

太湖西岸水质变化趋势及主要驱动因子^{*}

于东升 袁宏林[#] 张 颖 李世超 孙中浩

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要 基于 2009—2015 年太湖西岸 10 个监测断面的 8 个水质指标数据, 采用季节性 Kendall 检验法对其指标的浓度变化趋势进行分析, 并用主成分分析法结合相关分析评价历年水质状况, 分析影响太湖西岸水质的主要驱动因子。结果表明: (1) 2009—2015 年太湖西岸 COD 下降趋势显著, DO 非显著上升, 电导率、高锰酸盐指数、BOD₅、氨氮、TP 和 TN 均表现为高度显著下降趋势。(2) 主成分分析从原始信息中提取出两个主成分, 共解释了 73.645% 的结果, 分别代表水质氮磷营养盐和有机污染。综合得分表明, 2009—2015 年太湖西岸水质呈逐年改善趋势。水质污染在空间上表现为北部向南部递减的趋势。(3) 相关分析表明, 氨氮和 COD 是影响该区域水质的主要驱动因子。

关键词 太湖西岸 水质变化 季节性 Kendall 检验法 主成分分析 相关分析

DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2017.10.004

Trend and dominating factors of water quality change in the west bank of Taihu Lake YU Dongsheng, YUAN Honglin, ZHANG Ying, LI Shichao, SUN Zhonghao. (School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055)

Abstract: Based on 8 parameters monitored at 10 control sections of the west bank of Taihu Lake during 2009–2015, seasonal Kendall test was used to analyze the changing trend of index concentration. Combined with related analyses of water quality in calendar year, principal component analysis was used to analyses the dominating factors influencing the water quality in the west bank of Taihu Lake. The results showed that: (1) COD was significantly decreased, DO was non-significantly risen. Electrical conductivity, permanganate index, BOD₅, ammonia nitrogen, TP and TN were highly significantly decreased in the west bank of Taihu Lake during 2009–2015. (2) 2 principal components were extracted from the original monitoring data by principal component analysis, which explained 73.645% of the results and represented of nitrogen and phosphorus nutrient salt and organic pollution of water quality. Comprehensive score showed that water pollution improved year by year in the west bank of Taihu Lake during 2009–2015. The water pollution was showed a downtrend from the north to the south in space. (3) Correlation analysis showed that ammonia nitrogen and COD were the dominating factors influencing the water quality in this area.

Keywords: the west bank of Lake Taihu; water quality change; seasonal Kendall test; principle component analysis; correlation analysis

太湖位于长江三角洲南部, 是我国第 3 大淡水湖, 现有水面面积 2 338.1 km²^[1]。近年来, 由于太湖周边工业、农业及旅游业的迅速发展, 太湖出入湖河流水质均有不同程度恶化^[2]。湖泊与河流间水质高度关联, 入湖河流不仅补给湖泊水量, 也是湖泊污染物的重要来源, 大部分点源与面源污染物通过入湖河流进入湖泊, 与湖水混合并在湖泊水体中扩散, 导致河口附近一定区域内水质恶化^[3-4], 尤其是上游河流更能直接体现出湖泊污染的现状^[5]。因此, 研究太湖上游主要入湖河流的水质变化趋势及污染的主要驱动因子是正确进行水质污染防治的基

础。太湖西岸位于太湖上游, 是蓝藻水华发生最频繁的水域^[6]。国内部分学者对太湖西岸主要河流进行相关研究^[7-9], 然而目前对太湖西岸水质变化的分析多为定性分析, 并没有定量给出变化趋势, 也缺乏水质变化驱动因子的分析, 难以为治理该区域污染提供科学依据。

本研究采用季节性 Kendall 检验法对太湖西岸主要入湖河流近 7 年(2009—2015 年)的主要水质指标变化趋势进行判别, 对水质指标的变化趋势进行定量分析, 再利用主成分分析法探讨水质污染的年际及空间差异, 并分析引起差异的可能原因, 同时

第一作者: 于东升, 男, 1989 年生, 硕士研究生, 研究方向为水体污染控制技术与理论。[#] 通讯作者。

^{*} 国家水体污染控制与治理科技重大专项(No.2014ZX07305-002)。

结合相关分析法判断影响水环境的主要驱动因子, 以期为太湖西岸水质管理提供科学依据。

1 区域概况和研究方法

太湖西岸 ($31^{\circ} 10' 35'' \text{N} \sim 31^{\circ} 29' 13'' \text{N}$, $119^{\circ} 55' 28'' \text{E} \sim 120^{\circ} 3' 10'' \text{E}$) 位于太湖上游宜兴区段, 自分水至湫东岸线长 60 km, 分布有近 50 条入湖河道, 其中通航河道近 10 条, 由于防洪大堤的兴建, 部分入湖河道被阻断^[10], 其影响太湖水域面积为 242.3 km², 约占太湖总面积的 10.4%。宜兴市地区年降雨量较大, 地面水丰富。该区域河网密布, 主要水系为宜溧河和洮滆水系, 地势西高东低, 流域地表水体通过主要入湖河道最终汇入太湖西岸, 汇入水量占入湖径流总量的 52.87%。其中, 陈东港、大浦港和殷村港年均入湖水量超过 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 该区域入湖河流水质直接关系到太湖水质^[11]。由于流域内经济的高速发展、人口的快速增长及水资源保护工作的相对滞后, 流域内水污染一直未得到解决^[12], 致使汇流至太湖西岸的水质污染问题也很严峻, 已成为影响地区周围经济发展和居民生活健康的严重隐患。

1.1 数据来源

采用宜兴市环境保护局提供的辖区内 10 个监测断面 2009—2015 年的水质数据, 监测频率为每月一次, 共 840 个检测样本, 监测断面由北向南依次为百渎港、殷村港、沙塘港、社渎港、官渎港、洪巷港、陈东港、大浦港、乌溪港、大港, 均为太湖西岸主要入湖港口。水质监测指标为电导率、DO、高锰酸盐指数、BOD₅、COD、TP、氨氮、TN。所有水样的采集及检测分析均按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中的方法进行实验室分析。

1.2 研究方法

应用季节性 Kendall 检验法、主成分分析法和相关分析法对太湖西岸的监测数据进行处理, 各类方法由 Excel 2007 和 SPSS 19.0 实现。

1.2.1 季节性 Kendall 检验法

季节性 Kendall 检验是 Mann-Kendall 检验的一种推广, 可排除影响水质的复杂因素和非正态分布等原因^[13]。用季节性 Kendall 检验法判断水质趋势时, 序列长度一般选择 5~8 年为宜。过短的水质序列不能准确判断是否存在趋势, 过长的水质序列则会出现一种趋势掩盖或抵消另一种趋势的现象^[14]。本研究选取 7 年进行季节性 Kendall 检验,

能保证趋势分析的可靠性。

1.2.2 主成分分析法

由于水质系统的复杂性, 水环境质量受到诸多因素的影响, 使得目前常用的指数法、层次分析法、灰色评价法、模糊综合评价法等在进行水质分析时具有一定的局限性。主成分分析法将众多指标转化为少数综合指标, 最大程度地避免信息的丢失, 提高分析结果的可靠性^[15]。在使用主成分分析前对原始数据进行检验以确认是否适合做主成分分析, 其检验方法有巴特莱特球形检验和 KMO 检验。若差异检验值显著时认为数据适合进行主成分分析; KMO 统计量接近 1, 则变量适合进行主成分分析^[16]。

通过主成分的综合得分可评价年际和断面水质污染情况, 本研究利用相关分析中的斯皮尔曼检验来确定导致水质污染的主要驱动因子。

2 结果与讨论

2.1 水质趋势分析结果

根据水质监测数据, 取监测断面各指标历年各月均值作为当月均值进行季节性 Kendall 趋势检验, 结果见表 1。2009—2015 年, 太湖西岸 COD 下降趋势显著, DO 非显著上升, 其余 6 项水质指标均表现为高度显著下降趋势。电导率和 TP 下降趋势最明显, 平均每年分别下降 1.438 mS/m 和 0.011 mg/L, 表明生活污水减少; DO 无明显变化, 年平均仅上升 0.048 mg/L, 这与太湖西岸常年的盛行风导致水生植物稀少有密切关系; COD 有显著下降趋势, 年平均下降 0.487 mg/L, 可能是由于受到太湖西岸农业面源和居民生活污水释放的有机污染物的影响。根据水质监测资料, 2015 年太湖西岸年平均入湖 TN 为 4.54 mg/L, 严重超标, COD 和氨氮浓度

表 1 污染物指标季节性 Kendall 趋势检验结果¹⁾
Table 1 Seasonal Kendall trend test of the main pollutants

指标	标准方差(Z) ²⁾	肯达尔斜率	变化趋势
电导率	-7.587	-1.438	高度显著下降
DO	0.824	0.048	非显著上升
高锰酸盐指数	-3.122	-0.132	高度显著下降
BOD ₅	-3.945	-0.421	高度显著下降
氨氮	-3.859	-0.072	高度显著下降
TP	-4.292	-0.011	高度显著下降
COD	-2.558	-0.487	显著下降
TN	-3.165	-0.113	高度显著下降

注: ¹⁾ $|Z| \geq 2.567$, 表示高度显著; $1.645 \leq |Z| < 2.567$, 表示显著; $|Z| < 1.645$, 表示非显著。肯达尔斜率的正、负分别表示上升、下降。²⁾ 除电导率单位为 mS/m 外, 其余指标单位均为 mg/L。

大于 GB 3838—2002 中Ⅲ类标准限值,其余指标基本在Ⅲ类标准限值内。说明虽然水质指标呈下降趋势,但改善水环境的任务依然艰巨。

2.2 主成分分析评价结果

取各监测断面指标的历年年均值进行主成分分析,本研究中 KMO 统计量为 0.786,巴特莱特球形检验值小于 0.001,说明变量间存在相互关系,符合主成分分析的要求。特征值选取原则为大于 1,共筛选出的前两个主成了解释了 73.645%的结果(见表 2)。采用方差最大的正交旋转使数据具有更好的解释性。太湖西岸各指标旋转因子荷载表示各水质指标在主成分旋转空间上的投影,指标离中心越远,说明水质指标与主成分间的相关系数越大^[17]。主成分 1 的方差贡献率为 58.704%,其中 TN 和 TP 距离主成分 1 的距离最大,代表水体的氮磷营养盐污染状况;主成分 2 的方差贡献率为 14.941%,高锰酸盐指数和 COD 的距离最大,反映了水体的有机污染水平。总体表明,太湖西岸 2009—2015 年水体污染主要以氮磷营养盐污染为主,其次是有机污染。

表 2 相关矩阵的特征值、方差及累计方差贡献率

Table 2 Eigenvalues, variance contribution and its accumulated contribution rate in principal components

成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	4.696	58.704	58.704
2	1.195	14.941	73.645
3	0.748	9.345	82.990
4	0.646	8.078	91.068
5	0.323	4.040	95.108
6	0.169	2.107	97.215
7	0.135	1.686	98.901
8	0.088	1.099	100.000

2.3 水质污染空间分布特征

2009—2015 年监测断面综合得分平均值逐年下降(见图 1),表明水质呈改善趋势。百淩港、殷村港、沙塘港、社渚港和官渚港 5 个监测断面位于太湖西岸北部,综合得分总体高于平均值,表明该区域对太湖西岸水质污染贡献较大。2009 年后综合得分变小,呈稳定改善的趋势。百淩港、殷村港、沙塘港和社渚港属于洮湖水系,起源于太湖;官渚港西起钱墅荡,东入太湖,河流均为宜兴本地径流。以上 5 个监测断面均受武宜运河与横塘河水质影响。2009 年以来,该区域重点污染企业被强制关闭,乡镇污水管网基本实现覆盖,河流水质状况变好。以武宜运河为例,其水质呈逐渐变好趋势,以其 TP 和 TN 为例,年均值分别由 2009 年的 0.38、4.23 mg/L 降低到 2015 年的 0.18、3.45 mg/L(见图 2)。说明太湖西岸

北部 5 个监测断面水质受上游河流水质影响呈改善趋势。

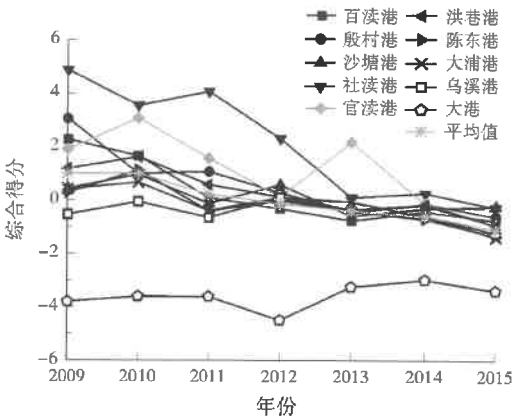
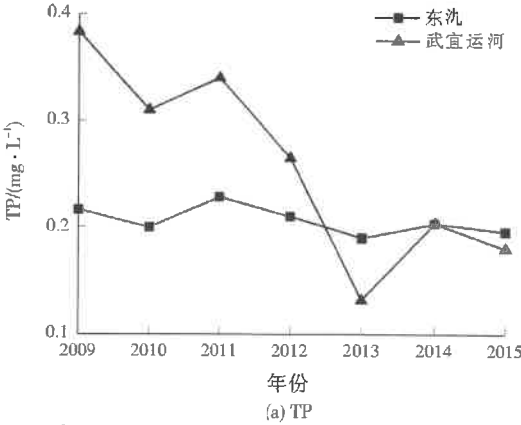
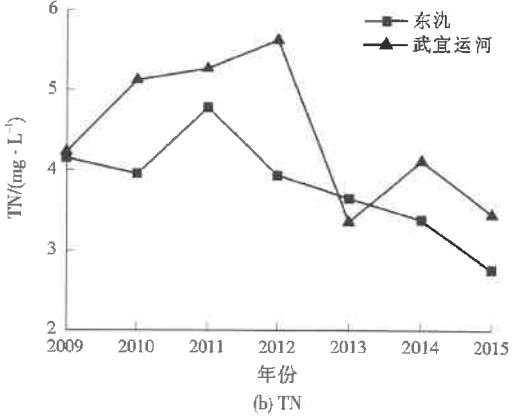


图 1 2009—2015 年监测断面综合得分

Fig.1 The comprehensive scores of monitoring sections during 2009-2015



(a) TP



(b) TN

图 2 太湖西岸上游河流中 TP 和 TN 年均值变化

Fig.2 The annual variation of TP and TN in the upstream rivers of the west bank of Taihu Lake

洪巷港、陈东港和大浦港 3 个监测断面位于宜兴城区下游,水质改善趋势不明显,除洪巷港外,陈东港和大浦港综合得分总体低于平均值。3 者均属于宜溧河水系,西起东洄,水质污染主要来自于上游宜兴城区。以东洄为例,TP 和 TN 总体均有改善趋

势,表明近年来宜兴城区对企业污水排放水平控制和生活污水处理设施建设起到重要作用。但由于城市雨水径流和港口附近较大面积的围塘养鱼等影响,致使入湖港口水质改善趋势并不明显。

乌溪港和大港位于太湖西岸南部丁蜀镇,综合得分总体低于平均值,乌溪港水质改善趋势不明显,大港水质有恶化趋势。这两个监测断面入湖水量全部为宜兴本地径流,区域林地覆盖面积大,工业污染较轻,污染源主要是生活污水。2013年,大港综合得分上升,水质突然变差,水质单项指标表明,TP、TN和COD等污染指标均突然增大。分析大港入湖流量得知,2013年流量为 $2.33\text{ m}^3/\text{s}$,是历年的2.06倍,降雨量增加是流量变大的主因,并带入大量的农业面源污染;同时,流量变大造成河流底泥扰动,使底泥中丰富的氮、磷等污染物进入水体,从而导致大港水质明显恶化。近几年,大港采取了不同的控制和削减方案,村庄生活污水的处理率达到70%^[11]~13,农田用地规范化,降低了农业面源的影响。因此,2015年大港综合得分又下降。

太湖西岸水质污染在空间上总体表现为自北部向南部递减的趋势,与边博等^[18]研究结果一致。其中控制太湖西岸入湖河流中氮负荷的输入仍然是太湖治理的重点。根据胡开明等^[19]研究,2015年太湖西岸氨氮和TN现状入河总量分别为1294.6、2018.8 t,削减潜力为638.3、641.9 t,其中生活源特别是农村生活源的削减潜力较大,削减率在30%~70%。说明氮污染现状较严峻。

2.4 水质污染的驱动因子

为从较多的指标中提取与水体污染状况有关的控制因素,分析太湖西岸水体污染的驱动因子,根据LUNDBERG等^[20]的研究方法,分析了各指标与主成分间的斯皮尔曼相关系数,结果见表3。氨氮与主成分1、COD与主成分2相关性最显著($P<0.01$),

表3 各指标与主成分间的斯皮尔曼相关系数¹⁾
Table 3 Spearman's correlation coefficient between the indicators and principal components

指标	主成分1	主成分2
电导率	0.786**	-0.219
DO	0.454**	0.214
高锰酸盐指数	0.702**	0.477**
BOD ₅	0.787**	0.095
氨氮	0.804**	-0.306*
TP	0.743**	-0.265*
COD	0.650**	0.628**
TN	0.662**	-0.556**

注:1) * 和 ** 分别表示显著性 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 。

且均为正相关。因此,氨氮和COD是太湖西岸水质污染的主要驱动因子。

氨氮是水体中的富营养化物质和主要耗氧污染物,2009—2015年平均占TN的30%左右,对氮污染贡献较大。其主要来源城镇生活污水,其次是工业废水和农业面源。由于宜兴城镇人口增加、污水处理不当和农业氮肥超量施肥,使得氨氮污染水平较高,促进水域富营养化,加重水质恶化状况。COD作为衡量水体有机污染的参数,其主要来源于工业和生活污水等点源输入。由于近几年氮磷污染呈下降趋势,有机污染物成为了影响水质的重要因素。

3 结论

(1) 2009—2015年太湖西岸COD下降趋势显著,DO非显著上升,电导率、高锰酸盐指数、BOD₅、氨氮、TP和TN均表现为高度显著下降趋势;电导率和TP下降趋势最明显。

(2) 运用主成分分析方法将8个水质指标综合为两个主成分,共解释了73.645%的结果,分别代表水体的氮磷营养盐污染和有机污染,能基本上反映原指标信息。应用综合得分评价历年太湖西岸水质污染状况,2009—2015年太湖西岸水质呈逐年改善趋势。水质污染在空间上表现为北部向南部递减的趋势。

(3) 太湖西岸水质污染的主要驱动因子为氨氮和COD。

参考文献:

- [1] 申金玉,甘升伟,陈润,等.环太湖出入湖水量影响因素分析及对策措施研究[J].水资源保护,2011,27(6):48-52.
- [2] ZHUO F, LIU Y, GUO H. Application of multivariate statistical methods to water quality assessment of the watercourses in Northwestern New Territories, Hong Kong[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 132(1/2/3): 1-13.
- [3] 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.
- [4] 金相灿,辛培光,卢少勇,等.入湖污染河流对受纳湖湾水质的影响[J].环境科学研究,2007,20(4):52-56.
- [5] 王雷,余辉,燕姝雯,等.太湖流域上游河流污染空间分布特征研究[J].长江流域资源与环境,2012,21(3):341-348.
- [6] 黄君,庄严,宋挺,等.3S技术在太湖富营养化和蓝藻水华分布规律中的应用研究[J].环境污染与防治,2014,36(12):31-37.
- [7] 徐龙生,吴敬禄.太湖大浦湖区环境变化的沉积物同位素响应特征[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(9):134-142.
- [8] 甘树,卢少勇,秦普丰,等.太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价[J].环境科学,2012,33(9):3064-3069.
- [9] 涂勇,刘伟京,张耀辉,等.太湖上游流域地表水及污水处理厂尾水氮、磷污染特征分析[J].环境污染与防治,2014,36(3):8-13.

(下转第1070页)