

南四湖入湖河口水质综合分析与改善效果评估*

武周虎 任杰 张晓波 陈珊 董国栋

(青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要 南四湖是南水北调东线工程重要的输水通道和调蓄湖泊,随着通水时间的临近,南四湖入湖河流的水质状况更加受到关注。通过对4次南四湖水质空间分布35个人湖河口的监测数据的统计比较和污染负荷量分析,在分析计算平均综合污染指数和等标污染负荷的基础上,进行不同河流的污染状况比较和水质改善效果评估。研究表明,2010—2011年南四湖入湖河口水质平均综合污染指数(1.56)比2006—2007年(2.73)下降了42.9%,重污染河流由12条减少为3条;南四湖入湖污染负荷总量削减率总体达到了66.0%,入湖污染负荷量分布75%以上集中在主要排污河流,南四湖流域的污染物以TN为主;南四湖的重污染河流为房庄河、老运河和洸府河,10条主要排污河流为老运河、洸府河、东鱼河、房庄河、泗河、洙赵新河、白马河、薛城小沙河、新薛河、新万福河,这些河流是南四湖流域治污的重点。

关键词 南水北调 南四湖 入湖河流 水质分析 平均综合污染指数 等标污染负荷比

南四湖是山东省最大的淡水湖泊,是国家南水北调东线工程重要的输水通道和调蓄湖泊,工程计划在2013年正式通水,其水质状况一直受到人们的广泛关注^[1-4]。为考量南四湖流域实施“治”、“用”、“保”并举策略等综合治理措施的效果,以及进行南四湖流域水质状况评价和重大水环境问题诊断研究,分别于2006年11月、2007年4月、2010年11月和2011年5月开展了4次南四湖水质空间分布监测工作^[5]。

国内外对地表水水环境质量现状调查与评价的研究成果很多,如尹海龙等^[6]开展了河流综合水质评价方法比较研究;刘硕等^[7]开展了对几种环境质量综合指数评价方法的探讨;范瑜^[8]进行了平均综合污染指数在地面水污染分级中的应用研究;钟定胜等^[9]采用等标污染负荷法评价污染源对水环境的影响;KEMKA等^[10]给出了城区湖泊富营养化研究成果;武周虎等^[11]根据前2次南四湖水质空间分布入湖河口监测数据,采用平均综合污染指数筛选了南四湖入湖重点污染河流。随着南四湖流域扎实推进污染综合治理和通水时间的临近,南四湖入湖河流的水质状况更加受到关注。

本文通过对4次南四湖水质空间分布入湖河口监测数据的统计比较和污染负荷量分析,在计算和分析平均综合污染指数和等标污染负荷的基础上,对不同河流的污染状况进行比较,确定重污染河流、主要排污河流和主要污染物,进行近4年来南四湖入湖河流的水质改善效果评估研究。

1 流域概况、采样点及监测指标

南四湖位于淮河沂沭泗流域西部,是南阳湖、独山湖、昭阳湖和微山湖4个由西北向东南相连而成湖泊的总称,南北狭长,湖盆浅平,北高南低。二级闸坝枢纽工程位于南四湖中部,将其分成上级湖(北)和下级湖(南),天然情况是上级湖经二级闸泄水入下级湖再经韩庄运河和不牢河入中运河,而南水北调输水是由下级湖南端进入、经二级坝泵站、由上级湖北端入梁济运河。

南四湖流域面积31700 km²(其中山东省流域面积25700 km²),南四湖东、西、北三面承接苏、鲁、豫、皖4省32个县(市、区)53条河流的来水。水质空间分布监测的35个主要入湖河口总汇水面积为29534 km²,占流域面积的93.2%。南四湖主要入湖河口采样点编号、河流名称及汇水面积见图1和表1。

根据南四湖流域的历史监测资料分析,该流域的水体污染特征主要是结构性污染,主要超标因子为COD、NH₃-N等^[12],且南四湖已处于不同程度的富营养状态。因此,在南四湖主要入湖河口水质空间分布监测中,监测项目为水温、pH、COD、NH₃-N、TP、TN、高锰酸盐指数(2010、2011年增加)、透明度、电导率和流量。

以2011年为例,共完成91个湖区点位和38个人湖河口点位的监测,共报出有效数据2017个,其中现场监测数据705个,实验室监测数据1312个。

第一作者:武周虎,男,1959年生,硕士,教授,主要从事水环境模拟与污染评估研究。

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(N0.2009ZX07210-007-01)。

表 1 南四湖主要入湖河流(口)采样点编号及汇水面积¹⁾

上级湖湖西区			上级湖湖东区			下级湖湖西区			下级湖湖东区		
编号	河名	汇水面积/km ²	编号	河名	汇水面积/km ²	编号	河名	汇水面积/km ²	编号	河名	汇水面积/km ²
1	梁济运河	3 306	3	洸府河 ²⁾	1 367	20	沿河	338	19	房庄河	82
2	龙拱河	52	4	幸福河	75	21	鹿口河	525	24	新薛河	663
6	洙水河	571	5	泗河	2 357	22	五段河	36	25	薛城小沙河	54
7	洙赵新河	4 206	10	白马河	1 052	23	郑集河	497	26	潘庄河	29
8	蔡河	322	18	城郭河	916	34	挖工庄河	510	27	小新河	25
9	新万福河	1 330	30	小荆河	53				28	夏镇航运河	42
11	老万福河	563	31	北沙河	505				29	薛城沙河	296
12	惠河	85	32	龙河	116						
13	西支河	96	33	界河	193						
14	东鱼河	5 923	35	老运河 ²⁾	30						
15	复兴河	1 812									
16	大沙河	1 638									
17	杨官屯河	69									

注: ¹⁾2006 年 11 月监测 1~26 号采样点,2007 年 4 月监测 1~34 号采样点,2010 年 11 月和 2011 年 5 月监测 1~35 号采样点; ²⁾在 2006、2007 年监测时,洸府河和老运河为同一入湖口;在此期间,文中对洸府河入湖口的水质分析也适用于老运河。

表 2 南四湖入湖河口水质及流量监测结果统计与比较¹⁾

项目	水温 ¹⁾ /℃	pH	COD (mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N (mg·L ⁻¹)	TP (mg·L ⁻¹)	TN (mg·L ⁻¹)	高锰酸盐指数 (mg·L ⁻¹)	透明度 /cm	电导率 (μS·cm ⁻¹)	总流量 (m ³ ·s ⁻¹)
2006	18.2	7.8	35.8	3.1	0.26	4.9		39.9	1 167	21.6
2007	18.9	8.1	43.6	2.8	0.28	5.9		53.5	1 203	15.4
2010	11.5	7.8	31.2	1.0	0.19	3.3	7.8	35.5	1 391	17.5
2011	22.3	8.4	29.6	1.1	0.19	2.9	6.9	38.9	1 484	11.0
2006—2007	18.5	8.0	39.7	3.0	0.27	5.4		46.7	1 185	18.5
2010—2011	16.9	8.1	30.4	1.0	0.19	3.1	7.4	37.2	1 438	14.3

注: ¹⁾2010 年水温偏低和 2011 年水温偏高都是由于汛前、汛后同期监测的日期推迟,受气候条件的影响所致。

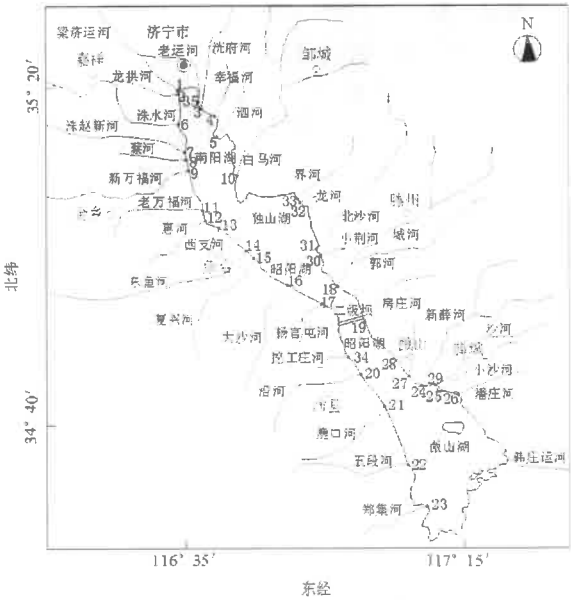


图 1 南四湖主要入湖河流(口)采样点位及编号

2 按平均浓度和污染指数分析

2.1 入湖河口水质比较分析

从时间上看,2006、2010 年为汛后监测,2007、2011 年为汛前监测,因此前 2 次监测的平均值可代表 2006—2007 年枯水期(对应东线工程实施后的调水期,下同)的水质状况,后 2 次监测的平均值可代

表 2010—2011 年枯水期的水质状况。表 2 给出了 4 次南四湖入湖河口水质及流量监测结果统计与比较,表中 2006—2007 和 2010—2011 栏分别表示相应年的枯水期平均值,总流量表示被监测河流的入湖累计流量。

由表 2 可以看出,2007 年汛前与 2006 年汛后相比,南四湖入湖河口 pH、COD、TP、TN、透明度和电导率的平均值均呈现上升趋势,NH₃-N 稍有下降,总流量下降。而 2011 年汛前与 2010 年汛后相比,南四湖入湖河口 COD、TN 和高锰酸盐指数的平均值均呈现下降趋势,这是由于随着南水北调东线工程通水时间的临近,南四湖流域治污和环境监管力度进一步加大,形成了水质在枯水期仍然呈现持续下降的趋势。

由表 2 数据计算可得到,2010—2011 年相对 2006—2007 年枯水期,水温、pH、COD、NH₃-N、TP、TN、透明度、电导率、总流量平均值的下降率分别为 8.6%、-1.3%、23.4%、66.7%、29.6%、42.6%、20.3%、-21.4%、22.7%。可以看出,近 4 年来南四湖入湖河流的水质得到大幅度的改善,COD、NH₃-N、TP、TN 的下降率在 23.4%~66.7%,平均下降率为 40.6%。南四湖入湖河口的总流量下降了 22.7%,

表3 南四湖入湖河口按平均综合污染指数的评价结果

时期	河口测点数/个	参与评价的水质指标	平均综合污染指数	按 GB 3838—2002 Ⅲ类标准评价/%			
				合格 $S_i \leq 0.8$	基本合格 $0.8 < S_i \leq 1.0$	污染 $1.0 < S_i \leq 2.0$	重污染 $S_i > 2.0$
2006—2007	26, 34 ¹⁾	COD、NH ₃ -N、TP、TN	2.73	11.8	20.6	35.3	32.4
2010—2011	35	COD、NH ₃ -N、TP、TN、高锰酸盐指数	1.56	8.6	34.3	48.6	8.6

注: 1) 2006年(26个测点)未监测的河口,采用2007年(34个测点)的监测数据计算。

除降雨气象原因外,南四湖流域的24个污水资源化与截蓄导用工程发挥着重要的作用。入湖河口水体的电导率上升,说明入湖中水比例增加,水资源的循环利用在流域内发挥着重要作用。

2.2 水质平均综合污染指数分析

水质平均综合污染指数是以单项污染指数为基础,采用主要水质指标单项污染指数的平均值进行评价。通过公式计算各入湖河口的平均综合污染指数,按其数值大小判断河流污染的轻重程度,逆排序筛选重污染河流。

单项污染指数(S_{ij}):

$$S_{ij} = C_{ij} / C_{si} \quad (1)$$

平均综合污染指数(S_j):

$$S_j = \frac{1}{n} \sum_i S_{ij} \quad (2)$$

式中: $i=1,2,3,4,5$,依次表示主要水质指标 COD、NH₃-N、TP、TN、高锰酸盐指数; j 为河流入湖口采样点编号($j=1,2,3,\dots,m$); C_{ij} 为 j 河流 i 水质指标的入湖口质量浓度实测值,mg/L; C_{si} 为 i 水质指标的评价标准限值,mg/L,按《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准依次为20、1、0.2、1、6 mg/L; n 为参与评价的水质指标数。

根据平均综合污染指数的大小可将水体分为合格、基本合格、污染和重污染4类,其对应关系见表3。表3还给出了2006—2007年和2010—2011年枯水期南四湖入湖河口按平均综合污染指数的评价结果。

由表3可以看出,2010—2011年比2006—2007年重污染河口比例大幅度减少,合格河口比例有所减少,处于基本合格和污染类别的河口比例增多。按平均综合污染指数逆排序筛选的重污染河流:2006—2007年为洸府河+老运河、薛城小沙河、房庄河、城郭河、白马河、梁济运河、新薛河、洙水河、老万福河、潘庄河和幸福河,共12个河口;2010—2011年为房庄河、老运河和洸府河,共3个河口。重污染河流由12条减少为3条。

2010—2011年南四湖入湖河口水质平均综合污染指数为1.56,比2006—2007年的2.73下降了42.9%,其中COD、NH₃-N、TP、TN的水质平均单

项污染指数依次下降了24.6%、60.9%、24.2%、39.2%。说明南四湖重污染河流和主要污染物得到比较有效的控制。

3 按污染负荷分析

3.1 入湖河口污染负荷量分析

南四湖各入湖河口COD、NH₃-N、TP、TN、高锰酸盐指数的污染负荷量等于河流流量与相应水质指标的浓度实测值乘积:

$$W_{ij} = C_{ij} \cdot Q_j \quad (3)$$

式中: W_{ij} 为 j 河流 i 水质指标的污染负荷量,mg/s(下面换算为t/a); Q_j 为 j 河流的流量,L/s。

根据式(3)按主要水质指标和入湖河口分别计算污染负荷量,然后将2006—2007、2010—2011年按各污染物负荷量筛选的10条主要排污河流分别列于表4和表5,表中年统计数据按枯水期平均值计算,即不考虑汛期洪水及集中的非点源污染物增加部分,因此可以理解为常年以点源污染为主入湖负荷量。由表4、表5数据计算可得,2006—2007年主要排污河流COD、NH₃-N、TP和TN负荷量占入湖负荷总量的比例分别为75.4%、97.6%、89.9%、89.6%;2010—2011年主要排污河流COD、NH₃-N、TP、TN和高锰酸盐指数负荷量占入湖负荷总量比例分别为75.7%、85.2%、87.4%、84.7%、77.3%;2010—2011年相对2006—2007年COD、NH₃-N、TP和TN入湖负荷总量削减率分别为45.0%、82.2%、45.0%、64.6%。

可见,2006—2007年COD的污染负荷量分布相对较广,而NH₃-N、TP、TN的污染负荷量集中分布在主要排污河流;2010—2011年COD、高锰酸盐指数的污染负荷量分布相对较广,而NH₃-N、TP、TN的污染负荷量集中分布在主要排污河流。根据35条入湖河流5个水质指标平均等标污染负荷的总和计算得出,2010—2011年(77 462.1万m³/a)相对2006—2007年(227 540.2万m³/a)各种污染物入湖负荷总量削减率总体达到了66.0%,成效显著。

根据文献[13]提供的2000年南四湖入湖负荷总

表4 2006—2007年南四湖10条主要排污河流各污染物负荷量及总量统计

序号	项目	COD /(t·a ⁻¹)	河名	NH ₃ -N /(t·a ⁻¹)	河名	TP /(t·a ⁻¹)	河名	TN /(t·a ⁻¹)
1,2	浼府河+老运河	3 689.8	浼府河+老运河	1 196.9	浼府河+老运河	94.9	浼府河+老运河	1 601.4
3	幸福河	3 076.5	白马河	563.7	城郭河	46.1	白马河	759.8
4	白马河	2 926.6	城郭河	302.4	幸福河	24.6	城郭河	384.3
5	洙赵新河	2 394.9	幸福河	126.7	白马河	11.0	幸福河	325.3
6	泗河	2 339.2	薛城小沙河	103.8	洙水河	9.4	薛城小沙河	147.1
7	城郭河	1 946.5	新薛河	43.6	洙赵新河	7.9	龙拱河	141.8
8	龙拱河	1 023.2	洙水河	35.0	泗河	6.3	洙赵新河	135.7
9	沿河	1 006.9	老万福河	31.2	薛城小沙河	3.4	洙水河	131.1
10	东鱼河	1 002.5	房庄河	11.5	龙拱河	3.2	泗河	130.8
	10条主要排污 河流负荷量	19 406.0		2 414.8		206.8		3 757.2
	入湖负荷总量	25 750.0		2 473.2		230.0		4 191.1

表5 2010—2011年南四湖10条主要排污河流各污染物负荷量及总量统计

序号	项目	COD (t·a ⁻¹)	河名	NH ₃ -N (t·a ⁻¹)	河名	TP (t·a ⁻¹)	河名	TN (t·a ⁻¹)	河名	高锰酸盐指数 (t·a ⁻¹)
1	老运河	2 469.9	老运河	158.6	老运河	42.1	老运河	625.9	老运河	816.8
2	东鱼河	2 086.2	房庄河	76.7	浼府河	33.4	浼府河	166.9	浼府河	570.5
3	浼府河	1 724.0	浼府河	61.8	东鱼河	8.9	房庄河	138.6	东鱼河	418.1
4	泗河	1 221.1	东鱼河	21.4	白马河	7.2	泗河	81.7	泗河	243.2
5	洙赵新河	964.9	泗河	15.6	泗河	3.8	白马河	57.9	洙赵新河	205.3
6	复兴河	513.2	洙赵新河	9.5	洙赵新河	3.7	薛城小沙河	55.4	沿河	121.5
7	新万福河	505.8	新薛河	8.8	新薛河	3.3	洙赵新河	37.8	新薛河	120.5
8	白马河	461.7	新万福河	8.4	洙水河	2.9	新万福河	31.3	新万福河	113.1
9	小新河	391.0	复兴河	7.8	城郭河	2.7	东鱼河	30.9	白马河	106.4
10	薛城沙河	371.5	白马河	7.3	薛城小沙河	2.4	新薛河	30.2	复兴河	105.4
	10条主要排污 河流负荷量	10 709.3		376.0		110.5		1 256.6		2 820.8
	入湖负荷总量	14 155.6		441.2		126.4		1 484.2		3 647.0

量统计数据(COD为17.20万t/a, NH₃-N为1.17万t/a)计算表明,2006年与2000年相比,COD削减率达到85.0%,NH₃-N削减率达到78.9%;2010年与2000年相比,COD削减率达到91.8%,NH₃-N削减率达到96.2%。10年来,山东省按照“治”、“用”、“保”并举策略,在南四湖流域治污效果显著。

3.2 入湖河口等标污染负荷比分析

在对南四湖流域的多个污染源(河流)及其排放的多种污染物进行评价,以确定主要污染源和主要污染物时,采用等标污染负荷作为统一比较的尺度,对各污染源和各污染物的环境影响大小进行比较。某河流某水质指标的等标污染负荷等于该河流该水质指标的污染负荷量除以环境质量标准限值,计算公式为:

$$P_{ij} = W_{ij} / C_{ij} \quad (4)$$

式中: P_{ij} 为j河流i水质指标的等标污染负荷,10⁶ m³/a。

某河流的等标污染负荷是该河流各主要水质指标等标污染负荷的总和,即j河流的等标污染负荷为:

$$P_j = \sum_i P_{ij} \quad (5)$$

南四湖流域的等标污染负荷是所有监测的入湖河流等标污染负荷的总和,即:

$$P = \sum_j P_j \quad (6)$$

某河流的等标污染负荷比是该河流各主要水质指标等标污染负荷的总和除以南四湖流域的等标污染负荷,即j河流的等标污染负荷比为:

$$K_j = P_j / P \times 100\% \quad (7)$$

某污染物的分担率是相应水质指标各河流等标污染负荷的总和除以南四湖流域的等标污染负荷,即i污染物的分担率为:

$$K_i = \sum_j P_{ij} / P \times 100\% \quad (8)$$

在前面按各污染物负荷量分别排序筛选的主要排污河流是突出单项污染物的来源,下面以主要水质指标综合计算等标污染负荷比逆排序筛选主要排污河流以突出各主要污染物的来源,结果见表6。图2给出了南四湖入湖河流的主要污染物分担率。

由表6可以看出,按等标污染负荷比逆排序筛选的10条主要排污河流:2006—2007年为浼府河+老运河、白马河、城郭河、幸福河、洙赵新河、泗河、

表6 南四湖入湖河口按等标污染负荷比逆排序筛选的10条主要排污河流

项目		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	合计
2006—2007	河名	洸府河+老运河		白马河	城郭河	幸福河	洙赵新河	泗河	薛城小沙河	洙水河	龙拱河	
	负荷比/%	38.0		16.8	11.1	8.0	3.3	3.1	3.1	2.8	2.4	88.6
2010—2011	河名	老运河	洸府河	东鱼河	房庄河	泗河	洙赵新河	白马河	薛城小沙河	新薛河	新万福河	
	负荷比/%	32.4	14.9	7.0	6.4	5.6	3.8	3.7	2.5	2.4	2.4	81.1

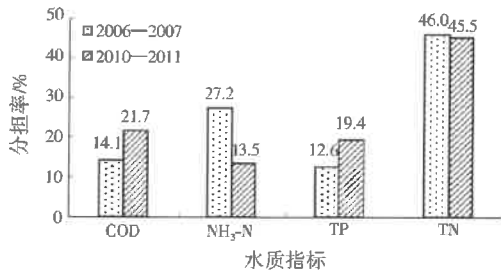


图2 南四湖入湖河流的主要污染物分担率

薛城小沙河、洙水河、龙拱河；2010—2011年为老运河、洸府河、东鱼河、房庄河、泗河、洙赵新河、白马河、薛城小沙河、新薛河、新万福河。主要排污河流的累计等标污染负荷比均达到了80%以上，说明南四湖的污染物集中来自主要排污河流，特别是来自洸府河和老运河。在洸府河和老运河的汇水区域主要有济宁市区、高新技术产业开发区以及兖州市区等人口和工业密集地区，每天有近60万m³的污水处理厂尾水，通过这些河流进入南阳湖，使得南四湖南阳湖形成类似滇池草海、太湖梅梁湾的污染形势。

由图2可以看出，南四湖入湖河口COD、NH₃-N、TP、TN的分担率2006—2007年依次为14.1%、27.2%、12.6%、46.0%，2010—2011年依次为21.7%、13.5%、19.4%、45.5%，说明南四湖流域的污染物以TN为主，但COD和TP的分担率出现上升。

4 结论

(1) 以4次南四湖水质空间分布35个人湖河口的监测数据为基础，通过统计比较得出2007年汛前比2006年汛后人湖河口水质稍差，而2011年汛前比2010年汛后南四湖流域治污和环境监管力度进一步加大，形成了水质在枯水期仍然呈现持续下降的趋势。

(2) 2010—2011年南四湖入湖河口水质平均综合污染指数(1.56)比2006—2007年(2.73)下降了42.9%，其中COD、NH₃-N、TP、TN的水质平均单项污染指数依次下降了24.6%、60.9%、24.2%、39.2%。重污染河流由12条减少为3条。

(3) 2010—2011年比2006—2007年南四湖COD、NH₃-N、TP、TN的入湖负荷总量削减率依次达到45.0%、82.2%、45.0%、64.6%，总体达到了

66.0%。南四湖入湖污染负荷量分布75%以上集中在主要排污河流，南四湖流域的污染物以TN为主。

(4) 2010—2011年按平均综合污染指数逆排序筛选的重污染河流为房庄河、老运河和洸府河；按等标污染负荷比逆排序筛选的10条主要排污河流为老运河、洸府河、东鱼河、房庄河、泗河、洙赵新河、白马河、薛城小沙河、新薛河、新万福河。这些河流是南四湖流域治污的重点。

(致谢：南四湖水质空间分布监测工作由山东省环境保护厅组织，得到了美商生化科技公司的技术支持，监测计划由青岛理工大学和山东大学共同编制，山东省环境监测中心站、济宁市环境监测站负责实施，在此一并表示感谢！)

参考文献：

- [1] 张祖陆,孙庆义,彭利民,等.南四湖地区水环境问题探析[J].湖泊科学,1999,11(1):86-90.
- [2] 陈磊,裴海燕,解军.改善南四湖水质的关键问题分析[J].中国给水排水,2007,23(20):6-10.
- [3] 刘洪林,邢文洁,王素芬,等.南水北调东线输水干线南四湖水环境质量研究[J].水文,2003,23(4):49-51.
- [4] WU Zhouhu, WANG H B, LU C G, et al. The lake eutrophication modeling and the appliance in Nansi Lake [C]//13th World Lake Conference. Beijing, China Agricultural University Press, 2010:900-903.
- [5] WU Zhouhu, ZHANG Jian, ZHU Jie, et al. A monitoring project planning technique of the water quality spatial distribution in Nansi Lake[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10 (C):2320-2328.
- [6] 尹海龙,徐祖信.河流综合水质评价方法比较研究[J].长江流域资源与环境,2008,17(5):729-733.
- [7] 刘硕,朱建平,蒋火华.对几种环境质量综合指数评价方法的探讨[J].中国环境监测,1999,15(5):33-37.
- [8] 范瑜.平均综合污染指数在地面水污染分级中的应用[D].上海:中国科学院上海冶金研究所,2000.
- [9] 钟定胜,张宏伟.等标污染负荷法评价污染源对水环境的影响[J].中国给水排水,2005,21(5):101-103.
- [10] KEMKA N, NJINE T, ZEBAZE TOGOUET S H, et al. Eutrophication of lakes in urbanized areas; the case of Yaounde Municipal Lake in Cameroon, Central Africa [J]. Lakes & Reservoirs: Research and Management, 2006(11):47-55.
- [11] 武周虎,张晓波,张芳园.南四湖人湖重点污染河流筛选与水环境问题研究[J].长江流域资源与环境,2011,20(4):475-481.
- [12] 武周虎,慕金波,谢刚,等.南四湖及入湖河流水质环境质量变化趋势分析[J].环境科学研究,2010,23(9):1167-1173.
- [13] 山东省环境保护局.南水北调水环境保护研究[R].济南:山东省环境保护局,2002.

编辑:陈泽军 (修改稿收到日期:2012-01-10)