

遥感学报

Yaogan Xuebao

第 24 卷 第 6 期 2020 年 6 月

目 次

学者观点

生态系统遥感:内涵与挑战 吴炳方, 曾源, 闫娜娜, 曾红伟, 赵旦, 张森 (609)

综述

2019年中国陆表定量遥感发展综述

梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 程洁, 范闻捷, 何涛, 贾坤, 江波, 蒋玲梅, 焦子锑, 刘元波, 倪文俭, 邱凤, 宋柳霖, 孙林, 唐伯惠, 闻建光, 吴桂平, 谢东辉, 姚云军, 袁文平, 张永光, 张玉珍, 张云腾, 张晓通, 赵天杰, 赵祥 (618)
中国空间辐射测量基准技术 卢乃锰, 丁雷, 郑小兵, 叶新, 李传荣, 吕达仁, 张鹏, 胡秀清, 周成虎, 尤政, 房建成, 龚建雅, 蒋兴伟, 李建军, 马灵玲, 徐娜 (672)

汶川地震前多圈层短—临遥感异常回顾及其时空关联性 何苗, 吴立新, 崔静, 王威, 齐源, 毛文飞, 苗则朗, 陈必焰, 申旭辉 (681)
测绘地物波谱本底数据库 钟守熠, 肖青, 闻建光, 郑兴明, 马明国, 屈永华, 郑柯, 池天河, 唐勇, 游冬琴, 郝大磊, 程娟, 贺敏, 姜涛, 晋锐, 姚晓婧, 赵理君 (701)

技术方法

联合卷积神经网络与集成学习的遥感影像场景分类 余东行, 张保明, 赵传, 郭海涛, 卢俊 (717)
面向类型特征的自适应阈值遥感影像变化检测 刘红超, 张磊 (728)
国产机载大视场三线阵 CCD 相机几何标定 王涛, 张艳, 张永生, 莫德林, 于英 (739)

遥感应用

应用随机辐射传输模型反演云南松林分郁闭度 李晓尧, 黄华国 (752)
风云三号卫星被动微波反演海洋上空云液态水含量 窦芳丽, 商建, 吴琼, 谷松岩 (766)
滑坡蠕变与遥感影像上植被异常关系 郭忻怡, 郭擎, 冯钟葵 (776)

本期责任编辑: 尤笛

《遥感学报》网络版: www.jors.cn

《遥感学报》微信公众号及官网



订阅号



官网

JOURNAL OF REMOTE SENSING (Chinese)

(Vol. 24 No.6 June, 2020)

CONTENTS

Scholar's View Point

- Remote sensing for ecosystem: Definition and prospects
..... WU Bingfang, ZENG Yuan, YAN Nana, ZENG Hongwei, ZHAO Dan, ZHANG Miao (617)

Review

- Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019

LIANG Shunlin, BAI Rui, CHEN Xiaona, CHENG Jie, FAN Wenjie, HE Tao, JIA Kun, JIANG Bo,
JIANG Lingmei, JIAO Ziti, LIU Yuanbo, NI Wenjian, QIU Feng, SONG Liulin, SUN Lin, TANG Bohui,
WEN Jianguang, WU Guiping, XIE Donghui, YAO Yunjun, YUAN Wenping, ZHANG Yongguang,
ZHANG Yuzhen, ZHANG Yunteng, ZHANG Xiaotong, ZHAO Tianjie, ZHAO Xiang (671)

- Introduction of the radiometric benchmark satellite being developed in China for remote sensing LU Naimeng,
DING Lei, ZHENG Xiaobing, YE Xin, LI Chuanrong, LYU Daren, ZHANG Peng, HU Xiuqing, ZHOU Chenghu,
YOU Zheng, FANG Jiancheng, GONG Jianya, JIANG Xingwei, LI Jianjun, MA Lingling, XU Na (680)

- Remote sensing anomalies of multiple geospheres before the Wenchuan earthquake and its spatiotemporal correlations
..... HE Miao,
WU Lixin, CUI Jing, WANG Wei, QI Yuan, MAO Wenfei, MIAO Zelang, CHEN Biyan, SHEN Xuhui (700)

- Design and realization of ground object background spectral library for surveying and mapping ... ZHONG Shouyi,
XIAO Qing, WEN Jianguang, ZHENG Xingming, MA Mingguo, QU Yonghua, ZHENG Ke, CHI Tianhe, TANG Yong,
YOU Dongqin, HAO Dalei, CHENG Juan, HE Min, JIANG Tao, JIN Rui, YAO Xiaojing, ZHAO Lijun (716)

Technology and Methodology

- Scene classification of remote sensing image using ensemble convolutional neural network
..... YU Donghang, ZHANG Baoming, ZHAO Chuan, GUO Haitao, LU Jun (727)

- Adaptive threshold change detection based on type feature for remote sensing image
..... LIU Hongchao, ZHANG Lei (738)

- Geometric calibration of domestic airborne wide-field three-linear CCD camera
..... WANG Tao, ZHANG Yan, ZHANG Yongsheng, MO Delin, YU Ying (750)

Remote Sensing Applications

- Retrieving canopy closure of Yunnan pine forests by using stochastic radiative transfer model
..... LI Xiaoyao, HUANG Huaguo (765)

- Retrieval of cloud liquid water content over global oceans using FY-3C/3D microwave imager
..... DOU Fangli, SHANG Jian, WU Qiong, GU Songyan (775)

- Relationship between landslide creep and vegetation anomalies in remote sensing images
..... GUO Xinyi, GUO Qing, FENG Zhongkui (786)

汶川地震前多圈层短一临遥感异常回顾及其时空关联性

何苗¹, 吴立新¹, 崔静², 王威¹, 齐源¹, 毛文飞³, 苗则朗¹,
陈必焰¹, 申旭辉^{2,1}

1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
2. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085;
3. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110819

摘要: 地震孕育过程伴随物质迁移、能量释放与信息交换。通过遥感手段获取地表、大气及电离层变化信息, 进行地震异常分析与前兆识别, 已成为遥感与地震科学交叉研究热点。本文收集整理了2008年汶川大地震以来, 国内外发表的该地震潜在遥感异常研究论文; 回顾了盖层、大气层、电离层的20个遥感参量异常显现的个体特征, 分析了其时空关联性, 揭示了总体时空特征。研究表明: (1) 汶川地震遥感异常显现是逐渐增多、增强和聚拢的, 地震短临前兆突出; (2) 震前3个月开始, 短一临遥感异常由盖层、大气层往电离层渐次显现, 与岩石圈—盖层—大气层—电离层(LCAI)耦合范式吻合; (3) 短一临遥感异常显现位置与发震断层相关性较强, 主要集中于龙门山断裂带(LMSFs)及其周边区域; (4) 多种短一临遥感异常区覆盖震中, 且多个条带状异常区与LMSFs走向一致, 体现了孕震后期LCAI耦合的局地效应。本研究有益于内陆大地震孕育后期的遥感监测分析, 也可为地震预测研究提供参考。

关键词: 汶川地震, 遥感异常, 异常显现, 时空关联, 多圈层

引用格式: 何苗, 吴立新, 崔静, 王威, 齐源, 毛文飞, 苗则朗, 陈必焰, 申旭辉. 2020. 汶川地震前多圈层短一临遥感异常回顾及其时空关联性. 遥感学报, 24(6): 681–700

He M, Wu L X, Cui J, Wang W, Qi Y, Mao W F, Miao Z L, Chen B Y and Shen X H. 2020. Remote sensing anomalies of multiple geospheres before the Wenchuan earthquake and its spatiotemporal correlations. Journal of Remote Sensing (Chinese), 24(6): 681–700 [DOI: 10.11834/jrs.20200059]

1 引言

地震是对人类危害最严重、破坏力最强的突发性固体地球灾害之一, 其孕育和发生是一个非常复杂的地球物理过程, 伴随物质迁移、能量释放与信息交换。震前一段时间及一定区域内, 往往会产生某些地球物理、化学变化, 伴随一些异常现象(马瑾等, 1995; 张国民, 2002; 张晁军等, 2015)。对典型震例的异常显现过程进行观测分析, 研究地震异常特征、潜在前兆及其规律, 是目前地震监测与预测研究的重要工作。但受地

基观测技术限制(如地面台站有限, 且分布不均匀、观测不连续等), 往往存在监测空区、时间缺失或参量不足, 难以获取多圈层、多参量的大范围、长时间序列观测数据。

遥感技术是近半个世纪以来发展最快的地球科学分支之一(申旭辉等, 2007), 具有覆盖范围广、重复观测周期短、数据更新快、不受地面条件限制等综合优势, 弥补了常规地基观测无法获取大面积、动态、连续地震前兆信息的缺点(荆凤等, 2008; 申旭辉, 2016)。随着遥感技术不断发展, 以地球系统多圈层、多参量为观测目标的

收稿日期: 2020-03-06; 预印本: 2020-03-24

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2018YFC15035); 国家自然科学基金(编号: 41930108); 湖南省创新人才项目(编号: 2018RS3013)

第一作者简介: 何苗, 1995年生, 女, 硕士研究生, 研究方向为气溶胶遥感、地震异常分析。E-mail: freyahe@csu.edu.cn

通信作者简介: 吴立新, 1966年生, 男, 教授, 研究方向为地灾感知认知、遥感—岩石力学、地球空间信息理论与方法等。E-mail: wulx66@csu.edu.cn

空间观测手段（包括可见光、红外、微波、高光谱、多光谱、电离层物理参数等），可获取丰富的与地震相关的遥感信息，已被广泛用于地震活动监测及地震前兆研究（刘德富等，1997；马瑾和单新建，2000；Ouzounov 和 Freund，2004；张元生等，2004；吴立新等，2008，2018；Wu 等，2012a，2012b；Maeda 和 Takano，2009；吕月琳等，2009；Singh 等，2010；Zhang 和 Shen，2011；康春丽等，2011；杨杰，2011；Tramutoli 等，2013；Qin 等，2012，2013；姚璐等，2014；姚宜斌等，2016）。

北京时间 2008-05-12 T 14:28，四川省汶川县（ 103.40°E , 31.01°N ）发生震级 Ms8.0 级的强烈地震，震源深度 14 km（陈运泰，2008）。该地震发生在巴颜喀拉（BYKL）地块东边缘的龙门山逆冲推覆断裂带（LMSFs）上；该断裂带由 3 条大断裂构成，为青藏高原地块与四川盆地地块的缝合区。汶川震后 11 年间，许多学者针对不同遥感参量进行了研究分析，如康春丽等（2009a, 2009b）发现汶川地震前后长波辐射 OLR（Outgoing Longwave Radiation）发生了明显变化；李美等（2010）研究揭示了汶川震前地表潜热通量 SLHF（Surface Latent Heat Flux）异常变化现象等。也有学者基于多源数据对多个异常特征进行了关联分析，如李金平和刘善军（2009）对地壳形变与地表温度 LST（Land Surface Temperature）异常进行了关联分析；陈杨（2011）探讨了汶川地震 LST、OLR 与 SLHF 异常之间的关系。还有学者针对特定观测的异常识别方法进行了对比研究（熊攀等，2009；邹斌等，2016；Cui 等，2019）。

综上，国内外针对汶川震前的潜在异常做了大量研究、取得了丰富成果，但有关汶川震前多圈层遥感异常显现的时空关联、总体特征及其机理机制等，仍有待深入研究。由于中国大陆强震分布不均（张培震，2008），对地理位置及地质环境均十分独特的汶川地震多圈层遥感异常进行系统分析和深入研究，不仅对 LMSFs 地震监测预测有重要意义，对大陆地震遥感综合观测分析也有参考价值。

针对地震异常识别，国外学者从地球物理的角度，提出了地震异常交叉检验与综合分析范式，即岩石圈一大气圈—电离层 LAI（Lithosphere-Ionosphere）耦合（Pulinets，2009；Pulinets 和 Ouzounov，2011），由此研究孕震过程中地球系统多圈层耦合作用所致地震异常及前兆。Wu 等（2012a, 2012b）则从遥感的角度，顾及岩石圈一大气圈之间广泛分布的盖层（土壤、沙漠、水体、冰雪、植被等）特征，基于遥感信息物理及空间观测属性，认为盖层对孕震过程产生的地下响应信号（电磁辐射、能量流、物质流等）的上行传播及卫星观测，存在不可忽视的重要影响，进而提出了岩石圈—盖层—大气层 LCA（Lithosphere-Coversphere-Atmosphere coupling）耦合分析范式。这两个范式相结合，即形成了链条完整的岩石圈—盖层—大气层—电离层 LCAI（Lithosphere-Coversphere-Atmosphere-Ionosphere）耦合分析新范式，并在近年地震异常研究中得到有效应用（Contadakis 等，2015；Wu 等，2016；Jing 等，2019），证实了基于 LCAI 耦合范式探究震前多圈层遥感异常及其时空耦合、内在机制的可行性和科学性与有效性。

本文以汶川地震为例，系统性搜集、梳理国内外已发表的汶川地震异常研究的文献，回顾汶川震前潜在遥感异常；总结震前多圈层遥感异常显现的个体特征，分析其时空关联性、揭示其总体时空特征。以此，为更深入研究汶川地震遥感多参量 LCAI 耦合机制及震兆机理提供参考。

2 文献收集与筛选

2.1 文献收集

汶川地震异常研究论文众多，散布于遥感、地震、地球物理等学科领域。课题组系统性搜集了国内外已发表的相关文献，包括：（1）以“汶川”、“遥感”、“异常”或具体异常如“地表温度”、“水汽”、“地表潜热通量”等为关键词，在中国知网、万方及维普等数据库搜索中文文献；（2）以 Wenchuan, anomaly/anomalous, precursor/precursory, remote sensing 等为关键词，或以具体异常如 land surface temperature, water vapor, surface latent heat flux 等为关键词，在 <https://www.researchgate.net/> [2020-03-06], <https://www.sciencedirect.com/> [2020-03-06] 等多个数据库搜索英文文献。有些文献的标题、摘要及关键词中

均无上述字眼,但其正文中有关(如以汶川地震为例进行信息处理与算法分析的论文),则下载阅读后进行具体判断和筛选。

2.2 文献筛选

为保证所选汶川地震遥感异常信息的可靠性,逐一研读搜索到的文献。通过仔细分析每篇文献所言遥感异常的内涵、原作者对该遥感异常的研判方法、所得遥感异常的信息要素等,按以下条件采用或排除相关文献:

- (1) 非遥感手段获取的异常不采用;
- (2) 汶川震后的异常不采用;
- (3) 观测量物理意义不清晰的异常不采用;
- (4) 若某一参量异常存在争议(如有文献提

出异议,明确指出该变化存在干扰),不采用;

- (5) 异常缺少明确的时间与空间信息,不采用;

(6) 所言异常包含遥感参量变化的正常形态(即背景)与震前异常(即扰动)的对比,并指明该异常显现与汶川地震活动有关,采用。

列出所采用的参考文献时,若同一课题组对某一项异常的研究成果在多篇论文(含学位论文)中同时出现,则仅保留其重要刊物论文。由此,共整理出100余篇相关文献,共涉及20个遥感参量。根据各参量本身的物理性质进行所属圈层划分,涉及盖层参量5个,大气层参量8个,电离层参量7个,其对应的数据来源、时空分辨率等信息如表1所示。

表1 多圈层遥感异常对应的观测参量、数据来源及时空分辨率

Table 1 Observation parameters, data sources, and spatio-temporal resolutions corresponding to remote sensing anomalies

遥感参量	数据来源	空间分辨率	时间分辨率	所属圈层
地表温度(LST, ST)	MODIS产品	0.05°×0.05°	8 d	
	NCEP/NCAR reanalysis	1.875°×1.915°	1 d	
微波亮温(MBT)(6.9—36.5 GHz)	AMSR-E	5—50 km(与波段相关)	1 d	
	FY-VISSL	5 km	0.5 h	
红外亮温(IBT)(3.5—4.02 μm, 10.3—12.27 μm)	MODIS	1 km	0.5 d	
	NOAA	2.5°×2.5°; 1°×1°	1 d; 0.5 d	
射出长波辐射(OLR)(8.0—12.0 μm)	NCEP/NCAR reanalysis	1.875°×1.915°	1 d	盖层
	AIRS	1°×1°	0.5 d	
	FY-VISSL	0.1°×0.1°	0.5 h	
植被指数(NDVI)	Landsat	30 m	16 d	
	MODIS	250 m	8 d	
	SPOT	1 km	10 d	
大气温度(AT)	NCEP/NCAR reanalysis	1.875°×1.915°	1 d	
	AIRS	1°×1°	1 d	
含碳气体(CBG; CO ₂ 、CO、CH ₄)	2.5°×2.5°(CO ₂)			大气层
	AIRS	1°×1°(CO)	0.5 d	
		1°×1°(CH ₄)		
气溶胶光学厚度(AOD)	MODIS	0.5°×0.5°	0.5 d	
线性云(LC)	FY-VISSL	1250 m	0.5 h	
大气水汽(AWV)	MODIS	0.5°×0.5°	0.5 d	
潜热通量(SLHF)	MODIS	0.5°×0.5°	0.5 d	
	NCEP/NCAR reanalysis	1.875°×1.915°	1 d	
总电子含量(TEC、VTEC)	IGS; GIM(JPL)	5°×2.5°	2 h	
F2层扰动	COSMIC; CHAMP	在轨原位观测	—	电离层
电子浓度、离子浓度、电子/离子温度、磁场强度、电场强度	DEMETER; CHAMP	在轨原位观测	0.5 d	

3 多圈层遥感异常显现的个体特征

由于数据来源不同、时空分辨率不同、数据处理与分析方法不同，以及直接或间接的地震异常信息提取方法多种多样，必然导致不同数据、不同方法、不同文献所得同一参量的遥感异常结果存在差别，或细节信息多寡。对于同一参量的差异化结果，本文分别摘出或取其综合表现，以此来描述其遥感异常显现的基本特征。

3.1 盖层遥感异常显现

(1) 地表温度 LST (Land Surface Temperature)。LST一般指地表及地下 10—20 cm 的温度，来自 MODIS 数据产品或 NCEP 再分析数据集（也称 skin temperature）。2008 年 2 月开始，震中附近 500 km 范围内显现多次 LST 异常升高现象，且每次持续时间均在 10 d 左右（李金平和刘善军，2009；宋冬梅等，2016）。4 月，LST 上升区集中在青藏高原东缘及四川盆地南部（陈杨，2011；宋冬梅等，2016）。4 月 17 日，震中东北约 100 km 沿 LMSFs 出现斑状 LST 上升；4 月 18 日，减弱并消失（孙珂，2017）。5 月，BYKL 地块的原地温度场（去除 LST 中地形、大气等非构造因素影响）整体高于周边地区（陈顺云等，2014）。5 月 1 日，LST 再现上升趋势，5 月 6 日达最大（Singh 等，2010）。5 月 5 日，汶川西南地区开始出现 LST 异常上升；5 月 6—8 日，加剧；之后，衰减；发震当天，凌晨再次上升（马未宇，2008；Yang 和 Mi，2009；Wu 等，2012a；Qin 等，2013）；而 LMSFs 及其西侧则出现一条反常的 ST 低温带（陈顺云等，2013）。

综上，震前 3 个月开始显现 LST 异常，发育过程断断续续、每次持续时间较长；5 月份 LST 异常与 LMSFs 的相关性增大，正异常区从青藏高原东部逐渐迁移、汇聚于 LMSFs；震前一周，异常显著。

(2) 红外亮温 IBT (Infrared Brightness Temperature)。IBT 来自 MODIS 和 FY-2C 的中波段和长波段数据。2006 年—2008 年 6 月，BYKL 块体内部出现多次 IBT 异常上升现象（张铁宝等，2013，2015；路茜等，2014）。3 月 17 起日，出现 5 次大规模 IBT 上升序列，增幅 2—14 K 不等（魏乐军等，2008）。4 月开始，震中西北部开始出现 IBT 异常（闫丽莉，2012；郭晓等，2014；张铁宝等，

2015）；4 月 10 日，异常呈大范围椭圆形，其长轴与 LMSFs 走向一致（闫丽莉，2012）。而 LMSFs 西北侧及东部盆地大面积、大幅度升温，4 月 25 日，IBT 上升达 35 K，并持续发育至 5 月底（Zhang 等，2010b）。4 月 22 日—5 月 4 日，青藏高原东缘出现长条带状 IBT 上升异常（吴立新等，2008）。5 月 7 日，IBT 异常幅度最大（闫丽莉，2012；张铁宝等，2013）。

综上，2006 年开始，BYKL 地块内 IBT 缓慢上升。2008 年 3 月，LMSFs 地区的 IBT 上升逐渐明显；4 月，正异常区加强，并逐渐收拢到 LMSFs 及其附近；5 月，LMSFs 的中北部异常突出，5 月 7 日异常最为显著。

(3) 微波亮温 MBT (Microwave Brightness Temperature)。2008 年 3—5 月，MBT 均值高于多年同期值（闫丽莉，2012）。3 月 2 日—4 月 26 日，LMSFs 西北侧出现 MBT 上升异常；4 月 14 日，达到该阶段最大值（Ma 等，2011）。历年偏移指数（K 值）异常最早出现在震前 44 d，强异常出现在 4 月 10 日；之后，经减弱再沿 LMSFs 向 NE 方向及其两侧扩展；4 月 21 日，异常范围扩至 12 万 km²（闫丽莉，2012）。5 月 2 日开始，LMSFs 和龙泉山断裂带之间第四系沉积区开始显现多波段、多极化的 MBT 异常（Qi 等，2020）；5 月 11 日，该 MBT 高值区在发震当天显著增强（Ma 等，2011；Qi 等，2020）。Singh 等（2010）的粗分析（未去背景场）则表明：5 月 1—6 日 MBT 异常上升，37 GHz 水平极化短期相对升温达 15 K。

综上，2008 年 3 月初，LMSFs 西北侧开始显现 MBT 正异常；4 月，正异常继续发育并迁移到 LMSFs 两侧；5 月，LMSFs 两侧的正异常不断增强；发震当天及震前一周，第四系沉积区的异常最为显著。

(4) 射出长波辐射 OLR (Outgoing Longwave Radiation)。2007 年，雅安北部出现了 OLR 增强（康春丽等，2009b）。2008 年 2 月，研究区 (98°E—110°E, 20°N—34°N) OLR 开始异常上升，但幅度较小（熊攀，2009；熊攀等，2009；康春丽等，2009a, 2009b；Wu 等，2012a）。3 月至发震时，研究区 (100°E—106°E, 28°N—34°N) 至少出现 3 次 OLR 幅值超过 20 a 的 OLR 极大值（Yang 和 Mi，2009）。4 月，OLR 异常上升，川滇边界地区出现了

OLR 增强中心 (Kong 等, 2018; 康春丽等, 2009a; 陈杨, 2011); 4月3—7日与4月23日, 出现两个小峰值 (荆凤等, 2009); 4月26日, OLR 上升幅度达最大 (Kong 等, 2018)。5月4日, OLR 功率谱信息增强现象达到相对峰值 (相对变化率为6倍), 在LMSFs的中北段更为突出 (郭晓等, 2010)。5月6日, 震中及LMSFs西北侧 OLR 上升显著 (Yang 和 Mi, 2009), 超过背景值的两倍标准差 (Wu 等, 2012a; Qin 等, 2013); 5月9日, 震中区OLR显著增强; 11日, 紧邻震中东南位置OLR值为最大, 达 $37.2\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (康春丽等, 2009b, 2011; 荆凤等, 2009)。

综上, 震前OLR异常显现的总体特征为: 较早即有所显现; 震前3个月内断续上升; 4月份, 上升幅度大、发育区域大; 5月份, 收缩至LMSFs附近; 震前2 d及震前一周最为突出。

(5) 植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)。2007年9月—2008年7月, 汶川震区NDVI普遍有所减少 (叶成名等, 2012); 震后的NDVI减少现象应该还与滑坡多发有关 (韩岭, 2011)。2008年5月上旬, 汶川震区NDVI反常地低于4月下旬, 降低区集中在LMSFs上, 且与震中重合。(冯建东和王明田, 2013); LMSFs上NDVI降低幅度超过20% (马保东等, 2010)。顾及植被变化响应及NDVI滞后效应, LMSFs的NDVI降低与4月份LMSFs上的LST、IBT、OLR异常上升有关, 符合遥感信息机理。

3.2 大气层遥感异常显现

(1) 大气温度 AT (Air Temperature)。震前2个月, 开始显现区域性AT异常上升 (Yang 和 Mi, 2009)。3月14日和4月16—19日, AT日均值高于20 a均值。震前1个月, AT升温区逐渐收缩至LMSFs及其周边 (Singh 等, 2010); 4月18日, 汶川大体位于升温区中心; 5月6日, 汶川及其周边日均AT远高于20 a均值, 达到或超过20 a的极值 (石俊等, 2010), 且多个气压层 (700 hpa、600 hpa、500 hpa 和 400 hpa) 均出现AT异常 (Singh 等, 2010), 震中像元也现弱异常 (Wu 等, 2012a)。

(2) 含碳气体 CBG (Carbon Bearing Gas)。本文分析的大气含碳气体浓度 (含量) 异常包括3种, 即CO₂, CO 和CH₄。

1) CO₂异常: 2008年2月初开始显现。3—4月, BYKL地块内部及LMSFs东北部、西南部的CO₂含量超过年际变化, 并出现高值 (崔月菊, 2011)。

2) CO异常: 3月9日开始显现, LMSFs的CO浓度高于周边。4月10日, 异常程度和范围均达最大, 主要集中于四川盆地; 之后减弱 (崔月菊等, 2016c)。5月, CO总含量远高于背景值; 5月4日和5月12日, 异常显现于震中东南部 (Cui 等, 2017)。发震当天, 明显沿断裂带分布 (崔月菊等, 2016a, 2016b)。

3) CH₄异常: 震前4年, BYKL内的松潘—甘孜地块即开始出现CH₄异常上升现象 (王杰等, 2017)。2008-03-25, 断裂带北段开始显现CH₄高值 (Cui 等, 2019), 并逐渐增大; 4月10—20日, 断裂带北段高值区面积扩大, 南段高值区面积减小、浓度增大; 4月21—30日, 南北两个高值区联通 (王杰等, 2017)。5月, CH₄高出背景值 (崔月菊等, 2016a, 2016b); 5月1—6日, 高值异常显著, 特别是5月4日出现大面积变化 (Cui 等, 2019); 5月7—12日, 断裂带西侧出现两个极值区 (王杰等, 2017)。5月12日, 异常范围达最大 (崔月菊, 2011; 崔月菊等, 2016c), 浓度也最大 (王杰等, 2017); 发震断层南部的控制像元上也出现了明显异常 (Cui 等, 2017)。

综上, CBG异常显现范围大, 主要受LMSFs及其南端的荥经—马边断裂控制, 震前一周异常突出。CO₂异常显现相对最早, CO₂和CO空间分布范围较大, CH₄异常虽然临震显现较晚, 但时空变化信息丰富, 且与附近的气温变化趋势一致 (王杰等, 2017), 体现了孕震过程所致地下气体逸出后的温室效应。

(3) 大气水汽 AWV (Atmospheric Water Vapor)。1990年以来LMSFs的AWV不断降低; 2008年开始, AWV异常主要沿LMSFs及四川盆地西南边沿发育; LMSFs中段、南段异常频度最高 (陈梅花等, 2011; 邓志辉等, 2014)。4月8日, 四川盆地开始出现AWV含量增高现象; 5月1日, LMSFs和则木河—安宁河断裂的AWV大幅增高, 之后回落; 5月11日, 则木河—安宁河断裂的AWV再次增高; 震后消失 (崔丽华, 2009; Liu 等, 2009b; 赵益洋等, 2010)。

(4) 潜热通量 SLHF (Surface Latent Heat Flux)。

基于NCEP的SLHF数据分析表明, 2008年1—3月, 云南腾冲SLHF日值多次超过最大参考值(陈梅花, 2014)。5月3日开始, 四川出现零散的高值异常; 5月6—8日, 高值区分布于距震中较远的川北地区; 5月9日至发震, 高值异常显著, 且集中到震中及其周边, 高值点(日值达 $120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)离震中仅60 km; 5月10—12日, 高值点逐渐向震中聚拢并增强(李美等, 2010)。MODIS反演表明: 5月7日, 四川盆地SLHF有所升高; 震前2 d, LMSFs周边出现SLHF异常高值, 都江堰—映秀镇的SLHF达 $300\text{--}400\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; 5月12日中午, LMSFs及龙泉山西坡断裂带上方的SLHF高达 $400\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (严研等, 2008; 邓志辉等, 2009)。

综上, 震前SLHF异常显现特征为: 随地震临近, SLHF高值区从远离震中逐渐向LMSFs及震中收拢; 震前2 d显著上升; 发震当日达到极值。

(5) 气溶胶光学厚度AOD(Aerosol Optical Depth)。4月底, 震中AOD时序出现超出背景值 1.5σ 的异常(Akhoondzadeh和Chehre bargh, 2016)。5月1日, LMSFs缓冲区的AOD开始显现, 异常大于 3σ ;(Liu等, 2019); 5月5日, LMSFs内AOD异常明显增强(Qin等, 2014); 5月11日大于 2σ (Liu等, 2019)。

(6) 线性云LC(Liner Clouds)。震前5 h, 卫星云图上出现线性云。5月12日9:30 am开始, 巴彦喀拉块体(BYKL)内部出现一条指向LMSFs的箭头型LC; 10:30 am开始, LMSFs中北段出现一条腰鼓形LC。两条LC的延伸线交汇于震中, 并保持相对静止状态达3 h, 直至发震。主震发生后, 该组LC立即消失(吴立新等, 2008)。

3.3 电离层遥感异常显现

(1) 总电子含量TEC(Total Electron Content)。基于全球电离层图(GIM)或地基系统(IGS基准站或中国陆态网络等)GPS监测数据进行的震前TEC异常分析揭示: 5月2日开始(震前10 d、4 d、3 d、2 d和1 d), 中国南方地区开始发育有TEC负异常(Akhoondzadeh等, 2010)。5月3—4日出现了TEC弱增强现象(Zhao等, 2008; 邹斌等, 2016; 谢嘉丽等, 2016); 5月5—10日(5月9日除外), 多次出现TEC显著减小(祝美英等, 2008; Akhoondzadeh等, 2010; Xia等, 2011; 贺黎明等, 2011; 闫相相等, 2012; 谢嘉丽等, 2016),

5月6日(余涛等, 2009; Jhuang等2010; 李旺等, 2014)和5月7日(林剑等, 2009)异常范围大; TEC负异常驼峰向磁赤道漂移, 磁共轭区同时出现TEC负异常。5月9日开始, TEC转为正异常(祝美英等, 2008; Li等, 2009; 余涛等, 2009; 吴云等, 2011), 下午大幅增强(Liu等, 2009a; Yu等, 2009; Zhao等, 2010; 丁宗华等, 2010; Klimenko等, 2011; Xia等, 2011; 闫相相等, 2012); 在 $250\text{--}390\text{ km}$ 高度范围内TEC异常最为强烈(Lin, 2011)。5月10—11日, TEC略有回升但仍下降约24%(Akhoondzadeh等, 2010)。分析广州及华南地区的GPS监测数据, 也发现类似的TEC扰动(黄江等, 2014)和VTEC变化(邓柏昌等, 2009)。VTEC变化趋势与TEC基本相同(Zhou等, 2009; 祝美英等, 2009; 赵莹等, 2010; 邢楠等, 2011)。

综上, 震前一周TEC异常显现突出、范围大。虽然数据来源存在差异, 但TEC异常表现基本一致, 均为先降后升; 震前6—7 d主要为负异常, 震前2 d以正异常为主, 集中于震中南部地区, 其驼峰向磁赤道漂移。

(2) F2层扰动。震前两周, 基于COSMIC和CHAMP电离层掩星数据探测到的F2层异常与TEC变化基本一致。首先, 4月27日震中东北部F2层扰动显著增强(马新欣等, 2013); 5月3日开始, 出现明显的NmF2负异常。震前一周, 负异常连续存在, 降幅达40%, F2层高度下降50—80 km(Liu等, 2009a)。5月3—9日, 多次出现NmF2负异常, 降幅达30%(熊晶等, 2008, 2013), F2层临界频率开始明显下降, 幅度约60%(张训械等, 2008); 震前5 d午时的NmF2下降约 $2\times 10^5\text{ el/cm}^3$, F2峰值高度下降了25 km(Hsiao等, 2010)。5月9—10日情形突变, 震中附近出现了大幅度的NmF2正异常(熊晶等, 2008, 2013)。

(3) 电子浓度Ne(electron density)。震前一周, 卫星过境震中附近时, Ne显现为下降。5月5日, Ne高值区突然减少一半, 而后处于稀释状态, 震后恢复(董健等, 2009; 闫相相等, 2012)。5月6—11日, 震中南部广大区域Ne总体降低(Kakinami等, 2010; 邢楠等, 2011; Yan等, 2013); 其中, 5月7—8日下降超50%(曾中超等, 2009)。5月9日, 震中周边出现了Ne局部上

升现象, 其峰值向赤道移动 (Kakinami 等, 2010; Le 等, 2015), 但震中东北依然下降 (Zhang 等, 2010a)。5月10日, Ne 总体下降率约37% (Akhoondzadeh 等, 2010)。可见, 震前一周的 Ne 变化趋势与TEC、NmF2基本一致。

(4) 离子浓度 Ni (ion density)。震前10 d, DEMETER 卫星经过震中附近时, Ni (主要为氧离子) 显现为先升后降。5月2日, Ni 上升42% (Akhoondzadeh 等, 2010); 5月5日, Ni 相对上升24% (曾中超等, 2009)。5月6日, Ni 急剧下降; 5月9日, 达到最低值 (Zhang 等, 2009; 闫相相等, 2014; Yan 等, 2013; 李美, 2015)。可见, Ni 变化与TEC、 Ne 、NmF2不同, 但时空关系对应较好。

(5) 离子/电子温度 Ti/Te (ion/electron temperature)。震前的 Ti/Te 变化均较复杂。Akhoondzadeh 等 (2010) 分析指出: 5月1—12日 DEMETER 卫星经过震中附近时, 记录到3次 Ti/Te 正异常 (5月10日、5月9日、5月2日), 1次负异常 (5月9日)。而国内研究则表明, 5月7—8日 Ti/Te 下降幅度接近30% (曾中超等, 2009); 5月9日, Ti/Te 快速上升, 震中北偏西方向明显升高 (Zhang 等, 2009; 顏蕊等, 2013)。董健等 (2009) 分析提出, Ti/Te 变化形态与 Ne 变化形态成强负相关。Liu 等 (2015) 分析指出, 震前1—6 d 的日间 Ti 与夜间 Ni 、 Ne 的变化趋势互反, 3者叠加后可凸显震中附近的电离层局部异常现象。

(6) 磁场强度 MFI (Magnetic Field Intensity)。基于 DEMETER 卫星观测数据探测到 MFI 变化情况: 2008年3月, 磁场X、Y分量的小波能谱 PSD 相对变化增强 (解滔等, 2013)。3月下旬开始, 20 Hz 的 ELF 的Z分量增强, 持续到8月底余震结束; 增强区以震中地磁纬度为中心呈对称分布 (张蓓等, 2010)。4月12日开始, 磁场Y、Z分量脉冲能量增大 (刘君等, 2011); 5月2日开始, 震中附近ELF磁场变化曲线出现尖峰 (安张辉等, 2011b); 5月5日和5月9日, 卫星探测到增强的电磁辐射 (曾中超等, 2009); 5月8日, 低于200 Hz 的 VLF 磁场频谱在震中2°以内有明显突升 (顏蕊等, 2013)。震前2.5 h, ELF信号峰值显著高于背景场, 南北跨越400 km (张蓓等, 2010)。

(7) 电场强度 EFI (Electric Field Intensity)。

EFI 异常显现时间也较早、情形多样。震前一个半月开始, 夜侧电场平均功率谱密度幅度明显增大; 震前约15 d 开始减小, 发震时几乎最小, 震后迅速恢复 (朱涛和王兰炜, 2011)。震前一个月, 以震中为中心的500 km 范围内 VLF 电场信噪比值明显降低 (He 等, 2009), 而累加振幅和边际谱则于震前14 d, 开始显现较连续的增强现象 (安张辉等, 2011a)。震前7 d 开始, 震中以南较大范围明显增强 (张学民等, 2009; 曾中超等, 2009); 震前1—5 d, 以震中为中心2000 km 范围内, ULF 电场扰动明显 (Zhang 等, 2012)。Ryu 等 (2014) 指出 EIA 浓度上升与震中上空的电场扰动有关。

4 多圈层遥感异常显现的时空特征

4.1 总体时空特征

为探讨不同时间尺度下多圈层、多参量遥感异常显现的总体时空特征, 整理了各异常分阶段显现的时间、位置信息, 罗列了与异常参数相关的参考文献 (表2)。为便于表述, 定义中期 M (3个月—4年)、短期 S (10天—3个月)、短临 SI (1—10天) 和临震 I (<1天) 共4种异常时间属性。可见, 盖层异常整体显现最早, 均存在短期乃至中期异常; 大气层异常除 AOD、LC 仅存在短临或临震显现之外, 其余也有短期乃至中期异常; 电离层异常显现最晚, 除电磁场、电场存在短期异常外, 其余均为短临异常显现。从异常显现的空间位置来看, 盖层、大气层的遥感异常与震中及 LMSFs 的空间对应性较好; 电离层异常则多集中于震中南部磁赤道附近, 且空间范围较大, 与 LMSFs 空间关系不明显。以1 a 为时间窗长对异常显现的最早时间进行逐年统计 (图1 (a)), 可见: 随时间临近发震年, 年度遥感异常的总量逐渐增多; 2007年及之前, 盖层、大气层偶有异常显现, 而电离层无异常显现; 2008年, 3个圈层的遥感异常显现均十分活跃。再以1 m 为时间窗长, 对2008年1—4月显现的遥感异常进行逐月统计 (图1 (b)), 表明, 2月份开始, 大气层、电离层的遥感异常显现均不断增加, 盖层异常数量有起伏。进一步考察5月份异常情况可见 (图1 (b)): 5月5—11日, 3个圈层的遥感异常均最为活跃; 之后相对减少, 随之地震发生。

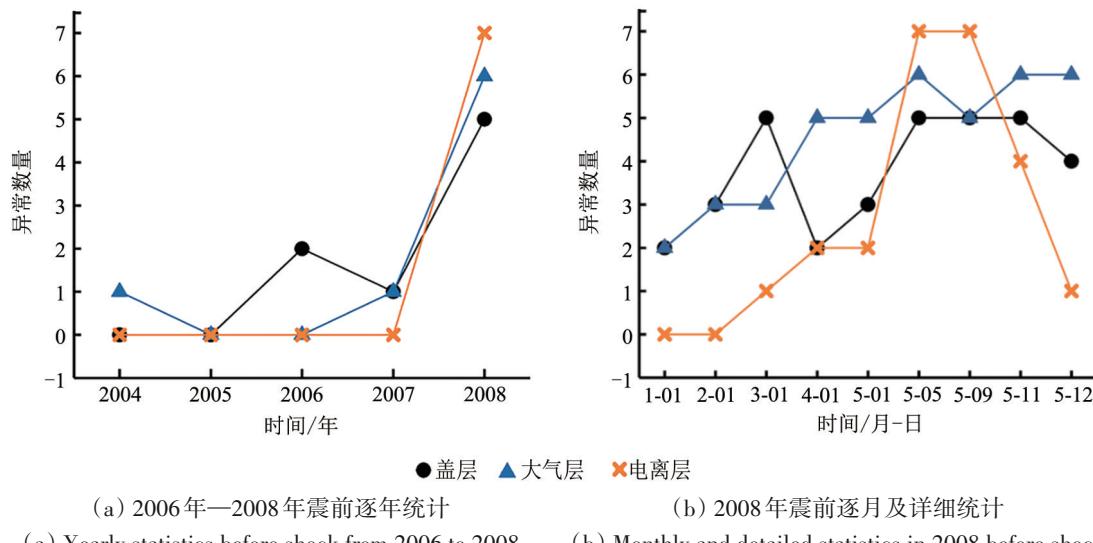
表2 汶川地震遥感多参数异常的时空信息统计

Table 2 Statistics of spatio-temporal information of multiple remote sensing parameters of Wenchuan earthquake

遥感 参数	各期异常显现的开始日期				资料来源	异常显现的空间位置	所属 圈层
	M(3个月— 4年)	S(10天— 3个月)	SI(1— 10天)	I(<1天)			
<i>Ne</i>		5月5日			董健等,2009;曾中超等,2009;Akhoondzadeh等,2010;Kakinami等,2010;Zhang等,2010a;邢楠等,2011;闫相相等,2012;Yan等,2013;Le等,2015	震中以南及震中附近	
F2层 扰动		5月3日			熊晶等,2008,2013;张训械等,2008;Liu等,2009a;Hsiao等,2010;马新欣等,2013	震中以南及震中附近	
<i>Ni</i>		5月2日			曾中超等,2009;Zhang等,2009;Akhoondzadeh等,2010;Yan等,2013;闫相相等,2014;李美,2015	震中以南、LMSFs北偏西	
<i>Ti/Te</i>		5月2日			董健等,2009;曾中超等,2009;Zhang等,2009;Akhoondzadeh等,2010;颜蕊等,2013; Liu等,2015	震中以南、LMSFs北偏西	
<i>TEC/ VTEC</i>	5月2日	5月11日			Zhao等,2008;祝美英等,2008;林剑等,2009;Yu等,2009;Li等,2009;邓柏昌等,2009;Zhou等,2009;祝美英等,2009;Liu等,2009a;余涛等,2009;丁宗华等,2010; Akhoondzadeh等,2010;赵莹等,2010;Zhao等,2010;吴云等,2011;Xia等,2011;Lin,2011;邢楠等,2011;贺黎明等,2011;Klimenko等,2011;闫相相等,2012;黄江等,2014;邹斌等,2016;谢嘉丽等,2016	SI/I-震中以南及其磁共轭区	电离层
<i>EFI</i>	3月	5月5日			张学民等,2009;曾中超等,2009;He等,2009;安张辉等,2011a;朱涛和王兰炜,2011;Zhang等,2012	S-震中以南大范围;SI-LMSFs	
<i>MFI</i>	3月	5月2日	震前2.5 h	2011b;刘君等,2011;颜蕊等,2013;解滔等,2013	曾中超等,2009;张蓓等,2010;安张辉等,2011b;刘君等,2011;颜蕊等,2013;解滔等,2013	S-震中及两侧,磁纬度对称; SI/I-震中附近	
<i>LC</i>		震前5 h			吴立新等,2008	BYKL内部、LMSFs(两者连线交汇于震中)	
<i>AOD</i>	5月1日	5月11日			Qin等,2014;Akhoondzadeh和Chehre bargh,2016;Liu等,2019	SI/I-LMSFs附近	
<i>AT</i>	3月14日	5月6日			Yang和Mi,2009;Singh等,2010;石俊等,2010;Wu等,2012a	S/SI-LMSFs及周边地区	
<i>CO₂浓度</i>	3月				崔月菊,2011	四川盆地、LMSFs两侧	
<i>CO 浓度</i>	3月9日	5月4日	5月12日		崔月菊等,2016a,2016b,2016c;Cui等,2017	S-受LMSFs、荥一马断裂控制, 震中附近;SI-震中东南部; I-LMSFs	大气层
<i>SLHF</i>	2008年 1月		5月3日	震前2 h	严研等,2008;邓志辉等,2009;李美等,2010;陈梅花等,2014	S-腾冲地区;SI-LMSFs及周边 地区;I-LMSFs	
<i>AWV</i>	2007年	4月8日	5月2日	5月11日	崔丽华,2009;Liu等,2009b;赵益洋等,2010;陈梅花等,2011;邓志辉等,2014	M-四川盆地及以南;S/SI-LMSFs、则木河—安宁河断裂; I-则木河—安宁河断裂	
<i>CH₄ 浓度</i>	2004年	2月	5月4日	5月12日	崔月菊,2011;崔月菊等,2016a,2016b,2016c; Cui等,2017;王杰等,2017;Cui等,2019	M-松潘;S-LMSFs和荥经—马 边断裂交汇处;SI/I-LMSFs西侧	

续表

遥感 参量	各期异常显现的开始日期				资料来源	异常显现的空间位置	所属 圈层
	M(3个月— 4年)	S(10天— 3个月)	SI(1— 10天)	I(<1天)			
MBT		3月	5月2日	震前1 h	Singh等,2010;Ma等,2011;闫丽莉,2012; Qi等,2020	S-LMSFs西北侧;SI/I-LMSFs 与龙泉山之间	
LST		2月		5月12日	马未宇,2008;李金平和刘善军,2009;Yang 和Mi,2009;Singh等,2010;陈杨,2011;Wu 等,2012a;Qin等,2013;陈顺云等,2013, 2014;宋冬梅等,2016;孙珂,2017	S-发震断层及四川盆地; I-LMSFs	
OLR	2007年	2月	5月4日	5月11日	熊攀,2009;熊攀等,2009;荆凤等,2009; Yang和Mi,2009;康春丽等,2009a,2009b, 2011;郭晓等,2010;陈杨,2011;Wu等, 2012a;Qin等,2013;Kong等,2018	M-雅安北部;S-川滇地区; SI/I-LMSFs	盖 层
IBT	2006年	3月17日	5月7日		吴立新等,2008;魏乐军等,2008;Zhang等, 2010b;闫丽莉,2012;张铁宝等,2013,2015; 郭晓等,2014;路青等,2014	M-BYKL与华南地块; S-震中西北;SI-LMSFs北部	
NDVI	2006年		5月2日		马保东等,2010;韩岭,2011;叶成名等, 2012;冯建东和王明田,2013	M-四川;SI-LMSFs	



(a) 2006年—2008年震前逐年统计
(a) Yearly statistics before shock from 2006 to 2008 (b) 2008年震前逐月及详细统计
(b) Monthly and detailed statistics in 2008 before shock

图1 震前不同时段各圈层遥感异常显现的总量

Fig.1 The total number of remote sensing anomalies of different geospheres during different periods

4.2 短—临时空特征

4.2.1 短—临时间特征

图2表达了震前3个月至发震，遥感短期—临震异常（简称短—临，包括S、SI和I）显现的时间顺序与连续性特征。图中，不同异常的图标所在位置对应异常显现日期，图标上方对应主要参考文献；水平虚线表示该异常显现断断续续，水平实线表示该异常显现连续存在。

整体来看：异常在的时间演化上表现出明显

的孕育—发展—强烈—衰减的趋势。震前3个月开始，短—临遥感异常显现逐渐增多，盖层、大气层、电离层异常显现顺序总上呈“斜坡”结构，即盖层异常显现最早、大气层异常显现随后、电离层异常显现最晚。3月份，3个圈层首次均有遥感异常显现；之后异常断续发育，并减缓进入相对平静期；5月2日开始，电离层参量突然异常变化，显现TEC下降、 Ti/Te 和 Ni 上升；5月3日、5月5日， $NmF2$ 和 Ne 分别开始随TEC下降。

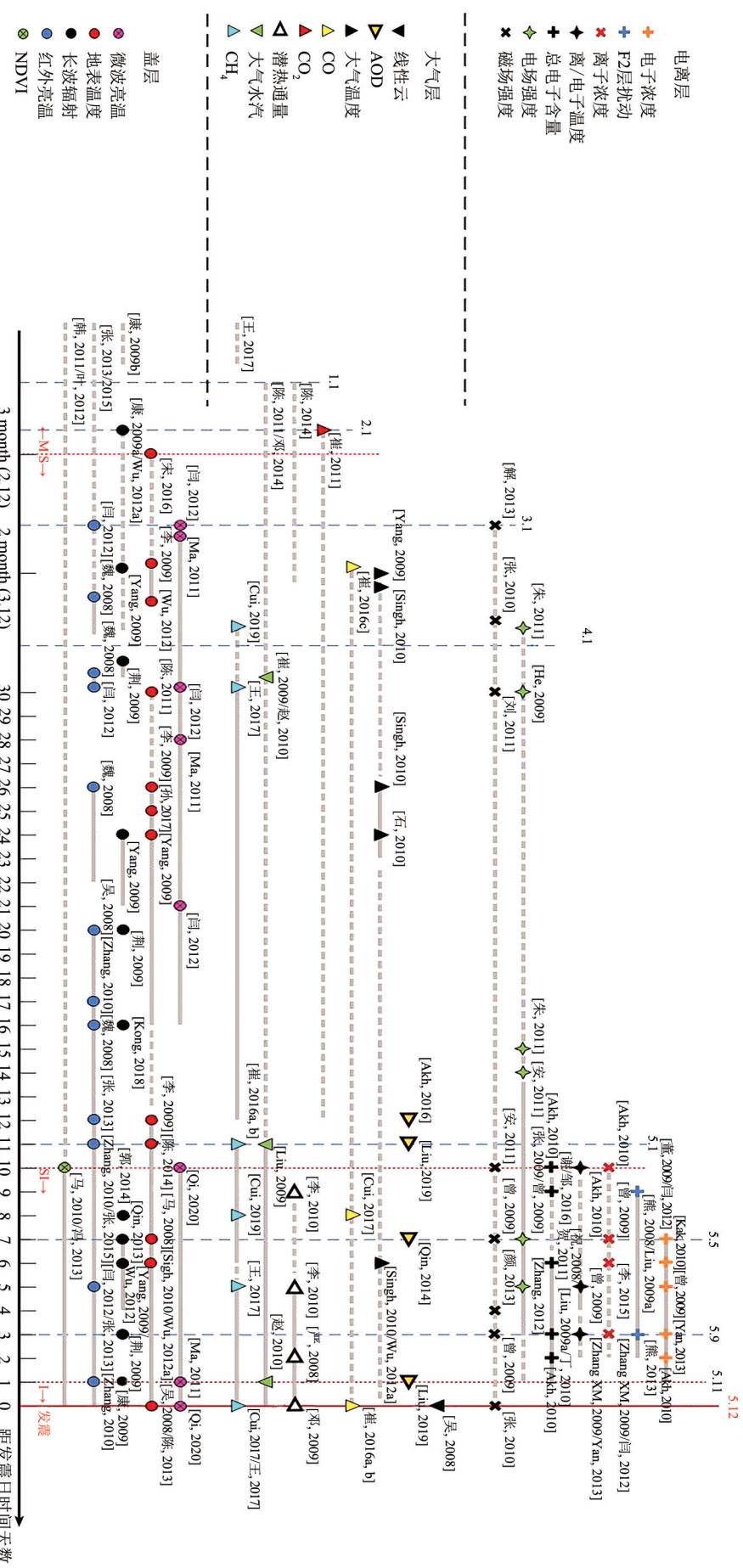


Fig.2 Time distribution of short-term-impending remote sensing anomalies before shock
图2 汶川地震短—临震遥感异常时间分布图

4.2.2 短一临空间特征

因汶川震前遥感异常多样、异常分布广，直接对全部异常区的空间关系进行可视化分析十分困难。经概化，绘制了盖层、大气层遥感异常空间分布示意图（图3），以便理解地震遥感异常显现位置、形态及其与震中、断裂的空间关系。由于电离层异常多与卫星轨道密切相关，且多集中在震中以南较大区域，与震中及LMSFs对应关系不明显，故不涉及。图3中，与震中实线相连的图

块不仅表示该异常显现的空间范围包含了震中，而且表达该异常与LMSFs的相对位置；与震中无连接的图块表示该异常范围不包括震中位置，仅指代该异常与LMSFs的相对位置。图块大小表达遥感数据空间分辨率的差异，图块中心大体为该异常最强区的位置。图块外的包络图形代表该异常发育区轮廓的基本形状（条带状或圆斑状），条带的长轴方向表达该异常的优势发育方向。

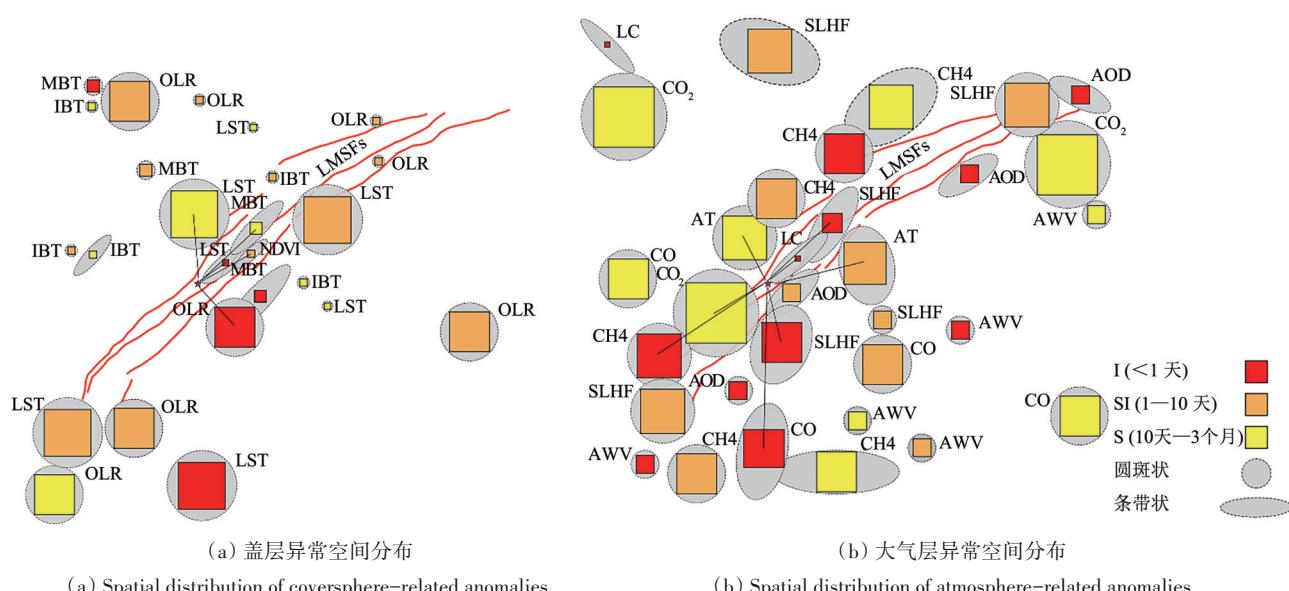


图3 汶川地震短一临遥感异常的空间分布概略图

Fig.3 Conceptual spatial distribution of short-term-impending remote sensing anomalies of Wenchuan earthquake

由图3可见，不管是盖层还是大气层，短一临遥感异常显现多集中于LMSFs及其两侧。多个圆斑状异常区覆盖震中位置；LMSFs内部及邻近的条带状异常区基本与LMSFs走向一致，LMSFs外部远方的条带状异常区则基本垂直于LMSFs。盖层的短一临遥感异常多集中于青藏高原东缘暨LMSFs周围，以及LMSFs南端，与区域构造及孕震过程相符，与遥感—岩石力学基础实验结果（吴立新等，2018）一致。大气层遥感异常（除BYKL内的LC、CO₂之外），则主要显现在LMSFs周围及四川盆地西南部。CH₄在盆地西南部的异常显现可能与盆地含煤地层和高压甲烷气田的活化（岳中琦，2013）有关。

5 结语

5.1 总体结论

地震孕育及发生过程伴随地球系统多圈层物质与能量交换，孕震区辐射平衡被打破，使得多种遥感参量受到扰动，并显现各种异常现象。经过对已有文献的系统性梳理、总结提炼和时空关联分析，得到汶川地震多圈层、多参量短一临遥感异常显现的总体时空特征：(1) 汶川震前短一临遥感异常显现是逐渐增多、增强和聚拢的，地震短临前兆突出；(2) 震前3个月开始，短一临遥感异常由盖层、大气层往电离层渐次显现，与岩石圈—盖层一大气层一电离层（LCAI）耦合范式吻

合；(3) 短一临遥感异常显现位置与发震断层相关性较强，主要集中于LMSFs及周边区域；(4) 多种短一临遥感异常区覆盖震中，且多个条带状异常区与LMSFs走向一致，体现了孕震后期LCAI耦合的局地效应。

5.2 时空关联性讨论

盖层与大气层的短一临遥感异常可从区域尺度反映汶川地震孕育后期的地气交换过程。地表与大气辐射能量、地表潜热流、大气气体成份等，是表征孕震过程地球系统多圈层物质与能量交换的重要因子。LMSFs上的NDVI下降应与孕震后期LMSFs拉张、干旱有关；土壤湿度下降导致地表辐射上升，故NDVI降低区与LST、IBT和OLR增强区存在空间对应、时间滞后性。OLR反映星下第一界面（包括云顶、冠层和地表）处介质的长波红外辐射特征，指代地气系统向外层空间发射的长波红外能量密度。由于大气对OLR的散射作用极小、却对短波红外的衰减作用较强，OLR比短波IBT更易捕获孕震异常信息，表现为较早出现震前异常现象。而微波穿透云雾能力比OLR、红外均强，故短临阶段MBT异常显现比OLR强烈。此外，由于OLR数据源的空间分辨率较低，其难以获得与MBT类似的地表辐射亮温异常的空间细节信息。

地应力场变化驱动下，地下气体、气溶胶和热能，易沿孕震区断裂带、拉张区及微破裂溢出。孕震区上方CBG浓度增加，大气温室效应增强、孕震区气温随之升高，并在近地表大气层中发生系列氧化、还原反应。故，短期及短临阶段，均呈现出孕震区AT上升滞后于CO₂、CH₄浓度上升的时空关联性。CBG俘获大气电子的能力较强，其浓度上升及产生的化学反应使得大气离子浓度上升，加速离子水合进程，故AWV上升。AWV具有吸附离子形成气溶胶的能力；AWV上升为气溶胶形成提供更多核，从而引起AOD上升。作为表征地表接受辐射能与蒸发耗能热交换过程的物理量，SLHF短临异常显现与AWV、AOD相对应，在时间上略有滞后。大气层多个参数扰动，喷射流上升，最终影响天气变化，并形成线型地震云。

短一临阶段，地下深部震源集中产生的电磁辐射增强信息向上传播，盖层IBT、OLR、LST、MBT及大气层CBG、AWV、SLHF、AOD等异常显

现十分活跃。电磁场变化响应、地面与电离层之间垂直电流增强等，引起电离层扰动。故电离层参量均有短一临异常显现，尤其5月9日，不仅电离层全部参量群体式异常显现，而且TEC、NmF2、Ne同时由下降转为上升，具有地震短临前兆意义。临震阶段即震前1 d内，盖层、大气层、电离层分别有5、6、4个参量显现异常，占遥感参量总数的75%。地震当日，OLR、AOD及电离层异常减弱乃至消失，但震中及LMSFs上LST、OLR、CH₄、CO、SLHF呈聚集性显现，LC突然出现，MBT、磁强持续扰动。

总之，顾及5月9日电离层3个电子参数的转折性变化，可将5月12日震前多圈层、多参数、聚集性遥感异常显现视为具有临震前兆意义的地震异常。

5.3 未来展望

通过对多圈层、多参量遥感短一临异常显现特征及其时空关联性进行仔细分析，获取地震孕育过程遥感短一临异常显现的个体特征与总体时空规律，有利于探索地震遥感异常的信息机理。但受构造活动复杂性与多样性、孕震过程差异性与不确定性等综合影响，不同遥感参量异常显现的信息机理及其内在耦合关系等，还需加强研究。后续不仅要继续总结探寻汶川地震更可靠、更精细及更多的遥感异常，还应充分利用包括地震台网监测数据在内的岩石圈观测参量(Zhang和Shen, 2011)，以及气象站点的近地表温度场、湿度、电场等观测参量等，进一步对汶川地震LCAI耦合范式的完整链条和相互作用进行分析印证。据此，深入探寻汶川地震遥感异常显现的前兆特征，挖掘遥感异常显现背后的地球物理与遥感物理机制。

在遥感科学、地震学、地球物理学、大气科学等相关领域科研工作者的密切配合下，取长补短、互为支撑，坚定信心、攻坚克难，已在通往地震前兆认知及地震短临预知的道路上，迈出了前进步伐。期待明天，前进的步伐更为坚实。更期待不远的将来，在对地观测集成系统(GEOSS)框架下，遥感科学与技术的新发展、地球物理卫星系统(申旭辉等, 2018)的建设与丰富，能为地震预测提供有效和强力的武器。

志 谢 在数据库访问方面得到了中南大学图书馆工作人员的支持和帮助。

参考文献(References)

- Akhoondzadeh M and Chehrebargh F J. 2016. Feasibility of anomaly occurrence in aerosols time series obtained from MODIS satellite images during hazardous earthquakes. *Advances in Space Research*, 58(6): 890-896 [DOI: 10.1016/j.asr.2016.05.046]
- Akhoondzadeh M, Parrot M and Saradjian M R. 2010. Electron and ion density variations before strong earthquakes ($M > 6.0$) using DEMETER and GPS data. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(1): 7-18 [DOI: 10.5194/nhess-10-7-2010]
- An Z H, Du X B, Fan Y Y, Liu J, Tan D C, Chen J Y and Xie T. 2011a. A study of the electric field before the Wenchuan 8.0 earthquake of 2008 using both space-based and ground-based observational data. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(11): 2876-2882 (安张辉, 杜学彬, 范莹莹, 刘君, 谭大诚, 陈军营, 解滔. 2011a. 汶川 $M_s=8.0$ 级大震前天基与陆基电场资料联合应用研究. 地球物理学报, 54(11): 2876-2882) [DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.017]
- An Z H, Tan D C, Chen J Y, Fan Y Y, Liu J and Xie T. 2011b. Discussion on the analysis method of magnetic field waveform data recorded by the DEMETER satellite. *South China Journal of Seismology*, 31(1): 55-65 (安张辉, 谭大诚, 陈军营, 范莹莹, 刘君, 解滔. 2011b. DEMETER 卫星磁场波形数据分析方法初探. 华南地震, 31(1): 55-65) [DOI: 10.13512/j.hndz.2011.01.007]
- Chen M H, Deng Z H, Liang Q Z, Ding L W and Tao J L. 2014. Study on the association between the surface latent heat flux (SLHF) in Tengchong region with the earthquakes in Sichuan-Yunnan region. *Seismology and Geology*, 36(2): 422-433 (陈梅花, 邓志辉, 梁琦珍, 丁留伟, 陶京玲. 2014. 腾冲地区潜热通量与周围地区地震活动的相关性. 地震地质, 36(2): 422-433) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.02.012]
- Chen M H, Deng Z H, Ma X J, Tao J L and Wang Y. 2011. Long- and mid-term anomalous variations of atmospheric water vapor before strong earthquake. *Seismology and Geology*, 33(3): 549-559 (陈梅花, 邓志辉, 马晓静, 陶京玲, 王煜. 2011. 强地震前水汽中长期异常变化特征研究. 地震地质, 33(3): 549-559) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2011.03.005]
- Chen S Y, Ma J, Liu P X, Liu L Q and Hu X Y. 2013. Exploring co-seismic thermal response of Wenchuan earthquake by using land surface temperatures of Terra and Aqua satellites. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(11): 3788-3799 (陈顺云, 马瑾, 刘培洵, 刘力强, 尹小燕. 2013. 利用 Terra 和 Aqua 卫星地表温度探索汶川地震前震热响应. 地球物理学报, 56(11): 3788-3799) [DOI: 10.6038/cjg20131120]
- Chen S Y, Ma J, Liu P X, Liu L Q, Hu X Y and Ren Y Q. 2014. Exploring the current tectonic activity with satellite remote sensing thermal information: a case of the Wenchuan earthquake. *Seismology and Geology*, 36(3): 775-793 (陈顺云, 马瑾, 刘培洵, 刘力强, 尹小燕, 任雅琼. 2014. 利用卫星遥感热场信息探索现今构造活动: 以汶川地震为例. 地震地质, 36(3): 775-793) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.03.018]
- Chen Y. 2011. Study on Earthquake-Related Anomalous Features of Infrared Remote Sensing. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, CEA (陈杨. 2011. 地震红外遥感异常特征综合研究. 北京: 中国地震局地震预测研究所)
- Chen Y T. 2008. On the magnitude and the fault length of the great Wenchuan earthquake. *Science and Technology Review*, 26(10): 26-27 (陈运泰. 2008. 汶川特大地震的震级和断层长度. 科技导报, 26(10): 26-27) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-7857.2008.10.007]
- Contadakis M E, Arabelos D N, Vergos G, Spatalas S D and Skordilis M. 2015. TEC variations over the Mediterranean before and during the strong earthquake ($M=6.5$) of 12th October 2013 in Crete, Greece. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 85-86: 9-16 [DOI: 10.1016/j.pce.2015.03.010]
- Cui J, Shen X H, Zhang J F, Ma W Y and Chu W. 2019. Analysis of spatiotemporal variations in middle-tropospheric to upper-tropospheric methane during the Wenchuan $M_s = 8.0$ earthquake by three indices. *Natural Hazards and Earth System Science*, 19(12): 2841-2854 [DOI: 10.5194/nhess-19-2841-2019]
- Cui L H. 2009. Study on Anomaly of Remote Sensing Information and Mechanism before the Wenchuan Earthquake. Tangshan: Hebei Polytechnic University (崔丽华. 2009. 汶川地震前的遥感信息异常及其机理研究. 唐山: 河北理工大学)
- Cui Y, Ouzounov D, Hatzopoulos N, Sun K, Zou Z and Du J. 2017. Satellite observation of CH_4 and CO anomalies associated with the Wenchuan $M_s=8.0$ and Lushan $M_s=7.0$ earthquakes in China. *Chemical Geology*, 469: 185-191 [DOI: 10.1016/j.chemgeo.2017.06.028]
- Cui Y J. 2011. Satellite Hyper-Spectrum Information of Gas Geochemistry Related to Earthquakes. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, CEA (崔月菊. 2011. 地震有关的卫星高光谱气体地球化学信息. 北京: 中国地震局地震预测研究所)
- Cui Y J, Du J G, Chen Y, Liu L, Liu H, Yi L and Sun F X. 2016c. Increasing of CO and CH_4 gas emission at Longmenshan fault zone before and after Wenchuan $M_s=8.0$ earthquake. *Journal of Seismological Research*, 39(2): 239-245 (崔月菊, 杜建国, 陈杨, 刘雷, 刘红, 易丽, 孙凤霞. 2016c. 汶川 $M_s=8.0$ 地震前后龙门山断裂带 CO 和 CH_4 排气增强. 地震研究, 39(2): 239-245) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0666.2016.02.009]
- Cui Y J, Du J G, Jing F and Li X Y. 2016b. Mapping emission of carbon-bearing gases from the satellite hyperspectral data in western Sichuan before and after the 2008 Wenchuan $M_s=8.0$ earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 38(3): 448-457 (崔月菊, 杜建国, 荆风, 李新艳. 2016b. 2008 年汶川 $M_s=8.0$ 地震前后川西含碳气体卫星高光谱特征. 地震学报, 38(3): 448-457) [DOI: 10.11939/jass.2016.03.012]
- Cui Y J, Du J G, Li Y and Guo Q N. 2016a. Detecting anomalies of atmospheric total column CH_4 and CO related to the 2008 Wenchuan

- M_s8.0 and 2013 Lushan M_s7.0 earthquakes. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 35(5): 1022-1027 (崔月菊, 杜建国, 李营, 郭秋娜. 2016a. 探测与2008年汶川M_s8.0和2013年芦山M_s7.0地震相关的大气CH₄和CO异常变化. 矿物岩石地球化学通报, 35(5): 1022-1027) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.05.023]
- Deng B C, Yang M L, Huang J and Zhao W H. 2009. Study on VTEC anomaly of ionosphere in South China before and after Wenchuan-earthquake. *South China Journal of Seismology*, 29(4): 8-15 (邓柏昌, 杨马陵, 黄江, 赵文化. 2009. 华南地区电离层在汶川地震前VTEC异常的研究. 华南地震, 29(4): 8-15) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-8662.2009.04.002]
- Deng Z H, Chen M H, Yang Z Z, Yan X and Deng Y L. 2014. Water vapor anomalies related to the Lushan and Wenchuan earthquakes in the Longmenshan mountains area. *Seismology and Geology*, 36(3): 658-666 (邓志辉, 陈梅花, 杨竹转, 严兴, 邓远立. 2014. 芦山地震、汶川地震与龙门山地区水汽异常. 地震地质, 36(3): 658-666) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.03.009]
- Deng Z H, Yan Y and Chen M H. 2009. Surface latent heat flux anomalies before the 2008 Wenchuan Ms8.0 earthquake. *Chinese Geophysical Society*: 532 (邓志辉, 严研, 陈梅花. 2009. 2008年汶川Ms8.0级地震前的潜热通量异常. 中国地球物理学会: 532)
- Ding Z H, Wu J, Sun S J, Chen J S and Ban P P. 2010. The variation of ionosphere on some days before the Wenchuan earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(1): 30-38 (丁宗华, 吴健, 孙树计, 陈金松, 班盼盼. 2010. 汶川大地震前电离层参量的变化特征与分析. 地球物理学报, 53(1): 30-38) [DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.01.004]
- Dong J, Yan R, Zhang J F, Zhang X M and Liu J. 2009. Analysis of earthquake-related information in ionosphere based on DEMETER satellite data-applied to Wenchuan and Donghai earthquake. *Earthquake*, 29(S1): 67-75 (董健, 颜蕊, 张景发, 张学民, 刘静. 2009. 基于DEMETER卫星观测数据的电离层地震前兆分析——以汶川地震、东海地震为例. 地震, 29(S1): 67-75) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2009.z1.010]
- Feng J D and Wang M T. 2013. Normalized vegetation index analysis in Wenchuan earthquake area. *Science of Soil and Water Conservation*, 11(4): 63-66 (冯建东, 王明田. 2013. 汶川地震灾区归一化植被指数变化监测分析. 中国水土保持科学, 11(4): 63-66) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-3007.2013.04.011]
- Guo X, Zhang Y S, Wei C X, Zhong M J and Zhang X. 2014. Medium wave infrared brightness anomalies of Wenchuan 8.0 and Zhongba 6.8 earthquakes. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(3): 338-344 (郭晓, 张元生, 魏从信, 钟美娇, 张旋. 2014. 汶川8.0级和中巴6.8级地震中波红外热辐射异常. 地球学报, 35(3): 338-344) [DOI: 10.3975/cagsb.2014.03.09]
- Guo X, Zhang Y S, Zhong M J, Shen W R and Wei C X. 2010. Variation characteristics of OLR for the Wenchuan earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(11): 2688-2695 (郭晓, 张元生, 钟美娇, 沈文荣, 魏从信. 2010. 提取地震热异常信息的功率谱相对变化法及震例分析. 地球物理学报, 53(11): 2688-2695) [DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.016]
- Han L. 2011. Study on Technologies of Remote Sensing Feature Analysis and Information Extraction of Earthquake Disaster. Chengdu: Chengdu University of Technology (韩岭. 2011. 地震灾害遥感特征分析与信息提取技术研究. 成都: 成都理工大学)
- He L M, Wu L X and Liu S J. 2011. A novel method for detecting seismo-ionospheric anomalies based on Wavelet transform. *Chinese Geophysical Society*: 1012 (贺黎明, 吴立新, 刘善军. 2011. 基于小波变换的地震电离层异常分析方法. 中国地球物理年会: 1012)
- He Y F, Yang D M, Chen H R, Qian J D, Zhu R and Parrot M. 2009. SNR changes of VLF radio signals detected onboard the DEMETER satellite and their possible relationship to the Wenchuan earthquake. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(6): 754-763 [DOI: 10.1007/s11430-009-0064-5]
- Hsiao C C, Liu J Y, Oyama K I, Yen N L, Liou Y A, Chen S S, and Mi au J J. 2010. Seismo-ionospheric precursor of the 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake observed by FORMOSAT-3/COSMIC. *GPS Solutions*, 14(1): 83-89 [DOI: 10.1007/s10291-009-0129-0]
- Huang J, Yang M L, Deng B C, Xu J, Wan D H and Kong D B. 2014. The relation of TEC perturbations of low-latitude ionosphere in Guangzhou region and two strong earthquakes. *South China Journal of Seismology*, 34(4): 1-8 (黄江, 杨马陵, 邓柏昌, 徐杰, 万德焕, 孔德宝. 2014. 广州地区低纬电离层TEC扰动与两次强地震的关系研究. 华南地震, 34(4): 1-8) [DOI: 10.13512/j.hndz.2014.04.001]
- Jhuang H K, Ho Y Y, Kakinami Y, Liu J Y, Oyama K I, Parrot M, Hat tori K, Nishihashi M and Zhang D H. 2010. Seismo-ionospheric anomalies of the GPS-TEC appear before the 12 May 2008 magnitude 8.0 Wenchuan Earthquake. *International Journal of Remote Sensing*, 31(13): 3579-3587 [DOI: 10.1080/01431161003727796]
- Jing F, Shen X H, Hong S Y and Ouyang X Y. 2008. The application of remote sensing technology to earthquake science research. *Remote Sensing for Land and Resources*, 28(2): 5-8 (荆凤, 申旭辉, 洪顺英, 欧阳新艳. 2008. 遥感技术在地震科学中的应用. 国土资源遥感, 28(2): 5-8)
- DOI: 10.3724/SP.J.1047.2008.00128] Jing F, Shen X H, Kang C L, Meng Q Y and Xiong P. 2009. Anomalies of outgoing longwave radiation before some medium to large earthquakes. *Earthquake*, 29(4): 117-122 (荆凤, 申旭辉, 康春丽, 孟庆岩, 熊攀. 2009. 中强地震前的长波辐射异常震例研究. 地震, 29(4): 117-122) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2009.04.013]
- Jing F, Singh R P and Shen X H. 2019. Land-atmosphere- Meteorological coupling associated with the 2015 Gorkha (M7.8) and Dolakha (M7.3) Nepal earthquakes. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1): 1267-1284 [DOI: 10.1080/19475705.2019.1573629]
- Kakinami Y, Liu J Y, Tsai L C and Oyama K I. 2010. Ionospheric electron content anomalies detected by a FORMOSAT-3/COSMIC empirical model before and after the Wenchuan Earthquake. Inter-

- national Journal of Remote Sensing, 31(13): 3571-3578 [DOI: 10.1080/01431161003727788]
- Kang C L, Li Z X, Meng Q Y, Jing F, Li M, Yan W and Shen X H. 2009a. Study of short-term earthquake prediction indicators for thermal infrared outgoing longwave radiation. Earthquake, 29(S1): 83-89 (康春丽, 李志熊, 孟庆岩, 荆凤, 李美, 闫伟, 申旭辉, 刘德富, 李安. 2009a. 地震红外长波辐射的短期预测指标研究. 地震, 29(S1): 83-89) [DOI: 10.3969/j. issn. 1000-3274.2009. z1.012]
- Kang C L, Liu D F, Jing F, Xiong P and Cao Z Q. 2011. Study on the indication of infrared radiation prior to impending strong earthquakes. Progress in Geophysics, 26(6): 1897-1905 (康春丽, 刘德富, 荆凤, 熊攀, 曹忠权. 2011. 大地震红外辐射异常信息时空特征分析. 地球物理学进展, 26(6): 1897-1905) [DOI: 10.3969/j. issn.1004-2903.2011.06.002]
- Kang C L, Zhang Y M, Liu D F and Jing F. 2009b. Long-wave-radiation patterns prior to the Wenchuan M8.0 earthquake. Earthquake, 29(1): 116-120 (康春丽, 张艳梅, 刘德富, 荆凤. 2009b. 汶川8.0级大地震的长波辐射征象. 地震, 29(1): 116-120) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2009.01.015]
- Klimenko M V, Klimenko V V, Zakharenkova I E, Pulinets S A, Zhao B and Tsodilina M N. 2011. Formation mechanism of great positive TEC disturbances prior to Wenchuan earthquake on May 12, 2008. Advances in Space Research, 48(3): 488-499 [DOI: 10.1016/j.asr.2011.03.040]
- Kong X Z, Li N, Lin L, Xiong P and Qi J. 2018. Relationship of stress changes and anomalies in OLR data of the Wenchuan and Lushan earthquakes. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 11(8): 2966-2976 [DOI: 10.1109/jstars.2018.2839089]
- Le H J, Liu J, Zhao B Q and Liu L B. 2015. Recent progress in ionospheric earthquake precursor study in China: a brief review. Journal of Asian Earth Sciences, 114: 420-430 [DOI: 10.1016/j.jseas.2015.06.024]
- Li J P and Liu S J. 2009. On the anomalies of crustal deformation and surface temperature and its correlation: a case study of Wenchuan earthquake. Geography and Geo-Information Science, 25(1): 79-83 (李金平, 刘善军. 2009. 地壳形变与地面温度异常及其关联分析: 以汶川地震为例. 地理与地理信息科学, 25(1): 79-83)
- Li J Y, Meng G J, Wang M, Liao H and Shen X H. 2009. Investigation of ionospheric TEC changes related to the 2008 Wenchuan earthquake based on statistic analysis and signal detection. Earthquake Science, 22(5): 545-553 [DOI: 10.1007/s11589-009-0545-9]
- Li M. 2015. Statistical Characteristics of Seismic Influence Ionosphere and Study of Earth-atmosphere Electromagnetic Coupling Based on the Wenchuan $M_8.0$ Earthquake. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (李美. 2015. 地震电离层异常统计特征与基于汶川 $M_8.0$ 地震的地-气电磁耦合研究. 北京: 中国地质大学(北京))
- Li M, Kang C L, Li Z X, Jing F, Xue Y and Yan W. 2010. Abnormal surface latent heat flux prior to the Wenchuan Ms8.0 earthquake. Earthquake, 30(3): 64-71 (李美, 康春丽, 李志雄, 荆凤, 薛艳, 闫伟. 2010. 汶川 Ms8.0 地震前地表潜热通量异常. 地震, 30(3): 64-71) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2010.03.006]
- Li W, Guo J Y, Yu X M and Yu H J. 2014. The ionospheric anomaly before earthquake detected by GPS. GNSS World of China, 39(2): 18-25 (李旺, 郭金运, 于学敏, 于红娟. 2014. 由 GPS 探测的大地震前 TEC 异常扰动. 全球定位系统, 39(2): 18-25) [DOI: 10.1344/gnss.2014.9268.2014.02.005]
- Lin J, Wu Y, Zhu F Y, Qiao X J and Zhou Y Y. 2009. Wenchuan earthquake ionosphere TEC anomaly detected by GPS. Chinese Journal of Geophysics, 52(1): 297-300 (林剑, 吴云, 祝美英, 乔学军, 周义炎. 2009. 基于 GPS 探测汶川地震电离层 TEC 的异常. 地球物理学报, 52(1): 297-300)
- Lin J W. 2011. Spatial pattern of a seismo-ionospheric signature using principal component analysis. International Journal of Remote Sensing, 32(21): 6423-6435 [DOI: 10.1080/01431161.2010.512621]
- Liu D F, Luo Z L and Peng K Y. 1997. OLR anomalous phenomena before strong earthquakes. Earthquake, 17(2): 126-132 (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)
- Liu J, Du X B, Zlotnicki J, Fan Y Y, An Z H, Xie T, Zhen G L, Tan D C and Chen J Y. 2011. The changes of the ground and ionosphere electric/magnetic fields before several great earthquakes. Chinese Journal of Geophysics, 54(11): 2885-2897 (刘君, 杜学彬, Zlotnicki J, 范莹莹, 安张辉, 解滔, 郑国磊, 谭大成, 陈军营. 2011. 几次大震前的地面和空间电磁场变化. 地球物理学报, 54(11): 2885-2897) [DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.018]
- Liu J Y, Chen Y I, Chen C H, Liu C Y, Chen C Y, Nishihashi M, Li J Z, Xua Y Q, Oyama K I, Hattori K and Lin C H. 2009a. Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 $M_w7.9$ Wenchuan earthquake. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 114(A4): A04320 [DOI: 10.1029/2008JA013698]
- Liu J Y, Chen Y I, Huang C C, Parrot M, Shen X H, Pulinets S A, Yang Q S and Ho Y Y. 2015. A spatial analysis on seismo-ionospheric anomalies observed by DEMETER during the 2008 $M_8.0$ Wenchuan earthquake. Journal of Asian Earth Sciences, 114: 414-419 [DOI: 10.1016/j.jseas.2015.06.012]
- Liu Q Q, Shen X H, Zhang J F and Li M. 2019. Exploring the abnormal fluctuations of atmospheric aerosols before the 2008 Wenchuan and 2013 Lushan earthquakes. Advances in Space Research, 63(12): 3768-3776 [DOI: 10.1016/j.asr.2019.01.032]
- Liu S J, Cui L H, Wu L X and Wang Z. 2009b. Analysis on the water vapor anomaly before Wenchuan earthquake based on MODIS data/2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town: IEEE [DOI: 10.1109/IGARSS.2009.5418102]
- Lu Q, Zhang T B, Xin H and Liu F. 2014. The comparison of anomalous

- lies of the satellite thermal infrared observation data between the 2008 M8.0 Wenchuan and the 2013 M7.0 Lushan earthquakes. *Earthquake Research in Sichuan*, (2): 38-42 (路茜, 张铁宝, 辛华, 刘放. 2014. 汶川 8.0 级和芦山 7.0 级地震前卫星热红外异常现象对比. *四川地震*, (2): 38-42) [DOI: 10.13716/j.cnki.1001-8115.2014.02.009]
- Lv Y L, Mao Y P and Shi Z T. 2009. Thermal infrared remote sensing applied to earthquake monitoring and prediction. *Science and Technology Review*, 27(6): 91-96 (吕月琳, 毛玉平, 史正涛. 2009. 热红外遥感在地震监测预测中的应用. *科技导报*, 27(6): 91-96) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-7857.2009.06.018]
- Ma B D, Wu L X and Liu S J. 2010. NDVI variation features before Wenchuan Ms8.0 earthquake. *Science and Technology Review*, 28 (13): 52-57 (马保东, 吴立新, 刘善军. 2010. 中国汶川 Ms8.0 级地震前 NDVI 变化特征及其佐证. *科技导报*, 28(13): 52-57)
- Ma J, Ma S L and Liu L Q. 1995. The stages of anomalies before an earthquake and the characteristics of their spatial distribution. *Seismology and Geology*, 17(4): 363-371 (马瑾, 马胜利, 刘力强. 1995. 地震前异常的阶段性及其空间分布特征. *地震地质*, 17 (4): 363-371)
- Ma J and 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 (马瑾, 单新建. 2000. 利用遥感技术研究断层现今活动的探索——以玛尼地震前后断层相互作用为例. *地震地质*, 22(3): 210-215) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2000.03.002]
- Ma W Y. 2008. Abnormal phenomenon of NCEP before Wenchuan earthquake. *Science and Technology Review*, 26(10): 37-39 (马未宇. 2008. 汶川地震前的 NCEP 异常现象. *科技导报*, 26(10): 37-39) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-7857.2008.10.011]
- Ma X X, Lin Z, Chen H R, Jin H L, Li D H, Jiao L G and Liu X C. 2013. Ionosphere anomaly before the Wenchuan M_s 8.0 earthquake detected by COSMIC occultation data. *Acta Seismologica Sinica*, 35(6): 848-855 (马新欣, 林湛, 陈化然, 金红林, 李大虎, 焦立果, 刘晓灿. 2013. 基于 COSMIC 掩星数据探测汶川 M_s 8.0 地震震前电离层异常. *地震学报*, 35(6): 848-855) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-3782.2013.06.008]
- Ma Y T, Liu S J, Wu L X and Xu Z Y. 2011. Two-step method to extract seismic microwave radiation anomaly: case study of M_s 8.0 Wenchuan earthquake. *Earthquake Science*, 24(6): 577-582 [DOI: 10.1007/s11589-011-0819-x]
- Maeda T and Takano T. 2009. Detection of microwave signals associated with rock failures in an earthquake from satellite-borne microwave radiometer data//2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town: IEEE [DOI: 10.1109/igarss.2009.5418159]
- Ouzounov D and Freund F. 2004. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. *Advances in Space Research*, 33(3): 268-273 [DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00486-1]
- Pulinets S. 2009. Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling (laic) model. *Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Trivandrum, India: Transworld Research Network: 235-254
- Pulinets S and Ouzounov D. 2011. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model-an unified concept for earthquake precursors validation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(4/5): 371-382 [DOI: 10.1016/j.jseas.2010.03.005]
- Qi Y, Wu L X, He M and Mao W F. 2020. Spatio-temporally weighted two-step method for retrieving seismic MBT anomaly: May 2008 Wenchuan earthquake sequence being a case. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 382-391 [DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2962719]
- Qin K, Wu L X, De Santis A and Cianchini G. 2012. Preliminary analysis of surface temperature anomalies that preceded the two major Emilia 2012 earthquakes (Italy). *Annals of Geophysics*, 55(4): 823-828 [DOI: 10.4401/ag-6123]
- Qin K, Wu L X, Zheng S and Liu S J. 2013. A Deviation-Time-Space-Thermal (DTS-T) method for Global Earth Observation System of Systems (GEOSS)-based earthquake anomaly recognition: criterions and quantify indices. *Remote Sensing*, 5(10): 5143-5151 [DOI: 10.3390/rs5105143]
- Qin K, Wu L X, Zheng S, Bai Y and Lv X. 2014. Is there an abnormal enhancement of atmospheric aerosol before the 2008 Wenchuan earthquake?. *Advances in Space Research*, 54(6): 1029-1034 [DOI: 10.1016/j.asr.2014.04.025]
- Ryu K, Parrot M, Kim S G, Jeong K S, Chae J S, Pulinets S and Oyama K I. 2014. Suspected seismo-ionospheric coupling observed by satellite measurements and GPS TEC related to the $M_7.9$ Wenchuan earthquake of 12 May 2008. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(12): 10305-10323 [DOI: 10.1002/2014JA020613]
- Shen X H. 2016. Preface to the special issue on satellite application to earthquake science. *Acta Seismologica Sinica*, 38(3): 329-332 (申旭辉, 2016. 《卫星地震应用研究》专辑前言. *地震学报*, 38(3): 329-332) [DOI: 10.11939/jass.2016.03.001]
- Shen X H, Wu Y and Shan X J. 2007. Remote sensing application in earthquake science and general proposal for earthquake satellite project in China. *Recent Development in World Seismology*, (8): 38-45 (申旭辉, 吴云, 单新建. 2007. 地震遥感应用趋势与中国地震卫星发展框架. *国际地震动态*, (8): 38-45) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4975.2007.08.011]
- Shen X H, Zhang X M, Cui J, Zhou X, Jiang W L, Gong L X, Li Y S and Liu Q Q. 2018. Remote sensing application in earthquake science research and geophysical fields exploration satellite mission in China. *Journal of Remote Sensing*, 22(S1): 5-20 (申旭辉, 张学民, 崔静, 周新, 姜文亮, 龚丽霞, 李永生, 刘芹芹. 2018. 中国地震遥感应用研究与地球物理场探测卫星计划. *遥感学报*, 22 (S1): 5-20) [DOI: 10.11834/jrs.20188337]
- Shi J, Wang W X and Wen J X. 2010. The meteorological anomalies before and after the Wenchuan earthquake. *Astronomical Re-*

- search and Technology, 7(1): 78-84 (石俊, 王维侠, 温敬霞. 2010. 汶川地震前后的气象异常. 天文研究与技术, 7(1): 78-84) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-7673.2010.01.013]
- Singh R P, Mehdi W, Gautam R, Senthil Kumar J, Zlotnicki J and Kafatos M. 2010. Precursory signals using satellite and ground data associated with the Wenchuan Earthquake of 12 May 2008. International Journal of Remote Sensing, 31(13): 3341-3354 [DOI: 10.1080/01431161.2010.487503]
- Song D M, Zang L, Shan X J, Yuan Y, Cui J Y, Shao H M and Shen C. 2016. A study on the algorithm for extracting earthquake thermal infrared anomalies based on the yearly trend of LST. Seismology and Geology, 38(3): 680-695 (宋冬梅, 臧琳, 单新建, 袁媛, 崔建勇, 邵红梅, 沈晨, 时洪涛. 2016. 基于LST年趋势背景场的地震热异常提取算法. 地震地质, 38(3): 680-695) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2016.03.014]
- Sun K. 2017. Study on Seismic Thermal Infrared Algorithm and Characteristics Based on Satellite Remote Sensing Retrieval. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration (孙珂. 2017. 基于卫星遥感反演的地震热红外算法及特征研究. 北京: 中国地震局地质研究所)
- Tramutoli V, Aliano C, Corrado R, Filizzola C, Genzano N, Lisi M, Martinelli G and Pergola N. 2013. On the possible origin of thermal infrared radiation (TIR) anomalies in earthquake-prone areas observed using robust satellite techniques (RST). Chemical Geology, 339: 157-168 [DOI: 10.1016/j.chemgeo.2012.10.042]
- Wang J, Li X R, Du C C and Zeng Z X. 2017. Aerial methane concentration anomaly and air temperature increase before the Wenchuan earthquake. Earth Science Frontiers, 24(3): 331-340 (王杰, 李献瑞, 杜承宸, 曾佐勋. 2017. 汶川地震前的甲烷浓度异常及大气增温耦合. 地学前缘, 24(3): 331-340) [DOI: 10.13745/j.esf.yx.2017-2-30]
- Wei L J, Guo, J F, Cai H, Li H B and Qiang Z J. 2008. Satellite thermal infrared anomaly: a short-term and impending earthquake precursor before the Wenchuan Ms8.0 Earthquake in Sichuan, China. Acta Geoscientica Sinica, 29(5): 583-591 (魏乐军, 郭坚峰, 蔡慧, 李海兵, 强祖基. 2008. 卫星热红外异常——四川汶川Ms8.0级大地震的短临震兆. 地球学报, 29(5): 583-591) [DOI: 10.3321/j.issn:1006-3021.2008.05.007]
- Wu L X, Liu S J, Chen Y H, Ma B D and Li L L. 2008. Satellite thermal infrared and cloud abnormalities before Wenchuan earthquake. Science and Technology Review, 26(10): 32-36 (吴立新, 刘善军, 陈云浩, 马保东, 李玲玲. 2008. 汶川地震前卫星热红外异常与云异常现象. 科技导报, 26(10): 32-36) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-7857.2008.10.010]
- Wu L X, Mao W F, Liu S J, Xu Z Y, Li Z W, Qi Y and Miao Z L. 2018. Mechanisms of altering infrared-microwave radiation from stressed rock and key issues on crust stress remote sensing. Journal of Remote Sensing, 22(s1): 146-161 (吴立新, 毛文飞, 刘善军, 徐忠印, 李志伟, 齐源, 苗则朗. 2018. 岩石受力红外与微波辐射变化机理及地应力遥感关键问题. 遥感学报, 22(S1): 146-161) [DOI: 10.11834/jrs.20187256]
- Wu L X, Qin K and Liu S J. 2012a. GEOSS-based thermal parameters analysis for earthquake anomaly recognition. Proceedings of the IEEE, 100(10): 2891-2907 [DOI: 10.1109/jproc.2012.2184789]
- Wu L X, Qin K, Liu S J, De Santis A and Cianchini G. 2012b. Importance of lithosphere- coversphere- atmosphere coupling to earthquake anomaly recognition//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich: IEEE [DOI: 10.1109/igarss.2012.6350657]
- Wu L X, Zheng S, De Santis A, Qin K, Di Mauro R, Liu S J and Rainone M L. 2016. Geosphere coupling and hydrothermal anomalies before the 2009 M_w 6.3 L'Aquila earthquake in Italy. Natural Hazards and Earth System Sciences, 16(8): 1859-1880 [DOI: 10.5194/nhess-16-1859-2016]
- Wu Y, Fu N B, Lin J, Zhou Y Y, Zhu F Y, Yang J and Xiong J. 2011. Research on TEC anomalies before Ms8.0 Wenchuan earthquake by using Kalman filtering. Journal of Geodesy and Geodynamics, 31(2): 23-27 (吴云, 付宁波, 林剑, 周义炎, 祝美英, 杨剑, 熊晶. 2011. 用卡尔曼滤波法分析汶川Ms8.0地震TEC异常. 大地测量与地球动力学, 31(2): 23-27) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-5942.2011.02.006]
- Xia C L, Wang Q, Yu T, Xu G R and Yang S M. 2011. Variations of ionospheric total electron content before three strong earthquakes in the Qinghai-Tibet region. Advances in Space Research, 47(3): 506-514 [DOI: 10.1016/j.asr.2010.09.006]
- Xie J L, Gao S Z, Xu J H and Zeng X. 2016. Investigation on ionospheric anomaly of Wenchuan Ms8.0 earthquake based on moving Chapman-Miller method. Geomatics and Spatial Information Technology, 39(3): 41-44 (谢嘉丽, 高淑照, 徐京华, 曾行. 2016. 基于移动Chapman-Miller方法的汶川Ms8.0地震电离层异常研究. 测绘与空间地理信息, 39(3): 41-44) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2016.03.012]
- Xie T, Du X B, Liu J, Fan Y Y, An Z H, Chen J Y and Tan D C. 2013. Wavelet power spectrum analysis of the electromagnetic signals of Wenchuan Ms8.0 and Haiti M_w 7.0 earthquakes. Acta Seismologica Sinica, 35(1): 61-71 (解滔, 杜学彬, 刘君, 范莹莹, 安张辉, 陈军营, 谭大诚. 2013. 汶川 M_s 8.0、海地 M_w 7.0地震电磁信号小波能谱分析. 地震学报, 35(1): 61-71) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-3782.2013.01.007]
- Xing N, Wang X Y and Hu X G. 2011. Study of ionosphere using GPS data and its application to analysis about earthquake. Chinese Journal of Space Science, 31(2): 236-245 (邢楠, 王小亚, 胡小工. 2011. GPS电离层反演方法研究及其在地震方面的应用. 空间科学学报, 31(2): 236-245)
- Xiong J, Wu Y and Lin J. 2013. Ionospheric electron density anomalies detected by BP artificial neural network before Wenchuan earthquake. Journal of Geodesy and Geodynamics, 33(1): 13-16 (熊晶, 吴云, 林剑. 2013. 用BP神经网络技术探测汶川地震前电离层NmF2异常扰动. 大地测量与地球动力学, 33(1): 13-16) [DOI: 10.14075/j.jgg.2013.01.031]

- Xiong J, Wu Y, Zhu F Y, Lin J, Zhou Y Y and Yang J. 2008. Anomalous disturbance of ionospheric NmF2 during Wenchuan earthquake. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 28(6): 22-26 (熊晶, 吴云, 祝美英, 林剑, 周义炎, 杨剑). 2008. 汶川地震前电离层 NmF2 异常扰动. *大地测量与地球动力学*, 28(6): 22-26 [DOI: 10.14075/j.jgg.2008.06.012]
- Xiong P. 2009. Wavelet-based Methods for Detecting Earthquake Information in Remote Sensing Data. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, CEA (熊攀). 2009. 小波方法在地震遥感信息提取中的应用. 北京: 中国地震局地震预测研究所
- Xiong P, Shen X H, Bi Y X, Kang C L and Jing F. 2009. Detection of earthquake anomalies from outgoing longwave radiation data using wavelet maxima. *Earthquake*, 29(S1): 98-104 (熊攀, 申旭辉, 毕亚新, 康春丽, 荆凤). 2009. 小波极大值法在长波辐射地震异常信息提取中的应用. *地震*, 29(S1): 98-104 [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2009.z1.014]
- Yan L L. 2012. Comparison of Brightness Temperature Images from Satellite Remote Sensing of Infrared and Microwave and the Preliminary Application to Earthquake Monitoring. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration (闫丽莉). 2012. 卫星红外与微波亮温对比研究及在地震监测中的初步应用. 中国地震局地质研究所
- Yan R, Wang L W, Hu Z, Liu D P, Zhang X G and Zhang Y. 2013. Ionospheric disturbances before and after strong earthquakes based on DEMETER data. *Acta Seismologica Sinica*, 35(4): 498-511 (颜蕊, 王兰炜, 胡哲, 刘大鹏, 张兴国, 张宇). 2013. 利用 DEMETER 卫星数据分析强震前后的电离层异常. *地震学报*, 35(4): 498-511 [DOI: 10.3969/j.issn.0253-3782.2013.04.005]
- Yan X X, Shan X J, Cao J B and Tang J. 2014. Statistical analysis of electron density anomalies before global $M_w \geq 7.0$ earthquakes (2005-2009) using data of DEMETER satellite. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(2): 364-376 (闫相相, 单新建, 曹晋滨, 汤吉). 2014. 利用 DEMETER 卫星数据统计分析全球 $M_w \geq 7.0$ 地震的电离层电子浓度异常. *地球物理学报*, 57(2): 364-376 [DOI: 10.6038/cjg20140203]
- Yan X X, Shan X J, Cao J B, Tang J and Wang F F. 2012. Seismoionospheric anomalies observed before Wenchuan earthquake using GPS and DEMETER data. *Seismology and Geology*, 34(1): 160-171 (闫相相, 单新建, 曹晋滨, 汤吉, 王飞飞). 2012. 利用 GPS 和 DEMETER 数据分析汶川地震前电离层变化. *地震地质*, 34(1): 160-171 [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2012.01.015]
- Yan X X, Shan X J, Zhang X M, Qu C Y, Tang J, Wang F F and Wen S Y. 2013. Multiparameter seismo-ionospheric anomaly observation before the 2008 Wenchuan, China, Mw7.9 earthquake. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7(1): 073532 [DOI: 10.11117/j.jrs.7.073532]
- Yan Y, Deng Z H, Chen M H, Zu J H and Tao J L. 2008. Retrieving the latent heat flux of Wenchuan area of Sichuan province using a Dualtemperature-difference method. *Seismology and Geology*, 30(4): 1085-1094 (严研, 邓志辉, 陈梅花, 祖金华, 陶京玲). 2008. 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. *地震地质*, 30(4): 1085-1094 [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2008.04.024]
- Yang G A and Mi Y Q. 2009. Thermal anomalies and earthquakes: evidence from Wenchuan, China. *Earthquake Research in China*, 23(1): 48-55
- Yang J. 2011. Analysis of Thermal-Infrared Abnormality Based on Multi-Source Remote Sensing Data Before Earthquake. Xi'an: Chang'an University (杨杰). 2011. 基于多源遥感数据地震前热异常分析. 西安: 长安大学
- Yao L, Shen X H and Zhang X M. 2014. Analysis of ionospheric anomalies preceding the 2010 Yushu $M_s 7.1$ earthquake. *Earthquake*, 34(3): 74-85 (姚璐, 申旭辉, 张学民). 2014. 玉树 $M_s 7.1$ 地震前电离层异常扰动分析. *地震*, 34(3): 74-85 [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2014.03.007]
- Yao Y B, Zhai C Z, Kong J and Liu L. 2016. The Pre-earthquake ionosphere anomaly of the 2015 Nepal earthquake. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 45(4): 385-395 (姚宜斌, 翟长治, 孔建, 刘磊). 2016. 2015年尼泊尔地震的震前电离层异常探测. *测绘学报*, 45(4): 385-395 [DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150384]
- Ye C M, Han L and Miao F. 2012. Monitoring and analysis of vegetation using remote sensing in 5.12 Wenchuan earthquake region. *Progress in Geophysics*, 27(5): 1922-1928 (叶成名, 韩岭, 苗放). 2012. 5.12 汶川震区植被遥感动态监测与分析. *地球物理学进展*, 27(5): 1922-1928 [DOI: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.05.012]
- Yu T, Mao T, Wang Y G and Wang J S. 2009. Study of the ionospheric anomaly before the Wenchuan earthquake. *Chinese Science Bulletin*, 54(4): 493-499 (余涛, 毛田, 王云冈, 王劲松). 2009. 汶川特大地震前电离层主要参量变化. *科学通报*, 54(4): 493-499 [DOI: 10.1007/s11434-008-0587-8]
- Yue Z Q. 2013. Cause and mechanism of highly compressed and dense methane gas mass for Wenchuan earthquake and associated rock-avalanches and surface co-seismic ruptures. *Earth Science Frontiers*, 20(6): 15-20 (岳中琦). 2013. 汶川地震与山崩地裂的极高压甲烷天然气成因和机理. *地学前缘*, 20(6): 15-20
- Zeng Z C, Zhang B, Fang G Y, Wang D F and Yin H J. 2009. The analysis of ionospheric variations before Wenchuan earthquake with DEMETER data. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(1): 11-19 (曾中超, 张蓓, 方广有, 王东峰, 阴和俊). 2009. 利用 DEMETER 卫星数据分析汶川地震前的电离层异常. *地球物理学报*, 52(1): 11-19
- Zhang B, Zeng Z C, Fang G Y and Wang D F. 2010. ELF electromagnetic emissions observed by the DEMETER satellite before the 2008 Ms8.0 Wenchuan earthquake and its aftershocks. *Acta Seismologica Sinica*, 32(5): 625-630 (张蓓, 曾中超, 方广有, 王东峰). 2010. 汶川地震及其余震期间的 ELF 电磁异常. *地震学报*, 32(5): 625-630 [DOI: 10.3969/j.issn.0253-3782.2010.05.012]
- Zhang C J, Chen H Z, Li W D, Xu H H and Peng Y Q. 2015. Thinking of earthquake monitoring and prediction at the age of big data.

- Progress in Geophysics, 30(4): 1561-1568 (张晁军, 陈会忠, 李卫东, 许洪华, 彭远黔. 2015. 大数据时代对地震监测预报问题的思考. 地球物理学进展, 30(4): 1561-1568) [DOI: 10.6038/pg20150410]
- Zhang G M. 2002. The main science advance of earthquake monitoring and prediction in China. Earthquake, 22(1): 2-8 (张国民. 2002. 我国地震监测预报研究的主要科学进展. 地震, 22(1): 2-8) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2002.01.002]
- Zhang P Z. 2008. Earthquake disaster and its reduction in China. Seismology and Geology, 30(3): 577-583 (张培震. 2008. 中国地震灾害与防震减灾. 地震地质, 30(3): 577-583) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2008.03.001]
- Zhang T B, Lu Q, Liu F and Xin H. 2013. Analysis on Infrared Anomalous Increase of MODIS Satellite before Wenchuan M8.0 and Yushu M7.1 earthquakes. Journal of Seismological Research, 36(4): 496-501 (张铁宝, 路茜, 刘放, 辛华. 2013. 汶川和玉树地震前 MODIS 卫星红外异常分析. 地震研究, 36(4): 496-501) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0666.2013.04.014]
- Zhang T B, Lu Q, Xin H and Liu F. 2015. Analysis on brightness temperature of satellite infrared in the central-eastern Bayan Har block before and after the Wenchuan and Lushan earthquakes. Earthquake Research in China, 31(2): 344-352 (张铁宝, 路茜, 辛华, 刘放. 2015. 汶川和芦山地震前后巴颜喀拉地块中东段红外亮温分析. 中国地震, 31(2): 344-352) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-4683.2015.02.019]
- Zhang X M, Chen H R, Liu J, Shen X H, Miao Y Q, Du X B and Qian J D. 2012. Ground-based and satellite DC-ULF electric field anomalies around Wenchuan M8.0 earthquake. Advances in Space Research, 50(1): 85-95 [DOI: 10.1016/j.asr.2012.03.018]
- Zhang X M and Shen X H. 2011. Electromagnetic anomalies around the Wenchuan earthquake and their relationship with earthquake preparation. International Journal of Geophysics, 2011: 904132 [DOI: 10.1155/2011/904132]
- Zhang X M, Shen X H, Liu J, Ouyang X Y, Qian J D, and Zhao S F. 2010a. Ionospheric perturbations of electron density before the Wenchuan Earthquake. International Journal of Remote Sensing, 31(13): 3559-3569 [DOI: 10.1080/01431161003727762]
- Zhang X M, Shen X H, Ouyang X Y, Cai J A, Huang J P, Liu J and Zhao S F. 2009. Ionosphere VLF electric field anomalies before Wenchuan M8 earthquake. Chinese Journal of Radio Science, 24(6): 1024-1032 (张学民, 申旭辉, 欧阳新艳, 蔡晋安, 黄建平, 刘静, 赵庶凡. 2009. 汶川8级地震前空间电离层VLF电场异常现象. 电波科学学报, 24(6): 1024-1032) [DOI: 10.3969/j.issn.1005-0388.2009.06.008]
- Zhang X, Shen X, Liu J, Ouyang X, Qian J and Zhao S. 2009. Analysis of ionospheric plasma perturbations before Wenchuan earthquake. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9(4): 1259-1266 [DOI: 10.5194/nhess-9-1259-2009]
- Zhang X X, Hu X and Zhang C Z. 2008. Ionospheric response with Wenchuan big earthquake by occulted data. GNSS World of China, 33(5): 1-5 (张训械, 胡雄, 张春泽. 2008. GPS 电离层掩星数据分析汶川大地震电离层响应. 全球定位系统, 33(5): 1-5) [DOI: 10.13442/j.gnss.2008.05.001]
- Zhang Y S, Guo X, Zhong M J, Shen W R, Li W and He B. 2010b. Wenchuan earthquake: brightness temperature changes from satellite infrared information. Science Bulletin, 55(18): 1917-1924 [DOI: 10.1007/s11434-010-3016-8]
- Zhang Y S, Liu Q H and Guo X. 2004. Progress in application and study of the technology of satellite infrared remote sensing on earthquake prediction. Northwestern Seismological Journal, 26(4): 357-361 (张元生, 柳钦火, 郭晓. 2004. 卫星红外遥感在地震预报中的应用及研究进展. 西北地震学报, 26(4): 357-361) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2004.04.014]
- Zhao B Q, Wang M, Yu T, Wan W X, Lei J H, Liu L B and Ning B Q. 2008. Is an unusual large enhancement of ionospheric electron density linked with the 2008 great Wenchuan earthquake? Journal of Geophysical Research: Space Physics, 113(A11: A11304) [DOI: 10.1029/2008JA013613]
- Zhao B Q, Wang M, Yu T, Xu G, Wan W X and Liu L B. 2010. Ionospheric total electron content variations prior to the 2008 Wenchuan Earthquake. International Journal of Remote Sensing, 31(13): 3545-3557 [DOI: 10.1080/01431161003727622]
- Zhao Y, Zhang X H and Liu J N. 2010. Perturbation analysis of the ionospheric TEC before and after the Wenchuan earthquake. Progress in Geophysics, 25(2): 447-453 (赵莹, 张小红, 刘经南. 2010. 汶川大地震前后电离层电子含量的扰动分析. 地球物理学进展, 25(2): 447-453) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.02.010]
- Zhao Y Y, Liu S J, Ma Y T and Wu L X. 2010. On the method to identify the atmospheric water vapor abnormal before earthquakes and the analysis on Wenchuan earthquake. China Association of Remote Sensing Applications and Regional Remote Sensing Development and Industry Symposium: 209-216 (赵益洋, 刘善军, 马运涛, 吴立新. 2010. 震前大气水汽异常识别方法与汶川地震分析. 中国遥感应用协会2010年年会暨区域遥感发展与产业高层论坛论文集: 209-216)
- Zhou Y Y, Wu Y, Qiao X J and Zhang X X. 2009. Ionospheric anomalies detected by ground-based GPS before the Mw7.9 Wenchuan earthquake of May 12, 2008, China. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 71(8/9): 959-966 [DOI: 10.1016/j.jastp.2009.03.024]
- Zhu F Y, Wu Y, Lin J, Zhou Y Y, Xiong J and Yang J. 2008. Study on ionospheric TEC anomaly prior to Wenchuan Ms8.0 earthquake. Journal of Geodesy and Geodynamics, 28(6): 16-21 (祝美英, 吴云, 林剑, 周义炎, 熊晶, 杨剑. 2008. 汶川Ms8.0地震前电离层TEC异常分析. 大地测量与地球动力学, 28(6): 16-21) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-5942.2008.06.004]
- Zhu F Y, Wu Y, Lin J, Zhou Y Y, Xiong J and Yang J. 2009. Anomalous response of ionospheric VTEC before the Wenchuan earthquake. Acta Seismologica Sinica, 31(2): 180-187 (祝美英, 吴云, 林剑, 周义炎, 熊晶, 杨剑. 2009. 汶川地震前电离层VTEC的异常响应. 地震学报, 31(2): 180-187) [DOI: 10.3321/j.issn.0253-

- 3782.2009.02.007]
- Zhu T and Wang L W. 2011. LF electric field anomalies related to Wenchuan earthquake observed by DEMETER satellite. Chinese Journal of Geophysics, 54(3): 717-723 (朱涛, 王兰炜. 2011. DEMETER 卫星观测到的与汶川地震有关的 LF 电场异常. 地球物理学报, 54(3): 717-727) [DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.011]
- Zou B, Guo J Y, Chang X T, Zhu G B and Li W D. 2016. Analysis of TEC anomalies before earthquake based on principal component analysis and the sliding inter quartile range method. GNSS World of China, 41(4): 63-69, 76 (邹斌, 郭金运, 常晓涛, 朱广彬, 李武东. 2016. 基于主成分分析与滑动四分位法的震前 TEC 异常探测对比分析. 全球定位系统, 41(4): 63-69, 76) [DOI: 10.1344/gnss.1008-9268.2016.04.014]

Remote sensing anomalies of multiple geospheres before the Wenchuan earthquake and its spatiotemporal correlations

HE Miao¹, WU Lixin¹, CUI Jing², WANG Wei¹, QI Yuan¹, MAO Wenfei³, MIAO Zelang¹, CHEN Biyan¹, SHEN Xuhui^{2,1}

1. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. The Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China;

3. School of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract: The preparation for the occurrence of an earthquake is a complicated process. This process is usually accompanied with material migration, energy release, and information exchange, which can disturb the radiation balance in the seismogenic zone. Obtaining the changing information of the coversphere, atmosphere, and ionosphere through satellite remote sensing; analyzing seismic anomalies; and identifying earthquake precursors, have become the interactive hotspots of the remote sensing and seismology fields. As a typical case where numerous anomalies precede the main shock, this study investigated the Ms 8.0 Wenchuan earthquake and its physical mechanism of the relevant seismic anomalies.

On the basis of published research results, this study systematically collected and filtered the possible remote sensing anomalies of the Wenchuan earthquake under certain criteria and summarized the abnormal features of 20 remote sensing parameters related to the coversphere (five parameters), atmosphere (eight parameters), and ionosphere (seven parameters). By mapping the anomalies in a unified framework, the spatiotemporal correlations among the anomaly manifestations were analyzed, and the overall spatiotemporal characteristics of the short-term manifestations of multiple anomalies were revealed.

The results of this study can be summarized as follows. (1) The manifestations of remote sensing anomalies gradually increased, enhanced, and congested before the Wenchuan earthquake, and prominent impending earthquake precursors were observed. (2) Remote sensing anomalies developed in a bottom - up manner from the coversphere and atmosphere to the ionosphere three months before the shock, which is in accordance with the Lithosphere - Coversphere - Atmosphere - Ionosphere (LCAI) coupling paradigm. (3) Strong spatial correlations were present among the seismic faults and manifestation positions of short-term-to-impending remote sensing anomalies, which congested along the Longmenshan faults and its nearby region. (4) Multiple short-term-to-impending remote sensing and strip-shaped anomalies covered the epicenter of the main shock and developed along the Longmenshan faults, respectively, thereby reflecting the local effect of the LCAI coupling in the late stage of the seismogenous process. The clustering multi-parameter remote sensing anomalies before May 12 can be regarded as Wenchuan earthquake anomalies with precursory significance.

At the macroscopic scale, the seismic response driven by the deep part of the Earth can be explained using the knowledge on the multiple geosphere coupling of the entire planet system. The in-depth analysis of the individual characteristics, spatiotemporal correlations, and overall laws of the Wenchuan earthquake remote sensing anomalies during the earthquake preparation process is critical to the investigation of the physical mechanism of seismic anomalies. This retrospective research provides heuristic clues about the energy exchange process of the Wenchuan earthquake and confirms the great potential of multi-parameter earthquake precursor research. Furthermore, this study benefits the satellite monitoring and synergic analysis of strong inland earthquakes during the late stage of earthquake preparation and provides reference for earthquake prediction studies.

Key words: Wenchuan earthquake, remote sensing anomaly, anomaly manifestation, spatio-temporal correlation, multiple geospheres

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2018YFC15035); National Natural Science Foundation of China (No.41930108); Talents Gathering Program of Hunan Province China (No.2018RS3013)