

分类号：
学号：20222010002

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于微气候改善的新疆夏季干热地区城市公园 优化设计研究

学位申请人	赵钊
指导教师	李洁 副教授
申请学位类别	工学硕士
专业名称	土木工程
研究领域	寒区绿色建筑
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

分类号：
学号：20222010002

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于微气候改善的新疆夏季干热地区城市公园 优化设计研究

学位申请人	赵钊
指导教师	李洁 副教授
申请学位类别	工学硕士
专业名称	土木工程
研究领域	寒区绿色建筑
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

**Study on optimal design of urban parks in summer dry and hot
areas of Xinjiang based on microclimate improvement**

A Dissertation Submitted to
Shihezi University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Engineering

By
Zhao Zhao
(**Civil engineering**)

Dissertation Supervisor: Prof. Li Jie

May, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：赵剑

时间：2025年5月19日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：赵剑

时间：2025年5月19日

导师签名：李华

时间：2025年5月19日

摘要

在全球气候变暖加剧城市热岛效应的背景下,新疆干旱区夏季极端高温显著降低了城市宜居性,制约着居民户外活动的舒适度与安全性。为改善新疆地区居民室外活动的舒适性,本研究以石河子明珠公园为典型案例,通过解析公园景观形状指数与景观要素对微气候的调节机制,提出城市公园优化方案,旨在改善户外活动空间的热环境,提升气候舒适度,减轻极端高温天气对人体健康的不利影响,提升城市整体宜居性。本文主要研究结论如下:

(1) 采用实地调研和实地测量的方法,明确公园微气候影响机制,分析微气候要素与居民主观感觉的关系。结果表明:公园对周边建成区降温增湿效应可辐射至边界外 200 米范围,公园内景观要素对微气候具有显著的调节作用。太阳辐射与生理等效温度(PET)值呈 0.93 强正相关,是新疆热舒适度的核心影响因子;56 岁以上长者占使用人群的 27.1%,活动偏好休闲(38.9%)和散步(27.5%),活动高峰集中在 9:00-11:00 和 18:00-24:00,树木遮蔽区热感觉最优(TSV=0 占 60.7%),而硬质铺装区辐射感最差,需控制热感觉 ≤ 2.07 、湿感觉 ≈ 1.23 、太阳辐射感觉 ≤ -1.39 以确保舒适体验。

(2) 采用 ENVI-met 数值模拟的方法,分析研究区域微气候现状。结果表明:测量与模拟数据趋势高度一致,模拟值在 95%置信区间内精准可靠,线性回归 $R^2 > 0.7$ 显示强相关性,且空气温度与相对湿度的均方根误差(RMSE)分别为 2.77 $^{\circ}\text{C}$ 和 9.98%,均低于可接受的标准值(4.30 $^{\circ}\text{C}$ 和 10.2%),验证了模型的有效性。植被和水体能有效改善微气候,植被区比裸地降温 2-6 $^{\circ}\text{C}$ 、PET 低 3-5 $^{\circ}\text{C}$ 、增湿 3-18%。水体降温增湿效果更强,但因风速影响,其 PET 反比植被区高 20-30%。东南部受西北风影响降温增湿显著,高地比低地更凉爽湿润。公园对周边具有降温增湿效应。主要不足在于正午 PET 仍较高,尤其北侧裸地 PET 比植被区高约 10 $^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 采用 ENVI-met 数值模拟,构建 4 组理想化单变量模型,揭示景观形态参数、植被覆盖率、水体覆盖率及地形坡度对微气候及 PET 的作用规律。结果表明:公园区域 PET 低于周边建成区;景观形状指数(LSI)与 PET 呈显著正相关,每增加 0.1 单位, PET 上升 1.4 $^{\circ}\text{C}$;而绿化覆盖率、水体覆盖率及山体坡度与 PET 呈显著负相关,尤其是水体覆盖率每增加 10%, PET 降幅达 2.2 $^{\circ}\text{C}$,优化效果最为显著。LSI=1.0、植被覆盖率 85%、水体占比 40%、坡度 15 $^{\circ}$ 时, PET 最低,热舒适性最佳。

(4) 根据前文研究结果,提出城市公园优化设计方案,并对明珠公园进行优化设计及评价分析。结果表明:本研究以 PET 为核心指标,针对新疆干热地区夏季气候特点,提出城市公园优化设计目标与原则。提出包括选址与空间形态设计、植被、水体、地形及公园内景观小品的城市公园优化设计策略。对明珠公园进行优化设计,优化后空气温度降低 0.35 $^{\circ}\text{C}$,高温区减少,相对湿度升高 0.88%, PET 降低 1.35 $^{\circ}\text{C}$,在 19:00 研究区域整体最高降低 0.67 $^{\circ}\text{C}$,平均降低 0.43 $^{\circ}\text{C}$,人体热舒适性显著提升。

本研究为科学优化新疆夏季干热地区城市公园的微气候环境、提升人体热舒适度提供了理论依据和实践指导。

关键词：新疆地区；城市公园；夏季；微气候；热舒适性

Abstract

Against the background of global warming exacerbating the urban heat island effect, the extreme summer high temperatures in the arid region of Xinjiang significantly reduce the livability of the city, restricting the comfort and safety of residents' outdoor activities. In order to improve the comfort of residents' outdoor activities in Xinjiang, this study takes Shihezi Mingzhu Park as a typical case, and proposes an optimization scheme for urban parks by analyzing the park landscape shape index and the regulation mechanism of landscape elements on microclimate, with the aim of improving the thermal environment of outdoor activity space, enhancing the comfort of the climate, mitigating the negative impacts of extreme high temperature weather on human health, and enhancing the overall livability of the city. The main findings of this thesis are as follows:

(1) Field research and field measurements are used to clarify the mechanism of park microclimate influence and analyze the relationship between microclimate elements and residents' subjective feelings. The results show that the cooling and humidifying effect of the park on the surrounding built-up area can be radiated to 200 meters outside the boundary, and the landscape elements in the park have a significant regulatory effect on the microclimate. Solar radiation showed a strong positive correlation of 0.93 with physiologically equivalent temperature (PET) values, which is the core influence factor of thermal comfort in Xinjiang. Elderly people over 56 years of age accounted for 27.1% of the use population, with activity preferences for leisure (38.9%) and walking (27.5%), and activity peaks were concentrated in the areas between 9:00-11:00 and 18:00-24:00, with optimal thermal sensation in the shaded area of the trees (TSV = 0 accounted for 60.7%), while the radiation sensation in the hard-paved area was the worst, and the thermal sensation ≤ 2.07 , wet sensation ≈ 1.23 , and solar radiation sensation ≤ -1.39 should be controlled to ensure a comfortable experience.

(2) The microclimate conditions in the study area were investigated using the ENVI-met numerical simulation model. The results demonstrate a high degree of consistency between the measured and simulated data trends. The simulated values fall within the 95% confidence interval, confirming their accuracy and reliability. Furthermore, a strong correlation is evidenced by a linear regression coefficient ($R^2 > 0.7$). The root mean square error (RMSE) for air temperature and relative humidity is 2.77°C and 9.98%, respectively—both below the acceptable thresholds of 4.30°C and 10.2%. These findings validate the robustness and applicability of the ENVI-met model for microclimate analysis in the study area. Vegetation and water bodies can effectively improve the microclimate, and the vegetated area cools down the temperature by $2\text{-}6^\circ\text{C}$, lowers the PET by $3\text{-}5^\circ\text{C}$, and increases the humidity by 3-18% than the bare ground. Water bodies were more effective in cooling and humidifying, but their PET was inversely 20-30%

higher than that of vegetated areas due to wind speed. The southeastern part of the park is significantly cooled and humidified by the northwest wind, and the upland is cooler and wetter than the lowland. The park has a cooling and humidifying effect on the neighborhood. The main shortcoming is that the PET is still high at midday, especially on the north side where the bare ground PET is about 10° C higher than the vegetated area.

(3) Numerical simulation with ENVI-met was used to construct four sets of idealized univariate models to reveal the effects of landscape morphology parameters, vegetation cover, water body cover and topographic slope on microclimate and PET. The results showed that the PET in the park area was lower than that in the surrounding built-up areas; the landscape shape index (LSI) was significantly positively correlated with PET, with a 1.4°C increase in PET for every 0.1 unit increase; and the green coverage, water coverage and hill slope were significantly negatively correlated with PET, especially the 10% increase in water coverage resulted in a 2.2°C decrease in PET, which was the most significant effect of optimization. The optimization effect was most significant for LSI=1.0, vegetation coverage, and topography slope, and the optimization effect was most significant for LSI=1.0 and vegetation coverage, respectively. 1.0, 85% of vegetation cover, 40% of water body, and 15° slope, PET is the lowest and thermal comfort is the best.

(4) Based on the research findings presented in the preceding text, an optimization design framework for urban parks is proposed, followed by a detailed optimization design and evaluation analysis of Mingzhu Park. The results show that this study takes PET as the core index, and proposes the objectives and principles of the optimal design of urban parks with respect to the summer climate characteristics of the dry and hot regions of Xinjiang. The optimization design strategy of urban parks is proposed, including site selection and spatial form design, vegetation, water body, topography and landscape vignettes in the park. Optimization design of Pearl Park, after optimization, the air temperature is reduced by 0.35°C, the high temperature area is reduced, the relative humidity is increased by 0.88%, the PET is reduced by 1.35°C, and the overall maximum in the study area is reduced by 0.67°C at 19:00, the average is reduced by 0.43°C, and the human body's thermal comfort is significantly improved.

This study provides theoretical basis and practical guidance for scientific optimization of microclimate environment and enhancement of human thermal comfort in urban parks in dry and hot areas of Xinjiang in summer.

Key words: Xinjiang region; urban park; summer; microclimate; thermal comfort

目录

摘要.....	I
Abstract	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的和意义.....	2
1.2.1 研究目的.....	2
1.2.2 研究意义.....	2
1.3 研究现状.....	3
1.3.1 城市公园几何形态对微气候的影响.....	3
1.3.2 城市公园内景观要素对微气候的影响.....	4
1.3.3 城市公园周边空间环境对微气候的影响.....	7
1.3.4 研究评述.....	8
1.4 研究内容.....	8
1.4.1 城市公园及周围环境微气候现状分析及影响因素研究.....	9
1.4.2 各影响因素对微气候的调节机制研究.....	9
1.4.3 基于微气候改善的城市公园优化设计策略研究.....	9
1.5 研究方法.....	9
1.6 研究框架.....	10
第 2 章 相关概念与理论基础.....	12
2.1 城市公园.....	12
2.2 微气候相关概念.....	13
2.3 人体热舒适度评价指标.....	15
2.4 微气候模拟软件.....	17
2.5 研究区域概况.....	18
2.6 小结.....	23
第 3 章 公园构成要素对微气候及人群热舒适度影响综合调研.....	24
3.1 明珠公园概况.....	24
3.2 公园实测与结果分析.....	24
3.2.1 公园实测.....	24

3.2.2 数据处理与结果分析	27
3.3 公园人群热舒适调研	35
3.3.1 人群舒适度调研	35
3.3.2 微气候要素与主观感觉相关性分析	40
3.4 小结	43
第 4 章 城市公园微气候调节影响因素研究与分析	44
4.1 明珠公园模型建立与分析	44
4.1.1 明珠公园模型建立及参数设置	44
4.1.2 ENVI-met 准确性验证	45
4.1.3 明珠公园微气候与热舒适度现状分析	46
4.2 各构成要素优化模拟方案设置	49
4.3 各方案微气候与热舒适模拟结果分析	50
4.3.1 各方案微气候与热舒适度模拟分布图结果分析	50
4.3.2 各方案 PET 分析	55
4.3.3 各方案参数与 PET 相关性分析	55
4.4 小结	57
第 5 章 基于微气候调节的城市公园影响因素优化设计策略	58
5.1 城市公园优化设计策略	58
5.1.1 城市公园优化设计目标	58
5.1.2 城市公园优化设计原则	58
5.1.3 城市公园优化设计策略	59
5.2 明珠公园优化设计与验证	63
5.2.1 明珠公园优化设计	63
5.2.2 明珠公园优化方案模拟结果分析	64
5.3 小结	66
第 6 章 总结与展望	67
6.1 结论	67
6.2 展望	68
参考文献	69
附录	74
致谢	77
作者简介	78

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

随着社会经济的不断发展，全球气候变暖已成为当今人类面临的严峻挑战之一，尤其自 21 世纪以来，全球变暖的趋势变得越来越严重。在全球气候变暖的背景下，城市的快速扩张加速了城市热岛(UHI)现象^[1-3]，使得很多城市酷热程度不断加深的形势变得更加严峻，加速了城市能源消耗，导致热舒适降低，极大地增加了损害人类健康的风险。

《中国气候变化蓝皮书（2024）》指出，2023 年全球平均温度为 1850 年有气象观测记录以来的最高值，最近 10 年（2014 至 2023 年）全球平均温度较工业化前水平（1850 至 1900 年平均值）高出约 1.2℃。2023 年，全球平均温度、海洋热含量和海平面高度均创新高，南极海冰范围再创新低。中国是全球气候变化的敏感区和影响显著区^[4]。因此，研究可以减缓和降低城市热岛效应的策略和措施，对于改善城市热环境，提高城市的宜居性，实现城市的可持续发展有着重要的意义。

城市热岛效应问题可以通过对微气候的调节机制的研究进行缓解。随着城市化进程带来的环境负面影响愈加严重，改善城市微环境与提升居民热舒适的需求日益增长，同时设计结合气候理念更加完善，城市公园在改善城市微气候环境中发挥着重要作用^[5,6]。大量研究表明，城市公园空间的温度通常低于周围城市建成区的温度，并且城市公园对城市具有显著的降温增湿效应^[7-10]。城市公园作为城市生态系统重要的组成部分，通过影响大气的水、热循环等，在缓解生态矛盾、调节城市气候和协助城市应对未来气候变化中扮演着极为重要的角色。城市公园通过遮阳和蒸散的综合作用，创造了一个“城市冷岛”(UCI)，降低了城市热岛的影响^[11-13]。

新疆地区深居内陆，四周多高山，来自海洋的湿润气流很少能够到达，以沙漠或戈壁为下垫面，因而成为我国最干旱的地区，属典型的温带大陆性气候。其特点表现在：其一，冬季寒冷、夏季炎热、昼夜温差大，冬季最冷月份 1 月历史最低气温-28℃、最高气温 3℃，夏季最热月份 7 月历史最低气温 13℃、最高气温 41℃；其二，日照时间长、太阳辐射值大，全年日照一般达 2500~3000hrs，年平均辐射值每平方米在 5400~6300MJ 之间；其三，水资源极端缺乏，降水量小但蒸发量大，年降水量小于 400mm 且从东向西减少^[14]。新疆冬季漫长寒冷，春夏秋三季是居民进行户外活动的主要季节，但夏季干热的气候环境极大地降低了居民的热舒适度。因此，可以利用城市公园对微气候的调节作用，通过分析城市公园不同空间景观要素的组成，在微气候尺度上分析景观要素的改

变对城市热环境的影响，有效缓解城市热岛效应，从而改善户外活动空间的热环境与气候舒适度，减少夏季极端热环境对人体造成的不适与伤害^[15-17]，形成更好的户外空间环境舒适性。

1.2 研究目的和意义

1.2.1 研究目的

针对新疆夏季干热地区如何通过优化城市公园设计提升室外环境热舒适的问题，本文以石河子市明珠公园及其周边环境为研究对象。客观上，通过实地测量分析公园内外的温湿度分布及微气候改善效应的关键因素，并利用软件模拟技术构建明珠公园及其周边环境的数字模型，与实测数据进行对比验证。在此基础上，详细剖析现状模型，并通过多情景模拟量化分析城市公园的几何布局、内部景观元素及周边环境对微气候的显著影响，明确这些客观因素在微气候调节中的具体作用。主观上，研究探讨不同活动空间内人群的活动特征与分布模式，深入分析热舒适客观参数与居民主观评价之间的关联，对比不同环境下的热舒适影响因素，从而理解居民在不同微气候条件下的舒适感受与需求。结合新疆夏季干热气候特点，本研究明确城市公园微气候改善设计的目标与原则，提出针对性的设计策略，并据此制定明珠公园的优化设计方案。最终，通过对比分析，验证该方案在改善微气候及提升人体热舒适性方面的显著效果。

1.2.2 研究意义

(1) 提升居民生活质量与热舒适度

新疆夏季干热地区的室外环境对居民的热舒适度构成挑战，通过研究公园及其周边环境的微气候改善效应，可以为城市规划和公园设计提供科学依据，从而优化室外空间布局，创造更加舒适的居住和休闲环境，提升居民的生活质量。

(2) 为干热地区城市微气候改善提供理论基础

城市公园作为城市绿地系统的重要组成部分，不仅具有美学价值，还承担着调节城市微气候、缓解“热岛效应”等重要生态功能。通过实地测量、问卷调查与软件模拟相结合的方法，本研究能够明确影响城市公园微气候的关键因素，如公园景观形状指数、景观要素配置等，为城市公园的规划与设计提供量化的科学指导。本研究通过深入分析公园对微气候的改善作用，有助于为未来城市建设中如何更有效地利用绿色空间来促进城市的生态平衡和可持续发展提供理论指导。

1.3 研究现状

20 世纪 80 年代已有研究证明公园绿地对微气候具有改善作用^[18]。随着城市化进程的加快,环境问题愈加严重^[19-22],公园对微气候改善效应受到了国内外专家学者的关注^[23-28],研究内容更加广泛、研究方法更加全面完善。公园空间是由景观构成及周边城市空间环境共同组成,具有调节城市微气候、改善生态环境等功能^[29]。公园的几何形态、景观要素以及周边空间环境均会对微气候产生影响^[30,31]。

1.3.1 城市公园几何形态对微气候的影响

在微气候效应影响因素相关研究中发现,几何形态不同的城市公园对微气候产生的影响也不同。随着研究方法与技术的进步,越来越多的学者对公园几何形态带来的微气候效应进行具体的量化研究,并且关注两者之间的相互关系。肖湘东等^[32]将苏州工业园区 9 个不同公园为研究对象通过实地观测分析每个公园下垫面因子和其特征因子对微气候效应的影响,发现绿地面积每增加 1hm^2 ,降温强度降低 0.079°C ,增湿强度增加 0.67% ;绿地周长每增加 100m ,降温强度降低 0.043°C ,增湿强度增加 0.23% ;绿地周长面积比每增加 0.01 ,降温强度降低 0.28°C ,增湿强度增加 0.71% 。王新军等^[33]通过对常州市内公园研究发现公园的面积为 26hm^2 、周长阈值为 3600m ,公园的面积和周长在阈值范围内能够发挥较强的降温效率,超过阈值则降温效率下降。Du, Hongyu 等^[34]对 35 个城市绿地进行了微气候现场测量,结果表明城市绿地的形状对温湿度指数有显著影响,影响程度为:面状绿地>点状绿地>线状绿地。Feng, Xiaojing 等^[35]基于城市公园形态定量分类的视角,以城区 117 个城市公园为研究对象,研究发现不同形态的城市公园对周围热环境的冷却效果不同,有条形倾向的圆形公园>圆形公园>带状公园。其中,形态边界复杂的圆形公园具有良好的经济效益和生态效益,其形状指数比最小值高 71.5% 。城市公园面积显著影响公园降温距离和降温面积,相关系数分别为 0.898 和 0.964 。当城市公园面积大于 30ha 时,降温效果增加下降 50.0% 。对于冷却距离,城市公园区域的阈值为 70 公顷。城市公园的周边与公园的冷却距离和冷却面积呈显著正相关。当周长大于 3000m 时,园区冷却面积增加较快。当公园周长超过 4000m 时,冷却距离不再明显增加,当达到 9000m 时,增幅再次急剧上升。城市公园形状指标与公园降温效率呈显著正相关。当形状指数为 2.8 时,冷却效率达到拐点值。然而,城市公园的长宽比对冷却效果的影响不大。

综上所述,公园对室外空间微气候的改善起到了重要作用。公园不同的几何形态特征会产生不同的微气候调节效益。在城市中,可用于城市公园建设的实际面积有限,合理设计城市公园的几何形态就显得非常重要。

1.3.2 城市公园内景观要素对微气候的影响

城市微气候的直接影响因子主要包括空气温度、相对湿度、太阳辐射和风向风速等，因此要营造出一个宜人的微气候环境，则需要综合考虑这些气候要素。城市公园中的植物、水体、下垫面种类、地形这些景观要素对于微气候的调节具有不可忽视的作用。

(1) 植物对微气候的影响

植物具有遮荫和蒸腾的作用，能够明显降低空气温度、增加空气湿度^[36]。树木的遮荫作用^[37]可以有效降低太阳的直接辐射与炫光并且降低来自天空和周围表面的散射光，从而调节建筑与周围环境的热交换。肖湘东等^[38]对苏州市 20 个不同地点研究发现，夏季城市中，植物遮荫度较大时在局部区域内起到了降温增湿的作用，并且在多植被区阻力较小，益于空气流动从而达到降温增湿的作用。植物的蒸腾作用可以有效降低树叶表面的温度^[39]及其周边环境的空气温度、增加环境湿度，是其调节微气候的重要作用途径^[40]。许多研究表明，植物的蒸腾作用，或结合遮荫作用可以有效降低夏季高温时段的气温^[41]，从而为人们提供更加舒适的城市环境。Ghasem Keikhosravi 等^[42]通过对利廷斯基模型确定选定城市（马什哈德、萨布泽瓦尔、内沙布尔和曲阜）的不同气候和公园物理变量对伊朗呼罗珊-拉扎维定居点周围环境降温半径和强度的影响研究，发现与树木覆盖相比，短植被（草和灌木）不会显著冷却周围环境。树木高度、太阳与地表的角度以及树木覆盖的阴影是控制地表温度的重要因素。在所有研究城市的白天，树木覆盖比草覆盖表现出更强的冷却效果。王爱霞等^[43]以半干旱区城市呼和浩特成吉思汗广场中 4 种不同植物群落类型的样地和 1 块空地为试验地，进行实测和 ENVI-met 软件模拟分析，以评估各样地对微气候的影响。研究表明：植物群落调节微气候具有明显的季节性差异，且与树木胸径、高度、郁闭度、叶面积指数有明显相关性；乔木高度、形状、胸径可直接影响微气候环境。Yingzi Zhang 等^[44]研究探讨了高海拔寒冷气候特征下树木形态指标对室外小气候的影响，得出以下结论：与无树开放空间控制点相比，树下的热环境和热舒适变化更稳定，具有更好的空间热环境。树木叶面积指数是影响树下空间热环境和热舒适的关键因子，其次是树高、冠宽和枝下高度的改善潜力相对较弱。树高、叶面积指数和冠宽的交互作用影响树下空间热舒适。帅林茹等^[45]通过实地调研植被情况和建筑格局，共抽象出 8 种不同植被种植方式模型，利用微气候数值模拟软件 ENVI-met 进行建模模拟和时空特征分析，探索不同植被种植方式对微环境热舒适度的改善效果。结果表明：植被对热舒适度的影响在一天内呈现先上升后下降的钟型曲线，11:00 和 16:00 改善效果最明显；乔木对热舒适度的改善效果强于草坪和灌木丛形成的简单绿地；乔木密集排布和乔灌草种植方式对热舒适度的改善效果强于其他种植方式。晏海^[46]以北京奥林匹克森林公园为例，研究了城市公园内不同树木群落、不同下垫面组成的空气温湿度差异、变化规律及其对公园微尺度热环境的影响，揭示了局地尺度上城市气温与植被覆

盖关系的时空变化。

综上所述,植物在室外空间中不仅是重要的景观要素,而且对微气候的调节也起到了重要的作用。了解其不同特点(植物种类、密度、覆盖率、形态等)对微气候的调节机制,对优化城市室外环境、改善居民室外环境的热舒适性具有重要意义。目前,大部分研究都是采用实地测量和软件模拟相结合的方式探究植被的不同特点对微气候的影响。

(2) 水体对微气候的影响

许多对城市水体微气候效应的研究,证实水体面积、深度、形状、布局等因素都会对水体的微气候效应产生影响。李吉富和李艳梅^[47]总结了水体面积与微气候变化关系特征,表明水体面积与微气候变化之间是一种长期相互影响、相互作用的循环过程。一方面,水体面积是引起区域气候变化的重要因素,它与区域性气候变化整体呈正相关关系,即水体面积变化越大,气候变化越明显,但对各季节的影响效应又有所差异,对冬季气温、降水等具有正效应、夏季具有负效应;另一方面,水体面积变化亦受气温、降雨、风速、蒸发量等气候因子变化的影响,表现为气温、风速、降雨对水体面积增加具有正效应,而蒸发量等对其具有负效应,但各地区引起水体面积变化的主要气候因子以及所受影响程度有所不同,这可能与地区的水体形式与特征、海拔、地形等因素有关。韩羽佳等^[48]通过实测哈尔滨市五分钟生活圈高层居住区中 9 处典型水景周边 100 处测点的微气候,实测结果表明,不同表现形式的水景设计对哈尔滨市五分钟生活圈高层居住区的空气温度改善作用显著,对相对湿度和风速改善作用不大。水景的方位、布局、面积和类型四类设计要素以及建筑朝向均对住区亲水空间微气候环境产生影响,按影响程度从大到小排列为:面积、建筑朝向、方位、驳岸形式和布局。H Xu 等^[49]利用景观生态学中的景观格局指数对水体的尺度、形态和扩散进行量化。研究发现:(1)水体的规模、形状和扩散对校园广场的温湿度有显著影响。水体尺度与温度正相关,与湿度负相关;水体形态和扩散与温度呈负相关,与湿度呈正相关。3 个因素对风速的影响均不显著。(2)从降温和增湿效果来看,水体布局因子的调节能力排序为尺度>形状>分散;影响范围排序为形状>尺度>离散度。(3)通过对水体尺度、形状、离散度三个因素的分析,得出校园广场一定面积水体的最佳布局模式为:水体面积占正方形总面积的 36%,形状呈方形、集中、非分散。在水体布局要素确定的情况下,校园广场边界的最佳布局模式为长:宽=1:2。吕鸣杨等^[50]通过对杭州太子湾公园的气象因子的实测分析,发现小型水体对微气候有降温增湿的作用,湖泊的降温增湿作用高于溪流;并且部分类型水体可以提高局部风速。Xiaolei Geng 等^[51]发现城市公园内的水体在高纬度、干旱地区的降温效果中起着更显著的作用。

综上所述,水体对热环境的缓解起到了重要的作用。影响微气候的水体要素一般包

括水体的形状、面积、深度、布局等，除了这些自身要素，水体对微气候的调节作用还受到外部空间以及地域和气候的影响，植被、周围建筑环境都会影响水体的微气候调节效益，所处纬度、温湿度等也会影响水体对微气候的调节。

（3）下垫面对微气候的影响

城市下垫面性质和结构的不同会导致太阳辐射吸收与散射能力的差异，进而影响地表温度。刘大龙等^[52]选择 4 种具有代表性的城市下垫面(沥青路面、混凝土路面、铺面砖地面、草地)作为研究对象，对下垫面热环境参数进行测量，研究发现四种下垫面热环境舒适度从高到低依次是草地、混凝土、铺面砖、沥青。邢丽珠等^[53]通过对三亚市近 21 年来的不透水面时空变化及其对地表温度影响进行了研究不透水面与地表温度显著正相关，不透水面增加显著引起地表温度升高，而植被和水体能够显著缓解地表温度的升高，抵消不透水面对地表温度的正效应。Yang 等^[54]定量研究新加坡热带气候下高层住宅区的路面材料、绿化和水体等景观设计元素对城市小气候和热舒适度的影响，发现高反照率路面材料和水体在炎热潮湿气候条件下不能有效降低热应激。Morabito, M 等^[55]发现随着不透水面的增加，地表城市热岛强度进一步增加。李膨利等^[56]通过对北京市朝阳区地表温度与下垫面类型动态变化相关性进行分析表明，地表温度与不透水面面积呈正相关，与植被面积呈负相关关系。郭亚男和王爱霞^[57]在春、秋季对半干旱地区城市广场——包头市银河广场 4 种下垫面微气候要素进行实测，并利用 ENVI-met 软件建立不同围合条件及下垫面配置比例的模拟模型对其微气候调控效应进行评估。研究发现不同的围合条件及绿地-硬质比可有效调节城市广场局部的微气候环境，保温、降风的适宜绿地-硬质比为 11: 9、9: 11，增湿效果与人体舒适度改善指数较好的绿地-硬质比则为 15: 5。

综上所述，下垫面种类、面积会对热环境产生不同的影响。城市公园中的硬质铺装作为一种常见的下垫面，不同材质和颜色对太阳光的吸收率和反射率也各不相同，对微气候的调节有很大的差异性。

（4）地形对微气候的影响

由于不同朝向的坡地上获得的热量和水分不同，因此地形对微气候的影响一般表现在太阳辐射^[58]分布不一致和地形对气流^[59]的改变作用两个方面，因此可以充分利用微地形或营造微地形改善局部微气候，从而提升人体热舒适度感受。Zhifeng Wu 等^[60]通过系统地评估不同的树木覆盖率和微地形条件，来阐明绿色空间内外的冷却效应，发现与平坦地形相比，微地形对绿地和邻近开放空间的降温效果更强。孙晓松^[61]选取具有典型代表性的哈尔滨市主城区公园中的地形及测点作为实测研究对象，通过现场实测和后续数据处理，分析比较微气候因子对热舒适度的影响作用差异、不同地形表现形式对夏季热舒适度的影响及权重，探索有益于调节微气候的地形表现形式，运用控制变量法，通过