

南水北调东线一期江苏段试调水期间的水质变化

吕学研¹, 张咏¹, 徐亮¹, 陈亚男², 刘雷¹

(1. 江苏省环境监测中心, 南京 210036; 2. 中国环境监测总站 国家环境保护环境监测质量控制重点实验室, 北京 100012)

摘要: 基于南水北调东线一期工程2013年试调水期间输水干线监测断面水质的实际监测数据, 分析了试调水前后各断面的水质变化情况以及试调水期间各断面的水质变化特征, 以期对南水北调东线工程的持续运行和后续工程建设提供参考。结果表明: 调水前和调水期间, 各监测断面水质处于地表II~III类水平; 溶解氧的沿程变化趋势均不明显; 高锰酸盐指数均呈升高趋势; 氨氮在调水前呈沿程下降趋势, 而在调水期间则呈沿程升高趋势。调水期间水质变化还显示, 为了确保长期运行阶段的水质安全, 还需采取措施切实改善沿线支流的水质。

关键词: 水质变化; 监测断面; 试调水; 输水干线; 南水北调

中图分类号: TV68 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)06-0012-07

Variation of water quality of Jiangsu during water transfer test in first phase of eastern section of south to north water diversion project

LÜ Xueyan¹, ZHANG Yong¹, XU Liang¹, CHEN Yanan², LIU Lei¹

(1. Jiangsu Province Environmental Monitoring Center, Nanjing 210036, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Quality Control in Environmental Monitoring, China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China)

Abstract: According to the actual water quality monitoring data in the first phase project of eastern route of the south to north water diversion project during water transfer test of 2013 in water monitoring section of trunk route, the paper analyzed the state of water quality change and quality change characteristics each section before and after water test during water so as to provide a reference for the continued operation of the eastern route of south to north water diversion project and the subsequent construction. The result shows that before and during water diversion test, the water quality each monitoring section reached the II ~ III level according to the Chinese surface water quality standard (GB3838 - 2002); the variation trend of dissolved oxygen along the path is not obvious; all of permanganate indexes express a clear up trend; ammonia nitrogen express a clear down trend before water diversion experiment, but express a clear up trend during water diversion experiment. The data also show that in order to guarantee the safety of water quality in long-term operation, it is necessary to take measures so as to thoroughly improve the water quality along the tributaries of the canal.

Key words: water quality variation; water monitoring section; water diversion experiment; trunk route; south to north water diversion project

调水工程是实现水资源再分配从而控制或解决与水资源有关的社会经济或生态环境问题的有效措施。调水工程的水资源再分配涉及水量和水质两个方面, 在实施以水量补给为主的调水工程时, 需要关注水质变化对生态环境的潜在影响。Lane等^[1]在研究了调水对密西西比三角洲河口水温、盐度、悬浮物和叶绿素a的影响后指出, 调水对河口的水温不

会造成显著影响, 但是对盐度和悬浮物的影响较大; Rozas等^[2]通过野外试验验证, 密西西比调水导致受水区水体的盐度降低, 并造成对虾可获得的食物减少, 最终导致不同种类对虾的生长率均下降; Piazz等^[3]认为密西西比河排水对河口地区的浮游动物群落在空间和时间分布上都产生了显著的影响; Hyfield等^[4]分析后指出, 密西西比河调水作为河口

收稿日期: 2015-07-20; 修回日期: 2015-08-10

基金项目: 江苏省环境监测科研基金项目(1414); 江苏省环保科研课题(2014039)

作者简介: 吕学研(1984-), 男, 江苏宿迁人, 博士, 工程师, 主要从事水污染控制及环境与生态水力学研究。

三角洲硝酸盐氮和总氮的最大来源,有效地补充了河口地区的营养物质。但是,由于滨海湿地的净化作用,水体的营养盐结构发生了显著变化^[5],调水并不会造成 Maurepas 湖持续的藻类暴发^[6],相反,河口水体的叶绿素 a 与调水量呈负相关关系^[1]。受水体空间分布影响,湿地对营养盐的去除效果差异较大,虽然湿地系统可以有效去除调水中的硝酸盐氮,但是为了使调水不至于引起某些河口水体发生富营养化,仍需要控制进入湿地的调水流量^[7]。

南水北调工程旨在通过工程措施解决我国水资源南多北少分布不均的问题。作为调水线路之一,东线工程实施效果成败的关键在于水质^[8]。东线工程水质变化主要受点源、面源和内源的影响^[9]。唐莉华等^[10]的测算结果表明,淮河流域南水北调东线工程沿线的农业面源入河量分别为化学需氧量约 3.6 万 t/a、化学需氧量约 9.0 万 t/a、总氮约 1.4 万 t/a、氨氮约 0.14 万 t/a,且 70% 集中在汛期。这也可能是造成汛期水质劣于非汛期的原因^[11]。扎实推进的污染控制工程和措施,使得东线沿程断面的水质达标率逐年升高^[11]。随着水质的有效改善,工程正式运行对沿程水体的潜在影响也受到关注。赵世新等^[12]通过数值模拟认为,在优质来水的影响下,调水后南四湖尤其是微山湖的水质能够得到显著改善。

调水过程的水质变化是评判各项污染治理措施效果的根本。本文以南水北调东线一期工程 2013 年试调水期间输水干线监测断面水质的实际监测数据为基础,分析了试调水前后各断面的水质变化情况以及试调水期间各断面的水质变化特征,以期为南水北调东线工程的持续运行和后续工程建设提供参考。

1 监测断面与指标

南水北调东线一期工程于 2013 年 10 月 19 日试调水,至 11 月 30 日结束。为了密切跟踪调水期间的水质变化,在调水干线(江苏段)布设 10 个水质监测断面,分别为长江至洪泽湖段的三江营、江都西闸和老山乡,洪泽湖至骆马湖段的五叉河口、马陵翻水站和三场,骆马湖至微山湖段的骆马湖乡、张楼和蔺家坝,洪泽湖至京杭运河的顾勒大桥和张楼。10 月 16 日开展调水前水质监测,以对比调水前后控制断面的水质变化,10 月 19 日开始对沿线 10 个断面开展连续逐日监测,11 月 5 日后监测频次降为 5 日一次。根据《南水北调东线工程治污工程规划》中的水质超标状况,试调水期间,按照国标方法对沿

线各断面的溶解氧、高锰酸盐指数和氨氮等主要指标开展监测。水质评价按照《地面水环境质量标准(GB3838-2002)》中河流的标准进行。

2 结果与分析

2.1 调水前各断面水质

调水前(10 月 16 日),10 个断面水质处于地表 II~III 类水平。各监测点溶解氧在 6.60~9.60 mg/L 之间,氨氮在 0.100~0.445 mg/L 之间,高锰酸盐指数在 3.0~5.7 mg/L 之间。测点水质趋势变化(图 1)分析表明:调水前溶解氧的沿程变化趋势不明显,浓度最低值出现在蔺家坝断面(6.60 mg/L),最高值点出现在骆马湖乡(9.60 mg/L);氨氮浓度沿程出现两个波峰,分别位于洪泽湖老山(0.445 mg/L)和骆马湖乡(0.380 mg/L),整体上沿程呈现浓度降低的趋势;高锰酸盐指数整体上呈较明显的上升趋势,浓度最高值出现在出境控制蔺家坝断面,为 5.7 mg/L。

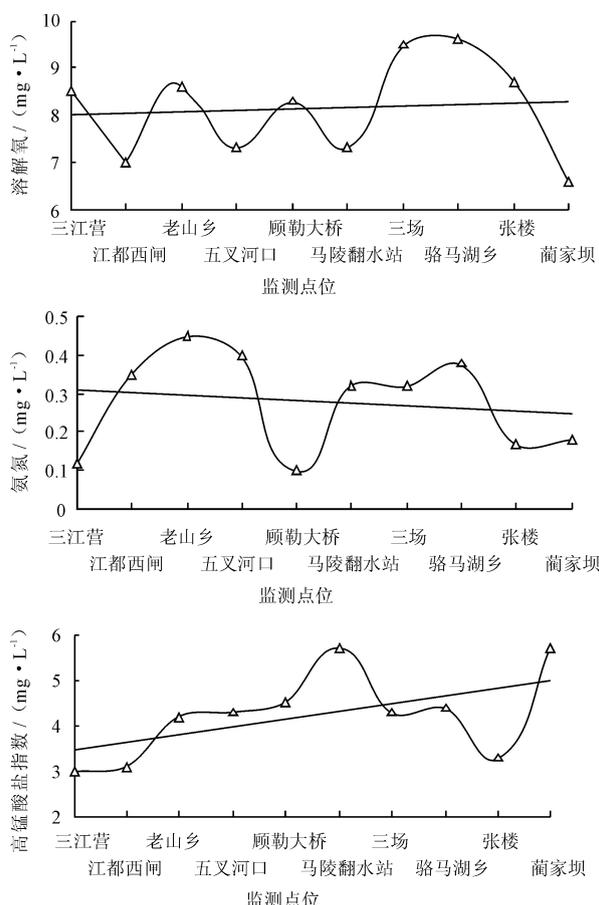


图 1 调水前溶解氧、氨氮和高锰酸盐指数沿程变化情况

2.2 调水期间各断面水质

根据调水线路及沿线水系特点,南水北调东线

一期工程试调水期间的监测断面共分成长江-洪泽湖、洪泽湖-骆马湖、骆马湖-微山湖和洪泽湖-微山湖两条线路四段。根据试调水期间沿程各泵站的开停机时间估算,调水水头约在10月20日到达洪泽湖,22日到达骆马湖,24日江苏段全线贯通到达微山湖。

2.2.1 长江-洪泽湖段 调水水头约在10月20日从长江到达洪泽湖,该段分布有三江营、江都西闸和老山乡3个断面。监测结果(表1)显示:调水前后,3个断面的溶解氧均满足地表Ⅲ类水的要求;与调水前溶解氧的沿程变化相同,调水期间溶解氧在长江-洪泽湖段呈“V”型变化的特征,即江都西闸断面的溶解氧较三江营断面和老山乡断面低,其潜在的原因可能是,三江营断面紧邻长江,平时受江水潮汐影响水质较好,随着水流北上,沿线支流或污染源输入的耗氧物质(氨氮、有机物等)导致水体溶解氧浓度下降,而在老山乡断面,虽然氨氮和高锰酸盐指数较江都西闸高,由于该断面处在洪泽湖内,开阔的水面对水体大气复氧有利,同时,洪泽湖目前处于富营养化状态,水体内的浮游植物通过光合作用进

一步补充了水体的溶解氧。

监测结果还显示:三江营断面的氨氮浓度较调水前有所升高;调水期间,江都西闸断面的氨氮均值为0.205mg/L,较调水前下降了41.9%,说明调水显著降低了江都西闸断面的氨氮浓度,同样,调水也一定程度上降低了老山乡断面的氨氮浓度,而且随着调水的不断推进,该断面的氨氮浓度一直维持在较低水平(图2)。作为藻类生长优先选择的含氮营养物质,氨氮浓度的降低对于抑制洪泽湖的藻类生长将起到积极作用。调水显著降低了三江营断面的高锰酸盐指数浓度,而对江都西闸和老山乡断面高锰酸盐指数的影响较小。

调水期间各断面溶解氧、氨氮和高锰酸盐指数的变化趋势(图2)表明:调水期间,江都西闸断面的溶解氧呈现出升高的变化趋势,而三江营和老山乡断面的溶解氧相对保持稳定;老山乡断面氨氮在调水前期呈快速降低趋势,随着调水的推进,氨氮浓度趋于稳定,三江营和江都西闸断面的氨氮浓度相对一直保持稳定;调水期间,三个断面的高锰酸盐指数一直较为稳定,变化较小。

表1 调水前后长江-洪泽湖段水质

监测断面		溶解氧		氨氮		高锰酸盐指数	
		范围	均值	范围	均值	范围	均值
三江营	调水前	8.54	8.54	0.124	0.124	3.0	3.0
	调水后	7.00~8.70	7.76	0.096~0.174	0.146	2.0~2.7	2.2
江都西闸	调水前	7.00	7.00	0.353	0.353	3.1	3.1
	调水后	5.80~8.02	6.36	0.125~0.321	0.205	2.2~3.4	2.8
老山乡	调水前	8.40~8.58	8.49	0.445~0.550	0.498	3.8~4.2	4.0
	调水后	7.27~9.23	8.11	0.248~0.606	0.350	3.7~4.4	4.1

2.2.2 洪泽湖-骆马湖段 调水水头约在10月22日到达骆马湖,该段分布有五叉河口、马陵翻水站和三场3个断面。监测结果(图3)显示:调水前后,溶解氧和氨氮在洪泽湖-骆马湖段的空间变化特征保持一致,溶解氧均呈明显的升高趋势,氨氮呈“V”型变化特征,但整体均呈现升高趋势;对于高锰酸盐指数,调水前在洪泽湖-骆马湖段呈倒“V”型变化,沿程的整体变化不明显,调水后,高锰酸盐指数在该段呈“V”型变化,沿程整体呈较明显的降低趋势。

监测结果(表2)还显示,调水前后,洪泽湖-骆马湖段各断面的溶解氧和氨氮浓度保持稳定,五叉河口断面的高锰酸盐指数浓度保持稳定,马陵翻水站和三场断面的高锰酸盐指数均不同程度下降,降

低幅度分别为35.2%和15.9%。由此可见,调水对洪泽湖-骆马湖段各断面溶解氧和氨氮的影响较低,对马陵翻水站和三场断面高锰酸盐指数的改善效果较为明显。

调水期间各断面溶解氧、氨氮和高锰酸盐指数的变化趋势(图3)表明:调水期间,洪泽湖-骆马湖段各断面溶解氧整体保持稳定。五叉河口和三场断面氨氮的变化主要发生在通水前期(10月底前),随后水质保持相对稳定,整体而言,调水期间两个断面的氨氮浓度保持稳定,无明显的升高或降低趋势;马陵翻水站断面的氨氮在调水期间整体呈较为明显的升高趋势。该段3个断面的高锰酸盐指数在调水期间均呈一定的降低趋势。

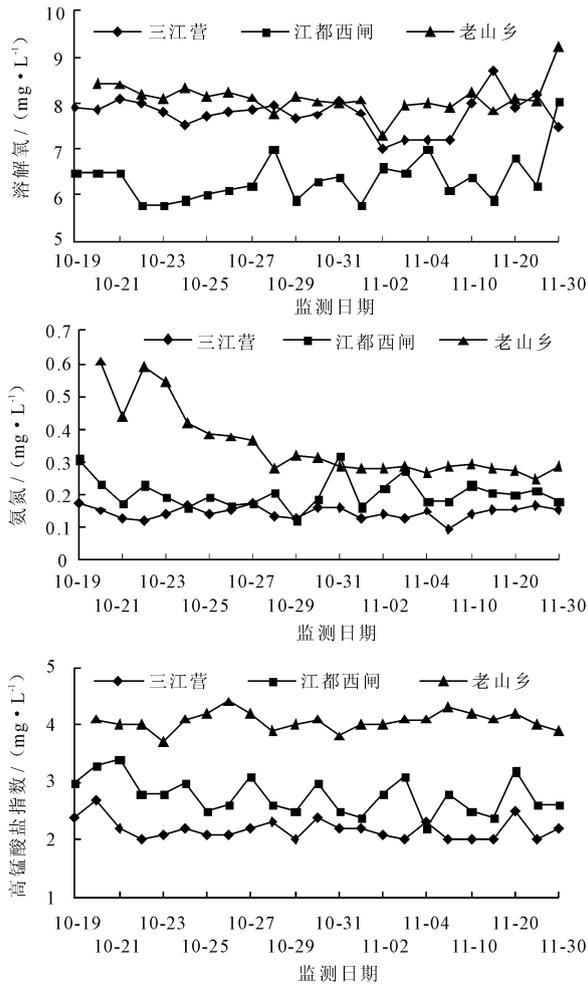


图 2 调水期间长江—洪泽湖段溶解氧、氨氮和高锰酸盐指数变化趋势

2.2.3 骆马湖—微山湖段 调水水头约在 10 月 24 日到达微山湖,该段分布有骆马湖乡、张楼和蔺家坝 3 个断面。监测结果(表 3)显示:调水前后,溶解氧、氨氮和高锰酸盐指数在骆马湖—洪泽湖段的空间变化特征均保持一致,溶解氧呈明显的下降趋势,氨氮呈“V”型变化特征,高锰酸盐指数呈升高趋势。监测结果还显示,调水前后,骆马湖—微山湖段 3 个断面的水质基本保持稳定。

由此可见,调水对骆马湖—微山湖段各断面水质的影响较小。

调水期间各断面溶解氧、氨氮和高锰酸盐指数的变化趋势(图 4)表明:调水期间,骆马湖—微山湖段各断面的氨氮浓度整体保持稳定,整体处于地表 II 类水平,这对于通过降低微山湖的氨氮浓度非常有利^[12]。

监测结果还显示,蔺家坝断面的氨氮在 10 月 27 日显著升高。实地调查表明,该次水质异常的原因是上游支流的闸板开裂,导致污水进入调水干流,在闸板修复后,干流的水质很快恢复正常,说明,为了有效保障调水干流的水质,需要采取措施从根本上改善支流的水质^[13],闸坝截流只能作为暂时的应对措施。调水期间,骆马湖乡的溶解氧一直保持相对稳定,而张楼和蔺家坝断面的溶解氧表现为小幅升高趋势。骆马湖乡断面的高锰酸盐指数在调水期间也一直保持相对稳定,张楼断面高锰酸盐指数降低的趋势明显,蔺家坝断面呈小幅下降趋势。

表 2 调水前后洪泽湖—骆马湖段水质

监测断面		溶解氧		氨氮		高锰酸盐指数	
		范围	均值	范围	均值	范围	均值
五叉河口	调水前	7.31 ~ 7.50	7.43	0.220 ~ 0.401	0.290	4.2 ~ 4.3	4.3
	调水后	6.25 ~ 9.35	7.70	0.221 ~ 0.385	0.289	3.8 ~ 5.4	4.4
马陵翻水站	调水前	7.27 ~ 8.56	8.06	0.190 ~ 0.320	0.240	4.8 ~ 5.8	5.4
	调水后	8.20 ~ 9.90	8.86	0.130 ~ 0.425	0.246	2.9 ~ 5.1	3.5
三场	调水前	8.40 ~ 9.50	8.92	0.320 ~ 0.390	0.344	3.9 ~ 5.0	4.4
	调水后	8.40 ~ 9.20	8.73	0.210 ~ 0.418	0.321	3.1 ~ 4.9	3.7

表 3 调水前后骆马湖—微山湖段水质

监测断面		溶解氧		氨氮		高锰酸盐指数	
		范围	均值	范围	均值	范围	均值
骆马湖乡	调水前	8.90 ~ 9.60	9.18	0.310 ~ 0.380	0.346	4.4 ~ 5.3	4.8
	调水后	8.50 ~ 9.30	8.85	0.246 ~ 0.461	0.361	3.3 ~ 4.9	4.3
张楼	调水前	5.80 ~ 8.70	6.81	0.167 ~ 0.210	0.183	3.3 ~ 6.0	5.1
	调水后	5.60 ~ 8.20	6.42	0.166 ~ 0.270	0.212	3.8 ~ 5.8	5.2
蔺家坝	调水前	5.30 ~ 6.60	5.71	0.184 ~ 0.434	0.357	5.6 ~ 6.0	5.8
	调水后	5.90 ~ 8.10	6.55	0.202 ~ 0.900	0.328	4.7 ~ 5.8	5.4

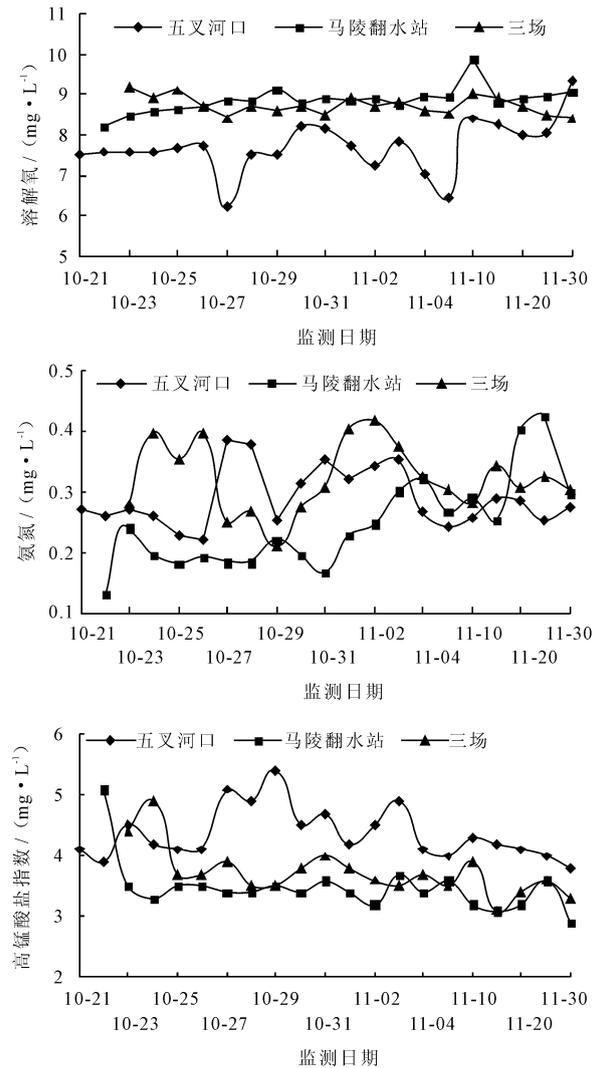


图3 调水期间洪泽湖—骆马湖段溶解氧、氨氮和高锰酸盐指数变化趋势

2.2.4 洪泽湖—京杭运河段 监测工作在洪泽湖以北段分成两路进行。其中一路为前述的洪泽湖—骆马湖—微山湖一线,另一路为洪泽湖—京杭运河一线,此段的控制断面为徐洪河顾勒大桥断面和京杭运河张楼断面。徐洪河顾勒大桥断面10月20日开始过水。监测结果表明:调水后,顾勒大桥断面的溶解氧和高锰酸盐指数均值分别为7.35和4.5 mg/L,较调水前保持稳定;顾勒大桥断面氨氮平均浓度在调水后显著升高,从调水前的0.135 mg/L升高至0.300 mg/L。调水期间顾勒大桥断面水质变化趋势(图5)表明,调水期间,顾勒大桥断面的溶解氧保持稳定,氨氮和高锰酸盐指数稳中有降。

2.3 调水期间水质沿程变化

调水期间,10个断面水质处于地表II~III类水平。各监测点溶解氧均值在6.36~8.86 mg/L之

间,氨氮在0.146~0.361 mg/L之间,高锰酸盐指数在2.2~5.4 mg/L之间。测点水质趋势变化(图6)分析表明:调水期间,溶解氧的沿程变化趋势不明显,浓度均值最低值出现在江都西闸断面(6.36 mg/L),最高值点出现在马陵翻水站(8.86 mg/L);调水期间,氨氮浓度峰值出现在洪泽湖老山(0.350 mg/L)和骆马湖乡(0.361 mg/L)两个测点,与调水前的分布相同,但是调水期间氨氮浓度整体上沿程呈现升高趋势,与调水前发生了显著变化;与调水前的变化一致,高锰酸盐指数整体上呈较明显的上升趋势,浓度最高值出现在出境控制蔺家坝断面,为5.4 mg/L。

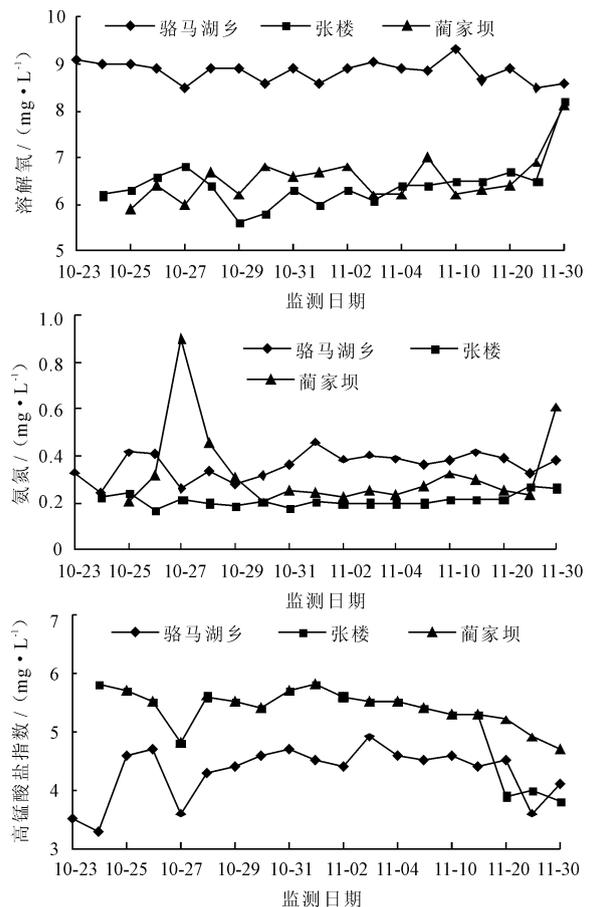


图4 调水期间骆马湖—微山湖段溶解氧、氨氮和高锰酸盐指数变化趋势

调水前后,溶解氧的沿程变化趋势均不明显。这是因为,东线江苏境内沿线的污染源得到了有效控制^[11,14],沿程水质在调水前已有显著改善,调水期间,水体溶解氧浓度主要因受水温的影响。对于氨氮来说,调水前洪泽湖老山乡的浓度最高,调水后,徐洪河的水流方向变为出湖,在洪泽湖水质的影响下顾勒大桥断面的氨氮浓度较调水前显著升高;

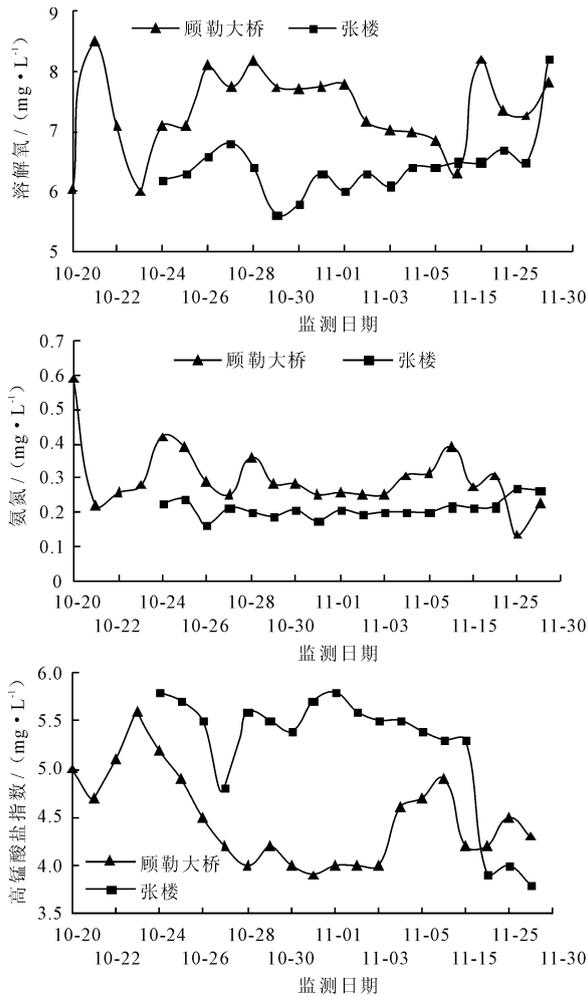


图 5 调水期间洪泽湖—京杭运河段溶解氧、氨氮和高锰酸盐指数变化趋势

受骆马湖较高氨氮浓度的影响,张楼断面氨氮浓度较调水前也有所升高,从而调水期间氨氮沿程表现出升高趋势。调水前后,高锰酸盐指数均呈现沿程升高趋势,最高值均出现在出境断面蔺家坝,虽然其浓度满足地表Ⅲ类要求,但是与Ⅲ类标准上限值的差值较小,存在较大的超标风险。相关研究表明,骆马湖以北段是水质控制的难点^[11],采取切实措施降低该段水质超标的风险,将是未来南水北调东线工程治污、控污的重点工作。

3 结语

以南水北调东线一期工程 2013 年试调水期间输水干线监测断面水质的实际监测数据为基础,本文分析了试调水前后各断面的水质变化情况以及试调水期间各断面的水质变化特征。结果表明:

(1)调水前后,各监测断面水质满足地面水环境质量标准(GB3838-2002)II~III类水的要求;溶

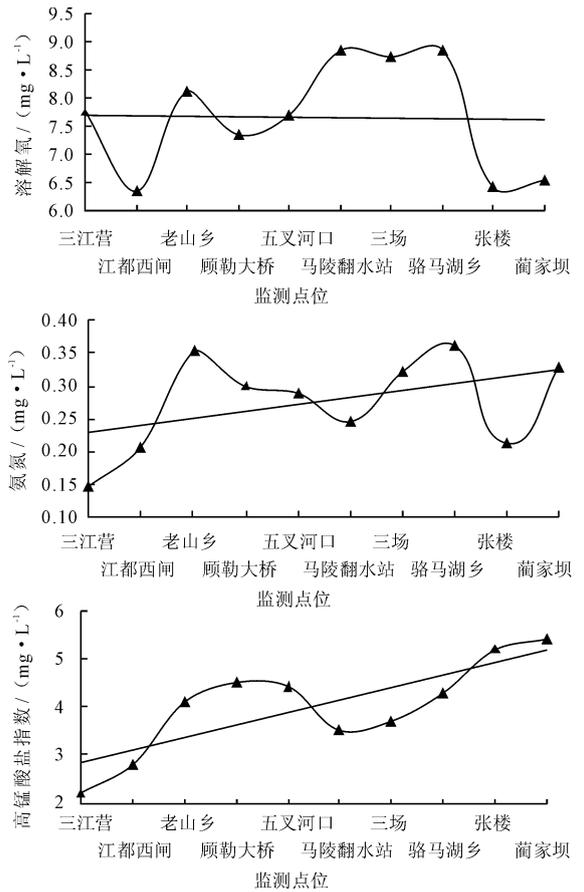


图 6 调水期间溶解氧、氨氮和高锰酸盐指数沿程变化情况
解氧的沿程变化趋势调水前后均不明显,而高锰酸盐指数均呈升高趋势;氨氮在调水前呈沿程下降趋势,在调水期间则呈沿程升高趋势。

(2)调水对东线各段水质的影响也不同,调水期间,各断面的水质指标的变化特征也不尽一致。

(3)蔺家坝断面调水期间氨氮的监测数据显示,采用闸坝控制支流污水进入干流只能作为水质保障的暂时措施,从根本上改善支流的水质才能确保调水期间干流水质稳定。

参考文献:

- [1] Lane Robert R, Jr John W Day, Marx Brian D, et al. The effects of riverine discharge on temperature, salinity, suspended sediment and chlorophyll a in a Mississippi delta estuary measured using a flow-through system[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007,74(1-2):145-154.
- [2] Rozas Lawrence P, Minello Thomas J. Variation in penaeid shrimp growth rates along an estuarine salinity gradient; Implications for managing river diversions [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2011,397(2):196-207.
- [3] Piazz Bryan P, Peyre Megan K La. Nekton community re-

- sponse to a large - scale Mississippi River discharge: Examining spatial and temporal response to river management [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 91(3): 379 - 387.
- [4] Hyfield Emily C G, Day John W, Cable Jaye E, et al. The impacts of re - introducing Mississippi River water on the hydrologic budget and nutrient inputs of a deltaic estuary [J]. *Ecological Engineering*, 2008, 32(4): 347 - 359.
- [5] Lane Robert R, Day John W, Justic D, et al. Changes in stoichiometric Si, N and P ratios of Mississippi River water diverted through coastal wetlands to the Gulf of Mexico [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 60(1): 1 - 10.
- [6] Lane Robert R, Mashriqui Hassan S, Kemp G P, et al. Potential nitrate removal from a river diversion into a Mississippi delta forested wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2003, 20(3): 237 - 249.
- [7] DeLaune R D, Jugsujinda A, West J L, et al. A screening of the capacity of Louisiana freshwater wetlands to process nitrate in diverted Mississippi River water [J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25(4): 315 - 321.
- [8] Wang Chao, Wang Yanying, Wang Peifang. Water quality modeling and pollution control for the eastern route of south to north water transfer project in China [J]. *Journal of Hydrodynamics Ser. B*, 2006, 18(3): 253 - 261.
- [9] 李俊玲, 钱自立. 南水北调东线工程江苏段水环境问题及其对策 [J]. *水利科技与经济*, 2007, 13(3): 180 - 182.
- [10] 唐莉华, 张思聪, 吕贤弼, 等. 南水北调东线工程淮河流域段农业面源污染负荷估算 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1437 - 1441.
- [11] 张素英. 南水北调东线江苏段水污染防治现状及水质保证措施探讨 [J]. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(2): 18 - 20 + 39.
- [12] 赵世新, 张晨, 高学平, 等. 南水北调东线调度对南四湖水质的影响 [J]. *湖泊科学*, 2012, 24(6): 923 - 931.
- [13] 颜志俊, 张明月, 逢勇. 南水北调东线江苏段深化治污重点方向及措施 [J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 12(4): 42 - 46.
- [14] 郭鹏, 吴培任, 任静. 南水北调东线主要污染物入河量历年变化分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(6): 62 - 66.

(上接第 11 页)

- [7] 陈民, 谢悦波, 冯宇鹏. 人类活动对海河流域径流系列一致性影响的分析 [J]. *水文*, 2007, 27(3): 57 - 59.
- [8] 王巧平, 王成建. 海河流域人类活动对径流的影响分析 [J]. *海河水利*, 2009(1): 4 - 6.
- [9] Bao Zhenxin, Zhang Jianyun, Wang Guoqing, et al. Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River basin, northern China: Climate variability or human activities? [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 460(3): 117 - 129.
- [10] Xu Xiangyu, Yang Dawen, Yang Hanbo, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 510: 530 - 540.
- [11] 鲍振鑫, 张建云, 严小林, 等. 环境变化背景下海河流域水文特征演变规律 [J]. *水电能源科学*, 2014, 23(10): 1 - 5.
- [12] 杨雪丽. 气候变化对漳卫南流域水资源安全影响研究 [D]. 山东: 济南大学, 2012.
- [13] 王文军, 吉华. 漳河水事纠纷的成因及其对策探析 [J]. *海河水利*, 2011(2): 14 - 15.
- [14] 蔡锡填, 徐宗学, 李占玲. 漳卫南运河流域水文气象要素长期变化趋势分析 [J]. *资源科学*, 2008, 30(3): 363 - 370.
- [15] Li Donglong, Wang Wensheng, Hu Shixiong, et al. Characteristics of annual runoff variation in major rivers of China [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(19): 2866 - 2877.
- [16] 鲍振鑫, 张建云, 严小林, 等. 海河流域 60 年降水量的变化及未来情景分析 [J]. *水利水运工程学报*. 2014(5): 8 - 13.
- [17] 翟劭斌, 张建云, 刘九夫, 等. 海河流域近 50 年降水变化多时间尺度分析 [J]. *海河水利*, 2009(1): 1 - 4.