



建筑空间与
热舒适设计

Design of Architectural Space and Thermal
Comfort

宋德萱 教授 博士生导师

同济大学建筑与城市规划学院
同济大学高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室

2019年4月8日 上海

目录

1、建筑空间组合

2、热之评价实践

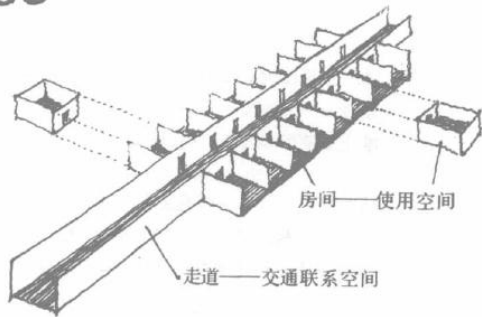
案例1、校园室内共享空间热舒适研究

案例2、校园室外共享空间热舒适研究

3、空间与热：热景观研究

1

建筑空间组合



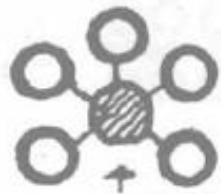
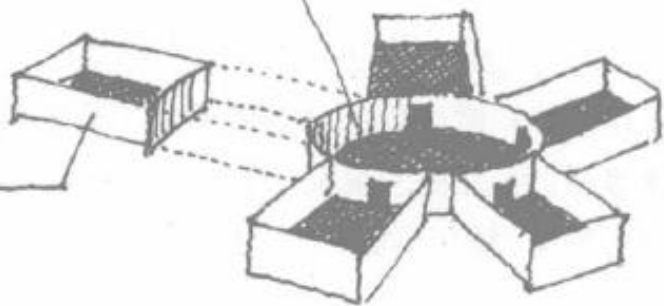
走道式组合

多用于学校、医院、办公楼等

彭一刚-建筑空间组合论

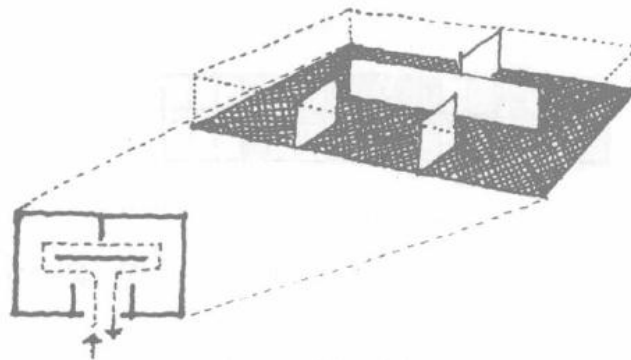
广厅——交通联系空间

主要使用空间



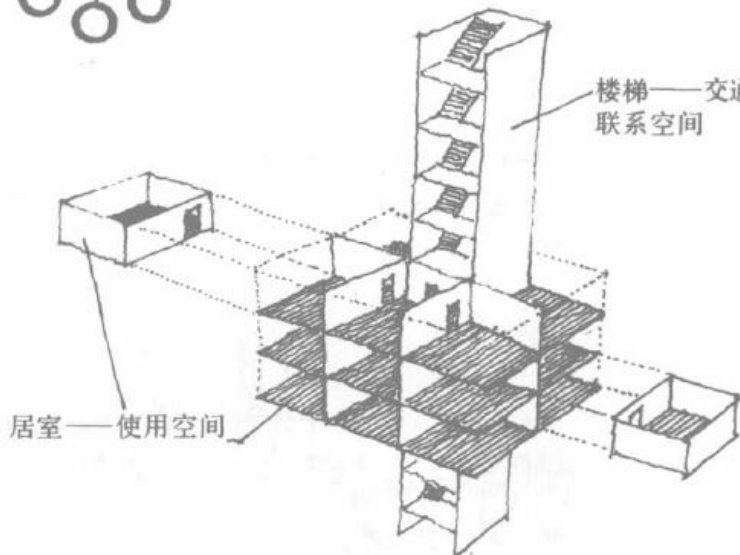
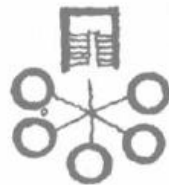
广厅式组合

多用于车站、展览馆等



串联式组合

多用于商场、陈列室等



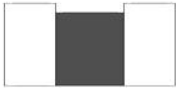





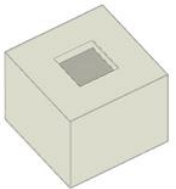
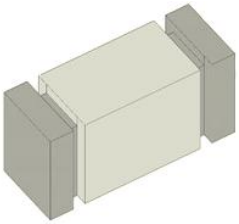

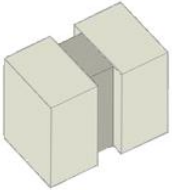
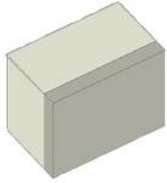
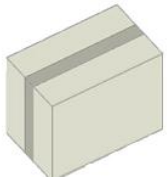
单元式组合

多用于住宅等

1

建筑空间组合-办公

办公建筑组合形式演进

类型	中庭式	杠铃式	核心筒式	对称组合式	外廊式	内廊式
剖面图						
轴测图						

1

建筑空间组合-医疗

医疗建筑组合形式演进

类型

集中式

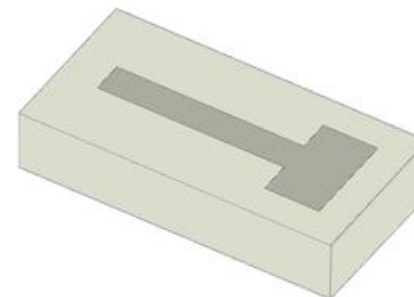
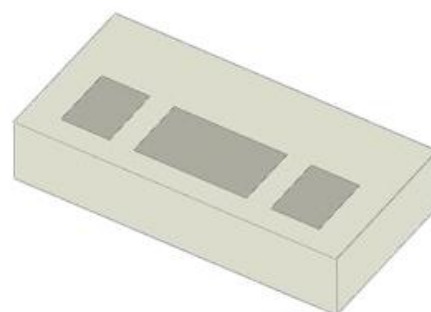
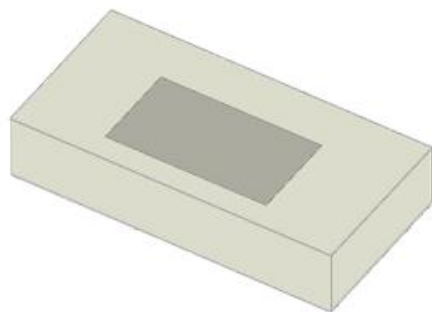
分散式

条形

剖面图






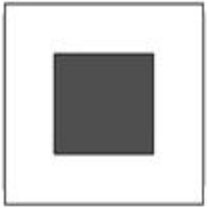





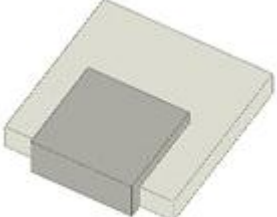
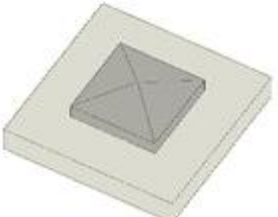
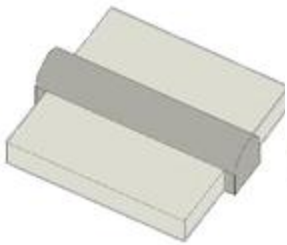

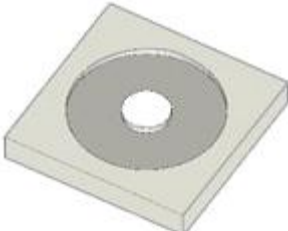
轴测图



1

建筑空间组合-中庭

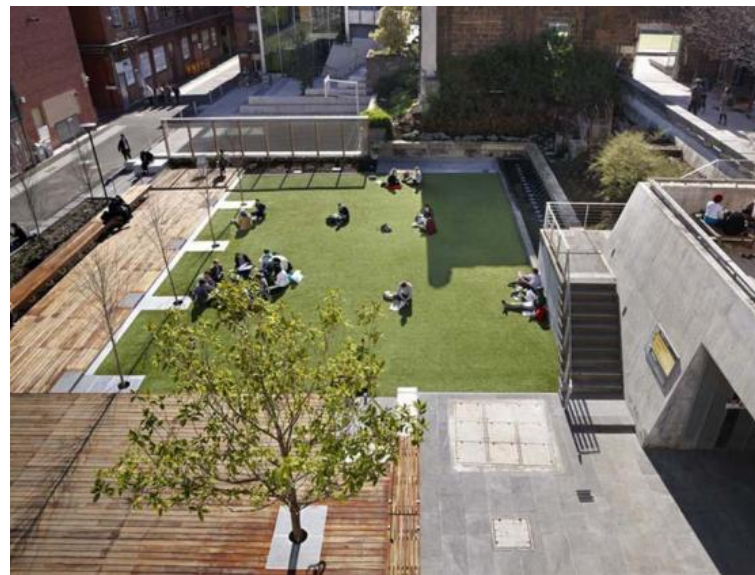
公共空间组合形式演进

类型	单向中庭	双向中庭	三向中庭	四向中庭	线性中庭	水平复合式	环绕式
平面图							
轴测图							

2

热舒适评价实践

在温度较低时，学生更倾向于室内的交往空间



在温度较高时，通风较好的半室外空间更受欢迎

2

热舒适评价实践

评价指标

热舒适模型	理论基础	提出年份	提出人	定义	适用范围
PMV	热舒适方程	1970	Fanger	$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \{M - W - 0.00305[5733 - 6.99(M - W) - P_a] - 0.42(M - W - 58.15) - 0.0000173M(5867 - P_a) - 0.0014M(34 - T_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4] - f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a)\}$	稳态环境：PMV为-2~2，并且影响PMV的6个参数在下列范围：新陈代谢率（46~232W/m ² ）、服装热阻（0~2 clo）、空气温度（10~30℃）、平均辐射温度（10~40℃）、风速（0~1m/s）、空气水蒸气分压（0~2.7kPa）
OUT_SET*	二节点模型，室外平均辐射温度模型	2000	Dear RD, Pickup J	若身着标准热阻服装的人在标准环境[相对湿度为50%，空气静止不动，空气温度等于室外平均辐射温度（OUT_MRT）]下的平均皮肤温度和皮肤湿润度与实际环境相同，则标准环境下的空气温度就是室外标准有效温度	稳态环境：未发生寒战的温度范围；炎热气候
PET	热平衡方程、二节点模型、慕尼黑人体热量平衡模型（MEMI）	1987	Mayer H, Höppe P	在一个风速为0.1m/s、水蒸气分压力为1200kPa（相当于空气温度20℃时相对湿度为50%）的普通等温室内环境中，一个人着装0.9 clo 从事轻度活动，其核心温度和皮肤温度与在实际环境相同，且保持相同的热平衡状态，该等温环境的空气温度就是生理等效温度。	稳态环境：季节性温差较大的热环境评估；城市规划与设计
UTCI	Fiala人体体温调节属性（340节点）、服装模型	2002	国际生物气象学会（ISB）	在参考环境下[平均辐射温度等于空气温度，相对湿度为50%（空气温度小于或等于29℃），地面以上10m处的风速为0.5m/s]，人体水平步行（速度为4km/h,新陈代谢率为135W/m ² ）时的动态生理热反应与在实际环境下相同，该参考环境的空气温度就是通用热气象指数。	可适用于不同气候、不同季节、不同纬度地区

2

热舒适评价实践

1、校园室内共享空间热舒适研究

时间

2018年12月22日至2019
年1月15日间共计13天
每日11:00~14:00

地点

上海某高校12栋建筑中的
24个中庭与门厅

气候

晴天较少，太阳辐射强度不高
平均气温7.33℃
平均相对湿度65.7%

研究内容






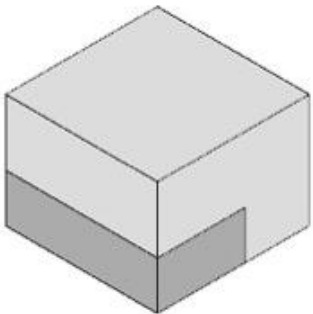
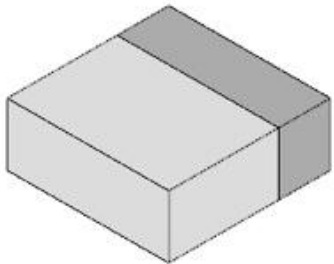
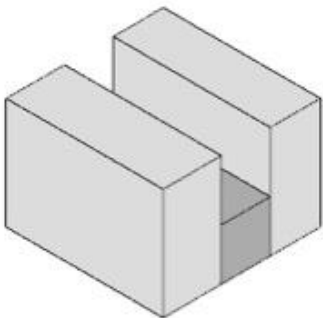
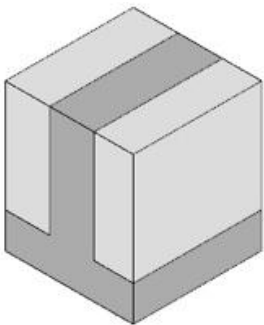
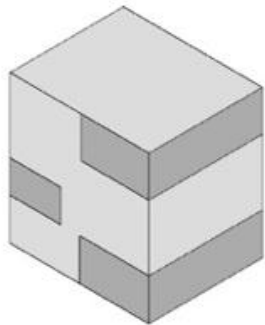
室内共享空间的建筑形态对热舒适（热舒适方程PMV及其修正方程aPMV，通过空气温度、平均辐射温度、风速、空气湿度、新陈代谢率及服装热阻等参数得出。）的影响与改善策略研究。

2

热舒适评价实践

1、校园室内共享空间热舒适研究

上海某高校共享空间建筑形态分类

类型	门厅式	单边式	夹心式	复合式	垂直错落式
剖面图					
轴测图					
数量	6	7	4	1	6

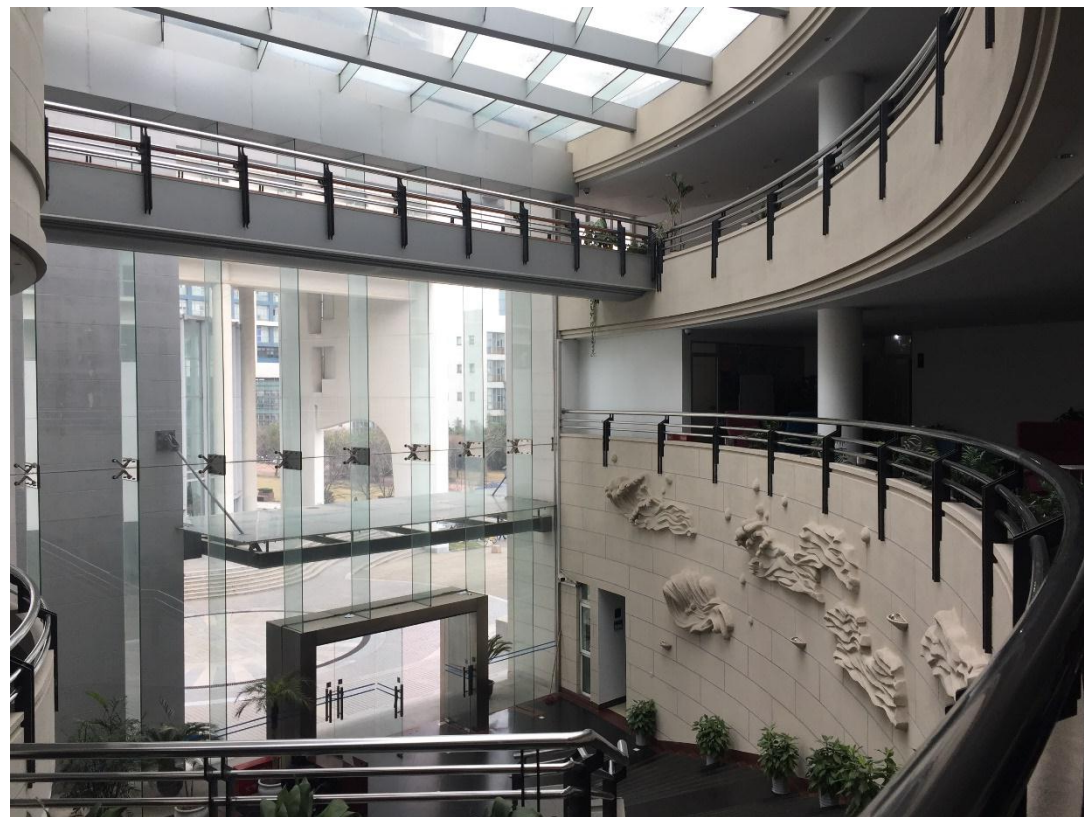
2

热舒适评价实践

1、校园室内共享空间热舒适研究



建筑与城市规划学院某建筑门厅



人文学院某建筑边庭兼门厅

2

热舒适评价实践

1、校园室内共享空间热舒适研究



Testo 480多功能测量仪及探头



风速探头



球形探头



室内空气质量探头

测试工具：德国德图公司生产的testo 480多功能测量仪2台，配风速，温度，湿度，热辐射，CO₂等传感器

2

热舒适评价实践

1、校园室内共享空间热舒适研究

设备型号	测量参数	精度误差	量程	分辨率
Testo 480多功能测量仪	内置高精度压力传感器	± (0.3 Pa + 1 %测量值) (0 ~ +25 hPa) ± (0.1 hPa + 1.5 %测量值) (+25.001 ~ +100 hPa)	-100 ~ +100 hPa	0.001 hPa
球形探头 (K型热电偶)	黑球温度	1级精度	0 ~ +120 ° C	
热线式风速探头	风速	± (0.03 m/s + 5 %测量值)	0 ~ +20 m/s	0.01 m/s
IAQ室内空气质量探头	二氧化碳	± (75 ppm + 3 %测量值) 0 ~ +5000 ppm ± (150 ppm + 5 %测量值) 5001 ~ +10000 ppm	0 ~ +10000 ppm	1 ppm
	温度	± (1.8 %RH + 0.7 %测量值)	0 ~ +100 %RH	0.1 %RH
	湿度	±0.5 ° C	0 ~ +50 ° C	0.1 ° C
	绝对压力	±3.0 hPa	+700 ~ +1100 hPa	0.1 hPa

2

热舒适评价实践

1、校园室内共享空间热舒适研究

- PMV规定的舒适区较为狭窄，适用于空调房间。结合热适应理论的aPMV考虑了人对不舒适环境的适应能力，在本次测试中用于非空调房间
- 新陈代谢率设定为1（静坐），学生所穿着服装根据访谈确定为羽绒服、薄毛衣、秋衣、西装裤、秋裤、棉鞋，查询ASHRAE55可得服装热阻为1.39。

- $$aPMV = \frac{PMV}{1 + |PMV|}$$

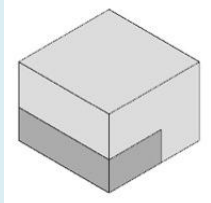
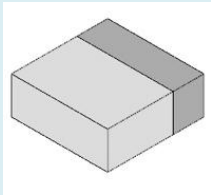
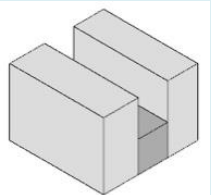
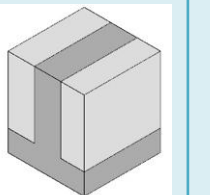
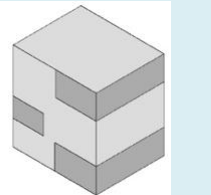
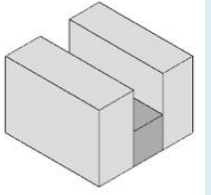
- 当PMV≥0时，为0.17，当PMV≤0时，为-0.28。



2

热舒适评价实践

1、校园室内共享空间热舒适研究

建筑形态变化对 aPMV 变化的影响					PMV结果	
建筑空间分类	门厅式	单边式	夹心式	复合式	垂直错落式 (HVAC)	夹心式 (柜式空调)
数量	6	7	3	1	6	1
平均aPMV	-1.1	-1.21	-1.27	-1.03	-0.5	-1.33
变化范围	-1.07~-1.47	-0.91~-1.42	-0.93~-1.48	-1.03	-0.32~-0.72	-1.33
轴测图						

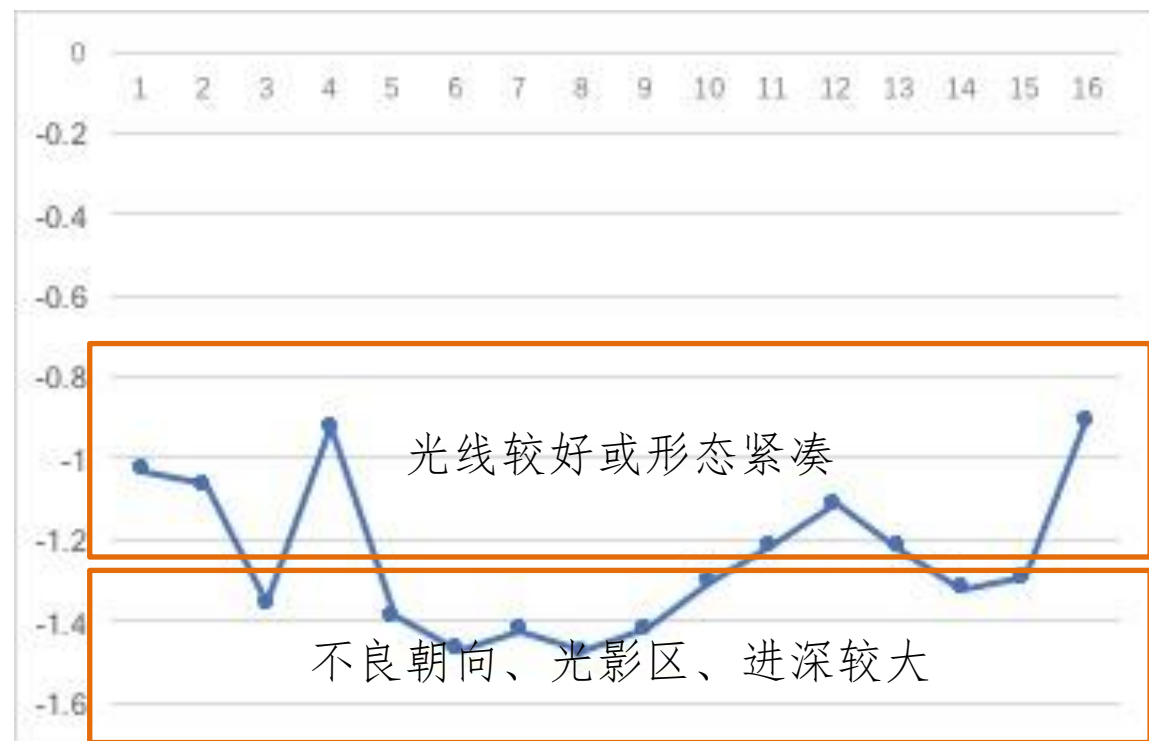
2

热舒适评价实践

1、校园室内共享空间热舒适研究



空调房间PMV空调变化



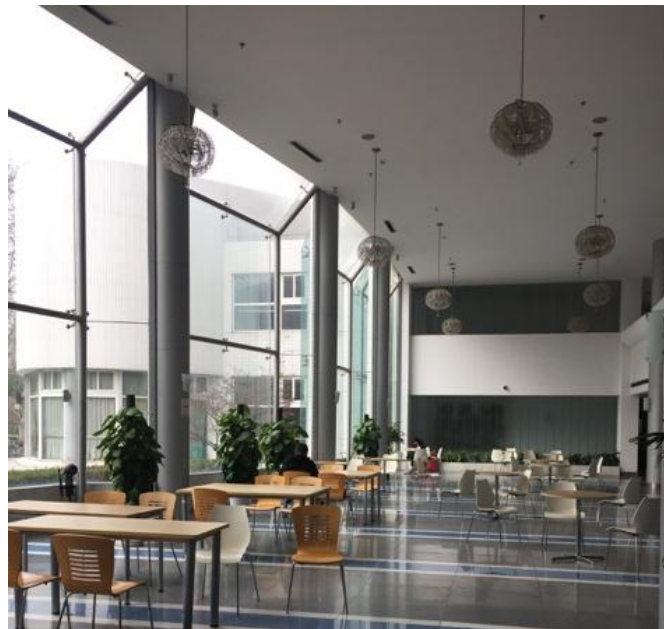
非空调房间PMV空调变化

2

热舒适评价实践

1、校园室内共享空间热舒适研究

- 在中庭、门厅等大面积空间中，柜式空调机的使用并不能带来舒适性的改善。整体看来，空调空间的舒适性能优于非空调房间。
- 大型复合型交往空间要充分利用南向与屋顶采光，充足的辐射热可以使空间温度保持在比较恒定的状态，夏季还可以形成拔风效应，增强通风降低室内温度。



复合式中庭南向采光充足

2

热舒适评价实践

1、校园室内共享空间热舒适研究

- 小型交往空间如门厅或边庭，可以选择紧凑型建筑形态与良好的朝向，或在顶层设置屋顶采光，增加太阳辐射的同时保证空间的保温性能。借鉴相邻区域的供暖形成热对流，也不失为一种好的办法。



小尺度庭廊舒适性较好



顶层增加南向与屋顶采光



紧邻开放供暖空间的北向中庭

2

热舒适评价实践

1、校园室内共享空间热舒适研究

- 交往空间设计中，要避免不良朝向，避免固定的遮阳系统，避免在光影区设置交往空间，造成冬季辐射热的大量浪费，严重损害室内舒适度。



冬季半室外共享空间舒适性能较差



设置在光影区的门厅冬季过于寒冷



固定式遮阳降低冬季室内舒适度

2

热舒适评价实践

2、校园室外共享空间热舒适研究

时间

春季：2017年3月21日、26日、27日、4月2日、3日
夏季：6月17日、7月22日、9月17日 每天8:30~17:30

地点

上海某高校校园内典型
室外活动空间

气候

春夏季节晴朗静风天气
平均气温春季19℃，夏季30℃
平均相对湿度春季29%，
夏季50%

研究内容

室外共享空间的PET生理等效温度测试（通过太阳辐射、温度、湿度、风速等测试得出）与城市形态影响因素（包括容积率、SVF等）的关系分析。

2

热舒适评价实践

2、校园室外共享空间热舒适研究



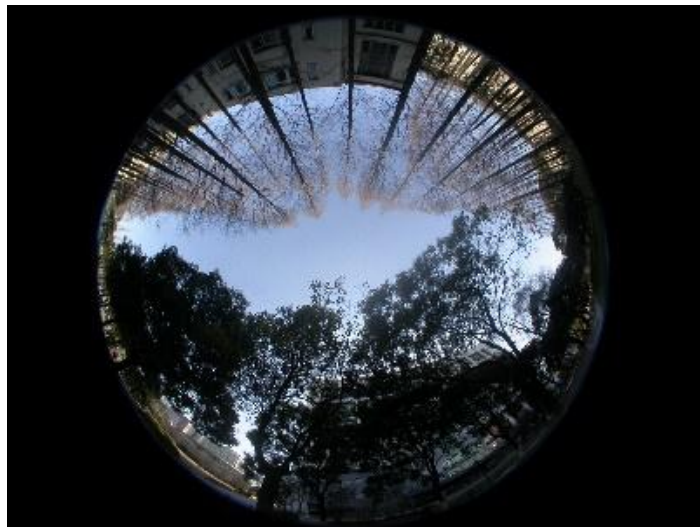
设备型号	测量参数	精度误差	量程	照片
H21-002-微气象站记录仪				
S-THB-M002-温湿度传感器（置于白色通风遮阳罩内）	空气温度（Ta）/相对湿度（RH）	温度： $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 湿度： $\pm 2.5\%$	-40°C to 75°C ; 0 to 100%	
S-LIB-M003-总辐射传感器	太阳总辐射	$\pm 10\text{ W/m}^2$ or $\pm 5\%$	0 到 1280 W/m^2	
S-WSET-B 风速风向传感器	风速/风向	$\pm 1.1\text{ m/s}$	0 至 45 米/秒	
U23-001-温湿度记录仪	温度（Ta），相对湿度	温度： $\pm 0.18^{\circ}\text{C}$ 相对湿度： $\pm 2.5\%$	-40° 到 70°C ; 0% 到 100%	
UX100-014M 温度记录仪	温度（Ta）	（外接 T 型热电偶） $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$	-260°C 至 950°C	

（数据来源：Onset HOBO）

2

热舒适评价实践

2、校园室外共享空间热舒适研究



A9春季（上）夏季（下）

A10春季（上）夏季（下）

A12春季（上）夏季（下）

2

热舒适评价实践

2、校园室外共享空间热舒适研究

春季测点与参照点样本数据的描述性统计表

春季数据	个案数	最小值	最大值	平均值	标准差
Solar太阳辐射	244	8.27	930.08	378.68	271.76
RefSolar参照点的太阳辐射	244	45.65	812.37	478.06	242.09
Rh湿度	244	16.27	45.00	28.87	7.01
RefRH参照点湿度	244	20.93	44.43	31.89	6.76
Ta温度	244	13.43	23.88	19.16	2.24
RefTa参照点温度	244	15.14	21.56	18.52	1.80
Wv风速	244	0.00	4.78	0.89	0.71
RefWV参照点风速	244	0.03	1.79	0.92	0.40
有效个案数	244	-	-	-	-

数据来源：博士生根据实测数据计算获取

夏季测点与参照点数据的描述性统计表

	个案数	最小值	最大值	平均值	标准差
Solar 太阳辐射	246	5.00	956.53	316.32	296.39
RefSolar 参照点太阳辐射	246	22.22	960.00	499.11	271.09
Ta 温度	246	24.08	39.63	30.79	4.16
RefTa 参照点温度	246	24.30	38.49	30.31	4.06
Rh 湿度	246	30.74	67.81	49.88	8.45
RefRH 参照点湿度	246	0.00	67.94	34.34	25.33
Wv 风速	246	0.00	2.73	0.46	0.50
RefWV 参照点风速	246	0.00	0.90	0.35	0.26
有效个案数（成列）	246	-	-	-	-

数据来源：博士生根据实测数据计算获取

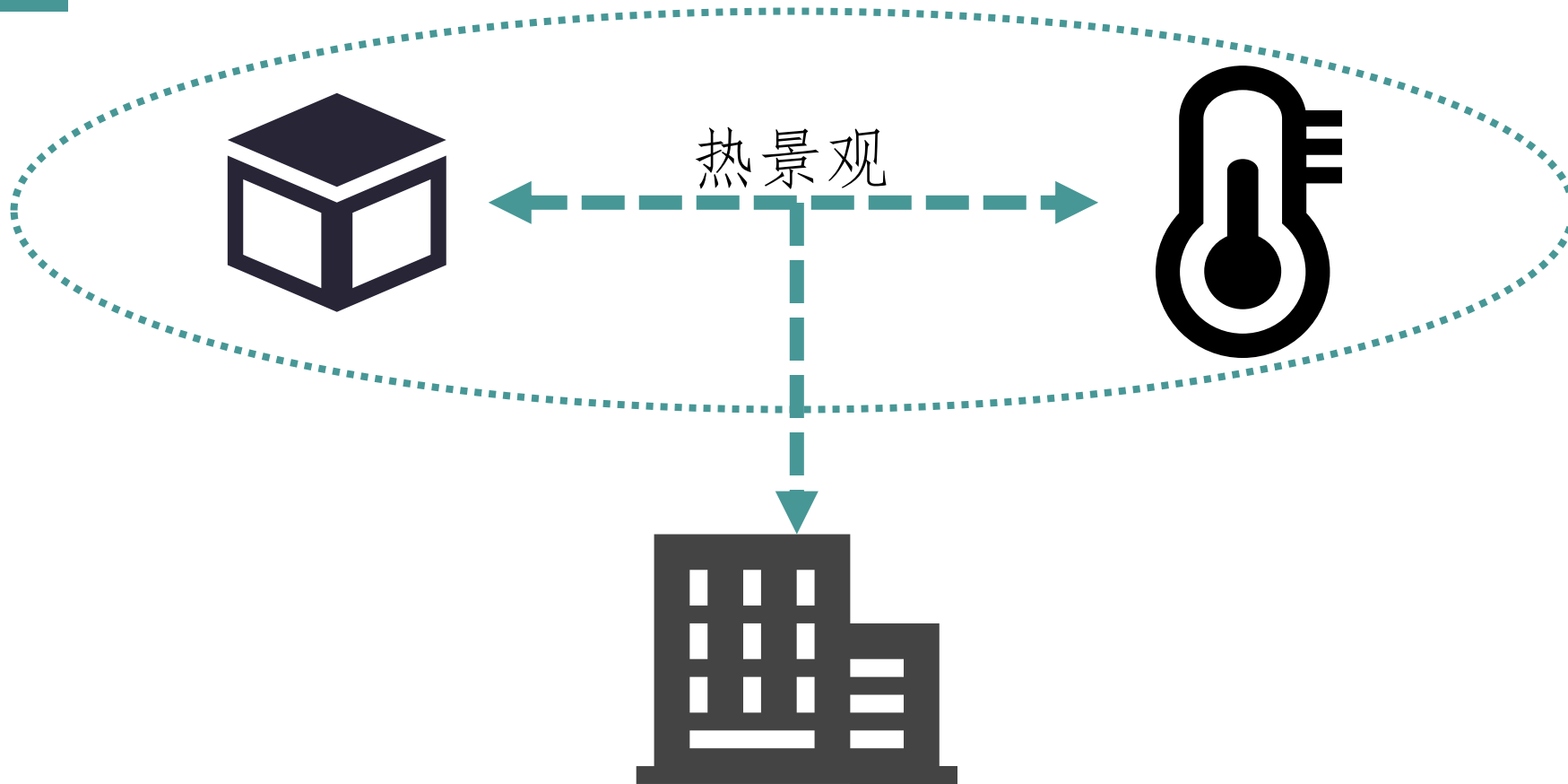
2

热舒适评价实践

2、校园室外共享空间热舒适研究

城市形态因子与生理等效温度PET的关联性研究

春季模型系数					夏季模型系数				
模型	非标准化系数		标准系数	Sig.	模型	非标准化系数		标准系数	Sig.
	B	标准误差	试用版			B	标准误差	试用版	
(常量)	-19.149	4.791		.000	(常量)	-5.702	8.737		.515
FAR容积率	-1.182	.378	-.160	.002	RefSolar	.015	.002	.476	.000
SVF	7.890	1.862	.217权重最大	.000	RefTa	1.127	.248	.542	.000
RefSolar	.013	.001	.467	.000	RefRH	-.047	.047	-.136	.325
RefTa	1.826	.202	.490	.000	RefWV	-3.523	2.274	-.100	.123
RefRH	-.047	.055	-.047	.395	L平均高度	-.315	.110	-.123	.005
因变量: PET (数据来源: 博士生根据实测数据利用SPSS计算整理)					SVF	13.112	1.789	.336权重最大	.000
					GnPR绿容率	-1.785	.657	-.125	.007
					HBDG平均建筑高度与面积比	4.168	1.140	.157	.000



“热景观”运用自然环境中的热感知要素，对建筑空间的热环境进行全面的设计和规划，并强化热环境与建筑空间以及景观元素之间的协调。

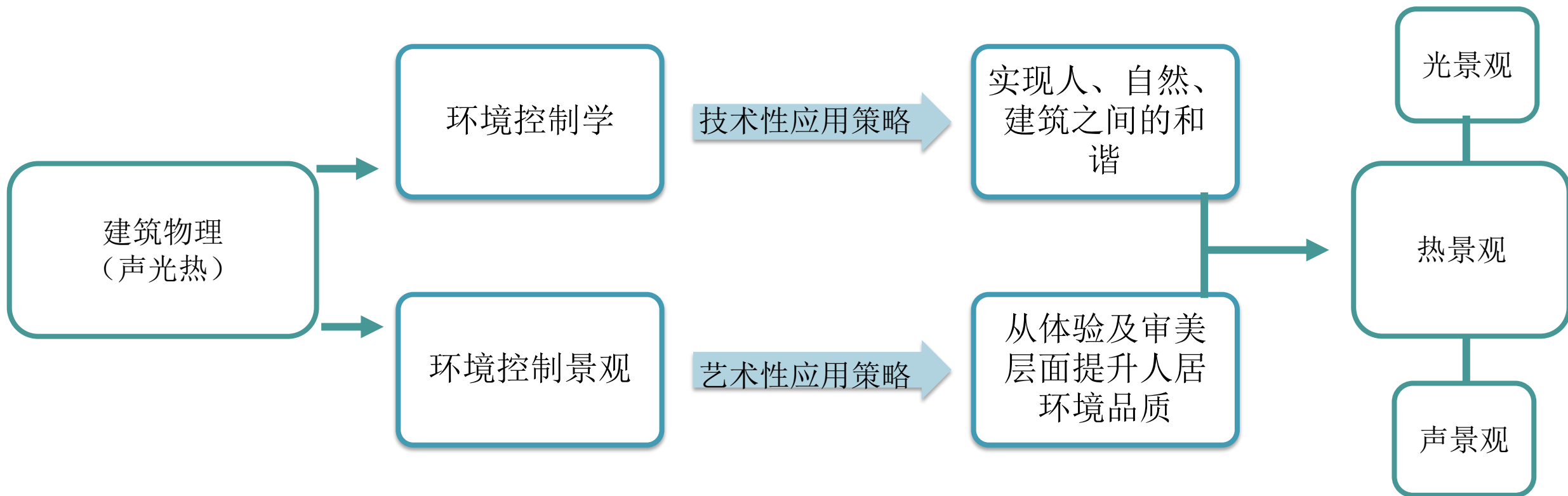
范畴	要素	指标	涉及问题
理论体系	“热景观” 空间组合论 表皮性能 形态生成 人的感知	温度分区法 体形系数 外围护综合指数 容积率、覆盖率 热传导系数 建筑设计	绿色节能 健康与舒适 热因子图示化 建筑自然通风与采光 建筑形态与场地
设计方法	导向性 多样性 场所性 适应性 趋同性	空间路径引导 空间视觉引导 “热景观”引导 热量传播与空间 热场景与环境感知	建筑热学创新研究 建筑节能创新方法 建筑空间创新设计 人的行为模式创新研究

热景观分殊理论“STDT”是一个基于建筑热学、建筑空间组合理论、建筑节能设计等基本理论，结合技术创新，对建筑空间进行空间营造、热舒适和建筑节能相统一的创新设计，实现绿色节能目标的研究体系。

3

空间与热的桥梁-热景观

环境控制景观



“热景观”作为新的研究领域可以进一步完善人的热感知、空间与环境理论研究，与光景观和声景观一起形成整体的“环境控制景观”体系，推动建筑设计以及“热景观”设计的研究。

绿色实践问题聚焦

在建筑设计后期阶段才开始介入
多以指标、技术落实为评价标准
建筑设计与绿色技术之间的脱节

热景观

绿色建筑系统设计

绿色——以绿色环保为理念
建筑——以舒适宜居为基础
设计——以审美愉悦为追求

微观层面的热景观是研究建筑尺度下（含室内）的热环境分布及空间组合。

3

空间与热的桥梁-热景观

微观尺度

研究层面	研究尺度	主要研究内容
宏观层面	城市及城市规划	城市总体热环境分布、热岛效应及城市热污染治理
中观层面	城市设计与社区	片区及社区环境的“热景观”、微气候空间环境
微观层面	建筑设计	建筑尺度下（含室内）的热环境分布及空间组合

3

空间与热的桥梁-热景观

空间引导



通过不同空间的热环境特性来进行空间组织，加强空间序列节奏



通过热环境的变化引起人们的感知变化，以此来引导空间流线

3

空间与热的桥梁-热景观

场所多样性



集中热源增强空间的向心性



大片落地窗带给人温暖的感觉

3

空间与热的桥梁-热景观

场所多样性



绿化可以与日光结合营造自然的场所感

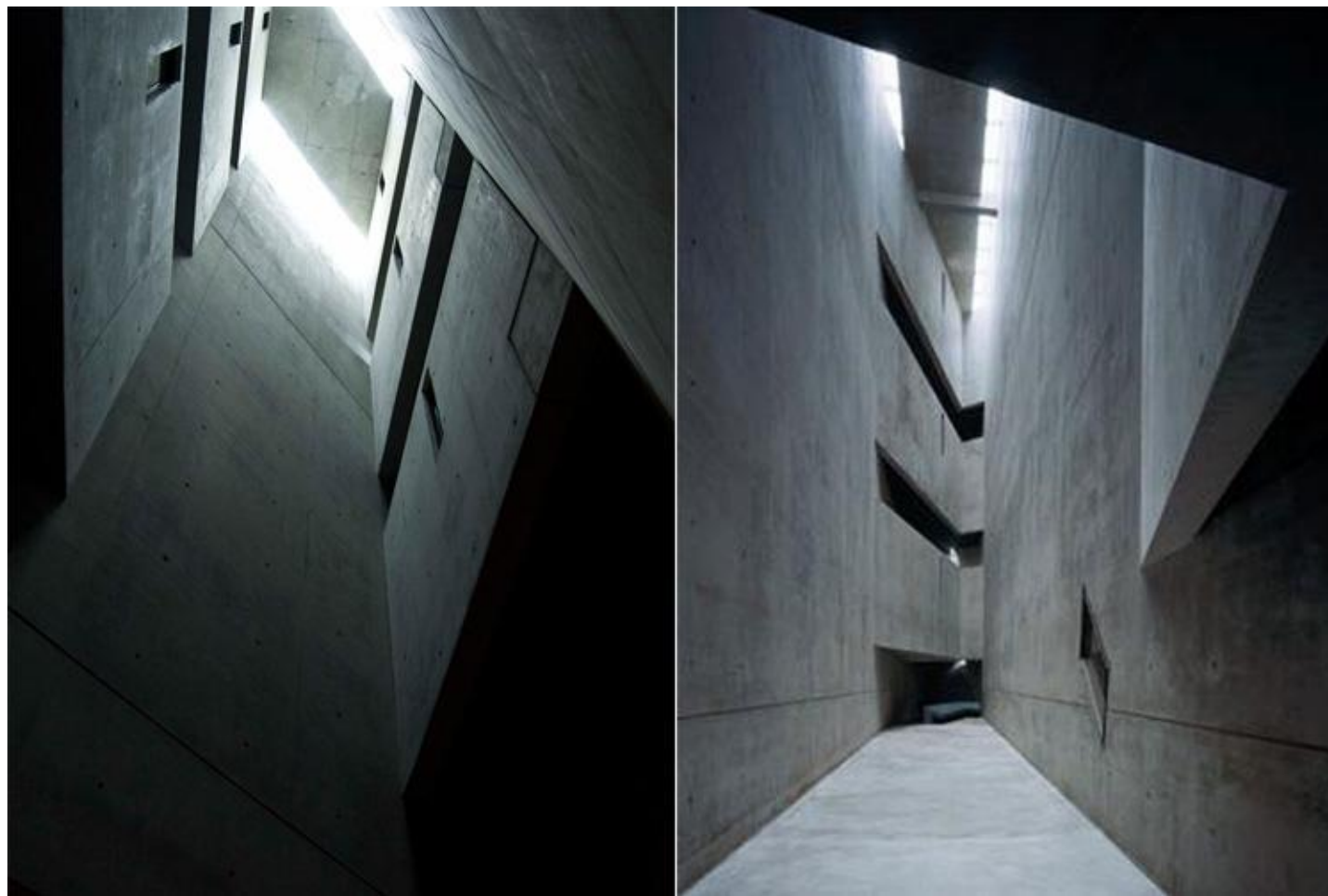


水体可以降低温度，提升人体舒适

3

空间与热的桥梁-热景观

场所多样性



阴冷的“热景观”塑造空间仪式感

3

空间与热的桥梁-热景观

研究目标

- 绿色与节能建筑的深度落实
- 建筑空间与热舒适的完善结合
- 工程师与建筑师的高度协作



谢谢!



13044651877



dxsong@tongji.edu.cn