

营养状态指数在长江下游小型浅水湖泊富营养化水平评价中的局限及改进建议^{*}

钱 畅¹, 汪晓东¹, 罗 芳¹, 许丹丹², 吴博文¹, 薛颖昊², 居学海^{2**}, 温新利^{1**}

(1:安徽师范大学生态与环境学院,皖江流域退化生态系统的恢复与重建省部共建协同创新中心,芜湖 241002)

(2:农业农村部农业生态与资源保护总站,北京 100125)

摘要: 基于多个环境变量、以等权或者加权平均法获得的综合营养状态指数(Carlson 指数: $TSIc$;修正后的 Carlson 指数: $TSImc$;综合营养状态指数: $TLIc$;湖库营养状态指数: EIc)得分是当前评价湖泊营养水平的主要依据,其值计算时先要获得基于单个环境变量的营养状态指数分值。若基于总氮(TN)、总磷(TP)和透明度(SD)等的单个理化指标与基于叶绿素 a (Chl. a)的营养状态指数得分间存在显著差异,表明依据理化指标的评估结果低估或者高估湖泊的实际营养水平。长江下游分布大量的小型浅水富营养化湖泊,但基于理化指标的评估结果是否会误判湖泊的实际富营养化水平的研究很少。本研究以长江下游的 14 个浅水富营养化湖泊为对象,于 2019—2020 年按照季度采集水样并测定水环境因子,分析基于理化指标和基于 Chl. a 的各营养状态指数(TSI 、 $TSIm$ 、 TLI 和 EI)得分间的差异。结果表明,基于 SD 的 TSI 、 $TSIm$ 、 TLI 和 EI 的年均得分均显著高于基于 Chl. a 的相应营养状态指数的年均值;除 $TSI(TP)$ vs. $TSI(Chl.a)$ 外,基于 TP 与基于 Chl. a 的其他营养指数的年均得分间均有显著性差异;仅 $TLI(TN)$ 与 $TLI(Chl.a)$ 的年均得分间无显著性差异。这表明,除 $TSI(TP)$ 和 $TLI(TN)$ 外,基于理化指标与基于 Chl. a 的其他营养状态指数的评估结果间均不能相互匹配。针对基于理化指标的营养状态指数在长江下游小型湖泊富营养化水平评估中的问题,提出如下改进建议:1) 依据 $\ln SD - \ln Chl.a - \ln TP$ 间的回归关系重构了营养状态指数($TSIr$ 、 $TSImr$ 和 $TLIr$)方程,结合基于单个理化指标与基于 Chl. a 的各指数得分间的匹配性、基于多个环境变量的综合营养状态指数 $TSIrc$ 、 $TSImrc$ 和 $TLIrc$ 得分间的差异性及其与水体实测 Chl. a 浓度对应的营养状态指数赋分区间的一致性,建议在长江下游小型浅水湖泊的富营养化水平评估中使用 $TSImr$ 和 $TLIr$ 指数;2) 以加权平均法计算综合营养状态指数 $TLIrc$ 得分时,发现基于理化指标实测值的归一化相关权重(W_{j1})与基于直接引用文献数据的相关权重(W_{j2})的 $TLIrc$ 得分间无显著差异。从简便性角度出发,建议直接以 W_{j2} 计算 $TLIrc$ 指数得分。

关键词: 长江下游;浅水湖泊;富营养化水平;评价方程;重构

Application limitations and improvement recommendations of trophic state indices in the eutrophication level assessment of small shallow lakes along the lower reach of the Yangtze River^{*}

Qian Chang¹, Wang Xiaodong¹, Luo Fang¹, Xu Dandan², Wu Bowen¹, Xue Yinghao², Ju Xuehai^{2**} & Wen Xinli^{1**}

(1: School of Ecology and Environment, Collaborative Innovation Center of Recovery and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Wanjiang Basin Co-founded by Anhui Province and Ministry of Education, Anhui Normal University, Wuhu 241002, P.R.China)

(2: Rural Energy and Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, P.R.China)

Abstract: The comprehensive trophic state indices based on multiple environment variables, including the Carlson's trophic state index ($TSIc$), the modified Carlson's trophic state index ($TSImc$), the comprehensive trophic level index ($TLIc$) and the lake and

* 2022-08-31 收稿; 2022-11-04 收修改稿。

国家自然科学基金项目(41877417)、安徽省自然科学基金项目(1808085MC79)、“生物环境与生态安全”安徽省高校重点实验室专项基金和全国第二次全国污染源普查项目(2110399)联合资助。

** 通信作者; E-mail: juxuehai@163.com; wenxinli1977@126.com。

reservoir trophic state index (EIc) , are widely used in the trophic level evaluation of lakes. The lake trophic level is generally assessed according to the scores of $TSIc$, $TSImc$, $TLIc$ and EIc , which are based on the scores of trophic level indices (TSI , $TSIm$, TLI and EI) derived from single environment variables, and thereby are calculated with the method of equal weight averages or by weighted averages method. If the scores of trophic level indices based on single physio-chemical indicators such as total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and secchi disk (SD) are significantly different from those based on chlorophyll-a (Chl.a), the assessment results based on the physio-chemical indicators could have underestimated or overestimated the actual trophic levels of the lakes. A large number of small shallow eutrophic lakes are distributed in the lower reach of the Yangtze River. However, little research has been undertaken to determine whether the assessment results based on physio-chemical indicators could misjudge the actual eutrophication levels of these lakes. Here, 14 small shallow eutrophic lakes were selected as the research waterbodies. The water samples in April, July, and October 2019 and January 2020 were collected, and Chl.a, TN and TP concentrations as well as SD were measured simultaneously. Subsequently, the differences between each of the trophic state indices scores (TSI , $TSIm$, TLI and EI) based on SD, TN, TP and the scores based on Chl.a were detected. The results showed that the annual scores of TSI , $TSIm$, TLI and EI based on SD were all significantly higher than those based on Chl.a. The score of TSI (TP) was not significantly different from that of TSI (Chl.a), but the scores of $TSIm$, TLI and EI based on TP were remarkably different from those based on Chl.a. Among TN-based trophic level indices, only the annual score of TLI (TN) was not significantly different from that of TLI (Chl.a). The abovementioned results indicated that except for TSI (TP) and TLI (TN), the assessment results based on physio-chemical indicators and that based on Chl.a could not match each other. For resolving the problem in the eutrophication level assessment of these small lakes based on physio-chemical indicators, the following improvement suggestions were proposed: 1) based on the $\ln SD - \ln Chl.a - \ln TP$ linear relationships, the trophic state index equations of $TSIr$, $TSImr$ and $TLIr$ were reconstructed. $TSImr$ and $TLIr$ indices were recommended to be used in the eutrophication level assessment of the small shallow lakes according to the match degree between the scores of based on single environment variables and that of the Chl.a-based indices, the differences among the scores of $TSIrc$, $TSImrc$ and $TLIrc$ based on multiple physio-chemical indicators, and the consistency between the scores of $TSIrc$, $TSImrc$ and $TLIrc$ and the score zones of trophic level indices corresponding to the measured Chl.a concentrations; 2) the score of $TLIrc$ was calculated by weighted averages methods. $TLIrc$ score that was based on normalized correlation weight (W_{j1}) derived from measured physio-chemical indicators was not significantly different from that based on the weights (W_j) originated directly from literature data. Therefore, it is recommended to calculate the score of $TLIrc$ index with W_j for convenience.

Keywords: Lower reach of the Yangtze River; shallow lakes; eutrophication level; evaluation equation; restriction

湖泊是水生态系统的重要组成部分,承担着旅游休闲、防洪排涝、水产养殖和航运等多种生态系统的服务功能,在生物多样性保护和生态安全等方面发挥着重要的作用。从全球范围看,大部分湖泊属于小型浅水性湖泊^[1]。经济的快速发展和人口迅速增加等因素导致了水体营养状态维持在较高水平^[2]。至今,湖泊富营养化仍是全球关注的重大水环境问题之一^[3-4],富营养化湖泊的综合治理受到世界上多数国家的高度重视。长江中下游地区是我国淡水湖泊的密集分布区,但自 1980s 以来该地区湖泊的营养水平和富营养化风险持续增加。2016 年以来,“长江大保护”上升为国家战略,解决长江流域湖泊富营养化的突出问题已成为各级政府的重要工作内容。然而,如何准确地评估水体营养水平是采取合适的湖泊综合治理对策的前提和基础^[5-6]。

目前,用于评价湖泊营养水平的参数包括单个理化指标(总氮、总磷等)、营养状态指数和生物指标(如浮游植物叶绿素 a 浓度)等^[7-10],其中以综合营养状态指数得分高低来评价湖泊的营养状态是当前最常用的方法。这些指数包括 Carlson 指数(TSI)、修正后的 Carlson 指数($TSIm$)、综合加权的营养状态指数(TLI)和湖库营养状态指数(EI)等^[8,11-17]。实际评估时,首先计算基于单个环境变量的营养状态指数(TSI 、 $TSIm$ 、 TLI 和 EI)得分,然后再给予它们相应权重系数而获得基于多个环境变量的综合营养状态指数($TSIc$ 、 $TSImc$ 、 $TLIc$ 和 EIc)得分,并以此为依据来评估湖泊的营养状态。 $TSIc$ 、 $TSImc$ 和 EIc 得分常基于等权平均法^[18],而 $TLIc$ 得分则基于加权平均法^[19]。因此,基于单个环境变量的营养状态指数(TSI 、 $TSIm$ 、 TLI 和 EI)得分是否合理对于准确判断湖泊的营养状态非常重要,但其的合理性取决于自身计算方程的科学性。

基于单个环境变量的营养状态指数($TSI/TSIm/TLI/EI$)方程构建的原理和过程有所差异。 TSI 指数构建是以深水湖库为对象,基于 SD 构建基础方程,再根据 $\ln SD - \ln Chl.a - \ln TP$ 的线性关系推导出 TSI (Chl.a)

和 $TSI(TP)$ 方程^[11]。与深水湖库不同,浅水湖泊的 SD 往往并不是藻类生物量的良好指示,而 $Chl.a$ 可较好体现藻类生物量,因此日本学者设计了以 $Chl.a$ 为核心的 $TSIm$ 指数,该指数首先构建 $TSIm(Chl.a)$ 函数,然后再依据 $\ln SD - \ln Chl.a - \ln TP$ 的回归关系并通过替换获得 $TSIm(SD)$ 和 $TSIm(TP)$ 等的评估方程^[12]。中国学者根据我国湖库藻类生产量常也受 TN 限制的现状,结合化学需氧量(COD_{Mn})也是藻类生物量良好的间接体现,设计了包括 TN、TP、SD、 COD_{Mn} 和 $Chl.a$ 等监测项目的 TLI 指数,具体公式是 $TLI_j = 10(a_j + b_j C_{jx})$,其中 a_j 和 b_j 是根据对数极差规格化公式计算出的常数, C_{jx} 是第 j 个监测指标的实测值^[13]。 EI 指数构建时,将 EI 设置为 10~100 且间隔为 10 的连续分值,每间隔 10 分设置各监测指标的浓度或者数值阈值,不同的阈值区间内采用线性插值法获得该指标的 EI 分值^[17]。虽然 TLI 和 EI 的单参数营养状态指数表面上并不是直接通过各实测的理化参数与 $Chl.a$ 之间的线性回归关系构建的,但 TLI_j 方程的 a_j 和 b_j 值计算、 EI 指数得分计算所依赖的合理化参数与 $Chl.a$ 的源数据阈值之间本身均存在线性回归关系。这就表明基于理化指标的 TSI 、 $TSIm$ 、 TLI 和 EI 指数在湖泊营养水平评估中的可靠性与 $SD-Chl.a-TP(TN)$ 间是否存在线性关系有很大关系。

然而,除了营养盐外,自然界水体中非藻类浊度、水文气象条件、光照条件等常也对藻类生长繁殖具有较大的影响,使得 $\ln Chl.a - \ln SD - \ln TP(TN) - \ln Chl.a$ 间的线性关系有时并不存在^[20-22],这样可能会造成基于 SD、TN 和/或 TP 等理化指标的营养状态指数得分常显著高于或者低于基于 $Chl.a$ 的营养状态指数分值。由于氮磷营养盐浓度增加并不会对水环境产生直接的负面影响,其导致的藻类异常增殖才是富营养化的核心问题,这使得 $Chl.a$ 成为了评估湖泊富营养化现状和相关风险的最终指示^[10,23]。因此当基于水体理化指标(TN、TP 和 SD 等)与基于 $Chl.a$ 的营养状态指数得分间不匹配时,势必会造成基于理化指标的评估结果高估或者低估了实际富营养化水平和相关风险^[10],进而引起对部分本应是较低营养水平湖泊的过度保护或对本应是较高营养水平湖泊的保护不足等问题。邹伟等采集并分析了我国包括长江中下游在内的东部平原的非通江浅水湖泊、通江浅水湖泊和深水水库等重点中大型湖库的夏季水样,发现三种类型水体中基于水体理化指标(TN、TP、SD 和 COD_{Mn})和基于 $Chl.a$ 的 TLI 营养状态指数间均存在显著性差异,表现为高估或者低估了湖库的实际富营养化水平和相关风险^[10]。

我国长江中下游地区湖泊众多,除了普遍关注的中大型湖库外^[10],还分布有大量的小型浅水湖泊,其中有些湖泊属于城市内湖,在调节局域小气候、净化城市空气和提高游览观赏价值等方面具有特别的生态功能^[13,23-24]。与中大型湖泊类似,这些小型浅水湖泊的富营养化问题也很突出^[25],但其实际富营养化水平评估方法可靠性的研究存在不足,从而难以确定 TSI 、 $TSIm$ 、 TLI 和 EI 等营养状态指数在长江下游小型浅水湖泊富营养化水平及相关风险评估中的适宜性。

本研究以位于长江下游中小型湖泊群为研究对象,通过周年四季样品的采集,统计分析各湖泊营养状态指数,目的在于:(1)探讨基于理化指标(SD、TN 和 TP)与基于 $Chl.a$ 的 TSI 、 $TSIm$ 、 TLI 和 EI 营养状态指数得分间的差异性及其形成的可能原因;(2)若上述差异显著,则根据本研究的 $\ln SD - \ln TN(TP) - \ln Chl.a$ 间的回归关系,重构相应的营养状态指数方程,比较依据重构后方程的各营养状态指数得分间差异并评判这些重构方程的合理性,旨在为筛选合适的、可较准确地评价长江下游小型浅水湖泊富营养化水平的营养状态指数提供依据。

1 材料与方法

1.1 采样湖泊群

长江下游包括江西(湖口段以下)至长江口段,经过江西、安徽、江苏和上海,总长度约 938 km,流域面积约 12 万 km^2 ;流域内人口密集,城市化水平高。2019 年,安徽、江苏和上海三省市平均人口密度达到 1699 人/ km^2 ,平均城镇化率达到 71.51%,总 GDP 达到 17.35 万亿,是我国长江经济带的龙头区,但同时也是生态承载力低、生态压力高的地区^[26-27]。该区域内有大量的湖泊,多是由地质运动和河流冲淤作用形成的,湖盆浅平,大多属浅水湖^[28]。由于快速的工业化和城市化等使得长江下游湖泊中氮磷等营养盐浓度长期维持在较高水平,加上该地区较高的年均温度和充足的光照等条件也有利于藻类繁殖^[13,28],使得区域内湖泊的藻情较为严重,多数湖泊处于富营养化状态^[29-31]。

本研究选择了安徽省和江苏省内的 14 个湖泊为研究水体,这些湖泊均位于长江下游且是浅水湖泊(平均深度<3.0 m)^[32]。根据湖泊大小,于每个湖泊设置了 1~3 个采样点,共设置 20 个采样点(图 1)。

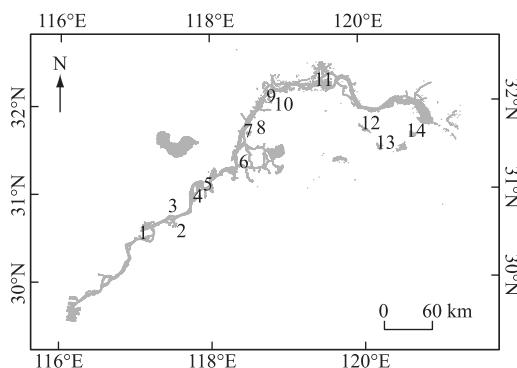


图 1 长江下游的采样湖泊群(各数字代码对应的湖泊名称:1 菱湖、2 平天湖、3 上小湖、4 天井湖、5 西湖湿地、6 镜湖、7 雨山湖、8 秀山湖、9 玄武湖、10 前湖、11 珍珠湖、12 宋剑湖、13 五里湖、14 尚湖)

Fig.1 The sampling lakes in the lower reach of the Yangtze River

1.2 样品采集与分析

于 2019 年 4 月底(春季)、2019 年 7 月(夏季)、2019 年 10 月(秋季)和 2020 年 1 月初(冬季)分别采集样品。为尽可能保证水体透明度测定的准确性,采样前查询天气情况,尽可能保证每次采样期为弱风无雨的天气状况^[33]。为避免可能存在的藻类垂直分布对研究结果的影响,采样时,使用 2.5 L 采水器分别采集表层、中间水层和接近底层的水样各 5.0 L 后混合。接着,从 15.0 L 的混合湖水中随机各取 1.0 和 0.5 L 的水样,用冰块冷却,带回实验室用于叶绿素 a(Chl.a)浓度、总氮(TN)和总磷(TP)浓度的测定等。Chl.a 测定采用丙酮萃取法^[34],TN 和 TP 浓度的测定参照文献进行^[35]。

采集样品同时,现场用 YSI Professional Plus 手持式多参数水质分析仪测定水温(WT)、水体 pH 值、电导率等,用 Secchi-Disk 圆盘记录水体透明度(SD)。

1.3 数据分析

基于理化参数(SD、TP 和 TN)和 Chl.a 的各营养状态指数值($TSI(SD/Chl.a/TP)$, $TSIm(SD/Chl.a/TP)$, $TLI(SD/Chl.a/TP/TN)$ 和 $EI(SD/Chl.a/TP/TN)$)的计算分别参照文献进行^[11-13,17],均取各营养状态指数的年均值用于后续的统计分析。

利用线性回归法分析各湖泊的 Chl.a 年均值与 TN、TP 和 SD 的年均值之间的关系,对不符合正态分布的数据进行了对数转化。运用单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较法分析基于水体理化因子(SD、TN 和 TP)和基于 Chl.a 的营养状态指数得分间的差异性。多重比较采用 Tukey-Test 法(方差齐)或 Games-Howell 法(方差不齐)。若基于理化参数与基于 Chl.a 的 TSI 、 $TSIm$ 、 TLI 和 EI 营养状态指数得分间的差异性显著,则基于 TSI 、 $TSIm$ 和 TLI 的基础方程并根据本研究 $\ln SD - \ln Chl.a - \ln TP$ (TN) 的回归关系,通过相互替换获得重构方程($TSIr$ 、 $TSImr$ 和 $TLIr$),并再次根据重构方程比较基于水体理化参数和基于 Chl.a 的营养状态指数得分间的差异性,统计分析方法同上。

方程重构后,假定基于理化参数与基于 Chl.a 的 $TSIr$ 、 $TSImr$ 和 $TLIr$ 指数得分间均无显著性差异,则进一步分析各综合营养状态指数($TSIrc$ 、 $TSImrc$ 和 $TLIrc$)得分间是否一致,统计分析方法同上。 $TSIrc$ 和 $TSImrc$ 计算时采用等权法^[36]。 $TLIrc$ 计算时采用相关加权法,各理化参数($TLIrc$ (SD)、 $TLIrc$ (TN) 和 $TLIrc$ (TP))的权重系数根据公式 $W_j = r_{ij}^2 / \sum_{j=1}^m r_{ij}^2$ 计算获得^[13], r_{ij} 为第 j 种参数与基准参数 Chl.a 的相关系数, m 为评价参数的个数。根据本研究实测出的各理化参数与 Chl.a 间的 Pearson 相关系数获得的权重系数记为 W_1 ,相应的 $TLIr$ 得分记为 $TLIr_{c-1}$;根据文献中各理化参数与 Chl.a 间的相关系数获得的权重系数记为 W_2 ,相应的 $TLIr$ 得分记为 $TLIr_{c-2}$ 。所有数据分析均在 SPSS 16.0 软件中完成。以上数据分析思路见流程附图 I。

2 结果

2.1 本研究湖泊的富营养化参数背景值

本研究各环境变量均获得了 80 个数据。SD 在 0.10~1.30 m 之间变动(仅有 2.5% 的 SD>1.0 m),其年均值和中位数分别为(0.43 ± 20.22)和 0.40 m。Chl.a 在 3.64~312.13 $\mu\text{g/L}$ 之间变动(仅有 15% 的 Chl.a<10.0 $\mu\text{g/L}$,其中马鞍山秀山湖占 5%),其年均值和中位数分别为(37.21 ± 40.78)和 26.57 $\mu\text{g/L}$ 。TN 在 0.59~9.89 mg/L 间变动(仅有 8.8% 的 TN<0.7 mg/L),其年均值和中位数分别为(1.67±1.33)和 1.29 mg/L。TP 在 0.02~0.49 mg/L 间变动(仅有 5.0% 的 TP<0.02 mg/L),其年均值和中位数分别为(0.09 ± 0.07)和 0.07 mg/L。

2.2 lnSD–lnChl.a–lnTP (TN) 间的回归关系

线性回归分析结果表明,所研究湖泊中,lnSD–lnChl.a–lnTN (TP) 间均呈显著的线性关系;TP 解释了 73% 的 Chl.a 变化,TN 解释了 47% 的 Chl.a 变化,Chl.a 解释了 50% 的 SD 变化(图 2)。

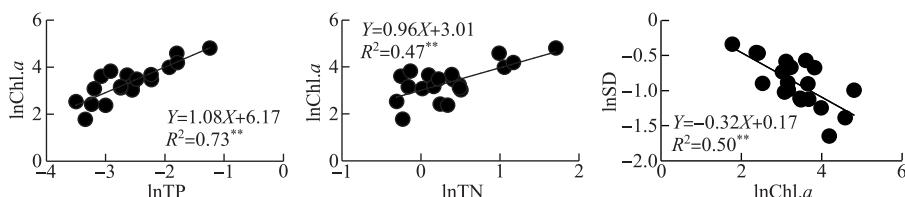


图 2 长江下游小型浅水湖泊中 SD–Chl.a–TP (TN) 间的对数回归关系 (** : $P<0.01$)

Fig.2 The linear regression models of lnSD–lnChl.a–lnTP (TN) of the small shallow lakes in the lower reach of the Yangtze River(** : $P<0.01$)

2.3 基于理化指标(SD、TN 和 TP)与基于 Chl.a 的营养状态指数评估结果比较

2.3.1 基于 SD 和 TP 与基于 Chl.a 的 TSI (TSIm) 得分年均值间比较 单因素方差分析和多重比较结果表明,所研究湖泊中,TSI(SD) 得分显著高于 TSI(Chl.a) 的分值,而 TSI(TP) 与 TSI(Chl.a) 得分间无显著性差异(图 3A); TSIm(SD) 和 TSIm(TP) 的得分均显著高于 TSIm(Chl.a) 得分(图 3B)。

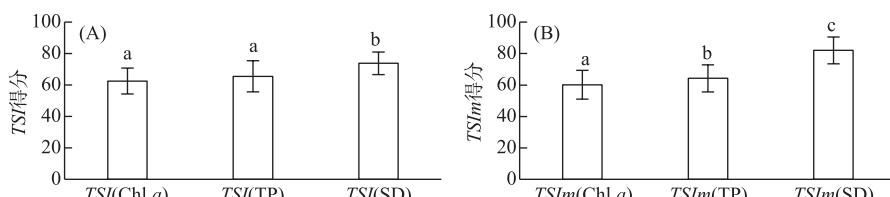


图 3 长江下游小型浅水湖泊的 TSI 指数(A)、TSIm 指数(B)得分(平均数±标准差)
(不同小写字母表示不同营养状态指数得分间存在显著性差异。下同)

Fig.3 The scores of TSI (A) and TSIm (B) indices (Mean±SD) of the small shallow lakes in the lower reach of the Yangtze River (Different lower-case letters indicate that there are significant differences among the scores of different trophic level indices. The same see below)

2.3.2 TLI(SD)、TLI(TN)、TLI(TP) 与 TLI(Chl.a) 得分间比较 单因素方差分析和多重比较结果表明,所研究湖泊中,TLI(SD) 得分显著高于 TLI(Chl.a) 分值,TLI(TN) 的得分与 TLI(Chl.a) 间无显著性差异,TLI(TP) 的得分显著低于 TLI(Chl.a)(图 4A); EI(SD) 得分显著高于 EI(Chl.a) 得分,EI(TP) 的得分显著低于 EI(Chl.a) 的分值,EI(TN) 的得分显著高 EI(Chl.a)(图 4B)。

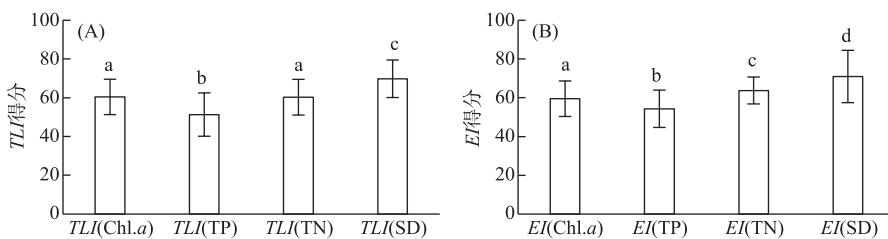


图 4 长江下游小型浅水湖泊的 TLI 指数(A)、EI 指数(B)得分

Fig.4 The scores of TLI (A), EI (B) indices of the small shallow lakes in the lower reach of the Yangtze River

3 讨论

3.1 长江下游小型浅水湖泊 Chl.a 变动的主要影响因子

湖泊中浮游植物生物量的时空变动受营养盐浓度、光照强度和水温等因素的影响, Chl.a 是反映水体浮游植物生物量的间接指标。在包括长江下游在内的中国东部平原湖库中, Chl.a 是否受氮磷营养盐和光照强度的限制取决于湖泊类型(湖泊深浅、水滞留时间长短等)^[16,37], 表现为当区分湖泊类型时, 利用简单线性回归方程发现小型浅水性湖泊中的 Chl.a 受氮磷营养盐共同限制^[16]; 当不区分湖泊类型时, 利用分位数回归模型发现, 湖泊 Chl.a 受何种营养盐限制与被研究湖泊的水深有关^[37]。从本研究的简单线性回归方程看(图 2), 长江下游 14 个浅水湖泊的 Chl.a 可能更偏向于受氮磷共限制。当然, 受人力等因素限制, 本研究的湖泊数不多, 每个湖泊设置的采样点数也偏少, 客观上可能影响了对长江下游浅水湖泊 Chl.a 变动限制因子的判断。

水温对湖泊 Chl.a 变动具有较为明显的影响。一般认为, 受低温影响, 亚热带湖泊中冬季 Chl.a 浓度最低^[33,38]。正因为如此, 为消除水温对 TP(TN)-Chl.a 关系的干扰, 在探讨湖泊营养水平评估指数可靠性研究中多以夏季湖泊为研究水体^[10]。但前期分析结果表明, 本研究的 14 个浅水湖泊的 Chl.a 在 4 个季节间并没有显著性差异; 且在冬季, TP 解释了 76% 的 Chl.a 变化^[32]。有调查发现, 尚湖中冬季浮游植物密度和生物量仅低于夏季^[39]; 南京市玄武湖、月牙湖、琵琶湖的冬季浮游植物平均密度仅低于春季或夏季^[40], 而前湖的冬季浮游植物平均密度低于秋季但与春季间差距并不大^[41]; 长江下游干流中, 浮游植物密度和生物量反而在冬季最高^[41]。上述有关长江下游冬季水体中浮游植物现存量较高的原因与其中的浮游植物群落在冬季均以硅藻占优势有关^[39-41], 因为研究发现硅藻适宜在低温环境中生存^[42]。因此, 推测本研究湖泊冬季 Chl.a 与其他 3 个季节间无显著性差异的原因可能是, 冬季水体浮游植物群落中以硅藻占优势。当然, 需要今后进一步调查这些湖泊浮游植物物种组成及其现存量的季节动态予以证实。

3.2 基于理化指标(SD、TN 和 TP)与基于 Chl.a 的单参数营养状态指数得分差异的原因

经典的 TSI、TSIm、TLI 和 EI 营养状态指数方程构建是以被研究的原初湖泊的 SD-Chl.a-TP(TN) 的线性关系为重要依据。然而, 由于全球各地湖泊生态背景差异较大, 造成了水体 Chl.a 和理化指标之间的响应关系有时偏离了 TSI、TSIm、TLI 和 EI 经典方程构建时的线性关系^[43-45]。在此情况下, 基于水体理化指标(TN、TP 和 SD 等)和基于 Chl.a 的评估结果间常存在不匹配现象^[10], 导致依据理化指标的评估结果常会误判湖泊的实际富营养化水平和相关风险^[10]。

本研究湖泊中, TSI(SD)、TSIm(SD)、TLI(SD) 和 EI(SD) 年均值均分别显著高于 TSI(Chl.a)、TSIm(Chl.a)、TLI(Chl.a) 和 EI(Chl.a), 表明基于 SD 的评估结果高估了湖泊的实际富营养化水平。从本研究的 lnChl.a-lnSD 间的回归关系看, 二者之间呈现显著的负相关关系, 且 Chl.a 解释了 50% 的 SD 变化(图 2), 说明了藻类的“遮挡”效应仅能解释湖泊透明度下降的一半原因。有研究表明, 在包括长江下游在内的中国东部平原湖库中, 无机悬浮物浓度(ISS)与水深之间呈现显著负相关关系, 且其在水深低于 2.0 m 的湖泊中更为明显^[37]。本研究中的大多数湖泊水深均低于 2.0 m^[32], 因此可以推测在本研究的浅水湖泊中, 沉

积物的再悬浮导致水体中的 ISS 浓度较高,这种非藻浊度(non-algal turbidity)因素削弱了藻类对水体透明度影响的敏感性,从而导致了基于 SD 的各营养状态指数得分均显著高于基于 Chl.a 的得分。

营养盐是否具有富营养化现状及风险评估的意义首先取决于其是否是相应水体藻类生物量的限制因子^[10]。本研究的湖泊中,尽管基于 TN 和 Chl.a 的年均值,发现 TN 解释了 47% 的 Chl.a 变化(图 2)。但若以各样点 TN 和 Chl.a 的测定值为依据,发现 TN 仅能解释 24% 的 Chl.a 变化(未发表数据);且通过多元线性回归分析发现,仅 TP 对周年 Chl.a 变动影响最大,而 TN 被排除出回归方程^[32]。这就说明了本研究湖泊中 TN 对 Chl.a 变动的影响并不是很大。究其原因,可能与本研究的湖泊数有限、每个湖泊的样点数不多有关。因此,尽管本研究发现 $TLI(TN)$ 与 $TLI(Chl.a)$ 得分间无显著差异,但并不能确定 $TLI(TN)$ 的评估结果就能反映湖泊的实际富营养化水平,况且 $EI(TN)$ 分值显著高于 $EI(Chl.a)$ 分值。今后需要采集更多湖泊的样品,尽量增加采样湖泊的样点数,同时视情况采用分位数回归法在分布上界(95 分位及以上)构建 TN 与 Chl.a 之间的回归方程^[43],以更加合理地探讨基于 TN 的营养状态指数在湖泊富营养化水平评估中的适宜性。

从基于 TP 的营养状态指数的评估结果看,基于 TP 与基于 Chl.a 的得分间的差异性取决于营养状态指数类型。本研究湖泊中, $TLI(TP)$ 与 $EI(TP)$ 的得分分别显著低于 $TLI(Chl.a)$ 和 $EI(Chl.a)$ 的得分,这说明基于 TP 的 TLI 和 EI 指数均低估了湖泊的实际富营养化水平,表明 Chl.a 对营养盐的利用效率比 TLI 和 EI 指数构建所对应湖泊中的效率更高^[10]。同时,从 $\ln TP(TN) - \ln Chl.a$ 的回归方程看,本研究湖泊中藻类偏向受氮磷共同限制(因为 $\ln TN - \ln Chl.a$ 回归方程的 $R^2 = 0.47$ 且 $P < 0.01$), TN 对藻类生物量的影响可能削弱了 Chl.a 对 TP 响应的敏感性。然而, $TSIm(TP)$ 得分却显著高于 $TSIm(Chl.a)$ 。由于 $TSIm$ 方程构建时是以日本湖泊的监测数据为基础,而 TLI 和 EI 的相关方程构建所依赖的源环境变量均来自中国湖泊,两国湖泊间的背景差异使得 SD-TP-Chl.a 间的关系可能并不一致,这或许是导致本研究 $TSIm(TP)$ 得分高于 $TSIm(Chl.a)$ 得分的重要原因。值得注意的是, $TSI(TP)$ 与 $TSI(Chl.a)$ 得分间无显著差异,但作者认为 $TSI(TP)$ 并不一定适合于我国长江下游小型湖泊营养状态的评价,因为 TSI 指数构建原理是以 SD 指示 Chl.a 浓度,此指数主要适用于深水湖库的营养水平评估^[11],而本研究的湖泊均是浅水湖泊,SD 不但受到 Chl.a 浓度影响,可能还与水体中较高 ISS 浓度密切相关。

3.3 长江下游中小型浅水湖泊营养水平评估的建议

由于自然湖泊中 SD-Chl.a-TP(TN) 关系的多样性,使得基于理化指标的评估结果往往不能反映湖泊的真实营养状态,因此有学者建议建立“一类一策”的湖泊营养状态评估方法^[10,24]。本研究结果表明,不管采用哪个营养状态指数,基于理化指标的评估结果都难以反映湖泊的实际富营养化水平,因而根据本研究的 $\ln SD - \ln Chl.a - \ln TP(TN)$ 的回归方程,重构获得了湖泊的 $TSIr$ 、 $TSImr$ 和 $TLIr$ 指数方程(表 1)。需要说明的是,由于 EI 指数方程的构建并不是基于实测值的 SD-Chl.a-TP(TN) 关系,因此没有重构 EI 指数方程。

表 1 长江下游小型浅水湖泊营养状态指数的重构方程($TSIr/TSImr/TLIr$)

Tab.1 Reconstruction models of the trophic state index ($TSIr/TSImr/TLIr$)
of the small shallow lakes in the lower reach of the Yangtze River

$TSIr$ 方程	$TSImr$ 方程	$TLIr$ 方程
$TSIr(Chl.a) = 10 \times \left(6 + \frac{0.32 \ln Chl.a - 0.17}{\ln 2} \right)$	$* TSImr(Chl.a) = 10 \times \left(2.46 + \frac{\ln Chl.a}{\ln 2.5} \right)$	$* TLIr(Chl.a) = 10 \times (2.5 + 1.086 \ln Chl.a)$
$* TSIr(SD) = 10 \times \left(6 - \frac{\ln SD}{\ln 2} \right)$	$TSImr(SD) = 10 \times \left(2.46 + \frac{0.53 - 3.13 \ln SD}{\ln 2.5} \right)$	$TLIr(SD) = 10 \times (3.03 - 3.13 \ln SD)$
$TSIr(TP) = 10 \times \left(6 + \frac{0.35 \ln TP + 1.80}{\ln 2} \right)$	$TSImr(TP) = 10 \times \left(2.46 + \frac{1.08 \ln TP + 6.17}{\ln 2.5} \right)$	$TLIr(TP) = 10 \times (1.17 \ln TP + 9.20)$
		$** TLIr(TN) = 10 \times (1.69 \ln TN + 5.45)$

* :分别是 TSI 、 $TSIm$ 和 TLI 的基础方程,非重构方程。 ** :由于本研究中 TN 对 Chl.a 变化的解释度低于 50%,因此 $TLIr(TN)$ 方程仍然沿用原始方程^[11]。

采用重构方程后,基于理化指标(SD、TN 和 TP)与基于 Chl.a 的营养状态指数得分间均无显著性差异(附

图Ⅱ),说明上述3个指数的重构方程在湖泊富营养化水平评估中具有一定的应用价值。但是在实际应用过程中,人们常用的是基于多个环境变量的综合营养状态指数($TSIc$ 或 $TSImc$ 或 $TLIc$ 或 EIc)得分,而不是基于单个环境变量的湖泊营养状态指数^[8,17-19]。基于重构方程,进一步通过等权平均法或者加权平均法获得基于TN、TP、SD和Chl.a的综合营养状态指数得分,发现 $TSIrc$ 得分年均值显著高于 $TSImrc$ 和 $TLIrc$ 的分值,而后两者间无显著差异(附图Ⅲ)。然而,本研究湖泊中Chl.a浓度的年均值为37.21 μg/L^[32]。从 TSI 、 $TSIm$ 和 TLI 方程构建依据的源数据的营养状态指数赋分看,该Chl.a浓度对应的 TSI 、 $TSIm$ 和 TLI 的分值均在60~70间^[11-13],而本研究的 $TSIrc$ 年均值为73.00±4.32,这说明基于本研究重构方程的 $TSIc$ 得分显然高估了湖泊的实际富营养化水平和相关风险。结合 TSI 指数构建的生态学原理(具体见本文前言部分),建议在我国长江下游中小型浅水湖泊营养水平评估中,不宜采用 TSI 指数。

表2 基于 TLI 湖泊营养状态指数的各评价参数的归一化相关权重

Tab.2 Normalized correlation weight of each of the assessment parameters based on lake trophic level index of TLI

权重系数	TLI (Chl.a)	TLI (TN)	TLI (TP)	TLI (SD)
W_{j1}	0.370	0.174	0.270	0.185
W_{j2}	0.326	0.230	0.219	0.225

III)。从简便性角度出发,建议在利用 $TLIrc$ 指数评估长江下游小型浅水湖泊富营养化水平时,可以考虑以直接引用文献数据获得的归一化相关权重(W_{j2})计算 $TLIrc$ 指数得分。

当然,本文所有分析和讨论的前提是:Chl.a是湖泊富营养化状态的最终指示。因此,藻类Chl.a测定的准确性就显得尤为重要。当前藻类Chl.a浓度测定的方法较多,测定用的萃取剂有乙醇和丙酮等多种,藻类细胞的破碎方法也不尽相同,因而导致测定出的Chl.a浓度可能存在差异。比如:有研究发现,以乙醇为萃取溶剂所获Chl.a浓度显著高于以丙酮作为提取溶剂的浓度^[46];以采用反复冻融、浸提的方法提取出的Chl.a浓度比传统使用的研磨法的结果更准确^[47]。尽管如此,近期不少研究仍然用丙酮作为萃取剂来测定藻类Chl.a浓度^[48-49]。因此建议有关学术机构与政府部门联合发布湖泊藻类Chl.a提取和测定的标准方法,以避免因Chl.a浓度测定方法的偏差导致误判了湖泊的实际营养水平。并且,有研究表明,浅水湖泊的Chl.a浓度在较短的采样周期内甚至在同一天的不同时刻,都可能因环境因素的变化产生较大波动^[50-51]。因此建议相关学者还要考虑制定统一的采样频次标准,以便能更准确地评估湖泊的营养状态。

4 结论

- 1) 基于理化指标的营养状态指数普遍误判了长江下游小型浅水湖泊的实际营养状态。
- 2) 根据 $\ln SD - \ln Chl.a - \ln TP$ (TN)间的回归关系重构了长江下游小型浅水湖泊的营养状态指数方程(TSI_r 、 $TSIm_r$ 和 TLI_r)。基于理化指标与基于Chl.a的 $TSIm_r$ 和 TLI_r 的营养状态指数得分间均无显著性差异。综合水体实测Chl.a浓度及基于多参数的综合营养状态指数($TSImrc$ 和 $TLIrc$)得分,建议考虑应用 $TSImrc$ 和 $TLIrc$ 指数来评估我国长江下游小型浅水湖泊的富营养化水平。

5 附录

附图Ⅰ~Ⅲ见电子版(DOI: 10.18307/2023.0411)。

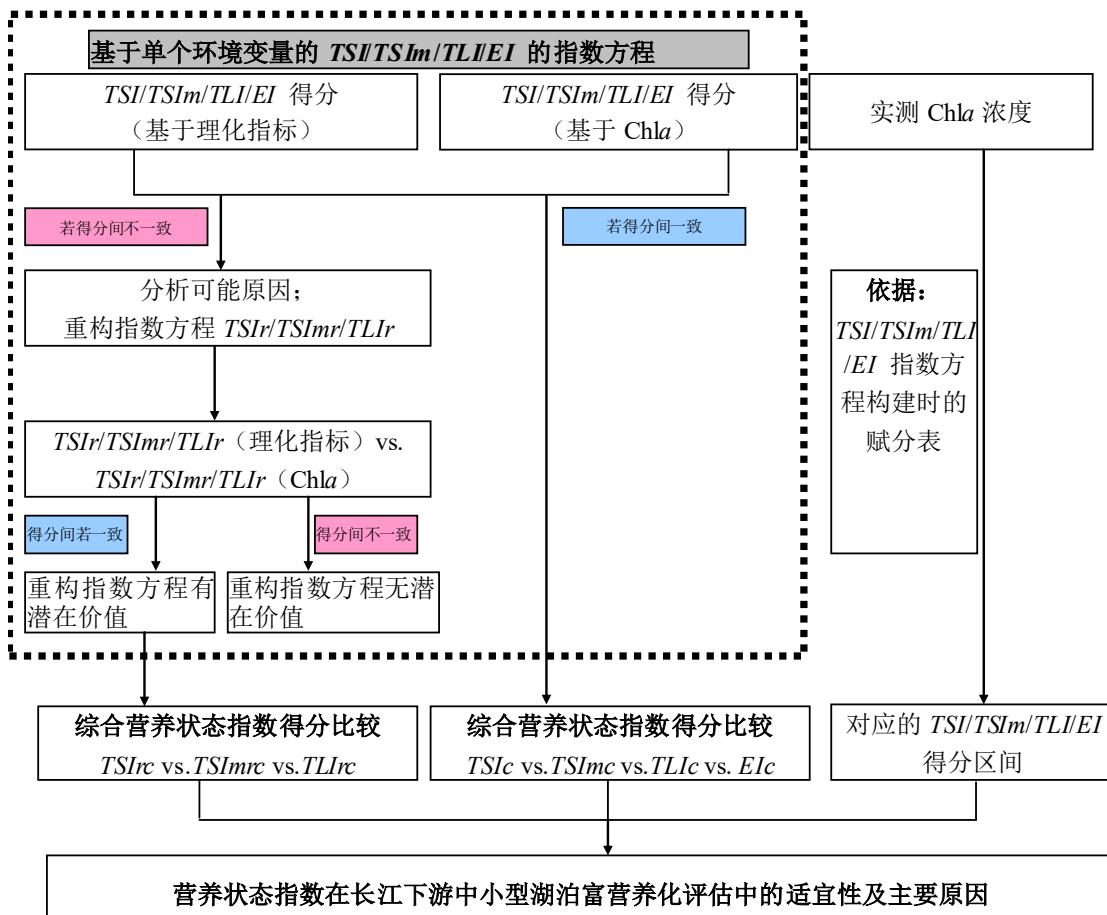
6 参考文献

- [1] Downing JA, Prairie YT, Cole JJ et al. The global abundance and size distribution of lakes, ponds and impoundments. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(5): 2388-2397. DOI: 10.4319/lo.2006.51.5.2388.
- [2] Chang NN, Luo L, Wang XC et al. A novel index for assessing the water quality of urban landscape lakes based on water transparency. *Sci-*

同样基于重构方程,发现本研究湖泊中的综合营养状态指数得分间($TSImrc$ vs. $TLIrc$)无显著性差异且其分值均在60~70之间,这与水体Chl.a浓度(37.21 μg/L)对应的 $TSIm$ (Chl.a)和 TLI (Chl.a)得分区间一致。因此,建议考虑应用 $TSImrc$ 和 $TLIrc$ 指数来评估我国长江下游小型浅水湖泊的富营养化水平。需要特别说明的是,基于本研究环境因子实测值的归一化相关权重(W_{j1})和基于直接引用文献数据的相关权重(W_{j2})(表2),分别计算出了 TLI_{r-1} 与 TLI_{r-2} 的得分,并发现后两者间无显著性差异(附图

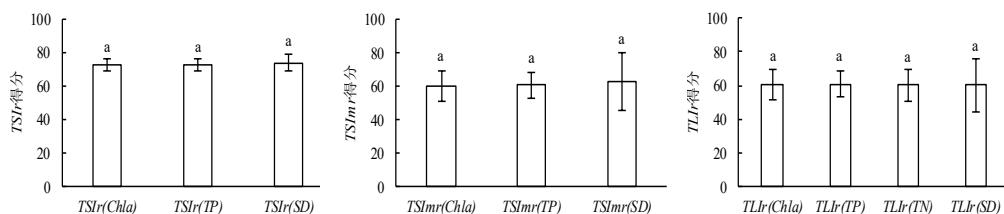
- ence of the Total Environment, 2020, **735**: 139351. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139351.
- [3] Conley DJ, Paerl HW, Howarth RW et al. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus. *Science*, 2009, **323**(5917): 1014-1015. DOI: 10.1126/science.1167755.
- [4] Dodds WK, Smith VH. Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in streams. *Inland Waters*, 2016, **6**(2): 155-164. DOI: 10.5268/iw-6.2.909.
- [5] Ji PF, Xu H, Zhan X et al. Spatial-temporal variations and driving of nitrogen and phosphorus ratios in lakes in the middleand lower reaches of Yangtze River. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4030-4041. DOI: 10.13227/j.hjkx.202002017. [季鹏飞, 许海, 詹旭等. 长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素. 环境科学, 2020, **41**(9): 4030-4041.]
- [6] Qin BQ. Shallow lake limnology and control of eutrophication in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1229-1243. DOI: 10.18307/2020.0501. [秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1229-1243.]
- [7] USEPA. National Lakes Assessment: A Collaborative Survey of the Nations Lakes. Technical Report, US Environmental Protection Agency, 2009.
- [8] Wang JL, Fu ZS, Qiao HX et al. Assessment of eutrophication and water quality in the estuarine area of Lake Wuli, Lake Taihu, China. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**(Pt 1): 1392-1402. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.137.
- [9] Liang ZY, Soranno PA, Wagner T. The role of phosphorus and nitrogen on chlorophyll *a*: Evidence from hundreds of lakes. *Water Research*, 2020, **185**: 116236. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116236.
- [10] Zou W, Zhu GW, Cai YJ et al. The limitations of comprehensive trophic level index (*TLI*) in the eutrophication assessment of lakes along the middle and lower reaches of the Yangtze River during summer season and recommendation for its improvement. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 36-47. DOI: 10.18307/2020.0104. [邹伟, 朱广伟, 蔡永久等. 综合营养状态指数(*TLI*)在夏季长江中下游湖库评价中的局限及改进意见. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 36-47.]
- [11] Carlson RE. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22**(2): 361-369. DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
- [12] Aizaki M, Otsuki A, Fukushima T et al. Application of Carlson's trophic state index to Japanese Lakes and relationships between the index and other parameters. *SIL Proceedings*, 1922-2010, 1981, **21**(1): 675-681. DOI: 10.1080/03680770.1980.11897067.
- [13] 金相灿, 刘树坤, 章宗涉等. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [14] Duan HT, Zhang YZ, Zhang B et al. Assessment of chlorophyll-a concentration and trophic state for Lake Chagan using landsat TM and field spectral data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **129**(1): 295-308. DOI: 10.1007/s10661-006-9362-y.
- [15] Zheng XD, Teng YG, Song LT. Iron isotopic composition of suspended particulate matter in Hongfeng Lake. *Water*, 2019, **11**(2): 396. DOI: 10.3390/w11020396.
- [16] Zou W, Zhu GW, Cai YJ et al. Relationships between nutrient, chlorophyll *a* and Secchi depth in lakes of the Chinese Eastern Plains ecoregion: Implications for eutrophication management. *Journal of Environmental Management*, 2020, **260**: 109923. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109923.
- [17] 中华人民共和国水利部. 地表水资源质量评价技术规程: SL 395—2007. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [18] Lin JL, Karangan A, Huang YM et al. Eutrophication factor analysis using Carlson trophic state index (CTSI) towards non-algal impact reservoirs in Taiwan. *Sustainable Environment Research*, 2022, **32**(1): 1-12. DOI: 10.1186/s42834-022-00134-x.
- [19] Ji B, Liang JC, Chen R. Bacterial eutrophic index for potential water quality evaluation of a freshwater ecosystem. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(26): 32449-32455. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.06.028.
- [20] Philips EJ, Cichra M, Havens K et al. Relationships between phytoplankton dynamics and the availability of light and nutrients in a shallow sub-tropical lake. *Journal of Plankton Research*, 1997, **19**(3): 319-342. DOI: 10.1093/plankt/19.3.319.
- [21] Lind OT. The effect of non-algal turbidity on the relationship of Secchi depth to chlorophyll *a*. *Hydrobiologia*, 1986, **140**(1): 27-35. DOI: 10.1007/BF00006726.
- [22] Swift TJ, Perez-Losada J, Schladow SG et al. Water clarity modeling in Lake Tahoe: Linking suspended matter characteristics to Secchi depth. *Aquatic Sciences*, 2006, **68**(1): 1-15. DOI: 10.1007/s0027005-0798-x.
- [23] Huo SL, Ma CZ, Xi BD et al. Lake ecoregions and nutrient criteria development in China. *Ecological Indicators*, 2014, **46**: 1-10. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.06.014.
- [24] 宫莹. 城市小型浅水湖泊水环境预测方法应用研究[学位论文]. 南京: 河海大学, 2004.
- [25] Chang NN, Zhang QH, Wang Q et al. Current status and characteristics of urban landscape lakes in China. *Science of the Total Environment*, 2020, **712**: 135669. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135669.
- [26] 国家统计局. 中国第三产业统计年鉴——2019. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [27] Wang W, Zhang T, Wang XW et al. Spatial and temporal pattern of urban ecological carrying capacity in Yangtze River economic zone. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(12): 1963-1971. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201712004. [王维, 张涛, 王晓伟等. 长江经济带城市生态承载力时空格局研究. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(12): 1963-1971.]
- [28] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.

- [29] Wu SK, Xie P, Liang SB *et al.* Relationships between microcystins and environmental parameters in 30 subtropical shallow lakes along the Yangtze River, China. *Freshwater Biology*, 2006, **51**(12) : 2309-2319. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2006.01652.x.
- [30] Wen XL, Xi YL, Qian FP *et al.* Comparative analysis of rotifer community structure in five subtropical shallow lakes in East China: Role of physical and chemical conditions. *Hydrobiologia*, 2011, **661**(1) : 303-316. DOI: 10.1007/s10750-010-0539-6.
- [31] Qin BQ, Gao G, Zhu GW *et al.* Lake eutrophication and its ecosystem response. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(10) : 855-864. DOI: 10.1360/csb2013-58-10-855. [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.]
- [32] Wu BW, Dai SN, Wen XL *et al.* Chlorophyll-nutrient relationship changes with lake type, season and small-bodied zooplankton in a set of subtropical shallow lakes. *Ecological Indicators*, 2022, **135** : 108571. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108571.
- [33] Wen XL, Feng RN, Zhang G *et al.* Temporal variations of chlorophyll-a concentration and their relationships with abiotic and biotic factors in two small shallow lakes. *J Lake Sci*, 2017, **29**(6) : 1421-1432. DOI: 10.18307/2017.0614. [温新利, 冯若楠, 张根等. 两小型浅水湖泊水体叶绿素 a 浓度的季节变化及与理化因子和生物因子的关系. 湖泊科学, 2017, **29**(6) : 1421-1432.]
- [34] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [35] American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, vol. 21. Washington, DC: American public health association, 1995.
- [36] Kratzer CR, Brezonik PL. A carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Journal of the American Water Resources Association*, 1981, **17**(4) : 713-715. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1981.tb01282.x.
- [37] Zou W, Zhu GW, Xu Hai *et al.* Elucidating phytoplankton limiting factors in lakes and reservoirs of the Chinese Eastern Plains ecoregion. *Journal of Environmental Management*, 2022, **318** : 115542. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115542.
- [38] Xun SP, Yang YJ, He BF *et al.* Analysis of relationship between spring water temperature and chlorophyll-a in Lake Chaohu. *J Lake Scis*, 2011, **23**(5) : 767-772. DOI: 10.18307/2011.0515. [荀尚培, 杨元建, 何彬方等. 春季巢湖水温和水体叶绿素 a 浓度的变化关系. 湖泊科学, 2011, **23**(5) : 767-772.]
- [39] 杨金艳, 徐勇, 高晓平等. 尚湖浮游植物时空变化特征及影响因素分析. *江苏水利*, 2017, **12** : 1-6.
- [40] 许海. 河湖水体浮游植物群落生态特征与富营养化控制因子研究[学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [41] 沈蓉蓉. 长江下游干流浮游植物分布格局及其与环境因子相关性[学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2019.
- [42] Jung SW, Kwon OY, Lee JH *et al.* Effects of water temperature and silicate on the winter blooming diatom *Stephanodiscus hantzschii* (Bacillariophyceae) growing in eutrophic conditions in the lower Han River, South Korea. *Journal of Freshwater Ecology*, 2009, **24**(2) : 219-226. DOI: 10.1080/02705060.2009.9664286.
- [43] Xu YY, Schroth AW, Rizzo DM. Developing a 21st Century framework for lake-specific eutrophication assessment using quantile regression. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2015, **13**(5) : 237-249. DOI: 10.1002/lom3.10021.
- [44] Cunha DGF, Calijuri M do C, Lamparelli MC. A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSI_{sr}). *Ecological Engineering*, 2013, **60** : 126-134. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.07.058.
- [45] Pomari J, Kane DD, Nogueira MG. Application of multiple-use indices to assess reservoirs water quality and the use of plankton community data for biomonitoring purposes. *International Journal of Hydrology*, 2018, **2**(2) : 168-179. DOI: 10.15406/ijh.2018.02.00065.
- [46] Chen YW, Gao XY. Comparison of two methods for phytoplankton chlorophyll-a concentration measurement. *J Lake Sci*, 2000, **12**(2) : 185-188. DOI: 10.18307/2000.0215. [陈宇炜, 高锡云. 浮游植物叶绿素 a 含量测定方法的比较测定. 湖泊科学, 2000, **12**(2) : 185-188.]
- [47] Lin SJ, He LJ, Huang PS *et al.* Comparison and improvement on the extraction method for chlorophyll a in phytoplankton. *Ecological Science*, 2005, **1** : 9-11. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8873.2005.01.003. [林少君, 贺立静, 黄沛生等. 浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进. 生态科学, 2005, **1** : 9-11.]
- [48] Brezonik PL, Bouchard RW, Finlay JC *et al.* Color, chlorophyll a, and suspended solids effects on Secchi depth in lakes: Implications for trophic state assessment. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2019, **29**(3) : e01871. DOI: 10.1002/eap.1871.
- [49] Mamun M, Kwon S, Kim JE *et al.* Evaluation of algal chlorophyll and nutrient relations and the N:P ratios along with trophic status and light regime in 60 Korea Reservoirs. *Science of the Total Environment*, 2020, **741** : 140451. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140451.
- [50] Zhang YC, Hu MQ, Shi K *et al.* Sensitivity of phytoplankton to climatic factors in a large shallow lake revealed by column-integrated algal biomass from long-term satellite observations. *Water Research*, 2021, **207** : 117786. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117786.
- [51] Xu YF, Chen LM, Chen LG *et al.* High temporal resolution remote monitoring of chlorophyll a concentration change after rainstorm based on GOCCI data in Lake Taihu. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, **51**(10) : 151-158. [徐祎凡, 陈黎明, 陈炼钢等. 基于 GOCCI 数据的暴雨后太湖水体叶绿素 a 浓度遥感反演研究. 水利水电技术, 2020, **51**(10) : 151-158.]



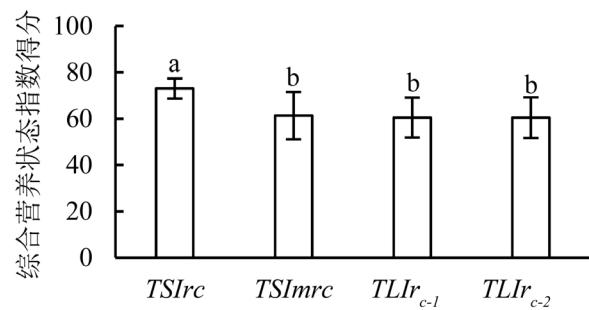
附图 I 本研究数据分析流程

Attached Fig. I The flowchart for data analysis in this study



附图 II 长江下游小型浅水湖泊 $TSIr$ 、 $TSImr$ 和 $TLIr$ 指数得分 (平均数±标准差) (不同小写字母表示不同营养状态指数得分间存在有显著性差异. 下同)

Attached Fig. III The scores of $TSIr$, $TSImr$ and $TLIr$ indices (Mean±SD) of the small shallow lakes in the lower reach of the Yangtze River (Mean±SD). Different lower-case letters indicate that there are significant differences among the scores of different trophic level indices. The same see below



附图 III 长江下游小型浅水湖泊 $TSIrc$ 、 $TSImrc$ 、 $TLIr_{c-1}$ 和 $TLIr_{c-2}$ 指数得分 (平均数±标准差)
Attached Fig.III The scores of $TSIrc$, $TSImrc$, $TLIr_{c-1}$ and $TLIr_{c-2}$ indices (Mean±SD) of the small shallow
lakes in the lower reach of the Yangtze River (Mean±SD)