DOI: 10.5846/stxb201711122022

周玄德,郭华东, 孜比布拉·司马义.城市扩张过程中不透水面空间格局演变及其对地表温度的影响——以乌鲁木齐市为例.生态学报,2018,38 (20): - .

Zhou X D, Guo H D, Zibibula · Simayi. Spatial pattern evolution of impervious surfaces and its influence on surface temperature in the process of urban expansion: a case study of Urumqi. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): - .

城市扩张过程中不透水面空间格局演变及其对地表温 度的影响

——以乌鲁木齐市为例

周玄德^{1,2},郭华东², 孜比布拉·司马义^{1,*}

1 新疆大学资源与环境科学学院,乌鲁木齐 830046

2 中国科学院对地观测与数字地球科学中心数字地球重点实验室,北京 100094

摘要:伴随着城市热岛问题的日益显现,关于不透水面与地表温度的关系研究成为热点。在遥感技术的支持下,以乌鲁木齐市 主城区为研究对象,从不透水面出发,分别对不透水面类型、变化强度进行研究,探讨不透水面的时空变化特征。同时引入景观 生态学理论,分析不透水面景观类型的空间格局及规律。然后以反演的地表温度为基础,分析了不透水面相关变量与地表温度 的关系。结论如下:(1)研究区不透水面指数主要集中在 0.3—0.7 之间,占总面积的 90%以上;(2)2000 年以来,15.89% 的区域 不透水面指数连年下降,分布在主城区,20.07% 的区域不透水面指数连年上升,分布在城市的郊区,增长区域的幅度主要集中 在 10%以下;(3)不透水面的景观类型多样性减弱,以中、高覆盖区为主,其中高覆盖区的聚集指数最高,高达 87.71,不透水面 类型斑块形状由复杂向规则化推移;(4)研究区地表温度,增温明显,2000 年地表温度均值 25.94℃,2016 年地表温度的平均值 高达 35.51℃;(5)不透水面对地表温度影响,存在阶段性、正负相关的交替性特征,整体表现为"M"形状;(6)不透水面类型面 积百分比、不透水面类型景观指数对地表温度的影响相对复杂、差异明显,不能从单一的不透水面覆盖分析对地表温度的影响。 不透水面是构成地表升温的重要因素,还需要从不透水面斑块数量、分布格局、材质、地形及周围环境等因素综合研究,才能够 更加准确的刻画不透水面与地表温度的关系。

关键词:不透水面覆盖;景观;地表温度;变量;乌鲁木齐

Spatial pattern evolution of impervious surfaces and its influence on surface temperature in the process of urban expansion: a case study of Urumqi

ZHOU Xuande^{1,2}, GUO Huadong², Zibibula · Simayi^{1,*}

1 College of Recourse and Environmental Science of Xinjiang University Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Digital Earth, Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: As the problem of urban heat islands has increased, the relationship between the imperviousness of a surface and surface temperature has become a topic of interest. In this study, by using the remote sensing technology, the main urban area of Urumqi was studied for the degree of surface coverage, the surface type, the intensity of the change, and the characteristics of the space-time variation of the impervious surface. Simultaneously, the theory of landscape ecology was introduced to analyze the spatial distribution pattern and the regularity of the impervious surface. Then, based on the surface

收稿日期:2017-11-12; 网络出版日期:2018-00-00

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41661036);国家自然科学基金项目(U1603241);新疆自治区研究生科研创新项目(XJGRI2014020)

^{*} 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zibibulla3283@ sina.cn

temperature of the inversion, the relationship between the impervious surface and the surface temperature was analyzed. The following conclusions were drawn: (1) The impervious surface index in the study area was mainly between 0.3—0.7 and 90% of the total area. (2) Since 2000, the index of 15.89% in the main urban area decreased each year; 20.07% of the regional impermeable surface index increased each year with the growth area mainly concentrated in less than 10%; (3) The diversity of the landscape type of the impervious surface was reduced; the medium and high coverage areas were predominant, among which the aggregation index of the high coverage area was the highest, reaching 87.71, and the shape of the impermeable surface type changed from complex to regular; (4) The surface temperature of the study area was obviously increased. In 2000, the average surface temperature was 25.94 °C and the average surface temperature in 2016 reached 35.51 °C; (5) Impervious surface coverage on the surface temperature showed positive and negative correlation of the alternating features and an overall performance in an "M" shape; (6) The percentage of impermeable surface type to the influence of landscape index on surface temperature was relatively complex and had a clear effect, and the influence of surface water temperature cannot be analyzed from a single impermeable surface coverage. An impervious surface is an important factor that contributes to the surface temperature and it is necessary to examine the relationship between impervious surfaces and the surface temperature more accurately from a comprehensive study of the number, distribution pattern, material, terrain, and surrounding environment of impervious surfaces.

Key Words: impermeable surface coverage; landscape; surface temperature; variable; Urumqi

随着城市化进程的不断加快和人类活动的加剧,生态与环境问题大量涌现,人类赖以生存和发展的生态 系统受到巨大的影响,其中城市生态问题尤为突出,如环境污染、交通拥堵、城市安全等。城市生态环境与人 类自身发展的协调性,成为生态质量监测的热点之一^[1-2]。在城市生态系统研究中,多基于单一的指标进行 监测,如土地利用覆盖变化、植被径流变化、城市热岛问题、不透水面等生态因子对城市生态进行评价,从景观 生态学的角度研究生态因子之间的关系相对较少。城市化加快的一个明显特点是城市不透水面快速扩张,城 市建设中各类建筑物和构筑物的面积和密度不断增加,大量的自然表面转化为不透水面,城市景观发生了巨 大的变化^[3-4]。因此研究不透水面覆盖变化对城市热环境的影响对优化城市生态系统有一定的指导意义。

不透水面,主要是指如道路、沥青、水泥等水不能通过其下渗到土壤中的城市人工景观^[5-7],已成为城市 景观的重要组成部分。不透水面景观的面积、丰度、空间格局变化特征,反映城市扩张、变化,体现了城市化的 程度。近年来城市热岛问题日益显著^[8-9],主要是城市化过程中,不透水面的大幅度增加,使得下垫面土地利 用覆盖类型发生变化^[10-11],进而影响着地表温度,因此研究两者的关系,对于改善城市热环境有着重要的 意义。

随着遥感技术的快速发展,特别是遥感监测技术的应用,使得不透水面的提取更加客观化、科学化,能够 很好的从多个角度反映不透水面的动态变化^[12-14]。同时热红外波段数据的出现,使得获取不同时相的地表 温度成为可能。近年来,在多源遥感数据的支撑下,不透水面与城市热岛效应的关系研究成为热点^[15-16]。大 量的研究表明,不透水面与城市热环境表现为显著的相关性,包括线性、非线性的正相关^[17-22],即地表温度随 着不透水面的升高而升高。然而该类研究主要侧重于不透水面与地表温度之间的数值关系分析,从不透水面 景观生态学的角度,特别是不透水面各类景观指数对地表温度的影响研究较少。在城市中,不透水面呈现着 各类不同覆盖程度不透水面构成的斑块,面状的空间格局特征相对明显。基于该考虑,在前人研究的基础上, 从不透水面类型的角度出发,研究不透水面对地表温度的影响。目前,伴随着生态修复、城市修补、城市更新、 海绵城市等概念的提出,将不透水面景观融入到城市大环境中,分析面状的不透水面与地表温度的定量关系 更显重要。本文选取乌鲁木齐市作为研究区,分析 2000 年以来不透水面类型变化强度、变化方向及景观格局 特征,对地表温度影响的定量分析,探讨两者的变动规律,为城市规划相关部门在城市发展的整体布局中提供 参考。

1 研究区、数据来源与研究方法

1.1 研究区

本文以乌鲁木齐市主城区为研究范围,如图1,覆盖外环以内的矩形区域,同时考虑到乌鲁木齐市区的长条形状,将矩形区域北边延至城北主干道,南边延至大湾南路,具体的经纬度范围,87.51°—87.64°E,43.74°—43.91°N,总面积188.25 km²,该区域人类活动比较剧烈,不透水面是该区域的主要构成部分,是不透水面空间格局特征及对地表温度影响研究的典型区域。



Fig.1 The Location of the study

1.2 数据来源

获取了 2000 年 9 月 2 日、2008 年 8 月 7 日 Landsat5 TM 数据,2016 年 7 月 28 日 Landsat8 OLI 数据三幅影 像数据源,数据分辨率 30 m,轨道号 142/030,日间成像数据,影像季相相同,成像时间较接近,数据云量覆盖 较少,数据质量较好,避免了因季节差异、植被生长状态不同而造成的影响,具体数据标识包括 LT51420302000246BJC00、LT51420302008220BJC01、LC81420302016210LGN00,详见表 1,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)。由于影像数据的可获性、质量等 因素,未能选取同月数据予以研究。同时获取成像时间当日七个气象监测点气温数据,包括米东区环保局、新 疆农科院农场、培训基地、铁路局、监测站、三十一中学、收费所,覆盖整个研究区范围。

1.3 研究方法

1.3.1 城市不透水面提取

城市不透水面是本文研究的基础,这里选用不透水面指数来表征,具体计算方法中^[23-24],综合考虑下选取了徐涵秋的归一化差值不透水面指数^[25-28],用于提取研究区的不透水面。同时将归一化不透水面指数(Normalized Impervious Surface Index, NDISI),划分为7个区间,反映不透水面覆盖类型,依次是无覆盖(NDISI <0.2)、低覆盖(0.2< NDISI <0.3)、较低覆盖(0.3< NDISI <0.4)、中覆盖(0.4< NDISI <0.5)、较高覆盖(0.5<

NDISI <0.6)、高覆盖(0.6< NDISI <0.7)、全覆盖(NDISI >0.7)。

$$NDISI = \left(\frac{TIR - (MNDWI + NIR + MIR_1)/3}{TIR + (MNDWI + NIR + MIR_1)/3}\right)$$

式中,NDISI为归一化差值不透水面指数,NIR、MIR₁和 TIR 分别为影像的近红外、中红外 1 和热红外波段,分别对应着 TM 影像的 B4、B5、B6 波段,Landsat8 对应着 B5、B6、B10 波段,MNDWI 为改进的归一化水体指数,见下式:

$$MNDWI = (Green - MIR_1) / (Green + MIR_1)$$

式中, Green 为绿色波段, 对应着 TM 影像的 B3 波段, Landsat8 的 B4 波段。

1.3.2 地表温度反演

地表温度的计算主要是基于热红外波段反演,反演算法主要包括辐射传输方程法、单窗算法、单通道算法^[29-30],考虑数据的获取性及操作的可行性,采用了在 TM 影像的 B6 波段、TIRS 影像的 B10 波段,在辐射传输方程算法下反演研究区地表温度,其中辐射传射方程算法中,所涉及的大气透过率τ、大气向上辐射亮度 L ↑、大气向下辐射亮度 L ↓ 的参数值,是在 NASA 网站(http://atmcorr.gsfc.nasa.gov)查询,输入成像时间及中心经纬度获取大气剖面信息,具体的值如下:

Table 1 Atmospheric profile parameter information						
获取时间 Get time	中心经度 Center Longitude	中心纬度 Center Latitude	透过率 Transmission rate	向上辐射 Upward radiation/ (W m ⁻² sr ⁻¹ µm ⁻¹)	向下辐射 Downward radiation/ (W m ⁻² sr ⁻¹ µm ⁻¹)	
2000-09-02 04:27:56	88.2486	43.1880	0.93	0.4	0.7	
2008-08-07 04:36:04	88.2295	43.1926	0.86	1.12	1.9	
2016-07-28 04:49:53	88.3122	43.1846	0.77	2.05	3.46	

表1 大气剖面参数信息

1.3.3 不透水面格局与地表温度的关系

为了更好的研究不透水面景观空间格局特征,在不透水面类型划分的基础上,结合景观生态学的理论,分别选取了斑块密度(Patch Density, PD)、面积-周长分位数(Permimeter-area fractal dimension, PAFRAC)、聚集指数(Aggregation Index, AI)、香农多样性指数(Shannon's diversity index, SHDI),细化不透水面斑块的景观特征。

不透水面空间格局对地表温度的影响分析中,分别从不透水面类型百分比、各类景观指数共计11个指标 作为自变量,具体包括较低覆盖面积百分比、中覆盖面积百分比、较高覆盖面积百分比、高覆盖面积百分比、斑 块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、边界密度(ED)、斑块面积均值(AREA_MN)、形状指数均值(SHAPE_ MN)、邻近指数均值(ENN_MN)、斑块结合度指数(COHESION),计算与因变量地表温度均值之间的相关性。

2 结果分析

2.1 城市不透水面的变化特征

根据前面介绍的不透水面指数的提取方法,得到了 2000 年以来 3 个时间点的乌鲁木齐市主城区不透水 面指数的空间分布图,精度验证选用 GoogleEarth 作为对比,选取不同地表覆盖类型进行检验,提取精度达到 85%以上。根据图 2 发现,乌鲁木齐市主城区的不透水面扩张明显,特别是西南区域,由较低覆盖类型明显的 转化为中覆盖、较高覆盖类型。2016 年,高覆盖不透水面的区域面积明显减少,主要由于在道路、广场、交通 环岛等重要节点摆放花卉及新建街旁绿地、绿道等,但是整个区域被较高不透水面类型所覆盖。在高覆盖不 透水面的空间布局上,2000 年主要集中在城市中心,相对集中,2008 年高覆盖不透水面分布相对分散,逐渐向 郊区扩散,2016 年高覆盖不透水面主要集中在城市交通道路上,道路周边区域的不透水面指数降低,侧面了
 2000年
 2016年

 2000年
 2016年

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

 1
 1

反映了随着城市的发展表现为扩张的同时,不透水面的内部结构不断优化。

图 2 乌鲁木齐市不透水面类型图



通过 3 个时间点不透水面覆盖类型占比的统计,见 图 3,研究发现:2000 年以来,乌鲁木齐市主城区不透水 面主要集中在较低覆盖到高覆盖之间,占整个研究区面 积的 95%以上,即研究区不透水面指数主要集中分布 在 0.3—0.7 区间内,较低覆盖类型逐年向较高覆盖类型 转化,2000 年以后较低覆盖类型不透水面逐年降低,由 5.77%下降到 2016 年的 0.29%,而在较高覆盖类型的不 透水面上,2000 年 48.44%,2016 年高达 73.34%,说明 了主城区不透水面呈现着由中心向郊区不断蔓延的 态势。

为了比较直观的分析 2000 年以来,每个区域的不 透水面的变化情况,分别用当年的数据减去上个时间点 的数据,大于零记为升变化,小于零记为降变化,得到





2000—2008、2008—2016 两个时间段的升降变化图,然后再对两幅图进行合成,得到由升、降构成的分类图, 见图 4,进一步显示了研究区不透水面指数的升降变化空间分布,计算得到 2000 年以来不透水面指数一直处 于下降的区域占 15.88%,主要集中在主城区内部;一直处于上升的区域占 29.86%,主要分布在城市的郊区, 其中贯穿城区的 G216 国道不透水面增强显著;表现为先降后升和先升后降的不透水面分别占 20.07%、 34.20%,主要穿插在城区与郊区之中。

关于不透水面指数变化的量化分析中,将不透水面指数的变化划分为5个层次,见图4,其中0表示不透水面指数没有变化,计算得到了两个时间段不透水面指数的具体增量。分析得到,两个时间段不透水面指数

5



图 4 乌鲁木齐市不透水面覆盖变化及增量 Fig.4 The changes and increments of impermeable surface cover of Urumqi

并没有体现大幅度的增量,2000年到2008年中没有增量的占35.95%,2008年以来没有增量的区域继续增加,达到了50.08%,该区域主要集中在老城区,即基础设施很早就已经完善的区域,随着城市绿化、生态环境等人居条件的改善,该区域"去水泥"化效果突出。在不透水面指数的增量上,主要位于城市郊区,这也是城市发展的需要,体现了城市扩张的趋势,由老城向新城、城中心向近郊远郊逐渐推移的过程。

2.2 城市不透水面的空间格局变化

不透水面已成为城市景观的重要组成部分之一,本文借助生态学中景观的相关概念对研究区不透水面类型的相关指数予以分析,结合研究需要及景观指数特点,选择公式简单、生态学意义明确、足以说明景观格局特征的斑块密度(Patch Density, PD)、聚集指数(Aggregation Index, AI)、面积-周长分维数(Permimeter-area fractal dimension, PAFRAC)、香农多样性指数(Shannon's diversity index, SHDI)4个指数,定量分析 2000 年以来不透水面空间格局的变化。其中,斑块密度 PD、AI、PAFRAC,计算结果见表 2。

	Table 2	Impermeable	e surface typ	e landscape	index value	of Urumqi			
类型	斑块密度 PD Patch density		面积-周分维数 PAFRAC Permimeter-area fractal dimension		聚集指数 AI Aggregation Index				
Туре	2000	2008	2016	2000	2008	2016	2000	2008	2016
无覆盖 No coverage	0.13	0.16	0.05	1.61	1.61	N/A	77.3	77.56	77.87
低覆盖 Low coverage	0.86	0.48	0.12	1.46	1.46	1.6	59.79	43.53	29.9
较低覆盖 Relatively Low coverage	3.79	2.83	1.08	1.47	1.4	1.39	67.83	65.21	38.53
中覆盖 Medium coverage	9.68	10.51	13.11	1.45	1.46	1.42	75.86	73.63	67.66
较高覆盖 Relatively High coverage	5.94	4.63	1.59	1.47	1.47	1.5	79.76	81.46	87.71
高覆盖 High coverage	9.8	9.06	13.47	1.5	1.49	1.49	66.43	69.53	54.59
全覆盖 Full coverage	1.56	1.57	0.44	1.29	1.28	1.21	57.57	56.39	72.48

7

斑块密度 PD 反映了每 100 hm²中斑块的数量,由于 3 个年份的影像数据范围的一致性,即总景观面积, 斑块密度、斑块数量与斑块数量占总数量比值均传达同样的信息。分析发现,2000 年以来,不透水面无覆盖、 低覆盖、全覆盖斑块密度相对较小,主要集中在其他斑块,特别是中覆盖、高覆盖斑块,而且此类斑块密度上升 明显,如 2000 年中覆盖密度到 9.68,2008 年为 10.51,2016 年增加到 13.11,相比 2000 年增长了 35.44%,侧面 反映了研究区不透水面主要以较低覆盖、中覆盖、较高覆盖、高覆盖景观斑块为主,而且表现为增长趋势,与前 面的不透水面斑块占比分析的结论一致。

面积周长分维数反映了斑块形状由二维景观镶嵌体向欧氏几何的分离的过程,取值范围在1—2之间,当 所有斑块都较小或斑块样本小于10时,PAFRAC在分类文件中没有明确定义,比如在2016年的PAFRAC显 示为"N/A",说明了无覆盖斑块数量太少。2000年以来面积周长分维数均位于1.5左右大于1,反映了斑块 形状的复杂性,然而对每个年份所有斑块的面积周长分维数的整体比较发现,均值有下降的趋势,反映了随时 间的推移,斑块形状规则化明显,这与城市化进程中城市规划的作用相一致。

聚集指数是基于同类型斑块像元间公共边界长度来计算,取值范围 0—100 之间,值越大反映了斑块的聚 合程度越高。计算结果显示,研究区不透水面斑块中,无覆盖、中覆盖、较高覆盖斑块的聚集相对较高,到了 2016 年较高覆盖不透水面景观的聚集程度最大,聚集指数达到 87.71,其他斑块的聚集程度相对较弱。

香农多样性指数 SHDI 是对整体景观中斑块类型的复杂性、多样性的评价,利于不同景观斑块的比较。研究发现,SHDI 逐渐下降,2000 年 SHDI 为 1.29,2008 年 SHDI 为 1.18,2016 年仅 0.84,说明了斑块丰富度在降低,不透水面景观类型多样性减弱。



图 5 乌鲁木齐市地表温度空间分布图 Fig.5 Spatial distribution of surface temperature of Urumqi

2.3 城市不透水面空间格局对地表温度的影响

通过辐射传输方程法,反演得到研究区的地表温度的空间分布,结合地表气象数据的验证,精度较高,见 图 5。2000 年以来,地表温度增温显著,如表 3,2000 年地表温度均值 25.94℃,2008 年达到 32.06℃,2016 年 地表温度的平均值高达 35.51℃,而且最小、最大温度也表现为同等的增大趋势。同时,2000 年不透水面指数 均值 0.51,2008、2016 年不透水面指数均值分别为 0.53、0.54,也表现为明显的增长趋势。2000—2008 年,不 透水面指数增长了 0.02,地表温度增长了 6.12℃;2008—2016 年,不透水面指数增长了 0.01,地表温度增长了 3.45℃。由此发现,2000 年以来,不透水面指数每增加 0.01,地表温度增长 3℃左右。从空间分布上,2000 年 主城区零散的分布着"冷点"区,数量相对较多,"热点"区域的数量及面积相对较少;2008 年以来,"冷点"数 量较少、"热点"区域增多;2016 年,"冷点"区域极少,被大批量的"热点"区域所包围,该"热点"分布相对零 散,表现为向郊区蔓延的趋势。"热点"区域主要分布着地表温度的极大值,该分布区与较高及以上不透水面 覆盖区高度重合。

	Table 3	Surface temperature statistic	s of Urumqi	
年份	最小值	最大值	平均值	标准差
Year	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation
2000	13.69	39.52	25.94	2.46
2008	17.87	44.65	32.06	2.90
2016	21.39	45.80	35.51	2.53

表 3 乌鲁木齐市地表温度统计

2.3.1 不透水面与地表温度的关系

很多研究表明,随着不透水面的增加,地表温度也随之增加,两者呈现明显的正相关关系。从不透水面指数、地表温度影像图入手,构成两者之间的散点图,如图 6(a)。研究发现,图形呈聚集的点球装,形状所覆盖的面积逐渐变小,侧面反映了研究区不透水面指数及地表温度的集聚性,不透水面指数相对比较集中,95%以上的集中在 0.3—0.7 之间。

因此进一步的将不透水面指数进行密度分割,以 0.01 为起点,0.01 为步长,1 为终点,得到 100 个等级的 不透水面指数值,分别计算每个等级指数对应像元的地表温度的均值,由此得到了不透水面指数与对应地表 温度均值的曲线图,见图 6(b)。

分析发现,不透水面指数与地表温度的关系相对复杂,两者的曲线波动明显,表现为"M"形状,以 0.3、 0.5、0.7的不透水面指数值为转折点,不透水面指数在 0—0.3时,伴随不透水面指数的增加,地表温度上升; 不透水面指数在 0.3—0.5时,不透水面指数增加,地表温度表现为下降的趋势;不透水面指数在 0.5—0.7时, 两者表现为同增的趋势;当不透水面指数大于 0.7时,两者表现了一定程度的负相关。

考虑到研究区无覆盖、低覆盖、全覆盖类型的不透水面占比较低,共计不足 5%,因此分割得到的样本数量相对较少,可能会对均值化后得到的地表温度带来误差,难以较全面表现该类型不透水面的真实温度。关于在对不透水面类型与地表温度的关系研究中,将剔除无覆盖、低覆盖、全覆盖类型,重点研究较低覆盖、中覆盖、较高覆盖、高覆盖不透水面对地表温度的影响。

从不透水面的覆盖类型上,分析不透水面类型与地表温度的关系,发现两者表现为比较明显的"V"型曲线,见图 7。2000 年不透水面覆盖区域对地表温度起到增温效果的区间集中在较高覆盖到高覆盖之间,"降 温"效果的区间集中在低覆盖到较高覆盖之间,2008 年、2016 年的不同类型不透水面与地表温度的关系曲线 图比较一致,以中覆盖不透水面为临界点。

2.3.2 其他地表类型与地表温度的关系

为了进一步的验证前面的研究,从不同地表类型对地表温度的影响分析出发,分别选用了建筑指数 (IBI)、裸土指数(SI)、植被指数(NDVI)定量的研究与地表温度的关系。其中,建筑指数越高,不透水面指数 越高,反之,不透水面指数越低;裸土指数、植被指数越高,不透水面指数越低,反之,不透水面指数越高。借鉴 前面对不透水面指数密度分割的方法,分别得到了三者与地表温度的散点图,见图 8。研究发现,建筑指数、 裸土指数与地表温度的曲线图比较相近,它们与地表温度的相关性不是很明显,除 2000 年以外,其他年份关 系比较复杂。2000 年时,建筑指数、裸土指数主要分布在 0—0.2 之间,随着指数的增大,地表温度上升,主要







维持在 25—30℃;2008 年时,建筑指数、裸土指数主要 分布在 0—0.3 之间,随着指数的增大,地表温度变化不 大,主要维持在 30—40℃;2016 年时,建筑指数、裸土指 数主要分布在 0—0.3 之间,随着指数的增大,地表温度 的变化波动明显,主要维持在 40—45℃。由于"同物异 谱、异物同谱"的存在,关于建筑用地与裸土的区分— 直是遥感信息提取的一个难点,因此建筑指数、裸土指 数与地表温度的散点图比较相似。但是它们指数值分 布区间的扩大,反映了在空间布局的变化,集聚性增加, 同时该类地表的温度上升明显。在植被指数与地表温 度的分析中,表现为比较明显的负相关,即随着植被指 数的增加,地表温度下降明显。



2.3.3 不透水面空间格局与地表温度的相关性

前面的分析发现,研究区不透水面类型中,无覆盖、 低覆盖、全覆盖的比重相对较少,因此在研究地表温度与不透水面类型及对应景观指数的关系时,这三类斑块 将不予考虑。由于一副影像只能得到一组因素变量,无法完成相关系数的计算,因此需要重新采样。考虑到 不同时间成像的数据间的差异性,应尽可能以某一年的数据为基础数据,这里选取 2016 年的 Landsat8 数据进 行分析。首先对 2016 年的不透水面指数值采样,随机选取 100 个 100×100 像元的样区,再对这 100 个样区分 别计算地表温度的相关影响变量,包括:较低覆盖面积占总面积百分比、中覆盖面积占总面积百分比、较高覆 盖面积占总面积百分比、高覆盖面积占总面积百分比、PD、LPI、ED、AREA_MN、SHAPE_MN、ENN_MN、 COHESION 及影像地表温度的均值,由此得到 100 个样本,用于分析不透水面空间格局对地表温度的影响,计 算过程主要是通过 Matlab 2015 代码、Fragstats 4.2 软件实现,结果见表 4。



图 8 乌鲁木齐建筑指数、裸地指数、植被指数与地表温度的散点图

Fig.8 Scatter map of Urumqi Building Index, Bare earth Index, vegetation index and surface temperature

表 4	乌鲁木齐市地表温度与不透水面的相关系数

Table 4	Correlation coefficient	t of Urumqi between surface	temperature and impermeable	surface Related variables
---------	-------------------------	-----------------------------	-----------------------------	---------------------------

变量 Variable	较低覆盖 Lower cover	中覆盖 Medium coverage	较高覆盖 Relatively high coverage	高覆盖 High coverage
面积构成 Percentage of area	-0.27 *	-0.69 **	0.41 **	0.42 *
斑块密度 PD Patch Density	-0.47 **	0.45 **	0.30 **	0.49 **
最大斑块指数 LPI Largest Patch Index	-0.06	-0.41	0.29 **	0.08 *
边缘密度 ED Edge Density	-0.34 **	-0.66 **	-0.32 **	0.15 **
斑块面积均值 Area Index Mean	0.13 **	-0.12 **	-0.76 **	0.01 *
形状指数均值 Shape Index Mean	-0.33 **	0.32 **	0.30 **	-0.61 *
临近指数均值 Euclidean nearest neighbor distance mean	-0.60 **	0.05	-0.01	-0.40 **
斑块结合度指数 Patch Cohesion Index	-0.27 **	-0.65 **	0.40 **	0.19 **

*:0.05 的显著性水平; **:0.01 的显著性水平

不透水面类型斑块中,与地表温度相关性比较显著,低覆盖、中覆盖与地表温度之间表现为负相关,即低 覆盖、中覆盖类型面积越多,地表温度越低,其中中覆盖斑块负相关程度较大,相关系数绝对值达到0.69;较高 覆盖、高覆盖与地表温度之间表现为正相关,即较高覆盖、高覆盖面积越多,地表温度越高,两者的相关系数分 别达到了0.41、0.42。

斑块密度与地表温度之间的相关性分析中,较低覆盖斑块密度与地表温度表现为负相关性,其绝对值为 0.47,即该斑块下,斑块密度越高,地表温度越低;中覆盖、较高覆盖、高覆盖斑块下,与地表温度呈现正相关关 系,随着斑块密度的增长,地表温度也随着增长。

最大斑块指数与地表温度之间的相关性分析中,较高覆盖、高覆盖斑块与地表温度呈现正相关关系,随着 最大斑块指数的增长,地表温度也随着增长。 边界密度与地表温度之间的相关性分析中,除高覆盖斑块边界密度与地表温度表现为正相关以外,其余 斑块,包括较低覆盖、中覆盖、较高斑块的边界密度与地表温度均呈现负相关性,即该斑块下,边界密度指数越 高,地表温度越低。

斑块面积均值、形状指数均值与地表温度的相关性方面,两者的作用相反。临近指数均值、斑块结合度指数与地表温度的关系方面,在较低覆盖斑块下,两类指数越大,地表温度越低,其中临近指数的相关系数绝对 值较大,负相关作用明显;其余斑块下,两类景观指数对地表温度的作用是背离的。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1)研究区不透水面整体表现为由城市中心向郊区蔓延的方向,其中西南区域更为显著。研究区不透水面指数,主要集中在 0.3—0.7 之间,以中覆盖、较高覆盖、高覆盖为主,占总面积的 90%以上。

(2)不透水面指数变化上,15.89%的区域不透水面指数在连续下降,主要集中在主城区内部;20.07%的区域不透水面指数连续上升,主要分布在城市的郊区;不透水面变化强度中,不透水面指数多集中在10%以下的增长。

(3)不同地表类型中,植被与地表温度呈负相关,随着植被指数的增加,地表温度下降显著;建筑、裸地对 地表温度的影响相对复杂,2000年正相关明显,其他年份波动变化。

(4)不透水面空间格局分析中,香农多样性指数逐年下降,不透水面类型多样性减弱;斑块密度高值区主要集中在中覆盖类型,由 2000 年的 9.68 上升到 2016 年的 13.11,增长了 35.44%;面积周长分维数均在 1.5 左 右,反映了斑块形状的复杂性,在各时间点的对比上表现为下降趋势,说明斑块形状向规则化方向推移;聚集 指数的高值区主要集中在中覆盖、较高覆盖类型,2016 年较高覆盖该指数高达 87.71。

(5) 地表温度增温显著,2000 年地表温度均值 25.94℃,2008 年达到 32.06℃,2016 年地表温度的平均值 高达 35.51℃,而且"冷点"数量减少,"热点"数量增多。

(6)不透水面指数与地表温度的关系研究中,曲线图呈"M"形状,以 0.3、0.5、0.7 的不透水面指数值为转 折点,不透水面指数 0—0.3 之间,两者表现为负相关,不透水面指数 0.3-0.5 之间,两者表现为正相关,不透水 面指数 0.5—0.7 之间,两者表现为负相关,不透水面指数大于 0.7 时,两者表现为正相关。

(7)地表温度的相关变量研究中,较高覆盖、高覆盖不透水面面积占比与地表温度呈正相关,面积越大, 温度越高,相关系数分别为0.41、0.42;其中,较高覆盖不透水面的景观指数中,斑块密度、最大斑块指数、形状 指数均值、斑块结合度指数与地表温度正相关,相关系数依次为0.30、0.29、0.30、0.40,其余表现为不同程度的 负相关。

伴随着城市的快速发展,研究区不透水面急速扩张,城市热岛效应明显,其中较高覆盖、高覆盖的不透水 面对地表温度的影响较大,植被的降温效果较好。因此在城市生态建设中,应保证一定的绿地率,一方面可以 美化市容市貌,还可以降低城市热岛效应。同时,通过优化不透水面的空间布局、降低不透水面的斑块密度等 措施,消弱不透水面对地表温度的正相关作用。还可以从道路的材质选择、屋顶绿化等手段,来尽可能的优化 城市生态环境。总体而言,城市生态系统较复杂,完善、优化系统的有效运行,并不是单一的生态因子可以彻 底解决的,今后需要因地制宜,科学合理的制定生态修复的方案,保障乌鲁木齐市社会经济与生态环境协调可 持续发展,为人们提供一个宜居场所。

3.2 讨论

本文通过归一化差值不透水面指数法、辐射传输方程法分别提取了研究区的不透水面指数及地表温度, 精度较高,能够满足研究要求。同时借助景观指数很好的反映了不透水面覆盖类型的景观空间特征。研究发 现不透水面与地表温度的关系存在一定程度的阶段性。该阶段性特征,一方面印证了前人关于不透水面与城 市热环境的显著相关性特征,同时也体现了非线性的正相关性。然而阶段性特征也给出了不透水面与城市热 环境之间负相关性的存在,即在一定的范围内,随着不透水面指数的增加,地表温度下降,这是在对不透水面 指数分类予以细分后得到的。因此不透水面对地表温度的影响相对复杂,不能单一的将不透水面指数值绝对 化。不透水面指数仅体现了该像元内不透水面多少情况,还需要思考该像元内不透水面的斑块数量、空间布 局等因素,综合评价与地表温度的影响。同时单个像元内不透水面的材质、像元的高程等因素也会带来不同 程度的影响。在建筑用地、裸地的提取方面,还有待进一步的改善。

在后期研究中,可以通过高分辨率影像为数据源,将地表类型细化,分别从商业区、办公区、住宅区、道路、 公园等相对微观的尺度量化不透水面对地表温度的分析,更加深入的分析不透水面相关要素对地表温度的影 响程度。

参考文献(References):

- [1] 陈爱莲,孙然好,陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展. 生态学报, 2012, 32(14): 4553-4565.
- [2] 杨朝斌,何兴元,张树文,唐俊梅,卜坤,于灵雪,颜风芹.基于 Landsat8 的城市热岛效应与地表因子关系研究——以长春市为例.干旱 区资源与环境,2016,30(12):110-115.
- [3] 王耀斌, 赵永华, 韩磊, 奥勇, 蔡健. 西安市景观格局与城市热岛效应的耦合关系. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2621-2628.
- [4] 买买提江·买提尼亚孜, 阿里木江·卡斯木. 干旱区典型城市下垫面特征及其与地表热环境的关系研究. 生态环境学报, 2015, 24(11): 1865-1871.
- [5] 哈尚辰, 阿里木江・卡斯木. 基于土地集约利用水平的城市热岛效应影响因子分析. 冰川冻土, 2016, 38(1): 270-278.
- [6] 王迎迎, 许玮. 景观格局对城市热岛效应影响研究——以武汉市为例. 城市勘测, 2016, (1): 58-61.
- [7] 罗智勇,王明珠,陈婉佳.城市不透水面信息提取及水环境效应分析——以武汉市江南三区为例.信阳师范学院学报:自然科学版, 2016,29(1),148-151,156-156.
- [8] Wang Q H. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: requirements, methods, and trends. Remote Sensing of Environment, 2012, 117: 34-49.
- [9] Klok L, Zwart S, Verhagen H, Mauri E. The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics. Resources, Conservation and Recycling, 2012, 64: 23-29.
- [10] 谢启姣. 武汉城市热岛特征及其影响因素分析. 长江流域资源与环境, 2016, 25(3): 462-469.
- [11] 黄聚聪,赵小锋,唐立娜,邱全毅.城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征——以厦门市为例.生态学报,2012,32(2): 622-631.
- [12] 王靓, 孟庆岩, 吴俊, 张佳晖, 张琳琳. 2005-2014 年北京市主要城建区热岛强度时空格局分析. 地球信息科学学报, 2015, 17(9): 1047-1054.
- [13] 邱健壮, 桑峰勇, 高志宏. 城市不透水面覆盖度与地面温度遥感估算与分析. 测绘科学, 2011, 36(4): 211-213.
- [14] 唐泽,郑海峰,任志彬,崔明星,何兴元.城市地表热力景观格局时空演变——以长春市为例. 生态学报, 2017, 37(10): 3264-3273.
- [15] 王美雅, 徐涵秋, 付伟, 林中立, 李霞, 张博博, 唐菲. 城市地表水体时空演变及其对热环境的影响. 地理科学, 2016, 36(7): 1099-1105.
- [16] 潘涛, 张弛, 杜国明, 董金玮, 迟文峰. 城乡不透水面增长格局及地表温度的响应特征研究. 地球信息科学学报, 2017, 19(1): 134-142.
- [17] 徐涵秋.从增强型水体指数分析遥感水体指数的创建.地球信息科学,2008,10(6):776-780.
- [18] 徐涵秋,王美雅. 地表不透水面信息遥感的主要方法分析. 遥感学报, 2016, 20(5): 1270-1289.
- [19] 方刚.改进型混合水体指数的城市水体信息提取——以宿州市为例.测绘科学, 2016, 41(4): 44-49.
- [20] 李苗,藏淑英,吴长山,田旸.哈尔滨市城乡结合部不透水面时空变化及驱动力分析.地理学报,2017,72(1):105-115.
- [21] 陈婉佳,高孝杰,刘蓉蓉,何政伟. 基于 Landsat8 数据的城市不透水面及其与热环境的关系研究. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(4): 92-95.
- [22] 葛壮,李苗. 基于 NDISI 的七台河市不透水面信息提取. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2015, 31(3): 129-131.
- [23] 尹昌应, 石忆邵, 王贺封, 吴婕. 城市地表形态对热环境的影响——以上海市为例. 长江流域资源与环境, 2015, 24(1): 97-105.
- [24] 王丽云,李艳,周阳. 基于 TM 影像的宁波市不透水面变化研究. 遥感信息, 2014, 29(1): 35-39.
- [25] 岳文泽, 刘学. 基于城市控制性详细规划的热岛效应评价. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3631-3640.
- [26] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [27] 程熙, 沈占锋, 骆剑承, 朱长明, 周亚男, 胡晓东. 利用混合光谱分解与 SVM 估算不透水面覆盖率. 遥感学报, 2011, 15(6): 1228-1241.
- [28] 徐涵秋. 一种快速提取不透水面的新型遥感指数. 武汉大学学报・信息科学版, 2008, 33(11): 1150-1153.
- [29] 林荣平,祁新华,叶士琳.沿海河谷盆地城市热岛时空特征及驱动机制. 生态学报, 2017, 37(1): 294-304.
- [30] 刘波,张源,程涛,宋杨.基于高分二号卫星影像的城市不透水面提取.地理信息世界,2017,24(2):103-107.