

引用格式: 陈柯欣, 丛丕福, 卢伟志, 等. CA-Markov 与 LCM 模型的黄河三角洲湿地变化模拟比较[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(12): 1903-1910. [Chen K X, Cong P F, Lu W Z, et al. Comparison of the CA-Markov and LCM models in simulating wetland change in the Yellow River Delta[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(12): 1903-1910. ] DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180660

# CA-Markov 与 LCM 模型的黄河三角洲湿地变化模拟比较

陈柯欣<sup>1,2</sup>, 丛丕福<sup>1</sup>, 卢伟志<sup>3</sup>, 曲丽梅<sup>1\*</sup>

1. 国家海洋环境监测中心, 大连 116023; 2. 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029  
3. 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004

## Comparison of the CA-Markov and LCM Models in Simulating Wetland Change in the Yellow River Delta

CHEN Kexin<sup>1,2</sup>, CONG Pifu<sup>1</sup>, LU Weizhi<sup>3</sup>, QU Limei<sup>1\*</sup>

1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2. School of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 3. College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

**Abstract:** The aim of this paper is to select the optimization model of the region and understand the future quantity and spatial variation trend of the wetland landscape types in the Yellow River Delta. We used the classified maps of the three periods of 1996, 2006 and 2016, of which the 1996 and 2006 maps were modeled for predicting 2016; we then compared the classified and simulated maps of 2016 to assess the model performances. The best model were used to take the classified 2006 and 2016 maps to simulate the landscape of the Yellow River Delta in 2026. We found that: ① For the simulation of the landscape types of the Yellow River Delta, under the influence of the same driving force factors, the LCM (Land Change Modeler) model performed better than the CA-Markov model in terms of spatial error, while CA-Markov was more suitable for the actual wetland change trend modeling than the LCM model in terms of numerical error. For the areas of larger landscape changes, the advantages of the two models should be combined to best simulate the change trend of wetlands. ② The interference of some human factors and the impact of natural disasters on the landscape types cannot be considered the model, it would cause some interference to simulation accuracy. For the LCM model, the number of transition sub-models had an effect on the simulation results with the same driving force factor, the more transition sub-models were used to generate suitable images, the higher the simulation accuracy. For CA-Markov model, the setting of proportional error coefficient was suitable for improving the accuracy of numerical simulation. ③ Assuming the continuation of the landscape dynamics trend during 2006-2016, and by simulation via combining the two simulation methods up to year 2026, the simulated natural wetlands area was 1252.69 km<sup>2</sup>, the human-made wetlands area was 1265.00 km<sup>2</sup>, and the non-wetlands area was 924.51 km<sup>2</sup>. The simulated results suggest that natural wetlands and non-wetlands area will likely reduce, and human-made wetlands area

收稿日期: 2018-12-13; 修回日期: 2019-05-27.

基金项目: 国家重点研发计划专项(2017YFC0505901)。[ **Foundation item:** National Key Research and Development Program of China, No.2017YFC0505901. ]

作者简介: 陈柯欣(1994-), 女, 辽宁营口人, 硕士生, 主要从事湿地遥感和应用研究。E-mail: 457261689@qq.com

\*通讯作者: 曲丽梅(1973-), 女, 吉林白城人, 博士, 高级工程师, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: lmqu2016@126.com

will increase and expand to even shallow sea areas. Our findings can provide a scientific basis for the rational layout planning of the regional development space and the rational and effective utilization and management of wetland resources.

**Key words:** wetland; simulation; Yellow River Delta; CA-Markov model; Land Change Modeler

**\*Corresponding author:** QU Limei, E-mail: lmqu2016@126.com

**摘要:** 为了了解黄河三角洲湿地景观类型演变最优模拟模型以及景观的变化趋势,本文采用1996、2006、2016年3期黄河三角洲分类影像,分别利用CA-Markov、LCM、2种模型叠加开展变化模拟。研究发现:①在相同驱动力因子影响下,空间模拟上LCM比CA-Markov好,数量模拟上,CA-Markov比LCM更贴合,对于变化较大研究区,综合2种模型优势来模拟该湿地变化最佳;②对于较强的人为、自然灾害干扰,会对模拟精度有影响。在LCM模型中,驱动力相同情况下,生成适宜性图像的转移子模型数量越多,模拟精度越高。对于CA-Markov模型,比例误差系数适宜的设置对数量模拟的精度也有提升;③在保持2006–2016年的变化趋势下,综合2种模型模拟的2026年自然湿地面积1252.69 km<sup>2</sup>,人工湿地面积1265.00 km<sup>2</sup>,非湿地面积924.51 km<sup>2</sup>。从2026年黄河三角洲模拟的结果可看出,自然、非湿地的面积减少,人工湿地大量的增加并不断向浅海区域扩张。通过对黄河三角洲湿地变化进行预测分析,可为湿地资源的合理有效利用与管理等提供科学依据。

**关键词:** 湿地;模拟;黄河三角洲;CA-Markov模型;LCM模型

## 1 引言

随着城市化进程的加快,土地利用方式发生剧烈的变化,因其变化所产生的生态环境问题日益突出<sup>[1]</sup>。作为地球三大生态系统之一的湿地,其景观类型的变化及演变趋势直接关乎了人类的生存发展。在经济全球化的趋势下,人们对物质能源的需求加大,对湿地开发的力度不断加剧<sup>[2]</sup>,生态环境遭到严重破坏。2016年国务院办公厅印发了《湿地保护修复制度方案》<sup>[3]</sup>,规划到2020年,全国湿地面积不低于5.33×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,其中,自然湿地面积不低于4.67×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,新增湿地面积2×10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>,湿地保护率提高到50%以上。在这种趋势下,对现有湿地面积的有效监控和未来湿地面积变化趋势的模拟有很大的研究价值。土地利用变化模型可以为研究景观类型动态变化提供有力工具<sup>[4]</sup>,通过对湿地景观类型的变化模拟,可对未来湿地景观类型演变趋势进行有效监测,对未来湿地的管理规划提供有力帮助<sup>[5]</sup>。

国内外应用于景观变化模拟的模型种类较多,分类方式也各有异同,各种模型模拟的关键在于依据驱动力因素生成适宜性图集。影响景观类型变化驱动力因素较多,如土地规划相关政策因素、社会经济因素、人口增长速度因素。常用的景观类型模拟有CA-Markov、LCM(Land Change Modeler), CA、DINAMICA、CLUE-s模型等。Castella等<sup>[6]</sup>将景观类型模型分成2大类:①强调土地利用动态变化过程的Agent-based模型;②强调土地利用动态变化模式的Pattern-based。每一种模型都有其适用范围,也有大量学者针对几种模型之间优劣的比较

分析进行了研究<sup>[7–9]</sup>。其中,Olmedo等<sup>[7]</sup>以西班牙赛古拉河流域为研究区,从数量和空间分布比较了LCM和CA-Markov模型,具体地阐明了2个模型的参数设置和适宜范围,发现CA-Markov模型中滤波器设置与否对模拟结果有影响,但对于其他参数的影响和模型的叠加模拟没有进一步研究。国内大部分学者将研究重点放在城市变化<sup>[10–12]</sup>和森林面积变化的模拟,对于湿地景观类型动态变化模拟,也有部分学者进行了研究<sup>[13–14]</sup>。目前,对LCM模型和CA-Markov模型参数设置对模拟结果影响,以及将2种模型叠加模拟的研究较少。

黄河三角洲是国内外开展湿地研究的重点区域,本文以黄河三角洲为研究区,利用黄河三角洲1996年和2006年实际分类数据做为输入数据,2016年实际分类数据做为验证数据,分别开展CA-Markov模型和LCM模型模拟研究,并选择最优模型对2026年黄河三角洲湿地景观进行模拟。通过模拟结果可对黄河三角洲湿地未来数量变化及空间分布趋势有一定的了解,对湿地保护和规划有一定的参考价值。

## 2 研究区概况与数据来源

### 2.1 研究区概况

黄河三角洲是黄河携带大量泥沙在河口处缓慢淤积填海造陆形成,位于36°55′N–38°10′N, 118°07′E–119°10′E,处于北半球中纬度,温度大陆性季风气候,降水年际变化较大,季节分配不均,年

蒸发量达到 1550 mm<sup>[15]</sup>。区域地貌形态复杂多样,人类活动对地貌类型的演替影响较大,如黄河改道、修建黄河大堤、围垦、城建、高速公路、海堤、石油开采等,造成景观类型的变化较大<sup>[15]</sup>。为了保证研究区模拟范围的一致性,本文以现代黄河三角洲作为研究区。该研究区位于山东省东营市河口区、利津县、垦利县境内,以垦利县的渔洼为顶点,北起挑河口,南至宋春荣沟口,东以-6 m 等深线<sup>[16]</sup>为边界的扇形闭合区域(图1)。

## 2.2 数据来源

遥感数据由地理空间数据云<sup>[17]</sup>下载(<http://www.gscloud.cn/>),选择 7-10 月的遥感影像,该时相湿地植被生长旺盛易于区识别别。本文选择了 1996 年 7 月 2 日、2006 年 10 月 2 日、2016 年 8 月 26 日的 Land-

sat 系列遥感影像作为湿地分类的基础数据,选择 5 (NIR)、4(R)、3(G)波段组合进行假彩色合成,并进行图像增强和影像裁剪。利用目视解译和面向对象分类方法将研究区划分为 3 大类:① 自然湿地,包括天然水域、盐沼植被、滩涂;② 人工湿地,包括库塘、养殖塘、盐田、水田;③ 非湿地,包括林地、旱田、居民地和工矿用地、未利用地。本文重点关注现有湿地面积的变化和未来湿地面积变化趋势的模拟结果,将湿地类型合并成 3 大类进行模拟。

依据野外调查数据和 Google Earth 历史影像数据每大类选择 30 个点进行精度验证,1996、2006、2016 年精度 KIA (The Kappa Index of Agreement) 分别为 88.33%、86.67%、86.67%,分类结果如图 2 所示。矢量数据包括:东营市道路交通数据、海岸线数据、建筑用地数据。

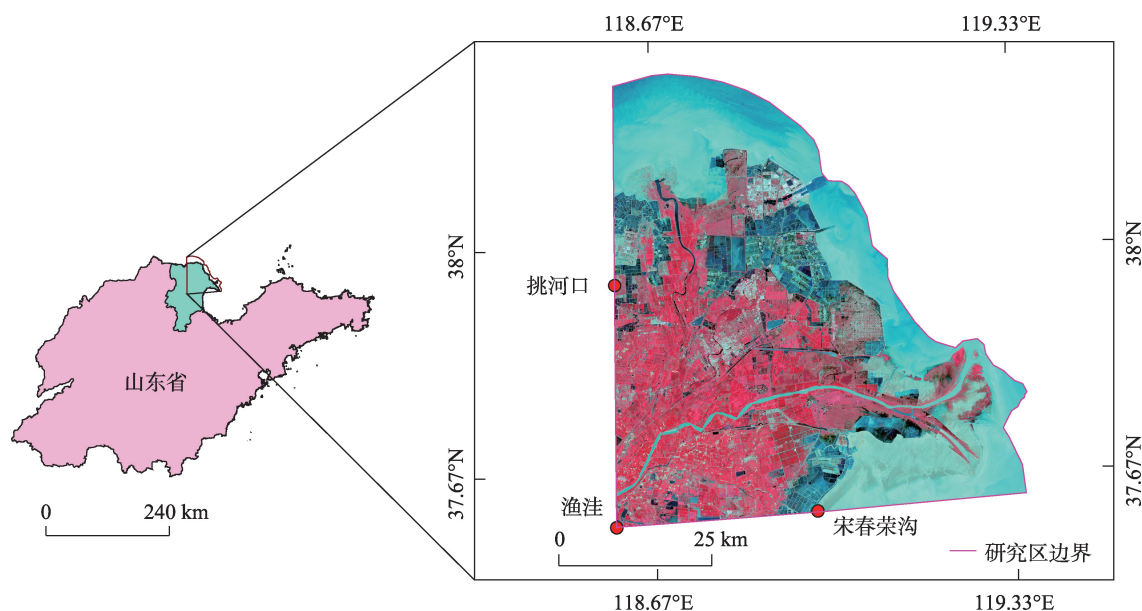


图1 黄河三角洲范围

Fig. 1 Study area of Yellow River Delta



图2 1996-2016年黄河三角洲湿地分类

Fig. 2 Classified wetland maps of Yellow River Delta from 1996 to 2016



### 3 研究方法

#### 3.1 CA-Markov 模型

Markov 模型指利用湿地处于的某一类型来预测该湿地未来类型的一种预测分析方法。湿地  $t_n$  时刻的类型变化只与前一刻  $t_{n-1}$  的类型有关系,具有无后效应,符合湿地变化的特性。在 Markov 模型参数设置时,将背景值设置为 0,错误比例(Proportional Error)设置成 0.15(表明大多数土地利用图分类精度都能达到 85%)<sup>[17]</sup>。

Markov 模型优点在于该模型在数量上可以进行均衡的模拟,但缺乏空间信息考量。CA 有较强模拟复杂空间信息的能力,但是对于数量的模拟较差。CA 模型包括 4 大部分:元胞、状态、邻域、转换规则。将 CA-Markov 的结合有利于对模拟结果空间和数量的整体提升<sup>[18]</sup>。本文先利用 1996 年和 2006 年湿地分类结果在 Markov 模块中作为输入生成 Markov 转移概率矩阵,再选择距离海岸线的距离、距离交通用地的距离、当前变化区域变量(新变化发生在已有变化的周围)、距离城市距离作为驱动力因子,利用 MCE(Multi-criteria Evaluation)模块将各类影响因子叠加组合分别生成 3 个适宜性图像,再将元胞大小设置为  $30 \times 30$  m,选择  $5 \times 5$  的滤波器,元胞迭代次数设置为 10 次,最后将模拟结果与 2016 年真实分类结果对比验证。

#### 3.2 LCM 模型

LCM 模型是基于像素模拟,通过使用适宜性地图来指定每个像素转移类型的优先级,并预测类别空间位置的变化情况。适宜性图集由转移子模型通过训练生成,每个转移子模型受驱动力因素影响<sup>[17]</sup>。转移子模型训练方式有 3 种:MLP(Multi-

Layer Perceptron)模型、SimWeight 模型、Logistic Regression 模型。

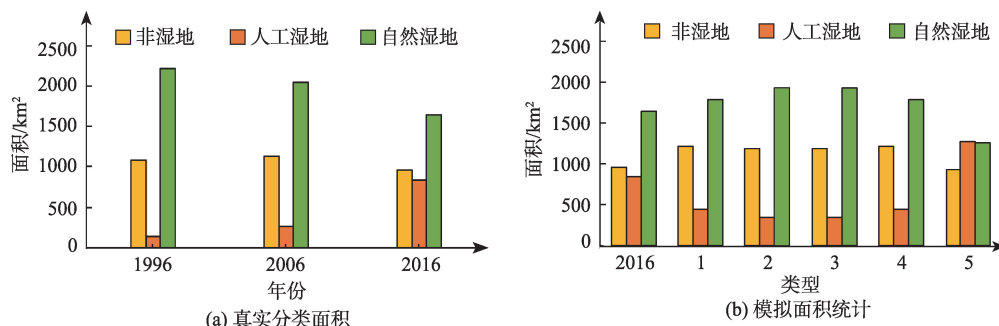
本文选择 MLP 模型<sup>[19-20]</sup>来训练,该模型是一种多层感知器神经网络模型,选择距海岸线的距离、距交通用地的距离、当前变化区域变量、距城市距离 4 种相同因素作为转移子模型的驱动力因素。本文将研究区分成 3 类,共有 6 种湿地景观类型转换方式,对于面积较小的转换可以进行面积忽略。在模拟过程中发现,在相同驱动力影响下,生成适宜性图像的转移子模型数量对模拟精度有影响,转移子模型数量越多,训练次数越多,模拟精度越高。在生成适宜性图像的每个转移子模型中,转换类型不能超过 9 种<sup>[17]</sup>,为了验证转移子模型数量对模拟精度的影响,本文将 6 种转变方式分成二组进行研究,选择最小转移子模型数量和最大转移子模型数量,判断在驱动力因子影响相同的情况下子模型的数量对模拟结果影响大小,第一组由 1 个转移子模型进行 6 种转移方式适宜性图集的生成,第二组将 6 种转移方式放入 6 个子模块参与适宜性图集的制作。训练的迭代次数设置成 10 000,理想训练精度达 100%,其余参数选择默认值。

#### 3.3 LCM 模型与 CA-Markov 模型叠加

2 种模型都有其优势性,利用 CA-Markov 模型经过 Proportional error 设置生成的转移矩阵,利用 LCM 模型生成的转移适宜性图集,将二者进行叠加来进行黄河三角洲湿地景观类型变化的模拟。

### 4 结果及分析

从图 2、图 3(a)可看出,1996–2016 年湿地的变



注:图(b)中,2016表示2016年实际分类面积;1代表2016年CA-Markov模型模拟;2代表LCM模型第一组模拟;3代表LCM模型第二组模拟;4代表2个模型叠加模拟;5代表2026年模拟。

图3 3期实际分类和5类模拟面积统计

Fig. 3 Actual classification of three periods and simulated area statistics of five kinds

化趋势,自然湿地面积不断减少,人工湿地和非湿地面积不断增加,表明黄河三角洲的湿地已呈现退化趋势发展。2016年真实的分类影像和2016年不同模拟的模拟结果和面积统计如图3(b)所示。

#### 4.1 CA-Markov 模型模拟结果

2016年真实的分类面积:非湿地 955.39 km<sup>2</sup>,人工湿地 839.84 km<sup>2</sup>,自然湿地 1646.98 km<sup>2</sup>。将 CA-Markov 模型的模拟结果利用 GIS analysis 模型的 Change/time Series 中的 Validate 进行空间和数量的验证,数量误差(Quantity disagreement)达到 0.11,空间位置 Allocation disagreement(grid cell level)误差 0.29,整体精度(Overall kappa)验证 34.53%。该模型模拟的面积统计:非湿地为 1217.20 km<sup>2</sup>,人工湿地为 447.85 km<sup>2</sup>,自然湿地为 1777.15 km<sup>2</sup>。

可以看出,该模拟结果的面积相对较为符合 2016年真实的分类结果,但是从图4来看空间位置误差较大,模拟结果在已有的景观类型附近扩散分布。研究发现在 CA-Markov 模拟中 Markov 过程中 Proportional error 的参数设置对模拟数量精度有影响(表1)。当值为 0 时,代表影像的分类精度一般

能达到 100%,与 LCM 模型自动生成的转移矩阵相近。当数量为 0.15 时,代表影像的分类精度一般能达到 85%以上,通过影响着转移概率矩阵生成来影响模拟的数量结果。

#### 4.2 LCM 模型模拟结果

LCM 模型的关键在于利用不同训练模型生成适宜性图集。本文选择 MLP 模型,该模型训练的过程为暗箱方式,不带有人为干预的因素。2016 年 LCM 模型中第一组 MLP 模型对整体训练的准确率(Accuracy Rate)47.59%,整体精度验证为 44.48%,非湿地面积为 1181.78 km<sup>2</sup>,人工湿地 340.35 km<sup>2</sup>,自然湿地 1920.07 km<sup>2</sup>。第二组 MLP 模型对 6 种转换用 6 个子模型训练,非湿地向人工湿地准确率 65.59%,非湿地向自然湿地准确率 61.41%,人工向非湿地转换准确率 74.01%,人工湿地向自然湿地准确率 52.25%,自然湿地向非湿地转换准确率 87.30%,自然湿地向人工湿地转换准确率 80.64%,整体精度验证达到 52.07%,非湿地 1181.78 km<sup>2</sup>,人工湿地 340.35 km<sup>2</sup>,自然湿地 1920.07 km<sup>2</sup>。从图4看出,LCM 模型的空间分布较 CA-Markov 效果较

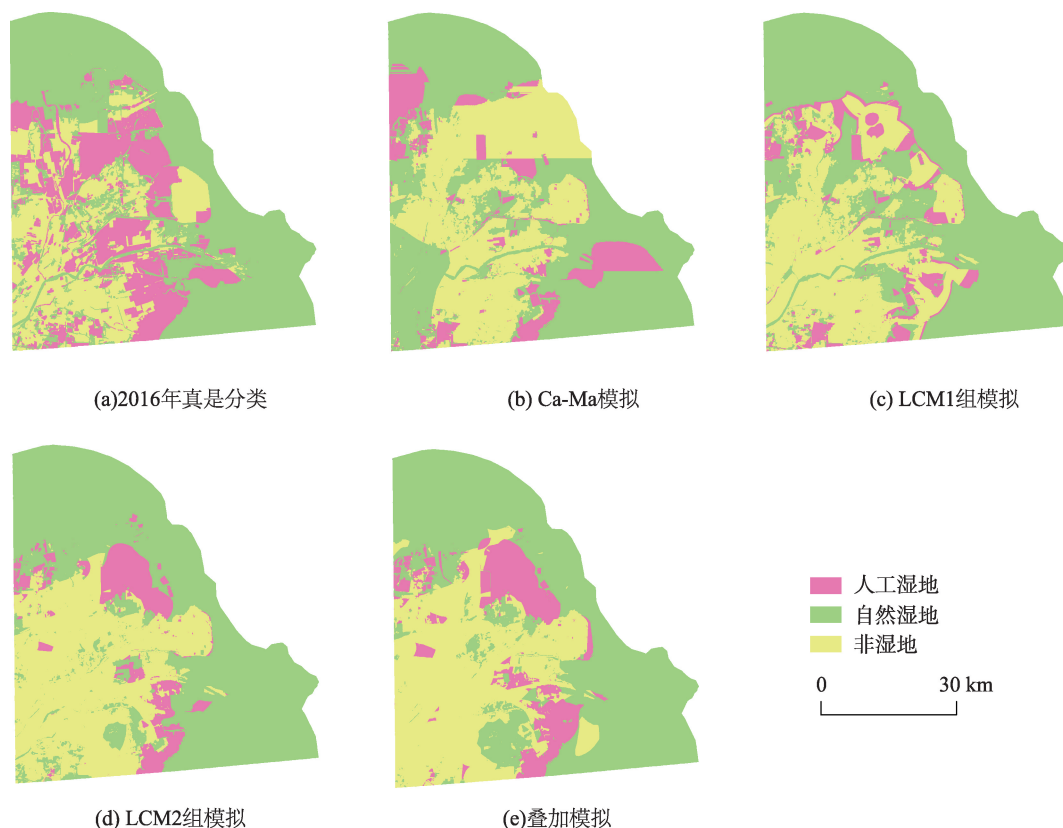


图4 2016年真实分类结果和各种模型模拟结果

Fig. 4 Classified and simulated wetland maps by different models in 2016

表1 Proportional error 参数设置  
Tab. 1 Proportional error parameter settings

过程	错误比例	数量误差
CA-Markov 过程	0	0.15
CA-Markov 过程	0.15	0.11

注:数量误差等于 $P(p)-P(m)$ 。 $P(p)$ 两种图完全一致为1; $P(m)$ 为参考图和修改的比较图之间的一致性。

好,湿地景观类型的模拟扩散不仅只发生于原有湿地景观类型附近。在相同驱动力影响下,利用Change/time Series中的Validate进行空间和数量的验证,得到的误差如表2所示。从数量来看,LCM模拟的结果与真实分类结果误差相比相对较大;从空间来看,LCM模型空间误差相对较小。对于LCM模型第一组和第二组的比较,由于所使用转移矩阵相同,数量误差保持一致,但是对于空间位置误差第二组比第一组有了一个明显的提升,整体精度验证也有所提高。

表2 MLP模型中转移子模型的数量  
Tab. 2 Number of transition sub-models in the MLP model

过程	转移子模型 数量	数量 误差	空间 误差	整体精度 验证/%
LCM第一组	1	0.15	0.20	44.48
LCM第二组	6	0.15	0.15	52.07

注:空间误差 Allocation disagreement (grid cell level) 等于 $K(m)-M(m)$ 。 $K(m)$ 是参考图和修改的比较图之间的一致性; $M(m)$ 是参考图和未修改的比较图之间的一致性。

4.3 2种模型叠加后的模拟结果

通过CA-Markov和LCM的预测结果可以看出,CA-Markov模型中经过参数设置的Markov对数量的模拟结果较好,LCM模型对空间位置的模拟相对较好。为扬长避短发挥2个模型各自优势,因此进行了叠加研究实验,将CA-Markov模型中的Markov矩阵利用到LCM模型中去。将CA-Markov的转移矩阵和LCM模型生产的适宜性图集文件进行模拟,模拟精度达到为47.29%,数量误差为0.11,位置误差为0.21。

4.4 几种模型模拟结果对比

在CA-Markov模型中,过滤器选择5×5模拟结果主要集中在原有湿地景观类型的基础上进行扩散分布这与Olemdo等的研究结果一致,而LCM模型模拟结果不仅仅在原有湿地景观类型附近分

布。在模拟中进一步发现,将2种模型组合,在相同的驱动力作用下,数量精度相对于LCM模型得到提升,空间精度相对于CA-Markov模型提升,综合数量和空间误差选择叠加模拟的效果最佳。

一般认为模拟精度在40%以下为不成功模拟,40%~75%模拟效果一般,75%以上说明效果较好<sup>[12]</sup>,然而湿地景观类型演替的速度和方式会对模拟的精度产生一定的影响<sup>[4]</sup>。从图3可看出,实际景观类型从2006年后,转变方式和变化速度与1996–2006年有较大不同,说明2006年后黄河三角洲变化程度之剧烈,主要受到了黄河三角洲自然因素和人为因素双重干扰下,开发程度加快,人工湿地快速的增加,导致景观类型发生了较大的变化,这是导致黄河三角洲几种模拟精度较低的主要原因。

通过本文的模拟结果可以看出,对于变化较大的湿地模拟,在数量上,CA-Markov模型在设置比例误差系数后对数量模拟效果更好;在空间上,LCM模拟可以将动态驱动力因子考虑到模拟中去,因而将驱动力因素考虑更加全面。从总体上来看,将2种模型叠加模拟在数量和空间上能获得较好结果。因此,本文综合采用CA-Markov模型和LCM模型进行叠加模拟,以2006年和2016年为基期,利用距离城市用地的距离、距离海岸线的距离、距离交通用地的距离、2006年到2016年的变化区域变量为驱动力因素,利用MLP模型训练开展模拟研究。最后的模拟结果如图5所示。

2026年自然湿地面积1252.69 km<sup>2</sup>,人工湿地面

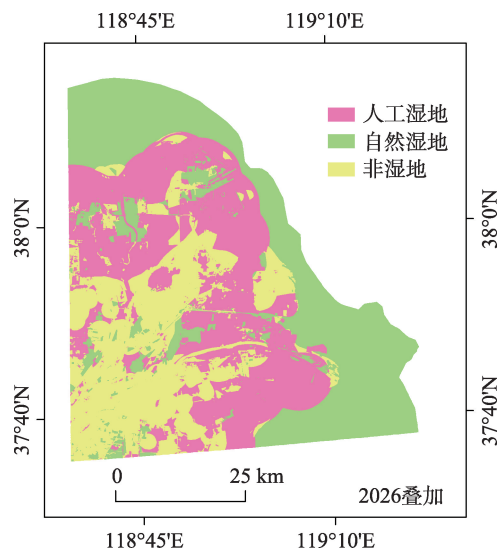


图5 2026年模拟结果  
Fig. 5 Simulation result in 2026



积 1265.00 km<sup>2</sup>, 非湿地面积 924.51 km<sup>2</sup>。经过 MLP 模型训练之后, 非湿地向人工湿地转换准确率 64.14%, 非湿地向自然湿地转换准确率 56.30%, 人工湿地向非湿地转换准确率 70.39%, 人工湿地向自然湿地准确率 68.96%, 自然湿地向非湿地转换准确率 87.56%, 自然湿地向人工湿地转换 85.80%。可以看出, 在保持 2006 年到 2016 年的变化速度下, 2026 年黄河三角洲的人工湿地面积还在不断增加并不断向海扩散, 自然湿地面积减少, 无法满足 2020 年湿地保护制度的目标。

## 5 结论

从 1996–2016 年的分类结果和面积可看出, 黄河三角洲自然湿地面积一直呈下降趋势, 人工湿地一直保持增加的趋势, 2006–2016 年有一个激增。通过将 CA-Markov 模型和 LCM 模型应用于黄河三角洲湿地的模拟发现以下结论:

(1) 在相同驱动力影响下, CA-Markov 模型的数量误差 0.11 是优于 LCM 模型的 0.15。LCM 模型的最佳模拟方式空间误差达到 0.15, 优于 CA-Markov 模型的 0.29。对于黄河三角洲这种变化较大研究区的模拟, 选择将 2 种模型叠加模拟, 数量误差达到了 0.11, 空间误差为 0.21, 获得了综合时空上较好的模拟效果。

(2) 在模型的模拟中, 人为因素的干扰、自然灾害对景观类型造成的影响没有考虑, 会模拟精度造成影响, 这也是模拟精度较低的主要原因。CA-Markov 模型 Proportional error 参数设置通过影响转移概率矩阵, 对模拟数量精度有影响。对于 LCM 模型, 在驱动力因子完全相同的情况下, 转移子模型的数量对模拟空间位置结果产生影响, 转移子模型多需要训练的次数也越多, 模拟出的结果精度越高。

(3) 在保持 2006–2016 年的变化趋势下, 得到 2026 年的预测结果。相对于 2016 年湿地面积, 数量上, 自然湿地从 1646.98 km<sup>2</sup> 减少到 1252.69 km<sup>2</sup>, 共减少 394.29 km<sup>2</sup>; 非湿地减少 30.88 km<sup>2</sup>; 人工湿地大量增加, 从 839.84 km<sup>2</sup> 增加到 1265.00 km<sup>2</sup>, 共增加了 425.16 km<sup>2</sup>。空间变化趋势上, 自然湿地缩减, 人工湿地不断向浅海区域扩张。时空变化总体趋势, 未来需要对黄河三角洲自然湿地加以保护和人工湿地的扩张趋势加以控制, 实现 2020 年湿地保

护的目标, 维持黄河三角洲生态环境的稳定。

## 参考文献(References):

- [1] 汪小钦, 王钦敏, 刘高焕, 等. 黄河三角洲土地利用/土地覆被区域分异[J]. 自然资源学报, 2006, 21(2): 165-171. [Wang X Q, Wang Q M, Liu G H, et al. Spatial pattern of land use/land cover in the Yellow River Delta[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(2): 165-171.]
- [2] 王红, 宫鹏, 刘高焕. 黄河三角洲土地利用/土地覆盖变化研究现状与展望[J]. 自然资源学报, 2004, 19(1): 110-118. [Wang H, Gong P, Liu G H. The review and prospect on land use and land cover change research in Yellow River Delta[J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(1): 110-118.]
- [3] 国务院办公厅.《湿地保护修复制度方案》[J]. 给水排水, 2017, 53(2): 134. [The General Office of the State Council. The wetland protection and restoration system program[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(2): 134.]
- [4] Mishra V N, Rai P K, Mohan K. Prediction of land use changes based on Land Change Modeler (LCM) using remote sensing: A case study of MUZAFFARPUR (BIHAR), INDIA[J]. Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic Sasa, 2014, 64(1): 111-127.
- [5] 胡胜杰, 牛振国, 张海英, 等. 中国潜在湿地分布的模拟[J]. 科学通报, 2015, 60(33): 3251-3262. [Hu S J, Niu Z G, Zhang H Y, et al. Simulation of spatial distribution of China potential wetland[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(33): 3251-3262.]
- [6] Castella J C, Verburg P H. Combination of process-oriented and pattern-oriented models of land-use change in a mountain area of Vietnam[J]. Ecological Modelling, 2007, 202(3-4): 410-420.
- [7] Olmedo M T C, Jr R G P, Paegelow M, et al. Comparison of simulation models in terms of quantity and allocation of land change[J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 69(C): 214-221.
- [8] Mas J F, Kolb M, Paegelow M, et al. Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages[J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 51(1): 94-111.
- [9] Pérez-vega A, Mas J, Ligmann-zielinska A. Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 29(1): 11-23.
- [10] 杨丽桃. 福州城区土地利用变化 LCM 模型构建与模拟[D]. 福州: 福建农林大学, 2012. [Yang L T. Building and simulation of Fuzhou city land use change LCM model[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012.]

- [11] 彭峰. 基于RS和GIS的银川市土地利用/土地覆盖变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011. [ Peng F. Research on land use/land cover changes in Yinchuan city based on RS and GIS[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. ]
- [12] 魏辽生. 基于IDRISI-LCM模型的土地利用变化与预测研究—以庄河市为例[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2015. [ Wei L L. Land use change prediction based on IDRISI-LCM model-case study of the Zhuanghe city[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2015. ]
- [13] 刘世梁, 安南南, 尹艺洁, 等. 广西滨海区域景观格局分析及土地利用变化预测[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 5915-5923. [ Liu S L, An N N, Yin Y J, et al. Landscape pattern analysis and prediction of land-use change in Guangxi coastal area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 5915-5923. ]
- [14] Nagabhatla N, Finlayson C M, Sellamuttu S S. Assessment and change analyses (1987-2002) for tropical wetland ecosystem using earth observation and socioeconomic data[J]. European Journal of Remote Sensing, 2012, 45(2): 215-232.
- [15] 山东黄河三角洲国家级自然保护区管理局. 山东黄河三角洲国家级自然保护区详细规划[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016. [ Shandong Yellow River Delta National Nature Reserve Administration. Detailed Planning of Shandong Yellow River Delta National Nature Reserve (2014-2020)[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2016. ]
- [16] 吕宪国. 湿地生态系统保护与管理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. [ Lu X G. Protection and management of wetland ecosystem[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. ]
- [17] Eastman, R. J. IDRISI Andes, Guide to GIS and Image Processing[M]. America: Clark University, Worcester, 2006, 87-131.
- [18] 井云清, 张飞, 张月. 基于CA-Markov模型的艾比湖湿地自然保护区土地利用/覆被变化及预测[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3649-3658. [ Jing Y Q, Zhang F, Zhang Y. Change and prediction of the land use / cover in Ebinur Lake Wetland Nature Reserve based on CA-Markov model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(11): 3649-3658. ]
- [19] Pijanowski B C, Brown D G, Shellito B A, et al. Using neural networks and GIS to forecast land use changes: a Land Transformation Model[J]. Computers Environment & Urban Systems, 2002, 26(6): 553-575.
- [20] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. Learning internal representations by error propagation. Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition[M]. Cambridge: MIT Press, 1986.