

# 基于生态水文学的黄河口湿地生态需水评价

连 煜<sup>1</sup>, 王新功<sup>1</sup>, 黄 翀<sup>2</sup>, 刘高焕<sup>2</sup>, 王瑞玲<sup>1</sup>, 张绍锋<sup>1</sup>, 刘月良<sup>3</sup>

Bas Pedroli<sup>4</sup>, Michiel van Eupen<sup>4</sup>

(1. 黄河流域水资源保护局, 郑州 450004;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 山东黄河三角洲国家级自然保护区管理局, 山东东营 257091;

4. Alterra Wageningen UR, The Netherlands)

**摘要:** 根据生态系统保护的要求, 以提高生态系统承载力、保护河口生态系统完整性和稳定性为原则, 以促进区域生态系统的良性维持为目标, 从生物多样性保护的角度, 研究确定了 23600 hm<sup>2</sup> 的黄河三角洲应补水的湿地恢复和保护规模。在此基础上, 采用景观生态学的原理和方法, 在湿地植物生理学、生态学、水文学研究基础上及遥感和 GIS 技术的支持下, 研究水分—生态耦合作用机理, 建立基于生态水文学的黄河口湿地生态需水及评价模型, 并运用预案研究方法和景观生态决策支持系统的规划评价思想, 预测和评价了黄河口湿地不同补水方案产生的生态效果, 重点研究了丹顶鹤、东方白鹳、黑嘴鸥等指示性物种适宜生境条件与湿地补水后的生态格局变化。评价结果表明, 黄河三角洲湿地具备东方白鹳及丹顶鹤等保护性鸟类的繁殖和越冬的潜在生境条件, 但其生境质量并不十分理想, 通过湿地补水, 作为珍稀鸟类重要栖息地芦苇湿地面积从现状的 10000 hm<sup>2</sup> 增加至 22000 hm<sup>2</sup>, 生态承载力大幅提高; 研究在统筹黄河水资源条件、水资源配置工程措施和湿地生态系统综合保护需求后, 推荐提出了黄河三角洲湿地恢复和保护的 3.5 亿 m<sup>3</sup> 黄河补水量及补水时期。

**关键词:** 生态水文学; 黄河三角洲; 湿地; 生态需水

## 1 项目背景

黄河是维持黄河三角洲生态系统演替和发育的最重要因素, 在黄河独特水沙条件和渤海弱潮动力环境的共同作用下, 黄河三角洲形成了我国温带最广阔、最完整和最年轻的湿地生态系统, 其特有的原生性湿地不仅为许多珍稀濒危鸟类提供了适宜的栖息环境, 也是研究河口新生湿地生态系统形成、演化、发展规律的重要基地。黄河三角洲国家级自然保护区作为中国唯一的三角洲湿地自然保护区, 已列入世界及中国生物多样性保护和湿地保护名录, 作为东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙的“中转站”、越冬地和繁殖地, 保护区在世界生物多样性保护中具有重要地位, 也是实现可持续发展进程中关系国家和区域生态安全的战略资源。然而自 20 世纪后期以来, 由于受黄河进入河口地区水沙资源量急剧减少、河口堤防建设造成的河流渠化, 以及河口三角洲农业开发和城市化等影响, 黄河口出现了黄河河道断流、淡水湿地萎缩、植被生态功能退化、物种多样性衰减等生态环境问题, 对黄河三角洲生态系统的稳定和社会可持续发展产生了威胁<sup>[1]</sup>。研究黄河河口生态需水过程, 优化黄河水资源的配置与调度, 实现并维持三角洲生态系统的良性发展, 已成为维持黄河健康生命亟待解决的关键问题之一, 也是黄河口地区社会、经济和生态环境协调发展的必然要求。

收稿日期: 2007-08-27; 修订日期: 2008-02-06

基金项目: 中荷水利科技合作项目(12793) [Foundation: Sino-Dutch Cooperation Project on Water Management, No.12793]

作者简介: 连煜 (1962-), 高级工程师, 主要从事水资源保护与生态环境保护研究工作。E-mail: lianyu@vip.sina.com

杨志峰、崔保山<sup>[2,3]</sup>等国内学者在河流、湿地生态环境需水量方面开展了大量工作,也对河口或三角洲的生态需水进行了研究,研究方法多采用水文学或生态生理学的方法,将景观生态学方法应用于湿地修复的实例研究尚不多见。近年来的研究表明,物种的保护必然要同时考虑它们所生存的生态系统和景观的多样性和完整性<sup>[4-7]</sup>。目前国内对河口或三角洲生态需水的研究多是在河口或三角洲的理想状态下进行,从景观生态学角度研究较少,也很少考虑河流水资源承载能力及人类社会的现实要求,计算的生态需水过程乃至生态需水研究结论较难满足生态系统保护和水资源生态配置的迫切需求;同时,湿地生态需水计算中对生态保护目标及规模的科学合理界定,以及湿地补水后生态效益等生态需水计算重要环节的研究方面较为薄弱,成果鲜有报道。

生态环境需水问题不仅仅是一个生态问题,还是一个社会问题,生态环境需水量的确定不仅仅是技术上的问题,还需要许多用水户如农业、工业、城镇等用水户的参与,需要综合社会经济与自然生态系统多方的需求。本文综合考虑黄河口生态系统稳定需求、黄河水资源与水文情势的实际以及区域经济社会发展的要求等方面的因素,合理界定了黄河口淡水湿地适宜的保护规模,综合地表水和地下水、土壤水,以及植物生理需水和生态系统发育需水与濒危物种生境保护关系等生态学与水文学方面的知识,应用水力学模型及生态学模型对河口湿地的生态需水及生态补水后带来的生态景观效果进行了生态水文学的过程与评价研究,提出了黄河口淡水湿地适宜的生态保护目标及需水量,可为有限的黄河水资源配置及三角洲湿地生态系统的科学管理与决策提供技术支撑。

## 2 研究区概况

### 2.1 黄河三角洲

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,属陆相弱潮强烈堆积性河口,位于中国山东省北部莱州湾和渤海湾之间,其范围大致界于东经 118°10' 至 119°15' 与北纬 37°15' 至 38°10' 之间。近代黄河三角洲一般是指以宁海为顶点,北起套尔河口,南至支脉沟口的扇形地带,成 135° 角,面积约为 6000 余 km<sup>2</sup>,海岸线长约 350 km。

黄河三角洲地势平缓,自然坡降在 1/8000~1/12000。由于黄河在该地区改道频繁,形成了近代黄河三角洲和三角洲内部以废弃河床为基轴的波浪起伏的地貌特征。黄河三角洲地区属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候,由于濒临渤海,又具有明显的海洋性气候特征。本区多年平均气温 12.3 °C,年平均降水量 561.6 mm,年内降雨多集中在 6~9 月份,多年平均水面蒸发量为 1167.2 mm。黄河三角洲属暖温带落叶阔叶林区域,但区内无大面积的天然阔叶林植被类型,植被盖度不高。木本植物很少,以草甸景观为主体。黄河河口属弱潮陆相河口,大量的泥沙进入河口地区以后,河海交汇处水流挟沙力骤然降低,海洋动力又不足以输送如此巨量的泥沙,因此,河口尾间形成了淤积、延伸、摆动、改道的自然演变规律,使入海口不断更迭,海岸线不断外移,河口三角洲面积不断扩大。自 1855 年以来,黄河较大的流路变迁就有 6 次。由于黄河三角洲沿岸极易发生风暴潮,是我国风暴潮重灾区之一,海潮侵袭是造成该区域土壤盐渍化的主要原因之一<sup>[8]</sup>。

### 2.2 黄河三角洲国家级自然保护区

为保护黄河湿地生态和鸟类栖息环境,中国政府设立了黄河三角洲国家级自然保护区,保护区位于黄河入海口两侧新淤地带,分为南北两大部分,北部位于黄河刁口河故道区域,南部位于黄河现行流路两侧,保护目标为新生湿地生态系统和珍稀濒危鸟类,总面积 15.3×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,其中核心区面积 5.8×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,缓冲区面积 1.3×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,实验区面积 8.2×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>。

2.3 研究区域植被与动物现状

自然保护区共有种子植物 42 科，393 种，国家二级保护濒危植物野大豆分布十分广泛。由于自然保护区是新生湿地这一特殊的立地条件和植物区系成份特点，决定了自然保护区内基本没有地带性植被，多属隐域性植被，植被类型主要有落叶阔叶林、盐生灌丛、典型草甸、盐生草甸、草本沼泽、水生植被和人工栽培植被等，其中自然植被占植被面积的 91.9%，是中国沿海最大的海滩自然植被区。

自然保护区内分布各种野生动物 1543 种，其中海洋性水生动物 418 种，属国家重点保护的 6 种；淡水鱼类 108 种，属国家重点保护的 3 种；鸟类 283 种，属国家一级保护的有丹顶鹤、白鹤、白头鹤、大鸨、东方白鹳、黑鹳、金雕、白尾海雕、中华秋沙鸭等 9 种，属国家二级保护的有灰鹤、大天鹅、鸳鸯等 41 种<sup>[8]</sup>。

3 研究思路与方法

3.1 生态基础调查

2005 年 7 月与 10 月，对三角洲陆生高等植物及演替规律、陆栖动物、淡水生物、潮间带生物等进行了地面生态调查，并对主要陆生植物芦苇、柽柳和翅碱蓬等植被进行了生理学观测和蒸散发试验，对主要植被类型进行了遥感和植物蒸散发研究，以作为生态模型建立基础边界条件。

3.2 研究思路

从生态学及水文学角度入手，借助生态观测和遥感、地理信息系统等技术手段，通过资料收集和现场踏勘，掌握三角洲天然淡水湿地生态系统发育现状、群落构成情况，识别优势种群和指示性物种，研究优势种群和指示性物种的生态需水规律，掌握湿地指示性物种分布与湿地水位变化之间的规律，采用地表能量平衡系统模型 (SEBS)，利用遥感技术估算区域的蒸散量，结合优势植被及指示性物种生长繁衍对湿地地面和地下水深的要求，计算确定湿地生态补水量及补水水深范围；

制定补水预案，并集合生态、水文、水资源、土壤、植物生理、鸟类生态学等学科知识和专家知识，建立生态补水漫流水力学模型 (SOBEK 模型)、地下水模型 (MODFLOW 模型) 及黄河三角洲景观生态决策支持系统 (LEDESS 模型)，模拟不同生态补水预案下湿地生态水文变化与湿地生态效果之间的响应关系，评价不同的生态补水配置所带来的景观生境适宜性变化，综合考虑工程可行性、社会、生态效益等方面，探讨并确定维持河口湿地发育和生态稳定的需水规模与过程(图 1)。

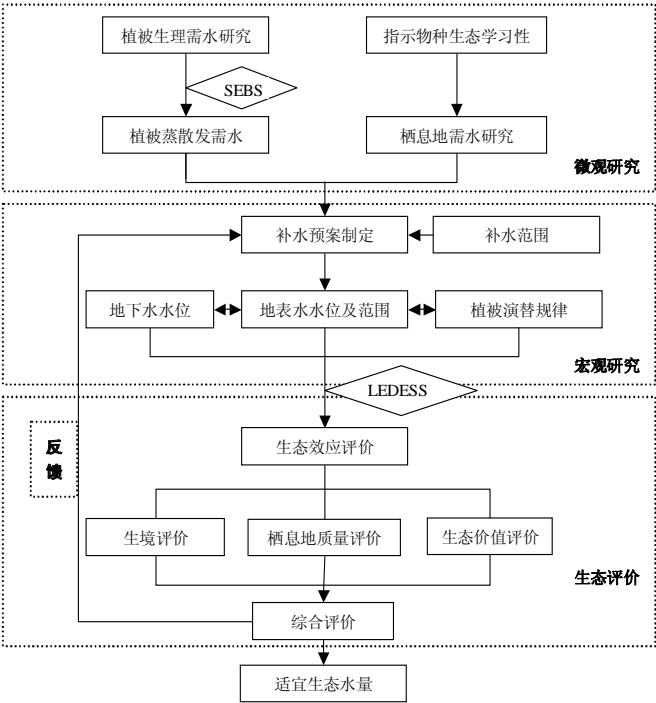


图 1 河口湿地生态需水及评价总体思路  
Fig. 1 The general frame for evaluating environmental flows of estuary wetlands

### 3.3 研究方法

传统的以物种为中心的自然保护途径缺乏考虑多重尺度上生物多样性的格局和过程及其相互关系,其研究结果较为片面、对策措施的可行性差<sup>[5]</sup>。对于退化的生态系统或景观,除了需要保护外,还必须要修复其结构,恢复其功能<sup>[9-11]</sup>。湿地生态补水作为湿地修复的主要手段,理应从湿地生态系统结构与功能的完整性及生态系统的稳定方面宏观决策。目前湿地生态需水的分析多基于湿地的组成将湿地分解为各个组成部分(湿地植物、湿地土壤和湿地野生生物栖息地)进行分析和计算,主要侧重于湿地组分的某个方面,而忽略了湿地生态系统更是一个有机整体的特性,尤其对于湿地功能方面缺少针对性的论述。而生态过程和生态系统的时空联系性与差异性,决定了采用传统的生态学模型和水文学模型都会导致描述生态需水过程的失真,不能满足对生态需水进行科学调控的需要。相比之下,基于物理机制的水循环模拟技术和生态模拟技术研究生态系统的需水规律更为成熟,当前重要的是从物理机制的角度耦合上述两类模型,形成物理机制严格、一体化的生态—水文模拟系统<sup>[11]</sup>。

本研究从景观生态学的观点,对黄河河口湿地不同生态补水方案进行“模拟—评价—调控—模拟”的循环计算,提出不同补水方案及其生态景观效果,为管理部门提供不同的决策选择。LEDESS 模型是荷兰 Alterra Green World Research 开发的一个基于 GIS 的专家系统。LEDESS 模型建模的景观生态学原理可以简单表达为:区域景观的植被过程取决于自然生态单元等立地(Site)无机自然条件以及相应的管理方式;自然生态单元与植被或地表覆被类型不同的组合和匹配方式决定生境结构(Ecotopes),据此确定其生境的适宜性<sup>[12-15]</sup>。

## 4 生态补水预案研究

### 4.1 湿地合理保护规模

近几十年来,黄河来水量的大幅减少使洪水漫滩的几率大大降低,与此同时,黄河下游河道的高度人工化阻隔了沿岸和河口湿地与河流的天然联系,除少量河道内湿地外,黄河三角洲大多数湿地如不靠人工补水,湿地生态系统的良性发育便难以维持。然而,在流域用水量急剧增加,水资源供需矛盾日益尖锐和河口地区人工干预日益增大的今天,要把三角洲湿地完全恢复到过去的状态是不现实的,尤其是在经济开发价值较大的河口三角洲地区。因此,在保证湿地功能恢复的基础上,合理确定淡水湿地的保护规模与保护方式,使有限的黄河水资源得到高效利用,使区域生态保护与经济发展达到双赢,十分关键而必要。

合理生态保护目标的确定是竞争用水条件下生态需水核算的关键,也是目前生态需水研究的一个难点。它不仅需要考虑维持生态系统良好的服务功能,还需要考虑关键生态因子的制约、人们的价值取向及其实现的可能性等。研究认为,黄河三角洲湿地合理的保护规模需从河口生态系统健康稳定的需求、黄河水资源的现实与可能以及社会或人们的需求等方面进行综合平衡考虑。通过对河口地区生态状况的调查分析,考虑生态单元系统恢复以及区域经济发展和黄河工程布局的实际情况,在多方案比选后确定以 1992 年黄河三角洲国家级自然保护区建立时的典型芦苇湿地面积(约为 23000 hm<sup>2</sup>),作为黄河口淡水湿地恢复的目标和规模。主要原因有:一是 1992 年黄河三角洲国家级自然保护区淡水湿地规模及质量尚可;二是自 1992 年始到黄河水量统一调度的 1999 年,黄河下游断流越来越严重;三是较早的年份由于黄河水沙条件及下垫面发生变化,与现状可比性较差。

4.2 生态补水范围

生态补水范围的确定主要考虑以下因素:

(1) 湿地保护的重要性。自然保护区北部的刁口河、南部的黄河口、大汶流三区域湿地共同组成了自然保护区完整的湿地生态体系, 新黄河口、老黄河口、大汶流海沟分布区对整个鹈类重要性最大, 达到国际重要湿地标准。刁口河故道湿地是天鹅的重要越冬栖息地, 是自然保护区生态完整性不可或缺的生态单元, 其丰富的生物多样性、咸淡水交汇的多样生态景观在维持自然保护区生态功能发挥及生态系统稳定方面起着十分关键的作用。

(2) 土地利用现状。虽然湿地补水区域均选定在自然保护区以内, 但由于目前自然保护区内有较大量农田、道路及油井等, 因此, 湿地补水区域主要选在阻水障碍物少的退化盐碱地(图 2)。

(3) 黄河补水的可能性及难易程度。河口区域黄河河道因油田建设的导流堤影响, 大部分河口湿地不能直接由黄河自然补水, 需工程引水或工程输水。黄河现行流路清水沟流路导流堤内的淡水湿地, 可以基本实现黄河的自然补水; 导流堤外沿河区域的黄河口、大汶流湿地采取引黄涵闸建设措施后, 较易实现生态补水, 而刁口河故道区域受黄河流路和输水条件的制约, 湿地补水难度较大, 需通过已有水库间接补水。

综合考虑保护区湿地植被类型、格局现状及河口土地利用等以上因素, 确定本次研究湿地生态补水区域(图 3), 总面积约为 23600 hm<sup>2</sup>, 主要为自然保护区内退化的芦苇湿地及部分滨海滩涂, 湿地生境适宜性评价范围是整个黄河三角洲国家级自然保护区。

4.3 生态需水计算方法

湿地生态恢复补水主要考虑代表性植被及鸟类栖息繁殖的水量需求。湿地补水计算采用地表能量平衡系统模型 (SEBS), 利用遥感技术提供的地表反照率、地表覆盖度 (或

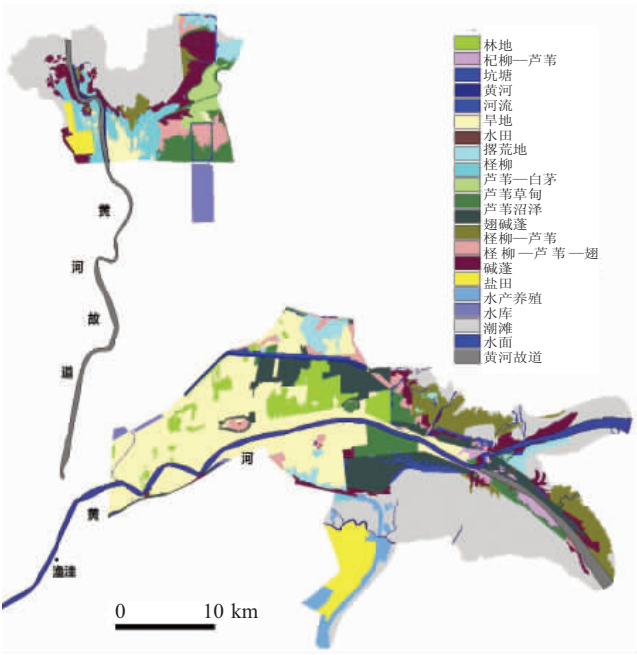


图 2 黄河三角洲自然保护区植被图 (2005 年 9 月)  
Fig. 2 The vegetation map of YRDNRR (Sept.2005)

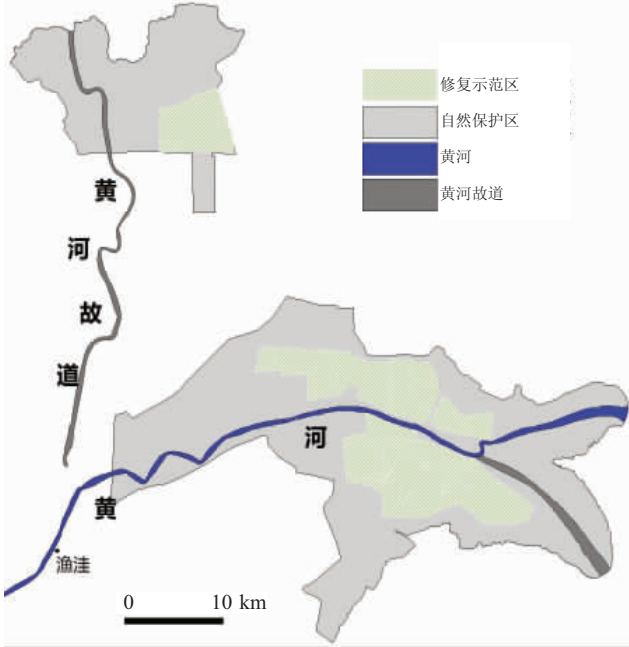


图 3 湿地生态补水范围  
Fig. 3 Extent of the demonstration area

者叶面积指数)和地表温度数据估算区域的蒸散量,同时从宏观上根据淡水湿地主要植被(芦苇)及保护鸟类的需水特性、规律,综合确定湿地恢复适宜的补水量及补水水深范围。根据河口湿地生态系统的季节性特征,得到4-6月、7-10月、11-3月三个时段的需水要求(表1)。根据补水时间,反算出引水断面的补水流量,作为地表水及地下水联合模型模拟的输入参数。

4.4 生态补水预案

影响黄河三角洲淡水湿地栖息地质量的因素很多,如景观破碎化、油田开发、农业垦殖等,但为了比较不同补水水深或不同等级生态需水量与补水时段对湿地栖息地质量的影响,从而确定最适宜的生态环境需水及过程,因此,本研究重点对不同补水水深进行了生态效果模拟与评价。根据黄河水文条件,考虑补水区下垫面地表、地下水和植被耗水的季节性,生态补水月份确定为3-10月,其中7-10月以自流引水为主,其他时段以提水与自流相结合引水,以2005年为现状年,依据湿地恢复补水水深的不同,制定不同的湿地恢复补水预案,在众多预案中有代表性的选择3个生态补水预案,预案的主要差别是补水水深(表2)。

5 生态补水效果评估

5.1 现状年(2005年)湿地情况

黄河水沙资源是形成和维持黄河口湿地的主导因素,是黄河口湿地赖以生存发育的根本,是河口湿地生态系统顺向演替的根本动力。黄河入海泥沙的促淤造陆功能,使黄河三角洲不断形成新的原生湿地,黄河水资源的补给也保证了先前形成的湿地的正常发育与顺向演替,使其具有不同演替阶段的河流及河漫滩湿地,黄河三角洲湿地具有东方白鹳、丹顶鹤及黑嘴鸥等保护性鸟类的繁殖和越冬的潜在生境条件。然而,近几十年来,由于人类大规模开发、城镇化发展、油田生产道路及导流堤建设,使湿地与黄河的水力联系被阻隔,湿地正常发育的水文条件被改变,致使河口湿地面积不断萎缩、退化,湿地的生态功能衰退。2005年,黄河三角洲自然保护区共有芦苇湿地面积10657 hm<sup>2</sup>,其中芦苇沼泽面积约为5604 hm<sup>2</sup>,比1992年自然保护区建立时芦苇湿地面积(约为23000 hm<sup>2</sup>)减少50%以上。由于黄河下游为地上悬河,污染源难以进入黄河,河口湿地水环境状况尚好,多数时期为地表水Ⅲ类水质。

5.2 补水后的生境变化

从不同补水方案下自然保护区湿地连续补水5年后的生境变化(图4)和不同植被类型面积比较(图5)可以看出,三种引水预案都能够显著提高芦苇湿地尤其是芦苇沼泽的面积,这对于以芦苇沼泽湿地为主要栖息地的鸟类如丹顶鹤等的生境保护和恢复具有重要作用。在三种预案措施下,芦苇沼泽面积从原有的5600 hm<sup>2</sup>分别增加到15800 hm<sup>2</sup>、16400 hm<sup>2</sup>、17700 hm<sup>2</sup>,广泛分布于引水补给区低洼处(图4);各补水预案措施下,芦苇草甸面积则变化不大,预案C条件下较现状减少约200 hm<sup>2</sup>,但芦苇草甸的空间分布或景

表 1 黄河三角洲湿地恢复水深需求表 (单位: cm)

Tab. 1 The needed water depth for wetlands restoration in the Yellow River Delta (YRD)

需水时段	平均需水水深	需水水深范围	需水原因
4-6 月	30	10~50	芦苇发芽及生长期
7-10 月	50	20~80	芦苇生长、鸟类栖息
11-3 月	20	10~20	鸟类栖息

根据补水时间,反算出引水断面的补水流量,作为地表水

表 2 各预案的规划目标及措施

Tab. 2 The planning objectives of different scenarios

需水时段	芦苇湿地面积 (ha)	引水月份 (月)	平均补水深度 (cm)
现状 (2005 年)	4800	6-7	30
预案 A	23600	3-10	15
预案 B	23600	3-10	30
预案 C	23600	3-10	30

及地下水联合模型模拟的输入参数。

根据黄河水文条件,考虑补水区下垫面地表、地下水和植被耗水的季节性,生态补水月份确定为3-10月,其中7-10月以自流引水为主,其他时段以提水与自流相结合引水,以2005年为现状年,依据湿地恢复补水水深的不同,制定不同的湿地恢复补水预案,在众多预案中有代表性的选择3个生态补水预案,预案的主要差别是补水水深(表2)。

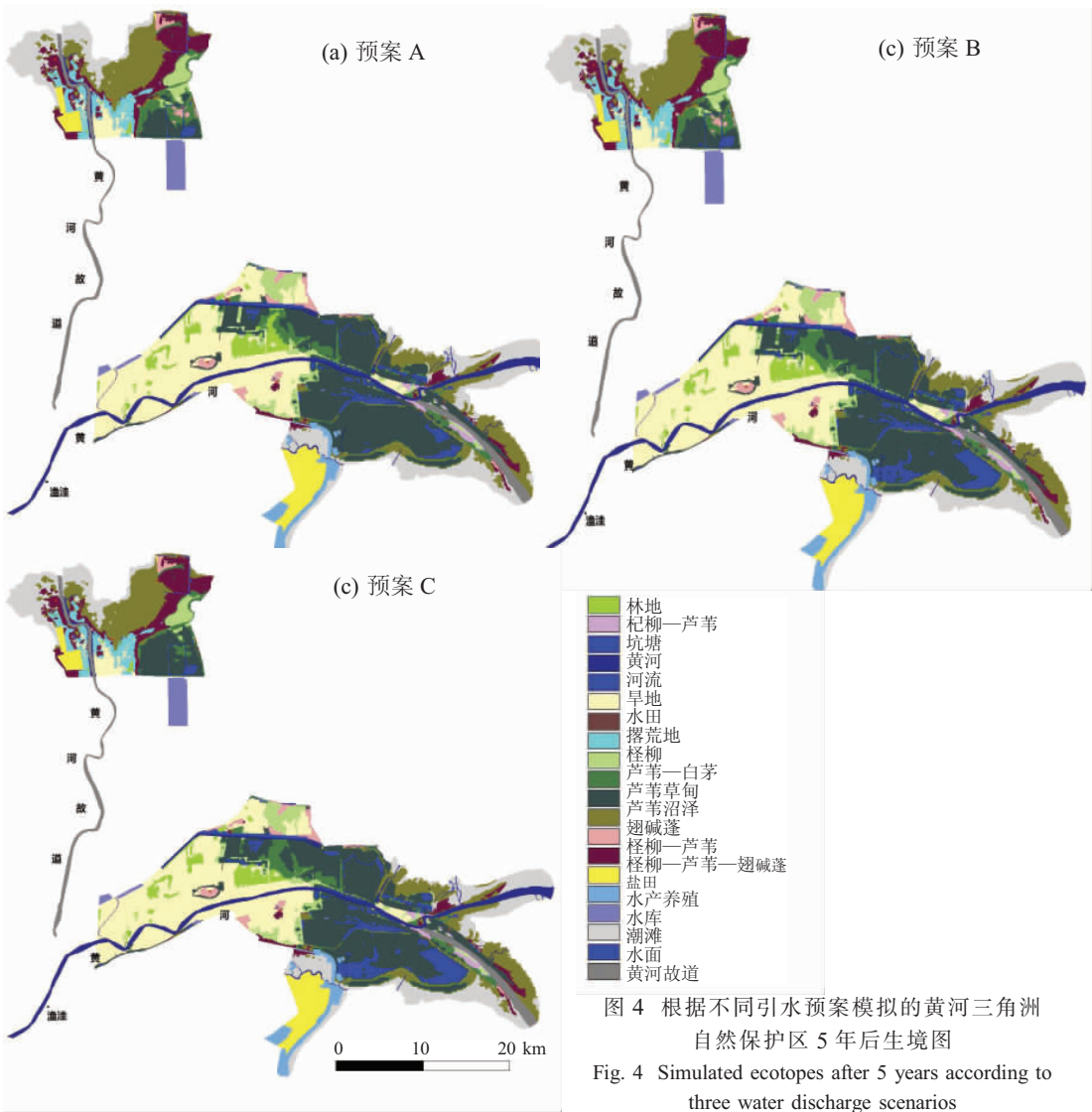


图 4 根据不同引水预案模拟的黄河三角洲自然保护区 5 年后生境图

Fig. 4 Simulated ecotopes after 5 years according to three water discharge scenarios

观格局较现状有很大不同，原有的芦苇草甸由于淡水补给大多演化为芦苇沼泽，而新生成的芦苇草甸则分布在补给区内地势较高部位及补给区周边。在潮上带及部分潮间带，由于淡水资源的补给，咸淡水混合的环境更有利于翅碱蓬的生长。三种引水预案下的翅碱蓬滩涂面积有很大幅度的增加但彼此差别较小，从 4500 hm<sup>2</sup> 增加到修复后的 7000 hm<sup>2</sup>。由此可以看出，芦苇湿地淡水对滩涂的补给使翅碱蓬滩涂的面积显著增加，在实施科学的补水方案情况下，芦苇植被的扩展并不会对以滩涂尤其是翅碱蓬滩涂为主要栖息地的珍稀鸟类如黑嘴鸥的生境造成太大影响。怪柳灌丛三种预案情况下，面积较现状均有增加，但变化幅度不大，盐碱地与光板地较现状大幅度减少，而水面面积各预案均有大幅度增加，其中预案 C 增加最为显著，从现状 500 hm<sup>2</sup> 增至约 3100 hm<sup>2</sup>，水面面积的增加一方面为丹顶鹤、白鹤、大天鹅、小天鹅、疣鼻天鹅等许多水禽提供了理想栖息地，另一方面芦苇沼泽核心区的水面可以在旱季作为湿地的水源和鸟类的饮水源，有利于河口湿地生态系统的稳定与健康发展。当然，对芦苇湿地的修复并非引水量越大越好。引水量越大，湿地水深越大，当超过一定的阈值后会对芦苇生长形成抑制。这时，加大引水

量只能增加水面面积，而芦苇面积则相应减小，这一点从预案 A 到预案 C 芦苇湿地面积的变化可以看出。

各预案比较来看，从预案 A 到预案 B，水量增加了 0.71 亿 m<sup>3</sup>/a，水面面积增加 1700 hm<sup>2</sup>，从预案 B 到预案 C，水量增加了 0.68 亿 m<sup>3</sup>/a，但是水面面积只增加了约 500 hm<sup>2</sup>，芦苇沼泽面积只增加 1300 hm<sup>2</sup>，芦苇草甸面积则减少 1100 hm<sup>2</sup>，因此，预案 B 的生态经济效益要优于预案 C 与预案 A。

5.3 栖息地质量变化

根据生态保护的有关理念和方法，选取东方白鹳、丹顶鹤、黑嘴鸥作为黄河三角洲湿地水禽生境的指示物种。其主要原因一方面是这些物种对生境变化、植被演替等湿地环境变化非常敏感；另一方面，这些物种生境代表了黄河三角洲的主要和典型生境类型，如东方白鹳代表以芦苇沼泽为主要繁殖、栖息环境的淡水沼泽鸟类生态类群，丹顶鹤代表了以芦苇沼泽为主要越冬生境的淡水沼泽鸟类生态类群，黑嘴鸥代表了以翅碱蓬为典型生存环境的滩涂鸟类生态类群。各预案将导致区域自然生态单元、地表覆盖物类型的变化，并减小系统所受到的生境破碎化因素影响，从而导致物种生境适宜性、生境质量条件的改善，并最终优化提高保护物种生境的生态承载力<sup>[13-15]</sup>。

生态承载力是指在无狩猎等干扰条件下种群与环境所达到的平衡点<sup>[13]</sup>，这里可以理解为某生境所能承载的指示物种的数量。指示物种的生态承载力根据该物种对栖息繁殖地、觅食地、休憩地及对道路等干扰的距离要求综合确定，由景观生态决策模型 (LEDESS) 进行模拟计算。依据恢复生态系统主要恢复植被生长所需要的适宜立地条件，以及湿地植被的自然演替规律，建立河口不同水盐条件下研究区域的植被演替知识表，并将其转换为 LEDESS 模型的知识矩阵，通过水文分布和生态恢复模型，预测不同补水条件下可能产生的自然生态单元与地表覆盖物类型，利用模型中建立的指示物种对生境类型及面积的需求知识矩阵，模拟得出不同预案条件下指示物种生境的适宜性变化及不同指示物种的生态承载力(表 3，图 6)。

就现状生境而言，繁殖期内黄河三角洲国家级自然保护区东方白鹳数量平均约为 45 对(表 3)，繁殖的黑嘴鸥数量约为 400 对，越冬期保护区内丹顶鹤平均数量约为 30 对。

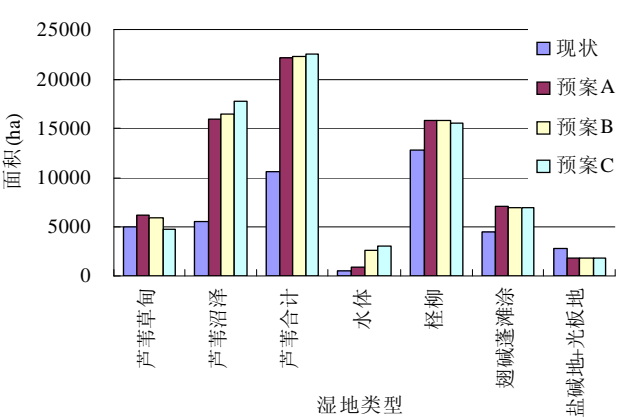


图 5 三种引水预案对黄河三角洲自然保护区湿地修复比较  
Fig. 5 Comparison of three scenarios for YRD wetland restoration

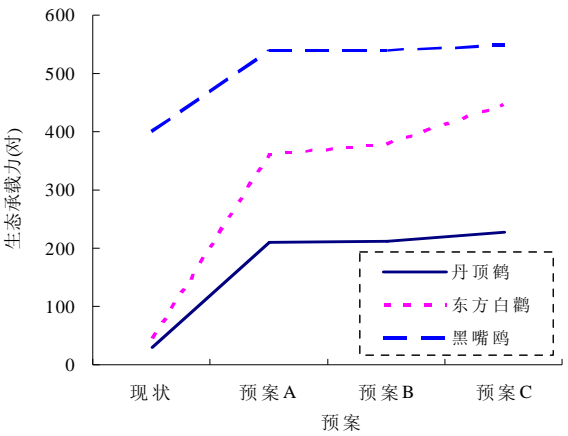


图 6 各预案不同指示物种生态承载力比较  
Fig. 6 Comparison of carrying capacity of indicator species in different scenarios

表 3 各预案不同指示物种生态承载力比较

Tab. 3 Comparison of habitat's carrying capacities in three scenarios for YRD wetlands restoration			
预案	越冬期丹顶鹤 数量 (对)	繁殖期东方白鹳 数量 (对)	繁殖期黑嘴鸥 数量 (对)
现状	30	45	400
预案 A	209	361	540
预案 B	211	378	541
预案 C	227	446	549

就现状生境而言，繁殖期内黄河三角洲国家级自然保护区东方白鹳数量平均约为 45 对(表 3)，繁殖的黑嘴鸥数量约为 400 对，越冬期保护区内丹顶鹤平均数量约为 30 对。

表明现状水平年黄河三角洲湿地虽然具备了东方白鹳、丹顶鹤及黑嘴鸥等保护性鸟类的繁殖和越冬生境条件，但由于生态质量较差，东方白鹳、丹顶鹤及黑嘴鸥数量较少。黄河三角洲作为珍稀鸟类中转站、越冬地和繁殖地的生态功能发挥受到湿地水资源减少及质量下降的严重影响。

在进行自然保护区不同补水方案下的生态补水恢复时，丹顶鹤数量由现状的 30 对分别增加到 209 对 (预案 A)、211 对 (预案 B)、227 对 (预案 C)，繁殖期东方白鹳数量由现状的 45 对分别增加到 361 (预案 A)、378 (预案 B)、446 对 (预案 C)，表明退化的芦苇湿地、盐碱地已被湿地修复新产生的高质量芦苇沼泽所替代，成为丹顶鹤、东方白鹳等淡水沼泽鸟类适宜的栖息地；黑嘴鸥数量与现状比较有所增长，但增长缓慢，芦苇湿地的恢复对黑嘴鸥的栖息地也产生了一定的有利影响，但仅靠补水对黑嘴鸥栖息地修复作用并不十分明显，原因在于黑嘴鸥的适宜生境为咸淡水交替的翅碱蓬群落，对淡水资源的要求不是十分敏感，过多的补水反而会不利于黑嘴鸥栖息地质量的提高。

从各预案条件下不同指示物种的生态承载力比较可看出(图 6)，各不同预案的补水条件下，黄河三角洲作为珍稀鸟类栖息地，生物多样性指标得到提高，指示物种数量显著增加，生态承载力得到大幅提高。但在各种补水方案生态效果分析中。各类指示物种的承载水平并未出现随补水量持续增加而出现显著持续增长的情况，如预案 B 相对于现状和预案 A 而言，补水后丹顶鹤的数量有明显增加，表明其恢复的生态系统效益较为显著，但预案 C 相对于预案 B，补水量的增加并没有对越冬期丹顶鹤数量的增加趋势起到十分明显的促进作用，尤其对黑嘴鸥来说，其生存需要咸淡水交替环境，适宜的补水是必需的，但过多的补水反而不利于其栖息繁殖。修复河口受损的生态系统，需要统筹考虑生态系统各保护物种和栖息环境的特点与需求，在保护物种和生态景观多样性的前提下，科学协调区域咸、淡水湿地保护和修复的关系。

5.4 湿地生态需水量确定

收集黄河三角洲多年实测气温、降雨、蒸发等资料，依据同步长系列的利津站降水、蒸发资料和有关卫星遥感蒸发资料，根据确定的补水目标采用水量平衡方程进行湿地生态需水量计算。降水量采用三角洲地区多年平均降水量 561.6 mm，淡水湿地蒸散发量采用地表能量平衡系统模型 (SEBS) 进行测算(表 4)。

从表 4 可看出，各预案湿地生态补水量的范围为 2.78~4.17 亿 m<sup>3</sup>，根据不同补水条件下保护区指示物种栖息地质量及生态承载力的分析，可以得出如下结论：保护区生态需水量的范围约为 2.8~4.2 亿 m<sup>3</sup>，预案 B 所带来的综合生态效益最高，因此，适宜生态需水量可确定为 3.5 亿 m<sup>3</sup>。在现实水资源配置中，可根据研究区气候条件分干旱年份、湿地年份、一般年份进行生态补水，干旱年份补水 4.2 亿 m<sup>3</sup>，湿润年份补水 2.8 亿 m<sup>3</sup>，一般年份补水 3.5 亿 m<sup>3</sup>。适宜生态需水量是指能够使保护区栖息地质量达到较为理想状态并能获得较高的生态效益的补水量，此时保护区的主导生态功能得到较好的发挥，生态系统稳定、健康、可持续发展。

6 结论

(1) 针对目前生态环境需水计算中存在的水分—生态耦合作用机理不清、生态环境补水效果不明等导致生态环境需水过程失真的问题，集合生态、水文、水资源、土壤、植物生理、鸟类生态学等学科知识和专家知识，建立了黄河三角洲湿地生态补水水力学-地

表 4 不同预案条件下湿地生态 补水量  
(单位：亿 m<sup>3</sup>)

Tab. 4 The discharge water quantities of different scenarios (unit: 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)

预案	南部补水量	北部补水量	合计
A	2.35	0.43	2.78
B	2.95	0.54	3.49
C	3.52	0.65	4.17

下水模型, 以及湿地补水的景观生态决策支持系统, 形成了一体化的河口湿地生态需水生态—水文模拟系统, 在此系统的支持下, 通过河口地区植被类型、土地利用演变及现状分析, 考虑黄河水资源的实际等因素, 确定了河口湿地的合理规模及生态需水量, 对湿地补水后的生态效果进行了评价。结果显示, 黄河口须进行生态补水的湿地规模约为 23600 hm<sup>2</sup>, 接近黄河三角洲自然保护区上世纪 90 年代初建立时的淡水湿地规模, 在此规模下, 生态需水的范围约为 2.8~4.2 亿 m<sup>3</sup>, 适宜生态需水量为 3.5 亿 m<sup>3</sup>; 黄河三角洲湿地作为东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙的“中转站”、越冬地和繁殖地, 具有东方白鹳及丹顶鹤等保护性鸟类的繁殖和越冬的潜在生境条件, 但其生境质量并不十分理想, 通过湿地补水, 作为珍稀鸟类重要栖息地芦苇湿地面积从现状的 10000 hm<sup>2</sup> 增加至 22000 hm<sup>2</sup>, 翅碱蓬滩涂生境从现状的 4500 hm<sup>2</sup> 增加至 7000 hm<sup>2</sup>, 指示性物种丹顶鹤、白鹳、黑嘴鸥适宜生境面积增加明显, 生态承载力大幅提高, 自然保护区湿地生态系统完整性及稳定性得到加强, 有利于区域生态系统的良性维持。

(2) 研究同时表明, 景观生态学方法应用于湿地生态修复决策研究时, 一方面可以根据历史和现实景观格局来建立恢复目标, 并为恢复地点的选择提供空间依据; 另一方面, 还可以通过景观预案方法对不同修复措施下景观格局演化进行模拟, 对恢复后的景观生态效果进行综合评价。景观预案研究与评价方法在黄河三角洲湿地需水评价的应用不仅为黄河三角洲湿地生态保护提供了不同的途径与方向, 在黄河水资源供需矛盾日益尖锐的今天, 湿地恢复适宜需水量及其效果的评价也为科学合理的利用有限的黄河水资源提供了有效技术支持。

## 参考文献 (References)

- [1] Wang Xingong, Xu Zhixiu, Huang Jinhui et al. Study on ecologic water demand of fresh water wetland of the Yellow River Estuary. *Yellow River*, 2007, 29(7): 33-35. [王新功, 徐志修, 黄锦辉 等. 黄河河口淡水湿地生态需水研究. *人民黄河*, 2007, 29(7): 33-35.]
- [2] Cui Baoshan, Yang Zhiheng. Water consumption for eco-environmental aspect on wetlands. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, (2): 219-224. [崔保山, 杨志峰. 湿地生态环境需水量研究. *环境科学学报*, 2002, (2): 219-224.]
- [3] Cui Lijuan, Bao Daming, Xiao Hong et al. Calculation methods of wetland ecological water and case study. *Journal of Soil and Water conservation*, 2005, 19(2): 147-151. [崔丽娟, 鲍达明, 肖红 等. 湿地生态用水计算方法与应用实例. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 147-151.]
- [4] Guan Wenbin, Xie Chunhua, Ma Keming et al. A vital method for constructing regional ecological security pattern: Landscape ecological restoration and rehabilitation. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 64-73. [关文彬, 谢春华, 马克明 等. 景观生态恢复与重建是区域生态安全格局构建的关键途径. *生态学报*, 2003, 23(1): 64-73.]
- [5] Wu Jianguo. *Landscape Ecology Pattern, Scale and Grade*. Beijing: Higher Education Press, 2000. 218-219. [邬建国. *景观生态学: 格局、尺度与等级*. 北京: 高等教育出版社, 2000. 218-219.]
- [6] Charles Simenstad, Denise Reed, Mark Ford. When is restoration not? Incorporating landscape-scale processes to restore self-sustaining ecosystems in coastal wetland restoration. *Ecological Engineering*, 2006, 26: 27-39.
- [7] Mary E Kentula. Perspectives on setting success criteria for wetland restoration. *Ecological Engineering*, 2000, 15: 199-209.
- [8] Zhao Yanmao, Song Chaoshu. *Scientific Survey of Yellow River Delta Nature Reserve*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1995. 13-50. [赵延茂, 宋朝枢. *黄河三角洲自然保护区科学考察集*. 北京: 中国林业出版社, 1995. 13-50.]
- [9] Harms W B, Knaapen J P, Rademakers J G M. Landscape planning for nature restoration: Comparing regional scenarios. In: Vos C, Opdam P. *Landscape Ecology and Management of a Landscape under Stress*. IALE-studies 1. London: Chapman & Hall, 1993.
- [10] Laura R Musacchio, Robert N Coulson. Landscape ecological planning process for wetland, waterfowl, and farmland conservation. *Landscape and Planning*, 2001, 56: 125-147.
- [11] Yan Denghua, Wang Hao, Wang Fang et al. Frame of research work on ecological water demand and key topics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(3): 267-273. [严登华, 王浩, 王芳 等. 我国生态需水研究体系及关键研究命题初探. *水利学报*, 2007, 38(3): 267-273.]
- [12] M van Eupen et al. *Landscape Ecological Decision & Evaluation Support System (LEDESS) Users Guide*. Alterra Report 447, Alterra, Green World Research, Wageningen, 2002.

- [13] Xiao Duning, Hu Yuanman, Li Xiuzhen et al. Landscape Ecology Studies on the Deltaic Wetlands around Bohai Sea, Beijing: Science Press, 2001. 347-354. [肖笃宁, 胡远满, 李秀珍 等. 环渤海三角洲湿地的景观生态学研究. 北京: 科学出版社, 2001. 347-354.]
- [14] Li Xiaowen, Xiao Duning, Hu Yuanman. The landscape planning scenarios designing and the measures identification in the Liaohe River Delta wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 353-364. [李晓文, 肖笃宁, 胡远满. 辽河三角洲滨海湿地景观规划预案设计及其实施措施的确定. *生态学报*, 2001, 21(3): 353-364.]
- [15] Li Xiaowen, Xiao Duning, Hu Yuanman. The effects of different land-use scenarios on habitat suitability of indicator species in the Liaohe River Delta wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(4): 550-560. [李晓文, 肖笃宁, 胡远满. 辽东湾滨海湿地景观规划各预案对指示物种生境适宜性的影响. *生态学报*, 2001, 21(4): 550-560.]

## Environmental Flows Evaluation Based on Eco-hydrology in the Yellow River Delta Wetlands

LIAN Yu<sup>1</sup>, WANG Xingong<sup>1</sup>, HUANG Chong<sup>2</sup>, LIU Gaohuan<sup>2</sup>, WANG Ruiling<sup>1</sup>,  
ZHANG Shaofeng<sup>1</sup>, LIU Yueliang<sup>3</sup>, Bas Pedroli<sup>4</sup>, Michiel van Eupen<sup>4</sup>

(1. *Yellow River Basin Water Resources Protection Bureau, Zhengzhou 450004, China;*

2. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

3. *Yellow River Delta National Nature Reserve, Dongying 257091, Shandong, China;*

4. *Alterra Wageningen UR, The Netherlands)*

**Abstract:** Based on the principles of protecting integrity and stability of ecosystem, and aimed at promoting maintenance of well-conditioned delta ecosystem, as well as improving the carrying capacity of the ecosystem and protecting biodiversity, this paper identified 23,600 hm<sup>2</sup> of wetlands for restoration project which urgently needed to be supplied with freshwater in the Yellow River Delta (YRD). Whereas, this paper, adopting the principle and methodology of landscape ecology and supported by RS and GIS and wetlands plant physiology, ecology and hydrology, made a study on coupling mechanism between water and ecological process, and therefore, established the eco-hydrology based environmental flow calculation and evaluation model of the YRD. Furthermore, this study uses pre-scheme methodology and planning evaluation concept of landscape ecology decision & evaluation support system to forecast and evaluate ecological effects on the wetlands with different wetlands water discharge scenarios, which focused on the relationship study between suitable habitat conditions for indicator species such as red-crowned crane, Oriental stork, Sauder's gull and changing ecological pattern after water supplement. The evaluation results show that the wetlands of the YRD have the potential to be the habitat for rare birds such as red-crowned crane, Oriental stork, Sauder's gull, but the present habitat quality is not good. After discharging water to wetlands, the area of reed wetlands will reach 22,000 hm<sup>2</sup> from 10,000 hm<sup>2</sup> and seablite mudflats will reach 7000 hm<sup>2</sup> from 4500 hm<sup>2</sup>, serving as wintering, inhabiting and breeding sites for many rare birds. The habitat quality and carrying capacity will increase notably. In general, after fully taking into account water resources, water allocation engineering measures and integrated requirement of wetlands ecosystem protection, this study proposed recommendation of supplying the wetlands of the YRD with 0.35 billion m<sup>3</sup>/a freshwater abstracted from the Yellow River to restore and protect the YRD wetlands ecosystem.

**Key words:** eco-hydrology; wetland; environmental flows; Yellow River Delta (YRD)