

2009 年青海海西地震序列的潜热通量异常时空特征

秦凯¹, 吴立新², 马未宇¹

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2. 北京师范大学; 民政部/教育部减灾与应急管理研究院; 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875

摘要 采用美国国家环境预报中心(NCEP)的地表潜热通量资料, 对2009年8月28日青海海西6.4级地震及其余震前的潜热变化过程进行分析发现, ①主震前6d, 震中附近开始出现潜热异常, 然后异常幅度增强、面积扩大, 并向震中迁移; ②余震前也出现了明显的潜热异常, 但其时空演化过程不同于主震前的潜热异常; ③潜热异常位置与震中具有良好的空间对应关系, 其中都兰余震前的潜热异常位置与震中位置重合。本案例分析表明, 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(LCA)效应, 进一步的研究有望揭示特定地震区震前及余震序列的潜热通量异常规律, 有益于地震监测预报研究与防灾减灾。

关键词 海西地震; 潜热通量; 地震序列; 余震; 临震异常

中图分类号 P315.02, P237

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)04-0068-06

Spatial-temporal Features of Abnormal Surface Latent Heat Flux Before the Qinghai Haixi Earthquake Sequence in 2009

QIN Kai¹, WU Lixin², MA Weiyu¹

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management; Key Laboratory of Environment Change and Natural Disaster of Ministry of Education; Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract Remote sensing technology can be used to obtain accurately the variation of Surface Latent Heat Flux (SLHF), therefore, can serve as a means for long-term monitoring of SLHF for tectonic activities and earthquakes (EQ). In this paper, the SLHF data from NCEP are used to analyze the variation of latent heat before Qinghai Haixi Ms 6.4 earthquake on August 28, 2009 and its aftershocks. Several conclusions are drawn. (1) SLHF anomaly started to appear around the epicenter 6 days before the main shock. Then it continued to develop in intensity and extent, and moved to the coming epicenter. It disappeared when the main shock came. The maximum SLHF reaches 70W/m². (2) SLHF anomaly also appeared before aftershocks, but in a different spatio-temporal evolving process. The evolving processes are multi-revolving with cycling features. (3) There is a good spatial corresponding relation between SLHF anomalies and the epicenters. The strong abnormal area corresponds to the main shock, while a weak abnormal area corresponds to aftershocks. Particularly, the SLHF anomaly is located exactly at the coming epicenter in Dulan aftershock. This case implies that SLHF anomaly before earthquakes should be a Lithosphere-Coversphere-Atmosphere (LCA) coupling effect in the earthquake preparation period, especially, in the impending-earthquake process. The features of SLHF anomaly before the main shock and aftershocks in seismic active regions might be important in future researches, and can be used in earthquake monitoring, prediction, hazard warning and disaster reduction.

Keywords Haixi earthquake; Surface Latent Heat Flux(SLHF); earthquake sequence; aftershock; impending anomaly

收稿日期: 2009-12-14

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50525414)

作者简介: 秦凯, 博士研究生, 研究方向为地震遥感与数字减灾, 电子信箱: qinkai20071014@163.com; 吴立新(通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: E381010119S), 教授, 研究方向为灾变遥感与灾害测量、数字减灾与数字矿山、空间信息理论与方法等, 电子信箱: awulixin@263.net



0 引言

震源系统在孕震过程中积累了大量能量,通过辐射、感热、潜热等方式释放出来。地表潜热通量(Surface Latent Heat Flux,SLHF)反映了地表系统与大气之间的水热交换,它主要是由于水的相变(凝结、蒸发、融化)所吸收或释放的热量。2003年Dey等^[1]首次发现了印度沿海地区强震前普遍存在潜热通量异常,而内陆地震前未出现异常。Cervone等^[2]为剔除气候变化和地理因素对SLHF的影响,采用小波分析法提取震前SLHF异常;Pulinets等^[3-4]分析了2003年墨西哥Colima 7.8级地震前SLHF异常、空气湿度变化和电离层异常之间的关系,利用Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling(LAIC)模型解释地震前SLHF异常。李金平等^[6]对4次中国沿海和内陆强震分析发现,内陆地震也有SLHF异常,该异常主要分布在震中及其周围地区,且与区域内的主要活动构造带走向一致;秦凯等^[7]分析了5次中国内陆地震,同样发现了潜

热异常前兆。目前,关于震前SLHF异常的物理机制尚未完全清楚,但作为一种临震前兆信息应是无疑的^[1-7]。

当前研究主要分析单一典型震例的SLHF异常特征,未见地震序列的SLHF时空演化特征研究报道。本文分析2009年8月28日青海海西地震序列的SLHF时空演化特征。

1 数据与处理方法

2009年8月28日,青海省海西蒙古族藏族自治州大柴旦镇发生6.4级地震,截至11月20日,海西地区共发生4级以上余震20次,本文从中国地震台网中心(<http://www.ceic.ac.cn/>)收集了地震相关参数(表1)。SLHF数据来自美国气象环境预报中心和国家大气研究中心(<http://iridl.ldeo.columbia.edu/>),该数据集从赤道($L=0$)到极点($L=88.54196$)划分94条高斯格网线,经向按 1.875° 划分192条格网线,全球共构成18048个SLHF日值数据像元,数据精度 $10\sim 30\text{W/m}^2$ ^[8-9]。

表 1 2009 年海西地震序列相关参数
Table 1 Related parameters of Haixi earthquake sequence of 2009

地点(上标为时序)	发震日期	发震时刻	震中	震级(Ms)	震源深度/km
大柴旦 ¹	2009-08-28	09:52:06	37.7°N,95.8°E	6.4	7
大柴旦 ²	2009-08-28	10:14:56	37.6°N,95.8°E	5.3	7
大柴旦 ³	2009-08-28	12:28:39	37.7°N,95.8°E	4.3	7
大柴旦 ⁴	2009-08-28	18:13:56	37.7°N,95.8°E	4.0	7
大柴旦 ⁵	2009-08-29	00:28:40	37.7°N,95.8°E	5.0	7
大柴旦 ⁶	2009-08-30	02:43:50	37.7°N,95.8°E	4.1	7
大柴旦 ⁷	2009-08-31	00:41:34	37.6°N,95.6°E	4.0	6
大柴旦 ⁸	2009-08-31	01:15:51	37.7°N,95.7°E	5.0	7
大柴旦 ⁹	2009-08-31	18:15:27	37.7°N,95.9°E	5.9	10
大柴旦 ¹⁰	2009-09-01	05:51:35	37.7°N,96.0°E	4.6	8
大柴旦 ¹¹	2009-09-01	06:27:49	37.7°N,95.9°E	4.4	6
大柴旦 ¹²	2009-09-01	08:16:08	37.7°N,95.9°E	4.2	10
大柴旦 ¹³	2009-09-01	18:06:50	37.7°N,95.7°E	4.0	6
大柴旦 ¹⁴	2009-09-04	16:12:55	37.6°N,95.8°E	4.1	8
大柴旦 ¹⁵	2009-09-10	08:20:10	37.6°N,96.0°E	4.7	8
大柴旦 ¹⁶	2009-09-17	17:24:17	37.7°N,96.0°E	4.2	8
大柴旦 ¹⁷	2009-09-18	08:43:23	37.7°N,95.7°E	4.3	8
大柴旦 ¹⁸	2009-09-18	14:53:48	37.7°N,95.7°E	4.6	5
大柴旦 ¹⁹	2009-09-18	15:02:11	37.7°N,95.7°E	4.9	5
都兰 ²⁰	2009-09-28	10:43:21	35.7°N,95.8°E	4.1	7
大柴旦 ²¹	2009-11-05	05:56:09	37.6°N,95.8°E	5.1	6

为研究地震前后震中附近一定区域内的SLHF变化,对数据集进行如下处理。

1) 计算过去10年(1999—2008)研究区域内各像元的同日平均值及其标准差。同日平均值代表特定像素点全年各天的SLHF基本背景。以同日平均值加2倍标准差,作为该像元的背景噪声变化边界。

2) 计算震前潜热通量变化值 $\Delta SLHF$:

$$\Delta SLHF=SLHF-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n SLHF_i$$

其中, $SLHF$ 为发震年的潜热通量日值数据, $SLHF_i$ 为过去无震年份的潜热通量日值数据, n 为年数。根据SLHF数据精度,分析时当 $\Delta SLHF$ 超过 $\pm 30\text{W/m}^2$ 时视为异常。空间范围取 $10^{\circ}\times 10^{\circ}$,时间范围取8、9两个月。

2 震区构造背景与历史地震

青海海西地震序列震区位于青藏高原北部,柴达木盆地东北部,属于祁吕贺兰山字型构造体系。震区地质构造规模大、活动性强,活动断裂区常密集成带状分布,不少断裂绵延

上千公里,切入地壳深部,并且有发育历史悠久和多期活动的特点。主要断裂有:F1 阿尔金断裂,F2 宗务隆山南断裂带,F3 宗务隆山-青海湖南断裂带,F4 阿尼玛卿断裂,F5 玉树南断裂等。这些活动断裂带多数是在原有断裂的基础上发育起来的,它们不仅制约着山系盆地的发展与发育,而且控制着本区现今构造运动,成为中强地震带^[10-11]。

该地区历史上曾经发生过多次中强地震。据中国地震台网中心地震目录显示,从 2003 年至今,大柴旦地区共发生 5 级以上地震 14 次、6 级以上地震 3 次(即 2003 年 4 月 17 日德令哈 6.6 级地震、2008 年 11 月 10 日大柴旦 6.3 级地震和 2009 年 8 月 28 日大柴旦 6.4 级地震)。

3 潜热通量时空变化分析

3.1 SLHF 时序变化特征

SLHF 的大小与下垫面的物理状态、植被状况和降水变化密切相关,其变化受大气相对湿度、风速以及下垫面温度等因素的影响,具有一定的节律性^[6]。本文分析了主震与余震震中附近像元 (37.1423°N, 95.625°E; 35.2375°N, 95.625°E) 的 SLHF 时序变化情况(图 1)。图中黑色线是 2009 年的 SLHF 变化曲线,粉红色线是过去 10 年的日平均值 μ 曲线,浅蓝色区域是均值加减 2 倍标准差 σ ,代表噪音变化范围,箭头所指为发震时刻。

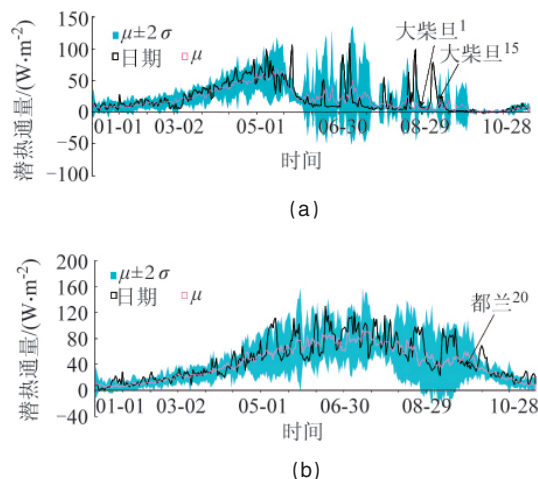


图 1 大柴旦¹主震震中附近像元(37.1423°N, 95.625°E)(a)和都兰²⁰余震震中附近像元(35.2375°N, 95.625°E)(b)的 SLHF 时序变化特征

Fig. 1 Temporal features of SHLF in the pixel (37.1423°N, 95.625°E) near the epicenter of Dachaidan¹ main-shock (a) and the pixel (35.2375°N/95.625°E) near the epicenter of Dulan²⁰ after shock (b)

从图 1(a)可以看到,像元(37.1423°N, 95.625°E)的 SLHF 变化特征从 2009 年 1 月 1 日到 5 月 25 日期间,与多年平均值变化特征相似,随气温上升而上升;5 月 26—28 日,SLHF 出现一个峰值,但随即下降到正常水平;7 月 6 日该地区发生 3.6 级的小地震,可能与此次 SLHF 峰值有关;5 月 29 日到 8

月 21 日期间,SLHF 在多年平均值上下波动,出现数个高值,但未超过 2 倍标准差。8 月 22—25 日,SLHF 突然大幅度上升且超出 2 倍标准差,最大变化值达到 100W/m²,表现出十分明显的震前异常。8 月 26 日至 9 月 4 日,SLHF 下降到正常水平;9 月 5—9 日,SLHF 再次上升且超出 2 倍标准差,表现出震前异常;之后,SLHF 下降到正常水平。

从图 1(b)可以看到,像元(35.2375°N, 95.625°E)的 SLHF 总体变化特征与多年平均值基本相似,即随气温变化先上升后下降;8 月 23—26 日,9 月 10 日、19 日 SLHF 出现数个高值,超过 2 倍标准差,这些可能是都兰²⁰地震的震前异常。

3.2 SLHF 时空变化特征

8 月 28 日 09:52,海西大柴旦镇发生 6.4 级地震,截止 9 月 4 日共发生了 5 次 4 级以上余震。这次地震序列震源深度都在 8km 以下,属于浅源地震(表 1)。分析此次地震序列前的 SLHF 时空变化(图 2)特征发现,22 日震中南边开始出现异常, $\Delta SLHF$ 最大值为 30~40W/m²;23 日出现两个异常区域,一个在震中东北方向呈片状,一个在震中西边呈椭圆形,且异常幅度增强, $\Delta SLHF$ 最大值达到 50~60W/m²;24 日两异常区域以震中为中心连成片,强异常区紧邻震中, $\Delta SLHF$ 的最大值达到 70W/m²;25 日强异常区面积扩大,覆盖震中;26 日震中 $\Delta SLHF$ 恢复正常,南边出现一个圆形异常区域;27 日震中平静无异常,进入临震状态;28 日主震发生。此次地震序列前的 SLHF 异常表现为起始—增强—高峰—平静—发震的演变过程。

9 月 10 日 08:20,海西大柴旦镇发生了 4.7 级余震,截止到 9 月 18 日共发生了 14 次 4 级以上余震,这次地震序列震源深度都在 10km 以下,也属浅源地震(表 1)。分析此次余震序列前的 SLHF 时空变化(图 3)特征发现:6—8 日震中及附近区域出现明显异常, $\Delta SLHF$ 最大值为 70W/m²;9 日异常向西移动;10 日异常继续西移,南边出现弱异常区域,震中恢复正常,当日地震发生。此次地震序列前的 SLHF 异常表现为起始—稳定—平静—发震的演变过程。

9 月 28 日 10:43,海西都兰县发生 4.1 级余震,震中位于(35.7°N, 95.8°E),与前几次地震几乎位于同一经度,只是纬度往南偏移了约 2°。分析此次余震前的 SLHF 时空变化(图 2、图 4)特征发现,主震前(8 月 22、23、26 日)就在此次余震位置出现明显的 SLHF 异常,其中,8 月 26 日异常区域正好位于未来的震中位置,且幅度较大(图 2);随后,震中 $\Delta SLHF$ 恢复正常,9 月 10 日震中再次出现明显异常,11—12 日异常趋势减弱,13 日异常消失,14 日震中再次出现异常,15—17 日,异常逐渐增强且与未来震中重合,18 日震中 $\Delta SLHF$ 恢复正常,19 日震中再次出现异常,20 日震中 $\Delta SLHF$ 恢复正常,21 日直到 28 日发震,均无明显异常(图 4)。此次余震前的 SLHF 异常孕育时间长,早在主震前就出现了明显异常,表现为一个反复的演变过程,即:起始—稳定—平静—再出现—衰减—平静—再出现—增强—稳定—平静—发震。8 月 26 日、9 月 15—17 日、19 日的 SLHF 异常的空间位置与此次余震震中位置重合。

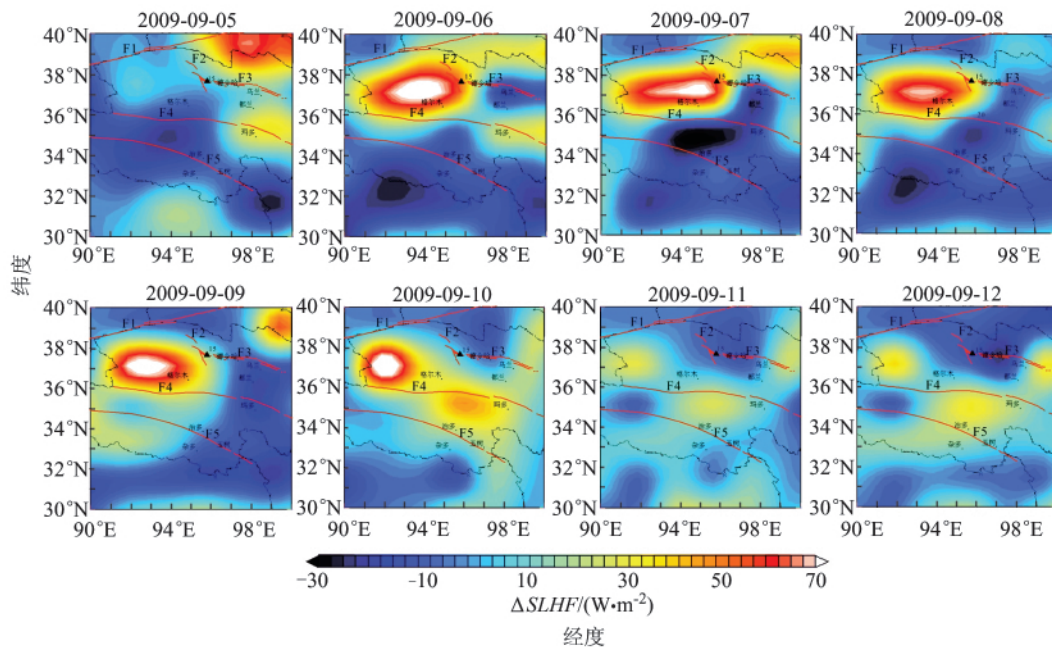


图2 大柴旦¹主震前 $\Delta SLHF$ 时空分布(▲为震中位置,——为主要断层)

Fig. 2 Spatial-temporal distribution of $\Delta SLHF$ before the main-shock (▲ indicates the epicenter of Dachaidan¹ main shock, —— indicates regional main faults)

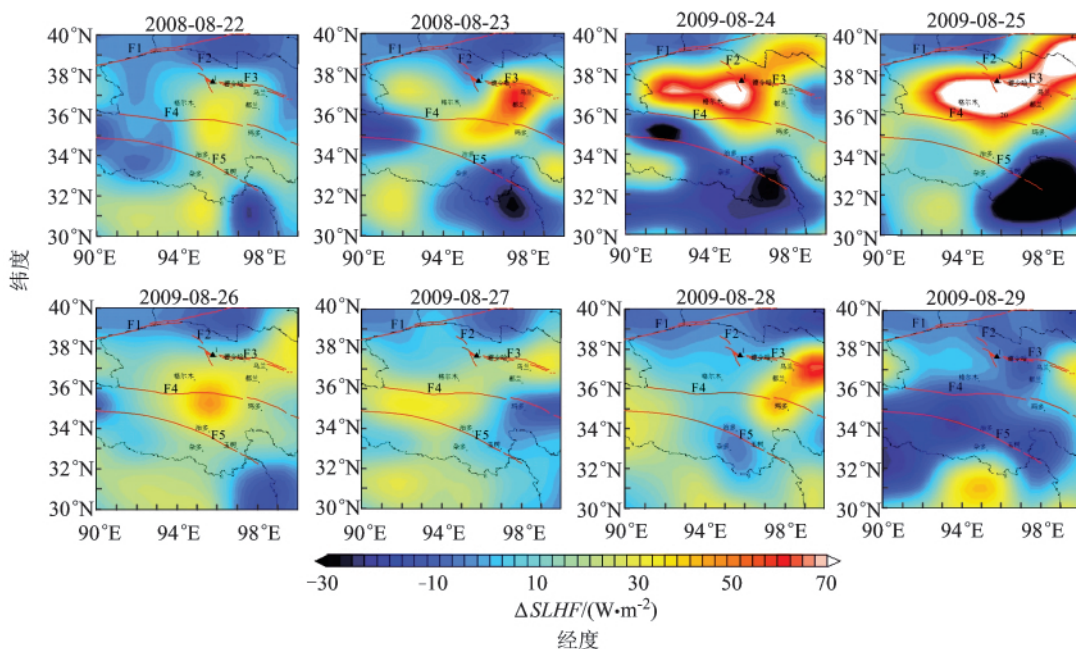


图3 大柴旦¹⁵余震震前 $\Delta SLHF$ 时空分布(▲为震中位置,——为主要断层)

Fig. 3 Spatial-temporal distribution of $\Delta SLHF$ before Dachaidan¹⁵ aftershock (▲ indicates the epicenter, —— indicates regional main faults)

4 结论

经过上述分析,得出以下主要结论。

1) 青海海西地震序列存在明显的 $SLHF$ 异常前兆,表现为3个不同的演变过程:8月28日至9月4日主震及余震前的 $SLHF$ 异常表现为起始—增强—高峰—平静—发震的演变

过程;9月10日至9月18日余震前的 $SLHF$ 异常表现为起始—稳定—平静—发震的演变过程;9月28日余震前的 $SLHF$ 异常表现为一个反复的演变过程,即:起始—稳定—平静—再出现—衰减—平静—再出现—增强—稳定—平静—发震。

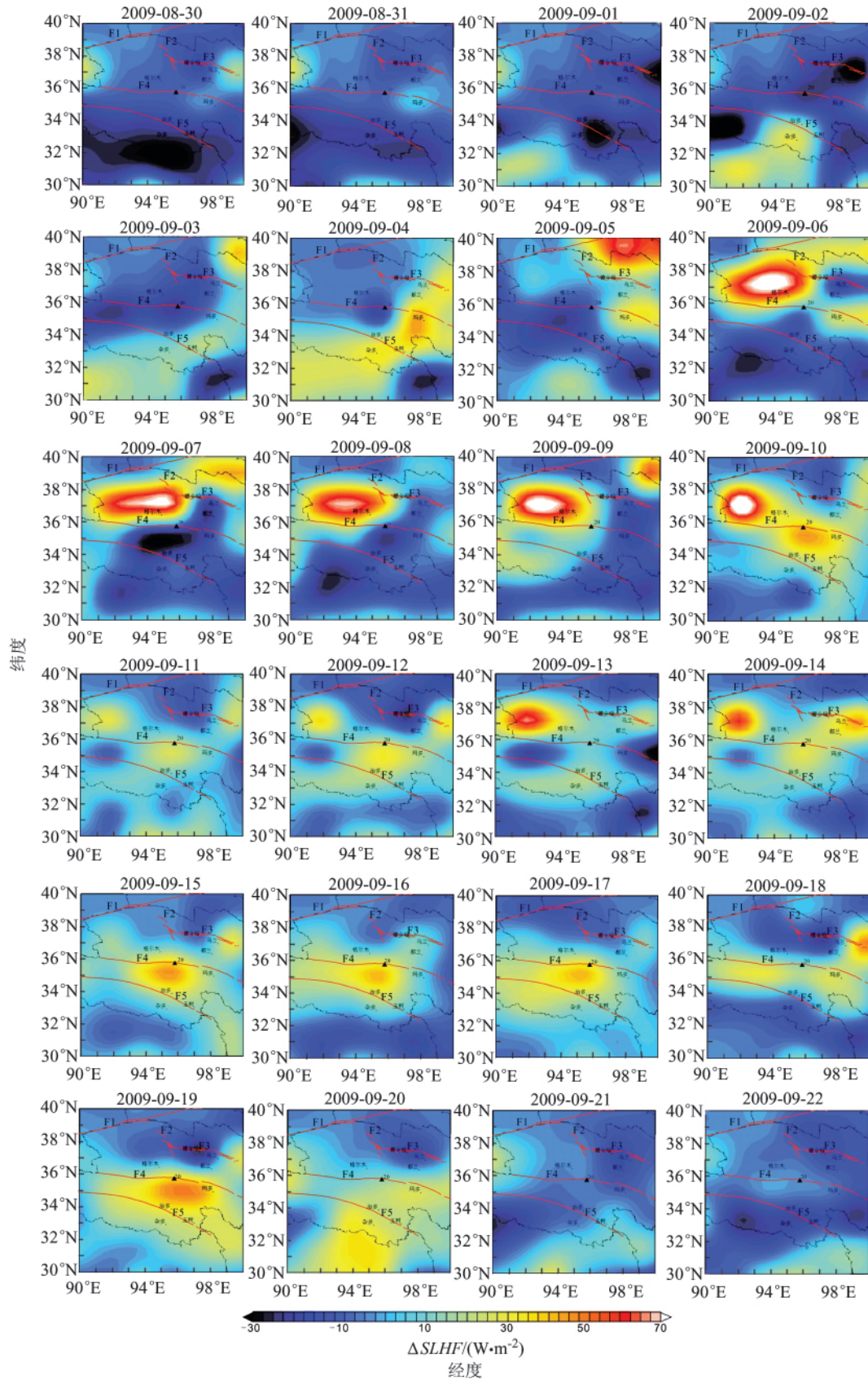


图 4 都兰²⁰余震震前 $\Delta SLHF$ 时空分布 (▲为震中位置, —为主要断层)

Fig. 4 Spatial-temporal distribution of $\Delta SLHF$ before Dulan²⁰ aftershock (▲ indicates the epicenter location, — indicates regional main faults)

2) 青海海西地震序列的震前 SLHF 异常位置与震中位置有良好的空间对应关系。

内陆地震是岩石圈活动构造应力积累与运动失稳的结果。在孕震过程中,岩石圈通过地表层与大气层进行广泛的物质与能量交换,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 (Lithosphere-Coversphere-Atmosphere Coupling, LCA) 效应^[12]。孕震区潜热异常既受到区域断层控制,又受到不同盖层的影响,其中水体、植被、土壤等不同的地表盖层必然对震前热异常信号产生放大或缩小作用。中国内陆许多强震后一般都有大量余震发生,通过同一地震区多个地震的 SLHF 序列分析,并综合其他监测数据和物理参数深入揭示不同震区主震及其余震的 SLHF 前兆特点与基本规律,意义重大。这对地震活跃区主震及其余震的遥感监测、预警和防震减灾有实用价值。

参考文献 (References)

- [1] Dey S, Singh R P. Surface latent heat flux as an earthquake precursor[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, 3: 749-755.
- [2] Cervone G, Kafatos M, Napoletani D, et al. Wavelet maxima curves associated with two recent great earthquakes [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2004, 4: 359-374.
- [3] Pulinet S A, Ouzounov D, Ciralo L. Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003[J]. *Ann Geophys*, 2006, 24: 835-849.
- [4] Pulinet S A, Ouzounov D, Karelin A V, et al. The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes [J]. *Physics and*

Chemistry of the Earth, 2006, 31: 143-153.

- [5] Chen M H, Deng Z H, Yang Z Z. Surface latent heat flux anomalies prior to the Indonesia MW9.0 earthquake of 2004[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(1): 118-120.
- [6] 李金平, 吴立新, 温志勇, 等. 中国沿海和内陆强震前的地表潜热通量异常特征[J]. *科技导报*, 2008, 26(5): 40-44.
Li Jinping, Wu Lixin, Wen Zhiyong, et al. *Science & Technology Review*, 2008, 26(5): 40-44.
- [7] Qin K, Guo G, Wu L. Surface latent heat flux anomalies preceding inland earthquakes in China[J]. *Earthquake Science*, 2009, 22: 555-62.
- [8] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-471.
- [9] Smith S R, Legler D M, Verzone K V. Quantifying uncertainties in NCEP reanalysis using high quality research vessel observation[R]. CLIMAR 99. WMO Workshop on Advances in Marine Climatology, Vancouver, 8-15 Sept, 1999: 223-230.
- [10] 陈有顺, 李文巧, 哈辉. 青海省海西州大柴旦 6.3 级地震房屋震害调查与分析[J]. *震灾防御技术*, 2009, 4(1): 117-120.
Chen Youshun, Li Wenqiao, Ha Hui. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2009, 4(1): 117-120.
- [11] 姜枚, 许志琴, 钱荣毅, 等. 青海省海西州大柴旦 6.3 级地震房屋震害调查与分析[J]. *中国地震*, 2006, 33(2): 268-273.
Jiang Mei, Xu Zhiqin, Qian Rongyi, et al. *Geology in China*, 2006, 33(2): 268-273.
- [12] Wu L, Liu S. Remote sensing rock mechanics and earthquake infrared anomalies[M]//Jedlovac G. *Advances in Geosciences & Remote Sensing*. Sweden, In-Tech, 2009.

(责任编辑 朱宇)

·学术动态·



“第二届亚洲阿登制药技术研讨会暨中国药学会 药剂专业委员会 2010 年学术年会”征文

由中国药学会和美国药科学家协会 (American Association of Pharmaceutical Scientists)、中国药学会药剂专业委员会共同主办,沈阳药科大学和辽宁省药学会承办的“第二届亚洲阿登制药技术研讨会暨中国药学会药剂专业委员会 2010 年学术年会”将于 2010 年 6 月 11-13 日在沈阳召开,会议主题为“难溶药物的剂型策略”。

会议现面向相关科技工作者征文,全文截止日期:2010 年 5 月 20 日。

联系方式:北京市朝阳区建外大街四号建外 SOHO 九号楼 18 层 1802 室 (100022),赵临襄

电话:024-23986083

传真:024-23896576

电子信箱: sypukyc@163.net