

Urban Climate Trends and Changing Trend in the Tianjin 1961-2017

Meiling Sun, Wenyan Fan*, Peng Si, Xuejiao Wang

Tianjin Meteorological Bureau, Tianjin
Email: *fwy210@163.com

Received: Sep. 2nd, 2019; accepted: Sep. 13th, 2019; published: Sep. 20th, 2019

Abstract

Conventional meteorological data in Tianjin from 1961 to 2017 was analyzed. The climatic characteristics and changing trend of northern coastal cities were revealed, also the regularity and causes. The results indicate that there were two centers of urban heat island in Tianjin, one was city, the other was tanggu, which were 0.78°C - 1.12°C and 0.18°C - 0.90°C, respectively. Taking the urban area as the center, the dry island, muddy island, and rain island effect were obvious, the relative humidity decreased year by year with trend of 2%/10a, and the average value in the urban area was 4% - 5% lower than that in the rural area, the visibility difference between the urban and rural was about 2 km. But in recent years, with the improvement of urban air quality and urbanization extension, the visibility difference between urban and rural was smaller. With the increasing of urban buildings, the trend of wind speed in urban area was decreasing year by year of 44% decline from 1960s to the last 20 years.

Keywords

Urban Climate, Urban Heat Island, Muddy Island, Dry Island

天津城市气候趋势和变化特征的研究1961~2017

孙玫玲, 樊文雁*, 司 鹏, 王雪娇

天津市气象局, 天津
Email: *fwy210@163.com

收稿日期: 2019年9月2日; 录用日期: 2019年9月13日; 发布日期: 2019年9月20日

摘 要

通过分析天津近60年的温度、降水、风速、辐射、能见度、相对湿度、雾等变化特征, 揭示北方沿海城

*通讯作者。

市气候特征和变化趋势,分析其中规律和产生原因。结果表明:天津地区存在两个热岛中心,市区热岛强度在 $0.78^{\circ}\text{C}\sim 1.12^{\circ}\text{C}$ 之间,塘沽在 $0.18^{\circ}\text{C}\sim 0.90^{\circ}\text{C}$ 之间。以市区为中心,天津干岛、浑浊岛、雨岛效应明显,天津市区相对湿度低于近郊4%~5%,且呈每10年2%的下降趋势,城市能见度与近郊相差2 km,但近些年随着城市空气质量改善和城市化外延,城郊能见度差异较少。而随着城市建筑的增加,天津市区风速呈逐年减少趋势,从20世纪60年代到近20年下降44%。

关键词

城市气候,热岛效应,浑浊岛效应,干岛效应

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市由于人口高度密集,众多建筑物构成特殊下垫面,高强度的经济活动中消耗大量的燃料,释放出有害气体和粉尘,以及其他人类生产和生活影响,改变了该地区原有的区域气候状况,形成一种与城市周围不同的局地气候——称为城市气候。人们对城市气候的研究可以追溯到19世纪初,1818年英国人L. Howard [1]首次提出城市气候概念之后,气象科研人员就不断地对城市气候进行研究,并取得了许多瞩目的成果,城市气候学有了迅速的发展。

城市气候学研究显示城市气候既有所属区域大气背景,又反映城市化后人类活动产生的影响,其主要表现为以下几个方面:城市热岛效应[2],城市雨岛效应[3],城市浑浊岛效应[4],城市干岛效应[5],城市湿岛效应[6],城市风的影响。关于城市热岛效应的研究最早由Howard在伦敦发现,至今已有100多年的历史,其产生的原因主要是城市工业、公共设施与居民耗费大量燃料,使城市成为一个重要热源,同时建筑物有较高的热容量,白天能吸收较多热量,夜间辐射至城市大气中,此外城市水面少,蒸发耗热又不多,因此城市温度比乡村高,热岛强度在 $0.5^{\circ}\text{C}\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ [7] [8] [9],韩素芹的研究显示在天津热岛强度在 $0.6^{\circ}\text{C}\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 之间,成逐年增强的趋势,热岛强度的日变化在17:00的地面表现的最强,到300 m存在个别的弱热岛中心,500 m高度城郊不存在温度差异[10] [11]。闫少锋等人研究发现,南京的城市热岛效应对城市居民生活影响较大[12]。

而城市干岛效应,则是由于城区多为建筑物和街道覆盖,水泥路面铺盖,降水流失多,绿地和水域面积小,这种特殊的下垫面造成空气中水汽明显减少,加上城市热岛效应,使城区气温高于郊区,因此产生了城区相对湿度小于郊区的现象,称为“干岛效应”。国内外许多大中城市的气候观测研究结果表明,白天城区相对湿度比郊区低,形成“干岛”,夜间城市相对湿度比郊区大,形成“湿岛”。“干岛”和“湿岛”是城市气候的一种特殊现象。从其强度上看,日本东京20世纪夏季相对湿度从83%降到73%,武汉[13]1974年市中心湿度比较去低8%,北京湿岛强度为5%,郑州[14]地区进入深秋,早晨6点城市和郊区的相对湿度可相差12%。上海[15]湿岛也在夏季显示出较强的“湿岛效应”。

天津位于我国华北平原,东面毗邻渤海,西北与北京相连,地势由西北向东南渐低,一般海拔在2~5米,受海陆环流影响显著。进入21世纪,随着环渤海区域经济崛起,天津城市化速度加剧,同时其沿海城市的特性,又使得其具有不同于其他城市的气候特征。然而,到目前为止,对天津城市气候的研究大都围绕热岛现象进行,对诸如降水、相对湿度、城市风、辐射、能见度的研究则较少,系统的研究天津等北方沿海大城市气候特征就成为一项有意义的工作。

2. 资料和方法

天津地处华北平原北部,东临渤海,北依燕山,本文所用资料包括天津 13 个国家级观测站 1961~2017 年温度、降水、相对湿度、风速、风向、能见度等常规地面观测资料。台站均匀分布在天津所有区,如图 1 所示,环线四区指的是东丽(54526)、北辰(54527)、西青(54527)、津南(54622)。

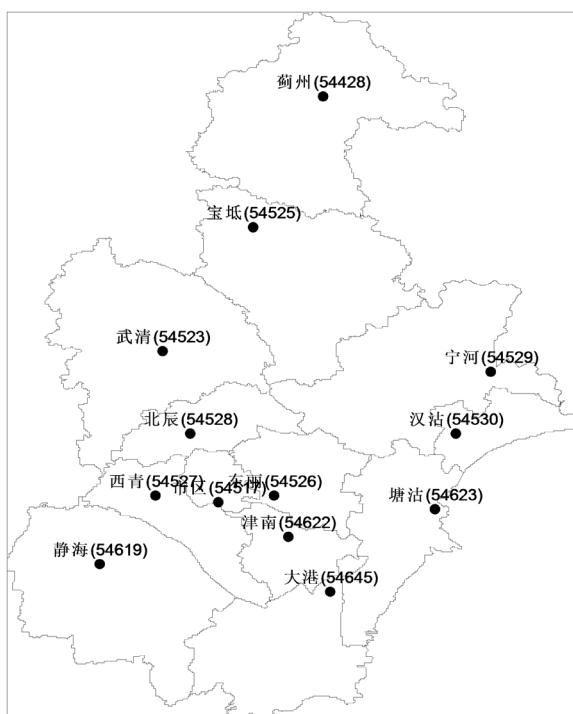


Figure 1. Geographical distribution of the 13 observation stations in Tianjin
图 1. 天津地区 13 个台站地理分布

3. 结果和讨论

3.1. 城市热岛效应

气温观测数据统计显示(如图 2(a)), 1986~2017 年, 天津全市气温在 11.91°C ~ 13.85°C , 全市形成两个热岛中心, 市区和塘沽。市区在近 30 年中的气温均值比环线四区(近郊)高出 0.78°C ~ 1.12°C , 均值 0.96°C , 塘沽呈现弱热岛中心, 相对临海的大港和汉沽, 其气温分别高出 0.18°C 和 0.90°C 。

在全球变暖的大背景下, 天津地区温度也同幅度升高, 在近 60 年尺度上(1961~2017 年), 以天津市区为中心, 呈每十年 0.248°C ~ 0.587°C 的增加。其中市区比郊区的西青平均每十年多增加 0.092°C , 比宝坻多增加 0.119°C , 这反映出天津地区温度增幅, 除了受大区域尺度全球变暖的影响, 城市化以及随之而来的下垫面改变, 人口增加, 能源消耗带来的人为热源激增, 都对其城区温度升幅有重要影响。

近 60 年天津地区气温增加线性趋势图显示(图 2(b)), 天津地区增温趋势东南大于西北, 形成市区、东丽、大港、津南、塘沽为一体的新增温带, 连接两个热岛中心, 这与新形势下, 天津城市规划和工业布局密切相关, 若按此趋势发展, 天津地区两个热岛中心的强度必将进一步加强, 范围增大, 甚至在天津的东南部, 形成一个连接两个中心的大热岛带。而城市热岛效应的产生, 一方面在夏季会增加高温热浪袭击的可能; 另一方面在市区高温中心会形成一个弱的辐合中心, 污染物聚集在市区很难扩散。

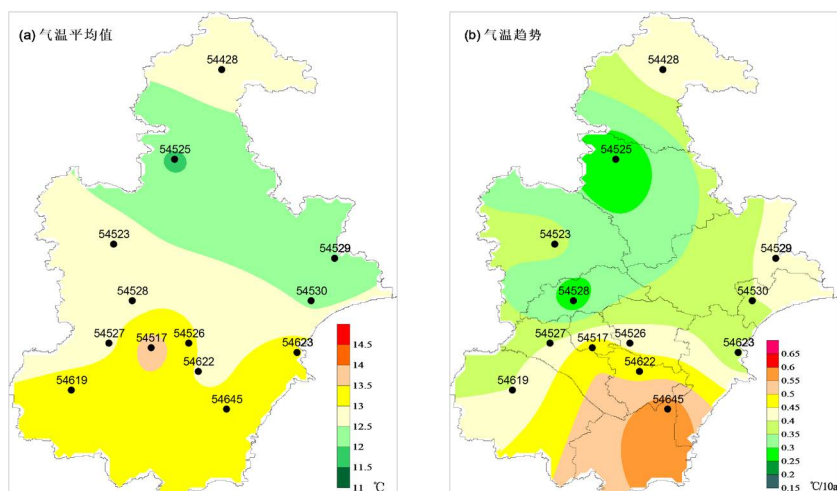


Figure 2. Average (a) and trend (b) change of temperature in Tianjin covering 1986-2017 and 1961-2017 respectively
图 2. 天津地区气温平均值(a) (1986~2017 年)和趋势变化(b) (1961~2017 年)

图 3 显示伴随温度的升高,天津城区高温日数呈逐年增加趋势,但与平均气温表现出的热岛中心不一样,天津地区沿海塘沽、汉沽、大港三地,受海陆风调节,温度日较差明显低于全市其它地区,不易形成高温天气,以最高温度大于 35°C 划分高温天气,天津地区静海最高,近 30 年平均出现 11 天,市区平均高于环线四区均值 1.3 天。而城市化的另一个后果,使得市区下垫面比热容增加,白天吸收较多的热量,夜间辐射至城市大气中,气温日较差明显低于郊区(图 4(a))。如图 4(b)所示,在近 60 年中天津市区气温日较差呈明显下降趋势,约为 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。在近 30 年中加速到 $0.31^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。目前(2017 年)天津市区气温日较差比环线四区低 1.63°C ,近 30 年平均值低 1.13°C ,这些都反映出天津城市化进程中下垫面变化对气温的影响。同时,在环线四区中,除北辰气温的日较差变化不大外,其余三区,伴随气温的升高,日较差也呈每 10 年 $0.20^{\circ}\text{C}\sim 0.38^{\circ}\text{C}$ 的下降,体现天津郊区城镇化和城市化外延化的趋势。而从数据上反映,近 30 年郊县的升温幅度虽不如城市,但日较差上升速率略快于市区,显示出其下垫面变化的剧烈程度要强于市区,而市区温度的上升,除了下垫面改变的贡献,人为热的增加也是不可忽略的一个重要因素。

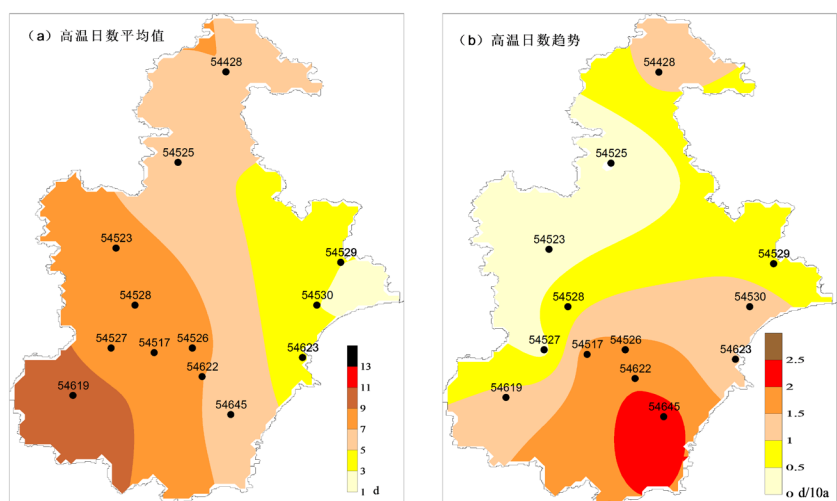


Figure 3. Average (a) and trend (b) change of temperature greater than 35°C in Tianjin covering 1986-2017 and 1961-2017 respectively
图 3. 天津地区高温日数平均值(a) (1986~2017 年)和趋势变化(b) (1961~2017 年)

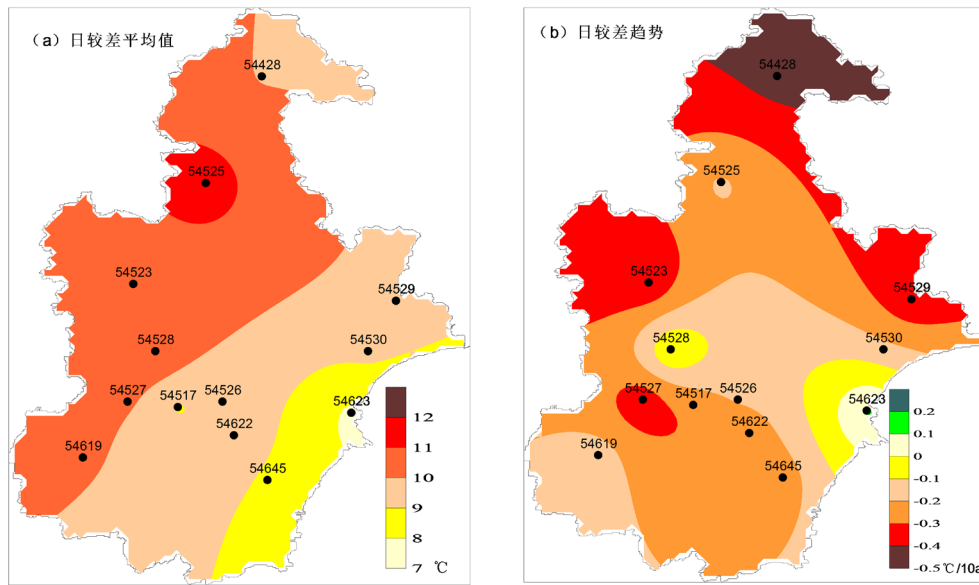


Figure 4. Average (a) and trend (b) change of diurnal temperature range in Tianjin covering 1986-2017 and 1961-2017 respectively

图 4. 天津地区温度日较差平均值(a) (1986~2017 年)和趋势变化(b) (1961~2017 年)

低温日数较少是全球变暖的另一个重要结果。近 30 年来, 天津市区、塘沽出现低温(低于 0°C)的平均日数要低于全市均值的 15.5、12.5 天(图 5(a)), 而市区高温平均日数高于全市均值的 2.3 天, 塘沽则低于全市 2.7 天(图 3(a))。换言之, 在城市化过程中, 两个热岛中心表现出不同的规律, 市区高温增加, 低温减少, 高温增加、低温减少的幅度均高于全市平均水平(图 2(b)、图 5(b)), 热岛加强, 并且相对全市平均水平, 气温整体分布, 向高温倾斜。而塘沽地区, 高温增加, 低温减少, 但高温增加幅度低于全市平均水平, 低温减少幅度高于全市水平(图 2(b)、图 5(b)), 热岛加强, 气温整体呈现两头小, 中间大的格局。

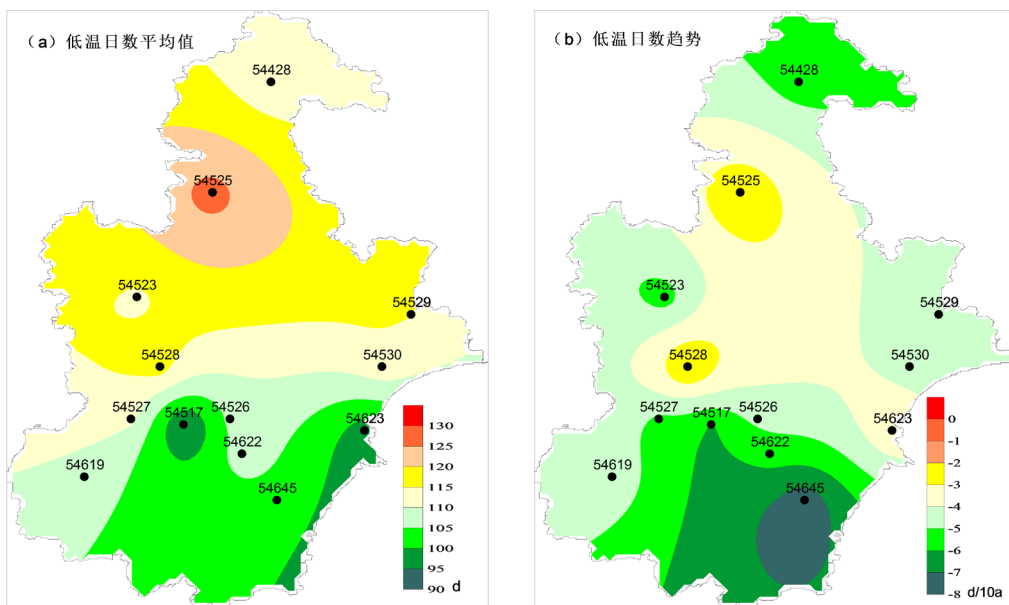


Figure 5. Average (a) and trend (b) change of temperature less than 0°C in Tianjin covering 1986-2017 and 1961-2017 respectively

图 5. 天津地区低温日数平均值(a) (1986~2017 年)和趋势变化(b) (1961~2017 年)

结合遥感方法研究城市热岛是当时最为常规方法[16],近年来热岛效应的概念已扩展至遥感观测的城市陆表温度高于郊区或乡村的现象,通常把这种主要通过卫星观测的城市热岛称之为地表城市热岛(Surface Urban Heat Island,简称SUHI)。基于2001~2018年的MOD11A1卫星数据资料,进而利用城乡二分法估算出SUHI,结果如下:

Table 1. Change of SUHI and the area with $SUHI \geq 3^{\circ}\text{C}$ in Tianjin covering 2001-2018
表 1. 近 18 年天津市热岛强度及较强热岛面积变化

年份	地表城市热岛 SUHI ($^{\circ}\text{C}$)	SUHI $\geq 3^{\circ}\text{C}$ 的面积(km^2)
2001	0.27	580
2005	0.52	865
2010	0.75	1242
2016	0.93	1286
2017	0.77	1295
2018	0.80	1149

根据表 1 可知,天津市 2001 年、2005 年、2010 年、2016 年、2017 年和 2018 年六个不同时期 SUHI 结果,整个天津市的平均 SUHI 呈现出先迅速增加后开始保持平稳震荡走低的变化规律。天津 SUHI 自 2001 年的 0.27°C 迅速增加,到 2016 年达到最大值 0.93°C ,此后 2017 和 2018 年平均 SUHI 小幅降低波动变化。整个天津市较强热岛($SUHI \geq 3^{\circ}\text{C}$)面积 2001 年约为 580 km^2 ,此后较强热岛面积便迅速增加,到 2010 年较强热岛面积已翻倍,达到 1242 km^2 ;后续几年天津市较强热岛面积开始平稳缓慢增长,2017 年增长到 1295 km^2 ,2018 年较强热岛面积又略有降低,为 1149 km^2 。这种变化表明了天津市自 2001 年开始随着天津城市建设的迅速扩张导致城市热岛效应增大增强,而近两年伴随海绵城市建设的实施,从 2017 年至 2018 年天津热岛效应增长放缓,开始有缓解的迹象出现。

此外,从区域统计来看(图 6),近 18 年天津市区 SUHI 一直保持最强,年平均 SUHI 为 4.85°C ,2001 年至 2016 年保持在较大值波动,而 2017 年降至最低 3.85°C ,2018 年又有所增强。对于环城四区(东丽区、津南区、西青区和北辰区)2001 年至 2010 年的 SUHI 呈单边增长的趋势,而后自 2016 年保持平稳开始有下降趋势。热岛强度空间分布图(图 7)表明近十几年天津市区-滨海新区城区一线迅速发展,热岛带面积显著增加,未来市区及环线四区地表热岛有可能连绵成片,需要采取对应措施(如绿化、减少热排放等)减缓城市地表热岛效应发展。

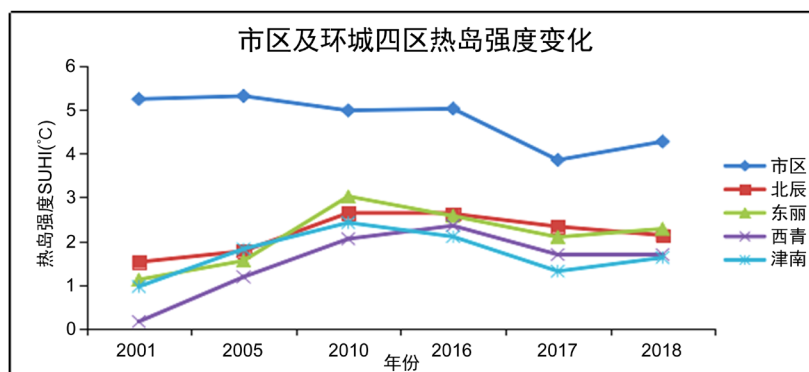


Figure 6. Change of Surface Urban Heat Island in Tianjin and outskirts covering 2001-2018
图 6. 天津市区及环线四区热岛强度变化

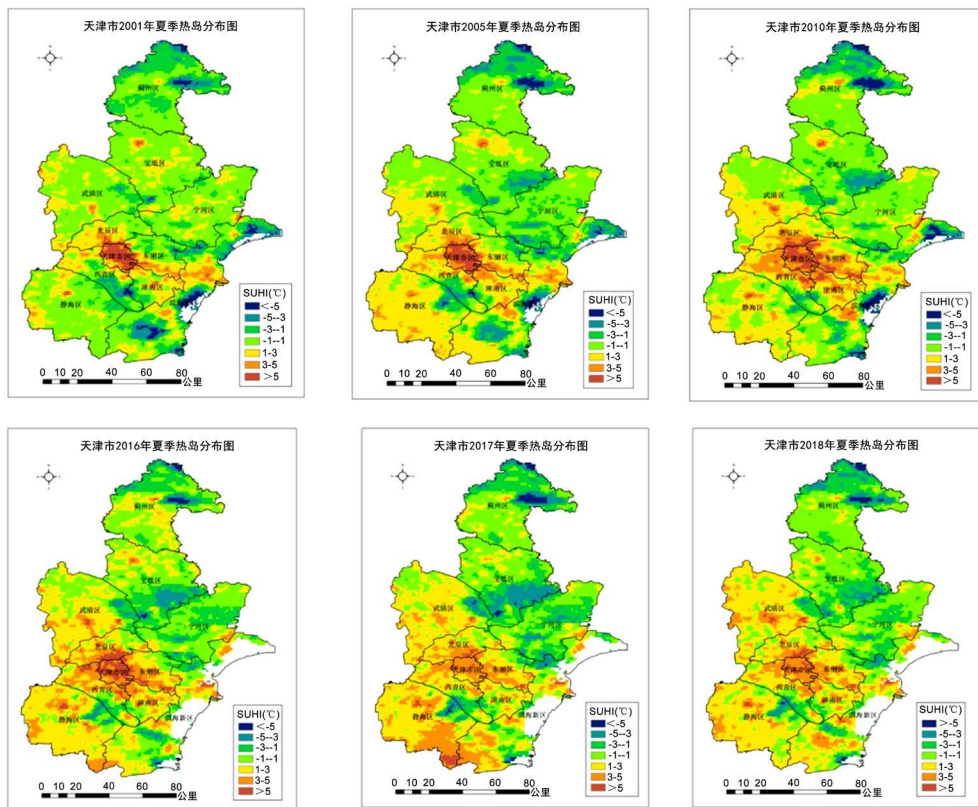


Figure 7. Change of Surface Urban Heat Island in Tianjin covering 2001-2018
图 7. 天津地区 2001~2018 年地表热岛强度

3.2. 城市雨岛和干岛效应

相对湿度观测数据统计显示(图 8), 天津市区呈现明显的干岛效应, 1986~2017 年近 30 年的均值大约比环线四区低 4%~5%, 均值 4.8%。1961~2017 年近 60 年呈明显下降趋势, 其每 10 年下降 2%。从年代际变化来看(图略), 市区相对湿度从上世纪 60 年代的 62.4%下降至近 20 年(2000~2017 年)的 54.6%。但其并不是天津相对湿度下降最快的地区, 塘沽相对湿度从上世纪 60 年代的 67.1%下降至近 20 年的 58.7%, 其每 10 年下降 2.1%。与干岛效应相对的是雨岛, 观测事实表明, 由于热岛效应产生的热岛环流使市区内上升气流加强, 以及更多的凝结核, 和增加的城市摩擦力, 使得城市上空的低云量明显增加, 在城市的下风方向, 距市中心几十公里, 降水明显增加, 这种增加的趋势以城市为中心, 外延至其下风方向, 称之为雨岛。通过对天津市区 1986~2017 年风向频率进行分析(图 9), 天津市区主风向是西风, 而由降水量分布图分析(图 10), 天津市区以及向西北方向延伸的北辰相对南北方向的西青、东丽, 以及冬季西北风盛行时, 下风向的津南, 降水量有明显的增加, 城市雨岛带(市区、北辰)大约比周围其它三区每年降水量多 12 mm, 雨岛特征在天津有所表现。

3.3. 城市浑浊岛效应

随着城市工业的发展, 人口增加、汽车和家庭炉灶不断增加, 燃料消耗也大幅度增长, 人类生活所产生的大量烟尘和废弃不断污染城市空气, 在天气稳定时, 大量烟尘, 不易扩散, 聚集浮游于空气中形成雾和霾, 使得城市中雾、霾比乡村和小城市明显增多, 形成“城市浑浊岛效应”。我国大部分地区 1961~1990 年气溶胶光学厚度增加 25% [17], 天津能见度平均减少 1 km/10a, 气溶胶平均增加 0.024/10a,

城市浑浊岛效应明显, 不过进入 21 世纪, 对排放源的治理以及城市发展过程中裸露下垫面的减少, 天津市区空气质量好转, 浑浊岛效应减弱, 不过轻雾仍然保持增加趋势。

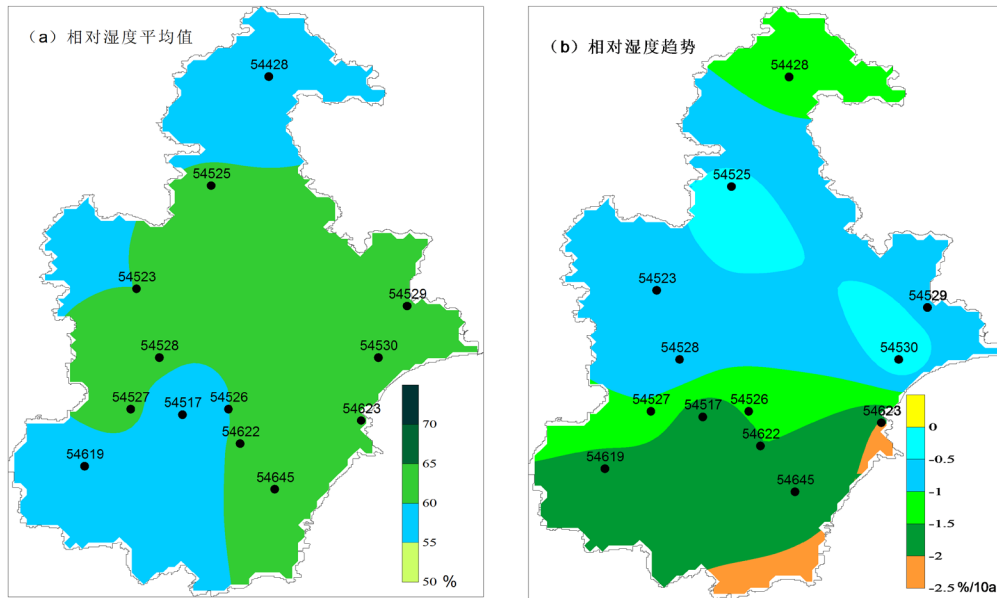


Figure 8. Average (a) and trend (b) change of relative humidity in Tianjin covering 1986-2017 and 1961-2017 respectively
图 8. 天津地区相对湿度平均值(a) (1986~2017 年)和趋势变化(b) (1961~2017 年)

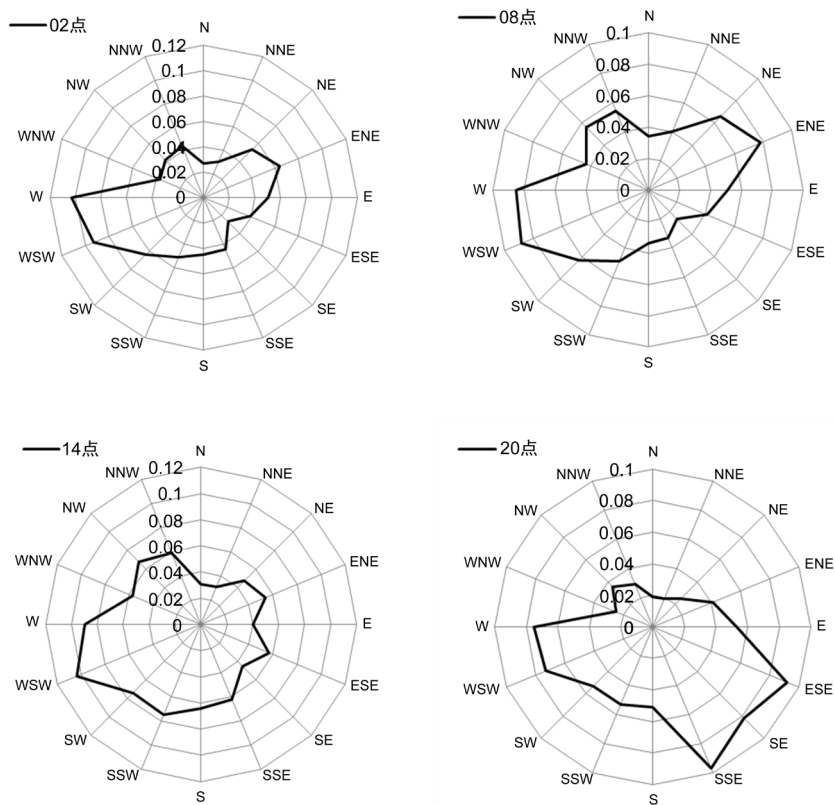


Figure 9. Distribution of wind direction frequency in Tianjin covering 1986-2017
图 9. 天津市区风向频率分布(1986~2017 年)

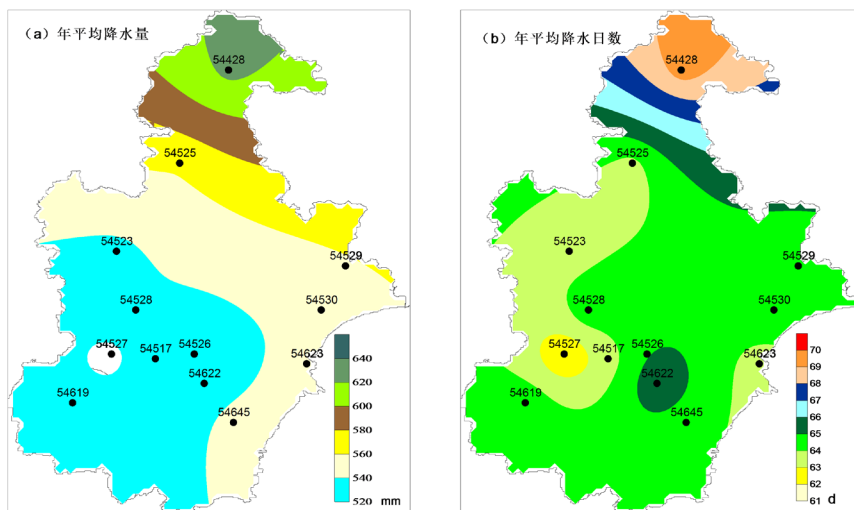


Figure 10. Average (a) and date (b) of precipitation in Tianjin covering 1986-2017
图 10. 天津地区年平均降水量(a)和降水日数(≥ 0.1 mm) (b) (1986~2017 年)

水平能见度是指视力正常的人在当时的天气条件下，能够从天空背景中看到和辨认的目标物的最大水平距离。能见度的大小主要与空气中污染气体和颗粒物的含量有关，能见度的变化，可以反映出城市浑浊程度。由于水平能见度资料在 1980 年前后存在格式上的不统一，即 1980 年前能见度资料仅给出了 10 个等级，而自 1980 年起，能见度资料则为实际观测到的能见度距离，资料格式的不统一会对能见度长期变化分析造成比较大的影响，所以这里仅对 1980~2017 年能见度资料进行分析。根据天津市区和环线四区(近郊)1980~2017 年平均能见度观测数据显示(图 11)，相对于天津近郊，天津市区能见度明显偏低，近 40 年来平均相差 2.0 km。在 1980~2003 年，市区能见度呈现明显的下降趋势，到 2003 年以后，随着人们对环境质量的重视，市区能见度有所好转，而天津近郊，随着城市化的外延，与城市能见度差异减少。综合言之，从水平能见度呈现，天津城区存在明显的浑浊岛效应，但随着城市大气环境的改善，城市浑浊岛效应的强度有所减弱，但城市化外延工作，使得城市浑浊岛涉及郊县，其强度减弱，但范围更大。

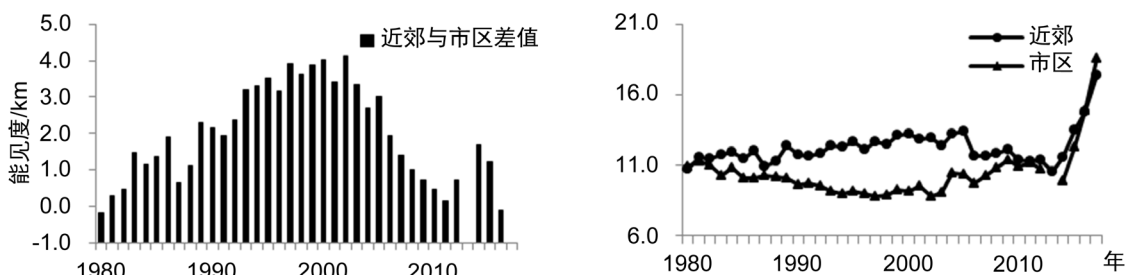


Figure 11. Variation of visible at urban and rural covering 1980-2017
图 11. 天津地区市区和近郊能见度的变化趋势(1980~2017 年)

水平能见度反映是大气水平消光的情况，太阳短波辐射反映的是大气垂直消光的情况，辐射观测是一种特种观测，在我国有长时间序列的辐射站相对较少，天津地区并没有长时间序列的辐射数据，但近郊的西青，属于国家站，积累了近 60 年完整的地面太阳辐射观测资料，由 1961~2017 年资料统计显示(图 12)，天津西青地面太阳总辐射呈明显的下降趋势，幅度达 $104.55 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}/10\text{a}$ 。尤其是直接辐射，直接辐射下降是 1990 年前总辐射下降的主要原因。

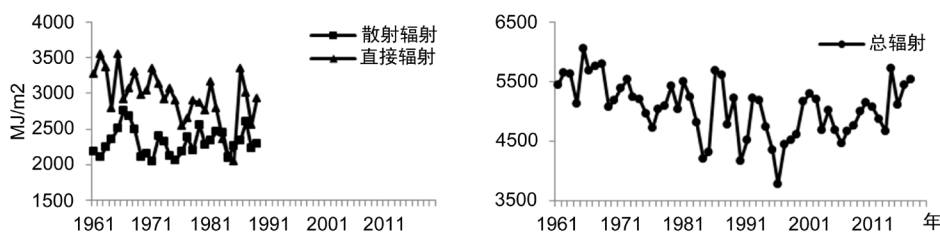


Figure 12. Variation of solar radiation in xiqing covering 1961-2017

图 12. 天津西青太阳辐射的变化趋势(1961~2017 年)

城市浑浊岛效应的另一个表现是城市空气污染气体和颗粒物增加,使得城市雾增加,但从实际情况看(图 13),1961~2017 年天津市雾日数一直呈下降的趋势,平均每 10 年减少 1.78 天,雾平均日数也少于环线四区,近 60 年来平均少了 6 天。所以,城市能见度下降,并且低于郊区,并不是雾日增加所致。而雾日数的较少,可能与 3.2 节所述城市相对湿度下降,干岛效应明显以及下垫面人为活动剧烈有关。

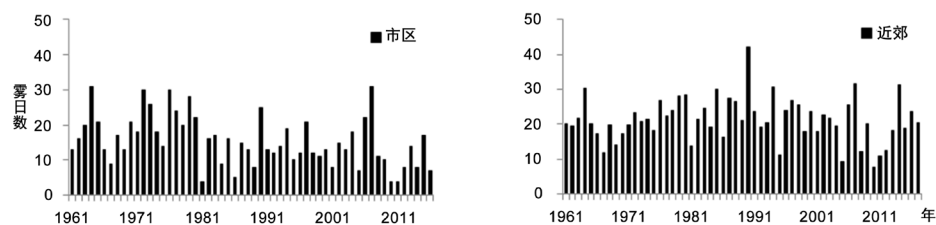


Figure 13. Variation of fog in Tianjin covering 1961-2017

图 13. 天津雾日的变化趋势(1961~2017 年)

3.4. 城市发展对风的影响

城市发展对于风的影响主要是由于高层建筑的不断增加,使空气流动受阻,而导致风速减少,一般情况下市内的风速比郊区平均小 20%~30%。在天津地区则表现为两个方面,一方面由于受下垫面影响,市区平均风速呈逐年减少的趋势,另一方面受下垫面影响的城市冠层厚度增加,风速受影响的高度逐年增加[18],而郊区和城市风的差异也是显著的[19]。

利用天津市 1961~2017 年平均风速观测数据统计显示,天津市市区风速呈明显的下降趋势(图 14),从 20 世纪 60 年代的 $2.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下降至近 20 年(2000~2017 年)的 $1.60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风速下降了 44%,说明城市发展对风速有重要的影响。而近 30 年(1986~2017 年)随着市区建筑物的相对定型,城市化的外延导致环线房地产开发项目的进行,环线四区及远郊的风速下降幅度基本表现出明显的减少趋势(图 15),城市热岛效应明显。

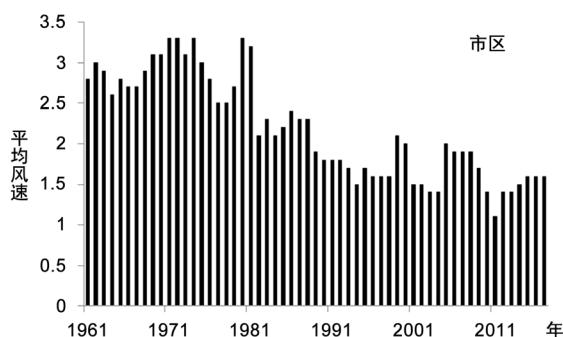


Figure 14. Variation of wind speed in city covering 1961-2017

图 14. 天津市市区平均风速变化趋势(1961~2017 年)

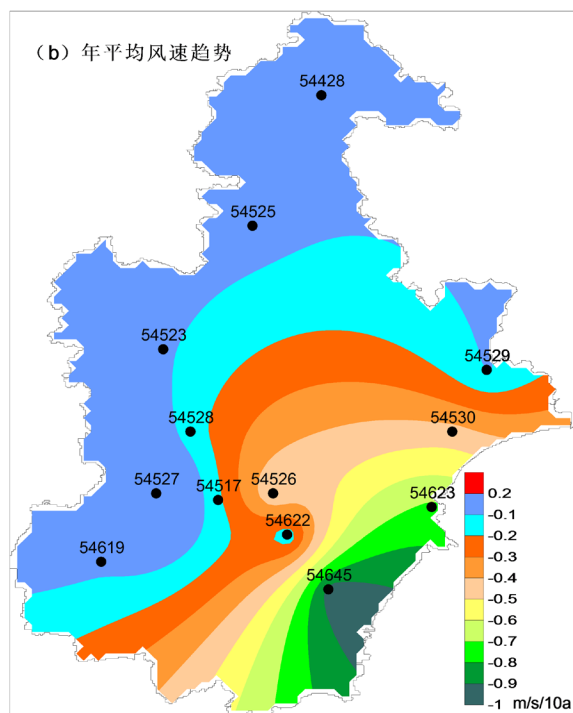


Figure 15. Trend change of wind speed in Tianjin covering 1961-2017
图 15. 天津地区平均风速趋势变(1961~2017 年)

4. 主要结论

1) 天津全市形成两个热岛中心，一个位于市区，一个位于塘沽，市区气温均值比环线四区(近郊)高出 $0.78^{\circ}\text{C}\sim 1.12^{\circ}\text{C}$ ，均值 0.96°C ，塘沽呈现弱热岛中心，相对临海的大港和汉沽，其气温分别高出 0.18°C 和 0.90°C ，遥感反演可知，整个天津市的平均 SUHI 呈现出先迅速增加后开始保持平稳震荡走低的变化规律，近十几年天津市区-滨海新区城区一线迅速发展，热岛带面积显著增加。

2) 天津城区呈现明显的干岛效应，其大约比环线四区低 $4\%\sim 5\%$ 。在近 60 年中，城区相对湿度呈现明显的下降趋势，其每 10 年下降 2% 。

3) 天津城市浑浊岛效应明显，市区能见度明显偏低，1980~2017 年与近郊相差约 2 km。在 1980~2003 年，市区能见度呈现明显的下降趋势，在 2003 年后，随着人们对环境质量的重视，市区能见度略有好转，而天津近郊随着城市化的外延，能见度与城市差异减少。

4) 天津市区雾日一直呈下降的趋势，近 60 年来平均每 10 年减少 1.78 天，雾平均日数也少于环线四区，城市能见度下降，并且低于郊区，并不是雾日增加所致。

5) 天津城区风速呈明显的下降趋势，从 20 世纪 60 年代的 $2.86\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下降到近 20 年的 $1.60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，风速下降了 44% 。

参考文献

- [1] Howard, L. (1833) Climate of London: Deduced from Meteorological Observation. 3rd Edition, Vol. 1, Haryey and Darton, Cambrige Iniversity Press.
- [2] 宫阿都, 徐捷, 赵静, 等. 城市热岛研究方法概述[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(6): 96-99.
- [3] 任春艳, 吴殿廷, 董锁成. 西北地区城市化对城市气候环境的影响[J]. 地理研究, 2006, 25(2): 234-241.
- [4] 周淑贞, 束炯. 城市气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1994.

-
- [5] 徐祥德. 城市大气环境观测工程技术与原理[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [6] 李子华. 重庆市区冬季热岛和湿岛效应研究[J]. 地理学报, 1993, 48(4): 358-366.
- [7] 董国平, 姜鹏, 赵梓淇, 等. 鞍山城市热岛特征及影响因子分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(4): 51-57.
- [8] 王清川, 郭立平, 张绍恢. 不同气象条件下廊坊城市热岛效应变化特征[J]. 气象与环境学报, 2009, 25(6): 44-48.
- [9] 张凯杨, 许春晓, 崔桂香, 等. 城市热岛成因及其对污染物扩散影响的数值模拟[J]. 气象与环境学报, 2007, 23(3): 10-14.
- [10] 韩素芹, 郭军, 黄岁霖. 天津城市热岛效应演变特征研究[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 280-284.
- [11] 韩素芹, 孟冬梅, 佟华, 等. 天津城市热岛及其对污染物扩散影响的数值模拟[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 403-407.
- [12] 闫少锋, 张金池, 张波, 等. 2008 年南京市热岛效应演变特征及其对城市居民生活影响[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(1): 14-20.
- [13] 张富国, 姚华栋, 张华林, 等. 北京城区的“雨岛”“湿岛”、与“干岛”特征分析[J]. 气象, 1991, 17(2): 44-47.
- [14] 李有, 郑敬刚, 杨志清, 等. 郑州市深秋热(干)岛效应初探[J]. 河南科学, 2002, 20(5): 553-556.
- [15] 周淑贞, 王行恒. 上海大气环境中的城市干岛和湿岛效应[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1996(4): 70-80.
- [16] 纪瑞鹏, 张喜民, 李刚. 沈阳等 6 城市热岛效应卫星监测研究[J]. 气象与环境学报, 2000, 16(4): 22-23.
- [17] 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 等. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析[J]. 大气科学, 2002, 26(6): 721-730.
- [18] 韩素芹, 刘彬贤, 解以扬, 等. 利用 255 m 铁塔研究城市化对地面粗糙度的影响[J]. 气象, 2008, 34(1): 54-48.
- [19] 刘学军, 吴丹朱. 城市建筑群对低层大气风速廓线影响的统计分析[J]. 气象, 1991, 17(7): 14-18.