

DOI:10.11918/202101123

夏热冬暖地区室外平均辐射温度估算修正

唐培傑^{1,2}, 李 琼^{1,2}

(1. 华南理工大学 建筑学院, 广州 510640; 2. 亚热带建筑科学国家重点实验室(华南理工大学), 广州 510640)

摘 要: 为解决目前常用评估室外平均辐射温度(Mean radiant temperature, MRT)的黑球温度计法的观测缺陷, 提高夏热冬暖地区室外辐射热环境估算精度, 提出了一种针对黑球温度计法估算 MRT 的直接修正方法。首先, 在广州采用六向辐射法对3种不同下垫面场地的辐射特征进行了观测和分析, 明确了下垫面反照率对辐射环境的影响。其次, 根据六向辐射法和黑球温度计法的估算结果和统计分析, 确定了 50、150 mm 规格黑球温度计合适的响应时间分别为 5、20 min。最后, 验证了直接修正方法的地区适用性。以观测方法估算 MRT 的统计结果为依据, 构建了不同气候条件下两种规格黑球温度计法的多项式修正模型, 在相应天气条件验证了模型准确性。研究结果表明: 直接修正方法适用于相同气候条件区域; 根据不同天气条件回归函数修正后的黑球温度计法 MRT 与六向辐射法 MRT 之间的拟合方程、决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 均得到较大程度改善, 两种规格黑球的偏差范围分别改善 61.35% 和 68.71%。本研究可为广州为代表的夏热冬暖地区室外辐射环境估算提供理论依据。

关键词: 夏热冬暖地区; 室外平均辐射温度; 响应时间; 六向辐射法; 黑球温度计

中图分类号: TU111; TU119 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2022)06-0128-10

Correction of outdoor mean radiant temperature estimation in hot summer and warm winter zone

TANG Peijie^{1,2}, LI Qiong^{1,2}

(1. School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science (South China University of Technology), Guangzhou 510640, China)

Abstract: A direct correction method for estimating the outdoor mean radiant temperature (MRT) with black globe thermometer method was proposed to solve the observation defects of the traditional black globe thermometer method and improve the estimation accuracy of the outdoor radiant environment in hot summer and warm winter zone. First, the six-directional radiation method was used to observe and analyze the radiation characteristics of three different underlying surface sites in Guangzhou, and the effect of the underlying surface albedo on the radiation environment was clarified. Then, the estimation results of the six-directional radiation method and the black globe thermometer method were compared, and the suitable response periods of 50 mm and 150 mm black globe thermometers were determined to be 5 min and 20 min respectively. Finally, the regional applicability of the direct correction method was verified. On the basis of the statistical results of the two observation methods for estimating MRT, a polynomial correction model was constructed for two specifications of the black globe thermometer method under different weather conditions, and the accuracy of the model was verified in the corresponding weather. Research results show that the direct correction method was suitable for regions with the same climatic conditions, and the fitting equation, the coefficient of determination (R^2), and the root mean square error (RMSE) between the six-directional radiation method and the black globe thermometer method modified according to the regression function of different weather conditions were greatly improved. The deviation ranges of the two specifications of black globe thermometers were improved by 61.35% and 68.71% respectively. This study can provide a theoretical basis for the estimation of outdoor radiation environment in hot summer and warm winter zone represented by Guangzhou.

Keywords: hot summer and warm winter zone; outdoor mean radiant temperature; response time; six-directional radiation method; black globe thermometer

收稿日期: 2021-01-27
基金项目: 国家重点研发计划(2020YFE0200300); 国家自然科学基金(51938006, 51778237); 广州市科技计划项目(2020020030261)
作者简介: 唐培傑(1990—), 男, 博士研究生;
李 琼(1980—), 女, 研究员, 博士生导师
通信作者: 李 琼, arliqiong@scut.edu.cn

城市室外空间热环境在全球变暖和城市热岛的背景下正在变得愈发恶劣, 预计到 21 世纪末, 全球平均地表气温根据不同的排放情境和气候模式将上升 0.3~4.8℃^[1]。在密集的城市区域, 由于下垫面结构的改变、交通排热和建筑排热等因素的影响, 城

市热环境逐渐恶化,“热岛现象”及其负面作用日渐凸现,而湿热地区则面临更为严峻的室外热环境挑战。

基于上述背景,关于城市室外空间热环境的研究愈发得到关注,许多学者致力于研究室外热环境的改善措施,研究要素以植被利用、下垫面物性、水体利用、城市形态为主^[2-3],而这些措施都将以改变温度、湿度、热辐射、风速环境作为实际手段。在气象参数中,热辐射强烈影响着室外的舒适性,现有研究表明人体与环境之间的热辐射交换对热舒适的影响占到 50%^[4]。

平均辐射温度(Mean radiant temperature, MRT)是评价热辐射的一种重要手段。MRT 被定义为“假想环境的均匀温度,其中人体的辐射热传递等于实际的非均匀环境的辐射热传递”^[5]。最初,MRT 是用来表征居住者或工人与室内热源之间的辐射热交换^[6-7],随着时间的推移,MRT 成为了一个室内环境中的均匀环境参数^[5],目前 MRT 已经成为计算热舒适指标的关键参数,如生理等效温度(Physiological equivalent temperature, PET)和通用热气候指数(Universal thermal climate index, UTCI)均需要 MRT 作为输入参数进行计算^[8-9]。室外 MRT 的研究仅有 20 年的历史^[10],与室内环境不同,室外由于暴露在长波辐射和短波辐射的共同作用下,导致显著的辐射不对称性。由于 MRT 的定义和测量方法的复杂性,使得室外 MRT 较难得到准确测定。在目前的观测方法中,六向辐射法是相对来说最为精确的^[11],但由于其需要的仪器较为复杂和昂

贵,因此现有室外热环境研究文献中,最为常见的 MRT 观测方法是球形温度计法。球形温度计方法相对而言最为简单和经济,但根据是球体热平衡间接获得 MRT,而非通过辐射通量密度直接计算,其观测缺陷在过去的研究文献中已经得到证实^[12-15]。

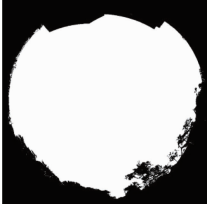
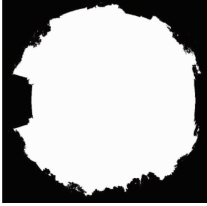
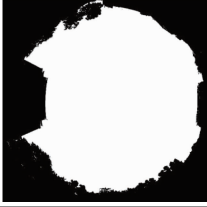
在中国,以广州为代表的夏热冬暖地区,受到城市热岛效应显著影响,关于室外热环境和热舒适的研究在持续开展^[16-20]。以往研究中,MRT 的观测方式大多采用了黑球温度计法,但并未对其准确性进行分析和深入探讨。因此,在该地区对室外 MRT 观测方法进行准确性研究对于该地区乃至中国其他气候区的室外热环境和热舒适的评估具有重要意义和参考价值。

本文研究的目的是通过六向辐射法表征广州地区不同下垫面的热辐射情况,比较通过六向辐射法和黑球温度计法估算的 MRT 差异,确定不同规格黑球合适的响应时间,基于观测数据提出黑球温度计法 MRT 的修正方程,以适用于夏热冬暖地区室外空间。

1 观测地点和方法

广州(北纬 23°07',东经 113°15'),在中国的气候区划中属于夏热冬暖地区,是典型的湿热气候城市。本文在不同日期分别选择广州华南理工大学校园内 3 处开敞空间(天空可视因子 SVF>0.9)进行了不同下垫面情况下的热辐射情况测试,包括文理楼平台、励吾楼草坪、励吾楼广场,观测场地信息见表 1,鱼眼图像和 SVF 使用佳能 Cannon EOS 60D 单反相机、Sigma EX-DC 4.5 mm 鱼镜头观测并计算。

表 1 观测场地信息
Tab. 1 Attributes of observation locations

观测场地	观测日期	SVF	下垫面材质	鱼眼图像	测点照片
场地 A: 文理楼平台	2020-10-08(多云)	0.963	木塑复合材料		
	2020-10-09(多云)				
	2020-10-27(晴,少云)				
场地 B: 励吾楼草坪	2020-10-10(晴天)	0.948	草地		
	2020-10-11(晴天)				
场地 C: 励吾楼广场	2020-10-12(晴天)	0.904	混凝土铺砖		

为了研究目的,在2020年10月8日~10月12日和2020年10月27日进行了为期6 d的微气候和辐射环境测量,观测物理量包括空气温度 t_a 、相对湿度RH、风速 v_a 、黑球温度 t_g ,以及6个方向的长、短波辐射通量密度,相应的仪器信息见表2,仪器记录周期为1 min,所有仪器均已通过厂家校准。通过计算,观测期间的日出至日落时段为06:20~18:00,

因此现场的观测时间与该时段相同,以反映完整白天的辐射情况。通过校园内气象站和太阳跟踪系统获得了观测期间的气候条件,仪器信息见表2。图1显示了空气温度、水平面总辐射、法向直射辐射的变化情况。其中,2020-10-08为多云天气,2020-10-09为多云转晴,2020-10-10日~2020-10-12日为晴天,2020-10-27为晴天少云。

表 2 仪器信息
Tab. 2 Details of instruments

参数	空气温度 $t_a/^\circ\text{C}$	相对湿度 RH/%	风速 $v_a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	黑球温度 $t_g/^\circ\text{C}$ (直径 150 mm)	黑球温度 $t_g/^\circ\text{C}$ (直径 50 mm)
设备	Deltaohm-HD2003 温度传感器 Pt100	Deltaohm-HD2003 相对湿度传感器 H6100	Deltaohm-HD2003 三维超声波风速计	Deltaohm-TP875. I 黑球温度计 $\varnothing 150\text{ mm}$, Pt100	Deltaohm-TP3276. 2 黑球温度计, Pt100
量程	-40 ~ 60	5 ~ 98	0 ~ 70	-30 ~ 120	-10 ~ 100
精度	± 0.2	± 2.5	$\pm 1\%$ 的读数	± 0.15	± 0.1

参数	长波辐射通量密度 $K/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	短波辐射通量密度 $L/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	气象站:空气温度/ $^\circ\text{C}$	气象站:水平面太阳总辐射, 法向直射辐射/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$
设备	Deltaohm-LPNET14	四分量辐射计	CS215	Kipp & Zonen SOLYS 2 太阳跟踪系统
量程	短波辐射计:0 ~ 2 000	长波辐射计: -300 ~ 300	-40 ~ 70	短波辐射计:0 ~ 4 000 直接辐射计:0 ~ 4 000
精度	<5%	<10%	± 0.3	<1% <1%

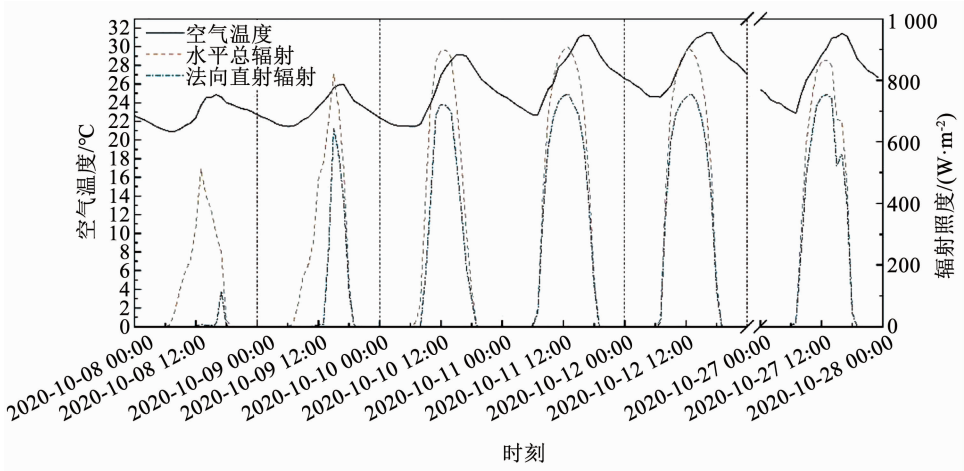


图 1 观测期间空气温度和辐射照度情况

Fig. 1 Air temperature and irradiance during observation period

本次观测采用六向辐射法、黑球温度计法在选定场地对MRT进行观测。观测仪器如图2所示,将三组四分量辐射计固定于离地1.1 m高度处,即成人重心的平均高度^[21],分别观测上、下、东、南、西、北6个方向的长、短波辐射通量密度,用于计算采用

六向辐射法获得的MRT结果;将150 mm和50 mm规格的黑球固定于离地1.1 m高度处,用于计算黑球温度计法获得的MRT结果。设备位置置于场地中央,确保不受周围构筑物阴影影响。



图2 现场观测仪器装置

Fig.2 Instruments for field observation

本文采用 Origin 进行实验结果的处理和分析。根据统计学原理,回归方程反映横坐标与纵坐标变量数据的关系,拟合的线性直线与 $y=x$ 越接近,则两者数据越一致; R^2 为回归函数对观测值的拟合程度,值越接近 1,拟合程度越好;均方根误差 RMSE 为数据的离散程度,值越低,离散程度越小。

2 结果分析

2.1 六向辐射法估算 MRT

六向辐射法,又称积分辐射法(Integral radiation measurement, Irm),采用六向辐射法对平均辐射温度进行计算,通过确定人体的平均辐射通量密度 S_{str} 确定 MRT。 S_{str} 可通过 6 个方向的短波辐射通量密度 K_i 和长波辐射通量密度 L_i 与人体和周围表面之间的视角因子 F_i 相乘:

$$S_{str} = \alpha_k \sum_i^6 K_i F_i + \varepsilon_p \sum_i^6 L_i F_i \tag{1}$$

式中: α_k 为短波辐射吸收系数,涉及到太阳辐射时,根据 ASHARE 标准设为 $0.7^{[21]}$,代表穿中间色服装的人体; ε_p 为人体辐射率,根据 Fanger^[22] 研究结果通常设为 0.97;视角因子 F_i 取决于位置和方向, Fanger^[22] 研究表明,对站立或行走的人,东、南、西、北 4 个方向辐射通量密度的 F_i 设为 0.220,上、下辐射通量密度的 F_i 设为 0.060。渡邊慎一^[23] 曾表示这样的计算方法忽略了室外太阳直射辐射的方向性,但 Fanger^[22] 的研究和 VDI 3787 标准的陈述表明^[22,24],上述 F_i 的数值是通过计算太阳直射辐射的投影因子作为量化依据的,因此本次估算仍采用上述数值进行计算。此外,若研究对象为球体,则所有方向 F_i 均为 0.167。获得平均辐射通量密度 S_{str} 后,

根据 Stefan-Boltzmann 定律,可由下式计算得到平均辐射温度 t_{mrt} :

$$t_{mrt} = \sqrt[4]{S_{str}/\varepsilon_p \sigma} - 273.15 \tag{2}$$

式中, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, 为 Stefan-Boltzmann 常数。

通过上述公式,计算获得了在 2020-10-08 多云条件下场地 A 的 t_{mrt} 以及在 2020-10-11、2020-10-12、2020-10-27 晴天条件下 3 种不同下垫面场地的 t_{mrt} , 如图 3 所示。

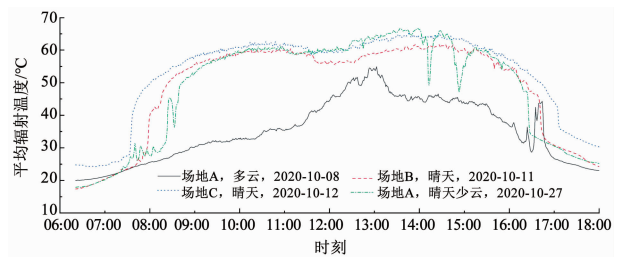


图3 不同下垫面场地的平均辐射温度对比

Fig.3 Comparison of MRT of different underlying surfaces

2020-10-08 为多云天气,场地 A 下垫面为木塑复合材料,此时 t_{mrt} 最大值在 13:03,为 $54.9\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2020-10-11 为晴天,场地 B 下垫面为草地, t_{mrt} 最大值出现在下午 13:55,为 $61.8\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2020-10-12 为晴天,场地 C 下垫面为混凝土铺砖, t_{mrt} 最大值出现在下午 13:46,为 $65.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2020-10-27 为晴天少云,下午时段由于云层遮挡 t_{mrt} 出现两次较大波动,场地 A 下垫面为木塑复合材料, t_{mrt} 最大值出现在下午 13:58,为 $66.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

结果表明,在多云天气条件下,各方向辐射通量密度基本均在中午达到最大值,平均辐射温度最大值出现在 13:00 左右。在晴天条件下, t_{mrt} 在正午时段出现一段局部最小值,根据 Thorsson 等^[13] 研究,其原因可能在于仪器正交放置时,东、西向短波辐射计在正午时段处于较高入射角条件,东、西向直射辐射误差较大,使得短波辐射通量密度有所低估。各场地最大值出现在下午,3 种下垫面条件下最大值时刻均在 13:50 左右;草地相较混凝土铺砖平均辐射温度最大值低 $3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,相较木塑复合材料平均辐射温度最大值低 $4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

根据水平方向布置的四分量净辐射计测得的太阳反射辐射与太阳总辐射之比得到晴天时不同场地的反照率情况,如图 4 所示。由于日射辐射计在太阳高度角为 10° 以下时方向响应会产生偏差,反照率误差较大^[13],因此采用 09:00 ~ 16:00 时的数据平均进行对比,此时地表反照率比较稳定。结果表

明,不同下垫面场地由于反照率不同,导致对太阳辐射的吸收率不同,表面温度有所差异,最终在辐射环境中表征为 t_{mrt} 的变化差异:草地的反照率最高(0.19),吸收率最低,表面温度相对最低,因此其 t_{mrt} 的最大值相对最低;木塑复合材料反照率最低(0.12),吸收率最高,表面温度相对最高,因此其 t_{mrt} 的最大值相对最高;混凝土铺砖反照率则(0.16)介于两者之间。

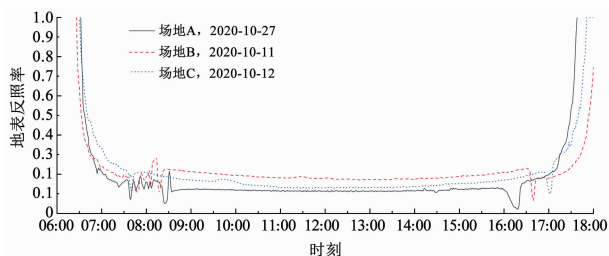


图 4 晴天条件下不同下垫面的反照率情况

Fig. 4 Albedo of different underlying surfaces under clear weather conditions

2.2 黑球温度计法估算 MRT

黑球温度计法估算获得 t_{mrt} 本质是辐射换热和对流换热间的平衡结果。根据 ISO 7726 标准^[25],有

$$t_{\text{mrt}} = \left[(t_g + 273.15)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 \times v_a^{0.6}}{\varepsilon_g \times D^{0.4}} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273.15 \quad (3)$$

式中: t_g 为黑球温度, $^{\circ}\text{C}$; v_a 为风速, m/s ; ε_g 为黑球发射率; D 为黑球直径, m ; t_a 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

根据上述公式和观测的风速、黑球温度、空气温度数据获得了基于黑球温度计法估算的平均辐射温度 $t_{\text{mrt}}(\text{tg})$ 。由于本次观测采用了 50、150 mm 两种规格的黑球温度计,因此获得了两种规格计算得到的平均辐射温度 $t_{\text{mrt}}(\text{tg}50)$ 、 $t_{\text{mrt}}(\text{tg}150)$ 。将两者分别与六向辐射法获得的平均辐射温度 $t_{\text{mrt}}(\text{irm})$ 进行比较,以考虑黑球温度计法估算的偏差。图 5 显示了多云天气和晴天条件下不同方法获得的 t_{mrt} 以及空气温度 t_a 、黑球温度 t_g 。如图 5(a)、(b)所示,由于其受到对流换热项中风速波动变化的影响, $t_{\text{mrt}}(\text{tg})$ 相较 $t_{\text{mrt}}(\text{irm})$ 波动较大。多云天气下, $t_{\text{mrt}}(\text{tg})$ 相较 $t_{\text{mrt}}(\text{irm})$ 全天均有一定程度高估,且两种规格黑球获得的 $t_{\text{mrt}}(\text{tg})$ 趋势基本一致。晴天条件下,正午时段左右 $t_{\text{mrt}}(\text{tg})$ 相较 $t_{\text{mrt}}(\text{irm})$ 的高估程度较大;在上午太阳高度角迅速增加的时段,50 mm 黑球 $t_{\text{mrt}}(\text{tg}50)$ 与 $t_{\text{mrt}}(\text{irm})$ 差异较小,而 150 mm 黑球 $t_{\text{mrt}}(\text{tg}150)$ 相较 $t_{\text{mrt}}(\text{irm})$ 有所低估;在下午太阳高度角迅速减小的时段,50 mm 黑球温度计法低估了 t_{mrt} ,而 150 mm 黑球温度计法则高估了 t_{mrt} 。结

果表明,黑球受短波辐射吸收率影响,在辐射环境变化率较小的条件下,对 t_{mrt} 有所高估,而在辐射环境变化率较大的条件下,由于需要时间达到平衡,不同规格的黑球响应速度具有差异,150 mm 黑球响应时间相对较长,表征为 $t_{\text{mrt}}(\text{tg}150)$ 升温 and 降温速度较慢,导致与 50 mm 黑球结果 $t_{\text{mrt}}(\text{tg}50)$ 在太阳高度角迅速变化的时段具有差异。

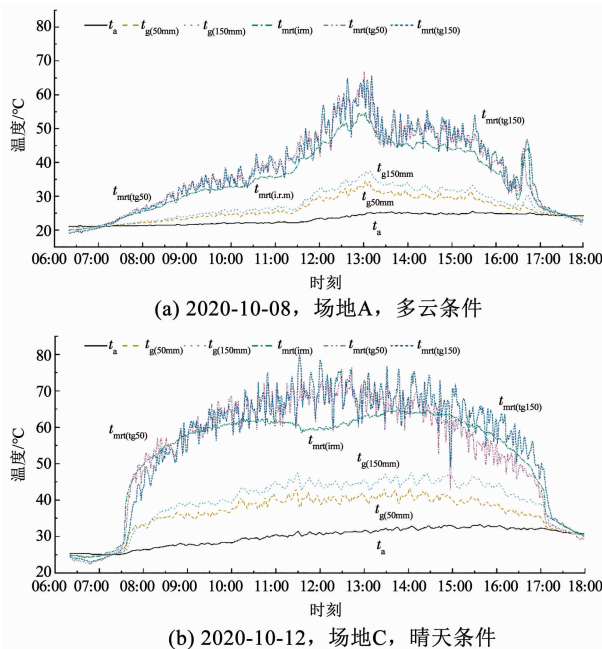


图 5 不同天气条件下六向辐射法和黑球温度计法估算的 MRT 比较

Fig. 5 Comparison of MRT estimated by six-directional radiation method and black globe thermometer method under different weather conditions

由于不同规格黑球达到热平衡所需的响应时间不同,将两种规格黑球的估算结果分别取 1、5、10、20、30 min 平均,与六向辐射法结果比较,以探寻各自合适的时间平均值,相应结果如图 6、7 所示。图中线性拟合公式的结果表明,增加时间步长后, $t_{\text{mrt}}(\text{tg})$ 与六向辐射法计算得到的 $t_{\text{mrt}}(\text{irm})$ 差异减小。此外,时间步长增加可以提高拟合度并降低均方根误差,即降低数据离散程度,这在一定程度上可以降低黑球温度计法因风速而造成的波动。根据图 6 的拟合结果,50 mm 黑球在采用 5 min 平均值时 $t_{\text{mrt}}(\text{tg}50)$ 与 $t_{\text{mrt}}(\text{irm})$ 的差异和离散程度显著减小,采用 10 min 平均后只是在拟合度和均方根误差上有稍微的改善。根据图 7 的拟合结果,150 mm 黑球相应最合适的步长为 20 min 平均。因此,在后续分析中 50 mm 规格的黑球温度计法采用了 5 min 平均,150 mm 规格的黑球温度计法采用了 20 min 平均。

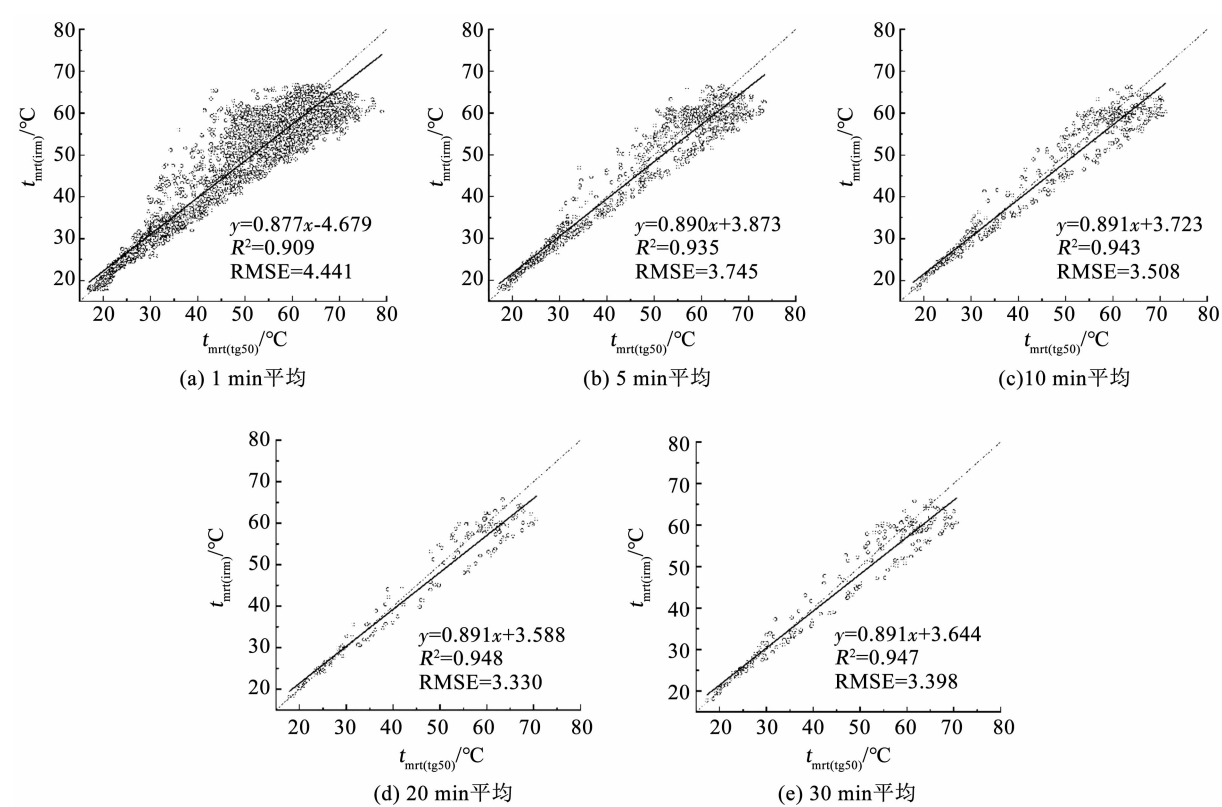


图 6 采用不同时间平均的 50 mm 黑球温度计法与六向辐射法估算 MRT 差异

Fig. 6 MRT difference estimated by 50 mm black globe thermometer method and six-directional radiation method with different time averages

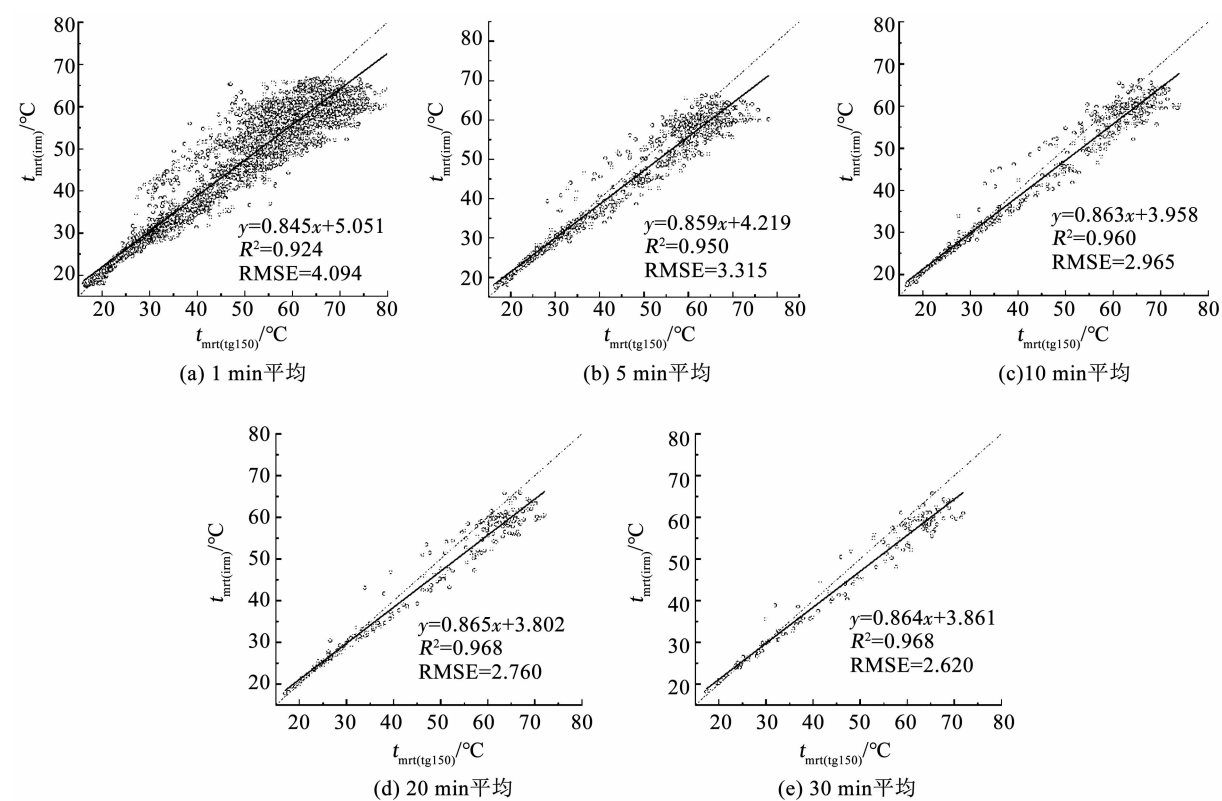


图 7 采用不同时间平均的 150 mm 黑球温度计法与六向辐射法估算 MRT 差异

Fig. 7 MRT difference estimated by 150 mm black globe thermometer method and six-directional radiation method with different time averages

3 平均辐射温度估算修正

在球型温度计准确性的既有研究中,一些学者

针对涂灰的铜球或树脂球进行了对流系数项的修正。然而,黑球温度计的结果偏差主要是由于辐射项与人体实际差异的影响,因此基于对流系数项进

行修正并不合适。Kántor 等^[26]曾基于台湾地区的观测数据对直径 150 mm 标准的黑球温度计法进行了多项式修正,针对所有天气条件的直接修正方程如下:

$$t_{\text{mrt(irm)}} = -3.849 + 1.255t_{\text{mrt(tg)}} - 4.028 \times 10^{-3}t_{\text{mrt(tg)}}^2$$

(4)

式中, $t_{\text{mrt(irm-sp)}}$ 为六向辐射法计算获得的平均辐射温度,但视角因子 F_i 的6个方向均取为0.167,表示研究对象为球体。Kántor 等^[26]研究表明在不同气候

地区,修正方程的准确性可能有所差异,在匈牙利地区,其修正方程改善程度并不显著。将 Kántor 修正方程代入本次观测结果,以验证其准确性。图 8 表明,采用修正方程后, $t_{\text{mrt(tg)}}$ 准确性与修正前相比均有所改善,且 150 mm 规格黑球的改善效果相较 50 mm 黑球更佳,这可能是由于 Kántor 的研究中采用的同样是 150 mm 标准黑球。由于台湾地区同属夏热冬暖气候区范围,该结果表明直接修正方法对相同气候环境具有适用性。

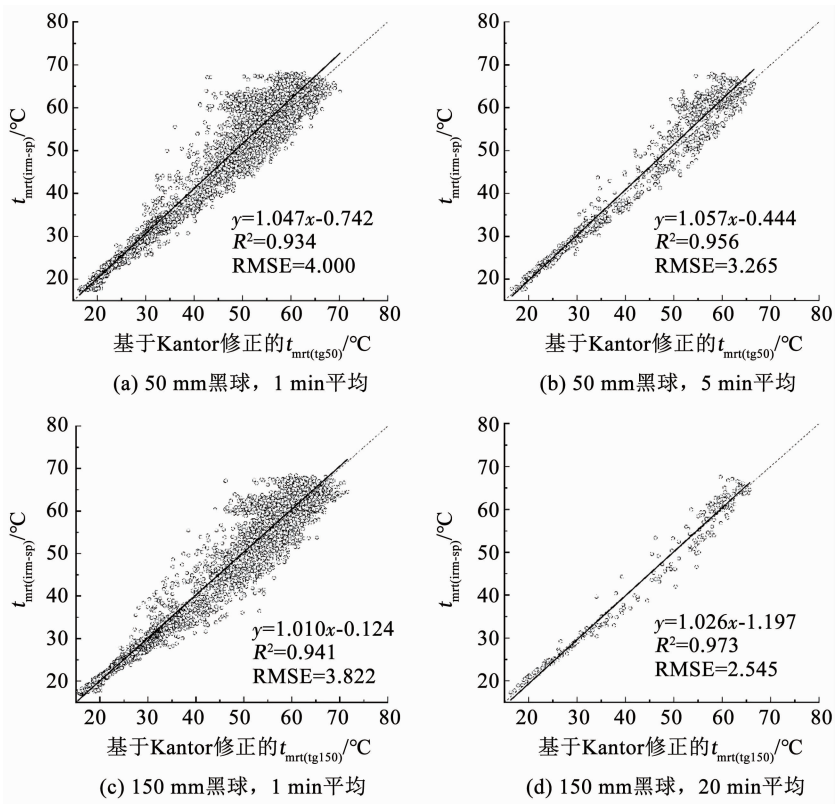


图 8 基于 Kántor 修正方程的黑球温度计法与采用球形视角因子的六向辐射法估算 MRT 差异
Fig. 8 MRT difference estimated by black globe thermometer method based on Kántor modified equation and six-directional radiation method using spherical angular factor

为了更清晰的获得黑球温度计法的准确性,将观测获得的 $t_{\text{mrt(tg50)}}$ 和 $t_{\text{mrt(tg150)}}$ 结果分别与采用人体视角因子的 $t_{\text{mrt(irm)}}$ 进行多项式回归。观测期间存在多云和晴天两种情况,图 9 展现了多云和晴天观测日数据分离后 $t_{\text{mrt(tg50)}}$ 和 $t_{\text{mrt(tg150)}}$ 与六向辐射法 $t_{\text{mrt(irm)}}$ 的拟合情况,结果表明,多云和晴天条件下拟合曲线具有较大差异,多云时线性拟合结果较好,而晴天时二阶多项式拟合更优。因此,本文将根据晴天、多云、所有天气 3 种方式进行回归方程的分析。

此外,Kántor 等^[26]的研究表明,当采用直接修正的方法时,由于白天 t_{mrt} 较高时的数据驱动了修正方程,导致在 t_{mrt} 较低值时,修正后相较修正前的准

确性降低。图 5 以及其他观测日的观测数据表明,当 t_{mrt} 在 25 ℃ 以下时,黑球温度法与六向辐射法的差异较小,因此当 $t_{\text{mrt}} < 25\text{ ℃}$ 时,仍采用 $t_{\text{mrt(tg)}}$ 。由于需要进行结果验证,多云天气采用 2020-10-08 日数据分析,晴天条件采用 2020-10-10 ~ 2020-10-12 日数据分析,所有天气则采用上述 4 d 数据分析。由此,获得不同气候条件下两种规格黑球温度计法的修正方程见表 3。

基于上述黑球温度计法修正方程,分别对 2020-10-09 和 2020-10-27 两日的平均辐射计算值进行修正前后对比,以验证上述方程在不同天气情况下的准确性。

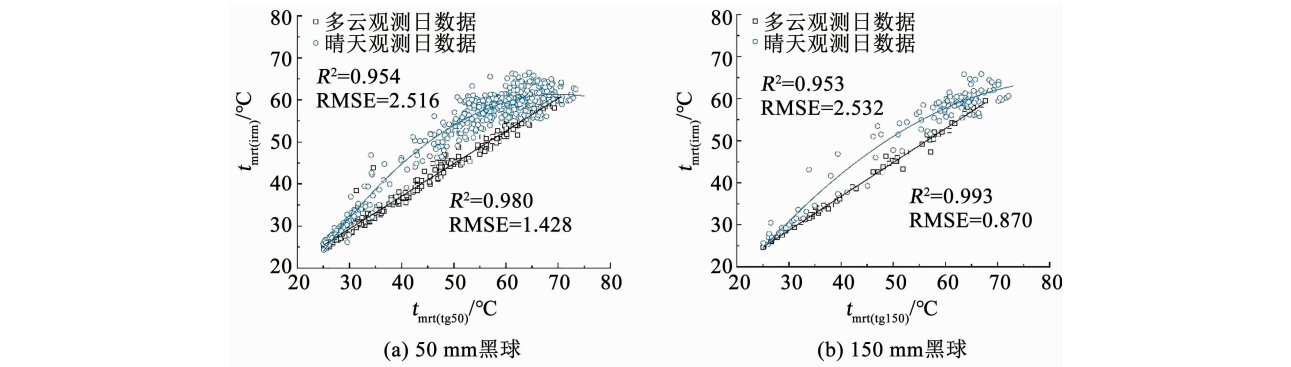


图 9 不同天气条件下黑球温度计法与六向辐射法估算 MRT 差异

Fig. 9 MRT difference estimated by black globe thermometer method and six-directional radiation method under different weather conditions

表 3 六向辐射法关于黑球温度计法的直接回归函数

Tab. 3 Direct regression function of six-directional radiation method on black globe thermometer method

黑球规格/mm	天气情况	R^2	回归函数(y :观测 $t_{\text{mrt(irm)}}$; x :观测 $t_{\text{mrt(tg)}}$)		时间平均/min
			$x > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$x < 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	
50	多云	0.960	$y = 4.565 + 0.815x$		5
	晴天	0.964	$y = -28.320 + 2.534x - 1.776 \times 10^{-2}x^2$		
	所有天气	0.930	$y = -16.953 + 1.877x - 1.031 \times 10^{-2}x^2$		
150	多云	0.993	$y = 3.962 + 0.821x$		20
	晴天	0.965	$y = -12.957 + 1.744x - 9.340 \times 10^{-3}x^2$		
	所有天气	0.958	$y = -4.042 + 1.233x - 3.620 \times 10^{-3}x^2$		

结果如图 10 所示,修正后的 $t_{mrt(tg)}$ 准确性均得到一定改善,并且采用相应天气情况的回归函数时,改善效果更为显著。2020-10-09 多云天气条件下,采用基于多云天气回归函数修正的 $t_{mrt(tg)}$ 更为显著的降低了与六向辐射法 $t_{mrt(irm)}$ 的差异。2020-10-27

晴天少云条件下,采用基于晴天回归函数修正的 $t_{mrt(tg)}$ 改善效果更佳,但修正后的 $t_{mrt(tg)}$ 在午后时段会一定程度低估 MRT。该验证结果表明上述修正方程在该地区具有一定准确性,且需要对于不同天气情况采用对应回归函数。

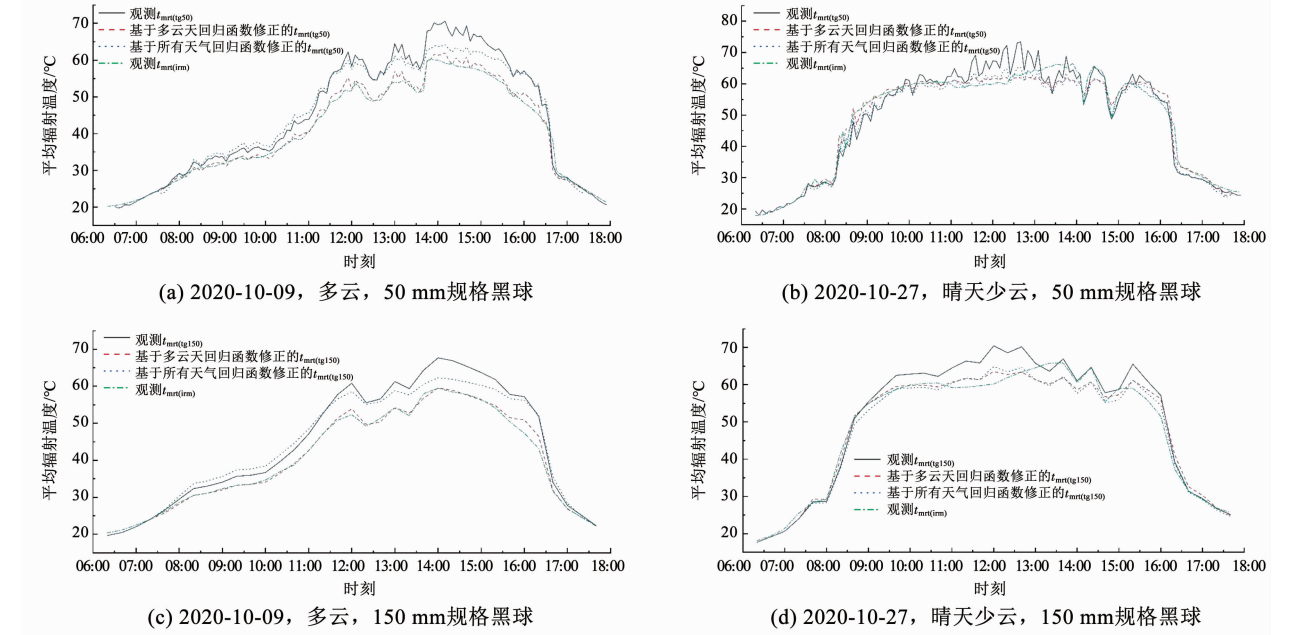


图 10 黑球温度计法估算 MRT 的修正前、后对比

Fig. 10 Comparison of MRT estimated by black globe thermometer method before and after correction

图 11、12 为采用不同回归函数修正的 50、150 mm 规格黑球温度计法与六向辐射法估算的 t_{mrt} 散点图。与修正前的结果图 6、7 相比,修正后的 $t_{mrt(tg)}$ 与 $t_{mrt(irm)}$ 拟合方程更接近 $y = x$ 线,且决定系数

R^2 变大,均方根误差 RMSE 变小,表明修正后的黑球温度计法在准确性、拟合度、离散性上均得到改善,而图 11(b) 和图 12(b) 的结果表明,基于不同天气条件的回归函数修正结果改善程度更为明显。

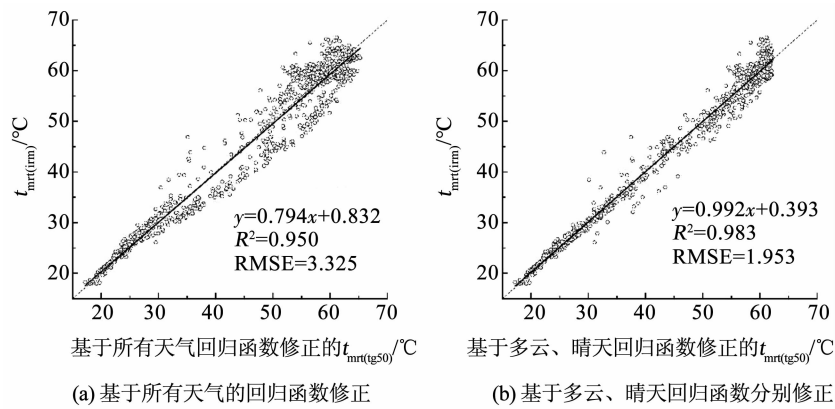


图 11 六向辐射法与采用不同回归函数修正的 50 mm 黑球温度计法估算的 MRT 散点图

Fig. 11 Scatter plot of MRT estimated by six-directional radiation method and 50 mm black globe thermometer method modified by different regression functions

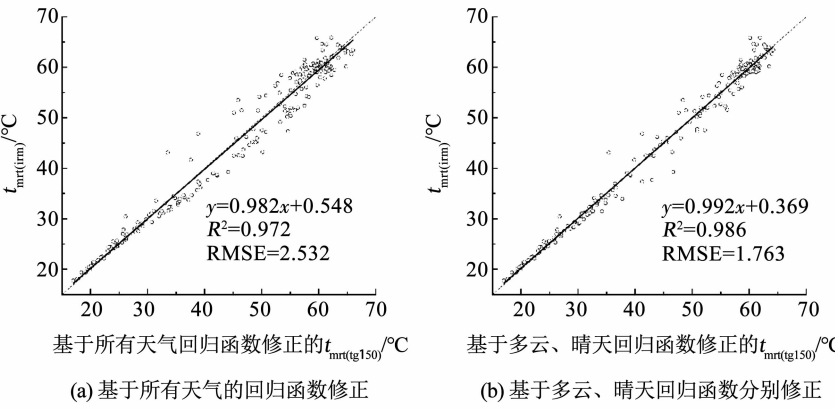


图 12 六向辐射法与采用不同回归函数修正的 150 mm 黑球温度计法估算的 MRT 散点图

Fig. 12 Scatter plot of MRT estimated by six-directional radiation method and 150 mm black globe thermometer method modified by different regression functions

图 13 显示了修正前后黑球温度计法与六向辐射法估算的 t_{mrt} 差值箱型图。结果表明基于不同天气条件的回归函数修正结果可大幅改善黑球温度计的偏差问题:50 mm 规格的差值平均值从修正前的 1.16 °C 变为修正后的 0.01 °C, 差值的最大值至最

小值范围从 $[-8.36, 10.89]$ 降至 $[-3.71, 3.73]$, 改善程度达 61.35%; 150 mm 规格的差值平均值从修正前的 2.44 °C 变为修正后的 -0.01 °C, 差值的最大值至最小值范围从 $[-6.49, 10.29]$ 降至 $[-2.52, 2.73]$, 改善程度达 68.71%。同时, Kántor 方程的验证结果表明, 该直接回归函数修正方法在夏热冬暖地区具有适用性。

4 结 论

- 1) 下垫面辐射通量密度观测结果表明, 反照率差异导致不同下垫面 MRT 大小产生差异, 草地相较于混凝土铺砖 MRT 最大值降低 3.7 °C, 相较于木塑复合材料 MRT 最大值降低 4.9 °C。
- 2) 黑球温度计法在多云和晴天条件均高估了 MRT, 且在晴天正午时段高估程度更为显著; 在晴天太阳高度角迅速变化的时段, 150 mm 规格黑球表现出了明显的滞后性。
- 3) 黑球温度计法 MRT 取不同时间平均后与六向辐射法对比表明, 50、150 mm 规格的黑球温度计法合适的平衡响应时间分别为 5、20 min。

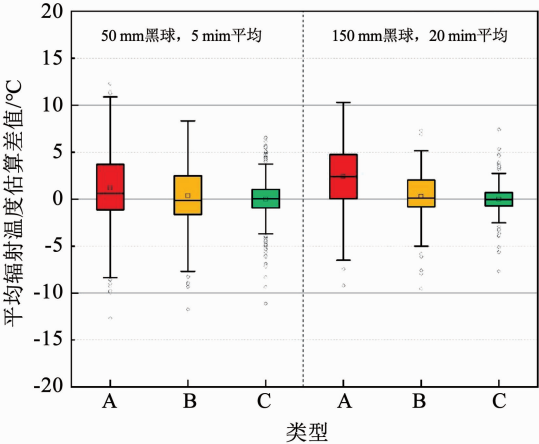


图 13 黑球温度计法与六向辐射法估算的 MRT 差值箱型图

Fig. 13 Box diagram of MRT difference estimated by black globe thermometer method and six-directional radiation method

4) Kántor 模型的验证结果表明,在夏热冬暖气候区,直接修正方法具有适用性。

5)采用不同天气条件回归函数修正后的黑球温度计法 MRT 估算结果在拟合方程、决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 上得到大幅改善,50 mm 黑球偏差范围改善 61.35%,150 mm 黑球偏差范围改善 68.71%。

参考文献

[1] MEINSHAUSEN M, MEINSHAUSEN N, HARE W, et al. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C [J]. Nature, 2009, 458(7242): 1158. DOI: 10.1038/nature08017

[2] TALEGHANI M. Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies-A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.010

[3] LAI Dayi, LIU Wenyu, GAN Tingting, et al. A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces[J]. Science of The Total Environment, 2019, 661: 337. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.062

[4] MCINTYRE D A, GRIFFITHS I D. Radiant temperature and thermal comfort[M]. [S. l.]: Vol. CIB Commission W45, 1972

[5] ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 [S]. USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2017

[6] VERNON H M. The measurement of radiant temperature in relation to human comfort[J]. Journal of Industrial Hygiene, 1932(14): 95

[7] BEDFORD T, WARNER C G. The globe thermometer in studies of heating and ventilation [J]. Epidemiology and Infection, 1934, 34(4): 458. DOI: 10.1017/s0022172400043242

[8] HÖPPE P. The physiological equivalent temperature-a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment [J]. International Journal of Biometeorology, 1999, 43(2): 71. DOI: 10.1007/s004840050118

[9] JENDRITZKY G, DE DEAR R, HAVENITH G. UTCI—Why another thermal index? [J]. International Journal of Biometeorology, 2012, 56(3): 421. DOI: 10.1007/s00484-011-0513-7

[10] GUO Hongshan, AVIV D, LOYOLA M, et al. On the understanding of the mean radiant temperature within both the indoor and outdoor environment, a critical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 117: 109207. DOI: 10.1016/j.rser.2019.06.014

[11] HÖPPE P. A new procedure to determine the mean radiant temperature outdoors[J]. Wetter und Leben, 1992(44): 147.

[12] CHEN Y C, LIN T P, MATZARAKIS A. Comparison of mean radiant temperature from field experiment and modelling: A case study in Freiburg, Germany [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 118 (3): 535. DOI: 10.1007/s00704-013-1081-z

[13] THORSSON S, LINDBERG F, ELIASSON I, et al. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting [J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(14): 1983. DOI: 10.1002/joc.1537

[14] TAN C L, WONG N H, JUSUF S K. Outdoor mean radiant temperature estimation in the tropical urban environment [J]. Building and Environment, 2013, 64: 118. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.03.012

[15] MANAVVI S, RAJASEKAR E. Estimating outdoor mean radiant temperature in a humid subtropical climate [J]. Building and Environment, 2020, 171: 106658. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106658

[16] 杜晓寒, 石玉蓉, 张宇峰. 广州典型生活性街谷的热环境实测研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(12): 8
DU Xiaohan, SHI Yurong, ZHANG Yufeng. Field study on thermal environment of typical living street canyons in Guangzhou [J]. Building Science, 2015, 31 (12): 8. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2015.12.02

[17] 李坤明, 张宇峰, 赵立华, 等. 热舒适指标在湿热地区城市室外空间的适用性[J]. 建筑科学, 2017, 33(2): 15
LI Kunming, ZHANG Yufeng, ZHAO Lihua, et al. Applicability of thermal comfort indices in urban outdoor space in hot and humid zone[J]. Building Science, 2017, 33(2): 15. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2017.02.03

[18] LAM C K C, CUI Shuhang, LIU Jiarui, et al. Influence of acclimatization and short-term thermal history on outdoor thermal comfort in subtropical South China [J]. Energy and Buildings, 2021, 231: 110541 DOI: 110541. 10.1016/j.enbuild.2020.110541

[19] XIE Yongxin, HUANG Taiyang, LI Jiarong, et al. Evaluation of a multi-nodal thermal regulation model for assessment of outdoor thermal comfort: Sensitivity to wind speed and solar radiation[J]. Building and Environment, 2018, 132: 45. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.01.025

[20] LIN T P, HO Y F, HUANG Y S. Seasonal effect of pavement on outdoor thermal environments in subtropical Taiwan [J]. Building and Environment, 2007, 42 (12): 4124. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.11.031

[21] MAYER H, HÖPPE P. Thermal comfort of man in different urban environments [J]. Theoretical and Applied Climatology, 1987, 38(1): 43. DOI: 10.1007/bf00866252

[22] FANGER P O. Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 1972

[23] 渡邊慎一. 測定に基づいた屋外における平均放射温度の算出方法[J]. 日本生気象学会雑誌, 2012, 49(2): 49

[24] Environmental meteorology-methods for the human biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning at regional level Part I: Climate:VDI 3787-2[S]. Beuth, Berlin: VDI, 2008

[25] International Organization for Standardization. Ergonomics of the thermal environment-instruments for measuring physical quantities: ISO-7726[S]. Switzerland: ISO, 1998

[26] KÁNTOR N, KOVÁCS A, LIN T. Looking for simple correction functions between the mean radiant temperature from the “standard black globe” and the “six-directional” techniques in Taiwan [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 121(1/2): 99. DOI: 10.1007/s00704-014-1211-2