

引用格式:袁秀,孙燕燕,王计平,等.基于水鸟栖息地恢复的黄河三角洲水资源综合利用策略[J].资源科学,2020,42(1):104-114.[Yuan X, Sun Y Y, Wang J P, et al. Comprehensive utilization of water resources in the Yellow River Delta for waterfowl habitat restoration[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 104-114.] DOI: 10.18402/resci.2020.01.11

# 基于水鸟栖息地恢复的黄河三角洲水资源综合利用策略

袁秀<sup>1</sup>,孙燕燕<sup>2</sup>,王计平<sup>3</sup>,于莉莉<sup>2</sup>

(1. 中国科学院科技战略咨询研究院,北京 100190;2. 东营市自然资源局,东营 257091;  
3. 中国林业科学研究院 国家林业和草原局盐碱地研究中心,北京 100091)

**摘要:**黄河三角洲是国际重要水鸟停歇地,由于受自然因素和人类活动的影响,该地区水鸟栖息地面积不断减少,生物多样性不断降低。通过引用淡水对栖息地进行恢复,能大大提高水鸟的生境质量,增加水鸟的多样性。然而该地区淡水资源短缺,农业、工业和生活用水量,生态用水量严重不足,如何因地制宜地利用淡水、海水和废水资源,发挥湿地保护生物多样性及净化环境的功能成为水鸟栖息地恢复的关键问题。本文总结了黄河三角洲的水鸟多样性及其生境需求,归纳了水资源的应用现状。在淡水资源短缺情况下,使用淡水、海水和废水3种不同水源补给湿地时,水鸟及其栖息地的特征和面临的挑战。结合水鸟迁徙、黄河来水的时间特征、水鸟栖息地斑块尺度和区域尺度需求特征、不同水源的用水现状、恢复效果及空间分布特征等要素,提出了综合利用海水、淡水和废水对区域和斑块尺度的生境类型进行配置的生态补水恢复模式,建议斑块尺度重点考虑水深及水面植被比例,区域尺度重点考虑水资源分布及自然和人工不同类型湿地的空间优化配置,最后从多样性维持以及不同水资源综合利用方面提出了未来研究展望。本文结果旨在为黄河三角洲湿地恢复和水鸟生物多样性提高提供科学依据。

**关键词:**水鸟;栖息地;淡水;废水;海水;海岸带湿地;生物多样性;黄河三角洲

DOI :10.18402/resci.2020.01.11

## 1 引言

黄河三角洲泛指黄河在入海口多年来淤积、延伸、摆动、改道和沉淀而形成的一个扇形地带,是世界上形成年代最晚的大河三角洲湿地,也是中国乃至世界暖温带最完整、最典型、最年轻的滨海河口湿地生态系统<sup>[1]</sup>。习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会中指出“黄河三角洲要做好保护工作,促进河流生态系统健康,提高生物多样性”;明确了黄河三角洲的发展方向,做好黄河三角洲生态保护工作,对促进黄河流域生态健康具有特殊意义。近年来,因黄河三角洲淡水资源来源单一,导致湿地内部生态用水不足的问题愈发严重,需秉承“重在保护,要在治理”的思想,采取有效治

理措施,以维持黄河三角洲湿地整体的生态功能。

黄河三角洲在全球水鸟保护中起着重要作用。现代黄河三角洲是典型的滨海河口湿地,具有原生性、脆弱性、稀有性以及国际重要性等特征,区域内浅海滩涂、沼泽等湿地类型孕育了丰富的湿地植被和水生生物资源,是鸟类重要的庇护场所,为水鸟的繁衍生息、迁徙越冬提供了优良的栖息环境,是东亚—澳大利西亚、东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙路线上重要的停歇地和繁殖地。凭借其拥有国际重要水鸟的数量,在东亚—澳大利西亚鸟类迁徙路线的各中途停留地点中,黄河三角洲的重要性排名第一<sup>[2]</sup>;有42种水鸟的1%以上个体都会栖息在黄河三角洲地区,该数量在中国列入《拉姆

收稿日期:2019-12-17 修订日期:2019-12-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505802-3)。

作者简介:袁秀,女,重庆渝北区人,助理研究员,博士,研究方向为资源环境可持续发展。E-mail: yuanxiu@casisd.cn

通讯作者:孙燕燕,女,山东东营市人,高级工程师,博士,研究方向为动物生态学。E-mail: sunyanyan8866@163.com

2020年1月

萨尔公约》名录的国际重要湿地中居第一位<sup>[3]</sup>。在该区域分布有国家Ⅰ级重点保护鸟类有12种,包括东方白鹳(*Ciconia boyciana*)、丹顶鹤(*Grus japonensis*)、白鹤(*Grus leucogeranus*)、黑鹳(*Ciconia nigra*)、白头鹤(*Grus monacha*)和遗鸥(*Larus relictus*)等水鸟,分布有国家Ⅱ级重点保护的鸟类51种,包括黑脸琵鹭(*Platalea minor*)、白琵鹭(*Platalea leucorodia*)、灰鹤(*Grus grus*)、小杓鹬(*Numenius minutus*)、小天鹅(*Cygnus columbianus*)、大天鹅(*Cygnus cygnus*)、疣鼻天鹅(*Cygnus olor*)、卷羽鹈鹕(*Pelecanus crispus*)、白枕鹤(*Grus vipio*)和白额雁(*Anser albifrons*)等水鸟。鸟类中还有52种被列入《濒危野生动植物种国际贸易公约》,有152种被列入《中华人民共和国政府与日本政府保护候鸟及其栖息环境的协定》,有51种被列入《中华人民共和国政府和澳大利亚政府保护候鸟及其栖息环境的协定》<sup>[4]</sup>。每年途经黄河三角洲保护区的鸕鹚类水鸟达110余万只,其中超过迁徙路线上同一种鸟类总量1%的就有17种之多<sup>[5]</sup>。但由于人类活动影响,1999—2015年,经过黄河三角洲的鸕鹚类水鸟从187296只减少至74412只<sup>[5]</sup>。通过明确保护水鸟多样性的管理目标,有利于提高人们的资源利用意识和生态系统保护意识<sup>[6]</sup>,有利于黄河三角洲地区的有效管理。

水鸟群落是湿地生态系统的重要组成部分,一般被认为是生态系统中的顶级消费者<sup>[7,8]</sup>,食物网中顶级消费者通过下行效应和营养级联效应影响自养生物的组成与丰富度,并促进生态系统多样性格局转化和多稳态的产生,从而为人类提供文化、调节、支持等生态系统服务。例如水鸟通过捕食有害生物减少鱼类死亡率、通过取食过程中扩散植物种子促进植物在新的或恢复的湿地定居,从而利于生物多样性提高和维持<sup>[9]</sup>;研究证明滨鸟通过下行效应直接影响着潮间带生态系统的稳定性<sup>[10]</sup>。基于鸟类在食物链和生态系统中的重要性及敏感性,常将水鸟作为湿地环境的指示物种,开展面向水鸟群落栖息地保护和恢复的研究,对维持黄河三角洲湿地健康和生物多样性保护具有重要意义。

湿地水文条件是湿地类型和湿地功能最重要的决定因子,不同水文条件赋予湿地生态系统不同的物理和化学属性,湿地水文的改变是决定湿地恢复成功与否的关键因素<sup>[11]</sup>。面向水鸟的湿地恢复措

施主要通过影响生境因子来影响湿地鸟类群落的组成特征<sup>[12]</sup>,通过为不同水鸟提供觅食和歇息的环境,进而驱动湿地生态系统服务功能的改变;常利用补水措施影响水鸟生境的水深,从而直接和间接影响湿地内水鸟的食物类型、食物可获得性、环境盐分浓度、植被类型、地形和水位波动等因子<sup>[13]</sup>。由此得出本文研究的依据:不同水源会产生不同的生境类型,不同生境类型优势水鸟种群不同。

综上所述,本文的具体研究方法和思路为:①通过对文献资料综合分析,确定黄河三角洲地区水鸟现状、特征,及其不同类群对湿地的需求,依次明确恢复目标湿地类型。②通过对遥感影像解译,了解湿地的现状及变化趋势,据此可以明确水鸟栖息地现状及潜在可恢复地区。③通过分析淡水、废水和海水资源现状,包括水量、时空分布特征,明确不同水源可利用现状。④对利用淡水、废水和海水补给湿地后,水鸟在不同湿地类型的分布状态及潜在风险进行综述,为实施面向水鸟栖息地恢复的不同水源利用策略提供基础。⑤最后综合黄河三角洲的水鸟类型及其时间特征、不同水鸟对相应湿地的利用情况、湿地空间分布现状、水资源时空现状及不同水源恢复效果,结合景观生态学理论,提出相应的基于水鸟栖息地保护与恢复多水源利用策略。本文结果将为黄河三角洲地区有效利用水资源恢复湿地,以此保护和提高以水鸟为代表的生物多样性提高科学依据。

## 2 黄河三角洲水鸟多样性及生境需求

### 2.1 河海交汇作用下的黄河三角洲生物多样性

黄河三角洲受到陆-海-河三者交互作用,陆海物质交汇、淡咸水交融、径流和潮流相互作用、动力过程复杂,形成了类型多样的陆上地貌、潮滩地貌和潮下带地貌,包含了河流湿地、河滩湿地、河口湿地、芦苇沼泽、潮间带滩涂湿地、潮上带盐碱化湿地和怪柳灌丛沼泽等湿地类型。黄河三角洲孕育了丰富的生物多样性,包括大型底栖动物195种,维管束植物382种,野生鸟类368种,超过200种候鸟在此栖息、停歇和越冬,鸟类种群数量超过600万只<sup>[6]</sup>。潮上带各类湿地类型中共有动植物1490种,包括维管束植物298种、淡水浮游植物291种、陆生动物901种;潮间带滩涂湿地中有海洋性水生动物193种;潮下带浅海湿地中共有动植物537种,包括浮游

植物116种、浮游动物79种、底栖动物222种、鱼类112种、其他动物8种<sup>[14]</sup>。

## 2.2 黄河三角洲水鸟及群落特征

近年来,黄河三角洲地区观察到的鸟类已达368种,其中水鸟80种<sup>[15]</sup>,从居留型来看,冬候鸟和旅鸟最多<sup>[16]</sup>。秋季鸟类种群数量最多,其次是春季和冬季。春季水鸟北上过境在3—5月,高峰期在4月,秋季水鸟南下过境在9—10月。该地区优势鸟类主要为雁鸭类和鸕鹚类;过境旅鸟以鸕鹚类为主,春、秋季在该区短暂停歇;越冬候鸟于9月下旬至次年3月中旬停留在黄河三角洲,以鹤类、鸥类和雁鸭类等类群为主<sup>[12]</sup>。

鸟类群落多样性与其赖以生存的栖息地密切相关,根据相近的生态习性和水鸟对栖息地的选择<sup>[17]</sup>,常将水鸟分成9个相对稳定的生态类群:鸕鹚类、雁鸭类、秧鸡类、鸕鹚类、鸥类、鹭类、鹤类和鹳类<sup>[15,18]</sup>。

## 2.3 黄河三角洲水鸟及其生境

水鸟组成<sup>[19]</sup>与栖息地关系<sup>[18,20]</sup>的研究表明,在黄河三角洲,水鸟的生境偏好性相对稳定。水鸟体型特征及食物偏好决定了不同栖息地分布不同类群:水鸟的腿长、喙长、颈长等特征对其生境选择有很大影响;食物偏好,如鹤类喜好以种子为食,鸭类大多为杂食性,小型鸕鹚类多取食无脊椎动物,鸕鹚多以鱼类为生,决定着水鸟对栖息地类型的选择。

水鸟群落与湿地生境关系包括斑块尺度和区

域尺度<sup>[12,21]</sup>,区域尺度湿地面积、结构等因素影响水鸟群落组成;斑块尺度栖息地水深<sup>[22]</sup>、盐分<sup>[22]</sup>、植被类型、植被盖度、植被高度等环境特征以及提供相关食物的时间、多度、质量与适口性决定了不同湿地类型上优势水鸟类型<sup>[22]</sup>。

栖息地的水深是影响水鸟组合的最主要变量<sup>[22]</sup>。水鸟对栖息地水深的需求存在差异性,小型滨鹬类在不到5 cm深的水中觅食;大型鸕鹚类可在水深达15 cm的水中觅食;大型涉禽(如苍鹭、白鹭和鸕鹚类)和游禽(如绿头鸭)在水中觅食深度达30 cm;潜水鸟类(如鸕鹚和鸕鹚)需要最低水深大于25 cm,可在几米深的水中活动<sup>[13]</sup>。

从植被类型来看,水鸟在黄三角地区主要栖息于滩涂和芦苇沼泽;游禽主要栖息于芦苇沼泽、滩涂;涉禽主要栖息于滩涂,芦苇柹柳沼泽中游禽和涉禽都有分布;芦苇、碱蓬柹柳沼泽中游禽明显多于涉禽,滩涂类型中涉禽占优势;鸕鹚类主要在滩涂活动<sup>[23]</sup>。

在黄河三角洲,可以大致将水鸟栖息地分为浅海滩涂、河流、芦苇沼泽等7个类型<sup>[5]</sup>,每种生境类型分布的主要水鸟类群有所不同(表1)。

人工湿地和自然湿地内水鸟组成有一定差别。Li等<sup>[15]</sup>对比了黄河三角洲地区水产养殖场、稻田、灌溉渠、水库和盐田等5类人工湿地与自然湿地对冬季水鸟的影响,结果表明:人工湿地具有给水鸟提供临时性栖息地的功能<sup>[2]</sup>。虽然废水灌溉对环

表1 黄河三角洲水鸟及其生境

Table 1 Main bird species and their habitats in the Yellow River Delta

生境类型	类型界定	生境特征	主要水鸟
浅海滩涂	潮汐定期涨落和淹没区域	大量底栖生物,是众多水鸟的食物	鸕鹚类、鹳类、鹭类、鸥类、鸕鹚类、雁鸭类、鹤类
河流	黄河、小清河、广利河、支脉河、小清河等河流	盛产鱼、虾等水生物,水底有大量水草,河滩周围有大量湿生植物,是鸟类理想环境	雁鸭类、鸥类、燕鸥类、鸕鹚类、秧鸡类等,在河滩宽阔处有时分布鸕鹚类、鹳类、鹭类、鹤类
芦苇沼泽	以芦苇为主要植物群落的沼泽湿地	不同水深梯度,水鸟集中区域	鹤类、鹳类、雁鸭类、鸥类、燕鸥类、鸕鹚类、秧鸡类、鸕鹚类、鸕鹚类、鹭类
水库及周围沉沙池	存储淡水的水库,及周围沉沙池	水库面积广阔,鱼、虾丰富;部分沉沙池有水草、芦苇沼泽等生境	天鹅类、鸭类、鸕鹚类、鹭类、鸥类、鸕鹚类、鸕鹚类、秧鸡类
人工池塘	以水产养殖、村庄饮水为目的的池塘	呈斑块状分布,面积或大或小,水边常生长有芦苇、香蒲等湿生植物,水中生长有狐尾藻、眼子菜等沉水水生植物	鸭类、鸕鹚类、秧鸡类、鸕鹚类、鹭类
盐池及海产养殖池	近海开发的盐池及海产养殖池	大面积分布	鸕鹚类、鹳类、鹭类、鸥类、鹤类
农田	冬小麦、大豆等农田,以及水稻田	丰富的食物	鸕鹚类、鹳类、鹭类

注:编引自《黄河三角洲鸟类》<sup>[23]</sup>



2020年1月

境土壤存在潜在风险,但污水生境包括污水处理厂和废水处理湿地也能够为水鸟提供活动空间;同时水鸟对人工湿地的生境利用不仅受到栖息地本身特征的影响,还受到周围景观性质的影响<sup>[24]</sup>。

#### 2.4 黄河三角洲水鸟栖息地面临多重威胁

黄河三角洲地区自然湿地面积缩小,近海滩涂湿地退蚀,鸟类栖息地缩减。通过遥感影像解译和调查发现,2019年东营市地区盐田面积40128 hm<sup>2</sup>、内陆滩涂27705 hm<sup>2</sup>、沿海滩涂94037 hm<sup>2</sup>、水田22633 hm<sup>2</sup>、河流水面15332 hm<sup>2</sup>、水库水面18037 hm<sup>2</sup>、坑塘水面95758 hm<sup>2</sup>、浅海海域156814 hm<sup>2</sup>,合计湿地470444 hm<sup>2</sup>(图1)。2013—2019年东营市湿地变化(图2)显示出:①自然湿地缩减,人工化趋势加大;自然湿地从2013年的339963 hm<sup>2</sup>减少到2019年的137319 hm<sup>2</sup>;人工湿地从2013年的116810 hm<sup>2</sup>增加到2019年的218245 hm<sup>2</sup>。②沼泽湿地退化面积41854 hm<sup>2</sup>,退化为盐碱地和草地;沿海滩涂面积减少37455 hm<sup>2</sup>,转换为内陆滩涂和坑塘水面、盐田、沟渠等,部分退化为盐碱地和草地。

黄河三角洲水鸟栖息地同时面临沿海开垦<sup>[2]</sup>、

滩涂养殖、围海筑堤、海港建设、沿海大通道建设、外来物种入侵、城市化、农业发展、工业、石油开发、污染<sup>[5]</sup>及海水养殖和盐业扩张带来的湿地丧失和质量退化的问题。黄河来水、来沙影响黄河口湿地,老河口湿地面积总体呈减小趋势,新河口呈现出先增后减的趋势<sup>[25]</sup>。在此背景下,水鸟保护的关键问题是如何通过改善湿地来提供合适的栖息地<sup>[13]</sup>。

### 3 黄河三角洲水资源现状与挑战

中国快速的社会经济发展给黄河流域用水带来了更大的压力,农业、工业和人口的增长将进一步增加对水的需求,而环境污染已经成为黄河三角洲的主要环境威胁之一<sup>[1]</sup>。目前,只有黄河水是该地区可开发利用的淡水资源。区内还有十余条河流主要用于排碱、排涝和排污,如沾利河、草桥沟、挑河、神仙沟支脉河、永丰河、张镇河、小岛河等(图3);黄河以北河流属于海河流域,流入渤海;黄河以南河流属于淮河流域,流入莱州湾<sup>[26]</sup>。

#### 3.1 淡水资源短缺

黄河三角洲水资源补给主要有大气降水与过境河流补给2种方式,区域内淡水资源总量多年平

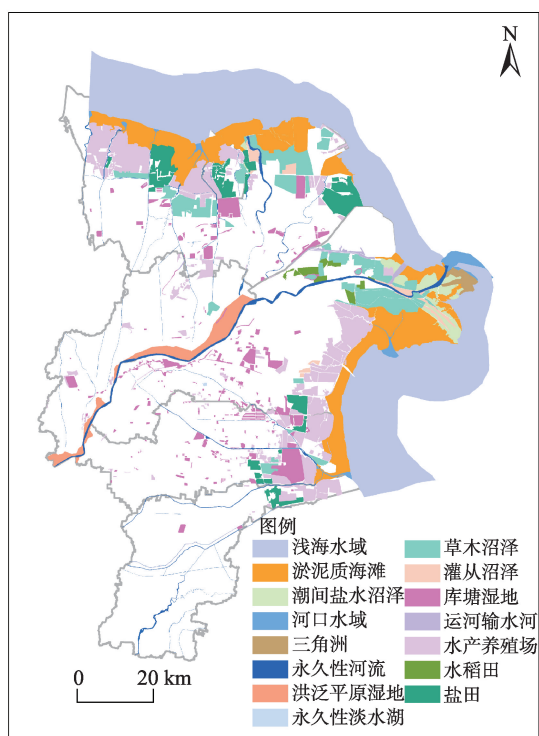


图1 2019年东营市湿地格局

Figure 1 Pattern of wetlands in Dongying City, 2019

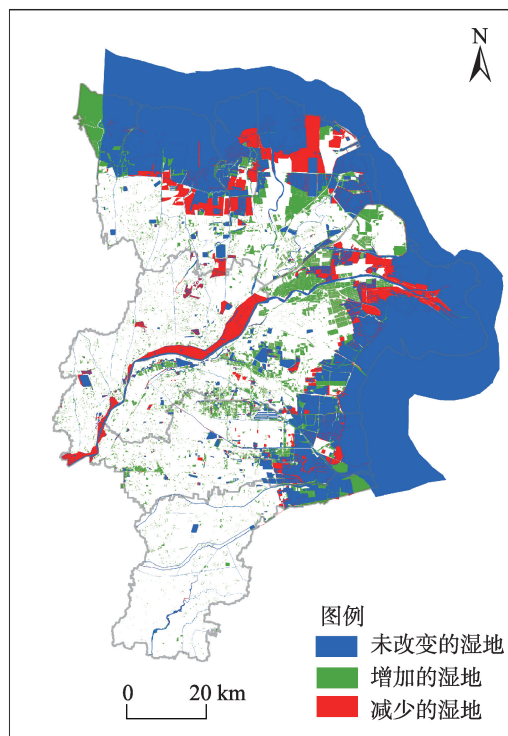


图2 2013—2019年东营市湿地变化

Figure 2 Wetland changes in Dongying City, 2013-2019

均约为29亿m<sup>3</sup>,人均占有296m<sup>3</sup>,仅为全国的1/6,属严重缺水地区。①就降水条件而言,作为黄河三角洲中心城市的东营地区,多年平均降水量为537mm,75%集中在汛期6—9月,其他季节干旱少雨。多年平均蒸发量为1885mm,蒸发量是降水量的3.5倍。多年地表水资源量4.3亿m<sup>3</sup>,地下水资源量2.6亿m<sup>3</sup>,扣除地表水、地下水重复计算量,多年平均水资源总量为6.2亿m<sup>3</sup>,严重缺水<sup>①</sup>。②就过境河流补给而言,东营市过境水资源补给主要有黄河、小清河、支脉河和淄河。小清河、支脉河多年平均入境水量分别为5.21亿和2.46亿m<sup>3</sup>。黄河是唯一可大规模开发利用的淡水水源,多年平均流量为314.7亿m<sup>3</sup>,东营分配的引黄指标为年22.7亿m<sup>3</sup>;黄河来水来沙量年际和年内分配不均匀,年内来水主要集中于8、9月,3—6月期间黄河水流流量较小。黄河入海流量减少,会直接减少黄河三角洲的水资源补给,导致该地区湿地生态系统退化,从而影响栖息在此的水鸟及其他生物的生存和繁殖。

**3.2 生态用水缺乏保障**

2012—2015年东营市年均供水量为9.33亿m<sup>3</sup>,其中主要来源是调水引黄,水量为6.68亿m<sup>3</sup>,当地地表水为1.76亿m<sup>3</sup>;地下水为0.79亿m<sup>3</sup>;其他水源,如污水处理回用和集雨工程供水,供水量为0.10亿



图3 黄河三角洲不同水源类型及其分布

Figure 3 Distribution of water sources in the Yellow River Delta

m<sup>3</sup>(图4)。2012—2015年平均总用水为8.97亿m<sup>3</sup>,其中占比最多的是灌溉用水,为5.72亿m<sup>3</sup>,占总用水量的64%;生态用水量占比最少,为0.45亿m<sup>3</sup>,占总用水量的5%;工业用水1.69亿m<sup>3</sup>;居民生活用水1.11亿m<sup>3</sup>(图5)。东营市年需生态补水量大约为1.5亿m<sup>3</sup>(表2),远大于2012—2015年平均生态用水量0.45亿m<sup>3</sup>,生态用水缺乏保障。

**3.3 水污染日益严重**

东营市黄河干流及耿井水库、南郊水库、辛安水库、孤河水库、孤东水库、胜利水库、永镇水库、城南水库8个饮用水水源地水质能达到Ⅲ类水标准。省控及以上河流中广利河、太平河、小清河、阳河、织女河、支脉河等水质为Ⅴ类水,中度污染;挑河、溢洪河、神仙沟等水质为劣Ⅴ类,重度污染;市控重

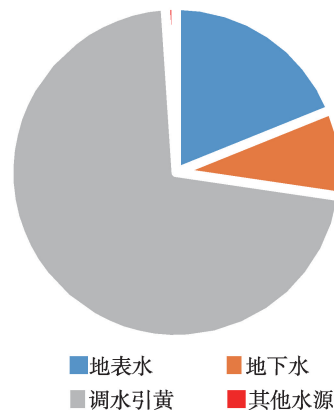


图4 东营供水来源

Figure 4 Water sources in Dongying City

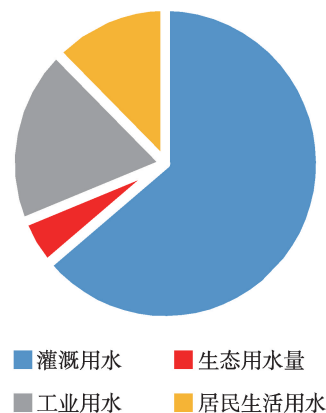


图5 东营用水渠道

Figure 5 Water uses in Dongying City

① 东营市水资源数据来源于东营市政府《东营市全面建设生态城市“五水统筹”工作方案(2018)》。

2020年1月

表2 东营市主要修复地区生态补水量

湿地	生态补水量(万 m <sup>3</sup> /年)
黄河三角洲国家级自然保护区	6000
东营龙栖湖省级湿地公园	100
河口鸣翠湖省级湿地公园	20
山东垦利天宁湖国家湿地公园	1500
垦利米芡湾省级湿地公园	100
垦利兴隆省级湿地公园	100
广饶孙武湖省级湿地公园	3000
广饶县支脉河湿地公园	2000
沾利河湿地公园	49
太平河湿地公园	300
东津湿地公园生态	602
共计	14671

点河流预备河、广蒲河、东营河、永丰河、草桥沟等均均为劣V类水,为重度污染。从整体来看,东营市湿地水质情况较差,除少数湿地水质优良外,均受到不同程度的污染,超标项目主要为重金属、石油类、化学需氧量(COD)、氨氮和总磷等。污染源主要是城镇生活、外来入境污染(小清河主要污染源来自上游济南、淄博、滨州等市企业排放污废水;支脉河污染源主要来自上游博兴县和高清县的企业污废水)、农业面源污染(化肥、农药)、工业污废水(造纸、石油、COD排放量)、油区落地原油等。同时黄河口近海水域水质也在不断下降,造成近海与海岸湿地生境遭到破坏,生物多样性衰减<sup>[26]</sup>。

## 4 综合利用多水源恢复重建水鸟栖息地

随着自然和人类活动影响,黄河三角洲地区水鸟栖息地数量和质量下降,基于该地区淡水资源短缺、水环境污染加剧以及生态用水缺乏保障的现状,可综合利用淡水、废水和海水对水鸟栖息地进行恢复。对淡水、废水和海水补给后,形成的不同生境类型及分布的相应水鸟类型进行总结(图6),当确定需要提升水鸟类型及数量时,即可判断所需要生境类型,根据区域生态系统中水源分布,制定合理的引水方案和措施,实现生境恢复、资源合理利用、环境净化等多方面功能,提升湿地系统的整体生态功能。以下将分别从不同水源利用措施、对水鸟的影响、恢复措施潜在风险等几个方面进行阐述。

### 4.1 利用淡水恢复重建水鸟栖息地

#### 4.1.1 淡水水源特征与恢复措施

黄河三角洲地区淡水水源为黄河与相关水库内存水。近年来,黄河三角洲地区年均引淡水约3000万~4000万 m<sup>3</sup>。黄河为多泥沙河流,径流量随季节性变化大。为保证黄河的功能性流量和堤防防洪安全,防止渠道淤积,一般在利津水文站流量小于100 m/s或超过5000 m/s时不引水;来水含沙量超过30 kg/m<sup>3</sup>时不引水;一般流冰期不引水<sup>[27]</sup>。

引用淡水对水鸟栖息地恢复的措施包括引灌黄河水、沿海修筑围堤和增加湿地淡水存量等措

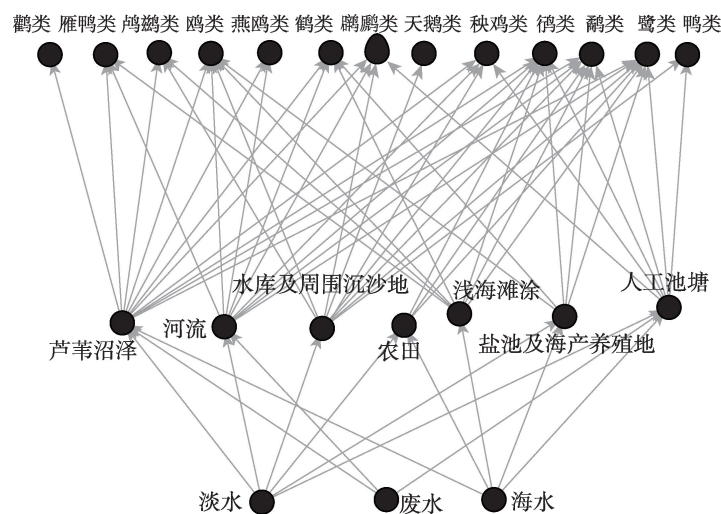


图6 不同水源恢复下的水鸟栖息地

Figure 6 Bird habitats under different water source restoration scenarios



施,通过引入淡水,水资源得到充分供给,从而改变了土壤的化学性质,降低了地表水分蒸发引起的地表积盐,同时通过地表径流溶盐洗碱,使恢复区内土壤盐分逐年下降<sup>[28]</sup>;引用黄河水还能提供营养和沉积物,使植被盖度增加、植被类型改变等,改变栖息地环境。

#### 4.1.2 淡水恢复效果与面临的挑战

自2001年开始,在黄河三角洲开始实施淡水补水工程,通过修筑围堤和引水渠,在雨季蓄积雨水、在黄河丰水期引蓄黄河水,调控湿地水位和水面面积,恢复退化的淡水湿地生态系统。结果显示淡水湿地恢复对水鸟多样性有明显提高,恢复时间越长,湿地鸟类群落多度和丰富度越高,尤其是提高了鹤鹑类、雁鸭类和鹳类的丰富度<sup>[12]</sup>。2010年在刁口实施的生态调水,修复湿地2.3万hm<sup>2</sup>,以解决黄河三角洲自然保护区北区湿地水盐失衡、生态系统退化等问题<sup>[11]</sup>。有研究表明2010年和2011年水禽数量分别增加了11180只和36798只;指示性物种丹顶鹤、黑鹳、白鹤适宜生境面积增加明显,单顶鹤分别增加了11只和19只,黑鹳分别增加了14只和4只,东方白鹳分别增加了18只和149只,2011年东方白鹳出现152只大群迁徙种群,首次发现白鹳种群14只<sup>[30]</sup>。

淡水恢复水鸟栖息地也面临挑战,具体包括:①淡水湿地补水并不能使所有鸟类生境都得到改善。例如,过多补给淡水对于黑嘴鸥栖息地质量有不利一面<sup>[31]</sup>。因此在海岸带地区,通过补给淡水进行湿地恢复需适度,保持栖息地类型多样性。淡水过多或过少都会对鱼类产卵、贝类生存、鸟类筑巢、种子繁殖以及鱼类和野生动植物的其他季节性活动产生不利影响。②引黄河水时间有限。黄河作为主要淡水来源,主要在7—8月水量适合引流,而黄河三角洲地区淡水湿地关键需水期为每年3—5月和7—9月上旬。因此在旱季,需要考虑库塘作为水源对湿地进行补给,保证湿地生态需水量。③淡水资源有限。保证自然保护区淡水湿地稳定发育的最小生态需水量为2.8亿m<sup>3</sup>,在该水量下鸟类栖息地功能才能基本发挥,生物多样性才能得到逐步恢复<sup>[30]</sup>。

## 4.2 利用废水恢复重建水鸟栖息地

### 4.2.1 废水水源特征与恢复措施

黄河三角洲地区的河流有15条处于重度污染状态,3条受到轻度污染,污染有不断加剧的趋势。区内的挑河、神仙沟、支脉河、广利河、溢洪河、小清河、渤海湾7个主要水系的11条河流是主要的纳污水系。在工业废水中,主要污染物包括COD、石油类、悬浮物和挥发酚等。生活污水中主要污染物是COD、总悬浮固体、含硫化合物和大肠杆菌等<sup>②</sup>。

东营市污水、雨水、大量的灌溉尾水经河道直接入海,非常规水资源(雨水、再生水、灌溉尾水等)利用水平较低,合理开发利用当地非常规水资源是缓解当地水资源供需矛盾的重要手段<sup>[31]</sup>。将废水定义为水通过非消费性用途后,仍可以被收集、处理、再利用的水资源,如工业用水、生活用水<sup>[17]</sup>。废水湿地包括污水处理池(Waste Stabilization Ponds)和废水处理湿地(Constructed Wetlands),它们本身可以为水鸟保护提供临时的栖息地<sup>[32]</sup>。

### 4.2.2 废水恢复效果与面临的挑战

未经处理的河流污水为河口鸟类群落提供了直接和间接的食物资源<sup>[34]</sup>,如海鸥可以在未经处理的污水湿地中觅食;污水排放到河口海岸带湿地,能增加底栖生物的多样性,为水鸟提供食物<sup>[33]</sup>。再生水处理厂附近水鸟有增加趋势<sup>[35]</sup>,如墨尔本西南部的西部污水处理厂(Western Treatment Plant)地区,维持了较高的水鸟多样性,被列为维多利亚州的五大水鸟湿地之一<sup>[32]</sup>。

必须指出,废水湿地作为水鸟栖息地存在一定的生态风险。废水中通常含有大量重金属和其他化学污染物,这些污染物可能对鸟类的健康构成重大威胁<sup>[18]</sup>。随着水鸟对污水处理池和其他废水处理湿地的依赖性日益增加,废水中污染物和疾病对水鸟的影响可能增加,由此可能引起水鸟疾病在人类中传播。因此需要研究和积极管理,以有效、安全地实现废水处理和鸟鸟栖息地的双重目标,达到既可控制病原菌又可控制废水中污染物的处理目标。

## 4.3 利用海水恢复重建水鸟栖息地

### 4.3.1 海水水源特征与恢复措施

按GB3097-1997《海水水质标准》Ⅱ类标准进行

② 水源污染数据来源于山东省环境保护科学研究设计院《东营市生态环境保护“十三五”规划技术报告(2017)》。

2020年1月

评价,黄河三角洲海水主要污染物是COD、铅、活动磷酸盐和石油类。海水温度、盐度受大陆气候和黄河径流的影响较大。冬季沿岸有2个月冰期,海水流冰范围为0~5海里,盐度在35‰左右;春季海水温度为12~20℃,盐度多为22‰~31‰;夏季海水温度为24~28℃,盐度为21‰~30‰。潮汐属不规则日潮和不规则半日潮的不同潮型,每日2次,潮流为来复流,潮差一般为2m,潮流流速平均为1.1海里/小时。

海岸带水鸟具有一套形态、生理和行为机制,能够在不同盐度环境中生活和觅食<sup>[35]</sup>,为利用海水对水鸟栖息地进行恢复提供了可能。海水灌溉通常包括在淡水灌溉的基础上间或灌溉海水、用低浓度海水喷灌、直接用海水浇灌或漫灌3种灌溉方式。形成的湿地类型包括潮水引入和人工引用海水形成的盐沼,以及各种水产养殖活动,例如贝类或鱼类养殖场。

#### 4.3.2 海水恢复效果与面临的挑战

适当的海水恢复措施,可以显著改善鸟类生境。如崇明东滩通过潮汐作用下引入海水修复湿地,在大潮期间辅助少量人工引导潮水,营造潮沟和光滩生境,为水鸟提供了食物来源,促进了水鸟多样性提高,滨鸟、潜水鸟类、溅水鸭类、鹭均对海水恢复湿地表现出明显偏好<sup>[36]</sup>。

科学海水养殖(滩涂养殖、围海养殖)既可提供经济来源,又能为水鸟提供栖息和觅食场所。如广东海丰湿地在粗放型海水养殖过程中,会定期降低养殖塘中的水位,由此提供的开阔、人为干扰少且不同水深的浅水区,吸引了包括雁鸭类、鹭类、鸬鹚类等数以千计的水鸟前往栖息和觅食<sup>[37]</sup>。但同时不科学的海水养殖会破坏近海生态环境,养殖本身会占用水鸟栖息地和觅食地,会造成近海环境有机物、营养盐、重金属和抗生素污染<sup>[38]</sup>。因此建议在利用海水来恢复水鸟栖息地过程中,结合人工保护和自然修复的理念,加强滩涂等自然湿地保护及其生态过程维持。此外,用海水漫灌,有可能引起土壤严重盐渍化,海水恢复需要注意在持续监测下逐步实施;同时为有效引用海水需要对地区进行科学的选择,对潮水运行规律、海水中泥沙和生物对恢复湿地的影响相关方面进行深入研究。

## 5 结论、建议与研究展望

### 5.1 结论与建议

由于水鸟有不同的栖息地使用偏好,修复河口受损生态系统和实施人工补水过程中,需要统筹考虑保护对象的生境和景观多样性,科学修复与谨慎重建不同功能的湿地,协调好不同保护种群的栖息生境需求。结合湿地需要,合理利用淡水、废水和海水资源,确定不同水鸟恢复目标,即确定在哪恢复、恢复成什么、用什么水恢复、采取什么措施等问题。有效恢复退化湿地生态系统,提高湿地质量和湿地生物多样性,切实提升湿地保护成效,为鸟类栖息和鱼类繁殖创造更优良的湿地生态环境,以保证黄河三角洲高质量发展,具体建议如下:

(1)用水保障上面,提高淡水利用率。从用水量上看,东营地区农业用水比例还较高,利用率低,应在农业上提高用水利用率,为生态用水提供保障。

(2)综合利用淡水、海水和废水,优化配置,达到最佳效果。基于淡水资源短缺,能利用黄河水的时间大多7—8月;基于水鸟对栖息地多样性的需求,应重点发挥淡水和海水在水鸟栖息地保障上的作用;同时,应积极发挥湿地的生态功能,合理利用工业、农业、生活用水废水处理,使污水得到二次利用,用于恢复湿地。为此,建议开展基于水鸟栖息地保护与恢复的多水源综合利用策略的研究,集合不同水源水量、水质、空间分布等特征,发挥3种水源优势,对不同水源在黄河三角洲地区应用后的风险进行防范。

(3)由于水深及其营造的湿地类型对水鸟类型影响大,斑块尺度可营造出不同地势,通过水位调控构建多样的微生境,注意水面与植被面积的组合比例,实现景观多样性与生态系统功能同步提升。同时可以利用生态浮床提高水鸟利用效率,改善水鸟栖息环境。

(4)同一种水鸟需要不同生境类型的组合,所以,在景观尺度范围内需要考虑在一定区域范围内不同生境类型组合的营造,如鸬鹚水鸟需要水域、裸地、植被3种生境单元的同时出现。基于水资源分布空间格局、水鸟对区域尺度格局的需求、土地基底特征、不同水源的恢复效果,面向水鸟多样性



区域尺度需求,优化景观中斑块组成类型、数量及生态连通性。可在沿海滩涂恢复近海湿地生物栖息地,在河口地区构建东方白鹳、黑嘴鸥、丹顶鹤栖息繁殖区,在黄河沿岸两侧库塘营造鸟类栖息地。

(5)黄河来水时间、黄河三角洲以水鸟迁徙旅鸟为主这2个主要特征,决定了黄河三角洲湿地的季节性变化特征。在黄河水缺乏时,考虑从水库中补水;同时发挥废水湿地、海水湿地的替代性作用,可以在不同季节营造不同生境类型特征的人工湿地,以适应不同水鸟的迁徙规律,为水鸟顺利迁徙、繁殖提供保障。

## 5.2 研究展望

管理者制定技术、经济和环境适宜的管理计划,需要了解沿海地区生态系统的复杂性,建议对以下4个方面继续研究:

(1)滨海滩涂湿地功能稳态与生物多样性维持机制研究。对不同水源湿地内的食物网进行分析,以利于实现以水鸟多度和丰富度提升为代表的多样性保护。

(2)对水鸟栖息地恢复优化技术研究。科学地明确水鸟类型及多度提升目标,以此确定需要恢复湿地的类型及面积,结合水鸟恢复目标、水资源类型及时空分布、现有土地利用状态,综合不同引水方案,空间优化不同栖息地类型、分布及采用措施。

(3)不同水源利用过程中物理和生物组合影响过程研究。不同水资源中物质类型多样,如淡水中沙、海水中生物和盐分、废水中污染物质都会影响不同水源的利用,利用过程中物理和生物过程复杂,对这些影响过程进行研究,利于确定合适的水资源开发利用措施。

(4)湿地不同恢复措施长时间的恢复效果研究。引水时间、引水量、水深以及维持时间对水鸟栖息地环境及植被类型作用大,对不同水源在长时间恢复效果及风险进行研究,利于科学判断恢复效果及存在风险。

## 参考文献(Reference):

[1] 陈怡平,傅伯杰.关于黄河流域生态文明建设的思考[N/OL]. (2019-12-20) [2019-12-26]. <http://www.cas.cn/zjs/201912/>

t20191220\_4728425.shtml. [Chen Y P, Fu B J. Think about Ecological Civilization Construction in the Yellow River Basin[N/OL]. (2019-12-20) [2019-12-26]. [http://www.cas.cn/zjs/201912/t20191220\\_4728425.shtml](http://www.cas.cn/zjs/201912/t20191220_4728425.shtml).]

[2] Li X W, Hou X Y, Song Y, et al. Assessing changes of habitat quality for shorebirds in stopover sites: A case study in Yellow River Delta, China[J]. *Wetlands*, 2019, 39(1): 67-77.

[3] Ma T T, Li X W, Bai J H, et al. Habitat modification in relation to coastal reclamation and its impacts on waterbirds along China's coast[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 17: 1-10.

[4] Bai Q Q, Chen J Z, Chen Z H, et al. Identification of coastal wetlands of international importance for waterbirds: A review of China Coastal Waterbird Surveys 2005-2013[J]. *Avian Research*, 2015, (3): 153-168.

[5] 张晓龙,李萍,刘乐军,等.黄河三角洲湿地生物多样性及其保护[J]. *海岸工程*, 2009, 28(3): 33-39. [Zhang X L, Li P, Liu L J, et al. Biodiversity and its protection in the Yellow River Delta Wetland[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 28(3): 33-39.]

[6] 崔保山,李英华,杨志峰.基于管理目标的黄河三角洲湿地生态需水量[J]. *生态学报*, 2005, (3): 606-614. [Cui B S, Li Y H, Yang Z F. Management-oriented ecological water requirement for wetlands in the Yellow River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 606-614.]

[7] Steinmetz J, Kohler S L, Soluk D A. Birds are overlooked top predators in aquatic food webs[J]. *Ecology*, 2003, 84(5): 1324-1328.

[8] Leat E H K, Bourgeon S, Magnusdottir E, et al. Influence of wintering area on persistent organic pollutants in a breeding migratory seabird[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2013, 491:277-293.

[9] Green A J, Elmberg J. Ecosystem services provided by waterbirds[J]. *Biological Reviews*, 2014, 89(1): 105-122.

[10] Sinclair A R E, Mduma S, Brashares J S. Patterns of predation in a diverse predator-prey system[J]. *Nature*, 2003, 425(6955): 288-290.

[11] Zhao Q Q, Bai J H, Huang L B, et al. A review of methodologies and success indicators for coastal wetland restoration[J]. *Ecological Indicators*, 2011, 60: 442-452.

[12] 王明春.黄河三角洲湿地恢复对湿地鸟类群落的效应研究[D].曲阜:曲阜师范大学,2008. [Wang M C. Effect of Wetland Restoration on Wetland Bird Community in the Yellow River delta[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2008.]

[13] Ma Z J, Cai Y T, Li B, et al. Managing wetland habitats for waterbirds: An international perspective[J]. *Wetlands*, 2010, 30(1): 15-27.

[14] 张绪良,肖滋民,徐宗军,等.黄河三角洲滨海湿地的生物多样性特征及保护对策[J]. *湿地科学*, 2011, 9(2): 125-131. [Zhang X L, Xiao Z M, Xu Z J, et al. Biodiversity characteristics and protection countermeasures of the coastal wetlands in the Yellow Del-

2020年1月

- ta[J]. *Wetland Science*, 2011, 9(2): 125-131.]
- [15] Li D L, Chen S H, Lloyd H, et al. The importance of artificial habitats to migratory waterbirds within a natural/artificial wetland mosaic, Yellow River Delta, China[J]. *Bird Conservation International*, 2013, 23(2): 184-198.
- [16] 黄子强, 车纯广, 谭海涛, 等. 黄河三角洲水鸟多样性调查及种群数量监测[J]. *山东林业科技*, 2018, 48(2): 41-45. [Huang Z Q, Che C G, Tan H T, et al. Investigation on the diversity and population of waterbird in the Yellow River Delta Nature Reserve[J]. *Shandong Forestry Science and Technology*, 2018, 48(2): 41-45.]
- [17] Grant S B, Saphores J D, Feldman D L, et al. Taking the "waste" out of "wastewater" for human water security and ecosystem sustainability[J]. *Science*, 2012, 337(6095): 681-686.
- [18] 孙孝平, 张银龙, 曹铭昌, 等. 黄河三角洲自然保护区秋冬季水鸟群落组成与生境关系分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(4): 514-521. [Sun X P, Zhang Y L, Cao M C, et al. Structure of waterfowl community in relation to habitat in the Yellow River Delta Nature Reserve in autumn migratory and wintering periods[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(4): 514-521.]
- [19] 王立冬. 黄河三角洲水鸟种群动态变化[J]. *山东林业科技*, 2012, (2): 67-70. [Wang L D. Waterfowl population change in Yellow River Delta[J]. *Shandong Forestry Science and Technology*, 2012, (2): 67-70.]
- [20] 郝迎东. 黄河三角洲水鸟动态监测[J]. *山东林业科技*, 2012, 42(4): 21-24. [Hao Y D. Dynamic monitoring of water birds in the Yellow River delta[J]. *Shandong Forestry Science and Technology*, 2012, 42(4): 21-24.]
- [21] Cao M C, Xu H G, Le Z F, et al. A multi-scale approach to investigating the red-crowned crane-habitat relationship in the Yellow River Delta Nature Reserve, China: Implications for conservation [J]. *Plos One*, 2015, 10(6): e0129833.
- [22] Tavares D C, Guadagnin D L, de Moura J F, et al. Environmental and anthropogenic factors structuring waterbird habitats of tropical coastal lagoons: Implications for management[J]. *Biological Conservation*, 2015, 186: 12-21.
- [23] 刘月良. 黄河三角洲鸟类[M]. 北京: 中国林业出版社, 2013. [Liu Y L. *Birds of the Yellow River Delta*[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2013.]
- [24] King S, Elphick C S, Guadagnin D, et al. Effects of landscape features on waterbird use of rice fields[J]. *Waterbirds*, 2010, 33: 151-159.
- [25] Zhu C M, Zhang X, Huang Q H. Four decades of estuarine wetland changes in the Yellow River Delta based on Landsat observations between 1973 and 2013[J]. *Water*, 2018, DOI: 10.3390/w10070933.
- [26] 王薇. 黄河三角洲水土资源承载力综合评价研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012. [Wang W. *Research on Comprehensive Evaluation of Water and Soil Resources Carrying Capacity in Yellow River Delta*[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2012.]
- [27] 李玉娟. 黄河三角洲高效生态经济区水资源保障能力分析-以山东省东营市为例[J]. *河北农业科学*, 2009, 13(8): 96-97. [Li Y J. Analysis on the support ability of water resource in high efficient ecological economic zone of Yellow River Delta: A case of Dongying, Shandong Province[J]. *Hebei Agricultural Sciences*, 2009, 13(8): 96-97.]
- [28] 董凯凯. 黄河三角洲退化湿地淡水恢复对土壤养分和植被的影响研究[D]. 济南: 济南大学, 2011. [Dong K K. *Effects of Freshwater Restoration on the Soil Nutrients and Vegetation in the Degraded Yellow River delta Wetlands*[D]. Jinan: Jinan University, 2011.]
- [29] 司敬玲, 张月明. 黄河三角洲刁口河生态调水实践[J]. *人民黄河*, 2013, 35(2): 30-32. [Si J L, Zhang Y M. Practice of ecological water dispatching in Diaokouhe waterway of the Yellow River Delta[J]. *Yellow River*, 2013, 35(2): 30-32.]
- [30] 卓俊玲, 葛磊, 史雪廷. 黄河河口淡水湿地生态补水研究[J]. *水生态学杂志*, 2013, 34(2): 14-21. [Zhuo J L, Ge L, Shi X T. Study on eco-water supplement for freshwater wetlands in the Yellow River estuary[J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, 34(2): 14-21.]
- [31] 卜庆伟, 辛宏杰. 黄河三角洲非常规水资源综合利用[J]. *水资源保护*, 2012, 28(1): 42-45. [Pu Q W, Xin H J. Integrated utilization of unconventional water resources in Yellow River Delta[J]. *Water Resources Protection*, 2012, 28(1): 42-45.]
- [32] Murray C G, Hamilton A J. Perspectives on wastewater treatment wetlands and waterbird conservation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(5): 976-985.
- [33] Alves J A, Sutherland W J, Gill J A. Will improving wastewater treatment impact shorebirds? Effects of sewage discharges on estuarine invertebrates and birds[J]. *Animal Conservation*, 2012, 15(1): 44-52.
- [34] Morris L, Petch D, May D, et al. Monitoring for a specific management objective: Protection of shorebird foraging habitat adjacent to a waste water treatment plant[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, DOI: 10.1007/s10661-017-5924-4.
- [35] Gutierrez J S. Living in environments with contrasting salinities: A review of physiological and behavioural responses in waterbirds[J]. *Ardeola*, 2014, 61(2): 233-256.
- [36] 邹业爱. 崇明东滩水鸟群落对生境变化及湿地修复的响应[D]. 上海: 华东师范大学, 2014. [Zou Y A. *Waterbird Community Response to Habitat Changes and Wetland Restoration Strategies in the Chongming Dongtan Wetlands, China*[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.]
- [37] 保尔森基金会. 中国滨海湿地保护管理战略研究项目[R/OL]. (2016-09-07) [2019-12-17]. <https://max.book118.com/html/>

2017/0907/132522793.shtm. [Paulson Institute. Blueprint of Coastal Wetland Conservation and Management in China[R/OL]. (2016- 09- 07) [2019- 12- 17]. <https://max.book118.com/html/2017/0907/132522793.shtm>.]

[38] 吕兑安, 程杰, 莫微, 等. 海水养殖污染与生态修复对策[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(11): 43-48. [Lv D A, Cheng J, Mo W, et al. Pollution and ecological restoration of mariculture[J]. Marine Development and Management, 2019, 36(11): 43-48.]

## Comprehensive utilization of water resources in the Yellow River Delta for waterfowl habitat restoration

YUAN Xiu<sup>1</sup>, SUN Yanyan<sup>2</sup>, WANG Jiping<sup>3</sup>, YU Lili<sup>2</sup>

(1. Institutes of Science and Development, CAS, Beijing 100190, China; 2. Dongying Natural Resources Bureau, Dongying 257091, China; 3. Research Center of Saline and Alkali Land of State Administration of Forestry and Grassland, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** The Yellow River Delta is an internationally important stopover place for waterfowl, but natural factors and human activities have resulted in loss of waterfowl habitat and biological diversity in this area. The habitat quality and diversity of waterfowl can be greatly improved by using fresh water to restore habitat. However, with fresh water shortage and large water consumption in agriculture, domestic use, and industry in this area, ecological water consumption is insufficient. In this case, how to utilize fresh water, sea water, and waste water adaptively considering the local conditions and give full play to the wetland function to protect biodiversity and purify the environment become the key problem to bird habitat restoration. This article summarized the diversity and the habitat requirements of waterfowl in the Yellow River Delta, and examined the water use status and the demands and challenges to the habitat of waterfowl in this area. We also analyzed the measures to restore waterfowl habitat, resource availability, restoration effects, challenges of waterfowl habitat restoration using fresh water, sea water, and waste water, and then proposed some research prospects. We hope that this article can provide a scientific foundation for the optimized measures of waterfowl habitat restoration for improving waterfowl diversity. Bases on the migration of waterfowl, temporal pattern of Yellow River water discharge, patch pattern of waterfowl habitat, status of water utilization, the wetland type after water diversion, and spatial distribution of different kinds of water resources, we recommend to comprehensively use fresh water, sea water, and waste water to restore waterfowl habitat by considering the temporal patterns of water supply, spatial arrangements of habitats, and a combination of the different habitat types at the same patch, with the purpose of giving full play to the wetland function and improving the biological diversity.

**Key words:** waterfowl; habitat; freshwater; waste water; sea water; coastal wetland; biodiversity; Yellow River Delta