

闫丽莉, 屈春燕, 温少妍, 单新建. 2012. 卫星热红外亮温、气温及地温观测的年变变化对比研究. 地震学报, 34(2): 257-266.

Yan Lili, Qu Chunyan, Wen Shaoyan, Shan Xinjian. 2012. A comparison study on annual variation of thermal infrared brightness temperature and land temperature from meteorological stations. *Acta Seismologica Sinica*, 34(2): 257-266.

卫星热红外亮温、气温及地温观测 的年变变化对比研究*

闫丽莉^{1,†} 屈春燕¹⁾ 温少妍^{1,2)} 单新建¹⁾

1) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室

2) 中国山东青岛 266555 中国石油大学(华东)

摘要 通过对 NOAA 卫星热红外亮温与野外安装气象观测站接收的气温、地下不同深度地温(0.2, 0.5, 1.5, 2 m)进行不同方式的对比研究, 分析了卫星热红外亮温、气温、地下不同深度地温的变化特征, 探讨了亮温与气温及不同深度地温之间的关系. 结果表明: ① 卫星热红外亮温观测, 由于受天气、云层短周期因素变化影响, 曲线呈现高频突跳特征, 但按最大值拟合出的亮温曲线有较好的年变变化规律; ② 浅层地温受气温及太阳辐射的影响较大, 能够体现出日变化, 表现出很好的季节变化规律; ③ 深层地温年变平稳, 年变变化与季节相关. 但与气温相比, 表现出滞后效应, 且深度越深, 滞后时间越长; ④ 亮温、气温及深度 0.2 m 地温三者之间呈现很好的相关性. 亮温、气温、0.2 m 地温的极值几乎同时段出现, 都符合季节变化. 分析表明, 亮温能够真实地反映地表温度的变化情况, 能够为利用卫星热红外亮温提取地震异常信息提供可靠准确证据. 本研究结果为理解不同观测属性及其相互关系, 以及更好地为地震监测应用提供了基础.

关键词 卫星热红外亮温 气温 地温 对比研究 相关分析

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2012.02.012 中图分类号: P315.72⁺8 文献标志码: A

A comparison study on annual variation of thermal infrared brightness temperature and land temperature from meteorological stations

Yan Lili^{1,†} Qu Chunyan¹⁾ Wen Shaoyan^{1,2)} Shan Xinjian¹⁾

1) National Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology,
China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2) China University of Petroleum(East China), Shandong Qingdao 266555, China

Abstract: It is of significance to understand the relationship between thermal infrared brightness temperature and land temperature from observation stations, in order to know the observational accuracy of brightness temperature and the difference among temperatures of different meaning. In this study, NOAA ther-

* 基金项目 国家自然科学基金项目(40772107)和国家科技支撑项目(2008BAC35B03-04)联合资助.

收稿日期 2011-03-16 收到初稿, 2011-08-05 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: yanlili_2003@163.com

mal infrared BT and meteorological data from meteorological stations are compared and studied in different ways. The result shows: ① In the observation of BT from TIR, due to influence of short period variation such as weather or cloud, diurnal variation present in high frequency and sudden jump. However, the brightness curve fitted with maximum BT has better annual variation regularity. ② Land temperature of superficial layer shows regular daily and seasonal variation because of the influence of air temperature and solar radiation. ③ Annual variation of land temperature of deep layer is smooth and is correlated with seasonal variation. However, in comparison with air temperature, there is a hysteretic effect, and the deeper the layer is, the longer the lag time. ④ BT and air temperature, and 0.2 m land temperature, reveal a quite good correlation. The extreme value appears almost at the same time, corresponding to seasonal variation. It indicates that BT can reflect variation of land surface temperature, actually providing reliable evidence for using thermal infrared brightness temperature to extract abnormal information of earthquakes.

Key words: thermal infrared brightness temperature; air temperature; land temperature; comparative study; correlation analysis

引言

热红外遥感以其大视野、高精度和短周期等诸多优势,为地表辐射研究、亮温变化监测、地震异常信息提取等方面提供了丰富的基础数据,成为监测断裂活动性及地震短临前兆具有很有前景的观测技术。但卫星热红外遥感获取的地表热红外辐射信息受天气、云层等因素影响较大,观测到的红外亮温能否准确反映气温变化情况,与不同深度的地温(以下简称地温)关系如何,目前还没有做过系统的对比分析。

为了应用热红外遥感实现地表温度的空间拓展,前人开展了大量的卫星反演温度产品与地面实际观测值之间的对比分析。有中分辨率光谱成像仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, 简称为 MODIS)数据与 NOAA 卫星的甚高分辨率辐射计(NOAA-AVHRR)数据的温度产品与地面实测值之间的对比分析。如,MODIS 反演地表温度与地面同步气温、地温的相关分析(闵文彬,李跃清,2008)发现:实测地表温度与卫星反演的地表温度的差值同实测地温与气温的差值之间存在极显著的线性正相关关系;NOAA-AVHRR 资料反演地温与地面实测地温的对比分析(廖顺宝等,2004)发现,遥感反演月最高地温与地面实测月最高地温的线性相关系数为 0.86;MODIS 亮温与气温及地温的相关分析(刘放等,2010)表明,亮温与气温、地温在较长时间尺度(月均值)上相关性很好。总体上看,过去的研究工作大多是基于卫星反演的地表温度与气温、地温的相关分析(刘晶森等,2001;王天星等,2007;阿帕尔等,2007),而在亮温与气温、地温系统的对比分析方面开展的工作相对较少,更未开展过利用气温、地温实测数据验证红外亮温提取地震异常信息的可靠性及准确性的研究。

本文利用 NOAA 卫星热红外观测数据,与野外气象观测站的气温,以及地下 0.2, 0.5, 1.5, 2 m 地温观测数据进行对比分析,研究三者之间的定量关系,为利用卫星热红外亮温观测数据开展地震监测提供技术支撑。

1 数据资料及研究区介绍

1.1 气温及地温数据

本文应用的是于 2009 年 9 月 7 日在首都圈怀来县安装的一台 CAW600 自动气象站接收的气温和地温数据，温度的测定范围为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，观测精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。地面气象观测中的气温是指百叶箱内温度感应器距地面 1.5 m 处的温度，是空气温度、太阳的热能被地面吸收后，地面再通过辐射、传导和对流把热传给空气，这是空气温度中热量的主要来源。地温则是地下浅层(0.2, 0.5 m)和地下深层(1.5, 2 m)所观测到的温度。本文应用的数据资料的起止时间为 2009 年 10 月—2010 年 9 月。

1.2 卫星热红外遥感资料

NOAA 是由美国于 20 世纪 60 年代开始发射的系列极轨气象卫星，目前在轨运行的 NOAA 系列卫星上装载的 AVHRR 探测器星下点空间分辨率为 1.1 km，有 5 个探测通道。其中，第 4—5 通道($10.5\text{--}12.5\text{ }\mu\text{m}$)为热红外通道，反映常温下(约 300 K)地气系统的长波辐射，为研究地面热场分布提供了丰富的数据源，其数据计算精度为 0.1 K(屈春燕等, 2006, 2011)。陆面和海面温度的反演主要用这两个波段。与地震及断裂活动相关热红外异常的分析与提取也是利用这两个波段的数据。本文所用资料为 2009 年和 2010 年的 NOAA 卫星热红外遥感影像。为避免太阳辐射的影响，选用夜间 2 时—3 时 30 分时段内的数据。

1.3 研究区介绍

气象观测站位于首都圈地区($112^{\circ}\text{--}118^{\circ}\text{E}$, $38^{\circ}\text{--}42^{\circ}\text{N}$)的怀来盆地，其地形地貌如图 1 所示。其所在的位置在气候、植被类型上具有典型的过渡性质。从气候条件看，该气象观

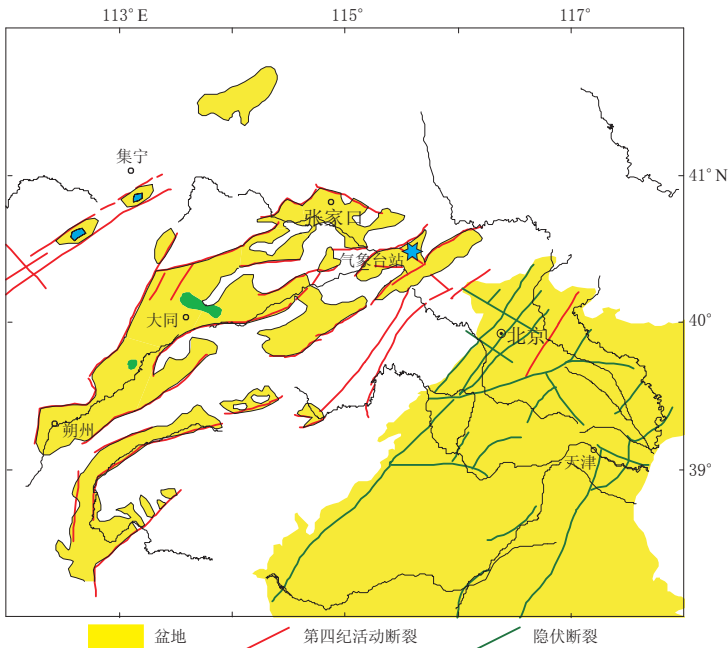


图 1 研究区概况及气象观测站位置

Fig. 1 General information of study area and a meteorological observatory (pentagram)

测站位于我国半湿润气候向半干旱气候过渡的地带,属暖温带半干旱季风气候.多年的平均温度为 8.9℃,最冷月为 1 月份,最热月为 7 月份.在植被类型上,该气象观测站是森林草原植被类型,为怀来盆地的地带性植被.在地形地貌上,该气象观测站位于由桑干河、洋河、泃水河等冲击而成的宽谷盆地的中部,其土壤类型主要以褐土为主(郑秋红等, 2005).

2 气象观测站所在位置的亮温年变分析

2.1 NOAA 卫星热红外亮温数据处理

接收的 NOAA18 遥感数据源以 1a5 格式存储,为了得到可靠准确的热红外亮温图像,需要进行一系列的相关处理:一是要应用 AVHRR 数据集中存储的定位数据,对 NOAA 数据中像素的几何畸变及相邻扫描带形成的“蝴蝶结”效应进行几何校正;二是要通过辐射定标计算得到研究区的亮温值;三是要对研究区亮温影像进行去云、去噪处理(温少妍等, 2011).

2.2 气象观测站位置的亮温年变分析

以怀来野外气象观测台站所在地理位置(115.59°E, 40.49°N)为中心,选取不同滑动窗口(1×1, 9×9, 30×30, 50×50, 70×70, 90×90)内的亮温均值的最大值绘制的时序变化曲线,取最大值的目的是减少厚云的影响.

从年变曲线中可以看出,从整体上,亮温表现出夏高冬低的年变特征(图 2).从 1—7 月份是升温的过程,从 9 月份至次年 1 月份是降温的过程.其最高值出现在 7 月份,达到约 18℃;最低值出现在 1 月份,约为-20.8℃.

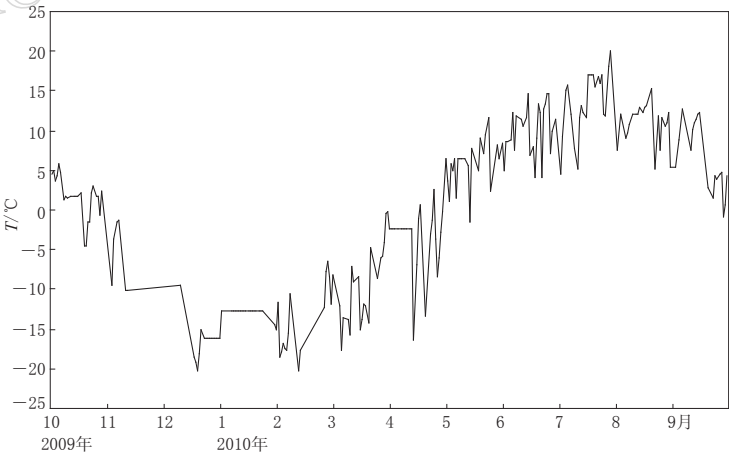


图 2 气象观测站位置的亮温年变曲线

Fig. 2 Annual variation of brightness temperature at meteorological observatory site

3 气温与地温数据的对比分析

3.1 卫星过境时刻的气温与不同深度地温的对比分析

野外气象观测站接收到的气温,以及 0.2, 0.5, 1.5, 2 m 的地温数据,一天有 24 个整点观测值.时间上,每日分别取与卫星过境时刻最接近的气温,0.2, 0.5, 1.5, 2 m 的地温

整点值，并绘制对比曲线，如图 3 所示。

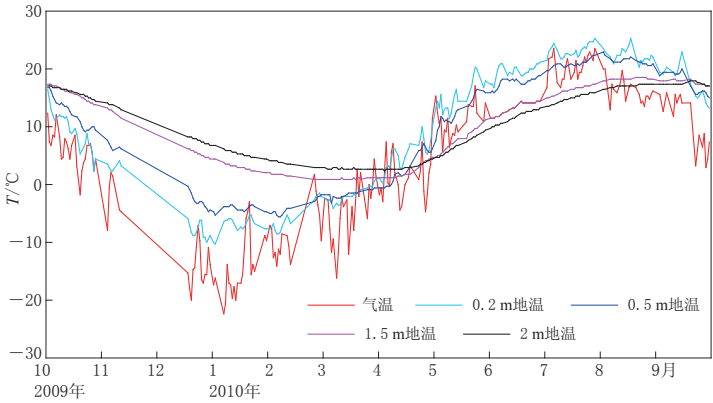


图 3 卫星过境时刻的气温、地温变化曲线
Fig. 3 Variation of air and ground temperature

从 2009 年与 2010 年卫星过境时刻的气温、地温变化曲线(图 3)可以看出：

- 1) 气温变化呈锯齿状，波动明显。在 7 月份是气温一年中的最高值，最大值达到 23.5℃；在 1 月份是气温的最低值，最小值达到 -22.4℃。
- 2) 浅层地温(0.2, 0.5 m)与气温类似，受太阳辐射的影响大，锯齿式波动，且随深度增加，波动幅度减小。该层温度主要来自太阳的辐射热能，它随季节、天气、昼夜的变化而不同。气温与 0.2 m 地温变化基本一致，只是 0.2 m 受土壤影响，变化幅度略小于气温。
- 3) 深层地温(1.5, 2.0 m)变化比较稳定，曲线平滑，日变消失，年变清晰。与气温、浅层地温相比，极值出现的时间要晚，显示出滞后现象。
- 4) 从 2009 年 10 月—2010 年 4 月(冬季时段)，地温表现出深度越深，温度越高，温度从高到低依次为：2 m 地温>1.5 m 地温>0.5 m 地温>0.2 m 地温。这主要是由于从秋季到冬季土壤是一个散热过程，而且深度越深散热越慢，降温速度越慢；从 2010 年 5—9 月(夏季时段)，地温表现出深度越深，温度越低，温度从高到低依次为：0.2 m 地温>0.5 m 地温>1.5 m 地温>2 m 地温。这主要是因为夏季是个吸热过程，浅层地温受太阳辐射影响较大，升温要比深层地温速度快；深部温度受太阳辐射影响小，升温较慢。

3.2 卫星过境时刻的气温与不同深度地温的相关分析

为了进一步进行气温与不同深度地温的对比分析，下面从气温与不同深度地温的相关性进行分析。

利用线性相关系数的计算公式

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \tag{1}$$

计算气温与地温的相关性。从图 4 和表 1 可以进一步看出：

- 1) 气温与地温的相关性。气温与 0.2 m 地温的相关系数最高，达到 0.95；其次是与 0.5 m 地温，相关系数达到 0.9；与 1.5, 2 m 地温相关性很差。这进一步说明，气温与浅层地温受到的影响因素基本一致，且浅层地温场除受气温影响外，还受到土体内部自身温度

表 1 气温与不同深度地温之间相关系数

Table 1 Correlation coefficient between air temperature and different depth ground temperature

温度类型	气温	0.2 m 地温	0.5 m 地温	1.5 m 地温	2 m 地温
气温	1				
0.2 m 地温	0.9475	1			
0.5 m 地温	0.8980	0.9807	1		
1.5 m 地温	0.7638	0.8689	0.9395	1	
2 m 地温	0.6920	0.8036	0.8887	0.9913	1

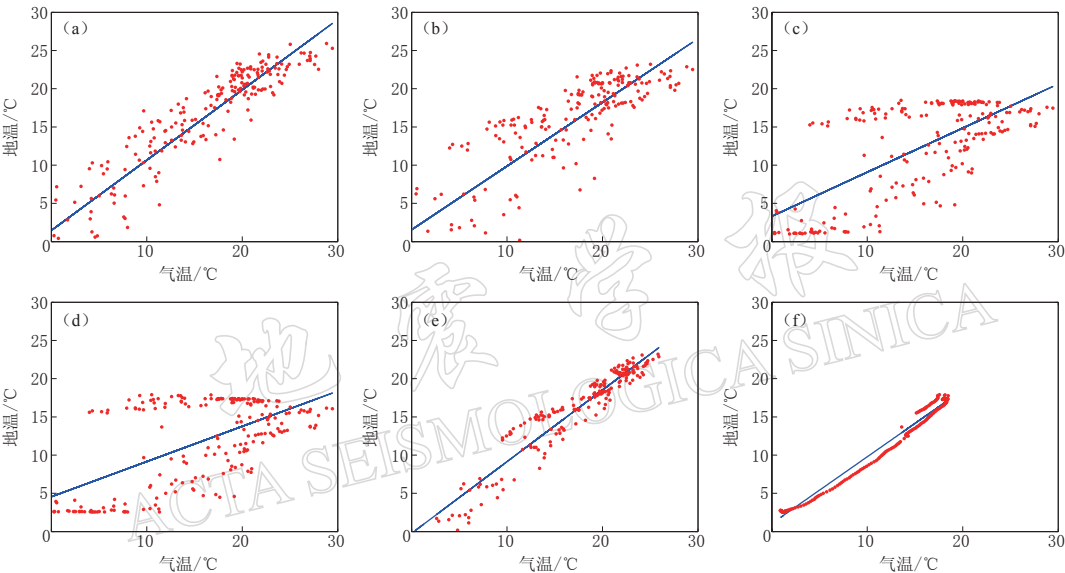


图 4 气温与不同深度地温线性相关图

(a) 气温与 0.2 m 地温的线性相关; (b) 气温与 0.5 m 地温的线性相关; (c) 气温与 1.5 m 地温的线性相关; (d) 气温与 2 m 地温的线性相关; (e) 0.2 m 与 0.5 m 地温的线性相关; (f) 1.5 m 与 2 m 地温的线性相关

Fig. 4 Linear correlation between air temperature and ground temperature at different depth (a) Linear correlation between air temperature and 0.2 m ground temperature (GT); (b) Between air temperature and 0.5 m GT; (c) Between air temperature and 1.5 m GT; (d) Between air temperature and 2 m GT; (e) Between 0.2 m GT and 0.5 m GT; (f) Between 1.5 m and 2 m GT

场的控制, 随着深度的增加与气温的相关性变小. 说明深层地温受气温变化的影响很小, 日变不明显仅仅受季节的控制.

2) 不同深度地温之间的相关性. 1.5 m 地温与 2 m 地温之间的相关系数最高, 达到 0.99, 而且在线性相关图上也表现出很好的相关性. 0.2 m 与 0.5 m 地温之间的相关系数很高, 达到 0.98. 这说明在不同深度层次上, 影响因素较为一致.

4 亮温与气温、地温之间的对比分析

4.1 亮温与气温及地温的对比研究

以怀来野外气象观测台站所在位置(115.59°E, 40.49°N)为中心, 选取不同滑动窗口内的亮温均值与气温进行时序对比分析. 其中气温及地温是选取与卫星过境时间最为

接近的气温(地温)整点观测值；红外亮温数据采用 $1\times 1, 9\times 9, 30\times 30, 50\times 50, 70\times 70, 90\times 90$ 的 6 种不同滑动窗口类型。运用此方法对怀来台站的气温数据，不同深度的地温、亮温数据进行了相应的处理。其中由于接收系统原因造成的亮温数据缺失，这些缺失的亮温数据用计算得到的亮温月均值进行替代，得到 2009 年 10 月—2010 年 9 月怀来气象观测台气温与亮温、各种不同深度的地温与亮温对比曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出：

1) 亮温与气温的对比。由于亮温受云层、天气等短周期因素的影响，观测曲线呈现出高频突跳特征，且出现了很多极低值，特别是在 3—9 月份。冬季亮温受云的影响相对较小，而云对气温的干扰不及亮温敏感。但从整体上看，气温与不同窗口下亮温的变化趋势基本一致，都表现出夏高冬低的年变特征。夏季(尤其是 7—8 月份)气温与亮温的差值大，越接近冬季差值越小。其主要的原因因为水汽对红外辐射具有很强的吸收能力，夏季水汽较冬季多，故地表的热红外辐射的损失多些。

2) 亮温与地温的对比。0.2, 0.5 m 地温均高于不同滑动窗口下的亮温，浅层地温与亮温的变化趋势基本一致，也体现出夏高冬低的年变特征。0.2 m 地温与亮温的日变化更为接近。1.5, 2 m 地温与亮温的变化趋势的一致性比较差，在 5—8 月份出现了亮温高于地温的情况，从 9 月份至次年 4 月份地温与亮温的差值表现得更大。这主要是因为深层地温由于受气温及太阳辐射的影响较小，且深层土壤储能、释能的速度较慢，表现为一种滞后效应，所以两者存在较大差值。

3) 对于 $1\times 1, 9\times 9, 30\times 30, 50\times 50, 70\times 70, 90\times 90$ 的 6 种不同滑动窗口内的亮温均值曲线几乎重合，说明不同大小窗口内的亮温均值基本保持一致。这是因为亮温变化具有较强的空间相关性所致。

4.2 亮温与气温、地温的相关分析

为了进一步更好地对比分析，下面从亮温与气温及不同深度地温的相关性方面进行分析。为了排除云对亮温的影响，首先将亮温进行处理。方法是：首先求出每日不同滑动窗口下亮温的最大值，再根据经验排除这些最大值中是云顶的亮温。

从图 6 和表 2 中可以看出：亮温与气温及 0.2 m 地温均呈现出很好的线性相关性，亮温与气温、0.2 m 地温的相关系数很高，均达到近 0.95。这一点更加能够说明亮温能够真实可靠地反映地表的温度变化情况。随着深度的增加，亮温与地温的相关性比较差，主要是由于深部地温变化的时间延迟性造成。此外，可以看出 1.5 m 地温、2 m 地温的温度范围越来越稳定在 0°C — 20°C 之间。

表 2 亮温与气温及不同深度地温的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between TBB and temperature

	气温	0.2 m 地温	0.5 m 地温	1.5 m 地温	2 m 地温
亮温	0.9358	0.9454	0.9168	0.7608	0.6551

4.3 亮温、气温、地温的拟合曲线对比分析

为了对亮温、气温、不同深度地温进行定量分析，首先将 2009 年 10 月—2010 年 9 月的三者数据，分别利用最小二乘法，拟合 6 次曲线并绘于图 7。从图 7 中的亮温、气温、地温的拟合曲线可以看出：

1) 0.2, 0.5 m 地温的过渡转换带分别在 3 月份和 9 月份。在 3 月份，0.2 m 地温与

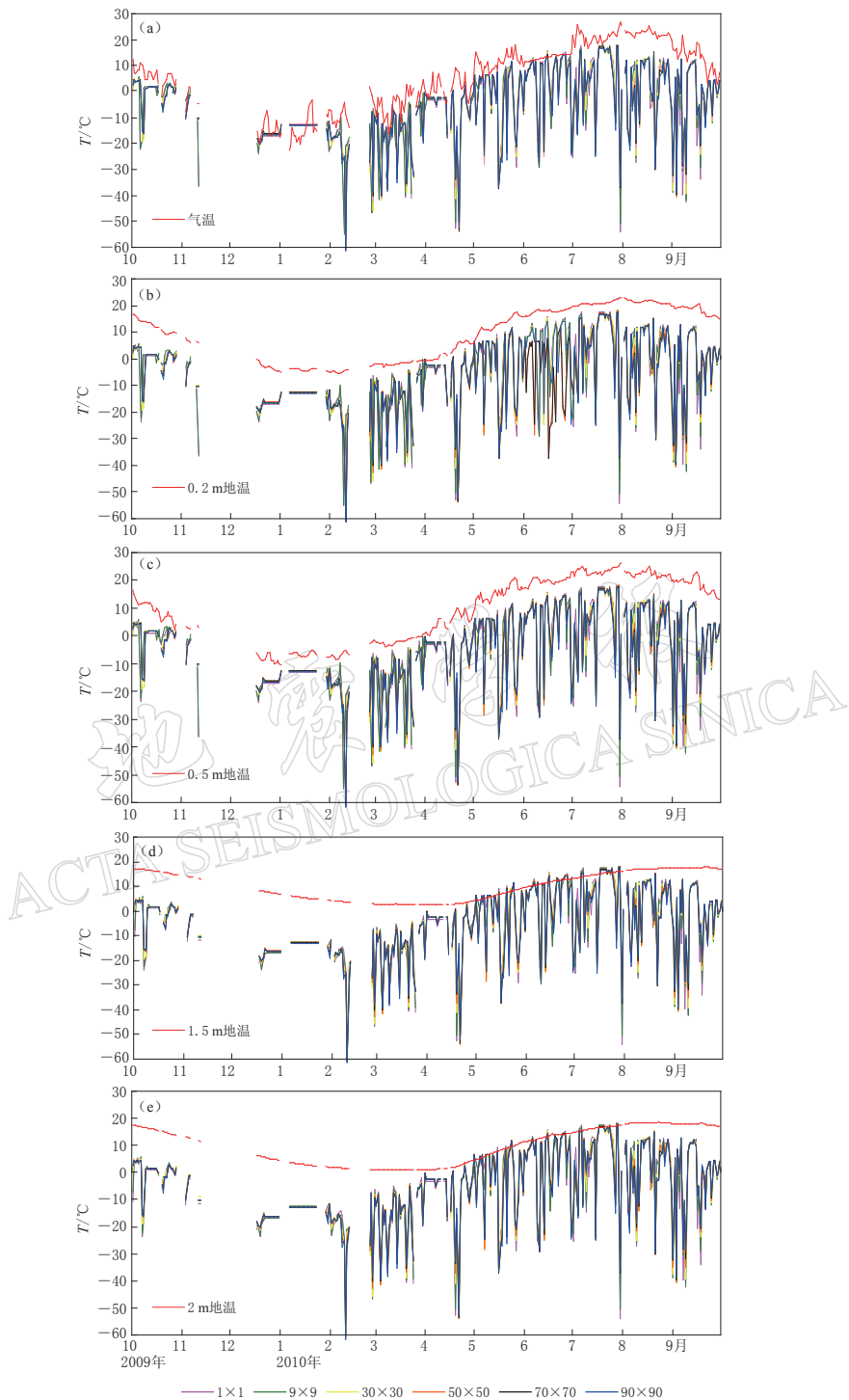


图 5 亮温与气温及不同深度地温的对比曲线

(a) 亮温与气温对比曲线；(b) 亮温与 0.2 m 地温对比曲线；(c) 亮温与 0.5 m 地温对比曲线；(d) 亮温与 1.5 m 地温对比曲线；(e) 亮温与 2 m 地温对比曲线

Fig. 5 Comparison between TBB and different temperature variation
(a) Between TBB and air temperature; (b) Between TBB and 0.2 m ground temperature (GT); (c) Between TBB and 0.5 m GT; (d) Between TBB and 1.5 m GT; (e) Between TBB and 2 m GT

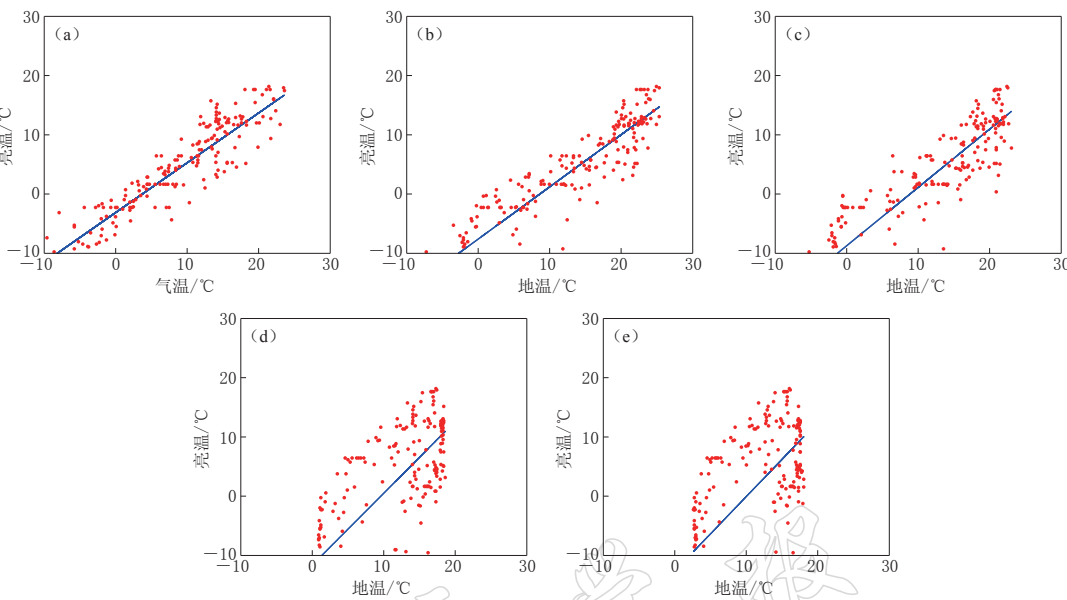


图 6 亮温与气温及地温的线性相关图

(a) 亮温与气温的线性相关；(b) 亮温与 0.2 m 地温的线性相关；(c) 亮温与 0.5 m 地温的线性相关；
(d) 亮温与 1.5 m 地温的线性相关；(e) 亮温与 2 m 地温的线性相关

Fig. 6 Linear correlation between TBB and temperature

(a) Between TBB and air temp; (b) Between TBB and 0.2 m ground temp; (c) Between TBB
and 0.5 m ground temp; (d) Between TBB and 1.5 m ground temp;
(e) Between TBB and 2 m ground temp

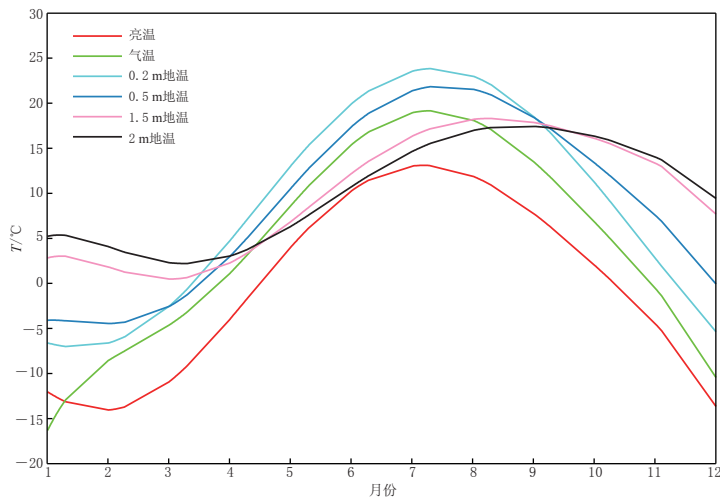


图 7 亮温、气温、地温拟合曲线

Fig. 7 Fitted curve of TBB and temperature

0.5 m 地温交替出现高值；从 4 月份开始，0.2 m 地温高于 0.5 m 地温；直到 9 月下旬开始，0.2 m 地温低于 0.5 m 地温，这两点与图 3 吻合。这说明拟合出的曲线完全符合事实。

2) 1.5, 2 m 地温的过渡转换带分别在 4 月下旬和 10 月份。在 4 月下旬，1.5 m 地温

与 2 m 地温出现交替现象;从 5 月份开始,1.5 m 地温高于 2 m 地温;但从 10 月下旬开始,1.5 m 地温低于 2 m 地温,这两点与图 3 吻合.这说明拟合出的曲线完全符合事实.

3) 亮温、气温、0.2 m 地温的极值几乎同时段出现,且均符合季节变化规律,呈现出很好的一致性.而 0.5 m 地温的极值要比前者 3 个温度稍晚约 10 天;1.5, 2 m 地温的极值出现的更晚,约 40 天左右.这些均与图 3 相当吻合.

5 讨论与结论

对首都圈研究区的 2009 年 10 月—2010 年 9 月一年的亮温、气温、地温(0.2, 0.5, 1.5, 2 m)数据,通过三者间的对比分析得到下面几点认识:

1) 卫星热红外亮温,由于受天气、云层等短周期因素的影响,曲线呈现高频突跳特征,但按不同滑动窗口的最大值拟合出的亮温曲线可以反映出较好的年变规律.

2) 浅层地温与气温类似,受太阳辐射的影响较大,锯齿式波动,且随深度增加,波动幅度减小.浅层地温(0.2, 0.5 m 地温)比气温滞后 1 天.该层温度主要来自太阳的辐射热能,故能够体现出日变化,表现出很好的季节变化规律.深层地温年变平稳,年变变化与季节相关.但与气温相比,1.5 m 地温滞后 24 天,2 m 地温滞后 51 天.说明深度越大,滞后时间越长.

3) 亮温、气温及 0.2 m 地温三者之间呈现很好的相关性.亮温、气温、0.2 m 地温的拟合曲线极值几乎同时段出现,均符合季节变化.亮温在同期最低,年均气温高于年均亮温 4.58 °C,年均 0.2 m 地温高于年均亮温 9.08 °C.

4) 通过观测数据拟合曲线,亮温与气温及亮温与 0.2 m 地温的对比曲线表明,亮温与气温、0.2 m 地温具有较好的一致性.今后的工作可以从理论方面开展,进而研究亮温与气温及亮温与浅层地温(0.2 m 地温)的定量关系,并试图用气温或浅层地温代替由于不同原因造成的不可用的亮温数据.

以上分析表明,亮温能够真实地反映地表温度的变化情况,为利用卫星热红外亮温提取地震异常信息提供了可靠的事实证据.

参 考 文 献

- 阿帕尔,叶尔克江,冯俊平. 2007. 昌吉市地温与气温关系初探[J]. 沙漠与绿洲气象, **1**(3): 53-56.
- 廖顺宝,马琳,岳燕珍,李泽辉. 2004. NOAA-AVHRR 资料反演地温与地面实测值的对比分析[J]. 国土资源遥感, (1): 19-22.
- 刘放,吕戈培,江利明,辛华,张铁宝,路茜. 2010. MODIS 亮温与气温及地温的相关性分析[J]. 地震地质, **32**(1): 127-137.
- 刘晶淼,丁裕国,王纪军. 2001. 利用任意时刻 AVHRR 资料近似估计区域地表温度日较差的实验[J]. 南京气象学院学报, **24**(3): 323-329.
- 闵文彬,李跃清. 2008. MODIS 反演地表温度与地面同步气温、地温的相关分析[C]//中国气象学会 2008 年年会卫星遥感应用技术与处理方法分会场论文集. 北京:中国学术期刊(光盘版)电子杂志社: 283-290.
- 屈春燕,单新建,马瑾. 2006. 地震活动性热红外异常提取方法研究[J]. 地球科学进展, **7**(21): 699-705.
- 屈春燕,闫丽莉,温少妍. 2011. 首都圈地区卫星热红外亮温变化特征研究[J]. 地球科学进展, **26**(2): 202-211.
- 温少妍,屈春燕,闫丽莉. 2011. 区域红外亮温背景场建立方法及初步应用[J]. 地震, **31**(2): 59-67.
- 王天星,陈松林,马娅. 2007. 亮温与地表温度表征的城市热岛尺度效应对比研究[J]. 地理与地理信息科学, **23**(6): 73-77.
- 郑秋红,伍永秋,张宏,全占军. 2005. 怀来盆地丘陵区弃耕地自然恢复中植物群落特征的变化[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, **41**(6): 627-631.