

干热干冷地区室外综合温度计算模型适用性分析

陈 洁, 罗智星, 杨 柳

(西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 室外综合温度对建筑负荷计算和围护结构热工设计十分重要, 为评价室外综合温度计算模型在干热干冷地区的适用性, 以吐鲁番作为干热干冷地区代表城市, 同时选取西安、拉萨、上海作为对比对室外综合温度计算模型差异进行分析。同时采用数值模拟计算了一栋简化居住建筑的模型计算误差。结果表明, 两种模型在不同气候下均存在差异, 干热干冷地区差异最显著, 西安和上海地区可采用空气温度做室外综合温度简化计算, 吐鲁番和拉萨地区应采用天空辐射值对室外综合温度进行计算。

关键词: 室外综合温度; 长波辐射换热; 围护结构得热; 数值模拟

中图分类号: TU201.5; TU111

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)03-0439-06

Research on the applicability of sol-air temperature calculation model in dry-hot and dry-cold areas

CHEN Jie, LUO Zhixing, YANG Liu

(School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Sol-air temperatures are very important to the thermal load calculation and building envelope structure design. To evaluate applicability of the sol-air temperatures calculation model for dry hot and dry cold areas, the paper takes Turpan as the representative city, with Shanghai and Xi'an, Lhasa as a comparison to analyze the differences of sol-air temperatures calculation models. The model error of a simplified residential building is calculated by numerical simulation. The results show that the differences exist in two models in different climates, which are remarkable in dry hot and dry cold areas. Air temperature can be used for the simplified calculation of sol-air temperatures in Xi'an and Shanghai, and sky radiation value should be used for the calculation of sol-air temperatures in Turpan and Lhasa.

Key words: sol-air temperatures; long-wave radiation exchange; building envelope heat gain; numerical simulation

室外综合温度是室外空气温度、太阳辐射、地面反射辐射和长波辐射、大气长波辐射对围护结构外表面的综合热作用, 为方便工程计算通常对室外综合温度以不同参数的形式进行简化, 建筑外围护结构如屋面、外墙和外窗等热工设计主要目标是提高保温隔热性能以应对不同的气候类型, 而我国气候类型多样, 因此综合考虑室外综合温度模型在不同气候下的适用性, 对准确进行建筑热工设计具有十分重要的意义。关于室外综合温度对建筑负荷的研究主要为以下三个方面:

(1) 室外综合温度计算模型分析: 陈启高教授^[1]给出室外综合温度是太阳辐射当量温度与室外空气温度、邻近建筑物外表面和地面温度、大气长波辐射温度三者加权平均值之和, 但由于反射

辐射强度、地面黑度系数等参数建筑建成后才能准确测得, 因而不利于热工设计采用。文献[2]中将围护结构外表面和周围环境之间长波辐射换热与围护结构外表面和天空大气之间长波辐射换热分开考虑, 且太阳总辐射强度中也考虑了反射辐射, 但外表面温度难以获得不利于采用。刘加平教授^[3]提出气象台站给出的是郊区空气温度值, 应在室外空气温度上加上该城市的热岛强度值。民用建筑热工设计规范(GB 50176-2016)^[4]中室外综合温度计算考虑总辐射和室外干球温度, 忽略长波辐射换热量。CIBSE 指南^[5]室外综合温度计算是围护结构外表面上的短波辐射、长波辐射交换、空气温度和表面上的风速四个相关变量所合并的一个假设外表面温度指数。

收稿日期: 2019-03-09

修改稿日期: 2021-05-11

基金项目: “十三五”国家重点研究计划项目(2018YFC0704500)

第一作者: 陈 洁(1986—), 女, 博士生, 主要从事绿色建筑与被动式建筑设计研究。E-mail: 442509779@qq.com

(2)外表面长波辐射换热对建筑负荷的影响: 室外综合热作用中长波辐射作为引起表面温度下降的一种物理作用过程在过去几十年中得到了广泛的研究, 肖勇全^[6]区别以往仅考虑太阳辐射的静态方法, 建立了一个考虑围护结构蓄热和传热的动态的建筑围护结构热平衡模型, 并用该模型计算了济南夏季某日某单栋建筑各围护结构外表面的温度。Luca Evangelisti^[7]对不同气候的天空辐射率与天空温度之间的相关关系进行分析, 结果表明在晴空条件下差异为 10.8~19.7℃, 多云条件下差异为 7~17.2℃。Nwaigwe^[8]通过建筑夜间降温分析, 研究了不同地点夜间辐射冷却器的性能, 提出在晴朗的夜晚, 冷却功率可以达到 40 W/m²。刘森元^[9]根据我国 82 个台站 1960 年至 1970 年的月平均资料, 对天空长波辐射作用在我国的分布进行了计算, 求得了这些台站的天空有效温度及其与气温差值。Lu^[10]对晴空辐射降温在建筑中的应用进行研究, 对辐射冷却的结构、系统配置、辐射冷却的能力以及辐射冷却在满足建筑冷负荷方面的局限性进行了讨论。闫杰^[11]在给出地面反射辐射和大气长波辐射在建筑围护结构热负荷中的计算公式基础上, 分析了两者在热负荷计算中的作用机理, 并对长波辐射在建筑节能中的应用进行了探讨。文献[12-13]对冬季夜间通过屋面结构的换热逐时热负荷计算, 提出屋面实际热负荷比不考虑夜间辐射时的负荷升高, 供暖空调系统在冬季夜间运行时应考虑这部分负荷。林波荣^[14]通过建筑外微气候的监测, 综合分析了太阳辐射、长波辐射、对流换热对外表面温度的作用效果分析。

(3)性能模拟工具研究: Al-janabi^[15]通过对 EnergyPlus 和 IES 对比研究发现, IES 对太阳辐射参数相对更加敏感, EnergyPlus 更容易受室外空气温度变化的影响。徐斌^[16]利用 BuildingEnergy 软件, 分析了透明围护结构的太阳光谱透过率、太阳吸收率、长波热发射率对建筑冷、热负荷的影响, 进行了全年周期的能耗分析与评估。蒋福建^[17]建立用于描述围护结构系统与周边环境间关系的二维简化模型, 利用 ANSYS 软件对夏季典型围护结构表面的长波辐射换热情况进行数值计算, 指出在夏季空调负荷计算的围护结构传热过程计算中, 围护结构外表面的长波辐射换热往往具有冷却外壁面的作用。

室外综合温度是夏季建筑隔热设计的基本参数, 其中有些计算公式简洁方便, 适合实际工程的建筑外围护结构隔热设计计算, 另一些计算过

程复杂结果也更为准确。在现行热工规范计算中, 长波辐射换热往往忽略不计, 但是不同气候条件下天空辐射造成的建筑得热率有所差异, 因此本文通过室外综合温度计算模型理论分析, 对比了忽略长波辐射作用的室外综合模型, 和以空气温度为参数的简化长波辐射计算下的室外综合温度模型在不同气候下差异结果, 之后进一步对长波辐射的计算方法展开讨论, 分别对室外空气温度、大气辐射率两种长波辐射计算参数进行了数值模拟计算, 为不同气候地区室外综合温度模型选用提供参考, 同时对于热干冷地区的室外综合温度准确计算提供理论基础。

1 室外综合温度

1.1 热工规范标准

《民用建筑热工设计规范》(GB 50176-2016)提出由室外气温增加太阳辐射的等效温度值, 其计算式中忽略了地面反射辐射和大气长波辐射换热, 即

$$t_{sa} = t_e + \frac{\rho_s I}{\alpha_e} \quad (1)$$

式中: t_{sa} 为室外综合温度, ℃; t_e 为室外空气温度, ℃; I 为投射到围护结构外表面的太阳辐射照度, W/m²; ρ_s 为外表面的太阳辐射吸收系数; α_e 为外表面换热系数, W/m² · K。

1.2 长波辐射作用

考虑围护结构外表面与大气间的长波辐射换热, 室外空气综合温度的表达式为

$$t_{sa} = t_e + \frac{\rho_s I}{\alpha_e} - \frac{Q_R}{\alpha_e} \quad (2)$$

式中: Q_R 为围护结构外表面与天空的长波辐射换热量, W/m²。将天空看作黑体, 根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律, 外表面与大气层之间的辐射换热量 Q_R , 就是外表面向大气层的辐射能量 Q_g 与大气层向外表面的逆辐射 Q_{sky} 之差, 即

$$Q_R = Q_g - Q_{sky} = \sigma(\epsilon T_g^4 - T_{sky}^4) \quad (3)$$

式中: σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 5.67×10^{-8} W/m² K⁴; ϵ 为外表面的长波发射率; T_g 为外表面温度, K; T_{sky} 为天空有效温度, K, 根据式(3)可得

$$T_{sky} = \sqrt[4]{(\epsilon T_g^4 - \frac{Q_R}{\sigma})} \quad (4)$$

一种估算有效天空温度的方法, 是根据地面附近空气与大气层的辐射和热平衡关系式得到的, 即

$$\sigma T_{sky}^4 = Q_{sky} = Q_{air} = \epsilon_{air} \sigma T_a^4 \quad (5)$$

$$T_{sky} = \sqrt[4]{\epsilon_{air}} T_a \quad (6)$$

式中: T_a 为距地面 1.5~2.0 m 处的空气温度,

K ; ϵ_{air} 为地面附近空气的发射率, 可用 $\epsilon_{air} = 0.741 + 0.006 \ 2t_{dp}$ 计算; t_{dp} 为地面附近的空气露点温度, $^{\circ}\text{C}$.

2 模型对比分析

选用式(1)为模型一与考虑长波辐射作用的式

(2)为模型二进行比较, 计算不同气候下屋面室外综合温度, 得到两个模型间差值变化规律, 即长波辐射降温效果分析. 对吐鲁番、西安、拉萨、上海气候数据进行计算, 采用气象数据 CSWD 模式的典型气象年数据, 代表城市冬、夏季气象参数见表 1.

表 1 代表城市冬夏季气象参数
Tab. 1 Meteorological parameters of typical cities

城市	相对湿度/%	总辐射/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	干球温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	总辐射/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	干球温度/ $^{\circ}\text{C}$
季节	夏季			冬季		
拉萨	59.82	239.73	15.77	29.12	142.27	-0.11
上海	82.6	165.74	26.28	71.65	98.73	6.08
吐鲁番	33.11	223.109	30.97	55.535	72.306 5	-3.75
西安	68.09	178.34	26.02	66.00	69.26	1.03

2.1 模型比较

通过模型一、二计算得到吐鲁番地区夏季和冬季室外综合温度均值, 如图 1. 并通过两个模型的逐时差值对长波辐射降温效果进行分析, 见图 2.

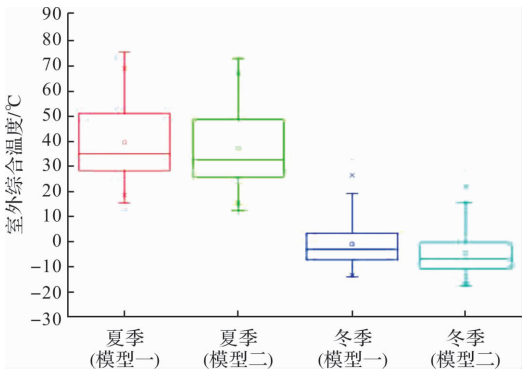


图 1 吐鲁番两种模型室外综合温度

Fig. 1 Sol-air temperatures of two models in Turpan

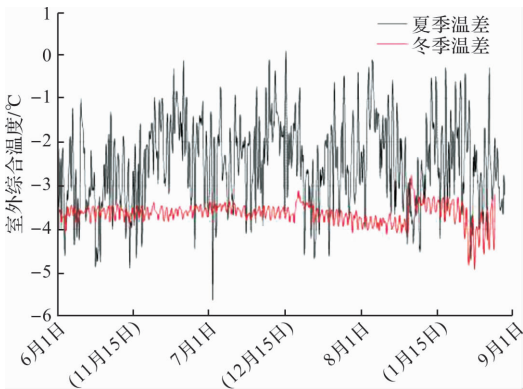


图 2 吐鲁番长波辐射降温逐时值

Fig. 2 Hourly value of long wave radiation cooling in Turpan

从图 1 中可以看出, 模型一的夏季室外综合温度均值为 42.13°C , 模型二为 39.65°C , 相对降低

了 2.48°C . 冬季室外综合温度均值分别为 -0.92°C 、 -4.57°C , 相对降低了 3.65°C . 可见, 室外综合温度计算模型在冬夏季均存在明显差值, 并且冬季降温值高于夏季.

从图 2 模型一、二模拟所得室外综合温度全年逐时差值可见, 夏季差值变化波幅较大, 平均标准偏差达到 0.95, 冬季差值较高且相对稳定, 平均标准偏差 0.23. 这是因为天空辐射受水蒸气分压力的作用影响, 而吐鲁番水蒸气分压力夏季平均 $1\ 420.06\ \text{Pa}$, 标准偏差 350.33, 冬季平均 $231.46\ \text{Pa}$, 标准偏差 81.49, 因此吐鲁番地区太阳辐射季节性变化和降水蒸发气候特征是决定长波辐射降温的主要影响因素. 值得注意的是实际表面温度取决于围护结构表面的能量平衡, 在夜晚水平面上存在大量长波辐射热量损失, 特别是冬季太阳辐射时长减少, 造成更多的围护结构得热的降低, 因此干热干冷地区通过长波辐射降低室外综合温度具有冬季大, 夏季小的季节性特征.

2.2 模型适用性

分别选取不同气候特征代表地区西安、拉萨、上海与吐鲁番地区进行对比研究, 比较两组计算模型的室外综合温度在不同气候条件下的变化规律. 得到四个代表城市的冬夏季两组模型下室外综合温度均值和冬夏季两组模型的累计温差, 见图 3、4, 对两组模型不同气候的适用性进行分析.

从图 3 可以看出, 受室外空气温度的影响, 四个城市的室外综合温度具有明显的差别, 在不考虑长波辐射的情况下, 吐鲁番地区夏季室外综合

温度高达 39.65°C , 上海、西安居中, 拉萨地区夏季室外综合温度相对最低, 仅为 25.10°C . 可见夏季降温需求存在明显差距. 冬季上海室外综合温度最高, 达到 9.25°C , 拉萨和西安分别为 4.46°C 和 3.26°C , 而吐鲁番地区冬季最低, 仅为 -0.92°C . 室外综合温度吐鲁番年较差最大, 拉萨地区最小.

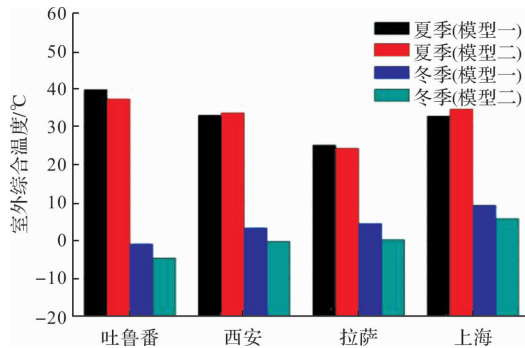


图3 典型城市室外综合温度

Fig. 3 Sol-air temperatures of typical city

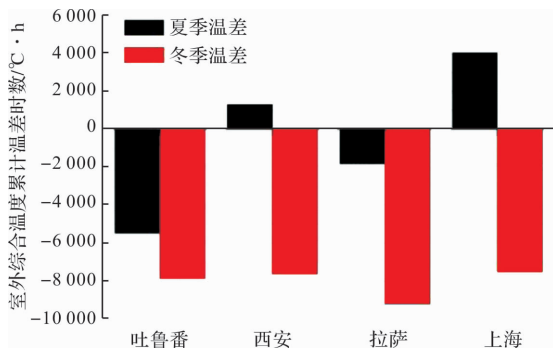


图4 典型城市长波辐射降温

Fig. 4 Long wave radiation cooling of typical cities

从冬季室外综合温度累计差值可见, 在四个地区中长波辐射均对室外综合温度产生降温效果, 下降幅度从高到低分别是拉萨 $9\,197.77^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ 、吐鲁番 $7\,873.85^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ 、西安 $7\,619.20^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ 、上海 $7\,502.10^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$. 从夏季差值来看, 长波辐射在吐鲁番和拉萨地区具有降温效果, 综合温度分别下降 $5\,479.13^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ 、 $1\,821.83^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$. 但是在西安和上海地区, 室外综合温度反而上升了 $1\,288.91^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ 和 $4\,020.02^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$. 这是因为长波辐射受水蒸气分压力影响, 夏季室外相对湿度较高对长波辐射散热具有负作用. 这也说明长波辐射散热作用不与室外气温线性相关, 室外相对湿度是室外综合温度计算模型的适用性研究的关键影响因素. 综合来看, 长波辐射模型在吐鲁番地区影响最强, 其冬季和夏季负荷计算均应考虑长波辐射的作用. 拉萨地区冬季热负荷应考虑长波辐射降温产生的不利影响.

3 误差分析

以上讨论的是以空气温度作为辐射计算参数的一种估算方法, 采用式(4)和式(6)对长波辐射作用展开分析, 通过数值模拟求出大气的辐射当量温度, 并对模型二(式(4))与实际得热(式(6))误差进行分析.

3.1 模型设置

采用模拟软件 ApacheSim 各向异性太阳辐射模型, 在模拟之前初始化建筑物的温度, 在指定模拟周期开始前 10 d 预处理天数, 由 SunCast 计算直接遮阳和内部太阳跟踪, 时间步数 10 min, 结果平均输出的时间间隔 60 min.^[19] 所采用的程序是根据文献[18], 白天大气在水平面上的长波辐射照度为

$$L_{sky} = \sigma T_a^4 [0.904 - (0.304 - 0.061 \sqrt{P_w}) S_h - 0.005 \sqrt{P_w}] \quad (8)$$

式中: L_{sky} 为水平表面上白天的天空辐射, W/m^2 ; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$; T_a 为空气温度, K ; P_w 为水蒸气分压力, hPa ; S_h 为每小时日照率. 在夜间 S_h 被替换为 $1 - (N_h/8)$, 其中 N_h 为每小时云量. 由于 S_h 值在白天的第一个小时和最后一个小时不够稳定, 所以将这两个小时视为夜间时段.

选取一栋典型多层居住建筑作为分析围护结构得热计算几何模型, 其标准层平面图见图 5, 建筑总高度为 18.8 m, 体型系数为 0.28; 屋顶长波辐射率为 0.9, 太阳辐射吸收系数 0.7, 外墙长波辐射率 0.9, 太阳辐射吸收系数 0.5, 计算用几何模型见图 6.

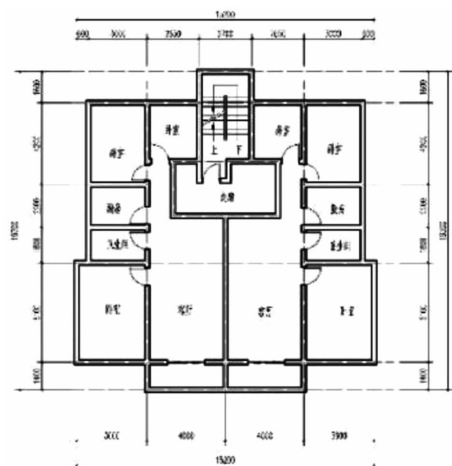


图5 建筑标准层平面图

Fig. 5 Building standard floor plan

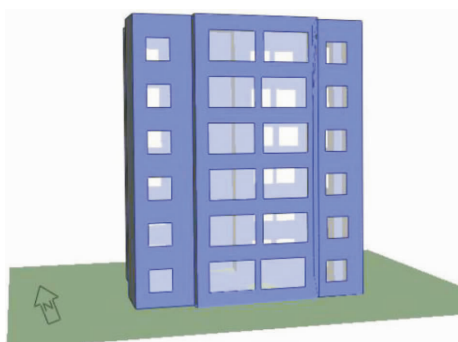


图6 居住建筑简化几何模型

Fig. 6 Simplified geometric model of residential building

4 围护结构得热计算结果

通过动态模拟计算天空辐射温度与模型二得到围护结构简化得热计算结果进行误差分析,将动态模拟天空辐射温度计算的围护结构得热值设为约定真值,得到全年得热逐时值误差值及误差频率,见图7、8,采用同样计算条件下对西安、拉萨、上海地区得热误差率对比分析,见图9。

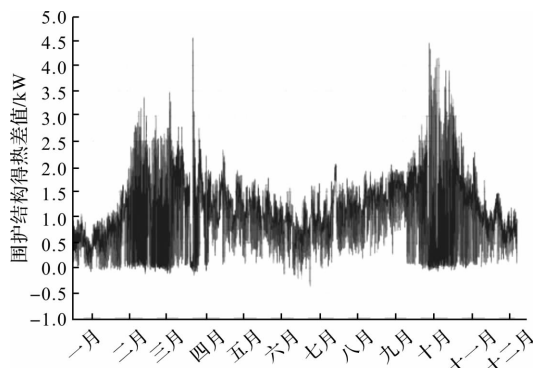


图7 吐鲁番围护结构得热计算逐时误差值

Fig. 7 Hourly error value of heat gain calculation of Turpan envelope structure

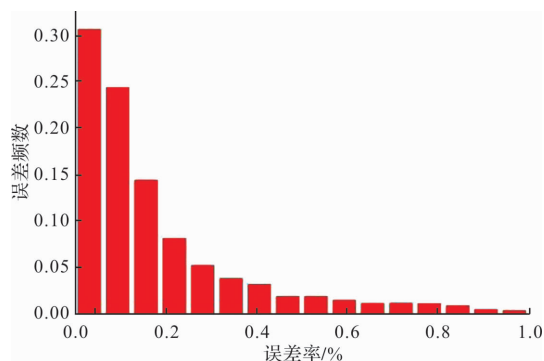


图8 吐鲁番围护结构得热计算误差频率

Fig. 8 Error frequency of heat gain calculation of Turpan envelope structure

以模型二计算得到的围护结构得热值整体高于约定真值,平均误差为1.04 kW,误差率为夏季误差较高平均误差为0.94 kW,冬季误差波动幅度

较大,平均误差为0.78 kW。从图8误差频率分布中可见,相对频率分布0.54的误差小于10%,频率0.36的误差范围在20%~50%,频率超过0.087的误差超过50%,考虑到误差季节性的波动幅度差异,干热干冷地区地区室外综合温度计算模型采用空气温度替代外表面温度进行计算将与实际值存在差异,特别是对围护结构保温设计及热负荷计算产生不利影响。因此,干热干冷地区长波辐射换热计算应采用天空辐射值进行准确计算。

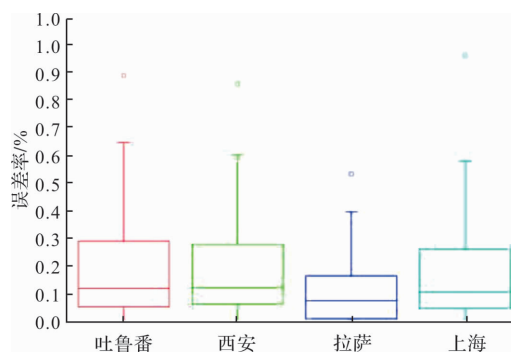


图9 各典型城市围护结构得热计算误差率

Fig. 9 The error rate of heat gain calculation of urban envelope structure in typical cities

从图9不同气候条件下模型二的误差率可见,西安和吐鲁番地区得热误差比较接近,误差率中位在13%左右,上海相对降低为11%,拉萨地区误差中位数仅为8%,这是因为天空辐射温度计算参数中外表面温度与空气温度差值越小,则模型二的计算更加准确。通过误差频率分析,西安地区0.72的频率在10%以内,拉萨地区高达0.95的频率在误差10%以内,因此,在拉萨、西安地区可选用长波辐射换热计算模型二进行室外综合温度计算。

5 结论

依据上述室外综合温度计算模型的理论分析和差值比较,以及针对不同地区的计算模型适用性分析,其结果表明:

(1) 选取不同的计算模型对室外综合温度产生重要影响,天空辐射和水蒸气分压力是影响长波辐射降温的主要因素,干热干冷地区长波辐射换热模型夏季差异达到2.48℃,冬季3.65℃。

(2) 干热干冷地区长波辐射换热量冬季作用高于夏季,规范所提供的计算模型室外综合温度忽略了夜间辐射对围护结构的冷却影响,对于夏季冷却负荷计算是偏安全的,但是对于冬季热负荷的计算值偏小,导致干热干冷地区保温设计与实

际建筑围护结构热工性能有所差距。

(3) 不同模型选取对吐鲁番地区影响最大,夏季模型差异累计度时数达到 $5\,479.13^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$,冬季 $7\,873.85^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$;在拉萨地区夏季差异较小,冬季高达 $9\,197.77^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$;在西安、上海地区则冬季差异较小,夏季增加 $1\,288.91^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 和 $4\,020.02^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$,需考虑长波辐射夏季得热的不利影响。

(4) 以空气温度代替外表面温度的长波辐射换热简化计算模型可用于拉萨、西安地区进行室外综合为温度计算,对于西安、吐鲁番地区则误差率较高,应选用计算天空辐射温度的长波辐射换热模型。

参考文献 References

- [1] 中国建筑学会建筑物理分会建筑热工与节能专业委员会. 陈启高建筑物理学学术论文选集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 452-455.
Building Thermal Engineering and Energy Conservation Committee of Building Physics Branch of Architectural Society of China. Selected papers of CHEN Qigao in architectural physics[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2004: 452-455.
- [2] 彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京: 建筑工业出版社, 1986: 26-30.
YAN Qisen, ZHAO Qingzhu. Building thermal process [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1986: 26-30.
- [3] 刘加平. 关于室外综合温度[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1993, 25(2): 175-178.
LIU Jiaping. About the tsal-temperature[J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech., (Natural Science Edition), 1993, 25(2): 175-178.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 民用建筑热工设计规范: GB 50176-2016[S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for thermal design of civil building: GB 50176-2016[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd, 2016.
- [5] Environmental Design CIBSE Guide A [R]. London: Chartered Institution of Building Services Engineers, 1999.
- [6] 肖勇全, 王菲. 太阳辐射下建筑围护结构的动态热平衡模型及实例分析[J]. 太阳能学报, 2006 (3): 270-273.
XIAO Yongquan, WANG Fei. Building envelope's dynamic heat balance model under solar radiation and ex-
- ample analysis[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2006 (3): 270-273.
- [7] EVANGELISTI L, GUATTARI C, ASDRUBALI F. On the sky temperature models and their influence on buildings energy performance: a critical review [J]. Energy and Buildings, 2019, 183: 607-625.
- [8] NWAIGWE K, OKORONKWO CA, OGUEKE NV, et al. Review of nocturnal cooling systems[J]. International Journal of Energy for a Clean Environment, 2010, 11(1): 117-143.
- [9] 刘森元, 黄远锋. 天空有效温度的探讨[J]. 太阳能学报, 1983, 4(1): 63-68.
LIU Senyuan, HUANG Yuanfeng. Discussion on effective sky temperature[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 1983, 4(1): 63-68.
- [10] LU X, XU P, WANG H, et al. Cooling potential and applications prospects of passive radiative cooling in buildings: the current state-of-the-art[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 65: 1079-1097.
- [11] 闫杰, 岳鹏, 马斌齐. 长波辐射的计算理论及其在建筑节能设计中的应用[J]. 喀什师范学院学报, 2009, 30(3): 42-44.
YAN Jie, YUE Peng, MA Binqi. Calculation theory of long wave radiation and its application in architecture saving energy design[J]. Journal of Kashgar Teachers College, 2009, 30(3): 42-44.
- [12] 孟凡康, 殷志祥, 周哲, 等. 考虑冬季夜间辐射的建筑热负荷研究[J]. 建筑科学, 2007, 23(4): 95-97, 106.
MENG Fankang, YIN Zhixiang, ZHOU Zhe, et al. Analysis on building heating load including night radiation in winter[J]. Building Science, 2007, 23(4): 95-97, 106.
- [13] 蒋建平, 刘加平, 李安桂. 屋顶夜间辐射对顶层房间热负荷的影响[J]. 西安科技大学学报, 2009 (4): 445-448.
JIANG Jianping, LIU Jiaping, LI Angui. Influence of night radiation on heating load of top-floor rooms[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009(4): 445-448.
- [14] 林波荣, 李晓锋, 朱颖心. 太阳辐射下建筑外微气候的实验研究——建筑外表面温度分布及气流特征[J]. 太阳能学报, 2001, 22(3): 327-333.
LIN Borong, LI Xiaofeng, ZHU Yingxin. Study on solar radiation effects on the microclimate of building envelope: the characteristic of external surface temperature and airflow[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2001, 22(3): 327-333.