

文章编号: 1000-2022(2005)03-0384-07

中国东部地区夏季对流层大气辐射加热研究

王承伟^{1,2}, 陈渭民¹, 宋庆利³,
胡文东⁴, 殷世萍⁵

(1 南京信息工程大学 电子工程系, 江苏 南京 210044

2 黑龙江省气象中心, 黑龙江 哈尔滨 150030 3 黑龙江省大兴安岭气象局, 黑龙江 加格达奇 165000;

4 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏 银川 750002 5 黑龙江省气象研究所, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:应用 TOVS 资料及 MORTRAN3 模式, 研究中国东部夏季对流层的太阳短波辐射和红外辐射对大气的加热状况。考虑不同纬度, 不同大气状况下 12 个站点 43 个样本的太阳加热率和红外冷却率情况, 分析发现: 在夏季的对流层, 太阳加热率随着距地面的高度增加而减小, 它的大小及变化率与纬度、天顶角及当时大气的状况有关, 同时, 太阳加热率也存在日变化。红外冷却率在对流层中、高层有极小值, 它的大小及变化率与当时的大气状况及纬度有关。将本文的结果与前人的结论及实况相比较, 发现本文较为真实地反映了中国东部地区夏季对流层的辐射加热情况, 利用卫星资料计算的结果基本可信。

关键词: MORTRAN3 太阳加热率; 红外冷却率; 日变化

中图分类号: P422.4 **文献标识码:** A

外源加热作用是给大气提供能量, 引起大气运动的最重要因素之一, 它了解地气系统的增温和冷却、地面能量收支平衡、大气中的冷源和热源, 进而研究天气、气候系统的变化, 提高数值天气预报模式的准确率有重要意义。外源对大气的加热主要有两种形式: 一种是热传导和热对流等方式对大气的加热, 另一种则是通过太阳和地球辐射作用对大气进行加热, 后一种加热是大气获得能量的最主要的形式, 本文主要研究的就是大气中的辐射加热。

辐射加热也分为两个部分: 一是太阳发射到地球上的短波辐射对大气的加热作用, 另一方面则是地球向外发射长波辐射对大气的加热作用。因此, 外源对大气的辐射加热作用的效率, 可以通过辐射传输过程中, 太阳加热率和红外冷却率来表述。目前已有许多学者对这一加热过程进行了多方面的研究^[1-4], 讨论在高原及热带地区辐射加热的状况, 另外有一部分学者把大气中的加热率与冷却率直接用于气候系统中具体问题的分析^[5-6], 讨论它们的作用。但这些研究工作大部分集中在青藏高原及热带地区, 对中国东部地区的研究相对较少。考虑到大气加热是一个全球的过程, 因此中纬度低海拔区域的辐射加热作用也十分重要, 所以本文对中国

收稿日期: 2004-07-23 改回日期: 2004-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40175007); 南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室资助项目

作者简介: 王承伟 (1973-), 女, 黑龙江阿城人, 硕士生, 研究方向: 大气辐射。E-mail: chengwei12342002@yahoo.com.cn.

东部地区的辐射加热状况进行研究。

卫星反演技术的迅速发展大大弥补了地面辐射观测站及探空站点稀疏的不足,可以得到更高时、空分辨率的大气温、压、湿场资料,这就为研究整层大气辐射加热状况提供了有利的条件。随着卫星分辨率的提高,观测时次的增加,卫星资料的优势将越来越明显。目前国内已经有一些学者利用卫星反演资料在辐射方面做了许多工作^[7-9]。但对辐射过程中的加热和冷却方面,卫星资料应用得还不是很多。本文取 2002 年 7 月 11—20 日的 NOAA-16 极轨气象卫星大气垂直探测 (TOVS) 反演的大气温、压、湿场作为当时的大气状态,对大气的辐射加热进行研究,并与前人的研究结果进行比较分析。

1 资料说明与计算方法

1.1 资料说明

表 1 是本文所选的 12 个站点 43 个晴空样本情况,我国南北跨度较大,为了综合考虑南北辐射加热的不同,站点基本包括了我国东部由南至北绝大部分省份(本文中出现的均为北京时)。

表 1 卫星扫描时间及所对应的晴空样本

Table 1 Scanning time of satellite and corresponding clear sky samples

卫星扫描时间	样本	卫星扫描时间	样本
7月 12日 18:32—18:49	长春	7月 16日 17:48—18:05	青岛、天津、北京
7月 13日 05:54—06:13	南昌、杭州、上海	7月 17日 05:11—05:27	天津
7月 13日 18:21—18:38	南昌、上海	7月 18日 05:01—05:16	长春、哈尔滨
7月 14日 04:09—04:18	福州、南昌、上海、天津、北京	7月 18日 17:27—17:43	哈尔滨
7月 14日 05:51—06:02	上海、天津、北京	7月 18日 20:48—21:01	哈尔滨
7月 14日 18:10—18:28	福州、合肥、上海、青岛、天津、北京	7月 19日 04:51—05:05	南京、天津
7月 15日 05:32—05:50	福州、南昌、青岛、天津、北京	7月 19日 06:29—06:48	南昌、天津
7月 15日 17:58—18:16	福州、青岛	7月 20日 06:18—06:37	大连
7月 16日 05:21—05:39	天津、北京	7月 20日 18:45—19:02	大连

TOVS 资料是极轨卫星大气垂直探测资料^[10],水平分辨率为 75 km,共有 6 个层次 (1 000、850、700、500、400、300 hPa) 的温度、位势高度、湿度的资料。由于 TOVS 产品为离散点资料,在使用过程中往往相应的站点上并没有资料,因此本文在计算过程中,取站点周围同 1 个时次 1 个经、纬度以内 TOVS 资料的所有离散点进行平均,并以此作为该时刻的站点资料。

1.2 计算方法

首先应用美国空军实验室的 MORTRAN3 辐射传输模式^[11],计算对流层各层次上的辐射状况。由于太阳辐射的能量主要集中在波长 4 μm 以下的短波波段,而地球向外发射的辐射则在波长大于 4 μm 的长波波段^[12],因此,太阳辐射的波数积分段取 2 500~50 000 m^{-1} ,红外辐射的波数取 10~2 500 m^{-1} ,积分步长为 5 m^{-1} 。

太阳加热率及红外冷却率计算公式^[13]为

$$\frac{T}{t} = - \frac{1}{c_p} \frac{F(z)}{z} \quad (1)$$

公式左边为大气的加热(冷却)率;公式右边 $F(z)$ 是厚度为 z 的空气层所吸收的净辐射。

是该层中的空气密度, c_p 是定压比热容。

2 计算结果及分析

2.1 晴空大气中各地的太阳辐射加热与红外冷却率

由加热(冷却)率公式(1)可知,加热(冷却)率除了与净辐射和气层的厚度有关外,还与空气密度和定压比热有关。由于密度与温度有关,定压比热又与湿度有关^[14-15],因此,本文利用温度和湿度的变化,来代替密度和定压比热的变化,并综合考虑其他因素,对各地的太阳加热率、红外冷却率进行分析。

图 1 是中国东部 4 个样本 7 月 14 日 04 时的大气加热(冷却)状况,表 2 是与图 1 相对应站点的站点经纬度、海拔高度及太阳天顶角。

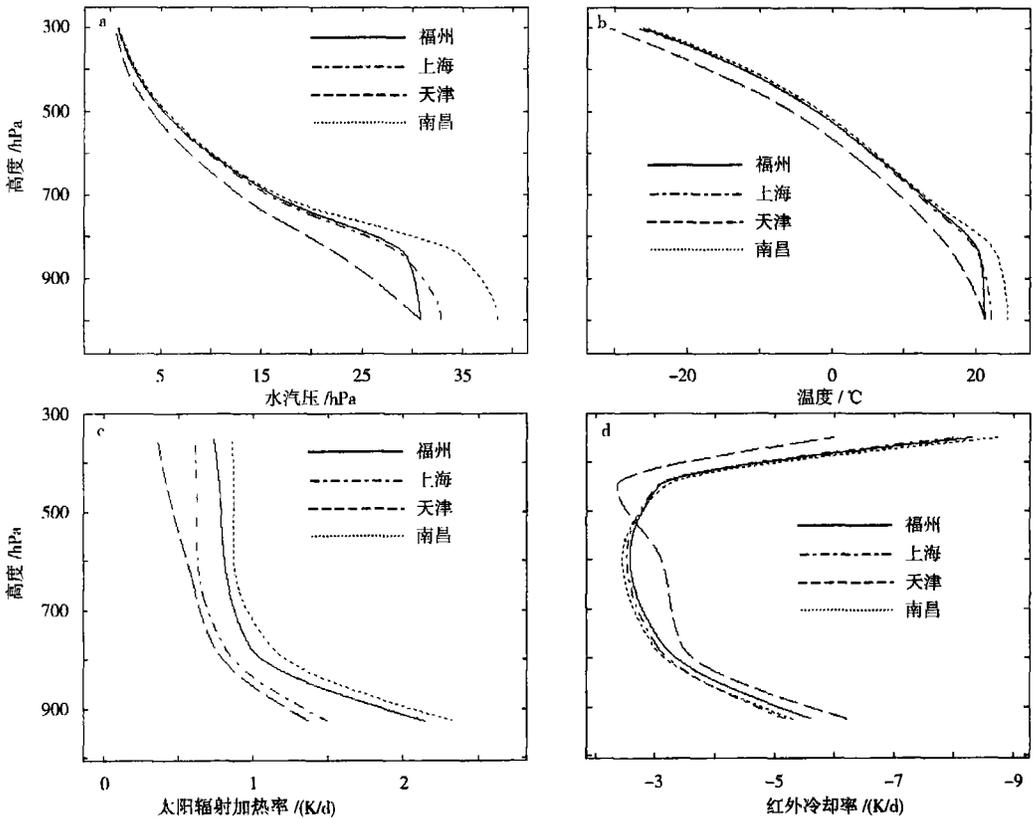


图 1 2004 年 7 月 14 日 04 时福州、南昌、上海、天津的大气状况及辐射加热状况
a 水汽压; b 温度; c 太阳辐射加热率; d 红外冷却率

Fig. 1 Atmospheric state and radiation heating rates
in Fuzhou, Nanchang, Shanghai and Tianjin at 0400BST 14 July 2004
a vapour pressure; b temperature; c solar heating rate; d infrared cooling rate

由图 1a 1b 可以看到,这 4 个样本的水汽压和温度在垂直方向上递减。在对流层的中、低层各地的水汽压相差较大,但到了对流层高层,各地的水汽压接近。对流层的低层温度下降较慢,对流层中、高层温度下降相对较快。

图 1c 是 4 个样本的太阳加热率,由图上可以看出,太阳加热率随着高度减小。在对流层的低层,太阳加热率在垂直方向上随高度迅速减小;而在 500 hPa 以上,太阳加热率变化幅度

减小。在 4 个样本中, 南昌的太阳加热率最大, 福州其次, 太阳加热率在低层变化较大。将太阳加热率与图 1a、1b 对比, 可以看到与对流层低层的水汽压有较好的对应关系。水汽压较大, 太阳净辐射较大时, 太阳加热率大; 在本图中, 纬度居中的上海太阳加热率居中, 但在对流层低层加热率与纬度较高的区域接近, 高层加热率与纬度较低的区域接近。

表 2 7 月 14 日 04 时中国东部 4 个样本站点情况

Table 2 Background of 4 sample sites at 0400BST, July 14

站点	经度 / ($^{\circ}$ E)	纬度 / ($^{\circ}$ N)	海拔高度 / m	天顶角 / ($^{\circ}$)
福州	119.17	26.05	85.40	106.37
南昌	115.55	28.36	45.70	107.59
上海	121.29	31.24	8.20	102.00
天津	117.10	39.06	5.20	199.92

图 1d 是 4 个样本的红外冷却率, 可以看到, 红外冷却率 (下文讨论均为红外冷却率的绝对值) 在对流层的低层和高层较大, 但在对流层的中层较小。对于纬度较低的福州、南昌、上海而言, 极小值出现在 500~700 hPa 间, 而纬度较高的天津极小值点在 400~500 hPa 间。到了对流层高层, 红外冷却率迅速增大, 福州、南昌、上海的增值幅度大于纬度较高的天津。将本图与图 1a、1b 对比, 可以看到红外冷却率与水汽压和温度也有较好的对应关系。温度较高, 则红外冷却率大。水汽压大时, 红外冷却率大。在对流层的高层, 红外冷却率的变化与纬度有关, 纬度较低的地区, 红外冷却率值在垂直方向上升幅较大, 而纬度高的地区升幅则相对较小。

图 2 是是中国东部 4 个样本的大气加热 (冷却) 状况。其中, 表 3 是与图 2 相对应站点的站点经纬度、海拔高度及太阳天顶角。

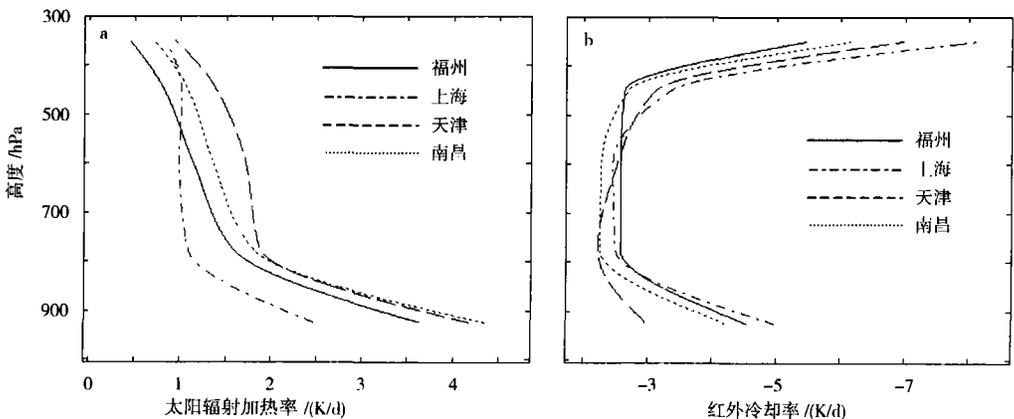


图 2 2004 年 7 月中旬南昌、天津、长春、哈尔滨的早晨辐射加热状况

a 太阳辐射加热率; b 红外冷却率

Fig 2 Morning radiation heating rates in Nanchang, Tianjin, Changchun and Harbin in middle July 2004

a solar radiation heating rate; b infrared cooling rate

将图 2 与图 1 相对照, 可以看出, 太阳辐射加热率与红外冷却率在垂直方向上的变化、纬度变化的特点是相似的; 将本图与当时当地的大气温度和湿度情况对照, 也可以得出与图 1 相似的结论。将表 2 图 1 与表 3 图 2 对比还可以发现, 对于相同的站点, 太阳高度角越大, 则太

阳加热率越小,如南昌和天津,在图 2 的情况下太阳高度角较小,但太阳辐射加热率较大。

表 3 我国东部 4 个样本站点情况

Table 3 Background of 4 sample sites in eastern China

站点	经度 / ($^{\circ}$ E)	纬度 / ($^{\circ}$ N)	海拔高度 /m	天顶角 / ($^{\circ}$)
南昌	115.55	28.36	45.70	85.16
天津	117.10	39.06	5.20	80.23
长春	125.13	43.54	238.50	83.38
哈尔滨	126.46	45.45	143.00	81.77

对所选其余样本的太阳辐射加热率和红外冷却率进行计算分析,得到了与上文中基本一致的结论。

在大气中,太阳辐射加热与红外冷却主要是由气体吸收辐射引起的。无论短波还是长波,水汽都是主要的吸收气体,它主要位于对流层的低层,因此,太阳辐射加热率和红外冷却率在这个层次间的变化较大,水汽压越大,则辐射加热(冷却)率越大。到了对流层中、高层,水汽逐渐减少,加热(冷却)率越小。另外,红外冷却率还和温度有关,温度降低,红外冷却率减小。

2.2 太阳加热率与红外冷却率的日变化

大气中辐射的状况存在日变化,因此加热(冷却)率也有日变化。本文中 TOVS 资料都取自早晨或傍晚时刻,因此,本文利用不同纬度样本站点的某一时次的资料,通过改变时次的方法,来讨论晴空大气中加热率与冷却率的日变化。

图 3 是以福州 2002 年 7 月 14 日 04 时大气状况为基础的太阳加热率的日变化:在对流层中,早晚的太阳加热率较小,而中午太阳加热率大,与天顶角的变化相反。太阳加热率的最大值出现在中午 12 时左右的对流层低层大气中。

图 4 是以天津 2002 年 7 月 14 日 05 时大气状况为基础的太阳直接加热率的日变化,在本图上可以看到与福州一致的变化趋势,同时注意到,大多数时候,福州的太阳加热率大于天津。

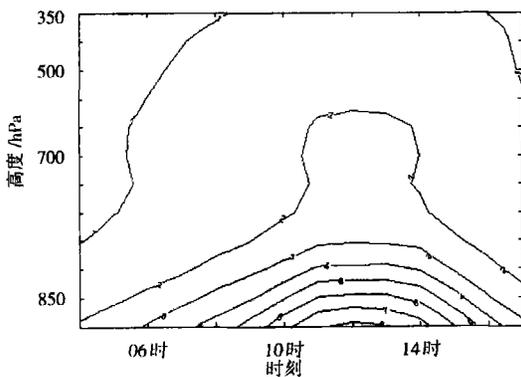


图 3 福州太阳加热率的日变化(单位:K/d)

Fig. 3 Diurnal variation of solar radiation heating rate in Fuzhou (units: K/d)

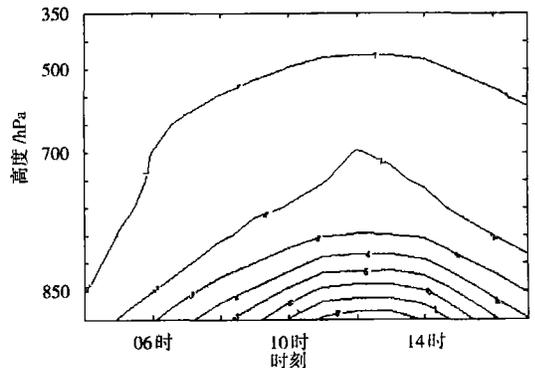


图 4 天津太阳加热率的日变化(单位:K/d)

Fig. 4 Diurnal variation of solar radiation heating rate in Tianjin (units: K/d)

对其余不同纬度样本的太阳加热率日变化进行分析,发现太阳加热率的日变化趋势是一致的,一般情况下,低纬度的太阳加热率比高纬度大。

在本模式中,如果不考虑到大气状况在一天中的变化,则红外冷却率没有明显的日变化。

2.3 对比分析

Freeman 等对 7 月份全球纬向平均太阳加热率和红外冷却率进行了研究 (图略)^[13], 认为: 对于北半球中、低纬来说, 纬向平均的红外冷却率在距离地面 3~8 km 偏小, 在对流层低层及高层则较大, 这与本文的结论是一致的。

对于太阳加热率来说, Freeman 等发现, 在对流层中、高纬度的太阳加热率是随着高度递减的^[13], 这与本文的结论一致, 但对 0~40°N 左右的地区, 在 36 km 左右存在太阳加热率的极大值, 与本文随高度递减的结论不一致。分析其原因, 主要是因为 Freeman 等的结果为 7 月平均值^[13], 此时中国东部地区为雨季, 中、低层大气水汽含量较大。而本文分析的是晴空大气, 空气中的水汽含量较平均值小, 吸收的太阳能量较小, 因此太阳加热率较小。

讨论太阳加热率和红外冷却率的日变化时, 本文所计算的结果与实际大气会有所差异: 本文讨论中采用早晨 04:05 时 (北京时间) 的大气资料作为基础场, 此时气温较低。而白天气温会有所升高, 由于 $T = \frac{1}{t}$ ^[14], 根据加热 (冷却率) 公式 (1) 可知, 在 $F(z)$ 不变时, $\frac{1}{t}$ 增加则 $\frac{T}{t}$ 的值增大, 而白天的 $F(z)$ 也升高, 因此, 实际的太阳加热率要比本文的计算结果大。对比本文的结果与上海城市太阳辐射的日变化^[16], 结果相同。

3 误差来源和计算结果分析

本文误差的主要来源, 是卫星资料反演误差、MORTRAN 3 模式及模式其参数选取的误差。另外, 利用 TOVS 资料对站点经纬度插值也是导致误差的一个原因。

将本文的中间计算结果 (表略) 太阳直接辐射和净全辐射与实况对比, 可以看到实测值与计算值之间存在误差。不过, 模式计算值是以卫星扫描时刻的瞬时辐射值作为小时内的平均量得出的结果, 实测值则是以小时内各瞬时量累计的结果, 由于每一时刻的太阳天顶角不同会导致每一时刻的辐射值不同, 因此, 二者之间是存在差别的。如 18 日 20~21 时的净全辐射计算值的绝对值大于实测值的绝对值, 卫星观测的时间是在小时内后半时间段里, 此时已经入夜, 太阳向下辐射的总量是逐渐减小的, 因此, 计算值小于实测值也是合理的。

4 小 结

(1) 晴空大气中, 太阳加热率在垂直方向是递减的, 并与天顶角的大小呈反比, 太阳加热率在垂直方向的变化速率与纬度成反比。

(2) 晴空大气中, 红外冷却率在 400~700 hPa 间存在极小值, 而对流层的低、高层较大, 红外冷却率与温度和水汽成正比, 在垂直方向的变化速率与纬度成反比。

(3) 太阳加热率存在明显的日变化, 最大值出现在中午 12 时前后; 在相同的大气条件下, 红外冷却率没有明显的日变化。

(4) 大气辐射加热大小主要取决于入射能量与吸收气体, 在相同的入射能量下, 在低层, 水汽的吸收作用明显。

参考文献:

- [1] 刘长盛, 叶伯明. 云层分布对辐射加热和冷却的影响 [J]. 气象学报, 1991, 49(4): 483-493.
- [2] 王建凯, 陈渭民, 吴鹏飞. 我国部分地区的太阳辐射加热率和红外冷却率的研究 [J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(6): 324-332.

- [3] 翁笃鸣. 青藏高原地表净辐射若干重要特征研究 [J]. 南京气象学院学报, 1991, 14(2): 151-159.
- [4] Smith E A, Shi Lei. Surface forcing of the infrared cooling profile over the Tibetan Plateau [J]. *J Atmos Sci* 1992, 49(10): 805-822
- [5] 黎伟标, 罗会邦. 大气系统净辐射加热的季节变化及其与亚洲夏季风的关系 [J]. *热带气象学报*, 1999, 15(3): 205-212
- [6] 付遵涛, 刘式适. 辐射冷却与低频振荡中的宽频带现象 [J]. *热带气象学报*, 1999, 15(4): 330-339.
- [7] 傅炳珊, 陈渭民, 张凤英. 利用 TOVS 资料计算我国东南地区的太阳直接辐射和散射辐射 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(6): 807-815.
- [8] 赵增亮, 毛节泰. 联合反演大气气溶胶光学特性和地区反照率 [J]. *大气科学*, 1999, 23(6): 722-732
- [9] 陈渭民, 缪英好, 高庆先. 由 GMS 资料估算夏季青藏高原地区地面总辐射 [J]. 南京气象学院学报, 1997, 20(3): 326-333
- [10] 张凤英, 胡筱欣, 冉茂农, 等. 极轨气象卫星 TOVS 资料微机处理系统简介 [J]. *气象*, 1997, 23(1): 23-27
- [11] Kneizys F X, Robertson D C, Abreu L W, et al. The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 model [M]. North Andover AFGL - TR Press, 1996, 140-148
- [12] 尹宏. 大气辐射学基础 [M]. 北京: 气象出版社, 1993
- [13] 廖国男. 大气辐射学导论 [M]. 北京: 气象出版社, 1985
- [14] 南京大学大气物理学编写组. 大气物理学教程 (上册) [M]. 南京: 南京大学出版社, 1990, 53-55
- [15] 林晔, 王庆安, 顾松山, 等. 大气探测学教程 [M]. 北京: 气象出版社, 1995, 151-152
- [16] 周淑贞, 郑景春. 上海城市太阳辐射的日变化和季节变化 [J]. *华东师范大学学报 (自然科学版)*, 1992, 26(6): 63-73.

A Study on Atmospheric Radiation Heating over East China in Summer Troposphere Using TOVS Data

WANG Cheng-wei^{1, 2}, CHEN Wei-min¹, SONG Qing-li³,
HU Wen-dong⁴, YIN Shaping⁵

(1. Department of Electronic Engineering NU IST, Nanjing 210044 China

2. Heilongjiang Province Weather Forecast Center, Harbin 150030 China

3. Heilongjiang Province Daxinganling Region Weather Bureau, Jiagedaqi 165000 China

4. Ningxia Key Laboratory of Preventing and Reducing Meteorological Disaster, Yinchuan 750002 China

5. Institute of Meteorological Science of Heilongjiang Province, Harbin 150030, China)

Abstract The solar and infrared radiation over east China in summer troposphere were calculated using the MODTRAN3 model and the satellite TOVS data. Solar heating rate and infrared cooling rate were calculated and analyzed from the 43 samples at 12 stations at different latitudes on sunshine day. It is found from the analyses that in summer troposphere, the solar heating rate decreases with height and its magnitude and change rate are correlated with latitude, zenith angle and atmospheric state. And meanwhile, the solar heating rate also varies diurnally. The infrared cooling rate reaches the minimum value in middle and upper troposphere, and its magnitude and change rate are correlated with latitude and atmospheric state. Results of this paper were compared with previous conclusions and reality, and it is found that the results realistically reflect the radiation heating state of the summer troposphere over east China, and therefore are reliable.

Key words MODTRAN3, solar heating rate, infrared cooling rate, diurnal variation