DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.04.008

海湾水库突然泛咸的实验研究

岳大伟,高增文,赵全升,彭玉春

(青岛大学化学化工与环境学院,山东 青岛 266071)

摘要:通过室内中型水槽实验模拟分层水体受到突然扰动后水体盐分浓度及含盐总量的变化,探讨海湾水库的突然泛咸机理。结果表明,水体受到强烈扰动后,底部咸水与上层淡水的混合将导致库水整体泛咸;表层沉积物中的盐分也是库水泛咸的重要盐源,扰动条件下表层沉积物盐分的增强释放将强化库水的泛咸程度。海湾水库水体的分层结构与稳定强度明显不同于温度分层水库,导致它与温度分层水库的混合频次不同。海湾水库运行过程中,可以采用机械抽排水库底层咸水等措施来抑制库水泛咸。研究结果可为海湾水库的突然泛咸管理提供理论与实践依据。

关键词:海湾水库;突然泛咸;底边界层;混合;孔隙咸水

中图分类号:X524 **文献标志码**:A **文章编号**:1004-6933(2013)04-0040-05

Experimental study of abrupt salinization in estuary reservoirs

YUE Dawei, GAO Zengwen, ZHAO Quansheng, PENG Yuchun

(*College of Chemical and Environmental Engineering, Qingdao University, Qingdao* 266071, *China*)

Abstract: We explored the mechanism of abrupt salinization in estuary reservoirs by evaluating the changes of the profiles of salt concentration and the amount of salt in a water column under the conditions of abrupt disruption of stratified water in a medium-sized flume. The results show that the mixing of the salt water in the benthic boundary layer and the fresh water in the top layer leads to salinization, while the solutes released from the surficial sediments under disruption conditions are the additional sources of salt. The stratification structure and stability are distinct between the water with salinity stratification and the water with thermal stratification, leading to different mixing frequencies. We can discharge the benthic salt water to suppress the abrupt salinization during the operation of estuary reservoirs. This study may provide a theoretical and practical basis for the control of abrupt salinization in estuary reservoirs.

Key words: estuary reservoir; abrupt salinization; benthic boundary layer; mixing; salty pore water

海湾水库建设能够有效缓解沿海地区水资源短缺的问题。通常情况下,海湾水库水质(指盐分或氯离子浓度)能够满足工农业用水和生活用水的要求,但在一定的环境条件下,水体中氯离子质量浓度会突然过高,库水泛咸,如 1974 年建成的大塘港水库分别于 1979 年、1986 年、1991 年 3 度泛咸,表层水中氯离子质量浓度高达 1 500 mg/L,对水库附近地区的工农业生产和居民生活造成了严重影响[1]。

很多学者研究了滨海地区水库咸化的原因。余堃[2]指出影响海涂水库水质咸化的因素主要有降雨量、盐淡水掺混率、海水渗漏入侵、滩地返咸、建库时积存海水等;朱江平[3]认为胡陈港水库咸化还与船闸运行时放入海水、节制闸渗入海水等多种因素有关;赵文玉[4]指出水质咸化与库底的盐碱土质、蒸发量大于降水量以及风等因素有关,盐碱土向水体的传质作用是造成水质咸化的主要原因;一些学者[5-9]还指出沉积物与上覆水之间的盐分交换是造成库水咸化的重要原因。

在上述咸化因素作用下,库水咸化是一个逐渐的过程。目前的研究不能很好解决库水在特定年份

基金项目:国家自然科学基金(51279075);山东省自然科学基金(ZR2009EQ001;ZR2011DM001)

作者简介:岳大伟(1989—),男,硕士研究生,主要从事水资源利用与保护方面的研究。E-mail:xxyzw314@sina.com

突然泛咸的问题。王雨春[10]指出气温突然下降会破坏湖库原有的温度分层结构,引发水质突发性变化;余堃[2]指出深潭水体在大风浪下会被掀起导致水体混合,从而影响上层水体的盐度;高增文[7]指出水库的沉积物-水界面处常存在一个底边界层,边界层溶质的浓度通常要明显高于边界层之上水体中的溶质浓度,并且海湾水库的底边界层较厚,边界层的盐分占整个水库中盐分的绝大部分;潘桂娥[8]曾指出水库底部高浓度咸水遇到干旱、高温及降雨量减少等条件时,上层盐度升高导致盐度梯度减小,水体稳定性降低,受风浪等外界条件扰动时,水库底部高浓度咸水可能掺混到库面,引起库水泛咸,但作者没有探讨库水混合对咸化的影响程度。另外,在前期的预实验中发现,库水混合后沉积物上覆水中的总盐分超过混合前的盐分总量,因此,深入探讨库水混合后盐分的来源及库水混合对咸化的定量影响,对海湾水库突然泛咸的管理具有十分重要的意义。

青岛市规划在横河河口-沐官岛海域建设海湾水库,拟建库区位于海岸潮间带,库底广泛分布中细砂、粉砂、粉质黏土,这些沉积物中饱含海水。本研究结合拟建的沐官岛水库,进行室内水槽实验,模拟水体形成盐分分层后受到突然扰动时水体盐分及含盐总量的变化,以识别库水泛咸的盐分来源,并量化泛咸对水质的影响程度,探讨盐分分层水库与温度分层水库混合频次不同的原因,为库水的咸化管理提供依据。

1 实验装置与方法

1.1 实验材料与装置

a. 实验材料。淡水采用自来水,水中氯离子质量浓度为0.19 g/L,与沐官岛水库入库河流的河水含盐量相近;浸泡沉积物所用的海水(水中氯离子质量浓度为35.24 g/L)为青岛近海表层海水;沉积物采用沐官岛海域的中细砂。

b. 实验装置。① 120 cm×60 cm×60 cm 的有机玻璃水槽(图1),在水槽侧壁设有7个取样孔,各孔中央距沉积物-水界面距离分别为1.0、2.0、3.0、6.0、10.0、16.3、18.5 cm;② DDS-307A 型电导率仪,实验中用风扇模拟自然风,采用 ZQQF-30J 型号的风速仪测定风速。

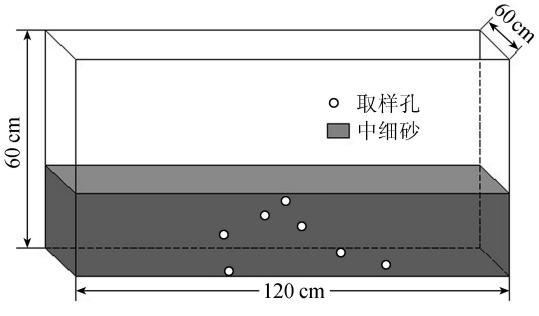

图1 实验装置示意图

1.2 实验方法与步骤

1.2.1 边界层的形成

实验中采用海风作用下沉积物盐分释放的方法自然形成水体的盐分分层。

a. 将经过洗盐、晾干后的中细砂装入水槽,砂厚19 cm。加入海水使砂样浸没,浸泡24 h后,将沉积物之上多余的海水吸出,并保证沉积物表面平整。

b. 水槽内缓慢加入自来水,加水完成后,槽内沉积物之上的水层厚度为34.3 cm。

c. 当水槽注满自来水后,在水槽一端启动风扇,模拟自然风,风速为3.0 m/s。实验过程每隔48 h向水槽内补充蒸发损失的水量。随着沉积物中盐分向其上覆水体的释放,水体中逐渐形成盐分分层。

d. 实验运行670 h后,水体形成明显分层。

1.2.2 分层后的混合

a. 使用电导率仪测定上覆水体不同深度的电导率,根据盐度-电导率曲线将其转换成与之相应的氯离子质量浓度,计算水体中的总含盐量 m,将其作为搅拌前的盐分初值。计算公式如下:

$$m = \sum_{i=1}^{n} c_i v_i \tag{1}$$

式中:c_i为测量时段第 i 层水体中的氯离子质量浓度,g/L;v_i 为测量时段第 i 层水体的体积,L。

b. 用2 mL医用注射器从水槽侧壁各取样孔分别抽取沉积物孔隙水水样1 mL,然后测定其电导率。

c. 人工手动旋转搅动水体,搅动时间为5 min。

d. 水体搅动后,用电导率仪直接测定上、中、下3层水体的电导率;用2 mL医用注射器分别在水槽中间沉积物凹凸界面以下1 cm、2 cm、3 cm处抽取孔隙水,然后测定其电导率。

1.3 水体稳定性的计算

稳定性频率(N^2)可以用来表征局部水体分层的强弱,N 值越大表明水体越稳定,即对扰动的阻抗能力越强[11]。稳定性频率计算公式[11]为

$$N^2 = -\frac{g}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z} \tag{2}$$

式中:g 为重力加速度,m/s^2;ρ 为密度,kg/m^3,计算时采用各水层的平均密度;Z 为相邻的两个水层每层中心之间的距离,m。

2 结果与讨论

2.1 水体搅动前后的盐分变化

在有风条件下,由于蒸发作用,自上一次加水后,水面下降约3 cm,扰动前未补充损失的水量。沉积物上覆水中搅动前后盐分变化情况见图2。由图2可知,水体搅动前,上层水体中盐分分布均一(ρ=2.01 g/L);下层水体(贴近沉积物的水体)存在一个明显的线性盐分渐变区,即边界层,其厚度为3.0 cm,这与高增文等[7]在有风条件下的水槽试验结果大致相当。底部边界层上边界氯离子质量浓度为2.02 g/L,下边界(沉积物-水界面处)氯离子质量浓度为3.41 g/L。水体搅动后,水体中氯离子质量浓度上下分布非常均一(ρ=2.24 g/L),并且大于搅动前上层水体中的氯离子质量浓度(ρ=2.01 g/L),而小于底边界层的氯离子质量浓度,上层水体中氯离子质量浓度升高了0.23 g/L,边界层下边界氯离子质量浓度降低了1.17 g/L。这表明水体搅动后底边界层中高浓度盐水受到扰动后掺混到上层水体,致使上层水体氯离子质量浓度升高。

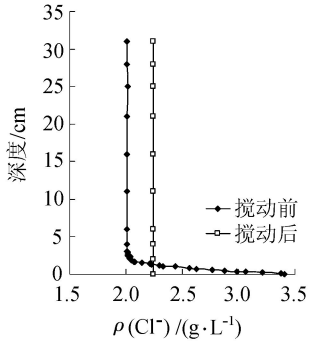

图2 搅动前后上覆水体中盐分变化情况

2.2 水体搅动前后含盐总量变化

根据公式(1)计算搅动前后上覆水体中的盐分总量。搅动后水体中含盐量(475.24 g)大于搅动前(434.61 g),扰动后上覆水含盐量增加了9.3%。Portiejie等[12]指出波浪或者漩涡在沉积物-水界面处产生的压力差会促进相邻的孔隙水产生相对运动,Thibodeaux等[13]指出边界流与不平的多孔沉积物表面作用会在沉积物中产生明显而复杂的对流。在这种情况下,将增强泥水界面的物质交换。据此可知,搅动后水体中增加的含盐量可能来自表层沉积物在扰动条件下释放的盐分。

2.3 孔隙水盐分剖面变化情况

水体搅动后,沉积物表面变得凹凸不平,凸凹高度相差约2 cm,这是由于在搅动过程中,离心力驱使水体向外围运动,从而产生横向压力梯度,致使水体压力沿中心向周围水体逐渐升高[14],继而沉积物表面在水体搅动过程中变得凹凸不平。水体搅动前后沉积物孔隙水中氯离子质量浓度的变化情况见图3。从图3可以看出,搅动对沉积物的扰动深度大约3 cm,远大于Thomsen[15]指出的水动力对沉积物孔隙水的扰动厚度(一个或几个沙粒厚度),这可能与水体搅动强度有关;搅动前,孔隙水中的氯离子质量浓度随深度加深而逐渐升高;搅动后,凸起处上层孔隙水中的氯离子质量浓度降低,下层孔隙水中氯离子质量浓度不变;凹陷处上层孔隙水中氯离子质量浓度先升高后降低,下层孔隙水中氯离子质量浓度不变。由此可知,水体搅动后表层沉积物孔隙水中的氯离子质量浓度发生了复杂的变化,但并不能确定其含盐量变化情况。根据质量守恒定律,水槽中含盐总量不变,上覆水体含盐量升高,故孔隙水中的含盐量相应降低,即搅拌后沉积物上覆水体中增加的盐分来自表层沉积物的增强释放。

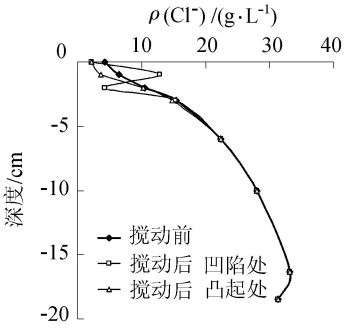

图3 搅动前后孔隙水中氯离子质量浓度的变化

目前在边界层混合研究方面主要关注边界层中溶质对表层水体的影响[16-17],而往往忽视水体混合对沉积物的扰动作用促使表层沉积物中增强释放溶质的影响。本研究的实验结果表明,除了边界层中累积的盐分外,扰动条件下表层沉积物增强释放的盐分也是水库突然泛咸的重要盐分来源。

2.4 分层水体的稳定性分析

分层水体在扰动条件下是否发生混合取决于扰动的能量与分层势能变化的强弱对比,水体的稳定性越强,即N^2越大,则水体越稳定。水环境中典型的N^2值通常在10^{-10}~10^{-1} s^{-2}范围内[18]。从图4可以看出,实验中边界层水体的N^2在3.4×10^{-4}~1.5×10^{-2} s^{-2}之间,可以看出底层盐分分层水体的稳定性较强,并且明显高于常见的温度分层水体的稳定性(如瑞士Alpnachersee湖分层水体N^2为2×10^{-5} s^{-2})[19]。值得指出的是,海湾水库盐分分层水体的稳定性在水库底部高,而温度分层湖库的稳定性高值常出现在湖库的中部(图5)。盐分分层水库与温度分层水库的混合频次不同,海湾水库(盐分分层为主)间隔多年才发生一次库水混合[1],而温度分

层水库通常每年都发生混合[20-21]。差别的主要原因可能是海湾水库的分层结构与稳定性强度明显不同于温度分层水库;在大部分湖库中,风的扰动通常是湖库垂向混合的主要能量来源[18],这种情况下,稳定性强的水体越靠近水体表面,则越易受到风的扰动而发生库水的垂向混合;稳定性频率(N^2)越大,越不易发生库水的混合。温度分层水库的强稳定性水体出现在水体中部,并且其N^2通常明显小于盐分分层水体,所以该类水库通常每年都发生库水的混合。

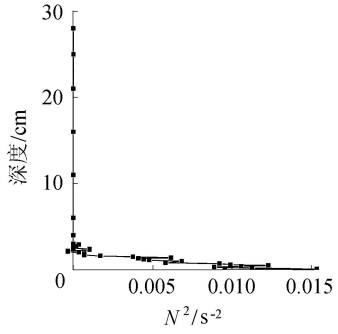

图 4　盐分分层水体稳定性剖面分布

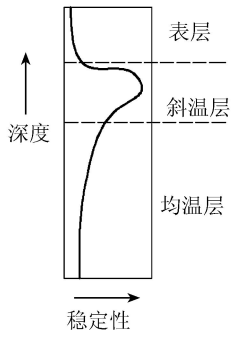

图 5　温度分层水体稳定性示意图[11]

2.5　避免库水泛咸的措施

a. 海湾蓄淡水库由于盐分分层明显,在水库底层蓄积高浓度的咸水,通常难以通过泄水闸排水淡化。高增文等[5]的室内实验表明,抽排沉积物之上的高浓度盐水对降低整个水体的盐分效果显著。浙江大塘港水库实施过小流量机组群抽排水库底部深潭咸水的工程,实践表明,工程的实施对于降低库水盐分含量的效果明显[1]。因此,可以采取抽排边界层咸水等措施,避免海湾水库库底咸水在强扰动下与表层淡水混合而影响整个库水的使用。

b. 海湾处的沉积物长期受到海水侵蚀而含有大量的高盐孔隙水。水库建成后,沉积物的盐分增强释放会强化库水泛咸的程度。有研究[22]表明,水库蓄水之前开挖排咸沟排出沉积物中高盐孔隙水能有效地降低库水的咸化,并且排水量越大,效果越显著。因此,可以采取蓄水前开挖排咸沟的方式抑制库水的咸化程度。

3　结　论

a. 海湾水库受到强烈扰动后可以导致水体突然泛咸。实验中水体搅动前,上层为盐分均一的淡水,底层为具有显著盐分梯度的咸水;水体搅动后,上层水体盐分升高了 11%。

b. 库底蓄积的盐分是库水泛咸的主要盐分来源,但扰动条件下表层沉积物的盐分增强释放将强化库水的泛咸程度。

c. 海湾水库间隔多年才发生一次库水混合,不同于每年都发生库水混合的温度分层水库,主要原因可能是海湾水库水体的分层结构与稳定性强度明显不同于温度分层水库。

d. 可以采取机械抽排库底咸水及开挖排咸沟的措施来抑制海湾水库的库水泛咸。

参考文献:

[1] 王高正,朱江平. 大塘港水库机械排咸技术[J]. 水利水电科技进展,1998,18(4):44-46. (WANG Gaozheng, ZHU Jiangping. Mechanical extraction salty technology of Datanggang Reservoir [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,1998,18(4):44-46. (in Chinese))

[2] 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 Kun. Zhejiang tidal marsh reservoirs water desalination analysis and prediction [J]. Environmental Pollution & Control,1996,8(2):27-29. (in Chinese))

[3] 朱江平. 胡陈港水库水质咸化原因分析及治理对策[J]. 浙江水利科技,2002(4):50-51. (ZHU Jiangping. Huchengang Reservoir water salinization cause analysis and counter measures[J]. Zhejiang Hydrotechnics,2002(4):50-51. (in Chinese))

[4] 赵文玉,王启山,吴国平,等. 引黄水在北大港水库蓄存期水质咸化的研究[J]. 水科学进展,2005,6(6):763-766. (ZHAO Wenyu, WANG Qishan, WU Guoping, et al. Study on salinization of water channeled from Yellow River in Beidagang Reservoir during the stored period [J]. Advances in Water Science,2005,6(6):763-766. (in Chinese))

[5] 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实验研究[J]. 水科学进展,2006,17(2):170-175. (GAO Zengwen, ZHENG Xilai, WU Junwen. Experimental studies on salt exchange between freshwater and sediments in a polder reservoir [J]. Advances in Water Science,2006,17 (2):170-175. (in Chinese))

[6] 姜翠玲,裴海峰. 底泥盐分释放对北塘水库水质咸化的

影响[J]. 环境科学与技术,2007,30(9):39-41. (JIANG Cuiling,PEI Haifeng. Effect of salt release from sediment on water quality of Beitang Reservoir[J]. Environmental Science & Technology,2007,30(9):39-41.(in Chinese))

[7] 高增文,郑西来,赵全升. 扩散边界层对沉积物盐分释放的阻滞影响[J]. 水科学进展,2010,21(2):255-260. (GAO Zengwen, ZHENG Xilai, ZHAO Quansheng. Diffusive boundary layer and its resistance on salt release from deposited sediments in a polder reservoir[J]. Advances in Water Science,2010,21(2):255-260.(in Chinese))

[8] 潘桂娥,黄罗春,金利军,等. 沿海滩涂水库蓄淡技术研究[J]. 水利规划与设计,2004(2):51-55. (PANG Guie,HUANG Luochun,JIN Lijun,et al. Coastal shoreline reservoirs storage freshwater technology research[J]. Water Resources Planning and Design,2004(2):51-55.(in Chinese))

[9] 姜翠玲,裴海峰. 天津市北塘水库水质咸化原因和防治对策[J]. 湖泊科学,2007,19(4):428-433. (JIANG Cuiling,PEI Haifeng. Reasons of water salinization and its prevention measures in Beitang Reservoir, Tianjin City[J]. Journal of Lake Sciences,2007,19(4):428-433.(in Chinese))

[10] 王雨春,朱俊,马梅,等. 西南峡谷型水体的季节性分层与水质的突发性变化[J]. 湖泊科学,2005,17(1):54-60. (WANG Yuchun,ZHU Jun,MA Mei,et al. Thermal stratification and paroxysmal deterioration of water quality in a canyon-reservoir,Southwestern China[J]. Journal of Lake Sciences,2005,17(1):54-60.(in Chinese))

[11] WÜEST A,LORKE A. Small-scale turbulence and mixing: energy fluxes in stratified lakes[J]. Encyclopedia of Inland Waters,2009,1:628-635.

[12] PORTIELJE R, LIJKLEMA L. Estimation of sediment-water exchange of solutes in Lake Veluwe, The Netherlands[J]. Water Research,1999,33(1):279-285.

[13] THIBODEAUX L J, BOYLE J D. Bedform generated convective transport in bottom sediment[J]. Nature,1987,325:341-343.

[14] HUETTEL M,GUST G. Solute release mechanisms from confined sediment cores in stirred benthic chambers and flume flows[J]. Marine Ecology Progress Series,1992,82:187-197.

[15] THOMSEN L. The benthic boundary layer[EB/OL]. [2002-10-30]. http://212. 201. 48. 1/course/fall04/Dynamics Marine Systems/BBL. pdf.

[16] BRUCE L C,JELLISON R,IMBERGER J,et al. Effect of benthic boundary layer transport on the productivity of Mono Lake,California[J]. Saline Systems,2008,4:11.

[17] KATSEV S, CROWE S A, MUCCI A. Mixing and its effects on biogeochemistry in the persistently stratified, deep,tropical Lake Matano,Indonesia[J]. Limnology and Oceanography,2010,55(2):763-776.

[18] WÜEST A,LORKE A. Small-scale hydrodynamics in lakes[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,2003,35:373-412.

[19] WÜEST A,GLOOR M. Bottom boundary mixing: the role of near-sediment density stratification[J]. Coastal and Estuarine Studies,1998,54:485-502.

[20] HONDZO M, HAIDER Z. Boundary mixing in a small stratified lake [EB/OL]. [2004-03-02]. http://onlinelibrary. wiley. com/doi/10. 1029/2002WR001851/full.

[21] MARTI C L,IMBERGER J. Exchange between littoral and pelagic waters in a stratified lake due to wind-induced motions: Lake Kinneret Israel[J]. Hydrobiologia,2008,603:25-51.

[22] 王娟,高增文,赵全升. 库底排咸沟对控制海湾水库库水咸化的效应[J]. 环境科学与技术,2010,33(12F):33-35. (WANG Juan,GAO Zengwen,ZHAO Quansheng. Effects of draining interstitial water on the water salinization in polder reservoirs[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(12F): 33-35.(in Chinese))

(收稿日期:2012-12-02 编辑:彭桃英)

(上接第 39 页)

[5] 王玲玲,申剑. 固相萃取/GC-MS 法测定水中半挥发性有机物[J]. 现代科学仪器,2003(3):53-55. (WANG Lingling,SHEN Jian. Determining semi-volatile organism in water by SPE/GC-MS[J]. Modern Scientific Instruments,2003(3):53-55.(in Chinese))

[6] 陈明媚. 珠江流域水污染治理的问题与对策[D]. 广州:华南理工大学,2011.

[7] 万晓凌,马倩,董家根,等. 江苏省入太湖河道污染物分析[J]. 水资源保护,2012,28(3):38-41. (WAN Xiaoling, MA Qian, DONG Jiagen, et al. Analysis of pollutants in rivers entering Taihu Lake in Jiangsu Province[J]. Water Resources Protection,2012,28(3):38-41.(in Chinese))

[8] 李粉茹,段立珍,朱兰保. 淮河蚌埠至临淮关段表层水质分析与评价[J]. 水资源保护,2005,21(5):73-78. (LI Fenru, DUAN Lizhen, ZHU Lanbao. Analysis and assessment of surface water quality of Huaihe River ranged from Bengbu to Linhuaiguan[J]. Water Resources Protection,2005,21(5):73-78.(in Chinese))

(收稿日期:2012-09-26 编辑:彭桃英)