#### DOI: 10.5846/stxb202201120112

李程蓉,陈天.缓解城市热环境的多层级"源-汇"景观网络构建.生态学报,2023,43(8):3068-3078. Li C R, Chen T.Construction of multi-level "source-sink" landscape network to alleviate urban thermal environment. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3068-3078.

# 缓解城市热环境的多层级"源-汇"景观网络构建

李程蓉<sup>1,2</sup>,陈 天<sup>1,\*</sup>

1 天津大学建筑学院,天津 300072 2 中南林业科技大学家具与艺术设计学院,长沙 410004

摘要:以天津市六区和新四区为研究对象,首先运用形态学空间格局分析获得 7 种景观类型,从中提取稳定性较好、面积较大、 连通性较高、热贡献度显著的核心区斑块为中心"源""汇";其次使用 6 个空间数据指标构建热环境格局评价模型,根据 2009— 2013、2013—2018 年热环境格局的变化情况提出 4 类修正系数对基本阻力面进行修正;最后利用"源-源"、"汇-汇"、"源-汇"廊 道构建能体现"补偿-输送-作用"过程的多层级"源-汇"景观网络。结果表明:(1)提取的 I、II类中心"源"共 27 个,总面积为 22773 hm<sup>2</sup>;中心"汇"共 23 个,总面积为 50732 hm<sup>2</sup>。中心"源"的整体抗干扰能力较小,容易受到种植类型和水体富营养化的 影响。(2)多层级"源-汇"景观网络总长度约为 1445 km,新四区的廊道占总廊道的 70%。廊道在空间上分布不均,津南区分布 稀疏,北辰区和市六区分布密集。(3)能量从中心"源"逐渐向中心"汇"流动的过程,可揭示网络之间的层级关系和各级廊道对 热环境气候的调控作用。以生态格局与过程的角度构建缓解城市热环境的多层级"源-汇"景观网络体系,对合理规划廊道建 设、高效缓解城市热环境效应具有积极意义。

关键词:热环境;格局与过程;多层级;"源-汇"景观;网络廊道;空间主成分分析;最小累计阻力模型

# Construction of multi-level "source-sink" landscape network to alleviate urban thermal environment

LI Chengrong<sup>1, 2</sup>, CHEN Tian<sup>1, \*</sup>

1 School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2 School of Furniture and Art Design, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

**Abstract**: Taking the six districts and new four districts of Tianjin as the research objects, this paper firstly obtains seven landscape types by using morphologically spatial pattern analysis, and extracts the core area patches with good stability, large area, high connectivity and significant contribution as the central "source-sink". Secondly, six spatial data indicators are used to build the evaluation model of thermal environment pattern, and four types of correction coefficients are proposed to correct the basic resistance surface according to the changes of thermal environment pattern from 2009 to 2013 and 2013 to 2018. Finally, the corridors of "source-source", "sink-sink" and "source-sink" are used to build a multi-level "source sink" landscape network that can reflect the process of compensation transportation action. The results show that: (1) there are 27 central "sources" of class I and II, with a total area of 22773 hm<sup>2</sup>; There are 23 central "sinks", with a total area of 50732 hm<sup>2</sup>. The overall anti-interference ability of the central "sources" is small, and it is vulnerable to the influence of planting types and water eutrophication. (2) The total length of the multi-layer "source-sink" landscape network is about 1445 km, and the corridor in new four districts accounts for 70% of the total corridor. The corridors are unevenly distributed in space, with sparse distribution in Jinnan District and dense distribution in Beichen District and the six districts. (3) The

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52078329);国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(52061160366)

收稿日期:2022-01-12; 网络出版日期:2022-12-22

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: chentian5561@ vip.sina.com

gradual flow of energy from the central "source" to the central "sink" can reveal the hierarchical relationship between networks and the regulatory role of corridors at all levels on thermal environment and climate. Constructing a multi-level "source-sink" landscape network system to alleviate the urban thermal environment from the perspective of ecological pattern and process is of positive significance to reasonably plan the corridor construction and efficiently alleviate the effects of urban thermal environment.

Key Words: thermal environment; pattern and process; multilayer level; source-sink landscape; network corridor; spatial principal component analysis; minimum cumulative resistance model

日趋恶化的热环境气候对城市生态系统造成了极大的负面影响<sup>[1]</sup>,如何缓解热环境效应已成为城市可 持续发展的重要课题<sup>[2]</sup>。近年来有学者围绕城市可持续降温为目标,开展了蓝绿基础设施对热环境贡献价 值的量化研究<sup>[3-4]</sup>,提出了利用自然冷源网络<sup>[5]</sup>和蓝绿基础设施网络缓解城市高温的方法<sup>[6-7]</sup>。但基于"源-源"的网络构建不能充分体现自然状态下高温地物与低温地物之间能量传递的过程<sup>[8]</sup>,于是本文将借用"源" "汇"景观的概念<sup>[9]</sup>构建多层级"源-汇"景观网络,以揭示热环境格局中能量的流动过程。考虑到城市景观格 局的剧烈变化会对热环境气候产生较大影响,夏季"源""汇"温差较大适于观察能量流动的路径且热环境问 题较为严重<sup>[10]</sup>,为提高廊道构建的合理性,本文选择景观格局变化相对稳定、气候条件接近的 2009、2013、 2018 年 8 月同期无云的卫星遥感数据开展研究。

"源-汇"景观网络的构建主要从三个方面开展:"源""汇"景观划分与网络中心提取、阻力面设置、廊道构 建。在"源""汇"景观的划分上,有的研究直接依据土地利用类型<sup>[11-12]</sup>、地表温度<sup>[13]</sup>、斑块降温效率<sup>[14]</sup>进行 划分,但这些划分方法忽略了景观组分的差异性和同一土地利用类型中的内部异质性对结果带来的影响;有 的研究通过构建二维矩阵关系<sup>[15]</sup>将相对温差阈值外的像元视为异常值去除,再对"源""汇"景观进行划分, 这种方法相对可靠,但异常值的去除会破坏景观整体连续性。因此,如何在保障景观连续性的情况下对"源" "汇"景观进行合理划分亟待研究。在阻力面设置上,过往研究多是依据专家经验对各项评价指标进行赋值 打分,这使得阻力面构建的主观性较强<sup>[16]</sup>。本文尝试将空间数据信息<sup>[17]</sup>引入研究,采用空间主成分分析法 对高维变量实现最佳综合与降维,从而客观构建热环境格局的基本阻力面<sup>[18]</sup>,但如何使最终阻力面能够有效 综合多年热环境格局的变化情况是研究的难点。在廊道的构建上,过往研究多使用最小阻力模型模拟潜在廊 道,再通过重力模型计算网络中心之间的相互作用强度以评价各潜在廊道的重要性,最后利用自然断点法对 重要廊道进行单层网络分级。但单层分级的方法无法体现物质能量流动的复杂性和系统性,本文尝试探索新 的方法构建既相对独立又相互联系的多层级网络结构。

针对天津市热环境的研究,已有学者从风道建设的角度构建了"源-流-汇"系统的绿色控制理论框架<sup>[19]</sup>。 本文将从生态格局与过程的角度构建缓解天津市热环境的多层级"源-汇"景观网络,首先利用标准差和异常 值对数据的可用性进行评价并对"源""汇"景观进行划分,基于多项评价标准对中心"源""汇"进行提取;其 次使用空间主成分分析法构建热环境格局评价模型,根据 2009—2013、2013—2018 年热环境格局的变化情况 设置 4 类系数对基本阻力面进行修正;最后对"源-源"、"汇-汇"、"源-汇"廊道进行叠加优化,构建体现"补偿-输送-作用"过程的多层级"源-汇"景观网络。

#### 1 研究区域与数据来源

#### 1.1 研究区域概况

本文以天津市六区(和平区、河北区、河东区、河西区、南开区、红桥区)和新四区(东丽区、津南区、西青区、北辰区)为研究对象(图1),总面积207696 hm<sup>2</sup>。研究区位于华北地区海河流域下游,地处华北平原,地势平坦,临近渤海湾,受地形和海洋性气候的共同影响,夏季炎热,冬季寒冷,四季分明。市六区的城市化进程较

快,近年来城市建设范围不断向新四区扩张<sup>[20]</sup>,城市高温范围呈扩大趋势,热岛强度以每 10 年 0.11℃的速率 增加<sup>[21]</sup>,历史最高气温为 41.6℃<sup>[22]</sup>。



图 1 研究区池園 Fig.1 Study area

### 1.2 数据来源与处理

本研究所用数据主要包括:①2009 年 8 月 30 日 Landsat TM 影像、2013 年 8 月 25 日和 2018 年 8 月 23 日 Landsat OLI 影像,来自美国地质调查局网站(http://earthexplorer.usgs.gov);②高程数据(DEM),来自地理空 间数据云网站(https://www.gscloud.cn/);③水网数据,来自全国地理信息资源目录服务系统(http://www.webmap.cn/)。通过辐射定标、大气校正、几何校正、监督分类、人工目视解译、裁剪等处理,得到总体精度高 于 90%和分辨率为 30 m 的 2009、2013、2018 年土地利用类型图,将研究区的土地利用类型分为建设用地、块 状水域、带状水域、绿地和耕地 5 类。

### 2 研究方法

#### 2.1 数据可用性分析

针对建设用地、块状水域、带状水域、绿地、耕地 5 种土地利用类型,以世界气象组织提出的两倍标准差为标准<sup>[23]</sup>,划定各类型地表温度的 95%置信区间 [*x̄* - 2*σ*,*x̄* + 2*σ*](公式 1)。参考相关研究<sup>[15]</sup>,认为建设用地地表温度低于研究区平均地表温度 2℃为异常,水域、植被地表温度高于研究区平均地表温度 2℃为异常。当各类型地表温度的 95%置信区间上、下限在正常范围之内时认为数据可用于后续研究。

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n}}$$
(1)

式中: $\sigma$ 为标准差,n为样本数量, $x_n$ 为第n个样本值, $\bar{x}$ 为该组数据平均值。

2.2 "源""汇"景观划分与网络中心提取 本研究将缓解城市热的低温景观作为"源"景观,将加剧城市热的高温景观作为"汇"景观。针对 2009、
2013、2018 年数据,分别将低于研究区平均地表温度的土地利用类型划分为"源"景观,高于研究区平均地表 温度的土地利用类型划分为"汇"景观。利用 GUIDOS 软件,使用 30 m×30 m 栅格数据,设置边宽为1、邻域为

温度的土地利用类型划分为"汇"景观。利用 GUIDOS 软件,使用 30 m×30 m 栅格数据,设置边宽为 1、邻域为 8 的规则,对"源"为前景和"汇"为前景的景观形态学空间格局进行分析,得到的数据含 7 种景观类型:核心 区、桥接区、边缘、孤岛、环道、支线、孔隙。

利用 ArcGIS 的相交工具对 2009、2013、2018 年的"源"核心区进行叠加,重叠部分在长时间内都保持了较高稳定性,在 2018 年"源"核心区中识别出包含有这些重叠部分的斑块,从中筛选低于核心区平均热贡献度、面积大于 200 hm<sup>2</sup>、连通性重要程度在前 4 级的斑块作为 I 类中心"源";筛选面积在 10—200 hm<sup>2</sup>位于市六区内的斑块作为 II 类中心"源";由它们共同组成多层级"源-汇"景观网络的中心"源"。在中心"汇"的提取上,

由于城市扩展使得"汇"面积逐年增加,所以仅从 2018 年的"汇"核心区中选取高于该区平均热贡献度、面积 大于 200 hm<sup>2</sup>、连通性重要程度在前 4 级的斑块作为多层级"源-汇"景观网络的中心"汇"。斑块的热贡献度 (*CI*)的计算方法如下:

$$CI = (\overline{\text{LST}_i} - \overline{\text{LST}}) \times \frac{S_i}{S}$$
 (2)

式中: *CI* 为斑块的热贡献度, LST<sub>i</sub> 为斑块的地表平均温度, LST 为当年研究区的地表平均温度, *S<sub>i</sub>* 为斑块面积, *S* 为研究区面积。源的 *CI* 值为负值, 汇的 *CI* 值为正值。

2.3 阻力面构建

2.3.1 评价指标与标准化

地表覆被直接影响入射的太阳净辐射能在地表面的转换和再分配的过程,而太阳净辐射能主要分配于近 地层感热通量(地气显热交换)、近地层潜热通量(蒸发或凝结)和土壤热流<sup>[24]</sup>,为此选择地表参数中的地表 温度、湿度指数、归一化植被指数、改进归一化差异水体指数、裸土指数、坡度指数作为衡量"热环境"的有效 指标。

(1)地表温度<sup>[25]</sup>(LST)

地表温度的高低直接决定了人们的热舒适度,过高的地表温度会严重干扰生产生活的正常运行,其计算 公式为:

LST = 
$$\frac{K_2}{\ln(K_1/B(T_s) + 1)}$$
 (3)

式中:  $B(T_s)$  为黑体热辐射亮度, Landsat TM 中 $K_1$ =607.76 W/(m<sup>2</sup> ·  $\mu$ m · sr),  $K_2$ =1260.56 K; Landsat TIRS 中的 $K_1$ =774.89 W/(m<sup>2</sup> ·  $\mu$ m · sr),  $K_2$ =1321.08 K<sub>o</sub>

(2)湿度指数(WET)

该指数是影响地表温度的重要因素,值越大代表地表潮湿程度越大,其计算公式为:

WET(OLI) =  $0.1511\rho_{Blue} + 0.1973\rho_{Green} + 0.3283\rho_{Red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{MIR1} - 0.4559\rho_{MIR2}$  (4)

WET(TM) =  $0.0315\rho_{Blue} + 0.2021\rho_{Green} + 0.3102\rho_{Red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{MIR1} - 0.6109\rho_{MIR2}$  (5) (3) 归一化植被指数(NDVI)

该指数主要表征植物的生长状况和茂盛程度,可以间接反映植被覆盖的变化情况,值越大代表植物长势 越好<sup>[26]</sup>,其计算公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$$
(6)

(4)改进归一化差异水体指数<sup>[27]</sup>(MNDWI)

该指数能准确区分水体与建筑阴影,可精确提取城市范围内的水域。其计算公式为:

$$MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{MIR1}}{\rho_{Green} + \rho_{MIR1}}$$
(7)

(5)裸土指数(BSI)

裸土是指还未被利用的裸露土地,是城市建设和绿化的主要对象,指数值越大表示土地利用程度越低。 其计算公式为:

$$BSI = \frac{(\rho_{MIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})}{(\rho_{MIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})}$$
(8)

式中: $\rho_{Blue}$ 、 $\rho_{Green}$ 、 $\rho_{Red}$ 、 $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{MIR1}$ 、 $\rho_{MIR2}$ 分别为 landsat8 携带的陆地成像仪和 landsat5 携带的专题制图仪中 所采集的蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、短红外波1、短红外波2。

(6) 坡度指数

http://www.ecologica.cn

地形坡度能改变气流的速度和方向,影响近地层的热交换以及坡地温度。利用 ArcGIS 的软件坡度分析 工具可得到研究区地形坡度特征。

由于以上 6 个指标的单位和数值范围各不相同,难以进行比较评价。将采用 z-score 标准变换法进行数据的标准化处理(公式 9),使得标准化后的样本均值为 0,方差为 1,且无量纲。

$$Y_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \tag{9}$$

式中:  $Y_i$  为标准化后的值,  $X_i$  为指标的实际值;  $\overline{X}$  为指标的均值; S 为指标的标准差。

2.3.2 空间主成分分析

空间主成分分析是一种多变量统计方法,可将存在相关性的变量数据转换为线性不相关的变量数据,能 直观地将空间数据信息对应到二维空间<sup>[18]</sup>,比人为确定权数更有助于研究的客观性<sup>[28]</sup>。借助 AreGIS 的波 段合成工具将以上标准化后的6个指标合成为一个栅格数据,再利用空间主成分分析工具进行分析,选择方 差累计贡献率大于90%<sup>[29]</sup>的主成分因子构建热环境格局评价模型(公式10),热环境格局值(TEPV)越高表 示热环境越恶劣,值越低表示热环境越优越。

$$\text{TEPV} = K_1 \times PC_1 + K_2 \times PC_2 + \dots + K_n \times PC_n \tag{10}$$

式中: TEPV 为热环境格局值,  $K_n$  为第 n 个主成份的贡献率,  $PC_n$  为第 n 个主成分因子。 2.3.3 阻力面修正

将 2009、2013、2018 年的热环境格局值进行标准化处理(公式 9),在像元尺度上比较 2009—2013 年、2013—2018 年热环境格局值的变化情况(公式 11),将 *V*<sub>2009—2013</sub> ≤0 与 *V*<sub>2013—2018</sub> ≤0 的数据相交得到热环境格局在 2009—2018 年间持续好转或稳定的像元(I类),将 *V*<sub>2009—2013</sub> >0 与 *V*<sub>2013—2018</sub> ≤0 的数据相交得到热环境格局在 2013 年恶化后 2018 年又好转的像元(II类),将 *V*<sub>2009—2013</sub> ≤0 与 *V*<sub>2013—2018</sub> >0 的数据相交得到热环境格局在 2013 年好转后 2018 年又恶化的像元(II类),将 *V*<sub>2009—2013</sub> >0 与 *V*<sub>2013—2018</sub> >0 的数据相交得到热环境格局在 2009—2018 年间持续恶化的像元(II类)。

以 2018 年热环境格局现状为基本阻力面,针对 I—IV类像元分别设置修正系数,对基本阻力面进行修正 (公式 12)。要求修正后的各像元阻力值仍符合自身土地利用类型的热物理特性,同时又能突显像元在各自 类型中的潜力和稳定程度,使热环境格局较好且相对稳定有潜力的像元阻力值降低,让它们在构建廊道时更 容易被识别,以保证廊道构建的合理性和稳定性。

$$V_{a-b} = Y_{\text{TEPVb}} - Y_{\text{TEPVa}} \tag{11}$$

$$R' = K \times R_i \tag{12}$$

式中:  $Y_{\text{TEPVa}}$ 、 $Y_{\text{TEPVb}}$ 为 a 年份和 b 年份标准化后的热环境格局值,  $V_{a-b}$ 为 a 年到 b 年热环境格局变化的差值,  $R_i$ 为栅格 i 的基本阻力值, R'为栅格 i 修正后的阻力值, K 为修正系数。

2.4 多层级"源-汇"景观网络廊道构建

首先利用 AreGIS 的最小累积阻力模型依次模拟"源"之间多对多的最小成本路径,"汇"之间多对多的最小成本路径,以及单个"汇"与所有"源"之间一对多的最小成本路径。其次引入重力模型定量计算各网络中心的相互作用强度(公式 13),选择合适的相互作用强度阈值,确保多对多路径的中心"源"和中心"汇"、一对多路径的中心"汇"均被连通,从而提取出"源-源"、"汇-汇"、"源-汇"廊道。最后用 AreGIS 分析模块中的相交工具将以上三个廊道进行叠加相交,获得 I 级补偿廊道;将"源-源"与"源-汇"廊道叠加相交,获得 II 级输送引导廊道;将"源-汇"与"汇-汇"廊道叠加相交,获得 II 级作用廊道。由 I、II、II 级廊道构成多层级"源-汇"景观网络廊道。

$$G_{ab} = \frac{L_{max}^2 \ln S_a \ln S_b}{L_{ab}^2 P_a P_b}$$
(13)

式中: Gab 为网络中心 a 和 b 之间相互作用强度, Lmax 为所有潜在廊道中的最大阻力值, Lab 为网络中心 a 到网

络中心 b 之间潜在廊道的累积阻力值,  $S_a \, \langle S_b \rangle$ 为网络中心  $a \, \pi b$ 的面积,  $P_a \, \langle P_b \rangle$ 为网络中心  $a \, \pi b$ 的阻力值。

# 3 结果与分析

#### 3.1 数据可用性分析

2009、2013、2018 年研究区平均地表温度为 26.1℃、38.3℃、35.7℃,对比各类型地表温度的 95% 置信区间 上、下限值与正常值范围(表 1),可知各土地利用类型的地表温度基本在正常值范围之内。但 2013 年有极少 数的植被地表温度高于正常值范围,这可能是 2013 年夏季高温、降水量较常年同期偏少两成所致<sup>[30]</sup>。此外, 建设用地可能受到建筑阴影和夏季树木遮蔽的影响,使得其 95% 置信区间的下限值低于正常值范围。依据 世界气象组织对温度提出的第二判别标准<sup>[23]</sup>,用 1.5 倍标准差分析,该下限值仍处在正常范围之内,由此认 为所有数据均可用于后续研究。

	Table 1         Pixel surface temperature description statistics of land use types										
年份 Year	土地利用类型 Land use types	类型平均地表温度/℃ Average surface temperature	标准差 Standard deviation	95%置信区间/℃ 95% Confidence interval	正常值范围/℃ Normal value range						
2009	建设用地	27.9	2.6	22.7—33.1	≥24.1						
	块状水域	22.6	1.2	20.2—25	≤28.1						
	带状水域	23.1	1.2	20.7—25.5	≤28.1						
	绿地	24.7	1.7	21.1—28.1	≤28.1						
	耕地	24.5	1.5	21.5—27.5	≤28.1						
2013	建设用地	40.7	3.1	34.5—46.9	≥36.3						
	块状水域	34.3	2.6	29.1—39.5	≤40.3						
	带状水域	32.6	1.9	28.8—36.4	≤40.3						
	绿地	36.3	2.2	31.9—40.7	≤40.3						
	耕地	36.7	2.1	32.5—40.9	≤40.3						
2018	建设用地	38.2	3.1	32.0—44.4	≥33.7						
	块状水域	30.9	2.3	26.3—35.5	≤37.7						
	带状水域	32.4	2.6	27.2—37.6	≤37.7						
	绿地	33.8	1.9	30.0—37.6	≤37.7						
	耕地	32.6	1.8	28.5—35.7	≤37.7						

表1 土地利用类型的像元地表温度描述统计

#### 3.2 中心"源-汇"

针对 2009、2013、2018 年数据,分别将低于研究区平均地表温度的块状水域、带状水域、绿地、耕地划分为 "源"景观,高于研究区平均地表温度的建设用地划分为"汇"景观(表1)。对"源"为前景和"汇"为前景的景 观形态学空间格局进行分析,其中"源"景观的核心区斑块温度最低,"汇"景观的核心区斑块温度最高 (表2)。从 2018 年"源"核心区中筛选出中心"源"27 个(图5),总面积约为 22773 hm<sup>2</sup>,占研究区面积的 11%。其中,I类中心"源"17 个(表3),以大面积耕地、块状水域和带状水域为主,土地利用类型多年来基本 保持稳定,除部分带状水域流经市六区外,其它主要集中在研究区西南部和东北部的耕种养殖区;II类中心 "源"10 个,以面积较小的块状水域和绿地为主,全部位于市六区内,占各自行政区面积的 0.4%—2.8%左右。 从 2018 年"汇"核心区中筛选出中心"汇"23 个(图6),总面积约为 50732 hm<sup>2</sup>,占研究区面积的 24.4%,主要 由大面积建设用地组成。各行政区内中心"汇"的面积都大于中心"源"的面积,市六区内超 80%的面积为中 心"汇",热环境问题较为突出。

祝之 际 L 泉枕/叶天至地农于均温及/G							
	Table 2   Average	surface temp	perature of seven	types of "sourc	e-sink" landscap	e	
类型	核心区	桥接区	边缘	孤岛	环道	支线	孔隙
Types	Core	Bridge	Edge	Islet	Loop	Branch	Perforation
"源"景观"Source" landscape	30.3℃	31.6°C	31.8°C	34.5℃	32.0°C	33℃	30.7℃
"汇"景观"Sink" landscape	38.8°C	34°C	34.7℃	37.3℃	35.8°C	33.4℃	35.8℃

"源""汇" 暑观 7 种类型地表平均温度/℃ 主っ

表3"源""汇"	景观斑块重要桯度分级
----------	------------

Table 3 Importance classification of "source-sink" landscape patches

		-			-	-		
类型 Types	等级 Level	I级 Level I	Ⅱ级 Level Ⅱ	Ⅲ级 Level Ⅲ	Ⅳ级 Level Ⅳ	V级 Level V	VI级 Level VI	₩级 Level ₩
I 类中心"源"	斑块数量	3	1	8	5	6	12	6
Class I center "source"	重要程度值	22.2—41.4	12.1-22.2	6.3—12.1	3.3—6.3	2.4-3.3	1.3—2.4	0.8—1.3
中心"汇"	斑块数量	6	6	5	6	7	16	15
Center "sink"	重要程度值	10.9—14.9	6.7—10.9	4.2—6.7	3.1-4.2	2.1-3.1	1.1-2.1	0-1.1

# 3.3 最终阻力面

依据空间主成分分析结果(表4),提取方差累计贡献率大于90%的前4个主成分因子,分别构建2009、 2013、2018年热环境格局评价模型(公式14—16),利用自然断点法对热环境格局值进行高、中、低分级 (图 2-4),其中 2009-2018 年热环境格局的中值区增长了近 1.2 倍,高值区增长了约 1.6 倍,中值区和高值 区在 2018 年分别达到研究区总面积的 62.4%和 31.3%, 热岛现象非常明显。

表 4 空间主成分分析结果									
		Table 4	The results o	f spatial prin	cipal compor	nent analysis			
主成分因子		特征值		方差贡献率%			方差累计贡献率%		
Principal	Characteristic value			Variance contribution rate			Cumulative contribution rate of variance		
component factor	2009 年	2013 年	2018 年	2009 年	2013 年	2018 年	2009 年	2013 年	2018年
PC <sub>1</sub>	1.311	1.980	1.172	36.6	55.6	32.9	36.6	55.6	32.9
$PC_2$	1.159	0.621	0.963	32.3	17.4	27	68.9	73.0	59.9
$PC_3$	0.593	0.374	0.596	16.5	10.5	16.7	85.5	83.5	76.7
$PC_4$	0.232	0.306	0.594	6.5	8.6	16.7	91.9	92.1	93.4



http://www.ecologica.cn



图 4 2018 年热环境格局 Fig.4 Thermal Environment Pattern Value in 2018

 $\text{TEPV}_{2009} = 0.366 \times PC_1 + 0.323 \times PC_2 + 0.165 \times PC_3 + 0.065 \times PC_4 \tag{14}$ 

 $\text{TEPV}_{2013} = 0.556 \times PC_1 + 0.174 \times PC_2 + 0.105 \times PC_3 + 0.086 \times PC_4 \tag{15}$ 

$$\text{TEPV}_{2018} = 0.329 \times PC_1 + 0.27 \times PC_2 + 0.167 \times PC_3 + 0.167 \times PC_4 \tag{16}$$

以 2018 年热环境格局为基本阻力面,通过表 5 可知基本阻力面的建设用地在四类像元中都有适量分布, 这是由于城市道路绿化、建筑遮挡、城市建设等复杂环境都有可能影响建设用地的热环境格局;而作为热环境 格局稳定的水域类型却多分布在Ⅱ类像元,通过查阅相关文献<sup>[30—31]</sup>发现天津 2013 年夏季高温少雨、海河水 域爆发了相当厚度的大面积蓝藻,导致水体的热调节能力减弱,热环境格局值出现明显波动;绿地和耕地多为 Ⅲ类像元,出现这种波动主要是由于耕种类型和植被长势发生较大变化所致<sup>[32]</sup>。

	Table 5	Distribution propor	tion of land use typ	es in class I—IV	τ	
土地利用类型 Land use types	持续好转 或稳定/% Continuous improvement or stability	恶化后好转/% Get better after deterioration	好转后恶化/% Get worsen after improvement	持续恶化/% Continuous deterioration	修正前的 阻力值 Resistance value before correction	修正后的 阻力值 Corrected resistance value
建设用地 Development land	14.2	43.3	24.0	18.4	360	349
块状水域 Massive waters	23.7	58.4	9.5	8.4	152	146
带状水域 Banded waters	15.9	56.3	19.3	8.5	209	201
绿地 Green space	9.8	24.8	52.5	12.9	318	312
耕地 Cultivated land	6.0	13.9	70.4	9.8	302	298

表 5 土地利用类型的在 Ⅰ—Ⅳ类中的分布比例

将 I — IV 类像元分别设置修正系数为 0.92、0.95、0.98、1。修正后,大量块状水域、带状水域以及有好转潜 力的绿地和耕地的阻力值进一步降低,成为同类型中构建廊道的优势像元。对比修正前后各土地利用类型的 平均阻力值,仍保持了块状水域和带状水域最低、耕地和绿地其次、建设用地最高的特点,说明最终阻力面的 构建达到了预期目的(图 9)。

3.4 多层级"源-汇"景观网络廊道

通过 ArcGIS 的最小累积阻力模型模拟最小成本路径,得到"源-源"潜在廊道 351 条,从中提取出"源-源"

廊道 55 条共 1403 km; "汇-汇"潜在廊道 253 条,从中提取出"汇-汇"廊道 30 条共 877 km; "源-汇"潜在廊道 621 条,从中提取出"源-汇"廊道 89 条共 2053 km。"源-源"廊道中的 21 号中心"源"(图 5)、"汇-汇"廊道中的 4、23 号中心"汇"(图 6)仅能被单条廊道连通,说明它们在热环境中相对独立,受同类斑块的影响较小; "源-汇"廊道中的 20 号中心"源"与所有"汇"均不连通(图 7),表明该"源"的利用不充分。



在多层级"源-汇"景观网络廊道中(图8), Ⅰ级补偿廊道主要由海河、子牙河、永定新河、独流减河等一级 河道构成,能够拉动城市新鲜冷空气交换,是补偿能量的主干;Ⅱ级输送引导廊道连接中心"源""汇",将冷资 源进行再次分配,是传递能量的支线;Ⅲ级作用廊道处在热环境问题突出的建成区,在北辰区和市六区内分布 密集,是"源""汇"作用的末端。为观察冷资源在网络廊道中的流动过程,将廊道缓冲 50 m 后叠加 2018 年地 表温度,可见"源"沿各级廊道逐渐向"汇"传递能量的路径(图 10),体现了廊道具有"补偿-输送-作用"的功 能,可为区域热环境格局的优化提供有效参考。



# 4 讨论与结论

# 4.1 讨论

(1)在数据可用性分析上,不同土地利用类型的热物理特性存在差异且地表温度受气候的影响明显,将2℃作为所有土地利用类型相对温差的统一标准时,可能使得某些土地利用类型的正常地表温度被认为异常,这时可适当调整标准差倍数再进行数据的可用性判别。

(2) 在阻力面修正上,本研究使用的修正系数虽然通过反复比对测算,能满足预设的修正要求,但仍具有 主观性。因此,如何设计修正系数公式是需进一步思考的问题。当修正的年份越多、数据越密集时,可利用多 个修正系数同时对基本阻力面进行修正,使最终阻力面的信息量更大更精确。

(3) 在网络构建上, 研究区内没有国家级湿地公园和森林公园, 中心"源"中有一部分是抗退化能力较差、 易受人为影响的斑块, 它们的变化将直接影响网络结构的稳定性。如何有效构建人类活动与气候变化下稳定 可持续的景观网络是将来需要着重研究的问题。

(4) 在生态格局与过程上,本研究在网络廊道分级时没有沿用自然断点分级法,而是通过强调不同网络 类型间的共有信息来突出"源"在网络廊道中的主导地位,从而在"源""汇"间构建既相对独立又相互联系的 多层级景观网络,体现了能量流动的联系过程,为缓解城市热环境问题的后续研究提供了新的思路。 4.2 结论

(1)多层级"源-汇"景观网络有 27 处中心"源"和 23 处中心"汇",其中Ⅰ类中心"源"抗干扰能力小,热环境格局值随年份上下波动明显;Ⅱ类中心"源"作为热环境中的"踏脚石",其数量与分布较少。建议控制耕种类型以稳定植被的气候服务功能;防止水体富营养化以避免蓝绿藻爆发影响水域的热交换能力;分散式增加公园绿地和水域以促进"源""汇"之间能量交换频率。

(2)多层级"源-汇"景观网络总长度约为1445 km,新四区的廊道占总廊道的70%。廊道在空间上分布不均,津南区分布稀疏,北辰区和市六区分布密集。Ⅰ级补偿廊道是调节区域气候的重要部分,建议从河道治理、河堤高度、整合岸线资源等方面开展生态规划保护;Ⅱ级输送引导廊道是将冷空气传送到中心"汇"的重要桥梁,建议从廊道走向、地形地貌、廊道内布置等方面保障廊道连接通畅;Ⅲ级作用廊道是热交换的主要场所,建议从拓宽横截面、加强沿线生态绿化建设等方面优化廊道微气候环境。

(3)在多层级"源-汇"景观网络中,贯穿市区的海河流向与天津夏季盛行的偏南风向较为一致,建议从统

筹改善城市整体热环境的角度出发,规划廊道与主导风的夹角;根据海河流向调整廊道走向;在研究区东南部 加选冷源、增设廊道,提升Ⅱ级和Ⅲ级廊道的连接度。通过城市新鲜冷空气的快速补偿,实现缓解城市热环境 气候的目标。

#### 参考文献(References):

- Ziska L H, Bunce J A, Goins E W. Characterization of an urban-rural CO<sub>2</sub>/temperature gradient and associated changes in initial plant productivity during secondary succession. Oecologia, 2004, 139(3): 454-458.
- [2] 蒋欣桐. 全球地方主义治理理念下的跨国城市气候网络研究[D]. 北京: 外交学院, 2021.
- [3] 苏王新,常青,刘筱,张刘宽.城市蓝绿基础设施降温效应研究综述.生态学报,2021,41(7):2902-2917.
- [4] 殷炳超. 气候变化下的闽南地区景观连接度评估与生态廊道构建[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [5] 许翔, 郭吴羽, 黄鼎曦, 李晓晖, 廖绮晶, 李诗, 王雪漫, 肖媛, 聂危萧, 吴婕, 赖奕堆, 郭亮. 聚焦城市降温关键问题的可持续发展解决 方案——世界银行与广州的"清凉城市"试点实践. 城市规划, 2021, 45(6): 52-62.
- [6] 赵晨晓,刘春卉,魏家星.缓解城市热岛效应的南京市绿色基础设施网络构建方法.浙江农林大学学报,2021,38(6):1127-1135.
- [7] 成雅田,吴昌广.基于局地气候优化的城市蓝绿空间规划途径研究进展.应用生态学报,2020,31(11):3935-3945.
- [8] 林孟龙,曹宇,王鑫.基于景观指数的景观格局分析方法的局限性:以台湾宜兰利泽简湿地为例.应用生态学报,2008,19(1):139-143.
- [9] 陈利顶,傅伯杰,赵文武."源""汇"景观理论及其生态学意义.生态学报,2006,26(5):1444-1449.
- [10] 度苗苗.2000—2014年北京地区冬、夏季热环境时空分异研究[D].北京:中国地质大学(北京),2017.
- [11] 李丽光, 许申来, 王宏博, 赵梓淇, 蔡福, 武晋雯, 陈鹏狮, 张玉书. 基于源汇指数的沈阳热岛效应. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3446-3452.
- Pramanik S, Punia M. Land use/land cover change and surface urban heat island intensity: source-sink landscape-based study in Delhi, *India*.
   Environment, Development and Sustainability, 2020, 22(8): 7331-7356.
- [13] 孙宗耀, 孙希华, 徐新良, 黄宁钰, 吴晨, 乔治. 土地利用差异与变化对区域热环境贡献研究——以京津冀城市群为例. 生态环境学报, 2018, 27(7): 1313-1322.
- [14] 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.
- [15] 陆晓君,刘珍环.城市"源-汇"热景观变化及其空间作用强度特征——以深圳西部地区为例. 生态学报, 2021, 41(16): 6329-6338.
- [16] 杨凯,曹银贵,冯喆,耿冰瑾,冯漪,王舒菲.基于最小累积阻力模型的生态安全格局构建研究进展.生态与农村环境学报,2021,37 (5):555-565.
- [17] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.
- [18] 李航鹤,马腾辉,王坤,谭敏,渠俊峰.基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究. 生态与农村环境学报,2020,36(8):1036-1045.
- [19] 曾穗平. 基于"源—流—汇"理论的城市风环境优化与 CFD 分析方法——以天津市为例[D]. 天津:天津大学, 2016.
- [20] 孟凡超,郭军,李明财,张雷,张瑞雪.天津市单次极端低温过程中城市热岛对建筑负荷的影响.地理科学, 2020, 40(10): 1753-1762.
- [21] 韩素芹, 郭军, 黄岁樑, 边海. 天津城市热岛效应演变特征研究. 生态环境, 2007, 16(2): 280-284.
- [22] 梁颢严, 孟庆林, 李琼, 任鹏. 城市设计中的气候分析和评价方法研究——以天津为例. 建筑节能, 2019, 47(6): 93-97, 127.
- [23] 王延贵, 孙茂璞, 王友强. 济宁市近四十年气温异常分析. 山东气象, 2001, 21(3): 26-27.
- [24] 李彦,黄妙芬.绿洲-荒漠交界处蒸发与地表热量平衡分析.干旱区地理,1996,19(3):80-87.
- [25] 邓书斌,陈秋锦,杜会建. ENVI 遥感图像处理方法. 北京:高等教育出版社, 2014.
- [26] 潘竞虎,刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化——以张掖市甘州区为例. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3126-3136.
- [27] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [28] 林海明, 杜子芳. 主成分分析综合评价应该注意的问题. 统计研究, 2013, 30(8): 25-31.
- [29] 杨春旭. 医院核心竞争力分析与综合评价体系研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [30] 中国新闻网.天津今夏气温 13 年来最高降水量偏少两成.(2013-09-11)[2022-03-31].https://www.chinanews.com.cn/sh/2013/09-11/ 5270011.shtml.
- [31] 于洪利, 杜庆有.天津海河 2013 年蓝藻暴发过程及相关因素分析. 海河水利, 2017(S1): 30-33.
- [32] 杨朝斌. 城市空间结构对城市热环境时空异质性分布影响研究[D].长春:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2018.