

doi: 10.3724/SP.J.1201.2013.01087

北大港水库水质咸化规律与影响因素分析

李海明^{1,2}, 夏雪桐^{1,2}, 康文娟^{1,2}, 李 银^{1,2}, 陈健健^{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: 天津滨海平原水库普遍存在的水质咸化问题, 以北大港水库为研究对象, 采用野外调查和取样分析方法, 识别了北大港水库不同季节水质咸化垂直分布规律, 同时分析了水库水质咸化机理及其影响因素。研究表明: 从电导率、氯离子和总溶解性固体(TDS)等代表性咸化指标来看, 相对于引黄水, 水库水各站点均存在咸化现象, 并且出库口水质咸化程度明显高于进水口; 不同站点电导率、氯离子浓度和总溶解性固体(TDS)值分别为 867.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、0.41 g/L 和 1.46 g/L, 水体呈弱碱性; 北大港水库水质咸化程度有季节性变化, 为夏季略高于春季; 水库各站点氯离子浓度和 TDS 值垂向上均随深度的增加而降低, 但不明显; 而电导率则随着深度的增加而增加, 且变化明显。研究还发现, 水库水质咸化受土壤含盐量、温度和混合作用影响: 从各站点水平分布来看, 越靠近海岸线土壤含盐量越高, 水质咸化现象越严重; 温度的升高会影响底泥盐分的释放, 温度越高, 底泥中 Cl^- 越容易释放; 引黄水进入水库后, 水库水体垂向发生了混合作用, 导致氯离子和 TDS 垂向方向变化很小。

关键词: 北大港水库; 咸化; 季节性; 垂向分布

中图分类号: P342 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2013)01-0087-06

Analysis of Water Salinization and Its Impact Factors in Beidagang Reservoir

LI Hai ming^{1,2}, XIA Xue tong^{1,2}, KANG Wen juan^{1,2}, LI Yin^{1,2}, CHEN Jian jian^{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: The problem of water salinization existed widely in the coastal reservoirs of Tianjin. In this paper, the field investigation and sampling analysis method were conducted to determine the vertical distribution of salinization in the Beidagang reservoir in different seasons, and the mechanism of water salinization and its impact factors were analyzed. The results showed that (1) based on the investigation of the representative salinization indexes, such as electric conductivity, chloride ion, and total dissolved solid (TDS), water salinization is found at each site of the reservoir compared to the water diverted from the Yellow River, and the degree of water salinization is higher at the outlet of the reservoir than that at the inlet; (2) the average level of electric conductivity, chlorine ion, and TDS of the reservoir water at different sites was 867.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 0.41 g/L, and 1.46 g/L, respectively, and the reservoir water appears to be weak alkaline; (3) the degree of water salinization is higher in the summer than that in the spring in the Beidagang reservoir; (4) the contents of chloride ion and TDS decrease with the increasing of depth at each site of the reservoir, but the trend is not apparent; (5) the electric conductivity increases significantly with the increasing of depth; and (6) the salinization of reservoir water quality is affected by the soil salinity, temperature, and the mixing actions. According to the horizontal distribution of salinization at each site of the reservoir, the water salinization was more serious at the locations closer to the coastline where soil salinity was higher. The rising temperature can affect the release of salt from the sediment, and the chlorine ion of sediment was easier to be released when the temperature was high. When the water diverted from the Yellow River entered into the reservoir, the vertical mixing action occurred, resulting in the insignificant variations of chloride ion and TDS in the vertical direction.

Key words: Beidagang reservoir; salinization; seasonal variation; vertical distribution

滨海平原水库咸化已成为一个普遍现象, 天津滨海平原地区建设的蓄淡水库, 往往存在水质咸化现象^[1]。2003年—

收稿日期: 2012-12-23 修回日期: 2013-01-13 网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1128.006.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(40872156)

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

2004 年,引黄水在天津北大港水库蓄存一段时间后,就曾出现水质咸化现象^[2],滨海地区的其他水库如北塘水库、黄港水库、营城水库、官港水库、钱圈水库的水质也均存在咸化问题^[3]。刘克等^[4]研究表明北大港湿地植物群落退化,有向盐渍化过渡的趋势。多数学者对水库水质咸化机理进行了研究,张宇龙等^[5]研究了北大港水库底泥释放氯离子的规律。姜翠玲^[6]模拟分析底泥含盐量、蓄水水质及水位变动和扰动条件下北塘水库底泥氯化物释放规律。赵玉明^[7]建立了北大港水库水质咸化的水质模型,研究了水库水体水质与初始浓度、进出水流量、蒸发浓缩作用和底泥释放的关系。赵文玉等^[3,8]认为北大港水库水质咸化受到盐碱土、浅层地下水、气候气象条件、大气沉降、海水入侵等因素影响;水体温度变化也会影响底泥盐分的释放^[9]。天津滨海地区浅层地下水咸埋深浅,当水库蓄水水位低于地下水水位时,地下水将会通过土壤孔隙与上覆库内水体相连,加剧水库咸化^[10]。李军^[11]等认为蒸发-浓缩作用是控制天津滨海地区地表水化学组成的主要原因,咸/海水入侵以及由其导致的阳离子交换反应、碳酸钙的沉淀/溶解等对水质咸化也有重要的影响。陈卫^[12]等对北塘水库蓄水期水质变化规律进行研究,也认为水体氯化物浓度的增加主要是由于蒸发浓缩作用引起的。李子琛等^[13]研究结果表明北大港水库底质对重金属铬的吸附作用与底质固体颗粒粒径大小、阳离子交换量和含盐量等因素有关。张晨等^[14]采用数值模拟方法,应用 EFDC 三维水动力水质模型,以氯离子为模拟指标,探讨底泥氯离子释放对水质的影响,指出主辅库联合调度为较优的调控方案。李海明等^[5]研究认为,水库不同位置地下水与水库水体交换过程中,盐分的归宿不同:接近水库入口处的沉积物能将盐分截留下来,而出水口沉积物却将盐分释放转移到水体。

关于天津滨海地区水库水质咸化问题,不少学者进行了室内试验研究,但对于水库咸化规律、时空分布特征的研究涉及很少。本文通过野外调查、取样,识别了北大港水库不同季节水质咸化垂向分布特征,分析了水库咸化机理及其影响因素。研究成果为北大港水库水资源优化调度、供水安全的定量评价和工程设计提供科学依据和基础数据。

1 北大港水库概况^[16]

北大港水库是位于天津市东南部大港区的一座大型平原水库,位于海河流域、大清河、南运河、子牙河水系独流减河下游,距海岸线 6 km,初步建成于 1974 年,具有防汛和抗旱功能。自“引黄济津”工程实施以来,北大港水库多次作为“引黄济津”工程的调蓄水库,其地位已由一般防汛、抗旱等农用水库的地位上升到了水源型水库的地位。

北大港水库占地 164 km²,蓄水面积 150 km²,设计库容 5 亿 m³,库底平均高程 3.0 m(大沽高程),设计蓄水位 7.0 m。水库主要建筑物包括 5 围堤和 13 座蓄供水建筑物:水库围堤分为东南围堤、西南围堤、西围堤、北围堤和东围堤;主要蓄供水建筑物包括姚塘子扬水站、马圈进水闸、赵连庄闸、大港农场闸、刘岗庄闸、跃进闸、大苏庄农场虹吸管、用支三虹吸管、沙井子闸、大港油田虹吸、鱼种场虹吸管、排咸闸和十号口门调节闸。详见图 1。

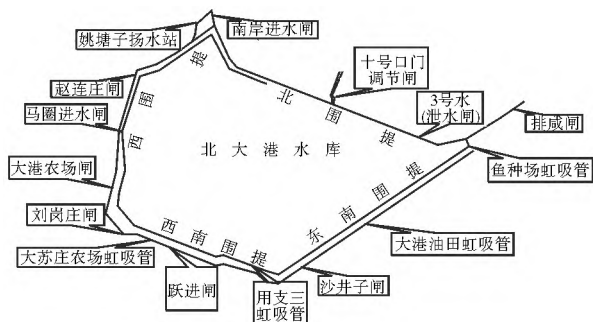


图 1 北大港水库工程布置图^[16]

Fig. 1 Layout of the engineering project of the Beidagang reservoir^[16]

2 取样点的布设与样品采集

为了更好地研究北大港水库水质咸化的时空变化特征,在北大港水库布设 5 个站点,其中 3 个入库口方向站点(马圈闸内、赵连庄闸、姚塘子扬水站),2 个出库口站点(3 号泄水闸、十号口门);同时为了对比,选取北大港水库附近独流减河 2 个地表水站点(独流减河和排咸闸外)和引黄水样一组;用定深取样器在每一个站点分层(水深 0.5 m)、中层(1~2 m)和底层(3~4 m)不同位置分别取样。

北大港水库 2011 年 11 月调入引黄水,本文选择调水后两个不同的季节 2012 年春季(4 月)和夏季(5 月)进行样品的采集和水质分析,此时北大港水库没有承担引黄调水任务。测试组分选择代表性咸化指标,如电导率、氯离子和总溶解性固体(TDS)以及 pH。各项指标的监测均依据相关的国家或行业标准和环境规范。布点方法与原则、样品采集、制备与保存均参照《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91-2002)。水样电导率采用电导率仪(DDS-12B 精密电导率仪)测定,氯离子和 TDS 分别采用硝酸盐滴定法和重量法测定。

3 结果与讨论

3.1 北大港水库水质咸化指标

3.1.1 pH

各站点 pH 较稳定,基本在 7.9~9.8 之间,平均 8.7,呈弱碱性。与地表水环境质量标准(GB 3838 2002)比较,各站点均未超标。北大港水库 pH 变化较大,在 7.9~9.8 之间,平均 8.67;引黄水 pH 基本稳定在 8.06~9.80 之间,平均 8.9。总体看,北大港水库进水方向站点 pH 最小,出水站点 pH 最高。水库外独流减河和排咸闸外 2 站点 pH 基本稳定在 8.5~8.9 之间,平均 8.7,但低于引黄水和水库出水站点。

3.1.2 电导率

各采样点中排咸闸外站点电导率最大为 12 170 μS/cm,北大港水库入库口方向赵连庄闸站点电导率最小为 500 μS/cm。北大港水库电导率基本稳定在 500~1 720 μS/cm 之间,平均 867.5 μS/cm;独流减河 2 站点电导率较大,在 9 630~10 461 μS/cm 之间,平均 10 045.75 μS/cm。引黄水电导率基本稳定在 630~770 μS/cm 之间,平均 691.5 μS/cm。

3.1.3 氯离子

各采样点中排咸闸外站点氯离子最大为 19.21 g/L,北大港水库入库口赵连庄闸站点氯离子最小为 0.12 g/L,平均

为 4.81 g/L。北大港水库氯离子基本稳定在 0.12~1.09 g/L 之间,平均 0.41 g/L;独流减河 2 站点氯离子含量较大,在 16.75~19.21 g/L 之间,平均 18.035 g/L。引黄水氯离子基本稳定在 0.21~0.26 g/L 之间,平均 0.22 g/L。与地表水环境质量标准(GB 3838 2002) 250 mg/L 比较,各站点均已超标。

3.1.4 总溶解性固体(TDS)

各采样点中排咸闸外站点 TDS 最大为 48.97 g/L,北大港水库入库口赵连庄闸站点 TDS 最小为 0.62 g/L;各站点 TDS 变化幅度较大,平均为 10.8 g/L。北大港水库 TDS 基

本稳定在 0.62~2.72 g/L 之间,平均 1.46 g/L;独流减河 2 站点 TDS 含量较大,在 31.59~49.44 g/L 之间,平均 38.83 g/L。引黄水 TDS 基本稳定在 0.86~1.01 g/L 之间,平均 0.94 g/L。

3.2 北大港水库水质咸化季节性变化特征

3.2.1 pH

从各站点的平均值看,pH 季节性变化总体趋势较显著。北大港水库各站点和独流减河 2 站点 pH 均表现为夏季高于春季(表 1)。赵连庄闸以及独流减河站点 pH 季节性变化相对很小,其余各站点变化较为明显。

表 1 不同季节各监测点水质特征结果统计

Table 1 Statistics of the sanitization indexes at each site of the reservoir in different seasons

取样地点	统计参数	pH 值		电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)		氯离子/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)		TDS/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	
		春季	夏季	春季	夏季	春季	夏季	春季	夏季
引黄水	最大值	8.42	9.80	770	680	0.26	0.26	0.97	1.01
	最小值	8.06	9.72	700	630	0.21	0.21	0.86	0.95
	均值	8.18	9.76	730	653	0.22	0.22	0.91	0.97
姚塘子 扬水站	最大值	8.14	8.83	950	970	0.36	0.39	1.09	1.22
	最小值	8.08	8.81	930	960	0.36	0.38	0.99	1.19
	均值	8.11	8.82	940	963	0.36	0.39	1.04	1.21
入库口 方向	最大值	8.01	8.17	530	620	0.13	0.16	0.74	0.83
	赵连庄闸 最小值	7.90	8.01	520	500	0.12	0.16	0.62	0.83
	均值	7.97	8.09	527	560	0.12	0.16	0.68	0.83
马圈闸内	最大值	8.77	9.11	730	800	0.23	0.36	1.06	2.45
	最小值	8.29	8.82	720	770	0.22	0.35	0.64	1.15
	均值	8.52	8.96	727	790	0.22	0.35	0.84	1.63
3 号泄 水闸	最大值	8.53	8.80	950	740	0.38	0.42	1.07	2.72
	最小值	8.42	8.73	920	640	0.37	0.41	0.97	2.61
	均值	8.47	8.77	933	700	0.37	0.41	1.02	2.66
出库口 方向	最大值	8.91	9.54	1720	1220	0.97	1.09	2.12	1.40
	十号口门 最小值	8.84	9.53	1680	1170	0.95	1.06	2.05	1.38
	均值	8.88	9.54	1697	1190	0.96	1.07	2.08	1.39
独流减河	最大值	8.77	8.80	10720	8880	17.05	17.95	33.74	49.44
	独流减河 最小值	8.72	8.71	10400	8460	16.75	17.69	31.59	35.63
	均值	8.74	8.76	10567	8693	16.91	17.82	33.00	40.67
排咸闸外	最大值	8.59	8.86	12170	9400	19.21	18.61	48.97	39.38
	最小值	8.47	8.82	11550	8830	18.67	18.11	37.32	34.93
	均值	8.55	8.84	11760	9163	18.99	18.40	44.64	36.99

3.2.2 电导率

从电导率平均值看,各站点季节性变化很大(表 1),引黄水春季电导率略高于夏季,而北大港水库出水口站点(十号口门、3 号泄水闸)电导率春季明显高于夏季;独流减河 2 站点也表现为春季高于夏季的特征。北大港水库进水方向 3 站点(马圈闸内、赵连庄闸、姚塘扬水站)电导率变化规律与其余站点相反,表现为春季低于夏季。

3.2.3 氯离子

北大港水库氯离子春季低于夏季;独流减河站点氯离子也表现为春季低于夏季,而排咸闸外站点却表现为春季高于夏季的特征。相比而言,独流减河的 2 站点氯离子季节性变化较大,北大港水库各站点氯离子季节性变化很小(表 1),表现出夏季略高于春季的趋势,而引黄水春季和夏季氯离子变

化很小。

3.2.4 TDS

北大港水库 TDS 总体夏季略高于春季,其中十号口门站点 TDS 变化规律与水库其余站点相反,表现为夏季低于春季;独流减河 2 站点 TDS 季节性变化很大,且规律相反,独流减河站点夏季高于春季,排咸闸外站点 TDS 却表现为春季高于夏季的特征;相比独流减河 2 站点来讲,北大港水库各站点 TDS 季节性变化不明显(表 1)。引黄水 TDS 季节性变化很小,表现为夏季略高于春季。总体看,每一个站点的 TDS 平均值季节性变化较明显。

3.3 北大港水库水质咸化垂向变化规律

3.3.1 pH

总体而言,多数站点 pH 随着深度的增加而降低,但各

层 pH 差别很小(图 2)。图 2 中数据为春季和夏季数据的平均值,以下同。引黄水 pH 垂向变化不明显,基本无变化,中层较高,表层次之,底层略低。马圈闸内、赵连庄闸、姚塘子扬水站 3 站点为水库进水向站点,马圈闸内 pH 变化较为明显,表层 pH 明显大于中层和底层,姚塘子扬水站表层至底层 pH 也呈减小趋势,而赵连庄闸规律相反, pH 变化不大,中层略大,表层最小。3 号泄水闸、十号口门、独流减河与排咸闸外 pH 垂向变化总体趋势为随深度的增加而降低,但变化不明显。

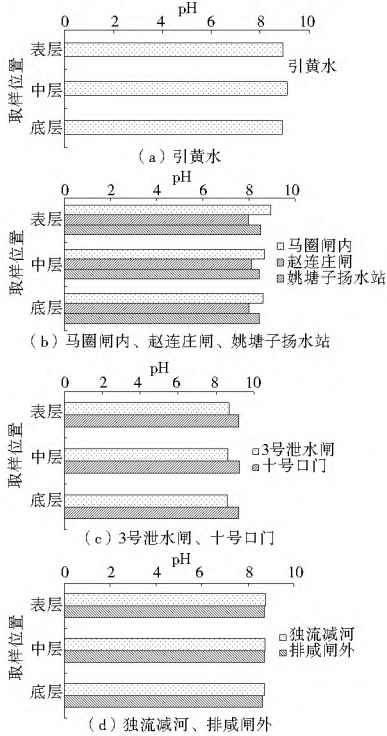


图 2 各站点 pH 垂直分布特征

Fig. 2 The vertical distributions of pH of the reservoir water at different sites

3.3.2 电导率

各站点电导率垂向变化明显,大致为电导率随着深度的增加而增加,引黄水站点规律相反(图 3)。北大港水库进水方向 3 站点(马圈闸内、姚塘子扬水站和赵连庄闸)电导率垂向变化明显,马圈闸内站点表层电导率明显低于中层和底层,随着深度的增加而增加;姚塘子扬水站站点也符合该规律,但底层电导率略高于表层和中层;而赵连庄闸的电导率中层最高,表层和底层明显低于中层。水库出水口的两站点(3 号泄水闸和十号口门)电导率垂向变化较明显,均表现出随深度的增加而增加的趋势。十号口门电导率表层略高于中层。北大港水库外的独流减河 2 站点电导率垂向变化明显,随着深度的增加电导率呈升高趋势,底层电导率最大。引黄水电导率各层间差异较为明显,整体表现为随着深度的增加而减小,表层最大,中层最小。

3.3.3 氯离子

各站点氯离子垂向变化不明显,表层、中层、底层浓度差异性很小,总体上表层氯离子含量略高(图 4)。北大港水库进水口 3 站点垂向上氯离子浓度均无明显变化;水库出水口

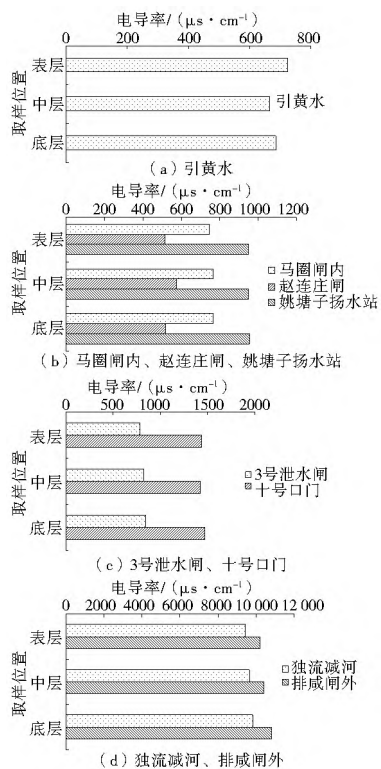


图 3 各站点电导率垂直分布特征

Fig. 3 The vertical distributions of electrical conductivity of the reservoir water at different sites

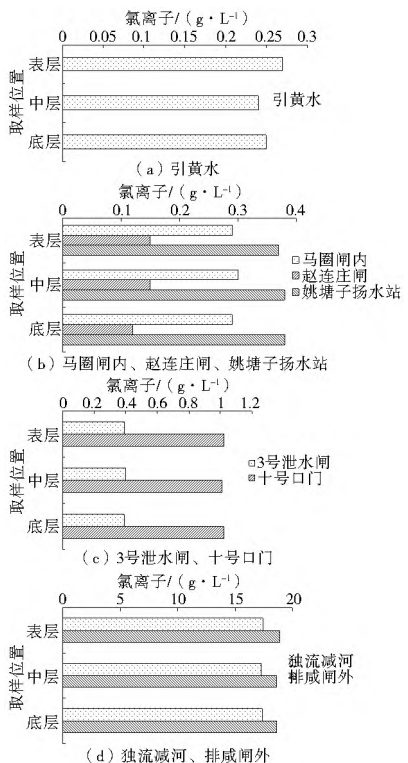


图 4 各站点氯离子垂直分布特征

Fig. 4 The vertical distributions of chloride ion of the reservoir water at different sites

的 2 站点氯离子含量也不随着深度的变化而变化,且站点之间的也无明显差异;独流减河与排咸闸外 2 站点氯离子含量相对于其他站点很高,表层的氯离子含量大于中层和底层,总体趋势为随着深度的增加,氯离子含量减少。引黄水站点

表层氯离子浓度略高,中层、底层无明显变化。

3.3.4 TDS

在北大港水库的进水方向,马圈闸内站点随深度的增加TDS明显降低,赵连庄闸也符合该规律,但不明显;而姚塘子扬水站TDS变化规律相反(图5),表层略小,底层略大。北大港水库出水方向2站点变化规律不明显,3号泄水闸站点TDS大体上随深度增加而增加,但不显著,十号口门的TDS随深度基本无变化。独流减河2站点的TDS变化规律与上述情况相反,TDS总体随深度的增加呈增加趋势,但表层和中层相差很小,底层最大;而排咸闸外TDS随深度的增加呈降低趋势。引黄水站点TDS呈现随深度的增加呈降低趋势,但不明显,表层略大。

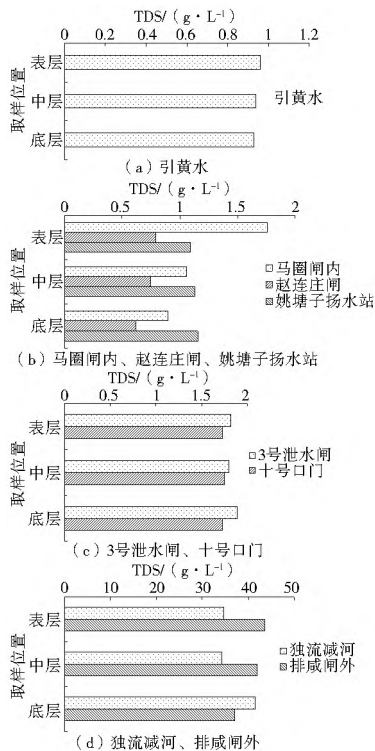


图5 各站点TDS垂直分布特征

Fig. 5 The vertical distributions of TDS of the reservoir water at different sites

3.4 水库水质咸化机理与影响因素探讨

3.4.1 土壤含盐量对水库咸化的影响

前面统计结果可以看出,从电导率、氯离子和总溶解性固体(TDS)等代表性咸化指标来看,相对于引黄水,水库水各站点均存在咸化的现象,并且出库口各站点水质咸化现象明显高于进水口。这说明引黄水调入北大港水库后,与原水库水混合一段时间后,混合以后的水库水发生了咸化现象。研究区由于地下水位浅、含盐量高,各类土壤均有不同程度的咸化。从各站点水平分布来看,越靠近海岸线水质咸化现象越严重。由于独流减河2站点据海岸线较近,土壤含盐量高,因此其电导率、氯离子和总溶解性固体(TDS)均高于水库水和引黄水。

3.4.2 温度对水库咸化的影响

从各站点电导率、氯离子和总溶解性固体(TDS)统计参数(最大值、最小值和平均值)季节性变化来看,引黄水和水

库各站点变化很小,基本表现为夏季略高于春季;而独流减河2站点规律基本相反。这说明温度的升高会影响底泥盐分的释放,温度越高,底泥中 Cl^- 越容易释放⁹⁾。在夏季温度高的条件下,引黄水进入库区,混合过程的扰动使底泥盐分更容易释放。

3.4.3 混合作用对水库咸化垂直分布的影响

从水库各咸化指标垂直变化规律来看,引黄水电导率、氯离子和TDS基本表现为随着深度的增加而减小,电导率各层间差异较为明显。相对于引黄水,北大港水库进水方向3站点和独流减河2站点电导率垂向变化明显,随着深度的增加而增加;氯离子含量随着深度的变化无明显差异;各站点基本上随深度的增加TDS降低。引黄水进入水库后,垂向发生了混合作用,氯离子垂向方向变化很小;又由于电导率和TDS是水体中各种阴阳离子的综合体现,由于不同的离子与底泥固体表面的吸附与解吸附作用都与温度变化、混合作用有关,同时不同离子之间要发生阳离子交换反应、碳酸钙的沉淀/溶解等作用,最终结果导致水库水体电导率和TDS升高,表现出与氯离子不一样的垂直分布规律。

4 结论

(1) 不同季节北大港水库水体呈弱碱性,电导率、氯离子和TDS分别为 $3\ 162.06\ \mu S/cm$ 、 $4.81\ g/L$ 和 $10.8\ g/L$;引黄水调入北大港水库后,与原水库水混合一段时间后,相对于引黄水,混合以后的水库水发生了咸化现象。

(2) 北大港水库水质咸化季节性变化特征,pH、氯离子和TDS基本表现出夏季高于春季的趋势,电导率变化规律正好相反。温度的升高会影响底泥盐分的释放,温度越高,底泥中 Cl^- 越容易释放。

(3) 北大港水库各站点pH、氯离子和TDS垂向变化特征整体表现出随深度的增加而降低,但不明显;电导率随着深度的增加而增加,垂向变化明显,也有个别站点表现为相反规律。在夏季温度高的条件下,引黄水进入库区,混合过程的扰动使底泥盐分更容易释放;垂向发生了混合作用,氯离子垂向方向变化很小。

参考文献(References):

- [1] 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 Science, 2007, 19(4): 428-433. (in Chinese))
- [2] 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))
- [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,2006,6(3):33-35.(ZHAO Wenyu, WANG Qishan, WU Ting, et al. Reservoir Water Salinization and Mechanism Analysis in Tianjin Binhai Area [J]. Haihe River Water Conservancy, 2006, 6(3): 33-35. (in Chinese))

- [4] 刘克, 赵文吉, 杜强, 等. 北大港湿地动态变化特征研究[J]. 资源科学, 2010, 32(12): 2356-2363. (LIU Ke, ZHAO Wenji, DU Qiang, et al. Characteristics of the Dynamic Changes of the Beidagang Wetland in Tianjin, China[J]. Resources Science, 2010, 32(12): 2356-2363. (in Chinese))
- [5] 张宇龙, 王启山, 贺兰晔, 等. 北大港水库调蓄“引江水”水质变化[J]. 城市环境与城市生态, 2005, 18(2): 24-26. (ZHANG Yulong, WANG Qishan, HE Lanwan, et al. Water Quality of South to North Transfer Water in Beidagang Reservoir[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2005, 18(2): 24-26. (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): 39-42. (JIANG Cuiling, PEI Haifeng. Effect of Salt Release from Sediment on Water Quality of Beitang Reservoir[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 30(9): 39-42. (in Chinese))
- [7] 赵玉明, 冯平. 北大港水库水质管理运行问题的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004: 55. (ZHAO Yuming, FENG Ping. Research on the Problem of Water Quality Management of Beidagang Reservoir[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004: 55. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 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))
- [10] 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. (WU Guanghong, LI Jinzhong, LI Xueju. The Salinization Reason and Control Measures of Urban Water Supply Regulating Reservoir in Tianjin Binhai Area[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1): 29-31. (in Chinese))
- [11] 李军, 刘丛强, 岳甫均, 等. 天津地区地表水咸化的水化学证据[J]. 环境化学, 2010, 29(2): 285-289. (LI Jun, LIU Congqiang, YUE Fuyun, et al. Hydrochemical Evidence of Surface Water Salinization Process in the Tianjin Coastal Plain, China[J]. Environmental Chemistry, 2010, 29(2): 285-289. (in Chinese))
- [12] 陈卫, 张国立, 刘玉香. 天津北塘水库水体咸化研究[A]. 中国水利学会学术年会论文集[C]. 2007: 45-49. (CHEN Wei, ZHANG Guoli, LIU Yuxiang. Tianjin Beitang Reservoir Salinization Research[A]. Chinese Hydraulic Engineering Society Proceedings of the Conference[C]. 2007: 45-49. (in Chinese))
- [13] 李子琛, 李海明, 赵雪, 等. 滨海平原水库底质对铬的吸附作用[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 82-86. (LI Zichen, LI Haiming, ZHAO Xue, et al. Adsorption of Chromium at the Bottom Sediment of Coastal Plain Reservoir[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(3): 82-86. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 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 Haiming, 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))
- [16] 朱慧芳, 高学平. 北大港水库水质安全研究[D]. 天津: 天津大学, 2009: 68. (ZHU Hui Fang, GAO Xueping. Research on Water Quality Safety of Beidagang Reservoir[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009: 68. (in Chinese))