

doi: 10.6046/gtzyyg.2020.04.24
引用格式: 谷艳春,孟庆岩,胡蝶,等. 工业热异常热环境效应分析[J]. 国土资源遥感,2020,32(4):190-198. (Gu Y C, Meng Q Y, Hu D, et al. Analysis of environmental effects of industrial thermal anomalies [J]. Remote Sensing for Land and Resources ,2020, 32(4):190-198.)

工业热异常环境效应分析

谷艳春¹, 孟庆岩², 胡蝶², 周小成¹

(1. 福州大学数字中国研究院(福建),福州 350002; 2. 中国科学院遥感与数字地球研究所,北京 100094)

摘要: 工业作为影响城市热环境的重要机制之一,准确检测出引起热异常的工厂,分析工业热异常对局域热环境的影响力度,对科学规划工业建设、改善城市热环境具有重要意义。基于不同季节的 Landsat8 数据,采用辐射传输方程法反演地表温度,对比在热场变异指数基础上以不同分级方式进行热异常检测的方法,并依据较高精度的检测结果进行局域热环境效应分析。结果表明:四级法更适合工业热异常检测研究;工厂生产规模与其对应热异常斑块面积呈正比关系,工厂生产规模面积每增加 5.8 km²,热异常斑块面积平均增加 0.18 km²;工业热异常对局域建设用地和非建设用地均有热环境效应,对建设用地的增温作用随着距离越远作用越小,对 1 km 范围内的非建设用地增温作用明显。研究成果可为工业热异常检测、分析工业热异常对局域环境效应提供参考。

关键词: 工业热异常; 热环境效应; 热场变异指数; 辐射传输方程; 遥感

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2020)04-0190-09

0 引言

我国作为世界上最大的发展中国家,目前正处于工业化进程中。工业化水平从 1990 年的 36.1% 上升到 2011 年的 41.3%^[1]。但迅速工业化在推动文明、促进经济发展的同时^[2],由工业排放引起的热异常问题日益突出,且因工业区以集中分布的形式排放废热,致使城市生态热环境化更加严重^[3-4]。同时,由工业热异常引发的局域热环境变化问题也越来越突出^[5]。因此,准确检测出引起热异常的工厂并准确分析其对局域热环境的效应,不仅为评估工业对城市热环境的影响提供准确信息,对科学规划工业建设、改善城市热环境具有重要意义。

现有的热异常检测方法可分为 4 类:与实际温度做差法、等间距分级法、均值-标准法和热岛强度法。与实际温度做差法是将高出天气预报的温度值作为热异常^[6],此方法可检测出高出实际温度的高温区,但存在大量冗余结果;等间距分级法是基于密度分割技术将地表温度按相等间距分割为若干个区间,并根据不同区间定义不同热岛效应,取热岛效应最强的区域为热异常区^[7],该方法一定程度上可以反映地表温度的空间分布^[8];均值-标准差法以地表温度

的均值与标准差的倍数关系为切入点进行等级划分^[9],此方法在对比分析不同时相区域热岛演变过程中,可以消除不同时相的差异;热岛强度法主要是根据地表平均温度计算热岛强度值,并采用不同分割方法将热岛强度值分割成若干份,取热岛强度值最大的区域为高温异常区,此方法的精度较高^[10-11]。但以上 4 种方法均是在地表温度基础上进行热异常的界定,未从地表温度中提升热异常的显著性。而孙飒梅等^[12]提出的热场变异指数,将地表温度进行归一化处理,以提高地表温度图中热异常像元的显著性。后经多位学者基于该指数进行热异常检测的相关研究,证明该指数的有效性^[13-15]。因此,本文在基于该指数的不同分级中选取最佳工业热异常检测方法。

综上,本研究以工业为主导产业的茌平县为研究区,基于多时相 Landsat8 遥感影像数据,运用辐射传输方程法反演地表温度。对比基于热场变异指数的不同分级法,优选最佳分级法,并进而分析工业热异常对局域热环境的效应。

1 研究区概况及数据源

本文研究区茌平县(N36°22'~36°45',E115°54'~116°24')隶属山东省聊城市,如图 1。2017 年,首次

收稿日期: 2019-12-10; 修订日期: 2020-03-18
基金项目: 国家高分辨率对地观测重大科技专项项目“高分环境监测综合验证和应用示范”(编号: 05-Y30B01-9001-19/20-1)、三亚市科技成果转化项目“三亚市城市热污染遥感监测技术”(编号: 2017CZ07)和海南省重点研发计划项目“基于高分辨率数据的农业陆表环境关键参量遥感提取技术”(编号: ZDYF2018231)共同资助。
第一作者: 谷艳春(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向为城市热环境。Email: 1023654239@qq.com。
通信作者: 孟庆岩(1971-),男,博士,研究员,主要研究方向为城市陆表环境。Email: mengqy@radi.ac.cn。

入围全国工业百强县第 85 位。2018 年,入选年度全国综合实力百强县市(第 67 位)、投资潜力百强县市、绿色发展百强县市、全国新型城镇化质量百强县市。同年 11 月,入选 2018 年工业百强县(市)第 81 位。

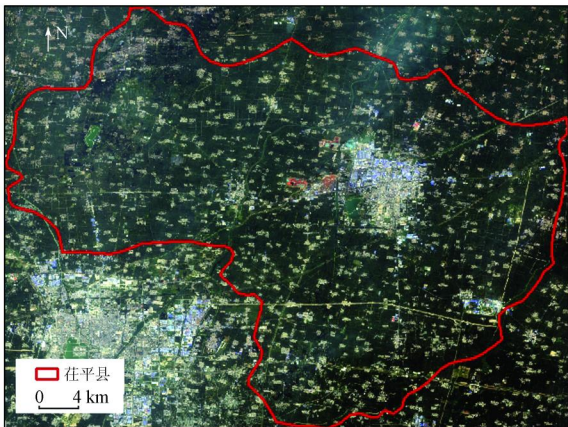


图 1 研究区位置示意图
Fig. 1 Location of study area

2013 年 2 月 11 日,美国宇航局成功发射的 Landsat8 卫星携带有 2 个主要载荷:陆地成像仪(operational land imager,OLI)和热红外传感器(thermal infrared sensor,TIRS)。TIRS 具有 2 个热红外波段,B10(10.6~11.2 μm)和 B11(11.2~12.5 μm),这 2 个波段与 MOD11A1 的热红外波段 31 和 32 的波宽以及中心波长基本一致,因此本文使用 MOD11A1 为验证数据。本文使用的 Landsat8 遥感影像数据因 B11 的定标出现问题^[16],故本文利用 B10 单波段反演地表温度,所用 Landsat8 影像数据均可在美国地质勘探局网站(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)获取。

2 研究方法

2.1 地表温度反演

辐射传输方程法精度高、所需参数信息少且易获取,是一种常用地表温度反演方法^[17],故本文采用辐射传输方程法反演地表温度(图 2)。

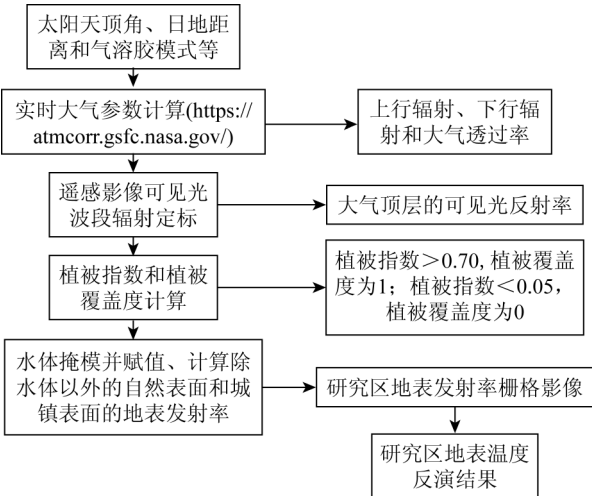


图 2 辐射传输方程法地表温度反演流程
Fig. 2 Flow chart of radiative transfer equation method

2.1.1 辐射传输方程法原理

热红外辐射能量在传输过程中,卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值由 3 部分组成^[18]。辐射传输方程表达式为:

$$L_{\text{sensor}} = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon) L_{\downarrow}] \tau + L^{\uparrow}, \quad (1)$$

式中: L_{sensor} 为表观辐射亮度; ε 为地物比辐射率; T_s 为地表温度; $B(T_s)$ 为根据普朗克定律推导得到的黑体的热辐射强度; $L_{\downarrow}$ 为大气下行辐射; τ 为大气透过率; $L^{\uparrow}$ 为大气上行辐射。因此,已知地表辐射率,便可计算出 $B(T_s)$,根据普朗克定律求解地表温度 T_s ,实现地表温度反演,即

$$T_s = K_2 / \ln[K_1 / B(T_s) + 1], \quad (2)$$

式中 K_1 和 K_2 分别为 TIRS 传感器特定的定标常数,分别为 774.89 和 1 321.08。

由式(1)—(2)可知,辐射传输方程法还需要 2 类参数:大气剖面参数和地表比辐射率。大气剖面参数 $L_{\downarrow}$, $L^{\uparrow}$ 和 τ 均可由成像时间和中心经纬度代入前文所述的大气计算网站获得,地表比辐射率估算在 2.1.2 节中介绍。

2.1.2 地表比辐射率估算

地表比辐射率表征地面物体向外辐射电磁波的一种能力,定义为物体在确定的温度、波长处的辐射出射度与黑体在同温度、同波长处的辐射出射度的比值^[19]。Van 等^[20]首次发现归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和地表比辐射率间存在对数关系,提出了 Van 半经验公式,即

$$NDVI = \frac{R_{\text{nir}} - R_{\text{red}}}{R_{\text{nir}} + R_{\text{red}}}, \quad (3)$$

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.074 \ln(NDVI), \quad (4)$$

式中: R_{nir} 为 Landsat8 影像的近红外波段反射率; R_{red} 为 Landsat8 影像的红光波段反射率。

由于地表物质结构复杂性,从遥感尺度大体分为 3 种类型:水体、城镇和自然表面^[21]。而水体像元的地表比辐射率很高,与黑体的比辐射率较为相似,因此,在估算水体比辐射率时常被赋值为 0.995^[22],自然表面和城镇像元的地表比辐射率估算公式分别为:

$$\varepsilon_{\text{surface}} = 0.9625 + 0.0614 P_{\text{vege}} - 0.0461 P_{\text{vege}}^2, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\text{building}} = 0.9589 + 0.086 P_{\text{vege}} - 0.0671 P_{\text{vege}}^2, \quad (6)$$

式中： e_{surface} 为自然表面像元的地表比辐射率； e_{building} 为城镇像元的地表比辐射率； P_{vege} 为植被覆盖度。 P_{vege} 计算公式为^[23]：

$$P_{\text{vege}} = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\text{soil}}}{NDVI_{\text{vege}} - NDVI_{\text{soil}}} \right)^2, \quad (7)$$

式中： $NDVI_{\text{vege}}$ 为影像中纯植被像元的 $NDVI$ 值； $NDVI_{\text{soil}}$ 为影像中纯土壤像元的 $NDVI$ 值。当某个像元的 $NDVI$ 大于 0.70 时， P_{vege} 取值为 1；当 $NDVI$ 小于 0.05 时， P_{vege} 取值为 0；当 $NDVI$ 介于 0.05 ~ 0.70 之间时，则分别将 $NDVI_{\text{vege}}$ 和 $NDVI_{\text{soil}}$ 取值 0.70 和 0.05^[24]，并利用式(7)估算影像的植被覆盖度。

2.2 热场变异指数

孙飒梅等^[12]根据马蔼乃^[25]在遥感信息模型研究中所提出的地理相似准则，提出以相对亮温定量分析热异常强度，并首次将城市热异常强度作为城市生态环境状况的监测指标之一。张勇等^[26]将此方法称为热场变异指数法。

热场变异指数法的计算过程为：先将研究区域的逐像元地表温度和研究区域的平均温度相减；然后将相减所得值与研究区平均温度进行比值运算，用比值结果来描述该点的热异常强度情况^[27]。其中，热场变异指数的计算公式为：

$$HI = \frac{T_i - T_{\text{mean}}}{T_{\text{mean}}}, \quad (8)$$

式中： HI 为热场变异指数； T_i 为逐像元的地表温度； T_{mean} 为研究区的平均地表温度。

整理基于热场变异指数的分级法发现：孙飒梅等^[12]采用阈值法将热场变异指数分为 6 个等级，同时将该等级作为城市环境质量的一个生态指标等级；罗小波等^[13]为反映热岛等级的空间分布，根据实际情况确定 4 级划分指标；张宇等^[14]依据热场变异指数更能直观表达热岛强度的大小和变化的优势，将热场变异指数按阈值划分为 4 个等级；王宏博等^[15]和武文昊等^[10]根据计算的相对地温和较常用的热岛强度划分等级，将其分为 5 个等级；陶于祥等^[11]借助热场变异指数将地表温度进行标准化处理，将热场变异指数划分为 5 个等级。

2.3 建设用地提取

为探究工业热异常对局域热环境的效应，在距离工业热异常区 1 ~ 5 km 范围内提取建设用地和非建设用地。具体方法如下，为区别 2 种用地类型，使用建设用地指数 (index - based built up index, IBI) 来提取建设用地。该指数主要有以下 3 个指数构成：土壤调节植被指数 (soil adjusted vegetation index, SAVI)、改进归一化差异水体指数 (modified

normalized differences water index, MNDWI) 和归一化建筑指数 (normalized differences built - up index, NDBI)^[28]。IBI 能清楚地将城市 3 个主要组成部分的光谱集群区别开：建设用地、植被和水。其计算方法见参考文献[28]。代颖懿等^[29]也选取 Landsat 影像分析了国内外建设用地提取指数，并用同期 QuickBird 和 Google Earth 影像辅以验证。研究结果表明，IBI 精度较高，达到 92%，建议提取建设用地优选 IBI，因此本文也采用 IBI 提取建设用地 (图 3)。

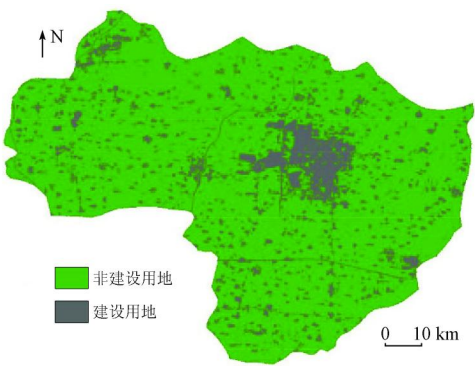


图 3 在平县建设用地和非建设用地空间分布
Fig. 3 Distribution of building and nonbuilding areas in Chipping County

3 结果与分析

3.1 热场变异指数计算

孙飒梅等^[12]设置的分级阈值均较小，致使大量热异常冗余结果。张宇等^[14]分级中的最后一级与罗小波等^[13]分级中最后一级的阈值一致，因此，本文结果中只展示罗小波等^[13]分级法的结果。夏季的热场变异指数最大值为 0.46，秋季的最大值为 0.45，均未达到陶于祥等^[11]分级中最后一级的阈值，说明该方法不适用于本文的工业热异常检测。因此，本文依据罗小波等^[13]四级法和王宏博等^[15]五级法进行工业热异常检测。为对比分析这 2 种方法的检测精度，本文采用直观定性评价与精度分析相结合的方法进行综合评价。且多期冬季影像的热场变异指数结果精度极低，因此本文不再对冬季时相的研究结果展开讨论。

3.1.1 直观定性评价

为直观对比四级法和五级法的优劣，研究选取了信源大铝厂 (36.579 6°N, 116.168 6°E) 作为对比对象。为对比热异常检测结果，春季选取该厂扩建前的影像，夏季和秋季为扩建后的影像，如图 4 所示，叠加在工厂示意图层上的红色区域为 2 种方法检测到的热异常。从图 4 来看，四级法和五级法的

检测差异具体表现为：①春季,2 种方法检测的热异常边界与炼铝房轮廓重合度均较低,但在上侧,四级法较一致；②夏季,2 种方法的重合度仍极低,初步推断因为当天生产量低所致；③秋季,2 种方法的重合度均较高。且四级法的重合度高于五级法。综上可得,四级法更适用于研究区热异常检测。

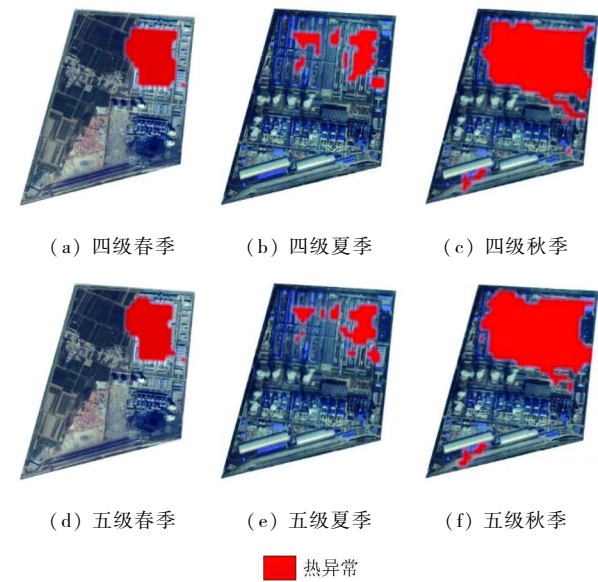


图 4 茌平县信源大铝厂热异常检测结果

Fig. 4 Thermal anomaly detection partial result in Xinyuan Aluminum factory of Chiping County

3.1.2 精度评价

本文利用自身检测比率和工厂个数占比^[30]指标对

四级法和五级法的检测结果进行量化评估分析。

结合高空间分辨率且坐标无偏移的 Google Earth 影像,辅以有在线地名的百度地图,利用人工判读方式识别出茌平县进行工业改建前有 84 个工厂,改建后有 62 个工厂。同时采用自身检测比率和工厂个数占比作为评价指标,自身检测比率是检测的正确个数与检测总个数之比,工厂个数占比是检测的正确个数与工厂总个数之比。结果如表 1 所示：①春季,四级法的自身检测比率与工厂个数占比均较大；②夏季,四级法和五级法的自身检测比率虽一致,但四级法的工厂个数占比较大；③秋季,虽然五级法的自身检测比率较大,但 2 种方法的工厂个数占比相同。综上,四级法更适用于工业热异常的检测。

表 1 检测精度定性对比分析

Tab. 1 Qualitative contrast analysis of extraction accuracy

季节	方法	检测总个数	检测正确个数	自身检测比率/%	工厂个数占比/%
春季	四级法	160	80	50.00	94.12
	五级法	163	77	47.24	91.67
夏季	四级法	40	40	100	64.52
	五级法	38	38	100	61.29
秋季	四级法	74	61	82.43	98.39
	五级法	69	61	89.29	98.39

3.2 地表温度结果验证及空间分布特征

为对温度反演结果(图 5)进行精度验证,以对应时段的 MOD11A1 日温度产品进行交叉验证。精度对比结果如图 6 所示。

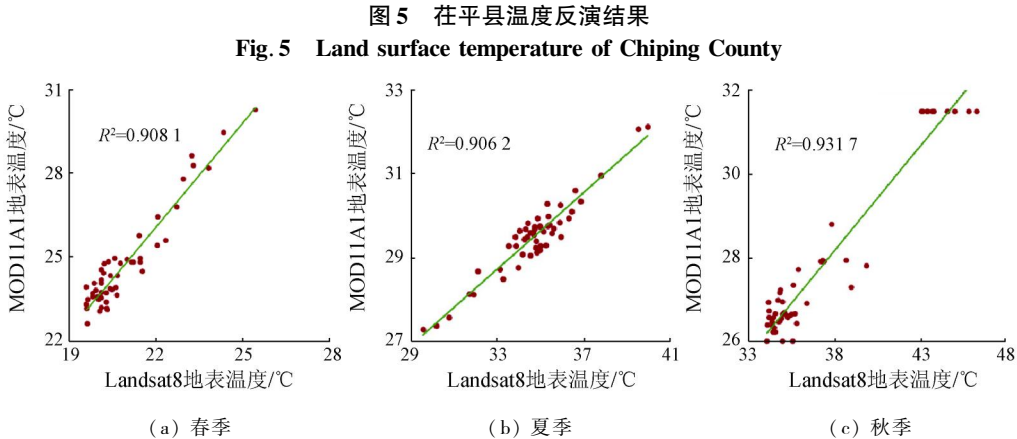
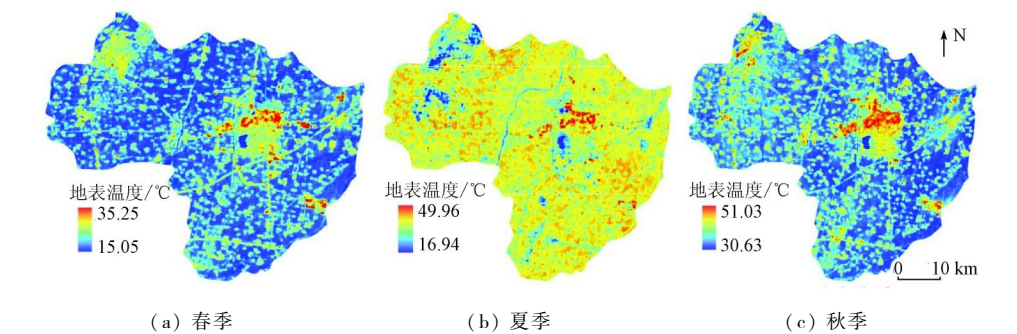


图 6 Landsat8 与 MODIS 地表温度精度对比

Fig. 6 Comparison of land surface temperature of Landsat8 and MODIS

由图 6 可见,Landsat8 数据反演的地表温度与 MOD11A1 日温度产品的地表温度相关系数 R^2 在春季为 0.908 1,夏季为 0.906 2,秋季为 0.931 7,两者关系显著。因此,表明本文反演的地表温度结果具有一定的可信度,可以作为下一步研究的数据。

从地表温度空间分布格局可以看出(图 5),城区地表温度明显高于周边郊区,城区内的工业区地表温度明显高于其他功能区,形成岛中岛的高温区域,且界限清晰。表明工业热异常不仅确实存在,且十分明显。

基于在平县秋季四级法结果,计算不同等级的面积和比例(表 2),分析地表温度空间分布特征(图 7)。结合表 2 和图 7 可以看出,工业热异常区多分布于工业区域;高温区多分布于距离工业区较近的城市建成区;中温区多分布于距离工业区中远距离的建成区和村落;低温区则主要分布于植被区域。不同地表温度等级面积从大到小分别为:低温区、中温区、高温区与工业热异常区。其中低温区面积高达 745.47 km²,所占比例最高,为 66.21%;中温区面积也较高,占比为 28.71%;高温区占比较低,为 4.34%;工业热异常区占比最低,为 0.74%。

表 2 在平县不同地表温度热力等级面积及比例

Tab. 2 Area and proportion of different surface temperature thermal levels in study area

指标	低温区	中温区	高温区	工业热异常区
面积/km ²	745.47	323.26	48.81	8.35
比例/%	66.21	28.71	4.34	0.74

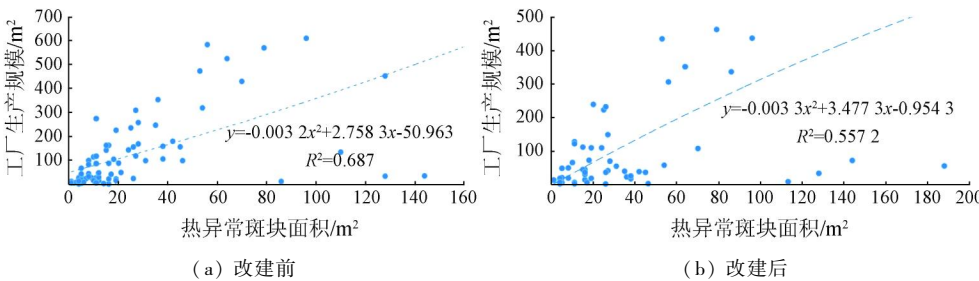


图 8 在平县工厂面积与热异常面积

Fig. 8 Factory area and thermal anomaly area in Chiping County

3.4 工业热异常对局域热环境的增温效应

为分析工业热异常对局域热环境的效应。首先,在四级法检测工业热异常精度最高且剔除错检结果的基础上,以工业热异常为圆心,分别以 1 km,2 km,3 km,4 km 和 5 km 为半径^[31],建立工业热异常的 5 级缓冲区,如图 9 所示;其次,在每级缓冲区范围内,结合 IBI 结果,提取建设用地和非建设用地;最后,计算距离工业区 1~5 km 缓冲区范围内建设用地和非建设用地的最低温、最高温和均温,通过定量统计 1~5 km 缓冲区范围内建设用地和非建设用地的温差,来定量描述工业热异常对局域热环境的效应。

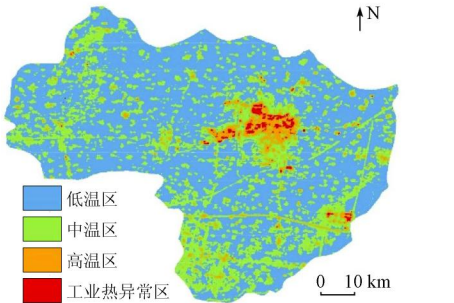


图 7 在平县秋季地表温度热力等级空间分布

Fig. 7 Spatial distribution map of surface temperature in Chiping County in autumn

3.3 工厂生产规模对热异常斑块效应

使用不同的生产技术导致不同形式的能耗和发热,致使不同工业规模对热异常有不同的贡献率。前文已得出四级法检测热异常效果较好,尤其是春季(改建前)和秋季(改建后)。因此,基于该热异常结果,以工厂斑块面积指标表征工厂生产规模^[16],分析工厂生产规模大小与其引发的热异常斑块面积大小的关系。具体方法为:首先,计算能够引起热异常的工厂生产规模面积和热异常斑块面积;然后,将两者数据进行统计分析(图 8)。研究结果表明,工厂改建前后两者均呈正相关关系,即工厂生产规模越大,热异常斑块面积越大,说明工厂生产规模越大对热环境的贡献率越大。定量结果表明工厂生产规模面积每增加 5.2 km²,热异常斑块面积平均增加 0.18 km²。

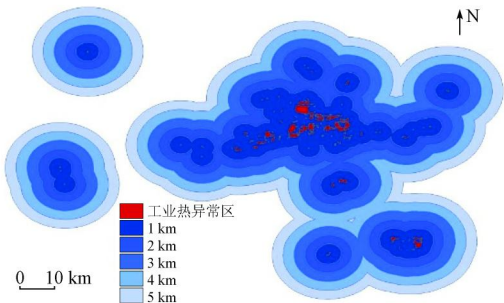


图 9 在平县工业热异常 5 级缓冲区空间分布

Fig. 9 Industrial thermal anomaly five-level buffer spatial distribution map in Chiping County

为保证建设用地和非建设用地提取精度的可靠性,在 2 种用地类型中各随机生成验证点,结合同期 Google Earth 影像确定验证点的属性值。结果 2 种用地类型的提取精度均超过 93%。研究表明,建设用地和非建设用地的提取结果可以作为进一步研究的数据。

同时,将 5 级缓冲区与建设用地和非建设用地范围进行叠加,展示两者的空间分布效果,结果如图 10 所示。

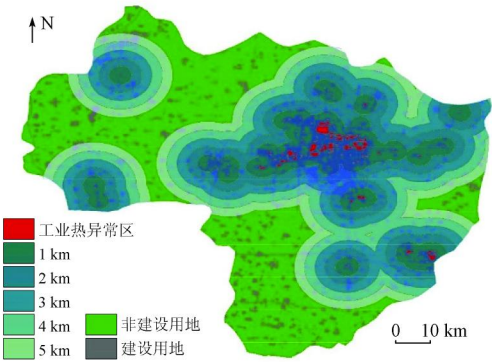


图 10 在平县 5 级缓冲区与建设用地和非建设用地叠加
Fig. 10 Overlap of five – level buffer with building and nonbuilding areas in Chipping County

3.4.1 工业热异常对局域建设用地热环境的增温效应

图 11 为在平县工业热异常对局域建设用地的增温结果。

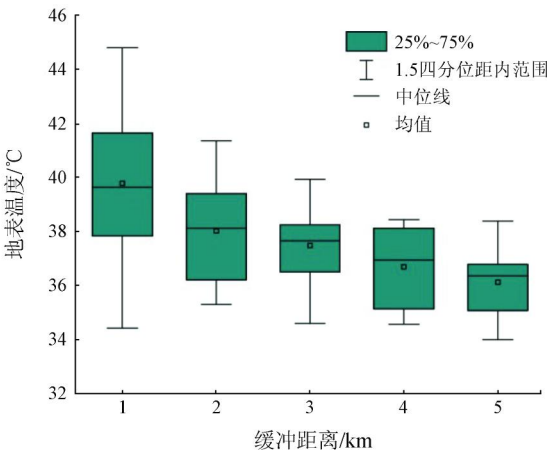


图 11 在平县工业热异常对局域建设用地增温结果
Fig. 11 Result of industrial thermal anomaly on local building temperature increase in Chipping County

从图 11 可以看出,距离工业热异常区越远,建设用地的温度越低。在距离工业热异常 1 ~ 5 km 范围内的建设用地均温分别为 39.91 °C, 38.01 °C, 37.48 °C, 36.68 °C 和 36.11 °C。其中,距离工业热异常 1 km 比 2 km 的温度高了 1.9 °C, 2 km 比 3 km 的温度高了 0.53 °C, 3 km 比 4 km 的温度高了

0.8 °C, 4 km 比 5 km 的温度高了 0.57 °C。说明工业热异常对局域建设用地有增温作用,但随着距离越远,增温作用越小。主要原因是,在建设用地地类中,随着距离越远,工业热异常区的热量影响力主要依靠大气削弱作用减弱,而建设用地对工业热异常区热量的削弱作用较小,且自身也有一定的热量。因此,随着距离越远,工业热异常区对建设用地的增温作用呈现小幅度递减。

3.4.2 工业热异常对局域非建设用地热环境的增温效应

图 12 为在平县工业热异常对局域非建设用地的增温结果。

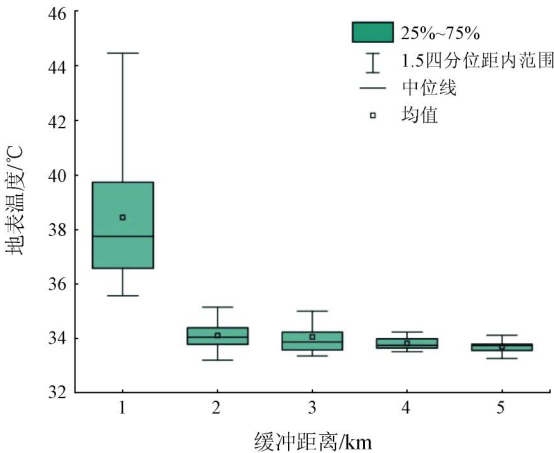


图 12 在平县工业热异常对局域非建设用地增温结果
Fig. 12 Result of industrial thermal anomaly on local nonbuilding temperature increase in Chipping County

从图 12 可以看出,距离工业热异常 1 km 范围内的非建设用地温度较高,2 ~ 4 km 范围内的非建设用地温度较低且趋于稳定,这一结果与非建设用地具有降温作用一致^[32]。在距离工业热异常 1 ~ 5 km 范围内的非建设用地平均温度分别为 38.45 °C, 34.12 °C, 34.06 °C, 33.83 °C 和 33.72 °C。说明工业热异常对 1 km 范围内的非建设用地有明显增温作用。主要原因是,随着距离越远,非建设用地地类对工业热异常区的热量影响力的削弱作用较强,且自身地表温度比建设用地地类的低。因此,工业热异常区对非建设用地的增温作用主要体现在 1 km 范围内,在距离大于 1 km 时,无明显增温作用。

4 结论

本文以工业为主导产业的在平县为研究区,以多时相的 Landsat8 遥感影像为数据源,利用辐射传输方程法进行地表温度反演。同时对比分析不同分级法检测的热异常结果,基于精度较高的检测结果

进行局域热环境效应分析。结论如下：

- 1) 四级法更适合研究区工业热异常检测研究。
 - 2) 工厂生产规模与其对应的热异常斑块面积呈正比关系。工厂规模面积每增加 5.8 km², 热异常斑块面积平均增加 0.18 km²。
 - 3) 工业热异常对局域建设用地和非建设用地均有热环境效应。对建设用地的增温作用随着距离越远作用越小, 对 1 km 范围的非建设用地增温作用明显。
- 本文通过多时相遥感影像探索出四级法为最佳工业热异常检测方法, 并分析出工厂生产规模越大引发的工业热异常斑块面积越大的规律, 工业热异常对局域建设用地和非建设用地的增温作用。该研究结果为选取高精度工业热异常检测方法具有参考价值, 为促进工业发展规划和政策制定提供依据。但四级法的自身检测比率较低, 因此寻求更高精度的工业热异常检测方法有待研究。

参考文献 (References) :

[1] Xu B, Lin B. How industrialization and urbanization process impacts on CO₂ emissions in China: Evidence from nonparametric additive regression models [J]. *Energy Economics*, 2015, 48: 188 – 202.

[2] Yan H, Wu F, Dong L. Influence of a large urban park on the local urban thermal environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622 – 623: 882 – 891.

[3] Mohan M, Kandya A. Impact of urbanization and land – use/land – cover change on diurnal temperature range: A case study of tropical urban airshed of India using remote sensing data [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 506 – 507: 453 – 465.

[4] Robaa S M. Some aspects of the urban climates of Greater Cairo Region, Egypt [J]. *International Journal of Climatology*, 2013, 33 (15): 3206 – 3216.

[5] Rao Y H, Xu Y, Zhang J J, et al. Does subclassified industrial land have a characteristic impact on land surface temperatures? Evidence for and implications of coal and steel processing industries in a Chinese mining city [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 22 – 34.

[6] 张敦虎, 王晓鹏, 康高峰, 等. 基于 ASTER 数据的煤田火区温度异常信息提取方法研究——以新疆轮台县阳霞火区为例 [J]. *中国煤炭地质*, 2009, 21 (9): 35 – 37.

Zhang D H, Wang X P, Kang G F, et al. Study on coal fire area land surface temperature anomaly information extraction from ASTER satellite images: A case study of Yangxia coal fire area in Luntai County, Xinjiang [J]. *Coal Geology of China*, 2009, 21 (9): 35 – 37.

[7] 吴学伟, 徐亚明, 龚文峰. 城市热岛空间格局及其变化的图形信息特征分析 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2017, 42 (12): 1711 – 1718.

Wu X W, Xu Y M, Gong W F. Graphical information characteristics of urban heat island spatial pattern and its change [J]. *Geomatics*

and Information Science of Wuhan University, 2017, 42 (12): 1711 – 1718.

[8] 陈松林, 王天星. 等间距法和均值标准差法界定城市热岛的对比研究 [J]. *地球信息科学学报*, 2009, 11 (2): 145 – 150.

Chen S L, Wang T X. Comparison analyses of equal interval method and mean – standard deviation method used to delimitate urban heat island [J]. *Journal of Geo – Information Science*, 2009, 11 (2): 145 – 150.

[9] 潘竞虎, 董磊磊, 王娜云, 等. 兰西城市群热环境格局多尺度研究 [J]. *国土资源遥感*, 2018, 30 (2): 138 – 146. doi:10. 6046/gtzyyg. 2018. 02. 19.

Pan J H, Dong L L, Wang N Y, et al. A multi – scale study of thermal environment pattern in Lanzhou Xining agglomeration [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2018, 30 (2): 138 – 146. doi:10. 6046/gtzyyg. 2018. 02. 19.

[10] 武文昊, 王新杰, 黄瑞芬. 基于遥感数据的常州市热岛效应分析 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2017, 41 (5): 185 – 190.

Wu W H, Wang X J, Huang R F. Study on urban heat islands Changzhou City based on remote sensing data [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2017, 41 (5): 185 – 190.

[11] 陶于祥, 许凯丰, 易宗旺, 等. 基于半变异函数的城市热岛空间异质性分析 [J]. *西南大学学报 (自然科学版)*, 2018, 40 (10): 145 – 152.

Tao Y X, Xu K F, Yi Z W, et al. A semi – variogram – based analysis of spatial heterogeneity of urban heat islands [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science)*, 2018, 40 (10): 145 – 152.

[12] 孙飒梅, 卢昌义. 遥感监测城市热岛强度及其作为生态监测指标的探讨 [J]. *厦门大学学报 (自然科学版)*, 2002, 41 (1): 66 – 70.

Sun S M, Lu C Y. Remote sensing monitoring of urban heat island intensity and its application as ecological monitoring index [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2002, 41 (1): 66 – 70.

[13] 罗小波, 陈丹, 刘明皓, 等. 基于 HJ – 1B/IRS 的重庆市热岛效应监测应用 [J]. *地球信息科学学报*, 2011, 13 (6): 833 – 839.

Luo X B, Chen D, Liu M H, et al. Application research on monitor of heat island effect in Chongqing based on HJ – 1B/IRS [J]. *Journal of Geo – Information Science*, 2011, 13 (6): 833 – 839.

[14] 张宇, 赵伟, 龙凤, 等. 基于 Landsat TM/TIRS 的重庆市主城区热岛效应研究 [J]. *水土保持研究*, 2015, 22 (5): 191 – 196, 203.

Zhang Y, Zhao W, Long F, et al. Study of urban heat island based on Landsat TM/TIRS in the central area of Chongqing City [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22 (5): 191 – 196, 203.

[15] 王宏博, 李丽光, 赵梓淇, 等. 基于 TM/ETM + 数据的沈阳市各区城市热岛特征 [J]. *生态学杂志*, 2015, 34 (1): 219 – 226.

Wang H B, Li L G, Zhao Z Q, et al. Urban heat island variation of each district in Shenyang based on TM / ETM + data [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34 (1): 219 – 226.

[16] Matthew M, Aaron G, Allen L, et al. Stray light artifacts in imagery from the Landsat8 thermal infrared sensor [J]. *Remote Sensing*,

- 2014,6(11):10435–10456.
- [17] Soux A, Voogt J A, Oke T R. A model to calculate what a remote sensor ‘Sees’ of an urban surface[J]. Boundary – Layer Meteorology, 2004, 112(2): 401–424.
- [18] Yu X, Guo X, Wu Z. Land surface temperature retrieval from Landsat8 TIRS: Comparison between radiative transfer equation – based method, split window algorithm and single channel method [J]. Remote Sensing, 2014, 6(10): 9829–9852.
- [19] Kamran K V, Pirnazar M, Bansouleh V F. Land surface temperature retrieval from Landsat8 TIRS: Comparison between split window algorithm and SEBAL method[C]//Proceedings of SPIE – the International Society for Optical Engineering, 2015, 9535.
- [20] Van D G A A, Owe M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(6): 1119–1131.
- [21] Chen J, Yang K, Zhu Y, et al. Analysis of the relationship between land surface temperature and land cover types: A case study of Dianchi Basin [C]//International Conference on Geoinformatics. IEEE, 2016.
- [22] 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. The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6 [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2004, 16(3): 28–32. doi: 10.6046/gtzyyg. 2004. 03. 07.
- [23] Sobrino J A, Jimenez – Muoz J C, Soria G, et al. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(2): 316–327.
- [24] Zhang L L, Meng Q, Sun Z H, et al. Spatial and temporal analysis of the mitigating effects of industrial relocation on the surface urban heat island over China[J]. ISPRS International Journal of Geo – Information, 2017, 6(4): 121.
- [25] 马蔼乃. 地理科学与地理信息科学论[M]. 武汉: 武汉出版社, 2000.
- Ma A N. Geographical science and geographic information science [M]. Wuhan: Wuhan Publishing House, 2000.
- [26] 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化分析中的应用[J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 789–797.
- Zhang Y, Yu T, Gu X F, 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.
- [27] 薛晓娟, 孟庆岩, 王春梅, 等. 北京市热岛效应时空变化的 HJ – 1B 监测分析[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(4): 474–480.
- Xue X J, Meng Q Y, Wang C M, et al. Monitoring spatio – temporal changes of heat island effect in Beijing based on HJ – 1B[J]. Journal of Geo – Information Science, 2012, 14(4): 474–480.
- [28] Zhang L L, Meng Q Y, Sun Z H, et al. Spatial and temporal analysis of the mitigating effects of industrial relocation on the surface urban heat island over China [J]. ISPRS International Journal of Geo – Information, 2017, 6(4): 121.
- [29] 代颖懿, 刘 辉, 黎启燃, 等. 基于中等空间分辨率遥感影像的建筑用地信息提取[J]. 亚热带资源与环境学报, 2013, 8(4): 68–74.
- Dai Y Y, Liu H, Li Q R, et al. Extraction of built – up land information from medium spatial resolution satellite image [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2013, 8(4): 68–74.
- [30] 孙佳琪, 刘永学, 董雁仁, 等. 基于 Suomi – NPP VIIRS 夜间热异常产品的城市工业热源分类——以京津冀地区为例[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(3): 13–19.
- Sun J Q, Liu Y X, Dong Y Z, et al. Classification of urban industrial heat sources based on Suomi – NPP VIIRS nighttime thermal anomaly products: A case study of the Beijing – Tianjin – Hebei Region[J]. Geography and Geo – Information Science, 2018, 34(3): 13–19.
- [31] Peng S S, Piao S L, Ciais P, et al. Surface urban heat island across 419 global big cities[J]. Environmental Science and Technology, 2011, 46(2): 696–703.
- [32] Yu Z W, Xu S B, Zhang Y H, et al. Strong contributions of local background climate to the cooling effect of urban green vegetation [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 6798.

Analysis of environmental effects of industrial thermal anomalies

GU Yanchun¹, MENG Qingyan², HU Die², ZHOU Xiaocheng¹

(1. The Academy of Digital China, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China; 2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Science, Beijing 100094, China)

Abstract: As one of the important mechanisms affecting urban thermal environment, industry accurately detects factories that cause thermal anomalies, and analyzes the impact of industrial thermal anomalies on local thermal environment, which is of great significance for scientific planning of industrial construction and improvement of urban thermal environment. Based on the Landsat8 data of different seasons, this paper uses the radiation transmission method to invert the surface temperature, compares the thermal anomaly detection method based on the thermal field variation index, and performs the local thermal environment effect analysis based on the higher precision detection results. The results are as follows: ① The four – stage method is more suitable for industrial

thermal anomaly detection research. ②The scale of the factory production is directly proportional to the area of the corresponding thermal anomaly plaque. For every 5.8 square kilometers of factory production scale, the average thermal plaque area increases by 0.18 square kilometers. ③ Industrial thermal anomalies have thermal environmental effects on local building and nonbuilding, the effect of warming on building is smaller with distance, and the effect of temperature increase on nonbuilding in the 1 km range is obvious. The research results can provide reference for industrial thermal anomaly detection and analysis of the effects of industrial thermal anomalies on the local environment.

Keywords: industrial thermal anomaly; thermal environment effect; thermal field variation index; radiative transfer equation; remote sensing

(责任编辑: 陈 理)