

引用格式: Shi Shushu, Kuang Wenhui, Dong Siqi. Spatiotemporal Pattern of Urban-rural Gradient Land Cover Changes and Their Impact on Urban Heat Island in Xi'an City Since the 21st Century[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(3): 537-547. [史姝姝, 匡文慧, 董斯齐. 21世纪以来西安城乡梯度土地覆盖变化及对城市热岛影响时空特征[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(3): 537-547.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.3.0537

21世纪以来西安城乡梯度土地覆盖变化及对城市热岛影响时空特征

史姝姝¹, 匡文慧², 董斯齐^{2,3}

(1. 西安科技大学测绘科学与技术学院遥感科学与技术系, 陕西 西安 710600;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:城市快速扩张导致城乡梯度土地覆盖发生显著的变化, 引发不透水地表的增加, 植被覆盖的减少, 从而加剧了城市热岛强度。研究城乡梯度土地覆盖变化引起的城市热岛效应, 并揭示城市热岛的时空特征及强度的变化, 对城市规划建设、人居环境改善及提升城市生态系统服务功能具有重要的意义。基于Landsat系列4期影像, 利用单窗算法反演西安市地表温度, 计算热场变异指数得到热力场强度图并对其进行等级划分, 结合土地利用/覆盖类型数据分析城乡梯度土地覆盖变化对城市热岛强度的影响。结果表明: ①2000年西安市极强热岛效应区占研究区面积的10.58%, 逐渐增加到2011年极强热岛效应区域的面积占比达到16.14%, 而后到2015年降低为9.00%, 整体上西安市城市热岛效应呈现出了先增长后降低的趋势; ②2000年到2015年城乡建设用地面积增加了412.76 km², 极强热岛强度的范围随城市建成区的扩张逐年向外扩展; ③无热岛效应区约70%位于耕地和林地, 水域在无热岛效应中的占比也在逐年增多, 从31%增加到了47%。不透水地表面积占比与地表温度有显著相关性, 城乡梯度植被和水体面积的增加可以有效地缓解城市热岛强度。

关键词:城市热岛; 土地覆盖变化; 地表温度; 遥感; 城市建成区; 西安市

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)03-0537-11

1 引言

进入21世纪以来, 全球经济快速发展, 农村人口不断涌入城市。据联合国报告, 2018年世界城市人口已占总人口数的55%^[1]。城市化进程的加速, 产生了一系列的生态环境问题。城市化进程中, 原有地表的植被、水面及裸土等土地覆盖类型逐渐被沥青、水泥和砖瓦等不透水表面取代, 导致了地表

水分蒸散发减少、径流增加、显热通量和储热增加及河流水质降低等生态环境问题^[2-3]。2008年中国不透水地表面积占国土总面积的比例达到了0.86%, 城市不透水地表平均比例约为66%^[4]。这些不透水地表的增加, 植被的减少以及人类热源的增加导致城市地区气温与郊区相比显著升高, 形成了强烈的城市热岛。城市热岛正严重地影响着人居环境的舒适性及人类健康, 导致城市生态系统服

收稿日期: 2019-02-26; 修订日期: 2020-05-24

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41590842), 2018年“中国科学院大学生创新实践训练计划”项目。

作者简介: 史姝姝(1998—), 女, 内蒙古乌兰察布人, 学士, 主要从事遥感科学与技术研究。E-mail: shishushu926@163.com

通讯作者: 匡文慧(1978—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 副研究员, 博士, 主要从事土地利用/覆盖变化和城市生态环境研究。

E-mail: kuangwh@igsnrr.ac.cn

务功能下降。作为城市土地利用/覆盖结构特征的重要组合形式,城市不透水地表与绿地的空间格局会对地表辐射与能量的分配起着至关重要的作用^[5],从而引发城市地表热环境的空间异质性^[6-10]。

城市热岛相关研究已经受到国内外学者的广泛关注,其中遥感观测技术凭借其扫描范围大,更新周期短的优势被广泛应用。Rao^[11]于1972年利用遥感技术来研究城市热岛,此后大量学者基于热红外遥感数据对不同城市的热岛效应进行了深入研究,Matson等^[12]利用NOAA数据对美国西海岸城市的夜间城乡辐射温度差异进行了研究;Streutker^[13]利用AVHRR的分窗红外通道获得的辐射温度图计算单个城市热岛特性,分析了德克萨斯州休斯顿市城市热岛的时空特征;叶柯等^[14]利用MODIS数据对南京市夏季城市热岛的空间分布、热岛范围和热岛强度进行了分析;陈云浩等^[15]提出了热力景观概念并在景观尺度研究了上海市的热环境空间格局。但是,近年来国内大多数学者选择对北京、上海、广州等超大和特大城市进行深入研究^[16-18],缺乏对西部地区城市的关注。近年来,西安、成都等西部地区重要节点城市正迅猛发展,导致城市热岛显著加强。对西安市土地覆盖变化及城市热岛深入研究对于科学合理规划城市具有重要的应用实践意义。

近年来,西安市正处于“一带一路”核心区、国际化大都市、国家中心城市叠加发展的关键时期,城市快速发展带来的生态环境问题不容忽视。此外,现有的西安城市热岛的研究中关于土地覆盖变化与城市热岛强度的定量关系研究相对不足。因此,本文选择西安市作为研究区,基于Landsat系列遥感影像,利用单窗算法反演地表温度,并使用热场变异指数来表征城市热岛强度,结合土地利用/覆盖类型数据,分析城乡梯度土地覆盖变化及对城市热岛影响,以揭示西安城市热岛效应的变化过程及其成因。

2 研究区概况

西安市位于渭河流域中部关中盆地,107.40°~109.49°E和33.42°~34.45°N,北临渭河和黄土高原,南邻秦岭。西安自古有“八水绕长安”的美称,市区东有灞河、浐河,南有潏河、涝河,西有沣河,北有渭河、泾河。属暖温带半湿润大陆性季风气候,冷暖干湿四季分明,年平均气温13.0~13.7℃,年平

均降水量522.4~719.5mm,且由北向南递增,年平均日照时数1646.1~2114.9h。西安市下辖11个区、2个县和7个国家级开发区,总面积10752km²,其中市区面积1066km²,2019年常住人口达1020.35万人,城镇化率达74.61%,2019年地区生产总值9321.19亿元。研究区域包含了西安市市内6区及阎良区、临潼区、高陵区、长安区4个郊区及蓝田县。

3 数据获取与分析方法

3.1 数据源

所用影像全部为Landsat系列遥感影像,由地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)下载,为保证数据分析的可比性,选择时间较相近的影像,并且保证所用遥感影像及土地利用/覆盖类型数据的时间一致性,因Landsat系列影像质量问题难以获取到2005年和2010年的相近时相的数据,所以用2003年和2011年的影像代替。综合考虑上述因素,最终所用影像为2000年5月20日、2003年5月29日、2011年6月4日的Landsat 5 TM影像和2015年4月28日Landsat 8 OLI/TIRS影像共4期,空间分辨率为30m/120m和30m/15m/100m;地图投影为UTM,坐标系统为WGS84,所选影像含云量较少,数据质量较好。

3.2 城乡梯度土地覆盖制图方法

土地利用数据集下载自中国科学院环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)^[15],包括2000年、2005年、2010年、2015年共4期数据,将土地利用类型分为耕地(水田和旱地)、林地(有林地、灌木林、疏林地和其它林地)、草地(高覆盖度、中覆盖度和低覆盖度草地)、水域(河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩涂和滩地)、城乡建设用地(城镇用地、农村居民点和其他建设用地)和未利用土地(土地沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地和裸岩石质地)6大类。此外,另将城乡建设用地内部结构细分为不透水地表、绿地、水体及裸土地,不透水地表主要由城市建成区范围内的房屋屋顶、沥青水泥道路、大理石广场以及混凝土等组成^[19]。利用ENVI软件通过混合像元分解法得到不透水地表面积比例数据。

3.3 城乡梯度地表温度获取

采用覃志豪的单窗算法^[20]结合ENVI软件来反演地表温度,相关公式及具体参数说明如下:

$$T_s = [a \times (1 - C - D) + (b \times (1 - C - D) + C + D) \times T_6 - D \times T_a] / C \quad (1)$$

$$C = \varepsilon \times \tau \quad (2)$$

$$D = (1 - \varepsilon) \times [1 + (1 - \varepsilon) \times \tau] \quad (3)$$

其中: T_s 为地表温度, 单位为 K; a, b 为常量分别为 -67.355 351 和 0.458 606; T_6 为亮度温度值; T_a 为大气平均作用温度; ε 为地表比辐射率; τ 为大气透过率。

(1) 地表比辐射率的计算。根据覃志豪等提出的地表比辐射率的估计算法^[21], 用下式来估计地表比辐射率:

$$\varepsilon = P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_v) R_m \varepsilon_m + d\varepsilon \quad (4)$$

其中: P_v 为植被覆盖度; R_v 和 R_m 为全植被和建筑表面的温度比率; $d\varepsilon$ 为修正值。依据植被与裸土、建筑之间相互作用对地表比辐射率的贡献($d\varepsilon$):

当 $P_v \leq 0.5$ 时: $d\varepsilon = 0.003\ 8 P_v$

当 $P_v > 0.5$ 时: $d\varepsilon = 0.003\ 8 (1 - P_v)$

当 $P_v = 0.5$ 时: $d\varepsilon = 0.001\ 9$

植被覆盖度:

$$P_v = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}) / (\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}) \quad (5)$$

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_n - \rho_r}{\rho_n + \rho_r} \quad (6)$$

其中: ρ_n 表示近红外波段反射率值, ρ_r 表示红波段的反射率值。

(2) 亮度温度 T_6 的计算公式为:

$$T_6 = \frac{K_2}{\ln(1 + \frac{K_1}{L_6})} \quad (7)$$

其中: L_6 为辐射亮度值, 对于 Landsat 5 数据 K_1 为 607.76, K_2 为 1 260.56, 对于 Landsat8 数据 K_1 为 774.89, K_2 为 1 321.08。

(3) 大气平均温度 T_a 的计算。根据覃志豪对大气平均作用温度的研究^[22], 及结合研究区范围, 采用中纬度夏季的大气平均温度的计算公式:

$$T_a = 16.011\ 0 + 0.926\ 21 T_0 \quad (8)$$

其中: T_a 与 T_0 的单位均为 K, T_0 可以为研究区年平均温度。

(4) 大气透过率从 NASA 官网 (<https://atm-corr.gsfc.nasa.gov/>) 查询得到。

3.4 城乡梯度热岛强度划分

利用反演所得的地表温度来计算城市热场变异指数, 从而定量分析城市热岛强度, 城市热场变异指数具体计算公式如下:

$$\text{HI} = (T - T_{\text{MEAN}}) / T_{\text{MEAN}} \quad (9)$$

其中: HI 为城市热场变异指数, T 为研究区范围内某点的遥感反演地表温度, T_{MEAN} 为研究区域的平均地表温度。

为了更加直观地描述城市热岛强度的变化情况, 进一步采用阈值法将热场变异指数分为 6 级^[23], 阈值划分及对应的热岛强度如表 1 所示。

表 1 热场变异指数等级划分

Table 1 Classification of thermal field variability index

热场变异指数	热岛效应强度
≤ 0	无
0.01~0.05	弱
0.06~0.10	中
0.11~0.15	较强
0.16~0.19	强
≥ 0.20	极强

3.5 城乡梯度土地覆盖变化对热岛强度影响分析方法

综合考虑研究区地理位置和区域范围等因素, 为反映城乡梯度土地覆盖变化对城市热岛的影响, 以西安市中心为中心建立以 3 km 为间距的缓冲区梯度带, 共建立距离中心 3~30 km 的 10 个缓冲区梯度带, 分别编号为 1~10。将缓冲区梯度带数据与土地利用/覆盖类型数据和地表温度数据叠加, 分析不同缓冲区梯度带的变化特征。

城市不透水地表与绿地格局通过改变城市下垫面结构, 引起地表反照率、地表比辐射率和地表粗糙度的变化, 从而对区域垂直方向的辐射平衡产生直接的影响^[24], 使得城区与郊区的地表热环境产生较大的差异, 造成城乡地表温度的反差从而形成强烈的热岛效应。因此, 土地利用/覆盖类型与地表温度之间存在一定的定量关系, 借助于遥感和 GIS 技术的空间分析功能可以分析两者的关系。通过 ArcGIS 软件叠加分析土地利用/覆盖类型数据与城市热岛强度图, 统计并输出不同等级的城市热岛强度比例, 对比分析城乡梯度土地覆盖变化对城市热岛强度的影响特征(图 1)。

4 结果与分析

4.1 城乡梯度土地覆盖变化特征分析

21 世纪以来西安市的土地利用/覆盖变化较明显(图 2), 西安市的土地覆盖变化以城乡建设用地和耕地面积的变化为主(表 2)。林地以“减—增—

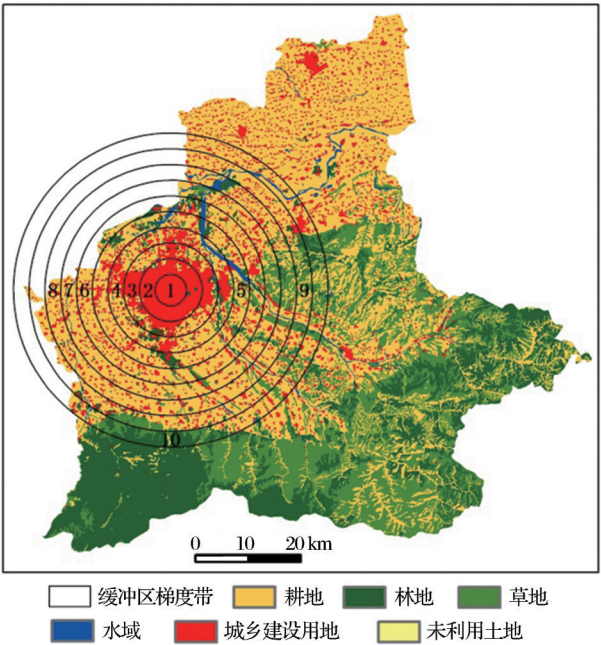


图1 研究区2000年土地利用状况和城乡梯度缓冲区
Fig.1 Land use in 2000 and buffer zones along urban-rural gradient in Xi'an City

减”的变化模式小幅度变化最终呈现小幅度增长的趋势;水域面积在2000~2005年增长较多,在2005年达到最大面积,而后先增加后减少,整体上表现为小幅度的增长;草地、未利用土地小幅度的减少;耕地面积逐年减少,2000~2015年耕地面积减少了386.14 km²。而城乡建设用地面积以平均每5 a 137.59 km²的速度逐渐增加,2005~2010年城乡建设用地面积增长最多,2000~2015年城乡建设面积

共增加了412.76 km²,西安市主城区范围逐渐扩大,城市边界向四周扩张明显。

从城区不透水地表面积比例分布来看,2000~2005年西安市城市扩展区集中在西南和西偏北方向,2005~2010年城市建成区整体扩展最大,扩展方向集中于东部和南部,2010~2015年城市扩展强度减弱,以填充式发展导致城市不透水地表分布更加紧密。

研究区土地利用/覆盖类型沿城乡梯度变化特征表现为,距离城市中心越远的缓冲带耕地的面积占比越多、城乡建设用地的占比面积越少。从时间序列来看,0~3 km缓冲区和3~6 km缓冲区位于距城市中心6 km以内,城市内部城乡建设用地面积达到饱和,各土地覆盖类型基本保持稳定。从6~9 km缓冲区到27~30 km缓冲区,2000~2015年城乡建设用地面积比例整体呈现出上升趋势。其中6~15 km缓冲区城乡建设用地的增长显著,增幅分别为28.25%、42.86%、35.42%,9~12 km缓冲区城乡建设用地的面积增幅最大,并且伴随着耕地面积的大幅度减少。21~30 km缓冲区距离城市中心稍远,城乡建设用地的增幅不大,耕地的减少趋势也趋缓,变化幅度小于1.5%,其他土地覆盖类型变化幅度均较小。

由此可见,西安市城市扩张模式以外延型为主,以“圈层和放射状”的方式将城郊耕地转化成了城乡建设用地。

表2 2000~2015年各土地利用/覆盖类型面积变化(单位:km²)

Table 2 The area change of land use/cover types in 2000~2015(Unit:km²)

土地利用/覆盖类型	2000年	2005年	2010年	2015年	2000~2015年变化
耕地	825.13	2 715.49	2 584.22	2 439.00	-386.14
林地	1 131.91	1 130.29	1 149.58	1 144.75	12.84
草地	1 154.64	1 162.37	1 106.51	1 106.60	-48.04
水域	91.85	106.01	93.71	100.49	8.64
城乡建设用地	659.16	747.84	928.68	1 071.92	412.76
未利用土地	1.20	1.20	1.18	1.13	-0.07

4.2 城市地表温度时空变化特征分析

通过中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),查阅西安市当日温度数据对反演的地表温度进行比较,反映出来地表温度和近地面气温之间一致的变化趋势,该研究反演的地表温度可用于西安城市热岛的评价。

对2000~2015年4期地表温度图像进行阈值分割,将地表温度分为8个等级(图3)。由图可见,小

于23℃的区域主要位于研究区域南部,结合遥感影像分析,该地区地貌以山地为主,海拔较高植被茂盛,导致地表温度较低。23~29℃过渡区主要分布于近郊区的耕地,而32~38℃高温区主要位于西安主城区以及黄土高原的裸土地。

整体来看,西安城市地表温度空间分布上具有明显的城乡梯度差异性,建成区范围内具有明显的热岛效应。

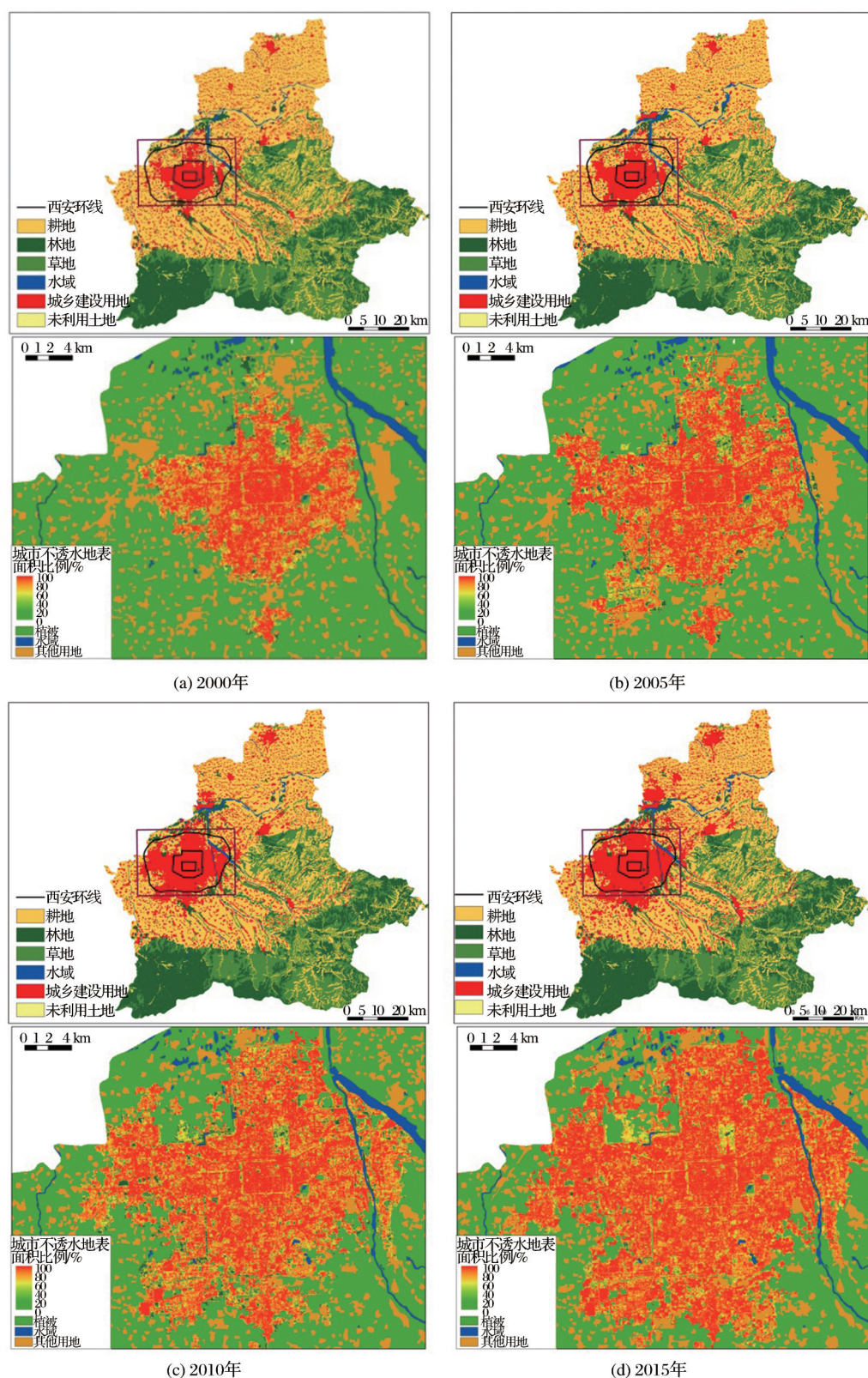


图2 2000~2015年土地利用/覆盖类型及城市不透水地表面积比例图

Fig.2 Land cover/use types and proportion of urban impervious surface area in 2000~2015

4.3 城市热岛强度变化特征

从2000~2015年4期热力场强度图(图4)中可看出,西安市区内的热岛强度最高,而向着近郊区、

远郊区、县城方向热岛强度依次递减。从空间特征分析,大部分无热岛效应区域分布于长安区南部及蓝田县东南部的秦岭山脉区域,植被覆盖度较高,

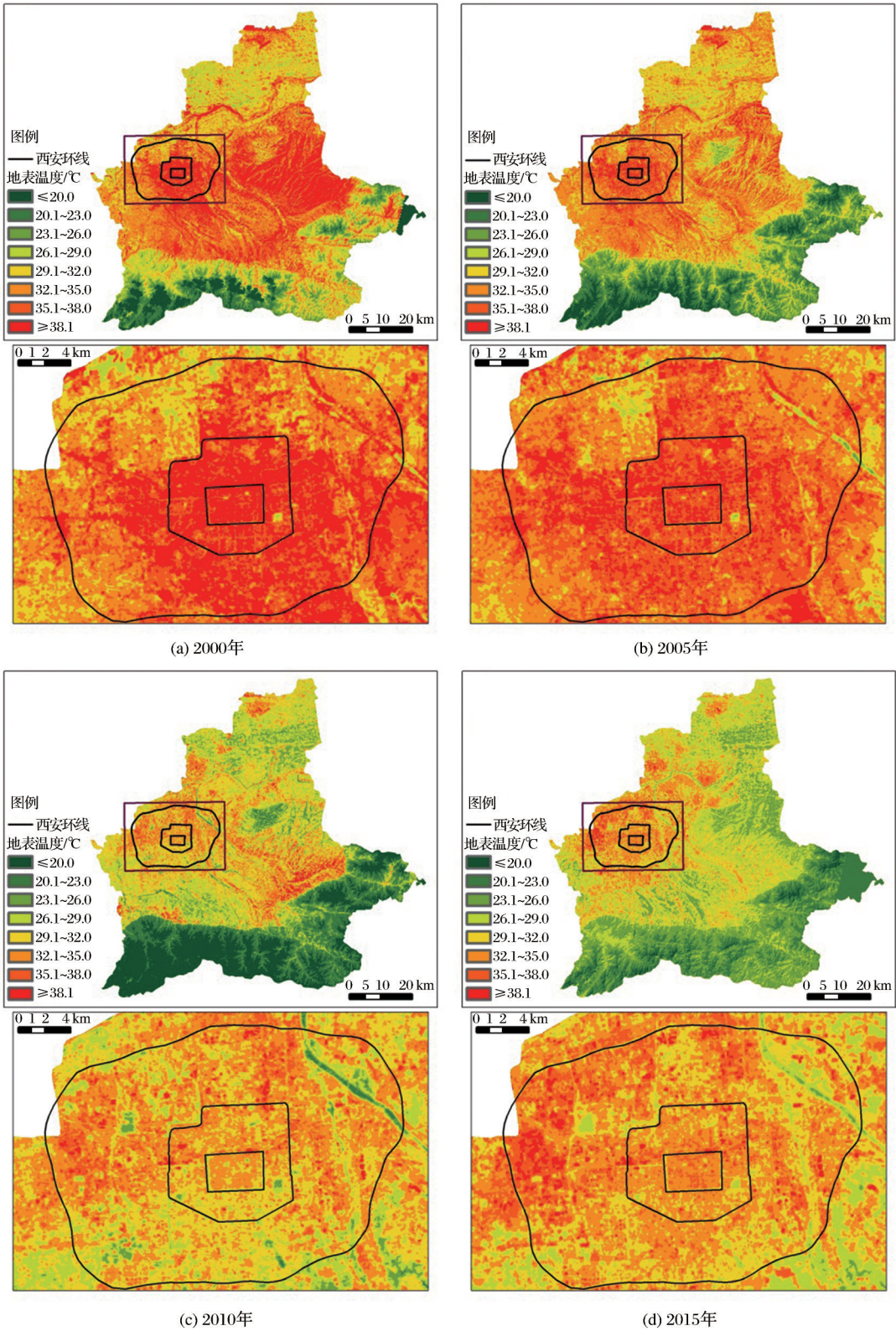


图 3 2000~2015年西安市地表温度分布图

Fig.3 Spatial distribution of land surface temperature in Xi'an municipality from 2000 to 2015

而强和极强热岛效应区位于西安主城区以及远郊区的人口分布较集中的中心城区。不同热岛效应强度的分布范围差异明显。

从时间特征分析,2000年主城区的热岛效应最弱,极强热岛效应分布最少,仅有主城区及部分山地裸岩区有极强热岛效应。而2003年主城区的热

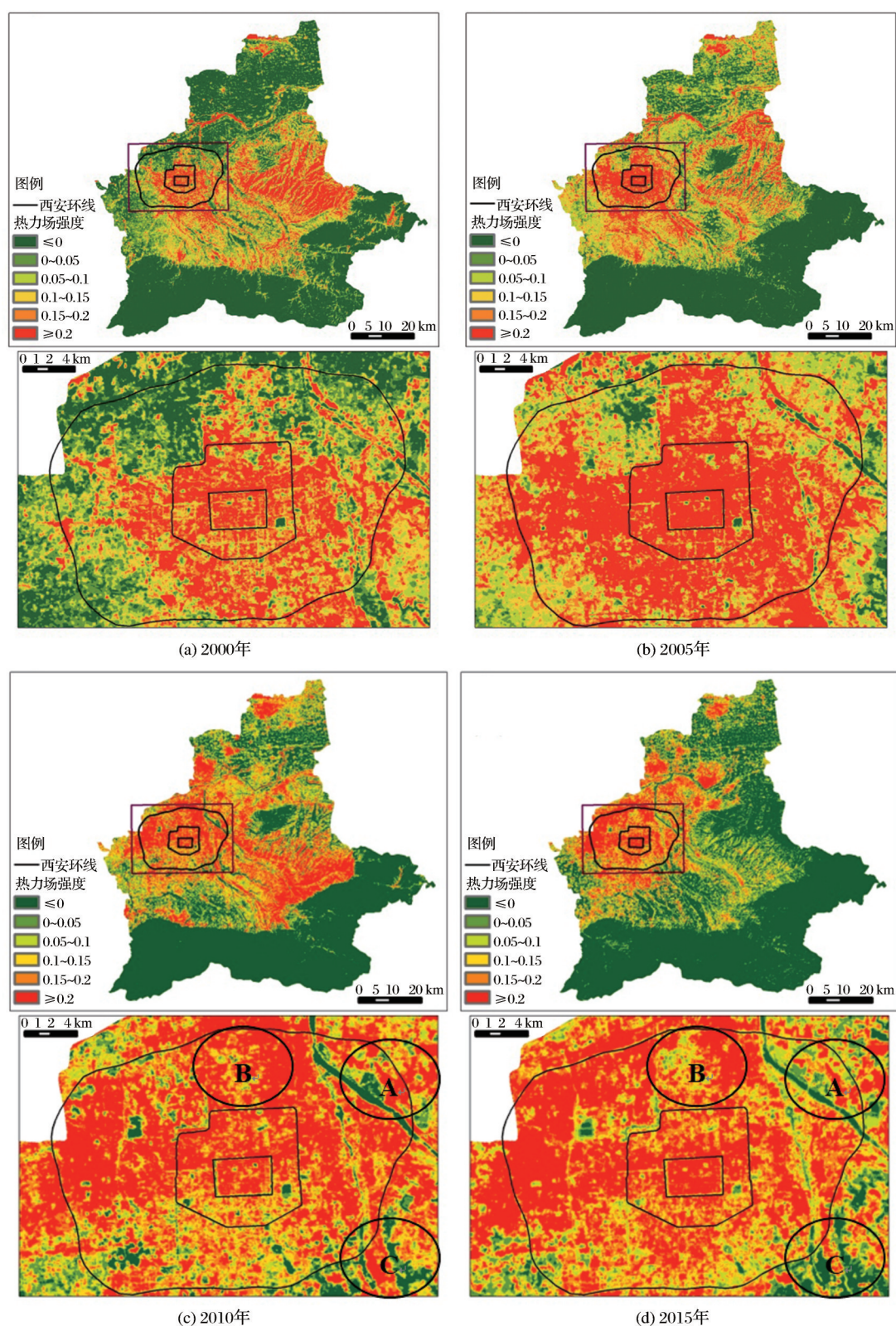


图4 2000~2015年西安市热力场强度等级分布图

Fig.4 Spatial distribution of surface thermal field intensity level in Xi'an municipality from 2000 to 2015

岛效应最明显,建成区范围内均存在极强热岛效应。2011年及2015年主城区热岛强度有减弱趋势,但极强热岛效应的范围向外扩散,主要表现在沿西

北方向和南面扩散。

整体上强热岛与极强热岛效应区与城市建成区范围大致相同,且随着城市扩张逐渐向外扩散,

以及较为明显区为研究区域西北方及北面部分区域,2000年时为无热岛效应区,而后热岛强度逐年增加,到2015年变为极强热岛效应区。

2013年西安市开启了国家森林城市创建工作,城区增绿、建立绿色廊道、建设森林生态文化、建设森林公园等大型重点城市生态绿化工程相继实施,形成“一屏、三轴、五环、十块、百廊、千点”的绿色城市建设基本格局。图4中A区位于“十块”中的“浐灞原艺博览与生态度假聚集板块”,B区位于“奥林匹克绿色运动板块”,C区位于“白鹿原生态经济与田园休闲文化聚集板块十大生态文化体验板块”,可从图中对比出这3块区域2011年时热岛效应等级较高,而到2015年时热岛效应等级显著降低。此外,西安市创森工作中提出的“百廊”、“千点”分别指以市内道路、河流水系为主体和以城市内街区公园为主体进行绿化,这些绿化工程的实施对西安市的城市热岛减缓有显著影响,2010~2015年西安市极强热岛效应区域面积比减少了7.14%,无热岛效应区域面积比增加了9.41%。

4.4 城乡梯度土地覆盖变化对热岛强度影响特征

叠加热力场强度和土地利用/覆盖类型数据,分析土地利用/覆盖类型与城市热岛强度的内在联系。表3可看出,2000~2015年无热岛效应区所占面积比以2011年为转折点呈现先减小后增长的形式。而极强热岛效应区所占面积则呈现先增长后减小的趋势,2000年极强热岛效应区占全部面积的10.58%,逐渐增加到2011年时极强热岛效应区域的面积占比达到16.14%,仅次于无热岛区域,而后到2015年减弱为9.00%。

表3 2000~2015年城市热岛强度面积占比(单位:%)

Table 3 The proportion of urban heat island intensity area in 2000~2015 (Unit: %)

年份	无热岛	弱热岛	中热岛	较强热岛	强热岛	极强热岛
2000	45.39	12.71	11.70	11.49	8.14	10.58
2003	40.18	10.64	16.22	12.36	9.36	11.23
2011	43.31	8.67	11.21	10.76	9.91	16.14
2015	52.72	12.68	10.36	8.35	6.89	9.00

不同土地覆盖类型的热岛强度差异显著,其中耕地、林地、草地及水域主要表现为无热岛效应,而城乡建设用地主要表现为较强、强和极强热岛效应。其中2000~2015年无热岛效应区分布于林耕总用地的比例分别为74%、66%、67%、69%,说明了高的植被覆盖度对热岛效应有明显的减弱作用。

水域在无热岛效应中的占比也在逐年增多,从2000年的31%增加到了2015年的47%。考虑到水域用地在降低城市地表温度、缓解城市热岛效应方面发挥了较大的作用。在城市建设规划中应考虑到城市中绿地和水域的占地比例及分布格局的重要性。

城乡建设用地在强热岛效应上贡献最大,分布于城乡建设用地的较强、强、极强热岛效应占比也在逐年增加,从2000年的2.19%逐渐增加到2015年的6.47%。城市化进程的加快,城市人口的增多,为满足城市居民生活生产的需要,面积更大的不透水地表取代了原有的植被和土壤,导致了热岛效应的增强。在满足人类需要的前提下,合理地规划城市用地、适当增加水体及绿地的面积可以提高城市的宜居性,提升城市环境的舒适性。

研究区地表温度沿城乡梯度变化特征表现为距离城市中心越远平均地表温度越低,热岛效应强度越弱。2000~2015年,0~3 km缓冲区和27~30 km缓冲区的平均地表温度相差约4℃。24~27 km缓冲区和27~30 km缓冲区之间面积相差最多的是耕地和林地,且二者之间的地表温度的差异非常显著,可见林地和耕地的面积变化可以显著地影响地表温度。2000年3~6 km缓冲区和6~9 km缓冲区分别位于市区内和近郊区,在相邻梯度带之间城乡建设用地面积差异最大,平均地表温度差异也最大,达1.36℃;2005年时9~12 km缓冲区和12~16 km缓冲区分别位于市区内和近郊区,平均地表温度差异也较大,达0.90℃;而2010~2015年城市向外扩张趋势稍有减缓,12~15 km缓冲区和15~18 km缓冲区分别位于市区内和近郊区,平均地表温度差异分别达1.01℃和1.45℃。可见,在城市边缘区温度差异显著,城乡建设用地的占比显著影响到地表温度。

从城市中心设置一条样线,考虑到要保证样点的土地覆盖类型的多样性,从西到东设置一条样线,在样线上等距选取样点,样点间隔为800 m,共选取了28个样点并依次编号,提取每个样点对应的2000和2015年地表温度值和不透水地表面积比例。不同城市梯度,地表温度演变趋势及其对应的不透水地表面积比例变化趋势如图5所示。地表温度和不透水地表面积比具有很好的相关性,不透水地表面积比较小时对应的地表温度较小,反之亦然。结合图5可看出,2号样点位于阿房宫遗址公园,13号样点位于护城河,21号样点位于长乐公园。2号和

23号样点所处位置及其周围植被覆盖度高,13号样点水域面积广,所以其地表温度较低。由此也说明了增加城区绿地和水域面积可有效减弱城市热岛效应。

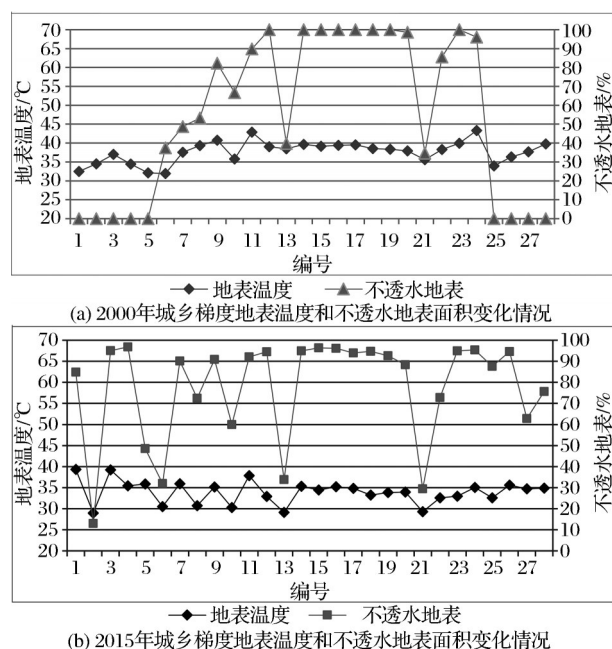


图5 城乡梯度地表温度与不透水地表面面积比例变化

Fig.5 Changes of land surface temperature (LST) to impervious surface area (ISA) proportion

5 结论与讨论

5.1 结论

本文基于 Landsat 系列影像利用单窗算法反演了西安市2000年、2003年、2011年、2015年4个时期地表温度,并分析了西安市近15a的城市热岛效应时空变化特征,结合土地利用/覆盖类型数据,分析了城乡梯度土地覆盖变化及对城市热岛影响,得出以下结论:

(1)低温区主要位于城市外围的植被高覆盖区,过渡区位于郊区及乡村耕地,高温区主要位于市内城区和部分山区裸地。西安市城乡梯度温度差异显著,建成区范围内热岛效应明显。

(2)2000~2015年热岛效应以2011年为拐点呈现了先增强后减弱的形式,2000年极强热岛效应区占全部面积的10.58%,逐渐增加到2011年时极强热岛效应区的面积占比达到16.14%,而后到2015年减弱为9.00%。且热岛效应范围随着建成区范围的扩大而向外扩散。

(3)城乡梯度土地覆盖变化导致地表热效应特征显著,74%的无热岛效应区位于耕地和林地,极

少部分位于城乡建设用地,而较强、强和极强热岛效应区主要位于城乡建设用地,且占比逐年增加,从2.19%逐渐增加到6.47%。

(4)地表温度和不透水地表面面积占比有较强的相关性,说明了植被覆盖度的提高,水域面积的增加可以有效的缓解城市热岛效应。

5.2 讨论

综合前人的研究成果,从不同角度分析多种因素对城市热岛的影响。刘宇峰等^[25]分析了单位GDP能耗、人口密度等经济、人口因素对城市热岛效应的影响,证明了常住人口的增多、建成区面积的增加对西安市城市热岛强度的变化贡献较大。李瑶等^[26]从热环境格局与地表能量分量的关系出发,定量测算了西安市的城市热岛效应范围,结果表明城市热岛集中分布在植被覆盖度较差的区域。卞子浩等^[27]研究了景观生态格局与城市热岛的相关性,表明西安市城市热岛效应受城市绿地的影响显著,与本文得出的结论一致。本文主要从土地覆盖变化的角度出发,证明了在城市规划建设中需要科学地规划布局城区绿地和水域,将更好地提高城市的生态系统水热调节功能,以改善人居环境舒适性、建设低碳性生态城市。此外,考虑到城市热岛效应的成因较多^[28],后续的研究需要综合分析这些因子的影响结果,为城市科学规划和热岛减缓提供重要科学依据。

参考文献(References):

- [1] Department of Economic and Social Affairs. United Nations Statistics Yearbook[M]. New York:United Nations, 2019.
- [2] Zhang Hao, Xu Hanqiu, Li Le, et al. Analysis of the Relationship between Urban Heat Island Effect and Urban Expansion in Chengdu, China[J]. Journal of Geo-information Science, 2014, 16(1): 70-78. [张好, 徐涵秋, 李乐, 等. 成都市热岛效应与城市空间发展关系分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(1): 70-78.]
- [3] Hunt A, Watkiss P. Climate Change Impacts and Adaptation In cities: A Review of the Literature [J]. Climatic Change, 2011, 104(1): 13-49.
- [4] Kuang Wenhui, Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal Dynamics of Impervious Surface Areas Across China During the Early 21st Century [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58: 465-478. [匡文慧, 刘纪远, 张增祥, 等. 21世纪初中国人工建设不透水地表遥感监测与时空分析[J]. 科学通报, 2013, 58: 465-478.]
- [5] Kuang Wenhui. Remote Sensing Analysis and Ecological Regulation of Urban Surface Thermal Environment [M]. Beijing:

- Science Press, 2015.[匡文慧. 城市地表热环境遥感分析与生态调控[M]. 北京: 科学出版社, 2015.]
- [6] Berger C, Rosentreter J, Voltersen M, *et al.* Spatio-temporal Analysis of the Relationship between 2D/3D Urban Site Characteristics and Land Surface Temperature[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 193: 225-243.
- [7] Kuang W H, Dou Y Y, Zhang C, *et al.* Quantifying the Heat Flux Regulation of Metropolitan Land Use/Land Cover Components by Coupling Remote Sensing Modeling with in Situ Measurement [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(1): 113-130.
- [8] Lin Yunshan, Xu Hanqiu. A Study on Urban Impervious Surface Area and Its Relation with Urban Heat Island: Quanzhou City, China[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, 22(1): 14-19.[林云杉, 徐涵秋. 城市不透水面及其与城市热岛的关系研究——以泉州市区为例[J]. *遥感技术与应用*, 2007, 22(1): 14-19.]
- [9] Pan Jinghu, Feng Zhaodong, Xiang Denian, *et al.* Analysis on Thermal Environment Effect of Land Use Type and Pattern in Valley City——A Case Study of Lanzhou City [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(2): 201-207.[潘竟虎, 冯兆东, 相得年, 等. 河谷型城市土地利用类型及格局的热环境效应遥感分析——以兰州市为例[J]. *遥感技术与应用*, 2008, 23(2): 201-207.]
- [10] Xia Junshi, Du Peijun, Zhang Hairong, *et al.* The Quantitative Relationship between Land Surface Temperature and Land Cover Types based on Remotely Sensed Data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(1): 15-23.[夏俊士, 杜培军, 张海荣, 等. 基于遥感数据的城市地表温度与土地覆盖定量研究[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(1): 15-23.]
- [11] Rao P. Remote Sensing of Urban Heat Islands from an Environmental Satellite[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1972(53): 647-648.
- [12] Matson M, McClain E P, McGinnis D F, *et al.* Satellite Detection of Urban Heat Islands [J]. *Monthly Weather Review*, 1978, 106(12): 1725-1734.
- [13] Streutker D R. A Remote Sensing Study of the Urban Heat Island of Houston, Texas [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(13): 2595-2608.
- [14] Ye Ke, Qin Zhihao. A Study of Urban Heat Island in Summer of Nanjing based on MODIS Data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2006, 21(5): 426-431.[叶柯, 覃志豪. 基于MODIS数据的南京市夏季城市热岛分析[J]. *遥感技术与应用*, 2006, 21(5): 426-431.]
- [15] 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.[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.]
- [16] Dai Xiaoyan, Zhang Liqun, Guo Zhongyang, *et al.* Mechanism of Formation of Urban Heat Island Effect and Its Spatial Pattern in Shanghai [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3995-4004.[戴晓燕, 张利权, 过仲阳, 等. 上海城市热岛效应形成机制及空间格局[J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3995-4004.]
- [17] Wei Chunzhu, Meng Qingyan, Zheng Wenfeng, *et al.* The Study of Quantitative Relationship between Land Surface Temperature and Land Cover of Guangzhou [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(6): 955-963.[韦春竹, 孟庆岩, 郑文锋, 等. 广州市地表温度反演与土地利用覆盖变化关系研究[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(6): 955-963.]
- [18] Resource and Environment Data Center of Chinese Academy of Sciences. Land Use Data in China [DB/OL]. [http://www.resdc.cn. 2018-3-25. [中国科学院资源环境科学数据中心. 中国土地利用现状遥感监测数据 [DB/OL]. http://www.resdc.cn. 2018-3-25.]
- [19] Kuang Wenhui, Chen Lijun, Liu Jiyuan, *et al.* Remote Sensing Based Artificial Surface Cover Classification in Asia and Spatial Pattern Analysis [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 46(9): 1162-1179.[匡文慧, 陈利军, 刘纪远, 等. 亚洲人造地表覆盖遥感精细化分类与分布特征分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(9): 1162-1179.]
- [20] Qin Zhihao, Zhang Minghua, Arnon Karniel, *et al.* Mono-window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM6 Data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 456-466.[覃志豪, 张明华, Arnon Karineli, 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.]
- [21] Qin Zhihao, Li Wenjuan, Xu Bin, *et al.* The Tabular Auto-generatio Technology for Field Survey in Land-use Dynamic Monitoring [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2004, 16(3): 28-32, 36, 41.[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, 36, 41.]
- [22] Qin Zhihao, Li Wenjuan, Zhang Minghua, *et al.* Estimating of the Essential Atmospheric Parameters of Mono-window Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat TM6 [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2003, 15(2): 37-43.[覃志豪, 李文娟, 张明华, 等. 单窗算法的大气参数估计方法[J]. *国土资源遥感*, 2003, 15(2): 37-43.]
- [23] Zhang Yong, Yu Tao, Gu Xingfa, *et al.* Land Surface Temperature Retrieval from CBERS-02 IRMSS Thermal Infrared Data and Its Applications in Quantitative Analysis of Urban Heat Island Effect [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 789-797.[张勇, 余涛, 顾行发, 等. CBERS-02 IRMSS 热红外数据地表温度反演及其在城市热岛效应定量分析中的应用[J]. *遥感学报*, 2006, 10(5): 789-797.]
- [24] Kuang Wenhui. Advance and Future Prospects of Urban Land Use/Cover Change and Ecological Regulation of Thermal Environment [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(10): 1643-1652.[匡文慧. 城市土地利用/覆盖变化与热环境生态

- 调控研究进展与展望[J]. 地理科学, 2018, 38(10): 1643-1652.]
- [25] Liu Yufeng, Yuan Zhihua, Kong Wei, *et al.* The Changing Trend of Heat Island Intensity and Main Influencing Factors during 1993~2012 in Xi'an City[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(06): 974-985.[刘宇峰, 原志华, 孔伟, 等. 1993~2012年西安城区城市热岛效应强度变化趋势及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(06): 974-985.]
- [26] Li Yao, Pan Jinghu, Luo Jing. Urban Heat Environment and Surface Energy Balance Analysis of Xi'an based on LDCM Remote Sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(5): 868-875.[李瑶, 潘竞虎, 罗晶. 基于Landsat 8影像和能量平衡的西安市热场格局研究[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(5): 868-875.]
- [27] Bian Zihao, Ma Chaoqun, Wang Di, *et al.* Relation between the Urban Heat Island Effect and Landscape Ecological Pattern in Xi'an Region[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(2): 342-348.[卞子浩, 马超群, 王迪, 等. 西安地区热岛效应与景观生态格局相关性研究[J]. 干旱气象, 2016, 34(2): 342-348.]
- [28] Wang Meiya, Xu Hanqiu. Analyzing the Influence of Urban forms on Surface Urban Heat Islands Intensity in Chinese Mega Cities[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(12): 1787-1798.[王美雅, 徐涵秋. 中国大城市的城市组成对城市热岛强度的影响研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 1787-1798.]

Spatiotemporal Pattern of Urban-rural Aradient Land Cover Changes and Their Impact on Urban Heat Island in Xi'an City Since the 21st Century

Shi Shushu¹, Kuang Wenhui², Dong Siqu^{2,3}

(1.College of Geomatics Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710600, China;

2.Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Rapid urban expansion had a significant impact in land use/cover change along urban-rural gradient, and the increase of impervious construction land and the reduction of vegetation cover had induced and aggravated the urban heat island effect. Studying the impact of urban-rural gradient land cover change on urban heat island effect was significant for urban planning and construction, improving the comfort of human settlements and enhancing the function of urban ecological services. The surface temperature of Xi'an city was retrieved by mono-window algorithm based on Landsat images, and the thermal field intensity map was obtained by calculating the thermal field variation index, and the gradient land cover changes in urban and rural areas were analyzed with land use data. The results showed that: ① The urban heat island effect in Xi'an showed a trend of first increasing and then decreasing from 2000 to 2015. In 2000, the extremely strong heat island effect area accounted for 10.58% of the research area, and gradually increased to 16.14% in 2011, and then decreased to 9.00% in 2015. ② From 2000 to 2015, the area of construction land increased 412.76 km² and the intensity of extremely strong heat island expanded year by year with the expansion of urban built-up areas. ③ About 70% of the non-heat island effect areas were located on farmland and forest land, and the proportion of water area in the non-heat island effect was increasing year by year from 31% to 47%, which showed that the increase of vegetation and water area could effectively alleviate the urban heat island effect.

Key words: Urban heat island effect; Land use change; Land surface temperature; Remote sensing; Urban built-up area; Xi'an