

2017—2022 年洱海水体营养状态的时空变化趋势及其成因分析^{*}

华兆晖^{1,4}, 李锐², 杨智³, 文紫豪¹, 单航^{1,4}, 丑庆川¹, 张霄林¹, 曹特^{1**}

(1: 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

(2: 云南省水利水电勘测设计院有限公司, 昆明 650000)

(3: 云南省水利水电勘测设计研究院, 昆明 650000)

(4: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 洱海是云贵高原重要湖泊, 近年来经历了多次污染和治理。2017 年以来, 洱海全流域开展高水平保护治理, 外源污染和水质发生了时空变化。为分析洱海水质的影响因素, 于 2017—2022 年在洱海 8 个主要湖湾以及北部、中部、南部 3 个湖心水域进行连续 6 年的逐月水质监测, 重点分析了总氮、总磷和叶绿素 *a* 浓度以及透明度 4 项水质指标, 并用综合营养状态指数 (TLI) 法评价水体的富营养化程度。结果表明, 1) 洱海水体富营养化程度呈北高南低趋势, 与外源污染物主要经由北三江入湖有关。2) 2017—2022 年, 南部水域富营养化程度逐年降低, 中部水域氮、磷浓度呈降低趋势, 北部水域氮、磷浓度略有升高, 表明中部和南部治理成效优于北部。3) 洱海富营养化程度在汛期高于非汛期, 北部水域富营养化程度的季节变异高于中部和南部水域。4) 洱海北片区及汛期污染控制尤其是水体磷控制是洱海治理需要关注的重点问题。

关键词: 洱海; 水质; 富营养化; 综合营养状态指数; 水环境治理

The spatiotemporal variation and potential causes for the nutrient status of water in Lake Erhai from 2017 to 2022^{*}

Hua Zhaozhi^{1,4}, Li Rui², Yang Zhi³, Wen Zihao¹, Shan Hang^{1,4}, Chou Qingchuan¹, Zhang Xiaolin¹ & Cao Te^{1**}

(1: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P.R.China)

(2: Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design Co., Ltd, Kunming 650000, P.R.China)

(3: Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650000, P.R.China)

(4: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: Lake Erhai is an important lake on the Yunnan-Guizhou Plateau, which has experienced pollution and treatment in recent years. Since 2017, the high-level protection and management have been carried out in the entire Lake Erhai basin, resulting in spatiotemporal changes in the external pollution and water quality. To analyze the influencing factors of external pollution on the water quality of Lake Erhai, this study conducted monthly water quality monitoring in eight major bays, as well as in the central of the northern, middle, and southern parts of Lake Erhai from 2017 to 2022. The concentrations of total nitrogen, total phosphorus, chlorophyll-*a* and water transparency were measured in the water column. The eutrophication was evaluated by the trophic level index (TLI). The results showed that: 1) The TLI decreased from the northern area to southern area, in agreement with the higher nutrients input of rivers in the northern part of the lake. 2) During the period from 2017 to 2022, the trophic index decreased significantly in the southern area of Lake Erhai and decreased slightly in the middle area, while increased in the northern area, indicating that the pollution control was more effective in the southern and middle areas than in the northern area. 3) the trophic index was higher in the wet season than in the dry season, and the seasonal variation of TLI was higher in the northern area than in the middle and southern areas. 4) It is important for the control of phosphorus input into the lake, particularly for the northern area of

* 2023-10-12 收稿; 2024-03-08 收修改稿。

国家自然科学基金项目(32101319, 32071574, 31930074)和中国博士后科学基金项目(236070)联合资助。

** 通信作者; E-mail: caote@ihb.ac.cn。

Lake Erhai basin and/or in the flooding season, as well as the phosphorus concentration in the lake water.

Keywords: Lake Erhai; water quality; eutrophication; trophic level index; water pollution control

淡水湖泊是我国重要的生态系统类型,具有供水、气候调节、生物多样性保护、航运和景观等功能^[1]。随着入湖氮、磷污染物的增加,我国众多湖泊已处于富营养化状态^[2-3],表现为水体中氮、磷浓度增加,从而提高水体初级生产力^[4]。湖泊富营养化评价常采用综合营养状态指数(*TII*)法^[5],主要通过氮、磷、叶绿素*a*和透明度4项水质指标进行综合评估^[6-7]。

洱海是云贵高原典型淡水湖泊,具有独特的气候条件和丰富的生物多样性。然而,受城镇化和工农业发展的影响,近50年来洱海经历了富营养化进程。20世纪80年代初至90年代末,洱海的水质从Ⅱ类向Ⅲ类转变^[8]。当前,洱海流域点源污染已得到较好控制,面源污染成为主要污染源^[9-10]。洱海面源污染主要来自农业活动,因用地类型空间差异和季节性耕作导致了面源氮、磷污染强度存在明显的空间差异,北部农村地区的面源污染比南部城镇地区更为严重^[9,11]。洱海入湖河流主要分布在北部与西部,西部有18条溪流和众多沟渠,但水量和总污染负荷相对小。北部有罗时江、弥苴河和永安江3条主要入湖河流,入湖水量和污染物约占全湖外源污染输入的60%以上。汛期北三江入湖水量约占全年总量的70%,导致氮、磷负荷集中入湖^[12]。富营养化会导致藻类水华,洱海于1996年首次发生较大范围水华,其后多次发生局部水华,包括2003、2006、2013和2021年^[13]。水体叶绿素*a*(Chl.*a*)浓度是浮游植物生物量的直接表征,可用于衡量水华的严重程度^[14]。研究表明,洱海Chl.*a*浓度在时间上呈春夏季上升、秋季达到峰值、冬季下降的趋势^[15]。洱海Chl.*a*的空间分布也不均匀,2015年之前,冬、春季北部Chl.*a*浓度略低于南部,而近年来北部Chl.*a*浓度高于南部^[16-17]。

当前,洱海处于富营养化初期和保护治理的“拐点”阶段。2017年以来,地方政府加大洱海综合治理,开展了流域“两违”整治、村镇“两污”整治、面源污染减量、节水治水生态修复、截污治污工程提速、流域执法监管和全民保护洱海“七大行动”。2018年6月30日,洱海环湖截污工程闭合,有效控制了流域内总氮和总磷的点源污染,削减了进入洱海的污染负荷^[18]。2018年7月,大理市启动了“环洱海流域湖滨缓冲带——生态修复与湿地建设工程”,包括生态修复及湿地工程建设、生态搬迁、生态廊道建设以及管网完善等一系列措施^[19]。这些综合措施使洱海流域的污染源结构、时空分布和入湖量发生了显著变化,初步遏制了水质下降趋势。

已有研究多关注洱海水质的长期变化,然而自2017年开展综合治理以来(表1),关于洱海水质变化的研究报道仍较少。本研究在2017—2022年期间对洱海水质指标进行逐月监测,从空间、年际和季节3个方面探讨水体营养状态的变化,并初步分析其成因,旨在为洱海水环境保护与治理提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洱海($25^{\circ}35' \sim 25^{\circ}58'N$, $100^{\circ}05' \sim 100^{\circ}17'E$)位于云南省大理白族自治州,属低纬高原亚热带季风气候,全年水温在 $12 \sim 24^{\circ}C$ 之间波动,平均水深达10.6 m,最大水深达21.3 m,湖泊面积为 252 km^2 ^[8]。洱海流域多年平均降水量约为960 mm,汛期(6—11月)降水量占全年降水量的90%以上^[9]。流入洱海的河流共计117条,其中经罗时江、永安江和弥苴河的入湖径流量占比在60%以上,位于洱海西南部的西洱河是唯一天然出湖河流^[12]。受全球气候变化影响,近30年来洱海流域的年降水量呈下降趋势,气温呈上升趋势^[13]。

1.2 样点设置与数据收集方法

基于对洱海水动力学特性和潮流模型的研究^[22]以及洱海水质空间特征,本研究将洱海分为北部、中部和南部3个水域,并在各水域的湖心和代表性湖湾总共设置了11个采样点位(图1),2017年1月8日—2022年12月16日期间,在每个点位逐月采集水样分析。水样采集、预处理、保存和测定方法遵循《水和废水监测分析方法》(第四版)^[23]。在每个点位采集3个水样重复样本,每个样本为上层水、中层水和底层水的混合,在每个位点用塞氏盘测定水体透明度(SD)。采集的水样灌装于棕色瓶中并置于 $4^{\circ}C$ 保温箱内带回实验室,测定总氮(TN)、总磷(TP)和叶绿素*a*(Chl.*a*)浓度。根据洱海流域多年降水量的逐月分布^[24],6—

表1 2017年以来洱海治理的主要措施

Tab.1 The projects and management for the environmental protection of Lake Erhai since 2017

时间	洱海治理措施	措施的具体内容
2017年6月23日	洱海保护治理“七大行动”	“七大行动”包括流域“两违”整治、村镇“两污”整治、面源污染减量、节水治水生态修复、截污治污工程提速、流域执法监管、全民保护洱海。
2017年8月14日	开展洱海流域水生态保护区核心区餐饮客栈服务业专项整治	对洱海流域水生态保护区核心区餐饮客栈等服务业开展整治，共关停核心区餐饮客栈经营户1900余户。
2018年6月30日	洱海环湖截污工程闭合	建设污水管网厂设施，对城镇和乡村污水进行全收集处理，有效控制了流域内总氮(TN)和总磷(TP)的点源污染，削减了进入洱海的污染负荷。
2018年7月	实施《大理市洱海生态环境保护“三线”管理规定》 ^[20-21]	明确了洱海湖区界线(蓝线)、洱海湖滨带保护界线(绿线)和洱海水生态保护区核心区界线(红线)，对洱海环湖空间进行有效管控。
2018年11月	部署洱海保护治理“八大攻坚战”	“八大攻坚战”包括环湖截污、生态搬迁、矿山整治、农业面源污染防治、河道治理、环湖生态修复、水质改善提升、过度开发建设。

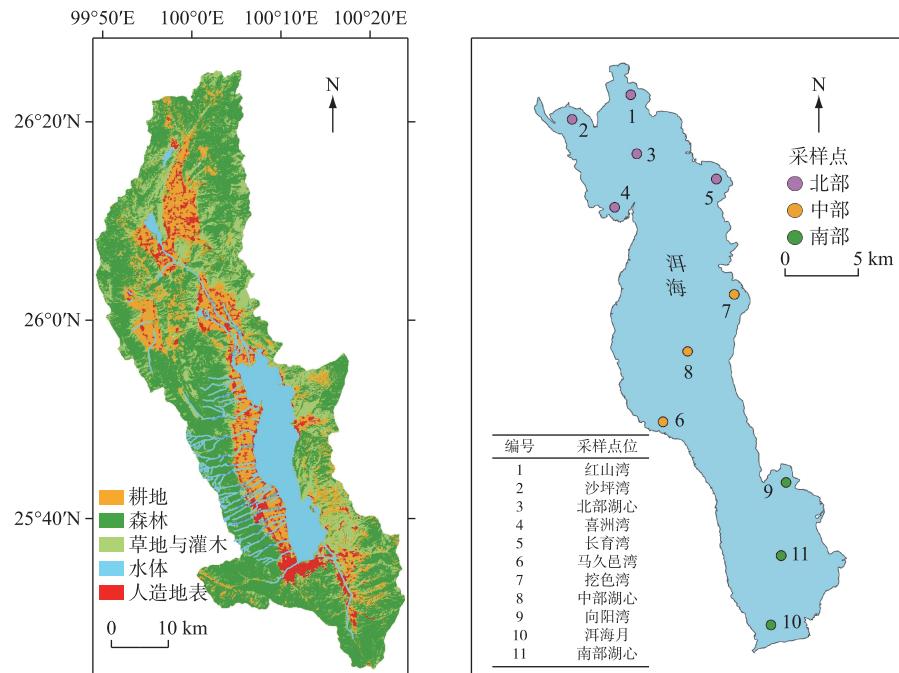


图1 洱海流域2020年土地利用类型及本研究的采样点位分布

Fig.1 The land use types in Lake Erhai basin in 2020 and sampling sites in the present study

11月为汛期,12月一次年5月为非汛期。根据流域内年内温度的变化,3—5月划定为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12月一次年2月为冬季。依据洱海20条主要入湖河流的年平均营养盐浓度^[12]和年均流量^[25-26],并将其与3个水域相对应地分为北部、中部和南部3类(入湖河流名录及分类见附表I和II),计算其氮、磷年总负荷量。

1.3 湖泊富营养状态评价方法

本研究采用综合营养状态指数($TLI(\Sigma)$)法^[27]评价湖泊富营养化程度,计算公式如下:

$$TLI(TN) = 10(5.453 + 1.694 \ln TN) \quad (1)$$

$$TLI(TP) = 10(9.436 + 1.624 \ln TP) \quad (2)$$

$$TLI(Chl.a) = 10(2.5 + 1.086 \ln Chl.a) \quad (3)$$

$$TLI(SD) = 10(5.118 - 1.94 \ln SD) \quad (4)$$

$$TLI(\Sigma) = W(TN) \times TLI(TN) + W(TP) \times TLI(TP) + W(Chl.a) \times TLI(Chl.a) + W(SD) \times TLI(SD) \quad (5)$$

式中, $W(TN)$ 、 $W(TP)$ 、 $W(Chl.a)$ 和 $W(SD)$ 分别为0.2192、0.2300、0.3260和0.2246。采用0~100的一系列连续数字对湖泊营养状态进行分级: $TLI(\Sigma) \leq 30$ 为贫营养; $TLI(\Sigma) \in (30, 50]$ 为中营养; $TLI(\Sigma) \in (50, 60]$ 为轻度富营养; $TLI(\Sigma) \in (60, 70]$ 为中度富营养; $TLI(\Sigma) > 70$ 为重度富营养。

1.4 数据分析方法

采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)对各湖区年际间、四季以及汛期/非汛期综合营养指数以及富营养化度量指标的差异进行分析,采用双因素方差分析法(two-way ANOVA)分析时间与空间的交互效应,组内的多重比较采用LSD(least significant difference)法。通过基于Pearson相关分析的路径分析(不含潜在变量的结构方程模型),探讨了各指标与 TLI 间的直接和间接影响通路。基础统计分析在R语言的stats程序包(版本4.2.1)中进行,路径分析的 R^2 、路径系数和模型拟合参数在Amos(版本23.0)软件中计算,LSD多重比较使用了agricolae程序包(版本1.3-5),箱线图和双轴图在Origin 2021软件中绘制(版本9.8.0)。

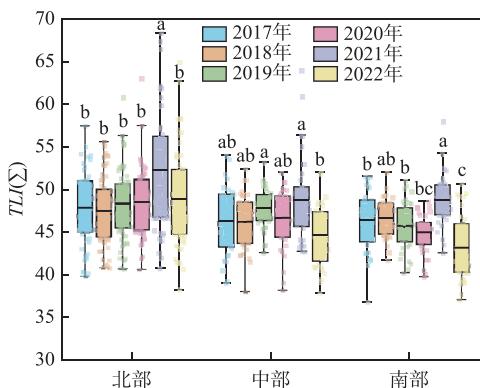


图2 洱海北部、中部和南部水域综合营养状态指数的年际变化(不同小写字母表示差异显著。箱体代表四分位距,箱子内的水平线表示均值,上边缘与下边缘分别表示最大值与最小值。下同)

Fig.2 Annual variation of tropical level index ($TLI(\Sigma)$) in the northern, middle and southern areas of Lake Erhai(Different letters indicate a significant difference. The box represents the quartile range, the horizontal line inside the box represents the mean, and the upper and lower edges represent the maximum and minimum values, respectively. The same below)

较于2017年(0.806 mg/L)下降了11.2%;2019—2022年TN浓度转变为上升趋势,增幅为8.1%。中部水域TN浓度除了2020年略回升外,其他年份均表现出逐年下降趋势,总体降幅达到了13.4%。南部水域2021年和2022年的TN浓度分别为0.615和0.631 mg/L,分别比2018年的平均浓度(0.722 mg/L)下降了14.8%和12.6%。3个水域的TP浓度变化趋势不同(图3b)。北部水域的TP浓度逐年上升,总增幅为30.1%。中

2 结果

2.1 不同水域水体营养状态的年际间变化

2017—2022年,洱海水体营养状态在空间上表现为北部水域高于中部和南部水域,年际变异表现为南部逐年降低,中部和北部水域稳定波动(图2)。2017—2022年期间,北部水域 $TLI(\Sigma)$ 分别显著高于中部和南部水域4.75%和6.59%($P < 0.05$)。2021年洱海各水域 $TLI(\Sigma)$ 均显著高于其他年份($P < 0.05$)。在其他年份,北部水域 $TLI(\Sigma)$ 整体无显著差异,有升高趋势;中部水域2022年 $TLI(\Sigma)$ 相较于2019年显著降低了6.65%($P < 0.05$);南部水域 $TLI(\Sigma)$ 呈逐年降低趋势,2022年 $TLI(\Sigma)$ 相较于2017年、2018年和2019年分别显著降低了7.10%、7.63%和5.55%($P < 0.05$)。除2021年北部水域 $TLI(\Sigma)$ 均值处于轻度富营养状态区间外,2017—2022年各水域 $TLI(\Sigma)$ 均处于中营养状态区间。

2017—2022年,洱海北部水域TN的年平均浓度总体呈前3年下降、后3年上升的趋势,中部和南部水域TN的年平均浓度呈持续下降趋势(图3a)。2019年是北部水域TN浓度变化的转折点,年平均TN浓度达到最低值(0.716 mg/L),相

部和南部水域的TP浓度保持相对稳定,6年内平均浓度分别为0.039和0.037 mg/L。2021年3个水域的TP浓度达到了最高值,显著高于其他年份($P<0.05$)。

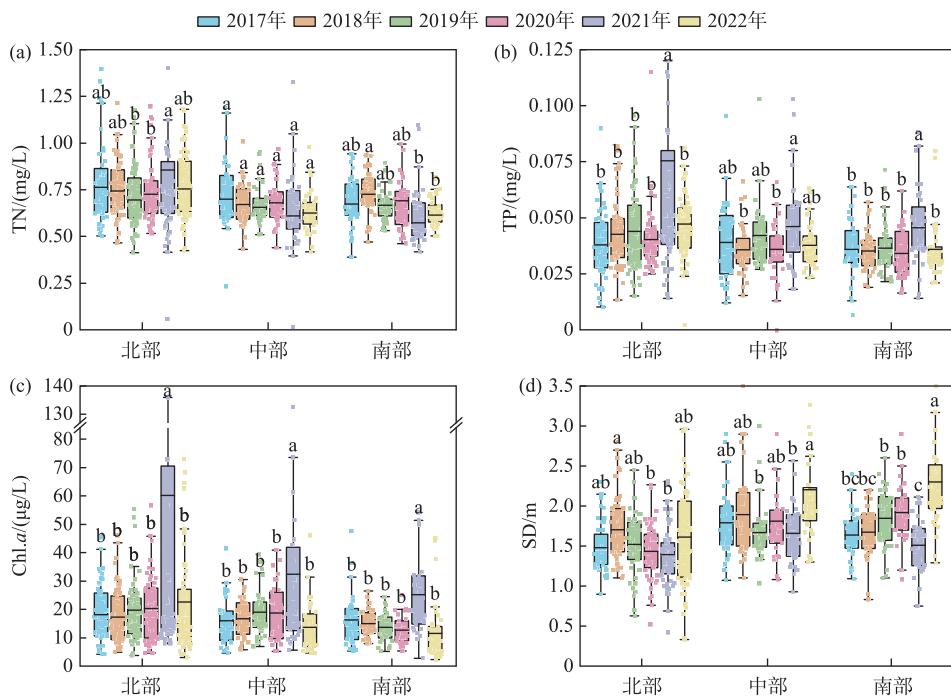


图3 洱海北部、中部和南部水域的TN、TP、Chl.a和SD的年际变化

Fig.3 Annual variation of the TN, TP, Chl.a concentrations and SD in the northern, middle and southern areas of Lake Erhai

2017—2022年,洱海的Chl.a浓度总体上呈北部升高、南部降低的趋势(图3c)。北部水域Chl.a浓度均值从2017年(18.198 μg/L)至2022年(22.625 μg/L)上升了24.3%。中部水域Chl.a浓度均值稳定维持在19.607 μg/L左右。南部水域Chl.a浓度均值从2017年(16.326 μg/L)至2022年(11.569 μg/L)逐年下降,总降幅为29.1%。2021年3个水域Chl.a浓度均达到最高值,显著高于其余年份($P<0.05$)。SD总体呈北部降低南部升高的趋势(图3d)。北部水域SD均值从2018年(1.705 m)开始降低,2020年与2021年分别降至1.435和1.393 m,降幅分别为15.8%和18.3%($P<0.05$),2022年SD有一定程度回升。中部水域SD趋于稳定,2022年SD均值为2.122 m,较2019年(1.668 m)和2021年(1.659 m)分别提升了27.3%和27.9%;南部水域SD均值从2017年(1.639 m)到2022年(2.226 m)逐年上升,上升幅度为35.8%,2022年SD相较于前5年显著提升($P<0.05$)。

2.2 不同水域水体营养状态的季节变化

汛期(6—11月)洱海TLI表现为北部>中部>南部($P<0.05$),南、北部相差8.95%。非汛期(12月至次年5月)北部水域TLI显著高于中部和南部($P<0.05$),中部与南部水域间TLI无显著性差异,南、北部相差4.68%。汛期北部、中部和南部水域TLI分别显著高于非汛期9.41%、8.67%和5.12%($P<0.05$)。汛期北部水域TLI均值达51.46,属轻度富营养状态,中部与南部水域全年均处于中营养状态(图4)。

汛期与非汛期北部水域的氮、磷浓度均显著高于中部和南部($P<0.05$,图5)。北部水域TN浓度在汛期与非汛期分别高于南部水域17.3%和19.5%,TP浓度分别高于南部水域29.2%和29.8%。汛期北部、中部和南部水域TN浓度相比于非汛期分别高出了7.69%、7.60%和5.69%,在中部和南部水域的汛期与非汛期差异显著($P<0.05$,图5a)。3个水域TP浓度与TN浓度呈相同的趋势:汛期北部、中部和南部水域TP浓度相比于非汛期分别高出了15.6%、30.2%和15.1%(图5b)。

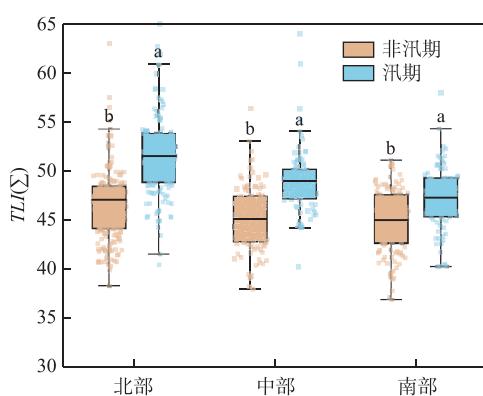


图 4 洱海北部、中部和南部水域汛期与非汛期综合营养状态指数的变化

Fig.4 The trophic level index ($TLI(\Sigma)$) in the northern, middle and southern areas of Lake Erhai in the dry and wet seasons

$TLI(\Sigma)$ 相似,但 Chl.*a* 的季节变化比 TN 和 TP 更明显。TN、TP 和 Chl.*a* 浓度在春季全湖分别为 0.655 mg/L、0.036 mg/L 和 10.952 μ g/L, 在秋季北部水域可分别达 0.892 mg/L、0.061 mg/L 和 37.562 μ g/L, 在南部水域夏、秋、冬季均值分别为 0.673 mg/L、0.038 mg/L 和 17.076 μ g/L(图 7a~c)。SD 的季节变化与 TLI 呈相反趋势,全年春季中部水域的 SD 最高(2.148 m),北部夏秋季 SD 最低(约 1.346 m;图 7d)。

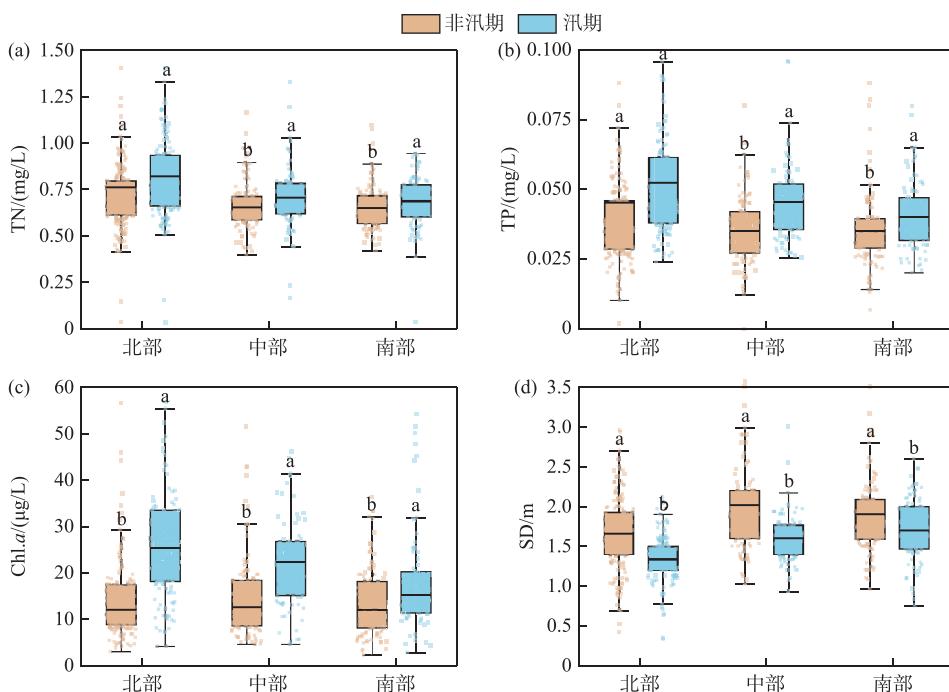


图 5 洱海北部、中部和南部水域汛期与非汛期 TN、TP、Chl.*a* 和 SD 的变化

Fig.5 TN, TP, Chl.*a* concentrations and SD in the northern, middle and southern areas of Lake Erhai in the dry and wet seasons

汛期北部水域 Chl.*a* 浓度显著高于南部 58.2%; 非汛期 Chl.*a* 浓度在空间上无显著性差异。汛期与非汛期北部水域 SD 均显著低于中部与南部($P<0.05$), 汛期北部水域 SD 分别比中部与南部水域低 16.1% 和 20.9%; 非汛期北部水域 SD 分别比中部与南部水域低 16.7% 和 11.5%。汛期北部、中部和南部水域 Chl.*a* 浓度均显著高于非汛期($P<0.05$), 分别高出 48.3%、66.7% 和 38.4% (图 5c)。汛期北部、中部和南部水域 SD 均显著低于非汛期, 分别降低了 18.8%、19.4% 和 9.0% (图 5d)。

洱海水质指标季节变化显著, 北部水域季节变化比中部和南部水域更为明显。北部水域 $TLI(\Sigma)$ 表现为秋季>夏季>冬季>春季, 相邻季度间差异显著($P<0.05$), 秋季 $TLI(\Sigma)$ (52.71) 比春季(45.11) 高 16.8%; 在中部水域, $TLI(\Sigma)$ 表现为秋季≈夏季>冬季>春季, 夏、秋季 $TLI(\Sigma)$ (约 48.70) 比春季(43.42) 高 12.2%; 在南部水域, $TLI(\Sigma)$ 表现为夏季(47.52)>春季(44.27), 其他相邻季度差异不显著(图 6)。TN、TP 和 Chl.*a* 的季节变化与

2.3 时间与空间的交互效应

洱海 $TLI(\Sigma)$ 具有显著的时间(汛期 vs. 非汛期; 季节)和空间(北部、中部和南部)差异, 在所有时间与空间因子下均呈现显著的交互效应($P<0.05$, 表 2)。洱海 TN、TP、Chl.*a* 浓度和 SD 4 项指标具有显著时空差异($P<0.01$, 表 3)。洱海水体营养状态具有显著空间差异并与年际(图 3)或季节(图 7)具有交互作用, 使得不同水域的指标在时间上呈现为不同趋势。但是, 不同水域指标在汛期和非汛期的影响下表现出相同的趋势(图 5)。

2.4 成因分析

采用结构方程模型分析了洱海营养状态受各指标的直接与间接影响(SRMR<0.08, CFI>0.9; 图 8), 水体 TN、TP 和 Chl.*a* 浓度的升高以及 SD 的降低均使得 $TLI(\Sigma)$ 显著升高($P<0.001$), 各指标间具显著关系, 从而对 $TLI(\Sigma)$ 产生了级联效应。较高的 TP 浓度显著升高了水体 Chl.*a* 浓度($r=0.769, P<0.001$), Chl.*a* 浓度升高进一步显著降低水体 SD ($r=-0.426, P<0.001$)。TN 浓度对 Chl.*a* 浓度($r=0.114, P>0.05$)和水体 SD($r=0.120, P>0.05$)无显著影响。

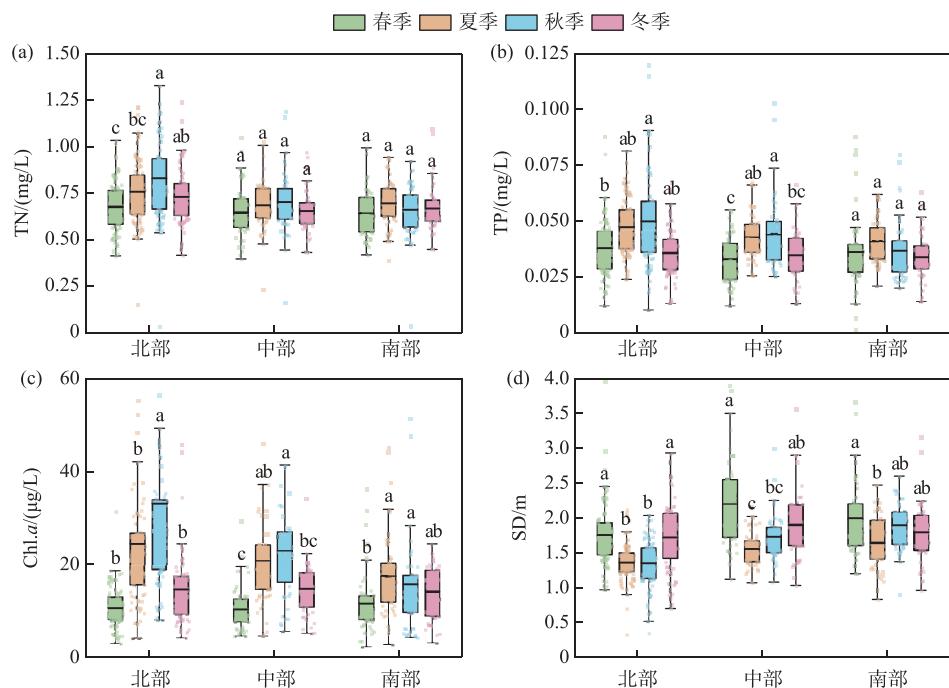


图 6 洱海不同水域综合营养状态指数的季节变化

Fig.6 Seasonal variation of tropical level index ($TLI(\Sigma)$) in the northern, middle and southern areas of Lake Erhai

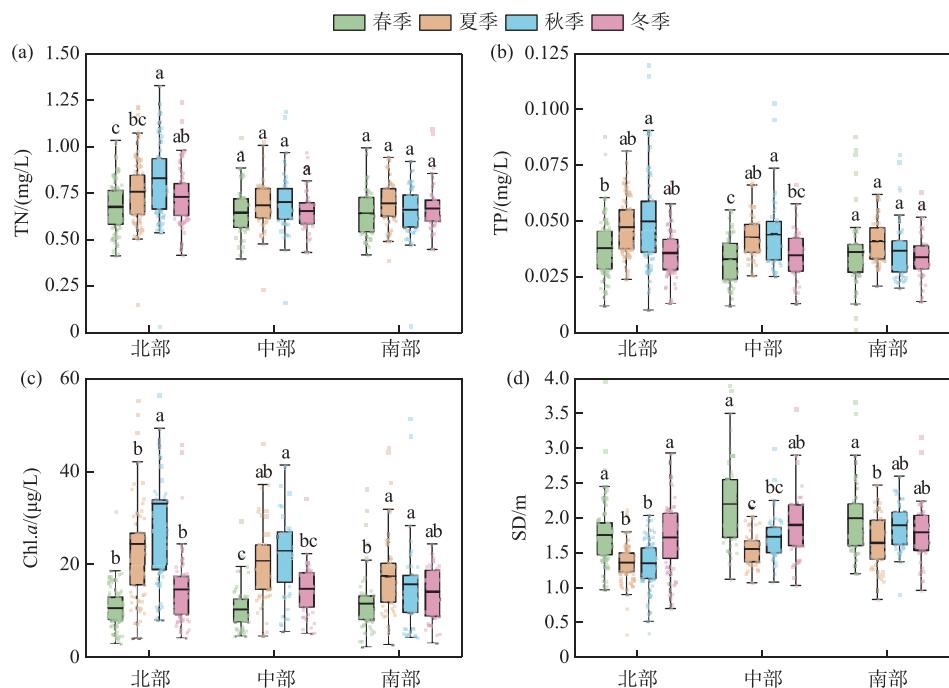


图 7 洱海不同水域 TN、TP、Chl.*a* 和 SD 的季节变化

Fig.7 Seasonal variation of the TN, TP, Chl.*a* concentrations and SD in the northern, middle and southern areas of Lake Erhai

洱海入湖河流年总氮、磷负荷和洱海水体氮、磷浓度在空间上均表现为北部高于中部和南部。北部入湖河流的年 TN 负荷占洱海全湖 TN 负荷的 76.2%, 分别为中部和南部入湖河流年 TN 负荷的 8 倍和 5.3 倍。北部入湖河流的年 TP 负荷占洱海全湖 TP 负荷的 61.7%, 分别为中部和南部入湖河流年 TP 负荷的 4.2 倍和 2.6 倍。

表 2 洱海综合营养状态指数的双因素方差分析

Tab.2 Two-way ANOVA for the trophic level index ($TLI(\Sigma)$) of Lake Erhai

方差来源	$TLI(\Sigma)$		
	F	P	显著性
水域	35.170	0.000	***
年份	14.568	0.000	***
水域×年份	2.343	0.010	*
水域	42.163	0.000	***
季节	72.895	0.000	***
水域×季节	6.544	0.000	***
水域	37.920	0.000	***
汛/非汛期	142.190	0.000	***
水域×汛/非汛期	4.070	0.017	*

当 $P < 0.001$ 时显著性用 *** 表示, $0.001 \leq P < 0.01$ 时用 ** 表示, $0.01 \leq P < 0.05$ 时用 * 表示。

研究表明,水体 TN 和 TP 浓度呈由北向南逐渐降低的空间分布趋势,本研究结果与其一致。在 2009—2018 年期间,TN 浓度高值从北部水域转移至中部,TP 浓度高值从南部水域转移至北部。祁兰兰等的研究表明^[29],在 2014—2018 年期间,洱海的中部和南部水域的富营养化程度高于北部,北部水域的水质相对较好。一方面,洱海中部和南部城镇化程度较高,在 2018 年以前外源污染控制措施不完善;另一方面,南部沉积物的内源性营养释放高于北部^[30-31]。然而,本研究中,2017—2022 年洱海 TN 高值在北部水域,反映了这期间控污措施对中部和南部水域 TN 改善程度优于北部水域。2018 年 6 月洱海环湖截污工程闭合运营,环湖周边村镇点源污染得到有效控制,湿地库塘和调蓄带工程可有效削减中部和南部农业污染^[18],从而使南部水域得到持续改善。本研究中,2017—2022 年间洱海中部和南部水质呈现出不同程度改善趋势;但是,北部水域 TN 浓度呈先降低后上升趋势,TP 浓度逐年上升。洱海中部水域和南部水域的外源污染负荷主要源自海西农田、村镇和南部城市,且海西苍山 18 溪和农田沟渠的流程较短,截污治污工程更容易取得成效。海北片区有大量村落和农田,北三江汇水面积大、河网交错及径流距离长,一定程度上增加了截污控污难度。

表 3 洱海 TN、TP、Chl.a 和 SD 的双因素方差分析
Tab.3 Two-way ANOVA for the TN, TP, Chl.a concentrations and SD of Lake Erhai

方差来源	TN			TP			Chl.a			SD		
	F	P	显著性									
水域	23.045	0.000	***	14.042	0.000	***	11.878	0.000	***	42.267	0.000	***
年份	2.172	0.055		13.424	0.000	***	20.465	0.000	***	15.715	0.000	***
水域×年份	2.508	0.006	**	2.566	0.005	**	3.076	0.001	***	4.478	0.000	***
水域	23.531	0.000	***	13.312	0.000	***	11.366	0.000	***	43.446	0.000	***
季节	9.047	0.000	***	10.051	0.000	***	23.064	0.000	***	40.025	0.000	***
水域×季节	3.219	0.004	**	2.163	0.045	*	3.324	0.003	**	3.591	0.002	**
水域	22.594	0.000	***	12.951	0.000	***	10.517	0.000	***	41.344	0.000	***
汛/非汛期	8.355	0.004	**	14.508	0.000	***	18.945	0.000	***	86.663	0.000	***
水域×汛/非汛期	0.132	0.876		0.511	0.600		0.645	0.525		2.839	0.059	

$P < 0.001$ 时显著性用 *** 表示, $0.001 \leq P < 0.01$ 时显著性用 ** 表示, $0.01 \leq P < 0.05$ 时显著性用 * 表示。

本研究中,水体富营养化指标间紧密相关,TP—Chl.a—SD 通路存在级联效应,TP 是影响水体营养状态

3 讨论

本研究结果表明,洱海北部水域富营养化程度高于中部和南部水域,这种水质空间分布特征与入湖河流有关,北部入湖河流水量大且年总氮、总磷输入高,占全湖氮、磷外源输入的 60% 以上。洱海流域北部乡镇的氮、磷面源污染排放量较高^[9],北部入湖河流污染物浓度季节变化明显,具有面源污染的典型特征^[26]。因此,北部河流季节性氮、磷输入主导了洱海水质指标的时空变化趋势^[17]。洱海南北长约 46 km,东西宽约 4~8 km,在北部海舌至双廊(宽约 5.3 km)和南部才村至文笔(宽约 3.4 km)两处收窄,使洱海北部、中部和南部形成 3 个相对独立潮流,在收窄处为弱流区^[22]。此外,洱海水体交换周期长,潮流缓慢。这种湖盆及潮流特征使得污染物自北向南扩散慢,从而促进北部水域富营养化。

肖梦琦等^[28]对洱海 2009、2013 和 2018 年的水质

的关键指标。在2017—2022年期间,北部水域总氮浓度为0.787 mg/L,总磷浓度为0.048 mg/L,氮磷比值为16.4,这与引发固氮蓝藻水华的氮磷比阈值16相当^[2]。因此,在北部总磷难以有效控制的状况下,北部水域水华的风险升高。本研究在2021年秋、冬季监测到洱海北部发生甲藻水华,Chl.a浓度最高可达264.8 μg/L。

洱海汛期富营养化程度高于非汛期,这与洱海流域气候呈明显干湿季相关。汛期入湖河流的流量占全年的70%以上^[12],降雨对地表强冲刷也使河流水体氮、磷浓度最高^[26]。洱海TLI(Σ)在空间和季节这两个因素影响下有显著的交互效应,这种交互效应可以理解为富营养化程度相对较高的北部水域在不同季节表现出较大的变化,而低富营养化程度的中部和南部水域其水质指标在不同季节变化幅度较小,年内变化相对稳定。汛期外源营养输入和适宜水温是导致北部水域夏、秋季浮游植物生长的重要因素。相比之下,南部水域在相同温度条件下夏、秋季浮游植物生物量没有明显增加,表明南部相对低营养水平抑制了浮游植物的生长。

4 结论

2017年以来,洱海保护治理措施改变了外源污染结构和入湖污染物强度,从而对洱海北部、中部和南部水域的水质指标造成显著影响。洱海北部水域的入湖污染负荷和水体营养状态高于中部和南部水域,且有逐年升高趋势,对北部水域实施针对性保护措施尤为紧迫。汛期污染物集中输入和适宜水温导致夏、秋季北部水域浮游植物大幅增加,发生局部藻类水华,但南部水域相对低营养抑制了同期浮游植物的大量生长,汛期是入湖污染防控的关键阶段。总磷是TP—Chl.a—SD级联响应通路的源头,控制水体总磷可有效抑制藻类水华和富营养化。

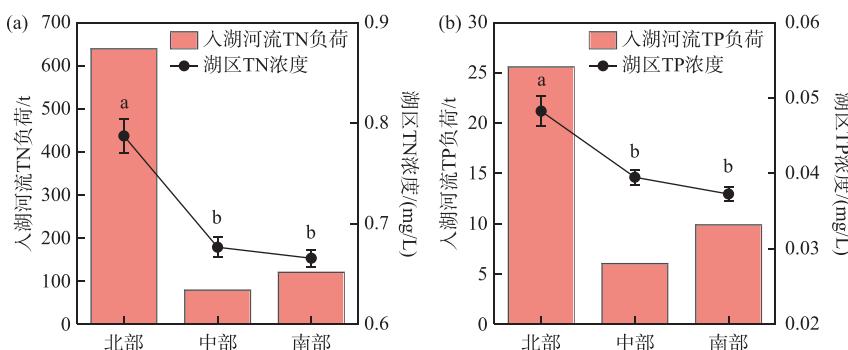


图9 洱海北部、中部和南部入湖河流年总氮和总磷负荷及对应湖区水体的总氮和总磷浓度

Fig.9 Annual TN and TP inputs loads and concentrations in the northern, middle and southern areas of Lake Erhai

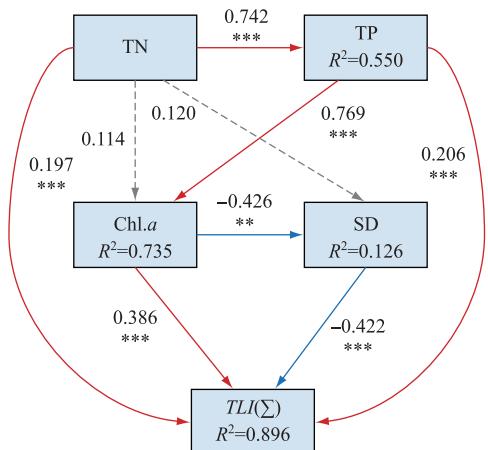


图8 洱海富营养化指标间的直接与间接影响路径
(箭头旁的数字为标准化路径系数 r)

* 表示显著性: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ 。
模型中响应变量的下方标注了其方差解释量 R^2 。

红色和蓝色实线分别表示显著的正面和
负面影响,虚线箭头表示不显著)

Fig.8 Path model analysis for the direct or
indirect effects of eutrophication metrics on
the water nutrient status in Lake Erhai (Numbers
adjacent to the arrows are standardized path
coefficients r . * denotes significance: * $P < 0.05$,
** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$. The R^2 values
explaining the variance of the response variables
are labeled below each variable in the model.
The red and blue solid indicate significant positive
and negative effects, respectively, and the dashed
arrows means insignificance)

5 附录

附表 I、II 见电子版(DOI: 10.18307/2024.0611)。

6 参考文献

- [1] 高俊峰, 蒋志刚. 中国五大淡水湖保护与发展. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] Smith VH, Tilman GD, Nekola JC. Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 1999, **100**(1/2/3): 179-196. DOI: 10.1016/s0269-7491(99)00091-3.
- [3] Cheng XY, Li SJ. Evolution and characteristic analysis of eutrophication of typical lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **57**(7): 848-855. [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, **57**(7): 848-855.]
- [4] Qing BQ, Gao G, Zhu GW et al. Lake eutrophication and its ecosystem response. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(10): 855-864. DOI: 10.1360/csh2013-58-10-855. [秦伯强, 高光, 朱广伟等. 湖泊富营养化及其生态系统响应. 科学通报, 2013, **58**(10): 855-864.]
- [5] Wang MC, Liu XQ, Zhang JH. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environmental Monitoring in China*, 2002, **18**(5): 47-49. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2002.05.023. [王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, **18**(5): 47-49.]
- [6] Kerekes J, Kerekes V. Eutrophication of water: Monitoring, assessment and control. Paris: Organization for Economic Co-operative Development, 1982.
- [7] Vollenweider RA. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. *Organisation for Economic Co-operation and Development*, 1970, **15**: 169-170.
- [8] Gao SJ, Hou ZY, Wu Y et al. Trend and driving factors of water environment change in Lake Erhai in the last 50 years. *J Lake Sci*, 2023, **35**(4): 1296-1306. DOI: 10.18307/2023.0422. [高思佳, 侯泽英, 吴越等. 近 50 a 洱海水环境演变特征及其主要驱动因素. 湖泊科学, 2023, **35**(4): 1296-1306.]
- [9] 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.]
- [10] Carpenter SR, Caraco NF, Correll DL et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 1998, **8**(3): 559. DOI: 10.2307/2641247.
- [11] Li XL, Shuai YF, Zhang Y et al. GIS-based analysis on the temporal and spatial variation characteristics of nitrogen and its sources in Lake Erhai basin. *J Lake Sci*, 2022, **34**(3): 816-827. DOI: 10.18307/2022.0309. [李晓琳, 师永芳, 张翼等. 基于 GIS 的洱海流域氮素时空分异特征及源结构解析. 湖泊科学, 2022, **34**(3): 816-827.]
- [12] Huang MY. Water quality characteristics and pollution load estimation of main rivers around Lake Erhai. *Yangtze River*, 2022, **53**(1): 61-66. [黄明雨. 环洱海主要入湖河流水质特征及入湖污染负荷估算. 人民长江, 2022, **53**(1): 61-66.]
- [13] Wang JY, Chen GJ, Huang LP et al. Spatio-temporal patterns and drivers of cyanobacteria blooms in Lake Erhai, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(14): 4831-4842. DOI: 10.5846/stxb201604200740. [王教元, 陈光杰, 黄林培等. 洱海蓝藻爆发的时空特征及影响因子. 生态学报, 2017, **37**(14): 4831-4842.]
- [14] Zhou WH, Yuan XC, Huo WY et al. Distribution of chlorophyll *a* and primary productivity in the adjacent sea area of Changjiang River Estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, **26**(3): 143-150. [周伟华, 袁翔城, 霍文毅等. 长江口邻域叶绿素 *a* 和初级生产力的分布. 海洋学报, 2004, **26**(3): 143-150.]
- [15] Bai XH, Cao T, Ni LY et al. Seasonal variation of water column optical parameters in Lake Erhai, China. *Journal of Hydroecology*, 2016, **37**(2): 10-16. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2016.02.002. [摆晓虎, 曹特, 倪乐意等. 洱海水体光学特性的季节变化及其影响因素分析. 水生态学杂志, 2016, **37**(2): 10-16.]
- [16] Xie EH, Wu JE, Yang K. Mass concentration inversion for chlorophyll *a* in Lake Erhai based on Sentinel-2. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, **16**(9): 3058-3069. DOI: 10.12030/j.cjee.202204166. [谢恩弘, 吴骏恩, 杨昆. 基于 Sentinel-2 影像的洱海叶绿素 *a* 质量浓度反演. 环境工程学报, 2022, **16**(9): 3058-3069.]
- [17] Wang JL, Lu JZ, Zhang Z et al. Agricultural non-point sources and their effects on chlorophyll-*a* in a eutrophic lake over three decades (1985–2020). *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(31): 46634-46648. DOI: 10.1007/s11356-022-19220-z.
- [18] Yang FL, Tang WJ, Zhang XZ et al. Project around Lake Erhai performance diagnosis and analysis of sewage Interception and treatment. *China Water & Wastewater*, 2022, **38**(17): 21-26. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.17.004. [杨逢乐, 唐文景, 张先智等. 洱海环湖截污治污工程的治污效果诊断与分析. 中国给水排水, 2022, **38**(17): 21-26.]
- [19] Sun YY, Yang LC, Shi H. Riparian buffer zone around Lake Erhai basin in Dali city, Yunnan Province: Ecological restoration and wetland

- construction engineering design practice. *Landscape Architecture*, 2022, **29**(5): 64-67. [孙妍艳, 杨凌晨, 施皓. 云南省大理市环洱海流域湖滨缓冲带——生态修复与湿地建设工程设计实践. 风景园林, 2022, **29**(5): 64-67.]
- [20] He WZ, Yin CJ, Yuan J et al. Ecological corridor construction on the distribution and diversity of fish communities in different types of bays in Lake Erhai. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(12): 1965-1975. DOI: 10.7541/2023.2023.0091. [何万朝, 尹成杰, 袁静等. 生态廊道建设对洱海不同类型湖湾鱼类群落分布及多样性的影响. 水生生物学报, 2023, **47**(12): 1965-1975.]
- [21] Li WJ, Ma L, Zang ZH et al. Construction of ecological security patterns based on ecological red line in Lake Erhai Basin of southwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, **40**(7): 85-95. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170074. [李维佳, 马琳, 臧振华等. 基于生态红线的洱海流域生态安全格局构建. 北京林业大学学报, 2018, **40**(7): 85-95.]
- [22] Ma W, Zhou Y, Su JG et al. Study on the hydrodynamic characteristics and transporation and diffusion of pollutants in Lake Erhai. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2021, **19**(3): 281-289. [马巍, 周云, 苏建广等. 洱海水动力特性与入湖污染物迁移扩散规律研究. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, **19**(3): 281-289.]
- [23] 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(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [24] 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.]
- [25] 黄明雨, 卫志宏, 窦嘉顺等. 洱海西岸入湖河流污染特征分析. 中国环境科学学会2021年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集(三). 天津, 2021: 88-95.
- [26] Yan CL, Zhao M, Li ZK et al. Water characteristics of inflow rivers in northern Lake Erhai and their impact on the northern lake area. *Environmental Engineering*, 2020, **38**(12): 59-63, 55. DOI: 10.13205/j.hjgc.202012011. [严春丽, 赵明, 李泽坤等. 洱海北部入湖河流水质特征及其对北部湖区的影响. 环境工程, 2020, **38**(12): 59-63, 55.]
- [27] Kong XH, Xiao LL, Su HJ et al. Status of aquatic plants and its relationship with water environment factors in the lakes along the lower reaches of the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2015, **27**(3): 385-391. DOI: 10.18307/2015.0303. [孔祥虹, 肖兰兰, 苏豪杰等. 长江下游湖泊水生植物现状及与水环境因子的关系. 湖泊科学, 2015, **27**(3): 385-391.]
- [28] Xiao MQ, Ni ZK, Zhao HC et al. Characteristics and significance of nitrogen and phosphorus variation during high risk period of algal bloom in Lake Erhai. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(2): 294-304. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.06.28. [肖梦琦, 倪兆奎, 赵海超等. 洱海水华高风险期水体氮磷变化及其指示意义. 环境科学研究, 2021, **34**(2): 294-304.]
- [29] Qi LL, Wang JL, Nong LP et al. Temporal and spatial monitoring on water quality of Lake Erhai in dry season based on GF-1 satellite data. *Yangtze River*, 2021, **52**(9): 24-31. [祁兰兰, 王金亮, 农兰萍等. 基于GF-1卫星数据的洱海干季水质时空变化监测. 人民长江, 2021, **52**(9): 24-31.]
- [30] Qing BQ, Fan CX. Exploration of conceptual model of nutrient release from inner source in large shallow lake. *China Environmental Science*, 2002, **9**(2): 55-58. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6923.2002.02.013. [秦伯强, 范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨. 中国环境科学, 2002, **9**(2): 55-58.]
- [31] Zhao HC, Wang SR, Jiao LX et al. Characteristics of temporal and spatial distribution of different forms of phosphorus in the sediments of Lake Erhai. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(3): 227-234. DOI: 10.13198/j.res.2013.03.6.zhaohch.006. [赵海超, 王圣瑞, 焦立新等. 洱海沉积物中不同形态磷的时空分布特征. 环境科学研究, 2013, **26**(3): 227-234.]

附表 I 各湖区采样点位及其经纬度

Attached Tab. I Sampling points and their latitude and longitude in various lake areas

湖区	采样点位	经度	纬度
北部	红山湾	100.13685	25.93322
北部	沙坪湾	100.11644	25.93426
北部	北部湖心	100.16270	25.90525
北部	喜洲湾	100.14319	25.87445
北部	长育湾	100.21258	25.89310
中部	马久邑湾	100.17200	25.74027
中部	挖色湾	100.22321	25.82478
中部	中部湖心	100.18433	25.79433
南部	向阳湾	100.25017	25.70752
南部	洱海月	100.23687	25.61185
南部	南部湖心	100.24750	25.66010

附表 II 洱海各湖区入湖河流分区名录及其年总营养负荷

Attached Tab. II Directory of river basin divisions entering Lake Erhai in each lake region and their annual total nutrient load

河流	分区	入湖河流 TN 负荷/t	入湖河流 TP 负荷/t
弥苴河	北部	381.626	15.431
永安江	北部	156.039	4.235
罗时江	北部	75.373	3.868
西闸河	北部	18.634	1.548
万花溪	北部	6.874	0.451
霞移溪	北部	0.079	0.025
棕树河	北部	0.500	0.023
桃溪	中部	3.728	0.399
梅溪	中部	1.179	0.159
隐仙溪	中部	3.546	0.357
双鸳溪	中部	2.397	0.122
白石溪	中部	1.886	0.202
灵泉溪	中部	3.557	0.297
锦溪	中部	9.391	0.444
茫涌溪	中部	30.437	2.073
阳溪	中部	22.898	1.980
阳南溪	南部	1.355	0.052
葶苈溪	南部	0.683	0.034
莫残溪	南部	39.404	1.794
清碧溪	南部	27.589	3.954
黑龙溪	南部	32.738	1.389
白鹤溪	南部	11.388	1.450
中和溪	南部	7.345	1.201