### DOI: 10.5846/stxb202105311433

叶家慧,叶露锋,刘辉,韩永伟.雄安新区生态系统热消减功能研究.生态学报,2022,42(24):9981-9994. Ye J H, Ye L F, Liu H, Han Y W. Research on reducing heat function of ecosystem in Xiong'an New Area. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24):9981-9994.

# 雄安新区生态系统热消减功能研究

叶家慧<sup>1</sup>,叶露锋<sup>1,2</sup>,刘 辉<sup>1</sup>,韩永伟<sup>1,\*</sup> 1中国环境科学研究院,北京 100012

2 兰州大学,兰州 730000

摘要:維安新区作为国家确立不久的新区,建设绿色生态宜居新城区是其重大规划目标之一。近几年城市化进程加快,城市面 貌变化大,城市热岛效应愈发严重,而城市生态系统中的蓝绿空间能够提供温度调节功能,消减并改善城市热环境。基于 Landsat 遥感数据和土地利用数据,分析生态斑块的降温效益并模拟了雄安新区生态系统的热消减功能。结果表明:(1)雄安新 区各类绿地中园地和其他林地的降温距离最大,为 300 m,降温幅度分别为 0.79℃和 0.62℃;各类水体中湖泊的降温距离最大, 为 350 m,降温幅度为 1.29℃。(2)不同生态斑块温度与景观格局指数有一定的相关性,其中相关性较强的有面积、周长、周长 面积比和最小邻近距离指数,且不同类型斑块有不同的景观格局指数阈值,在阈值范围内温度呈下降趋势,城市蓝绿空间规划 建设过程中可以参考各生态斑块的景观格局指数阈值开展工作。(3)雄安新区生态系统的热消减量在 0.4—5.63℃之间,热消 减能力突出的区域主要集中在白洋淀附近,其中湖泊发挥的作用最强,其次为分布在建成区的部分林地和草地,河渠的热消减 能力相对较低,热消减能力最弱的是分布在雄安新区北边建成区的少量草地和林地。 关键词;热消减功能;降温效益;景观格局;雄安新区

# Research on reducing heat function of ecosystem in Xiong'an New Area

YE Jiahui<sup>1</sup>, YE Lufeng<sup>1,2</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>, HAN Yongwei<sup>1,\*</sup> 1 Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China 2 Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Xiong'an New Area, as a newly established area in China, is a major goal of planning to build a new, green, eco-friendly and livable urban area. In recent years, the urbanization process of Xiong'an New Area has accelerated, the urban landscape has changed greatly, and the urban heat island effect has become more and more serious. The blue-green space in the urban ecosystem can provide the temperature regulation function to improve urban thermal environment. Based on Landsat remote sensing data and land use data, this paper analyzed the cooling benefits of ecological patches and simulated the reducing heat function of the ecosystem in Xiong'an New Area. The results showed that: (1) in Xiong'an New Area, the cooling distance of lakes is the largest, which is 350 meters, and the cooling range is 1.29 °C. In the green land, the cooling distance of woodlands and gardens is the largest, which is 300 meters, and the cooling range is 0.79 °C and 0.62 °C. (2) There was a certain correlation between different ecological patch temperatures and landscape pattern indexes, among which area (AERA), perimeter (PERIM), perimeter area ratio (PARA) and Euclidean nearest neighbor distance (ENN) index were strongly correlated. differently ecological patch types have different thresholds, within which the temperature decreases. In the process of urban blue-green space planning, the cooling threshold of each ecological patch can be referred to for construction. (3) The heat reduction of Xiong'an New Area is between 0.4 °C and 5.63 °C. The maximum reducing heat function of areas mainly distributed in the Baiyang Lake, where the lakes play the most important role and

收稿日期:2021-05-31; 网络出版日期:2022-07-29

基金项目:中国环境科学研究院中央公益性科研院所基本科研业务专项(2018-改革启动-003)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hyw916@126.com

followed by the part of woodland and grassland in built-up area. The reducing heat ability of the river channels is relatively low, and the weakest is a few grasslands and woodlands that are distributed in the northern built-up area of Xiong'an New Area.

Key Words: reducing heat function; cooling efficiency; landscape pattern; Xiong'an New Area

城市热岛效应(UHI)是很多城市共同面临的生态环境问题,中国大多数城市在过去的几十年中都表现出 UHI 效应增长的趋势<sup>[1-2]</sup>。UHI 引起的气候变化对全球生态系统的结构和功能造成影响,具体表现有:改变 物种的组成和分布<sup>[3]</sup>、增加城市居民水和能源的消耗量<sup>[4]</sup>、增加地面臭氧的产生<sup>[5]</sup>、影响城市居民的热舒适 度并增加健康风险<sup>[6]</sup>等。气候因素<sup>[7]</sup>、人口密度<sup>[8]</sup>、居民生产生活释放的人为热<sup>[9]</sup>、下垫面性质的改变<sup>[10]</sup>等 都会对热环境造成影响,如何减缓城市热岛效应造成的负面影响已成为当前国内外亟待解决的科学问题。地 表温度(LST)可以反映城市城市冠层气温,相较于气象站点数据具有覆盖范围广、连续性和多尺度等特点,现 有很多学者将其作为研究城市热环境的度量因子。而绿地和水体作为维持城市中自然生态系统服务功能的 蓝绿空间,绿地的蒸腾散热作用、植被冠层的削减太阳辐射作用、水体的显著蒸发作用和热交换能力<sup>[11-12]</sup>都 能够有效改变城市环境的能量传输,达到热消减的效果<sup>[13-14]</sup>,因此蓝绿空间对于改善城市群热环境问题和提 高居民热舒适度意义重大。然而城市可利用土地资源有限,蓝绿空间不能无限度扩张,在规划建设过程中会 受到诸多限制,研究如何规划才能使蓝绿空间的热消减功能最优化具有重要意义。

2017年4月1日中共中央、国务院印发通知,决定设立国家级新区河北雄安新区。作为北京非首都功能 集中承载地,探索人口经济密集型优化开发新模式,打造优美生态环境,构建合理城市空间布局是新区的重要 任务。雄安新区的城市建设目前处于起步阶段,快速城市化特征明显,快速增加的人口和高强度土地开发在 我国城市化发展中具有典型性。近几年有多位学者从长时间序列尺度研究雄安新区的气候特征发现,城市热 岛效应呈现由弱变强的增长趋势,在未来规划建设中有必要考虑高温风险<sup>[15-16]</sup>。刘原嘉等<sup>[17]</sup>探究 NDVI 对 雄安新区热环境的影响发现,NDVI 与 LST 为负相关关系,LST 上升区主要分布在人口密集的市中心和热加工 场集中地区。马瑞明等<sup>[18]</sup>识别城市热岛的"源汇"景观并分析景观降温效率发现绿色空间降温能力较高,且 降温效果随着温度和形状指数的增加均成先上升后下降的趋势。目前关于自然生态系统的热消减作用相关 研究主要集中在不同类型绿地和水体<sup>[19-21]</sup>、不同时间段的降温功能研究<sup>[22]</sup>、景观格局与温度的耦合关 系<sup>[23-24]</sup>等方面,从城市尺度对生态系统热消减功能进行空间上的模拟和量化研究少见报道。从雄安新区的 发展需求和热环境现状出发,研究如何在规划和建设过程中减少热岛效应的影响,充分发挥生态系统的热消 减功能具有较强的理论与现实意义。因此本研究以雄安新区为研究区,分析生态斑块的降温效益,探究影响 热消减功能的景观格局,构建热消减服务功能模型来模拟生态系统的热消减功能,旨在为城市蓝绿空间规划 和建设提供一定的理论依据。

# 1 研究区概况

雄安新区地处北京、天津、保定腹地,与京津形成等边三角形格局,距离约为 105 km。新区规划面积为 1770 km<sup>2</sup>,包括河北省的雄县、安新县、容城县以及部分周边区域(图 1)。新区位于太行山麓平原向冲积平原 的过渡地带,生态本底较好,属温带大陆性季风气候,四季分明,春旱多风,夏热多雨,秋凉气爽,冬寒少雪。雄 安新区年平均降水量为 480.8 mm,年平均气温为 12.6℃,年均日照时数为 2335.2 h,主导风向为西南风,年平 均风速为 1.7 m/s<sup>[25]</sup>。土壤类型包括褐土、潮土、沼泽土、砂姜黑土 4 个土类,其中潮土分布最广。

# 2 数据来源与研究方法

## 2.1 数据来源

本文所采用的数据有雄安新区的土地利用数据、DEM 数据和遥感影像数据。其中 2019 年土地利用数据



图 1 雄安新区地理位置示意图 Fig.1 Geographical location of Xiong'an New Area

和分辨率数字高程模型(DEM)数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/),分辨 率均为 30 m,其中土地利用分类按照《土地利用现状分类》GB/T 21010—2017 进行划分;Landsat 系列卫星遥 感数据来源于美国地质调查局官方网站(https://earthexplorer.usgs.gov/)level 1T 产品,分辨率为 30 m。

2.2 研究方法

2.2.1 遥感温度反演

在保证覆盖研究区、晴朗无云的原则下,获取 2019 年 9 月 18 日的 Landsat 8 影像数据,行列号为(123, 33)。Landsat 8 卫星搭载的 TIRS(Thermal Infrared Sensor)热红外传感器在温度反演中应用广泛,其中 TIRS 10 波段大气吸收区域更低,定标精度值更高,故选用 TIRS 10 单波段来计算地表温度<sup>[26]</sup>。本文选择基于热辐射传输方程的大气校正法来计算温度,该方法计算精度高,可以应用于不同的热红外波段<sup>[27]</sup>。具体步骤为:首先对热红外波段进行辐射校正,得到星上辐射亮度值;然后进行大气校正去除水汽的影响,得到辐射亮度值; 利用植被覆盖度(FVC)计算得到地物发射率,将辐射亮度值转化为相对于黑体的黑体辐射亮度值;最后通过 Plank 函数的转化,将黑体辐射亮度值转化为黑体亮度温度值,即为地表温度。反演过程公式如下:

$$B(Ts) = \frac{L_{\lambda} - L \uparrow - \tau \times (1 - \varepsilon) \times L \downarrow}{\varepsilon \tau}$$
(1)

式中,*Ts*为地表真实温度(K),*B*(*Ts*)为*Ts*在传感器接收的热辐射亮度值,*L*<sub>λ</sub>为卫星传感器利用辐射定标系数将其像元灰度值 DN转换为接收到的辐射亮度值。L↑为大气向上辐射亮度,*L*↓为大气向下辐射亮度, $\tau$ 为大气在热红外波段的透过率,*ε*为地表比辐射率。 $\tau$ 、*L*↓和*L*↑参数通过 NASA 提供的网站(http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/)上输入成像时间和中心经纬度进行获取。地表比辐射率 *ε*根据植被覆盖度 FVC 来计算,公式如下<sup>[28]</sup>:

$$FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil})$$
(2)

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{water}} = 0.995 \\ \varepsilon_{\text{building}} = 0.9589 + 0.086 \text{FVC} - 0.0671 \text{ FVC}^2 \end{cases}$$
(3)

 $\varepsilon_{natural} = 0.9625 + 0.0614 \text{ FVC} - 0.0461 \text{ FVC}^2$ 

式中,NDVI<sub>soil</sub>为无植被覆盖区域或裸土的 NDVI 值,取经验值 0.05;NDVI<sub>veg</sub>为植被完全覆盖的 NDVI 值,取经 验值 0.7。 $\varepsilon_{water}$ 、 $\varepsilon_{building}$ 和 $\varepsilon_{natural}$ 分别代表水体、自然表面和城镇像元的地表比辐射率。

$$Ts = K_2 / \left( ln \left( \frac{K_1}{B(Ts)} + 1 \right) \right) \tag{4}$$

式中 Landsat 8 TIRS 10 波段的  $K_1$ 值为 774.89 W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup>  $\mu$ m<sup>-1</sup>,  $K_2$ 值为 1321.08 K<sub>o</sub>

# 2.2.2 降温效益分析

基于土地利用数据,提取面积大于1公顷的绿地和水体斑块作为雄安新区的生态斑块。在 ArcGIS 软件 中对生态斑块进行缓冲区分析,以 50 m 为缓冲距离逐步向外建立缓冲区,然后与反演的温度数据叠加分析, 分区统计不同距离缓冲区内的平均温度。以缓冲区距离为横轴,缓冲区内部平均地表温度为纵轴,绘制 LST 曲线。基于前人研究,随着远离绿地和水体的边界,其周边温度会逐渐升高,最后趋于平稳<sup>[21,29]</sup>。温度的转 折点处表示生态斑块的影响范围,转折点温度与生态斑块内部温度的差值为降温幅度,对应的缓冲区距离即 为最大降温距离。

2.2.3 景观格局指数与温度相关性分析

为了探究生态斑块不同景观格局的温度差异性,将提取的生态斑块作为研究对象,在 Fragstats 软件中进 行景观格局分析。在斑块级别上,从面积指标、形状指标、边缘指标和聚散性指标中选择斑块面积(Area)、斑 块周长(PERIM)、分维数(FRAC)、边缘面积比(PARA)和最小邻近距离(ENN)进行分析,将各指标分析结果与 斑块平均温度进行相关分析,确定拟合程度最高的相关性方程。其中,FRAC 指数反映斑块形状的复杂程度,取 值范围为[1,2],取值越小斑块形状越简单,取值越大形状越复杂;PARA 指数表示周长与面积的比值;ENN 指数 反映斑块的孤立程度,是斑块到同类斑块最近距离的和与具有最近距离的斑块数的比值。

# 2.2.4 热消减功能模型构建

根据文献调研,生态斑块的热消减功能与土地利用类型和地形因子等相关,因此将生态斑块划分成绿地和水体两类来构建模型。其中数字高程数据(DEM)作为影响地表温度的共同因子,绿地斑块选取归一化植被指数(NDVI),水体斑块选择改进的归一化水体指数 MNDWI 为影响因子。分别统计绿地和水体斑块内的 DEM 均值(m)、NDVI 均值(无量纲)、MNDWI(无量纲)和 LST 均值(℃),进行回归分析(式5),得到温度拟合 方程,并对模拟误差进行检验(式7)。利用 ENVI 软件中的 Regions of Interest Band Threshold 工具获取 NDVI 和 MNDWI 的阈值(大于阈值表示该区域有林地或水体),在式(5)基础上将 NDVI 和 MNDWI 指数设为阈值 来模拟没有绿地和水体时的模拟温度(式6)。最后,将有无绿地和水体时的模拟温度进行差值,来表示生态系统的热消减量(式8)。

$$T_{ri} = C_0 + \sum_{k,i=1}^{n} C_k L_{ki}$$
(5)

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{n} (T_i - T_{ii})/n}{\overline{T}} \times 100\%$$
(7)

$$T_{si}' = T_{wi} - T_{ri} \tag{8}$$

式中,  $T_{ii}$  表示第 *i* 个栅格模拟的地表温度( $\mathcal{C}$ ),  $T_{wi}$  为第 *i* 个栅格模拟无绿地和水体的地表温度( $\mathcal{C}$ ),  $C_0$  为 模型回归常数,  $L_{ki}$  为第 *i* 个栅格第 *k* 类影响因素统计值,  $C_k$  为  $L_{ki}$  的回归系数; *E* 为模型误差( $\mathcal{S}$ ),  $T_i$  为第 *i* 个 栅格的真实地表温度( $\mathcal{C}$ ),  $T_{ii}$  为第 *i* 个栅格的模拟地表温度( $\mathcal{C}$ ), *n* 为研究区范围内栅格总数,  $\overline{T}$  为研究区 范围真实地表温度的平均值( $\mathcal{C}$ );  $T_{si}$  '为第 *i* 个栅格热消减量( $\mathcal{C}$ )。

# 3 结果与分析

# 3.1 地表温度分析

从雄安新区地表温度反演结果(图2)可知,雄安新区北部温度较高,南部温度较低。三县的平均温度排

序为雄县(28.88℃)>容城县(28.45℃)>安新县(26.89℃)。其中,容城县高温区主要分布在中部,安新县分 布在县城边界周围,雄县分布在东南地区,且高温区主要集中在居民小区、工业园区和商业大厦等区域。结合 土地利用分布情况(图 3)可以看到,雄县建设用地比例为 27.22%,比容城县(24.38%)和安新县(16.85%)高, 平均温度最高。白洋淀主要位于安新县境内,大片水域的存在可能是安新县整体温度相对较低的重要原因。



图 2 雄安新区 2019 年地表温度分布图 Fig.2 Land surface temperature distribution map of Xiong'an New Area in 2019

## 3.2 生态斑块降温效益分析

基于 2019 年雄安新区土地利用二级分类数据,将 绿地斑块划分为有林地、其他林地、天然草地、人工草地 和园地,水体斑块分为湖泊、水库坑塘、河渠和滩地(图 4)。降温斑块的平均温度和标准差统计结果见图 5,生 态斑块的平均温度排序为:园地>人工草地>其他林地> 天然草地>水库坑塘>河渠>有林地>滩地>湖泊;标准差 排序为河渠>人工草地>天然草地>有林地>水库坑塘> 其他林地>园地>湖泊>滩地。水体和绿地斑块中湖泊 和有林地的温度最低,降温效益较好。水体相较于绿地 的标准差更小,其中滩地的标准差最小,而河渠的标准 差最大,斑块之间的平均温度差异较大。

由生态斑块的 LST 曲线(图 6)和生态斑块降温距 离和降温幅度统计表(表 1)可知,绿地中园地和其他林 地的降温距离最大,均为 300 m,降温幅度分别为0.62℃ 和 0.79℃;水体中湖泊的降温距离和降温幅度最大,分 别为 350 m 和 1.29℃。结合土地利用分布情况,雄安新 区有林地分布较少,其他林地分布较为分散,雄县城区



图 3 雄安新区 2019 年土地利用分布图 Fig.3 Land use distribution map of Xiong'an New Area in 2019





有较大面积分布,后期建设应重点种植林地,提高绿地斑块的聚集度和连通性,形成连片成网的通风廊道,提

高其对热岛效应消减作用,同时可以适当建设园地,发 挥其良好的降温作用。雄安新区中白洋淀面积较大且 集中,后续应加强淀区内的湖泊和滩地的保护。

3.3 斑块温度与景观格局指数相关性分析

结合生态斑块的平均 LST 和景观指数的相关系数 和拟合方程(表 2、图 7、图 8、图 9、图 10、图 11)结果可 知:有林地、人工草地、湖泊、滩地和其他林地的温度与 面积具有一定的相关性,相关系数依次为 0.84、0.59、 0.47、0.35、0.21。其中有林地相关系数最大,拟合方程 为 y = -0.0881x + 27.68,面积与温度为负相关,面积越 大,热消减能力越大;人工草地的拟合方程为 y =0.003 $x^2$ -0.0447x+26.61,斑块面积大小在 2—20 km<sup>2</sup>之 间,温度整体变化趋势较小,说明人工草地面积对温度 的影响较小;湖泊的拟合方程是  $y = -0.423\ln(x) +$ 



![](_page_5_Figure_7.jpeg)

![](_page_5_Figure_8.jpeg)

26.99,温度随着面积增大呈下降趋势,在 300 km<sup>2</sup>后趋于平稳;滩地的拟合方程是  $y = -0.298 \ln(x) + 27.31$ ,在 面积为 50 km<sup>2</sup>内温度随着面积的增加而降低,能发挥较好的降温作用;其他林地的拟合方程为  $y = 0.0012x^2 - 0.0715x + 27.91$ ,面积在 30 km<sup>2</sup>内呈下降趋势,之后温度趋于稳定。周长指数中相关性较强的有有林地 (0.96)、滩地(0.48)、湖泊(0.33)、其他林地(0.23),与温度都呈负相关关系,其中有林地周长在 2.3 km 范围 内温度呈下降趋势,滩地为 15 km,湖泊为 3 km。

![](_page_5_Figure_10.jpeg)

#### 图 6 雄安新区生态斑块缓冲区的地表温度(LST)曲线

![](_page_5_Figure_12.jpeg)

表 1	雄安新区生态斑块的降温距离和降温幅加	蓃

Table 1	Cooling	distance	and		<b>e</b>	analagiaal	notohoo	:	Viena		Morri	4 -
Table 1	Cooning	uistance	anu	range	OI.	ecological	patches	ш	AIOIIg	ап	INEW	Area

降温效益 Cooling efficiency	有林地 Forestland	其他林地 Other woodland	天然草地 Natural grassland	人工草地 Artificial grass	园地 Garden	湖泊 Lakes	滩地 Mudflat	水库坑塘 Pond	河渠 Cannals
降温距离 Cooling distance/m	150	300	100	250	300	350	100	100	150
降温幅度 Cooling range/℃	0.18	0.79	0.07	0.19	0.62	1.29	0.71	0.18	0.49

反映斑块形状的分维数和边缘面积比两个指标中,相关性较大的有有林地、人工草地、园地、湖泊、水库坑 塘和滩地。根据 FRAC 分维数指数的拟合方程,有林地、其他林地、人工草地、园地和水库坑塘在 1.07 内呈下 降趋势,而滩地和湖泊的分维数超出 1.15 后温度上升,可见滩地和的湖泊的形状复杂程度对于热消减作用影 响更大。与 ENN 最小邻近距离指数相关性较大的有有林地(0.98)、河渠(0.74)、水库坑塘(0.29)和人工草地(0.2),根据拟合曲线可以得到各类斑块的最小临近距离,依次为 1400 m、5000 m、2500 m、8000 m,同类型斑 块在该距离内能够起到较好的降温效益。其中有林地的最小临近距离最小,后期应该优先进行成片栽种,缩 短林间距离来提高聚集度,起到更好的热消减作用。

Table 2	Statistical tab	le of correlation	on coefficient <i>l</i>	R <sup>2</sup> between diff	erent ecologic	al patches an	d landscape ind	lex in Xiong′aı	n New Area
景观指数 Landscape index	有林地 Forestland	其他林地 Other woodland	天然草地 Natural grassland	人工草地 Artificial grassland	园地 Garden	湖泊 Lakes	水库坑塘 Pond	河渠 Cannals	滩地 Mudflat
AREA	0.84	0.21	0.01	0.59	0.12	0.47	0.03	0.12	0.35
PERIM	0.96	0.23	0.05	0.17	0.05	0.39	0.01	0.48	0.33
FRAC	0.1	0.08	0.03	0.24	0.11	0.27	0.14	0.26	0.1
PARA	0.62	0.04	0.04	0.37	0.17	0.47	0.23	0.04	0.39
ENN	0.98	0.06	0.04	0.2	0.06	0.12	0.29	0.74	0.06

表 2 雄安新区不同生态斑块与景观指数的相关系数  $R^2$ 统计表

AREA:面积 Area; PERIM:周长 Perimeter; FRAC:分维数 Fractal dimension; PARA:边缘面积比 Perimeter area ratio; ENN:最小邻近距离 Euclidean nearest neighbor distance

![](_page_6_Figure_5.jpeg)

![](_page_6_Figure_6.jpeg)

Fig.7 Correlation analysis of ecological patch temperature and AREA index

28

有林地

园地

32

30

32

30

![](_page_7_Figure_3.jpeg)

图 8 生态斑块温度与斑块周长(PERIM)指数相关性分析 Fig.8 Correlation analysis of ecological patch temperature and PERIM index

# 3.4 热消减功能分析

根据热消减功能模型,分析绿地、水体的 NDVI、MNDWI、DEM 值与温度的相关性,发现绿地与 DEM (0.348\*\*)和 NDVI(-0.697\*\*)有显著相关性,水体与 DEM(0.399\*\*)和 MNDWI(-0.683\*\*)有显著相关性, 拟合程度最高的为一元二次方程。在 SPSS 软件中选择非线性回归分析工具,输入模型表达式,分别得到水体和绿地斑块温度的拟合方程和 R<sup>2</sup>值(表 3),且拟合方程的 R<sup>2</sup>均在 0.6 以上。经验证,绿地和水体拟合方程的模拟误差 E 分别为 3.56%和 3.12%,在误差允许范围内,可以较好地模拟地表温度。

	Table 3         Temperature fitting equation of ecological patch in Xiong'an New Area					
生态斑块 Ecological patch	拟合方程 Fitting equation	$R^2$				
绿地 Green space	$40.03+(-66.135)\times NDVI+70.019\times NDVI^{2}+0.198\times DEM+(-0.004)\times DEM^{2}$	0.664				
水体 Water	$28.136 + (-20.714) \times \text{MNDWI} + 37.063 \times \text{MDNWI}^2 + (-0.298) \times \text{DEM} + 0.022 \times \text{DEM}^2$	0.636				

根据热消减功能模型的计算方法,通过拟合方程得到绿地和水体的模拟温度(图 12), NDVI 和 MNDWI

![](_page_8_Figure_2.jpeg)

Fig.9 Correlation analysis of ecological patch temperature and PARA index

的阈值分别为0.15和-0.1,代入温度拟合方程中得到假设没有生态斑块时的模拟温度(图13),最后计算有无 生态斑块的温度差来反映雄安新区生态系统的热消减量(图14),热消减量反映了生态斑块在该区域能够调 节温度,削减热岛效应的能力。

整体来看,生态系统在缓解城市热环境起到重要作用,雄安新区热消减量的范围在 0.4—5.63℃之间,存 在空间布局的差异性,与土地利用类型密切相关。其中,热消减量最高的区域主要集中在白洋淀附近,淀区内 湖泊热消减能力最强,与生态斑块效益分析结果一致,湖泊的降温效益最好。其次为分布在建成区的部分林 地和草地,在未来规划中可以重点保护,河渠的热消减能力相对较低,尤其是位于白洋淀东边的两条河渠,热 消减能力最弱的是雄安新区建成区北部的零星草地和林地,从空间分布来看斑块之间孤立且斑块自身面积较 小,由于北边城区水域面积较少,后期应重点关注该区域的林草建设以及维护白沟河下游人工开凿的白沟引 河,提升整体的热消减能力。

## 4 讨论

(1)城市绿地和水体在消减城市热环境方面发挥着重要作用。孟倩文<sup>[30]</sup>研究京津唐城市群发现 LST 与

28

有林地

园地

32

32

42 卷

![](_page_9_Figure_3.jpeg)

图 10 生态斑块温度与分维数(FRAC)指数相关性分析 Fig.10 Correlation analysis of ecological patch temperature and FRAC index

NDVI 呈负相关关系,其中夏季林地相关性最大,降温幅度可达 2.86℃。不同土地利用类型、不同时间段与温度的关系也有所不同,孙宗耀<sup>[31]</sup>基于京津冀 MODIS 温度产品数据分析发现,在不同季节土地利用类型对于 热环境的贡献度不同,2005—2015 年间林地和草地的降温能力有所增加。陈彬辉等<sup>[32]</sup>研究发现,白天水体消 减城市热岛效应,夜间反而增强热岛效应;在春季、夏季和秋季的白天,林地和农田会缓解城市热岛效应,冬季 相反。本文基于二级土地利用分类数据分析了雄安新区绿地和水体的降温效益,得到一些初步结论,其中绿 地中其他林地降温效益最好,降温距离为 300 m,降温幅度为 0.79℃;水体中湖泊的降温效益最好,降温距离 为 350 m,降温幅度为 1.29℃。从缓解城市热的角度出发可以优先保护和建设湖泊、其他林地和园地,但没有 开展不同时段城市生态系统的热消减功能对比分析,下一步需要继续研究完善这方面的内容。

(2)不同的生态斑块空间格局对城市温度的影响也不同。张燊等<sup>[33]</sup>研究发现城市群热岛足迹一致情况 下,热岛强度会受到绿地和水体的空间格局影响。王戈<sup>[34]</sup>研究不同生态空间景观格局的降温效果发现:斑块 面积越大,降温效果越明显;斑块形状越复杂,边界越长,其降温效果越好;生态空间斑块丰度高的区域地表温 度较低;斑块聚合度指数越大,地表温度越低。这与本文研究结果基本一致,从面积指标、边缘指标、形状指标 和聚散性指标中选取的景观指数与生态斑块温度有一定的相关性。

![](_page_10_Figure_2.jpeg)

![](_page_10_Figure_3.jpeg)

(3)从景观水平研究空间配置与地面温度的关系是非常重要的。焦敏等<sup>[35]</sup>提出景观尺度上绿地斑块大 小在空间上的配置对热环境的影响在不同的研究中有所不同,甚至出现相反的结果。关于大面积绿地斑块和 多个破碎的小绿地斑块哪种格局能够更好地消减城市热环境有诸多探讨,目前还没有一致的结论。例如成都 某绿地覆盖率相同区域,斑块大且相对集中的区域温度明显低于斑块小且相对分散区域<sup>[36]</sup>,而 Zhang 等<sup>[37]</sup> 的研究结果相反。本文在研究过程中发现从景观水平研究降温距离和降温幅度是比较困难的,因此从生态斑 块尺度开展了相关工作,并结合模拟方程提出了能够起到热消减功能的景观指数范围,后期需要继续深入在 景观尺度对热消减功能进行量化研究。

(4)在生态系统中,每个生态斑块不是独立的,景观生态学"源-汇"理论的应用也是研究热消减功能的一个重要角度。"源汇"景观理论更加注重机理性、系统性和过程性,可以更好的反映生态斑块服务功能发挥的 过程与机制。生态斑块的降温功能从生态系统出发,除了考虑"源"驱动外,还需要考虑"流"过程。但目前基 于"源汇"理论研究城市热景观、热岛效应的较多,生态斑块降温的"源汇"研究是今后可以深入探讨的方向。

(5)关于模拟热消减功能的方法,Kong 等<sup>[38]</sup>结合微气候 ENVI-met 模型和现场数据构建室外三维热环境 模型,通过模型分析绿色空间对城市室外热环境的影响,并计算累积降温量。孟楠<sup>[39]</sup>将城市中的大型水体、 公园和山体作为生态系统服务功能的供给源,构建气候调节服务功能供需平衡模型,并识别出功能较弱的区 域。Elliot 等<sup>[40]</sup>利用生态系统服务矩阵方法来模拟土地覆盖变化对热岛强度的影响,结果表明城市景观缓解 热岛效应的能力自 1990 年以来呈下降趋势,并将持续小幅下降至 2022 年,该模型可以用于帮助城市规划者 在建筑结构和绿色空间布局方面进行决策。本研究构建了热消减模型来模拟热消减量,具有可量化、模拟区 域整体热消减功能的优点,能从城市尺度识别功能较弱的区域,但存在模型参数考虑不全面等不足,今后需要 结合其它研究方法开展工作,并对比分析不同方法之间优缺点,以促进相关方法的完善。

![](_page_11_Figure_2.jpeg)

图 12 雄安新区模拟温度图 Fig.12 Simulated temperature diagram in Xiong'an New Area

(6)热消减功能与生态系统的结构和过程密切相 关,两者耦合关系也是现在的研究热点。目前有不少研 究强调,由于不同城市的地理位置和地形地貌不同,热 消减能力也会存在差异,城市自身的气候背景必须纳入 研究的考虑因素。热环境的分析存在相互依赖性<sup>[41]</sup>, 因此在景观空间分析研究中,观测数据之间的空间自相 关性值得关注。此外,获取高精度的遥感地表参数数据 和实地试验观测数据,结合本地气候条件和能量平衡模 型来研究城市蓝绿空间的热消减原理和过程,从机理上 去解释生态系统是怎样实现气候调节以及各种因素对 热消减能力的影响,也是今后需要深入研究的一个 方向。

# 5 结论

本文以雄安新区为研究对象,以地表温度表征城市 热环境特征,基于土地利用数据和遥感数据研究了城市 热环境特征,分析了生态斑块的降温效益并构建模型计 算了城市生态系统的热消减功能。得出如下结论:

![](_page_11_Figure_7.jpeg)

![](_page_11_Figure_8.jpeg)

Fig. 13 Simulated temperature diagram of uncooled space in Xiong'an New Area

![](_page_11_Figure_10.jpeg)

![](_page_11_Figure_11.jpeg)

(1) 雄安新区地表温度反演结果显示,北部温度相对更高,其中三县平均温度排序为:雄县>容城县>安新 县。整体来看高温区主要集中在工业园区、居民小区等区域。温度分区与土地利用类型关系密切,林地低温 区居多,水体低温区占比最高,耕地以中温区为主。

(2 生态斑块的降温距离和降温幅度分析结果表明,雄安新区水体中湖泊的降温效益最好,绿地中其他林 地的降温效益最好。景观格局指数与生态斑块温度拟合方程反映出整体关系为:面积越大,周长越长,同类型 斑块之间距离越近,其斑块内部温度越低。不同类型斑块有不同的阈值,超过阈值后其温度趋于平缓,城市蓝 绿空间规划过程中可以参考各生态斑块的降温阈值来进行建设。

(3)本文构建的热消减模型模拟雄安新区的热消减量在 0.4—5.63℃之间, 白洋淀区域的热消减能力突出, 其中湖泊发挥的作用最强, 其次为分布在建成区的部分林地和草地, 河渠的热消减能力相对较低, 分布在北边建成区的少量草地和林地热消减能力最弱。

#### 参考文献(References):

- [1] Peng J, Ma J, Liu Q Y, Liu Y X, Hu Y N, Li Y R, Yue Y M. Spatial-temporal change of land surface temperature across 285 cities in China: an urban-rural contrast perspective. Science of the Total Environment, 2018, 635: 487-497.
- [2] Yang Q Q, Huang X, Tang Q H. The footprint of urban heat island effect in 302 Chinese cities: temporal trends and associated factors reducing heat island function. Science of the Total Environment, 2019, 655: 652-662.
- [3] Niemela J, Breuste J H, Guntenspergen G, Mcintyre N E, Elmqvist T. Urban ecology. Oxford Biology, 2014, 100(4): 44-47.
- [4] Santamouris M. Regulating the damaged thermostat of the cities—Status, impacts and mitigation challenges. Energy and Buildings, 2015, 91: 43-56.
- [5] Vukovich F M, King W J, Iii J W D, Worth J J B. Observations and simulations of the diurnal variation of the urban heat island circulation and associated variations of the ozone distribution: a case study. Journal of Applied Meteorology, 1979, 18(7): 836-854.
- [ 6 ] Poumadère M, Mays C, Mer S L, Blong R. The 2003 heat wave in France: dangerous climate change here and now. Risk Analysis, 2005, 25(6): 1483-1494.
- [7] Arnfield A J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. International Journal of Climatology, 2003, 23(1): 1-26.
- [8] Peng S S, Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, Ottle C, Bréon F M, Nan H J, Zhou L M, Myneni R B. Surface urban heat island across 419 global big cities. Environmental Science & Technology, 2012, 46(2): 696-703.
- [9] 孙然好, 王业宁, 陈婷婷. 人为热排放对城市热环境的影响研究展望. 生态学报, 2017, 37(12): 3991-3997.
- [10] Zhang K X, Wang R, Shen C C, Da L J. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island during rapid urbanization in Shanghai, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 169(1/4): 101-112.
- [11] Sun Y W, Gao C, Li J L, Li W F, Ma R F. Examining urban thermal environment dynamics and relations to biophysical composition and configuration and socio-economic factors: a case study of the Shanghai metropolitan region. Sustainable Cities and Society, 2018, 40: 284-295.
- [12] Huang X, Wang Y. Investigating the effects of 3D urban morphology on the surface urban heat island effect in urban functional zones by using high-resolution remote sensing data: a case study of Wuhan, Central China. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 152: 119-131.
- [13] Du H Y, Wang D D, Wang Y Y, Zhao X L, Qin F, Jiang H, Cai Y L. Influences of land cover types, meteorological conditions, anthropogenic heat and urban area on surface urban heat island in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration. Science of the Total Environment, 2016, 571: 461-470.
- [14] Du H Y, Song X J, Jiang H, Kan Z H, Wang Z B, Cai Y L. Research on the cooling island effects of water body: a case study of Shanghai, China. Ecological Indicators, 2016, 67: 31-38.
- [15] 冉明士,王森,刘峰,邢林啸,王华军.2003—2016年雄安新区地表温度时空变化特征分析.河北工业大学学报,2021,50(1):56-61, 91-91.
- [16] 马凤莲,刘园园,李春强.河北雄安新区近 50a 气温变化特征.林业与生态科学, 2020, 35(3): 294-303.
- [17] 刘原嘉, 王娟, 金泽林. 雄安新区 NDVI 变化对热环境影响分析. 测绘科学, 2020, 45(11): 107-114.
- [18] 马瑞明,谢苗苗,郧文聚.城市热岛"源-汇"景观识别及降温效率. 生态学报, 2020, 40(10): 3328-3337.
- [19] 唐罗忠,李职奇,严春风,孙储华,徐新,相恒让.不同类型绿地对南京热岛效应的缓解作用.生态环境学报,2009,18(1):23-28.
- [20] 曾素平,时琢,赵梅芳,刘发林,王光军,林杨,李沁园,向枝远,陈小伟,Ogbodo U S. 城市水体对热岛的缓冲性能沿河岸距离的变化 规律. 生态学报, 2020, 40(15): 5190-5202.
- [21] 杜红玉. 特大型城市"蓝绿空间"冷岛效应及其影响因素研究——以上海市为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.

#### http://www.ecologica.cn

- [22] 冯海霞, 侯元兆, 冯仲科. 山东省森林调节温度的生态服务功能. 林业科学, 2010, 46(5): 20-26.
- [23] 卞子浩,马超群,王迪,徐博,艾杰,马小雪.西安地区热岛效应与景观生态格局相关性研究.干旱气象,2016,34(2):342-348.
- [24] 黄聚聪,赵小锋,唐立娜,邱全毅.城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征——以厦门市为例.生态学报,2012,32(2): 622-631.
- [25] 廖要明, 黄大鹏. 雄安新区气候特征及变化趋势分析. 中国农学通报, 2020, 36(23): 99-105.
- [26] 花利忠, 孙凤琴, 陈娇娜, 唐立娜. 基于 Landsat-8 影像的沿海城市公园冷岛效应——以厦门为例. 生态学报, 2020, 40(22): 8147-8157.
- [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. Remote Sensing, 2014, 6(10): 9829-9852.
- [28] 杨江燕,吴田,潘肖燕,杜海童,李金鹿,张利,门明新,陈影.基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估.应用生态学报,2019,30 (1):227-284.
- [29] Wu Z J, Zhang Y X. Water bodies' cooling effects on urban land daytime surface temperature: ecosystem service reducing heat island effect. Sustainability, 2019, 11(3): 787.
- [30] 孟倩文. 京津唐城市群热环境的时空变化及其影响因子研究[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2011.
- [31] 孙宗耀. 土地利用时空格局对城市热环境的影响研究——以京津冀城市群为例[D]. 济南: 山东师范大学, 2018.
- [32] 陈彬辉, 冯瑶, 袁建国, 周一敏, 赵昕奕. 基于 MODIS 地表温度的京津冀地区城市热岛时空差异研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2016, 52(6): 1134-1140.
- [33] 张燊,刘洛,隆少秋,何永贤,胡月明. 基于 MODIS 的 2003—2013 年京津冀城市群热岛强度及变化影响研究. 科技通报, 2019, 35(8): 86-97.
- [34] 王戈. 京津冀生态空间网络与区域热环境关系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [35] 焦敏,周伟奇,钱雨果,王佳,郑重,胡潇方,王伟民.斑块面积对城市绿地降温效应影响的研究进展.生态学报,2021,(23):1-10.
- [36] 陈辉, 古琳, 黎燕琼, 慕长龙. 成都市城市森林格局与热岛效应的关系. 生态学报, 2009, 29(9): 4865-4874.
- [37] Zhang Y Z, Zhan Y L, Yu T, Ren X Y. Urban green effects on land surface temperature caused by surface characteristics: a case study of summer Beijing metropolitan region. Infrared Physics & Technology, 2017, 86: 35-43.
- [38] Kong F H, Sun C F, Liu F F, Yin H W, Jiang F, Pu Y X, Cavan G, Skelhorn C, Middel A, Dronova I. Energy saving potential of fragmented green spaces due to their temperature regulating ecosystem services in the summer. Applied Energy, 2016, 183: 1428-1440.
- [39] 孟楠. 基于生态系统服务功能的城市绿地格局优化研究——以重庆市人口集聚区为例[D]. 重庆;西南大学, 2019.
- [40] Elliot T, Almenar J B, Rugani B. Modelling the relationships between urban land cover change and local climate regulation to estimate urban heat island effect. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 50: 126650.
- [41] Chun B, Guldmann J M. Spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 76-88.