

doi: 10.6046/zrzyyg.2022217

引用格式: 冯晓刚,赵毅,李萌,等.城市河道及周临用地对地表热环境的影响研究[J].自然资源遥感,2023,35(3):264–273.
(Feng X G, Zhao Y, Li M, et al. Influence of urban rivers and their surrounding land on the surface thermal environment[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(3): 264–273.)

城市河道及周临用地对地表热环境的影响研究

冯晓刚¹, 赵毅², 李萌¹, 周在辉¹, 李凤霞¹, 王园¹, 杨永全³

(1. 西安建筑科技大学建筑学院, 西安 710055; 2. 中交城乡建设规划设计研究院有限公司, 武汉 430050; 3. 山东省冶金设计院股份有限公司, 济南 250101)

摘要: 水体作为城市生态系统的重要组成部分,对改善城市热岛效应和人居热环境具有重要的生态学意义。文章以多时相 Landsat 和 SPOT 为实验数据,提出了一种针对混合像元的支持向量机最优端元子集构建原理的地表比辐射率确定方法,采用单窗算法,以灞河及周临用地为研究对象,剖析了河道水体、周临用地与地表温度间的耦合关系。结果表明:①支持向量机的混合像元最优端元子集构建方法提取地表比反射率结果与 MODIS LSE 产品误差小于 0.005 ($R = 0.832$),表明该方法精度较高,可用于地表比辐射率的提取;②1992—2019 年 27 a 间灞河两岸用地类型与局地地表温度格局变化显著,建设用地急剧增加,变热趋势明显;不同时期河道周临用地类型对地表温度影响的幅度不同,建设用地、草地、水体及林地是影响灞河两岸热环境的主要用地类型,水体、林地、草地和耕地均表现为不同程度的降温效应,降温幅度依次为:水体 > 林地 > 草地 > 耕地;③同一时期灞河两岸用地类型对局地温度的影响存在空间差异。灞河以东水体、林地、草地和耕地降温效果显著,而灞河以西则为水体、林地及草地。该研究有助于正确认知城市河道对局地热环境的影响特征,能够为城市河道及其周临局地热环境改善提供科学参考。

关键词: 地表比辐射率; 热环境; 城市热岛效应; 水体; 灞河

中图法分类号: TP 79; TP 701 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)03-0264-10

0 引言

全球气候变暖导致的城市热环境持续恶化可引发死亡、疾病和能源危机等诸多问题,热环境已然成为学术界关注的热点命题。因此,剖析与热环境密切相关的城市水体对城市热环境的影响特征、交互机理等对构建适宜城市人居热环境至关重要。研究发现,全球和局地气候变暖的双重胁迫是导致城市热环境持续恶化的外在动因;快速城镇化导致的土地利用分异及人为热排放增加则是内在动因^[1]。在自然地表转变为城市用地的过程中,一方面地表物化性质显著改变,热通量增大;另一方面人为热排放促使近地面热辐射交换过程变化剧烈,城市逆温加剧^[2-3]。因此,构建影响因素与城市热环境间的交互过程与机理认知,解析城市河道水体及周临

用地对局地热环境的降温效应,对城市水资源规划与设计 and 改善城市局地人居环境具有重要的现实意义。

研究表明城市水体具有降温、增湿等功效,它能够吸收并存储热量,促使水体周临的气温和地温降低,从而形成“冷岛效应”^[4-5],其中水体结构、周临地形、土地利用方式、建筑物形态及空间布局等均影响水体对周临地表温度的缓冲效应^[6-8],且因影响因素不同而普遍存在差异特征^[9-10]。Tan 等^[6]基于景观视角,发现水体的形状指数与温度之间存在线性的冷岛效应;Wu 等^[9]发现冷岛效应的影响阈值介于 5.25 ~ 11.61 hm²,同时建议,城市建设必须限制水体周边 200 m 范围内的建设开发强度,增加 100 m 范围内的植被用地。就水体对周临气温影响的幅度与强度而言,岳文泽等^[3]发现面状水体比线状水体具有更高的冷岛效率,最大降温影响距离集

收稿日期: 2022-05-26; 修订日期: 2023-01-16

基金项目: “十三五”国家重点研发计划子课题“建筑节能设计基础参数研究—海洋气候条件建筑节能基础气象参数”(编号: 2018YFC0704505)、国家自然科学基金青年基金项目“黄土高原地区绿地景观格局时空变异特征及其对碳汇响应的机制研究”(编号: 51608419)、陕西省自然科学基金面上基金项目“基于大数据融合的一带一路地域性城镇热生态环境安全格局规划研究”(编号: 2018JM5073)和西安建筑科技大学自然科学基金专项基金项目“面向区域地表热环境改善的城市多元景观要素结构配置模式与优化策略研究”(编号: ZR19001)共同资助。

第一作者: 冯晓刚(1979-),男,博士,副教授,主要从事环境遥感及传统村落全信息化保护方面的教学与科研工作。Email: fendao_ren@163.com。

中在 200 ~ 300 m 之间;曾素平等^[10]发现湘江对长沙市热岛效应的平均缓冲距离为 400 m。水体的面积、覆盖率等是影响水体热效应的核心参数,不同的面积比与覆盖率降温效果不同。梁保平等^[7]认为城市园林水体面积与地表温度显著负相关,城市园林水体对外围一定区域的热环境产生影响,影响距离为 120 ~ 240 m; Lin 等^[5]发现水体覆盖率增加 10%,城市地表热岛将降低 11.33%,且在 100 m 范围内具有较强的冷却效应。关于最大降温影响距离和幅度结论不一,多存在个体化差异。张伟等^[11]认为湖泊水体的降温作用在距离湖岸 300 m 范围内明显,在 600 m 范围内均存在降温作用,且降温幅度可达 0.96 ℃; Zheng 等^[12]以西湖和玄武湖为例,发现降温距离分别为 471 m 和 336 m,在周临几千米范围内仍具潜在降温效应,而水体最远影响距离也因水体几何结构参数的不同而不同。然而,综述发现,在研究城市水体及其热环境效应时,研究者更多关注水体本身的几何结构参数,而对水体及其周临用地类型、格局特征及大气环流对局地热环境间的交互影响考虑不足^[13-14]。因此,针对这一现实问题,本文以水体及其周临用地类型为研究对象,展开两者与局地热环境间的相关关系,探索河道类型水体在现有用地参数背景下结合周临用地类型对灞河两岸的热缓冲及其影响机理。

陕西省西安市自 1992—2019 年经历了快速城镇化的初期和高速发展 2 个阶段,原有耕地和绿地

等不断转变为建设用地,进而导致西安市热岛强度逐年增加。尽管已有研究针对西安市热岛效应、演化趋势、成因及其对策等进行了深入探讨^[14-15],但将水体及周临用地参数相结合,探讨其对城市局地热环境的缓冲影响作用还有待进一步深入。基于此,本文以多时相遥感数据为基础,采用定量反演、GIS 时空分析和地统计分析等方法,以西安市灞河及周临用地为研究对象,沿灞河东西两岸分别构建缓冲区,以期探明灞河及周临用地类型对城市局地热环境的响应机理,为缓解城市局地热环境和水体生态规划建设提供理论与实践依据。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

本文以陕西省西安市灞河及周临用地为实验对象(图 1),灞河全长 109 km,流域面积为 258 1 km²,地理位置介于 E109°00'~109°47',N33°50'~34°27',是渭河一级支流,属温带季风气候,全年平均气温为 13 ~15.8 ℃。分析区域主要集中在灞河流经的西安市主城区以东及东北角地区,占地面积约 81.35 km²,主要流经灞桥区和未央区,并于高陵区南汇入渭河,是西安市域范围内最大的城市水体,区域中心以水体为主,近河道两侧以草地、林地及耕地为主,较远以建设用地为主,用地类型复杂多样,整体用地特征体现出了显著的空间异质性特征,具有代表性。

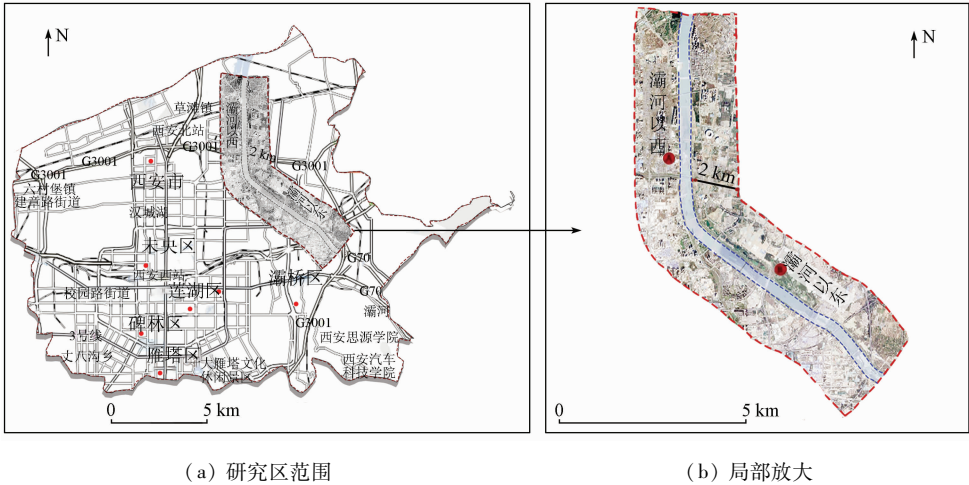


图 1 研究区位示意图

Fig.1 Location of study area

1.2 数据源与预处理

以西安市 1992 年、2000 年、2010 年及 2019 年的 Landsat TM/OLI/TIRS 数据结合 2019 年高空间分辨率 SPOT5 数据为基础,数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>); MOD11A1 数据来

源于 NASA 官网(<http://earthdata.nasa.gov/>),过境时间 2019 年 6 月 5 日与 Landsat8 过境时间基本吻合。辅助数据包括西安市 1:10 000 地形图、外业实际采样点数据、30 m 数字高程模型(digital elevation model,DEM)及西安市范围内的 12 个气象站点

1992—2019 年间的历史数据。首先,利用 FLAASH 大气校正模型对 Landsat 数据进行大气校正;然后,利用1:10 000 地形图,采用二次多项式变换模型,利用最邻近算法对 4 期影像数据分别进行重采样及坐标变换,校正误差控制在 0.5 个像元内;最后,基于改进的单窗算法进行地表温度数据的反演,并采用面向对象的分类方法对 Landsat 和 SPOT 数据进行土地利用类型及河道水体等信息的提取。

2 研究方法

2.1 基于改进地表比辐射率的单窗算法反演地表温度

研究发现,针对仅有一个热红外波段遥感数据的地表温度反演算法主要有:辐射传输方程(radizitive transfer equation, RTE)、Jiménez - Muñoz & Sobrino's 单通道算法和单窗算法 3 种^[16-18]。覃志豪等^[19]提出的单窗算法主要包括关键参数、辐射亮温和地表温度计算 3 个步骤。针对中尺度遥感影像中的混合像元分解问题,为了提高地表比辐射率的计算精度,本文提出了针对混合像元的支持向量机最优端元子集构建原理的地表比辐射率算法,以提高地表比辐射率估计精度。

1)针对混合像元的支持向量机最优端元子集构建方法的地表比辐射率确定。混合像元分解算法常认为单个像元往往包含全部端元,但实际上多数混合像元仅由部分端元组合而成^[20]。因此,直接对所有像元进行混合分解,会导致丰度估计值偏差较大^[21]。因此,本文采用了一种针对混合像元的支持向量机最优端元子集构建方法,进行混合像元地表比辐射率的计算。

首先,确定最优分类面。设分类面方程为:

$$x w + v = 0 \quad , \quad (1)$$

式中: w 和 v 为待求参数。样本集为 (x_i, y_i) , 其中 $i = 1, 2, \cdots, n, x \in R^4, y \in (-1, +1)$, x_i 为第 i 个样本的解释变量, y_i 为第 i 个样本的决策变量, 满足:

$$y_i [(w x_i) + v] - 1 \geq 0, i = 1, 2, \cdots, n \quad , (2)$$

且使 $(1/2) \|w\|^2$ 最小的分类面为最优分类面。

其次,求解目标函数最大值。采用 Lagrange 乘子算法,基于约束: $\sum_{i=1}^n a_i y_i = 0$ 和 $a_i \geq 0$ 条件下求解目标函数 $Q(a)$ 的最大值,即

$$Q(a) = \sum_{i=1}^n a_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j y_i y_j (x_i x_j) \quad . \quad (3)$$

再次,最优决策解。通过求解以上不等式约束下二次函数寻优得到最优决策函数,公式为:

$$f(x) = \operatorname{sgn} \left[\sum_{i=1}^n a_i y_i (x_i x) + b \right] \quad . \quad (4)$$

最后,混合像元的端元子集确定。通过综合考虑最小错分样本和最大分类间隔,得到混合像元 (x, y) 中包含的全部端元 e_1, e_2 和 e_3 。

基于以上支持向量机的混合像元最优端元子集构建方法得到的端元结果,进行地表比辐射率 ε 参数计算,公式为:

$$\varepsilon = f \varepsilon_v + (1 - f) \varepsilon_i + d_g \quad , \quad (5)$$

式中: ε_v 和 ε_i 分别为植被和裸地比辐射率; f 为植被盖度; d_g 为地表几何分布和内散射效应^[18]。

2)大气透过率和大气平均作用温度确定。大气透过率和大气平均作用温度较难获取。因此,本文利用覃志豪等^[19]提出的针对中纬度夏季平均大气作用温度 T_1 公式进行估算(式(6)),大气透过率 τ 由式(7)计算获得,公式为:

$$T_1 = 16.011\ 0 + 0.926\ 21T_0 \quad , \quad (6)$$

$$\tau = 1.031\ 412 - 0.115\ 36\omega \quad , \quad (7)$$

式中: T_0 为近地面高 2 m 处的大气温度; ω 为大气水分含量,本次实验在查阅历史气象资料的基础上确定 ω 取值。

3)辐射亮温计算。首先对 Landsat 热红外波段进行辐射定标^[18],公式为:

$$L_\lambda = \frac{DN(L_{\max} - L_{\min})}{255} + L_{\min} \quad , \quad (8)$$

$$T_2 = K_2 / \ln \left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1 \right) \quad , \quad (9)$$

式中: L_λ 为热辐射强度值; $L_{\max}$ 和 $L_{\min}$ 分别为传感器可探测的最大、最小辐射亮度值, $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$; T_2 为亮温温度, K; K_1 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) 和 K_2 (K) 为热红外波段预设值(表 1)。

表 1 Landsat5/7/8 热红外波段辐射常量值

Tab.1 Values of radiation constants of Landsat5/7/8 TIR bands

辐射常量	Landsat5 TM6 波段	Landsat7 ETM+6 波段	Landsat8 TIRS10 波段	Landsat8 TIRS11 波段
$K_1/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	607.76	666.09	774.89	480.89
K_2/K	1 284.30	1 282.71	1 321.08	1 201.14

4)地表温度计算。在确定地表比辐射率、大气

透过率和大气作用平均温度 3 个核心参数基础上^[19-22],进行地表温度计算,公式为:

$$T_s = \frac{1}{C} \{ a(1 - C - D) + [b(1 - C - D) + C + D] T_2 - D T_1 \} - 273.15 \quad , \quad (10)$$

式中: T_s 为地表温度; a, b 分别为拟合系数,通常取值 -67.355 351 和 0.458 606; C 和 D 分别为中间变量。 C 和 D 计算公式分别为:

$Y = A + Bx + e \quad , \quad (13)$

$$C = \varepsilon \tau \quad , \quad (11)$$

$$D = (1 - \tau) [1 + (1 - \varepsilon) \tau] \quad . \quad (12)$$

式中: A 为截距; B 为直线斜率; e 为误差项。

2.2 线性回归分析

线性回归分析是根据一个或一组自变量的变化情况预测与其相关关系的随机变量未来值的一种方法^[23]。本次实验中利用线性回归方法构建不同用地类型与地表温度间的相关关系,线性回归通过最

2.3 皮尔逊(Pearson)相关

皮尔逊相关是一种计算直线相关的通用方法,该模型主要用于度量 2 个变量之间的相关程度^[24]。假设变量 X 和 Y ,当 2 个变量呈线性相关且满足正态分布时,则它们的相关系数为:

$$\rho_{X,Y} = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{E - E^2(X)} \sqrt{E - E^2(Y)}} \quad , \quad (14)$$

式中: E 为数学期望; cov 为协方差。

3 结果与分析

3.1 灞河两岸土地利用时空变化分析

采用监督分类中的最大似然法,基于 2019 年实

地采样的 84 个先验数据,利用 ENVI5.4 平台分类得到 1992 年、2000 年、2010 年及 2019 年的土地利用数据(图 2),整体分类精度分别为 90.54%,92.31%,90.16% 和 91.41%; Kappa 系数分别为 0.852 3,0.884 1,0.866 7 和 0.892 4,经统计得到灞河两岸用地数据(表 2)。

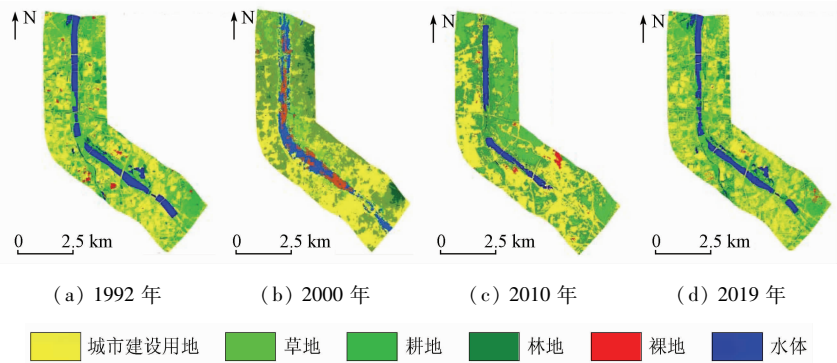


图 2 灞河区域 1992 年、2000 年、2010 年及 2019 年土地利用类型
Fig.2 Land use of Bahe River in 1992, 2000, 2010 and 2019

表 2 灞河两岸土地利用面积统计
Tab.2 Land use data of the Bahe River both banks (km²)

年份	区位	建设用地	草地	耕地	林地	裸地	水体
1992 年	灞河以东	15.549	8.046	7.873	2.240	0.601	0.774
	灞河以西	21.219	8.159	4.001	1.986	0.747	0.621
2000 年	灞河以东	15.899	7.257	6.849	3.412	0.914	0.752
	灞河以西	21.221	7.455	4.179	2.423	0.811	0.644
2010 年	灞河以东	17.849	5.221	4.511	5.412	1.393	0.699
	灞河以西	21.014	5.143	4.275	5.145	0.655	0.541
2019 年	灞河以东	18.124	4.548	6.486	4.672	0.583	0.675
	灞河以西	21.375	4.597	5.851	5.105	0.226	0.592

结合图 2 与表 2 可知,在以灞河为中心两岸 2 km 范围内,东西两岸建设用地占比平均为 48.1% 和 57.3%,表明建设用地占主导地位;灞河两岸建设用地和林地累计增幅分别为 16.6% 和 0.7%,108.6% 和 157%。草地、耕地和裸地均表现为减少趋势,其中草地减幅最大,两岸累计减少 43.4% 和 43.7%,

减少的草地主要流入建设用地。结合不同用地类型的时空变化及转移矩阵发现,建设用地的流入区域主要集中在灞河两岸 50 ~ 200 m 之间。整体来看,1992—2019 年灞河以东建设用地和林地显著增加,草地、耕地、裸地及水体减少;灞河以西草地、裸地和水体面积下降,林地增加显著,增加的建设用地主要分布在灞河以东的北部、南部及灞河以西靠近主城区的位置。

3.2 灞河两岸地表温度时空变化分析

基于提出的针对混合像元的支持向量机最优端元子集构建方法,以 Landsat8 B10 波段为例,将反演结果经重采样(1 000 m)与 MODIS LSE 进行同尺度比对分析(表 3),结果表明该方法计算的地表比辐射率计算结果与 MODIS LSE 产品具有较高的一致性($R=0.832$),精度可靠^[25]。因此,该算法可用于

Landsat 数据的地表比辐射率参数计算。在此基础上,基本构建的地表温度反演软件 LST 2.0,反演得到了研究区 1992 年、2000 年、2010 年及 2019 年地表温度数据(图 3),由于文中所选 4 幅影像数据对应的气象条件近似,结果可直接对比分析,因此,针对反演结果未做进一步消差处理。最后统计得到灞河两岸地表温度变化情况(图 4)。

表 3 地表比辐射率对比分析

Tab.3 Comparative analysis of surface emissivity

方法	平均值	标准差	平均误差	均方根误差	相关系数
结合支持向量机的混合像元最优端元子集模型	0.980 64	0.004 1	0.002 1	0.004 6	0.832
MODIS LSE	0.986 41	0.003 2			

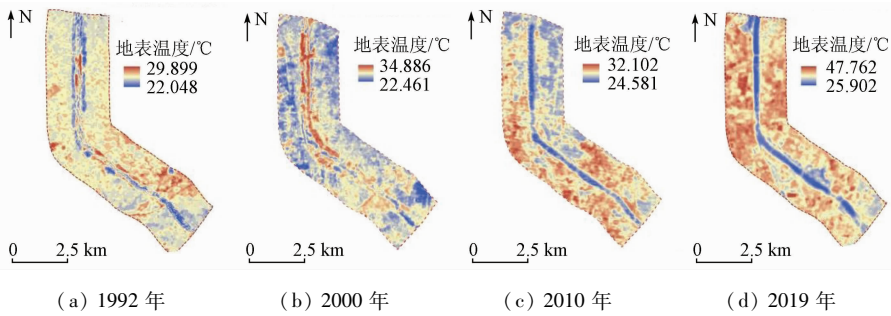


图 3 灞河区域 1992 年、2000 年、2010 年及 2019 年地表温度

Fig.3 Land surface temperature of Bahe River in 1992,2000,2010 and 2019

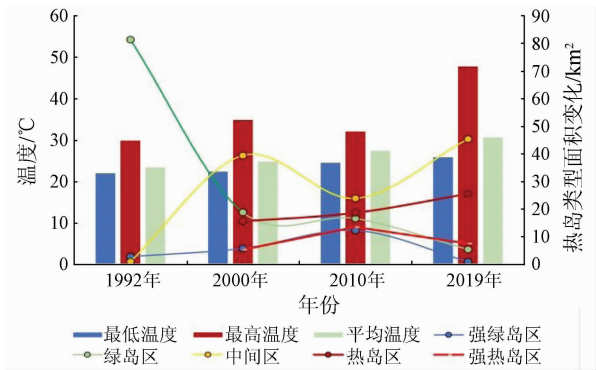


图 4 1992—2019 年温度变化

Fig.4 Temperature variation from 1992 to 2019

图 3—4 表明,1992 年灞河两岸热岛类型主要为强绿岛区、绿岛区、中间区 3 种,其中以绿岛区为主,占比 95.1%,强绿岛区与中间区面积基本持平,主要原因在于 1992 年灞河两岸建设开发强度低,原生态植被保存完好,整体热环境良好;2000 年中间区增速明显,占比 46.2%,热岛区出现,占比 18.3%;2010 年强绿岛区和强热岛区变化显著,占比 14.5%和 15.9%,强绿岛区的出现主要是由于浐河生态治理,该时间段内的强热岛主要为灞河的河床裸露所导致,而热岛区域主要以点面结合的形式分

布于灞河以西且接近主城区的地方;2019 年灞河两岸地表热环境空间格局变化显著,中间区占主导地位,累计增加 43.554 km²,热岛区和强热岛区累计增加 33.283 km²,以片状斑块连续状分布于灞河两岸;同时,灞河两岸强绿岛区逐渐消失,这是浐灞生态区快速城镇化建设导致灞河两岸建设用地持续增加的结果。

3.3 基于时间变化的用地类型与地表温度耦合特征分析

基于灞河两岸不同时相土地利用与地表温度反演结果,建立 200 m × 200 m 大小的矢量格网,利用 SPSS22 软件中 Pearson 双侧显著性检测分析工具,分析随时间变化灞河两岸不同用地类型与地表温度的相关关系。

3.3.1 用地类型与地表温度相关性分析

灞河两岸用地类型与地表温度相关性如图 5 所示。由图 5 可知:1992—2019 年灞河两岸建设用地面积占比与地表温度相关系数在 4 个时相内均最高,呈现“降低—升高”的变化趋势;草地、林地、水体面积占比与地表温度的相关系数逐渐升高。1992 年、2000 年和 2010 年灞河两岸建设用地、耕地、草

地和裸地面积占比均与地表温度正相关,为升温用地;水体、林地面积占比与地表温度负相关,为降温用地;2019 年,灞河两岸建设用地和裸地面积占比

与地表温度呈现正相关,草地、林地、耕地和水面面积占比与地表温度呈负相关,即水体、草地、林地和耕地有助于降低灞河两岸地表温度。

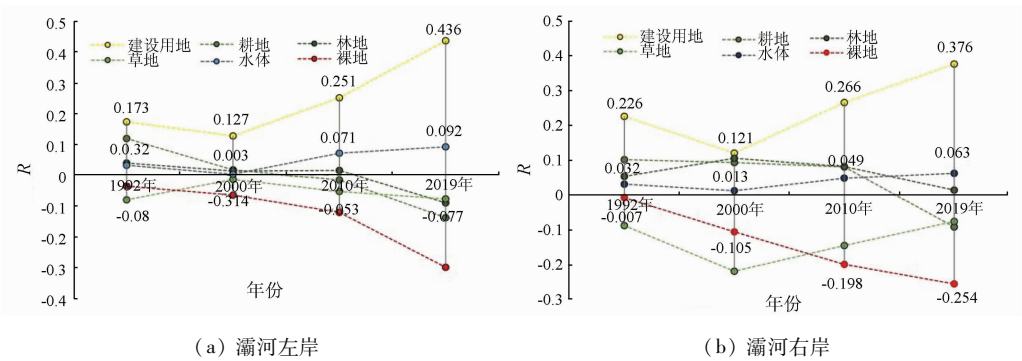


图 5 灞河两岸用地类型与地表温度的相关性

Fig.5 Correlation between land use and surface temperature on both banks of Bahe River

3.3.2 用地类型与地表温度线性特征分析

采用线性回归模型对不同用地类型与地表温度的相关关系进行拟合分析(图 6),结果表明:在 200 m × 200 m 尺度下,水体面积占比每增加 10%,地表温度平均降低 0.422 ℃;林地面积占比每增加 10%,地表温度平均降低 0.132 ℃;草地面积占比每增加

10%,地表温度平均降低 0.194 ℃;耕地面积占比每增加 10%,地表温度平均降低 0.115 ℃。因此,不同土地利用类型面积占比的拟合结果进一步表明:不同土地利用方式的降温效果不同,依次为:水体>林地>草地>耕地。

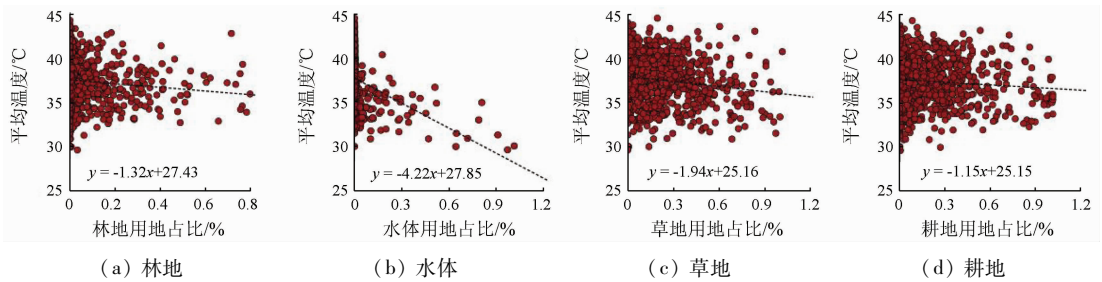


图 6 不同时期各降温用地面积占比与地表温度的线性关系

Fig.6 Linear relationship between the proportion of cooling land area and surface temperature in different periods

3.4 基于空间变化的用地类型与地表温度耦合特征分析

为了进一步分析灞河两岸用地类型与地表温度间的耦合关系,以 100 m 为缓冲间距,分别在灞河两岸构建 20 个缓冲区域,去除灞河水体对其周临降温的影响,以缓冲区用地平均温度与各缓冲区温度之

差作为评价依据,研究不同缓冲区内灞河两岸用地类型与地表温度的关系特征。

3.4.1 缓冲区地表温度变化特征分析

图 7 为不同年份灞河两岸各缓冲区内用地类型温度与缓冲区温度变化,图 7 表明:1992 年、2000 年、2010 年和 2019 年灞河两岸不同缓冲区内各用

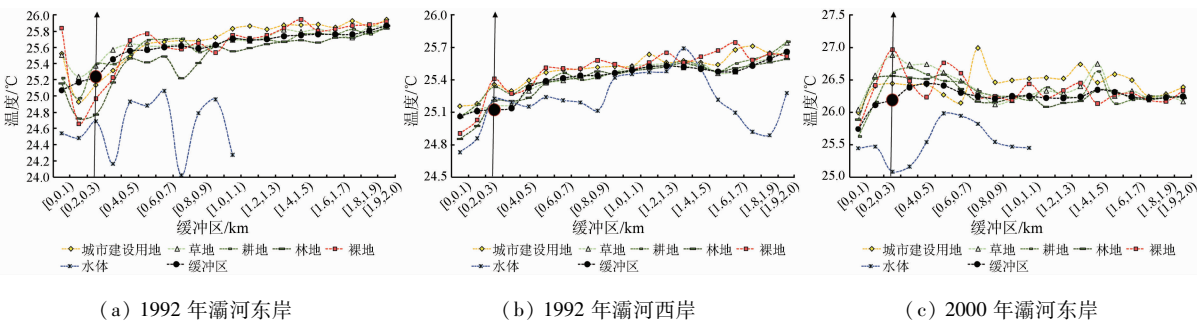


图 7-1 不同年份灞河两岸各缓冲区内用地类型温度与缓冲区温度变化

Fig.7-1 Variation of land use and buffer zone temperature on both banks of the Bahe River in different years

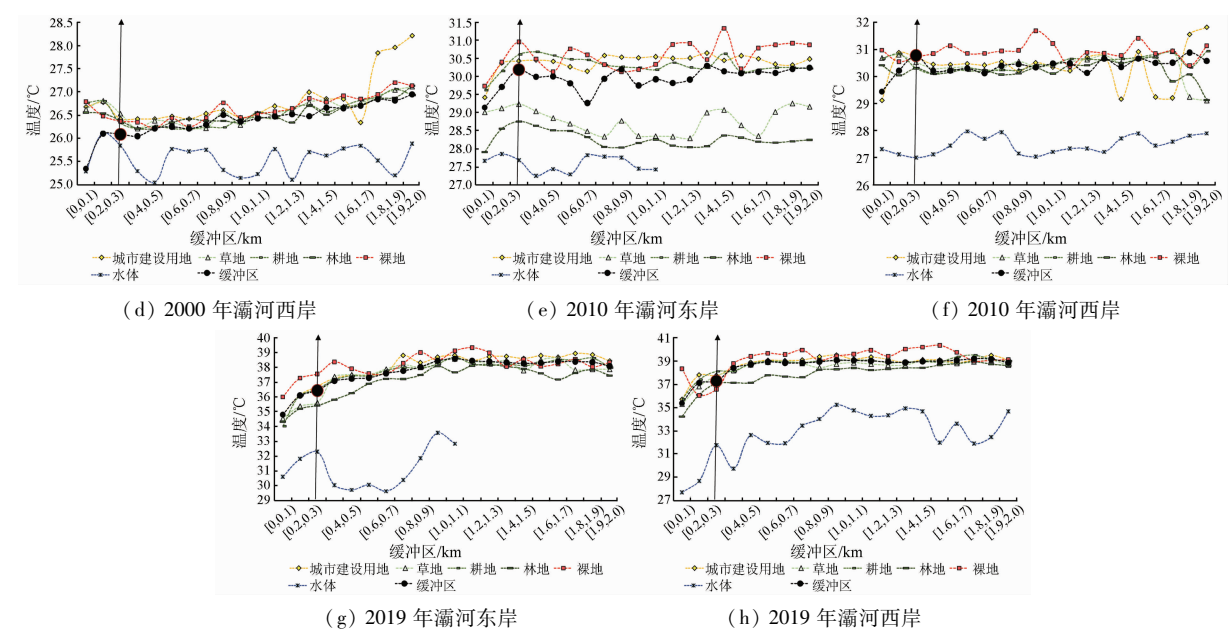


图 7-2 不同年份灞河两岸各缓冲区内用地类型温度与缓冲区温度变化

Fig. 7-2 Variation of land use and buffer zone temperature on both banks of the Bahe River in different years

地类型平均温度伴随缓冲区距离的增加呈现上升趋势,其中建设用地温度最高,水体最低;灞河两岸多级缓冲区平均温度在 0~300 m 和 0~400 m 范围内较低,且变化缓慢,表明灞河对两岸最大热环境改善距离分别为 300 m 和 400 m。同时,灞河以东水体、林地、耕地和草地的平均温度整体低于各缓冲区平均温度,降温效果依次为:水体>林地>草地>耕地;灞河以西则是水体、林地和草地的平均温度低于各

缓冲区平均温度,降温效果为:水体>林地>草地,且灞河以东草地的降温效果大于灞河以西,灞河以西的水体和林地降温效果则优于灞河以东。

3.4.2 缓冲区用地类型与 LST 特征分析

图 8 为不同时期灞河两岸各缓冲区用地类型的降温效果,图 8 表明:1992 年、2000 年、2010 年和 2019 年灞河两岸水体、林地、草地和耕地类型在不同时相、不同面积占比条件下,缓冲区距灞河河道不

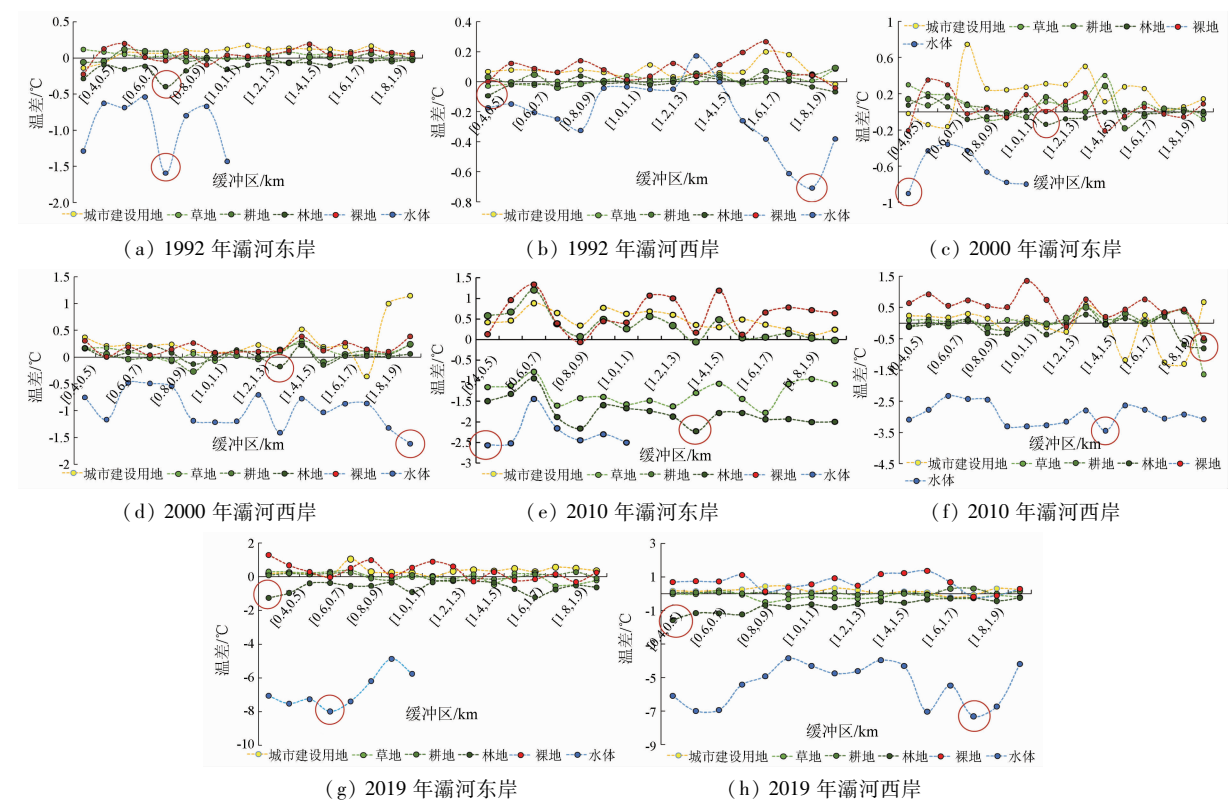


图 8 不同时期灞河两岸各缓冲区用地类型的降温效果

Fig. 8 Cooling effect of land use in buffer zones on both banks of the Bahe River in different periods

同距离的降温效果各异。灞河以西水体、林地和草地类型分别在缓冲区距离为400~500 m,800~900 m和1 600~1 700 m时,当用地类型面积占比分别为0.81%,11.6%和14.0%时,上述用地类型降温效果较好;灞河以东水体、林地、草地和耕地类型分别在缓冲区距离为300~400 m,600~700 m,1 200~1 300 m和1 700~1 800 m时,当用地类型面积占比分别为3.9%,15.7%,13.1%和14.1%时,上述用地类型降温效果最好。因此,灞河两侧在未来城镇建设时,可以参考各降温用地面积占比参数,以使降温用地效果最大化。

4 讨论

4.1 河道周临用地类型及影响因素分析

通过1992—2019年灞河流域土地利用变化发现,该时段内灞河流域用地类型变化主要集中在近河道及其两岸0~200 m范围内。灞河的生态治理,特别是2004年浐灞生态区的设立,使得灞河流域土地利用模式的转变经历了早期的无序化多模式转变后,步入政策引导阶段,特别是2006年后开工建设的浐渭湿地公园和世博园等大型基建项目,一定程度上加剧了灞河两岸土地利用方式的转变。分析结果表明土地利用变化密集区域主要集中在灞河中部,灞河以东的北部及灞河以西的中南部,且后者变化幅度小于前者,造成这种变化的主要原因是政府大型基建项目的开工建设;且灞河西岸更靠近主城区,导致西岸开发强度整体高于灞河东岸,统计结果表明建设用地是除了水体与林地之外最大的用地类型,该结论与王耀斌等^[14]研究相一致。

4.2 用地类型与地表温度的相关性分析

用地类型与地表温度相关性分析表明:建设用地的变化是导致灞河两岸地表温度不断升高的主要因素,这一发现与王耀斌等^[14]和曾素平等^[10]结论相一致;但1992年和2000年草地表现为升温作用,这一结论与2010年不符,原因在于2000年以前,该区域草地面积占比较大,但纯草形式不利于热环境改善^[6-7],之后草地面积持续减少,草冠混合模式出现,2019年草地表现为降温作用,该结论与岳文泽等^[3]和张晓东等^[13]研究结果一致。同时,耕地、林地和水体表现为降温作用与类似研究结论相同^[4,10-11]。

4.3 多级缓冲用地类型对地表温度的影响分析

多级缓冲区分析表明,灞河两岸用地类型随缓冲区距离的增大,建设用地变化幅度呈现变小的趋势。1992—2019年,灞河两岸各缓冲区内地表温度

均随缓冲距离的增加而升高,其中2019年变化幅度最大。灞河对东岸0~300 m范围内有明显降温效应,灞河以东地区建设用地占主导地位,1992—2019年的27 a间累计增长16.6%,耕地变化呈现“增加—减少”的趋势,草地呈现“增加—减少—增加”的变化趋势,特别是林地与水体面积在300 m范围内增加显著,且在200~300 m范围内面积均为最大,占地面积分别为0.309 km²和0.141 km²。灞河对以西0~400 m范围内降温影响显著。就河道水体对周临热环境的影响距离而言,不同研究者所得结论略有差异^[3-4,7,9,13],主要由于研究对象大小、形状、周临地表、建筑物形态及气候区划不同所导致^[12-13]。进一步分析发现,灞河以西建设用地与草地占主导地位,建设用地和裸地均在距灞河400 m范围内占地面积最小,而林地、草地和水体占比较大;同时,灞河以西更加靠近浐河流域,就浐河灞河相邻地带而言,浐河水体辅助大范围绿地系统促使灞河西岸对周临温度的影响范围更广。

4.4 不足与展望

针对混合像元地表比辐射率提取的问题,首先提出了结合支持向量机最优端元子集构建方法的混合像元分解算法,以提高地表比辐射率的计算精度。通过与传统混合像元分解结果对比分析,验证了该方法的有效性^[25],运用改进的地表比辐射率方法,采用单窗算法以灞河为例进行地表温度的反演分析,深入剖析了灞河水体及其周临用地类型对局地温度的影响研究,尽管取得了一些成果,但仍然存在一些不足和局限性。

水体及其周临用地类型对周边环境的冷却效应受诸多因素,如水体面积、形状、水量、周临地形、建筑物分布及气候区划等的综合影响。本研究以灞河及周临用地类型现状为基础展开分析,并未深入考虑周临建筑物的三维时空特征,因此,下一步研究应当将周临环境由平面地形转化为三维实景空间,精准参数设置,以校正所得结论。同时,由于该实验是在暖温带半湿润的季风气候区展开,未能在不同的气候区划展开实验,因此,不同气候区划条件下的水体及其周临用地对局地热环境的影响需进一步分析。

5 结论

本文利用多源遥感数据,在对地表比辐射率进行改正计算的基础上展开了灞河两岸缓冲带及周临用地与地表热环境的相关性分析,得出以下结论:

1) 本文针对混合像元地表比辐射率估计问题,提出了支持向量机的最优端元子集构建的地表比辐

射率方法,并与传统的混合像元分解技术计算的丰度估计值相比较,结果表明,该算法计算的地表比辐射率精度较改进前可提高 0.005 ($R=0.832$)。

2)1992—2019 年间西安市灞河两岸用地和地表温度时空格局变化显著。建设用地因草地、林地和耕地的转入而增幅显著,已经成为灞河两岸最主要的用地类型,灞河以西较灞河以东变化剧烈;灞河两岸整体地表温度增幅明显,强绿岛区和绿岛区面积大幅较少,中间区、热岛区和强热岛区增加显著,且热岛区以片状斑块分布于灞河两岸北部,强热岛区以点状形态分布于灞河西岸靠近主城区位置。

3)建设用地、林地、水体和草地是影响灞河两岸地表温度的主要用地类型,其中建设用地影响幅度最大。建设用地、裸地、耕地与地表温度呈正相关关系,对温度增加呈现正贡献;水体、林地、草地与地表温度呈现负相关,对地表温度表现为负贡献。灞河对东西两岸地表温度影响的最大缓冲距离分别为 300 m 和 400 m,东西两岸缓冲区内不同用地类型面积占比变化是导致两岸降温幅度不一的主要原因。

参考文献 (References):

[1] 姚远,陈曦,钱静.城市地表热环境研究进展[J].生态学报,2018,38(3):1134-1147.
Yao Y, Chen X, Qian J. Research progress on the thermal environment of the urban surface[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3):1134-1147.

[2] 冯晓刚,周在辉,李凤霞,等.西咸一体化驱动的咸阳市热力景观格局时空分异分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(3):413-420.
Feng X G, Zhou Z H, Li F X, et al. Spatiotemporal differentiation of thermal landscape pattern in Xianyang City driven by the integration of Xi'an and Xianyang[J]. Journal Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2021, 53(3): 413-420.

[3] 岳文泽,徐丽华.城市典型水域景观的热环境效应[J].生态学报,2013,33(6):1852-1859.
Yue W Z, Xu L H. Thermal environment effect of urban water landscape[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1852-1859.

[4] 冯悦怡,胡潭高,张力小.城市公园景观空间结构对其热环境效应的影响[J].生态学报,2014,34(12):3179-3187.
Feng Y Y, Hu T G, Zhang L X. Impacts of structure characteristics on the thermal environment effect of city parks[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3179-3187.

[5] Lin Y, Wang Z F, Yang C, et al. Water as an urban heat sink: Blue infrastructure alleviates urban heat island effect in mega-city agglomeration[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 262: 1-8.

[6] Tan X Y, Sun X, Huang C D, et al. Comparison of cooling effect between green space and water body[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 67: 1-11.

[7] 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 B P, Ma Y F, Li H. Research on colling effect of landscape green space and urban water in Guilin City[J]. Ecology and Envi-

ronmental Sciences, 2015, 24(2): 278-285.

[8] Du H Y, Song X J, Jiang H, et al. Research on the cooling island effects of water body: A case study of Shanghai, China[J]. Ecological Indicators, 2016, 67: 31-38.

[9] Wu J S, Li C M, Zhang X, et al. Seasonal variations and main influencing factors of the water cooling islands effect in Shenzhen[J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 1470.

[10] 曾素平,时琢,赵梅芳,等.城市水体对热岛的缓冲性能沿河岸距离的变化规律[J].生态学报,2020,40(15):5190-5202.
Zeng S P, Shi Z, Zhao M F, et al. The variation of buffer performance of water bodies on urban heat island along riverbank distance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5190-5202.

[11] 张伟,王凯丽,梁胜,等.基于计算流体力学的城市近郊湖泊“冷岛效应”及其情景模拟研究——以长沙市同升湖为例[J].生态环境学报,2021,30(10):2054-2066.
Zhang W, Wang K L, Liang S, et al. Research on the “Cold Island Effect” and scenario simulation of lakes in urban suburbs based on computational force fluid dynamics: Taking Tongsheng Lake in Changsha City as an example[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(10): 2054-2066.

[12] Zheng Y, Li Y, Hou H, et al. Quantifying the cooling effect and scale of large inner-city lakes based on landscape patterns: A case study of Hangzhou and Nanjing[J]. Remote Sensing, 2021, 13(8): 1526.

[13] 张晓东,赵银鑫,马风华,等.基于遥感数据的银川市城市公园对城市热环境降温效应分析[J].水土保持通报,2021,41(5):338-347.
Zhang X D, Zhao Y X, Ma F H, et al. Analysis on cooling effect of urban parks on urban thermal environment in Yinchuan City based on remote sensing[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 338-347.

[14] 王耀斌,赵永华,韩磊,等.西安市景观格局与城市热岛效应的耦合关系[J].应用生态学报,2017,28(8):2621-2628.
Wang Y B, Zhao Y H, Han L, et al. Coupling relationship of landscape pattern and urban heat island effect in Xi'an, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8): 2621-2628.

[15] 胡李发,谢元礼,崔思颖,等.关中平原城市群夏季城市热岛特征及驱动力[J].中国环境科学,2021,41(8):3842-3852.
Hu L F, Xie Y L, Cui S Y, et al. The characteristics and driving forces of summer urban island in Guanzhong Plain urban agglomeration[J]. China Environmental Science, 2021, 41(8): 3842-3852.

[16] 黄路,邵浩,张彩云,等.用辐射传输方程改进算法反演 Landsat8 海表温度的效果检验和适用条件分析[J].应用海洋学学报,2021,40(4):714-720.
Huang L, Shao H, Zhang C Y, et al. Radiative transfer equation algorithm to retrieve Landsat8 sea surface temperature[J]. Journal of Applied Oceanography, 2021, 40(4): 714-720.

[17] 段四波,茹晨,李召良,等. Landsat 卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展[J].遥感学报,2021,25(8):1591-1617.
Duan S B, Ru C, Li Z L, et al. Reviews of methods for land surface temperature retrieval from Landsat thermal infrared data[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(8): 1591-1617.

[18] 覃志豪, Zhang M H, Arnon K, 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(4): 456-466.
Qin Z H, Zhang M H, Arnon K, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface land temperature from Landsat TM6 data[J]. Acta Geo-Graphica Sinica, 2001(4): 456-466.

[19] 覃志豪,李文娟,徐 斌,等. 利用 Landsat TM6 反演地表温度所需地表辐射率参数的估计方法[J]. 海洋科学进展,2004(22): 129 – 137.
Qin Z H, Li W J, Xu B, et al. Estimation method of land surface emissivity for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data[J]. Advances in Marine Science, 2004(22): 129 – 137.

[20] 宋彩英,覃志豪,王 斐. 基于线性光谱混合模型的地表温度像元分解方法[J]. 红外与毫米波学报,2015,34(4):497 – 504.
Song C Y, Qin Z H, Wang F. An effective method for LST decomposition based on the linear spectral mixing model[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34(4): 497 – 504.

[21] 徐涵秋. Landsat8 热红外数据定标参数的变化及其对地表温度反演的影响[J]. 遥感学报,2016,20(2): 229 – 235.
Xu H Q. Change of Landsat8 TIRS calibration parameters and its effect on land surface temperature retrieval[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(2): 229 – 235.

[22] 周 佳,赵亚鹏,岳天祥,等. 结合 HASM 和 GWR 方法的省级尺度近地表气温估算[J]. 地球信息科学学报,2020,22(10): 2098 – 2107.
Zhou J, Zhao Y P, Yue T X, et al. Near surface air temperature es-

timation by combining HASM with GWR model on a provincial scale[J]. Journal of Geo – Information Science, 2020, 22(10): 2098 – 2107.

[23] 韩 晟,韩坚舟,赵 璇,等. 距离权重改进的 Pearson 相关系数及应用[J]. 石油地球物理勘探,2019,54(6):1363 – 1370.
Han S, Han J Z, Zhao X, et al. A Pearson correlation coefficient improved by spatial weight[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(6): 1363 – 1370.

[24] 凌德泉,毕硕本,左 颖,等. 缓冲区分析综合模型构建研究[J]. 测绘科学,2019,44(9):47 – 53.
Ling D Q, Bi S B, Zuo Y, et al. Study on the comprehensive model construction of buffer analysis[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(9): 47 – 53.

[25] 王丽霞,孙津花,刘 招,等. 基于 Landsat8 数据反演地表发射率的几种不同算法对比分析[J]. 西安科技大学学报,2019,39(2):327 – 333.
Wang L X, Sun J H, Liu C, et al. Comparison of several different algorithms to retrieve land surface emissivity using Landsat8 data[J]. Journal of Xi’ an University of Science and Technology, 2019, 39(2): 327 – 333.

Influence of urban rivers and their surrounding land on the surface thermal environment

FENG Xiaogang¹, ZHAO Yi², LI Meng¹, ZHOU Zaihui¹, LI Fengxia¹, WANG Yuan¹, YANG Yongquan³
(1. College of Architecture, Xi’ an University of Architecture and Technology, Xi’ an 710055, China;
2. CCC Urban and Rural Construction Planning and Design Institute, Wuhan 430050, China;
3. Shandong Province Metallurgical Engineering Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: As an integral component of the urban ecosystem, water bodies hold considerable ecological significance for mitigating the urban heat island effect and the thermal environment of human habitat. With multi – temporal Landsat and SPOT data as experimental data, this study proposed a method for determining surface emissivity for mixed pixels based on the principle behind the construction of the support vector machine (SVM) optimal endmember subset. Then, this study employed the surface emissivity determination method to analyze the coupling relationship of the water bodies and surrounding land of the Bahe River with the surface temperature using a mono – window algorithm. The results are as follows: ① The SVM optimal endmember subset construction method for mixed pixels yielded an error of surface emissivity less than 0.005 ($R = 0.832$) relative to the MODIS LSE product. This result indicates that the method has high accuracy and thus can be used to extract surface emissivity. ② Over the past 27 years, the land types and local surface temperature patterns on both sides of the Bahe River have changed significantly, with a sharp increase in construction land and a significant warming trend. The effects of land use types surrounding the Bahe River on surface temperature varied in different periods, with construction land, grassland, water bodies, and forest land being the principal land use types affecting the thermal environment on both sides of the Bahe River. The cooling effects of water bodies, forest land, grassland, and cultivated land are in the order of water bodies > forest land > grassland > cultivated land. ③ The effects of land use types on both sides of the Bahe River on local temperatures exhibited spatial differences during the same period. To the east of the Bahe River, the water bodies, forest land, grassland, and cultivated land show significant cooling effects. In contrast, to the west of the river, only water bodies, forest land, and grassland showed significant cooling effects. This study contributes to the proper understanding of the influence of urban rivers on the local thermal environment, providing a scientific reference for mitigating the local thermal environment of urban rivers and their surrounding areas.

Keywords: surface emissivity; thermal environment; urban heat island effect; water body; Bahe River
(责任编辑: 李 瑜)