

华南沿海温泉分布与地震活动关系初探^{*}

钟建强 周蒂

(中国科学院南海海洋研究所)

提要 华南沿海温泉分布与新构造运动关系密切。温泉和地震是活动断裂体系中既相辅相成又互为消长的两个侧面。一方面,两者之间存在正相关关系,即中高温温泉密集区(带)地震(包括强震)活跃,温泉稀少区(带)地震微弱;另一方面,温泉的过度集中反而降低了该地区的强震发生可能性。笼统认为强震发生于非地热异常场的说法不确切,易引起误解。

关键词 华南沿海 温泉与地震 三带特点 成因联系

研究温泉分布与地震活动的关系,实质是探讨热震关系中地震发生的地热场背景及其区域性构造力源的问题。温泉既以流体、溶体和载热体的物理形式,又以氢氧化合物的化学形式介入于岩石的力学性质中,因此,它与围岩之间的物理化学特性将对地震活动产生不可忽视的影响。现把华南沿海地区约400个温泉、近200个4级以上地震和少数第四纪火山等有关资料绘制成图1和图2。

除水文地质条件外,温泉的产生还与区域地热场有关。地热场的热源则与构造运动、岩浆活动、放射性元素蜕变等所产生的热源有关。此外,还有地球余热和重力分异、地球转动、月地潮汐、矿物物理化学变化等所产生的少量热能。

据研究,本区的温泉分布与放射性元素蜕变产生的地热场关系不密切^[1],近代地热异常显著地区放射性元素含量普遍低于平均含量^[2],尚未发现区内的温泉分布与放射性元素富集地区存在明显的关系^[1、3、4]。

Mckenzie (1976)认为,熔融岩浆冷却到稳定状态只需20—40Ma。鉴于本区广泛出露的花岗岩系绝大多数形成于燕山期(60—70Ma以前),新生代岩浆活动仅局限于雷琼、福建漳浦等地区,因此普遍认为本区的温泉分布与岩浆活动没有成生的必然联系。然而,不能否认地热场的生成和分布与中生代以来大陆裂谷或火山—岩浆热幕侵入—喷发作用存在继承性联系。

^{*} 本文承蒙刘以宣研究员的指导和提供部分资料,特致谢忱。

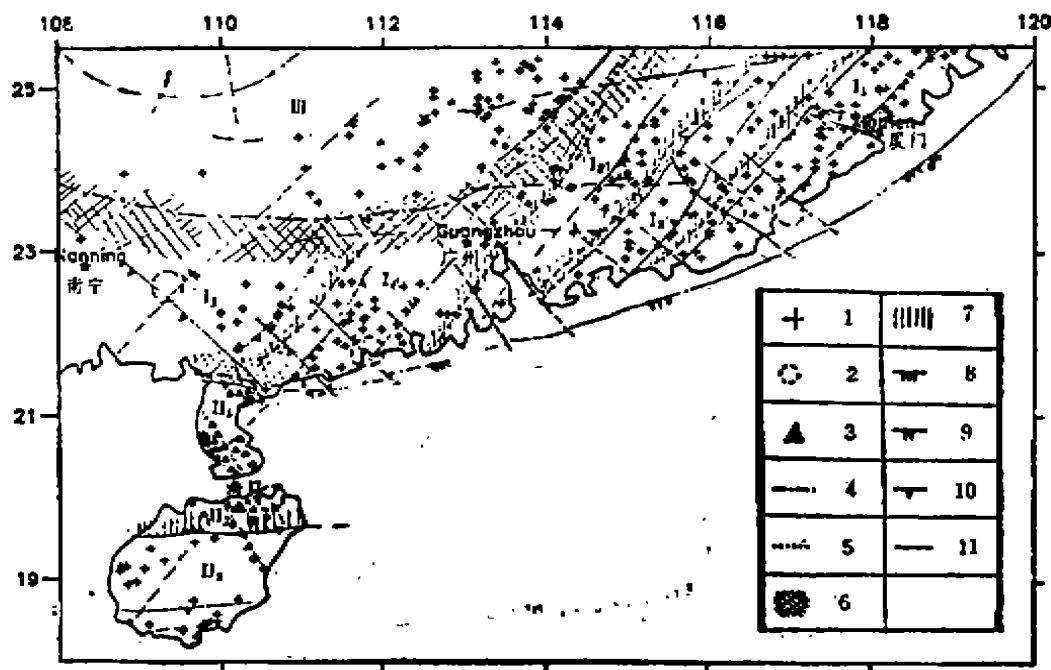


图1 华南沿海温泉及第四纪火山分布图

Fig. 1 Distribution of hot spring and volcano in Quarternary along South China Coast

1. 温泉; 2. 温泉空白窗; 3. 火山; 4. 温泉分区界; 5. 温泉分带界; 6. 温泉“空白带”; 7. 温泉空白堤; 8. 强活动断裂; 9. 中活动断裂; 10. 弱活动断裂; 11. 微活动断裂
I 闽粤桂温泉区; I₁. 厦门—汕头温泉带; I₂. 莲花山温泉带; I₃. 河源温泉带; I₄. 阳江温泉带; I₅. 廉江—灵山温泉带; II. 雷琼温泉区; II₁. 雷州半岛温泉带; II₂. 琼岛北温泉带; II₃. 琼岛南温泉带; III. 南岭温泉区

温泉常是地热异常场宏观现象的反映,也是新构造运动,尤其是活动断裂的标志之一⁽⁸⁾。对比温泉分布与活动断裂的特征,可见:

(1) 自西北向东南,温泉密度增大,泉温升高,中高温温泉的比例上升。这与活动断裂的活动性在同方向上逐渐增强的趋势一致。换句话说,温泉密度、泉温与活动断裂活动性强弱有关,活动断裂越活动,其温泉密度常越大、泉温越高。如南澳中活动断裂较海丰弱活动断裂活动性强,前者的温泉密度、泉温和地震活动等均较后者的大。

(2) 温泉在总体上呈NEE向宽带状分布,并可划分为闽粤桂、雷琼和南岭等三个温泉区(图1,表1)。其中前两者分别细分为五个和三个温泉带。温泉区和温泉带与活动断裂的格局吻合。

(3) 温泉区之间存在宽50—100Km以上的温泉“空白带”,温泉带之间常有宽20—50Km的温泉“空白堤”,温泉带内还常有被温泉群包围的、直径30—40Km的温泉“空白窗”(图1)。

(4) 温泉出露点与NE和NW向的活动断裂关系密切,主要表现在温泉受NE向活动断

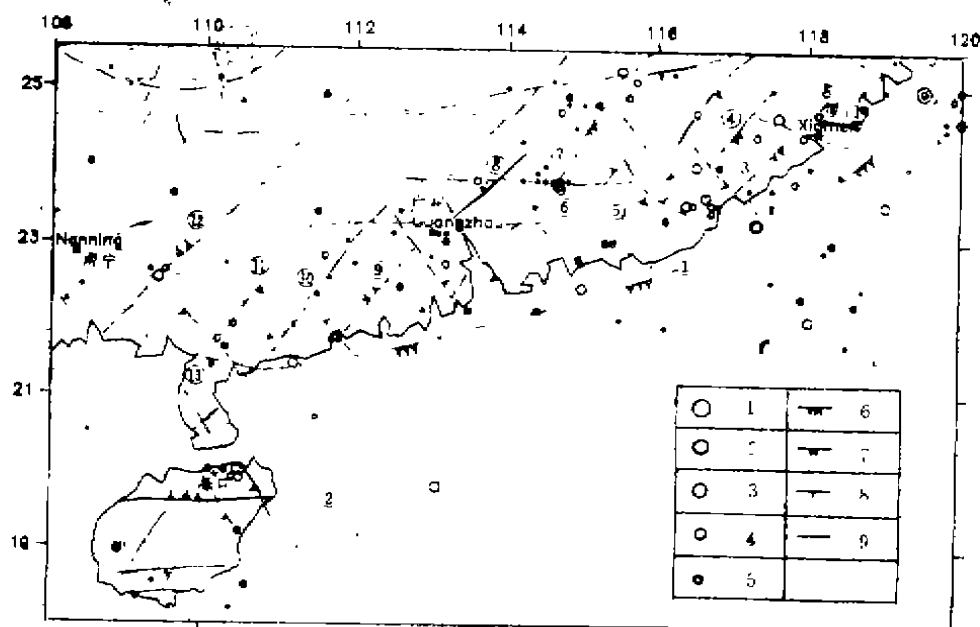
表1 华南沿海温泉分区及其基本特征

Table 1 Distribution of hot springs and their basic characters along South China Coast

温 泉 区	地壳厚度* (Km)	走向	温 泉	温泉密度 (个/10°Km²)	M≥6级地震 (个)	M≥5级地震 (个)
闽粤桂	34—36	NEE	中、高温为主	8—10	7	40
雷、琼	31—36	EW	中温为主	6—7	2	7
南 岭	37—38	EW	低温为主	5—6	0	3

*据余振华(1986)资料

裂控制, 并主要分布在NE向活动断裂被NW向活动断裂切割部位的上盘. 局部性泉群常沿NW向活动断裂溢出.

图2 华南沿海地震 ($M_s \geq 4$) 活动与活动断裂Fig. 2 Activity of earthquakes ($M_s \geq 4$) and active rift along South China Coast

1. $M_s \geq 8$ 级地震; 2. $7 \leq M_s < 8$ 级地震; 3. $6 \leq M_s < 7$ 级地震; 4. $5 \leq M_s < 6$ 级地震; 5. $4 \leq M_s < 5$ 级地震; 6. 强活动断裂; 7. 中强活动断裂; 8. 弱活动断裂; 9. 微活动断裂
①滨海; ②安定; ③南澳; ④陆丰; ⑤海丰; ⑥深圳; ⑦河源; ⑧广从; ⑨阳江; ⑩吴川; ⑪廉江; ⑫灵山; ⑬雷北

由上可知, 本区的温泉分布与活动断裂关系密切. 也就是说, 本区的温泉分布可能主要由新构造运动引起. 通过温泉热释放反演的近代地热异常场发现, 它与燕山期岩浆岩及放射

性元素蜕变的关系并不明显,而与新构造运动息息相关;区内绝大多数温泉的热源属新构造运动时期以来的地壳构造运动的构造热能^[2]。

二

温泉分布及其特征常反映活动断裂的类型及其活动性,高温($>60^{\circ}\text{C}$)、中温($40-60^{\circ}\text{C}$)温泉出露于中活动、弱活动和微活动断裂上的比例依次降低。而地震活动也明显地依赖于活动断裂的类型及其活动性。

本区的地震活动主要存在于海岸带附近, ≥ 6 级地震更是如此(图2)。活动断裂、地形变、海岸升降、断块运动等资料表明,海岸带附近具较强的新构造运动。同样,海岸带附近温泉密布且泉温多属中、高温的现象也支持这一观点。对照温泉分布与地震活动之间的空间关系,发现:

(1) ≥ 6 级地震发生于中高温温泉区的高温、中温温泉带;低温温泉区或温泉带未曾发生过6级以上地震,4.0—5.8级地震也较稀少;中、高温温泉带与地震带大体一致,即地震与温泉表现为正相关(表2)。换句话说,地震与高地热异常场呈正相关。如厦门—汕头带是高温温泉带,地震活动频度高、强度大;南岭区属低温温泉区,地震活动较平静,未曾发生过6级以上强震, < 6 级地震也少有发生。

表2 闽粤桂和雷琼两温泉区温泉分带基本特征

Table 2 The basic characters of hot spring zonings in the studying area

温泉区	温泉带	走向	泉温	温泉密度 (个/ 10^4Km^2)	≥ 6 级地震(个)	≥ 5 级地震(个)	主要活动断裂
闽 粤 桂	厦门—汕头	NE	高温为主	15—17	3	15	南澳*、陆丰*
	莲花山	NE	中温为主	12—14	0	4	海丰**, 深圳**
	河源	NE	中、高温为主	14—15	2	9	河源
	阳江	NE	中、高温为主	12—13	1	6	阳江*, 广从**, 吴川**
	阳江—灵山	NE	中、高温为主	7—8	1	6	灵山*, 廉江**
雷 琼	雷州半岛	DW	中温为主	8—10	0	0	雷北**
	琼岛北	EW	高温为主	3—6	2	5	定安***
	琼岛南	EW	中、高温为主	9—10	0	2	九所—陵水**

*中活动断裂;

**弱活动断裂;

***强活动断裂;

(2) ≥ 6 级地震发生于中、高温温泉带的高地热异常地段相对低地热异常部位,即温泉“空白窗”,且有地热异常反差愈大,震级愈高,频度愈密的趋势。如潮汕、漳州、阳江—河源、琼山和灵山等地区,它们主要位于高地热异常带受NEE、NW和NE向活动断裂切割的相对低地热异常的部位上(图1,图2)。

(3) 中、高温温泉出露地区,小震($M_s < 4.0$)频繁,且有小震发生率随温泉升高而增大的趋势(图3),即小震活动与温泉分布也常呈正相关关系。如海丰弱活动断裂未曾发生过6级以上地震,但现代小震频度甚高且明显成带。这与该带温泉密布、活动方式可能以

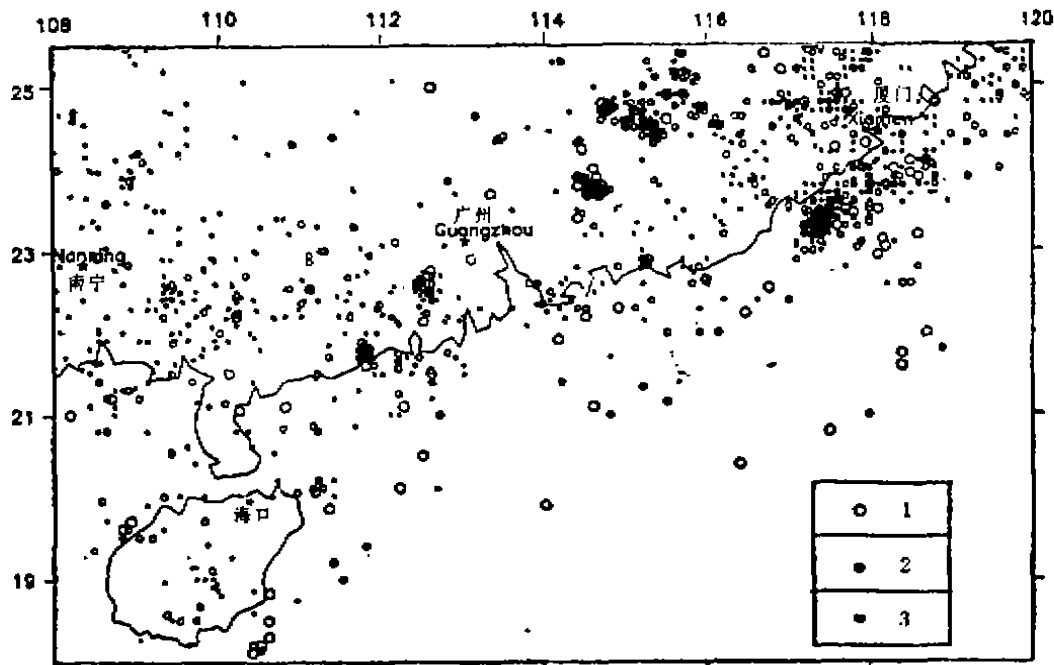


图3 华南沿海小震 ($M_s < 4$) 活动分布图 (1970—1986)

Fig. 3 Distribution of small seismicity ($M_s < 4$) along South China Coast

1. $3.0 < M_s < 4.0$ 级地震; 2. $2.0 < M_s < 3.0$ 级地震; 3. $M_s < 2.0$ 级地震.

蠕变滑动为主有关。即使在同一活动断裂的不同地热异常段，也常出现地震与温泉同步增长的趋势。如海丰弱活动断裂的梅垌段，温泉常见且以中、高温为主，该段发生过5级地震2次，近年来发生小震数百次。

(4) 从温泉推测近代地热异常场的形态特征，导出近代构造运动的主压应力有自东而西由SE逐渐转为NS向的趋势。这与由震源机制解绘制的构造应力场基本吻合^[2]。

温泉和地震都是活动断裂存在及活动性强弱的标志之一。中、高温温泉一般沿中、强活动断裂呈串珠状分布，如沿南澳—陆丰、河源等中活动断裂分布；中、低温温泉出露于弱活动断裂，如广从、吴川、廉江等弱活动断裂。 ≥ 6 级地震震中常出现于中、高温温泉群中心几十公里外外缘少有温泉的构造部位，也就是说， ≥ 6 级地震的发展断裂上，中、高温温泉密集出露，而震中附近几十公里内的发震段落则常无温泉或少有温泉分布，形成温泉“空白窗”，如潮汕、阳江、河源等构造部位（图1）。 ≥ 6 级地震发生于温泉“空白窗”，并不是说 ≥ 6 级地震发生于非地热异常场，而是说 ≥ 6 级地震仅发生于高地热异常地段中相对低地热异常的部位。

上述表明， ≥ 6 级地震只发生于高地热异常带中相对低地热异常的部位，而并不是认为高地热异常场内不发生 ≥ 6 级地震。撇开研究背景而认为强震只发生于非地热异常场（区）的说法，看来易引起误解。

三

高地热异常场常与地壳减薄、莫氏面上拱及地幔物质上涌有关。高地热异常场的地壳深

处可能存在近似熔融状态的物质或上地幔向上拱起,使地壳处于更不稳定状态,局部地段易发生显著差异运动、集中应力而发震。本区的地壳厚度等厚线走向在西部为EW向,越过中部进入东部则转为NEE—NE向;地壳厚度自北往南逐渐减小,与温泉区主要呈NEE向分布,由北而南温泉密度增大和泉温升高的现象吻合,与海岸带附近地震活动增强的趋势一致。在雷琼盆地,地壳厚度约28—30km,该盆地可能属于陆缘裂谷,其活动断裂、地热异常场、第四纪火山和地震活动等,可能都与其下的地幔上拱有关,虽然在地表上出现的温泉较稀少,但在琼岛北温泉带中仍存在高地热异常场,这与该带地震活动较强有关。

此外,温泉分布出现NEE向成区、NE向成带、NW向成群的现象,可能与华南沿海深部断裂构造以EW—NEE向活动为主,区域构造格局在浅部受NE和NW向活动断裂控制为主有关。即深部地壳结构是地热异常场的主控因素,区域构造为其外在具体表现。NEE向断裂构造在地壳深部反映清楚,是深部构造的主要成分^[6]。虽然NW向活动断裂就其规模不能与NEE和NE向深大活动断裂相比,但它们却与温泉分布和地震活动密切相关。这与华南大陆总体受NM向挤压,NW向活动断裂产生引张或张剪有关。NW向张性活动断裂则使深部地下热水易沿其上升至地震而成温泉,这可能是温泉沿NW向成群排列的主因。而地震活动除主要受NEE向活动断裂控制外,与NE和NW向活动断裂(尤其与后者)的关系也很密切。上述两种认识的一致性,说明温泉与地震这两种宏观现象的产生存在着内在的、深层的联系,也就是说,温泉分布与地震活动存在内在的关系。

四

地震是地壳应力突然释放的一种方式,温泉则是地壳应力转化成热能并通过地下水循环而以热泉的方式连续带出地表的另一种方式。温泉和地震都是地壳应力的能量转换形式的外在表现,它们的表达式分别为:

$$Q = C(T - T_0)qt \cdots \cdots \textcircled{1} \quad (C \text{ 为系数})$$

$$\lg Q = 11.8 + 1.5M_s \cdots \cdots \textcircled{2}$$

因此,若知泉温(T)与当地平均气温(T_0)、泉流量(q),就可计算该温泉在某段时间(t)内从地壳深处带走的热量(Q),再由②式转换,得到对应的震级(M_s)。对福建170多处温泉的统计得,年释放热量达 $2.396 \times 10^{23} \text{ erg}^{[4]}$ ($2.396 \times 10^{15} \text{ J}$),与7.05级地震的能量相当;以每个温泉年释放热量 $1.44 \times 10^{20} \text{ erg}$ ($1.44 \times 10^{13} \text{ J}$)计,则相当于5.57级地震的能量。现把各温泉带每年带走的热量粗略统计于表3。

由上表可见,温泉带走的能量是相当可观的。之所以温泉密布地段少有强震,部分是因为温泉带走了相当大量的、由活动断层滑动中机械能转化的热能,使得地应力难以积累到岩石破裂而发震的程度。由此推测,琼岛北温泉带除存在强震构造外,强震活动与该带是高地热异常带,其上温泉稀少,随温泉流出地表的能量较少,因而把相当大量的能量集中于地壳且地震发生频度较低等因素有关;而莲花山温泉带从未发生过6级以上地震的原因,可能主要与该带属中地热异常带且温泉带走的能量较多、地震活动频度较高等因素有关。

此外,根据闽粤桂温泉区各温泉带年释放能量的统计,可见温泉带的活动趋势由强到弱依次为厦门—汕头带、河源带、阳江带、莲花山带和廉江—灵山带,这与华南大陆新构造运动由东南向西北活动性逐渐减弱的趋势基本一致,与地震活动和活动断裂在这个区域的活动

特征也大体吻合。

表3 闽粤桂和雷琼两温泉区温泉带年释放能量初步统计

Table 3 The preliminary statistics of releasing energy every year at the hot spring zonings in the studying area

温 泉 区	温 泉 带	年释放能量 ($\times 10^{14} \text{J}$)	相当能级的震级 (Ms)
闽 粤 桂	厦门—汕头	8.93	6.77
	莲 花 山	4.32	6.56
	河 源	4.61	6.58
	阳 江	3.46	6.49
	廉江—灵山	2.16	6.36
雷 琼	雷州半岛	1.58	6.27
	琼 岛 北	0.43	5.89
	琼 岛 南	3.31	6.48

五

温泉既可诱发地震，也可降低地震活动的强度，它们的相互作用于统一于活动断裂的统一体中。温泉的物理化学特性，对活动断裂及其地震活动的影响还表现为：

(1) 产生热应力场，加强孕震应力场；

(2) 热水较普通地下水具更活跃的物理化学特性，它能进一步降低断层面的力学性而引发地震；

(3) 热水汽化爆炸，也可诱发地震；

(4) 热水渗入断层面产生负压，减少有效正应力，降低岩石抗剪强度，扩大致裂作用，加强断层面弱化。那些已软化且有效正应力降低地段的岩块两侧将产生缓慢、无震或无强震的滑动。

由于温泉（或热液）上升渗入到断裂中，促使岩石和断层的软化而产生蠕滑；那些温泉（或热液）过多的地段，将引起地温较大幅度升高，围岩膨胀，断层蠕动量加大，出现较多的宏观现象；但由于过于软化，反而不易发生地震。相反，在此邻近的断层，温泉（或热液）渗入不多，引起该地段小量蠕滑，甚至有的地段还被锁住，因此这些地段容易积累应变能而产生地震（包括6级以上地震）。当热流流过断裂面时，裂缝端点则形成应力集中区，该应力大致与热流值成正比^[1]，这就是温泉密集、温泉较高地段地震活动频繁的动力源泉之一。一方面，温泉聚集的主干断裂既利于侧向挤压力的集中，又利于热物质（如温泉）的运移和热应力的集中，当这两种力同时作用的断裂的闭锁段逐渐积累的应力超过那里的岩石破裂强度时，围岩突然破裂一错动而发震；另一方面，由于受热，该围岩塑性较大且岩石较破碎，不易积累巨大应力，而易把应力传递给邻近温度较低且刚性强度较大的围岩，

使相邻的断层面上积累起强大的应力而发震。这可能是为什么6级以上地震震中常出现于离温泉群几十公里且宏观异常量不一定是最多最明显的地方的现象的原因。如河源、阳江等地震即其著例。

此外,地震对温泉也产生一些影响,如地震发生前,震中及其邻近地区的温泉受地震活动影响,出现泉温升高、流量增大或减少、水位升降、喷沙喷汽及所含化学成分发生变化等迹象。若能对这些现象加以分析、利用,对研究地震的产生或许也可起到辅助的作用。

参 考 文 献

- 〔1〕范光禄等,长乐—诏安断裂带热震关系的研究,华南地震,第2卷第2期,1982。
- 〔2〕黄坤荣,华南地区温泉热释放与地震关系,华南地震,第3卷第4期,1983。
- 〔3〕王寿林,华南地区温泉地震和活动性断裂关系的研究,华南地震,第2卷第4期,1982。
- 〔4〕王洪涛等,浅谈我国的火山、地热和地震,福建地震,第2卷第4期,1981。
- 〔5〕刘以宣,华南沿海区域断裂构造分析,地震出版社,1981。
- 〔6〕任镇毅等,南海北缘地震构造带地壳构造特征的研究,海南岛北部地震研究文集:78—87,地震出版社,1988。

A PRELIMINARY STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE DISTRIBUTION OF HOT SPRINGS AND THE ACTIVITY OF EARTHQUAKES ALONG SOUTH CHINA COAST

Zhong Jianqiang and Zhou Di

(South China Sea Institute of Oceanology, Academia Sinica)

[Abstract] The distribution of hot springs along South China Coast is closely correlated with Neotectonic movements. Hot springs and earthquakes present two aspects of an active fault system which not only complement but also contradict each other. On one hand, active earthquakes, including strong earthquakes usually occur in zones of dense medium to high-temperature hot springs, while weak earthquakes in zones of sparse hot springs. On the other hand, an undue concentration of hot springs in one area may reduce the possibility of strong earthquakes in that area. The concept that strong earthquakes take place only in non geothermal anomaly zones is misleading.

Key words) south China Coast, Hot spring and earthquake, Characteres in the spring zonings, Connection of contributing factor