

# 东平湖氯化物质量浓度演变机理分析及预防对策

吴宸晖,姜翠玲

(河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098)

**摘要:**以1960—2017年的历史监测数据为基础,分析了东平湖氯化物质量浓度演变过程,探讨了氯化物质量浓度变化机理。结果表明:东平湖氯化物质量浓度自1960年以来总体呈上升趋势,尤其是南水北调东线通水后于2015年11月上升幅度较大,在年内会因汛期强降雨而显著下降;南水北调东线通水前,东平湖氯化物质量浓度主要受入湖河流、盐碱土和浅层地下水共同影响,通水后主要受盐碱土和浅层地下水共同影响。因此,通过改建或扩建排咸沟和截渗沟、增设防渗固坡工程、控制东平湖蓄水位等措施,其作为南水北调东线工程的重要枢纽和山东省西水东送的重要水源地是安全的。

**关键词:**东平湖;氯化物;演变趋势;机理分析;盐碱土;浅层地下水;预防对策

**中图分类号:**X832 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)02-0015-08

**Analysis of evolution mechanism of chloride mass concentration in Dongping Lake and preventive measures//**WU Chenhui, JIANG Cuiling(*College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** Based on the historical monitoring data from 1960 to 2017, the evolution of chloride concentration in the Dongping Lake was analyzed, and the mechanism of chloride concentration change was discussed. The results show that chloride concentration in the Dongping Lake has been on the rise since 1960, especially since November 2015 after the implementation of the east route of the South-to-North Water Diversion Project. The chloride concentration decreases significantly due to heavy rainfall during the flood season. Before the implementation of the east route of the South-to-North Water Diversion Project, the chloride concentration was mainly affected by the inflow river, saline-alkali soil and shallow groundwater, and after the water diversion, it was mainly affected by saline-alkali soil and shallow groundwater. Therefore, by rebuilding or expanding the salt drainage ditch and cut-off ditch, adding anti-seepage and slope stabilization project, and controlling the pool level of the Dongping Lake, etc., it is safe as an important hub for the east route of the South-to-North Water Transfer Project and an important water source for the West-to-East Water Transfer Project in Shandong Province.

**Key words:** Dongping Lake; chloride; evolution trend; mechanism analysis; saline-alkali soil; shallow groundwater; preventive measures

南水北调东线工程是跨省界区域的国家战略性工程,旨在将长江丰富的水资源,沿京杭大运河及其平行河道,经泵站逐级提水北送,缓解黄淮海平原东部和胶东地区的供水压力。较多学者<sup>[1-7]</sup>研究了天津滨海地区北大港水库规划作为南水北调东线调蓄水库的水质咸化机理,尚未重视和研究沿线内陆湖泊氯化物质量浓度演变趋势和变化机理,东平湖作为南水北调东线工程的重要枢纽和山东省西水东送的重要水源地,一旦氯化物质量浓度接近或超过集中式生活饮用水地表水源地标准限值 250 mg/L<sup>[8]</sup>,

将会影响引水水质,制约工程运行和发挥效益。

影响水体水质咸化的因素较多,在平原地区的丘陵地形中,盐碱土的形成和渗漏主要发生在洼地<sup>[9]</sup>,且在封闭盆地的区域范围内易发生咸化现象,盐碱土向水体中的传质作用是水库蓄存期水质咸化的原因之一<sup>[5]</sup>,风的扰动与蒸发浓缩作用会加速水体咸化。而对水资源的开发利用缺乏有效管控会造成地下水水位变化和含盐量上升<sup>[10]</sup>,浅层地下水波动对土壤盐渍化有着至关重要的影响<sup>[11]</sup>,潜水位埋深变小会加剧浅层地下水的蒸发浓缩和积盐过

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0406101)

作者简介:吴宸晖(1995—),男,硕士研究生,主要从事生态水文与水环境保护研究。E-mail: chwu@hhu.edu.cn

通信作者:姜翠玲(1966—),女,教授,博士,主要从事生态环境保护与水污染控制研究。E-mail: cljianghu@163.com

程<sup>[12]</sup>,尤其是在华北平原地区<sup>[13]</sup>,地下水浅埋条件下蒸发积盐强烈。另外,湖泊盐碱化也受气候的影响<sup>[14]</sup>,在湿润期盐度下降,干旱期盐度升高,且随地表水位下降而增加。

氯离子的环境化学行为比较简单,在物理迁移过程中不会发生转化。本文深入分析东平湖氯化物质量浓度的演变趋势,探讨引发盐分质量浓度变化的原因,提出预防东平湖水质咸化的对策,为供水安全保障以及南水北调东线有关部门的科学决策提供参考。

## 1 南水北调东线工程及东平湖概况

### 1.1 南水北调东线工程概况

南水北调东线一期工程于2013年11月15日正式通水运行,从江苏扬州江都水利枢纽抽引长江干流水,利用京杭大运河及其平行河道输水,经洪泽湖、骆马湖、南四湖等调蓄湖泊,逐级提水至东平湖后,向黄河以北和胶东地区供水。八里湾泵站是东线工程的最后一级泵站,也是东线至高点,引江水通过八里湾泵站抽调入东平湖,具体抽调水量见表1。

### 1.2 东平湖概况

东平湖位于山东省泰安市东平县西部大汶河流域内(图1),属暖温带半湿润季风气候区,年均气温13.3℃,年均降水量640.5mm,年均蒸发量1650.0mm。东平湖年均水深2.5m,常年水面面积124.3km<sup>2</sup>,湖区总面积627km<sup>2</sup>,由老湖(一级湖)和新湖(二级

湖)两部分组成,其中老湖面积209km<sup>2</sup>,相应蓄水能力11.94亿m<sup>3</sup>,新湖面积418km<sup>2</sup>,相应蓄水能力27.85亿m<sup>3</sup>,老湖区东南部入湖口大清河上设立戴村坝水文站,出湖口处设立陈山口水文站。稻屯洼位于东平湖东部、大清河下游北部,是东平县境北部山地水流的汇集区,也是调节大清河水位的重要滞洪区,滞洪区总面积66.1km<sup>2</sup>,水位44.79m时可蓄水3亿m<sup>3</sup>,是大清河和东平湖防洪体系的重要组成部分。

## 2 东平湖氯化物质量浓度演变趋势

### 2.1 年际变化

东平湖1960—1967年氯化物数据来源于水文年鉴中东平湖土山湖心站水化学分析成果表,1975—1982年氯化物数据来源于水文年鉴中东平湖陈山口站水化学分析成果表,2006年后氯化物数据来源于文献[15-17]及东平湖的监测数据(以老湖镇为主),由于东平湖水较浅,在风的作用下水体绝大部分处于完全混合状态<sup>[18]</sup>,且从水样测定结果显示东平湖不同采样点氯化物数据差异较小<sup>[19]</sup>,故长序列数据具有可靠性和可比性。从图2年际变化趋势来看,东平湖氯化物质量浓度自1960年以来总体呈上升趋势,在20世纪下半叶氯化物质量浓度波动变化大,1960—1967年变化范围在2.5~106.4mg/L之间,均值为28.0mg/L;1975—1982年变化范围在9.9~62.1mg/L之间,均值为23.4mg/L;在21世纪初氯化物质量浓度上升明显,2006至2015年10月

表1 八里湾泵站流量统计

m<sup>3</sup>/s

年份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2013	0	0	0	0	0.623	8.31	4.00	0	0	13.0	23.8	7.90
2014	0	0	0	0	14.1	0	0	0	0	0	0	0
2015	0	0	0	12.3	48.8	24.1	0	0	0	0	0	0
2016	37.0	0	22.5	21.6	23.2	41.6	0	0	0	0	0	36.9
2017	17.3	18.6	50.0	52.3	89.2	45.1	17.9	0.044	1.95	40.5	50.4	47.2

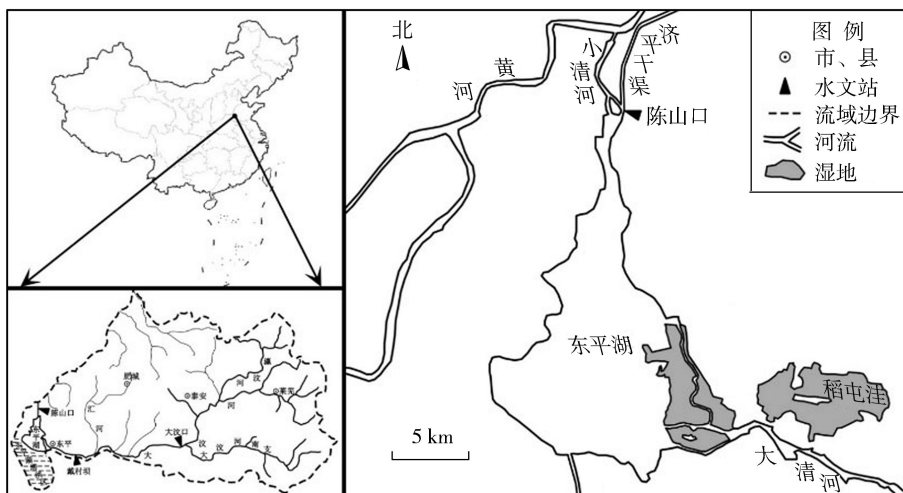


图1 东平湖地理位置示意图

变化范围在 50.8 ~ 130.7 mg/L 之间,均值为 88.4 mg/L;2015 年 11 月至 2017 年氯化物质量浓度范围在 141 ~ 296 mg/L 之间,均值为 199.0 mg/L。根据氯化物质量浓度变化区间,大体可分为 A、B、C 3 个阶段:A 阶段氯化物质量浓度为 0 ~ 50 mg/L 的稳定阶段(1960—1967 年,1975—1982 年),该阶段氯化物质量浓度大多时间不超过 50 mg/L,主要在 0 ~ 50 mg/L 范围内波动变化;B 阶段氯化物质量浓度明显上升(2006 年至 2015 年 10 月),大多时间不超过 100 mg/L,主要在 50 ~ 100 mg/L 范围内波动变化;C 阶段氯化物质量浓度迅速升高(2015 年 11 月至 2017 年),大多时间不超过 250 mg/L,主要在 150 ~ 250 mg/L 范围内波动变化,但相较 2015 年 10 月,仅一个月时间上升幅度达 75 mg/L,且在 2016 年 6 月超过标准限值,是南水北调东线工程潜在的环境污染因子。

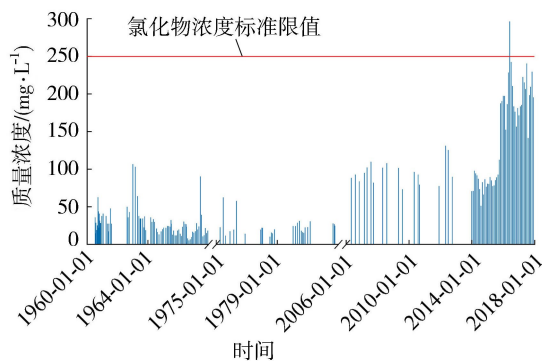


图2 东平湖氯化物质量浓度变化趋势

## 2.2 年内变化

从 3 个阶段中各取全年资料较为完整的年份(1965 年、1980 年、2017 年),分析年内东平湖氯化物质量浓度变化过程及影响因素,如图 3 所示,氯化物质量浓度在年初至汛期前均波动上升,1965 年从 21.7 mg/L 上升至 31.9 mg/L,1980 年从 23.8 mg/L 上升至 30.8 mg/L,2017 年从 171 mg/L 上升至 240 mg/L;汛期均快速下降,1965 年从 31.9 mg/L 下降至 12.4 mg/L,1980 年从 30.8 mg/L 下降至 14.8 mg/L,2017 年从 240 mg/L 下降至 141 mg/L;汛期后均有所回升,1965 年从 12.4 mg/L 回升至 17.9 mg/L,1980 年从 14.8 mg/L 回升至 22.6 mg/L,2017 年从 141 mg/L 回升至 229 mg/L。在不受工业污染情况下,东平湖相邻的济宁市<sup>[20]</sup>大气降水中多年平均氯化物质量浓度约为 2 mg/L,即使部分地区常年受燃煤电厂污染,其氯化物质量浓度也不超过 10 mg/L,故汛期强降雨会稀释水体中的氯化物质量浓度。

## 3 东平湖氯化物质量浓度变化机理

### 3.1 入湖河流的影响

南水北调东线通水前,东平湖的入湖河流为大

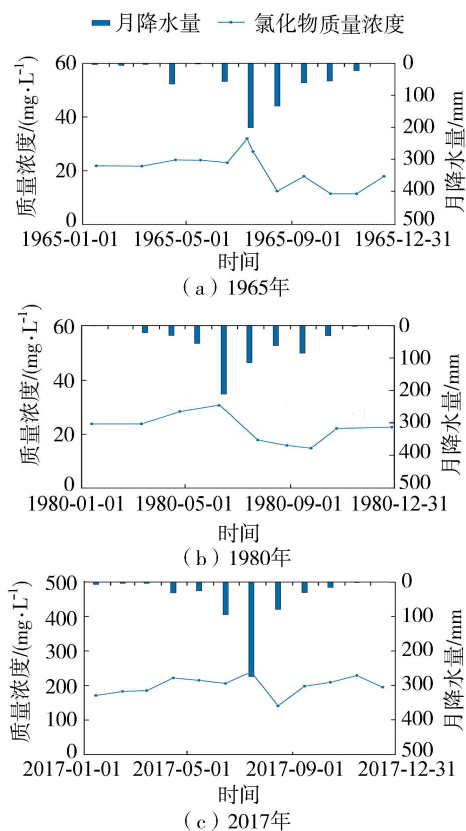


图3 东平湖氯化物质量浓度年内变化情况

清河,由表 2 可知,大清河入流量对东平湖蓄水量的贡献占比较高,在 2011 年为 92.4%,在 2012 年为 91.5%。分析入湖河流的水质,大清河入东平湖王台大桥处氯化物质量浓度在 2011 年为 101 mg/L<sup>[19]</sup>,并由水文年鉴可知,入湖口处戴村坝站氯化物质量浓度在 1984 年前绝大多数时间不超过 50 mg/L,均与东平湖氯化物质量浓度数值相近,故在南水北调通水前大清河入流补给是影响东平湖氯化物质量浓度的原因之一。

表 2 2011—2017 年入东平湖水量统计 亿 m<sup>3</sup>

年份	降水量	入流量	
		柳长河	大清河
2011	1.35	0	16.34
2012	0.87	0	9.36
2013	1.19	1.52	8.42
2014	0.99	0.38	0.045
2015	1.12	2.25	0.080
2016	1.23	4.84	6.13
2017	1.37	11.35	1.42

南水北调东线通水后,东平湖的入湖河流为大清河与柳长河,大清河入东平湖王台大桥处氯化物质量浓度在 2015 年为 80 mg/L<sup>[21]</sup>,远低于东平湖的 140 mg/L,故大清河入流补给不是通水后东平湖氯化物质量浓度持续上升的原因;柳长河由南四湖补给,其水质情况可参考南四湖(图 4),2014—2017 年南四湖下级湖至上级湖氯化物质量浓度均略有上

升,而南四湖上级湖至东平湖氯化物质量浓度在2014—2015年下降,在2016—2017年上升,结合引水量情况可知,受更高氯化物质量浓度的南四湖水质影响,2015年引水量大幅增加后东平湖氯化物质量浓度有所上升,但2016—2017年东平湖氯化物质量浓度高于南四湖,这说明引水水源对东平湖氯化物质量浓度演变有一定的影响,但不是导致通水后东平湖氯化物质量浓度持续上升接近标准限值的根本原因。

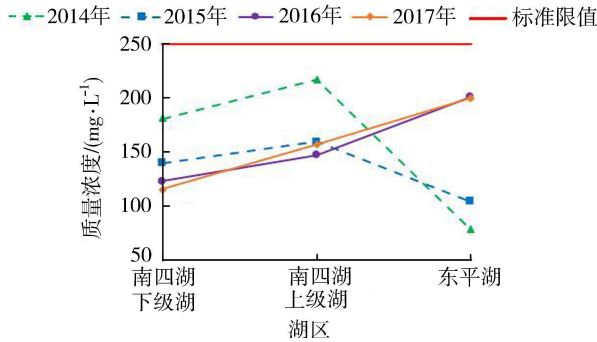


图4 2014—2017年南四湖至东平湖段年均氯化物质量浓度变化情况

此外,入湖河流除其水质好坏对东平湖产生影响,另一方面也表现在对东平湖水位变化的影响。将3个阶段的氯化物质量浓度资料和地表水位进行分析(图5),总体来看,在地表水位相同的情况下,东平湖氯化物质量浓度从大到小排序为C阶段、B阶段、A阶段。分阶段来看,A阶段中氯化物质量浓度随地表水位的变化不明显,大多数情况下低于50 mg/L;B阶段中氯化物质量浓度随地表水位的变化也较为稳定,在50~130 mg/L之间波动;C阶段中氯化物质量浓度较高值大多发生在地表水位较低处,以地表水位41.14 m(对应氯化物质量浓度198 mg/L)为分界线。综上所述,东平湖氯化物质量浓度与地表水位有一定的关系,但从A阶段到C阶段的过程中,存在其

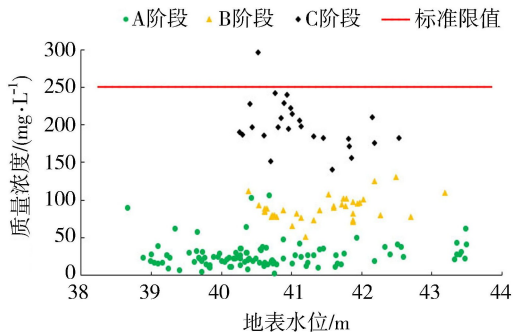


图5 东平湖氯化物质量浓度和地表水位的相关性

他影响因素导致东平湖氯化物质量浓度持续上升。

### 3.2 盐碱土的影响

氯化物在土壤中呈可溶状态,降水淋溶会降低土壤中的氯化物质量浓度,汛期当地表水淹没土壤时会由质量浓度梯度造成上覆水体中氯化物质量浓度上升,并经流域汇流进入湖泊。汛期过后水头降低使得土壤裸露,受东平湖地区强烈的蒸发浓缩作用影响,地下水中的盐分通过毛细管作用向地表积聚,造成土壤返盐强烈。如此循环往复,形成汛期脱盐、旱季积盐的现象,土壤盐渍化程度加深,盐碱土中的氯化物进入湖泊造成水体中氯化物质量浓度持续上升。在平原地区的丘陵地形中,盐碱土的形成和渗漏主要发生在洼地<sup>[9]</sup>,且在封闭盆地的区域范围内易发生咸化现象,而东平县内洼地主要分布在东平湖区,该区属黄河冲积平原,除腊山、昆山、马山等少数孤山残丘外,其余均为地面高程40 m以下的湖洼地,存在潜在的咸化条件。

南水北调东线通水前,戴村坝站自1977年6月1日起多年出现干河的现象,从历史资料中选取河道完全干涸的典型时间段,见表3和图6,分别为1978年4月19日至7月1日和1982年4月1日至8月10日,后于1978年7月2日和1982年8月11日河道恢复来水后氯化物质量浓度均呈现明显上升趋势,而1978年7月由于降水量大,氯化物质量浓度之后有所下降,8月降水量变小后又开始上升,说明河道一旦干涸,强烈的蒸发作用会造成土壤返盐

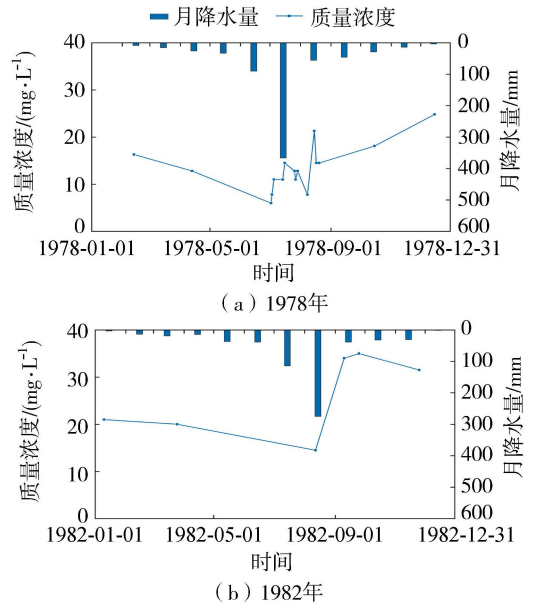


图6 1978年、1982年戴村坝站氯化物质量浓度变化情况

表3 1978年、1982年戴村坝站逐月平均水位

年份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1978	42.99	42.94	42.81	部分干河	干河	干河	部分干河	43.6	43.3	42.98	42.9	42.96
1982	42.59	42.59	42.51	干河	干河	干河	干河	部分干河	42.85	42.74	42.71	42.71

强烈,一旦河道恢复来水淹没土壤后,会溶解大量积聚的盐分,水体氯化物质量浓度迅速上升,若降雨强度持续较大,则仍会由于降雨稀释作用造成水体氯化物质量浓度下降。东平湖库周土壤属于轻-中盐化土<sup>[22]</sup>,土层中 Cl<sup>-</sup> 垂直分布较为明显,含量范围在 0.008% ~ 0.20% 之间,其中表层土壤中含量较大,多数样地表层土壤(0 ~ 5 cm)均呈现距湖越近土壤盐分越低的现象,这说明东平湖区土壤返盐强烈,且湖区周边表层土壤中的盐分由于淋溶作用会进入水体。

近些年东平湖区降水量较小(图 7),南水北调东线通水后,戴村坝站地表水位明显下降,2014—2016 年遭遇持续的旱情,在强烈的蒸发浓缩作用下必定会造成土壤的返盐。降水是径流形成的主要水源,2014 年东平湖氯化物质量浓度较通水前相差不大(图 2),是因为降水量较低,地表水位还在持续下降,尚未溶解因水头降低而在土壤表层积聚的盐分,但随着降水量增多,2016 年起戴村坝站地表水位开始上升,干旱时期积聚的盐分会通过淋溶作用和地表径流进入水体,造成水体中氯化物质量浓度上升,使得 2016 年东平湖氯化物质量浓度较先前显著升高。此外,入湖径流量能反映盐碱土中氯化物释放量对东平湖的影响,由图 8 可知,2014—2017 年际间东平湖氯化物质量浓度和入湖流量的相关性较好,2017 年内相关性一般但能看出变化趋势有一定相似性,说明湖区附近盐碱土中的氯化物通过径流对东平湖产生了一定的影响,但由 3.1 节分析结果可知引水水源不是通水后东平湖氯化物质量浓度持续上升接近标准限值的根本原因,由此说明可能存在因湖内边坡冲刷以及地下水反补而提升东平湖内的氯化物质量浓度的可能。

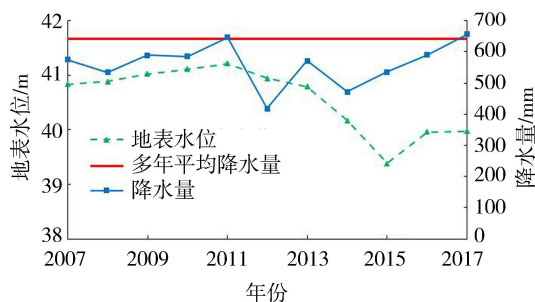
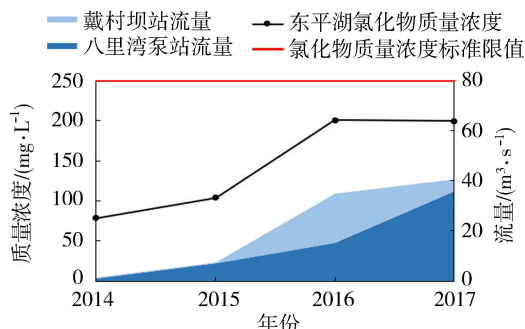


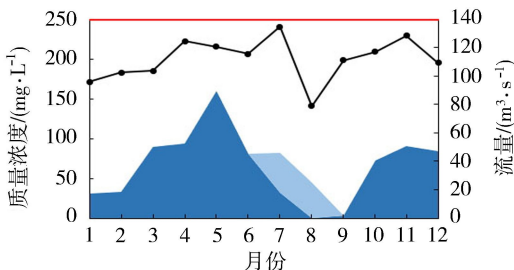
图 7 2007—2017 年戴村坝站地表水位和降水量变化情况

### 3.3 浅层地下水的影响

浅层地下水具有自由水面,通过土壤孔隙与上覆水体相连,其水质是影响土壤盐碱化<sup>[23]</sup>和湖泊氯化物质量浓度的重要因素,潜水埋深对浅层地下水与上覆水体之间的水分和盐分交换有很大影响。



(a) 2014—2017 年际



(b) 2017 年内

图 8 年际和年内东平湖氯化物质量浓度和入湖流量的变化情况

#### 3.3.1 东南部入湖口处地下水

由戴村坝站 1977 年 12 月至 1982 年 12 月间的监测数据可知,戴村坝站地表水位和地下水位随时间的变化趋势大致相同(图 9),且多数时间内地下水位高于地表水位,说明东平湖东南部入湖口处地表水和地下水连通性好,且地下水易补给地表水。

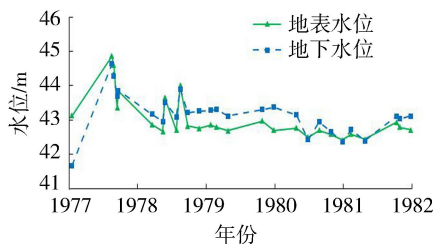


图 9 戴村坝站地表水位和地下水位随时间的变化趋势

戴村坝站 1964 年拥有年内同期测定的地表、地下水位和地表、地下氯化物质量浓度见图 10,可以看出 7 月前地下水位高于地表水位,7—11 月地表水位高于地下水位,两者变化趋势大致相同,而地下水氯化物质量浓度在 35.2 ~ 53.7 mg/L 之间,均值为 42.6 mg/L,始终高于地表水,两者变化趋势也大致相同,且其值较低,不会导致东平湖水质咸化。但根据 2005 年的水质监测结果<sup>[24]</sup>,东平湖东部老湖镇、东南部入湖口处卞庄和稻屯浅层地下水中氯化物质量浓度较高,分别为 419 mg/L、465 mg/L、377 mg/L,约为 1964 年的 10 倍,且从 2018 年泰安市潜水埋深等值线图可知,东平湖附近潜水埋深小,由西北向东南方向递减,湖内约在 3 ~ 6 m 之间,东南部入湖口处约在 1 ~ 3 m 之间,入湖口处浅层地下

水水位与地表水位的水头差较小,更易受到氯化物质量浓度较高的浅层地下水补给,从而使得东平湖氯化物质量浓度上升,入湖口处戴村坝站氯化物质量浓度在通水前均与东平湖氯化物质量浓度数值相近验证了该结论。

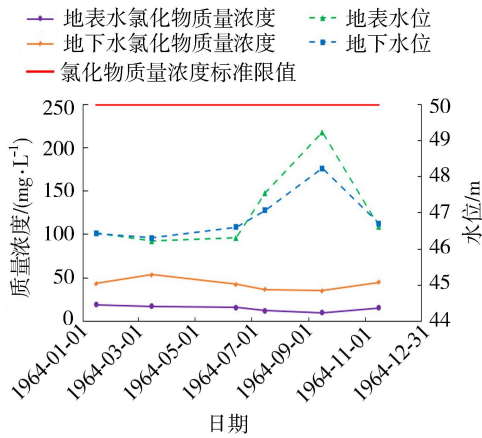


图10 1964年戴村坝站地表水和地下水的氯化物质量浓度和水位的变化情况

南水北调东线工程通水后,东平湖东南部入湖口处年际变化情况如图11所示,其中,地表水位选取戴村坝站资料,地表水氯化物质量浓度选取东平湖监测数据,地下水位选取州城街道办事处大东门村监测数据,其位于大清河南部,靠近戴村坝站西部,可以看出,地表水位与地下水位年际变化趋势大致相同,在2014至2016年下降,在2016至2017年上升,但均高于东平湖东南部湖底最低高程36.7m,东平湖易受浅层地下水补给。地表水氯化物质量浓度与地表、地下水位变化趋势相反,说明地表水位升高,水体被稀释,但2014年与2017年地表水位相同的情况下,2017年氯化物质量浓度和地下水位均较高,说明氯化物质量浓度较高的地下水由于水位抬升,与地表水的水头差变小,对东平湖及周边地表水体的补给量增大。

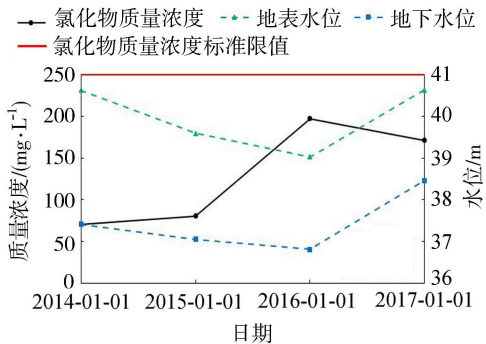


图11 东平湖东南部入湖口处地表水氯化物质量浓度和地表、地下水位的年际变化动态

### 3.3.2 梁济运河与柳长河沿线地下水

南四湖上级湖连接梁济运河,南水北调通水后,

经支流柳长河输入东平湖南部<sup>[25]</sup>。王雅欣等<sup>[26]</sup>研究显示,2009—2013年南四湖上级湖出湖口处浅层地下水氯化物质量浓度约为35 mg/L,2005—2012年梁济运河与柳长河交界处氯化物质量浓度约为175 mg/L,2013年试通水后达到约400 mg/L。胡学玉等<sup>[27]</sup>通过对梁济运河沿岸潜水动态观测发现,受河水位顶托而潜水位持续过高至超过地下水临界深度时,易造成沿岸土壤表层累积返盐,重新产生次生盐渍化,杨安邦等<sup>[28]</sup>则通过研究证实,梁济运河和柳长河沿线处于历史盐化土存在区,通水后减小了两岸浅层地下水埋深,存在土壤次生盐渍化发展的潜在条件。由此说明,南水北调通水后,由于地下水水位得到整体抬升,且主要集中在邓楼—长沟泵站区间<sup>[29]</sup>,溶解了土壤中的大量盐分,更易与地表水发生水分交换。在旱季,由于蒸发作用和毛细作用,土壤含盐量上升,经汛期淋溶,一部分进入河道水体,使得梁济运河和柳长河水体水质产生咸化,进而导致东平湖氯化物质量浓度上升,另一部分渗入地下水,加重浅层地下水的咸化程度,可见咸化浅层地下水和盐碱土也是相互作用、相互影响的。

## 4 预防东平湖水质咸化对策

a. 改建或扩建排咸沟和截渗沟。2014、2015年南四湖氯化物质量浓度高于东平湖(图4),且梁济运河和柳长河沿线由于地下水反补的影响,致使入湖河流氯化物质量浓度较高。建议改建或扩建湖区及输水沿线周边的排咸沟和截渗沟,以减少盐分的累积,同时改善地下水排泄条件以防止地下水位壅高。

b. 增设防渗固坡工程措施。对于湖底高程低的区域可在底部铺设防渗层,减轻底泥盐分的释放,减少氯离子通过固-液界面的传质作用,同时也减轻湖水的渗漏。对于湖内边坡,可通过夯实土坡、建设生态护坡降低蓄水、降雨、径流、风浪扰动等对边坡的冲刷,减少盐分的释放。对于库周盐碱土,可采取优化排灌系统,引种耐盐、洗盐植物等措施。

c. 控制东平湖蓄水位。东平县内洼地主要分布在东平湖区,周边地下水位常高于东平湖湖底最低高程,存在高氯化物质量浓度地下水反向补给东平湖的可能性。通过保证水库的最低设计水位可降低底泥氯离子释放强度<sup>[30]</sup>,并压制地下水补给造成的氯离子浓度上升<sup>[31]</sup>,由图5可知东平湖地表水位在41.14 m以上地表水氯化物质量浓度大多低于200 mg/L,建议进一步研究设定压咸水位。此外,在改善地下水排泄条件的基础上,建议建立地表水和地下水的长期动态观测系统,及时调整东平湖调度运行方案,提前预警。

## 5 结 论

a. 年际间,东平湖氯化物质量浓度自 1960 年以来总体呈上升趋势,在 20 世纪下半叶波动起伏但总体较为稳定,在 21 世纪初氯化物质量浓度明显升高,尤其是南水北调东线工程通水后于 2015 年 11 月上升幅度较大;代表年内,汛期强降雨会稀释水体中的氯化物质量浓度。

b. 南水北调东线工程通水前,东平湖氯化物质量浓度上升主要受人湖河流、盐碱土和浅层地下水共同影响,其与大清河入流氯化物质量浓度基本保持一致。汛期淋溶作用与干涸后蒸发浓缩作用循环往复,致使旱季东平湖周边土壤返盐强烈,后于汛期经流域汇流造成东平湖氯化物质量浓度上升。另外,东平湖东南部入湖口处地表水和地下水连通性好,易受氯化物质量浓度较高的浅层地下水补给。

c. 南水北调东线工程通水后,东平湖氯化物质量浓度上升主要受盐碱土和浅层地下水共同影响。戴村坝站自 2016 年地表水位和降水量显著上升后溶解了持续旱情所积聚的盐分,使得东平湖氯化物质量浓度显著升高。另外,由于输水导致地下水位抬升,氯化物质量浓度较高的浅层地下水易造成输水沿线土壤次生盐渍化,并对东平湖及周边地表水体的补给量增大。

d. 针对东平湖现状,提出了改建或扩建排咸沟和截渗沟、增设防渗固坡工程措施、控制东平湖蓄水位等预防东平湖水质咸化的对策,在采取合理措施的情况下,东平湖作为南水北调东线工程的重要枢纽和山东省西水东送的重要水源地是安全的。

### 参考文献:

- [ 1 ] 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(增刊 1): 69-73. (HU Peng, LIU Chunguang, SUN Hongwen, et al. Study on the release of salt from sediments of Beidagang Reservoir [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(Sup1): 69-73. (in Chinese))
- [ 2 ] 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. (WANG Hao, WANG Zhongliang. Geochemical analysis on water salinization mechanism of the Tianjin Beidagang Reservoir [J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2016, 36(6): 29-34. (in Chinese))
- [ 3 ] 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. (LI Haiming, CHEN Jianjian, LI Yin, et al. Law of salt release at soil-water interface in Beidagang Reservoir[J]. South-to-North Water Transfers and Water

Science & Technology, 2014, 12(3): 47-50. (in Chinese))

- [ 4 ] 张兵,刘小龙,王中良,等. 天津北大港水库水体的同位素和水化学特征[J]. 水文, 2017, 37(6): 44-50. (ZHANG Bing, LIU Xiaolong, WANG Zhongliang, et al. Isotopic and hydrochemical characteristics of salinization water in Beidagang Reservoir, Tianjin [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(6): 44-50. (in Chinese))
- [ 5 ] 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))
- [ 6 ] 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))
- [ 7 ] 王友恒,姜翠玲,张鹏,等. 底泥盐分释放对北大港水库分库蓄水后水质的影响[J]. 水电能源科学, 2013, 31(8): 49-52. (WANG Youheng, JIANG Cuiling, ZHANG Peng, et al. Influence of salt release from sediment on water quality of Beidagang Reservoir after divided storage [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(8): 49-52. (in Chinese))
- [ 8 ] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [ 9 ] SALAMA R B, OTTO C J, FITZPATRICK R W. Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization [J]. Hydrogeology Journal, 1999, 7(1): 46-64.
- [ 10 ] 陆玮,李兆,骆祖江. 南通市地下水压缩开采对水质咸化的控制效应[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 85-91. (LU Wei, LI Zhao, LUO Zujiang. Control effect of groundwater compression mining on water salinization in Nantong City [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 85-91. (in Chinese))
- [ 11 ] HAJ-AMOR Z, HASHEMI H, BOURI S. Soil salinization and critical shallow groundwater depth under saline irrigation condition in a Saharan irrigated land [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(14): 301.
- [ 12 ] 席文娟. 宁夏石嘴山地区地下水水质模拟与变化趋势分析[D]. 西安:长安大学, 2013.
- [ 13 ] 张长春,邵景力,李慈君,等. 华北平原地下水生态环境水位研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(3): 323-326. (ZHANG Changchun, SHAO Jingli, LI Cijun, et al. A study on the ecological groundwater table in the North China Plain [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33(3): 323-

- [14] GUO M J, ZHOU X D, LI J, et al. Assessment of the salinization processes in the largest inland freshwater lake of China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(7): 1823-1833.
- [15] 刘红彩. 东平湖水环境状况与影响因素研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [16] 罗文磊, 田娟, 张菊, 等. 东平湖冬季水体营养盐污染特征及水质评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2016(2): 8-16. (LUO Wenlei, TIAN Juan, ZHANG Ju, et al. Characterization of nutrient pollutants of Dongping Lake winter water and its quality assessment[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2016(2): 8-16. (in Chinese))
- [17] 徐梦辰, 张太志. 东平湖湖滨带人工林下草本植物生长研究[J]. *山东林业科技*, 2015, 45(3): 27-32. (XU Mengchen, ZHANG Taizhi. Study on herbaceous plant growth under plantation in lakeside zone of Dongping Lake [J]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2015, 45(3): 27-32. (in Chinese))
- [18] 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]. *水资源与水工程学报*, 2005, 16(3): 16-18. (ZHAO Wenyu, WANG Qishan, LIU Jun, et al. Theoretical analysis and experiment on water salinization influenced by wind in Beidagang Reservoir [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2005, 16(3): 16-18. (in Chinese))
- [19] 刘加珍, 陈永金, 陈诗越, 等. 东平湖湿地水质动态及其净化功能分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(4): 57-61. (LIU Jiazhen, CHEN Yongjin, CHEN Shiyue, et al. Analysis of water quality and its purified function of wetland ecosystem in the Dongping Lake [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(4): 57-61. (in Chinese))
- [20] 魏薇, 杨连宽. 济宁市区 2013—2015 年降水中阴离子浓度分析[J]. *中国环境管理干部学院学报*, 2016, 26(2): 90-93. (WEI Wei, YANG Liankuan. Analysis on anion concentration of rainwater in Jining from 2013 to 2015 [J]. *Journal of Environmental Management College of China*, 2016, 26(2): 90-93. (in Chinese))
- [21] 王有良, 齐建国, 李玉石, 等. 东平湖水质现状分析与评价[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(3): 414-416. (WANG Youliang, QI Jianguo, LI Yushi, et al. Analysis and evaluation of water quality in Dongping Lake [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2018, 49(3): 414-416. (in Chinese))
- [22] 路明. 东平湖湖滨带水盐梯度下的植被特征研究[D]. 聊城: 聊城大学, 2014.
- [23] WANG Z Y, LI L J. Determination of land salinization causes via land cover and hydrological process change detection in a typical part of Songnen Plain [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(8): 1099-1112.
- [24] 杨元青. 泰安市农村饮用水水源地的水质评价及改善对策[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- [25] 高学平, 李文猛, 张晨, 等. 入湖河流对南四湖水质的影响[J]. *水资源保护*, 2013, 29(2): 1-5. (GAO Xueping, LI Wenmeng, ZHANG Chen, et al. Impact of inflowing rivers on water quality of Nansi Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2013, 29(2): 1-5. (in Chinese))
- [26] 王雅欣, 冯忠伦, 邱庆泰, 等. 南水北调通水对梁济运河流域地下水化学成分影响[J]. *中国农村水利水电*, 2015(11): 110-114. (WANG Yaxin, FENG Zhonglun, QIU Qingtai, et al. An analysis of the influence of chemical composition of groundwater in the Liangji Canal Basin on South-to-North Water Transfer Project in operation [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2015(11): 110-114. (in Chinese))
- [27] 胡学玉, 薛爱明, 王宗敏. 梁济运河输水对沿岸潜动态的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2004(12): 57-59. (HU Xueyu, XUE Aiming, WANG Zongmin. Dynamic impacts of water conveyance on the phreatic water along Liangji Canal [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2004(12): 57-59. (in Chinese))
- [28] 杨安邦, 朱顺初, 周家贵, 等. 南水北调东线一期工程对梁济运河段地下水影响研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(6): 245-249. (YANG Anbang, ZHU Shunchu, ZHOU Jiagui, et al. The impact of the first stage in East-Route of South-to-North Water Transfer Project on ground water along Liangji Canal [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, 7(6): 245-249. (in Chinese))
- [29] 冯忠伦, 曹滨, 王维, 等. 南水北调输水梁济运河区地下水位预测[J]. *中国农村水利水电*, 2017(3): 131-135. (FENG Zhonglun, CAO Bin, WANG Wei, et al. Groundwater table prediction of the South-to-North Water Transfer Project in the Liangji Canal Zone [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(3): 131-135. (in Chinese))
- [30] 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]. *Environment Science and Technology*, 2007, 30(9): 39-41. (in Chinese))
- [31] 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))

(收稿日期:2020-03-17 编辑:郑孝宇)