DOI:10.19924/j.cnki.1674-4144.2020.06.004

中国滨海城市的山水关系及热岛效应对比研究*

蔡 智 唐 燕 江 伦

摘 要：绿地和水体可以有效改善城市热环境。中国有绵延上万公里的海岸线，沿海城市数量众多。各城市山头绿地、海洋水体、城市建成区关系多样，铸就了各地独特的城市微气候。基于夏、秋季节的卫星遥感数据，以中国10个滨海城市为例，尝试从山、水、城关系的视角，分析各城市的热环境特征及差异。结果表明，滨海城市山水格局类型可以分为山水环绕型、依山傍水型、众山环绕型和平原面水型四种。由于其形态类型的不一致，各城市的热环境也表现出一定的差异性，并且总体表现为依山傍水型最优，山水环绕型和平原面水型次之。受周边山脉围合影响，众山环绕型的城市最容易出现高温热岛和热浪天气。海洋水体在改善城市热环境中起着积极有效的作用，而顺畅的通风廊道有助于扩大水体对城市的降温影响范围。通过对比分析热环境差异及影响因素，以期为理性城市规划设计、提高城市气候适应性、应对气候变化挑战提供理论支持。

关键词：滨海城市；山水；热环境；城市热岛

Abstract: Green spaces and water bodies can improve the urban thermal environment. China has tens of thousand kilometers coastline and dozens of coastal cities, the various relationship between mountain green spaces, oceans and urban areas produced their unique microclimate. In this paper, we select ten coastal cities in China as a case study, and comparing their thermal environment differences. The results showed that those cities can be divided into four types: mountains and water around the city (I), city back to mountains and facing water (II), mountains around the city (III) and plain coastal city (IV). With the various distribution of landscape layout, significant thermal environment differences have also appeared in those cities, and the heatwave and high urban heat island effects are more likely to appear in type IV cities. The wind from the oceans plays a vital role in cooling the city, and the corridor in the city can enlarge the cooling distance of water bodies. The above findings can help planners use scientific methods to optimize urban form, and making the city cope with climate change.

Key words: coastal city ; mountain and water bodies ; thermal environment ; urban heat island

中图分类号：TU98 **文献标识码：**A
文章编号：1674-4144（2020）-06-28（6）

1 引言

随着快速城镇化进程的推进，截至2019年底，我国已有近60%的人口在城市居住。而到2035年，这一基数有望达到70%。人口向城市加速集聚的同时，城市热环境也在持续恶化。各地的气象部门数据显示，城市冬季变暖、夏季高温热浪天数上升的趋势愈发明显。城市高温不仅会导致因空调制冷产生更多的能源消耗需求[1, 2]，加剧空气污染[3]，而且会增加各类疾病爆发的几率[4,5]，严重威胁老幼、疾病等脆弱人群的健康[6,7]。因此，减缓城市热岛、提升城市气候适应性、应对气候变化的挑战，成为近年来城市生态环境领域关注的焦点。

城市热环境受空间形态、人口活动、社会经济、气候区等多个要素的制约影响[8,9]。由于空间形态特征与城市热环境的关系最为紧密，是城市建成环境的最直接反映，并且受地方经济文化、社会风俗等影响较小，其

作者简介
蔡 智，清华大学建筑学院博士研究生。
唐 燕，清华大学建筑学院副教授，博士生导师。
江 伦，重庆大学建筑城规学院硕士研究生。

* 基金项目：国家自然科学基金项目“多源数据融合的城市高温脆弱性空间识别与城市设计策略应对”（编号：51978363）；北京社会科学基金项目“首都城市更新制度建设与治理策略研究”（编号：19GLB034）和国家重点研发计划项目“城市新区运营中绿色规划控制方法与优化技术研究”（编号：2018YFC0704600）。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量化的指标如建筑密度、绿地率、天空开阔等因子[10]，在全球范围内都具有适用性及对比性。因此，城市空间形态也通常是热环境领域研究的重点。城市空间形态具体涉及城市的功能布局[11]、用地类型[12,13,14]、建筑空间形态[15,16,17]，甚至是城市的山水关系等。而由于山体和水体建设改造难度大，常成为城市中蓝绿空间的主要组成部分。已有大量研究指出，蓝绿空间可以有效改善城市热环境，缓解城市热岛[18]。目前关于城市蓝绿空间和热环境之间的关系，其研究的层面包括蓝绿空间自身的形态布局、降温影响范围以及和周边建成区之间的关系等[19,20]。其中蓝绿空间形态布局主要指面积、形状指数等[21]，通常来说面积越大、形状越规则的蓝绿空间，所能产生的冷岛效应也越强[22]。其对周边区域的降温效果可以达到好几摄氏度，降温范围可以达到几百甚至上千米[23]；虽然同样面积大小、多个破碎不规则的蓝绿空间斑块其降温效应较弱，大部分只能产生1℃以内的降温效果，其降温范围也仅有几十米[24]。但是城市中大量存在的微绿空间及水体，使得该种类型的蓝绿空间所产生的降温效果能覆盖城市更多的区域[25]；蓝绿空间和周边城市建成区的围合关系，包括通风廊道、开阔度等[24]。开阔的空间以及顺畅的通风廊道，可以有效把蓝绿空间的冷空气导入城市内部[26]。而有序起伏的城市空间形态甚至建筑空间布局，也有利于蓝绿空间内的冷空气和城市内部的热空气交换。

值得注意的是，尽管山体和水体是城市绿色空间和蓝色空间的重要组成部分，但少有对城市山水格局和城市热环境之间关系的研究。且已有研究大多聚焦在单一城市，很少有多个城市之间的对比。受城市不同山水格局及面积大小的影响，其热环境均有可能产生差异性。另外，已有的各类研究成果中，研究方法众多、研究数据多样、研究焦点不一，导致很难在同一个维度上对多个城市进行横向对比。而滨海城市大多背山面海，具有丰富的山水资源，孕育出各地独特的山、水、城空间格局及气候环境。为此，本文以中国10个滨海城市为例，基于夏、秋季节的卫星遥感影像数据，尝试从热环境的视角，对比分析各地的山水关系及热岛效应特征。以期为理性规划设计提供支持，增强城市应对热浪风险的能力。

2 研究数据与方法

2.1 研究区

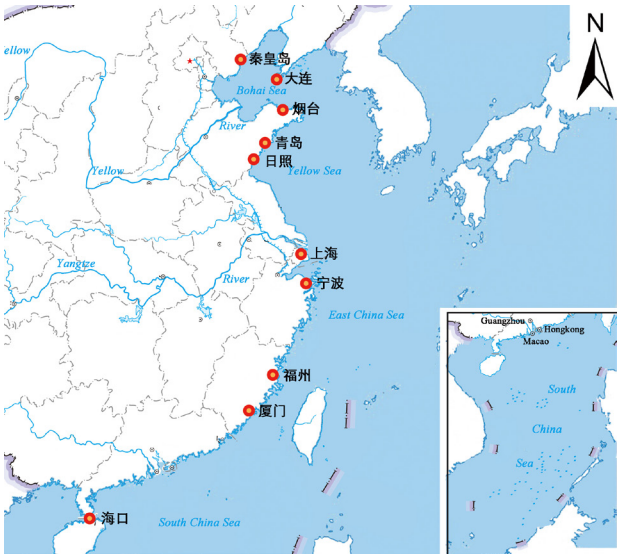


图1 样本研究城市图

中国拥有长达近3.2万公里的海岸线，滨海城市数量众多。各城市气候差异变化大，纵跨热带季风气候、亚热带季风气候、温带季风气候三个气候区，冬季南北温度差异明显，夏季普遍高温。便利的水运条件，使得滨海城市具有先天的发展优势。依托于港口及长期的对外通商功能，各城市在发展过程中，积累了深厚的人文历史底蕴。而气候各异、多样的地理要素也铸就了各地独特的山水城市格局。为此，本文选取了10个具有代表性的滨海城市作为研究对象（图1），其中3个为省会级城市（上海、福州、海口），7个为地市级城市（大连、秦皇岛、烟台、青岛、日照、宁波、厦门），分析其山水格局特征以及热环境特征。

2.2 数据

本次研究的数据主要包括Landsat 8卫星遥感数据、谷歌影像数据、地形数据、气象数据等。其中，卫星遥感影像来源为美国地质勘探局官方网站（https://

表1 各城市的遥感影像截取时间表

序号	城市	遥感影像获取日期
1	大连	2017.09.23
2	秦皇岛	2018.06.29
3	烟台	2017.09.23
4	青岛	2017.09.23
5	日照	2017.09.23
6	上海	2015.08.03
7	宁波	2017.08.24
8	福州	2016.07.27
9	厦门	2016.07.27
10	海口	2018.05.17

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

earthexplorer.usgs.gov），选取的时间主要为夏季或秋初，具体时间见表1。影像获取日，研究区上空无云，天气晴朗。谷歌影像数据主要通过卫星地图影像软件获取得到，其精度为0.5米。地形数据主要来源于地理空间数据云（http://www.gscloud.cn），其精度为30米。气象数据来源为中国气象数据网（http://data.cma.cn/），其产品为中国地面气象站逐小时观测资料。

2.3 方法

数据处理方法及流程主要包括城市山水识别与格局分类、地表温度反演、城市热岛效应计算与分析等。

2.3.1 城市山水识别与格局分类

本文主要使用地形数据和植被覆盖信息识别城市山体，其中植被覆盖信息使用归一化植被指数（NDVI）进行提取。水体信息使用归一化差异水体指数（MNDWI）进行提取。城市建设信息通过归一化建筑指数（NDBI）进行提取。NDVI、MNDWI、NDBI均在Arcgis pro 2.5 中通过Landsat 8影像数据直接计算得到。然后通过综合对比分析，使用定性分析的方法，总结归纳各城市的山水格局类型。

2.3.2 地表温度反演

本文基于Landsat 8 卫星遥感影像第10波段数据，采用大气校正方法反演地表温度，其具体流程和原理可以参考文献[27]。由于已有研究者在ENVI 5.3中将温度反演流程进行了模块集成，提供了半自动化的数据处理方式。为此，本研究使用“Landsat 8 地表温度反演工具”执行操作流程。

2.3.3 城市热岛效应计算与分析

大量研究指出，城市热环境统计与计算具有较大的空间尺度相关性，并且在300米左右具有较好的结果[28]。为此，本文在Arcgis Pro中使用300米的矩形格网，提取各类归一化指数及地表温度数据。使用城市热岛强度来比较城市和附近乡村之间的温度差异，其计算公式为城市热岛强度 = 城市地表温度–乡村地表温度。

3 研究结果

3.1 城市山水格局

通过对比分析，发现各滨海城市的规模大小不一、形态各异，其海岸线长度也从无到长达上百千米(图2)。其中面积最大的城市为上海，其规模达1892平方公里。面积最小的城市为海口，其规模仅158平方公里。

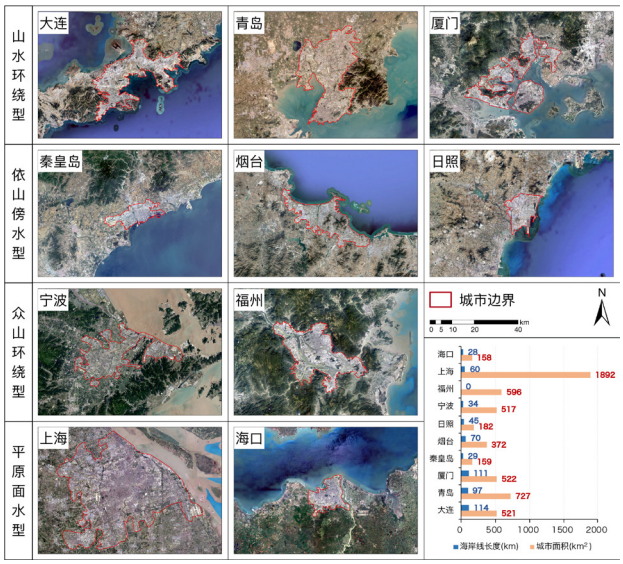


图2 城市山水格局类型及面积、海岸线长度大小图

海岸线最长的城市为大连，最短的城市为福州。大连为半岛城市，城市两侧坐拥美丽海港，为此其海岸线长达114千米。福州虽同为滨海城市，但受城市周边山体环绕的影响，城市边界没有与海直接相连，其海岸线长度为零。其他城市大多与海相傍，其海岸线长度从20千米到90千米不等。

城市山水格局可以概括总结为山水环绕型、依山傍水型、众山环绕型和平原面水型四种（图 2）。其中，大连、青岛、厦门三城，海港深入至城市，城市地形起伏变化大，水、山、城相融关系明显，形成独特的山水环绕城市格局。秦皇岛、烟台、日照三城，背靠山脉、面朝大海，大山大水特征明显，属于依山傍水型城市。宁波、福州二城，城市周边被山体环绕，仅有一面通向大海，整体开阔程度较低，属于众山环绕型滨海城市。上海、海口二城，地处河流与海洋交汇的三角洲区域，城市位于冲积平原之上，周边并没有明显起伏的山脉，属于平原面水型城市。

3.2 城市热环境

3.2.1 城市用地类型的温度差异

由于卫星遥感影像获取时间不一，且各城市空间形态各异，城市以及各类用地之间的温度差异变化均较大（图3）。但总体上，各类用地地表温度均表现出城市用地温度>附近乡村>山体绿地>海洋水体的趋势，并且乡村和山体绿地之间的温度差异较小。其主要原因在于，城市区域内，人工建设强度大、绿地覆盖稀少。大

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

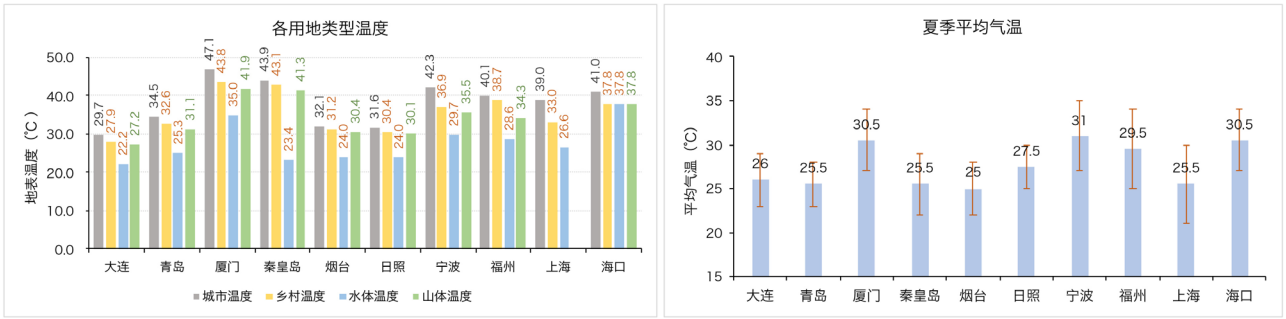


图3 城市各类用地类型的地表温度及夏季平均气温分布图

量存在的水泥硬质不透水地表对太阳辐射具有很强的吸收能力，高密度的人口活动及能量消耗也使得城市成为热量的释放源，导致城市地表温度显著高于其他类型地表温度。乡村地区除部分点状集聚的村庄外，其他地方建设量较少，大面积的地表被绿地所覆盖，其绿地率和山体差异甚小。这就导致乡村和山体绿地之间的地表温度差异较小。而水体比热容较大，在同等的太阳辐射量下，其温度上升显著比地表慢。这就导致水体通常在夏季成为“冷岛”。同时，水体的温度最低也说明了水体可能比绿地产生更强的降温效应。

3.2.2 不同形态类型城市的热环境差异

历年地面气象站数据资料表明，夏季平均气温最高的城市为宁波（31℃），平均气温最低的城市为烟台（25℃）（图3）。各类型城市夏季平均气温依次上升为依山傍水型（26℃），山水环绕型（27.3℃），平原面水型（28℃）以及众山环绕型（30.25℃）。其主要原因在于，在依山傍水型城市里，城市同时受背后山脉下沉冷空气和迎面而来的海洋风影响。山体风和海洋风的综合作用可以有效降低城市温度；在山水环绕型的城市里，几乎很少有较大规模的山脉存在，更多的是城市内部及周边的山头绿地，山体所能产生的冷却效应有限，而部分存在的山体甚至会在一定程度上阻碍海洋风进入城市。城市空气在海洋风的主导下，在山、水、城之间形成微循环；对于平原面水型城市而言，城市冷空气主要来源于海洋风。当城市规模较大时，单侧进入城市的海洋风所能产生的降温效果较为有限；而在众山环绕型的城市里，从海面而来的海风受山脉阻隔，不能顺畅到达城市。城市内部的冷空气主要来源于周边的山体，而城市产生的热空气又不能快速与外界进行交换，导致热量在城市积聚，使得城市内部极易出现高温的天气。

通过进一步使用地表温度对比分析，发现热岛效应最强的城市为上海（5.93℃），最弱的城市为秦皇岛（0.82℃）（图5）。各类型城市热岛强度依次为依山傍水型（0.97 ℃）、山水环绕型（2.32 ℃）、众山环绕型（3.37 ℃）以及平原面水型（4.58 ℃）。产生这种现象的主要原因在于，本次研究的三个依山傍水型城市（秦皇岛、烟台、日照），均位于温带季风气候区，夏秋季节干旱少雨，城市附近的乡村区域大多为农业用地所覆盖，自然绿地覆盖稀少，这就导致城市和乡村的绿地覆盖比例差异变化小。此外，如图4所示，海洋风、山体风可以便捷进入城市，城乡热量交换强度大，进而导致城乡地表温度差异较小；而在山水环绕及众山环绕的城市类型当中，山、城、水关系密切，不同用地之间的热量交换程度较高，这使得城市周边的绿地和水体，可以对城市产生有效的降温效应。进而导致城市热岛效应强度较弱。但多山的地形、山水交互加之湿热的气候条件，催生了大量大面积自然山体绿地。城市与其周边的乡村地区，其绿地覆盖比率差异悬殊。这也就导致了城乡之间的地表温差有一定程度的上升，尤其是对于城在山中、村在绿地中的众山环绕型城市而言，其城乡地表温差更大；对于平原面水型的城市而言（上海），城市面积巨大、海岸线较短、周边无大体量山脉存在，山、城、水之间的关系有限，热量很容易在城市区域聚集，从而产生显著的热岛效应。城市热岛强度与城市面积之间的显著的正相关关系（0.652*，P<0.05），也证实了城市面积越大其热岛效应越显著。

3.3 水体降温效应的对比分析

由于海风在滨海城市热环境中扮演着至关重要的角色。为进一步探究海洋水体在不同山水城市格局中的降温范围差异，通过使用已有研究中的三次函数拟合求解方法[10],获得了海洋水体在各城市的降温距离。其结果表明，海水对城市的降温范围在日照最远（1652

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

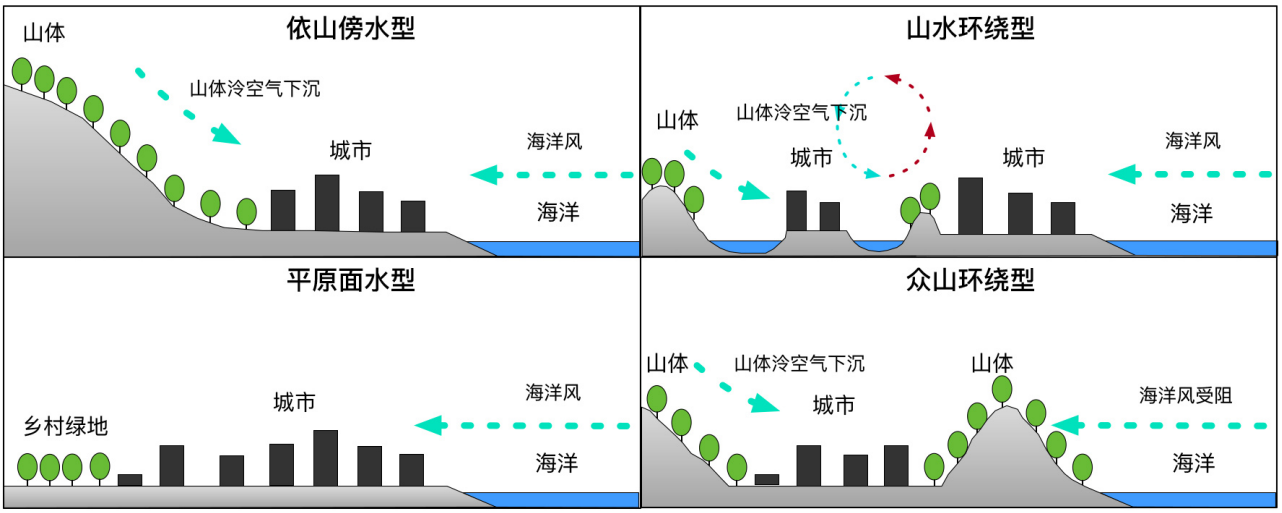


图4 不同类型的滨海城市空气交换示意图

m），在厦门最小 (701 m)。各类型海水的降温范围依次上升为众山环绕型（1008 m）、平原面水型（1045 m）、山水环绕型（1129 m）和依山傍水型（1618 m）。在众山环绕型城市，受山体阻隔，海风并不能顺畅到达城市。城市中心区远离海岸线，并且海岸线长度较短。这就导致海水所能影响的城市范围极为有限；而在平原面水型城市，由于用地充裕，城市建设受地形限制较小，其斑块形状较为规整。海风需要经过城市中心区才能影响城市内陆区域，而在此之前，海风便已被城市加热，海洋所能影响的城市范围基本上位于近海岸区域；在山水环绕型城市，海岸线长度较长，城市与海洋接触面积有所上升。海风可以从多个方向上影响城市内部区域，而部分因建设不便所保留下来的小山头绿地又在城市区域的尺度上构成了通风廊道，这也在一定程度上扩大了海风的影响范围；而在依山傍水型城市，受地形限制，城市大多呈狭长型。这一方面使得城市具有与海洋有较大的接触面，有利于热量的交换。另一方面，逐渐向内陆起伏的地形，也使得大量地表与海风直接接触。从而在统计层面上，海风所能影响的范围更广。

4 讨论与结论

本文以中国10个滨海城市为例，分析了其山水格局特征和热环境的差异。其结果表明，滨海城市可以分为山水环绕型、依山傍水型、众山环绕型和平原面水型四种。热环境在各城市也表现出一定的特质性，总体上，依山傍水型热环境最优，是夏季避暑的理想场所；山水环绕型热环境次之，但该类型城市拥有多变而绵长的海岸线，城市、海洋、山体相互作用，极易形成微循环的气候环境；平原面水型城市布局规整，山水关系差，海风对城市的冷却效果也较为有限，进而导致较差的城市热环境；众山环绕型城市因山脉围绕阻隔，城市热量不能及时散发出去，外界凉爽海风不能有效进入城市。这类城市极易在夏季产生高温热岛及热浪天气。

通过对比山体绿地和海洋水体的地表温度以及其

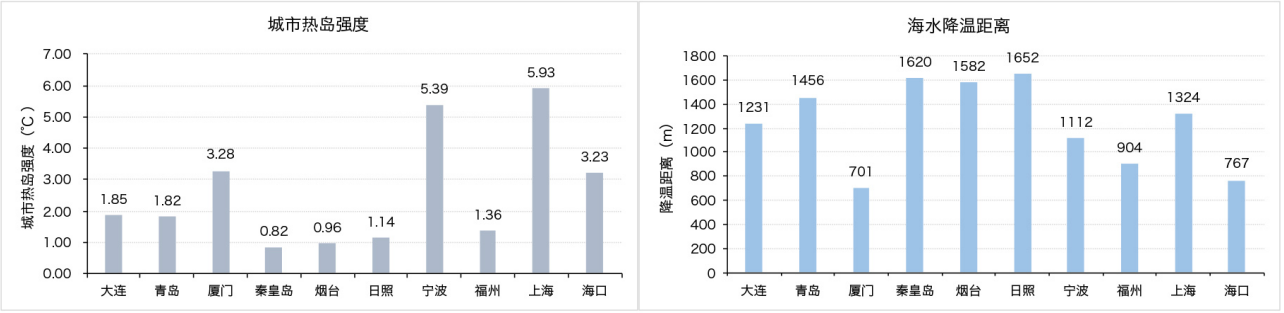


图5 各城市的热岛强度及海洋降温距离图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

降温范围，可以发现，对于滨海城市而言，海洋水体可更有效地改善城市热环境，而通风廊道是影响其降温范围的关键。因此，在城市规划设计中，尤其要注意通风廊道的设计，将凉爽海风导入城市内陆。对于受地形限制的山地型滨海城市而言，可以基于城市周边的山头绿地，设计通风廊道，将下沉的山体冷风引入城市，改善城市热环境。

参考文献：

[1] Wilson B. Urban form and residential electricity consumption: Evidence from Illinois, USA[J]. Landscape and Urban Planning. 2013, 115：62−71.

[2] Shen T，Chow D H C & Darkwa J. Simulating the influence of micro− climatic design on mitigating the Urban Heat Island effect in the Hangzhou Metropolitan Area of China. International Journal of Low−Carbon Technologies. 2013, http://dx.doi.org/10.1093/ijlct/ctt050

[3] Kalisa E，Fadlallah S，Amani M，Nahayo L，Habiyaremye G. Temperature and air pollution relationship during heatwaves in Birmingham, UK. Sustain. Cities Soc. 2018，43：111 − 120.

[4] Dye, C. Health and urban living. Science，2008，319：766 − 769.

[5] Khalaj, B.; Lloyd, G.; Sheppeard, V.; Dear, K. The health impacts of heat waves in five regions of New South Wales, Australia: A case−only analysis. Int. Arch. Occup. Environ. Health 2010, 83, 833 − 842.

[6] CDC. Asthma in the US Growing Every Year. CDC Vital Signs. Available online: http://www.cdc.gov/vitalsigns/asthma/ 2011.

[7] Schinasi L H，Benmarhnia T，de Roos A J. Modification of the association between high ambient temperature and health by urban microclimate indicators: A systematic review and meta−analysis. Environ. Res. 2018，161：168 − 180.

[8] Song J, Chen W, Zhang J, Huang K, Hou B, Prishchepov AV. Effects of building density on land surface temperature in China: Spatial patterns and determinants. Landscape and Urban Planning. 2020，198：103794.

[9] Manoli G, Fatichi S, Schläpfer M, Yu K, Crowther TW, Meili N, Burlando P, Katul GG, Bou−Zeid E. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. Nature. 2019, 573(7772): 55−60.

[10] Cai Z, Han G, Chen M. Do water bodies play an important role in the relationship between urban form and land surface temperature?. Sustainable cities and society. 2018, 39: 487−498.

[11] Feng Y, Du S, Myint SW, Shu M. Do urban functional zones affect land surface temperature differently? A case study of Beijing, China. Remote Sensing. 2019,11(15):1802.

[12] Kubota T, Lee HS, Trihamdani AR, Phuong TT, Tanaka T, Matsuo K. Impacts of land use changes from the Hanoi Master Plan 2030 on urban heat islands: Part 1. Cooling effects of proposed green strategies. Sustainable cities and society. 2017, 32: 295−317.

[13] Wang R, Cai M, Ren C, Bechtel B, Xu Y, Ng E. Detecting multi−temporal land cover change and land surface temperature in Pearl River Delta by adopting local climate zone. Urban Climate. 2019, 28:100455.

[14] 韩贵锋，蔡智，谢雨丝，曾卫．城市建设强度与热岛的相关性 −− 以重庆市开州区为例［J］．土木建筑与环境工程，2016(05):138−147.

[15] Wu Z, Dou P, Chen L. Comparative and combinative cooling effects of different spatial arrangements of buildings and trees on microclimate. Sustainable Cities and Society. 2019, 51:101711.

[16] Cai Z，Tang Y，Chen K & Han G. Assessing the heat vulnerability of different local climate zones in the old areas of a Chinese megacity. Sustainability. 2019，11（7）：2032.

[17] 蔡智，韩贵锋．山地城市空间形态的地表热环境效应—基于LCZ 的视角 [J]. 山地学报，2018（4）：617−627.

[18] Yang G, Yu Z, Jørgensen G, Vejre H. How can urban blue−green space be planned for climate adaption in high−latitude cities? A seasonal perspective. Sustainable Cities and Society. 2020, 53：101932.

[19] Bowler DE, Buyung−Ali L, Knight TM, Pullin AS. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. Landscape and urban planning. 2010, 97（3）：147−55.

[20] Yu Z, Yang G, Zuo S, Jørgensen G, Koga M, Vejre H. Critical review on the cooling effect of urban blue−green space: A threshold−size perspective. Urban Forestry & Urban Greening. 2020：126630.

[21] Gunawardena K R，Wells M J & Kershaw T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. Science of the Total Environment. 2017, 584：1040−1055.

[22] Wu C，Li J，Wang C，Song C，Chen Y，Finka M & La Rosa D. Understanding the relationship between urban blue infrastructure and land surface temperature. Science of The Total Environment. 2019, 694：133742.

[23] Park C Y，Lee D K，Asawa T，Murakami A，Kim H G，Lee M. K & Lee H S. Influence of urban form on the cooling effect of a small urban river. Landscape and urban planning. 2019, 183：26−35.

[24] Hathway, E. A., & Sharples, S. The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study. Building and Environment. 2012，58：14−22.

[25] Theeuwes N E，Solcerová A & Steeneveld G J. Modeling the influence of open water surfaces on the summertime temperature and thermal comfort in the city. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2013, 118（16）：8881−8896.

[26] Ferwati S, Skelhorn C, Shandas V, Voelkel J, Shawish A, Ghanim M. Analysis of urban heat in a corridor environment − The case of Doha, Qatar. Urban climate. 2018，24：692−702.

[27] 邓书斌，陈秋锦，杜会建，等. ENVI 遥感图像处理方法 [M]. 北京：高等教育出版社，2014：422−424.

[28] Dai, Z., Guldmann, J. M., & Hu, Y. Thermal impacts of greenery, water, and impervious structures in Beijing’s Olympic area: A spatial regression approach. Ecological indicators. 2019，97：77−88.

责任编辑：王凌宇

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net