

河口生态需水理论与计算研究进展

彭 涛,陈晓宏,陈志和,赵长森

(中山大学水资源与环境研究中心,广东 广州 510275)

摘要 在辨识河口生态需水概念和内涵的基础上,认为河口生态需水是在一定生态目标下,维持河口相应时空范围内生态系统健康所需要的水量。回顾国内外河口生态需水研究的总体情况,综述近年来河口生态需水的主要计算方法,包括功能设定法、相关分析法及生态模型法等。在此基础上,指出目前河口生态需水研究存在理论和计算方法还很不成熟,生态保护目标不明确及交叉重复计算等问题,今后应加强河口生态需水机理的综合研究,建立较为完整的理论框架和计算方法体系,为不同生态保护目标下河口生态需水分析提供科学依据。

关键词 生态需水 河口 研究进展 综述

中图分类号 :TV213.9 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-6933(2010)02-0077-06

Advances in research on theory and calculation method of ecological water requirement in estuaries

PENG Tao, CHEN Xiao-hong, CHEN Zhi-he, ZHAO Chang-sen

(*Research Center of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*)

Abstract :Based on identification of the concept and implications of the ecological water requirement in an estuary, the definition of the ecological water requirement of an estuary is provided. The ecological water requirement of an estuary is the amount of water sufficient for maintaining healthy estuarine ecosystems with certain ecological targets. Current research advances on the ecological water requirement of an estuary are reviewed, and the calculation methods of recent years are summarized, including the function method, correlation analysis method, and ecosystem model method. On the basis of these analyses, the main existing problems in this field are identified :the theory and calculation methods of the ecological water requirement in an estuary are immature, targets of ecological protection are indefinite, and there is an issue of repeated calculation. Further research on ecological water requirements in estuaries should be focused on a comprehensive understanding of mechanisms, the establishment of integrated theoretical frameworks and calculation method systems, and the provision of a scientific basis for designing the ecological water requirements of estuaries with different ecological protection targets.

Key words :ecological water requirement ;estuary ;research advance ;comprehensive review

河口是指河流的尾闾地区,是河流与受水体的结合地段。笔者讨论的是受水体为海洋的入海河口,以下简称河口。河口地区陆海物质交汇、咸淡水混合、径流和潮流相互作用,产生各种复杂的物理、化学及生物过程,具有独特的环境特征和重要的生态服务功能,在流域乃至全球生态平衡中占有重要

作用,是人类最重要的生存环境之一。同时,河口对流域自然环境变化和人类活动响应最敏感^[1],已成为相对脆弱的生态系统。近年来,由于流域水资源的高强度开发,如高坝建设、河道外用水剧增、跨流域调水及污染物大量排放等直接影响到河口及其邻近海域,导致入海泥沙锐减、河口与滨海湿地萎缩、

河口环境污染严重、盐水入侵加剧、生物多样性衰减等一系列河口生态与环境问题。因此,保证河口一定规模的生态用水需求,已成为流域水资源合理配置以及恢复河口生态系统健康亟待解决的关键问题之一。目前河口生态需水研究已经引起国内外学者的高度关注,并取得了一些初步研究成果。笔者对近年来河口生态需水研究进展进行分析和总结,并提出当前研究存在的主要问题,对今后的研究趋势进行展望,以期对我国河口生态需水研究起到推动作用。

1 河口生态需水概念及其内涵

由于研究者不同的研究角度和研究目的,迄今为止对河口生态需水的概念没有达成统一认识。在国外没有与河口生态需水相对应的专门术语,相关或相近的概念是淡水入流(freshwater inflow)。

在国内,对河口生态需水概念的定义也不尽一致。由于研究主体的差异以及研究者对河口生态需水内涵理解的不同,已有研究中出现了入海需水量、河口生态环境需水及河口生态需水等一些概念。

入海需水量主要是满足河口和近海地区生态环境需要、维持生态平衡所需要的水量^[2]。

河口生态环境需水是河口生态需水 and 环境需水的总和,是同时满足水盐平衡、水热平衡、海岸线进退相对平衡和动植物生境动态平衡所需水量^[3]。

河口生态需水是指维持河口生态系统中具有生命的生物体水分平衡所需要的水量,主要涉及生物多样性保护和河口保护问题,需要维持基流量和保持冲淤平衡的峰流量^[4]。

入海需水量是从流域水循环角度出发,维持河口及近海地区水分平衡所需要的一定规模下泄量;而河口生态环境需水及河口生态需水则是从河口生态系统健康角度出发,维持或恢复正常生态与环境功能所需水量,它是生态系统本身固有的属性,不同类型的河口生态系统都有各自相对稳定的需水范围。由于生态系统与其所在环境密切相关,一些研究并未将河口生态环境需水与河口生态需水加以严格区分,即将河口生态环境需水简称为河口生态需水。

通过以上分析可知,河口生态需水研究是在人类大量挤占生态用水、导致入海水量显著减少及河口生态系统健康受损的情况下提出的。因此,河口生态需水可以定义为在一定生态目标下,维持河口相应时空范围内生态系统健康所需要的水量。这一概念适用于水资源状况不同的河口,具有普遍意义。

2 研究概况

2.1 国外研究历程及进展

国外河口生态需水的研究主要集中在淡水入流对河口生态系统影响方面。近 30 年来,美国、南非、英国及澳大利亚等国家通过大量的生态调查和模型研究,分别从不同方面探讨了淡水入流对河口生态系统不同环节、因素的影响^[5-9],并提出了许多淡水入流的评价方法。

20 世纪六、七十年代,随着水库建设和水资源利用程度的提高,各国学者和资源管理部门开始关注河口淡水入流问题。Copeland^[10]在《河流入海量减少对河口生态系统的影响》一书中指出,没有淡水输入,河口的等盐线和物种组成将发生急剧变化。美国一些州就通过相关法规,要求在水资源规划中考虑河口的淡水入流需求,并规定了河口三角洲生态需水量阈值。20 世纪八、九十年代,淡水入流评价发展很快,逐渐成为研究热点。Browder 等^[11]首先提出了河口淡水入流需求评价的概念性框架,指出河口渔业产量与河口淡水入流量有密切关系。1981 年在美国得克萨斯州举行的河口淡水入流国家研讨会,提出应对河口淡水入流问题的可行解决办法和方案。同年,美国鱼类与野生动物组织发起淡水输入对河口影响的国际研讨会,使淡水入流问题受到世界许多国家的关注^[12]。随后,在 1987 年成立了美国国家河口项目(National Estuary Program, NEP),主要目的就是识别、修复及保护美国重要河口。在南非,Jezevski 等^[13]首次评估了河口淡水入流需求,评估包括淹没需求和蒸发需求两个部分。此后,南非完整提出河口淡水入流的概念,并制定了河口淡水入流的评价标准和计算步骤,但是没有给出具体的评价方法^[14]。进入 21 世纪以后,淡水入流评价在世界上许多国家广泛展开,理论框架和计算方法体系初步形成。2001 年,美国佐治亚州自然资源委员会发表水问题白皮书,提出河口入流的科学框架,主要包括淡水入流、河口条件和资源三个方面。Alber^[15]提出一种河口淡水需求管理的概念性框架模型,分析了科学家、市民、政治家及管理者在河口淡水入流管理中的目标。至此,美国全面调整对流域的开发和管理目标,初步形成河口淡水入流评价的理论框架,并提出了一些淡水入流需求的计算方法^[16-20]。在南非,Adams 等^[21]通过评价河口健康指数确定南非众多河口的生态保护物种,提出有利于这些河口保护物种的适宜淡水入流量。在澳大利亚,有学者提出维持河口过程的河流环境流量评价方法,确定不使河口生态特征衰退的适宜环境流

量^[22]。英国尝试开发了基于生态风险评价和河口流量模拟基础上的多学科系统方法来确定河口淡水入流量。

总体来看,国外研究主要集中在淡水入流评价方面,多从水资源管理角度展开,侧重于水资源的配置,较少从生态系统自身需水的角度来研究。

2.2 国内研究历程及进展

针对我国一些河口生态严重退化的趋势,国内对河口生态需水进行了初步研究,但大多是在研究河流生态需水时对河口生态需水的定性描述,专门针对河口生态需水的研究并不多。我国河口生态需水的相关研究主要集中在黄河、海河和长江等主要河口。

黄河一直是我国河口生态需水研究的热点之一。20 世纪 80 年代中期,国家水产总局黄河水产研究所对河口渔业生态需水的评价结果认为,黄河河口海域鱼虾生长需要黄河每年在 4~6 月下泄入海水量 60 亿 m^3 ,枯水年需要在 4 月下泄 20 亿 m^3 ^[23]。20 世纪 90 年代以来,黄河断流进一步加剧,导致黄河口生态问题日趋严重,国内学者在黄河断流对河口生态环境影响方面开展了许多研究^[24-26]。进入 21 世纪后,“维持黄河健康生命”的治河新理念应运而生,并将其作为治理黄河的终极目标^[27]。从此,黄河口生态需水研究更加受到重视。在国家“十五”科技攻关项目子专题“三门峡以下水环境保护研究”中分析认为^[28],考虑汛期输沙用水的情况下,汛期河口最小生态环境需水量为 150 亿 m^3 、非汛期 42 亿~58 亿 m^3 。但该研究没有建立河口生态系统与来水量的响应关系,研究成果显得粗略。以后,国家“十五”科技攻关计划重大项目子专题“黄河口淡水湿地生态需水研究”,综合生态水文模型法和生态学法两种方法计算成果,得出黄河口湿地生态需水量,考虑输沙用水,湿地最小需水量为 201.18 亿 m^3 ^[29]。近年还有学者采用水文学、生态学及水力学方法分别计算了黄河口蒸散发需水、湿地需水、盐度平衡需水及输沙需水,最后根据一定原则整合得到黄河口最小生态需水为 134.22 亿 m^3 ^[30]。由于诸多学者不同的研究角度和研究手段,黄河口生态需水计算成果存在一定差异,但为黄河流域不同时期的水资源合理配置及黄河口生态系统恢复提供了重要依据。

海河流域是我国水资源开发利用程度最高的流域。长期以来海河流域水资源开发利用中生产、生活用水过度挤占生态用水,入海水量大幅减少,20 世纪 90 年代与 50 年代比较,海河流域平均入海水量减少 84%,致使河口生态系统遭到根本性破坏。近年来,一些学者以恢复和维持河口生态系统健康

为目标,提出河口水循环消耗、生物循环消耗、生物栖息地等不同类型需水及其计算方法,根据“兼容性”和“最大值”原则整合计算,得到海河流域典型河口生态需水量^[31-32]。

20 世纪 90 年代以来,三峡工程和南水北调工程相继启动,在长江口生态与环境发生显著变异的背景下,大型水利工程建设对长江口生态环境的影响受到国内学者的高度关注,并开展了大量相关研究^[33-35],这为长江口生态需水研究奠定了良好基础。顾圣华^[36]以维持长江口水盐平衡并兼顾水沙平衡为目标,分析了长江口生态需水量。国家“十五”科技攻关计划重大项目子专题“湿润地区河流生态流量研究”开展了长江口生态流量的专题研究,采用水流、盐度模型模拟上游不同流量时外海盐水入侵的程度,得出防止咸水入侵所需的河口生态流量^[37]。孙涛等^[38]以长江口牡蛎、螃蟹生长关键期对盐度的适应范围为控制条件,通过水流和盐度模型推求保证它们生长适宜盐度的河口淡水入流量。

总的来说,我国河口生态需水研究起步较晚,但发展较快,已形成初步的理论和计算方法体系。然而,已有研究多从维持河口生态系统功能所需水量角度出发,未能充分反映河口生态需水的核心机理,存在重复交叉计算问题。

3 河口生态需水计算方法

由于河口生态系统相当复杂,观测资料较为短缺,故河口生态需水,至今尚未有比较公认的计算方法或标准。综合分析国内外的研究现状,目前河口生态需水的计算方法主要有功能设定法、相关分析法及生态模型法等。

3.1 功能设定法

功能设定法是以河口生态系统健康为目标,维持河口生态系统正常功能所需的水量。一般来说,河口生态需水按照其功能可划分为河口输沙需水、盐度平衡需水、湿地需水、航运需水等。该方法首先分解计算河口各项功能所需水量,然后按一定原则整合得出河口生态需水总量。功能设定法在国内已有一些研究实例^[31-32,39-41]。以下简介几项河口生态需水的计算方法。

3.1.1 河口输沙需水量

河口输沙需水量是针对我国河流特殊性而提出的,主要指维持河口冲淤平衡所需的水量。目前,河口输沙需水计算方法包括经验公式法^[41]、河相关系数法及动床数值模拟法^[39-40]等。

经验公式法是基于一定物理意义的简单估算法,大多是借鉴黄河下游输沙需水的一些经验公式。

根据基本的水流挟沙能力概念计算河口输沙需水量,即

$$W_t = Q_i / C_i \quad (1)$$

式中: W_t 为河口输沙需水量, m^3 ; Q_i 为河口泥沙年淤积量, kg ; C_i 为水流挟沙能力, kg/m^3 。

一般采用断面平均饱和含沙量表示。该法比较简单,但未能考虑输沙需水量的季节变化要求。

河相关系法利用实测水沙和地形资料,根据落潮潮量、落潮含沙量及河床颗粒特征建立河口的河相关系^[42],建立平衡断面形态和水沙要素的经验关系,推求维持河口冲淤平衡所需水量。此方法计算简单,可推广于资料较为缺乏的河口,但无法模拟河口冲淤平衡变化过程。动床数值模拟法则根据河口地形条件,采用水沙数学模型模拟河口冲淤变化与径流的响应关系,由此计算维持河口冲淤平衡需水量。此法对短期冲淤变化的模拟能保持一定精度,但对长序列计算存在误差累计问题。

3.1.2 河口盐度平衡需水量

河口盐度平衡需水量计算强调保持一定规模的淡水输入,维持河口适宜的咸淡水比例,以实现河口地区水体盐度平衡。主要计算方法有数值模拟法^[37-38,43]和箱式模型法^[31,41]等。

数值模拟法以盐水入侵的数值模拟为基础,建立河口水流和盐度数学模型,模拟上游不同来水时的河口盐水入侵程度,以盐度标准为衡量准则,反推出防止盐水入侵所需的河口生态流量。数值模拟法是一种适应性较强的计算方法,既可综合考虑各种因素影响,也可分析单项因子的影响,但需要大量的实测资料验证模型和率定参数,这在很多河口难以实现。箱式模型法通过建立河口径流与河口盐度的相关关系,假定河口水体混合均匀,通过盐度平衡方程推求一定河口盐度目标条件下的河口淡水输入量。箱式模型法计算简便,但无法反映河口区咸淡水混合过程的复杂性,计算结果偏差较大。

3.1.3 河口湿地需水量

河口湿地需水量是指在一定生态目标下为维持自身发展过程、保证基本生态功能发挥的多年平均需要补充的水量。河口湿地需水量计算方法大多采用水文学法和生态学法。一些学者以保持必要的湿地水面面积和水深为目标计算河口湿地需水量^[41],计算式为

$$W_f = \beta \gamma A_w H \quad (2)$$

式中: W_f 为河口湿地需水量, m^3 ; β 为湿地水面面积占湿地面积的百分比, $\%$; γ 为湿地的水体置换频率,次/a; A_w 为湿地面积, m^2 ; H 为湿地平均水深, m 。

单纯采用传统的水文学模型和生态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。在具体实践中,如能将这两种方法结合起来进行河口湿地需水量研究是最理想的。连煜等^[44]采用景观生态学原理和方法,在水文学、生态学研究基础上,在遥感和GIS技术的支持下,建立了基于生态水文学的黄河口湿地生态需水评价模型,计算得到河口湿地适宜生态需水量。

3.2 相关分析法

相关分析法主要通过分析河口不同生物种群数量、分布与环境质量指标的关系,利用生物对温度、盐度、营养物质等环境指标的适应能力作为控制条件来计算河口生态需水量。相关分析法在国内外已有一些应用。国内一些学者通过建立入海径流与盐度的相关关系,并以盐度为控制标准,计算得到河口生态需水量^[36,45]。Doering等^[16]提出以沉水植物的盐度适应范围来推求河口最小和最大的淡水需求量。Powell等^[18]则通过对Texas河口历年淡水入流量、盐度和河口渔业产量进行回归分析,推求得到维持河口盐度平衡和稳定渔业产量的最小淡水入海量。

3.3 生态模型法

生态模型法利用数学模型模拟生态系统物质和能量间的转化过程,将水文学参数与系统营养物质输入相联系,通过恢复或维持生态系统功能协调对水量及营养物质的要求确定河口生态需水量。Mitsch等^[46]利用生态模型建立水文学参数与生态系统物质循环间的关系,通过模型反映不同输入参数对生态系统的影响,并利用模型分析河口湿地恢复中对磷的需求,确定恢复河口湿地所需输入水量。Timchenko等^[47]建立了营养物质初级生产及消耗平衡生态模型,以下泄流量相关的水体滞留时间为参数,建立流量与生态系统的关系,根据河口有机污染程度的不同,确定上游电站所需下泄的流量。

综合比较上述计算方法,功能设定法概念清晰、理论性较强,易于掌握,适合大多数河口生态需水计算,但是没有将河口视为一个有机整体,存在重复计算的问题。相关分析法简单且易于操作,数据容易满足,但计算结果偏差较大,不过对于目前生物资料短缺的大多数河口来说,是一种有效的应急方法。生态模型法理论依据充分,适用于不同的河口生态系统,但所需生物资料难以获取,而且计算比较复杂,目前尚不能被广泛应用。

4 存在问题与展望

迄今为止,河口生态需水研究还刚起步,虽已取

得一些研究成果,但还很不成熟,总的看来,定性研究多于定量研究,对河口生态需水的机理研究较少,还存在许多需要进一步研究的问题。

a. 当前河口生态需水的理论研究还很不成熟,概念及其内涵存在着许多分歧,致使河口生态需水缺乏统一的评价标准,成为深入研究河口生态需水的瓶颈。已有研究多为经验性,系统分析明显不足,未能科学地解决水分-生态的过程变化以及耦合作用机理。因此今后迫切需要加强河口生态需水机理及相关支持理论的综合研究,形成一个较为明晰和完整的理论框架,为准确计算河口生态需水量提供可靠的理论依据。

b. 目前河口生态需水研究大多借鉴河道内生态需水的计算方法,并不完全适用于河口生态需水的计算,实用性和可操作性较差。河口是一个咸、淡水高度混合的区域,在径流、潮汐、波浪、地形等因素的影响作用下,其变化过程十分复杂。还有,世界上许多河口都建有拦潮闸,明显改变了河口发育方向、潮流及生物生境。现有河口生态需水的一些计算方法大多没有充分考虑河口这些自身特点及其变化,出现生态需水过程失真的问题。今后要加强不同类型河口生态需水规律研究,建立基于生态水文学的河口生态需水计算模型,形成一套比较成熟的计算方法体系。

c. 只有在生态保护目标设定的情况下,河口生态需水才有明确的意义。目前,在计算河口生态需水量时,生态保护目标及规模缺乏科学合理界定,很少考虑河流水资源承载能力及人类社会的现实要求,计算成果较难满足生态系统保护和生态需水配置的迫切需求。今后应根据区域水资源状况、生态保护及经济发展的情况,综合考虑自然生态系统与社会经济多方的需求,合理确定生态保护目标,这是竞争用水条件下河口生态需水核算的关键,也才更具有现实意义。

d. 目前河口生态需水计算未将河口视为一个生态系统的整体来考虑,如功能设定法中河口各项生态需水量之间的计算存在交叉重复。以后应该从河口生态系统的整体性出发,针对不同类型的河口生态系统进行综合研究,研究水在河口生态系统的循环机理,建立河口生态需水耦合模型,避免重复计算,提高河口生态需水量计算成果的实用价值,为维持和改善河口生态环境质量提供科学依据。

随着我国日益突出和严峻的河口生态与环境问题,河口生态需水研究必将更加引起人们的重视和关注,也将会在流域规划和管理决策中发挥更大作用。理论与实践相结合、多学科交叉综合研究将是

今后河口生态需水研究的方向和发展趋势。

参考文献:

- [1] 陈吉余,陈沈良.长江口生态环境变化及对河口治理的意见[J].水利水电技术,2003,34(1):19-25.
- [2] 杨志峰,崔保山,刘静玲,等.生态环境需水理论、方法与实践[M].北京:科学出版社,2003.
- [3] 倪晋仁,崔树彬,李天宏,等.论河流生态环境需水[J].水利学报,2002,33(9):14-19.
- [4] 唐克旺,王浩,王研.生态需水分类体系探讨[J].水资源保护,2003,19(5):5-8.
- [5] BENSON N G. The freshwater inflow to estuaries issue [J]. Fisheries,1981,6(5):8-10.
- [6] JASSBY A D, KIMMERER W J, MONISMITH S G, et al. Isohaline position as a habitat indicator for estuarine populations [J]. Ecological Applications,1995,5(1):272-289.
- [7] ARDISSONA P L, BOURGETB E. A study of the relationship between freshwater and runoff benthos abundance: a scale-oriented approach [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1997,45:535-545.
- [8] RAVENSCROFT A N O M, BEARDALL B C H. The importance of freshwater flows over estuarine mudflats for wintering waders and wildfowl [J]. Biological Conservation,2003,113:89-97.
- [9] GOBLER C J, CULLISON L A, KOCH F, et al. Influence of freshwater flow, ocean exchange, and seasonal cycles on phytoplankton nutrient dynamics in a temporarily open estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2005,65:275-288.
- [10] COPELAND B J. Effects of decreased river flow on estuarine ecology [J]. Journal of Water Pollution Control Federation, 1966,38:1831-1839.
- [11] BROWDER J A, MOORE D. A new approach to determining the quantitative relationship between fishery production and the flow of fresh water to estuaries [C]//CROSS R, WILLIAMS D, eds. Proceedings of a National Symposium on Freshwater Inflow to Estuaries, Washington D C:1981:403-430.
- [12] PAUL A M, MERRYL A, PETER D, et al. Freshwater inflow: science, policy, management [J]. Estuaries, 2002, 25 (6B): 1243-1245.
- [13] JEZEWSKI W A, ROBERTS C P R. Estuarine and lake freshwater requirements [R]. Pretoria: Department of Water Affairs and Forestry South Africa,1986:12-16.
- [14] SUSAN T L. Water resources protection policy implementation, resource directed measures for protection of water resources, estuarine ecosystems [R]. Pretoria: Department of Water Affairs and Forestry South Africa,1999:5-10.
- [15] ALBER M A. Conceptual model of estuarine freshwater inflow management [J]. Estuaries,2002,25(6B):1246-1261.
- [16] DOERING P H, CHAMBERLAIN R H, HAUNERT D E. Using submerged aquatic vegetation to establish minimum and maximum freshwater inflows to the Caloosahatchee Estuary,

- Florida[J]. Estuaries,2002,25(6B):1343-1354.
- [17] KIMMERER W J. Physical, biological, and management responses to variable freshwater inflow into the San Francisco Estuary[J]. Estuaries,2000,25:1275-1290.
- [18] POWELL G L, MATSUMOTO J, BROCK D A. Methods for determining minimum freshwater inflow needs of Texas Bays and estuaries[J]. Estuaries,2002,25(6B):1262-1274.
- [19] FLANNERY M S, PEEBLES E B, MONTGOMERY R T. A percent-of-flow approach for managing reductions of freshwater inflows from unimpounded rivers to Southwest Florida Estuaries[J]. Estuaries,2002,25(6B):1318-1332.
- [20] MATTSON R A. A resource-based framework for establishing freshwater inflow requirements for the Suwannee River Estuary[J]. Estuaries 2002,25(6B):1333-1342.
- [21] ADAMS J B, BATE G C, HARRISON T D, et al. A method to assess the freshwater inflow requirements of estuaries and application to the Mtata Estuary, South Africa[J]. Estuaries, 2002,25(6B):1382-1393.
- [22] PEIRSON W L, BISHOP K, VAN S D, et al. Environmental water requirements to maintain estuarine processes[R]. Environmental Flows Initiative Technical Report. Canberra: Commonwealth of Australia,2002,3.
- [23] 水利部黄河水利委员会设计院. 黄河水资源利用[R]. 郑州:水利部黄河水利委员会设计院,1986.
- [24] 田家怡,王民. 黄河断流对三角洲附近海域生态环境影响的研究[J]. 海洋环境科学,1997,15(3):59-65.
- [25] 王丽红. 黄河断流对下游生态环境的影响研究[J]. 山东师范大学学报:自然科学版,2000,15(4):418-421.
- [26] 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.
- [27] 李国英. 黄河治理的终极目标是“维持黄河健康生命”[J]. 人民黄河,2004,26(1):1-2.
- [28] 崔树彬,宋世霞. 三门峡以下水环境保护研究[R]. 郑州:黄河流域水资源保护局,2002.
- [29] 连煜,朱歧武. 黄河河口淡水湿地生态需水研究[R]. 郑州:黄河流域水资源保护局,2005.
- [30] SUN T, YANG Z F, CUI B S. Critical environmental flows to support integrated ecological objectives for the Yellow River Estuary, China[J]. Water Resources Management, 2008, 22: 973-989.
- [31] 孙涛,杨志峰,刘静玲. 海河流域典型河口生态环境需水量[J]. 生态学报,2004,24(12):2707-2715.
- [32] 崔拓. 河口生态环境需水量研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2004.
- [33] 罗秉征,沈焕庭. 三峡工程与河口生态环境[M]. 北京:科学出版社,1994.
- [34] 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.
- [35] 沈焕庭,茅志昌. 东线南水北调工程对长江口咸水入侵影响及对策研究[J]. 长江流域资源与环境,2002,11(2):150-154.
- [36] 顾圣华. 长江口环境用水量计算方法探讨[J]. 水文, 2004,24(6):35-37.
- [37] 李来,王高旭. 湿润地区河流生态流量研究[R]. 南京:南京水利科学研究院,2005.
- [38] SUN T, YANG Z F, SHEN Z Y, et al. Environmental flows for the Yangtze Estuary based on salinity objectives[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation,2009,14(3):959-971.
- [39] 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):395-402.
- [40] 尤爱菊. 强潮河口生态与环境需水及实现途径研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- [41] 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.
- [42] 窦国仁. 平原冲积河流及潮汐河口的河床形态[J]. 水利学报,1964,(2):1-13.
- [43] ZHAO R, YANG Z F, SUN T B, et al. Freshwater inflow requirements for the protection of the critical habitat and the drinking water sources in the Yangtze River Estuary, China[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation,2008,14(5):2507-2518.
- [44] 连煜,王新功,黄羽中,等. 基于生态水文学的黄河口湿地生态需水评价[J]. 地理学报,2008,63(5):451-461.
- [45] 郑建平,王芳,华祖林,等. 海河河口生态需水量研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2005,33(5):518-521.
- [46] MITSCH W J, WANG N M. Large-scale coastal wetland restoration on the Laurentian Great Lakes: determining the potential for water quality improvement[J]. Ecological Engineering,2000,15(3-4):267-282.
- [47] TIMCHENKO V, OKSIYUK O, GORE J A. Model for ecosystem state and water quality management in the Dnieper River Delta[J]. Ecological Engineering, 2000, 16(1):119-125.

(收稿日期:2008-11-27 编辑:高渭文)

