

文章编号: 1674-6139(2016)03-0063-08

# 基于遥感技术的城市污水处理厂热岛效应研究

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 哈尔滨 150090;

2. 香港理工大学 土地测量与地理资讯学系, 香港 九龙 999077)

**摘要:** 热岛效应已成为城市化发展中影响局地气候变化的重要因素之一。作为城市必要基础设施的一部分, 城市污水处理厂对全球性气候变化的影响受到了广泛关注和研究, 而对局地气候变化的影响却鲜有研究。文章首次尝试利用 Landsat 卫星遥感图像对 1995 年-2013 年间苏州市 11 座城市污水处理厂进行了热岛效应研究, 并对影响因素进行了初步分析。结果发现, 11 座城市污水处理厂热岛强度在 18 年间整体上增加了 48%; 从时间维度上来看, 在污水处理厂施工建设或升级改造阶段, 热岛强度都偏高。而根据回归分析发现, 城市地表平均温度、污水处理厂的施工建设状态和主体处理工艺与 WHII 具有显著正相关性。

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

中图分类号: X87

文献标志码: A

## Study on Heat Island Effect of Urban Sewage Treatment Plant

### Based on Remote Sensing Technology

Chai Chunyan<sup>1,2</sup>, Huang Wensheng<sup>2</sup>, Feng Yujie<sup>1</sup>

(1. State Key Lab of Water Resources and Water Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Department of Land Surveying and Geo Information Science, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

**Abstract:** The urban heat island effect has become one of the important factors that affect the local climate change in the development of urbanization. As part of the city the necessary infrastructure, the impacts of urban sewage treatment plants on global climate change have received widespread concern and research, however, the influence of the local climate change is rarely studied. This paper first attempts to use the Landsat satellite remote sensing image to study the urban heat island effect of city sewage treatment plant in Suzhou city during the period of 1995-2013, and its influencing factors are analyzed. It was found that the heat island intensity of 11 urban sewage treatment plants increased by 48% in the whole 18 years. From the perspective of the time dimension, in the sewage treatment plant construction or upgrading phase, the heat island intensity is high. According to the regression analysis, it is found that the average temperature of the urban surface, the construction and construction of sewage treatment plants and the main treatment process and WHII has a significant positive correlation.

**Key words:** remote sensing; wastewater treatment plant; heat island effect; Landsat; temperature inversion

近几十年来, 随着以土地利用(覆盖)变化为主的城市化发展, 热岛效应(Heat Island effect)正逐渐成为区域性气候变化的主要特征之一, 尤其是在快

速城市化的经济发达地区<sup>[1-2]</sup>。城市热岛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, 从近地气温分布图上来看城市就好像一个高温的岛屿, 因而得名热岛。在城市热岛的研究中, 城市建筑物和交通的人为热排放、地表热属性和城市冠层被认为是影响城市热岛的主要因素。而对地表城市热岛(Surface Urban Heat Island, SUHI)而言, 土地覆盖、人为活动(如能源消费强度)和景观类型是影响地表城市热岛形成和发展的关键因

收稿日期: 2015-09-16

基金项目: 香港理工大学城市可持续发展研究院基金项目(项目号: 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(项目号: ESK201303)

作者简介: 柴春燕(1982-), 女, 博士研究生, 研究方向: 污水处理技术、温室气体排放评价。

通讯作者: 冯玉杰

素<sup>[3-7]</sup>。在城市热岛的监测研究中,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城市热岛研究提供了先进的监测手段<sup>[8-10]</sup>。

作为城市水循环系统中不可缺少的基础设施之一,城市污水处理厂对全球气候变化的影响已受到广泛关注,其影响主要来自于污水和污泥处理过程中直接产生的  $N_2O$ 、 $CH_4$  和  $CO_2$  三种温室气体,以及消耗电力等能源和化学药剂所产生的间接温室气体排放<sup>[11-15]</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%。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  $CH_4$  排放量为 162 万吨,占  $CH_4$  总排放量的 3.6%;污水处理产生的  $N_2O$  排放量为 9 万吨,占  $N_2O$  总排放的 7.1%。而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以及对城市热岛效应的贡献率,有利于进一步理解不同土地利用(覆盖)对城市热岛效应的贡献,并填补城市污水处理厂对区域性气候变化影响的研究空白。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 研究方法和研究材料

### 1.1 遥感图像反演地表温度的原理

从理论上讲,自然界的任何高于热力学温度(Kinetic Temperature)的物体都会不断地向外发射具有一定能量的电磁波,而物体辐射的能量强度和辐射能量按波长的分布都是温度的函数。如公式(1)所示,根据普朗克辐射定律(也称黑体辐射定律),黑体辐射的强度与温度和波长存在定量关系,因此可以通过已知的温度和波长推算出物体的辐射强度;反之,也可以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。这就是地表温度反演的理论基础。

$$B_{\lambda}(T) = C_1 / \lambda^5 (e^{C_2 / \lambda T} - 1) \quad (1)$$

其中  $B_{\lambda}(T)$  = 黑体辐射强度,  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ;

• 64 •

$\lambda$  = 波长  $\mu m$ ;

$C_1$  = 辐射常数  $3.7418 \times 10^{-16} W \cdot m^{-2}$

$C_2$  = 辐射常数  $1.4387685104 \mu m \cdot K$ ;

$T$  = 热力学温度  $K$ 。

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。因此,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传感器上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(2)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(3)所示。

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

$$B(T_s) = [L_{\lambda} - L_{\uparrow} - (1 - \varepsilon) \times L_{\downarrow} \times \tau] / (\varepsilon \times \tau) \quad (3)$$

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(3)推算得到的黑体热辐射亮度  $B(T_s)$  之后,如公式(4)所示,依据普朗克定律反函数可以反演得到地表真实温度。

$$T_s = \frac{K_2}{\ln(K_1 / B(T_s) + 1)} \quad (4)$$

其中  $T_s$  = 地表真实温度  $K$ ;

$K1 = \text{常数}, W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$  (对于 ETM + 图像,  $K1$  取值 666.09; 对于 TM 图像,  $K1$  取值 607.76);

$K2 = \text{常数}, K$  (对于 ETM + 图像,  $K2$  取值 1 282.71; 对于 TM 图像,  $K2$  取值 1 260.56)。

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。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(2)和(3)中所需要的大气透过率、大气向上辐射亮度  $L_{\uparrow}$ 、大气向下辐射亮度  $L_{\downarrow}$ 。

## 1.2 研究材料

目前,基于遥感的城市热岛效应研究主要是利用城市地物的热红外遥感来反演陆地表面温度分析城市热岛的变化规律。而用来反演陆地表面温度,研究城市热岛效应的遥感影像也比较多,如陆地卫星 Landsat TM 图像、NOAA/AVHRR、MODIS 产品等。而 Landsat 遥感图像因其优越的空间分辨率,因而在城市热岛效应研究中得到了广泛的应用。LANDSAT 是美国 NASA 的陆地卫星计划(1975 年前称“地球资源技术卫星-ERTS”),自 1972 年开始发射第一颗卫星 LANDSAT 1 起,目前已发射 8 颗。本研究所使用的遥感图像来自 Landsat5 搭载的主题成像仪(Thematic Mapper, TM)多光谱扫描仪和 Landsat7 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。

## 1.3 地表温度反演方法

本文以 Landsat TM 和 ETM+ 数据为主要的数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。

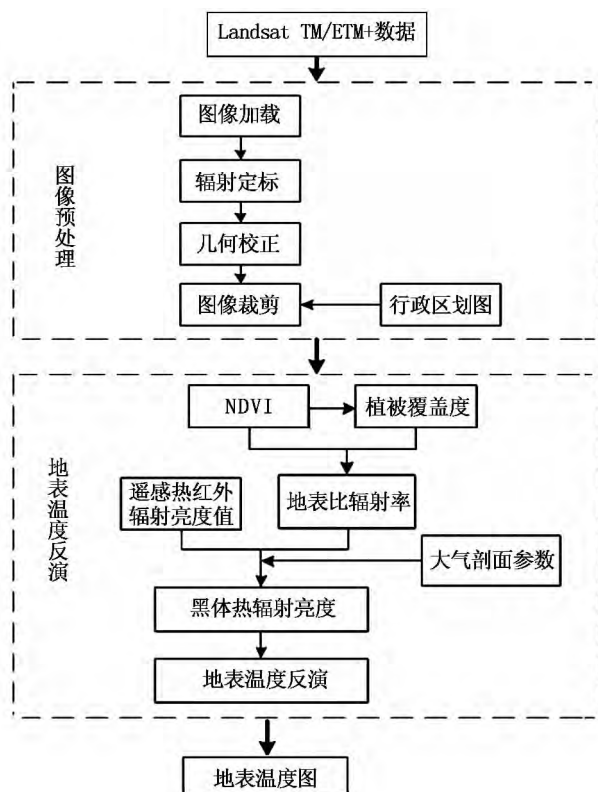


图1 遥感热红外图像地表温度反演路线图

### 1.3.1 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(Digital Number, DN)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。TM/ETM+ 图像的辐射定标通常采用公式(5)和公式(6)将像素灰度值  $DN_{\lambda}$  转换为大气顶部辐射亮度值  $L_{\lambda}$ 。

$$L_{\lambda} = L_{\min} + (L_{\max} - L_{\min}) \times Q_{DN}/Q_{\max} \quad (5)$$

$$L_{\lambda} = L_{\min} + (L_{\max} - L_{\min}) \times \frac{(Q_{DN} - Q_{\min})}{(Q_{\max} - Q_{\min})} \quad (6)$$

其中,  $L_{\lambda} = \lambda$  波段的大气顶部辐射亮度值(对于 TM/ETM+ 而言  $\lambda = 6$ );

$DN$  = 遥感影像中每个像元的灰度值;

$Q_{\max}$  = 像元可取的最大值 255;

$Q_{\min}$  = 像元可取的最小值 0;

$L_{\max}$  = 定标常数,  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ;

$L_{\min}$  = 定标常数,  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ 。

Landsat TM/ETM+ 遥感影像不同时期热红外波段的  $L_{\max}$  和  $L_{\min}$  值见表 1。

表 1 Landsat TM/ETM + 遥感影像热红外波段  $L_{max}$  和  $L_{min}$  值

Landsat TM	1984/03/01 – 2003/05/04				2003/05/05 – 至今			
	$L_{max}$	$L_{min}$	$L_{max}$	$L_{min}$	$L_{max}$	$L_{min}$	$L_{max}$	$L_{min}$
	15.303	1.237 8			15.303	1.237 8		
Landsat ETM +	2001/07/01 之前				2001/07/01 之后			
	低增益		高增益		低增益		高增益	
	$L_{max}$	$L_{min}$	$L_{max}$	$L_{min}$	$L_{max}$	$L_{min}$	$L_{max}$	$L_{min}$
	17.04	0.00	12.65	3.20	17.04	0.00	12.65	3.20

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。

1.3.2 计算归一化植被指数 NDVI

如公式(7)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。

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (7)$$

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

$\rho_{red}$  = 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(8)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。

$$\rho = \frac{\pi L_{\lambda} d}{E_{sun\lambda} \cdot \cos\theta} \quad (8)$$

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);

$E_{sun\lambda}$  = 太阳光谱在某波段内的平均辐射照度;

$\theta$  = 太阳入射天顶角。

如图 2 所示的 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“Reflection”,即可计算得到第 3、第 4 波段的表观反射率值。

1.3.3 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)。目前虽然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 TI-SI),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(NDVITHM)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  $F_v$  方程无法应用于水体像元。根据覃志豪等人的研究,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  $\varepsilon_{water} = 0.995$ 。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(9)和公式(10)所示。

$$\varepsilon_{nature} = F_v R_v \varepsilon_v + (1 - F_v) R_s \varepsilon_s + d\varepsilon \quad (9)$$

$$\varepsilon_{urban} = F_v R_v \varepsilon_v + (1 - F_v) R_m \varepsilon_m + d\varepsilon \quad (10)$$

其中  $R_v$  = 植被温度比  $R_v = 0.933\ 2 + 0.058\ 5F_v$ ;

$R_s$  = 土壤温度比  $R_s = 0.990\ 2 + 0.106\ 8F_v$ ;

$R_m$  = 城市表面温度比  $R_m = 0.988\ 6 + 0.128\ 7F_v$ ;

$\varepsilon_v$  = 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;

$\varepsilon_s$  = 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;

$\varepsilon_m$  = 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。

此外,公式(9)和公式(10)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。对于平坦表

面  $\rho\varepsilon$  可忽略不计; 但是对非匀质粗糙表面  $\rho\varepsilon$  可按公式(11)、公式(12)和公式(13)估值计算。

当  $F_v < 0.5$  时  $\rho\varepsilon = 0.0038F_v$  (11)

当  $F_v > 0.5$  时  $\rho\varepsilon = 0.0038$  (12)

当  $F_v = 0.5$  时  $\rho\varepsilon = 0.0019$  (13)

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(14)所示。

$$F_v = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$
 (14)

其中  $NDVI_{min}$  = 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。

1.4 研究对象

本文选取了苏州辖内八市区的 11 座城镇污水处理厂进行基于遥感的城市热岛效应研究。这些城镇污水处理厂的处理规模在 5~18 万吨/日。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 1995 年-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, 共选取了五景 Landsat5 图像和一景 Landsat7 图像。六景遥感图像的采集时间、空间分辨率、所采用的投影坐标系统和卫星轨道行列号信息如表 2 所示。研究的污水处理厂所处市区、主体处理工艺、处理规模、建设或运行状态等信息如表 3 所示。污水处理厂的标号参照表 3 中所列污水处理厂编号。

表 2 苏州市污水处理厂图像数据采集时间、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
Landsat - 5	1995/12/09	120	UTM 投影: WGS84 , WGS84 , Zone 51N	119/38
	1996/08/05			
	2001/04/13			
	2003/12/15			
Landsat - 7	2010/05/24	60		
	2013/03/21			

表 3 苏州市 11 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					
				1995/12/09	1996/08/05	2001/04/13	2003/12/15	2010/05/24	2013/03/21
1	张家港市	ZJG No. 2	OD	-	-	-	O(7)	O(7)	O(7)
2	常熟市	CS_CB	OD	-	-	O(3)	O(3) + C	O(9)	O(12)
3	昆山市	KS_JB	A/A/O	-	-	-	C	O(10)	O(10)
4	昆山市	KSWTP	A/O	C	O(2.5)	O(2.5) + C	O(5)	O(7.5)	O(7.5)
5	吴江市	WJWTP	A/A/O	-	O(0.5)	O(0.5) + C	O(2)	O(8.5)	O(8.5)
6	吴江市	WJ_JQ	SBR	-	-	-	C	O(3) + C	O(5.4)
7	吴江市	WJ_SZ	A/A/O	-	-	-	O(5)	O(5)	O(5)
8	相城区	FXWTP	SBR	-	-	C	O(6)	O(18) + C	O(18)
9	苏州工业园区	IJWTP	SBR	-	-	C	C	O(14) + C	O(14)
10	吴中区	CNWTP	A/A/O	-	-	-	-	O(7.5)	O(7.5)
11	苏州新区	XQWTP	OD	C	O(2)	O(4) + C	O(8)	O(8) + C	O(8)

(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。)

2 研究结果与讨论

2.1 苏州市地表温度反演结果

基于 LandsatTM/ETM+ 遥感图像反演得到的地表温度图不仅能反映苏州市地表温度的级别, 还能

反映出城市地表热岛的空间分布范围。1995 年冬季的苏州地表温度图显示温度范围为 3℃~15℃且平均地表温度为 7℃, 温度差异较小。在 1995 年的地表温度图上, 北部的长江沿岸地区和西部的低地地区比城区的温度要高, 说明在冬季苏州市的热岛

效应较弱。由 2003 年冬季的苏州地表温度图可知,地表温度范围在  $3^{\circ}\text{C} \sim 14^{\circ}\text{C}$  之间,与 1995 年类似;一些高温区出现在苏州市区、北部的常熟市、东部的昆山市和最南端的吴江市,而且这些高温区的地表温度明显高于周边的农村地区和水体。城市热岛可明显见于 1996 年夏季的苏州市地表温度图,地表温度范围在  $25^{\circ}\text{C} \sim 41^{\circ}\text{C}$  之间且平均地表温度为  $33^{\circ}\text{C}$ ,温度差异较大;最高的地表温度出现在苏州市区、昆山、常熟、张家港,同时高温区也出现在南部的新兴城镇吴江市;1996 年夏季苏州市呈现显著的城市热岛现象,城市最高地表温度与水体温度最高相差  $17^{\circ}\text{C}$ 。而 2001 年春季的苏州市地表温度图显示,地表温度范围在  $11^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$  之间且平均地表温度为  $20.5^{\circ}\text{C}$ ;苏州市区的热岛从老城区向东延伸到苏州工业园区、向西延伸到苏州高新区,形成一个东西 20 公里、南北 13 公里的热岛区域,而苏州市区与水体的地表温度最高相差至  $19^{\circ}\text{C}$ 。而与 1996 年的地表温度图比较,2001 年的地表温度图中昆山市的热岛范围也有所扩张。从 2010 年春季的苏州市地表温度图中可以发现,地表温度范围在  $19^{\circ}\text{C} \sim 43^{\circ}\text{C}$  之间,接近于 1996 年夏季温度水平;苏州市区的热岛区域几乎与昆山的热岛区域连为一体,这可能与当时苏州工业园区和昆山市的经济飞速发展和快速城市化发展有关;在北部的张家港市,高温区出现在张家港市沿江的自由贸易区和常熟市区;在南部,高温区出现在吴江市的新兴城镇盛泽镇。在 2013 年春季的苏州市地表温度图中,地表温度范围在  $8^{\circ}\text{C} \sim 23^{\circ}\text{C}$  之间,虽然由于该景图像采集于早春季节,城市地表温度与水体的温差不如其他两景春季地表温度图中那样不显著,但是高温区还是集中出现在苏州工业园区、昆山市、常熟市和吴江市。总体上来说,苏州市春夏两季的城市地表温度会显著高于周边农村和自然水体,并且随着新型城镇化的发展,城市热岛的空间区域不断扩大,从之前的散点形态逐渐发展成为区带状。

## 2.2 苏州市污水处理厂热岛强度

在大多数城市热岛效应研究中,通常利用城市热岛强度(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。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。而 Chen 等人<sup>[3]</sup>利用“城区-水体温差”研究了珠江三角洲地区和深圳市在快速发展过程中城市热岛和土地利用/覆盖变化的关系。在本文中,水体表面占苏州市总面积的 42%,而且在研究时间段内水体面积基本上没有太大变化,因此水体表面温度不太会受到因城镇化影响而导致的地区温度变化影响。本文采用“城区-水体温差”来研究城市污水处理厂热岛强度及其对城市热岛的贡献,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)。考虑到选择参考水体计算 WHII 时要尽量选择水体表面温度在研究时间段内保持稳定、变化较小,且水体较少受人为热干扰的影响,本文选择太湖作为参考水体来计算苏州地区污水处理厂的 WHII。

苏州市污水处理厂相对于太湖的热岛强度值可知,11 座污水处理厂最高(较高)的热岛强度值都出现在 2010 年春季,其中位于吴江市的 WJ\_JQ 污水处理厂热岛强度值最高,达到  $16.93^{\circ}\text{C}$ ,该厂当时正处于扩建工程阶段。总体上来看,污水处理厂在春(2001/04/13, 2010/05/24, 2013/03/21)夏(1996/08/05)两季的热岛强度值要高于冬季(1995/12/09, 2003/12/15)。从污水处理厂所处的空间位置来看,位于吴江市、苏州市区和常熟市的污水处理厂通常比昆山市和张家港市的污水处理厂的热岛强度值平均值要高,尤其是吴江市的 WJ\_JQ,苏州工业区的 LJWTP 和苏州新区的 XQWTP。值得注意的是,位于苏州市区的三座污水处理厂(FXWTP, LJWTP, XQWTP)最高的热岛强度值恰巧与污水处理厂处于升级改造或建设阶段。参照表 3 中各污水处理厂的建设运行信息,研究发现在春季开展建设施工工程的污水处理厂的的热岛强度值通常都比较高,例如位于昆山市的 KSWTP,位于吴江市的 WJWTP,位于苏州市区的 FXWTP, LJWTP, XQWTP。这可能与施工建设过程中改变了土地覆盖,从而导致地表温度变化,而在气温较高的季节更是加重了热岛效应。

2.3 苏州市污水处理厂热岛强度的影响因素研究

对苏州市 11 座城市污水处理厂 1995 年 - 2013 年的 43 组热岛强度数据进行分析,统计特征值如表 4 所示。总体上来看,苏州市污水处理厂热岛强度主要分布在 1.26℃ ~ 12.6℃ 范围内。本文采用单样本 K - S 检验( Kolmogorov - Smirnov test) 对热岛强度数据进行处理,并分析正态分布性。但是,结果表明苏州市 11 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。

随后,本文采用 K 平均值快速聚类法( K - Means Cluster) 对苏州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 55.8% 的污水处理厂热岛强度值在 0.99℃ ~ 6.00℃ 之间,32.6% 的污水处理厂热岛强度值为 7.48℃ ~ 11.56℃,剩余 11.6% 的污水处理厂热岛强度值在 11.96℃ ~ 16.93℃。结果表明,苏州市 11 座城市污水处理厂 1995 年 - 2013 年的热岛强度值主要集中在 1℃ ~ 11℃ 之间,数据分布与正态分布相比右偏。

表 4 1995 年 - 2013 年苏州市 11 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(℃)	16.93	0.99	6.730 5	3.958 2	5.370 0	3.630 0	9.930 0

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。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) 以及季节( S)、城市地表温度、污水处理厂距离城市热岛中心距离(  $D_u$ )、污水处理厂距离太湖水体(  $D_w$ ) 等因素与污水处理厂热岛强度进行回归分析。在进行回归分析之前,首先需要将“是否处于建设施工状态”、“处理工艺”和“季节”这三种分类变量通过亚变量转换为连续变量。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  $D_u$  以及污水处理厂与太湖地理中心的距离  $D_w$ 。

本文利用 SPSS 统计软件对污水处理厂多元逐步回归模型来筛选,分析对污水处理厂热岛强度有影响的因素变量。通常多元逐步回归分析的目的是为了解每个解释变量对被解释变量的影响程度,当方程出现异方差性( F 检验),且影响了回归模型方程的准确性,就要将该变量剔除,而回归模型中的标准化偏回归系数可以用来比较各因素作用的相对重要性。一般来说,多元逐步回归分析有三种筛选自变量的方法:向后法( Backward),向前法( Forward),逐步法( Stepwise)。向后法通常是先建立一

个全自变量因素的回归模型,之后每次剔除一个偏回归平方和最小且统计学意义不显著的自变量,直到不能剔除为止;但是,这种筛选方法的计算量大,有时实现的可能性较小。向前法是回归模型最先只由一个自变量构成,每次引入一个偏回归平方和最大且统计学意义显著的自变量,直到没有具有统计显著性的自变量因素可以引入为止;而这种筛选方法有时建立的方程不够精简。逐步筛选法兼顾上述两种方法的优点,在向前引入一个新的自变量的同时都要重新对之前已选入的自变量进行检验,来评价这些已选入的自变量是否有继续保留在回归方程中的价值;因此,在逐步筛选法过程中引入和剔除交替进行,指导不具有统计显著性的新的自变量可以引入,同时也不具有统计显著性的自变量可以被剔除时为止。本文利用 SPSS 统计软件采用逐步法对城市污水处理厂热岛强度进行多元逐步回归分析。

如公式( 15) 所示,多元逐步回归分析的结果显示,城市地表平均温度  $T_u$ 、污水处理厂的施工建设状态 C 和主体处理工艺 P 是具有统计显著性的影响因素,即这三个自变量在回归方程中的系数 p 值小于 0.05。根据回归模型的方差分析结果发现,p 值小于 0.05,回归方程具有显著统计意义,且  $R^2 = 0.736$ ,多元线性回归的拟合度可以接受。如果要减弱苏州市污水处理厂的热岛强度  $WHII$ ,可以主要通过控制城市地表温度  $T_u$  或减缓城市热岛效应达到目的。除此之外,根据回归模型中有关分类变量 C

和P的转换原则,污水处理厂处于施工建设时的WHII要比处于运行时的WHII要高,而且选择氧化沟和SBR工艺的污水处理厂WHII要比A/O和A<sup>2</sup>/O的WHII要高。

$$WHII = -5.481 + 0.810T_u + 0.339C + 0.212P \quad (15)$$

其中,WHII = 城市污水处理厂热岛强度值,℃;

$T_u$  = 城市地表平均温度,℃;

C = 城市污水处理厂的施工建设状态;

P = 城市污水处理厂主体处理工艺。

### 3 结论

本文通过利用遥感图像 Landsat TM/ETM + 热红外数据对苏州地区城市污水处理厂对地区气候的影响进行了分析。首先,本文利用大气辐射传输方程法反演并获得地表温度,然后通过污水处理厂热岛强度 WHII 来分析评价污水处理厂的热岛效应水平,最后通过统计与回归分析初步尝试分析了影响污水处理厂热岛强度的几种因素。研究发现:

(1) 从1995年-2013年,苏州市11座城市污水处理厂的热岛强度值主要集中在1℃~11℃之间;期间,苏州城市热岛强度整体上增加了64%,污水处理厂热岛强度整体上增加了48%。

(2) 从时间维度上分析来看,苏州市污水处理厂热岛强度值较高的时间点也恰巧与污水处理厂施工建设或升级改造的时间节点相吻合。因此,本研究认为:污水处理厂的建设施工状态对热岛效应有所影响。

(3) 根据回归分析可知,苏州市污水处理厂的热岛强度 WHII 与城市地表平均温度  $T_u$ 、污水处理厂的施工建设状态 C 和主体处理工艺 P 具有显著正相关性。如果要减弱苏州市污水处理厂的热岛强度 WHII,可以主要通过控制城市地表温度  $T_u$  或减缓城市热岛效应达到目的。而污水处理厂处于施工建设时的 WHII 要比处于运行时的 WHII 要高,而且选择氧化沟和 SBR 工艺的污水处理厂 WHII 要比 A/O 和 A<sup>2</sup>/O 的 WHII 要高。

#### 参考文献:

[1] Patz, J. A.; Campbell - Lendrum, D.; Holloway, T.;

Foley, J. A. Impact of regional climate change on human health [J]. Nature 2005, 438: 310 - 317.

[2] Li, Q.; Zhang, H.; Liu, X.; Huang, J. Urban heat island effect on annual meantemperature during the last 50 years in China [J]. Theoretical and Applied Climatology 2004, 79: 165 - 174.

[3] Chen, X. - L.; Zhao, H. - M.; Li, P. - X.; Yin, Z. - Y. Remote sensing image - based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes [J]. Remote Sensing of Environment 2006, 104: 133 - 146.

[4] 朱焱, 朱连芳, 徐永明等. 基于 Landsat 卫星资料的苏州城市热岛效应遥感分析 [J]. 高原气象, 2010, 29(1): 244 - 250.

[5] 胡华浪, 陈云浩, 宫阿都. 城市热岛的遥感研究进展 [J]. 国土资源遥感 2005, 65(3): 5 - 13.

[6] 肖捷颖, 张倩, 王燕等. 基于能量平衡的城市热岛效应研究进展 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版) 2013, 30(4): 128 - 133.

[7] Li, Juan - juan; Wang, Xiang - rong; Wang, Xin - jun; Ma, Wei - chun; Zhang, Hao. Remote sensing evaluation of urban heat island and its spatial pattern of the Shanghai metropolitan area, China [J]. Ecological Complexity 2009, 6: 413 - 420.

[8] 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.

[9] 刘红, 张清海, 林绍霞等. 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] Mo, W.; Zhang, Q. Can municipal wastewater treatment systems be carbon neutral [J]. J. Environ. Manag, 2012 (112): 360 - 367.

[14] 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.

[15] 李莎, 宫飞蓬, 齐飞等. 污水生化处理过程中 N<sub>2</sub>O 的产生特征研究进展 [J]. 安全与环境学报 2012, 12(1): 75 - 80.