

# Study on Heat Island Effect of Wastewater Treatment Plants in Harbin based on Thermal Infrared Remote Sensing Images

Chunyan Chai<sup>1, 2</sup>, Man Sing Wong<sup>2</sup>, Yujie Feng<sup>1†</sup>

1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

2. Department of Land Surveying and Geo-Informatics, the Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong 999077

†Email: yujief@hit.edu.cn

## Abstract

Heat island effect has been a significant factor contributing local climate change at the city level. As a necessary infrastructure in urban system, Wastewater Treatment Plants (WWTPs) have been recognized as a contributor to global climate change due to its greenhouse gas emissions and huge energy and resource consumption. But their impacts on local climate change have been hardly studied. Landsat TM/ETM+ images, infrared remote sensing imagery, were used to study heat island effect of nine WWTPs in Harbin by retrieving surface temperature during 2000-2013. Results showed that heat island intensity of nine WWTPs increase by 53% during the time. Principle Factor Analysis and multiple linear regressions showed that heat island intensity of WWTPs are positively correlated with treatment volumes, urban surface temperature and negatively correlated with discharge standards, construction condition and treatment process.

**Keywords:** Remote sensing; Waste Water Treatment Plants (WWTPs); Heat island effect; Landsat; Temperature retrieval

## 基于遥感热红外图像研究哈尔滨市 污水处理厂热岛效应\*

柴春燕<sup>1,2</sup>, 黄文声<sup>2</sup>, 冯玉杰<sup>1,†</sup>

1. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江省, 哈尔滨市 150090

2. 土地测量与地理资讯学系, 香港理工大学, 九龙红磡, 香港 999077

**摘要:** 热岛效应正成为城市气候变化的主要因素之一。作为城市必要的设施, 污水处理厂因其产生的温室气体排放和处理运行过程中消耗大量的能源和资源对全球性气候变化产生影响, 而其对区域性气候变化的影响却鲜有研究。利用热红外遥感图像反演地表温度是研究和监测热岛效应常用的手段之一。通过利用 Landsat TM/ETM+ 图像对哈尔滨市九座污水处理厂 2000-2013 年的地表温度进行反演, 并利用热岛强度来评价污水处理厂的热岛效应。研究发现, 十三年间污水处理厂热岛强度增加了 53%。通过主成分分析和多元线性回归分析发现, 污水处理厂热岛强度与处理水量、城市表面温度等呈正相关性, 而与排放标准、污水处理厂距离松花江中心的距离、建设施工状态和主体处理工艺呈负相关性。

**关键词:** 遥感; 污水处理厂; 热岛效应; Landsat; 温度反演

## 引言

在快速城市化的经济发达地区, 随着以土地利用(覆盖)的变化, 热岛效应(Heat Island effect)正逐渐成

\*基金资助: 受香港理工大学城市可持续发展研究院基金项目(基金号 PolyU 1-ZVBP), 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室开放基金项目支持资助(基金号 ESK201303)。

为区域性气候变化的主要特征之一<sup>[1]</sup>。热岛效应是指城市地区的近地空气温度明显高于周围郊区的近地空气温度的现象。在热岛效应的研究和监测中，遥感技术具有高空间分辨率、监测范围广、实时监测且连续等优势，其优越的时空特性为热岛研究提供了先进的监测手段<sup>[2-4]</sup>。

城市污水处理厂是城市水循环系统的一部分，但由于其产生的直接温室气体排放和处理运行过程中消耗大量的能源和资源，对全球性气候变化的影响已受到广泛关注和研究<sup>[5-9]</sup>。据测算，2013 年中国污水处理厂的耗电总量为 129 亿千瓦时（仅包括污水处理、污泥浓缩脱水），约占全社会电力消耗的 0.4%<sup>[9]</sup>。根据《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》，2005 年中国废水处理行业的温室气体排放为 1.14 亿吨二氧化碳当量，其中污水处理产生的甲烷排放量为 162 万吨，占甲烷总排放量的 3.6%；污水处理产生的氧化亚氮排放量为 9 万吨，占氧化亚氮总排放的 7.1%<sup>[10]</sup>。而作为城市必要基础设施不可或缺的一部分，城市污水处理厂对区域性气候变化的影响却很少得到关注，城市污水处理厂的建设运行也伴随着土地利用（覆盖）改变、能源消费与人为热排放。研究城市污水处理厂的热岛效应，将有利于了解城市污水处理厂对区域性气候变化的影响。本文将探索利用热红外遥感技术反演地表温度来研究城市污水处理厂热岛效应强度，并对影响城市污水处理厂热岛效应的相关因素进行分析。

## 1 研究方法和内容

### 1.1 地表温度反演算法

利用遥感图像研究热岛效应一般是根据普朗克辐射定律（也称黑体辐射定律），通过已知的物体辐射强度和波长反推得到物体的实际温度，以此来反演地表温度。目前，针对卫星遥感影像的地表温度反演的算法较多，常用的算法有辐射传导方程法（大气校正法）、单窗算法、劈窗算法、多通道算法。而对于单通道的 TM 和 ETM+热红外图像，多通道算法无法适用；而单窗算法和劈窗算法通常要求有实时的大气参数进行地表温度反演，但这些参数的获取却极为有限。本文采用辐射传导方程法利用 Landsat 热红外遥感影像进行地表温度反演。

采用辐射传导方程法进行地表温度反演的基本原理是：首先估计大气对地表热辐射的影响，然后把这部分大气影响从遥感卫星上传感器所观测到的热辐射总量中减去，从而得到地表热辐射强度，之后再把这一热辐射强度转化为相应的地表温度。如公式(1)所示，根据辐射传输方程遥感卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值  $L_\lambda$  由三部分组成：大气向上辐射亮度  $L_\uparrow$ ，地面的真实辐射亮度经过大气层之后到达卫星传感器的能量，以及大气向下辐射到达地面后反射的能量  $L_\downarrow$ 。此外，大气辐射传输方程也可表示为公式(2)所示。

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

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

其中， $L_\lambda$  = 遥感卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值；

$\varepsilon$  = 地表辐射率；

$T_s$  = 地表真实温度，K；

$B(T_s)$  = 普朗克定律推算得到的黑体热辐射亮度；

$\tau$  = 大气在热红外波段的透过率；

$L_\uparrow$  = 大气向上辐射亮度；

$L_\downarrow$  = 大气向下辐射亮度。

在根据公式(2)推算得到的黑体热辐射亮度  $B(T_s)$ 之后，如公式(3)所示，依据普朗克定律反函数可以反演得到地表真实温度。

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

其中,  $T_s$  = 地表真实温度, K;

$K_1$ =常数,  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$  (对于 ETM+图像,  $K_1$  取值 666.09; 对于 TM 图像,  $K_1$  取值 607.76);

$K_2$ =常数, K (对于 ETM+图像,  $K_2$  取值 1282.71; 对于 TM 图像,  $K_2$  取值 1260.56)。

根据上述反演算法基本原理得知, 地表温度反演的几个主要步骤主要包括: 传感器定标、获取地表比辐射率  $\varepsilon$ 、以及获取大气剖面参数 (大气透过率  $\tau$ 、大气向上辐射亮度  $L_{\uparrow}$ 、大气向下辐射亮度  $L_{\downarrow}$ )。其中, 大气剖面参数是利用 NASA 开发的基于 MODTRAN 辐射传输方程和一套整合算法模拟估算出来的<sup>[11]</sup>。通过在 NASA 官网 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>) 输入图像成像时间以及中心经纬度, 则会提供公式(1)和(2)所需要的大气透过率  $\tau$ 、大气向上辐射亮度  $L_{\uparrow}$ 、大气向下辐射亮度  $L_{\downarrow}$ 。

本文以 Landsat TM 和 ETM+数据为主要的的数据源进行地表温度反演的研究步骤如图 1 所示: 首先, 对遥感影像进行辐射定标, 然后根据研究区域的行政区划图, 在遥感图像处理软件 ENVI 中进行图像裁剪, 得到研究区域图像, 并计算遥感图像的归一化差异植被指数 NDVI; 随后, 运用 ENVI 软件对遥感影像测定地表比辐射率  $\varepsilon$ ; 第三步, 计算相同温度下黑体的辐射亮度值  $B(T_s)$ ; 第四步, 根据普朗克定律反函数反演地表实际温度。

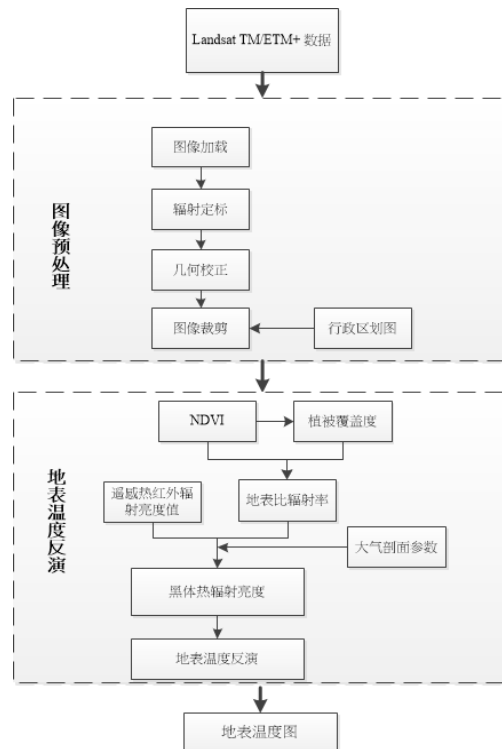


图 1 遥感热红外图像地表温度反演路线图

### 1.1.1 辐射定标

辐射定标是将遥感卫星传感器接收到的像素灰度值转换为辐射亮度或反射率, 以此消除一些大气的干扰。本文通过 ENVI 软件自带的定标工具, 计算热红外辐射亮度值  $L_{\lambda}$  或其他波段的反射率。在 ENVI 软件中 Basic Tools 里可以利用其自带的 Landsat 定标工具, 进行辐射定标, 只需要输入太阳高度角, 成像日期等参数。

### 1.1.2 计算归一化植被指数 NDVI

如公式(4)所示, 归一化植被指数 NDVI 是利用 TM/ETM+第 3、第 4 波段的地表反射率计算得到的。

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (4)$$

其中,  $\rho_{\text{nir}}$  = TM/ETM+第 3 波段的地表反射率;

$\rho_{\text{red}}$  = TM/ETM+第 4 波段的地表反射率。

通常, 如果假设地表为朗伯体的话, 可以用求得的辐射亮度值来计算表观反射率, 如公式(5)所示。表观反射率是指大气层顶(TOA)的反射率, 是辐射定标的结果之一。大气层顶表观反射率又简称为表观反射率或视反射率。

$$\rho = \frac{\pi L_{\lambda} d}{E_{\text{sun}\lambda} \cdot \cos \theta} \quad (5)$$

其中,  $\rho$  = 表观反射率;

$L_{\lambda}$  = 传感器在某个波段内表观亮度;

$d$  = 日地距离 (以日地平均距离为单位);

$E_{\text{sun}\lambda}$  = 太阳光谱在某波段内的平均辐射照度;

$\theta$  = 太阳入射天顶角。

同样, ENVI 中自带的辐射定标工具界面中, 如果要计算 TM/ETM+第 3、第 4 波段的表观反射率可在“Calibration Type”选项中选择“Reflectance”, 即可计算得到第 3、第 4 波段的表观反射率值。

### 1.1.3 计算地表比辐射率 $\varepsilon$

地表比辐射率是地面温度反演的关键影响因素之一。物体的比辐射率通常用来表征物体向外辐射电磁波的能力, 比辐射率很大程度上取决于地表物体的组成性质、粗糙度和其他物理特性 (如含水量), 以及观测条件 (如波长、像素和观测角度等) [12]。虽然目前已有不少成熟应用的地表比辐射率算法 (如温度/比辐射率分离法 TSE, 光谱指数法 TISI), 但是这些多应用于多热红外波段影像, 因而对仅有一个热红外波段的 Landsat TM/ETM+影像并不适用。尽管 NDVI 阈值法(NDVI<sup>THM</sup>)可用于估计单波段的地表比辐射率, 但是该算法有一个主要的缺陷就是不能用来提取水体表面的比辐射率值, 这主要是因为 NDVI 和植被覆盖度 Fv 方程无法应用于水体像元 [13-15]。根据覃志豪等人 [16] 的研究, 通常可以把遥感影像的地表覆盖类型分为三类: 水体、城市和自然表面。其中, 水体在热红外波段的比辐射率接近于黑体物质, 因而可假设水体的比辐射率  $\varepsilon_{\text{water}}=0.995$ 。而自然表面和城市的地表比辐射率可以通过植被覆盖度混合模型、以及在热红外波段的植被、土壤及建筑物的比辐射率经验值计算得到。用于估计自然表面和城市表面比辐射率的方程如公式(6)和公式(7)所示。

$$\varepsilon_{\text{nature}} = F_V R_V \varepsilon_V + (1 - F_V) R_S \varepsilon_S + d\varepsilon \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\text{urban}} = F_V R_V \varepsilon_V + (1 - F_V) R_m \varepsilon_m + d\varepsilon \quad (7)$$

其中,  $R_V$  = 植被温度比,  $R_V = 0.9332 + 0.0585F_V$  [16];

$R_S$  = 土壤温度比,  $R_S = 0.9902 + 0.1068F_V$  [16]

$R_m$  = 城市表面温度比,  $R_m = 0.9886 + 0.1287F_V$  [16];

$\varepsilon_V$  = 热红外波段植被比辐射率, 本文选取典型经验值 0.986 进行计算 [14, 16];

$\varepsilon_S$  = 热红外波段土壤比辐射率, 文本选取四种土壤 (棕壤沙土、粘质土、砂质土和砂壤土) 比辐射率的平均值 0.972 进行计算 [14, 16];

$\varepsilon_m$  = 热红外波段城市表面比辐射率, 本文选取典型经验值 0.970 进行计算 [16]。

此外, 公式(6)和公式(7)中的  $d\varepsilon$  要考虑到自然表面几何分布以及内部反射的作用 [14, 16]。对于平坦表面,  $d\varepsilon$  可忽略不计; 但是对非匀质粗糙表面,  $d\varepsilon$  可按公式(8)、公式(9)和公式(10)估值计算。

当  $F_V < 0.5$  时,

$$d\varepsilon = 0.0038F_V \quad (8)$$

当  $F_V > 0.5$  时,

$$d\varepsilon = 0.0038(1 - F_V) \quad (9)$$

当  $F_V = 0.5$  时,

$$d\varepsilon = 0.0019 \quad (10)$$

而计算地表比辐射率时的植被覆盖度  $F_V$  通常是指植被在地面垂直投影的面积占统计区域总面积的百分比。利用遥感测量植被覆盖度较为常用的方法是利用植被指数 NDVI 近似地估算植被覆盖度  $F_V$ , 计算如公式(11)所示。

$$F_V = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (11)$$

其中,  $NDVI_{\min}$  是在自然表面中, 取裸土覆盖区域的 NDVI 值; 而在城市 and 自然表面混合的地表覆盖中, 取城市表面像元的 NDVI 值;

$NDVI_{\max}$  = 完全被植被覆盖像元的 NDVI 值。

## 1.2 研究内容

表 1 哈尔滨市污水处理厂图像数据数据采集时间、投影坐标系统和轨道号信息

	图像采集时间	图像分辨率 (米)	投影坐标系统	轨道行列号Path/Row
Landsat-5	2000/09/26 2007/09/30 2009/10/05	120	UTM 投影: WGS84, WGS84, Zone 51N	128/28
Landsat-7	2013/10/08	60		

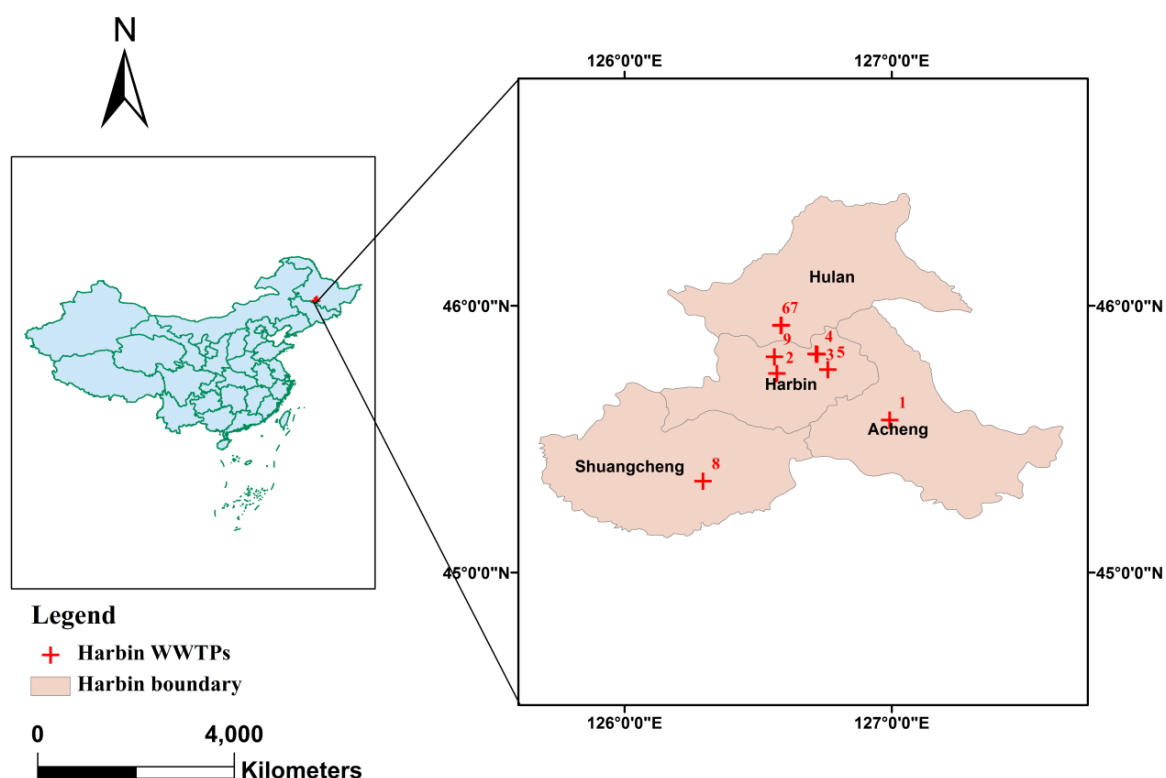


图 2 哈尔滨市所辖市区及研究的城市污水处理厂所在地图位置

本研究所使用的遥感图像来自 Landsat 5 搭载的主题成像仪(Thematic Mapper, TM)多光谱扫描仪和 Landsat 7 搭载的增强型主题成像仪(Enhanced Thematic Mapper Plus, ETM+)多光谱扫描仪。TM 有 7 个波段, 热红外波段的空间分辨率为 120 米; ETM+除有 TM 7 个波段外, 增加了一个全色波段, 空间分辨率为 15 米, 同时热红外波段空间分辨率也提高到了 60 米。

本文共选取了哈尔滨市六市区的 9 座城市污水处理厂进行基于遥感的城市热岛效应研究。为了研究这些污水处理厂建设、运行与城市热岛的时空关系，本文选择从 2000-2013 年的 Landsat 遥感图像进行地表温度反演研究。根据图像质量（云覆盖度、有无条带等）和图像可得性，共选取了三景 Landsat5 图像和一景 Landsat7 图像。四景遥感图像的相关信息如表 1 所示，污水处理厂的相关信息如表 2 所示。同时，所研究的污水处理厂位置在遥感图像上的空间位置如图 2 所示，图中污水处理厂的标号参照表 2 中所列污水处理厂编号。

## 2 研究结果与讨论

### 2.1 哈尔滨市地表温度反演结果

2000 年-2013 年哈尔滨市地表温度反演结果如图 3 所示。哈尔滨属于中温带大陆性季风气候，冬季漫长寒冷，夏季短暂凉爽，春季大风干旱，秋季多霜且凉。通常来说，哈尔滨的四季划分为 4-6 月为春季，7-8 月为夏季，9-10 月为秋季，11 月-次年 3 月为冬季。本研究所选择的四景遥感图像均处于哈尔滨的秋季，便于分析在相同季节条件下的地表温度的时空变化趋势。如图 3(a)所示，2000 年 9 月哈尔滨秋季的地表温度在 10-33℃ 之间，平均地表温度 11.5℃；低温区出现在东南部山区及北段小兴安岭地区，而高温区则出现在哈尔滨市南部，松花江河流也呈现较低的温度。2007 年 9 月哈尔滨秋季（图 3(b)）的地表温度在 13-34℃ 之间，平均地表温度为 10.5℃，与 2000 年 9 月秋季的地表温度范围接近；图中高温区范围比 2000 年都有所减少，主要呈点状散布于哈尔滨市、呼兰区中心和双城区中心。2009 年 10 月哈尔滨秋季（图 3(c)）的地表温度在 7-28℃ 之间，平均地表温度为 10.5℃，温度变化范围与 2000 年 9 月类似、稍低于 2007 年 9 月；与 2007 年 9 月的高温区空间分布类似，2009 年 10 月哈尔滨地表温度图中的高温区主要呈点状散布于哈尔滨市、呼兰区中心和双城区中心。而 2013 年 10 月哈尔滨秋季（图 3(d)）的地表温度在 4-29℃ 之间，平均温度为 12.5℃，温度变化范围与 2009 年 10 月类似；但从图中可以看出，高温区的范围明显比 2009 年 10 月要大，成片状分布于哈尔滨市、呼兰区中心、双城区。整体上来说，从 2000 年秋季到 2013 年秋季，哈尔滨市的高温区面积呈增加趋势，尤其是在 2013 年秋季，呈现出松北科技创新城-群力新区-哈南工业新城的连片城市高温区。

表 2 哈尔滨市 9 座城市污水处理厂各年运行基本信息

编号	所处区域	污水处理厂名称	主体处理工艺	污水处理厂运行情况			
				2000/09/26	2007/09/30	2009/10/05	2013/10/08
1	阿城区	ACTF	A/A/O	-	O(5)	O(5)	O(5)
2	道里区	DLQL	CASS	-	-	C	O(15)
3	道外区	DWTP	A/O	-	O(32.5)	O(32.5)	O(32.5)
4	道外区	DWWC	A/O	O(32.5)	O(32.5)+C	O(32.5)	O(32.5)
5	道外区	DWXY	A/A/O	-	-	C	O(10)
6	呼兰区	HLLL	A/O	-	-	-	O(2)
7	呼兰区	HLLM	CASS	-	O(5)	O(5)	O(5)+C
8	双城区	SCTD	CAST	-	-	O(3)	O(3)
9	松北区	SBJL	A/O	-	C	O(2)	O(2)

注：“-”表示当时还未有污水处理厂建设或运行；  
“C”表示污水处理厂处于施工建设阶段；  
“O”表示污水处理厂处于运行阶段；  
“O+C”表示污水处理厂处于扩建或升级改造阶段；  
括号中的数字表示图像采集时间内污水处理厂运行时的处理规模，单位：万吨/天。



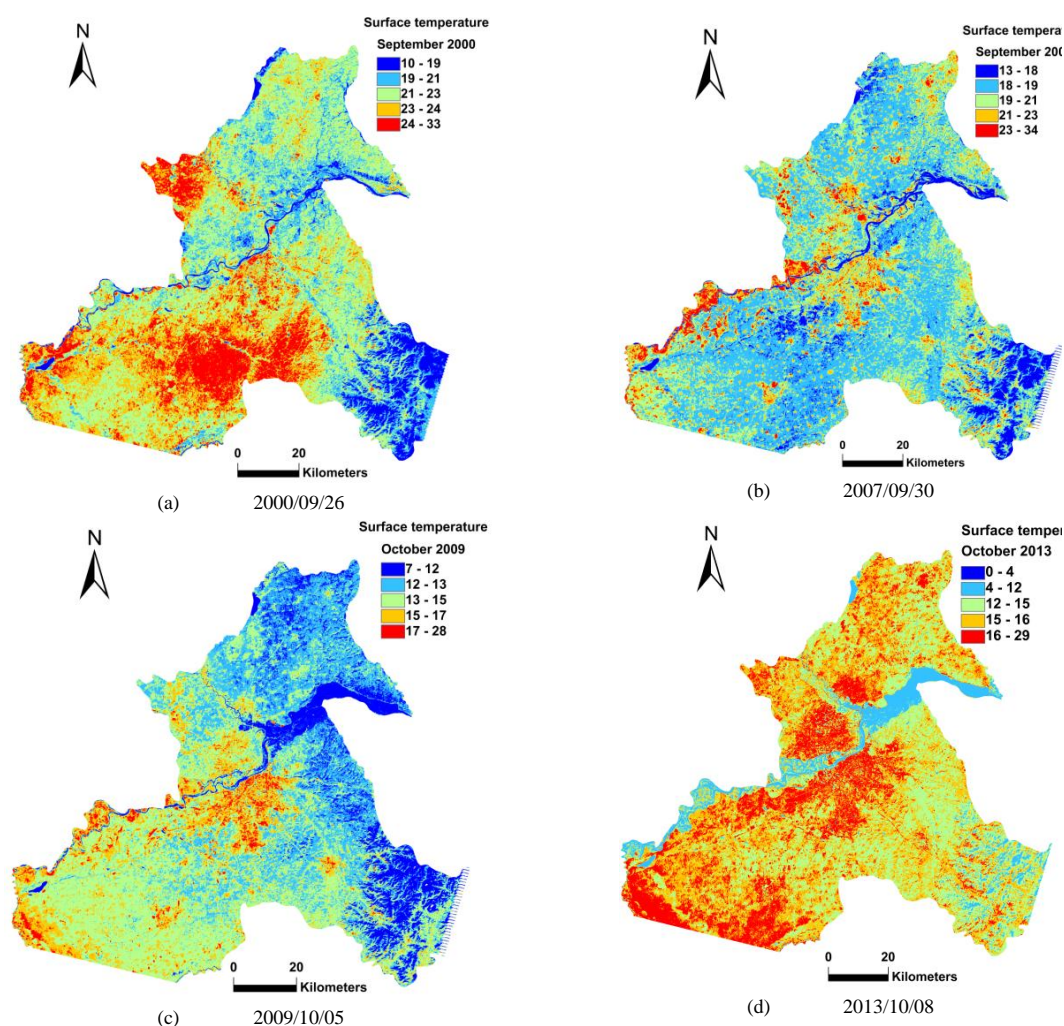


图3 哈尔滨市地表温度反演结果：Landsat TM 反演图像（a, b, c）和 Landsat ETM+反演图像（d）

## 2.2 误差分析与结果验证

利用遥感图像反演地表温度很大程度上与大气参数和地表性质有关，例如波长、观测角度、天气条件和地物材料与组成等。在本文的研究中，利用 TM/ETM+数据反演地表温度的误差来源主要来自于两方面：一是利用 NASA 大气校正参数计算模型来模拟大气剖面参数的过程中产生的误差，另一方面是估计地表比辐射率过程中产生的误差。根据文献报道<sup>[11]</sup>，利用 NASA 大气校正参数计算模型来模拟大气剖面参数产生的误差小于  $0.5 \pm 0.8K$ 。而对于估计地表比辐射率值的不确定性，Weng 等人的研究结果表明<sup>[17]</sup>，在中纬度地区的冬季、地面高度为 0 km 的误差范围为 0.8-1.4K。

为了评价遥感反演产品的准确性和真实性，通常对地表温度反演结果进行验证的方法主要有三种：地面温度观测数据、基于辐射能的地表温度验证、以及其他遥感影像同步反演结果。由于本研究是对历史遥感数据进行反演，所以采用同步地面观测方法进行结果验证受到了限制。美国 EOS/Terra 卫星所搭载的中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradio Meter, MODIS)用于全球生物地理现象的综合测量。MODIS 共有 44 种产品，其中 MODIS11 是基于热红外数据经劈窗算法反演得到的陆地表面温度产品，分辨率为 1km，反演得到的陆地温度精度好于 1K。因此，本文将采用 MODIS11 产品的每日地表温度 2 级数据对 TM 地面温度反演结果进行验证。

经过查询，Landsat 四景遥感影像的成像时间与对应的 MODIS11 产品的成像时间前后相差在 15 分钟到半小时之间，且成像时间均在上午 9 点 50 到 10 点 15 之间。在温度变化较为缓慢的秋季，这种时间间隔对于水体和植被茂盛覆盖区的温度变化影响不大，但是对水泥地等反射率较高的物体，会有一定的影响。在

验证过程中，分别选择了东部林地、松花江水面和哈尔滨城区三个区域进行结果验证。由于 MODIS 产品的空间分辨率为 1km，而 Landsat 为 120m，因此在选点时，首先在 MODIS 图像上确定出相邻四个点坐标，然后再从 Landsat 图像上找出落入上述四点内的像元，分别计算 MODIS 和 Landsat 相对应像元的等效温度。每四个 MODIS 像元作为一组，在每个验证区域选择 6 组像元数据进行验证，结果如图 4 所示。

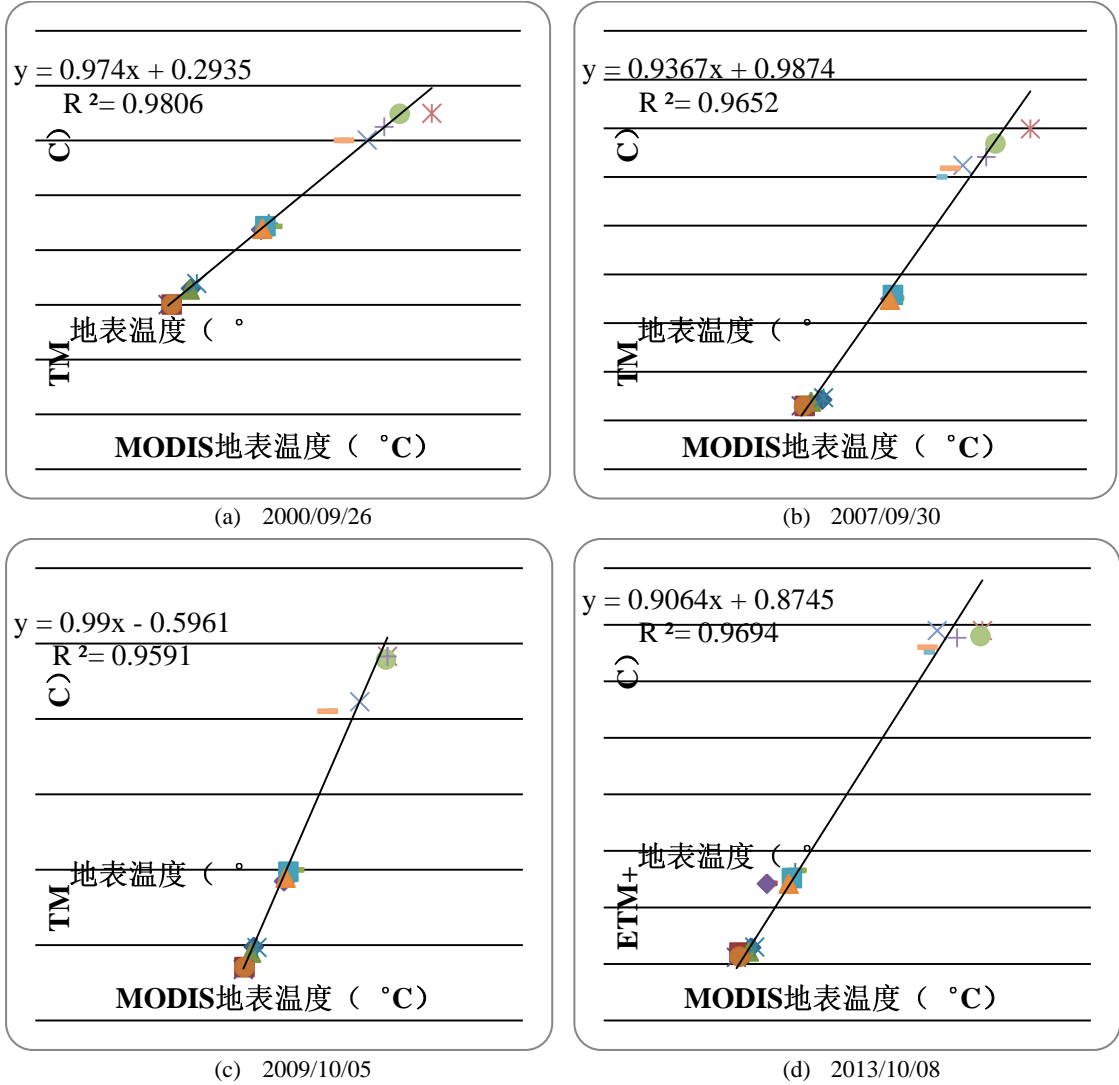


图 4 MODIS 与 Landsat TM/ETM+反演地表温度对比图

由图 4 可知，整体上来说，MODIS 与 TM/ETM+反演所得的地表温度相关性较好，且水体温度最低，城市温度最高，林地温度居于两者之间。从散点图上可以看出，水体温度和林地温度的差异比较小，散点的分布也比较集中；而城市地表覆盖状况均质化较差，散点分布比较离散。

### 2.3 哈尔滨市污水处理厂热岛强度

在大多数热岛效应的研究中，通常会利用城市热岛强度(Urban Heat Island Intensity, UHII)作为研究指标来评价热岛效应，而城市热岛强度一般是指城市与周边农村地区的温度差<sup>[18,19]</sup>。但是，由于在遥感研究中使用传统的地表城市热岛强度指标“城乡温差”通常需要事先界定相应的土地覆盖类型，所以会存在人为的假设误差。因而，研究人员又开发了一些其他的城市热岛强度指标，例如“城区-水体温差”。Schwarz 等人<sup>[17]</sup>比较了 11 种不同的地表城市热岛强度指标，并认为“城区-水体温差”可以应用于含有大量水体表面的城市。本研究采用“城区-水体温差”来研究评价城市污水处理厂的的热岛效应，并定义污水处理厂地表温度



与水体平均地表温度之差为“污水处理厂热岛强度”(WWTPs Heat Island Intensity, WHII), 并选取哈尔滨市境内最大的水体松花江哈尔滨市污水处理厂热岛强度研究的参考水体, 并将哈尔滨市污水处理厂热岛强度 WHII 定义为污水处理厂表面像元的地表平均温度与松花江哈尔滨段水体像元的表面平均温度之差。

哈尔滨市 9 座污水处理厂 2000-2013 年的热岛强度值如表 3 所示。从表中的结果可知, 有四座污水处理厂(67%)的最高热岛强度值发生在 2013 年秋, 而当季热岛强度值前三高的污水处理厂(DWTP, DWXY, DWWC)都是位于哈尔滨市道外区的城市污水处理厂, 分别为 8.1℃, 6.5℃, 6℃, 热岛强度值后两位的污水处理厂是位于道里区的 DLQL 和呼兰区的 HLLL, 分别为 2.3℃和 2.4℃。2009 年和 2013 年两个秋季的热岛强度值对照来看, 除了 DLQL, 其他污水处理厂 2013 年的热岛强度值都比 2009 年大幅提高, 涨幅在 11%-364%, 其中道里区的两座污水处理厂 DWXY 和 DWWC 增幅最高, 分别为 364%和 140%, 其次位于双城区的 SCTD 增幅也达到 104%。这说明, 从 2009 年到 2013 年, 哈尔滨市 9 座污水处理厂的热岛强度还是处于普遍增加的趋势, 而且个别污水处理厂的热岛效应增长趋势十分显著。参考表 4-12 中各污水处理厂的建设运行信息可以发现, 由于图像可得性的问题, 在采集的六景遥感图像中, 有 5 座污水处理厂在这段时间内既有建设又有运行阶段, 而其中有 4 座污水处理厂(80%)的热岛强度最高值发生的时间又同时与污水处理厂的建设、升级改造工程的时间重叠, 这一发现与苏州市污水处理厂热岛强度研究的结果是一致的。而从污水处理厂热岛强度的平均值结果来看, 位于道外区的污水处理厂热岛强度均值最高, 其次是松北区和双城区, 而阿城区、呼兰区和道里区的污水处理厂热岛强度均值较低。

表 3 哈尔滨市污水处理厂 2000-2013 年热岛强度值

污水处理厂	2000/09/26	2007/09/30	2009/10/05	2013/10/08	平均值
ACTF	-	2.7	2.9	3.4	3.0
DLQL	-	-	2.6	2.3	2.4
DWTP	-	4.1	5.1	8.1	5.8
DWWC	5.4	3.5	2.5	6.0	4.4
DWXY	-	-	1.4	6.5	3.9
HLLL	-	-	-	2.4	2.4
HLLM	-	2.7	2.9	3.4	3.0
SCTD	-	-	2.5	5.1	3.8
SBJL	-	5.2	4.0	4.0	4.4
平均值	5.4	3.7	3.0	4.6	/

注: “-”表示当时还未有污水处理厂建设或运行。

2.4 哈尔滨市污水处理厂热岛强度的影响因素研究

对哈尔滨市 9 座城市污水处理厂 2000-2013 年的 23 组热岛强度数据进行分析, 其统计特征值如表 4 所示。总体上来看, 哈尔滨市污水处理厂热岛强度主要分布在 1.4-7.6℃ 范围内, 且哈尔滨组的数据波动性比苏州组的数据小、数据比较集中。本文采用单样本 K-S 检验(Kolmogorov-Smirnov test)对哈尔滨市污水处理厂的热岛强度数据进行处理, 并分析其正态分布性。但是, 结果表明研究的哈尔滨市 9 座城市污水处理厂热岛强度值分布与正态分布有显著的差异。

表 4 2000-2013 年哈尔滨市 9 座城市污水处理厂热岛强度统计特征值

	最大值	最小值	平均值	标准差	中位数	四分之一分位数	四分之三分位数
污水处理厂热岛强度(° C)	8.10	1.40	4.1440	1.8446	3.5000	2.6500	5.3000

随后, 本文采用 K 平均值快速聚类法(K-Means Cluster)对哈尔滨市污水处理厂热岛强度值的分布情况进

行聚类分析。在选择  $k=3$  的聚类分析中, 结果显示, 有 52% 的污水处理厂热岛强度值在  $1.4\text{--}3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间, 32% 的污水处理厂热岛强度值为  $4.0\text{--}6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 剩余 16% 的污水处理厂热岛强度值在  $6.5\text{--}8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。结果表明, 哈尔滨市 9 座城市污水处理厂 2000-2013 年的热岛强度值主要集中在  $1.4\text{--}6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间, 数据分布与正态分布相比右偏。

根据文献调研, 初步筛选出了几种可能影响污水处理厂热岛强度的影响因素, 其中主要包括: 季节性因素、是否处于施工建设阶段、以及处理水量等都对污水处理厂热岛强度有影响。根据以往的研究表明, 不同的污水处理工艺、处理规模、以及执行的排放标准都会对污水处理厂的能源消耗和温室气体排放等造成不同程度的环境影响。因此, 为了进一步了解污水处理厂运行条件与其他因素对热岛强度的影响及其数量关系, 本文将对污水处理流量(F)、建设施工状态(C)、处理工艺(P)、排放标准(DS)以及、城市地表温度、污水处理厂距离城市热岛中心距离、污水处理厂距离松花江水体距离等因素与污水处理厂热岛强度进行回归分析。由于哈尔滨市遥感数据的可得性, 季节性因素在数据中的区别并不显著, 且 23 组数据多在秋季采集反演得到, 因此在此例研究中不再考虑季节性因素。在进行回归分析之前, 首先需要将“是否处于建设施工状态”和“处理工艺”这两种分类变量通过哑变量转换为连续变量:  $C=1$  为没有施工建设,  $C=2$  为处于施工建设状态;  $P=1$  为 A/O,  $P=2$  为 A<sup>2</sup>O,  $P=3$  为 CASS,  $P=4$  为 CAST。与此同时, 利用 ArcGIS 软件的空间分析工具, 计算得到每个市区城市表面像元的地表平均温度  $T_u$ 、污水处理厂与城市热岛中心的距离  $D_u$ 、以及污水处理厂与松花江地理中心的距离  $D_w$ 。

由于在很多情况下影响因素对污水处理厂热岛强度的影响不是单一的, 有时多个因素会协同作用影响污水处理厂的热岛强度。因此, 本文利用 SPSS 统计分析软件首先分析城市污水处理厂热岛强度 WHII 与各自变量的多元线性逐步回归关系, 但是结果发现, 多元线性回归的拟合度很低( $R^2=0.302$ )说明拟合结果不理想, 且解释变量存在多重共线性。多重共线性通常是由于回归模型中的解释变量存在精确或高度相关性而使模型难以准确估计。因此, 为了消除解释变量多重线性所引起的误差, 本文对解释变量进行主成分分析。主成分分析方法主要是利用降维的原理, 把原来具有一定相关性的很多变量通过线性组合, 重新组合成一组新的综合指标来代替, 而这组新的综合指标之间相互独立、不具有相关性。

利用 SPSS 统计软件分析模块中的因子分析功能进行主成分分析, 首先要进行相关性检验, 以验证变量之间具有相关性。根据因子分析的相关性检验结果, KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)值为 0.649 并接近 1; 同时, 根据 Bartlett 球形度检验结果,  $P$  值 $<0.05$ 。综合上述两项指标, 可以判定分析变量之间存在相关性, 适合进行因子分析。如表 5 所示, 模型默认特征值大于 1 的成分作为主成分, 因此, 成分 1 和 2 可提取作为主成分, 两个主成分累积的方差达到 78%, 包含了主要的变量信息。

表 5 主成分分析结果: 解释的总方差

成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差的%	累积%	合计	方差的%	累积%	合计	方差的%	累积%
1	4.132	59.034	59.034	4.132	59.034	59.034	4.097	58.523	58.523
2	1.340	19.149	78.183	1.340	19.149	78.183	1.376	19.660	78.183
3	.663	9.466	87.649						
4	.380	5.422	93.071						
5	.335	4.779	97.850						
6	.107	1.522	99.372						
7	.044	.628	100.000						

提取方法: 主成分分析。

主成分分析方法提取得到的两个主成分是一个大而全的“综合因子”, 为了更好地解释提取的主成分因子各代表哪一类变量, 本文采用最大方差法进行因子旋转, 旋转后得到的旋转成分矩阵如表 6 所示。表中数值代表各原始变量与对应主成分之间的相关关系, 数值的绝对值越大, 说明关系越密切。主成分 1 与

处理水量 F 及污水处理厂距离城市热岛中心的距离 Du 都呈很高的正相关关系，而与排放标准 DS、主体处理工艺 P、污水处理厂距离水体中心的距离 Dw 呈负相关，这些指标都与污水处理厂的设计选址和运行有关。因此，成分 1 可称为“设计运行因子”。而成分 2 主要与施工建设状态具有很高的正相关性，因此可称为“建设施工因子”。

表 6 因子旋转结果：旋转成分矩阵<sup>a</sup>

	成分	
	1	2
处理水量（万吨/天）	.862	-.375
城市地表平均温度（°C）	.728	.335
污水处理厂与城市热岛中心的距离（公里）	.926	.143
污水处理厂与水体中心的距离（公里）	-.748	-.391
排放标准	-.895	.151
施工建设状态	.031	.958
主体处理工艺	-.777	-.094

提取方法：主成分分析。  
 旋转法：具有Kaiser标准化的正交旋转法。  
 a. 旋转在3次迭代后收敛。

进一步根据主成分分析结果中“成分得分系数矩阵”可以得到主成分与原始变量的关系表达式，如公式(12)和(13)所示。

$$F1 = 0.235F + 0.162T_u + 0.222D_u - 0.164D_w - 0.231DS - 0.047C - 0.188P \tag{12}$$

$$F2 = -0.326F + 0.207T_u + 0.053D_u - 0.247D_w + 0.163DS + 0.707C - 0.026P \tag{13}$$

其中，F1, F2=主成分因子；  
 F=污水处理厂的处理水量（万吨/天）；  
 Tu=城市地表平均温度(°C)；  
 Du=污水处理厂与城市热岛中心的距离（公里）；  
 Dw=污水处理厂与水体中心的距离（公里）  
 DS=污水处理厂执行的出水排放标准；  
 C=污水处理厂的建设施工状态；  
 P=污水处理厂主体处理工艺。

用 SPSS 统计软件进行影响污水处理厂热岛强度因素设计运行因子 F1 和施工建设因子 F2 对污水处理厂热岛强度 WHII 的多元线性回归分析，结果可知 F1 因子与 WHII 具有统计学显著意义的线性相关性（如公式(14)所示），标准化系数为 0.517，p 值小于 0.05，且回归模型的方差分析 ANOVA 结果中 p 值为 0.008（小于 0.05），R<sup>2</sup>=0.672。

$$WHII = 4.144 + 0.517 \times F1 \tag{14}$$

将公式(14)代入公式(12)，可以得到 WHII 与标准化后的原始变量之间的数据模型，如公式(15)所示：

$$WHII = 4.144 + 0.121F + 0.084T_u + 0.115D_u - 0.085D_w - 0.119DS - 0.024C - 0.097P \tag{15}$$

由公式(15)可以看出，污水处理厂热岛强度 WHII 与处理水量 F、城市表面平均温度 Tu 和污水处理厂距离城市热岛中心的距离 Du 呈正相关性，而与排放标准 DS、污水处理厂距离松花江中心的距离 Dw、建设施工状态 C 和主体处理工艺 P 呈负相关性。由于建设施工状态 C 标准化系数过小且主要归因在 F2 因子中，因此在这里不予考虑该项变量。如果需要降低哈尔滨市污水处理厂的热岛效应强度 WHII，可通过减少处理水量 F、提高排放标准 DS，同时控制减缓城市热岛效应 Tu。而根据污水处理厂主体工艺变量的转换原则，选择 CASS 和 CAST 工艺比 A/O 和 A2O 更能有助于降低污水处理厂热岛强度 WHII。而根据回归模型结果，

也可以发现那些接近城市热岛中心 ( $D_u$  值小) 且远离松花江 ( $D_w$  值大) 的污水处理厂 (如双城区和阿城区的污水处理厂) 的热岛强度  $WHII$  通常较小。

### 3 结论

通过利用热红外遥感图像首次尝试反演了哈尔滨市污水处理厂的地表温度, 并通过 MODIS 地表温度产品进行了结果验证, 结果表明 LandsatTM/ETM+反演得到的地表温度与 MODIS 地表温度相关性较高, 结果精度较高。本文通过根据主成分分析和多元线性回归分析发现, 哈尔滨市污水处理厂热岛强度  $WHII$  与处理水量  $F$ 、城市表面平均温度  $T_u$  和污水处理厂距离城市热岛中心的距离  $D_u$  呈正相关性, 而与排放标准  $DS$ 、污水处理厂距离松花江中心的距离  $D_w$ 、建设施工状态  $C$  和主体处理工艺  $P$  呈负相关性。如果需要降低哈尔滨市污水处理厂的热岛效应强度  $WHII$  通过减少处理水量  $F$ 、提高排放标准  $DS$ , 同时控制减缓城市热岛效应  $T_u$ 。未来可通过提高遥感技术分辨率进一步研究污水处理对城市热岛效应的定量贡献率。

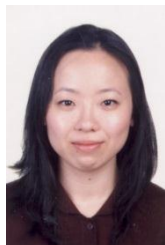
### REFERENCES

- [1] Li, Q.; Zhang, H.; Liu, X.; Huang, J. Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2004, 79: 165-174.
- [2] 曹越, 王宏宇. 城市环境中遥感技术的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(3): 5-8.
- [3] 刘红, 张清海, 林绍霞, 赵璐琳, 林昌虎. 遥感技术在水环境和大气环境监测中的应用研究进展[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(1): 187-190.
- [4] 陈哲, 屹立, 王美. 遥感技术在环境监测中的作用[J]. 北方环境, 2013, 29(4): 165-167.
- [5] Wang, X.; Liu, J.; Ren, N.Q.; Yu, H.Q.; Lee, D.J.; Guo, X. Assessment of multiple sustainability demands for wastewater treatment alternatives: A refined evaluation scheme and case study [J]. Environmental science & technology, 2012, 46: 5542-5549.
- [6] Corominas, L.; Foley, J.; Guest, J.S.; Hospido, A.; Larsen, H.F.; Morera, S.; Shaw, A. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art [J]. Water research, 2013, 47: 5480-5492.
- [7] Mo, W.; Zhang, Q. Can municipal wastewater treatment systems be carbon neutral [J] J. Environ. Manag. 2012(112): 360-367.
- [8] 李欢, 金宜英, 李洋洋. 污水污泥处理的碳排放及其低碳化策略[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(2): 117-121.
- [9] Chunyan Chai, Dawei Zhang, Yanling Yu, Yujie Feng, Man Sing Wong. Carbon footprint analyses of mainstream wastewater treatment technologies under different sludge treatment scenarios in China [J]. Water, 2015(7): 918-938.
- [10] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[M]. 北京: 中国经济出版社, 2013: 59-62.
- [11] Barsi, J.A.; Schott, J.R.; Palluconi, F.D.; Hook, S.J. SPIE: In Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments[C/OL]. San Diego, California, USA, 2005: 58820E-1-58820E-7.
- [12] Sobrino, J.A.; Raissouni, N.; Li, Z.-L. A comparative study of land surface emissivity retrieval from noaa data [J]. Remote Sensing of Environment, 75, 2001: 256-266.
- [13] Becker, F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite [J]. International Journal of Remote Sensing, 8, 1987: 1509-1522.
- [14] Sobrino, J.A.; Jiménez-Muñoz, J.C.; Paolini, L. Land surface temperature retrieval from landsat TM5 [J]. Remote Sensing of Environment, 90, 2004: 434-440.
- [15] Sobrino, J.A.; Jiménez-Muñoz, J.C. Surface emissivity retrieval from digital airborne imaging spectrometer data [J]. Journal of Geophysical Research, 107(23), 2002: 2401-2413.
- [16] 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 陈仲新, 刘佳. 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, 3(61), 2004: 28-41.
- [17] Weng, Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, 2009: 335-344.
- [18] Schwarz, N.; Lautenbach, S.; Seppelt, R. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of european cities with

modis land surface temperatures [J]. Remote Sensing of Environment, 115, 2011: 3175-3186.

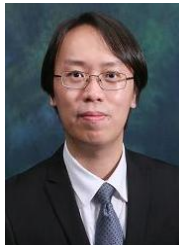
- [19] Memon, R.A.; Leung, D.Y.C.; Liu, C.-H. An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating [J]. Atmospheric Research, 94, 2009: 491-500.

## 【作者简介】



<sup>1</sup> 柴春燕（1982-），女，汉，博士研究生，  
污水处理碳足迹研究。

Email: cathy.chaichunyan@gmail.com



<sup>2</sup> 黄文声（1980-），男，汉，博士，助  
理教授，遥感教授和技术。

Email: lswong@polyu.edu.hk



<sup>3</sup> 冯玉杰（1966-），女，汉，博士，教  
授/博导，主要研究方向生物能源、环境  
电化学、区域环境风向识别与评价。

E-mail: yujief@hit.edu.cn