

泉州市城市化进程中的热岛效应遥感研究

潘卫华,张春桂

(福建省气象科学研究所,福州 350001)

摘要:利用 Landsat TM/ETM⁺ 热红外图像研究了泉州市 1989~2000 年间城市热岛的分布与变化情况。研究表明,泉州市热岛面积随城市扩展而增大,并与城市扩展方向和发展趋势相同。对不同时期的热力场进行正规化处理以克服不同季节间的温度差异,便于进行比较,并采用景观分析方法对泉州市热力场的形态、特征进行了分析,发现其主要由热团、热环和碎片体组成,最后,提出了治理和改善泉州市热岛效应的有效措施。

关键词:遥感;热岛效应;正规化;景观分析;泉州

中图分类号:TP 79:X 328 文献标识码:A 文章编号:1001-070X(2006)04-0050-05

0 引言

城市化和城市扩张是全球面临的重大问题之一。由于地表覆盖和土地利用类型随城市化进程发生巨大变化,引起城市及周边地区地表—大气系统能量状况的变化,产生了一系列的城市环境问题,尤以城市热岛问题最为突出。遥感技术监测城市热岛效应克服了传统点源地表常规观测的局限性,并能够提供一定时空精度的面状地表信息,满足城市热岛时空、动态的观测分析。

泉州市地处福建闽东南沿海,经济总量位居福建省首位,改革开放以来,随着经济建设的快速发展,泉州市城市化进程加快,城区扩展迅速,同时也使得其城市热岛的面积逐渐扩大,为此,有必要对泉州市城市热岛的分布和变化进行研究。

1 图像预处理

首先选取 1989 年 6 月 15 日 TM 图像进行几何纠正(在泉州市 1:5 万地形图上选取控制点),然后将 1996 年和 2000 年的 TM/ETM⁺ 图像与纠正后的 1989 年 TM 图像进行配准。由于 1989 年的 TM 图像热红外波段存在较严重的条带噪声,不利于城市热岛分析。为消除条带,保证影像的连续性,对影像进行了 5 像元×5 像元的中值滤波,1996 年和 2000 年的影像质量较好,不存在明显的噪声,也没有不连续条带。

2 地表亮温反演

2.1 地表亮温反演

Landsat TM/ETM⁺ 的热红外图像接收的是与地表温度高低相对应的强度不等的热红外辐射,像元的灰度值(DN 值)大小与其所表示的温度高低成正比。目前,国内外关于城市热岛效应和温度反演的研究已相当广泛。Gupta、李加洪等研究了城市温度场分布与土地覆盖类型及 NDVI 的相关关系^[1,2];Lo 则利用 RS 和 GIS 技术与评价了热场空间结构及其与周围环境的相互影响^[3];陈云浩等利用 TM6 波段反演了上海夏季亮温场并进行热场分析^[4];Hurtato 提出了用 TM6 波段数据反演地表温度的方法^[5],但算法复杂且参数获取困难;覃志豪提出单窗算法^[6-9],使得利用 TM6 波段反演地表实际温度成为可能;Weng 和 Markham 等成功探索出从卫星影像上反演地表温度的方法^[10-12]。由于缺乏时相同步的实际大气温湿廓线和气溶胶分布资料,并考虑到所研究的泉州市区和晋江市这样一个较小的区域内,在无云条件下,其所受的大气影响程度在空间上是一致的,因而,可设定其具有相同的大气发射率。本文采用最暗像元法进行影像的相对大气校正,并对影像热波段进行温度反演。

首先将热红外波段 DN 值转化成光谱辐射值,其转化公式为

$$L_{\lambda} = \frac{(L_{\max} - L_{\min})Q_{DN}}{Q_{\max}} + L_{\min} \quad (1)$$

式中 L_{λ} 为传感器接收的辐射强度 ($\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); $L_{\max} = 1.56 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ (在 ETM⁺ 影像中为 $12.56 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), 表示传感器可探测到的最大辐亮度; $L_{\min} = 0.1238 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ (在 ETM⁺ 影像中为 $3.20 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) 表示传感器可探测到的最小辐亮度; Q_{DN} 为 TM/ETM⁺ 热波段数据的像元灰度值; Q_{\max} 为最大的 DN 值, 即 $Q_{\max} = 255$ 。

然后, 将光谱辐射值转化成卫星高度的亮温值, 其公式为

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (2)$$

式中 T_B 为卫星高度亮温值 (单位为 K); $K_1 = 60.776 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ (在 ETM⁺ 影像中为 $666.09 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), $K_2 = 1260.56 \text{ K}$ (在 ETM⁺ 影像中为 1282.71 K) 为卫星发射前的常量。

以上公式都是在假定大地是黑体全辐射的条件下成立, 因此, 根据真实地面情况对光谱发射率 ε 的校正就显得特别重要。利用 Valor 和 Caselles 模型^[13]对研究区不同土地覆盖类型的发射率进行了求取, 最后, 得出经过校正后的地表亮温计算公式

$$S_t = \frac{T_B}{1 + (\lambda \times T_B / \rho) \ln \varepsilon} \quad (3)$$

式中, $\lambda = 11.5 \mu\text{m}$, 为发射光谱的波长; $\rho = h \times c / \sigma = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ ($\sigma = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, 为麦克斯韦常量; $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, 为普朗克常量; $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$, 为光速)。经过上述公式的一系列转化, 可将 1989 年、1996 年和 2000 年的研究区热红外图像像元灰度值反演成地表亮温, 并将其转为摄氏温度。结果分别为: 1989 年 6 月 15 日的地面亮温值分布范围为 $18.6 \sim 31.8^{\circ}\text{C}$, 1996 年 5 月 17 日的地面亮温值分布范围为 $15.8 \sim 29.7^{\circ}\text{C}$, 2000 年 4 月 18 日的地面亮温值分布范围为 $15.8 \sim 30.5^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 正规化处理

由于所采用的 3 幅遥感影像来自 1989 年 6 月 15 日、1996 年 5 月 17 日和 2000 年 4 月 18 日, 分别对应于泉州市的夏季、春末夏初和春季, 这造成了影像温度反演上的时相差异。为了克服时相不一致所造成的比较困难, 决定先分别对各时相的地面温度

进行正规化处理^[14], 将各自的地面温度分布范围统一到 0~1 之间, 其正规化公式为

$$N_i = (T_i - T_{\min}) / (T_{\max} - T_{\min}) \quad (4)$$

式中 N_i 为第 i 个像元正规化后的值; T_i 为第 i 个像元的地面温度; T_{\min} 为地面温度的最小值; T_{\max} 为地面温度的最大值。

利用上述公式对温度进行正规化处理后, 利用密度分割技术, 对正规化后的 3 个时相的地面温度进行等级划分, 共划分为 6 个温度等级。具体为低温区 ($0.0 \sim 0.35$)、较低温区 ($0.36 \sim 0.55$)、中温区 ($0.56 \sim 0.65$)、次高温区 ($0.66 \sim 0.75$)、高温区 ($0.76 \sim 0.85$) 和热中心区 ($0.86 \sim 1.0$)。

2.3 热力场景观分析

为了对泉州城市热力场的内在布局特征有清楚的认识, 本文以 2000 年 Landsat ETM⁺ 热红外图像为例, 对泉州市区进行了热力场的景观分析。根据泉州热力场构成特点, 首先, 对 2000 年影像的温度范围 ($15.8 \sim 30.5^{\circ}\text{C}$) 初步划分为 3 个等级: 相对低辐射温度地块 ($< 21^{\circ}\text{C}$)、相对中辐射温度地块 ($21 \sim 25^{\circ}\text{C}$) 和相对高辐射温度地块 ($25 \sim 30.5^{\circ}\text{C}$)。研究发现, 泉州市相对高辐射温度地块分布较广, 为了突出分析其过热斑块特征, 进一步将温度范围在 $27 \sim 30.5^{\circ}\text{C}$ 的斑块提取出来, 构成泉州市的相对过热斑块, 然后, 利用景观分析方法对相对过热斑块进行等级划分和统计分析, 并选取以下景观指数用于分析:

(1) 斑块面积 (A) 和斑块周长 (P)。这 2 个参数是景观空间格局分析的基础。

(2) 形状指数 (G)。形状指数表征了斑块的形状特征, 值越大其形状越狭长。

$$G_{ij} = P_{ij} / A_{ij} \quad (5)$$

式中 G_{ij} 表示任一斑块的形状指数; P_{ij} 表示任一斑块的周长; A_{ij} 表示任一斑块的面积。

(3) 破碎度 (C)。破碎度表示景观被分割的破碎程度。

$$\begin{aligned} \text{总破碎度} \quad C &= N/A \\ \text{类破碎度} \quad C_i &= N_i/A_i \end{aligned} \quad (6)$$

式中 C 为总破碎度; C_i 为类破碎度; N 为总斑块数目; N_i 为某一类的斑块数目。

为了便于分析, 首先在 ER Mapper 中对影像进行 $3 \text{ 像元} \times 3 \text{ 像元}$ 的滤波处理, 剔除单个像元, 以减少数据处理转换和计算的处理量; 将提取的过热斑块图斑从 ER Mapper 的 ers 格式转换为 bil 格式, 再从 bil 格式转换为 grid 数据格式; 利用 ArcGIS 软件对其进行矢量化 (Grid to Polygon Coverage), 形成矢量图层; 最

后 对矢量化的图层进行上述指数的统计和分析。

3 结果分析

3.1 城市化进程中的城市热岛分布变化

从插页彩片 14 可以得出泉州、晋江 2 市 11 a 的热岛分布格局变化情况,随着城区的不断向外扩展,城市下垫面的热辐射情况也相应地转移和交换。由于 1989 年热红外波段影像质量差而进行了滤波处理,使得图像中热格局有着很强的条带状;在 1996 年影像中高温区有所增长,热中心区主要集中在泉州的旧城区,并以鲤中街道、海滨街道和鲤城区政府一带为最高;到了 2000 年,高温区有所减少,而以次高温面积的扩大为主,城市热中心分布有所分散,除了原来的旧城区继续占有多个热中心点外,东湖街道、东尾小区也出现了新的热中心。此外,坪山路一带已由 1996 年还是大片农田的低温区转变为 2000 年的由云谷、金湖等工业区和小区构成的次中温、中温区。晋江市由于 11 a 城区扩展了 4 倍多,导致其热岛格局变化很大,由原来农田转变为城区的用地温度相对较低,这在 1996 年由蓝色的低温区所代表。总的来看,随着城市经济、商业中心的转移和工厂等的兴建,城市次高温和高温区面积有所扩大。相对泉州市区,晋江市热中心很少,只有零星的几个并且没有随时间发生转移。

3.2 热力场布局的景观特征

城市热力景观是城市景观的热辐射能量表现形式,包括瞬时热场和热场的日变化、季变化,通常用热场图像来表达^[15],其对城市热力场及动态规律的研究已成为城市规划、城市环境保护等方面的基础。通过对泉州市热力场的景观分析表明,研究区域内相对低辐射温度地块主要集中在水体、滩涂和含水量大的水田内;相对中辐射温度地块则集中在森林、果园、旱地和草地一带;相对高辐射温度地块则主要集中在城镇建设用地和道路上,并且城镇建设用地温度要比道路温度来的高。此外,从插页彩片 15 中还可以发现,在泉州市区相对高辐射温度斑块明显多于其余 2 类地块,其所占比例达 61%;相对低辐射温度地块数量最少,其所占比例仅为 17%。显然,相对高辐射温度地块过多是不良环境条件的一个具体反映。

泉州市所统计的热斑数量、平均面积、平均形状指数和平均破碎度如表 1 所示。

表 1 过热辐射斑块总体指标

斑块特征指标	数值	斑块特征指标	数值
高辐射斑块数/个	893	最小斑块面积/km ²	0.000 9
平均周长/km	0.038 4	平均形状指数	4.624 7
平均面积/km ²	0.008 3	斑块总体破碎度	1.204 8
最大斑块面积/km ²	1.026 1		

从表 1 中可以看出,相对过热辐射地块的总数为 893 块,总面积 7.417 1 km²,过热斑块大小不均,最小过热斑块面积仅为 0.000 9 km²,而最大过热斑块面积高达 1.026 1 km²,变动范围及变动系数极大。

由表 2 可知,过热斑块中面积小于 0.01 km² 的斑

表 2 过热辐射斑块面积分类统计

斑块面积/km ²	频数	百分比/%	平均形状指数	平均破碎度
<0.01	857	84.60	4.022 3	6.535 9
0.01~0.1	21	11.95	5.316 4	0.370 4
0.1~0.2	10	2.33	6.681 5	0.066 7
>0.2	5	1.48	7.094 8	0.018 8

块数量最多,约占斑块总数的 85%,但此面积等级的斑块总面积却并不大,仅为 1.371 2 km²,占斑块总面积的 17.68%,平均面积为 0.001 53 km²。面积大于 0.2 km² 的过热斑块数量为 5 块,只占过热斑块总数的 0.56%,其数量虽少,但总面积却达 2.659 6 km²,占斑块总面积的 35.86%,其总面积是 0.01 km² 以下斑块总面积的 2.01 倍。此外,斑块面积在 0.1~0.2 km² 之间的数量也只有 10 个,但其斑块总面积达到了 1.499 3 km²,占有斑块总面积的 20.21%。从城市环境的过热辐射污染指标及“热岛效应”产生的根源两方面来看,面积为 0.1 km² 以上的过热辐射斑块,无论在总体面积上,还是从其在城市热岛分布的格局上,对热污染的形成均起主导作用。此外,通过对过热斑块的形状上分析,还可以发现大面积的斑块在空间分布已经形成 3 种形式的复合体:热团、热环和碎片体。热团主要集中在鲤中街道一带,这里是泉州的旧城区,也是热中心分布密集的地区。热环主要集中在临江街道到丰泽街道之间的区域,是由多个过热斑块组成的环状体,热中心零星地分布在这个区域。而碎片体则是由分散的过热斑块构成,其平均温度相对其它 2 种类型来的低。

4 城市热岛的影响因素与改善措施

根据 3 个时相的遥感监测分析,泉州市的热岛面积随着城区的扩展而增大,热岛的强弱布局也随着发生变化。其中,城市的热中心主要集中在旧城区和新开发区域内,这与城市下垫面材料性质的变化密切相关,如新开发区的下垫面由农田、水体等类型变成了水泥、沥青等高吸热性建筑材料^[16]。城市下垫面材料的特殊性质不仅表现在对热量的强吸收上,还表现在增加城市不透水面积和加快径流流速上,不利于降温。此外,泉州市众多的工厂、汽车等城市热源和城市天气、气候等本身的自然条件也是影响泉州市城市热岛效应强弱的重要因素。

针对泉州市的热岛现状,在治理和改善热岛效应措施上可考虑选用浅色、高反射率并具有一定孔隙度的建筑材料用于城市建设中,这很大程度上可减少城市对热量的吸收。同时确保对湖泊、河流等水体面积的保持和维护,适当增加城市植被覆盖度。有研究表明,水体和植被与温度有着很强的负相关性,可有效地缓解和减轻热岛效应强度,这从 1996 年与 2000 年的城市热岛分布变化可以明显地看出。随着东湖的扩大整修和晋江沿岸植被的增加,附近的泉州旧城区热岛强度明显减轻了,个别区域热中心甚至消失。另外,由于城市热场碎片体相对比较容易治理,在改善城市热中心的措施上尽量先将热团、热环区域面积逐步变小变弱,成为碎片体,为此可适当减少热团、热环区域的热源数量,考虑将强热污染的工厂迁离市区,同时防止新的热污染企业的加入。此外,对泉州市城市建筑进行合理布局、增加通风性和减少汽车尾气排放等措施,也可有效地减少新热中心的产生。

5 结论

与以往单一时相城市热岛研究不同,本研究以时间为轴揭示了泉州市 11 a 城市化进程中的城市热岛变化过程,并对反演的温度进行了正规化处理,克服由于不同时相造成的不利于对比的问题,同时运用景观分析理论对泉州市的城市热力场格局进行了研究。得到以下结论:

(1) 泉州市的城市热岛面积随着城区的扩展而增加,并与城市扩展方向和发展趋势相同。

(2) 通过对单个时相温度的正规化处理,可以对

处于不同时相不同季节的温度等级进行对比,以研究城市化过程中城市热岛的分布和变化特征。

(3) 泉州市热力场的景观分析表明,泉州市过热斑块主要由热团、热环和碎片体组成,在治理城市热岛的措施上要着重对热团、热环面积减小上。

(4) 可以通过利用特殊的建筑材料、增加植被和水体面积等措施来改善泉州市城市热岛效应。

参考文献

- [1] Gupta R K, Prasad S, Seshasai M V R, et al. The Estimation of Surface Temperature Over an Agricultural Area in the State of Haryana and Panjab, India, and Its Relationship with the Normalized Difference Vegetation Index(NDVI), Using NOAA - AVHRR Data [J]. Remote Sensing, 1997, 18(18): 3729 - 3741.
- [2] 李加洪. 遥感图像在土地覆盖和温度分布之间对应关系研究中的应用[J]. 遥感技术与应用, 1998, 13(1): 18 - 28.
- [3] Lo C P, Quattrochi D A, Luyall J C. Application of High - Resolution Thermal Remote Sensing and GIS to Assess the Urban Heat Island Effect [J]. Remote Sensing, 1997, 18(2): 287 - 304.
- [4] 陈云浩, 王洁, 李晓兵. 夏季城市热场的卫星遥感分析[J]. 国土资源遥感, 2002, (4): 55 - 59.
- [5] Hurtado E, Vidal A, Caselles V. Comparison of Two Atmospheric Correction Methods for Landsat TM Thermal Band [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17: 237 - 247.
- [6] 覃志豪, Zhang Minghua, Karnieli A. 用 NOAA - AVHRR 热通道数据演算地表温度的劈窗算法 [J]. 国土资源遥感, 2001, (2): 33 - 42.
- [7] 覃志豪, 张明华, 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, 56(4): 456 - 465.
- [8] 覃志豪, Li Wenjuan, Zhang Minghua, et al. 单窗算法的大气参数估计方法 [J]. 国土资源遥感, 2003, (2): 37 - 43.
- [9] 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, (3): 28 - 32.
- [10] Weng Qihao, Lu Dengsheng, Jacquelyn Schubring. Estimation of Land Surface Temperature - Vegetation Abundance Relationship for Urban Heat Island Studies [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, (89): 467 - 483.
- [11] Markham B L, Barker J L. Landsat MSS and TM Post - Calibration Dynamics Ranges, Exoatmospheric Reflectances and At - Satellite Temperature [J]. EOSAT Landsat Tech. Notes, 1986 (1): 3 - 8.
- [12] Landsat Project Science Office (2002). Landsat 7 Science Data User's Handbook [EB/OL]. http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html, Goddard Space Flight Center, NASA, Washington, DC (last data accessed: 10 September 2003).
- [13] Valor E, Caselles V. Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 57: 167 - 184.
- [14] 徐涵秋, 陈本清. 不同时相的遥感热红外图像在研究城市热岛变化中的处理方法 [J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(3): 129 -

133.
 [15] 祝 宁 , 王 成 , 周 洪 泽 等 . 哈 尔 滨 市 瞬 时 热 力 场 空 间 格 局 分 析
 [J]. 应 用 生 态 学 报 , 2003 , 14 (11) : 1955 - 1958.

[16] Akbari H. Cool Construction Materials Offer Energy Saving and Help
 Reduce Smog [J]. ASTM Standardization News , 1995 (11) 32 - 37.

A STUDY ON URBAN HEAT ISLAND EFFECT IN QUANZHOU CITY DURING ITS URBANIZATION PERIOD

PAN Wei - hua , ZHANG Chun - gui

(Institute of Meteorological Science of Fujian Province , Fuzhou 350001 , China)

Abstract : Landsat thermal images were used to study the urban heat island effect of Quanzhou City during its urbanization period from 1989 to 2000. The result shows that the area of heat island is increasing along with urban expansion , and the trend is the same as that of urban expansion. The seasonal difference makes the comparison of the thermal image data very difficult. In order to solve this problem , the authors processed different thermal infrared bands one by one with the help of image normalization technology. The intensity and the spatial structure of the urban heat island effect were investigated by means of landscape analysis. It is shown that agglomerate , circularity and fragment are three basic configurations of the heat island in Quanzhou City. The cause of the urban heat island is discussed and the effective measures are suggested to tackle the urban heat island effect.

Key words : Remote sensing ; Urban heat island effect ; Normalization ; Landscape analyzing ; Quanzhou

第一作者简介 : 潘卫华 (1980 -) , 男 , 地图学与地理信息系统硕士 , 主要从事遥感应用和图像处理方面研究。

(责任编辑 : 肖继春)

=====

(上接第 49 页)

AN ANALYSIS OF URBAN EXPANSION AND ITS DYNAMICS BASED ON MULTI - TEMPORAL LANDSAT DATA

HU De - yong¹ , LI Jing¹ , CHEN Yun - hao¹ , ZHANG Bing² , PENG Guang - xiong¹

(1. College of Resources Science and Technology , Beijing Normal University , Beijing 100875 , China ; 2. Institute of Geographical Science and Natural Resource Research , CAS , Beijing 100101 , China)

Abstract : Based on multi - temporal Landsat imageries , the authors extracted the urban built - up areas in Changsha City , Hunan province on the basis of such methods as supervised classification , unsupervised classification and NDBI index. The spatio - temporal patterns of the urban expansion were analyzed quantitatively by using the entropy value and differential entropy value of sequential urban land use images. Overlay and buffer spatial analysis were used to establish the relationship between the urban expansion and the distance from the city center. On such a basis , the expansion rate map was drawn to show the dominant direction of urban expansion. The results show that the urban built - up areas have continued to increase , and the expansion was directed mostly southeastward from 1973 to 1986 , westward from 1987 to 1993 , and southward and southeastward from 1994 to 2001. The rapid increase of population is thought to be the most important driving force of urban expansion.

Key words : Urban expansion ; Remote sensing ; Spatio - temporal patterns ; Differential entropy ; Driving forces

第一作者简介 : 胡德勇 (1974 -) , 男 , 博士生 , 主要从事遥感与 GIS 在资源环境、自然灾害等领域的应用研究。

万方数据

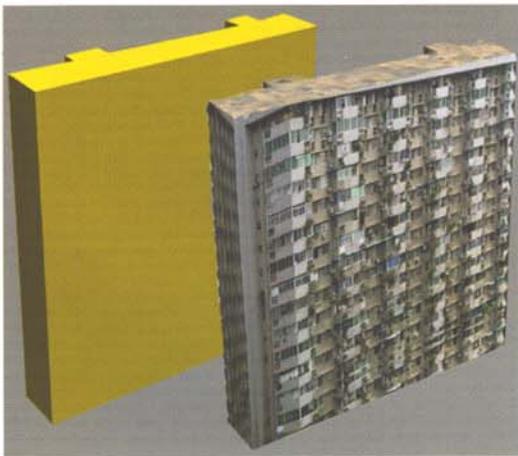
(责任编辑 : 肖继春)



彩片10 高分辨率的QuickBird影像



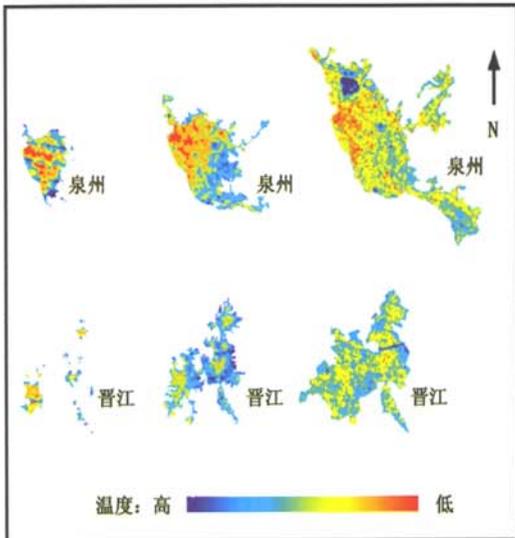
彩片11 红色实线为实验所采集的建筑物外型数据示意图



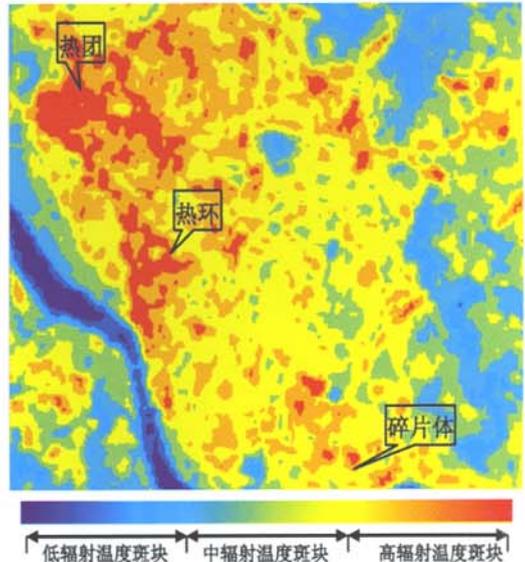
彩片12 建筑物三维模型的建立



彩片13 基于QuickBird影像建立的城市三维景观



彩片14 泉州、晋江3个时相的城市热岛分布
(从左到右:1989年、1996年、2000年)



彩片15 泉州市区的热力场格局分布图

(彩片14、15见潘卫华一文)