

张晓思, 邵继中, 林润泽, 等. 武汉市极端气温与生态空间景观格局的影响指数及耦合特征[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(4): 64-73.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.04.008

武汉市极端气温与生态空间景观格局的 影响指数及耦合特征

张晓思, 邵继中, 林润泽, 李坤洋, 谭嫣然, 张雪茵

华中农业大学园艺林学学院, 武汉 430070

摘要 为解析气候变化与城市生态空间格局降温效应的变化特征及两者的协调机制, 通过构建指标、函数模型、数理统计等方法对武汉市2000、2010、2020年的极端气温与具有降温效应的城市生态空间格局进行量化分析, 结果显示: 2000、2010、2020年的极端气温综合指数分别为10.752 5、21.888 2和3.257 5, 城市生态空间景观格局综合指数分别为13 032.0、11 834.4和10 0186.5; 与降温效应呈正相关的格局指数: 斑块类型面积、斑块所占景观面积比例、斑块数量、斑块密度、最大斑块占景观面积比例、景观形状指数平均斑块面积、平均分维数、聚集度、结合度、邻近度在2020年数值相对早年偏小, 表明武汉市生态空间的降温效应逐渐被削弱; 2000、2010、2020年极端气温综合指数与城市生态空间格局综合指数的协调程度由中级协调逐降为严重失调, 意味着武汉市生态空间的降温效应对极端气温的缓解作用逐渐降低。

关键词 气候变化; 城市生态空间; 景观格局; 极端气温综合指数; 气候适应

中图分类号 TU986 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)04-0064-10

自1850年以来, 地表温度升高、冰雪大范围融化和海平面上升等现象在全球范围内接连出现, 印证着全球气候系统变暖的事实。气候系统模拟结果显示, 21世纪我国气候还将持续变暖, 极端天气气候事件的发生频率和强度以及地质灾害等均呈增加趋势^[1]。城市生态空间是城市与区域范围内, 除去建设用地之外的所有自然或人工的植物群落、山林水体及具有绿色潜能的空间等系列生态用地, 而气候变化也将最直接显著地影响生态空间的环境, 面对气候变化带来的高温热浪、旱涝等风险时, 城市中的森林、草地、河流、湖泊、湿地等生态空间都将暴露在巨大威胁中。这会进一步加剧城市生态系统的脆弱性, 破坏生态系统服务的功能, 降低城市气候适应能力, 由此形成的脆弱性和暴露度作为反馈再度加剧了气候变化风险。但同时, 城市生态空间具有自然属性, 可以提供生态产品或生态服务功能^[2], 蓝绿设施的维护、自然生态区域的保护对于降低热浪期间的平均气温、缓解极端气温、预防干旱和优化水循环

等方面的功效, 都被视作促进城市气候适应性和降低灾害风险的有效方法^[3]。因此, 城市的生态空间被认为可以在各种尺度下对城市、居住区以及基础设施抵御气候灾害发挥积极作用。生态环境部等17部门联合印发《国家适应气候变化战略2035》, 提出要不断强化自然生态系统和经济社会系统气候韧性, 构建适应气候变化的区域格局^[4], 利用城市生态空间缓解气候灾害风险, 通过基于自然的解决方案适应气候变化成为主流策略^[5], 由此可见, 发挥城市生态空间的自然缓解作用成为城市气候适应的重要举措之一。城市生态空间可以改善局地气候, 进而在城市层面达到缓解极端气候的效果。已有研究发现生态空间不同格局形式对缓解气候的效果具有异质性^[6-7], 不同格局指数的缓解效益存在一定差异, 因此, 研究城市生态空间格局的变化特征及其与气候变化的协调发展机制, 可以为城市生态空间适应气候变化的自然解决方案提供一定研究基础。

目前有关城市生态空间格局缓解气候的研究更

收稿日期: 2022-11-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51878339); 中央高校基本科研业务费专项(11042010016; 2662021JC009); 江苏省社会科学基金一般项目(19GLB006); 江苏省高校哲学社会科学研究重大项目(2019SJZDA020); 住建部国际科技合作项目(H20220018)

张晓思, E-mail: zhangxiaosi@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 邵继中, E-mail: shao.j.z@hotmail.com

多关注生态空间格局在缓解高温、雨洪调蓄方面的作用,主要借助遥感、地理信息系统空间分析^[8]、SWMM模型^[9]等技术手段,通过建立回归模型^[10]分析城市绿地和水体景观斑块结构、空间配置方式^[11]与降温、蓄洪方面的关系:卞子浩等^[12]分析了热岛效应与景观格局的关联性,发现城镇用地和林地的斑块类型面积、破碎度、景观形状、最大斑块占景观面积比和斑块结合度与热岛效应强度均存在联系;李辉等^[13]在研究中发现景观优势度、多样性指数和聚合度指数会影响城市的地表温度;陈天等^[14]在景观格局层面发现地表温度与蓝绿空间的斑块周长指数呈显著负相关,与周长面积比指数呈显著正相关。上述研究多针对特定时段进行相关性分析得到关键格局指数,但却较少在长时间序列中结合城市生态空间格局变化与气候变化特点进行分析,且有关城市人居环境与气候变化协调机制的研究更多关注于

城市化、人口规模^[15]、空间扩张、经济发展^[16]等城市系统的协调发展,着眼于城市生态空间演化与气候变化协调发展的研究较少。本研究将城市生态空间与高温气候建立联系(图1),即高温气候直接影响城市局地气候,城市生态空间则在一定程度上缓解局地高温气候,表现为城市对高温的适应状态,然而,城市化发展也会加剧高温气候,同时对城市生态空间的分布格局产生影响,进而导致其对局地高温的缓解效果产生变化。因此,我们通过文献分析提出与降温效应具有相关性的景观格局指数,并综合测算武汉市生态空间景观格局指数与极端气温综合指数,得到气候变化与城市生态空间格局变化的年际演化特征,参考前人在城镇化^[17]、经济发展^[18]、人类活动^[19]与生态环境的耦合协调关系的分析方法,利用耦合协调程度测算方法分析两者协调发展状态,进而讨论城市生态空间格局的优化策略。

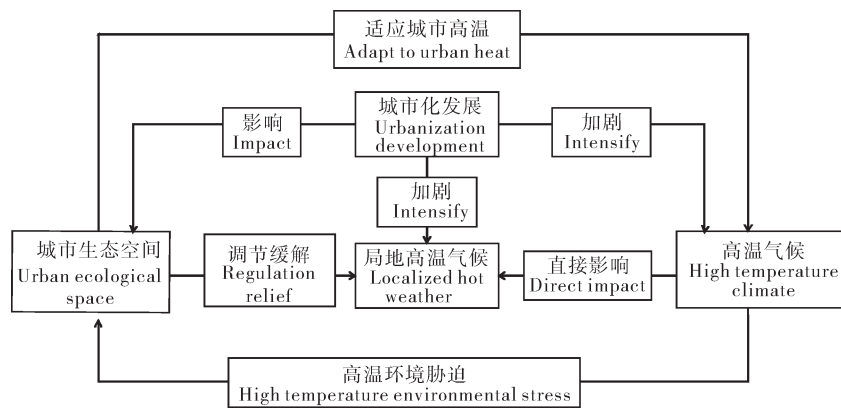


图1 城市生态空间与高温气候的联系

Fig.1 Linkage between urban ecological space and high temperature climate

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取武汉市森林、草地、湿地、湖泊4类生态空间作为研究对象,武汉市地处江汉平原东部,为千湖之市,拥有丰富的绿地、湖泊、湿地等城市生态空间^[20-21]。基于Landsat-8卫星遥感影像数据集,通过ENVI 5.3进行监督分类,提取武汉市全域森林、草地、湿地、湖泊4类生态用地覆盖的地理空间数据,通过美国国家海洋和大气管理局网站(NOAA)获取武汉市气象数据资料,基于数据的可获取性及武汉市城市发展特征,选择2000、2010、2020年作为研究的时间范围,在此期间城市社会经济建设不断加快并取得显著成效,随之而来的是武汉市生态空间格局变化明显,同时全球范围内气候变化加剧,极端天气事件强

度增加,数据变化的显著性便于量化和分析武汉市生态空间变化特征与气候变化特点。

1.2 指标构建与数据来源

1)气候变化组成要素与衡量标准。气候变化检测和指数专家组(Expert Team on Climate Change Detection and Index, ETCCDI)定义的极端气候指数^[22]中,16项为极端气温指标,11项为极端降水指标,这些极端气候指标从气候变化的频率、强度、持续时间3方面反映极端温度和极端降水气候事件^[23-24],考虑到温度是影响自然生态格局最直接的属性^[25],以及目前气象开源数据的可获取性,本研究在27项极端气候指数指标中选取12个极端气温指标作为衡量极端气温综合指数的测算指标,相关气象指标如表1。

表1 极端气温指数指标

Table 1 Extreme climate index indicators

极端气温指数 Extreme weather index	定义 Definition
夏日持续 时间/d SU	年内日最高气温>25℃的时间 Number of days with daily maximum temperature > 25℃ during the year
霜冻持续 时间/d FD	年内日最低气温<0℃的时间 Number of days with daily minimum temperature < 0℃ during the year
冷夜/% TN10p	最低气温<10%分位值的时间百分比 Percentage of days with minimum temperatures < 10% quantile
冷昼/% TX10p	最高气温<10%分位值的时间百分比 Percentage of days with maximum temperature < 10% quantile
暖夜/% TN90p	最低气温>90%分位值的时长百分比 Percentage of days with minimum temperatures > 90% interquartile
暖昼/% TX90p	最高气温>90%分位值的时间百分比 Percentage of days with maximum temperature > 90% interquartile
年最大日最高 气温/℃ TXx	年内日最高气温的最大值 Maximum daily maximum temperature during the year
年最大日最低 气温/℃ TNx	年内日最低气温的最大值 Maximum daily minimum temperature during the year
年最小日最高 气温/℃ TXn	年内日最高气温的最小值 Minimum daily maximum temperature during the year
年最小日最低 气温/℃ TNn	年内日最低气温的最小值 Minimum daily minimum temperature during the year
持续暖日 时间/d WSDI	连续6d最高气温>90%分位值的时间 Number of days with maximum temperature > 90% interquartile for 6 consecutive days
持续冷日 时间/d CSDI	连续6d最低气温<10%分位值的时间 Number of days with minimum temperature < 10% interquartile for 6 consecutive days

2)城市生态空间格局指数。本研究的城市生态空间包括森林、草地、湿地、湖泊4类,空间格局指数作为空间分布与形态信息的高度概括,通过对每一类生态空间进行格局指数的计算反映空间结构组成、空间配置特征的量化指标^[26]。本研究从形态、分布、数量及质量等格局要素研究城市生态空间格局的演化特征,选取斑块类型面积(class area, CA)、斑块所占景观面积比例(percentage of landscape, PLAND)、斑块数量(number of patches, NP)、斑块密度(patch density, PD)、最大斑块占景观面积比例(largest patch index, LPI)、景观形状指数(landscape shape index, LSI)、平均斑块面积(mean patch area, AREA_MN)、平均分维数(mean fractal dimension,

FRAC_MN)、聚集度指数(aggregation index, AI)、结合度指数(patch cohesion index, COHESION)、邻近度指数(contiguity index, CONTIG)11个指标(表2)对景观斑块整体的大小、数量与紧凑性方面进行量化分析。

3)数据来源与处理。本研究中武汉市生态空间土地覆盖数据来源于Landsat-8卫星遥感影像,采用ENVI5.3进行最大似然法监督分类,提取武汉市全域2000、2010、2020年森林、草地、湿地、湖泊4类生态空间土地覆盖空间信息数据,数据格式为Geo-TIFF图像,数据坐标为AEA_WGS_1984,空间分辨率为30 m,通过Fragstats4.2.1软件计算景观层面的空间格局指数。武汉市气象数据资料来源于美国国家海洋和大气管理局网站(NOAA),武汉市气象站点编码为57494099999,气象站名为TIANHE, CH,从中选取武汉市气象站点日值气温数据,导入RClimDex 1.0极端气候指数计算软件测算2000、2010、2020年13个极端气温指数数值,最终通过SPSS Statistics 26软件对武汉市生态空间格局指数与极端气温指数数据进行处理与分析。

1.3 采用综合指数方法测算武汉市极端气温指数和生态空间格局指数

1)熵权法权重计算。采用熵权法对各项指标赋予综合权重,通过数学模型与函数公式对次级指标进行量化,各指标在综合评价中可用熵值反映的指标信息效用价值来确定权重,它给出的指标权值具有较高的可信度。

第1步,建立决策矩阵。决策矩阵中 $X_{i,j}$ 表示对象集相对于指标集的原始样本数据值,即第*i*个对象在第*j*个指标的实测值,其中 $i=1,2,\dots,m;j=1,2,\dots,n$,则决策矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \cdots & X_{1,n} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \cdots & X_{2,n} \\ X_{3,1} & X_{3,2} & \cdots & X_{3,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i,1} & X_{i,2} & \cdots & X_{i,j} \end{bmatrix}$$

第2步,数据归一化。本研究所选取的评价指标分为正向相关和负向相关2类,由于各个评价指标的度量方式不同,无法直接进行比较。为了更加科学地衡量评价因子的适宜性程度,根据实际决策中评价正向指标越大越优,负向指标越小越优的原则,对决策矩阵做归一化处理,区分指标的优劣。

表2 景观格局指数及公式
Table 2 Landscape pattern index and formula

景观格局指数 Landscape pattern index	计算公式 Calculation formula	参数说明 Parameter description	与降温效应的关系 Relationship with cooling effect
斑块面积 CA	A	斑块总面积, 或者某一类型景观斑块总面积 Total area of patches, or total area of patches of a particular landscape type	正相关 Positive correlation
斑块所占景观面积比例 PLAND	$\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \times 100$	各种类型地类占总面积的比例 Proportion of various types of land to total area	正相关 Positive correlation
斑块数量 NP	N	斑块数量总量 Total number of plaques	正相关 Positive correlation
斑块密度 PD	$\frac{n_i}{A} \times 10000 \times 100$	n_i 类型 i 的斑块数量, A 是景观总面积 n_i is the number of patches of type i , and A is the total landscape area	负相关 Negative correlation
最大斑块占比 LPI	$\frac{[\max_{j=1}^n a_{ij}]}{A} \times 100$	a_{ij} 是第 i 类景观中第 j 个斑块的面积, A 是景观总面积 a_{ij} is the area of the j patch in the landscape of class i , A is the total area of the landscape	正相关 Positive correlation
景观形状指数 LSI	$\frac{e}{4\sqrt{a}}$	e 是斑块栅格边界数量与栅格单元边长之积, a 是栅格个数与栅格单元空间分辨率之积 e is the product of the number of patch raster boundaries and the raster cell edge length, and a is the product of the number of raster cells and the spatial resolution of the raster cells.	正相关 Positive correlation
平均斑块面积 AREA_MN	$\frac{A}{N}$	A 是斑块总面积, N 是斑块总数量 A is the total area of patches, N is the total number of patches	正相关 Positive correlation
平均分维数 FRAC_MN	$\frac{2}{\frac{n_{ij} \sum_{j=1}^n (\ln p_{ij} - \ln a_{ij})}{\left(n_i \sum_{j=1}^n \ln p_{ij}^2 \right) - \left(\sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \right)^2} - \left[\frac{\sum_{j=1}^n p_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \right]}$	A_{ij} 为斑块 ij 的面积, p_{ij} 为斑块 ij 的周长, n_i 为斑块数目 A_{ij} is the area of plaque ij , p_{ij} is the perimeter of plaque ij , n_i is the number of plaques	正相关 Positive correlation
聚集度指数 AI	$\left[\frac{g_{ij}}{\max \rightarrow g_{ij}} \right] \times 100$	g_{ij} 为相应景观类型的相似邻接斑块数量 g_{ij} is number of similar neighboring patches of the corresponding landscape type	正相关 Positive correlation
结合度指数 COHESION	$\left[1 - \frac{\sum_{j=1}^m p_{ij}}{\sum_{j=1}^m p_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right] \left[1 - \frac{1}{\sqrt{A}} \right]^{-1} \times 100$	a_{ij} 指第 i 类景观中第 j 个斑块的面积, p_{ij} 代表第 i 类景观中第 j 个斑块的周长, A 为该景观的总面积 a_{ij} refers to the area of the j patch in the landscape of class i , p_{ij} represents the perimeter of the j patch in the landscape of class i , and A is the total area of the landscape	正相关 Positive correlation
邻近度指数 CONTIG	$\left[\frac{\sum_{r=1}^z c_{ijr}}{a_{ij}^*} \right] - 1$	C_{ijr} 是斑块 ij 中的像素 r 的连续性值, v 是3乘3的单元格中的数值之和, a_{ij} 是以单元数计算的斑块面积 C_{ijr} is the continuity value of pixel r in patch ij , v is the sum of values in a 3 by 3 cell, and a_{ij} is the area of the patch in terms of number of cells	正相关 Positive correlation

$$Y_{ij'} = \begin{cases} \frac{X_{ij} - \min X_{1j} \dots X_{nj}}{\max X_{1j} \dots X_{nj} - \min X_{1j} \dots X_{nj}} \\ \frac{\max X_{1j} \dots X_{nj} - X_{ij}}{\max X_{1j} \dots X_{nj} - \min X_{1j} \dots X_{nj}} \end{cases}$$

个对象的第 j 个评价指标项指标数值, n 为研究对象的个数, m 为适宜性评价因子的数量。

第3步, 确定权重。计算方式如下, 若 $P_{ij} = 0$,

则 $\lim_{P_{ij} \rightarrow 0} P_{ij} \ln P_{ij} = 0$ 。

式中, $Y_{ij'}$ 为转化后指标的隶属度值; X_{ij} 为第 i

$$E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij}$$

$$P_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^n Y_{ij}$$

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n 1 - E_j}$$

2)综合指数测算。针对极端气候综合指数,结合熵权法权重计算,赋予12项极端气候指标权重,可得到极端气候综合指数,公式如下:

$$U_C = \sum_{j=1}^n (W_j \times \alpha_j), j=1, 2, \dots, n$$

式中, U_C 为极端气候综合指数得分, α_j 为极端气温指数各个指标, W_j 为对应指标权重。

针对城市生态空间格局综合指数,结合熵权法权重计算,赋予11类空间格局指标权重,可得到生态空间格局综合指数,公式如下:

$$U_N = \sum_{j=1}^n (W_j \times \beta_j), j=1, 2, \dots, n$$

式中, U_N 为生态空间格局综合指数得分, β_j 为空间格局指标, W_j 为对应指标权重。

1.4 耦合协调度模型构建

在耦合协调度模型^[27]的基础上,构建城市极端气温与城市生态空间格局的协调度测算模型。

将物理学中耦合概念推广到多个系统的耦合度模型如下:

$$C = 2 \left\{ \frac{u_1 \cdot u_2}{(u_1 + u_2)^2} \right\}^{1/2}$$

式中, $u_i (i=1, 2, 3 \dots n)$ 是各子系统评价值。本研究主要讨论 $n=2$ 时的情况,令 u_1 、 u_2 分别为极端气温综合指数、城市生态空间格局综合指数。其中, $C \in [0, 1]$, C 值越接近于1表示三者之间的关联程度越大,反之关联程度越小,当 $C=0$ 时,三者之间则处于无关状态。

耦合度仅仅反映了极端气温指数、城市生态空间格局指数两者之间的作用强度,并不能全面反映2个系统的整体功能或协调发展水平。为此,本研究引入耦合协调度模型,其计算公式为 $D = \sqrt{C \times T}$, $T = \alpha u_1 + \beta u_2$,式中, T 为极端气温综合指数、城市生态空间格局综合指数评价值; α 、 β 为待定系数。本研究将极端气温、城市生态空间格局的协调度分为10个等级(表3)。

表3 耦合协调度等级划分标准
Table 3 Classification criteria of coupling coordination level

耦合协调度D值区间 Coupling coordination degree D value interval	协调等级 Coordination level	耦合协调程度 Degree of coupling coordination
(0.0~0.1)	1	极度失调 Extreme disorder
[0.1~0.2)	2	严重失调 Severe disorder
[0.2~0.3)	3	中度失调 Moderate disorder
[0.3~0.4)	4	轻度失调 Mild disorder
[0.4~0.5)	5	濒临失调 Nearly dysfunctional
[0.5~0.6)	6	勉强协调 Barely coordinated
[0.6~0.7)	7	初级协调 Primary coordination
[0.7~0.8)	8	中级协调 Intermediate coordination
[0.8~0.9)	9	良好协调 Good coordination
[0.9~1.0)	10	优质协调 High quality coordination

2 结果与分析

2.1 极端气温指数

基于2000、2010、2020年的武汉市地面站点的气象数据以及相应年份的武汉市土地覆盖地理空间信息数据,结合极端气温指数指标与权重,得到武汉市2000、2010、2020年间极端气温综合指数(表4)。在极端气温指数计算过程中,CSDI(持续冷日时间数)、TNn(年最小日最低气温)、TN90p(暖夜)3类指数指标权重较高,其数值对最终结果的影响较大。SU(夏日持续时间)、TXx(年最大日最高气温)、TNx(年最大日最高低温)3类指标权重几乎为零,其数值基本不影响最终结果。比较各年份结果,2010年极端气温综合指数数值最高,为2000年数值的6.72倍以及2020年数值的2.04倍,这意味着2010年武汉市遭受更频繁的极端气温事件,这与当年全球气候变化趋势相吻合:2010年是各种极端天气和气候事件在世界各地频发的一年,也是我国近13年来极端天气气候事件发生频率、强度及影响最大的年份^[28]。2000年极端气温指数较低,2020年极端气温指数虽低于2010年但仍处于较高水平,这一结果与世界气象组织(WMO)全球气候2001—2010报告^[29]、2020年全

表4 极端气温指数计算结果

Table 4 Calculation results of extreme temperature index

气温指数 Climate index	熵值 Entropy value	效用值 Utility value	权重 Weights	2020年气温指数 Climate index of 2020	2010年气温指数 Climate index of 2010	2000年气温指数 Climate index of 2000
SU	0.999 4	0.000 6	0.03	0.047 1	0.043 2	0.045 9
FD	0.921 4	0.078 6	3.61	0.722 0	1.624 5	0.685 9
TN10p	0.905 3	0.094 7	4.34	0.451 8	0.998 8	0.356 7
TX10p	0.696 1	0.303 9	13.94	0.993 0	1.718 6	0.544 1
TN90p	0.610 4	0.389 6	17.87	2.643 8	1.664 6	0.000 0
TX90p	0.981 3	0.018 7	0.86	0.143 7	0.186 1	0.113 1
TXx	0.999 8	0.000 2	0.01	0.003 9	0.004 0	0.003 8
TNx	0.999 8	0.000 2	0.01	0.003 1	0.003 0	0.098 6
TX	0.920 0	0.080 0	3.67	0.073 4	0.025 7	0.073 4
TNn	0.597 2	0.402 8	18.48	1.570 8	1.201 2	0.868 6
WSDI	0.830 1	0.169 9	7.79	2.337 0	2.960 2	0.467 4
CSD	0.359 5	0.640 5	29.38	1.76 8	11.458 2	0.000 0
CSDI	极端气温综合指数 Extreme temperature composite index			10.752 5	21.888 2	3.257 5

球气候状况报告^[30]中提到全球气候变暖趋势相对应。

2.2 城市生态空间格局指数

根据武汉市土地覆盖空间信息数据可得到2000、2010、2020年的各类土地覆盖的面积(表5),通过Fragstats4.2.1软件进行景观格局指数的测算。武汉市生态空间格局指数测算结果(表6)表明,2000年的LPI、CA、PLAND指数权重相对较大,FRAC_MN、AI、COHESION指标的权重近乎为零;2010年的LPI依旧为权重最大的指标,而AREA_MN由于数据波动较大导致其信息熵增大、权重增大,相较于2000年该指标成为衡量2010年空间格局指数的重要指标;2020年的AREA_MN指标权重最大,LPI次之。可见LPI(最大斑块占比指数)在2000—2020年一直是较为重要的指标,AREA_MN(平均斑块面积)在近20年间的波动值不断增大,逐渐在空间格局指数中成为重要指标。比较2000、2010、2020年间4类景观类型的指数结果,森林、湖泊2类空间格局综合指数一直相对较高,这与武汉市拥有远郊区森林

保护地与众多湖泊的自然资源特点有关。

对2000、2010、2020年的城市生态空间格局综合指数进行比较可以看出,2010年相对于2000年的综合指数明显下降,2020年相对于2010年的综合数值略微上升,整体来看武汉市生态空间格局综合指数呈现出下降的特点,表明生态空间分布格局的降温效应在整体上存在一定的削弱,可见在城市建设的影响下生态空间逐渐被侵蚀破坏,从而降低了生态空间的降温效果。进一步分析11类景观格局指数,CA、PLAND、LPI测度指数在2020年的数值达到最大;NP、LSI测度指数在2010年的数值达到最大,而2000、2020年的数值均偏低;PD、COHESION测度指数数值在2010年最小,2000、2020年的数值相对偏大;AREA_MN在2020年的测度指数数值最大,2000、2010年的数值偏低且相差较小,AI测度指数与之相反,2000年的数值最大,而后的2010、2020年数值偏低且相差较小;CONTIG_MN测度指数在2000年的数值最小,之后2010、2020年的数值均偏大且近乎相同。

表5 2000、2010、2020年各类用地面积

Table 5 Area for each type of land during 2000, 2010, 2020

年份 Year	耕地 Cropland	森林 Forest	草地 Grassland	湿地 Wetlands	湖泊 Lakes	人造地表 Artificial ground	裸地 Bare ground
2000	6 050 385	1 612 843	273 746	164 991	1 769 048	756 773	8 117
2010	6 463 234	1 271 368	355 075	149 683	1 583 343	800 662	12 538
2020	5 961 452	1 049 981	277 137	45 956	1 385 609	1 901 231	11 258

表6 2000、2010、2020年生态空间格局指数测算结果

Table 6 Results of ecological spatial pattern index measurement 2000, 2010, 2020

景观格局指数 Landscape pattern index	年份 Year	熵值 Entropy value	效用值 Utility value	权重 Weights	森林 Forest	草地 Grassland	湿地 Wetlands	湖泊 Lakes
CA	2000	0.646	0.353	0.154	20 124.6	3 424.4	2 068.1	22 130.9
	2010	0.626	0.373	0.152	15 568.5	4 337.8	1 840.8	19 318.9
	2020	0.643	0.356	0.163	13 847.3	3 663.6	609.1	18 346.9
PLAND	2000	0.646	0.353	0.154	2.344	0.426	0.265	2.523
	2010	0.626	0.373	0.152	1.813	0.512	0.232	2.256
	2020	0.643	0.356	0.163	1.613	0.467	0.070	2.137
NP	2000	0.760	0.239	0.104	2 314.51	1 309.47	29.97	689.06
	2010	0.678	0.321	0.131	3 725.847	2 107.26	22.07	375.14
	2020	0.713	0.286	0.131	2 074.66	1613.36	44.54	96.21
PD	2000	0.760	0.239	0.104	-0.269	-0.152	-0.003	-0.080
	2010	0.678	0.321	0.131	-0.434	-0.245	-0.002	-0.043
	2020	0.713	0.286	0.131	-0.241	-0.187	-0.005	-0.011
LPI	2000	0.463	0.536	0.234	0.602	0.014 9	0.057	0.743
	2010	0.446	0.553	0.226	0.620	0.030	0.064	0.532
	2020	0.639	0.360	0.165	0.406	0.024	0.022	0.645
LSI	2000	0.926	0.073	0.032	5.838	4.666	1.214	2.782
	2010	0.895	0.104	0.042	7.316	7.001	0.986	2.599
	2020	0.906	0.093	0.043	5.551	5.587	0.882	1.768
AREA_MN	2000	0.554	0.446	0.195	1.149	0.345	9.118	4.244
	2010	0.655	0.344	0.140	0.505	0.249	10.089	6.230
	2020	0.614	0.385	0.176	0.950	0.323	1.946	27.142
FRAC_MN	2000	0.999	0.0001	0	0	0	0	0
	2010	0.999	0.0001	0	0	0	0	0
	2020	1.000	0	0	0	0	0	0
AI	2000	0.993	0.007	0.003	0.263	0.219	0.280	0.288
	2010	0.995	0.004	0.002	0.167	0.141	0.187	0.189
	2020	0.995	0.004	0.002	0.173	0.148	0.180	0.192
CONTIG	2000	0.965	0.035	0.015	0.004	0.003	0.008	0.007
	2010	0.952	0.048	0.019	0.004	0.005	0.011	0.010
	2020	0.955	0.044	0.020	0.005	0.005	0.007	0.013
COHESION	2000	0.999	0.001	0.000 4	0.039	0.037	0.039	0.039
	2010	0.955	0.044	0.021	0.005	0.005	0.007	0.013
	2020	0.999	0.000 8	0.000 4	0.039 42	0.037	0.038	0.039
生态空间分类景观格局指数 Ecological spatial classification landscape pattern index			2000年		22 449.10	4 739.480	2 109.030	22 830.1
			2010年		1 904.43	6 452.804	1 874.490	19 705.9
			2020年		15 930.50	5 283.330	656.818	18 475.1
生态空间景观格局综合指数 Composite index of ecological spatial landscape patterns			2000年			13 032.0		
			2010年			11 834.4		
			2020年			10 086.5		

2.3 极端气温综合指数与城市生态空间格局综合指数协调程度分析

基于极端气温综合指数、生态空间格局综合指

数以及耦合协调度的计算公式,依据协调程度等级划分标准,得到极端气候综合指数与城市生态空间格局综合指数协调程度等级(表7)。结果显示,

2000、2010、2020年极端气温综合指数与城市生态空间格局综合指数协调程度由中级协调逐降为严重失调,结果表明,武汉市生态空间产生的降温效应对极端气温变化的缓解作用逐渐降低,20年来

武汉市经历了城镇化协调发展阶段、城镇化高质量发展阶段,在城镇发展与城市扩张等人为干预影响下,城市生态空间应对极端气温的能力逐渐被削弱。

表7 极端气温综合指数与城市生态空间格局综合指数协调度计算结果

Table 7 Results of calculation of the coordination degree of the comprehensive index of extreme climate and the comprehensive index of urban ecological and spatial pattern

年份 Year	耦合度C值 Coupling degree C-value	协调指数T值 Coordination index T-value	耦合协调度D值 Coupling coordination D-value	协调等级 Coordination level	耦合协调程度 Degree of coupling coordination
2000	0.907	0.697	0.795	8	中级协调 Intermediate coordination
2010	0.199	0.5	0.315	4	轻度失调 Mild disorder
2020	0.863	0.02	0.132	2	严重失调 Severe disorder

3 讨论

本研究结果表明,2000、2010、2020年极端气温指数与生态空间格局综合指数的耦合协调程度由中级协调逐降为严重失调,表明武汉市生态空间产生的降温效应对极端气温变化的缓解作用逐渐降低。近20年来武汉市社会经济高速发展,城镇人口快速增加,土地利用开发强度越来越大,原有的水域与森林绿地逐渐被建设用地替代,城市生态空间的降温作用逐渐被削弱,同时全球性气候变化导致的极端气温对生态、经济、社会都会带来一定程度的影响,因此,需要针对性地对生态空间格局加以调控,从而协调生态空间对极端气温的适应能力。武汉市生态空间主要表现为覆盖面积逐渐萎缩,景观斑块之间的聚集程度降低,并呈现出一定程度的破碎化,基于此,本研究从提高覆盖度、提高连接度、降低破碎度3个方面对城市生态空间的保护与提升提出以下可行的策略。第一,在城镇发展区内需要加强绿色基础设施的建设,适当增加口袋公园、滨湖绿地、滨江公园等城市绿地,加强现有城市绿地生态环境保护,努力维护并扩大生态空间斑块面积。第二,加强城市内绿色生态廊道建设,连通城市内分散的绿地形成节点与廊道串联的网络格局,并在立面上形成城市立体绿地系统。第三,对城市生态空间小节点进行优化,将破碎的生态小节点之间进行连通,将生态空间内部打通形成节点相互连接的组团,从整体上有效改善武汉市生态空间格局破碎化与景观生态功能不稳定的现状。

本研究基于武汉市2000、2010、2020年的气象数

据与土地覆盖数据,通过定量分析、数理统计方法得到武汉市极端气温指数、城市生态空间格局指数及二者协调度,结果表明,二者之间的协调度逐渐降低,但由于本研究仅探讨2000、2010、2020年的变化特征,在数据的充分度上有所缺乏,依据较长的时间跨度分析波动性变化的气候演化特征会导致结果较为粗糙,因此将时间精度调至逐年才能够使结论更可靠。

参考文献 References

- [1] 中国科学院学部.关于气候变化对我国的影响与防灾对策建议[J].中国科学院院刊,2008,23(3):229-234. The Chinese Academy of Sciences Department. The impact of climate change on China and suggestions for disaster prevention [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2008, 23 (3) : 229-234 (in Chinese).
- [2] TESSLER Z D, VÖRÖSMARTY C J, GROSSBERG M, et al. Profiling risk and sustainability in coastal deltas of the world [J]. Science, 2015, 349(6248): 638-643.
- [3] ANDERSSON E, LANGEMEYER J, BORGSTRÖM S, et al. Enabling green and blue infrastructure to improve contributions to human well-being and equity in urban systems [J]. BioScience, 2019, 69(7): 566-574.
- [4] 周泽宇,曹颖.《国家适应气候变化战略2035》解析与思考[J].环境保护,2022,50(15):42-46. ZHOU Z Y, CAO Y. Analysis and reflection on national strategy for climate change adaptation 2035 [J]. Environmental protection, 2022, 50 (15) : 42-46 (in Chinese).
- [5] 王夏晖,刘桂环,华妍妍,等.基于自然的解决方案:推动气候变化应对与生物多样性保护协同增效[J].环境保护,2022,50(8):24-27. WANG X H, LIU G H, HUA Y Y, et al. Nature-based solutions: promote synergies between climate

- change response and biodiversity conservation[J]. Environmental protection, 2022, 50(8): 24-27 (in Chinese).
- [6] 姜允芳, 黄静. 蓝绿景观结构对城市热岛的减缓效应定量分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 2060-2072. JIANG Y F, HUANG J. Quantitative analysis of mitigation effect of urban blue-green spaces on urban heat island [J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(9): 2060-2072 (in Chinese with English abstract).
- [7] 禹佳宁, 周燕, 王雪原, 等. 城市蓝绿景观格局对雨洪调蓄功能的影响[J]. 风景园林, 2021, 28(9): 63-67. YU J N, ZHOU Y, WANG X Y, et al. Influence of urban blue-green landscape pattern on rainfall-flood regulation and storage function [J]. Landscape architecture, 2021, 28(9): 63-67 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王蕾, 贾佳, 路遥, 等. 长春市绿地空间配置特征与降温效率的动态响应[J]. 中国园林, 2022, 38(7): 44-49. WANG L, JIA J, LU Y, et al. Dynamic response of green space configuration and cooling efficiency in Changchun City [J]. Chinese landscape architecture, 2022, 38(7): 44-49 (in Chinese with English abstract).
- [9] 刘永, 刘晖. 中小尺度下绿地格局的径流控制分析[J]. 中国城市林业, 2022, 20(5): 69-76. LIU Y, LIU H. Surface runoff control by green space pattern at medium and small scales [J]. Journal of Chinese urban forestry, 2022, 20(5): 69-76 (in Chinese with English abstract).
- [10] 樊柏青, 刘东云, 李丹宁, 等. 北京市六环内区域城市绿地对地表温度降温效益的差异性[J]. 中国城市林业, 2022, 20(4): 43-50. FAN B Q, LIU D Y, LI D N, et al. Differences in land surface temperature cooling effect of urban green space within the sixth ring road of Beijing [J]. Journal of Chinese urban forestry, 2022, 20(4): 43-50 (in Chinese with English abstract).
- [11] WU Z F, CHEN L D. Optimizing the spatial arrangement of trees in residential neighborhoods for better cooling effects: integrating modeling with *in situ* measurements [J]. Landscape and urban planning, 2017, 167: 463-472.
- [12] 卞子浩, 马超群, 王迪, 等. 西安地区热岛效应与景观生态格局相关性研究[J]. 干旱气象, 2016, 34(2): 342-348. BIAN Z H, MA C Q, WANG D, et al. Relation between the urban heat island effect and landscape ecological pattern in Xi'an Region [J]. Journal of arid meteorology, 2016, 34(2): 342-348 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李辉, 王福海, 李斌, 等. 大型江心岛景观格局和地表特征参数时空变化及响应: 以广阳岛为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 308-315. LI H, WANG F H, LI B, et al. Spatial and temporal variation and response of landscape pattern and land surface characteristic parameters in large river island: taking Guangyang Island as an example [J]. Research of soil and water conservation, 2021, 28(3): 308-315, 3 (in Chinese with English abstract).
- [14] 陈天, 谭凝. 基于Landsat数据的蓝绿空间改善城市热环境分析: 以天津市为例[J]. 南方建筑, 2022(3): 19-27. CHEN T, TAN N. Analysis of urban thermal environment improved by blue and green space on the landsat data: a case study on Tianjin [J]. South architecture, 2022(3): 19-27 (in Chinese with English abstract).
- [15] 何咪, 何萍, 赵琳. 昆明城市化与局地气候的耦合关系研究[J]. 云南地理环境研究, 2022, 34(3): 41-50. HE M, HE P, ZHAO L. Study on the coupling relationship between urbanization and local climate in Kunming [J]. Yunnan geographic environment research, 2022, 34(3): 41-50 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张莉, 孙剑. 城市系统和气候变化耦合关系分析: 以南京市为例[J]. 环境工程, 2015, 33(6): 71-75. ZHANG L, SUN J. The analysis of the coupling relationship between the urban system and climate change: taking Nanjing as an example [J]. Environmental engineering, 2015, 33(6): 71-75 (in Chinese with English abstract).
- [17] DING L, CHEN K L, CHENG S G, et al. Water ecological carrying capacity of urban lakes in the context of rapid urbanization: a case study of East Lake in Wuhan [J]. Physics and chemistry of the earth, parts A/B/C, 2015, 89/90: 104-113.
- [18] CHEN K L, WANG X, LI D, et al. Driving force of the morphological change of the urban lake ecosystem: a case study of Wuhan, 1990-2013 [J]. Ecological modelling, 2015, 318: 204-209.
- [19] 程根根, 吴雷云, 张培林. 多源数据支持下的南昌市城市发展与生态耦合关系分析[J]. 测绘地理信息, 2023, 48(2): 107-112. CHENG P G, WU L Y, ZHANG P L. Research on the coupling relationship between urbanization and ecological environment of Nanchang city based on multi-source data [J]. Journal of geomatics, 2023, 48(2): 107-112 (in Chinese with English abstract).
- [20] 赵胡兰, 杨兆萍, 韩芳, 等. 新疆旅游产业—经济发展—生态环境耦合态势分析及预测[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 1146-1154. ZHAO H L, YANG Z P, HAN F, et al. Analysis and forecast of coupling situation among tourism industry-economic development-ecological environment in Xinjiang [J]. Arid land geography, 2020, 43(4): 1146-1154 (in Chinese with English abstract).
- [21] 郭琛, 何贞铭, 刘华东. 黄河流域生态系统服务与人类活动强度耦合协调的时空动态及影响因素[J]. 中国农村水利水电, 2023(4): 82-89. GUO C, HE Z M, LIU H D. Spatial and temporal dynamics and influencing factors of the coupling coordination between ecosystem services and human activity intensity in the Yellow River Basin [J]. China rural water and hydro-power, 2023(4): 82-89 (in Chinese with English abstract).
- [22] MONDAL S K, HUANG J L, WANG Y J, et al. Changes in extreme precipitation across South Asia for each 0.5 °C of warming from 1.5 °C to 3.0 °C above pre-industrial levels [J/OL]. Atmospheric research, 2022, 266: 105961 [2022-11-11]. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105961>.

- [23] LEMUS-CANOVAS M.Changes in compound monthly precipitation and temperature extremes and their relationship with teleconnection patterns in the Mediterranean [J/OL]. *Journal of hydrology*, 2022, 608: 127580 [2022-11-11]. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127580>.
- [24] MORFOPOULOS C, MÜLLER J F, STAVRAKOU T, et al. Vegetation responses to climate extremes recorded by remotely sensed atmospheric formaldehyde[J]. *Global change biology*, 2022, 28(5): 1809-1822.
- [25] 李响, 钱敏蕾, 徐艺扬, 等. 基于区域气候与城市发展耦合模型的气候变化适应度评价: 以上海市为例[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2015, 54(2): 210-219. LI X, QIAN M L, XU Y Y, et al. Adaptability assessment of climate change based on regional climate system and urban growth coupling model: a case study of Shanghai[J]. *Journal of Fudan University (natural science)*, 2015, 54(2): 210-219 (in Chinese with English abstract).
- [26] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2007. WU J G. *Landscape ecology* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2007 (in Chinese).
- [27] 王良虎, 王钊, 马雅恬. 人口年龄结构、消费结构与产业结构协调发展研究: 基于系统耦合协调度模型测度[J]. *重庆工商大学学报(社会科学版)*, 2023, 40(3): 34-45. WANG L H, WANG Z, MA Y T. Research on the coordinated development of population age structure, consumption structure, and industrial structure: model measurement based on system coupling coordination degree[J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (social science edition)*, 2023, 40(3): 34-45 (in Chinese with English abstract).
- [28] 李崇银, 杨辉, 赵晶晶. 大气环流系统组合性异常与极端天气气候事件发生[J]. *大气科学学报*, 2019, 42(3): 321-333. LI C Y, YANG H, ZHAO J J. Combinational anomalies of atmospheric circulation system and occurrences of extreme weather/climate events[J]. *Transactions of atmospheric sciences*, 2019, 42(3): 321-333 (in Chinese with English abstract).
- [29] 潘博煌. 2021年全球气候状况继续恶化[J]. *生态经济*, 2022, 38(2): 1-4. PAN B H. The global climate situation will continue to deteriorate in 2021[J]. *Ecological economy*, 2022, 38(2): 1-4 (in Chinese).
- [30] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 全球变暖在5个圈层的证据[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(6): 753-754. ZHAO Z C, LUO Y, HUANG J B. Evidences of global warming in five spheres[J]. *Climate change research*, 2021, 17(6): 753-754 (in Chinese).

Influencing indexes and coupling characteristics of extreme temperature and ecological spatial pattern of landscape in Wuhan

ZHANG Xiaosi, SHAO Jizhong, LIN Runze, LI Kunyang, TAN Yanran, ZHANG Xueyin

College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract Quantitative analyses were conducted on the extreme temperatures and urban ecological spatial patterns with cooling effects in Wuhan in 2000, 2010, and 2020 by constructing indexes, functional models, and mathematical statistics to analyze the evolutionary characteristics of climate change and the cooling effect of urban ecological spatial pattern and the coordination mechanism between them. The results showed that the comprehensive index of extreme temperatures in Wuhan in 2000, 2010, and 2020 showed a trend of first increasing and then decreasing, while the overall index of urban ecological spatial pattern showed a trend of decreasing. The pattern indices including CA, NP, PLAND, LPI, LSI and AI, that were positively correlated with cooling effects, all exhibited linear or fluctuating decline characteristics within 20 years. It is indicated that the cooling effect of ecological space in Wuhan has gradually been weakened. The coordination degree between the comprehensive index of extreme temperature and the comprehensive index of urban ecological spatial pattern in 2000, 2010, and 2020 gradually decreased from intermediate coordination to severe imbalance, indicating that the cooling effect of ecological space in Wuhan on alleviating extreme temperature is gradually decreasing.

Keywords climate change; ecological space in urban; patterns of landscape; comprehensive index of extreme temperatures; climatic adaptation

(责任编辑:张志钰)