

## 太湖流域典型中小型湖泊富营养化演变分析(1991—2010年)\*

陈小华<sup>1,2</sup>, 李小平<sup>1\*\*</sup>, 程曦<sup>1,2</sup>, 王菲菲<sup>1</sup>, 陈无歧<sup>1</sup>

(1: 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

(2: 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

**摘要:** 通过分析太湖流域的中小型湖泊富营养化指标近 20 年的变化趋势, 探讨流域富营养化特征的总体演变趋势. 从全流域看, 总氮浓度在近 20 年里呈稳中略降的趋势; 而总磷浓度在近 20 年里有明显上升趋势; 作为营养物上升的直接响应指标叶绿素 a 呈快速上升趋势, 平均值从 1991 年的 7.0  $\mu\text{g/L}$  上升至 2010 年的 27.5  $\mu\text{g/L}$ , 20 年间上升了近 3 倍, 叶绿素 a 数据离散程度出现大幅上升, 标准差从 1991 年的 1.25  $\mu\text{g/L}$  上升至 2010 年的 19.06  $\mu\text{g/L}$ , 说明各湖富营养化程度的空间分异性在加大, 藻华风险增加; 透明度在近 20 年中虽有波动, 但整体仍呈下降趋势. 综合营养状态指数 (TLIc) 计算结果显示, 近 20 年过水型湖泊淀山湖和昆承湖的 TLIc 指数明显高于封闭型湖泊水源地尚湖和傀儡湖. 典型过水型湖泊 (淀山湖)、封闭型湖泊水源地 (尚湖和傀儡湖) 以及典型的渔业生产型湖泊 (长荡湖) 的富营养化演变过程有所差异, 主要受湖泊本身自然属性、污染控制强度、管理模式、功能定位等影响.

**关键词:** 富营养化; 演变过程; 中小型湖泊; 太湖流域

## Eutrophication evolution of typical small and medium-sized lakes in Lake Taihu basin (1991—2010)

CHEN Xiaohua<sup>1,2</sup>, LI Xiaoping<sup>1</sup>, Cheng Xi<sup>1,2</sup>, WANG Feifei<sup>1</sup> & CHEN Wuqi<sup>1</sup>

(1: *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, P. R. China*)

(2: *Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, P. R. China*)

**Abstract:** The eutrophication evolution process and characteristics of typical small and medium-sized lakes in Lake Taihu basin in the recent 20 years were investigated. Results showed that total nitrogen concentration exhibited a slow downward trend, while total phosphorus concentration showed upward trend during the past 20 years. In response to this, the algae biomass expressed as chlorophyll-a increased gradually and the average transparency (secchi depth) decreased totally. The average chlorophyll-a concentration had increased more than three times since 1991. Standard deviation of chlorophyll-a increased from 1.25  $\mu\text{g/L}$  in 1991 to 19.06  $\mu\text{g/L}$  in 2010, indicating that spatial heterogeneity of eutrophication and algae bloom occurred more frequently. Different types of lakes varied in the eutrophication process. It was not only controlled by nutrient input, but also by its own characteristics of the lake. The calculated Comprehensive Nutrition State Index showed that eutrophication status of Lake Dianshan and Lake Kuncheng were slightly eutrophic but more serious than Lake Shanghu and Lake Kuilei, which were mesotrophic. Designated use and water resource management model of lakes were the important factors in the lake eutrophication. Lake Shanghu and Lake Kuilei, which are under strict management as enclosed drinking water resource area, had stable lower nutrient concentrations. As a typical open lake, Lake Dianshan was classified as middle-eutrophicated TN and TP concentrations of which were increasingly high. As a typical fish-culture type lake, eutrophication problem was becoming more serious due to high-density fish culture in the past 20 years in Lake Changdang, with higher nutrient concentration, higher chlorophyll-a, and lower transparency.

**Keywords:** Eutrophication; evolution process; small and medium-sized lakes; Lake Taihu basin

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2009ZX07106-001-001)资助. 2012-11-30 收稿; 2013-04-23 收修稿. 陈小华, 男, 1978 年生, 高级工程师; E-mail: shoutfar@yahoo.com.cn.

\*\* 通信作者; E-mail: lixp\_2008@hotmail.com.

太湖流域是我国经济最发达、城市化程度最高的地区之一,同时也是湖泊水质恶化和富营养化最严重的地区之一<sup>[1]</sup>.太湖流域内的湖泊与长江中下游地区其他湖泊类似,历史上均属于典型的浅水草型湖泊,沉水植物分布广泛,1980s以前各湖的沉水植物覆盖度大多达到80%以上.由于不合理的环湖开发、渔业养殖、过量排污等因素,导致水体富营养化进程加快,沉水植物衰退和消失的现象普遍出现<sup>[2]</sup>.沉水植物的逐步消亡打破了原有生态平衡,加快了水体从草型清水态转变为藻型浊水态,并引发了水质恶化、蓝藻水华频发、生态系统破坏等一系列生态环境问题<sup>[3]</sup>.

流域内的各湖泊在水体规模、管理水平、功能定位方面有所差异,可能导致湖泊的富营养化演变过程有明显差异.本文通过分析太湖流域的不同中小型湖泊的基本环境特征与长期水质变化,站在历史角度反观湖泊富营养化特征及过程,并比较不同湖泊富营养化过程的异同性,为制定整个太湖流域的湖泊富营养化治理和生态修复目标提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

太湖流域是长江三角洲的核心区域,总面积36895 km<sup>2</sup>.流域内主要中小型湖泊包括溧湖、长荡湖、昆承湖、淀山湖、澄湖、阳澄湖、傀儡湖、元荡、漕湖、尚湖(图1).溧湖面积最大(146.5 km<sup>2</sup>),尚湖面积最小(8 km<sup>2</sup>)<sup>[4]</sup>.本区浅水湖泊平均水深1~2 m,水位的变化具有缓涨缓落的特性.除了太湖换水周期达到250 d以外,其它湖泊都具有一定的过水型特征,换水周期较短,一般数十天,淀山湖和澄湖是典型的过水型湖泊.傀儡湖和尚湖是封闭型的饮用水源地.

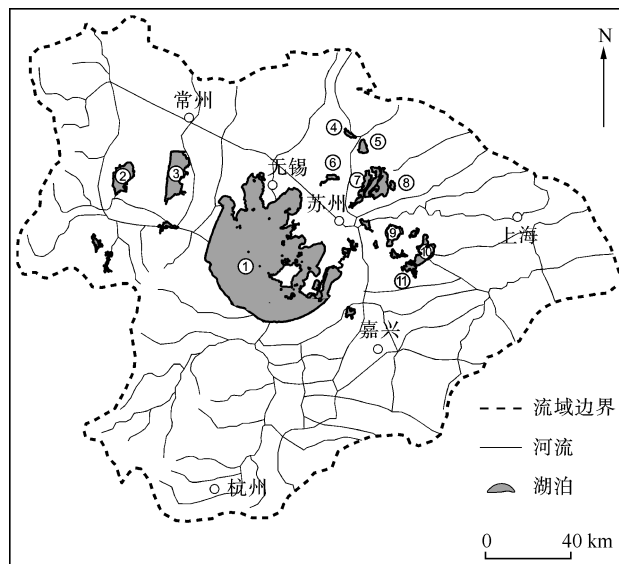


图1 太湖流域主要湖泊分布(①太湖;②长荡湖;③溧湖;④尚湖;⑤昆承湖;⑥漕湖;⑦阳澄湖;⑧傀儡湖;⑨澄湖;⑩淀山湖;⑪元荡)

Fig. 1 The location of the main lakes in Lake Taihu basin

### 1.2 数据来源

从上海市和江苏省各地方环境监测站收集各湖泊近20年(1991—2010年)的常规水质监测月平均或季度平均数据.分析的富营养化相关指标包括2个原因变量——总氮(TN)和总磷(TP),以及2个响应变量叶绿素a(Chl. a)和透明度(SD),指标测定方法如下:COD<sub>Mn</sub>测定采用酸性高锰酸钾法(GB/T 11892—1989),TN测定采用过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB/T 11894—1989),TP测定采用钼酸铵分光光度法(GB/T 11893—1989),叶绿素a测定采用四波段分光光度法(SL88—1994),透明度测定采用塞氏盘法(SL87—1994).

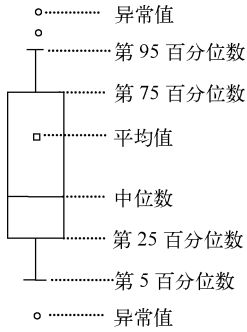


图2 箱须图的结构示意图  
Fig. 2 Sketch map of box-whisker plot

1.3 分析方法

1.3.1 综合营养状态指数法评价 基于 TN、TP、COD<sub>Mn</sub>、叶绿素 a 和透明度 5 个水质参数计算综合营养状态指数, 计算公式为:  $TLI(\Sigma) = \sum W_j \cdot TLI(j)$ . 式中,  $TLI(\Sigma)$  为综合营养状态指数;  $W_j$  为第  $j$  种参数的营养状态指数的相关权重.  $TLI(j)$  代表第  $j$  种参数的营养状态指数. 富营养化程度分级标准为:  $TLI(\Sigma) < 30$  为贫营养;  $30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$  为中营养;  $50 < TLI(\Sigma) \leq 60$  为轻度富营养;  $60 < TLI(\Sigma) \leq 70$  为中度富营养;  $TLI(\Sigma) > 70$  为重度富营养<sup>[5]</sup>.

1.3.2 箱须图法 箱须图法是利用数据中的 5 个统计量: 最小值、第 25 百分位数 (P25)、中位数、第 75 百分位数 (P75) 与最大值来描述数据的一种方法, 可反映一组或多组连续型定量数据的集中和离散趋势, 能以简单的组合图形直观地表现数据批的形状和分布结构 (图 2). 本文利用统计软件 Origin 8.0 对各湖泊不同时期的水质数据进行箱须图分析, 客观地反映湖泊水质指标变化情况和分布结构, 并进行多批数据的比较分析.

2 结果与分析

2.1 富营养化演变的总体趋势

通过分析太湖流域中小型湖泊富营养化指标近 20 年的变化趋势, 探讨富营养化特征的总体演变趋势 (图 3). 总氮浓度在近 20 年里呈稳中有降的趋势, 2000 年之前的各年份总氮平均浓度基本都超过 V 类水标准值 (2.0 mg/L), 而 2001 年之后, 各年份总氮平均浓度接近或低于 V 类水标准值. 总磷浓度在近 20 年里呈稳中略升趋势, 后 10 年 (2001—2010 年) 的多年平均值 (0.12 mg/L) 比前 10 年 (1991—2000 年) 多年平均值 (0.10 mg/L) 高近 20%, 1999 年和 2000 年出现浓度低谷, 尤其是 1999 年的平均浓度达到近 20 年中的最低水平, 这可能与 1998 年长江流域发生特大洪水以后, 整个流域的湖面和蓄洪容积增加, 且沉积环境和面

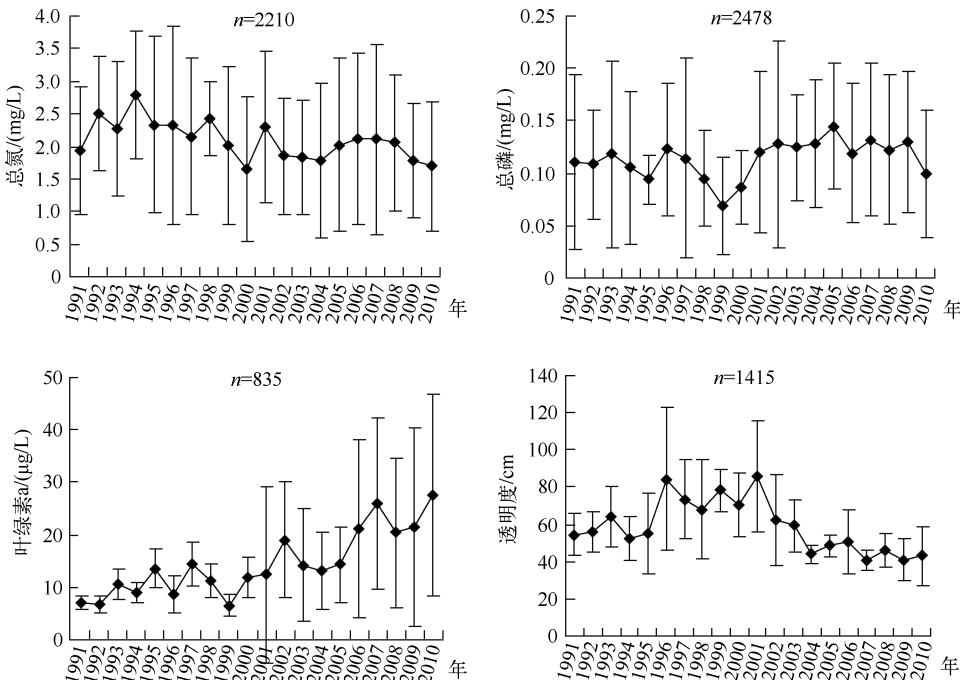


图3 太湖流域中小型湖泊富营养化指标近 20 年的变化规律

Fig. 3 20-year variation of eutrophication indicators of typical small and medium-sized lakes in Lake Taihu basin

源污染输入发生改变有关<sup>[6]</sup>。在TN、TP等营养物的胁迫下,藻类叶绿素a浓度总体上表现为逐渐上升,平均值从1991年的7.0 μg/L上升至2010年的27.5 μg/L,20年间上升了近3倍,遇到适宜的气象条件很容易出现藻华现象,比如2007年气温偏高,加上雨少、光照充足等气象因素,为蓝藻暴发提供了必要的气象条件,各湖平均叶绿素a浓度异常高,与2007年3—12月太湖发生蓝藻水华是一致的<sup>[7]</sup>。1999年叶绿素a浓度异常低,甚至达到近20年的最低水平,这与1999年前后TN、TP浓度异常低是对应的。叶绿素a的标准差逐年上升,尤其在2000年之后出现大幅度上升,1991—2000年间标准差为1.25~3.88 μg/L,而2001—2010年期间标准差介于7.36~19.06 μg/L之间,说明各湖泊的富营养化程度的空间分异性在加大,藻华频次升高。透明度变化分成3个阶段,表现为先升后降的特征:第1阶段(1991—1995年),变化范围为52.5~64.0 cm,多年平均值为56.5 cm;第2阶段(1996—2001年),各年透明度处于高值,变化范围为71~86 cm,多年平均值为75.2 cm;第3阶段(2002—2010年),变化范围为41~62 cm,多年平均值为48.3 cm。透明度在近20年中仍整体表现为下降趋势,2006—2010年期间的透明度平均值比1991—1995年期间低近20%。

## 2.2 典型湖泊的综合营养状态指数逐年变化

针对具备长时间连续监测数据的淀山湖、昆承湖、傀儡湖、尚湖分别计算综合营养状态指数(TLlc指数),结果显示近20年淀山湖和昆承湖的TLlc指数明显高于尚湖和傀儡湖,前两个湖泊各年份的TLlc指数高于55,属于富营养化状态,而后两个湖泊的TLlc指数总体维持在50以下,为中营养化湖泊(图4)。4个湖泊的TLlc指数在1999年均出现异常低值,可能与整个流域在1998年遭遇特大洪水有关。

淀山湖的综合营养状态指数呈持续上升趋势,富营养化程度逐渐加剧,1993—2000年TLlc指数在55~60之间波动,为轻度富营养化状态。2000年之后TLlc指数值超过60,转化成中度富营养化状态。昆承湖的TLlc指数先上升后下降,1999年前TLlc指数维持在60以上,为中度富营养化状态,1997年达到最高值68.5,1999年后TLlc指数维持在60以下,转为轻度富营养化状态。尚湖和傀儡湖的TLlc指数均呈现先上升后下降的特征,1998年达到最高值,1999年后基本维持在50以下,转为中度营养化状态(图4)。

## 2.3 典型湖泊的富营养化趋势

太湖流域的湖泊富营养化趋势总体在恶化,但各湖泊之间的富营养化趋势也有明显差异,这与各湖泊的自然特征、水力条件、换水周期污染源输入现状、水资源管理模式以及功能定位等密切相关。流域内的很多中小型湖泊出入湖的河道较多,换水周期较短,一般为1个月或数十天,大多具有过水型湖泊特征,如淀山湖、漕湖、澄湖、阳澄湖以及昆承湖。流域内大部分湖泊在发挥着生活饮用水源的功能,由于流域水体整体水质状况在恶化,有些小型湖泊已采取了封闭式的湖泊管理模式,如尚湖和傀儡湖。渔业生产是流域内很多湖泊的最重要使用功能之一,也成为引起水体富营养化的主要原因之一,如长荡湖、阳澄湖、溇湖、漕湖等。

**2.3.1 过水型湖泊——淀山湖** 淀山湖是太湖流域典型的过水湖泊,换水周期29 d,湖内水质受上游来水水质波动的影响很大。目前处于严重的富营养化阶段。近年来(尤其是2007年之后),流域污染物削减力度逐渐加大,上游来水水质状况出现明显改善,淀山湖湖内水质恶化趋势得到控制。

近20年的水质监测数据显示(图5),1996—2005年,TN和TP浓度呈逐年上升的趋势,近5年(2006—2010年)TN和TP浓度已经趋于稳定,TN平均浓度维持在3.5 mg/L左右,TP平均浓度维持在0.19 mg/L左右;Chl. a浓度出现明显下降,是2001—2005年期间的50%左右;但透明度仍处于继续恶化的状态,“十一

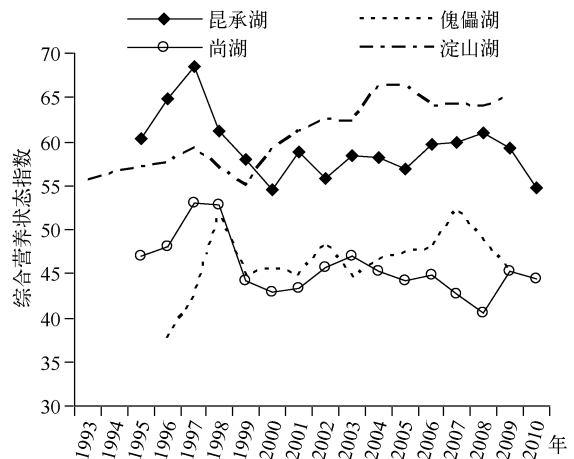


图4 太湖流域典型湖泊的综合富营养化状态指数年际变化(n=65)

Fig. 4 Yearly variation of trophic level index (TLlc) of typical lakes in Lake Taihu basin

五”期间的平均值比“十五”期间下降 10% 以上.

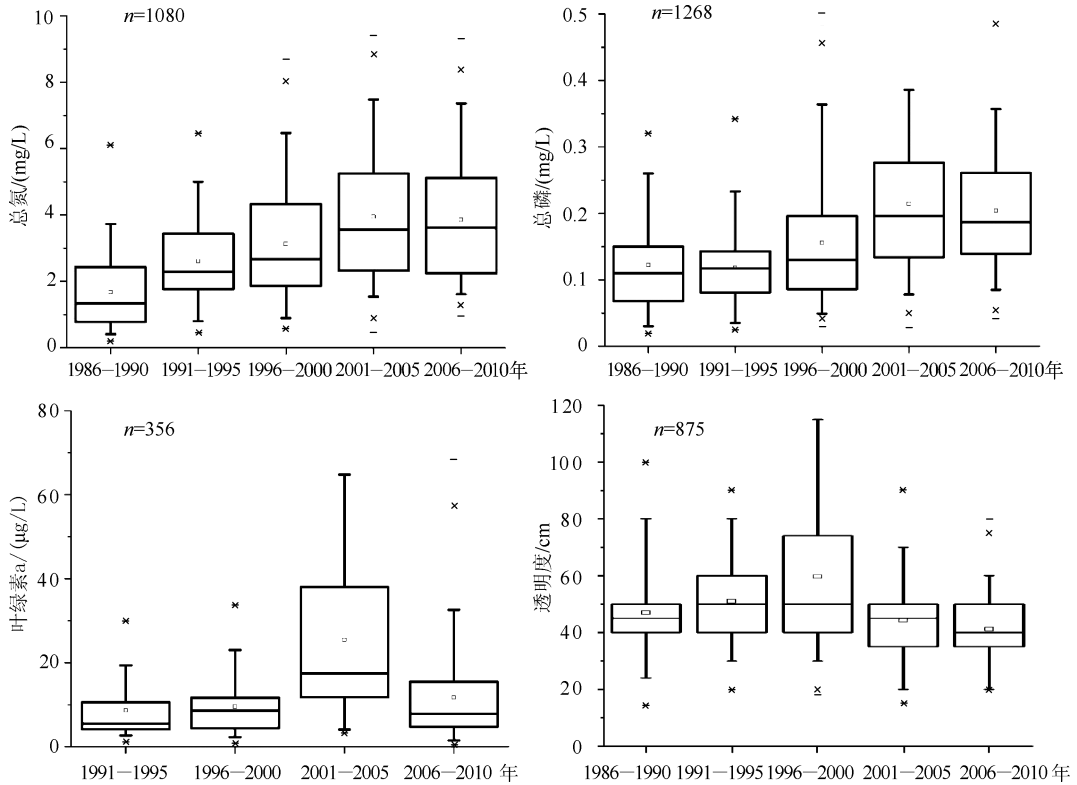


图 5 淀山湖富营养化指标长时间尺度的演变

Fig. 5 Long-term variation of eutrophication indicators of Lake Dianshan

2.3.2 封闭型湖泊水源地——尚湖和傀儡湖 尚湖和傀儡湖是太湖流域内典型的封闭型水源地,全湖采取封闭式管理,污染源受到严格控制,湖泊管理模式已逐步由资源利用管理过渡到资源保护管理. 尚湖作为常熟市主要供水水源,近 20 年逐步推进退田还湖和生态修复工程,并定期将长江的较清洁水引入尚湖,富营养化趋势出现明显好转,从近十年的水质监测结果来看, TN、TP 浓度出现明显下降,“十一五”期间(2006—2010 年)的 TN 平均浓度比“十五”期间(2001—2005 年)下降近 20% ,TP 下降 40% 左右,透明度相应上升近 60% (图 6). 傀儡湖经过近十年的生态综合整治,湖水的 TN 和 TP 明显下降,“十一五”期间的 TP 平均浓度比“十五”期间下降 20% 左右, TN 平均浓度也下降 10% 左右. 而富营养化响应指标叶绿素 a 浓度不降反升,

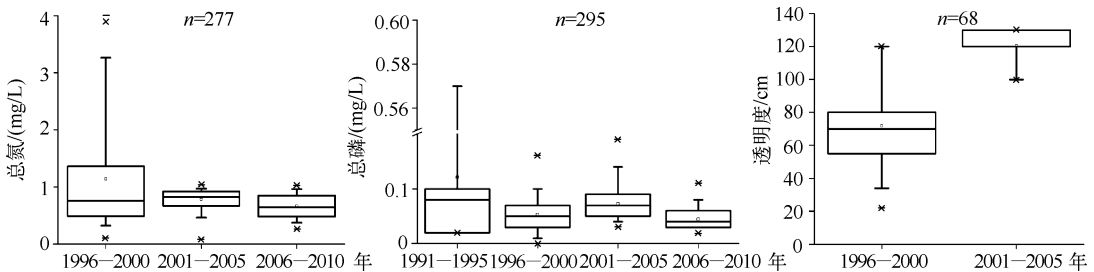


图 6 尚湖的富营养化指标长时间尺度的演变

Fig. 6 Long-term variation of eutrophication indicators of Lake Shanghu

近5年的平均浓度比“十五”期间上升20%左右(图7).这说明营养物的削减并不会快速改善湖泊生态系统,藻类生物量的下降和透明度的上升都明显滞后于污染物的削减,说明傀儡湖仍需要长期开展生态修复.

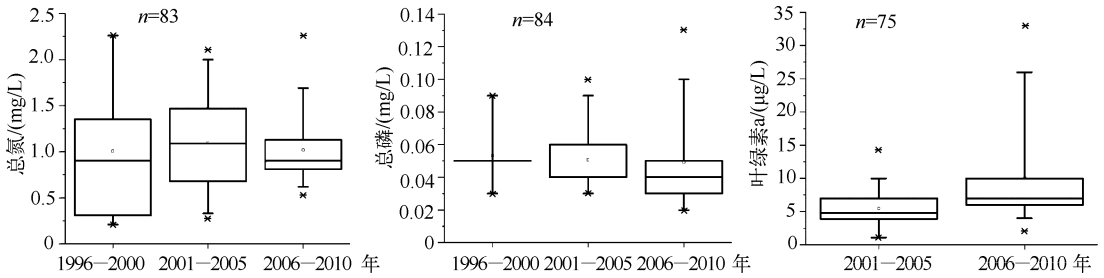


图7 傀儡湖的富营养化指标长时间尺度的演变

Fig. 7 Long-term variation of eutrophication indicators of Lake Kuilei

2.3.3 渔业生产型湖泊——长荡湖 太湖流域的湖泊大多属于集城市备用水源、农业灌溉、洪涝调节、渔业生产、休闲娱乐等多种功能于一体的浅水湖泊,渔业生产往往是湖泊最直接的经济功能.长荡湖是流域内典型的渔业生产型湖泊,网围养殖业及其带动的湖上餐饮业一度非常发达,导致湖水水质呈现不断恶化的趋势.“十一五”期间,当地政府对长荡湖实施了综合整治工程,包括全部拆除网围养殖、将湖面渔船饭店集中到下游指定区域、沿湖截污纳管等,水质监测数据充分反映出综合整治的初步成效,总氮平均浓度比“十五”期间下降了近60%,总磷平均浓度下降了近20%(图8).而近年长荡湖的富营养化响应指标却更加恶化,“十一五”期间的叶绿素a平均浓度是“十五”期间的数倍,藻华现象时有发生,透明度下降近50%,说明长荡湖虽经过大规模整治,生态系统的恢复过程严重滞后于营养物的削减,仍需要漫长的修复过程.

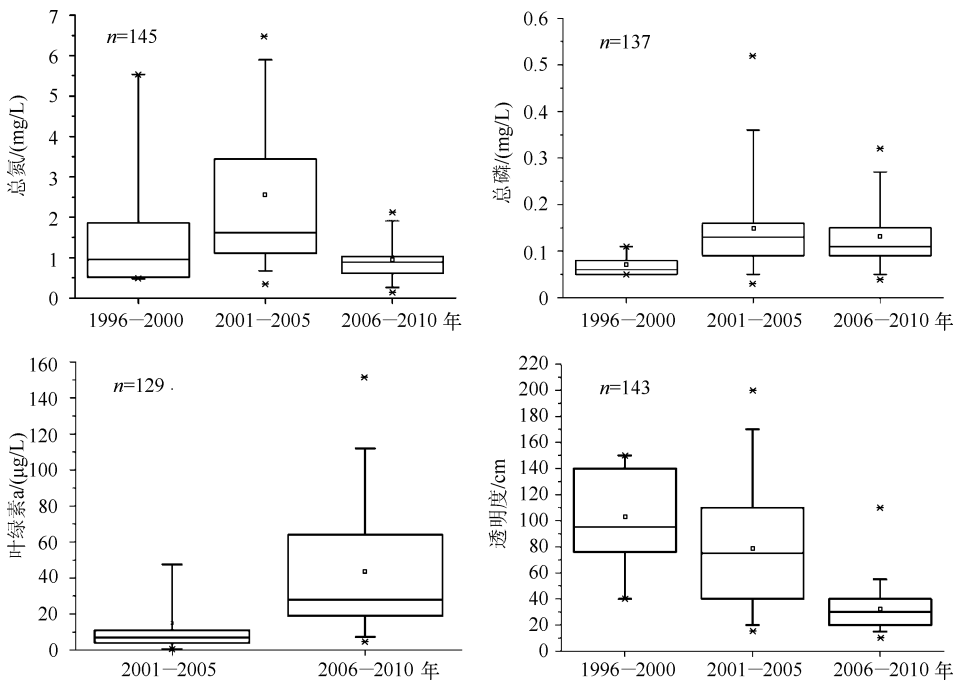


图8 长荡湖的富营养化指标长时间尺度的演变

Fig. 8 Long-term variation of eutrophication indicators of Lake Changdang

### 3 讨论

#### 3.1 流域富营养化总体趋势和不同湖泊之间的差异性

同处于太湖流域的各湖泊富营养化演变过程具有相似性. 从全流域看, 近 20 年里总氮浓度呈稳中略降的趋势; 而总磷浓度有较明显上升趋势; 作为营养物上升的直接响应指标, 叶绿素 a 浓度呈快速上升趋势, 年平均值从 1991 年的  $7.0 \mu\text{g/L}$  上升至 2010 年的  $27.5 \mu\text{g/L}$ , 20 年间上升了近 3 倍, 标准差从 1991 年的  $1.25 \mu\text{g/L}$  上升至 2010 年的  $19.06 \mu\text{g/L}$ , 藻华风险加大; 透明度虽有波动, 但整体仍呈下降趋势, 2006—2010 年期间的透明度平均值比 1991—1995 年间降低近 20%. 1996—2001 年期间透明度平均值达到 75 cm 左右, 相比前 5 年和后 10 年明显升高, 这主要是由于早期的营养物上升, 先促进湖泊的沉水植物爆发性增长, 沉水植物对污染物的净化作用能显著提高水体透明度, 但随着排入湖体污染物负荷的进一步上升, 对水生植物生长产生毒害, 沉水植物开始逐渐消亡, 藻类大量繁殖, 透明度也随之快速下降<sup>[8-9]</sup>. 1998 年特大洪水<sup>[8]</sup>和 2007 年的少雨高温等突发性环境因素曾对湖泊的营养物浓度和藻类生产力产生过短暂影响, 但并未改变污染物输入增加而引起湖泊富营养化程度总体加剧的趋势. 同处于一个流域的各湖富营养化过程并不是同步的, 富营养化状态有明显差异性, 主要与各湖的自然特征、水力条件、换水周期、湖泊功能定位、湖区社会经济发展以及水资源管理模式等因素密切相关<sup>[10]</sup>. 对于淀山湖、澄湖等过水型湖泊, 由于系统开放度大, 水力停留时间短, 上游来水的污染物在湖内未得到充分消纳, 与其它湖泊相比, 湖内水质对上游来水水质更加敏感, 生态系统结构更容易受到外源污染的冲击, 因此 TN 和 TP 浓度水平在流域内最高, 富营养化状态综合指数也最大, 后续治理应着重降低上游来水的污染物. 尚湖、傀儡湖等封闭型湖泊水源地, 功能上由天然湖泊逐渐转变成水库型湖泊, 管理目标已由资源利用逐步过渡到资源保护, 入湖量和出湖量采取严格的人工控制, 外源污染输入控制到最小, 内源污染得到清除, 近年来水质明显好转, 透明度显著提高, TN、TP 浓度在全流域内最低, 富营养化状态综合指数最小, 但湖泊生态系统的整体恢复仍需要很长时间, 封闭型湖泊的后续治理应着重修复湖泊的生态系统结构, 包括水生植物恢复、鱼类调控等. 长荡湖、阳澄湖等渔业生产型湖泊, 以水产养殖及相关休闲旅游为主要功能, 多年的围网养殖活动造成底泥中氮、磷的大量积累<sup>[11]</sup>, 内源污染严重, 水质持续恶化, 规模过大的养殖活动和不合理的养殖结构对湖内水草、底栖动物的多样性和生物量破坏严重<sup>[12]</sup>, 湖内水质恶化程度与围网养殖面积有着相同的变化趋势<sup>[13]</sup>, 对于渔业生产型湖泊的后续治理应按环境容量控制水产养殖规模, 实行生态养殖, 同步控制内源和外源污染.

#### 3.2 功能定位对湖泊富营养化控制的影响

了解湖泊及其流域的发展历史是作好湖泊综合管理的前提<sup>[14]</sup>. 太湖流域是我国经济最发达、城市化程度最高的地区之一, 流域内的湖泊富营养化多为人为富营养化, 而湖泊自然老化因素较小, 这与东部平原地区的其他湖泊类似<sup>[15]</sup>. 因此, 湖泊富营养化进程也是湖泊资源利用进程和管理组织制度的演化过程. 目前被确立为封闭型水源地的尚湖和傀儡湖经过全面规划和科学管理, 已完全从水产养殖向饮用水源转变, 富营养化程度明显改善. 1990s 以来, 尚湖经过大规模生态整治, 湖面逐渐扩大, 每月利用涨潮将长江的较清洁水引入尚湖, 并开展了全湖底泥疏浚等生态修复工程, 常熟市将其作为封闭式饮用水源地进行日常管理<sup>[16]</sup>, 富营养化趋势出现逐年好转, 近 5 年 TP 和 TN 浓度平均下降 40% 和 20%, 透明度则相应上升. 昆山市政府于 2001 年底着手进行傀儡湖生态保护工作, 全面实施生态修复工程. 目前已在傀儡湖沿岸修筑了宽 50 m 的湿地缓冲带, 湖内围网养鱼设施全部拆除, 库容由  $0.08 \times 10^8 \text{ m}^3$  增至  $0.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[17]</sup>, 全湖采取封闭式管理模式, 采用企业化运作机制, 实时监控人为污染和藻华风险, 近 5 年 TP 和 TN 浓度平均下降 20% 和 10%. 淀山湖虽一直被上海市政府确立为重要水源保护地, 但它属于江苏和上海的跨界湖泊, 隶属 2 个地区共同管理, 上下游地区对淀山湖管理模式和组织制度的不统一, 影响富营养化治理进程, 近几年湖内 TN 和 TP 浓度虽逐渐趋于稳定, 但仍分别维持在平均浓度为  $3.5 \text{ mg/L}$  和  $0.19 \text{ mg/L}$  的水平, 远高于流域内其他湖泊. 长荡湖、滆湖、漕湖、阳澄湖、澄湖等湖泊主要功能仍为水产养殖, 富营养化程度有加重趋势<sup>[1]</sup>, 比如近 5 年长荡湖的藻类叶绿素 a 平均浓度超过  $40 \mu\text{g/L}$ , 透明度只有 30 cm 左右. 因此, 湖泊的功能定位和管理模式可能成为影响湖泊富营养化演变进程的最主要因素之一. 湖泊使用目标的合理转变是解决太湖流域湖泊富营养化问题的关键, 管理模式需要由资源利用管理向资源保护管理进行转变<sup>[18]</sup>.

## 4 结论

通过分析太湖流域的中小型湖泊富营养化指标近20年的变化趋势,探讨富营养化特征的总体演变趋势,总氮浓度在近20年里呈稳中略降的趋势,而总磷浓度在近20年里有明显上升趋势,响应指标叶绿素a的浓度呈快速上升趋势,20年间上升了近3倍,透明度在近20年中虽有波动,但整体仍呈下降趋势.综合营养状态指数计算结果显示,近20年典型过水型湖泊淀山湖和昆承湖的 $TLIc$ 指数明显高于封闭型水源地湖泊尚湖和傀儡湖,前两者基本维持在轻度至中度富营养状态,后两者维持在中营养状态.

针对典型过水型湖泊(淀山湖)、封闭型湖泊水源地(尚湖和傀儡湖)以及典型的渔业生产型湖泊(长荡湖)的富营养化演变过程进行了比较分析.过水型湖泊的水质逐年恶化趋势明显,营养盐持续上升,透明度持续下降;封闭型湖泊的营养盐浓度较低,透明度有所改善;渔业生产型湖泊水质恶化趋势明显,经过生态修复,营养盐下降明显,但藻类生物量和透明度状况仍呈恶化趋势.

## 5 参考文献

- [1] 江苏省人民政府.江苏省太湖流域水环境综合治理实施方案.2009.
- [2] 成小英,李世杰.长江中下游典型湖泊富营养化演变过程及其特征分析.科学通报,2006,51(7):848-855.
- [3] 秦伯强,罗淑葱.太湖生态环境演化及其原因分析.第四纪研究,2004,24(5):561-567.
- [4] 王苏民,窦鸿身.中国湖泊志.北京:科学出版社,1998:1-300.
- [5] 金相灿.中国湖泊环境:第1册.北京:海洋出版社,1995:234-278.
- [6] 龙鑫,甄霖,成升魁等.98洪水对鄱阳湖区生态系统服务的影响研究.资源科学,2012,(2):220-228.
- [7] 任健,商兆堂,蒋名淑等.2007年太湖蓝藻暴发的气象条件分析.安徽农业科学,2008,36(27):11874-11875,11877.
- [8] 秦伯强,高光,胡维平等.浅水湖泊生态系统恢复的理论与实践思考.湖泊科学,2005,17(1):9-16.
- [9] 张运林,秦伯强,陈伟民等.太湖水体透明度的分析、变化及相关分析.海洋湖沼通报,2003,(2):30-36.
- [10] Marten S, Nes EH. Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. *Hydrobiologia*, 2007, 584: 455-466.
- [11] 宋学宏,邴旭文,孙丽萍等.阳澄湖网围养殖区水体营养盐的时空变化与水质评价.水生态学杂志,2010,3(6):23-29.
- [12] 鲍方印,赵洁,崔峰等.女山湖网围养殖对水质和大型底栖动物群落结构的影响.安全与环境学报,2012,12(2):23-27.
- [13] 班璇,余成,魏珂等.网围养殖对洪湖水质的影响分析.环境科学与技术,2010,33(9):125-129.
- [14] Johnes PJ. Understanding lake and catchment history as a tool for integrated lake management. *Hydrobiologia*, 1999, 395/396: 41-60.
- [15] 张运林,秦伯强.东部平原地区湖泊富营养化的演变及区域分析.上海环境科学,2002,21(9):549-553.
- [16] 刘文杰,宋立荣,许璞等.引水对尚湖浮游植物群落结构和营养盐浓度的影响.水生态学杂志,2012,(1):55-65.
- [17] 沈月明,沈文.昆山市给水工程改善水质的措施.中国给水排水,2006,22(8):32-34.
- [18] 钟太洋,黄贤金.湖泊管理组织制度演进及其驱动因素的比较研究——以固城湖和长荡湖为例.水利经济,2006,(6):6-10.