

doi:10.3799/dqkx.2014.165

对流层大气温度的“蝴蝶形”震前异常

郝国成^{1,2,3},董浩斌^{2*},曾佐勋^{3,4},赵娟^{2,3},Kashikin V.B.⁵

1.中国地质大学地球物理与空间信息学院,湖北武汉 430074

2.中国地质大学机械与电子信息学院,湖北武汉 430074

3.教育部长江三峡库区地质灾害研究中心,湖北武汉 430074

4.中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074

5.西伯利亚联邦大学,克拉斯诺亚斯克 660041

摘要: 利用美国国家和海洋大气管理局(NOAA)的大气温度数据,分析陆地地震和海洋地震震前震中上空的大气温度变化,研究其作为地震短临前兆的可能性。地震样本包括2014年2月12日于田 M_s 7.3地震、2008年5月12日汶川 M_s 8.0地震、2011年3月11日日本 M_s 9.0地震、2014年4月1日智利 M_s 8.1海洋地震、2013年3月27日台湾南投县 M_s 6.1地震和2014年5月30日云南盈江 M_s 6.1地震。结果表明:(1)震前,震中位置300~1000 hPa大气温度有较为一致的变化趋势;(2)200 hPa与400 hPa处(根据不同地点可选择其他,诸如350 hPa、300 hPa等高度数据)温度折线图在震前趋近或者相交,出现类似蝴蝶翅膀的“蝴蝶形”特殊曲线形状;(3)200 hPa与400 hPa温度差等值线图在(震前数月、数周或数天不等)震中附近区域的数值减小,温度差等值线图的塌陷最低点对应震中位置。以上规律有望应用于地震短临预测的时间与震中的确定。

关键词: 对流层;大气温度的异常;“蝴蝶形”特征;地震前兆;地震短临预测;天然地震。

中图分类号: P315.72

文章编号: 1000-2383(2014)12-1818-13

收稿日期: 2014-09-12

Anomalies of Tropospheric Air Temperature as “Butterfly Pattern” before Earthquake

Hao Guocheng^{1,2,3}, Dong Haobin^{2*}, Zeng Zuoxun^{3,4}, Zhao Juan^{2,3}, Kashikin V.B.⁵

1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Mechanical & Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Three Gorges Research Center for Geo-hazard, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

5. Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia

Abstract: Air temperature variation over the epicenter before terrestrial and marine earthquakes is analyzed and its possibility being applied in short-term and impending earthquake prediction is examined. The data obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in different height scales with hPa unit are analyzed. Earthquake samples include the earthquakes in Yutian (M_s 7.3, February 12th, 2014), Wenchuan (M_s 8.0, May 12th, 2008), Japan (M_s 9.0, March 11th, 2011), Chile marine earthquake (M_s 8.0, April 1st, 2014), (Nantou M_s 6.1, March 27th, 2013), and Yingjiang (M_s 6.1, May 30th, 2014). The results show: (1) atmospheric temperature has more consistent trends at 300—1000 hPa in the epicenter before earthquake; (2) the line charts of 200 hPa and 400 hPa temperature exhibit a graph with approaching and intersection (we can choose other height data such as 350 hPa, 300 hPa, etc. according to various locations) approaching earthquake occurring time. This special curve shape is similar to butterfly wings and be called as “butterfly pattern”; (3) the values of the air temperature difference between 200 hPa and 400 hPa are reduced in contour map near the epicenter area (a few months, weeks or several days before the earthquake). The lowest point of collapse in the contour map of air temperature difference corresponds to epicenter. The regularity is expected to be applied to predict on time and epi-

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(No.2012079104); 国家“985”创新平台建设项目子课题“地震及其次生地质灾害研究”(No.41230206)。

作者简介: 郝国成(1975—), 讲师, 主要从事信息处理研究。E-mail: haogch@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 董浩斌, E-mail: donghb@cug.edu.cn

center in short-term and impending earthquake.

Key words: tropospheric; abnormality of air temperature; characteristics of “butterfly pattern”; earthquake precursor; short-term and impending earthquake prediction; earthquake.

0 引言

地震的孕育是震源与外界不断发生物质和能量交换的过程,其中热能的交换是能量交换的最主要形式之一(刘德富等,1999).地表热能绝大部分通过辐射、感热和潜热等方式释放(邓志辉等,2009;陈梅花等,2011).李勇等(2001)研究了地震前震区气温升高的现象,认为地热通过地壳的裂缝传递到地表的空气中,形成地震前的大气升温现象,地面的异常升温区向未来发震区移动,并得出震级和异常温度的最高值、发震最高温度区域的面积以及背景温度有关.秦凯等(2010)认为震前地表潜热异常应是地震孕育尤其是临震过程的一种典型的岩石圈—盖层—大气耦合效应,孕震区上空的大气温度和地表温度异常(Dey and Singh, 2003; Habibeh *et al.*, 2013).张铁宝等(2013)利用距平方法分析了 2010 年青海玉树 $M_s 7.1$ 地震前后玉树及周边台的气温变化,初步分析认为玉树气温的异常变化与玉树地震孕育和发生存在一定的联系.陈芳等(2005)研究了青海省 7 个探空站 1970—2001 年高空观测的资料,对高空温度的突变及异常进行了分析,表明 20 世纪 80 年代的中后期,在 500 hPa 高度温度发生了由低到高的突变,这与地面气温暖突变发生的时间相吻合,表明大气温度与地表热能释放有较为一致的正相关性.

岩石破裂和摩擦生热学说认为震区热异常是由岩石破裂和摩擦引起,地壳中存在的断层很可能为孕震区持续的应力积累导致各种物理和化学相互作用而存在潜热通道.李美等(2010)研究了汶川 $M_s 8.0$ 地震前地表潜热通量异常,地震前后部分地表潜热通量(Surface Latent Heat Flux, SLHF)数据,SLHF 异常时间上经历弱—强—弱变化过程,地震发生在强异常时段,两个异常高值点出现在活动断层较为发育的应力低值区,地震发生后,异常信息很快衰减,震中位于异常区的中心位置.耿乃光等(1992)认为由于岩石受压破裂的过程中,断层蠕动的机械能转变为热能,或地磁辐射能转化为热能引起了震前的热异常.

幔源流体上涌学说,周晓成(2011)研究了汶川 $M_s 8.0$ 地震后川西地区的气体地球化学,认为幔源流

体上涌可能对汶川 $M_s 8.0$ 地震孕育和发生起到很重要的作用.陶明信等(2005)提出大型深大断裂带是地幔脱气的主要构造通道,而地球深部热流体上侵活动可能是深大断裂带形成演化的动力源之一.

排气说认为震前增温异常为地球排气作用的结果(强祖基等,2001).震前大气增温异常与温室气体如甲烷及臭氧的释放关系密切(冯德益,1996;周小玲,2012).在地壳的大部分地区,地球的排气并不明显,是以小规模、低速度的形式进行,而地壳的一些薄弱部位,如断裂带、火山、洋中脊地带等,则是地下气体集中排气带.因此,这些部位就成为地下气体向外散逸的主要通道(Italiano *et al.*, 2007).王杰等(2013)研究了芦山地震前后甲烷的浓度异常增高和大气温度的异常变化现象,地下甲烷等流体的释放机理与地震前上地壳岩石中裂隙的发育和扩展有直接关系.

地表热红外辐射学说认为岩石在应力作用下可直接增温,或增加红外辐射的强度(耿乃光等,1992, 1998);机械能够直接激发岩石分子的振动态能级跃迁(尹京苑,2000).有人研究了 1998 年张北 $M_s 6.2$ 地震前可能的卫星热红外异常现象,发现地震前十几天在地震区域附近的地震带上出现了明显的地表热红外高值异常现象,并且从外围向震中发展(吕琪琦等,1998;秦松涛和孙洪斌,2003;康春丽等,2009).魏从信等(2013)利用小波变换和相对功率谱估计分析了 2013 年玉树 $M_s 7.1$ 地震热红外与长波辐射异常,地震长波辐射异常最大幅度达到 9 倍.地表热红外辐射易受地形地貌、地物类型和气象等非震因素影响,地震热信息在空间域上受活动构造的控制而主要集中在活动断裂带上,气温的影响强度在空间上是逐渐过渡的,在时间上则呈现出数天或至少数小时连续变化,可能在增温区与非增温区之间形成较明显的温度梯度带.地震热异常的出现具有突发性特点,它不是在数日或数小时内连续存在,而是在一定时段内断续突现(郑兰哲等,1996;刘德富等,1997, 1999;强祖基等,1998;马瑾和单新建,2000;Guo, 2002;张元生等,2002;屈春燕等,2004, 2007).

震源声重力波动说:俄罗斯西伯利亚联邦大学 Kashkin (2014)教授认为,震前大气温度变化的传

播机制可能是从震源发出的长波次声波在大气中的扰动。震源的孕育加速了上层岩石圈板块运动,岩石圈板块摇摆不定的活塞效应可产生长波次声振荡。大气媒质在长波次声波的作用下,除了弹性力作用外,还附加有重力的作用。震前声重力波的异常导致上空大气的温度异常。

震前大气静电场异常极化说:徐秀登等(1995)针对“温室气体”的增温效应和临震大气电场异常与大气增温异常的关系进行了模拟对比实验,认为大气静电异常对大气的极化作用,是大气在太阳辐射下产生大面积、大幅度增温异常的主要因素;异常大气的增温效应也是其原因之一,各“温室气体”的增温效应是普遍存在的,但增温幅度不太大。实验模拟临震大气电场在太阳辐射下,对大气增温效应的促进作用是相当大的。在 700 V/m 电场作用下,可使大气增温提高 $4.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 、大气主要成分 N_2 提高 $6.6 \text{ }^\circ\text{C}$,相当于 $M_s \geq 6.0$ 地震的临震地面累积增温幅度。

由于地震的孕育和发生往往不仅是一个震源体封闭的应力现象,而更是一个区域场综合的物理、化学演化过程,并与空间大气场、地空界面的一些现象系统相关(姚清林,2005)。在分析大气温度时,除了地表热辐射、潜热效应、以及云顶长波辐射等影响参量外,地气系统的一些其他物理过程如臭氧吸收紫外辐射造成的加热与臭氧、二氧化碳和水汽红外发射造成的冷却、平流层—对流层之间的耦合,以及地球大气化学过程等也是不可忽视的重要因素(王卫国等,2008;荆凤,2013)。

地球大气分为 5 层,最靠近地面的是对流层。对流层包含了整个大气层四分之三的质量以及几近所

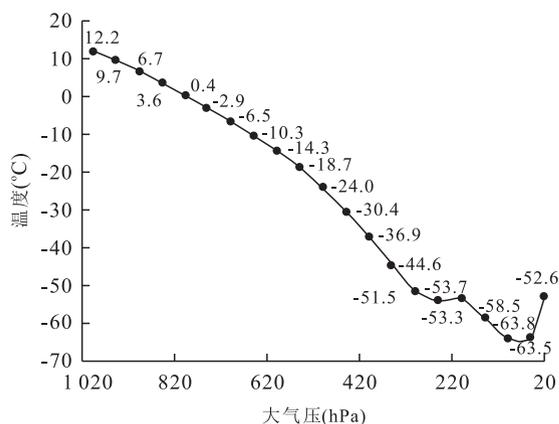


图 1 2014 年 2 月 12 日新疆于田 (36°N , 82°E) 大气压高度—温度关系

Fig.1 Atmospheric height and temperature relation of Yutian (36°N , 82°E) on Dec.12.2014

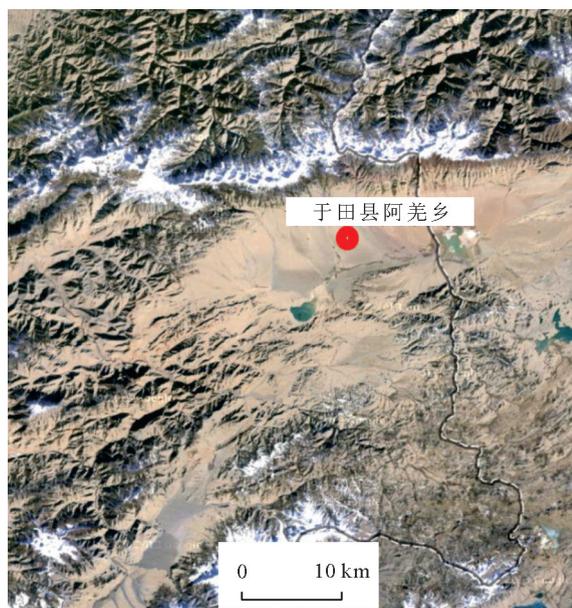


图 2 新疆和田地区于田县 $M_s 7.3$ 地震位置

Fig.2 Earthquake location of Yutian (Xinjiang) $M_s 7.3$

有的水气,下界直接与地面接触,云、雨、雪、雾等天气现象都发生在这一层。对流层大气的热量来源主要是来自地面的长波辐射,越离地面远温度就越低。图 1 为 2014 年 2 月 12 日于田 (36°N , 82°E) 位置的不同大气压高度下的温度图,大气压取 $1000 \sim 20 \text{ hPa}$,温度为每个大气压中午 12 点的开尔文数据换算成摄氏度,保留一位有效数字。图 1 显示:随着大气压的逐渐升高,温度降低,直至对流层顶区域温度开始回升,且 200 hPa 附近温度回升有个峰值。

1 数据及分析方法

1.1 数据来源

数据取自美国国家和海洋大气管理局 (NOAA) 的 hPa 高度和温度数据,每 3 h 为一个 bin 格式数据文件,一天 8 组数据,可根据需要选择目标点或者目标区域数据。本文分析震前震中位置 200 hPa 和 400 hPa (或 350 hPa) 大气温度差变化规律,探讨其与地震的关系。

1.2 分析方法

采用 2 种作图分析:目标点位置“时间—温度”折线图;目标区域“经度—纬度—温度差”等值线平面图。

(1) 目标点位置的“时间—温度”纵剖面折线图,首先分析目标区域 $20 \sim 1000 \text{ hPa}$ 的温度变化情况,从中选出两个适合“蝶形”表现的温度曲线,以便较

为明确地显示两条温度线的靠近点或者交集时间位置.针对本文分析的内陆地震,选择 200 hPa 和 400 hPa 压强的温度数据画在同一张折线图上,同时附上地震的次数作为次坐标轴进行参考分析.此图中,横轴为时间,左纵轴为温度数据值,右纵轴为该时间段震中附近 200 km 左右区域发生的 $M_s 4$ 以上的地震的次数.此图用以比较同一时间段内震中 200 hPa 和 400 hPa 的温度变化与地震发生是否有联系,尝试从中发现温度时间轴的异常特点.

(2) 目标区域的“经度—纬度—温度差”等值线图,以震中为中心,选定经纬度正负 10° 的正方形区域,将整个正方形面积的数据都画在一个平面图上.时间可根据分析要求选择震前一周、一个月或一年.将 200 hPa 与 400 hPa 温度差数据画图,横轴为经度,纵轴为纬度,用不同的颜色表示不同数值的温度,根据颜色的变化直观地观察温度差随时间和空间的变化特点.此图可用来观察大气温度异常的地点区域变化特点.

2 震前大气温度变化特点

2.1 震前大气温度异常数据的选取

分析对象选择大气压为 200~400 hPa 的温度数据,相同大气压高度的温度在不同的天、或者同一天的不同时刻也是变化的(王卫国,2008).

2.1.1 大陆地震 图 3 显示了 2014-02-12 于田地震当天和提前一周(2012-02-05)相同时刻(中午 12 点)在不同大气压高度下的变化情况,紫色圈中的为分析目标温度.400 hPa 和 200 hPa 区域温度有交集变化,400 hPa 以上具有较为一致的变化趋势,在此震中位置上,可采用 400、350 或 300 hPa 的任一数据分析,而 200 hPa 则可作为另外一个对比分析的数据.图 3 中,大气温度在震时与震前一周有逐渐趋近且交叉的特点.

图 4 为新疆于田地震震中不同气压下的大气温度变化图.从震前一个月到震后一周的温度变化趋势看,1 000~550 hPa 有较为一致的走势,500~300 hPa 也有较为一致的曲线走势,250 hPa 以下温度变化比较复杂,与其他高压的温度走势区别明显.图 4 横轴为时间 2014 年 1 月 12 日—2014 年 2 月 19 日,纵轴为国际温度单位开尔文.其中, $T = t + 273.15$ (T 单位为开尔文; t 为摄氏度).红线为地震发生的时间.

图 4 中筛出不会交叉很杂乱且有贴合性的几条

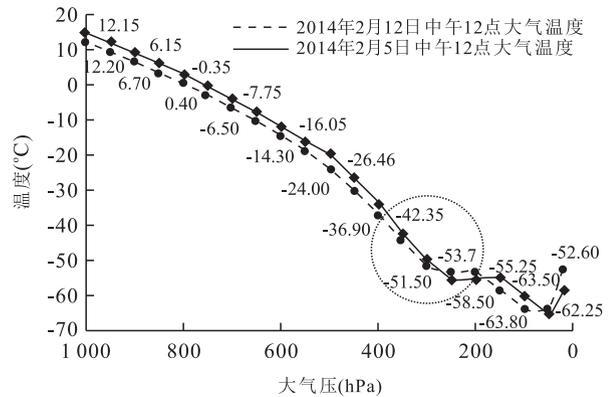


图 3 2014 年 2 月 12 日新疆于田 $M_s 7.3$ 地震震前一周中午 12 点大气压—温度变化

Fig.3 Atmospheric pressure-temperature change curves of Yutian before $M_s 7.3$ earthquake (02/12/2014) for one week (12 : 00 clock)

曲线,分别是 200 hPa、350 hPa、400 hPa、450 hPa 和 500 hPa 的大气温度.图 5 为筛选出的 6 种压强下温度的曲线图.

图 5 中,震中 200 hPa 和 300 hPa 的温度曲线有对称的趋近和远离的趋势,类似蝴蝶张开的翅膀,即出现对称的趋近相交或对称远离的变化形状,称之为“蝶形”大气温度震前异常,如图 7~图 10 所示.“蝶形”异常区,300 hPa 的温度从 A_1 下降到 A_2 ,再回升到 A_3 ,温度下降变化绝对值 $\Delta K_{A_{12}} = A_1 - A_2 = 9^\circ\text{C}$;温度回升增幅绝对值 $\Delta K_{A_{23}} = A_3 - A_2 = 7^\circ\text{C}$.200 hPa 温度则是反向变化, B_1 上升到 B_2 点,温差绝对值 $\Delta K_{B_{12}} = B_2 - B_1 = 9^\circ\text{C}$; B_2 下降到 B_3 ,温差 $\Delta K_{B_{23}} = B_2 - B_3 = 12^\circ\text{C}$.图 5 主震后及温度线交叉前,余震较多,图中列出了大于 $M_s 3.0$ 且小于 $M_s 5.0$ 的余震次数,2 月 12 日有 2 次,13 日有 9 次,14 日有 7 次,15 日有 4 次.这些余震能量的释放,同样产生了蝴蝶形的温度异常,导致如图 5 中最后一个蝶形的出现.

2.1.2 海洋地震 图 6 为 2011 年 3 月 11 日下午 14 点 46 分左右,日本宫城县以东太平洋海域 ($38.322^\circ\text{N}, 142.369^\circ\text{E}$) $M_s 9.0$ 地震的大气温度变化曲线.横轴为时间 2011 年 2 月 11 日—3 月 19 日,横轴第一项 20110211 代表 2 月 11 日,中间 20110303 代表 3 月 3 日,剩余其他项为日期和时间,如第二项 (20110212T21:00) 代表 2 月 12 日 21 点的时间,其他类推.图中纵轴为温度,单位为开尔文(K).

从图 6 可以看出与图 4 类似的特点.压强较大的部分变化具有较为相似的规律性,400~1 000 hPa

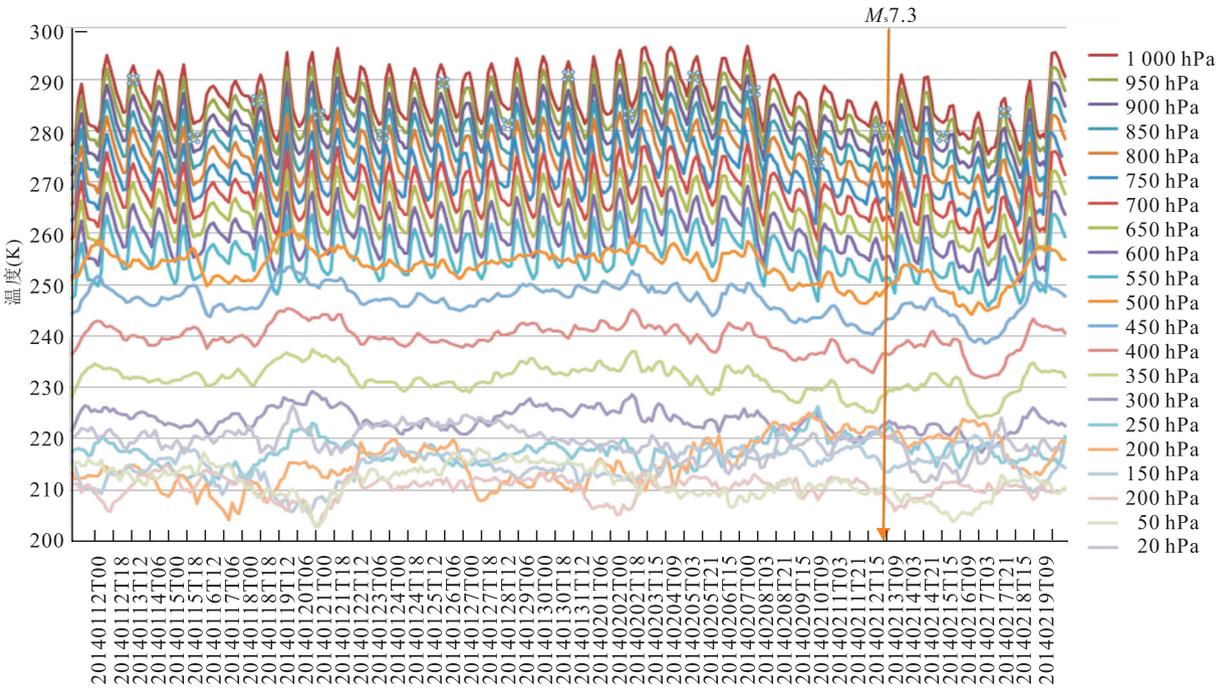


图 4 2014 年 2 月 12 日新疆于田 $M_s7.3$ 地震震前一个月不同压强下大气温度对比

Fig.4 Comparison of air temperature under different pressure of Yutian $M_s7.3$ earthquake on 02/12/2014 before one month

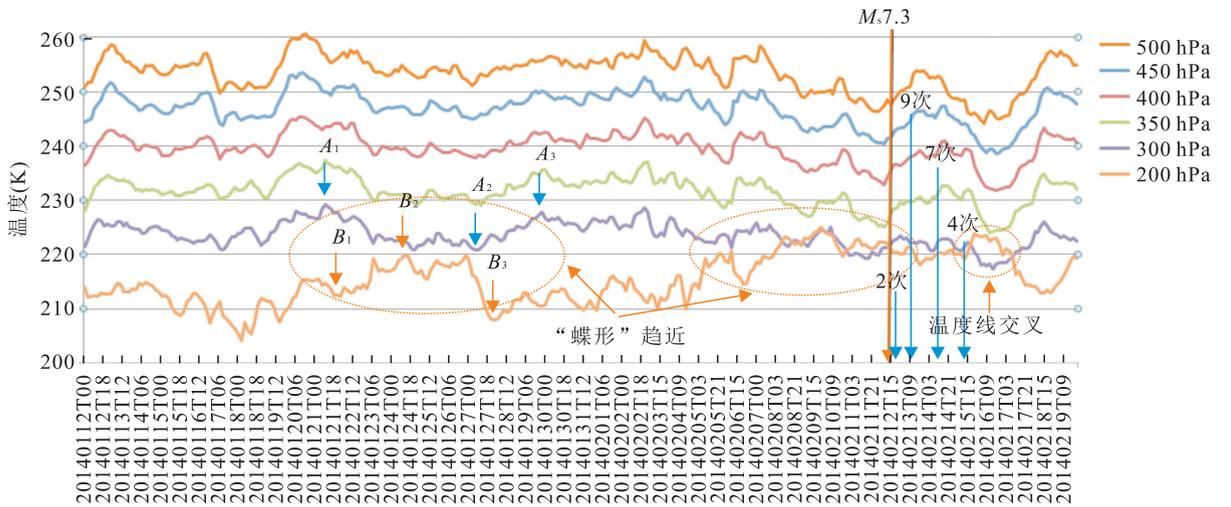


图 5 200 hPa、350 hPa、400 hPa、450 hPa 和 500 hPa 下的大气温度(2014 年 2 月 12 日新疆于田 $M_s7.3$ 地震)

Fig.5 Air temperature of 200 hPa, 350 hPa, 400 hPa, 450 hPa and 500 hPa

温度折线走势基本相同,只有 20~350 hPa 时的温度折线变换较复杂.震前折线图呈现先相交、后分离的趋势.图中加深线为 200 hPa 和 350 hPa 的温度曲线,比较有代表性,所以继续选择 200~350 hPa 作为分析对象,如图 7 所示.

图 7 为图 6 挑选出来的 5 条温度折线图,便于更清楚地观察不同气压下的温度变化趋势.发现只有 200 hPa 以下的折线图的变化与其余几条不同,并且 350 hPa 是上面所有高压值相同走势折线中最

低的曲线,所以,若分析此次地震的温度变化情况,选取 200 hPa 和 350 hPa 为研究对象比较合适.200 hPa 温度的折线图与最接近的 350 hPa 的温度折线图有几次趋紧分离的趋势,可以明显的从图中看出,图中细黑直线为地震时间.图 7 为震前“蝶形”异常区,350 hPa 的温度从 A_1 下降到 A_2 ,再回升到 A_3 ,再次下降到 A_4 点,出现 2 个降幅过程.温度变化范围:降幅绝对值 $\Delta K_{A_{12}} = A_1 - A_2 = 8^\circ\text{C}$,温度回升增幅绝对值 $\Delta K_{A_{23}} = A_3 - A_2 = 8^\circ\text{C}$,再次降幅绝

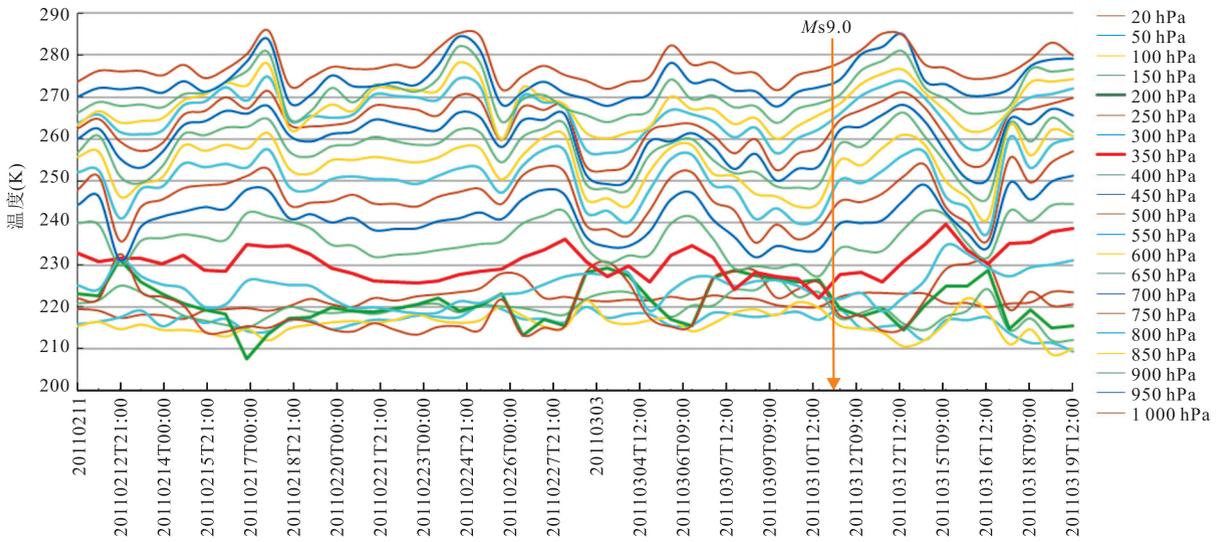


图 6 震前一个月和震后一周的大气温度变化趋势(2011 年 3 月 11 日日本 M_s 9.0 级地震)

Fig.6 Air temperature curve before the earthquake for one month earlier and a week later

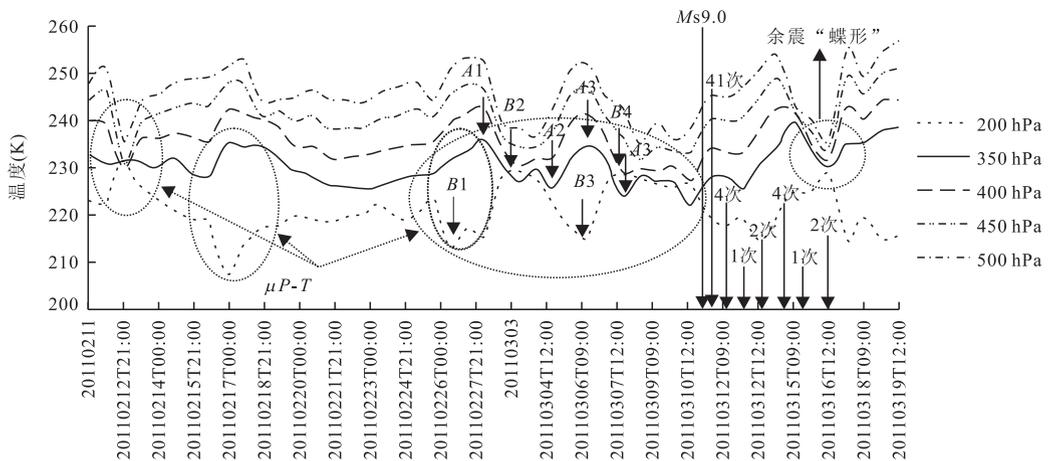


图 7 200~500 hPa 震前一个月和震后一周的大气温度变化趋势(2011 年 3 月 11 日日本 M_s 9.0 地震,日期和时间表示同图 6)

Fig.7 Air temperature curve (200–500 hPa) before the earthquake for one month earlier and a week later

对值 $\Delta K_{A34} = A_3 - A_4 = 10\text{ }^\circ\text{C}$.200 hPa 温度则是反向变化, B_1 上升到 B_2 点,温差增幅绝对值 $\Delta K_{B12} = B_2 - B_1 = 16\text{ }^\circ\text{C}$; B_2 下降到 B_3 ,温差下降绝对值 $\Delta K_{B23} = B_2 - B_3 = 14\text{ }^\circ\text{C}$; B_3 上升到 B_4 点,升温绝对值二次 $\Delta K_{B34} = B_4 - B_3 = 13\text{ }^\circ\text{C}$.350 hPa 的 2 次温度平均降幅为 $\Delta 9\text{ }^\circ\text{C}$,200 hPa 的 2 次温度平均升幅为 $\Delta 14.5\text{ }^\circ\text{C}$.图 7 同时有一个强烈的余震“蝶形”异常,原因在于主震后的余震非常强烈,据美国国家地震信息中心地震目录显示,2011 年 3 月 11 日至 2011 年 3 月 17 日,共有各类大小的余震 1 978 起,大于等于 M_s 5.0 的有 488 起,大于等于 M_s 6.0 的有 55 起,3 月 11 日当天就发生了 41 起大于 M_s 6.0 的余震,这些强大余震的能量释放,造成在 2011 年 3

月 17 日又产生明显的余震型“蝶形”异常.

2.2 震前大气温度异常分析

2.2.1 震前一个月的温度变化折线图

(1)大陆地震.图 8 为 2014 年 2 月 12 日发生在新疆和田地区于田县的 M_s 7.3 地震(震中: 36.1°N , 82.5°E).折线图是震中位置的震前一个月及后一个星期的 200 hPa 和 400 hPa 的温度变化曲线图.黑色竖线处为最大地震发生时间,绿色尖柱状代表地震发生的次数.

由图 8 可以看到在两条曲线比较趋近的时间段为 2 月 8 日至 13 日,地震发生次数多,温度异常强烈,表现为震前 200 hPa 和 400 hPa 的温度曲线靠近.图 8 中蝶形异常区,400hPa 温度降幅平均值为

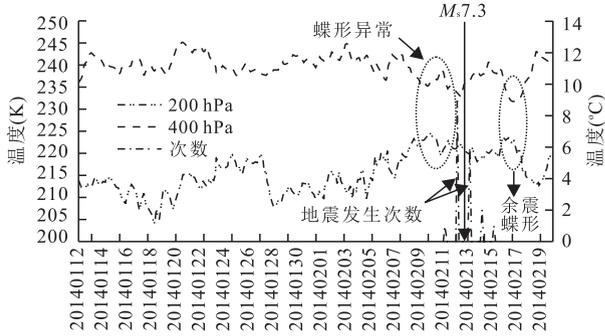


图 8 2014 年 2 月 12 日于田 $M_{7.3}$ 地震震中大气温度折线(震前一个月及后一星期)

Fig.8 Air temperature line chart of epicenter for one month earlier and a week later

8 °C, 200 hPa 温度升幅平均值为 10 °C.图 8 主震后大量余震带来的能量释放,又产生一个余震“蝶形”.

从图中可以看出,在 2013 年 3 月 27 日的前一周到两周内 400 hPa 到 200 hPa 的温差有最小值.其中最明显的是 2013 年 3 月 6 日温差有一个最小值,随后的一天 2013 年 3 月 7 日的地震次数出现了一个尖峰,地震次数明显增多,除此以外,2013 年 3 月 15 日温差也出现了极小值,在接下来的两天中地震次数出现了一个尖峰,这从一定程度上说明了在地震之前,200 hPa 和 400 hPa 的温度会有一个明显的趋近.图 9“蝶形”异常区,400 hPa 与 200 hPa 的温度差同 350 hPa 与 200 hPa 的温度差都有大幅下降的现象,前者两次下降的幅度分别为 30 °C 和 24 °C,后者两次下降的幅度分别为 29 °C 和 23 °C.

(2)海洋地震.图 10 中,3 月 28 号开始 400 hPa 的线条开始有向下走的小趋势,200 hPa 的线条也

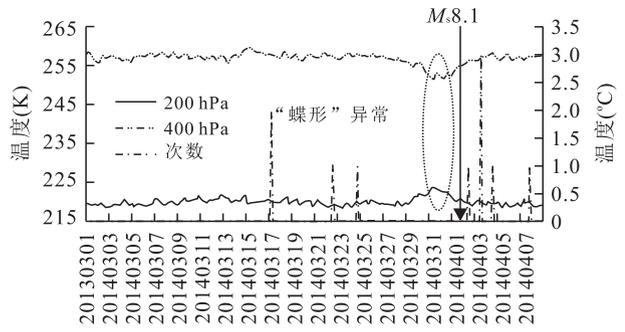


图 10 2014 年 4 月 1 日智利 $M_{8.1}$ 地震震中震前一个月大气温度折线

Fig.10 Air temperature line chart of epicenter for one month earlier and a week later

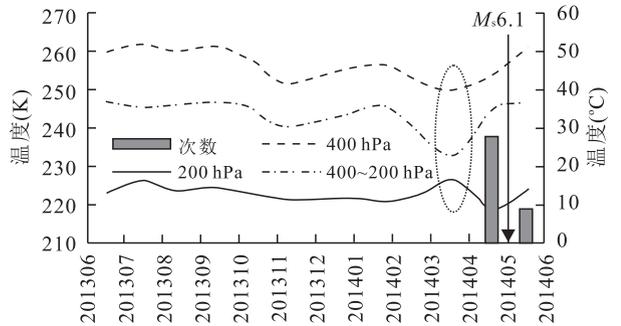


图 11 2014 年 5 月 30 日云南盈江 $M_{6.1}$ 震前一年大气温度折线(每月 1 号“日平均”气温)

Fig.11 Air temperature line chart of epicenter for one year earlier

是在 28 号左右有向上走的小趋势,但是两条线条的间距比内陆地震的大许多.震前 6 天开始 2 条温度线开始趋近,震前 2 天达到温差最小值.此处的地震次数可以从另一个角度定性的表明能量释放的规

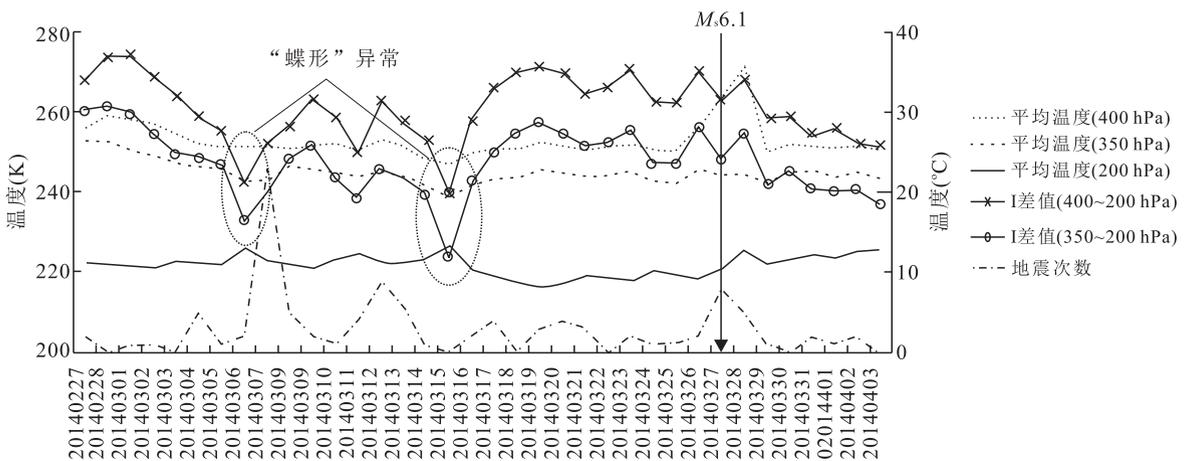


图 9 震中位置震前一个月及后一个星期的大气温度折线(2013 年 3 月 27 日台湾南投县 $M_{6.1}$ 地震)

Fig.9 Air temperature line chart of epicenter for one month earlier and a week later

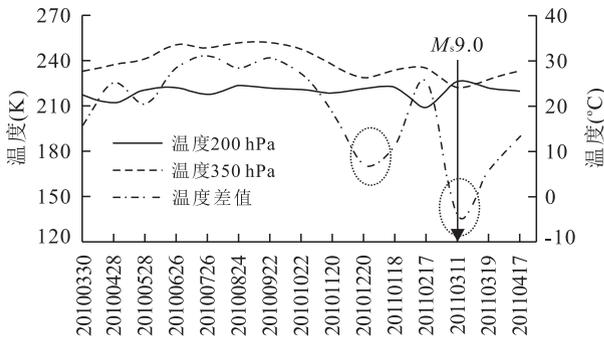


图 12 2011 年 3 月 11 日日本 M_s 9.0 震前一年大气温度折线(每月 1 号“日平均”气温)

Fig.12 Air temperature line chart of epicenter for one year earlier

模,图 10 中 M_s 8.1 主震后的多次余震,强化了温度蝴蝶形的形态,促使彼此更加靠近.

2.2.2 震前一年的温度变化折线图 (1)大陆地震.

图 11 中,200 hPa 和 350 hPa 的温度差在震前变化明显、起伏较大.震前半年左右,温度差开始减小,震前 3 个月即 2010 年 12 月 20 号附近差值为次低值,然后开始回升,在震前一个月左右再次陡峭下沉,在地震当天 3 月 11 号是两条温度线相交,并且温度差值达到最小值,显出临震的特点.震后,温度差增大,两条线开始分离.主震前后的地震次数表明了震中

附近能量的释放规模,同主震一样影响“蝶形”温度异常的出现并有可能加深蝴蝶形状.

(2)海洋地震.图 12 中,震前 3 个半月左右 400 hPa 和 200 hPa 曲线靠近,温差减小,可以观察到明显的温度差谷值.

由图 8、9、10、11 和图 12 可以看出,震前存在 400 hPa 和 200 hPa 温度靠近趋势,形似蝴蝶翅膀,可称之为震前的“蝴蝶形”,一旦观察到温度差出现大幅异常波动,则可能是地震前兆的一种表现形式.

2.2.3 目标区域的“经度—纬度—温度差”等值线图

(1)大陆地震.图 13 为 2014 年 2 月 12 日于田 M_s 7.3 地震震前一年的面区域“经度—纬度—温度差”等值线图(震中:36.1°N,82.5°E),中间红点标记为震中位置.选取区域:26°N~44°N,72°E~92°E,时间范围:2014 年 1 月 12 日—2014 年 2 月 19 日.图 13 中,震前 3 个月开始,震中区域的温度差开始降低(如图 2013.11.03、2013.12.03),到震前一个半月的时候温度差出现了明显的异常,震中区域附近的温度差降到相对变化的最低值.

图 14 为 2008 年 5 月 12 日汶川 M_s 8.0 地震震前一年的面区域“经度—纬度—温度差”等值线图(震中:31.01°N、103.42°E),中间红点标记为震中位置.选取区域:21°N~41°N,93°E~113°E,时间段为

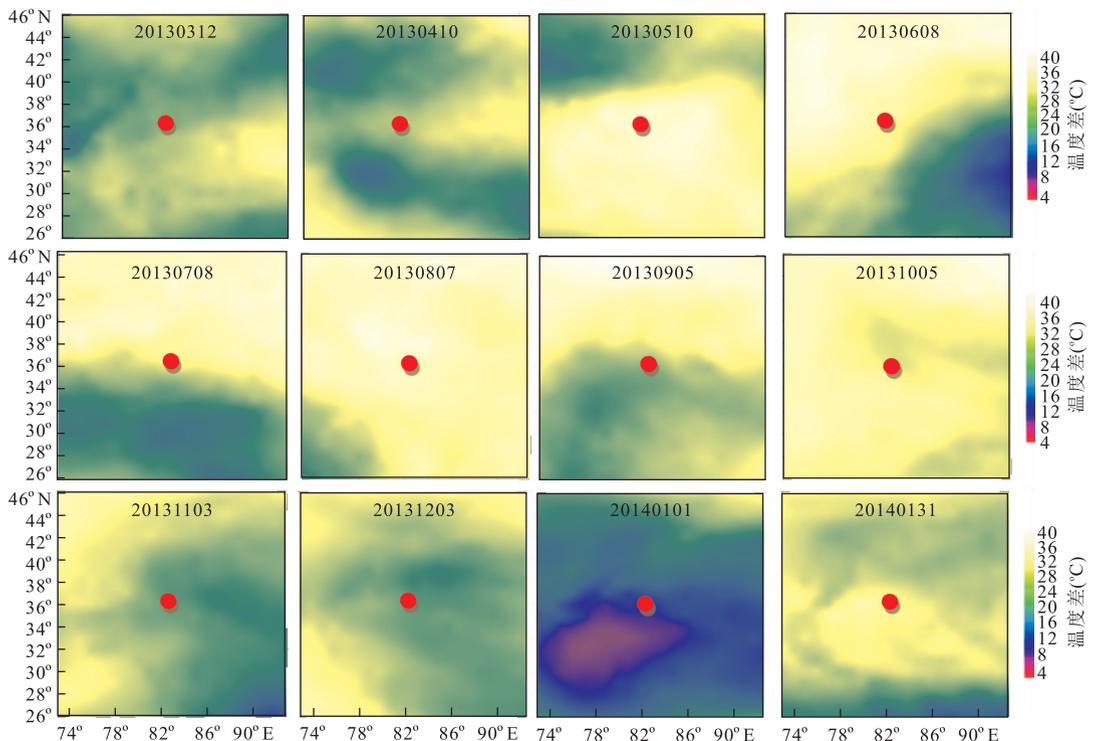


图 13 2014 年 2 月 12 日于田 M_s 7.3 震前一年大气温度差等值线

Fig.13 Air temperature difference contour map of epicenter for one year earlier

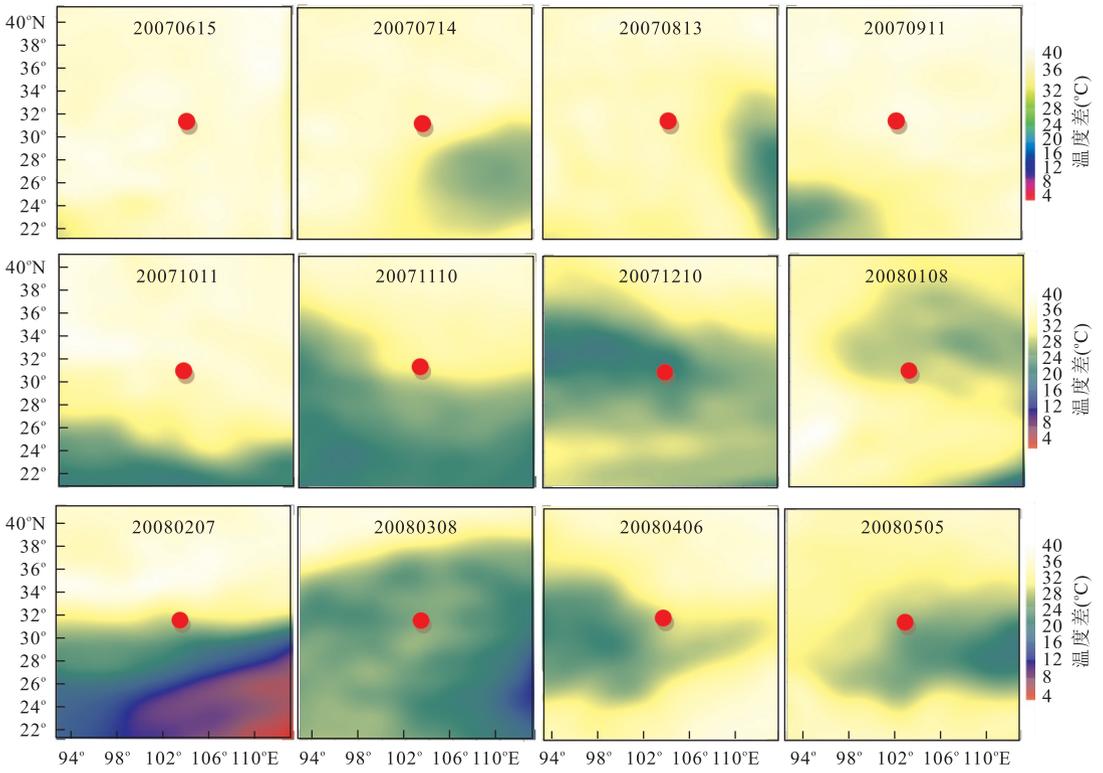


图 14 2008 年 5 月 12 日汶川 M_s 8.0 震前一年大气温度差等值线

Fig.14 Air temperature difference contour map of epicenter for one year earlier

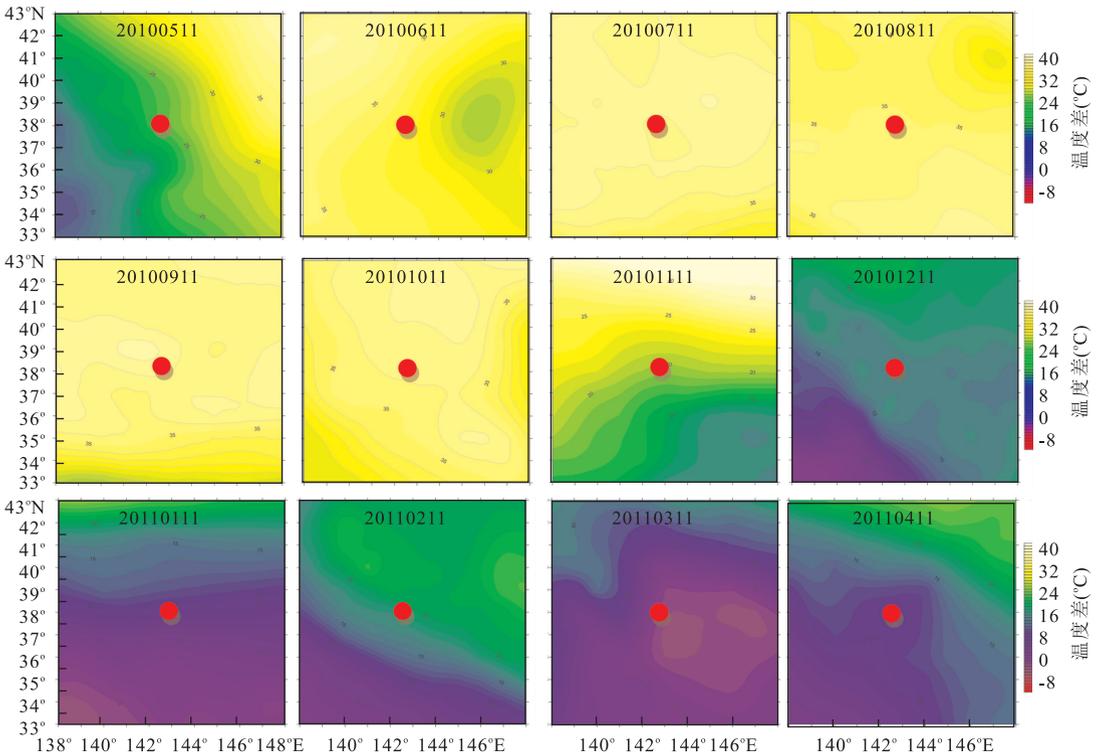


图 15 2011 年 3 月 11 日日本 M_s 9.0 震前一年大气温度差等值线

Fig.15 Air temperature difference contour map of epicenter for one year earlier

2008 年 4 月 12 日—2008 年 5 月 19 日.由图 14 可以发现类似的震前温度差异常现象,正方形区域下方从左下角开始到右下角有一个蓝色加深和移动的过程,并且在蓝色区域中间逐渐出现红色并随着蓝色区域一起向右下角移动直到震前一天逐渐褪去消失.上述现象显示出了大陆地震震前大气温度差的短期前兆特点,但在异常出现的时间上不相同.

(2)海洋地震.图 15 为 2011 年 3 月 11 日日本东北部海域发生 $M_s 9.0$ 地震震前一年温度差的等值图(震中位置:38.1°N、142.6°E),中间红点标记为震中位置.选取区域:33°N~43°N,138°E~148°E.图 15 显示震前 3 个月开始,震中区域出现温度差异常,到临震前一周又出现大幅度剧降.图 15 的子图(20110311)同时显示震中的位置,几乎就在温度差最低点附近.这对震前预测震中位置可以提供一定的参考.

从温度差的等值线图 13、图 14 和图 15 可以看出,在地震之前,震中区域上空的大气温度差(400~200 hPa)会发生较为明显的降低,2014 年 2 月 12 日于田 $M_s 7.3$ 地震从震前 3.5 个月开始下降至震前 1.5 个月出现温度差(400~200 hPa)极值(图 13).2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$ 地震则提前半年温度差开始降低,至震前 3 个月出现温度差(400~200 hPa)极小值,位置不在震中,偏向右下角东南方向.2011 年 3 月 11 日日本 $M_s 9.0$ 地震前 4 个月出现温度差减小变化,直到地震时温度差才趋于最小值,震后温度差继续增高,回归正常变化范围.从上面分析的海洋地震样本可以看出,震前短临前兆特性较好.陆地地震则提前出现异常的时间点较长,可以结合目标区域的折线图进行分析是否出现异常的“蝴蝶形”特点,然后利用目标区域温度差的等值线图来观察未来地震可能发生的震中位置.

4 讨论与结论

本文讨论了多个地震样本的震前不同大气压高度的温度变化趋势,发现震前有着一一定的大气温度异常特点.

(1)200 hPa 和 400 hPa(或其他大气压高度,如 350 hPa 或 300 hPa)的大气温度折线图在震前有着类似“蝴蝶形”现象,两条温度曲线彼此靠近或者相交,异常最早出现在震前半年到 3 个月,如图 11 和图 12.(2)温差出现震前短临异常的特点,如图 8、图 9、图 10、图 11 的温差在震前温度差明显减小,图 8

震前一天达到最小值,图 9 震前 12 天达到最小值,图 10 震前 2 天达到最小值,图 11 震前温度差持续下降,甚至当天才达到最低值.陆地地震震前“蝶形”区,温度上升与下降的相对变化幅度近似 9 °C,如 5 和图 8;海洋地震震前蝶形区温度相对变化幅度大一些:温度上升平均 9 °C,下降平均近似 14.5 °C,如 7;图 9 中,温度差下降幅度在 20~30 °C 之间.本文样本中,海洋地震的温度相对变化幅度要大于陆地地震,但与震级关系不明显,后续研究中可继续分析温度变化与震级的关系.(3)海洋地震与陆地地震在震前都有大气温度异常现象(如图 7、图 10、图 11、图 15).300~1 000 hPa 温度折线图有较为一致的变化趋势(如图 3、图 4、图 5、图 6).(4)温度差等值线图震前 40 天左右在震中附近区域出现明显变化,如图 13;温度差等值线图在震前一个月开始持续的降低,短临的特点明显,如图 15.特别需要说明的是,图 15 中,在 200 hPa 和 400 hPa 温度差等值线图的数值塌陷最低点对应了震中位置,此方法可辅助分析地震发生的地点.(5)温度折线图和温度差等值线图可以联合搭配使用.

以上讨论说明,震前大气温度变化“蝴蝶形”与地震存在一定的关联,可以用于对发震时间和震中位置定位给出辅助参考.

致谢:本文所依托的项目是在中国地质大学(武汉)教育部长江三峡库区地质灾害研究中心与俄罗斯科学院克拉斯诺亚尔斯克科学技术局合作协议框架下进行的,感谢唐辉明教授、项伟教授的关心和指导,感谢 V. Moskvichev 局长和 V. Sibgatulin 主任邀请第一作者到俄罗斯进行学术访问及给与热情接待,感谢参与本文资料处理的本科学生:陈辰、王雅璇、刘帅、武江燕、张变娜、白雨晓.

References

- Chen, F., Ma, Y. F., Jin, H. Y., 2005. Upper-Level Height and Temperature Change Characteristics and Its Correlation with Surface Temperature. *Meteorological Science and Technology*, 33(2): 163-166 (in Chinese with English abstract).
- Chen, M. H., Deng, Z. H., Ma, X. J., 2011. Probable Surface Latent Heat Flux Anomalies before the 2010 Chile $M_s 8.8$ Earthquake and Its Relationship to the Variations of Surface Temperature. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(7): 1738-1744 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Z. H., Yan, Y., Chen, M. H., 2009. Surface Latent Heat

- Flux Anomalies before the 2008 Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake. In: Chinese Geophysical Society, ed., *The Chinese Geophysics (2009)*. Chinese Geophysical Society, Beijing, 532 (in Chinese).
- Dey, S., Singh, R., 2003. Surface Latent Heat Flux as an Earthquake Precursor. *Natural Hazards and Earth System Science*, 3(6): 749–755. doi: 10.5194/nhess-3-749-2003
- Feng, D. Y., 1996. New Developments in Earthquake Precursor Research. *Recent Developments in World Seismology*, (8): 9–14 (in Chinese with English abstract).
- Geng, N. G., Cui, C. Y., Deng, M. D., 1992. The Beginning of Rock Fracture Experiment of Remote Sensing Observation and Remote Sensing Rock Mechanics. *Acta Seismologica Sinica*, 14(Suppl.): 645–652 (in Chinese).
- Geng, N. G., Yu, P., Deng, M. D., et al., 1998. The Simulated Experimental Studies on Cause of Thermal Infrared Precursor of Earthquakes. *Earthquake*, 18(1): 83–88 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. Q., 2003. Using NOAA Data to Detect the Earthquake's Thermal Infrared Radiation Precursory: Its Problems and Applied Methods. In: Mezel, W. P., ed., *SPIE Int Optical Engineering*, Bellingham, 177–181.
- Habibeh, V. A., Farid, H. A., Shattri, M., 2013. Latent Heat Flux and Air Temperature Anomalies along an Active Fault Zone Associated with Recent Iran Earthquakes. *Advances in Space Research*, 52(9): 1678–1687. doi: 10.1016/j.asr.2013.08.002
- Italiano, F., d'Alessandro, W., Martelli, M., 2007. Gas Geochemistry as a Tool to Investigate the Earth's Degassing through Volcanic and Seismic Areas; The Soul of the 8th International Conference on Gas Geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 65(1–2): 1–4. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2007.05.001
- Jing, F., Shen, X. H., Kang, C. L., 2013. Research of Gas System on Multi-Parameter Variation and Anomaly Model of Earthquake Thermal Infrared in Seismogenic Process. In: Earth Observation from Space Professional Committee of Seismological Society of China, ed., *Earth Observation from Space Professional Committee of Seismological Society of China 2013 Symposium Proceedings*. Earth Observation from Space Professional Committee of Seismological Society of China, Beijing, 31 (in Chinese).
- Kang, C. L., Chen, Z. W., Chen, L. Z., et al., 2003. Analysis on the Satellite Infrared Anomaly Feature before West to Kunlun Mountain Pass $M 8.1$ Earthquake. *Northwestern Seismological Journal*, 25(1): 12–15 (in Chinese with English abstract).
- Kashkin, V. B., 2014. Internal Gravity Waves in the Troposphere. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 27(1): 1–9. doi: 10.1134/S1024856014010059
- Li, M., Kang, C. L., Li, Z. X., et al., 2010. Abnormal Surface Latent Heat Flux Prior to the Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake. *Earthquake*, 30(3): 64–71 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Ma, L., Qiang, Z. J., 2001. Unusual Temperature and Earthquake. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 37(4): 427–430 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. F., Luo, Z. L., Peng, K. Y., 1997. OLR Anomalous Phenomena before Strong Earthquakes. *Earthquake*, 17(2): 126–132 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. F., Peng, K. Y., Liu, W. H., et al., 1999. Thermal Omens before Earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 21(6): 652–656 (in Chinese).
- Lü, Q. Q., Ding, J. H., Cui, C. Y., et al., 1998. Satellite Thermal Infrared Anomaly before the Zhangbei Earthquake $M_s = 6.2$. *Earthquake*, 18(3): 240–244 (in Chinese with English abstract).
- Ma, J., Shan, X. J., 2000. An Attempt to Study Fault Activity Using Remote Sensing Technology—A Case of the Mani Earthquake. *Seismology and Geology*, 22(3): 210–215 (in Chinese with English abstract).
- Qiang, Z. J., Du, L. T., 2001. Earth Degassing, Forest Fire and Seismic Activities. *Earth Science Frontiers*, 8(1): 235–245 (in Chinese with English abstract).
- Qiang, Z. J., Lin, C. G., Li, L. Z., et al., 1998. Satellite Thermal Infrared Image Brightness Temperature Anomaly: Short-Term and Impending Earthquake Precursor. *Science in China (Ser. D)*, 28(6): 564–573 (in Chinese).
- Qin, K., Wu, L. X., Ma, W. Y., 2010. Spatial-Temporal Features of Abnormal Surface Latent Heat Flux before the Qinghai Haixi Earthquake Sequence in 2009. *Science & Technology Review*, 28(4): 68–73 (in Chinese with English abstract).
- Qin, S. T., Sun, H. B., 2003. Analysis on Satellite Infrared Long Wave Radiation OLD before Delingha Earthquake with $M_s 6.6$. *Earthquake Research in Plateau*, 15(3): 42–44, 51 (in Chinese with English abstract).
- Qu, C. Y., Ma, J., Shan, X. J., 2004. An Attempt to Observe Gas Releasing Phenomena of the Earth by Using Satellite Thermal Infrared Technique. *Seismology and Geology*, 26(3): 539–547 (in Chinese with English abstract).

- Qu, C. Y., Shan, X. J., Ma, J., 2007. Influence Factors to Seismic Thermal Infrared Anomaly. *Journal of Seismological Research*, 30(2): 113—119 (in Chinese with English abstract).
- Tao, M. X., Xu, Y. C., Shi, B. G., et al., 2005. Mantle Degassing and Deep Geological Tectonic Features of Chinese Different Types of Fracture Zone. *Science in China (Ser. D)*, 35(5): 441—451 (in Chinese).
- Wang, J., Zhang, X., Pan, L. L., et al., 2013. Anomalies of Temperature Increase and Methane Release before Lushan Earthquake (M_s 7.0). *Earth Science Frontiers*, 20(6): 29—35 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. G., Liu, X. L., Wang, H. Y., et al., 2008. The Variation Character of Global Atmospheric Heat Budget at Tropopause. *Journal of Yunnan University*, 30(2): 155—165 (in Chinese with English abstract).
- Wei, C. X., Zhang, Y. S., Guo, X., et al., 2013. Thermal Infrared and Long-Wave Radiation Anomalies of Yushu M_s 7.1 Earthquake. *Progress in Geophysics*, 28(5): 2444—2452 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. D., Xu, X. M., Ma, S. D., et al., 1995. A Preliminary Understanding of Earthquake Genesis of Abnormal Temperature Rising of the Atmosphere before Impending Earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 17(1): 123—127 (in Chinese).
- Yao, Q. L., Qiang, Z. J., Wang, Y. P., 2005. CO Release from the Tibetan Plateau before Earthquakes and Increasing Temperature Anomaly Showing in Thermal Infrared Images of Satellite. *Advances in Earth Science*, 20(5): 505—510 (in Chinese with English abstract).
- Yin, J. Y., Fang, Z. F., Qian, J. D., et al., 2000. Research on the Application of Infrared Remote Sensing in Earthquake Prediction and Its Physical Mechanism. *Earthquake Research in China*, 16(2): 140—148 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T. B., Lu, Q., Xin, H., et al., 2013. The Temperature Abnormality before and after the 2010 Yushu M 7.1 Earthquake. *Earthquake Research in Sichuan*, (4): 7—11 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. S., Shen, W. R., Xu, H., 2002. Satellite Thermal Infrared Anomaly before the Xinjiang Qinghai Border M_s 8.1 Earthquake. *Northwestern Seismological Journal*, 24(1): 1—4 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, L. Z., Qiang, Z. J., Lin, C. G., 1996. Practice and Research on Short-Term-Impending Earthquake Prediction by Interpreting Satellite Thermal Infrared Anomaly Image. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21(6): 665—668 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. C., 2011. Gas Geochemistry in Western Sichuan Related to 12 May 2008 Wenchuan M_s 8.0 Earthquake (Dissertation). University of Science and Technology of China, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. L., 2012. Ozone from Rock Fracture could Serve as Earthquake Early Warning. *Recent Developments in World Seismology*, (1): 7 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈芳, 马英芳, 金惠瑛, 2005. 高空温度、高度变化特征及其与地面气温的相关分析. *气象科技*, 33(2): 163—166.
- 陈梅花, 邓志辉, 马晓静, 2011. 2010 年智利 M_s 8.8 级地震前可能的潜热通量异常及其与地表温度变化的关系. *地球物理学报*, 54(7): 1738—1744.
- 邓志辉, 严研, 陈梅花, 2009. 2008 年汶川 M_s 8.0 级地震前的潜热通量异常. *中国地球物理学会. 中国地球物理 · 2009*. 北京: 中国地球物理学会, 532.
- 冯德益, 1996. 地震前兆研究的某些新进展. *国际地震动态*, (8): 9—14.
- 耿乃光, 崔承禹, 邓明德, 1992. 岩石破裂实验中的遥感观测与遥感岩石力学的开端. *地震学报*, 14(增刊): 645—652.
- 耿乃光, 于萍, 邓明德, 1998 等. 热红外震兆成因的模拟试验研究. *地震*, 18(1): 83—88.
- 荆凤, 申旭辉, 康春丽, 2013. 孕震过程地气系统多参量变化特征及地震红外异常模型研究. *中国地震学会空间对地观测专业委员会, 中国地震学会空间对地观测专业委员会 2013 年学术研讨会论文摘要集*. 北京: 中国地震学会空间对地观测专业委员会, 31.
- 康春丽, 陈正位, 陈立泽, 等, 2003. 昆仑山口西 8.1 级地震的卫星热红外前兆特征分析. *西北地震学报*, 25(1): 12—15.
- 李美, 康春丽, 李志雄, 等, 2010. 汶川 M_s 8.0 地震前地表潜热通量异常. *地震*, 30(3): 64—71.
- 李勇, 马丽, 强祖基, 2001. 温度异常与地震. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 37(4): 427—430.
- 刘德富, 罗灼礼, 彭克银, 1997. 强烈地震前的 OLR 异常现象. *地震*, 17(2): 126—132.
- 刘德富, 彭克银, 刘维贺, 等, 1999. 地震有“热征兆”. *地震学报*, 21(6): 652—656.
- 吕琪琦, 丁鉴海, 崔承禹, 等, 1998. 张北 6.2 级地震前的卫星热红外异常. *地震*, 18(3): 240—244.
- 马瑾, 单新建, 2000. 利用遥感技术研究断层现今活动的探索—以玛尼地震前断层相互作用为例. *地震地质*, 22(3): 210—215.
- 强祖基, 杜乐天, 2001. 地球排气与森林火灾和地震活动. *地学前缘*, 8(1): 235—245.

强祖基, 赁常恭, 李玲芝, 等, 1998. 卫星热红外图像亮温异常—短临震兆. 中国科学(D)辑: 地球科学, 28(6): 564—574.

秦凯, 吴立新, 马未宇, 2010. 2009 年青海海西地震序列的潜热通量异常时空特征. 科技导报, 28(4): 68—73.

秦松涛, 孙洪斌, 2003. 德令哈 6.6 级地震前卫星红外长波辐射 OLR 的分析. 高原地震, 15(3): 42—44, 51.

屈春燕, 单新建, 马瑾, 2007. 地震活动热红外异常的影响因素分析. 地震研究, 30(2): 113—119.

屈春燕, 马瑾, 单新建, 2004. 利用卫星热红外观测地球排气现象的一次尝试. 地震地质, 26(3): 539—547.

陶明信, 徐永昌, 史宝光, 等, 2005. 中国不同类型断裂带的地幔脱气与深部地质构造特征. 中国科学(D 辑: 地球科学), 35(5): 441—451.

王杰, 张雄, 潘黎黎, 等, 2013. 芦山地震 ($M_s 7.0$) 前甲烷释放与大气增温异常. 地学前缘, 20(6): 29—35.

王卫国, 刘晓璐, 王颢樾, 等, 2008. 大气对流层顶热量收支变化的时空结构研究. 云南大学学报(自然科学版), 30(2): 155—165.

魏从信, 张元生, 郭晓, 等, 2013. 玉树 7.1 级地震热红外与长波辐射异常. 地球物理学进展, 28(5): 2444—2452.

徐秀登, 徐向民, 马升灯, 等, 1995. 临震大气增温异常成因的初步认识. 地震学报, 17(1): 123—127.

姚清林, 强祖基, 王弋平, 2005. 青藏高原地震前 CO 的排放与卫星热红外增温异常. 地球科学进展, 20(5): 505—510.

尹京苑, 房宗绯, 钱家栋, 等, 2000. 红外遥感用于地震预测及其物理机理研究. 中国地震, 16(2): 140—148.

张铁宝, 路茜, 辛华, 等, 2013. 2010 年玉树 7.1 级地震前后气温变化分析. 四川地震, (4): 7—11.

张元生, 沈文荣, 徐辉, 2002. 新青 8.1 级地震前卫星热红外异常. 西北地震学报, 24(1): 1—4.

郑兰哲, 强祖基, 赁常恭, 1996. 卫星热红外异常影象在地震短临预报中的应用. 地球科学, 21(6): 665—668.

周晓成, 2011. 汶川 $M_s 8.0$ 地震后川西地区的气体地球化学 (博士学位论文). 合肥: 中国科学技术大学.

周小玲, 2012. 岩石断裂释放的臭氧可用于地震预测. 国际地震动态, (1): 7.

《地球科学——中国地质大学学报》

2015 年 1 月 第 40 卷 第 1 期 要目预告

青海治多地区晚三叠世石英闪长岩地球化学特征及成岩动力学背景	赵少卿 等
锆石 U-Pb 年代学和地球化学对浙皖马鞍山高分异岩体成因的约束	张建芳 等
西藏尕尔穷—嘎拉勒铜金矿集区火山岩年代学及地球化学	张志 等
大兴安岭南段西坡拜仁达坝—维拉斯托矿床成矿流体特征及其演化	梅 微 等
湖北大冶铜绿山尾矿的地球化学特征及其综合利用	马真真 等
吉林延边地区棉田岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素研究	刘金龙 等
舒兰韧性剪切带应变分析及石英动态重结晶颗粒分形特征与流变参数估算	梁琛岳 等
桂东大瑶山南缘社山花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征: 对区内加里东期成岩成矿作用的制约	李 巍 等