引文格式：高雨凌,何贞铭,崔海福,等. 利用多时相遥感影像分析武汉市不透水面时空变化[J]. 地理空间信息, 2026, 24(5): 69-75. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.05.013

利用多时相遥感影像分析武汉市不透水面时空变化

高雨凌[1]，何贞铭[1*]，崔海福[1]，周再文[2]，彭　李[3]
（1. 长江大学 地球科学学院，湖北 武汉 430100；2. 长江荆州航道处，湖北 荆州 434000；
3. 荆州市自然资源卫星应用技术中心，湖北 荆州 434000）

摘　要：基于2010年、2015年、2020年及其相邻年份的294景遥感影像和现有土地利用产品，采用自动生成与人工修正相结合的方法制作了分类样本数据集；利用基于邻域网格的随机森林分类方法进行土地利用分类；利用GIS空间统计分析方法分析了近10年武汉市的土地利用变化情况，并结合景观格局指数分析了不透水面的时空变化情况。结果表明，武汉市不透水面面积持续增加，扩张了1.44倍；不透水面流入698.86 km²，流出183.36 km²，耕地为其流入流出的主要对象。武汉市建筑物更趋于集中分布在特定区域内，不透水面总体密度增加，但连片性减弱，景观破碎化程度增加。2010—2020年武汉市不透水面重心先向西南迁移再向正东方向迁移，分布主趋势基本维持在东北、西南方向，并逐渐趋于离散分布，空间分布更加均匀。

关键词：GEE；武汉市；土地利用分类；不透水面；时空变化
中图分类号：TU984　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）05-0069-07

Analysis of Spatio-temporal Changes of Impervious Surfaces in Wuhan City, Hubei Province, China Using Multi-temporal Remote Sensing Images

GAO Yuling[1], HE Zhenming[1], CUI Haifu[1], ZHOU Zaiwen[2], PENG Li[3]
(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China;
2. Jingzhou Waterway of the Yangtze River, Jingzhou 434000, China;
3. Satellite Application Technology Center for Natural Resources of Jingzhou City, Jingzhou 434000, China)

Abstract: Based on 294 remote sensing images in 2010, 2015, 2020 and adjacent years, and the existing land-use products, we used the automatic generation combined with manual correction method to produce a classification sample data set, and carried out the land-use classification by the random forest classification method based on the neighborhood grid. Combined with the GIS spatial statistical analysis method, we analyzed the land-use changes in Wuhan City in the past ten years, and the spatio-temporal changes of impervious surfaces in combination with the landscape pattern index. The results show that in the past ten years, the area of impervious surfaces in Wuhan City has continued to increase, expanding by 1.44 times. The impervious surface has a total inflow of 698.86 km² and an outflow of 183.36 km², with cultivated land as the main object of its inflow and outflow. During this period, buildings in Wuhan City tended to be more densely distributed in specific areas, the overall density of impervious surfaces increased, but its continuity weakened and the degree of landscape fragmentation increased. From 2010 to 2020, the gravity center of impervious surfaces in Wuhan City first migrated to the southwest and then to the east. The main trend of distribution of impervious surfaces in the past ten years has basically remained in the northeast and southwest, and gradually tended to be discretely distributed, with a more uniform spatial distribution.

Key words: GEE, Wuhan City, land-use classification, impervious surface, spatio-temporal change

不透水面即不透水建筑材料所覆盖的地表，是城市化最显著的特征之一，也是评价城市发展进程的重要指标[1]。改革开放以来，我国的城市化水平由17.9%升至59.6%[2]。城市化进程的加速将促使经济和人口的增长，但也会造成一系列的生态环境问题，如热岛效应、生物多样性减少等[3]。因此，分析不透水面的时空变化，对城市可持续发展与规划具有重要意义[4]。随着遥感和GIS技术的快速发展，土地利用分类成为全球环境变化领域的一个重要研究方向[5]，国内外学者提出了大量遥感影像自动分类方法，如光谱指数、决策树、随机森林、支持向量机以及多种深度学习算法等，使大范围、高精度地物识别提取得以实现。目前，机器学习分类方法的提取精度普遍高于指数法，但需要大量具有代表性的训练样本，制作样本数据集

第一作者简介：高雨凌（2001—），硕士研究生，研究方向为土地利用分类、土地利用变化检测，E-mail：1270727927@qq.com。
通信作者：何贞铭（1969—），博士，副教授，研究方向为自然地理学与测绘学，E-mail：hbhzm2005@163.com。

时将耗费大量精力。本文提出了一种自动生成结合人工修正的样本数据集制作方法，利用现有分类产品自动生成训练样本再结合人工微调，最终得到样本数据集，能有效减少制作样本数据的时间，且能保证样本数据的准确性。长时序大范围的土地利用变化研究对软硬件的要求较高，需要大量的储存空间和强大的计算能力，导致目前我国土地利用分类数据更新较慢。随着云计算等相关技术的发展，涌现了一批遥感云计算平台，能实现长时序、全球尺度的遥感数据快速分析[6-7]。GEE集成了众多卫星遥感影像数据和地理空间数据，已在土地利用分类、全球耕地变化、生态环境质量评价、全球森林变化和全球地表水监测等多个领域[8-11]成为重要的分析工具。本文借助GEE平台，基于长时序遥感影像数据和相关土地利用分类产品，采用自动生成结合人工修正的样本数据集制作方法以及基于邻域网格的随机森林分类方法提取了武汉市近10年的土地利用信息；再利用GIS技术对各地类的流入流出情况进行分析；最后分析了武汉市不透水面的景观格局变化及其空间分布格局，为武汉市城市规划和可持续发展提供了科学依据和数据参考。

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

武汉市位于湖北省东部，地处长江中游、江汉平原东部，地理范围为29°58′~31°22′N、113°41′~115°05′E；东临鄂州市、西临孝感市、北依黄冈市、南依咸宁市，是湖北省省会，素有“九省通衢”之称；全市总面积为8 569.15 km^2，东西最大横距约为134 km，南北最大纵距约为155 km；地貌属鄂东南丘陵经江汉平原东缘向南麓低山丘陵过渡地区，中间低平，南北丘陵、岗垄环抱，北部低山林立[12]；属亚热带季风气候，具有常年雨量丰沛、热量充足、雨热同季、光热同季、冬冷夏热、四季分明等特点，平均气温为15.8~17.5℃；年无霜期通常为211~272 d，年降水量为1 150~1 450 mm[13]；截至2020年，常住人口为1 232.65万人，平均人口密度为1 438.5人/km^2。

1.2 数据来源与预处理

本文采用的遥感影像数据为Landsat5 TM和Landsat8 OLI数据，按时间筛选2010—2020年符合研究条件的影像数据用于2010年、2015年、2020年土地利用分类。由于随机森林分类过程中涉及各类光谱指数的计算，因此本文采用GEE中经过大气校正的SR产品（更适合跨时间和空间研究）。为提高分类的准确性，选择在每年植被生长季（4—10月）进行分类。由于研究区面积较大，而Landsat系列卫星的重访周期为16 d，无法保证影像数据不受云遮挡影响，因此将目标年份相邻年份的Landsat数据作为补充，即选取2009—2011年（34、36、27景Landsat5）、2014—2016年（28、37、42景Landsat8）、2019—2021年（37、28、25景Landsat8）数据构建无云影像数据集。本文采用的主要辅助数据包括Google Earth历史影像数据、SRTM V4数据、武汉市统计年鉴（2010年、2015年、2020年）和武汉市行政区划边界。在自动生成备选样品数据库时采用中国年度土地覆盖数据集（CLCD）[14]和中国多时期遥感监测土地利用数据集（CNLUCC）[15]。

1）构建无云影像集。本文采用融合目标年份及其相邻年份影像的方法构建连续3年的影像集，从而合成目标年份的无云影像。以2010年为例，首先对2010年植被生长季的所有影像数据进行去云处理；然后计算每个像元的像素中值，生成2010年中值影像，若该中值影像中某些像元数据缺失，则通过2009年、2011年影像的像元中值填补空缺数据；最终得到无云且无数据缺失的2020年影像。

2）构建多维影像特征集。为使分类结果更精确，本文利用光谱指数、物候和地理特征构建了多维影像特征集，作为随机森林分类器的输入特征。本文计算得到归一化建筑指数（NDBI）、归一化植被指数（NDVI）、归一化燃烧率（NBR2）、地表水指数（LSWI）、改进的归一化水体指数（MNDWI）和增强型植被指数（EVI），其中NDBI用于识别不透水面[16]、NBR2用于区分裸地和不透水面[17]、NDVI和EVI用于区分植被与非植被[18]、LSWI和MNDWI用于划分水体区域[19-20]。为更好地区分建筑与非建筑，将NDBI最大时对应的影像光谱值加入光谱特征中，并用其计算上述光谱指数。由于本文的年内时间跨度为6个月，各地类的光谱特征持续变化，因此各类光谱指数的标准差能使物候信息更加突出。本文计算得到18个光谱特征值（Red、Green、Blue、NIR、SWIR1、SWIR2、Red_M、Green_M、Blue_M、NIR_M、SWIR1_M、SWIR2_M、Red_S、Green_S、Blue_S、NIR_S、SWIR1_S、SWIR2_S，后缀M表示NDBI最大时对应的光谱值，后缀S表示其标准差），18个光谱指数（NDBI、NDVI、NBR2、LSWI、MNDWI、EVI、

NDBI_M、NDVI_M、NBR2_M、LSWI_M、MNDWI_M、EVI_M、NDBI_S、NDVI_S、NBR2_S、LSWI_S、MNDWI_S、EVI_S，后缀含义同上），3个地形特征（Elevation、Slope、Aspect，根据SRTM高程数据计算）和2个地理坐标（Latitude、Longtitude）。

2　研究方法

2.1　自动生成与人工修正相结合的样本数据集制作

首先，本文调用2010年、2015年、2020年的CLCD和CNLUCC数据，依据构建的分类体系（未利用地、林地、耕地、水体、不透水面）对土地利用数据的各类地物进行重新映射并取交集。由于交集图层上的某些像元存在不确定性，无法直接生成样本数据集，选择应用大小为3×3的空间滤波器，仅保留中心像元及其周围8个像元均为相同地物类别的像素[21]，这样可有效排除不同地物交界处易于混淆且缺乏代表性的像素。然后，以一个像元为代表样本，得到备选样本数据集。选择标准遵循Zhang等[22]的研究，将3×3窗口内所有值的质心向量定义为 $\boldsymbol{v}_c=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{v}_i/n$，$n$ 为窗口面积，本文中为9；$\boldsymbol{v}_i$ 为像元 i 的样本值向量。最终选择的像元是使 $\Delta_i=\left|\boldsymbol{v}_i-\boldsymbol{v}_c\right|$ 最小的像元。

由于各地类数据集均不可避免的存在误差，本文将备选样本数据集的样本点导入奥维互动地图中，并结合同期的历史高清影像进行人工目视解译，修改错分的样本点属性，使样本点的分布更加均匀、特征明显。同时，对地物交界区域（如耕地与不透水面、不透水面与未利用地）进行了样本补充，确保样本数据集中包含足够数量的复杂场景样本，使训练样本中复杂场景样本占比达到20%，以提高模型在复杂场景下的分类精度。经过上述步骤最终得到具有代表性的样本数据集。

2.2　基于邻域网格的随机森林分类

为进一步优化全局分类模型，Zhang等[23]提出了瓦片分类模型，可减少地类间的错分，提高分类精度。本文基于瓦片模型，构建了一种基于邻域网格的随机森林分类模型，主要步骤为：

1）创建分类格网。设研究区最小外接矩形的左下角、右上角坐标为 $(x_{\min},y_{\min})$、$(x_{\max},y_{\max})$，按需求设置经纬度分割间隔 dx、dy，从左下角开始，沿经纬度方向将研究区的最小外接矩形划分为 $m\times n$ 个网格单元。

2）获取分类样本。分类某一网格单元 $G_{i,j}$ 时，取样本数据集与该网格单元3×3窗口内的格网交集，即选择中心网格单元及其周围8邻域网格内的样本数据作为该待分类网格的分类样本数据集 $T_{i,j}=\left\{S_{k,l}\middle|k\in[i-1,i+1],l\in[j-1,j+1]\right\}$，$S_{k,l}$ 为 $G_{k,l}$ 中的样本数据。

3）随机森林分类。所有网格单元样本采样完成后，即可对整个研究区进行土地利用分类。对于每个 $G_{i,j}$，利用 $T_{i,j}$ 训练该单元的随机森林模型 $RF_{i,j}$，并将模型应用于 $G_{i,j}$ 的分类，最终拼接所有网格的分类结果得到整个研究区的土地利用分类图[24]。

在GEE云平台中，大范围土地利用分类依赖于云平台分配的算力和网络性能；本文方法每次分类只需对3×3区域内的网格单元进行计算，降低了对软硬件的要求，提高了计算速度。

2.3　景观格局指数

对于非连续的土地格局变化，景观格局指数能高度浓缩空降格局信息，基于土地利用数据的景观格局指数分析更是景观空间格局研究的重要手段[25]。本文选取斑块密度（PD）、最大斑块指数（LPI）、聚集度指数（AI）对不透水面进行景观格局变化分析[26]。将分类得到的武汉市土地利用数据在ArcGIS中重采样为30像元×30像元，利用Fragstats 4.3软件计算各类指标。各指标的计算公式为：

$$PD=\frac{N_i}{A}$$

$$\mathrm{LPI}=\frac{\max\left(a_1,\cdots,a_n\right)}{A}\times 100$$

$$AI=2\ln n+\sum_{\substack{0\leqslant i\leqslant n\\0<j\leqslant n}}P_{ij}\ln P_{ij}$$

式中，N_i 为不透水面变化景观类型 i 的斑块数量；A 为景观总面积；a 为斑块面积；n 为景观斑块数量；P_{ij} 为斑块类型 i 和 j 相邻的概率。

3　研究结果与分析

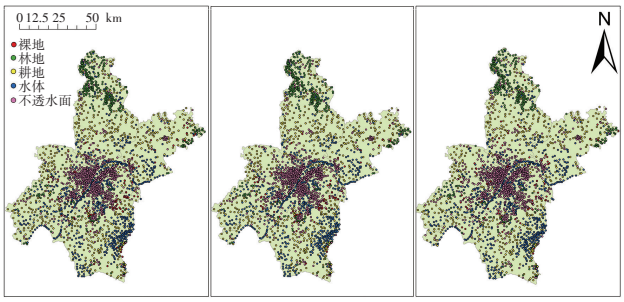
3.1　分类结果精度评价

本文在每个研究年份约生成3 000个训练样本，按8∶2的比例划分训练样本和测试样本，样本数量及其空间分布见表1、图1。由于本文采用基于邻域网格的随机森林分类，每个网格的样本数据及其训练得到的模型都是不同的；因此将各网格的验证集合并，在

分类结果中提取与验证集位置相同的像素，将其值赋给相应的样本点，进而计算精度评价指标。

表1 样本数量分布表/个

地类	2010年	2015年	2020年
未利用地	185	203	172
林地	400	400	400
耕地	622	661	603
不透水面	1 169	1 213	1 294



a 2010年 b 2015年 c 2020年

图1 样本点空间分布图

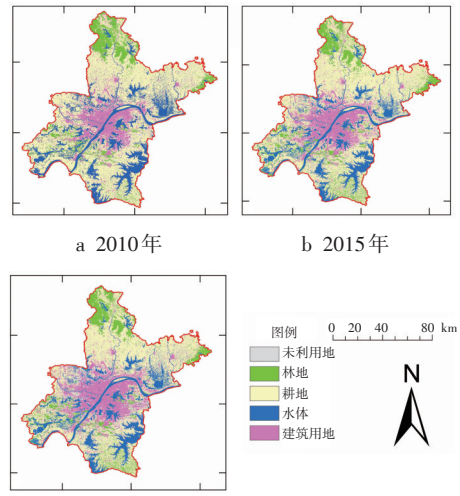
审图号：GS(2019)1822

由混淆矩阵计算得到的分类结果总体精度（*OA*）、Kappa系数以及各地类的用户精度（*UA*）和制图精度（*PA*）见表2。3个研究年份分类结果的*OA*分别为92.80%、92.99%、93.07%，Kappa系数均达到0.90以上，表明3个年份的分类结果较精确，能满足后续研究需求。

表2 分类结果精度评价表

类别	指标	2010年	2015年	2020年
未利用地	*UA*	71.05%	74.58%	71.93%
	PA	90.00%	89.80%	78.85%
林地	*UA*	93.98%	91.27%	94.92%
	PA	96.90%	95.83%	96.55%
耕地	*UA*	94.61%	89.72%	92.12%
	PA	85.78%	87.67%	86.98%
水体	*UA*	96.33%	97.55%	96.33%
	PA	96.77%	97.55%	99.53%
不透水面	*UA*	94.19%	96.81%	94.72%
	PA	94.19%	93.17%	94.06%
Kappa系数		0.906 7	0.908 4	0.908 5

2010—2020年武汉市土地利用分类结果见图2。为验证分类结果的有效性，将其与重分类后的CLCD产品进行空间叠加分析，计算各地类一致像元数量和一致率。结果表明，在本文分类体系下，耕地、林地、水体和不透水面的一致性比例分别为78.5%、79.3%、93.6%、90.25%，分类结果的可靠性较高。



a 2010年 b 2015年

c 2020年

图2 2010—2020年武汉市土地利用分类图

审图号：GS(2019)1822

3.2 土地利用变化分析

1）土地利用类型面积与结构变化。本文在GEE云平台中计算了3期土地利用分类结果中各地类的面积、占比和面积变化情况，结果见表3、4，可以看出：①2010—2015年未利用地、耕地、水体均呈减少趋势，其中未利用地减少幅度最大，达35.51%，耕地次之，水体最小，而林地和不透水面面积增加，分别增加了79.88、306.05 km²；②2015—2020年仅有耕地呈减少趋势且幅度较大，达10.87%，而未利用地出现大幅增加，增加面积为2010年面积的316.13%，林地和水体面积小幅增加，不透水面面积增加209.95 km²；③在2010年、2015年、2020年的土地利用类型中，耕地均为主要地类，2015年不透水面占比超过水体位于第二，2010—2020年虽然水体面积总体呈减少趋势但其面积占比仍大于林地，未利用地的占比最小。

表3 2010—2020年武汉市各地类面积与占比

地类	2010年		2015年		2020年	
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
未利用地	131.32	1.53	84.69	0.99	352.42	4.12
林地	815.86	9.53	895.74	10.46	897.01	10.48
耕地	4 915.14	57.42	4 648.13	54.30	4 143.03	48.40
水体	1 534.02	17.92	1 462.19	17.08	1 488.32	17.39
不透水面	1 162.96	13.59	1 469.01	17.16	1 678.96	19.61

表4　2010—2020年武汉市各地类面积变化

类别	2010—2015年		2015—2020年		2010—2020年	
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
未利用地	−46.63	−35.51	267.73	316.13	221.10	168.37
林地	79.88	9.79	1.27	0.14	81.15	9.95
耕地	−267.01	−5.43	−505.10	−10.87	−772.11	−15.71
水体	−71.83	−4.68	26.13	1.79	45.70	−2.98
不透水面	306.05	26.32	209.95	14.29	516.00	44.37

2）土地利用类型迁移分析。本文在ArcMap 10.7中对3期分类结果进行统计分析，得到地类间的流入与流出情况（表5~7），可以看出，2010—2015年不透水面向其他地类共流出了220.74 km²，主要向耕地转移；其他地类向不透水面共流入526.28 km²，主要来源为耕地。该时期林地和不透水面净流入面积为正，未利用地、耕地和水体净流入面积为负，其中不透水面净流入面积最大，耕地净流入面积最小。2015—2020年不透水面向其他地类共流出了80.92 km²，主要向耕地和未利用地转移；其他地类向不透水面共流入290.89 km²，主要来源为耕地。该时期仅有耕地的净流入面积为负，为−505.1 km²；未利用地净流入面积最大，为267.73 km²。总体而言，在近10年内武汉市不透水面流入的主要来源为耕地，共流入564.83 km²，

表5　2010—2015年武汉市土地利用类型转移矩阵/km²

	未利用地	林地	耕地	水体	不透水面	2010年总计	流出
未利用地	5.99	13.79	59.31	3.17	49.06	131.32	125.33
林地	5.78	567.48	195.34	18.89	28.37	815.86	248.38
耕地	55.76	286.79	3 997.83	157.99	416.75	4 915.11	917.29
水体	2.67	18.15	214.46	1 266.60	32.11	1 533.98	267.38
不透水面	14.49	9.53	181.19	15.53	942.20	1 162.94	220.74
2015年总计	84.68	895.74	4 648.13	1 462.18	1 468.48	8 559.21	
流入	78.69	328.25	650.30	195.58	526.28		
净流入	−46.63	79.88	−266.97	−71.80	305.54		

表6　2015—2020年武汉市土地利用类型转移矩阵/km²

	未利用地	林地	耕地	水体	不透水面	2015年总计	流出
未利用地	1.73	1.18	10.22	0.25	71.31	84.69	82.96
林地	21.22	769.41	91.99	8.29	4.84	895.74	126.33
耕地	302.25	112.57	3 952.69	75.91	204.73	4 648.13	695.45
水体	5.12	6.75	41.29	1 399.00	10.02	1 462.18	63.18
不透水面	22.11	7.10	46.84	4.88	1 388.07	1 468.99	80.92
2020年总计	352.42	897.00	4 143.03	1 488.32	1 678.96	8 559.73	
流入	350.69	127.60	190.34	89.32	290.89		
净流入	267.73	1.26	−505.10	26.14	209.97		

表7　2010—2020年武汉市土地利用类型转移矩阵/km²

	未利用地	林地	耕地	水体	不透水面	2010年总计	流出
未利用地	7.77	11.19	49.65	2.89	59.82	131.32	123.56
林地	16.77	584.52	164.21	17.60	32.76	815.86	231.34
耕地	275.80	274.01	3 632.91	167.56	564.83	4 915.11	1 282.20
水体	15.95	15.69	174.85	1 286.05	41.44	1 533.98	247.93
不透水面	36.14	11.60	121.41	14.21	979.58	1 162.94	183.36
2020年总计	352.42	897.00	4 143.03	1 488.32	1 678.44	8 559.21	
流入	344.66	312.48	510.12	202.26	698.86		
净流入	221.10	81.15	−772.08	−45.67	515.50		

同时有121.41 km²的不透水面转为耕地，为其流出的主要部分。从净流入方面看，仅有耕地和水体净流入面积为负，分别为–772.08、–45.67 km²；不透水面的净流入面积最大，为515.5 km²。

3.3 不透水面时空变化分析

1）景观格局变化。结果表明，2010—2015年不透水面的*PD*由5.25个/km²增至5.95个/km²，说明该时期随着土地利用的剧烈变化，大量不透水面在空间上未连片，导致其景观斑块的异质性增加，景观破碎化程度加剧；其LPI由7.69%降至6.14%，说明不透水面中最大连通斑块变小，在城市发展过程中部分不透水面被分割为较小或孤立的斑块，进一步反映了景观破碎化程度的增加；其*AI*由82.65%升至83.70%，说明随着城市化程度的增加，建筑物更密集地分布在特定区域内。2015—2020年不透水面*PD*小幅增至6.22个/km²，说明建筑物分布的密集程度和破碎化程度都在增加；其LPI明显升高，由6.14%升至7.21%，说明不透水面呈现出更大的单一连片或连续区域，趋于集中化；其*AI*仍在升高，由83.70%升至84.26%，说明不透水面趋于集中分布，进一步反映了城市化程度的提高。纵观整个研究期，武汉市不透水面*PD*增加了0.97个/km²，LPI下降了0.75%，*AI*上升了1.61%，表明虽然不透水面的总体密度增加了，但其连片性减弱，而不透水面更趋向于集中分布在较小的区域内，反映了城市化进程的加速进行以及土地利用的集中化趋势。

2）重心迁移与标准差椭圆分析。2010年、2015年、2020年武汉市不透水面的重心坐标分别为114°33′E、30°63′N，114°30′E、30°58′N，114°29′E、30°5′N。武汉市不透水面标准差椭圆参数见表8、图3，可以看出，2010—2020年武汉市不透水面的重心均位于中部地区，靠近长江，这是由于汉口位于汉水与长江交汇处，便于水路运输和连接，促进了商业和物流的发展；2010—2015年不透水面的重心先向西南方向迁移，直线迁移距离达6 811.88 m，2015—2020年重心向正西方向迁移，迁移距离为901.69 m。总体而言，前一时期重心迁移距离和速率均高于后一时期，结合

表8 2010—2020年武汉市不透水面标准差椭圆参数

年份	短轴标准差/km	长轴标准差/km	旋转度/(°)	面积/km²	扁率
2010	32.05	45.16	25.96	4 836.95	0.290 3
2015	32.91	46.76	33.34	5 146.44	0.296 2
2020	32.92	45.67	39.74	5 027.17	0.279 2

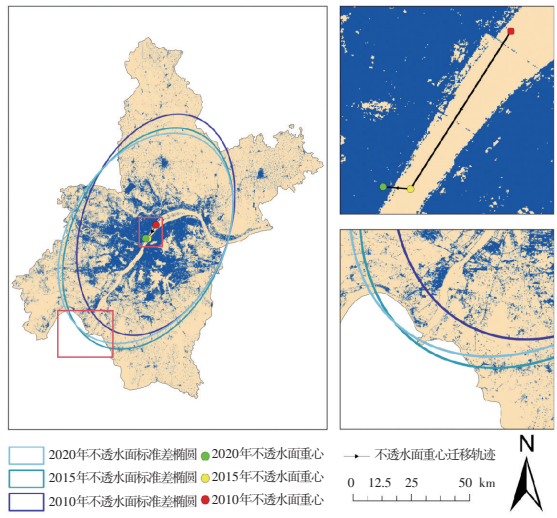


图3 2010—2020年武汉市不透水面重心与标准差椭圆

审图号：GS(2019)1822

土地利用分类结果来看，2010—2015年是武汉市不透水面的快速发展期，汉南区、蔡甸区大量耕地转变为不透水面，导致重心向西南方向迁移。结合标准差椭圆相关参数分析，研究年份的椭圆长轴均由东北向西南延伸，且旋转度在逐渐增大，说明不透水面总体呈现东北向西南的空间分布格局并逐渐向西偏移；短轴在逐渐增大，说明不透水面逐渐转向离散分布；椭圆面积和扁率均先增后减，说明不透水面的扩张特征在前一时期更明显，后一时期的空间分布更加均匀。

4 结 论

本文基于2010—2020年多时相遥感影像，采用自动生成结合人工修正的样本数据集制作方法、基于邻域网格的随机森林分类方法和景观格局指数等，对武汉市进行了土地利用分类并开展了不透水面的时空变化分析，为武汉市可持续发展和城市规划提供了数据支持和参考依据。

1）2010—2020年武汉市不透水面面积持续增加，由1 162.96 km²增至1 678.96 km²，扩张了1.44倍。不透水面共流入698.86 km²，流出183.36 km²，耕地为其流入流出的主要对象。

2）2010—2020年武汉市不透水面*PD*由5.25个/km²增至6.22个/km²，LPI由7.96%减至7.21%，*AI*由82.65%增至84.26%，反映了研究期内武汉市建筑物更趋于密集分布在特定区域，不透水面总体密度增加，但其连片性减弱，景观破碎化程度增加。

3）2010—2020年武汉市不透水面重心先向西南

迁移再向正东方向迁移，总迁移距离为7 222.72 m。从标准差椭圆参数来看，10年间不透水面分布的主趋势基本维持在东北、西南方向，2015年以后不透水面逐渐趋于离散分布，空间分布更加均匀。

参考文献

[1] Arnold J C L, Gibbons C J. Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator[J]. Journal of the American planning Association, 1996, 62(2):243-258

[2] 李浩,袁晓玲,李毓. 城市化水平、生态环境质量对居民幸福感影响的实证分析:基于中国家庭追踪调查数据[J]. 河南社会科学,2019,27(2):98-103

[3] 米军,张肖,刘良云. 1985—2020年上海市不透水面时空特征演化分析[J]. 遥感技术与应用,2023,38(2):297-307

[4] 徐冠华,葛全胜,宫鹏,等. 全球变化和人类可持续发展:挑战与对策[J]. 科学通报,2013,58(21):2100-2106

[5] 李文灏. 杭州市耕地时空演变与耕地保护分区研究[D]. 杭州:浙江大学,2021

[6] 程伟,钱晓明,李世卫,等. 时空遥感云计算平台PIE-Engine Studio的研究与应用[J]. 遥感学报,2022,26(2):335-347

[7] 陈柯兵,孙思瑞. 基于国产PIE-Engine和AI Earth遥感云平台的三种水域信息提取方法对比研究[C]// 2022(第十届)中国水利信息化技术论坛论文集,2022

[8] Patel N N, Angiuli E, Gamba P, et al. Multi-temporal Settlement and Population Mapping from Landsat Using Google Earth Engine[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 35:199-208

[9] Xiong J, Thenkabail P S, Gumma M K, et al. Automated Cropland Mapping of Continental Africa Using Google Earth Engine Cloud Computing[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 126:225-234

[10] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution Mapping of Global Surface Water and Its Long-term Changes[J]. Nature, Nature Publishing Group, 2016, 540(7633): 418422

[11] Hansen M C, Potapov P V, Moore R, et al. High-resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change[J]. Science, American Association for the Advancement of Science, 2013, 342(6160):850-853

[12] 2021年武汉市统计年鉴.[EB/OL].(2023-03-27)[2023-07-30]. https://tjj. hubei. gov. cn/tjsj/sjkscx/tjnj/gsztj/whs/202303/P020230327547984815812. pdf

[13] 2020年武汉市统计年鉴[EB/OL].(2022-01-25)[2023-07-30]. https://tjj. hubei. gov. cn/tjsj/sjkscx/tjnj/gsztj/whs/202201/P020220125601159778648. pdf

[14] 杨杰. 中国30米年度土地覆盖数据集及其动态变化(1985—2022年)[DS]. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心(http://www. ncdc. ac. cn),2023

[15] 徐新良,刘纪远,张树文,等. 中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)[DS]. 资源环境科学数据注册与出版系统(http://www. resdc. cn/DOI),2018

[16] 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

[17] 冯娴慧,曾芝琳,景美兮,等. 基于NDVI和EVI不同植被指数表征的粤港澳大湾区植被空间格局驱动因子影响力比较分析[J]. 华中农业大学学报,2023,42(4):116-124

[18] Kennedy R E, Yang Z, Cohen W B. Detecting Trends in Forest Disturbance and Recovery Using Yearly Landsat Time Series: 1. LandTrendr-Temporal Segmentation Algorithms[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(12): 2897-2910

[19] Xiao X, Boles S, Liu J, et al. Mapping Paddy Rice Agriculture in Southern China Using Multi-temporal MODIS Images[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(4): 480-492

[20] 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,2005,9(5):589-595

[21] Zhang C, Zhang H, Tian S. Phenology-assisted Supervised Paddy Rice Mapping with the Landsat Imagery on Google Earth Engine: Experiments in Heilongjiang Province of China from 1990 to 2020[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212:108105

[22] Zhang H K, Roy D P. Using the 500 m MODIS Land Cover Product to Derive a Consistent Continental Scale 30 m Landsat Land Cover Classification[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 197:15-34

[23] Zhang M, Huang H, Li Z, et al. Automatic High-resolution Land Cover Production in Madagascar Using Sentinel-2 Time Series, Tile-based Image Classification and Google Earth Engine[J]. Remote Sensing, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020, 12(21):36-63

[24] 周再文. 基于时序遥感影像的荆州市耕地利用动态监测研究[D]. 荆州:长江大学,2024

[25] 李均力,姜亮亮,包安明,等. 1962—2010年玛纳斯流域耕地景观的时空变化分析[J]. 农业工程学报,2015,31(4):277-285

[26] 王文才,杜嵩,邢晓露. 基于GIS的刘家峡水库流域景观生态风险评价及驱动力分析[J]. 地理空间信息,2024,22(10):70-74