蓝绿空间对城市热岛的调节效应*

茹 豪[1,2] 陈 琦[1,2] 靳晓娟[1,2] 张晓婷[3] 荀俊杰[3] 卢荣华[4]

(1. 山西省林业和草原科学研究院，太原 030012；2. 山西太原城市生态系统定位观测研究站，太原 030012；3. 太原市林业和草原工程技术中心，太原 030012；4. 太原市公园服务中心，太原 030012)

摘要：【目的】探讨太原市蓝绿空间对热岛效应的缓解机制，为北方河谷型城市热环境调控与生态规划提供理论参考。【方法】以太原市为研究对象，依托山西太原城市生态系统定位观测研究站，对市中心、太原森林公园和汾河公园的气象数据进行单因素方差以及相关性分析，探讨不同立地条件下气温差异的原因以及湿地、森林调节气温的机理。【结果】1）2023 年太原市 6—8 月市中心平均气温（26.24 ℃）高于森林公园（24.79 ℃）和汾河公园（23.70 ℃）；2）市中心的夜间气温（21.68 ℃）始终高于森林公园（19.34 ℃）和汾河公园（17.39 ℃）；3）湿地凭借水体高热容量蓄热调温、水面蒸发消耗潜热降温，从而有效减缓城市热岛效应；4）森林植被通过树冠层吸收太阳辐射，同时提高林下空气相对湿度、减缓林下空气流动以实现降温。【结论】不同类型蓝绿空间对热环境调节效应差异显著，湿地调控能力最优，森林次之，市中心热岛效应最强。未来可进一步深化不同植被配置、水体形态与热环境响应关系的定量研究，提升城市气候适应型规划的科学性与可操作性。

关键词：热岛效应；城市绿地；湿地；缓解；太原

DOI：10.12169/zgcsly.2025.12.16.0002

Regulating Effects of Blue-Green Spaces on the Urban Heat Islands

Ru Hao[1,2] Chen Qi[1,2] Jin Xiaojuan[1,2] Zhang Xiaoting[3] Xun Junjie[3] Lu Ronghua[4]

(1. Shanxi Academy of Forestry and Grassland Sciences, Taiyuan 030012, China; 2. Shanxi Taiyuan Urban Ecosystem Observation and Research Station, Taiyuan 030012, China; 3. Taiyuan Forestry and Grassland Engineering Technology Center, Taiyuan 030012, China; 4. Taiyuan Park Service Center, Taiyuan 030012, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to investigate the mechanisms by which blue-green spaces mitigate the urban heat island effect in Taiyuan, thereby providing a theoretical basis for thermal environment regulation and ecological planning in northern valley-type cities. 【Method】 Meteorological data from the city center, Taiyuan Forest Park, and Fenhe Park were obtained through the Shanxi Taiyuan Urban Ecosystem Research Station. One-way analysis of variance and correlation analysis were used to compare air temperature differences among different site conditions and to explore the mechanisms by which wetlands and forests regulate air temperature. 【Result】 1) From June to August 2023, the mean air temperature in the city center was 26.24 ℃, higher than those in Taiyuan Forest Park (24.79 ℃) and Fenhe Park (23.70 ℃). 2) Nighttime air temperature in the city center (21.68 ℃) was consistently higher than those in Taiyuan Forest Park (19.34 ℃) and Fenhe Park (17.39 ℃). 3) Wetlands effectively mitigated urban heat islands through the high heat capacity of water bodies, which enables heat storage and temperature buffering, and through evaporative cooling, which consumes latent heat. 4) Forest

收稿日期：2025-12-16

* 基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFE0104700）；山西省林草重点研发项目（JLYF-2025-30）；中国绿色碳汇基金会山西碳汇专项基金（碳汇基金会〔资〕字 2025 年 79 号）

第一作者：茹豪，男，1987 年生，博士，高级工程师，研究方向为城市森林生态功能监测与评价。E-mail：ruhaopaper@163.com

vegetation reduced air temperature by absorbing solar radiation through the canopy, increasing relative humidity beneath the canopy, and slowing air movement within the forest understory. 【Conclusion】 Different types of blue-green spaces showed significant differences in their thermal regulation effects. Wetlands exhibited the strongest cooling capacity, followed by forests, whereas the city center showed the most pronounced urban heat island intensity. Future studies should further quantify the relationships among vegetation configuration, water body morphology, and thermal environmental responses to improve the scientific basis and practical applicability of climate-adaptive urban planning.

Keywords: urban heat island effect; urban green spaces; wetland; mitigate; Taiyuan

城市热岛（Urban Heat Island，UHI）效应是指城市区域气温显著高于周边乡村区域的现象，由 Manley 于 1958 年首次定义[1]；其形成主要受城市化进程加速和人类活动的影响。20 世纪以来，工业化与城市化进程加速[2]，城市人口快速增长，建筑和道路等基础设施规模快速扩张，使得植被和湿地的生态降温功能受到削弱，城市热岛效应加剧[3-5]。热岛效应不仅会引起高温和极端降水等区域气候变化[6]，还会增加能源和水的消耗、CO_2排放、热应力与空气污染，从而降低生活舒适度、威胁城市居民健康。因此，如何有效缓解热岛效应对城市可持续发展意义重大。

城市绿地能有效缓解热岛效应[7]。基于遥感影像的分析表明，公园面积和水体比例是影响公园降温效应最主要因子，水体（面积）比例大于公园总面积的 30%时公园降温效果明显[8-9]；水体比绿地的降温效果更强[10]。

既有城市热环境研究多集中于大城市或特大城市，且以遥感技术为主要研究工具；学者们对太原的城市热岛效应研究十分有限。近年来，太原城市化进程加速，大量绿地被灰色基础设施取代，建成区面积不断增加，导致热岛效应逐步加剧[11-12]；尤其是夏季，热岛效应加剧了高温天气，使太原出现持续干旱的情况。据报道，2010 年 7 月 30 日太原大部分县区最高温升至 39.0～40.4 ℃，市中心更是高达 41.1 ℃；2018 年春季山西平均气温较常年偏高 2.4 ℃[13]。基于这种情况，学者们开始关注太原市城市热岛效应，例如张泽秀等[14]基于 Landsat 影像的研究发现，地表气温与植被覆盖度呈显著线性负相关关系。然而，太原市热岛效应的研究与其他大城市相比仍然十分匮乏。因此，本研究依托山西太原城市生态系统定位观测研究站，在城市中心、森林及湿地设置全自动气象站，长期定位观测不同土地利用类型条件下的气温、风速、降雨、湿度等气象要素，探讨太原城市蓝绿空间对热岛效应的缓解机制，以期为太原市热岛效应的管控与研究提供科学依据。

1 研究区概况

太原市（37°27′—38°25′N，111°30′—113°09′E）位于山西省中部，平均海拔 800 m，属于暖温带大陆性季风气候，年均降水量 456 mm，年均气温 9.5 ℃，7 月最热，全年无霜期 116—165 d[15]。主要研究区域为汾河公园、太原森林公园（以下简称森林公园）和市中心，这 3 处均设有气象站（图 1）。汾河公园是经过治理后形成的绿色生态长廊[16]，全长约 43 km，绿地面积约 8.5 km^2，水面面积约 11.5 km^2。森林公园位于太原市尖草坪区，公园占地约 224 hm^2，是以高大针阔叶林为主体的城市生态型公园，为太原建成区最大的城市森林绿地，兼具生态调节、休闲游览及科普教育功能；公园内地势平坦，北高南低，拥有常绿树、落叶树等各类树种 10 万多株[17]。市中心气象站则位于太原市迎泽区老军营，1982 年开发为太原市最大居民小区，现有近 5 000 户、2 万多名居民，小区生活配套设施完善，但是城市绿地和水体较少，属于不透水面的建成区。

2 研究方法

2.1 数据来源

土地利用/土地覆盖（Land Use/Land Cover，LULC）数据来源于 Google Earth Engine（GEE）平台提供的 Dynamic World V1 全球土地覆盖产品。该产品基于 Sentinel-2 Level-2A 地表反射率数据，利用深度学习分类模型生成，空间分辨率为10 m，具有较高的空间精度和时间分辨率。

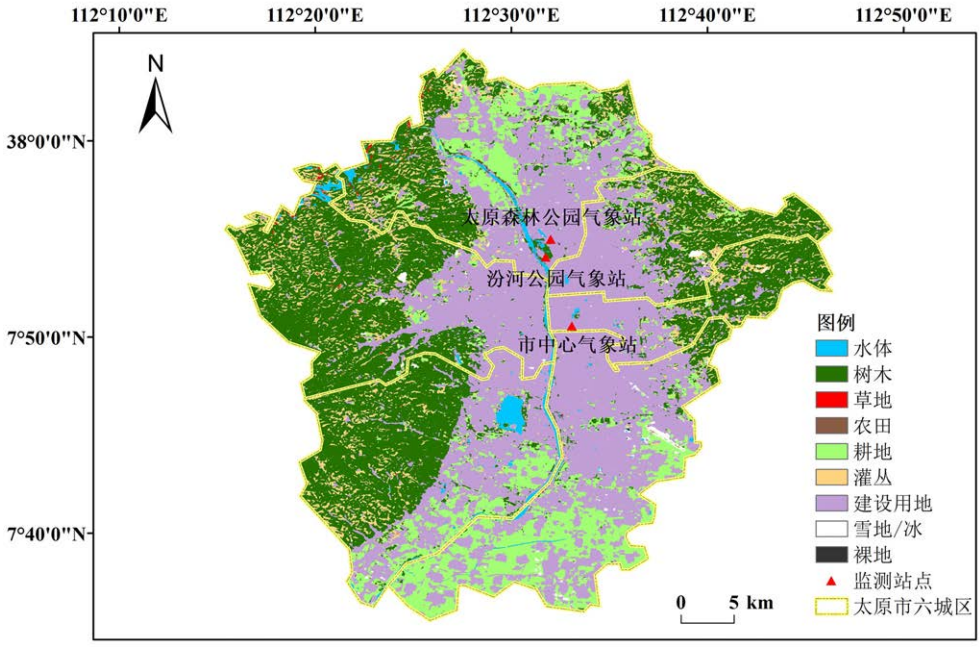


图 1　不同立地类型气象站点位图

Dynamic World 数据集共包含 9 种土地覆盖类型，分别为水体、林地、草地、农田、耕地、灌丛、建设用地、雪地/冰和裸地。在 GEE 平台中对 Dynamic World 数据集进行时间筛选（2023 年 1—12 月），获得研究区对应年份的土地覆盖数据，并完成年度合成处理。随后将结果裁剪至太原市行政边界范围，并导出至 ArcGIS 软件中完成后续制图与分析。

在森林公园、汾河公园、市中心设立自动气象站，监测温湿度（VAISALA TE525MM；芬兰）、风速（METONE 034E；美国）和蒸汽压力（VAISALA PTB110；芬兰），其中森林公园还设立梯度塔监测不同高度（1.5、10、16、24 m）处的气象数据（气温、空气相对湿度、风速、蒸汽压力），监测时间间隔均为 10 min，3 个站点的自动气象站和梯度塔均配备美国 CAMPBELL-CR1000 型数据采集器。虽然太原市植物在 4—10 月是生长期，但该研究主要针对城市热岛效应，因此选择 6—8 月作为主要观测期。

2.2　数据处理

气象站点位图用 ArcGIS 10.8 软件绘制，其余图均由 Origin 2024 软件绘制。使用 SPSS 22 软件进行统计分析：首先，对不同立地类型气象站月均日温差、梯度塔不同高度的气温进行单因素方差分析；其次，对不同高度梯度塔气温、空气相对湿度、风速、蒸汽压力进行相关性分析。

3　结果与分析

3.1　太原市气象数据

从图 2 可知，2023 年太原地区月均温变化范围是−2.64～27.47 ℃，最高月为 7 月，最低月为 12 月，呈现明显的季节变化。全年平均风速波动较小，平均值为 1.40 m·s^{-1}。降雨量为 376.50 mm，季节分布不均，4—10 月的降雨量占全年的 92.91%。空气相对湿度的季节分布与降水一致，4—10 月的平均空气相对湿度为 48.61%，1—3 月和 11—12 月的则为 36.87%。

3.2　不同立地类型气温月变化和日温差变化

3.2.1　不同立地类型条件下平均气温月变化

观测期内市中心平均气温始终高于森林公园和汾河公园（图 3），表明研究区域存在明显的城市热岛效应。7 月是太原市最热月，市中心的平均气温为 27.48 ℃，森林公园和汾河公园平均气温分别为 26.12、24.99 ℃，市中心与汾河公园温差最大，达 2.49 ℃。

4—10 月，市中心月平均气温为 20.52 ℃，森林公园和汾河公园的月平均气温分别为 19.08 和 18.01 ℃；市中心与森林公园温差为 1.44 ℃，与汾河公园温差为 2.51 ℃。在 6—8 月高温时段，市中心与汾河公园温差进一步扩大至 2.89 ℃。

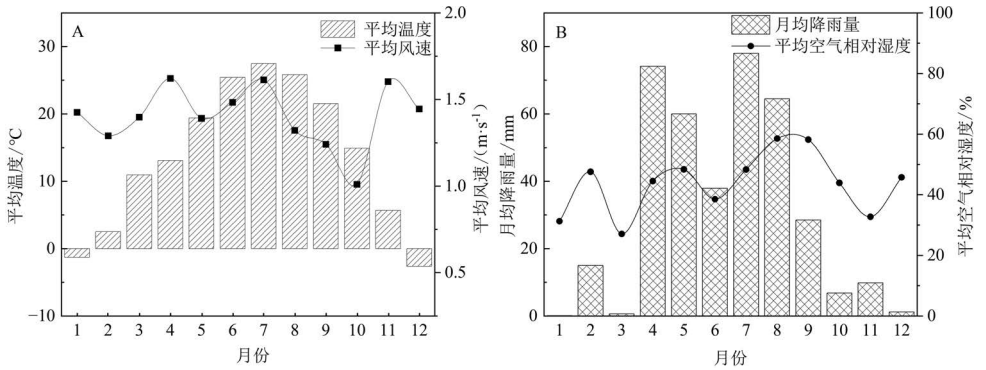


图 2　2023 年太原市月平均气象数据

从季节变化趋势来看，各区域气温变化趋势基本一致，均表现为 4 月逐渐上升，7 月达到峰值，随后下降至 10 月秋季低点。4—7 月，市中心气温上升 14.39 ℃，森林公园和汾河公园升温幅度分别为 14.13 和 13.21 ℃，说明城市中心区气温变化较公园绿地等生态空间更为剧烈。

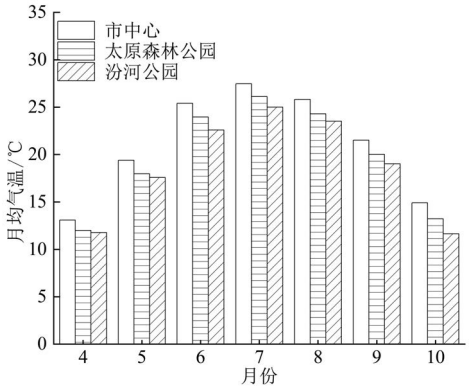
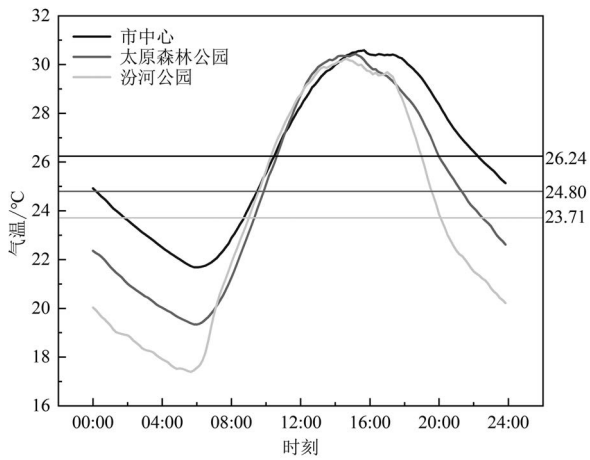


图 3　不同立地类型 4—10 月平均气温月变化

3.2.2　不同立地类型条件下气温的日变化

为更清晰揭示不同立地条件下的气温日变化规律，选取 6—8 月逐时（0∶00—24∶00）气温观测数据进行分析（图 4）发现，市中心平均气温（26.24 ℃）高于森林公园（24.80 ℃）与汾河公园（23.71 ℃）；10∶00—13∶00 各立地类型气温差异较小，表明夏季强太阳辐射下，不同下垫面对极端高温的调节作用有限。

不同立地类型在夜间低温时段的差异更为明显。18∶00 至翌日 06∶00，市中心气温（21.68 ℃）持续高于森林公园（19.34 ℃）和汾河公园（17.39 ℃）。夜间至日间最高温的升温速率表现为汾河公园（1.27 ℃ · h^{-1}）>森林公园（1.09 ℃ · h^{-1}）>市中心（0.86 ℃ · h^{-1}）。说明建成区夜间热量释放缓慢，存在明显的夜间热滞



注：直线表示日平均气温。

图 4　不同立地类型条件下 6—8 月气温日变化

留现象，夜间城市热岛效应尤为突出。

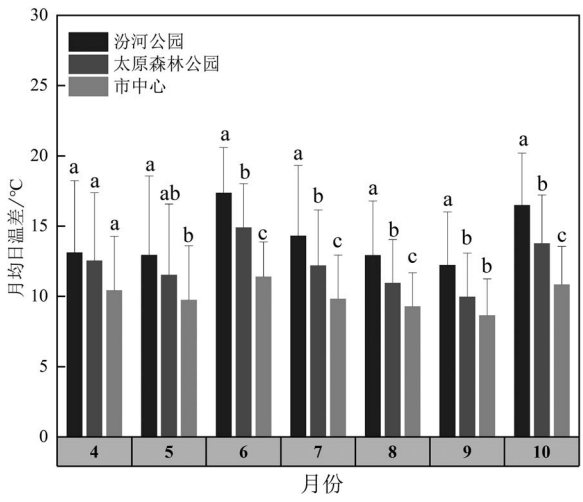
3.2.3　不同立地类型条件下月均日温差变化

由图 5 可知，观测期内除 4—5 月外，汾河公园月均日温差始终显著高于森林公园与市中心（$P<0.05$），其平均日温差为 14.68 ℃。尤其在 6—8 月夏季高温时段，月均日温差呈现汾河公园（14.86 ℃）>森林公园（12.38 ℃）>市中心（10.02 ℃）的特征，汾河公园日温差较森林公园与市中心分别高出 2.46 和 4.84 ℃。

各区域月均日温差的差异主要由夜间最低气温变化主导，而非白天最高气温的下降。总体而言，森林公园与汾河公园通过强化夜间冷却效应，有效降低了夜间气温，进而缓解了夜间城市热岛效应，对改善区域夏季热环境具有重要作用。

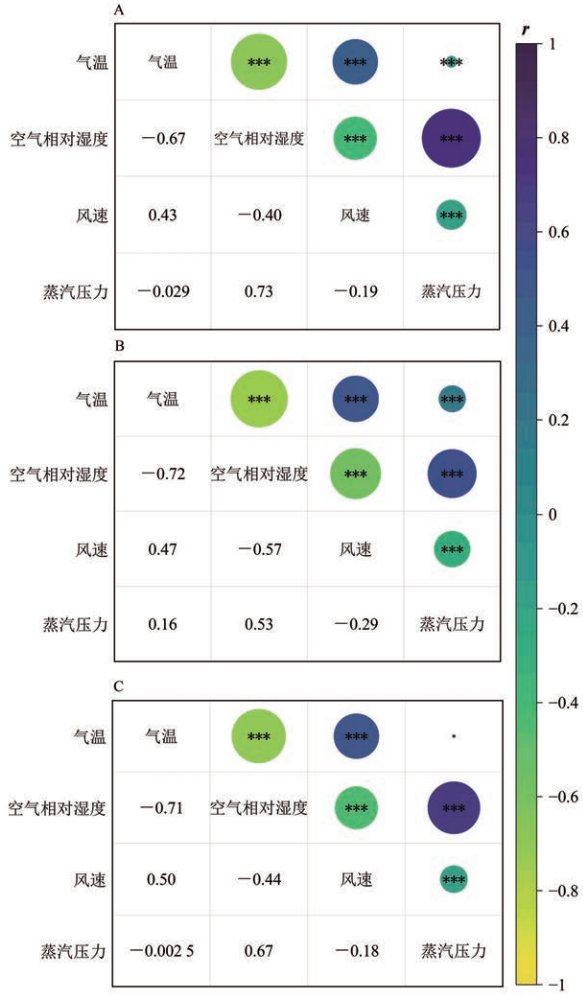
3.3　气温、空气相对湿度、风速及蒸汽压力的相关性

图 6 显示，市中心、汾河公园及森林公园气温、空气相对湿度、风速与蒸汽压力之间的相关



注：同一月份不同立地条件下不同小写字母代表月均日温差的差异显著（$P<0.05$）。

图 5　不同立地类型条件下不同月份日均温差的差异



注：* 代表 $P<0.05$；** 代表 $P<0.01$；*** 代表 $P<0.001$；下同。

图 6　市中心（A）、汾河公园（B）和森林公园（C）的气温、空气相对湿度、风速以及蒸汽压力的相关性

趋势整体一致，表明不同下垫面近地层微气候变化主要受相同的热力与动力过程影响。不同下垫面间各气象要素的相关强度存在一定差异，表明下垫面类型对气象要素间的耦合关系具有不同的调节效应。

市中心，气温与空气相对湿度呈极显著强负相关（$r=-0.67$，$P<0.001$），反映市中心下垫面缺乏植被蒸腾水汽补充。空气相对湿度与蒸汽压力呈极显著强正相关（$r=0.73$，$P<0.001$），说明实际水汽供给仍是城市空气相对湿度的重要影响因子。气温与蒸汽压力无显著相关（$r=-0.029$），由于市中心下垫面水汽供给量不足，水汽含量受局地来源控制，导致市中心下垫面缺乏气温驱动的蒸发散过程。风速与气温呈极显著正相关（$r=0.43$，$P<0.001$）、与空气相对湿度呈极显著负相关（$r=-0.40$，$P<0.001$），体现了热力环流与风的物理输送对城市微气候的调节作用。

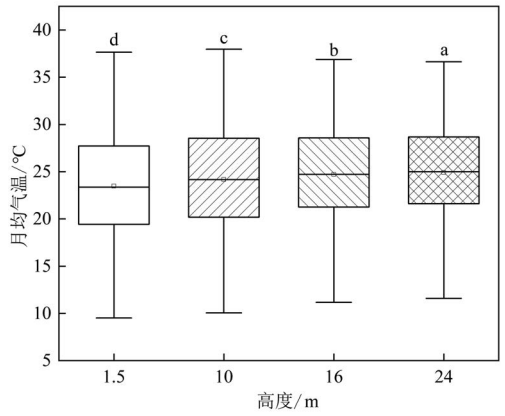
在汾河公园，气温与空气相对湿度呈极显著强负相关（$r=-0.72$，$P<0.001$），表明水体蒸发降温效应显著。空气相对湿度与蒸汽压力呈极显著中等正相关（$r=0.53$，$P<0.001$），说明实际水汽含量仍是空气相对湿度的重要影响因子，气温对空气相对湿度的调控作用增强。气温与蒸汽压力呈极显著弱正相关（$r=0.16$，$P<0.001$），反映出气温对水汽含量的微弱影响开始显现。风速与气温呈极显著正相关（$r=0.47$，$P<0.001$）、与空气相对湿度呈极显著负相关（$r=-0.57$，$P<0.001$），表明风速通过对流换热和水汽输送，对水体对温湿度的调节作用更为明显。

在森林公园，气温与空气相对湿度呈极显著强负相关（$r=-0.71$，$P<0.001$），同时空气相对湿度与蒸汽压力呈极显著强正相关（$r=0.67$，$P<0.001$），说明林内的温湿耦合关系主要由森林蒸腾的水汽供给驱动，是典型的潜热降温效应。气温与蒸汽压力无显著相关（$r=-0.002\ 5$），说明气温不是决定水汽含量的关键因子，也侧面印证了湿度变化主要受水汽供给控制。风速与气温呈极显著正相关（$r=0.50$，$P<0.001$），与空气相对湿度呈极显著负相关（$r=-0.44$，$P<0.001$），说明风速通过对流换热和水汽输送，对林内温湿度有重要调节作用，但对实际水汽压的影响不显著

（$r=-0.18$）。

3.4 不同冠层高度气温、空气相对湿度、风速及蒸汽压力的相关性

从图 7 可见，6—8 月森林公园内梯度塔不同高度的月均气温存在显著差异，气温随高度升高显著上升（$P<0.05$），具体表现为：1.5 m（23.48 ℃）<10 m（24.17 ℃）<16 m（24.70 ℃）<24 m（24.92 ℃）。森林不同高度的气温分布存在显著差异（$P<0.05$），气温中位数随高度升高呈显著上升趋势，近地面（1.5 m）气温显著低于 10、16 和 24 m 高度（$P<0.05$）。气温的波动范围则随高度升高逐渐缩小，1.5 m 高度气温变幅最大，24 m 高度气温分布最集中。这表明森林具有明显的垂直降温效应，近地面受冠层遮蔽与蒸腾潜热冷却作用影响，降温效果最为显著；随高度升高，冠层遮挡减弱、太阳辐射增强，气温逐渐升高且受大气湍流混合影响，稳定性增强。



注：不同小写字母代表不同高度的月均气温差异显著（$P<0.05$）。

图 7 6—8 月森林公园梯度塔不同高度的月均气温差异

为探究森林垂直结构对气温变化的影响，对森林公园梯度塔 6—8 月的气温、空气相对湿度、风速以及蒸汽压力进行相关性分析。结果（图 8）显示，在 1.5~24 m 各高度层内，气温与空气相对湿度均呈极显著（$P<0.001$）负相关，且随高度升高而逐渐减弱；空气相对湿度与蒸汽压力在各高度层均呈极显著（$P<0.001$）正相关，且相关性随高度升高而增强；气温与风速在近地层极显著（$P<0.001$）正相关，随高度升高相关性先升高后减弱。气象要素的这些垂直协同变化特征表明，森林通过调节水分循环、削弱湍流交换，进而降低气温。

在 1.5 m 近地面层，气温与空气相对湿度呈极显著强负相关（$r=-0.72$，$P<0.001$），表明林下植被与土壤的蒸腾蒸发作用形成了显著的“降温-增湿”耦合效应。空气相对湿度与蒸汽压力呈极显著中等偏强正相关（$r=0.57$，$P<0.001$），说明实际水汽供给仍是控制近地面湿度的主导因子。气温与蒸汽压力无显著相关（$r=0.12$），进一步印证了水汽主要来源于蒸散过程，而非气温驱动的蒸发。风速与气温呈极显著正相关（$r=0.51$，$P<0.001$）、与空气相对湿度和蒸汽压力均呈极显著负相关（$r=-0.58$，-0.31，$P<0.001$），体现了近地面层“挡风聚湿、通风降温”的微气候调控特征。

在 10 m 林冠层，气温与空气相对湿度呈极显著强负相关（$r=-0.71$，$P<0.001$），与风速呈极显著正相关（$r=0.60$，$P<0.001$）；空气相对湿度与蒸汽压力呈极显著正相关（$r=0.61$，$P<0.001$），与风速呈极显著负相关（$r=-0.54$，$P<0.001$）；气温与蒸汽压力、风速与蒸汽压力的相关性未达到显著水平（$P>0.05$）。上述结果反映了研究区近地层气象要素的耦合关系，气温变化是驱动空气相对湿度和风速变化的关键因子之一。

在林冠层上方的 16 m 高度，气象要素间存在显著的耦合关系：气温与空气相对湿度呈极显著强负相关（$r=-0.68$，$P<0.001$），空气相对湿度与蒸汽压力呈极显著强正相关（$r=0.69$，$P<0.001$），这反映了大气水汽状态的内在物理规律；气温与风速（$r=0.47$，$P<0.001$）、空气相对湿度与风速（$r=-0.42$，$P<0.001$）呈中等强度的极显著相关，表明热力差异仍是驱动该高度风场变化的重要因子，但相较于近地面（10 m），林冠对风速-气温、风速-空气相对湿度耦合过程的调控作用已明显减弱。此外，气温与蒸汽压力、风速与蒸汽压力的相关性虽达到统计显著水平，但相关系数极低（$r<0.2$），不具备实际的物理耦合意义。

在林冠层上方的 24 m 高度，气象要素间的耦合关系呈现出与近地面不同的特征：气温与空气相对湿度仍保持极显著强负相关（$r=-0.67$，$P<0.001$），空气相对湿度与蒸汽压力的强正相关进一步增强（$r=0.71$，$P<0.001$），反映大气水汽状

态的内在物理规律在垂直方向上的稳定性，且随高度升高水汽混合更充分。气温与风速（r = 0.38，P<0.001）、空气相对湿度与风速（r = −0.35，P<0.001）的相关性相较于 10 m 高度明显减弱，表明在 24 m 高度，林冠层对近地层热力−动力过程的调控作用已大幅削弱，风场更多受大尺度大气环流主导。气温与蒸汽压力无显著相关性（r = 0.013，P>0.05），说明在林冠上方较高处，气温对实际水汽压的直接影响可忽略不计。

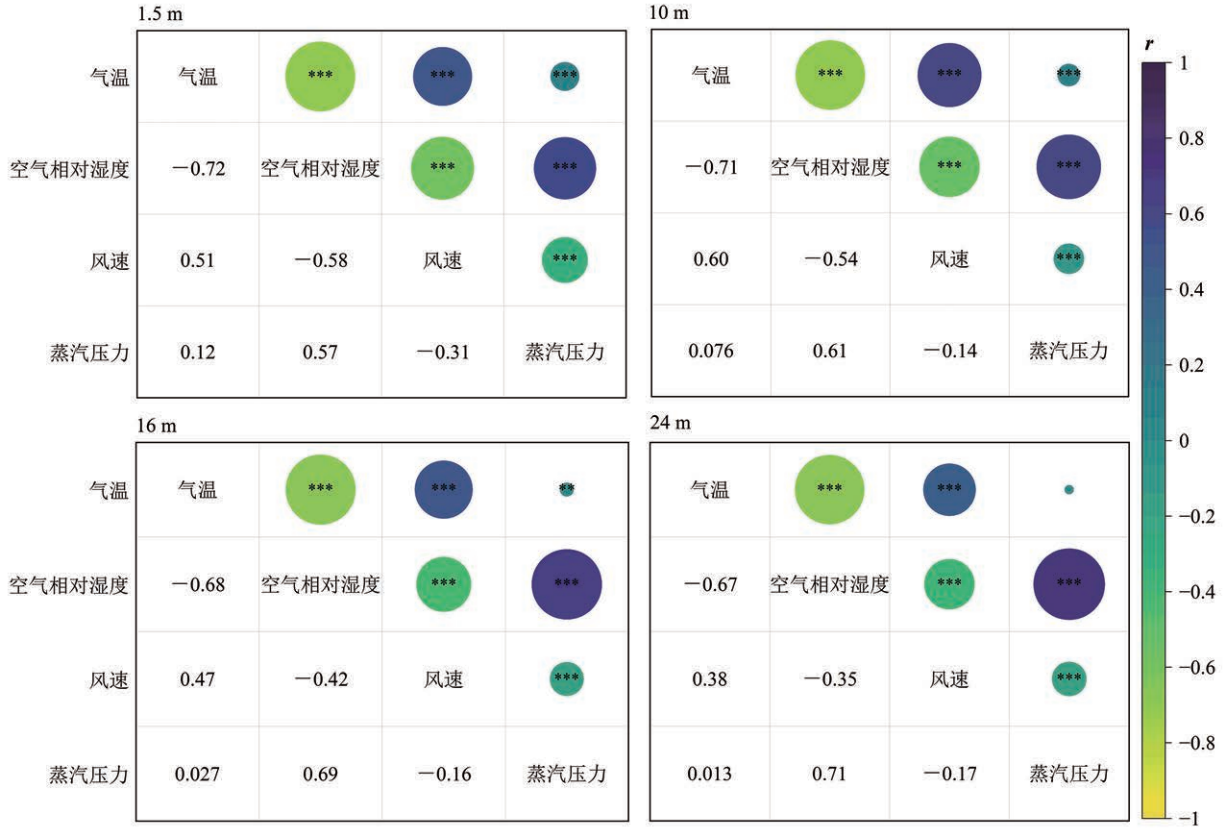


图 8　森林不同高度气温、空气相对湿度、风速以及蒸汽压力的相关性

4　讨论

4.1　不同类型蓝绿空间对城市热环境的调节差异

研究表明，市中心、森林公园与汾河公园气温差异显著（图 3~5，P<0.05），呈现出市中心>森林公园>汾河公园的空间分异特征；同时，不同类型蓝绿空间对城市热环境的调节能力存在极显著差异（图 6，P<0.001）。市中心建筑密集、交通活动频繁，夏季混凝土、沥青等高热容硬化下垫面可大量吸收并储存太阳辐射[18]，持续抬升近地气温；加之机动车尾气、空调运行等人为热源持续放热，进一步加剧了城市热岛效应。Zhou 和 Liu[19]研究表明，热岛强度通常沿城市核心−建成区内部−郊区−城乡边缘梯度递减。本研究中，森林公园与汾河公园靠近郊区，市中心则位于城市核心区，三者本底热环境本不具备直接对比的基础，但图 4 结果显示，3 处样点高温强度基本一致，因此可在相同城市热岛背景下，探讨不同立地条件对热环境的差异化影响。

各立地类型在升温速率上差异明显（图 4）。从夜间最低温至日间最高温的升温速率来看，呈现汾河公园>森林公园>市中心的规律。汾河公园夜间冷却效应明显，清晨气温较低，且水体与开阔区域受遮挡较少，日出后可快速接收太阳辐射，促使近地层气温迅速回升，因此升温速率最高。森林公园同样具有较强的夜间冷却能力，但白天树冠遮阴与植被蒸腾提升了潜热通量分配、削弱了感热通量，一定程度上抑制了升温过程。市中心因夜间热量残留量大，清晨基温偏高，加之城

市建筑格局限制太阳辐射入射与空气对流，导致升温速率最低。该差异反映了不同下垫面对昼夜热过程的调节机制不同，是城市热岛效应在日变化尺度上的典型体现[20-22]。

相较于市中心，森林公园植被覆盖度高，其降温效应主要依靠树冠遮荫与植被蒸腾实现，不同树种因叶面积指数与蒸腾能力差异，可产生不同的降温效果，但整体上森林植被能有效缓解城市热岛效应[23-24]。

汾河公园降温效果最为明显（图 4）。汾河贯穿太原市区约 33 km，宽 450～500 m，夏季水体通过蒸发持续冷却周围环境。城市开放式地表水体作为城市蓝色基础设施（Urban Blue Infrastracture，UBI）的重要组成，涵盖河流、溪流、湖泊、水墙、水库、池塘等自然与人工水体[25]，凭借高发射率可通过长波辐射高效实现地表冷却，并通过蒸发消耗短波辐射，同时水面能量可通过传导、对流、平流等方式随水体转移[26]。受水体高热容和蒸发作用共同影响，汾河公园可有效平缓昼夜气温波动，并维持较低的夜间气温，该结果与谢启姣等[27]的研究结果一致。此外，绿地内部水体面积占比是影响绿地降温效果的关键因素，水体面积越大、水体的降温能力就越强[28-29]。除下垫面类型外，人类活动强度与管理方式差异，亦可能是造成森林公园与汾河公园气温差异的重要原因[30]。

4.2 森林垂直结构对城市热岛效应的缓解作用

森林植被在城市生态系统局地气温调节中具有关键作用[25]。本研究发现，森林公园梯度塔不同高度气温差异显著，且随高度升高呈显著（$P<0.05$）上升趋势（图 7）。一方面，树冠层直接接收太阳辐射，能够吸收与反射大部分辐射能量，减少到达地表的热量[31]；同时，高层空气流通性更强，热量交换效率更高，而冠层下方受植被遮挡，空气流动受阻，热量传递效率降低[32]。另一方面，树木蒸腾作用释放水汽并带走热量，在冠层下部形成明显局部降温效应，该效应随高度上升逐渐减弱。

图 8 进一步揭示了森林垂直结构的微气候的调节机制。在 1.5～24 m 高度范围中，气温与空气相对湿度呈极显著（$P<0.001$）负相关，且相关性随高度升高而减弱，表明随垂直高度升高，森林下垫面及林层结构对微气候的调控能力逐渐减弱，近地面以潜热蒸发降温占主导，中林层为遮蔽+蒸腾协同降温，林冠上层受局地植被调控减弱、以大气热力过程为主，致使温湿负相关程度随高度上升逐步降低。而空气相对湿度与蒸汽压力在各高度层均呈极显著正相关（$P<0.001$），且相关性随高度升高而增强，说明森林冠层可通过持续蒸腾向近地层及上层空气补充水汽，有效调节局地湿度环境。同时，气温与风速的相关性随着高度升高呈现先升高后降低的趋势，表明在林下层，依靠林木密集结构削弱风速、抑制湍流，减少热量交换，锁存气温；在林冠层，利用林隙形成通风通道，风速驱动空气对流换热，成为林内气温最敏感的调节层，气温有所下降；在林冠上层，空气脱离林内微环境约束，气温受区域大气主导，树木对地面风速调控作用弱化。

综上，森林通过垂直层次结构，低层挡风稳温、中层通风换热、高层过渡缓冲，形成“阻风-通风-释风”的分层气温调控模式，从热量传输、水汽交换等多维度协同调控，形成了缓解城市热岛效应的重要生态调节机制。

5 结论

城市蓝绿空间对热岛效应具有显著缓解作用，且不同类型空间的降温效果存在明显差异，以水体为主的蓝色空间降温效果优于以林地为主的绿色空间。水体凭借高热容与蒸发冷却效应，在降低夜间气温、拉大昼夜温差方面作用突出；林地则通过遮阴与蒸腾作用，有效削弱日间增温幅度并改善局地温湿条件。二者在热环境调节上各具优势，共同构成缓解城市热岛的关键生态组分。因此，太原市在城市建设中应优化蓝绿空间布局结构，在中心城区适度增加水体与湿地规模，同时推广乔灌草结合的垂直绿化模式，选用适宜的高大乡土树种提升绿地生态调节服务功能，逐步缓解城市热岛效应、优化人居环境。本研究结果可为北方河谷型城市热环境调控与生态规划提供理论参考，未来可进一步深化不同植被配置、水体形态与热环境响应关系的定量研究，提升城市气候适应型规划的科学性与可操作性。

参考文献

[1] MANLEY G.On the frequency of snowfall in metropolitan England[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1958, 84(359): 70-72.

[2] WANG H J, HE Q Q, LIU X J, et al. Global urbanization research from 1991 to 2009: a systematic research review[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 104(3/4): 299-309.

[3] 李博睿，裴宏伟，李雅丽.近 20 年全球城市热岛效应研究热点及趋势的可视化分析[J].河北建筑工程学院学报，2023，41(4)：148-155.

[4] HOWARD L. Theclimate of London: deduced from meteorological observations[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

[5] OKE T R. The energetic basis of the urban heat island[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982, 108(455): 1-24.

[6] ULLAH S, YOU Q L, ULLAH W, et al. Climate change will exacerbate population exposure to future heat waves in the China-Pakistan economic corridor[J]. Weather and Climate Extremes, 2023, 40: 100570.

[7] 李娇.基于城市热环境的城市绿地系统生态评价研究[D].长沙：中南大学，2012.

[8] 李旋，徐岩岩，孟瑾.天津市城市公园对城市热环境的降温效应研究[J].华中建筑，2024，42(9)：60-64.

[9] 周寅桥，邵明，李雄.基于 Landsat-8 遥感影像的扬州市城市公园夏季温湿效应[J].中国城市林业，2023，21(5)：114-123.

[10] 李春雨，张雨，施鹏，等.不同城市热岛梯度下公园冷岛效应和景观特征的关联机制[J].中国城市林业，2024，22(2)：17-25.

[11] 牛艳，秦国杰.太原城市化进程对区域生态环境影响因素探析[J].花卉，2019(24)：288-289.

[12] 李艳红，李智才，周晋红，等.基于自动站资料的太原城市热岛研究[J].干旱区资源与环境，2013，27(12)：173-179.

[13] 王英杰.太原市热岛效应现状和绿地消减效应研究[D].晋中：山西农业大学，2020.

[14] 张泽秀，周晋红，周鹏，等.基于 Landsat 影像的太原市城区热岛效应特征分析[J].环境与发展，2023，35(6)：87-91，98.

[15] 范伟伟，张先平.太原市汾河公园和森林公园植物物种多样性比较[J].山西农业科学，2015，43(10)：1301-1304.

[16] 刘旭中，张权，赵佳怡，等.山西太原汾河公园植物群落结构：以南内环至长风街汾河东段为例[J].林业科技通讯，2024(2)：58-61.

[17] 赵雯妮.太原市森林公园近自然植物群落构建研究[D].晋中：山西农业大学，2021.

[18] 樊智宇，詹庆明，刘慧民，等.武汉市夏季城市热岛与不透水面增温强度时空分布[J].地球信息科学学报，2019，21(2)：226-235.

[19] ZHOU Z, LIU Y. Surface urban heat island disparities and the role of urban form across the urban-rural gradient[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2026, 116: 108144.

[20] 崔耀平，刘纪远，张学珍，等.城市不同下垫面的能量平衡及气温差异模拟[J].地理研究，2012，31(7)：1257-1268.

[21] JANDAGHIAN Z, COLOMBO A. The role of water bodies in climate regulation: insights from recent studies on urban heat island mitigation[J]. Buildings, 2024, 14(9): 2945.

[22] LEE K, HONG J W, KIM J, et al. Traces of urban forest in temperature and CO_2 signals in monsoon East Asia[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021, 21(23): 17833-17853.

[23] 刘东兰，戴忠炜.“双碳”目标下森林公园植被空间配置对降温效果的影响：以福州森林公园为例[J].科技导报，2024，42(15)：82-90.

[24] 徐欣，张兴，高飞，等.城市公园绿地植被群落郁闭度与三维绿量对夏季降温增湿效应的影响[J].中国城市林业，2024，22(2)：10-16.

[25] VÖLKER S, BAUMEISTER H, CLAßEN T, et al. Evidence for the temperature-mitigating capacity of urban blue space-a health geographic perspective[J]. Erdkunde, 2013, 67(4): 355-371.

[26] GUNAWARDENA K R, WELLS M J, KERSHAW T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity[J]. Science of the Total Environment, 2017, 584/585: 1040-1055.

[27] 谢启姣，杨晨哲，任陆.武汉城市水体热环境调节机制的尺度效应[J].生态学杂志，2024，43(8)：2325-2333.

[28] SUN X, TAN X Y, CHEN K L, et al. Quantifying landscape-metrics impacts on urban green-spaces and water-bodies cooling effect: the study of Nanjing, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 55: 126838.

[29] WU C Y, LI J X, WANG C F, et al. Understanding the relationship between urban blue infrastructure and land surface temperature[J]. Science of the Total Environment, 2019, 694: 133742.

[30] 李虹.区位因素对绿地缓解热岛效应的影响研究与实证分析[D].北京：北京林业大学，2016.

[31] HELLETSGRUBER C, GILLNER S, GULYÁS Á, et al. Identifying tree traits for cooling urban heat islands: a cross-city empirical analysis[J]. Forests, 2020, 11(10): 1064.

[32] 王文星，陈守跃，李留振，等.黄河滩地 4 种不同植被的降低风速效应分析[J].四川林业科技，2010，31(5)：121-123.