

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.01.006

多尺度下京津冀地区地表热环境与景观变化的关系分析

徐明雪¹, 李君², 姚磊¹, 吴泉源¹

(1. 山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250014; 2. 南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 基于 MODIS 地表温度数据和土地覆被数据, 分析了 2000—2015 年的京津冀地区景观时空变化和地表热环境效应演变规律, 按 1 km×1 km、5 km×5 km、10 km×10 km、15 km×15 km、20 km×20 km 五个空间尺度将京津冀地区进行网格划分, 定量分析多尺度下下垫面景观结构变化与地表温度的相关性。研究表明: ①2000—2015 年京津冀地区景观时空变化显著, 主要是由于耕地景观大面积转化为建筑用地景观。②2000—2015 年该地区地表热环境效应整体上逐渐增强, 空间格局变化中高温、次高温区明显增加。③林地和水体是抑制地表热效应的重要贡献源。④景观结构与地表温度的相关性随尺度变化而产生差异, 选择适宜的尺度合理配置各景观类型资源, 控制建设用地的增长速度可以有效地抑制京津冀地表热环境效应。

关键词: 京津冀地区; 地表温度; 景观; 尺度; 相关分析

中图分类号: X87

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)01-0043-10

Analysis of the relationship between surface thermal environment and landscape change in Beijing-Tianjin-Hebei Region under multiple scales

XU Mingxue¹, LI Jun², YAO Lei¹, WU Quanyuan¹

(1. Department of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China;

2. Department of Geographic Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Based on the MODIS surface temperature data and land cover data, the temporal and spatial changes of landscape and the evolution of surface thermal environment effects in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2000 to 2015 are analyzed. The study area is divided into several types of grids, i. e., 1 km×1 km, 5 km×5 km, 10 km×10 km, 15 km×15 km and 20 km×20 km, for analyzing the correlation between the changes in the underlying landscape structure and the surface temperature quantitatively in multiple scales. The results show that: ①From 2000 to 2015, the landscape of Beijing-Tianjin-Hebei Region changed significantly, mainly with a large area of cultivated land landscape transformed as construction land. ②The urban heat island effect of the study area is gradually enhanced, with a significant increase in the high and sub-high risk regions. ③Woodland performs as important contribution source to restrain surface thermal effect, as well as water body. ④The correlation between landscape structure and land surface temperature varies with the change of grid scales. Selecting appropriate scale to rationally allocate landscape pattern and controlling the scale of construction land can effectively restrain the urban heat island effect in Beijing-Tianjin-Hebei Region.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei Region; surface temperature; landscape; scale effect; correlation analysis

收稿日期: 2020-11-16; 网络出版日期: 2021-02-24

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20210224.1655.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41371395); 山东省重点研发计划资助项目(2019GSF109034)

第一作者: 徐明雪, 女, 硕士生, 研究方向为地理信息系统技术与应用。E-mail: xumingx1728@163.com

通信作者: 吴泉源, 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为地理信息系统技术与应用。E-mail: wqy6420582@163.com

随着城市化进程的推进,城市地表景观结构随土地利用变化而改变,由于不同景观类型的物理特性、热学特性和辐射特征存在巨大差异,从而引起地表温度的变化,导致不同的城市热环境效应^[1-3]。

目前,城市地表热环境的研究内容主要集中于地表温度反演^[4-6]、地表热环境时空动态^[7-9]、地表温度对景观格局变动的响应^[10-13]以及地表温度的影响机制^[14-15]等方面。地统计分析和多元统计分析应用于城市热环境的研究^[16-18],不仅能够反映影响因素对地表温度的影响,也可以表达因变量之间的关系。不同尺度对分析结果影响较大,即同一描述对象在不同尺度数据中表现的规律可能有很大的差别,对于某种目的的研究,存在比较适宜的地理数据尺度^[19-22]。目前,大多数研究从某一尺度上来探究景观类型变化与地表温度两者之间的关系^[23-26],多尺度范围上对其展开的研究比较匮乏,因此有必要进行多尺度分析,选择比较适宜的尺度。

京津冀地区是城市化水平较高,城市建设较为完善的地区,其城镇化发展导致该地区出现环境污染、生物多样性减少和城市热岛等一系列生态环境问题。张旻等^[27]结合夜间灯光数据和土地利用数据估算了京津冀地区各地级市城市热岛强度。陈彬辉等^[28]利用MODIS数据对京津冀地区城市热岛效应时空差异进行了研究。赵安周等^[29]基于MODIS-LST、EVI以及土地利用/覆盖数据,结合京津冀地区13个城市生长季来研究城市扩张对城市热岛效应的影响。综合前人研究,基于空间信息技术平台及相关分析等方法,研究2000—2015年京津冀地区景观结构和地表热环境的时空规律,并对多尺度下景观结构变化与地表热环境之间的关系展开讨论,可为京津冀地区区域规划、景观资源合理配置与生态系统优化、地表热环境效应调控措施的制定等提供理论依据。

1 研究区概况

京津冀地区(113°27′~119°50′E, 36°05′~42°05′N)作为研究区域,包括北京市、天津市和河北省地区,见图1。其位于华北平原,东临渤海,西临太行山,北靠燕山山脉。京津冀地区处于温带半湿润地区,为暖温带半湿润大陆性季风气候。该地区夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,春秋两季较短,四季分明。其中大部分的降水集中在夏季的6~8月。京津冀地区作为中国北方的经济中心,经历了巨大的经济增长和大规模的城市化,城市范围急剧扩大,从而导致土地利用发生了显著变化,使得城市热岛

效应日益严重,已成为京津冀地区可持续发展迫切需要解决的生态问题。

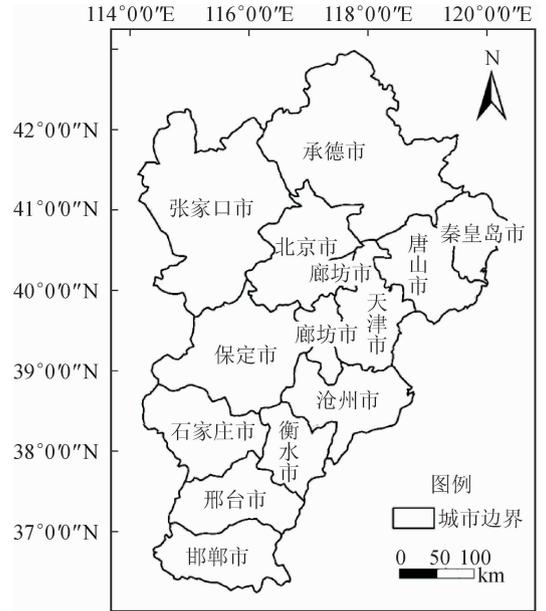


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

地表温度数据(Land Surface Temperature, LST)下载来自美国国家航空航天局NASA官方网站(<https://ladsweb.modaps.eos-dis.nasa.gov/search>)的MODIS MOD11A2地表温度产品,该产品包括白天地表温度和夜间地表温度,其为8天合成影像,空间分辨率为1 km。该温度产品是基于分裂窗算法通过反演获取的,数据误差小于1 K^[30-32]。本文选用2000年和2015年的6、7、8月京津冀地区白天地表温度数据,经过MRT、ArcGIS平台的拼接裁剪、投影和栅格计算等处理之后,最终得到2000年和2015年的京津冀地区夏季地表温度。

土地覆被数据来源于Landsat系列卫星遥感影像,选用2000年和2015年京津冀地区空间分辨率为30 m的遥感影像。根据《土地利用现状分类标准》(GB/T 21010-2007),利用监督分类方法中的最大似然法和目视解译将京津冀地区景观类型划分成林地、草地、水体、耕地、建设用地和其他用地等6类,基本涵盖了京津冀地区的主要景观类型。原始影像对照高分影像选取样本,分别在2000年、2015年的景观分类图上,每个地类各随机选取50个点(共100个),以相应年份遥感影像的目视解译结果为参照数据进行精度检验,2000年和2015年景观

分类图的分类精度分别为 90.36%、91.45%, Kappa 系数分别为 0.82、0.89, 满足了分类精度要求。

2.2 研究方法

2.2.1 数据格网化

地理学研究对象格局与研究过程、时空分布、耦合等特性都是尺度依存的, 即地理事物内部的某种关系可能只在其中某种尺度上才表现出来^[33]。利用 ArcGIS 10.2 软件的支持, 本文根据研究区面积以及现有数据的空间分辨率, 将研究区划分为 1 km×1 km、5 km×5 km、10 km×10 km、15 km×15 km、20 km×20 km 五个空间尺度, 其中 1~20 km 的空间尺度下创建的格网数分别为 198 603 个、8 262 个、2 149 个、1 010 个和 571 个, 进行景观类型与地表热环境的多尺度效应研究。

2.2.2 地表温度分级

目前探究地表热环境最常用的温度等级划分方法有自然断点法、温度正规化法、均值-标准差法等。本文采用均值-标准差法, 以京津冀地区地表温度 (LST) 平均值为基准, 通过与不同倍数标准差进行组合来区分阈值, 对 LST 等级进行划分。该方法具有在一定程度上减小背景差异影响的优势, 使不同时相的地表温度数据更具可比性^[34]。根据该方法将各年份夏季京津冀地区 LST 划分成 5 个温区, 即高温区、次高温区、中温区、次低温区和低温区, 见表 1。

表 1 均值-标准差法划分温度等级

Tab. 1 Mean-standard deviation method used to divide temperature grades

温度等级	划分区间
高温区	$T > u + std$
次高温区	$u + 0.5std < T \leq u + std$
中温区	$u - 0.5std < T \leq u + 0.5std$
次低温区	$u - std < T \leq u - 0.5std$
低温区	$T < u - std$

2.2.3 偏相关分析

为了使京津冀地区各景观类型及其变化与城市地表温度进行关联分析, 统计 1 km、5 km、10 km、15 km、20 km 格网单元下的各景观比例变化和平均地表温度变化, 以地表温度变化为因变量, 各景观类型变化比例为自变量。由于不同的覆被类型在城市地域之间交错分布, 本文以偏相关系数来定量揭示景观类型变化与地表温度变化的关系。

偏相关分析是指当两个变量同时与第三个变量有相关关系时, 剔除第三个变量的影响, 分析另外两个变量之间的净线性相关关系^[35-36]。其计算公式为:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (1)$$

式中: $r_{xy,z}$ 表示将变量 z 视为常数后, 变量 x 与 y 的偏相关系数; r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别表示 x 与 y 、 x 与 z 、 y 与 z 之间的相关系数。其中, 相关系数计算公式为^[37]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中: r_{xy} 表示 x 与 y 的相关系数, 范围在 $[-1, 1]$; x_i 表示第 i 个网格的变量值; y_i 表示第 i 个网格的变量值; \bar{x} 、 \bar{y} 分别表示 x_i 、 y_i 的平均值; i 表示网格数。

3 结果与讨论

3.1 京津冀地区的景观类型时序变化及转移趋势分析

图 2 表明, 2000—2015 年间, 随城市化和工业化的推动, 京津冀地区景观结构发生了变化, 其时空差异特征明显。其中, 2000 年的景观类型以林地和耕地景观为主, 建筑用地景观面积较小, 主要集中于北京市、天津市和河北省个别地区。2015 年, 京津冀地区林地和耕地景观面积仍最大, 但相较于 2000 年, 耕地面积明显缩减, 而建设用地在研究期间呈现快速增长趋势, 占全区的比重由 2000 年的 8.28% 增加到 2015 年的 12.05%, 成为面积仅次于林地和耕地的景观类型; 建筑用地面积在北京市、天津市区内并进一步扩大。研究期间水体的面积有所减少, 但变化相对较小。

分析 2000—2015 年京津冀地区景观类型的转化情况, 通过转移矩阵分析可揭示此期间京津冀地区景观时空演化规律, 见表 2。2000—2015 年间, 建筑用地的面积大幅度增加, 增加了 7 915.18 km², 其中主要是由耕地流向建筑用地, 转换的面积为 6 911.15 km², 耕地的面积剧烈缩减, 研究期间内共减少了 8 082.74 km²。同时, 有部分林地草地转化为耕地, 转化的面积比例分别是 1.26% 和 3.38%, 林地主要流向耕地和建筑用地, 转化的面积分别为 886.73 km² 和 421.44 km²。部分草地和耕地转化为林地, 耕地转化为林地的面积为 1 353.20 km², 草地主要流向耕地、建筑用地和林地, 转化的面积比例分别为 2.76%、3.38% 和 2.51%。部分耕地转化为草地, 水体主要流向耕地和建筑用地, 转化的面积比例分别为 5.54% 和 7.83%。其他用地的面积有少量减少, 但与其他景观类型之间的转化不明显。

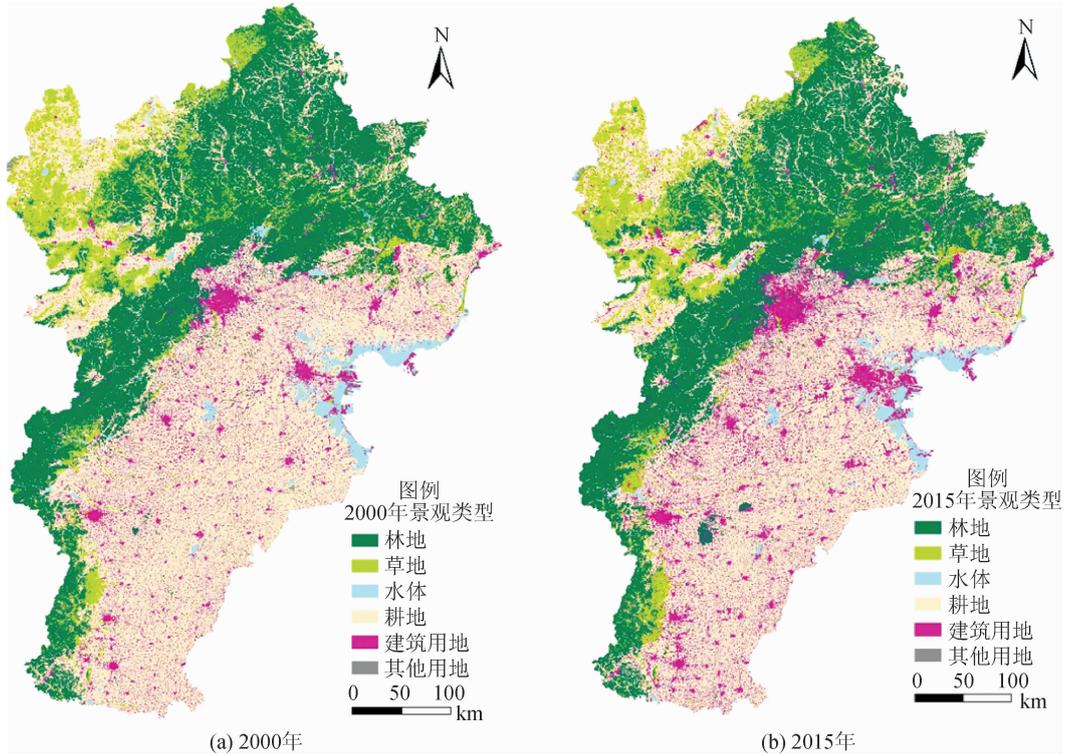


图 2 2000 年和 2015 年景观类型图
Fig. 2 Landscape Types in 2000 and 2015

表 2 京津冀地区景观时序变化转移矩阵(2000—2015 年)

Tab. 2 Landscape time series change transfer matrix in Beijing-Tianjin-Hebei Region (2000—2015)

							单位: km ²
景观类型	林地	草地	水体	耕地	建筑用地	其他用地	2000 年合计
林地	68 779.15	175.44	39.14	886.73	421.44	7.16	70 309.06
草地	519.79	17 147.66	54.08	637.44	472.08	11.64	18 842.69
水体	50.5	128.1	5 268.15	339.47	498.41	77.3	6 361.93
耕地	1 353.2	1 480.21	456.9	91 398.16	6 911.15	30.99	101 630.61
建筑用地	79.04	72.32	33.74	268.14	17 407.97	2.99	17 864.21
其他用地	9.01	26.09	49.01	17.93	68.33	463.54	633.91
2015 年合计	70 790.69	19 029.82	5 901.02	93 547.87	25 779.39	593.62	215 642.41
面积净变化	481.63	187.13	-460.91	-8 082.74	7 915.19	-40.29	0

3.2 京津冀地区地表温度(LST)空间分布特征

图 3 表明,2000—2015 年京津冀地区地表热环境空间格局发生了相应的变化,其时空差异特征明显。其中,2000 年的地表热场主要以中温及以下为主,高温区范围较小,主要位于北京市、天津市、廊坊市和沧州市,京津冀西南部地区也有部分高温区,呈条状分布。受地形影响,中温及以上温区主要分布在华北平原,低温区、次低温区分布在山地地区,集中在太行山一脉,地表热环境空间格局比较简单。

2015 年京津冀地区地表的大量自然景观转变为人工和半人工景观类型,导致京津冀地区下垫面景观格局改变,土地利用程度加强,高温、次高温区增加明显。京津冀西南部高温区范围进一步扩大,北京市-廊坊市-天津市-沧州市继续保持高温,在研究期间华北平原原本以中温区为主,2015 年,逐渐变为以高温区、次高温区为主,并呈辐射状向城市周边蔓延。其中京津冀地区南部地区的城市开始集中连片发展,导致京津冀地区建成区范围大幅度地增加,在

地表温度上表现为高温区、次高温区面积显著增加,热环境效应明显增强,唐山市地表温度也有一定程度上上升。北部地区地势高,低温区面积增加。整

体来看,京津冀地区在2000—2015年地表温度变化呈现中心升温迅速,廊坊市温度上升明显,北部稍有降温,南部整体升温的情况。

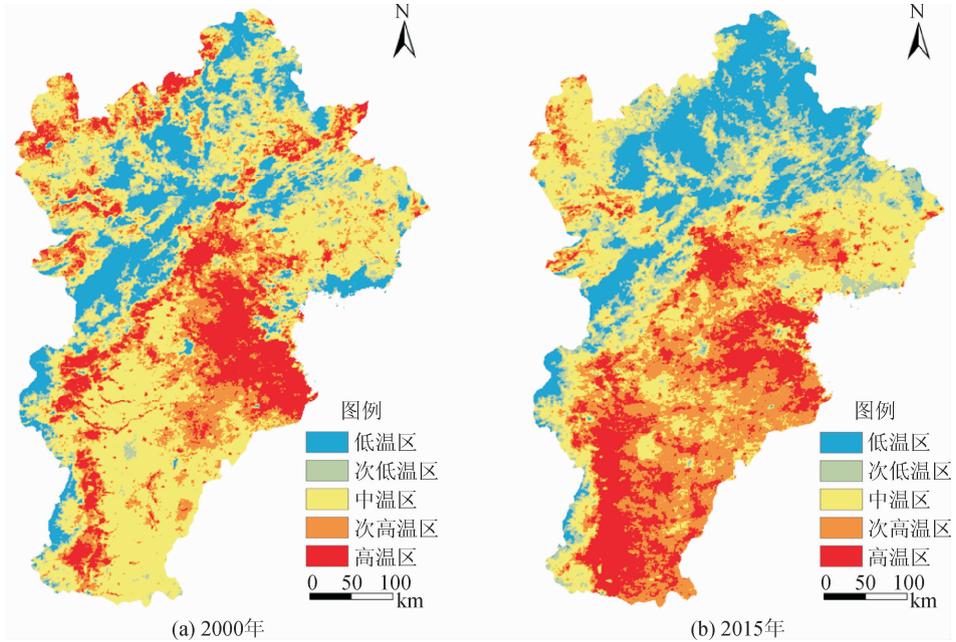


图3 京津冀地区2000年、2015年地表温度空间分布特征

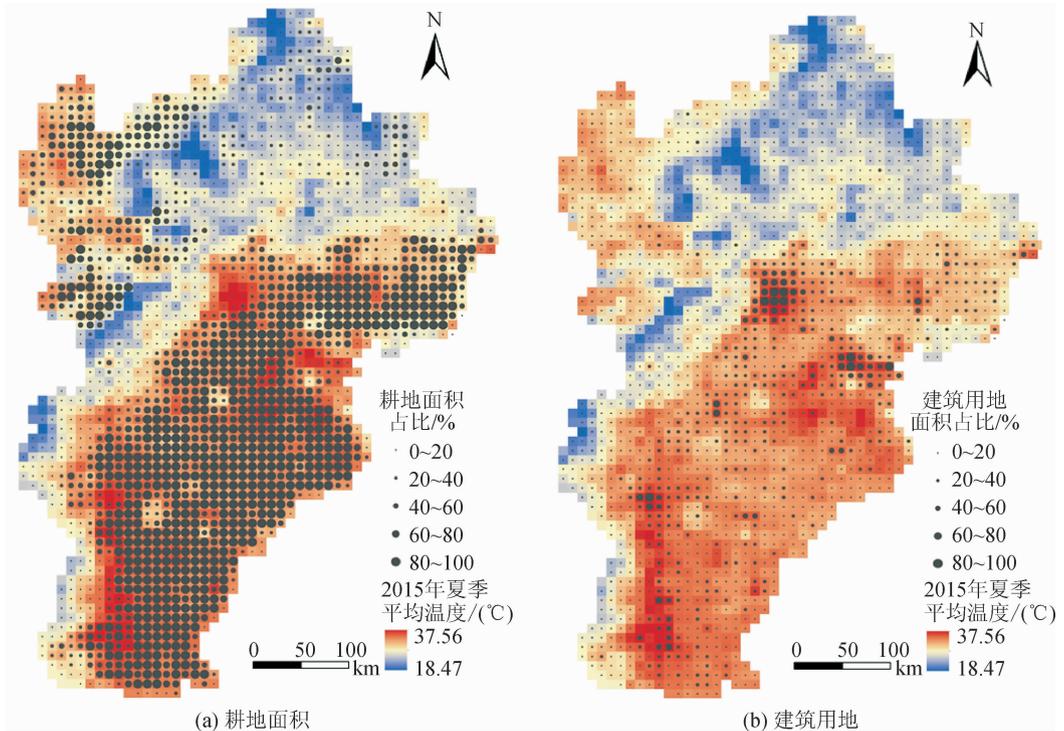
Fig. 3 Spatial distribution characteristics of surface temperature in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in 2000 and 2015

3.3 景观类型变化对地表温度的影响

3.3.1 景观类型占比与地表温度的相关分析

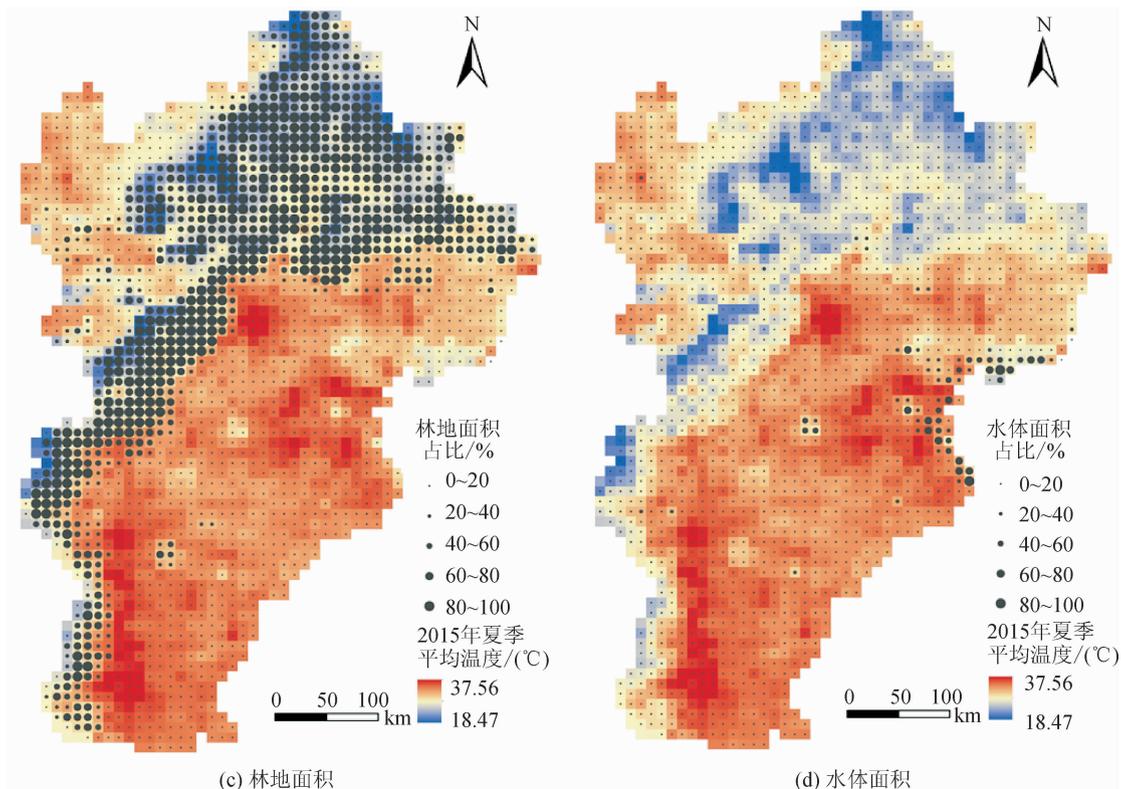
以2015年京津冀地区10 km空间单元下景观

结构与LST的相关关系为例(图4),结果表明,景观结构与LST有显著相关关系。



(a) 耕地面积

(b) 建筑用地



(c) 林地面积

(d) 水体面积

图 4 10 km 京津冀地区景观类型占比与地表温度的关系(2015 年)

Fig. 4 Relationship between landscape structure and surface temperature in Lower Beijing-Tianjin-Hebei Region (10 km) (2015)

由图 4 和图 5 可知,总体上林地景观与 LST 呈现极显著的负相关关系,相关系数高达 0.76,为抑制京津冀地区地表热环境效应的重要贡献源,而建筑用地、耕地景观与 LST 呈现显著正相关关系,相关系数最高分别为 0.67 和 0.65,两者为京津冀地区地表热环境效应的主要影响源。该地区耕地景观与 LST 呈现正相关关系,由于该地区部分农田作物收获后,大面积裸露的土壤表层比林地、水体显热量贡献更大,因此地表温度也相对较高。与 2000 年相比较,2015 年的林地、建筑用地景观与地表温度的相关性显著增强,结合 2000—2015 年期间的土地覆被情况和热环境分布变化可知,2000—2015 年京津冀地区的建筑用地景观面积明显增加,而林地、耕地景观面积大量减少。草地景观与地表温度的相关性一直在缓慢增强,草地景观面积一直处于逐渐扩张趋势,降温作用逐渐体现出来,但由于其不同于林地的物理特性并且分布较为破碎,降温效果不明显。因此京津冀地区建设用地景观面积的扩张是地表温度升高的重要原因,而林地景观在抑制京津冀地区地表温度的方面发挥了重要作用。不同空间单元下景观类型占比与地表温度的相关性分析表明,随着尺度变化,景观结构与地表温度的相关性产生差异。总体上,耕地、水体、建设用地景观与地表温度的相

关性随尺度增大而上升,而林地景观与地表温度的相关性随尺度增大而有轻微下降的趋势。以上说明,尺度变化对景观结构与地表温度的相关分析会产生一定的影响,之后在景观结构与地表热环境的互动分析上需注意选择适宜的尺度。

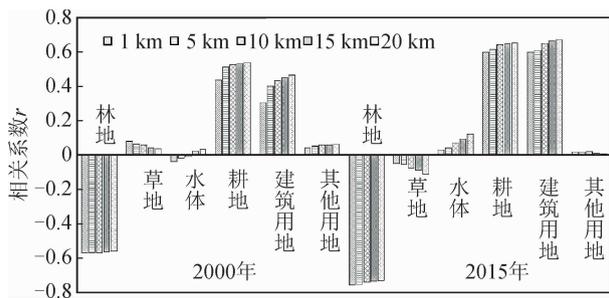


图 5 景观类型占比与地表温度的相关性随尺度变化的特征(2000 年和 2015 年)

Fig. 5 Features of the correlation between landscape type proportion and surface temperature changing with scale (2000 and 2015)

3.3.2 景观类型变化与地表温度变化的相关分析

通过在 1~20 km 不同空间单元上景观类型占比与热环境的相关性分析可知,景观类型占比对热环境具有显著影响,并且随着尺度的变化而有一定差异。为进一步揭示京津冀地区地表热环境与景观类型之间的关系,本文对 2000—2015 年地表温度变

化与各景观类型变化进行多尺度效应的研究。

将2000—2015年京津冀地区地表温度变化与各景观类型变化进行不同空间单元的相关分析,得到1~20 km京津冀地区地表温度变化与各景观类型变化的相关关系结果(图6),水体景观变化和耕地景观变化与地表温度变化呈极显著负相关关系,在10 km×10 km空间单元上相关系数高达0.421。由于水体景观面积较小,只通过在一定空间单元上研究水体景观的面积占比与地表温度的关系并不能够很好地表现出水体景观对地表温度的影响。本文通过水体景观在不同尺度空间单元的变化比例与地表温度的变化进行研究,结果表明,水体景观面积的增加抑制了地表温度的增加,降温作用明显。同时,耕地景观面积虽然在不断减少,但由于它有一定量的植被覆盖,随着城市热环境的恶化,耕地的降温作用也越来越明显。

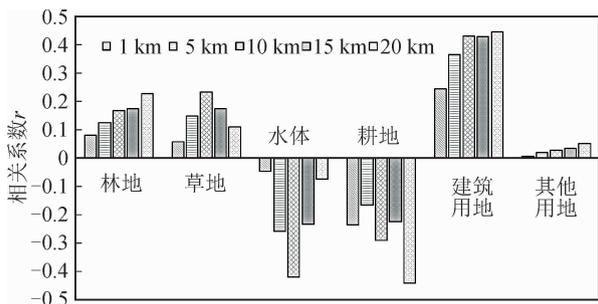


图6 2000—2015年景观类型变化与地表温度变化的相关性随尺度变化的特征

Fig. 6 Features of the correlation between landscape type change and surface temperature change with scale change from 2000 to 2015

建筑用地景观变化与LST变化呈极显著正相关关系,相关系数最高为0.442。本研究中建筑景观与LST呈正相关关系,主要因为2000—2015年京津冀地区建筑用地不断扩张,建筑物道路等化学人工材料吸热较快且热容量较小,较自然下垫面升温快,所以建筑用地景观类型的增加导致了地表温度升高。林地、草地和其他用地景观变化较小,较耕地景观、建筑用地景观来说,对地表温度的变化影响较小。不同空间单元下景观类型变化比例与地表温度变化的相关性分析表明,景观结构与地表温度的相关性随尺度变化而产生差异。总体上,建设用地的变化与地表温度变化的相关性随尺度增加而上升,其中在1~10 km之间增加迅速,而后缓慢增加。耕地景观变化与地表温度变化的相关性在1~20 km之间总体上呈现波动变化,10 km和20 km时两者之间相关关系较强。而草地、水体景观变化与地表温度变化的相关性在10 km×10 km的空间

单元上达到最高。从而说明,尺度变化对景观变化与地表温度变化的相关分析会产生一定的影响,选择适宜的尺度对城市土地利用规模、结构、方式进行空间布局可以达到更好地效果。

目前学者已深入研究了景观类型对城市热环境的影响,尤其注重建设用地景观、绿地景观(林地、草地)、水域景观空间形态对城市热岛效应的影响。然而目前研究通常是针对单一景观类型在单一尺度下产生的热环境效应,对于多种景观类型变化影响城市热环境的时空尺度对比较少,多尺度范围上对景观类型变化与地表热环境的研究也比较缺乏。本文将京津冀地区划分成1 km×1 km、5 km×5 km、10 km×10 km、15 km×15 km、20 km×20 km五个空间尺度,研究五个空间尺度范围下景观类型变化与地表热环境之间的关系,对比分析不同景观类型占比和景观类型变化与地表温度的相关性,从而区分城市热环境景观并定量计算其相关程度。研究发现林地和水体是抑制地表热效应的重要贡献源,建设用地、耕地景观变化与地表温度变化的相关性总体上随尺度增加而上升,而草地、水体景观变化与地表温度变化的相关性在10 km×10 km的空间单元上达到最高。不同景观类型变化与地表温度变化的相关分析在不同尺度上会产生不同的结果,后续研究景观类型与地表温度之间的关系时需要注意选择适宜的尺度。

4 结论

本文基于MODIS地表温度数据和土地覆被数据,综合分析了京津冀地区2000—2015年夏季地表热环境时空演变特征及多尺度下地表热环境与景观结构、景观变化之间的关系。通过分析得出如下结果。

1) 2000—2015年间,京津冀地区景观结构发生了较大的变化,其时空差异特征明显。京津冀地区林地景观和耕地景观的面积所占比例最大,15年间耕地景观面积明显缩减,而建设用地景观在研究期间呈现快速增长趋势,通过转移矩阵的计算分析,说明城市化的发展和建设用地的增加主要来自于耕地对其的转化。

2) 京津冀地区2000—2015年地表热环境效应在整体上逐渐增强,出现明显的空间格局变化,2000年的地表热场主要以中温及以下温区为主,高温区范围较小,且呈条状分布,热环境空间格局较简单。至2015年,京津冀地区高温、次高温区增加明显,呈现辐射状分布,热环境效应明显增强。

3) 京津冀地区景观结构与地表温度的相关性分析表明,林地景观与 LST 呈极显著负相关关系,能够有效地抑制京津冀地区地表热环境效应,而建筑用地、耕地景观与 LST 呈极显著正相关关系,两者对京津冀地区地表热环境效应具有重要影响。景观结构随尺度变化与地表温度的相关性产生差异说明,尺度变化对景观结构与地表温度的相关分析会产生一定的影响,选择适宜的尺度在景观结构与地表热环境的互动分析上具有重要意义。

4) 2000—2015 年地表温度变化与各景观类型变化进行多尺度效应的研究进一步表明,水体景观变化和耕地景观变化与地表温度变化呈极显著负相关关系,在 10 km×10 km 的空间单元上相关性最高,水体景观的增加抑制了地表温度的增加,降温作用明显。景观动态变化与地表温度变化的相关性随尺度变化而产生差异。建设用地、耕地景观的变化与地表温度变化的相关性随尺度增加而上升,而在 10 km×10 km 空间单元上草地和水体景观变化与地表温度变化的相关性达到最高,从而说明尺度变化对景观变化与地表温度变化的相关分析有一定的影响,选择适宜的尺度对城市土地利用规模、结构、方式进行空间布局可以达到更好的效果。

参考文献:

- [1] 陈爱莲,孙然好,陈利顶. 绿地格局对城市地表热环境的调节功能[J]. 生态学报,2013,33(8):2372-2380.
CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Lidong. Effects of urban green pattern on urban surface thermal environment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (8) : 2372-2380.
- [2] 梁保平,马艺芳,李晖. 桂林市典型园林绿地与水体的降温效应研究[J]. 生态环境学报,2015,24(2):278-285.
LIANG Baoping, MA Yifang, LI Hui. Research on cooling effect of the landscape green space and urban water in Guilin City[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(2): 278-285.
- [3] 宋瑞祥,张庆国,于海敬,等. 遥感数据的城市不透水面估算及增温效应[J]. 浙江大学学报(工学版),2017,51(5):1051-1056.
SONG Ruixiang, ZHANG Qingguo, YU Haijing, et al. Estimations to impervious surface and their effects of warming for city using remote sensing data[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2017, 51(5): 1051-1056.
- [4] 梁敏妍,林卓宏,吴婉萍,等. 江门市区冬季地表热环境与土地覆盖类型关系的研究[J]. 生态环境学报,2011,20(4):606-611.
LIANG Minyan, LIN Zhuohong, WU Wanping, et al. Relationship between land surface thermal environment and cover types in Jiangmen City during winter[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20 (4) : 606-611.
- [5] LAZZARINI M, MARPU P R, GHEDIRA H, et al. Temperature-land cover interactions: the inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 130: 136-152.
- [6] 郭秋萍,邹振东,李宏永,等. 深圳市城中村的热环境特征与热岛强度分析[J]. 生态环境学报,2015,24(3):427-435.
GUO Qiuping, ZOU Zhendong, LI Hongyong, et al. Analysis on the thermal environment of urban village in Shenzhen [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(3): 427-435.
- [7] 刘航,申格,黄青. 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 Hang, SHEN Ge, HUANG Qing. 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.
- [8] 杨浩,孟娜,王婧,等. 基于支持向量机的京津冀城市群热环境时空形态模拟[J]. 地球信息科学学报,2019,21(2):190-200.
YANG Hao, MENG Na, WANG Jing, et al. Spatial-temporal morphology simulation of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration thermal environment based on support vector machine [J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(2): 190-200.
- [9] YAO Rui, WANG Lunche, HUANG Xin, et al. The influence of different data and method on estimating the surface urban heat island intensity [J]. Ecological Indicators, 2018, 89: 45-55.
- [10] GAGE E A, COOPER D J. Relationships between landscape pattern metrics, vertical structure and surface urban heat island formation in a Colorado suburb [J]. Urban Ecosystems, 2017, 20(6): 1229-1238.
- [11] YANG Chaobin, HE Xingyuan, YAN Fengqin, et al. Mapping the influence of land use/land cover changes on the urban heat island effect—a case study of Changchun, China [J]. Sustainability, 2017, 9 (2) : 312-330.
- [12] EL-HATTAB M, AMANY S M, LAMIA G E, et al. Monitoring and assessment of urban heat islands over the southern region of Cairo Governorate, Egypt [J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and

- Space Science, 2018, 21(3): 311-323.
- [13] 孙宗耀,孙希华,徐新良,等. 土地利用差异与变化对区域热环境贡献研究——以京津冀城市群为例[J]. 生态环境学报, 2018, 27(7): 1313-1322.
SUN Zongyao, SUN Xihua, XU Xinliang, et al. Study on the contribution of land use heterogeneity and change to regional thermal environment: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(7): 1313-1322.
- [14] RANAGALAGE M, ESTOQUE R C, MURAYAMA Y, et al. An urban heat island study of the Colombo Metropolitan Area, Sri Lanka, based on Landsat data (1997-2017)[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017, 6(7): 189.
- [15] LI Xiaoma, ZHOU Yuyu, ASRAR G R, et al. The surface urban heat island response to urban expansion: a panel analysis for the conterminous United States [J]. Science of the Total Environment, 2017, 605-606: 426-435.
- [16] 周雯,曹福亮,张瑞,等. 绿地格局对城市地表热环境调节作用的多尺度分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 133-141.
ZHOU Wen, CAO Fuliang, ZHANG Rui, et al. Multi-scale analysis of the effects of green space pattern on the urban surface thermal environment[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(3): 1-16.
- [17] 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.
HUANG Muyi, YUE Wenze, HE Xiang. Correlation analysis between land surface thermal environment and landscape change and its scale effect in Chaohu Basin [J]. China Environmental Science, 2017, 37(8): 3123-3133.
- [18] 杜航,张艳芳. 基于POI的多尺度西安市热岛效应分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(3): 305-310.
DU Hang, ZHANG Yanfang. Xi'an multiscale heat island effect analysis based on points of interest[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2019, 55(3): 305-310.
- [19] 赵金,陈曦,包安明,等. 土地利用监测适宜尺度选择方法研究——以塔里木河流域为例[J]. 地理学报, 2007, 62(6): 659-668.
ZHAO Jin, CHEN Xi, BAO Anming, et al. Choice of appropriate scale for land use monitoring: a case of the Tarim River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(6): 659-668.
- [20] JU Junchang, GOPAL S, KOLACZYK E. On the choice of spatial and categorical scale in remote sensing land cover classification[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 96(1): 62-77.
- [21] RAHMAN A F, GAMON J A, SIMS D A, et al. Optimum pixel size for hyperspectral studies of ecosystem function in southern California chaparral and grassland[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(2): 192-207.
- [22] PHINN S R, MENGES C, HILL G J E, et al. Optimizing remotely sensed solutions for monitoring, modeling, and managing coastal environments[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 73(2): 117-132.
- [23] WU Qiong, TAN Jinxiang, GUO Fengxiang, et al. Multi-scale relationship between land surface temperature and landscape pattern based on wavelet coherence: the case of Metropolitan Beijing, China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(24): 3021.
- [24] SUN Ranhao, CHEN Liding. Effects of green space dynamics on urban heat islands: mitigation and diversification[J]. Ecosystem Services, 2017, 23: 38-46.
- [25] MORABITO M, CRISCI A, MESSERI A, et al. The impact of built-up surfaces on land surface temperatures in Italian urban areas[J]. Science of The Total Environment, 2016, (551/552): 317-326.
- [26] 潘辉,江振蓝,张宝玉. 土地利用与地表温度的空间关系[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(2): 165-173.
PAN Hui, JIANG Zhenlan, ZHANG Baoyu. Geographically weighted regression-based research on the spatial relationship of the influence of urban land use on land surface temperature[J]. Journal of Forestry and Environment, 2019, 39(2): 165-173.
- [27] 张畅,胡德勇,曹诗颂,等. 京津冀城市群热岛强度遥感监测及其城市规模效应分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 72-80.
ZHANG Yang, HU Deyong, CAO Shisong, et al. Monitoring urban heat island intensity of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration on remote sensing and its relationship with urban scale[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2018, 39(5): 72-80.
- [28] 陈彬辉,冯瑶,袁建国,等. 基于MODIS地表温度的京津冀地区城市热岛时空差异研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(6): 1134-1140.
CHEN Binhui, FENG Yao, YUAN Jianguo, et al. Spatiotemporal difference of urban heat island in Jing-Jin-Ji Area based on MODIS land surface temperature [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pe-

- kinensis, 2016, 52(6):1134-1140.
- [29] 赵安周, 裴韬, 曹森, 等. 京津冀城市扩张对植被和地表城市热岛的影响[J]. 中国环境科学, 2020, 40(4): 1825-1833.
ZHAO Anzhou, PEI Tao, CAO Sen, et al. Impacts of urbanization on vegetation growth and surface urban heat island intensity in the Beijing-Tianjin-Hebei[J]. China Environmental Science, 2020, 40(4):1825-1833.
- [30] WAN Zhengming, DOZIER J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(4): 892-905.
- [31] WAN Z, ZHANG Y, ZHANG Q, et al. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004: 261-274.
- [32] WANGK, WAN Z, WANG P, et al. Evaluation and improvement of the MODIS land surface temperature/emissivity products using ground-based measurements at a semi-desert site on the western Tibetan Plateau [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(11): 2549-2565.
- [33] 李双成, 蔡运龙. 地理尺度转换若干问题的初步探讨[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 11-18.
LI Shuangcheng, CAI Yunlong. Some scaling issues of geography[J]. Geographical Research, 2005, 24(1): 11-18.
- [34] 陈松林, 王天星. 等间距法和均值-标准差法界定城市热岛的对比研究[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(2): 145-150.
CHEN Songlin, WANG Tianxing. Comparison analyses of equal interval method and mean-standard deviation method used to delimitate urban heat island[J]. Journal of Geo-Information Science, 2009, 11(2): 145-150.
- [35] 董鹏宇, 赵华甫. 耕地多功能权衡与协同关系研究——以上海市青浦区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 368-375.
DONG Pengyu, ZHAO Huaifu. Study on trade-off and synergy relationship of cultivated land multifunction: a case of Qingpu District, Shanghai[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(2): 368-375.
- [36] 韦振锋, 任志远, 张翀. 近12年广西植被覆盖与降水和气温的时空响应特征[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 33-38, 44.
WEI Zhenfeng, REN Zhiyuan, ZHANG Chong. Research on vegetation response to temperature and precipitation in Guangxi in recent 12 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(5): 33-38, 44.
- [37] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 等. 耦合恢复力的林区土地生态适宜性评价——以吉林省汪清县为例[J]. 地理学报, 2015, 70(3): 476-487.
LIU Yanxu, WANG Yanglin, PENG Jian, et al. Land ecological suitability assessment for forest coupled with the resilience perspective: a case study in Wangqing County, Jilin Province, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(3): 476-487.

(责任编辑 王绪迪)