

引用格式:梁立,李鑫杨,刘庆生,等.基于多源遥感与地形信息的北极城镇用地信息提取[J].地球信息科学学报,2019,21(6):969-982. [ Liang L, Li X Y, Liu Q S, et al. Extraction of Arctic urban land use information based on multi-source remote sensing and topograph[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(6):969-982. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180536

# 基于多源遥感与地形信息的北极城镇用地信息提取

梁立<sup>1,2</sup>, 李鑫杨<sup>3</sup>, 刘庆生<sup>1\*</sup>, 刘高焕<sup>1</sup>, 黄翀<sup>1</sup>, 李贺<sup>1</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 内蒙古赤峰气象局, 赤峰 024000

## Extraction of Arctic Urban Land Use Information based on Multi-source Remote Sensing and Topograph

LIANG Li<sup>1,2</sup>, LI Xinyang<sup>3</sup>, LIU Qingsheng<sup>1\*</sup>, LIU Gaohuan<sup>1</sup>, HUANG Chong<sup>1</sup>, LI He<sup>1</sup>

1. State Key Lab of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Weather bureau of Chifeng, Chifeng 024000, China

**Abstract:** As climate warms up and ice melts, the Arctic is drawing much more attention. It is undeniable that Arctic urban spatial information is critical for studying, understanding, and exploring the Arctic. Due to the special geographical situation, Arctic urban extraction has unique difficulties such as urban fragmentation and confusion with bare mountains. To overcome the problems of extracting Arctic urban, multi-source data including Landsat, DMSP/OLS, and ASTER-GDEM2 were used. Spectral features, texture features, nighttime light features, and topographic features were obtained after feature extraction. Apart from that, the AdaBoost algorithm was used to extract the urban areas at 1990, 2004 and 2016. To clearly and more completely understand the function of each feature, we divided features into four different groups, and compared their differences. The result shows that, adding terrain features or nighttime lighting features can improve the extraction accuracy, and that the combination of spectrum, texture, terrain, and nighttime lighting is the optimal combination of features. The overall accuracy (OA) and kappa values based on spectral and texture features are 86.20% and 0.68, respectively. After adding terrain feature, the accuracy increased by 2.7% (OA) and 6.21% (kappa) respectively. When only adding nighttime lighting feature, OA increased by 2.1% and kappa 0.50. The best result was reached when we added terrain feature and nighttime lighting simultaneously. In this case, the overall accuracy and kappa increased by 3.7% and 8.55%, respectively. So, it is the optimal combination of features. After identifying the optimal feature combination, the maximum likelihood method was used to extract urban areas to prove the effectiveness of the AdaBoost algorithm. Experiment results show that, with the optimal feature combination, extraction based on AdaBoost has its OA and kappa value 10% and 20% higher respectively than those by the maximum likelihood method. Finally, the urban expansion was analyzed. The intensity of the urban expansion in

收稿日期:2018-10-22;修回日期:2019-01-24.

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC1402701)、国家自然科学基金项目(41801354)。[ **Foundation items:** National Key Research and Development Program of China, No.2016YFC1402701; National Natural Science Foundation of China, No.41801354. ]

作者简介:梁立(1994-),男,河南漯河人,硕士,研究方向为遥感和地理信息系统应用。E-mail: liangl.16s@igsrr.ac.cn

\*通讯作者:刘庆生(1971-),男,山西忻州人,副研究员,主要从事遥感与地理信息系统在资源环境评价中的应用研究。

E-mail: liuqs@lreis.ac.cn

the study area is around  $4.4 \times 10^{-3}$  from 1990 to 2004 and this number is  $4.5 \times 10^{-3}$  from 2004 to 2016, which can be interpreted as slow expansion. The average level of expansion is 0.018, 1/2 of the global average. The urban expansion level between 1990 and 2004 is higher than that between 2004 and 2016. The difference in the dynamics during 1990-2004 and during 2004-2016 indicates that the study area is currently transitioning from a high-speed development period to a stable development period. Given the warming of the Arctic and the growing of population, Arctic urban is expected to continue expanding slowly.

**Key words:** AdaBoost algorithm; landsat; DMSP/OLS; DEM; urban extraction; Tromsø; Arctic town

**\*Corresponding author:** LIU Qingsheng, E-mail: liuqs@lreis.ac.cn

**摘要:** 北极城镇空间信息对于研究北极,认识北极,利用北极都有重要意义。本文以北极圈内的城市特罗姆瑟为例,使用 Landsat 影像、DMSP/OLS 夜间灯光、ASTER-GDEM2 数据,通过特征提取得到属于光谱特征、纹理特征、夜间灯光特征、地形特征等 18 个特征,识别最优特征组合后基于 AdaBoost 算法提取 1990、2004、2016 年研究区的城镇用地,并将提取结果与最大似然法进行了对比,在此基础上进行了扩张分析。研究结果表明:引入地形与夜间灯光特征都可以在光谱纹理特征的基础上提高提取精度。基于光谱与纹理特征得到的总体精度与 kappa 值分别为 86.20% 和 0.68;加入地形特征后精度分别提高 2.70% (OA) 和 6.21% (kappa);加入夜间灯光特征后精度分别提高 2.10% 和 0.50;加入地形与夜间灯光特征精度分别提高 3.70% 和 8.55%,因此光谱、纹理、地形与夜间灯光的组合是最优特征组合。通过最优特征组合进行 AdaBoost 城镇提取,比最大似然法对城镇的两分类总体精度高 10% 左右、kappa 值高 20% 左右。计算结果显示,研究区城镇扩张强度为  $5.5 \times 10^{-4}$  左右,属于缓慢扩张;扩张的平均动态度水平为 0.018,是全球水平(0.0325)的一半左右;2004-2016 年的动态度水平低于 1990-2004 年的动态度水平,说明研究区目前由高速发展期向平稳发展期过渡。

**关键词:** 机器学习; Landsat; DMSP/OLS 夜间灯光; DEM; 城镇提取; 特罗姆瑟; 北极城镇

## 1 引言

近年来北极的地位在世界舞台上呈上升态势,自 2013 年北极理事会通过中国成为正式观察员国,中国参与北极治理的前景更加广阔。北极环境可持续发展与北极城镇密不可分,如何准确、客观地提取城镇信息是城镇研究的基础。目前,遥感数据成像方式多样化,数据可获取性增强,由此衍生以下科学问题:怎样利用多源遥感数据的优势提取北极地区的城镇信息? 北极地区的城镇近 30 年来是怎样发展变化的?

从影像来源方面,用于城镇提取的影像按空间分辨率可分为 3 类:高分辨率影像(QuickBird、IKONOS、SPOT);中分辨率影像(Landsat、Terra、ASTER);低分辨率影像(MODIS、AVHRR、DMSP-OLS)<sup>[1]</sup>。根据使用数据源的种类情况可分为:①单一类型影像提取,如 Schöttker 等<sup>[2]</sup>利用三期 TM 数据对德国威斯特伐利亚地区进行 40 年的城市发展变化遥感监测;Watanabe 等<sup>[3]</sup>基于 SAR 图像用 fmaX-filter 方法进行了城镇提取;②多源数据提取。多源数据包括了不同传感器、分辨率数据的融合使用,与单一影像相比,利用多源数据图像提高了图像信息的丰富度,可以使提取精度更高<sup>[4-5]</sup>。

从城镇提取方法上来看,目前常用的城镇提取方法有:谱间关系法、基于几何、形态学的提取方法、面向对象方法、基于亚像元的方法、基于机器学习的方法。谱间关系法通过分析图像光谱特征建立模型指标,并以此为阈值来提取城镇信息,如徐涵秋、查勇等分别提出了不透水面指数 NDISI<sup>[6]</sup>、遥感建筑用地指数 IBI<sup>[7]</sup>、归一化城镇指数 NDBI<sup>[8]</sup>。虽然专题指数的易用性较强,但是在阈值选取时,操作起来比较烦琐和困难,不够客观,并且普适性很差,仅适用于城镇密集的发达地区。基于几何、形态学的提取方法,比如通过纹理的参数化、滤波、形态学重建等方法来实现城镇的提取。付乾坤等<sup>[9]</sup>基于形态学白帽重建计算形态学建筑物指数进行城市建筑物提取。该方法通常作为辅助手段配合其他方法使用以得到更高精度的结果。面向对象方法是以影像中的对象为单位,利用对象的光谱信息、形状特征和邻近关系特征来对地物进行分类提取<sup>[10]</sup>,如 Qiu 等<sup>[11]</sup>基于面向对象的方法进行高分辨率城镇用地分类。面向对象方法适用于高分辨率城镇提取,可以在一定程度上克服常常伴随基于像元分类的“椒盐”现象,但分割尺度对城镇分类效果影响较大。基于亚像元的方法,其将混合像元分解为不同的端元,通过获取端元组份所占的比例来实现不透

水面的提取。现有的研究包括回归模型<sup>[12-13]</sup>与光谱混合模型<sup>[14]</sup>。亚像元的方法虽然在一定程度上减少了混合像元对不透水面提取造成的信息损失,但是往往会低估不透水面指数较低的地区,高估不透水面指数较高的地区<sup>[15]</sup>。基于机器学习的方法(如支持向量机、最大似然法、AdaBoost等方法)有先验知识依托,比传统的非监督分类算法更具针对性,但是过于依赖训练区的选择。

虽然前人对城镇的提取已经有了诸多有益研究,但却很少有人关注存在于北极这个特殊地区的城镇。与发达区域城镇提取相比,北极城镇的提取主要存在以下3个难点:①相比于发达区域的大型城镇,北极城镇的建城区面积十分小,且城镇形态十分不规则,这限制了面向对象方法在北极城镇提取方面的使用;②以往学者们在进行城镇提取时往往选择夏季影像,因为夏季影像中植被的丰度高有利于弱化裸露土壤对城镇提取的干扰。但北极地区的特殊性在于,秋冬季节山上有大范围的雪被覆盖,春夏季节在鲜有植被覆盖一些山脊和山顶处,融雪后反而显现出了土壤与裸岩,这部分信息北极城镇遥感提取带来难度;③北极城镇的破碎化特征,北极地广人稀,拥有大片可支配的土地,因此几乎在每个大型的北极城镇周围都会零星的分布数个小型的村落,再加上裸岩与裸地的干扰使得更难准确的提取到北极城镇。针对以上几个北极城镇提取的难点,本文在前人有关城镇提取研究的基础上,提出了将多源数据与机器学习方法相结合的北极城镇提取方法,尝试克服北极城镇难以准确提取的难题。

## 2 研究区概况、数据源及预处理

### 2.1 研究区概况

特罗姆瑟(Tromsø),是挪威芬马克郡首府,是挪威北部最大城市、海港。北极圈内第三大城市,2016年1月的常住人口约有73 480人。特罗姆瑟城区主要分布在挪威海特罗姆瑟海峡两旁的克瓦尔岛和特罗姆瑟岛上,形状不规则,由于海峡的阻隔形成了明显的两部分城区。其城郊地区包括克瓦尔岛西部和特罗姆瑟东部大陆部分,城郊区居民点沿山谷和海岸零星分布。特罗姆瑟周围遍布高山和峡湾是典型的冰川峡湾地貌,周围的海岸类型以基岩质海岸为主,有一些砂砾质海岸分布。特罗姆瑟的城镇分布特征囊括了北极城镇提取的难点,且与其他北极城市相比数据内容详实,是研究北极城镇发展变化的代表性区域(图1)。

城镇聚落的实体是由密集人口、建筑物和设施等组成的建成区,市和镇的总称叫城镇。鉴于目前世界上没有统一的城镇定义与未获得特罗姆瑟明确的城镇范围,本文的城镇定义为特罗姆瑟建筑用地与居民点所在区域,选定的研究区是以特罗姆瑟岛(Tromsøya)为中心的特罗姆瑟人口聚集区,地理位置为18°38' E-19°45' E,69°54' N-69°28' N(图1),该区域聚集了特罗姆瑟70%以上的人口,面积969 km<sup>2</sup>,平均高程257.9 m,属于副极地气候。

### 2.2 数据源与预处理

#### 2.2.1 基础数据

(1)Landsat 数据。排除极夜、雪被覆盖和云遮挡的影响,筛选出质量最高的3幅影像(1990年7

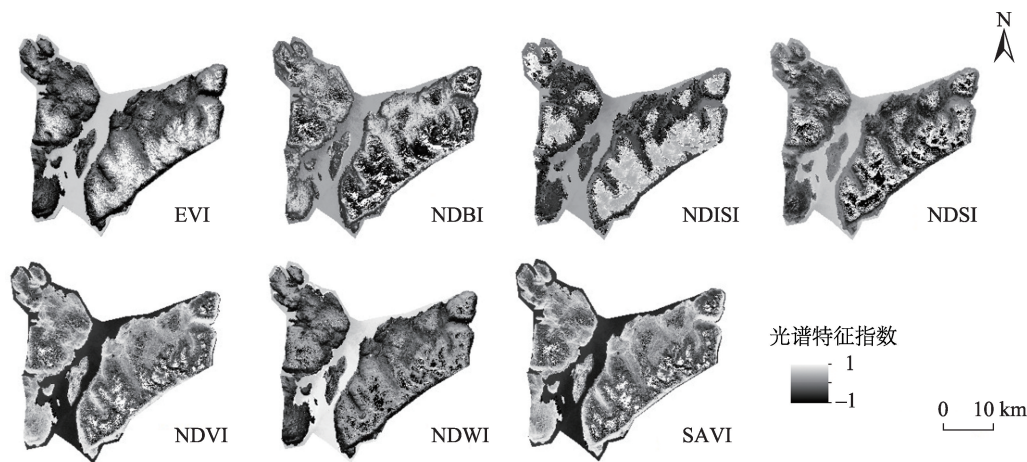


图1 光谱特征指数(以2016年为例)  
Fig. 1 Spectral indices (the case of 2016)



月20日,Landsat5 TM;2004年6月24日,Landsat5 TM;2016年6月21日,Landsat8 OLI)。对3幅影像进行几何校正、辐射定标和大气校正等预处理操作后作为城镇提取的基础影像。

(2)DMSP夜间灯光数据<sup>①</sup>。美国军事气象卫星DMSP(the Defense Meteorological Satellite Program)是美国空军和导弹系统中心运行的国防部(Department of Defense,DoD)计划,国家地球物理数据中心(National Geophysical Data Center,NGDC)制作了一系列DMSP夜间灯光的年度无云时间序列数据。其中,avg\_vis波段包含了可见光波段数字值的平均值,数据值范围从0~63,捕捉了城市、交通以及其他聚居点的稳定灯光,无云覆盖,空间分辨率为 $0.008\ 333^{\circ}$ ( $\approx 1\text{ km}$ ),且去掉了偶然噪声,如火光和云的影响<sup>[16]</sup>。根据现有的数据存档情况,本文选用1993年的F101993来代表研究区1990年夜间灯光情况;用2013年的F182013代替2016年的夜间灯光情况。

(3)ASTER-GDEM2数字高程数据<sup>②</sup>。美国国家航空航天局和日本国际贸易与工业部生产的ASTER GDEM V2于2011年10月17日发布,采用了一种先进的算法对V1版GDEM影像进行了改进,空间分辨率为30 m,覆盖南北纬 $75^{\circ}$ 以内的范围。

### 2.2.2 数据预处理与样点采集

采用生成随机点的方式,采集研究区2%的像元点作为训练样本,并采集与训练样本不重叠的1000个点作为测试样本。综合Landsat影像和Google Earth高清影像的参考信息,判断出是否为城镇类别并赋予属性值(1城镇,-1非城镇),3期数据的样本信息如表1所示。

在数据预处理方面,首先统一数据投影,由于1990年和2004年的Landsat数据具有相同的投影WGS\_84\_UTM\_Zone\_33N,所以将2016年的数据进行投影转换;然后将3个年份的Landsat、DMSP、

ASTER-GDEM2数据以1990年为基准进行空间校正,使得格网信息相匹配;再在GDAL中将所有Landsat的3期数据统一为int16的数据类型,便于进行后续的光谱与纹理计算;最后用选定的研究区边界将3期Landsat数据、DMSP数据与ASTER-GDEM2数据进行裁剪。

### 2.2.3 特征提取

(1)光谱特征。除了利用常用的几种城镇提取指数之外,考虑到研究区属于北极地区,海拔较高的山顶区域有雪覆盖,利用归一化积雪指数(NDSI)区别雪被与城镇;Konstantinov等<sup>[17]</sup>曾经对4个北极城市摩尔曼斯克、诺尔里斯克、阿帕季特、沃尔库塔的热岛效应进行研究,发现这些城市中心与远郊的温差高达 $5\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,说明北极地区城镇与其周边的非城镇地类温度存在较大差异,考虑使用与温度密切相关的归一化差值不透水面指数(NDISI)将城镇提取与温度结合起来,与归一化建筑指数(NDBI)和其他光谱指数相补充作为识别城镇的光谱特征指标(表2和图2)。

(2)纹理特征。纹理特征是描述在图像中呈现反复性规律并以不同的规则排列的局部模式。城镇的内部格局具有很强的规律性,城镇的纹理特征是区别城镇与其他地物必不可少的指示特征。灰度共生矩阵用图像中2个像元在灰度空间中的灰度关系来描述纹理信息<sup>[18-19]</sup>。用 $P_{ij}^{(d,\theta)}(i,j=0,1,2,\dots,n-1)$ 表示GLCM灰度共生矩阵,其代表了满足位置关系为 $(d,\theta)$ 灰度级分别为 $i$ 和 $j$ 的像元的个数,其中距离 $d$ ,方向 $\theta$ 。本文基于8种通用纹理计算公式来计算城镇的纹理信息<sup>[20]</sup>,所用纹理特征指数见表3,2016年纹理特征指数见图2。

(3)地形特征。地形状况是各个尺度人类活动的分布格局的基本骨架,海拔低通常比海拔高的地区更加适宜居住,坡度较大的地区限制了土地开发与人类活动<sup>[21]</sup>,所以地形特征在一定程度上也能克服裸岩对北极城镇提取的影响。图3为ASTER-GDEM经过表面分析得到的结果。从图中可看到,特罗姆瑟主城区部分海拔较低,两侧城郊区中有山地分布,特别是特罗姆瑟东部地区海拔较高。在坡度方面,特罗姆瑟主城区分布在坡度平缓的区域,特罗姆瑟海峡两岸有部分区域坡度较陡,限制了城镇的建设。

表1 3期数据采集样点数量

Tab. 1 Ground truth samples for the 3 studied years (个)

年份	训练样本		测试样本	
	城镇	非城镇	城镇	非城镇
1990	4458	21 914	265	735
2004	4076	21 452	272	728
2016	4225	20 855	327	673

① <https://www.ngdc.noaa.gov/eog/>。

② <https://search.earthdata.nasa.gov/search>。



表2 光谱特征指数及计算方法

Tab. 2 Information of the spectral indices

光谱特征	公式	编号	说明
归一化植被指数 <i>NDVI</i>	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$	(1)	利用植被指数区分植被与城镇
增强型植被指数 <i>EVI</i>	$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + 6.0\rho_{RED} - 7.5\rho_{BLUE} + 1}$	(2)	相较于NDVI, EVI对土壤背景变化敏感,能帮助区分稀疏植被与人造地表
土壤调整植被指数 <i>SAVI</i>	$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \cdot (1 + L)$	(3)	SAVI可以在研究区植被覆盖较低的地区降低土壤背景的影响,依旧作为NDVI指数对于区分植被与城镇的补充指标
归一化水体指数 <i>NDWI</i>	$NDWI = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{NIR}}{\rho_{GREEN} + \rho_{NIR}}$	(4)	用以区分水体与城镇
归一化雪被指数 <i>NDSI</i>	$NDSI = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{GREEN} + \rho_{SWIR1}}$	(5)	NDSI通过组合绿光波段 $\rho_{GREEN}$ 及短波红外波段 $\rho_{SWIR1}$ 对图像的雪被信息进行增强
归一化建筑指数 <i>NDBI</i>	$NDBI = \frac{\rho_{SWIR1} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}}$	(6)	最常用的城镇用地识别指标,城镇用地的 $\rho_{NIR}$ 与 $\rho_{SWIR1}$ 反射率值变高的同时其他地类反射率值变低,呈相反趋势,所以NDBI可有效识别城镇类别
归一化差值不透水面指数 <i>NDISI</i>	$NDISI = \frac{\rho_{TIR} - [(\rho_{VIS} + \rho_{NIR} + \rho_{MIR})/3]}{\rho_{TIR} + [(\rho_{VIS} + \rho_{NIR} + \rho_{MIR})/3]}$	(7)	$\rho_{VIS}$ 代表可见光红、蓝、绿3个波段中的任何一个(本文选择了红光波段)。 $\rho_{MIR}$ 可将土壤与道路、建筑物等不透水面进行区分, $\rho_{VIS}$ 可区分道路、建筑物等不透水面与水体

注:  $\rho_{NIR}$  表示近红外反射率;  $\rho_{RED}$  表示红光反射率;  $\rho_{BLUE}$  表示蓝光反射率;  $\rho_{GREEN}$  表示绿光反射率;  $\rho_{SWIR1}$  表示短波红外反射率;  $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{MIR}$ 、 $\rho_{TIR}$  分别表示近、中、热红外波段;  $\rho_{VIS}$  表示可见光红、蓝、绿3个波段中的任何一个(本文选择了红光波段)。

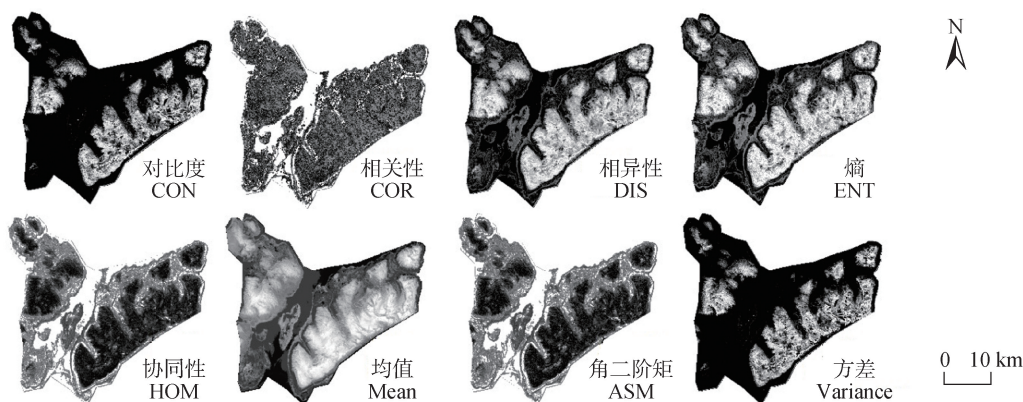


图2 2016年纹理特征指数

Fig. 2 Texture indices (the case of 2016)

(4)夜间灯光特征。DMSP/OLS夜间灯光数据具有独特的夜间低光探测能力和反映人类活动信息(尤其是城市区域的人类活动信息)的特点<sup>[22]</sup>。夜间灯光特征一方面能够框定城镇的大致范围,保证城镇提取的精度;另一方面,也能够限制其他偶然因素对城镇提取的影响。这两点对于北极地区的城镇提取显得尤为重要,所以本论文引入夜间灯光数据(图4)进行城镇提取研究。从整体上看,夜间灯光辐射强度最高的地方分布在特罗姆瑟岛周围,最低的地方在城郊区的山地中,1993–2013年夜间灯光数据并无太大变化。但仍有几点值得注意:从最低值上看,1993–2013年的最低值从0变化到了5,这说明这个区域的总的夜间灯光辐射强度是在增

加的,从而导致1993年并未辐射到的地方在2004年和2013年有了辐射强度,这说明2013年夜间灯光的溢出效应要比1993年更加明显。从夜间灯光的空间分布上看,特罗姆瑟西北部的夜间灯光有些许增强,表示这部分可能有新的居民点建成。

## 2.3 研究方法

### 2.3.1 城镇提取方法

目前常用的机器学习算法有支持向量机、随机森林方法、最大似然法等。但这些方法与同样属于机器学习的AdaBoost算法<sup>[23]</sup>相比,只属于单一的弱分类器,而AdaBoost属于基于分类器集成的聚合模型(Aggregative Model-based Classifier Ensemble,

表3 纹理特征指数及计算方法  
Tab. 3 Information of the texture indices

纹理特征	公式	编号	说明
均值 Mean	$\mu_i = \sum_{i,j=0}^{N-1} (P_{ij})$	(8)	帮助寻找突变区域,有利于零星居民点的提取
协方差 Variance	$\sigma_i^2 = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{ij} (i - \mu_i)^2 \sigma_j^2 = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{ij} (j - \mu_j)^2$	(9)	显示突变程度,辅助均值信息排除干扰像元
协同性 Homogeneity	$HOM = \sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{P_{ij}}{1 + (i - j)^2}$	(10)	协同性其大小表征纹理信息的同质性,HOM值若大表示指定窗口的图像灰度矩阵总体变化小,灰度均匀
对比度 Contrast	$CON = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{ij} (i - j)^2$	(11)	其大小表征了影像清晰程度和局部纹理深与浅,及图像灰度差。CON值高表示指定窗口的图像灰度矩阵纹理深则显示出来的图像辨识度高
相异性 Dissimilarity	$DIS = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{ij}  i - j $	(12)	相异性与对比度比较相似,表征了灰度差绝对值的大小,呈现线性趋势。CON越高则DIS越高
熵 Entropy	$ENT = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{ij} (-\ln P_{ij})$	(13)	熵表征了图像灰度均匀性,换句话说就是纹理的丰富程度,若局部图像的所有像元的灰度值相等,则无纹理信息,ENT=0;若指定窗口的图像灰度矩阵灰度变化大,则纹理信息丰富,纹理信息复杂则ENT越大
角二阶矩 Angular Second Moment	$ASM = \sum_{i,j=0}^{N-1} (P_{ij})^2$	(14)	角二阶矩又名能量,是指定窗口的图像灰度矩阵灰度值的平方和,其表征了图像中纹理特征的粗与细。当ASM大时,纹理特征粗大,ASM小时,纹理特征细小
相关性 Correlation	$COR = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{ij} \frac{(i - m_i)(j - m_j)}{\sqrt{\sigma_i^2 \sigma_j^2}}$	(15)	相关性表征了指定窗口的图像灰度矩阵像元值的相似性度量。图像中存在纹理信息的位置对应的COR值大于不存在纹理信息位置的COR值

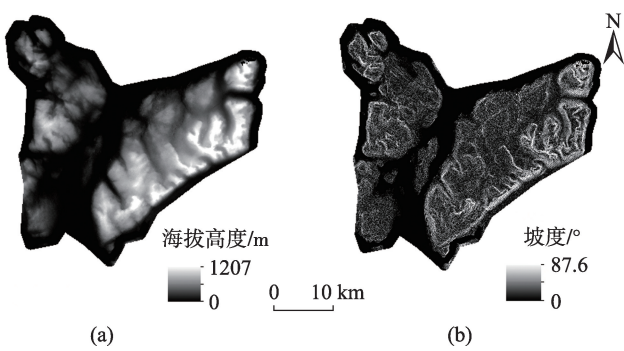


图3 研究区地形数据  
Fig. 3 Elevation and slope of the study area

AMCE)。AdaBoost这种强弱分类器训练集成的特点能较好的与多种特征数据相结合,且能够省去特征选择的步骤,提高分类方法的自动化程度。因此

本文选择AdaBoost算法根据研究区特点结合多源遥感数据生成的多类特征进行城镇提取。此外,为了显示方法选取的科学性,也加入了利用最大似然法进行城镇提取的实验。本文的分类过程中将弱分类器为200个CART分类树,进行弱分类器的训练学习过程中每一次循环都产生一个利用光谱、纹理、夜间灯光和地形指标的CART决策树弱分类器,用加权投票法将弱分类器集成为最终的强分类器。然后利用强分类器进行分类,得到最终分类结果。

为了更加清楚地理解各个数据在北极城镇提取中的作用并避免实验结果的偶然性。实验结合研究区特征与城镇的地物特性选择4类提取特征,并分别使用不同的特征组合进行城镇提取并对实验结果进行对比。利用实验结果中的最优特征组合进行3期北极城镇提取,并根据该结果进行城镇

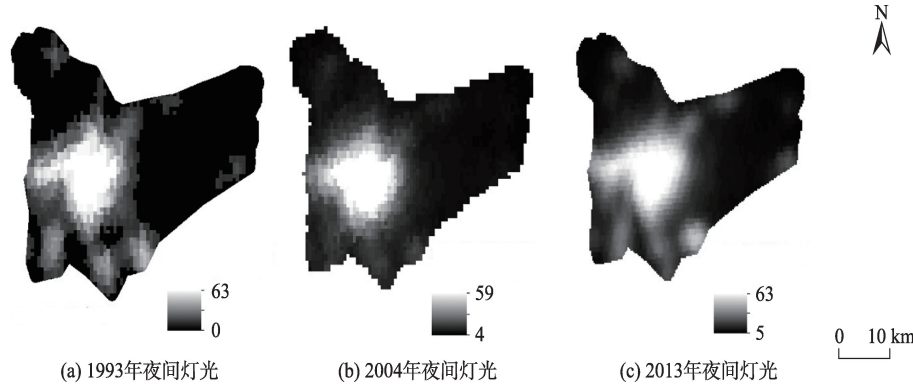


图4 研究区3期DMSP夜间灯光数据  
Fig. 4 DMSP night data of the study area in the 3 studied years

扩张分析。技术路线如图5所示。

### 2.3.2 城镇扩张分析方法

本文在数量与形态方面对城镇提取结果进行扩张分析,公式如下<sup>[24-25]</sup>。

城镇扩张速度( $V_T$ ):城镇面积在2个研究年份里(基期为 $U_a$ ,末期为 $U_b$ , $T$ 为时间间隔)的平均变化量值。其计算公式为:

$$V_T = \frac{U_b - U_a}{T} \times 100\% \quad (16)$$

城镇扩张强度( $U_n$ ):城镇扩张面积占区域土地面积的比例( $A$ 为城镇总面积),表征城镇扩张的强弱,是为了排除不同地域总面积不同的影响,将城镇扩张速度进行的标准化。其计算公式为:

$$U_n = \frac{U_b - U_a}{A \times T} \times 100\% \quad (17)$$

城镇扩张动态度( $K$ ):利用初始研究年份城镇面积的引入来表现城镇变化面积在相对量上的变化,其计算公式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a \times T} \times 100\% \quad (18)$$

城镇紧凑度指数( $C$ ): $P$ 为城市边界轮廓长。 $C$

值在介于0~1之间, $C$ 值高代表城镇形态紧凑,向圆形(紧凑度为1)逼近,城镇受外界干扰越小,内部稳定向越强, $C$ 值低表示城镇分布狭长破碎、离散度大。其计算公式为:

$$C = 2\sqrt{\pi A} \div P \quad (19)$$

## 3 结果分析与精度评价

### 3.1 特征组合对比

#### 3.1.1 基于光谱与纹理特征的提取

首先,利用常规的光谱与纹理特征进行提取。从精度上看,利用光谱与纹理特征总体精度为86.20%,kappa值为0.68(表4);从提取的结果来看,虽然图6的B区表明基于光谱与纹理特征可以整体上区分出城镇与非城镇,但是在研究区的海岸线内部的大片区域仍然有许多细碎非城镇像元被分为城镇像元(图6的A区),从图中可看出,裸地和稀疏植被与城镇之间的错分较多,这也是由于三者的光谱差异不大而导致的。所以对于光谱与纹理特征的城镇提取来说,其能够大致将城镇与城镇分开。

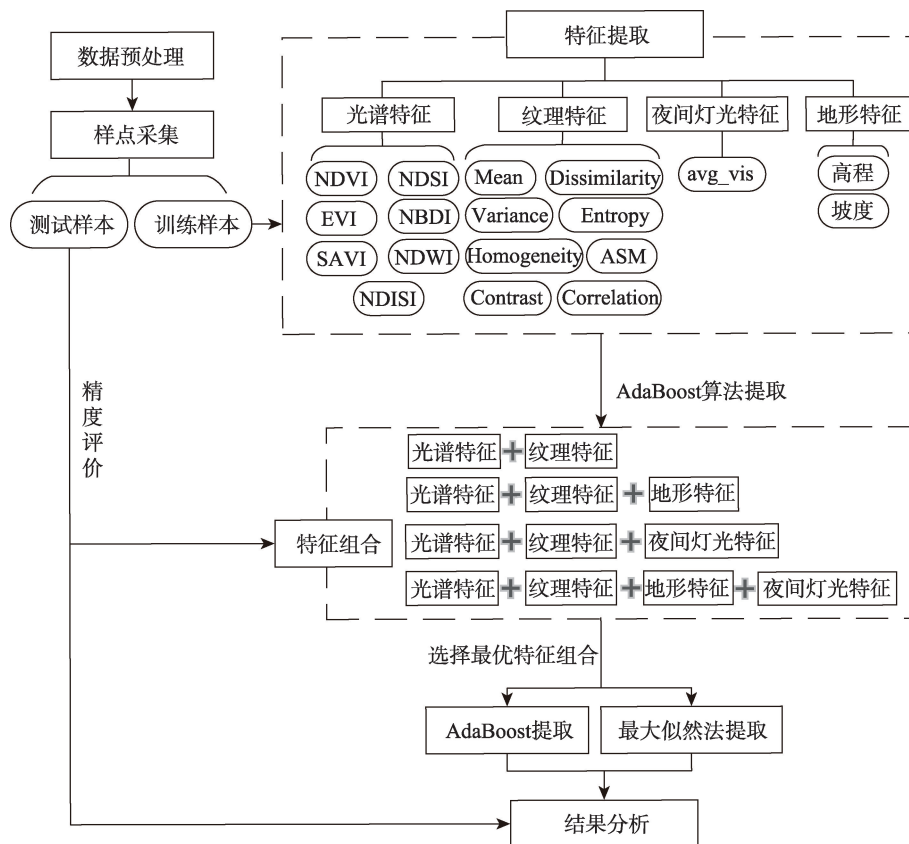


图5 城镇提取流程

Fig. 5 Flow chart of urban extraction



表4 基于光谱、纹理特征的提取精度  
Tab. 4 Extraction accuracy based on the spectral and texture features

分类类别	真实类别	
	城镇	非城镇
城镇	249	78
非城镇	60	631
总体精度/%	86.20	
Kappa值	0.68	

但由于光谱和纹理信息的局限性,其无法克服零碎分布的裸地和稀疏植被对于分类结果的影响,从而导致仅用光谱和纹理提取出的城镇有较多的碎屑状区域。

3.1.2 基于光谱、纹理与地形特征的提取

从表5看出,加入地形特征(海拔高度与坡度)参与提取,得到的总体精度为88.90%(提高2.7%),kappa值为0.74(提高6.21%);提取结果图中紫色斑块为加入地形特征后的城镇提取结果,黄色斑块为利用光谱和纹理特征的城镇提取结果。图7中的B区表示加入地形特征后与仅用光谱纹理特征的提取结果主要差别体现在城镇周边的非城镇区域能更好地识别出来。图8中的A区和B区表示在坡度大、海拔高的区域地形信息能够很好地将原本错分为城镇的裸地识别出来,有效地减少了碎屑状的错分,减少了地形因素对城镇提取的干扰。

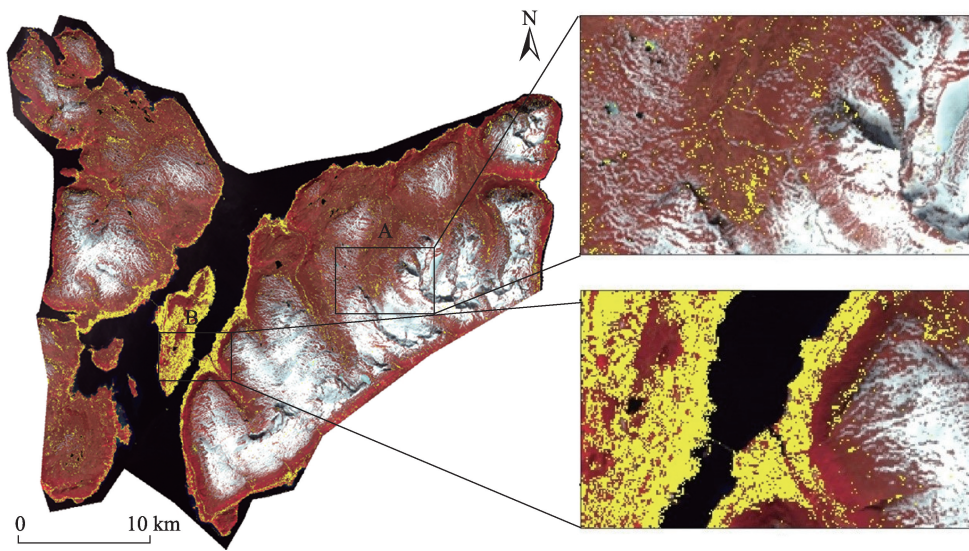


图6 基于光谱、纹理特征的提取结果

Fig. 6 Extraction result based on the spectral and texture features

3.1.3 基于光谱、纹理与夜间灯光特征的提取

加入夜间灯光特征后得到的总体精度为88.30%(提高2.1%),kappa值为0.73(提高4.95%)(表6)。图9表明夜间灯光信息对于提取精度的提升有很大的帮助。在灯光值较高的区域,提取出的

表5 基于光谱、纹理、地形特征的提取精度  
Tab. 5 Extraction Accuracy based on the spectral, texture, and terrain features

分类类别	真实类别	
	城镇	非城镇
城镇	262	65
非城镇	46	627
总体精度/%	88.90	
Kappa值	0.74	

城镇斑块更加完整,有效减弱了建城区内的错分、漏分现象。而在夜间灯光值为0的地区,错分为城镇的区域明显减少。同时,夜间灯光的使用也存在相应的缺点,如夜间灯光的溢出效应可能会导致城镇周边的一些非城镇区的错分。从整体上看,夜间灯光的加入使城镇的提取精度有了提升,并且限定作用在城镇分布密集的区域效果较好。

3.1.4 基于光谱、纹理、地形与夜间灯光特征的提取

最后将2个新特征与光谱、纹理特征一起加入进行提取,得到的总体精度为89.90%(提高3.7%),kappa值为0.77(提高8.55%)(表7),比每次单独加入地形特征和夜间灯光特征对精度的提高都要高。从图10中可看出,加入夜间灯光信息与地形信息后,在距离城镇较远和海拔较高的东部山地区域

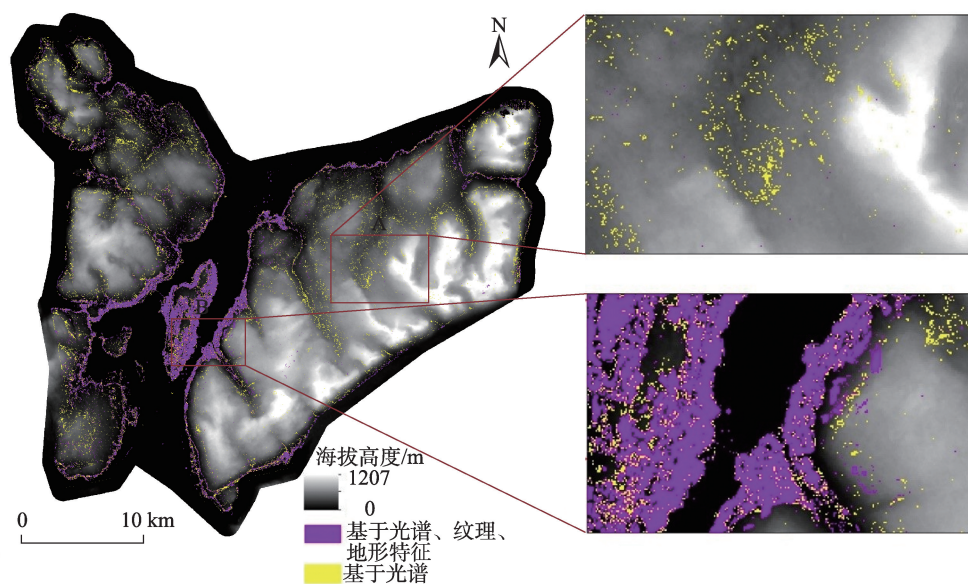


图7 基于光谱、纹理、地形特征的提取结果(叠加高程数据)

Fig. 7 Extraction result based on the spectral, texture, and terrain features (overlaying elevation data)

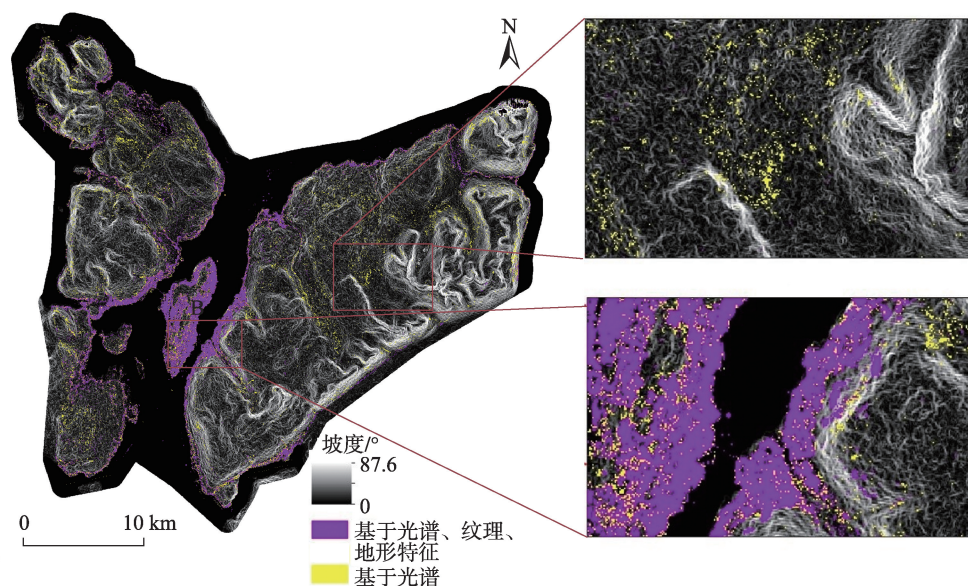


图8 基于光谱、纹理、地形特征的提取结果(叠加坡度数据)

Fig. 8 Extraction results based on the spectral, texture, and terrain features (overlaying slope data)

表6 基于光谱、纹理、夜间灯光的提取精度

Tab. 6 Extraction accuracy based on the spectral, texture, and nightlight features

分类类别	真实类别	
	城镇	非城镇
城镇	262	65
非城镇	52	621
精度/%	88.30	
kappa 值	0.73	

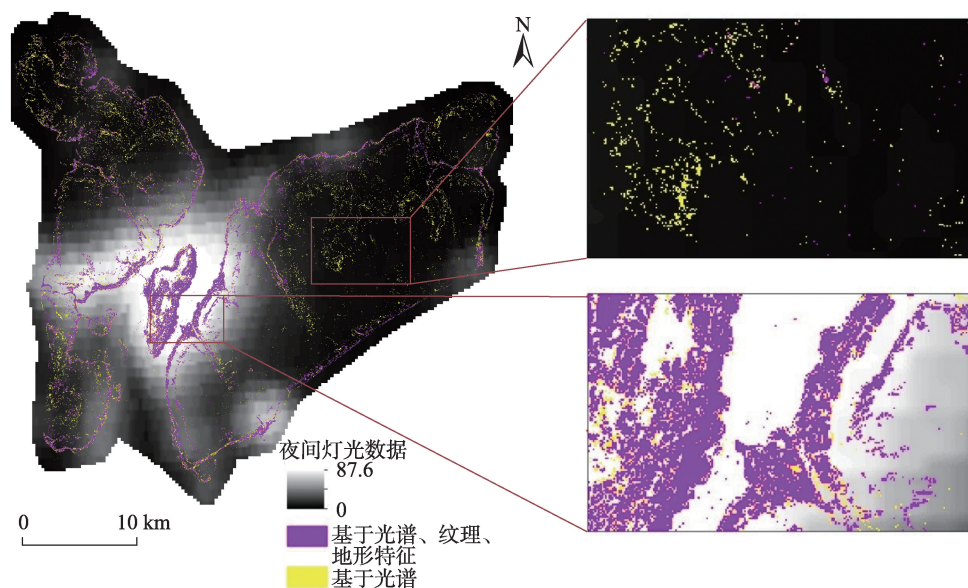
里几乎没有非城镇错分为城镇的现象。此外,算法也成功的提取出了沿岸线零星分布的居民点,减弱

了城镇提取对于光谱和纹理特征的依赖。这也就说明了两种信息的加入能够使算法更加准确的判断出非城镇的特征并进行提取。下文用此最优特征组合对1990年与2004年的城镇进行提取。

### 3.2 城镇提取结果精度评价

采用相同的训练样本和特征栅格创建特征文件后进行最大似然法城镇提取,分别对比3期基于光谱、纹理、地形与夜间灯光特征的AdaBoost提取结果与最大似然法提取结果,并用1000个测试样本





注:提取结果图中紫色斑块为加入夜间灯光特征后的城镇提取结果,黄色斑块为利用光谱和纹理特征的城镇提取结果。

图9 基于光谱、纹理、夜间灯光特征的提取结果

Fig. 9 Extraction result based on the spectral, texture, and nightlight features

表7 基于光谱、纹理、地形、夜间灯光的提取精度

Tab. 7 Extraction accuracy based on the spectral, texture, terrain, and nightlight features

分类类别	真实类别	
	城镇	非城镇
城镇	268	59
非城镇	42	631
总体精度/%	89.90	
kappa 值	0.77	

进行精度分析,得到图 11。由表 8 可知,AdaBoost 对城镇的两分类精度高于最大似然法 9%左右、kappa 系数值高 20%左右。

AdaBoost 算法可以较好地地区分城镇与植被、水体、阴影、山体、裸土、雪,并可以基于像元精细的识别出部分典型道路像元,克服了最大似然法混淆城镇与裸土、雪、部分植被、过分依赖某一类特征的现象,可以应用于中尺度的城镇用地提取。但是对于

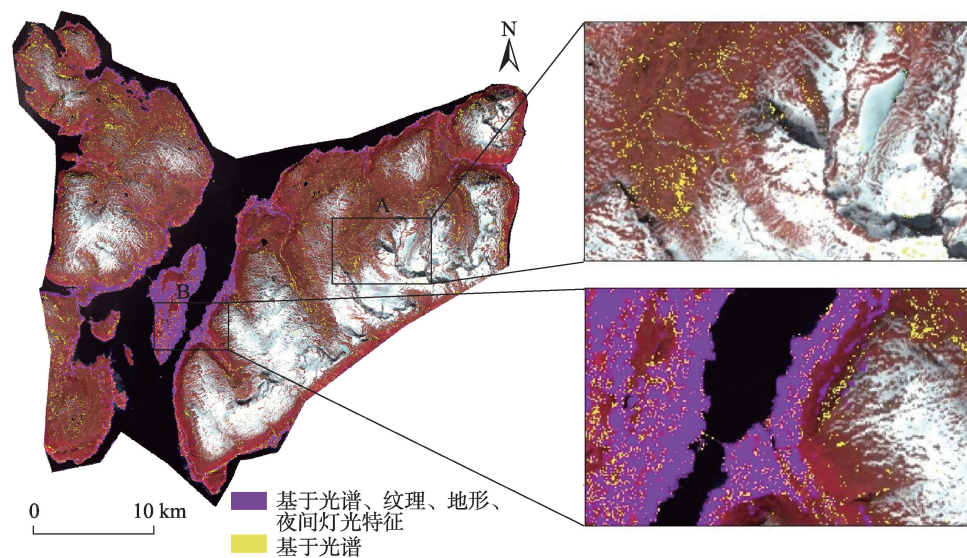


图10 基于光谱、纹理、地形、夜间灯光特征的提取结果

Fig. 10 Extraction result based on the spectral, texture, terrain, and nightlight features



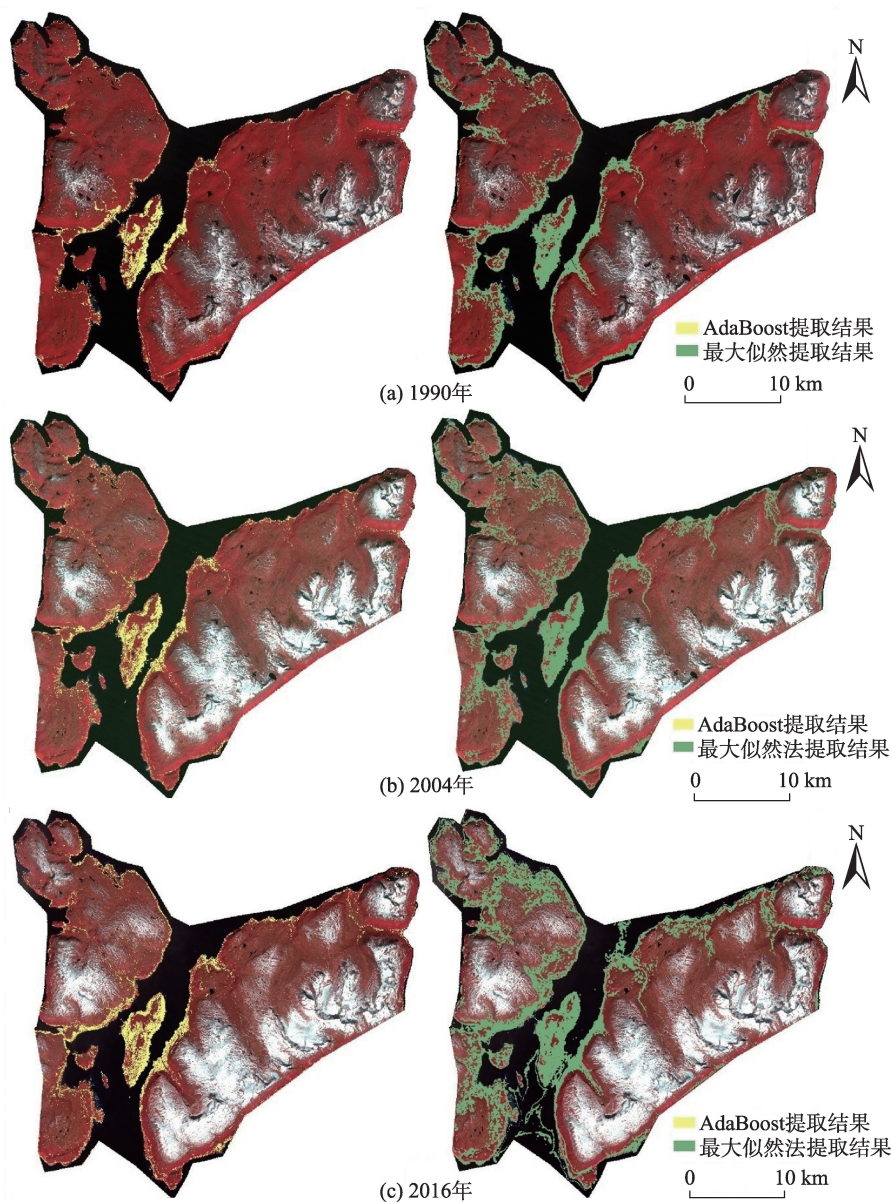


图 11 1990、2004 和 2016 年提取结果

Fig. 11 Extraction results of 1990, 2004 and 2016

部分有水体的信息,如细小的河流、滩涂像元会错误识别为城镇,非城镇总体识别效果较好,但是会有细碎的非城镇点被识别为城镇,原因可能是综合的判断算法使得某些依靠单一特征就能识别的像元被过度考虑。

### 3.3 城镇扩张结果与分析

对研究区不同时期的城镇提取结果进行地图叠加,可以看出城镇扩张的空间特性,结果如图 12 所示。

研究区城镇平均面积约占整个研究区面积的 28%。城镇紧凑度指数随着年份的增长而增加;扩张速度保持在  $42.3 \text{ hm}^2/\text{年}$ ,且 2004–2016 年略大于

1990–2004 年;扩张强度约为 0.045,与扩张速度的变化趋势相反,动态度的变化是 1990–2004 年略大于 2004–2016 年。具体由表 9 所示。

圆形的紧凑度为 1,图 12 可看出研究区交通线上的城镇在逐渐向周边扩张从而使整体变得“圆润”;而根据扩张强度的 5 个分级<sup>[26]</sup>:大于 1.92 为高速扩张、1.05~1.92 为快速扩张、0.59~1.05 为中速扩张、0.28~0.59 低速扩张、0~0.28 为缓慢扩张,特罗姆瑟属于缓慢扩张;2004–2016 年的动态度水平低于 1990–2004 年的动态度水平。从结果中可以看出,1990 年和 2004 年是特罗姆瑟城区的高速发展期,1964 年建立的特罗姆瑟机场在 1990 年之后进行了

表 8 3 个年份提取结果精度比较

Tab. 8 Comparison of the extraction accuracy of the three studied years

年份		AdaBoost 分类		最大似然法分类	
		城镇	非城镇	城镇	非城镇
1990	城镇	238	27	258	7
	非城镇	16	719	139	596
	总体精度/%	95.70		85.40	
	Kappa 值	0.88		0.67	
2004	城镇	232	40	262	10
	非城镇	31	697	161	567
	总体精度/%	92.90		82.90	
	Kappa 值	0.82		0.63	
2016	城镇	268	59	162	149
	非城镇	42	631	38	651
	总体精度/%	89.90		81.30	
	Kappa 值	0.77		0.52	

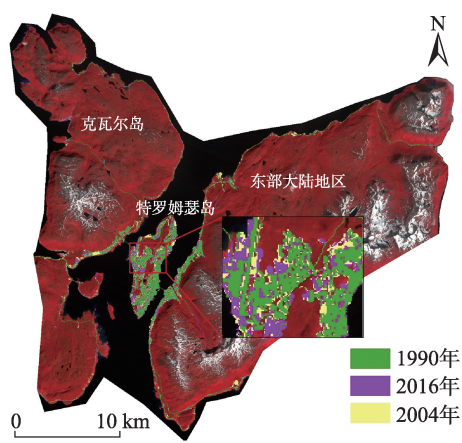


图 12 研究区城镇空间扩张

Fig. 12 Urban expansion of the study area

大范围扩建,特罗姆瑟大学医院在 1991 年建成,极地研究所于 1998 年建成等,这些较大规模的基础设施的建设都反映在了 1990–2004 年的城区变化中。2004–2016 年的城镇扩张幅度没有 1990–2004 年大,城区的扩张主要表现在居民点的变化,虽然变化面积较小,但城镇扩张频率却在增加,这体现出研究区由高速发展期向平稳发展期过渡;在城郊区域,1990–2004 年的扩张比例较小,且集中在距离城区较近的区域。2004–2016 年城郊区域的变化则有

了明显的增强,特别是沿岸线分布居民点的扩张却较为明显,这也可能与当地放牧与捕鱼的需求增长有关。通过 Angel 等<sup>[27]</sup>研究的全球城镇变化的结论中可知,不论是发达国家平均动态度水平(0.029)还是发展中国家平均动态度水平(0.036)都高于研究区的动态度水平(0.016),1900–2004 年的研究区动态度水平略微低于欧洲的整体水平(0.020),特罗姆瑟城镇扩张平均动态度是全球水平(0.0325)的一半左右。总体而言,过去 30 年中,特罗姆瑟一直以一个缓慢的速度进行着城市的扩张,而这种扩张主要体现在基础设施的建设和居民点的增多,预计今后特罗姆瑟的城镇扩张会主要集中在居名点的建设上,并继续保持缓慢的城市扩张速度。

4 讨论

针对北极城镇的特征,本文提出了一种基于多源信息的遥感提取方法。从实验结果来看,地形信息的加入能够将海拔高和坡度较大的裸露地与城镇区分开,而夜间灯光的加入帮助城镇提取框定了大致的范围,有效地减少了噪声点。在机器学习算法方面,为了适应特征信息较多,特征组合复杂

表 9 城镇扩张信息

Tab. 9 Urban expand measurements

年份	面积/hm <sup>2</sup>	紧凑度	扩张速度/(hm <sup>2</sup> /y)	扩张强度	动态度
1990	2174.7	0.01917	–	–	–
2004	2767.0	0.02091	42.31	0.044	0.01946
2016	3291.7	0.02411	43.72	0.045	0.01580



的特点,本文选取了AdaBoost算法进行城镇提取。这种算法将强弱分类器训练集成的特点能较好的与多种特征数据相结合,且这种方法能够省去特征选择的步骤,提高分类方法的自动化程度与精度。

虽然本文的城镇提取获得了较高的精度,但是AdaBoost算法对样本的要求高,本研究中利用随机布点结合目视解译获取的样点,样点容量较大,且几乎均匀覆盖了整个研究区,这样的操作虽然能够提高分类的精度,但前期的工作了较大。因此,今后研究中应考虑简化样本获取方式以实现快速的高精度城镇提取;由于时间和条件的限制,本论文的研究方法只在特罗姆瑟典型研究区展开研究。在以后的工作中可以进行研究区的时空拓展,以对北极的城镇扩张进行更深入的研究。

从1990-2016年,特罗姆瑟一直进行着城镇的扩张,其中1990-2004年主要是基础设施的修建,2004-2016主要是城镇居民点的膨胀。有数据显示,1994-2017年特罗姆瑟的人口增加了约一倍,这可能是城镇居民点扩张的主要原因。其次,随着国际旅游业的发展,特罗姆瑟作为观赏极光的最佳目的地之一,吸引了很多国际游客。挪威政府公布的数据显示,2005/2006年度至2012/2013年度,冬季海外游客在挪威北部地区过夜的数量增加了206%,这也同样驱动着特罗姆瑟的城镇发展。除了人文因素外,全球气温的升高也同样影响着以特罗姆瑟为代表的北极城镇,北极温度的升高为北极航道的开通提供了可能,现在许多国家都在注视着北极航道开通所可能带来的机遇,而航道的开通对于北极城镇来说无疑是一个重要的发展机会,这能够北极城镇的发展注入新的活力,促进北极的蓬勃发展。同时,人们也必须意识,全球变暖和人类活动对北极脆弱生态环境的影响,只有妥善的应对将来的变化,才能实现北极地区的可持续发展。因此,各个国家需要都对北极地区城镇的基础设施建设提出更高的要求。预计随着温度的继续升高和各国政府对北极区域投资的增加,北极城镇的人口会进一步增多,北极城镇的规模也将进一步增加。

## 5 结论

将Landsat、夜间灯光与地形信息多源信息相结合的方法可以实现北极城镇的高精度提取,结果表明:引入地形与夜间灯光特征都可以在光谱纹理特征的基础上提高提取精度,并且光谱、纹理、地形与

夜间灯光的组合是最优特征组合。对不同的特征组合的AdaBoost提取结果显示:基于光谱与纹理特征得到的总体精度与kappa值分别为86.20%和0.68;加入地形特征后总体精度与kappa值分别提高2.7%和6.21%;加入夜间灯光特征后总体精度与kappa值分别提高2.1%和0.50。地形与夜间灯光特征一起加入AdaBoost算法,总体精度与kappa值分别提高3.7%和8.55%。通过最优特征组合进行AdaBoost提取,比最大似然法对城镇的两分类总体精度高10%左右、kappa值高20%左右。

对提取结果分析后可得,研究区紧凑度在3年中逐年增长,研究区交通线上的城镇在逐渐向周边扩张从而使总体变得“圆润”;研究区城镇扩张强度为 $4.5 \times 10^{-3}$ 左右,属缓慢扩张;扩张的平均动态度水平为0.018,是全球平均水平的1/2;1990-2004年与2004-2016年动态度差异表明研究区目前由高速发展期向平稳发展期过渡。可以看出,研究区内主城区基础设施的发展建设已经逐渐发展完善,所以扩张区域并不大。总的来说,发展速度平缓并不代表城镇的建设与经济市场的萎缩,而是有多种转变的可能,如发展建设视角逐渐偏向可持续,增长方式逐渐转型为资源能源或旅游等创新模式。因此,中国与挪威特罗姆瑟以及其他北极相似地区的投资开发加入可持续与创新模式的思维以适应如今的城镇发展规律,实现利益最大化。

## 参考文献(References):

- [1] 王浩,卢善龙,吴炳方,等.不透水面遥感提取及应用研究进展[J].地球科学进展,2013,28(3):327-336. [Wang H, Lu S L, Wu B F, et al. Advances in remote sensing of impervious surfaces extraction and its applications[J]. Advances in Earth Science, 2013,28(3):327-336.]
- [2] Schoettker A B, Over M, Braun M, et al. Monitoring state-wide urban development using multitemporal multisensor satellite data covering a 40-year time span in north Rhine-Westphalia(Germany)[C]// Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2004.
- [3] Watanabe M, Thapa R B, Ohsumi T, et al. Detection of damaged urban areas using interferometric SAR coherence change with PALSAR-2[J]. Earth Planets & Space, 2016,68(1):131.
- [4] 柴宝惠,李培军,张瑞洁,等.基于Landsat数据和DMSP/OLS夜间灯光数据的城市扩展提取:以天津市为例[J].北京大学学报(自然科学版),2016,52(3):475-485. [Chai B H, Li P J, Zhang R J, et al. Urban expansion extraction using Landsat series data and DMSP/OLS nighttime light data: A case study of Tianjin area[J]. Acta Scientiarum



- Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016,52(3):475-485. ]
- [ 5 ] 陈征,胡德勇,曾文华,等.基于TM图像和夜间灯光数据的区域城镇扩张监测——以浙江省为例[J].国土资源遥感,2014,26(1):83-89. [ Chen Z, Hu D Y, Zeng W H, et al. TM image and nighttime light data to monitoring regional urban expansion: A case study of Zhejiang Province[J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2014,26(1):83-89 ]
- [ 6 ] 徐涵秋.一种快速提取不透水面的新型遥感指数[J].武汉大学学报·信息科学版,2008,33(11):1150-1153. [ Xu H Q. A new remote sensing index for fastly extracting impervious surface information[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008,33(11):1150-1153. ]
- [ 7 ] 徐涵秋,杜丽萍.遥感建筑用地信息的快速提取[J].地球信息科学学报,2010,12(4):574-579. [ Xu H Q, Du L P. Fast extraction of built-up land information from remote sensing Imagery[J]. Journal of Geo-information Science, 2010,12(4):574-579. ]
- [ 8 ] 查勇,倪绍祥,杨山.一种利用TM图像自动提取城镇用地信息的有效方法[J].遥感学报,2003,7(1):37-40. [ Zha Y, Ni S X, Yang S. An effective approach to automatically extract urban Land-use from TM Imagery[J]. Journal of Remote Sensing, 2003,7(1):37-40. ]
- [ 9 ] 付乾坤,吴波,汪小钦,等.基于形态学建筑物指数的城市建筑物提取及其高度估算[J].遥感技术与应用,2015,30(1):148-154. [ Fu Q K, Wu B, Wang X Q, et al. Building extraction and its height estimation over urban areas based on morphological building index[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015,30(1):148-154. ]
- [ 10 ] 任金华,吴绍华,周生路,等.城市不透水面遥感研究进展[J].国土资源遥感,2012,24(4):8-15. [ Ren J H, Wu S H, Zhou L S, et al. Advances in remote sensing research on urban impervious surface[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2012,24(4):8-15. ]
- [ 11 ] Qiu X M, Wu S S, Miao X. Incorporating road and parcel data for object-based classification of detailed urban land covers from NAIP images[J]. Mapping Sciences & Remote Sensing, 2014,51(5):498-520.
- [ 12 ] Civco D, Chabaeva A, Parent J. KH-series satellite imagery and Landsat MSS data fusion in support of assessing urban land use growth[J]. Proc Spie, 2009,7478:74780I(1-12).
- [ 13 ] Matthias Braun. Mapping imperviousness using NDVI and linear spectral unmixing of ASTER data in the Cologne-Bonn region (Germany)[J]. Proc Spie, 2004,12(12):274-284.
- [ 14 ] Rashed T, Weeks J R, Roberts D, et al. Measuring the physical composition of urban morphology using multiple end-member spectral mixture models[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2003,69(9):1011-1020.
- [ 15 ] 李彩丽,都金康,左天惠.基于高分辨率遥感影像的不透水面信息提取方法研究[J].遥感信息,2009(5):36-40. [ Li C L, Du J K, Zuo T H, The study of extracting impervious surface information based on high-resolution remote sensing Image[J]. Remote Sensing Information, 2009(5):36-40. ]
- [ 16 ] Zhifeng Liu, Chunyang He, Qiaofeng Zhang, et al. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008[J]. Landscape and Urban Planning, 2012,106(1):62-72.
- [ 17 ] Konstantinov P, Baklanov A, Varentsov M, et al. Experimental urban heat island research of four biggest polar cities in northern hemisphere[C]// Geophysical Research Abstracts, Egu General Assembly, 2014.
- [ 18 ] 高程程,惠晓威.基于灰度共生矩阵的纹理特征提取[J].计算机系统应用,2010,19(6):195-198. [ Gao C C, Hui X W. GLCM-Based texture feature extraction[J]. Computer Systems & Applications, 2010,19(6):195-198. ]
- [ 19 ] Robert M H, Karthikeyan S. Textural features for image classification[J]. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, 1973(6):610-621.
- [ 20 ] Hall-Beyer M. Practical guidelines for choosing GLCM textures to use in landscape classification tasks over a range of moderate spatial scales[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017,38(5):1312-1338.
- [ 21 ] Xu Y, Tang Q, Fan J, et al. Assessing construction land potential and its spatial pattern in China[J]. Landscape and Urban Planning, 2011,103(2):207-216.
- [ 22 ] Christopher S, Francesca P, Christopher D E. Spatial analysis of global urban extent from DMSP-OLS night lights[J]. Remote Sensing of Environment, 2005,96(3-4):277-291.
- [ 23 ] Yoav Freund, Robert E Schapire. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting[J]. Journal of computer and system sciences, 1997,55(1):119-139.
- [ 24 ] Batty M. Exploring Isovist fields: Space and shape in architectural and urban morphology[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2001,28(1):123-150.
- [ 25 ] 刘纪远,王新生,庄大方.凸壳原理用于城市用地空间扩展类型识别[J].地理学报,2003,58(6):885-892. [ Liu J Y, Wang X S, Zhuang D F. Application of convex hull in identifying the types of urban land expansion[J]. Acta Geographica Sinica, 2003,58(6):885-892. ]
- [ 26 ] 刘盛和,吴传钧,沈洪泉.基于GIS的北京城市土地利用扩展模式[J].地理学报,2000,55(4):407-416. [ Liu S H, Wu C J, Shen H Q. A GIS based model of urban land use growth in Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 2000,55(4):407-416. ]
- [ 27 ] Angel S, Parent J, Civco D L, et al. The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000-2050[J]. Progress in Planning, 2011,75(2):53-107.