

引用格式: 潘涛, 张弛, 杜国明, 等. 城乡不透水面增长格局及地表温度的响应特征研究[J]. 地球信息科学学报, 2016, 19(1): 134-142. [Pan T, Zhang C, Du G M, *et al.* 2017. Pattern of impervious surface change and its effect on land surface temperature in urban and rural areas. Journal of Geo-information Science, 19(1): 134-142. ] DOI:10.3724/SP.J.1047.2017.00134

# 城乡不透水面增长格局及地表温度的响应特征研究

潘涛<sup>1,3</sup>, 张弛<sup>1\*</sup>, 杜国明<sup>2</sup>, 董金玮<sup>4,5</sup>, 迟文峰<sup>5,6</sup>

1. 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 2. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. Departments of Microbiology and Plant Botany, Center for Spatial Analysis, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma 73019, USA; 5. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 6. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018

## Pattern of Impervious Surface Change and Its Effect on Land Surface Temperature in Urban and Rural Areas

PAN Tao<sup>1,3</sup>, ZHANG Chi<sup>1\*</sup>, DU Guoming<sup>2</sup>, DONG Jinwei<sup>4,5</sup> and CHI Wenfeng<sup>5,6</sup>

1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Departments of Microbiology and Plant Botany, Center for Spatial Analysis, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma 73019 USA; 5. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 6. Inner Mongolia Agricultural University, College of Desert Science and Engineering, Inner Mongolia Hohhot 010018, China

**Abstract:** As a big city in Northeast China, Harbin has experienced dramatic urban expansion in recent decades, followed with increased impervious surface area (ISA) and land surface temperature (LST) effects. In order to explore the relationship between ISA and LST under such a rapid urbanization process in urban and rural areas, based on the National Environmental Remote Sensing temporal resource information platform of land use/cover change (LUCC) data set, we extracted the construction land for urban and rural areas between 2001 and 2015. Combined with the end-member selection model for vegetation-impervious surface-soil (V-I-S) and the fully constrained least squares linear mixed pixel decomposition model, we extracted the impervious surface (a resolution of 15 m×15 m). The mono-window algorithm and Landsat images were used to retrieve the LST of Harbin City in the summer of 2001 and 2015. The results showed that: (1) ISA had increased by 163.96 km<sup>2</sup> and an expansion of 259.05 km<sup>2</sup> had occurred to the construction land, indicating an increase of 10.26% between 2001 and 2015; the proportions of ISA in construction land for urban and rural areas are 43.92% and 21.35% respectively in 2001, and 49.14% and 34.27% in 2015. The ratio of the poor had reduced from 22.57 to 14.87%, and the change of per unit construction land in the rural area is more sensitive. (2) The urban areas are dominated by inferior low temperature, medium temperature and inferior high temperature, with fast increasing speeds; while the rural areas are dominated by inferior low temperature and medium temperature, within which the inferior low

收稿日期 2016-01-25; 修回日期: 2016-05-05.

基金项目 国家自然科学基金项目(U1503301); 东北农业大学“学术骨干”项目(16XG07)。

作者简介 潘涛(1987-), 男, 黑龙江绥化人, 博士生, 研究方向为城市资源环境遥感、生态系统碳循环模拟。

E-mail: pantaohlj@163.com

\*通讯作者 张弛(1973-), 男, 湖北武汉人, 博导, 研究员, 研究方向为全球变化与生态系统碳循环模拟、城市生态系统模拟。E-mail: zc@ms.xjb.ac.cn

temperature and inferior high temperature have faster increasing speeds. (3) LST and ISA have a significant positive correlation, and the temperatures for the low, medium and high-density areas of ISA were raised up by 1.16, 1.45 and 1.79 °C respectively. Also, the temperature rose faster in the urban area than the rural area under the same coverage of ISA. In summary, the partitions of LST have severe changes, which are accompanied with substantial expansion of ISA, and the increase of LST is significant in response to the expansion of ISA.

**Key words:** impervious surface area; pattern; land surface temperature; urban and rural

**\*Corresponding author:** ZHANG Chi, E-mail: zc@ms.xjb.ac.cn

**摘要:** 为探究中国北方中温带,特别是东北寒区快速城市化地区城乡不透水增长格局及地表温度的响应特征,本文以哈尔滨市为例,基于国家资源环境遥感时空信息平台土地利用/覆盖变化(LUCC)数据集解译的2001年与2015年城乡建设用地和Landsat 7/8数字遥感影像,结合植被-不透水面-土壤(V-I-S)端元选取和完全约束最小二乘混合像元线性分解模型进行了不透水面提取(分辨率15 m×15 m),并运用单窗算法进行了夏季地表温度遥感反演。结果表明:2001-2015年建设用地扩张259.05 km<sup>2</sup>,不透水面上升163.96 km<sup>2</sup>,城市与乡村不透水面占各自建设用地的比例由2001年的43.92%、21.35%变化为2015年的49.14%、34.27%,城乡比例差由22.57%缩减至14.87%,单位建设用地内乡村不透水面增量较高;2001-2015年城区以低温区、中温区、高温区为主,对不透水面扩张的响应剧烈,而乡村以低温区和中温区为主,低温区和高温区响应剧烈;地表温度与不透水面具有显著正相关,在低、中、高不透水密度区分别升温1.16°、1.45和1.79 °C,相同不透水面盖度下城市升温高于乡村。总体而言,研究区不透水面大幅扩张,温度分区变化剧烈,地表温度随不透水面增加升温效果明显。

**关键词:** 不透水面;增长特征;地表温度;城乡地区

## 1 引言

21世纪以来,城市化与工业化的快速发展、人口规模的集聚增长,以及居民生活品味的不断提高导致了建设用地大幅增加。不透水面作为地表覆盖/土地利用结构特征的重要组分,随建设用地扩张不断上升,对地表辐射和能量的分配方式产生显著作用并受到广泛关注<sup>[1-2]</sup>。目前,不透水面已成为不同时空尺度下自然覆盖向人造地表转换并带来生态环境以及气候效应的重要指标<sup>[3]</sup>,对局地 and 区域地表径流、水体质量、能量平衡、生物多样性产生重要影响<sup>[4-5]</sup>;基于不透水面反照率小、热容量大、蒸发、蒸腾微弱的固有属性,其面积增加的直接表征是引发地球陆表温度上升<sup>[6]</sup>,而地表温度在大气下界与地表的物质与能量交换、局地洋流循环,气候变化等领域扮演重要角色<sup>[7-8]</sup>,尤其对近地面生态环境格局、水电能源消耗、居民人身健康带来的影响日益剧烈<sup>[9]</sup>。因此,明晰不透水面变化状况及地表温度的响应特征,实现区域生活、生产与生态空间的不透水面、绿地组分与结构的合理布局,有助于提高生态服务功能,改善人居环境质量。

随着高分辨率影像的发展和遥感处理技术的日趋成熟,基于遥感影像获取不透水面得到关注。继Ridd提出地表覆被组分模型(Vegetation-Impervious Surface-Soil, V-I-S),认为地表由除水体外的植

被、不透水面与土壤3种组分构成<sup>[10]</sup>。Wu和Murray运用LSMA(Linear Spectral Mixture Analysis)模型结合V-I-S模型获取了美国Columbus地区的亚像元不透水地表<sup>[11]</sup>。Lu等将中尺度空间分辨率影像混合像元成功分解<sup>[12]</sup>。刘珍环等从局地尺度进行了不透水面的提取<sup>[13]</sup>。因此,基于LSMA与V-I-S模型的结合使用能够有效、快速、便捷地获取不透水面。对于地表温度的陆面模拟,国内外学者在热红外遥感数据反演领域做了大量研究,并取得了一定的成果,其中单窗算法作为局地基于Landsat TM影像反演温度的技术手段,得到广泛应用<sup>[14]</sup>。

目前,基于Landsat影像,提取不透水面和定量反演地表温度并探究二者关系的研究不多。区域上,集中在深圳<sup>[15]</sup>、上海<sup>[16]</sup>、成都<sup>[17]</sup>以及北京<sup>[18]</sup>等地,对东北寒区关注较少;内容上,以阐述城区不透水面及其热效应为主,对城乡同步变化情形下的对比分析很少。尤其是21世纪以来,“新农村建设”积极稳妥推进,乡村加速生产发展,生活宽裕,乡风文明,村容整洁,加之“新型城镇化”的深入落实<sup>[19]</sup>,基础设施快速现代化背景下乡村不透水面的面积与结构发生显著变化。本文以哈尔滨城区及其边缘区为研究区,分析城乡不透水面随建设用地增加的动态特征,揭示城乡地表温度对不透水面扩张的响应差异,为东北乃至整个寒区城乡气候、生态和环境的研究提供参考,同时对促进城乡协调、和谐发展具有现实意义。

## 2 研究区概况

哈尔滨市位于中国东北寒区,黑龙江省中南部,地理坐标  $125^{\circ}42'11''\sim 130^{\circ}10'27''$  E、 $44^{\circ}04'34''\sim 46^{\circ}40'09''$  N,总面积为 5.38 万  $\text{km}^2$ 。本文研究范围界定为香坊区、南岗区、道里区、道外区、平房区、松北区 6 个市辖区,该地区包含建城区及周边乡村聚落,是该市城乡变化剧烈和不透水面扩张显著区域,区内常驻人口 453.25 万,实现国民生产总值 (GDP) 2666.7 亿元<sup>[20]</sup>。其属中温带大陆性季风气候,冬季漫长寒冷,夏季短暂凉快,春、秋季温度升降变化快,过渡性明显。基于“中国气象科学数据共享服务网数据”,研究区年均降水量 569.1 mm,降水集中在 6–9 月,降雪集中在 11 月至次年 1 月,最高月平均气温在夏季 7 月,为  $23^{\circ}\text{C}$ ,最低月平均气温在冬季 1 月,为零下  $21^{\circ}\text{C}$ <sup>[21–22]</sup>。境内河流以松花江水系和牡丹江水系为主,水资源呈现自产水偏少、过境水丰沛、时空分布不均、东富西贫的特点。

## 3 数据来源与分析方法

### 3.1 城乡建设用地的获取

研究区 2000 年土地数据来源于“国家资源环境遥感时空信息平台的土地利用/覆盖变化 (LUCC) 数据集”,该数据集地类一级类综合评价精度 94.3% 以上<sup>[23]</sup>。根据研究需要在 USGS 官网 (<http://glovis.usgs.gov/>) 获取 2001 年和 2015 年质量较好的影像,通过 ENVI 平台进行空间配准、波段融合 ( $15\text{ m}\times 15\text{ m}$ )、图像增强、裁剪等处理。采用“中国科学院土地利用变化地类代码分类系统”<sup>[24]</sup>,根据遥感影像的色彩、亮度、纹理等特征建立地类解译标志,以 2000 年数据为基准,基于 ArcGIS 平台进行人机交互式目视判读解译,获得 2001 年和 2015 年土地利用数据。通过地统计分析工具进行随机抽样,在野外用 GPS 进行实地地类验证,运用混淆矩阵 (confusion matrix) 将实地验证地类与解译地类综合一起进行精度评价,结果显示 2001 年和 2015 年研究区地类精度分别为 94.9%、95.2%,Kappa 系数分别为 0.795、0.803,并通过空间分析工具对城乡建设用地进行提取。

### 3.2 不透水面的获取

本文对不透水面提取的流程如图 1 所示。提取方法的改进有 3 点,分别为:

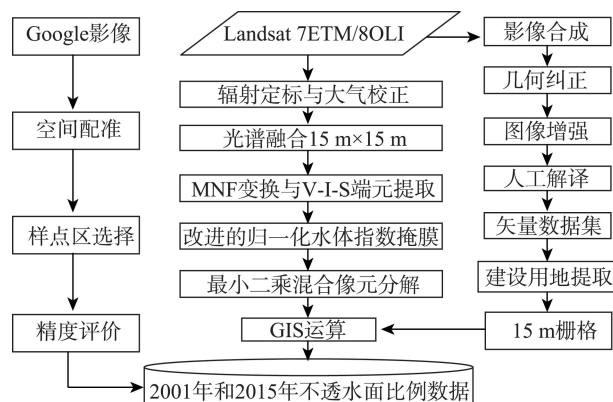


图1 不透水地表提取流程

Fig.1 Process of impervious surface extraction

(1)应用完全约束最小二乘混合像元分解模型 (FCLS Spectral Unmixing) 进行不透水面的线性分解,其优点是使得每个像元内每种端元的丰度图 DN 值范围在 0~1 之间,并且和为 1,精度较高<sup>[25]</sup>,公式如式(1)所示。

$$R_{i\lambda} = \sum_{k=1}^n f_{ki} C_{k\lambda} + \varepsilon_{i\lambda} \quad (1)$$

式中:  $R_{i\lambda}$  为第  $i$  个像元在波段  $\lambda$  上的反照率;  $f_{ki}$  为第  $k$  个基本组分在第  $i$  个像元中所占面积比例;  $C_{k\lambda}$  为第  $k$  个基本组分在波段  $\lambda$  上的反照率;  $\varepsilon_{i\lambda}$  为残差值。

(2)针对水体与低反照率具有显著的异物同谱特征,本文基于改进型的归一化水体指数 (MNDWI) 进行水体的提取<sup>[26]</sup>,水体掩膜阈值设为零。另外,研究区高程数值 (DEM) 介于 83~241 m 之间,为平原区,阴影对低反照率的影响可忽略不计。

(3)为得到空间分辨率为  $15\text{ m}\times 15\text{ m}$  高精度像元,端元选取前运用 Gram-Schmidt Spectral Sharpening 法将大气校正波段与 Landsat 高分辨率的全色灰度图像融合以创建高分辨率彩色影像。

本文采用精度为 0.5 m 的 2015 年 Google earth 影像进行数据验证,通过相关系数 ( $R^2$ ) 和均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 对不透水面进行精度评价。将  $15\text{ m}\times 15\text{ m}$  的不透水面与 Google earth 影像空间配准,按照 3 像元  $\times$  3 像元大小 ( $45\text{ m}\times 45\text{ m}$ ) 在不透水面中随机分层,选择其中的 150 个样本,在相同区域目视解译 Google earth 的不透水面作为实际数值,结果见图 2。

### 3.3 地表温度数据的获取

基于 USGS 官网 (<http://glovis.usgs.gov/>) 获得 2001 年 7 月 27 日、2015 年 7 月 18 日 Landsat 7/8 共 2 期影像。以这两天为中心,前后两天内天气状况均



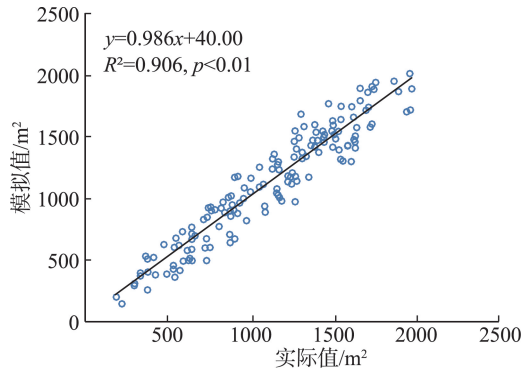


图2 不透水面实际值与模拟值拟合

Fig.2 Fitting of the actual value and the analog value of impervious surface area

为晴天、无风、气温接近,有利于降低系统误差,增加温度的可比性。本文采用单窗算法进行定量遥感反演<sup>[27]</sup>, Landsat 8 影像采用 TIRS 载荷的波段 10。波段 10 遥感参数做相应调整<sup>[28]</sup>,如式(2)所示。 $T_s=[a(1-C-D)+b(1-C-D)+C+D]T_a+DT_a]/C$  (2) 式中:  $T_s$  为地表温度;  $C=\varepsilon\tau$ ,  $D=(1-\tau)[1+(1-\varepsilon)\tau]$ ; 当温度变化范围为 0~70 °C 时,  $a=-67.355351$ ,  $b=0.458606$ ;  $T_a$  为大气平均作用温度,通过式(3)、(4)确定;  $\tau$  为大气透过率,通过式(5)、(6)确定;  $\varepsilon$  为地表比辐射率,通过式(7)确定<sup>[29]</sup>。

$$T'_a = 16.011 + 0.92621 \times T_0 \quad (\text{夏季}) \quad (3)$$

$$T_a = T'_a + 273.15 \quad (4)$$

$$\tau(w) = 0.982007 - 0.09611w, w \in (0.4, 1.6] \quad (5)$$

$$\tau(w) = 1.053710 - 0.14142w, w \in (1.6, 3.0) \quad (6)$$

$$\varepsilon = P_v \times R_v \times \varepsilon_v + (1 - P_v) \times R_m \times \varepsilon_m + d_e \quad (7)$$

式(3)中,  $T_0$  为近地面大气温度;式(4)、(6)中,  $w$

为水汽含量;式(7)中,  $R_v$ 、 $R_s$ 、 $R_m$  分别为植被、裸土、建筑的温度比率,  $d_e$  为修正值。

验证数据采用与反演影像时间间隔最近的卫星过境温度数据,气象站点 13 个,包括研究区内 3 个,周边 10 个,以使气象站点具有一定的离散特征,增加差值的准确度。基于 30 mDEM,结合 ANUSP-LIN 模型进行温度空间差值,裁剪研究区范围,随机选取 70 个样区进行相关性分析,结果见图 3。

本文采用温度等间距方法确定各个温度区间,划分为极低温区(<28 °C)、低温区[28 °C, 31 °C)、中温区[31 °C, 33 °C)、高温区[33 °C, 36 °C)、极高温区( $\geq 36$  °C)5 个区间。

## 4 结果分析

### 4.1 城乡不透水面时空格局分析

2001 年研究区不透水面积 156.22 km<sup>2</sup>, 占建设用地的比例为 34.85%, 其中,城市与乡村不透水面积 117.74 km<sup>2</sup>、38.48 km<sup>2</sup>, 分别占各自建设用地的比例为 43.92%、21.35%, 城市不透水比例明显大于乡村。

2003 年房地产成为国民经济的“重要支柱产业”,有力地推动混凝土结构建筑物的兴起;2006 年国家实施“村村通公路”工程,以沥青或水泥为路面的硬化道路在乡村地区大幅扩张;2009 年世界大学生冬运会在哈尔滨的主办使得基础设施得到完善、建设水平得到大幅提升,城乡基础设施快速现代化背景下的不透水面大面积增长;到 2015 年,不透水面积增加 163.96 km<sup>2</sup>, 达到 320.19 km<sup>2</sup>, 在建设用地

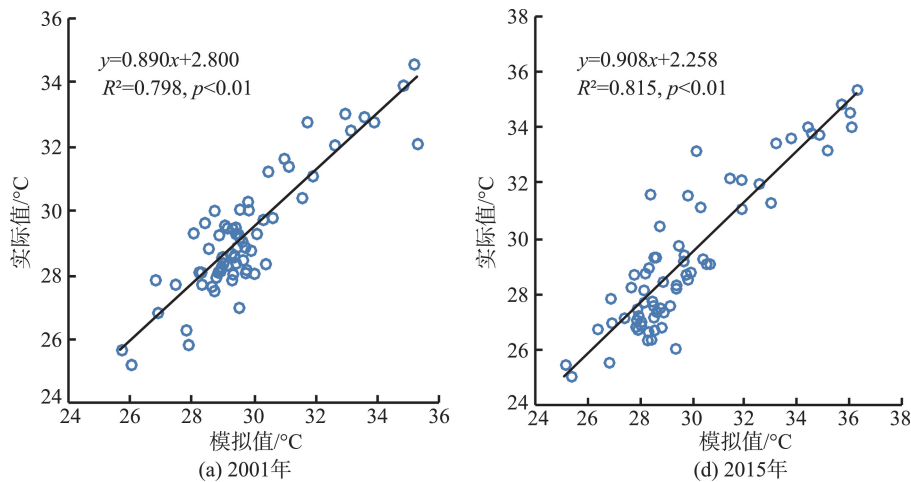


图3 地表温度实际值与模拟值拟合

Fig.3 Fitting of the actual value and the analog value of land surface temperature



的比例增幅 10.26%。其中,城市、乡村分别增加 136.45 km<sup>2</sup>、27.51 km<sup>2</sup>,在建设用地的比例增幅为 5.22%、12.92%。呈现出城市与乡村不透水面均上升的同步变化情形,城市与乡村不透水面占建设用地的比例差值在缩小,单位建设用地内乡村不透水面增量较高。

2001–2015 年受“一江居中”、“两岸繁荣”、“北越”、“南拓”、“中兴”的城市空间发展战略影响,城区发展具有方向性,不透水面空间格局随之扩张。目前,城市不透水面呈现出南拓至平房区,北越过松花江到达松北区,东展至道里区中部,西推至道外区中东部的空间格局(图 4)。在城区基础设施完善的中部地区和周边的工厂集聚区域,不透水面比例得到明显提升。乡村地区除城区周边村庄因城市发展而消失外,乡村聚落外部路网建设导致不透水

面“线状”密度增多,长度增加,聚落内部房屋以旧翻新、拆倒重盖、批地新建、庭院路面硬化,小工业作坊的发展增加了不透水面的面积,呈现出聚落内部不透水面得到填充并由核心向外围扩展的趋势。

#### 4.2 城乡温度分区变化特征分析

以 2 期不透水面为掩膜数据源,掩掉建设用地内没有不透水面的区域,获得基于不透水下垫面的地表温度分区信息,探究 2001–2015 年不透水面的扩张对各温度分区的影响(图 5)。2001 年城市温度以低温区、中温区、高温区为主,总面积 215.33 km<sup>2</sup>,其中,中温区面积最多,为 101.45 km<sup>2</sup>,而极高温区和极低温区面积较小,仅为 1.69 km<sup>2</sup>。到 2015 年各区面积具有同向变化特征,低温区、中温区、高温区分别增加 71.90、33.36 和 95.55 km<sup>2</sup>,总面积达到

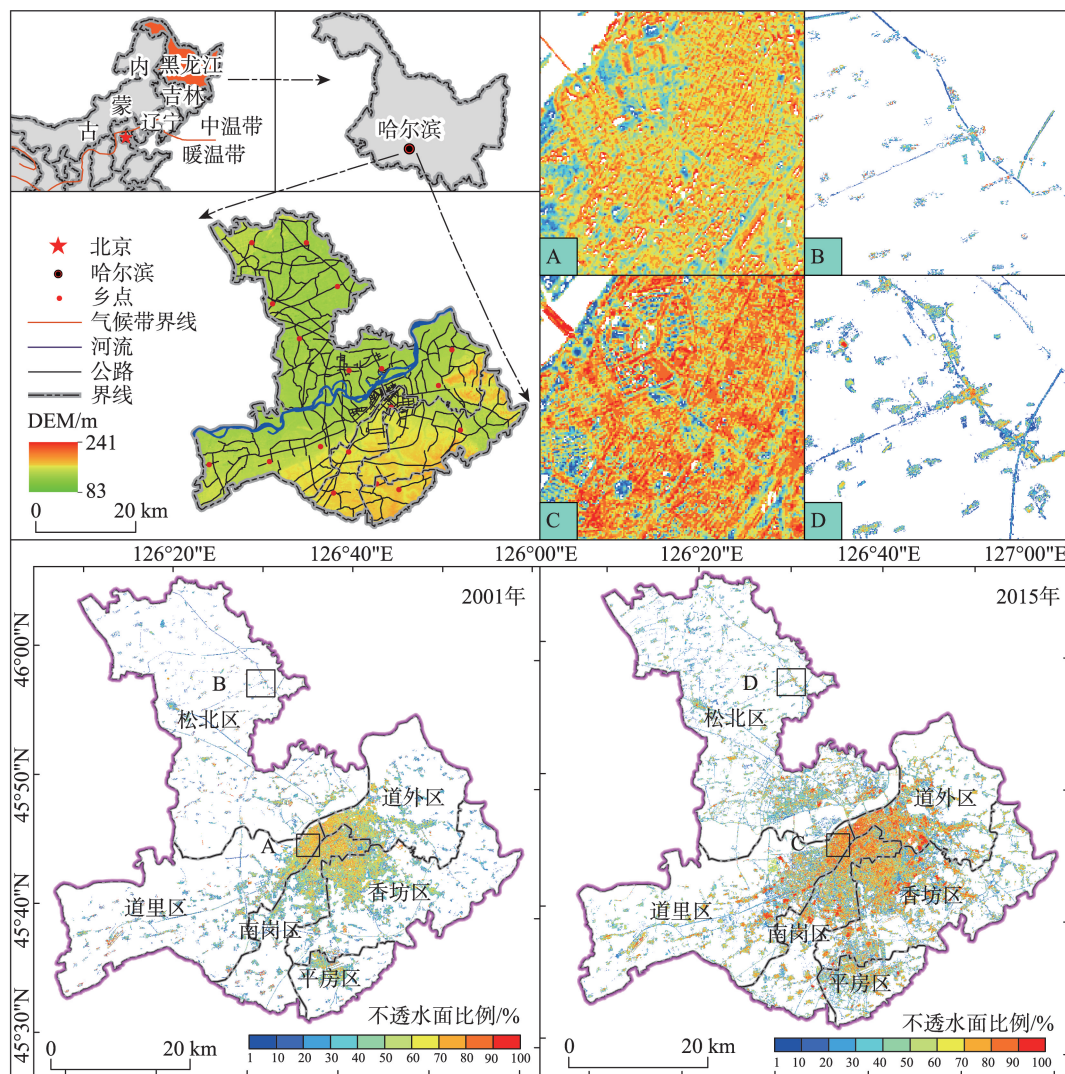


图 4 2001 年和 2015 年不透水地表百分比空间信息

Fig.4 Spatial information for the percentage of impervious surface land in 2001 and 2015

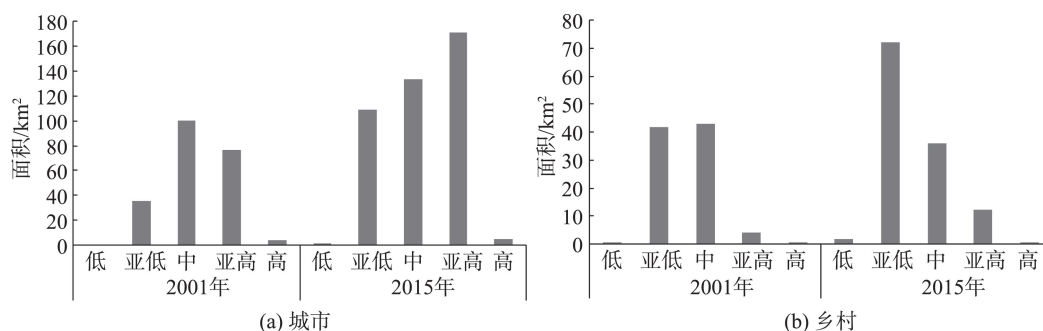


图5 温度分区的面积变化信息

Fig.5 The changing information of temperature partition

416.14 km<sup>2</sup>, 扩张明显, 而极高温区和极低温区仅增加 2.88 km<sup>2</sup>, 微幅上升。2001–2015 年低温区、中温区、高温区对不透水面扩张的响应较为剧烈, 有利地促进了城市地表温度的上升。

2001 年乡村地表温度以中温区、低温区为主, 总面积 88.76 km<sup>2</sup>, 极低温区 and 高温区仅占 4.01 km<sup>2</sup>, 而极高温区面积为 0。到 2015 年, 各区面积具有异向变化特征, 低温区增加 29.59 km<sup>2</sup>, 源于乡村路网建设引发增温和道路两侧护林带的阴影、蒸腾引发降温的综合作用。高温区增加 8.30 km<sup>2</sup>, 源于乡村聚落不透水面密度的进一步上升和小型工厂的建设。极低温区增加 1.95 km<sup>2</sup>, 集中在聚落内建设用地密度较低区域。2015 年乡村地区出现极高温区, 面积为 0.01 km<sup>2</sup>, 主要分布在建设用地集聚区域, 而中温区面积则降低 6.54 km<sup>2</sup>, 由于该区域建设用地密度增大, 地表温度上升, 部分进入高温区。2001–2015 年低温区和高温区对不透水面扩张的响应明显, 对乡村地区温度变化的贡献多。

#### 4.3 城乡不透水面与温度定量回归分析

一般而言, 探究 ISA 与 LST 回归关系的模型以

线性和指数为主, 基于本文数据, 指数模型在同样显著水平下, 具有更高的  $R^2$  (图 6), 表明指数模型能更科学地刻画 ISA 与 LST 的关系。

图 7 显示 LST 随 ISA 增加的升温状况。总体而言, LST 呈现随着 ISA 盖度的增加而升高的趋势: 在 ISA < 30% 区域 (低 ISA 密度区), 其面积每增加 10% 时 LST 平均增加 1.16℃; 在 30% < ISA < 70% 区域 (中 ISA 密度区), 其面积值每增加 10%, LST 平均增加 1.45℃; 而在 ISA > 70% 区域 (高 ISA 密度区), 其面积每增加 0.1, LST 平均增加 1.79℃。这表明 ISA 对 LST 的贡献度随密度的增加呈现加速上升趋势。这是因为 ISA 与蒸腾蒸发之间具有显著的负相关, 且在低 ISA 盖度地区减小的幅度要大于高 ISA 盖度地区, 导致高 ISA 盖度区的热量更多地以显热的形式出现, 使得 LST 的上升要快于低 ISA 面盖度区。在低、中、高密度 ISA 区, ISA 密度每增加 10%, 城市增温 1.24、1.50 和 1.82℃, 乡村增温 0.90、1.31 和 1.54℃。在 ISA 盖度相同情况下, 城市具有更高的地表温度, 这是因为城市内部 ISA 盖度大, 植被和水体覆盖度小, 蒸腾蒸发作用较弱, 热量主要以显热形式交换且伴有聚合效应。而乡村地区 ISA 盖

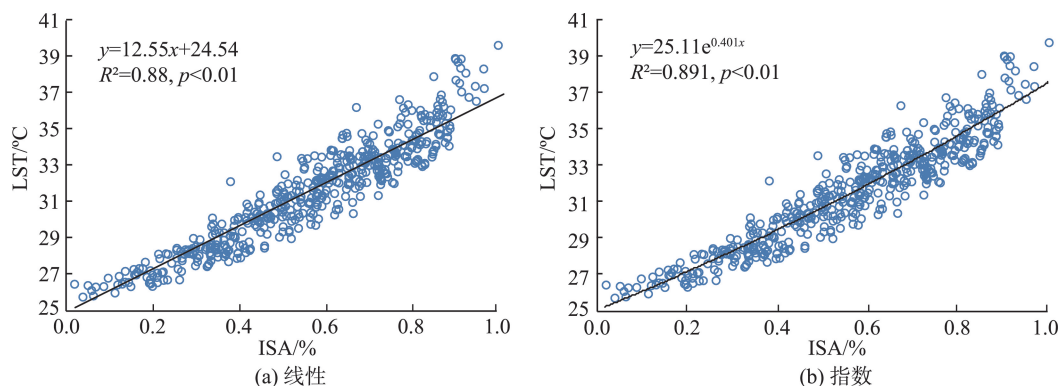


图6 不透水面和地表温度的线性与指数函数回归方程

Fig.6 Equations of the linear and index functions for LST and ISA

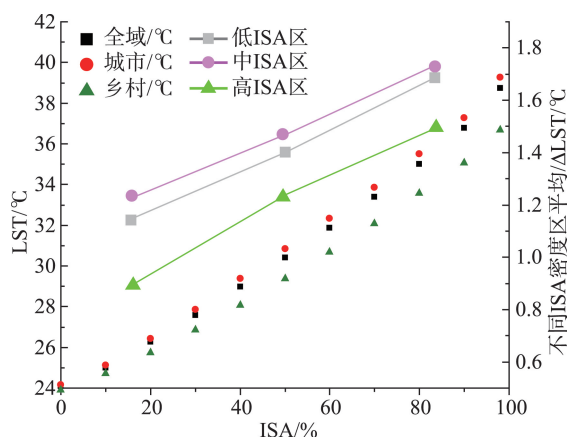


图7 地表温度随不透水比例增加的升温状况

Fig.7 The response of LST with respect to the proportion increase of ISA

度小,植被覆盖度大,蒸腾作用较强,热量更多以潜热形式交换。

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

本文在城市化、新型城镇化、新农村建设等背景下开展东北寒区快速城市化地区城乡不透水面增长格局及地表温度的响应特征研究,结论如下:

(1)基于不透水面时空信息:2001–2015年研究区建设用地增加259.05 km<sup>2</sup>,不透水面上升163.96 km<sup>2</sup>。城市与乡村不透水面占各自建设用地的比例由2001年的43.92%、21.35%变化为2015年的49.14%、34.27%,城乡比例差由22.57%缩减至14.87%,单位建设用地内乡村不透水面增量较高;城市不透水面空间变化格局与“北越”、“南拓”、“中兴”的城市空间发展战略相一致,乡村不透水面表现出聚落内部填充、聚落外部路网建设,空间格局由核心向外围扩展的趋势,城市与乡村聚落结构均发生明显变化。

(2)基于温度分区变化信息:2001–2015年城市始终以低温区、中温区、高温区为主,对不透水面扩张的响应剧烈,而极高温区和极低温区面积微幅上升;乡村各区面积具有异向变化特征,低温区增加最多,其次为高温区、极低温区、极高温区,而中温区面积微幅降低,其中低温区和高温区面积增加较多,对不透水面扩张的响应明显。

(3)基于ISA与LST的定量关系信息:LST随ISA盖度增加呈现加速上升趋势,在低、中、高ISA密度区分别升温1.16、1.45和1.79 °C;相同ISA盖度

下城市升温效果高于乡村,源于城市热量主要以显热形式交换且伴有聚合效应,乡村地区热量更多以潜热交换。

### 5.2 讨论

本文研究发现,ISA面积增量城市大于乡村,但乡村ISA面积扩张仍十分明显且对建设用地的响应程度大于城市。目前,乡村聚落间分布着大量网状连接的各等级公路,乡村聚落内道路铺设和房屋新建等使ISA密度增加,乡村ISA面积比过去大幅增长。相比于广泛分布的乡村聚落和道路,城市占地面积较大但孤立存在。随着中国经济的快速发展,会进一步推进城市ISA扩张<sup>[30]</sup>。与此同时,乡村路网设施建设基本完毕,部分聚落已出现空心化现象,“撤村并点”逐步落实<sup>[31]</sup>,乡村聚落结构(不透水面结构)将进一步发生明显变化,因此,在快速经济发展条件下城市与乡村ISA空间变化格局需受到持续关注。

由于影像分辨率的限制,本文对乡村建设用地中道路的提取以国道、省道等里程长、路面宽的高等级公路为主,对宽度介于3.5~4.0 m之间连接于乡村聚落的低等级道路的提取并不完整,未能阐述乡村道路与居民点聚落对乡村ISA增长的贡献率。而高分辨率影像的发展(如SPOT<sup>[32]</sup>、IKONOS<sup>[33]</sup>等),有助于更加精确地进行ISA的提取,厘清乡村道路和居民点聚落的ISA对建设用地的响应特征。另外,由于ISA年内变化微弱,本文基于夏季来探究LST与ISA的定量关系,而东北寒区春、夏、秋、冬四季LST变化明显,因此开展基于ISA下垫面的城乡LST季节性变化规律分析将成为新的关注点。

### 参考文献(References):

- [1] Li B C. Problems of municipal ecological environment and the sustainable development in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006,20(2):1-6.
- [2] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use[J]. Science, 2005,309:570-574.
- [3] Kuang W H, Liu J Y, Zhang Z X, et al. Spatiotemporal dynamics of impervious surface areas across China during the early 21<sup>st</sup> century[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(14):1691-1701.
- [4] Montgomery M R. The urban transformation of the developing world[J]. Science, 2008,319:761-764.
- [5] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global



- change and the ecology of cities[J]. *Science*, 2008,319: 756-760.
- [6] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003,86:370-384.
- [7] 刘越,迟文峰,匡文慧.基于地表通量特征的城市不透水表面定量热红外遥感反演[J].*地球信息科学学报*,2014,16(4):609-620. [Liu Y, Chi W F, Kuang W H. The surface flux characteristics based quantitative thermal infrared remote sensing inversion of urban impervious surfaces [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2014,16(4):609-620. ]
- [8] Voogt J A. Urban heat island[A]. In: Ian Douglas (ed.). *Encyclopedia of global environmental change*[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2002:660-666.
- [9] Stathopoulou M, Cartalis C. Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation[M]. *Remote Sensing of Environment*, 2009,113(12):2592-2605.
- [10] Ridd M K. Exploring a V-I-S (Vegetation-Impervious Surface-Soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing comparative anatomy for cities[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995,16(12):2165-2185.
- [11] Wu C S, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003,84:493-505.
- [12] Lu D, Weng Q. Extraction of urban impervious surface from an IKONOS image[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009,30(5):1297-1311.
- [13] 刘珍环,王仰麟,彭建.不透水表面遥感监测及其应用研究进展[J].*地理科学进展*,2010,29(9):1143-1152. [Liu Z H, Wang Y L, Peng J. Remote sensing of impervious surface and its applications: a review[J]. *Progress in Geography*, 2010,29(9):1143-1152. ]
- [14] Qin Z H, Li W, Zhang M, et al. Method for estimating the principal atmospheric parameters of mono-window algorithm[J]. *Remote Sensing for Land and Resource*, 2003,56(2):37-43.
- [15] 刘珍环,王仰麟,彭建.深圳市不透水表面的遥感监测与时空格局[J].*地理研究*,2012,31(8):1535-1545. [Liu H Z, Wang Y L, Peng J. Quantifying spatiotemporal patterns dynamics of impervious surface in Shenzhen[J]. *Geographical Research*, 2012,31(8):1535-1545. ]
- [16] 王敏,孟浩,白杨,等.上海市土地利用空间格局与地表温度关系研究[J].*生态环境学报*,2013,22(2):343-350. [Wang M, Meng H, Bai Y, et al. Relationships between landscapes spatial pattern and land surface temperature in Shanghai[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(2):343-350. ]
- [17] 彭文甫,张东辉,何政伟,等.成都市地表温度对不透水面的响应研究[J].*遥感信息*,2010(2):98-102. [Peng W F, Zhang D H, He Z W, et al. Study on response of urban surface temperature to impervious surface area in the city Chengdu[J]. *Remote Sensing Information*, 2010,2:98-102. ]
- [18] 徐永明,刘勇洪.基于TM影像的北京市热环境及其与不透水面的关系研究[J].*生态环境学报*,2013,22(4):639-643. [Xu Y H, Liu Y Y. Study on the thermal environment and its relationship with impervious surface in Beijing city using TM image[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013,22(4):639-643. ]
- [19] 陆大道,陈明星.关于“国家新型城镇化规划(2014-2020)”编制大背景的几点认识[J].*地理学报*,2015,70(2):179-185. [Lu D D, Chen M X. Several viewpoints on the background of compiling the "National New Urbanization Planning (2014-2020)"[J]. *Geographica Sinica*, 2015, 70(2):179-185. ]
- [20] 哈尔滨市统计局,国家统计局哈尔滨调查队.2014年哈尔滨市国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. <http://www.harbin.gov.cn/info/news/index/detail/412865.htm>, 2015-08-06. [Harbin Statistics Bureau, NBS Survey Office in Harbin. Statistical communiqué of Harbin city on the 2014 national economic and social development[EB/OL]. <http://www.harbin.gov.cn/info/news/index/detail/412865.htm>, 2015-08-06. ]
- [21] 王永波,张治,周秀杰.哈尔滨气温的长期变化及基本态特征[J].*高原气象*,2012(2):492-497. [Wang Y B, Zhang Z, Zhou X J. Characteristics of secular change and base state of temperature in Harbin[J]. *Plateau Meteorology*, 2012,2:492-497. ]
- [22] 崔琳琳.哈尔滨市近50年降水变化规律分析[J].*水利科技与经济*,2014(2):101-102,104. [Cui L L. The variational characteristics and trend prediction of temperature in Harbin past 50 years[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014,2:101-102,104. ]
- [23] Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010,20(4):483-494.
- [24] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等.20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J].*地理学报*, 2014,69(1):3-14. [Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. *Geographica Sinica*, 2014,69(1):3-14. ]
- [25] Weng Q, Lu D. A sub-pixel analysis of urbanization effect

- on land surface temperature and its interplay with impervious surface and vegetation coverage in Indianapolis, United States[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*, 2008,10(1):68-83.
- [26] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005(5):589-595. [ Xu H Q. A study on information extraction of water body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005,5:589-595. ]
- [27] Qin Z, 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.
- [28] Jiang D L, Kuang H H, Cao X F, et al. Study of land surface temperature retrieval based on Landsat8 - with the sample of Dian chi Lake Basin[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015,30(3):448-454.
- [29] Kuang W H, Dou Y Y, Zhang C, et al. Quantifying the heat flux regulation of metropolitan land use/land cover components by coupling remote sensing modeling with in situ measurement[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014,10(2):113-130.
- [30] 房艳刚,刘继生. 基于多功能理论的中国乡村发展多元化探讨——超越“现代化”发展范式[J]. *地理学报*, 2015,70(2):257-270. [ Fang Y G, Liu J S. Diversified agriculture and rural development in China based on multifunction theory: Beyond modernization paradigm[J]. *Geographica Sinica*, 2015,70(2):257-270. ]
- [31] 杜国明,刘彦随. 黑龙江省垦区居民点体系优化分析——以建三江管理局为例[J]. *中国土地科学*, 2015(4):65-71, 97. [ Du G M, Liu Y S. Analyzing optimization of settlement system in the reclamation region of Heilongjiang Province: A case study of Jiansanjiang authority[J]. *China Land Sciences*, 2015,4:65-71,97. ]
- [32] Deguchi C, Sugio S. Estimations for percentage of impervious area by the use of satellite remote sensing imagery [J]. *Water Science Technology*, 1994,29:135-144.
- [33] 陈爽,张秀英,彭立华. 基于高分辨卫星影像的城市用地不透水率分析[J]. *资源科学*, 2006,28(2):41-46. [ Chen S, Zhang X Y, Peng L H. Impervious surface coverage in urban land use based on high resolution satellite images[J]. *Resources Science*, 2006,28(2):41-46. ]