

网络出版时间:2012-07-18 10:26

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120718.1026.010.html>

黄河河口生态需水量研究

薛小杰¹, 巩琳琳^{1,2}, 黄 强¹

(1 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048; 2 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

[摘 要] **【目的】**针对黄河入海口流量减少导致的河口生态环境破坏、生物多样性降低和生态系统退化问题, 研究确定黄河口的生态需水量, 为黄河口的生态系统平衡和环境改善、生物多样性维护及生态稳定提供参考。**【方法】**在分析历史文献和调查资料的基础上, 进行关键物种的识别, 确定食物网中优先保护的序列; 分析河口生态系统的限制因子, 建立入海径流量与近岸海洋站盐度之间的相关关系; 根据优先保护物种的关键生命阶段, 用相关分析方法计算黄河河口近海海域不同时期入海流量和径流量。**【结果】**在近海生态系统中, 鱼类是关键物种, 鲢和黄鲫为优先保护物种。盐度为河口及附近海域生态系统的限制因子, 鲢和黄鲫的优先保护生命阶段为4月、5—6月和7—10月3个阶段, 盐度分别为27~31, 28~32和27~31。根据黄河入海径流量与盐度的相关关系, 确定黄河河口生态需水量约为124亿m³。**【结论】**关键种和关键性指数能够用于生态系统结构比较复杂的河口及附近海域优先保护生物类别的选择, 根据关键种占优势的种类以及限制因子盐度, 可以计算渤海河口及附近海域的盐度阈值, 进而可以确定黄河入海径流量。

[关键词] 河口生态需水量; 关键种; 关键性指数; 盐度; 限制因子

[中图分类号] TV213.4

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2012)08-0223-07

Study on ecological water demand of the Yellow River estuary

XUE Xiao-jie¹, GONG Lin-lin^{1,2}, HUANG Qiang¹

(1 Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an,

Shaanxi, 710048, China; 2 Shaanxi Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi 710001, China)

Abstract: **【Objective】**The decrease of ocean inflow of the Yellow River damages estuary eco-environment, which leads to decrease of biodiversity and degradation of ecosystem. Research on the estuary ecological water demand is very important to the balance of ecosystem, environmental improvement, biodiversity protection and ecological stabilization. **【Method】**In this paper, key species were identified based on historical documents and investigations. At the same time, priority protection sequence in food network was determined. Salinity was determined as limiting factor of estuary ecosystem. Correlation between ocean runoff and salinity of offshore stations was set up. On the basis of key stage of life of priority protection's species, flow into the sea and runoff were calculated with related calculation method. **【Result】**In offshore ecosystem, fishes are key species, anchovies and carps are priority protection species. Salinity is restriction factor of ecosystem in estuary and adjacent waters, the period of priority protection is April, May-June, July-October, salinity is 27—31, 28—32 and 27—31. On the basis of correlativity between runoff into sea and salinity, the ecological water demand of the Yellow River estuary is $1.24 \times 10^{10} \text{ m}^3$. **【Conclusion】**Key species and key index are used to estuary with complex ecosystem and surrounding waters to select priority protec-

* [收稿日期] 2012-03-31

[基金项目] 国家自然科学基金项目(40501011)

[作者简介] 薛小杰(1973—), 男, 陕西宝鸡人, 副教授, 博士, 主要从事水文学与水资源研究。E-mail: xxjxaut@163.com

[通信作者] 巩琳琳(1972—), 女, 陕西西安人, 在读博士, 主要从事水资源规划与生态需水研究。E-mail: linlingong@126.com

tion's species, on the basis of species whose key species are in the ascendant and restriction factor salinity, salinity threshold is confirmed in Bo sea estuary and surrounding waters, the runoff into sea of the Yellow River is confirmed.

Key words: estuary ecological water demand; key species; keystone index; salinity; restriction factor

黄河入海口位于渤海西南岸,处于渤海湾和莱州湾之间。20 世纪 80 年代以来,黄河断流以及来水量的减少,改变了淡水、海水生态交错带的格局,促成了资源的再分配和环境的异质性,使得河口部分鱼类面临灭绝的危险;水体盐度升高,加强了对地下水 and 地表淡水的入侵;底栖厌氧条件增加,河口生物可利用的营养盐和有机物质减少;同时,泥沙通量减少带来的三角洲地区的侵蚀增加。针对黄河河口及附近海域淡水资源供需矛盾突出、生态系统退化的现状,开展河口及附近海域淡水生态需水量研究,对保护河口生物多样性和生态稳定具有重要意义。

目前,国内外已有大量关于水生生态系统、生态环境需水研究的文献,但大部分研究对象是关于河流、湖泊和湿地的^[1-2]。河口生态需水研究从 20 世纪 80 年代开始兴起,近 20 年来虽得到不断深入和完善,但由于河口生态系统位于河流生态系统和海洋生态系统的交汇处,其需水动力过程复杂,影响因素众多,因此目前还缺乏公认的确切方法或标准。河口生态需水机理和计算方法的复杂性,相应地造成了淡水生态系统的生态需水研究成果难以直接应用于河口生态系统。

南非 1986 年第 1 次评估了河口淡水需求。其评估包括淹没和蒸发需求 2 部分,前者考虑的是打开临时关闭的河口拦门沙,淹没湿地和冲刷淤积所必需的水量;后者计算蒸发量,由此防止河口盐度超量的出现。澳大利亚学者提出了维持河口过程的河流环境流量评价方法,研究的主要目标是识别澳大利亚受威胁或濒危的河口,确定适当的环境流量,以保护河口的生态特征不衰退,该方法考虑了河口盐度分布随时间的变化及其在河口生态中的支配作用。

国内学者也相继开展了针对河口生态需水的研究^[3-5]。孙涛等^[6]认为,河口径流量的减少将首先影响泥沙的输运,进而改变河口生态系统的盐度平衡,并由此提出了一种河口生态环境需水量的计算方法,计算中考虑了水循环消耗、生物循环消耗、生物栖息地等不同类型需水量及其随时间的变化;韩曾萃等^[7]对钱塘江河口的生态环境需水量进行了研究,给出各需水组成的计算方法和相应结果,提出河

口环境和生态需水由 4 部分组成:维持河口泥沙冲淤平衡需水,防止河口咸水入侵需水,维持河口水功能区水质要求的需水及河口最小生态需水。

由于河口的复杂性,导致了河口生态需水研究的困难。目前,国内外对河口生态需水研究,多从河口生态系统的功能出发考虑其需水量,未涉及生物因素,没有真正建立需水量与生态系统的响应关系。本研究欲对河口生态需水的科学定量进行初步探讨,避免单一考虑河口生态功能的需要,从分析河口生态系统组成入手,为深入分析生态系统与生态需水的相关关系进行了有意义的探索。

本研究通过对历史文献和调查资料的分析^[8-14],在生态学原理的指导下进行了关键物种的识别,并通过对入海水量减少引起的环境要素变化及其对水生生态影响的分析,确定盐度为河口生态系统的限制因子;在此基础上,利用相关分析方法直接建立了入海径流量与近岸海洋站盐度之间的相关关系,然后依据盐度标准确定所需的淡水入流量即为生态需水量,以期对黄河河口生态需水量的确定提供參考。

1 黄河河口生态系统关键种及保护目标的界定

1.1 关键种的概念及测度指标

关键种指生物群落食物网中关键位置的物种。1969 年, Paine^[15] 将关键种 (Keystone-species) 术语应用于海洋群落,并将关键种概念定义为:使被捕食者的种群密度保持在资源限制水平以下,阻止被捕食物种因竞争而消失的一类捕食者,即关键种是指其活动和丰富度决定群落的完整性并在一定时间内保持系统稳定的物种。目前看来,保护关键种可能是保护生物多样性最有效的手段之一^[16]。

目前,研究者在关键种的确定方面提出了一些测度指数。其中,关键性指数 (Keystone index) 是由 Jordan 等^[17] 提出的,该指数建立在食物网的基础上,可以分成 2 个部分,即 K_b 和 K_t 。 K_b 是指上行 (Bottom-up) 关键性指数, K_t 则是指下达 (Top-down) 关键性指数。具体可以写成如下公式:

$$K_b(i) = \frac{1 + K_b(j)}{m(i)(j)}, \quad (1)$$

$$K_i(i)=\frac{1+K_i(j)}{n(i)(j)}, \tag{2}$$

$$K(i)=K_b(i)+K_i(i). \tag{3}$$

式中: $K_b(i)$ 是种 i 的上行关键性指数, $K_b(j)$ 是种 j 的上行关键性指数,物种 j 是物种 i 的直接捕食者, $m(i)(j)$ 是物种 j 的直接猎物种类数量; $K_i(i)$ 是种 i 的下达关键性指数, $K_i(j)$ 是种 j 的下达关键性指数, $n(i)(j)$ 是物种 j 的直接捕食者种类数量; $K(i)$ 是物种 i 的关键性指数。

在近海生态系统中,浮游植物和水草是生产者,它们通过光合作用制造有机物;鱼类、底栖动物和浮游动物是近海生态系统的消费者,底栖动物和浮游动物以浮游植物和水草为食,鱼类又以浮游植物、水草、底栖动物和浮游动物为食,大鱼吃小鱼;而在水底的土壤中,又有数量巨大的微生物在从事有机质的分解工作。近海生态系统的食物链结构如图 1 所示。

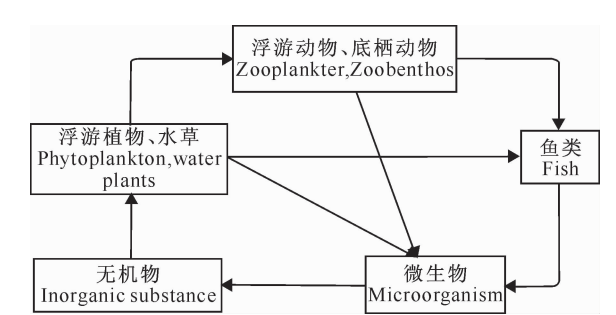


图 1 近海生态系统的食物链结构

Fig.1 Food chain of offshore ecosystem

根据公式(1)、(2)、(3)和图 1 所示的近海生态系统食物链结构,可以计算得到近海生态系统各种种群的关键性指数(表 1)。由表 1 可知,鱼类的关键性指数最大。因此,在近海生态系统中,鱼类是关键物种^[18]。

表 1 近海生态系统各种种群的关键性指数

Table 1 Critical specifications of populations of offshore ecosystem

种群 Population	K_b	K_i	K
浮游植物、水草 Phytoplankton, Water plants	0	1	1
浮游动物、底栖动物 Zooplankter, Zoobenthos	0	0.5	0.5
鱼类 Fish	1	0.5	1.5

生物群落是依赖于某一多维生态空间的生物类群集合体,每一生物物种共同参与群落成分及其对生态环境变化的响应。但其各自对环境的适应和控制能力不尽一致,只有少数物种能以其数量和贡献左右群落演替格局,即为优势种。综合已有的优势

种度量指标,结合黄河口特殊的生态环境特点,采用相对重要性指数(IRI)^[19]综合研究其种类组成、个体数和生物量对群落的控制作用。综合以上分析,将鳀和黄鲫确定为优先保护的物种。

鱼卵和仔稚鱼是鱼类的补充资源,对鱼类种群的生存与延续、资源补充以及保持生态稳定具有重要意义。鱼的成活率高低,决定着鱼类种群的资源丰度。鱼卵和仔稚鱼在育幼场的转运过程、健康发展及其对生物环境的适应性,是调控种群年资源补充量的关键因子。选择适宜关键种群的生存环境,对幼体早期成活十分重要。因此,一般以鱼卵和仔稚鱼生长阶段作为关键种的关键生命阶段。

1.2 河口生态系统的限制因子识别

任何一种生物要在某环境中生存和繁衍,就必须有合适的各种理化条件,而且必须能够从环境中不断地得到生长和繁殖所需要的各种基本物质。如果某种生态因子接近或超过某种生物的耐受极限,从而阻碍其生存、生长、繁殖或扩散,这种因子即为限制因子。

对河口及附近海域研究的基本出发点,就是从食物链和食物网中找出占据关键位置的生物物种,针对其生命过程中的关键阶段,分析其限制因子,并以此为对象,进一步研究系统的变化及其成因和结果。

入海淡水量的多少,直接影响盐度和营养盐通量,导致河口与近岸海域生物的生境和基础食物发生改变,从而引起生物的演替。有学者指出,淡水入流减少造成的影响,主要是增加水体的盐度并导致垂向分层,使盐楔向更远的上游渗透,并导致河口种类的捕食者和寄生虫入侵,增加底栖厌氧条件,减少河口种类用到的营养盐和有机物质,减少代表性物种和有经济价值的海产食品。河口及其附近海域的低盐度区域对稚鱼和无脊椎动物来讲是重要的育苗场,也是洄游鱼类重要的产卵场,盐度升高,会破坏栖息地和产卵场环境。可见,盐度是海水特性最重要的参数之一,海洋中许多现象的发生均与盐度的分布和变化紧密相关。

综合分析可以得出,盐度是河口及其附近海域生境最敏感的环境因子,可以作为生物分布的“限制因子”。河口及其附近海域盐度的变化受控于河道淡水的补给,因此可以利用生物对盐度的适应能力作为控制条件,来计算河口淡水的需求量。

对黄河近海海域莱州湾盐度变化的多年监测结果见图 2。

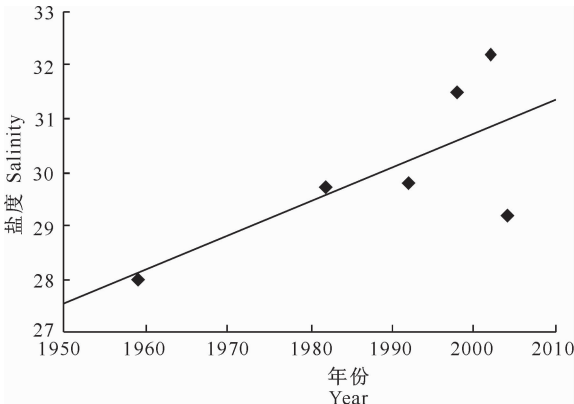


图 2 莱州湾 5 月份表层盐度的历年变化趋势

Fig. 2 Surface salinity variation trend in May of the Laizhou Bay

由图 2 可知,尽管莱州湾盐度年际变化有升降波动,但总的变化呈上升态势,且 2010 年莱州湾盐度值与以前相比有明显升高。

在黄河口附近海区,近年来黄河入海水量基本上逐年减少,甚至出现长时间的断流^[20]。自 1972 年开始,黄河下游出现经常性断流,最严重的 1997 年,利津站断流 226 d,全年 330 d 无水入海。1999 年,在黄河水利委员会统一管理调度下,黄河下游不再断流,但径流量仍然比较小。黄河流量的减小是造成渤海盐度升高的主要原因^[21],黄河河口利津水文站 1950—2001 年的入海径流量如图 3 所示。从径流量变化趋势看,黄河下游径流量仍然较低(图 3)。因此,莱州湾盐度升高的趋势依然存在。

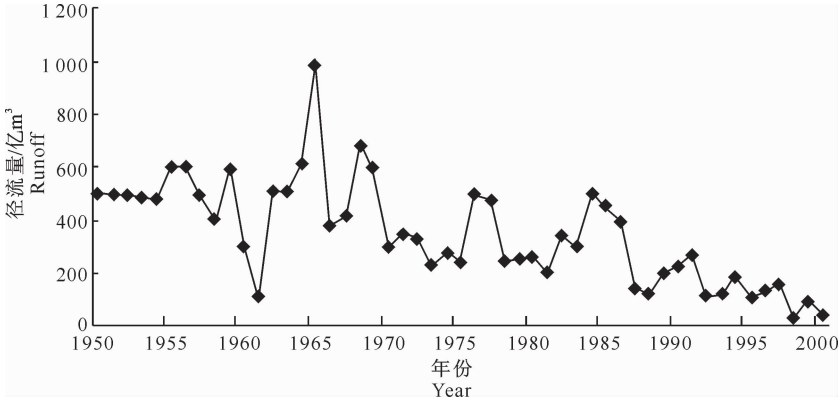


图 3 黄河河口利津水文站入海径流量的年际变化趋势

Fig. 3 Mean inter-annual variation of ocean runoff at the Lijin Station

1.3 保护目标适宜的盐度条件

盐度是河口及其附近海域生境最敏感的环境因子,对近海生物有致命影响。鱼类的生长和繁殖都具有自己的适盐条件,这是鱼类对环境因子的长期

适应结果。根据文献[22-25]整理得到了近海生态系统优势种在不同生长阶段适应盐度的相关研究成果,详见表 2。

表 2 黄海和渤海水生生物适应的盐度

Table 2 Salinity adaptable for aquatic organism of the Huang Sea and the Bo Sea				
鱼种 Fish	盐度 Salinity	说明 Explanation	备注 Remark	文献出处 Reference
鳀鱼 Anchovy	22.5~30.5	鳀卵分布区 Distribution area of anchovy egg	生殖期从 4 月中旬开始,10 月中旬结束。在该区的生殖期与黄海、渤海区大体相同,仅生殖盛期略有提前 Idiophase starts at April and ends at October. It is same to that of Huang sea and Bo sea, and ahead of time	[26]
	20~30.71	鳀鱼卵和仔稚鱼	4—5 月 April to May	
	23~31	分布区表层	6 月 June	
	25~30	鳀鱼卵和仔稚鱼	7 月 July	[26]
	≥24	分布区表层	8 月 August	
	29.5~32.35	鳀鱼卵和仔稚鱼	9—10 月 September to October	
	27~31	产卵初期、产卵盛期、产卵末期	产卵盛期中心产卵场位置正好处于大洋河淡水形成的低盐水舌附近,即黄海冷水团北部的边缘	[27]
	28~31	Early days of spawn,	Spawning ground is just in nappe with low salinity	
	28~31	Acme of spawn, Evening of spawn	formed by fresh water in acme of spawn, the border of Huang sea cold water group northern	

续表 2 Continued talbe 2

鱼种 Fish	盐度 Salinity	说明 Explanation	备注 Remark	文献出处 Reference
黄鲫 Crucian	12.96~33.31	幼鱼适应盐度 Suitable salinity of juvenile fish	7—9月随水温上升,渤海南部黄鲫幼鱼群体迅速向 外海洄游,遍及整个渤海湾及莱州湾西部;随水温下 降,幼鱼又向近岸洄游,活动范围缩小;数量分布与温 度间呈密切负相关,与盐度呈抛物线相关 Crucians migrate to the open sea with water tempera- ture increasing at July-September, throughout Bo sea Bay and the weatern of Laizhou Bay;juvenile fish mi- grate to nearshore, scope of activities shrinks. There is negative correlation between quantitative distribu- tion and temperature, there is parabolic correlation between quantitative distribution and salinity	[28]
	28~32	性成熟个体分布盐度 Salinity distribution of sexual maturity	渤海南部黄鲫的性成熟期为 5 月中下旬至 7 月中下 旬,盛期为 6 月上中旬。群体主要分布于莱州湾西北 部和渤海湾南部,其次是渤海湾西部海域。属广温狭 盐性,数量分布与温度、盐度的相关关系密切 Sexual maturity stage of crucian is in the period of late of May-July,acme is at June. The groups distrib- ute in north west of Laizhou Bay, south and west of Bo sea Bay. Salinity is low,there is parabolic correla- tion between quantitative distribution, temperature and salinity	[28]
	23.5~32.14 27~31	适盐范围,最适盐度 Range of salinity, optimum salinity	属广温狭盐性。5—9 月,在适温、适盐区间内,渤海 南部黄鲫洄游数量分布与其均呈曲线相关关系 Salinity is low,there is curvilinear correlation between quantitative distribution, temperature and salinity in May-September	[28]

由表 2 可知,鲢和黄鲫在 4 月产卵这一关键期,要求近海产卵场的盐度分别为 27~31 和 23.5~32.14,综合 2 个物种的适盐范围在 27~31;同理,根据表 2,鲢和黄鲫在 5—6 月、7—10 月 2 个阶段的盐度分别为 28~32 和 27~31。

2 黄河河口近海生态需水计算

2.1 河口及附近海域淡水生态需水量的相关分析
计算法

首先,利用河口的年入海径流量与相应海域的盐度进行回归分析,建立二者的相关关系;然后根据盐度测站地理位置的生物类型及其适应盐度作为控制标准,计算相应的水量作为河口及附近海域淡水生态需水量。

由于生物对盐度的敏感性具有季节变化的特点,需要进一步给出合理的年内水量分配过程。利用水文学上的典型年法,找出与生态总需水量接近、自然状态下的 1 个或几个年份的月水量分配过程或过程均值,按天然来水的比例分配到各月。

2.2 入海径流量与盐度关系的变化

由于受黄河入海径流量的影响,近海区域盐度值起伏变化明显,最低值出现在 1984-08,仅为 20.82,最高值出现在 2003-05,为 32.89,多年盐度平均值为 26.63。由图 4 可以看出,盐度随入海径流量的增大而降低。

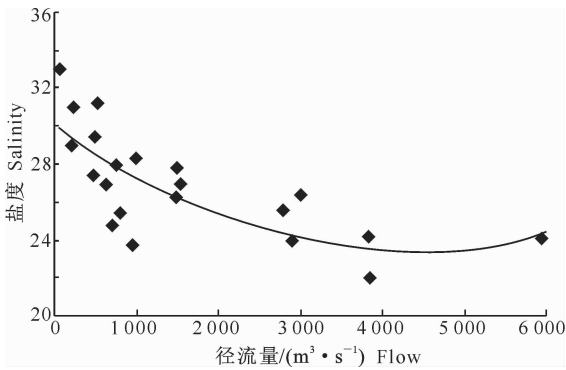


图 4 黄河河口盐度与入海径流量变化的拟合曲线
Fig.4 Fitting curve between salinity and runoff variation
of Yellow River estuary

2.3 河口及附近海域的淡水生态需水量

4—6 月是鱼类的主要产卵期,而 7—10 月是当年生仔稚鱼生长的主要季节,汛期丰沛的水量,可以带来丰富的营养物质,为仔稚鱼的生长提供有利条件。据此将年内生态需水过程分为 4 月、5—6 月、7—10 月 3 个阶段。

根据表 2 分析结果,结合历年来入黄径流量,盐度取下限进行计算,根据入海径流量与盐度的相关关系,计算得到黄河河口近海 4—10 月的适宜生态需水量分别为:4 月 757.52 m³/s,5—6 月 452.61 m³/s,7—10 月 757.52 m³/s。进一步计算得到 4—10 月的黄河河口适宜生态需水量为 123.99 亿 m³。

3 结 论

本研究针对近年来黄河入海水量减少引起黄河河口近海海域表层盐度明显升高、低盐度区域面积减小、河口产卵场严重退化、生境丧失或改变、生物群落结构异常等现象和问题,通过对黄河河口及附近海域淡水生态需水的研究,得到如下研究成果:

1)将生态系统的关键种理论及其测度指标即关键性指数,用于生态系统结构比较复杂的河口及附近海域,从中选择优先保护的生物类别,并以鱼卵和仔稚鱼阶段为优先保护生命阶段,进而确定河口及附近海域生态系统的保护目标。

2)根据生态系统稳定阈值理论、关键种理论以及物种的限制因子原理,提出以关键物种对环境限制因子的适应下限作为生态系统稳定的条件阈值。通过分析盐度变化对生态系统主要成分的影响,提出盐度为河口及附近海域生态系统的限制因子。根据关键食物链中优先保护物种序列的适应盐度条件,确定渤海河口及附近海域的盐度阈值。

3)用简单相关分析方法计算得到了黄河河口近海海域不同时期的淡水生态需水量为 123.99 亿 m^3 ,为该地区生态系统保护、水资源管理提供了依据。

4)由于河口生态系统比较复杂、生态监测资料有限及河口区盐度计算难度大等原因,本研究计算结果仅是初步成果。今后需要进一步明确河口生态系统的结构和功能、河口生态环境影响因子及相关标准,在确定河口生态保护目标的基础上,通过建立河口二维盐度和温度模拟模型,以得到更为准确的河口近海生态需水量。

[参考文献]

[1] 孙 涛,徐 静,刘方方,等.河口生态需水研究进展[J].水科学进展,2010,21(3):282-286.
Sun T, Xu J, Liu F F, et al. Advances in the assessment of ecological water requirements in estuaries [J]. Advances In Water Science, 2010, 21(3): 282-286. (in Chinese)

[2] 王进喜,李怀恩.渭河流域生态环境需水量研究[M].北京:中国水利水电出版社,2004:3-7.
Wang J X, Li H E. Research on ecological environment water demand in the Wei River basin [M]. Beijing: China Water Power Press, 2004: 3-7. (in Chinese)

[3] 孙 涛,杨志峰.河口生态系统恢复评价指标体系研究及其应用[J].中国环境科学,2004,24(3):381-384.
Sun T, Yang Z F. Studies on the evaluating index system for estuarine ecosystem restoration and its application [J]. China

Environmental Science, 2004, 24(3): 381-384. (in Chinese)

[4] 陈吉余,陈沈良.南水北调工程对长江河口生态环境的影响[J].水资源保护,2002(3):10-13.
Chen J Y, Chen S L. Impacts of the South-to-North Water Transfer Project on ecological environment at the Yangtze River estuary [J]. Water Resources Protection, 2002(3): 10-13. (in Chinese)

[5] 尤爱菊,韩曾萃,张扬波.钱塘江口水资源供需分析及有效利用对策[J].水利学报,2007(10):393-398.
You A J, Han Z C, Zhang Y B. Water balance analysis and water resources utilization in Qiantang estuary [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(10): 393-398. (in Chinese)

[6] 孙 涛,杨志峰.河口生态环境需水量计算方法研究[J].环境科学学报,2005,25(5):573-579.
Sun T, Yang Z F. Study on the methods for quantifying the environmental flow in estuaries [J]. Acta Scientiae Circumstance, 2005, 25(5): 573-579. (in Chinese)

[7] 韩曾萃,尤爱菊,徐有成,等.强潮河口环境和生态需水及其计算方法[J].水利学报,2006,37(4):396-399.
Han Z C, You A J, Xu Y C, et al. Calculation methods of environmental and ecological water demand for Macro-tidal estuary [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(4): 396-399. (in Chinese)

[8] 时晓燕,刘德富,黄钰铃.河道生物需水量的理论及计算方法[J].水资源与水工程学报,2006,17(3):42-45.
Shi X Y, Liu D F, Huang Y L. Theory and calculate ion approach of biological water requirements in river course [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2006, 17(3): 42-45. (in Chinese)

[9] 连 煜,崔树彬.黄河水资源状况及小浪底水库以下河段生态用水研究[J].南阳师范学院学报:自然科学版,2003,12(2):59-64.
Lian Y, Cui S B. Study on the water resource of Yellow River and its ecological needed water below the Xiaolangdi reservoir [J]. Journal of Nanyang Teachers College: Natural Sciences Edition, 2003, 12(2): 59-64. (in Chinese)

[10] 郝伏勤,王新功,刘海涛,等.黄河水量统一调度对下游生态环境的影响分析[J].人民黄河,2006,28(2):35-37.
Hao F Q, Wang X G, Liu H T, et al. Analysis on effects of integrated water regulation to the ecological environment of the lower Yellow River [J]. Yellow River, 2006, 28(2): 35-37. (in Chinese)

[11] 梁犁丽,王 芳,汪党献,等.乌伦古湖最低生态水位及生态缺水水量[J].水科学进展,2011,22(4):471-478.
Liang L L, Wang F, Wang D X, et al. Research on the lowest ecological water level and ecological water quantity of Ulun-gur Lake [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(4): 471-478. (in Chinese)

[12] 张文鸽,黄 强,蒋晓辉.基于物理栖息地模拟的河道内生态流量研究[J].水科学进展,2008(2):192-197.
Zhang W G, Huang Q, Jiang X H. Study on in stream ecological flow based on physical habitat simulation [J]. Advances in

- Water Science, 2008(2): 192-197. (in Chinese)
- [13] 石伟, 王光谦. 黄河下游生态需水量及其估算 [J]. 地理学报, 2002, 57(5): 595-598.
- Shi W, Wang G Q. Estimation of ecological water requirement for the lower Yellow River [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(5): 595-598. (in Chinese)
- [14] 倪晋仁, 金玲, 赵业安, 等. 黄河下游最小生态环境需水量初步研究 [J]. 水利学报, 2002(10): 1-8.
- Ni J R, Jin L, Zhao Y A, et al. Minimum water demand for ecosystem protection in the Lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(10): 1-8. (in Chinese)
- [15] Paine R T. Food web complexity and species diversity [J]. American Naturalist, 1966, 100(1): 56-61.
- [16] 葛宝明, 鲍毅新, 郑祥. 生态学中关键种的研究综述 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(6): 102-106.
- Ge B M, Bao Y X, Zheng X. A review on key species study in ecology [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(6): 102-106. (in Chinese)
- [17] Jordan F, Takacs-Santa A, Molnar I. Are liability theoretical quest for keys tones [J]. Oikos, 1999(86): 453-462.
- [18] 蒋晓辉, 刘晓燕, 张曙光, 等. 黄河干流水生态系统关键物种的识别 [J]. 人民黄河, 2005, 27(10): 1-3.
- Jiang X H, Liu X Y, Zhang S G, et al. Distinguishing key species of aquatic ecosystem of the main Yellow River [J]. Yellow River, 2005, 27(10): 1-3. (in Chinese)
- [19] 安传光, 赵云龙, 林凌, 等. 长江口九段沙潮间带大型底栖动物季节分布特征的初步研究 [J]. 水产学报, 2007, 31(9): 54-59.
- An C G, Zhao Y L, Lin L, et al. Primary investigation of seasonal characters of acrobatic communities distribution in tidal flats of Jiuduansha wetland of Yangtze river estuary [J]. Journal of Fisheries of China, 2007, 31(9): 54-59. (in Chinese)
- [20] 何宏谋, 陈红莉, 刘争胜. 黄河三角洲地区水资源利用研究 [J]. 海岸工程, 2000, 19(4): 52-58.
- He H M, Chen H L, Liu Z S. Research on Yellow River delta area water resources utilization [J]. Coast Work, 2000, 19(4): 52-58. (in Chinese)
- [21] 马超, 鞠霞, 吴德星, 等. 黄、渤海断面及海洋站的盐度分布特征与变化趋势 [J]. 海洋科学, 2010, 34(9): 70-75.
- Ma C, Ju X, Wu D X, et al. The spatial distribution and temporal evolution of salinity at the sections and observation stations in the Yellow Sea and Bohai Sea [J]. Marine Sciences, 2010, 34(9): 70-75. (in Chinese)
- [22] 金显仕, 邓景耀. 莱州湾春季渔业资源及生物多样性的年间变化 [J]. 海洋水产研究, 1999(1): 6-12.
- Jin X S, Deng J Y. Yearly variations of fishery resources and biodiversity in the Laizhou Bay [J]. Marine Fisheries Research, 1999(1): 6-12. (in Chinese)
- [23] 何宏谋, 王煜, 陈红莉. 黄河断流对河口地区生态环境的影响 [J]. 海岸工程, 2000, 19(4): 41-46.
- He H M, Wang Y, Chen H L. Influence of the Yellow River zero flow on estuarine economic environment [J]. Coast Work, 2000, 19(4): 41-46. (in Chinese)
- [24] 任一平, 刘群, 李庆怀. 青岛近海小型鳀鲱鱼类渔业生物学特性的研究 [J]. 海洋湖沼通报, 2002(1): 69-74.
- Ren Y P, Liu Q, Li Q H. Biological characteristics of some small species in *engraulidae* and *clupeidae* [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2002(1): 69-74. (in Chinese)
- [25] 蒋晓辉, Arthington A, 刘昌明. 基于流量恢复法的黄河下游鱼类生态需水研究 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2009, 45(5/6): 537-542.
- Jiang X H, Arthington A, Liu C M. Environmental flow requirements by major fishes in the lower reach of the Yellow River determined by flow restoration [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2009, 45(5/6): 537-542. (in Chinese)
- [26] 吴光宗. 长江口海区鳀鱼和康氏小公鱼鱼卵和仔、稚鱼分布的生态特征 [J]. 海洋与湖沼, 1989, 20(3): 217-228.
- Wu G Z. The ecological characteristics of distribution of eggs, larvae and juveniles of the *engraulis japonicus* (*temminck & schlegel*) and *anchoviella commersonii* (*lec ped*) in the Changjiang river estuary [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1989, 20(3): 217-228. (in Chinese)
- [27] 陈介康, 秦玉江, 李培军. 黄海北部日本鳀鱼 (*Engraulis japonica* Houuttyn) 生殖习性的初步研究 [J]. 水产科技情报, 1978(3): 1-5.
- Chen J K, Qin Y J, Li P J. The preliminary research of the reproductive habit of *Engraulis japonica* Houuttyn in the north of the Yellow Sea [J]. Fisheries Science & Technology Information, 1978(3): 1-5. (in Chinese)
- [28] 张孟海, 孙同秋, 李永明, 等. 渤海南部性成熟黄鲫季节分布的研究 [J]. 海洋湖沼通报, 1994(4): 72-80.
- Zhang M H, Sun T Q, Li Y M, et al. On the seasonal distribution of sexually *maturrh zunast* in southern Bohai sea [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1994(4): 72-80. (in Chinese)