

地形变场与现代地壳垂直运动及地震活动关系 初探(Ⅱ)——地凸凹区与地壳运动及地震活动的关系

郭维栋¹, 汤懋苍²

(1. 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室,
中国科学院大气物理研究所全球变化东亚研究中心, 北京 100029;
2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要 初步探讨了1987~1990年我国东部地形变场的分布特征及其与现代地壳垂直运动、地震带和中强地震震中分布的关系, 并进行了典型个例分析。结果表明: 现代地壳活动强烈区亦是地形变凸、凹中心的高发区。地凸、凹中心的分布与中强地震震中和地震带的分布比较吻合。地震易发生在地凸、凹区的接合部, 也即水平切应力最大的地区。闽粤地区的地形变场可以捕捉到台湾的强震信息。两个(或多个)地凸区的突然增强或合并对大震有临界促发作用。

关键词 地形变场; 地凸区; 地凹区; 地震; 地热涡

中图分类号 P315.72⁺5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-0844(2003)02-0112-07

0 前言

本文第一部分(见本刊2002年第1期)^[1]阐述了地形变场的数值计算方法及其物理意义, 指出引入场分析的方法不仅可以合理地弥补测站资料时空不连续的缺陷, 而且计算得到的地表形变场还可以很好地反映某些关键的地表形变特征——如地凸区、地凹区、鞍形场等。地形变场上的地凸/凹区与地温场上的高/低温区分别有很好的对应。地形变、地温、地震的配置关系符合“地热涡”的概念模型。

本文作为第二部分, 将就1987~1990年我国东部地形变场的总体分布特征及其与现代地壳垂直运动、地震带和中强地震震中分布进行比较, 并针对1989年10月大同6.1级地震进行典型个例分析。

1 地形变场与现代地壳垂直运动的关系

在1987~1990年逐月地形变场图上共出现地凸区178个, 地凹区155个。分析发现地形变中心的地理分布并不均匀, 倾向于集中出现在某些区域。将所有地凸区和地凹区的中心点绘在图上, 再将所研究区域划分为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的小单元, 然后标出每个小单元内出现的地凸区或地凹区中心的次数, 即得到图1和图2。在这两张图上还分别画出了地形变系统中心分布的高值轴线, 轴线穿过的地区即是地凸区或地凹区的高发区。

根据张祖胜等所绘的“现代地壳垂直形变速率图”^[2](图3), 可对比我们得到的地形变系统的总体分布特征与我国大陆地壳多年平均的形变特征的关系。如果单看地凸区与上升剧烈区或地凹区与下降中心区的对应关系并不很好, 例如华北南部到华中、川北到陇东为地凸中心多发区, 但同时又是地壳下降中心区。这可能是因为我们的地形变场仅有4年的资料的缘故。但综合看, 地凸、地凹区的中心区与现代地壳上升剧烈区和下降中心区(它们都是垂直形变的剧烈区)分布颇为一致。图3中有6个地壳上升中心区, 其中3个分布在我们的研究范围内, 即云贵高原、湖南、苏南—浙北三个地区。对比图1和图2, 其中云贵高原

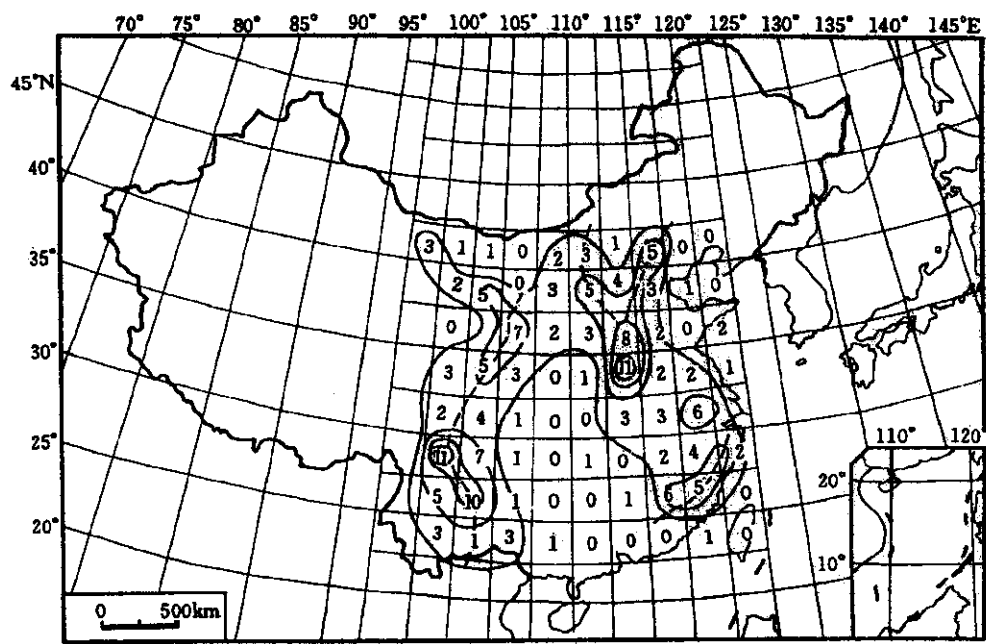


图 1 1987 ~ 1990 年地凸区中心的地理分布

Fig. 1 Geographical distribution of convex area in China during 1987 ~ 1990.

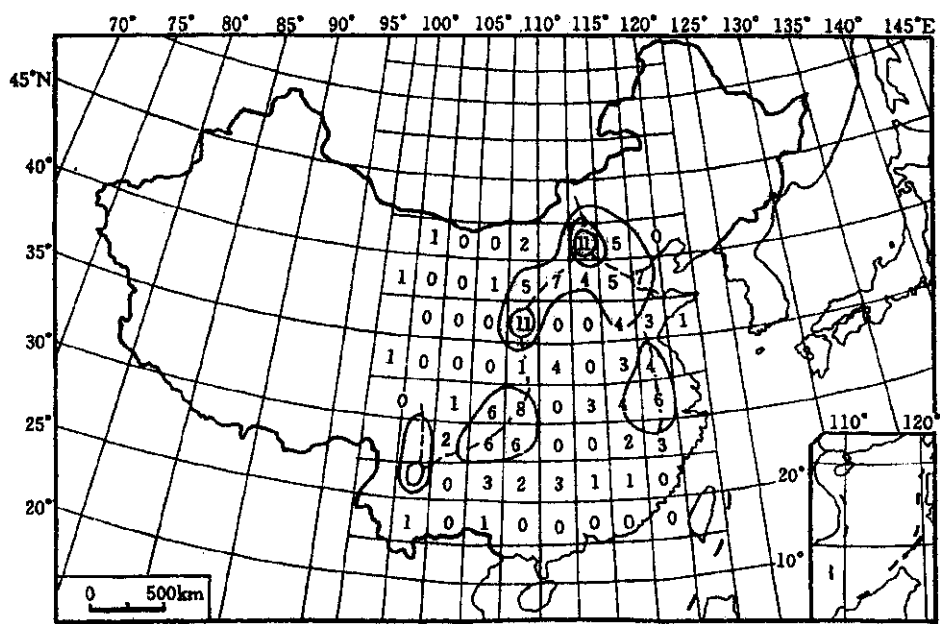


图 2 1987 ~ 1990 年地凹区中心的地理分布

Fig. 2 Geographical distribution of concave area in China during 1987 ~ 1990.

和苏南 - 浙北均为地凸、地凹中心密集区,而湖南仅在其西南部是一个地凸区的密集区,对此将在后面给出可能的解释。图 3 中的 8 块地壳下降中心区,在我们的研究范围内有 5 个,即祁连东段、川西 - 青南、河

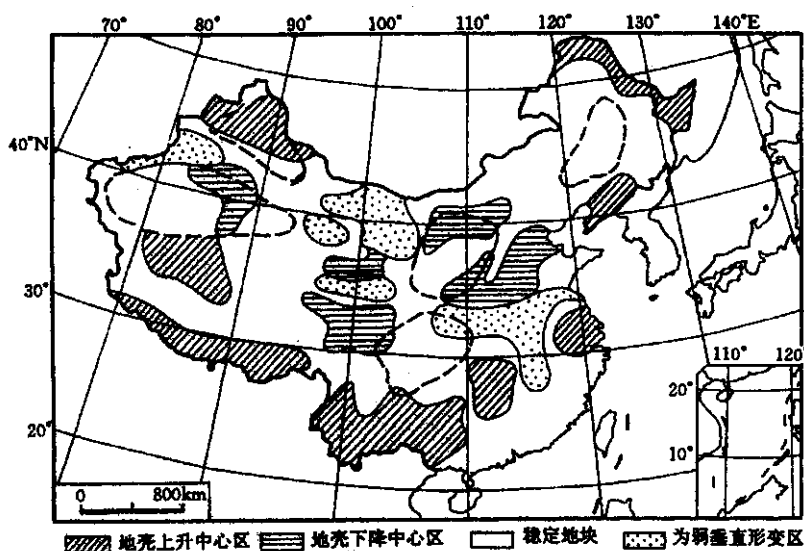


图3 现代地壳垂直形变速率图(张祖胜等,1989)

Fig. 3 Rate of crustal vertical deformation in China (from Zhang et al. 1989).

套北端、汾渭河谷、华北大部,经对比,它们亦是地凸、凹中心的密集区。这说明:现代地壳活动强烈(上升或下降)区亦是地形变凸、凹中心的活跃区,也就是说,地形变场上的地形变系统是有其地质构造背景的。

从图1可以看到闽粤沿海有一地凸中心的密集区,但在图3上无地壳活动强烈区与之对应。从40多年的地震震中分布图上,可知此带是一多震带(东南沿海带)^[3],也是地热流的一个高值带^[4],说明此区地下活动强烈。

图3中还标志了5处“稳定地块”,其中鄂尔多斯和四川盆地在本文研究范围内。可看出,它们相对于周围地区较少出现凸、凹中心。在文献[2]中,作者规定:凡垂直形变速率的绝对值小于 1 mm/a ,且其水平梯度小于 $1\text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}/200\text{ km}$ 的地区为地壳垂直形变稳定区(图3),研究范围内有内蒙西段、甘、青南部及淮河流域。对比发现它们也是地凸、凹中心的少发区。这表明地下活动弱或许是其地壳稳定的基本原因。

对比图3与地凸、凹图上的空白地带,它们亦吻合很好。

通过上述对比可以得出结论:在地壳活动强烈的地区,也是地凸、凹中心的易发区;反之,则较少出现地形变场的凸、凹中心。据汤懋苍等人的研究^[5],在地壳活动强烈的地区“地热涡”也活跃;在地壳活动平静(或稳定)的地区,“地热涡”亦不活跃。这一结果暗示着反映构造运动过程的地形变场和反映地下热力运动过程的地温场有很好的对应关系。

2 地形变场与地震场的相关分析

地震资料取自《中国地震目录》^[6],选取了1986~1990年间中国 $M_s \geq 4.0$ 的中强地震。

2.1 地形变系统中心分布与地震震中和地震带分布的关系

将这段时期发生在研究区域的所有中强地震(105°E 以东取 ≥ 4.5 级, 105°E 以西取 ≥ 5.5 级,共计70个)的震中点绘出来,如图4所示。与图1和图2对比,发现此间地凸凹中心与中强地震震中的分布比较吻合。

在研究区域,共有16条地震带^[7],计为:郯城—庐江带、燕山带、山西带、河北平原带、渭河平原带、东南沿海带、银川带、六盘山带、天水—兰州带、武都—马边带、滇东带、腾冲—澜沧带、滇西带、安宁河谷带、康定—甘孜带、河西走廊带。如图5所示(在图中标号依次为1~16)。

将此图与地凸凹中心的分布图作一对比,发现二者的总体形式颇为相似。我国的地震带分布和这段时

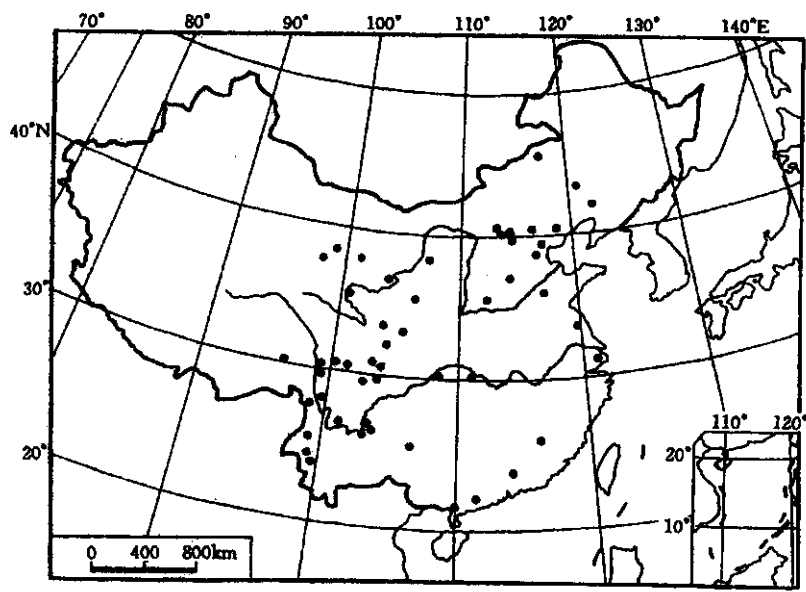


图 4 1987 ~ 1990 年研究区内的中强地震分布

Fig. 4 Distribution of epicenters of strong earthquake in research region from 1987 to 1990.

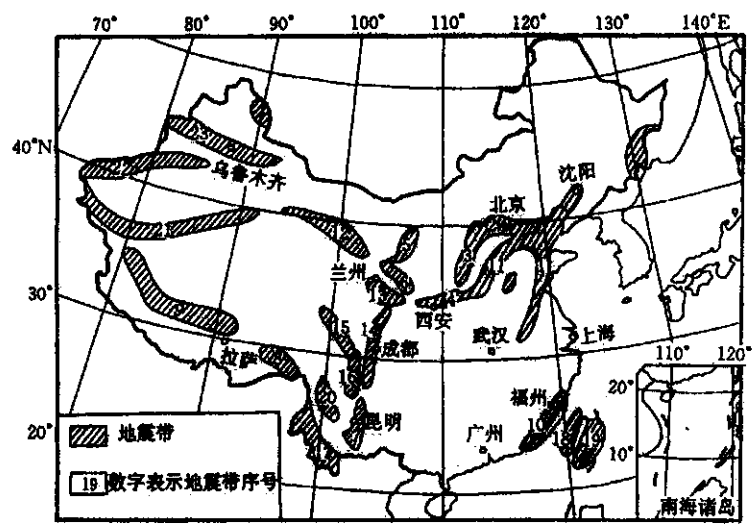


图 5 研究区内的地震带分布

Fig. 5 Distribution of seismic belt in research region.

间的中强地震震中分布与地形变系统中心地理分布的相似关系表明地凸、凹区和地震有着密不可分的联系,值得进一步研究它们与地震三要素(发震时间、地点和强度)的关系。

还应指出,在上一节的分析中发现我国所有地壳垂直运动(上升和下沉)剧烈区仅有湖南区一片与地凸、凹中心密集区对应不甚好。通过与图 5 的对比可以看出,所有这些上升、下降中心区恰恰仅有湖南区一片无地震带分布。

另外,在这 70 个地震中,震中出现在地凸区中心的仅有一例(1989 年 9 月);没有出现在地凹区中心的。这一结果符合地气耦合的概念模式,即地震易发生在地热涡(对应着地凸区)和地冷涡(对应着地凹

区)的接合部,也即水平切应力最大的地方.

2.2 台湾大地震与闽粤地形变场异常变化的关系

台湾是环太平洋地震带的一部分,5~6 级的中强地震几乎年年都有.台湾地震意味着菲律宾海板块向西运动的加强,它通过台湾这个“楔子”挤压着我国南方的地壳.汤懋苍等人的研究已指出,台湾大震(7 级以上)与大陆旱涝紧密相关^[8].因此,我们希望能通过已得到的大陆地形变场获取一些台湾大震的前兆信息.

大陆与台湾隔海相望的地形变监测台站有厦门、汕头两站^[1].厦门的资料为 1984~1987 年,汕头为 1986~1990 年.再结合全国的台站分布,可以按资料情况将研究时段又分为 4 小段:(1)1984~1985 年,仅厦门站有资料,同时全国的地倾斜台站也很少(10 个以下);(2)1986~1987 年,厦门、汕头两站均有资料,同时全国的地倾斜测站也较多(约 37 个);(3)1988~1990 年,仅汕头站有资料,但全国的地倾斜测站仍较多(约 36 个);(4)1991~1992 年,上述两站均无资料,同时全国测站锐减(约 12 个).

选取台湾地区 6.0 级及以上地震为研究对象,余震不计.1984~1985 年间有一次 6 级以上地震(1985 年 6 月,台湾东侧 6.3 级).在季度地形变场上,从 1984 年第 4 季(1984 年 12 月~1985 年 2 月,余顺推)在闽粤出现了一片水平尺度 500 km,中心强度 9999/[$10^{-20} \cdot \text{km}^{-2}$] (规定强度大于 9999 者仍计为 9999)的鞍形场强形变区(图略);1985 年第 1 季这一强形变区演变为一尺度很大的地凸场,中心强度 712;发震季度闽粤鞍形场强度有所减弱,震后这一地区迅速演变为一地凹场.这两年其余时间闽粤的地形变场均无地凸区,鞍形场也从未达到 1984 年第 4 季度那样的强度(两年间平均强度仅在 1000 左右).根据前述资料情况推断,1984 年第 4 季度的鞍形场或许是因为当地测站少而且全国台站也不多的情况下地凸区出现的形态失真.

1986~1987 年间发生了两次 6.0 级以上地震,分别为 1986 年 5 月 6.9 级及 1986 年 11 月 7.3 级地震.前者在闽粤地形变场上表现为 1985 年第 4 季度开始出现一片鞍形场的极值区(中心值达 9999);1986 年第 1 季演变为一小片地凸区;以后的两季度该地区均为鞍形场的极值区;至 1988 年 11 月,台湾 7.3 级大震发生,这样的鞍形场又维持了一季后消失.

为简明起见,1988~1990 年间的情形列如表 1 所示.

表 1 1988~1990 年间台湾强震与闽粤地形变场的关系

震级	6.0	6.1	6.7	6.1
时间	1988 年 7 月	1988 年 10 月	1989 年 8 月	1990 年 7 月
地形变前兆 出现时间	前一季和当季	当季	当季	当季
形态	地凸区	地凸区	地凸区	地凸区
强度/ 10^{-20}km^{-2}	2 881	658	1 309	5 542
尺度/100km	4	3.8	2.6	5.7

这 3 年间,台湾 6 级以上地震的当季在闽粤地区无地凸区对应者为 0 次,而出现了地凸区无地震对应(当季及后一季)为 2 次.1991 年以后因资料很少,暂不予讨论.

通过以上分析,可以认为闽粤地区的地形变场可以捕捉到大陆对岸台湾强震信息,甚至是前兆信息.

3 1989 年大同 6.1 级地震与地形变场的关系分析

1989 年 10 月大同 6.1 级地震是 1986~1990 年这 5 年间发生在我国东半部的最强的一次板内地震.由于华北地区的地倾斜测站的密度相对较大,同时地温资料也比较密集^[1],有利于我们选此典型个例进行较细致的分析.分析过程中还结合讨论地温场的演变特征.限于篇幅,此处涉及的众多图表均从略.

在1989年5月华北东部3.2 m地温距平场上存在着两个地热涡^[5],中心分别位于40°N,110°E和35°N,115°E附近.其中,北部的地热涡尺度较大,强度也较高(中心值1.0℃),而南部的地热涡尺度较小,强度也较弱(中心值0.7℃).在同期的地形变场上也相应有两个地凸区.其中北部的地凸区尺度和强度都较小(中心值85),而南部的地凸区尺度和强度都较大(中心值2 970).

6月,北部地热涡中心降至0.8℃,相应的地凸区强度也降低,中心值仅为35(小于最低标准50),按规定已不计为一块地凸区.这期间南部地热涡一直维持,中心强度升至0.7℃,与它相应的地凸区中心强度亦均在1 000以上.7月,北部地热涡中心又进一步降到0.6℃,其相应的地凸区从地形变场上完全消失.相反,南部地热涡则继续加强,中心强度升至0.8℃,其相应的地凸区中心强度也增至2 896.

1989年9月,在南部地热涡和地凸区继续增强的背景下,北涡的中心值突然猛增至1.1℃,在地形变场上对应地区又出现小片地凸区,中心值为49.10月北涡仍维持着较高温度,在这个月发生了大同6.1级地震.

11月北部地热涡消失,此处的地凸区也一直未再出现.南部的地凸区11月北移,中心强度降到276;但南部地热涡的中心强度并未减小,只是向北移了些后便稳定下来.1990年1月以后,这个地热涡的强度开始持续较弱,到了6月地热涡消失,基本变为负距平区.

值得注意的是,强地震发生在两地凸区(地热涡)之间,这与文献[9]给出的地气耦合的概念模式和本文2.1节的统计事实是吻合的.

据此个例和最近的工作^[10~12]发现两个(或多个)地热涡(地凸区)的突然增强或合并似乎对大地震有临界促发作用.可以理解为地下两组或数组扰动非线性相互作用增强的结果.另外,从本个例地形变场和地温场的演变过程看,地凸区和地热涡在表现形态和变化趋势上对应较好,而其具体强度之间的对应关系并不是很好,也即一个较弱的地热涡可能对应着一个较强的地凸区.

4 小结

1987~1990年我国东部地形变场的分布特征及其与现代地壳垂直运动、地震带和中强地震震中分布的比较结果表明,现代地壳活动强烈区亦是地形变凸、凹中心的高发区,也就是说,我们分析的地形变场上的地形变系统是有其地质构造背景的.地形变场上地凸、凹中心的地理分布与中强地震震中和地震带的分布比较吻合.地震易发生在地凸、凹区的接合部,也即水平切应力最大的地区.闽粤地区的地形变场可以捕捉到大陆对岸台湾强震信息.个例分析表明两个(或多个)地凸区的突然增强或合并对大震有临界促发作用.

文献[8]和本文的分析结果表明,地形变场作为一种能反映地球内部动力要素四维时空连续演变的监测手段,它和地下热力活动(如地温场的演化)及地震发生有密切的联系,可以为地震分析和预报提供更丰富的信息.另需指出的是,限于条件,本文所用到的地倾斜资料十分有限.虽然得到了一些有意义的结果,但如何利用更丰富的资料进行更深入细致的工作是值得认真考虑的.

[参考文献]

- [1] 郭维栋,汤懋苍.地形变场与现代地壳垂直运动及地震活动关系初探(I)——地形变场的计算方法和物理意义[J].西北地震学报, 2002, 24(1): 21—26.
- [2] 马杏垣主编.中国岩石圈动力学地图集[M].北京:地图出版社,1989.
- [3] 汤懋苍,董文杰,王宝灵,等.我国的土壤热流场及与大地热流场的比较[J].地球科学进展,1991, 6(4): 10—17.
- [4] 马宗晋,李献智.全球 $M_s \geq 7\frac{3}{4}$ 地震的定向迁移[J].地震地质,1993, 15(3): 127—136.
- [5] 汤懋苍,高晓清.1980~1993我国“地热涡”的若干统计特征.(I)“地热涡”的时空分布[J].中国科学(B辑),1995, 25(11): 1178—1186.
- [6] 顾功叙主编.中国地震目录[M].北京:地震出版社,1994.

- [7] 中国强地震震中分布和主要地震带 [A]. 见 : 中华人民共和国地图集 [Z]. 北京 : 地图出版社 , 1983.
- [8] 汤懋苍 , 张建 , 杨良. 近 40 年台湾大震与大陆旱涝的相关分析 [J]. 高原气象 , 1994 , 13(1) : 56—63.
- [9] Tang M C , Gao X Q. Some statistical characteristics of Geothermal Vortex in China during 1980 ~ 1993 (II) [J]. Science in China (Ser. D) , 40 : 569—576.
- [10] 汤懋苍 , 高晓清. 引发 1966 年邢台地震的地热涡分析 [J]. 地震学报 , 1997 , 19(3) : 303—308.
- [11] 江灏 , 汤懋苍. 地热涡合并与 1976 年唐山大地震 [J]. 西北地震学报 , 1998 , 20(1) : 47—50.
- [12] 江灏 , 汤懋苍. 我国板内强地震与地热涡合并 [J]. 西北地震学报 , 1999 , 21(4) : 378—382.

STUDY ON THE EARTH DEFORMATION FIELD AND ITS RELATION WITH CRUSTAL VERTICAL MOVEMENT AND EARTHQUAKE (II)

—Convex/concave regions and their relation with crustal movement and earthquake

GUO Wei-dong¹ , TANG Mao-cang²

(1. Key Laboratory of Regional Climate-Environment for East Asia , START Regional Center for Temperate East Asia ,
Institute of Atmospheric Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China ;

2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute ,
Chinese Academy of Sciences , Gansu Lanzhou 730000 , China)

Abstract Basic features of the earth deformation field , especially the convex/concave area , in East China during 1987 ~ 1990 and relationship among distributions of deformation field , crustal movement , seismic belt and epicenters of middle-strong earthquakes are discussed , then some typical cases are analyzed. The results show that the convex/concave area tends to be centered at the region with intense vertical movement. Earthquakes prefer occurring at the copulae between convex and concave areas , which are also the areas with strongest horizontal shear stress. Some information of strong earthquake in Taiwan can be reflected in deformation fields in Fujian and Guangdong provinces. Enhancement or mergence of two or more convex areas may play an important role in triggering occurrence of strong earthquake.

Key words Earth deformation field ; Convex area ; Concave area ; Earthquake ; Geothermal vortex