

· 研究报告 ·

福州城市热岛精细化时空结构特征研究

温康民^{1,2}, 任国玉^{3,4}, 阙翔⁵, 孙秀宝⁶

(1. 福建省气象科学研究所, 福建 福州 350028; 2. 福州市气象局, 福建 福州 350028; 3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430078; 4. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081; 5. 福建农林大学计算机与信息学院, 福建 福州 350002; 6. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301)

摘要:利用福州地区139个自动站2012—2020年逐时气温资料,对福州城市热岛时空结构进行研究并探讨其成因。结果表明,加密自动站清晰地展现了福州城市热岛的精细结构表现为“多中心”特征,即除了福州市中心城区的热岛主中心外,在闽清县城区和福清市城区还有两个副热岛中心,热岛强度在 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。此外,除永泰及闽侯等山区呈负热岛外,大部地区呈正热岛。在城市热岛演变趋势上,福州郊区及山区大部呈减少趋势,呈增长趋势的区域仅分布在闽清、罗源沿海、永泰东部、中心城区、闽侯南部、福清北部、长乐南部、连江西部等地区,速率为每 $10\text{ a } 0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

关键词:城市热岛;质量控制;时空结构特征;福州

中图分类号:X16

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2023)01-0014-06

Refined Spatiotemporal Structure Characteristics of Fuzhou Urban Heat Island

WEN Kang-min^{1,2}, REN Guo-yu^{3,4}, QUE Xiang⁵, SUN Xiu-bao⁶

(1. *Fujian Institute of Meteorological Sciences, Fuzhou, Fujian 350028, China*; 2. *Fuzhou Meteorological Bureau, Fuzhou, Fujian 350028, China*; 3. *School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430078, China*; 4. *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*; 5. *College of Computer and Information Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China*; 6. *South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510301, China*)

Abstract: Based on the hourly air temperature data from 139 automatic stations in Fuzhou from 2012 to 2020, the spatiotemporal structure of Fuzhou urban heat island was studied and its causes were discussed. The results showed that the fine structure of Fuzhou urban heat island clearly demonstrated the characteristics of “polycentric” by encryption automatic stations, that is, besides the main heat island center in the downtown area of Fuzhou, there were two sub-heat island centers in the urban area of Minqing County and Fuqing, and the heat island intensity was between $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. In addition, except for Yongtai and Minhou mountains, most areas showed positive heat island. In terms of the evolution trend of urban heat island, most of the suburbs and mountainous areas in Fuzhou showed a decreasing trend, while the increasing trend were only distributed in Minqing, Luoyuan coastal areas, eastern Yongtai, central city, southern Minhou, northern Fuqing, southern Changle, western Lianjiang etc., with a rate of $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ every 10 years.

Key words: Urban heat island; Quality control; Spatiotemporal structure characteristic; Fuzhou

收稿日期:2022-02-15;修订日期:2022-11-26

基金项目:国家重点研发计划基金资助项目(2018YFA0605603);福建省气象局开放式课题基金资助项目(2021KFM02);福州市科技计划基金资助项目(2021-S-200)

作者简介:温康民(1992—),男,江西赣州人,工程师,博士,主要从事气候变化研究。

城市环境对于城市居民来说至关重要,对城市气候的研究有助于城市环境的治理^[1]。在全球变暖和我国城市化快速发展的背景下,城市热环境研究是环境等相关领域的热门话题^[2-5]。虽然加密

自动站观测比常规观测的时空分辨率高,有利于描述精确的热岛结构,但其质量的准确性及可靠性往往是制约研究和服务的核心,故系统、科学地评估自动站数据的质量是一项关键的基础工作。国内外有很多关于自动站数据质控的研究^[6-9],如 Veen 等^[10]描述了北欧自动站数据质控系统,包括台站级质控、入库前实时质控、入库后非实时质控及人工质控等;傅娜等^[9]虽然开展了上海 2011 年 7 月—2012 年 6 月自动站气温数据质控,但其仅检验了空间一致性,时间一致性等方面未作检验。已有的城市热岛研究基本上是采用常规观测或卫星遥感数据^[11-14],如丁淑娟等^[15]基于哈尔滨的气温数据及城市发展强度数据,对城市发展同热岛效应的相关性进行了分析;Yang 等^[16]利用北京建成区的 56 个城市站及 8 个郊区站的 1 小时自动站资料,分析了北京建成区的热岛强度时空特征;Jia 等^[17]利用均一化的月值数据集分析了武汉站城市热岛强度的时间特征及其对气温长期趋势的影响;Gal-lo 等^[18]通过 NOAA/AVHRR 数据得到归一化植被指数 (NDVI),并估算了城市热岛对城郊气温的影响。由于常规资料的时空分辨率及卫星遥感资料的准确性都不够高,故有必要基于质控后的加密自动站资料来揭示城市热岛的精确结构特征。

今基于福州市 2012—2020 年加密自动站逐时气温资料,在对其开展系统评估检验基础上,得到一套质控后的高时空分辨率资料集。基于该资料集对福州市城市热岛的时空结构进行研究,为精细化预报预警服务、城市热岛应对提供一定的科技支撑。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

以福州市为研究区,其地理范围为 E118°08' ~ E120°31', N25°15' ~ N26°39'。福州市东濒东海,西邻南平、三明,北接宁德,南接莆田,居于亚太经济圈中国东南的黄金海岸。该市属南亚热带湿润季风气候区,福州城区、福清市、长乐区、连江县、罗源县具有海洋性气候特征,永泰县、闽侯县、闽清县兼有大陆性气候特点。该市年平均气温 19.9℃,年降水量 1 503.2 mm,年平均风速 1.8 m/s,年平均相对湿度 77.4%。

1.2 气象站点选择

利用福州市 2012 年 1 月 1 日—2020 年 12 月 31 日期间的常规站逐日和 139 个自动站逐小时气

温观测资料,常规站数据由国家气象信息中心提供,自动站数据从福州市气象局获取。若自动站 24 h 均无缺测,则日平均气温为 24 个时次气温的平均值;若自动站在 2:00、8:00、14:00 和 20:00 4 个时刻均无缺测,其余时次有缺测,则日平均气温为上述 4 个时次的气温平均值;若自动站在 2:00、8:00、14:00 和 20:00 部分缺测,则将该日定义为缺测。常规站包括福州城区、福州郊区、闽侯、长乐、福清、闽清、连江、永泰和罗源共 9 个气象站。自动站的空间分布广泛,覆盖了福州市除平潭以外的全部地域,且分布密度呈现从福州市中心城区及各区县中心向近郊及远郊渐渐减少的特征。这与福州城市化进程的空间差异相对应,基本上可以满足城市热岛效应加密研究的需求。

以福州 139 个自动站作为乡村站的候选站进行参考站遴选。在参考站选取时利用了 2018 年各省市土地使用遥感观测资料,该数据从中科院地理所网站下载,主要使用其中的 51 号城镇用地和 53 号其他建设用地。研究表明,考虑以站点为中心、16 km 为半径区域内的城市用地面积可以有效地选取出乡村参考站^[19]。对上述各候选乡村站逐一计算其周围分别以 1 km ~ 16 km 为半径的圆范围内的城市用地比例,将 16 个城市用地比例中最大值 ≤ 5% 的候选乡村站作为正式乡村站。根据该标准,139 个自动站中有 96 个站符合要求,再从中选取位于福州周边不同方位郊区且海拔高度低于 200 m 的 6 个站点作为参考站。将 6 个参考站的气温平均序列作为参考序列,在计算城市热岛强度时,利用各站气温与参考序列的气温差值得求。

1.3 质量控制与评估

1.3.1 质控方案

对加密自动站气温资料设计本地化的质控方案和流程,依次包括台站格式参数检查、气候极值检查、时间一致性检查和空间一致性检查。其中,气候极值检查和时间一致性检查还包括气候界限检查、台站极值检查。

1.3.2 质控检查

(1) 台站格式参数检查。检查结果表明,数据格式大部分符合要求,存在极少数缺测及记录错误的情况。以缺测值替代记录错误的数值,读取时赋值为 -999.9。

(2) 气候极值检查。其包含气候界限值及台站极值检查。气温阈值采用 -30℃ ~ 50℃^[20]。

台站极值依据各月的月极端最高(最低)气温值动态地修改阈值。由于不同站点的环境因素及极端天气事件出现的可能性不同,在以上极值的基准上再上下调整5℃。超过阈值的数据当作缺测处理。

(3)时间一致性检查。①连续性检查,用当前时刻的气温观测数据与前1h的相比,若 $|T_k - T_{k+1}| > 6\text{℃}$,则判定数据错误,其中 T_k, T_{k+1} 分别代表第 k 和 $k+1$ 时刻的气温;②最小变率检查,若气温观测数据连续 $> 12\text{h}$ 恒定不变,则判定数据为错误。

(4)空间一致性检查。依据观测站点的分布,中心城区距离 $< 10\text{km}$ 、郊区距离 $< 15\text{km}$ 的两个站点定义为相近站点,检查相近站点间的观测资料是否具有可比性。定义若某个站点的气温与其附近范围内多个站点的平均气温的差超过 $\pm 5\text{℃}$,则认为数据错误。

1.3.3 质量评估

将通过以上检查得出的错误或可疑资料按缺测值对待,获得质控后的资料集,并进一步根据缺测率评估加密自动站观测资料的可用性及完整性。将原始缺测值和修订缺测值一并纳入计算缺测率,即:

$$I_{\text{MVR}} = (I_{\text{OMN}} + I_{\text{RMN}}) / I_{\text{TDN}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: I_{MVR} 为缺测率; I_{OMN} 为原始缺测值个数; I_{RMN} 为修订缺测值个数; I_{TDN} 为总样本数。

根据公式(1)计算得出2012—2020年质控前年缺测率分别为2.69%、2.57%、1.83%、1.90%、0.56%、0.30%、0.41%、0.32%、0.31%;质控后年缺测率分别为3.19%、2.90%、2.13%、2.20%、0.83%、0.66%、0.80%、0.72%、0.84%。可以发现质控并没有改变资料年缺测率的演变趋势,这也从侧面证实质控过程是正确的。从质控前后观测资料的年缺测率来看,2012—2020年的年缺测率虽然在质控前后存在一定差异,但二者缺测率都维持在3.20%以下较低水平,且缺测率逐年降低,质控后2017年缺测率最低,仅为0.66%。说明文中采用的经质控后的加密自动站观测资料有较好的可用性和完整性。

采用经以上质控方案获得的加密自动站观测资料,与常规站资料作比对,能够直观地说明其准确性。图1(a)(b)分别为自动站与常规站观测的福州年平均气温空间分布。由图1可见,整体上来看,二者年平均气温空间分布相符,即福州市中心

城区及其附近、闽清县城区为气温高值区,远郊及平潭岛为低值区。此外,加密观测还可清晰地反映福清市城区的气温高值中心。

春夏秋冬季自动站观测的福州平均气温分别为18.49℃、27.52℃、21.83℃、11.54℃;常规站分别为19.25℃、28.43℃、22.73℃、12.26℃。加密自动站和常规观测的差别并不大,均低于0.91℃,尤其是冬、春季节。表明质控后的加密自动站与常规观测的福州季节平均气温基本吻合。因为常规观测资料比较可信,所以质控后的加密自动站资料可以较好地反映福州的气候状况。进一步利用季节平均气温空间分布上的标准差[见公式(2)],检查上述两套资料在空间分布上的差别。

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_{i,j} - \bar{T}_j)^2} \quad (2)$$

式中: i 为站号; j 为季节编号; N 为站点数目; $T_{i,j}$ 为第 i 站在 j 季节的平均气温; \bar{T}_j 为 j 季节各站的平均气温; S_j 为 j 季节平均气温的空间标准差。

春夏秋冬季自动站平均气温的空间标准差分别为1.15℃、1.32℃、1.56℃、1.29℃;常规站分别为0.55℃、0.40℃、0.47℃、0.45℃。自动站资料说明各季节福州气温空间差别春季最小,秋季最大;而常规站资料则说明各个季节差别不大。各个季节自动站标准差均比常规站大,表明自动站之间的气温差别比常规站更为明显。总体而言,虽然加密自动站获得的福州市年、季平均气温均与常规资料基本吻合,但空间差别比常规资料更大,这说明了加密自动站资料比常规资料更有优势。

2012—2020年福州9个常规站与附近自动站逐月气温的相关系数在0.995~1.0之间,表明常规站与其附近自动站观测的气温相关性很好,这也

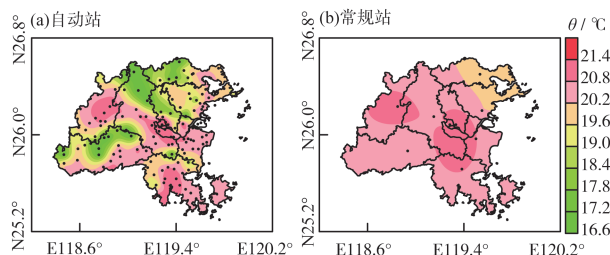


图1 自动站与常规站观测的福州年平均气温空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of annual mean air temperature from automatic and conventional stations in Fuzhou

进一步验证了自动站观测的准确性。

利用 2012—2020 年福州 139 个自动站的年及四季平均气温减去 6 个参考站年及四季气温的平均值,得到 139 个自动站观测的福州逐年及四季的热岛强度,并讨论其时空分布特征及成因。

2 结果与讨论

2.1 福州市年平均热岛强度分布特征

图 2 为 2012—2020 年福州年平均热岛强度空间分布。由图 2 可见,加密自动站的气温观测资料能清晰地展现福州城市热岛的精细结构,表现为“多中心”特征,即除了福州市中心城区的热岛主中心外,在闽清县城区和福清市城区还有两个副热岛中心,热岛强度均在 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。热岛强度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的区域主要分布在闽清大部、永泰南部、福清中部及南部、长乐、闽侯中部及南部、连江和罗源沿海部分地区;热岛强度 $< -1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的区域主要分布在闽清北部、闽侯北部、晋安中部、罗源西部及中部、永泰西部及北部、闽侯南部部分地区;热岛强度为 $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的区域主要分布在连江、罗源东部、福清北部、永泰西部等地。

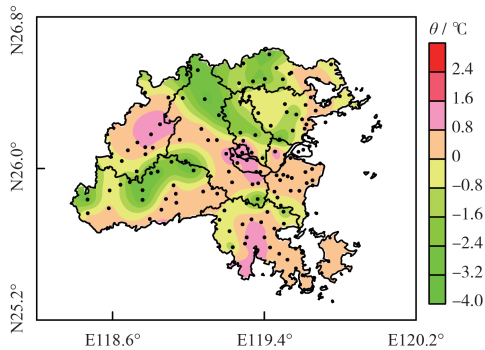


图 2 2012—2020 年福州年平均热岛强度空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of annual mean heat island intensity in Fuzhou from 2012 to 2020

2.2 福州市季节平均热岛强度分布特征

图 3(a)—(d)分别为 2012—2020 年福州各季节平均热岛强度的空间分布。由图 3 可见,春季热岛中心在福州市中心的台江及鼓楼区、闽清中部、永泰南部,热岛强度为 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$;热岛强度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的区域包括永泰南部、闽清大部、闽侯中部及南部、仓山区、马尾及长乐靠近市区的区域、福清中部;热岛强度 $< -1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的区域包括永泰北部及西部、闽清北部、闽侯北部、晋安中部、罗源中部、连江及闽侯南部。夏季有两个热岛中心,即福州市中心城区及闽清中部,中心城区的热岛中心比春季有所扩张,热岛强度最高达 $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,而位于闽清的热岛中心区域有所缩减;连江、罗源、长乐、福清沿海地区的热岛强度比春季有所增强,为 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$;其余地区热岛强度分布与春季类似。秋季是热岛强度最强的季节,有 3 个热岛中心,即福州市中心城区并扩展至马尾及长乐的,闽清中部、福清中南部地区,热岛强度为 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中中心城区附近及福清南部的热岛中心强度最高可达 $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上;其余地区热岛强度分布与春季类似。冬季也有 3 个热岛中心,即闽清中部、福州市中心城区附近、福清中南部,热岛强度为 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$;其余地区热岛强度分布也与春季类似。

综上所述,春夏季福州热岛主要在中西部地区,而秋冬季热岛主要在中部、东部沿海及东南部。以上热岛结构的季节差异与局地海陆风影响和受盛行风向的季节转换有关。春夏季福州主要为东南风向,东南部地区受东南风影响最明显相对凉爽,热岛中心位于偏西北方向;秋冬季节主要为西北风,西北部郊区受其影响相对偏冷,且东部及东南沿海地区受局地海陆风影响较内陆偏暖,综合局地性海陆风和区域性大气环流影响,秋冬季热岛中心在偏东南方向。由此可见,自动站观测显示的热岛结构走向与局地海陆风的实际影响和大气环流

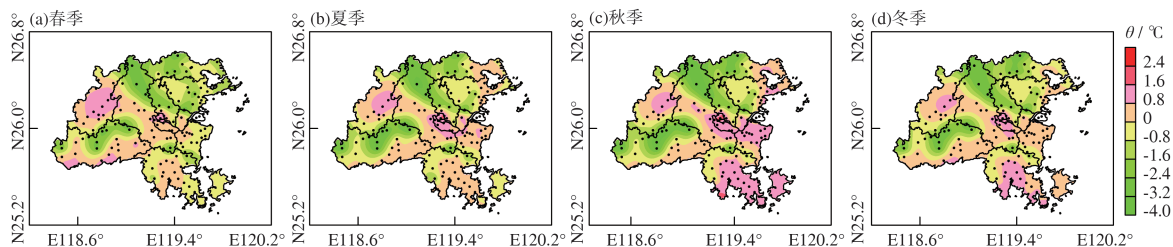


图 3 2012—2020 年福州各季节平均热岛强度的空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of mean heat island intensity in Fuzhou in different seasons from 2012 to 2020

的季节转换相吻合;而常规观测由于站点稀少,对热岛空间结构走向的描述存在不可避免的缺陷。

2.3 福州热岛强度年变化趋势

图 4 为 2012—2020 年福州年平均热岛强度变化率的空间分布。由图 4 可见,热岛以每 10 a 0.25 °C ~ 0.5 °C 增强的区域仅分布在闽清北部及南部少量地区、福清西北部少量地区;热岛以每 10 a 0 °C ~ 0.25 °C 增强的区域分布在闽清大部、罗源沿海部分地区、永泰东部、福州市中心城区附近、闽侯南部、福清北部、长乐南部、连江西部少数地区;其余地区热岛呈减弱趋势,其中永泰西部及北部部分、闽侯西部及北部、福清西部部分、连江中部部分及沿海部分、罗源中部部分地区减弱趋势较大,以每 10 a -0.75 °C ~ -0.25 °C 减弱,其他地区减弱趋势较小,以每 10 a -0.25 °C ~ 0 °C 减弱。

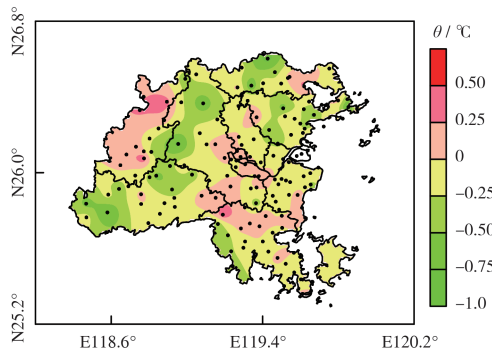


图 4 2012—2020 年福州年平均热岛强度变化率的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual mean heat island intensity change rate in Fuzhou from 2012 to 2020

2.4 福州热岛强度季节变化趋势

图 5(a)—(d) 分别为 2012—2020 年福州各季节热岛强度变化率的空间分布。由图 5 可见,春季,热岛以每 10 a 0 °C ~ 0.5 °C 增强的区域分布在福州市中心城区附近、闽清北部及南部、福清除西

部以外的大部、永泰东部、闽侯南部、长乐、连江及罗源沿海地区,以每 10 a 0.5 °C ~ 1.0 °C 增强的区域仅分布在福清最南端;永泰西部及中部、闽侯西部及北部、福清西部、连江西部、罗源北部减弱趋势较大,以每 10 a -1.0 °C ~ -0.5 °C 减弱,以每 10 a -0.5 °C ~ 0 °C 减弱的地区分布在罗源连江西部、晋安、闽侯中北部、闽清、福清西部、永泰中部。

夏季,热岛以每 10 a 0.5 °C ~ 1.0 °C 增强的区域仅分布在闽清西部、长乐南部及福清北部;热岛以每 10 a 0 °C ~ 0.5 °C 增强的区域分布在福州市中心城区附近、闽清大部、长乐大部、福清大部、永泰北部及东部、闽侯南部;永泰西部及中部、闽侯西部、闽清东部、马尾中部、连江西北部、罗源中部减弱趋势较大,以每 10 a -1.0 °C ~ -0.5 °C 减弱,其中减弱趋势最大的地区分布在连江西北靠近晋安的地区及马尾中部,以每 10 a -1.5 °C ~ -1.0 °C 减弱,其余地区减弱趋势较小,以每 10 a -0.5 °C ~ 0 °C 减弱。

秋季,热岛以每 10 a 0.5 °C ~ 1.0 °C 增强的区域仅分布在闽清北部及南部;以每 10 a 0 °C ~ 0.5 °C 增强的区域分布在福州市中心城区附近、闽清大部、永泰西部及东部、闽侯南部及福清北部、连江中西部及罗源沿海部分地区;永泰南部少量、福清西部及南部少量、闽侯西部少量、长乐东部少量、马尾中部部分、连江西部及沿海少量、罗源中部少量地区减弱趋势较大,以每 10 a -1.0 °C ~ -0.5 °C 减弱,其中减弱趋势最大的分布在马尾中部少量地区,以每 10 a -1.5 °C ~ -1.0 °C 减弱,其余地区减弱趋势较小,以每 10 a -0.5 °C ~ 0 °C 减弱。

冬季,热岛以每 10 a 0 °C ~ 0.5 °C 增强的区域分布在福州市中心城区附近、闽侯南部及北部少量、闽清北部及南部部分、永泰东部少量、福清除西部以外的大部、长乐大部、罗源沿海及中部少量、

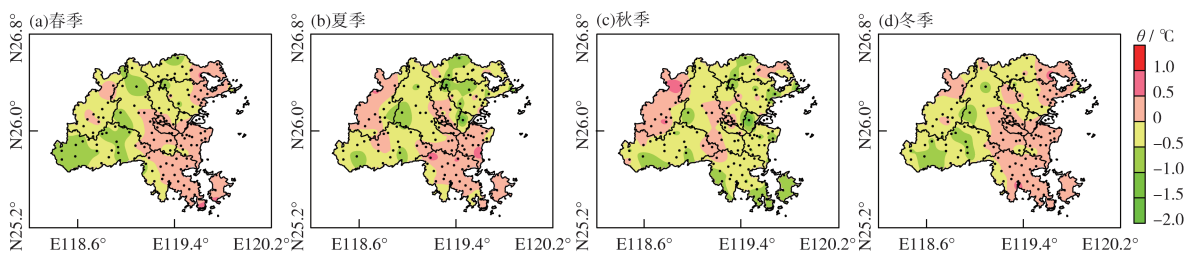


图 5 2012—2020 年福州各季节热岛强度变化率的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of heat island intensity change rate in Fuzhou in different seasons from 2012 to 2020

连江沿海及西部少量地区;永泰中部及西部部分、闽侯西部及北部少量地区减弱趋势较大,以每10 a $-1.0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 减弱,其余地区减弱趋势较小,以每10 a $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 减弱。

综上,福州热岛以秋季呈减弱趋势的范围分布最为广泛,呈增加趋势的地区仅包括福州市中心城区附近、永泰福清闽侯3区交界的地区、闽清大部及罗源沿海部分地区,且以每10 a $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增强;其他季节,呈增强趋势的范围分布较为广泛,春季及冬季主要分布在罗源连江沿海、闽清部分、福州市中心城区附近、长乐大部及福清除西部以外的大部,夏季内陆中西部地区呈增强趋势的范围有所增加,而沿海有所减少,主要分布在闽清大部、福州市中心城区附近、永泰北部部分、长乐除东部沿海地区的大部、福清除南部沿海及西部以外的大部,且大部分以每10 a $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增强。而呈减弱趋势的地区主要分布在永泰大部、罗源及连江中西部、晋安北部、闽侯中部及北部等山区或郊区,大部分以每10 a $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 减弱。

3 结论

(1) 利用质控后的加密自动站资料研究福州城市热岛效应,结果表明,福州城市热岛的精细特征体现出“多中心”特征,即除了福州市中心城区的热岛主中心外,在闽清县城区和福清市城区还有两个副热岛中心。

(2) 春、夏季,福州城市热岛主要分布在中西部地区,而秋冬季城市热岛主要位于中部、东部沿海及东南部。以上热岛空间结构的季节差异与局地海陆风影响和受盛行风向的季节转换有关。

(3) 在城市热岛演变趋势上,增强趋势较大的区域仅分布在闽清北部及南部少量地区、福清西北部少量地区;闽清大部、罗源沿海部分、永泰东部、中心城区附近、闽侯南部部分、福清北部、长乐南部部分、连江西部分部地区增强趋势较小;其余地区呈减弱趋势。

[参考文献]

- [1] 王坚. 厦门市气候特征变化与酸雨形成研究[J]. 环境监测管理与技术, 2014, 26(5): 12-14.
- [2] 史军, 梁萍, 万齐林, 等. 城市气候效应研究进展[J]. 热带气象学报, 2011, 27(6): 942-951.
- [3] 杨鹏, 陈静, 侯晓玮, 等. 基于多源数据的城市热岛效应研究——以石家庄地区为例[J]. 气象, 2013, 39(10): 1304-1313.
- [4] TAN J G, YANG L M, GRIMMOND C S B, et al. Urban integrated meteorological observations: practice and experience in Shanghai, China[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(1): 197-210.
- [5] 叶书朝, 冯徽徽, 邹滨, 等. 近40年洞庭湖区地表景观演变及气候潜在响应特征[J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(4): 13-18.
- [6] EISCHEID J K, BAKER C B, KARL T R, et al. The quality control of long-term climatological data using objective data analysis[J]. Journal of Applied Meteorology, 1995, 34(12): 2787-2795.
- [7] PETERSON T C, VOSE R, SCHMOYER R, et al. Global historical climatology network (GHCN) quality control of monthly temperature data[J]. International Journal of Climatology, 1998, 18(11): 1169-1179.
- [8] 陶士伟, 徐枝芳. 加密自动站资料质量保障体系分析[J]. 气象, 2007, 33(2): 34-41.
- [9] 傅娜, 陈葆德, 谭燕, 等. 上海自动站气温资料的空间质量控制与特征分析[J]. 大气科学学报, 2014, 37(2): 199-207.
- [10] VEJEN F, JACOBSSON C, FREDRIKSSON U, et al. Quality control of meteorological observations automatic methods used in the Nordic countries: Climate Report, No. 8/2002, KLIMA [R]. Oslo: Norwegian Meteorological Institute, 2002.
- [11] 侯依玲, 陈葆德, 陈伯民, 等. 上海城市化进程导致的局地气温变化特征[J]. 高原气象, 2008, 27(S1): 131-137.
- [12] 王桂玲, 蒋维楣, 魏鸣. 城市热岛效应的卫星遥感分析[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 298-304.
- [13] 程蕊. 上海市热环境监测方法及城镇居住区热岛效应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [14] 吴慧凤, 陈志强. 福州市城市热岛效应的转移矩阵与缓冲区[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2019, 39(3): 69-75.
- [15] 丁淑娟, 张继权, 刘兴明, 等. 哈尔滨市城市发展与热岛效应的定量研究[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(4): 230-234.
- [16] YANG P, REN G Y, LIU W D. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2013, 52(8): 1803-1816.
- [17] JIA W Q, REN G Y, SUONAN K Z, et al. Urban heat island effect and its contribution to observed temperature increase at Wuhan station, central China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2019, 25(1): 102-113.
- [18] GALLO K P, MCNAB A L, KARL T R, et al. The use of a vegetation index for assessment of the urban heat island effect[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(11): 2223-2230.
- [19] TYSA S K, REN G Y, QIN Y, et al. Urbanization effect in regional temperature series based on a remote sensing classification scheme of stations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(20): 10646-10661.
- [20] 王亚男, 吴彬贵, 解以扬. 华北高速天津段公路气象数据质量控制分析[J]. 气象科技, 2011, 39(6): 723-730.