刘爽，方小山，吴任之 . 庭园空间形态对热环境影响的研究进展与启示 [J]. 风景园林，2022，29（4）：94-100.

庭园空间形态对热环境影响的研究进展与启示

Research Status and Prospect on the Influence of Courtyard Spatial Form on Thermal Environment

刘爽 方小山 * 吴任之

LIU Shuang, FANG Xiaoshan*, WU Renzhi

开放科学（资源服务）标识码（OSID）

中国分类号：TU986
文献标识码：A
文章编号：1673-1530(2022)04-0094-07
DOI：10.14085/j.fjyl.2022.04.0094.07
收稿日期：2021-04-02
修回日期：2022-02-07

刘爽 / 女 / 华南理工大学建筑学院在读博士研究生 / 研究方向为地域景观与亚热带气候适应性设计

LIU Shuang is a Ph.D. candidate in the School of Architecture, South China University of Technology. Her research focuses on regional landscape and adaptability design of subtropical climate.

方小山 / 女 / 博士 / 华南理工大学建筑学院副教授、博士生导师，亚热带建筑科学国家重点实验室固定成员 / 研究方向为地域景观与亚热带气候适应性设计

通信作者邮箱（Corresponding author Email）：xshfang@scut.edu.cn

FANG Xiaoshan, Ph.D., is an associate professor and doctoral supervisor in the School of Architecture, South China University of Technology, and a fixed member of the State Key Laboratory of Subtropical Building Science (SKLSBS). Her research focuses on regional landscape and adaptability design of subtropical climate.

吴任之 / 男 / 华南理工大学建筑学院在读博士研究生 / 研究方向为地域景观与亚热带气候适应性设计

WU Renzhi is a Ph.D. candidate in the School of Architecture, South China University of Technology. His research focuses on regional landscape and adaptability design of subtropical climate.

摘要：庭园作为城市绿色空间的重要组成部分，其建造过程蕴含了具有地域特征的气候适应性方法与技术，其空间形态布局从朝向、边界划定、空间尺度等方面直接减少太阳辐射的进入和与外部气体的交换，是庭园适应地域气候的基本建造规律的体现。在能源形势日益严峻的背景下，对庭园传统生态智慧的探究成为热点。通过收集 1985—2020 年庭园空间形态热环境效应的研究成果，利用 CiteSpace 软件对该领域的研究历程、方法和影响热环境的空间形态指标进行文献梳理和评析。分析归纳出庭园空间形态对热环境的影响主要集中在空间整体特征、空间围合特征和空间遮蔽特征 3 个方面；从不同尺度下空间形态指标的适宜性选择、研究方法的融合创新和研究成果的应用价值提升三方面给予启示。为中国以气候适应性为导向的庭园空间形态设计研究在探索研究思路及适应性策略等方面提供借鉴。

关键词：风景园林；庭园热环境；空间整体特征；空间围合特征；空间遮蔽特征

基金项目：国家自然科学基金（编号 51878286）

Abstract: As an important component of urban green space, the construction process of courtyard presents the climate adaptation methods and techniques with regional characteristics. Its spatial form layout directly reduces the entry of solar radiation and the exchange with external gas from the aspects of orientation, boundary demarcation and spatial scale, which embodies the basic construction rules of courtyards adapting to the regional climate. Against the background of an increasingly severe energy situation, the study of climate wisdom in traditional gardens has become a research hotspot. By collecting the research results related to the thermal environmental effects of courtyard spatial form from 1985 to 2020, this research conducts a literature review and analysis of the research process, methods and spatial form indicators affecting the thermal environment in this field based on the CiteSpace software. It analyzes and concludes the influence of courtyard spatial form on thermal envionment is mainly concentrated on three aspects: spatial overall feature, spatial enclosure feature and spatial sheltering feature, it gives enlightenment from three aspects: the suitability selection of spatial form indicators at different scales, the integration and innovation of research methods, and the improvement of the application value of the research results, which can be used to explore the research ideas and adaptation strategies for the researches on courtyard spatial form design oriented by climate adaptability in China.

Keywords: landscape architecture; courtyard thermal environment; spatial overall feature; spatial enclosure feature; spatial sheltering feature

Fund Item: The National Natural Science Fund of China (No. 51878286)

城市化和全球气候变化导致的热岛效应对人们的身体健康和幸福生活造成威胁。因此，人们日益关注城市绿色空间对热环境、热舒适的调节效应 [1]。庭园是在以围墙限定边界的基础上，组织植物、水体、山石、小品等造园要素形成院落空间，将建筑空间与院落空间有机结

合，形成集娱乐、休憩等功能为一体的园林空间形态。相关研究已论证了庭园是一种具有良好微气候调节功能的城市绿色空间[2-4]。

当前相关研究多探讨布局设计[5]、单一景观要素（植物[6-7]、山石[8]、水体[9-10]等）和多种景观要素搭配组合等方面改善微气候的理法并分析了各要素对庭园微气候的影响程度，但从形态角度展开的研究相对较少。然而庭园景观要素从属于建筑，若建筑环境消失，园景则失去了空间界限和构图依据。因此，庭园空间形态的设计应先于景观要素的配置。同时，不同于植物、水体等景观要素依靠其降温增湿的物理特性来调节热环境，庭园空间形态设计可以在空间朝向、边界界定等方面减少太阳辐射的进入和与外部气体的交换，从整体设计角度考虑对气候环境的适应。因此，本研究聚焦于庭园空间形态和热环境的关联性，利用 CiteSpace 软件梳理其研究思路和研究方法，有利于完善本土庭园空间的热环境效应研究体系，探讨如何从庭园空间形态设计角度实现热环境调节效应的最大化以及庭园在不同空间形态情境下的热环境状况，为中国城市庭园的绿色空间建设提供理论参考。

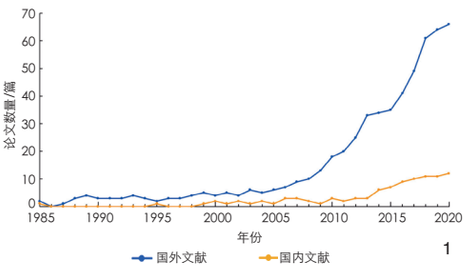
1 庭园空间形态对热环境影响的研究概况

CiteSpace 是目前科学计量学中的一款主流工具，可通过量化分析与解读文献内容，以知识图谱的形式直观表达研究领域的发展过程与结构关系[11]。本研究以 1985—2020 年为时间区间，在 Web of Science 核心合集中以 TS =（courtyard * AND thermal environment *）or（courtyard form * AND microclimate*）为检索词，得到英文文献 586 篇，选择研究性论文、综述和会议论文 3 种类型的文献为数据来源，最终获取有效数据样本 557 篇。在中国知网中以“庭园”“院落空间形态”“微气候”“小气候”“热环境”为检索词收集中文文献 100 篇。基于 CiteSpace 5.8R3 软件，得到该研究领域的关键词聚类视图与时间线视图，梳理分析后对该研究领域形成初步认知。

1.1 研究历程分析

国内外研究的文献数量分别自 2013 年和 2006 年开始呈稳步增长趋势；从论文增长率看，自 1985 年起，国内外年均增长率分别为 7% 和 11%，表明该领域的研究规模和影响力均有所提升（图 1）。值得注意的是，Web of Science 中研究庭园空间高宽比的论文占 16%，但未在中国知网的研究群组中出现，可见中国对庭园空间比例与热环境关系方面的研究较少。

鉴于中国的相关研究在 1998 年之前多为对岭南地区庭园建造经验的归纳总结，研究代表性有限，因此，本研究将检索到的 1998 年以后的数据样本导入软件后，输出关键词聚类视图和时间线视图展开进一步分析（图 2、3）。关键词聚类视图以模块值（Q 值）和轮廓值（S 值）分别衡量聚合关系的结构性是否显著，聚类是否具备同质性（Q 值 >0.30 时，结构性为显著，S 值 >0.50 且接近 0.70 时，同一聚类内部研究主题明确，聚合结果令人信服[12]）。本研究中 9 个聚类的 Q 值为 0.73，S 值为 0.63，表明该领域可以清楚划分得到具体类别，研究分支较少。“#2 courtyard design 庭园设计”连接了“#0 ceiling geometry 顶棚几何”“#1 regression analysis 回归分析”和“#7 thermal benefits 热效益”；“#5 phoenics 模拟软件”和“#4 courtyard 庭园”连接了“#3 courtyard microclimate 庭园微气候”“#8 aspect ratio 高宽比”和“#6 heat mitigation 热缓解”，表明庭园设计和 phoenics 模拟软件的研究主题在当前领域中的内容覆盖面较广，应用计算机模拟软件探索庭园设计方法是该领域的核心研究内容，这也为后续研究提供了理论支持和方向指引（图 2）。时间线视图将关键词出现的年份在其所属的聚类中铺展开来，可以展现研究主题的转变及聚类间的关系。时间水平线及各关键词节点连线的色彩与其所属的聚类色彩保持一致，节点连线的粗细疏密代表两节点共现关系的强弱。从时间线视图看，在研究领域的发展阶段，对庭园空间设计与热解策略的探讨逐渐增多，体现了当前从理论研究意识向实践应用意识的转向。值得关注的是，虽然聚类 8 的研究起始时间较新，但与其他研究主题产生了多条连线，从侧面反映出对于庭园空间形态尺度与热环境相关的研究是当下的研究前沿（图 3）。



1

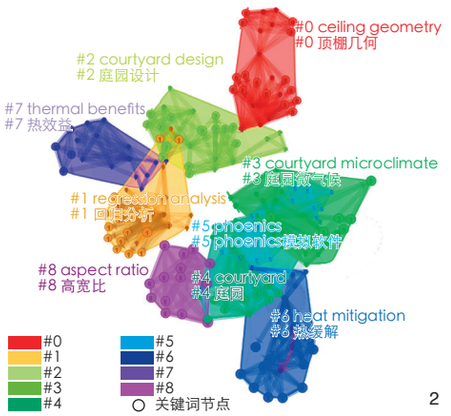
1 国内外庭园空间形态对热环境影响研究的文献数量年度分布图（1985—2020 年）
Annual distribution map of the quantity of literature on the researches of the influence of courtyard spatial form on thermal environment at home and abroad (1985–2020)

1.2 研究主题分类

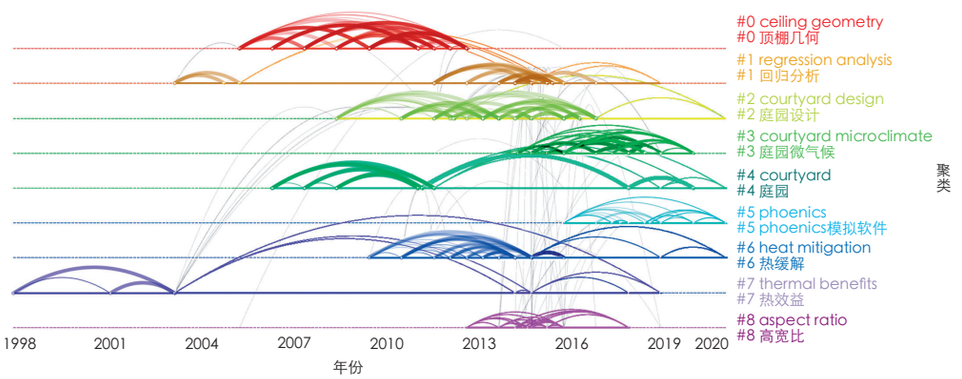
基于关键词聚类视图导出中心性排名前 10 位的关键词（表 1），将其归纳为 2 个研究主题。一是由“空间几何”（space geometry）、“热缓解策略”（heat mitigation strategy）、“设计”（design）等关键词统领的适应气候的庭园空间形态特征归纳，其内容覆盖面广，既是研究重点，也可以关联和辐射其他关键词，所以其中心性和频次均最高。二是以“影响”（impact）、“热性能”（thermal performance）、“模拟”（simulation）等关键词为代表的研究主题，其聚焦于庭园空间形态指标对热环境的影响机理分析。据此，对 2 个研究主题下的研究对象、研究内容、研究方法和气候区进行具体分类（图 4），本研究中所有的气候区均使用柯本气候分类法[13]。

1.2.1 适应气候的庭园空间形态特征归纳

该研究主题关注庭园对热环境的调节作用及适应气候的庭园空间形态特征总结。1980 年，《热带住宅和建筑手册》（*Manual of Tropical Housing and Building*）中首次提出了庭园在炎热干旱气候区的微气候调节价值，引发了人们对庭园气候适应性设计的关注[14]。陆续有学者利用实测[15]、风洞试验[16-17]和计算机模拟[18]的方法从定性与定量角度归纳了庭园适应热环境的空间形态特征，以期为当代庭园设计提供参考。相较于国外，中国的定量研究起步较晚，2010 年之前，邓其生[4]、汤国华[19]等依据其实践经验总结了庭园在遮阳、通风方面的空间布局、构筑物形式、植物配



2



3

年份	研究主题		庭园空间形态的研究内容						热环境研究内容			研究方法						气候区						
	形态特征归纳	影响机理分析	植物	水体	空间比例	围合度	朝向	细部设计	遮阳	通风	热环境舒适度	文献研究	实测	风洞试验	计算机模拟	问卷调查	统计分析	BW	BS	Cs	Cf	Cw	Am	Af
1998–2005	■		■						■			■	■				■	■						
	■		■	■	■				■			■										■		
2006–2010	■		■				■	■	■	■		■	■	■			■	■	■	■				
	■				■			■	■	■		■										■		
2011–2015		■	■		■	■			■	■		■	■	■	■		■	■	■	■	■			
	■		■	■					■	■		■										■		
2016–2020		■			■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■		■	■	■				■	■		

■ 国外的相关研究 ■ 中国的相关研究

4

注：BW、BS 分别为沙漠气候、草原气候；Cs、Cf、Cw 分别为温暖夏干气候、温暖常湿气候、温暖冬干气候；Af、Am 分别为热带雨林气候、热带季风气候。

2 庭园空间形态对热环境影响研究的关键词聚类视图（1998—2020 年）
Keyword clustering view of the researches on the influence of courtyard spatial form on thermal environment (1998–2020)

3 庭园空间形态对热环境影响研究的时间线视图（1998—2020 年）
The timeline view of the researches on the influences of courtyard spatial form on thermal environment (1998–2020)

4 国内外庭园空间形态对热环境影响研究的发展（1998—2020 年）
The development of the researches on the influence of courtyard spatial form on thermal environment at home and abroad (1998–2020)

置等造景理法。2015 年之后有学者开始通过实测与计算机模拟结合的方法梳理了岭南[10]、江南[7]、西南[20]地区庭园的热环境适应性空间形态特征。

1.2.2 庭园空间形态指标对热环境的影响机理分析

该研究主题聚焦于探索庭园空间形态指标对热环境的作用机理。Muhaisen[21]提出了夏冬两季以热舒适为目标的庭园最佳空间配置比例。在分析庭园空间形态特征的基础上，空间特征与气候要素、人体热舒适的关联性成为近年来的研究热点。相关学者立足于其所处地区的气候特点，借助实测和计算机模拟技术，分析庭园空间的整体比例、围合度对遮阳、通风和热舒适的影响，并评价不同指标对热环境的影响程度[22-23]。

表 1 关键词中心性排序
Tab. 1 Keyword centrality ranking

排序	关键词	中心性	频次	排序	关键词	中心性	频次
1	空间几何（space geometry）	0.26	54	6	影响（impact）	0.14	40
2	热缓解策略（heat mitigation strategy）	0.26	51	7	热性能（thermal performance）	0.20	39
3	设计（design）	0.23	47	8	热舒适（thermal comfort）	0.20	36
4	微气候（microclimate）	0.21	45	9	模拟（simulation）	0.16	34
5	自然通风（natural ventilation）	0.21	41	10	预测（prediction）	0.10	28

2 庭园空间形态对热环境影响的研究热点分析与评述

庭园空间形态指标的选取和定量化是探讨其热环境效应的前提。庭园空间整体特征、空间围合特征及空间遮蔽特征均会对热环境产生一定影响（图 5）。当前研究的热点主要是从这 3 个方面提出具体的指标并通过实测和计算机模拟探讨了庭园空间形态影响热环境的机理。

2.1 空间整体特征对热环境的影响

空间整体特征即由空间长（L）、宽（W）、高（H）3 个维度的数值变化而形成面积不同、形状各异的平面形态和不同大小的立面比例等特征。当前衡量空间整体特征的指标有平

面、立面形态指标2类，其中较为常用并对热环境有显著影响的指标为高宽比（H/W）、高度周长比（H/P）、宽长比（W/L）。

2.1.1 平面形态指标对热环境的影响

不同的平面形态影响太阳对庭园室外空间的直射范围，形成各异的庭园热环境。平面形态的变化主要体现在矩形庭园宽长比（W/L）和非矩形庭园的形状变化。

1）宽长比（W/L）。已有研究将庭园简化为立方体，模拟不同气候区下庭园的W/L变化对遮阳效果的影响，结果发现在冬季，干热与温和气候区的日照面积与矩形庭园的W/L呈正相关[21]。Manioğlu等[24]的研究证实了这一结论，并通过能耗模拟软件EnergyPlus总结矩形庭园对夏季热环境性能的影响高于冬季。随着计算机模拟方法的快速发展，Lobaccaro等[25]和Tabadkani等[26]基于Grasshopper、Ladybug tools等工具分析归纳了干旱气候区不同中尺度气候①下庭园宽度与长度的关系式（表2）。Lobaccaro等[25]的研究首次把参数化设计平台应用于庭园，提出了贯穿设计全程的模拟与评价工作流程，可以启发更多的庭园参数化研究。

2）形状变化。庭园平面形状变化丰富，不只有简单的矩形。Muhaisen等[27]比较了五、六、七、八边形庭园的墙面日晒与墙面阴影面积，得出形状变化对夏季的庭园墙面阴影面积有显著影响，对冬季日晒面积影响较小。五边形庭园可以形成最大的墙面阴影面积，七边形庭园的墙面阴影面积则最小。该研究首次关注到庭园多边形形态与热环境的关联性，并尝试提出一种在不同季节测算多边形庭园日晒面积的计算方法，但实践中鲜有此类规则庭园，因此，其结果的指导性有限。

2.1.2 立面形态指标对热环境的影响

立面形态指标主要通过影响太阳辐射过程和气流分布来调节热环境。现有研究多以高宽比（H/W）、高度周长比（H/P）衡量三维空间形态对热环境的影响。

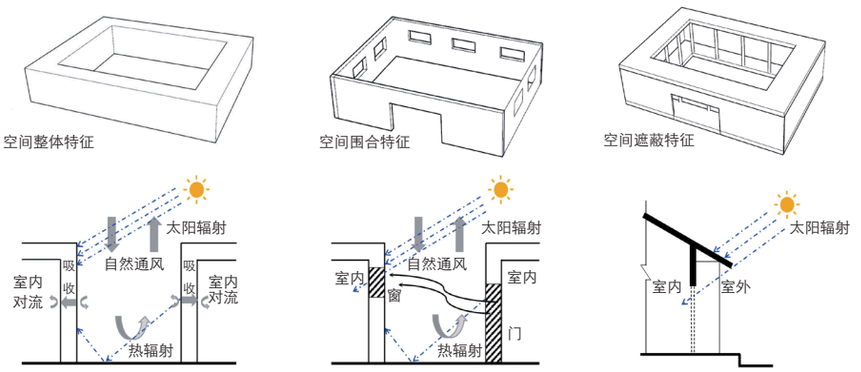
1）高宽比（H/W）。已有研究表明H/W是影响干旱气候区庭园日间遮阳、夜间保温效果的主要因素[28]。Nazanin等[29]对伊朗设拉子（Shiraz）庭园的模拟研究发现H/W每增加1，日间平均空气温度降低约1.5℃。Yang等[30]模拟分析了北京不同H/W庭园的日间太阳辐射，发现H/W为0.5的庭园日间太阳辐射值为550 W/m^2，比H/W为1和2的庭园日间太阳辐射值分别大120 W/m^{2}和300 W/m^2。

实测和计算机模拟研究均表明风场受到H/W的强烈影响[31-33]。Hall等[15]利用风洞试验并结合空间内污染物的流动情况，分析了3个长宽相等、高度不同的封闭庭园内空气流动特征。Rojas等[34]在其基础上利用计算机进行模拟的结果表明：当$H/W < 0.3$时，园内外形成稳定的空气循环；当$0.3 \leqslant H/W \leqslant 1$时，园中形成了不同于外界环境的小气候，也产生了一个与外界空间气流交换的过渡区域；当$H/W > 1$时，庭园内部上方易形成涡流，不利于自然通风。总体来说，H/W与空气温度、太阳辐射量呈负相关，但当H/W增加到一定程度时可能会造成热空气滞留在庭园内部而使温度不降反增的结果。

2）高度周长比（H/P）。H/P常被用来衡量不规则平面形状的庭园整体比例，其对太阳辐射过程的影响与H/W相似。已有研究分析了意大利不同城市4种多边形庭园的H/P对墙面阴影面积的影响，结果表明在夏季，H/P与墙面阴影面积呈正相关；在冬季，H/P与墙面日照面积呈负相关，并建议庭园的$H/P \geqslant 0.2$以满足夏冬两季的热舒适[27]。Muhaisen[21]对不同气候区庭园H/P对热环境影响的模拟分析得到湿热、温和气候区的H/P与遮阳面积呈正相关，并建议湿热地区庭园H/P宜为0.15~0.35[21]。

2.2 空间围合特征对热环境的影响

空间围合特征即由庭园空间内部围合界面上存在的大小、形状、位置各异的开口所形成的封闭、开敞或半封闭的围合状态，其主要通过影响空气流动改变庭园热环境（图6）。



5

5 影响热环境的庭园空间形态特征及其剖面图

Features of courtyard spatial form affecting the thermal environment and their sectional views

表2 干旱气候区不同中尺度气候下庭园宽度与长度的关系式[25-26]

Tab. 2 Correlation between courtyard width and length in different mesoclimate in arid climate region[25-26]

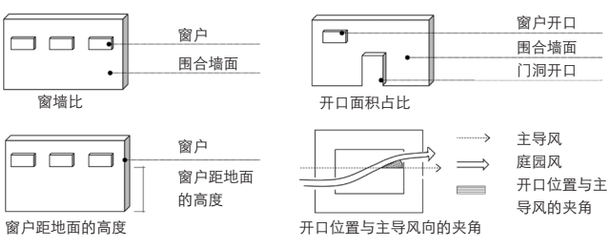
气候区	关系式	中级气候区	关系式	城市	关系式
草原气候（BS）	$W=0.8L+0.17$	温带草原气候（BSk）	$W=0.73L+2.4$	马什哈德（Mashhad）	$W=0.7L+3.7$
				设拉子（Shiraz）	$W=-0.04L+13.9$
				德黑兰（Tehran）	$W=1.2L-4$
		热带草原气候（BSh）	$W=0.85L-2.8$	迪兹富勒（Dezful）	$W=-0.1L+8.3$
				舒什塔尔（Shushtar）	$W=L-5.5$
沙漠气候（BW）	$W=0.68L+1.2$	温带沙漠气候（BWk）	$W=0.76L-0.76$	克尔曼（Kerman）	$W=0.7L+0.9$
				伊斯法罕（Isfahan）	$W=0.6L+2.6$
		热带沙漠气候（BWh）	$W=0.65L+1.8$	卡尚（Kashan）	$W=0.2L+14.8$
				塞姆南（Semnan）	$W=0.5L+3.7$
				亚兹德（Yazd）	$W=1.2L-13.2$

表 3 庭园空间形态对热环境影响的研究内容总结 [15, 21, 24, 30, 33-34, 37, 39-40, 44-48]

Tab. 3 Summary of the research contents on the influence of courtyard spatial form on thermal environment[15, 21, 24, 30, 33-34, 37, 39-40, 44-48]

研究方向	空间形态	具体指标	研究方法	共识结论
对太阳辐射过程的影响	整体特征	*H/W*	ENVI-met[30, 44]	较大的 *H/W*、*H/P* 可以降低日间温度，但不利于夜间散热；*W/L* 的变化对夏季热环境性能的影响高于冬季
		H/P	CourtSun[21]，Integrated Virtual Environment (IES)[45]	
		W/L	CourtSun[21]，Energyplus[24]	
	遮蔽特征	出挑宽度	定性研究 [37, 40]	出挑宽度越大，遮阳效果越好
对自然通风的影响	整体特征	*H/W*	Fluent[46]，风洞试验 [15]	*H/W* > 1 时不利于自然通风
	围合特征	WWR	RANS-LES[33]，风洞试验 [34]，Designbuilder[47]	开口朝向与主导风向的夹角≤ 30° 时，WWR、SH 的大小与风速成正比
		SH	Phonenics[39]	
		开口朝向	风洞试验 [48]	

注：ENVI-met, CourtSun, IES, Energyplus, Fluent, RANS-LES, Designbuilder, Phoenics 均为计算机模拟软件。



6 空间围合特征的开口形态指标示意图

Schematic diagram of the opening shape index of the space enclosure features

6

开口面积占比（open area ratios, OAR）、多个开口间的相对位置与当地主导风向间的角度直接影响流入庭园内的风速大小和进、出风口的位置 [35]。当主导风向与开口位置的轴线平行时，园内空气流动加速，窗墙比（window-to-wall ratios, WWR）与风速成正比 [36-37]。与 WWR 对热环境影响过程相似，窗户距地面的高度（sill height, SH）是影响庭园风速的主要因素之一 [38]。杜宇航 [39] 在对珠三角院落的模拟研究中，提出窗户位置不当可能会导致院落内出现大面积的静风区、室内风速过大等诸多不良影响，并提出院落的开窗设计策略。

2.3 空间遮蔽特征对热环境的影响

空间遮蔽特征即庭园在构筑物细部构件设计中以遮阳、隔热为目的形成的诸如屋面挑檐、门窗飘檐、斜坡屋顶等形态特征。

空间遮蔽特征通过阻挡太阳辐射输入或将热量阻隔在核心空间之外来影响热环境。陆元鼎等 [40]、陆琦 [41] 分析了岭南庭园将遮阳设计结合在建筑自身造型中的设计手法，包括利用建筑构件产生阴影，形成互遮阳和自遮阳的屋檐设计，在门、窗上设计向外延伸的遮阳构件等细部处理。曾志辉 [37] 归纳了岭南庭园建筑门窗的飘檐一般向外延伸 0.2~0.5 m。谢浩 [42] 分析了岭南庭园利用窗洞装饰的出挑宽度、窗梁部位的壁厚达到遮阳作用的构造。张涛 [43] 实测了中国各气候区庭园屋面挑檐及其遮阳性能，发现南向屋面的出挑宽度变化一般在 0.4~1.3 m 之间，东西屋面的出挑宽度一般在 0~3.0 m 之间。在高纬度地区，出挑宽度越小越能保证庭园采纳足够的阳光以提高冬季热舒适；在中国夏热冬暖地区，增加东西向屋面出挑宽度可以有效遮阳。总体而言，中国各地区传统庭园建筑的屋面出挑宽度呈现出一定的规律性。

2.4 研究评述

从研究方向、空间形态指标选取、研究方法及共识结论等方面对该领域研究进行总结（表 3）。从研究内容来看，各空间形态指标在量变模拟时缺少一定的取值规则，其量变范围和间隔对实际设计项目中相应指标的规范标准考虑不足，使得无法有效地指导实际项目。研究方法经历了从定性到定量的转变，目前主要有实测、风洞试验和计算机模拟等方法。考虑到实测和风洞试验存在成本消耗高、标准模型制作复杂的局限性，计算机模拟因其数据处理效率高、对复杂形体可进行精确建模的优势而得到广泛的应用，但在进行多变量模拟时，其计算量大、耗时较长的问题也不断暴露出来。

研究区域分布上，各气候区的研究结论较为分散且代表性受限。虽有学者尝试在多样本庭园实测和模拟中提取热环境改善策略，但某些措施并不一定具有普适性，甚至会对热环境产生负面影响 [49-50]。比如，南北向庭园更适合地中海沿岸地区的气候 [51]，而在中纬度城市阿德莱德（Adelaide），东西向庭园的热环境较为舒适 [52]。因此，应结合各城市具体的地理特征和季节特征，因地制宜地提出庭园热环境优化策略。

3 对当前中国相关研究的启示

国外该领域研究已开展了约 40 年，可为中国的相关研究提供理论经验和研究工具。然而，中国庭园的空间形态与大多数西方国家存在显著差异，因此，需要基于本土的庭园进行理论提升及典型案例研究。笔者认为中国研究的展开应在学科融合、提升基础理论的研究基石上，从研究方法的选择、研究过程的深入分析等方面搭建研究框架（图 7）。

3.1 形态指标的适宜性选择

3.1.1 空间整体形态指标的选择

基于前文综述，空间整体特征中针对 *H/W*、*W/L* 指标对热环境影响的探讨更为深入，其研究将庭园视为一个建筑围合而成的空心立方体以便于模拟和量变分析，为中国相关研究提供了参考思路。但中国的庭园空间多由建筑及景观要素组合成丰富各异的整体形态，使用简化的模型会忽略中国庭园特有的空间特征。因此，未来中国庭园空间整体形态指标的选择应在分析院落空间和建筑的位置关系及其分别作为虚、实空间的比例大小、景观要素的形态及面积等因素的基础上做针对性的筛选。如以建筑空间为主的岭南庭园整体形态指标需纳入建筑与院落的平面布局形态指标；以自然景物为主的江南庭园整体形态指标也应纳入水体面积、乔木郁

闭度等指标。

3.1.2 空间围合形态指标的选择

建筑围合面的开口位置、窗户开口大小指标对微气候环境影响程度的研究已有一定规模。但中国江南及岭南地区的庭园常以空间渗透性较强的形态存在，庭园空间常没有明确的建筑围合面或围合面形态不局限于窗户。因此，在选择围合界面开敞度指标时，除窗户之外，还需考虑诸如岭南敞口厅的开口面积指标及其量化方式。

3.1.3 空间遮蔽形态指标的选择

空间遮蔽特征作为中国庭园独有的建筑设计细节呈现，当前研究已关注到屋面挑檐、门窗飘檐的宽度指标，但较少提及庭园建筑屋顶遮阳的形态指标，如屋顶高度、屋面坡度对热环境的影响。而在岭南私园中，其作为影响庭园太阳辐射量、适应湿热气候的重要指标需要进一步研究。

总体来说，当前需构建适于中国庭园特征的空间形态设计指标体系。需要注意的是，各地区庭园空间建造一般使用尺寸固定的营造尺，并由此衍生出一套固定的尺寸模数[53]，各指标在进行计算机模拟的取值间隔即与模数相对应。因此，未来应系统地整理各地区庭园空间整体、围合、遮蔽特征的具体形态指标数值，并以当地营造尺为量变间隔，科学确定各指标的量变取值范围。

3.2 研究方法的融合创新

热环境性能优化导向的庭园空间形态设计策略应在分析形态指标与热环境关联性的基础上有针对性地提出，因此须从量化研究着手。

空间整体形态及围合形态指标对热环境的研究多采用计算机模拟结合敏感性分析、回归分析与结构方程模型等统计分析方法建立形态指标与热环境的数学关系模型。目前已有相关研究提出基于参数化控制模型联合性能模拟工具[35]的方法，通过改变一个或多个指标使目标形态变化并最终实现优化结果，该方法表现出数据处理效率高、量变模拟速度快、可以实现以性能为目标的空间整体形态设计方案比对的优势。

空间遮蔽形态指标与热环境的相关性研究目前仅采用了实测和数理统计方法。未来在分析其影响程度和规律时也可以基于计算机模拟技术，在可视化编程技术平台（Grasshopper+Ladybug）上，建立 ENVI-met 与 Ladybug 的关联转化程序以实现设计模型和室外微气候模拟模型的联动，继而利用统计学和回归拟合计算进行寻优。

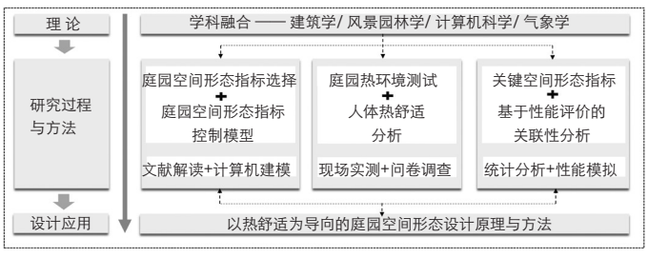
总体来说，综合考虑 3 类空间形态指标对热环境影响研究开展过程中应用的不同研究方法，中国在推进此类研究时采用参数化模拟研究结合样本案例中庭园热环境实测数据和热舒适问卷调查数据来校验结果准确性，进而利用统计学方法来探究空间形态指标与热环境的耦合机理更具可行性。

3.3 研究成果的应用价值提升

相比中国，国外更强调热环境研究对庭园空间形态设计的指导意义。未来可以从行业规范引导、设计人员对热环境设计的认知更新、学科交叉合作等方面加强庭园空间的设计实践，使空间形态设计方案中提高热舒适的目标和措施得以落实。

对设计人员来说，未来可以从总体设计、详细设计 2 个层级划分设计内容，形成融合热舒适设计的庭园空间形态方案。在总体设计阶段，从庭园规模、建筑和景观要素的布局等方面评估其对热环境、热舒适的影响进而调整优化；在详细设计阶段，基于开口尺寸、出挑宽度对通风、太阳辐射和热舒适的影响评估，确定可以提高热舒适的建筑围合面和构筑细节，在此基础上对总体设计方案进行调整。

总体来说，未来应进一步探索各空间形态指标的组合形式，解析庭园空间整体、围合及遮蔽特征中形态指标对热环境、热舒适的交互作用和相对重要性，为构建庭园空间热舒适预测模型提供数据支持。同时建立庭园空间形态指标配置模型来指导以热舒适为导向的风景园林空间设计。



7

7 未来中国庭园空间形态对热环境影响的研究框架

Research framework of the influence of courtyard spatial form on thermal environment in China in the future

4 结语

大量的实地研究验证了优化庭园空间形态可以营造良好热舒适的庭园室外环境，而中国在庭园空间形态热环境效应方面的研究起步时间晚，多数研究集中在数据实测和客观原理总结上，从空间形态角度出发分析传统庭园的热环境效应并将其影响机理与设计实践有效衔接的研究有限。因此，中国庭园空间形态对热环境影响的研究尚存在深入研究的必要性。在系统思辨国内外相关研究的基础上，未来可以从建立庭园空间形态设计指标体系、探索适用于中国庭园空间的模拟方法等方面制定研究框架。同时，伴随着计算机模拟、数学建模等科学方法的广泛应用，未来也应更加重视借助跨学科理论和方法，将更具定量化的环境模拟等技术化手段作为设计和管理决策的科学技术支撑，为中国相关研究的展开和庭园在当代绿色开放空间规划中的合理运用提供指导。

（本文获 2020 年第一届 LA 青年学者论文奖优秀奖）

注释 (Note)：

① 中尺度气候是指水平尺度几十千米至几百千米，时间尺度几小时到几十小时的气候现象。

参考文献 (References)：

[1] 刘滨谊，魏冬雪 . 城市绿色空间热舒适评述与展望 [J]. 规划师，2017，33（3）：102-107.

[2] ZAMANI Z, HEIDARI S, HANACHI P. Reviewing the Thermal and Microclimatic Function of Courtyards[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 93:

580-595.
[3] ABDULKAREEM H A. Thermal Comfort Through the Microclimates of the Courtyard: A Critical Review of the Middle-Eastern Courtyard House as a Climatic Response[J]. Procedia Social and Behavioral Sciences, 2016, 216: 662-674.
[4] 邓其生 . 庭园与环境保护 [J]. 广东园林，1981（3）：1-4.
[5] 汤国华 . 岭南湿热气候与传统建筑 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2005：210-217.
[6] XIONG Y, ZHANG J P, XU X Y, et al. Strategies for Improving the Microclimate and Thermal Comfort of a Classical Chinese Garden in the Hot-Summer and Cold-Winter Zone[J]. Energy and Buildings, 2020, 215: 109914.
[7] 熊瑶，张建萍，严妍 . 基于气候适应性的苏州留园景观要素研究 [J]. 南京林业大学学报（自然科学版），2020，44（1）：145-153.
[8] 康蒙召 . 苏州传统私家园林多类型山体洞室的小气候效应空间模式研究 [D]. 西安：西安建筑科技大学，2019.
[9] TALEGHANI M, TENPIERIK M, VAN DEN DOBBELSTEEN A, et al. Heat in Courtyards: A Validated and Calibrated Parametric Study of Heat Mitigation Strategies for Urban Courtyards in the Netherlands[J]. Solar Energy, 2014, 103: 108-124.
[10] 薛思寒 . 基于气候适应性的岭南庭园空间要素布局模式研究 [D]. 广州：华南理工大学，2016.
[11] 吴隽宇，梁策 . 风景园林视野下我国微气候研究概述与进展 [J]. 南方建筑，2019（6）：116-123.
[12] 李杰，陈超美 .CiteSpace 科技文本挖掘及可视化 [M]. 北京：首都经济贸易大学出版社，2016：57-66.
[13] 朱耿睿 . 基于柯本气候分类的中国大陆气候变化研究（1961—2010 年）[D]. 兰州：兰州大学，2017.
[14] KOENIGSBERGER O H, INGERSOLL T G, MAYHEW A, et al. Manual of Tropical Housing and Building[J]. Building Science, 1975, 10(1): 85-86.
[15] HALL D J, WALKER S, SPANTON A M. Dispersion from Courtyards and Other Enclosed Spaces[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(8): 1187-1203.
[16] ETZION Y. The Thermal Behaviour of Non-shaded Closed Courtyards in Hot-Arid Zones[J]. Architectural Science Review, 1990, 33(3): 79-83.
[17] MEIR I A, PEARLMUTTER D. Attached Courtyards: Asset or Debit?[C]//Aristotle University of Thessaloniki. The Third International Conference on Energy and Building in Mediterranean Area. Thessaloniki: Standing Committee of Building Physics Professors of European Universities, 1992: 246-253.
[18] 方小山，王平清，乔德宝 . 基于 ENVI-met 模拟的顺德清晖园布局通风设计要素研究 [J]. 城市建筑，2018（33）：69-76.
[19] 汤国华 . 东莞“可园”热环境设计特色 [J]. 广东园林，1995（4）：33-37，40.
[20] DU X, BOKEL R, ANDY V D D. Building Microclimate and Summer Thermal Comfort in Free-Running Buildings with Diverse Spaces: A Chinese Vernacular House Case[J]. Building and Environment, 2014, 82: 215-227.
[21] MUHAISEN A S. Shading Simulation of the Courtyard Form in Different Climatic Regions[J]. Building and Environment, 2006, 41(12): 1731-1741.
[22] MARTINELLI L, MATZARAKIS A. Influence of Height/Width Proportions on the Thermal Comfort of Courtyard Typology for Italian Climate Zones[J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 29: 97-106.
[23] AL-HAFITH O, DE WILDE P, BK S. The Impact of Courtyard Geometry on Its Mean Radiant Temperature[C]// École Polytechnique Fédérale de Lausanne. CISBAT 2019: Energy Efficiency and Renewables in the Digital Era. Lausanne: IOP Publishing, 2019: 1-6.
[24] MANIOĞLU G, ORAL G K. Effect of Courtyard Shape Factor on Heating and Cooling Energy Loads in Hot-Dry Climatic Zone[J]. Energy Procedia, 2015, 78: 2100-2105.
[25] LOBACCARO G, WIBERG A H, CECI G, et al. Parametric Design to Minimize the Embodied GHG Emissions in a ZEB[J]. Energy and Buildings, 2018, 167: 106-123.
[26] TABADKANI A, VALINEJAD SHOUBI M, SOFLAEI F, et al. Integrated Parametric Design of Adaptive Facades for User's Visual Comfort[J]. Automation in Construction, 2019, 106: 102857.
[27] MUHAISEN A S, B GADI M. Shading Performance of Polygonal Courtyard Forms[J]. Building and Environment, 2006, 41(8): 1050-1059.
[28] RODRÍGUEZ-ALGECIRAS J, TABLADA A, CHAOS-YERAS M, et al. Influence of Aspect Ratio and Orientation on Large Courtyard Thermal Conditions in the Historical Centre of Camagüey-Cuba[J]. Renewable Energy, 2018, 125: 840-856.
[29] NASROLLAHI N, HATAMI M, KHASTAR S R, et al. Numerical Evaluation of Thermal Comfort in Traditional Courtyards to Develop New Microclimate Design in a Hot and Dry Climate[J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 35: 449-467.
[30] YANG X, LI Y, YANG L. Predicting and Understanding Temporal 3D Exterior Surface Temperature Distribution in an Ideal Courtyard[J]. Building and Environment, 2012, 57: 38-48.
[31] CARPENTIERI M, ROBINS A G. Influence of Urban Morphology on Air Flow over Building Arrays[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 145: 61-74.
[32] SKOTE M, SANDBERG M, WESTERBERG U, et al. Numerical and Experimental Studies of Wind Environment in an Urban Morphology[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(33): 6147-6158.
[33] MOONEN P, DORER V, CARMELIET J. Evaluation of the Ventilation Potential of Courtyards and Urban Street Canyons Using RANS and LES[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99(4): 414-423.
[34] ROJAS J M, GALAN-MARIN C, FERNANDEZ-NIETO E D. Parametric Study of Thermodynamics in the Mediterranean Courtyard as a Tool for the Design of Eco-Efficient Buildings[J]. Energies, 2012, 5(7): 2381-2403.
[35] SOFLAEI F, SHOKOUHIAN M, TABADKANI A, et al. A Simulation-Based Model for Courtyard Housing Design Based on Adaptive Thermal Comfort[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 31: 101335.
[36] OK V, YASA E, ÖEZGUNLER M. An Experimental Study of the Effects of Surface Openings on Air Flow Caused by Wind in Courtyard Buildings[J]. Architectural Science Review, 2008, 51(3): 263-268.
[37] 曾志辉 . 广府传统民居通风方法及其现代建筑应用 [D]. 广州：华南理工大学，2010.
[38] 韩松，刘学贤，杨爽秋 . 窗户：建筑节能的关键 [J]. 青岛建筑工程学院学报，2002（4）：12-16.
[39] 杜宇航 . 不同围合度下院落的风环境研究 [D]. 广州：广州大学，2019.
[40] 陆元鼎，魏彦钧 . 广东民居 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，1990.
[41] 陆琦 . 岭南造园与审美 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2005.
[42] 谢浩 . 岭南民居的建筑遮阳 [J]. 住宅科技，2007（4）：9-13.
[43] 张涛 . 国内典型传统民居外围护结构的气候适应性研究 [D]. 西安：西安建筑科技大学，2013.
[44] NASROLLAHI N, HATAMI M, KHASTAR S R, et al. Numerical Evaluation of Thermal Comfort in Traditional Courtyards to Develop New Microclimate Design in a Hot and Dry Climate[J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 35: 449-467.
[45] MUHAISEN A S, GADI M B. Effect of Courtyard Proportions on Solar Heat Gain and Energy Requirement in the Temperate Climate of Rome[J]. Building and Environment, 2006, 41(3): 245-253.
[46] MOONEN P, DORER V, CARMELIET J. Effect of Flow Unsteadiness on the Mean Wind Flow Pattern in an Idealized Urban Environment[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 104-106: 389-396.
[47] ASFOUR O S. A Comparison Between the Daylighting and Energy Performance of Courtyard and Atrium Buildings Considering the Hot Climate of Saudi Arabia[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 30: 101299.
[48] VAISMAN G, HORVAT M. Influence of Internal Courtyards on the Energy Load and Hours of Illuminance in Row Houses in Toronto[J]. Energy Procedia, 2015, 78: 1799-1804.
[49] MEIR I A, PEARLMUTTER D, ETZION Y. On the Microclimatic Behavior of Two Semi-Enclosed Attached Courtyards in a Hot Dry Region[J]. Building and Environment, 1995, 30(4): 563-572.
[50] UNGER J. Intra-Urban Relationship Between Surface Geometry and Urban Heat Island: Review and New Approach[J]. Climate Research, 2004, 27(3): 253-264.
[51] SHASHUA-BAR L, HOFFMAN M E. Quantitative Evaluation of Passive Cooling of the UCL Microclimate in Hot Regions in Summer, Case Study: Urban Streets and Courtyards with Trees[J]. Building and Environment, 2004, 39(9): 1087-1099.
[52] LAN Y L, ZHAN Q. How do Urban Buildings Impact Summer Air Temperature? The Effects of Building Configurations in Space and Time[J]. Building and Environment, 2017, 125: 88-98.
[53] 吴承洛 . 中国文化史丛书：中国度量衡史 [M]. 上海：上海书店，1984.

图表来源 (Sources of Figures and Tables)：

图 1~7 由作者绘制；表 1 由作者绘制；表 2 由作者根据参考文献 [25-26] 整理绘制；表 3 由作者根据参考文献 [15, 21, 24, 30, 33-34, 37, 39-40, 44-48] 整理绘制。

（编辑 / 邓泽宜 李清清）