

河口三角洲湿地健康生态圈构建：理论与方法

韩广轩¹✉ 牛振国² 栾兆擎³ 王光美¹ 张俐文¹ 管博¹

(¹中国科学院烟台海岸带研究所, 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东烟台 264003; ²中国科学院遥感与数字地球研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; ³南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037)

✉通信作者 Corresponding author. E-mail: gxhan@yic.ac.cn

摘要 河口三角洲湿地生态环境保护 and 区域开发的矛盾突出, 对湿地生态圈健康和栖息地生态功能产生直接而强烈的影响。健康的河口三角洲湿地生态圈是由自然过程的连续性、生态系统的连通性、生境的异质性以及食物网的多样性等多种因素共同决定的。本文讨论了健康湿地生态圈构建的基础理论, 综述了景观生态网络构建、水文连通性网络构建、食物网构建以及生境异质性栖息地营建的理论与方法。在区域和景观尺度上, 以土地利用-生态系统完整性为主线, 阐明了湿地破碎化对湿地生态功能的影响, 特别强调景观完整性、水文连通性对湿地栖息地的影响; 在生态系统和群落尺度上, 以食物网-生态系统稳定性为主线, 强调食物网多样性、生境异质性对湿地生物圈构建的支撑作用。基于景观完整性、水文连通性、生境异质性和食物网多样性构建健康湿地生态圈, 可为湿地生态环境保护 and 建设提供科学依据和技术支撑。

关键词 河口三角洲; 栖息地破碎化; 生态圈; 连通性; 生境异质性; 食物网; 生态功能

DOI: 10.13287/j.1001-9332.201808.036

Construction of healthy wetland ecosphere in an estuarine delta: Theory and method.

HAN Guang-xuan^{1*}, NIU Zhen-guo², LUAN Zhao-qing³, WANG Guang-mei¹, ZHANG Li-wen¹, GUAN Bo¹

(¹Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; ²State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China; ³College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract The healthy wetland ecosphere of an estuarine delta is determined by many factors, such as continuity of natural processes, ecosystem connectivity, habitat heterogeneity and food web diversity. The contradiction between ecological and environmental protection and regional development in the estuarine delta is becoming more and more prominent. A series of man-made and natural processes directly or indirectly resulted in the habitat fragmentation of wetlands, which has a direct and strong impact on the ecosphere health and the habitat ecological function of wetlands. In this paper, we provided a perspective on researches on the basic theory of healthy wetland ecosphere, landscape ecological network system, hydrologic network construction, key food webs, and habitat heterogeneity. It was suggested that at the regional and landscape scale, the linkages between land use and ecosystem integrity is the main line, in order to clarify the influence of habitat fragmentation on wetland ecological functions, especially the effect of landscape integrity and river connectivity on wetland habitat. At the community and ecosystem levels, emphasis might be given on the relationship between food web and ecosystem stability, especially the supporting role of food web diversity and habitat heterogeneity on the construction of wetland biosphere. The further efforts should be focused on the wetland habitats construction based on landscape integrity, hydrologic connectivity, habitat heterogeneity and food web diversity. It was sure that, these efforts could help to develop and perfect the theory and method of constructing wetland ecosphere and enhancing its ecological function, and promote the sound development of regional

基金项目: 本文由国家自然科学基金项目(41671089)和中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STZ-ZDTP-023)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41671089) and Science and Technology Service Network Initiative of the Chinese Academy of Sciences (KFJ-STZ-ZDTP-023).

作者简介: 韩广轩, 男, 1978年生, 研究员。主要从事滨海湿地演变机制与生态修复, 滨海湿地碳循环与碳收支研究。E-mail: gxhan@yic.ac.cn

网络首发时间: 2018-04-25 13:43:40 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1253.q.20180424.1540.003.html>

ecological environment and resource utilization in an estuarine delta.

Key words estuarine delta; habitat fragmentation; ecosphere; connectivity; habitat heterogeneity; food web; ecological function

河口三角洲受海洋、陆地和河流的多重影响,具有河海交互性、海陆过渡性、新生性及生态脆弱性等特点。同时,河流尾间摆动、水沙通量变化、淤积、冲刷使河口三角洲发育处于动态变化之中,湿地演变剧烈^[1]。河口湿地具有较高的生物多样性,是重要经济和渔业资源的产卵场、索饵场和越冬场,也为湿地鸟类提供食物和栖息环境^[2-3],成为地球上生态系统服务价值最高的生态系统类型^[4]。但是,河口三角洲往往区位优势,具备丰富的水资源、油气资源、港口资源和多样化的湿地资源,是人类活动最为集中的地区之一,已成为全球变化的生态脆弱带和环境变化敏感区。三角洲湿地生态环境保护和区域开发的矛盾突出,直接或者间接导致了三角洲湿地栖息地破碎化^[5-6],生物多样性降低,湿地生态系统结构和功能面临威胁^[7-8],制约湿地栖息地功能的发挥。

栖息地破碎化(habitat fragmentation)是由自然和人为因素影响,造成的生境景观由简单、连续的整体向复杂、不连续的斑块镶嵌体变化的过程^[9],最直接的表现是湿地景观中面积最大的自然栖息地生境斑块不断被分割成较小且孤立的生境斑块^[10]。栖息地的丧失和破碎化对三角洲湿地生态系统完整性和生态圈健康产生直接而强烈影响^[11],被认为是生物多样性减少和物种灭绝的主要影响因素^[12]。一方面,栖息地破碎化破坏湿地生物与景观格局之间的平衡关系,导致适宜生境面积丧失和空间格局的变化,而且在不同空间尺度上引起干扰的扩散、物种的分布、迁移和建群等生态过程的复杂变化,还会对物种的丰富度和密度产生重要影响,会导致生态系统严重退化^[13-14]。例如,石油开采及为采油活动而修建的道路造成了黄河三角洲湿地景观的破碎化,使丹顶鹤(*Grus japonensis*)生境斑块面积变小并产生斑块隔离^[13]。另一方面,栖息地破碎化影响湿地与陆地和浅海区域的连通性。例如,近年来黄河三角洲进行的集约化的围填海活动隔断了湿地的水文连通性,使浅海湿地生物失去陆地食物源,同时陆域湿地栖息地逐渐消失,影响湿地生物栖息地的完整和生物多样性的维持^[5,14],大型底栖动物的物种和数量明显下降^[8]。

本文讨论了健康湿地生态圈构建的基础理论,综述了景观生态网络构建、水文连通性网络构建、食物网构建以及生境异质性栖息地营建的理论与方法,提出从景观尺度和生态系统尺度上开展湿地栖息地破碎化过程与机制研究,构建基于景观完整性、水系连通性、生境异质性和食物网多样性的湿地栖息地,为湿地生态环境保护和建设提供科学依据和技术支撑。

1 河口三角洲健康湿地生态圈模式

生态圈(Ecosphere)是生物圈与生态系统两个概念的结合,包括生物圈及其赖以生存和发展的环境——大气圈、水文圈和岩石圈在内。由于处在陆海过渡带,受海洋潮汐过程与河流淡水冲刷的共同作用,河口三角洲湿地生态圈是由自然过程的连续性、生态系统的连通性、生境的异质性以及食物网的多样性等多种因素共同决定的(图 1)。1)自然过程(processes)以动态的方式创造和维持湿地,使湿地保持一个平衡、综合和适宜的生态系统的功能^[15-16]。自然过程和格局的完整性有利于湿地生态功能的发挥^[17-18],而湿地的破碎化往往破坏了自然过程和湿地生态系统的完整性。例如,堤坝和道路作为线状地物虽所占面积不大,但对潮汐、径流等水文过程造成的分割和干扰作用,以及所产生的生境污染效应,对湿地生态系统完整性产生深刻的影响,是促使野生动物生境行为性破碎化的重要因素^[9]。2)湿地生态系统的连通性(connectivity)是通过气象、水文、生物及地球化学循环等过程耦合产生的^[19-20],是各个生态系统或斑块之间空间关系、生物体功能关系以及生物体与空间关系之间相互作用的结果^[21]。例如,从陆地到海洋的湿地景观网络和水系网络为物质运移和生物迁移提供了通道。3)生境异质性和多样性(habitat heterogeneity and diversity)可以提供更为丰富的生态位,从而有利于物种共存而维持更高的生物多样性^[22-23]。4)食物网(food webs)是生态系统中多种生物及其营养关系的网络,是生态学上最经典的概念之一^[24]。食物网是生态系统物质和能量流动的重要形式,是维持生态系统稳定性

的重要组成部分，恢复和维持湿地生态系统食物网对于提升湿地生态功能具有关键性作用。

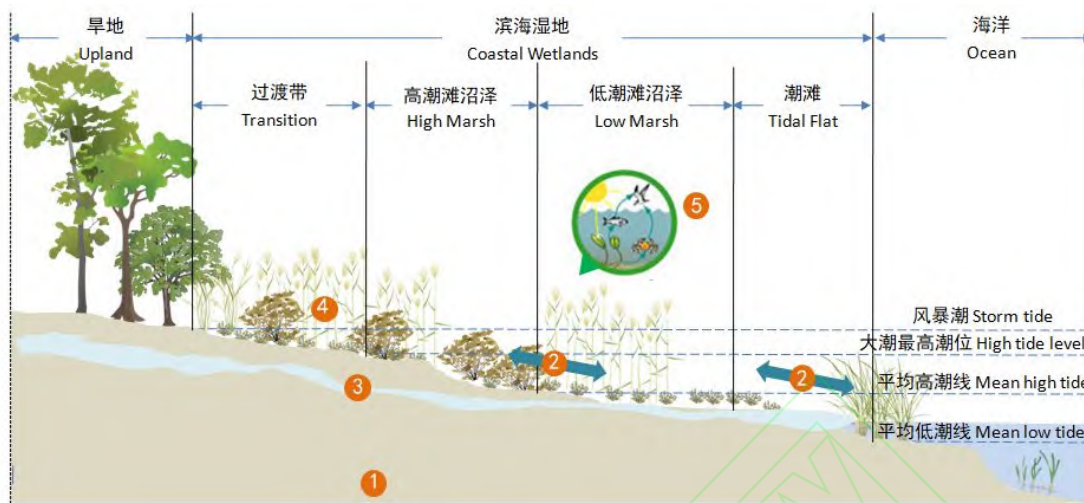


图 1 河口三角洲健康湿地生态圈模式图

Fig.1 A schematic diagram illustrating the ecosphere construction of wetlands in an estuarine delta.

- 1) 背景决定了湿地中的约束和机会 Setting determines the constraints and opportunities within a wetland;
- 2) 过程以动态的方式创造和维持湿地 Processes create and sustain wetlands in a dynamic way;
- 3) 连通性使物质运移和生物迁徙 Connectivity enables movement of materials and organisms;
- 4) 异质性和多样性为湿地生物提供了一系列栖息地选择 Heterogeneity and diversity provide a range of habit options for wetland organisms;
- 5) 食物网决定湿地的生态系统稳定性 Food webs determine ecosystem stability of wetlands

2 湿地景观破碎化与生态网络构建

景观破碎化过程伴随着生境空间格局的改变，是生物多样性丧失的重要原因之一。生态网络的概念于 20 世纪 70 年代提出，用于解决景观破碎化问题。到 20 世纪 90 年代被广泛应用^[25]，证明了生态网络是解决景观破碎化的有效方法。景观格局指数是度量景观结构破碎化的常用方法^[26]，可分为斑块级、类别级、景观级 3 个层次，分别用于表征不同空间尺度上景观的结构特征^[27-28]。而景观连接度可以反映景观结构连接度和景观功能连接度两个方面^[29]，是测度和评价景观功能破碎化的有效方法，对动物迁移和扩散、基因交流等生态过程，以及维持自然生态系统的稳定发展均具有重要影响^[30]。景观连接度被应用在生物多样性保护、自然景观格局优化等方面，以及采用景观格局指数对景观破碎化进行分析评价^[31]。

受遥感数据源的限制，2009 年以前，湿地景观的演变机制无法从更深入的层次上进行解释。一方面由于湿地具有水文动态性和植被季节性特征，传统基于单时相遥感数据的地表覆盖分类方法不能满足湿地生态系统动态监测的需要；同时传统土地利用/覆盖遥感分类无法满足湿地特定服务功能(如特定生境植物群落)的需求。另一方面，景观破碎化导致的生境面积缩小、斑块形状趋于不规则、廊道被截断以及斑块彼此隔离，即使在像素水平也无法解释湿地退化和驱动因素之间的定量关系^[32]。这些特征对湿地遥感监测提出了更高的时空分辨率要求。

合理的生态网络，可以提高生境斑块间的连接水平，提高生态系统功能，缓解生态环境问题，是对生态系统进行管理的重要科学依据。国外生态网络构建研究从 20 世纪 80 年代开始，以保护生物多样性为主要目标，如欧洲的生态基础设施(Ecological Infrastructure)、生态构架(Ecological Framework)及美国的绿道体系(Greenway System)等。在这些实践的基础上，结合景观生态学和保护生物学原理，形成了生态网络规划的理念。近年来，在遥感和 GIS 技术支持下，提出了很多网络优化的模型方法，如耗费距离模型、景观格局指数、景观连接度指数以及最小耗费距离模型)、最小累积阻力模型等。国内的生态网络规划主要应用在城市绿地的生态网络规划方面。例如，Pereira 等^[33]采用多节点可达性(multi-node reachability)分析西班牙东北地区 20 种鸟类的栖息地斑块的连通性，以提高景观网络分析的现实性和适用性。吴未等^[34]以苏锡常地区为研究区域，以白鹭(*Egretta garzetta*)、鸳鸯(*Aix*

galericulata)和雉鸡(*Piasianus colchicus*)3种鸟类为焦点物种,通过采用生境斑块约束条件模型与最小成本路径法相结合的方法识别出生境网络;从满足集合覆盖问题视角出发,通过采用网络构成要素复合的方法进行网络复合;通过采用观测数据为生境斑块和迁移廊道增补依据的方法进行复合生境网络优化。陈小平和陈文波^[35]基于重力模型定量分析了鄱阳湖生态经济区生态斑块间的相互作用强度,采用最小费用模型构建了该区域的潜在生态廊道。谢慧玮等^[36]采用最小耗费距离模型分析方法,构建江苏省自然遗产地生态网络保护体系,并基于网络连通性指数分析方法对生态网络的连通性和有效性进行评价,最后提出生态网络的优化措施。目前为止未见有就河口三角洲湿地栖息地的保护从生态功能提升的角度进行构建和优化的研究,同时对景观生态类型的判别多依赖于传统的中分辨率遥感数据,不能满足湿地景观生态网络优化的需求。

3 湿地水文连通性网络恢复及构建

水文连通性是系指系统内部和其它系统之间物质、能量和生物体以水为媒介进行迁移和传递的能力^[37]。从生态水文学角度看,水文连通性是表征湖泊、河流、湿地等水体之间的连通程度,是影响流域内河流、湖泊与湿地等水生态系统内部及其与外部环境以水为媒介进行物质循环、能量流动和生物迁移等水文生态过程的关键因素,对于维持湿地格局和功能的稳定性和生物多样性具有重要意义^[38]。

湿地水文连通性的评估方法主要包括:1)实地监测法:通过获取研究观测点的水文数据,分析流域水体的连通状况^[39-40]。2)水文模型法:通过关键水文过程的模型模拟研究,分析岸带、河漫滩和河网之间的水文连通状况^[41]。3)连通性函数法:基于景观生态学的景观连接度理论,构建某种指数反映不同景观类型的水文连通性^[29,42-43]。4)图论方法:利用数字化水系网络中点、线几何拓扑关系,分析水系网络的水文连通状况^[44]。水文连通性评估已经成为湿地生态水文研究的热点问题之一,综合现有研究方法的优缺点,充分结合地理信息技术和多类型监测手段,开展多尺度、多维度的区域水文连通性量化评估将成为湿地水文连通性研究的主要发展方向。

水文连通性在较长时间尺度上主要受地质构造和气候变化等自然因素控制,而在短时间尺度上主要与土地利用方式、水利工程建设等人类活动密切相关^[37,45]。水文气象条件也是影响湿地水文连通性的重要因素。不定期的洪泛过程决定着河流与洪泛湿地的水文连通性,控制着洪泛湿地的形成、演化和发展^[46]。量化区分气候变化和人类活动对湿地水文连通性改变的贡献,阐明其演化的驱动机制,将是湿地生态水文过程基础研究和湿地生态水文恢复实践中所关注的重点问题。

有关水文连通在水生态修复实践中的应用研究主要集中于分析水文连通性对河湖湿地水生态系统功能的影响,保护与恢复水生态系统维持最低或最适功能所需的水文连通理论及相应工程措施,以及通过水文连通理论研究评估湿地水生态系统功能修复效果等^[47-48]。例如,在美国 Money 河口湿地,通过填平沟渠、修建低水道路交叉口、铺设涵管和移除入侵植物等方式,进行湿地水文连通性的恢复;在2012年伊利湖(Lake Erie)湖滨湿地恢复项目中,通过拆除部分堤坝和过鱼栅栏等设施,恢复和重建自然湿地的水文连通性,为湿地水文循环情势和鱼类通道恢复提供了水文基础,恢复了消失长达一个世纪的食物网和鱼类繁育栖息地。在我国,佟守正^[49]分析了扎龙湿地沟渠的类型、长度和密度及扩展方式的时间动态变化,评估了沟渠对扎龙湿地水文连接度、水系分布格局以及来水路径的影响及其生态效应,确定沟渠阻隔后湿地缺水是导致扎龙湿地退化的关键原因。根据扎龙湿地的水文规律、湿地功能区划、地形地势和以往对湿地补水的经验,提出了扎龙退化湿地生态补水的恢复方案。李晓珂等^[50]从结构连通性和功能连通性两个方面,分析公路构筑物、路基填筑方式等因素对湿地水系连通性的影响,提出水系连通性的保护技术。夏敏等^[51]基于水流阻力与图论的水系连通性计算方法,概括了表征河网连通程度的主要指标,得到水系格局连接度,在此基础上综合各指标构建指标体系,评价了巢湖环湖区域的水系连通性。从水文连通角度出发,分析流域/区域水生态系统的退化机制及修复措施,建立系统评价体系,开展湿地水文连通性恢复的效果评估,已成为生态水文学领域的研究重点,同时也对维护湿地水生态系统健康、促进湿地生态系统保护具有重要指导意义。

4 湿地食物网构建的理论与方法

国际上湿地食物网相关研究开始于 20 世纪 50—60 年代。关于盐沼湿地食物网的基本理论主要有两种假说：1)“碎屑假说”认为盐沼湿地具有较高的维管植物初级生产，可以为盐沼消费者提供大量可利用的有机碎屑，因此维管植物初级生产是整个盐沼湿地食物网的能量基础^[52]；2)“输出假说”认为盐沼湿地具有较高的初级生产力，从而把更多的有机碎屑输出到邻近的河口及滨海水体中，支持着河口及滨海次级生产^[52]，物理输出(潮水或雨水作用)和生物输出(游泳动物的取食)是输出的两种主要表现形式。然而随着研究的不断深入，针对这两种假说存有一定的争议。针对碎屑假说，有研究认为底栖微藻是盐沼湿地食物网最重要的碳源，而很少的消费者能够直接利用盐沼维管植物及其碎屑^[53]；而对于输出假说，后续许多研究结果表明，盐沼湿地有机物输出能力与初级生产力、湿地面积、潮汐强度以及河口地形等因素有关^[54-55]。关于多样性与生态系统的稳定性关系是生态学的研究热点问题，而且很多研究表明多样性促进生态系统的稳定^[56]。然而食物网的复杂性(物种数、链接数、营养级数据、物种特征等)与生态系统稳定性正相关关系依然存在争议，也有研究认为食物网的复杂性与生态系统稳定性无关^[57]。

食物网研究作为理解水域生态系统结构和功能的核心问题已经成为滨海湿地生态系统研究的热点^[55,58]。传统的食物网研究方法一般是基于野外直接调查直接观察法、胃容物分析法、粪便显微分析法等。传统方法优点是能够直接观测到消费者的觅食活动，但较高的时间、劳动力、物质消耗成本以及只能观测短暂食性使其不适于延续应用^[59]。直至近 20 年，食物网研究方法从传统观测法发展到稳定同位素法乃至高通量测序法^[60]。稳定同位素技术为示踪食物网碳流途径和构建食物网模型提供了新的手段，极大地推进了人类对于湿地生态系统食物网乃至生态圈的认识^[61]。稳定同位素法的优势在于可以反映动物与食物之间较长的取食关系，可以测出动物在食物网中的营养位置。例如，全为民^[62]通过测定 5 种初级生产者、19 种无脊椎动物和 11 种鱼类的稳定同位素 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值以及结合胃容物分析法构建长江盐沼湿地食物网，研究发现 C₄ 维管植物互花米草(*Spartina alterniflora*)和底栖微藻是整个食物网的能量基础，30 种消费者被划分为 3 个营养级：肉食性动物、杂食性动物和碎屑/藻食性动物。Mazumder 等^[63]通过同位素技术构建澳大利亚新南威尔士州红树林-盐沼湿地的食物网。该研究采集了维管束植物(包括红树植物、盐沼植物、海草等)、附生植物、底栖微藻、植食性动物、杂食性动物和食肉动物样品，并测定其 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值，构建红树林-盐沼湿地的食物网结构和营养途径。研究表明，盐沼植物 *Sporobolus virginicus* 和 *Juncu Kraussii* 是食物网主要的碳源，蟹类幼体是连接潮汐湿地和河口生态系统非常重要的食物网节点，而肉食鱼类 *Acanthopagrus australis* 则位于食物网最顶端。

目前关于湿地食物网相关研究中，多集中于食物网源判定、食物网各营养级关系等方面^[64]，关于破碎化湿地食物网的重新构建、以及食物网与生态系统稳定性关系等方面研究还尚未开展。另外，在潮间带、河口湿地等区域水文波动、景观破碎化以及人类活动等干扰的影响下，对湿地食物网结构及生态系统功能是如何响应的，以及生境与食物网各营养级之间的关系尚缺乏完整系统的科学认识；同时，湿地关键食物网构建及其与生境优化、生态功能提升关系的研究也是目前亟待开展并解决的科学问题，可以为湿地生物资源的保护、管理和恢复提供理论基础和重要的参考依据。

5 生境异质性与湿地栖息地营建

全球范围内的研究表明，包括植物、鸟类、无脊椎动物、大型底栖动物、哺乳动物等各种生物类群，其物种多样性和丰富度大多与生境异质性呈正相关关系^[22, 65-66]。相比于单一类型生境面积的大小，生境异质性是预测物种多样性的更好指标^[23]，也是维持物种多样性的更重要的基础条件^[67-68]。另一方面，生境异质性也可以减轻外来物种对本地物种的影响。例如，生境异质性是鱼类群落分布的决定性因子，尼罗尖吻鲈(*Lates niloticus*) 在引入乌干达维多利亚湖 100 多年以后，其主要猎物慈鲷(*Haplochromine cichlids*) 仍能与其共存，原因就在于该区丰富的水位和溶解氧梯度^[69]。因此，营造生

境类型丰富的栖息地, 已成为生态系统功能提升实践和生物多样性保护管理工作中的共识^[65,69-71]。然而, 生境异质性与生物多样性会存在尺度效应^[65], 在同一地区, 不同生物类群的多样性与生境异质性的关系也存在差别^[71]。某些物种受生境组成异质性的影响较大, 而另外一些物种则受生境结构异质性的影响更强^[22]。因此, 就生态功能提升和生物多样性保育工作而言, 明确目标区域生境异质性与生物多样性的关系尤为重要。

水分条件恶化是三角洲湿地退化的主要原因。以黄河三角洲为例, 自 2002 年黄河调水调沙以来, 补充淡水对黄河三角洲湿地的恢复起到了显著的效果^[72]。然而, 恢复湿地区域生境类型多样, 植被覆盖区、滩涂和裸地共存, 淡水补充对不同区域类型的生态恢复效果各异^[72], 相对粗放的淡水补充方式也影响了生态恢复效果。另一方面, 目前的生态恢复偏重于植被覆盖度的提高。由于不同物种, 特别是鸟类对生境的要求各异, 单一提高植被覆盖度并不能相应地提升生物多样性和生态服务功能, 甚至会起到反作用^[73]。前期的调研也证实, 高植被覆盖度地区, 相对于水面-裸地-植被镶嵌分布区域, 鸟类种类和数量都显著降低。因此, 在黄河三角洲地区, 进行水资源的合理补给, 维持和营造生境异质性和多样性, 改善水资源的时空分布, 同时结合植被覆盖的适当恢复, 是当前湿地生态功能提升的发展方向^[74]。目前, 国内外较为成功的湿地退化生态修复与生物多样性改善案例(表 1), 包括长江口滩涂湿地鸟类栖息地优化与营造工程^[75]、美国佛罗里达沼泽湿地恢复^[76]、路易斯安那滨海湿地恢复^[77]等均注重多样化栖息地的营造并取得了良好的效果。因此, 以河口三角洲地区各种生境类型镶嵌分布的典型区域为研究对象, 探讨生境异质性与生物多样性的关系, 分析适宜栖息地生境构成及关键生物类群生态需求, 并在此基础上构建生境同质化类型湿地栖息地优化概念模式, 可为破碎化栖息地的关键区域和节点的生态改良提供理论指导, 促进湿地生态圈的完善和功能提升。

表1 退化湿地生态修复与生物多样性提升案例

Table 1 Case studies of ecological restoration and biodiversity improvement of degraded wetlands

生态修复案例 Case of ecological restoration	示范地点 Demonstration site	退化原因 Causes of degradation	关键技术 Key technology	修复效果 Restoration performance	参考文献 Reference
黄河三角洲退化滨海湿地修复 Restoration of degraded coastal wetlands in the Yellow River Delta	山东省黄河三角洲自然保护区	淡水补给减少及岸线后移潮汐影响减弱, 导致水分状况恶化盐碱化, 地形单一, 水分无法保持, 鸟类栖息功能严重削弱	依据地势挖沟筑岛营造鸟类栖息岛, 围绕鸟岛开挖深沟集水区, 借助夏季降雨及人工复水构建水位梯度, 植被进行人工配置及自然恢复	植被覆盖面积增加, 生境构成比例改善, 底栖动物开始拓殖, 栖息觅食鸟类达 74 种, 景观效果和生态系统服务功能同步恢复	任葳等, 2016 ^[78]
大莲湖湖滨带湿地生态修复 Restoration of lakeside wetlands in Dalian Lake	上海青浦大莲湖湿地	围湖造田导致湿地面积锐减, 富营养化问题严重	疏浚淤泥, 拓宽水塘, 疏通水系, 增加人工小岛以及围建土堤等措施进行地形地貌改造, 重建及优化植被群落结构配置, 上、中层及底层鱼类结合放流	由以鱼塘和林地为主的人工湿地转变为乔灌草及各类水生植物相结合的半自然湿地, 鸟类多样性和均匀性显著增加, 水体总氮、总磷、硝氮、叶绿素 a 及高锰酸钾指数显著下降	吴迪等, 2011 ^[79]
佛罗里达沼泽湿地恢复 Restoration of the Florida Everglades	美国佛罗里达州	城市化及工农业发展, 导致栖息地破坏以及生物入侵, 生物多样性下降, 水质污染	建立洪水控制系统, 建设地表水蓄水和河流改向项目, 河湖联通、河道裁弯取直工程措施与恢复本地种、限制入侵种的生物措施有机结合	物种数量不断增加, 暴雨治理区磷负荷量减少 79%, 磷浓度降低 0.02 mg·L ⁻¹ , 农业区磷浓度降低至 1.7 mg·L ⁻¹	Brennan, 2009 ^[80]

松嫩平原退化盐碱湿地恢复 Restoration of degraded saline-alkali wetlands in the Songnen Plain	吉林省大安市牛心套堡芦苇湿地	水分缺失, 土壤、水体盐碱化, 植被裸斑状退化	工程、生物及农艺措施相结合, 联通水系, 进行基底改造和芦苇复壮, 以及鱼虾增殖和鱼虾放流	水环境盐度和碱度年均下降 30%, 芦苇覆盖率达 100%, 产量年均增加 34%, 水生动物经济种群密度与多样性增加, 鱼-苇湿地景观重现	杨富亿等, 2009 ^[81]
长江口潮滩湿地鸟类栖息地优化与营造 Restoration of bird habitat on the intertidal flats in the Yangtze Estuary	长江口崇明西沙湿地	人类活动影响导致鸟类适栖地生态服务功能遭到破坏	包括挖塘、浅滩开挖、土堤建设、潮沟拓宽等生境改造, 结合植物引种和饵料投放措施	从以芦苇群落为主的潮滩湿地变成以明水面、光滩、植被复合结构的湿地鸟类栖息地, 目标鸟类种类增加 56%, 大型底栖动物种类增加 62%, 从无纳鱼功能增加到滞纳鱼类 16 种	高伟等, 2008 ^[82]
路易斯安那滨海湿地恢复 Restoration of Louisiana coastal wetlands	美国路易斯安那州	大坝、人工运河等修建减少淡水及沉积物输入, 海水入侵, 海岸侵蚀及水质污染严重	引淡压咸与泥沙改道, 淡水导流, 清淤疏浚, 沼泽促淤, 加强海岸线保护, 恢复离岸沙洲岛, 结合植被种植	系统长期工程, 正在实施中	Wilson, 2004 ^[83]

6 研究展望

针对目前河口三角洲湿地破碎化与生态功能下降的现状, 在区域和景观尺度上, 以土地利用-生态系统完整性为主线, 阐明湿地破碎化对栖息地生态功能的影响, 特别强调景观完整性、水系连通性对湿地栖息地的影响; 在生态系统和群落尺度上, 以食物网-生态系统稳定性为主线, 特别强调食物网多样性、生境异质性对湿地生物圈构建的支撑作用; 从生态系统完整性、水系的连通性、生态系统的稳定性 3 个层面构建湿地生态圈, 形成以提升生态系统服务功能为目标的湿地生态圈构建理论与方法体系(图 2)。以中国河口海岸带中的典型区域黄河三角洲为例, 具体阐述湿地健康生态圈构建方法与过程。

1) 黄河三角洲湿地破碎化及景观生态网络构建。基于不同空间分辨率遥感数据资料, 建立多层次的三角洲湿地遥感分类体系, 以满足不同尺度(区域/群落)湿地生态遥感调查的需求; 结合三角洲湿地精细分类结果, 依据图论连通度理论, 构建景观生态网络邻接矩阵, 数量化评估湿地不同层次生态系统的景观连通性; 在景观战略节点基础上, 构建联通廊道, 叠加水系网络现状图, 进行断裂点识别与恢复性连接, 提出湿地景观网络的构建与优化方案。

2) 黄河三角洲湿地水系连通性及水网构建。结合研究区数字高程模型、土地利用、沟渠道路等要素的时空动态, 综合采用景观生态学方法、图论等手段, 结合地理信息技术和实地监测, 量化湿地水文连通性指数, 阐明 40 年来区域湿地水文连通性格局现状及其时空演化特征; 系统分析气候变化、黄河径流、岸线冲淤、土地利用、水利工程及基础设施修建等因子的时空特征, 通过与湿地水文连通性时空动态的耦合分析, 揭示湿地水文连通性变化的驱动机制; 基于黄河三角洲湿地生态功能提升的最终目标, 结合湿地生态水文恢复的需求, 探索湿地水文连通性恢复措施, 建立湿地水文连通性恢复效果评价的方法和理论体系, 提出黄河三角洲湿地水文连通性网络构建和恢复的实施方案。

3) 基于营养级关系的湿地关键食物网构建模式。从浅海、潮间带、河口到盐沼湿地选择不同生境类型, 对这些生境进行物种(底栖微藻、浮游植物、维管植物、底栖生物、浮游动物、昆虫、鱼类和鸟类)调查, 确定不同自然湿地生境的环境特征、现存物种种类、物种数量、生态习性; 采集各种动植物样品, 采用稳定同位素技术测定各物种 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的自然丰度。通过模型确定食物网组成、营养关系和能量流动过程, 构建自然湿地生境下的食物网。分析食物网特征(物种数、链接数、相互作用强度、营养级数目、物种特性等)和生态系统稳定性的关系以及关键种的特征, 从而找出影响食物网和生态系统稳定性关系的关键食物网特征和关键种特征。根据关键营养级关系简化食物网, 构建相对简单但功能稳定、基于营养级关系的黄河三角洲自然湿地食物网模型。

4) 基于生境异质性的黄河三角洲湿地栖息地优化模式。选择各种生境类型(高植被覆盖区、裸地-植被-水面镶嵌分布区、潮滩、退化盐碱湿地区域等)镶嵌分布的典型区域, 抽取各种生境类型斑块, 度量不同生境类型斑块和同一生境类型斑块间的生境组成异质性和生境结构异质性; 以鸟类多样性为

衡量指标,以高鸟类多样性区域和目标保护鸟类(东方白鹳 *Ciconia boyciana* 和黑嘴鸥 *Chroicocephalus saundersi*)集中分布区域为两种代表性鸟类适宜栖息地类型,分析其植物群落组成、生境构成及合适土地覆盖比例,明确关键植物物种和鸟类的生态需求及限制因子;依据生境异质性与生物多样性的关系及鸟类适宜栖息地生境构成特点,以提高鸟类生物多样性和改善重点保护鸟类栖息地为目标,提出植物配置(种类和比例等)、生境斑块构成(形状、面积、水深梯度设置等)和食物资源(鱼类和底栖动物等)的优化组合方案,构建生境同质化类型湿地栖息地优化概念模式。

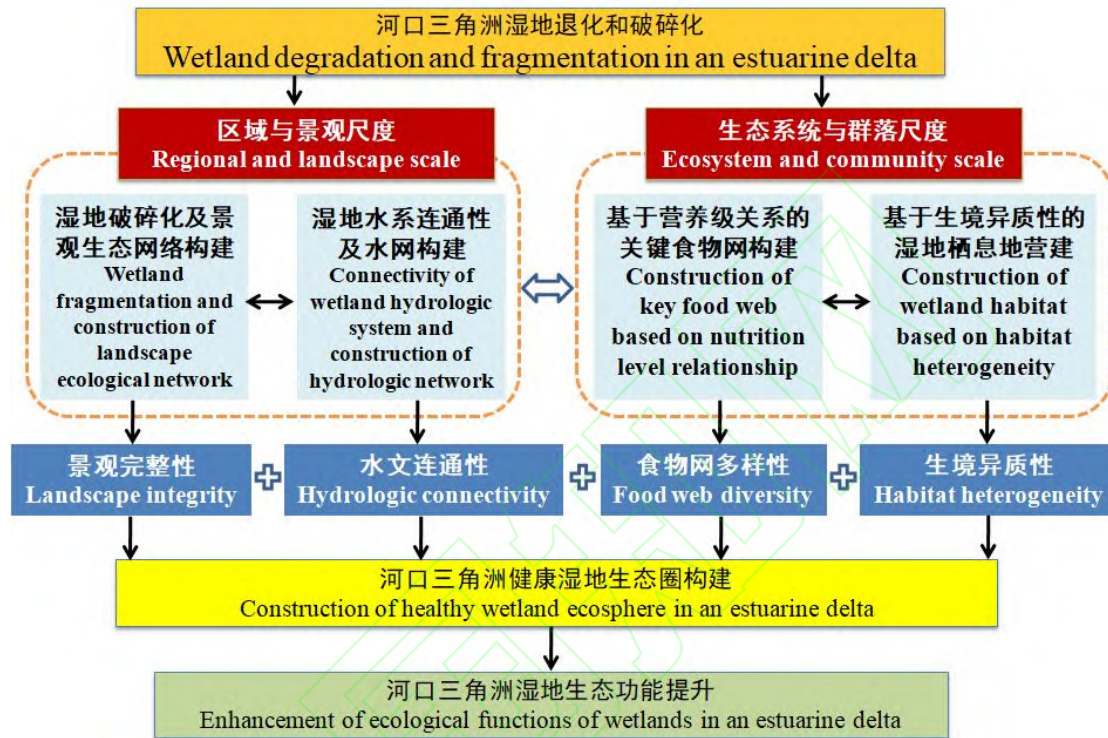


图2 河口三角洲健康湿地生态圈构建技术路线

Fig.2 A technology roadmap of the healthy ecosphere construction of wetlands in an estuarine delta.

参考文献

- [1] Huang G-L (黄桂林), He P (何平), Hou M (侯盟). Present status and prospects of estuarine wetland research in China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, 17 (9): 1751-1756 (in Chinese)
- [2] Gao F, Luo XJ, Yang ZF, *et al.* Brominated flame retardants, polychlorinated biphenyls, and organochlorine pesticides in bird eggs from the Yellow River Delta, North China. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43: 6956-6962
- [3] Hua YY, Cui BS, He WJ. Changes in water birds habitat suitability following wetland restoration in the Yellow River Delta, China. *Clean-Soil, Air, Water*, 2012, 40: 1076-1084
- [4] Costanza R, D'ArgeR, Groot RS, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260
- [5] Hua YY, Cui BS, He WJ, *et al.* Identifying potential restoration areas of freshwater wetlands in a river delta. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 438-448
- [6] Liu XQ, Gippel CJ, Wang HZ, *et al.* Assessment of the ecological health of heavily utilized, large lowland rivers: Example of the lower Yellow River, China. *Limnology*, 2016, 18: 1-13
- [7] Ottinger M, Kuenzer C, Liu G, *et al.* Monitoring land cover dynamics in the Yellow River Delta from 1995 to 2010 based on Landsat 5 TM. *Applied Geography*, 2013, 44: 53-68
- [8] Yang W, Sun T, Yang ZF. Does the implementation of environmental flows improve wetland ecosystem services and biodiversity? A literature review. *Restoration Ecology*, 2016, 24: 731-742
- [9] Wang L (王凌), Li X-Z (李秀珍), Hu Y-M (胡远满), *et al.* Spatial diversity index analysis on wildlife habitat pattern change in the Liaohe Delta. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, 14 (12): 2176-2180 (in Chinese)
- [10] Rodriguez A, Delibes M. Population fragmentation and extinction in the Iberian lynx. *Biological Conservation*, 2003, 109: 321-331
- [11] Li SZ, Cui BS, XieT, *et al.* Diversity pattern of macrobenthos associated with different stages of wetland restoration in the Yellow River Delta. *Wetlands*, 2016, 36:57-67
- [12] Zhang D-Y (张大勇). Metapopulation and biodiversity protection. *Biology Bulletin* (生物学通报), 2002, 37: 1-4 (in Chinese)
- [13] Huang C (黄翀), Liu G-H (刘高焕), Zhang H-L (张海龙), *et al.* Wetland landscape dynamics in the Yellow River

- Mouth: Implications for conservation. *Journal of Geo-Information Science* (地球信息科学学报), 2012, 11(4): 491-497 (in Chinese)
- [14] Wong B, Keogh JS, McGlashan D. Current and historical patterns of drainage connectivity in eastern Australia inferred from population genetic structuring in a widespread freshwater fish *Pseudomugil signifer* (Pseudomugilidae). *Molecular Ecology*, 2004, 13: 391-401
- [15] Karr JR, Dudley DR. Ecological perspective on water quality goals. *Environmental Management*, 1981, 5: 55-68
- [16] Miller P, Ehnes JW. Can Canadian approaches to sustainable forest management maintain ecological integrity//Pimentel D, Westra L, Noss RF, eds. *Ecological Integrity: Integrating Environment, Conservation, and Health*. Washington DC: Island Press, 2000: 157-176
- [17] Liu S, Zhao Q, Wen M, et al. Assessing the impact of hydroelectric project construction on the ecological integrity of the Nuozhadu Nature Reserve, southwest China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013, 27: 1709-1718
- [18] Becke DA, Wood PB, Strager MP, et al. Impacts of mountaintop mining on terrestrial ecosystem integrity: Identifying landscape thresholds for avian species in the central Appalachians, United States. *Landscape Ecology*, 2015, 30: 339-356
- [19] Sheaves M. Consequences of ecological connectivity: The coastal ecosystem mosaic. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 391:107-115
- [20] Du J-G (杜建国), Ye G-Q (叶观琼), Zhou Q-L (周秋麟), et al. Progress and prospects of coastal ecological connectivity studies. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, 35(21): 6923-6933 (in Chinese)
- [21] Tischendorf L, Fahrig L. On the usage and measurement of landscape connectivity. *Oikos*, 2000, 90: 7-19
- [22] Tew J, Brose U, Grimm V, et al. Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: The importance of keystone structures. *Journal of Biogeography*, 2004, 31:79-92
- [23] Lorenzón RE, Beltzer AH, Olguin PF, et al. Habitat heterogeneity drives bird species richness, nestedness and habitat selection by individual species in fluvial wetlands of the Paraná River, Argentina. *Austral Ecology*, 2016, 41:829-841
- [24] Vander Zanden MJ, Rasmussen JB. Primary consumer $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ and trophic position of aquatic food web studies. *Limnology and Oceanography*, 1999, 46: 2061-2066
- [25] Cheng ST, Hou JX, Jia HF. An ecosystem-based understanding and analysis for SENCE toward sustainable development. *Journal of Environmental Sciences*, 2001, 13: 328-332
- [26] Nagendra H, Pareeth S, Sharma B, et al. Forest fragmentation and regrowth in an institutional mosaic of community, government and private ownership in Nepal. *Landscape Ecology*, 2008, 23: 41-54
- [27] Southworth J, Munroe D, Nagendra H. Land cover change and landscape fragmentation: Comparing the utility of continuous and discrete analyses for a western Honduras region. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 101:185-205
- [28] Olsen LM, Dale VH, Foster T. Landscape patterns as indicators of ecological change at Fort Benning, Georgia, USA. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 79:137-149
- [29] Kindlmann P, Burel F. Connectivity measures: A review. *Landscape Ecology*, 2008, 23: 879-890
- [30] Crist MR, Wilmer B, Aplet GH. Assessing the value of roadless areas in a conservation reserve strategy: Biodiversity and landscape connectivity in the northern Rockies. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42: 181-191
- [31] Song H, Liu L, Zhang Y, et al. Research on landscape pattern optimization of Xianglan Town based on GIS and fragstats. Hangzhou, China: International Conference on Society Science, 2017, doi: 10.2991/iccoss-17.2017.39
- [32] Hong J (洪佳), Lu X-N (卢晓宁), Wang L-L (王玲玲). Quantitative analysis of the factors driving evolution in the Yellow River Delta Wetland in the past 40 years. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2016, 36(4): 924-935 (in Chinese)
- [33] Pereira J, Saura S, Jordán F. Single-node vs. multi-node centrality in landscape graph analysis: Key habitat patches and their protection for 20 bird species in NE Spain. *Methods in Ecology and Evolution*, 2017, 8: 1458-1467
- [34] Wu W (吴未), Hu Y-T (胡余挺), Fan S-W (范诗薇), et al. Recombination and optimization of bird habitat networks: a case study of the little egret (*Egretta garzetta*), Mandarin duck (*Aix galericulata*) and ring-necked pheasant (*Phasianus colchicus*) in Su-Xi-Chang area. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2016, 36(15): 4832-4842 (in Chinese)
- [35] Chen X-P (陈小平), Chen W-B (陈文波). Construction and evaluation of ecological network in Poyang Lake Eco-economic Zone, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, 27(5): 1611-1618 (in Chinese)
- [36] Xie H-W (谢慧玮), Zhou N-X (周年兴), Guan J (关健). The construction and optimization of ecological networks based on natural heritage sites in Jiangsu Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, 34(22): 6692-6700 (in Chinese)
- [37] Fracz A, Chow-Fraser P. Changes in water chemistry associated with beaver-impounded coastal marshes of eastern Georgian Bay. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2013, 70: 834-840
- [38] Fracz A. Importance of Hydrologic Connectivity for Coastal Wetlands to Open Water of Eastern Georgian Bay. Hamilton, Ontario, Canada: McMaster University Library, 2012
- [39] Lesack LF, Marsh P. River-to-lake connectivities, water renewal, and aquatic habitat diversity in the Mackenzie River Delta. *Water Resources Research*, 2010, 46: 439-445
- [40] McDonough OT, Lang MW, Hosen JD, et al. Surface hydrologic connectivity between Delmarva Bay wetlands and nearby streams along a gradient of agricultural alteration. *Wetlands*, 2015, 35: 41-53
- [41] Ameli AA, Creed IF. Quantifying hydrologic connectivity of wetlands to surface water systems. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2017, 21: 1791-1808
- [42] Epting SM. Using Landscape Metrics to Predict Hydrologic Connectivity Patterns between Forested Wetlands and Streams in a Coastal Plain Watershed [EB/OL]. (2016-01-16) [2017-02-08]. https://www.researchgate.net/publication/308261376_Using_landscape_metrics_to_predict_hydrologic_connectivity_patterns_between_forested_wetlands_and_streams_in_a_coastal_plain_watershed
- [43] Wu Q, Lane CR. Delineating wetland catchments and modeling hydrologic connectivity using lidar data and aerial imagery. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21: 3579-3595
- [44] Poulter B, Goodall JL, Halpin PN. Applications of network analysis for adaptive management of artificial drainage systems in landscapes vulnerable to sea level rise. *Journal of Hydrology*, 2008, 357: 207-217
- [45] Karim F, Kinsey-Henderson A, Wallace J, et al. Modelling wetland connectivity during overbank flooding in a tropical floodplain in north Queensland, Australia. *Hydrological Processes*, 2012, 26: 2710-2723
- [46] Garcia A, Winemiller K, Hoeninghaus D, et al. Hydrologic pulsing promotes spatial connectivity and food web subsidies in a subtropical coastal ecosystem. *Marine Ecology Progress Series*, 2017, 567:17-28
- [47] Merenlender AM, Matella MK. Maintaining and restoring hydrologic habitat connectivity in mediterranean streams: An integrated modeling

- framework. *Hydrobiologia*, 2013, 719: 509-525
- [48] Oxley T, McIntosh B.S, Winder N, *et al.* Integrated modelling and decision-support tools: A Mediterranean example. *Environmental Modelling & Software*, 2004, 19: 999-1010
- [49] Tong S-Z (佟守正). Effect of Channel on Zhalong Wetland Degradation and Its Design for Wetland Restoration. PhD Thesis. Changchun: Northeast Normal University, 2012 (in Chinese)
- [50] Li X-K (李晓珂), Wang H-Q (王红旗), Li C-J (李长江). Effect of highway construction on hydrologic connectivity and some protective measures. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)* (北京师范大学学报: 自然科学版), 2015, 51(6): 620-625 (in Chinese)
- [51] Xia M (夏敏), Zhou Z (周震), Zhao H-X (赵海霞). Evaluation of water system connective of the district around Chaohu based on comprehensive indexes. *Geography and Geo-Information Science* (地理与地理信息科学), 2017, 33(1): 73-77 (in Chinese)
- [52] Odum EP. Tidal marshes as outwelling/pulsing systems//Weinstein MP, Kreeger DA, eds. Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology. Dordrecht, UK: Kluwer Academic Publishers: 3-8
- [53] Melville AJ, Connolly RM. Food webs supporting fish over subtropical mudflats are based on transported organic matter not in situ microalgae. *Marine Biology*, 2005, 148: 363-371
- [54] Ou Z-J (欧志吉), Jiang Q-W (姜启昊), Zuo P (左平) Primary study on food web of Jiangsu Coastal saltmarshes. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报), 2013, 35(1): 149-157 (in Chinese)
- [55] Feng Q, Gong J, Liu J, *et al.* monitoring cropland dynamics of the Yellow River Delta based on multi-temporal landsat imagery over 1986 to 2015. *Sustainability*, 2015, 7:14834-14858
- [56] Ives AR, Carpenter SR. Stability and diversity of ecosystems. *Science*, 2007, 317: 58-62
- [57] Jacque C, Moritz C, Morissette L, *et al.* No complexity-stability relationship in empirical ecosystems. *Nature Communications*, 2016, 7, doi: 10.1038/ncomms12573
- [58] Pasquaud S, Lobry J, Elie P. Facing the necessity of describing estuarine ecosystems: A review of food web ecology study techniques. *Hydrobiologia*, 2007, 588: 159-172
- [59] Pinnegar JK, Polunin NV. Contributions of stable-isotope data to elucidating food webs of Mediterranean rocky littoral fishes. *Oecologia*, 2000, 122: 399-409
- [60] McMeans BC, McCann KS, Tunney TD, *et al.* The adaptive capacity of lake food webs: From individuals to ecosystems. *Ecological Monographs*, 2016, 86: 4-19
- [61] Bond A.L, McClelland G.T, Jones IL, *et al.* Stable isotopes confirm community patterns in foraging among Hawaiian Procellariiformes. *Waterbirds*, 2010, 33: 50-58
- [62] Quan W-M (全为民). Food Web Analysis of Salt Marshes of the Yangza River Estuary by Using Stable Isotopes. PhD Thesis. Shanghai: Fudan University, 2007 (in Chinese)
- [63] Mazumder D, Saintilan N, Williams RJ, *et al.* Trophic importance of a temperate intertidal wetland to resident and itinerant taxa: Evidence from multiple stable isotope analyses. *Marine & Freshwater Research*, 2011, 62:11-19
- [64] Chen Z-Y (陈展彦), Wu H-T (武海涛), Wang Y-B (王云彪), *et al.* Research progress on food sources and food web structure of wetlands based on stable isotopes. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, 28(7): 2389-2398 (in Chinese)
- [65] Weisberg PJ, Dilts TE, Becker ME, *et al.* Guild-specific responses of avian species richness to lidar-derived habitat heterogeneity. *Acta Oecologica*, 2014, 59: 72-83
- [66] Leung JY. Habitat heterogeneity affects ecological functions of macrobenthic communities in a mangrove: Implication for the impact of restoration and afforestation. *Global Ecology and Conservation*, 2015, 4: 423-433
- [67] Ashcroft MB, French KO, Chisholm LA. An evaluation of environmental factors affecting species distributions. *Ecological Modelling*, 2011, 222: 524-531
- [68] López-González C, Presley SJ, Lozano A, *et al.* Ecological biogeography of Mexican bats: The relative contributions of habitat heterogeneity, beta diversity, and environmental gradients to species richness and composition patterns. *Ecography*, 2015, 38: 261-272
- [69] Chrétien E, Chapman LJ. Habitat heterogeneity facilitates coexistence of native fishes with an introduced predator: The resilience of a fish community 5 decades after the introduction of Nile perch. *Biological Invasions*, 2016, 18: 3449-3464
- [70] Myers MC, Mason JT, Hokschi BJ, *et al.* Birds and butterflies respond to soil: Induced habitat heterogeneity in experimental plantings of tallgrass prairie species managed as agroenergy crops in Iowa, USA. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52: 1176-1187
- [71] Lengyel S, Déri E, Magura T. Species richness responses to structural or compositional habitat diversity between and within grassland patches: A multi-taxon approach. *PLoS One*, 2016, 11(2): e0149662
- [72] Yang W, Li X, Sun T, *et al.* Habitat heterogeneity affects the efficacy of ecological restoration by freshwater releases in a recovering freshwater coastal wetland in China's Yellow River Delta. *Ecological Engineering*, 2017, 104: 1-12
- [73] Stirnemann I, Mortelliti A, Gibbons P, *et al.* Fine-scale habitat heterogeneity influences occupancy in terrestrial mammals in a temperate region of Australia. *PLoS One*, 2015, 10(9): e0138681
- [74] Chen A, Sui X, Wang D, *et al.* Landscape and avifauna changes as an indicator of Yellow River Delta Wetland restoration. *Ecological Engineering*, 2016, 86:162-173
- [75] Zou Y, Liu J, Yang X, *et al.* Impact of coastal wetland restoration strategies in the ChongmingDongtan wetlands, China: Waterbird community composition as an indicator. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 2014, 60: 185-198
- [76] Brennan M, Dodd A. Exploring citizen involvement in the restoration of the Florida Everglades. *Society and Natural Resources*, 2009, 22: 324-338
- [77] Couvillion BR, Steyer GD, Wang H, *et al.* Forecasting the effects of coastal protection and restoration projects on wetland morphology in coastal Louisiana under multiple environmental uncertainty scenarios. *Journal of Coastal Research*, 2013, 67: 29-50
- [78] Ren W (任葳), Wang A-D (王安东), Feng G-H (冯光海), *et al.* Restoration of degraded coastal wetlands based on water level. *Wetland Science and Management* (湿地科学与管理), 2016, 12(4): 4-8 (in Chinese)
- [79] Wu D (吴迪), Yue F (岳峰), Luo Z-K (罗祖奎), *et al.* Ecological effects of lakeside wetlands restoration in Dalian Lake, Shanghai. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, 31(11): 2999-3008. (in Chinese)
- [80] Brennan M A, Dodd A. 2009. Exploring citizen involvement in the restoration of the Florida Everglades. *Society and Natural Resources*, 22:

324-338

- [81] Yang F-Y (杨富亿), Li X-J (李秀军), Liu X-T (刘兴土), *et al.* Recovery pattern of degraded saline-alkali reed pond in the Songnen Plain. *Wetland Science* (湿地科学), 2009, 7(4): 306-315 (in Chinese)
- [82] Gao W (高伟), Lu J-J (陆健健). A restoration trial of bird habitat on the intertidal flats in the Yangtze Estuary and its short-term effects. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, 28(5): 2080-2089 (in Chinese)
- [83] Wilson L. Coast 2050: A new approach to restoration of Louisiana coastal wetlands. *Physical Geography*, 2004, 25: 4-21

