

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.01.001

京津冀城市群土地利用变化对地表热环境的影响研究

孙 硕¹, 李 君^{1,2}, 王一旭¹, 姚 磊¹

(1. 山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358; 2. 南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 近年来,城市化进程的不断加快引发了城市下垫面性质的改变和人为热源的增加,导致城市群热环境的不断恶化。为探求城市群土地利用变化对地表热环境的影响,本研究基于 MODIS 地表温度产品和土地利用数据,分析了京津冀城市群土地利用/覆被和地表热环境的时空变化特征,并通过不同土地利用/覆被类型的热效应贡献度、土地利用与地表温度的相关关系,来定量表征土地利用变化所引起的热环境效应。研究结果表明:①2000—2015 年京津冀城市群的建设用地大幅增加,城市化进程显著;②2000—2015 年京津冀城市群的温度西北低东南高;以特高温区为中心,温度向四周递减,温度相近的区域呈集聚状态,随时间变化各温度分区的破碎度均有所降低;③土地利用变化对地表热环境有显著影响,建设用地、耕地均与地表温度呈显著正相关,绿地与地表温度呈显著负相关。

关键词: 地表热环境; 土地利用变化; 时空格局; 热效应贡献度

中图分类号: X87

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)01-0001-12

Study on the impact of land use change on urban land surface thermal environment in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

SUN Shuo¹, LI Jun^{1,2}, WANG Yixu¹, YAO Lei¹

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China;

2. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In recent years, the acceleration of urbanization has led to the change of the nature of urban underlying surface and the increase of man-made heat sources, leading to the continuous deterioration of urban agglomeration thermal environment. In order to explore the relationship between land use change in urban agglomeration and urban surface thermal environment, based on MODIS surface temperature products and land use data, this paper analyzes the temporal and spatial characteristics of land use/cover and surface thermal environment in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, and analyzes the thermal contribution of different land use/cover types and the correlation between different land use and surface temperature. The above analysis is used to quantitatively characterize the thermal environmental effects caused by land use changes. The main research results are as follows. ①The construction land of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration increased significantly from 2000 to 2015, and the urbanization process was of significance. ②From 2000 to 2015, the temperature of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration was low in the northwest and high in the southeast; with the ultra-high temperature zone as the center, the temperature decreases in all directions, the areas with similar temperatures showed a concentrated state, the temperature changed with time, and the fragmentation of the partitions is reduced. ③Land use changes have a significant impact on the surface thermal environment. Construction land and cultivated land have a significant positive correlation with surface temperature, and green land has a significant negative correlation with surface temperature.

收稿日期: 2021-04-06; 网络出版日期: 2021-11-20

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20211118.2149.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42171094, 41701206); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2017BD011)

第一作者: 孙硕,男,硕士生,研究方向为地理信息系统技术与应用。E-mail: sdnu_ss@163.com

通信作者: 姚磊,男,博士,副教授,研究方向为地理信息系统技术与应用。E-mail: alex_yaolei@126.com

Key words: land surface thermal environment; land use change; temporal-spatial pattern; contribution of thermal effect

城市空间热环境状况是城市空间环境在热力场中的综合体现,其演变过程与人类活动有着密切联系^[1-2]。近年来,随着经济的快速发展,城市化进程不断加快,在提高了人民生活水平的同时,也引发了城市下垫面性质的改变和人为热源的增加,导致了大气污染、生态失衡、城市热岛等一系列的生态环境问题^[3-5]。其中,以热岛效应为主要表现的城市空间热环境恶化已成为全球气候变化和生态环境问题的显著特征之一,并对城市人居环境质量和生态系统结构造成了严重的影响^[6-8]。

根据《2012 中国新型城市化报告》,1992 年至 2016 年,中国城市化处于快速发展阶段^[9]。都市圈、城市群、城市带和中心城市的发展也标志着城市化水平的提高。与此同时,由城市化引发的城市热岛效应也在进一步加剧^[10]。当前,国内外学者采用了多种方法对不同研究区的城市空间热环境开展了大量研究,探讨了城市空间热环境的形成机制和城市热岛的缓解方法等,这对改善城市生态环境质量和促进可持续发展具有重要的理论和现实意义^[11-14]。

1833 年,Lake Howard^[15]首次在《伦敦气象》杂志中提出了城市气温高于郊区气温的现象。随后在 1958 年,Manley^[16]提出了“城市热岛”的概念。此后,国内外学者针对城市热岛效应开展了一系列研究。城市热岛效应是指城市温度高于周边郊区温度,在建筑物密集、人为热量释放较多的中心城区形成明显高温区的现象^[17-19]。之后,相关学者在城市热岛效应概念的基础上,进一步提出了城市空间热环境的概念,将关于城乡温度差异的研究扩展到了包括城市边界层、冠层和地表层在内的城市生态、物理环境中的热场状况的研究^[2,20-21]。土地利用作为影响下垫面性质的主要因素,与地表温度的分布具有密切关系,而快速的城市化进程导致城区的土地利用/覆被类型发生了较大变化,主要表现为建设用地面积和密度的增加,由沥青、水泥等材料构成的不透水面面积增大等,这严重影响了地表的热量平衡,是地表热环境的主要驱动力之一。很多研究基于土地利用/覆被数据,来探讨景观格局对城市热环境的影响。不同大小和形状的景观要素在城市内部排列组合,形成了一定的景观格局,影响着城市生态过程^[22]。谢启姣等^[23]从斑块、斑块类型、景观水平 3 个方面选取了常见的景观指数,划分了规则格网,对各景观指数与地表温度进行主成分回归分析,发现

大部分景观指数与地表温度具有显著相关性,且景观指数之间信息交叉严重。黄丽明等^[24]引入重心转移指数,研究了广州市花都区的热力重心与建设用地重心变化的关系,并基于移动窗口计算景观指数,分析其与地表温度的相关性,研究结果表明,热岛效应随建设用地的扩张而增强,且景观格局多样性与地表温度关系密切。大量研究表明,不同的景观格局对热环境的影响程度不同,合理的景观配置可以有效降低地表温度。因此,定量分析不同土地利用/覆被类型与地表温度的相关关系及其对地表热环境的贡献程度,对缓解城市热环境问题具有重要意义。

地表温度数据和大气温度数据是城市空间热环境研究的主要数据来源,前者主要通过遥感数据反演获得,后者主要为气象数据^[25-27]。早期对热岛效应的研究主要依靠大气温度数据,研究对象实际是城市大气热岛,主要包括城市边界层和城市冠层热岛;随着热红外遥感技术的发展,地表温度数据逐渐取代了大气温度数据,成为了城市空间热环境研究的主要数据源,主要研究范围也由城市大气热岛转变为城市地表层热岛^[28]。

相对于城市大气热环境,地表热环境能更好地反映城市地表辐射以及热量平衡,因此,本文基于遥感反演的地表温度数据,以京津冀城市群为研究区,主要探讨城市群整体和各地市地表热环境的时空分布及变化特征、土地利用/覆被时空变化特征及其热环境效应,分析不同土地利用类型与热环境的相关关系并计算热效应贡献度,以期为城市规划提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本文研究区域为京津冀地区,位于东经 113°52′~119°49′,北纬 36°15′~42°34′,地势由西北向东南倾斜,西北高东南低。该地区属温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,春季干旱少雨、夏季炎热多雨。京津冀城市群以首都为中心,是中国七大城市群之一,包括北京市、天津市和河北省的邯郸市、邢台市、衡水市、石家庄市、保定市、沧州市、廊坊市、香河县、秦皇岛市、唐山市、张家口市和承德市,共 14 个城区(其中香河县隶属于河北省廊坊市),总面积约 $2.1 \times 10^5 \text{ km}^2$,占国土面积的 2.26%,如图 1 所示。

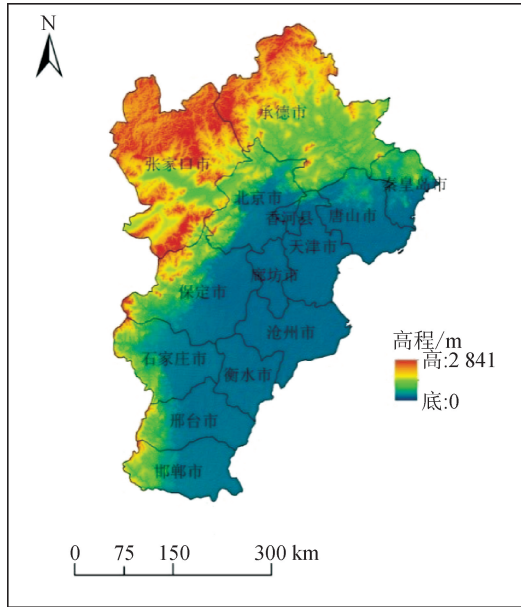


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

京津冀城市群是中国北方经济规模最大的城市群,城市化发展迅速,城区总面积由1990年的2 010.82 km²增加到了2015年的4 339.68 km²^[29-30],

表1 2000—2015年京津冀城市群土地利用/覆被类型面积及比例

Tab.1 Land use/cover type area and proportion of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2000 to 2015

土地利用/ 覆被类型	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	面积/ (10 ³ km ²)	比例/%	面积/ (10 ³ km ²)	比例/%	面积/ (10 ³ km ²)	比例/%	面积/ (10 ³ km ²)	比例/%
林地	70.31	32.52	71.14	32.91	71.60	33.12	70.79	32.74
草地	18.84	8.72	19.74	9.13	19.96	9.23	19.03	8.80
湿地	6.92	3.20	6.73	3.11	6.27	2.91	6.11	2.83
耕地	101.63	47.01	98.47	45.55	96.01	44.41	93.55	43.27
建设用地	17.86	8.26	19.53	9.03	21.65	10.01	26.05	12.05
其他	0.63	0.29	0.58	0.27	0.70	0.32	0.66	0.31
总计	216.19	100	216.19	100	216.19	100	216.19	100

1.3 研究方法

1.3.1 年均地表温度与分级

1) 全区及各地市年均地表温度计算。为满足本研究需要,需对地表温度产品进行年度合成,基于每年46份(见表2)8天合成温度的计算结果^[31],逐像元计算2000年、2005年、2010年、2015年每年的平均温度值,并对各地市的年均地表温度进行了分区统计。

2) 地表温度分级。采用均值-标准差法,以地

地表热环境问题日益突出。作为当前中国三大发展战略之一“京津冀协同发展”的核心区,京津冀城市群战略意义重大,深入研究其地表热环境的时空格局及其与土地利用的相互作用机理,对因地制宜地指导国土空间规划、缓解城市热环境问题具有重要意义。

1.2 数据来源

1.2.1 地表温度数据

采用的地表温度数据是由美国国家航空航天局NASA提供的MODIS地表温度数据(MODIS Land Surface Temperature),分析时段为2000—2015年。选用搭载在Terra卫星上的地表温度8天合成产品(MOD11A2)。

1.2.2 土地利用/覆被数据

基于Landsat TM影像,采用最大似然分类方法,解译得到2000年、2005年、2010年和2015年4期土地利用/覆被数据,包括林地、草地、湿地、耕地、建设用地和其他共6个地类,分类精度达到94.2%,满足研究的基本要求,空间分辨率为30 m,不同年份的面积及比例如表1所示。

表温度相对于平均温度的偏离程度为依据进行温度等级的划分。首先对温度进行归一化处理,计算公式为:

$$T_i = \frac{T_{i0} - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (1)$$

式中: T_i 为第 i 个像元归一化后的温度值; T_{i0} 为第 i 个像元的原始温度值; $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别为京津冀城市群地表温度的最大值和最小值。

使用归一化后的像元均值和标准差进行地表温度等级的划分,将京津冀城市群地表温度划分为特

高温区、高温区、次高温区、中温区、次中温区和低温区 6 个等级^[30],具体划分标准如表 3 所示。

表 2 数据编号与时间对应表

Tab. 2 Data number and time corresponding table

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
数据编号	001	033	065	089	121	153	185	217	241	273	305	337
	009	041	073	097	129	161	193	225	249	281	313	345
	017	049	081	105	137	169	201	233	257	289	321	353
	025	057		113	145	177	209		265	297	329	361

表 3 地表温度等级划分标准

Tab. 3 Standard for classification of surface temperature

温度等级	温度范围
特高温区	$T_i < T_{\text{mean}} + T_s$
高温区	$T_{\text{mean}} + 0.5T_s < T_i \leq T_{\text{mean}} + T_s$
次高温区	$T_{\text{mean}} < T_i \leq T_{\text{mean}} + 0.5T_s$
中温区	$T_{\text{mean}} - 0.5T_s < T_i \leq T_{\text{mean}}$
次中温区	$T_{\text{mean}} - T_s < T_i \leq T_{\text{mean}} - 0.5T_s$
低温区	$T_i < T_{\text{mean}} - T_s$

注: T_i 、 T_{mean} 和 T_s 分别为归一化后的像元值、平均值和标准差。

1.3.2 土地利用/覆被转移矩阵

土地利用转移矩阵反映了一定区域在一定时期内不同土地利用类型的转移方向和转移数量^[32],通用形式为:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: n 代表土地利用类型的数量; S_{ij} 代表由 i 地类转化为 j 地类的面积($i, j=1, 2, \cdots, n$)。

1.3.3 土地利用/覆被热效应贡献度

热效应贡献度是指不同的土地利用/覆被类型对区域平均温度的影响程度,即对区域温度的贡献度,用某种土地利用/覆被类型的面积比例与该地类的温度距平值(该地类平均温度和区域平均温度的差值)的乘积来表示^[32]。热效应贡献度的正负分别代表升温 and 降温作用,绝对值的大小则代表升温 and 降温的强度。计算公式为:

$$H_i = \frac{S_i}{S} \times (T_i - T) \quad (3)$$

式中: H_i 代表 i 地类的热效应贡献度; S_i 和 T_i 分别代表 i 地类的面积和平均温度; S 和 T 分别代表整

个区域的总面积和平均温度。

2 结果与分析

2.1 土地利用/覆被时空格局分析

2.1.1 土地利用/覆被时空变化特征

由图 2 可知,在空间分布上,建设用地主要集中在分布在各地市的中心城区,而且在北京市、天津市、唐山市和石家庄市分布最为集中,所占面积最大,在其他地市分布较为破碎,并未出现大范围集中成片现象;耕地分布范围最广,所占研究区面积最大,大部分分布在华北平原,位于研究区中部和东南部,覆盖了东部滨海发展区、中部核心功能区和南部功能扩展区;林地主要分布在燕山和太行山脉,位于西北部生态涵养区;草地主要分布于张家口市西部以及环绕在林地周围;湿地面积较小,主要分布于渤海湾沿岸、天津市海河沿岸、北部于桥水库和南部北大港水库、北京市东北部密云水库和西北部官厅水库以及保定市东部;其他用地类型面积积极小,主要分布在张家口市西部和承德市西北部,包括稀疏林草地和裸地等。

对比 4 期土地利用/覆被分布图发现,建设用地的扩张在全区范围内均较为明显,且多数由耕地转化而来,北京市和天津市的城区扩张尤为显著,各地市建设用地主要在原有主城区的基础上进行扩张,这在不同程度上形成了新的建设用地斑块。

同时,为定量表征 2000—2015 年京津冀城市群各土地利用/覆被类型的变化特征及转化方向,基于 4 期土地利用/覆被数据,构建土地利用/覆被转移矩阵(见表 4)。总体来看,2000—2015 年,京津冀城市群土地利用/覆被变化方式主要以耕地减少和建设用地扩张为主,且主要转移方向为耕地→建设用地、耕地→林地、耕地→草地、耕地→湿地、草地→林地、草地→建设用地、林地→建设用地、湿地→建设用地。另外,林地、草地和湿地间均存在不同程度的相互转化。

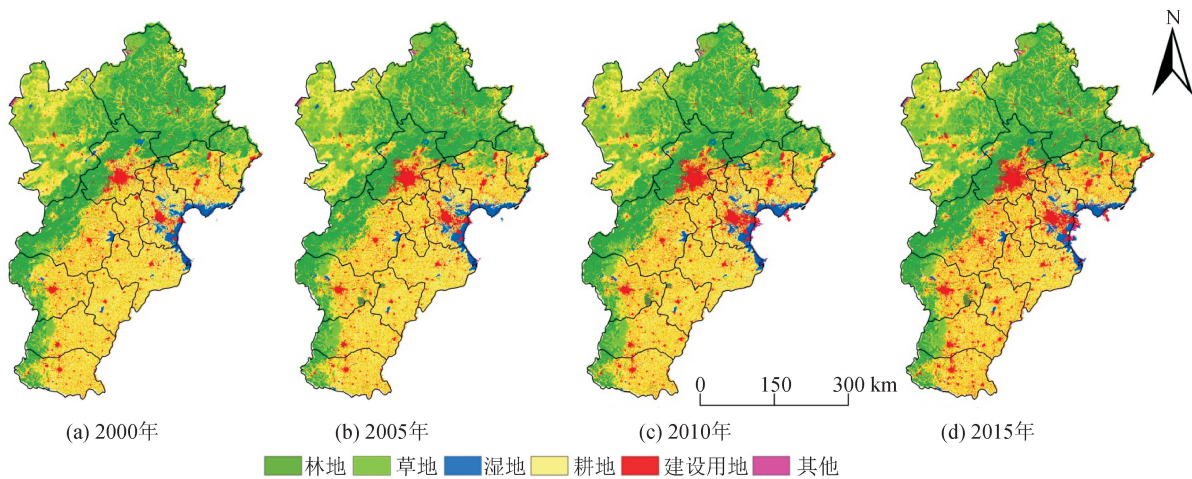


图 2 2000—2015 年京津冀城市群土地利用/覆被空间分布图
Fig. 2 Spatial distribution map of land use/cover in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2000 to 2015

表 4 2000—2015 年京津冀城市群土地利用/覆被转移矩阵

Tab. 4 Land use/cover transfer matrix of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2000 to 2015

土地利用/ 覆被类型	2000—2015 年转移量/km ²						转出量
	林地	草地	湿地	耕地	建设用地	其他	
林地		170.59	38.73	876.63	419.42	7.50	1 512.87
草地	516.92		52.65	622.44	468.17	10.41	1 670.59
湿地	50.50	122.03		336.41	425.48	59.21	993.63
耕地	1 334.24	1 465.32	452.99		6 863.64	30.98	10 147.17
建设用地	78.94	70.83	31.99	264.07		2.89	448.72
其他	8.89	25.05	25.85	17.77	43.27		120.83
转入量	1 989.49	1 853.82	602.21	2 117.32	8 219.98	110.99	0

2.1.2 各地市土地利用/覆被时空变化特征

为了进一步分析京津冀城市群中各地市的土地利用/覆被结构及其变化特征,结合不同土地利用/覆被类型对地表热环境的影响程度,将林地、草地、湿地和其他土地统一划归为绿地,将土地利用/覆被重新划分为建设用地、绿地和耕地三大类,计算 2000 年各地市各土地利用/覆被类型所占面积(见图 3)。京津冀城市群中建设用地面积最大的是北京市,保定市次之;绿地面积最大的是承德市,张家口市次之;耕地面积最大的是张家口市,沧州市次之。天津市、唐山市、石家庄市、邯郸市和邢台市的土地利用/覆被结构及各土地利用/覆被类型所占面积基本一致,均为耕地面积最大,绿地面积次之,建设用地面积最小。沧州市、衡水市和廊坊市土地利用/覆被结构相似,均为耕地面积大于建设用地面积,绿地面积均较小。保定市绿地和耕地所占面积相近,且三类土地利用/覆被类型面积均较大。秦皇岛市各土地利用/覆被类型面积均较小,市内林地面积比例最大。

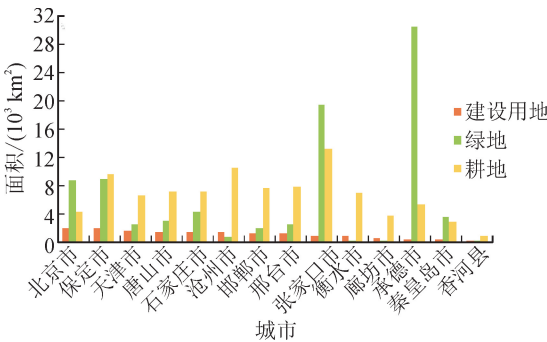


图 3 2000 年各地市各土地利用/覆被类型所占面积柱形图
Fig. 3 Bar chart of area occupied by land use/cover type in each city in 2000

2.2 热环境时空格局分析

2.2.1 热环境时空分布特征

根据温度分级结果,制作温度等级分布图(见图 4),以定量描述京津冀地区地表温度的时空变化特征。如图 4 所示,低温区主要分布在承德市全区和张家口市北部,随着时间增长,承德市北部的低温区破碎度降低,逐渐连接成片;次中温区分布在低温区周

围,且随时间增长,面积逐渐增大,至 2015 年几乎覆盖了承德市南部、张家口市东北部和西北部地区;中温区主要分布在北京市西南部和保定市西部,在张家口市、秦皇岛市和唐山市也有零散分布,中温区面积总体呈减少趋势,2010—2015 年,张家口市西北部的中温区转变成低温区;次高温区主要分布在唐山市、秦皇岛市、香河县、保定市中部和石家庄市东

部,面积呈减少趋势,至 2015 年保定市中部和石家庄市东部的次高温区几乎全部转变为高温区;高温区主要分布在北京市东部、保定市东部和衡水市,高温区域逐年向外扩张;特高温区主要分布在廊坊市、沧州市、保定市、石家庄市、邢台市和邯郸市的中心城区,2005 年和 2010 年廊坊市和沧州市的特高温区面积较 2000 年有所减少,至 2015 年又有所增加。

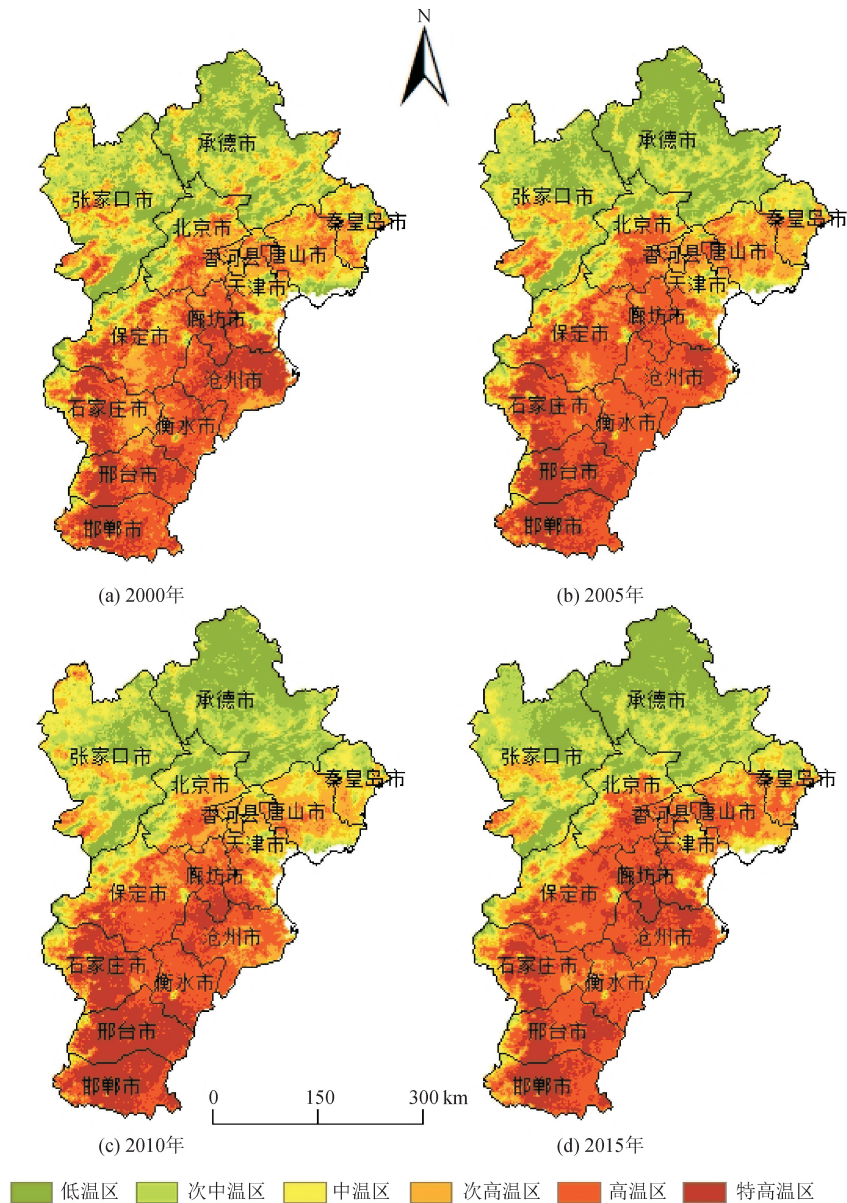


图 4 2000—2015 年京津冀城市群温度等级分布图

Fig. 4 Temperature grade distribution map of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2000 to 2015

综上所述,京津冀城市群的温度自北向南呈增加趋势,且南部温差有所降低,全区温差有所升高;各温度分区的破碎度均有所降低,以特高温区为中心,温度向四周递减,温度相近的区域呈集聚状态^[31,33]。

同时,统计不同温度分区所占面积(见图 5),定

量分析 2000—2015 年不同温度分区的面积变化。2000 年各温度分区的面积由大到小依次为:次中温区、中温区、特高温区、次高温区、低温区、高温区;2005 年各温度分区的面积由大到小依次为:次中温区、特高温区、中温区、高温区、低温区、次高温区;2010 年各温度分区的面积由大到小依次为:次中温

区、特高温区、中温区、低温区、高温区、次高温区;2015年各温度分区的面积由大到小依次为:次中温区、特高温区、高温区、低温区、中温区、次高温区。

在4个年份中,京津冀城市群的次中温区面积均为最大,特高温区和次中温区面积在一定程度的波动下最终都有所增加,高温区面积持续增加,次高温区和中温区面积在一定程度的波动下最终都有所减少,低温区面积在多年的波动下最终无明显变化。

总体而言,16年来温度等级变化的总体趋势为次高温区和中温区向特高温区、高温区和次中温区转化,说明2000—2015年京津冀城市群的地表温度值分布明显向高温和低温集中,中温区域大幅减少,全区温差在逐渐增大。

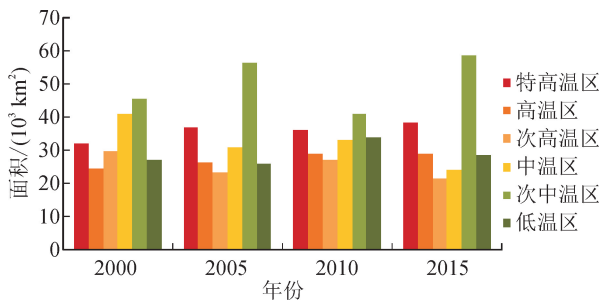


图5 2000—2015年京津冀城市群不同温度分区所占面积柱形图

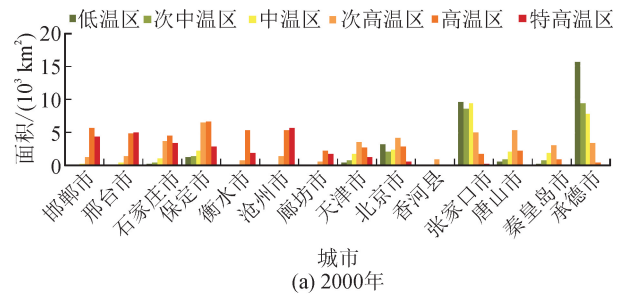
Fig. 5 Bar chart of area occupied by different temperature zones of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2000 to 2015

2.2.2 各地市热环境时空变化特征

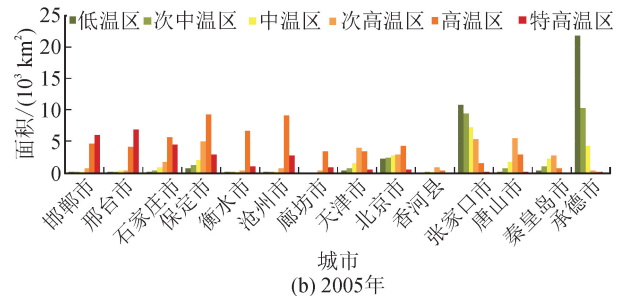
为进一步分析2000—2015年各地市内部的温度变化情况,统计各地市不同温度等级所占面积,制作柱形图(见图6)。

由图6可知,京津冀全区的低温区将近一半都分布在承德市,且在承德市的土地利用/覆被中占有较大比例,并逐年增加,2000年承德市分布有次高温区、高温区和特高温区,至2015年,次高温区面积由3 313 km²减少为225 km²,已不存在高温区和特高温区,说明承德市温度呈下降趋势;张家口市低温区、次中温区和中温区面积较大,中温区面积波动较大,低温区和次中温区面积有小幅增减;北京市各温度分区面积比例相近,特高温区和高温区面积有所增加;保定市各温度分区面积呈近似的正态分布,高温区面积持续增加,特高温区面积有小幅增加,次高温区面积有所减少;秦皇岛市中温区和次中温区面积有所减少,高温区面积增加,并于2015年出现了特高温区;邯郸市和邢台市主要以特高温区和高温区为主,其他温度分区占比较小,至2010年特高温区面积明显增加,高温区面积有所减小,至2015年

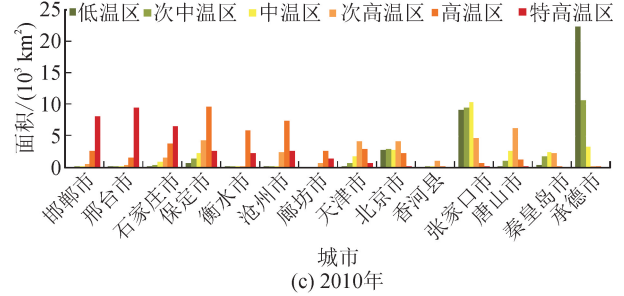
两者面积又呈相近状态;沧州市主要以高温区为主,特高温区在2000年时面积较大,之后在不断波动中有所缩减;香河县的主要温度分区由次高温区转变成了高温区,其他温度分区面积积极小;廊坊市只分布有次高温区及特高温区,且次高温区面积减少,特高温区面积增加;石家庄市次高温区面积持续减少,高温区和特高温区面积有所增加;衡水市主要以高温区为主,其他温度分区面积较小,且波动较小;天津市低温区面积减少,高温区面积增加;唐山市次高温区面积比重最大,低温区和中温区面积减少,2010—2015年高温区面积明显增加。



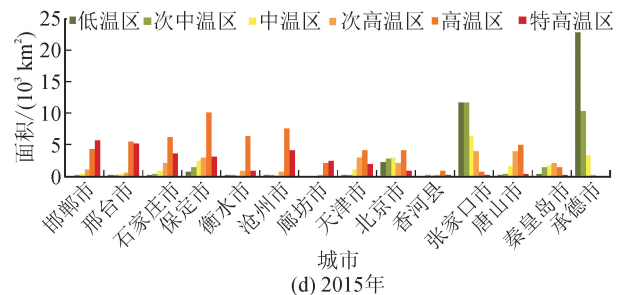
(a) 2000年



(b) 2005年



(c) 2010年



(d) 2015年

图6 2000—2015年各地市不同温度分区所占面积柱形图

Fig. 6 Bar chart of the area occupied by different temperature zones in different cities from 2000 to 2015

综上所述,各地市温度分区的面积变化特征差

异较大,承德市明显降温,北京市、秦皇岛市、天津市和石家庄市明显升温,其他各地市在波动中呈小幅的升、降温,而全区平均温度有所升高,这与全区建设用地明显增加,不透水面面积增大有一定关系。由于研究区范围较大,各地市对全区地表温度的扰动较大,区域升温与降温在一定程度上相互抵消,导致研究区的温度多年来没有太大波动,整体的变化趋势不太明显。

2.3 土地利用/覆被变化的热环境效应分析

2.3.1 土地利用热环境贡献度及年际差异分析

通过分析土地利用/覆被和地表温度的时空分布特征,发现高温区域主要分布在中心城区和建设用地密集区域,低温区域主要分布在林地和草地区域。为进一步定量分析不同土地利用/覆被类型的升降温作用,基于 4 期土地利用/覆被和温度数据,计算了各土地利用/覆被类型的热效应贡献度(见表 5、表 6)。

表 5 2000 年和 2005 年京津冀城市群各土地利用类型的热效应贡献度

Tab. 5 Contribution of land use types to thermal effect in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in 2000 and 2005

土地利用/ 覆被类型	2000 年			2005 年		
	面积比/%	温度距平值/℃	热效应贡献度/℃	面积比/%	温度距平值/℃	热效应贡献度/℃
林地	32.52	-1.92	-0.624	32.91	-2.41	-0.793
草地	8.72	-0.65	-0.057	9.13	-0.98	-0.089
湿地	3.20	-0.86	-0.028	3.11	-0.83	-0.026
耕地	47.01	1.20	0.564	45.55	1.54	0.701
建设用地	8.26	1.61	0.133	9.03	2.14	0.193
其他	0.29	-0.86	-0.002	0.27	-1.83	-0.005

表 6 2010 年和 2015 年京津冀城市群各土地利用类型的热效应贡献度

Tab. 6 Contribution of land use types to thermal effect in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in 2010 and 2015

土地利用/ 覆被类型	2010 年			2015 年		
	面积比/%	温度距平值/℃	热效应贡献度/℃	面积比/%	温度距平值/℃	热效应贡献度/℃
林地	33.12	-2.62	-0.868	32.74	-2.87	-0.940
草地	9.23	-0.87	-0.080	8.80	-1.44	-0.127
湿地	2.91	-0.69	-0.020	2.83	-0.03	-0.001
耕地	44.41	1.66	0.737	43.27	1.76	0.762
建设用地	10.01	2.12	0.212	12.05	2.55	0.307
其他	0.32	-1.11	-0.004	0.31	-1.33	-0.004

根据热效应贡献度,建设用地和耕地具有升温作用,林地、草地、湿地和其他土地利用/覆被类型具有降温作用。

由表 5 和表 6 还可知,随时间变化,林地、草地、耕地、建设用地的温度距平值的绝对值越来越大,湿地的温度距平值的绝对值越来越小,这可能与各土地利用/覆被类型的破碎度变化有关,由土地利用/覆被的时空变化特征可知,相同类型的土地利用/覆被在空间上呈集聚状态,随时间增长,部分土地利用/覆被类型在空间上进一步整合,形成了更大的斑块,部分土地利用/覆被类型被分割成更小的斑块,密集度减小,导致不同土地利用/覆被类型对热环境的作用强度有所增加或减小。

由温度距平值可知,耕地对热环境的影响强度低于建设用地,但其贡献度却高于建设用地,这是由于全区内耕地面积远大于建设用地面积,说明土地利用/覆被对区域热环境的影响程度由其面积和强度共同决定。京津冀地区由四个天然农业区组成,其中耕地大多由一年一季的旱地组成,主要分布在北部山区和东部平原地区,而南部地区能达到一年两季或三季^[34],故大部分时间耕地的下垫面状态为裸露地表,因此会导致地面升温更快。

除 2015 年其他土地利用/覆被类型的热效应贡献度绝对值大于湿地,其他年份各土地利用/覆被类型的热效应贡献度绝对值由大到小依次为:林地、耕地、建设用地、草地、湿地、其他,说明耕地对全区

升温作用最强,而林地对全区的降温作用最强。多年来,除湿地贡献度降低外,其他土地利用/覆被类型的热效应贡献度均有所增加,其中林地和建设用地的面积和影响强度均有所增加,耕地面积虽有所减少,但其作用强度逐年增大,所以总体的热效应贡献度有所增加。

2.3.2 土地利用与地表温度的相关分析

根据各土地利用/覆被类型对热环境的贡献度,林地、草地、湿地和其他用地均有降温作用,湿地贡献度较小且面积变化较小,所以将林地、草地、湿地和其他用地统一划归为绿地,将土地利用/覆被重新划分为建设用地、绿地和耕地三大类。选取各地市的土地利用/覆被面积比例和地表温度数据,分别对地表温度与建设用地、绿地和耕地的面积比例,地表温度变化与建设用地、绿地和耕地面积比例的变化进行相关分析,并绘制各地市建设用地、绿地和耕地面积比例与地表温度的散点图及拟合曲线(见图7)。

对各地市建设用地的面积比例与年均地表温度进行相关分析,得出 Pearson 相关系数为 0.564,且在 0.01 水平上呈显著的正相关,结合二者的散点图和拟合曲线可知,建设用地面积比例越大,地表温度

越高。对各地市绿地的面积比例与年均地表温度进行相关分析,得出 Pearson 相关系数为 -0.795,且在 0.01 水平上呈显著的负相关,结合二者的散点图和拟合曲线可知,绿地面积比例越大,地表温度越低。对各地市耕地的面积比例与年均地表温度进行相关分析,得出 Pearson 相关系数为 0.759,且在 0.01 水平上呈显著的正相关,结合二者的散点图和拟合曲线可知,耕地面积比例越大,地表温度越高。

对各地市建设用地的面积比例变化与年均地表温度变化进行相关分析,得出 Pearson 相关系数为 0.448,且在 0.01 水平上呈显著的正相关,即在一定程度上,建设用地面积变化量越大,温度变化幅度就越大。而由二者的散点图和拟合曲线可知,在建设用地面积比例增量低于 1% 时,年均地表温度呈下降趋势,且随建设用地面积比例增量的增大,降温幅度下降,部分原因在于当建设用地面积比例增量小于 1% 时,其增温作用低于其他土地利用/覆被类型的降温作用,使得温度整体有所下降。各地市耕地和绿地的面积比例变化与年均地表温度变化没有显著的相关关系。

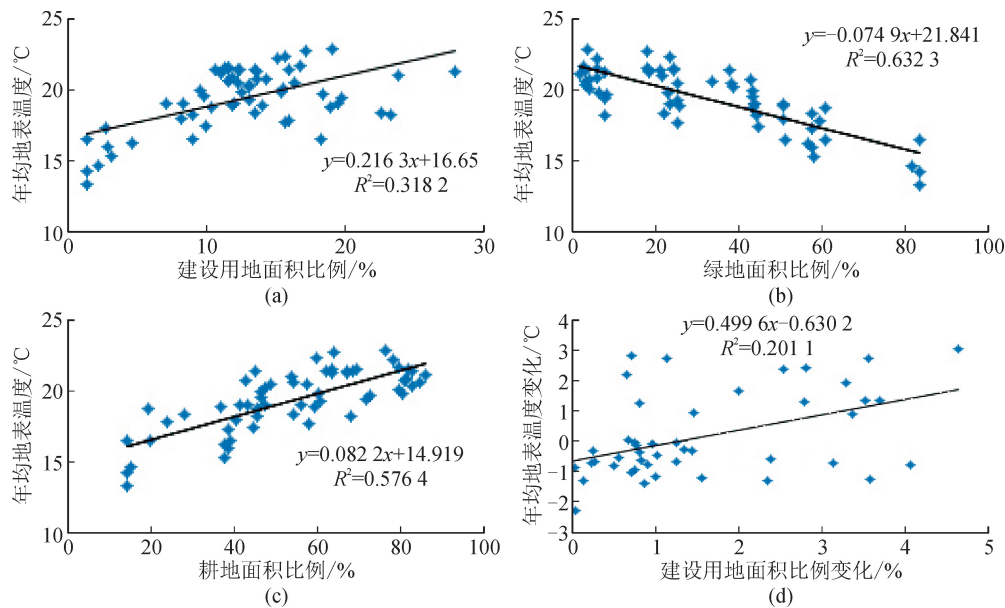


图7 各地市土地利用与地表温度变化散点图

Fig. 7 Scatter plot of land use and land surface temperature change in different cities

2.3.3 土地利用/覆被结构及其变化对温度的影响分析

制作各地市建设用地、绿地、耕地面积变化与地表温度变化的空间分布图(见图8),进一步探讨各地市内部土地利用/覆被结构及其变化对地表温度的影响。

如图8所示,2000—2015年,研究区内耕地转

出量大部分转化为建设用地,对比地表温度变化图,地表温度升高幅度最大的也正是这些区域,说明建设用地扩张是区域升温的主导因素。其他土地利用/覆被相互转化的斑块面积及范围较小,与地表温度变化的关系不太明显。土地利用/覆被类型基本不变的区域,其地表温度也保持相对稳定状态。图中没有体现出林地、草地和湿地的相互转化,因此难

以进一步地解释西北部的降温现象。

综上所述,各地市的温度变化都在较大程度上取决于其建设用地和绿地的面积变化,建设用地的

扩张使大部分地区的温度有所上升,而绿地对城市的降温作用非常明显。

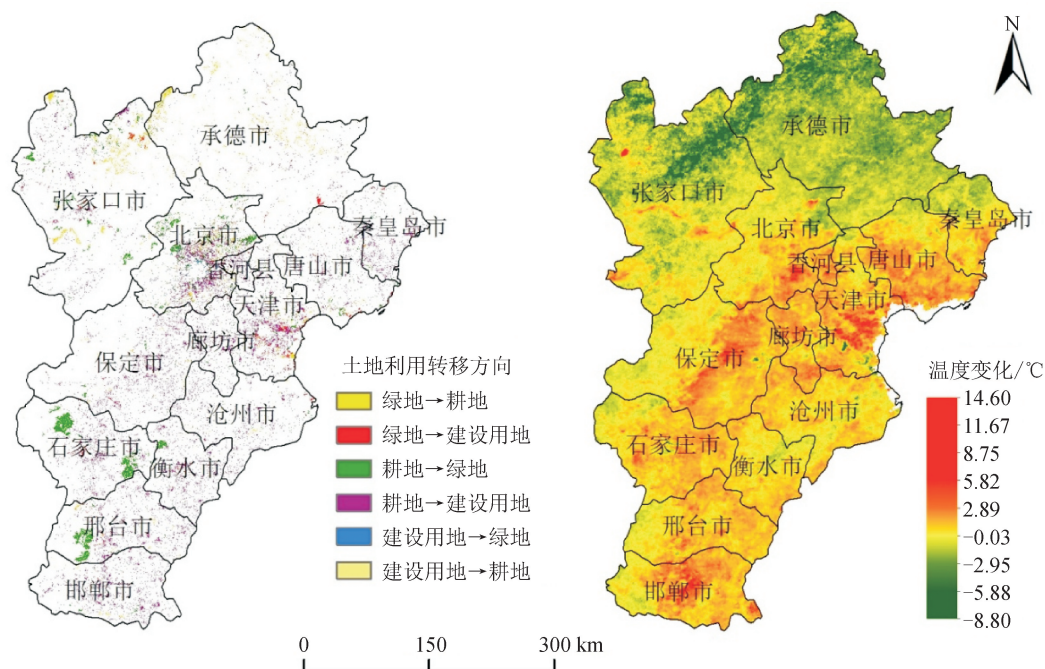


图 8 2000—2015 年京津冀城市群地表温度变化和土地利用/覆被变化空间分布图

Fig. 8 Spatial distribution of land surface temperature change and land use/cover change in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2000 to 2015

3 结 论

本文旨在研究长时间序列下京津冀城市群土地利用和地表热环境的时空分布与变化特征,以探讨土地利用结构及其变化对地表温度变化的作用机理,可为缓解城市热环境问题提供参考依据。基于上述研究目的,利用 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年 4 期土地利用数据以及 MODIS 地表温度产品,分析了 2000—2015 年京津冀城市群土地利用/覆被的空间分布特征以及城市群地表热环境的空间分布状况;计算了不同土地利用/覆被类型的热效应贡献度指数,并在分析了建设用地、绿地和耕地与地表温度的相关关系的基础上,进一步对各地市的土地利用/覆被和温度变化特征进行了解释。

1) 土地利用/覆被的时空变化特征:①城市群土地利用/覆被类型以耕地和林地为主,其次是草地和建设用地,湿地和其他类型面积较小;其中耕地大部分分布在华北平原,林地主要分布在燕山和太行山脉,草地分布在林地周围,大部分建设用地集中在各地市的中心城区;②2000—2015 年京津冀城市群土地利用/覆被的变化方式以各土地利用类型向建设用地转化为主,其中来自耕地的转出量最大,占新

增建设用地面积的 83.50%。

2) 地表热环境的时空变化特征:①京津冀城市群西北部温度较低,东南部温度较高;以特高温区为中心,温度向四周递减,温度相近的区域呈集聚状态;②2000—2015 年,各温度等级区域的破碎度均有所降低。

3) 土地利用/覆被变化的热环境效应:①对比土地利用和地表温度空间分布图,发现高温区域主要分布在建设用地密集区域,低温区域主要分布在林地和草地区域;②根据土地利用的热效应贡献度,建设用地和耕地具有升温作用,林地、草地、湿地和其他类型土地具有降温作用,且影响强度由大到小依次为:林地、耕地、建设用地、草地、湿地、其他;多年来,除湿地贡献度(绝对值)降低外,其他土地利用/覆被类型的热效应贡献度(绝对值)均有所增加;③建设用地的扩张是城市群温度上升的主要原因之一,而林地、草地和湿地具有明显的降温作用,因此在城市发展过程中,应合理规划建设用地,加大绿化力度,从而有效缓解城市热环境问题。

本研究虽讨论了土地利用对地表热环境的作用机理,但因研究区范围较大,纬度跨度较大,各地市的温度差异也相对较大,其对全区的温度变化具有

很强的扰动性,未来可以在更小的空间尺度上,结合多个影响因子进行更深入的综合热环境效应研究。

参考文献:

- [1] 陈云浩,史培军,李晓兵. 基于遥感和 GIS 的上海城市空间热环境研究[J]. 测绘学报, 2002, 31(2):139-144.
CHEN Yunhao, SHI Peijun, LI Xiaobing. Research on spatial thermal environment in Shanghai city based on remote sensing and GIS [J]. Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica, 2002, 31(2):139-144.
- [2] 姚远,陈曦,钱静. 城市地表热环境研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(3):1134-1147.
YAO Yuan, CHEN Xi, QIAN Jing. Research progress on the thermal environment of the urban surfaces[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 1134-1147.
- [3] 葛荣凤,王京丽,张力小,等. 北京市城市化进程中热环境响应[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6040-6049.
GE Rongfeng, WANG Jingli, ZHANG Lixiao, et al. Impacts of urbanization on the urban thermal environment in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19):6040-6049.
- [4] 胡鞍钢. 城市化是今后中国经济发展的主要推动力[J]. 中国人口科学, 2003(6): 5-12.
HU An'gang. Urbanization as an engine of China's economic growth [J]. Population Science of China, 2003(6): 5-12.
- [5] 冯悦怡,胡潭高,张力小. 城市公园景观空间结构对其热环境效应的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3179-3187.
FENG Yueyi, HU Tan'gao, ZHANG Lixiao. Impacts of structure characteristics on the thermal environment effect of city parks[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12):3179-3187.
- [6] OOKA R. Recent development of assessment tools for urban climate and heat-island investigation especially based on experiences in Japan[J]. International Journal of Climatology, 2007, 27:1919-1930.
- [7] 蔡智,梁雪君. 城市建设强度的热环境效应[C]//共享与品质——2018 中国城市规划年会论文集(08 城市生态规划), 2018:10.
CAI Zhi, LIANG Xuejun. Thermal environmental effects of urban construction intensity[C]// Sharing and Quality - Proceedings of the 2018 China Urban Planning Annual Conference (08 Urban Ecological Planning), 2018:10.
- [8] 刘耀彬,李仁东,宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析[J]. 地理学报, 2005, 60(2):237-247.
LIU Yaobin, LI Rendong, SONG Xuefeng. Grey associative analysis of regional urbanization and eco-environment coupling in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(2):237-247.
- [9] 牛文元. 中国新型城市化报告[M]. 北京:科学出版社, 2016.
- [10] WANG Y, XU M, LI J, et al. The gradient effect on the relationship between the underlying factor and land surface temperature in large urbanized region [J]. Land, 2020, 10(1): 1-16.
- [11] 杨浩,王子羿,王婧,等. 京津冀城市群土地利用变化对热环境的影响研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(11): 1912-1925.
YANG Hao, WANG Ziyi, WANG Jing, et al. Study on the influence of land use change on the thermal environment in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(11): 1912-1925.
- [12] 徐涵秋. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析[J]. 生态学报, 2011, 31(14):3890-3901.
XU Hanqiu. Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(14): 3890-3901.
- [13] YAO L, LI T, XU M, et al. How the landscape features of urban green space impact seasonal land surface temperatures at a city-block-scale: an urban heat island study in Beijing, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 52:126704.
- [14] KONOPACKI S, AKBARI H. Energy savings for heat-island reduction strategies in Chicago and Houston (including updates for Baton Rouge, Sacramento, and Salt Lake City) [J]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2002:1-51.
- [15] HOWARD L. The climate of London, deduced from meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis. Vol. I. [M]. London: Harvey and Darton, 1833.
- [16] MANLEY G. On the frequency of snowfall in metropolitan England[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1958, 84(359):70-72.
- [17] OKE T R. The energetic basis of the urban heat island [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982, 108(455):1-24.
- [18] 彭少麟,周凯,叶有华,等. 城市热岛效应研究进展[J]. 生态环境学报, 2005, 14(4):574-579.
PENG Shaolin, ZHOU Kai, YE Youhua, et al. Research progress in urban heat island[J]. Ecology and Environment, 2005, 14(4):574-579.
- [19] 乔治,田光进. 基于 MODIS 的 2001 年—2012 年北京热岛足迹及容量动态监测[J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 476-484.
QIAO Zhi, TIAN Guangjin. Dynamic monitoring of the footprint and capacity for urban heat island in Beijing between 2001 and 2012 based on MODIS [J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(3):476-484.
- [20] 杨玉华,徐祥德,翁永辉. 北京城市边界层热岛的日变化周期模拟[J]. 应用气象学报, 2003, 14(1):61-68.
YANG Yuhua, XU Xiangde, WENG Yonghui. Simulation of daily cycle of boundary layer heat island in Beijing[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2003, 14(1):61-68.

- [21] 郭宇,王宏伟,张喆,等.南京市热环境与地表覆被的时空尺度效应及驱动机制研究[J].生态环境学报,2020,29(7):1403-1411.
GUO Yu, WANG Hongwei, ZHANG Zhe, et al. Spatio-temporal scale effect and driving mechanism of thermal environment and land surface cover in Nanjing[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(7):1403-1411.
- [22] 陈爱莲,孙然好,陈利顶.基于景观格局的城市热岛研究进展[J].生态学报,2012,32(14):4553-4565.
CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding. Studies on urban heat island from a landscape pattern view: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(14): 4553-4565.
- [23] 谢启姣,段吕晗,汪正祥.夏季城市景观格局对热场空间分布的影响——以武汉为例[J].长江流域资源与环境,2018,27(8):1735-1744.
XIE Qijiao, DUAN Lühan, WANG Zhengxiang. Impact of urban landscape pattern on spatial distribution of thermal field in summer: a case study of Wuhan[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(8):1735-1744.
- [24] 黄丽明,陈健飞.城市景观格局时空特征的热环境效应研究——以广州市花都区为例[J].自然资源学报,2015,30(3):480-490.
HUANG Liming, CHEN Jianfei. Study on thermal environment effect of urban landscape pattern: a case study on Huadu district, Guangzhou[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(3):480-490.
- [25] 历华,曾永年,负培东,等.利用多源遥感数据反演城市地表温度[J].遥感学报,2007,11(6):891-898.
LI Hua, ZENG Yongnian, YUN Peidong, et al. Study on retrieval urban land surface temperature with multi-source remote sensing data[J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(6):891-898.
- [26] 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.
XIE Zheyu, HUANG Ting, LI Yajing, et al. Study on the relationship between spatial-temporal evolution of land use and of urban heat environment in Nanchang[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(S1):241-248.
- [27] 曾侠,钱光明,潘蔚娟.珠江三角洲城市群城市热岛效应初步研究[J].气象,2004,30(10):12-16.
ZENG Xia, QIAN Guangming, PAN Weijuan. Study on urban heat island effect in Pearl River Delta urban group[J]. Meteorological Monthly, 2004, 30(10): 12-16.
- [28] GUTENBERG P. Bulletin of the American meteorological society[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(9):1424-1425.
- [29] 宁晓刚,王浩,林祥国,等.京津冀城市群1990—2015年城区时空扩展监测与分析[J].测绘学报,2018,47(9):1207-1215.
NING Xiaogang, WANG Hao, LIN Xiangguo, et al. Spatio-temporal urban sprawl monitoring and analysis over Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration during 1990-2015[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(9):1207-1215.
- [30] 徐明雪,李君,姚磊,等.多尺度下京津冀地区地表热环境与景观变化的关系分析[J].西安理工大学学报,2021,37(1):43-52.
XU Mingxue, LI Jun, YAO Lei, et al. Analysis of the relationship between surface thermal environment and landscape change in Beijing-Tianjin-Hebei region under multiple scales[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2021, 37(1):43-52.
- [31] 孙宗耀.土地利用时空格局对城市热环境的影响研究[D].济南:山东师范大学,2018.
SUN Zongyao. Study on the influence of land use spatio-temporal pattern on urban thermal environment[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2018.
- [32] 刘璐,申广荣,吴裕,等.城市化进程中县域土地利用类型的转移特征及其对热环境的影响[J].水土保持通报,2019,39(6):260-266.
LIU Lu, SHEN Guangrong, WU Yu, et al. Characteristics of land use transfer and its influence on thermal environment in county-level urbanization[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 260-266.
- [33] CHEN M, ZHOU Y, HU M, et al. Influence of urban scale and urban expansion on the urban heat island effect in metropolitan areas: case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Remote Sensing, 2020, 12(21):3491.
- [34] WANG Lili, XIONG Qiulin, WU Gaofeng, et al. Spatio-temporal variation characteristics of PM_{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China, from 2013 to 2018[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(21): 4276-4286.

(责任编辑 周 蓓)