

文章编号: 1671-6612 (2025) 02-224-09

感知空气品质对户外空间室外热舒适的影响

罗 薇^{1, 2} 殷颖迪^{1, 2} 井文强^{1, 2}

张 锦^{1, 2} 秦泽明^{1, 2} 陈小珊¹ 沈 阳¹ 夏钰凯¹

(1. 西安欧亚学院人居环境学院 西安 710065;

2. 城市智慧建造陕西省高校工程研究中心 西安 710065)

【摘 要】 大气颗粒物污染对环境空气质量的影响不可忽视, 对大学生的个人健康和舒适性构成威胁。通过为期半年的夏季和秋季的户外微气候测量和纵向问卷调查, 研究了中国西安大学校园户外人群感知空气品质对热舒适的影响, 结果表明: (1) 在夏秋两季时 ($PET < 32^{\circ}\text{C}$, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低于 $123\mu\text{g}/\text{m}^3$), 空气满意度投票和热感觉投票均呈正相关, 即当受试者对室外环境的空气品质质量更满意时, 他们对环境的 TSV 倾向于更热的投票。当人体对空气环境满意度越高时, 对于环境的热舒适就越高。(2) 进一步依据空气满意度将人群划分为满意组 ($\text{PM}_{2.5}$ 浓度为 $7\sim 40\mu\text{g}/\text{m}^3$)、中性组 ($\text{PM}_{2.5}$ 浓度为 $41\sim 79\mu\text{g}/\text{m}^3$) 和不满意组 ($\text{PM}_{2.5}$ 浓度为 $80\sim 123\mu\text{g}/\text{m}^3$) 时发现: 在夏季和秋季, 当 PET 范围在 $16\sim 40^{\circ}\text{C}$, 空气品质不满意组的人群的热感觉多为“Hot” (34.8%和 1.3%), 感到不满意的人群占比最高 (15.0%和 2.3%), 其中夏季更为明显。(3) 但当夏季 PET 高于 32°C 时, 空气环境不满意组的热感觉投票值明显高于其他两组, 夏季高于秋季。在高温环境下, 空气品质不满意的人群的热感觉的变化幅度更明显 ($\Delta\text{TSV}=1.1$); 对空气品质感到满意的人群对热环境舒适的比例高于不满意的人群, 这对于夏季和秋季都是一致的。

【关键词】 空气品质; 室外热舒适; 空气品质满意度; 热感觉; PET

中图分类号 TU111 文献标志码 A

The Influence of Air Quality on Outdoor Thermal Comfort in Campus Outdoor Public Space

Luo Wei^{1,2} Yin Yingdi^{1,2} Jing Wenqiang^{1,2}

Zhang Jin^{1,2} Qin Zeming^{1,2} Chen Xiaoshan¹ Shen Yang¹ Xia Yukai¹

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Eurasia University, Xi'an, 710065;

2. Urban smart construction Engineering Research Center of Shaanxi University, Xi'an, 710065)

【Abstract】 The impact of atmospheric particulate matter pollution on ambient air quality is significant and poses a threat to the personal health and comfort of university students. This study, conducted through a six-month outdoor microclimate measurement and longitudinal questionnaire survey during the summer and autumn seasons, examined the influence of outdoor air quality perception on thermal comfort among people in a university campus in Xi'an, China. The results showed that: (1) During the summer and autumn seasons (with $PET < 32^{\circ}\text{C}$ and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations below $123\mu\text{g}/\text{m}^3$), there was a positive correlation between

基金项目: 西安欧亚学院智能建造技术工程中心 (2022XJPT01);

西安欧亚学院校级科研基金项目-基于人体湿热感觉的户外体育训练空间物理环境品质预测研究 (2023XJZK04);

西安欧亚学院科研创新团队: 建筑建造技术科研创新团队 (2021XJTD01)

作者 (通讯作者) 简介: 罗 薇 (1996.03-), 女, 硕士, 讲师, E-mail: wlouaj@163.com

收稿日期: 2024-08-12

air satisfaction votes and thermal sensation votes, indicating that when the participants were more satisfied with the outdoor air quality, their TSV tended to lean toward a warmer vote. The higher the satisfaction with the air environment, the higher the perceived thermal comfort. (2) Further grouping participants based on air satisfaction into satisfied ($PM_{2.5}$ concentration: $7\sim 40\mu g/m^3$), neutral ($PM_{2.5}$ concentration: $41\sim 79\mu g/m^3$), and dissatisfied groups ($PM_{2.5}$ concentration: $80\sim 123\mu g/m^3$), the study found that in both summer and autumn, the thermal sensation of the dissatisfied group was predominantly "Hot" (34.8% in summer and 1.3% in autumn), with the highest proportion of dissatisfaction (15.0% in summer and 2.3% in autumn), particularly in the summer. (3) However, when the summer PET exceeded $32^\circ C$, the thermal sensation votes of the dissatisfied group were significantly higher than those of the other two groups, with the summer values higher than those of autumn. Under high-temperature conditions, the variation in thermal sensation among those dissatisfied with air quality was more pronounced ($\Delta T_{SV}=1.1$). Those satisfied with the air quality experienced a higher proportion of thermal comfort than those dissatisfied, consistent for both summer and autumn.

【Keywords】 Air quality; Outdoor thermal comfort; Air Quality Satisfaction; Thermal Sensation; PET

0 引言

在校园环境中,户外空间对学生的校园生活非常重要,它将直接影响学生的生活质量。一个舒适健康的户外空间有助于鼓励大学生进行户外锻炼,保障大学生的健康和福祉^[1]。

近几年,随着城市化的发展,以 $PM_{2.5}$ 为主要成分的空气质量对人群的身心健康造成了威胁。而人群的室外热舒适受到综合环境的影响。因此,创造一个健康舒适的空气质量环境,对于保证学生户外热舒适和身心健康以及城市的可持续性发展都有着重要的意义。

近几年,许多学者针对大学校园热环境和学生的室外热舒适开展了研究。Li Jianong^[2]等人调查了太阳和风条件对香港校园学生室外热舒适的评价,研究结果表明受试者的热感觉效应取决于阳光和风条件的可取性,对阳光条件比风条件更宽容。Huang Zefeng^[3]等人对中国夏热冬冷地区的绵阳某大学校园进行了室外热舒适和适应行为调查,结果表明性别与 TSV、TCV 无关。Chen Xin^[4]等人针对中国严寒地区的哈尔滨工业大学进行了为期一年的纵向户外热感觉和热舒适调查,发现在心理适应方面,热期望和热舒适需求随季节变化而变化,证明了心理适应的存在。目前,大多数校园热环境和户外热舒适的研究集中在气象参数^[2]、生理参数^[3]和心理^[4,5]方面,对于空气质量对热舒适的影响研究较少。其中,多数学者的研究也仅局限在室内。Sadat^[6]分析了室内环境质量 IEQ (包括热舒适、室内空气质量、视觉、听觉舒适度)对英国小学儿童总体舒适度的影响。最终提出了在考虑居住者健康

的 IEQ 因素中,室内空气质量和热舒适应给予最高的优先权。Fang^[7]等人发现空气质量评价与温度有很强的相关性。当温度下降时,感知的空气质量可能会显著改善。Jialu Liu^[8]等人以室外温度为 $10^\circ C$ 时,自然通风的西安的大学教室为研究区域。结果发现居住者对室内空气质量的可接受性主要受热感觉的影响。当参与者对热环境感觉中性时,他们对室内空气质量的感知达到最佳。尽管有学者指出了空气质量与人群热舒适存在一定关联性,但缺少定量分析。且大多数研究集中在室内,对于室外空气质量与热舒适的研究较少。同时,多数对空气质量的评价集中在实测数据分析,缺乏对人群空气质量的主观评价。因此,研究方法应由客观评价转向主观与客观评价结合的方式,综合评价空气质量对热舒适的评价。

空气质量影响着人体的健康程度,同时空气品质和热环境也是对人体热舒适影响最重要的方面,本研究选取户外校园四个典型的空间场所探讨空气质量对人体热感知的影响。本研究的主要目的是:(1)得到空气质量与室外热舒适之间的相互作用。(2)按照空气质量满意度进行分组,评估分组人群热舒适的差异性。(3)估计不同空气满意分组下人群的 PET 分布特点。根据调查,空气质量的评价与热舒适的关系是基于主观和客观测量与相关性分析进行预测的。

1 研究方法

1.1 研究区域

西安属于寒冷地区,冷暖干湿四季分明。夏季

炎热多雨，冬季寒冷少雨雪，春秋时有连阴雨天气出现。研究区位于西安欧亚学院（108.9235°N，34.17768°E），校园占地面积 286835.68 平方米，校园绿化率在 65%以上。本次调查选择具有一定广泛性和代表性，包括教学区、休憩区、活动区绿荫道和宿舍区等。为了研究空气品质对校园人群户外

公共空间热舒适的影响，经过实地调查，考虑在日常学习活动中所选的环境的人流量和不同的景观类型，我们选取 4 个典型的观测点进行气象观测，分别对应停车场、教学楼之间的空地、校园的林荫路下以及无遮阳的草坪（见图 1）。

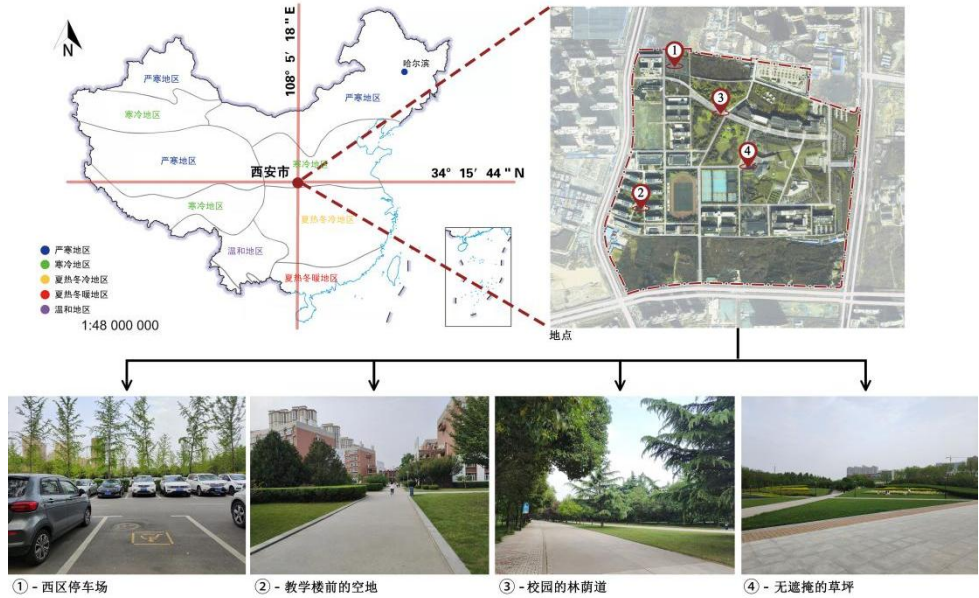


图 1 研究区域及试验场地

Fig.1 Study area and test site

1.2 现场数据采集

实验选择 2023 年 6 月 1 日-11 月 5 日作为研究周期进行气象参数监测，西安夏秋冬季节的平均初日分别为 5 月 23 日、9 月 8 日和 11 月 6 日^[9]，因此根据实验时间按照夏季 6 月 1 日-9 月 7 日，秋季 9 月 8 日-11 月 5 日每天 10:00-10:30 进行测试。利用室外气象站分别对空气温度、相对湿度、

PM_{2.5} 参数进行每 10min 一次的数据采集，测点距地面高 1.5m（选取行人层面高度）。风速使用手持式 Digital Anemometer AS836 进行测量。根据 ISO 7726 1998^[10]有关要求对仪器选择，并符合测试的准确性和敏感性，室外气象站的测量精度和仪器量程如表 1 所示。

表 1 室外气象站测量精度及仪表量程

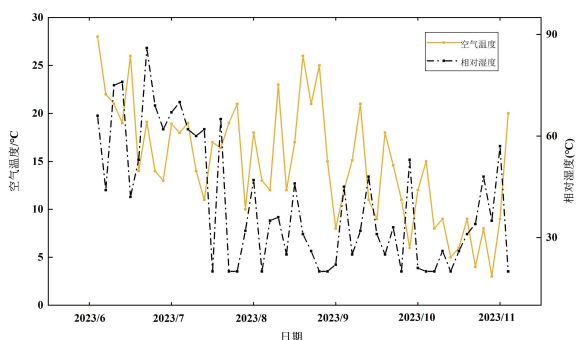
Table 1 Measurement accuracy and instrument range of outdoor weather stations

	测量仪器	仪器精度	测量范围	测量方法
风速	数字风速计 AS836	±(0.2+0.03V)m/s	0~45m/s	手动
PM _{2.5}		0.2micron	0.0~999.9µg/m ³ ; 0~20µg/m ³	
温度	室外气象站	±0.5℃	-40~+125℃	自动
相对湿度		±1%	0~100%RH	

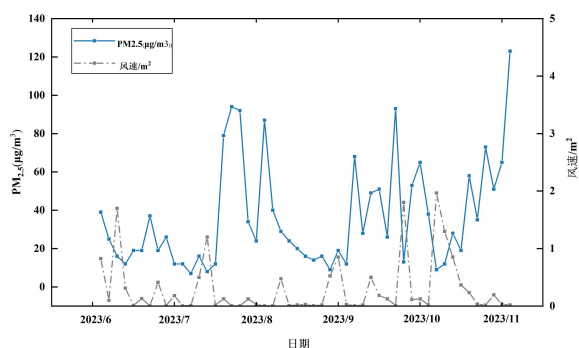
图 2 为调查期间(2023 年 6 月 1 日-11 月 5 日)室外微气候的气象参数。从图 2（a）可以得出，气温在 6 月 27 日达到最高峰为 29℃，气温在 10

月 28 日达到最低值为 3℃，调查期间的平均气温为 14.4℃；相对湿度最高为 86%，最低为 20%，调查期间的平均湿度为 41%。图 2（b）可以看到，

调查期间的风速均低于 2m/s, 平均风速为 1.3m/s。户外空气品质在 6-7 月较好, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 $7\sim 39\mu\text{g}/\text{m}^3$ 范围内波动。调查期间 $\text{PM}_{2.5}$ 在 11 月 14 日达到最大值为 $123\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 在 7 月 5 日达到最小值为 $7\mu\text{g}/\text{m}^3$, 表 2 显示调查期间夏季平均 $\text{PM}_{2.5}$ 为 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$, 秋季平均 $\text{PM}_{2.5}$ 为 $51\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。



(a) 室外空气温度和相对湿度的变化



(b) 室外 $\text{PM}_{2.5}$ 与风速的变化

图 2 调查期间室外微气候的气象参数

Fig.2 Meteorological parameters of outdoor microclimate during the survey period

表 2 夏秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 测试结果的差异性

Table 2 The difference of $\text{PM}_{2.5}$ test results in summer and autumn

季节	$\text{PM}_{2.5}/(\mu\text{g}/\text{m}^3)$		
	最大值	最小值	平均值
夏季	94	7	35
秋季	123	12	51

1.3 热舒适问卷

本实验招募了 50 名健康的学生, 并随机分配到四个典型的空间进行主观评价, 最终回收有效问卷 1950 份, 其中夏季份 1032 份, 秋季份 918 份。所有的受试者被告知问卷的目的, 并自愿参加问卷调查。每个志愿者在填写问卷时, 要求 20min 体验

当下的环境并用 10min 填写问卷。热舒适性问卷和室外测量同时进行。问卷由三部分构成: 基本信息、受试者主观感受。问卷第一部分记录了受试者的年龄、性别、户籍、健康状况、活动水平和衣着情况。第二部包括受试者的热感觉(TSV)、热舒适(TCV)以及空气品质满意度(AQS)。其中, 热感觉采用 ASHRAE 7 级量表, 从 (-3) 冷到 (+3) 热。空气品质满意度和热舒适采用李克特五分制进行评估, 分别对应非常不满意 (-2) 到非常满意 (+2) 以及非常不舒适 (-2) 到非常舒适 (+2), 如表 3 所示。由于是在校园内进行的, 研究对象为学生, 其中男性和女性分别占 61.8% 和 38.2%。研究对象年龄一般在 18-20 岁之间。经计算, 其中夏季和秋季平均代谢率分别 (Met) 为 1.34Met 和 1.12Met, 平均服装热阻 (Clo) 分别为 0.49Clo 和 0.76Clo。

表 3 调查问卷的主观评价

Table 3 Subjective evaluations as used in the survey

questionnaires			
分级	TSV	TCV	AQS
3	Hot	——	——
2	Warm	Very comfortable	Very comfortable
1	Slightly warm	Comfortable	Comfortable
0	Neutral	Neutral	Neutral
-1	Slightly cool	Uncomfortable	Uncomfortable
-2	Cool	Very uncomfortable	Very uncomfortable
-3	Cold	——	——

1.4 PET 指标

PET 被定义为在典型的室内环境下的生理平衡温度与对应的室外条件下人体达到相同的热状态时所对应的温度, 它是基于 Munich Personal Energy Balance Model (MEMI) 的综合评价热环境指标^[10]。

目前, PET 已经成为用来评估户外复杂的气候环境使用较多的指标^[12-14]。在本文的研究中, 我们使用 Rayman 进行 PET 的计算, 需要参数包括 T_a 、 RH 、 V_a 、 G 以及 T_{mrt} 。其中: T_a 为空气温度; RH 为空气湿度; V_a 为空气风速; G 为太阳辐射; T_{mrt} 平均辐射温度表示环境周围温度对人体辐射作用

的平均温度,用来评价人体热舒适或计算人体辐射热损失的常用参数。由公式(1)和 ISO 7726 standard^[15]计算而得:

$$T_{mrt} = [(T_g + 273)^4 + \frac{1.10 \times 10^8 V_a^{0.6}}{\varepsilon D^{0.4}} (T_g - T_a)]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (1)$$

式中: T_g 为地球温度, $^{\circ}\text{C}$; D 为球体直径, 取 0.150m; ε 为球体的吸收率, 取 0.95。

2 结果分析

2.1 热感觉与空气品质满意度的关系

对夏秋两季的 AQS 与 TSV 和 TCV 的数据分别绘制直方图, 结果发现数据分布明显偏离正态分布, 且呈现出偏态和峰态的特征。为进一步验证数据的相关性, 通过计算斯皮尔曼相关系数 (ρ) 来检验 TSV 和 TCV 对于空气品质满意度的之间的显著性。如表 4 所示, 我们发现, 夏季的人群的热感觉和热舒适与空气品质投票热舒适均在 0.05 水平上显著, 而秋季的热感觉和热舒适对 AQS 影响显著 ($***\rho < .001$)。夏季和秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 与空气品质满意度均在 0.000***水平上显著。

表 4 TSV、TCV 与空气质量满意度 AQS 的相关性

Table 4 Correlation between TSV and TCV and air quality satisfaction AQS

		AQS			
		夏季		秋季	
TSV	R^2	0.682		R^2	0.705
	P	0.039*		P	0.000***
	ρ	0.244		ρ	0.322
TCV	R^2	0.701		R^2	0.785
	P	0.021*		P	0.000***
	ρ	0.267		ρ	0.385
$\text{PM}_{2.5}$	R^2	0.926		R^2	0.892
	P	0.000***		P	0.000***
	ρ	0.108		ρ	0.289

注: ***表示在 0.001 水平上显著; **表示在 0.01 水平上显著; *表示在 0.05 水平上显著。

Spearman 相关系数表明 TSV 与 AQS 之间存在显著相关 ($p\text{-value}_1=0.039$, $\rho_1=0.244$, $R_1^2=0.682$; $p\text{-value}_2=0.000$, $\rho_2=0.322$, $R_2^2=0.705$)。如图 3 (a)、(b) 所示显示了夏季和秋季的人体热感觉和空气

品质满意度投票的评价结果 (1°C 为 PET 为划分)。PET $< 32^{\circ}\text{C}$, 可以看到, 夏季和秋季的 TSV 和 AQS 之间均存在较强的相关性 ($R_1^2=0.68$ 和 $R_2^2=0.71$)。夏季时, $\text{PM}_{2.5}$ 范围在 $7\sim 95\mu\text{g}/\text{m}^3$, TSV 的波动范围从 -1~2.08, 平均值为 0.41, 偏向于有点暖和。空气品质投票热舒适范围在 -1.1~0.34, 平均值为 -0.25, 偏向于有一点不舒适。当 AQS=-0.45 时, 即当空气品质有一点不舒适时, 人体热感觉为中性。当 TSV ≥ 0.84 (PET= 17.9°C) 偏暖和时, 人们对于环境的空气品质评价偏向舒适。秋季时, $\text{PM}_{2.5}$ 范围在 $12\sim 123\mu\text{g}/\text{m}^3$, TSV 的波动范围在 -2.5~0.5 之间, 平均值为 -0.72, 偏向有点凉。空气品质投票热舒适范围在 -1.8~0.72, 平均值为 -0.39, 较夏季波动更大且评价值更低。当 AQS=0.27 时, 即当空气品质偏舒适时, 人体热感觉为中性。当 TSV ≥ -0.30 (PET= 12.5°C) 偏凉爽时, 人们对于环境的空气品质评价逐渐舒适。即人群在秋季感到不冷不热的热状态时, 空气品质的评价值比夏季要高 0.72。当受试者对室外环境的空气品质质量更满意时, 他们对环境的热感觉倾向于更热的投票。

Spearman 相关系数表明 TCV%与 AQS 之间存在显著相关 ($p\text{-value}_3=0.021$, $\rho_3=0.267$, $R_3^2=0.304$; $p\text{-value}_4=0.000$, $\rho_4=0.385$, $R_4^2=0.785$)。图 3 (c)、(d) 所示为夏季和秋季的人群对环境的热舒适百分比与空气品质满意度的评价结果 (1°C 的 PET 为划分)。PET $< 32^{\circ}\text{C}$, 可以得到夏季和秋季的 TCV 百分比和 AQS 之间也存在较强的相关性 ($R_3^2=0.71$ 和 $R_4^2=0.78$)。秋季的环境的满意度随空气品质投票的增长更快。 $\text{PM}_{2.5}$ 范围在 $7\sim 95\mu\text{g}/\text{m}^3$, 人群在夏季对环境满意度的百分比从 2.02%~30.12%, 平均值为 18.24%, 即在对于户外环境的热舒适偏低。当 AQS=0.34 时, 有 30% 的人群感到舒适, 此时环境的热舒适评价达到最佳。秋季时, $\text{PM}_{2.5}$ 范围在 $12\sim 123\mu\text{g}/\text{m}^3$, 环境满意度的波动范围为 5.02%~55.1%, 平均值为 22.55%, 比夏季高 4.31%。当 AQS=0.93 时, 有 55% 的人群感到舒适, 此时环境的热舒适评价达到最佳。当 AQS=0 时, 分别有夏季 21% 和秋季 28% 的人对于当前环境的热舒适感觉满意, 秋季较夏季满意度有所提升。由此得到如果受访者对于空气品质的评价结果更满意, 那么他们对于环境的热舒适的投票结果会更满意。

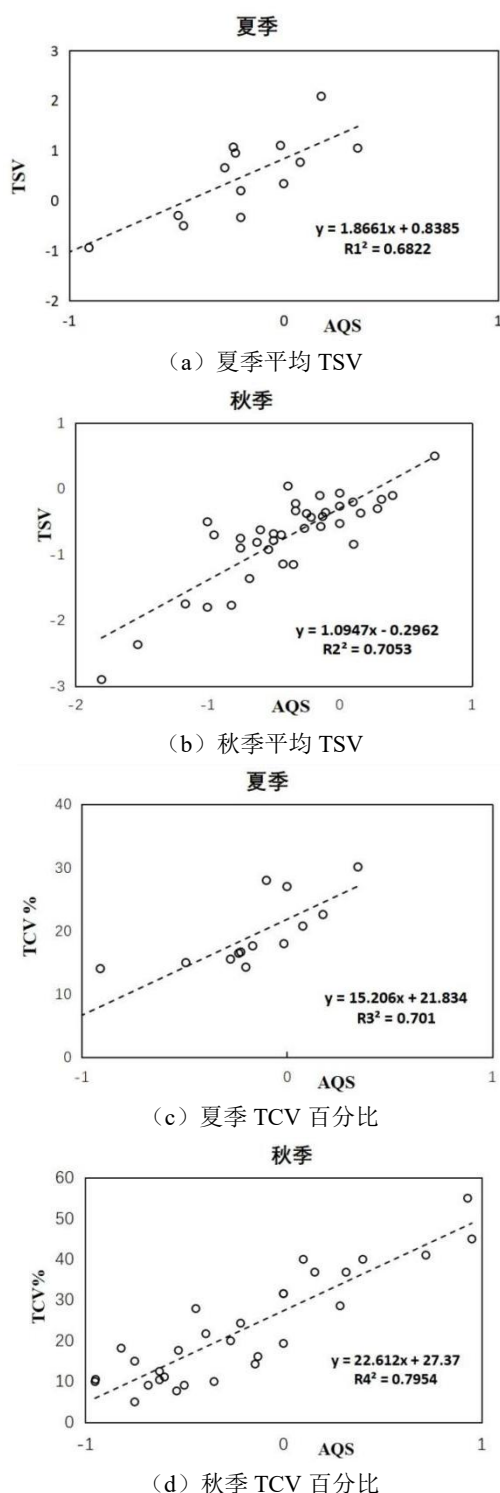
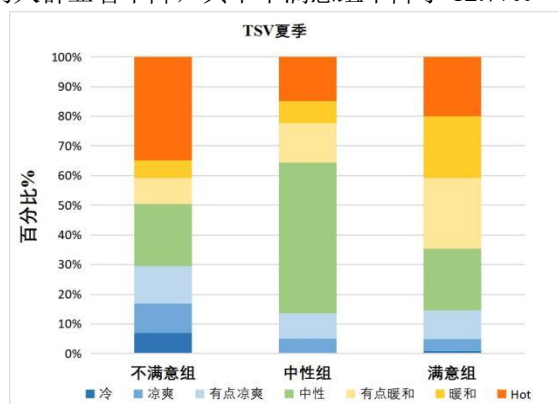


图 3 夏季平均 TSV 与秋季平均 TSV 与 AQS 散点图夏季 TCV 百分比和秋季 TCV 百分比与平均 AQS 的散点图

Fig.3 Scatterplots between mean TSV in summer and mean TSV and AQS. Scatterplots between percentage of TCV in summer and percentage of TCV in autumn and AQS

2.2 不同空气满意度的人群热舒适差异分析

为了检测人群的 TSV 和 TCV 是否在空气品质满意度之间分布,我们将人群对于空气品质的评价根据 $PM_{2.5}$ 浓度范围划分成了满意、中性和不满意三组并进行了 K-S 检验,其中空气满意组、中性组以及不满意组的 $PM_{2.5}$ 的浓度范围分别是 $7\sim 40\mu g/m^3$ 、 $41\sim 79\mu g/m^3$ 以及 $80\sim 123\mu g/m^3$ 。K-S 检验表明,当 PET 范围在 $16\sim 40^\circ C$,在夏季空气品质满意组的 TSV 分布与中性组和不满意组存在显著差异 ($p < 0.001$)。夏季,对空气环境不满意的受访者中,有 34.8% 的人群感觉到很热,其余两组分别是 14.9% 和 19.9% (见图 4 (a))。在秋季时,空气品质不满意组的 TSV 分布与中性组和满意组存在显著差异 ($p < 0.001$)。对空气环境不满意的受访者中,有 33.8% 的人群感觉到有点凉爽,其余两组分别是 17.3% 和 20.4% (见图 4 (b))。相较夏季,秋季对空气环境不满意的被调查者的热感觉主要偏向有点凉爽,而满意组的人群中占到比例最大的热感觉为有点暖和,占到 34.6%,不满意组和中性组仅为 7.3% 和 10.2%。而 K-S 检验也显示 TCV 分布在三组空气品质满意度之间存在差异。其中,三组人群的夏季环境的满意率依次升高分别为 12%、15.4% 和 32.3% (见图 4 (c)),对于空气品质评价为中性的人群来说,他们对于整体环境的评价也偏向于中性且满意率和不满意率接近,空气品质满意组人群对于整体环境的热舒适评价分级(不舒服、中性和舒适)更加均匀。值得注意的是在不满意组和满意组的不满意投票比例分别是 56.8% 和 27.9%。如图 4 (d) 秋季三组人群的满意率仍依次升高分别为 12%、14.9% 和 36.6%,相较夏季满意率略高。不满意组和满意组的不满意投票比例分别是 52.4% 和 25.1%,与夏季相比三组感觉到非常不满意的人群显著下降,其中不满意组下降了 12.7%。



(a) 夏季

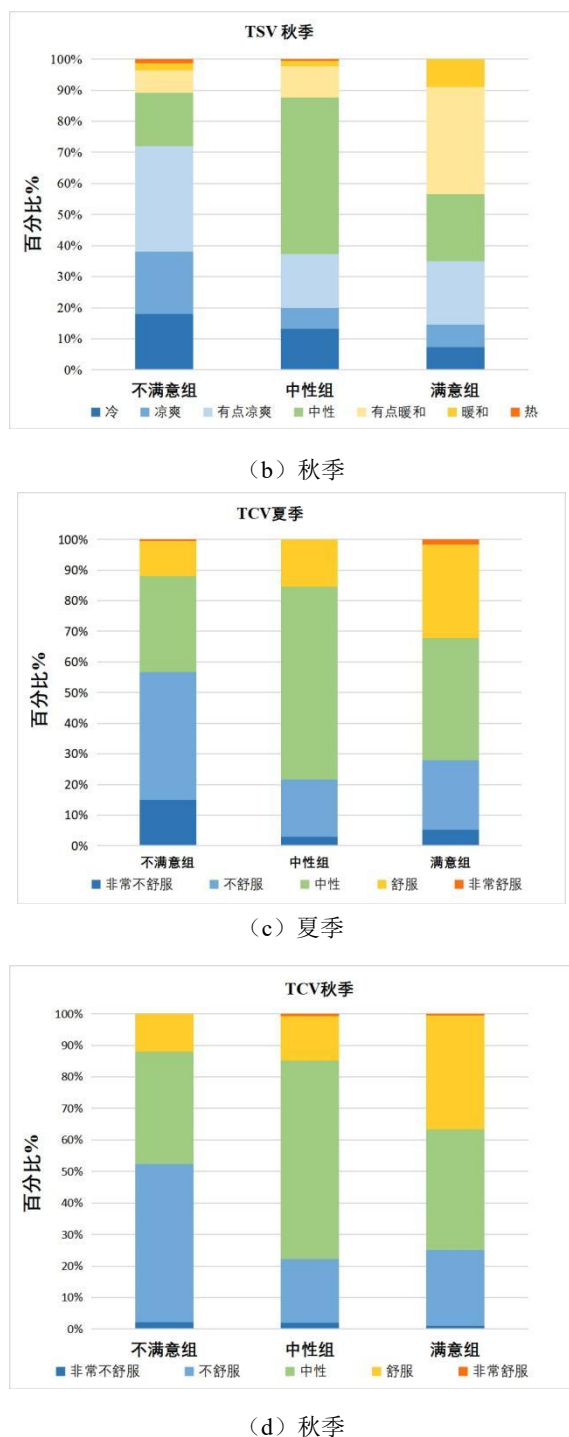


图4 根据空气品质满意度的夏季和秋季 TSV 分布以及夏季和秋季的 TCV 分布

Fig.4 Summer and autumn TSV distributions and summer and autumn TCV distributions based on air quality satisfaction

2.3 不同空气满意度的人群 PET 差异分析

空气品质满意度对于热感觉起着重要的作用，

如图 5 (a)、(b) 表示三组空气品质满意度下的人体热感觉和 PET 之间的关系。由此可以看出，三组数据在整体趋势上基本一致，其中夏季 $PM_{2.5}$ 范围在 $7\sim 95\mu g/m^3$ 时，不满意组和中性组均有较高的相关性 ($R_1^2=0.71$ 和 $R_2^2=0.62$)，而满意组的相关性最低 ($R_3^2=0.3$)。秋季三组数据较夏季相比更加集中且均保持着较高的相关性，中性组 ($R_1^2=0.69$) > 不满意组 ($R_2^2=0.68$) > 满意组 ($R_3^2=0.60$)。在夏季当 PET 高于 $32^\circ C$ 时，对于空气品质不满意的受试者的 TSV 高于对于空气品质中性和满意的人群。而秋季 $PM_{2.5}$ 范围在 $12\sim 123\mu g/m^3$ ，不满意组的 TSV 始终低于中性组和不满意组。在夏季超过 $32^\circ C$ 环境， $PM_{2.5}$ 范围在 $7\sim 95\mu g/m^3$ 时，空气品质不满意的人群的热感觉的变化幅度 ($\Delta TSV=1.1$) 较满意组 ($\Delta TSV=0.9$) 和中性组 ($\Delta TSV=0.4$) 更明显。热感觉对于热环境变化 (对于 PET) 的敏感性高低夏季依次为不满意组 (斜率为 0.1127)、满意组 (斜率为 0.0767) 和中性组 (斜率为 0.0426)。秋季依次为不满意组 (斜率为 0.0744)、中性组和满意组相比均不太敏感 (斜率为 0.0541 和 0.0507)。这表明对空气品质不满意组对于温度变化最为敏感，其中夏季的敏感性高于秋季。

图 5 (c)、(d) 显示了不同空气满意度分组下人体对周围环境热舒适与 PET 的线性关系。其中，在夏季，中性组和不满意组的 TCV% 差异不大，平均满意率中性组高于不满意组 3%；满意组对环境的热舒适最高，平均满意率为 30%。当 PET 每增加 $1^\circ C$ 时，对于空气品质感到满意的受试者的 TCV% 下降 0.71%，而对于空气品质感受度为不满意的人群下降速率为 0.69%。然而，对于空气环境中性的人群，随着温度的升高，热舒适满意率下降的速率更快 (斜率=0.54)。在秋季，不满意组和中性组的 TCV% 差异不大，但平均满意率不满意组高于中性组 2.06%；满意组对的热舒适仍是最高，平均满意率达到 31.94%，相较不满意组高出 10%。而与夏季不同的是，随着 PET 的增加 ($PET \leq 30^\circ C$)，人群对于环境的热舒适逐渐提升。当 PET 每增加 $1^\circ C$ 时，对于空气品质感到满意的受试者 TCV% 升高 1.95%，而对于空气品质感受度为不满意的人群上升速率为 1.63%。对于空气环境感到满意的人群受温度的变化影响，满意率上升的更快。

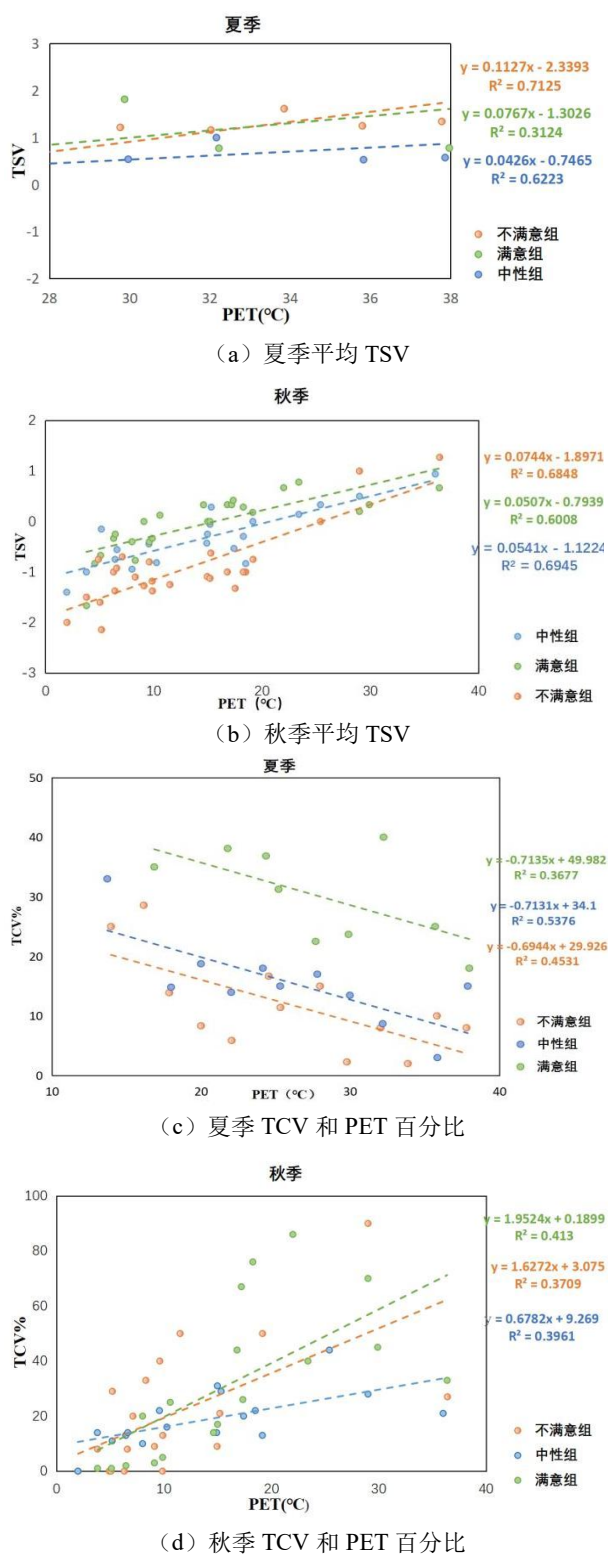


图5 夏季平均 TSV 和 PET 秋季平均 TSV 和 PET 夏季 TCV 和 PET 百分比秋季 TCV 和 PET 百分比之间的散点图

Fig.5 Scatterplots between mean TSV and PET in summer mean TSV and PET in autumn, and percentage of TCV and PET in summer percentage of TCV and PET in autumn

3 结论与展望

本文选取了西安欧亚学院校园 4 个典型室外空间作为研究对象,采用实际测量气象参数和问卷调查的方法,以揭示校园户外空气质量对人体主观热感觉和热舒适的影响。主要结论如下:

(1) 在夏季和秋季 ($PET < 32^{\circ}\text{C}$, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低于 $123\mu\text{g}/\text{m}^3$) AQS 和 TSV 均呈正相关,即当受试者对室外环境的空气品质质量更满意时,他们对环境的 TSV 倾向于更热的投票。当 $\text{TSV}=0$ 时,秋季的 AQS 比夏季高 0.72; 人体对空气环境满意度越高时,对于环境的 TCV 就越高。秋季对热环境的满意度较夏季提高 4.31%,且当空气环境达到最佳值时,有超过一半的人对环境的热舒适感到满意,较夏季增长了 25%。

(2) 在夏季和秋季,当 PET 范围在 $16\sim 40^{\circ}\text{C}$, $\text{PM}_{2.5}$ 为 $80\sim 123\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,不同空气品质满意度的人群 TSV 和 TCV 存在差异性,空气品质不满意组的人群的热感觉中“hot”占比最高,分别为 34.8% 和 1.3%。因此,感到不满意的人群 ($\text{TCV}=-2$) 比例占比最高,分别为 15.0% 和 2.3%。空气品质中性组 ($\text{PM}_{2.5}$ 为 $41\sim 79\mu\text{g}/\text{m}^3$) 的人群的热感觉“Neutral”占比最高,分别为 50.8% 和 50.2%,其中感到中性的人群 ($\text{TCV}=0$) 比例占比最高,分别为 63.0% 和 62.9%。在满意组 ($\text{PM}_{2.5}$ 为 $7\sim 40\mu\text{g}/\text{m}^3$) 中,感觉到舒适 ($\text{TCV}=1$) 的比例最高,分别为 30.5% 和 36.1%。

(3) 对比不同空气满意度的 PET 差异时发现,在夏季 PET 超过 32°C , $\text{PM}_{2.5}$ 范围在 $7\sim 95\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,空气环境不满意组的热感觉投票值高于其他两组,空气品质不满意的人群的热感觉的变化幅度 ($\Delta\text{TSV}=1.1$) 较满意组 ($\Delta\text{TSV}=0.9$) 和中性组 ($\Delta\text{TSV}=0.4$) 更明显;空气品质不满意组对于温度变化最为敏感,其中夏季的敏感性高于秋季。此外,对空气品质感到满意的人群对热环境舒适的比例高于不满意的人群,这对于夏季 (平均满意率=30%) 和秋季 (平均满意率=31.94%) 都是一致的。

由于人体热感觉的投票与感知空气品质投票不一致,在未来可以在特定工况下进一步修正 TSV,以验证 TSV 与感知空气品质的相关性。室外环境中对空气品质感到满意的人群对热环境舒适的比例高于不满意的人群,这在夏季和秋季都是一致的,人们在空气质量更好的环境中会有更高的热

舒适。这有助于更全面地理解人们的热感知是如何受户外环境条件的影响,也对于未来在校园规划和城市建设中获得更好的室外热舒适具有指导价值和意义。

参考文献:

- [1] Niu J, Hong B, Geng Y, et al. Summertime physiological and thermal responses among activity levels in campus outdoor spaces in a humid subtropical city[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,728:138757.
- [2] Li J, Niu J, Mak C M, et al. Assessment of outdoor thermal comfort in Hong Kong based on the individual desirability and acceptability of sun and wind conditions[J]. *Building and Environment*, 2018,145:50-61.
- [3] Huang Z, Cheng B, Gou Z, et al. Outdoor thermal comfort and adaptive behaviors in a university campus in China's hot summer-cold winter climate region[J]. *Building and environment*, 2019,165:106414.
- [4] Chen X, Xue P, Liu L, et al. Outdoor thermal comfort and adaptation in severe cold area: A longitudinal survey in Harbin, China[J]. *Building and Environment*, 2018,143:548-560.
- [5] Zhang T, Su M, Hong B, et al. Interaction of emotional regulation and outdoor thermal perception: A pilot study in a cold region of China[J]. *Building and Environment*, 2021,198:107870.
- [6] Sadat S K, Azadeh M, Dejan M. The impact of indoor environment quality (IEQ) on school children's overall comfort in the UK; a regression approach[J]. *Building and Environment*, 2020:185.
- [7] Fang L, Clausen G, Fanger P O. Impact of Temperature and Humidity on Perception of Indoor Air Quality During Immediate and Longer Whole-Body Exposures[J]. *Indoor Air*, 1998,8(4):276-284.
- [8] Liu J, Yang X, Jiang Q, et al. Occupants' thermal comfort and perceived air quality in natural ventilated classrooms during cold days[J]. *Building and Environment*, 2019,158:73-82.
- [9] 高红燕,梁佳,张曦,等.西安四季变化的差异性及其阶段性特征[J].*陕西气象*,2021,(1):33-39.
- [10] ASHRAE 55-2017, Standard 55-2017-Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ANSI/ASHRAE Approved)[S]. ASHRAE A, Standard AS. 55-2017, Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta: ASHRAE, 2017.
- [11] P Höppe. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment[J]. *Int. J. Biometeorol.*, 1999, (43):71-75.
- [12] Shooshtarian S, Lam C K C, Kenawy I. Outdoor thermal comfort assessment: A review on thermal comfort research in Australia[J]. *Building and Environment*, 2020,177:106917.
- [13] Potchter O, Cohen P, Lin T P, et al. Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification[J]. *Science of The Total Environment*, 2018,631-632(AUG.1):390-406.
- [14] Lai D, Lian Z, Liu W, et al. A comprehensive review of thermal comfort studies in urban open spaces[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,742:140092.
- [15] Standard, ISO 7726 Ergonomics of the thermal environment — instruments for measuring physical quantities, ISO Stand, (1998)ISO 7726:1998[S]. International Organization for Standardization. Ergonomics of the thermal environment: instruments for measuring physical quantities. ISO, 2002.