

陈顺云,刘培洵,刘力强等. 遥感与实测地表温度的对比分析及在地震研究中的意义. 地球物理学报, 2011, **54**(3):747~755, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.014

Chen S Y, Liu P X, Liu L Q, et al. Comparative analysis between land surface temperatures obtained by field measurement and satellite remote sensing and its implication in earthquake research. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(3):747~755, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.014

遥感与实测地表温度的对比分析及 在地震研究中的意义

陈顺云,刘培洵,刘力强,马 瑾,陈国强,扈小燕

中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室,北京 100029

摘 要 伴随着空间观测技术的发展,卫星热红外遥感在地震领域受到越来越多的关注,同时存在许多基础性工作亟待完善. 本文以由卫星遥感影像与实际测量两种不同方法获取的地表温度为基础,选取 2006 年 3 月~2008 年 2 月近 2 年的数据,进行遥感与实测地表温度之间的对比研究. 分析结果表明遥感与实测地表温度之间:夜间差值比白天要小,白天的相关性比夜间相关性差;无论是白天还是夜间,长周期信号相关性比短周期要好,对于几十天以上的变化,两者相关程度均极高. 意味着分析地表温度的长周期变化时,选用白天或者夜间数据产品没有实质性区别. 通过本文分析,初步明确了遥感地表温度与实测地表温度之间的相关性,有助于选取合适的遥感资料开展地震研究.

关键词 地表温度,天地对比,相关性,MODIS

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.014 中图分类号 P423,P315 收稿日期 2010-02-08,2011-02-16 收修定稿

Comparative analysis between land surface temperatures obtained by field measurement and satellite remote sensing and its implication in earthquake research

CHEN Shun-Yun, LIU Pei-Xun, LIU Li-Qiang, MA Jin, CHEN Guo-Qiang, HU Xiao-Yan
Laboratory of Earthquake Dynamics Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract The satellite thermal infrared remote sensing is getting more and more attention in earthquake science, for satellite remote sensing has a significant advantage of the space information. Meanwhile, there exist many key basic problems which should be solved, for instance, what data are suitable for the corresponding research. In this paper, the relationship between two kinds of land surface temperatures obtained by field measurement and satellite remote sensing is studied, based on data from March, 2006 to February, 2008. Our results indicate that: (1) as for the two kinds of land surface temperatures, the difference at night is smaller than that of day, and correlation at night is more significant than that of day; (2) No matter whether it is day or night, the correlation between long period components of the two kinds of land surface temperature is more significant than that between short period components. This means that there is essentially no difference between day and night when analyzing

基金项目 地震动力学国家重点实验室自主课题(LED2009A07)、中国地震局地质研究所基本科研业务专项(DF-IGCEA-0608-2-6)、地震行业专项(200808011)和国家自然科学基金(40872129,40902095)共同资助.

作者简介 陈顺云,男,1976年生,博士,副研究员. 主要从事定量热红外遥感在现今构造活动探测中的应用及构造物理实验研究.
E-mail:chenshy@ies.ac.cn

temperature component of long period. In summary, the relationship between the two kinds of land surface temperatures is obtained preliminarily, which is helpful to data selection.

Keywords Land surface temperature, Comparative analysis, Correlation, MODIS

1 引言

卫星遥感在空间信息的获取方面有着显著的优势,遥感影像在地震研究有关的多个领域中得到了应用^[1~7].随着空间观测技术的发展,卫星影像的空间和光谱分辨率越来越高,这种应用势必更加广泛与深入.从20世纪80年代末至今,国内外学者一直致力于寻找可用作地震前兆的卫星热红外异常信息^[6~20].然而,由于所报道的热红外异常现象缺乏可靠性检验,迄今为止,运用热红外遥感预测地震仍未成为一种普遍接受的可靠方法,而是处于探索阶段,存在许多基础性工作亟待完善^[4],例如,地表热场是否存在正常背景^[21],如何选用卫星遥感数据,等等.

地震或断层活动发生于地表之下,卫星则悬于地表之上的太空之中,“地表”自然而然成了卫星遥感与来自地下的热活动信息之间的桥梁.卫星热红外遥感探测到的是经过大气改造过的地表热辐射信息,扣除大气对地表热辐射传输过程的干扰是通过热红外遥感获得来自地下的热信息的一个重要环节^[4].这也就是说,利用卫星遥感热红外资料,经过大气校正等处理后获得的,同时又能反映地表热平衡效果的物理参量——地表温度,不失为一种适于开展地震研究的理想数据源.那么,通过卫星遥感获得的地表温度与实际测量的地表温度二者间有何异同呢?这个问题对于如何选取遥感信息开展地震研究有着重要的现实意义.

本文即以由卫星遥感影像与实际测量两种不同方法获取的地表温度为基础,进行遥感与实测地表温度之间的对比研究.

2 遥感地表温度

在晴空条件下,卫星接收到的热红外辐射率 $L(\lambda, \mu)$ 包括:地表热红外发射辐射,路径热红外辐射 $L_a(\lambda, \mu)$, 散射太阳辐射 $L_s(\lambda, \mu, \mu_0, \phi_0)$, 太阳直射辐射和漫射辐射以及地表反射的大气热红外辐射^[22]:

$$L(\lambda, \mu) = t_1(\lambda, \mu)\epsilon(\lambda, \mu)B(\lambda, T_s) + L_a(\lambda, \mu)$$

$$+ L_s(\lambda, \mu, \mu_0, \phi_0) + t_2(\lambda, \mu, \mu_0)\mu_0 E_0(\lambda) f_r(\mu; \mu_0, \phi_0) + \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mu' f_r(\mu; \mu', \phi') [t_3(\lambda, \mu) L_d(\lambda; -\mu', \phi') + t_4(\lambda, \mu) L_i(\lambda; \mu', \phi')] d\mu' d\phi', \quad (1)$$

其中, μ 为观测天顶角的余弦, $\epsilon(\lambda, \mu)$ 为地表比辐射率, $B(\lambda, T_s)$ 是温度为 T_s 的黑体辐射率, $E_0(\lambda)$ 为大气层顶的太阳辐射率, μ_0 为太阳天顶角的余弦, ϕ_0 为观测方向与太阳入射方向间的相对方位角, $f_r(\mu; \mu_0, \phi_0)$ 为双向反射率分布函数, $L_d(\lambda; -\mu', \phi')$ 为向下太阳漫射辐射率, $L_i(\lambda; \mu', \phi')$ 为大气向下的热辐射率, 其入射方向用 μ', ϕ' 表示, $t_i(\lambda, \mu)$, $i = 1, 2, \dots, 4$ 为相应的传递函数.

在实际应用中,根据卫星接收到的热红外辐射信息获取地表温度信息,上式需要进一步简化.通过卫星遥感获取地表温度的经典算法是分离窗方法^[23~25],其前提是地表比辐射率已知. Wan & Li 根据多时相多波段热红外影像发展了一套地表温度和地表比辐射率同步反演算法:白天/夜间地表温度算法^[22],用该法反演地表温度,其均方根误差优于 1 K ^[22, 26].

文中选取根据白天/夜间地表温度反演算法获取的 V5 版 MODIS/Terra 地表温度数据产品进行分析.该地表温度产品空间分辨率 0.05° , 时间分辨率为 1 天^[27],其经过京西北地区的当地时间,白天约 11:30 左右,夜间约 22:30 左右,如图 1 所示.为了描述方便,文中将通过遥感反演获取的地表温度称为遥感地表温度,记为 LST.

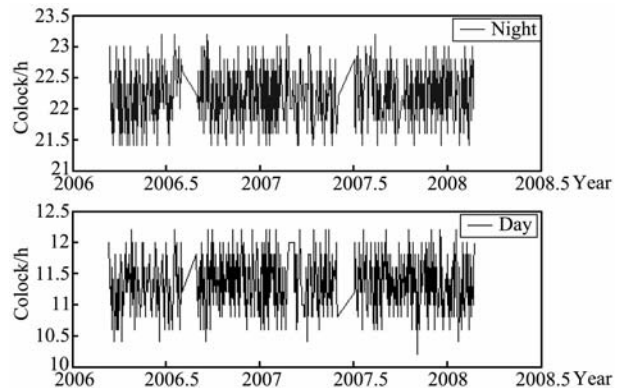


图 1 遥感地表温度对应当地时间(时间为北京时间)
Fig. 1 Local clock (Beijing time) corresponding to land surface temperature extracted from remote sensing

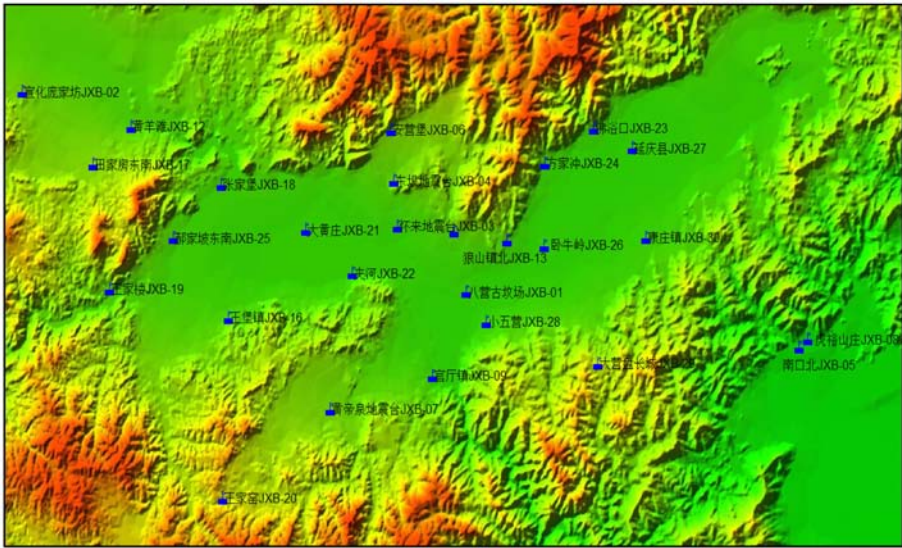


图 2 地温观测台网分布

Fig. 2 A distribution of network to measure land surface temperature

3 实测地表温度

作者所在实验室在京西北地区建有高密度地温无线遥测系统^[28], 台站分布如图 2 所示. 该台网全为地下隐蔽埋藏式, 无人值守. 台站数量为 30 台, 每个台站有 4 个采样深度, 分别为 0、25、50 cm 和 100 cm. 于 2006 年初建成投入连续观测, 目前已积累了 3 年多的地温观测数据.

上述地温测量系统的主要技术包括:

- (1) 温度采集使用铂电阻温度传感器, 温度的分辨率为 2 mK.
- (2) AD 转换 24 位, 由单片机控制实现低功耗定时采集.
- (3) 使用铅酸电池供电, 每年需更换电池 1~2 次.
- (4) 采用 GPRS 无线网络通信方式, 适用范围广, 有手机信号的地区即可建立遥测台站.
- (5) 用 TCP/IP 协议通信, 实现数据自动汇集和远程控制.

温度测量采样间隔优于分钟级, 实际运行中采样设定为每半小时测量 1 次. 为了描述方便, 实际测量获得的 0 m 地温简称实测地表温度, 记为 T_0 .

4 对比分析

遥感地表温度的时间分辨率较低, 同一地区, 白天和夜间各有一个观测值. 实测地表温度的采样频

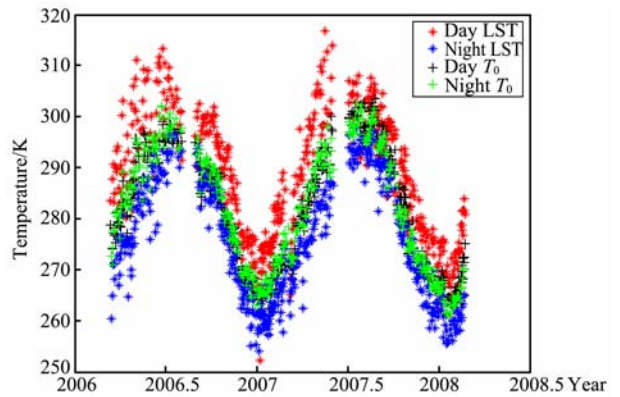


图 3 遥感地表温度和实测地表温度随时间的变化
LST, 遥感地表温度; T_0 , 实测地表温度;
测点: JXB01. 下同.

Fig. 3 Variation of land surface temperatures by satellite and field measurement with time

率是 1 次/0.5 h, 每天有 48 次观测值, 日变特征清晰. 为了适应遥感地表温度和实测地表温度的对比分析, 文中以卫星过境时间为基准, 对实测地表温度进行重采样, 使之与遥感地表温度进行时间匹配.

图 3 给出了白天和夜间遥感地表温度与实测地表温度共 4 种观测值随时间的变化情况. 从图中可以看出, 遥感地表温度与实测地表温度二者的总体变化趋势基本相同. 实测白天与夜间地表温度值介于遥感反演的白天与夜间地表温度值之间, 即白天实测地表温度比遥感地表温度要低, 而夜间实测地表温度比遥感地表温度要高.

下文将从差值、相关性及时频特性等几个方面对遥感地表温度与实测地表温度进行具体的对比

分析.

4.1 差值

遥感地表温度与实测地表温度之间的差值能直观反映出二者绝对量上的差别,如图4所示.从图中可以看出,白天遥感地表温度比实测地表温度整体性偏高约7K左右.最高时,高出20余度;最低时,低10余度,离散度较大.夜间遥感地表温度比实测地表温度整体性偏低约4K左右.最高时,高出约2°;最低时,低10余度.上述情况表明,从绝对值来看,遥感与实测地表温度之间偏离较大.相较于白天,夜间遥感与实测地表温度偏离程度略小一些.

4.2 统计特征

通过遥感与实测地表温度之间的统计分析,可以获得二者间的相关性、分布情况等一些基本特征.图5给出了遥感地表温度和实测地表温度的分布情况,从图中可以看出,遥感地表温度与实测地表温度二者之间呈现出明显的线性关系.其中,白天从低温到高温段离散度逐渐变大,而夜间从低温到高温段

离散度较为平稳.

本文统计了所有测点的遥感地表温度和实测地表温度的相关系数(表1).结果表明:从白天与夜间数据来看,夜间遥感地表温度和实测地表温度的相关系数整体性比白天的要高.其中,对于白天情况,大多数测点二者相关系数均在0.9以上,其中有3个测点小于0.9(分别为0.8870、0.8983和0.6270);对于夜间情况,大多数观测点相关系数大于0.95,仅1个测点小于0.9(为0.8177).

4.3 时频分析

从相关系数上看,遥感地表温度与实测地表温度相关程度均较高,相关系数基本在0.9以上.但从差值来看,遥感地震温度与实测地表温度差值较大,有时甚至超过10K之多,且存在明显的离散性.虽然从总体而言,夜间数据相关性要好一些,差值也稍小一点,但离差依然较大(图4).也就是说,简单根据整体的相关系数和差值,难以判断遥感地表温度和实测地表温度之间的异同,也难以弄清应该在什

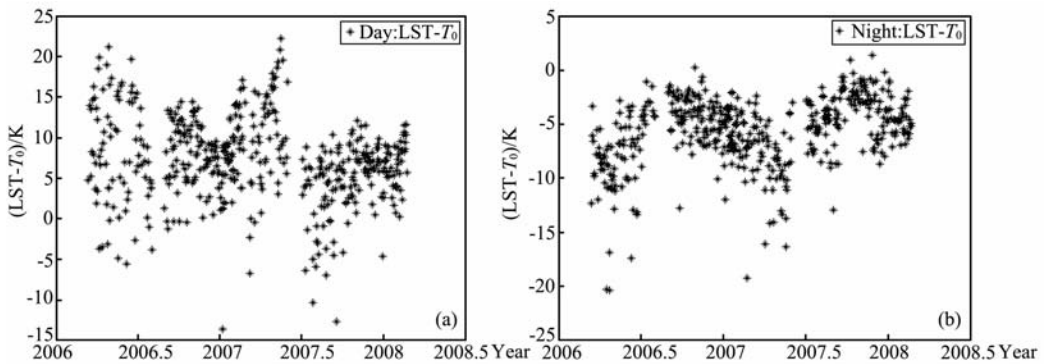


图4 遥感地表温度与实测地表温度之差随时间的变化
(a) 白天; (b) 夜间.

Fig. 4 Difference between land surface temperatures by satellite and field measurement

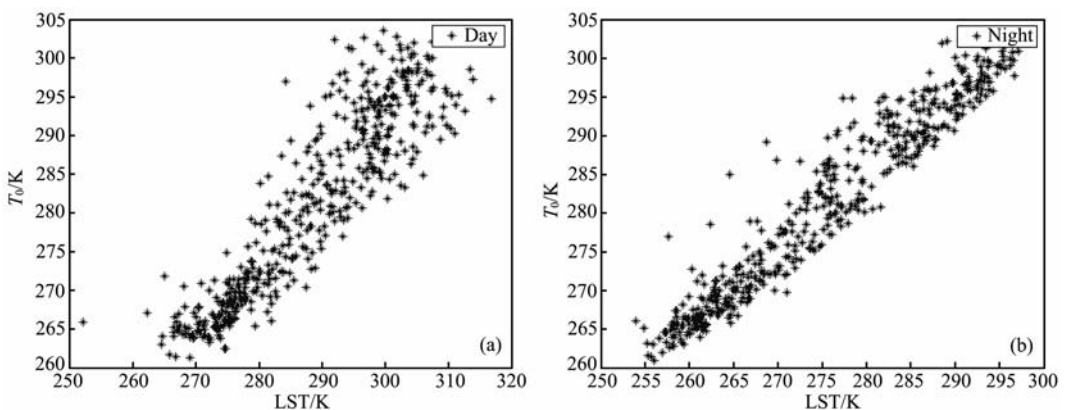


图5 遥感地表温度和实测地表温度的分布情况
(a) 白天; (b) 夜间.

Fig. 5 Distribution information between land surface temperatures by satellite and field measurement

表 1 遥感与实测地表温度之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between land surface temperatures by satellite and field measurement

测点编号	白天				夜间			
	全频	高频	中频	低频	全频	高频	中频	低频
JXB01	0.9074	0.1395	0.4937	0.9782	0.9633	0.5666	0.7138	0.9849
JXB02	0.9124	0.4007	0.7083	0.9628	0.9659	0.6682	0.8928	0.9834
JXB03	0.9510	0.4542	0.7567	0.9895	0.9680	0.5087	0.6332	0.9952
JXB04	0.9329	0.3615	0.7235	0.9839	0.9722	0.5517	0.8670	0.9923
JXB05	0.9392	0.4979	0.6439	0.9861	0.9645	0.5299	0.8536	0.9845
JXB06	0.9200	0.3409	0.6425	0.9727	0.9622	0.5785	0.8449	0.9820
JXB07	0.9095	0.2537	0.5544	0.9666	0.9789	0.5828	0.8521	0.9968
JXB08	0.9337	0.3860	0.8069	0.9918	0.9599	0.5115	0.8452	0.9891
JXB09	0.9103	0.2433	0.6164	0.9576	0.9664	0.5136	0.8440	0.9867
JXB11	0.8870	0.4117	0.6610	0.9299	0.9665	0.6529	0.8270	0.9842
JXB12	0.9556	0.2262	0.6481	0.9935	0.9807	0.5744	0.7708	0.9950
JXB13	0.9384	0.3754	0.7499	0.9915	0.9679	0.4927	0.7430	0.9935
JXB16	0.9137	0.2766	0.4468	0.9656	0.9770	0.4797	0.7921	0.9956
JXB18	0.9370	0.1841	0.6203	0.9856	0.9752	0.5252	0.8566	0.9950
JXB19	0.9266	0.3432	0.5349	0.9787	0.9709	0.5403	0.8256	0.9893
JXB20	0.9380	0.3785	0.8103	0.9810	0.9732	0.5642	0.8306	0.9963
JXB21	0.9296	0.2324	0.5333	0.9891	0.9764	0.4950	0.8178	0.9958
JXB22	0.9218	-0.0038	0.5161	0.9732	0.9694	0.4845	0.8224	0.9916
JXB23	0.8983	0.1903	0.6406	0.9634	0.9664	0.4983	0.7439	0.9887
JXB24	0.9248	0.2562	0.4979	0.9890	0.9652	0.5142	0.7052	0.9927
JXB25	0.9121	0.0729	0.4627	0.9657	0.9768	0.4174	0.7586	0.9975
JXB26	0.9127	0.1144	0.4616	0.9692	0.9663	0.3863	0.7923	0.9940
JXB27	0.6270	0.0624	0.7251	0.9843	0.8177	0.4380	0.9356	0.9821
JXB28	0.9300	0.2859	0.5492	0.9790	0.9651	0.4384	0.7843	0.9890
JXB29	0.9302	0.3820	0.8204	0.9829	0.9659	0.5548	0.7629	0.9911
JXB30	0.9269	0.2260	0.5832	0.9770	0.9717	0.4022	0.8199	0.9966

么样的时间尺度上运用遥感地表温度来开展地震研究.有必要进一步找出变化趋势一致的温度成份加以利用,同时尽量消除离散度较大的成份的影响.

根据小波理论,任意给定的信号 $f(x) \in L^2(R)$, 可以按尺度分解为不同的频带^[29]:

$$\begin{aligned}
 f(x) &= \sum_{j,k=-\infty}^{\infty} C(j,k)h_{j,k}(x) \\
 &= \dots + g_{-1}(x) + g_0(x) + g_1(x) + \dots \\
 &\quad + g_j(x) + \dots, \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中, $g_j(x)$ 为 $f(x)$ 在尺度 j 上的分量; $C(j,k)$ 为小波系数, $C(j,k) = \langle h_{j,k}, f \rangle$, $\langle \cdot \rangle$ 表示内积; $h(x)$ 为小波函数, $h_{j,k}(x) = 2^{j/2}h(2^jx - k)$, j 为伸缩(尺度)因子, k 为平移因子. 如果 h 是一个正交小波,

(3)式中各分量($g_j(x)$)相互正交,即各分量互不相关,可以任意组合相加而不受其他分量的影响.

文中选用正交 Coiflet 小波,将遥感地表温度和实测地表温度分别分解为长中短三个互不重叠的周期成份^[30],然后分别分析遥感地表温度与实测地表温度三个周期成份之间的相关性.其中,高中低三个频率成份对应的周期分别是:2~15,16~64,64~365 天.

图 6 和图 7 分别给出了白天和夜间不同频段的遥感地表温度和实测地表温度随时间的变化.白天,遥感地表温度和实测地表温度的高频成份相关性较低,相关系数仅为 0.14;中频成份相关系数 0.5 左右;低频成份明显相关,相关系数达到 0.978.夜间,

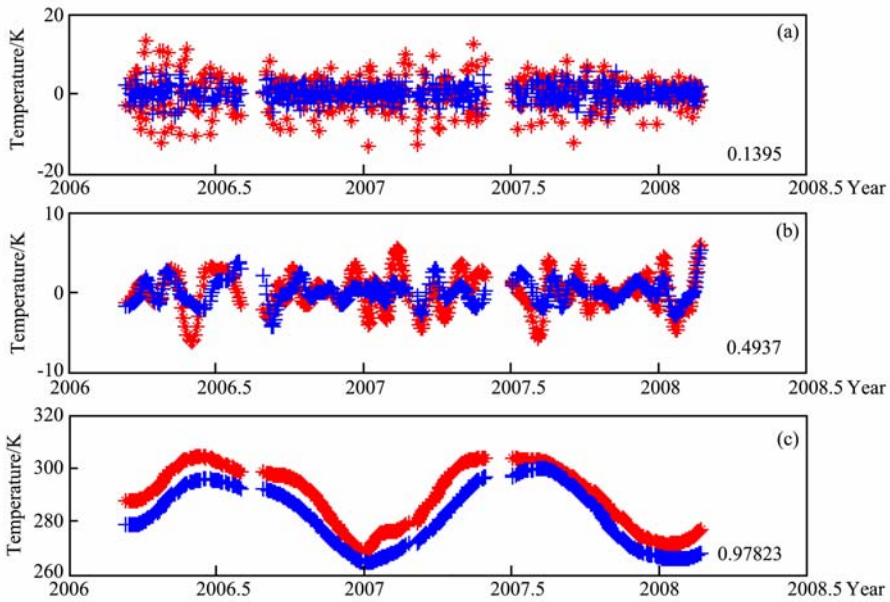


图 6 白天不同频段的遥感地表温度和实测地表温度随时间的变化

(a) 高频; (b) 中频; (c) 低频; 右下角数字为遥感与实测地表温度值的相关系数; 红色: 遥感地表温度; 蓝色: 实测地表温度.

Fig. 6 Variation of different components of land surface temperatures on day

(a) High frequency part; (b) Mid frequency part; (c) Low frequency part.

The value at down-right is correlation coefficient; Red, by satellite; blue, by field measurement.

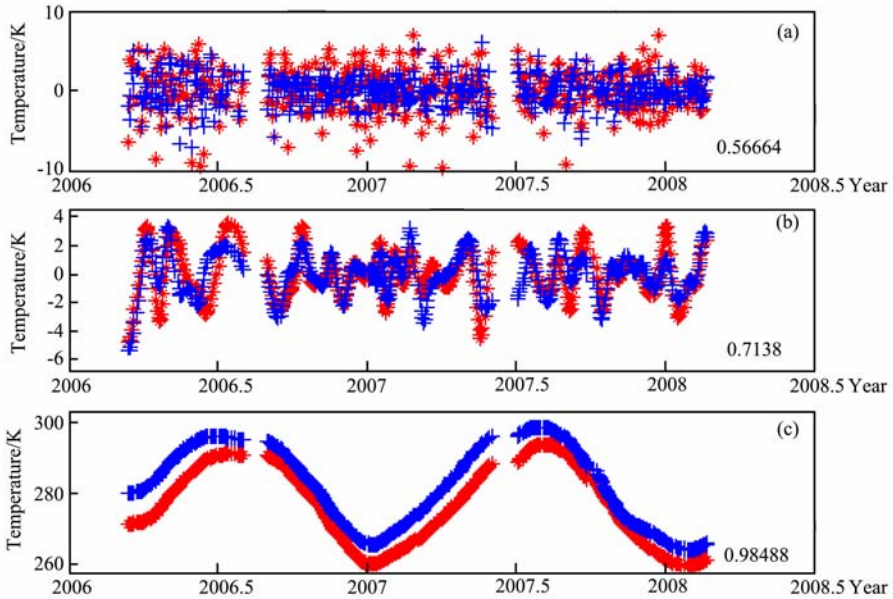


图 7 夜间不同频段的遥感地表温度和实测地表温度随时间的变化

(a) 高频; (b) 中频; (c) 低频; 右下角数字为遥感与实测地表温度值的相关系数; 红色: 遥感地表温度; 蓝色: 实测地表温度.

Fig. 7 Variation of different components of land surface temperatures at night

(a) High frequency part; (b) Mid frequency part; (c) Low frequency part.

The value at down-right is correlation coefficient; Red, by satellite; Blue, by field measurement.

遥感地表温度和实测地表温度的高频成份相关性较低, 相关系数为 0.57; 中频成份相关系数 0.7 左右; 低频成份明显相关, 相关系数达到 0.984.

表 1 给出了所有测点、不同频段遥感与实测地表温度之间的相关系数. 从表中可以看出, 白天遥感与实测地表温度的高频成份相关性较低, 相关系数

为 $-0.0038\sim 0.4979$;中频成份相关性较好一些,相关系数变化范围为 $0.4937\sim 0.8204$;低频成份明显相关,相关系数均大于 0.95 。夜间结果与白天结果类似,夜间遥感与实测地表温度的高频成份相关性同样较低,相关系数变化范围为 $0.4022\sim 0.6682$;中频成份相关系数变化范围为 $0.6332\sim 0.8928$;低频成份明显相关,相关系数均大于 0.98 。

图 8 给出了所有测点的遥感与实测地表温度平均相关系数的情况。从图中可以看出,无论是整个频段,还是部分频段,夜间相关性均比白天要高。白天,高频成份的相关系数仅 0.27 ,夜间为 0.52 ;中频成份白天和夜间分别为 0.62 和 0.81 ;低频成份白天和夜间分别为 0.98 和 0.99 ,二者相差不明显,这就是说对于长周期变化趋势,无论是白天还是夜间,二者的相关程度均极高,相关系数非常接近,二者没有明显差别;全频段白天和夜间分别为 0.91 和 0.96 。

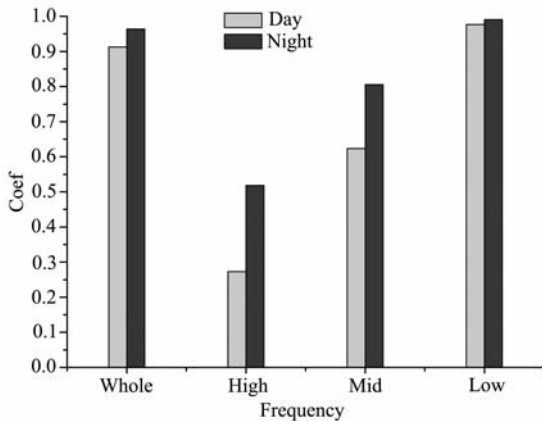


图 8 所有测点的遥感与实测地表温度平均相关系数情况
whole,全频;High,高频;Mid,中频;Low,低频。

Fig. 8 The mean of correlation coefficient between land surface temperatures by satellite and field measurement at all points

5 讨论与结论

经过遥感地表温度与实测地表温度的对比分析,主要获得以下几点认识:

(1)从昼夜差异看,遥感与实测地表温度,白天值的相关性比夜间值相关性要差,夜间差值比白天要小。MODIS 地表温度产品的反演过程中同时利用了白天和夜间的热红外遥感数据,包括了中红外和远红外数据,白天由于太阳源的影响,不确定性增加,客观上增加白天结果的离差。反之,这可能意味着太阳的影响难以忽略。

(2)从时频特性看,从高频到低频,无论是白天还是夜间,遥感与实测地表温度的相关性均逐渐变好。对于几天到十几天的短期温度变化,遥感与实测地表温度相关性极低,白天不到 0.3 ,夜间也仅为 0.5 。从数据处理的角度看,运用遥感地表温度产品分析短临地震前兆时则应更加谨慎。

(3)对于长周期变化趋势,无论是白天还是夜间,遥感和实测地表温度二者的相关程度均极高。本文中长周期成份白天和夜间相关系数分别为 0.98 和 0.99 ,白天和夜间的相关系数非常接近,无明显差别,这意味着分析地表温度的长周期变化时,选用白天或者夜间数据产品没有实质性区别。

通过本文的分析,可以知道在多大时间尺度上天与地观测结果具有共同的变化趋势,这为如何选择遥感地表温度产品进行地震研究提供了一定的参考依据。然而,应注意的是,卫星遥感属于“面”观测,地面实测属于“点”观测。通过卫星遥感获得的地表温度代表一定空间区域内的平均温度,通过地表实测的方式获得的地表温度代表测点的温度。遥感与实测之间,空间尺度上存在不确定性,这种不确定性会给二者带来多大程度的偏离,有待进一步分析。

致谢 国际 MODIS 地表温度研究小组提供了地表温度数据产品,马胜利研究员为该项研究提供了支持,汪一鹏研究员、冉勇康研究员和陈献程副研究员帮助选定了实测地温测点,张智河开发了地温无线测量电子设备,汲云涛、黄元敏、侯岳和孔祥杰等参与了测点布设,一并致谢。

参考文献(References)

- [1] 陈 或,徐瑞松,蔡 睿等. 遥感技术在地震研究中的应用进展. 地球物理学进展, 2008, **23**(4): 273~1281
Chen Y, Xu R S, Cai R, et al. Application progress of remote sensing technology in earthquake research. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, **23**(4): 273~1281
- [2] 童立强. “5·12”汶川大地震极重灾区地震堰塞湖应急遥感调查. 国土资源遥感, 2008, (3): 61~63
Tong L Q. Emergency remote sensing investigation of barrier lakes at the quake center area caused by “5·12” Wenchuan strong earthquake. *Remote Sensing For Land & Resources* (in Chinese), 2008, (3): 61~63
- [3] 王文杰,潘英姿,徐卫华等. 四川汶川地震对生态系统破坏及其生态影响分析. 环境科学研究, 2008, **21**(5): 110~116
Wang W J, Pan Y Z, Xu W H, et al. Analysis on ecosystem destroy and its ecological impact caused by earthquake Wenchuan Sichuan Province. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 2008, **21**(5): 110~116
- [4] 马 瑾,汪一鹏,陈顺云等. 卫星热红外信息与断层活动关系

- 讨论. 自然科学进展, 2005, **15**(11): 77~85
- Ma J, Wang Y P, Chen S Y, et al. Insights into correlation between satellite infrared information and fault activities. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2006, **16**(4): 394~402
- [5] 马 瑾, 单新建. 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, 2000, **22**(3): 210~215
- Ma J, Shan X J. An attempt to study activity of fault using remote sensing technology: A case of the Mani earthquake. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2000, **22**(3): 210~218
- [6] В. И. Горкий и др. Уходящее инфракрасное излучение Земли-индикатор сейсмической активности. Док. АН СССР, 1988, **301**(1): 67~69
- [7] 强祖基, 徐秀登, 赁常恭. 热红外异常—临震前兆. 科学通报, 1990, **35**(17): 1324~1327
- Qiang Z J, Xu X D, Dian C G. Satellite infrared thermal anomaly: Earthquake imminent precursor. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1990, **35**(17): 1324~1327
- [8] 徐秀登, 强祖基, 赁常恭. 临震卫星热红外异常与地面增温异常. 科学通报, 1991, **36**(4): 291~294
- Xu X D, Qiang Z J, Dian C G. Earthquake imminent infrared thermal anomaly and temperature increase on earth surface. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1991, **36**(4): 291~294
- [9] 强祖基, 赁常恭, 李玲芝等. 卫星热红外图像亮温异常—短临震兆. 中国科学 D 辑, 1998, **28**(6): 564~573
- Qiang Z J, Dian C G, Li L Z. Satellite infrared brightness temperature anomaly earthquake imminent precursor. *Science in China (Seri. D)* (in Chinese), 1998, **28**(6): 564~573
- [10] 刘德富, 彭可银, 刘维贺等. 地震有“热征兆”. 地震学报, 1999, **21**(6): 652~656
- Liu D F, Peng K Y, Liu W H, et al. Thermal omens before earthquakes. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1999, **21**(6): 652~656
- [11] 陈梅花, 邓志辉, 贾庆华. 地震前卫星红外异常与发震断裂的关系研究—以 2001 年昆仑山 8.1 级地震为例. 地震地质, 2003, **25**(1): 100~108
- Chen M H, Deng Z H, Jia Q H. The relationship between the satellite infrared anomalies before earthquake and the seismogenic fault: A case study on the 2001 Kunlun earthquake. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2003, **25**(1): 100~108
- [12] 屈春燕, 马 瑾, 单新建. 一次卫星热红外地震前兆现象的证伪. 地球物理学报, 2006, **49**(2): 490~495
- Qu C Y, Ma J, Shan X J. Counterevidence for an earthquake precursor of satellite thermal infrared anomalies. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 2006, **49**(2): 490~495
- [13] Tronin, Hayakawa, Molchanov. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China. *Journal of Geodynamics*, 2002, **33**: 519~534
- [14] Ouzounov D, Freund F. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. *Advances in Space Research*, 2004, **33**: 268~273
- [15] Morzova L I. Manifestations of the lithosphere-atmosphere coupling at strong earthquake in Asia. *Physics of the Solid Earth*, 1996, **32**(5): 453~458
- [16] Morzova L I. Dynamics of cloud anomalies above faults in periods of natural and induced seismicity. *Physics of the Solid Earth*, 1997, **33**(9): 778~779
- [17] Morzova L I. Satellite meteorological images as carriers of information on seismic processes. *Geology of Pacific Ocean*, 2000, **15**: 439~446
- [18] Tronin. Satellite thermal survey—a new tool for the studies of seismoactive regions. *International J. of Remote Sensing*, 1996, **17**: 1439~1455
- [19] Tramutoli V. TIR satellite techniques for monitoring the earthquake active regions: review of the limits, achievements and perspectives. 2004, T53C~06, Fall Meeting, AGU, EOS, Nov. 7
- [20] 陈顺云, 马 瑾, 刘力强等. 巴基斯坦地震前热红外辐射增强现象. 自然科学进展, 2006, **16**(11): 1437~1490
- Chen S Y, Ma J, Liu L Q, et al. An enhance phenomenon of thermal infrared radiation prior to Pakistan earthquake. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2006, **16**(11): 1487~1490
- [21] 陈顺云, 马 瑾, 刘培洵等. 中国大陆地表温度年变基准场研究. 地球物理学报, 2009, **52**(9): 2273~2281
- Chen S Y, Ma J, Liu P X, et al. A study on the normal annual variation field of land surface temperature in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(9): 2273~2281
- [22] Wan Z, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1997, **35**(4): 980~996
- [23] Becker F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, **8**(10): 1509~1522
- [24] Becker F, Li Z L. Toward a local split window method over land surface. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, **11**(3): 369~393
- [25] Wan Z, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**(4): 892~905
- [26] Wan Z M, Zhang Y L, Zhang Q C, et al. Validation of the land surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**: 163~180
- [27] Wan Z M. Refinements of the MODIS Land Surface Temperature Products. 2005, <http://www.ices.ucsb.edu/modis/modis~1st.html>[2010-02-08]

- [28] 刘培洵,张智河,陈国强等. 地表温度天地联合监测系统. 国际地震动态,2006,(增刊):96
Liu P X, Zhang Z H, Chen G Q, et al. A system to detect land surface temperature by combining both space and field. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), 2006, (Suppl): 96
- [29] 崔锦泰[美]. 小波分析导论. 程正心译. 西安:西安交通大学出版社, 1995. 1~99,161~333
Cui J T. An Introduction to Wavelet (in Chinese). Translated by Cheng Zhengxin. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995. 1~99,161~333
- [30] 陈顺云,刘培洵,刘力强等. 地表热红外辐射的小波分析及其现今构造活动研究中的意义. 地球物理学报, 2006, **49**(3): 824~830
Chen S Y, Liu P X, Liu L Q, et al. Wavelet analyses to thermal infrared radiation of land surface and its implementation for exploring the current tectonic activity. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(3):824~830

(本文编辑 胡素芳)