

# 基于 Landsat - 7ETM+ 的 青岛地区热岛效应反演及分析

王宇昊

(山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266510)

**摘要:**采用青岛地区 landsat - 7ETM+ 的两时像遥感卫星影像以及相关的气象参数数据资料,利用单窗法和辐射传输方程法,对两幅不同时像的遥感数据进行温度反演,通过对 NDVI、植被覆盖度、光谱分析、相关性分析、不透水面、下垫面的差异等进行分析并结合对当地实际的环境研究,讨论热岛效应的表现、温度等级分布和转移趋势,得出结论:研究区域的热岛效应显著,并且强度分布与该地区的工商业发展和居民区规模的扩大相关,随着城市化进程深入,向城乡交界处转移。

**关键词:**遥感;反演;光谱分析;热岛效应;青岛地区

**中图分类号:**P463.1

**文献标识码:**B

## 0 引言

青岛市位于太平洋黄海西岸,与韩国、日本隔海相望。处于山东半岛南端、黄海之滨,东北与烟台市毗邻,西与潍坊市相连,西南与日照市接壤。市域陆地总面积约为 10 654 km<sup>2</sup>, 统辖海域面积约为 13 800 km<sup>2</sup>。总面积 24 454 km<sup>2</sup>, 其中市区(含市南、市北、四方、李沧、崂山、城阳、黄岛 7 区)1 102 km<sup>2</sup>, 所辖胶州、胶南、即墨、平度、莱西等 5 市 9 552 km<sup>2</sup>。青岛市处于北温带东亚季风区,属暖温带季风气候。平均气温 12.7℃, 极端最高气温 38.9℃ 年降水量 667.3 mm; 月平均湿度 72%。平均气压为 1 008.6 百帕。水域约 13 800 km<sup>2</sup>, 平均海拔 76 m。

在全球经济高速发展的今天,重工业和商业的大规模发展,伴随着温室气体的大量排放,使城市工厂、居民商业区周围的温度异常升高,城市热岛效应显著,这一效应是形成城市化过程对城市生态环境影响的必然结果。热岛效应强烈地影响城市生态系统中的物质流、能量流,进而改变城市生态系统功能和结构,影响城市能量代谢和居民健康。例如:热岛效应与环境风场相互作用可影响季节性的降雨量分布<sup>[1]</sup>;谈建国等研究了热岛的增强与城市的规模扩

大呈正相关<sup>[2]</sup>,且与植被、水体的分布相关联。除此之外,Streurker 指出在影响城市热岛效应的原因中下垫面热力学性质的改变是最重要的原因<sup>[3]</sup>。在此之前,有关于气象站资料和基于对多时相对比的青岛热岛研究,而该课题是利用陆地卫星传感器的波段数据进行不同的科学算法,准确地反演地表温度,分析青岛地区的热岛的表现、强度分布和转移趋势,为相关部门的环境监测、绿化布局和城市管理提供依据。

## 1 研究方法

### 1.1 辐射传输方程法

根据辐射原理可知,地表物体的能量主要由太阳的辐射能量传递而来,一部分能量受到大气气溶胶微粒的散射和大气反射的影响,使太阳辐射的总能量不能完全地传递到地面;而传递到地面的大部分能量由地物吸收和反射,这部分能量可由较敏感的卫星传感器的热红外波段所探测。

首先要估计得到卫星历元的对应大气气溶胶对辐射的影响,将热红外波段的辐射能量减去受大气影响的辐射能,再将得到的地表辐射能量演算成地

\* 收稿日期:2013-02-06;修订日期:2013-03-14;编辑:曹丽丽

作者简介:王宇昊(1992—),男,贵州兴义人,在校学生,遥感科学技术专业;E-mail:kukujoyyo@163.com。

表温度。热红外波段的辐射能量(亮度值) $L_\lambda$  由 3 部分组成:大气上行辐射(大气直接热辐射) $L_\uparrow$ 、大气下行辐射(大气向地面的热辐射) $L_\downarrow$ 、地面真实的辐射亮度,卫星传感器—热红外波段接收能量,大气和地表温度均视为朗伯体。辐射传输方程为:

$$L_\lambda = [\epsilon \cdot B(T_s) + (1 - \epsilon)L_\downarrow] \cdot \tau + L_\uparrow \quad (1)$$

式中: $\epsilon$  为地表比辐射率; $T_s$  为地表真实温度; $B(T_s)$  为黑体在温度时的热辐射亮度; $\tau$  为大气在热红外波段的透过率。温度为  $T_s$  的黑体在热红外波段的辐射亮度  $B(T_s)$  为:

$$B(T_s) = [L_\lambda - L_\uparrow - \tau \cdot (1 - \epsilon)L_\downarrow] / \tau \cdot \epsilon \quad (2)$$

根据普朗克公式反函数,推导出地表真实温度的计算公式:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln(1 + \frac{K_1}{B(T_s)})} \quad (3)$$

式中: $K_1 = 666.09 \text{ watts}/(\text{meter squared} * \text{ster} * \text{m}^2)$ ;  $K_2 = 1282.71 \text{ temperature degrees (Kelvin)}$

由辐射传输方程可知,必须求解大气透过率  $\tau$ ,  $L_\uparrow$ ,  $L_\downarrow$ , 辐射亮度  $L_\lambda$  的参数值,根据同步观测的无线电探空数据输入大气校正模型 MODTRAN 或 6S 可以计算出大气参数;辐射亮度  $L_\lambda$  可由热红外波段进行辐射定标求解,然后代入方程(2)求解出温度为  $T_s$  时黑体的辐射亮度  $B(T_s)$ ,再将结果代入(3)求解反演温度  $T_s$ 。如果有准确的大气轮廓线数据,利用这种方法可以得到准确的地表温度,均方差(RMS)可达到  $0.57 \text{ K}^{[4]}$ 。目前一般的做法都是根据当时的气象数据对所需大气参数等进行估算,反演精度不是很高<sup>[5]</sup>。

## 1.2 单窗法

覃志豪等提出的单窗算法是一种利用地表辐射率、大气透射率和大气平均温度 3 个参数进行的地表温度演算,其反演精度在有参数估计有适度误差时,精度  $< 1.1^\circ\text{C}^{[6]}$ 。

由于大气模拟通常用标准大气剖面数据来代替实时数据,或者使用非实时的大气空探数据来代替;而大气剖面数据的非真实性或非实时性,导致了大气模型模拟出来的大气参数估算出来的大气辐射影响有偏差,地表温度的演算精度  $> 3^\circ\text{C}$ ,单窗算法如下<sup>[6]</sup>:

$$T_s = [a(1 - C - D) + (b(1 - C - D) + C + D) \cdot T_6 - DT_a] / C$$

式中: $a$  和  $b$  为经验参数,  $a = -67.35535$ ,  $b =$

$0.458608$ ;  $T_6$  为 ETM+6 的亮度温度(K);  $T_a$  为大气平均作用温度(K);  $C, D$  为中间参数。

中间参数  $C, D$  的计算:

$$C = \epsilon \cdot \tau$$

$$D = (1 - \tau) \cdot [1 + \tau \cdot (1 - \epsilon)]$$

### 1.2.1 辐射亮度 $L_\lambda$ 求解

通常 Landsat ETM+ 数据时以灰度值 DN 的 8 位量化级别表示的遥感数据,  $0 \sim 255$ , 值越高,亮度越大,根据 NASA 提供的 Landsat - 7 说明手册可得知公式:

$$L_\lambda = \frac{(L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda})}{(QAL_{\max} - QAL_{\min})} \times (QCAL - QCAL_{\min}) + L_{\min\lambda}$$

QCAL 为照准像素量化值 DN;  $L_{\max\lambda}$ ,  $L_{\min\lambda}$  为定标参数(辐射亮度范围)

$$0 \sim 17.04 \text{ watts}/(\text{metersquared} * \text{ster} * \mu\text{m})$$

$$QAL_{\max}, QAL_{\min} \text{ 为像元亮度范围}(0 \sim 255)。$$

### 1.2.2 亮度温度解算 $T_6$

Landsat - 7 第 6 波段的亮度温度是单窗法算法中的重要参数,可由上式求解出的辐射亮度代入普朗克公式计算,计算公式如(1~3),将其中的黑体辐射亮度由第 6 波段的辐射亮度替换。

### 1.2.3 NDVI 和植被覆盖度 $F_v$ 的计算

NDVI 植被归一化指数可以敏感地反应植被的分布情况,亮度越高,植被所占的混合像元比率越大,计算公式如下:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}}$$

式中: $\rho_{NIR}$  为近红外波段; $\rho_{red}$  为红色波段。

$F_v$  植被覆盖度为观测区域内植被垂直投影面积占地表面积的百分比,是反演地表植被覆盖的重要参数<sup>[7]</sup>,可以反应植被密度、土壤侵蚀程度等现象<sup>[8]</sup>。计算植被覆盖度利用混合像元分解法,将整景影像大概分为水体、植被和建筑,计算公式如下:

$$P_v = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s}$$

根据对 NDVI 图像的解译,取  $NDVI_v = 0.67$  和  $NDVI_s = -0.56$ ,且当某个像元  $NDVI > 0.67$  时,  $F_v$  取 1;当小于  $-0.56$  时,  $F_v$  取值 0。

### 1.2.4 比辐射率解算

遥感影像分为水体、城镇和自然表面 3 种类型。将研究区域的地表比辐射率中的水体像元比辐射率赋值 0.995,自然表面和城镇像元的比辐射率估算如下:

$$\epsilon_{\text{自然表面}} = 0.9625 + 0.0614Fv - 0.0461Fv^2 \quad (4)$$

$$\epsilon_{\text{城镇}} = 0.9589 + 0.086Fv - 0.0671Fv^2 \quad (5)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 陆地温度 (SLT) 分级

根据大气校正法和单窗法得到 2000 年 4 月和 2002 年 5 月的青岛市地区温度分布图 (图 1), 可得知反演的温度范围为 9~25℃, 对于 2000 年 4 月研究地区的最低温为 9℃ 左右, 最高温为 19℃, 反演结果的亮度温度有部分温度极高像元, 超过 19℃, 最高可达 25℃, 经过与融合后的高分辨率真彩色影像进行对比, 发现为工厂生产车间和烟囱所产生的高温; 2002 年 5 月的分布图, 显示最低温度为 9℃, 部分地区最高温度为 24℃, 总体结果与实际气象资料温差为 0.6℃ 左右, 拟合的精度较高。

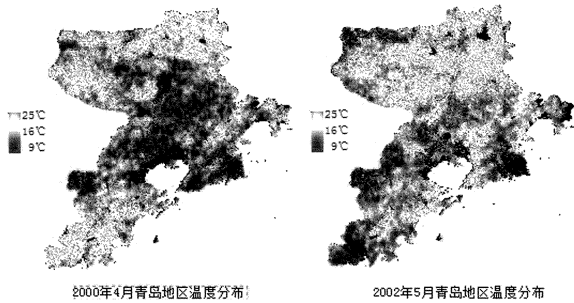
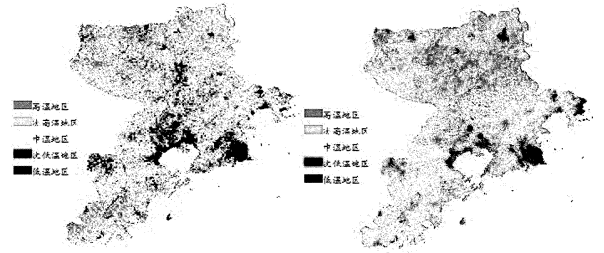


图 1 2000 年与 2002 年青岛地区温度分布图

将青岛地区温度分布图进行陆地温度分级 (图 2), 研究其分布概况, 热岛效应的产生以及对其防范的措施。根据均值-标准差法<sup>[9]</sup>, 可以将陆地温度分为高温地区、次高温地区、中温地区、次低温地区、低温地区。由于物体本身的热容量和比热容越大, 其热惯量越大, 对于图像中的高温地区和次高温地区的地物有市区建筑材料、铁路、裸地等, 其热容量低、比热容小、导热率高, 导致温度高且易扩散至周围的物体。低温、次低温地区主要有水体、植被等, 其热惯量大、导热率低, 覆盖在岩石和道路周围减小高温区的温度, 这由下垫面的物理性质决定<sup>[10]</sup>。由于岩石、钢铁金属与植被、水体的热惯量差异, 致使部分地区由于特殊的性质导致部分温差的反规律现象。庞治国等研究可知<sup>[11]</sup>, 物体的热容量能减小高温地区的温度, 升高低温区的温度, 这是总体温差较小的原因。



2000年4月青岛地区温度等级分布 2002年5月青岛地区温度等级分布  
图 2 2000 年和 2002 年青岛地区温度等级分布图

### 2.2 热岛强度与不透水面的下垫面定性关系分析

城市下垫面是人类活动干扰城市土地利用方式最为直接的表现形式, 由于城市土地利用类型的不同, 下垫面特有的反照率、辐射亮度和热导率直接影响地区的生态环境, 下垫面主要有非渗透性物质组成, 这样的不透水面主要由城市街道、公路、屋顶建筑等构成。

根据 Ridd 提出的不透水面与植被覆盖度的负相关性, 由 Carlson<sup>[12]</sup> 在城市化对气候的研究中得到计算不透水面的估算方法, 认为不透水面面度越深, 亮度越大 (图 3)。图中的采样地区为青岛市中心地区, 其人口密度大, 商业区较集中, 所以建筑物密集, 不透水面积大, 面度深, 直接说明不透水面对温度的影响极大, 经过像元统计不透水面达到 70.4%, 高于大部分城市的平均 40%, 青岛城市化规模较大, 正好对应温度等级分布的高温、次高温地区 (图 2)。

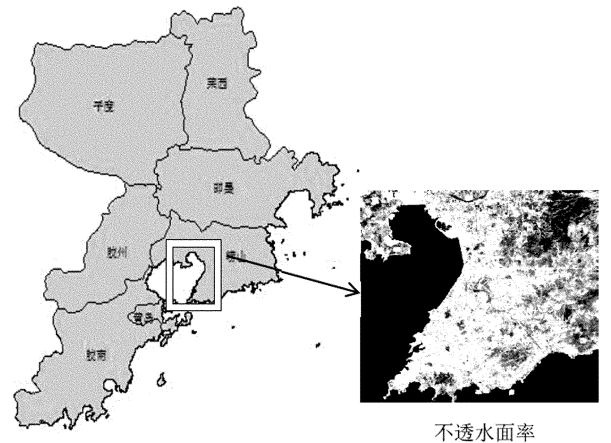


图 3 不透水面采样图

### 2.3 热岛时空演变特征分析

将第 8 全色微波波段与真彩色图像进行 Gram-Schmidt 法的图像融合为 15 m 的分辨率的影像, 并和标准假彩色图像为基础, 结合光谱分析的方法

进行遥感解译,对热岛地区地标物进行判定,图 4 是崂山地区的山脊和山顶地区,山脚有水体、道路和植被覆盖,截取山地部分的波谱曲线如右图所示,并与提供的标准波谱曲线,运用二进制编码、波谱分类和波谱特征拟合的方法进行权重拟合波谱范围 0.5~2.25  $\mu\text{m}$ ,分析出该区域为蒙脱石,其总权重系数得分 2.35;图 5 为青岛地区的波谱采样图,图中的波谱曲线经过拟合分析后以此判断为:红柳、赤铁矿、

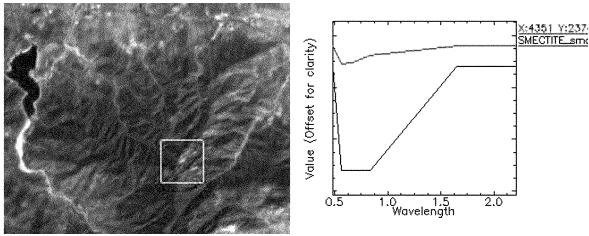


图 4 崂山山顶波谱采样图

石位于崂山的山顶和山腰的位置,裸露在空间当中,受到太阳的暴晒后会及时反射大量的热能,白天容易被卫星传感器探测,但其热容量小,夜间呈现低温现象;波谱中的赤铁矿是炼铁和红颜料的原料,分布在城市建筑的钢铁材料和粉刷原料中,这部分属于城市的工商业或居民区,温度相比郊区较高。菱铁矿是炼铁和陶瓷的主要原料,分布大致与赤铁矿相同。红柳等植被则为植被覆盖的代表,有吸收太阳能降低周围温度等影响,削弱热岛的效应。

在热岛分布研究中,对于两年气温分布的变化,可寻求一定的演变规律,由概率矩阵来估计变化性,此种由时空变化的概率数学模型称为马尔科夫(Markov)模型,估计仅与前一次的温度有关,与之前都不相关,这是转移概率的无后效性。马尔科夫模型是由马尔科夫链的基本原理和方法来预测地区演变的概率转移,利用“无后效性”和“稳定性”来预测下次事件发生的情况。

表 1 2000 年和 2002 年热岛类型转移矩阵(栅格/个)

2000 年	2002 年					
	绿地	常温一类	常温二类	热岛一类	热岛二类	2002 年合计
绿地	34622	9925	14636	20840	22214	102237
常温一类	20277	22397	25224	31364	46877	146139
常温二类	73500	152901	288971	451288	42069	1008729
热岛一类	58664	37288	245876	128404	44758	514990
热岛二类	10635	1985	46527	35468	23579	118194
2000 年合计	197698	224496	621234	667364	179497	

表 2 2000 年和 2002 年热岛类型转移概率矩阵

2000 年	2002 年				
	绿地	常温一类	常温二类	热岛一类	热岛二类
绿地	0.339	0.097	0.143	0.204	0.217
常温一类	0.139	0.153	0.173	0.215	0.321
常温二类	0.073	0.152	0.286	0.447	0.042
热岛一类	0.114	0.072	0.477	0.250	0.087
热岛二类	0.090	0.017	0.394	0.300	0.199

热岛类型的概率转移矩阵是马尔科夫模型中的核心,由表 1 的统计值进行概率计算,得到表 2 的数值,分析可知,2000 年到 2002 年的热岛类型转移概率最大值  $P = \{ \text{绿地、常温一类、常温二类、热岛一类、热岛二类} \} = \{ 0.339, 0.321, 0.447, 0.477, 0.394 \}$ ,热岛一类向常温二类的转移概率最大为 0.477,热岛二类向常温一类的转移概率最低为 0.017,说明在工业、商业、生活社区和植被分布的布局都有所变化,部分地区的植被和水体覆盖增多,弱

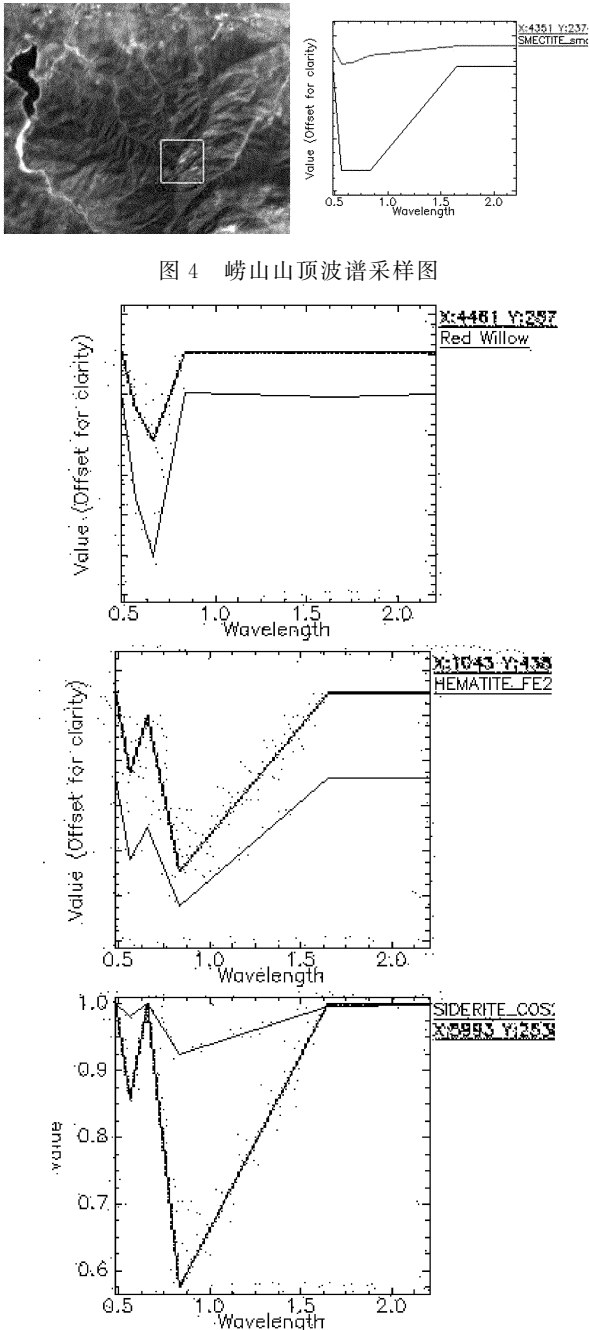


图 5 青岛市区波谱采样图

菱铁矿。对合成的影像进行波谱的采样分析,蒙脱

热岛地区的中高温现象有所减弱,而相反表明热岛效应严重的地区高温的现象减缓趋势较弱。

根据4月和5月青岛市地区的温度等级分布、波谱分析和热岛类型的转移概率进行综合统计比较,可发现在2002年的青岛地区的西北部平度市,北部的莱西市、西部胶州市和青岛的市南区、市北区、黄岛区为高温和次高温地区,较2000年的温度分布有所转移,尤其体现在平度、胶南和即墨,2000年的绿岛、低温分布在这3个地区较明显,而两年后相继呈现出热岛趋势,并且明显有由城市中心向城乡地区转移的趋势,原因是城市规模的向外扩张,青岛大力发展西海岸经济新区导致胶南发展迅速。相关资料报道了平度市推出“拥湾发展”,规划了环胶州湾的产业格局区域,将东海岸、北海岸划分开来,发展科技、通信、交通和港口贸易,加上胶南市及市区的经济贸易发展迅速,交通发达,人流量也逐步增多,汽车尾气和黄岛工厂中的温室气体的大量排放,居民楼的建设 and 经济区的区域扩张,这些因素就是热岛效应显著的主要原因。

青岛东北部的莱西一直处于次高温甚至高温的状态,相关资料显示,莱西的金矿、稀土、橡胶等工厂分布在莱西的周围,其工厂气体的排放和大量交通工具导致持续高温现象,并且有研究表明,近地面温度每年增加 $0.5^{\circ}\text{C}$ 左右,向城市扩散<sup>[13]</sup>。在青岛地区的西南方向明显发现2002年的温度有所降低,呈现出绿岛的现象,这部分地区属于宝山镇、六汪镇等地区,周围有铁路和高速公路以及吉利河水库和韩家庄水库,由于经济相对落后,植被和水库蓄水量的增长导致绿岛分布。

### 3 局限性分析

由于在温度反演中的遥感影响变换处理中,受大气的影 响和大气气溶胶反演的参数资料的限制难以获得实测数据,运用了估算值进行演算,以及地表比辐射率本身和全球气候变暖的不确定性<sup>[14]</sup>,在研究中也排除了大气环流和特殊性气候变异的影响,使得温度的反演具有误差的局限性。但研究主要是针对青岛地区热岛时空演变分析,反演的局限性并不影响整体的分析结果。

### 4 结语

该课题是基于陆地卫星 Landsat - 7ETM+的

遥感影像,利用单窗算法和大气校正算法,通过了定量的演算温度和马尔科夫预测概率矩阵,并结合定性的下垫面和不透水面,对青岛地区的温度反演及热岛进行了综合分析。得到的像元是同温同质体,用像元的亮度值来代表地表的等效温度,研究过程运用了波谱分析的方法,准确地对低分辨率的卫星影像中的地表物体进行了判读,通过像元统计和热岛强度图的转移对比得到热岛的时空演变特征,但其分析结果的有效性还有待于对更多的样本数据进行检验。

研究的结果对热岛效应的起因、热岛效应对生态环境的影响和热岛的缓解有重要的意义,提供了基本的理论依据,特别是对相关环保部门的有效控制、城市环境评价和基于热岛效应的其他科学研究提供了相关资料,丰富了信息。

### 参考文献:

- [1] 孙继松,舒文军.北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响[J].大气科学,2007,31(2):318-319.
- [2] 谈建国,郑有飞,彭丽,等.城市热岛对上海夏季高温热浪的影响[J].高原气象,2008,27(S1):146-151.
- [3] Streutker, D. R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston[J]. Int J Remote Sens, 2002, 23: 2595-2608.
- [4] Sobrino, J. A. LiZ. L. St oll, M. P. B ecker, F. Improvements in the Split - Window technique for landsurface temperature determination[J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1994, (32): 243-253.
- [5] 王天星.地表参数遥感定量反演及其在城市热环境研究中的应用[D].福建师范大学,2008.
- [6] 覃志豪, Zhang Minghua, Arnon Karnieli 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):456-466.
- [7] 程红芳,章文波,陈峰.植被覆盖度遥感估算方法研究进展[J].国土资源遥感,2008,1(1):16-21.
- [8] 杨胜天,李茜,刘昌明,等.应用“北京一号”遥感数据计算官厅水库滨岸带植被覆盖度[J].地理研究,2006,25(4):571-578.
- [9] 张金区.珠江三角洲地区地表热环境的遥感探测及时空演化研究[D].中国科学院广州地球化学研究所,2006.
- [10] 董靓.城市化材料的热效应[J].城市环境与城市生态,1994,8(4):18-20.
- [11] 庞志国.干旱遥感监测模型研究及墒情预报探索[D].中国水利水电科学研究院,2003.
- [12] Carlson T N, Arthur S T. The impact of land use - land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective[J]. Global Planet Change, 2000, 25: 49-56.

[13] 刘洪利,李维亮,周秀骥,等.长江三角洲地区区域气候模式的  
发展和检验[J].应用气象学报,2005,16(1):25-35.

[14] 龚道益,王绍武.全球气候变暖研究中的不确定性[J].地学前  
缘(中国地质大学),2002,9(2):371-372.

## Inversion and Analysis on Heat Island Effect in Qingdao Area Based on Remote Sensing Technology

WANG Yuhao

( Shandong Science and Technology University , Shandong Qingdao 266510, China)

**Abstract:** By using two different remote sensing satellites in Qingdao area from Landsat-7 ETM+ and related meteorological parameter data, using single window method and radiative transfer equation method, temperature retrieval of remote sensing datas from two different images has been carried out. Through analysis on NDVI, vegetation coverage, spectral analysis, correlation analysis, impervious surface and differences of underlying surface, combining with local environment, discussing the performance of urban island, the temperature level of the distribution and transfer trend, it is concluded that urban island effect is significantly in research area. The intensity distribution has close relation with industrial and residential expansion. Accompanying with the process of urbanization, it will transfer to connection part of the urban and rural areas.

**Key words:** Remote sensing; inversion; spectral analysis; correlation analysis; urban island effect