生态环境学报 2018, 27(1): 71-78 http://www.jeesci.com
Ecology and Environmental Sciences E-mail: editor@jeesci.com

黄河三角洲自然湿地景观连接度动态变化及其驱动因素分析

吴晶晶[1,2]，栗云召[3]，于良巨[1]，高猛[1]，吴晓青[1]，毕晓丽[1*]

1. 中国科学院烟台海岸带研究所，山东 烟台 264003； 2. 中国科学院大学，北京 101400；
3. 鲁东大学资源与环境工程学院，山东 烟台 264000

摘要：景观连接度用来度量景观空间单元之间的连续程度，它同具体的生态过程相结合可有效表征景观的功能特性。已有景观连接度的研究往往缺乏长时间序列动态变化的分析，且从不同区域尺度开展的研究也较少。同时，关于影响景观连接度变化的驱动因素还未有明确解释。因此，文章基于 1991—2013 年 6 期遥感影像数据，利用基于图论的指数方法测度景观连接度，对黄河三角洲整体以及自然保护区一千二管理站和黄河口管理站、垦利农业生态区、河口农业生态区和胜利油田区 5 个区域内自然湿地景观连接度的时空变化格局进行分析，并探讨影响自然湿地景观连通格局的主要驱动因素。结果表明，1991—2013 年黄河三角洲自然湿地面积减少了 548.75 km^2，景观连接度整体较低且呈现下降趋势，最大可能连接度指数不足 0.1。期间，垦利农业生态区、河口农业生态区和胜利油田区的自然湿地面积减少严重，景观连接度下降明显。到 2013 年，这 3 个区域的自然湿地景观连接度全部下降至 0.01 以下。而一千二管理站和黄河口管理站内自然湿地的面积与景观连接度却有所增加，其中，一千二管理站自然湿地的景观连接度均在 0.5 以上，黄河口管理站自然湿地的可能连接度也从 0.203 增加到 0.360。人类活动对黄河三角洲湿地景观格局的演变产生了重要影响。耕地、人工湿地以及油田、道路等建设用地是黄河三角洲湿地景观连接度变化的主要驱动因素，而自然保护区的设立和有效的管理措施是区内湿地景观连接度增加的主要原因。在此基础上建议扩大保护区范围，增加踏脚石斑块，保持水系连通以提高景观连接度。

关键词：景观连接度；自然湿地；驱动因素；黄河三角洲

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2018.01.010

中图分类号：P942; X14 **文献标志码：**A **文章编号：**1674-5906（2018）01-0071-08

引用格式：吴晶晶, 栗云召, 于良巨, 高猛, 吴晓青, 毕晓丽. 2018. 黄河三角洲自然湿地景观连接度动态变化及其驱动因素分析[J]. 生态环境学报, 27(1): 71-78.

WU Jingjing, LI Yunzhao, YU Liangju, GAO Meng, WU Xiaoqing, BI Xiaoli. 2018. Dynamic changes and driving factors of landscape connectivity for natural wetland in Yellow River Delta [J]. Ecology and Environmental Sciences, 27(1): 71-78.

景观连接度是指景观促进或阻碍生物或某种生态过程在源斑块间运动的程度，它描述了景观要素在功能和生态学过程上的有机联系，包括生物群体之间的物种交流，景观元素间直接的物质、能量与信息交换（Saura et al.，2007；Sork et al.，2006；Taylor et al.，1993）。1984 年，Merriam 首次将景观连接度应用到景观生态学中。随后，国内外学者对景观连接度的概念、量测方法及应用也展开了大量研究。例如，Marulli et al.（2005）采用 ECI 指数对巴塞罗那中心区景观进行评价，确定了对当地景观具有重要连接度的区域；Zhu et al.（2008）利用生境适宜性评价模型分析了丹顶鹤（*Grus japonensis*）生境连接度对物种生境利用程度的影响。景观连接度的研究和发展对于关键生境栖息地保护、生物多样性维持以及景观设计与规划具有重要意义（陈利顶等，1996；Gao et al.，2004；吴昌广等，2010）。

黄河三角洲湿地是中国暖温带最完整、最广阔、最年轻的湿地生态系统，蕴含着丰富的自然资源，具有原生性、脆弱性、稀有性等生态特征，其作为世界上许多珍稀濒危鸟类的重要栖息地备受国内外学者重视（李政海等，2006；张晓龙等，2007）。自 1976 年黄河改道至清水沟流路以来，黄河三角洲的自然条件和社会环境都发生了较大改变，同时，黄河三角洲的开发力度也得到加强（栗云召等，2011，宗秀影等，2009）。

近年来，许多学者借助 3S 技术、运用景观生态学理论对黄河三角洲湿地演变过程及机制方面开展了大量研究（洪佳等，2016）。目前，主要集中在土地利用变化和湿地景观格局变化（郭笃发，

基金项目：国家自然科学基金项目（31670471）；中国科学院科技服务网络计划项目（KFJ-STS-127）

作者简介：吴晶晶（1990 年生），女，硕士研究生，主要研究方向为地理信息系统、景观生态学和湿地生态学方面的研究。E-mail: 1562685889@qq.com

*通信作者：毕晓丽（1978 年生），女，副研究员，硕士生导师。E-mail: xlbi@yic.ac.cn

收稿日期：2017-10-11

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2005，王永丽等，2012）、湿地生物多样性分布特征（张绪良等，2011）、湿地保护与恢复（陈为峰等，2003；孙志高等，2011）等方面，这些研究为认识黄河三角洲湿地演变规律，开展湿地生态保护提供了借鉴和参考。然而，这些研究往往聚焦于湿地景观的空间结构分布，而对其功能特性考虑不足，且未能充分结合具体的生态过程，难以全面揭示黄河三角洲湿地演变的特征和机制。而景观连接度与生态过程密切关联，可以为景观功能研究提供新思路。迄今为止，关于黄河三角洲湿地景观连接度的研究未见报道，缺乏对其时间序列动态特征的分析研究。因此，本研究基于GIS技术平台，利用基于图论的景观连接度量测指数对黄河三角洲自然湿地景观的时空变化格局进行分析，在探讨其动态变化特征的基础上，进一步分析引起该区景观连接度变化的主要驱动因素，以期为三角洲湿地生态系统的管理与保护提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河三角洲位于渤海湾南岸和莱州湾西岸，地处118°33′~119°21′E和37°35′~38°12′N之间。三角洲属于暖温带半湿润大陆性季风气候区，四季分明，年平均气温11.7~12.6 ℃，年均降水量530~630 mm（卢晓宁等，2016）。该区域地势平坦，海拔高程低于15 m。区内分布着丰富的湿地资源，为许多珍稀濒危鸟类提供重要的栖息地和迁徙中转站。黄河三角洲自然湿地作为国际上重要的河口湿地生态系统，在过去的20多年中经历了剧烈的演变过程。1973—2013年，自然湿地面积减少了40%，植被覆盖率降低，景观破碎化程度不断增加（洪佳等，2016）。

1.2 数据处理

本研究以黄河三角洲1991年、1995年、1999年、2004年、2009年、2013年共6期Landsat TM遥感影像作为主要数据源。在ENVI 5.1平台下，对遥感影像进行几何校正和图像增强处理，运用非监督分类法以及目视解译法对影像数据进行判读和解译，并结合实地调查数据对分类结果进行验证，总体解译精度达80%以上。

依据《拉萨姆尔公约》分类系统将黄河三角洲自然湿地划分为：草本沼泽、灌丛湿地、森林湿地、盐沼湿地、积水洼地、河口水域、滩涂；人工湿地划分为沟渠、池塘、水库、河流、养殖池、盐田；其他土地利用类型包括旱地、水田、公路、居民区、工矿区、堤坝。为便于分析研究区不同尺度的景观连接度，本文根据黄河三角洲自然保护区规划图、河道分布图以及东营市行政区划图将研究区分为黄河三角洲国家级自然保护区（包括一千二管理站和黄河口管理站）、河口农业生态区、垦利农业生态区和胜利油田区5个区域。

2 研究方法

2.1 景观连接度分析

基于图论的景观连接度指数，考虑了景观要素对生态过程的影响，针对性较强，在反映景观破碎化程度、识别重要生境斑块方面优于其他指数类型，这些指数可借助Conefor Sensinode 2.6软件计算得到（Santiago et al.，2009；吴健生等，2012）。

（1）斑块间的连接数（Number of links，NL），指每两个斑块相连关系的数量。任意两个斑块之间的距离小于距离阈值，则认为它们是相连接的，产生连接数。

（2）组分数（Number of components，NC），指由功能或结构上相互连接的斑块组成的整体。不同景观组分之间是彼此孤立的，不存在生态过程的联系。最大组分特指斑块数量最多的组分，相应的最大组分面积指斑块数量最多的组分的面积。

（3）H-Harary指数（H），计算公式如下：

$$H=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1,\ i\neq j}^{n}\frac{1}{\mathrm{NL}_{ij}} \tag{1}$$

式中，n表示景观中斑块总数；NL_{ij}表示斑块i和斑块j之间的连接数，当斑块不连接时，$\mathrm{NL}_{ij}=\infty$；H越大，表示生境斑块之间的连通可能性越大。

（4）景观相合概率（Landscape coincidence probability，LCP），通过研究连接斑块区域集来反映景观的连续性程度，其景观生态学意义是反映待研究景观组分在整体研究区中的连贯性，计算公式如下：

$$\mathrm{LCP}=\sum_{i=1}^{\mathrm{NC}}\left(\frac{c_i}{A_{\mathrm{L}}}\right)^2 \tag{2}$$

式中，c_i为这些景观组分的面积之和；A_{L}为研究区域的总面积。LCP=1时，表示这些景观组分面积与研究区面积相等，即研究区内所有景观同属一个类型。

（5）Flux指数（F），计算公式如下：

$$F=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1,\ i\neq j}^{n}p_{ij} \tag{3}$$

式中，n表示景观中斑块总数；p_{ij}表示斑块i和斑块j之间连接的可能性。

（6）Area-weighted flux指数（AWF），计算公

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式如下：

$$\mathrm{AWF}=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1,\ i\neq j}^{n}p_{ij}\cdot a_i\cdot a_j \qquad (4)$$

式中，n 表示景观中斑块总数；p_{ij} 表示斑块 i 和斑块 j 之间连接的可能性；a_i 和 a_j 分别表示斑块 i 和斑块 j 的面积。

（7）整体连接度指数（Integral index of connectivity，IIC）

$$\mathrm{IIC}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}[(a_i a_j)/(1+\mathrm{NL}_{ij})]}{A_{\mathrm{L}}^{2}} \qquad (5)$$

式中，n 表示景观中斑块总数；a_i 和 a_j 分别表示斑块 i 和斑块 j 的面积；NL_{ij} 表示斑块 i 和斑块 j 之间的连接数；A_{L} 表示整个景观的面积。0≤IIC≤1，当 IIC=0，生境斑块之间没有连接；当 IIC=1，整个景观都为生境斑块。

（8）可能连接度指数（Probability of connectivity，PC）

$$\mathrm{PC}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}a_i a_j p_{ij}^{*}}{A_{\mathrm{L}}^{2}} \qquad (6)$$

式中，n 表示景观中斑块总数；a_i 和 a_j 分别表示斑块 i 和斑块 j 的面积；p_{ij}^{*} 表示物种在斑块 i 和斑块 j 直接扩散的最大可能性；A_{L} 表示整个景观的面积。0<PC<1，PC 越大，表示生境斑块之间的连通可能性越大。

本文基于以上指数，考虑到野生动植物扩散范围多在百米级别，将距离阈值设为 500 m（陈杰等，2012；蒙吉军等，2016），计算不同年份下黄河三角洲自然湿地的景观连接度指标。同时结合土地利用覆盖类型数据和其他社会经济数据对过去 20 年来黄河三角洲湿地景观的连通变化进行驱动因素分析。

3 结果与分析

3.1 黄河三角洲自然湿地面积动态变化

3.1.1 黄河三角洲自然湿地面积总体变化

根据遥感影像分类结果，提取 1991—2013 年的自然湿地生境斑块（图 1）。整体而言，除 1995 年，1991—2013 年黄河三角洲自然湿地面积呈下降趋势，湿地面积从 1 879.23 km^2 减少为 1 330.48 km^2。研究初期，自然湿地类型以草本沼泽、灌丛湿地、盐沼湿地、滩涂为主，到 2013 年，草本沼泽、灌丛湿地、盐沼湿地的面积大幅度衰减，分别减少了 337.57、309.71、242.27 km^2，衰减趋势在 1999 年之后尤为明显。此外，滩涂湿地、积水洼地面积分别从 209.61 km^2 和 21.36 km^2 增加到 444.78 km^2 和 88.43 km^2；同时，新增 13.87 km^2 的河口水域湿地类型（表 1）。

3.1.2 黄河三角洲区域自然湿地面积变化

由图 1、表 2 可知，1991—1995 年，草本沼泽、灌丛湿地分布在整个研究区内；盐沼湿地和滩涂主

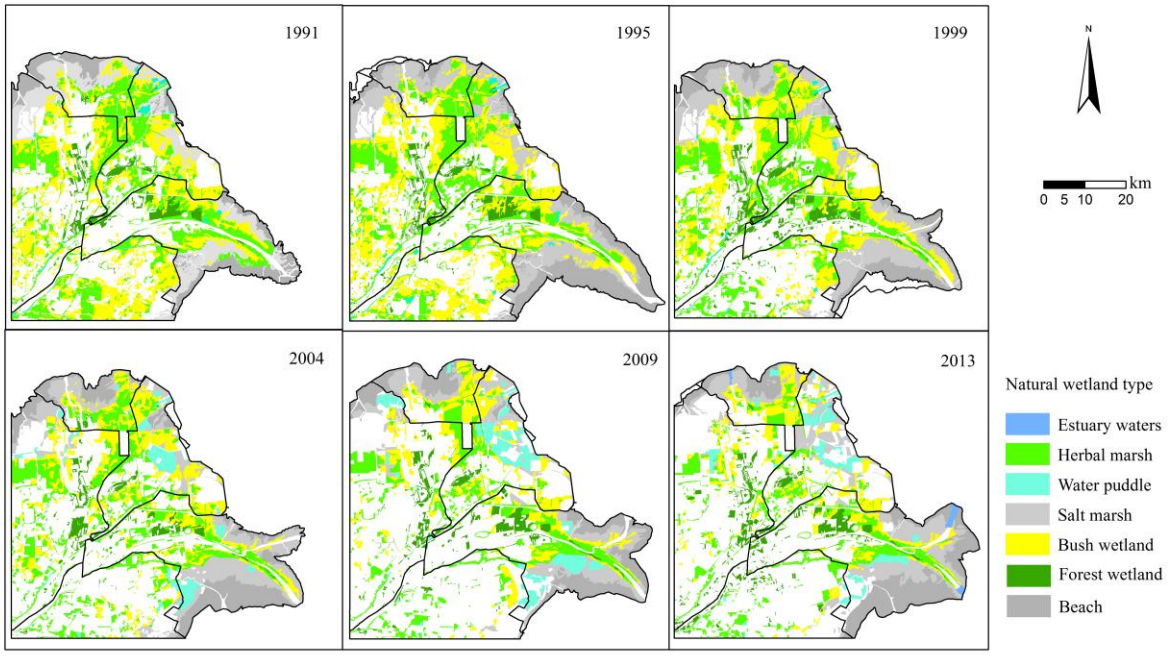

图 1 1991—2013 年黄河三角洲自然湿地分布

Fig. 1 Distribution of natural wetlands in the Yellow River Delta from 1991 to 2013

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1 1991—2013年黄河三角洲各自然湿地类型面积

Table 1 Area of natural wetland types in Yellow River Delta from 1991 to 2013 km^2

Natural wetland type	Year					
	1991	1995	1999	2004	2009	2013
Herbal marsh	566.38	531.00	539.40	465.51	320.20	228.81
Bush wetland	627.76	659.75	561.98	393.09	298.56	318.05
Forest wetland	91.68	91.11	126.38	78.02	101.35	116.37
Salt marsh	362.44	399.45	426.62	353.21	266.82	120.17
Beach	209.61	267.48	191.80	255.97	223.72	444.78
Water puddle	21.36	20.83	13.63	95.07	140.59	88.43
Estuary waters	0	0	0	0	0	13.87
Total	1 879.23	1 969.62	1 859.82	1 640.88	1 351.24	1 330.48

表2 1991—2013年黄河三角洲各分区自然湿地面积

Table 2 Area of regional natural wetland in Yellow River Delta from 1991 to 2013 km^2

Each district	Year					
	1991	1995	1999	2004	2009	2013
Yiqianer management station	211.67	204.99	215.07	211.29	199.58	201.83
Yellow River mouth management station	491.69	540.60	545.57	562.83	499.15	601.12
Estuarine agro-ecological zone	507.54	491.92	462.66	383.61	273.30	201.01
Kenli agro-ecological zone	284.80	251.72	175.83	135.19	95.91	56.09
Shengli oilfield zone	356.76	353.74	359.50	315.75	276.17	204.67

要分布在三角洲北部、东南沿海区域，包括了一千二管理站和黄河口管理站；森林湿地主要分布在三角洲中部。到 2013 年，垦利农业生态区、河口农业生态区和胜利油田区 3 个区域的草本沼泽、灌丛湿地面积大幅度减少，并且严重破碎化。河口水域湿地分布在黄河入海口处，滩涂、积水洼地多分布在沿海地带。研究期间，一千二管理站的自然湿地面积维持在 200 km^{2}左右；黄河口管理站的自然湿地面积增加了 109.43 km^2；而内陆垦利农业生态区、河口农业生态区的自然湿地面积不断减少，依次减少了 306.53 km^2、228.71 km^2；胜利油田区自然湿地面积在 1999 年后迅速减小，面积从 359.51 km^{2}减小到 204.67 km^2。

3.2 黄河三角洲自然湿地景观连接度动态变化

3.2.1 黄河三角洲自然湿地整体连接度变化

本文选取斑块连接数(NL)、景观组分数(NC)、Harary 指数（H）、景观相合概率（LCP）、Flux 指数（F）、Area-weighted flux 指数（AWF）、整体连接度指数（IIC）和可能连接度指数（PC）共 8 个指数评价黄河三角洲自然湿地景观连接度的总体变化情况（表 3）。结果表明，1991—2013 年期间，斑块间的 NL、H 和 F 指数值呈逐渐下降趋势，NL 指数值从 658 下降到 313，减少 50%以上，H 指数值从 11 018.14 减少到 2 215.898，下降率达 80%，F 指数减少 50%左右，自然湿地生境间连通的可能性快速降低；NC 值逐渐增大，景观中相互孤立组分数从 14 增加到 65；LCP、AWF 指数值整体呈下降趋势；IIC 和 PC 值都极低，IIC 最高指数值不足 0.05，PC 值虽然稍有增加，但依然不足 0.1；研究期间，除 1995—1999 年和 2009—2013 年外，IIC 和 PC 呈逐年下降趋势。总体而言，研究期间黄河三角洲 IIC 和 PC 值均不高，景观整体连接度不断下降。

3.2.2 黄河三角洲区域自然湿地景观连接度动态变化

尽管黄河三角洲自然湿地整体景观连接度不断下降，但 5 个分区的景观连接度变化情况却显著不同（图 2，图 3）。1991—2013 年期间，一千二管理站和黄河口管理站的整体连接度指数 IIC 和可能连接度指数 PC 值呈稳中增加的趋势，尤其是一千二管理站自然湿地的景观连接度较高，IIC 和 PC 值全在 0.5 以上，黄河口管理站 IIC 指数值从 0.159 增加到 0.293，PC 指数值从 0.203 增加到 0.360；2000 年之前，胜利油田区的自然湿地保持了一定的连接度，2000 年之后呈现大幅度下降的趋势，PC 值从 0.465 持续下降到 0.139；垦利农业生态区、河口农业生态区湿地连接度指数值 IIC、PC 都较低，1991 年 IIC 和 PC 值分别维持在 0.1 和 0.2 左右，到 2013 年，景观连接度指数下降到 0.01 以下。

表3 1991—2013年黄河三角洲自然湿地景观连通性指数

Table 3 Landscape connectivity indices of natural wetland in Yellow River Delta from 1991 to 2013

Year	Landscape connectivity indices							
	Number of links	Number of components	Harary	Landscape coincidence probability	Flux	Area-weighted-fiux	Integral index of connectivity	Probability of connectivity
1991	658	14	11 018.140	0.118	1 611.531	428 233.3	0.035	0.076
1995	645	12	8 996.208	0.064	1 536.743	154 137.8	0.018	0.043
1999	499	36	5 377.721	0.113	1 219.247	339 235.1	0.033	0.077
2004	515	38	5 073.774	0.084	1 270.774	243 623.5	0.028	0.054
2009	420	65	3 011.807	0.034	1 044.520	123 003.3	0.011	0.020
2013	313	65	2 215.898	0.048	796.083	113 851.5	0.022	0.041

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

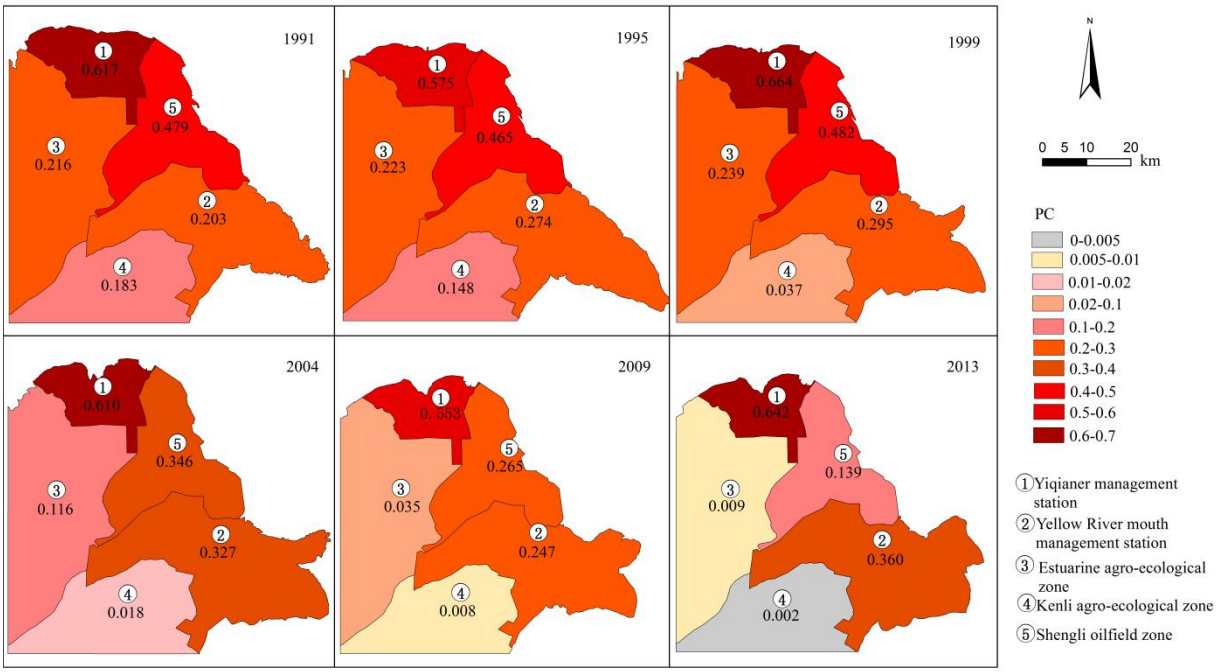

图 2　1991—2013 年黄河三角洲各分区自然湿地可能连通性指数（PC）

Fig. 2　The possible index of connectivity of natural wetlands of each district in Yellow River Delta from 1991 to 2013

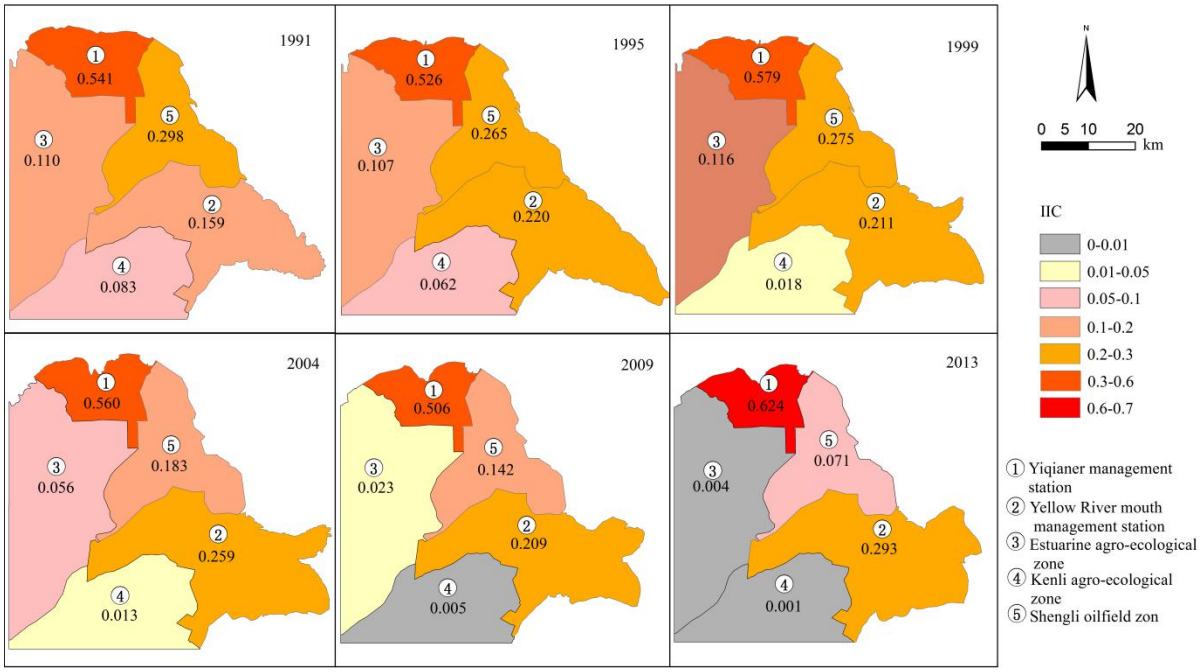

图 3　1991—2013 年各分区自然湿地整体连通性指数（IIC）

Fig. 3　The integral index of connectivity of natural wetlands of each district in Yellow River Delta from 1991 to 2013

3.3　自然湿地景观连接度变化的驱动因素

多项研究表明，黄河三角洲湿地的形成和演变是基于自然条件和人类活动两种因素的影响（洪佳等，2016；卢晓宁等，2016）。自然因素的影响往往在大时间尺度上比较明显，自 20 世纪 90 年代以来，人类活动已成为黄河三角洲自然湿地面积减少和景观破碎化的主要原因（王永丽等，2012）。

3.3.1　耕地

与 1991 年相比，2013 年黄河三角洲耕地总面积增加了 278.02 km^2，尤其是河口生态区和垦利农业生态区的耕地面积增加最多，分别增加了 117.41 km^2、128.93 km^2（图 4）。水是维系湿地空间结构和生态功能的支点，农作物代替湿地植物将影响土壤性质和径流响应，使水土流失增加（栗云召等，

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

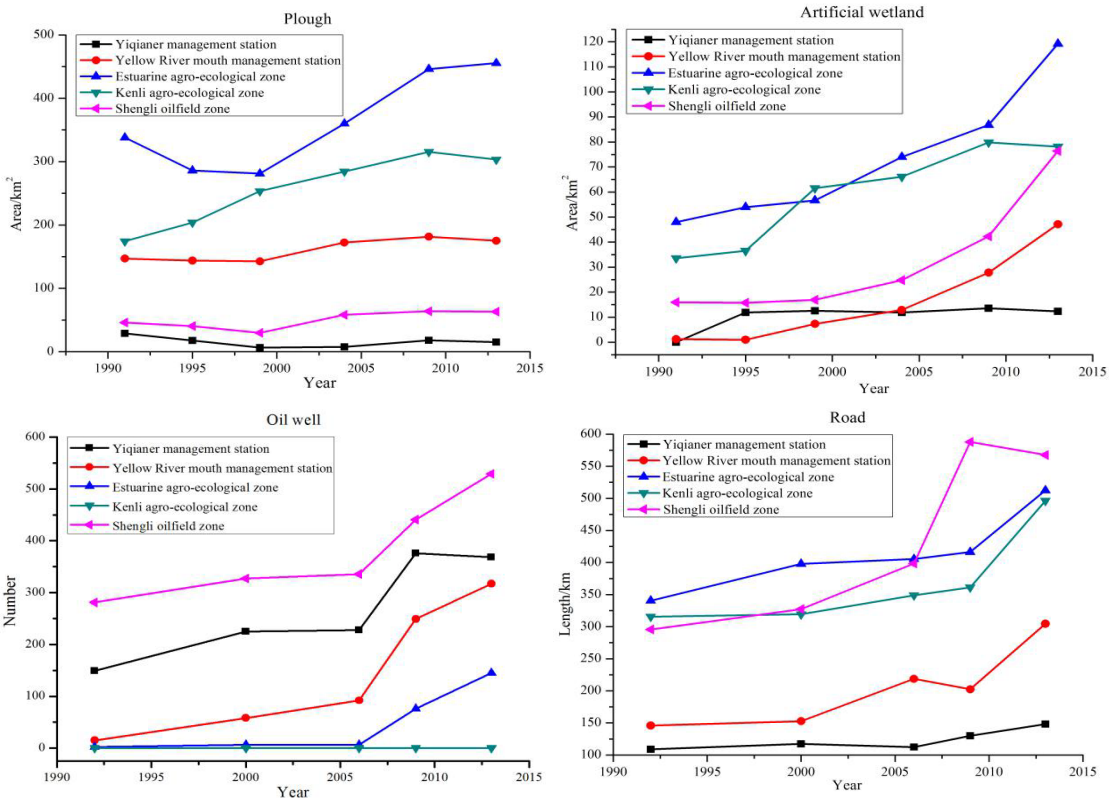

图 4 1991 年以来黄河三角洲主观景观因素变化

Fig. 4 Changes of Subjective Landscape Factors in the Yellow River Delta since 1991

2011)。此外，农业灌溉用水必然加重研究区水资源的紧张状况，影响自然湿地淡水水源补给，从而导致原生湿地面积减少和连接度下降。

3.3.2 人工湿地

随着区域经济的发展，人工湿地面积大幅度增加。1991—2013 年，黄河三角洲人工湿地总面积从 98.71 km^2 增加到 333.3 km^2(图 4)。以河口农业生态区、垦利农业生态区和胜利油田区的人工湿地面积最多，增涨最快。区内的滩涂、积水洼地被大规模开发为盐田、养殖池，导致自然湿地面积减少。水产养殖、盐田等产业排放的废水，直接污染近岸滩涂湿地，导致适宜性生境栖息地减少，从而使湿地生态系统受到严重破坏。

3.3.3 油田

黄河三角洲是中国重要的石油工业生产基地，有胜利油田及区内孤岛、孤东等大型油田。1992—2013 年，油井数量从 447 个增加到 1 359 个。一千二管理站和胜利油田区的油井数量最多，增涨最快，约占研究区全部油井的 66.01%(图 4)。油田开发除了直接占用部分滨海湿地以外，在勘探和开采集输的过程中也会不可避免对湿地环境产生影响，石油泄漏污染湿地水文生态系统，影响水文连通效应，往往不利于生态系统中物质能量的流通。

3.3.4 道路

随着三角洲农业和油田的开发，建设用地不断扩张。以交通道路为例，20 余年来黄河三角洲公路网络越来越密集，主干道路总长度从 1 206.69 km 增加到 2 029.13 km，尤其在胜利油田区、河口农业生态区和垦利农业生态区快速增加，而道路长度占研究区的 77.69%(图 4)。作为一种典型的人工廊道，道路在促进物质能量流通的同时，还起到分割、隔离和占用生境的作用。道路会影响区域水文环境和地貌形态，并改变区域景观的完整性。它阻断生物物种的迁移扩散，降低生境之间的连接，加剧了生物栖息地破碎化(梁国付等，2014)。

4 讨论

景观连接度作为衡量景观要素结构和功能上连通程度的指标，较好体现了生态安全格局的评判标准(蒙吉军等，2016)。本研究从景观连接度角度出发，基于 GIS 平台，对 1991—2013 年黄河三角洲自然湿地的演变进行分析，并探讨影响其变化的主要驱动因素，为研究区湿地景观格局的评价提供了新思路。

1991—2013 年黄河三角洲自然湿地面积大幅度减少，湿地面积的退化情况与前人的研究结果是一致的(卢晓宁等，2016)。利用基于图论的量测

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

指数评价黄河三角洲自然湿地的景观连接度，结果表明，研究区自然湿地景观破碎化加剧，连接度总体较低，并且呈下降趋势。自然湿地的景观连接度与面积的变化在一定程度上是一致的。然而，生境斑块的连接度还与具体的生态过程相关，不合理的生境分布是导致景观连接度下降的主要原因。例如，2009—2013 年，自然湿地总面积虽然持续减少，但一些小的湿地生境作为踏脚石斑块，促进了生物物种的流通，反而维持了一定的景观连接度。

与垦利农业生态区、河口农业生态区和胜利油田区内湿地面积减少和景观连接度下降相比，一千二管理站和黄河口管理站的自然湿地斑块保持了较高的景观连接度，且呈增加趋势，说明黄河三角洲自然保护区的设定以及采取的各种管理措施对区内湿地生态系统结构和功能的维持起到了良好的促进作用。例如，2008 年，保护区借助黄河调水调沙的有利时机实行生态补水，引注黄河河流淡水资源改良退化湿地，使得植被覆盖率提高，湿地生境间的连接得到了增强（崔保山等，2016；王富强等，2016）。因此，建议扩建自然保护区范围，增加湿地保护面积，重视保护区内外自然湿地物质交流和功能连接。其他区域可借鉴保护区相关管理措施以提高自然湿地的整体景观连接度。

景观连接度水平由区域主要生态过程和景观格局共同决定，连接度指数的计算需要设置距离阈值。本文仅将距离阈值设为 500 m，未明确具体的生态过程，存在一定的主观性。黄河三角洲自然湿地演变是自然条件和社会因素共同作用的结果，本研究将人类活动作为自然湿地连接度动态变化的主要驱动因素进行分析，由于相关研究较少，外界因素对景观连接度的作用机制有待进一步研究。

5 结论

1991—2013 年黄河三角洲自然湿地面积减少了 548.75 km^2，湿地的景观连接度整体较低，且呈下降趋势，最大可能连接度指数不足 0.1。内陆垦利农业生态区、河口农业生态区和胜利油田区 3 个区域的自然湿地面积与景观连接度大幅度下降，到 2013 年这 3 个区域景观连接度下降至 0.01 以下。而一千二管理站的自然湿地面积稳定，景观连接度在 0.5 以上。黄河口管理站的自然湿地面积和景观连接度明显增加，可能连接度指数从 0.203 增加到 0.360。

黄河三角洲土地利用方式的变化以及社会经济发展是黄河三角洲自然湿地连接度变化的重要因素。垦利农业生态区、河口农业生态区内，耕地、人工湿地和道路等的快速扩张，极大地影响了自然湿地的景观格局，直接导致自然湿地面积的萎缩，景观连接度下降。作为中国重要的石油工业生产基地，油田开发以及交通道路是胜利油田区自然湿地景观连接度下降的重要因素。近年来，由于自然保护区的设立和一系列管理措施的实施，一千二管理站和黄河口管理站自然湿地景观格局得到了优化，景观连接度较高。

参考文献：

GAO C, ZHU J Y, ZHANG T L. 2004. Landscape management practices for the control of non-point source pollution: methods and principals [J]. Acta Ecologica Sinica, 24(1): 109-116.

MARULLI J, MALLARACH J M. 2005. A GIS methodology for assessing ecological connectivity: application to the Barcelona Metropolitan Area [J]. Landscape and Urban Planning, 71(2): 243-262.

MERRIAM H G. 1984. Connectivity: a fundamental characteristic of landscape pattern [J]. Methodology in landscape ecological research and Planning, 1: 5-15.

SANTIAGO S, JOSEP T. 2009. Conefor Sensinode 2.2: A software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity [J]. Environmental Modelling & Software, (24): 135-139.

SAURA S, PASCUAL H L. 2007. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning:comparison with existing indices and application to a case study [J]. Landscape Urban Planning, 83(2): 91-103.

SORK V L, SMOUSE P E. 2006. Genetic analysis of landscape connectivity in treep opulations [J]. LandscapeEcology, 21(6): 821-836.

TAYLOR P D, FAHRIG L, HENEIN K, et al. 1993. Connectivity is a vital element of landscape structure [J]. Oikos, 68(3): 571-573.

ZHU L J, LIU H Y. 2008. Landscape connectivity of red-crowned crane habitat during its breeding seasonin Naoli River Basin [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 24(2): 12-16.

陈建, 王世岩, 毛战坡. 2011. 1976—2008 年黄河三角洲湿地变化的遥感监测[J]. 地理科学进展, 30(5): 585-592.

陈杰, 梁国付, 丁圣彦. 2012. 基于景观连接度的森林景观恢复研究——以巩义市为例[J]. 生态学报, 32(12): 3773-3781.

陈利顶, 傅伯杰. 1996. 景观连接度的生态学意义及其应用[J]. 生态学杂志,15(4): 37-42.

陈为峰, 周维芝, 史衍玺. 2003. 黄河三角洲湿地面临的问题及其保护[J]. 农业环境科学学报, 22(4): 499-502.

崔保山, 蔡燕子, 谢湉, 等. 2016. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势[J]. 北京师范大学学报, 52(6): 738-746.

富伟, 刘世梁, 崔保山, 等. 2009. 景观生态学中生态连接度研究进展[J]. 生态学报, 29(11): 6174-6182.

郭笃发. 2005. 黄河三角洲滨海湿地土地覆被和景观格局的变化[J]. 生态学杂志, 24(8): 907-912.

洪佳, 卢晓宁, 王玲玲. 2016. 1973—2013 年黄河三角洲湿地景观演变驱动力[J]. 生态学报, 36(4): 924-935.

蒋文伟, 刘彤, 丁丽霞, 等. 2003. 景观生态空间异质性的研究进展[J]. 浙江林学院报, 20(3): 311-314.

李政海, 王海梅, 刘书润, 等. 2006. 黄河三角洲生物多样性分析[J]. 生态环境, 15(3): 577-582.

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[J]. 生态学杂志, 30(7):1535-1541.

梁国付, 许立民, 丁圣彦. 2014. 道路对林地景观连接度的影响——以巩义市为例[J]. 生态学报, 34(16): 4775-4784.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

卢晓宁, 张静怡, 洪佳, 等. 2016. 基于遥感影像的黄河三角洲湿地景观演变及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 32(1): 214-223.
蒙吉军, 王晓东, 尤南山, 等. 2016. 黑河中游生态用地景观连接性动态变化及距离阈值[J]. 应用生态学报, 27(6): 1715-1726.
侍昊, 徐雁南. 2011. 基于景观连通性的城市绿地核心区规划方法研究[J]. 南京林业大学学报, 35(1): 51-56.
孙志高, 牟晓杰, 陈小兵, 等. 2011. 黄河三角洲湿地保护与恢复的现状、问题与建议[J]. 湿地科学, 9(2): 107-115.
汪小钦, 王钦敏, 刘高焕, 等. 2002. 黄河三角洲油田集中区土地利用演化的遥感分析[J]. 地球信息科学, (4): 75-79.
王富强, 王利娇, 彭勃, 等. 2016. 水沙变异对黄河三角洲湿地面积演变的影响[J]. 南水北调与水利科技, 14(2): 1-5.
王学金, 郅兴桥, 万鹏, 等. 2004. 黄河三角洲湿地利用与影响因素分析[J]. 人民黄河, 26(10): 10-11.
王永丽, 于君宝, 董洪芳, 等. 2012. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析[J]. 地理科学, 32(6): 717-723.
吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 等. 2010. 景观连接度的概念、度量及其应用[J]. 生态学报, 30(7): 1903-1910.
吴健生, 刘洪萌, 黄秀兰, 等. 2012. 深圳市生态用地景观连通性动态评价[J]. 应用生态学报, 23(9): 2543-2549.
张晓龙, 李培英, 刘月良, 等. 2007. 黄河三角洲实地研究进展[J]. 海洋科学, 31(7): 81-85.
张绪良, 肖滋民, 徐宗军, 等. 2011. 黄河三角洲滨海湿地生物多样性特征及保护对策[J]. 湿地科学, 9(2): 125-131.
赵欣胜, 崔保山, 杨志峰. 2005. 黄河流域典型湿地生态环境需水量研究[J]. 环境科学学报, 25(5): 567-572.
朱书玉, 王伟华, 王玉珍. 2011. 黄河三角洲自然保护区湿地恢复与生物多样性保护[J]. 北京林业大学学报, 33(2): 1-5.
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[J]. 地理信息科学学报, 11(9): 91-97.

Dynamic Changes and Driving Factors of Landscape Connectivity for Natural Wetland in Yellow River Delta

WU Jingjing[1, 2], LI Yunzhao[3], YU Liangju[1], GAO Meng[1], WU Xiaoqing[1], BI Xiaoli[1*]

1. Yantai Institute of Coastal Zone Research Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China;
3. Faculty of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264000, China

Abstract: Landscape connectivity is an efficient index measuring the continuity of the spatial landscape units, and reflects the functional characteristics of the landscape. The coastal wetland ecosystem in the Yellow River Delta which have high ecosystem service functions have changed greatly due to local development. Therefore, it is necessary to analyze the dynamic changes of the natural wetland landscape in the Yellow River Delta and to explore the causes. In this study, Landsat TM images from 1991 to 2013 were used to evaluate the changes of landscape connectivity using connectivity index based on the graph theory. The dynamic characteristics of wetland landscape connectivity were analyzed at both regional and local scales and the driving factors of natural wetland landscape connectivity in the Yellow River Delta were also discussed. The results showed that the landscape connectivity of natural wetlands in the whole delta from1991 to 2013 was generally low and declining gradually, with the maximum possible connectivity index of less than 0.1, and the area of natural wetlands decreased by 548.75 km^2. The area of natural wetlands in the Kenli agro-ecological zone, Estuary agro-ecological zone and Shengli oilfield zone severely decreased, and the degree of landscape connectivity dropped significantly. By 2013, the landscape connectivity index in these zones dropped below 0.01. However, the landscape connectivity and wetland area of Yiqianer management station and the Yellow River mouth management station had increased. In the meantime, the connectivity indices of both stations were all above 0.5, and the possible connectivity of the Yellow River mouth management station increased from 0.203 to 0.360. It indicated lower landscape connective patterns in inland wetland than those in the Yellow River delta nature reserve. Farm land, artificial wetlands and construction land werethe main driving factors that affected the changes of wetland landscape connectivity. Therefore, we strongly recommended to expand the area of nature reserves in the future, and increase the number of footsteps to increase habitat connection to improve landscape connectivity in the Yellow River Delta.

Key words: landscape connectivity; natural wetland; driving factor; Yellow River Delta

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net