

doi: 10.6046/zrzyyg.2021198

引用格式: 王驹鹁, 赵春雷, 陈霞, 等. 基于遥感的唐山市绿色空间演化及对热岛效应的影响[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(2): 168–175. (Wang S Y, Zhao C L, Chen X, et al. Remote sensing-based green space evolution in Tangshan and its influence on heat island effect[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(2): 168–175.)

基于遥感的唐山市绿色空间演化及对热岛效应的影响

王驹鹁¹, 赵春雷^{2,3}, 陈霞⁴, 刘丹⁵

(1. 唐山市气象局, 唐山 063000; 2. 河北省气象科学研究所, 石家庄 050000;
3. 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050000; 4. 河北省气候中心,
石家庄 050000; 5. 唐山市丰南区气象局, 唐山 063000)

摘要: 城市环境问题是当今世界面临的重要问题, 城市热岛问题是其中重要研究方向之一, 伴随着城市扩张、人口增加, 城市热岛效应也发生着显著的变化。以 Landsat 系列卫星资料为数据源, 河北省唐山市中心城区为主要研究区, 利用辐射传输方程、监督分类、重心迁移、随机采样等方法, 分析绿色空间演化对城市温度变化的影响。研究表明: ①研究时段内, 热岛发展方向和面积与城市快速发展的规模和方向较为一致, 冷热岛重心的迁移方向和绿色空间、城镇重心迁移方向相类似, 冷岛重心迁移距离要大于热岛重心; ②城市绿色空间持续损失, 其中农业用地损失面积最大, 为 55.79 km², 城镇用地增加面积最大, 为 47.85 km²; ③在不同时期, 冷热岛演化的趋势与绿色空间演化趋势不一致, 这或许与绿色空间存量有一定关系; ④绿色空间扩张对于城市地表降温的作用(−0.16 °C)远小于绿色空间损失造成的地表升温作用(6.37 °C)。研究结果能给城市规划提供参考, 合理布局绿色空间, 保留足够的绿色空间存量, 有效降低城市热岛效应的发展速度。

关键词: 城市热岛; landsat; 绿色空间演化; 温度影响

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)02-0168-08

0 引言

城市环境问题是当今世界面临的人口、资源与环境三大问题的重要内容之一^[1], 而城市热岛是城市环境问题研究的重要方向。城市热岛效应(urban heat island effect, UHI)指在城市化发展过程中, 由于城区下垫面性质及结构变化, 人为热的排放、建筑及道路密集等导致的城区温度明显高于郊区, 形成类似“高温岛屿”的现象^[2]。随着全球气候变暖, 极端天气事件频发, 高温事件呈现越来越多的趋势, 城市热岛加剧了这种现象, 已经开始影响居住环境和人体健康, 因此成为很多学者研究对象。

已有大量研究表明, 城市热岛变化特征与城市发展特征高度相似, 由于城市人口密集, 土地利用类型多为建筑用地, 大量释放的人为热等导致城市热岛现象普遍存在^[3-5]。城市冷岛效应是随着城市热

岛效应研究深入而发展起来的, 在城市热岛内部, 零星散布着明显低于周围环境温度的冷点区域, 这一现象被称为冷岛效应^[6]。一般来说, 城市中的绿色空间能够有效减轻热岛效应程度^[7], 这些绿色空间由林地、草地、水体、湿地等土地利用类型组成。林草地具有蒸腾、遮阴作用^[8], 水体自身具有高热容性、流动性、低热辐射率等特点^[9], 湿地则同时具有以上两种作用^[10], 这些绿色空间通过降温、增湿来调节局地气候^[11], 形成冷岛效应。近年来, 城市绿色空间对热岛效应影响的相关研究逐步增加^[12], 尤其是 2009 年以后, 有学者开始深入探究城市热岛的形成机制, 并将绿地格局作为研究切入点^[13-15]。研究表明, 城市绿地的空间组成对城市热岛效应有显著影响^[16-17], 但绿地斑块所占比例和总面积对热岛效应改善影响有区别^[18-19]。此外, 城市绿地空间配置也对城市热岛效应有影响, 主要表现为城市绿地的形状、密度、边界、聚集度、离散度及城乡梯度上绿

收稿日期: 2021-06-30; 修订日期: 2021-11-15

基金项目: 科技部专项“冬奥雪场赛道雪质的判定、监测和预报技术”(编号: 2020YFF0304401)和河北省创新能力提升计划项目“冬奥赛区雪道表层冻融过程研究”(编号: 19245419D)共同资助。

第一作者: 王驹鹁(1987-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为生态环境遥感。Email: henson1011@126.com。

通信作者: 刘丹(1985-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为专业气象服务。Email: liudan128200@126.com。

地分布格局的差异^[20-21]。已有研究对于不同土地利用类型,尤其是绿色空间对城市热岛效应的影响已经较为深入^[22],但是城市绿色空间的演化对于热岛温度变化的影响研究较为匮乏。有学者以福建省福州市为例研究了城市绿色空间演化过程对温度变化的影响^[23],但是北方城市水体较少、绿植较稀疏的绿色空间演化对温度影响是否与南方城市相同有待进一步研究。因此,本研究选取华北地区典型工业化城市唐山为研究对象,利用遥感、GIS 软件及相关统计方法,着重分析城市绿色空间的演化对于地表温度的影响。研究能给地方政府部门城市规划尤其是绿色空间的规划提供理论指导,具有重要的实际应用价值。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

唐山市(117°31'~119°19'E,38°55'~40°28'N)地处渤海湾中部,河北省东部,是中国北方的重要工业城市。近年来,随着经济社会的快速发展,唐山正经历城市快速发展阶段,城市人口越来越多^[24],城镇用地规模不断扩大^[25]。并且由于生态文明建设的需求,面临工业转型升级、钢铁企业去产能搬迁等问题,城市下垫面用地类型改变较大,城市热岛问题逐渐显现。根据唐山市城市分布特点,本研究选取唐山市中心城区为研究对象,主要包括路南区、路北区部分乡镇、街道,总面积约为 167 km²。

1.2 数据源及其预处理

本研究采用的数据均为 Landsat 系列卫星影像,其中 4 景为 Landsat5 影像,分别是 1993 年、2000 年、2003 年和 2009 年,3 景为 Landsat8 影像,分别为 2014 年、2018 年和 2019 年,这 7 景影像基本包含了唐山城市建设快速发展的时段。影像来源于美国地质勘探局(USGS)官网,采集时间为 6 月底至 8 月初,研究区无云覆盖。数据需进行辐射校正、大气校正等预处理。

2 研究方法

2.1 地表温度反演

不同学者针对 Landsat 数据反演地表温度提出了多种不同算法^[26],主要有单窗算法^[27]、单通道算法^[28]、辐射传输方程法^[29]、劈窗算法^[30]等,大量研究均已证明这些算法的可行性,本文选取辐射传输

方程法进行地表温度的反演。

2.1.1 辐射传输方程

辐射传输方程法,也称大气校正法(radiative transfer equation algorithm, RTE)。基本原理为卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值 L_λ 由 3 部分组成:大气上行辐射亮度 L_{up} 、地面真实辐射亮度经过大气层后到达卫星传感器的辐射亮度以及大气下行辐射亮度 L_{down} ,表达式(辐射传输方程)可以写为:

$$L_\lambda = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_{down}]\tau + L_{up}, \quad (1)$$

式中: ε 为地表比辐射率; T_s 为地表真实温度, K; $B(T_s)$ 为黑体热辐射亮度; τ 为大气在热红外波段的透过率; 大气剖面参数 τ , L_{up} , L_{down} 可在 NASA 网站查询。 T_s 可以用普朗克公式获取:

$$T_s = K_2 / \ln(K_1 / B(T_s) + 1), \quad (2)$$

式中:对于不同的 Landsat 数据, K_1 和 K_2 的取值不同,对于 TM 数据, $K_1 = 607.76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, $K_2 = 1260.56 \text{ K}$; 对于 TIRS Band10, $K_1 = 774.89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, $K_2 = 1321.08 \text{ K}$ 。

2.1.2 地表比辐射率计算

地表比辐射率是指地表发射能力的大小,用于反演地表温度,值位于 0~1 之间,不同地物类型,地表比辐射率差别较大,根据已有学者的研究^[31-32],计算公式如下:

$$\varepsilon_{\text{building}} = P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_v) R_m \varepsilon_m + d_\varepsilon, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\text{surface}} = P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_v) R_s \varepsilon_s + d_\varepsilon, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\text{water}} = 0.995, \quad (5)$$

式中: $\varepsilon_{\text{building}}$, $\varepsilon_{\text{surface}}$ 和 $\varepsilon_{\text{water}}$ 分别为建筑、自然表面、水体的地表比辐射率; P_v 为植被覆盖度; R_v , R_m 和 R_s 分别为植被、建筑和裸土的温度比率,可由 P_v 计算求得; ε_v , ε_m 和 ε_s 分别为植被、建筑和裸土的地表发射率,其值分别为 0.986, 0.970 和 0.972; d_ε 为比辐射率修正项,可由以下公式计算:

$$P_v \leq 0.5, d_\varepsilon = 0.0038 P_v, \quad (6)$$

$$P_v > 0.5, d_\varepsilon = 0.0038(1 - P_v). \quad (7)$$

2.1.3 温度标准化分级

为了消除因传感器、采集时间不同导致的数据误差,增加温度数据的可比性,采用温度标准化分级公式对温度进行标准化处理,并采用自然间断点分级法^[33]重分类,分类后的低温区和次低温区为冷岛区域,次高温区、高温区和超高温区为热岛区域(见图 1)。

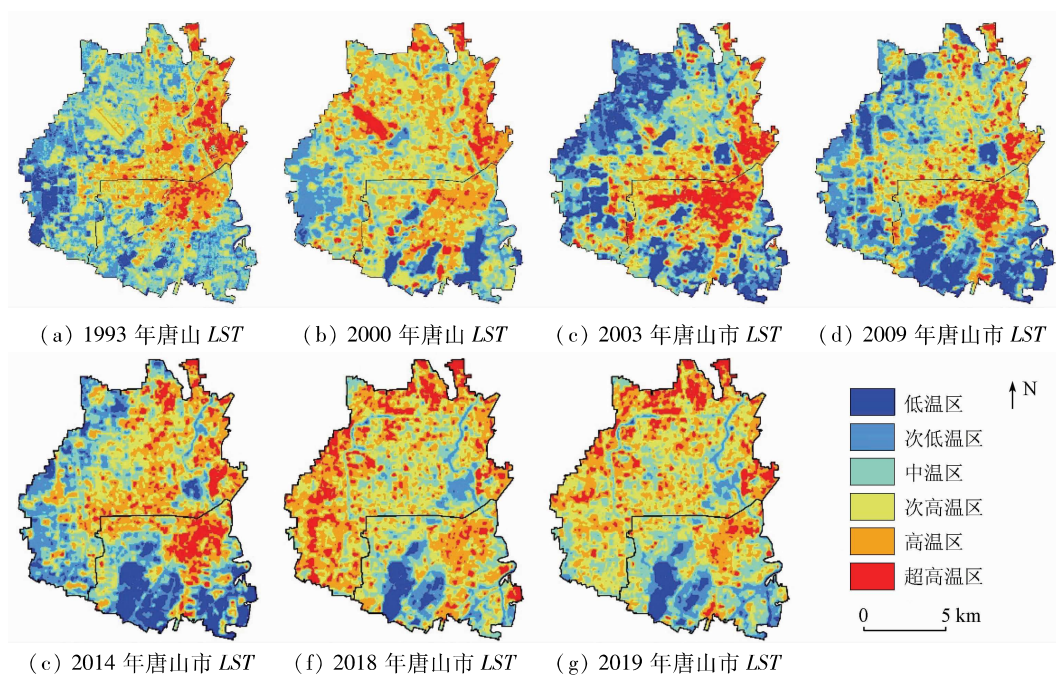


图1 唐山市中心城区 1993—2019 年温度分布变化

Fig.1 Changes of temperature distribution in the downtown area of Tangshan from 1993 to 2019

2.2 土地利用分类及绿色空间演化

2.2.1 监督分类

采用监督分类方法,根据唐山市土地利用实际情况进行分类,将研究区划分为林/草地、农业用地、水体、城镇、裸地等 5 类。

2.2.2 绿色空间演化

分类结果根据已有研究学者对绿色空间的界定^[34-35],将林/草地、农业用地、水体确定为绿色空间。将绿色空间的演化过程分为以下 3 种情况:绿

色空间扩张、绿色空间损失、绿色空间不变,分别表示非绿色空间向绿色空间转变、绿色空间向非绿色空间转变,绿色空间类型未发生改变。

根据以上界定,对监督分类后影像的各个类型进行叠置分析,如前后 2 景影像均为水体,则表示为绿色空间不变;如由水体演变成城镇,则表示为绿色空间损失,以此类推。各年份之间绿色空间动态演化情况如图 2 所示。

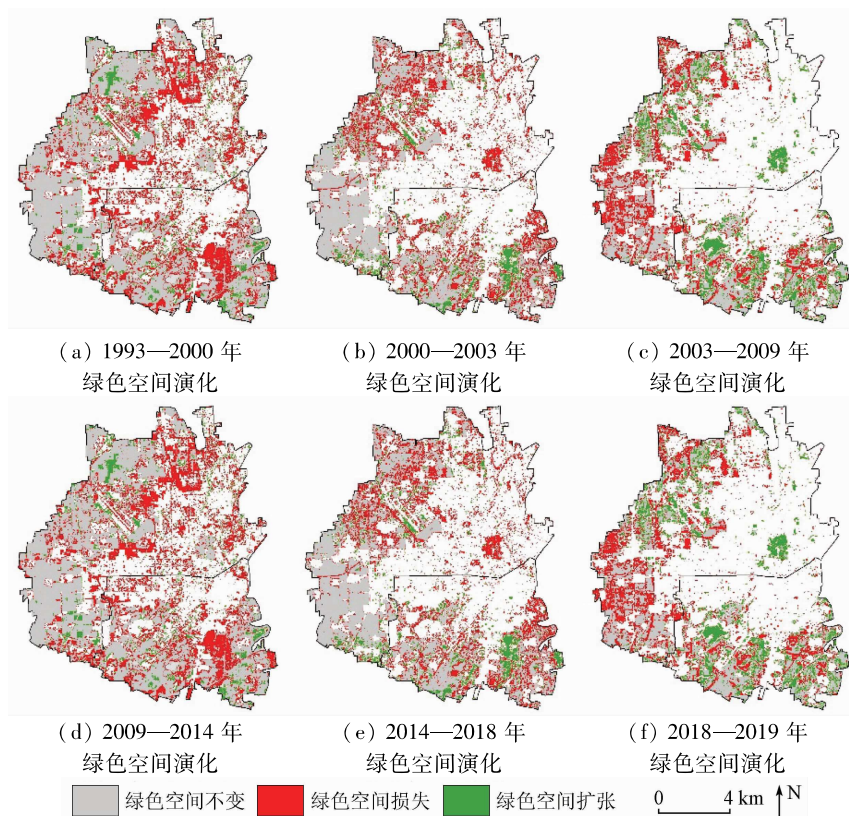


图2 唐山市中心城区 1993—2019 年绿色空间演化图

Fig.2 Green space evolution in the downtown area of Tangshan from 1993 to 2019

2.3 统计分析

2.3.1 重心分析

从温度分级图中分别提取出冷岛、热岛区域,从土地利用分类图中分别提取出城镇、绿色空间区域,计算各区域重心,用于分析冷热岛变化趋势和城市不同用地类型演化之间的关系。

2.3.2 随机采样统计

对研究区范围内随机采样 100 个点,叠加 1993 年、2019 年土地利用类型、地表温度数据进行采样,用于量化分析绿色空间演化对温度的影响。

3 结果与讨论

3.1 城市热岛变化特征

图 1 可见,20 世纪 90 年代研究区的热岛区域集中分布于城市中东部,2003 年开始逐步向西北方向蔓延,2018 年以后热岛区域较为分散且分布较广,不再有明显热岛中心。而 20 世纪 90 年代研究区并不存在明显冷岛中心,冷岛区域主要分布在研究区边缘地带,2000—2009 年南部区域开始出现冷岛中心,2009 年之后,中南部地区冷岛中心较为明显。据了解,研究区城市建设经历了几个快速发展的时期,1996 年开始对城市南部采煤塌陷区进行综合整治,在

此基础上建设了南湖公园并于 2009 年对外开放,逐步成为了研究区冷岛中心。2008 年研究区西北部的“凤凰新城”项目开始建设,2014 年研究区西南部的“站西片区”开始建设,这些大规模的城市规划建设项目与研究区热岛发展方向和时间都较为一致。

从冷热岛转移面积上来看(图 3(a)),2009 年以前,热岛区转为冷岛区的面积多于冷岛区转为热岛区的面积,全区的热岛面积有所下降,仅 2000—2003 年 3 年时间,热岛区转为冷岛区的面积就达 22.53 km²,转化速率为 7.51 km² · a⁻¹; 2009 年以后,仅有极少量的热岛区转为冷岛区,而冷岛区转为热岛区的面积却大幅上升,2014—2018 年 4 a 时间,冷岛区转为热岛区的面积就增加了 23.68 km²,转化速率为 5.92 km² · a⁻¹,这也与研究区大规模城市规划建设项目时间相对应。2018 年以后冷岛区转热岛区面积几乎没有增加,而热岛区转冷岛区面积有增加趋势,这是由于研究区范围内大规模城市建设已经基本完成,并且由于生态文明建设的要求,地方政府较重视城市绿化,绿色空间开始缓慢增长。从转化速率上来看(图 3(b)),研究时段内,冷岛区转热岛区的速率呈明显增加趋势,热岛区转冷岛区的速率呈明显降低趋势。

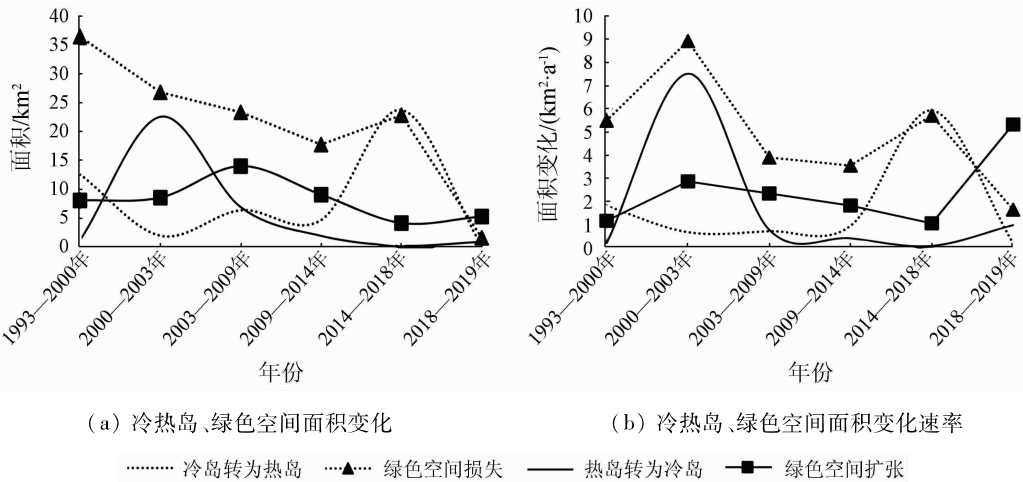


图 3 冷热岛、绿色空间面积及转化速率变化趋势图

Fig. 3 Change trend of UCI/UHI/UGS area and evolution rate

从温度等级面积转化来看(表 1),1993 年次高温区面积最大,为 44.28 km²,其次分别为中温区(38.99 km²)、次低温区(36.76 km²); 2019 年,次高温区面积依然最大,为 54.60 km²,但面积排名第二变为高温区(43.97 km²)。1993—2019 年,冷岛区面积均出现损失,其中次低温区面积损失最大,达 22.86 km²; 热岛区面积均有所增长,其中高温区面积增长最大,达 13.65 km²,次高温区次之,达 10.32 km²。

表 1 研究区温度等级面积转化

Tab. 1 Transfer area of temperature grades in the downtown area of Tangshan (km²)

温度等级	低温区	次低温区	中温区	次高温区	高温区	超高温区
总和(1993 年)	8.27	36.76	38.99	44.28	30.33	8.81
总和(2019 年)	5.50	13.90	34.87	54.60	43.97	14.61
面积变化	-2.78	-22.86	-4.12	10.32	13.65	5.80

3.2 城市绿色空间变化特征

随着城市化进程不断推进,城市绿色空间范围也不断缩小,1993—2018 年,绿色空间损失的面积均明显大于绿色空间扩张面积,绿色空间损失区域大部分位于研究区西北部,仅在中南部存在小范围的绿色空间扩张;2019 年绿色空间面积有小幅增加(图 2)。绿色空间面积损失最大的是 1993—2000 年,损失面积达 36.36 km²,损失速率最快的为 2000—2003 年,损失速率达 8.92 km² · a⁻¹;绿色空

间面积扩张最大的是 2003—2009 年,扩张面积达 14.02 km²,扩张速率最快的是 2018—2019 年,达 5.32 km² · a⁻¹(表 2)。1993 年面积最大的土地利用类型为农业用地,面积达 86.1 km²,2019 年面积最大的土地利用类型为城镇,面积达 118.12 km²。1993—2019 年,土地利用类型面积损失最大的为农业用地,达 55.79 km²,面积扩张最大的为城镇,增长面积达 47.85 km²(表 3)。

表 2 研究区绿色空间演化面积及变化速率

Tab. 2 Changes of UGS area and evolution rate in the downtown area of Tangshan

时间	绿色空间扩张		绿色空间不变		绿色空间损失	
	面积/km ²	速率/(km ² · a ⁻¹)	面积/km ²	速率/(km ² · a ⁻¹)	面积/km ²	速率/(km ² · a ⁻¹)
1993—2000 年	8.11	1.16	61.3	8.76	36.36	5.48
2000—2003 年	8.59	2.86	42.65	14.22	26.76	8.92
2003—2009 年	14.02	2.34	27.85	4.64	23.31	3.89
2009—2014 年	9.10	1.82	24.00	4.80	17.72	3.54
2014—2018 年	4.20	1.05	9.55	2.39	22.80	5.70
2018—2019 年	5.32	5.32	12.11	12.11	1.64	1.64

表 3 研究区土地利用转化面积

Tab. 3 Transfer area of LULC in the

downtown area of Tangshan (km²)

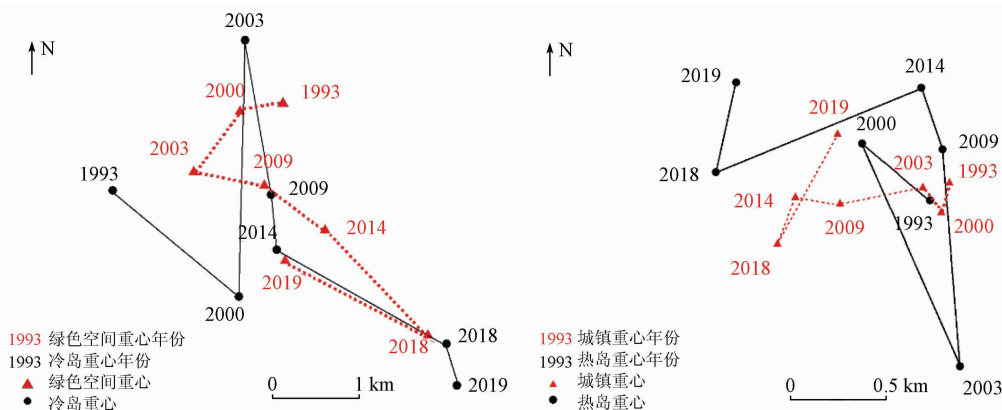
时间	水体	城镇	耕地	林地	裸地
总和(1993 年)	1.61	70.27	86.1	9.94	0.03
总和(2019 年)	3.14	118.12	30.31	9.08	7.30
面积变化	1.53	47.85	-55.79	-0.86	7.27

自 1993—2018 年,绿色空间损失的面积是呈递减趋势的,绿色空间扩张的面积相对较为稳定,面积变化速率趋势也大致相同,但冷热岛面积相互转换的趋势在 1993—2003 年时间段内并没有与之相一致,甚至出现绿色空间降低,热岛面积也减少的情况。2009—2019 年时间段内,冷热岛面积相互转换的趋势与绿色空间面积转换趋势趋于一致(图 3)。表明在城市发展的不同阶段,绿色空间的演化引起地表温度变化的效果有所区别,在城市发展早期,城

镇化程度较低,绿色空间面积较大,城市热岛效应不明显,此时如果损失少量的绿色空间并不会导致热岛效应迅速增强。在城市发展了一段时间后,城镇化程度已经相当高,除了湿地公园外绿色空间仅斑块状存在,这时增加少量的城镇面积就会导致热岛效应显著增强,而增加少量的绿色空间对于缓解城市热岛效应效果不明显,这与已有学者的研究结果相吻合^[12,23]。显然,城市绿色空间转移对于热岛效应的影响是与城市绿色空间存量存在一定的关系,具体的量化指标还有待进一步研究。

3.3 绿色空间、城镇重心与冷热岛重心迁移特征

利用 GIS 软件提取了城市冷、热岛重心及城镇、绿色空间的重心(图 4)。可以看出,城市绿色空间重心和冷岛重心在 2003 年之前迁移方向不太一致;2003 年之后,两者迁移方向趋于一致,均由西北向



(a) 绿色空间、冷岛重心转移

(b) 城镇、热岛重心转移

图 4 研究区绿色空间、冷岛及城镇、热岛重心转移图

Fig. 4 Movement of the gravity center of UGS/UCI and Urban/UHI

东南方向移动,且重心移动距离较长,可达4 km左右。城镇重心和热岛重心在2003年之前同样迁移方向不一致,并且城镇重心在2003年之前基本无变化;2003年之后,两者迁移方向趋于一致,均向城市西北方向迁移。由此表明,城市下垫面的改变是造成热岛发生发展的重要因素,城市热岛与城镇化发展进程关系密切,城市冷岛分布与绿色空间的扩张息息相关。

3.4 绿色空间演化对温度的影响

研究区范围内随机取样100个点,分别统计1993年,2019年这100个点所对应的地表温度以及土地利用类型,分析绿色空间演化对地表温度的影响。表4可见,绿色空间损失造成的升温幅度平均值为6.37℃,大于绿色空间交换的影响;而绿色空间扩张则造成地表温度下降,下降幅度平均值为-0.16℃。研究表明,绿色空间扩张对于城市地表降温的作用远小于绿色空间损失造成的地表升温作用。这是由于绿色空间的损失往往是大块面积的改变,比如房地产开发、基础设施建设等;而绿色空间扩张一般是小面积的增加,比如街心公园、沿路的绿化等等,对于地表降温影响有限。

表4 绿色空间演化对地表温度的影响

Tab.4 Temperature effect of UGS evolution

绿色空间演变	绿色空间扩张	绿色空间交换	绿色空间损失
温度变化/℃	-0.16	3.00	6.37

4 结论

本研究利用遥感数据反演了唐山中心城区地表温度,以多种空间统计方法分析了研究区绿色空间的变化及其对地表温度的影响。结果表明:

1)研究时段内,城市热岛面积增加较为明显,次低温区面积损失最大,高温区面积增加最大,热岛发展方向和面积与城市快速发展的规模和方向较为一致。

2)每个时间段内的绿色空间损失面积均大于扩张面积,农业用地损失的面积最大,城镇增加的面积最大;且在城市的不同发展阶段,冷热岛演化的趋势与绿色空间演化趋势不一致,这或许与绿色空间存量有一定关系。

3)城市下垫面的改变是造成地表温度改变的重要因素,冷热岛重心的迁移方向和绿色空间、城镇重心方向较为一致。

4)绿色空间扩张对于城市地表降温的作用远小于绿色空间损失造成的地表升温作用,这与绿色空间扩张、损失的规模有关。

综上所述,城市快速发展与城市热岛效应的增强之间确实存在密切关系,但是并非城市发展就一定会造成热岛效应增强,合理做好城市规划,保留足够的绿色空间存量,且绿色空间规模达到一定标准,便可有效缓解城市热岛效应,促进城市绿色健康发展。

参考文献 (References):

- [1] 潘莹,崔林林,刘昌脉,等. 基于MODIS数据的重庆市城市热岛效应时空分析[J]. 生态学报,2018,37(12):3736-3745.
Pan Y, Cui L L, Liu C M, et al. Spatiotemporal distribution of urban heat island effect based on MODIS data in Chongqing, China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(12): 3736-3745.
- [2] 彭少麟,周凯,叶有华,等. 城市热岛效应研究进展[J]. 生态学报,2005,14(4):574-579.
Peng S L, Zhou K, Ye Y H, et al. Research progress in urban heat island [J]. Ecology and Environment, 2005, 14(4): 574-579.
- [3] 王文杰,申文明,刘晓曼,等. 基于遥感的北京市城市化发展与城市热岛效应变化关系研究[J]. 环境科学研究,2006,19(2):44-48.
Wang W J, Shen W M, Liu X M, et al. Research on the relation of the urbanization and urban heat island effect changes in Beijing based on remote sensing [J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(2): 44-48.
- [4] 张艳,鲍文杰,余琦,等. 超大城市热岛效应的季节变化特征及其年际差异[J]. 地球物理学报,2012,55(4):1121-1128.
Zhang Y, Bao W J, Yu Q, et al. Study on seasonal variations of the urban heat island and its interannual changes in a typical Chinese megacity [J]. Chinese J Geophys (in Chinese), 2012, 55(4): 1121-1128.
- [5] 刘航,申格,黄青,等. 近10a武汉市城市热岛效应演变及其与土地利用变化的关系[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(9):1466-1475.
Liu H, Shen G, Huang Q, et al. Evolution of urban heat island effect and its relationship with land use change in Wuhan City in recent 10 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(9): 1466-1475.
- [6] Ren Z B, He X Y, Zheng H F, et al. Estimation of the relationship between urban park characteristics and park cool island intensity by remote sensing data and field measurement [J]. Forests, 2013, 4(4): 868-886.
- [7] 花利忠,孙凤琴,陈乔娜,等. 基于Landsat-8影像的沿海城市公园冷岛效应——以厦门为例[J]. 生态学报,2020,40(22):8147-8157.
Hua L Z, Sun F Q, Chen J N, et al. Quantifying the cool-island effects of urban parks using Landsat-8 imagery in a coastal city, Xiamen, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(22): 8147-8157.
- [8] Jaganmohan M, Knapp S, Buchmann C M, et al. The bigger, the better? The influence of urban green space design on cooling effects for residential areas [J]. Journal of Environmental Quality, 2016, 45(1): 134-145.
- [9] Ren Y, Deng L Y, Zuo S D, et al. Quantifying the influences of va-

- rious ecological factors on land surface temperature of urban forests [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 519–529.
- [10] 杨一鹏, 曹广真, 侯鹏, 等. 城市湿地气候调节功能遥感监测评估[J]. *地理研究*, 2013, 32(1): 73–80.
- Yang Y P, Cao G Z, Hou P, et al. Monitoring and evaluation for climate regulation service of urban wetlands with remote sensing[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(1): 73–80.
- [11] 陈旭, 李霖, 王江, 等. 城市绿地对热岛效应的缓解作用研究——以台州市为例[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(4): 643–649.
- Chen X, Li L, Wang J, et al. Heat island effect mitigation by urban green space system: A case study of Taizhou City[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(4): 643–649.
- [12] 王晓俊, 卫笑, 邹昊. 城市绿地空间格局对热岛效应的影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(9): 1904–1911.
- Wang X J, Wei X, Zou H. Research progress about the impact of urban green space spatial pattern on urban heat island [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2000, 29(9): 1904–1911.
- [13] Ji Q, Yu M. Studying dynamical monitoring of heat island effect based on MODIS data in coastal cities of southeast Fujian Province [C]. *Urban Remote Sensing Joint Event*. Shanghai: IEEE, 2009.
- [14] Zhang J H, Yao F M. The characteristics of urban heat island variation in Beijing urban area and its impact factors [C]. *Urban Remote Sensing Joint Event*. Shanghai: IEEE, 2009.
- [15] Zhang X P, Wang D X, Hao H K, et al. Effects of land use/cover changes and urban forest configuration on urban heat islands in a loess hilly region: Case study based on Yan'an City, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(8): 840.
- [16] Li B Y, Wang W, Bai L, et al. Effects of spatio-temporal landscape patterns on land surface temperature: A case study of Xi'an City, China [J]. *Environmental Monit Assess*, 2018, 190: 419.
- [17] Liu K, Su H B, Li X K, et al. Quantifying spatial-temporal pattern of urban heat island in Beijing: An improved assessment using land surface temperature (LST) time series observations from Landsat, MODIS, and Chinese new satellite GaoFen-1 [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2015: 1939–1404.
- [18] Du H Y, Cai W B, Xu Y Q, et al. Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing data [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 27: 24–31.
- [19] Ngulani T, Shackleton C M. The degree, extent and value of air temperature amelioration by urban green spaces in Bulawayo, Zimbabwe [J]. *The South African Geographical Journal*, 2019, 102(3): 344–355.
- [20] Estoque R C, Murayama Y, Myint S W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 577: 349–359.
- [21] 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.
- [22] 张硕, 刘勇洪, 黄宏涛. 珠三角城市群热岛时空分布及定量评估研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(7): 1157–1166.
- Zhang S, Liu Y H, Huang H T. Research on quantitative evaluations and spatial and temporal distribution of heat islands for the Pearl River Delta agglomeration [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(7): 1157–1166.
- [23] 陈燕红, 蔡芜簇, 全川. 基于遥感的城市绿色空间演化过程的温度效应研究——以福州主城区为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(7): 2439–2449.
- Chen Y H, Cai Y B, Tong C. Temperature effect under the green space evolution based on remote sensing: A case study of Fuzhou, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(7): 2439–2449.
- [24] 唐山市人民政府. 唐山统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- Tangshan Municipal People's Government. Tangshan statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [25] 张学儒, 陈春, 董坤. 基于 RS 与 GIS 唐山海岸带地区近 50 年土地利用格局时空特征分析 [J]. *西北农业学报*, 2013, 22(2): 204–208.
- Zhang X R, Chen C, Dong K. Analysis of temporal and spatial characteristics of land use pattern in Tangshan coastal zone from 1956 to 2005 based on RS and GIS [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2013, 22(2): 204–208.
- [26] 金点点, 宫兆宁. 基于 Landsat 系列数据地表温度反演算法对比分析——以齐齐哈尔市辖区为例 [J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(5): 830–841.
- Jin D D, Gong Z N. Algorithms comparison of land surface temperature retrieval from Landsat series data: A case study in Qiqihar, China [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(5): 830–841.
- [27] 覃志豪, 张明华, Arnon Karnieli, 等. 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): 456–466.
- Qin Z H, Zhang M H, Arnon Karnieli, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 456–466.
- [28] Jiménez - Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D22): 2015–2023.
- [29] 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 等. 用辐射传输方程从 MODIS 数据中反演地表温度的方法 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(4): 12–17.
- Mao K B, Tang H J, Zhou Q B, et al. Retrieving land surface temperature from MODIS data by using radiance transfer equation [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2007, 43(4): 12–17.
- [30] Rozenstein O, Qin Z H, Derimian Y, et al. Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm [J]. *Sensors*, 2014, 14(4): 5768–5780.
- [31] 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, 61(3): 28–30. doi: 10.6046/gtzyyg. 2004. 03. 07.
- Qin Z H, Li W J, Xu B, et al. The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6 [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2004, 61(3): 28–30. doi: 10.6046/gtzyyg. 2004. 03. 07.
- [32] 宋挺, 段峥, 刘军志, 等. Landsat8 数据地表温度反演算法对比 [J]. *遥感学报*, 2015, 19(3): 451–464.

- Song T, Duan Z, Liu J Z, et al. Comparison of four algorithms to retrieve land surface temperature using Landsat 8 satellite [J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(3): 451–464.
- [33] Peng J, Xie P, Liu Y X, et al. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 173: 145–155.
- [34] 孟伟庆, 李洪远, 朱琳, 等. 城市绿化的发展思路—绿色空间建设[J]. 城市环境与城市生态, 2005, 18(2): 8–10.
- Meng W Q, Li H Y, Zhu L, et al. Ideas on urban greening – green space construction [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2005, 18(2): 8–10.
- [35] 李锋, 王如松, Juergen Paulussen. 北京市绿色空间生态概念规划研究[J]. 城市规划学刊, 2004(4): 61–64.
- Li F, Wang R S, Juergen Paulussen. Study on ecological concept planning of green space in Beijing [J]. Urban Planning Forum, 2004(4): 61–64.

Remote sensing – based green space evolution in Tangshan and its influence on heat island effect

WANG Siyao¹, ZHAO Chunlei^{2,3}, CHEN Xia⁴, LIU Dan⁵

(1. Tangshan Meteorological Bureau, Tangshan 063000, China; 2. Hebei Institute of Meteorological Sciences, Shijiazhuang 050000, China; 3. Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050000, China; 4. Hebei Climate Center, Shijiazhuang 050000, China; 5. Fengnan District Meteorological Bureau, Tangshan 063000, China)

Abstract: The urban environment is an important issue in the whole world, and the urban heat island (UHI) effect is one of the important research topics. Owing to the expansion of the urban area and the increase in population, the urban heat island effect has also significantly changed. With the Landsat imageries as the data source and the central urban area of Tangshan City, Hebei Province as the main study area, this study analyzed the impacts of green space evolution on urban temperature change using the methods such as the radiative transfer equation algorithm, supervised classification, gravity center shift, and random sampling. The results are as follows. ① During the study period, the development direction and area of UHIs were roughly consistent with the scale and direction of rapid urban development. Moreover, the migration directions of the gravity centers of the UCI/UHIs were similar to those of the green space and urban area, with the migration distance of the gravity centers of UCIs greater than that of the UHIs. ② The urban green space (UGS) has been continuously lost during the study period, with the largest loss area of approximately 55.79 km² occurring in agricultural land. Moreover, the largest increased area occurred in urban land and was approximately 47.85 km². ③ The evolutionary trends of UCIs/UHIs were inconsistent with those of the UGS in different periods. This result may be related to the stock of green space. ④ The cooling effect on the urban surface (–0.16 °C) induced by green space expansion was much smaller than the warming effect on the urban surface (6.37 °C) caused by green space loss. The research results will provide a reference for urban planning in order to rationally arrange green space, retain sufficient green space, and effectively reduce the development speed of UHIs.

Keywords: urban heat island; landsat; green space evolution; temperature influences

(责任编辑: 李瑜)