

碳酸氢盐型盐化与富营养化对淡水生态系统水质及碳存量的影响

王心如

云南师范大学地理学部, 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明

收稿日期: 2026年3月24日; 录用日期: 2026年4月15日; 发布日期: 2026年4月24日

摘要

随着全球气候变化与人类活动加剧, 淡水盐化与富营养化已成为高原湖泊面临的双重挑战。本研究通过构建室外中宇宙模拟实验, 设计了0~2000 mg/L的碳酸氢钠浓度梯度及两种营养水平, 重点探讨碳酸氢盐型盐化与营养水平对水体理化稳态(pH、溶解氧、溶解性无机碳、二氧化碳)、营养盐(总磷、总氮)及有机碳组分(溶解性有机碳)的交互作用。研究发现: 1) 随着碳酸氢钠梯度增加, 水体DIC、CO₂与pH显著上升, 高营养组DIC与CO₂浓度在同盐度下始终低于低营养组。2) 总磷随盐度增加而升高, 且在高营养下增长更显著; 而总氮在各组间保持相对稳态。3) 高营养组在盐度低于1450 mg/L时表现出更高的产氧水平, 但超过该阈值后, 溶解氧急剧下降且DOC大量积累。研究揭示了营养水平对盐化响应的双重作用, 为气候变化背景下湖泊的盐化管理与生态修复提供了科学依据。

关键词

淡水盐化, 中宇宙实验, 碳酸氢钠, 淡水生态系统

Effects of Bicarbonate Salinization and Eutrophication on Water Quality and Carbon Inventory in Freshwater Ecosystems

Xinru Wang

Yunnan Plateau Geographic Process and Environmental Change Key Laboratory, Department of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: March 24, 2026; accepted: April 15, 2026; published: April 24, 2026

Abstract

Driven by global climate change and intensifying human activities, freshwater salinization and

文章引用: 王心如. 碳酸氢盐型盐化与富营养化对淡水生态系统水质及碳存量的影响[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(4): 520-529. DOI: 10.12677/aep.2026.164052

eutrophication have emerged as dual challenges for plateau lakes. This study utilized outdoor mesocosm experiments to establish a sodium bicarbonate (NaHCO_3) gradient (0~2000 mg/L) across two nutrient levels. We investigated the interactive effects of bicarbonate salinization and nutrients on physicochemical stability (pH, dissolved oxygen [DO], dissolved inorganic carbon [DIC], and carbon dioxide [CO_2]), nutrient dynamics (total phosphorus [TP] and total nitrogen [TN]), and organic carbon components (dissolved organic carbon [DOC]). The findings indicate that: 1) While DIC, CO_2 , and pH rose significantly with increasing NaHCO_3 , the high-nutrient group consistently maintained lower DIC and CO_2 concentrations than the low-nutrient group at equivalent salinities. 2) TP increased with salinity, a trend significantly amplified under high-nutrient conditions, whereas TN remained relatively stable across all treatments. 3) The high-nutrient group exhibited higher oxygen production levels at salinities below 1450 mg/L; however, exceeding this threshold triggered a sharp decline in DO accompanied by substantial DOC accumulation. This study highlights the dual role of nutrient levels in modulating ecosystem responses to salinization, providing a scientific framework for lake management and ecological restoration in the context of global climate change.

Keywords

Freshwater Salinization, Mesocosm Experiment, Sodium Bicarbonate, Freshwater Ecosystems

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 淡水盐化现状

内陆水体正面临着全球气候变化和人类活动的双重挑战。其中，淡水水体盐化与富营养化已成为威胁全球淡水生态系统健康的两大核心环境问题[1] [2]。全球范围内，淡水盐化趋势日益严峻。研究表明，北美约 37%的流域受到盐化影响，欧洲多个监测站点的电导率呈现显著上升趋势[3]-[5]。在中国，地表水盐化同样面临巨大挑战，超过 20%的监测站点盐度长期高于灌溉用水阈值，且在干旱及半干旱地区表现尤为突出[6]。云南省作为我国重要的生态屏障，其水体盐化特征具有独特性。受喀斯特地貌及地质构造影响，滇东等地区广泛分布碳酸盐岩，导致流经区域的河流天然具有较高的矿化度与碱度[7]-[9]。以程海为例，受暖干化气候及人为活动影响，该湖泊已由淡水湖转变为咸水湖，盐度及碱度逐年升高[10]-[12]。这种由自然风化与人为干扰共同驱动的盐化过程，使得碳酸氢根成为该区域水化学特征中的关键因子[13] [14]。

碳酸氢盐浓度的升高是内陆湖泊碱化的主要特征，它不仅显著改变水体的无机碳库(DIC)和酸碱缓冲体系(pH)，还可能通过渗透压胁迫直接影响水生生物的生理代谢[2] [15]。与此同时，外源氮、磷输入增加导致的富营养化改变了系统的基础生产力[16]。

1.2. 盐化与富营养化的交互作用

盐化对富营养化过程具有潜在的调节作用。一方面，高浓度的碳酸氢盐可作为无机碳源缓解光合限制，促进藻类生长[17]；但也可能通过高 pH 环境改变营养盐的赋存形态，例如通过影响吸附 - 解吸平衡或化学沉淀过程改变磷的有效性[1] [4]。另一方面，高营养水平可能增强系统的代谢强度，通过固定无机碳产生氧气的过程，缓冲盐度升高带来的理化冲击[18] [19]。

这种交互效应如何影响水体溶解氧(DO)、溶解性有机碳(DOC)以及氮磷的周转,是评估受污染水体对盐化响应的关键[20]-[22]。特别是在云南高原湖泊,水体的碳酸氢盐浓度相对偏高,然而,当前研究多侧重于单一因子影响,关于碳酸氢盐型盐化与富营养化如何通过交互作用重塑水环境稳态的机理尚不明确[2] [18] [23]。因此营养盐与碳酸氢盐型盐化交互作用的具体响应阈值与调节机制仍需深入探究[19] [24]。

1.3. 研究目的

本研究通过构建室外中宇宙模拟系统,设计了 0~2000 mg/L 的 NaHCO_3 浓度梯度及两种营养水平,重点探讨:

- 1) 盐度梯度如何改变不同营养水平下水体的理化稳态(pH, DO, DIC);
- 2) 营养水平与盐度对总氮(TN)、总磷(TP)及有机碳组分的交互作用。

研究结果旨在为气候变化背景下受盐化威胁的湖泊管理及生态修复提供理论依据。

2. 材料方法

2.1. 实验设计

实验在室外中宇宙系统中进行,共设置 44 个容量为 120 L 的黑色聚乙烯桶作为实验单元,实际注水 100 L。实验设计了两个因素:一是营养水平,包括低营养处理(10 $\mu\text{g P/L}$, 160 $\mu\text{g N/L}$)和高营养处理(40 $\mu\text{g P/L}$, 640 $\mu\text{g N/L}$),分别使用磷酸二氢钾(KH_2PO_4)和氯化铵(NH_4Cl)进行配制。二是 NaHCO_3 浓度梯度,在每种营养水平下设定 21 个处理水平,空白组设两个重复,其余处理各一个,浓度范围从 0~2000 mg/L。实验时长 43 天,为防止盐度剧烈波动产生的渗透压冲击,高浓度 NaHCO_3 处理组采取分步添加法。实验期间每周定期补充营养盐以维持梯度,并清理桶壁附着藻类,定期补充纯水以补偿蒸发损耗,保持 100 L 恒定体积。

2.2. 生态系统构建

本实验模拟了复杂的自然水生生态系统,每个桶中注入 40 L 自来水和 40 L 矿泉水作为基础水体,过滤并采集了北潭、龙潭及南湖三个校园湖泊湖水,按照北潭:龙潭:南湖 = 3 L:3 L:6 L 的比例制备混合藻液并分别接种,每桶接种 12 L 混合藻液。初始背景营养盐按 N:P = 16:1 添加,确保群落中浮游植物正常生长。一周后引入包括滇池、抚仙湖在内五个湖泊的浮游动物,每桶中添加五个湖泊浮游动物浓缩液各 1 L,并用纯水将桶内水体补充至 100 L,正式实验前进行了一周的混合培育,以实现生物背景的均一化。

2.3. 采样与指标测定

实验第 43 天进行采样。使用 YSI 多参数水质分析仪原位测定溶解氧和 pH,监测深度为水面下 20 cm 处。采用全水柱积分采样法采集 4 L 混合水样, TN、TP 依照标准实验室分光光度法测定;溶解性有机碳及溶解性无机碳经过滤后采用 TOC 分析仪测定。采用顶空平衡法采集气体样品,并利用气相色谱仪进行浓度分析。

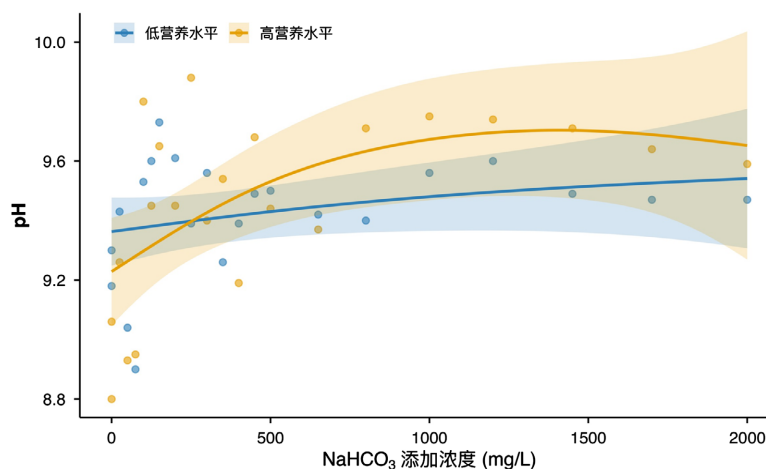
2.4. 数据处理与分析

实验数据采用广义加性模型(GAM)评估各指标随 NaHCO_3 梯度的响应趋势,利用 R 语言及 ggplot2 包进行可视化绘图。

3. 结果

3.1. 水体 pH、DIC 与 CO₂ 的变化趋势

水体 pH 值随碳酸氢钠添加浓度升高而变化的趋势如图 1 所示。在低营养组中, pH 值随 NaHCO₃ 浓度的增加缓慢上升, 起始 pH 值约为 9.4, 随浓度增加呈线性小幅增长, 在 2000 mg/L 处达到约 9.55。高营养水平下 pH 值的波动幅度显著大于低营养组, 在浓度为 0~300 mg/L 区间, pH 值从约 9.2 持续上升, 在 1250~1500 mg/L 区间达到最高值约 9.7, 随后曲线趋于平缓并略有下降。NaHCO₃ 添加浓度低于 300 mg/L 时, 低营养组的 pH 值高于高营养组; 当浓度超过 300 mg/L 后, 高营养组的 pH 值显著超过低营养组。



注: 图中拟合实线为局部加权回归曲线, 其周围的对应颜色的阴影区域表示 95% 的置信区间, 下同。

Figure 1. The trend of pH with salinity

图 1. 水体 pH 值随盐度的变化趋势

两种营养水平处理的 DIC 浓度均随盐度增加显著上升(图 2)。两个营养水平下的 DIC 响应极显著($P < 0.001$), 且模型解释率均在 99.9% 以上。在整个浓度梯度范围内, 低营养水平组的 DIC 响应值始终高于高营养水平组, 低营养组的 DIC 响应范围为 66.61~1569.19 mg/L, 而高营养组的 DIC 响应范围为 58.49~1487.87 mg/L。随着 NaHCO₃ 添加浓度的升高, 两组曲线之间的差值呈逐渐扩大的趋势。

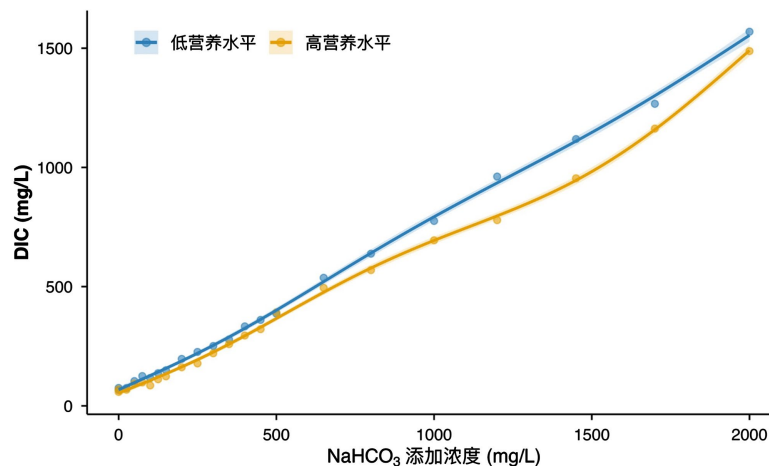


Figure 2. The trend of DIC with salinity

图 2. 溶解性无机碳随盐度的变化趋势

CO₂ 浓度随盐度升高在两个营养水平下均表现出极显著的线性增长趋势(图 3)。在低营养水平组, CO₂ 随添加浓度的增加显著上升, 响应值范围为 138.88 至 1591.31 μg/L; 在高营养水平组, CO₂ 同样显著上升, 响应值范围为 186.33 至 1395.28 μg/L。对比两组可见, 低营养组的 CO₂ 随盐度增加的增长斜率高于高营养组, 添加浓度超过约 500 mg/L 后, 低营养组的 CO₂ 排放水平始终高于高营养组。

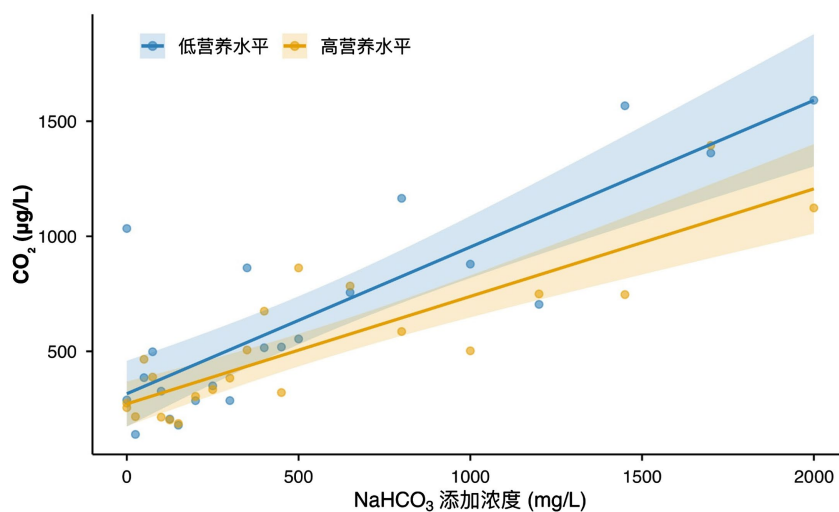


Figure 3. The trend of CO₂ with salinity
图 3. CO₂ 随盐度的变化趋势

3.2. 营养盐的响应趋势

TN 对盐度的响应在不同营养水平间呈不同趋势(图 4)。在高营养水平组, TN 浓度随碳酸氢钠浓度的增加整体呈现上升趋势, 响应值范围为 0.82 至 2.4 mg/L。然而, 该响应在统计学上并不显著($P = 0.237$), 其 R^2 仅为 0.0226。在低营养水平组, TN 浓度随碳酸氢钠浓度的增加缓慢下降, 响应值范围为 0.8 至 1.55 mg/L, 该响应同样不显著($P = 0.301, R^2 = 0.006$)。对比两组可见, 高营养组的 TN 浓度始终显著高于低营养组, 且两条拟合曲线随盐度增加表现变化相反。

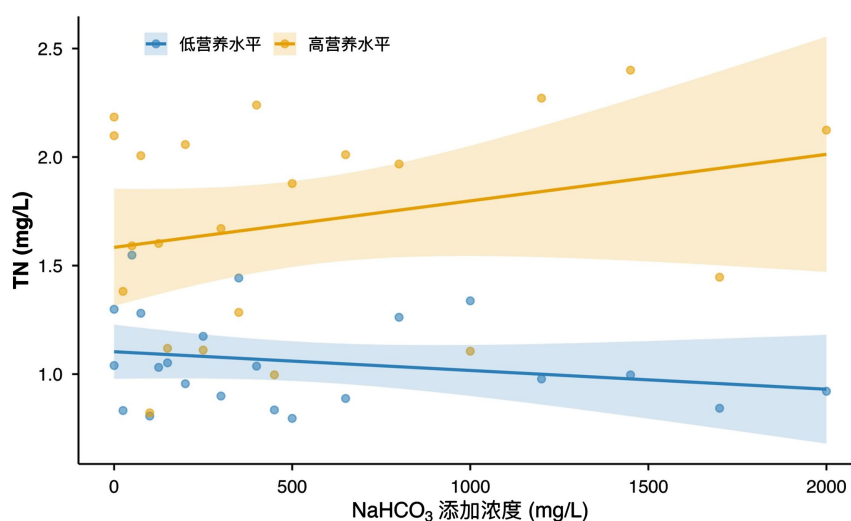


Figure 4. The trend of TN with salinity
图 4. 总氮随盐度的变化趋势

与 TN 不同, TP 随碳酸氢钠浓度的增加在两个营养水平下均表现出显著的增长趋势(图 5)。在高营养水平组, TP 浓度随添加浓度的升高呈显著上升趋势($P < 0.001$), 模型解释率较高($R^2 = 0.7361$), 其响应值从约 $24 \mu\text{g/L}$ 增长至约 $48.3 \mu\text{g/L}$ 。在低营养水平组, TP 浓度也随添加浓度的升高而显著增加($P = 0.001$, $R^2 = 0.5035$), 其响应值范围为 16.2 至 $46.65 \mu\text{g/L}$ 。在低盐度区间 TP 增长较快, 当浓度超过 1500 mg/L 后, 其增长趋于平缓。

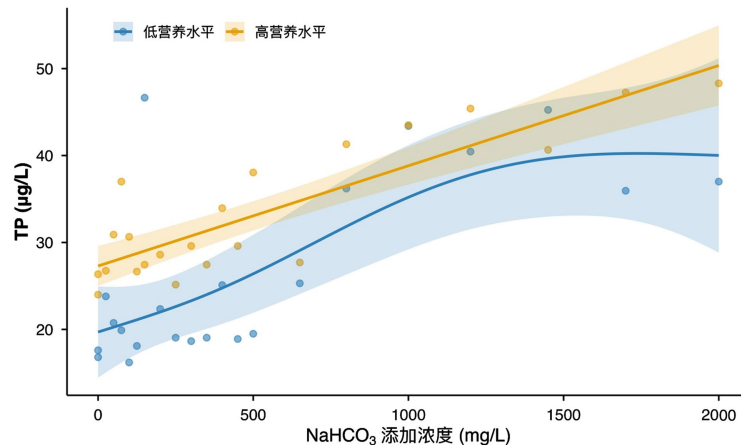


Figure 5. The trend of TP with salinity
图 5. 总磷随盐度的变化趋势

3.3. 生态系统代谢指标的响应

溶解氧随碳酸氢钠浓度的变化趋势在不同营养水平下表现出显著差异(图 6)。在高营养水平组, DO 随盐度的增加呈先上升后下降的趋势, 响应值范围在 6.89 至 13.00 mg/L 之间, 在盐度约为 1450 mg/L 附近达到峰值, 随后在更高的浓度区间出现快速下降。在低营养水平组, DO 随添加浓度的变化相对平缓, 响应值范围在 6.92 至 10.54 mg/L 之间, 虽然整体波动较小, 但在添加浓度达到 2000 mg/L 的末端, DO 也表现出了明显的下降趋势。对比两组数据可以发现, 当碳酸氢钠添加浓度低于约 500 mg/L 时, 两组的 DO 水平及变化趋势基本一致; 而在 500 至 2000 mg/L 的范围内, 高营养组的 DO 水平整体高于低营养组, 且高营养背景显著放大了系统对盐度梯度的响应强度。

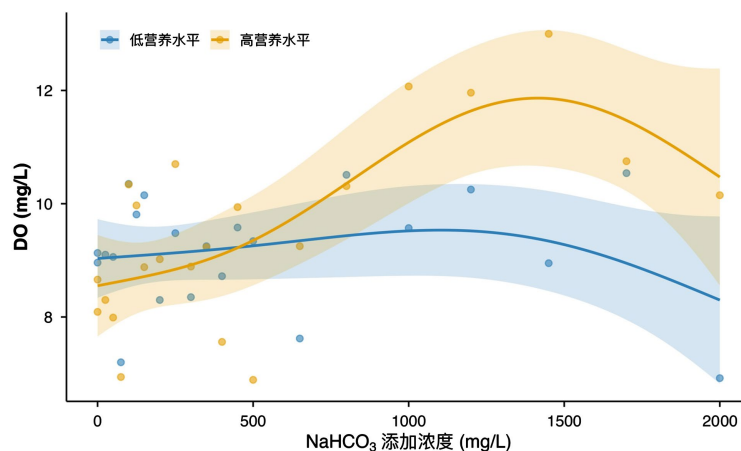


Figure 6. The trend of DO with salinity
图 6. 溶解氧随盐度的变化趋势

DOC 随碳酸氢钠浓度的增加在两个营养水平下的变化趋势如图 7 所示。在低营养水平组，DOC 随盐度的升高持续上升，响应值范围为 41.19 至 182.98 mg/L，在 1000 至 1500 mg/L 区间增长相对放缓，但在超过 1500 mg/L 后再次迅速上升。在高营养水平组，DOC 随盐度升高而增长，斜率高于低营养处理，响应值范围为 37.5 至 234.05 mg/L。对比两组发现，当碳酸氢钠浓度低于 500 mg/L 时，两组 DOC 水平接近；但当浓度超过 500 mg/L 后，高营养组的 DOC 积累量明显超过低营养组，且随着盐度升高，两组之间的差距进一步扩大。

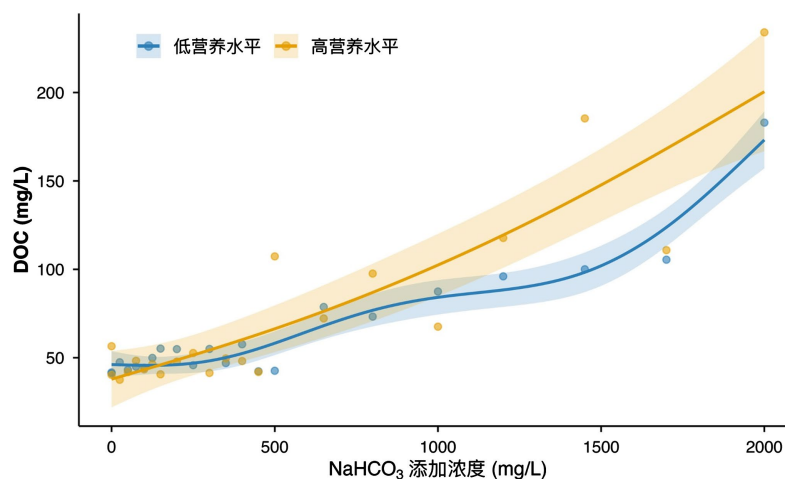


Figure 7. The trend of DOC with salinity
图 7. 溶解性有机碳随盐度的变化趋势

4. 讨论

4.1. 水体缓冲体系与无机碳的响应

本研究中，随着碳酸氢钠梯度的增加，水体溶解无机碳显著上升，这直接证明了盐化过程对水体无机碳库的物理增益作用。然而，无机碳库的变动并非纯粹的物理化学过程，而是受到浮游生物代谢的强烈调制。结果显示，高营养水平组的 DIC 始终低于低营养组，且二氧化碳的排放斜率也更低(图 2 和图 3)，这一观测数据直接表明：在相同盐度背景下，高营养水平导致浮游植物光合作用增强，有效消耗了部分溶解性无机碳，将其转化为生物质，从而在物理增碳的基础上实现了显著的生物固碳[17][25]。在酸碱度响应上，高、低营养组在 300 mg/L 浓度处出现了 pH 交汇点。一种合理的推测是，在低盐度范围内，高营养组由于初级生产力旺盛，光合作用对 CO₂ 的剧烈消耗导致其 pH 上升速度显著快于低营养组[19]；然而，当 NaHCO₃ 浓度超过 1500 mg/L 后，高营养组的 pH 趋于平缓甚至略有下降，结合 DO 在此时的同步跌落，说明高盐胁迫已达到生物耐受阈值，导致光合固碳效率受抑[15][26]。这种由生物调制向物理化学主导的转变，揭示了碳酸氢盐型盐化对湖泊碳循环稳定性的影响[2]。

4.2. 高盐胁迫下的营养盐变化

本研究观察到总磷随 NaHCO₃ 浓度增加而显著上升，且高营养组的升幅更为剧烈(图 5)。基于现有数据的分析推测，这种 TP 的异常升高主要归因于强阴离子间的竞争性解吸机制：高浓度的碳酸氢根和氢氧根会与颗粒物表面的磷酸根竞争吸附位点，促使底泥或悬浮物中的内源磷大量向水相释放[4][13]。由于本实验中高营养组具有更高的生物量基数和有机残体，其潜在的可解吸磷库可能更为丰富，导致了更强的释放响应[19][27]。相比之下，总氮在各组间保持了相对稳态(图 4)，这反映出碳酸氢盐型盐化对氮、

磷循环的影响机制存在显著差异[1] [28]。在高盐化情况下,系统面临着由 pH 驱动的磷源内源释放,而氮循环则在生物同化与可能的氨挥发损失间达到了动态平衡[18]。这种养分结构的失衡可能进一步诱发水生生物群落的演替,甚至加剧蓝藻爆发的风险[21] [29]。需要指出的是,上述关于磷释放的解吸机制目前仅为基于水相数据趋势的推论,未来研究需通过直接测定沉积物或颗粒物磷释放速率以及不同离子强度下的吸附等温线实验来进一步验证。

4.3. 生态系统代谢转变与有机碳积累

溶解氧和溶解性有机碳的动态变化反映了碳酸氢盐型盐化与富营养化的交互效应。高营养组 DO 随盐度呈现出的单峰响应(图 6)直观证实了存在一个盐度影响的转换阈值(约 1450 mg/L): 在 1450 mg/L 以下, NaHCO₃ 提供的充足无机碳源缓解了光合限制,促进了产氧[17]; 一旦超过该阈值,高渗透压和离子毒性导致藻类活性急剧下降,产氧量迅速下滑[15] [30] [31]。与 DO 的下降相对应,对于 DOC 随盐度升高而显著积累的现象,一种可能的解释是:在高盐胁迫下,浮游生物为调节细胞渗透压,主动向胞外分泌了更多的胞外聚合物(EPS)等小分子有机物,导致 DOC 的被动增加[20] [32]。另一种可能的机制是,高盐环境抑制了异养微生物的活性,导致系统对 DOC 的降解速率下降,从而引发有机碳在水体中的积累[22] [33]。本研究观测到了 DOC 的积累量随营养水平放大,但要明确这种积累究竟源于产量增加还是降解受阻,仍需在后续研究中通过测定微生物呼吸速率及利用同位素示踪技术分析有机碳的周转效率。

5. 结论

综合分析表明,营养水平与碳酸氢盐型盐化对淡水生态系统的作用是双重的。在低中度碳酸氢钠盐度下(<1450 mg/L),高营养水平通过提升光合速率对生态系统起着促进作用,表现为更高的产氧水平和更有效的无机碳截留。然而,这一缓冲效应存在明显的阈值(约 1450 mg/L),一旦跨越临界点,高营养背景反而会放大碳酸氢钠带来的生态风险,诱发内源磷释放与有机质积累。需指出的是,该阈值是在本实验特定环境下测得,在自然生境中,其具体数值可能受水温波动、光照强度及群落演替等多种环境因子的调控。

本研究结果对于云南高原湖泊(如程海)的治理具有重要现实意义,程海等湖泊正经历从淡水向咸水、碱水湖的转变,碳酸氢盐浓度的持续升高伴随着营养盐浓度的波动。研究提示,在气候暖干化导致盐化加剧的背景下,严格控制外源营养输入、降低湖泊基础营养水平,是防止湖泊跨越生态临界点、避免碳循环功能紊乱的关键前提。未来的湖泊管理应从单一因子管控转向盐度-营养盐的多维度协同管理,以应对全球变化下高原湖泊独特的生态挑战。

参考文献

- [1] Kaushal, S.S., Shelton, S.A., Mayer, P.M., Kellmayer, B., Utz, R.M., Reimer, J.E., *et al.* (2025) Freshwater Faces a Warmer and Saltier Future from Headwaters to Coasts: Climate Risks, Saltwater Intrusion, and Biogeochemical Chain Reactions. *Biogeochemistry*, **168**, Article No. 31. <https://doi.org/10.1007/s10533-025-01219-6>
- [2] Cunillera-Montcusí, D., Beklioglu, M., Cañedo-Argüelles, M., Jeppesen, E., Ptacnik, R., Amorim, C.A., *et al.* (2022) Freshwater Salinisation: A Research Agenda for a Saltier World. *Trends in Ecology & Evolution*, **37**, 440-453. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.12.005>
- [3] Kaushal, S.S., Likens, G.E., Pace, M.L., Utz, R.M., Haq, S., Gorman, J., *et al.* (2018) Freshwater Salinization Syndrome on a Continental Scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **115**, E574-E583. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711234115>
- [4] Kaushal, S.S., Likens, G.E., Pace, M.L., Reimer, J.E., Maas, C.M., Galella, J.G., *et al.* (2021) Freshwater Salinization Syndrome: From Emerging Global Problem to Managing Risks. *Biogeochemistry*, **154**, 255-292. <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00784-w>

- [5] Dugan, H.A., Bartlett, S.L., Burke, S.M., Doubek, J.P., Krivak-Tetley, F.E., Skaff, N.K., *et al.* (2017) Salting Our Freshwater Lakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **114**, 4453-4458. <https://doi.org/10.1073/pnas.1620211114>
- [6] Gao, L., Yuan, Z., Mao, X. and Ma, T. (2025) Salinity Levels, Trends and Drivers of Surface Water Salinization across China's River Basins. *Water Research*, **281**, Article ID: 123556. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123556>
- [7] 万国江, 徐义芳, 李菽蓉, 等. 云贵高原若干湖泊水库水化学组分研究[J]. 环境科学丛刊, 1988(3): 37-51.
- [8] 蒋志文, 吴遇安, 宋学良, 等. 云南湖泊的水质及沉积物地球化学[J]. 云南地质, 1997(2): 115-128.
- [9] 冯泽波, 史正涛, 苏斌, 等. 滇池主要入湖河流水化学特征及其环境意义[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(3): 18-24.
- [10] 单振光. 程海 1992 年水化学研究[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 1996(2): 21-28.
- [11] 严谷芬, 路萍, 李俊, 等. 程海水化学基本特征研究[J]. 环境科学导刊, 2015, 34(4): 1-8.
- [12] Chen, X., Liu, X., Peng, W., Dong, F., Chen, Q., Sun, Y., *et al.* (2019) Hydroclimatic Influence on the Salinity and Water Volume of a Plateau Lake in Southwest China. *Science of The Total Environment*, **659**, 746-755. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.013>
- [13] 朱正杰, 陈敬安. 云南程海沉积物碳酸盐来源辨识[J]. 湖泊科学, 2009, 21(3): 382-386.
- [14] 刘成, 徐文蕙, 周卫东, 等. 饮用水中碳酸氢根的意义和控制目标探讨[J]. 净水技术, 2023, 42(8): 1-9.
- [15] Griffith, M.B. (2017) Toxicological Perspective on the Osmoregulation and Ionoregulation Physiology of Major Ions by Freshwater Animals: Teleost Fish, Crustacea, Aquatic Insects, and Mollusca. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **36**, 576-600. <https://doi.org/10.1002/etc.3676>
- [16] Li, Y., Wang, R., Su, H., Wang, J., Xie, P. and Chen, F. (2022) Eutrophication and Predation Mediate Zooplankton Diversity and Network Structure. *Limnology and Oceanography*, **67**, S133-S145. <https://doi.org/10.1002/lno.11957>
- [17] 马淑娟, 孙力平, 钟远, 等. 碳酸氢盐投加对寡枝刚毛藻光合色素及碳酸酐酶活性的影响研究[J]. 生态科学, 2018, 37(6): 114-121.
- [18] Ersoy, Z., Abril, M., Cañedo-Argüelles, M., Espinosa, C., Vendrell-Puigmitja, L. and Proia, L. (2022) Experimental Assessment of Salinization Effects on Freshwater Zooplankton Communities and Their Trophic Interactions under Eutrophic Conditions. *Environmental Pollution*, **313**, Article ID: 120127. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120127>
- [19] 杨丽娟. 不同水深湖泊浮游动物群落对营养与盐度及其交互作用的响应规律[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2024.
- [20] Spiegel, C.J., Mladenov, N., Wall, C.B., Hollman, K., Tran, C.H., Symons, C.C., *et al.* (2024) Life after a Fiery Death: Fire and Plant Biomass Loading Affect Dissolved Organic Matter in Experimental Ponds. *Global Change Biology*, **30**, e17061. <https://doi.org/10.1111/gcb.17061>
- [21] Urrutia-Cordero, P., Langvall, O., Weyhenmeyer, G.A., Hylander, S., Lundgren, M., Papadopoulou, S., *et al.* (2024) Cyanobacteria Can Benefit from Freshwater Salinization Following the Collapse of Dominant Phytoplankton Competitors and Zooplankton Herbivores. *Freshwater Biology*, **69**, 1748-1759. <https://doi.org/10.1111/fwb.14323>
- [22] Degerman, R., Lefebvre, R., Byström, P., Båmstedt, U., Larsson, S. and Andersson, A. (2018) Food Web Interactions Determine Energy Transfer Efficiency and Top Consumer Responses to Inputs of Dissolved Organic Carbon. *Hydrobiologia*, **805**, 131-146. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3298-9>
- [23] Cañedo-Argüelles, M., Beklioglu, M., Crabot, J., *et al.* (2025) Preparing European Freshwaters for a Saltier Future. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- [24] 马锐婧. 外源溶解性有机碳和营养盐添加对浮游生物丰度和多样性的影响[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2024.
- [25] Rumschlag, S.L., Casamatta, D.A., Mahon, M.B., Hoverman, J.T., Raffel, T.R., Carrick, H.J., *et al.* (2022) Pesticides Alter Ecosystem Respiration via Phytoplankton Abundance and Community Structure: Effects on the Carbon Cycle? *Global Change Biology*, **28**, 1091-1102. <https://doi.org/10.1111/gcb.15952>
- [26] Valleau, R.E., Celis-Salgado, M.P., Arnott, S.E., Paterson, A.M. and Smol, J.P. (2022) Assessing the Effect of Salinization (NaCl) on the Survival and Reproduction of Two Ubiquitous Cladocera Species (*Bosmina longirostris* and *Chydorus brevilabris*). *Water, Air, & Soil Pollution*, **233**, Article No. 135. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05482-9>
- [27] Bai, X., Jiang, Y., Jiang, Z., Zhu, L. and Feng, J. (2022) Nutrient Potentiate the Responses of Plankton Community Structure and Metabolites to Cadmium: A Microcosm Study. *Journal of Hazardous Materials*, **430**, Article ID: 128506. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128506>
- [28] 白雪. 基于人工模拟水生态系统的氮磷营养盐群落效应研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 南开大学, 2022.
- [29] Filstrup, C.T., Hillebrand, H., Heathcote, A.J., Harpole, W.S. and Downing, J.A. (2014) Cyanobacteria Dominance

-
- Influences Resource Use Efficiency and Community Turnover in Phytoplankton and Zooplankton Communities. *Ecology Letters*, **17**, 464-474. <https://doi.org/10.1111/ele.12246>
- [30] Huang, J., Li, Y., Sun, Y., Zhang, L., Lyu, K. and Yang, Z. (2022) Size-Specific Sensitivity of Cladocerans to Freshwater Salinization: Evidences from the Changes in Life History and Population Dynamics. *Environmental Pollution*, **296**, Article ID: 118770. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118770>
- [31] Soucek, D.J. (2007) Sodium Sulfate Impacts Feeding, Specific Dynamic Action, and Growth Rate in the Freshwater Bivalve *Corbicula fluminea*. *Aquatic Toxicology*, **83**, 315-322. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2007.05.006>
- [32] Lee, S., Lee, M., Puthumana, J., Park, J.C., Kang, S., Hwang, D., *et al.* (2017) Effects of Salinity on Growth, Fatty Acid Synthesis, and Expression of Stress Response Genes in the Cyclopoid Copepod *Paracyclops nana*. *Aquaculture*, **470**, 182-189. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.12.037>
- [33] Astorg, L., Gagnon, J., Lazar, C.S. and Derry, A.M. (2023) Effects of Freshwater Salinization on a Salt-Naïve Planktonic Eukaryote Community. *Limnology and Oceanography Letters*, **8**, 38-47. <https://doi.org/10.1002/lol2.10229>