

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.010

北大港水库水-土界面盐分释放规律

李海明^{1,2}, 陈健健^{1,2}, 李银^{1,2}, 李群^{1,2}

(1. 天津科技大学 滨海地下水利用与保护研究室, 天津 300457; 2. 天津市海洋资源与化学重点实验室, 天津 300457)

摘要: 为了研究天津北大港水库水质咸化机理, 采用野外取样与室内土柱试验相结合的方法, 研究了北大港水库蓄水时底质与上覆水体之间盐分的释放规律。结果表明: 底质向上覆水体释放盐分时水体中存在一个明显的盐分渐变区(扩散边界层), 该层位于水-土界面以上10 cm的范围, 底质中释放出的盐分有60%集中在边界层, 边界层以上水体盐分垂直变化较小; 底质中盐分的累积释放量随时间的变化符合对数函数形式, 试验运行前50天中盐分累积释放量占底质盐分总释放量的80%左右; 水-土界面处盐分释放通量的变化趋势存在周期性, 每个周期内均呈现先迅速增加后缓慢下降。

关键词: 北大港水库; 盐分扩散; 累积释放量; 释放通量; 边界层;

中图分类号: X832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0047-04

Law of Salt Release at Soil-water Interface in Beidagang Reservoir

LI Hai ming^{1,2}, CHEN Jian jian^{1,2}, LI Yin^{1,2}, LI Qun^{1,2}

(1. Laboratory of Coastal Groundwater Utilization & Protection, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Marine Resources and Chemistry, Tianjin 300457, China)

Abstract: In order to investigate the water salinization mechanism in Beidagang reservoir of Tianjin, field sampling method and laboratory column experiment were conducted to examine the rule of salt release between the bed sediment and overlying water body under reservoir filling. The results showed that (1) a salinity variation zone (diffusion boundary layer) exists in the water body of 10 cm above the sediment and water interface when salt is released from bed sediment. About 60% of the total released salt accumulates in the diffusion boundary layer, and the vertical variation of water salinity is insignificant above the diffusion boundary layer; (2) the accumulative amount of salt released from the bed sediment conforms to the form of logarithmic function with time, and the accumulative amount of released salt in the first 50 days of the experiment can reach 80% of the total amount; and (3) the variation of salt flux at the sediment and water interface shows periodic characteristics with a rapidly initial increasing and then a slow decline within each period.

Key words: Beidagang reservoir; salt diffusion; accumulative release amount; release flux; boundary layer

北大港水库位于天津市东南部滨海的大港区, 是一座洼淀围堤型的人工水库, 始建于1974年, 水源主要来自西部的马厂减河和西北部的独流减河, 前者源自海河南系南运河来水, 后者则是海河西系大清河、子牙河和南运河等水系。水库主要功能为分洪、供水、防洪、灌溉等^[1]。北大港水库是“南水北调”东线工程备用方案的调蓄水库, 但是引黄水在该水库蓄存一段时间后曾出现水质咸化现象, 极大地影响了北大港水库作为饮用水源水库的功能^[2]。

关于水库蓄水后水质咸化的问题不少学者进行了探讨, 认为平原水库引蓄地表水后水质发生咸化, 原因主要包括盐碱土的影响、浅层咸化地下水、气象气候条件、大气沉降、海

水入侵、库底原水水质水量的影响等^[2-5]。赵文玉等^[2]通过在库边修建模拟试验水池定量计算了库底盐碱土质质作用、蒸发浓缩对水质咸化影响的比重, 并认为风的扰动使得模拟水池内的水体处于完全混合状态; 张晨^[6]采用EFDC技术, 模拟了底泥氯离子释放对水库水质的影响, 通过实测数据与模拟结果比较分析, 验证了模型的可靠性; 姜翠玲等^[7]研究发现温度变化、风浪扰动、换水、下渗等条件均影响底泥氯离子的释放; 李海明^[8,9]采用野外调查和取样分析方法, 识别了北大港水库水质咸化的垂直分布规律, 认为盐分随水库深度的增加而增加, 并且发现接近入库口的沉积物能将盐分截留下来, 而水库出库口的沉积物易将盐分释放出来

收稿日期: 2013-10-20 修回日期: 2014-04-01 网络出版时间: 2014-05-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.010.html>

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目(11JCZDJC24700); 国家自然科学基金项目(41372231)

作者简介: 李海明(1971-), 男, 山西临县人, 教授, 主要从事地下水资源可持续利用与污染控制研究。E-mail: lhm99044@163.com

转移到水体; Jose Soares dos Santo 等^[10]采用 PCA 主因子分析法对地处巴伊亚-巴西的一些小水库水质咸化问题进行了研究, 认为强降雨期间洪水带入的盐分积累也会造成水库水质咸化; 高增文等^[11-12]分别通过对海湾水库、盐碱地排水沟蓄水后底质释放对上覆水体的影响研究, 认为底质释放时上覆水体中存在一个扩散边界层, 并且边界层的存在对底质释放向上覆水体的进一步扩散有一定的阻滞作用。还有部分学者对湖泊^[13]、海湾水库、农业排水沟渠等水体盐分交换作用进行了研究, 但总体来说目前针对底质与上覆水体盐分交换作用的相关研究较少。

本文通过室内土柱试验, 分析北大港水库底质中盐分的释放对上覆水体水质的影响, 探究该水库底质与上覆水体之间的盐分分布及其交换机理, 为滨海新区水库的水资源管理提供科学依据和数据支持, 并为其他滨海地区水库水质咸化问题提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验土样与水样

在北大港水库出库口的库底采集土样, 将采样点表层杂质铲去, 取 10~50 cm 深的土样密封运回实验室。将土样中的砂石、贝壳及动植物碎片等杂质分离后, 土样经自然风干过筛分选, 采用常规土工方法分析其物理化学性质, 测得比重为 2.61 g/cm³, 容重为 1.228 g/cm³, 含水率为 7.360%, 以及 pH 为 8.65, 含盐量 16.34 g/kg, 含氯量 9.446 g/kg。试验用水为北大港水库水, pH 为 8.47, 氧化还原电位为 40 mV, 含盐量为 1.04 g/L。

1.2 试验装置和方法

1.2.1 试验装置

试验装置见图 1, 土柱是由内径 10 cm、长 120 cm 的有机玻璃柱构成, 柱体主要分两部分, 上部为北大港水库水, 下部柱体为 50 cm 厚的水库底质。上设 6 个取样口, 监测水体中各层中盐分浓度的变化, 每个取样口间隔 10 cm。水土界面定义为 0 cm 水层, 垂直向上依次分为 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 五个水层。

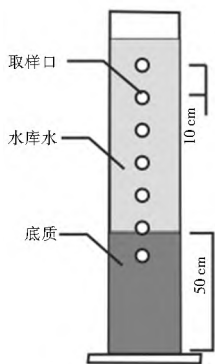


图 1 试验土柱示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental soil column

1.2.2 试验方法

根据装填土体长度和土样容重算出装填土重。将已知重量的湿土装入有机玻璃柱, 分层装填, 每段 2~5 cm, 边装填边用木棒压实, 分若干次填入柱内, 均匀压实。土柱装好

后, 在柱体上部沿柱内壁缓缓加入北大港水库水, 使柱内保持一定水位, 同时检查土柱运行情况。土柱运行初期每隔 2 d 在柱体不同深度取样, 所取样品 24 h 内测完, 同时记录取样时间, 根据试验情况可适当调整取样时间间隔。

测试组分: pH、电导率、浊度、氧化还原电位分别用 PHS 3C pH 计、DDS 12B 精密电导率仪、LP2000-11 浊度仪、HI98120 ORP 测定。根据电导率与含盐量的相关曲线, 可由测定的电导率值求得水体中含盐量。

2 结果与讨论

2.1 上覆水体中盐分的时空变化特征

图 2 表示上覆水库水体不同时刻含盐量垂直分布的变化情况, 可以看出同一取样时刻, 水体中盐分空间分布不均匀, 分层现象比较明显: 10~50 cm 水层的盐分浓度比较均一, 变化不大; 10~20 cm 的水层只在第 1 天取样时有稍微的变化; 10 cm 以下的水层盐分表现出了明显的差异。这表明水库底质盐分向上覆水体扩散时存在着一个明显的盐分渐变区(扩散边界层)。而且在试验运行期间, 边界层始终位于水-土界面上 10 cm 的范围。Kuhl 研究认为扩散边界层的厚度与水流速、沉积物表面平坦程度以及沉积物孔隙度有关^[15]。

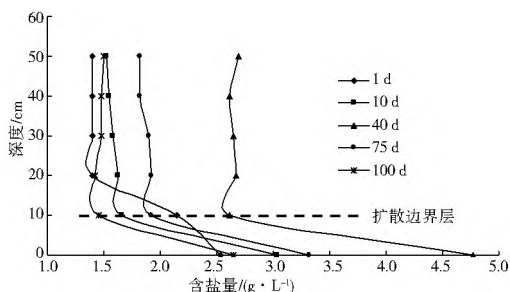


图 2 不同时刻水库各水层盐分的分布

Fig. 2 Salinity distribution in each layer of reservoir at different times

图 3 表示边界层内外水体含盐量随时间的变化曲线, 其中边界层内盐分含量为 0~10 cm 水层盐分浓度平均值, 边界层外盐分含量为 10~50 cm 水层盐分浓度的平均值。由图 3 可以看出, 边界层内外含盐量随时间的变化趋势相同, 均表现为初期迅速增加, 土柱运行 40 d 时达到了最大值, 随后缓慢下降最后趋于稳定。边界层内盐分最小值为 2.53 g/L, 最大值达 4.77 g/L。边界层外盐分最小值为 1.40 g/L, 最大值为 2.61 g/L。土柱运行期间边界层内的盐分浓度始终高于边界层外的盐分浓度, 这是由于水-土界面上存在着的扩散边界层对底质盐分的释放具有阻滞作用^[12], 使得边界层内外的盐分保持着动态平衡, 而边界层外的水体因为分子的扩散作用盐分能够保持均一变化。

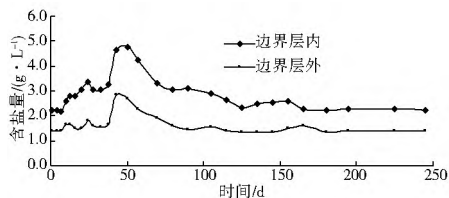


图 3 边界层内外水体含盐量随时间的变化曲线

Fig. 3 Salinity variation of the water body inside and outside of the salt diffusion layer with time

2.2 底质盐分累积释放量的变化特征

根据实际监测的水体中不同位置的盐分浓度,采用式(1)计算土柱上覆水体中盐分在不同时刻的累积增量(m_i),由此推测底质中盐分的释放量。

$$m_i = \sum_{i=1}^6 C_i V_i - C_0 V_0 \quad (1)$$

式中: C_i 为计算时刻第*i*层水体中的盐分浓度(g/L); V_i 为计算时刻第*i*层水体的体积(L); C_0 为水体初始时刻的盐分浓度(g/L); V_0 为水体总体积(L);*i*为水层的层数。

图4表示水库底质中盐分累积释放量随时间的变化曲线,可以看出水库底质盐分的累积释放量随时间的变化符合对数函数形式。试验开始阶段底质中的盐分迅速释放,随着时间推移,盐分的累积释放量的变化逐渐趋于平稳。250 d后试验结束底质中盐分共累积释放20.57 g,但在试验运行的前50 d中盐分累积释放量达17 g,占总释放量的83%。

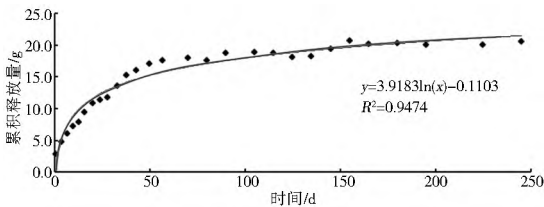


图4 水库底质盐分累积释放量的变化曲线

Fig. 4 Variation of accumulative amounts of salt released from bed sediment with time

图5表示边界层内盐分累积增量随时间的变化曲线,可以看出边界层内盐分累积增量随时间的变化趋势与水库底质总体盐分的累积释放趋势相同,均表现为初期迅速增加然后缓慢趋于平稳,符合对数函数的形式。试验结束时边界层内盐分累积增加到16.45 g。

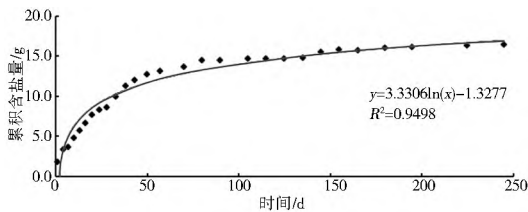


图5 边界层内累积含盐量变化曲线

Fig. 5 Variation of accumulative amounts of salt in the boundary layer with time

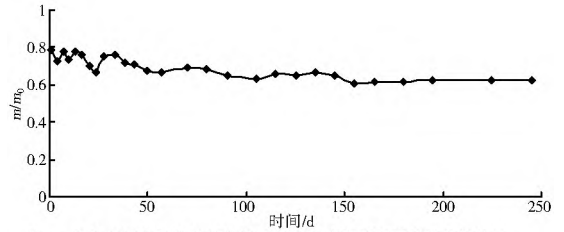
图6表示边界层内盐分总增量在底质盐分总释放量中所占的比例,可以看出底质释放出的盐分大部分集中在了扩散边界层,最多时高达78%。试验初期的前50 d比值的变化波动较大,这是由于试验初期底质盐分的累积释放量和边界层水体盐分的总增量变化均不稳定。随着土柱运行,边界层内盐分增量在底质释放的总盐分中所占比例稳定在60%左右。

2.3 底质-水体界面盐分释放通量的变化特征

为了进一步研究底质中盐分向上覆水库水体的释放情况,采用公式(2)计算水-土界面盐分的释放通量($flux$)。

$$flux = \frac{\Delta m_i}{(t_i - t_{i-1}) \times A} \quad (2)$$

式中: $flux$ 为释放通量($g/(d \cdot m^2)$); t_i 为试验的第*i*个时刻



注: m 为边界层内的盐分的增量(g); m_0 表示水库底质释放的总盐分(g)。

图6 边界层盐分所占比例随时间的变化曲线

Fig. 6 Variation of salinity percentages in the boundary layer with time

(d); t_{i-1} 为试验的第*i*-1个时刻(d); A 为水-土接触面积(m^2); Δm_i 为第*i*个时段释放的盐分, $\Delta m_i = m_i - m_{i-1}$,其中 m_i 和 m_{i-1} 分别为 t_i 和 t_{i-1} 时刻该底质释放盐分(g)。

图7表示水-土界面盐分释放通量随时间的变化曲线,可以看出,水-土界面处盐分释放通量随时间具有周期性变化,大致可划分为3个周期,每个周期中盐分释放通量随时间均呈现出先增加后逐渐降低趋势:1~50 d为第 \bar{N} 周期,盐分释放通量由78.13 $g/(d \cdot m^2)$ 下降到45.20 $g/(d \cdot m^2)$;51~125 d为第 $\bar{0}$ 周期,通量值由55.75 $g/(d \cdot m^2)$ 下降到3.56 $g/(d \cdot m^2)$;126~250 d为第 $\bar{0}$ 周期,通量值由21.14 $g/(d \cdot m^2)$ 下降到1.49 $g/(d \cdot m^2)$ 。第 \bar{N} 、 $\bar{0}$ 周期,水-土界面处盐分的通量值随时间的变化较大,而第 $\bar{0}$ 周期通量的变化则慢慢趋于平缓,最后稳定在1.5 $g/(d \cdot m^2)$ 左右。

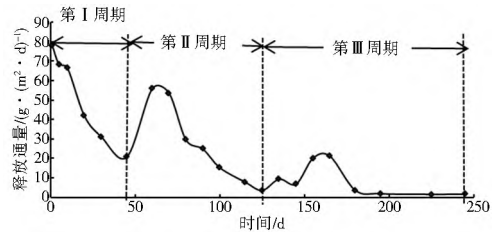


图7 水-土界面盐分释放通量的变化曲线

Fig. 7 Variation of salt release fluxes at the sediment and water interface with time

3 结论

(1)底质中盐分向上覆水体扩散时存在着扩散边界层,边界层厚度为10 cm。边界层内盐分变化明显,边界层外水体盐分变化均一。

(2)底质中盐分的累积释放随时间的变化是以对数函数的形式进行的,即试验初期,释放量迅速增加,随着时间推移累积释放量缓慢趋于稳定。

(3)水-土界面处盐分释放通量的变化受底质间隙水中盐分浓度变化的影响,土柱运行期间二者随时间的变化均分三个周期,第 \bar{N} 、 $\bar{0}$ 周期底质盐分浓度及通量均急剧减小,第 $\bar{0}$ 周期变化都较平缓,随着时间推移趋于稳定。

(4)扩散边界层的存在对底质盐分向上覆水体扩散有一定的阻滞作用,底质释放出盐分的60%集中在边界层。

参考文献(References):

[1] 天津市水利局水志志编纂委员会. 天津市水志-北大港水库水志[M]. 天津:天津科学技术出版社,1998: F 22. (Water

- Conservancy Records Editor Committee of Tianjin Water Conservancy Bureau. Water Conservancy Records Beidagang Reservoir Conservancy Records [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1998: F22. (in Chinese)
- [2] 赵文玉, 王启山, 赵玉明, 等. “引黄水”在北大港水库蓄存期水质咸化机理分析及防治措施[J]. 南水北调与水利科技, 2004, 2(6): 24-26. (ZHAO Wenyu, WANG Qishan, ZHAO Yuming, et al. Salinization Mechanism of Water from the Yellow River in Beidagang Reservoir & Control Measures[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2004, 2(6): 24-26. (in Chinese))
- [3] 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, 16(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, 16(6): 763-766. (in Chinese))
- [4] 崔淑芬, 赵珺, 李国光, 等. 气象条件对滨海地区湖泊、水库水质咸化的影响[J]. 农业环境与发展, 2011, (3): 65-66, 94. (CUI Shufen, ZHAO Jun, LI Guoguang, et al. Meteorological Conditions on Water Salinization of Coastal Lakes, Reservoirs[J]. Agror Environment & Development, 2011, (3): 65-66, 94. (in Chinese))
- [5] 陶晓冬, 严志程, 崔勇. 滨海平原水库的主要水环境问题及对策分析[J]. 水利规划与设计, 2012(4): 17-18, 53. (TAO Xiaodong, YAN Zhicheng, CUI Yong. The Main Environmental Problems and Countermeasures of Coastal Reservoir [J]. Water Resources Planning and Design, 2012(4): 17-18, 53. (in Chinese))
- [6] 张晨, 高学平, 朱慧芳, 等. 以氯离子为例的北大港水库水质调控技术[J]. 天津大学学报, 2012, 45(1): 6-12. (ZHANG Chen, GAO Xueping, ZHU Hui Fang, et al. Control Technology of Water Quality for Chloride in Beidagang Reservoir [J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(1): 6-12. (in Chinese))
- [7] 姜翠玲, 裴海峰. 北塘水库底泥盐分释放的影响因子研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(10): 1-4. (JIANG Cuiling, PEI Haifeng. Impact Factors on Salt Release from Beitang Reservoir Sediment [J]. Environmental Science and Technology, 2007, 30(10): 1-4. (in Chinese))
- [8] 李海明, 夏雪桐, 康文娟, 等. 北大港水库水质咸化规律与影响因素分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 87-92. (LI Haoming, XIA Xuetong, KANG Wenjuan, et al. Analysis of Water Salinization and Its Impact Factors in Beidagang Reservoir [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 87-92. (in Chinese))
- [9] 李海明, 马斌, 李子琛, 等. 地下咸水与水库水体交换过程中沉积物胶体释放规律[J]. 岩矿测试, 2012, 31(5): 849-854. (LI Haoming, MA Bin, LI Zichen et al. Law of Colloid Release for Sediments in the Exchange Process of Saline Groundwater and Reservoir Water [J]. Rock and Mineral Analysis, 2012, 31(5): 849-854. (in Chinese))
- [10] Jose Soares dos Santos, Elisabeth de Oliveira. Evaluation of the salt accumulation process during inundation in water resource of Contas river basin (Bahia Brazil) applying principal component analysis [J]. Water Research, 2004, 38(6): 1579-1585.
- [11] 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))
- [12] 潘延鑫, 罗纨, 贾忠华, 等. 盐碱地排水沟蓄水后底泥与水体盐分交换试验 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 81-87. (PAN Yanxin, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al. Experiment on Salt Exchange between Sediments and Ponding Water in Drainage Ditches of Saline Farm Land [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(2): 81-87. (in Chinese))
- [13] House W A, Denison F H. Exchange of inorganic phosphate between river waters and bed sediments [J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36(4): 4592-4301.
- [14] 彭焱梅, 姜翠玲, 朱立琴, 等. 天津市滨海新区拟建水库水质咸化风险试验研究 [J]. 水电能源科学, 2013, 31(3): 31-33, 205. (PENG Yamei, JIANG Cuiling, ZHU Liqin, et al. Experimental Study on Water Salinization Risk of Proposed Reservoir in Coastal Region of Tianjin City [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(3): 31-33, 205. (in Chinese))
- [15] Khl M, Revsbech NP. Biogeochemical micro sensors for boundary layer studies [C]. The Benthic boundary layer. New York: Oxford University Press, 2001: 180-210.