

湟水干流浮游植物群落结构特征及生态健康评价

耿昭克¹, 贾洁², 时璐², 陆丹²

(1.青海省水资源及节约用水技术服务中心, 西宁 810001; 2.青海省水文水资源测报中心, 西宁 810001)

摘要:基于2024年3月(枯水期)、5月(平水期)、8月(丰水期)采集的湟水干流浮游植物定性定量样品, 分析了浮游植物群落的结构特征, 并进行功能群划分。结果表明: 1) 湟水干流共鉴定出浮游植物8门128种, 硅藻门占比最大, 其次为绿藻门和蓝藻门。浮游植物丰富度和生物量均呈现出枯水期最大, 平水期次之, 丰水期最小的趋势。2) 湟水干流浮游植物共划分19个功能群, 优势功能群共7个, 分别为C、D、LM、MP、TD、W1、和Y。浮游植物H指数、J指数、D指数和Q_i指数均值分别为3.58、0.71、3.60和4.03, 表明除东大滩水库出口以外, 湟水干流水质整体处于寡污、轻污水平, 为“优秀”的生态健康状态。3) DO、WT、NH₃-N、TN为影响湟水干流浮游植物结构和优势功能群组成的最主要环境因子。

关键词: 湟水干流; 浮游植物; 功能群; 生态健康评价

中图分类号: Q178

文献标志码: A

文章编号: 1000-2367(2026)04-0053-07

浮游植物是水生态系统主要的初级生产者, 相比于鱼类和大型底栖动物, 浮游植物具有生物周期短、个体小、敏感性高、易于采集等优势, 因此, 浮游植物常被用于水域生态系统的生态健康状态评估^[1]。相比传统的浮游植物分类法, 浮游植物功能群能较为直观地反映群落演替规律和生态健康状态, 结果更为合理可靠。2002年 Reynolds等^[2]初次提出了FG(functional groups)功能群分类法, 2009年 Padisák等^[3]将功能群补充至39种。目前应用较多的分类方法有FG、MFG(morphology-functional groups)、MBFG(morphology-based functional groups)和PFT(plant functional types)^[4]。FG功能群分类法已广泛用于河流生态健康评价, 且更适合评价小流域健康状态。湟水作为黄河上游重要的一级支流, 被誉为“青海人民的母亲河”^[5], 不仅是青海省东部重要的工农业用水来源, 更是维系青藏高原东北缘生态安全的关键屏障。随着流域内城市化进程加速, 水生态系统面临着严峻的挑战。截至目前, 湟水干流的研究主要关注水质评价^[6]、底栖动物^[7]、水资源可持续利用^[8]等, 缺少流域浮游植物功能群的研究。基于此, 本研究选取不同季节对湟水干流7个站点的浮游植物进行定性定量监测, 系统分析湟水干流浮游植物群落结构特征, 利用FG功能群分类法进行生态系统健康评价, 为青海省高原河流生态健康评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湟水作为黄河上游最大的支流, 其源头位于海北州海晏县境内肯特达坂山的洪呼日尼哈, 河源海拔4 353 m,

收稿日期: 2025-05-29; 修回日期: 2025-09-23.

基金项目: 国家重点研发项目(2022YFC3201703-02).

作者简介: 耿昭克(1982—), 男, 云南昭通人, 青海省水资源及节约用水技术服务中心高级工程师, 研究方向为水资源保护, E-mail: 645639313@qq.com.

通信作者: 陆丹, E-mail: 249141572@qq.com.

引用本文: 耿昭克, 贾洁, 时璐, 等. 湟水干流浮游植物群落结构特征及生态健康评价[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2026, 54(4): 53-59. (Geng Zhaoke, Jia Jie, Shi Lu, et al. Characterization of phytoplankton community structure and ecological health assessment of the main stream of the Huangshui River[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2026, 54(4): 53-59. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.05.29.0002.)

干流总长 371 km,最终在甘肃省兰州市西固区达川乡河嘴村汇入黄河,河道总落差达 2 788 m,平均比降 4.53‰.湟水干流略靠流域南部,两岸分布着 100 余条大小支流.水系结构具有分段特点:西宁市以上呈扇状,以下则为羽状和树枝状.湟水径流以降水补给为主,干流每年的 4~9 月径流量占全年的 80%以上.湟水干流多年平均年输沙量为 2 050 万 t,冰冻期 6~7 月^[8].

1.2 数据来源

于 2024 年 3 月(枯水期)、5 月(平水期)和 8 月(丰水期)分 3 个水期对湟水干流从上到下的海晏、东大滩水库出口(水库出口下游 200 m 处)、湟源、西宁、小峡、乐都和东垣村等 7 个站点进行水质和浮游植物定性定量样品采集,同时在海晏、湟源、西宁和乐都等有水文站的站点进行水量同步监测,站点布设见附录图 S1.定量样品用有机玻璃采水器采集水样 2.0 L,立即加入 10 mL 鲁哥试剂(10%)充分摇匀固定,实验室静止 48 h 后,浓缩至 50 mL 进行镜检.定性样品:用 25 # 浮游生物网在表层缓慢划“∞”拖曳采集 3~5 min,过滤并用鲁哥试剂固定保存.参照文献^[9-10]对浮游植物进行种类鉴定.水质样品按照《水环境监测规范》(SL219-2013)中样品采集和保存方法执行.用 HQ2200 型多参数水质监测仪现场测定水温、pH 和溶解氧,其余监测项目氨氮、高锰酸盐指数、化学需氧量、总磷、总氮、叶绿素 *a* 等数据来源于青海省水质监测中心实测数据.

1.3 评价方法

浮游植物优势度 $(Y) = (n_i / N) f_i$,取 $Y \geq 0.02$ 为优势种, n_i 为某种个体数量, N 为所有种的个体总数, f_i 为 i 种类出现的样点数与总样点数的比值.

多样性指数、Shannon-Wiener 指数(H')、均匀度指数(J')和丰富度指数(D'),公式详见文献^[11],其中 H' 值在(0,1]为多污带,(1,2]为 α -中污带,(2,3]为 β -中污带,大于 3 为寡污带; J' 值在(0,0.3]为重污染,(0.3,0.5]为中污染,(0.5,0.8]为轻污染,大于 0.8 为无污染; D' 值在(0,1]为重污染,(1,2]为中污染,(2,4]为轻污染,(4,6]为无污染.

Q_r 指数. $Q_r = \sum_{i=1}^j P_i \times F_i$,式中, j 为浮游植物功能群数, P_i 为第 i 个功能群生物量占总生物量的比例, F_i 为第 i 个功能群的功能群赋值^[11]. F 因子的赋值不仅与功能群藻类所处的营养状况、湍流程度和停留时间等有关,还与该藻类所处的自然环境的物理和化学特性有密切关系^[11].根据 Q_r 值的范围可以将水生态健康状况划为 5 个等级,(0,1]为“极差”,(1,2]为“较差”,(2,3]为“中等”,(3,4]为“良好”,(4,5]为“优秀”^[1].

1.4 数据处理

运用 ArcGIS 10.8 绘制湟水干流采样点布设图,使用 Excel 2021 对浮游植物定性和定量数据进行分析统计,用 Canco 5.0 进行冗余分析,分析浮游植物的种类组成与环境因子之间的相关关系.其余的种类、密度、生物量、多样性指数图等均采用 Origin 2024 进行绘制.

2 结果分析

2.1 环境因子变化

湟水干流海晏、湟源、西宁和乐都 4 个站点流量流速采用水文站实测数据,东大滩水库出口、小峡和东垣村 3 个站点的流量数据通过水文比拟法(各站点位于同一条河流上下游,2 个站控制的集水面积相差不超过 3%~15%,且区间降水、下垫面条件等相似,可按面积比来推荐多年平均流量)获得^[12],流速通过相邻水文站实测流量-流速关系曲线拟合而来.由附录表 S1 可以看出,丰水期流量和流速均远大于平水期、枯水期,从流速的空间分布来看,东大滩水库出口处河床比降小,在各个水期其流速均低于其余 6 个站点.从水质理化因子来看,3 个水期水温呈上升趋势,溶解氧、氨氮和总氮 3 个指标则呈下降趋势,叶绿素 *a* 在平水期最高,枯水期和丰水期基本持平,其余各指标各时间段差异较小.根据《地表水资源质量评价规程》(SL 395-2007),总氮指标不参评,采用水质单因子评价法对各站点水质进行评价,水质均优于或达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中 II 类水质标准,水质优良.

2.2 浮游植物群落组成

浮游植物定性样品共检出浮游植物 8 门 128 种,其中,硅藻门数量最多,达 74 种,绿藻门次之,为 30 种,

蓝藻门、裸藻门和甲藻门分别为 11 种、4 种和 3 种,金藻门、隐藻门与黄藻门的种类数量相同,均为 2 种.各站点浮游植物定性数量见附录图 S2.

湟水干流 7 个站点 3 次监测浮游植物密度在 $1.20 \times 10^6 \sim 1.10 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$,基本呈现枯水期>平水期>丰水期的趋势,各站点浮游植物的空间变化见图 1(a).枯水期各站点流量较小,流速较缓,水体清澈,因此浮游植物密度较大,尤其在东大滩水库出口,浮游植物密度最大,达 $1.10 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$,根据水利部《全国重点水域水生态监测方案(试行)》中水华分析评价标准,枯水期东大滩水库出口达“轻度水华”.丰水期水体流速较大且水体浑浊度较高,造成浮游植物密度降低.

各站点浮游植物生物量在枯水期范围为 3.33~10.19 mg/L,均值为 6.59 mg/L、平水期范围为 3.37~8.72 mg/L,均值为 5.38 mg/L,丰水期的范围为 1.26~3.78 mg/L,均值为 2.28 mg/L.综合全年检测结果,浮游植物生物量范围为 1.26~10.17 mg/L,平均值 4.75 mg/L,其中,硅藻生物量占比最大,为 86.16%,裸藻和绿藻次之,占比分别为 4.36%、3.08%.详见图 1(b).

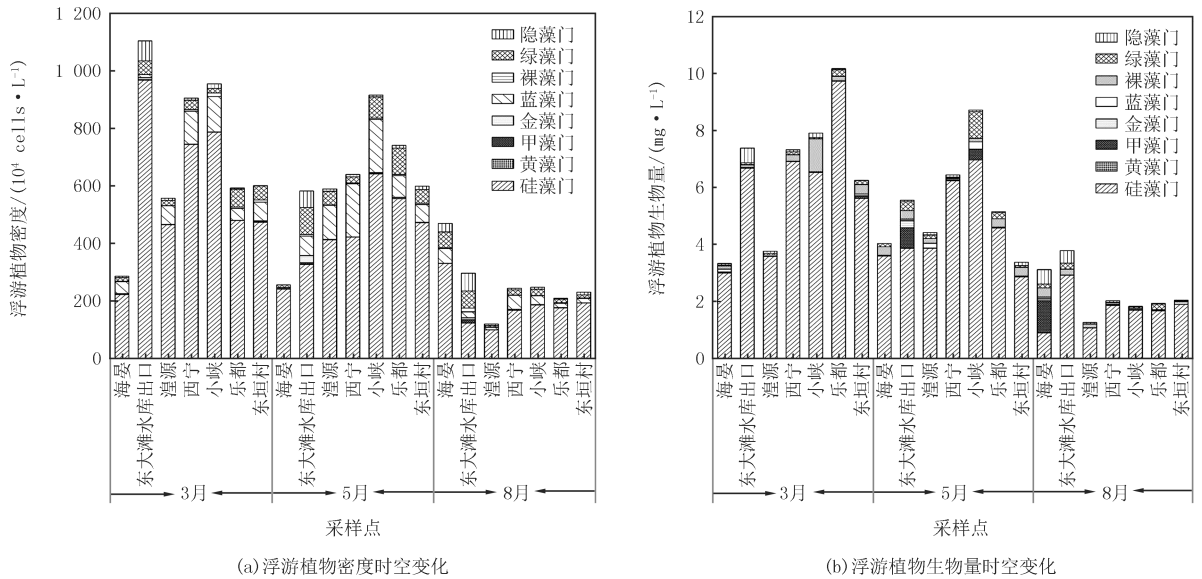


图1 浮游植物密度(a)、优势功能群生物量(b)

Fig.1 Spatio-temporal variations of phytoplankton density(a),Spatio-temporal variations of phytoplankton biomass(b)

2.3 浮游植物优势种

湟水全年干流优势种共 13 种,硅藻门占比最高,有 9 种;隐藻门次之,共 2 种;蓝藻门与绿藻门数量相同,各有 1 种.湟水干流各水期的优势种不尽相同,枯水期和平水期优势种基本为伪鱼腥藻(*Pseudoanabaena* sp.)、等片藻(*Diatoma* sp.)、星杆藻(*Asterionella* sp.)、舟形藻(*Navicula* sp.)、异极藻(*Gomphonema* sp.)和菱形藻(*Nitzschia* sp.),丰水期在此基础上增加了衣藻(*Chlamydomonas* sp.)、隐藻(*Cryptomonas* sp.)和蓝隐藻(*Chroomonas* sp.)等优势种,见附录表 S2.

2.4 功能群划分

依据 FG 功能群分类方法^[2],湟水干流浮游植物共有 19 个功能群,分别为 B、C、D、E、F、G、H₂、L₀、L_M、MP、P、S₁、T_C、T_D、W₀、W₁、X₂、X₃ 和 Y,其中功能群 D、MP 和 T_B 等 3 个功能群出现频率为 100%,功能群 C、G、H₂、L₀、L_M、P、S₁、T_D、W₁ 和 X₃ 等 10 个功能群出现频率均小于 20%,为湟水干流偶见或罕见功能群,其余为常见功能群,湟水干流浮游植物优势功能群划分见附录表 S3.

分别计算各站点中至少有 1 个采样点相对生物量大于 10% 的浮游植物种类,枯水期分别有等片藻、桥弯藻、星杆藻、舟形藻、放射性舟形藻、裸藻等,平水期有等片藻、舟形藻、星杆藻、菱形藻、尖肘形藻、角甲藻、桥弯藻等;丰水期有等片藻、异极藻、星杆藻、桥弯藻、菱形藻、舟形藻、放射性舟形藻、角甲藻、多甲藻、隐藻等.选取优势度大于 0.02 的物种和至少在 1 个采样点相对生物量大于 10% 种类^[13],定义为优势功能属(种),从而确定优势功能群,通过计算,湟水干流优势功能属(种)代表生物量占各站点生物量的 95% 左右,其中,枯水期占比达 97.22%,平水期占比为 93.81%,丰水期占比为 94.16%.经分析湟水干流可分为 7 个优势功能

群,分别为 C、D、L_M、MP、T_D、W₁和 Y(舟形藻、放射性舟形藻、等片藻、桥弯藻均归为混合水层的 MP 功能群,各水期优势功能群基本相似,枯水期 5 个优势功能群(C、D、MP、W₁和 Y),平水期 6 个优势功能群(C、D、L_M、MP、T_D和 W₁),丰水期 6 个优势功能群(C、D、L_M、MP、T_D和 Y)。

浮游植物功能群生物量占比见图 2。枯水期由星杆藻组成的功能群 C 在东大滩水库出口生物量占比最大,达 61.06%,其余站点均为曲壳藻、异极藻、双菱藻、舟形藻、等片藻等组成。功能群 MP 生物量占比最大;平水期功能群 MP 仍为占比最大的功能群,但相比于枯水期,功能群 D(代表种为菱形藻)占比有所增加,东大滩水库出口和小峡桥 2 个站点出现了由喜营养的角甲藻和多甲藻组成的功能群 LM,同时,小峡还出现了功能群 T_D(代表种为水绵),其余站点都出现了由裸藻组成的功能群 W₁;丰水期,东大滩水库出口功能群 MP 生物量相对量为 7.03%,功能群 L_M 生物量相对占比为 35.34%,其余站点 MP 生物量占比为 61.11%~72.23%,基本与枯水期和平水期类似。

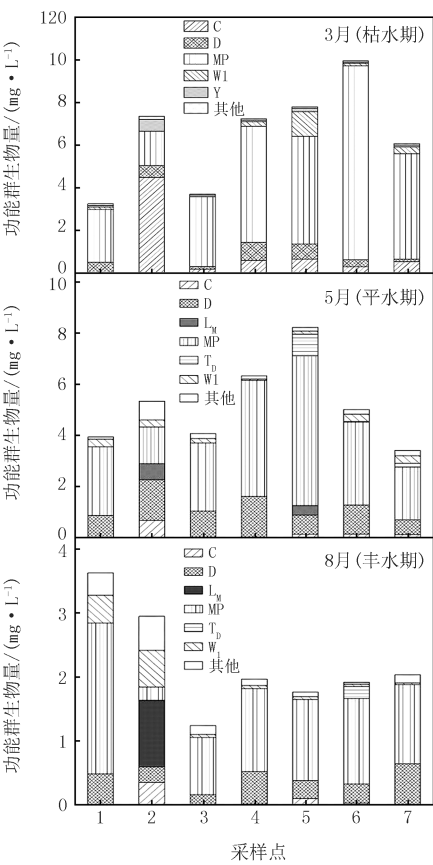
2.5 浮游植物的水生态健康评价

湟水干流 *H* 指数介于 1.42~4.13,平均值为 3.58,除枯水期东大滩水库出口 *H* 指数为 1.42(α -中污带)和丰水期海晏 *H* 指数为 2.83(β -中污带)外,其余各站点 *H* 指数均大于 3,表明湟水干流水体总体上物种种类丰富,群落结构复杂,水质状况优良。浮游植物的 *J* 指数为 0.31~0.83,全年 *J* 指数均值为 0.71,除枯水期东大滩水库出口 *J* 指数为 0.31、平水期和平水期海晏 *J* 指数分别为 0.58、0.42 以外,其余站点 *J* 值均大于 0.70,整体上来看,水体介于轻污与清洁状态,生物个体分布较均匀,群落结构较为稳定。*D* 指数为 2.52~4.46,平均值为 3.60,除 3 个水期东大滩水库出口为轻污染外,其余各站点均为寡污染或无污染状态;*Q_r* 指数为 2.31~4.68,均值为 4.04,除东大滩水库出口 *Q_r* 指数分别为 2.74、2.81、2.31 处于中等的健康水平外,其余站点均大于 4.0,处于优秀水平,主要原因是东大滩水库出口水体流速相对较慢,喜富营养水体的星杆藻大量繁殖,造成 *Q_r* 指数处于较低水平。各指数时空变化见附录图 S3。

2.6 浮游植物群落、优势功能群与环境因子相关性分析

选取硅藻门(Baci)、甲藻门(Dino)、金藻门(Chry)、蓝藻门(Cyan)、裸藻门(Eugl)、绿藻门(Chlo)、隐藻门(Cryp)、*Q_r* 指数等与流量(*Q*)、流速(*V*)、水温(*WT*)、pH、溶解氧(*DO*)、氨氮(*NH₃-N*)、高锰酸盐指数(*COD_{Mn}*)、总磷(*TP*)、总氮(*TN*)和叶绿素 *a* (*Chl a*) 等 10 个环境因子,利用 Canoco 5.0 进行冗余分析(图 3),首先进行去趋势对应分析(DCA),结果显示第一轴 Axis1 数值为 0.70,因此选择基于线性 RDA 分析。RDA 分析结果表明:RDA1 轴和 RDA2 轴的差异解释率分别为 94.62%、3.45%,且浮游植物与环境因子的相关系数分别为 0.822 8、0.770 2,表明排序结果可靠且代表性强。结合蒙特卡洛置换检验,共提取 *DO*、*WT*、*NH₃-N* 等 3 个极显著影响因子($P<0.01$)和 pH、*TN*、*TP* 等显著环境因子($P<0.05$)进行分析,各门类密度组成与 pH、*Q*、*V*、*WT* 呈负相关;硅藻门、绿藻门和裸藻门与 *DO*、*TN*、*NH₃-N*、*TP* 呈正相关;蓝藻门与 *TN*、*NH₃-N*、*TP* 呈正相关;其余门类与 *DO* 呈正相关。

DCA 分析显示第一轴 Axis1 数值为 1.70,因此选择 RDA 分析,RDA1 轴和 RDA2 轴的差异解释率分别为 81.59%、13.65%,且浮游植物优势功能群生物量与环境因子的相关系数分别为 0.882 4、0.802 4,表明 RDA 分析能较好地反映优势功能群和环境因子之间的关系。结合蒙特卡洛置换检验,提取出 *DO*、*WT*、*TN*



1. 海晏;2. 东大滩水库出口;3. 湟源;4. 西宁;5. 小峡;6. 乐都;7. 东垣村。

图2 优势功能群生物量分布
Fig.2 Biomass distribution of dominant functional groups

等 3 个极显著影响环境因子($P<0.01$)和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、V 等 3 个($P<0.05$)显著影响的环境因子.功能群 MP 和 W1 与 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 呈显著的正相关;功能群 MP 和 C 与 DO 呈较强的正相关关系;功能群 MP、C、Y 与 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、WT 等环境因子都呈负相关.

综上所述,DO、WT、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 为影响湟水干流浮游植物结构和优势功能群组成的最主要环境因子.

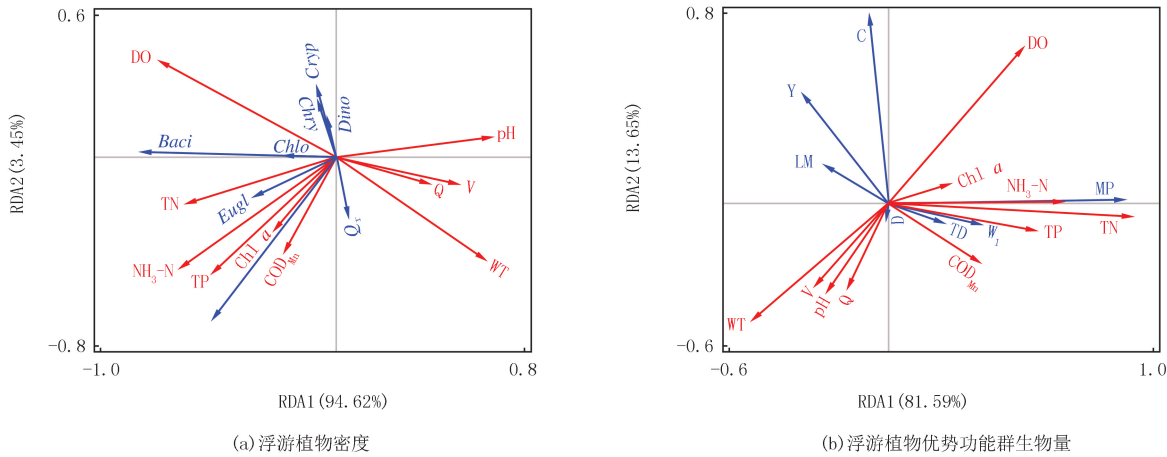


图3 浮游植物密度(a)、优势功能群生物量(b)与环境因子的RDA分析
Fig.3 RDA analysis between phytoplankton density and environmental factors(a),RDA analysis of biomass of dominant functional groups and environmental factors(b)

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构

本次调查共检出浮游植物 8 门 128 种,密度 $1.20\times 10^6\sim 1.10\times 10^7\text{ L}^{-1}$,硅藻是湟水干流浮游植物的最主要优势门类,丰富度和生物量占比均最大,其次为绿藻门,蓝藻门,其余门类占比较小,符合高原水体特有的浮游植物组成特征.浮游植物丰富度和生物量均呈现出枯水期>平水期>丰水期的趋势,主要原因有 3 个:一是营养盐浓度的影响,丰水期河流水流量明显增大,稀释了水中的营养物质(枯水期氨氮和总氮浓度均大于丰水期浓度),抑制了浮游植物生长,而枯水期水量减少,河流流速减缓,水体更新慢,营养盐易积累,浓度升高后为藻类生长提供充足养分;二是光照的影响,丰水期水流速较快,水体浑浊,透光性差,而枯水期水流平缓,水体透明度较高,光照更易穿透,更利于藻类光合作用;三是水流扰动的影响,丰水期水流湍急,强烈的扰动会破坏藻类的生长环境,枯水期水流平缓,藻类更易悬浮生长,形成稳定种群.

3.2 水生态健康评价

从理化指标可以看出,湟水干流各理化指标达到或优于Ⅱ类水质标准,水质优良.浮游植物的 Shannon-Wiener 指数(H')、均匀度指数(J')、丰富度指数(D')和 Q_r 指数分析结果表明,除东大滩水库出口为 α -中污带或“中等”生态健康状态外,其余各站点均为寡污、轻污或“优秀”的生态健康状态,主要的原因是东大滩水库出口水体流速相对较慢,喜富营养水体的星杆藻大量繁殖,造成各指数均处于较低水平,调查期间发现,尽管湟水干流各站点水质理化指标优良,但浮游植物的相关分析可以看出,东大滩水库出口可能面临星杆藻水华的威胁.

3.3 浮游植物组成、优势功能群与环境因子的关系

湟水干流浮游植物各门类与 pH、Q、V、WT 呈负相关,水体 Q 的增加,V 随之增大,不仅稀释了浮游植物也稀释了水中的各类营养物质,因此藻类密度有所减少;研究发现,一些硅藻受 pH 的影响较为显著^[14],由于湟水干流硅藻的丰富度和生物量均占绝对优势,pH 越高,硅藻越少,相对的藻类丰富度也减少,此观点在黄河干流的研究中也得到了证实^[15].浮游植物丰富度除受 DO 影响外,还受 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、Chl a、 COD_{Mn} 等环境因子的影响,DO 浓度的变化与浮游植物的生命活动密切相关,浮游植物的呼吸作用会消耗水体中的 DO,光合作用则会促进水体中的 DO,TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 为藻类生长提供了所需要的营养物质^[12],其

含量对藻类丰富度均具有较大的影响.湟水干流共划分 19 个功能群,其中 C、D、LM、MP、TD、W1、和 Y 为优势功能群.功能群 MP 和 W1 与 TN、NH₃-N、TP 呈显著的正相关,主要原因是以部分硅藻为优势种组成的 MP 和以裸藻为代表种构成的 W1,其生长需要大量的氮、磷等营养物质^[13],MP 与 WT 呈显著负相关,功能群 MP 主要代表种为硅藻门种类,大部分硅藻在低温下适应能力强,因此在高原河流硅藻占比较大^[12];3 个水期,功能群 MP 生物量占绝对的优势,枯水期 MP 生物量占比 21.83%~91.32%,平均值为 71.39%;平水期 MP 相对生物量为 26.71%~71.74%,平均值为 61.69%;丰水期 MP 生物量相对生物量为 7.03%~72.23%,平均值为 59.00%,MP 占比呈下降趋势,而与之相反的是,以肘形藻和菱形藻为代表物种的功能群 D 占比则呈上升趋势,丰水期河流水量增加,水体冲刷作用加强,造成含沙量和浑浊度增大,更适合喜浑浊水体的肘形藻和菱形藻生长^[15].枯水期到丰水期,以星杆藻为代表物种的功能群 C 占比也逐渐减少,流量的增加,造成流速和浑浊度的升高,也进一步抑制了喜光的星杆藻生长^[15].

4 结论

- 1)湟水干流共鉴定出浮游植物 8 门 128 种,硅藻门占比最大,其次为绿藻门和蓝藻门.浮游植物丰富度和生物量均呈现出枯水期最大,平水期次之,丰水期最小的趋势.
- 2)湟水干流浮游植物共 19 个功能群,优势功能群 7 个,综合浮游植物 *H* 指数、*J* 指数和 *Q*_r 指数,除东大滩水库出口以外,湟水干流其余站点水质处于寡污、轻污水平,为“优秀”的健康状态.
- 3)冗余分析表明,DO、WT、NH₃-N、TN 为影响湟水干流浮游植物结构和优势功能群组成的最主要环境因子.
- 4)湟水干流各站点水质达到或优于 II 类水质标准,但东大滩水库出口仅为“中等”健康状态,建议加强该站点的浮游植物监测,为湟水干流水生态保护提供基础数据支撑.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.05.29.0002).

参 考 文 献

[1] 陈航,关现,曹樱樱,等.浙江省安地水库浮游植物群落结构特征及生态健康评价[J].水生生物学报,2025,49(5):146-157.
Chen H, Guan X, Cao Y Y, et al.Characterization of phytoplankton community structure and ecological health assessment of andi reservoir in Zhejiang Province[J].Acta Hydrobiologica Sinica,2025,49(5):146-157.

[2] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, et al.Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton[J].Journal of Plankton Research,2002,24(5):417-428.

[3] Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L.Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification:a critical review with updates[J].Hydrobiologia,2009,621(1):9645.

[4] 胡韧,蓝于倩,肖利娟,等.淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用[J].湖泊科学,2015,27(1):11-23.
Hu R, Lan Y Q, Xiao L J, et al.The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups[J].Journal of Lake Sciences,2015,27(1):11-23.

[5] 陆丹,耿昭克,闵敏,等.基于区间型贝叶斯模型的湟水干流水质评价[J].水利水运工程学报,2020(2):15-21.
Lu D, Geng Z K, Min M, et al.Water quality evaluation in Huangshui mainstream based on interval type Bayesian model[J].Hydro-Science and Engineering,2020(2):15-21.

[6] 卓丰金,杨中文,高鑫,等.湟水河流域大型底栖动物功能摄食类群时空分布特征及生态系统属性评价[J].生态毒理学报,2025,20(1):123-139.
Zhuo F J, Yang Z W, Gao X, et al.Temporal-spatial distribution characteristics of benthic macroinvertebrates functional feeding groups and ecosystem attributes evaluation in Huangshui River Basin[J].Asian Journal of Ecotoxicology,2025,20(1):123-139.

[7] 樊立娟,黎嵘岚,高举.基于 ELECTREⅢ的湟水流域水资源可持续利用能力评价[J].人民长江,2025,56(1):110-116.
Fan L J, Li R L, Gao J.Evaluation of sustainable utilization capacity of water resources in Huangshui Basin based on ELECTREⅢ method [J].Yangtze River,2025,56(1):110-116.

[8] 青海省水利厅.青海河湖概览[M].武汉:长江出版社,2018:87-88.

[9] 齐雨藻.中国淡水藻志·第十卷-硅藻门,羽纹纲(无壳缝目 拟壳缝目);硅藻门 羽纹纲(无壳缝目 拟壳缝目)[M].北京:科学出版社,2004.

[10] 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.

[11] 方金龙,王仕禄,王雨春,等.怒江和澜沧江上游段河流浮游植物群落特征及其水生态驱动作用[J].生态学杂志,2025,44(12):4052-4061.
Fang J L, Wang S L, Wang Y C, et al.Characteristics of phytoplankton communities and their hydroecological drivers in the Nujiang River basin and the upper section of Lancang River basin[J].Chinese Journal of Ecology,2025,44(12):4052-4061.

[12] 刘画眉,林美兰,徐林春,等.利用流域水文站进行无资料河段径流分析[J].中国农村水利水电,2015(1):53-57.
Liu H M, Lin M L, Xu L C, et al.Runoff analysis of river reach without data by using watershed hydrological station[J].China Rural Water and Hydropower,2015(1):53-57.

[13] 罗敏纳,孙蓓丽,朱冰川,等.太湖流域浮游植物功能类群分布特征及其与环境因子的关系[J].湖泊科学,2022,34(5):1471-1483.
Luo M N, Sun B L, Zhu B C, et al.Distribution characteristics of phytoplankton functional groups and their relationship with environmental factors in Taihu Basin[J].Journal of Lake Sciences,2022,34(5):1471-1483.

[14] 李慧,刘妍,范亚文,等.三江平原湿地同江地区水域夏季浮游植物群落结构特征[J].植物学报,2014,49(4):440-449.
Li H, Liu Y, Fan Y W, et al.Community structure characteristics of phytoplankton in Tongjiang of the Sanjiang Plain wetland[J].Bulletin of Botany,2014,49(4):440-449.

[15] 丁一桐.黄河干流浮游植物生物地理格局及其水环境指示作用有效性研究[D].西安:西安理工大学,2023.
Ding Y T.Biogeographic pattern of phytoplankton and its effectiveness as an indicator of water quality in the yellow river mainstream[D].Xi'an:Xi'an University of Technology,2023.

Characterization of phytoplankton community structure and ecological health assessment of the main stream of the Huangshui River

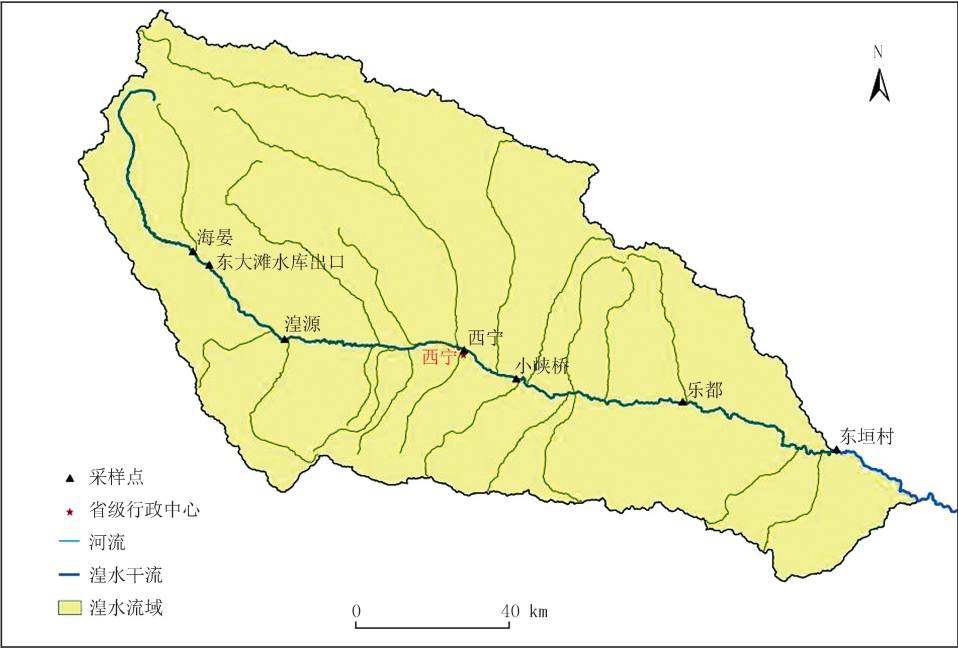
Geng Zhaoke¹, Jia Jie², Shi Lu², Lu Dan²

(1. Water Resources and Water Conservation Technical Service Center of Qinghai Province, Xining, 810001, China;
2. Hydrology and Water Resources Forecast Center of Qinghai Province, Xining 810001, China)

Abstract: Based on the qualitative and quantitative samples of phytoplankton collected from the main stream of the Huangshui River in March 2024 (low water period), May (normal water period), and August (high water period), the structural characteristics of the phytoplankton community were analysed and functional groups were classified. The following results were noted: 1) Totally 128 species of phytoplankton belonging to 8 phyla were identified in the main stream of the Huangshui River. Diatoms accounted for the largest proportion, followed by green algae and cyanobacteria. The abundance and biomass of phytoplankton showed a trend of maximum during low water period, followed by medium level during the normal water period, and minimum during high water period. 2) There were 19 functional groups of phytoplankton in the main stream of the Huangshui, with 7 dominant functional groups, respectively C, D, LM, MP, T_D, W1. The mean values of the *H* index, *J* index, *D* index, and *Q_r* index for phytoplankton were 3.58, 0.71, 3.60, and 4.03, respectively, indicating that with the exception of the outlet of the Dongdatan Reservoir, the water quality of the main stream of the Huangshui River was generally low to moderately polluted, representing an "excellent" state of ecological health. 3) DO, WT, NH₃-N and TN were the primary environmental factors influencing the phytoplankton structure and dominant functional group composition in the main stem of the Huangshui River.

Keywords: the main stream of the Huangshui River; phytoplankton; functional groups; ecological health assessment

[责任编辑 刘洋 赵晓华]

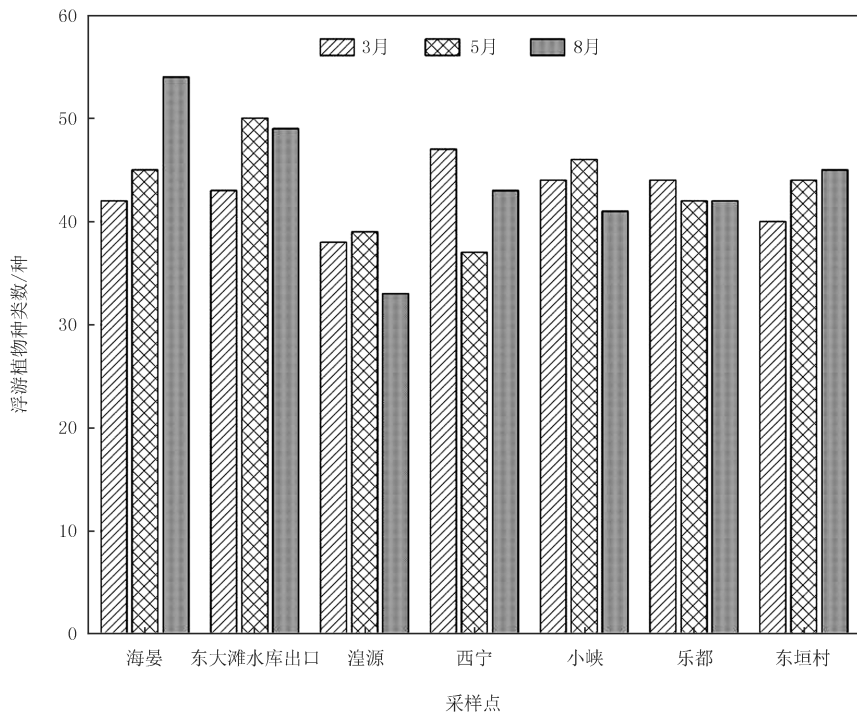


图S1 湟水干流采样点布设图
Fig.S1 Sampling sites of the main stream of the Huangshui River

表 S1 环境因子统计
Tab. S1 Statistics of environmental factors

理化因子	3 月(枯水期)	5 月(平水期)	8 月(丰水期)
流量(Q)/(m ³ · S ⁻¹)	19.0(2.15~43.3)	23.5(3.45~43.9)	57.4(5.00~109)
流速(V)/(m · S ⁻¹)	0.84(0.62~1.22)	1.03(0.75~1.03)	1.36(1.05~1.61)
水温(WT)/℃	3.0±2.1	12.9±4.1	15.8±2.7
pH(无量纲)	8.3±0.2	8.3±0.0	8.6±0.2
ρ溶解氧(DO)/(mg · L ⁻¹)	8.9±0.4	7.2±0.2	7.0±0.3
ρ氨氮(NH ₃ -N)/(mg · L ⁻¹)	0.376±0.034	0.225±0.181	0.125±0.088
ρ高锰酸盐指数(COD _{Mn})/(mg · L ⁻¹)	2.8±0.6	2.5±0.6	2.6±0.3
ρ化学需氧量(COD _{Cr})/(mg · L ⁻¹)	12.1±0.5	10.3±0.6	11.6±2.5
ρ总磷(TP)/(mg · L ⁻¹)	0.04±0.03	0.03±0.02	0.03±0.02
ρ总氮(TN)/(mg · L ⁻¹)	4.6±1.9	3.1±1.2	2.3±0.8
ρ叶绿素a(Chl a)/(ug · L ⁻¹)	8.8±2.6	9.8±4.5	8.9±6.1

注:流量和流速采用平均值(最小值~最大值)表示,其余指标采用“平均值±标准偏差”表示.



图S2 浮游植物定性种类数
Fig.S2 Qualitative species number of phytoplankton

表 S2 浮游植物优势种种类及优势度
Tab. S2 The dominant species and dominance degree of phytoplankton

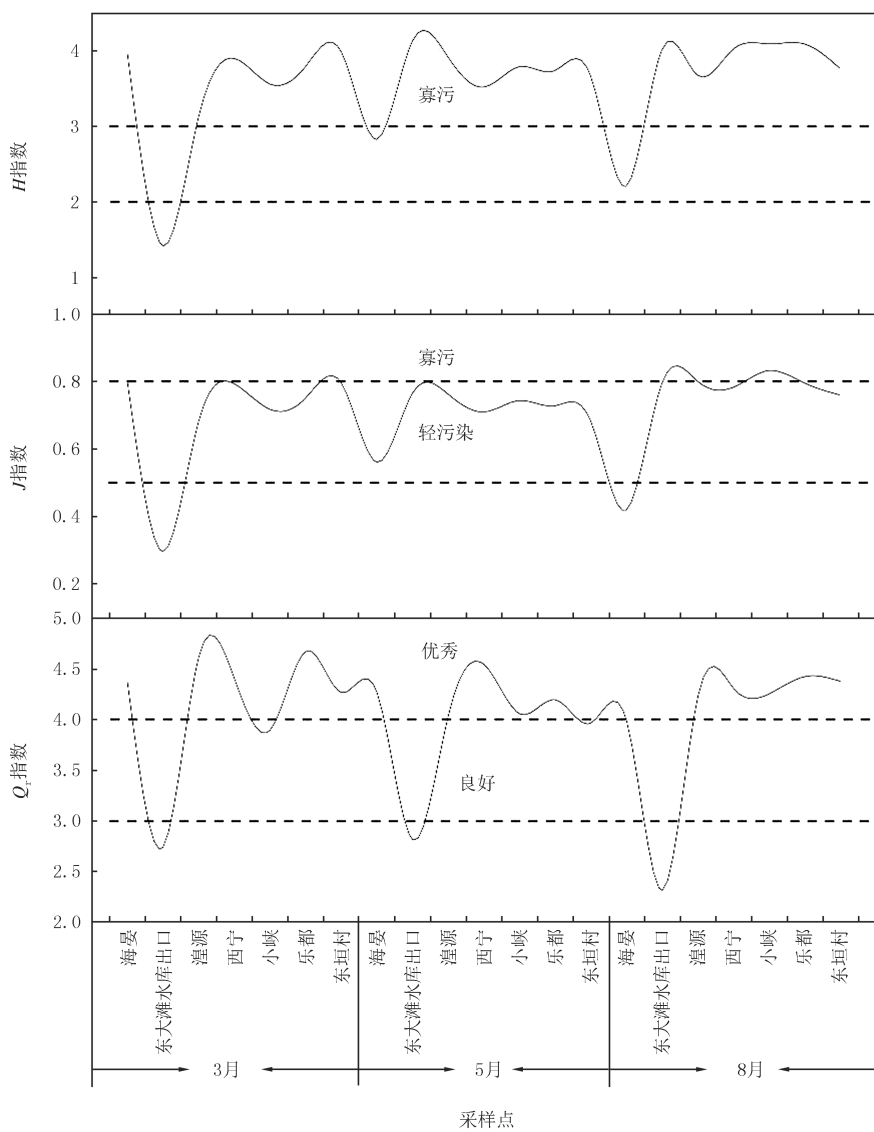
门	优势种	拉丁文	优势度		
			3月(枯水期)	5月(平水期)	8月(丰水期)
蓝藻门	伪鱼腥藻	<i>Pseudoanabaena</i> sp.	0.037	0.045	0.041
绿藻门	衣藻	<i>Chlamydomonas</i> sp.	—	—	0.027
硅藻门	纤细等片藻	<i>Diatoma tenue</i>	—	—	0.021
	等片藻	<i>Diatoma</i> sp.	0.128	0.040	0.074
	星杆藻	<i>Asterionella</i> sp.	0.260	0.025	0.039
	曲壳藻	<i>Achnanthes</i> sp.	0.023	—	0.069
	放射舟形藻	<i>Navicula radiosa</i>	—	—	0.031
	舟形藻	<i>Navicula</i> sp.	0.133	0.125	0.167
	桥弯藻	<i>Cymbella</i> sp.	0.023	—	0.041
	异极藻	<i>Gomphonema</i> sp.	0.038	0.024	0.051
	菱形藻	<i>Nitzschia</i> sp.	0.031	0.031	0.053
	蓝隐藻	<i>Chroomonas</i> sp.	—	—	0.031
隐藻门	隐藻	<i>Cryptomonas</i> sp.	—	—	0.036

注：“—”表示该物种的优势度 $Y < 0.02$ 。

表 S3 浮游植物优势功能群划分
Tab. S3 Division of dominant functional groups of phytoplankton

功能群类别	生境描述	代表属/种	监测时段			F 赋分值
			3 月(枯水期)	5 月(平水期)	8 月(丰水期)	
B	中营养浅水水体、低光照	小环藻 <i>Cyclotella</i> spp.	✓	✓	✓	3
C*	中小型富营养水体	星杆藻 <i>Asterionella</i> sp.	✓	✓	✓	2
D*	营养盐、浑浊浅水水体	菱形藻 <i>Nitzschia</i> spp.	✓	✓	✓	4
		尖肘形藻 <i>Ulnaria acus</i>		✓		4
E	小型水体、贫营养或异养型浅水	锥囊藻属 <i>Dinobryon</i> sp.	✓	✓	✓	4
F	混合充分、中高营养、浑浊水体	蹄形藻属 <i>Kirchneriella</i> sp.	✓	✓	✓	4
		卵囊藻属 <i>Oocystis</i> sp.	✓		✓	4
G	富营养、停滞高光照水体	实球藻 <i>Pandorina morum</i> sp.			✓	2
H ₂	贫到中营养、光照好	长孢藻属 <i>Dolichospermum</i> sp.		✓		0
L ₀	贫到富营养、可深可浅	平裂藻属 <i>Merismopedia</i> sp.	✓			1
L _M	富到超富营养、中小型水体	角甲藻属 <i>Ceratium</i> sp.		✓	✓	0
		多甲藻属 <i>Peridinium</i> sp.		✓	✓	0
MP*	经常性搅动、浑浊、浅水	曲壳藻 <i>Achnanthes</i> sp.	✓		✓	5
		舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	✓	✓	✓	5
		放射形舟形 <i>Navicula radiosa</i>	✓	✓	✓	5
		异极藻 <i>Gomphonema</i> spp.	✓	✓	✓	5
		双菱藻 <i>Surirella</i> sp.		✓	✓	5
		等片藻 <i>Diatoma</i> spp.	✓	✓	✓	5
P	中营养、混合程度较高	新月藻属 <i>Closterium</i> sp.			✓	5
SI*	混合浑浊、透明度低	伪鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena</i> sp.	✓	✓	✓	0
T _C	富营养、静水或者流动缓慢水体	鞘丝藻属 <i>Lyngbya</i> sp.	✓			1
T _D *	中营养型、静水、缓慢的河流	水绵 <i>Spirogyra</i> sp.		✓		3
W ₀ *	有机物含量高的河流和池塘	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.			✓	1
W ₁ *	富含有机质水体	裸藻 <i>Euglena</i> sp.	✓	✓	✓	1
X ₂ *	中到富营养、浅水	蓝隐藻 <i>Chroomonas</i> sp.			✓	4
X ₃	贫营养、混合、浅水	小球藻属 <i>Chlorella</i> sp.		✓	✓	4
Y*	静水	隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.			✓	2

注：“*”表示为优势功能群，拉丁文名后 sp.表示该属的特定种，spp.表示该属的多个种，“✓”表示该监测时段有此属/种；F 赋分值参考正文文献[4—5,14].



图S3 浮游植物各指数时空变化

Fig.S3 Spatio-temporal variations of various indices of phytoplankton