DOI:10.15928/j.1674-3075.2020.04.006

生态恢复视角下海滨湿地景观模拟
——以江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区为例

张华兵[1,2],韩 爽[1],王 娟[1,2],刘玉卿[1],于英鹏[1]

(1.盐城师范学院 城市与规划学院,江苏 盐城 224007;
2.南京师范大学地理科学学院,江苏 南京 210023)

摘要:选择盐城典型淤泥质海滨湿地区,从生态恢复的视角,模拟预测未来海滨湿地景观可能的变化结果,为海滨湿地的科学管理提供决策参考。盐城海滨湿地是区域重要的生态屏障,近年来,在人类与自然的双重作用下,区域湿地景观变化显著。为维护区域生态安全,发挥湿地应有的功能,以2000年和2011年遥感影像为基础,结合土壤水分和盐度数据,采用景观过程模型,从生态恢复的视角,对2020年盐城海滨湿地景观演变进行模拟,研究结果表明:(1)人工围堰、互花米草扩张和碱蓬沼泽退化是研究区面临的主要生态问题。(2)人工管理区,至2020年,碱蓬沼泽比现状条件下模拟结果增加了18.46倍,互花米草沼泽减少了66.04%;景观多样性指数从1.007增加到1.150,景观均匀度指数从0.626增加到0.715。(3)自然条件区,至2020年,互花米草沼泽的面积比现状条件下模拟结果减少了82.32%,碱蓬沼泽增加了19.65倍;景观多样性指数从1.082增加到1.237,景观均匀度指数从0.780增加到0.892。

关键词:景观过程模型;生态恢复;情景模拟;江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区

中图分类号:X37 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2020)04-0041-07

盐城淤泥质海滨湿地是我国乃至国际上现存不多的原生态海滨湿地之一(刘青松等,2003),在人类活动与自然的双重作用下,景观结构与格局变化显著(江苏省GEF湿地项目办公室,2008)。为深入探索景观变化过程,基于生态过程的景观模型研究日益受到重视,逐渐成为近年来景观生态学关注的热点(刘红玉等,2009)。在已有研究中,景观模型研究以套用现有模型成果居多,以CLUSE-S、LCM、LANDIS、马尔科夫模型和元胞自动机模型最具代表(王慧等,2018;刘世梁等,2017;孙万龙等,2017;潘月等,2018;周梦遥等,2018;刘菁华等,2017;吴卓等,2018)。而关于生态过程驱动的湿地景观过程模型研究比较欠缺,除了很难找到现有模型直接使用外,大批量湿地生态过程支撑数据获取及空间处理较难,此外还需要与"3S"技术进行空间整合,更增加了模型构建的难度(刘红玉和李兆富,2013)。国外在景观过程模型领域的研究开展相对较早,Costanza等(1990)以水文和营养要素为驱动因子,构建过程模型研究海滨湿地植物覆被类型演变。Fitz等(1999)揭示了景观尺度上生态的相互作用机理,模拟了Everglades湿地区域植物群落演替。国内在该方面的研究起步相对较晚,《基于水盐过程的盐城海滨湿地景观动态模拟系统V1.0》是将生态系统尺度与景观尺度数据相耦合,以土壤水分和盐度为驱动,能够实现空间可视化的景观过程模型,不仅可以从机理上解释区域景观演变机制,也可以科学预测景观变化趋势。

情景模拟是基于各种关键假设,对未来情景进行严谨的推理与描述,不仅考虑关键变量及相互关系在未来保持相对稳定的情况,也能将突发性和非常规的扰动情况进行预设(Fleisher and Bensoussan,2003)。目前对情景分析多应用于能源、低碳经济、土地利用、气候变化、生物保护、决策管理等领域,其中以大区域、流域的尺度为研究对象的土地利用变化情景分析与模拟最为典型(赵雪等,2017;邓华等,2016;耿冰和付梅臣,2017;李斌等,2017;Sun et al,2016)。结果表明,情景模拟法能够有效模拟预测未来不同情境下区域可能的变化结果。盐城海滨湿地类型齐全、面积集中。尤其是江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区和大丰麋鹿自然保护区的建

收稿日期:2018-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41771199,41501567,41601594);江苏省自然科学基金项目(BK20171277,BK20160446);江苏省教育厅自然科学研究项目(18KJD170001)。

作者简介:张华兵,1979年生,男,副教授,主要从事湿地景观及遥感/GIS应用研究。E-mail: yctuzhanghb@163.com

立，一些岸段仍然保持了天然的结构和功能，是我国为数不多的原始海岸湿地之一，在我国生物多样性保护中具有重要地位。但是，多年来海滨湿地景观结构与功能已发生巨大变化、湿地生态问题逐渐凸显。鉴于此，模拟盐城海滨湿地景观未来可能的变化对于湿地生态保护就显得尤为重要。本研究选择小尺度盐城典型淤泥质海滨湿地区为研究案例，运用《基于水盐过程的盐城海滨湿地景观动态模拟系统 V1.0》，从生态恢复视角，模拟预测未来海滨湿地景观可能的变化，可以为海滨湿地的科学管理提供决策参考。

1　研究区概况

江苏盐城国家级自然保护区位于江苏中部沿海地区，濒临黄海，介于32°20′～34°37′N，119°29′～121°16′E，横跨东台、大丰、亭湖、射阳、滨海、响水6县（市、区），海岸线长 582 km，滩涂湿地面积 45.33×10^4 hm^2，是西太平洋海岸最大的淤泥质潮滩湿地。保护区地处北亚热带与暖温带的过渡地带，季风气候显著，年平均气温介于 13.7～14.8℃，年平均积温达 4 600℃，年降水量 900～1 100 mm。保护区核心区，北至新洋港河，南至斗龙港河，西至海堤公路，为典型的淤长型海滨湿地，区域面积为 1.92×10^4 hm^2。核心区以中路港道路为界，分为南北两部分（图 1）。北部区域面积约 0.52×10^4 hm^2，因进行了大面积的人工芦苇沼泽恢复，成为典型的人工管理区域。南部区域面积约 1.40×10^4 hm^2（含养殖池），区域景观演变主要受潮汐等自然条件的影响，人类活动影响微弱，成为典型的自然条件控制区域，景观从陆地向海洋依次表现为芦苇沼泽、碱蓬沼泽、米草沼泽和光滩（张华兵等，2012）。海滨湿地景观结构变化，总体上表现为：芦苇沼泽、米草沼泽不断扩张，碱蓬沼泽不断减少。景观演变主要表现为：碱蓬沼泽转变为芦苇沼泽，碱蓬沼泽转变为米草沼泽，光滩转变为米草沼泽。在互花米草引种之前、碱蓬-互花米草沼泽交错带形成之前，还存在着光滩向碱蓬沼泽的转变（张华兵，2013）。

2　研究方法

2.1 数据来源与处理

景观数据来源于 2000 和 2011 年的 ETM＋遥感影像。ETM＋影像含有同一传感器的 7 个多光谱波段（分辨率为 30 m）与 1 个全色波段（分辨率为 15 m）。全色波段与多光谱波段可以实现高精度融合。为了提高遥感图像的解译精度，研究中还参考了江苏省海岸土地利用图以及 60 个野外实际调查点的地物数据和点位信息。在 ENVI4.7 软件中依次进行大气校正、几何校正、主成分分析、彩色合成、波段融合对 ETM＋影像进行前处理。在研究中，为了避免“同谱异物”、“同物异谱”现象影响遥感影像解译精度，采用非监督分类与决策树分类相结合的方法，以野外调查数据为验证，完成研究区图像解译，总体解译精度达到了 95%（图 2、图 3）。

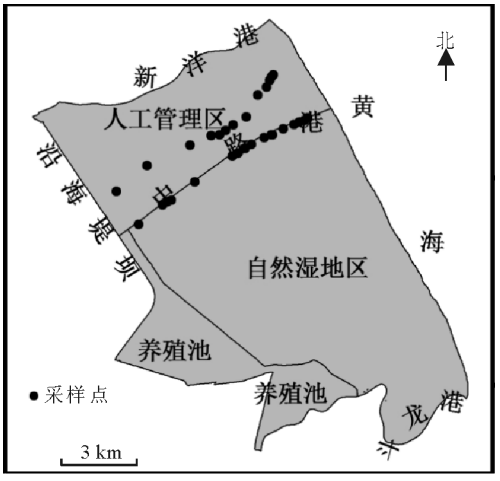

图 1　研究区及样点位置

Fig.1　Location of the study area in Yancheng coastal wetlands

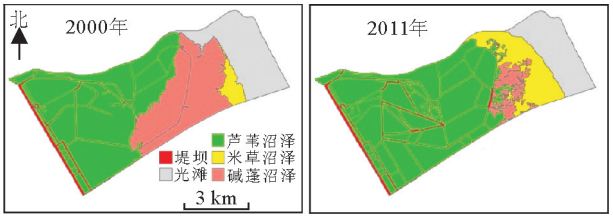

图 2　人工管理区海滨湿地景观变化

Fig.2　Landscape changes in the artificial management area of the coastal wetlands from 2000 to 2011

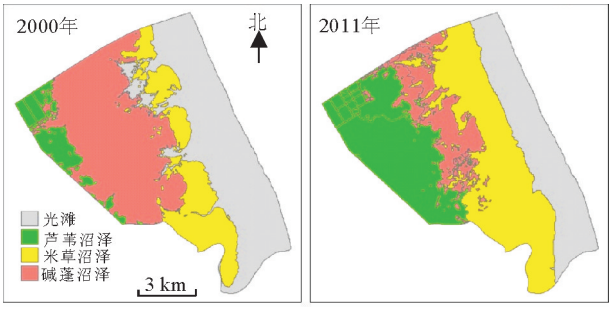

图 3　自然条件区海滨湿地景观变化

Fig.3　Landscape changes of the natural coastal wetland area from 2000 to 2011

分别于 2011 年 4 月和 2012 年 4 月对研究区 2

个样带的 30 个样地进行了土壤盐度和水分数据采集，如图 1。每个样地设置 3 个样点，采表层土（距地面 0～20 cm）进行混合；土壤水分用 TRIME-PICO-BT（德国）便携式水分测量仪野外测得；土壤盐度在实验室采用 TFC－203 土壤化肥速测仪获得；每个样品测 3 次平行样，取平均值。进一步，利用景观数据与采集的点状生态数据，通过人工神经网络方法（BP-ANN）构建土壤水分、盐度空间分布图（图 4、图 5）。

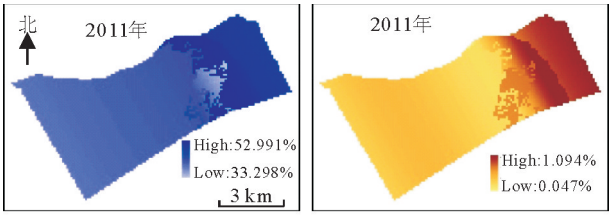

图 4　人工管理区海滨湿地土壤水分（左）和盐度（右）

Fig.4　Distribution of soil moisture (left) and salinity (right) in the artificial management area of the coastal wetlands

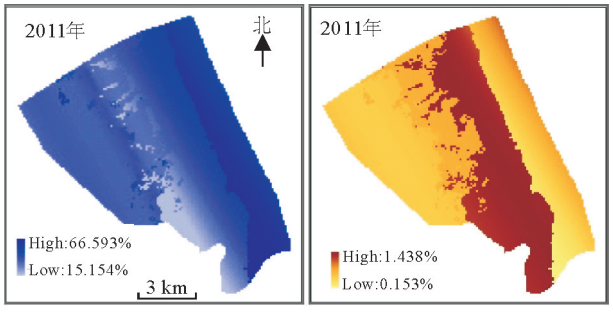

图 5　自然条件区海滨湿地土壤水分（左）和盐度（右）

Fig.5　Distribution of soil moisture and salinity in the natural coastal wetland area

2.2　研究方法

《基于水盐过程的盐城海滨湿地景观格局动态模型 V1.0》（软件著作权编号：No.01678102，2017 年）（以下简称“V1.0”）是在 ArcGIS 10.0 和 Matlab2008 平台上开发设计的，其功能不仅可以动态显示区域景观变化，而且能够从生态过程的视角，解释区域景观变化的机制问题。系统由 4 个部分构成：一是主程序，揭示景观格局变化与生态过程的关系；二是时间函数，景观格局演变在时间上的连续变化，可以实现对任意时候（不限时间间隔）研究区景观模拟；三是可视化表达；四是调用命令。模型自带了盐城海滨湿地不同景观类型土壤水分和盐度的阈值参数（表 1）以及不同驱动下土壤水分和盐度的年变化参数，其中 x1、x2、x3、x4 分别为碱蓬沼泽向芦苇沼泽、碱蓬沼泽向米草沼泽、光滩向米草沼泽、光滩向碱蓬沼泽演变时土壤盐度的变化速率；x5、x6、x7、x8 分别为碱蓬沼泽向芦苇沼泽、碱蓬沼泽向米草沼泽、光滩向米草沼泽、光滩向碱蓬沼泽演变时土壤水分的变化速率。在研究中，以“V1.0”为基础，调节土壤水盐参数，对研究区进行景观情景模拟。

表 1　盐城海滨湿地不同景观类型土壤水分和盐度的阈值参数

Tab.1　Scope of soil moisture and salinity values in different landscape types

景观类型	水分值/%	盐度值/%
芦苇沼泽	33.1132～42.2824	0.1531～0.5325
碱蓬沼泽	33.1132～48.6342	0.5325～0.8862
米草沼泽	26.4158～55.3316	0.8862～1.4375
光滩	48.6342～66.5934	0.3148～0.8862

3　结果分析

3.1　主要生态问题

3.1.1　人工围堰　通过图 2 两期图像对比可以看出，人工管理区中人工堤坝明显增多。2011 年，人工筑堤面积比达到了 4.44%，人工筑堤长度超过 40 km，人工围堰面积达到了 3 245.40 hm^2，占人工管理区总面积的 60.07%。通过修筑堤坝，引入淡水，阻挡潮汐的进退，加快了湿地土壤的脱盐进程，改变了原生生态系统。自然植被的延续和演变进程遭到破坏，大面积的滩涂湿地转变为水域，使得獐、丹顶鹤等的栖息地遭到破坏，活动面积大幅度缩小，有必要进行一定程度的生态恢复。

3.1.2　互花米草扩张　通过图 2、图 3 的对比分析，江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区核心区内，互花米草沼泽面积百分比从 2000 年 11.22%增加到 2011 年的 23.74%。与 2000 年相比，2011 年有 31.60%的光滩转变为米草沼泽，16.67%的碱蓬沼泽转变为米草沼泽。在空间扩张上，米草沼泽表现出向海陆 2 个方向扩张的特征，尤以南部自然条件区为典型，与 2000 年相比，2011 年米草沼泽平均宽度增加了 1 538.80 m，平均向海洋方向扩张了约 1 291.31 m，向陆地方向扩张了约 247.49 m。

互花米草在江苏沿海于 20 世纪 80 年代引种成功，90 年代形成了较大面积、间断不连续分布的群落，后来迅速扩展，短时间内在江苏沿海形成了南北相连、东西数千米宽的互花米草带，成为淤泥质潮滩湿地的优势植被。由于互花米草具有很强的促淤、抗侵蚀功能，使得互花米草沼泽带高程增加，在研究区互花米草促淤的高度达到了 1.5 m，造成海滨湿地微地貌格局发生变化，而互花米草又沿着潮沟向碱蓬沼泽的下边缘扩张，这就使得潮水很难越过互

花米草带到达碱蓬带。另外,互花米草的广生态幅特征,以及无性和有性的双重繁殖方式,使其在与碱蓬的种间竞争中具有独特的优势。所以,碱蓬沼泽下边缘的碱蓬-互花米草交错区,在种间竞争中,碱蓬的生长空间就极易被互花米草侵占(袁红伟等,2009;陈正勇等,2011),从而形成碱蓬沼泽转变为互花米草沼泽的演变序列。

3.1.3 碱蓬沼泽退化严重 通过图2、图3的对比分析,自然保护区核心区内,人工围堰和互花米草扩张的最直接表现就是碱蓬沼泽受到芦苇沼泽和互花米草沼泽从东西两个方向向其扩张,碱蓬沼泽不断减少、乃至存在消失的危险。碱蓬沼泽的面积由2000年的5 503.97 hm^2,减少至2011年的1 856.99 hm^2,减少了66.26%,萎缩趋势越来越明显。与2000年相比,2011年分别有52.11%、16.67%的碱蓬沼泽转变为芦苇沼泽和米草沼泽。在空间上表现为,从海陆两个方向往中间收缩的特征,与2000年相比,2011年碱蓬沼泽的平均宽度减少约2 132 m,向海洋方向退缩约1 770 m,向陆地方向退缩约430 m。碱蓬是海滨湿地一种重要的一年生草本、盐生本地植物物种,耐盐能力强,是盐城海滨湿地的先锋植物物种(张学杰等,2003),是海滨湿地生物多样性重要组成部分,对维持地区生态系统稳定和演替发挥着重要作用(毛培利等,2011;张立宾等,2007)。

3.2 现状条件下景观变化趋势

通过图2、图3分析,可以看出:研究区景观变化最明显的特征是芦苇沼泽向海洋方向、米草沼泽向海陆两个方向扩张明显;碱蓬沼泽受到来自海陆两个方向的挤压,面积不断减少。现状条件下模拟,不改变现有条件,以2011年为初始条件,模拟研究区2020的情况。此时土壤水分和盐度变化速率,主要通过不同时期土壤水分和盐度空间分布图的叠加计算获取。人工管理区,参数设置为[x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8]=[-0.010%,0.052%,0.050%,0.000%,-0.100%,0.800%,0.230%,0.000%]。结果显示(图6a):芦苇沼泽的比重从2011年的61.09%上升至65.35%,增加了6.96%;米草沼泽的比重由12.13%上升至16.04%,增加了32.25%;碱蓬沼泽的比重由5.22%下降至0.96%,减少了81.56%,碱蓬沼泽接近消失。景观多样性指数(H)为1.007,均匀度指数(E)为0.626。

在自然条件区,参数设置为[x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8]=[-0.007%,0.085%,0.300%,0.000%,-0.250%,1.500%,-3.500%,0.000%]。结果显示(图7a),芦苇沼泽的面积百分比从2011年的26.14%上升至28.92%,增加了10.62%;米草沼泽面积比重由2011年的34.47%上升到51.99%,增加了50.84%;碱蓬沼泽的面积比重由2011年的14.41%下降到2.12%,减少了85.27%,进一步模拟到2030年,仅剩下0.036%,碱蓬沼泽基本消失。2020年模拟结果,景观多样性指数(H)为1.082,均匀度指数(E)为0.780。

3.3 生态恢复下景观模拟结果

3.3.1 生态恢复目标 总体目标是维护区域景观多样性,消除人类活动的不利影响、控制互花米草扩张、恢复碱蓬沼泽。主要任务一是去除堤坝的阻碍,实现自然植被演变的连续性,通过一定的措施恢复到自然状态下的演变规律,尤其是碱蓬沼泽向芦苇沼泽的演变速率恢复到自然状态。二是控制互花米草沼泽,既要利用互花米草超强的促淤能力来保滩护岸,又不影响本地物种碱蓬的生存,恢复海滨湿地植被原生演替;同时积极通过生物技术措施、工程措施实施碱蓬沼泽恢复。

3.3.2 人工管理区生态恢复模拟结果

(1)通过对人工管理区2000年景观类型图的分析,发现2000年人工芦苇湿地主要分布在原有的芦苇沼泽区内,未开始对碱蓬沼泽进行大面积匡围。将2000年的状态理解为一种自然状态或者未受干扰的状态,保持原生状态下碱蓬沼泽→芦苇沼泽的演变趋势,模拟2020年的情景。与现状条件下比较,参数设置只需要将x1、x5按照自然条件下参数设置即可。具体参数参数设置为[x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8]=[-0.007%,0.052%,0.050%,0.000%,-0.100,0.800%,0.230%,0.000%]。

(2)假设从2011年开始,互花米草已经具备了保滩护岸功能,因其扩张迅速,引起了物种入侵,设想通过某种措施,互花米草沼泽只保持向海洋方向扩张的态势,即光滩→互花米草沼泽演变序列不变,与现状条件下比较,只需要将参数x2、x6调整为0。具体参数设置为[x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8]=[-0.010%,0.000%,0.050%,0.000%,-0.100%,0.000%,0.230%,0.000%];在向陆地一侧,去除部分互花米草沼泽,恢复光滩→碱蓬沼泽的演变序列,在上一步调整的基础上,调节x4、x8为米草引种前的状态。具体参数设置为[x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8]=[-0.010%,0.000%,0.000%,0.125%,-0.100%,0.000%,0.000%,-4.600%]。

(3)按上述两种假设分别模拟 2020 的情景，并在 ArcGIS 中实现两种结果的综合。

人工管理区模拟结果显示(图 6b)：至 2020 年，人工管理区芦苇沼泽面积比例为 59.94%，比现状条件下减少了 8.28%；米草沼泽的面积比例为 5.97%，比现状条件下减少了 66.04%；碱蓬沼泽的面积比例为 18.68%，比现状条件下增加了 18.46 倍。景观多样性指数(H)为 1.150，均匀度指数(E)为 0.715。

3.3.3　自然条件区生态恢复模拟结果　基础数据选择以 2011 年为起始年份。(1)设想通过人工控制，消除互花米草向碱蓬沼泽的扩张，互花米草只向海洋扩张，与现状条件下比较，只需要将 x2、x6 调整为 0。具体参数设置为[x1，x2，x3，x4，x5，x6，x7，x8]＝[－0.007%，0.000%，0.300%，0.000%，－0.250%，0.000%，－3.500%，0.000%]。(2)假设从 2011 年开始研究区内没有了互花米草，海滨湿地的先锋物种仍然是碱蓬，恢复光滩→碱蓬沼泽的演变序列，与现状条件下比较，基础图中就去除了米草景观，调整 x3、x7 为 0；将 x4、x8 恢复为米草引种前的状态。具体参数设置为[x1，x2，x3，x4，x5，x6，x7，x8]＝[－0.007%，0.000%，0.000%，0.125%，－0.250%，0.000%，0.000%，－4.600%]。(3)按上述两种假设分别模拟 2020 的情景，并在 ArcGIS 中实现两种结果的综合。

自然条件区模拟结果显示(图 7 b)：至 2020 年，自然条件区芦苇沼泽面积为 30.61%，与现状条件相比，变化较小；米草沼泽的面积比例为 8.73%，比现状条件下减少了 82.32%；碱蓬沼泽的面积为 43.83%，比现状条件下增加了 19.65 倍。景观多样性指数(H)为 1.237，均匀度指数(E)为 0.892。

3.4　生态恢复措施

通过该土壤水盐过程模型进行情景模拟，结果说明：生态恢复不管采用什么样的措施，从根本上还是通过土壤水分和盐度来控制海滨湿地景观变化。对于海滨湿地而言，土壤水分和盐度的调节，其实质就是控制海水与淡水的进与出。重点需要考虑以下 3 个问题：一是去除堤坝影响。为了保障在潮汐作用下海水能够自由的进出潮滩湿地，可以通过降低堤坝高度或者铲除堤坝，也可以通过闸门控制海水的进入和消退，按照生态恢复目标，按需引入海水，使海滨湿地土壤环境达到生态恢复目标状态下的要求。二是碱蓬沼泽恢复。一方面现有碱蓬生长区碱蓬长势差，这种情况可以通过人工播种的技术，提高碱蓬的密度，提高生物量。另一方面，碱蓬长势差的原因在于互花米草的促淤作用使得米草沼泽的高程增加，从陆向海，芦苇沼泽、碱蓬沼泽、米草沼泽高程变化呈现“高-低-高”的特征；甚至不少小的潮沟都被互花米草所侵占，就使得海水较难通过米草沼泽而到达碱蓬沼泽区。这就需要人工增加、疏通潮水通道，使潮水能够周期性的到达碱蓬沼泽，恢复碱蓬沼泽的生境。三是控制互花米草扩张。通过物理工程措施，大规模的匡围可以快速控制互花米草，但是自然保护区核心区内是不可能实施的。生态工程措施、生物措施多是在实验条件下或者在非核心区内进行模拟的。这种方案在保护区一旦实施，是否会引发例如物种入侵的新问题，是需要考虑的。所以，如何将这些措施技术升级、方案革新，使其转变为符合保护区实际情况的可行方案才是关键；另一方面，对于互花米草不能只提消除，还要保留适当规模以发挥其保滩护岸功能。这些措施，不仅是研究的需要，也是保护区管理部门亟待解决的问题。

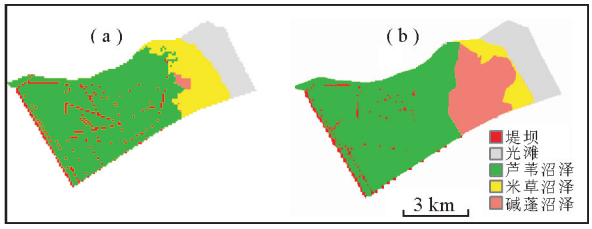

图 6　2020 年人工管理区景观模拟结果

Fig.6　Landscape simulation for the artificial management area in 2020

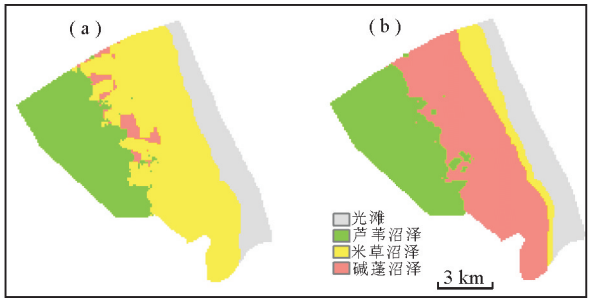

图 7　2020 年自然条件区景观模拟结果

Fig.7　Landscape simulation in the natural coastal wetland area in 2020

4　结论

选择江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区为研究对象，运用《基于水盐过程的盐城海滨湿地景观动态模拟系统 V1.0》，从生态恢复的视角，对海滨湿地景观演变进行了情景模拟。结果如下：

(1)在现状条件下，至 2020 年模拟结果显示，研究区内芦苇沼泽、米草沼泽迅速扩张；碱蓬沼泽急剧

减少，在人工管理区和自然条件区比例分别为0.96%、2.12%，面临消失的危险。

(2)研究区生态恢复需从去除堤坝影响、恢复碱蓬沼泽和控制互花米草扩张3个方面着手，综合考虑这些方面因素。研究区2020年综合模拟结果显示：芦苇沼泽变化较小，而米草沼泽明显减少、碱蓬沼泽明显增多。人工管理区米草沼泽比现状模拟结果减少了66.04%，碱蓬沼泽比现状条件增加了18.46倍；自然条件区，米草沼泽比现状模拟结果减少了82.32%，碱蓬沼泽比现状条件增加了19.65倍。景观多样性指数和均匀度指数都显著提高。

(3)《基于水盐过程的盐城海滨湿地景观动态模拟系统V1.0》中只选用了土壤水分和盐度两个生态要素，海滨湿地景观演变是受到具有复杂关系的多重过程因素制约，如何进行多要素耦合过程模拟是未来需要继续研究的课题。

参考文献

陈正勇，王国祥，刘金娥，等，2011.苏北潮滩群落交错带互花米草斑块与土著种竞争关系研究[J].生态环境学报，20(10)：1436－1442.

邓华，邵景安，王金亮，等，2016.多因素耦合下三峡库区土地利用未来情景模拟[J].地理学报，71(11)：1979－1997.

耿冰，付梅臣，2017.基于SD模型的土地可持续集约利用情景模拟[J].技术经济与管理研究，(3)：8－13.

江苏省GEF湿地项目办公室，2008.盐城滨海湿地生态价值评估及政策法律、土地利用分析[M].南京：南京师范大学出版社：76－77.

李斌，刘越岩，张斌，等，2017.基于Tietenberg模型的土地利用变化多情景模拟预测—以武汉市蔡甸区为例[J].资源科学，39(9)：1739－1752.

刘红玉，李玉凤，曹晓，等，2009.我国湿地景观研究现状，存在的问题与发展方向[J].地理学报，64(11)：1394－1401.

刘红玉，李兆富，2013.海滨湿地景观过程模型研究的理论基础与概念框架[J].生态学杂志，32(10)：2815－2822.

刘菁华，李伟峰，周伟奇，等，2017.京津冀城市群景观格局变化机制与预测[J].生态学报，37(16)：5324－5333.

刘青松，李杨帆，朱晓东，2003.江苏盐城自然保护区滨海湿地生态系统的特征与健康设计[J].海洋学报，25(3)：143－148.

刘世梁，安南南，尹艺洁，等，2017.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，37(18)：5915－5923.

毛培利，成文连，刘玉虹，等，2011.滨海不同生境下盐地碱蓬生物量分配特征研究[J].生态环境学报，20(8)：1214－1220.

潘月，于东升，王秀虹，等，2018.基于CA-Markov模型的土地利用景观格局预测研究[J].土壤，50(2)：391－397.

孙万龙，孙志高，田莉萍，等，2017.黄河三角洲潮间带不同类型湿地景观格局变化与趋势预测[J].生态学报，37(1)：215－225.

王慧，丁忠义，侯湖平，等，2018.高潜水位煤矿区土地利用景观格局分析与模拟预测研究—以沛北煤矿区为例[J].长江流域资源与环境，27(3)：574－582.

吴卓，戴尔阜，林媚珍，2018.气候变化和人类活动对南方红壤丘陵区森林生态系统影响模拟研究——以江西泰和县为例[J].地理研究，37(11)：2141－2152.

袁红伟，李守中，郑怀舟，等，2009.外来种互花米草对中国海滨湿地生态系统的影响评价及对策[J].海洋通报，28(6)：122－128.

张华兵，2013.自然和人为影响下海滨湿地景观演变特征与机制研究[D].南京：南京师范大学.

张华兵，刘红玉，郝敬锋，2012.自然和人工管理驱动下盐城海滨湿地景观格局演变特征与空间差异[J].生态学报，32(1)：101－110.

张立宾，徐化凌，赵庚星，2007.碱蓬的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果[J].土壤，39(2)：310－313.

张学杰，范守金，李法曾，2003.中国碱蓬资源的开发利用研究状况[J].中国野生植物资源，22(2)：1－3.

赵雪，黄庆旭，何春阳，2017.城市扩展过程对湿地影响的情景模拟研究—以河北怀来为例[J].自然资源学报，32(9)：1469－1481.

周梦遥，游巍斌，林美娇，等，2018.基于LANDIS模型的福建天宝岩森林景观演替动态模拟[J].北京林业大学学报，40(8)：12－22.

Costanza R，Sklar F H，White M L，1990. Modeling coastal landscape dynamics[J]. BioScience，(40)：91－107.

Fitz H C，Sklar F H，1999. Ecosystem analysis of phosphorus impacts and altered hydrology in the Everglades：a landscape modeling approach，in Phosphorus Biogeochemistry in Subtropical Ecosystems[J]. Lewis Publishers，Boca Raton，FL：585－620.

Fleisher C S，Bensoussan B E，2003. Strategic and Competitive Analysis：Methods and Techniques for Analyzing Business Competition [M]. Upper Saddle River，NJ：Prentice Hall.

Sun Piling，Xu Yueqing，Yu Zhonglei，et al，2016. Scenario simulation and landscape pattern dynamic changes of land use in the Poverty Belt around Beijing and Tianjin：A case study of Zhangjiakou city，Hebei Province[J]. Journal of Geographical Sciences，26(3)：272－296.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

Landscape Simulation of Coastal Wetlands to Support Ecological Restoration: A Case Study of the Jiangsu Yancheng Wetland Rare Birds National Nature Reserve

ZHANG Hua-bing[1,2], HAN Shuang[1], WANG Juan[1,2], LIU Yu-qing[1], YU Ying-peng[1]

(1. School of Urban and Planning, Yancheng Teacher's University, Yancheng 224007, P.R.China;
2. College of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, P.R.China)

Abstract: The Yancheng coastal wetland is the largest tidal flat wetland on the western Pacific coast and is an important ecological barrier for regional development. In recent years, human activities and natural processes have markedly changed the wetland landscape. Thus, landscape simulation of the Yancheng coastal wetland is important for managing and protecting wetland ecology. In this research, to support ecological restoration, a landscape process model was used to simulate the Yancheng coastal wetlands for the year 2020. soil moisture and salinity investigations were carried out at 30 sampling plots in a managed area and a natural coastal wetland area. The simulation model was constructed based on annual soil moisture and salinity data, combined with remote sensing images from 2000 and 2011. Research indicates that cofferdam, the expansion of *Spartina alterniflora* marsh and degradation of the *Suaeda* marsh were the primary ecological problem in the study area. Simulation results for the managed area shows the *Suaeda* marsh area increased by a factor of 18.5 by 2020, and a 66.0% decrease in the *Spartina alterniflora* marsh area. The landscape diversity index increased from 1.007 to 1.150, and the landscape evenness index increased from 0.626 to 0.715. In the natural area, the *Suaeda* marsh area increased by a factor of 19.7 and the *Spartina alterniflora* marsh area decreased by 82.3%. The landscape diversity index increased from 1.082 to 1.237, and the landscape evenness index increased from 0.780 to 0.892.

Key words: landscape process model; ecological restoration; scenario simulation; Jiangsu Yancheng Wetland Rare Birds National Nature Reserve