doi:10.16112/j.cnki.53-1223/n.202601090002
引用格式:施艳峰,马俊,翟竟余,等.藻类调控下杞麓湖水体化学需氧量的赋存形态特征[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2026,51(3):137-146.
Citation:SHI Yanfeng,MA Jun,ZHAI Jingyu,et al. Characteristics of Chemical Oxygen Demand Occurrence Forms in Qilu Lake Under Algal Regulation[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science),2026,51(3):137-146.

藻类调控下杞麓湖水体化学需氧量的赋存形态特征

施艳峰,马 俊,翟竟余,艾德平,金 星,赵海茜,刘绍俊*
(云南省生态环境厅驻玉溪市生态环境监测站,云南 玉溪 653100)

摘要:为探究藻类调控下杞麓湖水体化学需氧量(COD)的赋存形态特征,基于2024年4月至2025年3月的月度调查数据,分析了杞麓湖水体总COD(TCOD)、颗粒态COD(PCOD)、溶解态COD(DCOD)、藻类总密度和微囊藻密度的周年变化特征,并采用Spearman相关分析和一元线性回归分析探讨了其相互关系.同时,通过季节性的分级过滤实验,解析了不同季节PCOD来源的粒径(d)组成特征.结果表明:杞麓湖藻类总密度和微囊藻密度变化范围分别为2.29×10^8~5.73×10^8 cells/L和7.20×10^7~5.28×10^8 cells/L,年均值分别为3.99×10^8 cells/L和3.09×10^8 cells/L.TCOD浓度全年处于高位(44~85 mg/L,均值60 mg/L),其变化受PCOD主导.Spearman相关分析显示,TCOD、PCOD与藻类总密度、微囊藻密度均呈极显著正相关($P<0.01$);DCOD与微囊藻密度呈极显著正相关($P<0.01$),与藻类总密度呈显著正相关($P<0.05$).基于回归方程估算,杞麓湖全藻类细胞对PCOD的年均贡献量为26 mg/L,贡献率达85.6%,其中微囊藻细胞贡献量占全藻类细胞贡献量的65.4%,表明藻源性PCOD是杞麓湖水体PCOD的主要来源.受藻类群落结构变化影响,PCOD粒径组成呈现明显的季节差异,夏、秋、冬季以$d>30$ μm的中、大型颗粒为主,春季0.45 μm$<d\leqslant$5 μm细小颗粒贡献率明显增加.综上,杞麓湖水体有机污染以藻源PCOD为主导,且其粒径分布受优势藻类形态调控.建议在坚持控源截污的同时,加强针对中、大型粒径藻类群体的定向物理移除,作为快速削减藻源内负荷、辅助降低水体COD浓度的可行措施.

关键词:杞麓湖;化学需氧量;藻类;微囊藻;Spearman相关分析
中图分类号:X524 **文献标识码**:A **文章编号**:1007-855X(2026)03-0137-10

Characteristics of Chemical Oxygen Demand Occurrence Forms in Qilu Lake Under Algal Regulation

SHI Yanfeng, MA Jun, ZHAI Jingyu, AI Deping, JIN Xing, ZHAO Haixi, LIU Shaojun*
(Yuxi Ecological Environment Monitoring Station, Yunnan Provincial Department of Ecology and Environment, Yuxi 653100, Yunnan, China)

Abstract: This study investigated the characteristics of chemical oxygen demand (COD) occurrence forms under algal regulation in Qilu Lake. Monthly survey data from April 2024 to March 2025 were analyzed to examine the annual variations of total COD (TCOD), particulate COD (PCOD), dissolved COD (DCOD), total algal density and *Microcystis* density, and then the relationships between different COD fractions and algal density were explored by Spearman correlation analysis and univariate linear regression analysis. Additionally, seasonal size-

收稿日期:2026-01-09. **基金项目**:云南省生态环境厅2023年省级环保专项资金(省对下)项目(云环通〔2023〕28号).
作者简介:施艳峰(1978-),男,硕士,高级工程师.主要研究方向:生态环境监测与管理. **E-mail**:26824142@qq.com
通信作者:刘绍俊(1985-),男,硕士,高级工程师.主要研究方向:水生生物监测与评价. **E-mail**:liushaojun998@126.com

fractionated filtration experiments were conducted to analyze the particle size (d) composition of PCOD source materials in different seasons. The results showed that the total algal density and *Microcystis* density in Qilu Lake ranged from 2.29×10^8 to 5.73×10^8 cells/L and 7.20×10^7 to 5.28×10^8 cells/L, with annual averages of 3.99×10^8 cells/L and 3.09×10^8 cells/L, respectively. The TCOD concentration remained at a high level throughout the year, ranging from 44 to 85 mg/L, with an annual average of 60 mg/L. Its annual variation was primarily driven by PCOD. Spearman correlation analysis revealed significant positive correlations between TCOD, PCOD and both total algal density and *Microcystis* density ($P < 0.01$); while DCOD exhibited a highly significant positive correlation with *Microcystis* density ($P < 0.01$) and a significant positive correlation with total algal density ($P < 0.05$). Further estimation based on the univariate linear regression equation showed that the average annual contribution of total algal cells to the PCOD in the lake water was 26 mg/L, accounting for 85.6% of the total. Among these, *Microcystis* cells contributed 65.4% of the total algal contribution, indicating that algal-derived PCOD is the primary source of PCOD in Qilu Lake. Influenced by seasonal changes in the algal community structure, the particle size composition of PCOD exhibited distinct seasonal variations. Medium and large particles ($d > 30$ μm) predominated in summer, autumn, and winter, while the contribution rate of fine particles (0.45 μm $< d \leqslant 5$ μm) increased markedly in spring. In conclusion, organic pollution in Qilu Lake is predominantly driven by algal-derived PCOD, and its particle size distribution is regulated by the morphology of the dominant algae. It is suggested that, while continuing to control external pollution inputs, targeted physical removal of medium and large algal aggregates should be strengthened as a feasible measure to rapidly reduce internal algal-derived loads and assist in lowering the COD concentration in the water.

Keywords: Qilu Lake; chemical oxygen demand; algae; *Microcystis*; Spearman correlation analysis

0 引 言

杞麓湖位于云南省玉溪市通海县境内,属珠江流域西江水系,是云南省九大高原湖泊之一[1]. 杞麓湖湖泊面积36.86 km^2,最大水深6.8 m,平均水深4.0 m,无明显的外流出口,为典型的封闭高原浅水湖泊[2],也是云南省九大高原湖泊中污染较严重的四个湖泊之一[3]. 湖泊补水主要依赖入湖河流、湖面降雨及大龙潭生态引水,其中红旗河、中河、大新河、者湾河等7条入湖河流是外源污染物输入的主要通道,流域内农业面源污水及农村与城镇生活污水携带的有机质(Organic Matter, OM)及N、P等营养物质持续高负荷输入,成为驱动杞麓湖富营养化的重要外源因子[4-5]. 同时,杞麓湖封闭、浅水及富营养化的特征导致污染物易累积、难扩散,在风浪扰动[6]、微生物活动[7]及藻类衰亡[8]等因素调控下,沉积物中的营养盐及OM易再次释放至水体,形成显著的内源污染,因此湖泊水质持续恶化. 据当地生态环境监测部门资料显示,杞麓湖综合水质类别在1990~2003年间以Ⅳ类为主,而2004~2009年间在Ⅳ~Ⅴ类间波动,2010~2019年间则在Ⅴ~劣Ⅴ类间波动. 2020年以来,水质持续处于劣Ⅴ类,化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)是导致其成为劣Ⅴ类的关键指标.

COD是指在强酸并加热的条件下,以重铬酸钾作为氧化剂处理水样时所消耗氧化剂的量,其值反映了水中受还原性物质(有机物、亚硝酸盐、硫化物等)污染的程度[9]. 作为我国水环境质量评价中有机耗氧污染的关键指标[10],其涵盖了水体溶解态有机质(Dissolved Organic Matter, DOM)和颗粒态有机质(Particulate Organic Matter, POM)被氧化所需的氧量[11]. COD根据赋存形态可进一步分为溶解态COD(Dissolved COD, DCOD)和颗粒态COD(Particulate COD, PCOD),二者共同构成总COD(Total COD, TCOD). 在富营养化湖泊的水质评价中,COD超标已成为普遍现象[12-13],因为高浓度的营养盐会促进藻类显著增殖,进而产生和释放大量的藻源性有机质(Algal-derived Organic Matter, AOM)[14],在外源污染被有效控制后,这些藻源负荷是引起水质指标,尤其是COD异常升高的重要原因之一[15-16]. 已有研究多集中于藻类对DOM的影响[17-19],对POM影响的关注相对不足. 事实上,POM作为水体OM的重要组成部分,其粒径(d) >0.45 μm[20],由多种胶体和颗粒物组成,包括来自内源和外源的活性与非活性物质[21]. 藻类通常被

认为是水体 POM 的重要来源[22]，尤其在夏、秋季节，藻类的增殖、衰亡及其降解产物可显著增加水体 POM 的含量，进而影响 POM 的时空分布[20,23]. 目前，尽管针对 POM 的组分特征及来源解析已开展了一系列研究[22,24]，但对于富营养化湖泊中藻类对 PCOD 的贡献及其粒径分布特征的研究仍较为鲜见，这在一定程度上制约了对藻型湖泊 COD 赋存形态与调控机制的解析.

杞麓湖作为典型的富营养化封闭高原浅水湖泊，近年来以微囊藻属（*Microcystis*）为绝对优势类群的蓝藻水华常年发生，尤其是在夏、秋高温季节，导致了湖泊生态系统的持续退化. 目前针对杞麓湖藻类与 OM 的相关研究较为有限，已有研究主要聚焦于：吴函鸿[25]对杞麓湖不同季节表层水体可溶性碳（Dissolved Organic Carbon，DOC）浓度进行了研究，发现秋季 DOC 含量较高，可能与藻类生长释放 AOM 及陆源输入有关. 金星等[4]基于 2023 ~ 2024 年杞麓湖水质监测数据，分析了微囊藻水华成因以及微囊藻密度与 COD 浓度之间的关系，表明微囊藻水华是杞麓湖 COD 长期居高不下的主要原因之一. 但现有研究尚未涉及杞麓湖水体 COD 赋存物质形态分异特征，未阐明藻类对各形态 COD 浓度的影响，尤其是对 PCOD 的周年贡献，也未揭示 PCOD 来源的粒径分布特征.

因此，本研究对杞麓湖水体进行周年动态调查，分析水体 TCOD、PCOD、DCOD、藻类总密度、微囊藻密度的周年变化特征，解析各形态 COD 浓度与藻类密度的相关性，估算周年内藻类细胞对水体 PCOD 浓度的贡献，同时探究不同季节 PCOD 来源物质粒径组成特征，以揭示藻类变化对杞麓湖 COD 的动态影响，为进一步了解该湖水体 COD 波动及有效削减情况提供基础数据支持.

1　材料与方法

1.1　样品采集与分析

全湖共设置 3 个调查点位（见图 1），分别为湖管站、湖心和马家湾，于 2024 年 4 月至 2025 年 3 月间，每月上旬对各点位表层（水面下 0.5 m）水样进行采集与分析. 其中 2024 年 4 月、5 月、7 月、8 月、10 月、11 月和 2025 年 1 月、2 月，COD 和藻类密度样品各取水样 1 L，采样结束后立即对样品进行处理. COD 样品充分摇匀后分成两份（各约 500 mL），其中一份用于 TCOD 浓度的测定，另一份在现场经 0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤后，用于 DCOD 浓度测定. 2024 年 6 月（夏季）、9 月（秋季）、12 月（冬季）和 2025 年 3 月（春季），藻类密度样品取水样 1 L，COD 和叶绿素 a（Chlorophyll a，Chla）样品各取水样 5 L，COD 和 Chla 样品现场充分摇匀后取约 500 mL 作为原始水样，其余样品逐级经不同孔径筛网（63 μm、30 μm、5 μm）和 0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤，各处理收集滤液约 500 mL，实验室测定原水（即未经处理的前述原始水样）及各滤液 TCOD、Chla 浓度. 筛网孔径的选择主要依据杞麓湖藻类优势类群形态大小实测值（微囊藻属群体直径或长轴为 28 ~ 582 μm；假鱼腥藻属（*Pseudanabaena*）藻丝长 8 ~ 75 μm、宽 1 ~ 3 μm）以及国家生态环境标准《地表水环境质量监测技术规范》（HJ 91.2—2022）[26]的相关要求综合确定.

TCOD 和 DCOD、Chla、藻类密度样品保存及测定方法分别依据国家环境保护标准《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》（HJ 828—2017）[27]、国家环境保护标准《水质 叶绿素 a 的测定 分光光度法》（HJ 897—2017）[28]、国家生态环境标准《水质 浮游植物的测定 0.1 mL 计数框 - 显微镜计数法》（HJ 1216—2021）[29]进行. PCOD 浓度参照陈友媛等[30]的差减法计算，即 PCOD 浓度等于 TCOD 浓度减去 DCOD 浓度. 0.45 μm 玻璃纤维滤膜对 DCOD 测定结果影响的排除参照李爱军等[12]的方法进行. 藻类的分类鉴定参考《中国淡水藻类——系统、分类及生态》[31]等资料进行，样品鉴定到属水平.

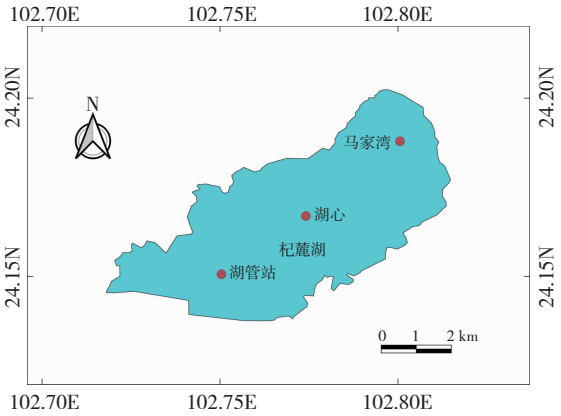


图 1　采样点位分布

Fig. 1　Distribution of sampling sites

1.2 数据处理及分析

将所有数据在 Excel 2007 中建立基础数据库,采用 SPSS 27.0 对周年内杞麓湖水体 TCOD、PCOD、DCOD 浓度与藻类总密度、微囊藻密度进行相关性分析. 相关性分析前,对所有变量进行 Shapiro – Wilk 正态性检验,结果显示,变量 TCOD 和 PCOD 不满足正态分布,因此选用非参数的 Spearman 秩相关分析检验各变量间的相关性. 为估算周年内杞麓湖藻类对水体 PCOD 浓度的贡献,进一步以 PCOD 浓度为因变量,分别以藻类总密度和微囊藻密度为自变量建立一元线性回归方程. 建立前,通过散点图检验变量间的线性假设;建立后,通过标准化残差图检验方差齐性,残差 P – P 图和直方图检验残差正态性. 各项诊断结果表明,模型假设均得到满足,在本研究条件下模型结果具有较好的可靠性.

为量化不同粒径颗粒物对 PCOD 和 Chla 的贡献率,本研究基于分级过滤实验进行分析. 根据筛网与滤膜过滤的核心原理,该过程能够截留颗粒态物质,而溶解态物质则随滤液通过,因此可将过滤过程作为逐级分离样品中颗粒物的技术手段. 实验以原水为参照,过滤孔径分别为 63 μm、30 μm、5 μm 和 0.45 μm,据此划分出 $d>63$ μm、30 μm $<d\leqslant 63$ μm、5 μm $<d\leqslant 30$ μm、0.45 μm $<d\leqslant 5$ μm 四个颗粒物粒径区间. 通过计算上一级较大孔径滤液浓度与本级孔径滤液浓度的差值,可以得出该区间颗粒物对 PCOD 或 Chla 的贡献浓度,该浓度占原水 PCOD 或 Chla 浓度的百分比即为该区间颗粒物的贡献率.

2 结果与讨论

2.1 水体藻类密度变化特征

周年内杞麓湖藻类数量组成以蓝藻为主,蓝藻密度占藻类总密度的 87.0% ~ 98.1%,微囊藻属是全年的绝对优势类群,其密度占藻类总密度的 30.6% ~ 92.2%,年均值为 74.6%. 杞麓湖藻类密度呈明显的年内波动模式(见图 2). 藻类总密度和微囊藻密度变化范围分别为 2.29×10^8 ~ 5.73×10^8 cells/L 和 7.20×10^7 ~ 5.28×10^8 cells/L,年均值分别为 3.99×10^8 cells/L 和 3.09×10^8 cells/L. 总体上看,藻类总密度与微囊藻密度月际波动情况较为一致. 根据湖泊营养类型评价中藻类生物学指标与标准[32],杞麓湖周年内较高的藻类密度,已达到极富营养型水平. 值得注意的是,2024 年 8 月藻类密度明显低于 7 月及 9 月,分析认为这可能与水华过程有关:夏季随温度升高,微囊藻大量增殖,其密度在 7 月达到了年内峰值,为典型的蓝藻暴发期;而 8 月采样时段可能正处于水华消亡期,藻类大量衰亡降解,密度显著降低;9 月则再次暴发蓝藻水华,藻类的再增殖,导致密度显著回升.

从季节上看,微囊藻密度夏季(6 ~ 8 月)、秋季(9 ~ 11 月)均值分别为 4.07×10^8 cells/L 和 3.90×10^8 cells/L,春季(3 ~ 5 月)、冬季(12 ~ 次年 2 月)均值分别为 2.48×10^8 cells/L 和 1.90×10^8 cells/L,表明杞麓湖微囊藻密度具有明显的季节变化特征,这种变化趋势与其水华发生规律比较吻合,夏、秋季为杞麓湖微囊藻水华暴发期,微囊藻密度整体水平较高;冬、春季水华发生频次和规模相对较小,微囊藻密度整体水平也相对较低.

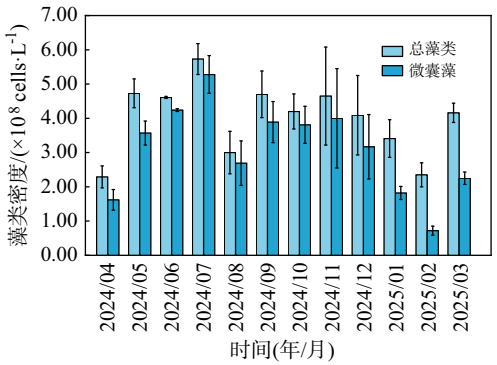


图 2 杞麓湖藻类密度周年变化

Fig. 2 Annual variation of algal density in Qilu Lake

2.2 水体不同形态 COD 浓度变化特征

周年内杞麓湖水体各形态 COD 浓度变化特征如图 3 所示. TCOD 浓度全年持续处于较高水平,变化范围为 44 ~ 85 mg/L,年均值达 60 mg/L,是地表水Ⅴ类标准限值(40 mg/L)的 1.5 倍,反映出杞麓湖水体有机污染较为严重. 从季节变化来看,春、夏、秋、冬各季 TCOD 平均浓度分别为 57 mg/L、70 mg/L、63 mg/L 和 50 mg/L,呈现出明显的季节性波动特征,这种变化趋势与微囊藻密度的季节变化较为一致. PCOD 浓度变化较为显著,变化范围为 17 ~ 52 mg/L,年均值为 30 mg/L;2024 年 4 月至 9 月间波动较大,9 月至 2025 年 2 月间基本呈稳定式下降,3 月后又有所回升,反映出杞麓湖水体 PCOD 浓度随时间变化明显,推测可能受季节性外源输入、藻类增殖等因素的影响较大. DCOD 浓

度变化范围为 23 ~ 37 mg/L,年均值为 30 mg/L;相比 PCOD 浓度变化而言,其总体变化相对平缓,表明杞麓湖水体 DOM 周年内的来源或被转化利用等情况相对稳定. 周年内 PCOD 与 TCOD 浓度变化趋势高度吻合,二者 Spearman 相关系数达 0. 903(P <0. 01),而 DCOD 与 TCOD 相关系数为 0. 541(P <0. 01),表明杞麓湖水体 TCOD 浓度变化受 PCOD 浓度变化主导,而 DCOD 虽然是 TCOD 的重要组成部分,但二者变化情况不完全一致,导致其关联性强度也相对较弱.

2. 3 不同形态 COD 浓度与藻类密度的相关分析

为探究杞麓湖水体不同形态 COD 浓度与藻类密度的相关关系,对其周年内 TCOD、PCOD、DCOD 与藻类总密度、微囊藻密度进行了 Spearman 相关分析(见表 1). 结果发现,TCOD、PCOD 与藻类总密度、微囊藻密度均呈极显著正相关(P <0. 01),DCOD 与微囊藻密度呈极显著正相关(P <0. 01),与藻类总密度呈显著正相关(P <0. 05),表明藻类(尤其是微囊藻)生物量是杞麓湖水体有机污染的重要来源. 探究其原因,首先,藻类作为水体悬浮颗粒物的重要组成部分,其活体细胞本身以生命有机体的形式存在,是 PCOD 的重要来源. 潘攀等[33]的研究表明,太湖打捞的藻类样品中有机物含量高达 95. 65%. 苏新然等[34]的研究表明,夏、秋季三峡库区蓝藻丰度的升高使水体中有机物含量上升,COD 与蓝藻丰度呈显著的正相关. 其次,藻类生长代谢过程中会释放各种胞外有机物,从而促使水体 COD 升高. 如微囊藻生长过程中会产生大量的胞外多糖(Exopolysaccharide,EPS),包括包裹在细胞外的胶鞘多糖(Capsular Polysaccharide,CPS)和释放到周边环境中的水溶性多糖(Water - soluble Released Polysaccharide,RPS)[35]. EPS 是微囊藻群体形成的物质基础[36],也是藻源性有机碳的重要组成成分,高温条件对蓝藻生长和 EPS 的释放具有促进作用[37]. 分析认为,杞麓湖藻类绝对优势种惠氏微囊藻(*Microcystis wesenbergii*)以典型的群体形态存在,表面具有明显加厚的胶被,其全年保持较高的密度水平,尤其在夏秋季水温较高时可能分泌大量的 EPS,一部分 EPS 构成胶被以形成更大的微囊藻藻团,成为 PCOD 来源;另一部分则释放到水体中,成为 DCOD 来源,从而增高了夏、秋季水体 TCOD 浓度. 其三,是藻类死亡分解过程中,藻类通过细菌降解能快速释放有机物,从而使水体 COD 浓度上升[38 - 39]. 张瑾等[40]的研究表明,富营养化湖泊藻华后期,藻体发生衰亡和腐解过程中会产生大量的藻源 DOM,水体富营养化程度越高,藻体腐解向水体释放的 DOM 越多. 分析认为杞麓湖藻类密度全年维持在较高水平,藻类在不断增殖的同时,必然也存在衰亡降解过程,该过程产生的一些 DOM,成为了水体 DCOD 的组成部分,而未被完全分解的藻屑还可能成为 PCOD 的来源. 基于以上原因,杞麓湖水体各形态 COD 浓度与藻类(尤其是微囊藻)密度呈现正相关,体现了藻类本身及其生长代谢与死亡分解过程中所释放的 AOM 是重要的内源污染物来源,其对 COD 的动态变化具有显著影响,这与前人的研究[34,39 - 40]结果是一致的.

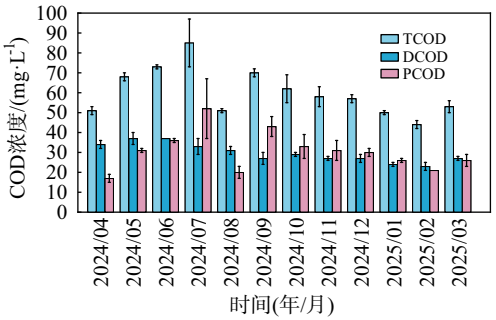


图 3　杞麓湖水体不同形态 COD 浓度周年变化

Fig. 3　Annual variation of different forms of COD concentration in Qilu Lake

表 1　杞麓湖水体不同形态 COD 浓度与藻类密度的 Spearman 相关系数

Tab. 1　Spearman correlation coefficients between different forms of COD concentration and algal density in Qilu Lake

	TCOD	PCOD	DCOD	藻类总密度	微囊藻密度
TCOD	1. 000				
PCOD	0. 903 **	1. 000			
DCOD	0. 541 **	0. 172	1. 000		
藻类总密度	0. 809 **	0. 794 **	0. 359 *	1. 000	
微囊藻密度	0. 877 **	0. 804 **	0. 490 **	0. 914 **	1. 000

注:* 表示在 0. 05 水平(双侧)上显著相关;** 表示在 0. 01 水平(双侧)上极显著相关.

值得注意的是,藻类的增殖会导致水体 COD 浓度升高,而水体中的有机物同样能促进藻类的生长. 太原汾河蓄水区 Chla 与 COD 呈极显著正相关,因为水体中的有机物通过氧化分解,最终转变为可供藻类直

接利用的营养物质,从而促进藻类的生长繁殖[41]. 杞麓湖位于通海县主城下游,是流域内生活污水、农业施肥废水等集中排放吸纳的场所[3],2022 年 COD 入湖污染负荷高达 6 831.59 t[42]. 长期以来,杞麓湖沉积物 OM 含量呈持续增长趋势,1900 至 1950 年间平均值为 11.7%,1950 至 1990 年间平均值为 14.8%,1990 至 2014 年间平均值为 24.4%[2];2020 年其表层沉积物 OM 含量为 11.56% ~ 28.44%,平均值为 17.25%,显著高于太湖、巢湖等许多水体[43]. 综上,高负荷的外源输入与不断累积的内源储量,构成了杞麓湖丰富的 OM 库,这些 OM 通过微生物分解,不断释放 N、P 等营养盐,为藻类大量、持续地生长提供了充足的物质基础.

2.4 藻类细胞对水体 PCOD 浓度的贡献

杨苏文等[15]模拟了不同温度和营养条件下 5 种常见藻类的生长情况,并基于藻类净增长过程中,藻细胞自身及其代谢物质产生的理论藻源内负荷与藻密度之间显著的相关性,建立了藻源 COD 内负荷计算模型. 本研究通过每月野外采样分析获取数据,根据前文已知杞麓湖水体 TCOD 浓度受 PCOD 浓度主导,鉴于水样中藻类细胞直接贡献于 PCOD,且 PCOD 浓度变化与藻类总密度、微囊藻密度均呈极显著正相关,具备构建杞麓湖藻类细胞对水体 PCOD 贡献模型的基础. 而藻类在其生长代谢过程中虽然会释放 DOM 使水体 DCOD 浓度升高,但该过程本身可能存在连续性与滞后性,以及复杂的生物转化与再利用等情况,基于野外瞬时采样的分析结果无法反映当前水样中藻类细胞对 DCOD 的贡献. 因此,藻类对 DCOD 和 TCOD 浓度的贡献在本研究条件下尚无法有效量化,不再进一步分析.

以 PCOD 浓度为因变量,分别以藻类总密度和微囊藻密度为自变量建立一元线性回归方程(见表 2),结果显示,PCOD 浓度与藻类总密度、微囊藻密度均存在极显著的线性关系($P < 0.01$),且两个回归方程的决定系数 R^2 均较高,表明模型拟合度较好,分析结果可靠度高.

表 2 杞麓湖水体 PCOD 浓度与藻类密度的回归方程及相关统计量

Tab. 2 Regression equations and statistics between PCOD concentration and algal density in Qilu Lake

回归方程	R	R^2	F	P
$y = 6.415x_{\text{藻类总密度}} + 4.961$	0.699	0.489	32.492	0.000
$y = 5.544x_{\text{微囊藻密度}} + 13.455$	0.715	0.511	35.565	0.000

式中,y 为 PCOD 浓度,mg/L;$x_{\text{藻类总密度}}$ 为藻类总密度,$\times 10^8$ cells/L;$x_{\text{微囊藻密度}}$ 为微囊藻密度,$\times 10^8$ cells/L. R 为相关系数;R^2 为决定系数;F 为回归模型的 F 统计量;P 为对应的显著性水平. 基于回归方程估算,2024 年 4 月至 2025 年 3 月间杞麓湖藻类细胞对水体 PCOD 浓度的贡献如图 4 所示. 结果显示,周年内全藻类细胞对 PCOD 的贡献量为 15 ~ 37 mg/L,年均值为 26 mg/L,年均贡献率达 85.6%;微囊藻细胞对 PCOD 的贡献量为 4 ~ 29 mg/L,年均值为 17 mg/L,年均贡献率为 55.3%. 从全年平均来看,微囊藻细胞贡献的 PCOD 占全藻类细胞贡献量的 65.4%,表明藻类(尤其微囊藻)是杞麓湖水体 PCOD 的核心来源. 富营养化水体中藻类光合作用初级生产力对水体颗粒态有机碳(Particulate Organic Carbon,POC)的贡献超过 80%[44]. 类似地,Xu 等[21]的研究表明,太湖藻类对表层水体 POC 的平均贡献率为 57.2%;李爱军等[12]对异龙湖的研究显示,在贡献了 48% COD 的有形颗粒($d > 0.45$ μm)中,藻类细胞数量占比高达 95.5%,间接反映了藻类细胞对 PCOD 的重要贡献. 本研究中,杞麓湖全藻类细胞贡献率达 85.6%,与上述研究结果相似,表明了在富营养化的藻型湖泊中,藻类是调控 PCOD 动态变化的关键因子. 相比之下,草型湖泊中藻类对 PCOD 的贡献率通常较低. 例如,白洋淀水体 POM 虽以植物源为主,但藻类的贡献率仅为 28.6% ~ 37.4%[45];草海藻类对 POM 的贡献率仅为 14% ~ 28%[46]. 这从侧面映证了在以

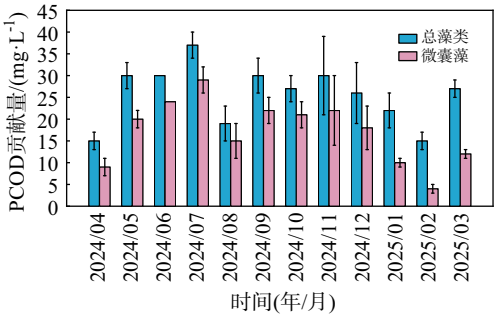


图 4 杞麓湖藻类细胞对水体 PCOD 浓度的贡献量

Fig. 4 Contribution of algal cells to PCOD concentration in Qilu Lake

杞麓湖为代表的富营养化藻型湖泊中,藻类对 PCOD 贡献的绝对主导地位.

2.5 不同季节水体 PCOD 来源物质粒径组成特征

为探究不同季节杞麓湖水体 PCOD 来源物质粒径大小组成及藻类对其的影响,对原水及不同孔径筛网(滤膜)过滤后水样的 TCOD 和 Chla 浓度进行测定,并估算各粒径区间颗粒物质对 PCOD 和 Chla 的贡献,结果见表 3. 由表 3 可知:夏季,$d>63$ μm 与 30 μm $<d\leqslant63$ μm 的颗粒物对 PCOD 的贡献率分别为 23.1% 和 59.4%,合计 82.5%;秋季分别为 44.3% 和 36.6%,合计 80.9%,表明夏、秋季杞麓湖水体 PCOD 来源物质以 $d>30$ μm 的中、大型颗粒为主. 冬季,$d>63$ μm 的颗粒物贡献率达 50.6%,同时 0.45 μm $<d\leqslant5$ μm 贡献率升高至 23.1%,呈现了大粒径突出、小粒径并存的特征. 春季,$d>30$ μm 的颗粒物贡献率下降至 54.8%,而 0.45 μm $<d\leqslant5$ μm 贡献率升高至 32.0%,体现了细小颗粒物贡献率明显上升的趋势.

表 3　不同季节杞麓湖水体各粒径颗粒物对 PCOD 和 Chla 的贡献率

Tab. 3　Seasonal percentage contribution of particle size fractions to PCOD and Chla in Qilu Lake

d/μm	夏季		秋季		冬季		春季	
	PCOD/%	Chla/%	PCOD/%	Chla/%	PCOD/%	Chla/%	PCOD/%	Chla/%
$d>63$	23.1	44.7	44.3	52.6	50.6	78.2	34.2	43.0
$30<d\leqslant63$	59.4	46.6	36.6	40.5	14.1	11.8	20.6	20.4
$5<d\leqslant30$	8.4	3.3	4.0	2.3	12.2	5.4	13.2	7.5
$0.45<d\leqslant5$	9.1	5.4	15.1	4.6	23.1	4.6	32.0	29.1

杞麓湖夏、秋、冬季藻类均以微囊藻属为绝对优势,其密度占比分别为 92.0%、82.8% 和 77.5%,该藻类通常以群体形式存在,主要分布于 $d>30$ μm 的粒径区间,以其为主的藻类对 Chla 的贡献率稳定在 90.0% 以上(见表 3),表明微囊藻是夏、秋、冬季 PCOD 的主要来源. 春季藻类群落结构发生明显变化,微囊藻密度占比降低至 54.1%,且群体体积较其他季节明显减小,而以假鱼腥藻属、泽丝藻属(*Limnothrix*)为代表的细小丝状蓝藻开始大量出现,密度占比为 39.4%,导致 $d>30$ μm 的藻类对 Chla 贡献率明显降低(63.4%),而 0.45 μm $<d\leqslant5$ μm 粒径的贡献率明显升高(29.1%),这一变化与不同粒径颗粒物对 PCOD 贡献的变化趋势同步. 综上表明,杞麓湖藻类群落结构的变化是调控水体 PCOD 粒径分布的核心因素. 李爱军等[12]的研究表明,异龙湖悬浮颗粒物以 $d<20$ μm 的小颗粒为主,与该湖以个体细小、呈丝状的拉氏拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*)为绝对优势密切相关. 这与以群体微囊藻为优势,PCOD 集中于中、大粒径区间的杞麓湖形成鲜明对比,两者共同表明,优势藻类的形态学特征可能是影响富营养化藻型湖泊 PCOD 粒径分布的关键生物因子.

3 结 论

为明确藻类对杞麓湖水体 COD 内源污染的重要影响,开展了周年内的逐月调查监测,分析了杞麓湖水体 TCOD、PCOD、DCOD 及藻类总密度、微囊藻密度的月际变化,解析了各指标间相关关系,定量估算了藻类细胞对水体 PCOD 的贡献量与贡献率,并探究了不同季节水体 PCOD 粒径分布变化特征. 结论如下:

1)杞麓湖藻类密度全年处于高位且波动明显,微囊藻属为绝对优势类群;相应地,水体 TCOD 全年处于高浓度水平,其月际波动受 PCOD 浓度变化主导. TCOD、PCOD 与藻类总密度、微囊藻密度均呈极显著正相关($P<0.01$),DCOD 与微囊藻密度呈极显著正相关($P<0.01$),与藻类总密度呈显著正相关($P<0.05$),表明藻类(尤其是微囊藻)密度是调控各形态 COD 浓度变化的关键内因.

2)藻源性 PCOD 是杞麓湖水体 PCOD 的重要来源. 周年内全藻类细胞对水体 PCOD 的年均贡献量和贡献率分别为 26 mg/L 和 85.6%,微囊藻细胞年均贡献量和贡献率分别为 17 mg/L 和 55.3%,微囊藻细胞贡献的 PCOD 占全藻类细胞贡献量的 65.4%.

3)藻类群落结构是调控杞麓湖水体 PCOD 粒径分布的关键因素. 以微囊藻属为绝对优势的夏、秋、冬季,藻类群体促使 PCOD 来源物质以 $d>30$ μm 的中、大型颗粒为主,而春季细小丝状蓝藻增多,导致

0.45 μm < d ≤5 μm 粒径的细小颗粒对 PCOD 的贡献显著提升.

4)杞麓湖水体 PCOD 主要赋存于 d >30 μm 的粒径范围内,表明其具有较高的物理可分离性. 建议在坚持控源截污的同时,加强针对中、大型粒径藻类群体的定向物理移除(如高效打捞),作为快速削减藻源内负荷、辅助降低杞麓湖水体 COD 浓度的有效措施.

参考文献:

[1] 许惟栋. 杞麓湖水体和表层沉积物营养盐雨旱两季特征及其对叶绿素 a 的影响[D]. 昆明:云南大学,2023.
XU W D. Characteristics of nutrients in water and surface sediments of Lake Qilu and their effects on Chlorophyll - a in rainy and dry seasons[D]. Kunming:Yunnan University,2023.

[2] 钱福明,张恺,陈光杰,等. 云南杞麓湖沉积物记录的近现代生态环境变化及影响因子识别[J]. 湖泊科学,2018,30(4):1109 - 1122.
QIAN F M,ZHANG K,CHEN G J,et al. Sediment - inferred recent pattern and drivers of environmental and ecological changes at Lake Qilu,Yunnan Province[J]. Journal of Lake Sciences,2018,30(4):1109 - 1122.

[3] 王万宾,管堂珍,梁启斌,等. 杞麓湖流域污染负荷及水环境容量估算研究[J]. 环境污染与防治,2020,42(11):1436 - 1442.
WANG W B,GUAN T Z,LIANG Q B,et al. Study on the estimation of pollution loads and water environmental capacity in Qilu Lake watershed[J]. Environmental Pollution & Control,2020,42(11):1436 - 1442.

[4] 金星,刘绍俊,普发贵,等. 杞麓湖污染源调查分析及治理对策研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2025,50(5):146 - 161.
JIN X,LIU S J,PU F G,et al. Investigation and analysis of pollution sources and control countermeasures for Qilu Lake[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science),2025,50(5):146 - 161.

[5] 唐中奥,杨常亮,刘雯清,等. 杞麓湖入湖河口湿地沉积物氮磷垂向的分布特征[J]. 环境化学,2025,44(2):522 - 536.
TANG Z A,YANG C L,LIU W Q,et al. Study on the vertical distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in the sediment of estuarine wetland of Qilu Lake[J]. Environmental Chemistry,2025,44(2):522 - 536.

[6] 尤本胜,马书占,古小治,等. 风浪扰动对太湖梅梁湾水体总磷变化的驱动模式研究[J]. 环境污染与防治,2023,45(6):756 - 764.
YOU B S,MA S Z,GU X Z,et al. Preliminary study on the contribution model of wind wave disturbance to the variation of total phosphorus in Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. Environmental Pollution & Control,2023,45(6):756 - 764.

[7] 魏烈群,徐书童,王效昌,等. 微生物和硬毛藻对天鹅湖不同湖区沉积物氮磷释放的影响[J]. 生态环境学报,2020,29(3):580 - 588.
WEI L Q,XU S T,WANG X C,et al. Effects of microbial activity on nitrogen and phosphorus release from sediments in different lakes of Swan Lake[J]. Ecology and Environment Sciences,2020,29(3):580 - 588.

[8] 朱梦圆,朱广伟,王永平. 太湖蓝藻水华衰亡对沉积物氮、磷释放的影响[J]. 环境科学,2011,32(2):409 - 415.
ZHU M Y,ZHU G W,WANG Y P. Influence of scum of algal bloom on the release of N and P from sediments of Lake Taihu[J]. Environmental Science,2011,32(2):409 - 415.

[9] 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)(增补版)[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[10] 李琦,张超,张文强,等. 白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献[J]. 环境科学,2023,44(9):4915 - 4926.
LI Q,ZHANG C,ZHANG W Q,et al. Chemical oxygen demand(COD) composition and contribution in typical waters of Baiyangdian Lake[J]. Environmental Science,2023,44(9):4915 - 4926.

[11] 陈慧敏,俞晓琴,朱俊羽,等. 太湖有色可溶性有机物(CDOM)对 COD 及 BOD_5 的指示意义[J]. 湖泊科学,2021,33(5):1376 - 1388.
CHEN H M,YU X Q,ZHU J Y,et al. Optical indices of chromophoric dissolved organic matter(CDOM) as potential indicators tracing the variability of chemical oxygen demand(COD) and biochemical oxygen demand(BOD_5) in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences,2021,33(5):1376 - 1388.

[12] 李爱军,李飞,文诗蕴,等. 异龙湖水体化学需氧量赋存物质的形态学分析[J]. 中国环境监测,2024,40(5):165 - 170.
LI A J,LI F,WEN S Y,et al. Analysis of morphological factors contributing to chemical oxygen demand in the water body of Yilong Lake[J]. Environmental Monitoring in China,2024,40(5):165 - 170.

[13] 付蕊,刘沙沙,索诚宇,等. 2008 ~ 2022 年我国湖泊有机质相关指标时空演变[J]. 中国环境科学,2024,44(3):1426 - 1435.
FU R,LIU S S,SUO C Y,et al. Spatiotemporal variations of indicators of organic matter from 2008 to 2022 in inland lakes of China[J]. China Environmental Science,2024,44(3):1426 - 1435.

[14] LIU S S,HOU J W,SUO C Y,et al. Molecular - level composition of dissolved organic matter in distinct trophic states in Chinese lakes:Implications for eutrophic lake management and the global carbon cycle[J]. Water Research,2022,217:118438.

[15] 杨苏文,金位栋,闫玉红,等. 湖泊理论藻源内负荷估算方法研究[J]. 中国环境科学,2017,37(1):271 - 283.
YANG S W,JIN W D,YAN Y H,et al. Theoretic estimation method of algae derived loading for lakes[J]. China Environmental Science,2017,37(1):271 - 283.

[16] 张心怡,肖峰,晏明全,等. 河道藻源胞内有机质光化学 - 生物降解机制[J]. 环境工程学报,2023,17(5):1496 - 1503.
ZHANG X Y,XIAO F,YAN M Q,et al. Photochemical - biodegradation mechanism of intracellular dissolved organic matter from river algae[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2023,17(5):1496 - 1503.

[17] 乔煜琦,江海洋,李星,等. 蓝藻水华暴发和衰亡对太湖有色可溶性有机物的影响[J]. 湖泊科学,2018,30(4):907 - 915.
QIAO Y Q,JIANG H Y,LI X,et al. Impacts of cyanobacterial blooms outbreak and decline on chromophoric dissolved organic matter in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences,2018,30(4):907 - 915.

[18] ZHANG Y L,VAN DIJK M A,LIU M L,et al. The contribution of phytoplankton degradation to chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in eutrophic shallow lakes:Field and experimental evidence[J]. Water Research,2009,43(18):4685 - 4697.

[19] 贾世琪,杨芳,王希欢,等. 白洋淀秋季溶解性有机质组分与浮游植物的关系研究[J]. 环境污染与防治,2021,43(9):1101 - 1107.
JIA S Q,YANG F,WANG X H,et al. Relationship between DOM components and phytoplankton in Baiyangdian Lake in autumn[J]. Environmental Pollution & Control,2021,43(9):1101 - 1107.

[20] 陈秋羽. 衡水湖“水 - 悬浮颗粒物 - 沉积物”中有机质来源、降解及其环境效应[D]. 南宁:广西大学,2025.
CHEN Q Y. Sources,degradation and environmental effects of organic matterin “water - suspended particulate matter - sediment” of Lake Hengshui[D]. Nanning:Guangxi University,2025.

[21] XU J,LYU H,XU X G,et al. Dual stable isotope tracing the source and composition of POM during algae blooms in a large and shallow eutrophic lake:All contributions from algae? [J]. Ecological Indicators,2019,102:599 - 607.

[22] 涂天鸿. 鄱阳湖水体 POM/DOM 的特征及其与浮游生物群落的关系研究[D]. 南昌:南昌大学,2023.
TU T H. Studies on the characteriazation of water POM/DOM and relationships with plankton community in Poyang Lake[D]. Nanchang:Nanchang University,2023.

[23] 张霄鹏. 程海 COD 的分布特征及溯源分析[D]. 昆明:云南大学,2024.
ZHANG X P. Distribution characteristics and traceability annlysis of COD in Chenghai[D]. Kunming:Yunnan University,2024.

[24] 吕伟伟,姚昕,张保华,等. 太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义[J]. 环境科学,2018,39(5):2056 - 2066.
LYU W W,YAO X,ZHANG B H,et al. Fluorescent characteristics and environmental significance of particulate organic matter in Lake Taihu,China[J]. Environmental Science,2018,39(5):2056 - 2066.

[25] 吴函鸿. 典型云南高原湖泊溶解有机质组成特征及藻源影响[D]. 北京:中国环境科学研究院,2025.
WU H H. Composition characteristics of dissolved organic matter and algal - derived influence in typical Yunnan plateau lakes[D]. Beijing:Chinese Research Academy of Environmental Sciences,2025.

[26] 生态环境部. 地表水环境质量监测技术规范:HJ 91.2—2022[S]. 北京:生态环境部环境标准研究所,2022.

[27] 环境保护部. 水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法:HJ 828—2017[S]. 北京:中国环境出版集团有限公司,2017.

[28] 环境保护部. 水质 叶绿素 a 的测定 分光光度法:HJ 897—2017[S]. 北京:中国环境出版集团有限公司,2018.

[29] 生态环境部. 水质 浮游植物的测定 0.1ml 计数框 - 显微镜计数法:HJ 1216—2021[S]. 北京:生态环境部环境标准研究所,2021.

[30] 陈友媛,刘花,杨世迎,等. 化学需氧量在人工浅水湖泊高含沙补水过程中的变化规律[J]. 环境化学,2013,32(10):1970 - 1975.
CHEN Y Y,LIU H,YANG S Y,et al. The variation of chemical oxygen demand in the artificial shallow lakes during high suspended sediment water supplement[J]. Environmental Chemistry,2013,32(10):1970 - 1975.

[31] 胡鸿钧,魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京:科学出版社,2006.

[32] 况琪军,马沛明,胡征宇,等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报,2005,5(2):87 - 91.

KUANG Q J,MA P M,HU Z Y,et al. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology [J]. Journal of Safety and Environment,2005,5(2):87 - 91.

[33] 潘攀,刘德启,李海青,等. 藻类打捞对水体营养循环的影响及其生态效果研究[J]. 环境工程学报,2010,4(7):1509 - 1512.
PAN P,LIU D Q,LI H Q,et al. Study on influence and ecological effect of water nutrient cycle caused by algae salvage[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2010,4(7):1509 - 1512.

[34] 苏新然,于潘,尤庆敏,等. 三峡库区浮游植物群落结构特征及水生态评价[J]. 湖泊科学,2023,35(2):493 - 506.
SU X R,YU P,YOU Q M,et al. Phytoplankton community structure and water ecological assessment in the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences,2023,35(2):493 - 506.

[35] 陈毛珍,谢梅娟,巫伟,等. 微囊藻胶鞘多糖和水溶性胞外多糖的化学特性[J]. 湖泊科学,2016,28(3):609 - 615.
CHEN M Z,XIE M J,WU W,et al. Chemical characteristics of capsular polysaccharide and water - soluble released exopolysaccharide from *Microcystis*[J]. Journal of Lake Sciences,2016,28(3):609 - 615.

[36] 代晓炫,朱伟,李明. 营养盐对微囊藻细胞组分及多糖组成的影响[J]. 湖泊科学,2013,25(2):277 - 282.
DAI X X,ZHU W,LI M. Effect of nutrients on components and polysaccharide content of *Microcystis* cells[J]. Journal of Lake Sciences,2013,25(2):277 - 282.

[37] 刘菲菲,冯慕华,尚丽霞,等. 温度对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)和鱼腥藻(*Anabaena* sp.)生长及胞外有机物产生的影响[J]. 湖泊科学,2014,26(5):780 - 788.
LIU F F,FENG M H,SHANG L X,et al. Effects of temperature on the growth and generation of extracellular organic matter of *Microcystis aeruginosa* and *Anabaena* sp.[J]. Journal of Lake Sciences,2014,26(5):780 - 788.

[38] 李翔,李致春,汪旋,等. 蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征[J]. 环境科学,2021,42(7):3281 - 3290.
LI X,LI Z C,WANG X,et al. Characteristics of dissolved organic matter in overlying water during algal bloom decay[J]. Environmental Science,2021,42(7):3281 - 3290.

[39] 尚丽霞,柯凡,李文朝,等. 高密度蓝藻厌氧分解过程与污染物释放实验研究[J]. 湖泊科学,2013,25(1):47 - 54.
SHANG L X,KE F,LI W C,et al. Laboratory research on the contaminants release during the anaerobic decomposition of high - density cyanobacteria[J]. Journal of Lake Sciences,2013,25(1):47 - 54.

[40] 张瑾,陈明滢,郝智能,等. 富营养化湖泊藻华腐解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应[J]. 环境科学,2024,45(3):1539 - 1552.
ZHANG J,CHEN M Y,HAO Z N,et al. Dynamic changes of dissolved organic matter derived from algal decomposition and the environmental effects in eutrophic lakes[J]. Environmental Science,2024,45(3):1539 - 1552.

[41] 刘洋,吕俊平,刘琪,等. 太原汾河蓄水区浮游植物细胞密度及其与营养元素的关系[J]. 生态学报,2018,38(3):991 - 1002.
LIU Y,LYU J P,LIU Q,et al. Relationship between the growth of phytoplankton and the distribution of nutrients in the Fenhe water storage area of Taiyuan[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(3):991 - 1002.

[42] 何潇. 杞麓湖流域水环境评价及污染源解析[D]. 昆明:昆明理工大学,2023.

[43] 尹鹏飞,熊静,贾雨欣,等. 杞麓湖表层沉积物营养盐和粒度空间分布及评价[J]. 环境科学与技术,2023,46(10):32 - 41.
YIN P F,XIONG J,JIA Y X,et al. Spatial distribution and evaluation of nutrients and grain size in surface sediments of Qilu Lake[J]. Environmental Science & Technology,2023,46(10):32 - 41.

[44] PACE M L,CARPENTER S R,COLE J J,et al. Does terrestrial organic carbon subsidize the planktonic food web in a clear - water lake? [J]. Limnology and Oceanography,2007,52(5):2177 - 2189.

[45] 张乐天,田凯,张文强,等. 夏季白洋淀颗粒的有机质碳氮同位素特征及其来源解析[J]. 环境工程学报,2023,17(6):2067 - 2076.
ZHANG L T,TIAN K,ZHANG W Q,et al. Carbon and nitrogen isotope characteristics and source analysis of particulate organic matter in Baiyangdian in summer[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2023,17(6):2067 - 2076.

[46] 吴嘉曦. 高原喀斯特湖泊颗粒有机质组成与来源示踪[D]. 贵阳:贵州大学,2023.

(编 辑:李 媛)