海板块以及澳大利亚板块与欧亚大陆板块东部边界的复杂汇聚带,并致使欧亚大陆东部边缘地区岩石圈的拉张减薄与破坏。中国大陆东部地区(以下简称“大陆东部”)地质构造运动与地震活动与这一地球构造环境有紧密关联^[13–17]。但西太平洋火山带大喷发与大陆东部强震活动关系的研究至今少见,

为此,本文拟收集整理历史上西太平洋火山带大喷发资料,分析西太平洋火山带大喷发与大陆东部强震活动的特征及其关系。

1 基本数据

1.1 西太平洋火山带大喷发目录整理

1.1.1 火山喷发强度下限

VEI(Volcanic Explosivity Index)是表征火山喷发强度的参数,主要由火山喷出物体积、喷发柱高度等综合确定,以自然数表示,每增1级表示喷发威力增大10倍^[18]。按火山喷发释放能量统计经验公式计算^[19],VEI5级属于大喷发,释放的能量达 8.3×10^{17} J,相当于1次 $M 8.7$ 级特大地震释放的能量;VEI6级属于特大喷发,释放的能量达 5.0×10^{18} J,相当于1次 $M 9.3$ 级巨大地震释放的能量;VEI7级属于巨大喷发,释放的能量达 3.0×10^{19} J,相当于1次 $M 9.8$ 级巨大地震释放的能量;而VEI4级属于中等喷发,且VEI4级火山喷发资料完整时段较短。故此,本文取西太平洋火山带VEI ≥ 5 级火山大喷发目录进行分析。

1.1.2 区域

本文火山大喷发资料的区域为西太平洋火山带。该带主要包括勘察加—日本—马里亚纳、琉球—台湾—菲律宾—印尼—巴布亚新几内亚—汤加—新西兰等相关火山链,该火山带分布的活火山约占全球活火山总数的50%以上^[20–23]。

据全球火山监测网站(volcano.si.edu/)及有关文献^[23–28],本文遴选整理了自1586年印尼东爪哇岛克鲁特(Klut)火山VEI 5级大喷发以来,至2022年1月15日汤加火山大喷发的西太平洋火山带VEI ≥ 5 级大喷发事件目录,共23条。其中5级大喷发19

条、6级巨大喷发3条及7级特大喷发1条,最强为1815年4月26日印尼坦博拉(Tambora)火山7级特大喷发(表1、图1)。其中绝大多数喷发时间由文字记载确定,个别为地质测年方法确定的年代。而在1586年之前,可以追溯到的西太平洋火山带最后1次 $VEI \geq 5$ 级大喷发事件是1450年菲律宾吕宋岛皮纳图博(Pinatubo)火山 VEI 5级大喷发,与1586年的 VEI 5级大喷发相隔136年,超过1586年以来火山大喷发最长间歇时间的近2倍。因此认为,自1586年开始西太平洋火山带 $VEI \geq 5$ 级大喷发目录较为完整。

图1给出1586年以来西太平洋火山带 $VEI \geq 5$ 级大喷发空间分布情况。该带 $VEI \geq 5$ 级大喷发空间分布具有分段性:①北起勘察加半岛,经千岛群岛、北海道到本州分布10次 VEI 5级大喷发,该段火山大喷发频次高而喷发强度指数低。该区段是西北太平洋板块以 NWW 方向向欧亚大陆俯冲,主要作用于华北及东北地震区;②琉球—菲律宾

—巴布亚新几内亚段分布5次 $VEI \geq 5$ 级大喷发,其中2次 VEI 达6级,喷发强度指数较高。该区段主要是西太平洋板块及菲律宾海板块与欧亚板块汇聚为主;③印尼火山弧地区分布6次大喷发,其中 VEI 7及6级各1次,是喷发强度最强烈的区段,且火山分布方向呈近 EW 方向。这里是西太平洋板块、菲律宾海板块、澳大利亚板块与欧亚板块西南边缘相汇聚的复杂地区,对南海、大陆东部有复杂作用;④汤加—新西兰段,分布2次 VEI 5级大喷发,火山大喷发次数较少和强度指数不高。但据有关研究^[29],约2万6千多年前新西兰陶波(Taupo)火山8级超级大喷发,是已知的全球7次8级超级大喷发的最后一次,对全球生物造成了威胁。而约公元230年前后的7级大喷发则彻底毁灭了新西兰北岛,现在陶波火山已有重新活动迹象。因此,对该段火山大喷发的危险性不可低估。这段主要为西太平洋板块与澳大利亚板块汇聚,二者俯冲或对冲形成岛弧及弧后扩张带^[23, 30]。

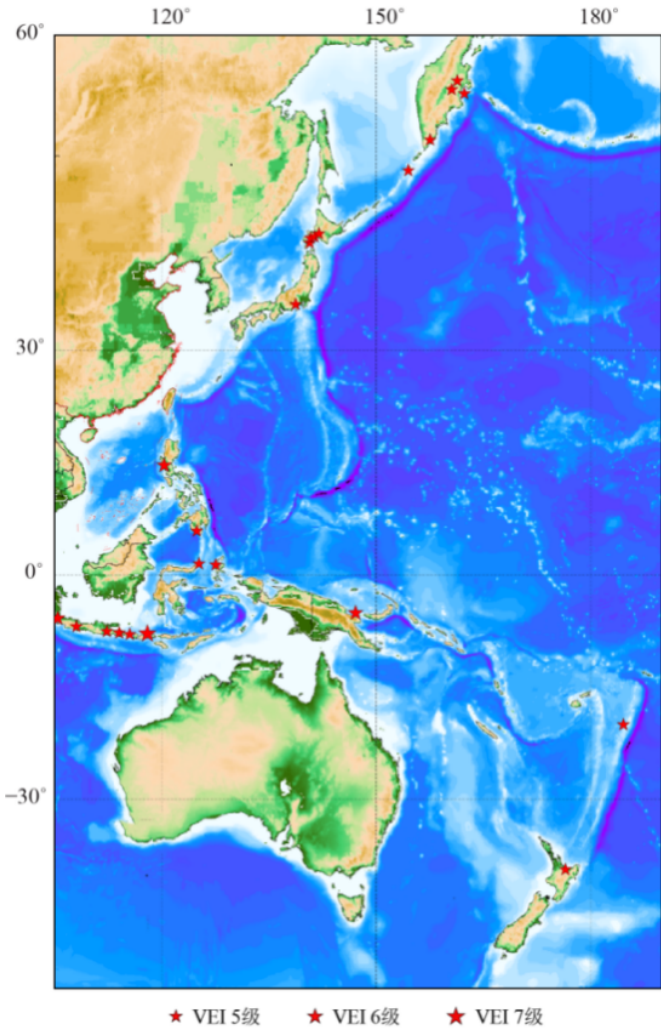


图1 西太平洋火山带大喷发空间分布示意图(1586—2022-01 $VEI \geq 5$)

Fig.1 Spatial distribution of large eruptions in the western Pacific volcanic belt(1586—2022-01 $VEI \geq 5$)

1.2 大陆东部强震目录

选取大陆东部(106°E以东)1586年以来 $M \geq 6$ 级浅源强震进行研究, 该区域为南北地震带以东区域, 包括华南、华北及东北地震区。地震目录源于中国地震局震害防御司组织编辑的中国地震目录^[31-33]以及中国地震台网中心网站(<https://www.cenc.ac.cn/cenc/dzxx>)发布的地震目录, 其中强震序列只取主震1次(剔除强余震), 且不取中、深源地震及水库诱发地震。公元1586—2022年(1

月), 大陆东部共发生 $M \geq 6$ 级的浅源构造地震94次, 其中6.0~6.9级强震73次、7.0~7.9级大震18次、8.0~8.9级特大地震3次, 最大为1668年山东郯城8½级地震。图2是大陆东部 ≥ 6 级地震震中分布图。其中有22次强震分布在华南地震区, 最高震级为7½级; 67次强震分布在华北地震区(二者大体以30°N为界), 最高震级达8½级; 5次强震分布在东北地震区(与华北地震区大体以42°N为界), 且震级仅为6级档次。

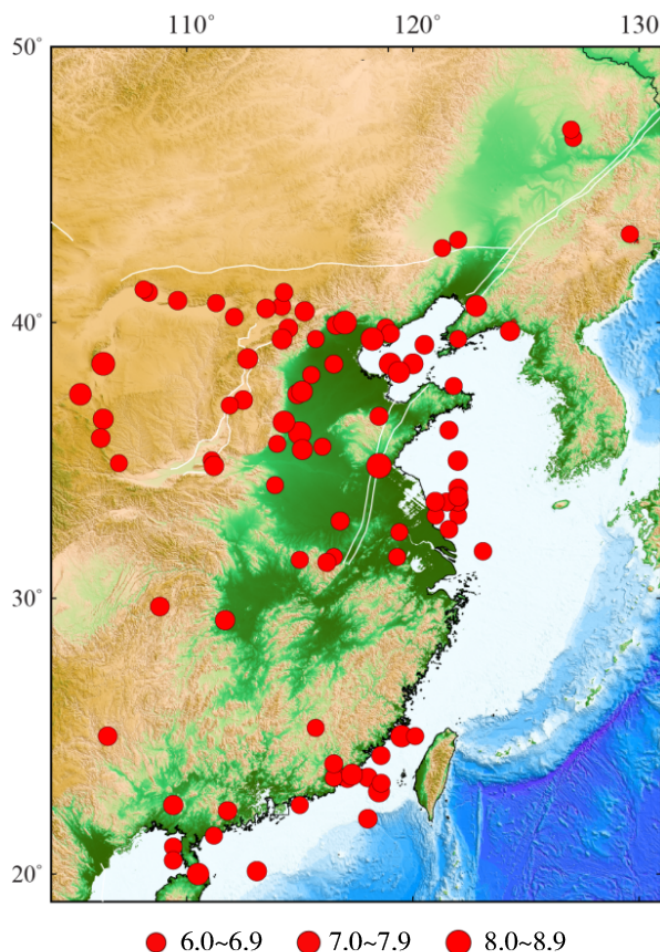


图2 中国大陆东部强震分布示意图(1586—2022-01 $M \geq 6$)

Fig.2 Distribution of strong earthquakes in eastern China(1586—2022-01 $M \geq 6$)

2 强震活动与火山大喷发特征

图3给出1586—2022年1月西太平洋火山带大喷发 $\Sigma E^{1/2}-t$ 图(a)及大陆东部强震 $\Sigma E^{1/2}-t$ 图(b)。可以看出, 其火山大喷发与强震活动的能量积累——释放过程形态趋势大体相似, 具有相似积累——释放韵律性, 且火山大喷发一般先于强震发

生, 强震活动则略滞后“跟踪”。

2.1 强震活动与火山大喷发的分段

地震时间变异系数(coefficient of variation) C_v 值可以表征地震活动时序类型特性^[33-36]

$$C_v = \sigma / \mu \quad (1)$$

式(1)中 σ 为地震时间间隔标准差, μ 为地震时间间隔的均值, C_v 值确定其分布状态。由于地震复杂

性, 参照文献[33]~[35], 本文划分的标准是: $0 < C_v < 0.7$ 属于准周期分布; $0.7 \leq C_v \leq 1.2$ 属于准泊松分布; $C_v > 1.2$ 属于丛集分布。计算求得大陆东部强

震总体时间序列 C_v 值为 2.00, 为丛集分布, 也就是整个强震时间序列是由多个丛集—平静相间的分组活动段所组成。

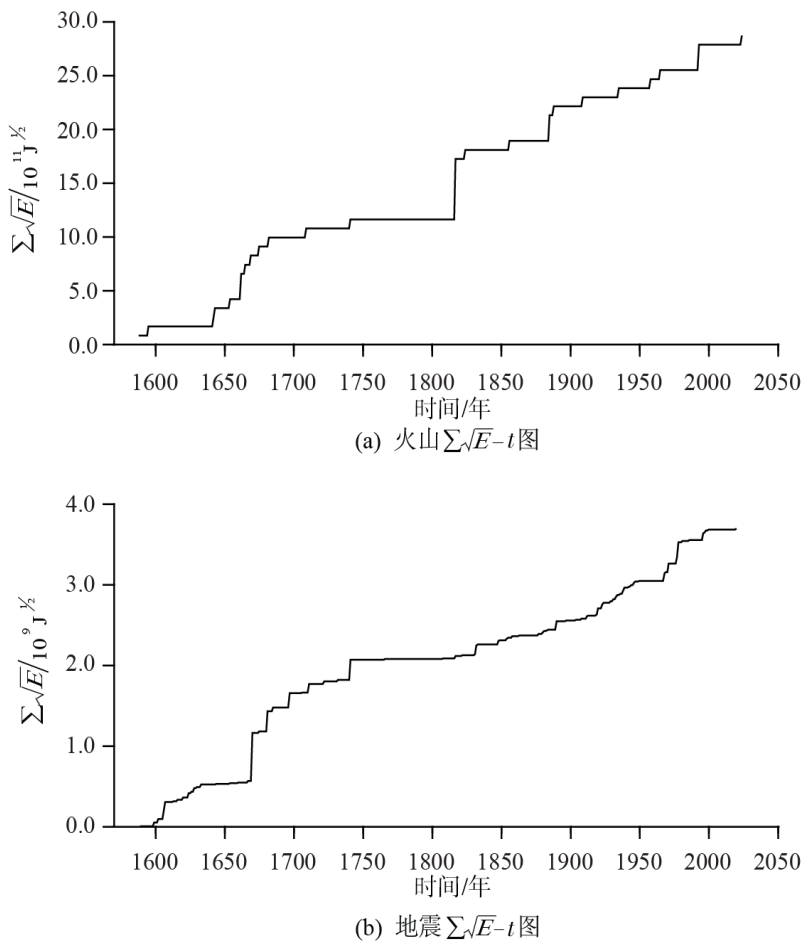


图3 西太平洋火山带强烈喷发及大陆东部强震 $\Sigma\sqrt{E}$ - t 图对比

Fig.3 Comparison of $\Sigma\sqrt{E}$ - t diagram of large eruptions in the western Pacific volcanic belt and strong earthquakes in eastern China

以相邻地震之间的时间间隔为依据, 依次把1586年以来大陆东部强震活动分解为相对丛集与相对平静的16段。同时, 把火山大喷发按时间顺序依次划分在相应的分段里, 有的时段也出现火山大喷发丛集现象。并假定2022年汤加火山喷发为第17段的开始。在丛集时段内, 地震频度高、强度大(多数 >7 级); 在相对平静时段没有强震或仅有孤立6级强震; 有的时间段内, 可以根据强震时间间隔和(或)火山大喷发情况, 可以进行次级分段, 以便讨论其更精细的结构。对比华北、华南地震区平静与活跃的期、幕划分结果^[37-40], 本文分段与其基本一致。这意味着华北、华南地震区的期、幕活动与西太平洋火山带大喷发有内在关系。大陆东部强震分段结果及各段火山与强震活动情况列于表1。

2.2 西太平洋火山带大喷发与大陆东部强震活动基本特征

由图3及表1可见, 自16世纪末期至今430多年来, 大陆东部 $M \geq 6$ 级强震丛集活动节奏与西太平洋火山带大喷发基本一致, 一直在步西太平洋火山带大喷发后尘, 亦步亦趋, 密切相关, 其特征主要为:

(1)西太平洋火山带大喷发后数年内, 大陆东部随之开始发生强震丛集活动。

大陆东部强震丛集的首发强震大都在西太平洋火山带大喷发后(丛集性大喷发以首发计)0.5~5年内开始发生, 首发地震滞后火山大喷发时间平均为2.7年。

表 1 西太平洋火山带强烈喷发与大陆东部强震活动分段及有关特征情况表(VEI≥5, M≥6)

Table 1 The large eruptions in the western Pacific volcanic belt and the segmentation of strong earthquake activity in the eastern China and the related characteristic(VEI≥5, M≥6)

序号	火山大喷发(VEI≥5)					相应的强震活动(M≥6)						
	时间/年	参考地名	VEI	板块运动	时序分段	持续时间/年	Σn (n)	v (n/a)	M_m	$\Sigma E\frac{1}{2}$ ($10^7J\frac{1}{2}$)	$\Sigma E\frac{1}{2}/a$ ($10^7J\frac{1}{2}/a$)	火山、地震活动状态
1	1586	东爪哇	5	A、E、WP 汇聚	1587—1631	45	16	0.356	7½	53.27	1.184	火山连续喷发, 1600—1611
	1593	东爪哇	5	A、E、WP 汇聚								华南强震高潮, 华北强震活动
2	—	—	—	—	1632—1641	10	0	—	—	—	—	火山间歇、强震平静
3	1640	北海道	5	WP 俯冲 E	1642—1658	17	3	0.176	6	2.37	0.139	火山连续喷发, 华北强震弱活动
	1641	棉兰老	5	P、E、WP 汇聚								
	1650	勘察加	5	WP 俯冲 E	1659—1664	6	6	0.194	8½	110.79	3.574	火山连续喷发 1668—1695 华北强震高潮
	1660	新几内亚	6	WP、A 汇聚								
	1663	北海道	5	WP 俯冲 E	1665—1695	31	6	0.194	8½	110.79	3.574	
	1667	北海道	5	WP 俯冲 E								
	1673	马鲁古	5	P、E、WP 汇聚	1665—1695	31	6	0.194	8½	110.79	3.574	
	1680	苏拉威西	5	P、E、WP 汇聚								
4	—	—	—	—	1696—1708	13	1	0.077	6	0.79	0.061	火山间歇、孤立强震
5	1707	富士山	5	WP 俯冲 E	1709—1739	31	4	0.129	8	40.76	1.31	火山喷发, 华北强震
	1739	北海道	5	WP 俯冲 E								
6	—	—	—	—	1940—1814	75	2	0.027	6	1.58	0.02	火山大喷发长期间歇期 强震长期平静期, 有孤立强震
	—	—	—	—								
7	1815	松巴哇岛	7	A、E、WP 汇聚	1815—1831	17	5	0.294	7½	17.47	1.03	VEI 7 级特大喷发, 华北新一轮强震活动期开始
	1822	西爪哇	5	A、E、WP 汇聚								
8	—	—	—	—	1832—1845	14	0	—	—	—	—	火山间歇、强震平静
9	1854	勘察加	5	WP 俯冲 E	1846—1853	8	4	0.500	7	8.60	1.075	火山间歇、华北强震弱活动
					1855—1882	28	7	0.250	6½	9.89	0.353	火山大喷发 华北、华南强震活动
10	1883	西爪哇	6	A、E、WP 汇聚	1883—1887	5	—	—	—	—	—	
	1886	新西兰	5	WP、A 汇聚								
					1888—1906	19	4	0.211	7½	13.64	0.718	华北、华南、东北强震活动
11	1907	勘察加	5	WP 俯冲 E	1907—1909	4	—	—	—	—	—	—
					1910—1932	23	14	0.609	7.3	29.97	1.303	1911—1921 华南强震高潮,
	1933	千岛群岛		WP 俯冲 E	1934—1948	15	10	0.667	7	17.66	1.177	华北、东北强震活动
12	1956	勘察加	5	WP 俯冲 E	1949—1965	17	0	0	—	0	0	1 次火山大喷发、强震平静
13	1963	巴厘岛	5	A、E、WP 汇聚	1966—1984	19	11	0.579	7.8	50.47	2.66	1966—1976 华北强震高潮
14	—	—	—	—	1985—1993	9	0	—	—	—	—	火山间歇、强震平静
15	1991	吕宋岛	6	P、E、WP 汇聚	1994—1998	8	6	0.750	7.3	13.16	1.64	1994—1995 小高潮、华北强震活动
16	—		—	—	1999—2021	23	1	0.043	6.2	1.1	0.04	火山间歇、孤立强震
17	2022	汤加	5	WP、A 汇聚	2022—?							?

注: A—澳大利亚板块(Australian plate), E—欧亚板块(Eurasian plate), P—菲律宾海板块(Philippine sea plate), WP—西太平洋(Western Pacific plate)

(2)强震丛集段持续时间一般在15至30年左右,平均约23年,一般发生4~16次强震,平均每次丛集时段发生7.8次强震。

(3)在强震平静时段大都没有强震发生,个别强震平静时段有孤立强震发生。强震平静时段一般持续10~17年,平均14.3年。

(4)2个突出的现象。①大陆东部强震高潮与西太平洋火山带连续大喷发密切相关。大陆东部强震活动高潮前,先有西太平洋火山带连续性大喷发。例如,1600—1611年东南沿海强震活动高潮前,曾先发生1586及1597年2次VEI 5级火山大喷发。又如,1668—1695年华北第三活动期强震高潮期间及此前,在1640—1650年连续发生3次VEI 5级大喷发的背景上,自1660—1680年又相继发生5次火山大喷发,其中包括1660年巴布亚新几内亚长岛火山(Long island)的6级巨大喷发,这是430多年来西太平洋火山带大喷发仅有的现象;相应的,这次强震高潮也是大陆东部历史上仅有的最强烈的地震高潮活动;②大陆东部强震长期平静也与西太平洋火山带长期间歇密切相关。在1739年北海道樽前山(Tarumai)火山VEI 5级大喷发后,至1815年印尼松巴哇岛坦博拉(Tambora)火山VEI 7级特大喷发,西太平洋火山带出现长达75年的间歇期。与此完全同步,大陆东部在1739年宁夏平罗银川间8级特大地震后同样出现强震平静期,期间只发生2次孤立的6级地震,直至1815年10月23日山西平陆6¾级强震发生(滞后于坦博拉火山7级巨大喷发约6个月),华北(也是大陆东部)开始新一轮强震活动。这是西太平洋火山带大喷发与大陆东部强震关系的又一个突出的现象。

(4)西太平洋火山带大喷发多数发生在中国大陆东部强震平静时段后期。火山大喷发的时间均处于强震平静持时已达80%以上的时间段里,平均平静持时高达89%。之后数年内大陆东部强震

平静打破,开始新一轮强震丛集活动。

(5)大陆东部强震丛集与西太平洋环火山带大喷发相对应的现象似有区域差异性。华北地震区(共67次强震)参与了所有丛集强震活动,与西太平洋火山带各火山弧大喷发没有明显差别;华南地震区(共22次强震)参与了6段强震丛集活动,其中5段对应菲律宾及以南火山弧的大喷发,1段对应勘察加—千岛群岛的火山喷发;东北地震区(共5次强震)主要参与1段强震丛集活动,对应勘察加—千岛群岛的火山的连续性大喷发。由此初步认为,大陆东部强震丛集似与西太平洋火山带大喷发有分区对应差异。但因样本较少,具体特点尚需待扩展资料进一步分析。这可能与华北、华南和东北地震区地质结构和构造、边界地球动力学等精细条件的差异有关。

综上所述,可以得到这样的认识:太平洋板块、菲律宾海板块及澳大利亚板块对欧亚大陆板块的俯冲作用和深部物质热运移可能有一二十年尺度的增强——减弱微动态变化,这是西太平洋火山带大喷发——间歇与大陆东部强震丛集——平静韵律性活动的共同“节拍器”。西太平洋火山带大喷发可能为大陆东部新的强震丛集活动即将开始发出警报“哨声”,但不认为西太平洋火山带大喷发可以“触发”或“诱发”大陆东部强震活动,二者是同源异象。

3 火山大喷发后强震活动预测

3.1 依据强震活动有关统计参数预测

前已述及,大陆东部强震总体时间序列属于丛集分布,并分成多个丛集—平静相间的分段活动。对于每一丛集或平静时段与地震趋势判定相关的参数计算结果及其统计学类型判定归纳于表2。

表2 大陆东部强震丛集分段活动有关参数及其分布类型表

Table 2 Table of related parameters and distribution types of segmentation of strong earthquakes cluster activity in eastern China

参数	火山大喷发间隔/(年)	相继强震间隔/(年)	火山大喷发后首发强震时间/(年)	强震丛集持续时间/(年)	丛集段强震次数/(次)	强震平静时间/(年)
均值(μ)	28.55	5.70	2.68	23.27	7.5	14.5
标准差(σ)	16.99	11.39	1.87	9.94	4.09	4.99
变异系数(C_v)	0.56	2.00	0.70	0.43	0.55	0.34
统计分布类型	准周期分布	准丛集分布	准泊松分布	准周期分布	准周期分布	准周期分布

一般来说,对于准周期分布的参数,可按均值做出粗略估计;对于准丛集分布的,可做分丛模型判断,并以相应方法分丛进行预测;对于准泊松分布的,可以建立概率统计模型进行预测。

表2中属于准周期分布的有,西太平洋火山带大喷发时间间隔(平均约28.5年)、强震丛集活动平均持续时间(约23.3年)、每次强震丛集平均发生 $M \geq 6$ 级地震次数(约7.5次),强震平静时段的平均持续时间(约14.5年)等,可以按平均周期推测。

由于大陆东部强震总体时间序列 C_v 值为2.00,属于丛集分布,可以分成多个丛集—平静相间的分段活动,对各个分段的强震时间分布进行函数拟合,可以分别估测各丛的活动情况;对于准泊松分布的,可以按一定数学模型进行概率预测。

值得注意的是,强震平静持续时间 δ 值(0.34)与火山大喷发间歇之间的时间间隔 δ 值(0.56)都属于准周期分布,可见二者具有相似的统计学模型特征,这隐含着二者具有相同地球动力学来源的信息。

3.2 火山大喷发后首发强震时间分布的概率预测

据上述分析,西太平洋火山带大喷发可能是大陆东部新一轮强震丛集活动即将开始的“哨声”,火山大喷发后始发强震时间基本服从准泊松分布,首发强震平均2.7年,大多数在5年内发生,但少数也可延迟,具有随机性。为进一步估计大陆东部强震丛集开始的时间,采用有关数学模型进行概率预测。

从火山大喷发后强震始发次数随时间(以年统计)直方图显示为单峰分布(图4)。由实测值统计,其均值 $\mu = 2.7$,众数 $m_0 \approx 2.0$,中位数 $m_e \approx 2.3$,因此其属于正偏态分布^[41-42]。同样由此计算而得的强震概率(频率)密度分布也属于正偏态分布(图4(a))。图4(b)是强震累积概率曲线,总体为对数分布。以最小二乘法拟合,可以得到西太平洋火山带大喷发后大陆东部首发强震的时间概率模型表达式:

$$P = a + b \ln t \quad (2)$$

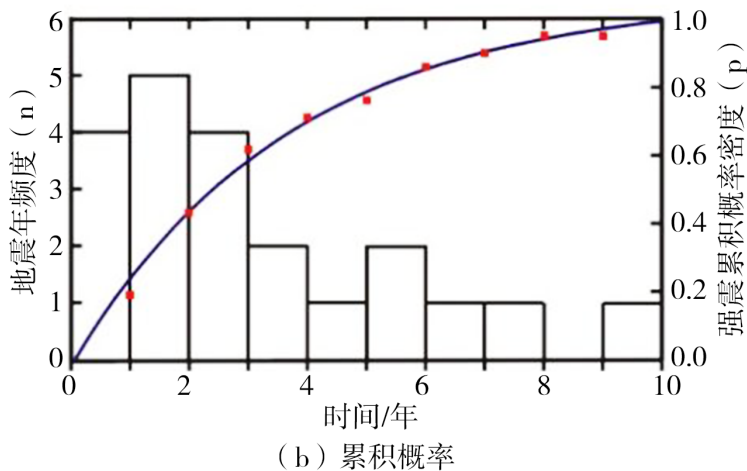
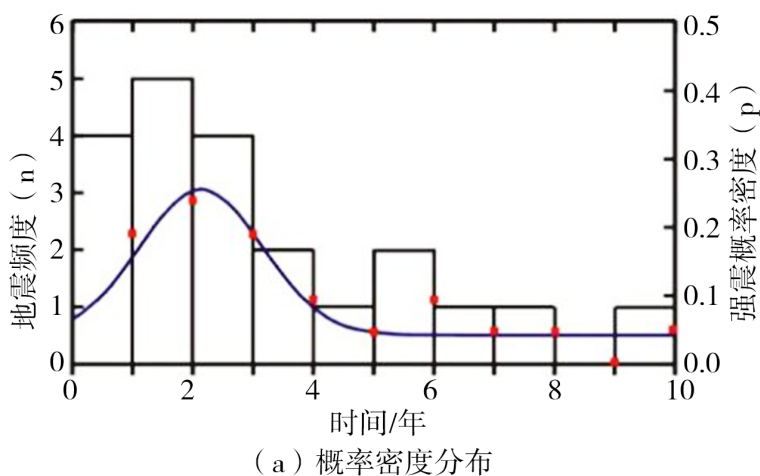
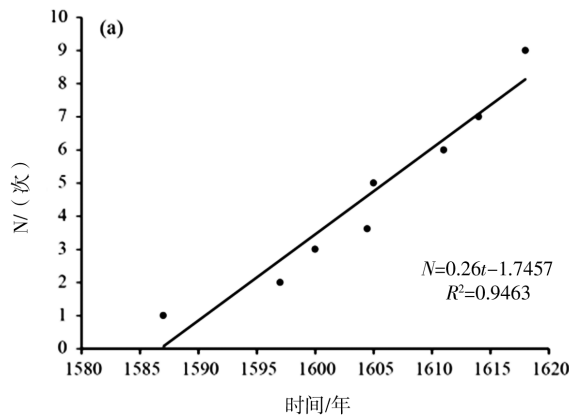


图4 火山大喷发后 首发强震时间直方图及概率分布图

Fig.4 Time histogram and probability distribution of the first strong earthquake after volcanic eruption

式中, $0 < t \leq t_n$ 。利用(2)式可以粗略估计火山大爆发后不同年份强震首发概率, 依此做出强震发生的概率预测。

本文 $t_n = 10$, 经最小二乘法拟合, 求得 $a = 0.1816$, $b = 0.3541$ 。这样, 可以估计不同年限内强震发生的概率。



3.3 丛集时段强震预测

利用强震丛集时段的强震累积次数(N)随时间的统计分布类型, 可以对每一丛后续强震发生时间进行估计。其分布类型可能不同, 图5给出2个类型的例子。具体操作可以在发生3、4次强震后进行试算, 并不断追踪修正。

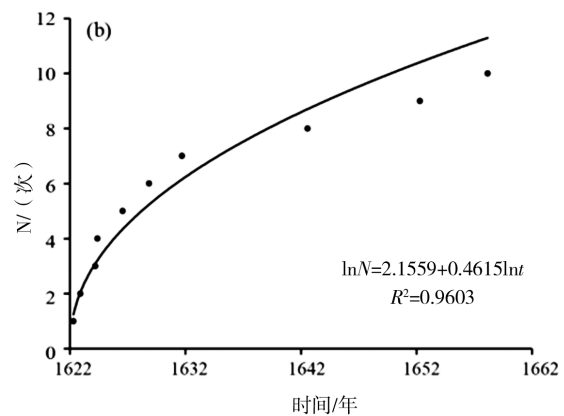


图5 大陆东部 $M \geq 6$ 级强震丛集时段地震 $N-t$ 分布图

Fig.5 $N-t$ distribution map of earthquakes in the cluster period of strong earthquakes with $M \geq 6$ in eastern China

以上有关预测方法依具体数据拟合试算择优选取。

3.4 汤加火山大喷发后大陆东部强震趋势估计

综合以上研究结果推测, 2022年1月15日汤加VEI 5级火山大喷发后, 未来3、6、8、10年内大陆东部发生 $M \geq 6$ 级强震累计概率 P 分别约达0.6、0.8、0.9、1.0; 计未来强震可能活动十几年, 发生数次强震。考虑到华北、华南地震区已经处于活动期的后期, 这次强震丛集活动可能较弱。

需要指出, 大陆东部强震活动特性是由各地岩石圈特性、地震地质构造条件、地球物理学与地球动力学环境等所综合决定, 本文只是以西太平洋火山带大喷发这样一个侧面, 轮廓性粗略分析大陆东部强震活动趋势, 其局限性是难免的。大陆东部强震大形势分析需要采用多种资料、利用多个方法分析的基础上, 经综合研究得出结论。

致谢: 对许建东教授在火山资料收集方面给予的帮助, 罗灼礼教授、林趾祥研究员、汤永安研究员、王正尚高工等提出的宝贵意见, 一并表示衷心谢忱!

参考文献

- [1] 张宣, 蒋明睿. 汤加火山喷发, 本世纪最强[N/OL]. 新华日报, 2022-01-26(12)[2022-10-12]. http://xh.xhby.net/pc/con/202201/26/content_1025394.html.
- [2] Yuen D A, Scruggs M A, Spera F J, et al. Under the surface: pressure-induced planetary-scale waves, volcanic lightning, and gaseous clouds caused by the submarine eruption of Hunga Tonga - Hunga Ha'apai volcano[J]. Earthquake Research Advances, 2022(03): 1-13
- [3] 阮煜琳. 中国沿海海域于16日凌晨监测到海啸波未造成灾害性影响[N/OL]. 新华日报, 2022-01-16 [2022-08-26]. <https://xw.qq.com/cmsid/20220116A05CJY00>.
- [4] 成良田. 汤加火山喷发石浦监测到全国最大海啸波[EB/OL]. 中国宁波网, 2022-01-17 [2022-08-26]. <http://news.cnnb.com.cn/system/2022/01/17/030322304.shtml>.
- [5] 吕品姬, 李正媛, 孙伶俐, 等. 2022年汤加火山喷发对中国大陆地应变观测的影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 927-933.
- [6] 许建东, 王佳龙. 汤加海底火山喷发特征与灾害启示[J]. 城市减灾, 2022(1): 1-6.
- [7] 王佳龙, 许建东. 从汤加火山喷发看不可忽视的火山之灾[J]. 中国机关后勤, 2022(1): 72-75.
- [8] 宋雨佳, 曹戎机, 盘晓东, 等. 汤加火山2022年喷发回顾[J]. 地球与行星物理评论, 2022, 53(2): 228-232.
- [9] 冯丽妃, 高雅丽. 汤加火山爆发缘何搅动半个地球[N]. 中国科学报, 2022-01-18(1)[2022-10-12].

- [10] 周飞飞. 从板块俯冲理论看汤加火山喷发[N]. 中国自然资源报, 2022-01-26(5)[2022-10-12].
- [11] 刘钊. 中国气象局专题研究汤加火山喷发对气候影响部署应对工作[N]. 中国气象报, 2022-01-26(5)[2022-10-12].
- [12] 胡羽丰, 李振洪, 王东, 等. 2022年汤加火山喷发综合遥感快速解译分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(2): 242-251.
- [13] 丁国瑜, 卢演传. 对中国现代板内运动状况的初步探讨[J]. 科学通报, 1986(18): 1412-1415.
- [14] 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 33(S1): 12-20.
- [15] 藏绍先, 宁杰远. 西太平洋俯冲带的研究及动力学意义[J]. 地球物理学报, 1996, 39(2): 188-202.
- [16] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 中国及邻近海域地球内部三维结构及动力学研究[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 497-503.
- [17] 许志琴, 杨经绥, 嵇少承, 等. 中国大陆构造及动力学若干问题的认识[J]. 地质学报, 2010, 84(1): 1-29.
- [18] Newhall C G, Self S. The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism[J]. *Geophysical Research (Oceans and Atmospheres)*, 1982, 87(C2): 1231-1238.
- [19] De la Cruz-Reyna S. Poisson distributed patterns of explosive eruptive activity[J]. *Bulletin of Volcanology*, 1991, 54(1): 57-67.
- [20] 洪汉净, 于泳, 郑秀珍, 等. 全球火山活动分布特征[J]. 地学前缘, 2003, 10(S1): 11-16.
- [21] 洪汉净, 陈会仙, 赵谊, 等. 全球地震、火山分布及其变化特征[J]. 地震地质, 2009, 31(04): 573-583.
- [22] 洪汉净. 近年来全球地震与火山活动分析[J]. 自然杂志, 2011(05): 266-270.
- [23] 洪汉净. 火山预测与预警[M]. 北京: 地震出版社, 2013.
- [24] 刁守中. 我国火山地震事例[J]. 华南地震, 2019, 39(S1): 1-10.
- [25] 王欢, 郝志新, 郑景云. 1750—2010强火山喷发事件的时空分布特征[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 134-140.
- [26] 李靖. 近一千年世界火山活动与中国旱涝分布的关系[D]. 北京: 中国气象科学院, 2005.
- [27] 蒋珊珊. 近540年强火山喷发对中国地区降水的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [28] 秦四清. 火山活动与火山喷发指数[EB/OL]. 2022-01-22 [2022-05-16]. <https://blog.sciencenet.cn/blog-575926-1322162.html>.
- [29] 陈理. 新西兰陶波火山每2000年爆发一次[J]. 环球人文地理, 2012(3): 33-37.
- [30] 尹延鸿(编译). 新西兰陶波火山带是一个弧后扩张系统[J]. 海洋地质动态, 1992(8): 22.
- [31] 国家地震局震害防御司. 中国历史强震目录(公元前23世纪—公元1911年)[M]. 北京: 地震出版社, 1995.
- [32] 中国地震局震害防御司. 中国近代地震目录(公元1912年—1990年, $M_s \geq 4.7$)[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.
- [33] Kagan Y Y, Jackson D D. Long-term earthquake clustering[J]. *Geophys J Int*, 1991, 104(1): 117-133.
- [34] 罗灼礼, 闻学泽, 罗伟. 中国大陆原地复发强震的基本特征及其预测[J]. 地震, 1995, 5(1): 1-11.
- [35] 罗灼礼, 孟国杰. 关于地震丛集特征、成因及临界状态的讨论[J]. 地震, 2002, 22(3): 2-14.
- [36] 毕金孟, 宋程, 马永, 等. 芦山两次强震序列活动特征及余震预测效能对比分析[J]. 地震研究, 2023, 46(2): 204-215.
- [37] 马宗晋, 傅征祥, 张郢珍, 等. 1966—1976年中国九大地震[M]. 北京: 地震出版社, 1982.
- [38] 任镇寰, 罗振暖, 秦乃岗. 华南地震区地震活动基本特征与地震大形势再研究[J]. 华南地震, 1998, 18(1): 40-49.
- [39] 郭培兰, 黄惠宁, 李莎, 等. 华南西部地区震群活动与中强震关系研究[J]. 华南地震, 2022, 42(04): 86-93.
- [40] 阎春恒, 周斌. 华南沿海地震带5级以上地震中期向短期过渡的跟踪预测策略[J]. 华南地震, 2022, 42(04): 26-33.
- [41] 贾乃光, 张青, 李永慈. 数理统计[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [42] 刘岩, 陈朝晖. 基于正偏态分布模糊数的专利价值实物期权评估模型[J]. 财会通讯, 2015(1): 119-123.