

蓝绿空间冷岛效应时空变化及其影响因素

——以苏州市为例

杨朝斌¹ 张亭¹ 胡长涛¹ 范吉康¹ 吉曹翔² 付喜娥³¹

(1. 山东理工大学 建筑工程学院, 山东 淄博 255000;

2. 沈阳市气象局, 辽宁 沈阳 110168;

3. 苏州科技大学 建筑与城市规划学院, 江苏 苏州 215009)

【摘要】: 水体和植被组成的“蓝绿空间”能够有效减缓城市热岛效应, 探究其时空变化特征和影响因素对于改善城市环境和促进区域绿色低碳发展具有重要意义。以 2004、2010 和 2014 年三期 Landsat 遥感影像为数据源反演地表温度表征热环境, 构建冷岛效应强度和冷岛指数定量分析苏州市蓝绿空间降温作用的时空变化特征, 利用分类统计、剖面趋势法和线性拟合等方法分析蓝绿空间面积、土地利用变化和其它社会经济因素对冷岛效应的时空影响, 结论如下: (1) 2004~2014 年苏州市冷岛效应面积不断减小, 减少比例高达 24.04%; 空间上看, 苏州北部和东部冷岛区域减少尤为明显, 南部湖泊为主的地区变化相对较小。(2) 从冷岛强度数值大小看, 蓝绿空间的降温能力不断增强, 2004、2010 和 2014 年的冷岛强度分别为 6.3°C、7.1°C 和 9.6°C; 但考虑到其面积变化, 苏州市蓝绿空间冷岛效应对于热环境的调节作用呈现出减弱趋势。(3) 水体构成的“蓝色空间”降温能力(10.5°C)远大于植被“绿色空间”的冷岛强度(4.8°C); 流动河渠的冷岛强度要明显高于静止的湖泊。(4) 土地利用变化: 尤其城市扩张侵占大量水田为影响苏州市冷岛效应时空变化的重要驱动因素, 反观苏州市湖泊总面积在研究时间范围内有小幅增长, 推断出政府决策者对于蓝绿空间类型的优先保护程度。

【关键词】: 蓝绿空间 冷岛效应 地表温度 遥感

【中图分类号】: TP79 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)03-0677-12

城市化进程导致的城市热岛效应, 即城区温度明显高于周边农村的现象, 对城市生产生活以及生态环境造成严重影响^[1~3]。如何缓解城市热岛效应的负面作用逐渐成为众多学者和政府官员的关注热点。植被通过蒸散作用和阴影能够有效改善热环境, 水体由于其较大的比热容从而具备明显的降温能力^[4~7]。“蓝绿空间”(Blue and Green Space, BGS), 是“蓝色空间”(Blue Space, BS)和“绿色空间”(Green Space, GS)的综合, 是水体与绿地的统称^[8]。“蓝绿空间”能够形成冷岛效应(CI, Cooling Island), 即水体和植被温度低于其它地物类型的现象, 能够有效减轻城市热岛效应, 对未来城市绿色低碳发展提供重要帮助^[9, 10]。

目前冷岛效应的研究大多仅集中于绿色空间的降温作用^[11~13], 尤其以沙漠绿洲和城市公园最具代表性, 杨丽萍等^[14]将景观生

作者简介: 杨朝斌(1989~), 男, 讲师, 主要研究方向为城市热环境. E-mail: yangchaobin@sdut.edu.cn

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2019BD036); 国家自然科学基金项目(51708379)

态学与定量遥感结合起来,研究了内蒙古额济纳绿洲地表温度时空格局; Yang 等^[15]利用遥感技术对长春市内公园“冷岛效应”的季节性变化规律和影响因素进行了探究。从研究数据源来看,随着热红外遥感技术的发展,地表温度(Land Surface Temperature, LST)具有覆盖度广、时间同步性好、数据质量高等优点,能够提供简单明了的一致性强的方法研究热环境相关问题,逐渐替代传统以离散的、数量有限的气象站点为主的城市热环境研究^[16~19]。从研究内容和主题来看,目前仍缺乏在年际尺度上同时对市域范围内的“蓝绿空间”冷岛效应进行时空变化特征和影响因素分析的研究案例。本文以湖泊众多且城市化进程明显的江苏省苏州市为例,利用热红外遥感反演地表温度表征热环境,利用遥感解译获取的土地利用信息表征蓝绿空间,构建冷岛效应强度和指数深入剖析蓝绿空间冷岛效应时空变化特征,并分析土地利用变化、社会经济因素等潜在因子对其产生的影响,以期对未来城市发展建设和区域规划提供强有力科学依据。

1 材料与方方法

1.1 研究区概况

苏州市(119° 55' E~121° 20' E, 30° 47' N~32° 02' N)地处中国江苏省东南部,面积 8648.44km²东邻上海市,南靠浙江省,西抱太湖,北接长江(图 1)。平均海拔 3~4m,境内河流、湖泊纵横交错,气候类型为亚热带季风海洋性气候,四季分明,雨量充沛,年平均降水量为 1300mm 左右,年平均温度为 15.7℃。2017 年末苏州市常住人口 1068.36 万人,是长三角城市群重要的城市之一。

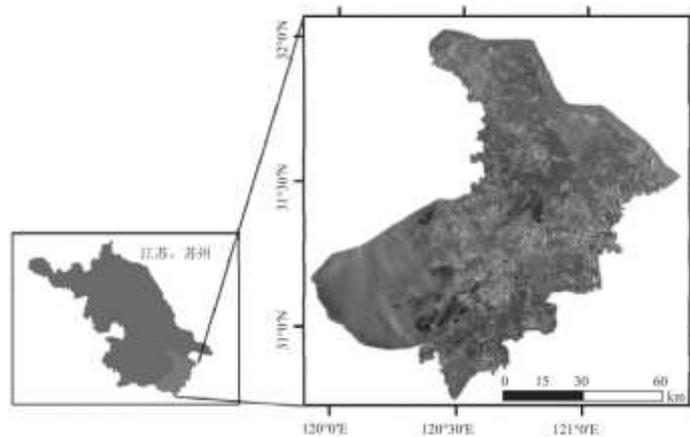


图 1 苏州市位置示意图(2014 年 Landsat8 假彩色合成影像)

1.2 数据源

Landsat 卫星系列自其发射以来便成为热环境相关研究的重要数据源,主要归因于其数据具备连续性和一致性的优点^[20]。选取苏州市夏季高质量的 Landsat TM/ETM+/TIRS 影像作为数据源,条带号为 119/38 和 119/39,获取时间分别为 2004 年 7 月 26 日、2010 年 8 月 20 日和 2014 年 7 月 22 日,数据获取于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)。苏州市 2005、2010 和 2015 年三期土地利用数据由中国科学院地理科学与资源研究所提供,其数据源同样为 Landsat 影像系列,空间分辨率为 30m,土地利用矢量数据通过基于地学知识的人机交互解译方法获得,总体精度达到 93%以上^[21]。受热红外数据获取限制,苏州市 2005 年和 2015 年夏季时间影像质量较差,云覆盖度较高,因此选用 2004 和 2014 年影像作为替代以期与土地利用数据年份相吻合,并假设相邻年份热环境差异较小。社会经济数据来自苏州市 2005~2015 统计年鉴。

1.3 研究方法

1.3.1 地表温度反演与重分类

基于辐射传输方程方法对地表温度进行反演，卫星传感器接收到的热红外辐射热量值 L_λ 的表达式可写为：

$$L_\lambda = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_\downarrow] \tau + L_\uparrow \quad (1)$$

式中： ε 为地表比辐射率； T_s 为地表真实温度； $B(T_s)$ 为黑体热辐射亮度； τ 为大气在热红外波段的透过率。大气向上辐射亮度 L_\uparrow 、大气向下辐射亮度 L_\downarrow 和大气在热红外波段的透过率 τ 可通过 NASA 提供的网站进行查 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>)。地表比辐射率 ε 使用 Sobrino 提出的 NDVI 阈值法进行计算^[22]。辐射热量可以通过以下方程进一步转换为辐射亮温：

$$T_b = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (2)$$

式中： T_b 为像元的辐射亮温(K)； k_1 和 k_2 为校正常数，其数值可以通过 Landsat 影像头文件获取。在计算辐射亮温的过程中将地球看成介质均匀的黑体，但由于自然环境中的物体并非理想黑体，因此在最终计算地表温度 $LST(T_s)$ (T_s) 时，需要借助地表比辐射率对辐射亮温进行修正，其公式如下：

$$T_s = \frac{T_b}{1 + (\lambda T_b / \rho) \ln \varepsilon} \quad (3)$$

式中： λ 为热红外波段对应的中心波长； ρ 为 1.438×10^{-2} mK。地表温度更详尽的计算方法可参考 Zhou 等的研究^[23,24]。使用不同时期遥感影像进行对比研究时，为了消除年代和气候等背景因素对地表温度产生的影响，需对地表温度进行标准化处理，计算公式如下：

$$NLST_i = \frac{LST_i - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (4)$$

式中： $NLST_i$ 为像元 i 标准化处理后的地表温度； LST_i 为像元 i 的地表温度； LST_{max} 和 LST_{min} 分别为研究区地表温度的最高值和最低值。本文采用均值-标准差法将标准化后的地表温度划分为五个等级^[25]，如表 1。

表 1 本研究中地表温度等级划分依据表

温度等级	热场划分方法
高温区	$NLST_m + 1std \leq NLST_i$
次高温区	$NLST_m + 0.5std < NLST_i \leq NLST_m + 1std$

中温区	$NLST_m - 0.5std < NLST_i \leq NLST_m + 0.5std$
次低温区	$NLST_m - 1std < NLST_i \leq NLST_m - 0.5std$
低温区	$NLST_i \leq NLST_m - 1std$

1.3.2 蓝绿空间界定

依据苏州市实际土地利用情况和探究蓝绿空间冷岛效应时空变化的研究目标，参考刘纪远等人提出的中国科学院土地利用遥感分类标准^[26]，将苏州市土地利用类型分为旱地、水田、林地、河渠、湖泊和建设用地6类，具体见表2。由于河流具有流动性，可导致不同水域地表温度有明显差异，故将水域划分为静态湖泊和动态河渠两类。

表2 苏州市土地利用类型划分及蓝绿空间界定

土地利用类型	蓝绿空间类型	具体含义
旱地		指无灌溉水源及设施，靠天然降水生长作物的耕地
水田	绿色空间	有水源保证和灌溉设施的耕地
林地	绿色空间	有林地、灌木林、疏林地、其它林地
河渠	蓝色空间	流动性的水体
湖泊	蓝色空间	湖泊、水库坑塘等静态水体
建设用地		城镇用地、农村居民点以及工矿用地

1.3.3 冷岛效应强度与指数

冷岛效应强度是一个区域内蓝绿空间与其它土地类型地表温度的差值，能准确地反映“冷岛效应”的强弱变化状况^[27,28]。本研究选用建筑用地代表其它土地利用类型，进一步将冷岛强度细分为：蓝绿空间冷岛强度(BGSCI)，绿色空间冷岛强度(GSCI)和蓝色空间冷岛强度(BSCI)，计算公式分别如下：

$$BGSCI = T_c - T_{BG} \quad (5)$$

$$BSCI = T_c - T_B \quad (6)$$

$$GSCI = T_c - T_G \quad (7)$$

式中： T_c 为建筑用地的平均地表温度； T_{BG} 为所有蓝绿空间的平均地表温度； T_B 为蓝色空间平均地表温度； T_G 为绿色空间平均地表温度。为了进一步探究单位面积蓝绿空间冷岛效应强度的差异，构建冷岛效应指数(CII, Cooling Island Index)，定义如下：

$$CII = \frac{1 / NLST_m}{A_{BS} / A} \quad (8)$$

式中：NLST_m为整个研究区平均的归一化地表温度；A_{BS}为研究区内蓝绿空间面积；A为整个研究区的总面积。NLST_m取值越小，表明整个研究区平均温度越低。CII 指数越大，则表明单位面积蓝绿空间的冷岛效应更强，降温作用更为显著。

2 结果与分析

2.1 苏州市热环境时空变化特征

利用 1.3.1 中的方法对研究区地表温度进行反演、标准化和重分类后，其空间分布结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出，虽然不同年份苏州市热环境空间格局呈现较大差异，但在空间和时间变化趋势上有一定规律可循。从空间分布看，苏州市各年份高温区域主要集中在中部城区和东部发达区域；低温和次低温区主要分布在东部长江、西部太湖以及众多零散分布的湖泊坑塘区域。从时间变化看，2004~2014 年期间，苏州市高温区域呈现出由西往东、由南往北发展的趋势，城市热岛效应区域的面积呈现明显扩张趋势；与此同时，北部大面积的低温区域变为次高温和高温区域。

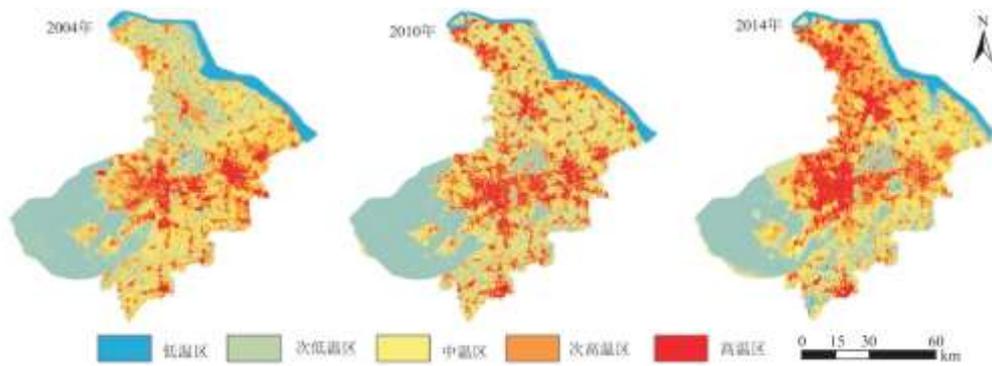


图 2 2004~2014 年苏州市热环境时空变化图

利用 ArcGIS 统计苏州市各年份不同温度等级的面积，结果如表 3 所示。将高温区与次高温区作为热岛效应分布区域，次低温与低温区作为冷岛区域。2004 年热岛区域占比 27.71%，冷岛区域占比 39.06%，冷岛区域相对较大；2010 年热岛区域占比 34.25%，较 2004 年增长了 6.54%，高温区域增加比较明显；2014 年热岛区域占比相比于 2004 年增加 17.05%，达到 44.76%，冷岛区域从 2004 年的 39.06%减少到 24.04%，降幅达 15.02%。2004~2014 期间，热岛效应面积持续增加而冷岛效应面积持续减小。

表 3 苏州市 2004~2014 年地表温度等级所占面积比例 (%)

时间	高温区	次高温区	中温区	次低温区	低温区
2004	16.88	10.83	33.23	31.6	7.46
2010	22.42	11.83	30.76	27.65	7.34
2014	25.73	19.03	31.2	16.35	7.69

2.2 蓝绿空间冷岛效应强度变化特征

利用 1.3.3 中方法分别计算苏州市 2004、2010 和 2014 年蓝绿空间冷岛效应强度，其结果如图 3 所示。图 3 表明，横向来看，在同一年份，蓝色空间的冷岛强度最大，其次为蓝绿空间混合体，最小为绿色空间，结果说明相比于植被等绿色空间的降温能力，水体组成蓝色空间的降温作用更为显著。纵向时间变化来看，各蓝绿空间冷岛强度都呈现增强趋势，2004~2014 年期间，蓝色空间冷岛强度分别为 8.4℃、9.3℃和 13.6℃，绿色空间冷岛强度分别为 4.3℃、4.9℃和 5.3℃，蓝绿空间的冷岛强度分别为 6.3℃、7.1℃和 9.6℃。

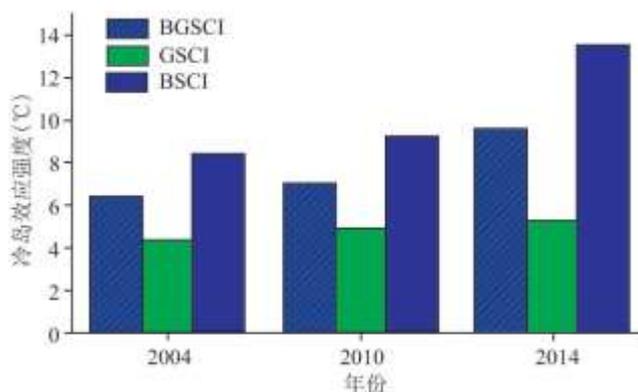


图 3 苏州市 2004~2014 年不同蓝绿空间冷岛效应强度变化图

2.3 冷岛效应时空变化的影响因素分析

2.3.1 蓝绿空间面积对于冷岛强度和指数的影响

为进一步探究蓝绿空间混合体自身面积的大小对于冷岛强度的影响以及单位面积内蓝色空间和绿色空间面积比例的差异对于冷岛指数的影响，本研究均匀随机生成 100 个大小为 1km×1km 的矩形样点，主要有两个原因：(1)考虑到苏州市实际面积，100 个 1km² 的样点能够较好代表整个研究区；(2)100 个样点满足统计回归分析的样本需求。利用 ArcGIS Zonal Statistics 统计功能，分别计算 2004、2010 和 2014 年每个样点的标准化地表温度(NLST)，蓝绿空间的总面积、蓝色空间面积和绿色空间的面积。将每个样点看成独立而完整的“小”研究区，利用 1.3.3 中的方法计算每一个样点的冷岛指数。

利用 SPSS 软件对样点的平均 NLST 和蓝绿空间总面积进行线性回归分析，得到图 4 左侧一系列的拟合图。从图 4 中可以看出，无论哪个年份，样点 NLST 与蓝绿空间面积比例都呈现出明显的负相关关系，即在样点内随着蓝绿空间面积的增加，样点的平均 NLST 呈现出下降的趋势。蓝绿空间面积比例每增加 0.1，样点平均 NLST 在 2004、2010 和 2014 年分别降低 0.019, 0.028 和 0.035，反映出蓝绿空间在 2014 年的降温能力要优于 2004 年。

借助 Origin 软件分析蓝色空间和绿色空间在蓝绿空间混合体中的面积占比对于单位面积蓝绿空间冷岛指数的影响差异，结果如图 4 右侧部分所示。需要说明的是，图 4 中绿色空间和蓝色空间面积比例为各自面积占据蓝绿空间的总面积而非样点总面积的比例。从图 4 中可以看出，随着蓝色空间面积比例的减小和绿色空间面积比例的增大，表征单位面积蓝绿空间混合体冷岛强度的冷岛指数呈现出整体下降的趋势，进一步反映出蓝色空间的降温效果要优于绿色空间。

2.3.2 土地利用/土地覆被变化对地表温度的影响

图5表明苏州市2005~2015年期间土地利用格局发生明显变化,在快速城市化进程背景下,建设用地扩张明显,呈现出由城市中心向东向北发展的趋势,与苏州市高温区域发展趋势相吻合。

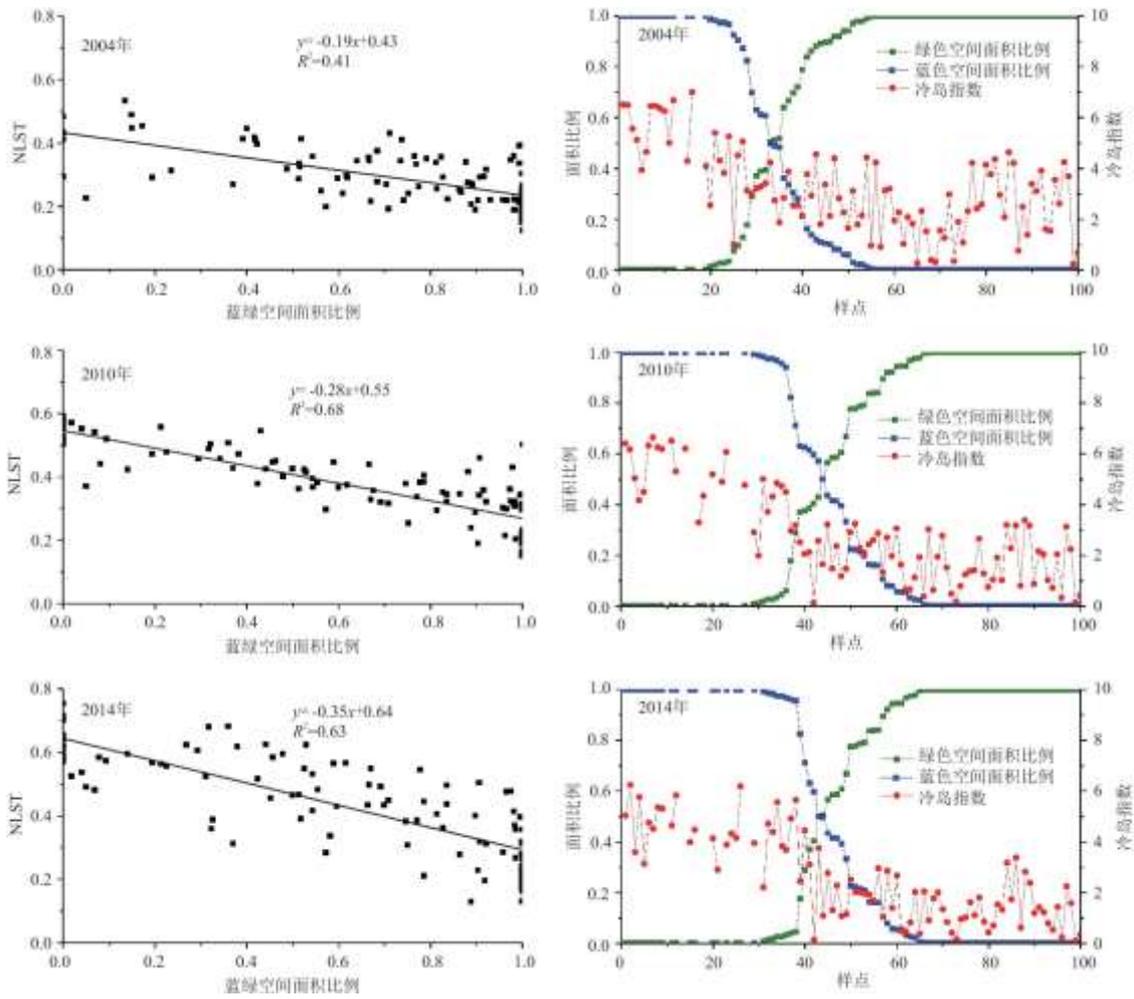


图4 2004~2014年样点NLST与蓝绿空间面积比例拟合图及蓝绿空间面积比例对冷岛指数的影响

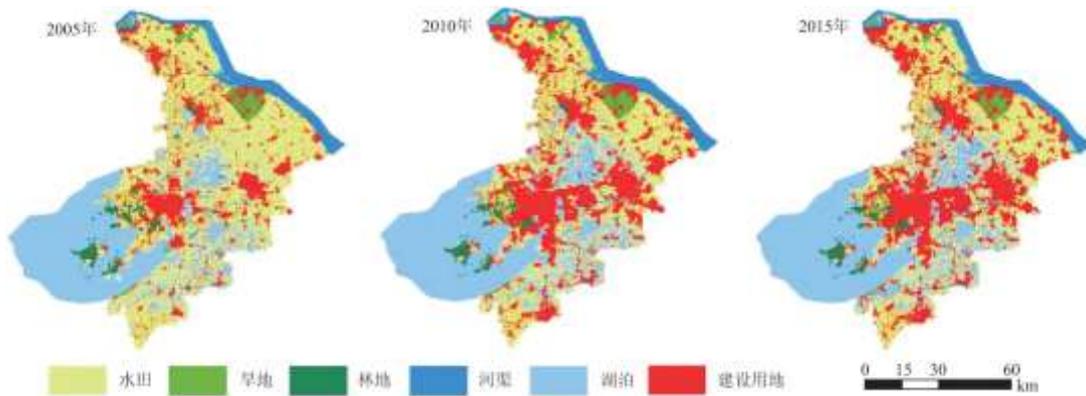


图5 2005~2015年苏州市土地利用时空变化图

不同土地利用类型在物质组成和热力学性质等方面存在较大差异^[29,30], 分别统计不同年份苏州市各土地利用类型的面积和平均 NLST 其结果如图 6 所示。图 6 表明, 水田、湖泊和建筑用地是苏州市最主要、面积最大的三种类型, 各土地利用类型平均 NLST 从高到低依次排序为: 建设用地>旱地>林地>水田>湖泊>河渠。

为了从空间上直观表征土地利用类型对于地表热环境的影响, 参考 Zhao 等^[31]的研究, 在研究区内选取西南-东北方向的剖面线 AB, 计算剖面线所经过像素对应的 NLST, 结果如图 7 所示。整体来看, 苏州主城区和太仓地区等建筑用的 NLST 要明显高于其它类型, 而以太湖和长江为主的蓝色空间的 NLST 要明显低于周围其它土地利用类型, 以林地和水田为主的绿色空间也有着较低的 NLST, 表明蓝绿空间生成的冷岛效应能够有效起到降温的作用。主城区内 NLST 变化剧烈, 说明城市内部结构异质性特征明显。在主城区内选取半径为 3km 的圆形样点, 并放大样点土地利用类型, 可以看到该样点内的土地利用类型在 2005~2015 年之间发生明显变化, 水田和湖泊构成的蓝绿空间被建筑用地侵占, 其对应 NLST 也由 2004 年(绿线)的低谷区域变成 2014(蓝线)表征的波峰高值区域。

正由于土地利用类型热力学性质存在差异, 土地利用时空变化势必会引起蓝绿空间格局的变化^[29], 进而影响冷岛效应的时空分布。利用 ArcGIS 对土地利用数据进行空间分析, 得到苏州市土地利用变化转移矩阵如表 4 和表 5 所示。2005~2010 年期间, 建筑用地由 1388.39km²增加到 2204.75km², 增长 816.36km², 增幅为 58.79%, 其中水田贡献率最大占比 94.79%;水田从 3743.80km²减少到 2811.66km², 减少 24.89%;湖泊在此期间从 2619.27km²小幅增长为 2776.11km²。在 2010~2015 年期间, 建筑用地继续增长到 2323.34km², 水田面积下降到 2676.00km², 湖泊面积增大到 2824.13km², 3 个主要土地利用类型面积变化趋势没有改变, 只是变化速率有所减缓。

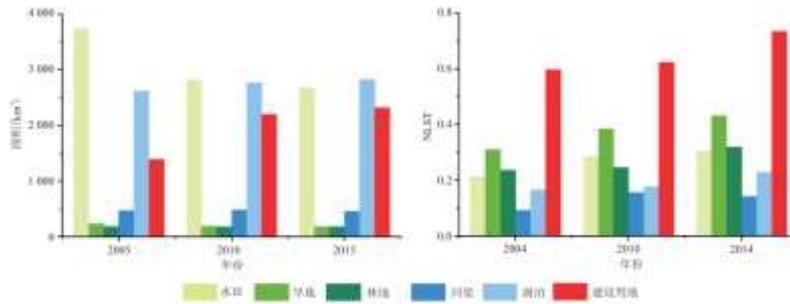


图 6 不同年份苏州市各土地利用类型面积及其对应的 NLST

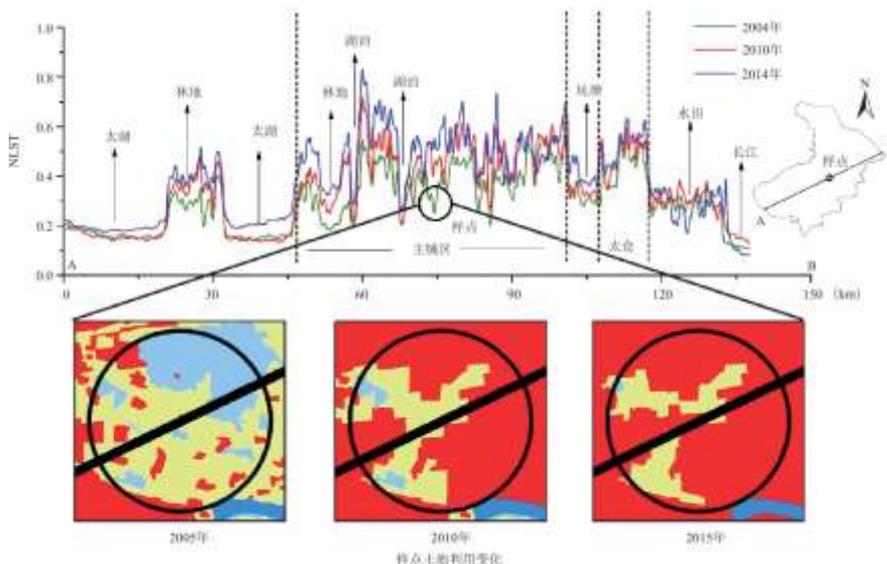


图 7 苏州市西南-东北方向 AB 剖面线对应的 NLST 及其土地利用类型

表 4 苏州市 2005~2010 年土地利用转移矩阵

km ²				2010 年			
2005 年	水田	旱地	林地	河渠	湖泊	建筑用地	总计
水田	2754.00	0.36	3.19	0.21	212.16	773.88	3743.80
旱地	6.17	187.82	1.16	1.57	4.63	30.08	231.44
林地	3.03	0.00	177.48	0.00	1.51	7.81	189.83
河渠	0.02	0.01	0.00	472.41	1.27	2.01	475.71
湖泊	17.38	1.00	0.00	5.61	2543.54	51.73	2619.27
建筑用地	31.05	3.54	1.56	0.01	12.99	1339.24	1388.39
总计	2811.66	192.74	183.38	479.81	2776.11	2204.75	8648.44

表 5 苏州市 2010~2015 年土地利用转移矩阵

km ²				2015 年			
2010 年	水田	旱地	林地	河渠	湖泊	建筑用地	总计
水田	2624.87	0.13	0.01	0.01	67.42	119.14	2811.58
旱地	0.00	177.09	0.00	0.01	0.65	15.00	192.76
林地	0.06	0.00	182.97	0.00	0.00	0.35	183.38
河渠	0.52	2.95	0.00	458.08	11.47	6.80	479.81
湖泊	14.43	0.00	0.00	0.00	2741.72	19.92	2776.07
建筑用地	36.13	3.67	0.04	0.01	2.87	2162.13	2204.85
总计	2676.00	183.83	183.03	458.11	2824.13	2323.34	8648.44

综上所述，城市化进程下建筑用地的快速扩张侵占了大量的水田坑塘等蓝绿空间，人类活动引起的土地利用变化成为影响蓝绿空间冷岛效应的主要因素。

2.3.3 社会经济因素对冷岛效应的影响

除去土地利用变化外，蓝绿空间冷岛效应也与社会经济有着密切联系^[32]。因此，本文利用常住人口数量、生产总值、建成

区面积以及人均道路面积等指标探究社会经济发展与蓝绿空间冷岛效应的关系。

如图 8 可知, 2005~2015 年, 苏州市常住人口数量、生产总值、建成区面积以及人均道路面积都呈现持续增长趋势, 符合快速城市化进程的发展规律。人口的持续增长会使得人为热量的排放不断增加, GDP 快速增长背后的驱动力来自大量的碳排放, 建成区和道路等人为不透水地表面积的不断增大改变了自然状态下的热平衡, 这些因素都促使城市热环境向着更热的方向发展, 是城市热环境恶化的推手; 与此同时, 城市面积的扩张不断侵占大量蓝绿空间, 在一定程度上牺牲了生态环境, 具备调节气候作用蓝绿空间面积正逐渐减少, 是导致冷岛效应面积减少的重要因素。社会经济的发展在给人类带来福祉的同时也不可避免的带来一些负面作用, 如何走可持续发展的道路仍是值得深究的科学问题和现实困难。

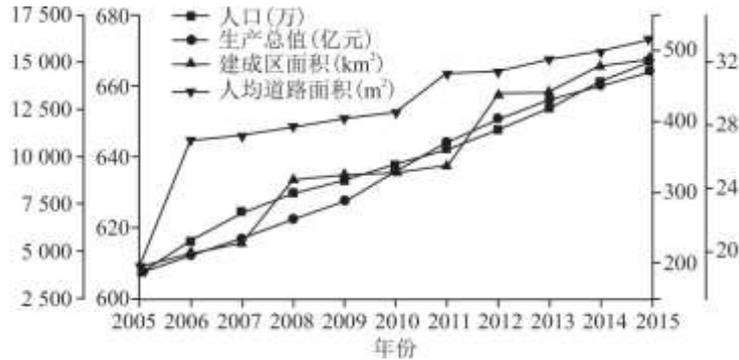


图 8 苏州市 2005~2015 年社会经济因素变化图

3 讨论

3.1 蓝绿空间冷岛效应时空格局变化特征

“冷岛效应”是相对于“热岛效应”而提出的概念, 它指的是某些土地利用类型的温度明显低于周围环境的现象, 而水体和植被构成的蓝绿空间则能够产生明显的冷岛效应。之前研究大多聚焦于城市绿地和公园、沙漠绿洲等绿色空间的降温效应^[33,34], 对于蓝绿空间综合体的冷岛效应缺乏探讨, 本文在市域尺度进行蓝绿空间冷岛效应年际变化研究是一个有效的尝试, 对于加深理解区域冷岛效应时空变化规律有着较强意义。

蓝绿空间拥有较低的地表温度, 其对应的低温区为冷岛效应区域。在城市化进程背景下, 2004~2014 年苏州市冷岛效应时空格局最大的特征是面积的持续快速减小, 其中苏州北部和东部地区冷岛效应区域面积减少尤为明显, 而苏州南部则一直属于低温区域。苏州北部零星分布的面积较小的城镇逐渐侵占周边农田, 将周围农村居住点不断合并使得城市建筑用地不断扩大, 大片低温区域逐渐被高温区域代替。此外, 苏州东部紧挨上海, 超大都市的引力以及交通设施的建设成为城市发展的重要影响因素, 因此苏州东部的冷岛区域也明显减少。苏州南部大部分地区则一直属于冷岛区域, 相比于苏州北方水田被侵占和东部上海吸引力导致的城市扩张, 苏州南部城市化进程并非特别显著, 主要由于苏州南部的土地利用类型以湖泊和坑塘为主^[35]。一方面湖泊等蓝色空间受生态环境政策的保护, 另一方面城市通过侵占湖泊进行扩张会面临更大的经济阻力和现实困难。城市扩张必然吞并周围土地类型, 水田成为苏州城市化进程下最大的牺牲品^[36], 紧挨城市周边的湖泊虽有小面积被侵占, 但苏州市湖泊总面积非但没有减少反而有小幅增加, 尤其苏州南部湖泊坑塘等蓝色空间保护较好。

综上所述, 苏州市冷岛效应空间格局呈现北部和东部明显减少, 南部相对稳定的态势。土地利用变化导致蓝绿空间面积不断减少, 致使苏州市整体平均温度不断升高, 城市热岛效应更为明显, 热环境呈现恶化的趋势。需要注意的是, 冷岛效应空间格局变化特征受土地利用变化的影响, 对于苏州市而言, 蓝绿空间的时空变化受到土地利用类型被侵占难易程度、周围超大城

市吸引力、生态环境保护政策等因素的综合影响^[36]。

3.2 冷岛效应强度变化的影响因素差异

本研究细化了蓝色空间和绿色空间各自冷岛强度的变化,结果表明蓝色空间的降温能力(10.5℃)要明显高于绿色空间(4.8℃)。通过分析单位面积蓝绿空间冷岛指数也能发现同样的规律,即湖泊面积占比大的情况下,单位面积蓝绿空间降温能力更强。纵向来看,无论蓝色空间还是绿色空间,在2004~2014年之间其冷岛强度都呈现出增强的趋势。众多研究已表明地表温度与绿色植被面积之间存在明显的负相关关系,增加绿地面积是减缓城市热岛效应最显著的途径之一^[37~39],本研究探讨了蓝绿空间总体面积与标准化地表温度之间的相关关系,也得到类似的负相关结果。除此之外拟合关系表明蓝绿空间的降温能力在逐渐增强。

为什么蓝绿空间冷岛效应强度出现增强的趋势?冷岛强度定义为建筑用地与蓝绿空间两者之间的温度差,因此可以从以下两个方面进行分析:一个潜在的原因可能是建筑用地的温度不断升高。城市扩张在水平方向体现为面积的扩大和建筑物密度的增强,同时其垂直方向的高度也在不断攀升,所以城市扩张呈现出面积更大、密度更强和高度更高的趋势,因此建筑用地所具有的温度会更高,热环境呈现恶化的趋势^[40,41];另一个潜在的原因可能与蓝绿空间质量的提升有关。如何理解蓝绿空间的质量?比如,虽然绿色空间的面积没有变大,但是绿色植被的生长、人工密植等行为使得绿色空间的绿量更大,因而降温效果更为明显^[19,42]。湖泊坑塘水质的提升、周边植被的生长等提升了降温能力。因此,相同面积下的蓝绿空间降温能力更强,冷岛效应更为显著。建筑用地温度的提升与蓝绿空间自身温度的降低共同促进了蓝绿空间冷岛强度的逐步增强。

综上所述,单纯从降温能力的数值大小来看,虽然苏州市蓝绿空间冷岛效应强度逐步增强,但是考虑到蓝绿空间面积的减少,尤其是水田大面积的占用,苏州市蓝绿空间对于整个苏州市热环境的调节能力仍然逐步下降^[43]。因此如何保证社会经济可持续发展的同时最大可能保护自然资源和生态环境仍然是值得永恒探讨的科学问题。

3.3 蓝绿空间冷岛效应对区域规划的帮助

由于蓝色空间的冷岛效应强度要优于绿色空间,如果仅从调节区域热环境角度来看,增大湖泊等蓝色空间的面积似乎是更好的选择。然而从实际情况出发,蓝色空间规划所受的影响因素更多,比如地形、水源、水质、安全性等等,因此增加绿色空间的面积或者对现有绿色空间进行密植是更为有效的方法。绿色空间除去降温作用外,还能够提供供给、调节、文化和支持等生态系统服务。在城市内部和城郊地区,同时包含蓝绿空间的城市公园和城市湿地既能有效调节热环境也能提供其它多种服务,或许是城市规划重点考虑的类型。在面积更为广阔农村区域,城市扩张必然侵占其它土地利用类型,侵占农田还是侵占湖泊,是要牺牲粮食生产还是牺牲生态环境,要结合多方面因素进行整体考虑。苏州市2005~2015年期间,水田减少1067.8km²,湖泊反而从2619.27km²增加到2824.13km²有小幅增长,可以看出决策者针对苏州市自身的特点做出了相应选择。从社会经济和生态环境发展情况来看,保护好苏州市湖泊坑塘为主的蓝色空间是保证可持续发展的重要前提。

4 结论

(1) 苏州市2004~2014年间热环境空间格局发生明显变化,北部和东部地区大面积低温区域被高温区域所替代,冷岛效应区域面积占比从2004年的39.06%减少到2014年的24.04%。

(2) 仅从冷岛效应强度数值来看,苏州市蓝绿空间降温能力呈现不断增强趋势,2004、2010和2014年的强度分别为6.3℃、7.1℃和9.6℃;冷岛效应强度与蓝绿空间面积呈现明显的负相关关系,考虑到蓝绿空间面积的大量减少,苏州市蓝绿空间整体的冷岛效应呈现出逐步减弱的趋势。从降温能力看,蓝绿空间冷岛强度排序从大到小为:河渠>湖泊>水田>林地。蓝色空间降温能力要优于绿色空间,而流动河渠的冷岛效应强度要高于静止的湖泊。

(3) 土地利用变化对蓝绿空间冷岛效应产生明显影响。苏州市蓝绿空间主要减少的土地利用类型为水田, 面积减少 28.5%, 是导致苏州市整体热环境变热的最重要原因; 反观苏州市湖泊面积研究时间范围内有小幅增长, 推断出政府决策者对于蓝绿空间类型的优先保护程度。

(4) 社会经济的发展, 尤其城市扩张、人为热量排放等能够间接影响蓝绿空间冷岛效应的时空特征。

参考文献:

- [1] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 等. 城市热岛的生态环境效应[J]. 生态学报, 2005, 25(8):2055-2060.
- [2] 寿亦萱, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2012, 70(3):338-353.
- [3] KAVEH D, MD K, YAN L. Urban heat island effect:A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures[J]. Int J Appl Earth Obs Geoinformation, 2018, 67:30-42.
- [4] HAMED F, MOHSEN F, HANYIEH S. Mitigating the urban heat island in a residential area in Tehran: Investigating the role of vegetation, materials, and orientation of buildings[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 46:101448.
- [5] YASHA W, QINGMING ZH, WANLU O. How to quantify the relationship between spatial distribution of urban waterbodies and land surface temperature?[J] Science of the Total Environment, 2019, 671:1-9.
- [6] 王晓娟, 孔繁花, 尹海伟, 等. 高温天气植被蒸腾与遮荫降温效应的变化特征[J]. 生态学报, 2018, 38(12):4234-4244.
- [7] 朱春阳. 城市湖泊湿地温湿效应—以武汉市为例[J]. 生态学报, 2015, 35(16):5518-5527.
- [8] 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.
- [9] 李锋, 王如松. 城市绿色空间生态服务功能研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3):527-531.
- [10] SEBASTIAN V, HENDRIK B, THOMAS C, et al. Evidence for the temperature mitigating capacity of urban blue space—A health geographic perspective[J]. Erdkunde, 2013, 67(4):355-371.
- [11] 陈康林, 龚建周, 陈晓越, 等. 广州城市绿色空间与地表温度的格局关系研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(5):842-849.
- [12] MATTHEW M, ABDUWASIT G, TASHPOLAT T, et al. Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: Implications for sustainable urban planning and climate change adaptation[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 89:59-66.
- [13] 杜铭霞, 张明军, 王圣杰. 新疆典型绿洲冷岛和湿岛效应强度[J]. 生态学杂志, 2015, 34(6):1523-1531.
- [14] 杨丽萍, 潘雪萍, 刘晶, 等. 基于 Landsat 影像的额济纳绿洲地表温度及冷岛效应时空格局研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2):116-121.

-
- [15] YANG C B, HE X Y, YU L X, et al. The cooling effect of urban parks and its monthly variations in a snow climate city[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9:1066.
- [16] WENG Q H. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64:335-344.
- [17] 乔治, 黄宁钰, 徐新良, 等. 2003-2017 年北京市地表热力景观时空分异特征及演变规律[J]. *地理学报*, 2019, 74(3):475-489.
- [18] MAHYAR M, PUAY YT, SOO CL. Multi-city comparison of the relationships between spatial pattern and cooling effect of urban green spaces in four major Asian cities[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98:200-213.
- [19] YANG C B, HE X Y, WANG R H, et al. The effect of urban green spaces on the urban thermal environment and its seasonal variations[J]. *Forests*, 2017, 8:153.
- [20] ROY D P, WULDER M A, LOVELAND T R, et al. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 145:154-172.
- [21] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. *地理学报*, 2014, 69(1):3-14.
- [22] SOBRINO JA, JIMÉNEZ-MUÑOZ JC, PAOLINI L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90:434-440.
- [23] ZHOU W Q, HUANG G L, CADENASSO M L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102:54-63.
- [24] PENG J, JIA J L, LIU Y X, et al. Seasonal contrast of the dominant factors for spatial distribution of land surface temperature in urban areas[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 215:255-267.
- [25] YANG C B, HE X Y, YAN F Q, et al. Mapping the influence of land use/land cover changes on the urban heat island effect: A case study of Changchun, China[J]. *Sustainability*, 2017, 9:312.
- [26] LIU JY, LIU ML, TIAN HQ, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990-2000: An analysis based on Landsat TM data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98:442-456.
- [27] VIDRIH B, MEDVED S. Multiparametric model of urban park cooling island[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12:220-229.
- [28] GHOSH S, DAS A. Modelling urban cooling island impact of green space and water bodies on surface urban heat island in a continuously developing urban area[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2018, 4:501-515.
- [29] PAUL C, LARISSA L. How factors of land use/land cover, building configuration, and adjacent heat sources and

sinks explain Urban Heat Islands in Chicago[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125:117-129.

[30] GEORGIANA G, BOGDAN U. Land use/land cover changes dynamics and their effects on surface urban heat island in Bucharest, Romania[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 80:115-126.

[31] ZHAO Z Q, HE B J, LI L G, et al. Profile and concentric zonal analysis of relationships between land use/land cover and land surface temperature: Case study of Shenyang, China[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 155:282-295.

[32] 高原, 刘普幸, 姚玉龙, 等. 基于遥感的石河子绿洲冷岛效应时空变化特征及其影响因子分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8):1319-1330.

[33] CAO X, ONISHI A, CHEN J, et al. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96:224-231.

[34] 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.

[35] 吴殿鸣, 邵大伟. 基于最佳尺度的城市扩张特征研究——以苏州中心城区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(9):1939-1946.

[36] 乔伟峰, 孙在宏, 邵繁荣, 等. 高度城市化区域土地利用结构演化与驱动因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(5):557-564.

[37] WENG Q H, LU D S, SCHUBRING J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89:467-483.

[38] CHEN AL, YAO XA, SUN RH, et al. Effect of urban green patterns on surface urban cool islands and its seasonal variations[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, 13:646-654.

[39] NASTRAN M, KOBAL M, ELER K. Urban heat islands in relation to green land use in European cities[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 37:33-41.

[40] BERGER C, ROSENRETER J, VOLTERSEN M, et al. Spatio-temporal analysis of the relationship between 2D/3D urban site characteristics and land surface temperature[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 193:225-243.

[41] LAN YL, ZHAN QM. How do urban buildings impact summer air temperature? The effects of building configurations in space and time[J]. *Building and Environment*, 2017, 125:88-98.

[42] LI X M, ZHOU W Q. Optimizing urban greenspace spatial pattern to mitigate urban heat island effects: Extending understanding from local to the city scale[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 41:255-263.

[43] 林芷欣, 许有鹏, 代晓颖, 等. 城市化对平原河网水系结构及功能的影响——以苏州市为例[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(6):1722-1731.