

洱海富营养化时间演变特征(1988—2013年)及社会经济驱动分析*

陈小华¹, 钱晓雍¹, 李小平², 卫志宏³, 胡双庆¹

(1: 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

(2: 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

(3: 中国大理洱海湖泊研究中心, 大理 671000)

摘要: 基于 1988—2013 年的洱海流域社会经济统计数据与湖内水质历史监测数据, 分析了社会经济指标和富营养化指标的逐年变化趋势, 并借助 Change-point Analyzer 对指标进行了拐点分析. 结果显示: 过去 25 年洱海水体呈明显富营养化趋势, 主要富营养化指标均出现过 1 次恶化拐点, 总磷出现时间最早(1996 年), 其次是高锰酸盐指数(1999 年), 总氮、叶绿素 a、透明度和综合营养状态指数则集中在 2002—2003 年期间出现拐点, 叶绿素 a 浓度上升 10 余倍, 透明度相应下降了近 50%. 流域主要社会经济指标出现了 2~3 次增长拐点, 首次拐点集中出现在 1994—1999 年期间, 明显早于富营养化指标恶化拐点出现时间. 多元回归分析显示洱海总磷浓度受流域农作物种植业发展影响最大, 其他水质指标则主要受流域畜牧业的影响.

关键词: 拐点; 富营养化; 稳态转换; 社会经济; 洱海

Long-term trend of eutrophication state of Lake Erhai in 1988–2013 and analyses of its socio-economic drivers

CHEN Xiaohua¹, QIAN Xiaoyong¹, LI Xiaoping², WEI Zhihong³ & HU Shuangqing¹

(1: *Shanghai Academy of Environmental Science, Shanghai 200233, P.R.China*)

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

(3: *Erhai Lake Research Center of China, Dali 671000, P.R.China*)

Abstract: This paper studies the long-term trend of socio-economic indicators with the watershed and water quality data of the lake from the year 1988 to 2013 AD at Lake Erhai, the second largest freshwater lake located in the Yunnan-Guizhou Plateau in south-western China. A powerful analyzing tool called Change-point Analyzer is employed to analyze the inflection points of all-time series. Our results show that each of the main eutrophic indicator has a worsening inflection point over the past 25 years. The inflection point of total phosphorus (TP) appeared the earliest (1996), followed by that of permanganate index (COD_{Mn}) (1999). While, inflection points of total nitrogen (TN), chlorophyll-a (Chl.a), translucency (SD), and comprehensive trophic level index (TLIc) were in 2002–2003 with TN concentrations doubled, Chl.a concentrations increased 10 times and SD decreased by 50%. Lake Erhai ecosystem experienced an abrupt regime shift from a grass-type lake to an algae-type lake in 2002–2003. Most socio-economic indicators for Lake Erhai Basin have two or three inflection points with the first one between 1994 and 1999, which is 2 to 3 years earlier than the inflection points of eutrophication index. This suggests uncontrolled rapid socio-economic development had directly promoted the eutrophication in Lake Erhai. The second one occurred from 2006 to 2010 when eutrophication indicators did not show a further deterioration trend, which may be related to effective pollution reduction measures of the basin and self-regulation capacity of lake ecosystem. Multiple regression analyses show that the development of animal husbandry and economic crop cultivation had the major impact on water quality. Therefore, our results suggest that increasing agricultural non-point source pollution control will be the key method to curb eutrophication in Lake Erhai.

Keywords: Inflection point; eutrophication; regime shift; socio-economics; Lake Erhai

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07106-001-006)资助. 2016-06-13 收稿; 2017-03-30 收修改稿. 陈小华(1978~), 男, 博士, 高工; E-mail: shoutfar@aliyun.com.

湖泊的富营养化趋势一直是全球最为突出的水环境问题之一^[1]. 我国改革开放以来,一方面随着流域人口、工农业生产的快速增长和流域大规模经济开发,需水量和污水排放量增大,导致流域环境的生态调节和自我恢复能力大幅下降,引起水质恶化、富营养化现象突出等许多生态问题^[2-3];另一方面,日益尖锐的湖泊富营养化问题,从多个方面影响着流域工农业生产、居民日常生活和水体功能的实现. 据最新统计(2008—2010 年)^[4],我国五大湖区的主要湖泊(面积大于 10 km²)中,处于富营养化状态的湖泊数量占总数的 78.7%,中营养湖泊占 14.6%,且有向富营养化状态转变的趋势,只有极少数(6.7%)处于贫营养状态. 从地理区域来看,中东部平原湖区湖泊几乎全部富营养化,其次是云贵高原湖区、东北平原和山地湖区等. 云贵高原湖区将是继中东部平原地区之后下一个面临全面富营养化趋势的地区. 洱海正是云贵湖区内处于“富营养化初期”阶段的典型湖泊,作为全国城市近郊保护最好的湖泊之一,近些年湖区水质出现恶化趋势,藻华时有发生^[5-6]. 长时间监测数据能有效、准确地描述湖泊的富营养化趋势,分析湖泊生态系统发生稳态转换的指标阈值,并发现其主要驱动因素^[7]. 因此,本研究基于 1988—2013 年的洱海流域社会经济统计数据与湖内水质历史监测数据,对所有指标的时间变化趋势和历史拐点进行探测分析,进而探讨洱海富营养化时间演变的社会经济驱动因素,为洱海富营养化控制措施的制定提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

洱海(25°36′~25°55′N, 100°0′~100°17′E)是云南省第二大高原淡水湖泊,为滇西最大的断陷湖,跨洱源县、大理两县市^[8]. 水面面积 249.8 km²,汇水面积 2565.0 km²,较大水深 21.0 m,平均水深 10.5 m,库容 28.8 亿 m³(图 1). 洱海湖面多年平均海拔 1965.8 m,光照充足,辐射强,气温温和(年均气温 15℃左右),为浮游藻类的大量繁殖提供了有利条件. 年均降雨量 1055 mm,年均蒸发量 1970 mm. 流域水系发达,入湖大小河流共 117 条,较大入湖河流包括弥苴河、罗时江、永安江、波罗江、苍山十八溪等. 洱海是流域人民生活、灌溉、工业用水的主要水源,已成为制约当地经济社会可持续发展的主要“瓶颈”^[9-10].

1.2 数据来源

1.2.1 流域社会经济发展数据 从中国知网的“中国经济与社会发展统计数据库”(http://tongji.cnki.net)收集整理 1990—2013 年《云南省统计年鉴》、《大理州统计年鉴》、《大理市统计年鉴》、《大理白族自治州国民经济和社会发展统计公报》等统计资料中的洱海流域国民经济与社会发展的相关数据. 通过对洱海流域各类污染源(农业、工业、生活等)多年入湖污染负荷量进行比较^[11],发现农业源入湖污染负荷远高于工业源、生活源以及旅游人口等其他源污染负荷,因此本文不考虑流域内工业废水、生活污水以及旅游人口等数据,而重点收集流域三大产业(第一、第二、第三产业)增加值,以及农业生产(第一产业)方面的经济数据,包括主要农作物(粮食作物和经济作物)播种面积、主要农作物品种与产量、牲畜和家禽饲养情况(品种和产量)、农用作肥施用量、水产品养殖面积及产量、农林牧渔业总产值等.

1.2.2 湖内水质数据 从云南省环境监测中心站、中国大理洱海湖泊研究中心等环境监测和研究部门收集了洱海 1988—2013 年的水环境常规监测数据,水质指标主要包括总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、透明度(SD)、藻类叶绿素 a(Chl.a). 全湖水水质监测点 8~13 个(图 1),采样频次为一年 6 次或 12

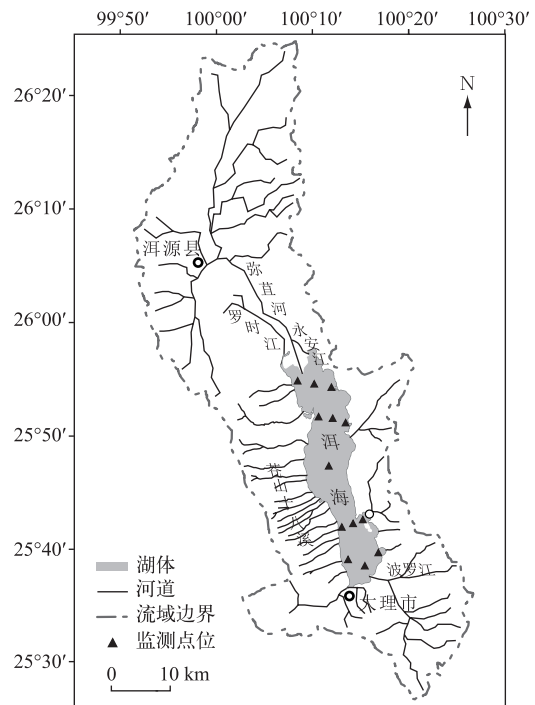


图 1 洱海流域及水质监测点分布

Fig.1 Lake Erhai Basin and water sampling sites

次. 各水质指标的主要测定方法为: TN 浓度采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法, TP 浓度采用钼锑抗分光光度法, COD_{Mn} 浓度采用酸性法, Chl.a 浓度采用四波段分光光度法, SD 采用塞氏盘法^[12]. 基于 COD_{Mn}、TN、TP、Chl.a 和 SD 5 个指标计算出洱海的综合营养状态指数 (TLIc)^[13].

1.3 统计分析

采用 Taylor Enterprises 公司的拐点分析软件 Change-point Analyzer v2.3 进行富营养化水质指标和社会经济发展指标的拐点探测分析, 该分析工具方便用于自动检测每组数据平均值之间的明显飞跃以及数据的波动范围, 判别各指标出现的多个拐点, 并提供每个拐点的置信水平以及拐点出现时间的置信区间^[14-15]. 具体计算原理如下:

设 X_1, X_2, \dots, X_n 表示 n 个数据点. 由此, 计算累积和 S_0, S_1, \dots, S_n , 计算方法如下:

1) 首先计算平均值: $\bar{X} = (X_1 + X_2 + \dots + X_n) / n$.

2) 将累积和的初始值 S_0 设置为 0.

3) 通过将当前值 (X_i) 和平均值 (\bar{X}) 之间的差值加到上一个累积和 (S_{i-1}) 上, 计算出当前的累积和值 (S_i), 即: $S_i = S_{i-1} + (X_i - \bar{X})$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$.

S 是各数据点与平均值之间的差的累积和. 这些差值总和为 0, 因此累积和总是以 0 结束 ($S_n = 0$).

4) 作 S 的分布曲线图, 横坐标为所有数据点对应的监测时间 (比如年份), 纵坐标是累积和, 曲线方向的突然改变指示平均值的突然移位或改变. 采用自助抽样法 (Bootstrapping) 来获取 S 的拐点, 并计算拐点的置信水平.

采用统计软件 SPSS 16.0 对富营养化指标 (Y) 与主要社会经济指标 (X) 进行多元线性回归分析 ($Y = b_1X_1 + \dots + b_nX_n$).

对数据标准化 (将原始数据减去相应变量的均数后再除以该变量的标准差) 后计算得到的回归方程称为标准化回归方程, 相应得到回归系数为标准化回归系数. 标准化回归系数是消除了因变量 Y 和自变量 X_1, X_2, \dots, X_n 所取单位的影响之后的回归系数, 其绝对值的大小直接反映了各项社会经济指标 (X_n) 对富营养化指标 (Y) 的影响程度.

2 结果

2.1 洱海富营养化指标历史变化趋势及拐点分析

结合洱海的 COD_{Mn}、TN、TP、Chl.a、SD 和 TLIc 等指标的浓度逐年变化趋势 (图 2) 和拐点探测分析结果 (表 1) 分析各指标的历史变化趋势特征.

COD_{Mn} 自 1995 年起呈逐年上升趋势, 中途出现 2 次拐点, 1999 年前后出现第 1 次拐点, 浓度值开始加速上升, 由 I 类水质恶化成 II 类水质, 在 2003—2004 年期间浓度达到峰值, 为 1995 年平均浓度的 2 倍之多. 第 2 次拐点出现在 2005 年, 浓度值进入下降通道, 有机污染状况有所好转, 但在 2010 年之后又略有回升 (图 2a).

TN 浓度在 1988—2002 年期间处于较好的 II 类水质, 但在 2003 年前后出现拐点 (表 1), 在短短 2~3 年内 (2001—2003) 由 II 类水质区直接跨入 III 类水质区. 2003—2013 年期间 TN 浓度一直维持在 III 类水平, 达到 1990—2001 年期间 TN 浓度水平的近 2 倍. 2008—2013 年全湖 TN 浓度趋于稳定 (图 2b).

TP 浓度的逐年变化趋势较 TN 更加平稳, 基本在 II 类水平线上下浮动 (图 2c). 统计结果显示 TP 在 1996 年出现 1 次拐点 (表 1), 浓度呈现一定上升态势, 1996—2013 年的 TP 平均浓度值比 1990—1996 年高 15.6% ($P < 0.01$). TP 月均数据的 I 类水质出现频率由 1996 年之前的 40% 下降至 1996 年之后的 5% 左右, II 类和 III 类水质的出现频率相应增加.

浮游藻类 Chl.a 浓度在 2002—2003 年期间出现 1 次拐点 (表 1), 步入快速上升通道. 2002 年之前, 全湖 Chl.a 维持在低浓度水平, 变化范围为 $1.0 \sim 3.5 \text{ mg/m}^3$. 2002—2003 年期间, Chl.a 浓度呈直线上升, 藻类生物量从低水平跨越至较高水平. 2003 年之后的 Chl.a 平均浓度是 2003 年之前平均浓度的 10 余倍, 2009 年之后 Chl.a 浓度趋于稳定 (图 2d).

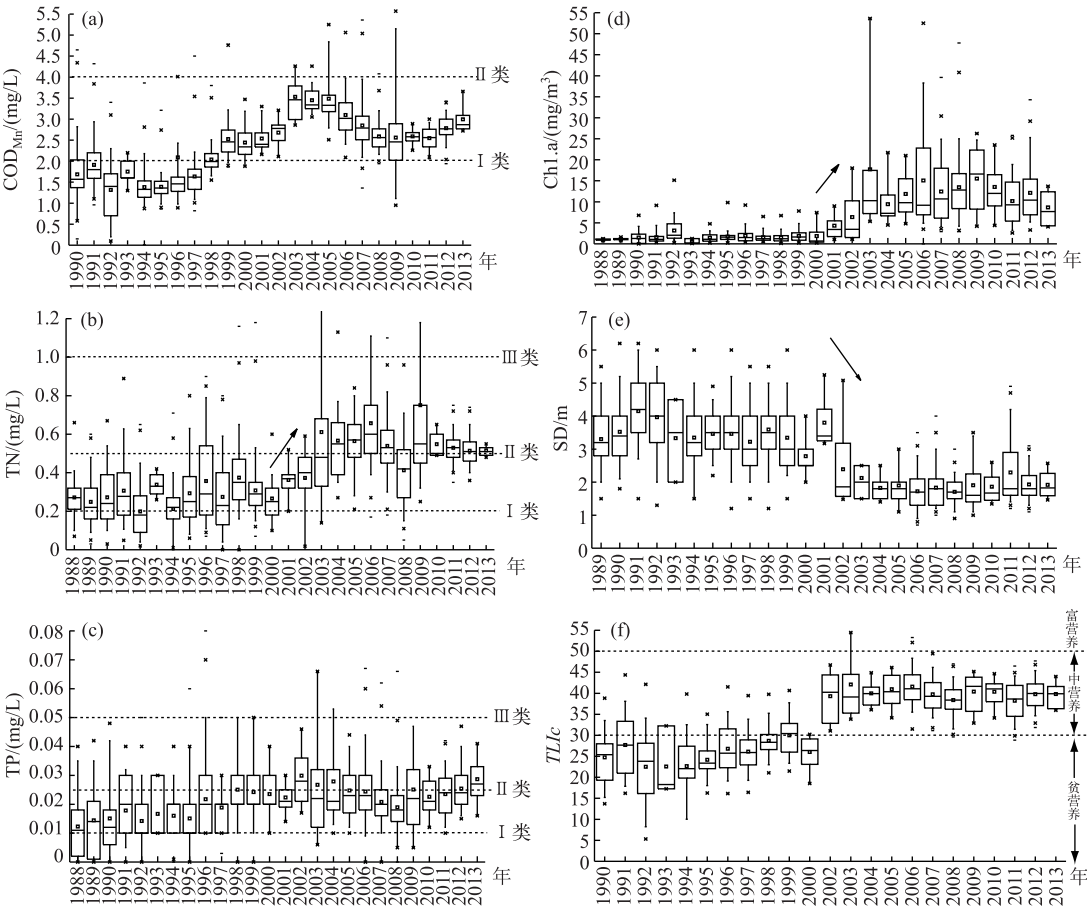


图 2 1988—2013 年洱海主要水质指标的逐年变化

Fig.2 Interannual variation of water quality indicators of Lake Erhai from 1988 to 2013

表 1 洱海富营养化指标的拐点分析

Tab.1 Inflection point analysis of the eutrophic indicators of Lake Erhai

水质指标	单位	拐点区数值范围	出现拐点的置信水平	对应的年份	95% 置信区间	水质趋势
TN	mg/L	0.30~0.56	100%	2003	2003—2004	恶化
TP	mg/L	0.015~0.024	100%	1996	1996—1997	恶化
COD _{Mn}	mg/L	1.69~2.55	100%	1999	1997—1999	恶化
		3.15~2.55	99%	2005	2005—2013	好转
Chl.a	mg/m ³	2.10~12.74	100%	2003	2002—2003	恶化
SD	m	3.50~1.95	100%	2002	2002—2002	恶化
TLIc	无量纲	27.5~40.0	100%	2002	2001—2002	恶化

SD 和 *TLIc* 均在 2002 年出现 1 次拐点(表 1),SD 在 2002 年之前维持在 3.0~4.0 m 之间,但在 2003 年之后下降至低水平(1.70~2.39 m),平均值只为 2002 年之前的 50% 左右(图 2e). *TLIc* 在 2002 年之前总体处于 30 以下,属于贫营养状态,在 2001—2002 年期间出现跃升,由 30 跨越至 40 左右,2002 年之后一直维持在 40 上下(图 2f),进入富营养化初期阶段.

2.2 洱海流域社会经济发展趋势与拐点分析

对洱海流域主要社会经济发展指标历史发展情况进行总体分析, 2003 年之前流域经济基本处于中低速增长期, 而在 2003 年之后进入高速增长期. 2003 年之前, 流域每年的 GDP 比前一年上升 2~8 亿元, 而在 2003 年之后, 每年 GDP 比前一年增长 12~45 亿元 (图 3a). 2000 年之后的流域种植业产值年增长率达到 30%~42%, 畜牧业的年增长率达到 27%~34%, 两者都远高于 2000 年之前的各自年增长率 4%~15% 和 5%~20% (图 3b). 由于种植业的快速发展, 流域内的化肥施用量一直呈直线上升态势, 氮肥上升幅度大于磷肥 (图 3c). 近 20 余年, 洱海流域经济高速发展, 对湖泊水环境造成巨大压力.

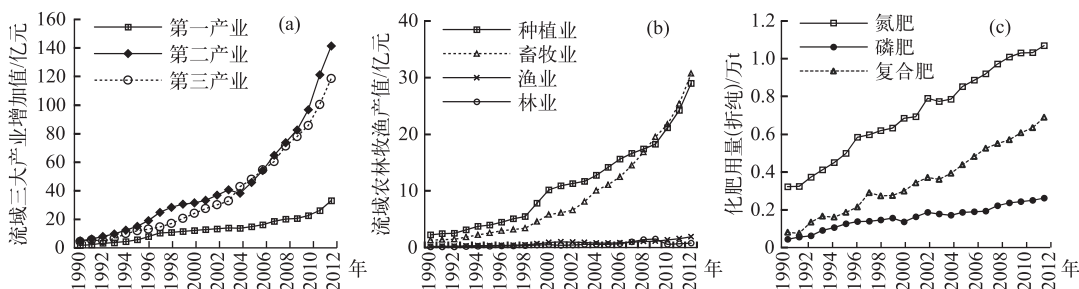


图 3 洱海全流域主要经济指标的逐年变化

Fig.3 Interannual variation of main economic indicators of Lake Erhai Basin

借助 Change-point Analyzer v2.3 软件对主要社会经济指标进行拐点分析, 显示过去 20 余年绝大部分经济指标出现 2~3 次拐点. 除了粮食作物产量在 2008 年的一次拐点属于步入下降通道以外, 其他拐点都属于增长率上升的拐点. GDP 及三大产业增加值的第 1 次拐点集中在 1997—1999 年, 第 2 次拐点出现在 2007—2008 年期间. 第一产业 (农林牧渔业) 范畴的种植业产值、牧业产值和渔业产值的第 1 次拐点均出现在 1999—2000 年, 第 2 次拐点则出现在 2009—2010 年, 林业产值没有出现拐点. 就农产品产量而言, 粮食作物产量、经济作物产量、牲畜肉类产量和水产品产量在 2000—2002 年期间均出现拐点, 前 3 个指标又同时在 2006—2008 年期间出现拐点. 肥料施用量出现第 1 次拐点的时间要明显早于其他经济指标, 氮肥、磷肥和复合肥的第 1 次拐点均出现在 1994—1996 年区间, 又同时在 2006—2008 年期间出现拐点, 复合肥施用量在 2001 年比氮肥、磷肥多出现 1 次拐点 (表 2).

2.3 富营养化指标对社会经济指标的回归分析

将洱海 TN、TP、COD_{Mn}、Chl.a、SD 等主要富营养化指标 (因变量) 与流域的三大产业产值 (自变量) 之间进行多元回归分析, 按照标准回归系数排序, 对水质的影响程度由大到小为: 第一产业>第三产业>第二产业 (表 3). 流域的第一产业 (农林牧渔) 对洱海水质的影响程度明显大于其他两种产业, 因此将第一产业进一步细分, 依据多元回归分析的标准化系数排序, 可知畜牧业产值对 TN、Chl.a 和 SD 的影响度最大, 而种植业产值对 TP 影响最大, 渔业和林业对水质指标影响很小 (表 3). 各项水质指标与牲畜肉类产量、粮食作物产量、经济作物产量及水产品产量之间的多元回归分析显示, TN、COD_{Mn}、Chl.a 和 SD 受畜牧业的牲畜肉类产量影响最大, 标准化系数依次为 1.371、1.607、0.822 和 -0.892, 其次是经济作物产量, 而 TP 受经济作物产量影响最大, 标准化系数达到 1.352, 其次是粮食作物产量 (表 3).

3 讨论

湖泊在持续的富营养化过程中不仅表现为水质恶化, 而且可能直接导致生态系统的结构发生根本性变化, 发生由“水草型”向“藻型”的稳态转换^[16-18], “突变式转换”是比较常见的一种湖泊稳态转换模式^[19]. 拐点探测分析结果显示洱海的大部分富营养化指标 (TN、Chl.a、SD 和 *TLIc*) 均在 2002—2003 年期间出现统计学上的拐点 (表 1), 代表水质出现急剧恶化和富营养化程度加剧的转折点, 比如 Chl.a 浓度上升了近 10 倍, 而 SD 突降了近 50% (图 2), 在短短 1~2 年时间内发生了突变式稳态转换, 浮游藻类生物量急剧增长. 洱海曾在 1996 年和 2003 年暴发了两次典型的全湖大面积蓝藻灾害事件, 而后藻华频次增加. 藻类竞争和 SD 下

表 2 洱海流域主要社会经济指标的拐点分析

Tab.2 Inflection point analysis of socio-economic indicators of Lake Erhai Basin

经济指标	单位	数值范围	出现拐点的置信水平	对应的年份	95% 置信区间	变化趋势
GDP	亿元	26.1~90.0	100%	1998	1998—2000	上升
		90.0~218.3	100%	2008	2008—2008	上升
第一产业增加值	亿元	3.4~12.4	99%	1997	1997—1998	上升
		12.4~20.5	100%	2007	2007—2007	上升
第二产业增加值	亿元	10.7~29.7	99%	1997	1997—1997	上升
第三产业增加值	亿元	9.7~37.9	100%	1999	1999—2002	上升
		37.9~90.7	100%	2008	2008—2008	上升
种植业产值	亿元	5.5~12.8	100%	2000	2000—2000	上升
		12.8~23.3	99%	2010	2010—2010	上升
牧业产值	亿元	2.4~7.4	100%	2000	2000—2000	上升
		13.7~24.4	97%	2009	2009—2010	上升
渔业产值	亿元	0.4~0.9	100%	1999	1999—1999	上升
		0.9~1.6	99%	2010	2010—2010	上升
粮食作物产量	万 t	26.7~29.1	99%	2001	2001—2002	上升
		29.1~27.6	98%	2008	2005—2010	下降
经济作物产量	万 t	1.3~3.4	100%	2001	2001—2001	上升
		3.4~4.6	99%	2006	2006—2006	上升
牲畜肉类产量	万 t	9.0~14.9	99%	1998	1998—1998	上升
		14.9~24.2	97%	2002	2002—2002	上升
		24.2~33.5	98%	2008	2008—2008	上升
水产品产量	万 t	0.8~1.8	97%	2000	2000—2002	上升
		1.8~3.9	99%	2011	2011—2011	上升
氮肥	t	3759~5865	96%	1995	1995—1995	上升
		7544~9880	100%	2006	2006—2006	上升
磷肥	t	634~1387	99%	1994	1994—1994	上升
		1849~2427	98%	2008	2007—2008	上升
复合肥	t	1343~2706	98%	1996	1996—1996	上升
		2706~3980	98%	2001	2001—2001	上升
		3980~5964	99%	2007	2007—2007	上升

降会导致湖体大型水生植物群落出现快速萎缩,2003 年洱海沉水植被覆盖度降至 10%,远低于上世纪末的 40%,而且优势种由海菜花、大茨藻等清洁种替换成了眼子菜、金鱼藻等耐污种^[20-21],说明洱海生态结构发生了根本变化,由“草型”湖泊向“藻型”湖泊方向转化,呈清水稳态向浊水稳态转换的趋势(全湖透明度下降了近 50%).与其他水质指标相比,TP 并没有很明显的突变点(未出现突变式恶化)(图 2c),这可能与磷在自然界中的复杂循环特征有关,磷在土壤中极易转化成难溶状态而被固定,在土壤中移动性相对比较小^[22].随着地表径流进入湖泊的大部分磷盐会随着泥沙长期沉积于湖底,退出磷循环^[23].但在风力、湖流及生物作用下,沉积物中的部分磷又会向上层水体迁移.水体中瞬间的磷浓度上升会支撑全湖藻类出现暴发性增长^[1].

污染问题表现在湖泊水体中,根源却在整个湖泊流域,社会经济高速发展可能导致废(污)水排放规模迅速上升,成为湖泊水体水质恶化的直接驱动力^[24-26].1980s 以来,洱海流域社会经济的高速发展带来的大量生产生活污染物,进入湖体后严重威胁到洱海水质^[27].拐点分析结果显示,洱海各富营养化指标的拐点出现时间普遍晚于社会经济类指标的第 1 次拐点出现时间,比如水体 TP 的拐点出现年份(1996 年)晚于肥料施用量的第 1 次拐点(1994—1996 年),COD_{Mn}拐点出现年份(1999 年)晚于 GDP、第一产业、第二产业的第 1 次拐点(1997—1998 年),TN、Chl.a、SD 和 TLIc 的拐点出现时间都在 2002—2003 年期间(表 1),普遍晚

于主要社会经济指标的第1次拐点出现时间(1995—2002年)(表2). 这种时间差反映出流域社会经济发展是推动洱海富营养化的重要因素. 多元回归分析显示农业发展(第一产业)对洱海水质的影响度远大于其他产业,尤其是畜牧养殖业和农作物种植业的过快发展对湖内水质影响尤为显著. TN、COD_{Mn}、Chl.a 和 SD 受畜牧业规模(牲畜肉类产量)影响最大,而 TP 受农作物产量影响最大(表3). 类似研究结果在国内外其他湖泊也得到体现,比如 Bechmann 等^[28]研究发现挪威两个湖泊的湖水悬浮固体、藻类 Chl.a 和 SD 直接受流域畜牧养殖规模影响,Huang 等^[29]认为农业面源也是导致滇池富营养化的最重要污染源.

表3 水质指标与主要经济指标之间回归分析的标准化系数
Tab.3 Standardized coefficients of linear regression analysis between
water quality indicators and main economic indicators

分析组	经济指标 (自变量 X)	水质指标(因变量 Y)				
		TN	TP	COD _{Mn}	Chl.a	SD
回归分析 1	第一产业(X1)	2.735 **	3.364 **	2.456 **	1.854	-2.528 **
	第二产业(X2)	-3.136 **	-0.393	-4.191 **	-2.884 **	3.886 **
	第三产业(X3)	1.102	-2.754 **	2.323 *	1.755 **	-2.145 **
回归分析 2	种植业产值(x1)	-1.620 *	3.650 **	0.740	-1.650	-0.100
	畜牧业产值(x2)	2.240 **	-1.780 **	0.720	2.370 *	-1.040
	渔业产值(x3)	0.520	0.100	-0.880	0.290	0.280
	林业产值(x4)	0.320 *	0.320	0.320	0.270	-0.170
回归分析 3	粮食作物产量(x ₁)	-0.650	0.499 *	-0.529 *	-0.672 **	0.644 **
	经济作物产量(x ₂)	0.284	1.352 *	0.468	0.279	-0.399
	牲畜肉类产量(x ₃)	1.371 *	-0.906	1.607	0.822	-0.892
	水产品产量(x ₄)	-0.349	-0.441	-0.942	0.257	-0.134

** 表示差异极显著($P<0.01$), * 表示差异显著($P<0.05$).

湖泊流域社会经济发展情况与湖体水质状况的关系非常复杂,两者在时间上并不完全同步. 过去 20 余年,洱海流域大部分社会经济指标出现过 2~3 次拐点,而富营养化指标(除了 COD_{Mn})只出现 1 次拐点. 社会经济指标集中在 2006—2008 年期间出现上升的拐点,但湖泊富营养化指标并没有出现进一步恶化趋势,甚至 COD_{Mn} 浓度出现低点,这可能有两个主要原因:一是近些年洱海流域在社会经济高速发展的同时,污染治理工程已取得一定成效,在“十二五”期间当地累计投入洱海保护资金超过 23.55 亿元,主要涉及畜禽养殖污染防治及资源化利用、农业产业结构调整、污水处理设施建设、生态修复等,控制流域排污强度有助于延缓富营养化趋势. 二是湖泊生态系统有自身演变规律,对流域社会经济发展引起的排污干扰有一定的自我调节和自我恢复能力,直到外部压力超过系统承载力临界点时才可能发生新的稳态转换. 洱海在 2008—2013 年水质总体趋于稳定,TN 和 Chl.a 浓度呈一定程度下降趋势,然而代表湖体总体环境质量的 SD 指标未出现转好迹象(图 2). 湖泊生态系统一旦发生不利的稳态转换,需要实施持续的污染控制和生态修复工程才可能扭转富营养化趋势^[30],比如芬兰的 Jyvasjarvi 湖沿湖污水处理厂的入湖 TP 负荷和有机物负荷在短期内分别下降了 95% 和 96%,湖内营养物浓度明显下降,但湖泊富营养化改善程度非常有限,生态系统恢复很慢^[31]. 我国太湖流域的一些湖泊经过较长时间综合整治后,虽能有效实现 COD、TN、TP 等营养物浓度下降,但藻类生物量和 SD 却很难有根本改善,比如长荡湖通过实施综合整治工程,使得 2006—2010 年期间 TN 浓度比 2001—2005 年期间下降了近 60%,TP 浓度也下降了近 20%,然而藻类 Chl.a 仍维持在高浓度水平,水体 SD 下降近 50%^[32]. 洱海富营养化控制将是一场长期的、复杂的系统工程,后续须坚持“一湖一策”的治理思路,持续加大畜禽养殖、种植业等农业面源污染治理.

4 结论

在 1988—2013 年期间,洱海的水质状况呈逐渐恶化趋势,TP 和 COD_{Mn} 分别在 1996 年和 1999 年出现统计学意义上的恶化拐点,TN、Chl.a、SD 和 *TLIc* 指数则集中在 2002—2003 年期间出现拐点,TN 平均浓度上升

了 1 倍, Chl.a 浓度上升了 10 余倍, SD 突降了近 50%, 湖体完成了由贫—中营养向中—富营养转化的突变式稳态转换。洱海流域社会经济持续高速发展, 主要社会经济指标均出现 2~3 次统计学意义上的增长拐点, 第 1 次集中出现在 1994—1999 年期间, 比水体富营养化指标出现拐点时间要早 2~3 年, 反映出社会经济过快发展带来的污染问题直接推动了洱海富营养化进程。社会经济指标出现第 2 次增长拐点期间(2006—2010 年), 水体富营养化指标未出现进一步恶化趋势, 这可能与流域污染削减强度加大和湖泊系统自我调节能力有关。社会经济指标中, 畜牧业产量产值和作物种植业产量产值对富营养化指标的影响度最大。因此, 加大流域畜禽养殖业、种植业等农业面源污染控制力度是扭转洱海富营养化趋势的关键。

5 参考文献

- [1] Schindler DW. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2012, **279**: 4322-4333.
- [2] Zhang YL, Qin BQ. Evolution and zone analysis on lake eutrophication in east plain region. *Shanghai Environmental Science*, 2002, **21**(9): 549-553. [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.]
- [3] Qing BQ, Luo LC. Changes in eco-environment and causes for Lake Taihu, China. *Quaternary Research*, 2004, **24**(5): 561-567. [秦伯强, 罗激葱. 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] Xu QJ, Xi BD, Hu XZ *et al* eds. Compiling description for lake eutrophication control technology policy (Exposure Draft). [2015-04-22]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201504/t20150428_299756.htm. [许秋瑾, 席北斗, 胡小贞. 《湖库富营养化防治技术政策》(征求意见稿)编制说明. [2015-04-22]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201504/t20150428_299756.htm.]
- [5] Liu WB. Study on the distribution of phosphorus fractionations and the flux from sediments in Erhai Lake [Dissertation]. Nanchang: Nanchang University, 2011. [刘文斌. 洱海沉积物磷形态分布特征及其通量[学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2011.]
- [6] Wu GG, Ni LY, Cao T *et al*. Warming and nutrients affect the growth of phytoplankton in Lake Erhai over the period of 1980-2009. *J Lake Sci*, 2013, **25**(2): 209-212. DOI:10.18307/2013.0205. [吴功果, 倪乐意, 曹特等. 气候变暖和营养水平对洱海浮游植物的长期影响(1980—2009 年). 湖泊科学, 2013, **25**(2): 209-212.]
- [7] Andersen T, Carstensen J, Hernandez-Garcia E *et al*. Ecological thresholds and regime shifts: Approaches to identification. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, **24**(1): 49-57.
- [8] Hyodo M, Yoshihara A, Kashiwaya K *et al*. A late Holocene geomagnetic secular variation record from Erhai Lake, south-west China. *Geophysical Journal International*, 1999, **136**: 784-790.
- [9] Han T, Peng WQ, Li HE *et al*. Evolution of eutrophication in the Erhai Lake and its relevant research progress. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2005, **3**(1): 71-73. [韩涛, 彭文启, 李怀恩等. 洱海水体富营养化的演变及其研究进展. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, **3**(1): 71-73.]
- [10] Shen J, Jones RT, Yang XD *et al*. The Holocene vegetation history of lake Erhai, Yunnan province southwestern China: the role of climate and human forcing. *Holocene*, 2006, **16**(2): 265-276.
- [11] Chen XH. Study on the recent 20-year eutrophication process and development of nutrient criteria/standards of Lake Erhai at its initial stage of eutrophication [Dissertation]. Shanghai: East China Normal University, 2015. [陈小华. 富营养化初期湖泊(洱海)的环境演变及营养物基准/标准研究[学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2015.]
- [12] “Water and wastewater monitoring and analysis method” editorial board of State Environmental Protection Administration of China ed. Monitoring and analysis methods of water and wastewater; fourth edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [13] Jin XC, Liu SK, Zhang ZS *et al* eds. Lake Environment in China. Beijing: China Ocean Press, 1995: 349-350. [金相灿, 刘树坤, 张宗涉等. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995: 349-350.]
- [14] Taylor WA. Change-point analysis: A powerful new tool for detecting changes. [2000-01-01]. <http://www.variation.com/cpa/tech/changepoint.html>.
- [15] Taylor WA. Change-Point Analyzer 2.3 shareware program, Taylor Enterprises, Libertyville, Illinois. [2012-08-01]. <http://www.variation.com/cpa/tech/changepoint.html>.

//www.variation.com/cpa.

- [16] Scheffer M, van Nes EH. Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. *Hydrobiologia*, 2007, **584**: 455-466.
- [17] Chang FY. Study on lake ecosystems and regime shift between macrophytes-dominated and algae-dominated states [Dissertation]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2009. [常锋毅. 浅水湖泊生态系统的草-藻型稳态特征与稳态转换研究[学位论文]. 武汉:中国科学院水生生物研究所, 2009.]
- [18] Wang YC. Studys on lake ecosystems regime shift course and phase division [Dissertation]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2010. [王英才. 湖泊生态系统稳态转换过程及阶段划分研究[学位论文]. 武汉:中国科学院水生生物研究所, 2010.]
- [19] Collie JS, Richardson K, Steele JH. Regime shifts: can ecological theory illuminate the mechanisms?. *Progress in Oceanography*, 2004, **60**: 281-302.
- [20] Hu XZ, Jin XC, Du BH *et al.* Submerged macrophyte of Lake Erhai and its dynamic change. *Research of Environmental Sciences*, 2005, **18**(1): 1-4. [胡小贞, 金相灿, 杜宝汉等. 云南洱海沉水植被现状及其动态变化. 环境科学研究, 2005, **18**(1): 1-4.]
- [21] Fu H, Yuan GX, Cao T *et al.* Succession of submerged macrophyte communities in relation to environmental change in Lake Erhai over the past 50 years. *J Lake Sci*, 2013, **25**(6): 854-861. DOI:10.18307/2013.0609. [符辉, 袁桂香, 曹特等. 洱海近 50a 来沉水植被演替及其主要驱动要素. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 854-861.]
- [22] Liu YR, Zhao LP. Research progress on the transfer of soil nitrogen and phosphorus. *Agriculture of Jilin*, 2010, (4): 84-85. [刘艳茹, 赵兰坡. 土壤中氮磷的迁移规律研究进展. 吉林农业, 2010, (4): 84-85.]
- [23] Xie P ed. The historical development and bloom hazard of cyanobacteria in Lake Taihu—why water pollution accident happened in Gonghu drinking water plant in 2007? Can Lake Taihu escape from cyanobacteria threats in future 30 years? Beijing: Science Press, 2008. [谢平. 太湖蓝藻的历史发展与水华灾害——为何 2007 年在贡湖水厂出现水污染事件? 30 年能使太湖摆脱蓝藻威胁吗? 北京: 科学出版社, 2008.]
- [24] Hu LX. Water quality changes based on time series analysis of trends and socio-economic-driven research in Shanghai [Dissertation]. Shanghai: East China Normal University, 2014. [胡兰心. 基于时间序列分析的上海水质变化趋势及社会经济驱动研究[学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2014.]
- [25] Ouyang ZH, Guo HC, Wang WJ *et al.* Analysis of water quality change and impacts from socio-economic development in Lake Dianchi from 1982 to 2012. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(2): 68-73. [欧阳志宏, 郭怀成, 王婉晶等. 1982—2012 年滇池水质变化及社会经济发展对水质的影响. 中国环境监测, 2015, **31**(2): 68-73.]
- [26] Wang C, Shan BQ, Qin J *et al.* The impact of socioeconomic development on the river water quality in the Haihe River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(8): 2354-2361. [王超, 单保庆, 秦晶等. 海河流域社会经济发展对河流水质的影响. 环境科学学报, 2015, **35**(8): 2354-2361.]
- [27] Jiao LX, Zhao HC, Wang SR *et al.* Characteristics of temporal and spatial distribution of phosphorus loading in Erhai Lake in 2010. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(5): 534-539. [焦立新, 赵海超, 王圣瑞等. 2010 年洱海全湖磷负荷时空分布特征. 环境科学研究, 2013, **26**(5): 534-539.]
- [28] Bechmann ME, Berge D, Eggstad HO *et al.* Phosphorus transfer from agricultural areas and its impact on the eutrophication of lakes—Two long-term integrated studies from Norway. *Journal of Hydrology*, 2005, **304**(1): 238-250.
- [29] Huang CC, Wang XL, Yang H *et al.* Satellite data regarding the eutrophication response to human activities in the plateau lake Dianchi in China from 1974 to 2009. *The Science of the Total Environment*, 2014, **11**(1): 485-486.
- [30] Kawanabe H, Nishino M, Maehata M eds. Lake Biwa: Interactions between Nature and People. Berlin: Springer, 2002: 220-225.
- [31] Merilainen JJ, Hynynen J, Palomaki A *et al.* Environmental history of an urban lake: A palaeolimnological study of Lake Jyvasjarvi. *Finland J Paleolimnol*, 2003, **30**: 387-406.
- [32] Chen XH, Li XP, Cheng X *et al.* Eutrophication evolution of typical small and medium-sized lakes in Lake Taihu basin (1991-2010). *J Lake Sci*, 2013, **25**(6): 846-853. DOI:10.18307/2013.0608. [陈小华, 李小平, 程曦等. 太湖流域典型中小型湖泊富营养化演变分析(1991—2010 年). 湖泊科学, 2013, **25**(6): 846-853.]