

西雷, 李海明, 李梦娣, 等. 北大港水库水质咸化特征与沉积物盐分释放[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 172-180. XI L, LI H M, LI M D, et al. Water salinization characteristics and sediment salt release in Beidagang Reservoir[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 172-180. (in Chinese)

北大港水库水质咸化特征与沉积物盐分释放

西雷^{1,2,3}, 李海明^{1,2,3}, 李梦娣^{1,2,3}, 肖瀚⁴, 王浩然^{1,2,3}

(1. 天津科技大学滨海地下水利用与保护实验室, 天津 300457; 2. 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457;
3. 海洋化学资源与食品技术教育部重点实验室, 天津 300457;
4. 中国环境科学研究院国家环境保护地下水污染模拟与控制重点实验室, 北京 100012)

摘要: 选择天津滨海地区北大港水库为研究对象, 采用野外调查和数据分析相结合的方法, 于夏季对水库不同位置取样, 分析水体 pH 值和主要咸化指标溶解性总固体(TDS)及 Cl⁻质量浓度, 研究北大港水库不同位置水质咸化的变化规律, 对水库咸化机理进行探讨。研究发现: 沿着水流方向自西向东, TDS 和 Cl⁻质量浓度呈现“水库上游闸 > 水库下游闸”的分布特征, 而 pH 值正好相反, 沿着水流方向水体咸化呈现逐渐减弱的趋势; 北大港水库水体各指标在垂向分布上可分为两种类型: “混合型”水体, 多分布在水库水流上游西侧进水闸口(南岸进水闸、赵连庄闸、马圈进水闸、大港农场闸和刘岗庄闸), 水库东南部的沙井子闸以及东北部的出水闸(十号调节闸和排咸闸); “分层型”水体, TDS 和 Cl⁻质量浓度在垂向上均随着深度的增加而增加, 其中三号泄水闸最具代表性。沉积物盐分释放对水库咸化有影响。

关键词: 北大港水库; 水质咸化; 水-岩相互作用; 底泥盐分释放; 空间分布

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0018

水库咸化现象在滨海地区的水库较为常见^[1]。自“引黄济津”实施以来, 北大港水库水体阳离子主要由 Na⁺组成, 占阳离子的 74.9%, Cl⁻质量浓度超过了地表水Ⅲ类标准^[2]。水库咸化现象逐渐引起人们的重视。相关学者研究了水库咸化机理^[3]、海水入侵与水库咸化的关系^[4]、库底沉积物对水库咸化的影响^[5]及气象条件对水库咸化的影响^[6]。赵文玉等^[3]认为滨海水库咸化机理有盐碱土和地下水的传质作用、蒸发浓缩作用以及风的搅拌加速传质作用等。姜翠玲等^[7]对北塘水库的咸化机理研究认为水库底泥的盐分释放和地下水的补给作用会影响水库咸化。李海明等^[8]发现越靠近海岸线水库水体咸化越严重, 温度越高沉积物中的氯离子越容易释放, 水体更容易咸化。高增文^[9]进行室内实验发现风的吹拂影响水库内盐分的分层的规律。赵文玉等^[10]发现风对水体的扰动加快了盐分从沉积物向水体的

扩散速度, 也加快了水体的蒸发浓缩作用。Robert 等^[11]采用数值模拟的方法对荷兰境内的 Veluwe 湖水中溶质的沉积物和水体之间的物质交换进行了模拟研究。

前人开展了大量对于水体咸化问题的室内和室外研究, 在研究的内容上缺少关于水库咸化的规律与水体 pH、TDS 和水体咸化指标中 Cl⁻质量浓度的空间变化规律的探讨。本文通过野外采样和室内检测分析对北大港水库水体不同空间位置的 pH、TDS 和 Cl⁻质量浓度进行了数据分析, 对水库沉积物的 pH、全盐量和 Cl⁻质量分数进行了检测分析。北大港水库作为天津市重要的淡水来源、南水北调工程中间的重要枢纽, 水体咸化现象引起了人们的重视, 研究北大港水库水质咸化的问题迫在眉睫。揭示北大港水库水体水质咸化的变化规律并探明水体咸化的机理和影响因素显得尤为重要。研究

收稿日期: 2022-07-15 修回日期: 2023-01-13 网络出版时间: 2023-02-07

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20230206.1510.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072288)

作者简介: 西雷(1996—), 男(满族), 河北承德人, 主要从事地下水污染机理与控制研究。E-mail: xl2271445@163.com

通信作者: 李海明(1971—), 男, 山西吕梁人, 教授, 主要从事水文地球化学、地下水资源利用与保护研究。E-mail: lhm@tust.edu.cn

结果可以为进一步研究北大港水库水体咸化提供充足的数据指导,为管理维护好北大港水库,使之充分发挥作用提供有力的数据支撑。

1 研究区域概况

北大港水库位于东经 $117^{\circ}11'$ ~ $117^{\circ}37'$,北纬 $38^{\circ}36'$ ~ $38^{\circ}57'$,地处天津市滨海新区,海河流域独流减河下游,东临渤海湾,距离河口 6 km,平均海拔 2 m(大沽高程)。19 世纪 70 年代初,通过加高加固独流减河以南的周边堤防,建设一系列蓄水工程、导水工程和排水等配套工程,1980 年正式建成^[12]。水库流域面积 150 km^2 ,全长 54.5 km,水库总库容 5 亿 m^3 ,是华北平原最大的人工平原水库^[13]。水库所在的区域属于北半球暖温带大陆性季风气候,春季干旱而且多风,夏季温度较高且多雨,秋季冷暖适宜,冬季寒冷少雪。丰水期为 7—9 月。年降雨很少,库区地下水水位在地表以下 1.5 m 左右,呈略碱性。多年平均降水量 533.3 mm,蒸发量 1 235.9 mm ^[14]。北大港水库表层为黏土,深度约 30 m。上层为黑色腐殖质土,厚度约 0.2 m,部分地段为沙质层,水库地表土壤的盐碱程度较高。

2 样品采集与分析方法

2.1 取样点的布设与采集

在北大港水库内 2021 年的夏季(8 月)取样。为保证采样安全地进行,尽量选取研究区域已有的闸口作为采样点。采样点位分布应尽量分布在研究区域四周,避免过于集中。采样点应涵盖水库上游和水库下游。为保证研究的准确性,采样点的库水和沉积物性质要保持相对的稳定。故选取北大港水库内的 9 个闸口作为取样点,在水库 9 个闸口每个闸口处分表层、中层和底层取水样,取水装置为 1 L 的分层采水器,共 27 个水样。采样位置见图 1。其中水库水流上游闸口包括水库西侧的南岸进水闸(NAJS)、赵连庄闸(ZLZ)、马圈进水闸(MJ)、大港农场闸(DGNC)、刘岗庄闸(LGZ)和水库东南角的沙井子闸(SJZ);水库水流上游附近各闸口的水深分别为南岸进水闸(NAJS)164 cm、赵连庄闸(ZLZ)252 cm、马圈进水闸(MJ)290 cm、大港农场闸(DGNC)305 cm、刘岗庄闸(LGZ)162 cm 和沙井子闸(SJZ)175 cm;水库水流下游附近的闸口水深分别为十号调节闸(SHTJ)540 cm、三号泄水闸(SHXS)330 cm 和排咸闸(PXZ)341 cm。

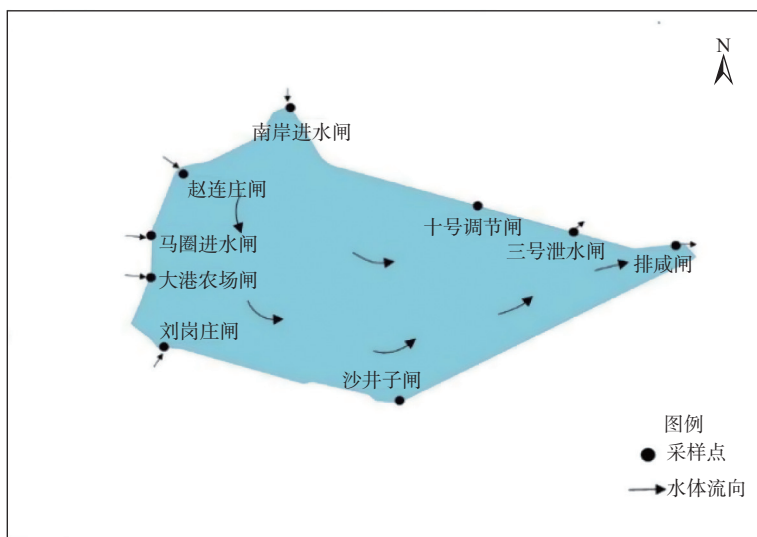


图 1 北大港水库采样点

Fig. 1 Location map of sampling points of Beidagang Reservoir

2.2 水体咸化检测指标及分析方法

通过对常规水化学组分的含量进行检测分析,对比水平方向上不同取样点水样数据指标差异,揭示水库咸化的空间分布规律并对水体咸化的影响因素进行解释。水体的检测指标为 pH、TDS 和 Cl^- ,检测方法如下:pH 的测量方法是玻璃电极法;采用重量法检测 TDS;采用滴定法测定 Cl^- 质量浓度。

3 研究结果与讨论

3.1 北大港水库咸化指标检出特征

研究水库不同位置水质咸化变化规律,选取 pH、水质咸化指标 TDS 和 Cl^- ,以每个取样点垂直方向不同点水质质量浓度平均值作为研究对象,进行北大港水库水质咸化水平分布规律研究。水质各指标检出特征见表 1。可以看出,不同空间位置水体

pH 分布较为稳定。水体 TDS 和 Cl^- 质量浓度平均值分别为 2 622 mg/L 和 1 047 mg/L; 与地表水环境质量标准(GB 3838—2002)中的 Cl^- 质量浓度标准值(250 mg/L)和生活饮用水卫生标准(GB 5749—2022)中的 TDS 质量浓度标准值(1 000 mg/L)相比, 水体具有高 TDS 和高 Cl^- 特征, 水体咸化较为严重。

表 1 北大港水库各指标检出特征
Tab. 1 Detection characteristics of each indicator in Beidagang Reservoir

指标	pH	TDS质量浓度/ ($mg \cdot L^{-1}$)	Cl^- 质量浓度/ ($mg \cdot L^{-1}$)
最大值	8.37	3 210	1 368
最小值	7.63	1 650	594
平均值		2 622	1 047
标准差		401	213
变异系数		0.15	0.20

3.2 水库水质咸化水平分布规律

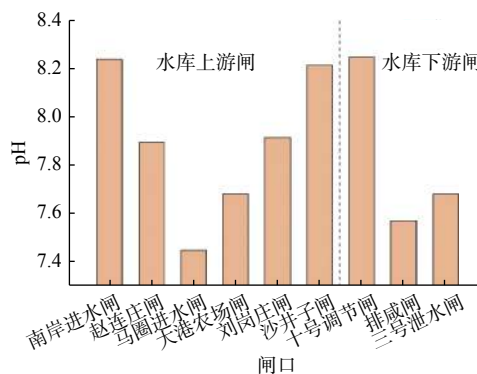
3.2.1 pH

北大港水库不同闸口的 pH 值见图 2(a), 总体 pH 值的范围为 7.45 ~ 8.24, 十号调节闸 pH 值最大, 马圈进水闸 pH 值最小。水库上游闸水体的 pH 值的范围为 7.45 ~ 8.23, 其中, 南岸进水闸的 pH 值最大, 马圈进水闸 pH 值最小。水库下游闸水体的 pH 值范围为 7.57 ~ 8.24, 其中, 十号调节闸最大, 排咸闸最小。可以看出水平方向上 pH 值的分布规律为水库上游闸水体大于水库下游闸水体。

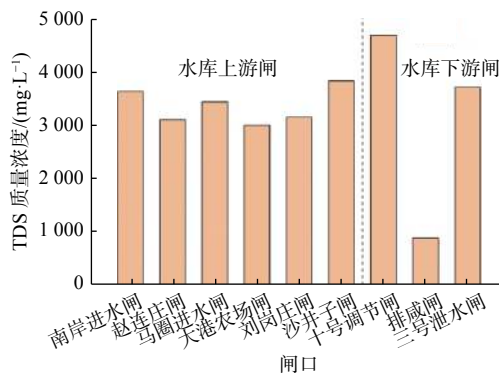
3.2.2 TDS

北大港水库不同闸口的 TDS 质量浓度见图 2(b), TDS 质量浓度范围为 880 ~ 4 670 mg/L, 平均值为 3 257 mg/L, 十号调节闸最大, 排咸闸最小。水库上游闸水体中 TDS 质量浓度范围为 2 987 ~ 3 813 mg/L, 平均值为 3 080.44 mg/L, 其中, 沙井子闸最大, 大港农场闸最小。水库下游闸 TDS 质量浓度范围为 880 ~ 4 670 mg/L, 平均值为 3 080 mg/L, 其中, 十号调节闸最大, 排咸闸最小。TDS 质量浓度在水平方向上整体呈现如下规律: 水库上游闸 > 水库下游闸。这说明水库上游水体咸化比下游较为严重。按 TDS 质量浓度由小到大的排列顺序, 天然水体依次可分为淡水、微咸水、咸水、盐水和卤水^[15]。当水体的 TDS 质量浓度小于 1 mg/L 时为淡水, TDS 质量浓度大于 1 mg/L 且小于 3 mg/L 时为微咸水, TDS 质量浓度大于 3 mg/L 且小于 10 mg/L 时为咸

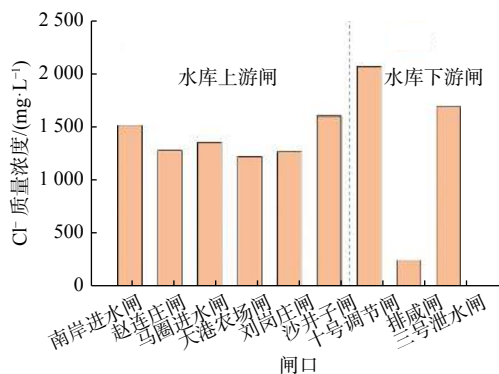
水, TDS 质量浓度大于 10 mg/L 且小于 50 mg/L 时为盐水, 大于 50 mg/L 时为卤水。除了大港农场闸和排咸闸水体为微咸水外, 其余闸口均为咸水。水库上游水体浅, 蒸发浓缩作用强烈, 导致西侧水体中 TDS 质量浓度较其他位置高。



(a) 北大港水库不同闸口 pH



(b) 北大港水库不同闸口 TDS 质量浓度



(c) 北大港水库不同闸口 Cl^- 质量浓度

图 2 北大港水库不同闸口的 pH, TDS 和 Cl^- 质量浓度
Fig. 2 pH, TDS and Cl^- mass concentrations at different gates of Beidagang Reservoir

3.2.3 Cl^-

Cl^- 是一种保守元素, 同时也是咸水组成元素^[16-17]。北大港水库不同闸口的 Cl^- 质量浓度见图 2(c), 水体中 Cl^- 质量浓度范围为 258 ~ 2 070 mg/L, 平均值为 1 366 mg/L, 南岸进水闸最大, 排咸闸最小。水库上游闸水体中 Cl^- 质量浓度为 1 227 ~ 1 607 mg/L,

平均值为 1 379 mg/L,其中,南岸进水闸的 Cl^- 质量浓度最大,大港农场闸 Cl^- 质量浓度最小。水库下游闸口水体 Cl^- 质量浓度范围为 258~2 070 mg/L,平均值为 1 340 mg/L,其中,十号调节闸最大,排咸闸最小。 Cl^- 质量浓度呈现“水库上游闸>水库下游闸”的趋势,由于水库上游水体浅,蒸发浓缩作用强烈,导致西侧水体中 TDS 质量浓度较其他位置高。

3.3 水库水质咸化垂直分布特征

为探究北大港水库水体垂直分布规律特征,揭示北大港水库水体水质垂直方向上的咸化规律。对不同深度水体 pH、TDS、 Cl^- 进行了检测分析。

3.3.1 pH

图 3 为水库水体 pH 垂直分布,不同位置不同深度 pH 值变化规律不同,可以分为两种类型:“混合型”和“分层型”。其中:“混合型”表示不同深度水质变化很小;“分层型”表示不同深度水质不同,出现分层现象。“混合型”位于水库上游闸的南岸进水闸、赵连庄闸、马圈进水闸、大港农场闸、刘岗庄闸和沙井子闸,pH 值范围为 7.16~8.39;“分层型”位于水库下游的排咸闸、三号泄水闸和十号调节闸,pH 值范围为 7.36~8.50。

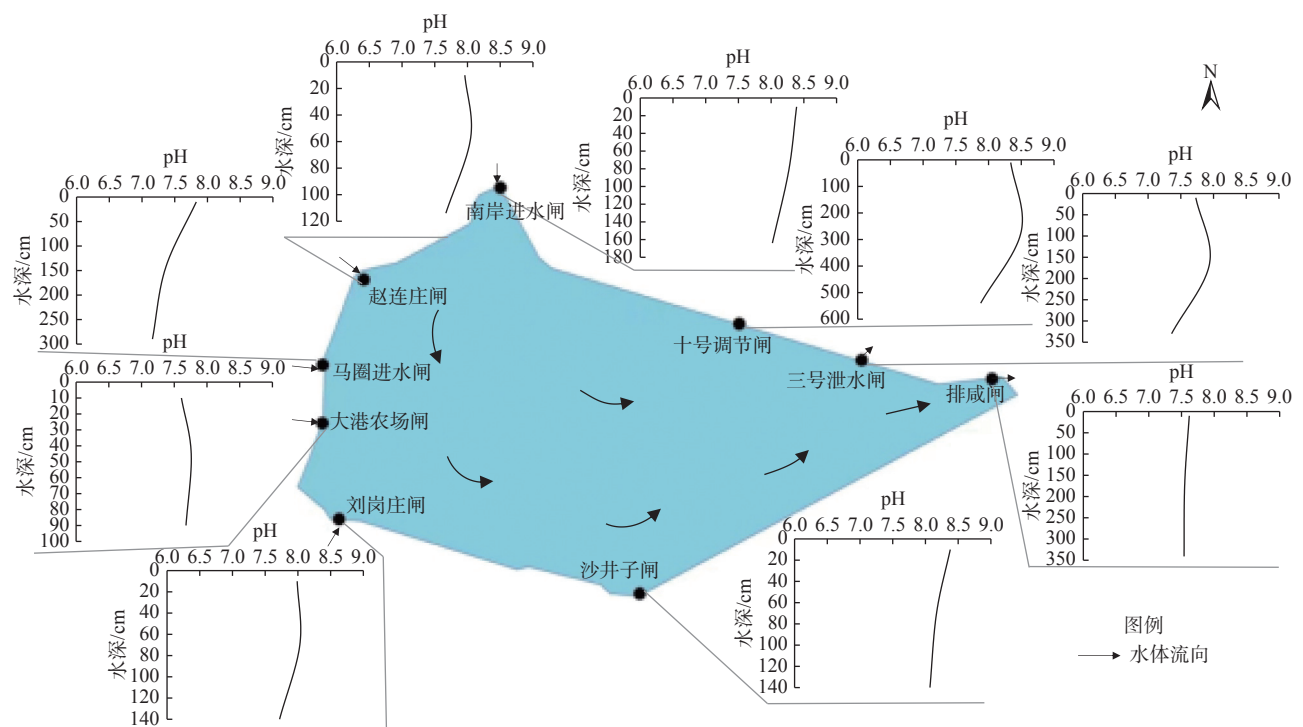


图 3 北大港水库水体 pH 质量浓度垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of pH mass concentrations in the water bodies of the Beidagang Reservoir

3.3.2 TDS

图 4 为水库水体 TDS 质量浓度垂直分布,不同位置不同深度水体 TDS 质量浓度变化规律不同。其中:“混合型”位于南岸进水闸、马圈进水闸、大港农场闸、赵连庄闸、刘岗庄闸、沙井子闸、排咸闸和十号调节闸,这 8 个闸口表层 TDS 质量浓度平均值为 3 184 mg/L,中层 TDS 质量浓度平均值为 3 201 mg/L,底层 TDS 质量浓度平均值为 3 224 mg/L;“分层型”位于三号泄水闸,表层 TDS 质量浓度为 964 mg/L,中层 TDS 质量浓度为 1 000 mg/L,底层 TDS 质量浓度为 4 800 mg/L。“分层型”水体 TDS 质量浓度随深度的增加而增加。这可能是底泥盐分释放导致底层水体 TDS 质量浓度升高。

3.3.3 Cl^-

如图 5 所示:“混合型”位于南岸进水闸、赵连庄闸、马圈进水闸、大港农场闸、刘岗庄闸、十号调节闸、沙井子闸和排咸闸,8 个闸口表层 Cl^- 质量浓度平均值为 1 377 mg/L,中层 Cl^- 质量浓度平均值为 1 383 mg/L,底层 Cl^- 质量浓度平均值为 1 377 mg/L;“分层型”水体位于三号泄水闸,表层 Cl^- 质量浓度为 264 mg/L,中层 Cl^- 质量浓度为 272 mg/L,底层 Cl^- 质量浓度为 4 540 mg/L。“分层型”水体 Cl^- 质量浓度随水体水深的增加而增加。 Cl^- 质量浓度和 TDS 质量浓度的变化趋势基本相同,可能是底泥中的氯离子释放到了水库底部导致水库底部的 Cl^- 质量浓度较高。

3.4 沉积物盐分释放对水库咸化的影响

所提出的对数转化法,将粒度的真值转化为 Φ 值^[18]。

3.4.1 北大港水库内沉积物粒径分布特征

$$\Phi = -\log_2 d$$

采用 Udden-Wentworth 粒径标准,根据 Krumbein

式中: d 为土壤颗粒粒径, mm。

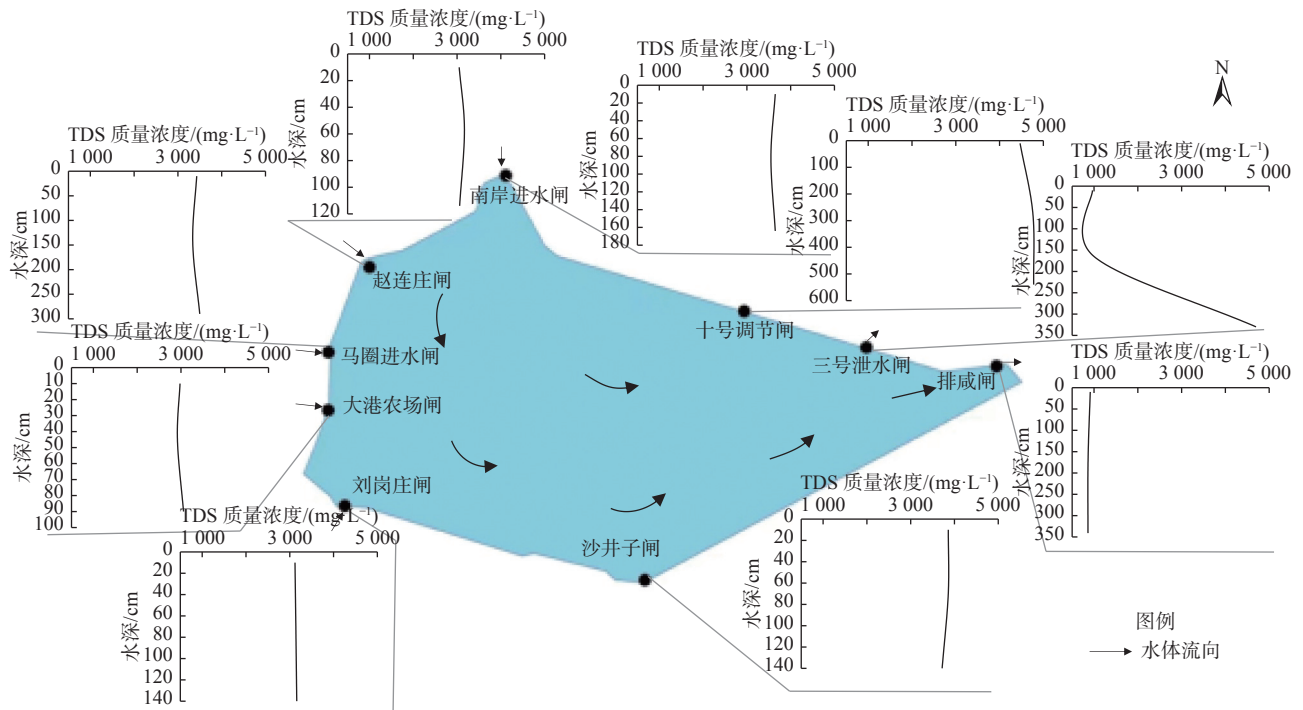


图 4 北大港水库水体 TDS 质量浓度垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of TDS mass concentrations in the water bodies of the Beidagang Reservoir

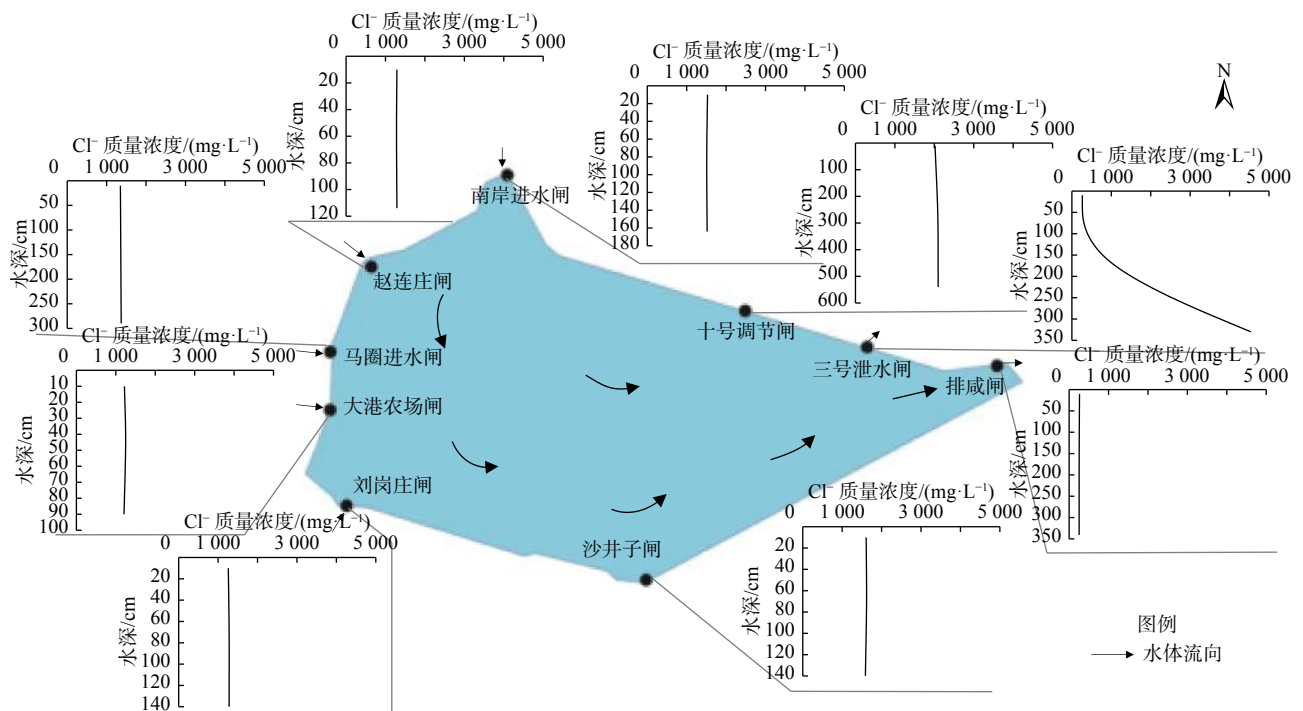


图 5 北大港水库水体 Cl⁻ 质量浓度垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of Cl⁻ mass concentration in the water bodies of the Beidagang Reservoir

根据沉积物粒径分布的检测结果绘制北大港水库内 9 个不同采样点的沉积物的粒度分布曲线, 见图 6。 Φ 值越大则说明沉积物颗粒的粒径越小, 沉积物颗粒性状越接近黏土; Φ 值越小则说明沉积物

颗粒的粒径越大, 即沉积物性状越接近砂土。由图 6 可知, 北大港水库内沉积物的颗粒粒径较小, 土壤质地接近黏土。沉积物中的盐分运动往往随着沉积物中水的运动而迁移。由于存在黏土层, 故沉

积物中水体的运动分为两个部分:0~30 cm 变化比较明显,30~40 cm 变化不大^[18]。故水库表层土以下0~30 cm 内水体与土壤之间的离子交换较为频繁,而30~40 cm 内水库水体与土壤之间的离子交换量较少。相同容重和水平距离,不同粒径盐渍土壤的土壤盐分与土壤水分扩散率的关系是单调递减的^[19]。土壤粒度累计频率分布曲线见图7,可以看出超过90%的水库沉积物粒径 ϕ 值小于6。根据土壤颗粒粒径的大小可以把土粒分为以下几级:粗砂(直径2.0~0.2 mm)、细砂(0.20~0.02 mm)、粉砂(0.020~0.002 mm)和黏粒(0.002 mm以下)。北大港水库周边地表土55.87%的颗粒粒径小于0.002 mm,28.56%的土壤颗粒属于粉砂,大约13%的土壤属于细砂,2.57%的土属于粗砂,整体来看水库沉积物颗粒粒径较小。

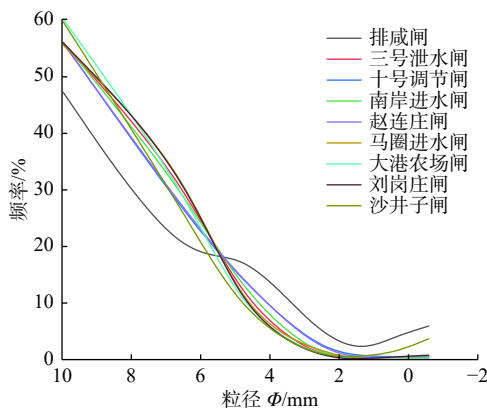


图6 土壤粒度频率分布曲线

Fig. 6 Frequency distribution curve of soil grain size

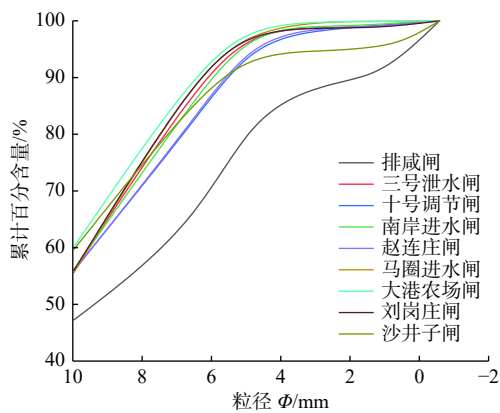


图7 土壤粒度累计频率分布曲线

Fig. 7 Cumulative frequency distribution curve of soil grain size

3.4.2 北大港水库沉积物化学特征

pH 值分布情况见图8,沉积物 pH 值范围为7.78~8.48,三号泄水闸最大,排咸闸最小。水库上游闸水体附近的沉积物 pH 范围为8.07~8.37,其中南岸进水闸最大,赵连庄闸最小。水库下游闸水体附近的沉积物 pH 的范围为7.78~8.48,其中,三号泄水闸最

大,排咸闸最小。从水库水流向来看,pH 值呈现“水库上游闸>水库下游闸”的分布类型。全盐量见图9,沉积物全盐量的范围为0.32~20.80 g/kg,平均值为3.92 g/kg,其中十号调节闸最大,大港农场闸最小。水库上游闸水体附近沉积物全盐量的范围为0.32~3.12 g/kg,平均值为1.14 g/kg,其中沙井子闸最大,大港农场闸最小。水库下游闸水体附近的沉积物全盐量范围为1.82~20.80 g/kg,平均值为9.49 g/kg,其中十号调节闸最大,排咸闸最小。水库沉积物全盐量“水库下游闸>水库上游闸”。这可能是由于水库下游距离渤海更近,土壤盐渍化更为严重。Cl 质量分数见图10,沉积物 Cl 质量分数范围为0.001~11.100 g/kg,平均值为1.871 g/kg,其中,十号调节闸最大,赵连庄闸最小。水库上游闸水体附近的沉积物 Cl 质量分数的范围为0.001~1.340 g/kg,平均值为0.360 g/kg,其中,沙井子闸最大,赵连庄闸最小。水库下游闸 Cl 质量分数范围为0.6~11.1 g/kg,平均值为4.9 g/kg,其中,十号调节最大,三号泄水闸最小。Cl 质量分数分布呈现“水库下游闸>水库上游闸”的规律。

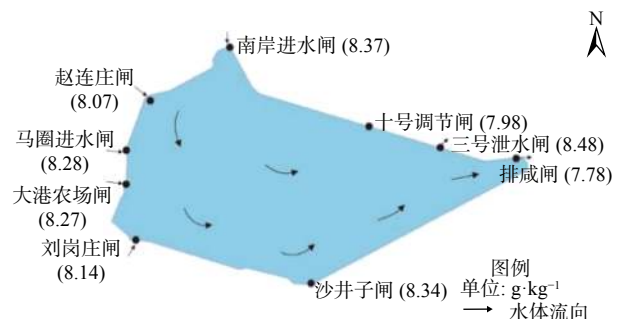


图8 北大港水库沉积物 pH 分布情况

Fig. 8 The pH distribution of sediments in the Beidagang Reservoir

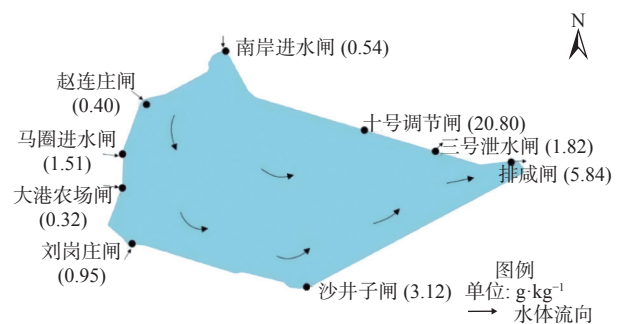


图9 北大港水库沉积物全盐量分布情况

Fig. 9 The distribution of total salt in the sediments of the Beidagang Reservoir

3.4.3 沉积物盐分释放对水库咸化的影响分析

底泥盐分释放是水库水质咸化的原因之一^[20]。底泥含盐量高使盐分释放通量变大,上覆水扰动会

促进底泥盐分释放^[21]。姜翠玲等^[7]研究发现,北塘水库的底泥氯离子含量、上覆水盐分含量以及水位对底泥盐分释放有明显的影 响。冯小平等^[22]通过对北大港湿地进行研究发 现沉积物离子以 Na^+ 和 Ca^{2+} 为主。阳离子交替、吸 附,岩盐溶解,硫酸盐还原,硅酸铝和碳酸盐矿化 等,使土壤中的离子逐渐向库水迁移^[23-24]。

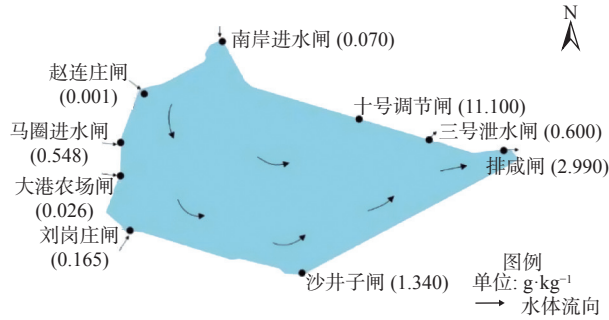


图 10 北大港水库沉积物 Cl^- 质量分数

Fig. 10 The chloride ion mass fraction in sediment from the Beidagang Reservoir

水库底部沉积物的盐分释放十分缓慢,水-沉积物界面之上水体含盐量具有明显的分层现象。盐分会从高盐度土壤水扩散到低盐度的水体中,当沉积物中的含盐量高于动态平衡的浓度时,沉积物中的盐分会释放到水体中造成水体盐分升高,相反则

水中的盐分会降低^[25]。高增文等^[26]利用室内水槽试验发现水和沉积物界面上 3 cm 处含盐量会突变,3 cm 以内含盐量较高,3 cm 以上含盐量比较均匀,说明土壤与水之间存在着扩散边界层。李海明等^[27]研究发现水库底泥与水库水体之间存在 10 cm 左右的扩散边界层,对盐分向上覆水体扩散有明显的阻 滞作用。胡鹏等^[21]发现较小的上覆水深不会显著抑制沉积物的盐分释放,较高的上覆水盐含量则会抑制沉积物释放盐分,水体扰动促进了沉积物盐分的释放。叶清华等^[28]模拟了沿海水库沉积物中盐分释放和对流扩散的过程,发现水库淡化平衡后的盐度主要取决于水库进出口流量和沉积物的盐度释放速度。

对沉积物和水库水体的相关性分析见表 2,在 $P < 0.01$ 水平上,水体中的 SO_4^{2-} 与沉积物中的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 和 Na^+ 呈显著的负相关,相关系数分别为 -0.795 、 -0.816 、 -0.803 和 -0.803 。水体的 Ca^{2+} 和沉积物的 K^+ 呈显著的负相关,相关系数为 -0.802 。在 $P < 0.05$ 水平上,水体中的 SO_4^{2-} 与沉积物中的 Ca^{2+} 呈显著的负相关,相关系数为 -0.677 。这说明沉积物与水库水体之间发生了阳离子交换作用,水库底泥的盐分释放影响了水库的咸化。

表 2 北大港水库的沉积物与水库水体之间的相关性

Tab. 2 Correlation between sediment and water bodies in the Beidagang Reservoir

指标	水 pH	水总硬度	水 TDS	水 Cl^-	水 SO_4^{2-}	水 HCO_3^-	水 Ca^{2+}	水 K^+	水 Mg^{2+}	水 Na^+
土 pH	0.074	0.349	0.400	0.377	0.361	0.192	0.282	0.017	0.358	0.357
土 Cl^-	0.170	-0.700^*	-0.634	-0.508	-0.798^{**}	-0.728^*	-0.712^*	0.254	-0.639	-0.482
土 SO_4^{2-}	0.213	-0.713^*	-0.632	-0.502	-0.816^{**}	-0.750^*	-0.729^*	0.289	-0.643	-0.473
土 HCO_3^-	0.264	0.171	0.264	0.247	0.255	0.058	0.120	0.184	0.222	0.272
土 Ca^{2+}	0.002	-0.623	-0.629	-0.545	-0.677^*	-0.570	-0.568	0.075	-0.610	-0.533
土 K^+	0.469	-0.725^*	-0.561	-0.426	-0.803^{**}	-0.742^*	-0.802^{**}	0.511	-0.586	-0.357
土 Mg^{2+}	0.095	-0.678^*	-0.632	-0.515	-0.768^*	-0.683^*	-0.674^*	0.207	-0.630	-0.492
土 Na^+	0.191	-0.701^*	-0.628	-0.499	-0.803^{**}	-0.743^*	-0.718^*	0.267	-0.636	-0.472

注: *表明在 0.05 水平(双侧)上极显著相关; **表明在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

4 结论

沿着水流方向自西向东, TDS 和 Cl^- 质量浓度呈现“水库上游闸 > 水库下游闸”的分布特征, 而 pH 值恰好相反。沿着水流方向水体咸化呈现逐渐减弱的趋势。

水体各指标在垂向分布上可分为两种类型: “混合型”水体, 多分布在水库水流上游西侧进水闸口(南岸进水闸、赵连庄闸、马圈进水闸、大港农场

闸和刘岗庄闸)、水库东南部的沙井子闸以及东北部的出水闸(十号调节闸和排咸闸); “分层型”水体, 多分布于三号泄水闸, “分层型”水体 TDS 和 Cl^- 质量浓度在垂向上均随着深度的增加而增加, 其中三号泄水闸的垂直分布特征最为明显。

沉积物 pH 值呈现“水库上游闸 > 水库下游闸”分布趋势, 而沉积物全盐量和 Cl^- 质量分数呈现“水库下游闸 > 水库上游闸”的分布趋势。水库上游沉积物全盐量和 Cl^- 质量分数低, 同时水库上游水体

的 TDS 与 Cl^- 质量浓度高;而水库下游沉积物全盐量和 Cl^- 质量分数高,同时水库下游水体的 TDS 与 Cl^- 质量浓度低,这表明沉积物盐分释放对水库咸化有影响。

因此,可以在水库上游对水体进行合理的控咸操作,例如安排进水闸的合理进水以及出水闸的合理出水,进一步降低水体咸化现象加剧。

参考文献:

- [1] 吴光红,李金中,李学菊.天津滨海地区城市供水调节水库水质咸化原因与改善途径[J].*水资源保护*,2010,26(1):29-31,35. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2010.01.008.
- [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(6):24-26. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2004.06.010.
- [3] 赵文玉,王启山,伍婷,等.天津滨海地区水库水质咸化问题及机理分析[J].*海河水利*,2006(3):33-35. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7328.2006.03.013.
- [4] 赵卫,梁昊,宫少军,等.天津浅层地下水海水入侵的水化学特征及氧同位素示踪研究[J].*首都师范大学学报(自然科学版)*,2019,40(6):66-69. DOI: 10.19789/j.1004-9398.2019.06.014.
- [5] 高增文,李宇浩,赵全升,等.海湾水库沉积物对水体咸化影响的时间尺度[J].*水科学进展*,2015,26(2):221-226. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.02.009.
- [6] 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*,2011,28(3):65-66,94.
- [7] 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(9):39-41,47,117. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2007.09.014.
- [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. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.01087.
- [9] 高增文.沐官岛水库蓄水初期水质演化过程研究[D].青岛:中国海洋大学,2005. DOI: 10.7666/d.y828712
- [10] 赵文玉,王启山,刘军,等.风对北大港水库水质咸化影响的理论分析与实验研究[J].*水资源与水利工程学报*,2005(3):16-18,24. DOI: 10.3969/j.issn.1672-643X.2005.03.004.
- [11] ROBERT P, LAMBERTUS L. Estimation of sediment-water exchange of solutes in Lake Veluwe, The Netherlands[J].*Water Research*,1999,33(1):279-285. DOI: 10.1016/S0043-1354(98)00202-4.
- [12] 朱慧芳.北大港水库水质安全研究[D].天津:天津大学,2009. DOI: 10.7666/d.y1676587
- [13] 杨卫东,程红,朱庆川.北大港水库蓄水水质的影响因素及水质改善措施[J].*现代农业科技*,2013(24):230-231. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5739.2013.24.148.
- [14] 王昊,王中良.天津北大港水库水质咸化的地球化学机理分析[J].*天津师范大学学报(自然科学版)*,2016,36(6):29-34. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1114.2016.06.007.
- [15] 李彦.新疆三屯河流域地下水的水化学特征及咸化趋势分析[J].*资源环境与工程*,2008,22(S2):36-40. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1211.2008.z2.010.
- [16] 赵建.海(咸)水入侵与浅层地下水水化学特征及变化研究[J].*地理科学*,1999(6):525-531. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0690.1999.06.009.
- [17] 陈宇轩,张飞岳,高广磊,等.科尔沁沙地樟子松人工林土壤粒径分布特征[J].*干旱区地理*,2020,43(4):1051-1058. DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2020.04.20.
- [18] 串志强,盛钰,赵成义,等.膜下滴灌条件下绿洲棉田土壤水分运动数值模拟[J].*干旱区地理*,2008(5):673-679.
- [19] 古莱姆拜尔·艾尔肯,虎胆·吐马尔白,马合木江·艾合买提.适用不同粒径含盐砂壤土水分扩散率的通用模式[J].*干旱地区农业研究*,2019,37(1):167-171. DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2019.01.23.
- [20] DANIEL C, OLIVIER M, JONATHAN I L, et al. An estimate of the chemical composition of Titan's lakes[J].*The Astrophysical Journal*,2009,707(2):L128. DOI: 10.1088/0004-637X/707/2/L128.
- [21] 胡鹏,刘春光,孙红文,等.北大港水库底泥盐分释放规律研究[J].*环境科学与技术*,2013,36(S1):69-73.
- [22] 冯小平,王义东,陈清,等.天津滨海湿地土壤盐分空间演变规律研究[J].*天津师范大学学报(自然科学版)*,2014,34(2):41-48. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1114.2014.02.011.
- [23] 周慧芳,谭红兵,张文杰.南通地区地下水循环与水化学时空变化规律研究[J].*人民长江*,2014,45(23):103-108. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2014.23.026.
- [24] 张岩,付昌昌,毛磊,等.江苏盐城地区地下水水化学特征及形成机理[J].*长江流域资源与环境*,2017,26(4):598-605. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj2017.04.13.
- [25] 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. DOI: 10.3969/j.issn.0254-5357.2012.05.017.
- [26] 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(2):170-175. DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2006.02.004.
- [27] 李海明,陈健健,李银,等.北大港水库水-土界面盐分释放规律[J].*南水北调与水利科技*,2014,12(3):47-50. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2014.03.010.
- [28] 叶清华,李煜,王文,等.底泥盐分释放影响下的滨

Water salinization characteristics and sediment salt release in Beidagang Reservoir

XI Lei^{1,2,3}, LI Haiming^{1,2,3}, LI Mengdi^{1,2,3}, XIAO Han⁴, WANG Haoran^{1,2,3}

(1. Binhai Groundwater Utilization and Protection Laboratory, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. School of Ocean and Environment, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 3. Key Laboratory of Marine Chemical Resources and Food Technology, Ministry of Education, Tianjin 300457, China; 4. State Key Laboratory of Groundwater Pollution Simulation and Control for Environmental Protection, Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Reservoirs salinization is a common environmental problem in coastal areas. After the salinization of the reservoir, salt will be transferred to the soil, seriously affecting agricultural production. The salinization of reservoir water also has an impact on industrial production. When the salinization of reservoir water cannot meet the industrial water demand, desalting equipment needs to be installed, which increases the cost of enterprises. Thus, it leads to the deterioration of the water quality of the deep fresh water, and even the destruction of the deep groundwater resources, seriously affecting people's daily drinking. Many experts and scholars have carried out relatively comprehensive research on the salinization of coastal reservoirs, but the research on the spatial variation law and salinization mechanism of reservoir salinization is still insufficient. Studying the problem of reservoir salinization can not only save resources and control costs, but also reduce economic losses caused by salinization, improve people's drinking water quality, deepen people's understanding of reservoir salinization, and provide a sufficient theoretical basis for the prevention and control of reservoir salinization.

Beidagang Reservoir in Tianjin Binhai area was selected as the research object, and the method of combining field investigation and data analysis was used to sample different locations of the reservoir in summer to analyze the pH of the water body, the content of dissolved total solids (TDS) and Cl^- to study the change law of water salinization in different locations to explore the mechanism of reservoir salinization.

The study found that along the flow direction from west to east, the concentration of TDS and Cl^- presents the distribution characteristics of "upstream gate of the reservoir>downstream gate of the reservoir", while the pH value is the opposite. Along the flow direction, the salinization of the water body shows a gradual weakening trend. The vertical distribution of water body indicators can be divided into two types: "mixed type" and "stratified type". The "mixed" water body is mainly distributed at the intake gate on the west side of the upstream of the reservoir (south bank intake gate, Zhaolianzhuang gate, Maquan intake gate, Dagang Farm gate and Liugangzhuang gate), the Shajingzi gate in the southeast of the reservoir and the outlet gate in the northeast (No. 10 regulating gate and salt drainage gate). The "stratified" water body is mostly distributed in the No. 3 sluice gate. The concentration of TDS and Cl^- in the "stratified" water body increases vertically with the increase of depth, and the vertical distribution characteristics of the No. 3 sluice gate are the most obvious. The pH value of sediment presents the distribution trend of "upstream gate of reservoir>downstream gate of reservoir", while the total salt content and Cl^- concentration of sediment presents the distribution trend of "downstream gate of reservoir>upstream gate of reservoir". The total salt content and Cl^- content of the sediment in upstream of the reservoir are low, and the TDS and Cl^- concentrations of the water in upstream of the reservoir are high. However, the total salt content and Cl^- content of the sediment in downstream of the reservoir are high, and the concentration of TDS and Cl^- in the water in downstream of the reservoir is low, which indicates that the release of sediment salt has an impact on the salinization of the reservoir.

Therefore, it is possible to carry out reasonable salt-control operations on the water body at upstream of the reservoir, such as arranging the reasonable water inflow of the inlet gate and the reasonable water outflow of the outlet gate, to further reduce the intensification of water salinization.

Key words: Beidagang Reservoir; salinization of water quality; water rock interaction; salt release from sediment; space distribution