

1976—2015年黄河三角洲人工沟渠 时空演变及驱动机制

宗敏^{1,2},王光镇¹,韩广轩²,栗云召¹,赵敏³

(1.鲁东大学 资源与环境工程学院,山东 烟台 264039;

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.东营市国土资源局,山东 东营 257091)

摘要:人工沟渠作为湿地中高强度人类活动的缩影,强烈影响着湿地的水文过程与生态环境,成为湿地演变的主要驱动力之一。基于1976—2015年黄河三角洲27期遥感影像和1:10万地形图,通过目视解译获得人工沟渠(农业沟渠和道路沟渠)数据,定量分析了人工沟渠的时空演变过程及驱动机制。结果表明:(1)黄河三角洲人工沟渠长度、密度呈明显的线性上升趋势,其长度、密度年均分别增长160 km和53 m/km²。农业沟渠长度、密度变化可分为两个发展阶段:2000年以前符合S型函数增长,2000年以后呈现出线性增长的趋势。道路沟渠的长度、密度变化一直表现为明显的线性上升趋势,其长度、密度年均分别增长141 km和47 m/km²。(2)黄河三角洲人工沟渠长度与农田面积呈显著的线性相关($P < 0.05$),与养殖池面积具有良好的对数关系($P < 0.0001$),与道路长度呈极显著的线性关系($P < 0.0001$)。(3)多元回归分析结果表明,农田面积和道路长度对人工沟渠长度的协同影响达到99.9% ($P < 0.0001$)。

关键词:农业沟渠;道路沟渠;时空演变;驱动机制;黄河三角洲

中图分类号:S277 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8020(2017)01-0068-08

湿地是位于水生生态系统和陆生生态系统之间的过渡性地带,在净化环境、促淤造陆、调节气候、蓄洪抗旱、保护生物多样性和生态平衡等方面都发挥着重要作用^[1]。随着人类活动的加剧,人为因素在湿地生态演变过程中的干预越来越明显。人工沟渠作为湿地中高强度人类活动的缩影,强烈影响着湿地的水文过程与生态环境,成为湿地演变的主要驱动力之一。人工沟渠主要是指与道路相伴而生的季节性湿地或农田间用于排水(泄洪)或灌溉的水道,其形成过程就是人类满足生产、生活保障等需要而挖掘的过水通道^[2-4]。人工沟渠同时兼备河流和湿地的景观特征,不仅具有汇水、持水和水流通道的作用,还可为水生和湿生动植物提供栖息地,极大地影响着区域的生物多样性^[5-7]。此外,人工沟渠还强烈影响着区域的地下水文过程,如沟渠中的水流通过直接灌溉农田和补给、排泄地下水,可直接或间接地影响周围农田的地下水位^[8]。虽然人工沟渠具有一定的

生态功能,但随着密度的增大,会使原来较大的自然景观斑块被割裂成为许多大小不同的小斑块,从而导致区域景观破碎化程度加剧,最终影响湿地的功能^[9-10]。

黄河三角洲作为我国保存最完整的河口三角洲湿地,以其资源的稀有性、生态的脆弱性而成为研究者长期关注的热点^[11-12]。近年来,人口增加以及农业垦殖、工矿业建设、油田开发等人类活动驱动着湿地类型、面积及分布格局不断发生变化,成为黄河三角洲经济社会发展与湿地生态保护的矛盾焦点之一,而这些人类活动往往伴随着人工沟渠的扩展。黄河三角洲的人工沟渠主要以农业沟渠和道路沟渠为主,其中农业沟渠是以排水和灌溉为主要目的的人工水道,成为农业区常见的景观要素之一。另外,黄河三角洲地势低平,其道路建设通常伴随着道路沟渠的扩张。道路沟渠促进湿地景观间的物质和能量交换,使系统更为开放,起着通道作用;同时,道路建设也阻断了水盐

收稿日期:2016-09-18;修回日期:2016-10-17

基金项目:中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-EW-ST5-127);国家自然科学基金(41301083)

作者简介:宗敏(1991—),女,山东淄博人,硕士研究生,研究方向为湿地景观格局变化与景观生态。E-mail:zongminzm@163.com

通讯作者:韩广轩(1978—),男,山东菏泽人,研究员,博士研究生导师,博士,研究方向为陆地生态系统碳循环与碳收支、植物生态学。E-mail:gxhan@yic.ac.cn

的横向运移,使得在道路两侧出现不同的湿地景观类型.目前有关黄河三角洲湿地演变的研究主要集中在土地利用变化与景观格局方面^[13-14],关于湿地驱动机制的研究多停留于地类之间的相互转化^[15-17].目前研究者已经认识到沟渠对湿地水文格局^[18]、水质净化^[19]以及景观破碎化的影响^[20],但是有关人工沟渠时空演变及驱动机制的定量研究则未见报道.本文通过目视解译方法提取 1976—2015 年黄河三角洲农业沟渠和道路沟渠数据,并量化农田面积、养殖池面积、道路长度与人工沟渠时空演变的关系,可为人类活动影响下黄河三角洲湿地景观演变研究提供新思路,同时为湿地的保护、恢复和管理提供科学依据和决策支持.

1 研究区概况

黄河三角洲(118°33'E~119°18'E,37°26'N~38°09'N)北临渤海湾,东靠莱州湾,西部以垦利县渔洼村(现在的北于村附近)为顶点,北到挑河口,南到宋春荣沟,包括东营市垦利县和河口区的大部分以及利津县的小部分.区内分布有黄河三角洲国家级自然保护区,包括位于北部黄河故道(刁口河)的一千二管理站,位于黄河现行河道北岸的黄河口管理站和南岸的大汶流管理站(图 1).黄河三角洲属暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,雨热同期,年均日照时数 2590~2830 h,年均气温 11.7℃~12.8℃,年无霜期 206 d,≥10℃年积温 4300℃,年均降水量 530~630 mm,70%降水分布在夏季,年均蒸发量 1900~2400 mm^[21].本区土壤因成土母质和成陆时间的不同而有所分异,以潮土和盐土为主.总体地势平缓,多为浅平洼地与微斜平地^[22].植物的分布主要受土壤盐碱化程度影响,植物种群组成简单,芦苇、柽柳及盐地碱蓬分布较广^[23].自 60 年代胜利油田大会战以来,人类活动对黄河三角洲地区自然生态环境的影响日趋严重,但分布不平衡^[24].东南部和西部地区人类活动比较强烈,而在东北部和近海岸的地方人类活动相对较弱.随着农业、养殖业以及城市化进程的加快,使得该地区景观破碎化更加严重,人工沟渠成为了黄河三角洲地区的发展的一个缩影.

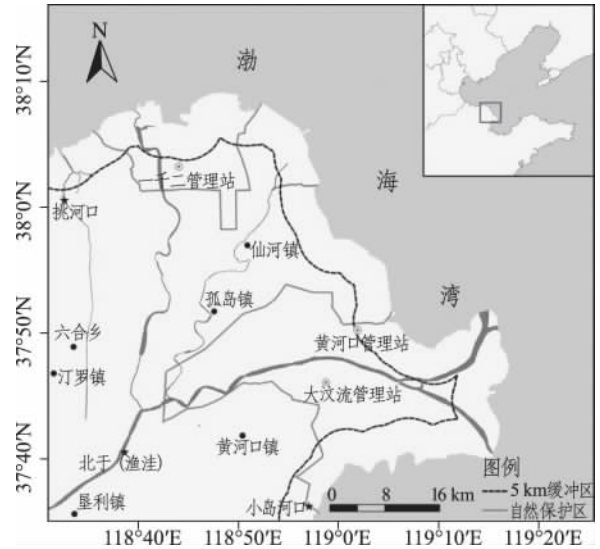


图 1 研究区位置

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

本研究选取 1976—2015 年间 27 期遥感影像数据,其中 1976—1988 年采用 Landsat MSS 数据,1989—2010 年采用 Landsat TM 数据,2013—2015 年采用 Landsat OLI 数据,统一采用 WGS_1984_UTM_zone_50N 投影坐标系统.首先对影像进行前期处理(辐射校正、正射校正、云量剔除等),然后利用 1972 年出版的 1:10 万地形图对影像进行校正.在 ENVI 中,采用假彩色合成将图层数据打包,其中 MSS 数据采用 4,3,2 波段合成,TM 数据采用 5,4,3 波段合成,OLI 数据采用 5,6,4 波段合成,这几个波段组合可以较好地区分出陆地和水体的信息,然后按照研究区范围对数据进行裁剪.

1976—1988 年的遥感影像数据由于分辨率较低,统一采用目视解译方法提取黄河三角洲陆地和海洋的分界线及陆地上水体的分布,对 1989 年以后的 Landsat 数据采用修正水体指数法(MNDWI)进行提取^[25]:

$$D_{MNDWI} = (B_1 - B_2) / (B_1 + B_2),$$

式中: B_1 为绿光波段,是 TM 的 2 波段,OLI 数据的 3 波段; B_2 为中红外波段,是 TM 的 5 波段,OLI 数据的 6 波段.在 ArcGIS 中根据提取的陆地水体信息,通过目视解译提取人工沟渠、养殖池、农田和道路数据.

2.2 研究方法

1) 人工沟渠的分类.近年来,随着黄河三角洲的开发和利用(修建黄河大堤、垦殖、城建、道路修建、海堤、石油开采等),人工沟渠格局发生重大变化.本文借鉴廊道的分类方式,并结合研究区的特点,将人工沟渠分为农业沟渠和道路沟渠.

农业沟渠的主要功能是水流输送,将黄河水引进农田内进行灌溉.此外,其还可作为人工养殖池的引水、排水通道.在遥感图像上进行目视解译时,农业沟渠与自然河流较为相似,但弯曲较自然河流少,大多与农田斑块和养殖池相连接.

道路沟渠是在道路两旁形成的较道路低洼的低地,是黄河三角洲分布最为广泛的人工沟渠类型.在遥感图像上进行目视解译时,道路沟渠弯曲较少、长度较长且在影像上为白色,大多与城镇、养殖池和农田斑块相连接.

2) 人工沟渠的空间分布格局.选取人工沟渠的长度、密度作为人工沟渠结构的指标^[26],沟渠密度采用单位面积上沟渠的总长度来表示.由于影像分辨率较低,无法辨别沟渠的宽度,本研究在计算沟渠的密度时,只考虑沟渠的长度,而不考虑沟渠的宽度^[10].采用缓冲区分析的方法,定量阐述人工沟渠在内陆和滨海(海岸线向陆地内 5 km)范围内的长度、密度的变化情况.

3) 数据统计分析.运用线性回归方法分析人工沟渠和道路沟渠的长度及密度变化趋势,养殖池面积及道路长度的变化趋势,农田面积和道路长度变化对人工沟渠演变的影响.运用非线性回归方法分析农业沟渠的长度及密度变化趋势,农田面积的变化趋势,养殖池面积变化对人工沟渠演变的影响.运用多元线性回归方法分析人工沟渠长度与农田面积、养殖池面积和道路沟渠长度的关系.所有数据分析均基于 SPSS 19.0 完成,相关图形均基于 SigmaPlot 10.0 完成.

3 结果与分析

3.1 人工沟渠的空间演变格局

1976—2015 年,黄河三角洲农业沟渠密度总体呈增大的趋势(图 2),其中 1976—1991 年密度增加明显,之后变化较小.1976 年农业沟渠的密度为 14.9 m/km^2 ,1991 年达到 208.7 m/km^2 ,到 2015 年其密度为 282.7 m/km^2 ,是 1976 年农业沟渠密度的 19 倍.滨海地区农业沟渠密度呈波动变化,1991 年其密度达到最大值 19.9 m/km^2 ,2009 年为最小值 6.7 m/km^2 .内陆地区农业沟渠密度呈明显的上升趋势,其密度从 1976 年的 16.3 m/km^2 增加到 2015 年的 375.2 m/km^2 ,增加了 22 倍.

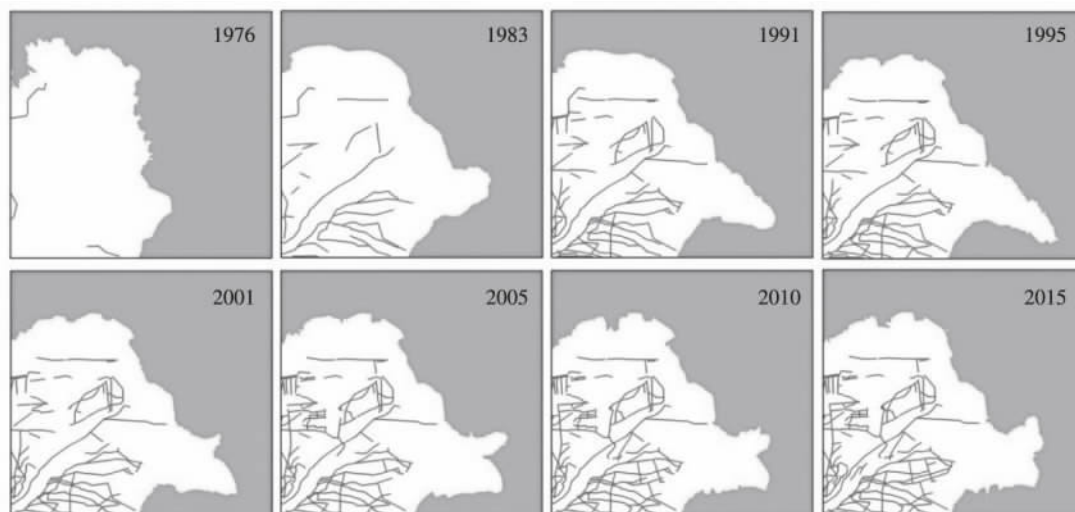


图 2 1976—2015 年黄河三角洲农业沟渠空间分布

1976—2015 年道路沟渠密度呈现很明显的上升趋势(图 3).1976 年道路沟渠的密度为 140.7 m/km^2 ,到 2015 年激增到 1898.8 m/km^2 ,是 1976 年的 13.5 倍.滨海地区道路沟渠密度呈明显的上升趋势,其密度从 1976 年的 37.1 m/km^2 增加到 2015 年

的 1332.2 m/km^2 ,增加了 34.9 倍.内陆地区道路沟渠密度也呈现出明显的上升趋势,其密度从 1976 年的 174.4 m/km^2 增加到 2015 年的 2090.2 m/km^2 ,增加 11 倍.内陆地区道路沟渠的长度、密度较滨海地区大,但滨海地区道路沟渠的长度、密度变化更为明显.

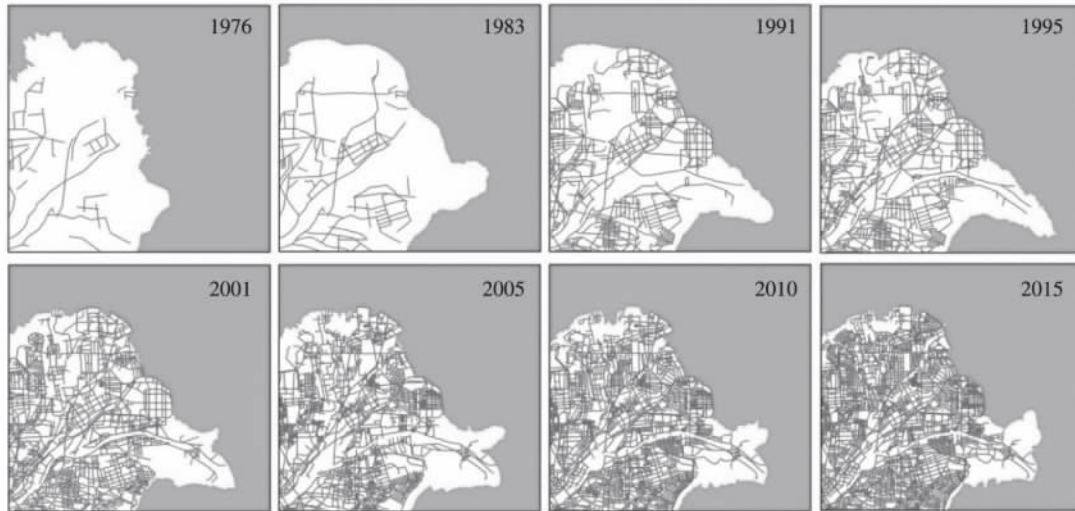


图 3 1976—2015 年黄河三角洲道路沟渠空间分布

3.2 人工沟渠的时间演变特征

1976—2015 年,黄河三角洲人工沟渠长度、密度呈明显的线性上升趋势,其中长度和密度年均分别增长 160 km 和 53 m/km²(图 4)。40 年间,农业沟渠的长度、密度总体上呈上升趋势,以 2000 年为分界点可分为 2 个发展阶段(图 4),2000 年以前农业沟渠的长度、密度符合 S 型函数增长,其中 1976—1991 年农业沟渠长度、密度增长较快,1991—2000 年以后增长趋于平缓。2000 年后,

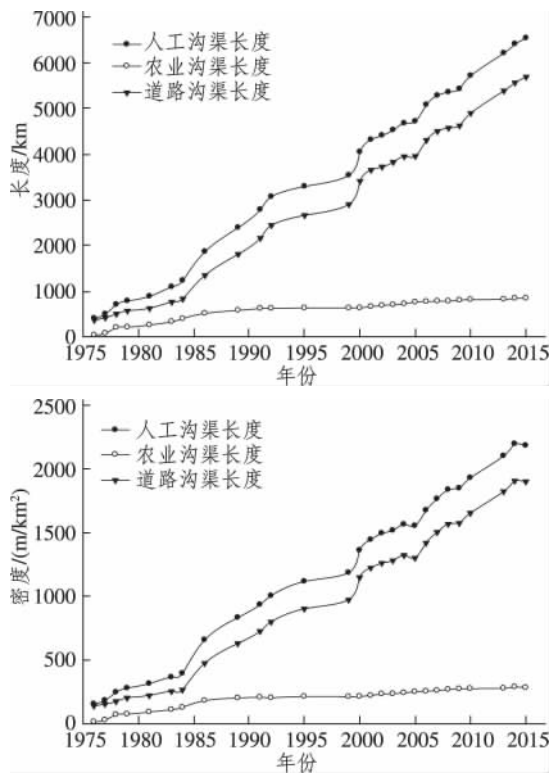


图 4 1976—2015 年黄河三角洲人工沟渠、农业沟渠、道路沟渠长度和密度的时间变化特征

农业沟渠的长度和密度呈现出线性增长的趋势,其长度和密度年均分别增长 14 km 和 5 m/km²。1976—2015 年间,道路沟渠的长度、密度呈显著地线性上升趋势,其中长度和密度年均分别增长 141 km 和 47 m/km²(图 4),说明道路沟渠的变化在人工沟渠的演变中占主导地位。

3.3 人工沟渠演变的驱动机制

1) 农田开垦对人工沟渠的影响。1976—2015 年,黄河三角洲农田面积总体呈增加的趋势,大体可以划分为 2 个发展阶段。1976—2000 年,农田面积呈 S 型函数增长,其中 1976—1991 年增长迅速,面积从 258 km² 增加到 734 km²,年均增加 29.8 km²;1991—2000 年,农田面积变化较小。2000 年以后,农田面积呈现出线性增加的趋势,年均增加 20.3 km²(见表 1)。黄河三角洲人工沟渠长度与农田面积呈显著的线性关系,拟合方程为 $y=8x-2087(R^2=0.958, P<0.05)$,见图 5。农田面积变化趋势与农业沟渠长度、密度变化趋势相一致,说明农田面积对人工沟渠的影响主要通过农业沟渠体现出来。

表 1 1976—2015 年黄河三角洲农田、养殖池面积及道路长度

年份	农田面积/km ²	养殖池面积/km ²	道路长度/km
1976	258	9	369
1983	472	38	763
1991	734	125	2162
1995	692	140	2660
2001	714	255	3653
2005	883	291	3954
2010	1025	341	4896
2015	998	690	5690

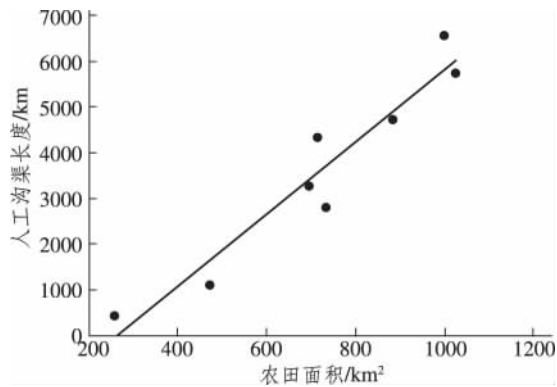


图 5 1976—2015 年黄河三角洲农田面积与人工沟渠长度的关系

2) 养殖业对人工沟渠的影响. 1976—2010 年,随着养殖池面积的不断增大,人工沟渠的长度在不断上升,该时间段内,养殖池面积年均增加 9.5 km^2 ,人工沟渠长度年均增加 152 km .2010—2015 年,养殖池面积年均增加 70 km^2 ,人工沟渠长度年均增加 158.7 km (表 1).人工沟渠长度同养殖池面积具有良好的对数关系, $y = 6940 \times (1 - e^{-0.0043x})$ ($R^2 = 0.995, P < 0.0001$),见图 6.2010 年以后,养殖池面积虽然大幅度增加,但是对人工沟渠增速影响不大,说明养殖池面积的增加对人工沟渠演变的影响在逐渐减小.

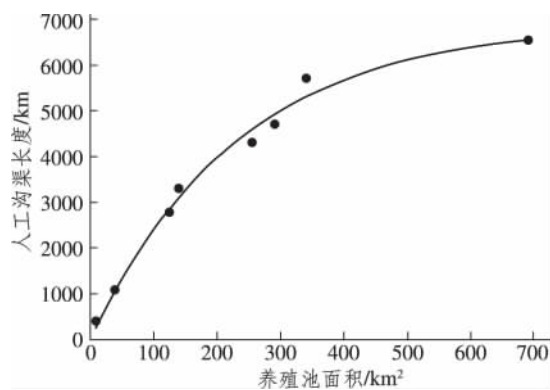


图 6 1976—2015 年黄河三角洲养殖池面积与人工沟渠长度的关系

3) 道路对人工沟渠的影响. 1976—2015 年道路长度从 369 km 增加到 5689 km ,年均增加 133 km ,人工沟渠长度平均每年增加 160 km (表 1).人工沟渠长度与道路长度呈极显著的线性关系, $y = x + 188$ ($R^2 = 0.999, P < 0.0001$),见图 7.黄河三角洲地区道路与道路沟渠相伴而生,道路长度的增加是引起该地区人工沟渠演变的主导因素.

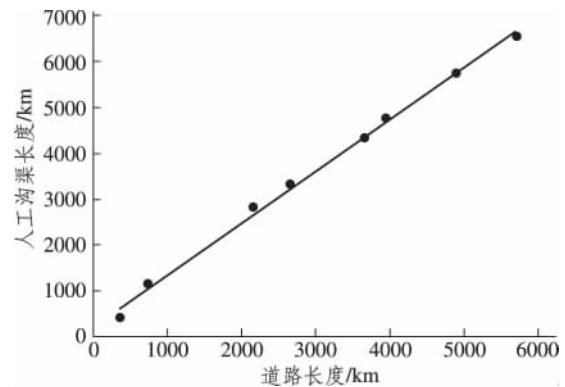


图 7 1976—2015 年黄河三角洲道路长度变化与人工沟渠长度的关系

4) 农田开垦、养殖业及道路长度对人工沟渠的影响.以研究区人工沟渠长度为因变量 (y),选取农田面积 (x_1),养殖池面积 (x_2),道路长度 (x_3) 作为自变量,建立多元回归分析模型(表 2).分析表明,农田面积和道路长度对人工沟渠长度的协同影响达到 99.9% ($P < 0.0001$),相对于农田面积及道路长度单因子的影响,协同作用的影响更为显著.

表 2 1976—2015 年黄河三角洲人工沟渠长度与农田面积和道路长度的多元回归分析

参数	系数	标准差	P	偏相关系数 R^2
常数	-166.911	115.873	0.209	
农田面积 (x_1)	1.079	0.318	<0.05	0.835
道路长度 (x_3)	0.992	0.044	0	0.995

4 结论与讨论

4.1 黄河三角洲人工沟渠的时空演变特征

1976—2015 年,黄河三角洲人工沟渠(农业沟渠、道路沟渠)的密度总体呈上升趋势.黄河三角洲作为我国重要的粮食和石油生产基地,于 20 世纪 60 年代开始石油的勘探开发,90 年代被确立为能源、化工和农牧渔业三大基地及在建的全国五大粮仓之一,近年来又将“发展黄河三角洲高效生态经济”列入国家“十五”和“十一五”规划.这一系列政策的实施,促进了黄河三角洲地区道路的修建和水利设施的建设,从而推动该地区人工沟渠长度和密度的增加.

内陆地区人工沟渠密度较滨海地区大且呈明显的上升趋势,但滨海地区道路沟渠的密度变化更为明显.可能是受到土壤盐渍化、油田开发及养殖业的影响,使得滨海地区与内陆地区人工沟渠

的变化速率不一致.土壤盐渍化是制约黄河三角洲农业发展最主要的因素,研究发现^[27-28],黄河三角洲滨海地区经常遭受海潮侵袭,使得该地区土壤盐分表现出离海岸线越近土壤盐分越高的分布规律.同时,黄河附近地区和泥沙堆积形成的河漫滩土壤含盐量较低,而滩涂地和平地土壤盐分较高^[29].由于受到土壤盐分分布规律的影响,使得农田多分布于距黄河较近的中西部和西南部地区^[30].再加上黄河三角洲内陆地区人口的增长和社会经济的发展促进了人工沟渠的修建,使得内陆地区人工沟渠的长度、密度不断增大.近年来,随着黄河三角洲滨海地区石油资源、人工养殖池和盐池的大力开发,尤其是滨海地区人工防潮大堤的修建、孤东特大型油田的开发以及东营港的建设,使得该地区道路沟渠的长度、密度激增,其变化速率较内陆地区更明显.

40年间,农业沟渠的长度、密度总体呈上升趋势,以2000年为分界点可分为两个发展阶段,2000年以前农业沟渠的长度和密度符合S型函数增长;2000年以后,农业沟渠的长度和密度呈现出线性增长的趋势.农业沟渠作为农业景观中的重要组分,其长度和密度的变化必然与耕地面积的变化有着不可割舍的联系.黄河三角洲在60~80年代,提倡充分利用土地资源,扩大复种面积,耕地面积迅速增加,大力兴修水利工程,使得农业沟渠长度迅速增加,这与本文中1976—1991年农业沟渠长度呈现快速增加的趋势相一致.黄河三角洲以灌溉农业为主,1991—2000年,黄河三角洲持续累计断流天数达到902d^[31],限制了农业的进一步发展,该时期内农业沟渠长度、密度变化不显著.2000年以后,黄河的调水调沙工程及将“发展黄河三角洲高效生态经济”列入国家“十五”和“十一五”规划,促进了黄河三角洲地区农业结构的调整和沿海养殖业的发展,使该地区农田面积稳中增长,水田和养殖池面积增加明显.研究表明,随着农田和养殖池的进一步扩大,其在空间上的分布更加紧凑,景观聚集度更高^[32],农业沟渠作为养殖池的引水、排水通道,使得该地区农业沟渠呈现出缓慢的线性增长.

1976—2015年间,道路沟渠的长度和密度呈明显的线性上升趋势.由于黄河三角洲地势低平,道路的修建往往伴随着道路沟渠的产生.黄河三角洲是胜利油田的核心采油区,东营市建市初期,道路修建大多是为石油的勘探和开发.90年代后

期,随着经济社会的发展,人们日常出行和农田耕作,成为道路的扩张的主要驱动力,该时期乡间道路发展迅速.近年来,随着滨海和浅海采油区的发展,油井与县乡公路连接线的通车里程增加较快,同时,滨海地区人工防潮大堤的修建,东营港的建设,盐田、养殖池、水库等面积的迅速增加,促进了道路沟渠的快速增长.道路沟渠和农业沟渠作为人工沟渠的组成部分,其长度和密度的增长,必将推动黄河三角洲地区人工沟渠长度和密度的快速增加.

4.2 黄河三角洲人工沟渠演变的驱动机制

多元回归分析表明,黄河三角洲人工沟渠的演化主要受道路长度和农田面积的影响,道路与人工沟渠长度呈极显著的线性相关.道路作为物质和能量流通的通道,其建设和发展比其他人为活动更为优先,已成为当今社会经济发展的中枢,其分布范围之广和发展速度之快,是其他人类建设工程所不能比拟的^[33].黄河三角洲地势低平,道路的修建需要挖沟堆土,往往伴随着道路沟渠的扩张.道路沟渠是较道路低的洼地,雨季时能蓄池一部分降水,阻滞一部分地表径流,可作为该流域的输水通道,有效促进该流域的物质能量交换,影响该区域生态系统的生产能力^[18].研究发现^[34],道路沟渠能够显著降低土壤含水量和盐度,使得由盐生植物占优势的群落向非盐生植物占优势的群落转换.另外,道路通常高出地面,形成堤坝,阻断了道路两侧的水盐流通和交换,使得道路两侧的植被类型存在明显差异.道路贯穿于各类景观,同时作为深入景观的途径,有利于土地的开发和利用,促进区域政治、经济、文化的发展,方便人民生活.黄河三角洲油田的开发、城镇化及农业机械化的发展,促进了该地区道路的蓬勃发展,使得道路沟渠的也随之增加.道路沟渠以绝对优势作为人工沟渠的组成部分,其长度和密度的变化必然会导致人工沟渠的演变,可见道路的建设是人工沟渠演变的主要推动力.

黄河三角洲农田面积与人工沟渠长度呈显著的线性相关关系,说明人工沟渠的演化受到农田面积的影响,人工沟渠随着农田面积的增加而增加.黄河三角洲特定的土壤成土过程以及不合理的人类活动,再加上该地区地势低平排水不畅,地下水位浅,在强烈的蒸发积盐作用下,容易形成盐渍土.因此,黄河三角洲主要靠引黄河水发展灌溉

农业,黄河水通过引水渠引入区内灌溉农田,农田灌溉退水经过排水渠汇入邻近湿地或近海水域。随着水利基础设施和机械化装备越来越完善,且对盐渍土的治理卓有成效,种稻改盐及“上农下渔”的农业生产模式^[35],使得原来不可利用的土地变成了可利用的耕地。随着农田面积的不断增长,农业沟渠的数量也在不断增多。同时,黄河三角洲由于其充足的后备土地资源,已成为国家重点农业开发区,东营市被列为黄淮海平原农业开发区,黄河三角洲被列为全国八大农业开发区和五大商品粮基地之一。“渤海粮仓”等农业科技项目的实施,促进了黄河三角洲农业的发展,也使得农业沟渠长度、密度增加,可见农田面积变化对人工沟渠的影响主要通过农业沟渠的演化体现出来。

参考文献:

- [1] 韩大勇,杨永兴,杨杨,等.湿地退化研究进展[J].生态学报,2012,32(4):1293-1307.
- [2] SHARPLEY A N, KROGSTAD T, KLEINMAN P J A, et al. Managing natural processes in drainage ditches for nonpoint source phosphorus control[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2007, 62(4): 197-206.
- [3] NEEDELMAN B A, KLEINMAN P J A, STROCK J S, et al. Improved management of agricultural drainage ditches for water quality protection: an overview[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2007, 62(4): 171-178.
- [4] 周俊,邓伟,刘伟龙.沟渠湿地的水文和生态环境效应研究进展[J].地球科学进展,2008,23(10):1079-1083.
- [5] ARMITAGE P D, SZOSZKIEWICZ K, BLACKBURN J H, et al. Ditch communities: a major contributor to floodplain biodiversity[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2003, 13(2): 165-185.
- [6] KATANO O, HOSOYA K, IGUCHI K, et al. Species diversity and abundance of freshwater fishes in irrigation ditches around rice fields[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2003, 66(2): 107-121.
- [7] MAZEROLLE M J. Drainage ditches facilitate frog movements in a hostile landscape[J]. *Landscape Ecology*, 2004, 20(5): 579-590.
- [8] ARMSTRONG A. DITCH: a model to simulate field conditions in response to ditch levels managed for environmental aims[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2000, 77(3): 179-192.
- [9] 刘红玉,张世奎,吕宪国.20世纪80年代以来挠力河流域湿地景观变化过程研究[J].自然资源学报,2002,17(6):698-705.
- [10] 卢涛,马克明,傅伯杰,等.三江平原沟渠网络结构对区域景观格局的影响[J].生态学报,2008,28(6):2746-2752.
- [11] 张鲁滨,崔青春,王富喜,等.基于NDVI的黄河三角洲植被覆盖度动态变化研究[J].鲁东大学学报(自然科学版),2013,29(3):250-254.
- [12] 李华兵,杜国云,张贵军.黄河三角洲芦苇群落土壤呼吸日动态研究[J].鲁东大学学报(自然科学版),2012,28(1):67-71.
- [13] 陈建,王世岩,毛战坡.1976—2008年黄河三角洲湿地变化的遥感监测[J].地理科学进展,2011,30(5):585-592.
- [14] 李东颖,杨文波,王琳,等.基于RS数据的黄河三角洲湿地信息提取及湿地动态变化研究[J].海洋湖沼通报,2012,21(1):100-109.
- [15] 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[J].地球信息科学学报,2009,11(1):91-97.
- [16] 王永丽,于君宝,董洪芳,等.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,2012,32(6):717-724.
- [17] 张成扬,赵智杰.近10年黄河三角洲土地利用/覆盖时空变化特征与驱动因素定量分析[J].北京大学学报(自然科学版),2015,51(1):151-158.
- [18] 郝敏,吕宪国,姜明.人工沟渠对流域水文格局的影响研究[J].湿地科学,2005,3(4):310-314.
- [19] 姜翠玲,崔广柏,范晓秋,等.沟渠湿地对农业非点源污染物的净化能力研究[J].环境科学,2004,5(2):125-128.
- [20] 郭雷,马克明,张易.三江平原建三江地区30年湿地景观退化评价[J].生态学报,2009,29(6):3126-3135.
- [21] 韩广轩,栗云召,于君宝,等.黄河改道以来黄河三角洲演变过程及其驱动机制[J].应用生态学报,2011,22(2):467-472.
- [22] 王薇,陈为峰,王燃黎,等.黄河三角洲新生湿地景观格局特征及其动态变化——以垦利县为例[J].水土保持研究,2010,17(1):82-87.
- [23] HAN Guangxuan, CHU Xiaojing, XING Qinghui, et al. Effects of episodic flooding on the net ecosystem CO₂ exchange of a supratidal wetland in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, 120(8): 1506-1520.
- [24] 陈利顶,傅伯杰.黄河三角洲地区人类活动对景观

- 结构的影响分析——以山东省东营市为例[J].生态学报,1996,16(4):337—344.
- [25] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):589—595.
- [26] 蔡婵静,周志翔,陈芳,等.武汉市绿色廊道景观格局[J].生态学报,2006,26(9):2996—3004.
- [27] 姚荣江,杨劲松,姜龙.黄河三角洲土壤盐分空间变异性与合理采样数研究[J].水土保持学报,2006,20(6):89—94.
- [28] 姚荣江,杨劲松,刘广明,等.黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究[J].农业工程学报,2006,22(6):61—66.
- [29] 王红,宫鹏,刘高焕.黄河三角洲多尺度土壤盐分的空间分异[J].地理研究,2006,25(4):649—658.
- [30] 洪佳,卢晓宁,王玲玲.1973—2013年黄河三角洲湿地景观演变驱动力[J].生态学报,2016,36(4):924—935.
- [31] 田家怡,王民,窦洪云,等.黄河断流对三角洲生态环境的影响与缓解对策的研究[J].生态学杂志,1997,16(3):39—44.
- [32] 刘艳芬,张杰,马毅,等.1995—1999年黄河三角洲东部自然保护区湿地景观格局变化[J].应用生态学报,2010,21(11):2904—2911.
- [33] 王娟,崔保山,刘世梁,等.各等级道路网对纵向岭谷区景观结构健康的影响[J].环境科学学报,2008,28(2):261—268.
- [34] 傅新,刘高焕,黄翀,等.人工堤坝影响下的黄河三角洲海岸带生态特征分析[J].地球信息科学学报,2011,13(6):797—803.
- [35] 郭洪海.黄河三角洲区域农业的特点与发展方向[J].中国农业资源与区划,2004,25(1):53—57.

Spatial and Temporal Evolution and Driving Mechanism of Man-made Ditches in the Yellow River Delta from 1976 to 2015

ZONG Min^{1,2}, WANG Guangzhen¹, HAN Guangxuan², LI Yunzhao¹, ZHAO Min³

(1.School of Resources and Environmental Engineering,Ludong University,Yantai 264039,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.Dongying Land and Resources Bureau,Dongying 257091,China)

Abstract: As an epitome of human activities with high intensity, man-made ditches strongly influence the hydrological process and ecological environment of the wetland, becoming one of the main driving forces of its evolution. Based on the 27 satellite images and the topographic map with the ratio of 1:100000 of the Yellow River Delta from 1976 to 2015, the data of the man-made ditches (agricultural and roadside ditches) were generated by use of the method of visual interpretation and the spatial and temporal evolution process and the driving mechanism were analyzed quantitatively. The results were as follows: (1) From 1976 to 2015, there was a significant linear increase in the length and density of man-made ditches, with the average annual growth rate of 160 km and 53 m/km² respectively. The evolution in the length and density of agricultural ditches can be divided into two development stages: there was sigmoidal growth before 2000, linear growth after 2000. There was a significant linear increase in the length and density of roadside ditches, with the average annual growth rate of 141 km and 47m/km² respectively. The length of man-made ditches had a significant linear correlation with the area of farmland ($P < 0.05$), a good logarithmic correlation with the area of culture ponds ($P < 0.0001$) and a very significant linear correlation with the road length ($P < 0.0001$). (3) The result of multiple regression analysis showed that the synergistic effect of farmland area and road length on the length of man-made ditches was 99.9% ($P < 0.0001$).

Keywords: agricultural ditches; roadside ditches; spatial and temporal evolution; driving mechanism; the Yellow River Delta

(责任编辑 李秀芳)