

1996—2017 年张家口市市区景观格局与地表热环境的时空变化

刘孟竹^{1,2}, 李雅丽^{1,2}, 张红娟^{1,2}, 王飞枭^{1,2}, 裴宏伟^{1,2}

(1.河北建筑工程学院 市政与环境工程系, 河北 张家口 075000;

2.河北省水质工程与水资源综合利用重点实验室, 河北 张家口 075000)

摘要: [目的] 对河北省张家口市景观格局及城市热环境的时空变化及关系进行分析, 为缓解城市热环境极端化给人居环境、工业生产带来的严重威胁提供策略。[方法] 基于 Landsat 遥感影像, 通过地表温度反演和移动窗口法分析张家口市市区 1996—2017 年城市热环境和景观格局的时空变化关系。[结果] ①1996—2017 年, 研究区景观格局主要变化为不透水面景观的增加(81.26 km²)以及植被景观的减少(61.78 km²); ②研究区平均地表温度(LST)在 1996—2017 年增长了约 3 °C; 不透水面和植被景观的平均 LST 为 27.29 °C 和 23.77 °C, 分别为城市热环境中的“热源”和“冷源”; ③植被、水域景观面积比例每下降 10%, 对应的 LST 分别下降 2.71 °C 和 5.77 °C; 不透水面面积比例增长 10%, LST 则上升 0.25 °C; 景观聚合度、景观形状指数、耕地面积比例均与 LST 保持非线性相关。[结论] 1996—2017 年张家口市热环境的进一步加剧, 主要与城市化扩张以及植被的减少有关。

关键词: 城市热环境; 遥感; 景观格局; 温度反演; 张家口市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)06-0303-07

中图分类号: X52, F301.2

文献参数: 刘孟竹, 李雅丽, 张红娟, 等. 1996—2017 年张家口市市区景观格局与地表热环境的时空变化 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 303-309. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.039; Liu Mengzhu, Li Yali, Zhang Hongjuan, et al. Spatiotemporal variations of landscape pattern and urban thermal environment in Zhangjiakou City during 1996—2017 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 303-309.

Spatiotemporal Variations of Landscape Pattern and Urban Thermal Environment in Zhangjiakou City During 1996—2017

Liu Mengzhu^{1,2}, Li Yali^{1,2}, Zhang Hongjuan^{1,2}, Wang Feixiao^{1,2}, Pei Hongwei^{1,2}

(1. Department of Municipal and Environmental Engineering, Hebei University of

Architecture, Zhangjiakou, Hebei 075000, China; 2. Hebei Key Laboratory of Water Quality

Engineering and Comprehensive Utilization of Water Resources, Zhangjiakou, Hebei 075000, China)

Abstract: [Objective] The impacts of landscape pattern on urban thermal environment were studied to support the strategies that can mitigate extreme thermal environment caused by rapid urbanization in living environments and industrial production. [Methods] Based on Landsat images in 1996, 2008 and 2017 in Zhangjiakou City of Hebei Province, land surface temperature (LST) retrieval was conducted to quantify and map the thermal environment. Meanwhile, the landscape pattern index was obtained by moving window method at a grid scale. Finally, the specific relationship between the landscape pattern and LST was analyzed quantitatively and spatially. [Results] ① The changes of landscape pattern were featured by the expansion of impervious surface landscape with an increase of more than 81.26 km² from 1996 to 2017, followed by the reduction in vegetation landscape (61.78 km²). ② During the study period, the average LST of the study area

收稿日期: 2021-05-06

修回日期: 2021-07-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“北方农牧交错带典型集约菜田蒸散及水盐迁移过程研究”(41701017); 河北省自然科学基金项目(D2020404001); 河北建筑工程学院研究生创新基金项目(XY202155); 河北省科技厅高水平人才团队建设项目(199A4201H); 张家口市科技局人才专项(201903Y)

第一作者: 刘孟竹(1994—), 男(汉族), 湖北省荆州市人, 硕士研究生, 研究方向为环境生态学。Email: protectzhuzhu@163.com。

通讯作者: 裴宏伟(1987—), 男(汉族), 河北省张家口市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事流域生态水文和城市生态学研究。Email: hwpei@sjziam.ac.cn。

increased by approximately 3 °C, and the impervious surface landscape and vegetation landscape as the “heat source” landscape and the “cold source” landscape maintained the average LST of 27.29 °C and 23.77 °C, respectively. ③ For every 10% decrease in the proportion of vegetation landscape and water landscape area, the corresponding LST decreased by 2.71 °C and 5.77 °C, respectively. For every 10% increase in the proportion of impervious surface area, LST increased by 0.25 °C. Landscape aggregation, shape index and proportion of cultivated area all maintained a non-linear correlation with LST. [Conclusion] The urban’s thermal environment has developed towards a high level in Zhangjiakou City in the last two decades, which was strongly related to both the increase in impervious surface and reduction in vegetation.

Keywords: urban thermal environment; remote sensing; landscape pattern; temperature retrieval; Zhangjiakou City

自 20 世纪 80 年代以来,中国城市化率已经由初期的 17.90% 增长至如今的 59.58%,在未来 30 a 估计将达到 70%^[1]。快速的城市化发展导致城市不透水面区域显著增加以及城市植被、水体等自然景观被大量的建筑、道路等人为景观代替,而人为景观往往热容量高、反照率低,易引起城市地表温度的升高,进而加剧城市地表热环境的极端化^[2]。极端的热环境不仅会导致城市空气污染加重、居民生产生活受威胁,还会引发能耗增加、热浪灾害等不利后果^[3-4]。因此,城市热环境一直是城市生态研究及可持续发展的重要内容之一^[5],大量研究^[6-7]表明,城市地表热环境与城市的景观格局密不可分。相比于费时、费力的地面点位测量,通过遥感手段多尺度地反演城市地表热环境参数进而分析这些参数与城市景观格局之间的关系,一直是国内外学者研究的主要方式^[8-9]。在数量关系上,Hoan 等^[10]研究发现越南河内市单位面积植被景观更替为建筑用地时,会导致局部约 3.3 °C 的增温效应;在驱动因素上,Tang 等^[11]通过分析城市热环境的主导因素得出,不透水面以及归一化植被指数为影响城市热环境最重要的因素;在空间关系中,Liu 等^[12]通过对南京市热岛效应的研究发现,景观斑块的破碎度对城市热环境的增温具有显著的正相关作用;在应对措施中,Li 等^[13]认为增加绿地覆盖度是缓解城市热环境的有效方式。以上可以明确,城市景观格局对城市热环境的影响是目前国内外学者普遍关注的研究热点。然而在国内外相关研究中,研究区域普遍为北上广深或是各国首都等特大城市,而对经济相对不发达的城市研究较少;在研究内容上,多数研究更加侧重于景观格局与城市地表热环境参数数量关系上的分析,对于两者空间关系的探讨仍然缺乏。基于此,本文选择河北省张家口市为研究区域,对该区景观格局及城市热环境的时空变化及关系进行分析。张家口市作为 2022 年冬奥会主办城市,一方面,该市多年来城市化发展并不显著落后于其他城市,未来的城市化进程在冬奥会的间接驱动下将进

一步提速;另一方面,该区的景观格局与城市热环境关系的研究鲜有报道。对城市景观格局与城市热环境关系的研究将有助于城市规划决策以及城市环境可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河北省张家口市(东经 113°50′—116°30′,北纬 39°30′—42°10′)地处河北省西北部,位于京、冀、晋、蒙 4 省市交界处,是冀西北地区的中心城市和连接京津、沟通晋蒙的交通枢纽,2019 年常住人口城镇化率为 58.38%。市主城区行政区划单元由桥东区和桥西区组成,总面积约为 602.79 km²。为了使得景观面积基数较大以符合后续的研究,将主城区周围区域均纳入研究范围。根据市区内气象站点(东经 114°88′,北纬 40°78′)统计分析,张家口市属温带大陆性季风气候,近 30 a 来日平均温度在 -9.5~24.8 °C 之间,年均气温 9.36 °C,气温最低值出现在 1 月,峰值在 7—8 月;多年平均降水量为 452.00 mm,主要集中在 6—9 月;多年平均日照时间为 2 723.7 h;多年平均风速在 1.6~3.0 m/s 之间,7—10 月处于低值。据《张家口统计年鉴》记载,桥东及桥西区 1994—2017 年 GDP(按当年价格计算)由 37.63 亿元增长至 275.39 亿元,市区人口由初期 44.18 万人增加至末期 52.15 万人,23 a 来净增加近 8 万人。

1.2 数据源及处理

为保证影像质量以及数据可获取性,选取了 Landsat 5/8 卫星影像 1996/9/25,2008/9/10,2017/9/19 这 3 景影像数据,来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。影像选取原则为研究区完全无云覆盖,成像时间相近,且天气均为晴天,以消除由于降雨给热岛效应带来的影响,热红外波段分辨率也已经重采样至与可见光及近红外波段相同,均为 30 m,市内气象站点对应影像的当天的平均气温分别为 17.9, 17.7, 18.0 °C。研究区卫星过境时间均为北京时间早

上 10:30—11:00 点左右。对获取的 3 景影像均采用辐射校正、FLAASH 大气校正和裁剪处理。影像分类采用监督分类中最大似然法并结合目视解译等人机交互解译完成,根据研究区实际情况分为:不透水面、植被、水域、裸地 4 类景观类型。根据 Google Earth 同期高清影像选点验证精度均在 85% 以上,可以满足后续分析研究。

1.3 研究方法

1.3.1 地表温度(LST)反演及分级 本研究选取适用于 Landsat 影像地表温度反演的大气校正法^[14],该方法经过孟宪红等^[15]研究论证,对比单窗算法、单通道算法,大气校正法反演结果具有更小的均方差。本文基于大气校正法,其原理是把大气对卫星传感器的影响从观测到的热辐射总量中去除,进而通过相应公式转换为地表温度^[16]。首先利用 Landsat 热红外波段(TM 为第 6 波段,TIRS 为第 10 波段)数据进行热红外波段辐射定标,将像元灰度值转换为辐射亮度值,根据覃志豪等^[17]的研究,通过归一化植被指数(NDVI)以及植被覆盖度(FVC)进行地表比辐射率计算,再进一步估算出同温下黑体辐射亮度,根据普朗克函数对研究区地表温度进行反演。具体方法参考文献^[18],计算公式为:

$$L_x = \text{Gain}_x \times \text{DN}_x + \text{Bias}_x \quad (1)$$

$$L_y = \frac{L_x - L_m - t \times (1 - e) \times L_n}{t \times e} \quad (2)$$

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_y} + 1\right)} \quad (3)$$

式中: L_x 为云顶辐射亮度 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})]$; Gain_x , Bias_x 和 DN_x 分别为转换函数的斜率系数、截距系数和像元灰度值,由影像自带的元数据中可获得。 L_y 为地表辐射亮度 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})]$; L_m , L_n 分别为上、下行辐射强度 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})]$; t 为大气透过率,这 3 个参数均可由 NASA 网站查询得到(<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>); e 为地表发射率,由覃志豪等^[17]研究成果计算可得; T_s 为反演的地表温度(K); K_1, K_2 均为定标常数,在 TIRS 10 波段中, $K_1 = 774.885 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1321.079 \text{ K}$ 。

为了更好地表达研究区整体温度多年来的变化,本文采用等间隔分割法对研究区 3 个时期的地表温度进行等距划分,划分低温区($\leq 20 \text{ }^\circ\text{C}$)、次低温区($20 \sim 23 \text{ }^\circ\text{C}$)、中低温区($23 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$)、中温区($26 \sim 29 \text{ }^\circ\text{C}$)、中高温区($29 \sim 32 \text{ }^\circ\text{C}$)、次高温区($32 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$)、高温区($\geq 35 \text{ }^\circ\text{C}$) 7 个等级来细化不同景观温度区间的分布。

1.3.2 移动窗口法获取景观指数 为避免选取多个景观指数带来的信息冗余,在 Fragstats 4.2 软件中采用移动窗口法获取窗口单元的 3 个景观指数,分别为斑块类型中的景观面积比例(PLAND)以及景观类型中的景观形状指数(LSI)和聚合度(AI),从景观类型的数量特征、形态特征、以及结构特征来分析对城市热岛效应的影响。通过参考同类研究^[19]选取范围并经过反复调试,最终确定窗口单元大小为 $210 \times 210 \text{ m}$ (7×7 个像元)。每个窗口的景观指数都将被赋值给中心像元上,一共生成 916 593 个窗口单元。各个景观指数的生态意义及计算公式发展已经非常成熟,具体可参考文献^[20]。窗口中心像元 LST 值根据 ArcMap 10.6 软件焦点统计工具计算出窗口内 7×7 个像元的温度平均值进行赋值,最后进行 LST 值与景观指逐像元的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 城市景观格局分析

如表 1 所示,研究区 1996—2017 年景观格局发生较为显著的变化。城市水域景观经历了下降后上升的变化,在 1996—2008 年期间减少了 1.29 km^2 后在 2008—2017 年期间又恢复到初期水平。通过 Google Earth 查阅研究区影像发现,1996 年张家口市市区内清水河还未修建人工水渠,仅有非常狭窄的细流,故该时期影像没有中未划分出市区内的水域景观。研究区裸地面积在前一阶段增加了 32.09 km^2 ,在后一时期减少了 51.60 km^2 ,裸地面积的增加主要来源于林草地的转入(图 1)。此外,植被景观多年来一直处于下降趋势,主要原因为大量的裸地侵占了林、草地,同时城市化扩张也占用了植被用地。近 20 a 来,研究区包括建筑用地、道路交通、工矿用地在内的不透水面景观呈现持续扩张趋势,整个时期增长了 81.26 km^2 ($+65.57\%$);2008—2017 年期间,不透水面景观增加了 57.04 km^2 ,占 1996—2017 年总增长面积的 70%,增长主要来源于裸地的转入。近 20 a 来,研究区景观格局变动明显,城市化扩张较显著。

表 1 研究区 1996—2007 年景观类型面积 km^2

年份	景观类型			
	裸地	植被	水域	不透水面
1996	338.06	370.90	3.79	123.92
2008	370.15	320.89	2.50	148.14
2017	318.55	314.12	3.82	205.18

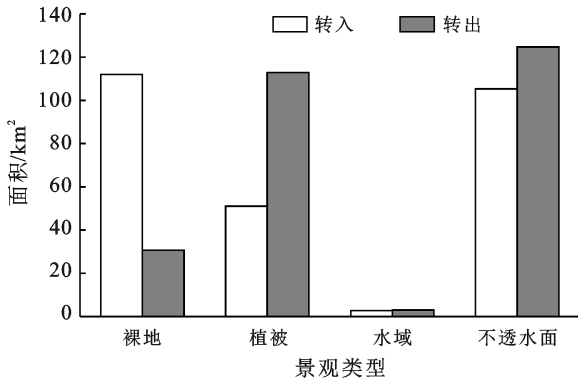


图 1 研究区 1996—2017 年不同景观流转变

2.2 地表温度 LST 反演结果与分析

由图 2 中地表温度经过分级后的统计结果详见表 2。由表 2 可知,研究区 1996, 2008 和 2017 年地表温度等级分别以次低温区、次低温区、中温区为主。在 2008 年,中低温区面积比 1996 年多 87.31 km²,地表温度同等级的面积增加,且地表温度等级升高。研究区 3 个时期平均温度分别为 23.58, 25.31 和 26.60 °C,

地表温度在 1996—2017 年以来整体处于上升态势。分阶段来看,研究区中温及以上热力等级面积在整个研究时期内逐阶段上升,高温区由初始阶段 0 km² 到 2017 年增长为 0.32 km²,次高温区由 0.11 km² 增长至 7.40 km²,中高温区在近 20 a 增加了近 128.23 km²,增幅达到 15.25%。低温及次低温区面积缩减均在 100 km² 以上。从分布来看,2008 和 2017 年,中高温及以上热力等级区域主要分布在张家口市区建筑、交通用地区域,次低温及以下热力等级区域分布在张家口市区东北部崇礼区。1996 年次低温及以下区域在张家口市区北部分布较广,低温区较多分布在在市区南部,该区以裸地景观为主,温度较低的原因与裸地季节性的农作物种植有关。在景观分类中,农作物植被没有被划分为植被景观,这就导致当农作物植被处于生长季、植被覆盖水平较高时,地表均温低于常年无植被覆盖的裸地景观水平。近 20 a 来,研究区低温区面积显著减少,高温区面积明显增加,城市热环境水平进一步提升(见图 2)。

表 2 研究区 1996—2017 年地表温度分级面积及比例

年份	项目	低温区	次低温区	中低温区	中温区	中高温区	次高温区	高温区
1996	面积/km ²	117.36	221.80	304.13	183.46	14.82	0.11	0.00
	比例/%	13.94	26.35	36.13	21.80	1.76	0.01	0.00
2008	面积/km ²	12.41	94.95	391.44	315.41	25.86	1.45	0.16
	比例/%	1.47	11.28	46.51	37.47	3.07	0.17	0.02
2017	面积/km ²	17.09	64.05	238.19	371.48	143.14	7.40	0.32
	比例/%	2.03	7.61	28.30	44.14	17.01	0.88	0.04

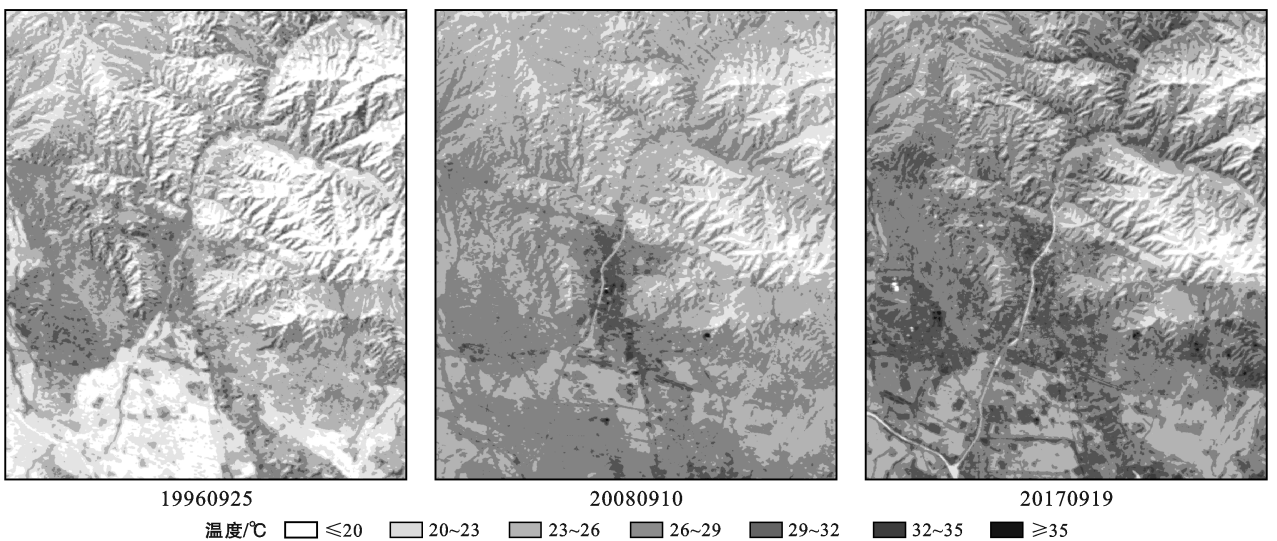


图 2 研究区 1996—2017 年地表温度

2.3 景观格局与 LST 影响分析

2.3.1 不同景观类型对 LST 影响 为更好地表征不同景观类型的对 LST 的整体影响,通过 GIS 对

不同景观类型的 LST 值进行栅格尺度上的分区统计(图 3)。研究区植被与水域景观在 1996, 2008 和 2017 年 3 个时间节点上平均 LST 均未超过 25 °C;不

透水面与裸地(除 1996 年)在整个研究期间地表平均温度均均超过 25℃,两者对于地表热环境的贡献程度最大。多年来,研究区 4 类景观类型的平均 LST 均呈现逐阶段上升趋势,裸地、植被、水域、不透水面景观平均 LST 在 1996—2017 年分别增加了 3.31, 1.97, 2.96, 3.19℃。其中,植被景观平均 LST 波动较小,较其他景观更具稳定性;水域景观面积占比较小,该景观区域内的 LST 易受水域周边不透水面景观影响,因此 LST 的波动性较大;裸地和不透水面景观区域的 LST 波动性不如植被景观的稳定。从整体上看,研究区各景观类型平均温度多年来逐步上升,进一步说明张家口市热环境水平趋于升高。

为细分研究区不同景观类型对于不同地表温度等级区域的贡献程度,通过 GIS 面积制表工具统计得到研究区 1996, 2008 和 2017 年各景观类型在不同地表温度等级的分布情况(表 3)。在 2008—2017 年,低温区植被景观占比接近 100%;在 1996 年植被景观在研究区低温区的占比也较大(近 63%),而随着地表温度等级的升高,其占比逐步减小,植被景观 LST 处于明显的低温水平。从裸地景观对 LST 的影响来看,裸地景观 LST 主要集中在中低温和中高温区,在

2008—2017 年期间在低温、高温区分布较少,裸地景观对 LST 的影响并没有很显著的相关性。研究区水域景观面积占比较少,这导致了水域景观在 LST 不同等级区占比均偏低。此外,水域景观在中高温及以上热力等级区占比均接近于 0%,说明该景观对 LST 升高的贡献程度极低。不透水面景观在 2008—2017 年高温区占比接近 100%,整个研究区期间在中高温、次高温区占比也较高(61%~100%),以上可以认为,植被、不透水面景观分别是研究区的热“汇”、热“源”景观。

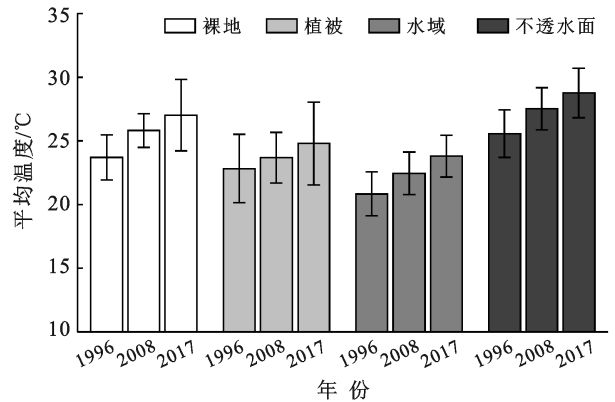


图 3 研究区 1996—2017 年不同景观类型平均温度

表 3 研究区不同地表温度等级区域景观类型面积比例

年份	景观类型	面积比例/%						
		低温区	次低温区	中低温区	中温区	中高温区	次高温区	高温区
1996	裸地	35.58	43.20	39.00	41.41	39.54	33.33	0.00
	植被	62.94	50.64	41.32	32.10	34.70	23.93	0.00
	水域	1.13	0.94	0.12	0.02	0.02	0.00	0.00
	不透水面	0.35	5.22	19.56	26.48	25.74	42.74	0.00
2008	裸地	0.01	5.90	48.42	54.41	13.11	0.00	0.00
	植被	99.97	93.62	45.34	13.33	0.26	0.00	0.00
	水域	0.00	0.16	0.36	0.29	0.06	0.00	0.00
	不透水面	0.01	0.32	5.87	31.97	86.57	100.00	100.00
2017	裸地	0.14	3.52	40.56	47.82	28.32	20.16	0.56
	植被	98.20	93.24	53.55	25.72	10.07	1.57	0.00
	水域	0.01	2.06	0.85	0.13	0.00	0.00	0.00
	不透水面	1.65	1.18	5.04	26.34	61.61	78.27	99.44

2.3.2 景观指数对 LST 影响 本文以邻近年份 2017 年为例,将选取的景观指数与 LST 做栅格尺度上的相关性分析。为更清晰地表达景观指数与 LST 的关系,对数据进行平滑处理,将各个景观指数的重复值对应的多个 LST 值做均值处理,最终拟合结果如图 4 所示。植被、水域景观比例与 LST 均具有明显的负相关性($R^2 > 0.94, p < 0.01$);不透水面景观比例与 LST 呈正相关性($R^2 = 0.95, p < 0.01$);裸地景观比例与 LST 呈非线性关系($R^2 = 0.91, p < 0.01$),

随着裸地比例的上升,其与 LST 的相关性由正相关转为负相关。植被、水域、不透水面景观比例与 LST 存在明显的线性相关性;裸地景观比例与 LST 最佳拟合曲线为二次函数,其面积占比达到 60%时,该类景观 LST 达到峰值。

聚合度(AI)表示同一景观类型的像元聚合形成斑块的邻接关系,当 AI 值越大,表示该类型景观集中程度越高。

由图 4 可知,研究区景观的聚合度与 LST 相关

性不够显著, R^2 仅为 0.04。可以认为, 在区域内景观规划时, 景观的集中程度对区域尺度内的 LST 几乎没有影响。景观形状指数(LSI)表示景观斑块形态特征的复杂性, LSI 值越小, 表示景观斑块形态越规则、

简单, LSI 值越大, 景观斑块形状越杂乱和无规律。当景观形状指数增大时, LST 呈现增加后减小的变化趋势, LST 与景观形状指数的相关性也由正转负 ($R^2 = 0.77, p < 0.01$)。

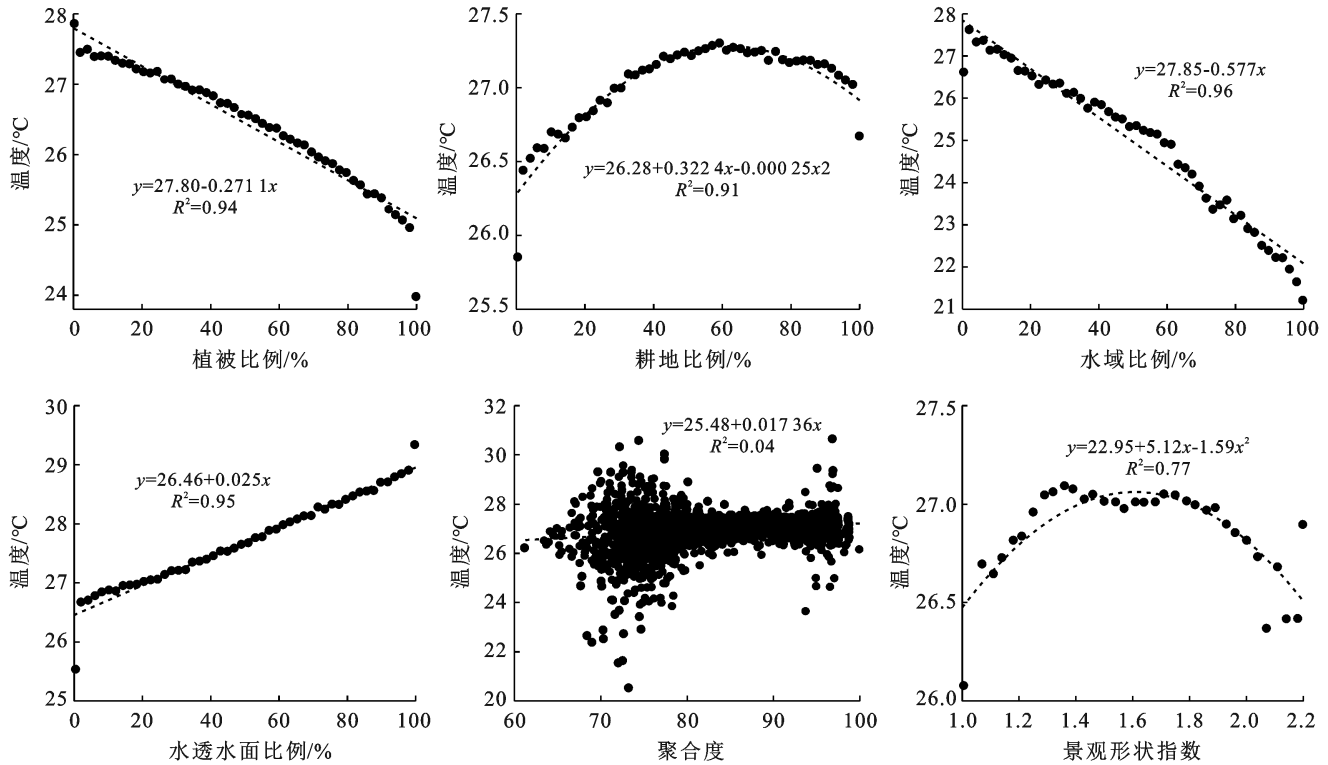


图 4 研究区 2017 年不同景观指数与地表温度的拟合关系

3 讨论与结论

3.1 讨论

从本文误差来源来看, 在影像质量上保证了其无云覆盖、时相临近, 且成像时期前后数天内均是无雨天气, 这样避免了对 LST 反演可能造成的影响; 在对影像的分类中, 本文选择了监督分类法中分类精度较高的最大似然法^[21], 同时通过对照 Google Earth 软件里的同时期高清影像在土地分类后进行了人工校正以及精度验证, 保证了后续景观指数对 LST 影响结果的可靠性; 在研究区 LST 反演方法上, 本文选择了大气校正法, 该方法经过孟宪红等^[15]的研究论证, 对比单窗算法、单通道算法, 大气校正法反演结果具有更小的均方差, 尽管如此, 天气冷热状况的偶然性给 LST 反演结果带来了不确定性, 时序数据和月均值数据的使用会是解决该问题的有效途径; 另外, LST 反演结果未得到有效验证, 结果的验证是未来需要进一步深入的方向。

与同类研究对比, 张家口市水域、植被景观面积比例与 LST 呈负相关性, 与不透水面和裸地呈现正

相关性, 该结果与同类研究^[19-20]一致。景观指数与 LST 相关性分析中, 本研究得出聚合度、景观形状指数均与 LST 之间没有明显的正负相关性, 这与以往研究^[13, 22]不同, 因为这些研究对于景观格局指数与 LST 的相关性分析均是基于全局或者局部的栅格尺度上的拟合, 本研究是基于景观指数重复的相同值对应的不同 LST 的均值求出的拟合, 可以看到植被、水域、不透水面景观均与 LST 之间展现了较高拟合程度的相关性, 而聚合度、景观形状指数与 LST 之间没有明显的相关性, 这也说明了不同的拟合方法得出的结论并不完全一致。另外, 随着裸地面积比例的增大, 其与 LST 的相关性由正到负的转变, 这与裸地的植被覆盖有关。裸地的植被覆盖水平往往与季节性、人类对土地的利用方式有关, 在影响分类精度的影响下, 低植被覆盖的像元也会被分类成裸地, 这种情况也会随着裸地面积的增多而愈发显著, 因此导致具有少许植被覆盖的裸地像元增多带来的低温效应越明显。

3.2 结论

(1) 整体来看, 裸地和植被景观是张家口市市区最主要的景观类型, 2017 年总占比达到 75.17%, 不透水

面景观次之(24.38%);水域景观在整个研究期间面积占比均为超过0.50%。由变化情况来看,裸地和植被景观面积在1996—2017年期间呈减少态势,分别达到5.77%,16.44%;同时期,不透水面面积增长65.57%(81.26 km²),水域面积在研究期间上无明显变化。

(2) 3个观测时期中,2017年张家口市市区地表平均LST为26.6℃,较1996年同时期增加了约3℃,研究区地表热环境向更热水平发展。

(3) 不透水面和植被分别为城市热环境中的“热源”和“冷源”,在研究期间的平均LST分别为27.39和23.77℃;裸地和水域的平均LST分别为25.52和22.36℃。各个景观类型的平均LST在1996—2017年呈逐阶段上升趋势。

(4) 植被和水域景观面积比例均与平均LST呈负相关,不透水面景观面积比例与平均LST呈正相关;随着裸地面积比例和景观形状指数增大,两者均与平均LST呈由正相关过渡到负相关的变化;聚合度与平均LST没有明显相关性。

[参 考 文 献]

- [1] Department of Economic and Social Affairs. World Urbanization Prospects: The 2007 Revision [R]. United Nations, 2008.
- [2] Li Junxiang, Song Conghe, Cao Lu, et al. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12): 3249-3263.
- [3] Peng Jian, Xie Pan, Liu Yanxu, 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.
- [4] Liu Huimin, Zhan Qingming, Yang Chen, et al. The multi-timescale temporal patterns and dynamics of land surface temperature using ensemble empirical mode decomposition [J]. Science of the Total Environment, 2018, 652: 243-255.
- [5] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 370-384.
- [6] Maimaitiyiming M, Ghulam A, Tiyyip T, et al. Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: Implications for sustainable urban planning and climate change adaptation [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 89(3): 59-66.
- [7] 黄木易, 岳文泽, 何翔. 巢湖流域地表热环境与景观变化相关分析及其尺度效应[J]. 中国环境科学, 2017, 37(8): 3123-3133.
- [8] Szymanowski M, Kryza M. GIS-based techniques for urban heat island spatialization [J]. Climate Research, 2009, 38(2): 171-187.
- [9] Meng Fei, Liu M. Remote-sensing image-based analysis of the patterns of urban heat islands in rapidly urbanizing Jinan, China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(24): 8838-8853.
- [10] Hoan N T, Liou Y A, Nguyen K A, et al. Assessing the effects of land-use types in surface urban heat islands for developing comfortable living in Hanoi City [J]. Remote Sensing, 2018, 10(12): 552-561.
- [11] Tang Junmei, Di Liping, Xiao Jingfeng, et al. Impacts of land use and socioeconomic patterns on urban heat island [J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(11): 3445-3465.
- [12] Liu Guilin, Zhang Qian, Li Guangyu, et al. Response of land cover types to land surface temperature derived from landsat-5TM in Nanjing metropolitan region, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(20): 1386.
- [13] Li Xiaoma, Zhou Weiqi, Ouyang Zhiyun, et al. Spatial pattern of green space affects land surface temperature: evidence from the heavily urbanized Beijing metropolitan area, China [J]. Landscape Ecology, 2012, 27(6): 887-898.
- [14] Sobrino J A, Jimenez-Munoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5 [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 434-440.
- [15] 孟宪红, 吕世华, 张宇, 等. 使用 LANDSAT-5TM 数据反演金塔地表温度[J]. 高原气象, 2005, 24(5): 721-726.
- [16] Zhao Chunhong, Jennifer J, Weng Qihao, et al. A geographically weighted regression analysis of the underlying factors related to the surface urban heat island phenomenon [J]. Remote Sensing, 2018, 10(9): 1428.
- [17] 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, 16(3): 28-32.
- [18] 谢哲宇, 黄庭, 李亚静, 等. 南昌市土地利用与城市热环境时空关系研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(S1): 241-248.
- [19] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 等. 1989—2015年海口城市热环境与景观格局的时空演变及其相互关系[J]. 中国环境科学, 2019, 39(4): 1734-1743.
- [20] 乔治, 黄宁钰, 徐新良, 等. 2003—2017年北京市地表热力景观时空分异特征及演变规律[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 475-489.
- [21] 成淑艳, 曹生奎, 曹广超, 等. 基于高分辨率遥感影像的青海湖沙柳河流域土地覆盖监督分类方法对比[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 261-268, 353.
- [22] 高静, 龚健, 李靖业. “源—汇”景观格局的热岛效应研究: 以武汉市为例[J]. 地理科学进展, 2019, 38(11): 1770-1782.