

doi: 10.6046/gtzyyg.2020.01.33

引用格式: 王茹,张艳芳,张洪敏,等. 城市新区不透水地表盖度与人为热的关系研究——以陕西省西咸新区为例[J]. 国土资源遥感,2020,32(1):247-254. (Wang R,Zhang Y F,Zhang H M,et al. Study on the relationship between surface impervious coverage and artificial heat in new urban districts: A case study of Xixian New District,Shaanxi Province[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2020,32(1):247-254.)

城市新区不透水地表盖度与人为热的关系研究

——以陕西省西咸新区为例

王茹^{1,2}, 张艳芳^{1,2}, 张洪敏^{1,2}, 李云^{1,2}

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安 710119; 2. 陕西师范大学
地理学国家级实验教学示范中心,西安 710119)

摘要: 基于 Landsat 数据,采用线性光谱混合模型分解法提取陕西省西咸新区 2007 年和 2016 年 2 景影像的不透水地表盖度,利用地表能量平衡法提取同期人为热信息,并探讨二者间的关系。结果表明:①2007—2016 年间不透水面从 294.93 km² 扩张至 362.62 km²,由以自然地表与低覆盖度等级占主导逐渐演变为以中、高覆盖度不透水地表盖度等级占主导;②2016 年研究区人为热在空间上区域差异显著,高值区集中分布于沣东新城中部和空港新城西安咸阳国际机场周边,在秦汉新城中部、沣西新城北部和泾河新城部分地区有零星分布;③各土地利用不透水地表盖度均值和人为热均值均呈现建设用地>耕地>林地>水体的特点;④不透水盖度与人为热呈正相关,相关系数为 0.97,各地区的人为热值随不透水地表盖度上升速率呈现空港新城>沣东新城>泾河新城>秦汉新城>沣西新城的规律。

关键词: 西咸新区;不透水地表盖度;人为热;线性光谱混合模型;地表能量平衡法

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2020)01-0247-08

0 引言

不透水面是一种以人工地表为主要特征的特定组分,其表面覆盖诸如水泥、沥青、混凝土、砖和压实土地等不渗透性材料^[1]。不透水地表盖度(imperVIOUS surface coverage,ISC)即单位地表面积内不透水面覆盖面积的百分比^[2]。城市不透水地表作为城市地表覆盖/土地利用结构特征的重要组分,对地表辐射与能量分配方式产生显著作用,对城市热岛强度、大气环境及局地气候产生重要影响。城市不透水地表作用的主要方式为通过改变城市下垫面结构,引起地表反照率、比辐射率和地表粗糙度等变化,从而对区域垂直方向辐射平衡产生直接影响,加剧地表显热通量和城市热岛强度,改变局地/区域气候,影响城市生态服务功能,特别是热调节功能^[3]。

城市人为热是城市热环境的重要组分,是指由于工业生产、汽车排放、人体新陈代谢以及空调使用

等排放出多余热量^[4]。人为热排放是导致城市热岛形成的重要因素。目前,国内外诸多学者采取多种方法对人为热排放进行定量研究,主要有源清单法、建筑模型模拟法和能量平衡方程法。能量平衡方程法利用遥感影像估算各组分通量后反推人为热,适用于小范围研究区^[5],故本研究采取能量平衡方程法对人为热进行估算。

在快速城市化背景下,人类活动日益增加的排热会显著改变城市热环境。但目前学者对于城市热环境的研究大多集中于对地表温度的反演以及景观格局的研究,多数并未考虑人为热排放。因此,准确提取不透水面和人为热信息,并探究二者间的定量关系,对城市规划与管理、改善城市微气候以及构建生态城市具有重要意义^[6]。陕西省西咸新区是关中一天水经济区的核心区域,是经国务院批准设立的陕西省首个以创新城市发展方式为主题的国家级新区,旨在加快西咸一体化建设,着力打造西安国际化大都市。在此背景下,探究西咸新区不透水面信

收稿日期: 2019-03-08; 修订日期: 2019-06-01

基金项目: 国家社会科学基金项目“中国丝绸之路经济带生态文明建设评价与路径研究”(编号: 14XKS019)资助。

第一作者: 王茹(1995-),女,硕士研究生,主要从事专题地图与地理建模和遥感方面的研究。Email: 1774069505@qq.com。

通信作者: 张艳芳(1969-),女,副教授,主要从事水土资源评价、生态安全和低碳方面的研究。Email: zhangyf@snnu.edu.cn。

息与以人为热为主的都市热环境间的定量关系,可为城市新区及城市规划和建设提供参考,并为处理好城市发展与生态建设间的关系提供科学依据。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

西咸新区位于 $N34.8^{\circ} \sim 34.34^{\circ}$, $E108.29^{\circ} \sim 108.59^{\circ}$, 关中盆地中部, 西安市和咸阳市建成区间。地形西北高东南低, 属温带半干旱半湿润气候区。涉及西安、咸阳 2 市所辖 7 县(区) 23 个乡镇和街道办事处, 规划控制面积约 882 km^2 。主要包括空港新城、沣东新城、秦汉新城、沣西新城和泾河新城。

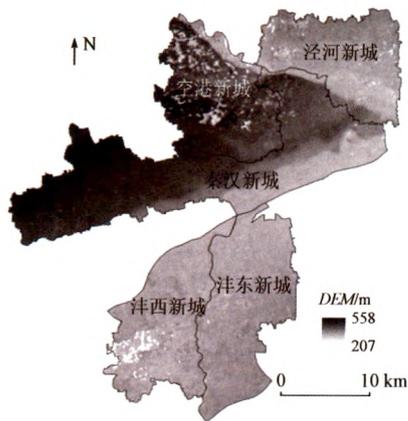


图 1 研究区范围
Fig.1 Extent of study area

1.2 数据源

本文采用的遥感影像数据产品类型主要是 Landsat7 ETM+ 和 Landsat8 OLI 数据, 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为 30 m , 具体成像时间分别为 2007 年 5 月 16 日和 2016 年 5 月 16 日。数字高程模型(digital elevation model, DEM)也来源于地理空间数据云, 用于地表净辐射通量计算。气象数据来源中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/site/index.html>), 包括气象站点的气压、气温、相对湿度和风向风速等同期数据。

2 研究方法

2.1 线性光谱混合模型

利用线性光谱混合模型获取研究区的 ISC 信息。该模型认为像元在某一波段的反射率是几个不同端元的反射率与其所占像元面积比例为权重系数的线性组合^[7], 其公式为

$$R_i = \sum_{j=1}^n (f_j \rho_{ji}) + e_i, \quad (1)$$

式中: R_i 为第 i 波段的反射率; n 为端元的总量; ρ_{ji} 为第 j 端元在第 i 波段的反射率; f_j 为各端元的面积占像元总面积的百分比; e_i 为第 i 波段的残差。全约束条件利用完全约束的最小二乘法求解^[8], 同时满足 $\sum_{j=1}^n f_j = 1$ 且 $0 \leq f_j \leq 1$ 。

在对研究区各时相影像进行最小噪声分离时, 前三波段累计贡献率均大于 90%。通过分析变换分量间的特征空间和从经过纯像元指数计算的影像上获取像元类别后, 最终确定出植被、土壤、高反照率和低反照率 4 种端元类型。Wu 等^[9]认为线性光谱混合分解模型均方根误差的均值必须小于 0.02。以 2016 年为例, 对线性光谱混合像元分解结果进行均方根误差检验, 其均方根误差介于 $0 \sim 0.027$ 之间, 平均值为 0.004, 大部分集中在 $[0.0, 0.01]$ 内, 远小于 0.02, 分解精度达到要求。

2.2 地表温度反演

估算人为热前需对研究区地表温度进行准确估算, 本文采用辐射传输方程法进行地表温度反演。卫星传感器接收的热红外辐射亮度值 L_λ 由 3 部分组成: 大气向上辐射亮度 L^\uparrow 、地面真实辐射亮度经过大气层后到达卫星传感器的能量和大气向下辐射到达地面后反射的能量 L_\downarrow 。卫星传感器接收的热红外辐射亮度值 L_λ 的表达式为^[10-12]

$$L_\lambda = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_\downarrow] \tau + L^\uparrow, \quad (2)$$

式中: ε 为地表比辐射率; T_s 为地表真实温度, K; τ 为大气在热红外波段的透过率; $B(T_s)$ 为温度为 T_s 的黑体热辐射亮度, 计算公式为

$$B(T_s) = [L_\lambda - L^\uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L_\downarrow] / \tau \varepsilon. \quad (3)$$

T_s 可以用普朗克公式的函数获取, 即

$$T_s = K_2 / \ln(K_1 / B(T_s) + 1), \quad (4)$$

式中 Landsat 8 影像采用 TIRS 载荷的第 10 波段, $K_1 = 774.89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, $K_2 = 1321.08 \text{ K}$ 。

2.3 基于地表能量平衡方程的人为热估算

能量平衡方程表达式为^[13]

$$R_n + H_{as} = G + H + E, \quad (5)$$

式中: R_n 为地表净辐射通量; H_{as} 为人为热; G 为土壤热通量; H 为感热通量; E 为潜热通量。

地表净辐射通量作为地表物质和能量交换的原动力, 是太阳短波辐射到达地表后经过反射、大气与地表的长波辐射交换后获得的净辐射能量, 其公式为^[14]

$$R_n = (1 - \alpha)R_s + (\varepsilon L_{in} - L_{out}); \quad (6)$$

式中: R_s 为太阳总辐射; L_{in} 和 L_{out} 分别为大气长波辐射和地面长波辐射; α 为地表反照率。

土壤热通量是表征土壤和大气之间热交换过程的物理量,应用 Bastiaanssen^[15] 提出的方法,仅需考

$$G = R_n \times \left(\frac{T_s - 273.15}{\alpha} \right) \times [(0.0032\alpha + 0.0062\alpha^2) \times (1 - 0.978NDVI^4)] \quad (7)$$

感热通量表示陆面的能量向大气进行传输的过程。计算公式为^[16-17]

$$H = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_a} \quad (8)$$

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{Z_m - d}{Z_{om}}\right) \ln\left(\frac{Z_h - d}{Z_{oh}}\right)}{k^2 u_z} \quad (9)$$

式中: ρ 为空气密度; C_p 为定压比热,二者乘积为空气的体积热容量,通常可取常数 $1205 \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$; T_a 为参考高度的气温, K; r_a 为空气动力学阻抗, s/m ; Z_m 为风速测量仪的测量高度, m; Z_h 为温度传感器的测量高度, m; d 为零平面位移高度, m; Z_{om} 为动量传输粗糙度, m; Z_{oh} 为热量传输粗糙度, m; k 为 von Karman 常数,取值为 0.41; u_z 为风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,可从气象数据中得到。本文参照已有文献的研究结果^[18],对研究区内 4 种不同土地利用类型的 Z_{om} , Z_{oh} 和 d 赋值,如表 1 所示。

表 1 不同土地利用类型的 Z_{om} , Z_{oh} 和 d 的值

Tab.1 Z_{om} , Z_{oh} and d for different surface coverage types

参数	建设用地	水体	耕地	林地
Z_{om}/m	0.33	0.00003	0.1	0.3
Z_{oh}/m	0.0033	0.000088	0.001	0.0003
d/m	1.66	0.05	0.1	1.5

潜热通量指下垫面与大气间水汽热交换所吸收

的热量,是水分循环的重要组成部分,主要以蒸散发的形式参与能量循环。利用 Kato 等^[18] 提出的公式计算,即

$$E = \frac{\rho C_p}{\gamma} \times \frac{e_s - e_a}{(r_a + r_s)} \quad (10)$$

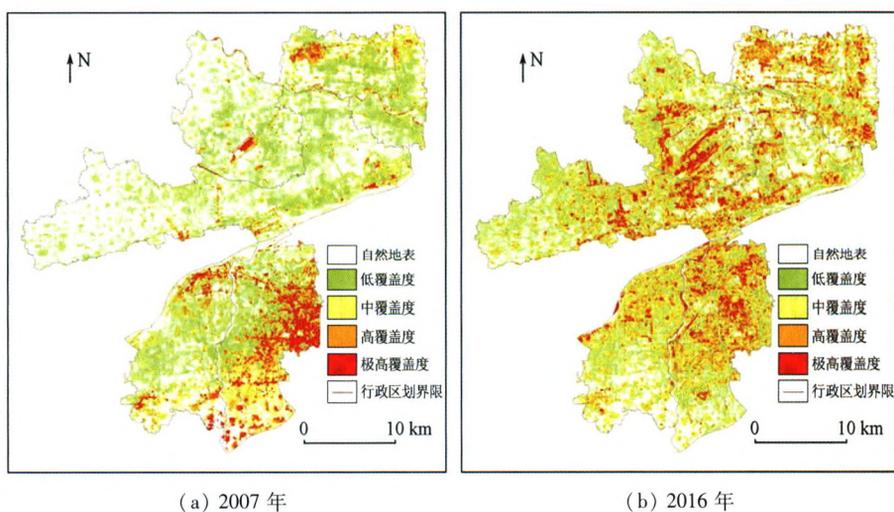
式中: e_s 为饱和水汽压, hpa; e_a 为空气水汽压, hpa; γ 为干湿球常数, hpa/K,与空气密度相关; r_s 为表面阻抗, $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$,参照 Nishida 等^[19] 提出的公式计算。最后,基于能量平衡方程,利用余项法求得人为热。

3 结果与分析

3.1 ISC 时空动态变化分析

3.1.1 ISC 时间变化

本文利用线性光谱混合分解法提取了 2007 年和 2016 年 ISC 特征。为便于比较各时相 ISC 特征,将根据研究区 ISC 范围统一划分为自然地表 [0, 20%]、低覆盖度 (20%, 40%)、中覆盖度 (40%, 60%)、高覆盖度 (60%, 80%) 和极高覆盖度 (80%, 100%) 5 个等级,见图 2。相比 2007 年,2016 年不透水面空间分布范围明显增大,不透水面扩张显著。通过像元统计,西咸新区 2007 年和 2016 年不透水面面积分别为 294.93 km^2 和 362.62 km^2 ,分别占总面积的 33.4% 和 41.09%。



(a) 2007 年

(b) 2016 年

图 2 ISC 空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ISC

ISC 转移矩阵(表 2)能够反映研究区 ISC 各等级时间维度上的变化特征,直观表达各等级间转入转出关系,体现其变化关系。自然地表转向其他等级面积共 188.59 km²,主要转为低、中覆盖度等级,分别占 40.86% 和 32.75%;其次转向高、极高覆盖度等级。低覆盖度等级转向其他等级面积共 290.43 km²,主要转向自然地表,占转化面积的 39.17%;其次是中覆盖度等级,占转化面积的 31.80%。中覆盖度等级转向其他等级的面积共 109.12 km²,向其他等级转化较为均匀。高覆盖度等级转向其他等级面积

共 48.32 km²,主要转为中覆盖度等级,占转化面积的 48.78%;向其他等级转化较为均匀。极高覆盖度等级转向其他等级面积共 37.26 km²,主要转为中覆盖度等级,占转化面积的 43.24%;其次转为高覆盖度等级,占转化面积的 29.74%;向其余等级转化较为均匀。总体来看,随着西咸新区发展建设,自然地表面积小幅减少,共减少 27.18 km²;低覆盖度等级面积大幅减少,共减少 163.49 km²;中、高和极高覆盖度等级均显著增加,分别增加 84.69 km², 83.86 km²和 22.12 km²。

表 2 2007—2016 年间 ISC 转移矩阵

Tab.2 ISC transfer matrix from 2007 to 2016

(km²)

覆盖度类型	2016 年					合计
	自然地表	低覆盖度	中覆盖度	高覆盖度	极高覆盖度	
2007 年						
自然地表	61.01	77.05	61.76	31.89	17.89	249.60
低覆盖度	113.75	90.39	92.37	57.29	27.02	380.82
中覆盖度	34.87	32.65	44.79	31.93	9.67	153.91
高覆盖度	8.97	10.99	23.57	18.17	4.79	66.49
极高覆盖度	3.82	6.25	16.11	11.08	4.25	41.51
合计	222.42	217.33	238.60	150.36	63.62	892.33

3.1.2 ISC 空间变化

观察 2007 年和 2016 年 ISC 分布情况(图 2)可以看出:2007 年 ISC 处在高、极高覆盖度等级主要集中分布于沣东新城和空港新城的西安咸阳国际机场,泾河新城的泾阳县和沣西新城的钓台镇等地零星分布。2016 年高、极高覆盖度等级面积明显增加,不单集中分布于沣东地区,且在 2007 年的基础上迅速向四周扩展。图 3 为 2007 年和 2016 年研究区各分区不透水面占比情况,2007—2016 年间,除去沣东新城不透水面占比稍有下降,其他地区占比均显著提升。泾河新城 2007 年不透水面占比 33.9%,2016 年占比 40.5%,增加了 6.6%;空港新城 2007 年不透水面占比 27.2%,2016 年占比 40.1%,增加了 12.9%;秦汉新城 2007 年不透水面占比 25.7%,2016 年占比 38.1%,

增加了 12.4%;沣东新城 2007 年不透水面占比 49.3%,2016 年占比 48.6%,减少了 0.7%;沣西新城 2007 年不透水面占比 36.6%,2016 年占比 37.2%,增加了 0.6%。空港、秦汉新城不透水面占比增幅较大,泾河新城次之,沣西新城稍有增加,沣东新城略有减少。沣东新城不透水面占比减少原因是近些年昆明池的修建使得昆明池附近绿地面积增多,建筑面积减少。

3.2 人为热空间分布特征

3.2.1 研究区人为热总体分布

2016 年 5 月 16 日西咸新区人为热值介于 -189.03 ~ 294.72 W/m²之间,均值为 57.88 W/m²。人为热空间分布见图 4。人为热在空间上区域差异显著,其高值区集中分布于沣东新城中部和空

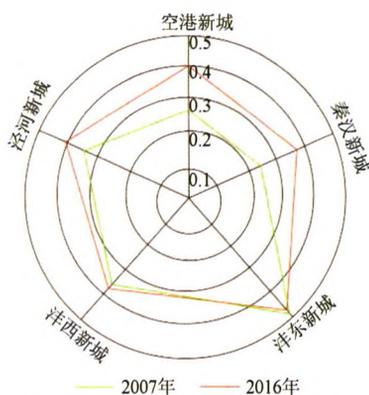


图 3 2007—2016 年各地区不透水面占比分布
Fig.3 Distribution of proportion of impervious surfaces in each region from 2007 to 2016

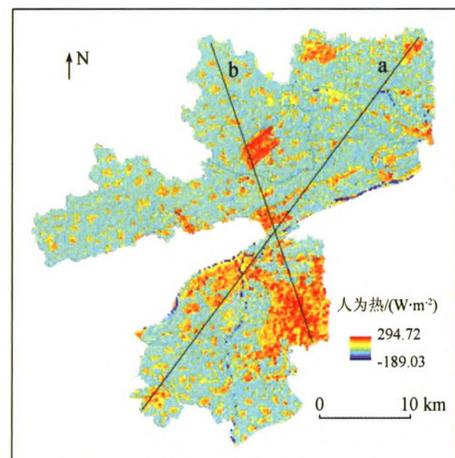


图 4 人为热空间分布
Fig.4 Anthropogenic heat spatial distribution

港新城咸阳国际机场周边,秦汉新城中部、沣西新城北部和泾河新城部分地区有零星分布。沣东新城的人为热均值最高,为 87.81 W/m^2 ; 秦汉、空港新城人为热均值次之,分别为 55.57 W/m^2 和 51.25 W/m^2 ; 沣西、泾河新城人为热均值最低,分别为 49.36 W/m^2 和 46.17 W/m^2 。

3.2.2 研究区人为热剖面分析

为直观反映人为热在空间上的细微变化,对 2016 年研究区人为热进行剖面分析。由于研究区形状不规则,考虑人为热高值分布情况,以秦汉、沣东新城的交界处为中心,向 NE—SW、NW—SE 2 个方向延伸,构成剖面线 a 和 b(见图 4)。图 5 为人为热的 NE—SW、NW—SE 方向剖面图。由图 5(a)可知,人为热在 NE—SW 方向上高值分布较为集中,

其中秦汉新城的渭城区人为热值最高;泾河新城泾阳县,沣西新城的钓台镇、大王镇和秦汉新城附近人为热值次高;沣河、渭河等水体附近人为热值最低。由图 5(b)可知,人为热在 NW—SE 方向分布规律性不强,其中空港新城西安咸阳国际机场和沣东新城人为热值最高;空港新城的桥底镇、太平镇和秦汉新城的渭城区人为热值次高;渭河附近人为热值最低。整体来看,NE—SW 方向人为热值略低于 NW—SE 方向,呈现的共同特征是:剖面经过水体,人为热值最低,对附近地域有一定降温作用;经过耕地、林地等植被覆盖度高的地区人为热值较低;经过乡镇等人口稠密区和商业区人为热值高,且商业区的人为热值高于乡镇地区。

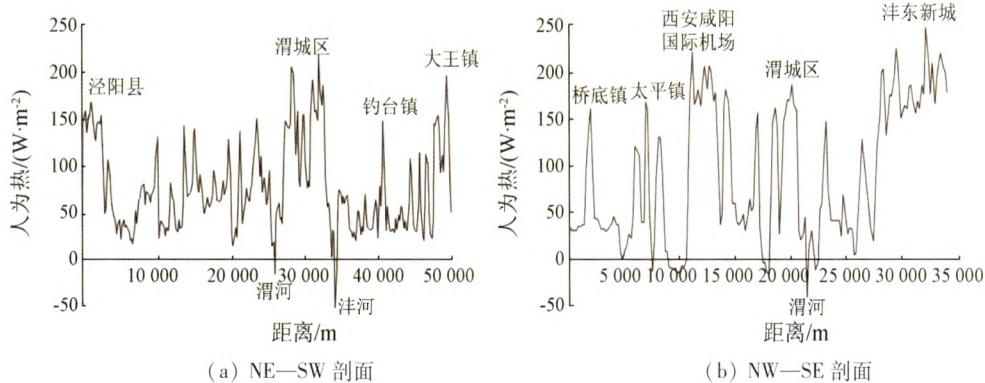


图 5 人为热剖面线分析

Fig. 5 Anthropogenic heat profile analysis

3.3 ISC 与人为热响应关系

3.3.1 ISC 与人为热的空间分布关系

图 6 为 2016 年研究区各分区 ISC 与人为热均值关系对比图。整体来看:人为热均值随着 ISC 等级提高而呈阶梯状上升;自然地表到低覆盖度等级人为热均值平均增幅为 22.65 W/m^2 ,低到中覆盖度等级人为热平均增幅为 22.58 W/m^2 ,中到高覆盖度等级人为热平均增幅为 14.6 W/m^2 ,高到极高覆盖度等级人为热平均增幅为 23.97 W/m^2 。其中,沣东新城的

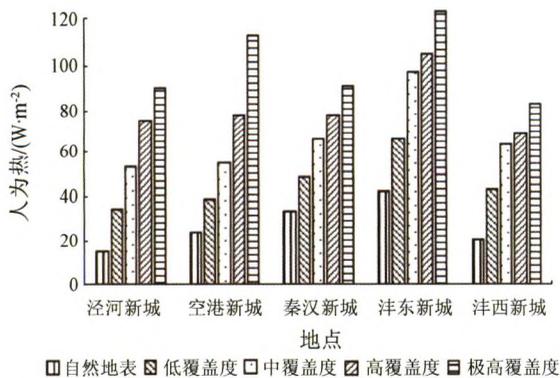


图 6 各地区 ISC 与人为热关系对比

Fig. 6 Comparison of ISC and anthropogenic heat in different regions

人为热均值在各 ISC 等级均为最高;与其他地区相比,空港新城高到极高覆盖等级的人为热增幅最为显著。

3.3.2 基于土地利用的 ISC 与人为热关系分析

不同土地利用类型在城市建设和自然条件方面存在诸多差异,因而 ISC 与人为热值间关系也存在差异。对 2016 年研究区进行土地利用解译(图 7),得出水体、林地、耕地和建设用 4 种地类的空间分布。统计其总体 ISC 均值和人为热均值(表 3),可

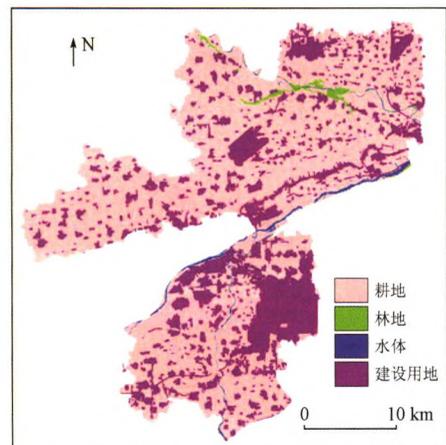


图 7 2016 年研究区土地利用

Fig. 7 Land use in the study area in 2016

表3 各土地利用 ISC 与人为热均值统计

Tab.3 Statistical results of ISC and anthropogenic heat mean values of land use

地表类型	ISC 均值	人为热均值/(W·m ⁻²)
水体	0.02	-70.76
林地	0.32	1.79
耕地	0.37	46.06
建筑用地	0.59	140.02

看出均呈现建设用地 > 耕地 > 林地 > 水体的规律。再将研究区栅格数据集转换为点要素提取每一像元

的 ISC 和人为热值,分别得到各地类的散点图(图 8)。其中,水体的 ISC 接近于 0,人为热值集中分布于[-150,36] W/m²,均值为 -70.76 W/m²;林地的 ISC 在[0,0.6]分布较多,均值为 0.32,人为热值集中分布于[-50,50] W/m²,均值为 1.79 W/m²;耕地的 ISC 分布较为分散,均值为 0.37,人为热值集中分布在[0,100] W/m²,均值为 46.06 W/m²;建设用地的 ISC 集中分布于[0.2,1],均值为 0.59,人为热值在[100,200] W/m²分布密集,均值为 140.02 W/m²。

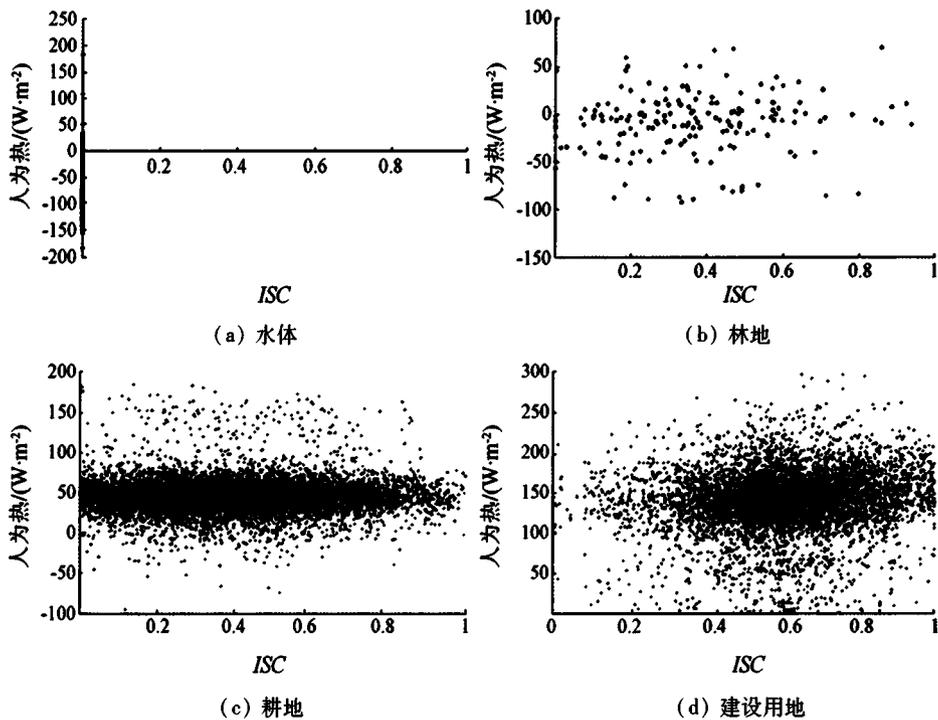


图8 各土地利用的 ISC 与人为热关系散点图

Fig.8 Scattered plots of the relationship between ISC and anthropogenic heat for each land use

3.3.3 ISC 与人为热的拟合关系

为进一步研究西咸新区 ISC 与人为热的关系,采取分级回归分析法,将 2016 年研究区 ISC 以 0.01 为一级,共分 100 级,分区统计每级 ISC 所对应平均人为热值,并利用一次函数进行线性拟合(图 9

(a)): ISC 与人为热间呈正相关,相关系数为 0.97,拟合质量较高,在置信度 0.001 水平上显著。其中,ISC 在[0,0.6]范围内人为热值迅速上升;在(0.6,0.8]范围内人为热值上升速率迅速减缓,几乎为 0;在(0.8,1]范围内人为热值又迅速大幅上升直至峰值。

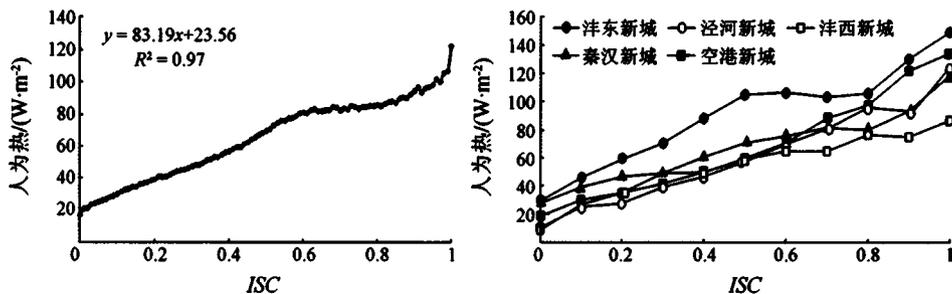


图9 ISC 与人为热拟合关系图

Fig.9 Relationship between ISC and anthropogenic heat

分析西咸新区各分区 ISC 与人为热关系,将 2016 年研究区 ISC 以 0.1 为一级,分 10 级,分区统

计不同地区每级 ISC 所对应平均人为热值(图 9 (b))。整体来看,西咸新区各分区 ISC 与人为热间

均呈正相关,且各分区二者的拟合趋势大致相同。其中,沣东新城在各ISC下人为热拟合值均为最高;空港新城人为热值增长速率最大,拟合曲线几乎没有停滞阶段;泾河、秦汉和沣西新城ISC与人为热的拟合曲线较为相近,增长速率停滞阶段稍有先后差异。

表4为ISC和人为热值拟合方程,各地区相关系数均大于0.9,在置信度0.001水平上显著。空港、沣东新城人为热值随ISC增长上升速率最快,ISC每上升10%,人为热值升高 11.35 W/m^2 和 10.52 W/m^2 ;泾河新城的上升速率次之,ISC每上升10%,人为热值升高 9.33 W/m^2 ;秦汉和沣西新城的上升速率较低,ISC每上升10%,人为热值分别升高 7.72 W/m^2 和 6.85 W/m^2 。

表4 2016年研究区ISC和人为热值拟合方程
Tab.4 Fitting equation of ISC and anthropogenic heat in the study area in 2016

地区	拟合方程	R^2
泾河新城	$y = 93.25x + 11.76$	0.94
空港新城	$y = 113.49x + 11.52$	0.97
秦汉新城	$y = 77.17x + 29.18$	0.95
沣东新城	$y = 105.22x + 38.04$	0.94
沣西新城	$y = 68.55x + 20.28$	0.94
全区	$y = 83.19x + 23.56$	0.97

4 结论

1)随着西咸新区发展建设,2007—2016年间不透水面从 294.93 km^2 扩张至 362.62 km^2 ,由以自然地表与低覆盖度等级占主导逐渐演变为以中、高覆盖度ISC等级占主导。2007—2016年间,该地区不透水面占比不断增大,内部差异逐渐显著,不单集中分布于中心城区周边,内、外延增长并存。

2)2016年研究区人为热在空间上区域差异显著,高值区集中分布于沣东新城中部和空港新城西安咸阳国际机场周边,秦汉新城中部、沣西新城北部和泾河新城部分地区有零星分布。剖面线分析表明人为热在空间上随下垫面变化而变化,人为热值呈商业区>乡镇地区>植被>水体的特点。

3)各土地利用类型的ISC均值和人为热均值均呈现建设用地>耕地>林地>水体的规律。不同土地利用类型的ISC和人为热值有其明显的分布规律:水体的ISC多为0,人为热值多为负;林地ISC多在中覆盖度及其以下等级分布,人为热值多在 0 W/m^2 上下浮动;耕地的ISC分布均匀,人为热值多在 50 W/m^2 上下浮动;建设用地ISC在中覆盖度及其以上等级分布密集,人为热值在 150 W/m^2 附

近分布最密。

4)ISC与人为热呈正相关,相关系数为0.97,人为热值随ISC上升的拟合变化趋势为:先迅速上升,上升到一定程度停滞再急速上升直至峰值。各地区ISC与人为热的相关系数均大于0.9,人为热值随上升速率呈现空港新城>沣东新城>泾河新城>秦汉新城>沣西新城的规律。

城市新区今后的发展建设过程中,应特别注重ISC等级的生态效应,对ISC高的地区可多修建公园绿地、人工湖等,以求减缓附近的人为热效应。本研究还存在一定的不足,所用的基于地表能量平衡提取人为热的方法未考虑到人为热的来源途径。今后的研究可将原清单算法和能量平衡法相结合,对人为热的来源进行分类整理和对比分析,进一步深入探讨人为热与ISC的关系。

参考文献(References):

- [1] Weng Q. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 117: 34-49.
- [2] 袁超. 基于光谱混合分解模型的城市不透水面遥感估算方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
Yuan C. Estimation Method of Urban Impervious Surfaces Based on Spectral Mixed Decomposition Model [D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [3] Torrance K E, Shun J S W. Time-varying energy consumption as a factor in urban climate [J]. Atmospheric Environment, 1976, 10 (4): 329-337.
- [4] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 等. 城市热岛的生态环境效应[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2055-2060.
Xiao R B, Ouyang Z Y, Li W F, et al. Eco-environmental effects of urban heat island [J]. Journal of Ecology, 2005, 25(8): 2055-2060.
- [5] 王业宁, 孙然好, 陈利顶. 北京市区车辆热排放及其对小气候的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 953-959.
Wang Y N, Sun R H, Chen L D. Study on the impact of vehicle emissions on microclimate in Beijing metropolis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 953-959.
- [6] 伶华, 刘辉志, 桑建国, 等. 城市人为热对北京热环境的影响[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(3): 409-421.
Ling H, Liu H Z, Sang J G, et al. Effects of urban anthropogenic heat on Beijing's thermal environment [J]. Climate and Environment Studies, 2004, 9(3): 409-421.
- [7] 姬翠翠, 贾永红, 李晓松, 等. 线性/非线性光谱混合模型估算白刺灌丛植被覆盖度[J]. 遥感学报, 2016, 20(6): 1402-1412.
Ji C C, Jia Y H, Li X S, et al. Estimation of vegetation coverage of Nitraria spinosa shrubs by linear/non-linear spectral hybrid model [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(6): 1402-1412.
- [8] 王浩, 吴炳方, 李晓松, 等. 流域尺度的不透水面遥感提取[J]. 遥感学报, 2011, 15(2): 388-400.

- Wang H, Wu B F, Li X S, et al. Remote sensing extraction of impervious surface at watershed scale [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(2): 388 - 400.
- [9] Wu C, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4): 493 - 505.
- [10] 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. doi: 10.6046/gtzyyg.2004.03.07.
- Qin Z H, Li W J, Xu B, et al. Estimation of surface emissivity within TM6 band of Landsat [J]. *Land and Resources Remote Sensing*, 2004, 16(3): 28 - 32. doi: 10.6046/gtzyyg.2004.03.07.
- [11] 宋挺, 段峥, 刘军志, 等. Landsat 8 数据地表温度反演算法对比 [J]. *遥感学报*, 2015, 19(3): 451 - 464.
- Song T, Duan Z, Liu J Z, et al. Comparison of land surface temperature inversion algorithms for Landsat8 data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(3): 451 - 464.
- [12] 徐涵秋. 新型 Landsat8 卫星影像的反射率和地表温度反演 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58(3): 741 - 747.
- Xu H Q. New Landsat 8 satellite image reflectivity and surface temperature inversion [J]. *Journal of Geophysics*, 2015, 58(3): 741 - 747.
- [13] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 235.
- Zhao Y S. Principles and Methods of Remote Sensing Application Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2003: 235.
- [14] 王煜东, 赵小艳, 徐向华, 等. 南京地区地表热通量的遥感反演分析 [J]. *生态环境学报*, 2016, 25(4): 636 - 646.
- Wang Y D, Zhao X Y, Xu X H, et al. Remote sensing inversion analysis of surface heat flux in Nanjing area [J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2016, 25(4): 636 - 646.
- [15] Bastiaanssen W G M. SEBAL - based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey [J]. *Journal of hydrology*, 2000, 229(1): 87 - 100.
- [16] 李宝富, 陈亚宁, 李卫红, 等. 基于遥感和 SEBAL 模型的塔里木河干流区蒸散发估算 [J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1230 - 1238.
- Li B F, Chen Y N, Li W H et al. Estimation of evapotranspiration in the main stream of Tarim River based on remote sensing and SEBAL model [J]. *Journal of Geography*, 2011, 66(9): 1230 - 1238.
- [17] Zhou Y, Weng Q, Gurney K R, et al. Estimation of the relationship between remotely sensed anthropogenic heat discharge and building energy use [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 67(none): 65 - 72.
- [18] Kato S, Yamaguchi Y. A nalysis of urban heat - island effect using ASTER and ETM + data; Separation of anthro - genic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99(1): 44 - 54.
- [19] Nishida K, Nemani R R, Running S W, et al. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D9): 1 - 14.

Study on the relationship between impervious surface coverage and artificial heat in new urban districts: A case study of Xixian New District, Shaanxi Province

WANG Ru^{1,2}, ZHANG Yanfang^{1,2}, ZHANG Hongmin^{1,2}, LI Yun^{1,2}

(1. College of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Geography (Shaanxi Normal University), Xi'an 710119, China)

Abstract: Based on Landsat data, the authors extracted the impervious surface coverage of the two sceneries in Xixian New District in 2007 and 2016 by the linear spectral mixture model decomposition method, and extracted the artificial thermal information by the surface energy balance method in the same period, and investigated the relationship between them. The results are as follows: ① From 2007 to 2016, the impervious surface expanded from 294.93 km² to 362.62 km², and gradually changed from natural surface and low coverage to medium and high coverage. ② In 2016, the regional differences of anthropogenic heat in the study area were significant. The high-value areas were concentrated in the north-central part of Fengdong New Town and around Xianyang International Airport of Airport New Town, and were scattered in the central part of Qinhan New Town, northern part of Fengxi New Town and part of Jinghe New Town. ③ The mean values of impervious coverage and anthropogenic thermal mean values of land use showed the tendency of construction land > cultivated land > woodland > water body. ④ There was a positive correlation between impervious coverage and artificial heat, with a correlation coefficient of 0.97. The rate of increase of artificial heat values with impervious coverage had the tendency of Airport New Town > Fengdong New Town > Jinghe New Town > Qinhan New Town > Fengxi New Town.

Keywords: Xixian New District; impervious surface coverage; anthropogenic heat; linear spectral mixing model; surface energy balance method

(责任编辑: 李瑜)