

文章编号:1001-5078(2009)04-0399-04

· 红外技术 ·

一种基于地面气温的地表出射长波辐射的计算方案

李超^{1,2}, 魏合理¹, 徐青山¹, 陈秀红¹, 周军¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 安徽合肥 230031; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:研究了草地下垫面出射长波辐射 R_{lu} 和地面气温 t_a 之间的关系, R_{lu} 与 t_a 之间具有很好的线性相关性, 各个季节两者日平均值之间的线性相关系数普遍大于 0.98, 拟合曲线的回归标准差小于 $5.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。并提出了基于地面气温的地表出射长波辐射的计算方案, 并利用本站 2004 年 9 月 - 2005 年 8 月一年期间的观测资料, 对计算方案的可行性进行了论证。检验结果表明, 各个季节 R_{lu} 计算结果的均方根误差和平均相对误差普遍小于 $5.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 1.3%, 计算值与观测值之间的一致性指数普遍大于 0.95。该研究结果对于缺乏地表出射长波辐射观测资料的地区或缺损该资料的时段具有重要参考价值。

关键词:地表出射长波辐射; 草地下垫面; 地面气温; 统计分析

中图分类号: TN211

文献标识码: A

Parameterization of Outgoing Surface Long-wave Radiation Based on Surface Air Temperature

LI Chao^{1,2}, WEI He-li¹, XU Qing-shan¹, CHEN Xiu-hong¹, Zhou Jun¹

(1. Center for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Outgoing surface long-wave radiation (R_{lu}) is an import component of surface radiation budget, unfortunately, a good many observation sites lacking this meteorological data. Therefore, a simple and accurate model for calculating R_{lu} is essential and significant. Based on two-year observation of outgoing grass land surface long-wave radiation and screen-level air temperature (t_a) at SKYNET Hefei site, the empirical relations between R_{lu} and t_a have been statistically analyzed. Results indicated that there being excellent linear correlation between R_{lu} and t_a , and the liner correlation coefficients R between daily mean R_{lu} and t_a are higher than 0.98 for each season, the standard deviation of regression lines less than $5.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. A parameterization for calculating R_{lu} based on t_a has been proposed and it's feasibility has been demonstrated using observed data during the period of September 2004 to August 2005. The results indicated that the root mean square errors and mean percent errors of calculated R_{lu} less than $5.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ and 1.3% for each season with the degree of agreement for observed and calculated value higher than 0.954. The scheme is proved to be valid and feasible and it has significant reference value for regions and/or period of time in defect of R_{lu} observation data.

Key words: outgoing surface long-wave radiation; grass land surface; surface air temperature; statistical analysis

1 引言

地气系统的辐射收支影响全球气候的变化, 地面辐射平衡在地球 - 大气能量交换过程中扮演着重要角色, 对大气边界层内的气候过程起到关键作用^[1]。地表热红外辐射作为地面辐射平衡中的重要分量, 其统计分布特性对地表目标探测的背景识

别以及地质学和农业气象学的应用具有重要价

基金项目:中国科学院知识创新工程方向性项目 (No. KGCX2 - SW - 413) 资助; 国家“973”计划项目资助 (No. 2006CB403702); 中国科学院合肥物质科学研究院院长基金项目资助。

作者简介:李超 (1975 -), 男, 博士研究生, 主要从事大气辐射特性及大气遥感研究。E-mail: chaoli@aiofm.ac.cn

收稿日期:2008-10-30

值^[2],其异常变化特征对重大自然灾害预测和防震减灾具有重要的应用前景^[3]。因此,对地表热红外辐射的研究逐渐得到人们的重视^[2-8]。

地表出射长波辐射,包括地表自身发射的长波辐射和地表反射的部分环境辐射(主要指大气逆辐射)^[1,9-10],即:

$$R_{lu} = \varepsilon_s \sigma T_s^4 + (1 + \varepsilon_s) R_{la} \quad (1)$$

式中, R_{lu} 为地表出射长波辐射 ($W \cdot m^{-2}$); T_s 为地表温度 (K); ε_s 为地表比辐射率; R_{la} 为大气逆辐射 ($W \cdot m^{-2}$)。 R_{lu} 的直接测量一般采用精密红外辐射仪,但这种仪器精密且昂贵,很难普及各个站点,尤其是偏远地区。在长波波段,一般地表的比辐射率在 0.95 以上^[10],地表反射的环境辐射很小,可以通过测量地表温度和地表比辐射率近似计算得到地表出射长波辐射,但前两者的测量具有很多不确定因素,难于测量得准确^[4]。所以,建立一种快速方便而又具有相当精度的地表出射长波辐射的计算方法具有重要的现实意义。

合肥地处中国东部的江淮流域,属于暖温带向亚热带的过渡地带,为亚热带湿润季风气候。文中根据大气辐射国际联合观测网 SKYNET 合肥站^[11] 2002 年 9 月至 2004 年 8 月两年期间共 564 天地表出射长波辐射和地面气温的观测资料,统计分析了两者的相关关系,提出了基于地面气温的地表出射长波辐射的计算方案。该研究结果对于缺乏地表出射长波辐射观测资料的地区或缺损该资料的时段具有重要参考价值。

2 资料与方法

SKYNET 合肥站 (31. 90° N, 117. 17° E, 36m ASL) 位于合肥市中心以西 15km 的郊区,这里三面环水,观测场内地面平坦并被草坪覆盖,观测场周围是高 2 ~ 4m 的树林,树林外围是开阔的农田和村舍^[12]。

用于观测地表出射长波辐射和大气逆辐射的两台 Eppley 精密红外辐射仪 (PIR 型) 安装在距地面 1.5m 高的水平固定支架上,其中感应面向下放置的一台用于测量地表出射长波辐射。仪器的感应面是涂黑的热电堆,外罩是用材料硅制成的直径为 3cm 的半球形固体罩,罩的内壁为真空镀膜的干涉滤光片,它在太阳短波辐射波段的透过率基本为零,而在 4 ~ 50 μ m 长波波段的透过率接近 50%。仪器每年标定一次,以保证测量数据的精度。

温、湿度传感器 (Vaisala HMP45A 型) 安装在距地面 1.5m 高的百叶箱内,用于测量地面气温和

相对湿度。

以上观测仪器可以在各种天气条件下连续、自动、有效运行;每 10s 采集并自动存储一组观测数据,文中取各自的日平均值进行讨论。在讨论地表出射长波辐射与地面气温的关系以及计算方案的可行性论证时,主要采用回归拟合和统计检验等统计学方法。

3 地表出射长波辐射与地面气温相关性的统计研究

图 1 给出了合肥站 2002 年 9 月至 2004 年 8 月两年期间共 564 天地表出射长波辐射 R_{lu} ($W \cdot m^{-2}$) 和地面气温 t_a ($^{\circ}C$) 两者日平均值之间的散点图,两者之间存在很好的线性相关关系:

$$R_{lu} = a + bt_a \quad (2)$$

式中,截距 a 和斜率 b 为回归系数,单位分别为 $W \cdot m^{-2}$ 和 $W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ 。

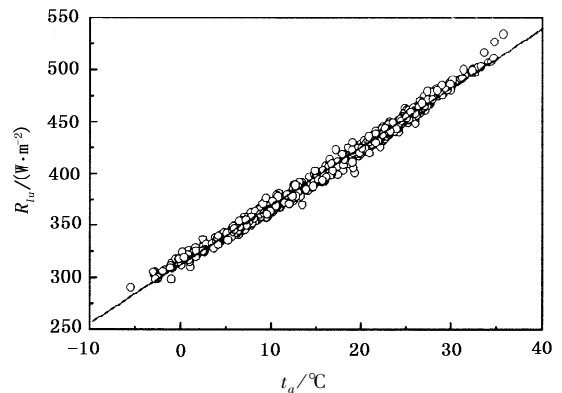


图 1 地表出射长波辐射与地面气温日平均值的散点图

将以上给出的地表出射长波辐射 R_{lu} 和地面气温 t_a 日平均值的观测资料分为春季 (3 ~ 5 月)、夏季 (6 ~ 8 月)、秋季 (9 ~ 11 月) 和冬季 (12 ~ 2 月) 四个季节分别进行回归反演,发现两者仍然很好地满足方程 (2) 给出的回归关系。表 1 给出了不同季节方程 (2) 的回归系数 a ($W \cdot m^{-2}$) 和 b ($W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$)、线性相关系数 R 以及回归标准差 SD ($W \cdot m^{-2}$),并列出了各个季节的样本量 N 和回归系数的误差,表 1 同时列出在年时间尺度情况下的对应结果。

表 1 不同时间尺度上方程 (2) 的回归系数、相关系数以及回归标准差

Time scale	N	a	b	R	S_D
Spring	117	316.21 \pm 1.30	5.49 \pm 0.07	0.990	4.68
Summer	136	296.09 \pm 4.24	6.33 \pm 0.09	0.985	3.64
Fall	168	306.56 \pm 0.98	5.81 \pm 0.05	0.993	4.48
Winter	143	315.59 \pm 0.45	5.14 \pm 0.09	0.980	3.59
All year	564	312.25 \pm 0.40	5.67 \pm 0.02	0.995	4.86

可以看出,各个季节 R_{lu} 与 t_a 均具有很好的线性相关关系,这说明地表出射长波辐射和地面气温具有很好的内在联系。两者日平均值之间的线性相关系数普遍大于 0.98,而且在秋季的相关性最好。

拟合曲线的回归标准差较小,各个季节线性方程的回归标准差 S_D 均小于 $5W \cdot m^{-2}$ 。回归方程(2)的回归系数在各个季节的数值有所不同,其中夏季的截距最小、斜率最大,反映出该季节地面温度场和热力场的特殊性;回归系数的误差较小,各个季节截距 a 的误差不超过 $4.5W \cdot m^{-2}$,斜率 b 的误差小于 $0.1W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ 。

在年时间尺度上, R_{lu} 与 t_a 的线性相关性较之季节尺度有所提高,但拟合曲线的回归标准差却相应增大。

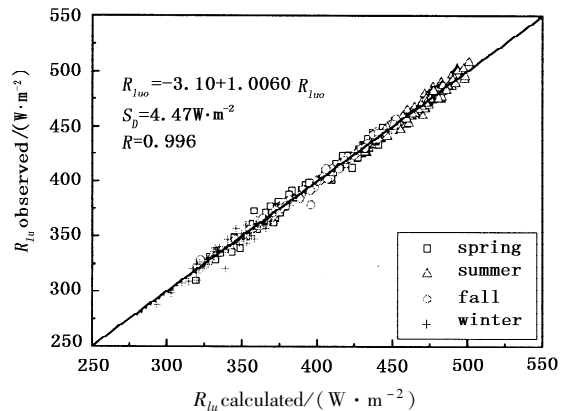
因此,不论是在季节尺度还是在年尺度 R_{lu} 与 t_a 均具有很好的线性相关性,而且拟合曲线的回归标准差较小,体现出较高的拟合精度。不妨可以利用两者的相关关系,基于地面气温计算地表出射长波辐射。

4 地表出射长波辐射计算方案可行性的实验论证

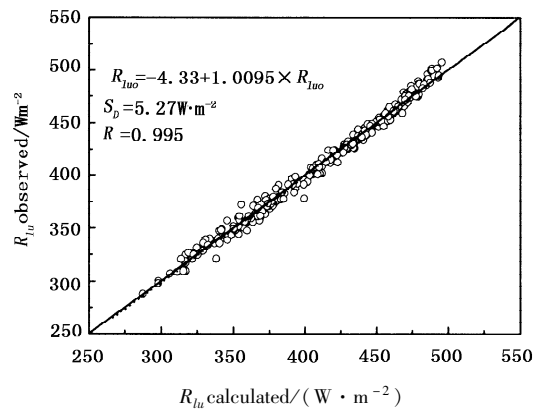
为验证以该计算方案推广应用的可行性,利用本站其他年度地表出射长波辐射和地面温度的实际观测资料对计算结果进行检验。根据表 1 列出的回归系数,基于合肥站 2004 年 9 月至 2005 年 8 月期间 280 天地面温度的资料计算该年度的地表出射长波辐射,得出了 R_{lu} 的计算值与实际观测值的关系,如散点图 2 所示。其中图 2(a)为利用表 1 给出的各个季节对应的回归系数计算得到的结果,图 2(b)为统一利用表 1 给出的年回归系数计算得到的结果;图中实线为斜率为 1 的直线;虚线为 R_{lu} 的计算值与实际观测值的线性回归曲线,其参数已在图中给出。可以看出。

不论是利用各个季节对应的回归系数还是统一利用年回归系数计算结果均具有相当高的精度, R_{lu} 计算结果的回归标准差均在 $5.3Wm^{-2}$ 以下,计算值与观测值之间的相关系数高达 0.995 以上,两者的实际回归曲线与斜率为 1 的直线基本重合。

利用各个季节对应的回归系数计算所得结果稍优于统一利用年回归系数计算的结果,表现在其回归曲线的截距更接近于零、斜率更接近 1,而且回归标准差进一步降低,计算值与观测值之间的相关系数也稍有提高。



(a) 利用各个季节的回归系数



(b) 利用年回归系数

图 2 地表出射长辐射的计算值与观测值关系的散点图

表 2 进一步给出了不同时间尺度下地表出射长波辐射的计算值与实际观测值的对比统计结果,其中 R_{lu} 的计算值相对于实际观测值的平均偏差 MBE ($W \cdot m^{-2}$)、平均绝对误差 MAE ($W \cdot m^{-2}$)、均方根误差 RMSE ($W \cdot m^{-2}$) 和平均相对误差 MPE (%) 分别由以下关系式给出:

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - O_i) \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|C_i - O_i|) \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$MPE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|C_i - O_i| / Q_i) \right] \times 100\% \quad (6)$$

式中, N 表示样本量; C_i 和 O_i 分别表示地表出射长波辐射的计算值和实际观测值。

另外,检验计算值与观测值之间吻合程度的一个非常重要的物理量是两者之间的一致性指数 $d^{[13]}$ (index of agreement), 计算关系式为:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|C_i - O_i| + |O_i - O_i|)^2} \quad (7)$$

表2 R_{lu} 的计算值与观测值的对比统计结果

Time scale	N	MBE	MAE	RMSE	MPE	d
Spring	81	0.47	3.75	4.71	0.95	0.996
Summer	81	0.58	3.75	4.48	0.80	0.986
Fall	64	0.21	3.30	0.53	0.997	
Winter	54	1.44	4.15	5.40	1.23	0.954
All year	280	0.42	4.16	5.29	1.04	0.997

注:表中 MBE, MAE, RMSE 和 MPE 的单位均为 $W \cdot m^{-2}$

表2表明,在季节尺度上, R_{lu} 的计算值与观测值之间的一致性指数均大于0.95,反映出两者具有很好的一致性; R_{lu} 计算结果的平均偏差普遍小于 $1.5 W \cdot m^{-2}$,平均绝对误差、均方根误差和平均相对误差分别小于 $4.2 W \cdot m^{-2}$, $5.5 W \cdot m^{-2}$ 和1.3%,而且在冬季计算结果的误差最大、秋季的误差则最小。在年时间尺度上, R_{lu} 的计算值与观测值之间的吻合程度更高,而且计算结果的误差与在季节尺度上的结果相差不大。

以上分析表明检验的结果是满意的,基于地面气温的草地下垫面地表出射长波辐射的计算方案可以应用于不同年度不同季节地表出射长波的计算。

5 结语

根据大气辐射国际联合观测网 SKYNET 合肥站2002年9月至2004年8月两年期间的观测资料,统计分析了草地下垫面地表出射长波辐射和地面气温之间的关系。研究指出, R_{lu} 与 t_a 之间具有很好的线性相关关系;各个季节两者日平均值之间的线性相关系数普遍大于0.98,拟合曲线的回归标准差均小于 $5.0 W \cdot m^{-2}$ 。进而提出了基于地面气温的地表出射长波辐射的计算方案。

利用本站2004年9月至2005年8月一年期间的观测资料,对该计算方案推广应用的可行性进行了实验论证。检验结果表明,各个季节计算结果的平均偏差、平均绝对误差、均方根误差和平均相对误差分别小于 $1.5 W \cdot m^{-2}$, $4.2 W \cdot m^{-2}$, $5.5 W \cdot m^{-2}$ 和1.3%,计算值与观测值之间的一致性指数普遍大于0.95。证明该计算方案适用于地表出射长波辐射的计算。

该研究结果对于缺乏地表出射长波辐射观测资料的地区或缺损该资料的时段具有重要参考价值,对地面辐射平衡研究以及地质学和农业气象学的应用具有重要意义。当然,由于局地环境以及地表状况的不同,不同地区关系式(2)的回归系数可能会存在一定差异。

参考文献:

- [1] Iziomon M G, Mayer H, Wicke W, et al. Radiation balance over low-lying and mountainous areas in south-west Germany[J]. Theor. Appl. Climatol, 2001, 68: 219 - 231.
- [2] Wei Heli, Song Zhengfang. Influence of random wind field on the infrared radiance statistics distribution of natural terrain[J]. J. Infrared Millim. Waves, 1995, 14(6): 424 - 428. (in Chinese)
- [3] Liu Defu, Kang Chunli. Predicting heavy disasters by outgoing longwave radiation (OLR) of the earth[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(2): 427 - 435. (in Chinese)
- [4] Jin Yi-e. Emissivities of natural surfaces and surface temperature[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1989, 47(1): 92 - 96. (in Chinese)
- [5] Rao Ruizhong, Song Zhengfang. Natural terrain infrared radiation statistics in a wind field[J]. J. Infrared Millim. Wave, 1991, 10(2): 141. (in Chinese)
- [6] Chehbouni A, Nouvellon Y, Kerr Y H, et al. Directional effect on radiative surface temperature measurements over a semiarid grassland site[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76: 360 - 372.
- [7] Li Z L, Zhang R, Sun X, et al. Experimental system for the study of the directional thermal emission of natural surface[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(1): 195 - 204.
- [8] Huang Miaofen, Liu Shaomin, Liu Suhong, et al. A study of the difference between true surface temperature and radiometric surface temperature[J]. Advances in earth Science, 2005, 20(10): 1075 - 1081. (in Chinese)
- [9] Olioso A. Estimating the difference between brightness and surface temperature for a vegetal canopy[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 1995, 72: 237 - 242.
- [10] Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. Atmospheric physics[M]. Beijing: Beijing University Press, 2003: 102. (in Chinese)
- [11] Li Chao, Liu Dong, Fan Aiyuan, et al. Characteristics of solar shortwave radiation on clear days in Hefei region[J]. Journal of Atmospheric and environmental optics, 2007, 2(1): 44 - 49. (in Chinese)
- [12] Zhou Jun, Yue Guming, Jin Chuanjia, et al. Lidar observation of Asian dust over Hefei, China, in spring 2000[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107: AAC5 1 - 8.
- [13] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance[J]. Bull. Am. Meteorol. Soc., 1982, 66: 1309 - 1313.