

DOI: 10.5846/stxb202009162413

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.

Lu X J, Liu Z H. The “source-sink” thermal landscape change and their interactions across space in urban area: A case study in the western part of Shenzhen City. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6329-6338.

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

陆晓君, 刘珍环*

中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275

摘要:城市热岛作为一种整体涌现性的地球表层系统环境问题受到地理学和景观生态学的广泛关注, 基于空间异质性对城市冷热岛影响方面的研究初步揭示了城市热环境的形成机制, 然而城市冷热岛在空间上是否存在相互影响及相互作用强度还有待研究。以深圳市西部城市区为例, 应用地表温度和景观分类数据, 通过构建二维矩阵识别“源-汇”热景观, 并采用“源-汇”热贡献指数和空间引力模型等方法定量分析了城市“源-汇”热景观的演变过程, “源-汇”热贡献程度的时空分异特征, 以及两者在空间上的整体相互作用强度及演变特征。结果表明: (1) 1988—2019 年, 城市热源、汇在空间上呈现由包围到反包围的变化, 热源景观呈现基质化, 其面积增长 210.45%; 热汇景观则表现为破碎化趋势, 其面积减少 48.07%。与之对应的热汇景观地表温度与区域的平均温度的温差逐渐增大, 从 1988 年的 0.49℃ 上升到 2019 年的 1.91℃。(2) 源、汇对热环境的贡献规模呈增长趋势, 热源景观的贡献程度会随着热岛规模从零星状向区域化的转变过程中提升, 形成温度聚集效果; 而热汇景观的贡献程度会随着冷岛规模的破碎化过程中被抑制。(3) 1988—2019 年“源-汇”热景观的作用对基本保持稳定, 但总作用强度发生了显著的变化, 30 年间增长了 8 倍。从热汇景观一对多影响热源景观转变为热源景观一对多影响热汇景观, 且作用强度也越来越强。研究发现城市热“源-汇”的空间相互作用强度与“源-汇”热景观的贡献程度有密切关联, 因此控制热源景观规模和维护热汇景观规模对调控城市热环境, 对提升城市居民生活质量有重要意义。

关键词:“源-汇”热景观; 热环境; 贡献指数; 引力模型; 空间相互作用

The “source-sink” thermal landscape change and their interactions across space in urban area: A case study in the western part of Shenzhen City

LU Xiaojun, LIU Zhenhuan*

School of geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Urban heat island is an emerging environmental problem worldwide, and has been widely concerned by the interdisciplinary of geography and landscape ecology. Many previous studies have discovered that the impact mechanism of landscape pattern on urban heat/cold island varied across space. However, as far whether the urban hot/cold island has mutual effects and how the intensity of their interaction may change over space remain uncertain. By focusing on the western part of Shenzhen city as the case study area and based on land surface temperature (LST) and landscape types, this study constructed a two-dimensional matrix to identify the source/sink thermal landscape. Then, a contribution index (CI) was used to quantitatively analyze the evolution process of the source/sink thermal landscape. The Gravity Model was used to quantify the intensity of interaction between thermal source landscape and thermal sink landscape during the 1988—2019. The results showed that (1) the urban thermal sink patches originally surrounded by sporadic thermal source patches in

基金项目: 国家自然科学基金 (41571172)

收稿日期: 2020-09-16; 网络出版日期: 2021-05-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuzhh39@mail.sysu.edu.cn

1988 were reversed in 2019. The area of thermal source landscape increased by 210.45%, while the thermal sink landscape showed a fragmentation trend, and decreased in area by 48.07%. The difference between regional average LST and that in thermal sink landscape increased from 0.49°C in 1988 to 1.91°C in 2019. (2) The CI of the thermal “source-sink” landscape had an increasing trend during the past thirty years. In more detail, the CI of thermal source landscape increased when the discrete thermal source patches became spatially more continuous, which aggregated LST. Meanwhile, the CI of thermal sink landscape is inhibited with the fragmentation of thermal sink landscapes. (3) In 1988—2019, the interaction between sources and sink thermal patches was relatively stable. However, the intensity of their interaction quantified by gravity model increased eight times after 30 years. Besides, the linking pattern of source and sink landscape from one sink to many sources changed from one source to many sinks, which led the intensity of link pairs to become stronger and stronger. Overall, our results indicated that the intensity of spatial interaction between urban thermal source-sink landscapes are closely related to the contribution degree of source/sink thermal landscape. Therefore, controlling the size of thermal source landscape and maintaining the size of thermal sink landscape are very important strategic for land policy makers to regulate urban thermal environment. It is also important to improve the quality of life of urban residents.

Key Words: source/sink thermal landscape; thermal environment; contribution index; gravity model; spatial interaction

热岛效应是城市化过程中最为典型的一种城市环境问题,几乎所有的大城市区都存在程度不一的热岛^[1]。它对城市生活、生产及居民健康都有显著影响^[2-3]。如何构建城市热岛效应的适应与缓解策略已成为城市人居环境、城市规划与城市景观生态建设等领域的焦点议题。现有的景观格局-热能量过程方面的研究主要关注景观格局与地表温度空间异质性的关系^[4-5],而城市冷热岛在空间上是否存在相互影响及相互作用强度尚未受到足够的重视。城市冷热岛的空间作用形式和强度是缓解城市热岛的科学策略的关键问题,对于合理规划景观斑块和调控冷热岛空间布局至关重要。

城市热岛形成受到城市扩展、景观变化与气候变化等多方面因素的影响^[6-7]。城市发展直接改变城市景观格局,决定了地表温度(Land Surface Temperature, LST)的空间异质性^[8],影响城市热岛的规模和作用程度^[9-10]。“源-汇”景观理论将城市热岛的形成科学假设为城市“源”、“汇”热景观在空间上分布失衡所致^[11]。目前,关于“源-汇”景观的识别并没有相对统一的标准,有基于土地利用/覆被类型划分^[12-14],将蓝、绿色景观作为热汇^[15-16],灰色景观作为热源^[17];也有采用地表温度,基于空间自相关^[18]或贡献度指标^[19],将高温区或对热环境效应贡献高的区域作为热源。然而,仅用土地利用/覆被类型识别热源、热汇,忽视了景观对周边温度的邻域影响^[20];而依据温度等级划分冷热岛则无法考察“源-汇”景观异质性的影响。为此,亟待构建科学的“源-汇”热景观的识别方法与区分特征。

众多研究从城市热环境空间异质性视角开展了城市景观格局与热环境的关系^[21-22],认为灰色景观组分及其空间配置对热岛有显著的增温效果^[23-24];而蓝色、绿色景观的组分和空间配置则对城市降温有显著作用,特别是还存在面积临界阈值、规模效应等非线性特征^[25-26]。热环境空间异质性研究从城市热岛强度判定^[12,14]、热岛范围及其影响^[13]到城市化响应的定量归因都有较好的认识,但总体上是从热源景观视角探索热岛效应的形成机理。近年来,大量针对城市蓝绿景观的降温强度、降温幅度和降温效率及其机制方面的研究^[19-20]也受到了研究者的重视,研究发现蓝绿景观的降温能力与自身及其周围一定范围内的局地景观特征有密切关系^[27],蓝绿色景观的温度越低,对外降温效应越高^[28]。总体而言,当前研究都是试图从现象出发发现城市冷热源形成的普适性规律,进而推动基于自然解决方案的城市热岛效应缓解途径^[29]。然而,单向的热源或热汇研究基本都忽略了景观间的相互作用及其对城市地表温度空间异质性的影响,究其原因是当前还尚未有较好的“源-汇”热景观识别方法,特别是尚不明晰两者的空间相互作用强度和机制^[30]。

本研究选择我国快速城市化的典型地区深圳市的主要城市区为案例区开展研究,深圳市景观格局与地表温度的关系认识已较为清晰^[23-24,31],然而基于“源-汇”热景观及其空间作用的认识尚未开展。研究拟通过构

建“源-汇”热景观的分类方案,建立以增降温效率为基础的热贡献指数定量评估“源-汇”热景观的贡献,进而运用空间引力模型分析“源-汇”热景观作用强度关系^[32],推进对深圳市热景观作用关系的认识,为缓解城市热环境,合理布局景观生态建设提供科学依据。

1 研究区域与数据源

1.1 研究区域概况

深圳市经济特区建立于 1979 年,是广东省南部的亚热带沿海城市($22^{\circ}27'—22^{\circ}52'N$, $113^{\circ}46'—114^{\circ}37'E$),位于珠江口东部,全市总面积约 1997.47 km^2 ,常驻人口超过 1300 多万,城市化过程将一个滨海渔村在短短 40 年内建造成全球性国际化大都市。快速的景观变化过程,改变了区域内自然环境条件,特别是对地表温度、大气环境、自然资源禀赋等都产生了显著的影响。因此,深圳是一个考察景观变化与人类活动影响的典型案例区,图 1 展示的研究区范围,占全市面积 75%,基本涵盖了深圳市主要建成区^[33]。灰色、蓝色和绿色景观在 2019 年的比例分别为 53.90%、4.21%和 41.89%;区域内 10—12 月地表温度平均值从 1988 年的 18.53°C 升高到 25.78°C 。

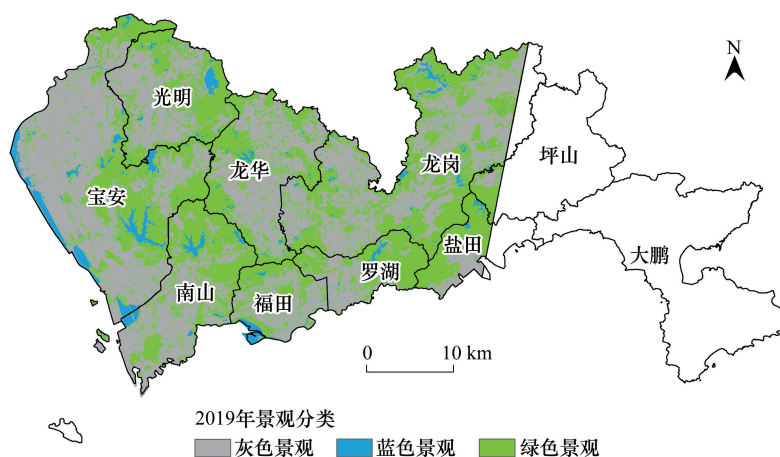


图 1 研究区范围及 2019 年景观分布图

Fig.1 Study area and its distribution of landscape in 2019

1.2 数据预处理

从地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)下载 1988—2019 年 10—12 月间的条带号为 122/44,云量小于 8%的 Landsat TM5/ETM+/OLI 系列影像数据,选用 1988/11/24、1994/10/24、2000/11/01、2006/12/28、2013/11/29 和 2019/11/14 的 6 期覆盖深圳市西部的遥感影像,空间分辨率 30 m。选用 10—12 月的遥感影像,一是为使时序上的 LST 反演可比,二是消除夏季热岛的人为热排放和气象条件在夏季突变的影响,使研究专注于景观变化引起的热“源-汇”动态分析。

在 ENVI 5.3 和 ArcGIS 10.2 软件支持下进行大气校正、辐射定标和几何精校正等前期处理,并进行景观分类和 LST 反演。采用决策树分类^[33]将研究区划分为蓝色景观、绿色景观以及灰色景观三大类,总体精度介于 90.11%—99.38%,Kappa 系数值介于 0.84—0.99。其中,蓝色景观主要指海洋、河流、水库等水体;绿色景观指有植被覆盖的景观类型,包括林地、草地、园地、耕地、公园绿地、高尔夫球场等;灰色景观主要由建设用地和推平未建地等建成景观构成。地表温度反演则采用 Jiménez-Muñoz 等人的辐射传输方程法^[34],空间分辨率为 120 m。

2 研究方法

2.1 “源-汇”热景观分类识别

“源-汇”热景观的分类是研究热环境空间相互作用的基础。已有相关研究表明,相对温差是反映地表温度源-汇空间分布较好的指标^[2],但因地表温度反演的季节性差异,往往导致高低温区的空间分布缺少延续,容易错分;而单纯从地表景观类型出发,也不容易识别混合景观区内温度对某类景观的影响。为此,本研究通过比较发现,综合二者的信息是相对可靠和稳定的分类方案。通过构建地表温度和景观类型的二维矩阵关系进行“源-汇”分类,将相对温差的低、中温及其对应的绿色、蓝色景观归为热汇景观;相对温差的高温区及其对应的绿色景观、高、中温及其对应的灰色景观归为热源。相对温差为低温区的灰色景观受到建筑物阴影遮盖和部分云覆盖的影响,表现为异于正常范围值的特征;还有少量的相对温差为高温区及其对应蓝色景观,受分类精度的影响,在水体周边往往存在混合像元现象,也难以区分真实温度与景观的关系。这两类像元数量很少,研究将这类列为异常值区(表1)。

其中,相对地表温差指数表征源、汇的温度冷热状况,其计算公式^[35]如下:

$$RLST = LST_i - \overline{LST}$$
(1)

式中,RLST为相对地表温差;LST_{*i*}为某年研究区像元*i*的地表温度值, $\overline{LST}$ 为研究区的平均地表温度值。将相对温差按照2℃进行分类,相关研究表明相对地表温差大于2℃会形成热岛区^[36],因此可将RLST<0℃分为低温区,RLST>2℃为高温区,0℃≤RLST≤2℃为中温区。

表1 “源-汇”热景观分类
Table 1 The classification of source-sink thermal landscape

景观类型 Landscape types	相对地表温差 Relative land surface temperature(RLST)	热景观类型 thermal landscape types
蓝色景观 Blue landscape	低温区(RLST<0℃)	热汇景观
	中温区(0℃≤RLST≤2℃)	热汇景观
	高温区(RLST>2℃)	异常值区
绿色景观 Green landscape	低温区(RLST<0℃)	热汇景观
	中温区(0℃≤RLST≤2℃)	热汇景观
	高温区(RLST>2℃)	热源景观
灰色景观 Gray landscape	低温区(RLST<0℃)	异常值区
	中温区(0℃≤RLST≤2℃)	热源景观
	高温区(RLST>2℃)	热源景观

2.2 热环境贡献指数

为定量“源-汇”热景观斑块对区域热环境的贡献,借鉴前人的贡献指数(Contribution Index,CI)开展定量分析^[36,12],其计算公式如下:

$$CI = (\overline{LST_{ij}} - \overline{LST}) \times \left(\frac{A_{ij}}{A}\right)$$
(2)

式中,CI表示为斑块的热环境贡献指数,*i*为斑块序号,*j*为热源景观(或热汇景观); $\overline{LST_{ij}}$ 代表“源-汇”热景观的*i*斑块内部的平均地表温度, $\overline{LST}$ 则表示整个区域的平均地表温度,单位为℃;A_{*ij*}为“源-汇”热景观的*i*斑块的面积和,A则表示整个区域的面积(km²)。热源景观的CI为正值,热汇景观的CI为负值,CI绝对值越大,该斑块对热环境效应贡献程度越高,增降温效果越强。

2.3 “源-汇”热景观作用强度

已有的“源-汇”热环境研究表明,“源-汇”之间的距离越近,彼此影响越大^[37],且热汇景观的降温效应随

斑块规模的增大而增强,离斑块边界越远而降低^[38];基于此,假设“源-汇”热景观之间存在相互吸引及热传递的过程,那么相邻的热源景观与热汇景观之间的热环境贡献度将会是决定温度梯度变化的重要指标。在不考虑热量传递的复杂要素的情况下,为度量热源景观与热汇景观的温度传递过程,我们可以引入空间引力模型将该过程简化为热环境贡献指数在距离上的相互影响过程。空间引力模型已在地理学相关研究中广泛应用,例如被经济地理学用于衡量区域间的联系强度^[39]。在本研究中,其度量热源与热汇之间的关系计算如下:

$$G_{si-so} = -k \frac{CI_{si} \times CI_{so}}{D^2} \quad (3)$$

式中, G_{si-so} 表示热源景观与热汇景观之间的相互作用强度; k 为模型参数,通常取值为 1; D 为热源与热汇斑块质心之间的距离,单位为 km; CI_{si} 和 CI_{so} 分别热汇景观和热源景观对热环境的贡献程度。

3 结果分析

3.1 城市“源-汇”热景观及其地表温度分布特征

图 2 展示的是 1988—2019 年间深圳市西部“源-汇”热景观及其地表温度的空间分布特征。从时序变化来看,1988—2019 年间城市热源和热汇景观在空间上发生了替换变化,热源景观由少量斑块嵌入热汇景观中演变为热汇斑块被嵌入到热源景观中。热源景观基质化,其面积增长 210.45%;热汇景观则不断被切割和破碎化,其面积减少 48.07%,与之对应的热汇景观地表温度与区域的平均地表温度的温差逐渐增大,从 1988 年的 0.49℃ 上升到 2019 年的 1.91℃。

表 2 统计了“源-汇”热景观斑块面积及其地表温度均值。其中,1988 年热源斑块数量相对较多,能够聚集成热源斑块的数量为 136 个,面积 376.01 km²,占区域的 25.46%;热汇斑块数量相对较少,集中连片的热汇斑块约 50 个,面积 976.34 km²,占区域的 66.12%。这一时期,热源景观的地表温度均值比区域的均值高 1.35℃;而热汇景观则低 0.49℃,热岛效应不明显。这一差距随着景观变化逐渐拉大,2000 年热源斑块数量减少到 118 个,而与区域地表温度均值已接近 2℃;热汇斑块增加到 107 个,与区域地表温度差值超过 1℃;这表明区域内热源斑块加大了对区域地表温度的贡献,而热汇景观斑块降温能力随着斑块的破碎化有所降低。2019 年,深圳的主城区和宝安的城郊基本连片,热源景观斑块数量降至 71 个,但面积却增加到 715.23 km²,与之对应的平均温度差值缩小,降至 1.33℃,这表明区域内热源景观成为基质性景观,控制了区域的地表温度朝着高温方向发展,零星分布的热岛演变成了区域性的热岛;而热汇景观斑块的数量增加到 133 个,斑块平均地表温度比区域平均地表温度低 1.91℃,愈发突显热汇景观在区域地表温度调控中的重要作用。

表 2 1988—2019 年深圳市“源-汇”热景观面积与 LST 统计

Table 2 The area of source-sink thermal landscape and its LST in Shenzhen City during 1988—2019

年份 Year	面积(km ²)及比例(%) Area and proportion				平均温度值/℃ The value of mean LST		
	热源面积 Area of source	热源比例 Area proportion of source	热汇面积 Area of sink	热汇比例 Area proportion of sink	区域地表温度 The average regional LST	热源地表温 度均值差 The value of LST difference between source and region	热汇地表温 度均值差 The value of LST difference between sink and region
1988	376.01	25.46	976.34	66.12	18.53	1.35	-0.49
1994	562.30	38.08	823.48	55.77	22.06	1.74	-1.06
2000	538.10	36.44	810.71	54.90	21.27	1.76	-1.03
2006	618.43	41.88	703.83	47.67	18.23	1.29	-0.97
2013	679.20	46.00	693.64	46.98	17.59	1.75	-1.58
2019	715.23	56.01	596.16	35.90	25.78	1.33	-1.91

LST: 地表温度 Land surface temperature

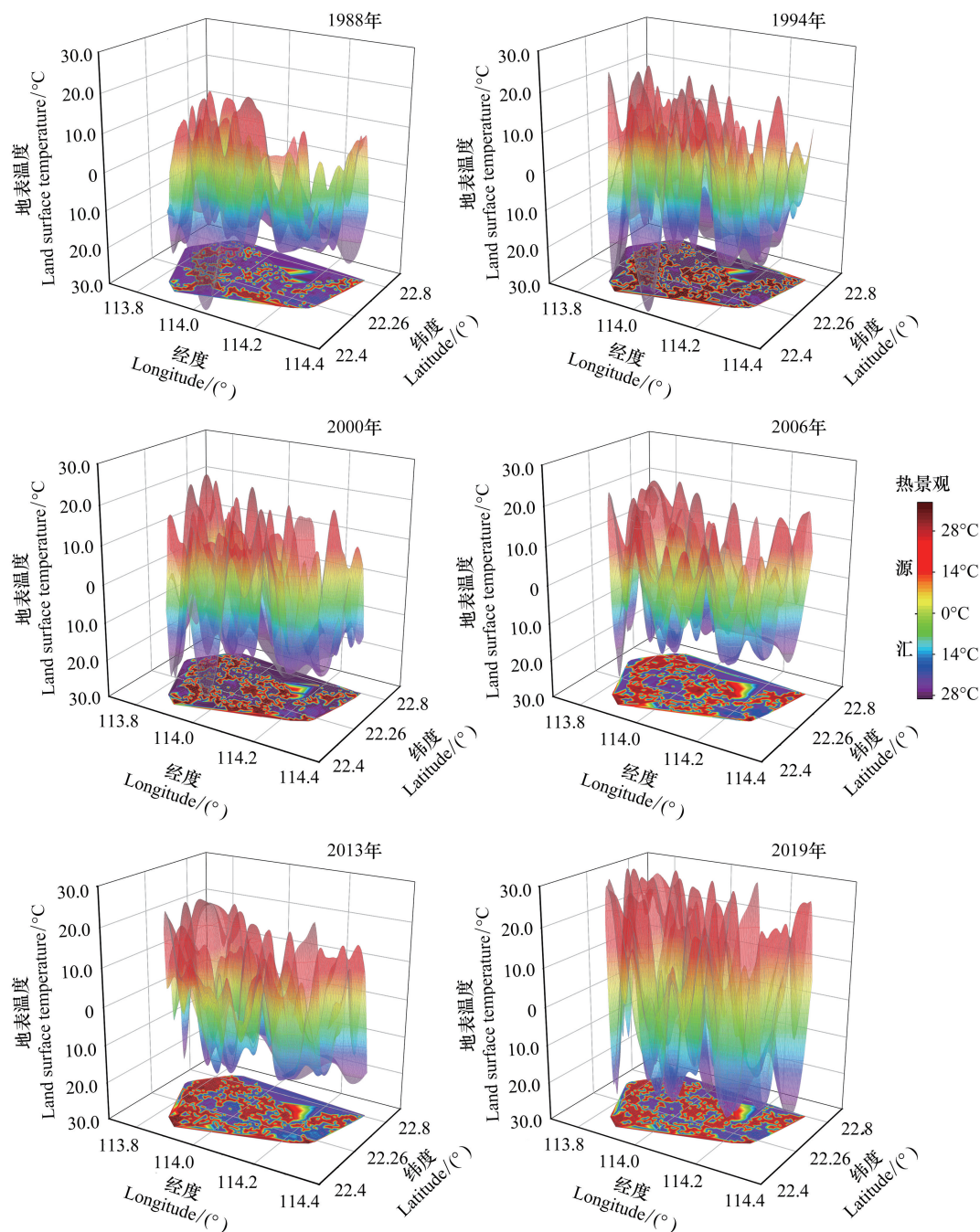


图2 1988—2019年深圳市西部“源-汇”热景观及其地表温度分布图

Fig.2 The distribution of source-sink thermal landscape and its LST in the Shenzhen City during 1988—2019

3.2 “源-汇”热景观对热环境的贡献指数变化

为比较“源-汇”热景观对区域地表温度的贡献,研究引入热环境贡献指数表征规模与温度贡献效率的关系,图3展示的是1988—2019年“源-汇”热景观对热环境贡献的时序变化特征,“源-汇”热景观的增降温贡献度由并列排布演变成相互交错的空间形态(图4)。从热源景观看,1988年热源景观对热环境贡献值CI介于2.71—6.75。1988—2000年,热源景观增加,热源斑块的贡献效率也在大幅长,CI值为6.76—14.89的斑块成为主要的增温贡献斑块。2006—2013年,深圳市主城区的福田和罗湖受到城市复绿的影响,热源景观孔隙化,有效地降低了增温贡献度;而宝安、光明、龙华等区域的热源景观集中连片增长,对热环境的贡献不断增

强,最大的 CI 值为 24.35。2019 年,宝安区的热源景观增温贡献度增长更快,区域性热岛已经形成,热源景观成为基质景观,热环境贡献值最高达 30.56,是研究时段中的最高峰值。从热汇景观看,1988 年热汇景观对热环境贡献值 CI 介于-0.04—-14.90。1994—2000 年是热汇斑块贡献度的降温效果最高峰值,分别达到 21.28 和 26.75。2006—2019 年间,热汇景观不断被城市化所蚕食和破碎化,导致热汇景观的降温贡献较低,最高才回到 16.51。

区域整体来看,热源景观的整体升温效果呈现增长态势,贡献度均值由 1988 年的 1.23 上升到 2019 年的 6.39;热汇景观的整体降温效果也有所提升,贡献度均值由 1988 年的 1.82 上升到 2019 年的 3.73,但热汇景观的降温效率增长速度远低于热源景观,这表明热源景观的贡献效率会随着热岛规模从零星状向区域化的转变过程中提升;而热汇景观的贡献效率会随着冷岛规模的破碎化过程中被抑制。

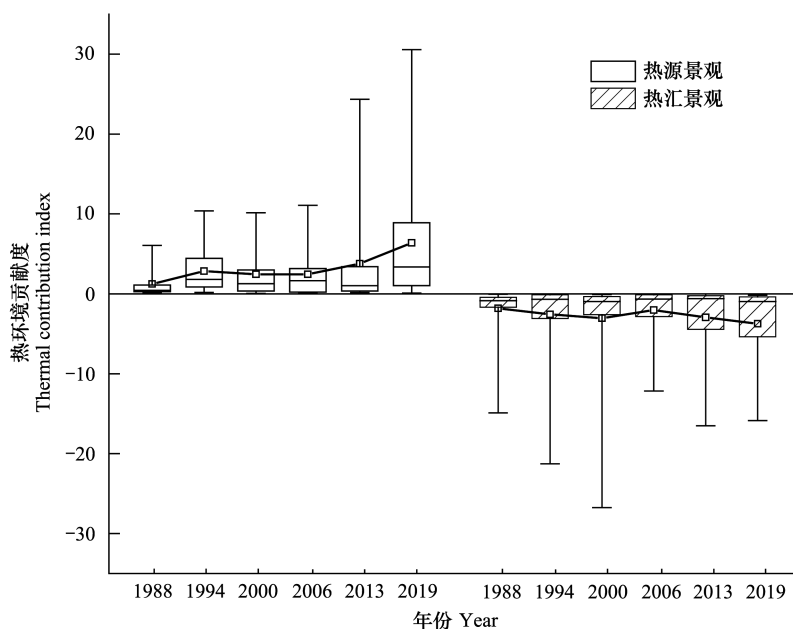


图 3 1988—2019 年“源-汇”热景观的增降温贡献效率比较

Fig.3 The comparison of source-sink thermal contribution index during 1988—2019

3.3 “源-汇”热景观空间相互作用强度特征

运用空间作用度量“源-汇”热景观之间的温度交换贡献,能够反映热源景观对热汇景观的辐射能力以及热汇景观对热源景观辐射能力的接受程度。图 4 展示的是 1988—2019 年间热源景观斑块与热汇景观斑块的相互作用强度分布特征。1988—2019 年“源-汇”的作用对基本保持稳定,在 48—60 对之间波动,但总作用强度发生了显著的变化,从 4.32 增加到 35.47,30 年间增长了 8 倍,说明热源景观与热汇景观的作用强度显著加强(表 3)。1988—2006 年,区域内“源-汇”总作用对逐渐增加,以弱相互作用为主;相互作用较强对集中在盐田、福田、罗湖以及宝安区。2006 年后,“源-汇”相互作用联系增加,在空间上形成相互镶嵌的网络格局,以强相互作用对为主。2019 年,“源-汇”热景观的作用强度均值是 1988 年的 8 倍,个别相互作用对已上升到研究时段内的最大值,如宝安区的热源斑块与凤凰山森林公园的热汇斑块作用强度为 10.28。

热源景观与热汇景观的空间作用对从热汇景观一对多影响热源景观变化为热源景观一对多影响热汇景观(图 4),且作用强度越来越强。1998 年深圳市市区的主要郊野公园如梧桐山、塘朗山和西部三个水库区对热环境的作用强度有很强的牵制作用,作用强度都是在 0.01—0.29 之间。随着城市化的发展,2019 年这些作用对强度上升到 2.3—10.28,一方面热源规模和贡献度增长快,另一方面热汇景观逐渐破碎,规模和温度贡献强度减弱。未来需要针对从区域整体性方面,合理布局热汇景观的规模,以提升城市热环境的缓解能力。

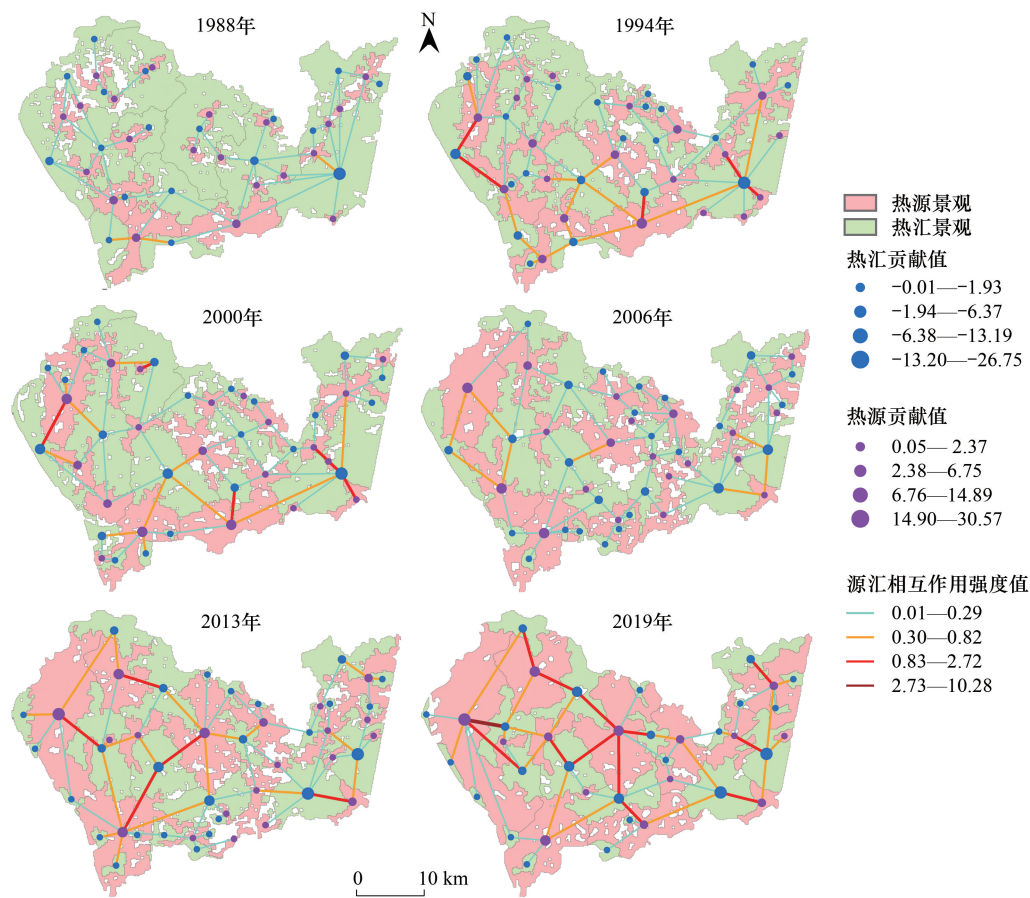


图 4 1988—2019 年“源-汇”热景观空间相互作用强度

Fig.4 The spatial interaction of source-sink thermal landscape during 1988—2019

表 3 1988—2019 年“源-汇”热景观相互作用强度

Table 3 The intensity of interaction between thermal source and thermal sink during 1988—2019

年份 Year	相互作用强度值 The intensity of interaction				源-汇作用对 Linkages between thermal source and thermal sink
	取值范围 The range	平均值 The mean	总值 Total value	方差 The variance	
1988	0.01—0.62	0.09	4.32	0.02	48
1994	0.01—2.72	0.29	16.20	0.19	56
2000	0.01—1.44	0.28	16.11	0.12	58
2006	0.01—0.56	0.13	8.32	0.02	64
2013	0.01—1.76	0.32	19.05	0.12	60
2019	0.03—10.28	0.71	35.47	2.07	50

4 讨论

(1)城市空间上的温差变化及其热“源-汇”规律受数据获取时间和地理区位的影响^[40]。本研究中采用了以冬季 10—12 月间的卫星过境日期的地表温度作为年温度代表量,地表温度的日变异差可能对“源-汇”贡献和作用强度的分析有部分影响,造成低估了景观的增降温效果,例如 1994 年选择的是 10 月 24 日,2000 年则为 11 月 01 日,分别比 1988 年,2013 年和 2019 年为 11 月的数值要高,而 2006 年 12 月 28 日则相对要低。

因数据源获取的难度,我们难以获得全年性的地表温度高分辨数据,这可能会对“源-汇”热景观间的作用强度分析有部分影响。

深圳市位于沿海地区,季节变化和昼夜温差变化引起的海陆风交替会对城市的热传导过程产生一定影响。深圳市西部基本被海域包围,对局部地区空间温度有显著的降温温度,地表景观决定的地表温度有一个缓慢的释放过程。海水组成的蓝色景观是一种典型的热汇景观,但本研究主要考虑陆地景观斑块间在水平方向上的作用,因此只在沿海地段纳入了部分的蓝色景观,而不是整体大斑块的蓝色景观。此外,研究着重分析区域整体性的“源-汇”交互特征与空间上的变化规律,因此,地表温度在时序上的波动或者所处海陆位置,在研究数据选取和方法设计时,考虑尽量将该影响降低到最小程度。

(2) 基于景观类型和相对地表温度信息识别的“源-汇”景观,考虑了景观自身的增降温特性、景观内部的异质性以及与邻域异质景观相互影响下对温度的响应,建立的分类方法具有较好的区分特性。在此基础上进行的“源-汇”景观的增降温分析方法,不管是用缓冲区分析还是空间相互作用强度分析都是遵循了距离衰减法则,即源汇景观的作用随距离的增加而降低;但缓冲区分析通常是只针对汇景观的降温效果而采用的分析方法,没有考虑源景观的增温效果,而且必须考虑缓冲区内部景观类型的组成的影响^[26];本研究采用的相互作用强度分析,充分考虑了“源-汇”热景观的空间交互作用以及它们在空间上的邻接。此外,热源景观、热汇景观相邻往往表现为同向性;源、汇景观之间联系强度受距离制约,斑块对热环境的贡献规模与斑块面积正相关^[39],同一源汇斑块内部的热贡献程度是决定源-汇斑块间作用强度的主要因素。

5 结论

本研究运用“源-汇”景观生态理论,通过构建景观类型和地表温度的二维矩阵关系识别出深圳市西部1988—2019年的“源-汇”热景观,并运用空间分析方法分析了热源、热汇景观对热环境效应的贡献及其空间相互作用特征,获得如下结论:

(1) “源-汇”热景观的时空演变表明恰当的热源汇分类对城市冷热岛边界识别以及空间分布特征分析有影响。1988—2019年间深圳市西部城区热源景观基质化,热汇景观则不断被切割和破碎化致使地表温度显著升高。(2) 热源景观的效率会随着热岛规模从零星状向区域化的转变过程中提升,即所谓的温度聚集效果;而热汇景观的效率会随着冷岛规模的破碎化过程中被抑制,降温效率越来越差。(3) “源-汇”热景观随着城市化发展,热源景观与热汇景观的作用强度显著加强,从最初的以热汇景观为中心的温度辐射转变为成以热源景观为中心。

总之,基于“源-汇”景观生态理论可以在空间上更清晰地揭示景观异质性对城市热环境形成过程和强度变化的影响,对于合理配置景观斑块,可为缓解城市热岛,调控冷热岛及其对应的景观类型,改善城市人居环境提供科学依据。

致谢:唐国平教授对研究给予帮助,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Sun Y, Zhang X B, Zwiers F W, Song L C, Wan H, Hu T, Yin H, Ren G Y. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in eastern China. *Nature Climate Change*, 2014, 4(12): 1082-1085.
- [3] Zhou X L, Wang Y C. Spatial - temporal dynamics of urban green space in response to rapid urbanization and greening policies. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(3): 268-277.
- [4] Peng J, Xie P, Liu Y X, Ma J. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: a case study in the Beijing metropolitan region. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 145-155.
- [5] Sun R H, Chen L D. Effects of green space dynamics on urban heat islands: mitigation and diversification. *Ecosystem Services*, 2017, 23: 38-46.
- [6] Song X P, Hansen M C, Stehman S V, Potapov P V, Tyukavina A, Vermote E F, Townshend J R. Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 2018, 560(7720): 639-643.

- [7] Chapman S, Watson J E M, Salazar A, Thatcher M, McAlpine C A. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landscape Ecology*, 2017, 32(10): 1921-1935.
- [8] Adams M P, Smith P L. A systematic approach to model the influence of the type and density of vegetation cover on urban heat using remote sensing. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 132: 47-54.
- [9] Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, Xu X L, Qin Y W, Ning J, Zhou W C, Zhang S W, Li R D, Yan C Z, Wu S X, Shi X Z, Jiang N, Yu D S, Pan X Z, Chi W F. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 195-210.
- [10] 刘焯序, 彭建, 王仰麟. 城市热岛效应与景观格局的关联: 从城市规模、景观组分到空间构型. *生态学报*, 2017, 37(23): 7769-7780.
- [11] 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.
- [12] Xu S L. An approach to analyzing the intensity of the daytime surface urban heat island effect at a local scale. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 151(1/4): 289-300.
- [13] 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.
- [14] 高静, 龚健, 李靖业. “源-汇”景观格局的热岛效应研究——以武汉市为例. *地理科学进展*, 2019, 38(11): 1770-1782.
- [15] Sun R H, Chen L D. How can urban water bodies be designed for climate adaptation? *Landscape and Urban Planning*, 2012, 105(1/2): 27-33.
- [16] Yu Z W, Guo X Y, Zeng Y X, Koga M, Vejre H. Variations in land surface temperature and cooling efficiency of green space in rapid urbanization: the case of Fuzhou city, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 29: 113-121.
- [17] 徐涵秋. 城市不透水面与相关城市生态要素关系的定量分析. *生态学报*, 2009, 29(5): 2456-2462.
- [18] 陈冰倩, 张友水, 程璟媛, 赵雪. 福州市地表温度热点及时空变化分析. *地球信息科学学报*, 2019, 21(5): 710-719.
- [19] Li W F, Cao Q W, Lang K, Wu J S. Linking potential heat source and sink to urban heat island: heterogeneous effects of landscape pattern on land surface temperature. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 457-465.
- [20] 马瑞明, 谢苗苗, 郎文聚. 城市热岛“源-汇”景观识别及降温效率. *生态学报*, 2020, 40(10): 3328-3337.
- [21] Qian Y G, Zhou W Q, Hu X F, Fu F. The heterogeneity of air temperature in urban residential neighborhoods and its relationship with the surrounding greenspace. *Remote Sensing*, 2018, 10(6): 965.
- [22] Yu Z W, Guo X Y, Jørgensen G, Vejre H. How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities? *Ecological Indicators*, 2017, 82: 152-162.
- [23] Peng J, Jia J L, Liu Y X, Li H L, Wu J S. Seasonal contrast of the dominant factors for spatial distribution of land surface temperature in urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 215: 255-267.
- [24] Liu Y X, Peng J, Wang Y L. Application of partial least squares regression in detecting the important landscape indicators determining urban land surface temperature variation. *Landscape Ecology*, 2018, 33(7): 1133-1145.
- [25] Kong F H, Yin H W, James P, Hutrya L R, He H S. Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 128: 35-47.
- [26] Ouyang W L, Morakinyo T E, Ren C, Ng E. The cooling efficiency of variable greenery coverage ratios in different urban densities: a study in a subtropical climate. *Building and Environment*, 2020, 174: 106772.
- [27] 冯悦怡, 胡潭高, 张力小. 城市公园景观空间结构对其热环境效应的影响. *生态学报*, 2014, 34(12): 3179-3187.
- [28] 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.
- [29] Jia W X, Zhao S Q. Trends and drivers of land surface temperature along the urban-rural gradients in the largest urban agglomeration of China. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134579.
- [30] Sun R H, Xie W, Chen L D. A landscape connectivity model to quantify contributions of heat sources and sinks in urban regions. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 178: 43-50.
- [31] Xie M M, Wang Y L, Chang Q, Fu M C, Ye M T. Assessment of landscape patterns affecting land surface temperature in different biophysical gradients in Shenzhen, China. *Urban Ecosystems*, 2013, 16(4): 871-886.
- [32] Wanghe K Y, Guo X L, Wang M, Zhuang H F, Ahmad S, Khan T U, Xiao Y Q, Luan X F, Li K. Gravity model toolbox: an automated and open-source ArcGIS tool to build and prioritize ecological corridors in urban landscapes. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e01012.
- [33] Liu Y X, Peng J, Wang Y L. Diversification of land surface temperature change under urban landscape renewal: a case study in the Main City of Shenzhen, China. *Remote Sensing*, 2017, 9(9): 919.
- [34] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Skoković D, Mattar C, Cristóbal J. Land surface temperature retrieval methods from landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(10): 1840-1843.
- [35] Yu Z W, Yao Y W, Yang G Y, Wang X R, Vejre H. Spatiotemporal patterns and characteristics of remotely sensed region heat islands during the rapid urbanization (1995-2015) of Southern China. *Science of the Total Environment*, 2019, 674: 242-254.
- [36] Qiu G Y, Zou Z D, Li X Z, Li H Y, Guo Q P, Yan C H, Tan S L. Experimental studies on the effects of green space and evapotranspiration on urban heat island in a subtropical megacity in China. *Habitat International*, 2017, 68: 30-42.
- [37] Sun R H, Chen A L, Chen L D, Lü Y H. Cooling effects of wetlands in an urban region: the case of Beijing. *Ecological Indicators*, 2012, 20: 57-64.
- [38] Lin W Q, Yu T, Chang X Q, Wu W J, Zhang Y. Calculating cooling extents of green parks using remote sensing: method and test. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 134: 66-75.
- [39] 刘瑜, 龚俐, 童庆禧. 空间交互作用中的距离影响及定量分析. *北京大学学报: 自然科学版*, 2014, 50(3): 526-534.
- [40] 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.