

# 太湖富营养化主要指标及营养水平变化分析

吕学研<sup>1</sup>, 吴时强<sup>2,3</sup>, 张咏<sup>1</sup>, 周冬卉<sup>2</sup>, 杨倩倩<sup>2</sup>, 刘晓华<sup>4</sup>

(1. 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210036; 2. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029;

3. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 江苏省环境工程咨询中心, 江苏 南京 210036)

**摘要:** 分析了太湖 1980-2011 年富营养化水质指标的变化情况, 同时利用水质富营养化评价结果, 分析了 2002-2011 年不同湖区营养水平的变化特征。结果表明: 太湖富营养化水质指标整体呈上升趋势, 虽然 TN 和 TP 在 1996 年后开始降低, 但仍处于较高水平;  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 Chl-a 的最高值出现在 2006 年; TN 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  具有相似的月间变化特征, 但是  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的极值较 TN 提前一个月出现;  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 Chl-a 呈单峰的月间变化特征, 而 TP 的月间变化呈双峰特征。西部沿岸区和五里湖的水质改善明显, 梅梁湖、竺山湖和南部沿岸区水质改善不明显, 东部沿岸区和东太湖水质呈恶化趋势。太湖不同湖区富营养水质出现频次的月变化特征也非常明显。

**关键词:** 富营养化; 营养水平; 水质评价; 太湖

中图分类号: TV213.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0001-06

## Analysis on variation of main indicators of eutrophication and nutrition level in Taihu lake

LÜ Xueyan<sup>1</sup>, WU Shiqiang<sup>2,3</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>, ZHOU Donghui<sup>2</sup>, YANG Qianqian<sup>2</sup>, LIU Xiaohua<sup>4</sup>

(1. Jiangsu Province Environmental Monitoring Centre, Nanjing 210036, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing

210029, China; 3. State Key Laboratory of Hydro-water Resources and Hydrolic Engineering, Nanjing 210029, China;

4. Jiangsu Province Environmental Consultants Centre, Nanjing 210036, China)

**Abstract:** The paper analyzed the variation situation of water quality indicators of eutrophication in Taihu lake from 1980 to 2011. By use of the evaluation result of water quality eutrophication it analyzed the variation feature of nutrition level in different lake areas from 2002 to 2011. The results indicate that the eutrophication indicators rise generally. Although TN and TP have decreased since 1996, they are still on a relative high level. The maximum of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and Chl-a appeared in 2006. TN and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  share a similar monthly variation character, but the extreme value of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  turn up one month earlier than those of TN.  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and Chl-a presents the unimodal character of monthly variation, but that of TP presents double-peaked. Improvement of water quality in west zone and Wuli lake is obvious, but the improvement in Meiliang lake, Zhushan Lake and south zone is not significant. The water quality in east beach zone and Dongtaihu lake exhibits a downtrend. There are also obvious variation characters of the monthly occurrence frequency in the subzones.

**Key words:** eutrophication; nutrition level; water quality assessment; Taihu lake

作为流域水资源的调蓄中心, 太湖具有防洪、供水、生态、航运、旅游及养殖等多种功能, 其水环境质量直接关系到苏、浙、沪两省一市的社会经济发展。1990 年, 太湖蓝藻水华给无锡市造成了 1.3 亿元的直接经济损失<sup>[1]</sup>。2007 年 5 月爆发的太湖蓝藻水华, 更是造成了 28.77 亿元的直接经济损失<sup>[2]</sup>。

鉴于蓝藻水华危害的严重性, 国家、流域、地方各级政府均采用各种措施来削减流域污染物的排放量、恢复湖区的生态环境<sup>[3]</sup>。太湖水质短期变化的报道目前很多, 且在一定程度上反映了湖区水质对外部压力的响应, 但是难以全面认识太湖水质的变化过程及特征。

收稿日期: 2014-02-28; 修回日期: 2014-03-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07506-003-04); 江苏省太湖治理科研课题(TH2012301); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301041); 中央级公益性科研院所基本科研项目(Y114002)

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

为了揭示太湖水质的变化特征,本文在资料收集、整理的基础上,分析了太湖富营养化指标—总氮(TN)、氨氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、总磷(TP)、高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )和叶绿素 a(Chl-a)的变化规律,同时结合2002—2011年10 a间太湖不同分区水资源质量评价结果,分析了不同湖区营养水平的变化情况。

## 1 研究区域概况及指标选择

### 1.1 研究区域概况

太湖是我国的第三大淡水湖,位于北纬 $30^\circ56'$ ~ $31^\circ34'$ ,东经 $119^\circ54'$ ~ $120^\circ36'$ 之间,地处江苏省南部、太湖流域中部,南北长68.5 km,东西宽56.0 km,湖区面积 $3\,192\text{ km}^2$ (包括湖面 $2\,338\text{ km}^2$ 、湖中岛屿 $89.7\text{ km}^2$ 及湖滨低地 $764\text{ km}^2$ )。根据水质测点的区域分布特征,通常将太湖分成如图1所示的9个湖区。

### 1.2 指标选择

相关成果表明<sup>[4]</sup>,TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP和 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 是太湖水质状况的代表性指标,能够较好地反映太湖水质的总体情况,Chl-a单项评价与太湖富营养化综合评价的相关性最高,可作为反映太湖富营养化的指标。因此,本文选择TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP和 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和Chl-a,进行太湖富营养化指标的变化特征分析。文中太湖水质数据分别来自文献<sup>[5]</sup>(1981—1995年)和太湖流域管理局(1996—2011年)。

在富营养化评价方面,2006年开始采用新的富营养化评价方法,即《地表水资源质量评级技术规范 SL295—2007》,为了保证数据的可比性,本文仍采用旧的评价方法,即将评分值位于50~60之间

的水体定为中营养水平。

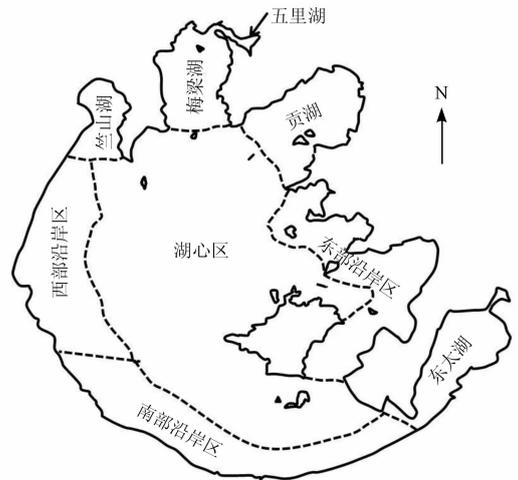


图1 太湖湖体分区示意图

## 2 结果与讨论

### 2.1 太湖富营养化指标变化

2.1.1 太湖TN的变化 1960年的调查资料显示,太湖的氮含量处于较低水平,总无机氮(TIN)为 $0.050\text{ mg/L}$ 。至1980年,TIN的浓度升高至 $0.894\text{ mg/L}$ ,增加了16.88倍。1988年TIN上升至 $1.115\text{ mg/L}$ <sup>[5]</sup>。太湖TN年均值变化(图2 a)显示,太湖TN浓度总体呈升高趋势,其中1996年之前的上升趋势较快,在达到最大值 $3.88\text{ mg/L}$ 后,TN浓度有所降低,但浓度仍较高,处于地表水劣V类水平。从太湖TN的月均值变化曲线(图2 b)可以看出,TN浓度在春末(4月份)达到最大值后开始下降,至秋末(10月份)达到最小值,随后又开始上升。

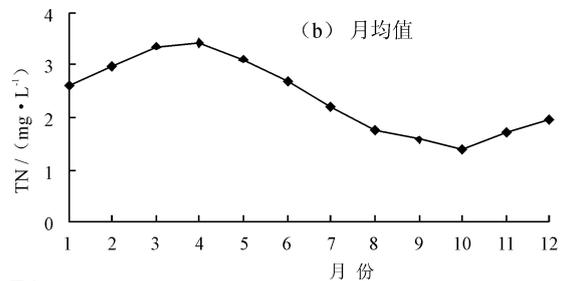
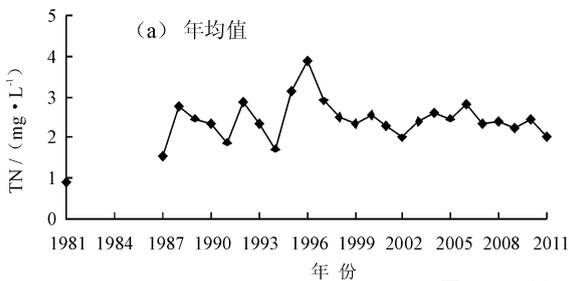


图2 太湖TN年均值和月均值变化

2.1.2 太湖 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的变化 与TN的变化过程不同,可能受当时工农业发展影响,太湖水体的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在20世纪80年代初期处于较高的水平(图3 a),随后开始下降,经过小幅波动后,在21世纪初开始快速上升,在2006年达到最大值后又开始快速降低。陈润等<sup>[6]</sup>在分析太湖2004—2008年的水质变化时也发现2006年是水质变化的一个拐点,2004

—2006年太湖水质恶化,2006年之后,水质逐步好转。太湖水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的月间变化(图3 b)与TN的变化趋势相似,不同点在于, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 最大值和最小值出现的时间均比TN提前一个月。

2.1.3 太湖TP的变化 太湖TP的年均值变化情况(图4 a)显示,太湖的TP整体上呈上升趋势,最大值在1996年出现,随后开始降低,但仍处于地表

IV 类水水平。1996 年,江苏省开始实施《江苏省太湖水污染防治条例》,一定程度上控制了氮、磷的入湖量,TN 和 TP 浓度的年际变化直观反应了这一措施的效果。

由太湖 TP 浓度的月间变化曲线(图 4 b)可以看出,TP 浓度的最高值出现在 3 月份,作为淡水藻类生长的限制因子<sup>[7-9]</sup>,较高的 TP 浓度对浮游藻类复苏是非常有利的。随后,在水生植物的消耗以及其他因素的影响下,TP 浓度开始降低,在 7 月份达到最小值,在 8 月份显著上升达到次大值后再次降低。TP 浓度的年内月间变化具有明显的双峰特征。

2.1.4 太湖 COD<sub>Mn</sub> 的变化 作为水体富营养化状况评价的指标之一,太湖水体的 COD<sub>Mn</sub> 整体上呈现

上升趋势(图 5 a),在 2006 年达到最大值后,开始降低。COD<sub>Mn</sub> 的月间变化显示出明显的单峰特征(图 5 b),且峰形较为平缓,延续了 8、9、10 三个月。

2.1.5 太湖 Chl-a 的变化 Chl-a 是目前表征水体浮游植物现存量的常用指标,也是评价水体富营养化状况的重要指标之一。数据显示,太湖 Chl-a 在 1990 和 2006 年出现了较高的浓度(图 6 a)。太湖 Chl-a 多年月均值结果(图 6 b)表明,湖体 8、9、10 三个月的藻类现存量较高,最高值出现在 9 月份;5 月份出现一个相对较小的峰值。

2.2 太湖水质营养水平的时空分布特征

2.2.1 太湖富营养水质空间分布 在分析太湖富营养化指标变化的过程中发现,虽然 2007 年太湖西

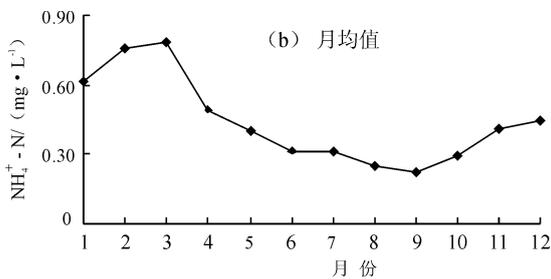
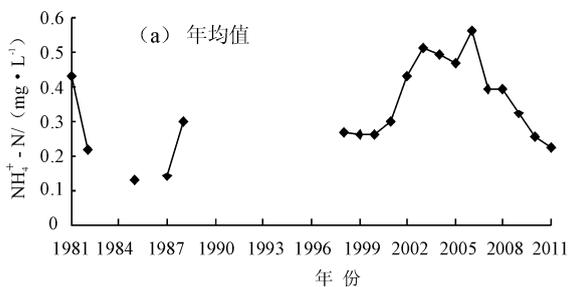


图 3 太湖 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 年均值和月均值变化

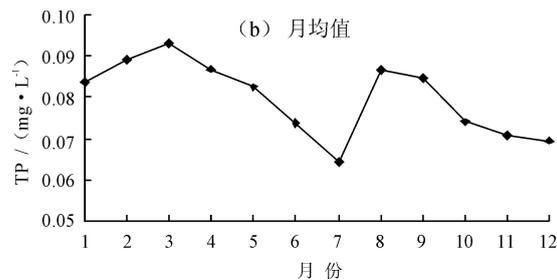
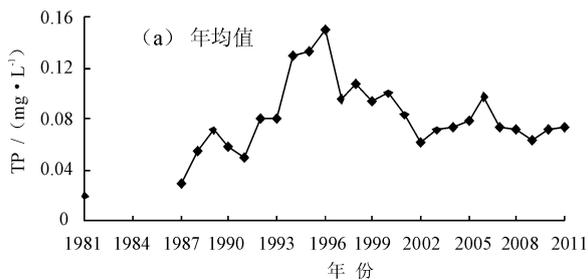


图 4 太湖 TP 年均值和月均值变化

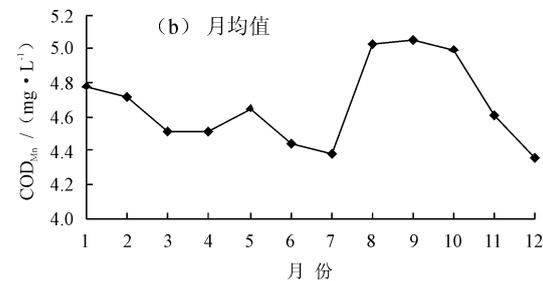


图 5 太湖 COD<sub>Mn</sub> 年均值和月均值变化

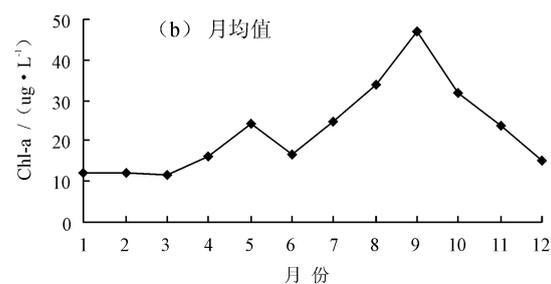
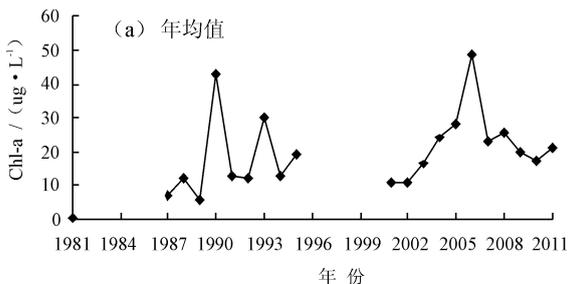


图 6 太湖 Chl-a 年均值和月均值变化

北部湖区发生了严重的蓝藻水华,但是该年全湖的Chl-a浓度并不是最高的。这主要是因为,太湖的水质存在明显的分区特征。分析2002-2011年太湖9个湖区不同营养水平水质出现的频次(表1)发现,不同湖区富营养水质出现次数的高低顺序为:梅梁湖、竺山湖>五里湖>湖心区>东部沿岸区>贡湖>南部沿岸区>西部沿岸区>东太湖。

表1 太湖9个湖区2002-2011年不同营养水平出现频次

湖区	富营养	中营养	湖区	富营养	中营养
梅梁湖	115	5	贡湖	72	48
竺山湖	115	5	南部沿岸区	67	53
五里湖	97	23	西部沿岸区	63	57
湖心区	89	31	东太湖	18	102
东部沿岸区	81	39			

2.2.2 不同湖区水质营养水平年际变化 从太湖9个湖区2002-2011年每年富营养水质出现的频次(图7)看,随着宜兴地区入河污染物控制措施的逐步实施,受其入湖河流水质影响较大的西部沿岸区的水质自2006年开始显著改善,富营养水质的出

现频次显著降低;五里湖的水质在湖区生态修复和底泥疏浚等工程的作用下,从2008年开始改善,尤其是2009年以后,富营养水质出现的频次显著降低;受“引江济太”及其他工程措施的影响,从2009年开始,贡湖湾和湖心区富营养水质出现的频次也有所降低,但是仍存在回升的趋势;作为太湖较为封闭的湖湾,梅梁湖和竺山湖的水质在治理工程开展后虽然略有好转,富营养水质出现的频次也有所降低,但是没有西部沿岸区和五里湖的改善程度明显,基本维持在原有的水平;南部沿岸区的富营养水质出现频次波动较大。

2002-2011年期间,东部沿岸区的水质整体呈现明显的恶化趋势,2006-2008年的水质全部属于富营养水平,随着治理措施的推进,2009年水质开始改善。更为值得关注的是,水质一直较好的东太湖在2008年开始出现富营养水质,且频次有升高的趋势,这对于维持太湖东部区域的生态系统健康是非常不利的,有可能导致东部湖区“草型”生态系统的崩溃,进而转变成“藻型”生态系统,最终出现类似西北部湖区的蓝藻水华危害<sup>[10-11]</sup>。

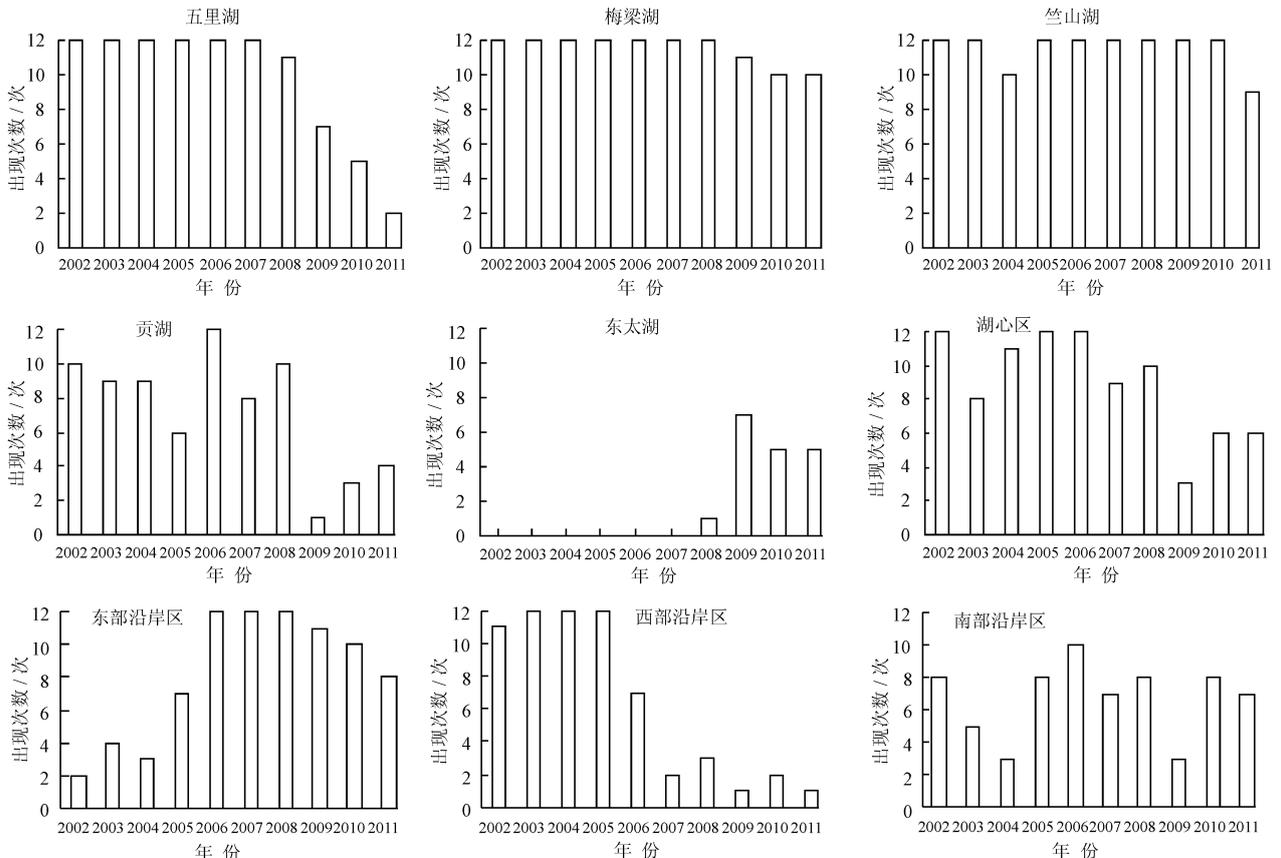


图7 2002-2011太湖9个湖区每年富营养水质出现频次

2.2.3 不同湖区水质营养水平月间变化 图8为太湖不同湖区2002-2011年10 a间每个月富营养水质出现的频次。结果表明,太湖富营养水质出现的月份,随湖区变化而变化,五里湖8-11月份富营养水质出现的频次较高,以8月份最高,每年均会出现;梅梁湖水质1-4月,8-11月均常年处于富营养水平;竺山湖水质在10-12月相对较好,富营养水质出现频次有所降低;贡湖的富营养水质出现频次较为分散,相对集中在2-4月份;湖心区富营养水质出现频次呈双峰特征,3、4月份达到第一个峰值,10月份达到第二个峰值,7月份的水质最好,富营养水质出现的频次最低;东部沿岸区和西部沿岸区的富营养水质频次峰值均发生在3月份;东太湖的富营养水质集中出现在12月份至翌年的4月份,但是出现的频次显著低于其他湖区,5月份和7-9月,东太湖水质最好,未出现过富营养状态;南部沿岸区整体上1-5月份的营养水平较高,富营养水质出现频次较高。

## 2.3 分析讨论

TN和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 表现出相似的月间变化特征,均在春季出现最高值,秋季出现最低值。这主要是因为,秋季是水生植物(包括大型水生植物和浮游植物)开始衰亡的季节,对营养物质的吸收降低,而其残体内积蓄的营养物质在微生物的作用下开始向水体释放,水体的TN含量开始升高;到了春末,复苏的水生植物需要消耗大量营养物质进行新陈代谢,水体的氮含量开始下降。此外,TN的这种月间变化特征也可能与外源的输入强度变化有关。虽然 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 与TN的月间变化相似,但是 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 极值的出现时间均较TN提前一个月。这主要是因为,有机体在微生物的作用下首先向水体释放的是有机氮(ON),ON在氨化细菌的作用下很快矿化成 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,而 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 向稳定态 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 的转变需要经历亚硝化和硝化过程,其中涉及的影响因素众多。TN是表征水中各种形态氮的综合指标,受到不同形态氮之间转化的制约,TN极值的出现较 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 均有延迟。

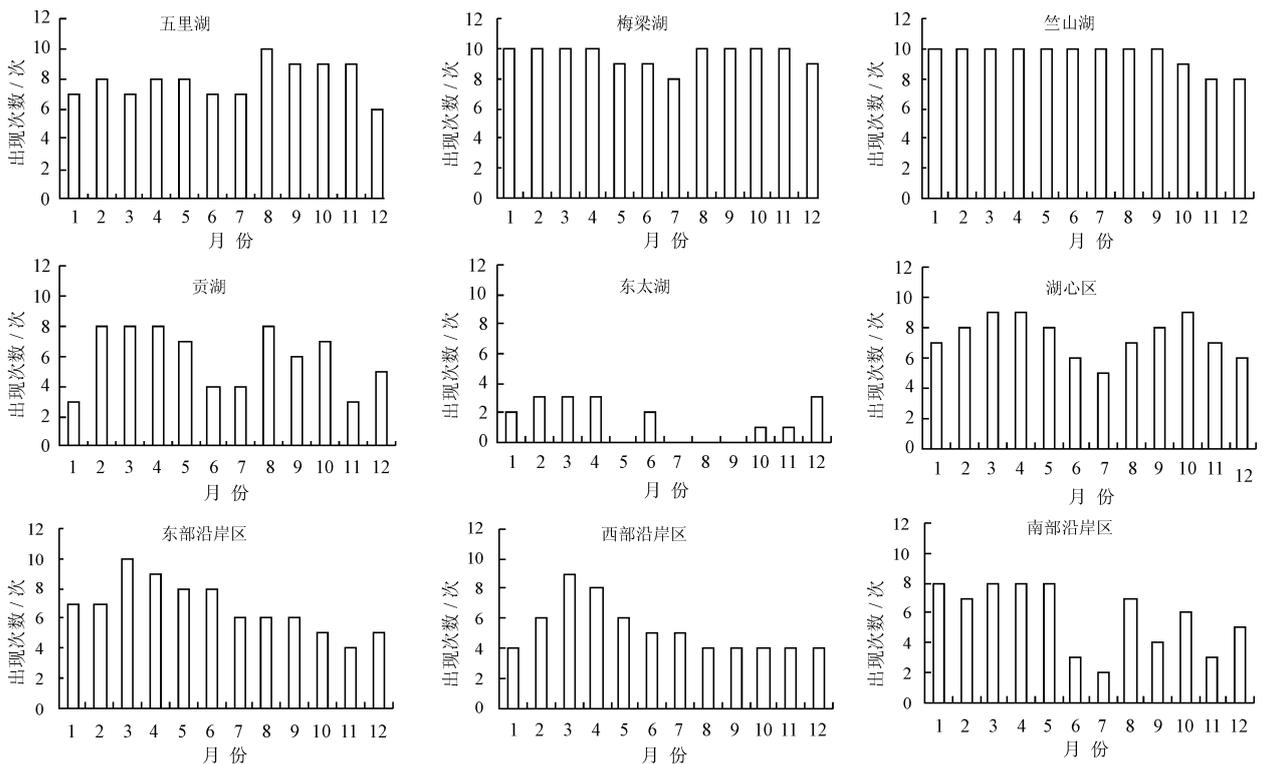


图8 2002-2011太湖9个湖区每月富营养水平出现频次

$\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和Chl-a的月均值表现出显著的相关性( $r = 0.689$ ,  $p < 0.05$ ),8-10月份的浓度值均较高。这是因为,虽然 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 是水体富营养化评价的指标之一,但并不是影响浮游植物生长的主动环境因素,而被认为是浮游植物生长后反馈给水体的被动因素<sup>[12]</sup>,因而二者之间存在显著的响应关系。

Chl-a浓度的年际变化显示,2007年的Chl-a浓度并不高。这是因为,文中采用的数据是太湖所有测点的监测值按照面积加权平均后得到的全湖均值,然后再由每个月的均值计算全年的平均值。2007年的蓝藻水华主要发生在西北部湖区(竺山湖、梅梁湖、五里湖和贡湖),从面积上看,仅约占全

湖面积的 14.5%,对整个太湖水体藻类现存量的影响较低。

分析过程中还发现,东太湖自 2008 年开始出现富营养水质,究其原因主要是 20 世纪 80 年代开始,东太湖围网养蟹盛行,到 2006 年,整个湖面几乎全被围网占据。养殖投放的过量饵料腐烂后释放出大量氮磷营养盐,导致水质恶化。虽然 2008 年对东太湖的围网养殖进行了治理,2009 年初湖区内的围网基本全部拆除,但是累积在湖底的营养盐存在缓慢的释放过程,短期内尚不能全面恢复湖区的水质<sup>[11]</sup>。

### 3 结 语

本文在现有资料的基础上分析了太湖 1980 - 2011 年富营养化水质指标的变化情况,利用水质富营养化评价结果,分析了不同湖区营养水平的变化特征,得到以下初步结论:

(1)1980 - 2011 年,太湖的 TN、TP 浓度总体呈上升趋势,最大值均出现在 1996 年。太湖  $\text{NH}_4^+$ -N 的最高值出现在 2006 年。TN 和  $\text{NH}_4^+$ -N 具有相似的月间变化特征,但是  $\text{NH}_4^+$ -N 的极值均比 TN 提前一个月出现。太湖的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 Chl-a 变化呈显著正相关,均表现为 8 - 10 月份的浓度较高。受统计方法影响,2007 年的 Chl-a 浓度并不高。

(2)太湖水质具有明显的分区特征,富营养水质出现的高低顺序为:梅梁湖、竺山湖 > 五里湖 > 湖心区 > 东部沿岸区 > 贡湖 > 南部沿岸区 > 西部沿岸区,东太湖富营养水质的出现频次较低,但 2008 年以来水质呈富营养化趋势。太湖不同湖区富营养水质出现频次的月间变化特征也非常明显。

(3)随着湖泊治理工程的推进,西部沿岸区和五里湖的水质明显改善,贡湖和湖心区富营养水质出现的频次也有所降低。梅梁湖、竺山湖和南部沿岸区的水质无明显变化。东部沿岸区和东太湖水质

有恶化的趋势。

### 参考文献:

- [1] 张振克. 太湖流域湖泊水环境问题、成因与对策[J]. 长江流域资源与环境,1999,8(1):81 - 87.
- [2] 刘聚涛,杨永生,高俊峰,等. 太湖蓝藻水华灾害灾情评估方法初探[J]. 湖泊科学,2011,23(3):334 - 338.
- [3] Li Yiping, Kumud Acharya, Yu Zhongbo. Modeling impact of Yangtze River water transfer on water ages in lake Taihu, China[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(2):325 - 334.
- [4] 水利部太湖流域管理局. 健康太湖综合评价与指标研究[R]. 上海:水利部太湖流域管理局,2012.
- [5] 黄漪平. 太湖水环境及其污染控制[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [6] 陈润,王跃奎,高怡,等. 2004 - 2008 年太湖水质变化原因及治理对策[J]. 水电能源科学,2010,28(11):35 - 37.
- [7] Björkman K M, Karl D M. Bioavailability of dissolved organic phosphorus in the euphotic zone at station ALOHA, North Pacific Subtropical Gyre[J]. Limnology and Oceanography, 2003, 48(3):1049 - 1057.
- [8] Barlow K, Nash D, Grayson R. Investigating phosphorus interactions with bed sediments in a fluvial environment using a recirculating flume and intact soil cores[J]. Water Research, 2004, 38(14):3420 - 3430.
- [9] Monbet P, McKelvie I D, Worsfold P J. Dissolved organic phosphorus speciation in the waters of the Tamar estuary (SW England)[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73(4):1027 - 1038.
- [10] 秦伯强. 湖泊生态恢复的基本原理与实现[J]. 生态学报,2007,27(11):4848 - 4858.
- [11] 秦惠平,焦锋. 东太湖缩减围网后的水质分布特征探讨[J]. 环境科学与管理,2011,36(5):51 - 55.
- [12] 阮晓红,石晓丹,赵振华,等. 苏州平原河网区浅水湖泊叶绿素 a 与环境因子的相关关系[J]. 湖泊科学, 2008, 20(5):556 - 562.