J. Lake Sci.(湖泊科学), 2026, 38(2):000-000
DOI 10.18307/2026.0252

藻类光合作用对水库溶解气体过饱和的影响初探*

王　莹[1]，黄杰山[2]，张君卓[1]，成晓龙[1]，冯镜洁[1**]，李　然[1]
（1:四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室，成都 610065）
（2:华能澜沧江水电股份有限公司，昆明 650214）

摘　要：自然环境中水坝泄水、藻类光合作用、水温突升等各因素变化均可导致溶解氧（Dissolved Oxygen, DO）或总溶解气体(Total Dissolved Gas, TDG)过饱和，致使鱼类患气泡病甚至死亡。为探究藻类光合作用单独影响对溶解气体特别是总溶解气体过饱和的定量影响，本文针对向家坝库区，运用黑白瓶产氧试验开展藻类光合作用产氧对溶解气体过饱和影响的定量研究，同时分析了金沙江下游河段水坝泄水和藻类光合产氧共同作用情形下，溶解气体饱和度与藻密度的关系。结果表明：藻类产氧使得TDG 饱和度的增加幅度在 0.18%-5.67%之间，远小于泄流建筑物对 TDG 饱和度的影响；藻类光合作用对溶解气体的影响受水动力因素影响较大，支流 DO 和 TDG 饱和度均与藻密度呈显著正相关性，而干流此种关系并不显著；藻类光合作用对 DO 饱和度影响大于对 TDG 饱和度的影响，连续时间的原型观测结果显示 TDG 饱和度变化幅度远小于 DO 饱和度变化幅度。研究结果为明晰水库溶解气体过饱和驱动要素提供依据，对于减缓溶解气体过饱和对鱼类影响具有理论意义。
关键词：总溶解气体；气体过饱和；藻类；光合作用；黑白瓶法

Effects of Algal Photosynthesis on Dissolved Gases in Reservoirs*

Wang Ying[1], Huang Jieshan[2], Zhang Junzhuo[1], Cheng Xiaolong[1], Feng Jingjie[1**], Li Ran[1]
(1:State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, P.R.China)
(2: Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunmig 650214, P.R.China)

Abstract: In natural environments, factors such as dam discharge, algal photosynthesis, and rapid increases in water temperature can lead to dissolved oxygen (DO) or total dissolved gas (TDG) supersaturation, potentially causing gas bubble disease or mortality in fish. To quantitatively evaluate the specific contribution of algal photosynthesis to dissolved gas supersaturation—particularly of TDG—this study employed the light-dark bottle method in the Xiangjiaba Reservoir area. Additionally, the relationship between dissolved gas saturation and algal density was analyzed downstream in the Jinsha River, accounting for the combined effects of dam discharge and algal photosynthetic oxygen production. Results indicated that algal oxygen production increased TDG saturation by 0.18% to 5.67%, an effect substantially smaller than that induced by spillway discharge. The impact of algal photosynthesis on dissolved gases was strongly influenced by hydrodynamic conditions. In tributaries, both DO and TDG saturation showed a significant positive correlation with algal density, whereas this correlation was negligible in the main channel. Algal photosynthesis exerted a more pronounced effect on DO saturation than on TDG saturation. Consistent with this, continuous field observations revealed that temporal variation in TDG saturation was considerably less than that of DO saturation. These findings help clarify the primary drivers of dissolved gas supersaturation in reservoir systems and provide a theoretical basis for mitigating its ecological impacts on fish.
Keywords: total dissolved gas; gas supersaturation; algae; photosynthesis; light-dark bottle method

* 2025-04-05 收稿；2025-06-17 收修改稿。
国家自然科学基金项目（52322905，52039006）联合资助。
** 通信作者；E-mail: fengjingjie@scu.edu.cn。

自然环境中水坝泄水、藻类光合作用、水温突升等各因素变化均可导致溶解氧（Dissolved Oxygen, DO）或总溶解气体(Total Dissolved Gas, TDG)过饱和，致使鱼类患气泡病甚至死亡，严重威胁水生生态安全[1-2]，其中水坝泄水已被证实是导致天然河流溶解气体过饱和的重要原因。而水坝泄水和藻类光合作用等多因素的协同作用则可导致更为复杂的溶解气体过饱和问题。为提出并制定针对性的气体过饱和控制措施，首先需要基于各因素单独作用对溶解气体影响的研究，解析天然水体溶解气体过饱和成因及主要驱动要素。目前对于藻类光合作用对溶解气体特别是总溶解气体过饱和影响的定量研究较缺乏，限制了对复杂水体溶解气体过饱和规律的揭示以及减缓措施的提出。

已有关于藻类光合作用对水体中溶解气体的影响研究主要关注对溶解氧的影响，对 TDG 饱和度影响的直接研究极为有限。溶解氧含量的变化与藻类生长密切相关，当藻类光合作用的产氧速率超过呼吸作用的耗氧速率时，水中溶解氧含量增加[3-4]。当叶绿素含量较高且水体表面温度超过 25℃时，溶解氧与叶绿素含量间有显著的正相关关系[5]。原型观测发现，在近岸海域或湖泊等弱流动水体 DO 饱和度受藻类光合作用影响显著，一些条件下藻类光合作用可导致 DO 饱和度高达 400%[6]，日本琵琶湖藻类爆发期间 12h 内 DO 饱和度可达 190%[7]，芝罘湾藻类光合作用强烈导致表层溶解氧高达 145.5%~260.6%[8]，浙江省近岸海域溶解氧 DO 饱和度最高达 120%，与浮游植物丰度高值区一致[9]。汛期三峡库区表层水体溶解氧饱和度达 172%，主要来源于浮游植物光合作用[10]。这些研究均表明藻类光合作用会对 DO 饱和度产生显著影响。DO 是 TDG 的重要组成部分，藻类光合作用产氧会直接影响 TDG 饱和度，但目前其中的定量影响研究尚极度缺乏。

因此，本文选择金沙江下游河段，开展了藻密度、DO 饱和度以及 TDG 饱和度原型观测，分析了三者间的相关关系并探讨了藻类光合作用产氧对 TDG 饱和度的贡献，为揭示 TDG 过饱和成因提供支撑。

1 材料与方法

1.1 区域概况与样点设置

研究区域选择在金沙江乌东德水电站倮果大桥至长江上游珍稀特有鱼类保护区下边界珞璜地维大桥。金沙江下游河段从上至下依次建有乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝四座梯级水电站，分别于 2021 年、2022 年、2013 年和 2012 年开始投产发电。两次监测时间分别在 2020 年 8 月 2 日-8 月 25 日和 2024 年 8 月 30 日-9 月 3 日。2020 年监测期间，溪洛渡和向家坝水电站均处于泄洪阶段，2024 年监测期间水电站未泄洪。2020 年自金沙江乌东德水电站倮果大桥至珞璜地维大桥长约 1100km 江段设置 20 个监测点（图 1）。根据水动力条件将监测点位分为干流主流区(M1~M7)、干流岸边缓流区(S1~S9)和支流汇口回流区(B1~B4)。其中干流主流区监测点主要位于干流河中高流速区域，干流岸边缓流区监测点主要位于干流河岸缓流区域，支流监测点位于雅砻江汇口、龙川江汇口、小江汇口、大汶溪汇口等重点支流汇口区域。2024 年在向家坝库区绥江段设置 3 个监测点（图 1）。3 个监测点分别位于金沙江干流主流区域（M8）、干流岸边的缓流区域（S10）以及大汶溪汇金沙江口的支流汇口回流区域（B5），分别代表干流高流速区域、干流岸边流速较缓区域以及支流汇入干流后受顶托作用回流区域。

1.2 监测内容与监测方法

2020 年监测指标包括 TDG 饱和度、DO 浓度、水温(WT)以及藻群落结构和藻密度。2024 年监测指标包括 TDG 饱和度、DO 浓度、流速(U)、浊度(Turb)、水温、电导率(Cond)、pH 值(pH)及藻群落结构与藻密度，并开展了黑白瓶实验测定研究区域内藻类产氧能力。2024 年新增监测指标（流速、浊度、电导率、pH）的选取基于以下考虑：浊度会通过影响藻类光合作用的光强辐射进而影响藻类光合作用，是解释净光合作用差异的关键参数；电导率与 pH 可间接反映水体营养盐状况，有助于分析藻类分布状况的潜在原因；流速是水动力的关键参数，会对水体中溶解氧和藻类分布产生直接影响。这些补充指标为量化水环境异质性及其对藻类与 TDG 饱和度关系的影响提供必要数据支撑。

1.2.1 理化因子检测 总溶解气体采用手持式 TDG 饱和度测定仪 Point4 测定；溶解氧及水温采用 YSI-Pro20I 仪器测定；流速采用便携式手持雷达流速仪测定；浊度通过哈希 2100Q 便携式浊度仪测定；电导率采用哈希 HD3600 便携式水质电导率检测仪测定；pH 值由哈希 HQ2100 便携式 pH 计测定。

1.2.2 藻群落结构及藻密度 测定依据《水质 浮游植物的测定 滤膜-显微镜计数法(HJ 1215—2021)》，用 10L 有机玻璃采水器于水下采水一次，采样深度依据标准选择水下 0.5m，主要反映表层藻类群落结构。混合均匀后转移至 500ml 采样瓶中并立即加入 7ml 鲁哥试剂固定。后期于实验室对样品进行藻群落结构及藻密度的分析。

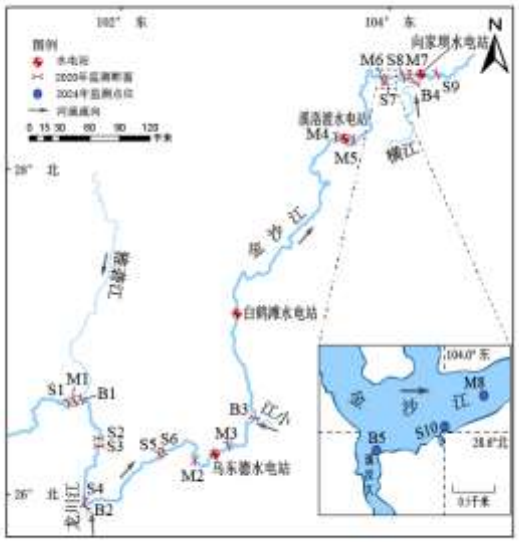

图 1 金沙江下游采样监测点分布

Fig.1 Sampling and monitoring sites distribution in the lower Jinsha River

1.2.3 黑白瓶测氧法实验 黑白瓶测氧法是基于藻类光合作用过程中会消耗二氧化碳并释放氧气的基本特性，通过测定曝光（白瓶）与遮光（黑瓶）条件下溶解氧的差值，来量化藻类的净光合作用强度[11]。黑白瓶现场实验中，用 10L 有机玻璃采水器采集表层 0.5m 深度的水样，每次采水同时采用下部出水管注满 4 个白瓶、4 个黑瓶和一个初始瓶。每个试验瓶注满后须溢出 3 倍体积的水以尽可能的保证溶解氧与相应水层相当。灌瓶完毕后及时封闭水样瓶，并立即对初始瓶进行溶解氧的固定（加入 1ml 氯化锰溶液与 2ml 碱性试剂，并将初始瓶颠倒转动数次，使瓶内成分充分混合），以防止氧气逸散或被生物进一步消耗，固定后的样品用于后续初始溶解氧（C_0）的测定。将剩余白瓶和黑瓶放回原采水处，每间隔 4 小时取出 1 瓶黑瓶和白瓶分别测定黑瓶溶氧量 C_b 和白瓶溶氧量 C_w，用于分析各时间段光合作用强度变化。溶解氧的固定和化学测定采用《水质溶解氧的测定—碘量法》（GB7489—1987）。

黑白瓶测氧法经计算转化可反映总光合作用强度（GPR）、净光合作用强度（NPR）与呼吸作用强度（RI）3 个重要指标。GPR 是衡量植物光合作用强弱的关键指标，它直接反映了植物在光照条件下，利用光能将无机物转化为有机物的能力。NPR 是衡量藻类在一定时间内通过光合作用合成有机物并释放氧气的能力。RI 是衡量生物体细胞呼吸活跃程度的一个量化指标, 可以直接反映生物体的代谢水平、生长状况以及生命活动的强弱。GPR、NPR、RI 计算公式为：

$$GPR\ (\mathrm{mg/L}) = C_w\ (\mathrm{mg/L}) - C_b\ (\mathrm{mg/L}) \quad (1)$$

$$NPR\ (\mathrm{mg/L}) = C_w\ (\mathrm{mg/L}) - C_o\ (\mathrm{mg/L}) \quad (2)$$

$$RI\ (\mathrm{mg/L}) = C_o\ (\mathrm{mg/L}) - C_b\ (\mathrm{mg/L}) \quad (3)$$

1.3 DO 饱和度计算方法

DO 饱和度是一个相对值，它考虑了温度、压力等环境因素对溶解氧含量的影响，反映了当前水体中的溶解氧含量占该条件下水体最大可能溶解氧含量的比例，较溶解氧浓度更能准确反映水体溶解氧供应状态，更能科学评估水体生态环境质量。由于 DO 测定仪器监测项为 DO 浓度，需通过公式转化为 DO 饱和

度，DO 饱和度的计算公式为：

$$S_{DO} = \frac{C_{DO}}{C_T} \times 100\% \tag{4}$$

式中：S_{DO}为DO 饱和度，%；C_{DO}为实测溶解氧浓度（mg/L）;C_T为观测温度下饱和溶解氧浓度(mg/L)。

1.4 TDG 饱和度变化值计算方法

假设水体中溶解气体除 DO 外，其余氮气等气体组分不变，可计算出 DO 浓度变化引起的 TDG 饱和度的变化值，即可用于反映藻类光合作用产氧对 TDG 饱和度的贡献值。本研究假设氮气组分不变主要基于以下考虑：（1）氮气是一种化学性质稳定的气体，其溶解浓度主要受水体物理条件（如温度、压力）影响，与藻类代谢活动关系较弱。（2）本研究聚焦于藻类光合作用产氧对溶解气体（特别是 TDG）的影响，未涉及氮气转化的生物或化学过程（如固氮作用或反硝化作用）。

总溶解气体饱和度变化值（ΔS_{TDG}）的计算公式如下：

$$\Delta S_{TDG} = S^1_{TDG} - S^2_{TDG} = 21\%\Delta S_{DO+}79\%\Delta S_{N_2} \tag{5}$$

$$\Delta S_{DO} = S^2_{DO} - S^1_{DO} = \frac{C^2_{DO}}{C^{*2}_{DO}} - \frac{C^1_{DO}}{C^{*1}_{DO}} \tag{6}$$

$$\Delta S_{N_2} = S^2_{N_2} - S^1_{N_2} = \frac{C^2_{N_2}}{C^{*2}_{N_2}} - \frac{C^1_{N_2}}{C^{*1}_{N_2}} \tag{7}$$

式中S^1_{TDG}、S^2_{TDG}、S^1_{DO}、S^2_{DO}、$S^1_{N_2}$、$S^2_{N_2}$分别为变化前后总溶解气体、溶解氧和溶解氮的饱和度，%；C^1_{DO}、C^2_{DO}、$C^1_{N_2}$、$C^2_{N_2}$分别为变化前后氧气和氮气在水中的实际溶解浓度，mg/L，C^{*1}_{DO}、C^{*2}_{DO}、$C^{*1}_{N_2}$、$C^{*2}_{N_2}$分别为变化前后氧气和氮气的溶解度，mg/L。本研究中由于忽略氮气组分的变化，计算结果显示ΔS_{N_2}近似为零，氮气饱和度变化的影响因此忽略不计。

1.5 数据分析

本研究中“均值”指平均值±标准差(Mean±SD)；采用一元线性回归分析以及皮尔逊相关性(Pearson correlation)分析 TDG 饱和度、DO 饱和度和藻密度三者之间的关系；采用单因素方差检验(One-way ANOVA)分析干、支流环境因子和藻密度差异，以上分析使用 SPSS statistics 27.0 来完成，P<0.05 表示显著、P<0.01 表示极显著。采用主成分分析法分析监测断面 TDG 饱和度的主要影响因素。数据处理由 Excel 2021 来完成，ArcGIS10.8 制作研究区域样点分布图，Origin2022 软件进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 环境因子比较分析

2020 年 8 月 2 日至 2020 年 8 月 25 日金沙江干流及支流监测点水温均值分别为 21.62 ℃±1.80 ℃、21.34 ℃±2.43 ℃，表明干流、支流监测点水温差异不大，因此后续在各监测点溶解气体饱和度分析中忽略温度差异影响。2024 年 8 月 30 日至 2024 年 9 月 3 日绥江段 3 个测点环境因子监测结果如表 1 所示。经分析，3 个测点流速和浊度差异性极显著(P＜0.01)，支流汇口回流区(B5)流速显著低于干流 2 个测点，浊度显著高于干流 2 个测点。

表 1 2024 年 8 月 30 日 9 月 3 日绥江测点理化因子（均值±标准差）比较

Tab.1 Physicochemical characteristics (mean ± SD) at Suijiang station (August 30–September 3, 2024)

理化因子	干流主流区(S10)	干流岸边缓流区(M8)	支流回流区(B5)	P
WT/℃	24.27±1.89	23.60±0.35	25.03±1.11	0.441
U/(m/s)	0.48±0.16	0.56±0.05	0.14±0.05	＜0.001
Turb/(NTU)	3.76±0.42	3.49±0.64	9.44±1.08	＜0.001
Cond/(μS/cm)	493.00±44.5	474.00±8.54	513.33±47.88	0.492
pH	7.41±0.11	7.39±0.22	7.50±0.04	0.625

注：P<0.05 表示差异显著，P<0.01 表示差异极显著。

2.2 藻类群落结构及密度检测结果

2020 年 8 月 2 日至 8 月 25 日金沙江下游共检测到藻类 7 门 53 属，分别为硅藻门、绿藻门、蓝藻门、裸藻门、甲藻门、金藻门、隐藻门。在所有 86 组平行检测结果中，硅藻门为优势门的有 66 组，有 14 组鉴定结果中绿藻门为优势门类，龙川江汇口和向家坝坝下共 4 组鉴定结果中蓝藻门和裸藻门为优势门类，表现为以硅藻门种类为主的群落格局，这与相关金沙江流域藻群落结构调查结果一致[12]。将数据线性归一化处理后得到藻类种属热图如图 2 所示。其中热图仅展示相对丰度>1%的属级分类单元，低频种属（合计占比<1%）未显示。除干流岸边缓流区部分测点(S2-S5)以蓝藻门和裸藻门数量居多，其余监测点藻群落结构相似。藻密度沿程观测结果如图 3 所示,其中大汶溪汇口处监测中藻密度出现最高值 508*10^{4}cells/L。

2024 年 8 月 30 日至 9 月 3 日绥江河段藻群落结构及藻密度如图 4 所示。共检测到藻类 5 门 25 属，隶属于硅藻门、绿藻门、蓝藻门、隐藻门、甲藻门 5 大常见浮游植物门类，其中绿藻门、硅藻门和蓝藻门最多。无论干、支流区域，绿藻中均以小球藻(*Chlorella vulgaris*)和实球藻(*Pandorina morum*)占比突出，蓝藻中以微囊藻(*Microcystis*)占比突出，硅藻中以小环藻(*cyclotella*)和直链藻(*Melosira*)占比突出，表明干支流区域藻群落结构呈现出相似性。3 个监测点监测期间平均藻密度分别为 218.0*10^{4}cells/L、202.7*10^{4}cells/L、208.3*10^{4}cells/L。

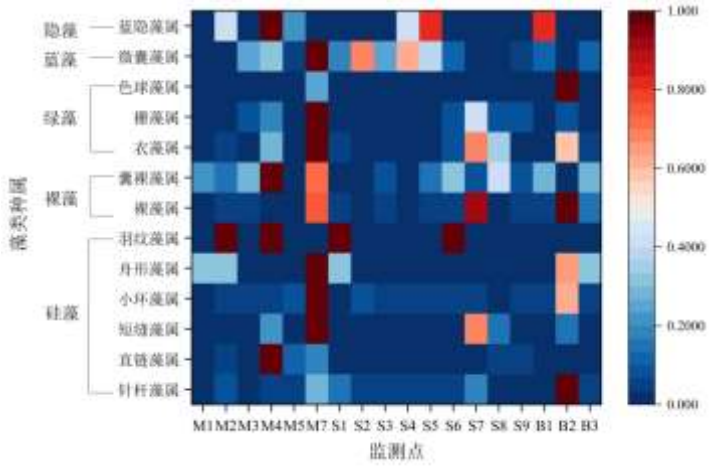

图 2 2020 年 8 月 2 日至 8 月 25 日金沙江下游主要藻类种属热图

Fig.2 Heatmap of dominant algal genera in the lower Jinsha River (August 2-25, 2020)

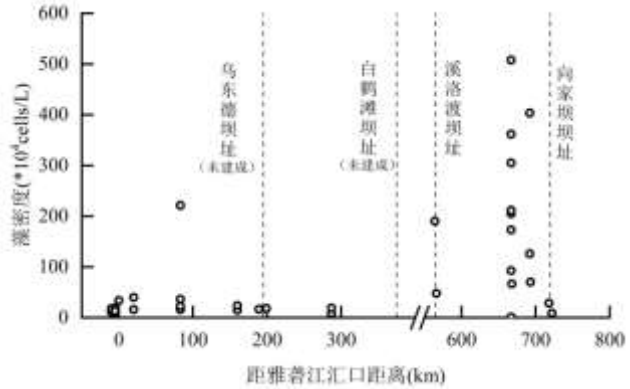

图 3 2020 年 8 月 2 日至 8 月 25 日金沙江下游干流及支流汇口藻密度沿程观测结果

Fig.3 Longitudinal observations of algal density in the mainstream and tributary confluences of the lower Jinsha River (August 2-25, 2020)

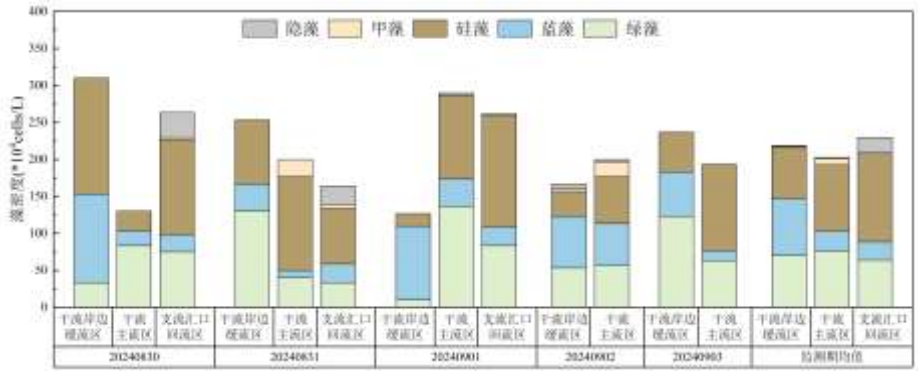

图 4 2024 年 8 月 30 日至 9 月 3 日绥江段每日藻群落结构及藻密度统计图

Fig.4 Daily statistics of algal community structure and density in the Suijiang reach (August 30 - September 3, 2024)

比较分析两次现场监测中金沙江下游干流、支流汇口区藻密度见图 5，干流藻密度在 0~100*10^{4}cells/L 区间数据最为集中，支流藻密度数据则较干流分布更为均匀，在 50~200*10^{4}cells/L 处较为集中。显著性差异分析表明支流藻密度显著高于干流藻密度(P＜0.01)。

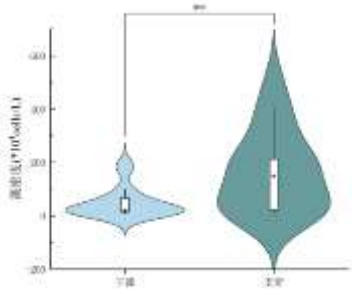

图 5 金沙江下游干、支流藻密度比较图

Fig.5 Comparison of algal density between mainstream and tributaries in the lower Jinsha River

2.3 藻类光合作用产氧对 DO 和 TDG 饱和度的影响分析

为从藻类产氧能力角度分析藻类对 DO 饱和度和 TDG 饱和度的影响，2024 年在绥江段 3 个测点处开展黑白瓶测氧法实验，连续监测了 3 个测点处藻类产氧能力，同监测期间 DO 饱和度和 TDG 饱和度进行分析。

2.3.1 基于黑白瓶测氧法的藻类产氧能力 采用黑白瓶测氧法测量得到藻类日内各时间段净光合作用强度，如图 6 所示。整体上干流岸边缓流区(S10)和干流主流区(M8)的净光合作用强度较为接近且表现出日动态同步性，峰值和谷值出现时段一致。与以往研究不同，干流 2 个测点在日内高光照强度期间表现出较低的产氧水平，且 NPR 小于 0，即呼吸消耗的氧气大于同期光合作用生成的氧气。相比之下，支流测点在 9:00-17:00 时间段净光合作用强度显著高于干流 2 个测点（对于干流岸边缓流区，P=0.004<0.01；对于干流主流区，P=0.008<0.01），表现出较高的产氧水平，而随后又在 17:00-21:00 时段降低至较低水平。

将藻密度与 NPR 和 GPR 进行相关性分析（图 7），NPR 和 GPR 均与藻密度呈现弱正相关性(NPR P=0.104,GPR P=0.263)，考虑到受现场条件影响，藻密度的测定及黑白瓶实验存在误差，此种相关性并不显著。净光合作用与藻密度的关系图中支流汇口区的净光合作用强度高于干流，这可能与其更高的藻密度和光照强度有关。同时支流汇口回流区硅藻占比较高（图 4），硅藻作为藻类中产氧能力突出的门类，提供了水体大部分氧气[13]。

2.3.2 DO、TDG 饱和度与日净光合作用强度关系 图 8 为 2024 年监测期间绥江段监测点 DO 饱和度、TDG 饱和度与日净光合作用强度的关系。结果表明，藻类光合作用所产生的氧气会对 DO 饱和度产生直接影响。具体而言，在干流岸边缓流区和支流汇口回流区两个监测点，DO 饱和度与 NPR 的动态变化呈现出一致性，即第 2 日的 DO 饱和度会因前 1 日 NPR 为正值而升高，因前 1 日 NPR 为负值而下降。

然而，在干流主流区，DO 饱和度的变化却与 NPR 的变化不相吻合。无论是在干流还是支流中，连续时间区间内藻类光合作用产氧对 TDG 饱和度的影响均较为微弱，TDG 饱和度在观测期间内呈现出较小的波幅变化（-12%至 4%），整体趋于平稳，变化幅度均较于 DO 饱和度（-45%至 19%）小。

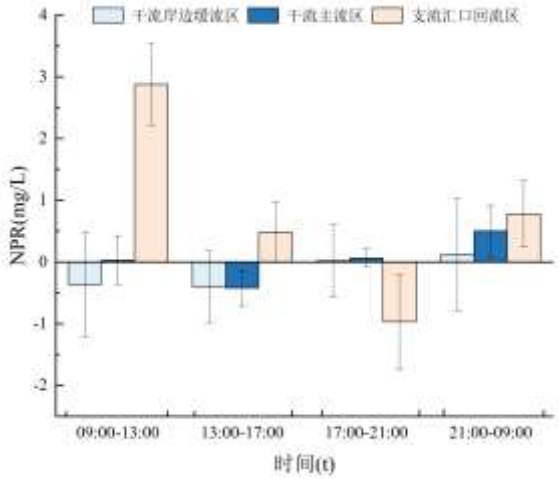

图 6 2024 年 8 月 30 日至 9 月 3 日藻类净光合作用强度日内变化过程图

Fig.6 Diurnal variation of net photosynthetic intensity in algal communities (August 30 - September 3, 2024)

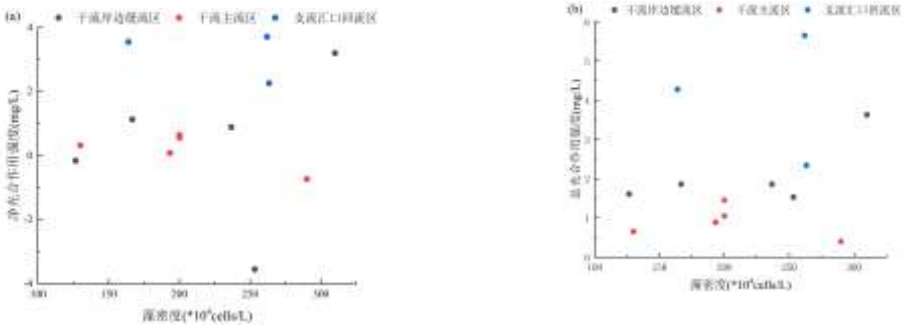

图 7 日光合作用强度与藻密度关系图: (a)净光合作用与藻密度关系图、(b)总光合作用与藻密度关系图

Fig.7 Relationship between photosynthetic intensity and algal density: (a) Net photosynthesis vs. algal density, (b) Gross photosynthesis vs. algal density

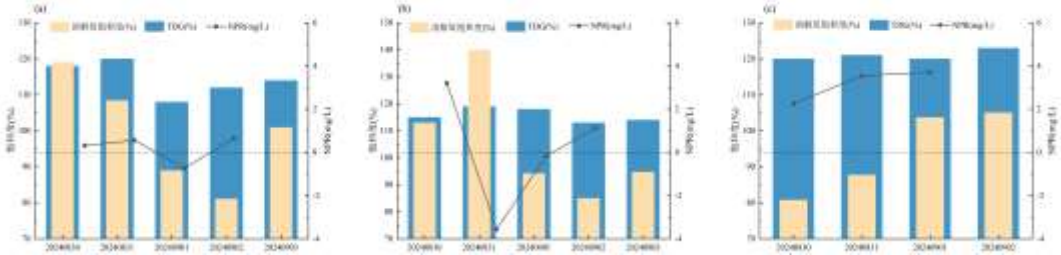

图 8 DO、TDG 饱和度与日净光合作用强度关系图: (a)干流主流区、(b)干流岸边缓流区、(c)支流汇口回流区

Fig.8 Relationships of DO and TDG saturation with daily net photosynthetic intensity: (a) Mainstream zone of the dry river, (b) Slow-flowing nearshore zone of the dry river, (c) Confluence backflow zone of the tributary

2.3.3 藻类光合作用产氧对 TDG 饱和度贡献值 监测期间 DO 饱和度和 TDG 饱和度的变化幅度比较结果见图 9。结果表明，无论是在干流还是支流中，TDG 饱和度在观测期间内均呈现出较小的波幅变化（均值为 2%±4.2%），整体趋于平稳，且较 DO 饱和度变化小，说明藻类光合作用对 DO 影响较 TDG 影响大。图 10 表明无论干、支流，藻类光合作用产氧使得水体 TDG 饱和度的增加幅度均较小，其对 TDG 饱和度的贡献程度在 0.18%-5.67%之间。

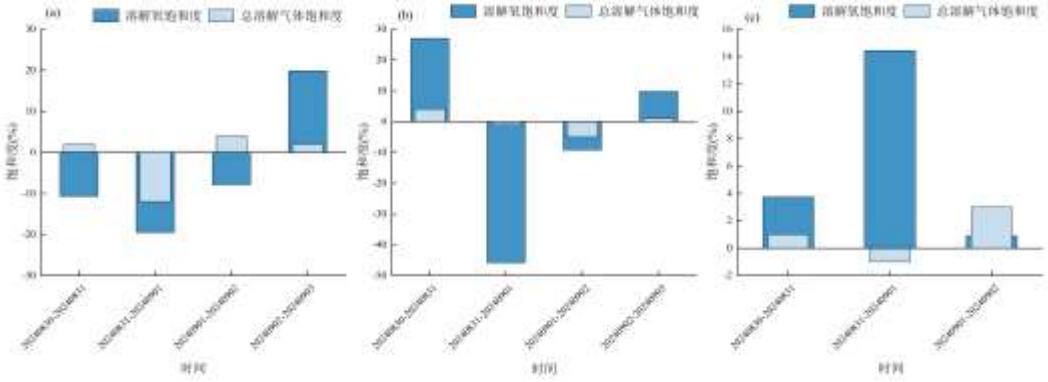

图 9 DO 饱和度与 TDG 饱和度变化幅度比较图: (a)干流主流区、(b)干流岸边缓流区、(c)支流汇口回流区

Fig.9 Comparative variation ranges of DO saturation versus TDG saturation: (a) Mainstream zone of the dry river, (b) Slow-flowing nearshore zone of the dry river, (c) Confluence backflow zone of the tributary

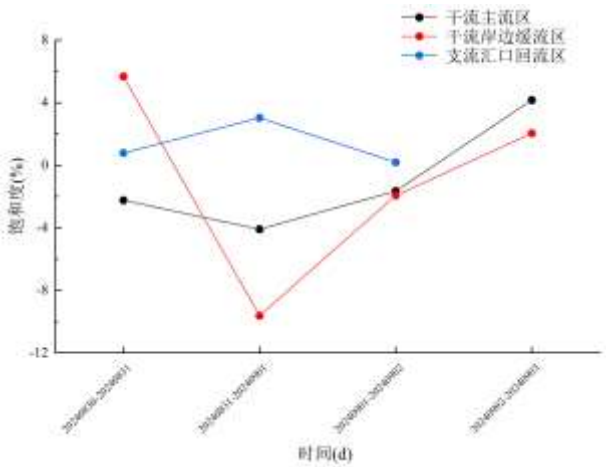

图 10 藻类光合作用产氧对 TDG 饱和度贡献值

Fig.10 Contribution of algal photosynthetic oxygen production to TDG saturation

2.4DO 饱和度、TDG 饱和度与藻密度相关性分析

通过 2024 年观测数据，进一步分析藻类光合作用单因素作用下溶解气体与藻密度的关系。同时以 2020 年泄洪期间数据为对比，在时间尺度上分析在高溶解气体饱和度背景下，藻类光合作用对溶解气体饱和度的影响。

2.4.1TDG 饱和度与 DO 饱和度相关性分析 2020 年与 2024 年两次原型观测得到的 TDG 饱和度与 DO 饱和度的一元线性回归分析如图 11。分析结果显示，尽管 2020 年监测数据中干流岸边缓流区和支流汇口回流区 TDG 饱和度与 DO 饱和度间存在正相关关系，但相关性不显著（干流岸边缓流区 P=0.452，支流汇口回流区 P=0.403）。2024 年 TDG 饱和度与 DO 饱和度均表现出显著正相关性。分析认为，DO 是 TDG 的一个重要组成部分，因此 DO 饱和度的高低会直接影响 TDG 饱和度。较 2024 年，2020 年 TDG 与 DO 饱和度相关性并不显著，这可能与 2020 年数据涉及监测河段较长，不同监测点气压条件、水生环境等因素有差异相关。

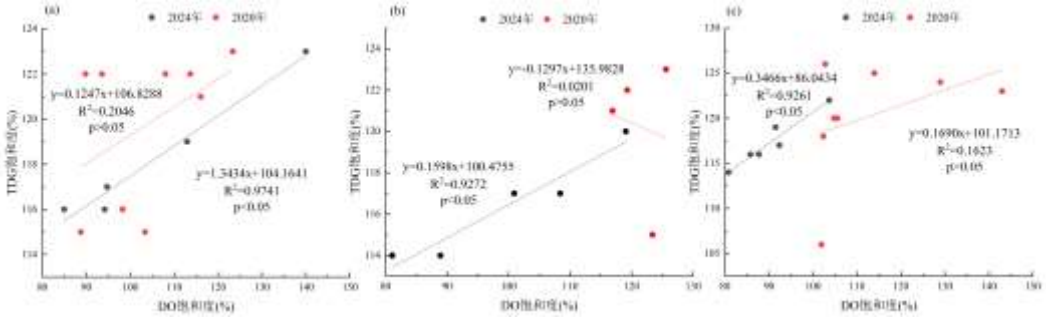

图 11 干、支流 TDG 饱和度与 DO 饱和度关系图：(a) 干流岸边缓流区、(b) 干流主流区、(c)支流汇口回流区

Fig.11 Correlation between TDG saturation and DO saturation in mainstream and tributaries: (a) Slow-flowing nearshore zone of the dry river, (b) Mainstream zone of the dry river, (c) Confluence backflow zone of the tributary

2.4.2 DO 饱和度与藻密度相关性分析 2020 年与 2024 年两次原型观测得到的 DO 饱和度与藻密度的一元线性回归分析如图 12。在空间尺度上，分析结果显示，在干流主流区和干流岸边缓流区，DO 饱和度与藻密度之间均无显著相关性(P＞0.05)，但岸边缓流区 DO 饱和度与藻密度之间的相关性(P=0.562)仍较主流区(P=-0.332)更为明显。支流汇口回流区 2020 年和 2024 年观测数据均显示 DO 饱和度与藻密度之间存在显著正相关性(2020 年 P=0.793，2024 年 P=0.898)。分析认为，结果可能受水动力条件、藻类分布差异、光照条件差异等因素影响。支流汇口回流区流速高于干流岸边缓流区，而干流岸边缓流区的流速又高于干流主流区，水流速度较慢的区域水体混合效应弱，且藻类更易聚集，同时岸边区域较主流区水体浅，光照条件较好，藻类光合作用效率较高，对 DO 饱和度的影响因此更为显著。

在时间尺度上，2020 年原型观测期间为泄洪期，研究河段背景 TDG 饱和度值较 2024 年非泄洪期高，在高饱和度的泄洪背景下，支流汇口回流区 DO 饱和度与藻密度之间仍存在显著正相关性，这说明在水坝泄水和藻类光合作用的协同作用下，藻类光合作用条件良好的区域，藻类光合作用产氧仍会对 DO 饱和度产生影响。

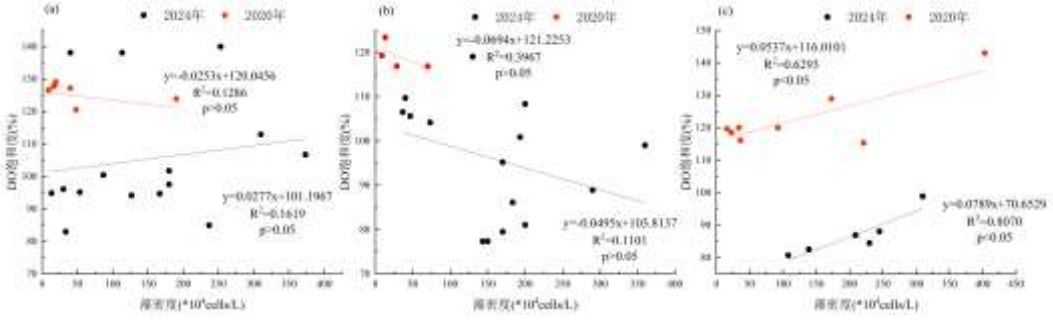

图 12 干、支流 DO 饱和度与藻密度关系图: (a) 干流岸边缓流区、(b) 干流主流区、(c)支流汇口回流区

Fig.12 Relationship between DO saturation and algal density in mainstream and tributaries: (a) Slow-flowing nearshore zone of the dry river, (b) Mainstream zone of the dry river, (c) Confluence backflow zone of the tributary

2.4.3 TDG 饱和度与藻密度相关性分析 2020 年与 2024 年两次原型观测中 TDG 饱和度和藻密度间的一元线性回归分析如图 13 所示。在空间尺度上，分析结果显示，在干流主流区和干流岸边缓流区，TDG 饱和度与藻密度之间均无显著相关性(P＞0.05)，支流汇口回流区 2020 年和 2024 年观测数据均显示 TDG 饱和度与藻密度之间存在显著正相关性(2020 年 P=0.541，2024 年 P=0.836)。干流 TDG 饱和度与藻密度之间的关系较弱，可能与其水流速度较快，藻类不容易聚集繁殖有关。

在时间尺度上，与 DO 饱和度与藻密度的相关性分析类似，2020 年在更高的 TDG 背景饱和度下，支流汇口回流区 TDG 饱和度与藻密度之间仍存在显著正相关性，这说明在水坝泄水和藻类光合作用的协同作用下，藻类光合作用条件良好的区域，藻类光合作用产氧仍会对 TDG 饱和度产生影响。

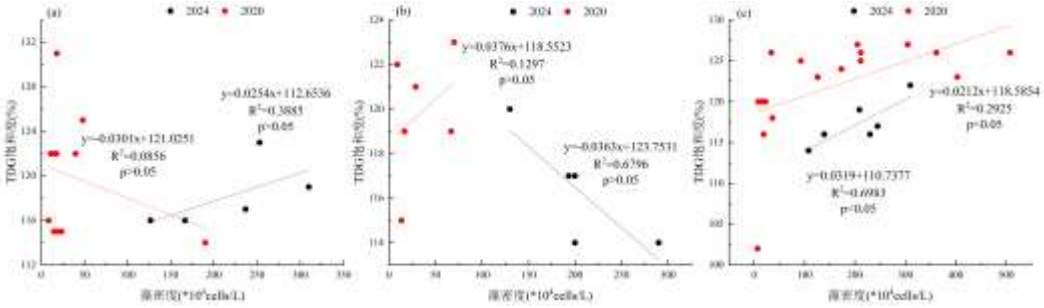

图 13 干、支流 TDG 饱和度与藻密度关系图: (a) 干流岸边缓流区、(b) 干流主流区、(c)支流汇口回流区

Fig.13 Relationship between TDG saturation and algal density in mainstream and tributaries: (a) Slow-flowing nearshore zone of the dry river, (b) Mainstream zone of the dry river, (c) Confluence backflow zone of the tributary

2.4.4 监测断面 TDG 饱和度影响因素分析 为进一步探究监测断面 TDG 饱和度的主要影响因素，即监测断面受上游来流 TDG 饱和度影响与该监测断面内藻类光合作用产氧影响的相对重要性，采取主成分分析法（图 14），旨在量化并比较两者对监测断面 TDG 饱和度的贡献程度。PCA 显示监测断面 TDG 饱和度同时受上游输入（PC1 载荷+0.62）与藻类光合作用（PC1 载荷+0.59）驱动，二者贡献相当。进一步通过 VPA 量化二者独立解释率，结果表明上游 TDG 饱和度的独立贡献占比(38.2%)远高于藻密度的独立贡献占比(2.1%)，表明水动力因素是主要驱动因素。

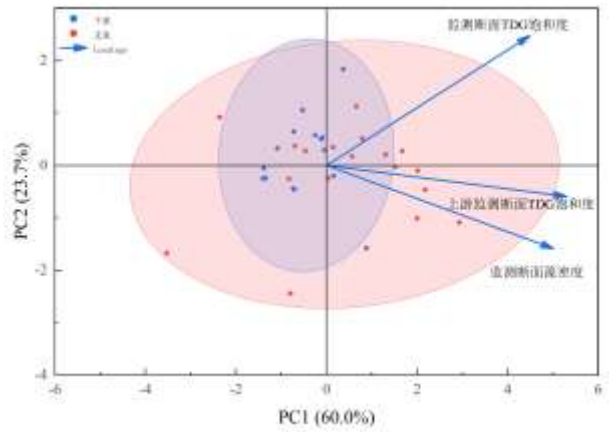

图 14 TDG 饱和度影响因素主成分分析图

Fig.14 Principal component analysis of factors influencing TDG saturation

3 讨论

3.1 藻类光合作用产氧对溶解气体饱和度的贡献

3.1.1 光合作用强度日内变化原因探讨 整体上干流 2 个测点的净光合作用强度(NPR)较为接近且表现出日动态同步性，值得注意的是，在日内光照高峰期(13:00-17:00)，两测点均呈现出负净光合作用强度水平(NPR<0)，表明此时段光合作用速率低于呼吸作用速率（图 6）。这一现象的潜在原因可能与当地高强度的光照条件诱发的光抑制效应有关。调查资料显示监测时段太阳辐射为 2.28-9.13 kWh/m²/day，属于中高辐射日。数据来自 NASA 全球能源预测（POWER）项目（NASA, 2023），获取了 28.6° N, 103.9° E（中国云南省绥江县）位置 2023 年 8 月至 9 月的日地表太阳辐射参数数据。由于分析时 2024 年太阳辐射数据暂未更新，因此根据与目标年的时间接近度和气候相似性获取了同期（2023 年 8 月至 9 月）的历史数据。现有研究资料表明，在强光下藻类会出现光抑制现象，光合能力、光化效率等都明显下降[14]。高光照强度以及过度光照对藻类具有不利影响，可能激活藻细胞内的叶绿素酶的活性使得藻细胞叶绿素 a 受到破坏，进而大幅削弱其光合作用能力[15]。

相比之下，支流汇口回流区测点在 9:00-17:00 时间段净光合作用强度显著高于干流 2 个测点，而随后又在 17:00-21:00 时段降低至较低水平（图 6），这种差异可能源于干、支流环境因子的异质性。本研究中支流测点浊度显著高于干流测点（表 1），许多河口地区的光衰减在很大程度上受浮游生物和悬浮沉积物之间相互作用的控制[16],浊度的增加能够散射和吸收部分光线，光强辐射受水体表层悬浮颗粒影响会呈现指数性衰减，从而降低了到达藻类细胞表面的光照强度，这在一定程度上保护了藻类免受过度光照的伤害[17-19]。因此在中高辐射强度下，相较于呈现出负净光合作用强度水平的干流测点，支流测点在日内光照强度较大的时间段反而表现出较高的产氧能力。

此外，支流汇口回流区测点日净光合作用普遍高于干流测点（图 7），这可能与其更高的藻密度有关。同时支流汇口回流区硅藻占比较高（图 4），硅藻在水生生态系统中起着非常重要的作用，它具有较高的产氧效率。研究表明，硅藻在地球无机物循环和碳固定中起重要作用，硅藻贡献了全球海洋硅循环的 50%，并驱动了约 40%的有机碳从表层向深海输送[20]，同时还承担了地球上约 20%的初级生产力[21-23]。干流岸边缓流区净光合作用强度与干流主流区呈相当水平，但数据更为离散，这可能与干流岸边缓流区蓝、绿藻占比较高有关，藻类群落的组成和结构与其产氧能力密切相关，Jones[24]认为日辐照度和温度等物理因素影响主要通过调控浮游植物的光合作用和呼吸作用来影响其生长。其研究发现，蓝、绿藻在生长过程中会产生强大的自遮光效应，这会减少有效光合作用面积进而抑制产氧。由于自遮光效应与群体结构的动态变化相关，蓝、绿藻的生长和产氧受水体流动状态影响，使得其生态行为更为复杂。

3.1.2 日净光合作用强度对溶解气体的贡献程度 在干流岸边缓流区和支流汇口回流区两个监测点，DO 饱和度与 NPR 的动态变化呈现出一致性（图 8），说明了 DO 饱和度对藻类净光合作用的响应。以干流岸边缓流区为例，黑白瓶测氧法结果显示 8 月 30 日 NPR 水平为正，表明当天该区域藻类光合作用产氧量大于水体耗氧量，8 月 31 日该区域水体 DO 饱和度随即较 8 月 30 日增加。然而，在干流主流区，DO 饱和度的变化却与 NPR 的变化不相吻合。这说明藻类光合作用对 DO 饱和度的影响可能受水动力因素影响较大。无论是在干流还是支流中，TDG 饱和度在观测期间内均呈现出较小的波幅变化（均值为 2%±4.2%），整体趋于平稳，且较 DO 饱和度变化小（图 9），说明藻类光合作用对 DO 影响较 TDG 影响大。无论干、支流，藻类光合作用产氧使得水体 TDG 饱和度的增加幅度均较小（0.18%-5.67%）（图 10）。

现有关于泄水引起的 TDG 过饱和原型观测研究中，坝下生成的 TDG 饱和度与泄洪流量有较好的正相关关系，其中针对大渡河原型观测提出的过饱和 TDG 生成预测经验模型显示，当泄洪流量在 1000-3000m³/s 时，坝下生成的 TDG 饱和度可达 115%-140%[25]。针对龚嘴水电站的原型观测提出的过饱和 TDG 生成预测经验模型显示，当泄洪流量在 1500 -3000m³/s 时，坝下生成的 TDG 饱和度可达 129%-138%[26]。因此，尽管藻类光合作用产氧对水体 TDG 饱和度有一定影响，其贡献程度相较而言则远小于水工建筑物泄水对 TDG 饱和度的影响。

3.2 溶解气体与藻密度相关性

现场监测结果表明，在干流河段，DO 饱和度与藻密度之间无显著相关性($P>0.05$)，其中干流岸边缓流区较干流主流区相关性更为明显。支流汇口回流区 DO 饱和度与藻密度则表现出显著正相关性（见 0 节），这可能与 3 种区域测点水动力条件差异有关。由支流河口的水动力研究特性相关研究可知，支流汇口区受干流水位顶托作用在顶托范围内水流流速减小[27]。有学者在对三峡库区长寿段桃花溪支流河口水动力特性的模拟研究中得出，枯水期河口区会形成明显的逆时针涡旋区域，受干流顶托作用，桃花溪流速为 0.5~3cm/s，较干流区流速 13~28cm/s 明显减小，且水体在桃花溪内部呈紊乱状态，与干流水体交换状态弱，但丰水期此种现象减弱[28]。辽宁大凌河白石水库库区交汇河段[29]、史灌河与淮河交汇河段[27]等支流河口的水动力特性模拟研究中也均得出相似结论。在本研究 2024 年的监测数据中，干流主流区较岸边缓流区以及支流汇口回流区流速显著更高（表 1），这与已有研究结果一致。

水动力条件会直接影响 DO 分布。本研究发现在流动状态较弱的支流汇口回流区 DO 饱和度与藻密度表现出显著正相关性。在关于 DO 空间分布的研究中，有国外研究表明，在 Urdaibai 河口的中部和内部区域，叶绿素 a 浓度（表征藻类生物量）与 DO 饱和度呈显著正相关[30]。这与本研究在支流汇口回流区的发现一致，即藻类光合作用是 DO 的重要来源，尤其在春季和夏季藻华期间，DO 饱和度显著提升[31]。而在潮汐作用强烈的外河口，DO 动态主要受物理过程驱动。高强度的水柱混合和潮汐冲刷使 DO 常年接近饱和状态，藻类生产或消耗的影响相对次要[30]。在 DO 的季节性变化研究中，亦有研究发现，DO 饱和度的季节变化与河流流量最相关，叶绿素 a 的影响则较小[32]。有学者在对影响河流中溶解氧含量主要因素的归因总结中指出，影响河流中溶解氧含量的主要物理因素有大气压、水温、盐度以及河流流速，其中河流水体流动对溶解氧具有正向相关性，即表现为复氧作用，当流速小于等于 0.05m/s 时，流速为溶解氧主导影响因素[33]。这些研究均说明水流速度较快、水柱混合强烈的区域能促进溶解氧的分布均匀，河流流量的增加可通过增强水体交换和氧气输入，进一步提升缺氧区的 DO 饱和度[34]。因此本研究中干流区 DO 饱和度与藻密度之间较支流区域并未呈现显著相关性。

水动力条件同时也影响了藻类分布。本研究发现支流汇口回流区藻密度显著高于干流藻密度（图 5）。水动力学是影响水生生物生命活动许多特征的主要生态因素之一[35]。水动力因素对水体表层水生植物结构和数量有显著影响，高流速、水位波动和风驱动波条件下的水分运动增加会导致水生植物物种丰富度降低，其物种组成、分类结构、优势复合体、维度结构及其数量和生物量结构也会相应发生变化。研究发现，水体中水生植物数量和生物量与流速、水位波动和风驱动波成反比[36]。流速低的区域藻类更易聚集和繁殖，较高的流速则会由于水流拖拽作用降低藻类生物量[37-39]。在对梯级平原水库——Kanev 水库不同水动力条件下附生植物的研究中发现，Kanev 水库的流速存在显著差异（非过境区为 0.05-0.10 m/s，过境区为 0.40-0.60 m/s），非过境区样本中的平均物种数和附生植物的平均数量和生物量均高于过境区的物种数和生物量。这与本研究发现一致。水动力条件会通过影响藻类分布进一步影响区域光合作用产氧强度[36]，导致支流区域较干流区域 DO 饱和度与藻密度之间呈现显著相关性，干流岸边缓流区也较干流主流区 DO 饱和度与藻密度之间相关性更强（图 12）。

类似的，水动力条件也因此影响了 TDG 饱和度与藻密度的关系。在干流河段，TDG 饱和度与藻密度之间无显著相关性($P>0.05$)，支流汇口回流区 TDG 饱和度与藻密度间呈现显著正相关性($P<0.05$)（图 13）。DO 是 TDG 的重要组成部分，TDG 饱和度与藻密度呈现上述关系的可能原因与 DO 饱和度和藻密度关系成因类似：干流由于其水流速度较快，水体混合效应强，促进 TDG 的垂向和横向分布均匀，相对于支流受上游来流水体 TDG 饱和度影响较大；支流水体由于其流动状态弱，更能为藻类提供稳定的生长环境，进而使得水体 TDG 饱和度对藻类光合作用表现出更强烈的响应。监测断面 TDG 饱和度影响因素 PCA 分析结果亦证明上游 TDG 饱和度的影响远高于藻密度的影响，表明水动力因素是主要驱动因素。

在时间尺度上，2020 年泄洪期间，支流汇口回流区 TDG 饱和度和 DO 饱和度与藻密度之间仍存在显著正相关性，表明在水坝泄水和藻类光合作用的协同作用下，藻类光合作用条件良好的区域，藻类光合作用产氧仍会对 TDG 饱和度产生叠加影响，这进一步说明水坝泄水和藻类光合作用的协同作用可导致更为复杂的溶解气体过饱和问题，两者的协同效应有待后续研究。

4 结论

本文针对向家坝库区，运用黑白瓶产氧试验开展藻类光合作用产氧对溶解气体过饱和影响的定量研究，同时分析了金沙江下游河段水坝泄水和藻类光合产氧共同作用情形以及藻类光合产氧单独作用情形下，溶解气体饱和度与藻密度的关系。得到以下主要结论：

（1）藻类光合作用对 TDG 饱和度的贡献远小于上游水工建筑物泄水对 TDG 饱和度的影响：黑白瓶测氧法试验计算结果表明，在本文研究的河道型水库中，受藻类光合作用产氧影响的 TDG 饱和度变化值（0.18%-5.67%）远小于泄流建筑物泄水对 TDG 饱和度的影响。这说明藻类光合作用产氧并非水体中 TDG 过饱和的主要驱动要素。

（2）藻类光合作用对溶解气体的影响受水动力因素影响较大：干流由于自身水动力特性，水体混合效应强，溶解氧分布和藻类分布受上游水流条件影响较大，藻密度与 DO 饱和度及 TDG 饱和度之间并未呈现出显著的相关性。在干支流交汇区，由于水流速度较慢、流动状态相对较弱，为藻类生长提供了较为稳定的环境，使得该区域藻密度显著高于干流藻密度，藻光合作用产氧对该区域 DO 饱和度和 TDG 饱和度影响变得更为显著。

(3) 藻类光合作用对 DO 饱和度影响大于对 TDG 饱和度的影响：黑白瓶测氧法试验结果显示 DO 饱和度与净光合作用强度的动态变化呈现出一致性，表明藻类光合作用产氧对 DO 饱和度的直接影响。TDG 饱和度受藻类光合作用产氧的影响程度则相对 DO 饱和度较小。尽管在藻密度较大的支流汇口区，TDG 饱和度与藻密度之间呈现出正相关关系，且黑白瓶测氧法试验说明连续时间区间内藻类光合作用产生的氧气会作用于 TDG 饱和度，但这种影响作用于 TDG 饱和度并不明显，变化幅度较于 DO 饱和度小。

综合以上研究成果，结论可为明晰水库溶解气体过饱和驱动要素提供依据，为减缓溶解气体过饱和对水生生物的影响提供参考。但本文研究区域为金沙江下游河道型水库，考虑到藻密度、光照强度、水动力条件等环境因素的区域差异性，本研究结论适用于中低藻密度、中等流速的河道型水库，建议结合本文研究，对不同水动力条件及水质区域进一步开展观测，丰富本文研究成果，综合评估藻类光合作用对水体溶解气体的影响。

5 参考文献

[1] Weitkamp D E, Katz M. A Review of Dissolved Gas Supersaturation Literature. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1980, 109(6):659-702. DOI: 10.1577/ 1548-8659(1980)1092.0.CO;2.

[2] Falkowski P G. The role of phytoplankton photosynthesis in global biogeochemical cycles. *Photosynthesis Research*, 1994, 39(3): 235-258. DOI: 10.1007/ BF00014586.

[3] Zhao K, Yang J, Lv J, *et al*. Structural Characteristics of Periphytic Algal Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Taiyuan Region of the Fenhe River. *Water*, 2022, 14(14):2151. DOI: 10.3390/w14142151.

[4] Xia W, Zhang M, Zhou M *et al*. Spatio-temporal dynamics of dissolved oxygen and its influencing factors in Lake Xiannv Jiangxi, China. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(3):874-885(in Chinese). [夏威, 张萌, 周慜等. 大型深水湖库溶解氧时空变化及驱动因素: 以江西仙女湖为例.湖泊科学, 2023, 35(3):874-885.]

[5] Jane S F, Hansen G J A, Kraemer B M *et al*. Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature*, 2021, 594(7861). DOI: 10.1038/s41586-021-03550-y.

[6] Holmes B, Paddock M B, Vandergheynst J S *et al*. Algal photosynthetic aeration increases the capacity of bacteria to degrade organics in wastewater. *Biotechnology and Bioengineering*, 2019, 117(1). DOI: 10.1002/bit.27172.

[7] Kuroiwa K, Ogawa Y, Seki H, *et al*. Dynamics of dissolved oxygen in a hypereutrophic lake: Lake Kasumigaura, Japan. *Water Air & Soil Pollution*, 1979, 12(2):255-264. DOI: 10.1007/BF01047128.

[8] Li Y, Lin Y, The analysis for the cause of over saturated dissolved oxygen in Zhifu Bay in summer. *Marine Environmental Science*, 1997(2):60-66(in Chinese). [李妍, 林影. 芝罘湾夏季表层溶解氧过饱和原因分析. 海洋环境科学, 1997(2):60-66. DOI: 10.1007/BF02951625.]

[9] Chai XP, Wei N, Mu QL, Distribution and Main Influencing Factors of the Surface Dissolved Oxygen Saturation of Zhejiang Offshore in Spring. *Environmental Monitoring in China*, 2015(5):5(in Chinese). [柴小平, 魏娜, 母清林等. 浙江近岸海域春季表层溶解氧饱和度分布及影响因素. 中国环境监测, 2015(5):5. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6002.2015.05.027.]

[10] Tian P, Song LX, Ji DB, *et al*. Vertical Distributions of Dissolved Oxygen and Chlorophyll-a in Shennong River Above Three Gorges Reservoir at Low and High Water Levels. *Journal of Hydroecology*, 2022, **43**(2):8(in Chinese). [田盼, 宋林旭, 纪道斌等. 三峡库区神农溪不同时期溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征. 水生态学杂志, 2022, 43(2):8. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202006120171.]

[11] Li XM, Liu L, Gong SS, Seasonal variation and driving factors of primary productivity of phytoplankton in Lake Changhu, Jianghan Plain. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(3):833-843(in Chinese). [李学梅, 刘璐, 龚森森等. 江汉平原长湖浮游植物初级生产力的季节性变化及其驱动因子. 湖泊科学, 2023, 35(3):833-843. DOI: 10.18307/2023.0307.]

[12] Shang KY, Han Y, Gao X, Spatial pattern of periphytic algae communities in major tributaries of the upper Jinsha River and the environmental drivers. *Journal of Lake Sciences*, 2024, **36**(5):1392-1402(in Chinese). [尚坤钰, 韩毓, 高欣等. 金沙江上游主要支流着生藻类群落的空间格局及其影响因子. 湖泊科学, 2024, 36(5):1392-1402. DOI: 10.18307/2024.0515.]

[13] Falkowski P G .Biogeochemical Controls and Feedbacks on Ocean Primary Production. *Science*, 1998, 281(5374):200-206.DOI:10.1126/science.281.5374.200.

[14] Xia L, Chen YZ, Photoinhibition at room temperature in dunaliella salina 1009. *Oceanologia et Limnologia Sinica,* 2000(01):**39**-45(in Chinese). [夏丽,陈贻竹. 盐藻的室温光抑制. 海洋与湖沼, 2000(01):39-45. DOI: 10.11693/ hyhz200001007007.]

[15] Zhuang SH, Hendrik Sven, The effects of light intensity and quality on benthic algae communities II the dynamics and adaptive modes of community and populations. *Acta Ecologica Sinica*, 2001,(12):2057-2066(in Chinese). [庄树宏, Hendrik, Sven. 光强和光质对底栖藻类群落影响 Ⅱ. 群落和种群的动态和适应模式. 生态学报, 2001.DOI: CNKI:SUN:STXB.0.2001-12-013.]

[16] Kemp W , Boynton W , Adolf J .Eutrophication of Chesapeake Bay: historical trends and ecological interactions. *Marine Ecology Progress*, 2005, 303:1-29. DOI:10.3354/meps303001.

[17] El-Chaghaby G, Rashad S, Moneem M A. Seasonal variation and correlation between the physical, chemical and microbiological parameters of Nile water in selected area in Egypt (Case study): physical, chemical and microbiological parameters of Nile water. *Baghdad Science Journal*, 2020(4). DOI: 10.21123/BSJ.2020.17.4.1160.

[18] 卢蓓.湖泊沉水植物适应水体光衰减的初步研究[学位论文]. 中国科学院大学(中国科学院武汉植物园),2017.

[19] Huang GL, Huang BS, Liu D, Temporal and spatial dynamics of dissolved oxygen and formation of hypoxia in typical reaches of Dongjiang River estuary. *Journal of Lake Sciences*, 2025,37(1):112-121(in Chinese). [黄广灵, 黄本胜, 刘达等. 东江河口典型河段溶解氧时空动态及低氧成因解析. 湖泊科学, 2025,37(1):112-121. DOI: 10.18307/2025.0122.]

[20] Tréguer, Paul, Bowler C , Moriceau B. Influence of diatom diversity on the ocean biological carbon pump. *Nature Geoscience*, 2017. DOI:10.1038/s41561-017-0028-x.

[21] Falkowski P G , Dubinsky Z , Wyman K . Growth-irradiance relationships in phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 1985, 30(2):311-321. DOI:10.4319/lo.1985.30.2.0311.

[22] Field C B , Behrenfeld M J , Randerson J T *et al*. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281(5374):237-240. DOI:10.1126/science.281.5374.237.

[23] Falkowski P G. The role of phytoplankton photosynthesis in global biogeochemical cycles. *Photosynthesis Research*, 1994, 39(3): 235-258. DOI: 10.1007/ BF00014586.

[24] Jones R I. Factors controlling phytoplankton production and succession in a highly eutrophic lake (Kinnego Bay, Lough Neagh): II. phytoplankton production and its chief determinants. *British Ecological Society*, 1977, 65(2):561-577. DOI: 10.2307/2259501.

[25] Zou Q, Liu SH, Huang X *et al*, Prototype Observation and Study of Dissolved Gas Supersaturation in Dadu River. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(01):139-145(in Chinese). [邹琴, 刘四华, 黄翔等. 大渡河过饱和溶解气体原型观测研究. 工程科学与技术, 2021, 53(01):139-145. DOI: 10.15961/j.jsuese.202000420]

[26] Qu L, Li R, Li J *et al*, Analysis on field observation of total dissolved gas supersaturation of Gongzui Dam. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011,42(05):523-528(in Chinese). [曲璐, 李然, 李嘉等. 龚嘴水电站总溶解气体过饱和原型观测结果分析. 水利学报, 2011,42(05):523-528. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2011.05.001.]

[27] Wang JY, Jia DD, Ruan JL *et al*, Response Patterns and Characterization of Tributary Hydrodynamic Characteristics to Mainstream Backwater Effect—A Case Study of the Shiguan River. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(6):207-216(in Chinese). [王金洋, 假冬冬, 阮锦楼等. 支流水动力特征对干流水位顶托的响应规律与表征——以史灌河为例. 工程科学与技术, 2024, 56(6):207-216. DOI: 10.12454/j.jsuese.202400135.]

[28] Wang Z, Liu Y, Qin C H *et al*. Study on Characteristics of Hydrodynamic and Pollutant Transport of the Tributary Estuary in the Three Gorges Reservoir Area. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 675-677:912-917(in Chinese). [王征,郭秀锐,程水源,等.三峡库区支流河口水动力及水污染迁移特性.北京工业大学学报, 2012, 38(11):7.DOI:CNKI:SUN:BJGD.0.2012-11-026.]

[29] Yan T, Chen L, Xu M *et al*. Experimental study of hydrodynamic characteristics at confluence reach in reservoir area.*Journal of Hohai University*, 2015, 43(1):60-65(in Chinese). [闫涛.库区交汇河段水动力特性试验. 河海大学学报(自然科学版), 2015(43):60-65. DOI:10. 3876/ j. issn. 1000 1980. 2015. 01. 012.]

[30] Iriarte A, Aravena G, Villate F *et al*. Dissolved oxygen in contrasting estuaries of the Bay of Biscay: effects of temperature, river discharge and chlorophyll a. *Marine ecology progress series*, 2010, 418(NOV.18):p.57-71. DOI:10.3354/meps08812.

[31] Villate F, Iriarte A, Uriarte I *et al*. Dissolved oxygen in the rehabilitation phase of an estuary: Influence of sewage pollution abatement and hydro-climatic factors. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 70(1-2):234-246. DOI:10.1016/j.marpolbul.2013.03.010.

[32] Iriarte A, Villate F, Uriarte I *et al*. Dissolved Oxygen in a Temperate Estuary: the Influence of Hydro-climatic Factors and Eutrophication at Seasonal and Inter-annual Time Scales. *Estuaries&Coasts*, 2015. DOI: 10.1007/s12237-014-9870-x.

[33] 蒋丹哲. 河流中溶解氧的影响因素及在水质评价中的改进应用. 地下水, 2024, 46(5):139-142.

[34] Lanoux, Aurélie, Etcheber H , Schmidt S *et al*. Factors contributing to hypoxia in a highly turbid, macrotidal estuary (the Gironde, France). *Environmental Science Processes & Impacts*, 2013, 15(3):585-595. DOI:10.1039/c2em30874f.

[35] Timchenko, V.M. Ekologicheskaya gidrologiya vodoyemov Ukrainy. (Ecological Hydrology of Water Bodies of Ukraine). Naukova Dumka Press, Kiev,2006.

[36] Shevchenko T F, Klochenko P D, Timchenko V M, *et al*. Epiphyton of a cascade plain reservoir under different hydrodynamic conditions. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 2019. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2019.01.006.

[37] V. Acuña, Vilches C, Giorgi A. As productive and slow as a stream can be—the metabolism of a Pampean stream. *Journal of the North American Benthological Society*, 2011, 30(1):71-83. DOI: 10.1899/09-082.1.

[38] Mitrovic S M, Hardwick L, Dorani F. Use of flow management to mitigate cyanobacterial blooms in the Lower Darling River, Australia. *Journal of Plankton Research*, 2011, 33(2):229-241. DOI: 10.1093/plankt/fbq094.

[39] Duan SY, Yang MW, Guan GH, Response of periphytic algae community structure characteristics to hydrodynamic conditions in an open channel. *Journal of Lake Sciences*, 2024,36(2):364-376(in Chinese). [段绍祎, 杨梦薇, 管光华等. 输水明渠着生藻类群落结构特征对水动力条件的响应. 湖泊科学,2024,36(2):364-376. DOI: 10.18307/2024.0212.]