

## 山东南四湖上级湖水质变化评价(2008—2014年)及成因分析\*

解文静<sup>1</sup>, 王松<sup>2</sup>, 娄山崇<sup>2</sup>, 曹升乐<sup>1</sup>, 孙秀玲<sup>1</sup>, 王月敏<sup>1</sup>, 林洁<sup>1</sup>

(1: 山东大学土建与水利学院, 济南 250061)

(2: 山东省水文局, 济南 250002)

**摘要:** 基于南四湖上级湖 6 个监测点 2008—2014 年 42 个奇数月份的水质资料, 选取溶解氧、化学需氧量(COD)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、氨氮、总磷和氟化物作为水质评价的指标。对水质指标的归一化方法进行了改进, 采用主成分分析法对 6 个监测点的水质综合状况进行评价, 根据得出的各月综合得分序列分析水质变化趋势。与 2000—2007 年南四湖上级湖的水质综合状况进行比较, 2008—2014 年水质明显变好。评价结果表明, 同一监测点的水质在不同时间点上有明显变化, 同一时间序列不同监测点的水质状况也有不同变化。此外, 分析得出南四湖上级湖的主要水质影响指标为 COD、COD<sub>Mn</sub> 和 BOD<sub>5</sub>。结合评价结果, 分析水质变化原因, 入湖河流水质状况和湖区底泥是其重要影响因素。

**关键词:** 主成分分析法; 归一化; 南四湖上级湖; 水质时间序列; 水质评价

## Evaluation of temporal water quality change (2008 – 2014) and the cause analysis in the upper-reach lakes of Lake Nansi, Shandong Province

XIE Wenjing<sup>1</sup>, WANG Song<sup>2</sup>, LOU Shanchong<sup>2</sup>, CAO Shengle<sup>1</sup>, SUN Xiuling<sup>1</sup>, WANG Yuemin<sup>1</sup> & LIN Jie<sup>1</sup>

(1: *School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, P.R.China*)

(2: *Hydrology and Water Resources Bureau of Shandong Province, Jinan 250002, P.R.China*)

**Abstract:** Based on water quality information from 6 stations in the upper-reach lakes of Lake Nansi which was sampled from a total of 42 odd months during 2008 and 2014, choosing dissolved oxygen, COD, COD<sub>Mn</sub>, BOD<sub>5</sub>, ammonia nitrogen, total phosphorus and fluoride as the indexes of water quality evaluation. The water quality index normalization was used to improve the method, and the principal component analysis was used to evaluate water quality comprehensively for the data from the six monitoring stations. According to the obtained comprehensive score of the monthly sequence, the trend of water quality status was analyzed. Compared with the general condition of water quality during 2000 and 2007, it is found that water quality was significantly better during 2008 and 2014. The evaluation results showed that the water quality at any monitoring station had obvious changes at different time, and had different changes at any time sequence on different water quality monitoring stations. Besides, the main influenced indicators of water quality in the upper-reach lakes of Lake Nansi were COD, COD<sub>Mn</sub> and BOD<sub>5</sub>. According to the evaluation results and the analyzed changes in the water quality, we found that the river quality into the lake and lake sediments were the two important factors influencing on the water quality.

**Keywords:** Principal component analysis; normalized; upper-reach lakes of Lake Nansi; time series of water quality; water quality evaluation

湖泊水质主要受外源污染和内源污染的双重影响, 入湖河流和湖区底泥是两个重要的污染来源。南四湖上级湖的入湖河流众多, 河流沿途多经过城镇, 可能携带生活、工业污水; 由于南水北调东线工程完成之前南四湖污染较为严重, 含氮、磷等污染物的底泥蓄积深度达 10~15 cm, 而这层沉积物与水体间存在频繁的物质交换, 也将成为水体的污染源<sup>[1]</sup>。对南四湖的水质变化趋势进行深入研究, 可以指导人们在社会与经济

\* 山东省省级水利科研及技术推广项目(SDSLK201302)资助。2015-06-09 收稿; 2015-08-19 收修改稿。解文静(1990~), 女, 硕士研究生; E-mail: 994306933@qq.com。

发展中能够更加有效合理地开发、利用湖泊水资源,保护湖泊水环境,维持生态平衡<sup>[2]</sup>.为进一步有效地改善与提升湖泊水质,综合全面分析南四湖的水质,特别是分析南水北调工程实施以来水质的变化成因及变化规律是非常必要和迫切的.

主成分分析法(PCA)是一种将多维因子纳入统一系统中进行量化研究且理论较完善的多元统计方法<sup>[3]</sup>.在此前的研究中,主成分分析法一般用于对同时间、不同空间监测点的水质评价进行比较,本文尝试采用该方法对同一空间监测点进行时间上的分析评价.通过对评价结果的分析,寻找南四湖上级湖水质变化趋势.

## 1 评价资料与分析方法

### 1.1 研究区概况

南四湖(34°27'~35°20'N,116°34'~117°21'E)位于山东省西南部,上级湖主要包括南阳湖、独山湖和昭阳湖,南四湖为我国北方最大的淡水湖,二级湖坝将南四湖分为上级湖与下级湖,上级湖面积约602 km<sup>2</sup>,下级湖644 km<sup>2</sup>,平均水深1.5 m,汛期最大水深2.5~3.0 m;湖东入湖河流为山溪性河流,湖西入湖为平原坡水性河流.上级湖来水量占南四湖全湖来水量的88.4%.南四湖是南水北调东线工程的调蓄湖泊,其水质的好坏直接关系到济宁、枣庄等地经济社会可持续发展和水生态环境的改善.国务院明确指出,南水北调东线工程顺利实施的前提是节水,治污是关键,而南四湖就是治污的重点<sup>[4]</sup>.了解南四湖的水质变化规律,对南四湖的整治管理及其周边地区经济社会的可持续发展具有重要意义.

研究采用南四湖上级湖的6个水质监测点,标记为S1~S6,分别为王庙、前白口、南阳、独山、沙堤和二级坝闸上(图1),其中,王庙和沙堤监测点分别邻近洙水河和城郭河的人湖口;洙水河主要接纳嘉祥县和任城区唐口镇的工业和城市污水,是济宁市的主要纳污河流之一;城郭河是流经滕州市最主要的河流.

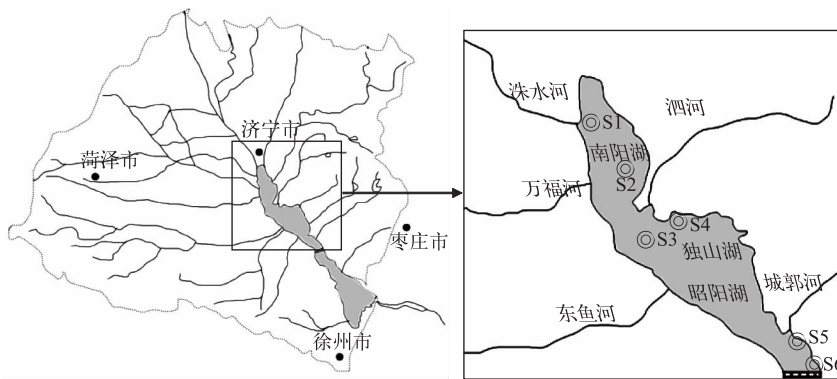


图1 南四湖流域和监测点分布

Fig.1 The distribution of Lake Nansi and the 6 stations in upper-reach lakes of Lake Nansi

### 1.2 资料选取

因已有数据资料中,所有年份均有奇数月监测数据,部分年份有偶数月的监测数据,为保证数据序列时间间隔的一致性,本研究采用的数据为南阳等6个监测点2008年1月—2014年11月期间奇数月份共42个月的监测数据.

《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)<sup>[5]</sup>中共有24项水质指标.但根据已有监测资料,考虑到监测数据的合理性以及某些指标监测值小于检出限,且pH值都在6~9之间,符合水质标准限值,筛选出溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)和氟化物7项指标组成本次水质评价的指标体系.

### 1.3 改进的归一化方法

常用的水质指标归一化方法都不同程度地放大或缩小了水质指标所属的水质类别,特别是当越小越优

型指标的水质类别属于劣V类,且超出V类标准很多时,常用的归一化方法便不再适用.为了更好地将水质指标的监测值和水质类别标准保持一致,本文采取如下的归一化方法:

根据水质评价标准将数值等间距划分(表1),介于两类标准之间的采用线性插值计算.效益型(越大越好)和成本型(越小越好)的指标归一化计算公式分别见式(1)和式(2).本节中的归一化方法主要侧重于水质指标监测值无量纲化的处理,因此,归一化后的数值并不仅限于[0,1].

表1 水质监测值归一化标准

Tab.1 Water quality monitoring values' normalized standards

水质标准类别	劣V类	V类	IV类	III类	II类	I类
归一化区间	<0	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	≥0.8

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 - \frac{b_{5j} - x_{ij}}{b_{5j}} & \text{劣V类} \\ 0 + \frac{x_{ij} - b_{5j}}{b_{4j} - b_{5j}} \times 0.2 & \text{V类} \\ 0.2 + \frac{x_{ij} - b_{4j}}{b_{3j} - b_{4j}} \times 0.2 & \text{IV类} \\ 0.4 + \frac{x_{ij} - b_{3j}}{b_{2j} - b_{3j}} \times 0.2 & \text{III类} \\ 0.6 + \frac{x_{ij} - b_{2j}}{b_{1j} - b_{2j}} \times 0.2 & \text{II类} \\ 0.8 + \frac{x_{ij} - b_{1j}}{b_{1j}} & \text{I类} \end{cases} \quad (1)$$

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 - \frac{x_{ij} - b_{5j}}{b_{5j}} & \text{劣V类} \\ 0 + \frac{b_{5j} - x_{ij}}{b_{5j} - b_{4j}} \times 0.2 & \text{V类} \\ 0.2 + \frac{b_{4j} - x_{ij}}{b_{4j} - b_{3j}} \times 0.2 & \text{IV类} \\ 0.4 + \frac{b_{3j} - x_{ij}}{b_{3j} - b_{2j}} \times 0.2 & \text{III类} \\ 0.6 + \frac{b_{2j} - x_{ij}}{b_{2j} - b_{1j}} \times 0.2 & \text{II类} \\ 0.8 + \frac{b_{1j} - x_{ij}}{b_{1j}} \times 0.2 & \text{I类} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $x_{ij}$ 为水质指标的原始监测数据; $b_{1j}$ 、 $b_{2j}$ 、 $b_{3j}$ 、 $b_{4j}$ 和 $b_{5j}$ 分别为水质指标的I、II、III、IV和V类相对应的水质标准.

经过上述归一化后,可以直观地通过数值的大小来反映水质状况,数值越大代表水质越好;数值越小代表水质越差.以王庙监测点为例,2008年1月7项指标的监测值和归一化值见表2.由表2可见,各指标水质好坏程度依次为:DO>氟化物>NH<sub>3</sub>-N>COD<sub>Mn</sub>>COD>TP>BOD<sub>5</sub>.

#### 1.4 主成分分析法

本文在已有研究的基础上,建立水质综合评价指标体系,评价某一测站随时间的水质污染程度变化.分析步骤如下:

表 2 王庙监测点 2008 年 1 月 7 项指标的监测值和归一化值

Tab.2 The seven indicators' monitoring and normalized values of Wangmiao Station in January of 2008

指标	DO	NH <sub>3</sub> -N	COD	COD <sub>Mn</sub>	BOD <sub>5</sub>	TP	氟化物
监测值/(mg/L)	9.70	0.44	21.00	5.70	10.30	0.10	0.90
归一化值	1.09	0.63	0.38	0.43	-0.03	0.20	0.82

①将监测值矩阵  $X$  中的各变量  $x_{ij}$  进行无量纲处理,具体方法见 1.3 节;②在标准化矩阵的基础上计算原始指标相关矩阵  $R$ ;③计算相关矩阵  $R$  的特征值、方差贡献率、累计方差贡献率、因子荷载矩阵,按累计贡献率达 70%,确定主成分个数  $n$ ;④选取前  $n$  个主成分,计算相应的单位特征向量,即可得主成分计算公式;⑤将各待评月份的标准化数据分别代入各主成分的表达式中,计算得出各月的各主成分得分  $F_i$ ,以方差贡献率( $d_i$ )为权重求和计算各月综合得分<sup>[6]</sup>,水质综合得分序列以下简称得分序列。

## 2 评价结果及分析

### 2.1 综合得分时间序列

对南四湖上级湖王庙等 6 个监测点的水质综合状况进行评价,各项综合得分值即是某一监测点各月份水质污染程度的定量化描述,得分大小可以反映其水质好坏,根据评价结果以及监测点地理位置的分布,6 个监测点的水质综合得分序列见图 2。

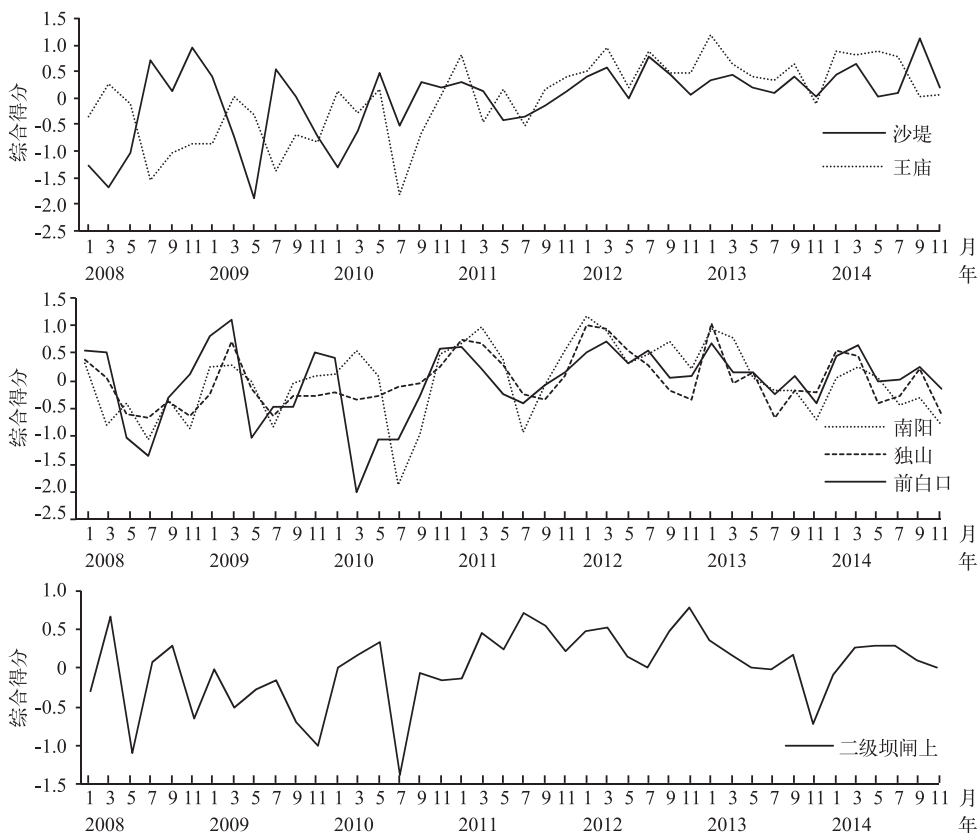


图 2 各监测点综合得分序列

Fig.2 The score sequence of each station

## 2.2 水质变化趋势分析

2.2.1 6个监测点水质变化趋势 王庙和沙堤监测点的水质在2010年末之后得分变大,出现稳定变好的趋势(图2)。王庙和沙堤监测点分别靠近洙水河和城郭河的入湖口,这2个监测点的水质状况直接受该两条河流水质的影响(图1)。自2008年以来,洙水河水质呈现逐步变好趋势,以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP为例,其年均浓度分别由9.44和0.64 mg/L减小为1.80和0.20 mg/L;城郭河水质指标变化幅度小于洙水河,但也明显变好,其 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP年均浓度分别由2.55和0.49 mg/L减小为1.16和0.23 mg/L;DO浓度明显增大变好(图3)。因此,王庙和沙堤监测点水质受入湖河流水质影响,稳定变好。

前白口、南阳和独山3个监测点水质变好趋势不明显,且呈现出明显的季节差异,水质冬季好、夏季差(图2)。分析单项水质指标,3个监测点的DO和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度均呈现明显的季节性,DO浓度冬季高、夏季低, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度冬季低、夏季高,其余指标年际变化无明显规律,这与整体水质状况是对应的。因数据仅选取奇数月,故分析3个监测点2011—2014年5、7、9月各项指标变化,尤以DO、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{BOD}_5$ 、TP浓度的变差趋势最为明显。分析入湖河流水质状况,以距离3个监测点较近的东鱼河、泗河、万福河为例,3条河流单项水质指标年均浓度大部分有变差趋势(图3),因此,受入湖河流水质的影响,前白口、南阳和独山3个监测点的水质并无明显变好趋势。南四湖流域四季分明,流域内平均降水量为620~740 mm左右,年内降水分配不均匀,有60%~70%集中于6—9月<sup>[7]</sup>。在汛期,入湖河流的流量和流速均明显变大,冲刷河流沿途城镇的生活垃圾进入湖区内,且极易引起湖区底泥扰动,加大水体与湖底沉积物的物质交换,从而使水体质量变差。

二级坝闸上监测点的水质变化趋势不明显,2010年底水质变好之后,在2013年11月水质突然变差(图2)。分析水质单项指标,2013年9月 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为0.42 mg/L,在2013年11月变为0.56 mg/L,TP浓度由小于检出限到0.1 mg/L,其余水质指标浓度变化不大。当湖水流速不大时,南四湖上覆湖水的有机质、氮磷浓度与湖底表层底泥有机质、氮磷浓度的相关性并不是很大<sup>[8]</sup>,南水北调东线一期工程在2013年10月试通水,二级坝闸门打开,使得二级坝附近的水体流量达到125 m<sup>3</sup>/s,基于南四湖北狭长的地理特性,流速变大,水流的冲击力导致该处底泥扰动,底泥中丰富的有机质和氮、磷等污染物进入水体中,从而导致二级坝闸上水质明显变差;且二级坝闸下极易蓄积污染物,调水使得这些污染物进入上级湖。

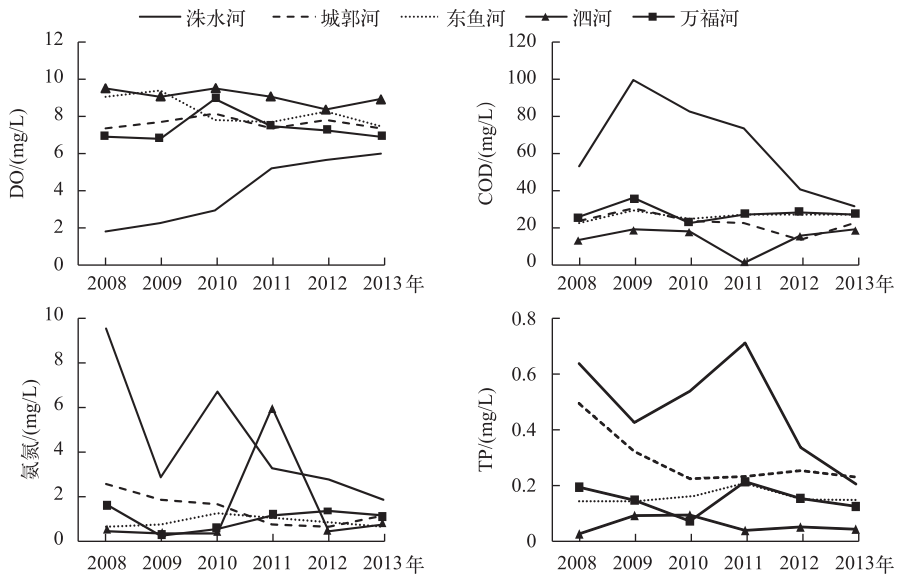


图3 南四湖上级湖入湖河流水质指标年均浓度变化

Fig.3 The indexes' annual variation of the rivers into upper-reach lakes of Lake Nansi

2.2.2 南四湖上级湖整体水质变化趋势 采用全参数评价法<sup>[9]</sup>计算南四湖上级湖2008—2014年的水质类别。2000—2007年水质类别查阅山东省水资源公报(2000—2007年)<sup>[10]</sup>。由表3可见,南四湖上级湖2008—

表3 南四湖上级湖 2000—2014 年水质类别  
Tab.3 The water quality category of upper-reach lakes of Lake Nansi during 2000—2014

年份	水质类别	年份	水质类别
2000	劣 V 类	2008	V 类
2001	劣 V 类	2009	V 类
2002	劣 V 类	2010	V 类
2003	V 类	2011	Ⅲ类
2004	V 类	2012	Ⅲ类
2005	V 类	2013	Ⅲ类
2006	V 类	2014	Ⅲ类
2007	劣 V 类		

2014 年的水质较 2000—2007 年有明显改善,特别是 2011—2014 年,水质达到Ⅲ类水标准。

2010 年,由于山东省南水北调截蓄导用工程的实施,该工程对南四湖的水质状况产生了明显的影响。中水截蓄导用工程的建设,使中水变成了工业、农业灌溉、城市景观等用水,从而要求污水处理厂、工业点源做到达标排放。以滕州市为例,滕州市城郭河中水截蓄在干线输水期回用水量为  $1201.2 \times 10^4$  t,通过中水回用可直接减少的 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  入河量分别为 1133.1 和 98.7 t/a<sup>[11]</sup>,从而使得城郭河入南四湖的 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  量减少;在济宁市环南四湖大生态带工程建设规划中,2008—2010 年为规划的第 1 阶段,湖区修复和水质净化工程的建设实施<sup>[12]</sup>,保证了南四湖上级湖水质的稳定。

### 2.3 水体主要污染指标分析

在利用主成分分析法进行水质评价的过程中,由主成分荷载矩阵可以得出王庙等 6 个监测点共有的主要水质污染指标为 COD、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{BOD}_5$ ,且在各月份最差指标所占比例的统计中,该 3 项指标在 42 个奇数月中所占比重均在 10% 以上,特别是  $\text{BOD}_5$  比重均在 30% 以上。因此,南四湖上级湖主要是有机物污染。

南四湖整体水质变差,受近年来沿湖地区无序开发,以及强度过大影响较为显著,文献[13]中详细分析了南四湖入湖河流的水质及主要污染指标,即南阳湖上级湖周边入湖河流的有机物污染严重,造成了接纳入湖河流的湖区有机物污染严重,本文分析得出的主要污染指标与其一致。所以河流是南四湖上级湖的主要污染源,湖区水环境的恢复治理首先要解决入湖河流的水污染问题。

## 3 结论及建议

1)为了更好地使水质指标的监测值和水质类别标准保持一致,本文对常用的归一化方法进行了改进,该方法客观地反映各类指标所属的水质类别。采用主成分分析法进行同一监测点水质在时间上的评价,得出的评价结果符合物理机制,能够较好地考虑各项指标之间的相关性,可用于水质时间变化分析。

2)6 个监测点在湖区分布位置不同,水质变化趋势也存在较大差异,水质主要影响因素也不同。王庙和沙堤监测点水质在 2010 年末呈现稳定变好趋势;前白口、南阳和独山监测点水质并未变好,但呈现出明显的季节性;二级坝闸上水质变化趋势不明显,但在 2013 年 11 月水质明显变差。

3)南四湖上级湖水质较 2010 年之前有明显改善,南水北调山东省截蓄导用工程的实施对水质改善起到了重要作用;但在南四湖调水期间,底泥扰动等因素会影响水体质量,应在此期间严格控制水体流速,改善水力特性,减少底泥及外源对水体的双重污染,从而保证输水通道的水质安全。

4)南四湖上级湖湖区水质的主要影响指标为 COD、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{BOD}_5$ ,其有机污染的特点较明显,由于缺少入湖河流水质监测数据,本研究仅根据沿湖地区经济社会发展现状,推断入湖河流的水质状况对湖区及出湖水质的影响应该是起决定性作用的因素。南四湖的治理需要针对不同水域的水质差别,查明污染源,实施入湖河流域污染的源头控制与湖泊内源污染防治相结合,以及工程治污、结构减排与监管控污相结合。

## 4 参考文献

- [1] 辛颖,武周虎,慕金波等.南四湖入湖、入干线河流与输水干线的水质动态分析.安全与环境工程,2013,20(3):36-41.
- [2] 宫莹.城市中小型浅水湖泊水环境预测方法应用研究[学位论文].南京:河海大学,2004:10-11.
- [3] 刘小楠,崔巍.主成分分析法在汾河水质评价中的应用.中国给水排水,2009,25(18):105-108.
- [4] 倪晓.南四湖流域水污染总量控制及水质综合改善方案研究[学位论文].济南:山东师范大学,2013:19-22.
- [5] 地表水环境质量标准. GB 3838—2002.
- [6] 杨竞,童祯恭,刘玉哲.SPSS 软件对饮用水水质进行主成分分析评价的运用.环境科学与技术,2011,34(7):

171-174.

- [ 7 ] 赵群群, 杨 凯. 南四湖污染物排放对南水北调东线水质的影响及治理措施. 价值工程, 2010, (8): 105-106.
- [ 8 ] 张双双, 武周虎, 张 洁等. 南四湖表层底泥有机质及氮磷分布特征. 青岛理工大学学报, 2014, 35(5): 64-69.
- [ 9 ] 山东省水功能区水质通报, 2013.
- [ 10 ] 山东省水资源公报, 2000—2007.
- [ 11 ] 郑从奇. 南水北调山东段中水截蓄导用工程综合效益评价研究[学位论文]. 济南: 山东大学, 2013: 22.
- [ 12 ] 南水北调东线济宁市环南四湖大生态带工程建设规划. 济宁市人民政府, 2009: 15.
- [ 13 ] 李文猛. 南四湖及其入湖河流的水质评价分析[学位论文]. 天津: 天津大学, 2012: 50-56.
- [ 14 ] 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. 湖泊科学, 2012, 24(6): 923-931. DOI 10.18307/2012.0616.
- [ 15 ] 李靖华, 郭耀煌. 主成分分析用于多指标评价的方法研究——主成分评价. 管理工程学报, 2002, 16(1): 39-43.
- [ 16 ] 邹海明, 蒋良富, 李粉茹. 基于主成分分析的水质评价方法. 数学的实践与认识, 2008, 38(8): 85-90.
- [ 17 ] 刘臣辉, 吕信红, 范海燕. 主成分分析法用于环境质量评价的探讨. 环境科学与管理, 2011, 26(3): 183-186.
- [ 18 ] 刘远书, 杜 婷, 黄跃飞等. 南四湖截污导流工程水量水质联合调度运行研究. 河海大学学报: 自然工学版, 2013, 41(5): 395-399.
- [ 19 ] 高学平, 李文猛, 张 晨等. 入湖河流对南四湖水质的影响. 水资源保护, 2013, 29(2): 1-5.