

# 1977-2014年江苏中部滨海湿地演化与 围垦空间演变趋势

李建国<sup>1</sup>, 濮励杰<sup>1,2</sup>, 徐彩瑶<sup>1</sup>, 陈新建<sup>1</sup>, 张云峰<sup>3</sup>, 蔡芳芳<sup>1</sup>

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 国土资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023; 3. 盐城师范学院城市与资源环境学院, 江苏盐城 224051)

**摘要:** 通过野外实地调研与遥感影像解译相结合的方式, 研究1977-2014年(1977、1984、2000、2007与2014年)江苏中部滩涂湿地演化与围垦空间演变的规律。结果表明, 1977-2014年江苏中部滨海湿地射阳河口以南岸线段总体以淤长为主, 但是也存在侵蚀的岸线段, 总体淤长/侵蚀速度在 $\pm 20$  m/yr左右, 最高值出现在东台和如东洋口港附近。研究区湿地围垦的速度远高于岸线淤长的速度, 基本维持在50 m/yr以上。1977-2014年江苏滨海湿地的生态关键区面积出现了快速的退化趋势, 特别是盐生植被空间的快速萎缩, 主要出现在射阳南部和大丰市。调查发现研究区传统的湿地围垦开发演变模式是光滩→盐生植被→养殖水面→耕地→建设用地。但是现在由于新技术和新方法的应用, 极大地缩短了围垦演变路径和周期, 有助于围垦经济效益的提高。江苏滨海湿地围垦后土地开发利用强度呈较为明显的上升趋势。同时, 江苏滨海湿地开发的热点空间在区域上主要集中于几个重要的港口及其腹地建制镇附近, 但总体规模不大。

**关键词:** 滨海湿地; 围垦模式; 淤长/侵蚀; 演变路径; 江苏

DOI: 10.11821/dlxb201501002

## 1 引言

江苏滨海湿地面积约占中国湿地面积的1/4, 面积约为 $9.97 \times 10^5$  hm<sup>2</sup>且每年以较快的速度向大海淤长<sup>[1-2]</sup>。滨海滩涂湿地是区域发展重要的土地后备资源, 同时也是具有重要生态功能和价值的自然资本<sup>[3-5]</sup>。滨海湿地的围垦一方面有助于缓解区域紧张的人地矛盾, 促进区域经济发展; 另一方面也会直接破坏滨海湿地的生态结构和功能, 加速生态资本的流失, 导致滨海湿地的功能退化和空间萎缩<sup>[6-7]</sup>。目前, 江苏滨海湿地的围垦强度和广度都达到空前的规模。2009年国务院通过的《江苏省沿海开发战略规划(2010-2020)》计划在未来的10年内围垦江苏沿海湿地面积达270万亩, 主要区域集中于射阳、大丰、如东和如东四个区域<sup>[8]</sup>。

围垦的不同方式与过程会直接改变滨海盐沼湿地演化的轨迹与方向<sup>[9-13]</sup>。孙永光等<sup>[14-16]</sup>在长江口湿地滩涂的研究表明, 滩涂湿地变化主要受到围垦时间和人类围垦方式的影响, 其对于滨海盐沼湿地景观变动的贡献率达到57.1%。盐城滨海湿地受人类活动的

收稿日期: 2014-10-13; 修订日期: 2014-11-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230751); 南京大学优秀博士生提升计划A(2014001A004); 南京大学研究生科研创新基金项目(2012CL14) [Foundation: National Natural Science Foundation, No.41230751; The Program A for Outstanding PhD Candidate of Nanjing University, No.2014001A004; The Scientific Research Foundation of Graduate School of Nanjing University, No.2012CL14]

作者简介: 李建国(1986-), 男, 江苏泗阳人, 博士生, 主要从事土地利用与规划研究。E-mail: lijianuo531@126.com

通讯作者: 濮励杰(1965-), 男, 江苏吴江人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110001875M), 主要从事土地利用与生态环境响应研究。E-mail: ljpu@nju.edu.cn

影响也比较明显,研究表明,由于围垦,1987-2007年间盐城滨海自然湿地面积比重从42.45%下降到21.44%,退化速度惊人<sup>[17]</sup>。同时,与自然湿地相比,围垦后的湿地景观破碎化发育明显,具有明显的多向性特征<sup>[18]</sup>,导致丹顶鹤的越冬数量明显降低<sup>[19]</sup>。已有的研究表明,土壤水分(Soil moisture)和盐分(Salinity)控制着自然滩涂盐沼演化的方向和过程<sup>[20]</sup>。随着人类建坝挡水作业,盐沼湿地在物理、化学和生态三个方面发生显著的变化<sup>[21]</sup>。首先,围垦后以芦苇、米草和碱蓬为代表的湿地景观面积锐减<sup>[22]</sup>,崇明东滩的研究发现,围垦使东滩湿地面积从1987年的19705.09 hm<sup>2</sup>下降到2002年的4773.8 hm<sup>2</sup><sup>[23]</sup>。从化学角度来看,围垦后土壤的养分(N、P)呈逐渐升高的趋势,而土壤盐分则下降迅速<sup>[2]</sup>。但同时也会带来土壤污染物富集(重金属、有机污染物)和近海海洋生态系统的富营养化问题<sup>[24-25]</sup>。从生态方面来看,围垦后湿地土壤向干旱化方向演进,这就导致围垦早期(10年左右)旱生耐盐植物群落扩张迅速,比如碱菀。而以芦苇为代表的的湿生植物群落则迅速收缩<sup>[26]</sup>,这在黄河三角洲的研究中得到进一步的印证<sup>[27]</sup>。围垦也使湿地的多样性水平显著下降,王宪礼等<sup>[28]</sup>在辽河三角洲的研究表明,随着人类活动的增强,湿地的多样性指数呈迅速降低的趋势。滨海湿地的演化受到多方面因素的共同作用。欧维新等在盐城滨海湿地的研究表明,耕地和水体是滨海垦区湿地演化的核心,而自然条件、人口增长、经济收益差异是盐城滨海湿地变化最重要的因素<sup>[29-30]</sup>。黄河三角洲的研究表明,影响黄河三角洲湿地演化的人为因素主要是农业围垦、油田开发和人工建筑。而自然因素则是河流断流、泥沙淤积和自身演替<sup>[31]</sup>。在经济发达的长江三角洲湿地,人口增长、经济发展和城市化已经成为影响该区湿地演化的重要驱动力<sup>[32]</sup>。

滩涂湿地演化与围垦是一对互为因果、相互矛盾的自然-人为共同体,探讨滩涂湿地的淤长/侵蚀变化就必须研究湿地的人类围垦的模式与规模。本研究选择江苏滩涂资源最为丰富的大丰麋鹿国家级自然保护区和盐城国家级珍禽自然保护区所在的中部地区作为研究区。通过获取1977、1984、2000、2007和2014年五期的遥感影像结合野外采样与实地踏勘,揭示1977-2014年间江苏滨海湿地的演化特征以及围垦过程与模式,探索二者相互作用的普遍规律,为滨海湿地管理与可持续发展提供信息支持。

## 2 研究区概况

研究区位于江苏东部沿海,主要包括大丰麋鹿国家级自然保护区与盐城国家级珍禽自然保护区,涉及射阳、大丰、东台和如东四个县(市),面积约15000 km<sup>2</sup>(包括辐射沙洲和部分海洋)(图1)。气候以亚热带海洋性季风气候为主,年平均气温约为14℃,无霜期为213 d,年平均降水量在1000 mm左右,年日照时数在2238.9 hr左右。研究区湿地总体上呈淤长的趋势,淤长/侵蚀格局并不一致。研究区大部分盐沼湿地多被用于农业围垦,主要是养殖水面和耕地。在盐沼湿地中,碱蓬、芦苇和大米草是最主要的盐生植被,主要分布于高潮线以下的围堤外围。而垦区的农业用地主要以种植玉米、棉花、小麦、蚕豆、西瓜、油菜和水稻为主。

## 3 数据来源与研究思路

本研究数据主要来源于遥感影像和实地调研,遥感影像的参数请详见表1。选取的影像都处于植物的生长期,这样有利于湿地植被信息的获取。运用ENVI 5.0软件对获取的遥感数据进行裁剪作业,为了保留研究区完整的湿地景观,将辐射沙脊洲等系列潮滩

都纳入到研究区当中（图 1）。运用监督分类和人工判读相结合的方式对遥感影像进行解译，形成研究区五期湿地景观主要土地利用/覆被状况的矢量分类数据。通过实地踏勘照片与解译图像进行比对并计算其精度，达到 85% 左右。

为了描述研究区湿地淤长/侵蚀与围垦动态，本研究由北向南设置了 18 个观测点作为测算基点（图 1）。这些点全部位于 1977 年围垦区最外围的堤坝上，通过与 2014 年的遥感影像的对比可以反映

出研究区近 40 年来不同岸线段的淤长/侵蚀与围垦速度变化。运用 ArcGIS 10.1 软件平台对获取的五期矢量数据进行叠加分析进而确定研究区土地利用强度的转变趋势、围垦区的主要围垦模式及其演变轨迹、围垦区土地利用转变的热点空间和盐沼湿地生态关键区主要的转变方向和规模，进而给出江苏滨海滩涂湿地演变的一般模式和规律（图 2）。

4 结果与分析

4.1 江苏滨海滩涂的淤长/侵蚀与围垦空间差异

通过测算不同时段 18 个基点到湿地外围边界的垂直距离，可以获取不同时期滩涂淤

表 1 研究区遥感影像参数

Tab. 1 The parameters of remote sensing images of study area

成像载体	传感器	Path/Row	成像时间	空间分辨率(m)
Landsat 8	ETM	119/37	2014-5-3	30
Landsat 5	TM	119/37	2007-6-17	30
Landsat 7	ETM	119/37	2000-5-20	30
Landsat 5	TM	119/37	1984-8-4	30
Landsat 2	MSS	128/37	1977-4-20	79
无人机	-	顺序编码	2013-2-11	0.3

数据来源：Landsat 2-8 影像来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)；无人机数据来源于江苏省金威遥感数据工程有限公司。

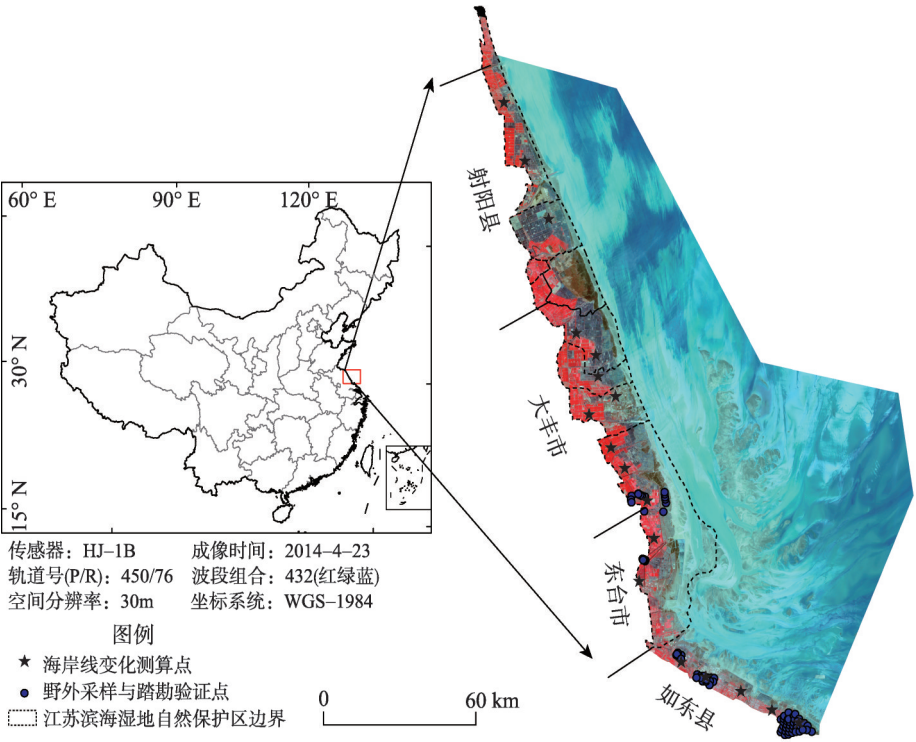


图 1 研究区区位与野外调查点  
Fig. 1 Study area and the field survey sites

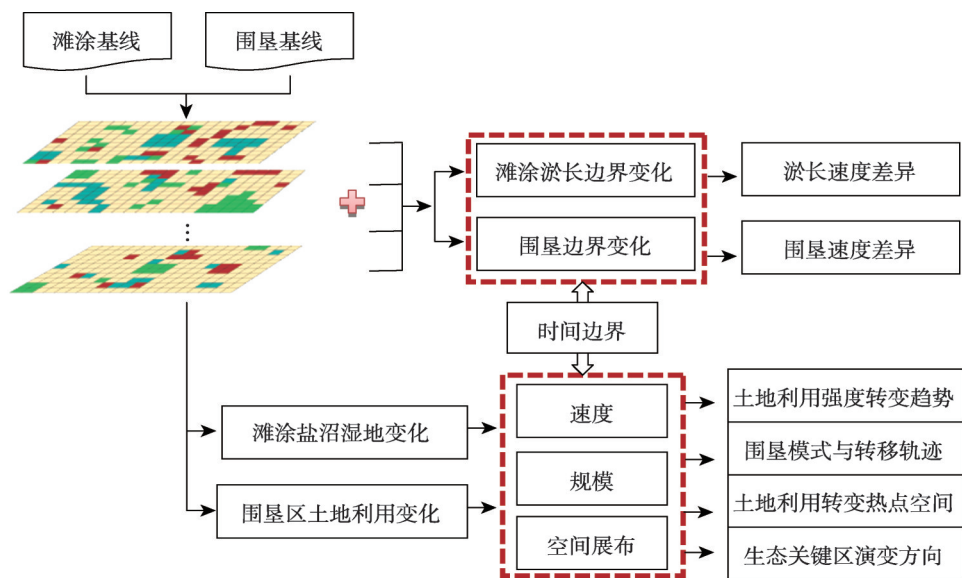


图2 研究思路和框架

Fig. 2 Description of study aims and framework

长/侵蚀的变化空间,进而获得40年来研究区不同岸线段的淤长/侵蚀速率。同时,通过不同时期的遥感影像对比可以清晰地获取不同时期的围垦边界,通过测算基点到围垦边界的最短距离可以获取滩涂围垦以及侵蚀/淤长变化及速率上的差异(图3-4)。为减少周期性的潮汐对距离测算产生的影响,本研究选取的Landsat遥感影像成像时间都在格林尼治时间1:30-2:30之间,大约为北京时间的9:30-10:30之间,成像时间相对一致,虽然由于研究区地势低平潮汐的影响较大,但是在近40年的时间尺度上测算淤长/侵蚀速率,其影响不是主要因素。

从图3可以看出,研究区滩涂的淤长速度远远低于围垦速度。从淤长/侵蚀速率变化的曲线来看,大部分区域(包括射阳与大丰)都维持在 $\pm 20$  m/yr左右。在大丰和射阳的部分岸线40年以来出现了明显的后退,表现为侵蚀形态,最高的侵蚀岸段位于大丰南岸,达到 $-49.34$  m/yr。东台与如东岸线段的淤长速度较快,最明显的淤长岸线段位于东台和如东北部,最高达到 $253.09$  m/yr。这主要是由于东台附近的辐射沙脊群快速淤长和处于黄海旋转潮波与东海前进潮波交汇区的结果。从围垦速率变化曲线来看,1977-2014年间围垦主要集中于大丰和东台两县(市),较高的围垦速度也主要出现在大丰南部和东台岸线段,分别达到 $369.85$  m/yr和 $353.12$  m/yr,这与泥沙的淤长空间有一定的错位。这主要是由于近几年来两个县(市)集中围垦的结果,如大丰在“十二五”期间集中围垦形成竹川三区、四区和五区三个垦区,而东台在2013年建设了面积达40万亩的条子泥垦区。

从围垦的空间上来看(图4),近40年以来,江苏滩涂湿地围垦的规模存在较大的差异(图3-图4和表2)。大丰和东台是近40年来围垦最为集中的区域。1977-2000年间主要

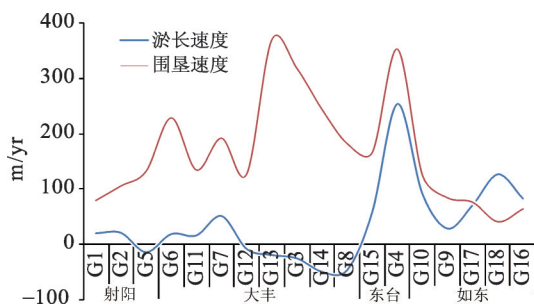


图3 研究区1977-2014年不同岸线段的淤长/侵蚀与围垦速率的差异

Fig. 3 The rate of expanding/erosion and reclamation in Jiangsu's coastal wetlands from 1977 to 2014



位于射阳与大丰，2000-2014年主要位于大丰、东台和如东，围垦的主要空间有逐渐向南转移的趋势，这与南部较高的淤积速率有很大的关系（图3）。从围垦的规模上来看，围垦的速度呈快速增加的趋势，从1977-1984年的21.29 km<sup>2</sup>/yr增加到2014年的41.46 km<sup>2</sup>/yr。从目前的规划来看<sup>①</sup>，在东台和如东岸线段围垦的规模在很长时间内都会维持在一个较高的水平。

4.2 江苏滨海生态关键区的演变方向

生态关键区是维持区域生态系统功能、结构以及良性运转的重要生态空间。而在研究区最为重要的生态空间就是盐生植被覆盖区和光滩。因此，本研究将1977年的盐生植被和光滩区域提取出来与2014年的图层叠加进而获取近40年来滨海盐沼湿地的演进去向和路径。从面积变化上来看，1977年江苏滨海生态关键区（光滩+盐生植被）的总面积为3328.1 km<sup>2</sup>，而2014年则锐减到1569.28 km<sup>2</sup>，生态关键区面积减少了52.85%。特别是盐生植被覆盖区，由1977年的958.05 km<sup>2</sup>下降为2014年的217.35 km<sup>2</sup>。从图5和表3可知，生态关键区最为主要的两个演变方向是耕地和养殖水面，面积分别达到673.95 km<sup>2</sup>和757.00 km<sup>2</sup>。可以看出，近40年以来大量的自然盐沼湿地转变为了耕地和养殖水面，这必然导致生态关键区所具备的高多样性水平和系统完整性遭到极大的破坏<sup>[34]</sup>。同时，可以发现大丰南部由于潮流的侵蚀，出现了较为明显的光滩退化趋势。这主要是由于一方面湿地淤长受海水潮流的影响较为明显，短期的潮流变化可以改变湿地的淤长/侵蚀格局，导致光滩的面积和空间形态呈现出极高的易变性<sup>[33]</sup>，进而导致这样的结果（图5）。另一方面，现在大部分的围海堤坝建设主要依靠吹沙作业，大量的外围沙洲和浅滩的沙源被机械的转移到围垦区，导致外围沙源不足，形成一个个浅坑，减缓了后续沙洲的形成，甚至造成了外围沙洲的退化。同时，也可以发现，生态关键区内的光滩和盐生植被也存在相互转化的过程，其中由盐生植被向光滩转变的逆向演替要引起足够的重视。从空间上看，这种逆向演替主要发生在射阳港以南、斗龙港以北的区域，面积约为36 km<sup>2</sup>左右。可能是受到大尺度海流状况和泥沙减少的因素影响，这一岸段呈现较为明显侵蚀退化现象（图3）。值得注意的是，这一岸线段是盐城国家级珍禽自然保护区重要缓冲区，对这一岸线段进行保护和修复对于巩固丹顶鹤的

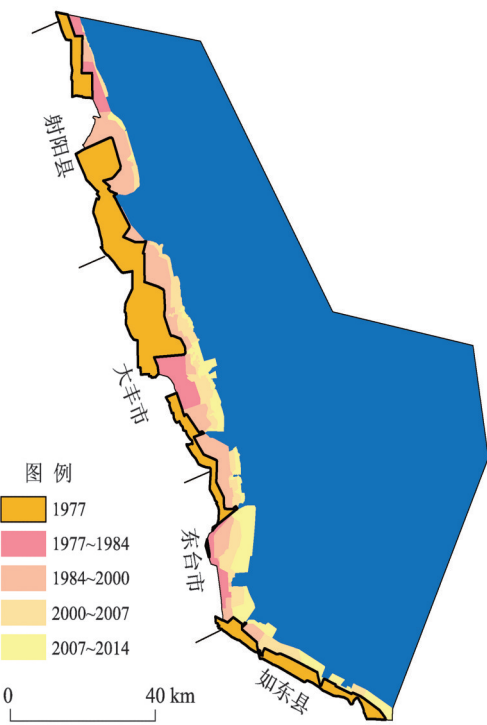


图4 研究区1977-2014年围垦边界变化

Fig. 4 The changes of reclamation boundary in study area from 1977 to 2014

表2 研究区1977-2014年围垦状况

Tab. 2 The areas of reclamation from 1977 to 2014

年份	1977-1984	1984-2000	2000-2007	2007-2014
新增面积(km <sup>2</sup> )	149	500.63	294.1	290.2
围垦速度(km <sup>2</sup> /yr)	21.29	31.29	42.01	41.46

① 《江苏沿海滩涂围垦开发利用规划纲要》(讨论稿)，江苏省发展与改革委员会，2009。

越冬湿地规模具有重要作用。由光滩向盐生植被演进为特征的正向演替面积较大,达到 140.01 km<sup>2</sup>。在空间上主要最集中与大丰和东台两个自然保护区内,特别是盐城的国家级珍禽自然保护区的核心区,其湿地面积和空间在近 40 年内都相对稳定。此外,有 28.56 km<sup>2</sup>的生态关键区向建设用地转化,以建设用地为代表的不透水面扩张大都属于不可逆的变化<sup>[35]</sup>,会在很大程度上加速区域生态环境的劣变。在围垦的过程当中严格控制建设用地的比例,约束其扩张的空间与规模是维持生态关键区与滨海湿地功能的重要工作。

东台沿海的辐射沙脊洲是江苏沿海滩涂生态关键区重要的组成部分,从东台市的未来十年围垦方案来看,辐射沙脊洲的面积在 667 km<sup>2</sup>左右,包括条子泥 (267 km<sup>2</sup>)、高泥 (186 km<sup>2</sup>) 和东沙 (213 km<sup>2</sup>) 三个沙洲,但是据本研究测算,其中大约有 300 km<sup>2</sup>左右的滩涂资源属于浅滩与沙洲类型的非稳定状态 (图 5)。非稳定状态的滩涂资源主要有两种可能性变化趋势,一种是趋于侵蚀和消亡,另一种则是趋于淤积和增长。从已有的资料来看,辐射沙脊洲西部 (包括东沙和高泥西部以及条子泥北部) 出现明显的侵蚀现象 (图 3),而辐射沙脊洲的东部和南部则呈现明显的淤长态势<sup>[36]</sup>。根据最新的遥感影像测算,辐射沙脊洲在 1977-2014 年间面积增加了约 500 km<sup>2</sup>,主要位于东沙的北部和东部、高泥和条子泥的东部和南部。

#### 4.3 江苏滨海滩涂主要的围垦模式与演变轨迹

特定的人类活动形式和过程会产生特定的生态效应,长此以往则会形成特定的生态系统类型、结构和生物群落<sup>[37]</sup>。确定江苏沿海湿地围垦的一般模式并对近 40 年来围垦方式演变轨迹进行准确刻画对于总结一般性围垦模式及其生态效应,制定生态应对策略具有重要的意义。本研究通过实地调研的方式来确定研究区主要的围垦模式,并通过预设路径模式判别语言,借助 ArcGIS 10.1 软件的 Field calculator 功能对不同地块在五个时段内土地利用过程进行刻画 (图 6-图 7)。

从实地调查的结果来看,目前围堤的建设主要依靠机械填埋与抽水作业。对于地势低洼的地方采用吹沙的作业方式。在围垦初期 (特别是围垦后的前 10 年),由于水分蒸发引起的毛细作用,导致大面积日趋严重的土壤盐渍化,甚至形成盐结皮。根据已有的

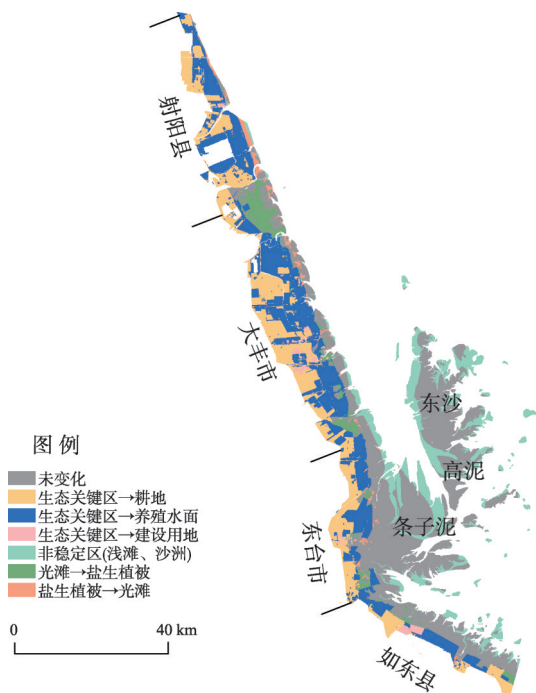


图 5 研究区 1977-2014 年生态关键区主要演进方向  
Fig. 5 The main evolution paths of the key ecological areas in the study area from 1977 to 2014

表 3 研究区 1977-2014 年生态关键区演进面积统计  
Tab. 3 The area of terminal landuse originated from the key ecological areas in the study area from 1977 to 2014

生态关键区转移方向	面积 (km <sup>2</sup> )
生态关键区→耕地	673.95
生态关键区→养殖水面	757.00
生态关键区→建设用地	28.56
盐生植被→光滩	36.64
光滩→盐生植被	139.25
非稳定区 (浅滩、沙洲)	461.01
未变化	1226.96

研究来看,主要的盐分成分是NaCl和KCl两种<sup>[1]</sup>。高的盐分导致围垦土地的可利用性大打折扣,大部分用于水产养殖或抛荒。在抛荒地旱生耐盐植被与部分湿生耐盐植被广泛发育,形成荒草地。围垦10~30年后,土壤肥力逐渐提高,一些耐盐性的农作物开始被种植,比如棉花、小麦、蚕豆和玉米,但是盐分的胁迫效应对产量的影响还是比较明显。另一方面,由于土壤肥力的限制,还不能长期种植传统产量较高的小麦-水稻模式,只能采取隔年种植的方法。同期,鱼塘面积在缩小,同时水产养殖开始由海水养殖向淡水养殖过渡,一方面是由于海水调取成本的提高,另一方面也由于地方政府在政策上的限制与引导。在围垦30年以后,耕地质量基本达到大规模种植的要求(图6)。农作物产量得到保障的同时必然会增加人口向垦区迁移的引力,在此基础上零散的居民点和村落开始形成,其独特的标志就是当地居民乐于将以前的临时的木草结构的简易棚帐更新为砖瓦结构的长期居住场所(图6)。农作物产量的迅速增加导致人口的快速聚集,加之传统海水捕捞/养殖贸易需要,加速了货物集散中心的形成和初级建制镇中心的发展与壮大。以东台市的弶港镇为例,弶港镇建立在1967年围垦的垦区内。按照弶港镇的发展趋势推算,应该在围垦后40~50年左右的,大规模的建制镇即可形成。

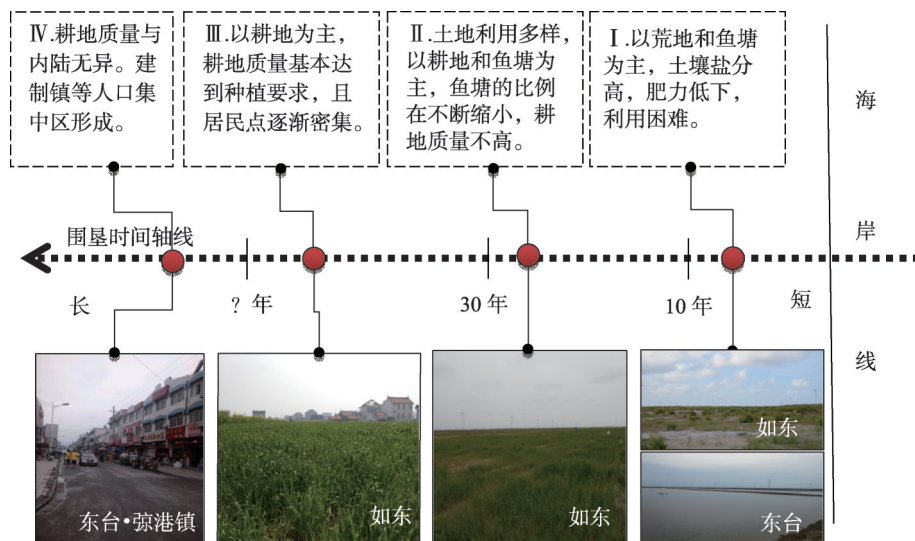


图6 江苏滨海湿地围垦区发展模式的历史演化过程

Fig. 6 The general evolution path of reclamation in Jiangsu's coastal wetlands

由于受到政策引导和社会强经济信号驱动,湿地围垦区现实的土地利用转换路径并非完全按照图6所示的传统模式进行。大规模工程建设、快速脱盐技术和新型耐盐物种的广泛应用从根本上缩短了围垦区土地利用演变路径与时间周期。江苏滨海湿地在1977-2014年间发生转变的方式极为多样(图6),传统的光滩/盐生植被→鱼塘/耕地→建设用地演进模式的地块面积只有15.51 km<sup>2</sup>(表4),这与已有的研究结果相差很大<sup>[38]</sup>。而由光滩/盐生植被直接转化为耕地和养殖水面的比重很大,达到1144.68 km<sup>2</sup>,这表明现在的围垦条件下,湿地转化为耕地的路径变短了,时间周期被极大的压缩。这对于提高围垦土地的利用效率和围垦的经济效益有很大的帮助。在如东垦区的调查发现,围垦初期当地居民在农场和开发公司的引导下大量种植一种耐盐经济树种—竹柳,这可能是压缩湿地围垦演变路径的一个缩影。从这里可以看出,这一围垦演变路径和周期的缩短主要是通过现代科学技术提高物种的耐盐性进而将围垦湿地的开发利用时间提前。同时,另一种



通过加速土壤属性改良，特别是在土壤脱盐方面也取得长足进步。目前，江苏滩涂围垦区已经全面引进天津的“节水型盐碱滩地物理—化学—生态综合改良与植被构建技术”和“暗管排水脱盐技术”，并在东台和如东建立了示范基地<sup>[39]</sup>。在空间上，围垦模式演进呈较为明显的带状分布（图7），在不同的县市没有特别明显的差异。

4.4 江苏滨海滩涂围垦开发的热点空间与强度转变趋势

按照已有文献中土地利用强度的定义<sup>[40-41]</sup>，本研究认为盐沼湿地→养殖水面/耕地→建设用地过程中土地利用强度呈逐渐增强的趋势。基于此认识，从图7和表4可以看出，研究区大部分围垦区土地利用强度都呈逐渐增强的趋势，但是也存在降低的地块。从表4可以看出，研究区有5.38 km<sup>2</sup>的土地从1977年的耕地和养殖水面转变为2014年的盐生植被和光滩，这一区域主要位于河流的河口地区（如：东台的方塘河河口）。这主要是由于新河闸的建设减少了作物种植的淡水供给，同时，河闸的建设加速了河口的淤积导致鱼塘和耕地外围的泥沙淤积严重，水生植被扩张迅速，挤占了大量的生态空间，增加了获得水源的难度，导致部分耕地和鱼塘的荒废，进而被盐生和水生植被占据形成新的湿地。这一趋势在客观上增加了滩涂湿地的面积，在维持湿地生态系统规模和增加区域野生动植物资源的栖息空间上具有积极的意义。

围垦开发的热点空间具有两个显著的特征：① 土地利用类型在不同的年份转换较为频繁；② 土地利用开发的强度呈逐渐增强的趋势。根据这两个

表4 研究区1977-2014年湿地典型转换  
路径地块面积统计

Tab. 4 The area of terminal landuse originated from natural wetlands in the study area from 1977 to 2014

转变路径	面积 (km <sup>2</sup> )
光滩→盐生植被→养殖水面	72.02
光滩→盐生植被→耕地	100.53
盐生植被→光滩→养殖水面	168.05
养殖水面→耕地	87.88
盐生植被→耕地	447.63
盐生植被→养殖水面	196.11
光滩→耕地	82.70
光滩→养殖水面	330.36
湿地→耕地/养殖水面→建设用地	15.51
耕地/养殖水面→湿地	5.38

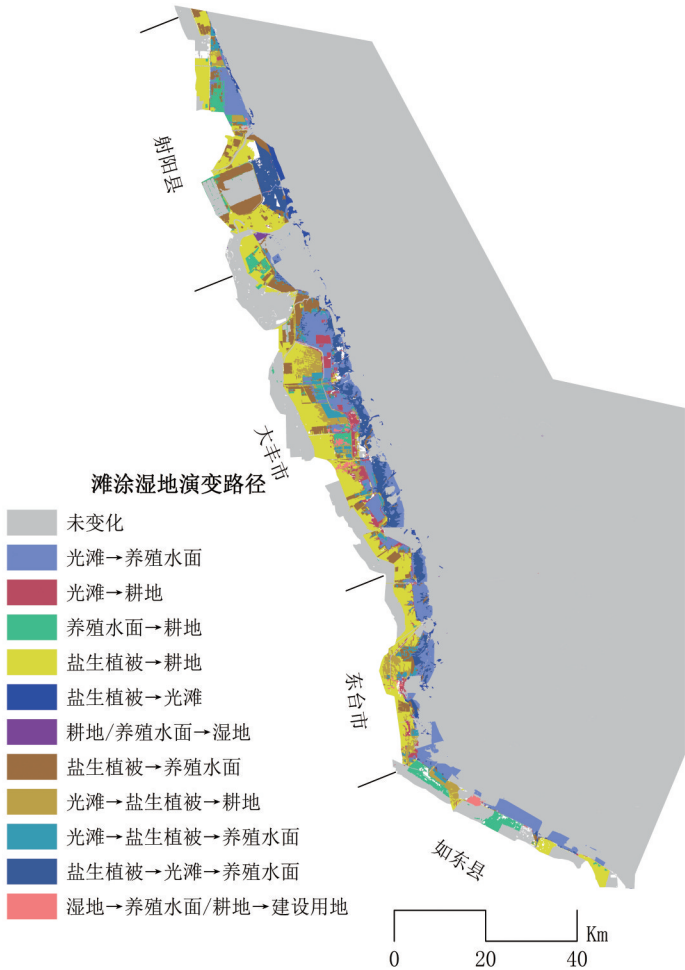


图7 研究区1977-2014年湿地典型转换路径空间表达  
Fig. 7 The spatial representation of typical evolution paths of natural wetlands in the study area from 1977 to 2014



特点可以确定围垦方式转换路径较复杂的地块就是围垦开发的热点空间, 即 1977-2014 年间演进路径为湿地→耕地/养殖水面→建设用地和海水→湿地→养殖水面→耕地的地块是围垦开发的热点空间。从图 7 可以看出, 前一种地块主要位于如东县的洋口港和大丰市的大丰港及南阳镇, 面积较小, 仅为 15.51 km<sup>2</sup>。后一种围垦开发的热点空间主要位于如东的豫东垦区, 面积不足 1 km<sup>2</sup>。由此可以看出, 1977-2014 年研究区高强度的开发在空间上还比较集中, 规模较小, 多位于垦区重要的建制镇周边和大型港口附近。这主要受到《规划纲要》严格的用地比例约束所致。在《规划纲要》中, 建设用地、农业用地与生态用地被严格限制在 2:6:2 的水平上。从空间上看, 大丰市的大丰港建设规模较大, 由于紧邻大丰麋鹿国家级自然保护区, 适当控制港口建设规模, 合理规划建设空间, 保留一定距离和范围的缓冲区对于保护区域丰富的动植物资源具有重要意义<sup>[36]</sup>。

## 5 结论

本研究通过遥感影像解译和野外实地踏勘调研揭示了江苏中部滨海湿地淤长/侵蚀变化与围垦空间演变趋势。研究结果表明:

(1) 1977-2014 年江苏中部滨海滩涂湿地射阳河口以南岸线段总体以淤长为主, 但是也存在侵蚀的岸线段, 总体淤长/侵蚀速度在  $\pm 20$  m/yr 左右, 最高值出现在东台和如东洋口港附近。研究区湿地围垦的速度远高于岸线淤长的速度, 基本维持在 50 m/yr 以上。如东县北部滩涂近年来增长较快, 达到 126 m/yr, 而围垦的速率总体不高, 基本上维持在 76 m/yr 左右, 具有较好的淤长/围垦空间格局。

(2) 1977-2014 年, 江苏中部滨海湿地快速向耕地、养殖水面转化, 面积分别达到 673 km<sup>2</sup> 和 757 km<sup>2</sup>, 占 1977 年滩涂面积的 42.97%。从目前的围垦趋势来看, 今后十年左右围垦的规模和速率还将继续维持在高位。1977-2014 年江苏滨海湿地的生态关键区面积出现了快速的退化趋势, 特别是盐生植被空间的快速萎缩, 主要位于射阳南部和大丰市, 面积达到 36 km<sup>2</sup>。调查发现研究区传统的湿地围垦开发演变模式是光滩→盐生植被→养殖水面→耕地→建设用地。但是现在由于新技术和新方法的应用极大的缩短了围垦演变路径和周期, 提高了围垦的经济效益。

(3) 江苏滨海湿地围垦后土地开发利用强度呈较为明显的上升趋势。土地开发强度的上升一方面有利于土壤质量的快速改良, 另一方面也在很大程度上压缩了动植物资源的生境空间。研究表明, 江苏滨海湿地开发的热点空间在区域上较为集中, 主要集中于几个重要的港口及其腹地建制镇附近, 但规模总体不大 (面积仅为 28.56 km<sup>2</sup>), 继续限制其开发的空间和规模很有必要。

致谢: 感谢江苏省金威遥感数据工程有限公司王铁成提供的高分率无人机数据。

## 参考文献(References)

- [1] Li J, Pu L, Zhu M et al. Monitoring soil salt content using hj-1a hyperspectral data: A case study of coastal areas in rudong county, eastern China. *Chinese Geographical Science*, 2014, doi: 10.1007/s11769-014-0693-2.
- [2] Li J G, Pu L J, Zhu M et al. Evolution of soil properties following reclamation in coastal areas: A review. *Geoderma*, 2014, 226: 130-139.
- [3] Cahoon D R, Hensel P F, Spencer T et al. Coastal wetland vulnerability to relative sea-level rise: Wetland elevation trends and process controls. Springer, Netherlands, 2006: 271-292.
- [4] Chmura G L, Anisfeld S C, Cahoon D R et al. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 182-195.

- [5] Lee S Y, Dunn R J K, Young R A et al. Impact of urbanization on coastal wetland structure and function. *Austral Ecology*, 2006, 31(2): 149-163.
- [6] Sun Yongguang, Li Xiuzhen, He Yanlong et al. Spatiotemporal dynamics of land use and land cover changes in different reclamation zones of Yangtze Estuary. *The Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 434-441. [孙永光, 李秀珍, 何彦龙等. 长江口不同区段围垦区土地利用/覆被变化的时空动态. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 434-441.]
- [7] Zhang Xiaoxiang, Yan Changqing, Xu Pan et al. Historical evolution of tidal flat reclamation in the Jiangsu coastal areas. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1549-1558. [张晓祥, 严长清, 徐盼等. 近代以来江苏沿海滩涂围垦历史演变研究. *地理学报*, 2013(11): 1549-1558.]
- [8] Zhang Changkuan, Chen Jun, Lin Kang et al. Spatial layout of reclamation of coastal tidal flats in Jiangsu province. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2011, 39(2): 206-212. [张长宽, 陈君, 林康等. 江苏沿海滩涂围垦空间布局研究. *河海大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(2): 206-212.]
- [9] Han Jinping, Xu Min. Assessment of Jiangsu's coastal wetland development. *Ocean Development and Management*, 2006, (2): 99-102. [韩进萍, 徐敏. 江苏沿海滩涂开发利用评价. *海洋开发与管理*, 2006, (2): 99-102.]
- [10] Li Jianguo, Pu Lijie, Zhu Ming et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1233-1245. [李建国, 濮励杰, 朱明等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点. *地理学报*, 2012, 67(9): 1233-1245.]
- [11] Shen Yongming, Feng Nianhua, Zhou Qin et al. The status and its influence of reclamation on Jiangsu coast. *Marine Sciences*, 2006, 30(10): 39-43. [沈永明, 冯年华, 周勤等. 江苏沿海滩涂围垦现状及其对环境的影响. *海洋科学*, 2006, 30(10): 39-43.]
- [12] Xu Xianghong, Chen Gang. Reclamation and sustainable development of Jiangsu's coastal wetlands. *Journal of Hohai University. Philosophy and Social Sciences*, 2002, 4(4): 26-28. [徐向红, 陈刚. 论江苏沿海滩涂围垦与可持续发展. *河海大学学报: 哲学社会科学版*, 2002, 4(4): 26-28.]
- [13] Xu Yan, Pu Lijie. The variation of land use pattern in tidal flat reclamation zones in Jiangsu coastal area: A case study of Rudong county of Jiangsu Province. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(4): 643-652. [许艳, 濮励杰. 江苏海岸带滩涂围垦区土地利用类型变化研究: 以江苏省如东县为例. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 643-652.]
- [14] Sun Y, Li X, Mander Ü et al. Effect of reclamation time and land use on soil properties in Changjiang River Estuary, China. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(4): 403-416.
- [15] Sun Yongguang, Li Xiuzhen, Guo Wenyong et al. Contribution rates of landscape driving factors in coastal reclamation zone based on CLUE-S model validation. *The Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9): 2391-2398. [孙永光, 李秀珍, 郭文永等. 基于CLUE-S模型验证的海岸围垦区景观驱动因子贡献率. *应用生态学报*, 2011, 22(9): 2391-2398.]
- [16] Sun Yongguang, Li Xiuzhen, He Yanlong et al. Dynamic characteristics and driving force analysis of land use in different reclamation time based on the PCA comprehensive evaluation model at the Yangtze Estuary. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(6): 697-704. [孙永光, 李秀珍, 何彦龙等. 基于PCA方法的长江口滩涂围垦区土地利用动态综合评价及驱动力. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(6): 697-704.]
- [17] Zhang Huabing, Liu Hongyu, Hao Jingfeng. Landscape spatial and temporal evolutions of Yancheng coastal wetlands in Jiangsu province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(6): 226-229. [张华兵, 刘红玉, 郝敬锋. 江苏省盐城海岸湿地景观时空演变特征研究. *水土保持通报*, 2012, 32(6): 226-229.]
- [18] Zhang Huabing, Liu Hongyu, Hao Jingfeng et al. Spatiotemporal characteristics of landscape change in the coastal wetlands of Yancheng caused by natural processes and human activities. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(1): 101-110. [张华兵, 刘红玉, 郝敬锋等. 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. *生态学报*, 2012, 32(1): 101-110.]
- [19] Zhang H, Liu H. The eco-environmental effects of landscape changes in Yancheng coastal wetland. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(6): 256-259. [张华兵, 刘红玉. 盐城海滨湿地景观变化的生态环境效应分析. *水土保持研究*, 2011, 18(6): 256-259.]
- [20] Zhang Huabing, Liu Hongyu, Li Yufeng et al. The studying of key ecological factors and threshold of landscape evolution in Yancheng coastal wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(21): 6975-6983. [张华兵, 刘红玉, 李玉凤等. 盐城海滨湿地景观演变关键土壤生态因子与阈值研究. *生态学报*, 2013, 33(21): 6975-6983.]
- [21] Zhang Xuliang, Xu Zongxue, Zhang Zhaohui et al. Review on degradation of coastal wetlands of northern China sea. *Geological Review*, 2010, 56(4): 561-567. [张绪良, 徐宗军, 张朝晖等. 中国北方滨海湿地退化研究综述. *地质论评*, 2010, 56(4): 561-567.]
- [22] Wang Yu, Jia Xiaobo, Zhang Wenguang et al. Land use change and analysis on the driving forces in the coastal zone of

- Jiangsu. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, (S1): 7-12. [王玉, 贾晓波, 张文广 等. 江苏海岸带土地利 用变化及驱动力分析. 长江流域资源与环境, 2010, (S1): 7-12.]
- [23] Gao Yu, Zhao Bin. The effect of reclamation on mud flat development in Chongming Island, Shanghai. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(8): 475-479. [高宇, 赵斌. 人类围垦活动对上海崇明东滩滩涂发育的影响. 中国农学通报, 2006, 22(8): 475-479.]
- [24] Fang S B, Jia X B, Yang X Y et al. A method of identifying priority spatial patterns for the management of potential ecological risks posed by heavy metals. Journal of Hazardous Materials, 2012, 237: 290-298.
- [25] Oleszczuk P, Baran S. Leaching of individual paks in soil varies with the amounts of sewage sludge applied and total organic carbon content. Polish Journal of Environmental Studies, 2005, 14(4): 491-500.
- [26] Gong Jinnan, Wang Kaiyun, Zhang Chao et al. Invasion and its effects of xerarch halophytes in reclaimed tidal wetlands. The Journal of Applied Ecology, 2009, 20(1): 33-39. [巩晋楠, 王开运, 张超 等. 围垦滩涂湿地旱生耐盐植物的入侵和影响. 应用生态学报, 2009, 20(1): 33-39.]
- [27] Huang Chong, Liu Gaohuan, Zhang Hailong et al. Wetland landscape dynamics in the Yellow River Mouth: Implications for conservation. Geo-information Science, 2009, 11(4): 491-497. [黄翀, 刘高焕, 张海龙 等. 黄河河口湿地景观变化影响丹顶鹤生境的评价分析. 地球信息科学, 2009(4): 491-497.]
- [28] Wang Xianli, Xiao Duning. Analysis of landscape pattern of wetlands in Liaohe Delta. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17 (3): 317-323. [王宪礼, 肖笃宁. 辽河三角洲湿地的景观格局分析. 生态学报, 1997, 17(3): 317-323.]
- [29] Ou Weixin, Yang Guishan, Li Hengpeng et al. Spatio-temporal variation and driving forces of landscape patterns in the coastal zone of Yancheng, Jiangsu. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(5): 610-615. [欧维新, 杨桂山, 李恒鹏 等. 苏北盐城海岸带景观格局时空变化及驱动力分析. 地理科学, 2004, 24(5): 610-615.]
- [30] Ou Weixin, Yang Guishan, Yu Xingxiu et al. Effect of coastal land use changes on eco-environment in the coastal zone of Yancheng. Resources Science, 2004, 26(3): 76-83. [欧维新, 杨桂山, 于兴修 等. 盐城海岸带土地利用变化的生态环境效应研究. 资源科学, 2004, 26(3): 76-83.]
- [31] Zong Xiuying, Liu Gaohuan, Qiao Yuliang et al. Study on dynamic changes of wetland landscape pattern in Yellow River Delta. Geo-information Science, 2009, 11(1): 91-97. [宗秀影, 刘高焕, 乔玉良 等. 黄河三角洲湿地景观格局动态变化分析. 地球信息科学, 2009(1): 91-97.]
- [32] Wang Min, Ruan Junjie, Wang Qing et al. Landscape pattern and its evolution characteristics of Chongming Island. China, Population, Resources and Environment, 2012, (S1): 217-223. [王敏, 阮俊杰, 王卿 等. 崇明岛景观格局演变特征研究. 中国人口资源与环境, 2012, (S1): 217-223.]
- [33] Wang Yunwei, Gao Shu. The effect of sediment resuspension on benthic boundary layer in macro-tidal environments. Marine Sciences, 2010, 34(1): 52-57. [王韞玮, 高抒. 强潮环境下悬沙对底部边界层的影响. 海洋科学, 2010, 34(1): 52-57.]
- [34] Liao Huajun, Li Guosheng, Wang Shaohua et al. Evolution and spatial patterns of tidal wetland in North Jiangsu Province in the past 30 years. Progress in Geography, 2014, 33(9): 1209-1217. [廖华军, 李国胜, 王少华 等. 近 30 年苏北滨海滩涂湿地演变特征与空间格局. 地理科学进展, 2014, 33(9): 1209-1217.]
- [35] Wang W, Yao X F, Zhai J P et al. A tetrahedron-based endmember selection approach for urban impervious surface mapping. PLoS ONE, 2014, 9(6): doi: 10.1371/journal.pone.0093479.
- [36] Wang Jian, Xu Min, Liu Zhaopu et al. Coastal wetland in Jiangsu and its potential for utilization. Beijing: China Ocean Press, 2012. [王建, 徐敏, 刘兆普 等. 江苏省海岸滩涂及其利用潜力. 北京: 海洋出版社, 2012.]
- [37] Li Bo, Yang Chi, Lin Peng et al. Ecology. Beijing: Higher Education Press, 2000. [李博, 杨持, 林鹏, 等. 生态学. 北京: 高等教育出版社, 2000.]
- [38] Zhang Mingjuan, Wang Lei, Liu Maosong et al. Landscape dynamics of aggradational coastal wetland in Jiangsu province in the past three decades. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(3): 696-703. [张明娟, 王磊, 刘茂松 等. 近 30 年来江苏省滨海淤长型湿地景观动态. 生态学杂志, 2013, 32(3): 696-703.]
- [39] Li J G, Pu L J, Han M F et al. Soil salinization research in China: Advances and prospects. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(5): 943-960.
- [40] Li J, Pu L, Liao Q et al. How anthropogenic activities affect soil heavy metal concentration on a broad scale: A geochemistry survey in Yangtze River Delta, eastern China. Environmental Earth Sciences. doi:10.1007/s12665-014-3536-7.
- [41] Li X, Sun Y, Mander U et al. Effects of land use intensity on soil nutrient distribution after reclamation in an estuary landscape. Landscape Ecology, 2013, 28(4): 699-707.



## The changes and dynamics of coastal wetlands and reclamation areas in central Jiangsu from 1977 to 2014

LI Jianguo<sup>1</sup>, PU Lijie<sup>1,2</sup>, XU Caiyao<sup>1</sup>, CHEN Xinjian<sup>1</sup>, ZHANG Yunfeng<sup>3</sup>, CAI Fangfang<sup>1</sup>

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. The Key Laboratory of the Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Land and Resources,

Nanjing 210023, China; 3. School of Urban and Resource Environment, Yancheng Teacher's

University, Yancheng 224051, Jiangsu, China)

**Abstract:** Five remote sensing images (1977, 1984, 2000, 2007 and 2014) were obtained to study the spatial dynamics of coastal wetlands and reclamation area in central Jiangsu province. The results indicated that most of the coastal wetlands showed an accretion trend from the south of Sheyang estuary, while there still existed some erosion phenomena in the past 40 years. The mean rate of accretion/erosion of Jiangsu coastal wetlands was  $\pm 20$  m per year, and the highest value was observed at Dongtai and Yangkou ports. Meanwhile, the reclamation rate was significantly higher than the accretion ones, and the former kept a level of 50 m per year. In addition, the key ecological areas of Jiangsu coastal wetlands reduced rapidly from 1977 to 2014, which can be found from the shrinkage of natural halophytic vegetation in the southern part of Sheyang County and the whole part of Dafeng County. It was found in field surveys that the evolution pattern of reclamation in coastal wetlands was in the order of bare flat  $\rightarrow$  halophytic vegetation  $\rightarrow$  aquaculture pond  $\rightarrow$  cropland  $\rightarrow$  built-up land. However, with the aid of new technology, the period of evolution pattern was shortened. Moreover, the development of coastal wetlands has been intensified due to reclamation activities. The hotspots of reclamation were presented at major ports and central towns.

**Keywords:** coastal wetland; reclamation pattern; expanding/erosion; evolution path; Jiangsu