

陈梅花, 邓志辉, 谭争光, 等. 利用 GPS 观测资料反演水汽含量及地震异常初步探讨[J]. 华南地震, 2017, 37(1): 8–16. [CHEN Meihua, DENG Zhihui, TAN Zhengguang, et al. Retrieving Precipitable Water Vapor from GPS Observation Data and Primary Discussion of Earthquake PW Anomalies[J]. South china journal of seismology, 2017, 37(1): 8–16.]

## 利用 GPS 观测资料反演水汽含量及 地震异常初步探讨

陈梅花<sup>1</sup>, 邓志辉<sup>2</sup>, 谭争光<sup>2</sup>, 刘吉平<sup>2</sup>, 韩玉兰<sup>1</sup>, 宋文杰<sup>1</sup>

(1. 浙江师范大学, 浙江 金华 321004; 2. 广东省地震局, 广州 510070)

**摘要:** 利用 GPS 观测数据反演大气水汽技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一种全新的大气探测手段。根据中国大陆构造环境监测网络(简称陆态网)和广东省地震局建设的广东省地壳运动观测网络提供的 GPS 数据反演大气水汽含量, 用 ECMWF 水汽含量数据进行对比和补充, 并试图把它们应用于地震研究, 探讨广东地区地震前后的水汽含量变化特征。结果表明: GPS 反演结果是可靠的; 广东地区水汽含量具有夏高冬低的年变规律和南高北低的分布特征; 广东地区 2000 年以来 3 个  $M_s$  4.8 级地震前 1 个月以内震中区都出现了显著的水汽含量增加的现象, 异常幅度超过平均值 30 mm, 高值区沿构造带展布, 并在水汽含量出现异常的同时, 伴随着地表气温的异常, 说明水汽含量增加与震中区热作用增强、水汽蒸发加速有关, 可能是地震前的异常反应。

**关键词:** GPS; 水汽含量; 地震; 广东; 新丰江水库

**中图分类号:** P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2017) 01-0008-09

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2017.01.002

## Retrieving Precipitable Water Vapor From GPS Observation Data and Primary Discussion of Earthquake PW Anomalies

CHEN Meihua<sup>1</sup>, DENG Zhihui<sup>2</sup>, TAN Zhengguang<sup>2</sup>,  
LIU Jiping<sup>2</sup>, HAN Yulan<sup>1</sup>, SONG Wenjie<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 2. Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** The use of the GNSS observation technology for estimating precipitable water vapor (PWV) is a brand-new technique developed in the 1990s. Precipitable water vapor are retrieved from GPS observation data (from China Mainland Tectonic Environment Monitoring Network, CMTEMN and Crustal movement observation network of Guangdong province) and contrast with the ECMWF total column water vapor data. It was found that the GPS PW match to the ECMWF TCWV data, so the authors supplied the ECMWF TCWV data to the GPS

**收稿日期:** 2016-06-02

**基金项目:** 广东省省级科技计划项目(项目编号: 2013B020200010)和国家自然科学基金项目(项目编号: 40702056)资助。

**作者简介:** 陈梅花(1976-), 女, 博士, 主要从事卫星遥感应用、地震异常研究。

**E-mail:** moonchun@126.com.

PW data to create a database of precipitable water vapor in Guangdong province from 2000 to 2014. In order to search for probable anomalies, the temporal variations of PW before and after several earthquakes ( $\geq M_s 4.8$ ) from 2000 that occurred in Guangdong province are summarized in this paper and so did the PW background. The PW in Guangdong area shows higher value during summer than during winter and higher values in the north region than in south region. The results also show that significant PW anomalies occurred in epicentral area one months before three  $M_s 4.8$  earthquakes since 2000. The abnormal amplitude is more than 30 mm and the high PW area distributed along the tectonic belt. We also found the PW anomalies accompanied by surface temperature anomalies. It means the increase of water vapor content is related to the increase of heat function in the epicenter area, which may be due to the strong volcanic activities prior to earthquake.

**Key words:** GPS; Precipitable water vapor; Earthquake; Guangdong; Xinfengjiang reservoir

## 0 前言

在地震发生前,由于岩石的变形、断层的预滑和微破裂的发育等原因,深部流体和热量可以快速上升到地表,并引起大气异常。在 2001 年印度古吉拉特 7.9 级大地震发生前,水汽含量异常伴随着潜热通量异常发生<sup>[1]</sup>。在 2008 年汶川 8 级地震、2010 年玉树 7.1 地震和 2013 年芦山 7 级地震前也都出现了显著的水汽异常<sup>[2-4]</sup>。地震前水汽的异常还可追溯到震前潜热通量(水汽蒸发的热通量)异常的研究,首先是沿海地区地震前的潜热通量异常被发现<sup>[5,1]</sup>,随后陈梅花、邓志辉等<sup>[6]</sup>发现 2004 年印度尼西亚 9 级大地震前沿破裂带出现了显著的潜热通量异常,远远超过历史最高值。2008 年汶川 8 级地震前潜热通量异常沿龙门山断裂带展布<sup>[7]</sup>。2010 年智利 8.8 级地震前在震中附近海域也出现了显著潜热通量异常<sup>[8]</sup>,并在近岸陆地出现了地表的温度异常,两者伴生出现。陈梅花、邓志辉等<sup>[9]</sup>还发现地震前潜热通量异常不局限于沿海地区,在内陆水体丰富的地区也可能发生潜热通量异常,如 2005 年江西九江 5.7 级地震前沿构造带分布的大片水域及周边地区出现了显著的潜热通量异常。地震前潜热通量异常是水汽含量异常的原因,当近地表水体蒸发将热量带到大气的同时,也会将水汽带到地表。地震前潜热通量异常和水汽含量异常有共同机理,都是热异常加速蒸发作用所致。

观测和反演水汽含量的方法很多,近年来利用 GPS 观测数据反演水汽含量得到越来越广泛的应用。地基 GPS 反演大气水汽技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一种全新的大气探测手段。具有实时性、连续性、精度高、不受天气影响等特点<sup>[10]</sup>,这

些优点正是地震前水汽含量异常研究所需要的。本文利用 GAMIT 软件处理了广东地区 GPS 观测资料,反演得到广东地区大气水汽含量,先与 ECMWF (欧洲中期天气预报中心)提供的大气中总水汽含量(Total column water vapour)进行对比分析,论证数据的可靠性,然后试图把它应用于地震研究,探讨广东地区地震前后的水汽含量变化特征。

## 1 GPS/PW 数据反演

地基 GPS 观测数据反演水汽的基本原理是:GPS 信号在对流层中传播时会产延迟,分为干延迟和湿延迟 ZWD(ZenithWet Delay),其中湿延迟与对流层中的水汽含量密切相关,由此即可反解出对流层中的水汽含量。GPS 水汽反演过程具体分三步<sup>[11]</sup>。

第一步,利用 GPS 解算软件,根据 GPS 观测数据、气象数据以及相关星历文件计算对流层天顶总延迟 ZTD。目前,估计天顶延迟的方法主要有单参数法、多参数法、随机过程法和分段线性法<sup>[12]</sup>。本文利用 GAMIT 软件采用分段线性法来估算天顶延迟。

第二步,利用地面气压和静力延迟模型计算天顶干延迟分量 ZHD;天顶干延迟可以按不同的模型来推算,本文采用 Hopfield 模型,需要用到测站气压和气温资料,具体公式如下:

$$ZHD=77.6 \times 10^{-6} \times P_s \times (h_d - h_s) / (5T_s) \quad (1)$$

$$h_d = 401.36 + 148.72 \times (T_s - 273.16) \quad (2)$$

式中:ZHD 为天顶干延迟(mm), $P_s$ 和 $T_s$ 分别代表 GPS 测站气压(hPa)和绝对温度(K), $h_s$ 为中性大气层顶部有效高度(m), $h_d$ 为 GPS 测站大地高程(m)。

第三步,根据天顶总延迟和干延迟分离出

ZWD, 并利用 ZWD 和 PW 的转化关系计算 PW 值。

$$ZWD=ZTD-ZHD \tag{3}$$

$$PW=\prod \times ZWD \tag{4}$$

$$\prod = \frac{10^6}{\rho_w R_v [(k_3/T_m) + k_2]} \tag{5}$$

其中  $\prod$  为无量纲,  $\rho_w$  为水的密度,  $R_v$  为气体常数,  $k_2$ 、 $k_3$  为大气折射常数,  $T_m$  就是对流层大气

加权平均温度, 可由测站上空水汽压和绝对气温  $T$  沿天顶方向的积分值计算得到。

本文反演所用的 GPS 数据由中国大陆构造环境监测网络(简称陆态网)和广东省地震局建设的广东省地壳运动观测网络提供, 从 2012 到 2014 年每 30 s 一个观测值。GPS 台站主要布局在广东沿海的主要活动断裂带上。参与反演的 GPS 台站见图 1。表 1 是所用 GPS 台站的基本信息。

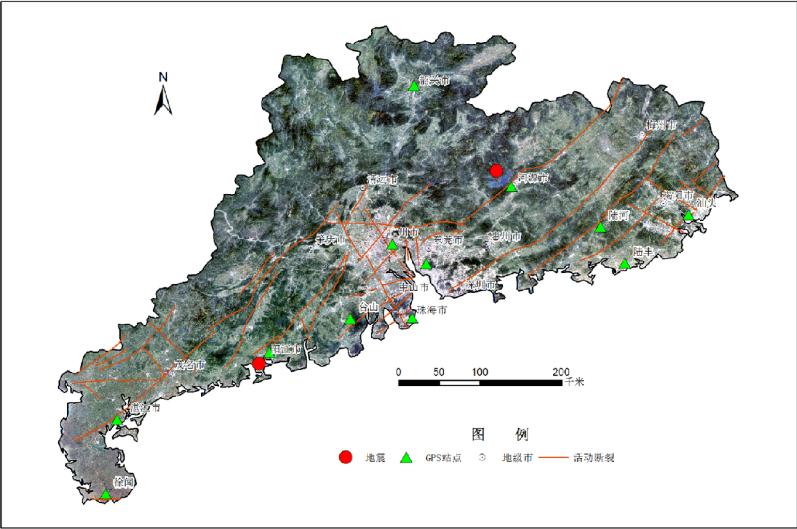


图 1 广东省地震构造简图  
Fig.1 Tectonic setting of earthquakes in Guangdong province

表 1 广东省 GPS 台站一览表  
Table 1 GPS stations in Guangdong province

序号	名称	代码	编码	纬度/(°)	经度/(°)	高程/m
1	广州	GZJZ	GD01	23.091 2	113.346	13.977
2	汕头	STJZ	GD02	23.417 8	116.625	33.034
3	台山	TSJZ	GD03	22.27	112.885	51.796
4	河源	HYJZ	GD04	23.728 4	114.662	45.001
5	徐闻	XWJZ	GD05	20.337	110.179	47.989
6	阳江	YJJZ	GD06	21.896 8	111.986	84.141
7	韶关	GDSC	ZD037	24.846 2	113.588	169.038
8	湛江	GDZJ	ZK005	21.154 9	110.304	39.195
9	珠海	GDZH	ZQ016	22.275 3	113.567	52.946
10	东莞	DCJZ	GD08	22.875 6	113.723	97.063
11	陆丰	LFJZ	GD09	22.883 3	115.921	41.137
12	陆河	LHJZ	GD10	23.285 7	115.65	84.548

2 GPS/PW 与 ECMWF 水汽含量对比研究

ECMWF 总水汽量由欧洲中期天气预报中心 (European Centre for MediumRange Weather Fore-

casts)提供, ECMWF 再分析资料是利用地面资料、高空观测资料、卫星反演资料等同化得到的全球格网点资料<sup>[13-14]</sup>。再分析资料将观测与模拟相结合, 兼具空间覆盖率广及时间分辨率高的优点<sup>[15]</sup>。本文用到的大气柱水汽含量和地表气温资料的时

间分辨率为一天 4 次,空间分辨率  $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ ,时间序列从 2000—2014 年。

为了论证数据资料的可靠性,本文以广州站为例,将 2013 年 GPS/PW 与 ECMWF 的总水汽量进行对比分析,相互验证。考虑到地震研究要尽量降低太阳辐射的影响,本文用的数据均为世界时 18 时(相当于夜间 2 点)。图 2 为 2013 年广州

站 GPS/PW 与 ECMWF 水汽含量的对比曲线,其中蓝色曲线代表广州站 GPS 反演得到的水汽,红色是 ECMWF 再分析得到的水汽总量,从图中可见,1~4 月、9~12 月二者几乎重叠,7、8 月份略有差异,ECWFM 水汽量比 GPS/PW 略低,差异不超过 10 mm。二者拟合很好,说明 GPS 反演结果是可靠的。

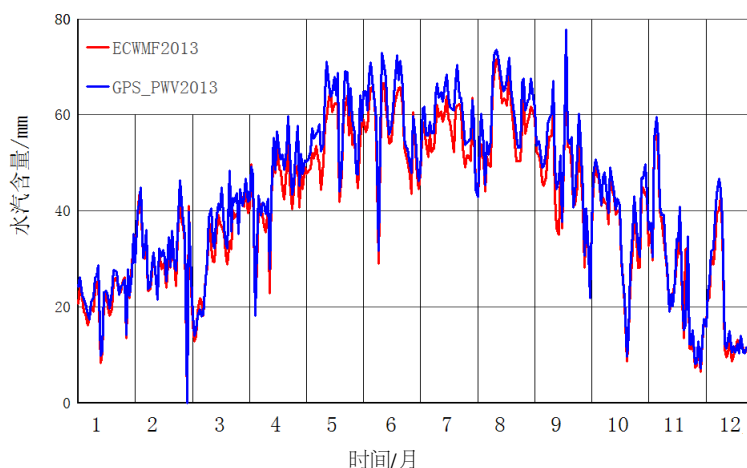


图 2 2013 年 1~12 月广州站 GPS/PW 与 ECMWF 水汽含量的对比曲线

Fig.2 Contrast curve of precipitable water vapor over Guangzhou from the GPS data and ECMWF from January to December in 2013

### 3 广东地区水汽动态分析

本研究系统反演了广东地区陆态网和广东省地壳运动观测网 12 个 GPS 观测站(表 1)从 2012 到 2014 年每天 GPS/PW 水汽含量,并试图对其时空演化特征及其可能与地震活动的关系进行分析。广东地区目前 GPS 观测站密度较稀疏,布设也不均匀,观测时间较短,从 2012 年开始才有比较完整的资料,而广东地区从 2012 年开始地震活动增强,对其分析需要 2012 年之前的背景数据。考虑

到前文已论证 GPS/PW 与 ECMWF 具有高度的一致性,所以,本研究利用 ECMWF 数据对 GPS/PW 进行补充,建立了广东地区 2000 年至 2014 年水汽含量数据库,并据此对广东地区水汽含量时空演化特征及其可能与地震活动的关系进行分析研究。

将 15 年水汽数据按日平均得到多年日均值,图 3 是河源测点年变动态曲线,从图中看见,河源地区水汽含量具有很好的年变规律,夏天水汽含量高,接近 60 mm。冬天水汽含量低,12 月和 1 月水汽含量在 20 mm 左右。

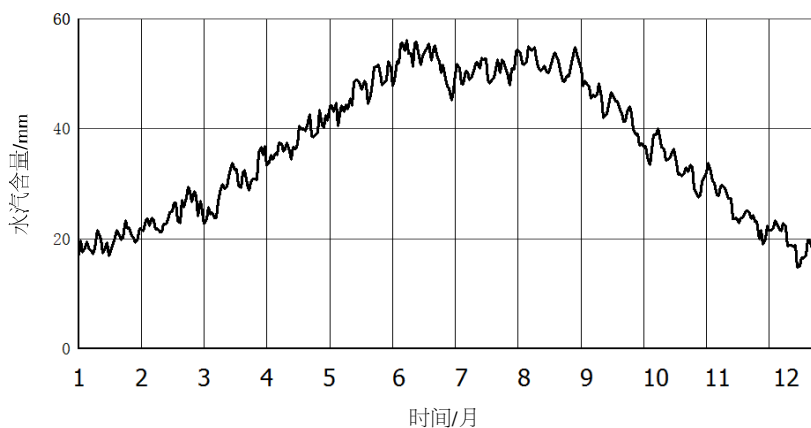


图 3 河源测点水汽含量年变动态曲线

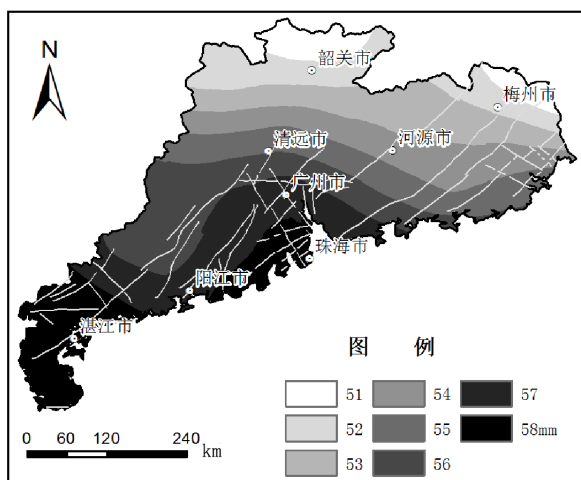
Fig.3 Curve of the annual variation of precipitable water vapor in Heyuan region

将 15 年水汽数据按月平均得到每月水汽分布图, 图 4a、b 分别是 6 月份和 12 月份广东地区月均水汽含量分布图。从 4a 图中看见, 在夏季 6 月, 水汽含量总体是北低南高, 广州以北地区水汽含量等值线呈东西向水平分布, 说明北部区域水汽含量主要受纬度控制。在珠江三角洲地区水汽含量为相对高值区, 说明在夏季炎热的天气条件下, 水网密布的珠江三角洲地区可能发生了较强的蒸发作用, 给大气输送更多的水汽。

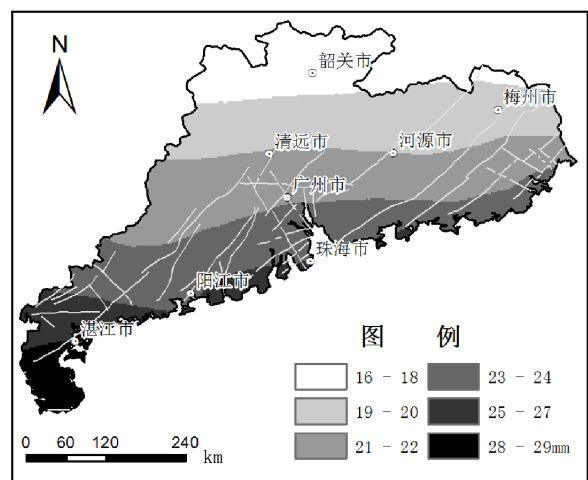
从图 4b 中看见, 在冬季 12 月, 研究区水汽含量仍然是北低南高, 韶关地区水汽含量最低, 南部沿海地区较高。水汽含量等值线分布呈东西

向条带状分布, 但在近海地区偏高。说明冬季水汽含量主要受不同纬度温度差异所控制, 沿海地区也受海洋水汽的影响。

对比 6 月和 12 月的月均水汽分布图还可以看到, 6 月份水汽含量整体上比 12 月高很多, 在 6 月, 水汽含量介于 51 到 58 mm 之间, 从南到北最大水汽含量差异不超过 8 mm; 在 12 月, 全区水汽含量介于 16~28 mm 之间, 南北差异达到 13 mm 左右。这是由于冬季南北温度差异较大, 导致蒸发量差异较大所致。此外, 由于受夏季蒸发作用增强的影响, 南部沿海地区水汽含量受水体分布的影响更明显。



(a) 6 月平均值



(b) 12 月平均值

图 4 广东地区月均水汽含量分布图

Fig.4 Spatial distribution of monthly mean PW in Guangdong province

## 4 地震前后水汽变化特征

近几十年来, 广东地区强地震比较少, 从 2000 年以来共记录到  $M_s$  4.8 级以上地震 3 次, 分别是以 2004 年 9 月 17 日阳江  $M_s$  4.9 级地震、2012 年 2 月 16 日河源  $M_s$  4.8 级地震以及 2013 年 2 月 22 日河源  $M_s$  4.8 级地震。下文将以这三个地震为例, 分析地震前后 6 个月水汽随时间的变化, 并对异常的可靠性进行初步的分析。

水汽含量数据每天 4 个时次, 为了尽量减少日照差异的影响, 本文选用世界时 18 时(北京时间晚上 2 点)的数据。下文水汽变化曲线图中的黑色粗实线代表研究时段内每天晚上 2 点的水汽含量。为了方便对比, 同时增加了 2 条参考曲线: 多年平均值曲线(黑色细实线), 即 2000 年到 2014 年每天夜间 2 点水汽含量平均值; 最大参考值曲

线(黑色虚线), 为多年平均值加上 1.5 倍标准差, 凡超过这条曲线可以看作是异常。

### 4.1 2004 年 9 月 17 日阳江 4.9 级地震

阳江地区活动性最强的断裂是北东东向平冈断裂和北西向洋边海断裂, 它们都是晚更新世以来强烈活动过的断裂, 1969 年曾发生 6.4 级地震, 之后小震频繁发生, 1986 年又发生 5.1 级地震<sup>[16]</sup>。2004 年 9 月 17 日阳江  $M_s$  4.9 级地震是此后记录到的最大地震, 发生在平冈镇, 震源深度 12 km, 震中位于东经 111.87°, 北纬 21.77°(据中国地震台网中心)。

图 5 是 2004 年 9 月 17 日阳江  $M_s$  4.9 级地震前后 7~12 月夜间水汽含量变化曲线。从图中可以看到, 在 8 月 25 日到 8 月 30 日, 出现了一个持续 6 天的异常, 最大值达到 73 mm, 明显超过最

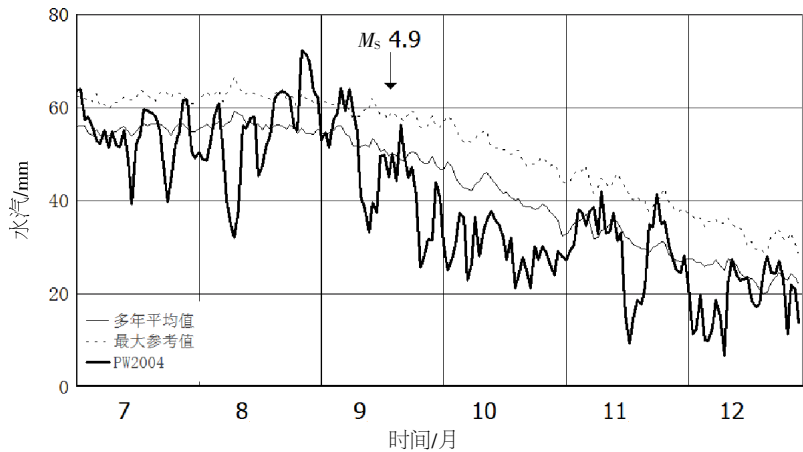


图 5 2004 年 7~12 月阳江 4.9 级地震震中区水汽变化曲线

Fig.5 Variation curve of water vapor in the epicenter area of the  $M_s$  4.9 Yangjiang earthquake from July to December in 2004

大参考值(图中虚线)。9 月 5 日至 9 日再次出现疑似异常,异常平静后 8 天发生地震。

为了研究此次地震异常的空间分布情况,本文做出了这个地震的异常增量空间分布图。异常期间水汽增量的空间分布图计算方法为:针对每个格点,先计算异常时段内水汽含量平均值,然后计算同一时段从 2000 年到 2014 年共 15 年的多年平均值作为背景值,最后用异常时段平均值与

多年背景值相减得到水汽含量增量,所有格点计算完毕就得到该时段研究区水汽增量分布图。

图 6 为 2004 年 8 月 25 日到 8 月 30 日水汽含量增量分布图。可以看到在这一时段水汽增量表现出西南高东北低,高值区北东向展布的特点。粤东地区水汽增量 4 mm 左右;粤西地区,特别是震中附近地区水汽增量最大,达到 9 mm,并主要局限于北东向构造带附近。

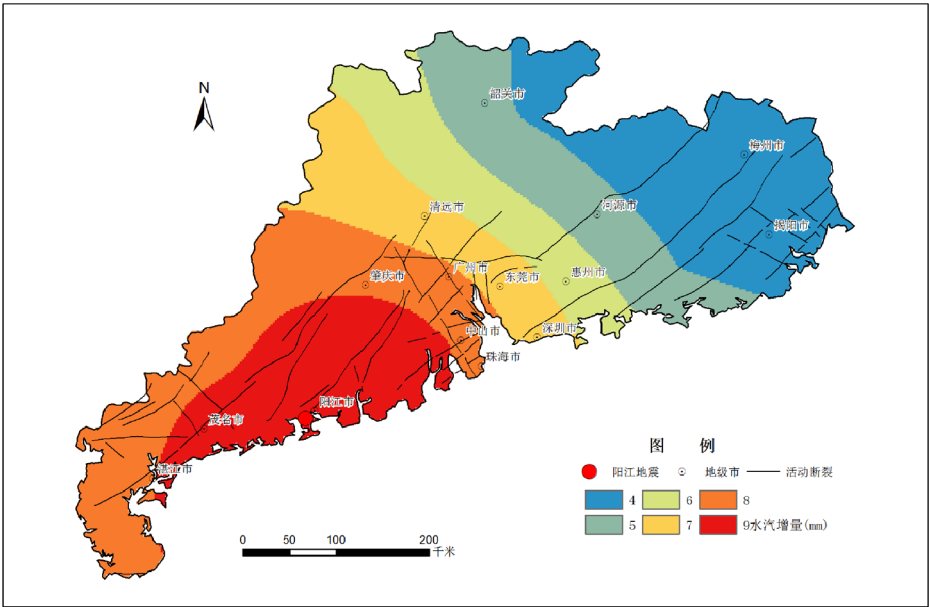


图 6 2004 年 9 月 17 日阳江 4.9 级地震前水汽异常分布

Fig.6 Spatial distribution of  $\Delta PW$  before the Yangjiang  $M_s$  4.9 earthquake in September 17<sup>th</sup>, 2004 from August 25<sup>th</sup> to August 30<sup>th</sup>, 2004

4.2 2012、2013 年河源 2 次 4.8 级地震

广东河源地区于 2012 年 2 月 16 日发生 4.8 级地震,震中位于东源县新丰江水库区(23.9°N, 114.5°E),震源深度 10 km。2013 年 2 月 22 日在

同一地区再次发生 4.8 级地震,震源深度 11 km。北西-北北西向的断裂带可能是 2 次河源 4.8 级地震的主要发震构造<sup>[7]</sup>。图 7 是 2012 年 1~6 月河源  $M_s$  4.8 级地震前后水汽含量随时间变化曲线,在 1



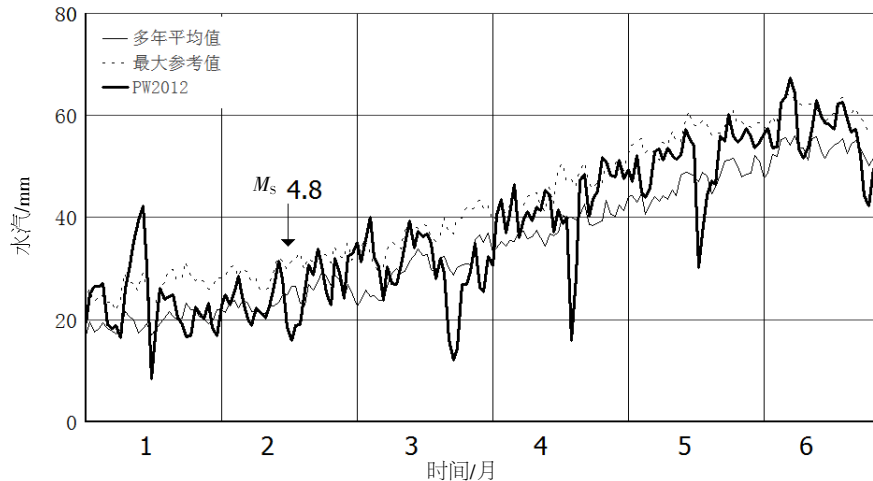


图 7 2012 年 1~6 月河源  $M_s$  4.8 级地震震中区水汽变化曲线

Fig.7 Variation curve of water vapor in the epicenter area of the Heyuan  $M_s$  4.8 earthquake from January to June in 2012

月 10 日至 1 月 15 日, 水汽含量出现异常, 持续 6 天超过最大参考值。

为了剖析异常的原因, 本文还分析了地震前后同一时段世界时 18 时的气温动态, 所用数据时间段与水汽含量数据相同, 2000 年到 2014 年。本研究计算了 15 年震中区的平均气温和最大参考值 (15 年平均值加上 1.5 倍均方差), 将多年平均值、最大参考值、2012 年河源 4.8 级地震震中区 1~6

月气温变化曲线绘制在一张曲线图上得到图 8。显著的气温异常出现在地震前后 1 周, 在地震前 2 天气温达到 292 K, 比多年参考值高出 3 度, 地震后 2 天也出现了高温异常现象。此外, 在 2012 年 1 月中旬, 震中区气温也出现上升趋势, 1 月 14 日气温超过最大参考值, 与水汽出现异常的时段重合, 说明此次地震前的水汽含量增加与本地温度升高有关, 可能是地震前的异常反应。

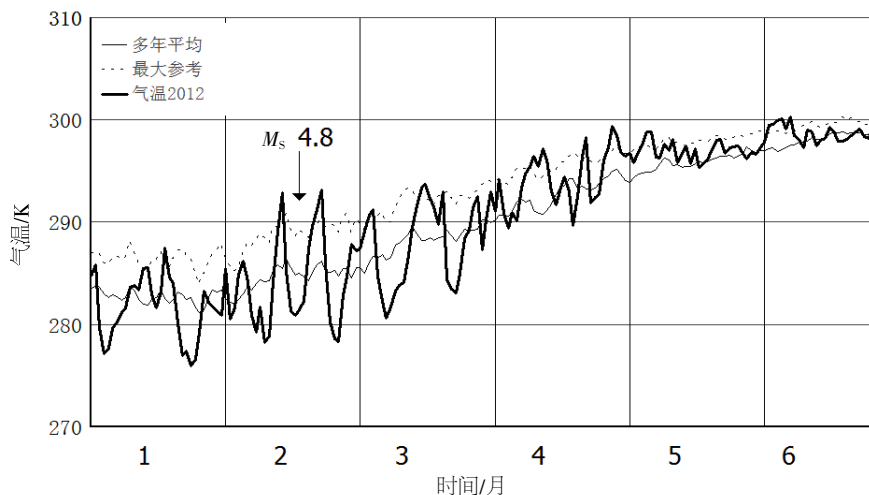


图 8 2012 年 1~6 月河源 4.8 级地震震中区气温变化曲线图

Fig.8 Curve of the 2-meter air temperature in the epicenter area of the Heyuan  $M_s$  4.8 earthquake from January to June in 2012

图 9 为 2013 年 1~6 月河源 4.8 级地震前后震中区水汽变化曲线, 在地震前半个月, 1 月 30 日到 2 月 4 日, 震中区水汽含量超过最大参考值, 出现持续 5 天的异常, 其最大值达到 40 mm, 超过平均值 30 多毫米, 也超出最大参考值 10 多毫

米。图 10 为 2013 年 2 月 22 日河源 4.8 级地震前后气温变化曲线图, 从中可以发现, 在水汽出现异常的时段, 气温也出现了显著异常。最大异常气温超出最大参考值 6℃。这也说明此次地震前的水汽含量增加与本地温度升高, 水汽蒸发作用增

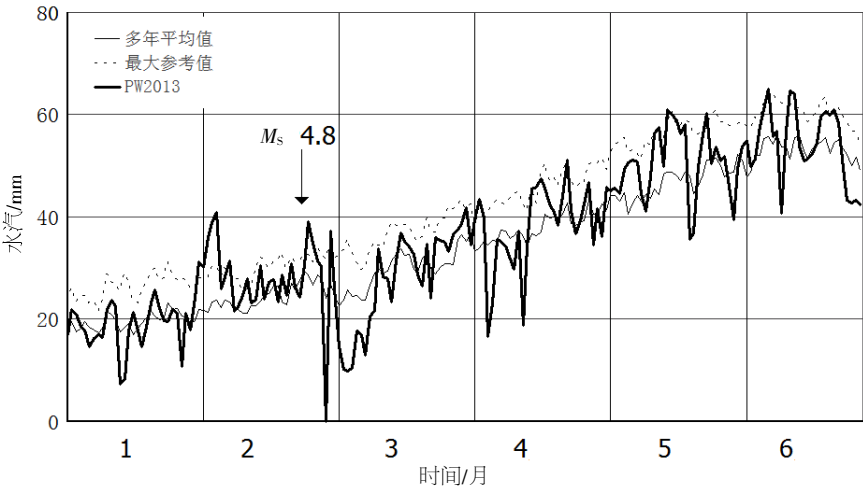


图 9 2013 年 1~6 月河源  $M_s$  4.8 级地震震中区水汽变化曲线图

Fig.9 Variation curve of water vapor in the epicenter area of the Heyuan  $M_s$  4.8 earthquake from from January to June in 2013

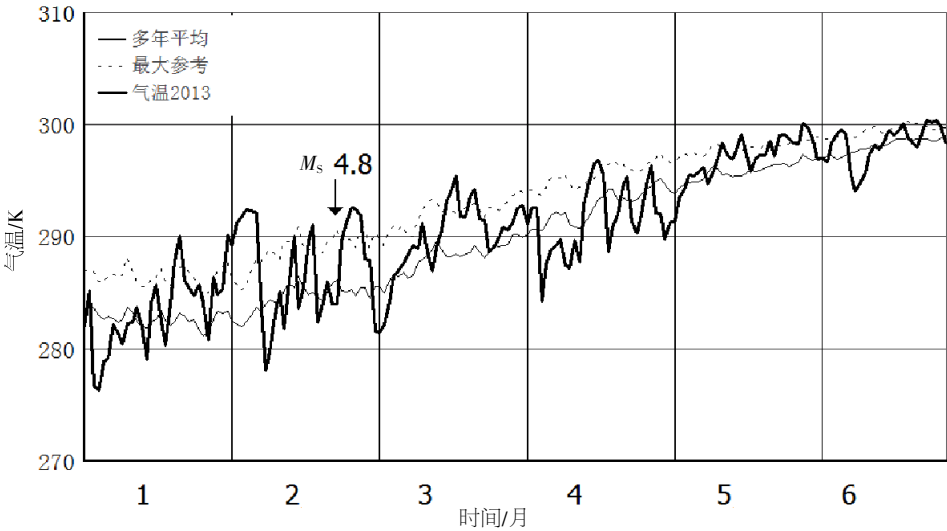


图 10 2013 年 1~6 月河源 4.8 级地震震中区气温变化曲线图

Fig.10 Curve of the 2-meter air temperature in the epicenter area of the Heyuan  $M_s$  4.8 earthquake from January to June in 2013

强有关，可能是地震前的异常反应。地震之后 2 天气温再次出现短暂异常，异常值超过 2℃。

从上述 3 个震例分析可以看出，在地震前 1 个月以内震中区都出现了显著的水汽含量增加的现象，异常幅度超过平均值 30 mm，高值区沿构造带展布，并在水汽含量出现异常的同时，伴随着地表气温的异常，说明水汽含量增加与震中区热作用增强有关，可能是地震前的异常反应。

### 5 结语

本文根据中国大陆构造环境监测网络（简称陆态网）和广东省地震局建设的广东省地壳运动观测网络提供的 GPS 数据反演水汽含量，并与

ECMWF 水汽含量进行对比，二者拟合很好，说明 GPS 反演结果是可靠的，同时也说明可以用 ECMWF 水汽含量数据补充 GPS 反演的水汽数据，来构建地震研究需要的长时间的水汽含量数据库。作者利用广东地区现有的 GPS 数据反演的水汽含量数据和 ECMWF 水汽含量数据研究了 2000 年以来  $M_s$  4.8 级以上地震前的水汽含量时空分布特征，发现震前 1 月内都出现了短临异常，持续时间 5~6 天，异常区分布在震中附近，水汽含量异常幅度大于多年平均值的 30 mm 以上。为了剖析异常的原因，研究中还分析了地震前后同一时段世界时 18 时的气温动态，结果发现在地震前水汽异常时段都伴随有地表气温异常，说明水汽含量增加与



震中区热作用增强,水汽蒸发加速有关,可能是地震前的异常反应。

致谢: 中国大陆构造环境监测网络和广东省地壳运动观测网络提供了 GPS 数据, ECMWF (欧洲中期天气预报中心) 提供了水汽含量以及地表温度数据, 在此表示感谢。

## 参考文献:

- [1] Dey S, Singh R P. Surface latent heat flux as an earth-quake precursor[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2003 (3): 749-755.
- [2] 吴立新, 刘善军, 陈云浩, 等. 汶川地震前卫星热红外异常与云异常现象[J]. 科技导报, 2008, 26 (10): 28-29
- [3] 陈梅花, 邓志辉, 马晓静, 强地震前水汽中长期异常变化特征研究[J]. 地震地质, 2011, 33 (3): 863-872.
- [4] 邓志辉, 陈梅花, 杨竹转, 等. 芦山地震、汶川地震与龙门山地区水汽异常[J]. 地震地质, 2013, 36 (3): 658-666.
- [5] Singh R, Simon B, Joshi P C. 2001. Estimation of surface latent heat fluxes from IRSP4/ MSMR satellite data [J]. Proc. Indian Acad.Sci. (Earth Planet Science), 110 (3): 231-238.
- [6] CHEN Mei-hua, DENG Zhi-hui, YANG Zhu-zhuan, et al. Surface Latent Heat Flux Anomalies Prior to the Indonesia Mw9.0 Earthquake of 2004. Chinese Science Bulletin, 2006, 51 (8): 1010-1013.
- [7] 严研, 邓志辉, 陈梅花, 等. 基于双温度差分双源模型的遥感方法反演四川汶川地区的潜热通量[J]. 地震地质, 2008, 30 (4): 1 085-1 094.
- [8] 陈梅花, 邓志辉, 马晓静. 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气温变化的关系[J]. 地球物理学报, 2011, 54 (7): 1 738-1 744.
- [9] 陈梅花, 邓志辉, 王煜, 等. 2005 年九江 5.7 级地震前后地表热动态初步研究[J]. 地震地质, 2007, 29 (3): 617-626.
- [10] 王晓英, 戴仔强, 曹云昌, 等. 中国地区地基 GPS 加权平均温度  $T_m$  统计分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36 (4): 412-416.
- [11] 李国平. 地基 GPS 水汽监测技术及气象业务化应用系统的研究[J]. 大气科学学报, 2011 (4): 385-392
- [12] 姚建群, 丁金才, 王坚捍. 用 GPS 可降水量资料对一次大暴雨过程的分析[J]. 气象, 2005, 31 (4): 48-52.
- [13] 李川, 张廷军, 陈 静. 近 40 年青藏高原地区的气候变化——NCEP 和 ECMWF 地面气温及降水再分析和实测资料对比分析[J]. 高原气象, 2004 (S1): 97-103.
- [14] 麻巨慧, 朱跃建, 王盘兴, 等. NCEP、ECMWF 及 CMC 全球集合预报业务系统发展综述[J]. 大气科学学报, 2011, 34 (3): 370-380.
- [15] 王 雨, 张 颖, 傅云飞, 等. 第三代再分析水汽资料的气候态比较[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45 (12): 1 895-1 906
- [16] 叶秀薇, 杨马陵, 叶东华, 等. 2004 年 9 月 17 日阳江 4.9 级地震概述[J]. 华南地震, 2005, 25 (3): 69-77.
- [17] 刘特培, 刘吉平, 李键梅, 等. 2012 年河源 M4.8 级地震活动特征及预测研究[J]. 华南地震, 2012, 32 (2): 20-36.