

近 50 a 洱海水环境演变特征及其主要驱动因素*

高思佳, 侯泽英, 吴越, 储昭升**

(中国环境科学研究院, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012)

摘要: 基于 1971–2020 年近 50 年洱海湖区主要水质指标的监测数据, 采用 M-K 检验和 GAMs 模型定量解析了洱海水质的年际变化趋势, 采用多元回归法综合分析了洱海水环境演变的驱动因素。结果表明, 近 50 年来, 在流域发展与湖泊保护双轮驱动的作用下, 洱海水质年际波动明显, 主要水质指标浓度也呈现出多个显著变化的趋势过程。1980s 初至 1985 年间水质指标浓度显著上升, 主要与流域南部城镇化发展有关; 1986–1980s 末显著下降, 与南部截污干渠(管)建设密切相关; 1990s 末至 2003 年间显著上升, 主要与南部城镇工业发展、农业种植结构调整等重要发展策略有关; 2004–2008 年间显著下降, 主要与中心城区截污治污、环洱海湖滨带修复等重要工程实施有关。在此期间洱海发生过两次较为严重的规模化藻华事件, 1996 年在水质优良的情况下洱海首次发生蓝藻水华, 这与长期低水位运行、网箱养鱼和银鱼引种等导致湖泊生态系统严重受损密切相关; 2003 年在水质污染加重、生态系统尚未恢复情况下洱海再次发生蓝藻水华。2 次藻华事件也改变了流域发展政策, 对洱海的科学认识和保护治理力度不断加大, 特别是 2016 年以来高强度的湖泊保护工作, 促使洱海氨氮、总氮、总磷、透明度等主要指标均呈现向好的趋势。然而, 值得注意的是, 近 10 年洱海 COD_{Mn} 浓度仍在显著升高, 且 TLI(COD_{Mn}) 加权占比由 1992 年的 6% 增加至 2020 年的 17%, 说明 COD_{Mn} 对洱海富营养化的影响逐渐增加, 这将是未来洱海保护工作重点关注的方向。

关键词: 洱海; 水环境; 演变趋势; 驱动因素

Trend and driving factors of water environment change in Lake Erhai in the last 50 years*

Gao Sijia, Hou Zeying, Wu Yue & Chu Zhaosheng**

(National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P.R.China)

Abstract: This paper is based on the long-term monitoring data of Lake Erhai from 1971 to 2020. Temporal trends of TN, TP, NH₃-N, SD, COD_{Mn} and Chl.a were quantified using M-K test methods and GAMs models. Combined with multiple linear regression, relationships between water quality parameters and driving factors were analysed. The results showed that in the past 50 years, under the dual drive of watershed development and lake protection, the water quality of Lake Erhai fluctuated significantly from year to year, and the concentration of key water quality indicators also showed a series of significant change trends. The trend of the concentration of key indicators increased significantly from the early 1980s to 1985, while a decrease occurred in 1986–1989, corresponding to the development of urbanisation and the construction of main sewers in the south of the basin. Between the late 1990s and 2003, the concentration of the main indicator increased significantly again, related to factors such as the development of southern cities and industries, and the adjustment of the structure of agricultural planting. Then, the local government took some constructive measures to combat the deterioration of water quality, such as sewage treatment and ecological restoration of the lakeshore. During this period, Lake Erhai experienced two severe algal blooms. In 1996, a *Herba houttuyniae* bloom occurred, although the overall water quality was in the second phase, which was closely related to long-term low water operations, cage fish farming and the introduction of whitebait fish. In 2003, the second algal bloom occurred due to increased water pollution and an unrestored ecosystem. Two algal blooms threatened the sustainable ecosystem functions of Lake Erhai, which motivated the implementation of subsequent social poli-

* 2022-08-25 收稿; 2022-10-11 收修改稿。

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07401003)资助。

** 通信作者; E-mail: chuzs@craes.org.cn。

cies and lake protection strategies. In particular, high-intensity lake protection since 2016 has contributed to the positive trend of Lake Erhai's key indicators. However, it is worth noting that the COD_{Mn} concentration still increased significantly in the last decade, and the contribution of $TLI(COD_{Mn})$ to $TLI(\Sigma)$ increased from 6% in 1992 to 17% in 2020. This indicates that the influence of COD_{Mn} on the eutrophication of Lake Erhai is gradually increasing, which will be the focus of future protection of Lake Erhai.

Keywords: Lake Erhai; water environment; long-term trend; influencing factors

湖泊是陆地重要的淡水储备和流域社会经济发展的承载者^[1-2],由于流域居民生活、工农业生产、旅游开发等人为活动排放的营养物质以及水利调控等影响^[3],以富营养化为代表的水质问题成为制约湖泊生态系统健康的主要因素^[4-6]。洱海是我国重要的淡水湖泊,总储水量约 29.59 亿 m^3 ,是滇西发展的重要淡水资源,更是大理市重要的饮用水源地,承载着大理市约 80 万居民的生活用水,洱海水质及其营养状况直接关系到流域的供水安全和生态安全。历史上洱海水生态平衡维护较好,水质优良。改革开放以来,由于人类活动干扰强度不断增加,洱海经历了从贫营养湖泊到中营养湖泊的演变过程,这与流域社会发展水平和湖泊保护治理强度密切相关。1996 年和 2003 年发生 2 次较为严重的规模化蓝藻水华,严重影响用水安全,制约区域社会经济发展。本文系统梳理了有关洱海水质与驱动因素的研究报道,王云飞等对 1996—1997 年洱海营养状况进行了分析,从流域地质背景、湖泊低水位运行、面源污染、资源开发等方面分析洱海富营养化的影响因素^[7-8];陈小华等借助拐点分析软件对 1988—2014 年洱海流域社会经济指标和湖泊富营养化指标进行了拐点分析,探讨社会经济因素对洱海富营养化演变的驱动作用^[9];王明杰等采用灰色关联法分析了 2007—2017 年洱海流域污染排放总量、结构变化与水环境变化的关联程度^[10];马巍等分析了 2008—2019 年洱海水质年际变化过程,从流域水文情势、面源负荷输入、水资源条件约束等方面分析对水质的驱动影响^[11]。总体来看,已有文献报道多为某一时期的评价,缺少历史长时间尺度水质演变趋势的定量解析。而且,历史上不同阶段流域发展与湖泊保护的形势与政策也在不断影响着洱海水环境的变化,因此有必要探讨不同阶段流域发展、湖泊保护与洱海水质之间的辩证关系。

本研究基于 1971—2020 年洱海湖区水质的历史监测数据,采用 M-K 检验和 GAMs 模型定量分析洱海近 50 年主要水质指标的阶段性变化趋势,在此基础上,从流域经济社会发展、湖泊水利调控、保护治理水平等多个角度,探讨驱动洱海水质演变的主要因素,为洱海水质管理提供参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

洱海地处云南省大理白族自治州境内,湖面高程 1966 m(八五高程,下同)时,湖面面积 252 km^2 ,蓄水量达 29.59 $\times 10^8$ m^3 ,平均水深 10.8 m;流域面积 2565 km^2 ,径流区有大小河流 117 条,西洱河是洱海唯一的自然出水河道,流合漾濞江后汇入澜沧江。由于人为活动的干扰,洱海水质不断恶化,历史上 1996 年和 2003 年发生两次严重的藻华事件,严重威胁居民饮用水安全和湖泊生态健康。

1.2 数据来源

1.2.1 洱海水质数据 本研究的时间尺度为 1971—2020 年,其中 1971—1991 年水质数据源于文献记录^[7,12-15],1992—2020 年水质数据源于大理州生态环境监测站,水质指标的年际变化趋势以年度算术平均值进行分析处理。

1.2.2 流域社会经济发展数据 本研究的洱海流域 GDP、人口、农作物播种面积、化肥施用量、畜禽养殖量等社会经济发展数据来源于《大理市统计年鉴》《洱源县统计年鉴》《大理州统计年鉴》等统计资料。洱海年均水位来源于云南省水文水资源局大理分局,洱海水力停留时间根据洱海出湖水量和洱海蓄水量进行核算,基础数据来源于云南省水文水资源局大理分局。

1.3 研究方法

采用《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》(总站生字[2001]090 号)确定的湖泊综合营养状态指数 $TLI(\Sigma)$ 对水体营养状况进行评价,评价指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、透明度(SD)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和叶绿素 $a(Chl.a)$ 5 项。营养状态分级: $TLI(\Sigma) < 30$ 为贫营养, $30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$ 为中营养, $TLI(\Sigma) >$

50 为富营养, $50 < TLI(\Sigma) \leq 60$ 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。

采用 M-K 检验对洱海水质历史变化趋势进行统计分析。用 R 语言程序中“trend”包 mk.test 函数进行 M-K 统计检验, 统计变量 Z 的大小代表数据的变化趋势, $Z > 0$ 表示上升趋势, $Z < 0$ 表示下降趋势。

采用 Bjørndahl 等^[16-19]的方法, 使用广义可加模型 (generalized additive models, GAMs) 对 1971—2020 年洱海水质指标浓度的时间变化趋势进行检验, 具体来说, 在 R 语言程序中利用“mgcv”包, 采用三次平滑样条 (cubic spline line) 作为平滑函数建立洱海水质指标与时间之间的分层广义可加模型 (HGAM), 使用限制性极大似然估计的方法 (restricted maximum likelihood) 确定平滑度参数。再使用 R 语言程序中的“gratia”包估算每个水质指标点位处平滑曲线的一阶导数, 利用一阶导数的性质确定显著变化趋势发生的时期, 即在一阶导数的置信区间在 $\alpha = 0.05$ 的显著水平上不等于 0。使用 R 语言程序中“tidyr”包和“dplyr”包进行数据整理, “ggplot2”包绘图。

采用多元回归法对洱海水质指标 (Y) 与主要驱动因素 (X) 进行关联程度分析, 对数据标准化后计算得到标准化回归系数, 其绝对值的大小直接反映了各项驱动因素 (X_n) 对水质 (Y) 的影响程度, 用 SPSS 25.0 软件进行分析。使用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 主要水质指标变化

本研究以 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、SD、 COD_{Mn} 和 Chl.*a* 6 项指标, 表征洱海水体营养盐、有机物和富营养化状态。根据 M-K 检验方法计算出 1971—2020 年洱海主要水质指标的变化趋势检验值 Z (表 1), 结果表明, 在 $\alpha = 0.01$ 水平上, 洱海主要水质指标均表现出显著的变化趋势, COD_{Mn} 、TN、TP 和 Chl.*a* 4 项指标呈显著上升趋势, SD 呈显著下降趋势。总体来看, 1970s 以来洱海水质不断下降, 主要水质指标发生了明显的变化, 为了定量各项水质指标的阶段性变化趋势, 本研究用 GAMs 模型进一步检验分析。

表 1 洱海主要水质指标 M-K 趋势检验结果
Tab.1 Mann-Kendall test result of the main water quality indicators in Lake Erhai

	SD	TP	TN	COD_{Mn}	Chl. <i>a</i>	$\text{NH}_3\text{-N}$
M-K 统计值 Z	-3.4804 **	4.1204 **	5.2078 **	6.8267 **	3.0393 **	1.9176
n	35	42	39	50	29	45
变化趋势	下降	上升	上升	上升	上升	上升

** 表示在 $\alpha = 0.01$ 水平上显著相关。

近 50 a 洱海主要水质指标的年际变化较大 (图 1 和附图 I)。从营养盐指标来看, 洱海 TP 浓度历史上出现 2 个峰值, 1970s 末—1980s 初洱海 TP 浓度相对较低, 处于 I 类水平^[13]; 1983—1985 年 TP 浓度显著上升, 1985 年达到第 1 个峰值 0.034 mg/L, 跃进为 III 类水平; 1986—1988 年显著下降, 1988 年降至 0.012 mg/L, 接近 I 类水平^[14-15]; 1990s 以后洱海 TP 呈现缓慢升高的趋势, 1997—2006 年间出现第 2 个显著上升和显著下降的过程, 2003 年水质恶化, TP 浓度达到历史第 2 个峰值 0.034 mg/L; 而后 TP 浓度波动变化, 2017 年以来逐年降低, 2020 年恢复至 II 类水平。

洱海 TN 浓度历史上出现 3 个显著变化的阶段, 1981—1987 年间呈现显著上升和显著下降过程, 1985 年达到峰值 0.51 mg/L^[20]; 1999—2003 年呈现显著上升过程, 同样在 2003 年升至高值 0.61 mg/L, 由 II 类转变为 III 类水平; 此后 TN 浓度波动变化, 2016 年以来略有下降趋势。洱海 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度历史上总体处于较低水平, 2002—2009 年间呈现显著上升和显著下降过程, 2006 年达到历史峰值 0.28 mg/L, 而后波动下降, 逐步恢复到 1990s 的较低水平。

从有机物浓度来看, 以 COD_{Mn} 为表征, 自 1970s 以来 COD_{Mn} 浓度呈现多个显著上升的趋势变化, 在 1988 年^[20]和 2003 年达到 2 个历史峰值, 浓度分别为 2.76 和 3.51 mg/L; 2010 年至今又呈现显著上升趋势, 2020 年达到了历史较高浓度 3.88 mg/L。

洱海 SD 历史出现 2 个显著变化趋势, 1971—1981 年间显著上升, 由 1.8 m 升高至 3.57 m; 至 1990s 末洱

海总体处于高透明度状态,SD 保持在 3 m 左右^[12];2000—2004 年洱海 SD 显著下降,2003 年洱海暴发全湖性规模化蓝藻水华,透明度急剧下降至历史最低(1.52 m),年内 7—9 月甚至不足 1 m;而后至今,洱海处于低透明度的状态,SD 略有增加,但较历史水质优良时期仍有差距。

洱海 Chl.*a* 浓度在 1998—2005 年间呈显著上升趋势,1992—2002 年间在 0.51~6.89 $\mu\text{g/L}$ 范围变化,处于较低浓度;在 2003 年蓝藻水华暴发,Chl.*a* 浓度急剧上升至 26.28 $\mu\text{g/L}$,达到历史最高值,水华暴发期甚至高达 55 $\mu\text{g/L}$;而后基本稳定在 10.13~17.31 $\mu\text{g/L}$ 范围内,处于较高浓度状态。

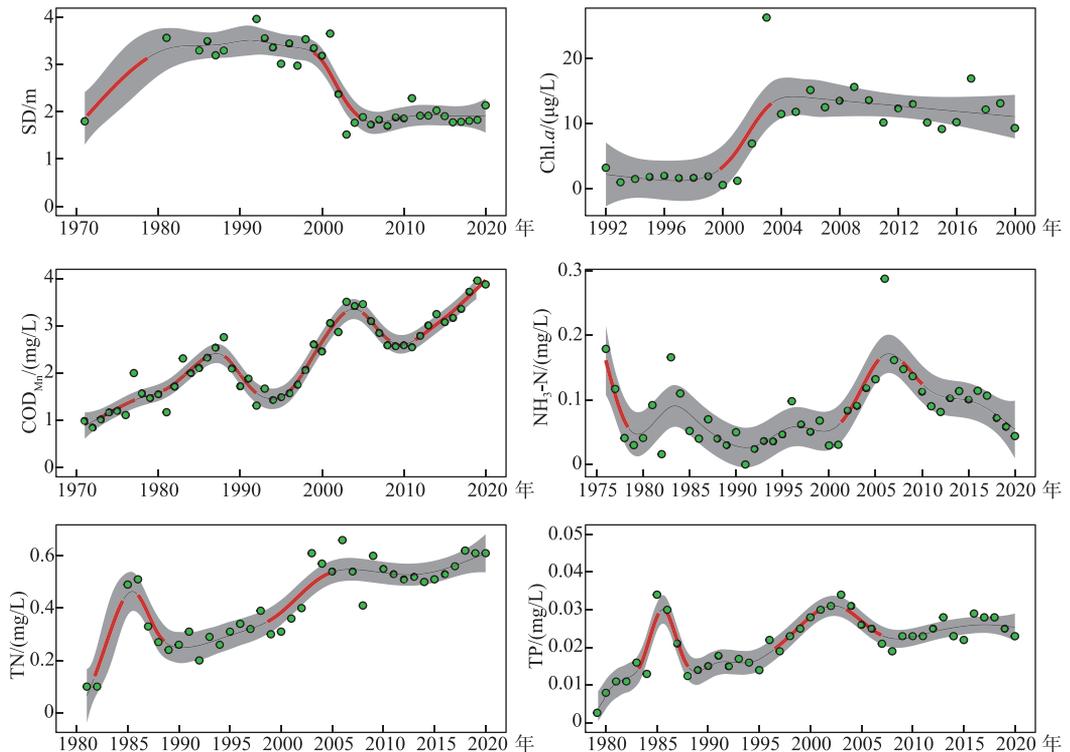


图 1 洱海主要水质指标平均浓度变化趋势(用层次广义加性模型(HGAMs)拟合指标平均浓度,所有图中,绿色圆点代表指标实测年均值,黑色实线代表拟合的模型趋势,灰色阴影代表趋势的 95% 置信区间,趋势的红色加粗部分代表浓度发生显著变化)

Fig.1 Mean concentrations of water quality indicators by year in Lake Erhai (Mean concentrations are fitted with hierarchical generalized additive models (HGAMs). In all plots, solid lines are the fitted model trends, gray shading represents 95% confidence intervals of the trends, and emboldened sections of the trends represent significant changes in pigment mean concentration)

2.2 富营养状态变化

自 1992 年连续监测以来,根据《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》评价结果(图 2),洱海综合营养状态指数 $TLI(\Sigma)$ 在 1992—1999 年呈缓慢上升趋势;2000—2003 年期间 $TLI(\Sigma)$ 急剧上升,2003 年达到历史峰值,此阶段洱海由贫营养状态转变为中营养状态;2003 年至今洱海富营养化状态变化相对稳定,总体处于中营养水平。从富营养化状态指数历史变化趋势来看(图 3),洱海营养状

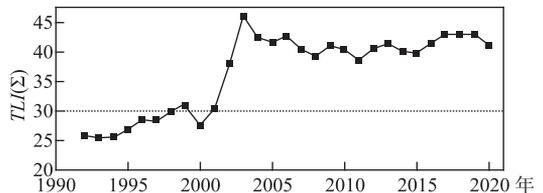


图 2 1992—2020 年洱海 $TLI(\Sigma)$ 变化趋势

Fig.2 Changes in $TLI(\Sigma)$ of Lake Erhai from 1992 to 2020

态指数最大值均为 $TLI(Chl.a)$, 2003 年以后保持在 50~60 之间, 表明 $Chl.a$ 始终是洱海富营养化状态评价的限制因子; 与 1990s 相比, $TLI(COD_{Mn})$ 增加明显, 加权占比由 1992 年的 6% 增加至 2020 年的 17%; $TLI(TP)$ 有所减小, 加权占比由 21% 减小至 15%, 说明 COD_{Mn} 对洱海的影响在逐渐增加, 而 TP 的影响在逐渐减小。

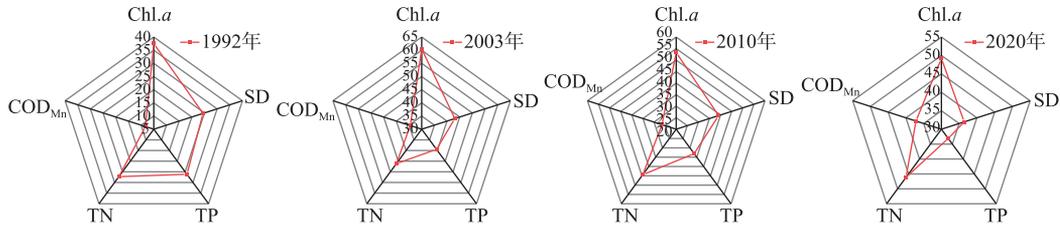


图 3 洱海富营养化状态分指数变化

Fig.3 Trends of trophic state indexes of Lake Erhai

2.3 水环境变化驱动因素分析

湖泊水质的驱动因素一般包括湖泊水位、降雨量等自然驱动因子, 流域人口、经济社会发展水平和污染治理水平等人驱动因素^[21-22], 考虑到数据可获得性以及洱海流域特征, 本研究选取湖泊水位和水力停留时间作为自然驱动因素, 流域 GDP、城镇人口、化肥施用量、蔬菜播种面积、奶牛养殖数量、污水处理规模等人为活动影响因素。

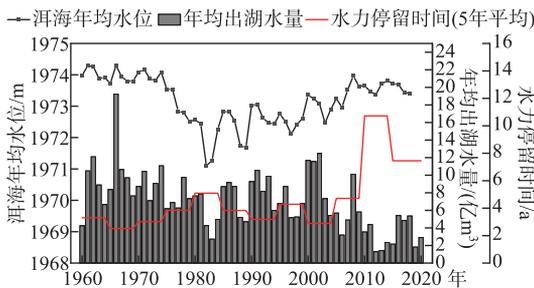


图 4 洱海年均水位与水力停留时间历史变化

Fig.4 Temporal variations of mean water level and hydraulic residence time of Lake Erhai

2.3.1 洱海水位及水力停留时间变化 根据云南省水文水资源局大理分局的洱海出湖水量和洱海蓄水量历史数据, 核算得到洱海水力停留时间变化趋势(图 4)。受洱海出湖水量减少的影响, 湖内水力停留时间不断延长。2011—2020 年洱海平均出湖水量仅为 3.24 亿 m^3 , 较多年(1960—2020 年)平均值偏少 54%, 特别是 2012 年出湖水量仅 1.3 亿 m^3 , 为有记录以来的最低值。洱海出湖水量减少的直接结果是湖内水力停留时间的增加, 1960—2009 年洱海平均水力停留时间为 3.6 年, 而 2010—2014 年高达 11 年, 2015—2020 年也有 7.5 年之久, 近 10 年水力停留时间达 8.6 年。

2.3.2 流域经济社会发展变化 1970s 以前, 洱海地区

经济不发达, 交通闭塞, 城市规模小。1970s 以后, 随着西洱河电站运行, 流域经济起步发展, 1980s 初南部下关城区开始城镇化发展, 工业企业数量逐渐增加。1990s 开始流域经济快速发展, 农业是流域传统的支柱产业, 为了提高经济效益, 1998 年农业种植结构发生重大调整, 经济收益高但环境风险大^[23-27] 的蔬菜种植替代了很大一部分烤烟, 播种面积显著上升, 化肥施用量也呈直线上升趋势(附图 IIb); 同时特色畜牧产业奶牛养殖数量逐年增加(附图 IIc)。2009 年之后流域经济进入高速发展期, GDP 一直保持着两位数的增长率(附图 IIa), 在此期间第一、二产业始终保持稳定增长, 第三产业特别是旅游业迅猛发展, 旅游人次逐年升高, 环湖客栈餐饮行业井喷发展。在促进 GDP 增长的同时, 与洱海保护相适应的经济发展政策也在不断调整, 典型的有化肥减量、大蒜禁种、奶牛养殖搬迁、环湖违建建筑拆(搬)迁等, 这些经济发展转型举措也促进了洱海水环境的改善。

2.3.3 影响因素与水质的回归分析 根据不同影响因素(自变量)与洱海主要水质指标(因变量)的回归分析结果(表 2), 分析组 1 代表自然驱动因素, 洱海年均水位对 SD、TN、TP 的影响程度较大, 洱海水力停留时间对 COD_{Mn} 的影响大于年均水位。分析组 2 代表经济发展水平, 从标准回归系数排序来看, 对水质影响程度

由大到小依次为:第一产业>第三产业>第二产业,这与陈小华等的研究结果一致^[9]。分析组 3 代表人为活动影响,以蔬菜为代表作物的种植业和氮肥施用量对 SD、TN、COD_{Mn}和 NH₃-N 的影响较大,以奶牛养殖为代表的畜禽养殖业对 COD_{Mn}的影响较大,污水处理规模与 NH₃-N 关系密切。

表 2 洱海主要水质指标与影响因子之间的回归分析的标准化系数
Tab.2 Standardized coefficients of linear regression analysis between water quality indicators and driving factors in Lake Erhai

分析组	影响因素 (自变量 X)	水质指标(因变量 Y)				
		SD	TP	TN	COD _{Mn}	NH ₃ -N
回归分析 1	洱海水力停留时间	-0.204	0.014	0.213	0.362	0.221
	洱海年均水位	-0.612**	0.472*	0.487*	0.069	0.294
回归分析 2	第一产业产值	-1.362	2.163	1.659	1.751	1.287
	第二产业产值	-0.274	-0.263	-0.152	-0.466	0.232
	第三产业产值	1.020	-1.540	-0.819	-0.557	-1.363
回归分析 3	氮肥施用量	-1.052*	0.263	1.190**	1.056*	0.813
	磷肥施用量	0.405	0.043	-0.633	-0.769	-0.143
	大理市蔬菜播种面积	-0.869**	0.312	0.768	0.834**	0.449
	流域奶牛数量	-0.072	-0.468	-0.102	-0.729**	0.344
	大理市城镇人口数量	0.027	-0.162	0.032	0.183	-0.322
	流域污水处理规模	0.106	0.107	0.340	0.682	-0.564*

** 表示极显著相关($P<0.01$); * 表示显著相关($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 流域发展与湖泊水质的相互作用

湖泊为流域社会经济发展提供了丰富的资源,同时人类高强度的活动干扰也导致湖泊生态系统在水动力、水质维持、生物多样性保护等方面的功能下降^[28-30]。洱海作为云贵高原典型断陷湖泊,坝区经济特点明显,相比平原湖区,人湖矛盾更加突出。20 世纪 50—60 年代,洱海尚处于天然状态,人为干扰小,水质清澈。1957 年黎尚豪等对洱海开展首次全面调查(9 月),洱海生源元素浓度都属于贫营养型范围(TN<0.2 mg/L, TP<0.05 mg/L,溶解氧浓度较高),沿岸水草较为丰富^[31]。直至 1960s 末,洱海一直处于贫营养状态。

1970s 为了满足流域工业发展,缓解供电压力,在洱海唯一天然出湖河流西洱河相继建成了 4 个梯级电站,导致出湖水量明显增加,至 2003 年洱海始终保持低水位运行。洱海低水位对湖泊水环境及生物演替都有着直接或间接的影响^[32-33],从回归分析结果也可看出(表 2),洱海年均水位与主要水质指标间具有较好的相关性。洱海氮磷和有机物浓度均在 1985 年前后出现拐点,透明度显著上升(图 1),究其原因,与此阶段洱海水位变化密切相关。西洱河梯级电站运行后,洱海由高水位的天然调节湖泊变为低水位的人工调节湖泊^[7,24-36],年均水位较 1960s 的天然状态下下降近 1.5 m。一方面,洱海长期低水位运行导致水动力减弱,湖水停留时间延长,致使入湖污染物在水体中逐渐累积^[37-38]。1980—1984 年洱海湖水力停留时间增加至 5.09 年(图 4),较 1960s 以来多年平均增加近 2 年。加之 1980s 初洱海南部下关城区城镇化发展,工业废水和城镇污水排放增大,污染物入湖量增多并在湖内累积增强,导致湖体 TN、TP 和 COD_{Mn}浓度在 1980—1985 年间出现一个显著上升的过程(图 1),到 1985 年洱海水质已由贫营养级转到贫中营养级^[20]。另一方面,洱海长期低水位运行有利于水生植物繁殖生长,从而限制浮游植物优势,促进湖泊透明度提升^[39],1980s 洱海 SD 提升明显,较 1970s 初增加了 2 m 多(图 1)。鉴于下关城区快速发展带来的污染问题,以工业和城镇点源污染治理为切入点的洱海保护治理序幕也自此拉开。1986 年建设西洱河南北岸排污干管,集中收集下关城区生活污水和部分企业废水至下游西洱河,工程效果明显,而后几年洱海 NH₃-N、COD_{Mn}、TN 和 TP 浓度的显著下降也说明了这一点(图 1)。

除此之外,洱海低水位运行也引发了一系列生态问题,最重要的是湖内土著鱼类大量消失^[37],这也影响

着后来地方政府的决策。由于鱼类资源供应急剧减少,1985年初大理州推行网箱养鱼、围湖养鱼等措施,至1995年洱海网箱养鱼面积已增至 10 hm^2 ;1991年引进太湖银鱼入洱海。然而,引进银鱼、网箱养鱼等在可观的经济效益背后,却是沉重的生态环境代价,洱海水质逐渐下降,水生态系统严重受损。网箱养鱼和围湖养鱼都是以捞水草喂养为主,致使洱海水生植被覆盖面积由1980s初的30.9%减少至18%^[7],与藻类竞争能力明显降低;银鱼引种产生的下行效应,即对浮游动物摄食增加,使浮游植物失去摄食者而数量剧增^[15]。综合水文气象因素,导致1996年洱海首次发生以鱼腥藻为主的规模化蓝藻水华,水华发生期水体呈“绿油漆”状,严重影响用水安全。此次水华事件对地方政府敲响警钟,随后立即开展取消网箱养鱼和取消机动渔船的“双取消”专项工作,到1998年水生植物覆盖率增加到40%左右^[23],SD也提升至3.54 m(图1),但洱海水质恶化进程并未因此减缓。1998年前后,洱海流域农业种植结构调整,蔬菜种植面积显著增加,化肥施用量显著增加(附图II b)。洱海南部区域工业及乡镇企业的快速发展,污水排放量不断增加,以及居民生活习惯的改变,含磷洗涤剂的广泛使用等均加剧了洱海水质的污染^[40]。1997—2003年,洱海TN、TP、 COD_{Mn} 和Chl.a均呈现出显著升高的趋势变化,SD显著下降(图1),洱海TLI(Σ)也急剧上升,跃进为中营养水平(图2)。加之洱海长期处于低水位运行状态,湖泊生态系统脆弱,2003年洱海再次发生规模化蓝藻水华,年均Chl.a浓度急剧上升近10倍,SD突降近50%,水生植物衰亡严重,覆盖率不足10%,且优势种转变为以耐污种为主^[34]。自此,洱海生态系统结构发生根本改变,由清水稳态退化到藻草共存、草藻共存的过渡态^[41],虽然TLI(Σ)评价洱海处于中营养状态(图2),但湖泊生态系统已呈现出富营养化的特征,湖泊学界也普遍认为洱海正处于关键的“富营养化初期”阶段^[42-43]。

2003年洱海蓝藻水华事件再次警示着洱海保护治理的紧迫性,湖泊保护治理力度不断加大。2004—2008年间洱海主要水质指标(TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_{Mn})呈现显著下降的变化趋势(图1),这与洱海高水位运行和保护治理工程实施的关系密切。2004年修正的《云南省大理白族自治州洱海管理条例》重新规定了洱海最低和最高运行水位,自此洱海实行高水位运行。2004年起洱海逐年增加运行水位,至2008年洱海年均运行水位已由1972.89 m提高至1973.96 m,增加了1.07 m,高水位运行增加了洱海的蓄水量,对水体污染物具有一定的稀释作用,促进水质改善。同时,在此期间大理州实施了一系列重大工程,包括古城至下关城区截污治污工程、洱海环湖湖滨带生态修复工程等,这些因素都促使洱海水质向好发展,2008年全湖水质更是达到了II类水平。

2009年至今,洱海流域经济进入高速发展阶段,特别是2010—2013年间流域GDP年均增速超过16%(附图II a),同时一系列洱海保护治理重大决策和工程措施相继实施,多重因素下洱海水环境并没有进一步恶化,波动变化明显,这也充分体现了社会经济发展、湖泊保护治理和水质的辩证关系。一方面,流域经济增长虽快但方式仍粗放,制约着湖泊水质改善。特别是第一产业,农业发展对洱海水质的影响程度远大于其他产业(表2),农田肥料污染流失逐渐成为流域氮、磷污染负荷的重要来源^[44]。2003年以来洱海流域氮肥和磷肥施用量显著增加,与1990s相比增加近3~4倍(附图II b),而主要农作物产量增加不明显,说明肥料的利用效率下降,肥料的流失量增加^[28]。特别是1998年流域种植结构调整后,高施肥作物蔬菜种植高峰期播种面积近6000公顷,流域内蔬菜种植过量依赖化肥增加产量和效益的种植业生产状况,导致农田土壤累积污染和化肥流失污染问题日益突出^[45]。从回归分析结果也可看出,氮肥施用和蔬菜种植对洱海TN、 COD_{Mn} 、SD的影响显著(表2)。畜牧业中奶牛养殖是洱海流域的特色产业,2000年开始奶牛养殖数量不断攀升,而其粪便中有机质含量较高,早期流域内畜禽粪便多在圈舍或田间无序堆放,雨季淋溶污染流失严重。“十二五”以来大部分畜禽粪便被集中收集并资源化利用,制备有机肥推广应用于全流域农业种植。已有研究表明,有机肥施用可增加农田土壤有机质浓度,使得淋溶水中COD浓度增加^[46],进而影响湖体有机物浓度。因此,奶牛养殖数量与洱海 COD_{Mn} 浓度呈极显著相关(表2)。另外,第三产业对洱海水环境的影响程度仅次于第一产业(表2),而旅游业的产值贡献接近50%,流域旅游发展对水环境存在一定影响,对洱海氮磷浓度的影响较大^[47]。另一方面,经济高速发展同时也带动了大量环保资金的投入,从“一湖之治”到“流域之治”再到“生态之治”,对洱海的认识和保护治理策略也在不断深入,在此过程中也有多个全国首次实施的保护治理举措,如“三退三还”、“三清洁”、环湖湖滨带生态修复工程、覆盖全流域的截污治污工程等,这些治理与管理举措,在一定程度上延缓了洱海富营养化进程。特别是“十三五”期间,大理州以洱海保

护治理统领流域经济社会发展,累积投入各级资金近 300 亿元,统筹流域水环境治理、水生态修复和水资源调控,也取得了阶段性成效,洱海 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度持续下降,2020 年全湖 TP 改善至 II 类水平、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 基本恢复到 1990s 中后期水平,SD 也提升至 2.1 m,洱海也成为我国近郊保护较好的湖泊之一。

3.2 洱海水环境演变特征的思考

经上述讨论分析,洱海水质与流域发展和湖泊保护存在一定的辩证关系,在二者驱动下主要水质指标也呈现出明显的阶段性变化趋势。然而,值得注意的是,洱海 COD_{Mn} 指标的变化趋势特征与其他指标差异明显,特别是“十三五”以来洱海氮磷指标呈现波动向好的态势,但 COD_{Mn} 浓度却在不断攀升,2020 年更是达到历史最高值 3.88 mg/L。与洱海相似,近年来云南其它高原湖泊如滇池^[48]、异龙湖、杞麓湖等都表现出有机物浓度升高或超标的现象,初步分析这可能与云南高原湖泊的生态系统特征有关。云南高原境内湖泊一般海拔较高,湖盆较深,故其湖泊特色与长江中下游浅水湖泊迥异^[32]。与平原湖泊相比,洱海汇水面积相对较小,且源近流短,来水量少,水资源相对匮乏,换水周期较长。尤其是近 10 年受流域天然来水量减少的影响,洱海水体停留时间延长长达 8.6 年(图 4),明显高于太湖^[49]等东部平原湖泊,这也加速了湖内难降解有机物的累积。另一方面,可能与流域碳氮磷污染控制不协调有关。最突出的是洱海流域建设了大量的湿地生态修复工程,初步统计,流域内已建库塘 325 座、湿地 56 座,总面积近 2667 公顷。由于湿地管理水平参差不齐,出现湿地植物残体收割不及时、湿地被闲置等问题,湿地水生植物残体在腐烂分解过程中会产生大量的溶解性有机质,随地表径流入湖也会在水体有机物含量产生影响。因此,洱海 COD_{Mn} 浓度持续升高的问题将是未来洱海保护治理需要关注的重点。

4 结论

近 50 年来,在流域发展与湖泊保护双轮驱动的作用下,洱海水质年际波动明显,1980s 初至 1985 年、1990s 末至 2003 年两个阶段洱海水质显著下降,1986—1980s 末、2004—2008 年两个阶段洱海水质显著改善。洱海经历了由贫营养湖泊向中营养湖泊的演变过程,发生过两次较为严重的规模化藻华事件。1996 年在水质优良的情况下洱海首次发生蓝藻水华,这与长期低水位运行、网箱养鱼和银鱼引种等导致湖泊生态系统严重受损密切相关。2003 年在水质污染加重、生态系统尚未恢复情况下洱海再次发生蓝藻水华。洱海流域农业发展特别是蔬菜种植、氮肥施用和奶牛养殖对洱海水质影响突出,因此,加大农业面源污染控制力度是持续改善洱海水质的关键。值得关注的是,近十年特别是 2016 年以来,高投入的湖泊保护工作促使洱海水质呈波动向好态势,但 COD_{Mn} 浓度仍在显著升高,且 $TLI(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 加权占比由 1992 年的 6% 增加至 2020 年的 17%,说明 COD_{Mn} 对洱海富营养化的影响逐渐增加,这将是未来洱海保护工作重点关注的方向。

5 附录

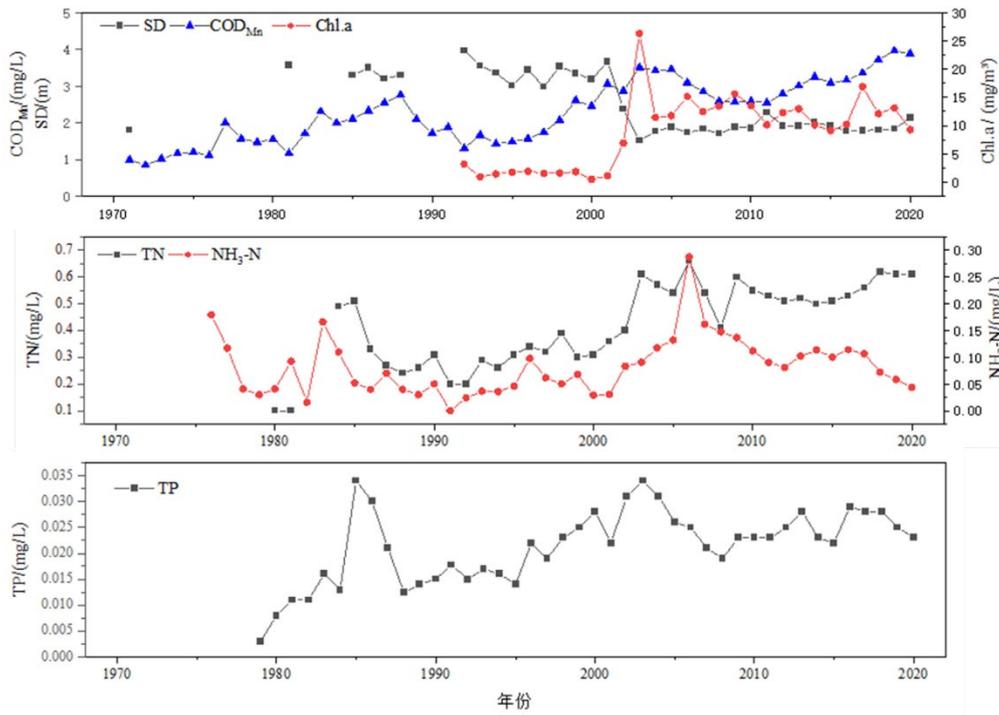
附图 I 和 II 见电子版(DOI: 10.18307/2023.0422)。

6 参考文献

- [1] Liu ZQ, Pan BZ, Han X *et al.* Water environment characteristics and water quality evaluation of lakes in Qinghai-Tibet Plateau. *Environmental Science*, 2022, (1): 5073-5083. DOI: 10.13227/j.hjks.202111079. [刘智琦, 潘保柱, 韩谔等. 青藏高原湖泊水环境特征及水质评价. 环境科学, 2022, (1): 5073-5083.]
- [2] Zhang Q, Liu YB, Yao J *et al.* Lake hydrology in China: Advances and prospects. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1360-1379. DOI: 10.18307/2020.0511. [张奇, 刘元波, 姚静等. 我国湖泊水文学研究进展与展望. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1360-1379.]
- [3] Liu Y, Jiang QS, Liang ZY *et al.* Lake eutrophication responses modeling and watershed management optimization algorithm: A review. *J Lake Sci*, 2021, **33**(1): 49-63. DOI: 10.18307/2021.0103. [刘永, 蒋青松, 梁中耀等. 湖泊富营养化响应与流域优化调控决策的模型研究进展. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 49-63.]
- [4] Zhu GW, Xu H, Zhu MY *et al.* Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1510-1524. DOI: 10.18307/2019.0622. [朱广伟, 许海, 朱梦圆等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1510-1524.]
- [5] Zhao YH, Li T, Huang B *et al.* Evolution characteristics and driving factors of water quality and eutrophication of typical lakes in the middle reaches of the Yangtze River from 2016 to 2020. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1441-1451. DOI: 10.18307/2022.0503. [赵晏慧, 李韬, 黄

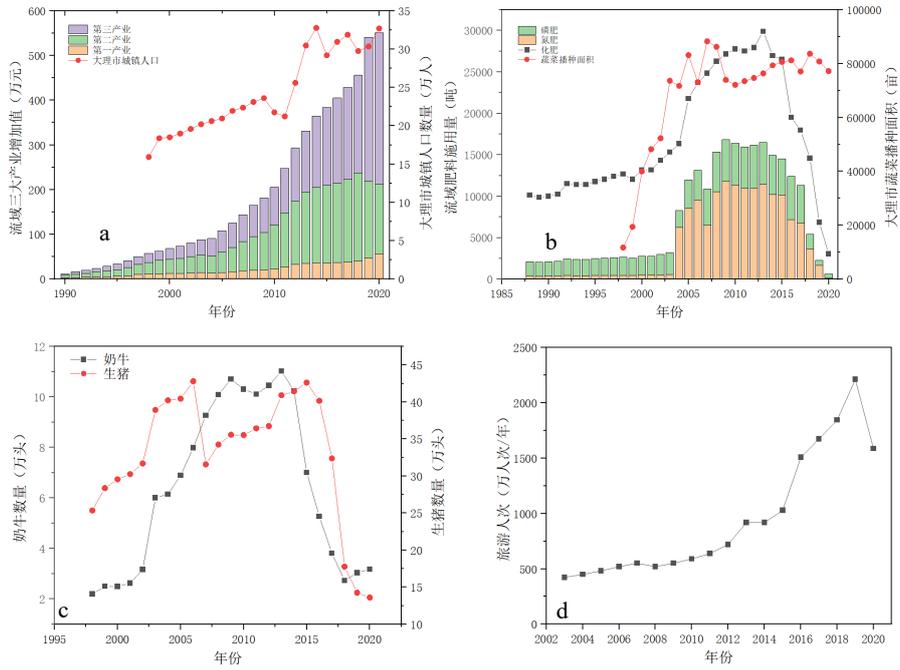
- 波等. 2016—2020年长江中游典型湖泊水质和富营养化演变特征及其驱动因素. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1441-1451.]
- [6] Wang SR, Duan B. Eutrophication of lakes in China and its protection and management needs. *Democracy & Science*, 2018, (5): 21-24. [王圣瑞, 段彪. 我国湖泊富营养化及保护治理需求. 民主与科学, 2018, (5): 21-24.]
- [7] Wang YF, Pan HX, Wu QL *et al.* Impacts of human activity on Lake Erhai and countermeasures. *J Lake Sci*, 1999, 11(2): 123-128. DOI:10.18307/1999.0206. [王云飞, 潘红玺, 吴庆龙等. 人类活动对洱海的影响及对策分析. 湖泊科学, 1999, 11(2): 123-128.]
- [8] Pan HX, Wang YF, Dong YS. Factor analysis of eutrophication in Lake Erhai. *J Lake Sci*, 1999, 11(2): 184-188. [潘红玺, 王云飞, 董云生. 洱海富营养化影响因素分析. 湖泊科学, 1999, 11(2): 184-188.]
- [9] Chen XH, Qian XY, Li XP *et al.* Long-term trend of eutrophication state of Lake Erhai in 1988-2013 and analyses of its socio-economic drivers. *J Lake Sci*, 2018, 30(1): 70-78. DOI: 10.18307/2018.0107. [陈小华, 钱晓雍, 李小平等. 洱海富营养化时间演变特征(1988—2013年)及社会经济驱动分析. 湖泊科学, 2018, 30(1): 70-78.]
- [10] Wang MJ, Yu B, Zhuo RR *et al.* Correlating analysis of water environment pollution and water environment change in Erhai River Basin. *Journal of Central China Normal University: Natural Sciences*, 2020, 54(4): 700-710. [王明杰, 余斌, 卓蓉蓉等. 洱海流域水环境污染与水环境变化的关联分析. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2020, 54(4): 700-710.]
- [11] Ma W, Su JG, Yang Y *et al.* Study on the evolution characteristics of water quality and its key impact factors of Lake Erhai. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2022, 20(2): 112-119, 128. [马巍, 苏建广, 杨洋等. 洱海水质演变特征及主要影响因子分析. 中国水利水电科学研究院学报, 2022, 20(2): 112-119, 128.]
- [12] 金相灿. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995: 192-195.
- [13] 沈仁湘. 洱海水位对环境的影响. 大理白族自治州科学技术委员会编. 云南洱海科学论文集. 昆明: 云南民族出版社, 1989: 93-99.
- [14] 胡文英, 胡红云, 潘红玺. 洱海的水化学特征. 大理白族自治州科学技术委员会编. 云南洱海科学论文集. 昆明: 云南民族出版社, 1989: 118-127.
- [15] Du BH. Loss of biodiversity results in Lake Erhai eutrophication. *Yunnan Environmental Science*, 1997, 16(2): 30-34. [杜宝汉. 洱海富营养化研究. 云南环境科学, 1997, 16(2): 30-34.]
- [16] Bjorndahl JA, Gushulak Cale AC, Stefano M *et al.* Abrupt changes in the physical and biological structure of endorheic upland lakes due to 8-m lake-level variation during the 20th century. *Limnology and Oceanography*, 2022, 67(5): 1022-1039.
- [17] Pedersen EJ, Miller DL, Simpson GL *et al.* Hierarchical generalized additive models in ecology: an introduction with mgcv. *Peer J*, 2019, 7:e6876 <https://doi.org/10.7717/peerj.6876>.
- [18] Wood SN. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 2011, 73(1): 3-36. DOI: 10.1111/j.1467-9868.2010.00749.x.
- [19] Simpson GL. Modelling palaeoecological time series using generalized additive models. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2018, 6. DOI:10.3389/fevo.2018.00149.
- [20] Du BH. Study on eutrophication of Lake Erhai. *J Lake Sci*, 1992, 4(2): 86-92. DOI:10.18307/1992.021. [杜宝汉. 洱海富营养化研究. 湖泊科学, 1992, 4(2): 86-92.]
- [21] Gao W, Chen Y, Xu M *et al.* Trend and driving factors of water quality change in Lake Fuxian(1980-2011). *J Lake Sci*, 2013, 25(5): 635-642. DOI:10.18307/2013.0503. [高伟, 陈岩, 徐敏等. 抚仙湖水质变化(1980—2011年)趋势与驱动力分析. 湖泊科学, 2013, 25(5): 635-642.]
- [22] Zhao S, Ni ZK, Huang DL *et al.* Evolution of water quality of Poyang Lake using WQI method and driving factors identification. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(1): 179-187. DOI: 10.13671/j.hjksxb.2019.0316. [赵爽, 倪兆奎, 黄冬凌等. 基于WQI法的鄱阳湖水质演变趋势及驱动因素研究. 环境科学学报, 2020, 40(1): 179-187.]
- [23] Li JJ. Research and countermeasures for Lake Erhai eutrophication. *J Lake Sci*, 2001, 13(2): 187-192. DOI: 10.18307/20010214. [李杰君. 洱海富营养化探析及防治建议. 湖泊科学, 2001, 13(2): 187-192.]
- [24] Duan JZ, Zhao XJ, Chen Q *et al.* Analysis on the impact of vegetable production on non-point source pollution and economy in Erhai River Basin and countermeasures for source control. *Agro-Environment & Development*, 2009, 26(2): 77-79, 83. [段杰珠, 赵学娟, 陈青等. 洱海流域蔬菜生产对面源污染和经济影响分析及控源对策. 农业环境与发展, 2009, 26(2): 77-79, 83.]
- [25] Tang QX, Zhai LM, Lei BK *et al.* Nutrient balance and soil nutrient status in farmland of the northern watershed of Lake Erhai. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11): 2163-2170. [汤秋香, 翟丽梅, 雷宝坤等. 洱海流域北部农田养分平衡及残留特性研究. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2163-2170.]
- [26] Cheng LL, Yin CB, Hu WL *et al.* Subsidy policy for agricultural nonpoint pollution control in northern area of Lake Erhai of Yunnan Province. *Agro-Environment & Development*, 2011, 28(4): 135-140. [程磊磊, 尹昌斌, 胡万里等. 云南省洱海北部地区农田面源污染现状及控制的补偿政策. 农业环境与发展, 2011, 28(4): 135-140.]
- [27] Sun L, Gao SJ, Chu ZS *et al.* Effects of land use on soil nitrogen, phosphorous and organic matter contents in flatland of Lake Erhai basin. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(9): 1318-1324. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2016.09.10. [孙莉, 高思佳, 储昭升等. 土地利用方式对洱海流域坝区土壤氮磷有机质含量的影响. 环境科学研究, 2016, 29(9): 1318-1324.]
- [28] Lin S, Shen S, Zhou A *et al.* Sustainable development and environmental restoration in Lake Erhai, China. *Journal of Cleaner Production*,

- 2020, **258**: 120758. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120758.
- [29] 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. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2015.02.014. [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.]
- [30] 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. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0030. [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.]
- [31] Li SH, Yu MJ, Li GZ *et al.* Limnological survey of the lakes of Yunnan Plateau. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1963, (2): 87-114. [黎尚豪, 俞敏娟, 李光正等. 云南高原湖泊调查. 海洋与湖沼, 1963, (2): 87-114.]
- [32] Gan F, Tang L, Guo HC *et al.* New method and application of estimating ecological water level of the Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 783-790. DOI: 10.18307/2015.0504. [淦峰, 唐琳, 郭怀成等. 湖泊生态水位计算新方法与应用. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 783-790.]
- [33] Li JX, Chen YY, Han F *et al.* Water level change of Dongping Lake and its impact on water quality from 1990 to 2016. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, **37**(23): 94-100. [李景璇, 陈影影, 韩非等. 1990—2016 年东平湖水位变化及其对水质的影响. 中国农学通报, 2021, **37**(23): 94-100.]
- [34] 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.]
- [35] Yuan JX, Wang YZ. Level in Lake Erhai. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 1985, (3): 7-12. [袁静秀, 王银珠. 洱海的水位. 海洋湖沼通报, 1985, (3): 7-12.]
- [36] Li P. Adjustment analysis of characteristic water level in Lake Erhai in Dali city. *Pearl River*, 2008, **29**(2): 46-48, 85. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2008.02.015. [李萍. 大理市洱海特征水位调整分析. 人民珠江, 2008, **29**(2): 46-48, 85.]
- [37] Xu M, Wang R, Yang X. Combining paleolimnological proxies to understand the long-term social-ecological interactions: A case study in the Erhai Basin, Southwest China. *Quaternary International*, 2021, **592**: 60-66. DOI: 10.1016/j.quaint.2021.03.040.
- [38] Wang XM, Zhai SH, Zhang HJ *et al.* Research on appropriate hydraulic retention time on basis of water quality improvement of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 9-21. DOI: 10.18307/2017.0102. [王洗民, 翟淑华, 张红举等. 基于水质改善目标的太湖适宜换水周期分析. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 9-21.]
- [39] Du BH. Studies on the physico-chemical properties of water and their variation in the Lake Erhai. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1989, **20**(6): 538-543. [杜宝汉. 洱海水理化特性及其变化探讨. 海洋与湖沼, 1989, **20**(6): 538-543.]
- [40] Zheng GQ, Yu XX, Jiang N *et al.* The cause for Chang of water quality of Lake Erhai and prediction of water quality. *Journal of Northeast Forestry University*, 2004, **32**(1): 99-102. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5382.2004.01.031. [郑国强, 于兴修, 江南等. 洱海水质的演变过程及趋势. 东北林业大学学报, 2004, **32**(1): 99-102.]
- [41] Wang Z, Li GB, Wang GH *et al.* Application of fuzzy synthetic evaluation on the regime shift phases of Lake Erhai. *Journal of Hydroecology*, 2011, **32**(3): 53-58. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2011.03.011. [汪贞, 李根保, 王高鸿等. 基于模糊评价法的洱海稳态阶段分析. 水生态学杂志, 2011, **32**(3): 53-58.]
- [42] 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 and 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.]
- [43] 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.
- [44] Geng B, Luo LG. Farmers' willingness to reduce fertilizer input and adopt organic fertilizer—Based on the perspective of non-point source pollution prevention and control in the upper reaches of Erhai watershed. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, **39**(4): 74-82. DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20180411. [耿飙, 罗良国. 农户减少化肥用量和采用有机肥的意愿研究—基于洱海流域上游面源污染防控的视角. 中国农业资源与区划, 2018, **39**(4): 74-82.]
- [45] Xiang S, Wu Y, Lv XJ *et al.* Characteristics and spatial distribution of agricultural non-point source pollution in Lake Erhai Basin and its classified control strategy. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(11): 2474-2483. DOI:10.13198/j.issn.1001-6929.2020.10.09. [项颂, 吴越, 吕兴菊等. 洱海流域农业面源污染空间分布特征及分类控制策略. 环境科学研究, 2020, **33**(11): 2474-2483.]
- [46] Teng YM, Han H, Hao ZY *et al.* Effect of vegetable cropping system on total nitrogen, phosphorus and COD in farmland leachate. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, **25**(5): 759-768. [滕艳敏, 韩卉, 郝梓依等. 不同蔬菜种植模式对土壤淋溶水总氮、总磷和 COD 的影响. 中国生态农业学报, 2017, **25**(5): 759-768.]
- [47] 史海银. 洱海流域旅游发展特征及其水环境效应[学位论文]. 武汉: 华中师范大学, 2016.
- [48] 杨枫. 滇池 COD 特征及升高原因解析[学位论文]. 北京: 中国环境科学研究院, 2017.
- [49] Wu HY, Jia GH, Xu B *et al.* Analysis of variation and driving factors of total phosphorus in Lake Taihu, 1980-2020. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 974-991. DOI:10.18307/2021.0402. [吴浩云, 贾更华, 徐彬等. 1980 年以来太湖总磷变化特征及其驱动因子分析. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 974-991.]



附图 I 洱海主要水质指标历史变化趋势

Attached Fig. I The yearly variation of water quality indicators in Lake Erhai



附图 II 洱海流域经济社会发展趋势

Attached Fig.II Interannual variation of main socio-economic indicators of Lake Erhai Basin