

吐鲁番坎儿井公共空间热舒适度模拟研究

阿布力克木·托合提, 朱礼同, 王万江

(新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 坎儿井公共空间作为传统村落中集景观要素和社会生活为一体的核心空间, 其热环境直接影响人们的户外活动质量。为了提高坎儿井公共空间的热舒适度, 厘清植物、坎儿井水和地面铺装对坎儿井公共空间热环境的影响程度。以再依丁坎儿孜村为例, 运用 ENVI-met 软件模拟分析坎儿井公共空间的热环境特征, 进一步建立无坎儿井水、无水无植被和水泥地面等 3 种模拟方案。结果表明: 坎儿井公共空间的热舒适度优于其他空间, 坎儿井水和植物的共同作用下最大可降温 2.3℃, PMV 值最大相差 3 个级别, 空间舒适度变化与植物分布高度相关。坎儿井水干涸后, 坎儿井公共空间的 PMV 值最大增大 0.38; 坎儿井公共空间植物也消失后, PMV 值最大增大 2.72; 当坎儿井公共空间的地面改为水泥地面时, PMV 值最大增大 0.37。优化吐鲁番农村公共空间夏季热环境需考虑多因素之间的协同作用, 应增加树木遮阳、加以保护坎儿井水源、减少水泥和沥青等硬质地面的使用。本研究可为干热地区公共空间热舒适度的研究和建设提供参考。

关键词: 坎儿井公共空间; 热舒适度; ENVI-met; 吐鲁番

中图分类号: TU119⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)05-0617-08

Simulation study on thermal comfort of Karez public space in Turpan

Abulikemu · TUOHETI, ZHU Litong, WANG Wanjiang

(College of Civil and Architectural Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: As the core space of traditional villages, Karez public space integrates landscape elements and social life, and its thermal environment directly affects the quality of people's outdoor activities. In order to improve the thermal comfort of Karez public space, clarify the influence of plants, Karez water and ground pavement on the thermal environment of Karez public space. Taking kanerzi village as an example, ENVI-met software is used to simulate and analyze the thermal environment characteristics of public space in Karez, and three simulation schemes are further established, such as no Karez water, no vegetation and cement ground. The results show that: the thermal comfort of Karez public space is better than other spaces, the maximum temperature of Karez water and plants can be reduced by 2.3℃, PMV values differ by up to 3 levels, and the change of space comfort is highly related to the distribution of plants. The PMV value of public space in Karez increases by 0.38 after the well water dries up; after the plants in Karez public space disappears, the maximum PMV value increases by 2.72; and when the ground of Karez public space is changed to cement ground, the maximum increase of PMV is 0.37. In order to optimize the thermal environment of rural public space in Turpan in summer, it is necessary to consider the synergy of many factors, such as increasing tree shading, protecting Karez water source, and reducing the use of hard ground such as cement and asphalt. This study can provide a reference for the research and construction of public space thermal comfort in dry and hot areas.

Key words: Karez public space; thermal comfort; ENVI-met; Turpan

“生态宜居”是乡村振兴的关键, 改善农村人居环境, 提升农村室外公共空间的热舒适度是亟须解决的问题。对吐鲁番坎儿井村落而言, 坎儿井公共空间是当地居民的主要活动场所, 其热舒适度关系到人们的室外活动质量。由于地下水位

的下降和人们对坎儿井水源依赖程度降低等原因, 传统村落中的坎儿井水量下降甚至干涸, 1957 年吐鲁番地区坎儿井数量最多时有 1 257 条, 截至 2003 年有水的坎儿井只剩 404 条, 这个数值仍不断在减少^[1]。随之带来的问题就是坎儿井公共空间

收稿日期: 2021-07-10

修改稿日期: 2021-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51768066); 国家自然科学基金资助项目(52068065)

第一作者: 阿布力克木·托合提(1961—), 男, 副教授, 学士, 主要从事人居环境研究方面的工作。E-mail: ablikim61@126.com

的热环境恶化,严重影响到住区环境质量。

国内外学者针对不同气候区室外空间的热环境问题展开了相关研究。Adeb 等^[2]分析了不对称街道高宽比对湿热地区小气候的影响,为室外空间的营造提供了重要参考;熊瑶等^[3]以江南历史街区为例,提出温度与室外热舒适度的关联性最高,其次是相对湿度,建筑高度、方位、绿化率等影响了该结果。金虹等^[4-5]对严寒地区的街道、广场等室外公共空间的热舒适度进行研究,确定了东北地区室外热舒适度的影响因素为湿度、风速和人口等因素,可见不同气候下影响室外空间舒适度的因素存在较大差异。Mehmet 等^[6]通过研究发现寒冷地区密集的绿地在夏季和冬季都能起到提高城市热舒适度的作用。Nedyomukti^[7]发现夏热冬冷地区夏季水体对城市微气候的调节能力有限且与太阳辐射和风速有关。刘大龙^[8]分析了草地、混凝土、铺面砖、沥青等下垫面对室外空间热环境的影响。姚雄等^[9]提出增加水覆盖面、减少建筑覆盖率以及优化树木覆盖范围可提高古典园林中的热环境及热舒适度。但目前针对干热地区室外空间热环境、特别是干热地区村落室外公共空间的研究极少,因为大部分研究都是以城市的室外空间作为研究对象^[10-12]。

上述文献中主要采用实测分析和问卷调查的方法对室外热环境进行研究。随着计算机算法的优化,多种模拟软件被用来分析室外空间的热环境。Esnart Libanda 等^[13]利用 RayMan 软件分析了卢萨卡不同月份的城市气候与人体热舒适度的关系。张凯等^[14]将气象观测数据与 FLUENT 软件模拟对照分析了街道峡谷对近地层风场的影响。陈淦等^[15]利用 PHOENICS 软件模拟不同下垫面和绿化对城市风热环境影响。Bruse 开发的 ENVI-met 软件综合考虑了地表-植物-大气之间的相互作用,广泛应用在室外热环境的模拟研究中^[16]。

吐鲁番地区夏季极端干热,村落室外公共空间的热环境问题突出,因此对吐鲁番传统村落的室外公共空间进行研究更加迫切。本文以吐鲁番地区传统村落中独特的坎儿井公共空间为研究对象,基于 ENVI-met 软件模拟,采用“实测-建模-验证-情景模拟”的方法,分析干热地区农村室外公共空间的热环境特征,综合考虑各因素之间的协同作用,厘清各因素与热环境之间的关联性。本研究可为干热地区农村室外公共空间的营造与室外热舒适度的研究和优化提供科学依据。

1 坎儿井公共空间的特点

坎儿井是新疆干旱区传统村落所采用的一种独特的水利灌溉系统,大多分布在吐鲁番地区,坎儿井由竖井、暗渠、明渠、蓄水池四部分组成(图1)。吐鲁番地区干旱少雨,年平均降水量仅有 16.4 mm,而蒸发量则高达 3 000 mm 以上。该地长期处于水资源短缺状态,但高山雪水的融化下渗后形成了丰富的地下水资源,坎儿井正是根据当地自然条件而创造出来的。传统坎儿井村落的居民生活、生产活动主要依赖于坎儿井水系所提供的水源。

传统坎儿井村落的形成是以坎儿井水系为中心而不断发展形成的人工绿洲,居住区—蓄水池—农田依托地势由高到低分布。民居沿着坎儿井明渠进行布置,并不断向两侧进行延伸。坎儿井公共空间是指在传统坎儿井村落中,以坎儿井的明渠为中心,在明渠两侧和蓄水池周围与建筑之间形成的具有良好舒适度的线型空间,主要由坎儿井水渠、绿化和活动场地等因素组成。坎儿井水源为植物生长带来了有利条件,水渠周围的高大乔木通过遮阳又减少了坎儿井水量的蒸发,因此,在坎儿井明渠两侧和蓄水池周围形成了独特的微环境。同时为了生活用水的便利,民居与坎儿井水渠之间的可达性更好。坎儿井公共空间的景观绿化水平和舒适度都远高于村落中其他空间。因此,坎儿井公共空间成为当地居民的重要活动场所,也成为村落的核心公共空间。

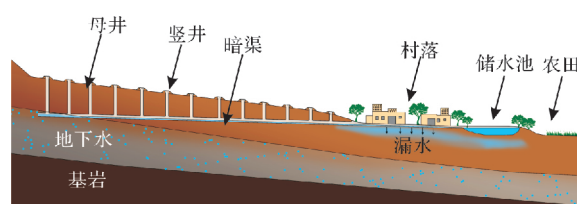


图1 坎儿井剖面结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Karez section structure

2 研究方法

2.1 研究对象

吐鲁番是我国夏季典型干热气候地区,自然条件独特,大部分地面海拔不超过 500 m,最低海拔低于海平面 155 m。全年日照时数长达 3 200 h,光热资源丰富,极端高温达 47.8 ℃,降水稀少。本研究选择位于吐鲁番高昌区恰特喀勒乡再依丁坎尔孜村进行分析,该村落内部纵向的坎儿井水系与横向的其那儿巴哥公路构成了十字形的骨架,

整个村落沿着这一骨架延伸, 形成了坎儿井村落特有的空间形态, 是一处典型的坎儿井村落。为了解决村落的坎儿井水源不足的问题, 该村将电井水引入明渠来维持坎儿井的生态, 因此该村落保持了坎儿井公共空间的形态特征并延续至今。

测试时间为: 2017 年 8 月 14 日—18 日, 在 1.5 m 高度下测试的环境参数及仪器参数如表 1 所示。本次测试沿坎儿井明渠方向纵向布置了 3 个测点, 各测点布置如图 3(a)所示。

表 1 测试仪器参数

Tab. 1 Parameters of test instrument

测试仪器	测试参数	仪器量程	仪器精度
FB-8 便携式风速风向仪	风速	0~30 m/s	±0.3 m/s
FB-8 便携式风速风向仪	风向	0~360°	±1/2 方位
JZ-RR002 温湿度自计仪	空气温度	-10~50℃	±0.5℃
JZ-RR002 温湿度自计仪	相对湿度	0~95%	±3%

2.2 测试结果分析

吐鲁番夏季高温天气持续时间极长, 选择本次实测最晴朗炎热的 8 月 15 日作为夏季典型气象日。吐鲁番当日的日出时间为 07:09, 正午时间为 14:07, 日落时间为 21:05。根据当地居民的活动时间, 选择对日出后的测试数据进行分析。再依丁坎尔孜村各测点温湿度变化及对比如图 2 所示。

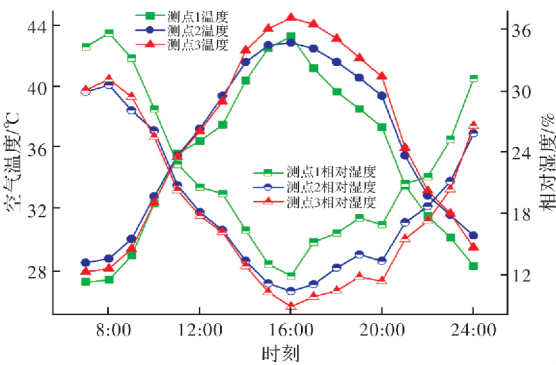


图 2 2017 年 8 月 15 日 各测点温湿度变化图

Fig. 2 Temperature and humidity variation of each measuring point on August 15, 2017

从温湿度日变化图可以看出, 各测点的温湿度逐时变化趋势基本一致。相对湿度变化与空气温

度变化基本呈负相关关系。日出前(7:00), 实测当天各测点温度最低为 27.2℃, 相对湿度最高为 35%(8:00)。9 点之后温度上升较快至 16 时到达峰值 44.0℃, 而相对湿度降至最低值为 8%。各测点最高温主要集中在 15:00—17:00。20:00 之后, 空气温度下降较快。在 11:00—20:00 的时间段内, 所有测点的温度均高于 35℃。

2.3 坎儿井公共空间热环境模拟验证及舒适度评价

2.3.1 ENVI-met 相关参数设置

首先将研究区域的卫星图如图 3(a)结合各个建筑的测量图纸对坎儿井公共空间进行精确建模。为了观测不同区域的热环境变化, 沿着坎儿井明渠设置 4 个监测点(Receptors)分别是: 空间开合度高的 R1、蓄水池附近且树木最密集的 R2、十字路口的 R3 以及北部狭窄区域的 R4, 如图 3(b)所示。为进一步提高模拟精度, 在模型周边设置了 30 m 的空白区域作为缓冲空间; 在 ENVI-guide 模块中输入 8 月 15 日的测试数据作为模拟气象边界。相关参数设置如表 2 所示。

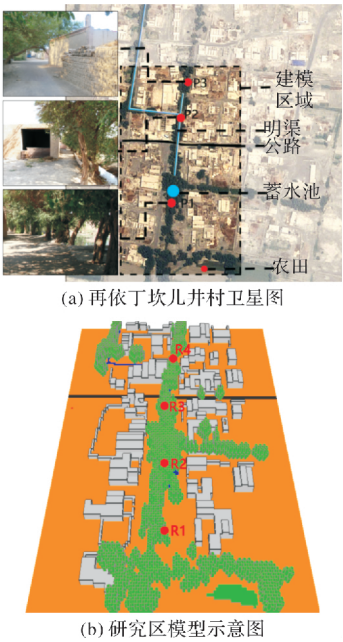


图 3 研究区域卫星图及模型示意图

Fig. 3 Satellite map and model diagram of study area

表 2 模拟参数设置表

Tab. 2 Simulation parameter setting table

建模参数	数值	环境参数	数值
研究地点	Turpan, 再依丁坎儿井村	风速(10 m 高)	1.3 m/s
参考时区	东八区(东经 120)	风向	NW 315°
网格尺寸	120×150×40	空气温度	27~44℃
网格分辨率	dx=2.00, dy=2.00, dz=1.00	相对湿度	9%~37%
嵌套网格数	5	模拟日期	2017 年 8 月 15 日
绿化	榆树、草地	模拟时间	10:00—22:00

2.3.2 模拟结果评价

为了验证模型的精度,将实测数据与模拟结果进行对比.引入均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)以及一致性指数 d 等统计指标来反映模型的误差. RMSE和MAE是关于连续变量的两个最普遍的度量标准,二者的数值越小,表示模拟的精度越高^[17]. Willmott提出的一致性指数 d 常用来评估模型的预测能力^[18], d 值越趋近于1,表示模型的预测能力越强.各指标的公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{N} \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P'_i| + |O'_i|)^2}, (0 \leq d \leq 1) \quad (3)$$

其中: $P'_i = P_i - \bar{O}$, $O'_i = O_i - \bar{O}$.

式中: O_i 、 P_i 分别为第 i 次的测试值、模拟值; \bar{O} 为测试数据的平均值; N 为测量次数.

提取研究区域内1~3号点的温度和相对湿度的模拟值与实测值进行分析.根据各点的温湿度对比情况以及模型精度的评价结果,见表3、图4.

表3 模型精度评价结果

Tab. 3 Model accuracy evaluation results

测点	d		RMSE		MAE	
	温度	相对湿度	温度	相对湿度	温度	相对湿度
1	0.96	0.87	1.28	4.97	0.94	3.49
2	0.97	0.84	1.06	5.43	0.81	4.69
3	0.98	0.85	1.17	5.28	0.81	4.43

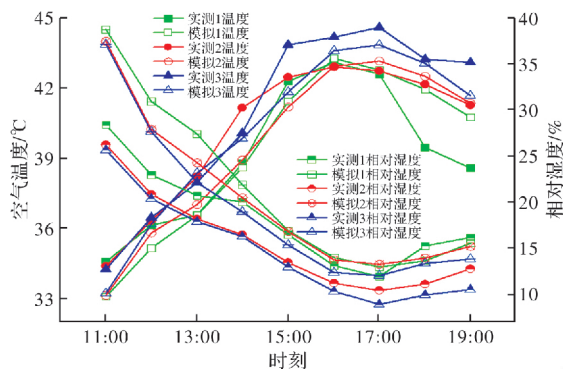


图4 点1-3实测与模拟的温湿度对比结果

Fig. 4 Comparison results of temperature and humidity measured and simulated at points 1-3

可以看出:①温湿度的模拟值曲线与实测值曲线整体变化趋势基本一致.②模拟的温度与实测结果的拟合度极高,一致性指数为0.96~0.98,

RMSE为1.06~1.28, MAE为0.81~0.94.③各测点相对湿度的模拟结果与实测值的差异相对较大,主要是因为受模型分辨率的限制,水体的建模与实际情况还存在一定的差异.实测时周围的环境更为复杂也会导致实测值有所误差.但基本在误差允许的范围内,相对湿度的一致性指数为0.84~0.87.可见ENVI-met软件可以模拟坎儿井公共空间热环境^[19].

2.3.3 温度模拟结果分析

提取1.5 m高度上不同阶段典型的升温时刻(11:00)、最热时刻(16:00)和降温时刻(19:00)等3个典型时刻的温度模拟结果,见图5.

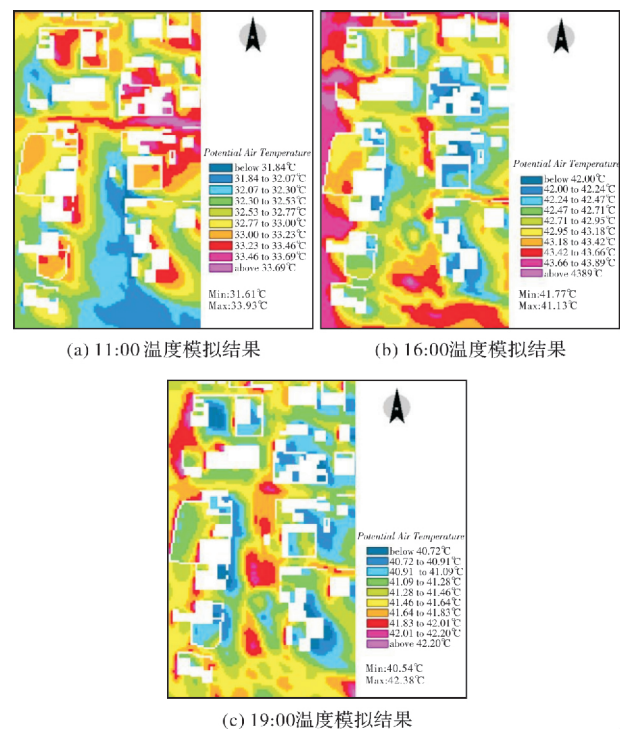


图5 2017年8月15日典型时刻温度模拟结果

Fig. 5 Temperature simulation results at typical time on August 15, 2017

在11:00时,研究区内最高温度与最低温度的差值为2.3°C.最高温度为33.9°C,高温区域出现在点R3北面的沥青柏油公路上.由于沥青的比热容较小,在太阳直接辐射的影响下,沥青路面快速升温并对周围的空间辐射热量.研究区南部及中部(R2、R1附近)的坎儿井公共空间温度最低为31.6°C.主要是因为树木的蒸腾作用以及比热容高的坎儿井水吸收了大量的热量,使得周围大面积的空气温度降低.此外,建筑物对太阳辐射的遮挡而产生阴影区域的空气温度也有所降低.

在16:00时,研究区域的整体温度达到峰值,气温的空间分布特征明显.研究区域的西侧和坎

儿井公共空间的南部区域出现最高温为 44.1℃. 主要是这些区域没有植被或建筑遮挡太阳辐射. 在观测点 R2 附近有遮阳区域的温度最低为 41.7℃. 此时研究区内的最大气温差可达 2.4℃.

在 19:00 时, 坎儿井公共空间的温度开始降低. 研究区内的最低温度为 40.5℃, 主要分布在建筑的阴影区, 建筑对西晒的遮挡起到了良好的降温效果. 而坎儿井公共空间的内部点 R1 和 R2 附近出现了高温区域, 最高温度为 42.3℃. 此时研究区内的最大气温差值为 1.8℃. 这是因为高密度的植物形成的较封闭空间及植物的散热在一定程度上延缓了空间温度地下降速度^[20].

从模拟结果来看, 坎儿井公共空间的整体温度水平低于其他的空间, 平均相差 1.8~2.4℃. 植物、坎儿井水以及民居建筑的阴影区都能够起到一定的降温作用. 沥青路面与覆土地面的温度在升温阶段差异最大.

2.3.4 坎儿井公共空间热舒适度评价

(1) 热舒适度评价指标

选择表征人体热反应的评价指标 PMV (Predicted Mean Vote) 作为坎儿井公共空间热舒适度的评价指标^[21]. ENVI-met 软件中的 BIO-met 模块可根据对坎儿井公共空间热环境的模拟结果以及人体与环境之间的能量交换等因素计算出 PMV 值. 具体评价指标如表 4 所示. 值得注意的是, 相关研究表明干热地区的人们具有更好的热承受能力^[22], 因此对于吐鲁番的居民来说实际的热感觉对应的 PMV 值应略大于一般规定的 PMV 值.

表 4 PMV 指标评价表

Tab. 4 PMV index evaluation table

热感觉	极热	热	暖	微暖	适中	微凉	凉	冷	极冷
PMV 值	≥4	3	2	1	0	-1	-2	-3	≤-4

(2) 坎儿井公共空间热舒适度分析

为了分析不同时刻坎儿井公共空间的热舒适度, 在模拟计算结果中提取上述典型时刻的 1.5 m 高度上的 PMV 值计算结果, 如图 6 所示.

对比不同时刻的 PMV 值可以看出: ①夏季坎儿井公共空间的大部分区域 PMV 值低于其他空间 3 个级别, 可见坎儿井公共空间的舒适度高于其他地点. 此外, 较舒适空间的分布在不同时刻均与树木的分布呈现出高度一致性. ②在 11:00 时, 坎儿井公共空间中的建筑阴影区与树荫下的 PMV 值较低, 最低值为 2.8, 而最高值约 5.6, 整体相差约 3 个等级; 而在 19:00 时, 坎儿井公共空间的东侧阴影区的 PMV 值明显小于西侧, 整体相差

2.8 个等级. 可见树木对太阳辐射的遮挡是影响坎儿井公共空间舒适度的重要因素. ③在 16:00 时, 研究区域内的温度最高, 此时坎儿井公共空间内的 PMV 最小值为 6.1, 出现在树荫下, 但该区域仍属于难以忍受的极热感觉, 不适宜人的活动.

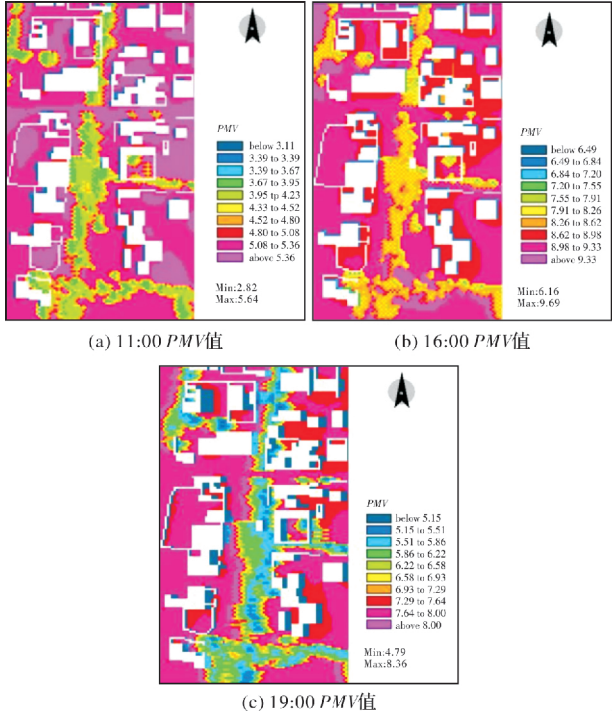


图 6 2017 年 8 月 15 日不同时刻模拟结果的 PMV 值
Fig. 6 PMV values of simulation results at different times on August 15, 2017

3 坎儿井公共空间的差异化模拟

从上文可以看出坎儿井公共空间中的坎儿井水、植物和地面铺装等都是影响坎儿井公共空间热环境的主要因素. 为了提升坎儿井公共空间的热舒适度, 在对坎儿井公共空间进行改造时, 准确评估各个影响因素与微气候环境的影响程度可为建筑师和规划师的相关规划设计工作提供一定的参考. 根据吐鲁番坎儿井村落的发展趋势, 以原有的实测参数(表 2)作为模拟边界, 通过改变单一因素来模拟不同条件下坎儿井公共空间的热环境

3.1 无水方案模拟结果分析

为研究坎儿井水对坎儿井公共空间微气候的影响, 建立一个无水方案, 即把模拟区域内的水流去掉, 以覆土地面代替, 其他模拟边界保持不变. 计算出无水方案与实际方案的 PMV 差值, 模拟结果如图 7 所示.

从不同时刻 PMV 差值可以看出, 去掉坎儿井水之后, 坎儿井公共空间的 PMV 值与实际情况的 PMV 值相比增大, 坎儿井公共空间的舒适度有所

下降。具体来看:①不同时刻坎儿井明渠附近空间的 PMV 差值为 $0.01 \sim 0.07$, 说明坎儿井明渠水对空间舒适度的影响较小, 而蓄水池附近空间的 PMV 差值为 $0.06 \sim 0.38$, 表明蓄水池对周围空间舒适度的影响程度大于明渠水的影响, 可见坎儿井水对热环境的影响与水体的面积有明显的关联性。②当空气温度较低时(11:00), 水体对周围空间舒适度的影响不明显, 最大 PMV 差值仅为 0.06 。随着空气温度的升高, 水体的影响也更加明显, PMV 差值逐渐增大, 最大为 0.38 。③从 PMV 差值分布情况来看, 位于下风向的空间的受坎儿井水的影响更大。主要是由于风经过坎儿井水面及其附近空间时, 可为下风向的空间带来一定的相对湿度和低温空气。

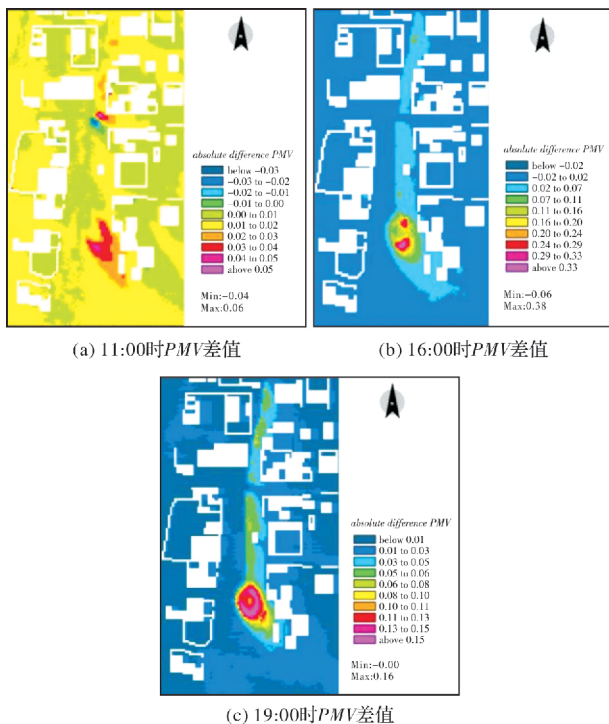


图7 不同时刻无水方案与实际方案的 PMV 差值

Fig. 7 PMV difference between water free scheme and actual scheme at different times

总体而言, 坎儿井水对坎儿井公共空间的热舒适度有一定的提升作用, 特别是水面积增大时, 作用效果更加明显。值得注意的是, 坎儿井水还影响到周围植物的生长来间接影响空间的热环境, 因此, 坎儿井水对坎儿井公共空间热环境至关重要。

3.2 无水、无绿化方案模拟结果分析

为了研究植被对坎儿井公共空间微气候的影响, 建立一个无水无绿化的方案, 用土壤来代替原有的植物与水体, 即坎儿井空间处于完全衰败的状态。计算出无水无植被方案与实际方案的

PMV 值的差值, 模拟结果如图8所示。

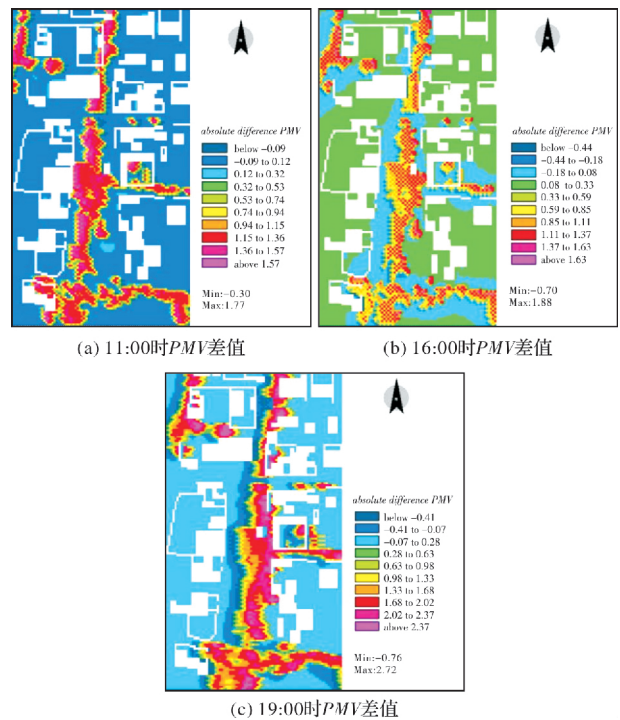


图8 不同时刻无水、无植被方案与实际方案的 PMV 差值

Fig. 8 PMV difference between no water and vegetation scheme and actual scheme at different times

去除坎儿井水和植物之后, 可以明显看出: 坎儿井公共空间中原有树木覆盖的区域的 PMV 差值明显增大, 而没有植物遮阳的区域的 PMV 值几乎没有变化。上午11:00时, 树荫下的空间 PMV 差值都在1以上, 最大可达1.77; 在16:00时树荫下的 PMV 差值为 $0.59 \sim 1.37$, 可见随着温度的升高, 植物对公共空间热舒适度的提高能力减弱; 在19:00时树木覆盖区域的 PMV 值平均升高了2个等级, 主要分布在植物的阴影区域及其东侧, 最大差值可达2.72。对比上述4.1中无水方案的模拟结果, 可以看出植物对坎儿井公共空间舒适度的提高效果显著。

3.3 硬质地面方案模拟结果分析

为了研究地面材质对坎儿井公共空间热环境的影响, 依据吐鲁番传统坎儿井村落的改造情况, 将坎儿井明渠两侧的覆土地面和道路全部改为水泥地面, 其他边界条件保持不变。

不同时刻 PMV 模拟结果的差值如图9所示。当坎儿井明渠两侧由覆土地面改为水泥地面时, 不同时刻的 PMV 值均有所增大, 表明该区域的热舒适度降低。(1)上午11:00时, 坎儿井公共空间的 PMV 值增大了0.1以上, 差值最大为0.32, 集中分布在坎儿井公共空间中明渠的东侧及南侧区域, 这主要是因为水泥的比热容较低, 不足水比

热的1/2。水泥地面在太阳辐射的影响下升温迅速,并向周围空间辐射热量,从而影响了整个区域的舒适度。(2)当整个研究区域的温度最高时,没有植物遮阳的区域PMV差值最大为0.27,而有植物遮阳的区域PMV值变化不大。主要是由于植物的遮阳有效减少了太阳辐射对地面的加热,从而降低了地面材质的影响。(3)温度下降(19:00)时,水泥地面对空间热环境的影响程度减弱,PMV最大差值为0.13。

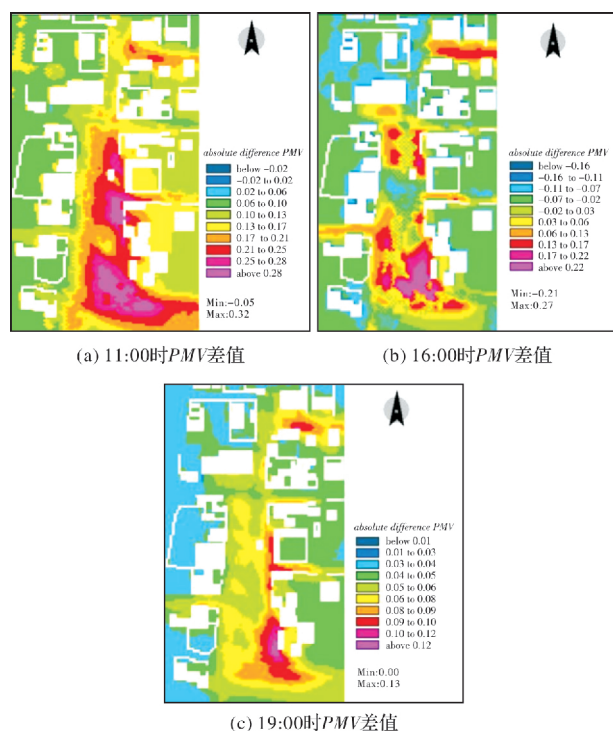


图9 不同时刻水泥地面方案与实际方案的PMV差值

Fig. 9 PMV difference between cement ground scheme and actual scheme at different times

综合来看,水泥地面会导致空间舒适度下降,而植物的遮阳可有效降低水泥地面的不利影响。

4 结论

(1)坎儿井公共空间中的植物与水都起到有效的降温作用,最大可降低1.5 m高度的气温2.3℃,空间PMV值最大可相差约3个级别;

(2)在夏季,当坎儿井水系消失时,坎儿井公共空间的舒适度下降,明渠附近空间的PMV值增大0.01~0.07,蓄水池附近PMV值最大增大0.38。总体而言,坎儿井水对热舒适度有一定的提升作用,水体面积较大时提升效果明显,且对下风向空间的影响大于上风向;

(3)树木对坎儿井公共空间的舒适度影响很大。当树木消失后,坎儿井公共空间热舒适度下降明显,PMV值平均升高1个层级,树木遮阳区

域的PMV最大增大了2.72。所以对于坎儿井公共空间来说,树木遮阳是影响空间热舒适度的主要因素;

(4)当坎儿井公共空间周围全部改为水泥地面时,PMV值最大可提高0.37个层级。树木遮阳可减小地面地热,而削弱了水泥地面对热环境的不利影响。

综上,吐鲁番传统村落坎儿井公共空间的舒适度明显优于村落中的其他室外空间,应对坎儿井及其周围空间加以保护。特别是针对干热地区没有水就没有植被的特点,要考虑多因素之间的协同作用对空间热环境的影响,水渠周围应种植树木来减少水体蒸发,部分干涸的坎儿井明渠应以保障植被灌溉的最低要求作为底线适当引入水源,以维持坎儿井公共空间的环境,如引电井水入渠。提高吐鲁番地区室外热环境舒适度首要考虑种植大树冠的耐旱树木或设置遮阳构件形成遮阳,降低太阳辐射的影响。在今后对坎儿井公共空间的改造和新建住区公共空间的建设中应适当引入水源、结合水源种植树木,尽量减少硬质地面的铺设,为人们的室外活动提供舒适的环境。

参考文献 References

- [1] 吾普尔·努尔丁·托合布克,张璐,杨生文. 新疆坎儿井[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,2006.
WUPUER N T, ZHANG Lu, YANG Shengwen. Xinjiang Karez[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 2006.
- [2] ADEB Q, DILSHAN R. O. Effect of asymmetrical street aspect ratios on microclimates in hot, humid regions[J]. International Journal of Biometeorology, 2015, 59(6): 657-677.
- [3] 熊瑶,严妍. 江南历史街区中小气候因子与热舒适性关联性研究[J]西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021,53(2):239-246.
XIONG Yao, YAN Yan. Study on the relationship between small and medium climate factors and thermal comfort in Jiangnan historical district[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021,53 (2): 239-246
- [4] JIN H., KANG J, LIU S Q. Thermal comfort range and influence factor of urban pedestrian streets in severe regions [J]. Energy& Buildings, 2019, 198: 197-206.
- [5] 金虹,崔鹏,乔梁. 严寒地区广场微气候舒适度与参与人数相关性研究[J]. 建筑科学,2017,33(10):1-7.
JIN Hong, CUI Peng, QIAO Liang. Research on the

- correlation between microclimate comfort and the number of participants in square in severe cold area[J]. Architectural science, 2017,33 (10): 1-7.
- [6] MEHMET A I, SEVGI Y, EMRAL M, et al. Analysis of different urban spaces on thermal comfort in cold regions: a case from Erzurum[J]. Theoretical Applied Climatology, 2020,141(3/4):1593-1609.
- [7] NEDYOMUKTI I S, MASAYUKI I, NYUK H W, et al. Experimental study on the influence of urban water body on thermal environment at outdoor scale model[J]. Procedia Engineering, 2016,169(5):191-198.
- [8] 刘大龙, 马岚, 刘加平. 城市下垫面对夏季微气候影响的测试研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020,52(1):107-112.
- LIU Dalong, MA Lan, LIU Jiaping. Study on the influence of urban underlying surface on summer microclimate[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020,52 (1): 107-112.
- [9] YAO X, 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 & Buildings, 2020,215(5).
- [10] FAZIA A, HELMUT M. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate[J]. Building and Environment, 2005, 41 (2): 94-108.
- [11] Susana S, María A C, Erica N C. Design of urban green square in dry areas: Thermal performance and comfort [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015,1 4 (2):323-335.
- [12] ERIK J. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco[J]. Building and Environment, 2005, 41 (10): 1326-1338.
- [13] ESNART L, NAMWIINGA B N, NGONGA C. Human thermal comfort and Urban climate of Zambia's economic and political hub: a RayMan model study[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2020, 6 (4): 1671-1682.
- [14] 张凯, 赵天良, 曹乐, 等. 街道峡谷对近地层风场影响的观测和模拟分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39 (12): 4187-4195.
- ZHANG Kai, ZHAO Tianliang, CAO Le, et al. Observation and simulation analysis of the influence of street canyons on near surface wind field[J]. Journal of Environmental Science, 2019,39 (12): 4187-4195.
- [15] 陈淦, 卓志雄, 张华荣, 等. 基于 CFD 模拟的不同下垫面对城市热环境的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(6):1021-1026.
- CHEN Gan, ZHAO Zhuoxiong, ZHAMG Huarong, et al. Effects of different underlying surfaces on urban thermal environment based on CFD simulation [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2019, 50 (6): 1021-1026.
- [16] LIU Z X, CHENG W W, Jim C Y, et al. Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4[J]. Building and Environment, 2021(pre-publish).
- [17] CORT J W, KENJI M. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance[J]. Climate Research, 2005,30(1):79-82.
- [18] CORT J W. Some comments on the evaluation of model performance[J]. Bulletin of The American Meteorological Society, 1982,63(11):1309-1313.
- [19] 耿红凯, 卫笑, 张明娟, 等. 基于 Envi-met 植被与建筑对微气候影响的研究——以南京农业大学为例[J]. 北京林业大学学报, 2020,42(12):115-124.
- GENG Hongkai, WEI Xiao, ZHANG Mingjuan, et al. Study on the influence of vegetation and architecture on microclimate based on ENVI-met: a case study of Nanjing Agricultural University[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020,42 (12): 115-124.
- [20] YOSHIHITO K, EMI K, KENTA F. Effects of outdoor thermal environment upon the human responses [J]. Engineering, 2019,11(8):475-503.
- [21] 劳钊明, 李颖敏, 邓雪娇, 等. 基于 ENVI-met 的中山市街区室外热环境数值模拟[J]. 中国环境科学, 2017, 37 (9):3523-3531.
- LAO Zhaoming, LI Yingmin, DENG Xuejiao, et al. Numerical simulation of outdoor thermal environment of Zhongshan block based on ENVI-met[J]. China Environmental Science, 2017,37 (9): 3523-3531.
- [22] YANG L, FU R, HE W F, et al. Adaptive thermal comfort and climate responsive building design strategies in dry-hot and dry-cold areas: Case study in Turpan, China[J]. Energy & Buildings, 2020,209.

(编辑 沈波)