

# 张家口市小区冬季室外热环境研究

翟一泽 武欣<sup>通讯作者</sup>

河北建筑工程学院, 河北省张家口市, 075000;

**摘要:** 小区室外热环境对居住人群日常生活产生着不可忽视的影响, 舒适的居住小区室外热环境能够增加居民在室外活动的时长, 促进居民的身心健康, 提升居民的生活质量。本研究在张家口市某行列式小区进行冬季实测和调查问卷工作, 了解本地居民对冬季居住小区室外环境的热感觉, 并通过 Rayman 以及 SPSS 软件计算分析张家口市冬季居住小区室外中性 PET 以及 UTCI 的温度值, 比较两种指标对于张家口冬季室外热环境的敏感性, 选取对于张家口市热环境评价更具敏感性的指标, 最终依据分析结果提出改善居住小区冬季室外热环境的优化建议。

**关键词:** 居住小区; 行列式; 室外热环境; 热感觉

## Study on outdoor thermal environment in winter in Zhangjiakou

Zhai Yize, WuXin

Hebei Institute of Civil Engineering and Architecture, Zhangjiakou 075000, China;

**Abstract:** The outdoor thermal environment of residential communities has a non-negligible impact on the daily life of residents. Comfortable outdoor thermal environment of residential communities can increase the time residents spend outdoors, promote the physical and mental health of residents, and improve the quality of life of residents. In this study, winter field survey and questionnaire survey were conducted in a linear residential district in Zhangjiakou to understand the thermal sensation of local residents to the outdoor environment of the residential district in winter. Besides, Rayman and SPSS software were used to calculate and analyze the outdoor neutral PET and UTCI temperature values of the residential district in Zhangjiakou in winter, and the sensitivity of the two indexes to the outdoor thermal environment in Zhangjiakou in winter was compared. This paper selects more sensitive indicators for the thermal environment evaluation of Zhangjiakou City, and finally puts forward optimization suggestions for improving the outdoor thermal environment of residential quarters in winter according to the analysis results.

**Key words:** residential district; Determinant; Outdoor thermal environment; Thermal sensation;

**DOI:** 10.69979/3029-2727.24.05.034

## 引言

小区热环境作为城市整体热环境的一部分, 对城市热环境具有一定影响, 从 20 世纪 90 年代末才开始发展并逐步完善, 由于早期建筑技术发展的滞后性以及小区设计之初未能全面考虑居住小区的热环境问题, 从而影响了居住人群在小区活动空间的热舒适。2022 年住房和城乡建设部、国家发改委颁布的《城乡建设领域碳达峰实施方案》要求发展绿色低碳社区, 贯彻绿色发展理念<sup>[1-2]</sup>。小区作为城市的基本单元, 对城市热环境具有一定影响的同时, 也会影响城市的绿色发展, 调节小区热环境不仅有利于缓解城市热岛效应, 还能够减低住宅能耗, 顺应“双碳”目标的发展。本研究以张家口市小区为例, 研究该地区冬季的热环境特征, 探究影响小区的热环境因素, 为小区的规划设计提供参考。

## 1 研究区域及研究方法

### 1.1 研究区域概况

张家口市位于中国东经 115° 北纬 41°, 根据建筑热工气候分区划分, 张家口市属于严寒气候区, 冬季主要以西北风为主, 夏季盛行东南风, 该地区冬季特征为寒冷、干燥、晴朗且少降水。由于张家口市地处高纬度地区, 且地势较高, 冬季受蒙古高压控制时间较长, 因此冬季寒冷且漫长, 集中供暖时间一般为当年 11 月至次年 3 月。

### 1.2 小区实测工作

本研究选取的小区位于张家口市桥东区的老鸦庄小区, 该小区为多层住宅小区, 住宅呈正南朝向, 占地总面积 10.3 公顷, 总住户 1584 户, 绿化率为 30%。实测工作为期两天, 选择张家口市供暖期间的 12 月份, 实测时间为上午 9:30 至下午 17:30, 每日 8 个小时。测量内容包括空气温度, 相对湿度、风速、太阳辐射和黑球温度。测量仪器以及仪器参数如表 2 所示, 图 1 和表 1 为小区内各测点位置的基本情况, 包括测点所在位置, 植被类型和铺装类型。



图1 小区各测点实拍图

表1 小区测点概况

三个测点特征	测点位置	下垫面类型	植被分布
测点1	位于小区入口处广场	透水砖	乔木+灌木
测点2	位于两栋住宅楼之间	板岩路	草地+灌木
测点3	位于两栋住宅楼之间的广场	透水砖	乔木+灌木

表2 实测仪器参数

仪器名称	精度	记录间隔
HOBO 无线温湿度记录仪	温度精度: $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ ( $0-50^{\circ}\text{C}$ )	1分钟
	湿度精度: $\pm 2\%$ ( $20\%-80\%$ )	
黑球温度计	$\pm 0.6^{\circ}\text{C}$	1分钟
小型手持便携气象站	$\pm 0.3\text{m/s}$	1分钟
手持式速测记录仪+太阳总辐射传感器	$\pm 0.3\%$	1分钟

### 1.3 调查问卷工作

本研究进行小区实测的同时进行调查问卷工作, 问卷内容主要包括两部分, 首先是受试者的基本信息: 身高、体重、年龄、衣着情况、活动状态、室外活动时长以及居住时长; 其次是受试者对当下环境的热感觉和热舒适评价以及对室外气候参数的热偏好。热感觉采用9级量表(-4, 非常冷; -3, 冷; -2, 凉; -1, 稍凉; 0, 适中; 1, 稍暖; 2, 暖; 3, 热; 4, 非常热), 热舒适采用7级量表(-3, 非常不舒适; -2, 不舒适; -1, 稍不舒适; 0, 适中; 1, 稍舒适; 2, 舒适; 3, 非常舒适)<sup>[3]</sup>。

### 1.4 热舒适评价指标

人体为维持正常体温、需要使人体产热和散热达到平衡<sup>[4]</sup>, 因而人体与环境的换热过程是一个动态平衡的过程, 图2为人体与外界热量交换示意图。

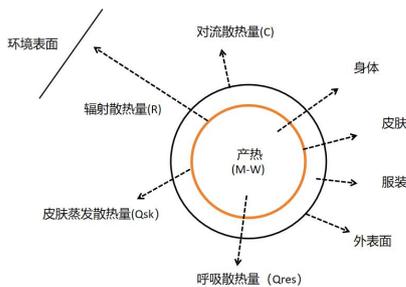


图2 人体与外界热交换示意图

本研究将对比 PET 和 UTCI 指标在张家口市的热环境评价适用性, 1984年, Hoop 等人基于慕尼黑能量平衡模型 MEMI 提出了生理等效温度 PET, PET 指标定义为在空气温度  $20^{\circ}$ 、相对湿度 50%、风速  $0.1\text{m/s}$  的典型空间下的等效温度; UTCI 定义为在辐射温度等于环境温度, 风速为距离地面 10M 的风速, 环境温度  $\leq 29^{\circ}$  且压强在  $20\text{hPa}$  以上, 空气湿度为 50% 时的典型环境中的等效温度。

## 2 结果与分析

### 2.1 实测结果

表3 测点1 实测结果

	空气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	相对湿度 (%)	风速 $\text{m/s}$	黑球温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
最大值	6.26	74.90	3.00	12.70
最小值	-10.55	23.00	0.74	-10.20
平均值	3.56	41.48	1.08	2.03
标准方差	4.21	8.41	0.27	5.64

表4 测点2 实测结果

	空气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	相对湿度 (%)	风速 $\text{m/s}$	黑球温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
最大值	-2.65	58.37	4.27	-1.40
最小值	-10.62	43.58	0.50	-11.00
平均值	-5.49	48.49	0.98	4.78
标准方差	2.23	3.43	0.56	2.49

表5 测点3 实测结果

	空气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	相对湿度 (%)	风速 $\text{m/s}$	黑球温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
最大值	-3.45	59.90	2.80	-2.50
最小值	-10.79	43.70	0.55	-10.70
平均值	-6.19	47.47	1.15	-5.30
标准方差	2.09	2.95	0.36	2.23

表3为测点1的气候实测数值的最大值、最小值、平均值和标准方差, 标准差越大, 说明该气候参数在测量期间的日均波动越强。从表中可以看出, 测点1的相对湿度和黑球温度的标准差较大, 相对湿度的日均波动范围在 23.00%到 74.90%之间, 黑球温度日均波动范围在  $-11.00^{\circ}\text{C}$ 到  $-1.40^{\circ}\text{C}$ 之间; 表4显示的是测点2的实测数值, 其中日均波动范围最大的是相对湿度, 为 43.58%到 58.37%, 其次是黑球温度; 表5为测点3的实测数值, 日均波动范围最大的仍是相对湿度, 在 43.70%到 59.90%之间, 其次是黑球温度。测点1相对于其他两个测点, 空气温度、相对湿度和黑球温度的日均波动范围都更大, 以下结合调查问卷部分进行分析。

### 2.2 问卷结果

测量期间共收集有效问卷 358 份，其中男性受试者共收集 180 份，占比 50.3% 女性受试者共收集 178 份，占比 49.7%，受试者年龄占比分别为：18 岁以下占比 2.2%，18 岁至 25 岁占比 41.3%，26 岁至 30 岁占比 20.7%，31 岁至 40 岁占比 4.5%，41 岁至 50 岁占比 3.4%，51 岁至 60 岁占比 8.9%，60 岁以上占比 19%。

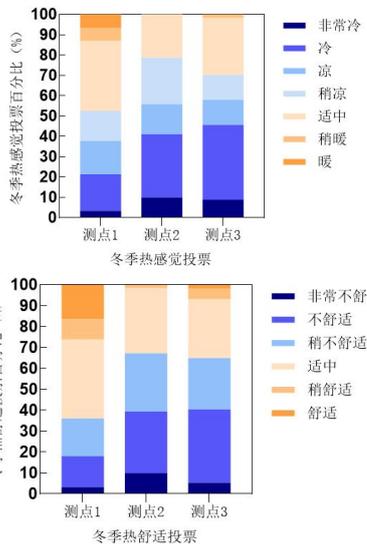


图 3 受试者室外热感觉和热舒适投票百分比

图 3 为三个测点在测量期间的热感觉投票和热舒适投票，问卷结果显示张家口小区冬季受试者热感觉投票主要集中在稍凉、凉、冷和非常冷的范围内，三个测点在该范围内的平均占比为 66%；热舒适投票主要集中在稍不舒适、不舒适和非常不舒适的范围内，三个测点在该范围内的平均占比为 54%。由于冬季植被枝叶凋零，呈现稀疏的状态，因而植被在冬季对热环境的影响相较于其他季节较小，测点 1 暴露在光照之下，住宅位于该测点北侧，该测点南侧为小区正门，因而周围环境对该测点投影的面积较小，而测点 2 位于小区两栋住宅之间，冬季太阳高度角变小，住宅投射在地面的阴影面积变大，接受太阳辐射的时间范围有限，虽然测点 2 风速标准方差较小，但由于所处位置局部风速波动较大，造成了测点 2 问卷中，人们的热感觉和热舒适普遍较差；测点 3 位置较为宽敞，因而实测期间风速低，风速变化较小，该测点的乔木为落叶乔木，因此对太阳辐射遮蔽性较低，空气温度相较于测点 2 略高一些。总体来说，三个测点的气候环境各异，影响三个测点热环境的原因为所处位置和植被类型。

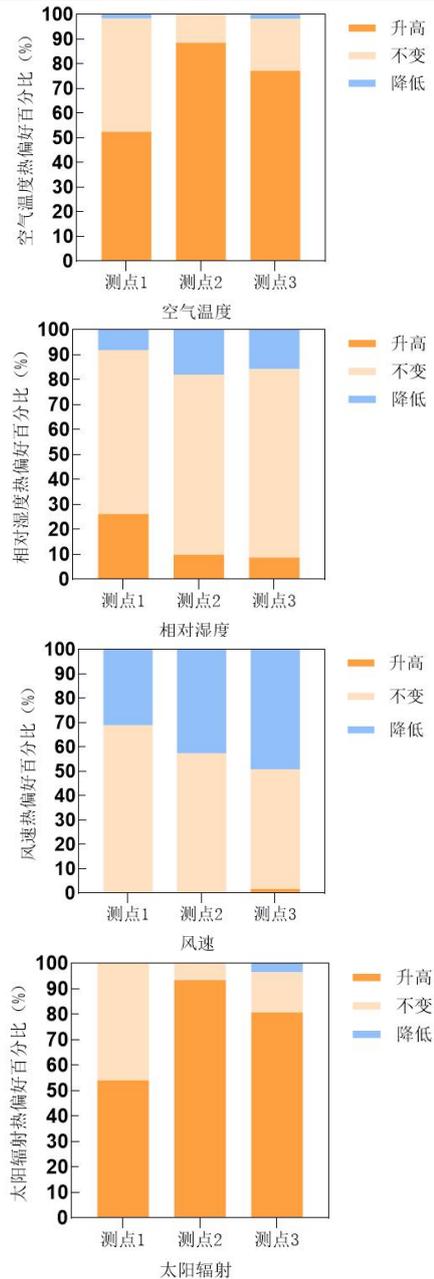


图 4 冬季小区室外气候参数热偏好百分比

受试者在冬季对于空气温度和太阳辐射更期望升高，期望升高的占比分别为 73% 和 76%，受试者对风速和相对湿度更期望保持不变，期望不变的占比分别为 51% 和 71%。说明受试者在冬季对相对湿度和风速敏感性较小，对空气温度和太阳辐射敏感性较强。从图 4 中可以看出，三个测点受试者对于空气温度的热偏好都是升高，测点 1 对于空气温度升高的热偏好占比超过 50%，测点 2 超过 80%，测点 3 超过 70%。受试者对于三个测点的相对湿度均呈现不变的热偏好，占比超过 50%，但在实测中显示三个测点的相对湿度日均波动范围不同，其中测点 1 日均波动范围最大，说明受试者在冬季对相

对湿度的变化敏感程度较小。受试者位于测点2和测点3对于风速降低的热偏好占比高于测点1，受到住宅间距的影响，测点2和测点3热感觉处于冷和非常冷的占比高于测点1，且日均风速波动大于测点1，造成了受试者更偏好降低风速；三个测点受试者对于空气温度和太阳辐射的热偏好一半以上均呈现升高的情况，说明受试者对于太阳辐射的感知较高，希望通过提高空气温度，增加太阳辐射，来降低不舒适的状态。其中测点2对于空气温度和太阳辐射的升高需求最大，这是由于冬季太阳高度角较小，且该测点受到住宅间距的影响，测点2长时间段位于建筑的遮阴之下，因而位于该测点的受试者对于空气温度提升和太阳辐射增加的需求更高。总体来说，三个测点的气候环境各异，在住宅布局方式为行列式的情况下，影响三个测点热环境的原因主要为所处位置的住宅间距，和植被类型。

### 2.3 热舒适指标计算

在Rayman软件内可计算PET值，输入内容包括实测所得的空气温度、相对湿度、风速，以及通过公式计算得到的平均辐射温度值；其次还有通过问卷调查所得的受试者年龄、性别、身高、体重、衣着状态和活动量。在SPSS软件中建立平均热感觉投票PET和UTCI的线性回归方程，即可得出张家口市冬季小区室外中性PET和UTCI的热感觉温度值。其中平均辐射温度需要单独计算，平均辐射温度计算公式如下所示：

$$T_{mrt} = \left[ (T_g + 273)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 V_a^{0.6}}{\epsilon D^{0.4}} (T_g - T_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273$$

式中：

$T_{mrt}$ ——平均辐射温度（℃）；

$T_g$ ——黑球温度（℃）；

$T_a$ ——空气温度（℃）；

$V_a$ ——风速（m/s）；

$D$ ——黑球直径（m），实测时为0.08m；

——黑球表面辐射系数，为0.95。

平均热感觉投票与PET以及UTCI的线性回归方程以及散点图如下所示：

$$M_{TSV} = 0.097PET - 1.630 \quad (R^2 = 0.833, P < 0.001)$$

$$M_{TSV} = 0.076UTCI - 1.237 \quad (R^2 = 0.514, P < 0.001)$$

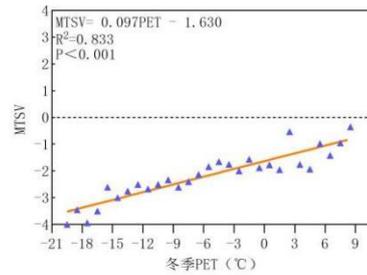


图5 冬季MSTV与PET拟合散点图

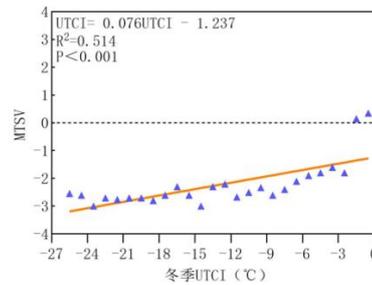


图6 冬季MSTV与UTCI拟合散点图

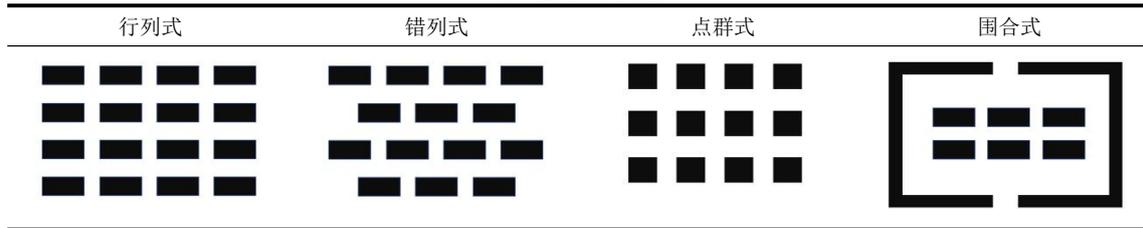
平均热感觉投票MTSV与PET的拟合R2值为0.833，当MTSV等于0时，即PET等于16.8℃时，张家口市小区室外人群热感觉处于热中性状态，当PET在-0.5到0.5之间时，热感觉处于中性温度范围，PET热中性温度范围在12.6℃到23.7℃之间；MTSV与UTCI的拟合R2值为0.514，当MTSV等于0时，即UTCI等于16.3℃时，张家口市小区室外人群热感觉处于中性状态，UTCI的中性温度范围是9.7℃到22.9℃。两个热环境评价指标的P值都小于0.001，说明PET和UTCI两个指标都可以很好的评价和预测张家口市冬季室外热环境，但对比PET和UTCI与张家口市冬季小区室外平均热感觉投票的拟合R2值可得，PET指标更接近于1，说明该指标更具敏感性，因而在评价张家口市冬季室外热环境时，宜选择PET作为评价指标。

## 3 优化措施

### 3.1 住宅布局

影响小区室外热环境的因素较为多样，除本文所研究得出的因素之外，还包括住宅布局方式和地面铺装因素，因此以下针对住宅布局、植被配置和地面铺装分别提出优化策略。住宅布局包括住宅的排列形式、住宅朝向和住宅间距，从住宅排列方式来说，小区常见布局形式有行列式，错列式、围合式和点群式，如表6所示。

表6住宅布局形态



每种住宅布局形式对小区室外热环境会产生不同影响。行列式布局排列平行规整，具有较好的光照和通风条件，当风向一定时，行列式住宅内部风热环境基本可以保持较为稳定的状态，除此以外，冬季太阳辐射对于提升空气温度具有一定作用，冬季太阳高度角变小，住宅投射在地面上的阴影变大，当采用行列式布局时可适当增加住宅的日照间距，将太阳辐射的投射面积增大，并利用小区地面以及住宅表面对空间的辐射热作用来提升小区室外热环境舒适度；错列式布局可视为行列式布局的变形，对小区内部风热环境影响显著，住宅的交错布置会导致小区内部局部风环境产生差异，形成局部风压增大或风影区分布不均匀的情况，但错列式布局对于住宅采光具有一定优势，若小区采用错列式布局的方式，应当使住宅边缘尽量与冬季主导风向保持平行，减少不利风向以及风影区分布不均造成的室外风环境差异；围合式布局中间留有一个较大的开阔空间，形成宅间空间共同围绕中心环境的布局方式，住宅中心可布置绿化景观，因而小区中心区域以及住宅之间和小区边界处的风热环境相差较大，因而当小区采用围合式布局时，应当在住宅朝向和间距上进行优化设计，减弱小区中心区域与宅间以及小区边界部分的风环境差异；点群式布局的特点是建筑排列灵活，间距较大，采光通风状况良好，在住宅之间可以自由布置景观，视觉感受上更加优美，住宅朝向不是单一朝向，间距较为开阔，因而小区

内部整体风压较小，地面可接受太阳辐射的面积较多，整体热环境较为均匀。综上，不论采用哪种住宅的布局方式，首先应当结合地域性差异进行规划设计，其次，当小区内部包含高层与多层住宅时，在保证小区内通风和污染物能够扩散的情况之下，可适当发挥高层住宅对于冬季主导风向的遮挡作用，形成防风屏障，减弱不利风向对小区室外热环境的影响。

### 3.2 植被配置

绿化被认为是改善城市热环境最为有效的策略之一，绿地面积、植被种类以及绿化布局的不同，都会对室外热环境产生影响，小区绿地主要由乔木、灌木和草坪组合而成，一方面可以美化环境，另一方面可以改善室外热环境。植被的影响作用主要产生于植被的叶面积指数，对于夏季而言，叶面积指数较大的植被能够起到良好的降温效果，而对于冬季而言，植被发挥的更多是防风作用，因而冬季小区住宅北侧可多种植常绿乔木，使其发挥对冬季盛行风风速的减弱作用和遮挡作用，同时也应当满足小区的光照要求，或增加植被的种类，丰富小区的下垫面，同样有利于减缓冬季盛行风强度。

### 3.3 地面铺装

不同的地面铺装对于室外热环境的辐射作用不同，常见的小区地面铺装有沥青、混凝土、水泥、透水砖或植草砖，如表7所示，照片来源为调研期间所拍。

表7常见小区铺装



从室外热环境角度来说，地表介质的改变使能量交换过程发生变化，影响路表温度高低的因素包括：反射率、导热系数、热容和发射率，通过改变室外硬质铺装

的类型可以有效改善居住小区室外热环境，地面铺装是通过对环境发射长波辐射，产生辐射热量来改变热环境状况，因而低反射率，高吸收率的铺装材质在人行处

的辐射热作用较强,对于居住人群的热感觉具有一定提升作用,冬季小区内部可适当提高低反射率、高吸收率的地面材质占比,来促进小区冬季热环境的改善。

#### 4 结论

本研究主要通过冬季对张家口市某行列式小区进行实测和调查问卷的方式,来了解张家口市小区居住人群在冬季的热感觉,并通过 Rayman 和 SPSS 软件计算修正张家口市中性 PET 和 UTCI 温度和范围,比较得出更适用于张家口市的热环境评价指标,并针对住宅布局、植被配置和地面铺装三个方面提出小区冬季热环境的改善策略,结论如下:

(一)测量期间问卷结果显示3个测点受试者热感觉普遍较差,说明张家口市冬季小区内部热环境改善空间较大,三个测点对于空气温度、相对湿度、风速和太阳辐射的热偏好不同,可以看出小区内部的热环境状况是不均匀的,其中大部分人群对于空气温度和太阳辐射的热偏好是升高,而对于风速和相对湿度并不敏感,然而风速和相对湿度对于热环境也会产生影响,说明张家口市小区常驻居民对于风环境和相对湿度产生了一定的适应性。

(二)张家口市冬季 PET 中性温度为 16.8,中性温度范围是 12.6℃到 23.7℃, UTCI 的中性温度为 16.3 摄氏度,中性温度范围是 9.7℃到 22.9℃。PET 与 MTSV 的拟合 R2 值为 0.833, UTCI 于 MTSV 的拟合 R2 值为 0.514, P 值都小于 0.001,两个指标都有较好的拟合度,但对比之下, PET 更适用于评价张家口市室外热环境。

(三)小区室外热环境的影响因素包含很多,通过分析张家口市小区冬季室外环境的实测结果和调查问卷结果,小区不同位置的热环境具有差异性,而导致这一差异性的原因主要为住宅的布局形态,住宅间距,植被配置等,因而根据地域性的差异采取合适的住宅布局方式,住宅间距或植被配置可以有效改善冬季小区的室外热环境。

#### 参考文献

- [1]姚春妮,丁洪涛,侯隆澍.我国净零碳社区(绿色繁荣社区)现状与发展建议[J].建设科技,2022,(19):16-19. DOI:10.16116/j.cnki.jskj.2022.19.003.
- [2]陈鑫.建筑垃圾高值化利用前景探讨[J].科技与创新,2024,(21):194-196. DOI:10.15913/j.cnki.kjyex.2024.21.060.
- [3]王琨,薛思寒.寒冷地区城市住区冬季室外热舒适特征研究[J].建筑科学,2022,38(12):85-92+151. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2022.12.11.
- [4]倪明龙,张英俊,刘明涛,等.火力发电厂集中控制室室内热舒适性研究[J].流体机械,2014,42(07):84-88.

本文系河北建筑工程学院创新基金,课题“寒冷地区高校冬季碳排放研究(XY2023069)”研究成果

作者简介:翟一泽,女,硕士,研究方向为建筑技术科学。

通信作者:武欣,女,副教授,主要研究方向为绿色建筑和建筑物理环境及微气候研究。