

河口底泥盐度释放模型研究及应用*

彭进平¹, 逢 勇², 周蓓蕾¹, 王 华²

(1. 广东工业大学 轻工化工学院, 广东 广州 510006; 2. 河海大学 环境科学与工程学院//
浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘 要: 通过室内模拟实验, 研究了底泥盐度释放的变化规律并定量计算了底泥盐度释放通量; 基于室内实验结果, 建立并率定了底泥盐度释放的概念模型; 以鉴江河口为例, 运用所建模型, 定量预测了不同水文条件下, 河口水库水质淡化的趋势。结果表明: ①在同一换水周期下, 底泥盐度的释放受底泥本底间隙水盐度的影响, 本底间隙水盐度越大释放量越大; 初期, 底泥盐度释放强度较大, 但随着换水周期的累加, 底泥盐度释放逐步降低; ②河口蓄淡水库在蓄淡初期, 水质(盐度)逐步增加, 到一定限值后又逐步递减; 淡化时间与来水频率呈正比关系, 丰水期淡化时间较短, 枯水期则较长。

关键词: 河口水库; 盐度; 模型; 释放通量; 淡化

中图分类号: X143 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)01-0031-06

Study on Estuary Sediment Salinity Release Model and Application

PENG Jinping¹, PANG Yong², ZHOU Beilei¹, WANG Hua²

(1. Faculty of Chemical Engineering and Light Industry, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. College of Environment Science and Engineering// Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Exploitation on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the laboratory experiment, the mechanisms of sedimentary salinity release was studied and the release flux was calculated. With the results from the laboratory experiment, the sedimentary salinity release model was established and validated. The model was applied to forecast the desalting tendency in Jian jiang River Estuary under different hydrology conditions. It was found that: ① under the same water exchange period, the sedimentary salinity release was mainly influenced by the salinity in overlying water, and the intensity of the sedimentary salinity release was higher at the initial stages, and decreased gradually with time increasing. ② After the water reservation in the Jian jiang River Estuary, the salinity was gradually increased, but the salinity decreased when it reached the maximum value. The desalting time was in a direct proportion with the inflowing water frequency, and the desalting time in the flood seasons was always shorter than that in the dry seasons.

Key words: estuarine reservoir; salinity; model; release flux; desalting

河口是河流与海洋的交汇地带, 其主要特征是盐淡水混合及底泥盐化^[1-2]。河口水库是利用河口的天然优势, 在河口处建筑拦河大坝而建成的河道水库, 其既有水库特征, 又有河流特性。建设河口

* 收稿日期: 2008-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579015); 江苏省科技厅太湖专项(基础)基金资助项目(BK2007742); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070294019); 河海大学自然科学基金资助项目(2007416611)

作者简介: 彭进平(1974年生), 男, 博士, 实验师; E-mail: veronpop@163.com

水库进行蓄淡利用是区域水资源利用的有益补充。然而在河口水库蓄水初期, 库内残留海水和盐化底泥中盐分的分子扩散会导致水库蓄水的盐化, 使河口水库的蓄水失去其资源的功能。但由于盐化底泥中盐分的库存是有一定限度的, 随着水库上游来水的不断进入, 河口水库的蓄水便出现混合、蓄满、下泻, 而逐步实现整体的置换, 水库蓄水的盐度便会逐步降低, 因此河口水库盐度的影响主要表现在未来水体淡化的速度上^[3]。目前关于蓄淡水水库底质中盐分释放的规律研究已有一些研究^[4], 但其成果仅将底泥盐度释放对蓄淡利用的影响直观估计为 1 年~2 年, 对于河口蓄淡利用的指导相对欠缺。部分研究通过建立完全混合和不完全混合模型对蓄淡水水库进行了蓄水的水质淡化预测, 但在盐度释放参数的确定上又缺乏实验数据率定, 结果实效性相对较低^[5-6]。针对这些不足, 本文首先开展了室内模拟换水实验, 研究了不同底泥盐度特征的释放规律; 基于实验结果, 建立了河口底泥盐度释放模型, 并以规划建设的鉴江调水枢纽工程——鉴江河口蓄淡水水库为例对模型进行了应用研究。本文研究成果将为河口水资源合理高效开发提供非常关键的依据。

1 底泥盐度释放实验

1.1 实验方法

在 GPS map 76 卫星定位仪定位下, 分别在鉴江河口的下段(出海口)、中段(黄坡桥下)及上段(吴阳坝下) 3 个采样点, 见图 1, 以抓斗采泥器采集河床表面底泥 20 kg 于干净塑料桶中, 密封后带回备用。

底泥盐度换水释放实验具体步骤为: ①将各采样点采集回来的底泥(重 1 kg) 分别置于 3 L 的圆桶中, 轻铺平整(泥厚度为 3 cm, 水泥界面面积 0.016 m²); ②以虹管吸入纯净水 2 L (上覆水深 12.5 cm), 静置, 每间隔 3、6、9 d, 以虹管吸出上覆水并搅拌均匀, 测其盐度, 同时用微量注射器抽取底泥中水样测定其盐度; ③再吸入 2 L 纯净

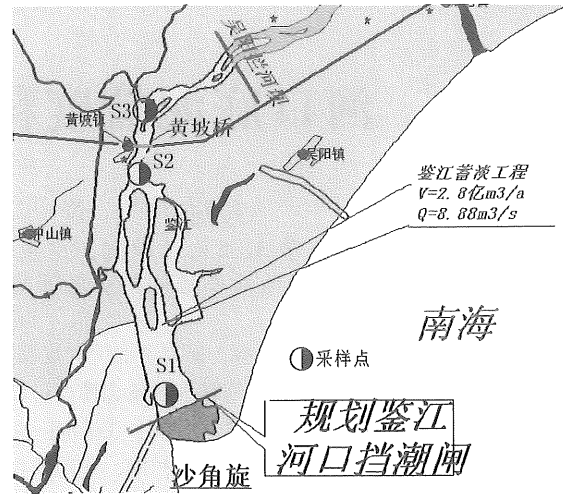


图 1 河口地区及试样采集点

Fig. 1 Outline of the estuarine and sampling

水, 之后每间隔 3、6、9 d 重复进行以上吸水、测盐度、测定底泥水样盐度及补水等实验步骤, 实验历经 30 d。底泥盐度静态释放实验具体步骤为: ①将各采样点采集回来的底泥(重 1 kg) 分别置于 3 L 的圆桶中, 轻铺平整(泥厚度为 3 cm, 水泥界面面积 0.016 m²); ②以虹管吸入纯净水 2 L (上覆水深 12.5 cm), 静置, 每间隔 3 d 抽取上覆水测定其盐度(在测定前 30 min 先以干净玻棒搅拌均匀), 同时用微量注射器抽取底泥中水样测定其盐度。实验中, 水体盐度的测定方法为银量滴定法(GB17378.4-1998)。

1.2 结果与分析

1.2.1 河口底泥特性 对采集回的底泥进行分析表明, 鉴江河口段均为沙质底, 其中河口上段为粗沙底, 中段为中沙底, 下段为软细沙底; 底泥颗粒从上往下逐渐变小, 表明区域河道来水流速相对平缓, 排沙量低。底泥盐度则从上往下逐渐变大, 河口下段为 7.07 g/kg, 上段仅为 0.87 g/kg。底泥的基本性质见表 1。

1.2.2 底泥盐度释放规律

(1) 底泥间隙水不同(本底)盐度下盐度的释放特征。

表 1 底泥基本性质表

Table 1 The basic characteristic of sediment

采样点	原底泥外观	间隙水 pH 值	孔隙率	风干后外观	风干后盐度/g · kg ⁻¹	本底间隙水盐度/mg · L ⁻¹
出海口	灰黑色淤泥	5.8	0.86	浅灰色细沙	7.07	8800
黄坡桥	黑色淤泥	5.8	0.89	浅灰色中沙	5.31	2600
吴阳坝	棕色淤泥	5.8	0.91	浅灰色粗沙	0.87	780

底泥间隙水不同本底盐度（分别 8 800 mg/L、2 600 mg/L 及 780 mg/L）条件下，上覆水盐度与时间的关系，见图 2。从图中可以看出，在相同的换水周期里，间隙水本底盐度大的，其上覆水盐度也相应较大，间隙水本底盐度小的，其上覆水盐度也相应较小，结果表明底泥间隙水本底盐度是影响

盐度向上覆水释放的主要因子；从图中也可以看出，换水实验的初始周期，上覆水盐度变化较大，后期则较为平缓，结果表明，底泥间隙水本底盐度向上覆水释放均以换水的初期为最高，也即初期上覆水累积的盐度大，随着换水次数的增加，其释放则逐步减弱，上覆水累积的盐度则逐渐降低。

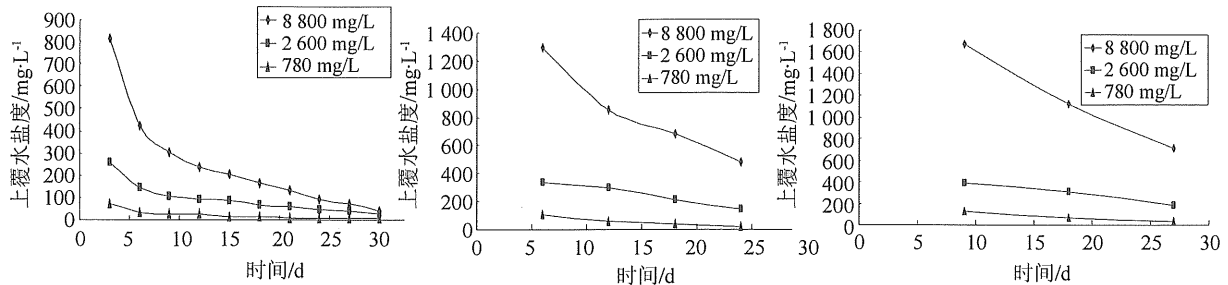


图 2 不同间隙水本底盐度下，底泥盐度释放与时间关系图（换水周期分别为 3、6、9 d）

Fig. 2 The relation of sedimentary salinity release and times in different basic salinity (water exchange period: 3, 6, 9 d)

(2) 不同换水周期下底泥盐度的释放特征。

不同换水周期下，上覆水盐度与时间的关系，见图 3。从图中可以看出，换水周期越长，上覆水盐度就越大，结果表明，在相同的底泥间隙水本底

盐度的状况下，换水时间越长，底泥盐度释放到上覆水的累积盐度就越大。随着时间的推移，底泥盐度向上覆水的释放均逐步减小，这应主要是底泥间隙水本底盐度也因不断地释放而降低的缘故。

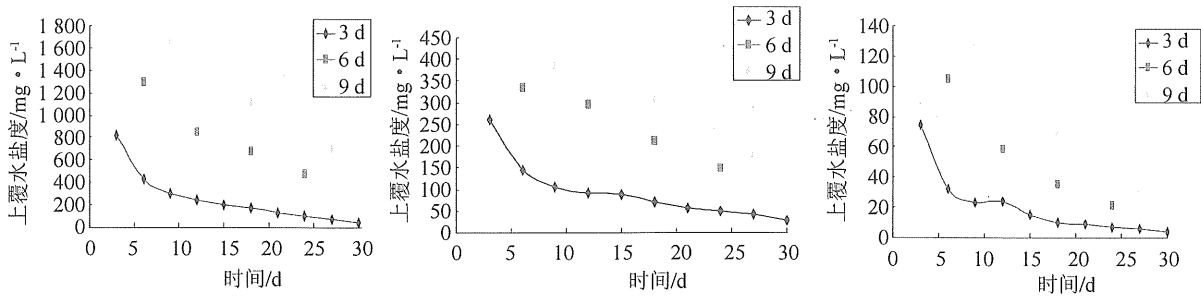


图 3 不同换水周期下底泥盐度释放与时间关系图（本底盐度分别为 8 800、2 600、780 mg/L）

Fig. 3 The relation of sedimentary salinity release and times in different water exchange period (basic salinity: 8 800, 2 600, 780 mg/L)

(3) 底泥盐度静态释放特征。

图 4 为静态释放实验中，不同底泥间隙水本底盐度下，其上覆水盐度随时间的变化图，从图中可以看出，在释放初期，底泥盐度的释放程度相对较快，上覆水盐度增加幅度也相应较大，后期则相对平缓，该结果与换水释放实验一致，主要也是因为底泥盐度的释放使其本底存量降低，而上覆水则浓度增加，最终导致盐度在底泥与上覆水间的浓度差降低所致。随着时间推移，上覆水盐度逐步累加，经 30 d，上覆水的盐度分别达 2 626、932、533 mg/L，远远超过饮用水水质的要求。

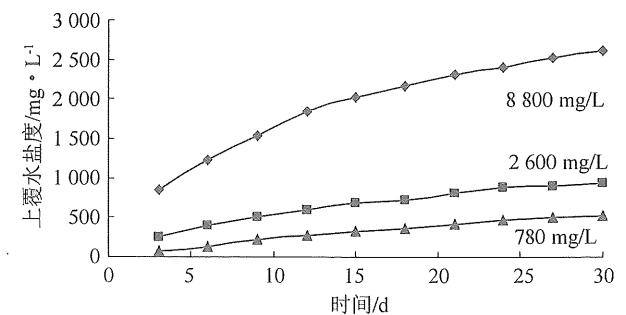


图 4 底泥盐度释放与时间关系图（静态释放）

Fig. 4 The relation of sedimentary salinity release and times (static release)

2 河口底泥盐度释放模型

2.1 模型建立

依据质量守恒原理, 采用完全混合系统水质模型, 具体模型为:

$$C_{in}Q_{in} + FS = Q_{out}C_{out} + V(C_{out} - C_{in}) \quad (1)$$

式 (1) 中: S 为水库水面面积 (m^2); F 为底泥中盐分释放通量 ($mg/d \cdot cm^2$); C_{out} 为完全混合后的水质浓度 (mg/L); C_{in} 为来水水质浓度 (mg/L); Q_{out} 为流出系统的流量为 (m^3/s); Q_{in} (m^3/s) 为进入系统的流量; V 为水库的库容 (m^3).

底泥中盐度释放量随时间一般呈指数衰减规律, 具体为:

$$F = F_0 \exp(-kt) \quad (2)$$

式 (2) 中: F_0 为初始释放通量 ($mg/d \cdot cm^2$); k 为衰减系数 ($1/d$); t 为衰减时间 (d).

对于蓄淡水库而言, 盐度满足 20.0 mg/L 时, 其供水水质才能合格, 因此以盐度是 20.0 mg/L 为盐度达标计算点, 以天为计算时段进行时间计算. 根据式 (1)、(2), 则在蓄淡的第一天有:

$$C_1 = \frac{C_{in}Q_{in} + F_0S + VC_{in}}{Q_{out} + V} \quad (3)$$

式 (3) 中: C_1 为蓄淡第一天完全混合后的水质浓度 (mg/L);

第二天有:

$$C_2 = \frac{C_{in}Q_{in} + F_0S \exp(-k) + VC_1}{Q_{out} + V} \quad (4)$$

第 n 天有:

$$C_n = \frac{C_{in}Q_{in} + F_0S \exp[-k(n-1)] + VC_{n-1}}{Q_{out} + V} \quad (5)$$

则当 $C_n \leq 20 \text{ mg/L}$ 时, 计算得 n 值.

2.2 参数率定

2.2.1 释放衰减系数 k 的确定 根据实验成果,

在换水实验里, 上覆水盐度的变化随时间呈负指数分布, 相关系数 (R^2) 在 $0.9466 \sim 0.9985$ 之间, 结果表明, 底泥盐度释放符合随时间一般呈指数衰减规律, 各指数方程式及相关系数见表 2. 换水周期为 3 d 时, k 值在 $0.0689 \sim 0.0964$ 之间, 换水周期为 6 d 时, k 值在 $0.047 \sim 0.0893$ 之间, 换水周期为 9 d 时, k 值在 $0.0417 \sim 0.0765$ 之间, 结果显示, k 值与底泥间隙水盐度没有明显的相关性, 但随着换水周期的增大, k 变小, 表明换水周期与 k 值有较为明显的负相关关系. 由于进行水质环境估算时, 均采用最恶劣状态进行, 因此本文 k 值在换水周期为 3 d 时, $k = 0.0689$; 6 d 时, $k = 0.047$; 9 d 时, $k = 0.0417$. 对于其它换水周期的 k 值, 则以换水周期与 k 值的关系图 (见图 5) 或相关方程式进行计算, 同样取最小值. 相关方程式如下:

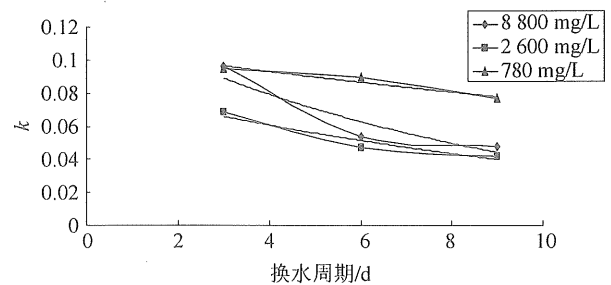


图 5 换水周期与衰减系数 k 的相关图

Fig. 5 Correlation of water exchange period and k

间隙水盐度为 8800 mg/L 时:

$$y = 0.1072e^{-0.0357x} \quad R^2 = 0.9387 \quad (6)$$

间隙水盐度为 2600 mg/L 时:

$$y = 0.1262e^{-0.1166x} \quad R^2 = 0.8633 \quad (7)$$

间隙水盐度为 780 mg/L 时:

$$y = 0.0848e^{-0.0837x} \quad R^2 = 0.9163 \quad (8)$$

以上各式中: y 代表 k ; x 代表换水时间 (d).

表 2 不同换水周期底泥盐度释放变化趋势曲线表

Table 2 The salinity release trend in different water exchange period

间隙水本底盐度	换水周期					
	3 d		6 d		9 d	
	方程式	R^2	方程式	R^2	方程式	R^2
8800 mg/L	$y = 868.01e^{-0.0964x}$	$R^2 = 0.972$	$y = 1726.2e^{-0.0534x}$	$R^2 = 0.988$	$y = 2600e^{-0.0479x}$	$R^2 = 0.998$
2600 mg/L	$y = 239.03e^{-0.0689x}$	$R^2 = 0.954$	$y = 474.92e^{-0.047x}$	$R^2 = 0.962$	$y = 741.81e^{-0.0417x}$	$R^2 = 0.947$
780 mg/L	$y = 68.2e^{-0.0948x}$	$R^2 = 0.959$	$y = 174.93e^{-0.0893x}$	$R^2 = 0.998$	$y = 265.67e^{-0.0765x}$	$R^2 = 0.994$

2.2.2 初始释放通量 F_0 的确定 底泥与上覆水界

面盐度的释放通量, 根据实验前后水体浓度变化直

接计算获得^[7-11]，计算公式为：

$$F = \sum_{i=1}^n V_i(C_i - C_{i-1}) / (A * t) \quad (9)$$

式 (9) 中， F 为底泥 ~ 上覆水界面释放通量 ($\text{mg/d} \cdot \text{cm}^2$)； V_i 为实验上覆水体积 (mL)； C_i 、 C_{i-1} 分别为在 t 和 $t-1$ 时刻水中盐度的浓度 (mg/L)； A 为底泥与上覆水界面面积 (cm^2)； t 为时间 (d)^[12]。

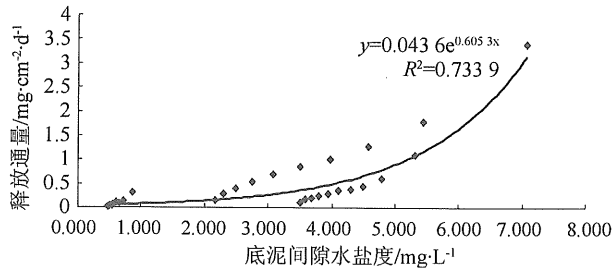


图 6 初始释放通量 F_0 与底泥本底盐度相关图

Fig. 6 Correlation of F_0 and basic salinity

底泥盐度的释放通量主要受底泥间隙水盐度的

影响，其与底泥间隙水氯离子浓度相关图（见图 6），关系式为：

$$y = 0.043 6e^{0.605 3x} \quad R^2 = 0.733 9 \quad (10)$$

式 (10) 中： y 为初始释放通量； x 为底泥间隙水氯离子浓度。

3 应用研究

鉴江干流发源于信宜县五里大山，河长 211 km，集雨面积 9 464 km^2 ，多年平均径流量为 80.44 亿 m^3 ， $P=90\%$ 年径流量 45.45 亿 m^3 ，鉴江不同频率径流量见表 3。鉴江河口水库正常蓄水位为 2.5 m，相应河槽库容为 0.742 5 亿 m^3 。根据公式 (10) 及鉴江河口采集样品中底泥间隙水盐度最大值为 8 800 mg/L ，则鉴江底泥初始释放通量 F_0 为 8.97 $\text{mg/d} \cdot \text{cm}^2$ ；衰减系数 k 则根据式 (6) ~ 式 (8) 及蓄淡水水库的来水状况计算确定，均取最恶劣状况（即该来水频率下，以最枯月流量计算确定换水周期）， k 值计算结果见表 3；入流盐度 C_{in} 取上游来水年平均盐度 0.3 mg/L ；水质标准 C 定为 20.0 mg/L （以工业用水对水质的要求确定）。

表 3 鉴江河口水库不同来水频率下 k 值表

Table 3 k in deferent hydrometry condition of jianjiang river estuarine

参数类别	频率/相关参数					
	10%	50%	75%	90%	95%	97%
径流量/(亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	120.14	76.78	58.84	45.45	38.61	34.46
最枯月流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	17 774 208	11 359 008	8 704 800	6 723 648	5 710 176	5 096 736
换水周期	4.177 4	6.536 7	8.529 8	11.043 1	13.003 1	14.568 1
k 值	0.059 8	0.049 1	0.041 5	0.033 6	0.028 6	0.025 1

根据盐度达标计算模型及上述参数，鉴江来水不同频率时（以最枯月来水计），蓄淡工程水体盐度随时间变化见图 7。由图 7 中可以看出，在水库蓄淡初期，水体盐度相对较低，随着蓄淡时间增加，水体盐度均先增加，然后又逐步降低。这主要是因为蓄淡初期虽然底泥盐度释放通量较大，但因时间较短，水体中累积的盐度总量相对较少，因而水体盐度浓度只能逐步增加；随着时间的增加，底泥盐度释放通量逐步降低，当释放增加的盐度量少于来水稀释的量时，水体盐度便逐步降低。从图 7 中也可以看出，不同来水频率下，蓄淡水水库水体淡化所需时间不同，丰水期淡化时间较短，枯水期则较长，淡化时间与来水频率呈正比关系。其中，当来水频率为 10% 时，即鉴江处于丰水期条件时，鉴江蓄淡工程水质能够满足工业取水要求的时限为

30 d 左右；若来水频率为 95% 时，即鉴江处于枯水期条件时，鉴江蓄淡工程水质能够满足工业取水要求的时限为 107 d 左右；若来水频率为 97% 时，即鉴江处于特枯水期条件时，鉴江蓄淡工程水质能

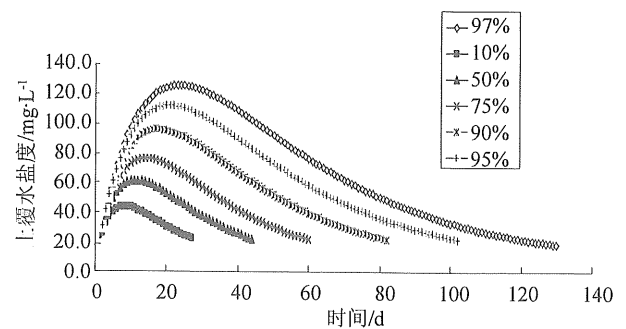


图 7 不同来水状况下，蓄淡工程水体盐度随时间变化图

Fig. 7 The Salinity change trend in Jianjiang river estuarine

够满足工业取水要求的时限为127 d左右。

4 小 结

(1) 通过换水释放、静态释放实验手段, 研究分析了底泥盐度的释放特征, 结果显示: 在同一换水周期下, 底泥盐度的释放受底泥本底间隙水盐度的影响, 本底间隙水盐度越大释放量越大; 初期, 底泥盐度释放强度较大, 但随着换水周期的累加, 底泥盐度释放逐步降低。

(2) 建立了考虑来水状况及底泥间隙水本底盐度的河口蓄淡水水库盐度达标的数学预测模型, 并利用实验数据对模型参数进行了分析确定。将模型应用于鉴江河口蓄淡水水库进行水质淡化分析, 结果显示: 河口蓄淡水水库在蓄淡初期, 水质(盐度)逐步增加, 到一定值后又逐步递减; 在不同来水频率下, 淡化时间不同, 丰水期淡化时间较短, 枯水期则较长, 淡化时间与来水频率呈正比关系。

参考文献:

- [1] PRITCHARD D W. What is a estuary? Physical viewpoint in estuaries[J]. AAAS, 1967; 3 - 5.
- [2] 黄胜, 卢启苗. 河口动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [3] 张爱莉, 赵其芬, 蒋志文. 山东省兴建河口海湾水库前景预测[J]. 山东水利, 1999, 6: 29 - 30.
ZHANG A L, ZHAO Q F, JIANG Z W. The forecast of constructed estuarine reservoir in Shandong province[J]. Shandong Water Resources, 1999, 6: 29 - 30.
- [4] 高增文, 郑西来, 吴俊文. 海湾水库蓄水初期底质与淡水盐分交换的试验研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 170 - 175.
GAO Z W, ZHENG X L, WU J W. Experimental studies on salt exchange between freshwater and sediments in a polder reservoir[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(2): 170 - 175.
- [5] 余堃. 浙江海涂水库水质淡化的分析与预测[J]. 环境污染与防治, 1996, 8(2): 27 - 29.
YU K. Analysis and forecast for water quality desalt in tidal mud flat reservoir[J]. Environmental Pollution & Control, 1996, 8(2): 27 - 29.
- [6] FRENCH J A, HARLEY B M, NEYSADURAL A. Desalination of an impounded estuary[A]. Environmental Engineering, Proceedings of the 1985 Specialty Conference [C]. New York: ASCE, 1985. 91 - 97.
- [7] TRIMMER M, NEDWELL D B, SIVYER D B, et al. Nitrogen fluxes through the lower estuary of the Great Ouse, England: the role of the bottom sediments [J]. Marine Ecology Progress Series, 1998, 163: 109 - 124.
- [8] 王东启, 陈振楼, 钱嫦萍, 等. 盐度对崇明东滩沉积物-水界面 NH_4^+ 交换行为的影响[J]. 海洋环境科学, 2002, 21(3): 5 - 9.
WANG D Q, CHEN Z L, QIAN C P, et al. Effect of salinity on NH_4^+ exchange behavior at the sediment-water interface in east chongming tidal flat [J]. Marine Environmental Science, 2002, 21(3): 5 - 9.
- [9] ALLER R C, MCKIN J E, ULLMAN W J, et al. Early chemical diagenesis, sediment - water solute exchange, and storage of reactive organic matter near the mouth of the Yangtze, East China Sea [J]. Continental Shelf Research, 1985, 4(12): 227 - 251.
- [10] ULLMAN W J, SANDSTROM M W. Dissolved nutrient fluxes from the near shore sediments of bowling green bay, central Great Barrier Reef lagoon (Australia) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1987, 24: 289 - 303.
- [11] 刘素美, 张经, 于志刚, 等. 渤海莱州湾沉积物-水界面溶解无机氮的扩散通量[J]. 环境科学, 1999, 20(2): 12 - 16.
LIU S M, ZHANG J, YU Z G, et al. Benthic fluxes of dissolved inorganic nitrogen in the laizhou bay, Bohai Sea [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1999, 20(2): 12 - 16.
- [12] 毛建忠, 王雨春, 赵琼美. 滇池沉积物内源磷释放初步研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(3): 229 - 233.
MAO J Z, WANG Y C, ZHAO Q M. Preliminary study on phosphorus release of internal load in Dianchi Lake sediment [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005, 3(3): 229 - 233.