

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.04.013

刘洛甫, 张伟. 城市湿地的小气候调节功能及其空间梯度效应 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(4): 133-142.

城市湿地的小气候调节功能 及其空间梯度效应

刘洛甫¹, 张伟²

1. 昆士兰大学 地球与环境科学学院, 昆士兰州 4066; 2. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715

摘要: 在全球气候变化、快速城市化等多重因素的共同作用下, 城市热环境日益恶化, 严重威胁着城市居民的健康。通过对杭州市西溪湿地的多季节实地观测, 分析和量化了西溪湿地的局地小气候调节功能, 探讨了其空间梯度效应, 剖析了其关键影响因素。研究表明: ① 西溪湿地具有显著的局地小气候调节功能。其在温度、湿度和风速等方面调节效应的平均影响范围分别为 137.5, 150.0, 87.5 m。此外, 西溪湿地的局地小气候调节功能还表现出显著的空间梯度效应。② 城市湿地的温度调节效应和人体舒适度调节效应具有显著的季节差异。在人体舒适度较低的夏季和冬季, 西溪湿地局地小气候调节效应的范围和幅度均大于人体舒适度更高的春季和秋季。季节性湿地的建设有助于最有效地发挥城市湿地的局地小气候调节功能。③ 太阳辐射和湿度是影响西溪湿地局地小气候调节功能的关键气象因子, 它们显著影响着西溪湿地的冷岛效应、湿岛效应和人体舒适度提升效应。在未来的城市湿地规划和建设过程中, 将湿地布局在具有特定气象条件的区域, 能够更好地发挥城市湿地的局地小气候调节功能。

关键词: 城市湿地; 小气候效应; 空间梯度效应; 影响因素;

杭州

中图分类号: X82

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2024)04-0133-10

Urban Wetland's Microclimate Regulation Function and Its Spatial Gradient Effect in City

LIU Luofu¹, ZHANG Wei²

1. School of Earth and Environmental Science, The University of Queensland, Brisbane, QLD 4066, Australia;

2. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Urban thermal environment in China is deteriorating and threatens the health of urban residents seriously due to the dual impacts of global climate change and rapid urbanization. This paper discussed the impact range and amplitude of urban wetland on microclimate, and analyzed the influences of seasonal fac-

收稿日期: 2023-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101039); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWU2009435).

作者简介: 刘洛甫, 硕士研究生, 主要从事城乡区域规划和城市生态研究.

通信作者: 张伟, 副教授, 硕士研究生导师.

tors and meteorological conditions on urban wetland's microclimate regulating function in Xixi wetland, Hangzhou, using field observation method. The results indicate that: ① Xixi wetland had obviously regulating effect on the microclimate. The average influence range of its regulating effects on air temperature, humidity and wind speed was 137.5, 150.0, 87.5 m, respectively. In addition, the regulating functions of Xixi wetland presented obvious spatial gradient effect. ② Urban wetland had seasonal difference on temperature and human comfort regulating effects. The impact range and amplitude of urban wetland's microclimate regulating effect were greater in the uncomfortable seasons such as summer and winter than those in comfortable seasons such as spring and autumn. The construction of seasonal wetland is an effective option for maximizing the local microclimate regulation function of urban wetland. ③ Solar radiation and humidity were the key factors affecting urban wetland's microclimate regulation function, and their impacts on wetland's cold-island effect, humid-island effect, and human comfort improvement effect were significant. In the future urban construction process, scientific planning and layout of urban wetlands according to the meteorological conditions of each region is helpful for the effectively utilization of urban wetland's local microclimate regulation function.

Key words: urban wetland; microclimate; seasonal variation; influence factors; Hangzhou

政府间气候变化专门委员会(IPCC)在《气候变化 2022: 影响、适应和脆弱性》报告中明确指出, 全球气候变化已经给自然界造成了较大的干扰, 对人类福祉和星球健康都产生了重大威胁. 在此背景下, 全球范围内高温热浪事件的范围、频率和幅度都在显著增加^[1-2]. 城市是地球上人类活动最为集中, 土地覆盖变化最为剧烈的区域^[3-4]. 在全球气候变化和城市热岛效应的双重胁迫下, 城市热环境状况不断恶化, 给城市乃至全球的生态环境带来了诸多影响^[5-6]. 如何有效适应和应对全球气候变化, 改善城市局地气候环境已经成为城市可持续发展领域中亟待破解的议题^[7-8].

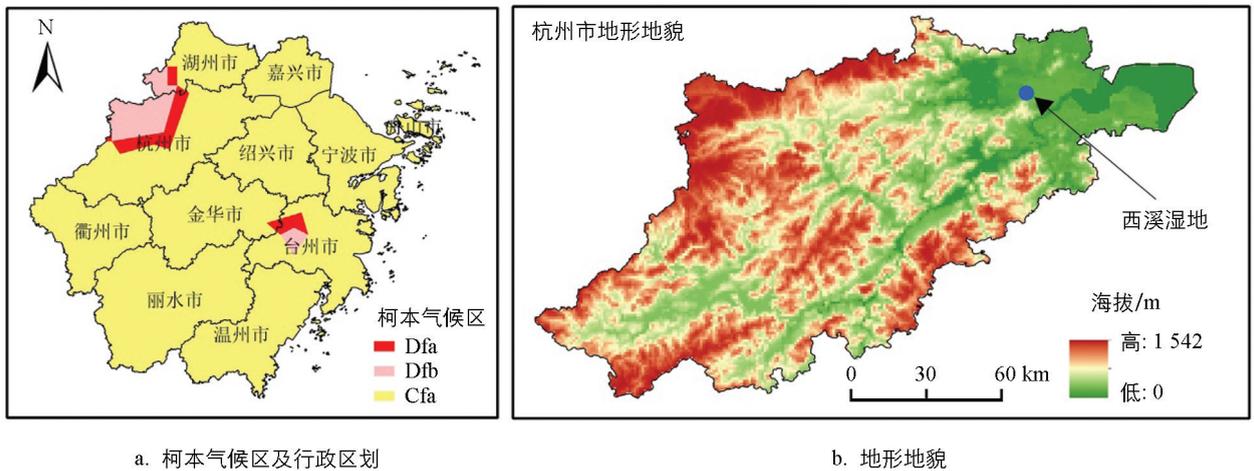
湿地是地球的三大生态系统之一, 它在缓解全球气候变化、调节局地小气候等方面具有重要的生态功能^[9]. 湿地的小气候效应主要来源于水体独特的蒸散和储热功能^[10]. 一方面, 由于水面的反射率小于陆地表面, 热容量高于陆地土壤, 可以接收和储存更多的太阳辐射. 因此, 湿地系统的储热功能优于陆地表面, 其能够有效地调节周边区域的小气候环境; 另一方面, 水域表面较平坦, 风速较快. 因此, 水面的蒸发和耗热通常高于陆地表面, 从而可以带走更多的热量, 增加空气的湿度^[11-12]. 尽管湿地在城市中所占比例较小, 其小气候效应也具有局部性, 但它的存在却可以制造出温度差, 改变整个城市的能量平衡过程^[13-14]. 诸多研究表明, 无论是自然湿地^[15]、水体^[16-17], 还是喷泉、瀑布等人工供水设施^[18], 都具有一定的局地小气候调节功能. 从全球尺度上看, 大面积湿地的气候调节效应甚至会对全球气候变化产生比较显著的影响^[19-20]. 因此, 如何利用城市湿地的小气候调节功能来缓解城市热岛效应, 改善城市人居环境, 已经成为城市湿地研究的热点和前沿问题. 在城市湿地的小气候效应研究中, 模型模拟^[21-22]、遥感反演^[23-24]等方法可以较为便捷地获取较大范围的分析结果, 但在数据精度、结论可靠性等方面存在一定的局限性. 实地观测方法的耗时较长, 观测范围有限, 但其数据精度较高, 分析结果更为可靠, 因而得到了许多学者的认可. 例如, Saaroni 等^[25]对以色列特拉维夫市贝京公园一个面积仅为 4 hm² 的小湖进行了实地观测, 分析了其对周边区域热应激的关系. 董建华等^[26]利用 24 h 的动态监测, 分析了杭州城市森林和湿地的降温增湿作用. 陆芊芊等^[27]利用 11 个常规气象观测站的数据, 分析了河北衡水市衡水湖的冷岛效应、湿岛效应和风岛效应.

虽然现有的研究取得了较多进展, 但在湿地小气候效应的影响机理方面仍然存在着一定的不足: ① 已有的研究多是对湿地内外部温度、湿度等气象参数进行比较分析, 较少关注湿地小气候效应的人体舒适度响应. 相对于温度、湿度等气象参数而言, 人体舒适度能够更加直接地反映人体对周边小气候环境的感受, 也可以更准确地揭示当地城市的人居环境质量. ② 已有研究多是讨论湿地自身属性及其位置对周边区域

环境的影响,鲜见对其季节性差异和关键驱动因子的研究.据此,本研究选择杭州市的西溪湿地为研究案例,通过4个季节的实地气象观测,重点探讨以下科学问题:城市湿地局地小气候调节效应的范围和幅度是什么?城市湿地的局地小气候效应是否具有季节性差异?哪些气象要素是城市湿地局地小气候效应的关键影响因子?

1 研究区概况

杭州市是浙江省的省会,位于亚热带季风区(图1).其夏季气候炎热湿润,冬季寒冷干燥.全年平均气温 17.5°C ,平均相对湿度 70.3% ,年降水量 1454 mm ,年日照时数 1765 h .随着社会经济的迅速发展,杭州市经历了快速城镇化发展历程,其建成区面积从2000年的 177.18 km^2 迅速增加到2020年的 666.18 km^2 ,增加了 2.76 倍^[28].城市建成区的快速扩张进一步加剧了热岛效应,导致了城市热环境的恶化^[29-30].



审图号:浙S(2023)38号.

Dfa: 热夏型大陆性湿润气候; Dfb: 温夏型大陆性湿润气候; Cfa: 亚热带湿润气候. 数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>).

图1 研究对象的空间位置与自然地理环境

西溪国家湿地公园位于杭州市区西部,总面积近 11 km^2 .西溪湿地公园是中国第一个集城市湿地、农耕湿地和文化湿地于一体的国家级湿地公园,素有“杭州之肾”的美誉.西溪湿地是罕见的城中次生湿地,主要由6条纵横交错的河流组成,河流总长约 110 km .2009年,西溪湿地成功列入国际重要湿地名录^[31].鉴于西溪湿地在杭州城市生态系统中的重要地位,学者们围绕其土地利用时空演变规律^[32]、生态系统服务动态演化及其权衡关系^[33]、湿地景观格局重建^[34]、环境污染与生态风险评价^[35]等方面展开了多项研究.综上所述,西溪湿地具有很强的典型性和代表性.选择西溪湿地开展本研究,有助于更深入地理解湿地生态系统在城市热环境改善方面的独特价值.

2 研究数据与方法

2.1 实地观测方案

确定城市湿地局地小气候调节效应的空间影响范围是制定实地观测方案的重要环节.部分学者已经对此展开了一些研究,如张伟等^[36]采用实地观测和CFD情景模拟等方法,分析了长沙市近郊湖泊的冷岛效应,发现湖泊在距湖岸 300 m 的范围内具有明显的降温效应.刘艳芬等^[37]基于Landsat遥感影像反演的地表温度数据,发现福州市城市公园冷岛效应的空间影响范围约为 $100\sim 600\text{ m}$.宋晓程等^[38]的研究成果也表明,河流、小型景观湖泊等城市水体对周边气候条件的影响范围约为 300 m .据此,我们将实地观测的空间范围确定为西溪湿地周边 600 m 范围内.由此拟定出具体的实地观测方案(图2).

2.1.1 观测点设置

以西溪湿地公园的边界为起点,沿直线依次向外设置 9 个观测点.考虑到距离湿地越近,其局地小气候调节效应越明显^[36],因而将前 5 个观测点(S1—S5)的间距设置为 50 m;外围的 S6—S9 等观测点的间距设置为 100 m.



a. 西溪湿地及周边区域的遥感影像

b. 气象观测点布设情况

图 2 西溪湿地气象观测点的空间梯度分布示意

2.1.2 观测时间

为了探讨西溪湿地局地小气候效应的季节变化规律,笔者分别在秋季(2020年10月中旬)、冬季(2020年1月中旬)、春季(2021年4月中旬)和夏季(2021年7月中旬)这4个季节进行观测.每个季节均选择晴朗天气,连续观测3天.每天的观测时间为人类活动较为频繁的8:00—18:00,观测频率为每小时观测一次.

2.1.3 观测仪器及观测参数

使用 PH-II 手持式气象站进行地面气象观测.该设备可观测各点位的风向、风速、大气压、温度、湿度等 5 项气象参数.其中,温度的测量精度为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度的测量精度为 $\pm 3\%$, 大气压的测量精度为 $\pm 0.3\text{ hPa}$.此外,使用 Microtops II 太阳光度计测量研究区逐小时的太阳辐射.该仪器为手持式五波段太阳光度计,分辨率为 0.01 W/m^2 ,精度为 $1\% \sim 2\%$.

2.2 小气候效应的确定

从影响范围和影响幅度两个方面来解析西溪湿地的局地小气候效应.①影响范围.本研究将湿地小气候效应的影响范围界定为:自湿地边界开始,至不再受到湿地小气候效应影响的距离.在具体的分析过程中,主要依据空间梯度曲线的拐点和总体趋势,通过人工判断的方式来确定湿地小气候效应的影响范围(图 3).

②影响幅度.本研究将湿地局地小气候效应的影响幅度定义为:在湿地小气候效应的影响范围内,最高值与最低值之间的差值.

2.3 人体舒适度计算

国内外学术界已经提出了多个测度人体舒适度的指数,包括不舒适指数(Discomfort Index, DI)^[39]、温湿指数(Thermal Humidity Index, THI)^[40]、

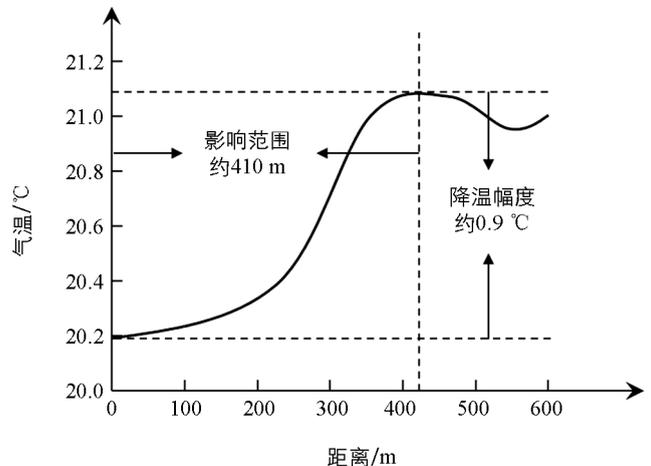


图 3 西溪湿地小气候效应的判断标准示意

热舒适度指数(Thermal Comfort, TC)^[41]、人体舒适度指数(Human Comfort Index, HCI)^[42]等. 但是, 考虑到人体舒适度受到当地气候、种族、地域环境等多个要素的共同影响, 中国国内开发的舒适度指数通常更符合本国人群^[43]. 因此, 本研究选择了国内应用较广的人体舒适度指数(Comfort Index of Human Body, CIHB)^[44-45]. CIHB 指数已经在中国进行了多次试验和比较, 模型的准确度较高(表 1)^[46], 现已被纳入《气候资源评价 气候宜居城镇(QX/T 570—2020)》《气候宜居指数(GB/T 42072—2022)》等多个行业标准或国家标准. CIHB 的计算公式如下:

$$C_{CIHB} = (1.8t + 32) - 0.55 \left(1 - \frac{r_{RH}}{100} \right) \times (1.8t - 26) - 3.2\sqrt{v} \quad (1)$$

式中: t 为温度(°C); r_{RH} 为湿度(%); v 为风速(m/s).

表 1 CIHB 指数的等级划分标准

舒适度指数	舒适度等级	感觉程度	舒适度指数	舒适度等级	感觉程度
<25.00	-4	寒冷	70.00~74.99	1	偏热
25.00~37.99	-3	冷	75.00~79.99	2	热
38.00~49.99	-2	清凉	80.00~85.00	3	炎热
50.00~59.99	-1	偏凉	>85.00	4	酷热
60.00~69.99	0	舒适			

3 结果与分析

3.1 气象要素的空间梯度变化

3.1.1 温湿度

图 4 显示了研究区 4 个季节的温度和湿度观测结果.

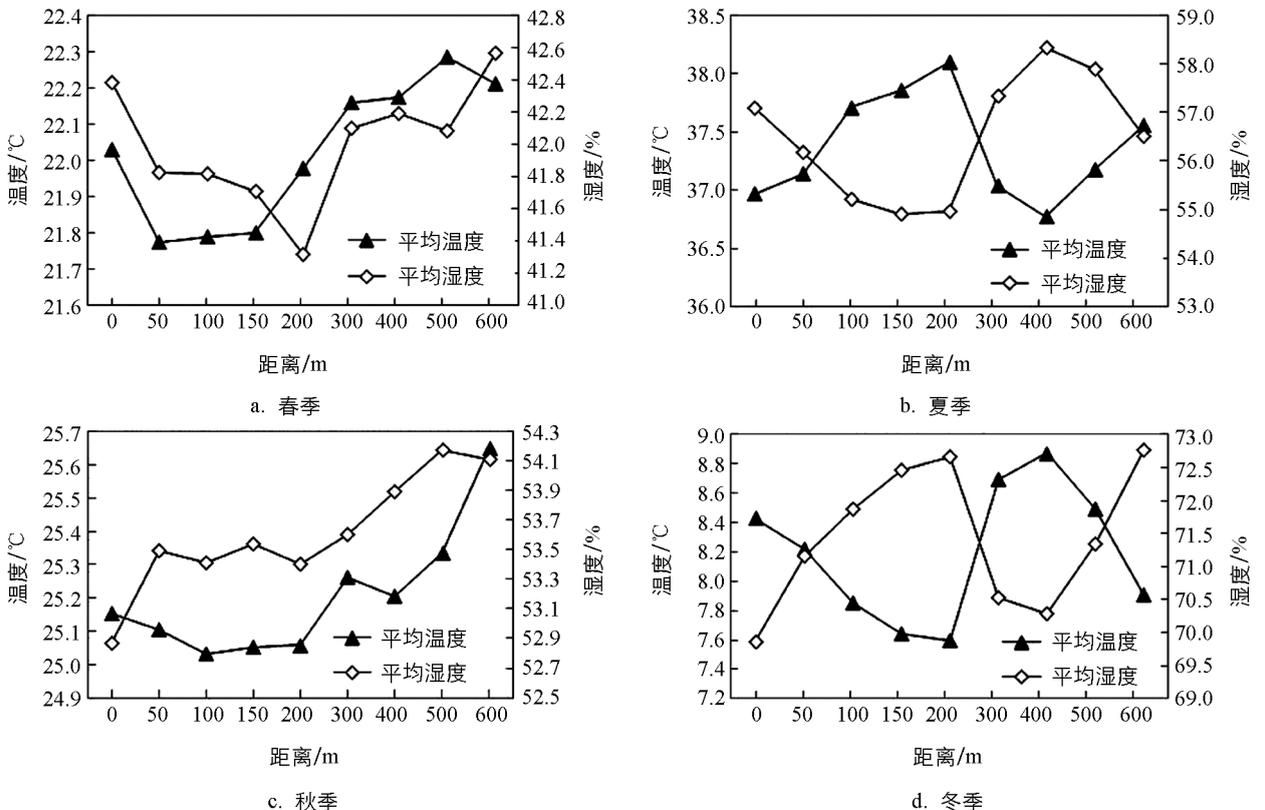


图 4 西溪湿地外各季节温湿度的空间梯度变化

从图 4 中可以看出,西溪湿地不仅显著影响着周边区域的局地小气候,还表现出明显的季节变化特征。

① 不同季节中局地气温的空间梯度变化. 局地温度调节类型方面,西溪湿地在春季和夏季主要表现为冷岛效应,即湿地可以降低周边环境的气温. 但是西溪湿地在秋季和冬季则主要表现为暖岛效应,即湿地可以提高周边环境的气温. 温度调节范围方面,西溪湿地在夏季和冬季的温度调节范围比较大,约为 200 m. 春季和秋季的调节范围相对较小. 温度调节幅度方面,西溪湿地在夏季和冬季的温度调节幅度比较大,分别为 1.12 °C 和 0.82 °C. 春秋两季的温度调节幅度相对较小.

② 不同季节中局地湿度的空间梯度变化. 湿度调节类型方面,西溪湿地在春季和夏季主要表现为湿岛效应,即它对周边区域具有增湿作用. 在秋季和冬季,西溪湿地主要表现为干岛效应,即它对周边区域具有一定的降湿作用. 湿度调节范围方面,西溪湿地在春季、夏季和冬季的湿度调节范围比较大,为 150~200 m. 相对而言,西溪湿地在秋季的湿度调节范围比较小,仅为 50 m. 湿度调节幅度方面,西溪湿地在夏季和冬季的调节幅度比较大,分别为 2.18% 和 2.80%,其在春季和秋季的调节幅度相对较小.

3.1.2 风速

西溪湿地对局地风速有较大的影响(图 5). 首先,季节差异方面,西溪湿地秋季的平均风速最大,达 1.08 m/s,而冬季的平均风速最小,仅为 0.64 m/s. 其次,风速调节类型方面,西溪湿地在春季、秋季和冬季均表现出明显的降风效应,而夏季则对周边区域有一定的增风效应. 再次,风速调节范围方面,西溪湿地在春季的风速调节范围最大,约为 150 m,而在夏季和秋季的风速调节范围最小,仅为 50 m. 最后,风速调节幅度方面,西溪湿地在春季和秋季的风速调节幅度最大,分别为 0.64 m/s 和 0.49 m/s,在夏季的风速调节幅度最小,仅为 0.12 m/s.

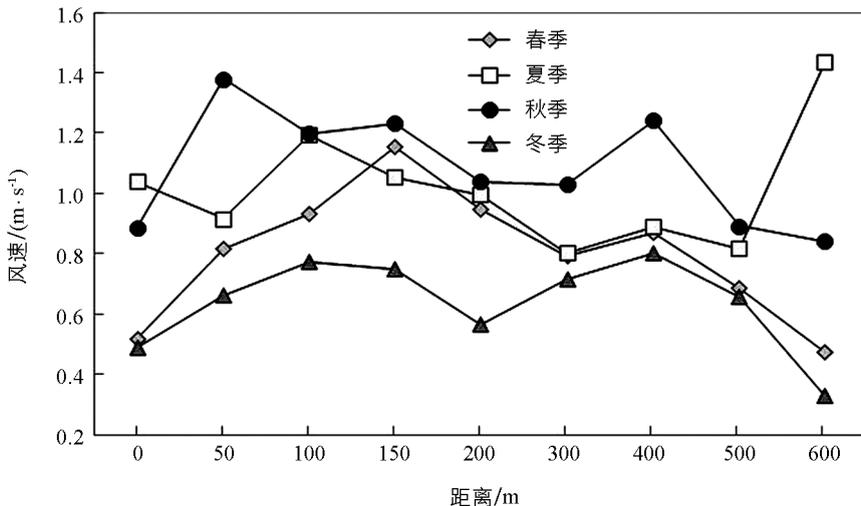


图 5 西溪湿地外各季节风速的空间梯度变化

3.2 人体舒适度的空间梯度变化

西溪湿地显著影响着周边区域的人体舒适度(图 6). 人体舒适度的调节范围方面,西溪湿地在夏季的人体舒适度调节范围最大,约为 200 m,而在秋季的人体舒适度调节范围最小,仅为 50 m. 人体舒适度调节幅度方面,西溪湿地在冬季和春季的人体舒适度调节幅度最大,分别为 1.92 和 1.59,而在秋季的人体舒适度调节幅度最小,仅为 0.57.

3.3 影响因素分析

以湿地小气候效应的范围和幅度为被解释变量,以所有观测点的平均温度、湿度、大气压、风速等因子为解释变量,利用逐步回归分析方法来探讨湿地局地小气候效应的影响因素,揭示湿地周边气象要素对湿地小气候效应的影响机理.

3.3.1 湿地的冷岛效应

表 2 显示了西溪湿地冷岛效应的影响因素分析结果. 从表 2 中可以看出,太阳辐射对西溪湿地冷岛效应的影响最显著. 太阳辐射越强,西溪湿地冷岛效应的影响范围和幅度越大. 此外,湿度也显著影响着西

溪湿地冷岛效应的范围.

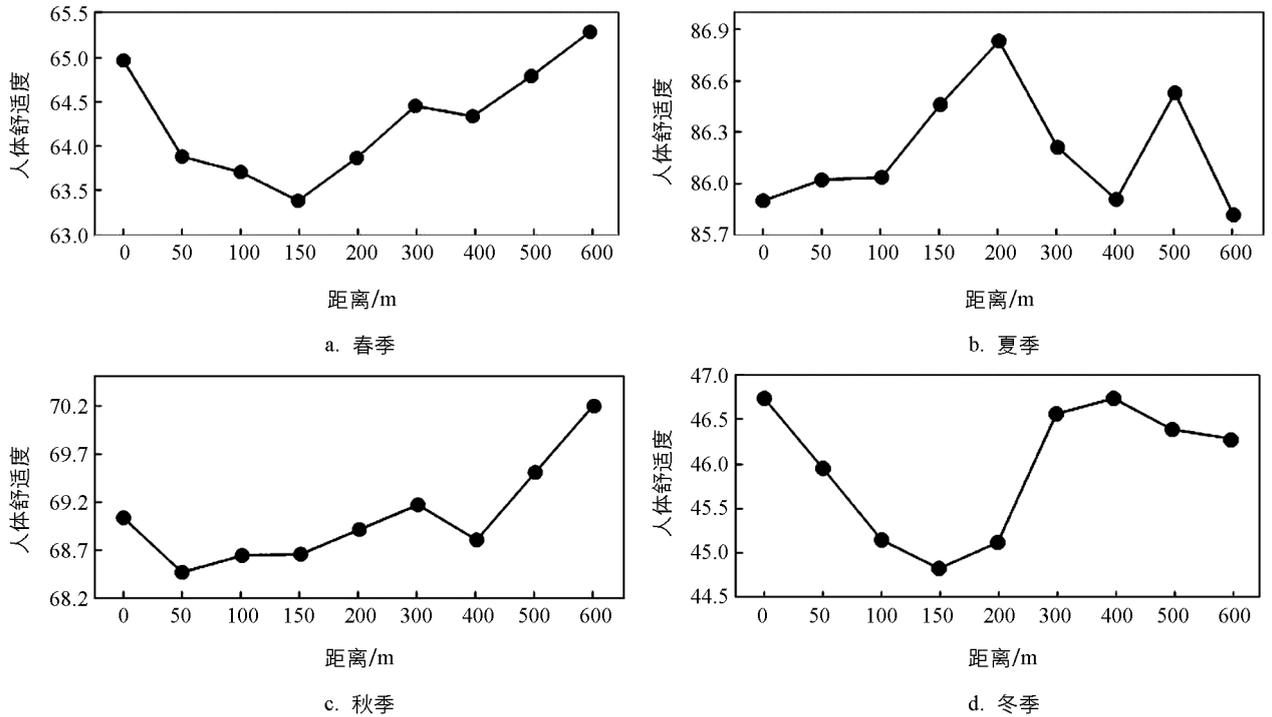


图 6 西溪湿地外各季节人体舒适度的空间梯度变化

表 2 湿地冷岛效应的影响因素

被解释变量	R	R ²	F 检验	显著性 (p 值)	解释变量	参数估计	标准误差	标准系数	t	显著性 (p 值)
降温的范围	0.90	0.81	19.46	0.00	(常量)	355.41	172.61		2.06	0.07
					湿度	-8.90	2.75	-0.50	-3.24	0.01
					太阳辐射	12.65	3.23	0.60	3.92	0.00
降温的幅度	0.82	0.67	20.17	0.00	(常量)	-0.84	0.26		-3.29	0.01
					太阳辐射	0.08	0.02	0.82	4.49	0.00

3.3.2 湿地的湿岛效应

表 3 显示了西溪湿地湿岛效应的影响因素分析结果. 从表 3 中可以看出, 湿度、太阳辐射和大气压显著影响着西溪湿地的湿岛效应. 其中, 湿度对西溪湿地湿岛效应的范围和幅度有显著的负向影响, 即周边区域的平均湿度越小, 西溪湿地的湿岛效应越明显. 太阳辐射对西溪湿地湿岛效应的范围存在正向影响, 即太阳辐射越强, 西溪湿地湿岛效应的范围越大. 大气压对西溪湿地湿岛效应的幅度存在负向影响, 即大气压越高, 西溪湿地湿岛效应的幅度越小.

表 3 湿地湿岛效应的影响因素

被解释变量	R	R ²	F 检验	显著性 (p 值)	解释变量	参数估计	标准误差	标准系数	t	显著性 (p 值)
增湿的范围	0.90	0.81	18.83	0.00	(常量)	207.31	124.46		1.67	0.13
					湿度	-6.31	1.99	-0.50	-3.18	0.01
					太阳辐射	8.97	2.33	0.60	3.85	0.00
增湿的幅度	0.82	0.67	9.28	0.01	(常量)	168.52	54.66		3.08	0.01
					湿度	-0.08	0.04	-0.41	-2.05	0.07
					大气压	-0.16	0.05	-0.60	-2.97	0.02

3.3.3 人体舒适度提升效应

表 4 显示了西溪湿地人体舒适度提升效应的影响因素分析结果. 从表 4 中可以看出, 风速、湿度和太阳辐射对西溪湿地周边区域的人体舒适度具有显著影响. 其中, 风速对西溪湿地人体舒适度增加的范围和幅度均有负向影响, 即风速越大, 西溪湿地周边区域中人体舒适度增加的范围和幅度越小. 湿度和太阳辐射对西溪湿地人体舒适度增加的幅度也存在负向影响, 即西溪湿地周边区域的湿度越大, 太阳辐射越强, 西溪湿地周边区域中人体舒适度增加的幅度越小.

表 4 湿地人体舒适度增加的影响因素

被解释变量	R	R^2	F 检验	显著性 (p 值)	解释变量	参数估计	标准误差	标准系数	t	显著性 (p 值)
舒适度增加的范围	0.60	0.36	5.59	0.04	(常量)	207.78	59.73		3.48	0.01
					风速	-150.33	63.58	-0.60	-2.36	0.04
舒适度增加的幅度	0.92	0.85	15.48	0.00	(常量)	6.53	1.16		5.64	0.00
					湿度	-0.04	0.02	-0.30	-2.05	0.07
					太阳辐射	-0.07	0.02	-0.49	-3.24	0.01
					风速	-2.77	0.59	-0.67	-4.68	0.00

4 结论和建议

4.1 湿地的小气候调节功能具有显著的空间梯度效应

研究表明, 西溪湿地对周边区域的小气候环境具有比较显著的影响. 从湿地边界开始, 随着与西溪湿地距离的增加, 湿地周边区域的温度、湿度、风速等气象参数表现出比较显著的空间梯度变化规律. 在局地小气候的影响范围方面, 西溪湿地的温度调节效应、湿度调节效应和风速调节效应的平均影响范围分别为 137.5, 150.0, 87.5 m. 在局地小气候的影响幅度方面, 西溪湿地温度调节效应、湿度调节效应和风速调节效应的平均影响幅度分别为 0.58 °C, 1.67%, 0.39 m/s. 在人体舒适度调节方面, 西溪湿地在 4 个季节均会对周边区域的人体舒适度产生影响, 平均调节范围约为 137.5 m.

4.2 湿地的局地小气候效应表现出显著的季节差异

湿地的局地小气候调节效应具有一定的季节性. 在温度调节方面, 西溪湿地在夏季表现出显著的冷岛效应, 而在冬季则表现出较强的暖岛效应. 在气温较为适中的春季和秋季, 西溪湿地温度调节效应的范围和幅度均弱于夏季和冬季, 这表明西溪湿地具有重要的稳定和调节局地小气候的功能. 在人体舒适度调节方面, 西溪湿地的人体舒适度调节效应也表现出一定的季节差异. 相对于人体舒适度较高的春季和秋季, 西溪湿地在夏季和冬季的人体舒适度调节效应更加显著, 其调节的范围和幅度也更大. 考虑到湿地局地小气候效应应具有明显的季节差异, 季节性湿地公园的建设不仅可以提高城市土地利用的效率, 还可以充分发挥湿地的局地小气候调节功能.

4.3 气象因素显著影响湿地的局地小气候效应

太阳辐射和湿度是影响城市湿地局地小气候效应的关键因子, 它们对西溪湿地的冷岛效应、湿岛效应和人体舒适度提升效应都具有显著的影响. 因此, 在城市湿地的规划建设过程中, 将湿地布局在具有特定气象条件的区域, 能够更好地发挥城市湿地的局地小气候调节功能. 此外, 本研究的结果表明, 气温这一重要的因子在所有的回归模型中均不显著, 其深层次原因有待进一步研究.

5 讨论

全球气候变化和城市热岛效应诱发了更加频繁的高温热浪事件, 严重威胁着城市居民的健康与福祉^[5-6]. 城市湿地生态系统在适应和应对全球气候变化, 改善城市局地气候环境方面发挥着重要作用^[9]. 本研究以杭州市的西溪湿地为研究案例, 通过 4 个季节的实地气象观测, 深入探讨了城市湿地局地小气候调节效应的空间梯度特征与季节差异, 揭示了其关键影响因子. 结果表明, 西溪湿地对周边区域的温度、湿度、风速等均有较为显著的影响. 此外, 西溪湿地的局地小气候调节效应还表现出显著的季节差异. 这些

结果与之前的研究结论基本一致^[25-27]。

与已有研究相比,本研究的贡献主要包括以下几点:①分析指标的选择方面,在全球气候变化、城市热岛效应等因素的共同影响下,城市热浪风险受到了广泛关注^[2,5]。因此,前人的研究重点探讨了城市湿地在炎热环境中的冷岛效应^[10,25]。相比而言,本研究不仅分析了城市湿地对周边区域的温度、湿度、风速等多个气象参数的影响,还进一步探讨了其人体舒适度的响应情况,丰富了城市湿地局地小气候研究。②观测方案设计方面,已有研究多是在湿地内、外分别选择若干个气象观测点,通过比较湿地内外气象参数的差异来分析其局地小气候效应^[11,26]。但是此类观测方案存在一定的不足:一是气象观测点的选择较为主观,这种主观性会对分析结果产生影响。二是该方案无法确定湿地局地小气候效应的空间梯度变化趋势,也难以准确判定其影响的范围和幅度。相比而言,本研究的观测方案较好地避免了这些问题,有助于更加深入、准确地分析湿地的局地小气候效应。③影响因素分析方面,前人的研究重点探讨了湿地的面积、形状、位置等个体特征对其局地小气候效应的影响^[37],本研究则分析了季节、气象环境等宏观因素的影响,有助于加深对城市湿地局地小气候效应的认知。

本研究存在不足之处。受各种条件的限制,本研究仅在一个方向上进行了气象要素的梯度观测。考虑到风速等气象要素具有较强的方向性特征^[36],从多个方向进行气象观测有助于更准确地揭示湿地的局地小气候效应。虽然西溪湿地具有一定的典型性和代表性,但从单一案例中得出的研究结论仍然有待进一步验证。

参考文献:

- [1] PETZOLD J, MOSE L. Urban Greening as a Response to Climate-Related Heat Risk: A Social-Geographical Review [J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 4996.
- [2] YI C Y, PENG C Z, ROBINSON D. Modelling Urban Dwellers' Indoor Heat Stress to Enhance Heat-Health Warning and Planning [J]. *Building and Environment*, 2023, 243: 110623.
- [3] AKINLUYI F O, OYINLOYE M A, ALADEKOYI C O. Effects of Urban Land Use Change on Selected Public Utilities for Sustainable Development in Akure, Nigeria [J]. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2021, 9(5): 25-39.
- [4] RATH S S, PANDA J. Urban Induced Land-Use Change Impact during Pre-Monsoon Thunderstorms over Bhubaneswar-Cuttack Urban Complex [J]. *Urban Climate*, 2020, 32: 100628.
- [5] TAN J G, ZHENG Y F, TANG X, et al. The Urban Heat Island and Its Impact on Heat Waves and Human Health in Shanghai [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2010, 54(1): 75-84.
- [6] REN G Y, ZHOU Y Q, CHU Z Y, et al. Urbanization Effects on Observed Surface Air Temperature Trends in North China [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(6): 1333-1348.
- [7] HUANG L M, LI J L, ZHAO D H, et al. A Fieldwork Study on the Diurnal Changes of Urban Microclimate in Four Types of Ground Cover and Urban Heat Island of Nanjing, China [J]. *Building and Environment*, 2008, 43(1): 7-17.
- [8] MORTEZAZADEH M, WANG L L, ALBETTAR M, et al. CityFFD-City Fast Fluid Dynamics for Urban Microclimate Simulations on Graphics Processing Units [J]. *Urban Climate*, 2022, 41: 101063.
- [9] 杨一鹏,曹广真,侯鹏,等.城市湿地气候调节功能遥感监测评估[J].*地理研究*, 2013, 32(1): 73-80.
- [10] NAKAYAMA T, FUJITA T. Cooling Effect of Water-Holding Pavements Made of New Materials on Water and Heat Budgets in Urban Areas [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(2): 57-67.
- [11] ZHANG Z Y, DONG J H, HE Q J, et al. The Temporal Variation of the Microclimate and Human Thermal Comfort in Urban Wetland Parks: A Case Study of Xixi National Wetland Park, China [J]. *Forests*, 2021, 12(10): 1322.
- [12] 傅抱璞.我国不同自然条件下的水域气候效应[J].*地理学报*, 1997, 52(3): 246-253.
- [13] CAI Z, GULDMANN J M, TANG Y, et al. Does City-Water Layout Matter? Comparing the Cooling Effects of Water Bodies across 34 Chinese Megacities [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 324: 116263.
- [14] LOTT R B, HUNT R J. Estimating Evapotranspiration in Natural and Constructed Wetlands [J]. *Wetlands*, 2001, 21(4): 614-628.
- [15] KIM K R, KWON T H, KIM Y H, et al. Restoration of an Inner-City Stream and Its Impact on Air Temperature and Humidity Based on Long-Term Monitoring Data [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(2): 283-292.
- [16] GAO Y, PAN H F, TIAN L. Analysis of the Spillover Characteristics of Cooling Effect in an Urban Park: A Case Study in Zhengzhou City [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1133901.

- [17] SONG U, KIM E, BANG J H, et al. Wetlands are an Effective Green Roof System [J]. *Building and Environment*, 2013, 66: 141-147.
- [18] NISHIMURA N, NOMURA T, IYOTA H, et al. Novel Water Facilities for Creation of Comfortable Urban Micrometeorology [J]. *Solar Energy*, 1998, 64(4-6): 197-207.
- [19] ZEDLER J B. Progress in Wetland Restoration Ecology [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2000, 15(10): 402-407.
- [20] KNOX J C. Agricultural Influence on Landscape Sensitivity in the Upper Mississippi River Valley [J]. *Catena*, 2001, 42(2-4): 193-224.
- [21] 于文颖, 纪瑞鹏, 贾庆宇, 等. 基于改进的双作物系数法估算辽河三角洲芦苇湿地蒸散量 [J]. *生态学报*, 2020, 40(1): 325-335.
- [22] 朱浩楠, 刘晓冉, 孙佳, 等. 湿地公园对局地气候舒适性影响的数值试验 [J]. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 412-423.
- [23] 康晓明, 崔丽娟, 赵欣胜, 等. 北京市湿地缓解热岛效应功能分析 [J]. *中国农学通报*, 2015, 31(22): 199-205.
- [24] DU J, SONG K S, YAN B H. Impact of the Zhalong Wetland on Neighboring Land Surface Temperature Based on Remote Sensing and GIS [J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(5): 798-808.
- [25] SAARONI H, ZIV B. The Impact of a Small Lake on Heat Stress in a Mediterranean Urban Park: The Case of Tel Aviv, Israel [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2003, 47(3): 156-165.
- [26] 董建华, 何奇江, 高月, 等. 典型城市森林和湿地的小气候效应及人体舒适度影响——以杭州市为例 [J]. *环境保护科学*, 2019, 45(6): 101-107.
- [27] 陆芊芊, 杨婷, 王自发, 等. 湿地小气候效应特征研究 [J]. *气候与环境研究*, 2020, 25(4): 399-409.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [29] 张含, 张小伟, 樊高峰. 城市化影响杭州城市热环境的数值模拟研究 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(9): 4107-4119.
- [30] 张玲玲, 滕雨婷, 胡晓森, 等. 郑州市综合性公园边界空间活力研究 [J]. *河南农业大学学报*, 2023, 57(5): 813-825.
- [31] 魏遐, 潘益昕. 湿地公园游客体验价值量表的开发方法——以杭州西溪湿地公园为例 [J]. *地理研究*, 2012, 31(6): 1121-1131.
- [32] 李维维, 王甫园, 马晓龙, 等. 生态型城市旅游综合体土地利用时空演化机制研究——以西溪湿地为例 [J]. *旅游学刊*, 2023, 38(4): 133-148.
- [33] 潘明欣, 张力小, 胡潭高, 等. 城市湿地生态系统服务动态演化及其权衡关系——以杭州西溪湿地为例 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(6): 893-900.
- [34] 徐遥辰, 刘贲, 卢兔, 等. 基于 CORONA KH-4B 影像的湿地景观格局重建——以杭州西溪湿地为例 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(11): 2233-2242.
- [35] 申秀英, 潘腊青, 许惠英, 等. 西溪湿地底泥质量现状与生态风险初步评价 [J]. *农业资源与环境学报*, 2013, 30(6): 53-57.
- [36] 张伟, 王凯丽, 梁胜, 等. 基于计算流体力学的城市近郊湖泊“冷岛效应”及其情景模拟研究——以长沙市同升湖为例 [J]. *生态环境学报*, 2021, 30(10): 2054-2066.
- [37] 刘艳芬, 黄茹鲜, 艾婧文, 等. 福州市城市公园的冷岛效应及其影响因素 [J/OL]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023: 1-10. (2023-08-11) [2023-08-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.s.20230810.1616.004.html>.
- [38] 宋晓程, 刘京, 叶祖达, 等. 城市水体对局地热湿气候影响的 CFD 初步模拟研究 [J]. *建筑科学*, 2011, 27(8): 90-94.
- [39] THOM E C. The Discomfort Index [J]. *Weatherwise*, 1959, 12(2): 57-61.
- [40] BROUCEK J, RYBA S, MIHINA S, et al. Impact of Thermal-Humidity Index on Milk Yield Underconditions of Different Dairy Management [J]. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 2007, 16(3): 329-344.
- [41] MAYER H, HÖPPE P. Thermal Comfort of Man in Different Urban Environments [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 1987, 38(1): 43-49.
- [42] BARRADAS V L. Air Temperature and Humidity and Human Comfort Index of Some City Parks of Mexico City [J]. *International Journal of Biometeorology*, 1991, 35(1): 24-28.
- [43] 郑有飞, 尹继福, 吴荣军, 等. 热气候指数在人体舒适度预报中的适用性 [J]. *应用气象学报*, 2010, 21(6): 709-715.
- [44] 高理, 刘焕彬. 1991—2021 年山东省人体舒适度时空分布特征 [J]. *海洋气象学报*, 2023, 43(3): 71-79.
- [45] 严明良, 沈树勤. 环境气象指数的设计方法探讨 [J]. *气象科技*, 2005, 33(6): 583-588.
- [46] 于庚康, 徐敏, 高萃, 等. 江苏冬夏季人体舒适度指数异常的背景场研究 [J]. *气象*, 2012, 38(5): 593-600.