

长时序遥感影像监测上海临港新片区城市化进程

陈 明, 郭东旭, 马振玲, 蒙梅清

(上海海洋大学 信息学院, 上海 201306)

摘 要: 为了监测中国(上海)自由贸易试验区临港新片区长时间序列城市化进程, 分析其时空连续变化特征及驱动力, 本研究利用1984—2020年Landsat长时间序列遥感影像, 构建年均值及像元水平归一化建筑物指数、归一化植被指数、归一化水体指数时间序列曲线, 采用线性回归拟合法进行突变点检测, 确定城市化开始和结束年份。在此基础上, 选取1984年和2020年作为基准年份, 利用随机森林分类器对临港新片区土地利用/覆盖进行分类。结果显示, 1984—2020年新增城市用地主要来源于水域和植被, 城市用地面积增长了346.73 km², 年均增长率为12.85%, 以2001和2010年为拐点, 分为3个阶段: 低速发展阶段(1984—2000年), 年均增长率为8.83%; 中速发展阶段(2001—2010年), 年均增长率为12.49%; 高速发展阶段(2011—2020年), 年均增长率为15.39%。研究表明, 经济与人口的增长是城市用地扩张的主要驱动力。上海临港新片区城市化发展在空间上呈现沿海岸带分布、条块状分布的特征, 不同时期城市用地扩张速度和来源有所不同, 且经济发展与城市化进程相互促进。本研究对未来长江经济带精细化城市建设、河口海岸带资源的合理有效利用具有极其重要的现实意义。

关键词: 长时序遥感影像; 城市化进程; 突变点检测; 随机森林分类器; 上海临港新片区

中图分类号: P 237; F 299.27

文献标志码: A

中国(上海)自由贸易试验区临港新片区是上海市建设的重点新城区之一, 是长江经济带走向21世纪海上丝绸之路的重要枢纽地带, 是滨江沿海发展轴的主要空间承载区, 同时又地处西太平洋弧带的中段和中国黄金海岸带的中点, 是世界级重要河口海岸, 大陆和海洋之间重要的过渡地带, 更容易受到城市发展和人类活动的影响, 是生态环境敏感区域。自2019年中国(上海)自由贸易试验区临港新片区正式成立以来, 临港新片区城市化进程快速发展, 基础建设、产业总体布局等方面发生巨大变化, 但临港新片区城市化发展受到区位特点、区域政策、社会秩序等多方面影响, 其经济水平与上海其他地区相比仍存在差距。因此, 监测临港新片区高时频城市化过程, 总结过去二十多年的发展规律和阶段特征, 对未来临港新片区城市建设、河口海岸带资源的合理有效利用及经济社会绿色协调发展具有极

其重要的现实意义^[1]。

利用长时间序列遥感影像可以提取城市演变信息, 获取并分析城市化时空格局演变过程和城市扩展规律。国内外学者对区域城市化时间序列的监测进行了大量研究, SEXTON等^[2]运用Landsat影像和决策树算法, 对美国华盛顿-巴尔的摩区域1984—2010年的不透水面变化进行了逐年监测, 以探究其深层次的水文地质特征; DOU等^[3]在美国加利福尼亚州萨特和金斯两个县, 利用归一化差异指数(Normalized difference index, NDI)建立基于NDIs的Landsat时间序列图像, 设计了一个遥感影像分类框架, 由基于深度学习的特征提取器和基于多分类器系统(Multiple classifiers system, MCS)的分类模型组成, 利用该框架对时间序列遥感影像进行土地利用/覆盖分类, 分类精度显著提升; 张磊等^[4]以Landsat-8 OLI影像为数据源, 辅以欧空局300 m

收稿日期: 2025-02-18 修回日期: 2025-03-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(42101443)

作者简介: 陈 明(1966—), 男, 教授, 研究方向为遥感信息处理与应用。E-mail: mchen@shou.edu.cn

通信作者: 马振玲, E-mail: zlma@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

空间分辨率全球陆地覆盖数据为参考,对长春市主城区使用监督分类和决策树分类方法,对2019的土地利用/覆被进行信息提取研究;CAO等^[5]采用Landsat时间序列影像,结合时序分割、随机森林分类器和长时间序列突变点检测方法,分析了舟山群岛城市扩张进程;张婷等^[6]利用2002—2015年间3个时相遥感影像进行临港新城城镇用地信息提取,分析城市扩张的特征,并通过相关社会经济统计资料对城市扩张的驱动因子进行分析;沈昕颖等^[7]基于遥感图像,研究了1990—2020年盐城海岸带湿地的景观时空动态变化。通过对不同时间段的遥感影像进行对比分析,揭示了盐城海岸带湿地在近年来的退化与恢复动态,分析了人类活动与自然因素对湿地景观变化的影响。李凤莹等^[8]则利用遥感生态指数,探讨了上海南汇东滩海岸带湿地的生态格局变化,研究表明,随着城市化进程的推进,南汇东滩湿地生态系统发生了显著变化,湿地面积逐渐减少,同时生态质量指数显著下降。刘瑜等^[9]基于遥感影像,分析了长江口南汇潮滩植被群落的时空动态变化,研究结果显示,随着气候变化和人为干扰的影响,潮滩植被群落的空间分布发生了较大变化,特别是在极端气候事件频发的背景下,植被的稳定性与恢复力受到显著影响。现阶段,临港新片区经济发展进入改革再升级阶段,城市用地必然会显著增加,亟需开展长时间序列城市化进程的研究来精确揭示临港新片区城市化的动态演化过程与规律。

综上,本研究利用1984—2020年临港新片区Landsat长时间序列遥感影像,分别构建年均值及像元水平归一化建筑物指数(Normalized difference built-up index, NDBI)、归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)、归一化水体指数(Normalized difference water index, NDWI)时间序列曲线,利用线性回归拟合法进行突变点检测,获得平均城市化及像元级城市化开始和结束的年份以及城市用地演变特点及规律,在此基础上,选择首末两期影像进行土地利用/覆盖分类,分析新增城市用地的空间分布特点及新增用地来源,分析城市用地在面积上的整体扩张特点及阶段特征,并探讨城市化与社会

经济指标之间的关系,结果可以为临港新片区经济与生态建设绿色协调发展提供有价值的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

中国(上海)自由贸易试验区临港新片区位于上海大治河以南、金汇港以东(包括小洋山岛以及浦东国际机场南侧区域),地处长江口南岸,东临杭州湾,西及黄浦江,南接洋山滨,北邻东海,是一个以港口、产业和城市为一体的综合性开发区,总面积873 km²(图1)。地势整体平缓,由于长期受潮汐冲刷、海浪冲击和地壳泥沙堆积等地质作用,形成了以盐碱地、沼泽和潮滩为主要地貌类型的滨海平原,平均海拔3~5 m。属于亚热带季风气候,具有较高的平均降水量、温度和湿度。年平均温度约16℃,年降水量约为1100 mm。是一个充满活力的现代化开发区域,同时在自然地理环境方面具备得天独厚的优势。

1.2 研究方法

本研究利用1984—2020年临港新片区Landsat长时间序列遥感影像构建NDBI、NDVI、NDWI时间序列曲线,利用移动平均滤波器对时序数据进行平滑去噪,减小由于低能见度、坚硬地面等因素对时间序列数据造成的干扰;利用线性回归法进行突变点检测,得到临港新片区平均城市化及像素级城市化进程演变过程。在此基础上,选取1984年和2020年作为基准年份,利用随机森林分类器对临港新片区进行土地利用/覆盖监督分类,分析城市用地在空间及面积上的整体扩张特点及阶段特征,探讨城市化与GDP、人口等社会经济因子之间的关系,实现临港新片区精细城市化进程的长时间序列遥感动态监测。

1.2.1 实验数据及预处理

本研究选取1984—2020年春季少雨期(2、3、4月)临港新片区Landsat影像作为实验数据,以减少云雨雪等天气和季节不同对影像处理和分析的影响^[10]。影像共24期,条带号为118、39,影像所属传感器、获取时间及含云量等信息如表1所示。本研究技术路线如图2所示。

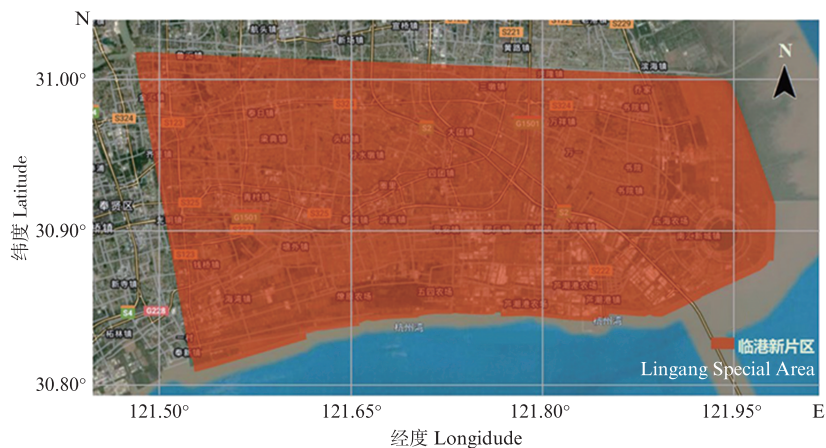


图 1 临港新片区地理位置示意图

Fig. 1 Geographical location diagram of Lingang Special Area

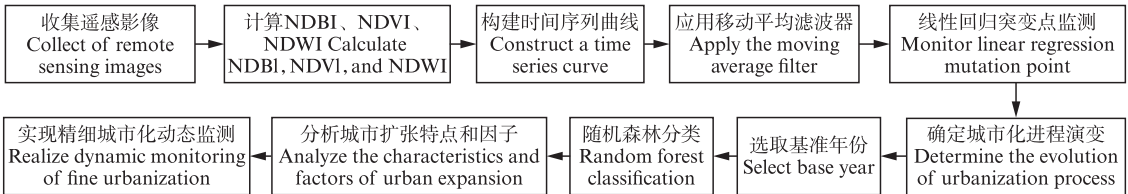


图 2 技术路线图

Fig. 2 Technology roadmap

表 1 临港新片区 24 期 Landsat 卫星影像信息

Tab. 1 Landsat satellite image information of Lingang Special Area in 24 phases

序号 Number	卫星传感器 Satellite sensor	获取时间 Acquisition time	云量 Cloud cover/%
1	Landsat 4-5 TM	1984-04-23	0.20
2		1985-02-21	40.00
3		1991-02-22	10.84
4		1992-04-13	10.84
5		1993-03-31	0.01
6		1994-03-02	0.12
7		1995-04-06	8.07
8		1996-04-24	0.25
9		1998-02-09	0
10		1999-04-01	0.46
11	Landsat 7 ETM SLC-on	2000-04-27	0
12		2001-03-21	0.03
13	Landsat 4-5 TM	2002-03-08	0.24
14	Landsat 7 ETM SLC-off	2005-02-20	27.62
15	Landsat 4-5 TM	2006-04-20	0
16		2007-04-07	0.01
17	Landsat 7 ETM SLC-off	2008-04-25	0.64
18		2010-04-23	43.48
19		2012-03-27	0
20	Landsat 8 OLI	2015-04-21	0.08
21		2016-04-23	7.38
22		2017-04-02	0.37
23		2019-04-08	9.00
24		2020-02-22	0.02

对 24 期遥感影像进行预处理,为时间序列遥感动态监测提供可靠的基础数据^[11]。利用 Landsat 元数据中各波段增益与偏移量进行辐射定标,将影像数字量化值转化为传感器入瞳处辐射亮度值^[12]。采用 MODTRAN 校正模型^[13]对辐射定标后的 Landsat 影像进行大气校正。以 2020 年影像为基准图像,在基准影像与待配准影像上选取均匀分布于影像平面的同名点对,以三次多项式作为配准模型,选择最近邻像元法进行灰度重采样,将其他年份影像配准到与 2020 年基准影像相同的坐标参考系统。利用临港片区的矢量边界范围(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/index.html>),对数据进行裁剪,最终得到临港新片区 24 期遥感影像。

本研究采用谷歌地球影像辅助分类数据集进行分类精度评定,采用社会经济统计数据(GDP 和人口数量等)进行临港新片区城市化驱动力分析。

1.2.2 光谱指数计算

利用 NDVI、NDWI、NDBI 构建时间序列曲线,对曲线进行平滑去噪及突变点检测,以获取城市化开始和结束的年份。NDVI、NDWI、NDBI 计算公式如下:

$$I_v = \frac{N - R}{N + R} \quad (1)$$

式中: I_v 为归一化植被指数 NDVI 值; N 为近红外波段反射率; R 为红波段的反射率。NDVI 取值为 -1~1,大于 0 时为植被,数值越大代表植被越茂盛^[14]。

$$I_w = \frac{G - N}{G + N} \quad (2)$$

式中: I_w 为归一化水体指数 NDWI 值; G 为绿波段反射率; N 为近红外波段反射率。NDWI 用于估算水体信息,大于 0 时为水体,数值越高则代表水体所占面积越大^[15]。

$$I_b = \frac{M - N}{M + N} \quad (3)$$

式中: I_b 为归一化建筑物指数 NDBI 值; M 为中红外波段反射率; N 为近红外波段反射率。当 NDBI 值大于 0 时为城市用地,NDBI 值小于 0 时为非城市用地。

1.2.3 时间序列遥感城市化监测

由于低能见度、坚硬地面等外部影响以及其

他干扰信号等因素会导致时间序列观测值出现异常情况,从而导致曲线不平滑,因此必须使用带有滤波器的平滑算法对曲线进行平滑和重建^[16]。本研究采用移动平均滤波法,通过计算窗口内数据点的平均值来减少遥感时间序列数据的软噪声^[5]。

利用时间序列遥感数据进行城市化检测实质是进行突变点检测。对突变点进行检测的基本假设是:在突变点之前和之后,时间序列的残差、均值、方差、自相关等统计量可能发生显著的变化。本研究根据线性回归法进行城市化监测。线性回归法基于简单的数学模型,假设因变量和自变量之间存在线性关系。这种简单性使得结果易于解释,研究人员可以直观地理解城市化进程中的趋势和突变点。线性回归法对数据的分布和噪声具有一定的鲁棒性。在存在一定程度的噪声和数据不完整的情况下,线性回归法仍能提供相对稳定的结果。在本研究中,线性回归法能够快速、有效地检测出临港新片区城市化进程中的突变点,为后续的详细分析和模型验证提供了坚实的基础。若植被转变为城市用地,则 NDVI 呈现平稳-降低-平稳的趋势;若水域转变为城市用地,则 NDWI 呈现平稳-降低-平稳的趋势。因此,在城市化过程中,NDVI 和 NDWI 曲线会出现两个拐点,分别对应从平稳到降低、从降低到平稳两个变化。通过逐年观测值得到一条线性回归拟合曲线,比较各个观测值与线性拟合值的残差,残差最大值对应的年份即开始城市化的年份,残差最小值对应的年份即完成城市化的年份,二者之间的年份差即城市化过程的持续时间^[5]。

1.2.4 遥感影像土地利用/覆盖分类

本研究采用随机森林分类器(Random forest, RF)^[17]对临港新片区进行土地利用/覆盖监督分类,分类流程包括类别定义/特征判别、样本点选取^[18]、选择分类方法、影像分类、分类后处理^[19]、精度评价等 6 个步骤。针对分类后出现的小碎斑状况,采用 Majority/Minority 将小碎斑进行合并处理。采用混淆矩阵、生产者精度(Producer's accuracy, PA)、用户精度(User's accuracy, UA)、总体精度(Overall accuracy, OA)、Kappa 系数对分类结果进行精度评定。

2 结果

2.1 基于时间序列年均光谱指数的城市化监测

利用 1984—2020 年 Landsat 时间序列遥感影像提取 NDVI、NDWI、NDBI。选取 2010 年前为植被或水域, 2010 年后为城市用地的像元, 计算这些像元 NDVI、NDWI、NDBI 年内均值得到逐年时间序列观测值(图 3), 采用移动均值滤波器(窗口大小为 3)进行去噪处理得到光滑平稳的时间序列值(图 4)。由图 4a 看出, NDVI 呈现平稳-下降-平稳的趋势, 说明这些像元在 1984—2020 年间发生了城市化, 是由植被转变为城市用地; 由图 4b 看出, NDWI 呈现平稳-下

降-平稳的趋势, 说明这些像元在 1984—2020 年间发生了城市化, 是由水域转变为城市用地; 由图 4c 看出, NDBI 呈现稳定-上升-稳定的趋势, 说明这些像元在 1984—2020 年间发生了城市化, 是由水域或植被转变为城市用地。利用线性回归法进行拟合, 并计算各观测点残差, 由 NDVI 城市化年份检测结果(图 5a)、NDWI 城市化年份检测结果(图 5b)、NDBI 城市化年份检测结果(图 5c)看出, 最大残差(P1, 红点标记)对应的年份为 2005 年, 最小残差(P2, 红点标记)对应的年份为 2010 年, 说明选取的这些像元平均城市化开始的年份为 2005 年, 城市化结束的年份为 2010 年。

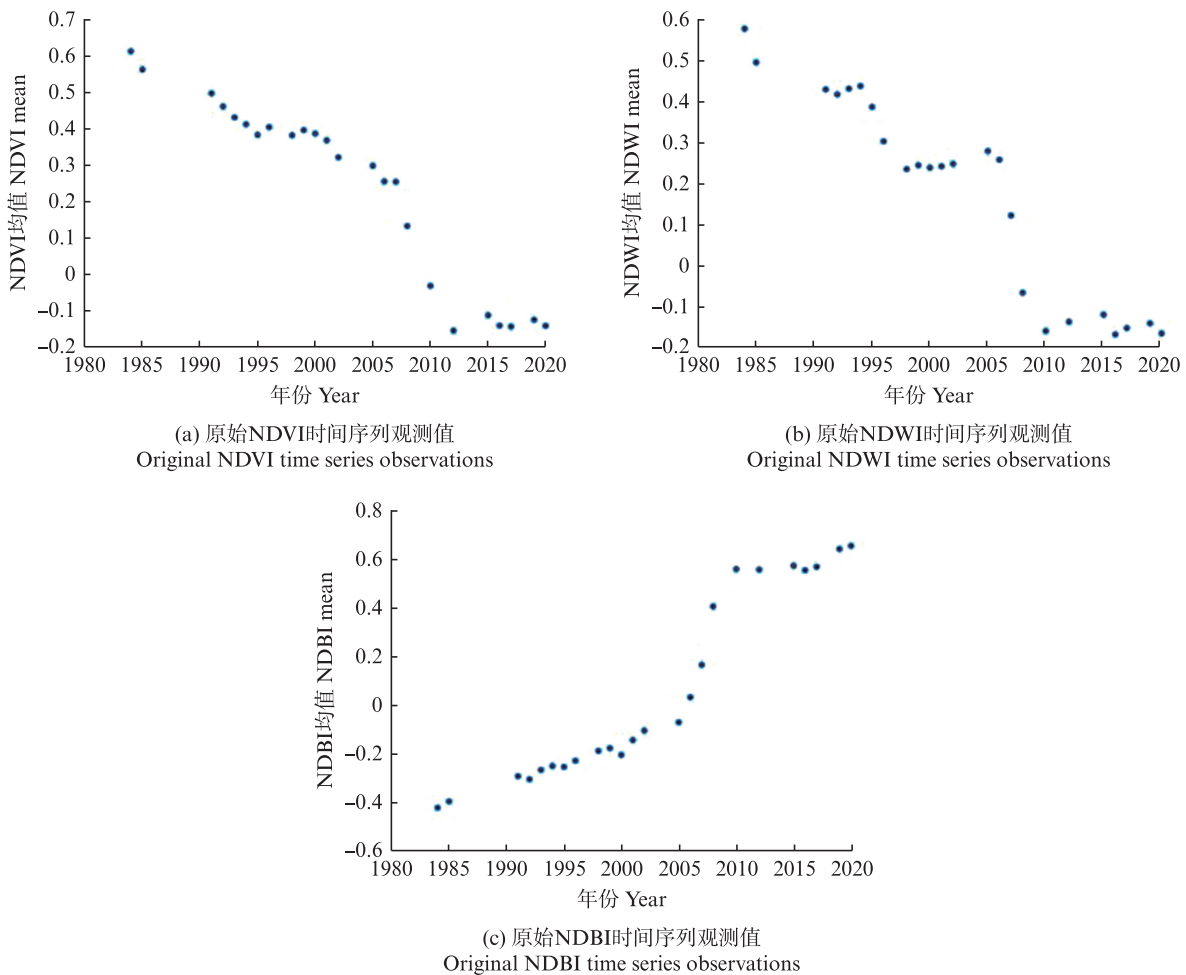


图3 原始时间序列观测值

Fig. 3 Original time series observations

2.2 基于时间序列光谱指数的像素级城市化监测

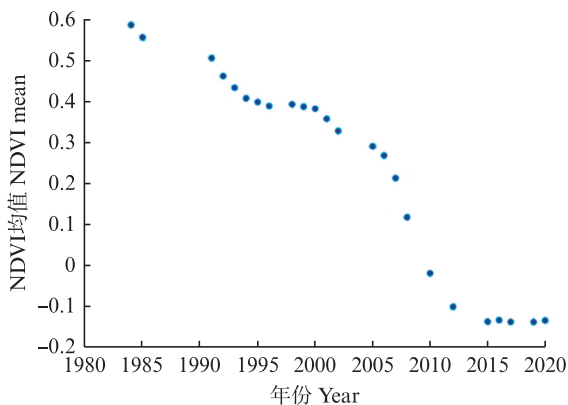
在临港新片区范围内土地利用/覆盖类型发生变化的区域内抽样选取20%样本点,获取1984—2020逐年的清晰影像,利用高分辨率卫星影像和植被指数、建筑物指数曲线,逐目视解译各样本点^[20]。

图6显示了像元(30°53'N, 121°49'E)在1990、2000、2010和2020年影像上的土地利用/土地覆盖情况,其中1990和2000年为植被,2010和2020年为城市用地。由NDBI和NDVI曲线看出,该像元于2008年开始城市化,并于2015年完成城市化。因此,时间序列光谱指数可以进行像素级城市化进程监测。

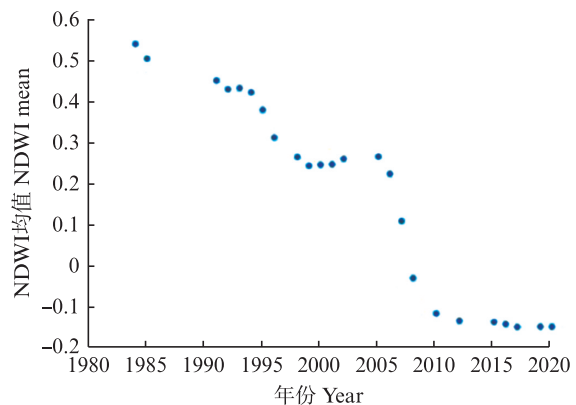
3 讨论

3.1 土地利用/覆盖分类

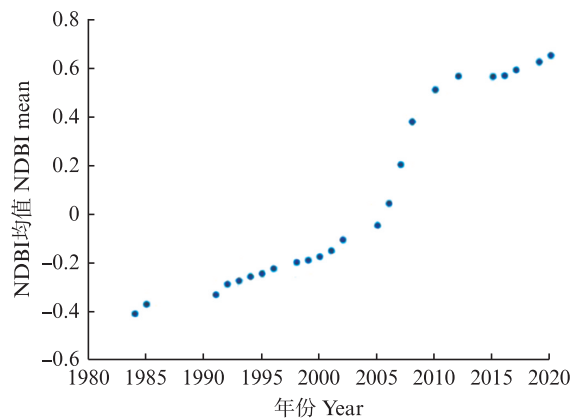
本研究选取1984和2020年作为基准年份,利用随机森林分类器对临港新片区进行土地利用/覆盖监督分类,获取研究期内的新增城市用地范围。根据临港新片区区域特性及研究目的需要,本文将土地利用/覆盖类型分为四类:城市用地、植被、水域和裸土地,利用随机森林分类器分类后得到临港新片区两期土地利用/覆盖图(图7),分类精度如表2所示。1984和2020年影像分类总体精度分别为99.69%和99.82%,Kappa系数均为0.99。各用地类型的生产者精度和用户精度如表2所示。造成错分的主要原因是围海工程的城市用地在监督分类时被识别为裸土地。



(a) 采用移动均值滤波器进行平滑后的
NDVI时间序列观测值
NDVI time series observations were
smoothed by moving mean filter



(b) 采用移动均值滤波器进行平滑后的
NDWI时间序列观测值
NDWI time series observations were
smoothed by moving mean filter



(c) 采用移动均值滤波器进行平滑后的
NDBI时间序列观测值
NDBI time series observations were
smoothed by moving mean filter

图4 采用移动均值滤波器进行平滑后的时间序列观测值

Fig. 4 Time series observations smoothed by a moving mean filter

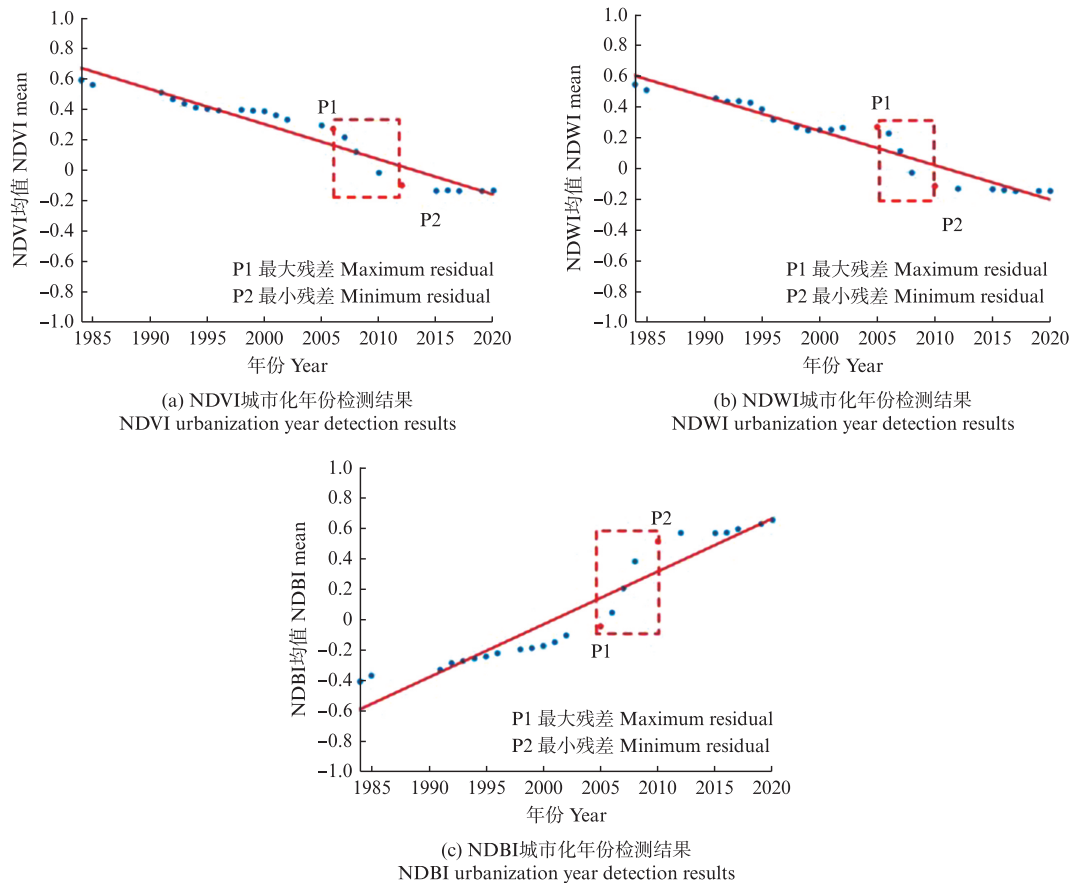


图5 城市化年份检测结果

Fig. 5 Urbanization year test results

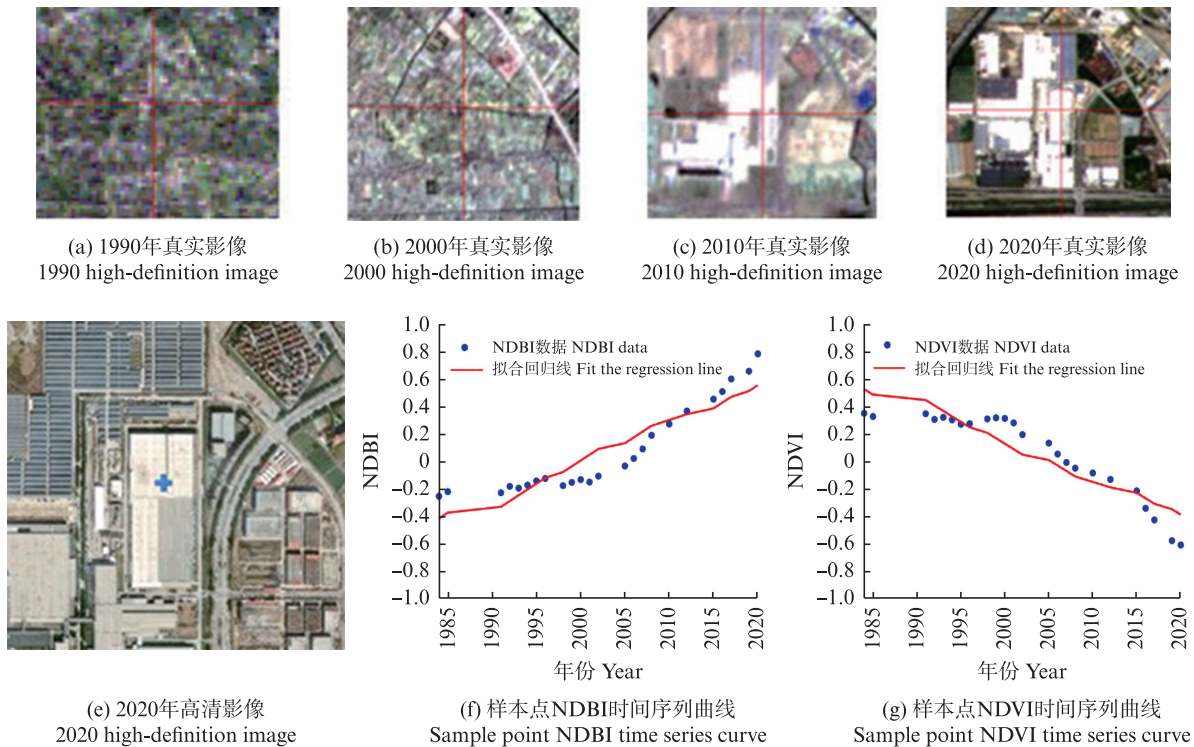


图6 某像元城市化过程

Fig. 6 Urbanization process of a pixel

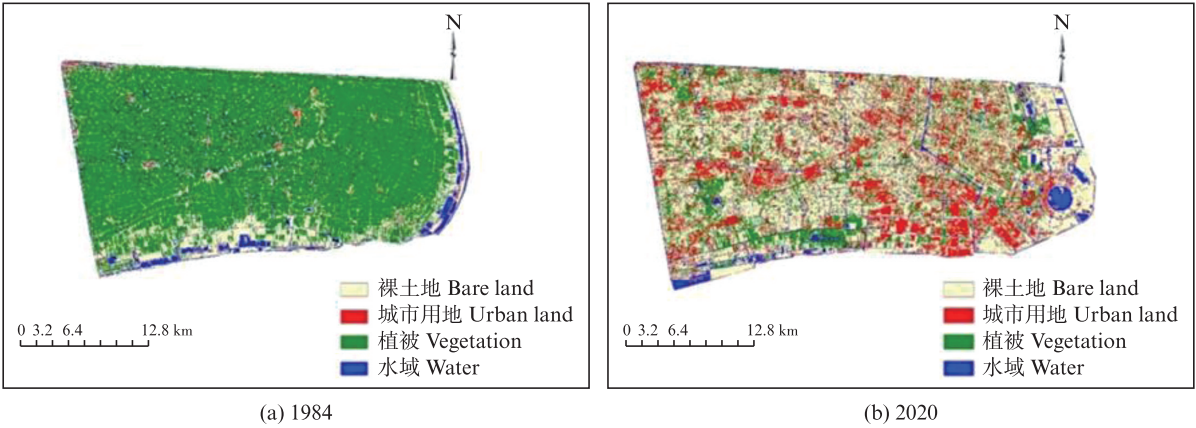


图7 1984和2020年土地覆盖分类图

Fig. 7 Land cover classification map in 1984 and 2020

表2 两期土地利用/覆盖分类精度评价——混淆矩阵

Tab. 2 Accuracy evaluation of land use/cover classification in the two phases-confusion matrix									
年份 Year	分类结果 Classification result	真实类别 Real class					用户精度 UA/%	总体精度 Overall accuracy/%	Kappa 系数 Kappa coefficient
		水域 Water	植被 Vegetation	城市用地 Urban land	裸土地 Bare land	总计 Total			
1984	水域 Water	814	0	0	0	814	100.00	99.69	0.99
	植被 Vegetation	1	767	0	0	768	99.87		
	城市用地 Urban land	0	0	395	0	395	100.00		
	裸土地 Bare land	2	0	6	903	911	99.12		
	总计 Total	817	767	401	903	2 888	—		
	生产者精度 PA/%	99.63	100.00	98.50	100.00	—	—		
2020	水域 Water	3 440	0	3	0	3 443	99.91	99.82	0.99
	植被 Vegetation	0	803	0	0	803	100.00		
	城市用地 Urban land	1	0	273	0	274	99.64		
	裸土地 Bare land	0	0	5	478	483	98.96		
	总计 Total	3 341	803	281	478	5 003	—		
	生产者精度 PA/%	99.97	100.00	97.15	100.00	—	—		

3.2 新增城市用地来源分析

图7展示了1984和2020年土地利用/覆盖的分布情况,可以看出,1984年临港新片区城市化水平较低,城市用地呈现条块状,分布在金汇港、大治河、二灶港、浦南运河等河流两岸,在沿海地带也有零星分布。2020年城市用地明显增加,城市化进程加快,芦潮港和五尺沟两边的地区发展为装备产业园区和物流园区,城市化水平剧增。

表3为1984—2020年土地利用/覆盖类型转移矩阵,可以看出这期间新增城市用地来源主要为水域(191.25 km²,占比43.74%)和植被(118.61 km²,占比27.13%),其中水域是通过填海造陆的方式转换成城市用地,具有沿海岸带分布的空间特征,说明临港新片区充分利用了港口效应,沿海岸带的发展更明显,滴水湖沿边建成区也较为突

出。对植被的开垦主要是沿着原有的城市用地展开,由于原有的城市用地沿河岸带分布,所以其空间分布出现条块状。

3.3 城市用地逐年扩张特征

临港新片区的城市用地总面积的逐年演变特征如图8所示。城市用地面积从1984年的25.54 km²增长到2020年的372.27 km²,年均增长率为12.85%。其中,1984—2000年间城市用地面积从25.54 km²扩张到59.93 km²,扩张量为34.39 km²,年均增长率为8.83%;该阶段临港新片区城市化进程处于起步阶段,交通、环保和基础设施建设持续投入,为后续城市化的中高速发展奠定基础。2001—2010年,城市用地面积从59.93 km²扩张到136.62 km²,扩张量为76.69 km²,年均增长率为12.49%;在该阶段,城市用地类型更加多样

化,包括住宅、商业、工业等,也为当地人口提供了大量就业机会。2011—2020年,城市用地面积从 136.62 km² 扩张到 372.27 km²,扩张量为 235.65 km²,年均增长率为 15.39%;该阶段城市化高速发展,临港新片区产业结构不断调整优化,

交通基础设施也得到了迅速完善,地铁 16 号线全线开通,随着交通基础设施的不断完善和提升,临港新片区与周边地区的联系也越来越紧密,城市用地也得到相应的扩张。

表 3 1984—2020 年土地利用/覆盖类型转移矩阵
Tab. 3 Land use/cover type transfer matrix from 1984 to 2020

1984	2020				
	城市用地 Urban land	水域 Water	裸土地 Bare land	植被 Vegetation	总计 Total
城市用地 Urban land	87.83	11.37	33.57	96.35	229.12
水域 Water	191.25	63.59	309.04	40.38	604.26
裸土地 Bare land	39.53	36.71	92.7	76.66	245.6
植被 Vegetation	118.61	14.68	71.51	305.66	510.46
总计 Total	437.22	126.35	506.82	519.05	1 589.44

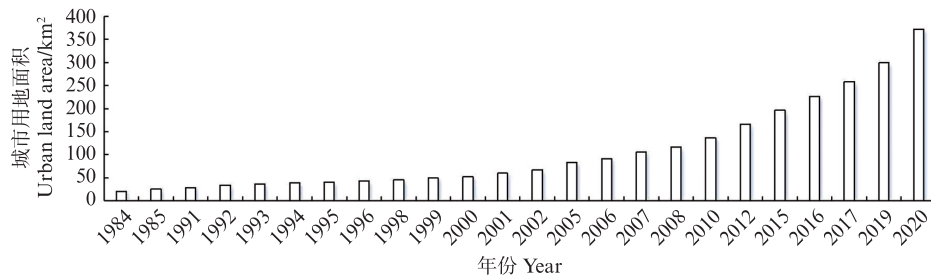


图 8 临港逐年城市用地面积统计
Fig. 8 Lingang urban land area statistics year by year

3.4 城市用地扩张驱动力分析

由于早期临港地区只是浦东新区的一个片区,而非独立的行政区划,具体数据难以确定,因此,选择 2008—2020 年 GDP 数据、2000—2020 年人口数据,分析 GDP、人口与城市用地之间的相关性。如图 9 所示,城市用地面积和 GDP 总量呈现显著正相关,相关系数为 0.97,说明经济增长和城市化相互促进,临港新片区经济高速增长在一定程度上推进了城市建设,是城市用地扩张的主要驱动力之一。

如图 10 所示,城市用地和人口数量相关系数为 0.78,人口不断增长为城市发展带来了持续不断的劳动力和经验技术,促进了城市内部的不断改革,加快了城市化的进程,是推动临港新片区城市扩张的另一重要驱动力。

4 结论

中国(上海)自由贸易试验区临港新片区是上海市建设的重点新城区之一,是中国长江三角洲地区的新城市发展极,是实施“一带一路”战略的重要

支撑点,同时又地处东部沿海区域,是典型的滨海平原型城市,海洋、陆地和社会人文生态系统相互作用、相互影响,具有重要的生态功能和资源价值。因此,精细全面监测临港新片区城市化发展演化过程,总结过去二十多年的发展规律,对未来临港新片区城市建设、海岸带资源的合理有效利用及经济社会可持续发展具有极其重要的现实意义。

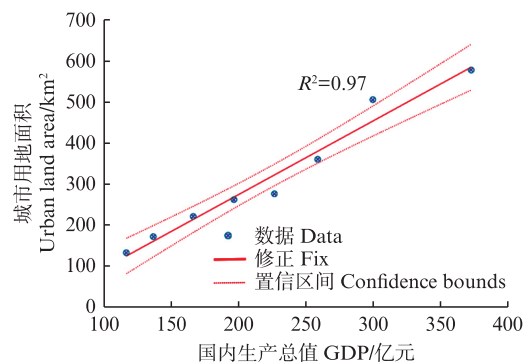


图 9 逐年 GDP 和城市用地面积相关性分析
Fig. 9 Correlation analysis of annual GDP and urban land area

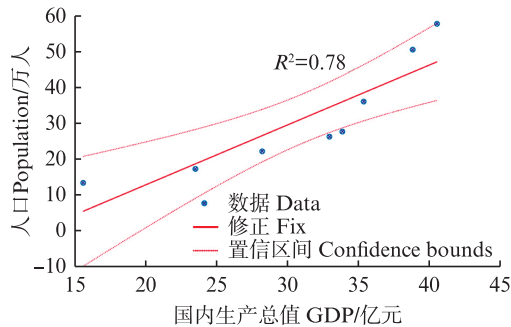


图 10 逐年人口和城市用地面积相关性分析
Fig. 10 Correlation analysis of annual population and urban land area

本研究利用 1984—2020 年临港新片区 Landsat 长时间序列遥感影像,分别构建年均值及像素级水平 NDBI、NDVI、NDWI 时间序列曲线,利用线性回归拟合合法进行突变点检测,获得平均城市化及像素级城市化开始和结束的时间以及城市用地演变特点及规律,在此基础上,选择首末两期影像进行土地利用/覆盖分类。主要研究结论如下:1984—2020 年新增城市用地来源主要为水域和植被,其中水域是通过填海造陆的方式转换成城市用地,具有沿海岸带分布的空间特征;对植被的开垦主要沿着原有的城市用地展开,呈现条块状的空间分布特点。临港新片区的城市扩张速率以 2001、2010 年为拐点,分为 3 个阶段:低速发展阶段(1984—2000 年);中速发展阶段(2001—2010 年);高速发展阶段(2011—2020 年)。临港新片区城市用地面积和 GDP 总量相关系数为 0.97,和人口数量相关系数为 0.78,说明经济与人口的不断增长和城市化进程相互促进,是城市用地扩张的主要驱动力。

本研究结果可以为临港新片区发展成为上海建设海洋生态文明、发展超大城市可持续生产力的重要空间提供有价值的参考。未来的研究将增加对近海生态系统服务价值损益的分析,以更全面地评估填海造陆对生态环境的影响。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 袁思越. 中国自由贸易试验区政府服务质量评价体系构建及实证研究[D]. 上海:华东政法大学, 2020.
YUAN S Y. Research on construction and application of government's service quality evaluation index system of China pilot free trade zones[D]. Shanghai: East China University of Political Science and Law, 2020.
- [2] SEXTON J O, SONG X P, HUANG C Q, et al. Urban growth of the Washington, D. C. - Baltimore, MD metropolitan region from 1984 to 2010 by annual, landsat-based estimates of impervious cover[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 129: 42-53.
- [3] DOU P, SHEN H F, LI Z W, et al. Time series remote sensing image classification framework using combination of deep learning and multiple classifiers system [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 103: 102477.
- [4] 张磊, 江洪. 基于 Landsat-8 遥感数据的土地覆被信息提取研究—以长春市主城区为例[C]//中国地理学会 2015 年(东北地区)学术年会论文集. 2015: 30-30.
ZHANG L, JIANG H. Research on land cover information extraction based on Landsat-8 remote sensing data-taking the main urban area of Changchun city as an example [C]//Proceedings of the 2015 (Northeast Region) Annual Conference of the Geographical Society of China. 2015: 30-30.
- [5] CAO W T, ZHOU Y Y, LI R, et al. Mapping changes in coastlines and tidal flats in developing islands using the full time series of landsat images[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 239: 111665.
- [6] 张婷, 郑宗生. 基于多时相卫星影像滨海卫星新城扩张的时空特征分析——以上海临港新城为例[J]. 上海国土资源, 2015, 36(4): 89-92, 98.
ZHANG T, ZHENG Z S. Temporal and spatial analysis of the expansion of a new coastal satellite city based on multi-dimensional satellite imagery[J]. Shanghai Land & Resources, 2015, 36(4): 89-92, 98.
- [7] 沈昕颖, 杨红, 王春峰, 等. 基于遥感图像的 1990-2020 年盐城海岸带湿地景观时空动态变化[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(4): 972-983.
SHEN X Y, YANG H, WANG C F, et al. Dynamic changes of wetland landscape in the coastal zone of Yancheng from 1990 to 2020 based on remote sensing images[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(4): 972-983.
- [8] 李凤莹, 张饮江, 赵志森, 等. 基于遥感生态指数的上海南汇东滩海岸带湿地生态格局变化评价[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(5): 746-756.
LI F Y, ZHANG Y J, ZHAO Z M, et al. Evaluation of ecological pattern change of Nanhui Dongtan wetland in Shanghai based on remote sensing ecological index [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(5): 746-756.
- [9] 刘瑜, 韩震. 基于遥感的长江口南汇潮滩植被群落时空动态变化[J]. 上海海洋大学学报, 2009, 18(5): 579-585.
LIU Y, HAN Z. The study of spatial and temporal

- variations on vegetation communities in Nanhui tidal flat of Changjiang Estuary by using remote sensing [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2009, 18(5): 579-585.
- [10] PAN Y, DENG J S, CAI J B, et al. Spatiotemporal dynamics of island land expansion response to intensive island development and reclamation [J]. Journal of Coastal Research, 2015, 31(6): 1439-1448.
- [11] 喻晓娟. 基于 Landsat 影像的 1987—2016 年武汉市湖泊面积动态变化分析[D]. 抚州: 东华理工大学, 2018.
- YU X J. Analysis of dynamic change of lake area in Wuhan city from 1987 to 2016 based on Landsat image [D]. Fuzhou: East China University of Technology, 2018.
- [12] 张志杰, 张浩, 常玉光, 等. Landsat 系列卫星光学遥感器辐射定标方法综述[J]. 遥感学报, 2015, 19(5): 719-732.
- ZHANG Z J, ZHANG H, CHANG Y G, et al. Review of radiometric calibration methods of Landsat series optical remote sensors [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2015, 19(5): 719-732.
- [13] 陈华胜. 基于辐射传输模型的机载高光谱遥感图像大气校正研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- CHEN H S. Research on atmospheric correction of airborne hyperspectral remote sensing images based on radiative transfer model [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [14] TUCKER C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation [J]. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127-150.
- [15] MCFEETERS S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [16] 王丽蒙, 王加胜, 杨昆, 等. 1990-2019 年石漠化区耕地时空特征及成因分析——以富源县为例[J]. 测绘通报, 2022(4): 77-82.
- WANG L M, WANG J S, YANG K, et al. Spatial-temporal characteristics and driving forces of the cropland in rocky desertification area from 1990 to 2019: taking Fuyuan county as an example [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(4): 77-82.
- [17] BREIMAN L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [18] 李义平, 蔡宏, 田鹏举, 等. 贵州省黎平县地表覆被变化引起的生态系统碳储量变化[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 92-99.
- LI Y P, CAI H, TIAN P J, et al. Changes in ecosystem carbon stock caused by land cover conversion in Liping County of Guizhou Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 92-99.
- [19] 戴芳筠. 南昌市城市热岛效应宏观模拟预测研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2018.
- DAI F Y. Study on macro simulation & prediction model of the urban heat island in Nanchang [D]. Fuzhou: East China University of Technology, 2018.
- [20] 张宁. 基于 Landsat8 遥感影像的沈阳市水稻种植信息提取及动态监测[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
- ZHANG N. Information extraction and dynamic monitoring of rice planting in Shenyang City based on Landsat 8 remote sensing image [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.

Monitoring the urbanization process in Shanghai Lingang Special Area using long-time-series remote sensing images

CHEN Ming, GUO Dongxu, MA Zhenling, MENG Meiqing

(College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To monitor the long-time-series urbanization process of the Lingang Special Area of China (Shanghai) Pilot Free Trade Zone and analyze its spatiotemporal continuous change characteristics and driving forces, this study utilized Landsat long-time-series remote sensing images from 1984 to 2020. Annual average and pixel-level time-series curves of the Normalized difference built-up index (NDBI), Normalized difference vegetation index (NDVI), and Normalized difference water index (NDWI) were constructed. Linear regression fitting was employed for abrupt change detection to determine the start and end years of urbanization. Based on this, 1984 and 2020 were selected as benchmark years, and a random forest classifier was used to classify the land use/cover types of Shanghai Lingang Special Area. The results showed that from 1984 to 2020, the additional urban land mainly originated from water bodies and vegetation. The urban land area increased by 346.73 km², with an average annual growth rate of 12.85%. Taking 2001 and 2010 as turning points, the process was divided into three stages: slow development stage (1984–2000), with an average annual growth rate of 8.83%, medium-speed development stage (2001–2010), with an average annual growth rate of 12.49%, and rapid development stage (2011–2020), with an average annual growth rate of 15.39%. The study revealed that economic and population growth were the primary driving forces of urban land expansion. Spatially, the urbanization development of Shanghai Lingang Special Area exhibited characteristics of coastal and patchy distribution. The speed and sources of urban land expansion varied across different periods, and economic development and urbanization process promoted each other. This research holds extremely important practical significance for the future refined urban construction of the Yangtze River Economic Belt and the rational and effective utilization of estuarine and coastal resources.

Key words: long-time-series remote-sensing images; urbanization process; change-point detection; random forest classifier; Shanghai Lingang Special Area