

太湖流域(江苏省)水质污染空间特征*

胡开明^{1,2}, 李冰^{1,2}, 王水^{1,2}, 周家艳^{1,2}, 田颖^{1,2}

(1: 江苏省环境科学研究院, 南京 210036)

(2: 江苏省环境工程重点实验室, 南京 210036)

摘要: 基于 SPSS 20.0 统计软件, 对太湖流域(江苏省)9 个三级生态功能分区和湖体 28 项水质指标数据分别进行处理, 从原始监测数据中提取出 5 个主成分, 计算其贡献率和主成分得分值, 研究主要污染因子的组合, 并对相应污染源进行分析。结果表明第一主成分主要体现了水体中氮、磷等导致富营养化的关键因子, 而第二个主成分主要反映水体重金属水平, 整个江苏省太湖流域污染情况空间分布略有不同, 水环境质量也大体表现为北高南低、西高东低的趋势, 湖体也存在对应的空间特征, 反映了流域外源输入是导致湖体水质污染的主要原因之一, 为太湖流域的环境监测及污染治理提供重要的信息和依据。

关键词: 太湖流域; 水质; 空间特征; 主成分分析

Spatial distribution characteristics of water quality pollution in the Lake Taihu basin, Jiangsu Province

HU Kaiming^{1,2}, LI Bing^{1,2}, WANG Shui^{1,2}, ZHOU Jiayan^{1,2} & TIAN Ying^{1,2}

(1: *Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, P. R. China*)

(2: *Jiangsu Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Nanjing 210036, P. R. China*)

Abstract: Using principal component analysis method in SPSS 20.0 statistical software, the data of 28 water quality indexes in 9 level III aquatic ecological function zones in the Lake Taihu basin as well as in each lake region were separately processed. Five principal components from the original monitoring data were derived. According to the contribution rate and score of each principal component, the combination of main pollution factors and relative pollution sources were analyzed finally. The first principal component reflected the key factors of the water eutrophication including N and P. The second principal component reflected the heavy metal matter level. There existed a significant spatial pattern in pollution source characteristics, and water quality both in basin and lake deteriorated not only from the south to the north, but also from the east to the west. The results indicated that exogenous source was a key factor causing water pollution in Lake Taihu. This study provides important information and foundation for the environmental monitoring and pollution treatment.

Keywords: Lake Taihu basin; water quality; spatial distribution characteristics; principal component analysis

近十多年来随着太湖流域工业经济的飞速发展、农村城市化进程的加快推进, 区域河网水质污染程度严重, 水生态问题日益凸现。“十一五”期间, 通过实施“流域水污染防治专项规划”、“国家水体污染控制与治理科技重大专项”等项目, 加大了水污染治理投资, 使得流域水污染防治工作取得了积极进展, 水质总体呈改善趋势, 但由于社会发展引起的诸多因素, 使得水环境污染的格局难以在短期内发生根本性转变。“十二五”期间, 太湖流域总体上仍处于工业化、城镇化加速发展的阶段, 经济增长粗放的状况仍将存在, 环境压力继续加大。由于湖泊围垦等因素导致湖区面积不断减小, 天然湿地逐渐消失, 天然植被覆盖面积大量萎缩, 水生态系统不断退化, 流域水环境问题日益加剧, 制约了经济的发展。因此全面认识太湖流域水质现状及污染空间特征对水环境保护、区域经济发展都具有重要意义。

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07506-001-001)资助。2013-03-25 收稿; 2013-06-28 收修
改稿。胡开明(1985~), 男, 博士, 工程师; E-mail: rickiviva@163.com.

目前,常用的水质评价方法主要包括指数法^[1]、层次分析法^[2]、模糊综合评价法^[3]、灰色评价法^[4]、人工神经网络法^[5]等.由于水质系统的复杂性,水环境质量受到诸多因素的影响,使得以上方法在进行水质分析时具有一定的局限性.主成分分析法与前述方法有着不同的原理和特性,可以将众多指标转换为少数综合指标,最大程度地避免信息的丢失,提高分析结果的可靠性,在实际应用中可以获得很好的效果.

本文通过对2012年江苏省太湖流域的全面水质调查数据进行系统分析,从流域水质空间变化特征入手,结合流域污染情况,利用主成分分析法探讨水质的空间差异以及引起差异的可能原因,找出影响流域水环境的主要驱动因子,以期对江苏省太湖流域水环境保护和水污染防治提供科学参考.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

太湖流域地跨江苏、浙江、安徽、上海三省一市,是长江三角洲的核心区域,总面积 $3.69 \times 10^4 \text{ km}^2$.江苏省太湖流域包括太湖湖体、苏州市、无锡市、常州市和丹阳市的全部行政区域,以及句容市、高淳区、溧水行政区域内对太湖水质有影响的河流、湖泊、水库、渠道等水体所在区域,总面积约 $1.94 \times 10^4 \text{ km}^2$,占太湖全流域的52.6%,其中陆地面积约为 $1.37 \times 10^4 \text{ km}^2$,水面面积为 $0.57 \times 10^4 \text{ km}^2$.全流域地势平坦低洼,西南高,东北低,地形以平原水网为主,少量低山丘陵分布于流域西部,流域内水网交错,湖泊众多,水流流速缓慢^[6].从太湖主要出入湖河道近年来水质变化状况分析,太湖流域水质已逐年改善并逐步趋于稳定,太湖综合治理的效果正逐步显现,但北部和西部入湖河流的污染问题依然严峻^[7-9].

1.2 样品采集与测定

为了对江苏省太湖流域水质空间分布变化特征进行研究,在研究区内共布设87个采样点,基本覆盖全流域(图1),其中太湖湖体20个,流域范围67个,各点位所处河道或湖区情况具体见表1.于2012年11月5-19日,对全部点位进行采样,调查的水环境指标包括五日生化需氧量(BOD_5)、化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总氮(TN)、总磷(TP)、硝酸盐(NO_3^-)、亚硝酸盐(NO_2^-)、磷酸盐(PO_4^{3-})、可溶性有机碳(DOC)、



图1 太湖流域(江苏省)水生态功能三级分区及采样点分布

Fig. 1 Level III aquatic ecological function regionalizations and sampling sites in Lake Taihu basin, Jiangsu Province

总有机碳(TOC)、悬浮物(SS)、总硬度(TH)、总碱度(TA)、碳酸盐(CO_3^{2-})、重碳酸盐(CO_4^{2-})、硫酸盐(SO_4^{2-})、氯化物(Cl^-)、钠(Na^+)、钙(Ca^{2+})、钾(K^+)、镁(Mg^{2+})、镉(Cd^{2+})、铬(Cr^{6+})、铜(Cu^{2+})、汞(Hg^{2+})、铅(Pb^{2+})、锌(Zn^{2+})和砷(As^{3+})。各项指标的测定方法见《湖泊富营养化调查规范》^[10]。采样期间,天气晴朗,没有降雨。水样采用有机玻璃采水器在水面下 50 cm 处采集,所有水样带回实验室后存于 4℃ 冰箱,在 48 h 内分析测试完毕。

表 1 各采样点位所在河道或湖区位置

Tab. 1 Location of sampling sites

点位	所在位置	点位	所在位置	点位	所在位置	点位	所在位置
1	贡湖湾	33	通济河	55	直湖港	77	娄江
2	贡湖湾	34	薛埠北河	56	湍里河	78	里塘河
3	梅梁湾	35	上兴河	57	中干河	79	急水港
4	梅梁湾	36	松溪河	58	煤炭河	81	杨林塘
5	竺山湾	37	沙河水库	59	丹金溧漕河	82	南溪河
6	竺山湾	38	屋溪河	60	宜兴六条河	83	懋港河
7	东部沿岸区	39	伏西溪河	61	武宜运河	84	锡北运河
8	东部沿岸区	40	乌溪港	62	太滬运河	85	张家港
11	东部沿岸区	41	浒光运河	63	德胜河	86	耿泾塘
13	东太湖	42	江南运河	64	江南运河	87	白茆塘
15	东太湖	43	横山水库	65	新孟河	88	吴淞江
16	西部沿岸区	44	浒光运河	66	江南运河	89	洮湖
18	西部沿岸区	45	胥江	67	三山港	90	太浦河
19	南部沿岸区	46	苏东运河	68	青祝河	91	新河
20	南部沿岸区	47	江南运河	69	白屈港	92	夏溪河
21	南部沿岸区	48	横草路	70	东横河	93	锡溧运河
25	湖心区	49	大庙港	71	张家港	94	五里湖
28	湖心区	50	麻溪	72	望虞河	95	湖心区
29	太平河	51	苏东运河	73	张家港	96	界浦江
30	古运河	52	苏东运河	74	常浒河	97	丹金溧漕河
31	香草河	53	小溪港	75	盐铁塘	98	张家港
32	洛阳河	54	武进港	76	浏河		

1.3 分析方法

本文采用主成分分析方法,在保证数据信息损失最小的前提下,经线性变换舍弃一小部分信息,以少数的综合变量取代原始采用的多维变量^[11]。在此基础上,将提取出的主成分因子的得分与其对应的特征值占所提取主成分因子总的特征值之和的权重相乘,而后求和得到综合评分,然后取水质综合得分来分析流域的水质状况。具体分析步骤见文献[12-13]。

2 结果与讨论

2.1 流域

2.1.1 水质主成分分析 根据太湖流域水生态功能分区^[14],太湖流域 21 个三级水生态功能区中,除湖体外江苏境内的有Ⅲ111、Ⅲ112、Ⅲ113、Ⅲ211、Ⅲ212、Ⅲ213、Ⅲ231、Ⅲ232 和Ⅲ233,共 9 个,具体分区见图 1。

将监测数据进行标准化处理后得到标准化数据,标准化处理后各行数据平均值等于 0,标准差等于 1。利用 SPSS 20.0 软件分别对 28 个水环境指标的相关系数和特征值进行分析,并根据累计贡献率确定主成分个数。主成分个数提取原则有 3 个:① 只取 $\lambda > 1$ 的特征根对应的主成分;② 累计百分比达到 80%~85% 以上的 λ 值对应的主成分;③ 根据特征根变化的突变点决定主成分的数量^[15]。为了使具有较大因子载荷量的变量个数减到最低限度,采用方差最大的正交旋转,经旋转后的因子重新分配各个因子的原始变量的方差,使

得因子的方差更接近,也更易于解释. 分析结果见图2和表2,图2反映了所有因子特征值信息,按照主成分分析因子选取原则,选取前5个因子作为主成分因子,累计方差贡献率达到88.908%(表2),能够代表整体因子的情况.

选取前三个主成分的分值来进行计算分析,经最大方差旋转后,第一主成分(F1)的方差贡献率为26.249%,其中TH、Ca²⁺、NH₃-N、Mg²⁺、TP、TN、As³⁺和PO₄³⁻所占的因子载荷较大,可以代表水体的富营养化状况;第二主成分(F2)的方差贡献率为19.222%,其中Hg²⁺、Cr⁶⁺、NO₃⁻、SS和Cd²⁺所占的载荷较大,说明第二主成分主要反映水体重金属水平;第三主成分(F3)的方差贡献率为15.582%,与第三主成分有关联的主要是K⁺、DOC、TOC、SO₄²⁻和Na⁺,主要代表水体有机污染状况及农业面源污染情况,各分区主成分得分及综合得分具体见表3.

由表3可以看出,2012年江苏省太湖流域各三级分区的水质污染程度排序为:Ⅲ213 > Ⅲ233 > Ⅲ211 > Ⅲ112 > Ⅲ212 > Ⅲ111 > Ⅲ232 > Ⅲ231 > Ⅲ113,各分区综合得分分布见图3.

从第一主成分F1得分的排名来看,排在前三位的是Ⅲ111、Ⅲ112和Ⅲ233,说明这3个分区水质因子NH₃-N、TP和TN等营养盐含量相对较高;第二主成分F2得分列前三位的分别是Ⅲ213、Ⅲ211和Ⅲ232,说明Hg²⁺等重金属污染是这些分区的主要问题;Ⅲ233、Ⅲ231和Ⅲ213在第三主成分F3上的得分较高,反映这3个区域受有机污染影响相对较大.

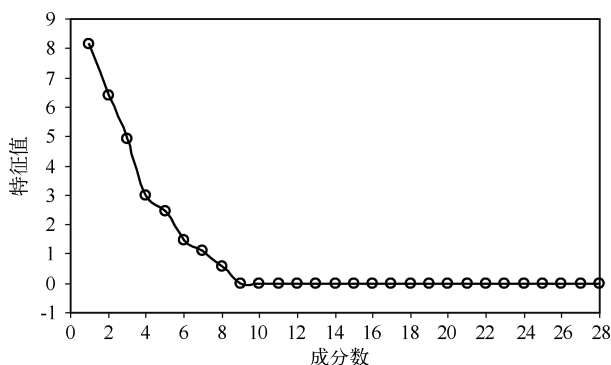


图2 碎石图
Fig.2 Gravel map

表2 太湖流域各分区方差分解主成分提取分析

Tab.2 Principal component extraction analysis of variance decomposition in each region in the Lake Taihu basin

成分	平方载荷的提取量			平方载荷的旋转量		
	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	8.146	29.092	29.092	7.350	26.249	26.249
2	6.393	22.834	51.926	5.382	19.222	45.472
3	4.920	17.571	69.497	4.363	15.582	61.053
4	3.003	10.724	80.221	4.145	14.802	75.855
5	2.432	8.687	88.908	3.655	13.053	88.908

表3 太湖流域各分区主成分得分及综合得分

Tab.3 Principal component scores and composite scores in each region in the Lake Taihu basin

分区	F1 得分	F1 排名	F2 得分	F2 排名	F3 得分	F3 排名	综合得分	综合排名
Ⅲ111	1.605	1	-0.899	9	-1.223	9	-0.125	6
Ⅲ112	0.881	2	-0.622	6	-0.140	5	0.226	4
Ⅲ113	-1.554	9	-0.849	8	-0.514	7	-0.923	9
Ⅲ211	0.128	5	1.439	2	-0.559	8	0.383	3
Ⅲ212	-0.111	6	-0.742	7	0.083	4	0.118	5
Ⅲ213	0.380	4	1.767	1	0.094	3	0.575	1
Ⅲ231	-1.088	8	-0.220	4	0.162	2	-0.421	8
Ⅲ232	-0.770	7	0.439	3	-0.307	6	-0.295	7
Ⅲ233	0.530	3	-0.314	5	2.403	1	0.463	2

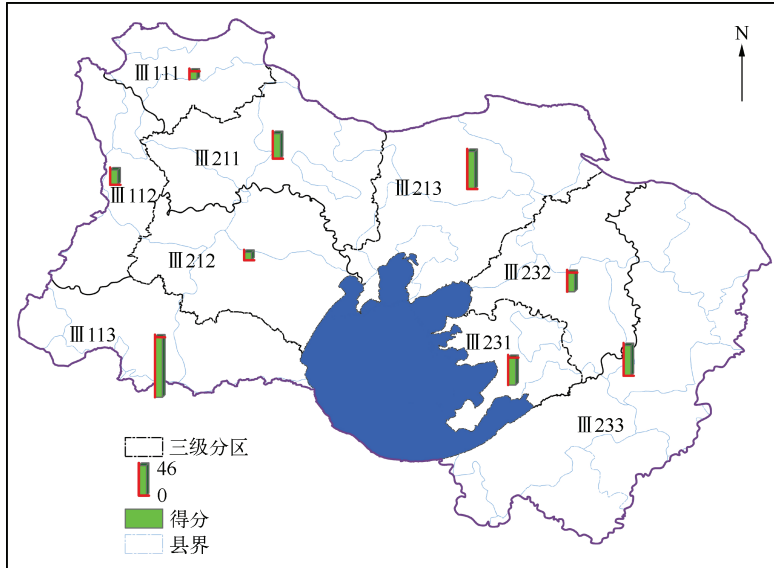


图3 太湖流域(江苏省)水生态功能三级分区得分分布

Fig.3 Distribution of composite scores in each region of the Lake Taihu basin, Jiangsu Province

2.1.2 水质污染空间分布特征 从水质监测数据来看,主成分分析结果较真实地反映了实际情况.在第一主成分 F1 上得分较高的 III 111、III 112 和 III 233 区域里所设的 4、5 和 11 个监测点中,分别有 3、4 和 8 个监测点的 TN 超标都很严重,超标 1.13 ~ 8.80 倍,位于 III 233 区的测点 81,其 TP 超标达 9.00 倍;主要受第二主成分 F2 影响的各分区中的 III 213 和 III 232 区域,监测点 53 的 Hg^{2+} 超标 3.40 倍,监测点 54 的 Cd^{2+} 、 Hg^{2+} 分别超标 0.20 倍和 1.80 倍,监测点 42 和 72 的 Hg^{2+} 分别超标 1.00 倍和 0.40 倍.

由此看出,江苏省太湖流域 9 个三级水生态功能区中,常规化学污染物主要为 TN,重金属污染物则主要是 Hg^{2+} ,这也与主成分分析得出的富营养化指标占优,其次为重金属指标的结论较吻合.徐前荣^[16]统计得知,太湖流域 TN 自浓度最高的 1996 年开始到 2001 年,基本处于下降状态,2001 年浓度最低,且接近 V 类地表水标准,而 2001 年以后,太湖湖体 TN 浓度逐年上升.监测发现^[17]河流 TN 浓度均值远高于湖泊 V 类水质标准,可见氮污染是环太湖河流的主要污染特征,环太湖河流总氮年均入湖量为 $3.70 \times 10^4 \text{ t}^{[18]}$,控制入湖河流中氮负荷的输入仍然是太湖治理的重点.流域受农业与工业污染的双重影响,从污染源类型分布来看,北部工业污染突出,排污量居流域之首,西部化工业污染贡献较大,小化工、印染、造纸业是污染贡献最大的三大产业;流域种植业发达,面源污染负荷重,据统计太湖流域各类化肥中氮肥所占比例最大^[19],且每亩耕地平均化肥施用量约为 40 kg,远高于全国平均水平 0.0277 kg/m^2 ^[16],而作物吸收的氮不到 40%^[20],虽然截止到 2011 年江苏省太湖地区氮肥的施用量比 2005 年降低了 18% 左右^[21],但仍有很大削减空间.环太湖河道水质差异的一般规律为:除望虞河水质好于或接近于出湖河道太浦河水质外,其它入湖河道的水质较差,而出湖河道的水质较好.太湖下游水质优于上游水质,太湖的稀释扩散作用极为明显.大城市河道的水质要好于乡镇和农村的一些小河道.河网污染与乡镇治污控制力度有直接关系,乡镇工业较发达的锡西、武东地区目前处于严重污染时期^[19],导致水环境质量空间特征大体表现为北高南低、西高东低的趋势,这与流域内水流走向一致,同时可以发现以湖体为中心,水环境质量基本上由流域周界向湖体逐渐变好,说明以湖体辐射流域的环太湖水体保护及污染治理工作取得了一定的成效,但改善水环境的任务依然艰巨.

2.2 湖体

2.2.1 水质主成分分析 对太湖湖体用同样的方法进行主成分分析,结果表明,前 5 个主成分因子的累计方差贡献率达到了 94.410% (表 4).经最大方差旋转后,第一主成分(F1)的方差贡献率占到了 39.671%,远大于其他主成分,其中 TN 所占的因子载荷最大,第二主成分(F2)的方差贡献率为 17.467%,其中 Hg^{2+} 所占的载荷超过其他因子,呼应流域水质分析的结果,反映了流域外源输入是导致湖体水质污染的主要原因之一.

2012年太湖湖体各湖区的水质污染程度排序为:竺山湾>梅梁湾>贡湖湾>西部沿岸区>五里湖>东部沿岸区>湖心区>东太湖>南部沿岸区。其中竺山湾、梅梁湾、五里湖以及西部沿岸区仍然是湖体中氮、磷污染较严重的区域(表5)。

表4 太湖湖体方差分解主成分提取分析

Tab. 4 Principal component extraction analysis of variance decomposition in Lake Taihu

成分	平方载荷的提取量			平方载荷的旋转量		
	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	11.669	41.674	41.674	11.108	39.671	39.671
2	6.430	22.964	64.638	4.891	17.467	57.139
3	4.096	14.628	79.267	4.063	14.511	71.650
4	2.872	10.258	89.525	4.036	14.414	86.064
5	1.368	4.884	94.410	2.337	8.346	94.410

表5 太湖湖体主成分得分及综合得分

Tab. 5 Principal component scores and composite scores in Lake Taihu

分区	F1 得分	F1 排名	F2 得分	F2 排名	综合得分	综合排名
五里湖	0.249	2	-0.689	6	0.071	5
梅梁湾	-0.255	4	0.512	3	0.360	2
竺山湾	2.583	1	-0.092	5	1.020	1
贡湖湾	-0.409	5	0.092	4	0.183	3
西部沿岸区	-0.195	3	2.016	1	0.156	4
南部沿岸区	-0.464	7	-0.720	7	-0.619	9
湖心区	-0.488	8	0.820	2	-0.302	7
东部沿岸区	-0.417	6	-0.737	8	-0.292	6
东太湖	-0.606	9	-1.203	9	-0.576	8

2.2.2 水质污染空间分布特征 从水质监测数据来看,竺山湾 TN 超标最显著,平均超标 3.14 倍,TP 平均超标 1.60 倍,TP 超标居首的是西部沿岸区,平均超标 2.60 倍。值得注意的是,苕溪和太浦河两条太湖主要出湖河流与太湖交界河口附近的湖区水质达标。对于重金属指标而言,湖体中竺山湾、梅梁湾以及贡湖湾 3 个湾口与湖心区交汇处重金属 Hg^{2+} 超标非常严重,超标倍数在 5.40~29.80 之间。

太湖流域氮、磷污染占的比重大,方差贡献率最大,总体上属于面源污染类型,来源主要是流域陆上农村生活污染和农业面源污染排放^[22]。湖体营养盐指标最高的是西北部湖湾,东太湖的营养盐指标较小,为全湖最低水平,呈现自北向南、自西向东以高营养程度向低营养程度扩散的趋势,这与已有的文献报道^[23-24]一致。营养盐含量的增加是水体营养程度提高的前提,一方面,竺山湾、梅梁湾及西部沿岸区一带受入湖污染源影响较大,其上游有多条太湖主要入湖河道,是太湖沿岸污染源最为集中的区域,故营养盐指标高,东太湖水生植被覆盖面积大,对营养盐吸收较好,说明 F1 的高值与主要河流入湖口排污量以及水生植被等生物净化作用密切相关^[11,25];另一方面,太湖北部区域,由于工业、旅游经济发达,人口集中,以及竺山湾、梅梁湾的地形不利于水中污染物扩散,同时该地区夏季盛行东南风等不利的气候水文条件,致使夏季在太湖西北部湖区经常形成严重水华现象,加重了太湖北部的污染,太湖调水引流工程也只能增强局部地区的水体流动。湖体营养盐含量还可能与内源释放有关,太湖除梅梁湾、五里湖、竺山湾、贡湖湾和东太湖几个湖湾淤积较重之外,还存在 3 个明显的底泥蓄积带:①自大浦口、茭泾港向东北至金墅港底泥蓄积带;②自新浜港西部沿岸向南至长兴分港底泥蓄积带;③自沉浜港向东北至漫山湖底泥蓄积带。这 3 条底泥蓄积带底泥深一般超过 1 m,泥量占总底泥量的 2/3^[26]。水体重金属 Hg^{2+} 的污染主要来自氯碱、塑料、电池、电子等工业排放的废水,燃煤、火电等行业排向大气和土壤的 Hg^{2+} 也将随着水循环回归水体,因此在太湖流域需加强对这些行业污染的重视。

3 结论

1) 采用主成分分析法研究江苏省太湖流域水质特征,从原始水质数据中提取占总方差的比例较大的5个因子来反映水体的污染程度,经过分析识别得到江苏省太湖流域的主成分因子:以氮、磷等为主的营养盐指标和以 Hg^{2+} 为主的重金属指标。

2) 江苏省太湖流域水环境质量空间特征大体表现为北高南低、西高东低的走向,这与流域内水流走向一致,同时可以发现以湖体为中心,水环境质量基本上由流域周界向湖体逐渐变好,对应流域水质分析的结果,太湖湖体也呈现自北向南、自西向东以高营养程度向低营养程度扩散的趋势,反映了流域外源输入是导致湖体水质污染的主要原因之一。

3) 解决太湖水环境问题的根本出路是减少水体的污染。通过减少外源输入来降低湖体所承纳的污染负荷,主要控制太湖流域农村生活污水、畜禽粪便、化肥农药等面源污染,同时加快全流域转变经济发展方式,大力发展低碳经济、循环经济、绿色经济,实现经济增长由粗放型向集约、节约型转变,优化产业结构调整。

4) 根据主成分分析法得出的结论,在今后的研究中重点考虑排名靠前的指标,删除次要的指标,确定造成污染的主要成分,这样不仅避免了选择指标的随意性,更节省了监测所需的人力物力,同时考虑不同区域污染特征的差异,有针对性地实施污染控制措施,使太湖水污染防治工作更加科学与准确。

4 参考文献

- [1] 郭劲松,王红,龙腾锐. 水资源水质评价方法分析与进展. 重庆环境科学, 1999, 21(6): 1-9.
- [2] 庞振凌,常红军,李玉英等. 层次分析法对南水北调中线水源区的水质评价. 生态学报, 2008, 28(4): 1810-1819.
- [3] 刘聚涛,高俊峰,姜加虎. 不同模糊评价方法在水环境质量评价中的应用比较. 环境污染与防治, 2010, 32(1): 20-25.
- [4] 姚建玉,钟正燕,陈金发. 灰色聚类关联评估在水环境质量评价中的应用. 环境科学与管理, 2009, 34(2): 172-174.
- [5] Jiang YP, Xu ZX, Yin HL. Study on improved BP artificial neural networks in eutrophication assessment of China eastern lakes. *Journal of Hydrodynamics, Series B*, 2006, 18(3): 528-532.
- [6] 郑建平,徐惠强,姚志刚等. 江苏省太湖流域湿地保护与修复研究. 污染防治技术, 2012, 25(3): 79-82.
- [7] 杨金艳,蔡思宇. 从太湖主要出水河道水质的变化看太湖水质. 江苏水利, 2012, (11): 33-35.
- [8] 高永霞,蔡琳琳,赵林林等. 丰水期环太湖河流与湖区水质比较研究. 环境科学, 2011, 32(10): 2840-2848.
- [9] 汪丽娜,李艳,陈晓宏. 太湖流域水质变化解析. 华南师范大学学报:自然科学版, 2013, 45(1): 96-99.
- [10] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范:第2版. 北京:中国环境科学出版社, 1990.
- [11] 李一平,逢勇,吕俊等. 太湖富营养化的驱动因子分析. 河海大学学报:自然科学版, 2004, 32(6): 644-647.
- [12] 许禄,邵学广. 化学计量学方法. 北京:科学出版社, 2006: 130-133.
- [13] 郝黎仁,樊元,郝哲欧等. SPSS 实用统计分析. 北京:中国水利水电出版社, 2003.
- [14] 高永年,高俊峰,陈炯烽等. 太湖流域水生态功能三级分区. 地理研究, 2012, 31(11): 1941-1951.
- [15] 吉祝美,方里,张俊等. 主成分分析法在 SPSS 软件中的操作及在河流水质评价中的应用. 环境研究与监测, 2012, 25(12): 68-73.
- [16] 徐前荣. 太湖流域水环境治理及区域协调研究[学位论文]. 南京:南京农业大学, 2009.
- [17] 王强,卢少勇,黄国忠等. 14条环太湖河流水质与茭草、水花生氮磷含量. 农业环境科学学报, 2012, 31(6): 1189-1194.
- [18] 胡开明,逢勇,王华. 太湖湖体总氮平衡及水质可控目标. 水科学进展, 2012, 23(4): 555-562.
- [19] 韦雪骐. 太湖流域水环境保护对策研究[学位论文]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [20] 程波,张泽,陈凌等. 太湖水体富营养化与流域农业面源污染的控制. 农业环境科学学报, 2005, 24(S1): 118-124.
- [21] 吕振霖. 太湖水环境综合治理的实践与思考. 河海大学学报:自然科学版, 2012, 40(2): 123-128.
- [22] 李钦钦,胡维平,邓建才. 基于因子分析的太湖湖湾污染物分布特征. 环境科学与技术, 2011, 34(7): 1-5.
- [23] 张红举,甘升伟,袁洪州等. 环太湖河流入湖水水质控制浓度分析. 水资源保护, 2012, 28(6): 8-11.
- [24] 卢少勇,焦伟,王强等. 环太湖河流水质时空分布特征. 环境科学研究, 2011, 24(11): 1220-1225.
- [25] 曾庆飞,谷孝鸿,周露洪等. 东太湖水质污染特征研究. 中国环境科学, 2011, 31(8): 1355-1360.
- [26] 陈润,王跃奎,高怡等. 2004~2008年太湖水质变化原因及治理对策. 水电能源科学, 2010, 28(11): 35-37.