城市热岛对热舒适度的景观格局影响演化分析

黄焕春[1,2], 运迎霞[1], 王世臻[3], 刘成哲[1], 李洪远[4]

(1.天津大学 建筑学院 城市规划系,300072 天津;2.南京林业大学 风景园林学院 城市规划系 210037 南京;
3.淄博智达建筑设计有限公司,255000 山东 淄博;4.南开大学 环境科学与工程学院, 300071 天津)

摘 要: 为明确城市热岛对热舒适度的空间格局过程的影响规律,给城市空间的合理规划布局提供理论支持,以1992—2011年天津市主城区为例,采用同季同时相的TM遥感数据和地面实测数据,基于人体舒适度和高温生理反应构建地表热岛对热舒适度的影响等级划分标准,划分成5个强度不同的影响区,进而利用景观格局指数评价方法进行分析.研究结果表明:热岛对热舒适度的影响区面积和强度都不断增大;二级影响区斑块破碎化,最大斑块面积减小,但其总面积却在升高,热岛影响无实质改善;引起人体不适应的三、四级影响区,斑块的数量与密度不断增大,总面积和最大斑块面积也迅速增加;热岛景观斑块的破碎化、斑块类型的混合、强热岛区的斑块连通度降低,都会改善热岛对热舒适度的影响;高层小区建设虽然节约用地,却增加了热舒适度的恶化总面积,并使局部热舒适度受影响等级异常增高.

关键词: 热舒适度;地表热岛;划分标准;景观格局;演化

中图分类号: TU984 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2014)10-0099-07

An analysis of landscape evolution for the thermal comfort degree affected by urban heat island effect

HUANG Huanchun[1,2], YUN Yingxia[1], WANG Shizhen[3], LIU Chengzhe[1], LI Hongyuan[4]

(1. Dept. of Urban Planning, School of Architecture, Tianjin University, 300072 Tianjin, China; 2.Dept. of Urban Planning, College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, 210037 Nanjing, China; 3. Zibo Zhida Architectural Design Co., Ltd., 255000 Zibo, Shandong, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, 300071 Tianjin, China)

Abstract: To clear the influence rule that the spatial pattern process of thermal comfort degree affected by urban heat island, and to provide theoretical support to the reasonable layout of city space, this paper constructed the criteria for the classification of thermal comfort degree affected by surface heat island effect, adopted the same phase of TM remote sensing data and ground measured data at the same time based on human comfort and human physiological reaction for the environment temperature. Utilizing the landscape pattern index evaluation method, this paper analyzed the urban heat island effect in downtown Tianjin from 1992 to 2011. The results show that, first, the space area is expanding of the thermal comfort degree affected, and the impact intensity is rising; second, for the secondary thermal comfort degree affected regions, the largest patch area is decreasing, but the total area is increasing; third, for the third and fourth thermal comfort degree affected regions which cause people feel discomfortable, patch classes area, the largest patch area, patch density are rising, indicating the heat island effect on the thermal comfort in the continuing deterioration; fourth, the fragmentation of heat island landscape patch, the mixture of patch types, the reduction of connectivity among strong heat island areas can weaken the impact of the urban heat island effect on thermal comfort; fifth, although saving land, high-rise residential building will increase the total area of deteriorating thermal comfort and make the local thermal comfort affected by super grade.

Keywords: thermal comfort degree; surface heat island; classification criteria; landscape; evolution

收稿日期: 2013-04-13.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278330);中英科研合作伙伴关系项目(201223).
作者简介: 黄焕春(1983—),男,博士,国家注册城市规划师;
运迎霞(1957—),女,教授,博士生导师.
通信作者: 运迎霞, yunyx@126.com.

中国城镇化快速发展,各大城市建成区面积迅速增加,近30年来扩张了5.5倍[1-2].与此相伴城市热岛效应不断加剧,2013年多地城市突破历

史最高气温,同年新华网报道 7 月上海中暑死亡超过十余人.城市热岛强烈地改变着城市生态系统的结构与功能[3-4],特别是夏季地表热岛使大气温度升高,对人体舒适感产生了严重影响.

近年来,卫星遥感技术,显示了其大范围监测城市温度场的巨大优势,各国学者纷纷利用卫星影像,研究地表热岛.其中有热岛反演的方法[5-6],热岛与人体健康[7],地表热岛与城市规模[8]、城市空间结构[9],城市规划建设的前后热岛对比[10],河流水体对热岛的影响[11-12]等方面研究.不乏利用景观格局指数,分析遥感反演的热岛强度文献.但目前,热岛强度分类中,尚未有确切的生态学和人体生理学等依据.而景观格局分析,恰恰需要明确分析对象所代表的物理和生态学意义等.由此可见热岛强度、热舒适度受影响等级划分标准的重要性.

本文基于人体舒适度和高温生理反应,提出了热岛强度与热舒适度的等级划分标准;划分 1992—2011 年天津市主城区夏季热岛对热舒适度影响等级分区;通过景观格局变化分析,得出热舒适度受影响的演化趋势规律.从而在城市规划过程中,提出有针对性的规划方案,具有缓解夏季城市热岛、提高城市环境舒适度、降低能耗和碳排放的重要意义[13].

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

研究区为天津市主城区(图 1),面积 2 080 km^2,位于华北平原东北部,下辖和平、南开、河东、河西、红桥、河北、东丽、津南、西青、北辰等 10 区.2011 年主城区人口为 697 万.1992 年主城区城乡建设用地 280 km^2,2011 年迅速增加至 795 km^2.其中,居住用地总量显著增加,居住空间逐步向外扩散,新建居住区主要集中在中环线与外环线之间;市级中心主要集中在和平区,大型商业设施在市中心区海河南岸高度聚集;高校主要集中在南开区和周边地区,已出现向中心城区外围转移的趋势.近年来,天津启动了工业东移战略,中心城区用地布局得到了调整.2005 年新版总规实施后,城市空间发生了很大变化.

1.2 研究数据

根据本研究的对象和目的,以 7、8 月 TM 遥感影像为数据源.为保证数据的可靠性与可比性,所选遥感影像的云量均为 0,影像拍摄前一天均未降水,48 h 内平均风速小于 2.3 m/s.卫星过境时间均为上午 10∶30 左右,这个时刻是人们工作的最佳时间.因此数据对研究夏季热岛效应对人体热舒适度影响具有很强的代表性.六景 TM 影像分别为:1992 年 7 月 30 日 10∶11、1999 年 8 月 11 日 10∶40、2001 年 7 月 7 日 10∶28、2006 年 7 月 21 日 10∶40、2009 年 8 月 30 日 10∶37、2011 年 8 月 20 日 10∶36,空间分辨率为 30 m,其中热波段为 120 m.同时配合 2005—2020 年天津城市总体规划图与现状图.

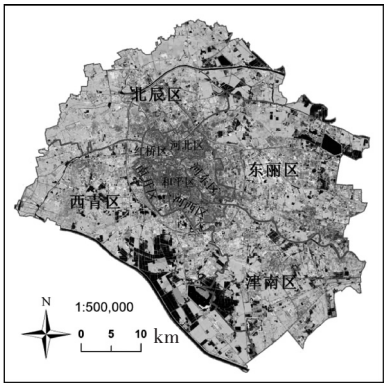


图 1 研究区 TM 卫星影像与行政区划

数据处理过程如下:首先,将遥感影像进行配准和几何精校正,把卫星影像统一校正到 1∶1 万地形图,校正采用二次多项式,并用 3 次卷积法进行灰度插值,校正误差控制在一个像元内.然后,将数据重采样至 30 m 分辨率,统一投影为 WGS_1984_UTM_50N,以便保持数据的一致性.最后,利用 ArcGIS 软件建立数据库,对不同时期的遥感影像数据进行提取分析.

2 研究方法

2.1 热舒适度受影响的等级划分

2.1.1 划分原理依据

本文研究对象突出的是地表热岛所施加的影响,而非当时气温绝对达到地表温度.本文研究数据为 landsat TM 影像,热波段空间分辨率为120 m(在这个尺度下,城市中有建筑、绿地、硬化地面等混合),遥感影像的热波段大部分都存在混合像元问题.降温地物的作用会适当平抑温度较高的地物,因而就会出现反演的地表温度非常接近实际气温的现象.对比 1999—2013 年城郊的 24 个观测点实测温度与反演温度,发现:反演平均误差为 0.42 ℃,郊区平均误差为 1 ℃,城区内居住区、商业区附近的平均误差为 0.39 ℃,由此证明 TM 影像反演结果较为可靠.

城市地表温度与上空一定距离的大气温度有协同变化的规律[14],地表温度与近地面 1.5 m 大气温度也有着更为密切的关系.夏季白天地表温度

高于近地面大气温度，通过热辐射、传导、气流热交换，会有大量的热从地表传向近地面大气，造成近地面大气温度升高，进而影响人体舒适度.此外，10∶40—14∶00 地表与近地面大气的温度都处于上升阶段，地表向近地面大气传热，气温很容易达到 10∶30 卫星拍摄的地表温度.因此，利用 10∶30 左右拍摄的遥感影像反演计算热岛强度，研究热舒适度受影响情况，具有很强的合理性和可行性.

2.1.2　划分结果

为了使研究更贴近实际情况，以夏季 7、8 月份非降雨天的平均温湿度作为基准.通过 2008—2012 年气象观测数据的计算，发现 7、8 月 10∶30 的平均温度为 28.2 ℃、平均湿度为 62.28%.

以 28.2 ℃和 62.28%为基准，计算叠加热岛升温后，对人体热舒适度的影响指数.笔者在分析大气舒适度[15]、人体综合舒适度[16]、PET 室外舒适度[17]等计算方法后，决定本文的热舒适度指数计算，采用 Tom 提出，Bosen 修正后的公式[18]

$I_L = 1.8T + 32 - 0.55(1 - RH)(1.8T - 26)$，

式中：RH 为相对湿度，T 为大气温度，I_L 为舒适度指数.

最后，参照北京市人体舒适度指数划分和人体高温生理反应情况，将地表热岛效应对热舒适度的影响分为 5 级(见表 1).

表 1　地表热岛对热舒适度影响的等级划分、人体感觉、热岛强度对照表

热舒适度受影响等级	达到平均温度/℃	地表热岛强度/℃	舒适度指数	人体热感觉	人体生理反应
零级	28.2	0	76.0	较舒适	
一级	28.2~31.3	0~3.1	76.0~80.0	不舒适	生理表现为易出汗
二级	31.3~35.1	3.1~6.9	80.0~85.0	很不舒适	生理容易过度出汗
三级	35.1~37.4	6.9~9.2	85.0~88.0	不适应	生理开始一级预警、心跳加快、浅静脉开始扩展
四级	37.4~40.0	9.2~11.8	88.0~91.5	很不适应	生理逐渐开始二、三级预警，人体排汗已无法保证正常温度调节
五级	40.0 以上	11.8 以上	91.5 以上	无法忍受	生理开始头晕眼花、甚至发生中暑、休克状态.

2.2　地表温度遥感反演方法

地表温度反演采用基于影像反演算法(IB 算法)，该算法简单准确，数据易获得.首先，依据 NASA 的数据使用手册，进行辐射定标，把 DN 值转化成相应的热辐射强度.然后，计算植被指数($NDVI$)及植被覆盖度 P_V.之后，采用覃志豪[19]、黄初冬[20]等提出的比辐射率 ε 计算方法，通过 $NDVI$ 和植被覆盖度计算出地表比辐射率.最后，通过 LST 计算公式，计算出地表温度，公式为

$$LST = \frac{T}{1 + (\lambda T/\rho)\ln\varepsilon} - 273.15,$$

式中：λ 为 TM6 波段的中心波长(11.5 μm)，$\rho = h \times \frac{c}{\sigma} = 1.438 \times 10^{-2}$ K(其中，斯特潘－波尔兹曼常数 $\sigma = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K，普朗克常数 $h = 6.626 \times 10^{-34}$ Js，光速 $c = 2.998 \times 10^{8}$ m/s).

2.3　景观格局指数评价方法

对热舒适度的影响等级进行景观数量和结构的分析，选用被证明具有稳定适用性的五类景观格局指数[21]进行评价，这 5 类分别为：多样性指数、面积/密度/边界指数、临近度指数、离散度指数、连通性指标[22-23].其中每类都有具体的指数(表 2)，详细定义计算见文献[22-23].景观格局指数的计算，利用由美国俄勒冈州立大学森林科学系开发的 fragstats4.1 软件.

表 2　本文所用景观格局指数类别

景观格局指数类别	景观格局指数
多样性指标	斑块丰富度指标 *PR*
	景观百分比 *PLAND*
面积/密度/边界	斑块密度 *PD*
	最大斑块指数 *LPI*
临近度	欧氏距离变异系数 *ENN_CV*
	欧氏距离均值 *ENN_MN*
离散度	分离度 *DIVISION*
连通性	斑块内聚力指数 *COHESION*

3　结果与分析

3.1　温度反演与热舒适度受影响等级划分

利用 IB 算法，在 ENVI 遥感软件平台上，反演 1992、1999、2001、2006、2009、2011 年遥感影像的地表温度.首先，计算出亮度温度；然后，计算出 $NDVI$、植被覆盖度、地表比辐射率；最后，反演出地表温度.

在 ArcGIS 软件中，首先计算出空间上每个点的热岛强度，计算公式为

$$\Delta T_{ij} = T_{ij} - T_{\mathrm{R}}.$$

式中：ΔT_{ij} 为空间位置 ij 上的热岛强度；T_{ij} 为空间

位置 ij 上的地表温度；T_R 郊区农村平均温度.然后依据表 1，对研究区热舒适度的受影响程度进行等级划分，划分结果见图 2(下文将热岛对热舒适度影响区，简称为影响区).

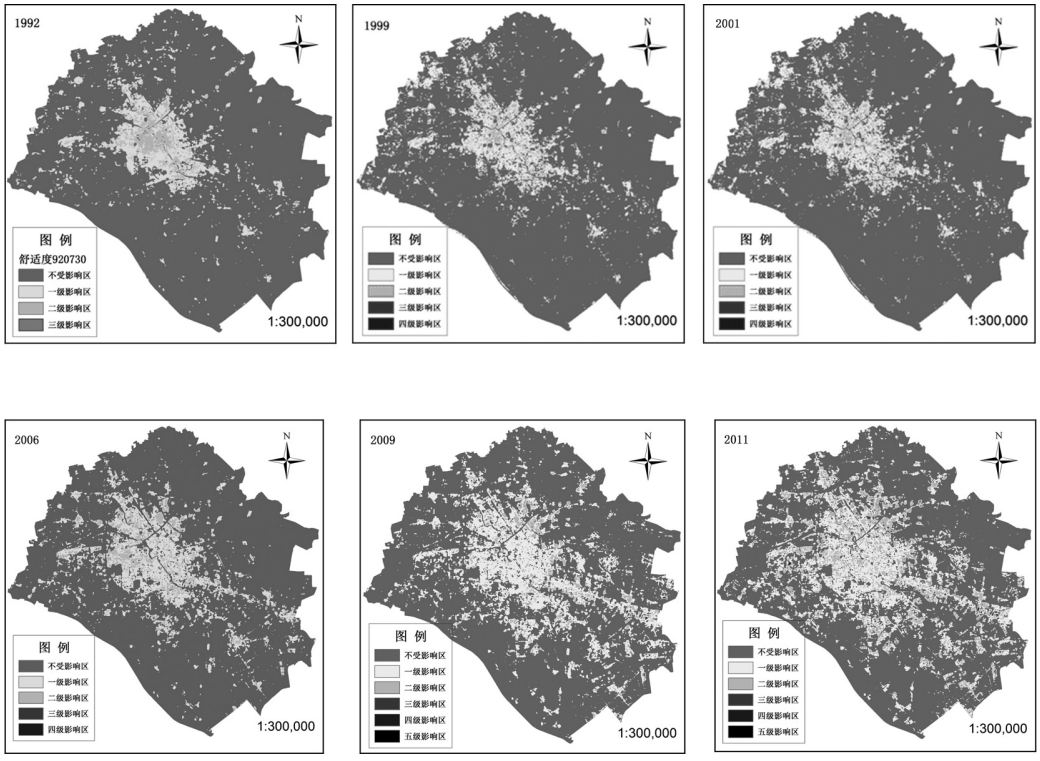


图 2 1992、1999、2001、2006、2009、2011 年热岛效应对热舒适度的影响空间等级

3.2 热岛对热舒适度影响的景观格局分析

3.2.1 多样性指标的影响分析

多样性指数采用斑块丰富度指标 *PR*，对热岛景观等级进行最简单的度量，但不反映等级间的相对丰富度.景观中的斑块丰富度 *PR* 越大，热岛对热舒适度的影响程度也就越深.1992 年的最大热岛强度为 8.55 ℃，2011 年增加到 12.47 ℃，增加了近 4 ℃；由图 3 可以看出相应的热舒适度受影响等级升高了两级.这说明天津市主城区的地表热岛强度不断上升，热舒适度受影响的等级平稳升高.

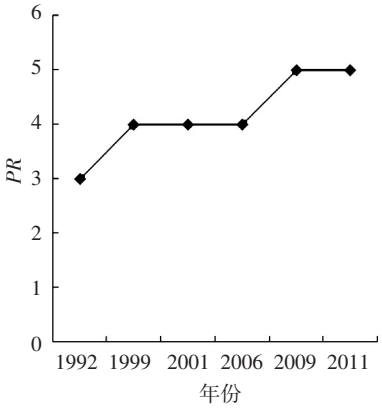


图 3 1992—2011 年 *PR* 指数变化曲线

3.2.2 斑块类型的面积/密度/边界影响分析

用景观百分比 *PLAND*，来度量某一等级在整个热岛景观中的丰度.从 1992—2011 年 *PLAND* 指数变化表(表 3)看：热舒适度不受影响区所占比例呈下降趋势；一级影响区快速增长；二级影响区比例波动上升；三级影响区逐渐增大，增加了 16.42 倍；四级影响区从无到有，且面积不断增加；2009 年出现了五级影响区.

这说明：热舒适度受影响的面积在扩大，高强度影响区面积在不断的增加恶化；二级影响区面积虽有波动，最值得注意的是 1999 年达到了最低值 1.85%，但 1992—2011 年面积仍在迅速扩大，增加了 2.56 倍；三级影响区的比重迅速增大，热舒适度恶化现象明显.四、五级影响区相继出现，并持续增加，说明局部热岛恶化严重.

用 *PD* 来表示单位面积(100 hm^2)上的热岛斑块数量.从 1992—2011 年 *PD* 指数变化曲线(图 4)看：热舒适度不受影响区的斑块密度逐步升高，1999 年达到一个小高峰，但又迅速回落.这说明非热岛区域与热岛区，实现了很好的交叉混合布局，形成了较好的散热格局；一级影响区斑块密度波动上升，这说明低级影响区，可作为高强度影响区的散热过度区，发挥较强的散热功能；二级影响区斑块密度上升较大，上升了 4.2 倍，这说明二级影响区的分散化现象不断加剧；三、四级影响区，*PD* 指数也逐渐的上升，这说明新的高强度热岛影响斑块不断出现.

表 3　1992—2011 年 *PLAND* 指数变化

影响区等级	1992	1999	2001	2006	2009	2011
零级	87. 582	86. 901	82. 133	82. 012	75. 331	70. 732
一级	9. 808	11. 215	14. 716	14. 396	21. 618	22. 382
二级	2. 596	1. 845	3. 125	3. 561	2. 970	6. 626
三级	0. 014	0. 034	0. 025	0. 031	0. 069	0. 230
四级	0	0. 006	0. 003	0. 001	0. 012	0. 029
五级	0	0	0	0	0. 0001	0. 001

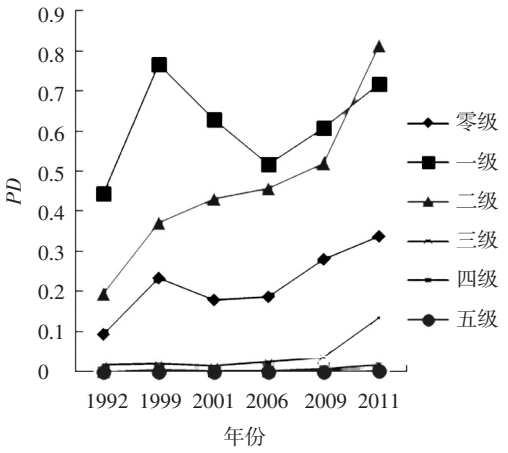


图 4　1992—2011 年 *PD* 指数变化曲线

用最大斑块指数 *LPI* 来测度每个影响等级中最大斑块变化态势.从 1992—2011 年 *LPI* 指数变化表(表 4)看:主城区热舒适度不受影响区的 *LPI* 快速降低;一级影响区 *LPI* 指数呈现波动性增大趋势;而二级影响区,*LPI* 指数迅速降低;三级影响区 *LPI* 指数虽然较小,但却增加了 6 倍;四级影响区(1999 年后出现)*LPI* 指数较小,但持续增加.

这表明:随着城市发展,热岛影响区在扩大,引起人体不舒适的一级影响区的最大斑块面积在增加,而引起人体很不舒适的二级影响区最大斑块面积则在迅速下降;引起人体不适应、很不适应的三、四级影响区,单个最大斑块面积也在增加;2011 年出现的五级影响区,因斑块面积较小, 自然 *LPI* 也较小.

表 4　1992—2011 年 *LPI* 指数变化

影响区等级	1992	1999	2001	2006	2009	2011
零级	87. 118 9	47. 625 4	81. 270 8	80. 942 0	73. 731 0	68. 705 1
一级	5. 591 0	2. 800 7	6. 846 8	4. 472 0	11. 506 1	12. 993 0
二级	0. 663 7	0. 181 3	0. 159 5	0. 229 0	0. 080 7	0. 152 1
三级	0. 002 0	0. 002 1	0. 004 9	0. 003 5	0. 004 8	0. 012 0
四级		0. 001 4	0. 001 1	0. 000 5	0. 002 2	0. 003 3
五级						0. 000 4

3. 2. 3　临近度指数的影响分析

临近度用来度量斑块的时空联系特征,反应某影响等级的破碎化及其在景观中的散布情况. *ENN_ CV* 反映的是斑块距离的变化稳定性程度,该值变小说明斑块距离差异程度减小.*ENN_ MN* 反映了整体斑块距离的变化情况.

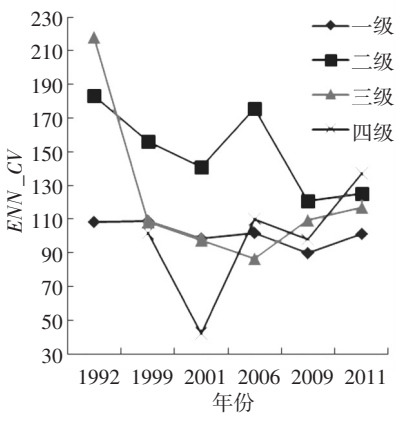
从 1992—2011 年各等级影响区的 *ENN_ CV* 和 *ENN_ MN* 指数变化曲线(图 5) 看:不受影响区 *ENN_ CV* 和 *ENN_ MN* 指数均略有下降;一级影响区 *ENN_ CV* 指数较为稳定,而 *ENN_ MN* 指数略减了 141;二级影响区 *ENN_ CV* 指数呈波动下降,*ENN_ MN* 指数下降了 166;三级影响区 *ENN_ CV* 指数迅速下降了 102,而 *ENN_ MN* 指数骤减了 778;四级影响区,*ENN_ CV* 指数呈波动上升,而 *ENN_ MN* 指数迅速下降了 5 247; 2011 年五级影响区 *ENN_ MN* 指数为 7 991. 24.

这表明:不受影响区的平均距离在缩短,斑块间距离变化稳定,这十分有利于受影响区的散热;一级影响区平均距离在缩短,说明斑块破碎化、与其他等级影响区混合程度增加,不同类型斑块之间进行热量交换更容易,从而更有利于热岛影响区的热量向外散失;二级影响区平均距离降低说明现存斑块空间上趋于聚集,易集聚成大面积斑块,从而加剧热岛效应;三级影响区平均距离稳定下降说明引起人体不适应的热岛区,在空间上出现频率增加. *ENN_ CV* 指数下降,说明其空间呈现规律性的出现;四级影响区平均距离缩短表明引起人体很不适应的热岛区,空间上每隔1 679~2 300 m,就出现一次,这种情况值得警惕;五级影响区空间上出现频率较小,平均空间距离 7 991 m.

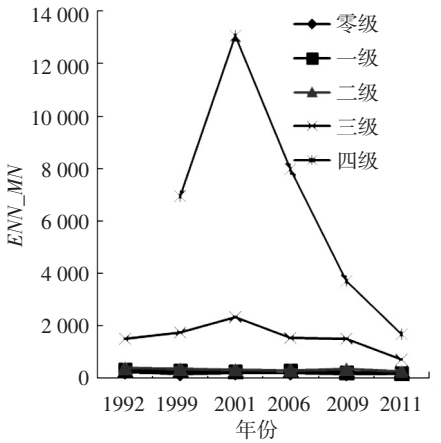
3. 2. 4　离散度指数的影响分析

离散度反映某一影响等级与其他等级的混杂程度,反映了不同斑块之间的邻接状况,采用 *DIVISION* 指数度量,其取值范围为 $0 \leqslant DIVISION < 1$.当整个景观由一个斑块组成,*DIVISION* = 0;

当该等级在面积中比重和斑块尺寸出现下降时，*DIVISION* 就接近 1.对于热岛效应而言，随着斑块离散化程度的提高，会使高温热岛区能量不断向外传递，进而使高温热岛区域减少，甚至使某个等级的高温热岛区消失.*DIVISION* 指标，就反应了各影响等级在空间分布的集聚情况.



(a) *ENN - CV*



(b) *ENN - MN*

图 5 1992—2011 年 *ENN_CV* 和 *ENN_MN* 指数变化曲线

从 1992—2011 年 *DIVISION* 指数变化表(表 5)看：热舒适度不受影响区 *DIVISION* 指数增加了 1.18 倍；一级影响区 *DIVISION* 指数略有下降；三、四级热舒适度受影响区均没有变化.

这表明：不受热岛影响区的斑块在空间分布呈离散化，接收影响区传热变得更近更容易；斑块与其他受影响等级混合，在降热方面发挥着越来越重要的作用；一级影响区斑块离散化略有降低，这与城市形态的快速扩张密切相关，这也有利于高等级受影响区的散热.

表 5 1992—2011 年 *DIVISION* 指数变化

影响区等级	1992	1999	2001	2006	2009	2011
零级	0.241 0	0.261 3	0.339 5	0.344 8	0.456 4	0.525 0
一级	0.996 9	0.997 2	0.995 2	0.997 2	0.986 6	0.984 7
二级	0.999 9	1	1	1	1	1
三级	1	1	1	1	1	1
四级		1	1	1	1	1
五级					1	1

3.2.5 连通性指数影响分析

连通性是指景观对能量流的促进或障碍程度，采用 *COHESION* 指数表示热岛影响区斑块类型间的连通性.*COHESION* 取值范围为 $0 \leqslant COHESION < 100$.当景观中某斑块类型的比例降低，并不断碎化和连通性降低，*COHESION* 值就接近 0.随着景观中该类组成比例的提高，在分布上变得越来越集聚，自然连通度也提高了，*COHESION* 值就增加.

从 1992—2011 年 *COHESION* 指数变化曲线(图 6)看：不受影响区和一级影响区的 *COHESION* 指数呈稳定趋势；二级影响区的 *COHESION* 指数呈波动下降趋势，但略有反弹；三、四级影响区 *COHESION* 指数均呈上升趋势，由 1992 年的 72.81 和 76.7，分别上升到 2011 年的 82.74 和 81.44.

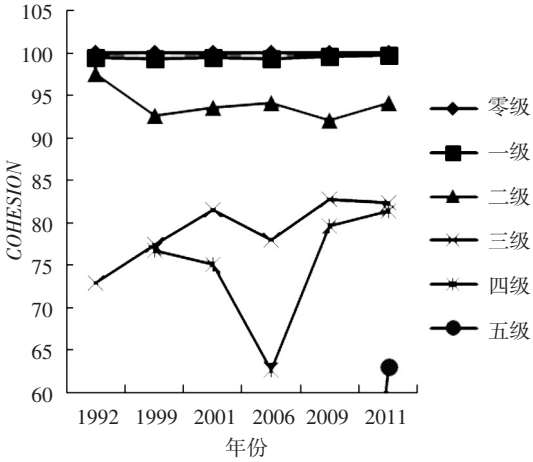


图 6 1992—2011 年 *COHESION* 指数变化曲线

这表明：二级影响区斑块的自然连通度降低，在空间上内部联系不畅，斑块被其他斑块类型分割加剧；二级影响区属引起人体很不舒适区域，地表热岛强度分别高达 3.1~6.9 ℃，其连接度下降表明斑块内部的能量聚集减少，不同等级间的斑块热量交换也更加便捷迅速，进而有助于高温热岛区热量散失，达到降低热岛强度和减弱热岛对热舒适度的影响；三级和四级 *COHESION* 指数上升，说明高等级斑块大面积集聚增强，无法实现斑块内部的快速散热，从而不断地增加斑块内部热量的集聚和温度的升高.

4　结　论

1)基于人体舒适度和高温生理反应，构建了地表热岛对热舒适度的影响等级划分标准.这使得对地表热岛强度划分，获得了一个科学的依据.为降低夏季热岛对热舒适度的影响，提供了一个分级分区调节的参考标准.

2)天津市热舒适度受影响区面积不断扩大，影响强度不断增强，高强度影响区不断集聚扩大.二级影响区，表现出破碎化趋势，被分割为许多小的斑块，但所占面积比例不断上升.

3)三、四级影响区，面积不断扩大，斑块数量与斑块密度不断增高，最大斑块面积也在迅速增加.2009 年出现了五级影响区，2011 年并出现了较大的增加，表明局部让人无法忍受热岛区应引起相关部门足够重视.

4)1999 年的景观格局特点，呈现出地表热岛对热舒适度的影响最弱.原因是格调春天、水西园等多层居住小区的改造建设，增加了绿地、打通了通风廊道.通过进一步分析发现：景观斑块的破碎化、斑块类型的混合、强热岛区的斑块连通度降低，对促进热量传递与高低压区的大气流动、减弱对热舒适度的影响、降低热岛有着重要的作用.

5)通过对 2001 年前后的二级影响区分析，尽管斑块破碎化，带来了平均斑块面积巨大降低，但并未改善热岛，反而增强了热岛影响.这说明高层小区的建设，虽然节约了用地，但是热舒适环境却大面积恶化，并使局部热舒适等级严重升高.而多层小区的建设，却增加了人体舒适度.

参考文献

[1] 赵可，张雄，张炳信. 城市化与城市建设用地关系实证——基于中国大陆地区 1982—2011 年时序数据[J]. 华中农业大学学报：社会科学版，2014，02：107-113.

[2]屈宇宏，孙帅，陈银蓉. 中国城市建设用地扩张趋势模拟及抑制策略[J]. 资源科学，2014(1)：1-7.

[3]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.

[4] IMHOFF M L, ZHAN P B, WOLFE R E, et al. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA [J]. Remote Sensing of Environment, 2010，114：504-513.

[5]陈云浩，李晓兵，史培军.城市空间热环境的遥感研究——热场结构及其演变的分形测量[J].测绘学报，2002，31(4)：323-326.

[6]覃志豪, MINGHUA Z, KARNIELI A.用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J].地理学报，2001，56(4)：457-466.

[7]TOMLINSON C J, CHAPMAN L，THORNES J E, et al. Including the urban heat island in spatial heat health risk assessment strategies：a case study for Birmingham，UK [J]. International Journal of Health Geographics，2011，10(1)：42-55.

[8] MACKEY C W, LEE Xuhui, SMITH R B. Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island [J]. Building and Environment，2011，10(8)：348-358.

[9] WOLFGANG W, WULF H. Climate protection and compact urban structures in spatial planning and local construction plans in Germany [J]. Land Use Policy，2010，27：864-868.

[10] SÜLEYMAN T, SEVGI Y. Evaluation of 10-Year temperature differences between urban and rural areas of a well-planned, unindustrialized, and medium-sized turkish town, Erzincan[J]. Journal of Urban Planning And Development，2010(12)：349-356.

[11]齐静静，刘京，宋晓程. 大型城市河流对城市气候影响的实测研究[J]. 哈尔滨工业大学学报，2011，43(10)：56-59.

[12]周红妹，丁金才，徐一鸣，等.城市热岛效应与绿地分布的关系监测和评估[J].上海农业学报，2002，18(2)：83-88.

[13]朱岳梅，刘京，李炳熙，等. 城市规划实践中的热气候评价[J]. 哈尔滨工业大学学报，2011，43(6)：61-64，75.

[14]韩贵锋，颜文涛，赵珂.近 20 年来重庆市主城区地表热岛效应的时空变化[J]. 环境科学研究，2012，25(6)：615-621.

[15]胡毅，李萍，杨建功，等.应用气象学[M].北京：气象出版社，2005：179-236.

[16]吴兑，邓雪娇. 环境气象学与特种气象学预报[M]. 北京：气象出版社，2001：115-120.

[17]TZU-PING L, ANDREAS M, RUEY-LUNG H. Shading-effect on long-term outdoor thermal comfort[J]. Building and Environment, 2010，45：213-221.

[18]胡毅，李萍，杨建功，等.应用气象学[M].北京：气象出版社，2005：194.

[19]覃志豪，李文娟，徐斌，等.陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J].国土资源遥感，2004(3)：28-42.

[20]黄初冬，邵芸，李静.北京城市地表温度的遥感时空分析[J]. 国土资源遥感，2008，3(9)：64-68.

[21]陈爱莲，孙然好，陈利顶. 传统景观格局指数在城市热岛效应评价中的适用性[J].应用生态学报，2012，23(8)：2077-2086.

[22]郑新奇，付梅臣.景观格局空间分析技术及其应用[M].北京：科学出版社，2010：93-139.

[23]付博杰，陈利顶，马克明，等.景观生态学原理及应用[M].北京：科学出版社，2011：55-115.

（编辑　赵丽莹）