2007－2017 年夏冬季上海市内外圈层土地覆盖与地表温度的定量关系

张周逸林[1,3]，申广荣[1,2,3]，张婧颖[1,2]，杨伟才[4]

（1. 上海交通大学 农业与生物学院 低碳农业研究中心，上海 200240；2. 农业部都市农业重点实验室，上海 200240；3. 国家林业局 上海城市森林生态系统国家定位观测研究站，上海 200240；4. 上海聚隆生态科技有限公司，上海 200090）

摘　要：[目的] 探究超大型城市地表温度对不同土地利用类型的响应特征，为城市建设和规划设计提供科学参考。[方法] 以上海市为例，运用 2007，2013，2017 年夏冬季共 6 期 Landsat 系列多光谱及热红外影像数据，解译土地利用类型并反演地表温度，基于 900 m×900 m 网格分析了夏季和冬季上海市外环内外土地利用类型对地表温度影响特征。[结果] 夏季上海市地表温度空间特征为外环外冷内热，平均温差 4.86 ℃；冬季上海市地表温度空间特征为外环外热内冷，平均温差 0.17 ℃。夏季外环外非渗水地表比例每增加 10%可升温 1.22 ℃，外环内升温 0.97 ℃；绿地及水体与地表温度呈负相关，外环外绿地比例每增加10%可降温 1.01 ℃，外环内林地比例每增加 10%可降温 1.06 ℃；水体比例每增加 10%最大降温 0.85 ℃。[结论] 夏季绿地的降温效应在外环内大于水体而在外环外小于水体，水体在不同季节不同圈层降温效应均一稳定，上海市形成冷岛所需水体和绿地比例呈逐年降低趋势。

关键词：土地利用；地表温度；上海市；城市冷岛；降温效应

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2021)01-0088-09　　**中图分类号**：TP79，U412.1+4

文献参数：张周逸林，申广荣，张婧颖，等. 2007—2017 年夏冬季上海市内外圈层土地覆盖与地表温度的定量关系[J]. 水土保持通报，2021，41(1)：88-96. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.013；Zhangzhou Yilin，Shen Guangrong，Zhang Jingying，et al. Quantitative relationship between land cover and surface temperature inside and outside of Shanghai City in summer and winter during 2007—2017 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2021，41(1)：88-96.

Quantitative Relationship Between Land Cover and Surface Temperature Inside and Outside of Shanghai City in Summer and Winter During 2007－2017

Zhangzhou Yilin[1,3]，Shen Guangrong[1,2,3]，Zhang Jingying[1,2]，Yang Weicai[4]

（1. *Low Carbon Agriculture Research Center，College of Agriculture and Biology，Shanghai Jiaotong University，Shanghai* 200240，*China*；2. *Key Laboratory of Urban Agriculture，Ministry of Agriculture，Shanghai* 200240，*China*；3. *Shanghai Urban Forest Research Station of State Forestry Administration of China，Shanghai* 200240，*China*；4. *Shanghai Julong Ecological Technology Co.，Ltd.，Shanghai* 200090，*China*）

Abstract：[Objective] The response characteristics of surface temperature in superlarge cities to different land use types were studied to provide a scientific reference for urban construction，planning，and design. [Methods] Taking Shanghai City as an example，this study used six phases of Landsat series multispectral and thermal infrared image data in the summer and winter of 2007，2013，and 2017 to interpret land use types and retrieve land surface temperature. The characteristics of the influence of land use types inside and outside Waihuan Road in Shanghai City on land surface temperature in summer and winter based on a 900 m× 900 m grid were analyzed. [Results] The surface temperature of Shanghai City in summer was characterized by the average temperature inside Waihuan Road being higher than that outside Waihuan Road with a temperature difference of 4.86 ℃；In winter，the surface temperature of Shanghai City was characterized by the average temperature inside Waihuan Road being lower than that outside Waihuan Road with a temperature difference

收稿日期：2020-10-29　　**修回日期**：2020-11-06

资助项目：上海 2017 年度“科技创新行动计划”企业国际科技合作项目“绿地消减城市热岛效应监测评估技术与标准体系研究与应用”(17230732600)。

第一作者：张周逸林(1996—)，男(汉族)，四川省成都市人，硕士研究生，研究方向为农业高光谱遥感。Email：online711@sjtu.edu.cn。

通讯作者：申广荣(1964—)，女(汉族)，山西省太谷县人，博士，副教授，主要从事农业遥感研究。Email：sgrong@sjtu.edu.cn。

of 0.17 ℃. In the summer, every 10% increase in the proportion of nonpermeable land surface outside Waihuan Road increased the temperature by 1.22 ℃, and the temperature inside Waihuan Road can increase by 0.97 ℃. The green space and water area were negatively correlated with the surface temperature. Every 10% increase in the percentage of green land can reduce the temperature by 1.01 ℃ outside Waihuan Road, and every 10% increase in the proportion of woodland can reduce the temperature by 1.06 ℃ inside Waihuan Road. For every 10% increase in the water area, the average temperature drops by 0.85 ℃. [Conclusion] In the summer, the cooling effect of green space is greater than that of water area inside Waihuan Road and smaller than that of water outside Waihuan Road. The cooling effect of water area is uniform and stable in different seasons and in different districts. The proportion of water area and green land required to form the cold island in Shanghai City is decreasing yearly.

Keywords: land use; land surface temperature; Shanghai City; urban cold island; cooling effect

伴随着经济的发展,城市土地利用格局在城市化影响下快速变化,自然植被、耕地、水体等逐渐被建筑、道路等不透水地面取代[1-2],不同下垫面的辐射、热能转换、空气动力等条件不同,引发了城市地表热力学属性的变化[3],进而产生了城市"热岛效应"等生态环境后果。同时,在大尺度上城市白天存在着明显低于周围环境温度的"冷岛",即"冷岛效应"。因而,不同土地覆盖类型对地表温度的联合影响效应成为了人们关注的重要内容。

一般认为,城市中各类地物类型面积比与地表温度均具有一定的相关性,但差异性较大。其中,建筑用地、裸地与地表温度呈正相关,林地、水体与地表温度呈负相关[4]。水体和林地在缓解城市热岛效应方面作用十分显著,城市绿地包括草地、林地、乔灌草混交地能够减缓热岛效应,具有"冷岛效应"。不同的学者认为绿地和水体的冷岛效应强度不一致[5-6],不同月份绿地与水体的冷岛强度也出现不同[7],说明时间是影响冷岛作用的重要因素[8]。另外,城市土地覆盖及热环境有着明显的空间异质性特征,热岛和冷岛效应与土地覆盖密切相关。丁海勇等[9]发现 2000—2015 年 15 a 间南京市热岛强度逐年增强,市区温度明显高于郊区,且南京区域内存在多个热岛中心,均为城镇建筑区域或人类活动较为频繁的商业区居民区及工业区域。仇宽彪等[10]研究表明北京市区主要公园内地表温度(28.91 ℃)显著低于北京市五环内平均地表温度(30.67 ℃)。

近年来,国内外开展了大量关于城市地表热环境结构与地物特征的相关性分析研究[11-13]。许多研究认为随着与市中心距离的增加,地表温度平均值与不透水面密度正相关,与植被密度趋势负相关,城市中心绿地冷岛与郊区非渗水地面依然可以达到最大 5 ℃的温差,且不透水面对地表温度的增温效应大于植被的冷却效应,城市用地是影响中心城区热环境的决定因素[14-17]。Chen 等[18]基于福州市城市绿地空间变化对地表温度的影响研究发现,影响地表温度变化或有效缓解热岛效应的城市绿地面积阈值为 0.04 km^2。城市热场的空间格局变化与土地利用变化高度相关,增加湿地面积及减小景观斑块复杂性都可以缓解热岛效应[19-20]。

上海作为国内城市化程度最高、常住人口过千万的超大城市之一,从 1990 年开始上海城市热岛强度递增率达到 0.20～0.27 ℃/(10 a)[21]。上海市城市冷岛效应具有典型性,绿地平均降温幅度达到 2.63 ℃[22]然而,上海市不仅有高人口密度的中心城区,郊区的诸多卫星城以及农业生产聚落与中心城区的城市景观形成了鲜明对比。对于类似上海的超大型城市,其中心城区与郊区的(热)冷岛效应时空分布特征特别是土地利用对地表温度的响应特征还鲜见报道。本文以上海为例,选取 2007,2013 年和 2017 年夏季及冬季共 6 期 Landsat 系列多光谱及热红外影像数据,通过反演地表温度,分析解译中心城区及城郊土地利用信息,基于 ArcGIS 的 FishNet 工具构建的研究区矢量网格,深入分析城市内外圈层地表温度与土地利用类型之间的量化关系,探究地表温度对不同土地利用类型的响应特征,力求为城市建设和规划设计提供科学参考。

1　研究区及研究方法

1.1　研究区概况

上海市位于 120°51′—122°12′N,31°40′—31°53′E,全市总面积 6 340.5 km^2,其中外环内城区面积 680 km^2,外环外面积 5 660.5 km^2。2019 年末常住人口达到 2.43×10^7 人,城市化发展迅速,截至 2018 年上海市城镇化率已达到 88%,是中国城市化程度最高的城市。全市多年平均气温 15.2～15.7 ℃,最冷月(1 月)平均气温 4.8 ℃,最热月(7 月)平均气温 28.6 ℃。国土资源调查及第六次人口普查表明,截

至2010年上海市外环内外人口密度分别为1.68×10^4 人/km^2，1.90×10^3 人/km^2；上海市耕地、林地、草地等绿地比例达到47.32%，建设用地比例43.77%，未利用荒地比例0.44%，滩涂、河流、湖泊等水体比例8.48%。

1.2 数据来源及预处理

本文以10 a作为时间尺度，基于研究区天空云量和夏冬季节期限两项指标，选取成像质量相对完整的Landsat 5 TM(2007年2月2日、2007年7月28日)和2013年升空的Landsat 8 OLI/TIRS影像数据[23](2013年8月29日、2013年12月3日、2017年8月24日、2018年1月15日)解译提取研究区土地利用类型信息，并通过热红外通道数据反演地表温度。影像的成像时间均为上午10∶30左右，研究区上空云量均小于5%，数据质量良好，地物识别度较高。本研究在对获取的图像数据使用ENVI进行辐射校正、FLAASH大气校正后，应用单窗算法基于六期热红外波段分别反演生成同期城市地表温度信息。同时利用Landsat不同波段计算NDVI，NDBI，MNDWI并经过假彩色合成后通过非监督分类和人工目视修正得到6期土地利用类型数据。

为提高图像分类精度和土地利用信息提取的精确性，研究利用Google Earth Pro 7.3下载的2007，2013，2017年高分卫星影像，以及相关的土地利用资源调查矢量图等作为参考和解译的辅助信息。

1.3 地表温度反演

地表温度(land surface temperature，LST)反映的是传感器在卫星高度下探测到的地面热辐射强度所对应的温度，LST反演采用Qin等[24]的单窗算法，通过地表比辐射率、大气透过率、大气平均作用温度可以计算出地表温度。地表温度计算公式如下：

$$T_s=\{a(1-C-D)+[b(1-C-D)+C+D]T_{\text{sensor}}-DT_a\}/C \quad (1)$$

式中：T_s 为地表温度(K)；T_{sensor} 为辐射亮温；T_a 为大气平均作用温度(K)；T_0 为近地面气温(K)，可使用Landsat图像当日平均气温；τ 为大气透射率，可由NASA大气校正参数计算器获得(https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/)；ε 为地表比辐射率；$a=-67.3554$，$b=0.4586$。

利用普朗克公式将热辐射强度转化为像元亮度温度，其公式如下：

$$T_{\text{sensor}}=\frac{K_2}{\ln(K_1/L_\lambda+1)} \quad (2)$$

式中：T_{sensor} 表示像元亮温(K)；K_1，K_2 为常量，其中Landsat 5传感器 $K_1=607.76$ (W·m^2)/(sr·μm)，$K_2=1\ 260.56$ K；Landsat 8传感器 $K_1=774.89$ (W·m^2)/(sr·μm)，$K_2=1\ 321.08$ K。

归一化植被指数(NDVI)计算：

$$\text{NDVI}=(\text{NIR}-R)/(\text{NIR}+R) \quad (3)$$

式中：NIR为传感器近红外波段；R 为红外波段。

植被覆盖率计算：

$$p_v=(N_i-N_g)/(N_v-N_g) \quad (4)$$

式中：p_v 为植被覆盖度；N_i 为第 i 个像元的NDVI值；N_v 和 N_g 分别为研究区内植被和裸地的NDVI值，一般选取研究区内NDVI最大值作为 N_v，最小值作为 N_g。

1.4 土地利用信息提取

在中国《城市用地分类与规划建设用地标准》中将城市用地分为12大类：居住用地、公共设施用地、工业用地、仓储用地、对外交通用地、道路广场用地、市政用地、特殊用地、绿地、林地、水域、裸地。

本文根据研究重点，在参考《标准与分类准则》的基础上综合Landsat传感器分辨率及研究区中心城区(外环内)和城郊区(外环外)土地利用特点，将上海市外环内土地利用类型划分为水体、林地、草地、裸地、非渗水地面5类；将外环外区域农业用地与草地林地合并为绿地，把土地覆盖类型划分为水体、绿地、裸地、非渗水地面4类。

为更有效和精确地提取研究区土地利用类型信息，本研究借助ERDAS IMAGINE 2018对经过辐射校正和大气校正的图像首先分别计算对植被、建筑用地和水体敏感的归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index，NDVI)，归一化差异建筑指数(normalized differences built-up index，NDBI)和改进归一化差异水体指数(modified normalized difference water index，MNDWI)，然后以NDBI为红色、NDVI为绿色、MNDWI为蓝色进行RGB假彩色合成，最后采用非监督分类法(K-means)对合成的假彩色图像进行不同圈层的分类，同时借助高分辨率Google Earth电子地图和相关辅助信息进行人工目视修正获得研究区土地利用信息。

1.4.1 *归一化差异植被指数(NDVI)* 由于绿色植物在红光波段的强吸收和近红外波段的强反射光谱特性，利用这一点经过一系列数学变换得到的归一化植被指数，NDVI可以消除部分因太阳辐射、阴影及不同土壤背景产生的光谱误差，可以较好地提取区域植被信息，其公式如下：

$$\text{NDVI}=(\text{NIR}-R)/(\text{NIR}+R) \quad (5)$$

式中：NIR为近红外波段，即TM/OLI第4波段的亮度值；R 为红外波段，即TM/OLI的第3波段亮度值。

1.4.2　*归一化差异建筑指数*(NDBI)　基于建筑物在中红外波段具有较高光谱反射而在近红外波段反射降低的原理,NDBI 指数通常用于提取建筑信息,但建筑物在中红外及近红外波段反射差异不及植被和水体明显,在实际研究中不能单纯将 NDBI>0 作为提取建筑信息的依据,因为裸地、水体等信息会混杂其中。故提取建筑信息需要 NDBI 融合 NDVI 和 MNDWI 指数合成之后再进行信息提取,其公式如下:

$$NDBI=(MIR-NIR)/(MIR+NIR) \quad (6)$$

式中:MIR 为中红外波段即 TM/OLI 第 5 波段亮度值;NIR 为近红外波段即 TM/OLI 第 4 波段亮度值。

1.4.3　*改进归一化差异水体指数*(MNDWI)　改进的归一化差异水体指数是在归一化水体指数(NDWI)的基础上,将差异较小的近红外波段替换为差异更大的中红外波段之后得到的一种改进型指数,使得水体在 MNDWI 影像上亮度更高且其他地物亮度更低,其公式如下:

$$MNDWI=(Green-MIR)/(Green+MIR) \quad (7)$$

式中:Green 为绿光波段即 TM/OLI 第 2 波段亮度值;MIR 为中红外波段即 TM/OLI 第 5 波段亮度值。

1.5　不同地类对地表温度的影响

为了深入分析研究区土地利用与地表温度的定量关系,本研究利用 ArcGIS 10.0 软件,根据上海市行政区划图以及 Landsat TM/OLI 影像分辨率,生成研究区 900 m×900 m 单元的矢量网格,其中 881 个网格覆盖研究区外环内区域,8 484 个网格覆盖外环外区域。通过分区统计获得每个网格内地表温度平均值及每个网格内不同土地利用类型面积,进一步计算获得不同土地利用类型在网格中所占面积比例,最后借助 SAS 9.4 软件进行不同土地利用类型的面积比例与地表温度的相关性分析、一元线性回归及多元线性回归。

研究区地表温度等级划分标准根据公式(8)计算获得,并将地表温度划分为 7 类,根据此等级划分法确定热岛区域(极高温区、高温区、次高温区),中温区及冷岛区域(极低温区、低温区、次低温区)[25](表 1)。

$$T_i=\overline{T}\pm n\times s \quad (8)$$

式中:T_i 为不同等级温度阈值;$\overline{T}$ 为研究区地表温度平均值;s 为研究区地表温度方差;n 为方差的倍数。

表 1　城市地表温度等级划分

等　级	温度阈值
极高温区	$T_i>\overline{T}+2.5s$
高温区	$\overline{T}+1.5s<T_i\leqslant\overline{T}+2.5s$
次高温区	$\overline{T}+0.5s<T_i\leqslant\overline{T}+1.5s$
中温区	$\overline{T}-0.5s<T_i\leqslant\overline{T}+0.5s$
次低温区	$\overline{T}-1.5s<T_i\leqslant\overline{T}-0.5s$
低温区	$\overline{T}-2.5s<T_i\leqslant\overline{T}-1.5s$
极低温区	$T_i\leqslant\overline{T}-2.5s$

注:表中符号含义同公式(8)。

2　研究结果

2.1　上海地表温度及土地利用类型时空变化特征

基于不同年份 Landsat 卫星遥感数据反演计算获得研究区地表温度分布结果表明,上海市夏季和冬季外环内外具有典型的空间差异(图 1—2)。

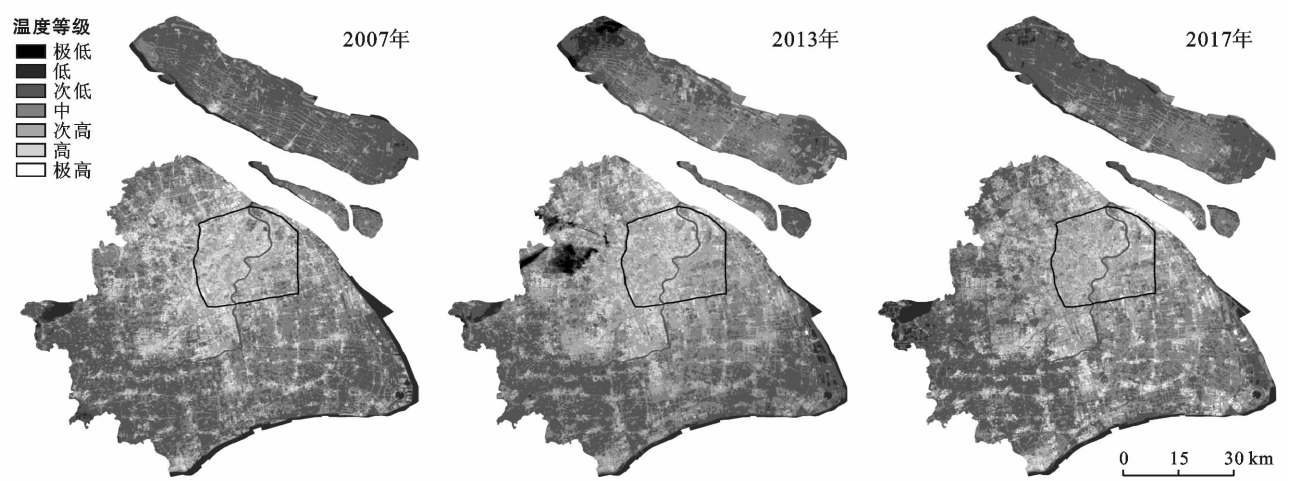


图 1　2007,2013,2017 年夏季上海市地表温度分布特征

如图 1 所示,夏季,2007,2013,2017 年 3 个年份上海市平均温度 29.97 ℃,外环内平均温度 34.39 ℃,外环外平均温度 29.53 ℃,外环内外平均温差达 4.86 ℃。3 个年份中,上海市外环内中心城区 5～7 成处于次

高温区，而外环外区域仅有 2 成处于次高温区，4 成左右处于中温区，还有 3 成左右处于次低温区。夏季地表温度空间特征为外冷内热。

研究区夏季地表温度分布特征与其地表覆盖类型密切相关。2007，2013，2017 年 3 个年份外环外城郊区域绿地比例平均为 53.58%，非渗水地表平均为 39.69%；外环内中心城区，3 个年份绿地平均比例为 16.77%，而非渗水地面积比例平均为 80.05%。时间尺度上，2007—2017 年上海市夏季地表温度总体上呈现下降趋势，夏季外环外区域和外环内中心城区地表温度分别由 2007 年的 32.1 ℃，37 ℃降低到 2017 年的 29.1 ℃和 33.5 ℃；外环内外温差由 2007 年的 4.91 ℃降到 2017 年的 4.39 ℃。其中外环外区域平均地表温度在 2007 到 2013 年间下降 4.76 ℃，而后到 2017 年升高 1.81 ℃。

相应地，外环外区域绿地比例由 2007 年的 59.84%降到了 2013 年的50.26%，而从 2013—2017 年绿地比例基本保持不变。类似地，上海市外环内中心区域平均地表温度从 2007 到 2013 年下降 4.38 ℃，到 2017 年又微增 0.91 ℃；相应地从 2007—2017 年外环内非渗水地面比例增加1.49%，林地及草地比例增加 5.58%。

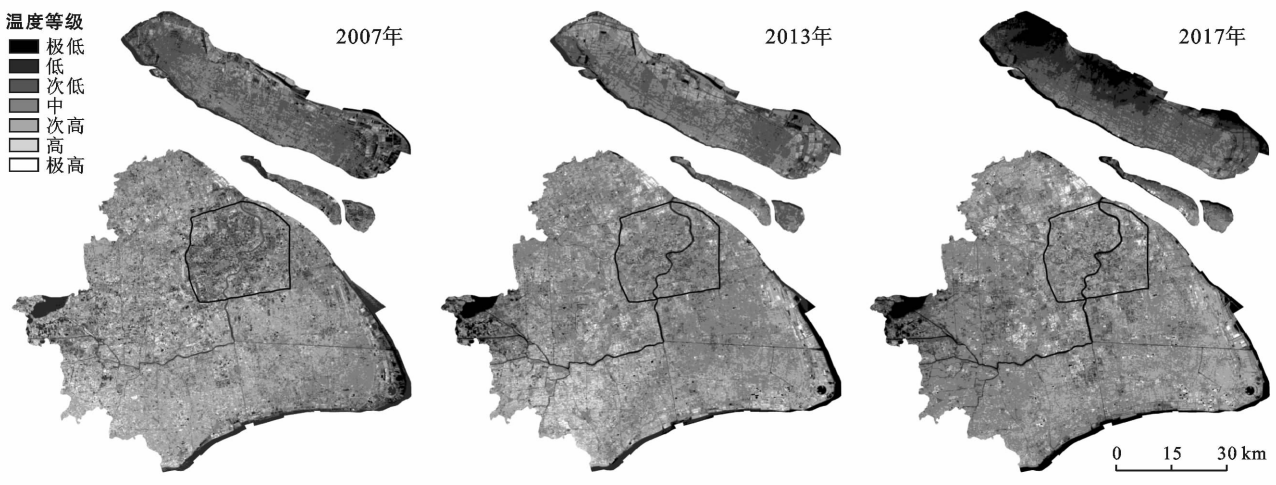


图 2 2007，2013，2017 年冬季上海市地表温度分布特征

如图 2 所示，冬季 2007，2013，2017 3 个年份上海市平均温度 13.21 ℃，外环内平均温度 13.05 ℃，外环外平均温度 13.23 ℃，外环内外温差较小。冬季上海市外环内中心城区近 7 成处于中温区，而外环外城郊区 40%～60%处于中温区，有 20%～30%左右面积处于次高温区，总体上地表温度空间特征为外热内冷。

研究区冬季地表覆盖类型分布特征为，3 个年份外环外城郊区域绿地比例平均 20.3%，裸地比例平均 23.56%，非渗水地面比例平均为 49.87%；外环内中心城区，3 个年份绿地平均比例为 10.72%，而非渗水地面积比例平均为 77.94%。时间尺度上，2007—2017 年上海市冬季地表温度总体上呈现上升趋势，冬季外环外区域和外环内中心城区地表温度分别由 2007 年的 7.84 ℃和 7.34 ℃升高到 2017 年的 14.74 ℃，14.82 ℃；不同年份中冬季外环内外温差均很小。

其中：冬季上海市外环外区域从 2007 到 2013 年地表温度急速上升 9.26 ℃，2013 到 2017 年又降低 2.36 ℃。同样地，外环内中心城区平均地表温度从 2007 到 2013 年升高 9.64 ℃，但到 2017 年又下降 2.16 ℃。3 个年份间，冬季上海市外环内外地表覆盖类型比例变化平缓。外环外区域非渗水地面比例从 2007 到 2017 增加了 15.92%，绿地比例则减少了 8.32%。外环内非渗水地面比例总体减少 5.67%，林地及草地比例总体增加 4.03%。

2.2 上海外环线内外冷岛效应相关因子分析

2.2.1 *土地利用类型比例与地表温度一元线性回归分析* 针对上海夏冬季地表温度和土地利用类型的变化特征，基于 2007—2017 年夏季冬季共 6 期遥感图像以及 900 m×900 m 单元的矢量网格，对地表温度与土地利用类型比例定量关系进行详细的分析。为排除单因子低比例时其他因子的影响，回归分析均剔除了低于 5%的土地覆盖比例数据。各土地利用类型比例与地表温度的相关性及一元线性回归分析显示，土地利用类型所占比例与地表温度的变化具有极显著相关性，其中绿地和水体与地表温度呈负相关，裸地和非渗水地面与地表温度呈正相关(图 3—4)。另外，在外环外城郊和外环内中心城区，绿地，草地以及非渗水地面的 k 值从 2007 到 2013 年变化均高于 2013—2017 时间段，这一变化趋势与对地表温度的变化趋势一致，也和不同用地类型所占比例的变化趋势

相同。夏季回归拟合度非渗水最大,R^2 为 0.7 左右,绿地与水体 R^2 均在 0.5～0.6 之间,表明夏季回归曲线中非渗水地面比例更贴近地表温度的变化,而绿地及水体的影响程度则低于非渗水地面。

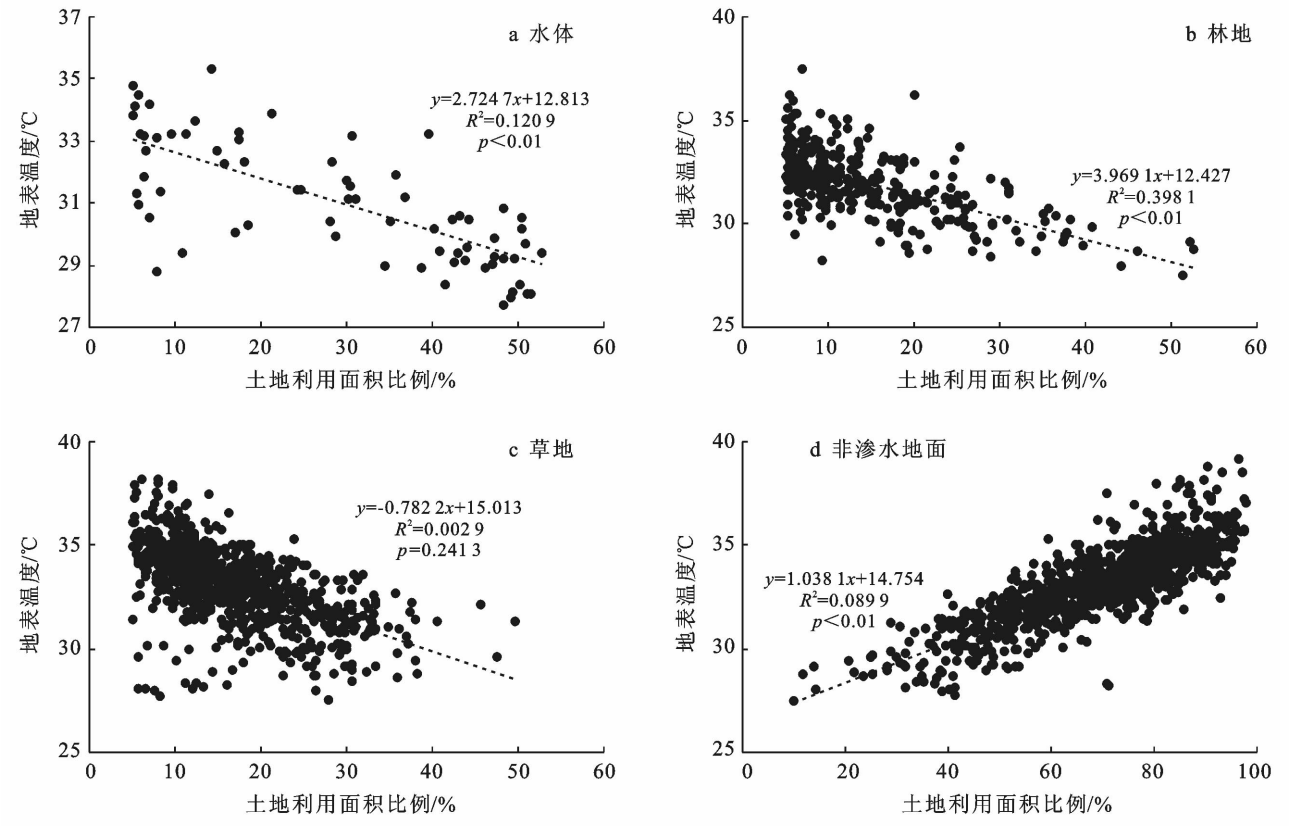


图 3　2017 年夏季上海市外环内外地表温度与土地利用面积比例

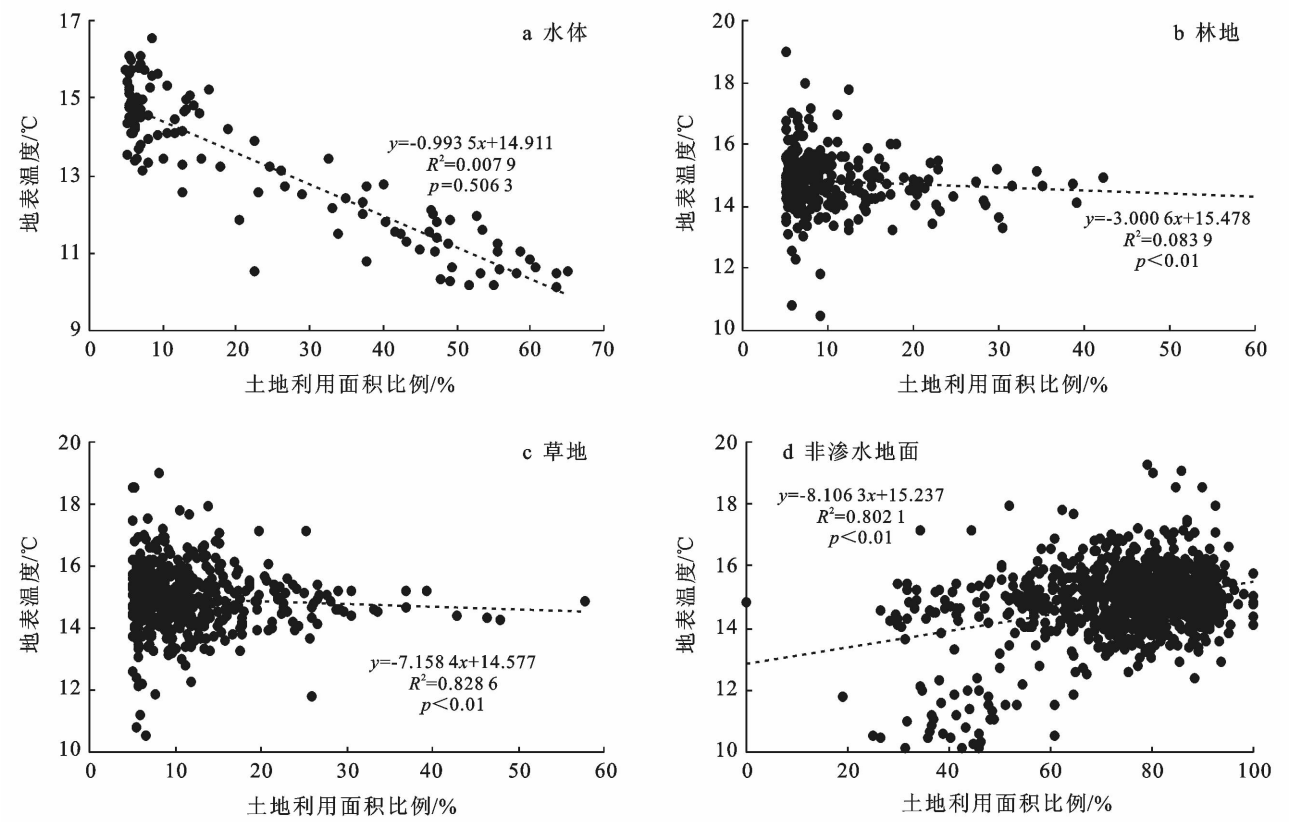


图 4　2017 年冬季上海市外环内外地表温度与土地利用面积比例

冬夏季上海市外环内外地表温度分布特征不同，其各土地利用类型比例对地表温度的影响特征也不相同。2007，2013，2017 年冬季上海市外环内外各地类一元回归曲线表明(图 4)，外环外区域和外环内中心城区水体 k 值分别为－3.39，－4.68，－7.16，外环内－0.52，－5.20，－8.16，3 个年份趋势相同，外环内外水体降温效应基本一致，总体比夏季低，但到 2017 年水体由弱冷源转变为强冷源，接近夏季的降温效应。外环外绿地 k 值 3 个年份分别为－2.79，－3.75，－3，绿地对冬季地表温度的影响较为稳定，为弱冷源；外环内林地 k 值分别为－3.47，－3.05，－0.99，降温效应呈缓慢减弱趋势；草地 k 值分别为 2.69，－1.56，－0.78，由弱热源转为弱冷源。外环外非渗水地面 k 值分别为 0.64，1.25，3.97，增温效应呈上升趋势；外环内非渗水地面 k 值分别为－1.81，1.50，2.72，由弱冷源转为弱热源。总体上，外环外各地类比例升温效应增加，外环内升温效应趋缓，与冬季上海外环外热外环内冷的分布特征一致。但从 3 个年份两个时间段看，2007—2013 年各用地类型比例对地表温度的影响如 k 值变化明显高于其值在 2013—2017 年的变化，这也与相同时期地表温度变化一致，并与其用地类型比例变化相关(图 2)。研究区夏冬季的一元回归分析均表明用地类型对地表温度的显著影响特征。冬季各地类一元线性回归 R^2 也与夏季产生明显区别；除水体外其余地类均未体现出较高拟合度，且仅有水体比例各像元与 LST 体现出线性相关。表明冬季 LST 受水体比例影响较大，而其他地类比例对 LST 的影响均较低。

2.2.2 土地利用与地表温度多元回归分析 不同土地利用类型对地表温度的一元线性回归分析了单一土地利用类型对地温的影响，为进一步揭示土地利用类型对地表温度的升高及降低产生的综合影响，研究利用 SAS 9.4 软件对上述网格样本数据进行基于逐步回归的多元线性回归分析，剔除不满足 0.05 显著性水平的影响因子，构建了 2007，2013，2017 年冬夏两季上海外环内外地表温度与各类土地利用类型比例的关系方程(表 2)。

多元回归结果(表 2)显示，夏季多元回归方程截距平均为外环内 28.89，外环外 25.21，由于截距反映了地表基础温度，表明夏季上海市基础地表温度外环内高于外环外，从一个角度解释了夏季地表温度外冷内热的空间特征(图 2)。非渗水地面(平均回归系数外环内 8.52，外环外 10.63)、裸地(平均回归系数外环内 5.75，外环外 8.14)起升温作用，总体上外环外升温效应高于外环内；但水体(平均回归系数外环内外均为－2)、绿地(平均回归系数外环内林地 2.21，草地－6.15，外环外－0.25)起降温作用，外环内降温效应更明显。相比外环内，夏季非渗水地面在外环外会使地表温度更快升高达 0.2 ℃/10%比例；裸地在外环外会使地表温度更快升高 0.3 ℃/10%比例。夏季多元回归部分结果中出现高系数裸地因子，但考虑到夏季上海市各像元中裸地比例均在 20%以内，因此在整个多元回归模型里实际贡献度有限。方程中非渗水地面回归系数均较高，反映出非渗水地面的升温作用较为明显。水体因子与非渗水因子在各年份多元回归结果中均有出现，表明水体和非渗水地面对地表温度的影响十分稳定，其中水体总体上体现为降温效应，非渗水地面总体上体现为升温效应，与一元线性回归结果一致。

表 2 2007，2013，2017 年上海市外环内外土地利用与 LST 多元回归方程

时 间	外环内	外环外
2007 夏	$LST=25.97+2.44X_{水}+5.48X_{林}+5.30X_{草}+17.36X_{裸}+12.05X_{非}$	$LST=31.53-6.55X_{水}-1.91X_{绿}+12.88X_{裸}+6.60X_{非}$
2013 夏	$LST=29.73-6.74X_{水}-6.15X_{草}+4.92X_{非}$	$LST=22.99-3.43X_{水}+11.54X_{裸}+9.70X_{非}$
2017 夏	$LST=27.36-4.10X_{水}-1.05X_{林}+8.60X_{非}$	$LST=21.10+3.93X_{水}+1.40X_{绿}+15.59X_{非}$
2007 冬	$LST=6.86-0.62X_{水}-2.97X_{林}+2.94X_{草}+5.74X_{裸}$	$LST=8.03-4.11X_{水}-1.82X_{绿}+2.17X_{裸}$
2013 冬	$LST=15.65-4.17X_{水}+3.92X_{裸}+1.58X_{非}$	$LST=17.78-6.39X_{水}-3.39X_{绿}+1.46X_{裸}$
2017 冬	$LST=13.89-6.76X_{水}+3.58X_{裸}+1.14X_{非}$	$LST=15.81-8.66X_{水}-2.90X_{绿}-0.16X_{非}$

冬季多元回归方程截距外环内 12.13，外环外13.87，表明上海市基础地表温度外环外高于外环内，和基于遥感数据反演计算的研究区冬季地表温度空间特征外热内冷(图 2)一致。冬季外环外相对更易降温，相比外环内，水体会使外环外温度下降更快 0.25 ℃/10%比例，绿地会使外环外温度加快下降 0.27 ℃/10%比例。外环内相对更易升温，相比外环外，裸地会使外环内温度上升更快，达 0.32 ℃/10%比例。水体因子在各年份冬季多元回归方程结果中均有出现，且回归系数均为所有因子中最小，表明冬季水体对地表温度的影响最为稳定，且总体上体现为降温效应。冬季各年份回归方程中裸地出现次数及回归系数均明显高于非渗水地面，表明冬季影响地温上升的主导因子为裸地，且裸地升温效应小于水体的降温效应。

总体上上海市外环内外地表温度夏季外冷内热、外热内冷的分布特征正是各类用地类型分布格局及其自身热效应的综合体现。

3　结论与讨论

本研究运用 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI/TIRS 数据,基于 900 m×900 m 单元的矢量网格详细分析了夏季和冬季上海市外环内外不同土地利用类型对地表温度的影响特征。

(1) 上海市夏冬季地表温度变化与土地利用类型比例紧密相关。夏季非渗水地面与地表温度的相关性最高,在外环外,非渗水地表比例每增加 10%可升温 1.24 ℃,外环内达升温 0.97 ℃。绿地及水体对地表温度呈负相关,外环内,林地比例每增加 10%可降温 1.29 ℃,外环外,绿地比例每增加 10%可降温 0.73 ℃;外环内外水体每增加 10%可降温平均为 0.85 ℃。夏季研究区土地利用类型对地表温度的影响程度为非渗水地面>裸地>水体>绿地。

冬季地表温度与水体相关性最高,其降温效应在外环内外平均为 0.80 ℃/10%比例;裸地的升温效应在外环内外平均为 0.43 ℃/10%比例。冬季土地利用类型对地表温度的影响程度外环内外综合为水体>裸地>绿地>非渗水地面。各土地利用类型夏冬季的热环境效应是进行科学合理的景观格局和土地利用规划,进而保证区域热环境质量的重要参考。

(2) 水体及绿地比例对夏冬季上海外环内外冷岛强度的影响不同。夏季形成城市冷岛的主导因素为绿地和水体,而冬季形成冷岛的主导因素为水体。但在不同季节外环内外绿地降温效应不同;夏季外环内林地、草地比例的回归系数均小于外环外绿地回归系数,表明外环内的绿地降温效应大于外环外;且夏季上海市绿地回归系数均小于水体回归系数,表明绿地(林地和草地)的降温效应高于水体。水体回归系数在冬夏季、外环内外基本相近,降温效应随年份推移逐渐增大。

研究区 2007,2013,2017 年夏季上海市外环外形成的次低温区中,水体比例分别为 28%,27%,25%,绿地比例则分别为 91%,78%,73%,夏季上海外环外形成次低温区所需水体和绿地比例呈降低趋势,同时也说明区域土地利用和景观格局等对形成低温区的重要作用。冬季水体对形成冷岛的贡献在上海外环内外也不相同;2007,2013,2017 年上海市外环外形成的冷岛中水体比例分别为 30%,29%,39%。外环内,2013,2017 年形成的冷岛中水体比例为 20%,27%。

(3) 地表因子信息的有效、准确提取是研究其地表温度关系的基础。本文采用与地表温度存在显著相关关系的 NDVI,NDBI 和 MNDWI 3 种指数叠加合成的假彩色图像,及其 900 m×900 m 单元的矢量网格为研究地表温度对不同用地类型比例的响应特征提供了重要支撑。但对植被覆盖度,以及 NDVI 与地表温度的季节性关系及其影响有待进一步深入研究。

与众多的 LST 和土地覆盖类型的相关研究相比,尽管不同研究所得出的相关性不尽相同,但在关键地类对 LST 的影响趋势上基本保持了一致,即非渗水地面主要导致 LST 升高而水体绿地主要导致 LST 降低。因此在城市规划建设中合理的保护、增加水体与绿地面积是缓解热岛效应的重要手段。通过由单一城市中心向多城市中心转变,实现多中心的城市格局;重视道路绿化建设,增加城市功能区中公园、绿地比例;守住城郊基本农田红线与自然水面,可以有效地降低热岛效应的影响范围和影响强度。

[参 考 文 献]

[1] Lazzarini M, Marpu P R, Ghedira H. Temperature-land cover interactions: The inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas [J]. Remote Sensing of Environment, 2013,130:136-152.

[2] Lu Dongmei, Song Kaishan, Zang Shuying, et al. The effect of urban expansion on urban surface temperature in Shenyang, China: An analysis with landsat imagery [J]. Environmental Modeling & Assessment, 2015,20(3):197-210.

[3] Sailor D J. Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetative cover [J]. Journal of Applied Meteorology, 1995,34(7):1694-1704.

[4] 梁保平,李晓宁. 城市 LUCC 时空格局对地表温度的影响效应研究:以广西柳州市为例[J]. 中国土地科学,2016,30(11):41-49.

[5] 曹璐,胡瀚文,孟宪磊,等. 城市地表温度与关键景观要素的关系[J]. 生态学杂志,2011,30(10):2329-2334.

[6] 徐涵秋. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析[J]. 生态学报,2011,31(14):3890-3901.

[7] 白杨,王敏,孟浩,等. 上海市快速城市化过程中地表温度与地表覆盖的关系研究[J]. 环境污染与防治,2013,35(6):49-54,77.

[8] 余兆武,郭青海,孙然好. 基于景观尺度的城市冷岛效应研究综述[J]. 应用生态学报,2015,26(2):636-642.

[9] 丁海勇,史恒畅. 基于 Landsat 数据的城市热岛变化分析:以南京市为例[J]. 安全与环境学报,2018,18(5):2033-2044.

[10] 仇宽彪,贾宝全,成军锋. 北京市五环内主要公园冷岛效应及其主要影响因素[J]. 生态学杂志,2017,36(7):

1984-1992.

[11] Tran D X, Pla F, Latorre-Carmona P, et al. Characterizing the relationship between land use land cover change and land surface temperature [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 124:119-132.

[12] Du Shihong, Xiong Ziqian, Wang Yichen, et al. Quantifying the multilevel effects of landscape composition and configuration on land surface temperature [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 178: 84-92.

[13] Peng Jian, Xie Pan, Liu Yanxu, et al. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region [J]. Remote Sensing of Environment, 2016,173:145-155.

[14] Lindén J. Nocturnal cool island in the Sahelian city of Ouagadougou, Burkina Faso [J]. International Journal of Climatology, 2011,31(4):605-620.

[15] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005,71(5):613-621.

[16] 刘璐,申广荣,吴裕,等.城市化进程中县域土地利用类型的转移特征及其对热环境的影响[J].水土保持通报,2019,39(6):260-266.

[17] 郑飞,张殿发,孙伟伟,等.基于 ASTER 遥感的杭州城市热/冷岛的景观特征分析[J].遥感技术与应用,2017,32(5):938-947.

[18] Chen Yanhong, Cai Yuanbin, Tong Chuan. Quantitative analysis of urban cold island effects on the evolution of green spaces in a coastal city: A case study of Fuzhou, China [J]. Environmental monitoring and assessment, 2019,191(2):121.

[19] Zhang Wei, Jiang Jingang, Zhu Yubin. Change in urban wetlands and their cold island effects in response to rapid urbanization [J]. Chinese Geographical Science, 2015,25(4):462-471.

[20] Shen Guangrong, Ibrahim A N, Wang Zijun, et al. Spatial-temporal land-use/land-cover dynamics and their impacts on surface temperature in Chongming Island of Shanghai, China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2015,36(15):4037-4053.

[21] 徐伟,杨涵洧,张仕鹏,等.上海城市热岛的变化特征[J].热带气象学报,2018,34(2):228-238.

[22] 杜红玉.特大型城市"蓝绿空间"冷岛效应及其影响因素研究[D].上海:华东师范大学,2018.

[23] 中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台[EB/OL](2007-02-02, 2007-07-28, 2013-08-29, 2013-12-03,2017-08-24,2018-01-15)[2020-10-29]. http://www.gscloud.cn

[24] Qin Zhihao, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region [J]. International journal of remote sensing, 2001,22(18):3719-3746.

[25] 程晨,蔡喆,闫维,等.基于 Landsat TM/ETM$^+$ 的天津城区及滨海新区热岛效应时空变化研究[J].自然资源学报,2010,25(10):1727-1737.

(上接第 87 页)

[16] 金立群,李希来,孙华方,等.不同恢复年限对高寒露天煤矿区渣山植被和土壤特性的影响[J].生态学杂志,2019,38(1):121-128.

[17] 王锐,李希来,张静,等.高寒矿区人工种草对露天排土场渣山表层基质的影响[J].草地学报,2019,27(4):938-948.

[18] 安福元,高志香,李希来,等.青海省木里江仓煤矿区高寒湿地腐殖质层的形成过程[J].水土保持通报,2019,39(2):1-9.

[19] 杨鑫光,李希来,金立群,等.短期恢复下高寒矿区煤矸石山土壤变化特征研究[J].草业学报,2018,27(8):30-38.

[20] 郭李凯.不同复垦年限煤矸山重构土壤养分和重金属污染状况研究[D].山西 临汾:山西师范大学,2017.

[21] 谷金锋.煤矿矸石山植被恢复机理研究:以鸡西市滴道矿区和城子河矿区为例[D].黑龙江 哈尔滨:东北林业大学,2004.

[22] 刘育红,魏卫东,杨元武,等.高寒草甸退化草地植被与土壤因子关系冗余分析[J].西北农业学报,2018,27(4):480-490.

[23] 潘瑞炽.植物生理学[M].6 版,北京:高等教育出版社,2008:28-33.

[24] 徐国策,李占斌,李鹏,等.丹江中游典型小流域土壤总氮的空间分布[J].地理学报,2012,67(11):1547-1555.

[25] 田应兵,熊明彪,宋光煜.若尔盖高原湿地生态恢复过程中土壤有机质的变化研究[J].湿地科学,2004,2(2):88-93.