



室外气温与太阳辐射的随动性关系研究

尚凯锋, 刘艳峰, 王登甲, 李 涛

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘 要: 室外气温与太阳辐射强度之间存在某种随动关系, 以中国南方 13 个典型城市气象数据为依据, 通过回归分析方法, 得到了太阳辐射与地表温度的动态拟合关系及地气温差随时间变化的动态拟合关系, 各拟合公式相关系数 R^2 均在 0.97 以上, 说明拟合结果能显著的反映数据点的变化规律, 进而建立了室外气温与太阳辐射强度的随动性关系。结果表明: 高原地区, 太阳辐射是室外气温与时间的一次函数; 平原地区, 太阳辐射是室外气温与时间的对数函数。对建筑冷负荷计算提供简便的方法, 同时, 也为太阳辐射强度与建筑冷负荷的随动性关系及太阳能空调的适宜性研究提供科学依据。

关键词: 太阳辐射; 室外气温; 地表温度; 随动关系

中图分类号: TU111 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)05-0116-06

Dynamic relationship between outdoor air temperature and solar radiation

Shang Kaifeng, Liu Yanfeng, Wang Dengjia, Li Tao

(School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: There is a dynamic relationship between outdoor air temperature and solar radiation. Based on the meteorological data of 13 typical cities in south China and by the regression analysis method, the dynamic fitting function between the solar radiation and the land surface temperature and the function of temperature difference between the air and land surface changing over time are established. And the correlation coefficient R^2 are over 0.97 which indicates that the results can significantly reflect the variation of data points, then the dynamic relationship between outdoor air temperature and solar radiation is obtained. The results suggest that solar radiation is a linear function of the outdoor air temperature and time in the plateau, while logarithmic function of both in the plains. The study will provide convenient method for building cooling load calculation, and provide scientific basis for studying the dynamic relationship between the solar radiation and the building cooling load as well as the suitability of the solar energy air conditioning.

Key words: solar radiation; outdoor air temperature; the surface temperature; the dynamic relationship

收稿日期: 2015-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(51378411, 51408462)

作者简介: 尚凯锋(1989-), 男, 主要从事太阳能空调研究, (E-mail) skf2015@163.com。

刘艳峰(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) liuyanfeng@xauat.edu.cn。

Received: 2015-06-16

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51378411, No. 51408462)

Author brief: Shang Kaifeng(1989-), main research interest: solar air conditioning, (E-mail) skf2015@163.com.

Liu Yanfeng(corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail) liuyanfeng@xauat.edu.cn.

气温和太阳辐射都是室外环境中重要的气象参数,构建两者之间的函数关系,有利于空调负荷计算和建筑节能计算。目前,大多计算将两者按独立变量进行考虑,或利用室外空气综合温度进行简单综合^[1],使得计算较为复杂。众所周知,室外气温与太阳辐射强度之间存在某种随动关系,如能通过分析获得两者之间的关系,实现两参数合二为一,将为建筑冷负荷计算提供简便的方法。对一定的太阳能空调系统,太阳辐射强度大小决定着太阳能集热器集热量的多少,从而间接决定着空调制冷量大小。同时,太阳辐射与室外气温作为建筑冷负荷计算中的重要参数^[1],在建筑内热源一定的条件下,二者直接决定着建筑冷负荷的大小。可见,研究二者的随动性关系对建立基于太阳辐射照度的冷负荷预测模型与制冷量预测模型同样具有重要意义,有利于空调制冷量或太阳能集热器面积与建筑冷负荷的匹配。另外,由于太阳辐射照度测试设备的成本及维修保养和校准困难,在世界上许多国家都缺乏足够的太阳辐射数据^[2],故大多研究将重心集中在利用室外气温估算太阳辐射强度的模型建立方面^[3-6]。例如, Hargreaves 等^[7]和 Samani 等^[8]首先提出了表示太阳辐射强度与室外气温日较差影响关系的简单方程; Daut 等^[9]将线性回归和 Hargreaves 的方法结合,提出了日平均太阳辐射强度与室外气温日较差的关系方程; Ibrahim 等^[10]建立了日平均太阳辐射强度与日平均最高、最低气温的线性回归方程。近些年,一些新的模型建立方法,如神经网络模型^[11-13]、支持向量法^[14-16]等逐渐应用于太阳辐射与室外气温之间数学关系的建立。但这些研究本质上仅适用于特定地点的历史气象参数,且少有对一天中逐时室外气温与太阳辐射强度的随动性变化关系进行研究。

该研究用回归分析方法,建立了室外气温与太阳辐射强度逐时值的动态拟合关系。

1 数据拟合

1.1 数据来源

该文所用数据取自于中国气象局气象信息中心气象资料室和清华大学建筑技术科学系共同编著的《中国建筑热环境分析专用气象数据集》,该数据集统计了全国 270 个地面气象台站 1971—2003 年的实测气象数据。该研究选取了中国南方 13 个典型城市的典型气象年数据,主要参照并利用其中的地理位置参数、水平面日总太阳辐射量、水平面逐时总

辐射照度、地表温度及室外干球温度等数据。由于所用数据均来自气象数据集,文中所述太阳辐射的时间均为北京时间。

1.2 拟合条件

室外气温主要随季节、海拔高度、地面类型、气象条件等的变化而变化,影响太阳辐射强度的因素主要有天文、地理因素、大气状况等,室外气温对太阳辐射响应的延迟性使得直接寻求太阳辐射与室外气温之间的动态关系存在一定的困难,故应对不同高度、不同地面类型、不同季节及不同天气状态下的室外气温与太阳辐射的随动性关系进行具体分析。如能找到一个变量将二者联系起来,将使问题得以简化。而这个变量应具备相关性、连续性、易获得性、无地域限制性的特点。

太阳辐射是地球能量的主要来源。到达地面的太阳辐射而引起地表温度日变化的根本原因是地球自转引起太阳辐射对地气系统加热的日变化^[17]。故太阳辐射强度变化直接影响着地表温度的变化。另外,地表温度是地表与大气之间辐射及能量交换的关键参数^[18]。太阳辐射到达地面后,一部分被反射,一部分被地面吸收,使得地表温度发生变化。太阳的热能被地面吸收后,地面再通过辐射、传导和对流把热量传给空气,这是空气热量的主要来源,而太阳辐射直接被大气吸收的部分使空气增热的作用极小,只能使气温升高 $0.015 \sim 0.02 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[19]。由此可见,太阳辐射是影响地表温度日变化的直接原因,而地面温度日变化又是引起空气温度日变化的直接原因。可以说,地表是太阳辐射与大气之间热量传递的媒介。

而其他影响因素,如风速、云量、大气透明度、海拔高度、季节、降雨量等,虽然对温度或太阳辐射强度有一定影响,但由于研究考虑的范围为夏季非阴天时的正常天气状况,考虑到同一地区海拔高度基本不变,其他数据如风速、云量、降雨量、大气透明度等存在相关性弱、不连续性、数据较难获得,均不宜作为中间变量。而地表温度作为中间变量时,不仅数据容易获得,且与辐射和气温均有很强相关性,因此,选择地温作为中间变量。

为此,该研究分别从寻求太阳辐射与地表温度的随动性及地表温度与室外气温的随动性出发,以地表温度为中间变量,探讨太阳辐射与室外气温的随动性关系。

1.3 平均日计算

挑选了南方各城市 6 月、7 月和 8 月的气象数

据,阴天太阳辐射强度很弱,且室外空气温度较低,降雨等非正常因素影响较大,故该研究仅探求夏季非阴天天气条件下水平面总太阳辐射照度与空气温度的随动性变化关系。

在数据分析过程中,发现个别日子太阳辐射数据出现异常,这是由于在特殊天气条件下,一日中天气状态变化无常,其他因素如短时阴天、急降雨等突变天气影响较大。研究选取了 3 个月里正常天气状态下的所有日子,计算出了平均日水平面太阳总辐射照度、地表温度和室外气温的逐时数据,并对平均日内逐时气象参数值进行了偏差性分析。以南宁地区室外气温变化为例,具体偏差情况如图 1 所示。

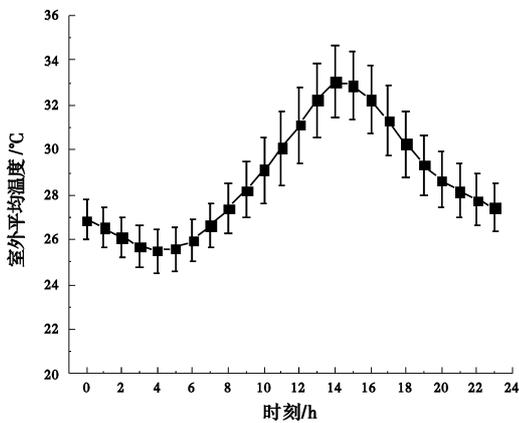


图 1 南宁地区平均日气温偏差图

Fig. 1 Average daily air temperature deviation chart for Nanning

由图 1 可知,各天气温与平均日气温偏差较小,且偏差变化较为均匀,说明夏季正常天气状态下各天气温波动对气温日变化规律影响不大,采用平均日内气温日变化能较好地表征一段时间内气温的整体变化情况。

偏差性分析结果表明,平均日能较好的表征一段时间内气象参数变化规律。

2 拟合结果及分析

2.1 太阳辐射和地表温度随动性关系

2.1.1 高原地区 以贵阳为例,上、下午时段太阳辐射和地表温度关系拟合曲线如图 2 所示,由图可以看出,太阳辐射与地表温度在上、下午均呈直线型的随动变化规律,且二者上、下午随动性变化曲线斜率基本相等,说明地表温度在一天中任一时刻随太阳辐射强度变化的变化率近似相等,即太阳辐射值增大或减小一定的量,地表温度随之升高或降低一定的量。但上、下午时段的随动性变化曲线并未重

合,而是存在大约 2 °C 的温差,这说明两者的随动性变化曲线的斜率只是相近但并不相等,上午曲线的斜率要略大于下午的斜率。这个结果可由表 1 中拟合公式的参数验证得到。贵阳和昆明上午的斜率分别为 0.027、0.025,下午的斜率分别为 0.023、0.019。另一方面,上午随太阳辐射增强,地面处于得热升温过程,而下午太阳辐射逐渐减弱,地面处于失热降温过程。由于地表具有较大的热容性,地表温度对太阳辐射的响应在时间上存在一定的延迟,使得在太阳辐射开始减弱时的地表温度仍比上一个时间点的温度要高,如图 2,最高温度相对最大辐射相差 1 h 左右。

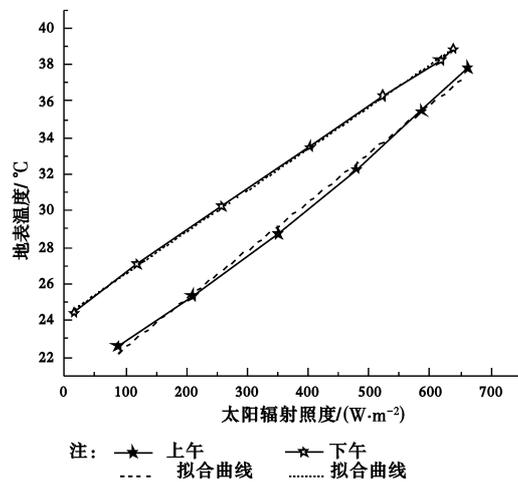


图 2 贵阳太阳辐射和地表温度关系拟合曲线图

Fig. 2 Fitting curve about the relationship between solar radiation and surface temperature for Guiyang

拟合得到地表温度与太阳辐射关系式如下:

$$t_{s,\tau} = a + bI_{\tau} \quad (1)$$

式中: $t_{s,\tau}$ 为任意时刻地表温度,°C; I_{τ} 为任意时刻太阳辐射照度, w/m^2 ; τ 为时刻数,h; a 、 b 为拟合常量。 a 、 b 具体值如表 1 所示:

表 1 高原地区太阳辐射与地表温度关系式参数

Table 1 Parameters for the relation between solar radiation and surface temperature in plateau sections

城市	上午			下午		
	a	b	R^2	a	b	R^2
贵阳	19.874	0.027	0.996	24.243	0.023	0.999
昆明	15.985	0.025	0.988	21.126	0.019	0.995

由表 1,贵阳和昆明上、下午拟合结果的决定系数 R^2 均在 0.988 以上,说明拟合公式能比较真实反映平均日内数据点的变化规律,同时,也可得出结

论,太阳辐射强度与地表温度在一天的上、下午时段呈显著的正的线性关系。

2.1.2 平原地区 以福州地区为例,上、下午时段太阳辐射和地表温度关系拟合曲线如图 3 所示。

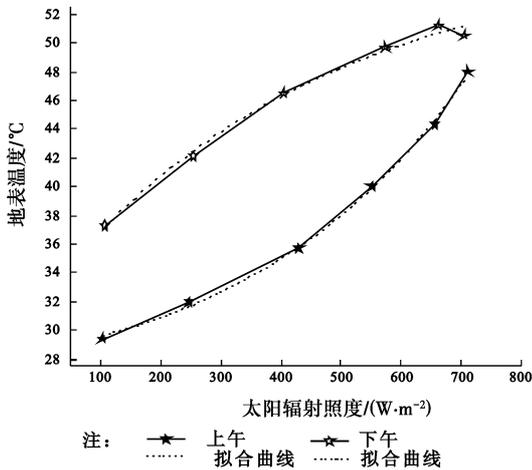


图 3 福州太阳辐射和地表温度关系拟合曲线图

Fig. 3 Fitting curve about the relationship between solar radiation and surface temperature for Fuzhou

从图 3 可以看出,上、下午分别呈凹和凸的曲线型随动变化规律,说明上午时段,随着太阳辐射的逐渐增强,地表温度随太阳辐射强度变化的变化率越来越大;下午时段,随着太阳辐射的减弱,地表温度随太阳辐射强度变化的变化率也越来越大。这可能是由于平原地区海拔低,且处于西南地区,受西南沿海湿润的海洋气候影响,地表相对高海拔的高原地区较为湿润,随太阳辐射的增强,地表温度升高,地表水分蒸发,使得地表热容性变小,地表温度变化率随太阳辐射增强而变大。相反,当太阳辐射减弱时,地表温度降低,地表附近水汽冷凝被地表吸附,使得地表热容性逐渐变大,地表温度变化率随太阳辐射减弱而变大。而高原地区海拔较高,空气密度小,且受海洋气候影响较小,故地表较为干燥,地表温度变化对地表热容性影响较小,故上、下午时段地表温度随太阳辐射变化的变化率基本保持不变。这也说明了高原地区地表温度与太阳辐射呈直线型随动性变化关系的原因。

拟合得到的平原地区上、下午时段地表温度与太阳辐射关系式分别如式(3)、(4)所示:

$$t_{s,\tau} = a + b \times e^{I_{\tau}/c} \quad (2)$$

$$t_{s,\tau} = a - b \times c^{I_{\tau}} \quad (3)$$

式中: $t_{s,\tau}$ 为任意时刻地表温度,°C; I_{τ} 为任意时刻太阳辐射照度, W/m^2 ; a 、 b 、 c 为拟合常量,各参数值如表 2 所示。

表 2 平原地区地表温度与太阳辐射关系式参数

Table 2 Parameters for the relation between solar radiation and surface temperature in plain areas

城市	时段	a	b	c	R^2
海口	上午	18.610	9.925	769.711	0.999
	下午	69.074	37.722	0.999	0.998
广州	上午	18.535	7.501	815.655	0.995
	下午	41.173	11.026	0.996	0.965
南宁	上午	24.623	1.069	235.640	0.976
	下午	45.900	16.384	0.997	0.997
福州	上午	23.758	4.269	412.330	0.997
	下午	55.655	24.073	0.998	0.995
长沙	上午	21.757	2.962	401.554	0.991
	下午	47.822	18.349	0.998	0.985
武汉	上午	25.321	1.409	259.334	0.992
	下午	56.853	23.069	0.998	0.999
上海	上午	24.345	1.245	301.764	0.987
	下午	41.665	12.475	0.997	0.986
杭州	上午	24.080	2.964	383.228	0.992
	下午	53.418	23.371	0.998	0.999
重庆	上午	21.602	1.871	258.050	0.992
	下午	58.989	27.958	0.999	0.990
南昌	上午	24.529	1.687	302.175	0.999
	下午	54.141	20.193	0.997	0.972
南京	上午	24.345	2.646	352.099	0.976
	下午	54.482	24.160	0.998	0.999

由表 2 中拟合公示的决定系数 R^2 可知, R^2 大小均在 0.972 以上,说明拟合公式能比较真实地反映平均日内太阳辐射与地表温度的随动性变化规律。

2.2 地表与空气温差随时间的变化关系

以南宁地区为例,平均日内地表与空气温差随时间变化曲线如图 4 所示。由图可以看出,昼间地表与空气温差先逐渐增大,达到最大温差后再逐渐减小。另外可以发现,夏季夜间地表与空气温差为负值,昼间为正值,即夜间地表温度低于室外气温,昼间地表温度高于室外气温。这与太阳辐射强度的逐时变化规律相一致。随着太阳辐射强度不断增大,地表与空气温差越来越大,随着太阳辐射减弱,地表与空气温差越来越小,夜间地表与空气温差变化幅度不大,说明太阳辐射对地表与空气温差有着显著的影响,且地表温度的变化幅度比室外气温的变化幅度要大得多。

研究根据地表与空气温差的日变化规律并采用 OriginPro8.5 中多个变化曲线与之接近的函数对数据点进行了拟合,并对各个函数拟和优度进行分析比较。结果表明,Asym2sig 分布函数与地表与空气温差的日变化曲线最为吻合,能比较真实地表征其日变化规律。Asym2Sig 函数表达式^[20]为

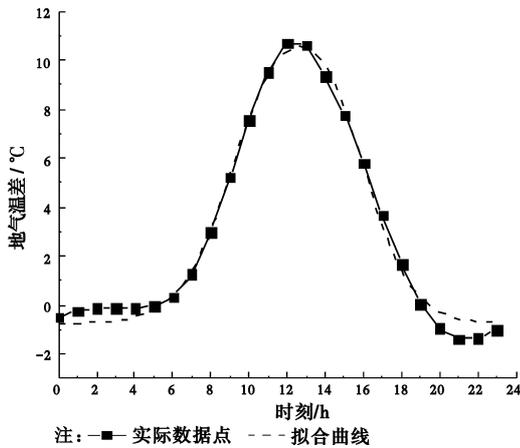


图 4 南宁地表与空气温差随时间变化拟合曲线图

Fig. 4 Fitting curve about the difference between the surface temperature and air temperature changing over time for Nanning

$$y = y_0 + A \left(1 + e^{-(x-x_c+\omega_1/2)/\omega_2} \right)^{-1} \times \left(1 - \left(1 + e^{-(x-x_c+\omega_1/2)/\omega_3} \right)^{-1} \right) \quad (4)$$

其中： x 和 y 分别为自变量和因变量； y_0 为偏移量； A 为振幅； x_0 为水平方向的中心点； $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为宽度参量，且 ω_2 和 ω_3 决定峰值位置。

由此得到的地表与空气温差的通式为

$$\Delta t_\tau = A_0 + A_1 \frac{1}{1 + e^{\frac{\tau-\tau_c+\omega_1/2}{\omega_2}}} \left(1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{\tau-\tau_c-\omega_1/2}{\omega_3}}} \right) \quad (5)$$

式中： Δt_τ 为 1 d 中白天时段任意时刻的地表与空气温差， $\Delta t_\tau = t_{s,\tau} - t_{a,\tau}$ ， $^\circ\text{C}$ ； τ 为任意时刻，h； $A_0, A_1, \omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为拟合常量。

表 3 地表与空气温差随时间变化关系式参数

Table 3 Parameters for the relation about the difference between surface temperature and air temperature changing over time

城市	A_0	A_1	τ_c	ω_1	ω_2	ω_3	R^2
贵阳	-1.715	15.900	13.710	6.650	1.531	1.182	0.997
昆明	-1.650	13.666	13.819	6.520	1.337	1.201	0.997
海口	-0.555	19.525	14.086	6.369	1.543	1.261	0.994
广州	-1.653	36.351	13.646	0.000	2.809	1.656	0.986
南宁	-0.761	13.032	12.585	6.810	1.345	1.249	0.989
福州	-3.294	73.783	15.835	0.000	3.863	1.621	0.994
长沙	-3.184	55.612	14.232	0.000	3.412	1.612	0.987
武汉	-2.681	70.969	13.977	0.000	3.058	1.754	0.992
上海	-3.383	44.386	14.741	0.000	4.263	1.684	0.995
杭州	-3.994	60.848	15.949	0.000	4.351	1.629	0.995
重庆	-2.112	19.242	12.661	7.150	1.317	1.214	0.990
南昌	-1.435	25.625	12.753	6.747	1.665	1.327	0.992
南京	-3.205	57.997	15.796	0.000	4.027	1.616	0.995

拟合结果显示，地表与空气温差随时间变化相关系数 R^2 不小于 0.986，说明拟合公式能较显著地反映地表与空气温差在时间序列上的变化规律。

2.3 室外气温与太阳辐射的随动性关系

由以上拟合结果，对于高原地区，室外气温与太阳辐射随动性变化关系式为

$$I_\tau = \frac{t_{s,\tau} - a}{b} = \frac{t_{a,\tau} + \Delta t_\tau - a}{b} \quad (6)$$

对于平原地区，上、下午时段室外气温与太阳辐射随动性变化关系式分别如式(7)、式(8)所示

$$I_\tau = c \ln \frac{t_{a,\tau} + \Delta t_\tau - a}{b} \quad (7)$$

$$I_\tau = \log_c \frac{a - (t_{a,\tau} + \Delta t_\tau)}{b} \quad (8)$$

式(6)及式(7)、(8)中 a, b, c 等参数由表 1 和表 2 所示。

由式(5)可知，任意时刻的地表与空气温差 ΔT_τ 可由该时刻的时刻数确定。故昼间任意时刻太阳辐射照度值可由该时刻的时刻数及室外气温确定。可得出结论，对于高原地区，太阳辐射是室外气温与时间的一次函数，平原地区，太阳辐射是室外气温与时间的对数函数。

3 结论

从太阳辐射、地表温度和室外气温 3 种气象参数出发，综合考虑各方面影响因素，通过回归分析方法，得到了太阳辐射与地表温度及地气温差随时间变化的动态拟合关系，进而建立了室外气温与太阳辐射强度的随动性关系，并得出以下几点结论：

1) 高原地区，太阳辐射与地表温度在上、下午均呈直线型的随动变化规律，二者上、下午随动性变化曲线斜率相近但并不相等，上午曲线的斜率要略大于下午的斜率。

2) 平原地区，在上、下午时段太阳辐射与地表温度之间分别呈凹的和凸的曲线型随动变化规律。

3) 夜间地表温度低于室外气温，昼间地表温度高于室外气温，且随太阳辐射强度不断增大，地表与空气温差也越来越大。

4) 某一时刻太阳辐射照度值大小可由室外气温及该时刻的时刻数确定。对于高原地区，太阳辐射是室外气温与时间的一次函数，平原地区，太阳辐射是室外气温与时间的对数函数。

参考文献:

- [1] 刘加平. 关于室外综合温度[J]. 西安冶金建筑学报, 1993, 25(2): 175-178.
Liu J P. On the comprehensive temperature of outdoors [J]. Journal of xi'an institute of metallurgical & construction. 1993, 25(2): 175-178. (in Chinese)
- [2] Chen J L, Li G S, Xiao B B. Assessing the transferability of support vector machine model for estimation of global solar radiation from air temperature[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 318-329.
- [3] Bristow K L, Campbell G S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature [J]. Agriculture and Forest Meteorology, 1984, 31(2):159-166.
- [4] Li M F, Li F, Liu H B, et al. A general model for estimation of daily global solar radiation using air temperatures and site geographic parameters in Southwest China[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2013, 92: 145-150.
- [5] Fletcher A L, Moot D J. Estimating daily solar radiation in New Zealand using air temperatures [J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2007, 35(1): 147-157.
- [6] Liu X Y, Mei X R, Li Y Z, et al. Evaluation of temperature-based global solar radiation models in China [J]. Agriculture and Forest Meteorology, 2009, 149(9): 1433-1446.
- [7] Bandyopadhyay A, Bhadra A, Raghuvanshi N S . Estimation of monthly solar radiation from measured air temperature extremes [J]. Agriculture and Forest Meteorology, 2008, 148(11):1707-1718.
- [8] Chineke T C. Equation for estimating global solar radiation in data Sparse regions[J]. Renewable Energy, 2007, 33(4): 827-831.
- [9] Daut I, Irwanto M, Irwan Y M, et al. Combination of Hargreaves method and linear regression as a new method to estimate solar radiation in Perlis, Northern Malaysia [J]. Solar Energy, 2011, 85(11):2871-2880.
- [10] Ibrahim S, Daut I, Irwana Y M ,et al. Linear regression model in estimating solar radiation in perlis [J]. Energy Procedia, 2012, 18:1402-1412.
- [11] Rehman S, Mohandesb M, Artificial neural network estimation of global solar radiation using air temperature and relative humidity[J]. Energy Policy, 2008, 36(2): 571-576.
- [12] Boscha J L, Lópezb G, Batllesa F J. Daily solar irradiation estimation over a mountainous area using artificial neural networks [J]. Renew Energy, 2008, 33(7):1622-1628.
- [13] Benghanem M , Mellit A, Alamria S N. ANN-based modelling and estimation of daily global solar radiation data; a case study [J]. Energy Convers Manage, 2009, 50: 1644-1655
- [14] Chen J L, Liu H B, Wu W. Estimation of monthly solar radiation from measured temperatures using support vector machines-a case study [J]. Renewable Energy, 2011, 36(1):413-420.
- [15] Wu W, Liu H B. Assessment of monthly solar radiation estimates using Support vector machines and air temperatures [J]. International Journal of Climatology, 2012, 32(2):274-285.
- [16] Zeynab R, Mahmoud O, Alireza K, et al. Potential of radial basis function based support vector regression for global solar radiation prediction [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014; 39:1005-1011.
- [17] 王燕, 吕达亿. GMS 5 反演中国几类典型下垫面晴空地表温度的日变化及季节变化 [J]. 气象学报, 2005, 63(6):957-968.
Wang Y, Lv D Y. Diurnal and seasonal variation of clear-sky land surface temperature of several representative land surface types in China retrieved by GMS 5 [J]. Acta meteorologica sinica, 2005, 63(6):957-968. (in Chinese)
- [18] 赵少华, 秦其明, 张峰, 等. 基于环境减灾小卫星(HJ-1B)的地表温度单窗反演研究 [J]. 2011, 31(6): 1552-1556.
Zhao S H, Qin Q M, Zhang F, et al. Research on using a mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from chinese satellite for environment and natural disaster monitoring (HJ-1B) Data [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(6): 1552-1556. (in Chinese)
- [19] 刘晨晨. 风云卫星地表温度反演及其在霜冻检测中的应用 [D]. 成都:电子科技大学, 2013.
Liu C C. A method for FengYun satellite land surface temperature retrieval and its availability for frost monitoring [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China. 2013. (in Chinese)
- [20] 杨毅, 唐刚, 宋丽建, 等. 分形基底上受限固-固模型动力学性质的数值模拟研究 [J]. 物理学报, 2014, 63(15): 10501-1-7.
Yang Y, Tang G , Song L J, et al. Numerical simulations of dynamic properties of the restricted solid-on-solid model on fractal substrates [J]. Acta Physica, Sinica, 2014, 63(15):10501-1-7. (in Chinese)