doi: 10.6046/gtzyyg.2019.04.25
引用格式: 曹琦,师满江,周亮,等. 山地城市裸地时空变化的热环境响应特征研究[J]. 国土资源遥感,2019,31(4):190 - 198 (Cao Q, Shi M J, Zhou L, et al. Study of the response characteristics of thermal environment with spatial and temporal changes of bare land in the mountain city[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(4): 190 - 198.)

山地城市裸地时空变化的热环境响应特征研究

曹 琦[1], 师满江[1], 周 亮[2], 王 婷[3], 彭黎君[1], 郑仕雷[1]
(1. 西南科技大学土木工程与建筑学院,绵阳 621010; 2. 兰州交通大学测绘与地理信息学院,兰州 730070; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘要: 裸地被认为是导致城市热岛效应的下垫面之一,然而以往研究对于裸地在热岛效应中的贡献度仍缺乏定量刻画。以 2005 年、2011 年和 2017 年 3 期 Landsat TM/OLI 遥感影像为数据源,以西南山地城市绵阳市为研究区,通过反演土地利用/土地覆被变化过程中地表温度响应特征,构建裸地热岛效应贡献度指数,分析了在城市化进程中裸地时空变化的地表热环境响应特征。主要结论有: ①2005—2017 年间,裸地占整个研究区面积最低为 4.73%(即 2005 年的 53.98 km^2),最高为 6.34%(即 2011 年的 72.28 km^2),12 a 间总面积减少了 5.54 km^2,城市开发区、城乡过渡带以及沿新建道路是裸地集中分布区; ②2005—2017 年间,随着裸地斑块的空间集聚,高密度区裸地地表温度显著高于低密度区,但地形(高程、坡度、坡向),斑块面积和形状等对裸地地表温度的影响不显著; ③2005—2017年间,裸地与农村地区地表温度的绝对差由 1.73 ℃增加到 2.12 ℃,低于同时期城市不渗水面与农村区域的地表温度差(3.07 ~ 3.23 ℃),裸地对区域热岛效应的贡献度由 34%(2005 年)增长到 37%(2011 年),最后又下降至 20%(2017 年)。研究结果可为评估城市裸地要素的热场时空变化特征、缓解城市热岛效应提供科学依据。

关键词: 裸地; 地表温度; 热岛效应; Landsat TM/OLI; 山地城市; 绵阳市
中图法分类号: TP 79　**文献标志码**: A　**文章编号**: 1001 - 070X(2019)04 - 0190 - 09

0 引言

扩大居住区、露天采矿、城市基础设施建设等人类活动直接或间接地导致地表植被退化,形成地表裸露(以下简称裸地)[1]。虽然裸地在全球土地利用/土地覆被变化(land use /land cover change, LUCC)中占比很小,但裸地的形成和增长改变了原生地表生态系统的结构和功能,造成区域生态环境的恶化[2-4]。此外,裸地也被认为是导致城市热岛(urban heat island, UHI)效应的地表下垫面之一[5]。然而裸地因分布零散、面积占比小,在传统的 LUCC 研究或城市规划中容易被忽视(如在土地利用分类中裸地常划分为未利用地或其他类用地类型),且裸地受人类活动和自然过程双重影响,时空转化复杂[2,6],因此,在 LUCC 研究中针对单一裸地要素的研究鲜有报道。此外,虽然已有研究证实裸地的地表温度仅次于城市不渗水面[7-8],是导致 UHI 的第二策源地,但对裸地在 UHI 中的比例及在时间上的变化特征缺乏定量化的描述。

中国有大约超过一半的城市位于山地丘陵区[9]。受地形影响,山地城市山体和地表植被更易被破坏,形成大量裸露山体和裸露地表[10]。此外,山地城市建成区空间闭塞,风速小,气流难以流动,加剧了 UHI 效应,俗称“火炉”(如重庆市)。传统对山地城市地表温度与 UHI 的研究主要基于以下 3 个方面: ①山地地形与 UHI 的关系,如 Estoque 等[11]和韩贵锋等[12]分别对菲律宾山地城市和重庆市进行研究,发现山地地形如坡度、坡向及海拔等并不能阻止山地城市 UHI 的加强,吕志强等[13]发现山地建成区地表温度受海拔变化的影响显著高于地形起伏的影响; ②山地城市形态与热环境的关系,如蔡智等[14]以重庆市为例,探讨了建筑容积率、建筑密度、天空开阔度等与地表温度之间复杂的非线性

收稿日期: 2018 - 09 - 26; **修订日期**: 2019 - 03 - 27
基金项目: 国家自然科学基金项目“山地丘陵城市建成区时空扩展与城市韧性协调发展研究”(编号: 41701172)、四川省教育厅项目“基于城市双修的城市裸地景观生态格局及修复路径”(编号: 18ZB0610)和西南科技大学人才引进专项项目“成渝城市群城镇化与生态环境耦合机理研究”(编号: 17zx7102)共同资助。
第一作者: 曹 琦(1984 -),女,博士,讲师,主要从事区域规划与理论的研究。Email: 1098890240@qq.com。
通信作者: 师满江(1985 -),男,博士,讲师,主要从事城乡规划理论与技术的研究。Email: shimj111@163.com。
万方数据

关系; ③山地城市 LUCC 对 UHI 的影响,在此类研究中,一般将导致山地城市 UHI 的用地类型归类为建设用地[15]。综上研究发现,现有对山地城市 UHI 效应的研究大多忽视了裸地在 UHI 中的作用; 此外,目前通过调整 LUCC 缓解 UHI 的研究大多集中在增加城市植被或水体上[16-17],也忽视了通过对裸地的改造利用来达到缓解 UHI 的作用。

基于此,本研究选择典型山地城市四川省绵阳市为研究区,通过遥感解译研究区 2005—2017 年间 LUCC 信息,结合裸地的时空变化特征,构建裸地 UHI 贡献度指数,定量分析裸地时空变化的地表热环境响应特征,为理清裸地在城市化进程中热环境特征及利用裸地缓解 UHI 提供科学依据。

1　数据和方法

1.1　研究区概况及数据源

绵阳市位于四川盆地西北部,涪江中上游,属山地丘陵地貌特征。市区三面环山,涪江、安昌江、芙蓉溪穿城而过,城市发展受地形影响,在空间形态上形成一个向 NW 倾斜的"Y"型。绵阳市是 2008 年"5·12"汶川大地震的重灾区,近年来通过灾后重建及国家科技城等建设,市区及周边出现大量裸地,给城市景观及生态环境都带来了很大破坏。本研究区范围参考绵阳市总体规划(2010—2020)中规划区范围,包含绵阳市涪城区、游仙区和安州区(图 1)。

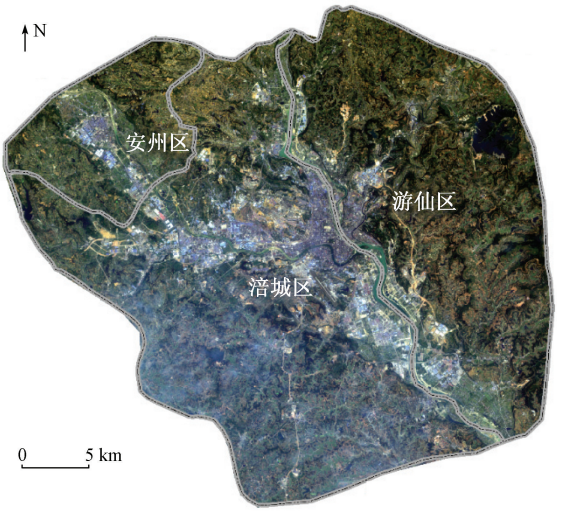


图 1　研究区 2017 年 5 月 1 日 Landsat OLI 彩色合成影像

Fig. 1　Landsat OLI images of the study areas in May 1, 2017 displayed in false color composite

本研究主要数据源如表 1 所示。Landsat TM, OLI/TIRS 遥感数据下载自美国地质调查局网站(https://earthexplorer.usgs.gov,行列号为 130/38)。其中 Landsat TM 的第 1—5 波段和 Landsat OLI 的第 1—7 波段用于 LUCC 的解译,Landsat TM 第 6 波段和 Landsat TIRS 的第 10 波段用于地表温度反演。所有地理信息数据经投影和坐标转换统一为 UTM_Zone_48N 投影和 GCS_WGS_1984 坐标系。

表 1　本研究主要数据源

Tab. 1　Landsat images and auxiliary data were used in this study

数据类型		卫星过境时间	空间分辨率	云覆盖度/%	主要用途
遥感影像	Landsat TM	2005-04-14	多光谱波段为 30 m 热红外波段为 120 m	0	解译研究区 LUCC 信息; 反演研究区地表温度
	Landsat TM	2011-06-02			
	Landsat OLI/TIRS	2017-05-01	多光谱波段为 30 m 全色波段波段为 15 m 热红外波段为 100 m	4	
辅助数据	数字高程模型(digital elevation model, DEM)		30 m	0	高程、坡度、坡向分析
	Google Earth 影像	2017-10-01 2010-11-15	0.5 m	0	训练样本选取和精度验证

1.2　LUCC 遥感解译方法

基于分层分类法[18]对影像进行 LUCC 遥感解译。首先将研究区 LUCC 分为裸地、城市不渗水面、耕地、林地、水域和其他共 6 类; 然后进行裸地信息的提取,待满足精度后将裸地信息掩模处理后再提取城市不渗水面; 同理,提取城市不渗水面后,将已经提取的类别进行掩模处理后再提取下一类用地,依此进行,直到所有用地类型提取完毕。其中,城市不渗水面和裸地的提取参考徐涵秋等[19]和李霞等[20]采用的归一化差异不透水面指数(normalized difference impervious surface index, NDISI)和归一化差异土壤指数(normalized difference soil index, NDSI)分别提取; 植被和水体由于光谱特征差异明显而相对容易被提取,林地和耕地依据归一化差异植被指数(normalized differential vegetation index, NDVI)阈值进行分离; 在完成以上 5 类用地提取和精度验证后,利用 ArcMap10.2 软件中的 Erase 工具,用研究区擦除以上 5 类用地,剩余为其他类用地。解译精度验证是在参考研究区 2010 年和 2017 年的 Google Earth 影像的基础上,在 Landsat TM/OLI 上尽可能选取各地类较为纯净的训练样本感兴趣区域(region of interest, ROI),每类用地的 ROI 数量不低

万方数据

于 100 个,然后将提取信息与 ROI 比对检验,保证每一类用地的精度保持在 90% 。

1.3 LUCC 及裸地时空变化分析方法

1.3.1 LUCC 及裸地年变化率和动态度

分别采用年变化率 K_i 和动态度 D_i[21] 来表示第 i 类 LUCC 的年均变化速率和强度。计算公式分别为

$$K_i = \left(\frac{\Delta S_{i,t}}{S_i}\right)\frac{1}{t} \times 100\% \quad , \qquad (1)$$

$$D_i = \left(\frac{|\Delta S_{i,t}|}{S_a}\right)\frac{1}{t} \times 100\% \quad , \qquad (2)$$

式中: S_i 为监测开始时间第 i 类 LUCC 的总面积; $\Delta S_{i,t}$ 为监测开始至结束时段内第 i 类 LUCC 的净变化面积; t 为时间段; S_a 为研究区总面积。

1.3.2 裸地景观变化特征及与地表温度的关系

首先,分别选取裸地斑块数量、面积、形状指数表征裸地时空变化的景观特征[22],其中斑块数量、面积、形状指数的计算在 ArcMap10.2 软件中完成; 然后,统计分析裸地景观指数与裸地地表温度的线性关系,分析裸地景观变化的热环境相应特征。

1.3.3 裸地空间分布及与地表温度的关系

1)裸地在空间分布上的集聚、分散趋势可能影响裸地地表温度。为此,首先选择核密度估计(kernel density estimation, KDE)计算裸地在空间分布上的密度特征,KDE 通过监测中心要素与周边邻近要素之间的距离,并对距离及权重进行连续化模拟形成栅格图像,每个栅格的核密度值反映空间要素的分布特征[23]; 然后,统计不同密度等级下对应裸地地表温度的面积比例,裸地高密度等级下对应裸地高温面积占比越高,表明密度对地表温度越有促进作用。

2)位于不同高程、坡度和坡向上的裸地,其对应地表温度可能也有差异。首先,基于研究区 30 m 空间分辨率 DEM 数据分析,提取裸地地形分布特征; 然后,建立不同裸地地形因子与裸地地表温度之间的线性关系,以表征不同地形条件下的裸地地表温度响应特征。

1.4 裸地地表温度反演及分析方法

考虑到研究区山地丘陵地形受水汽和云量的影响较大,因此选择辐射传输方程(radiative transfer equation, RTE)模型反演地表温度[24]。其基本原理为先估算大气对地表热辐射的影响,然后把大气影响这部分从卫星传感器所观测到的热辐射总量中减去,从而得到地表热辐射强度,再进一步将地表热辐射强度转换为地表温度,具体反演流程参考文献[24]。

1.4.1 地表温度热力等级划分

为表示研究区及裸地地表温度的空间分布特征,首先计算研究区及裸地的热岛强度指数,然后运用均值 - 标准差法对归一化后的热岛强度指数进行等级划分,从高到低依次划分为高温、次高温、中温、次低温和低温 5 个热力等级[25]。热岛强度计算公式为

$$H = \frac{T_i - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad , \qquad (3)$$

式中: H 为热岛强度指数; T_i 为第 i 个像元的地表温度; $T_{\max}$ 和 $T_{\mim}$ 分别为影像中最低温和最高温。H 值越大,说明热岛强度越高; 反之,则说明强度越低。

1.4.2 裸地热岛效应贡献率指数

裸地热岛效应贡献率指数(C_{UHI})由裸地在 UHI 中的相对温度比例和面积比例 2 部分构成,前者参考 UHI 的计算方式,后者计算裸地在 UHI 下垫面(本研究为城市不渗水面和裸地)中的面积比例。具体计算公式为

$$C_{\mathrm{UHI}} = \frac{T_{\mathrm{Bare}} - T_{\mathrm{Rural}}}{T_{\mathrm{Urban}} - T_{\mathrm{Rural}}} \frac{S_{\mathrm{Bare}}}{S_{\mathrm{Urban}} + S_{\mathrm{Bare}}} \times 100\% \quad , \qquad (4)$$

式中: C_{UHI} 为裸地的热岛效应贡献度指数; T_{Bare}, T_{Urban} 和 T_{Rural} 分别为裸地、城市区域和乡村区域的平均温度; S_{Bare} 和 S_{Urban} 分别为相应时期裸地和城市建成区(本研究以城市不渗水面代替)的面积。其中 $T_{\mathrm{Urban}} - T_{\mathrm{Rural}}$ 为 UHI 效应强度指数[26]; $T_{\mathrm{Bare}} - T_{\mathrm{Rural}}$ 为裸地热岛效应强度指数。

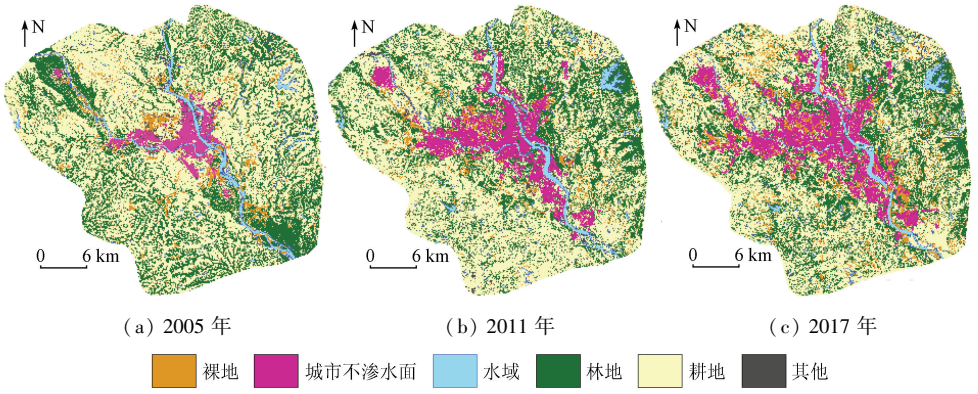
2 结果与分析

2.1 LUCC 变化及地表温度响应特征

2.1.1 LUCC 及裸地变化特征

图 2 展示了研究区不同时期的 LUCC 信息。城市建成区(图中为城市不渗水面)沿着河谷盆地不断扩展,裸地不同时期在城乡过渡带、城市建成区内以及道路两边均有分布,整体显示出零散的空间分布特点。经统计,2005—2017 年,研究区耕地、裸地、林地和城市不渗水面构成的 4 大类用地占研究区总面积(1 140.68 km^2)的 90% 左右,其中耕地和林地分别占 60% 和 20% 左右,裸地在研究区面积占比中最高达到 6.34%(2011 年 72.28 km^2),最低约占 4.73% (2005 年 53.98 km^2),反映出裸地占比面积小的特征,其次,水域和其他类用地面积合计约占研究区 6% 左右。

万方数据

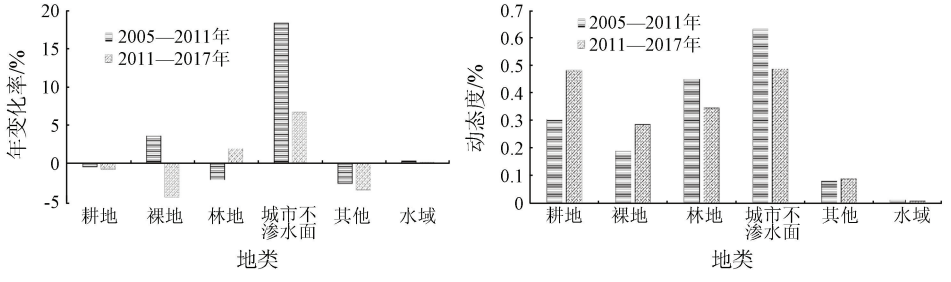


(a) 2005 年　(b) 2011 年　(c) 2017 年

图 2　研究区 2005—2017 年间 LUCC 分布

Fig. 2　LUCC in the study area from 2005 to 2017

图 3 为 2005—2017 年间研究区 LUCC 年变化率和动态度。如图 3(a),在 2005—2011 年和 2011—2017 年 2 个时期内,裸地年变化率分别为 3.57% 和 -4.22%,呈"先增后减"的变化特征;城市不渗水面面积由 38.96 km^2 增长到 115.02 km^2,年变化率分别为 18.37% 和 6.74%;同时期耕地面积由 73.83 km^2 下降到 68.49 km^2,林地总面积减少 0.71 km^2,水域面积基本维持稳定。从 2005—2011 年和 2011—2017 年 2 个时期内各用地类型的动态度来看(图 3(b)),裸地动态度分别为 19% 和 28%,对应同期城市不渗水面分别为 63% 和 49%,耕地分别为 30% 和 49%,林地分别为 35% 和 47%,因此,裸地在研究区 4 大类用地类别中动态度最小,最大为城市不渗水面。



(a) 年变化率　(b) 动态度

图 3　2005—2017 年间研究区 LUCC 年变化率和动态度

Fig. 3　Annual average growth rate and growth intensity of LUCC in the study area from 2005 to 2017

综合来看,2005—2017 年间,耕地面积大幅下降和城市不渗水面迅速扩张是研究区 LUCC 最显著的特征,裸地变化呈"先增后减"、整体下降的趋势。

2.1.2　LUCC 及裸地地表热环境特征

2005—2017 年间的 3 期遥感数据中,本研究反演的研究区地表温度与历史时期的气象记录(绵阳市统计年鉴 http://tjj.my.gov.cn/bmwz/mytjnj/index.html)相对误差分别为 13%,6% 和 8%。鉴于本研究侧重于不同时期地表温度在空间上的相对强弱特征。因此,地表温度反演结果可用于本文的后续研究。在地表温度遥感反演的基础上,将研究区地表温度和 3 个时期裸地地表对应的地表温度按照式(3)划分为 5 个等级,并分别统计不同温度等级下的面积占研究区的比例,结果如表 2 所示。

表 2　2005—2017 年间研究区及裸地不同等级地表温度对应的面积比例

Tab. 2　Area ratios corresponding to different levels of surface temperature of the study area and bare land from 2005 to 2017　(%)

温度等级	2005 年		2011 年		2017 年	
	研究区地表温度面积	裸地地表温度面积	研究区地表温度面积	裸地地表温度面积	研究区地表温度面积	裸地地表温度面积
高温区	4.05	33.38	4.14	29.52	4.12	26.09
次高温区	13.50	39.01	12.94	38.97	15.45	46.84
中温区	28.19	17.74	31.63	22.14	30.58	22.37
次低温区	20.97	8.92	18.56	8.27	17.19	4.02
低温区	32.29	0.95	32.73	1.10	32.66	0.68

万方数据

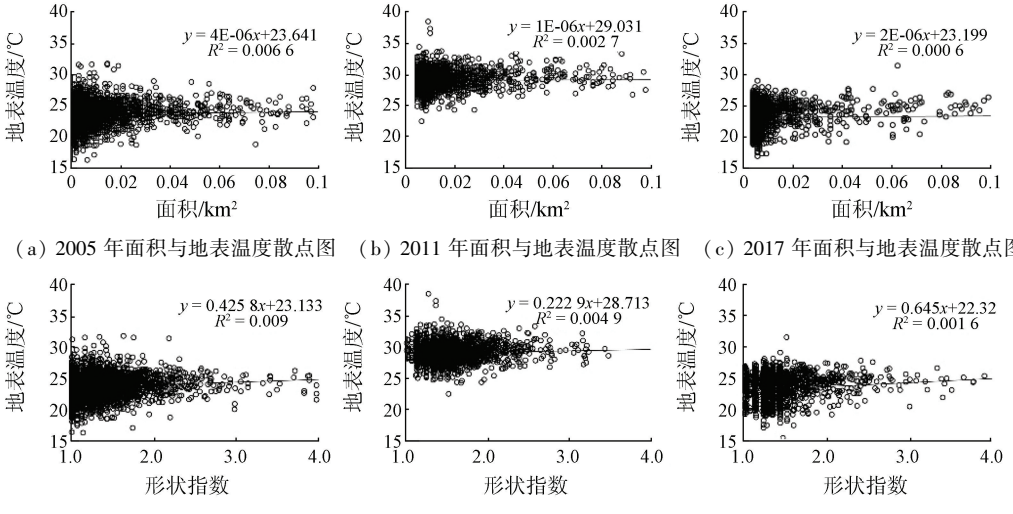
2005—2017 年间,研究区高温区、次高温区和中温区三者总面积比例由 45.74% 增长到 50.15%,其中高温及次高温区由 17.55% 增长到 19.57%,同时期次低温和低温区面积由 54.26% 下降低到 49.85%。研究区温度等级的变化呈现高温和次高温区面积逐年增长,次低温和低温区面积逐年下降的趋势,充分表明研究区 UHI 效应逐年增强的趋势。

2005—2017 年间,裸地地表次低温和低温区面积由 2005 年的 9.87% 降低到 2017 年的 4.70%,同期中温区由 17.74% 增长到 22.37%,高温和次高温区占到裸地面积的 70% 以上。反映出裸地地表温度在中温区的比例逐年增长,但面积占比较小,而高温和次高温区在裸地地表温度中起到了主导作用,这也是造成裸地 UHI 效应的主要原因。

2.2 裸地景观变化的热环境响应特征

2.2.1 裸地斑块面积、形状变化的热环境响应特征

2005—2017 年间,裸地斑块数量增加显著,但同时期裸地总面积、平均斑块面积减小。裸地斑块数量由 2005 年的 1 592 增长到 2017 年的 2 430,增长了 52%,但平均斑块面积下降了 42%,对应同时期斑块形状指数分别为 1.29,1.56 和 1.43。综合来看,研究区裸地景观格局随时间推移而呈现出更加破碎化的变化特点。图 4 为裸地斑块面积、形状指数与对应地表温度的散点图和线性关系。整体来看,除 2011 年裸地地表温度整体高于 2005 年和 2017 年外,其他各时期裸地斑块面积、形状指数与对应斑块地表温度之间不存在明显的线性关系,表明裸地斑块面积和形状对其地表温度的影响甚微。



(a) 2005 年面积与地表温度散点图 (b) 2011 年面积与地表温度散点图 (c) 2017 年面积与地表温度散点图

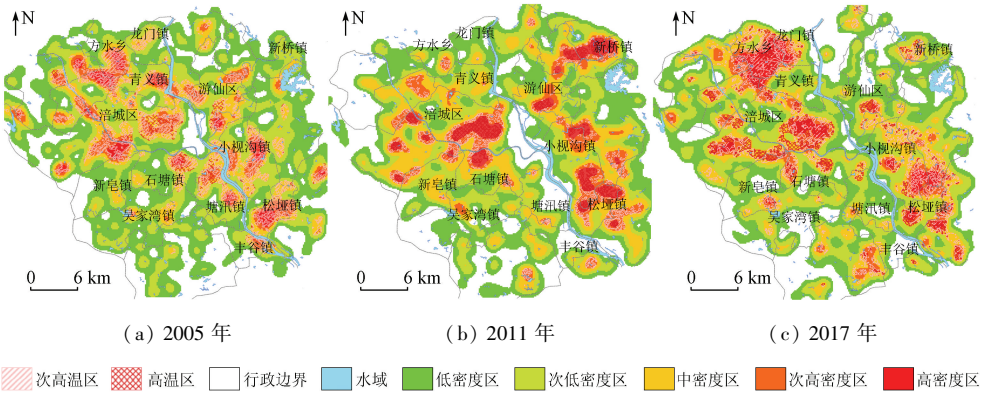
(d) 2005 年形状指数与地表温度散点图 (e) 2011 年形状指数与地表温度散点图 (f) 2017 年形状指数与地表温度散点图

图 4 2005—2017 年间研究区裸地面积、形状指数与裸地地表温度散点图

Fig. 4 Scattered plots of area, shape index and surface temperature of bare land in the study area from 2005 to 2017

2.2.2 裸地空间分布密度的热环境响应特征

表 2 表明裸地地表温度主要集中在次高温和高温区(占总温度的 70%),为此,首先将 KDE 结果按密度从大到小依次划分为高密度区、次高密度区,中密度区,次低密度区和低密度区 5 个等级(图 5);然后,统计落入高密度区、次高密度区和中密度区中裸地高温和次高温区的面积比例(表 3),面积占比越高,表明密度与地表温度相关性越高。



(a) 2005 年 (b) 2011 年 (c) 2017 年

图 5 2005—2017 年间裸地密度分布与温度分布特征

Fig. 5 Bare land density distribution and its surface temperature distribution characteristics from 2005 to 2017

万方数据

表 3　2005—2017 年不同密度等级下裸地温度等级分布面积比例

Tab. 3　Distribution area of bare land temperature grade under different density grades from 2005 to 2017　(%)

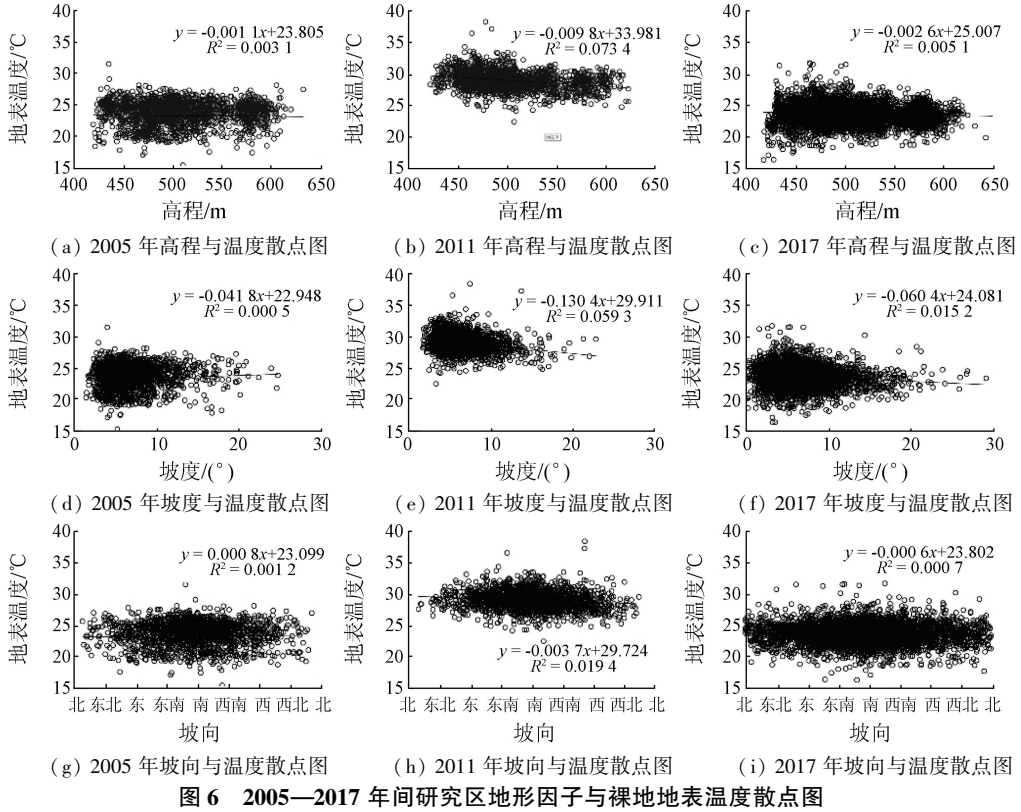
年份	高密度区 – 高温	高密度区 – 次高温	高密度区 – 中温	次高密度区 – 高温	次高密度区 – 次高温	次高密度区 – 中温	中密度区 – 高温	中密度区 – 次高温	中密度区 – 中温	合计
2005 年	2.53	4.18	2.32	5.36	11.49	10.50	5.82	16.20	23.54	81.93
2011 年	2.73	5.80	4.78	3.98	9.72	13.13	4.16	14.07	26.29	84.66
2017 年	3.15	9.61	7.29	3.64	11.17	15.58	4.10	13.26	22.94	90.73

首先,如图 5 所示,从裸地空间分布来看,裸地密度随时间有逐渐增强的趋势,特别是高密度区和次高密度区面积显著扩展。不同时期裸地高密度区集中分布在涪城区、游仙区、方水乡和松垭镇等区域,以上区域是近年来城市高密度开发建设区,代表了城市在空间上的扩展方向。其次,裸地密度分布与裸地地表温度在空间上有较高的重叠区。经表 3 统计,在 2005 年,分布在裸地中密度以上(包括高密度、次高密度和中密度)区域里裸地高温、次高温及中温区面积占中密度以上区域面积的 81.93%,到 2017 年这一比例增长到 90.73%;仅高温以上区域就占到不同时期的 50% 左右,且呈逐年上升的趋势。这一特征表明高密度裸地分布区地表温度显著高于低密度分布区。

2.2.3　裸地地形分布的热环境响应特征

经对研究区 DEM 进行统计分析,研究区裸地均分布在海拔 400 ~ 650 m 的高程范围内,坡度集中在 0 ~ 15°之间,在坡向上,各时期在东南、南和西南向略有增大,但整体较为均衡。

图 6 展示了裸地地形特征与地表温度之间的相关性。从地形因子对应的裸地地表温度来看,较为明显的是 2011 年裸地高程和坡度与裸地温度之间具有较弱的负相关(随高程的增长裸地地表温度有降低的迹象),而在 2005 年和 2017 年没有表现出明显的相关性,说明高程起伏和坡度变化对裸地的地表温度影响不显著。再从裸地分布的坡向上看,各个坡向上的裸地地表温度仍以各时期裸地平均地表温度为主。整体来看,除个别年份外,无论是裸地所处的高程,还是坡度和坡向,地形特征对裸地地表温度没有明显的影响。这与 Estoque 等[11] 和韩贵锋等[12] 的研究结论相似。



(a) 2005 年高程与温度散点图　(b) 2011 年高程与温度散点图　(c) 2017 年高程与温度散点图

(d) 2005 年坡度与温度散点图　(e) 2011 年坡度与温度散点图　(f) 2017 年坡度与温度散点图

(g) 2005 年坡向与温度散点图　(h) 2011 年坡向与温度散点图　(i) 2017 年坡向与温度散点图

图 6　2005—2017 年间研究区地形因子与裸地地表温度散点图

Fig. 6　Scattered plots of the topography factor and surface temperature in the study area from 2005 to 2017

2.3　裸地在 UHI 效应中的贡献度

表 4 统计了研究区 2005 年、2011 年和 2017 年 UHI 效应强度($T_{Urban} - T_{Rural}$)、裸地热岛效应强度($T_{Bare} - T_{Rural}$)和裸地热岛效应贡献度(C_{UHI})的计算结果。

万方数据

表 4 2005—2017 年间研究区 $T_{Urban}-T_{Rural}$, $T_{Bare}-T_{Rural}$ 和 C_{UHI}

Tab. 4 The $T_{Urban}-T_{Rural}$, $T_{Bare}-T_{Rural}$ and C_{UHI} from 2005 to 2017

年份	T_{Urban}/℃	T_{Rural}/℃	T_{Bear}/℃	$T_{Urban}-T_{Rural}$/℃	$T_{Bare}-T_{Rural}$/℃	C_{UHI}/%
2005 年	24.59	21.52	23.24	3.07	1.72	34
2011 年	29.69	26.58	29.06	3.11	2.48	37
2017 年	24.79	21.56	23.68	3.23	2.12	20

2005—2017 年间,研究区 UHI 效应强度由 3.07 ℃升高到 3.23 ℃,再次表明研究区 UHI 有加强的趋势。对应同期裸地地表温度与农村区域地表温度的绝对值也由 1.73 ℃增长到 2.12 ℃,通过前文分析推断,裸地随时间在空间上集聚特征加剧了裸地地表温度。

然而,裸地对区域 UHI 的贡献除绝对温度外,与其面积的变化也有直接关系。2005—2017 年间,在导致 UHI 增强的下垫面中,城市不渗水面总面积扩大了近 2 倍(由 2005 年 38.96 km^2 增长到 2011 年的 115.02 km^2),而同期裸地面积下降了 5.54 km^2,裸地自身面积下降导致其在 UHI 下垫面中的比重也随之降低。因此,综合来看,裸地在研究区 UHI 的贡献度由 2005 年的 34% 增长到 2011 年的 37% 的而后又下降至 2017 年的 20%。

3 讨论与结论

本研究利用 2005—2017 年间 3 期 Landsat 系列遥感影像提取研究区裸地时空分布信息,并通过构建裸地 UHI 贡献度指数,探讨城市化不同阶段裸地时空变化的地表热辐射特征及对 UHI 的贡献度。主要结论有:

1)2005—2017 年间,研究区裸地面积呈先增后减、总面积微降的变化趋势,而对应裸地斑块数量呈整体增长趋势,表明研究区裸地分布破碎化程度不断加剧。不同时期裸地占整个研究区面积在 4.73% ~6.34% 之间。从空间分布来看,城市新开发区,城乡交错带以及沿河流两岸、沿新建道路两边是裸地高密度分布区,裸地在空间上的分布趋势一定程度上揭示了城市未来空间扩展的方向。

2)从研究区地表温度的变化来看,UHI 效应强度由 3.07 ℃增长到 3.23 ℃,表明研究区 UHI 有不断加剧的迹象,主要原因是城市不渗水面的迅速扩张,城市不渗水面面积由 2005 年的 38.96 km^2 增长到 2017 年的 115.02 km^2,年变化率以及动态度是所有用地类型中变化最为剧烈的。而同时期中,裸地面积由 59.52 km^2(2005 年)下降到 53.98 km^2(2017 年),因此,在城市不渗水面迅速增长和裸地面积整体下降的双重影响下,裸地热岛效应贡献度也呈现整体下降趋势,即由 34%(2005 年)下降至 20%(2017 年)。

3)在影响裸地地表温度的因素中,裸地高程、坡度、坡向及斑块大小和形状对其地表温度的影响微弱,而裸地在空间上的密度分布趋势显著影响地表温度,两者在空间上呈显著的正相关。因裸地高密度区均集中在城市边缘或城乡过渡带,因此,相对于整个研究区,受城市不渗水面迅速扩张和裸地面积降低,裸地密度对裸地地表温度的作用并未明显加剧区域 UHI。

受遥感影像空间分辨率的限制,部分较小面积的裸地(如城市施工区等)在本研究中不能被有效提取,一定程度上影响了研究结果精准性。此外,本研究重点分析了裸地在城市化进程中对 UHI 的贡献度,但没能进一步探讨裸地经改造利用后,对缓解 UHI 的潜力大小。因此,该问题是今后需进一步深入研究的方向。

参考文献(References):

[1] Hansen M C, Egorov A, Potapov P V, et al. Monitoring conterminous United States (CONUS) land cover change with web - enabled Landsat data (WELD)[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140(1): 466 - 484.

[2] 高会议,郭胜利,刘文兆. 黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子[J]. 生态学报,2010,31(18):5217 - 5224.
Gao H Y, Guo S L, Liu W Z. Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid - highland of Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5217 - 5224.

[3] 黄积庆,郑有飞,徐静馨,等. 南京秋季裸地臭氧干沉降通量观测及土壤阻力模拟[J]. 应用生态学报,2016,27(10):3196 - 3204.
Huang J Q, Zheng Y F, Xu J X, et al. O3 dry deposition flux observation and soil resistance modeling over a bare soil in Nanjing area in autumn [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3196 - 3204.

[4] 徐 谦,李令军,赵文慧,等. 北京市建筑施工裸地的空间分布及扬尘效应[J]. 中国环境监测,2015,31(5):78 - 85.
Xu Q, Li L J, Zhao W H, et al. Spatial distribution of building sites and related emissions of particulate across Beijing, China[J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(5): 78 - 85.

[5] 胡华浪,陈云浩,宫阿都. 城市热岛的遥感研究进展[J]. 国土资源遥感,2005,17(3). 5 - 9. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2005. 03. 02.

万方数据

Hu H L,Chen Y H,Gong A D. Advances in the application of remotely sensed data to the study of urban heat island[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2005,17(3). 5 - 9. doi:10.6046/gtzyyg.2005.03.02.

[6] 杜金龙,朱记伟,解建仓,等. 基于 GIS 的城市土地利用研究进展[J]. 国土资源遥感,2018,30(3):9 - 17. doi:10.6046/gtzyyg.2018.03.02.
Du J L,Zhu J W,Xie J C,et al. An overview of urban land use research based on GIS[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2018,30(3):9 - 17. doi:10.6046/gtzyyg.2018.03.02.

[7] Omran E S E. Detection of land - use and surface temperature change at different resolutions[J]. Journal of Geographic Information System,2012,4(3):189 - 203.

[8] 历 华,曾永年,柳钦火. 基于遥感的长沙市城市热岛与土地利用/覆盖变化研究[J]. 国土资源遥感,2008,20(4):47 - 52. doi:10.6046/gtzyyg.2008.04.12.
Li H,Zeng Y N,Liu Q H. A remote sensing image - based study of the relationship between urban heat island and land use/cover changes in Changsha City[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2008,20(4):47 - 52. doi:10.6046/gtzyyg.2008.04.12.

[9] 汪昭兵,杨永春. 探析城市规划引导下山地城市空间拓展的主导模式[J]. 山地学报,2008,26(6):652 - 664.
Wang Z B,Yang Y C. Analysing the primary pattern of the space expansion of the mountainous city guided by urban planning[J]. Journal of Mountain Science,2008,26(6):652 - 664.

[10] 朱兆华,徐国钢,陈晓蓉,等. 道路边坡及裸露山体植被恢复与生态防护技术[J]. 中国科技成果,2014(16):26 - 30.
Zhu Z H,Xu G G,Chen X R,et al. Vegetation restoration and ecological protection techniques for road slopes and bare hills[J]. Chinese Science and Technology Achievements,2014(16):26 - 30.

[11] Estoque R C,Murayama Y. Monitoring surface urban heat island formation in a tropical mountain city using Landsat data(1987—2015)[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2017,133:18 - 29.

[12] 韩贵锋,叶 林,孙忠伟. 山地城市坡向对地表温度的影响——以重庆市主城区为例[J]. 生态学报,2014,34(14):4017 - 4024.
Han G F,Ye L,Sun Z W. Influence of aspect on land surface temperature in mountainous city: A case study in central area of Chongqing City[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(14):4017 - 4024.

[13] 吕志强,庞 容,朱金盛,等. 山地城市热环境及其聚落特征的关联分析[J]. 重庆大学学报,2017,40(05):60 - 71.
Lyu Z Q,Pang R,Zhu J S,et al. The correlation analysis of surface thermal environment and settlement characteristics in the hilly city[J]. Journal of Chongqing University. 2017,40(5):60 - 71.

[14] 蔡 智,韩贵锋. 山地城市空间形态的地表热环境效应——基于 LCZ 的视角[J]. 山地学报,2018,36(4):617 - 627.
Cai Z,Han G F. Assessing land surface temperature in the mountain city with different urban spatial form based on local climate zone scheme[J]. Journal of Mountain Science,2018,36(4):617 - 627.

[15] 刘 鑫. 遥感探测技术在山区城市热环境中的应用研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2011.
Liu X. Application of Remote Sensing Detection Technology in Urban Thermal Environment in Mountainous Areas[D]. Kunming: Kunming University of Technology,2011.

[16] 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.
Kuang W H. 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.

[17] Ranagalage M,Estoque R C,Zhang X,et al. Spatial changes of urban heat island formation in the Colombo District,Sri Lanka:Implications for sustainability planning[J]. Sustainability,2018,10(5):1367.

[18] 董 婷,焦利民,许 刚. 基于分层分类法提取城市裸地信息[J]. 测绘地理信息,2016,41(4):56 - 61.
Dong T,Jiao L M,Xu G. Extracting city bare land using hierarchical classification method[J]. Journal of Geomatics,2016,41(4):56 - 61.

[19] 徐涵秋,王美雅. 地表不透水面信息遥感的主要方法分析[J]. 遥感学报,2016,20(5):1270 - 1289.
Xu H Q,Wang M Y. Remote sensing - based retrieval of ground impervious surfaces[J]. Journal of Remote Sensing,2016,20(5):1270 - 1289.

[20] 李 霞,徐涵秋,李 晶,等. 基于 NDSI 和 NDISI 指数的 SPOT - 5 影像裸土信息提取[J]. 地球信息科学学报,2016,18(1):117 - 123.
Li X,Xu H Q,Li J,et al. Extraction of bare soil features from SPOT - 5 imagery based on NDSI and NDISI[J]. Journal of Geo - Information Science,2016,18(1):117 - 123.

[21] 刘纪远,宁 佳,匡文慧,等. 2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报,2018,73(5):789 - 802.
Liu J Y,Ning J,Kuang W H,et al. Spatio - temporal patterns and characteristics of land - use change in China during 2010—2015[J]. Acta Ggeographica Sinica,2018,73(5):789 - 802.

[22] Shi M,Xie Y,Cao Q. Spatiotemporal changes in rural settlement land and rural population in the middle basin of the Heihe River,China[J]. Sustainability,2016,8(7):614.

[23] 段亚明,刘 勇,刘秀华,等. 基于 POI 大数据的重庆主城区多中心识别[J]. 自然资源学报,2018,33(5):788 - 800.
Duan Y M,Liu Y,Liu X H,et al. Identification of polycentric urban structure of central Chongqing using points of interest big data[J]. Journal of Natural Resources,2018,33(5):788 - 800.

[24] 池腾龙,曾 坚,刘 晨. 近 30 年武汉市热环境格局演化机制及扩散模式研究[J]. 国土资源遥感,2017,29(4):197 - 204. doi:10.6046/gtzyyg.2017.04.30.
Chi T L,Zeng J,Liu C. A study of evolution mechanism and diffusion mode pattern of thermal environment for Wuhan City in the past 30 years[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2017,29(4):197 - 204. doi:10.6046/gtzyyg.2017.04.30.

[25] 王璐瑶. 武汉土地利用对城市热环境的影响研究[D]. 武汉:华中师范大学,2016.
Wang L Y. Analysis on the Influence of Land Use on City Thermal Environment[D]. Wuhan:Central China Normal University,2016.

[26] Feng H,Zhao X,Chen F,et al. Using land use change trajectories to quantify the effects of urbanization on urban heat island[J]. Advances in Space Research,2014,53(3):463 - 473.

万方数据

Study of the response characteristics of thermal environment with spatial and temporal changes of bare land in the mountain city

CAO Qi[1], SHI Manjiang[1], ZHOU Liang[2], WANG Ting[3], PENG Lijun[1], ZHENG Shilei[1]

(1. *College of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang* 621010, *China*;
2. *College of Surveying and Geographic Information, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou* 730070, *China*;
3. *Institute of Geographic Science and Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*)

Abstract: Bare land is considered to be an important source causing urban heat island (UHI) in the urban underlying surface. However, quantitative description of the contribution of bare land to UHI in different periods of urbanization remains vague. Taking three phase Landsat TM/OLI remote sensing images from 2005 to 2017 of Mianyang, a mountain city in southwest China, as the research area and based on inverting the thermal environment response characteristics of land use/land cover change, the authors constructed the contribution index of bare land to UHI effect and analyzed the spatial and temporal changes of the surface thermal environment of bare land in the process of urbanization. The results are as follows: (1) In 2005—2017, bare land accounted for 4.73% (53.98 km^2 in 2005) to 6.34% (72.28 km^2 in 2011) in the study area, showing a trend of "increasing first and then decreasing" with total area (5.54 km^2) decreasing. Bare land was mainly distributed along new roads, urban development zones and urban – rural boundaries. (2) In 2005—2017, with the spatial agglomeration of bare land patches, the surface temperature of bare land in high – density area was significantly higher than that in low – density area, but the influence of bare land topography (elevation, slope, aspect), patch area and shape on the surface temperature of bare land was not significant. (3) In 2005—2017, the absolute difference of surface temperature between bare land and rural areas increased from 1.73 ℃ to 2.12 ℃, which was lower than the temperature of urban impermeable surface and rural area (3.07 ~ 3.23 ℃), and the contribution of bare land to urban heat island effect increased from 34% (2005) to 37% (2011) and finally decreased to 20% (2017). This study can provide a scientific basis for evaluating the spatial and temporal changes of urban bare land elements and mitigating the urban heat island effect.

Keywords: bare land; surface temperature; urban heat island; Landsat TM/OLI; mountain city; Mianyang City

(责任编辑: 张 仙)

万方数据