生态学杂志
Chinese Journal of Ecology
ISSN 1000-4890,CN 21-1148/Q

《生态学杂志》网络首发论文

题目：1985—2015 年围填海活动影响下的环渤海滨海湿地演变特征
作者：魏帆，韩广轩，张金萍，栗云召，赵建民
DOI：10.13292/j.1000-4890.201805.028
收稿日期：2017-08-23
网络首发日期：2018-02-10
引用格式：魏帆，韩广轩，张金萍，栗云召，赵建民．1985—2015 年围填海活动影响下的环渤海滨海湿地演变特征．生态学杂志.
https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201805.028

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期刊汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络出版时间：2018-02-10 16:04:30
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20180209.1422.009.html

doi: 10.13292/j.1000-4890.201805.028

1985—2015 年围填海活动影响下的环渤海滨海湿地演变特征

魏　帆[1,2]　韩广轩[2*]　张金萍[1,3]　栗云召[4]　赵建民[2]

（[1]聊城大学环境与规划学院，山东聊城 252000；[2]中国科学院烟台海岸带研究所海岸带环境过程与生态修复重点实验室，山东烟台 264003；[3]海南师范大学地理与环境科学学院，海口 570100；[4]鲁东大学资源与环境工程学院，山东烟台 264039）

摘　要　滨海湿地位于海陆边缘，是水陆交互作用产生的独特生态系统，其演变过程易受人类活动的影响。自 20 世纪 50 年代以来，中国大陆沿海大规模的围垦活动导致滨海湿地生态服务功能退化。研究滨海湿地演变过程及其与人类活动的相关关系，对于湿地资源开发管理和保护具有重要意义。运用 3S 技术手段，基于环渤海滨海湿地 1985、1995、2005、2015 年 4 个不同时期的 TM 遥感影像，结合土地利用转移矩阵和景观格局分析法，对近 30 年围填海作用下的环渤海滨海湿地时空动态演变特征进行了研究。结果表明：1985—2015 年环渤海滨海湿地变化热点区域为黄河三角洲、莱州湾、渤海湾和辽河三角洲。近 30 年，环渤海滨海区域自然湿地面积减少了 45.37%，人工湿地面积增加了 57.23%，以盐田、养殖池面积增加为主，主要由沼泽、滩涂转出。自然湿地向人工湿地演变，人工湿地向非湿地演变，自然湿地人工化。由于受人类活动干扰强度大，环渤海滨海湿地景观趋于破碎化、均衡化，各景观类型均匀分布，景观异质性降低。近 30 年间，环渤海区域围填海活动面积增长了 1606.79 km^2，主要土地利用类型为养殖池、建筑用地。研究发现，国家政策和经济因素极大程度地影响了沿海湿地的演变过程，农田开垦、城镇建设和围海养殖等人类活动是滨海湿地演变的主要驱动力。

关键词　环渤海；滨海湿地；围填海；时空动态；驱动力

Temporal and spatial dynamic evolution of coastal wetland under the action of sea reclamation in bohai rim during 1985-2015. WEI Fan[1,2], HAN Guang-xuan[2*], ZHANG Jin-ping[1,3], LI Yun-zhao[4], ZHAO Jian-min[2]([1] School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China, [2]Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China,[3] College of Geography and Environmental science, Hainan Normal University, Haikou 570100, China ,[4] School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264039, China)

Abstract: Coastal wetlands are unique ecosystems which have special function and forms by amphibious mutual

中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-EW-STS-127)和中国科学院战略性先导科技专项（Y52C021021）资助。

收稿日期：2017-08-23　　接受日期：2018-01-25

*通讯作者　E-mail：gxhan@yic.ac.cn

effect. Human activities severely affected wetland evolution. Mainland China has been experiencing a massive sea reclamation, which has resulted to extremely rapid degradation and loss of coastal wetlands since the 1950s. This article studied on the evolution process of coastal wetland and its correlation with human activities, which was of great significance for administrating and protecting wetland resources. The spatial-temporal evolution characteristics of the coastal wetland under the action of sea reclamation were researched based on the remote sensing images in four years (1985, 1995, 2005 and 2015). The transfer matrix of land use and approach of landscape pattern analysis were used in the study. These data were processed by 3S technology and the soft wares of eCognition9.0, FRAGSTATS4.2 and SPSS. The results indicated that the Yellow River delta, Laizhou bay, Bohai bay and Liaohe River delta changed a lot, the natural wetland area decreased by 45.37%, whereas the artificial wetlands expanded by 57.23% in past 30 years. Aquatic farm and salt field increased the most significantly, which were mainly changed from moor and intertidal zone. Much natural wetland converted into urban construction land, and natural wetlands became more artificial. The landscape pattern tended to be broken and equalized. Meanwhile, the landscape heterogeneity decreased due to the strong human disturbance. Sea reclamation occupied a large area of natural wetlands such as moor and intertidal zone while the area increased by 1606.79 km^2 in recent 30 years. Its main land use types were aquatic farm and construction land. This study presented that the national policy and economic factors drastically affected the coastal wetlands evolution. The main driving forces of the Bohai Rim coastal wetland evolution were human activities, including farmland reclamation, urban construction, and tidal flats exploitation, etc.

Key words: Bohai Rim; coastal wetland; sea reclamation; spatiotemporal dynamics; driving force.

滨海湿地生态系统位于海陆边缘地带，生物物种丰富，具有净化污染、抗御风暴潮及海岸侵蚀等生态功能（徐东霞等，2007；张晓龙等，2014）。然而，滨海湿地海陆交互作用显著，生境较为脆弱（宋红丽等，2013），受人类干扰较强，自然灾害发生频繁，湿地退化现象普遍存在（El-Asmar *et al.*,2011; Rodriguez *et al.*,2017）。研究表明，中国沿海湿地面积呈减少趋势，景观格局破碎化（张绪良等，2009）。自新中国成立以来，全国滨海湿地丧失了总面积的 50%（闫淑君等，2010）。20 世纪 80 年代起，中国沿海开始了大规模的围海活动（王毅杰等，2012）。其中，环渤海经济圈和长江三角洲经济圈围垦强度最大，围垦总量占全国总体的 85%（吴文挺等，2016）。滨海湿地自然湿地面积的减少，导致生物栖息地丧失、生物多样性减少、湿地净初级生产力减弱、植被退化等（韩秋影等，2006）。除此之外，湿地退化会引发水体富营养化、赤潮现象，浅海水域污染以及土壤盐渍化等问题（张绪良等，2010）。

人类活动是滨海湿地演变的主导因素，主要体现形式是围垦和城镇建设（Cui *et al.*，2016）。开垦及城市化程度加深，使得沿海湿地面积减少，人工湿地及非湿地面积增加，景观斑块破碎化、优势度降低（林贞洁等，2014；王卷乐等，2013；许吉仁等，2013），滨海湿地退化趋势明显（杜培军等，2014）。尤其是在围填海问题突出的厦门、闽江口以及天津等滨海地区，填海进程是导致湿地景观格局呈破碎化的主要原因（闫淑君等，2010；张东水等，2007）。

围填海活动侵占了大面积的滩涂湿地（于杰等，2016），是自然湿地面积减少的主要驱动力（马田田等，2015）。一方面，围填海活动使得滩涂和河口湿地面积缩减，导致生物栖息地丧失，基因多样性锐减（李晓炜等，2016）。同时，不合理的开发利用，会引发地面沉降、海洋环境污染和海水入侵等灾害（刘春杉等，

2017）。此外，围填海活动导致岸线固化，当海平面上升时，防波堤等人为边界阻碍了滨海湿地向陆迁移，导致滨海湿地萎缩（罗舒心等，2015）。

环渤海地区主要涉及山东省、河北省、辽宁省、天津市等 4 个省级行政单位，有着独特的港口、资源等地理条件，是北方经济发展的“引擎”。社会经济发展的需求推动了环渤海区域的城镇建设，2005 年天津滨海新区写入“十一五”规划，2007 年河北省设立沧州渤海新区，2011 年山东半岛蓝色经济区设立并上升为国家战略。这一系列的战略实施，在加速区域沿海城镇建设与发展的同时，也对滨海湿地生态环境造成了不可忽视的负面影响（李晓炜等，2016）。有研究表明，辽东湾、莱州湾、渤海湾等区域的围填海活动规模大、扩张速度快，导致滨海湿地退化（吴文挺等，2016）。具体表现为栖息地丧失、生物多样性维持功能减弱以及气候调节功能损失等（索安宁等，2012）。

全国范围内持续大规模的围填海活动对滨海湿地的影响已经引起了学者们的高度关注（徐东霞等，2007；宋红丽等，2013）。遥感技术被广泛应用于定量评估长期围填海活动对不同类型滨海湿地影响的研究中（林洁贞等，2014；马田田等，2015；杜培军等，2014）。目前的研究可以被分为两类，一是定性地分析研究对象的现状、影响结果及整治对策等（张晓龙等，2014；宋红丽等，2013；Cui *et al.*,2016）；二是借助遥感和 GIS 技术，定量地进行围填海的研究（吴文挺等，2016；林洁贞等，2014）。前者缺乏实时准确的信息，后者对滨海湿地演变过程和围填海演变过程的研究及对两者相互关系的探讨不足。因此，本文选取 1985—2015 年近 30 年间的环渤海滨海区域影像数据，运用 3S 手段，结合土地利用转移矩阵和景观格局指数分析等方法，揭示环渤海滨海湿地时空动态规律及演变趋势，重点探究围填海活动与滨海湿地演变的关系，为滨海湿地的合理开发利用提供理论参考。

1　研究地区与研究方法

1.1　研究区概况

环渤海滨海区域自辽宁老铁山西角起，至山东半岛蓬莱（116.9°E—122.5°E，36.87°N—41.25°N），是我国滨海湿地分布最集中的区域，其中，包括黄河三角洲和辽河三角洲两大主要湿地资源。本文以环渤海滨海湿地为研究对象，以滨海县级行政界线为陆缘边界，共涉及 4 个省级行政区、37 个县市，共覆盖面积约 69042 km^2，平均入陆距离 70 km。

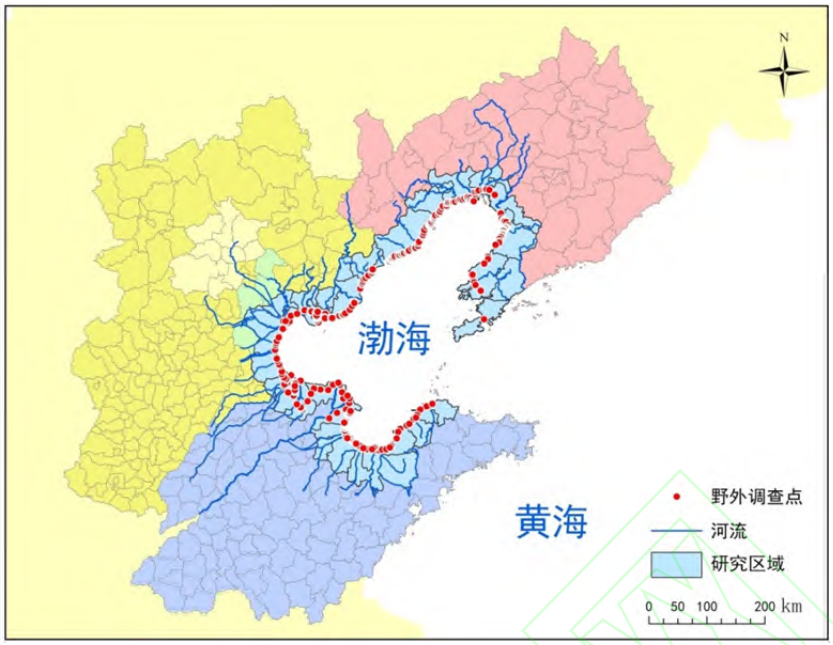

图 1　研究区位置示意图

Fig.1　Location of the study area

1.2　数据

本文采用的数据包括遥感影像数据、环渤海地区 1:20 万地形图、Google Earth 卫星图以及野外实地考察的坐标数据。由于环渤海区域频繁的围填海活动始于 20 世纪 80—90 年代，因此，本文选取 1985—2015 年近 30 年间的环渤海滨海区域影像数据。这些数据分别来源于美国地质调查局网站、国家测绘局、Google 网站。其中，遥感数据为 1985、1995、2005、2015 年 4 个时期的美国陆地卫星 Landsat-4/TM、Landsat-5/TM 和 Landsat-8/OLI 数据，云量少于 6%，每期 11 景，共 44 景影像数据。

1.2.1　环渤海滨海湿地分类体系　根据中国土地利用现状分类国家标准（GB/T 21010-2007），本文制定了环渤海滨海湿地景观类型的分类体系（表 1），按照湿地成因将滨海湿地景观分为一级分类和二级分类。一级分类包括自然湿地景观、人工湿地景观以及非湿地景观。二级分类包括建筑用地、养殖池、旱地、林草地、水田、河流水体、沼泽、滩涂和盐田等。

表 1　环渤海滨海湿地景观分类体系

Table 1　Classification system of coastal wetland landscape in Bohai area

一级分类	二级分类	定义
天然湿地	光滩沼泽	潮间带植被覆盖率极低的泥滩或沙滩等
	潮间沼泽	以碱蓬和芦苇为主要植被类型的潮间带湿地
	河口湿地	潮间带河口，潮流界至河口口门
	河口与浅海水域	河口咸淡水混合区域
	河流湿地	河流及其周围的植被形成的湿地类型
	湖泊湿地	湖泊
人工湿地	水塘	鱼、虾等养殖池塘，人工开垦种植的芦苇田
	水田	稻田等农田

	水库	水库等
	盐田	晒盐场和盐田贮水池
非湿地	建筑用地	维护城市机能运转所需土地，居民地、主干道路等
	旱地	旱田
	林草地	天然林地及人工林地、草地

1.2.2 滨海湿地地类信息提取方法　本文运用面向对象最临近分类法，对 1985、1995、2005、2015 年 4 个时相的环渤海区域遥感影像进行解译。得到分类结果之后，参考 Google Earth 卫星图修正分类结果，并利用 ArcGIS 进行分类后处理。结合实地野外调查获取的环渤海地区 274 个 GPS 控制点数据，选取均匀覆盖、不同类型的验证点，对分类结果进行精度评估。经检验，各类型精度均高于 80%，符合本次研究的精度要求，最终得到 1985、1995、2005 和 2015 年的滨海湿地分布图（图 2）。运用 GIS 手段将不同时相的遥感影像解译结果图按研究需求叠置构造转移矩阵，表行为起始年份，列为末尾年份，对角线为保持原始地类不变的数量，分析不同类型面积转化特征，详细了解滨海湿地退化及围填海进程的现状，直观地展现滨海湿地的时空动态过程，获取潜在的地物信息。以此揭示环渤海滨海湿地时空动态规律及演变趋势，阐明围填海对滨海湿地演变的影响。

1.2.3 数据统计分析　本研究基于 SPSS 17.0 软件，运用线性回归方法、非线性回归方法分析自然湿地面积与人工湿地、非湿地面积变化的关系，分析围填海面积与自然湿地、人工湿地和非湿地面积变化的相关关系。设置置信区间为 95%，显著性水平 $\alpha = 0.05$。相关图像均于 SigmaPlot 10.0 软件平台完成。

1.2.4 景观格局分析法　本文考虑到仅探究面积变化，并不足以全面地反映环渤海滨海区域的发育演变。因此在研究中结合景观生态的研究方法，选取可以满足研究需要的 Shannon 多样性(SHDI)、Shannon 均匀度(SHEI)、斑块面积(CA)、斑块密度(PD)、斑块个数(NP)、最大斑块指数(LPI)等 6 个指标（宗秀影等，2009；栗云召等，2011），利用 Fragstats 4.2 软件，分析研究区景观格局特征。

其中，斑块面积、斑块密度、斑块个数用于描述景观破碎度。最大斑块指数、景观均匀度指数则反映景观中各斑块在面积上分布的不均匀程度。景观多样性指数用来度量系统结构组成复杂程度，斑块类型的齐全程度或多样化状况。

2 结果与分析

2.1 环渤海滨海湿地时空演变特征

2.1.1 滨海湿地时空动态演变　从空间分布来看，1985 年环渤海区域自然湿地主要分布在黄河三角洲、辽河三角洲和莱州湾等区域（图 2）。截至 2015 年，自然湿地面积大幅度减少，分布范围主要集中在黄河三角洲和辽河三角洲地区。研究区域由南向北景观类型变化明显的区域分别为莱州湾沿岸、黄河三角洲、渤海湾沿岸、辽河三角洲和普兰店湾沿岸等。

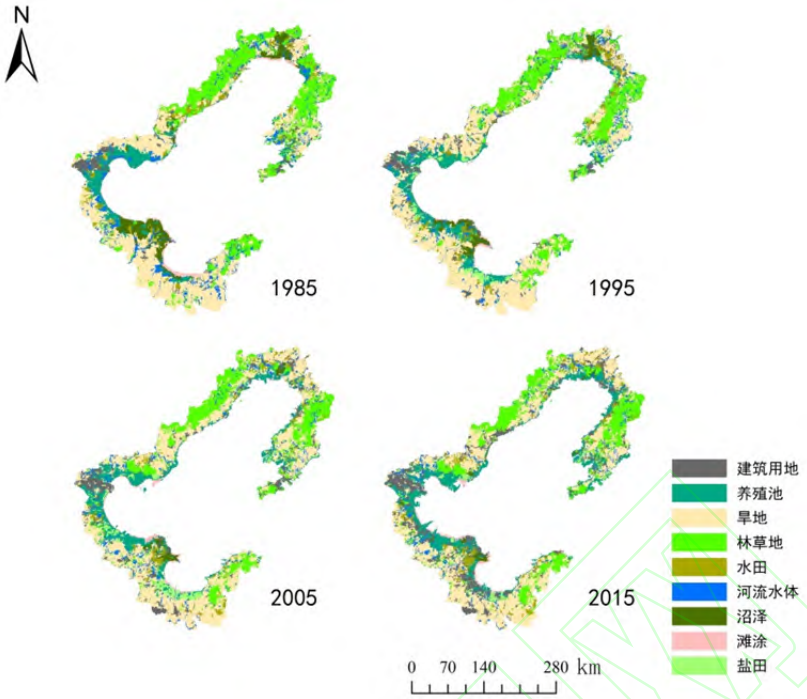

图 2　环渤海滨海湿地景观时空动态演变

Fig.2　Dynamic evolution of wetland landscape of Bohai Rim

河口湿地变化与海湾型湿地变化有差异（图 2）。其中，黄河三角洲湿地是最具代表性的河口湿地，此区域由于黄河携带大量泥沙，泥滩淤积速度明显高于其他区域，滩涂湿地向海方向扩张。然而，海湾型湿地主要受人类活动影响，由自然湿地向养殖池、盐田及建筑用地等地类转化。

从时间变化来看，1985—2015 年自然湿地的面积呈下降趋势，减少了 4763.8 km^2（图 3）。其中，1995—2005 年自然湿地变化幅度大于 1985—1995 和 2005—2015 年的湿地变化（图 2）。人工湿地的面积呈增长趋势，增长了 6339.1 km^2，增长率为 57.2%。非湿地的面积总体变化不明显。

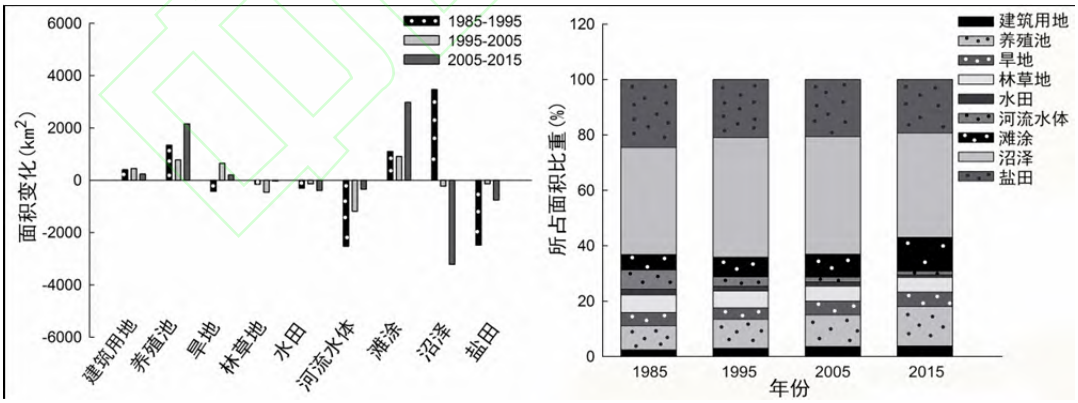

图 3　滨海湿地各景观类型面积及其所占总面积比重变化

Fig.3　Area and percentage of various landscape types in Bohai coastal wetland

总体来说，1985—2015 年，研究区中的各地类的面积均发生了不同程度的变化。养殖池、盐田、建筑用地、水田的面积呈增长趋势，增长最快的地类为盐田，其次为建筑用地、养殖池。林草地、沼泽、滩涂、河流水体的面积呈减少趋势，减少最多的地类为滩涂、沼泽。养殖池及盐田的面积增长率均在 60%以上，建筑用地的面积增长率为 95.6%。滩涂、沼泽的面积减少率均在 50%以上，林草地的面积减少了 30%。旱

地面积总体略有减少，基本保持不变（图 3）。其中，养殖池、盐田主要由滩涂、沼泽、和河流水体转化而来。滩涂、沼泽面积大幅度减少，变化率分别为 70.1%、64.8%（表 2）。

表 2　1985—2015 年环渤海地区湿地类型面积转移矩阵（km^2）及其变化率（%）

Table 2　Area transfer matrix (km^2) and their change rates (%) of wetland types in the Bohai region from 1985 to 2015

1985/2015	河流水体	滩涂	沼泽	养殖池	水田	盐田	建筑用地	旱地	林草地	变化率
河流水体	2320.09	7.79	94.44	777.38	195.86	122.31	142.11	1043.10	406.88	54.60
滩涂	151.43	1245.56	14.41	952.78	534.23	434.91	296.88	415.65	124.73	70.13
沼泽	21.17	2.92	430.57	393.84	12.93	127.22	116.75	99.94	17.06	64.78
养殖池	583.49	0	0	4113.20	498.66	582.07	163.59	24.39	690.23	38.20
水田	35.25	0	0	828.23	642.53	144.03	241.94	1066.82	176.28	79.51
盐田	30.37	0	0	373.16	25.93	769.43	60.91		25.20	40.12
建筑用地	165.50	0	0	544.67	98.35	25.72	2405.96	107.64	182.16	31.84
旱地	383.41	0	0	688.74	1134.71	194.53	2330.30	25187.59	1576.82	20.03
林草地	252.74	0	0	1030.30	444.19	118.13	1146.02	3410.98	9366.15	40.60

2.1.2　滨海湿地演变趋势　近 30 年来，环渤海滨海湿地自然湿地面积呈持续下降趋势。人工湿地面积增加，1985—1995 年增长幅度较小，1995 年之后呈急剧增长趋势。非湿地面积未发生明显变化（图 4a）。

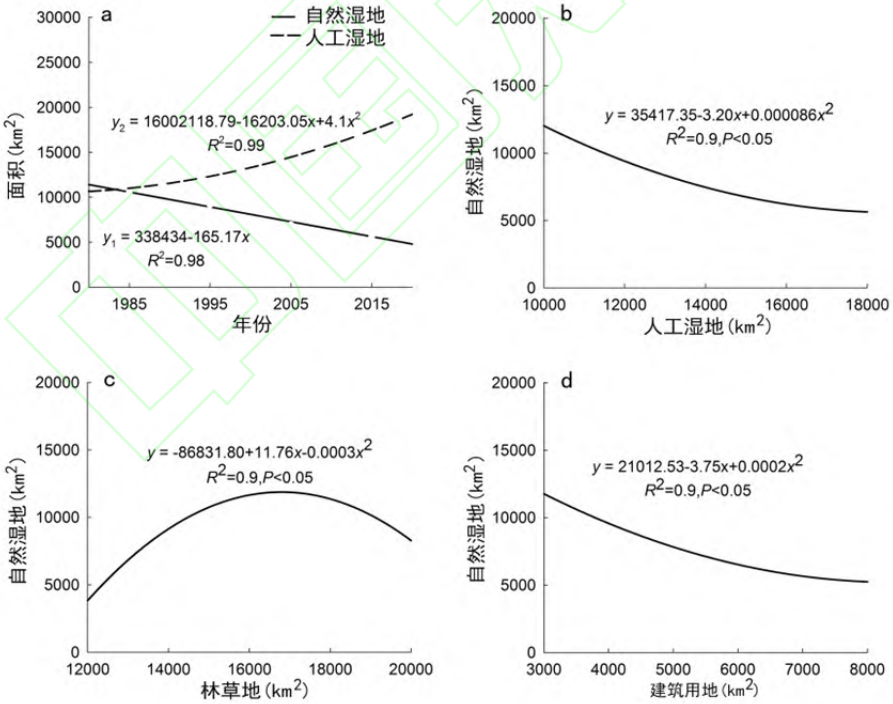

图 4　滨海湿地演变趋势及人工湿地、非湿地面积与自然湿地面积的关系

Fig.4　Area change tendency of coastal wetland and relationship between natural wetland and artificial wetland, non-wetlands

自然湿地面积与人工湿地面积(R^2=0.9，P<0.05 图(4b)呈显著关系，说明人工湿地面积的增长是由自然湿地转化而来，人为干扰是导致自然湿地面积减少的重要因素。非湿地各土地类型面积与自然湿地面积变

化相关性各不相同。其中，湿地面积变化与城镇建设有直接关系（R^2=0.9，P<0.05，图 4d）。随着自然湿地面积减少，林草地面积呈减少趋势（R^2=0.9，P<0.05，图 4c）。自然湿地与旱地面积变化无显著关系。

环渤海滨海湿地的总体演变趋势为自然湿地向人工湿地及非湿地类型转化，随着自然湿地面积的持续减少，人工湿地持续增加，自然湿地人工化。

2.2 环渤海滨海湿地景观格局变化特征

2.2.1 景观破碎化特征 1985—2005 年环渤海滨海湿地景观格局破碎化程度持续增高，2005 年以后呈下降趋势（图 5a、图 5b）。整体景观斑块数 NP 和斑块密度 PD 呈现相同的变化趋势，由 1985 年（1370、0.019）增至 2005 年，在 2005 年出现最大值，分别为 1623、0.022，2005—2015 年（1553、0.021）为减少的趋势。说明研究区内景观格局 1985—2005 年呈破碎化趋势，2005 年之后破碎程度有所缓解。

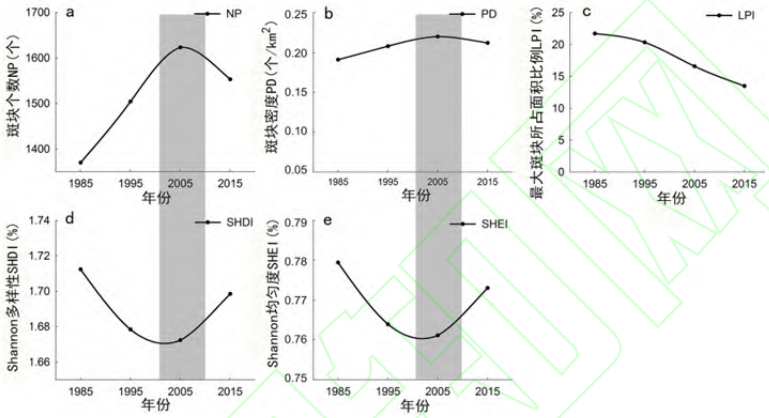

图 5 1985—2015 年环渤海滨海湿地景观指数

Fig.5 Landscape indices of coastal wetland in Bohai wetlands from 1985 to 2015

近 30 年间，环渤海滨海湿地各景观类型斑块数和斑块密度变化趋势一致，变化最大的地类为沼泽、盐田、滩涂，而旱地、林草地、养殖池的变化相对较小（表 3）。沼泽及河流水体的斑块数和斑块密度整体呈上升的趋势，表明景观趋于破碎化。1995 年为最小值（68、0.014，96、0.090），2015 年为最高值（305、0.077，221、0.410）。其中，1985—1995 年呈现下降趋势，人为干扰导致自然斑块规则化，景观破碎度减小。滩涂的破碎化程度在 1985—2005 年不断增大，而在 2005 年之后呈下降趋势，说明人类活动对滩涂的影响程度有所减弱。

表 3 环渤海滨海湿地各景观类型斑块数和斑块密度变化

Table 3 Dynamics of the number of patches and patch density of various landscape types in Bohai coastal wetland

土地利用类型	1985 年		1995 年		2005 年		2015 年	
	斑块数量 NP（个）	斑块密度 PD（个/km²）	斑块数量 NP（个）	斑块密度 PD（个/km²）	斑块数量 NP（个）	斑块密度 PD（个/km²）	斑块数量 NP（个）	斑块密度 PD（个/km²）
建筑用地	142	0.040	120	0.028	99	0.018	22	0.003
养殖池	35	0.005	248	0.036	173	0.020	62	0.006
旱地	66	0.002	71	0.002	41	0.001	188	0.006
林草地	136	0.009	149	0.011	274	0.021	47	0.004

水田	416	0.133	100	0.030	182	0.055	171	0.048
河流水体	146	0.02	68	0.014	258	0.057	305	0.077
滩涂	182	0.047	210	0.064	372	0.228	204	0.162
沼泽	198	0.162	96	0.090	187	0.236	221	0.410
盐田	49	0.038	442	0.210	37	0.015	333	0.118

盐田的斑块数和斑块密度在 1985—2015 年间波动增长，在 1995 年出现最高值（分别为 442、0.210），在 2005 年出现最低值（分别为 37、0.015），景观破碎化程度总体呈加深趋势。养殖池的斑块数和斑块密度由 1985 年增至 1995 年，再由 1995 年减至 2015 年，1995 年为最大值（分别为 248、0.036），前 10 年破碎化程度较深，1995 年之后破碎化程度降低。建筑用地的斑块数和斑块密度在 1985—2015 年持续减少，景观破碎程度降低。

总体来说，自然湿地景观类型呈破碎趋势，人工湿地、非湿地景观破碎化程度降低，人为干扰是影响景观破碎程度的重要因素。

2.2.2 景观多样性和均匀度变化特征　环渤海滨海湿地的最大斑块所占比例 LPI 在 1985—2015 年近 30 年间呈持续减少趋势（图 5c），由 1985 年（21.72）减少至 2015 年（13.50）。说明单一的景观类型对研究区的控制力减弱，景观呈均衡化趋势。

Shannon 均匀度 SHEI 在 1985—2005 年呈减少趋势，2005—2015 年呈增长趋势（图 5d），1985 年为最大值（0.78），2005 年为最小值（0.76）。Shannon 多样性 SHDI 的变化趋势与 Shannon 均匀度 SHEI 变化趋势一致（图 5e），1985 年为最大值（1.71），2005 为最小值（1.67）。1985—2005 年 Shannon 均匀度和 Shannon 多样性减少，人类活动对景观干扰较强，景观异质性降低，2005—2015 年国家政策倡导对湿地进行保护、修复，建立自然保护区，人为干扰影响减弱，生物多样性增加，景观异质性略有增长。

总体来说，环渤海滨海湿地优势景观类型在研究区的主导地位有所下降，景观趋于均衡化，人类活动在 1985—2005 年之前对景观的干扰较强，2005 年之后干扰强度略有减弱。

2.3 环渤海围填海对滨海湿地演变的影响

2.3.1 围填海动态演变　1985—2015 年环渤海地区围填海面积呈上升趋势，增长了 1606.8 km^2，增长速率为 197%。1985—2005 年围填海面积呈急速增长趋势，2005 年之后，围填海面积增长趋势较 10 年之前有所减缓。其中，1985—1995 年围填海面积变化最大，为 577.81 km^2，2005—2015 年围填海面积增幅相对较小（图 6）。围填海活动发生的热点区域位于莱州湾、黄河三角洲、渤海湾、辽河三角洲、辽东湾东北部和东部地区（图 2），其主要土地利用类型为建筑用地、养殖池、盐田和农用地等（图 6）。其中，渤海湾区域 1985—2005 年以养殖池和盐田的面积增长为主，2005—2015 年港口码头建设成为围填海面积增长的重点。天津、曹妃甸是该区域典型的围填海城市。莱州湾区域的围填海活动以养殖池和盐田为主（图 2）。

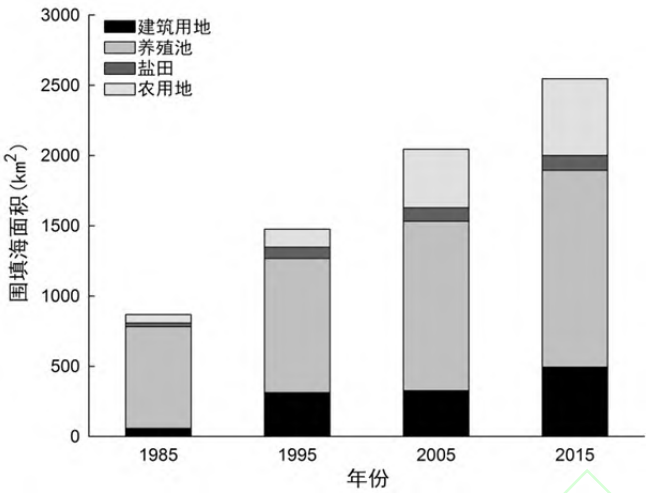

图 6　1985—2015 年围填海主要土地利用类型面积变化

Fig.6　Area changes of major land-use types of sea reclamation from 1985 to 2015

2.3.2　围填海对滨海湿地演变的影响　围填海面积与自然湿地面积呈极显著的线性关系（图 7a），随着围填海活动面积的增长，自然湿地面积呈下降趋势，即围填海活动与滨海湿地面积减少有直接关系。围填海与人工湿地显著的线性关系(图 7a)，人工湿地面积随着围填海活动面积增长而增长。非湿地面积变化受多种因素影响，因此本研究以二级分类为主，探讨围填海与非湿地面积变化关系(图 7d)。

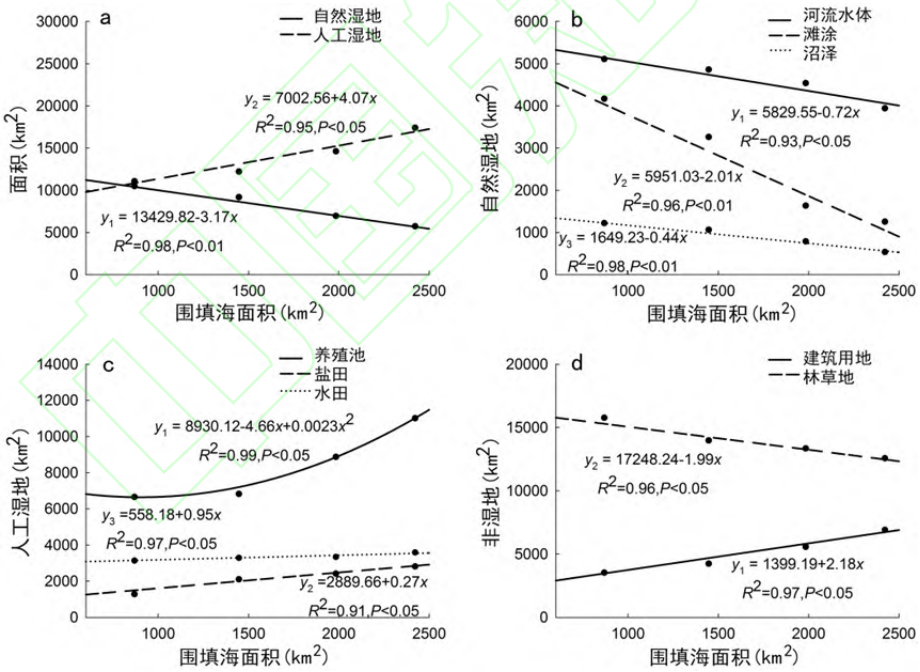

图 7　自然湿地、人工湿地、非湿地面积与围填海面积的关系

Fig.7　Relationship between the sea reclamation and nature wetland area, artificial wetland, non-wetlands

从二级分类来看，河流水体（R^2=0.93，P<0.05）、滩涂（R^2=0.96，P<0.05）、沼泽（R^2=0.98，P<0.05）、林草地（R^2=0.96，P<0.05）等面积随着围填海活动面积增加而减少（图 7b、7d），滩涂面积变化受围填海活动影响显著，随着围填海活动面积的增长，滩涂面积急剧下降。养殖池（R^2=0.99，P<0.05）、盐田（R^2=0.97，P<0.05）、水田（R^2=0.91，P<0.05）、建筑用地（R^2=0.97，P<0.05）等面积随着围填海活动面积的增长，呈

上升趋势（图 7c、7d），其中，养殖池和建筑用地是围填海活动中主要的土地利用类型。围填海活动面积与旱地面积无显著关系。

3 讨 论

3.1 滨海湿地演变趋势及其驱动力

1985—2015 年环渤海滨海湿地变化的热点区域为黄河三角洲、莱州湾、渤海湾和辽河三角洲（图 2）。近 30 年，环渤海滨海区域自然湿地面积减少了 4763.8 km^2，人工湿地面积增长了 6339.1 km^2，增长率为 57.2%，非湿地面积总体呈增长趋势，变化幅度相对较小（图 3）。对比前人的研究，环渤海区域的自然湿地演变特征与其他地域湿地演变有相似性。在叶功富等（2010）和周林飞等（2016）对泉州湾河口湿地以及凌河口湿地的研究中，滩涂湿地被大规模的盐田、养殖池占用，导致人工湿地面积增加，自然湿地面积随之减少。

滨海湿地演变趋势为自然湿地向人工湿地及非湿地转化，自然湿地人工化。随着人工湿地、建筑用地面积增加，自然湿地面积减少（图 4b、4d）。滩涂、沼泽、林草地、旱地向养殖池、盐田、建筑用地转化（表 2）。随着城市化程度加深，城镇建设规模扩大，养殖池、盐田及建筑用地面积增加，占用了滩涂湿地等自然湿地，是导致滨海湿地自然湿地减少的主要驱动因素。这与栗云召等（2011）和周林飞等（2016）对湿地演变的研究结果一致。近 30 年来，自然湿地面积明显减少，潮间带湿地向非潮间带湿地转化（孙万龙等，2017）。盐田、养殖池由大面积的耕地、滩涂、沼泽转化而来，耕地、林地面积减少，主要转出为城镇用地（王毅杰等，2012）。

1985—1995 和 1995—2015 年导致区域自然湿地面积减少的原因有所不同。其中，1985—1995 年环渤海区域自然湿地面积的减少，是由开垦、养殖池和盐田占用滩涂湿地及沼泽湿地导致的。然而，1995—2015 年研究区内自然湿地面积减少，是由于港口、城镇建设与养殖活动共同作用，加剧了自然湿地面积的萎缩（图 3）。20 世纪 90 年代，人类开垦活动是湿地退化的主要驱动因子（侯伟等，2004）。农业开垦、围海造田等农业活动占用了大面积自然湿地和林草地（周丽玲等，2017），导致农田面积呈增长趋势，林草地和湿地面积持续减少。然而，由于近 10 年国家实施退耕还林政策，导致开垦农田的力度减弱（周林飞等，2016）。同时，围海养殖、开垦及围海造地等围填海活动规模越来越大，对滨海湿地的影响日益增强（向英奇等，2015）。尤其是 21 世纪之后，城镇建设进程加快，一系列的政策实施带动了环渤海区域的城镇建设与发展，工业园区及房地产建设占用了大面积的耕地和滩涂，导致农田和自然湿地面积减少，围填海活动取代开垦成为影响滨海湿地退化的重要因素（方仁建等，2015）。

3.2 滨海湿地景观格局变化特征

1985—2015 年斑块数和斑块密度呈先上升后下降的趋势，说明环渤海滨海湿地在 2005 年之前景观格局呈破碎趋势，2005 年之后破碎程度有所缓解（图 5a、5b）。本研究认为，导致 1985—2005 年研究区景观格局呈破碎化的有原因有两个。一是退耕、撂荒、城镇建设、交通道路建设、油田开采等人类活动，将连贯的自然斑块分割成为离散的小斑块，加剧了景观格局的破碎程度（张国坤等，2007；周林飞等，2016）。二是围海造陆、水产养殖、围海造田等围填海活动使得研究区内各地类之间发生明显的转化（宋红丽等，2013；马田田等，2015），导致滨海湿地景观破碎化。然而，2005 年之后，由于农田结构调整以及养殖池面积增加，研究区内破碎斑块整合，主要景观类型以大斑块的形式呈现，而高度城市化的区域景观同质化，斑块聚合度高（付刚等，2017），使得破碎程度有所缓解。

最大斑块所占面积比例 LPI 呈下降趋势，说明各景观类型均匀分布，所占总面积比例差异不明显，景

观格局呈均衡趋势（图 5d）。这是因为研究区内农田和林草地等优势景观类型的转化率较高（表 2），林草地面积大幅度减少（图 3），导致农田、林草地在研究区所占主导地位有所下降，各景观类型面积所占比例相差不大，景观格局呈均衡化。研究区的景观多样性和均匀度在 1985—2005 年呈下降趋势，2005—2015 年略有上升（图 5c、5e），表明景观异质性呈先降低后增加的趋势。本研究认为，导致 1985—2005 年景观异质性降低的原因可以分为两个方面。首先，由于没有新的景观类型出现，景观组成要素未发生改变，各景观类型面积所占比例均衡化，使得景观异质性较低（李团胜等，2009）。其次，因为开垦，城镇、道路建设等人类活动频繁，导致规则化的斑块增加，降低了景观异质性。而 2005 年之后呈回升趋势是由于近 10 年来国家对湿地保护的意识增强，建立并完善湿地自然保护区制度，推动实施湿地保护政策（周林飞等，2016）。2010 年山东省启动实施百万亩湿地修复工程，修复退化湿地，恢复湿地生态。这些湿地保护政策的实施，减弱了人类活动对湿地的干扰，保护了湿地生态的多样性。因此，2005 年之后研究区景观异质性呈增长趋势。

3.3 围填海进程对滨海湿地演变的影响

1985—2015 年围填海面积增长了 1606.8 km^2，其中，1985—1995 年围填海面积变化最大（577.81 km^2），2005—2015 年围填海面积增幅相对较小（图 6）。自 20 世纪 80—90 年代开始，中国沿海地区进入围海活动的狂热期，环渤海区域的围填海状况尤其激烈，1985—2010 年间围垦滨海湿地面积占全国围垦滨海湿地总面积的 46%（吴文挺等，2016）。有研究表明，2000—2010 年环渤海区域围填海面积为 551.4 km^2，与本文研究结果差异不大（刘百桥等，2015）。将其他区域围填海的研究结果与本文研究结果相比可以发现，全国不同地区围填海的主要土地利用类型和面积变化有相似性。浙江省近 20 年围填海面积达 1087.6 km^2（徐谅慧等，2015），1980—2000 年广东省围海面积为 522.5 km^2，其中 1980—1990 年围填海面积增长最快（高志强等，2014）。围填海的主要土地利用类型为农业种植、水产养殖、盐田、港口与临港工业、城镇建设等 5 种类型（陈凤桂等，2012）。

1985—2005 年围填海面积持续快速增长，2005 年之后增长速度减慢（图 6）。围填海的主要土地利用类型为养殖池、建筑用地，养殖池所占围填海总面积比例呈下降趋势，建筑用地占围填海总面积的比例持续上升（图 7）。1985—1990 年是围填海活动的第一个高峰期，全国范围内掀起了围海养殖的热潮。由于黄河三角洲、辽河三角洲等地区多淤泥质海岸，围堤成本低、收益高，大量的围海养殖活动侵占了滩涂湿地（高志强等，2014）。至 2002 年，国家出台《中华人民共和国海域使用管理法》，围填海活动得到了有效的管控，围填海面积增长速度有所减缓。然而，国家的政策管控未能抵制围海造地的诱惑，围海面积增长速度虽然减缓，但是增长幅度仍然居高不下（宋红丽等，2013）。近 10 年为围填海活动的第二个发展阶段，即城市扩张型围垦期（吴文挺等，2016）。为缓解土地资源不足的压力，围填海的主要土地利用类型已从盐业、农业、渔业用地转向建设用地（李晓炜等，2016），主要用于港口、临海工业园区等的建设。目前，渤海湾区域的天津滨海新区、曹妃甸沧州渤海新区等开发区域的许多工业项目还在建设中，莱州湾区域大面积的滩涂正在被开发，围海造陆现象普遍存在，围填海面积将继续扩张。

围填海活动促进了自然湿地向人工湿地及非湿地地类的转化，是推动滨海湿地演变的重要影响因素。一方面，围填海活动直接占用滨海湿地面积。水产养殖、围垦、城镇建设、工厂以及港口建设等围填海活动侵占沿海湿地（李晓炜等，2016），导致滩涂、沼泽面积明显减少，自然湿地向养殖池、盐田、建筑用地转化（图 7）。另一方面，围填海活动使得人工岸线大比例增加，导致岸线固化，岸线长度增长（恭映璧等，

2012），加剧了海水对滨海湿地的侵占。同时，港口和防潮大坝阻隔了滩涂湿地与渤海的正常物质和能量交换，影响植被的正常演替过程，改变滨海湿地的生态系统格局，导致自然湿地面积减少，尤其是滩涂湿地的面积萎缩（宋红丽等，2013）。

参考文献

陈凤桂，吴耀建，陈斯婷. 2012. 福建省围填海发展趋势及驱动机制研究. 中国土地科学, **26**(5): 23-29, 97.

杜培军，陈　宇，谭　琨. 2014. 江苏滨海湿地土地利用/覆盖变化与地表温度响应遥感监测. 国土资源遥感, **26**(2): 112-120.

方仁建，沈永明，时海东. 2015. 基于围垦特征的海滨地区景观格局变化研究——以盐城海岸为例. 生态学报, **35**(3): 641-651.

付　刚，肖能文，乔梦萍，等. 2017. 北京市近二十年景观破碎化格局时空变化分析. 生态学报, **37**(8): 2551-2562.

高志强，刘向阳，宁吉才，等. 2014. 基于遥感的近 30a 中国海岸线和围填海面积变化及成因分析. 农业工程学报, **30**(12): 140-147.

恭映璧，靖　磊，彭　磊，等. 2012. 长沙城市斑块湿地资源的时空演变. 生态学报, **32**(23): 7302-7312.

韩秋影，黄小平，施平，等. 2006. 华南滨海湿地的退化趋势、原因及保护对策. 科学通报,(S3): 102-107.

侯　伟，张树文，张养贞，等. 2004. 三江平原挠力河流域 50 年代以来湿地退缩过程及驱动力分析. 自然资源学报, **19**(6): 725-731.

李团胜，石玉琼. 2009. 景观生态学. 北京：化学工业出版社: 50-52.

李晓炜，侯西勇，邸向红，等. 2016. 从生态系统服务角度探究土地利用变化引起的生态失衡——以莱州湾海岸带为例. 地理科学, **36**(8): 1197-1204.

栗云召，于君宝，韩广轩，等. 2011. 黄河三角洲自然湿地动态演变及其驱动因子. 生态学杂志, **30**(7): 1535-1541.

林洁贞，金　辉. 2014. 基于遥感的滨海湿地退化及其驱动力研究. 热带海洋学报, **33**(3): 66-71.

刘百桥，孟伟庆，赵建华，等. 2015. 中国大陆 1990—2013 年海岸线资源开发利用特征变化. 自然资源学报, **30**(12): 2033-2044.

刘春杉，张彤辉，陈玮哲. 2017. 珠江口海域围填海演进过程与问题分析研究. 海洋开发与管理, **34(3)**: 33-37.

罗舒心，万新月，熊欣悦，等. 2015. 海岸挤迫现象对滨海湿地丧失的影响及对策研究综述. 湿地科学, **13**(6): 778-784.

马田田，梁　晨，李晓文，等. 2015. 围填海活动对中国滨海湿地影响的定量评估. 湿地科学, **13**(6): 653-659.

于　杰，陈作志，徐姗楠. 2016. 围填海对珠江口南沙湿地资源与生物资源的影响. 中国水产科学, **23**(3): 661-671.

宋红丽，刘兴土. 2013. 围填海活动对我国河口三角洲湿地的影响. 湿地科学, **11**(2): 297-304.

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. 生态学报, **37**(1): 215-225.

索安宁，张明慧，于永海，等. 2012. 曹妃甸围填海工程的海洋生态服务功能损失估算. 海洋科学, **36**(3): 108-114.

王卷乐，冉盈盈，张永杰，等. 2013. 1980—2010 年鄱阳湖地区土地覆盖与景观格局变化. 应用生态学报, **24**(4): 1085-1093.

王毅杰，俞　慎. 2012. 长江三角洲城市群区域滨海湿地利用时空变化特征. 湿地科学, **10**(2): 129-135.

吴文挺，田　波，周云轩，等. 2016. 中国海岸带围垦遥感分析. 生态学报, **36**(16): 5007-5016.

向英奇，刘　淼，胡远满，等. 2015. 辽宁省沿海地区景观格局时空变化及其驱动力. 生态学杂志, **34**(9): 2628-2635.

徐东霞，章光新. 2007. 人类活动对中国滨海湿地的影响及其保护对策. 湿地科学, **5**(3): 282-288.

徐谅慧，杨　磊，李加林，等. 2015. 1990—2010 年浙江省围填海空间格局分析. 海洋通报, **34**(6): 688-694.

许吉仁，董霁红. 2013. 1987~ 2010 年南四湖湿地景观格局变化及其驱动力研究. 湿地科学, **11**(4): 438-445.

闫淑君，洪　伟，吴承祯，等. 2010. 闽江口琅岐岛湿地景观格局变化研究. 湿地科学, **8**(3): 287-292.

叶功富，谭芳林，罗彩莲，等. 2010. 泉州湾河口湿地景观格局变化研究. 湿地科学, **8**(4): 360-365.

张东水, 兰樟仁, 李　铮. 2007. 基于 ComGIS 的闽江口湿地时空演变分析系统. 湿地科学, **5**(3): 221-2226.

张国坤, 邓　伟, 吕宪国, 等. 2007. 新开河流域湿地景观格局动态变化过程研究. 自然资源学报, **22**(2): 204-210.

张晓龙, 刘乐军, 李培英, 等. 2014. 中国滨海湿地退化评估. 海洋通报, **33**(1): 112-119.

张绪良, 徐宗军, 张朝晖, 等. 2010. 中国北方滨海湿地退化研究综述. 地质论评, **56**(4): 561-567.

张绪良, 张朝晖, 徐宗军, 等. 2009. 莱州湾南岸滨海湿地的景观格局变化及累积环境效应. 生态学杂志, **28**(12): 2437-2443.

周丽玲, 黄金瓯, 诸　烨. 2017. 基于遥感的近 40a 椒江-台州湾岸线和围填海变迁与成因分析. 地质评论, **63**(S1): 337-338.

周林飞, 徐浩田, 张　静. 2016. 凌河口湿地自然保护区景观格局变化及功能区划分. 湿地科学, **14**(3): 403-407.

宗秀影, 刘高焕, 乔玉良, 等. 2009. 黄河三角洲湿地景观格局动态变化分析. 地球信息科学学报, **11**(1): 91-97.

Cui BS, He Q, Gu BH, *et al.* 2016. China's wetlands: Understanding environment change and human impacts for management and conservation. *Wetlands*, **36**: 1-9.

El-Asmar HM, Hereher ME. 2011. Change detection of the coastal zone east of the Nile Delta using remote sensing. *Environmental Earth Sciences*, **62**: 769-777.

Rodriguez JF, Saco PM, Sandi S, *et al.* 2017. Potential increase in coastal wetland vulnerability to sea-level rise suggested by considering hydrodynamic attenuation effects. *Nature Communications*, **8**: 16094.

作者简介　魏　帆，女，1993 年生，硕士研究生，研究方向为 3S 技术应用与建模。E-mail: fannywei@139.com

责任编辑　张　敏