工程科学与实践
Evidence in Engineering Science and Practice

研究论文

DOI: 10.63221/eesp.v1i01-04.30-36

亮点:

- 随机森林算法提取 Landsat 影像中不透水面具有较高的精度和稳定性。
- 1994 年至 2014 年间，广州市不透水面保持了较高的扩张期，重心先西南后东北的移动模式。
- 2014-2024 年间，广州市不透水面低速扩张，重心向西南偏移，表明广州城市规划发展向西南转移。

***通讯作者邮箱:**

zhangxuelei0111@126.com

英文引用: Wu Junchao, Huan Min,Zhang Xuelei et al., 2025. Extraction and Spatio-Temporal Evolution Analysis of Impervious Surface in Guangzhou Using Landsat Images. Evidence in Engineering Science and Practice, 1(01-04), 30-36.

中文引用: 吴军超, 郇敏, 张雪蕾等, 2025. 基于 Landsat 影像的广州市不透水面提取及时空演化分析. 工程科学与实践, 1（01-04）, 30-36.

稿件处理节点:

接收	2025 年 12 月 22 日
修订	2025 年 12 月 24 日
接受	2025 年 12 月 25 日
发表	2025 年 12 月 27 日

基金资助:

广州市科技局基础与应用基础项目(SL2023A04J00927)。

版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名 4.0 国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及 DOI 信息。

基于 Landsat 影像的广州市不透水面提取及时空演化分析

吴军超 [1]，郇敏 [2]，张雪蕾 [1,*]，吴春华 [1]，朱腾 [1]，张晓兰 [3]

[1] 广东工贸职业技术学院测绘遥感信息学院，广州 510550

[2] 陕西星原测绘科技有限公司，西安 710199

[3] 华南师范大学地理科学学院，广州 510631

摘要 随着全球城市化进程的不断加速，城市土地利用和覆盖发生了显著变化，其中不透水面的快速扩张是最为突出的特征之一，广州作为中国重要的经济中心和国际化大都市，改革开放以来经历了快速的城市化发展。选择 1994-2024 年间对广州的不透水面进行研究，能够全面、系统地了解广州在快速城市化进程中不透水面的演变特征，进而为城市的可持续发展提供科学依据。首先，依据归一化水体指数(MNDWI)、植被指数(NDVI)、归一化建筑指数(NDBI)等特征波段，同时引入影像 PCA 主成分分析后的 B1~B3 及最小噪声分离 MNF 变换后的 B1~B3 波段，共 9 个特征波段组合成不透水面特征波段，然后利用随机森林算法提取不透水面，研究表明，随机森林算法提取不透水面具有较高的精度和稳定性。最终，对不透水面时空变化特征进行了分析发现，1994-2014 年间不透水面呈现高速扩张的阶段，扩张模式由单核中心向多中心扩张转变的模式，2014-2024 年间广州市不透水面增长速度显著减弱，并且不透水面重心有向东南偏移的趋势，这与广州市“南拓-东进”的城市规划总体发展战略保持一致，取得了较好的研究效果。

关键词： Landsat 影像；特征提取；随机森林算法；不透水面；时空演化

Extraction and Spatio-Temporal Evolution Analysis of Impervious Surface in Guangzhou Using Landsat Images

Wu Junchao [1], Huan Min [2],Zhang Xuelei [1,*], Wu Chunhua [1], Zhu Teng [1], Zhang Xiaolan [3]

[1] Information School of Surveying, Mapping and Remote Sensing, Guangdong Polytechnic Industry and Commerce, Guangzhou 510550, China;

[2] Shaanxi Xingyuan Surveying and Mapping Technology Co., Ltd., Xi’an 710199, China;

[3] School of geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

Abstract With the continuous acceleration of global urbanization, significant changes have occurred in urban land use and coverage, among which the rapid expansion of impervious surfaces is one of the most prominent features. As an important economic center and international metropolis in China, Guangzhou has experienced rapid urbanization development since the reform and opening up. Studying the impervious surfaces in Guangzhou from 1994 to 2024 can comprehensively and systematically understand the evolution characteristics of impervious surfaces in Guangzhou during the rapid urbanization process, thereby providing a scientific basis for the sustainable development of the city. Firstly, based on characteristic bands such as the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and Normalized Difference Built-up Index (NDBI), while introducing bands B1-B3 after Principal Component Analysis (PCA) of images and bands B1-B3 after Minimum Noise Fraction (MNF) transformation, a total of 9 characteristic bands are combined to form the impervious surface characteristic bands. Then, the Random Forest algorithm is used to extract impervious surfaces. Studies have shown that the

Random Forest algorithm has high accuracy and stability in extracting impervious surfaces. Finally, an analysis of the temporal and spatial variation characteristics of impervious surfaces reveals that impervious surfaces showed a stage of rapid expansion from 1994 to 2014, with the expansion mode shifting from a single-core center to a multi-center expansion mode. From 2014 to 2024, the growth rate of impervious surfaces in Guangzhou slowed down significantly, and the center of gravity of impervious surfaces tended to shift to the southeast, which is consistent with Guangzhou's overall urban planning and development strategy of "expanding southward and advancing eastward", achieving good research results.

Keywords: Landsat image; Feature traction; Radom forest; Impervious surface; Spatio-Temporal Evolution

10.63221/eesp.v1i01-04.30-36

1. 引言

不透水表面作为城市化进程的核心指标，指的是被沥青、水泥、砖石等人工材料覆盖的表面类型，这种表面阻碍了水的渗透[1]。其空间分布和动态变化直接反映了城市建设用地扩张的强度，并对区域水循环、热环境调节和生物多样性维护等生态过程产生深远影响[2]。随着全球城市化进入高速发展阶段，不透水表面的迅速扩张已成为城市内涝、热岛效应加剧和水资源失衡等城市问题的关键诱因[3]。因此，开展不透水表面的时空演变研究是理解城市化可持续城市发展的核心前提。

国内外学者在基于遥感的不透水面研究方面取得了丰硕的成果。在不透水面提取方法上，早期主要采用监督分类与非监督分类方法[4-5]，利用遥感影像的光谱特征进行分类，如最大似然分类（MLC）、K 均值聚类等。但这些方法易受“同物异谱、异物同谱”现象影响，分类精度有限。随着研究深入，混合像元分解方法被广泛应用[6-7]，通过线性或非线性模型将混合像元分解为不同地物类型的比例，从而估算不透水面比例，适用于中低分辨率遥感影像。同时，遥感指数法也得到发展，利用遥感波段组合构建不透水面指数[8-11]（如 NDBI）来增强不透水面信息。近年来，深度学习方法兴起，卷积神经网络（CNN）[12]、U-Net[13]等深度学习模型被广泛应用于不透水面提取，能有效提取复杂城市环境中的不透水面信息。

本研究主要内容包括以下两个方面：一是基于多源遥感数据，构建不透水面特征波段，精确提取 1994 - 2024 年广州市不同时期的不透水面信息；二是对提取的不透水面数据进行时空分析，从重心迁移、主方向等视角对广州市城市不透水面的空间变化进行深入分析，有助于深入理解城市扩张的空间规律和特征，为广州市的城市规划、土地资源管理和可持续发展提供科学依据和决策支持。

2. 研究材料及方法

2.1. 研究区域

广州作为粤港澳大湾区的核心引擎城市，自改革开放以来经历了从“单核心集聚”到“多中心扩散”的跨越式城市化进程。截至 2023 年，广州的建成区面积已超过 1300 平方公里，人口密度每平方公里超过 1500 人[14]。高强度的人口集聚和产业活动不断推动建设用地向周边郊区扩张，不透水面与农田、林地、河网等自然地表之间的矛盾日益突出。在此背景下，系统厘清广州不透水面的长期演变格局，不仅对于理解华南地区特大城市的城市化模式至关重要，也是应对城市生态环境挑战、优化国土空间规划的迫切需求。

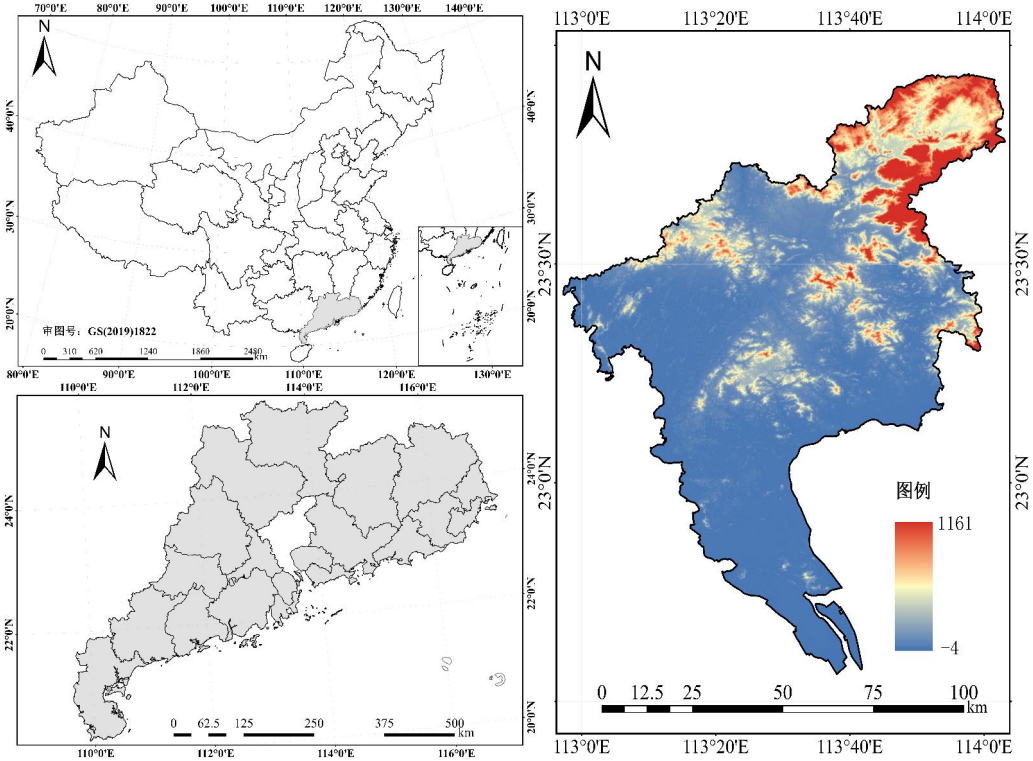

图 1 研究区域

2.2. 数据收集及预处理

考虑到本研究的时间跨度大，在卫星影像数据方面，所有影像数据通过本文主要使用来自美国地质调查局的卫星系列数据（https://earthexplorer.usgs.gov/,2025-10）获取影像分辨率为 30 m，包括 Landsat 5 TM、Landsat 7 ETM +和 Landsat 8 OLI/TIRS，由于广州市地处热带亚热带地区，常规光学卫星成像时间窗口多集中在全年 10-来年 2 月份的少云枯雨期，因此本研究选择的影像获取时间分别为 1994 年、2004 年、2014 年和 2024 年各周期的影像集中在 10-12 月份且云量低于 5%的多波段高质量地表反射率数据产品，然后对其进行辐射定标、大气校正、几何校正、镶嵌、图像裁切等预处理，为后续研究做准备。

2.3. 研究方法

2.3.1 不透水面增强特征空间构建

本研究参照学者研究成果不透水面提取的经验[1,7,9]，归一化水体指数(MNDWI)、植被指数(NDVI)、归一化建筑指数(NDBI)等特征指数可较好的增强水体、植被和不透水面。通过实验发现，对影像进行 PCA 主成分分析以及 MNF 变换之后的第一主成分波段、第二主成分波段和第三主成分波段均可较好增强不透水面、植被及水体信息[6,15]。因此，选取影像 PCA 主成分分析波段 B1~B3 及 MNF 变换方法的 B1~B3 波段以及 MNDWI、NDVI、NDBI 等典型地物指数构成不透水面高精度提取的特征波段组合。

2.3.2 随机森林分类算法

随机森林算法[16-17]于 2001 年由美国科学家 Breiman 提出，是一种基于决策树的集成学习算法，它通过构建多个决策树并将它们组合起来进行分类或回归，被广泛应用于复杂遥感数据集的分析处理。其原理是从原始训练数据集中有放回地随机抽样，生成多个自助样本集，针对每个自助样本集分别构建一棵决策树，在决策树的节点分裂过程中，随机选择一部分特征来寻找最优分裂点，而不是考虑所有特征。这样可以降低决策树之间的相关性，提高模型的鲁棒性。

在广州市不透水面提取中，随机森林的分类过程为：首先，基于 Landsat 影像中不透水面的辐射特征，选择对预处理后的影像进行 PCA 主成分分析之后的 B1~B3 波段、最小噪声分离 MNF 分析之后的 B1~B3、MNDWI、NDVI、NDBI 等指数增强典型地物信息（水体、不透水面、植被、裸土地）构建提取不透水面的特征波段。再利用提取的各个年份不透水面、水体、植被、裸土地等类别的样本集训练多棵决策树，每棵决策树在训练过程中对样本特征进行随机选择，以保证每棵树的差异性。然后，对于新的待分类样本，将其输入到每一棵决策树中进行分类，每棵决策树会给出一个分类结果，最后通过投票的方式确定最终的分类结果，即选择得票最多的类别作为该样本的分类。在样本库构建方面，采取目视解译的方式，每个时期的影像分别选择不透水面、水体、植被、裸土地各 100 个样本。其中，60 个样本用于随机森林算法分类，40 个样本用于分类结果的精度验证。

3. 结果与分析

3.1 不透水面分类精度评定

本研究将预处理后的影像分为不透水面、植被、水体、裸土等四个类别，各年份随机森林分类算法提取不透水面精度评定结果如表 1 所示，可以看出，随机森林算法在不透水面提取方面具有较强的优势，相对于指数算法，规避了人为选取阈值等可能影响提取精度的主观因素。各个年份的生产者精度最高的是 2014 年度达到了 97.54%，最低为 2004 年份达到 93.53%；各年份 kappa 系数均在 90%以上，说明随机森林算法在不透水面提取方面具有较好的提取精度和良好的鲁棒性。

表 1 各年份不透水面分类精度验证结果统计

年份	用户精度	生产者精度	总体精度	Kappa 系数
1994	0.9951	0.9451	0.9715	0.9589
2004	0.9811	0.9353	0.9576	0.9381
2014	0.9905	0.9754	0.9700	0.9530
2024	0.9902	0.9633	0.9334	0.9026

3.2 不透水面面积变化

通过对 1994-2024 年间广州市四个时间间隔的不透水面数据的统计表 2，清晰呈现出，广州市不透水面面积呈现出持续增长的态势。1994 年，广州市不透水面面积约为 927.355 km^2，占全市总面积的 12.86%；到 2024 年，不透水面面积增长至 2426.262 km^2，占比达到 33.65%。在 1994 - 2004 年期间，广州市不透水面面积从 927.355 km^2 增长至 1505.863

km^2，年均增长率为 6.24%。这一时期，广州市处于快速城市化阶段，城市建设项目大量开展，房地产开发、工业园区建设等活动频繁，导致不透水面面积迅速增加。2004-2014 年，不透水面面积新增了 583.712 km^2，年均增长率为 3.88%。虽然增长速率较前一阶段有所下降，但仍然保持着较高的增长态势。这一阶段，广州市的城市建设逐渐从大规模扩张向优化升级转变，城市更新项目增多，旧城区的改造和商业区的扩建等使得不透水面面积持续增加。在 2014-2024 年期间，不透水面面积从 2089.575 km^{2}增长至 2426.262 km^2，年均增长率为 1.61%。增长速率进一步放缓，这主要得益于广州市近年来对生态环境保护的重视，加强了对土地开发的管控，推动绿色发展理念的实施，一定程度上抑制了不透水面面积的快速增长。

表 2 各年份不透水面面积数量统计（单位:km^2）

年份	不透水面面积	比重	面积变化	变化强度
1994	927.355	12.86%	-	-
2004	1505.863	20.88%	578.508	6.24%
2014	2089.575	28.98%	583.712	3.88%
2024	2426.262	33.65%	336.687	1.61%

3.3 各年份不透水面空间分布特征

通过绘制 1994 年、2004 年、2014 年和 2024 年广州市不透水面空间分布图（见图 2），可以清晰地观察到其在不同区域的分布差异及变化如图 3（a）所示。1994 年度不透水面在广州中心城区（荔湾、越秀、天河、海珠以及黄埔部分区域）集中分布。

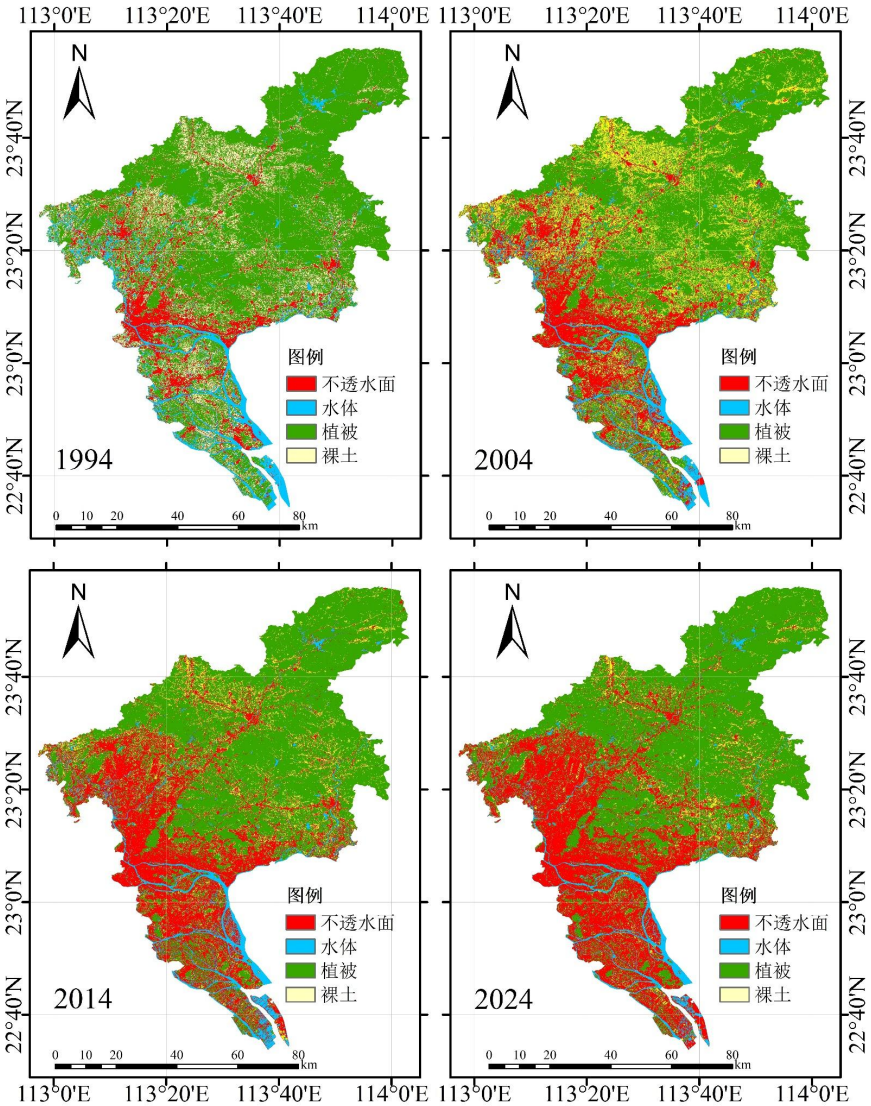

图 2 各年份不透水面随机森林算法分类结果

10.63221/eesp.v1i01-04.30-36

2004 年，不透水面开始向城市周边区域扩张。分析结果与 2000 年广州市政府组织编制的《广州市城市总体发展战略规划纲要》确立的“南拓、北优、东进、西联”的空间拓展方针一致。在城市东部，增城的新塘镇、永宁街等地区，由于承接了广州市的产业转移和人口外溢，工业厂房和住宅小区不断建设，不透水面面积明显增加。在城市北部，花都的汽车产业园区和空港经济区的发展，带动了周边地区的城市化进程，不透水面逐渐蔓延。在城市南部，番禺的一些镇街，如市桥、大石等，随着房地产开发和商业配套设施的完善，不透水面比例也有所提高，这一时期，不透水面重心向西南偏移。2004 年至 2014 年，不透水面的扩张趋势更加明显，城市周边的开发区和产业园区进一步发展壮大，南部的番禺区和南沙区，东部的黄埔区和增城区，城市建设用地面积大幅增加，如南沙港的扩建、南沙自由贸易试验区的设立等，推动了城市扩张。同时，城市轨道交通的建设也带动了沿线地区的开发，如地铁的开通，使得东部地区成为城市扩张的重要方向。到 2024 年，虽然不透水面的增长速率有所放缓，但在空间分布上仍在继续优化和调整。一些城市老旧区域的改造和更新，使得不透水面更加紧凑和合理。同时，在城市新区，如南沙新区，随着基础设施的完善和产业的发展，不透水面面积进一步扩大，但在规划和建设过程中更加注重生态环境保护，预留了一定比例的绿地和水系，形成了较为合理的城市空间格局。

3.4 扩张模式与方向

重心移动轨迹可较好反应不透水面的整体扩张模式，标准差椭圆能够通过长半轴、短半轴、方位角等参数，直观地反映地理要素的空间分布特征和扩张趋势。运用重心迁移、标准差椭圆方法等角度对广州市不透水面的扩张模式和主要方向进行分析，有助于深入理解城市扩张的空间规律和特征。

在重心迁移方面，1994 年至 2004 年间，不透水面重心向西南转移，移动距离为 2.83km,主要是由于 1994-2004 年间，广州市番禺区、南沙区、荔湾西部等区域不透水面增加较多。西北部地区花都区、白云区不透水面也有大幅增加，增城区不透水面呈现连片增加。东南部的番禺区和黄埔区，新的工业园区、商业区和住宅区不断涌现，推动了城市重心的迁移。2004-2014 年间，不透水面重心又回归向东北方向移动，移动距离为 2.21km。广州市不透水面的主要扩张方向为东北-西南方向。在东北方向，增城地区与广州市中心城区的联系日益紧密，随着交通基础设施的完善和产业的协同发展，增城承接了大量的城市功能外溢，不透水面沿着交通干线不断向东北方向延伸。2014-2024 年间，不透水面重心向东南方向移动，移动距离为 1.27km。这一迁移方向与城市“南拓、东进”的扩张趋势一致，进一步说明了城市在空间上向东南方向发展的态势。这种重心迁移现象表明广州市在城市发展过程中，逐渐向东南方向拓展城市空间，形成了以市中心为核心，向东南方向延伸的城市发展格局，也体现了广州市在区域发展战略上对东南方向的重视。

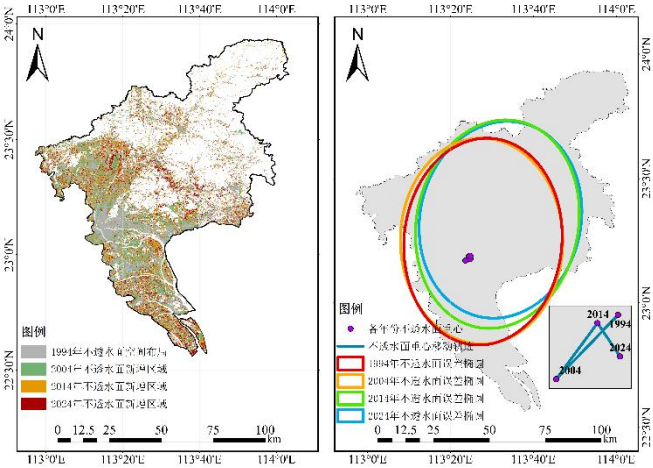

图 3 不透水面时空演化特征（a）不透水面扩张(b)不透水面扩张方向及重心偏移轨迹

4. 讨论

本研究借助随机森林算法对广州市 1994-2024 年间的不透水面进行提取，相较于指数法，随机森林算法识别能够较好的区分不透水面和裸土地。在不透水面特征选取方面，参考了已有不透水面提取成果[3,4,6,7]，在试验中发现，仅采用辐射特征中不透水面增强信息的特征波段，依然取得了较高的精度和稳定性。基于不透水面的提取结果，对各时间段的不透水面时空特征进行了深入分析。在不透水面重心提取中，为了提升结果准确性和稳定性，本研究将 2 个像元及以下的图斑不参与计算，以排除影像噪点的干扰。

5. 结论

本研究基于 Landsat 遥感影像实现不透水面的提取，对各个年份不透水面进行时空分析发现以下结论：

（1）随机森林算法在捕捉广州市不透水面的扩张模式和演化特征方面具有较好的精度和稳定性。

（2）1994 年至 2014 年间，广州市不透水面保持了较高的扩张趋势，扩张模式以城市中心为核心，不透水面重心移动方向先西南后东北的扩张模式。

（3）2014-2024 年间，随着党的十八大将生态文明建设纳入中国特色社会主义事业“五位一体”总体布局以来，广州市不透水面从高速增长期进入高质量增长期，不透水面重心向西南方向偏移，这与城市“南拓、东进”的扩张趋势一致，进一步说明了广州市在空间上向东南方向发展的态势。

虽然，研究结果不透水面提取精度较为理想，但也存在一些不足之处。本研究只考虑了影像的光谱特征，这容易导致“同物异谱”、“异物同谱”的现象，会导致尤其是裸土地和不透水面之间的混淆。今后的研究将尝试使用 Landsat 影像的纹理特征和几何特征，以提升不透水面识别的精度和稳定性。

参考文献

[1] 邵振峰,潘银,蔡燕宁,等.基于 Landsat 年际序列影像的武汉市不透水面遥感监测[J].地理空间信息,2018,16(01):1-5+7.

[2] 徐涵秋,王美雅.地表不透水面信息遥感的主要方法分析[J].遥感学报,2016,20(05):1270-1289.

[3] 杨栩,朱大明,杨润书,等.一种提取不透水面的可见光波段遥感指数[J].农业工程学报,2020,36(08):127-134.

[4] 边万超,张辛佳,张斌,等.城市不透水面遥感信息提取方法的比较研究[J].杭州师范大学学报(自然科学版),2022,21(06):657-663.

[5] 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(03):327-336.

[6] 林志垒. 基于 Landsat 系列影像的城区不透水面覆盖度估算研究[J].福建师范大学学报(自然科学版),2025,41(04):86-92.

[7] 法炜,常军,韩丽华. 基于特征指数合成影像的不透水面提取和分析[J].地理空间信息,2022,20(04):48-53.

[8] 葛壮,李苗.基于 NDISI 的七台河市不透水面信息提取[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,2015,31(03):129-131.

[9] 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,(11):1150-1153+1211.

[10] 赵玉竹.重庆市近 30a 不透水面时空变化研究[J].地理空间信息,2020,18(03):12-15+6.

[11] 穆亚超,颉耀文,张玲玲,等. 一种新的增强型不透水面指数[J].测绘科学,2018,43(02):83-87.

[12] 庞博,黄祚继,吴艳兰,等.基于改进全卷积神经网络的高分遥感影像不透水面提取制图[J].遥感信息,2020,35(04):47-55.

[13] 王晶,高帅,郭亮,等. 基于多尺度特征融合的 U-Net 网络高分影像不透水面提取研究[J].遥感技术与应用,2022,37(04):811-819.

[14] 2023 年广州市城市建成区面积统计情况公布 广州市规划和自然资源局网站（2025-12）https://ghzyj.gz.gov.cn/zwgk/xxgkml3/qt/tjsj/qt/content/mpost_9557600.html

[15] 翟珂,吴晓青,秦元伟,等. 基于 OLI 影像的环渤海湾不透水面提取及空间格局分析[J].资源科学,2015,37(10):1920-1928.

[16] 常翔宇,柯长青.基于随机森林算法的城市不透水面信息提取——以长春市为例[J].测绘通报,2020,(11):43-49.

[17] 赵艺淞,杨昆,王保云,等.随机森林在城市不透水面提取中的应用研究[J].云南师范大学学报(自然科学版),2017,37(03):73-78.