2026 年 第 26 卷 第 29 期
2026, 26(29): 12726-09

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671-1815
CN 11-4688/T

DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2508873

引用格式:许甜甜, 蒋成林, 杜晨秋, 等. 基于 ISM-MICMAC 的室外热舒适影响因素作用路径[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(29): 12726-12734.

Xu Tiantian, Jiang Chenglin, Du Chenqiu, et al. Interactive pathways of outdoor thermal comfort influencing factors based on ISM-MICMAC [J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(29): 12726-12734.

建筑科学

基于 ISM-MICMAC 的室外热舒适影响因素作用路径

许甜甜[1,2], 蒋成林[1], 杜晨秋[2], 刘吉营[1]

(1. 山东建筑大学热能工程学院, 济南 250101; 2. 重庆大学绿色建筑与人居环境营造国际合作联合实验室, 重庆 400045)

摘 要 为厘清室外热舒适影响因素的层级结构、交互关系与作用路径,完善室外热舒适理论体系,对室外热舒适影响因素进行梳理分类,通过解释结构模型与交叉影响矩阵相乘(interpretive structural modeling and matrices impacts croises-multiplication appliance classement,ISM-MICMAC)方法,构建因素系统的递阶结构模型并分析驱动-依赖特征。结果表明:9 项因素可划分为 4 级层级结构,气候特征为根本驱动因素,微环境因素、街区空间形态与社会因素为第三层级的关键驱动因素,热经历与个人因素为衔接环境刺激与个人感知的第二层级因素,生理、心理与行为因素为影响热舒适的表层直接因素;MICMAC 分析将因素划分为独立因素、自治因素与依赖因素 3 类,无联动因素,明确了系统内各因素的作用地位。研究揭示了室外热舒适影响因素的交互路径与系统结构,可为室外热舒适影响机理研究提供框架支撑,有助于丰富和完善室外热舒适理论体系。

关键词 室外热舒适; 影响因素; 作用路径; ISM-MICMAC 方法; 交互关系

中图法分类号 TU111; **文献标志码** A

Interactive Pathways of Outdoor Thermal Comfort Influencing Factors Based on ISM-MICMAC

XU Tian-tian[1,2], JIANG Cheng-lin[1], DU Chen-qiu[2], LIU Ji-ying[1]

(1. School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Joint International Research Laboratory of Green Buildings and Built Environments, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

[**Abstract**] To clarify the hierarchical structure, interaction relationships, and influence pathways of the factors affecting outdoor thermal comfort, and to improve the theoretical framework of outdoor thermal comfort, the factors influencing outdoor thermal comfort were classified and systematically summarized. The interpretive structural modeling and matrices impacts croises-multiplication appliance classement (ISM-MICMAC) method was adopted. A hierarchical structural model of the factor system was constructed. Its driving-dependence characteristics were analyzed. The results show that the nine factors are divided into a four-level hierarchical structure. Climatic characteristics are the fundamental driving factor. Microclimate factors, street-scale spatial form, and social factors are the key driving factors at the third level. Thermal experience and individual factors are the second-level factors linking environmental stimuli and individual perception. Physiological, psychological, and behavioral factors are the surface-level direct factors influencing thermal comfort. The MICMAC analysis classifies the factors into three categories: independent factors, autonomous factors, and dependent factors. No linkage factors are identified. The functional positions of the factors within the system are thus clarified. The interaction pathways and system structure of the factors influencing outdoor thermal comfort are revealed. A framework is provided for research on the influencing mechanisms of outdoor thermal comfort. The theoretical framework of outdoor thermal comfort is also enriched and improved.

[**Keywords**] outdoor thermal comfort; influencing factors; interactive pathway; ISM-MICMAC; interaction relationship

收稿日期: 2025-12-26 **修订日期**: 2026-04-07

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2025QC1151); 国家重点研发计划(2024YFE0106800)

第一作者: 许甜甜(1991—),女,汉族,山东莒南人,博士,副研究员。研究方向:室外热环境及热舒适评估。E-mail:xutiantian23@sdjzu.edu.cn。

室外开放空间是人们开展户外活动与休闲娱乐的重要载体,室外热环境的动态变化会相应引发人体热感知的动态响应。相较于空间范围有限的室内热环境,室外热环境具有显著的时空异质性,其温度、湿度、风速及辐射的变化幅度更大,且兼具瞬时性与动态性特征。除微气候因素的差异外,室内外人员的热适应模式亦存在区别:例如在室外环境中,人们可通过迁移至遮阴处或暴露于阳光下、调整着装、使用遮阳伞等行为方式调节自身热舒适状态。同时,室外环境的"自然效应"使人们对自然环境变化的容忍度更高[1]。鉴于复杂室外热环境与差异化热适应特征的综合作用,相对成熟的室内热舒适理论无法直接应用于室外热环境研究。因此,识别室外热舒适的关键影响因素、厘清各因素间的互动机制,对于完善室外热舒适评价体系、推动绿色低碳可持续城市建设具有重要意义。

室外热舒适影响因素众多,不同因素间存在复杂的耦合关系。随着热舒适研究的深入开展,人们逐渐意识到,环境与人之间的关系是十分复杂的,人对热环境的感知也不只是简单的物理换热过程,还包括人体的生理调节过程,心理感知过程,以及生理、心理支配下的自发行为适应过程。在现有研究中,Yao 等[2]和 Ming 等[3]的研究表明人们的生理、心理和行为适应过程是极其复杂的,受到诸多因素的影响,且各因素之间相互作用,对整个系统产生特定的影响。除人体自身的内部因素外,还有众多影响热舒适的外部因素,例如气候、文化、社会、习俗等长期积累形成的效应和影响[4]。胡琪琪等[5]梳理归纳了室外热舒适的影响因素,并分析室外热舒适评价指标的发展历程。Zhang 等[6]通过单因素、多因素分析明确了滨海城市的热基准和影响热感知的主要因素。Lai 等[7]从直接因素、间接因素等方面梳理了影响室外人员热舒适的重要因素。

虽然现有研究在一定程度上反映了影响因素之间的关系及其对室外热舒适的重要影响,但并未对各因素间的互动机制进行充分的探讨,各影响因素对室外热舒适影响的作用路径仍不清晰。现通过归纳梳理室外热舒适影响因素,采用解释结构模型(interpretive structural model,ISM)和交叉影响矩阵相乘(matrices impacts croises-multiplication appliance classement,MICMAC)相结合的方法,阐明各因素之间的相互作用路径,深入探究室外热舒适影响因素间的作用机制,并明确因素间的驱动-依赖关系,量化各因素的影响作用。研究成果可进一步丰富人们对室外热舒适理论体系的认识,为室外热舒适影响机理研究提供框架支撑。

1　室外热舒适影响因素

热舒适是"通过主观评价来表达对热环境满意的一种心理状态"[8]。从概念上讲,人们的室外热舒适水平总体取决于 3 类因素,即暴露环境、人员热适应性和人员敏感性[9]。

暴露环境是指人体所处的外部物理环境,主要聚焦直接影响人体热交换过程的关键热环境因素,包括气候特征、微环境因素及街区空间形态[10-11]等。现有研究表明人们的室外热舒适水平在不同气候区域和局地城市微环境中均表现出一定差异[12]。基于不同地区独特的气候特征与局地微环境,众多学者通过实地测试与主观问卷调研相结合提出了适用于当地气候的室外热舒适评价模型[13]。近年来,在室外热舒适影响因素的研究中,近一半的研究表明,以微气候参数为中心的物理因素对人员热舒适的影响最大[14]。在 4 个微气候变量中,空气温度是影响室外热舒适的最主要因素[15-16],除空气温度之外,Nikolopoulou 等[17]通过对欧洲 5 个国家进行的室外热舒适实地调查表明,太阳辐射对室外热舒适的影响作用最大。通过对新西兰及中国香港开展室外热舒适调查,Ng 等[18]和 Walton 等[19]的研究表明风速的变化对人员的热舒适度具有重要影响。相对湿度通常被视为相对不重要的微气候变量[15,20]。然而 Chow 等的研究表明[21],在新加坡地区高温高湿的气候特征下,湿度是影响人们室外热舒适的最重要因素。综合来看,不同气候特征下,微环境参数对人体室外热舒适度的影响权重存在一定差异。

人员热适应性受热经历因素、生理因素、心理因素和行为因素的影响[22]。在人员热适应研究中,热经历因素是室外热舒适研究中最常讨论的影响因素之一。热经历是指先前人们所经历的热环境,涉及居住时间、环境突变和季节更替等因素,其直接影响人们的热适应(即生理、心理和行为适应)能力,进而影响人们的热舒适需求[23-24]。Potchter 等[25]通过对全球室外热舒适模式的综合分析表明,不同城市的室外人员热中性温度与当地气温密切相关。人们在特定气候环境中所处的时间越长,对该气候环境的热适应能力越强。这是由于热经历会直接引起人体热调节过程中的体温调节、出汗功能和心血管系统功能等的生理设定点发生适应性变化[26]。因此,即使在相同温度范围内,不同热经历人员的室外热舒适需求仍存在一定差异[27]。生理适应是人们适应环境的基本体现,目前研究关注的生理适应因素主要为皮肤温度、直肠温度、心率

以及出汗率。在生理适应研究中,皮肤温度作为重要指标,受到广泛关注,现有研究通过开展典型热暴露情景实验,明确给出了不同温度阶跃变化条件下皮肤温度的动态响应特性[28-29]。除皮肤温度指标外,Liu 等[30]分析了不同舒适等级下人体心率变异性的差异,并探讨了人体的热适应机制。心理适应因素主要包括热期望、感知控制、自然效应等[31]。例如,Rutty 等[32]研究发现旅游者出于对目的地的特殊热期望,其热舒适水平与当地居民的热舒适水平存在差异性。行为适应可以分为个人调节和技术与环境调节两类,个人调节主要包括调整服装、改变活动量、喝冷热饮等。研究表明,当室外温度在4~24 ℃时,居民通过自由调节服装即可达到热舒适状态[33]。技术与环境调节主要是通过改变局部微环境参数以满足自身达到热舒适状态,例如从凉爽季节到炎热季节,人们的室外行为方式逐渐倾向于从阳光充足的空间转移到遮阴空间[34-35]。

人员热敏感性受个人因素(包括身高、体重、年龄、性别、活动等)和社会因素(包括经济水平、文化教育、伴侣关系以及民族等)的影响[36-37]。研究表明,与青年人相比,儿童对室外热环境更加敏感,而老年人对室外热环境相对不敏感[38]。性别对主观热感知评价具有一定的影响,其中女性对室外热环境变化比男性更敏感[39]。同时,Aljawabra 等[40]研究发现经济水平较高、文化教育程度较高的人群对室外热环境更敏感且更易产生不满。Shooshtarian 等[41]的研究表明有同伴的室外人群对室外热环境的敏感性低于没有同伴的人群。

室外热舒适影响因素众多,主要针对暴露环境、人员热适应性和敏感性 3 个方面的影响因素展开讨论分析,如图 1 所示。通过对上述 3 类影响因素的二级指标进行编号,构成系统要素集 S,记为 $S=\{S_i \mid i=1,2,\cdots,9\}$,具体内容如表 1 所示。

表 1 室外热舒适影响因素维度划分

Table 1 Dimensional classification of factors influencing outdoor thermal comfort

划分维度	二级指标
暴露环境	气候特征(S_1)、微环境因素(S_2)、街区空间形态(S_3)
人员热适应性	热经历因素(S_4)、生理因素(S_5)、心理因素(S_6)、行为因素(S_7)
人员热敏感性	个人因素(S_8)、社会因素(S_9)

2 ISM-MICMAC 模型构建方法

2.1 解释结构模型

解释结构模型(interpretive structural model, ISM)分析方法是美国 J. N. 沃菲尔德教授于 1973 年首次提出,可用于分析复杂系统的关系。它通过多种方法和技术,将模糊复杂的系统转化为多个关联且易于理解的子系统,进而形成一个层次分明的结构模型,该方法在现代系统工程中已被广泛应用[42]。具体计算步骤如下。

步骤 1 归纳与总结影响因素类别,确定构成系统的要素 $S_i(i=1,2,\cdots,n)$,并记所有的要素构成的集合为 S,即

$$S=\{S_i \mid i=1,2,\cdots,n\} \tag{1}$$

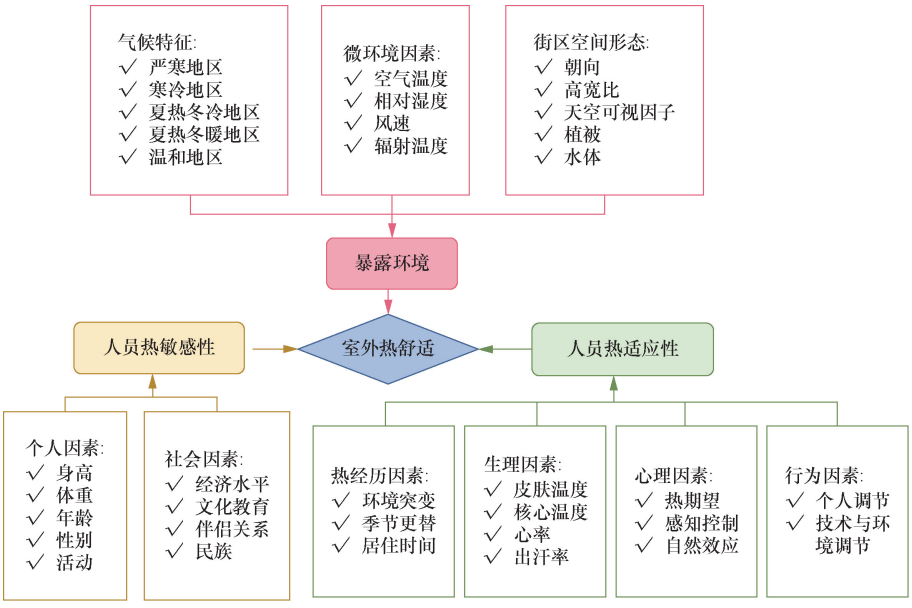


图 1 室外热舒适影响因素

Fig. 1 Factors influencing outdoor thermal comfort

步骤 2　建立邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$。逐一比较各要素之间的关系,建立邻接矩阵 $\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\times n}$,其中邻接矩阵 a_{ij}的元素可以用式(2)表示,如果因素 i 直接导致因素 j,则 $a_{ij}=1$,否则为 0,默认影响因素对自身的影响记作 0。

$$a_{ij}=\begin{cases}0, & S_i\rightarrow S_j \text{ 不存在直接二元关系}\\ 1, & S_i\rightarrow S_j \text{ 存在直接二元关系}\end{cases} \tag{2}$$

步骤 3　建立可达矩阵 $\boldsymbol{M}$。可达矩阵表示一个因素对其他因素的直接及间接关系,用来反映各要素之间经过一定长度的通路后可达到的程度[43]。根据这一特点,采用布尔运算规则,通过式(3)明确可达矩阵 $\boldsymbol{M}=\{b_{ij}\}$。

$$(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I})^{k-1}\neq(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I})^{k}=(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I})^{k-1}=\boldsymbol{M} \tag{3}$$

式(3)中:$\boldsymbol{A}$ 为原始邻接矩阵;$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵;$\boldsymbol{M}$ 为可达矩阵;k 为运算的次数,$2\leqslant k\leqslant 9$。当运算 $(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I})^{k}=(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I})^{k+1}$,将不再产生新传递关系。

步骤 4　由可达矩阵 $\boldsymbol{M}$ 对系统要素进行层级划分。设系统要素集合 $S=\{S_i\mid i=1,2,\cdots,n\}$,且系统要素可划分为 k 个级次,用 $L(n)=\{L_i\mid i=1,2,\cdots,k\}$ 表示,其中 $L_1,L_2,\cdots,L_k$ 为系统中从上到下的 k 个级次。定义第 0 级要素所构成的集合为空集,即 $L_0=\Phi$,则 L_p 的迭代算法为

$$\begin{aligned}L_p=\{&S_i\in N-L_0-L_1-\cdots-L_{p-1}\mid\\ &R_{p-1}(S_i)=R_{p-1}(S_i)\cap Q_{p-1}(S_i)\}\end{aligned} \tag{4}$$

式(4)中:$p=1,2,\cdots,k$;$M_{p-1}(S_i)$ 和 $Q_{p-1}(S_i)$ 分别为由 $N-L_0-L_1-\cdots-L_{p-1}$ 要素组成的集合求得的可达集和先行集。

可达集和先行集的定义用数学符号可分别表示为式(5)和式(6)。

$$\begin{aligned}M_{j-1}(S_i)=\{&S_j\in N-L_0-L_1-\cdots-L_{p-1}\mid\\ &b_{ij}=1,j=1,2,\cdots,n\}\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}Q_{j-1}(S_i)=\{&S_j\in N-L_0-L_1-\cdots-L_{p-1}\mid\\ &b_{ji}=1,j=1,2,\cdots,n\}\end{aligned} \tag{6}$$

式中:$i=1,2,\cdots,n$。

步骤 5　根据各要素之间的层级关系,对可达矩阵重排,建立解释结构模型。

2.2　交叉影响矩阵相乘法

交叉影响矩阵相乘法(MICMAC)可用于不同影响因素的分类研究,利用因素之间的可达路径、层次循环来分析因素相互作用的影响程度[44]。在 ISM 模型的基础上,通过 MICMAC 方法,依次计算各因素的驱动力 D_i 与依赖度 R_j,并进行综合可视化分析,以定量地明晰在系统中各因素的影响程度。其中,驱动力 D_i 与依赖度 R_j 的计算方法如下。

驱动力 D_i:

$$D_i=\sum_{j=1}^{n}a_{ij},\ i=1,2,\cdots,n \tag{7}$$

依赖度 R_j:

$$R_j=\sum_{i=1}^{n}a_{ij},\ j=1,2,\cdots,n \tag{8}$$

3　ISM-MICMAC 模型建立与分析

3.1　影响因素二元关系的判定

为提升因素间直接影响关系判定的客观性与可靠性,对 10 位在高校和设计院中长期从事室外热环境与热舒适研究的副高级及以上职称专家进行访谈调查,对 $S_1\sim S_9$ 共 9 项因素之间的二元关系 a_{ij} 进行 0-1 二分类判定(1 = 存在直接影响,0 = 无直接影响)。其中,$a_{ij}=1$ 表示因素 i 直接影响因素 j,否则 a_{ij}为 0,默认影响因素对自身的影响也记作 0。经专家内部交流修正后,以专家一致同意率≥80%作为最终关系确定标准[45],确定各影响因素之间的二元关系如表 2 所示。采用 Kendall 协调系数 W 检验专家意见一致性。经计算专家意见一致性良好($W=0.47$,$P<0.01$)。

基于表 2 数据,建立描述室外热舒适影响因素相互关系的邻接矩阵 $\boldsymbol{A}=\{a_{ij}\}$。

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}0&1&1&1&1&1&1&0&0\\0&0&1&1&1&1&1&0&0\\0&1&0&1&1&1&1&0&0\\0&0&0&0&1&1&1&0&0\\0&0&0&0&0&1&1&0&0\\0&0&0&0&1&0&1&0&0\\0&0&0&0&1&1&0&0&0\\0&0&0&0&1&1&1&0&0\\0&0&0&1&1&1&1&0&0\end{bmatrix}。$$

表 2　不同室外热舒适影响因素之间的二元关系

Table 2　Binary relationships between different outdoor thermal comfort influencing factors

因素	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
S_1	0	1	1	1	1	1	1	0	0
S_2	0	0	1	1	1	1	1	0	0
S_3	0	1	0	1	1	1	1	0	0
S_4	0	0	0	0	1	1	1	0	0
S_5	0	0	0	0	0	1	1	0	0
S_6	0	0	0	0	1	0	1	0	0
S_7	0	0	0	0	1	1	0	0	0
S_8	0	0	0	0	1	1	1	0	0
S_9	0	0	0	1	1	1	1	0	0

3.2 基于 ISM 的室外热舒适影响因素分析

基于布尔运算规则,运用 MATLAB 对邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$ 开展计算,获得可达矩阵 $\boldsymbol{M}=\{b_{ij}\}$,经计算 $\boldsymbol{M}=(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I})^2$。在可达矩阵中,$b_{ij}=0$ 表示 S_i 与 S_j 之间不存在相互影响的作用路径,$b_{ij}=1$ 表示 S_i 与 S_j 之间存在相互影响的作用路径。

$$\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I}=\begin{bmatrix}1&1&1&1&1&1&1&0&0\\0&1&1&1&1&1&1&0&0\\0&1&1&1&1&1&1&0&0\\0&0&0&1&1&1&1&0&0\\0&0&0&0&1&1&1&0&0\\0&0&0&0&1&1&1&0&0\\0&0&0&0&1&1&1&0&0\\0&0&0&0&1&1&1&1&0\\0&0&0&1&1&1&1&0&1\end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}1&1&1&1&1&1&1&0&0\\0&1&1&1&1&1&1&0&0\\0&1&1&1&1&1&1&0&0\\0&0&0&1&1&1&1&0&0\\0&0&0&0&1&1&1&0&0\\0&0&0&0&1&1&1&0&0\\0&0&0&0&1&1&1&0&0\\0&0&0&0&1&1&1&1&0\\0&0&0&1&1&1&1&0&1\end{bmatrix}。$$

根据可达集和先行集对影响因素进行层级划分。可达集 $M(S_i)$ 是指从 S_i 出发可以达到的所有因素的集合,即可达矩阵第 i 行值为 1 时,对应的所有列的因素集合;先行集 $Q(S_i)$ 可以达到 S_i 的所有因素的集合,即可达矩阵中第 i 列值为 1 时,对应的所有行的因素集合。$T(S_i)$ 为共同集合,即 $M(S_i)$ 和 $Q(S_i)$ 的交集。各室外热舒适影响因素的可达集 $M(S_i)$、先行集 $Q(S_i)$ 和共同集 $T(S_i)$,如表 3 所示。

当出现 $M(S_i)\cap Q(S_i)=M(S_i)$ 时,S_i 就是该模型的第一层级影响因素。去掉第一层级影响因素后,对剩余影响因素重复上述操作,可以得到第二层级影响因素。以此类推,可以得出每一层级的影响因素。基于可达矩阵 $\boldsymbol{M}$ 中各影响因素之间的逻辑关系,构建室外热舒适影响因素的 ISM 模型,如图 2 所示。

表 3 可达集、先行集与共同集

Table 3 Reachable set, antecedent set and intersection set

因素	可达集合 M	先行集合 Q	共同集合 $T=M\cap Q$
S_1	[1,2,3,4,5,6,7]	[1]	[1]
S_2	[2,3,4,5,6,7]	[1,2,3]	[2,3]
S_3	[2,3,4,5,6,7]	[1,2,3]	[2,3]
S_4	[4,5,6,7]	[1,4,9]	[4]
S_5	[5,6,7]	[1,2,3,4,5,6,7,8,9]	[5,6,7]
S_6	[5,6,7]	[1,2,3,4,5,6,7,8,9]	[5,6,7]
S_7	[5,6,7]	[1,2,3,4,5,6,7,8,9]	[5,6,7]
S_8	[5,6,7,8]	[8]	[8]
S_9	[4,5,6,7,9]	[9]	[9]

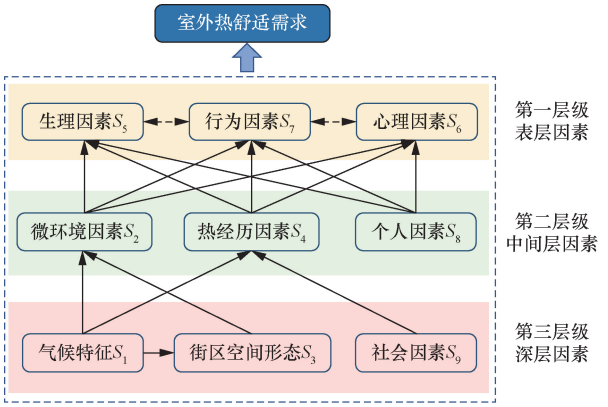


图 2 室外热舒适影响因素的 ISM 模型

Fig. 2 ISM model for factors influencing outdoor thermal comfort

室外热舒适影响因素的 ISM 模型将 9 项核心因素划分为 4 个层级,清晰揭示了因素的层级结构与作用路径。

室外热舒适需求的第一层级影响因素为生理因素(S_5)、心理因素(S_6)和行为因素(S_7)。该层级因素属于表层因素,是影响室外热感知的直接原因,其他影响因素通过不同路径影响该层级因素,进而影响室外热感知的变化。在该层级中,生理状态是影响热舒适的客观基础,心理感知是主观评价核心,行为调节则是个体应对热环境的主动策略,三者之间存在动态交互。

第二层级影响因素为热经历因素(S_4)和个人因素(S_8)。该层级影响因素属于中间层因素,是连接环境与个体感知的核心桥梁。S_4 代表个体过往热体验与热记忆,S_5 涵盖身高、体重、年龄等个体属性,二者共同调节个人对环境的敏感性与适应能力,并直接作用于表层因素。

第三层级影响因素为微环境因素(S_2)、街区空间形态(S_3)及社会因素(S_9)。该层级因素也属于中间层因素,承接气候特征的宏观影响,并进一步传递至热经历因素(S_4)。其中,S_2 通过物理形态塑造局部微环境,S_9 则通过社会活动模式、文化教育水平、经济等方面影响个人热暴露与适应行为。

第四层影响因素为气候特征(S_1)。S_1 是整个系统的根源驱动因素,直接作用于微环境因素(S_2)与街区空间形态(S_3),通过各种作用路径最终传递到表层因素,决定了区域热环境的基础背景,是室外热舒适形成的初始条件。

3.3　基于 MICMAC 的室外热舒适影响因素分析

驱动力是某一要素对其他要素产生的影响,依赖度是其他要素对该要素产生的影响。基于可达矩阵 $\boldsymbol{M}$ 获得各因素的依赖度与驱动力值,如表 4 所示。

如图 3 所示,将 MICMAC 的结果以平面直角坐标系的形式表达,其中横轴表示依赖性,纵轴表示驱动力,坐标系划分为 4 大区域,分别表征自治因素、独立因素、联动因素和依赖因素。在依赖度-驱动力坐标系中,各影响因素的驱动力和依赖度均已标注。

从图 3 中可以看出,独立因素中包括气候特征(S_1)、微环境因素(S_2)、街区空间形态(S_3)、社会因素(S_9),上述因素具有较高的驱动力和较低的依赖性特点,是影响室外热舒适需求的关键驱动因素;自治因素中主要包括个人因素(S_8),该因素具有较低的依赖性和驱动力;依赖因素为热经历因素(S_4)、生理因素(S_5)、心理因素(S_6)和行为因素(S_7),上述

表 4　各影响因素的依赖度和驱动力汇总

Table 4　Summary of dependence and driving power for each influencing factor

影响因素	驱动力 D_i	依赖度 R_j
气候特征(S_1)	7	1
微环境因素(S_2)	6	3
街区空间形态(S_3)	6	3
热经历因素(S_4)	4	5
生理因素(S_5)	3	9
心理因素(S_6)	3	9
行为因素(S_7)	3	9
个人因素(S_8)	4	1
社会因素(S_9)	5	1

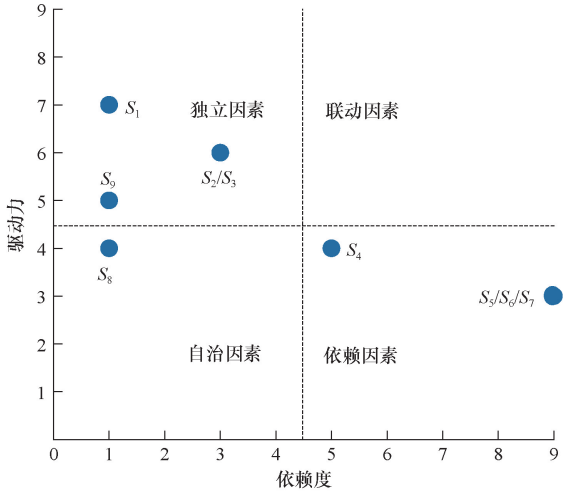


图 3　室外热舒适影响因素的依赖度-驱动力图

Fig. 3　Driving power and dependence diagram for outdoor thermal comfort influencing factors

各因素具有较高依赖性、较低驱动力的特点,容易受其他因素影响,应重点关注。在联动因素象限内没有因素分布,该结构表明在上述室外热舒适影响因素中,无驱动力和依赖度均较强的因素。对照室外热舒适影响因素 ISM 模型的层级结构可以发现,第三和第四层级因素为关键驱动因素,第一层级为关键依赖因素。

3.4　因素截断性分析

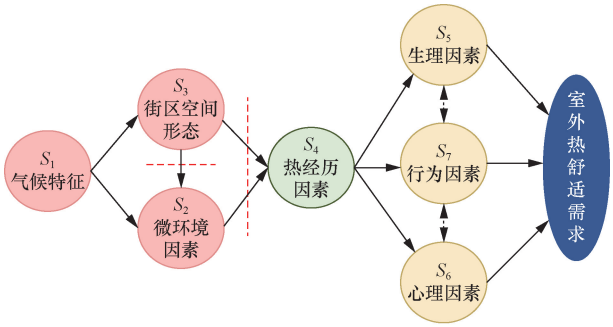
因素的作用过程具有动态持续性,任一因素的变化均可能引起系统结果的改变。因素截断性分析在判断主客观驱动影响因素的前提下,可确定截断因素,并提出针对性的控制措施[46]。基于室外热舒适影响因素的 ISM 模型和 MICMAC 分析可知,气候特征(S_1)、微环境因素(S_2)、街区空间形态(S_3)和社会因素(S_9)是影响室外热舒适需求的关键驱动因素,有必要对上述 4 个因素的影响路径进行因素截断性分析,并提出相应的室外热舒适营造及改善策略。

结合中国寒冷地区济南市的地域特征展开实例分析,可进一步直观印证各关键因素的作用路径与截断逻辑:济南市四季分明,冬季寒冷干燥、夏季炎热多雨,季节与昼夜温差显著,具备典型寒冷地区气候特征。该地区室外热舒适受地域环境约束性强,各影响因素的作用路径与本文模型分析结果基本一致。基于此,以济南市为例,开展其室外热舒适影响因素的截断性分析。

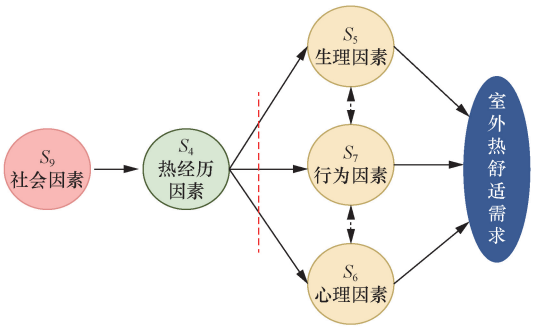
图 4(a)显示了以 S_1(气候特征)为起始驱动因素的 9 条作用路径。气候特征作为影响室外热舒适的客观因素,在城市整体规划与空间格局既定的前提下,其变化的可控性较低。济南地区冬季严寒、夏季湿热的气候条件难以人为改变。因此,提高室外热舒适性应在充分契合当地气候特点的基础上,合理规划设计城市街区的空间形态以及相应的配置要素。除此之外,改善室外热舒适仍需从优化街区空间形态与改善微环境两方面进行综合干预。街区空间形态和微环境参数作为影响室外热舒适的客观因素,城市规划和设计者应首先明确街区空间形态与微环境参数的定量关系、微环境参数与人员室外热舒适需求的定量关系。针对寒冷地区济南的气候特征,可通过合理规划或优化街区朝向、高宽比、天空可视因子等因素,兼顾冬季采光增温与夏季遮阳通风需求,从而提高人们的室外舒适性。同时还应考虑室外人员的动态热舒适需求,在不同季节或不同天气条件下,采取差异化的适应性策略,如冬季依托建筑布局阻挡寒风侵袭,夏季合理启用遮阳设施、搭配喷雾降温技术、优化植被与

水体配置等,贴合济南的季节气候特点提高室外热舒适水平,从而有效应对气候变化对热舒适的影响。

图 4(b)显示了以 S_9(社会因素)为关键驱动因素的 3 条作用路径,社会因素中涉及社会活动模式、经济水平、文化及教育水平、民族特征等多个维度,受地域发展、生活习惯等多重因素影响,其可控性相对较弱,仍需优先从热经历因素入手实施干预。济南当地人群长期适应寒暖交替的气候特征,进而形成了贴合地域的生活与活动习惯,不同群体因社会活动模式、经济水平等的差异,形成了不同的热经历与热舒适需求。基于此,需针对不同热经历人群进行分类,系统分析各类群体的生理、心理及行为适应特征,明确其特定热舒适需求,进而制定适配不同群体特征的差异化热舒适营造策略。上述人群分类调控措施,与空间形态优化和微环境干预策略相互补充,共同构成完整的室外热舒适优化实施路径,为寒冷地区户外热环境的科学营造提供可落地的执行方向。



(a) 气候特征因素驱动下的作用路径



(b) 社会因素驱动下的作用路径

图 4 关键驱动因素的作用路径

Fig. 4 Pathways of influence from key factors

4 结论与展望

室外热舒适影响因素间有着复杂的相互作用关系,通过文献综述,从暴露环境、人员热适应性和人员敏感性 3 个方面梳理了室外热舒适需求的重要影响因素,提出其影响因素的 ISM 模型,以有向层级拓扑图清晰地阐述了不同影响因素之间的层级结构和相互作用机制。同时通过 MICMAC 方法定量分析了各因素的影响程度,综合分析研究结果得到以下结论。

(1)生理因素、心理因素和行为因素对室外热舒适需求具有直接影响作用,属于表层因素。该层因素对其他因素具有较高的依赖性($R_5 = R_6 = R_7 = 9$),其他因素通过不同作用路径影响生理、心理和行为适应能力,进而影响室外人员的热舒适需求。

(2)热经历因素和个人因素是影响室外热舒适的关键因素,属于中间层因素,两者相互耦合作用于表层因素,进而影响室外热舒适评价。其中,个人因素对其他因素的依赖性最小,属于自治因素;热经历因素属于依赖因素,对其他因素的依赖性较大。

(3)气候特征、微环境因素、街区空间形态和社会因素等具有高驱动力($D_1 = 7, D_2 = D_3 = 6, D_9 = 5$)、低依赖性($R_1 = R_9 = 1, R_2 = R_3 = 3$)特点,是影响室外热舒适的关键驱动因素,其中,气候特征在 ISM 模型的层级结构中属于根本因素层级;微环境因素、街区空间形态和社会因素属于中间因素层级。

室外热舒适影响因素众多,且因素之间存在复杂的耦合关系,现有影响因素之间的互动机制并不清晰。基于 ISM-MICMAC 的室外热舒适影响因素层级结构与作用路径分析结果,对未来室外热舒适相关研究提出以下几点建议。

(1)由于各影响因素耦合关系复杂,且热适应因素具有显著时空差异性,未来研究应依据不同气候区、季节场景与人群适应特征,分类构建差异化热适应能力下的室外热舒适评价基准。在现有评价体系基础上,进一步揭示适应性因素对室外热舒适的影响机理,量化从环境刺激到热感知动态变化的响应过程,提升评价模型的精度与适用性。

(2)现有研究已证实热经历因素和个人因素对室外热舒适具有显著影响,但其与生理、心理和行为适应因素之间的定量关系仍不明确。后续相关研究仍需开展多因素耦合实验与长期追踪调研,从机制层面揭示适应性因素的动态演变规律,完善热适应理论框架。

(3)厘清关键驱动因素的作用路径是营造舒适室外空间的关键。未来应以气候特征、微环境因素、街区空间形态以及社会因素等关键驱动因素为设计出发点,结合地域气候背景与社会人文特征,优化街区朝向、高宽比、天空可视因子及绿化遮阳配置,明确街区空间形态与微环境参数的定量关系、微环境参数与人员室外热舒适需求的定量关系,建立“因素—路径—效果”的量化设计方法,为低碳宜居城市建设提供更精准的科学依据。

室外人员的热舒适水平受到多种因素的综合影响,基于 ISM-MICMAC 方法探究室外热舒适影响因素的作用路径具有以下两个方面的贡献和应用价值。首先,研究利用 ISM 方法揭示了室外热舒适影响因素的分层渐进关系,以有向层级拓扑图的方式清晰地呈现了不同影响因素的层级结构和互动机制,同时联合 MICMAC 方法量化了单个因素在系统中的影响程度,该方法可为室外热舒适评价体系的构建提供全面的视角和新思路。其次,基于 ISM-MICMAC 的室外热舒适影响因素作用路径能够为城市规划和设计者提供系统化的科学参考,通过因素截断性分析,确定截断因素,明确可调整实施路径,使其在设计优化过程中更具针对性和有效性。

参 考 文 献

[1] Jayesh D, Leticia O, Begona S. Outdoor thermal comfort in built environment: a review of studies in India[J]. Energy and Buildings, 2024, 303: 113758.

[2] Yao R, Zhang S, Du C, et al. Evolution and performance analysis of adaptive thermal comfort models: a comprehensive literature review[J]. Building and Environment, 2022, 217: 109020.

[3] Ming R, Li B, Du C, et al. A comprehensive understanding of adaptive thermal comfort in dynamic environments: an interaction matrix-based path analysis modeling framework[J]. Energy and Buildings, 2023, 284: 112834.

[4] De Dear R, Xiong J, Kim J, et al. A review of adaptive thermal comfort research since 1998[J]. Energy and Buildings, 2020, 214: 109893.

[5] 胡琪琪, 顾韩. 室外热舒适影响因素及其评价指标研究进展[J]. 中国城市林业, 2023, 21(1): 43-49.
Hu Qiqi, Gu Han. Research progress on influencing factors and evaluation indicators of outdoor thermal comfort[J]. Urban Forestry in China, 2023, 21(1): 43-49.

[6] Zhang H, Wang Y, Guo F, et al. Factors influencing outdoor thermal comfort in a coastal park during the transition seasons in cold regions of China[J]. Urban Climate, 2024, 55: 101856.

[7] 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.

[8] ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy: ASHRAE Standard 55[S]. Atlanta: ASHRAE, 2020.

[9] Adnan M S G, Dewan A, Botje D, et al. Vulnerability of Australia to heatwaves: a systematic review on influencing factors, impacts, and mitigation options[J]. Environmental Research, 2022, 213: 113703.

[10] Hu Y, Qian F, Yan H, et al. Which street is hotter? street morphology may hold clues-thermal environment mapping based on street view imagery[J]. Building and Environment, 2024, 262: 111838.

[11] Lai D, Liu Y, Liao M, et al. Effects of different tree layouts on outdoor thermal comfort of green space in summer Shanghai[J]. Urban Climate, 2023, 47: 101398.

[12] 郑文亨, 李翀潇, 冯荣奕, 等. 基于 ENVI-met 绿化形式对夏季微气候及热舒适影响的研究: 以桂林市为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15370-15380.
Zheng Wenxiang, Li Chongxiao, Feng Rongyi, et al. A study on the impact of ENVI-met greening forms on summer microclimate and thermal comfort: a case study of Guilin City[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(36): 15370-15380.

[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: 390-406.

[14] Tian Y, Hong B, Zhang Z, et al. Factors influencing resident and tourist outdoor thermal comfort: a comparative study in China's cold region[J]. Science of the Total Environment, 2022, 808: 152079.

[15] Lai D, Guo D, Hou Y, et al. Studies of outdoor thermal comfort in northern China[J]. Building and Environment, 2014, 77(3): 110-118.

[16] Liu W, Zhang Y, Deng Q. The effects of urban microclimate on outdoor thermal sensation and neutral temperature in hot-summer and cold-winter climate[J]. Energy and Buildings, 2016, 128: 190-197.

[17] Nikolopoulou M, Lykoudis S. Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries[J]. Building and Environment, 2006, 41(11): 1455-1470.

[18] Ng E, Cheng V. Urban human thermal comfort in hot and humid Hong Kong[J]. Energy and Buildings, 2012, 55(10): 51-65.

[19] Walton D, Dravitzki V, Donn M. The relative influence of wind, sunlight and temperature on user comfort in urban outdoor spaces[J]. Building and Environment, 2007, 42(9): 3166-3175.

[20] Feng X, Zheng Z, Yang Y, et al. Quantitative seasonal outdoor thermal sensitivity in Guangzhou, China[J]. Urban Climate, 2021, 39: 100938.

[21] Chow W T L, Akbar S N A B A, Heng S L, et al. Assessment of measured and perceived microclimates within a tropical urban forest[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2016, 16: 62-75.

[22] Yao R, Li B, Liu J. A theoretical adaptive model of thermal comfort: adaptive Predicted Mean Vote(aPMV)[J]. Building and Environment, 2009, 44(10): 2089-2096.

[23] Cohen P, Cohen S, Shashua-bar L, et al. Outdoor thermal perception and adaptation of immigrants from cold climates to hot arid climate[J]. Building and Environment, 2023, 243: 110631.

[24] 宋聪, 康佳敏, 王登甲, 等. 进藏人员冬季热适应层级及热需求特征研究[J]. 暖通空调, 2023, 53(10): 1-7.
Song Cong, Kang Jiamin, Wang Dengjia, et al. Study on winter heat adaptation levels and heat demand characteristics of personnel entering Tibet[J]. HVAC, 2023, 53(10): 1-7.

[25] Potchter O, Cohen P, Lin T P, et al. A systematic review advocating a framework and benchmarks for assessing outdoor human thermal perception[J]. Science of the Total Environment, 2022, 833: 155128.

[26] Xu T, Yao R, Du C, et al. Outdoor thermal perception and heatwave adaptation effects in summer: a case study of a humid subtropical city in China[J]. Urban Climate, 2023, 52: 101724.

[27] Xu T, Yao R, Du C, et al. A quantitative evaluation model of outdoor dynamic thermal comfort and adaptation: a year-long longitudinal field study[J]. Building and Environment, 2023,

237: 110328.

[28] Xiong J, Lian Z, Zhou X, et al. Potential indicators for the effect of temperature steps on human health and thermal comfort[J]. Energy and Buildings, 2016, 113: 87-98.

[29] 许甜甜, 赵文龙, 刘吉营, 等. 夏季室外活动水平变化时人体生理和心理的响应特征: 以重庆市为例[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(28): 12157-12166.
Xu Tiantian, Zhao Wenlong, Liu Jiying, et al. Physiological and psychological response characteristics of the human body to changes in outdoor activity levels in summer: a case study of Chongqing [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(28): 12157-12166.

[30] Liu W, Lian Z, Liu Y. Heart rate variability at different thermal comfort levels[J]. European Journal of Applied Physiology, 2008, 103(5): 361-366.

[31] 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.

[32] Rutty M, Scott D. Bioclimatic comfort and the thermal perceptions and preferences of beach tourists[J]. International Journal of Biometeorology, 2015, 59(1): 37-45.

[33] Qu S, Wang Z, Liu W. Clothing adjustment in outdoor environment: a new clothing model based on temperature change[J]. Building and Environment, 2021, 206: 108395.

[34] 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.

[35] Li K, Zhang Y, Zhao L. Outdoor thermal comfort and activities in the urban residential community in a humid subtropical area of China[J]. Energy and Buildings, 2016, 133: 498-511.

[36] 潘正琪, 张富, 韩蓉. 兰州城市公园老年人夏秋两季热舒适差异性研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(12): 285-292.
Pan Zhengqi, Zhang Fu, Han Rong. A study on the differences in thermal comfort of elderly people in urban parks of Lanzhou between summer and autumn[J]. Building Science, 2023, 39(12): 285-292.

[37] 薛思寒, 刘铭, 王琨, 等. 寒冷地区城市公园老年人秋季热舒适特征及影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(1): 336-343.
Xue Sihan, Liu Ming, Wang Kun, et al. Analysis of thermal comfort characteristics and influencing factors of elderly people in urban parks in cold regions in autumn[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(1): 336-343.

[38] Huang B, Hong B, Tian Y, et al. Outdoor thermal benchmarks and thermal safety for children: a study in China's cold region[J]. Science of the Total Environment, 2021, 787: 147603.

[39] Jin H, Liu S, Kang J. Gender differences in thermal comfort on pedestrian streets in cold and transitional seasons in severe cold regions in China[J]. Building and Environment, 2020, 168: 106488.

[40] Aljawabra F, Nikolopoulou M. Thermal comfort in urban spaces: a cross-cultural study in the hot arid climate[J]. International Journal of Biometeorology, 2018, 62(10): 1901-1909.

[41] Shooshtarian S, Ridley I. The effect of physical and psychological environments on the users thermal perceptions of educational urban precincts[J]. Building and Environment, 2017, 115: 182-198.

[42] Veerakumar R, Jyh-Bin Y. Interpreting crucial barriers to advancing prefabricated construction: an empirical study in Taiwan using ISM-MICMAC approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 489: 144702.

[43] 李晶, 李颖, 彭晓易. 基于矩阵自乘的一种解释结构模型改进方法[J]. 系统科学与数学, 2021, 41(7): 2046-2062.
Li Jing, Li Ying, Peng Xiaoyi. An improved method of interpretive structural modeling based on matrix self-multiplication[J]. Systems Science and Mathematics, 2021, 41(7): 2046-2062.

[44] 戴明慧, 王志强, 曾智. 基于 ISM-MICMAC 的被动式建筑增量成本影响因素研究[J]. 青岛理工大学学报, 2023, 44(5): 79-86, 159.
Dai Minghui, Wang Zhiqiang, Zeng Zhi. Study on influencing factors of incremental cost of passive buildings based on ISM-MICMAC[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2023, 44(5): 79-86, 159.

[45] 刘中玉, 祝连波, 林陵娜. 基于 ISM 与 MICMAC 模型的城市地下空间施工防坍塌韧性影响因素分析[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2026, 38(1): 61-68.
Liu Zhongyu, Zhu Lianbo, Lin Lingna. Analysis of influencing factors for collapse prevention resilience in urban underground space construction based on ISM and MICMAC models[J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2026, 38(1): 61-68.

[46] Wu P, Chen Q, Chen Y, et al. ISM-MICMAC based safety risk sources analysis and control measures for underground engineering of urban rail transit projects[J]. Journal of Engineering Research, 2023, 11(3): 40-50.