

不同气象条件下的城市湿地夏季 降温效应及其影响因素 ——以武汉为例

张丽文¹ 陈滢伊¹ 王凯^{1, 2} 梁之辰¹ 梁益同¹¹

(1. 武汉区域气候中心, 湖北 武汉 430074;

2. 金沙国家大气本底站, 湖北 咸宁 437599)

【摘要】: 理解城市湿地的气候效应特征及其影响因素, 有助于制定滨水城市优化气候承载力和适应力建设方案。鉴于此, 选择武汉市区 18 个典型城市湿地斑块为研究对象, 利用 2013~2020 年盛夏期 Landsat80LI/TIRS 和 GF-1 数据反演的地表温度和其他影响参数, 运用 GIS 缓冲区空间分析方法定量评估了武汉市四类城市湿地(主要河流、细小河流、湖泊湿地及水景公园)的夏季降温影响范围、降温强度、降温梯度及降温面积效率特征, 并参考梅雨期累计降水量、盛夏期气温、夏季主导风和卫星过境日气象条件, 探究了降雨、高温及风环境条件对城市湿地夏季降温效应的影响。结果表明:(1) 不同类型城市湿地的最优降温效应指标不同, 其中以长江为代表的主要河流有最强的降温影响范围和降温强度, 湖泊湿地对周边环境具有单位距离下较大的降温幅度, 而细小河流和水景公园则在降温面积效率上表现更明显。(2) 河流湿地降温效应主要由河流长度和表层水温等自身属性决定, 而湖泊湿地及水景公园降温效应则主要受到形状指数、湿地斑块地表温度、水体和植被覆盖水平、湿地周边建设用地等属性及周边环境因子的共同影响。(3) 气象条件差异是影响城市湿地降温效应年际变化的重要原因之一, 但对不同降温效应指标和不同湿地类型影响不同。梅雨期降雨偏多或盛夏期气温偏高, 对降温强度、降温梯度及降温面积效率的积极影响强于降温影响距离, 对细小河流和水景公园降温效应的积极影响大于主要河流和湖泊湿地。夏季主导风向只对与之平行河段的降温影响范围上起促进作用。

【关键词】: 城市湿地 降温效应 遥感 年际变化 降雨 高温

【中图分类号】: TU985.12 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)09-1938-15

城市湿地是与城市组成部分能相互作用并且有着密切持续关系的湿地^[1]。作为城市生态空间的重要组成部分, 湿地水体及水生植物通过水面蒸发和蒸腾转移等过程, 吸收消耗大量的太阳辐射热量并持续促进地气能量和物质交换, 从而发挥小气候调节作用, 显著降低湿地及其周边地区的地表温度、增加空气湿度等^[2]。理解城市湿地的气候效应特征及其影响机制, 已成为滨水城

作者简介: 张丽文(1985~), 女, 高级工程师, 主要研究方向为生态气象与遥感技术应用。E-mail:luomarsp2013@163.com;梁益同, E-mail:yitong2007@hotmail.com;

基金项目: 湖北省气象局科技发展基金重点项目(2018Z07);湖北省气象局科技发展基金重点项目(2021Z04)

市及受严重城市化影响的特大城市基于自然环境优化气候承载力和适应力的重要思路^[3]。

近年来,城市水体、湿地等“蓝色空间”气候效应研究逐渐得到了重视,不同科学领域根据研究目的、尺度及数据获取平台的不同,采用现场实测研究^[4,5,6]、遥感监测评价和计算机数值模拟^[7,8,9]等方法对城市蓝色空间气候效应特征及其影响机制展开研究。其中定量遥感技术因其具有同步大范围快速获取地表热辐射和下垫面生态景观类型等影响参数的便捷性,在国内外城市的热环境生态调控机理研究领域中广泛应用^[10,11,12,13,14,15,16]。然而,遥感监测手段具有瞬时性,卫星影像的有效选择是研究结论具有代表性的基础^[17]。目前的城市蓝绿空间降温效应遥感评估研究多以单日影像分析结果来诠释湿地降温效应的整体或分季节特征^[10,11,12,13,14,15],缺乏对不同年份气候背景及卫星过境日天气条件差异影响的考虑。事实上,已有一些研究证实不同气候背景影响下的湿地气候调节效应存在明显差异^[18]。Manteghi 等^[19]和 Yu 等^[20]发现低纬度城市比高纬度城市的湿地降温效应强,而干旱地区城市的湿地降温增湿效应则比湿润地区强。蒋志祥等^[21]选择昆山、哈尔滨、北京、昆明及广州 5 个气候背景各异的城市为研究对象,发现不同研究区太阳辐射和地形差异是导致河流向周围环境释放显热量和潜热量不同的主要原因。Wang 等^[22]使用局地气候分区理论(LCZs)^[23]来识别具有相似城市气候环境的湿地降温效应,以提升试验方案与城市应对气候变化规划应用的衔接。在气候调节效应研究中对气象条件差异加以考虑,对提升同类研究结论的客观性和可比性有重要意义。

鉴于探讨不同气象条件下的城市蓝绿空间气候调节效应的研究尚不多见,本文以城市湿地资源丰富且雨热气候特征明显的湖北省武汉市为例,利用卫星遥感定量分析了不同规模、景观配置的城市湿地夏季降温效应年际变化特征,并探究湿地自身属性、周边环境及气象条件如何影响城市湿地夏季降温效应。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

武汉市位于长江和汉水交汇处,素称“百湖之市”,湿地资源丰富,包含河流、湖泊、沼泽、库塘及水稻田等多种自然与人工湿地类型。武汉市气候属亚热带湿润季风气候,四季分明,冬季湿冷夏季闷热。根据武汉市内 5 个国家气象站监测数据统计显示,近 30 年(1991~2020 年)武汉市平均年累计降雨量 1299.3mm,其中初夏梅雨季节雨量集中;年平均气温 17.3℃、夏季平均气温 27.8℃,夏季最高气温高于 35℃日数多年平均 21.1d;日照充足,年累计日照时数 1818.4h。

1.2 数据源

利用 2013~2020 年盛夏期高质量无云 Landsat8OLI/TIRS 卫星影像作为反演地表温度、环境影响因子的基础数据,其中 2014、2015 年同期缺乏无云资料而排除;影像从空间地理云网站下载(<http://www.gscloud.cn/>),成像时间分别为 2013 年 7 月 31 日、2016 年 7 月 23 日、2017 年 8 月 27 日、2018 年 7 月 29 日、2019 年 8 月 1 日和 2020 年 8 月 3 日。参考公开规划图等信息,利用国家卫星气象中心提供的 2m 国产高分卫星多光谱底图目视解译提取城市湿地及水景公园斑块边界(图 1)。利用高分辨率对地观测系统湖北数据与应用中心提供的同时期 GF-1WV 数据,在 eCognition Developer 平台中使用面向对象分割法和最邻近分类法将每年土地覆盖划分为绿地植被、建设用地、水体和未利用地四种类型,采用随机取样方法(各类型取样 50 个)评价每年分类准确率检验值均大于 78.2%。气象数据来源于湖北省气象局,包含武汉市内 5 个国家气象站(武汉、蔡甸、江夏、黄陂、新洲)降水、平均气温、最高气温、相对湿度、日照时数日值观测数据,用于筛选不同气象条件对比年份。30mAW3D30DSM(数字地表模型)数据从 JAXAALOS 网站免费下载(<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm>),用于解析天空开阔度,利用 Relief Visualization Toolbox(RVT)工具实现计算。所有遥感影像预处理都在 ENVI5.3 平台下进行。

1.3 湿地样地选取

本文所述城市湿地,包含适度围堤的天然河流和湖泊、开发建设后含有水体及湿地水生植被的城市湿地公园和城市水景公

园^[24],其中若毗邻水体由绿地连通,则合并成一个湿地斑块。在综合考虑湿地类型、规模及景观构成差异基础上,选取了18个典型湿地斑块样地,根据河宽、河流流向及水体占比的不同,将湿地样地进一步细分为主要河流(平均河宽>1000m)、细小河流(河宽<300m)、湖泊湿地(水体占比>=20%)及水景公园(水体占比<20%)四类,其中主要河流:东北西南向长江(长江 NESW)、西北东南向长江(长江 NESW);细小河流:东北西南向汉江(汉江 NESW)、西北东南向汉江(汉江 NESW)、东西向汉江(汉江 EW)、滢水河、罗家巷;湖泊湿地:沙湖公园、东湖风景区、汤湖公园及西北湖、墨水湖公园及动物园、南湖及幸福湾公园、紫阳公园、杨春湖公园、月湖公园;水景公园:青山公园、解放公园、后襄河公园。图1展示了湿地斑块样地的空间位置、边界范围及周边环境。

1.4 地表温度反演

常用的地表温度反演方法主要有辐射传输方程法(也称大气校正法: Radiative Transfer Equation, RTE)、单窗算法、普适性单通道算法及分裂窗算法。考虑到 Landsat8 热红外第 11 波段绝对辐射定标存在较大的校准误差^[25],本文采用 RTE 进行地表温度反演,其原理是基于热红外辐射传输方程,从传感器观测到的热辐射总量中除去大气对地表热辐射的影响,从而得到地表热辐射强度,转化为相应地表温度。热红外辐射传输方程表示为^[26]:

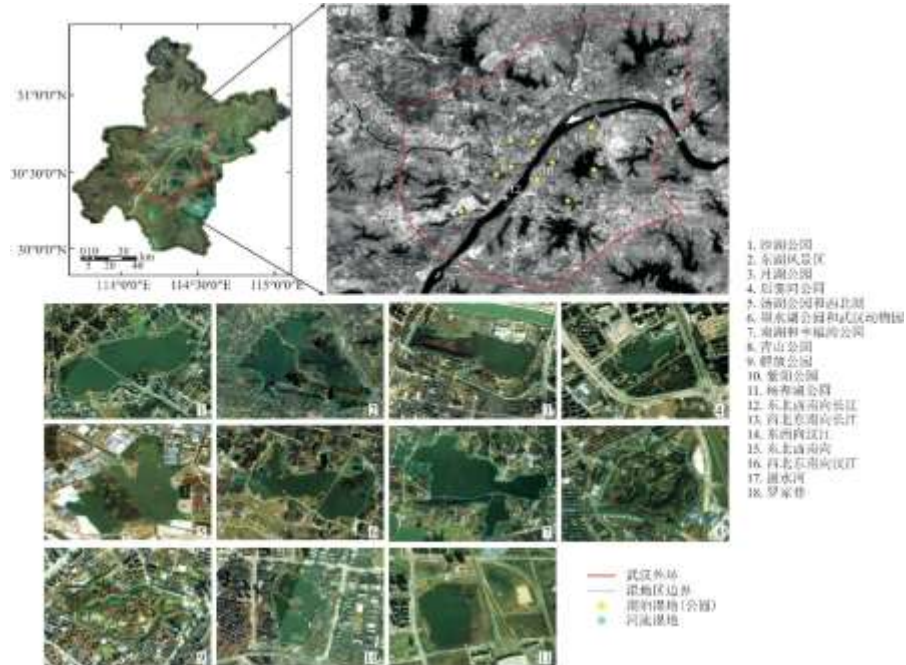


图1 湿地斑块边界及周边环境遥感示意图

$$L_{sen} = B(T_{sen}) = (\varepsilon B(T_s) + (1-\varepsilon)L_d) \tau + L_u \quad (1)$$

式中: L_{sen} 为星上辐亮度 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$); B 为普朗克函数; T_{sen} 为星上亮温 (K); ε 为地表比辐射率; τ 为大气透过率; T_s 为地表温度 (K); L_d 和 L_u 分别是大气下行辐射和大气上行辐射 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)。

$$T_s = K_2 / \ln \left(\frac{K_1}{B(T_s)} + 1 \right) \quad (2)$$

式中： $K_1(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$ 和 $K_2(K)$ 为辐射常量。对于 Landsat8TIRSBand10, $K_1=774.89$; $K_2=1321.08$ ^[25]

此方法中核心的大气上、下行辐射以及大气透过率参数值，可通过 NASA 网站获取 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>)。RTE 算法适用面广^[26]且被 Yu 等^[27]研究验证具有较高的反演精度 (RMSE 低于 1K)，在城市生态空间气候效应相关研究^[16]中被广泛应用。

1.5 湿地降温效应指标计算

在 ArcGIS10.6 平台中，以 30m 等距间隔向湿地斑块边界外建立 1km 的多缓冲环，并提取 33 个缓冲区环内 LST 均值。利用 Matlab 编程绘制湿地斑块边界外随距离变化的 LST 变化曲线图，进而计算降温效应定量评价指标。湿地降温效应有四种常见量化指标^[12,13,15]：将 LST 温度曲线首次出现拐点（即随距离变化的缓冲环内 LST 均值变化曲线一阶导数为 0）时的缓冲距离定义为降温影响范围 (L_{max})，将拐点对应缓冲环 LST 均温与湿地斑块内部 LST 均温之差定义为降温强度 (ΔT_{max})，将降温强度与影响范围之比定义为降温梯度 (G_{temp})，将降温强度与湿地斑块面积之比定义为降温强度面积效率 (E_{area})。

1.6 影响因素分析

1.6.1 湿地属性及周边环境

湿地属性及周边环境影响因子从湿地斑块形态属性、湿地斑块内外景观构成及湿地周边城市形态等方面选取 (表 1)，包含湿地斑块面积 (A)、周长 (P)、景观形状指数 (LSI)^[28]、平均地温 (Tb)、湿地斑块植被、水体及建设用地景观构成及天空开阔度指数。为对比不同文献中使用的同质性指标在本研究的适用性，植被、建设用地及水体景观构成特征包含面积占比及遥感指数均值两种形式^[12,13,29]。面积占比即单个景观类型覆盖面积占湿地斑块或湿地斑块外降温影响范围内总土地面积的比例；遥感指数选择增强型植被指数 (EVI)^[30]、新型建筑用地指数 (IBI)^[31]及缨帽变换中的湿度分量 (WET)^[32]分别指示湿地斑块内外植被覆盖、人造表面建设开发及下垫面植被土壤等透水面湿度水平。EVI 比归一化植被指数 (NDVI) 更具有抗大气干扰能力，提高了植被生物量的敏感度且更少地达到饱和；IBI 指数在城市热环境驱动因子分析应用上得到肯定^[33]；湿度分量 WET 指标对水分、土壤和植被中的湿度信息较为敏感，且被证实以此指征的城市地表湿度显著区对城市热岛效应起到了有效的调控作用^[32]。本文以 6 年数据为整体，利用 Pearson 分析湿地降温效应指标与影响因子指标间的正负向相关关系，在剔除相关性不显著的因子后，构建多元线性逐步回归方程以定量分析多影响因子贡献率，从而检验主要影响因素对湿地降温效应的影响机制。上述分析均在 SPSS26 统计软件中完成。

表 1 湿地属性及周边环境影响因子指标

影响因子	含义
斑块内 LST 均值 (Tb)	河湖湿地及水景公园斑块内地表温度平均值
面积 (A)	河湖湿地及水景公园表面面积
周长 (P)	河湖湿地及水景公园斑块边界周长
形状指数 (LSI)	衡量斑块边界形状复杂度. 值越大，湿地斑块边界形状越复杂
宽度 (W)	河流斑块平均河流宽度
长度 (L)	河流斑块长度
斑块内植被面积占比 (Pvi)	描述植被用地景观配比水平. 值越大，湿地斑块内绿植景观面积占湿地斑块总面积比例越大

斑块内建设用地面积占比 (Pbi)	描述建设用地景观配比水平. 值越大, 湿地斑块内建设用地面积占湿地斑块总面积比例越大
斑块内水体面积占比 (Pwi)	描述水体景观配比水平. 值越大, 湿地斑块水体面积占湿地斑块总面积比例越大
斑块内植被指数均值 (EVIi)	表征植被覆盖度或生物量. 值越大, 湿地斑块内绿植景观覆盖水平越高
斑块内建筑指数均值 (IBIi)	表征建成区或建筑密度. 值越大, 湿地内人造表面开发建设程度越高
斑块内湿度指数均值 (WETi)	缨帽变换湿度分量. 值越大, 湿地斑块内植被、土壤及水体等含水量越高
斑块外植被面积占比 (Pvo)	描述植被用地景观配比水平. 值越大, 绿植面积占湿地降温影响距离范围总面积比例越大
斑块外建设用地面积占比 (Pbo)	描述建设用地景观配比水平. 值越大, 建筑面积占湿地降温影响距离范围总面积比例越大
斑块外植被指数均值 (EVIo)	表征植被覆盖度或生物量. 值越大, 湿地斑块内绿植景观覆盖水平越高
斑块外建筑指数均值 (IBIo)	表征建成区或建筑密度. 值越大, 湿地降温影响距离范围内的硬化程度越高
斑块外湿度指数均值 (WETo)	表征植被、土壤含水量信息. 值越大, 湿地降温影响距离范围内的湿度信息越高
斑块外天空开阔度 (SVF)	描述城市街谷可见天空或开放峡谷空间的比例. 值越大, 环境开阔度越好

1.6.2 气象条件

气象条件包含夏季气候背景和卫星过境日的天气条件。武汉夏季可分为梅雨期和盛夏期两个主要阶段，呈现先雨水充沛后炎热高温的气候特点。根据武汉市 5 个国家气象站观测数据统计资料，以梅雨期累计降水量为参考，在相近的气温背景和卫星过境天气条件年份中，选择 2016 和 2020 年作为丰水年，2018 年作为枯水年；在排除丰水年的基础上，综合考虑盛夏期平均气温、最高气温和高温日数等气候背景特点及卫星过境日天气条件，筛选出 2013 和 2019 年作为高温年，2017 年作为常温基准年(表 2)；同时结合相关研究中的武汉市夏季主导风分布统计^[34]，探究夏季主导风向与河流流向不同空间关系对河流降温效应差异的影响。

表 2 气象条件统计

年份	气候背景					卫星过境天气条件				
	梅雨期累计降水量 (mm)	盛夏期平均气温 (°C)	盛夏期平均最高气温 (°C)	盛夏期累计高温日数 (d)	盛夏期累计炎热日数 (d)	卫星过境日期	平均气温 (°C)	最高气温 (°C)	2min 风速 (m/s)	前 5 日累计降雨量 (mm)
2013	521	30.9	35.8	29.0	15.6	2013-07-31	32.9	37.6	2.4	0
2016	978	30.0	34.6	25.0	11.8	2016-07-23	31.8	35.6	3	69.1
2017	222	29.4	33.9	18.2	7.6	2017-08-27	28.8	33.2	2.2	24.9

2018	180	30.0	35.0	24.6	9.4	2018-07-29	30.4	36.3	1.6	5.1
2019	365	30.9	36.1	35.0	13.2	2019-08-01	32.5	37.6	1.9	0.8
2020	897	29.3	33.8	15.4	1.6	2020-08-03	32	36.4	1.7	3
均值	385	28.5	32.8	11.5	2.8					

注：梅雨期：6月1日~7月19日；盛夏期：7月20日~8月31日；高温日：日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ ；炎热日：日最高气温 $\geq 37^{\circ}\text{C}$ ；均值：1981~2010年30年历史同期均值；当年累计降水量大于历史同期均值100%定义为丰水年，当年累计降水量小于历史同期均值-30%定义为枯水年。平均气温和平均最高气温均大于30年均值+2*标准差时定义为高温年，平均气温和最高气温均在30年均值+1*标准差范围内时定义为常温年。

2 结果与分析

2.1 不同湿地类型降温效应特征分析

图2举例展示了面状湿地样地(湖泊湿地及城市水景公园)2013、2016~2020年6年LST随湿地边界距离增加的变化曲线，图中竖线与横轴交叉处即为降温影响距离，与曲线交叉处对应的纵轴即值为降温拐点温度。如图可知，城市湿地对周边地表温度的影响存在一定的年际变化差异。按照1.3中描述，将18个湿地样地分为主要河流、细小河流、湖泊湿地及水景公园四类，并对其降温影响范围、降温强度、降温梯度及降温面积效率指标值进行分类统计(图3~图6)。虽然不同年份间湿地降温效应指标值大小略有浮动，但湿地降温效应在不同湿地类型间呈一定规律性差异特征。

2.1.1 降温影响范围

降温影响范围整体表现出主要河流最大、水景公园最小、细小河流和湖泊湿地相近的特征。主要河流降温影响距离范围多年均值在365.3m，其中东北西南向长江段降温影响范围(512m)远大于西北东南向长江段(219m)；细小河流包含汉江、淝水河和罗家巷，其降温影响距离范围多年均值166~296m，平均238.6m；湖泊湿地降温影响距离范围多年均值在161~580m、平均236.3m，其中南湖及幸福湾公园降温影响范围最大，沙湖公园影响范围最小；而水景公园降温影响距离范围多年均值在115~290m，平均198.9m，其中解放公园降温辐射距离最远，后襄河公园影响范围最小。

2.1.2 降温强度

降温强度同样表现出主要河流>湖泊湿地>细小河流>水景公园的特征。主要河流的降温强度多年均值 5.2°C ~ 10.3°C 、平均 7.7°C ；其中东北西南向长江的降温强度明显高于西北东南向长江。湖泊湿地降温强度多年均值在 4.1°C ~ 9.5°C 、平均 6.4°C ，其中汤湖及西北湖公园最强、杨春湖公园最弱，整体表现出降温强度随公园规模的增加而提升，而汤湖西北湖公园、墨水湖动物园及南湖幸福湾公园等由相邻水体组成而成的湿地斑块在降温强度表现上好于东湖等独立水体的湿地斑块。细小河流降温强度多年均值在 2.2°C ~ 7.8°C ，平均 5.2°C ；其中东西向汉江最强、罗家巷最弱。水景公园降温强度多年均值在 3.8°C ~ 4.7°C ，平均 4.3°C ；其中解放公园最强、后襄河公园最弱但差距较小，整体表现出随公园规模增加而提升的特征。

2.1.3 降温梯度

降温梯度则表现出湖泊湿地>水景公园>主要河流>细小河流的特征。湖泊湿地降温梯度多年均值在 $0.017\sim 0.054^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、平均 $0.036^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ，除南湖幸福湾公园外，湖泊湿地整体表现出单位距离内相对较大的降温幅度。水景公园降温梯度多年均值在 $0.017\sim 0.036^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 、平均 $0.025^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ，在相近降温强度中降温影响距离越小的后襄河公园具有最大的降温梯度。主要河流和细小河流的降温梯度多年均值接近，在 $0.021\sim 0.022^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ，显示出对周边环境相对平缓地降温效果。汤湖西北湖公园、紫阳公园、沙湖公园、后襄河公园及东西向汉江等湿地斑块具有较高的降温梯度值 ($G_{\text{temp}} > 0.03^{\circ}\text{C}/\text{m}$)，因为它们都整体上被城市商业区和工业区包围。

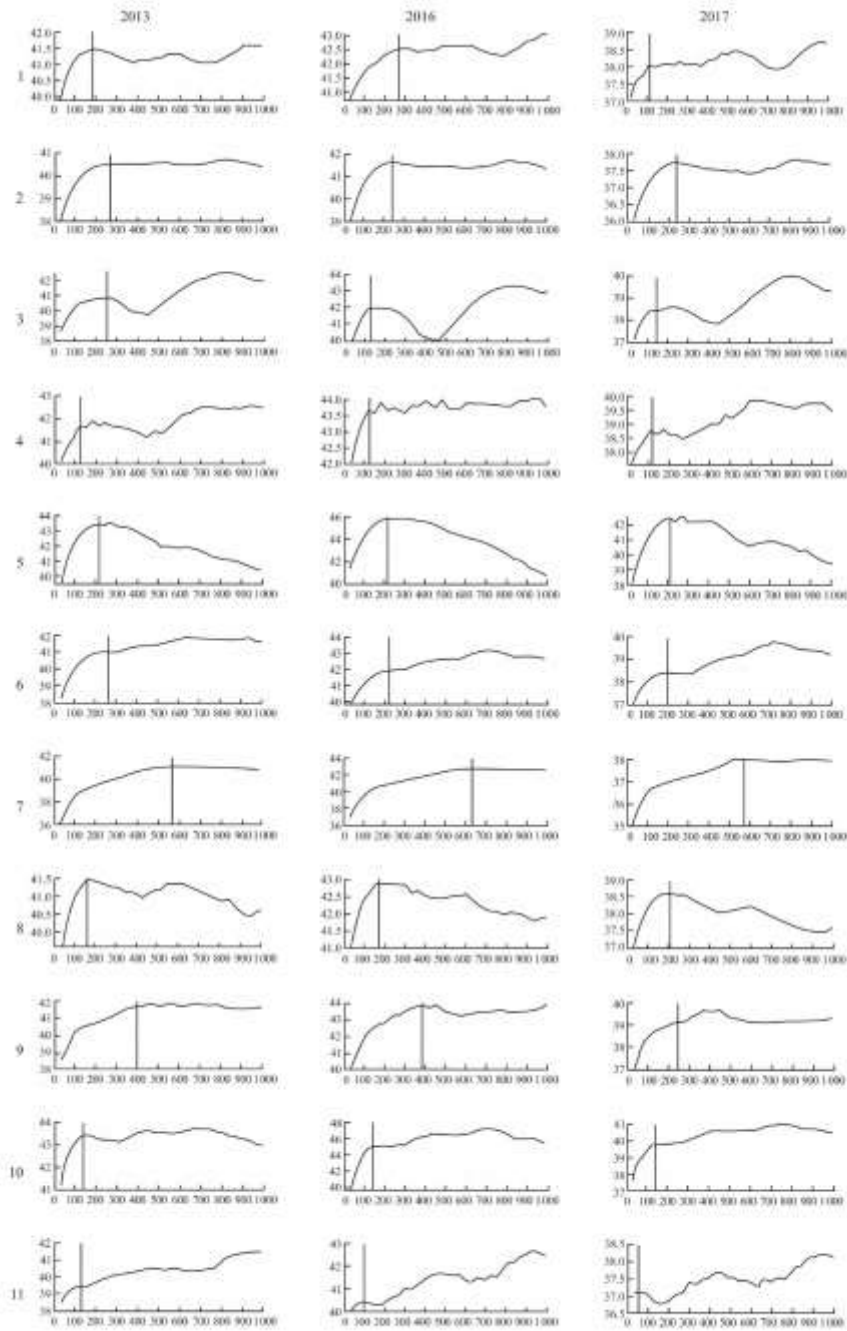


图 2 不同年份、不同面状湿地样地边界外地表温度随距离变化曲线(竖线代表首次出现拐点位置)

注:图 2 中左侧 1~11 的编号注解同图 1 编号注解。纵轴为 LST(°C)，横轴为湿地边界外缓冲环距离。

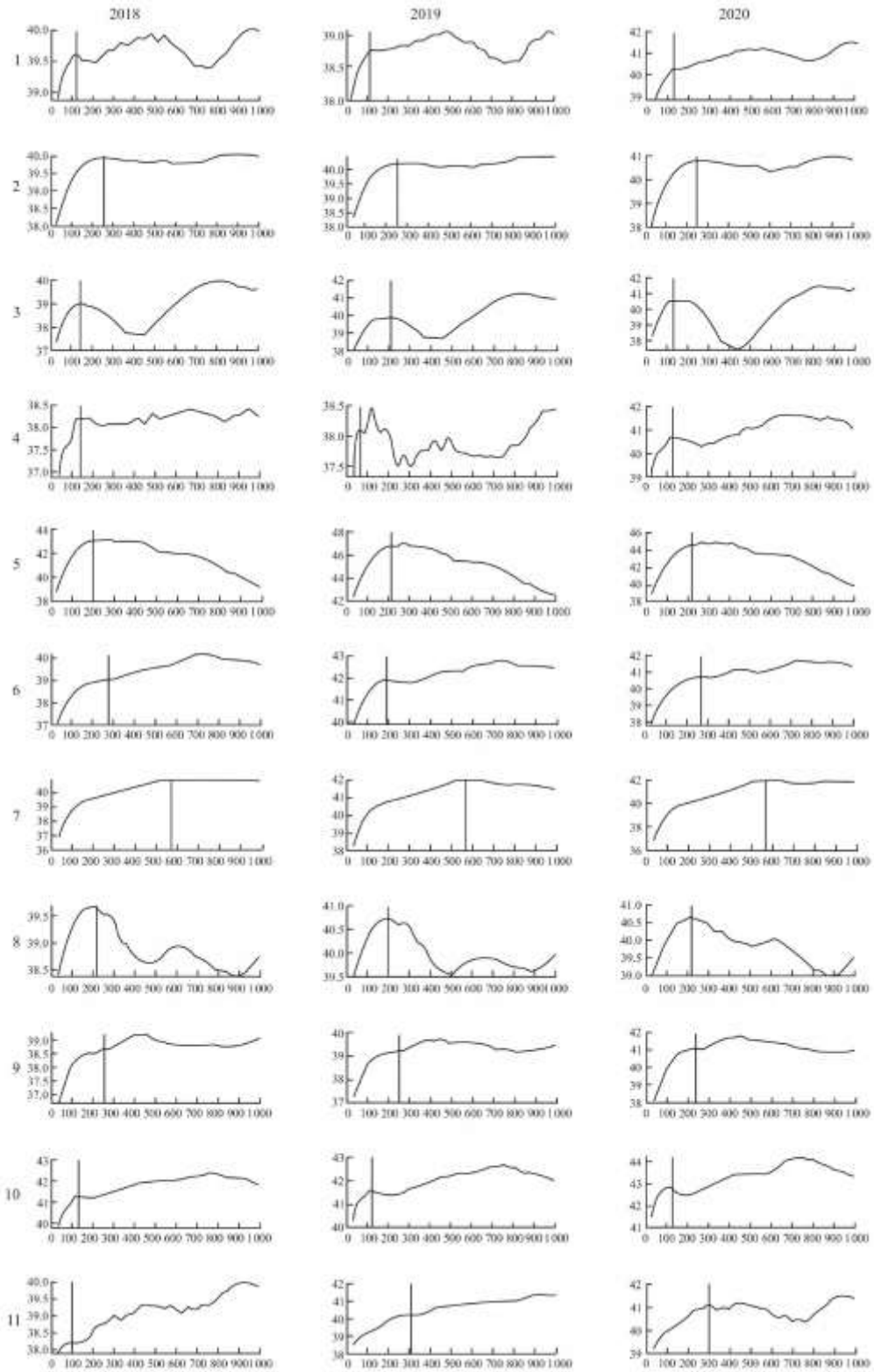


图2 不同年份、不同面状湿地样地边界外地表温度随距离变化曲线(竖线代表首次出现拐点位置)

注:图2中左侧1~11的编号注解同图1编号注解。纵轴为LST(°C),横轴为湿地边界外缓冲环距离。

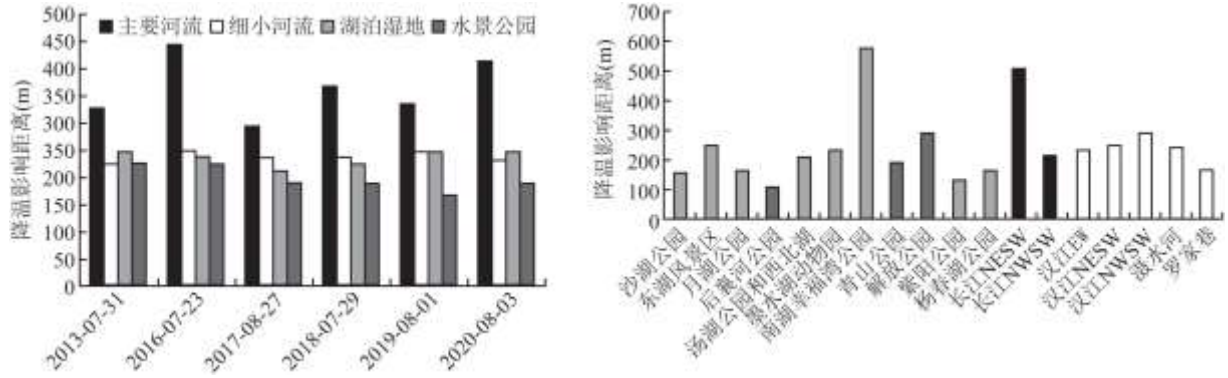


图3 城市湿地降温影响范围

左: 年际变化及分类统计; 右: 18个湿地样地多年均值. 下同.

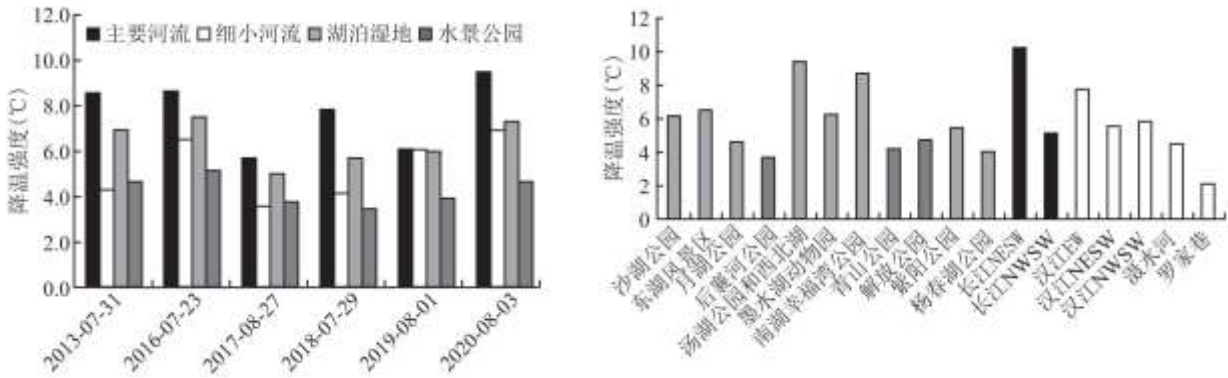


图4 城市湿地降温强度

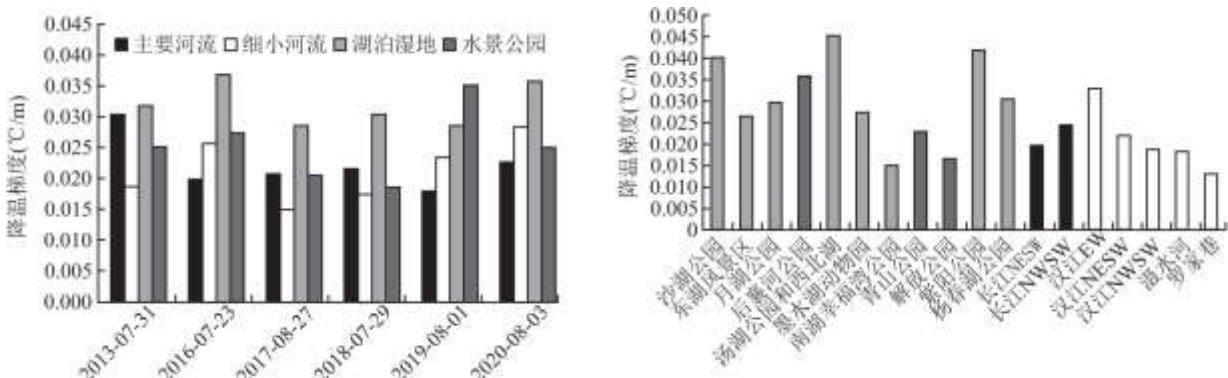


图5 城市湿地降温梯度

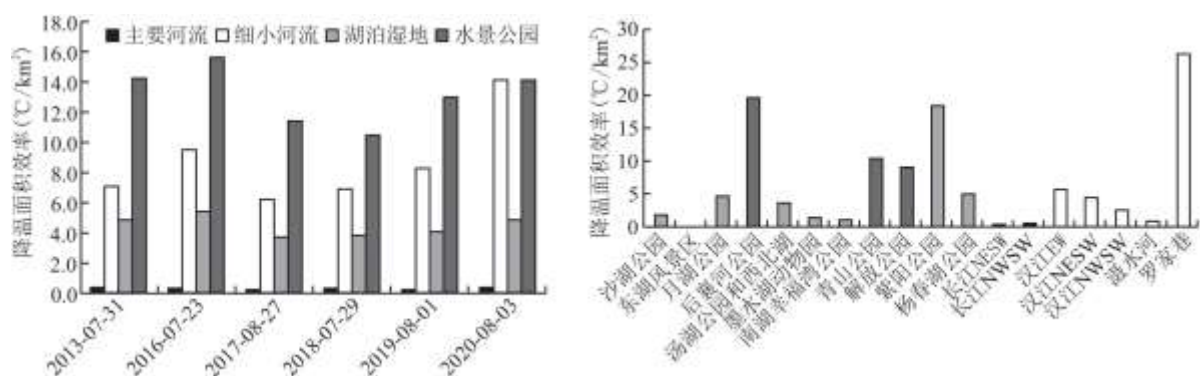


图6 城市湿地降温面积效率

2.1.4 面积效率

水景公园和细小河流在降温面积效率上表现出显著优势。水景公园降温面积效率多年均值在 $9.1 \sim 19.7^\circ\text{C}/\text{km}^2$ ，平均 $13.1^\circ\text{C}/\text{km}^2$ ；细小河流降温面积效率多年均值在 $1.0 \sim 26.3^\circ\text{C}/\text{km}^2$ ，平均 $8.0^\circ\text{C}/\text{km}^2$ ；其中细短的罗家巷最大，而长宽较大的滬水河则效率最低。湖泊湿地降温面积效率多年均值在 $0.1 \sim 18.5^\circ\text{C}/\text{km}^2$ ，不同斑块间差距也较大。后襄河公园、青山公园、解放公园、紫阳公园面积较小的湖泊和水景公园表现出较高的降温效率 ($>9.0^\circ\text{C}/\text{km}^2$)，而水域面积较大主要河流(长江)、东湖风景区则降温面积效率不足 $0.5^\circ\text{C}/\text{km}^2$ 。

2.2 影响因素分析

2.2.1 河流属性及周边环境影响

河流属性影响包含其长度、宽度和水体表层温度，周边环境因子包含河岸外围植被和建设用地覆盖水平。以主要河流和细小河流多年数据为整体，分析河流降温效应指标与影响因子的相关关系。从系数表(表3)可知，河流降温影响范围和降温强度均与河流长度、宽度呈极显著正相关，与河流水体表层温度呈极显著负相关。通常宽度越宽、流量越大的河流其水温也越低、稳定性越好，说明随着规模的增大，河流对周边降温作用也发挥的越好。河流降温梯度仅与河流水体温度呈显著负相关，说明水温越低，河流对周边环境的降温强度在单位距离上越大。降温面积效率则与河流长、宽及降温影响范围内植被指数均值呈负相关，与表层水温和降温影响范围内建筑指数呈现极显著正相关，说明单位面积的河流降温强度除了受到河流自身属性影响外，也由周边植被及建设用地覆盖状况来决定，周围植被水平越低、建设用地越多，细小河流的降温效率越高。

表3 河流降温效应与影响因子 Pearson 相关分析

	Tb	L	W	EVIo	IBIo
L_{\max}	-0.515**	0.875**	0.584**	-0.012	-0.102
ΔT_{\max}	-0.585**	0.632**	0.466**	-0.260	0.019
G_{temp}	-0.352*	-0.032	-0.096	-0.304	0.052
E_{area}	0.855**	-0.512**	-0.548*	-0.464**	0.696**
n	40	40	40	40	40

注：2020年汉江 NESW 和汉江 NWSE 区域受到云覆盖遮而数据缺失，故 $n=7 \times 6 - 2 = 40$ 。* $p < 0.05$ 。** $p < 0.01$ 。

以降温效应指标作为因变量，以 Pearson 相关分析中呈显著相关的因子作为自变量，得到逐步回归方程标准化的 beta 系数 (表 4)，用于解释变量因子对降温效应指数的相对贡献率。河流长度是决定河流降温影响范围的主导影响因素，占河流降温影响范围变化的 75.7%。降温强度一半的变化由河流长度及水温来解释，且长度影响略大于水温。水温是降温梯度相对重要的影响因素，但对降温梯度变化的贡献率不足，仅为 12.4%。河流降温面积效率主要受到水温影响、其次是降温影响范围内植被覆盖水平，两者的综合影响可占降温面积效率变化的 79.1%。整体而言，河流的长度和水温分别对河流降温影响距离及降温面积效率有主导影响，而河流降温强度及梯度主导因素相对不突出。

表 4 河流湿地逐步回归分析标准化系数

	L	Tb	EVIo	R ²
L _{max}	0.875**			0.757
ΔT _{max}	0.452**	-0.358*		0.495
G _{temp}		-0.352*		0.124
E _{area}		0.792**	-0.215*	0.791

注：* $p < 0.05$ 。** $p < 0.01$ 。

2.2.2 湖泊湿地和水景公园属性及周边环境影响

湖泊湿地及水景公园有固定的斑块边界和相似的景观配置，可将两者多年数据作为整体，分析块状城市湿地降温效应指标与影响因子的相关关系；其中湿地属性影响因子包含斑块面积、周长、形状指数、地表均温和水体(湿度)、植被及建筑覆盖水平，周边环境因子包含湿地斑块外降温影响范围内水体(湿度)、植被及建筑覆盖水平及天空开阔度。

对湖泊湿地及水景公园降温效应与影响因子进行 Pearson 相关分析(表 5)可知，降温影响距离与湿地斑块周长、形状指数及湿地斑块内水体面积占比、建筑指数均值 (IBI) 呈显著正相关，相关系数分别为 0.409、0.759、0.535、0.246；与湿地斑块内地表均温、植被及建设用地面积占比、植被指数均值和影响范围内建设用地面积占比呈显著负相关，相关系数分别为 -0.499、-0.398、-0.323、-0.588 和 -0.246。湿地斑块内水体面积占比与降温强度的正显著相关性最高 (0.611)，其次是斑块形状指数 (0.553)、周长 (0.390) 和湿地外建筑指数均值 (0.376)，而斑块内平均地温、植被覆盖水平、湿地外植被面积占比和湿度指数均值表现出对降温强度有显著消极影响。降温梯度与天空开阔度 ($p < 0.05$)、湿地外建筑用地参数 ($p < 0.01$) 呈显著正相关；与形状指数 ($p < 0.01$)、湿地外植被参数 ($p < 0.01$) 和湿度指数均值 ($p < 0.05$) 呈显著负相关。周边环境的开阔程度、湿地形状不规则程度以及湿地外建设用地覆盖程度对加速单位距离内的降温变化起到积极作用。降温面积效率 (E_{area}) 与湿地斑块内平均地温、植被和建筑面积占比、湿度指数均值 ($p < 0.05$)、湿地外建设用地参数成极显著或显著正相关；与湿地斑块面积、周长、形状指数、斑块内水体面积占比、建筑指数均值 ($p < 0.01$) 及湿地外植被面积占比、湿地外植被指数均值 ($p < 0.05$) 呈极显著或显著负相关。可见湖泊湿地及水景公园的降温强度面积效率受自身属性和周围环境共同影响。

值得注意的有两点：(1) 在分析湿地斑块内外景观类型配置影响中，不同文献使用了面积占比和遥感指数两种表达方式，两类指标指示意义相近、在数值上高度相关。就本文对比结果看，相对于遥感指数指标，湿地斑块内外不同土地覆盖面积占比在整体上与降温效应关系更密切。(2) 天空开阔度反映太阳辐射和散热，是影响城市地表热平衡、微尺度空气循环的关键因素^[35]。虽

然天空开阔度分析样本较少，但仍得出与降温梯度显著正相关，湿地外天空越开阔、遮挡物越少，单位距离的降温幅度越大。

表 5 湖泊湿地和水景公园降温效应与影响因子 Pearson 相关分析

	A	P	LSI	Tb	SVF	Pvi	Pbi	Pwi
L_{max}	0.165	0.409**	0.759**	-0.499**	-0.442	-0.398**	-0.323**	0.535**
ΔT_{max}	0.204	0.390**	0.553**	-0.424**	0.183	-0.586**	-0.141	0.611**
G_{temp}	-0.137	-0.226	-0.395**	0.175	0.609*	-0.106	0.233	-0.022
E_{area}	-0.403**	-0.578**	-0.649**	0.705**	-0.197	0.435**	0.598**	-0.579**
n	66	66	66	66	11	66	66	66
	EVIi	IBIi	WETi	Pvo	Pbo	EVIo	IBIo	WETo
L_{max}	-0.588**	0.246*	0.065	0.088	-0.246*	0.205	-0.137	-0.067
ΔT_{max}	-0.476**	0.245*	0.022	-0.330**	0.022	-0.108	0.376**	-0.594**
G_{temp}	0.113	0.006	-0.117	-0.373**	0.347**	-0.337**	0.383**	-0.259*
E_{area}	0.081	-0.551**	0.274*	-0.372**	0.547**	-0.271*	0.361**	-0.037
n	66	66	66	66	66	66	66	66

注：* $p < 0.05$. ** $p < 0.01$.

选择表 5 中呈显著相关的因子参与逐步回归分析，其中不同土地覆盖类型指标从面积占比和遥感指数之间选择相关性更高的一项参与，以减少多重共线性对回归系数产生的影响。根据表 6 统计可知，形状指数、水体面积占比和湿地斑块内 EVI 均值是决定湿地降温影响范围的主要影响因子，其影响占据了湿地降温影响范围的变化 69.6%。形状指数、水体面积占比和湿地外建筑指数均值是影响降温强度的主要因子，可解释降温强度变化的 67.4%。降温梯度主要受到天空开阔度、湿地外植被指数均值及湿地形状指数影响，它们解释了降温梯度差异的 86.2%。湿地斑块平均地表温度、水体和建设用地面积占比、湿地外植被和建设用地面积占比是降温面积效率的主要影响因子，占降温面积效率变化的 69.8%。

表 6 湖泊湿地和水景公园逐步回归分析标准化系数

	LSI	Tb	EVIi	Pbi	Pwi	Pvo	Pbo	EVIo	IBIo	SVF	R^2
L_{max}	0.795**		-0.435**		-0.306**						0.696
ΔT_{max}	0.437**				0.355**				0.499**		0.674
G_{temp}	-0.382*							-0.471*		0.643**	0.862
E_{area}		0.294*		0.225*	-0.231*	0.410*	0.685**				0.698

注：*p<0.05.**p<0.01.

2.2.3 气象条件影响

与枯水年相比，丰水年里四类城市湿地在4种降温效应指标值上均表现为正变幅(表7)，表明丰水年城市湿地夏季降温效应更突出。4种降温效应指标中，降温影响距离以主要河流增幅最大(16.8%)、细小河流最小(1.9%)，而湖泊湿地及水景公园增幅相近(8.3%~8.4%)；降温强度则以细小河流增幅最大(64.1%)、主要河流增幅最小(14.9%)；小幅度的降温距离提升和大幅度的降温强度提升导致细小河流(54.7%)和水景公园(40.9%)降温梯度增加明显；细小河流和水景公园在降温面积效率上的优势进一步凸显。

表7 丰水年与枯水年城市湿地及水景公园降温效应差异对比

	影响距离 L_{max} (m)			降温强度 ΔT_{max} (°C)			降温梯度 G_{temp} (°C/m)			面积效率 E_{area} (°C/km ²)		
	丰水	枯水	变幅(%)	丰水	枯水	变幅(%)	丰水	枯水	变幅(%)	丰水	枯水	变幅(%)
主要河流	430.3	368.4	16.8	9.1	7.9	14.9	0.022	0.022	0.0	0.351	0.332	5.7
细小河流	241.8	237.4	1.9	6.8	4.1	64.1	0.027	0.018	54.7	11.817	6.930	70.5
湖泊湿地	243.2	224.4	8.4	7.4	5.7	29.9	0.036	0.031	19.4	5.129	3.877	32.3
水景公园	208.5	192.5	8.3	4.9	3.5	42.6	0.026	0.019	40.9	14.881	10.498	41.8

城市湿地样地主体由水体、植被及土壤等透水下垫面组成，能对雨水进行截留等水文再分配。一方面透水面将蓄水在雨后借助蒸腾和蒸发等形式返回到大气，一方面降雨影响下垫面温湿度变化和热物理性质，改变城市冠层能量组成和迁移，两者对调节城市微气候均起到重要作用^[36]。城市湖泊及水景公园一般有固定岸线，水体面积变化不大，但梅雨期充沛的降雨可使城市透水面较长时间地保持水储量，本研究中国湖泊湿地及水景公园样地内地表湿度指标(WET)也满足丰水年>平水年>枯水年的特征。

高温年太阳辐射及大气温度改变时，由于物质热力学性质、波谱特征等方面存在差异，湿地斑块内外地表与大气之间的辐射、蒸散发等热量交换和能量平衡因此受到影响而发生改变^[21]。由高温年与常温年湿地样地降温效应差异(表8)可知，水景公园、主要河流和湖泊湿地在高温年的降温影响距离均比常温年有不同程度增加(3.7%~16.7%)，而细小河流湿地几乎无变化；降温强度上，四类湿地样地的高温年比常温年均有提升，提升效果以细小河流最大(43.7%)、主要河流和湖泊湿地次之(28.8%~29.2%)、水景公园最小(13.3%)；在降温梯度上，四类湿地样地的高温年均高于常温年，其中主要河流、细小河流及水景公园增幅达16.5%~44.4%，而湖泊湿地增幅仅5.0%。在面积效率上，四种湿地类型高温年较常温年的提升效果接近，仍表现出主要河流>细小河流>湖泊湿地>城市水景公园的特征。以上分析表明，高温年的城市湿地降温效应较常温年更为明显。

表8 高温年与常温年湿地样地降温效应差异

	影响距离 L_{max} (m)			降温强度 ΔT_{max} (°C)			降温梯度 G_{temp} (°C/m)			面积效率 E_{area} (°C/km ²)		
	高温	常温	变幅(%)	高温	常温	变幅(%)	高温	常温	变幅(%)	高温	常温	变幅(%)
主要河流	334.0	294.9	13.3	7.3	5.7	29.2	0.024	0.021	16.5	0.321	0.238	34.8

细小河流	236.7	237.3	-0.2	5.2	3.6	43.7	0.021	0.015	39.6	7.681	6.181	24.3
湖泊湿地	247.5	212.2	16.7	6.5	5.0	28.8	0.030	0.029	5.0	4.496	3.690	21.8
水景公园	196.9	189.9	3.7	4.3	3.8	13.3	0.030	0.021	44.4	13.586	11.419	19.0

以 2017 年为常温年、2019 年为高温年，计算不同湿地覆盖类型的高温年与常温年地表温度差，得到不透水面 (8.1℃) > 临水域森林 (7.0℃) > 临水域绿地 (6.8℃) > 农田 (5.2℃) > 湖泊水温 (3.1℃) > 细小河流水温 (1.9℃) > 主要河流水温 (1.6℃) 的特征。这表明，在相同气温提升条件下，不透水面升温幅度大，而水体、湿润土壤及植被覆盖区的升温幅度明显较小，不同湿地覆盖类型的增温差异导致高温年的城市湿地降温效应明显强于常温年。

湿地位置及其与城市主导风向的走向关系对城市水体发挥降温效应有着重要影响^[37]。缓冲区分析法获取的降温效应不存在方位的区分，鉴于本文尚未对湖泊湿地及水景公园的降温效应进行多方位细分采样，因此城市背景主导风的影响仅针对不同流向河流湿地开展。武汉市夏季的主导风向整体表现为东南风，局地受到水陆风的影响，并在青山区形成辐合区。北部黄陂区、江夏区南部东南风风速较大；中部的东西湖区盛行东南风和东风，风速较黄陂与新洲区较小、而江夏区东北部东南风风速最小。中部地区因长江和东湖南湖等大型河湖存在，水陆风风速较大、风向复杂多变^[34]。夏季主导风向对武汉河流湿地降温效应影响分析 (表 9) 显示，同一河流不同流向的水域存在降温效应差异，长江 NESW 降温影响范围和强度 (512m, 10.3℃) 明显高于长江 NWSE (218.6m, 5.2℃)，除受河段自身长度影响外，还受到主导风向 (平行和倾斜相交) 影响；汉江 NWSE 由于与主导风向为平行关系，其降温影响距离 (311.9m) 也大于汉江 EW 和汉江 NESW。这一结论与前期研究一致^[38, 39]。与主导风向平行时，河流利用风道顺风优势能促进大气的显热交换量和水面的蒸发量，进而表现出更强的气候调节影响范围。其他降温效应指标则未发现与河流流向和主导风空间关系没有明显联系。

表 9 不同流向河流湿地降温效应及其影响因子多年平均统计

	L_{max} (m)	ΔT_{max} (°C)	G_{temp} °C/m	E_{area} (°C/km ²)	L (km)	W (km)	Tb (°C)	EVIo	IBIo	与主导风向关系
长江 NESW	512.0	10.3	0.020	0.201	35.10	1.31	28.452	0.286	-0.152	平行、倾斜相交
长江 NWSE	218.6	5.2	0.025	0.437	10.01	1.23	27.884	0.327	-0.226	倾斜相交
汉江 EW	234.7	7.8	0.033	5.678	7.37	0.22	32.182	0.234	-0.104	倾斜相交
汉江 NESW	251.7	5.6	0.022	4.350	5.04	0.24	30.411	0.374	-	垂直
汉江 NWSE	311.9	5.9	0.019	2.605	8.74	0.27	30.224	0.423	-0.187	平行

3 讨论

由于遥感评估方法的限制，本文仅分析了湿地斑块对城市地表热缓释效果，同时仅以梅雨期降雨量、盛夏期高温等指标对不同年份气候背景特征作简要区分。实际上，城市湿地气候调节效应及气候背景内涵更为丰富。地表水覆盖率高的城市，城市气候与生态环境间的相互作用机理也更为复杂。在极端高温天气下，水体的大量蒸发反而增加了城市热岛效应和降低人体热舒适度^[40]，对人居环境产生了负收益。因此，如果在滨水城市开展结合不同水体密度和极端高温条件下人体热舒适度的湿地阈值研究，将对城市规划提供更有利的指导。此外，在全球气候变化背景下，城市气候要素如日照时数、蒸发量、相对湿度^[41]等也随之发生变化。在极端气候或水文事件发生时，城市湿地水体面积、水深、水温、水质及水动力特征的改变^[42, 43]是否会影响以及

如何影响城市湿地温、湿、风环境调节效应的发挥，都值得进一步深入探讨和研究。

本文所选斑块是水体与绿地复合系统，而湿地水植协同降温机制更加复杂^[44]，所以本文中的部分结论与现有单独以城市水体或绿地公园为研究对象得出的降温效应特征结论有所差异。此外，本研究是以武汉城市湿地为样本，所涉及的湿地单体规模差异较大且可能受到区域高水体密度及连通性的影响，因此获得的研究结论不一定适用于其他城市中湿地资源规模较小或气候背景差异较大的地区。

4 结论

(1) 城市湿地对周边地表温度的降温效应存在年际差异，但年际间不同类型湿地之间的降温效应差异保持一定规律性。主要河流(如长江)在降温影响范围和降温强度上优势突出，其次是湖泊湿地和河宽小于 300m 的细小河流，绿地覆盖率较大的城市水景公园在降温影响范围和降温强度上均弱于以水体为主的河湖湿地。湖泊湿地因地处居民区附近，降温效应主要体现在降温梯度上，而水景公园和细小河流在降温面积效率上表现更明显。

(2) 自身属性及周边环境影响共同决定城市湿地降温能力。河流长度、宽度及表层水温与河流降温效应密切相关，而河流外围植被和建设用地占比仅与降温面积效率相关。河流的长度和水温是影响河流湿地降温效应的主导因子。对湖泊湿地及水景公园来说，湿地斑块形状越不规则、边缘范围越大、湿地斑块景观配置中水体占比越高，斑块内温度越低、斑块外建设用地占比越高，湿地斑块降温影响范围越远、强度越大。湖泊湿地及水景公园的降温影响范围主要与其自身规模及景观配置属性相关，而降温强度、梯度及降温面积效率指数则还与湿地外各景观类型显著相关。湿地斑块形状指数、湿地外建筑指数均值、天空开阔度及湿地外建设用地面积占比分别是影响湖泊湿地及水景公园降温影响范围、降温强度、降温效率及降温面积效率的最主导因素。

(3) 气象条件差异是影响城市湿地降温效应变化的重要原因之一。梅雨期降雨偏多或盛夏期气温偏高的年份，武汉城市湿地夏季降温效应更为突出，但对不同降温效应指标和不同湿地类型影响不同。在降温效应指标上，梅雨期降雨偏多或盛夏期气温偏高对降温强度、降温梯度及降温面积效率的影响均强于降温影响距离；在湿地类型上，梅雨期降雨偏多或盛夏期气温偏高对规模较小的细小河流和水景公园效应增加的积极影响大于规模大及景观构成相对均一的主要河流和湖泊湿地。由于与主导风向的位置关系不同，河流湿地的降温效应存在差异，平行的主导风向对河流湿地的降温范围起促进作用，而其它降温效应指标对主导风向关系不明显。

参考文献:

- [1]董鸣. 城市湿地生态系统生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2]蒋卫国, 李京, 陈云浩. 城市湿地与城市热岛效应关系探讨[J]. 上海环境科学, 2007, 26(4):151-155.
- [3]张小全, 谢茜, 曾楠. 基于自然的气候变化解决方案[J]. 气候变化研究进展, 2020:1-11.
- [4]彭小芳, 孙逊, 袁少雄, 等. 广州城市湿地的景观特点及小气候效应[J]. 生态环境, 2008, 17(6):2289-2296.
- [5]朱春阳. 城市湖泊湿地温湿效应——以武汉市为例[J]. 生态学报, 2015(16):5518-5527.
- [6]张伟, 朱玉碧, 陈锋. 城市湿地局地小气候调节效应研究——以杭州西湖为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(4):116-123.

-
- [7]陈欢.生态斑块对城市微气候调节作用的影响研究——以武汉为例[D].湖北工业大学,2019.
- [8]胡颖炫.基于CFD模型的城市湖泊温度效应变化规律研究——以湖南烈士公园湖泊为例[D].中南林业科技大学,2018.
- [9]马妮莎.水体对城市热环境影响的遥感和模拟分析[D].华南理工大学,2016.
- [10]LEE D,OH K,SEO J.An analysis of urban cooling island (UCI) effects by water spaces applying UCI indices[J].International Journal of Environmental Science and Development,2016,7(11):810-815.
- [11]GUPTA N,MATHEW A,KHANDELWAL S.Analysis of cooling effect of water bodies on land surface temperature in nearby region:A case study of Ahmedabad and Chandigarh cities in India[J].The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science,2019,22(1):81-93.
- [12]DU H,SONG X,JIANG H,et al.Research on the cooling island effects of water body:A case study of Shanghai,China[J].Ecological indicators,2016,67:31-38.
- [13]SUN R,CHEN A,CHEN L,et al.Cooling effects of wetlands in an urban region:The case of Beijing[J].Ecological Indicators,2012,20:57-64.
- [14]XUE Z,HOU G,ZHANG Z,et al.Quantifying the cooling-effects of urban and peri-urban wetlands using remote sensing data:Case study of cities of Northeast China[J].Landscape and Urban Planning,2019,182:92-100.
- [15]张伟,蒋锦刚,朱玉碧.杭州典型城市湿地温度效应的季节和类型差异[J].华东师范大学学报(自然科学版),2015(4):123-131.
- [16]杨朝斌,张亨,胡长涛,等.蓝绿空间冷岛效应时空变化及其影响因素——以苏州市为例[J].长江流域资源与环境,2021,30(3):677-688.
- [17]MANTEGHI G,BIN LIMIT H,REMAZ D.Water bodies an urban microclimate:A review[J].Modern Applied Science,2015,9(6).
- [18]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(3):56-63.
- [19]MANTEGHI G.Street' s physical geometry and the cooling effect of waterbody of urban micro-climate in tropical region[D].Universiti Teknologi Malaysia,2016.
- [20]YU Z,YANG G,ZUO S,et al.Critical review on the cooling effect of urban blue-green space:A threshold-size perspective[J].Urban Forestry & Urban Greening,2020,49:126630.
- [21]蒋志祥.水体与周边植被对城市区域热湿气候影响的动态模拟研究[D].哈尔滨工业大学,2012.
- [22]WANG Y S,ZHAN Q M,OUYANG W L.How to quantify the relationship between spatial distribution of urban waterbodies and land surface temperature?[J].Science of the Total Environment,2019,671:1-9.

-
- [23] STEWART I D, OKE T R. Local climate zones for urban temperature studies[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(12):1879-1900.
- [24] 张洪东, 陶颖颖, 魏巍. 关于城市湿地公园概念的讨论[J]. 山西建筑, 2009, 35(33):352-353.
- [25] USGS. Landsat 8 calibration parameter file data format control book[EB/OL]. <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-calibration-parameter-file-data-format-control-book>, 2018.
- [26] 段四波, 茹晨, 李召良, 等. Landsat 卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展[J]. 遥感学报, 2021, 25(8):1591-1617.
- [27] YU X L, GUO X L, WU Z C. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS-comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method[J]. Remote Sensing, 2014, 6(10):9829-9852.
- [28] 纪鹏, 朱春阳, 盛云燕. 不同形状城市湿地对周边环境温湿度的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(10):3385-3392.
- [29] XIE Q J, LI J. Detecting the cool island effect of urban parks in Wuhan: A city on rivers[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(1):132.
- [30] JIANG Z Y, ALFREDO R. HUETE, et al. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(10):3833-3845.
- [31] XU H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(14):4269-4276.
- [32] 张宇, 陈龙乾, 王雨辰, 等. 基于 TM 影像的城市地表湿度对城市热岛效应的调控机理研究[J]. 自然资源学报, 2015, 30(4):629-640.
- [33] 张好, 徐涵秋, 李乐, 等. 成都市热岛效应与城市空间发展关系分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(1):70-78.
- [34] 余玲. 武汉市水陆风场与大气灰霾的关联性研究[D]. 华中科技大学, 2015.
- [35] 岳亚飞, 詹庆明, 王炯. 城市热环境的规划改善策略研究——以武汉市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(2):286-295.
- [36] 冯旭明. 降雨对湿热地区城市微气候影响的基础研究[D]. 华南理工大学, 2020.
- [37] 徐洪, 杨世莉. 城市热岛效应与生态系统的关系及减缓措施[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(6):790-798.
- [38] 卞晴, 赵晓龙, 刘笑冰. 水体景观气候调节性研究进展与展望[J]. 风景园林, 2020, 27(6):88-94.
- [39] SYAFII N I, ICHINOSE M, KUMAKURA E, et al. Thermal environment assessment around bodies of water in urban canyons: A scale model study[J]. Sustainable Cities & Society, 2017, 34:79-89.

[40]STEENEVELD G J, KOOPMANS S, HEUSINKVELD B G, et al. Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 121:92-96.

[41]索南看卓, 任国玉, 贾文茜, 等. 武汉城市相对湿度气候学特征与长期变化趋势[J]. 气候与环境研究, 2018, 23(6):715-724.

[42]AMPATZIDIS P, KERSHAW T. A review of the impact of blue space on the urban microclimate[J]. Science of the Total Environment, 2020, 730:139068.

[43]王青, 严登华, 翁白莎, 等. 流域干旱对淡水湖泊湿地生态系统的影响机制[J]. 湿地科学, 2012, 10(4):396-403.

[44]KELVIN J, ACREMAN M C, HARDING R J, et al. Micro-climate influence on reference evapotranspiration estimates in wetlands[J]. Hydrological Sciences Journal, 2017, 62(3):378-388.