

长江口生态流量研究

王高旭^{1,2}, 李褪来^{1,2}, 陈敏建³

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要: 根据长江流域生态系统特点, 把河流生态需水的重点定位于下游河段至河口区, 选择盐的质量分数作为关键因子, 提出了河道生态流量计算方法. 建立大通至长江口外海一、二维耦合数学模型, 采用实测资料对模型率定, 模拟大通水文站不同来流量时长江口盐的质量分数空间分布规律. 以维持长江口生态系统服务功能最大化为目标, 选定盐的质量分数控制标准, 分析得出长江大通站生态流量为 $10\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$.

关 键 词: 服务功能; 生态流量; 长江; 盐的质量分数

中图分类号: TV856:X143

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2010)03-0053-06

长江流域气候温和湿润, 雨量丰沛, 多年平均降水量约 $1\ 100\ \text{mm}$. 长江自西而东横贯中国中部, 数百条支流辐辏南北, 是中国水量最丰富的河流. 在人类活动干扰下, 流量条件的改变是河流生态系统状态变化的主要驱动因素. 自 20 世纪 50 年代以来, 长江流域已兴建水库 4.8 万座, 总库容达 $1\ 200\ \text{亿}\ \text{m}^3$. 长江流域大规模的水利开发活动已经改变了河川径流量在空间和时间上的分配, 对河流水文情势影响巨大. 如三峡水库建成以后, 由于 10 月、11 月的截流蓄水和翌年的 1~5 月的开闸放水, 将引起大通站 10 月份入海流量的大幅减少和 1~5 月份入海流量不同程度的增加. 南水北调工程东、中、西三线调水总规模约 $400\ \text{亿}\ \text{m}^3/\text{a}$, 相当于长江年径流量的 4%^[1]. 除此之外, 长江干、支流还分布着众多引水工程. 这些水利工程的实施及叠加的影响, 将使河流沿程的水文情势发生变化, 随之引起水质、水体的自净能力、输沙量和营养物质浓度等若干环境因子的改变^[1]. 这些变化产生的影响将在下游河段和河口区集中体现. 因此, 本文根据长江流域特点, 选择长江口作为研究区域, 以大通站为控制站开展生态流量的研究.

1 长江口生态流量分析

伴随着我国水生态问题的加重, 近 20 年来我国河流生态需水的研究进展迅速, 基本上形成了干旱及半干旱半湿润地区的生态需水理论和方法体系^[2-6]. 长江流域位于湿润地区, 水文循环条件与北方有很大差别, 河流生态需水与干旱半干旱地区大不相同, 目前国内常用的生态需水计算方法, 如 Tennant 法、湿润法^[7-8]等, 并不适用于长江流域. 因而, 需要根据流域特点, 分析长江流域生态需水研究重点, 提出适用的生态流量计算模型.

根据国内外研究结果, 河道枯水期径流量维持在多年平均径流量的 20%~30% 以上可满足水生态系统的水量和水动力学要求^[6,9-10]. 长江流域河川径流量丰沛, 水资源利用受土地资源制约, 灌溉用水量有限, 水资源利用率不高; 再加上众多水库的运行, 使长江水情均化. 因此, 在长江流域, 低水径流下水体生态系统的临界变化问题不显著; 水资源开发利用对生态系统的影响, 从水量角度, 即使在枯水年也不足以威胁到水生

收稿日期: 2009-10-20

基金项目: “十一五”国家科技攻关计划资助项目(2006BAB14B06, 2006BAB14B07); “十五”国家科技攻关计划资助项目(2004BA610A-01); 南京水利科学研究院基金资助项目(Y50603)

作者简介: 王高旭(1979-), 男, 江苏徐州人, 工程师, 博士研究生, 主要从事水资源规划与管理研究.

E-mail: gxwang@nhri.cn

生物生存与繁衍,不存在水生态系统生存危机的问题;但枯水期径流不足对供水水质、航运等河流服务功能影响明显.河口生态需水量主要包括控制含盐度需水量、航运需水量、生物多样性需水量、河床冲淤变化需水量和河口湿地需水量等.计算河口的生态需水相当复杂,至今尚未见到比较公认的方法或标准^[11-15].需要针对长江口特点,研究河口生态流量的安全标准,以维持河口的生物多样性、生态系统完整性,防止河口淤积、海水入侵,保障枯水期饮用淡水资源以及航运安全.

长江口是我国第一大河口,径流量大,水体自净能力强,河口水域水质基本达到地表水Ⅱ类标准,自然条件十分优越,是上海市及苏南地区的优质供水水源地.长江口是咸淡水交汇的地方,环境条件复杂多变.河口的许多重要理化特征和生物特征都具有其特殊性,使河口成为一个结构独特、功能多样的生态系统.由于河口环境因子变化剧烈,生态系统的结构有明显的脆弱性和敏感性.盐的质量分数是反映河口生态环境健康的敏感因子之一,对河口生物的生存和分布影响深远.保持河口水域合理的盐的质量分数是河口生物栖息地对水量的基本需求.盐的质量分数较低的河口和近岸海域是幼鱼和无脊椎动物的育苗场,还是洄游鱼类重要的产卵场,因此盐的质量分数增大,会破坏它们的栖息地和产卵场环境.盐的质量分数也是影响工农业生产用水的关键因子.河口盐水入侵导致盐的质量分数超过工农业生产用水和生活饮用水标准时就成为一种灾害,致使供水水质盐的质量分数超标,供水安全难以保障.此外,盐水还对泥沙的絮凝影响很大,是造成河口泥沙淤积的重要影响因素.河口生态需水量的主要服务目标可以概化为保证河口适宜的盐的质量分数.

上游来水量直接影响下游河口盐量分布,径流量的变化直接影响河口盐水入侵的频率和强度.河口径流量减少,是导致河口水域盐的质量分数升高的直接原因.因此,河口生态需水量即为维持一定盐的质量分数条件下的上游控制断面来水量.通过建立上游控制断面至河口外海潮流、盐的质量分数数学模型,模拟上游不同来流量时外海盐水入侵的程度,分析控制断面流量与河口盐的质量分数空间分布变化的关系;再根据维持河口生态服务功能最大化为依据选定盐的质量分数标准,就可以得出维持河口水盐平衡、防止海水入侵所需的河口生态流量.

2 长江口生态需水计算模型

相关研究^[16-17]显示,长江口盐的质量分数与长江下游大通水文站流量具有良好的负相关性.采用大通站流量作为模型的上边界输入条件,利用潮流、盐的质量分数数学模型计算大通站不同流量时下游各控制站点盐的质量分数值,模拟上游不同来流量时外海盐水入侵的程度.

大通至外海的一、二维联解潮流盐的质量分数数学模型采用一维和二维数学模型耦合技术.模型上游边界由大通流量控制,下游外海边界由潮位过程控制.一、二维模型的联解基本思想是通过河网非恒定流三级联解解出一、二维模型连接断面上的水位及流量,利用连接断面上的水位及流量,分别回代给一、二维模型所有各计算点上的物理量.一维模型以流量传递给二维模型,二维模型以水位传递给一维模型.通过模型,可以模拟大通站流量与长江口水域盐的质量分数变化的关系,以盐的质量分数标准作为衡量准则,就可以得出保证河口适当盐的质量分数,维持河口服务功能最大化的生态流量.

2.1 长江下游大通至江阴河段一维潮流模型

一维潮流模型用于提供二维潮流模型的上游流量边界,模型的基本方程是扩展后的圣维南(Saint-Venant)方程组:

$$\frac{\partial S_{co}(A + A_o)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (S_m Q)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (2)$$

式中: S_{co} 、 S_m 为河道蜿蜒系数; A 为有效过水断面面积(m^2); A_o 为蓄水断面面积(m^2); t 为时间(s); Q 为河道流量(m^3/s); x 为沿主流向的纵向距离(m); q 为侧向入流或出流(入流为正,出流为负)(m^2/s); β 为动量

校正系数; g 为重力加速度(m^2/s); h 为水位(m); S_f 为河道的阻力坡降.

方程离散格式采用加权隐式有限差分格式.函数 ψ 及其时间导数和空间导数的离散公式是:

$$\psi = \theta \psi_j^{n+1} + (1 - \theta) \psi_j^n \quad (3)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\psi_j^{n+1} - \psi_j^n}{\Delta t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \theta \left[\frac{\psi_{j+1}^{n+1} - \psi_j^{n+1}}{\Delta x_j} \right] + (1 - \theta) \left[\frac{\psi_{j+1}^n - \psi_j^n}{\Delta x_j} \right] \quad (5)$$

本文建立的大通至江阴一维模型共包括9个干、支流河道,335个断面.其中主干流210个断面,总长约450 km.

2.2 长江口二维潮流、盐的质量分数数学模型

在正交曲线坐标系 ξ - η 下,潮流和盐的质量分数二维运动基本方程为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{g_\xi g_\eta} \frac{\partial}{\partial \xi} (H u g_\eta) + \frac{1}{g_\xi g_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} (H v g_\xi) = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{g_\xi} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{g_\eta} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{g_\xi g_\eta} \frac{\partial g_\xi}{\partial \eta} - \frac{v^2}{g_\xi g_\eta} \frac{\partial g_\eta}{\partial \xi} + g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} - f v + \frac{g}{g_\xi} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{\rho_a C_D W_\xi |W|}{\rho H} = \\ E \left(\frac{1}{g_\xi} \frac{\partial A}{\partial \xi} - \frac{1}{g_\eta} \frac{\partial B}{\partial \eta} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{g_\xi} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{g_\eta} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{g_\xi g_\eta} \frac{\partial g_\eta}{\partial \xi} - \frac{u^2}{g_\xi g_\eta} \frac{\partial g_\eta}{\partial \xi} + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} - f u + \frac{g}{g_\eta} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{\rho_a C_D W_\eta |W|}{\rho H} = \\ E \left(\frac{1}{g_\xi} \frac{\partial B}{\partial \xi} + \frac{1}{g_\eta} \frac{\partial A}{\partial \eta} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\partial HS}{\partial t} + \frac{1}{g_\xi g_\eta} \left(\frac{\partial g_\eta u HS}{\partial \xi} + \frac{\partial g_\xi v HS}{\partial \eta} \right) = K_s \left(\frac{1}{g_\xi^2} \frac{\partial^2 HS}{\partial \xi^2} + \frac{1}{g_\eta^2} \frac{\partial^2 HS}{\partial \eta^2} \right) \quad (9)$$

式中: $A = \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (u g_\eta) + \frac{\partial}{\partial \eta} (v g_\xi) \right] / (g_\xi g_\eta)$; $B = \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (v g_\eta) - \frac{\partial}{\partial \eta} (u g_\xi) \right] / (g_\xi g_\eta)$; g_ξ, g_η 为Lami系数, $g_\xi = \sqrt{x_\xi^2 + y_\xi^2}, g_\eta = \sqrt{x_\eta^2 + y_\eta^2}$; u, v 分别为 ξ 和 η 方向上的流速分量; ζ 为水位, H 为总水深; C_D 为风应力拖曳系数; ρ_a 为大气密度; W_ξ 和 W_η 分别为 ξ 和 η 方向的风速分量; S 为水体盐的质量分数; C 为谢才系数; E 为水流紊动黏滞系数; K_s 为盐水的扩散系数.二维数学模型的计算范围为:西自江阴,东到东经 123° ,南起北纬 $29^\circ 27'$ (象山港附近),北到北纬 $32^\circ 15'$ (吕四港以北),包括长江口和杭州湾在内的水域.

由于长江口边界形状比较复杂,模型采用能拟合河道边界的正交曲线网格作为计算网格,以减少计算工作量,提高模拟精度.网格数为 $418 \times 328 = 137\,104$ 个,尺度在 $50 \sim 2\,000$ m之间.

2.3 基本方程的数值求解

方程(6)~(8)与笛卡尔坐标系下的潮流运动基本方程相比虽略显复杂,但方程的类型与性质并未改变,仍属于二阶非线性微分方程,可以用笛卡尔坐标系下求解基本方程的方法.

本模型采用有限差分方法,节点布置为交错网格.对于方程(6)~(8)式写出相应的差分方程,对差分方程用ADI法求解,即在 $n \rightarrow n+1/2$ 时段内,沿 ξ 方向联立求解式(6)和(7)的差分方程,得到 ζ 和 u ,显式求解式(9)的差分方程得到 v ;在 $n+1/2 \rightarrow n+1$ 时段内,沿 η 方向,联立求解式(6)和(8)的差分方程,得到 ζ 和 v ,再显式求解式(7)的差分方程得到 u .这样就求得了 $(n+1)$ 时刻的 u, v 和 ζ .

对盐的质量分数方程(9)进行离散,一阶导数采用迎风格式^[18-19].将二维潮流数学模型计算的 u, v, ζ 代入离散方程中,通过显式求出 $n+1$ 时刻的盐的质量分数.

2.4 模型参数确定与边界处理

2.4.1 边界处理

二维潮流、盐的质量分数模型的边界条件采用如下方法处理:

①初始值条件:二维潮流模型的上游流量边界由一维潮流模型提供,二维模型外海开边界的控制潮位采用东中国海大模型^[20]计算提供。

②动边界处理:长江口存在着滩地和沙洲,这些浅滩随着潮位的涨落,时而淹没,时而露出。为了反映水边线的变化,采用富裕水深法根据水位的变化连续不断地修正水边线,在计算中判断每个单元的水深,当单元水深大于富裕水深时,将单元开放,作为计算水域,反之,将单元关闭,置流速于零。

2.4.2 参数的率定与验证 一维模型采用 2002-02-25-03-06 的芜湖、南京、镇江和江阴的潮位资料,对模型进行验证,糙率取 0.02。二维模型当上游和外海边界给定时,通过率定计算调试参数,糙率从外海到上游按线性插值取 $n = (0.012 \sim 0.020) + 0.01/H$,紊动黏滞系数 ν_t 为 $30 \text{ m}^2/\text{s}$,潮流数学模型计算时间步长根据计算的收敛性和稳定性取为 4 s。

二维模型潮流场采用 2002 年 9 月测量的潮位资料和大、中、小潮的流速、流向资料率定。经过率定,17 个潮位站的潮位除个别站外,大、中、小潮的潮位都与实测较一致,误差均小于 0.10 m;在 28 个测点实测流速的率定计算中,各站的流速、流向过程与实测过程吻合较好,相位基本一致,误差基本在 10% 以内,均满足模型验证精度要求。

在完成潮流率定后,用 2002 年 3 月(枯季)实测资料对潮流一维和二维模型耦合数学模型进行验证。验证结果显示,各测站潮位计算值和实测值在大潮和中潮时较吻合,流速和流向的实测值与计算值符合较好。

2.4.3 盐的质量分数标准的设定 盐的质量分数标准的选择以维持河口生态服务功能最大化为目标,需要对比分析水生生物的耐受盐的质量分数标准、工业用水盐的质量分数标准、农业灌溉用水盐的质量分数标准以及生活用水盐的质量分数标准等。选择这些标准中最低值作为依据,这样计算得到的生态需水量能同时满足多种用水(工业、农业、生活、生物)的要求,能够较为充分地发挥河流生态系统的服务功能。对比分析水稻育秧苗标准、一般灌溉用水标准、上海自来水公司盐水入侵标准、宝山钢铁厂最大值和植物安全用水最大浓度后,选择上海自来水公司盐水入侵标准 0.18‰ 为计算河口生态流量的控制盐的质量分数标准。

3 结 果 分 析

3.1 模拟计算结果

大通站的潮差消失,其以上河段已完全不受潮汐影响,故采用大通站的流量作为模型的上边界输入条件,利用前述的潮流、盐的质量分数数学模型计算大通站不同流量时下游各控制站点盐的质量分数,模拟上游不同来流量时外海盐水入侵的程度。

大通径流量分别是 4 500,7 000,8 000,9 000,10 000 和 30 000 m^3/s 时,计算得到各河段盐的质量分数最大值和平均值分布见表 1。

表 1 不同径流量时盐的质量分数

Tab. 1 Salinity distribution under different runoff volumes

‰

流 量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	天生港以上		望虞河口		徐六泾		白茆河口		浪 港		浏河口		陈行水库	
	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
4 500	0.02	0.02	0.15	0.04	1.47	0.19	3.04	0.96	8.71	5.58	7.11	5.55	6.82	5.31
7 000	0.02	0.02	0.06	0.02	1.11	0.15	2.02	0.64	5.13	3.47	4.30	3.41	4.14	3.28
8 000	0.02	0.02	0.06	0.02	1.10	0.14	2.01	0.62	5.06	3.44	4.27	3.41	4.12	3.29
9 000	0.02	0.02	0.06	0.02	1.06	0.14	1.94	0.59	5.01	3.36	4.22	3.34	4.06	3.22
10 000	0.02	0.02	0.06	0.02	1.00	0.13	1.83	0.56	4.86	3.22	4.12	3.23	3.96	3.11
30 000	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.04	0.03	0.05	0.04	0.05	0.04

注:数值为斜体表示盐的质量分数超标。

3.2 生态流量分析

由于长江口三级分汊、四口入海的格局,以及径流分配和河槽形态的不同,导致各分汊河道的盐水入侵

程度存在较大的差异.长江口徐六泾站离口门约110 km,它既是南北支的分流点,又是整个长江口多级分汊的起点.当徐六泾的盐的质量分数满足用水标准时,徐六泾上游地区将不会受到海水倒灌的威胁.以上海自来水公司盐水入侵0.18‰为标准进行分析.

大通站流量处于4 500 ~ 7 000 m³/s时,徐六泾的盐的质量分数为0.19‰~0.15‰,处于临界位置,上游的望虞河、天生港的平均盐的质量分数达标,能满足上游地区工业用水、水稻育秧苗、灌溉用水标准、植物耐盐的要求;但徐六泾下游至口门地区盐的质量分数超标,徐六泾以下设有工业和生活取水口,影响到白茆河口、陈行水库的取水安全.当大通流量处于7 000 ~ 10 000 m³/s时,徐六泾最大盐的质量分数在1.00‰~1.11‰之间,此时盐的质量分数能满足水稻育秧苗、一般灌溉用水和植物安全用水的需求,但饮用水、工业用水安全得不到保障;同时,徐六泾站以下河段的最大盐的质量分数除能满足水生生物用水外,达不到其他用水的标准;徐六泾的平均盐的质量分数能满足多项用水的需求.当大通流量大于10 000 m³/s时,徐六泾基本满足各项用水要求.

4 结 语

长江流域河流低水径流水生态系统的临界变化问题不显著,本文将研究重点放在了长江下游河段至长江口,计算了长江口生态流量.维持河口水流在一定盐的质量分数以下,也是维持河口的生物多样性、生态系统完整性,防止河口淤积、海水入侵的必要条件;而上游控制站的来水量是影响河口盐的质量分数分布的最直接因素.因此,对大通至江阴河段建立一维潮流模型,对江阴至河口段建立二维潮流、盐的质量分数模型,采用一维二维联解技术计算出河口盐的质量分数分布与大通站入流量关系,以上海自来水公司盐水入侵标准为控制标准,提出长江大通生态流量以10 000 m³/s为宜.

参 考 文 献:

- [1] 姜翠玲,严以新.水利工程对长江河口生态环境的影响[J].长江流域资源与环境,2003,12(6):547-551.(JIANG Cui-ling, YAN Yi-xin. Impact of water conservancy project on ecosystem and environment of the Yangtze River Estuary[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2003, 12(6): 547-551. (in Chinese))
- [2] 王西琴,刘昌明,杨志峰.生态及环境需水量研究进展与前瞻[J].水科学进展,2002,13(4):507-514.(WANG Xi-qin, LIU Chang-ming, YANG Zhi-feng. Research advance in ecological water demand and environmental water demand[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(4): 507-514. (in Chinese))
- [3] 杨爱民,唐克旺,王浩,等.生态用水的基本理论与计算方法[J].水利学报,2004(12):39-45.(YANG Ai-min, TANG Ke-wang, WANG Hao, et al. Theory and calculation method of ecological water use[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004 (12): 39-45. (in Chinese))
- [4] 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[J].水利学报,2007,38(3):267-273.(YAN Deng-hua, WANG Hao, WANG Fang, et al. Frame of research work on ecological water demand and key topics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(3): 267-273. (in Chinese))
- [5] 陈敏建,丰华丽,王立群,等.适宜生态流量计算方法研究[J].水科学进展,2007,8(5):745-750.(CHEN Min-jian, FENG Hua-li, WANG Li-qun, et al. Calculation methods for appropriate ecological flow[J]. Advances in Water Science, 2007, 8(5): 745-750. (in Chinese))
- [6] 苏飞,陈敏建,董增川,等.辽河河道最小生态流量研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(2):136-139.(SU Fei, CHEN Min-jian, DONG Zeng-chuan, et al. Minimum ecological discharge of Liaohe River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(2): 136-139. (in Chinese))
- [7] JOWETT I G. Instream flow methods: a comparison of approaches[J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1997(13): 115-127
- [8] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.
- [9] 王西琴,杨志峰,刘昌明.河道最小环境需水量确定方法及其应用研究Ⅱ-应用[J].环境科学学报,2001,21(5):548-

552. (WANG Xi-qin, YANG Zhi-feng, LIU Chang-ming. Method of resolving lowest environmental water demands in river course(II)-application[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(5): 548-552 (in Chinese))
- [10] 占车生, 夏军, 丰华丽, 等. 河流生态系统合理生态用水比例的确定[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2005, 44(2): 121-124. (ZHAN Che-sheng, XIA Jun, FENG Hua-li, et al. Determination of the reasonable proportion of ecological water used of river ecological system[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni(Natural Science Edition), 2005, 44(2): 121-124. (in Chinese))
- [11] SUSAN T L. Water resources protection policy implementation, resource directed measures for protection of water resources, estuarine ecosystems[M]. Pretoria: Department of Water Affairs and Forestry South Africa, 1999: 5-10.
- [12] PEIRSON W L, BISHOP K, VAN S D, et al. Environmental water requirements to maintain estuarine processes[R]. Canberra: Commonwealth of Australia, 2002.
- [13] NGUYEN A D, SAVENIJE H H G, PHAM D N, et al. Using salt intrusion measurements to determine the freshwater discharge distribution over the branches of a multi-channel estuary: The Mekong Delta case[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 77: 433-445.
- [14] 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. (GU Sheng-hua. Study on the computational method for environmental water use in the Yangtze River Estuary[J]. Hydrology, 2004, 24(6): 35-37. (in Chinese))
- [15] SUN Tao, YANG Zhi-feng, SHEN Zhen-yao, 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.
- [16] 宋志尧, 茅丽华. 长江口盐水入侵研究[J]. 水资源保护, 2002(3): 27-30. (SONG Zhi-yao, MAO Li-hua. Salt water encroachment at the Yangtze River Estuary[J]. Water Resources Protection, 2002(3): 27-30. (in Chinese))
- [17] 沈焕庭, 茅志昌, 朱建荣. 长江河口盐水入侵[M]. 北京: 海洋出版社, 2003. (SHEN Huan-ting, MAO Zhi-chang, ZHU Jian-rong. Saltwater intrusion in Yangtze River Estuary[M]. Beijing: Ocean Press, 2003. (in Chinese))
- [18] 张小峰, 中川一, 许全喜. 一阶迎风差分格式的精度问题[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2001, 34(1): 6-9. (ZHANG Xiao-feng, NAKAGAWA Hajime, XU Quan-xi. On accuracy of first order upwind scheme[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2001, 34(1): 6-9. (in Chinese))
- [19] 张小峰, 张艳霞, 谢作涛. 一阶迎风差分格式求解非线性对流扩散方程的精度[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2003, 36(5): 1-5. (ZHANG Xiao-feng, ZHANG Yan-xia, XIE Zuo-tao. Simulated accuracy of nonlinear convection diffusion equation by first order upwind difference scheme[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(5): 1-5. (in Chinese))
- [20] 李褪来, 李谊纯, 高祥宇, 等. 长江口整治工程对盐水入侵影响研究[J]. 海洋工程, 2005, 23(3): 31-38. (LI Ti-lai, LI Yi-chun, GAO Xiang-yu, et al. Effects of regulation project on salinity intrusion in Yangtze Estuary[J]. The Ocean Engineering, 2005, 23(3): 31-38. (in Chinese))

Analysis and calculation of ecological flow in Yangtze River Estuary

WANG Gao-xu^{1,2}, LI Ti-lai^{1,2}, CHEN Min-jian³

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China; 3. China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: After analyzing the characteristics of river ecosystem in humid areas, ecological flow of the lower reaches and estuary of the Yangtze River is studied. The method takes salinity as the key factor and aims at maintaining maximum service functions of river ecosystem. 1-D and 2-D models considering tidal-currents and salinity from Datong section to Yangtze Estuary are established. After they are calibrated by field data, the models are used to describe salinity distribution under different incoming water amounts of Datong section. According to the selected salinity criterion, it is determined that the ecological flow in Datong section is 10,000 m³/s.

Key words: service functions; ecological flow; the Yangtze River Estuary; salinity