

王丽娟, 杜岩岩, 张世虎, 等. 青土湖湿地浮游生物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 湿地科学, 2025, 23(2): 341-351. [Wang L J, Du Y Y, Zhang S H, et al. Plankton community structure and its relationship with environmental factors in the Qingtu Lake wetland[J]. Wetland Science, 2025, 23(2): 341-351.] DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.20230261; CSTR: 32178.14.wetlandscience.20230261

青土湖湿地浮游生物群落结构及其与环境因子的关系

王丽娟¹, 杜岩岩², 张世虎³, 张艳萍², 王 太^{2*}

(1. 西北农林科技大学动物科技学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 甘肃省水产研究所/甘肃省冷水性鱼类种质资源与遗传育种重点实验室, 甘肃 兰州 730030; 3. 民勤县林业与草原局, 甘肃 武威 733300)

摘要: 为了解青土湖湿地浮游生物群落结构及其与环境因子的关系, 于2021年5月(春季)、8月(夏季)和11月(秋季)在青土湖设置了14个采样点进行浮游生物调查。结果表明, 在青土湖湿地共鉴定出浮游植物7门64属114种, 主要由硅藻门(57.02%)和绿藻门(24.56%)构成, 常年优势种主要为放射舟形藻(*Navicula radiosa*)、群生舟形藻(*Navicula gregaria*)、尖针杆藻(*Synedra acus*)和肘状针杆藻(*Synedra ulna*); 浮游动物5类37属48种, 以轮虫(50%)和原生动物(33.33%)为主, 且轮虫为主要优势类群; 浮游生物丰度和生物量随季节变化差异较为显著, 浮游植物年平均丰度为 5.88×10^3 个/L, 年平均生物量为 2.52×10^{-2} mg/L, 均在夏季达到最高值; 浮游动物年平均丰度为34.87个/L, 年平均生物量为 21.24×10^{-2} mg/L, 分别在秋季和夏季达到最高值; Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数和Pielou均匀度指数综合评价结果显示, 青土湖水质为无污染-中污染型; 冗余分析表明, 溶解氧质量浓度、氨氮质量浓度、pH和总氮质量浓度是影响浮游植物群落分布的主要环境因子, 影响浮游动物群落分布的主要环境因子为溶解氧质量浓度、总氮质量浓度、电导率和氨氮质量浓度。生态输水是维持青土湖湿地浮游生物多样性的有效措施, 研究结果可为青土湖湿地的生态修复与监测预警提供数据支撑。

关键词: 浮游生物; 群落结构; 环境因子; 生物多样性; 青土湖湿地

中图分类号: Q178; X835

文献标识码: A

文章编号: 1672-5948(2025)02-341-11

湿地生态系统是指地表过湿或常年积水, 生长着湿地植物的地区, 它兼具水生和陆地两类生态系统的特征^[1], 具有极强的生态功能, 在碳储藏、调节气候、涵养水源、保护生物多样性等方面扮演着重要角色^[2-3], 是地球上初级生产力最高、生物多样性最丰富的生态系统之一^[4]。浮游生物是湿地水生生态系统中物质循环和能量流动的重要环节, 也是水域生产力的基础^[5], 具有生命力强、繁殖迅速、对环境变化反应灵敏等特点^[6], 其群落结构易受水温、pH、溶解氧和营养盐等环境变化的影响, 常被作为评价水环境质量的一个重要指标, 在湖泊、河流、湿地、海洋等不同类型水

体中被广泛应用^[7-10]。

青土湖湿地是河西走廊地区三大内陆河之一石羊河的尾间, 位于腾格里沙漠与巴丹吉林沙漠之间, 属于天然湿地系统中的内陆湿地类^[11]。20世纪50年代, 青土湖湿地完全干涸而沦为草湖, 21世纪初期, 通过生态输水, 湖面面积开始扩大^[12]。据调查, 目前青土湖湖面生态环境及生物多样性逐渐恢复, 沙漠化程度得到了有效遏制, 形成了水域面积26.7 km²的沙漠湖泊, 旱区湿地面积已达106.0 km²^[13]。水生生态系统是湿地的重要组成部分, 对于维持湿地生态功能具有重要作用^[14]。截至目前, 还未出现有关青土湖湿地浮游生物及

收稿日期: 2023-10-31; 修订日期: 2024-05-11

基金项目: 甘肃省创新基地和人才计划项目(21JR7RA720)和甘肃省自然科学基金项目(23JRRA1334)资助。[Foundation: Gansu Provincial Innovation Base and Talent Program(21JR7RA720), and Gansu Provincial Natural Science Foundation Project(23JRRA1334).]

作者简介: 王丽娟(1999—), 女, 甘肃省酒泉人, 硕士研究生, 从事渔业资源学研究。E-mail: 2603816055@qq.com

*通信作者: 王太, 正高级工程师。E-mail: aqhongqi@qq.com

水体理化因子的研究,已有研究仅涉及植物群落演替、湿地生态现状、保护与修复方面^[15-16]。因此,本研究通过对青土湖湿地浮游生物群落结构进行调查分析,并运用冗余分析(RDA)来探究影响浮游生物群落生态分布的主要环境因子,以期对青土湖湿地生态环境保护与可持续发展提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样点布置

青土湖(39°10'N~39°13'N, 103°61'E~103°64'E)位于石羊河流域下游,平均海拔 1 305 m,年降水量在 110 mm 左右,蒸发量达 2 640 mm 以上,平均水深 1 m,属于温带大陆性干旱荒漠气候。由于上游来水量有限、蒸发强烈、入渗补给地下水等因素,大面积湖底常年裸露,风沙区植被覆盖度低,盐碱沙尘危害严峻^[17]。2021 年 5 月(春季)、8 月(夏季)和 11 月(秋季),在青土湖湿地常年积水区域进行浮游生物样品采集及环境因子测定。根据青土湖湿地水文条件与环境特征共布设了 14 个采样点(图 1)。

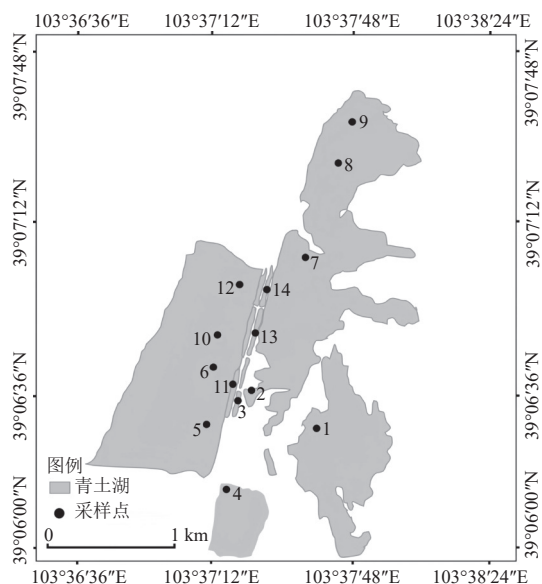


图 1 青土湖湿地采样点分布示意图

Fig.1 Sketch map of sampling points distribution in the Qingtu Lake wetland

1.2 样品采集与处理

1.2.1 浮游生物样品采集与鉴定

利用 25#浮游生物网,在水下 0.5 m 深处做水平“∞”字状巡回拖动 3~5 min,采集浮游植物定性样品,将滤出液放入 50 mL 样品瓶中并添加

4% 的鲁哥试剂固定。利用有机玻璃采水器,在水深 0.5 m 处采集 1 L 水样作为浮游植物定量样品,加入 15 mL 鲁哥试剂现场固定,然后带回实验室静置 48 h 后浓缩至 30 mL,进行浮游植物鉴定^[18]。

利用 13#浮游生物网,在水体表层(0~50 cm)按“∞”形缓慢拖网,采集浮游动物定性样品,并用 4% 的甲醛溶液固定;利用有机玻璃采水器,在水深 0.5 m 处采集 20 L 水样作为浮游动物定量样品,然后用 25#浮游生物网过滤后加入 4% 的甲醛溶液固定,带回实验室沉淀浓缩后进行浮游动物鉴定^[19]。

1.2.2 理化指标的测定

利用多参数水质分析仪(YSI Pro20 Plus, 美国)现场测定水温、溶解氧、pH 和电导率。取表、底层混合水样 1 L, 4 ℃ 冷藏带回实验室,进一步测定氨氮、总磷及总氮质量浓度,测定方法参照《地表水环境质量标准》^[20]。

1.3 指标计算

浮游生物优势度通过 Mcnaughton 优势度指数(Y)确定^[21];采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(D)和 Pielou 均匀度指数(J)对浮游生物群落结构进行分析^[21]。多样性指数水质评价标准见表 1^[22]。

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2021 和 SPSS 26 软件进行基础数据处理;利用 Origin 2021 软件绘制图表;利用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析,首先对浮游生物与环境因子的关系进行分析,将浮游生物优势种作为排序物种,通过排序寻找浮游生物群落的演替规律及驱动浮游生物群落生态分布的环境因子。在排序分析前,通过去趋势对应分析(DCA)确定选择线性模型或单峰模型。结果表明,浮游植物和浮游动物在 4 个排序轴中的最大长度梯度均小于 3,因此使用线性模型冗余分析(RDA)来探究浮游生物群落结构与各环境因子的关系^[23]。

2 结果与分析

2.1 水体理化因子

青土湖湿地水环境因子的季节变化见表 2。pH 在 8.19~8.38 之间,水体常年偏碱性;除 pH 外,其他环境因子均呈现明显的季节变化。水温变化范围为 2.73~22.84 ℃;溶解氧质量浓度为 2.94~8.68 mg/L;电导率为 4 259.10~44 932.29 S/m,

青土湖湿地盐碱化程度较高;总溶解固体质量浓度的变化范围为 4 851.04~26 867.14 mg/L;总磷质量浓度为 0.06~0.14 mg/L;总氮质量浓度为 0.50~2.71 mg/L。根据《地表水环境质量标准》^[20]对水体理化因子进行评价可知,溶解氧在春、秋季符合

I 类水质标准,在夏季含量较低,符合 V 类水质标准;氨氮在春、夏、秋 3 个季节均符合 III 类水质标准;总磷在春、夏季符合 II 类水质标准,在秋季符合 III 类水质标准;总氮在春、秋季符合 II 类水质标准,在夏季超标严重,属于劣 V 类水。

表 1 多样性指数水质评价标准

Table 1 Water quality assessment standard of diversity indices

多样性指数	评价标准
Shannon-Wiener 多样性指数	0~1 为重污染; >1~2 为 α -中污染; >2~3 为 β -中污染; >3 为轻污染或无污染
Margalef 丰富度指数	0~1 为重污染; >1~2 为 α -中污染; >2~3 为 β -中污染; >3 为轻污染或无污染
Pielou 均匀度指数	0~0.3 为重污染; >0.3~0.5 为中污染; >0.5~0.8 为轻污染; >0.8 为无污染

表 2 青土湖湿地水环境因子的季节变化

Table 2 Seasonal variation of water environmental factors in the Qingtu Lake wetland

水环境因子	春季	夏季	秋季
水温/℃	13.63±1.80	22.84±1.76	2.73±1.78
溶解氧质量浓度/(mg/L)	8.68±1.80	2.94±0.78	7.80±2.10
pH	8.19±0.63	8.35±0.27	8.38±0.25
电导率/(S/m)	8 586.65±619.62	44 932.29±5 471.87	4 259.10±314.18
总溶解固体质量浓度/(mg/L)	6 991.55±370.13	26 867.14±3 765.63	4 851.04±530.01
氨氮质量浓度/(mg/L)	0.57±0.05	0.51±0.05	0.58±0.05
总磷质量浓度/(mg/L)	0.06±0.01	0.10±0.04	0.14±0.06
总氮质量浓度/(mg/L)	0.50±0.00	2.71±0.96	0.50±0.00

注:数据为平均值±标准误差。

2.2 浮游生物群落结构

2.2.1 浮游生物物种组成

在青土湖湿地共检出浮游植物 7 门 64 属 114 种,其中硅藻门 28 属 65 种,占总种数的 57.02%;绿藻门 20 属 28 种,占总种数的 24.56%;蓝藻门 9 属 11 种,占总种数的 9.65%;隐藻门 2 属 3 种,占总种数的 2.63%;裸藻门 2 属 3 种,占总种数的 2.63%;甲藻门 2 属 2 种,占总种数的 1.75%;金藻门 1 属 2 种,占总种数的 1.75%。各门类在春、夏、秋 3 个季节均有分布,且主要以硅藻门和绿藻门种类为主(表 3)。浮游植物物种数量季节分布差异明显,春季物种数最多,有 100 种,其次是秋季,为 63 种,夏季最少,为 60 种。

共检出浮游动物 5 类 37 属 48 种,其中轮虫 15 属 24 种,占浮游动物总物种数的 50%;原生动物 14 属 16 种,占 33.33%;枝角类 5 属 5 种,占 10.42%;桡足类 2 属 2 种,占 4.17%;浮游小型甲

壳动物 1 种(卤虫),占 2.08%。浮游小型甲壳动物(卤虫)仅出现在夏季,其余种类在春、夏、秋 3 季均有分布,且主要以轮虫和原生动物为主(表 4)。浮游动物物种数量季节分布差异不大,春季物种数最多,为 37 种,其次是夏季,为 33 种,秋季最少,为 22 种。

2.2.2 浮游生物优势种组成

根据优势度 ($Y \geq 0.02$)^[24]筛选出浮游植物优势种共 5 门 12 种(表 5),包括硅藻门 7 种,绿藻门 2 种,金藻门、蓝藻门和甲藻门各 1 种。春、秋季优势种较多,均为 9 种,夏季仅 6 种,各季节优势种分布存在差异。硅藻门中的放射舟形藻、群生舟形藻、尖针杆藻和肘状针杆藻为常年优势种。除此之外,膨胀桥弯藻、洛伦菱形藻、转板藻属、孤枝根枝藻和分歧锥囊藻在春季具有绝对优势;孤枝根枝藻和链状伪鱼腥藻在夏季具有绝对优势;秋季则以美丽星杆藻、膨胀桥弯藻、洛伦菱形藻、转板藻属和薄甲藻为优势种。

表 3 不同季节青土湖浮游植物物种组成
Table 3 Species composition of phytoplankton in the Qingtu Lake in different seasons

门类	物种数量(占该季总物种数量的比例/%)		
	春季	夏季	秋季
硅藻门	58(58.00)	36(60.00)	40(63.49)
绿藻门	24(24.00)	10(16.67)	10(15.87)
蓝藻门	10(10.00)	7(11.67)	6(9.52)
隐藻门	3(3.00)	2(3.33)	3(4.76)
裸藻门	2(2.00)	3(5.00)	1(1.59)
金藻门	2(2.00)	1(1.67)	2(3.17)
甲藻门	1(1.00)	1(1.67)	1(1.59)
总物种数量/种	100	60	63

浮游动物优势种共 4 类 10 种, 包括轮虫 5 种, 原生动物 3 种, 桡足类和枝角类各 1 种, 其中轮虫占浮游动物总优势种数的 50%, 为主要优势类群。春、夏、秋 3 个季节均筛选出 4 种优势种, 各季节优势种组成不同。春季优势种有梨形单趾

表 4 不同季节青土湖浮游动物物种组成
Table 4 Species composition of zooplankton in the Qingtu Lake in different seasons

类别	物种数量(占该季总物种数量的比例/%)		
	春季	夏季	秋季
轮虫	21(56.76)	16(48.49)	6(27.27)
原生动物	10(27.03)	11(33.33)	11(50.00)
枝角类	4(10.81)	3(9.09)	3(13.63)
桡足类	2(5.41)	2(6.06)	2(9.09)
卤虫	0(0.00)	1(3.03)	0(0.00)
总物种数量/种	37	33	22

轮虫、长肢多肢轮虫、毛饰拟剑水蚤和旋口虫属。夏季以前节晶囊轮虫、萼花臂尾轮虫、月形腔轮虫和普通表壳虫占绝对优势。秋季则以月形腔轮虫、毛饰拟剑水蚤、大型溞及侠盗虫属为优势种。

2.2.3 浮游生物丰度及生物量的时空变化
青土湖湿地浮游植物丰度及生物量的时空变化如图 2 所示。调查期间, 浮游植物的季度平均

表 5 青土湖浮游生物优势种及优势度
Table 5 Dominant species and dominant degree of plankton in the Qingtu Lake

浮游生物	门类	优势种	优势度		
			春季	夏季	秋季
浮游植物	硅藻门	美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>	—	—	0.02
		膨胀桥弯藻 <i>Cymbella tumida</i>	0.02	—	0.02
		放射舟形藻 <i>Navicula radiosa</i>	0.03	0.02	0.06
		群生舟形藻 <i>Navicula gregaria</i>	0.02	0.02	0.03
		洛伦菱形藻 <i>Nitzschia lorenziana</i>	0.03	—	0.02
		尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	0.03	0.03	0.03
	绿藻门	肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i>	0.04	0.06	0.04
		转板藻属 <i>Mougeotia</i> sp.	0.03	—	0.02
		孤枝根枝藻 <i>Rhizoclonium hieroglyphicum</i>	0.02	0.02	—
	金藻门	分歧锥囊藻 <i>Dinobryon divergens</i>	0.02	—	—
浮游动物	蓝藻门	链状伪鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena catenata</i>	—	0.02	—
	甲藻门	薄甲藻 <i>Glenodinium pulvisculus</i>	—	—	0.07
	轮虫	前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>	—	0.02	—
		萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	—	0.03	—
		月形腔轮虫 <i>Lecane luna</i>	—	0.02	0.02
		梨形单趾轮虫 <i>Monostyla pyriformis</i>	0.02	—	—
		长肢多肢轮虫 <i>Polarthra dolichoptera</i>	0.02	—	—
	桡足类	毛饰拟剑水蚤 <i>Paracyclops fimbriatus</i>	0.02	—	0.04
	枝角类	大型溞 <i>Daphnia magna</i>	—	—	0.09
	原生动物	普通表壳虫 <i>Arcella vulgaris</i>	—	0.03	—
		旋口虫属 <i>Spirostomum</i> sp.	0.02	—	—
		侠盗虫属 <i>Strobilidium</i> sp.	—	—	0.03

注: “—” 表示优势度 $Y < 0.02$ 。

丰度变化范围为 $1.23 \times 10^3 \sim 10.10 \times 10^3$ 个/L, 年平均丰度为 5.88×10^3 个/L。浮游植物的季度平均生物量变化范围为 $0.37 \times 10^{-2} \sim 5.39 \times 10^{-2}$ mg/L, 年平均生物量为 2.52×10^{-2} mg/L。浮游植物丰度和生物量季节变化差异明显, 春、夏季浮游植物平均丰度较高, 秋季较低, 平均生物量表现为夏季>春季>秋季。

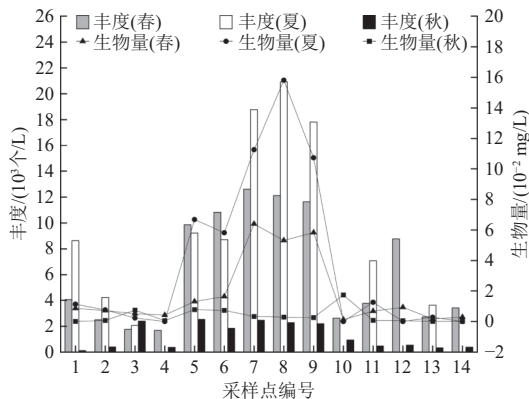


图2 青土湖浮游植物丰度和生物量的变化

Fig.2 Variations of phytoplankton abundance and biomass in the Qingtu Lake

浮游动物丰度及生物量的时空变化如图3所示。调查期间, 浮游动物的季度平均丰度变化范围为 $21.21 \sim 48.00$ 个/L, 年平均丰度为 34.87 个/L。浮游动物的季度平均生物量变化范围为 $14.08 \times 10^{-2} \sim 31.12 \times 10^{-2}$ mg/L, 年平均生物量为 21.24×10^{-2} mg/L。浮游动物的丰度均值表现为秋季>夏季>春季, 生物量均值表现为夏季>秋季>春季。

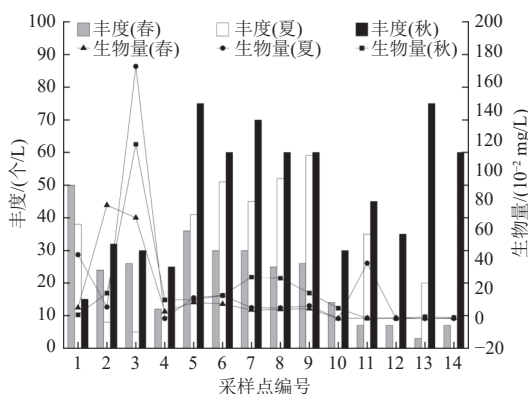


图3 青土湖浮游动物丰度和生物量的变化

Fig.3 Variations of zooplankton abundance and biomass in the Qingtu Lake

2.3 浮游生物多样性指数

青土湖湿地浮游生物多样性指数的空间分布见表6。调查期间, 各采样点浮游植物的 Shannon-

Wiener 多样性指数变幅为 $3.46 \sim 5.55$, 平均值为 4.57 , 污染等级为轻污染或无污染 (表1); Margelaf 丰富度指数变幅为 $1.36 \sim 4.80$, 平均值为 2.86 , 污染等级为 β -中污染; Pielou 均匀度指数变幅为 $0.81 \sim 0.94$, 平均值为 0.88 , 污染等级为无污染。

调查期间, 各采样点浮游动物的 Shannon-Wiener 多样性指数变幅为 $2.13 \sim 3.95$, 平均值为 3.00 , 污染等级为 β -中污染; Margelaf 丰富度指数变幅为 $0.93 \sim 3.14$, 平均值为 1.95 , 污染等级为 α -中污染; Pielou 均匀度指数变幅为 $0.73 \sim 0.89$, 平均值为 0.82 , 污染等级为无污染。浮游动物的多样性指数略低于浮游植物。总体来看, 青土湖湿地浮游生物多样性指数较高, 群落结构相对稳定, 物种分布较均匀, 根据多样性指数水质评价标准, 青土湖水质状况为无污染-中污染型。

2.4 浮游生物与环境因子的冗余分析

浮游植物优势种丰度与环境因子的 RDA 排序如图4所示。轴1和轴2的特征值分别为 0.4800 和 0.1073 , 物种与环境因子的相关系数分别为 0.8885 和 0.9144 , 前2个排序轴共解释了浮游植物优势种丰度变化率的 58.73% 。溶解氧质量浓度、pH、总氮质量浓度和水温分别与轴1正相关, 其中与 pH 相关性最高; 溶解氧、总氮、氨氮、总溶解固体质量浓度和电导率与轴2呈正相关, 溶解氧呈最大正相关。浮游植物优势种主要集中于排序图右侧, 与溶解氧质量浓度、pH、总氮质量浓度和水温呈正相关, 除美丽星杆藻和洛伦菱形藻外, 其他优势种均与氨氮、总磷、总溶解固体和电导率呈负相关。总体来看, 溶解氧质量浓度、氨氮质量浓度、pH 和总氮质量浓度对浮游植物群落生态分布有较大的影响。

浮游动物优势种丰度与环境因子的 RDA 排序如图5所示。轴1和轴2的特征值分别为 0.2349 和 0.1695 , 物种与环境因子的相关系数分别为 0.9546 和 0.8777 , 前两个排序轴共解释了浮游动物优势种丰度变化率的 40.44% 。溶解氧质量浓度、pH 和总磷质量浓度分别与轴1正相关, 其中与 pH 相关性最高; 水温、总氮质量浓度、溶解氧质量浓度和 pH 分别与轴2正相关, 与总氮质量浓度呈最大正相关, 溶解氧次之。浮游动物优势种均集中于第1、第2象限, 与溶解氧、总氮质量浓度、pH 和水温呈正相关, 与电导率、总溶解固体、总磷质量浓度和氨氮呈负相关。前节晶囊轮虫和

表 6 青土湖浮游生物多样性指数
Table 6 Plankton diversity indices in the Qingtu Lake

采样点 编号	浮游植物多样性指数			采样点 编号	浮游动物多样性指数		
	Shannon-Wiener 多样性指数	Margelaf 丰富度指数	Pielou 均匀度指数		Shannon-Wiener 多样性指数	Margelaf 丰富度指数	Pielou 均匀度指数
1	5.46	4.10	0.94	1	3.89	3.14	0.87
2	4.44	2.42	0.90	2	3.11	2.33	0.80
3	3.62	1.67	0.81	3	2.19	1.35	0.73
4	3.46	1.36	0.87	4	2.65	1.34	0.88
5	5.07	3.54	0.89	5	3.95	2.90	0.89
6	5.33	4.80	0.87	6	3.45	1.96	0.88
7	5.22	3.52	0.91	7	3.38	2.51	0.80
8	5.01	3.31	0.88	8	3.82	2.68	0.88
9	5.55	4.08	0.93	9	3.70	2.51	0.87
10	4.35	2.80	0.85	10	2.28	1.10	0.88
11	3.98	1.78	0.86	11	2.13	0.93	0.76
12	4.61	2.96	0.87	12	2.58	1.85	0.75
13	4.01	1.81	0.88	13	2.77	1.66	0.77
14	3.85	1.85	0.85	14	2.20	0.99	0.78
平均值	4.57	2.86	0.88	平均值	3.00	1.95	0.82

萼花臂尾轮虫均与溶解氧有较强的正相关性。总体来看,溶解氧、总氮质量浓度、电导率和氨氮对浮游动物群落生态分布有较大的影响。

3 讨 论

3.1 青土湖湿地浮游生物群落结构分析

在青土湖湿地共鉴定出浮游植物 7 门 64 属

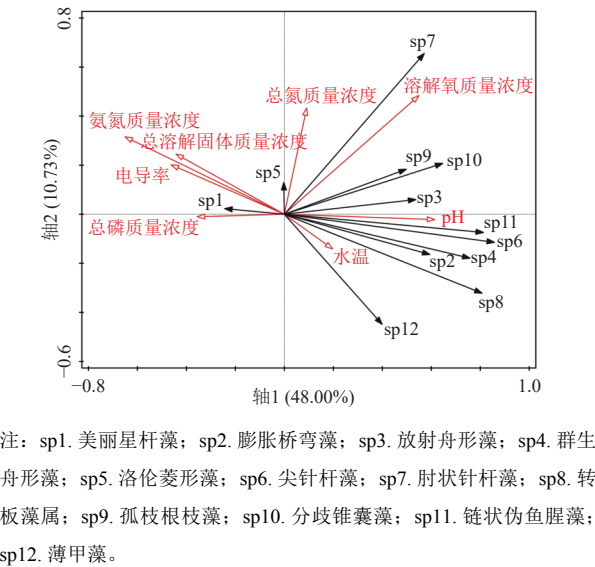


图 4 青土湖浮游植物与环境因子的冗余分析
Fig.4 Redundancy analysis of phytoplankton and environmental factors in the Qingtu Lake

114 种,主要由硅藻门和绿藻门组成。艾比湖湿地和大岗子泡盐碱湿地浮游植物均以硅藻门和绿藻门为主要优势类群^[14,25],与本研究的结果一致。硅藻细胞壁具有特殊的瓣片结构与硅质属性,对机体具有较好的机械保护作用,使其在盐碱化、荒漠化等环境中的耐受性更强^[26],这也是青土湖等湿地浮游植物均以硅藻门种类居多的原因。有研究发现,伪鱼腥藻和裸藻均是耐污染能力较好的物种^[27]。在此次调查中,春、夏、秋 3 季均检测到裸

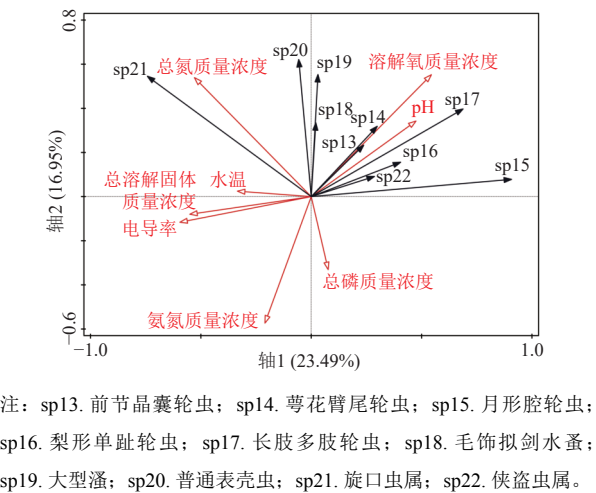


图 5 青土湖浮游动物与环境因子的冗余分析
Fig.5 Redundancy analysis of zooplankton and environmental factors in the Qingtu Lake

藻,且链状伪鱼腥藻在夏季为优势种,这与夏季气温高,蒸发量大,青土湖湿地水质较差有关。浮游植物丰度在夏季达到最高水平,且以蓝藻门中的链状伪鱼腥藻为优势种,这是因为夏季温度适宜、营养盐含量较高等条件有利于浮游植物的生长与繁殖,蓝藻因耐高温能力较强而获得竞争优势^[28],同时蓝藻的快速繁殖抑制了其他藻类的生长,从而导致青土湖湿地夏季浮游植物种类最少。

在青土湖湿地共鉴定出浮游动物 5 类 37 属 48 种,其中轮虫和原生动物占据绝对优势,这与国内其他盐湖和湿地的浮游动物群落组成类似^[29-30]。轮虫具有个体小、发育快、易于繁殖等特点,能快速适应水体中理化因子和水文条件的变化^[31],因此各采样点均以轮虫占据主导地位。青土湖湿地浮游动物群落特征表现为逐渐向小型浮游动物群落特征发展的趋势,这与洪泽湖浮游动物相关研究一致^[32]。夏季广泛分布的优势种萼花臂尾轮虫为富营养水体的指示物种^[33],表明夏季该水域处于富营养状态。有学者提出,水体富营养化可导致水体溶解氧浓度降低,而低氧环境会影响水生生态系统结构与功能的稳定性^[34]。与济南市济西湿地的研究结果对比发现^[35],青土湖湿地浮游动物丰度和生物量均较低,可能因为青土湖湖底泥沙等固体颗粒较多,水体透明度较低,不利于浮游植物进行光合作用,从而导致浮游动物饵料不足,进而影响其生长与繁殖。

3.2 理化因子对浮游生物群落分布的影响

浮游生物群落结构受环境因素的影响,且不同水体中理化因子对群落结构的影响也存在差异。对长江荆江段的研究表明,溶解氧、温度和氨氮是驱动浮游植物群落演替的主要环境因子,温度、溶解氧和氨氮是驱动浮游动物群落演替的主要环境因子^[36];对洪湖自然保护区的研究表明,透明度、温度和高锰酸盐指数与浮游植物群落分布密切相关,透明度、砷、温度和叶绿素 a 与浮游动物群落分布密切相关^[37]。本研究中浮游植物群落生态分布主要与水体溶解氧、氨氮、pH 和总氮有关。溶解氧是浮游植物生长的必要条件,也是影响浮游植物代谢的关键因素^[38]。浮游植物通过光合作用释放氧气,来增加水体的溶解氧含量,冗余分析显示,除美丽星杆藻与薄甲藻外,其余浮游植物优势种均与溶解氧呈正相关,该结果证实了以上观点。氮是浮游植物生长发育的基础,水体中

氮含量的增加能促进硅藻门、绿藻门和蓝藻门等浮游植物的生长^[39],这与本研究中硅藻门中的部分优势种和绿藻门中的孤枝根枝藻均与总氮质量浓度呈正相关的结果一致。青土湖湿地上游农业生产中化肥、农药等的降解以及水生生物的代谢活动,导致下游水体总氮浓度较高。冗余分析结果显示,薄甲藻和转板藻属与总氮质量浓度呈负相关,这可能与氮浓度过高影响藻类的生长发育有关^[40]。有研究表明,营养盐是影响浮游植物生长繁殖的限制因子^[41]。冗余分析排序图显示,青土湖大部分浮游植物优势种与氨氮呈负相关,此结果证实了以上观点。赵秀侠等^[42]提出,pH 对浮游植物群落结构及分布有重要影响,碱性水体具有较高的藻类生产力,且碱性环境更有利于浮游植物进行光合作用。青土湖湿地周边为荒漠,植被覆盖度低,湖床裸露,大部分地区被盐碱风沙土覆盖,生态输水和干旱区强烈蒸发加剧了青土湖湿地水土盐碱化,导致水体 pH 较高,为 8.19~8.38,冗余分析表明 pH 是影响浮游植物群落分布的最重要因子(见图 4)。

本研究中,溶解氧、总氮、电导率和氨氮是影响青土湖浮游动物群落生态分布的主要环境因素。有研究表明,溶解氧是水生生物赖以生存的环境因子,直接影响浮游动物的密度和生物量^[43]。水环境中溶解氧充足会加快轮虫和原生动物的生长繁殖速度;溶解氧不足,会抑制枝角类的生长繁殖,也会导致桡足类的产卵量、存活率和摄食效率降低^[44]。冗余分析结果显示,除旋口虫属外,其余轮虫、桡足类、枝角类和原生动物优势种均与溶解氧呈正相关,其中萼花臂尾轮虫与溶解氧相关性极为显著,这是因为臂尾轮虫属对溶解氧的适应范围广^[45],青土湖湿地盐碱生态系统及夏季较高的水温导致水体溶解氧含量较低,臂尾轮虫因耐低氧能力强而获得竞争优势^[34]。电导率体现了水体中离子的含量,其浓度变化反映了水体中营养盐的改变,被认为是驱动浮游生物群落演替的主要环境因子之一^[46]。冗余分析排序图显示,电导率与原生动物中旋口虫属呈正相关。对南京市 5 座中型水库的研究表明,氮类营养盐能通过渗透和离子调节机制影响低等浮游动物的食物变化、质量及丰度^[47]。本研究结果显示,总氮浓度对青土湖湿地浮游动物群落生态分布产生了较大的影响,其中普通表壳虫和旋口虫属与总氮浓度显著

正相关,该结果证实了以上观点,同时表明该物种适应高浓度营养盐环境的能力较好。

3.3 青土湖湿地水质评价

青土湖地处干旱区,降水量少、蒸发量大,随着农业生产规模不断扩大,上游水资源的大量开采,导致流入下游的水量逐年减少,水质恶化、植被退化、土壤盐碱化、土地荒漠化等问题逐渐加剧^[48]。同时,上游农业生产中残留的化肥、农药和除草剂及其降解产物经地表径流或地下水进入湖区,导致水体污染严重。生态输水是修复干旱区生态受损的重要方式,进行水质评价可以了解干旱区生态系统的恢复情况。浮游生物多样性指数和水体理化因子在一定程度上可反映水体的健康状况。由水体理化指标监测结果可知,溶解氧、氨氮、总磷和总氮含量在春、秋季均符合 I~III 类水质标准;总磷在夏季符合 II 类水质标准,氨氮在夏季符合 III 类水质标准。溶解氧在夏季含量较低,符合 V 类水质标准。据研究表明,当水温高于 8℃ 时,溶解氧含量与水温呈负相关,这可能由于夏季水温较高,水中污染物生化降解速率随水温升高而加快,进而消耗大量的溶解氧。同时,夏季适宜的水温有利于藻类进行光合作用,当水体中的氧含量超过饱和溶解度时,水体中的氧分子就会逸散到大气中,导致水体中溶解氧含量降低^[49]。总氮含量在夏季超标严重,属于劣 V 类水。这是因为藻类具有较强的固氮作用,在适宜的温度和营养盐条件下,藻类的快速增殖会使水体中大量的氮元素向藻体内富集,底泥中的氮元素在水动力作用下向水体释放,导致水体氮含量升高^[50]。根据 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数对水质污染状况的综合评价结果,青土湖湿地水体属于无污染—中污染型。

4 结 论

青土湖湿地浮游植物主要由硅藻门和绿藻门种类组成,浮游动物以轮虫和原生动物为主,优势种季节分布差异明显。浮游生物丰度和生物量较其他湖泊、湿地均较低。浮游植物群落结构主要受溶解氧、氨氮、pH 和总氮的影响;驱动浮游动物群落演替的主要环境因子是溶解氧、总氮、电导率和氨氮。生物多样性评价结果显示,青土湖湿地水质状况呈无污染—中污染型,水体理化指标除

溶解氧和总氮质量浓度外,均符合 I~III 类水质标准。生态输水是维持青土湖湿地浮游生物多样性的有效措施。

参考文献

- [1] 蒋高明. 湿地生态系统[J]. 绿色中国, 2022(20): 56-59. [Jiang G M. Wetland ecosystem. Green China, 2022(20): 56-59.]
- [2] Zhang S, Zhong H, Huang L L, et al. Recovery of soil organic carbon storage driven by microbial communities during long-term natural restoration in wetland ecosystems[J]. *Ecological Engineering*, 2024, 199: 107170.
- [3] Jiang H J Z, Lu A R, Li J X, et al. Effects of aquatic plant coverage on diversity and resource use efficiency of phytoplankton in urban wetlands: a case study in Jinan, China[J]. *Biology*, 2024, 13(1): 44.
- [4] Zhang B, Shi Y T, Liu J H, et al. Economic values and dominant providers of key ecosystem services of wetlands in Beijing, China[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 77: 48-58.
- [5] Seo D I, Nam G S, Lee S H, et al. Plankton community in weir section of the Nakdong River and its relation with selected environmental factors[J]. *Environmental Biology Research*, 2013, 31(4): 362-369.
- [6] Li X Y, Zhao Y X, Chai F Y, et al. Phytoplankton community structure dynamics in relation to water environmental factors in Zhalong Wetland[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(22): 14996-14996.
- [7] Zhang J P, Zhi M M, Zhang Y. Combined generalized additive model and random forest to evaluate the influence of environmental factors on phytoplankton biomass in a large eutrophic lake[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108082.
- [8] Edwine Y, Eunice M, Zhang P F, et al. Comparing the performance of the water quality index and phytoplankton index of biotic integrity in assessing the ecological status of three urban rivers in Haikou City, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 157: 111286.
- [9] Dalu T, Cuthbert R N, Wasserman R J. Limited plankton community shifts over winter inundation events in austral temporary wetlands[J]. *Chemistry and Ecology*, 2022, 38(6): 586-601.
- [10] Enrico S G, Lucie Z, Shruti M, et al. Ubiquitous abundance distribution of non-dominant plankton across the global ocean[J]. *Nature Ecology Evolution*, 2018, 2(32): 1243-1249.
- [11] 韩福贵, 满多清, 郑庆钟, 等. 青土湖典型湿地白刺灌丛沙堆群落物种多样性及土壤养分变化特征研究[J]. 草业学报, 2021, 30(1): 36-45. [Han F G, Man D Q, Zheng Q Z, et al. Species diversity and soil nutrient changes of a *nitraria tangutorum* shrub community in Qingtu Lake Wetland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(1): 36-45.]
- [12] 许守卫. 青土湖湿地生态保护与修复对策研究[J]. 农业科技与信息, 2022(16): 19-21. [Xu S W. Research on ecological protection and restoration strategies for Qingtu Lake Wetland. *Agricultural Technology and Information*, 2022(16): 19-21.]
- [13] 潘若云, 黄峰, 孙瑞瑞, 等. 甘肃省青土湖绿洲生态输水后地下水功能恢复调查评价[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(8): 36-41. [Pan R Y,

- Huang F, Sun R R, et al. Investigation and evaluation of groundwater function recovery in Qingtu Lake after ecological water transporting in Gansu Province. *China Flood and Drought Management*, 2021, 31(8): 36-41.]
- [14] Zhao Z B, Song T J, Zhang M Y, et al. Benefits of morphology-based functional group classification to study dynamic changes in phytoplankton in saline-alkali wetlands, taking typical saline-alkali wetlands in northeast China as an example[J]. *Diversity*, 2023, 15(12): 1175.
- [15] Chunyu X Z, Huang F, Zhang X, et al. Influence analysis of artificial ecological water transport on the spatiotemporal variations in vegetation in Qingtu Lake[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 191(1): 012095.
- [16] Chunyu X Z, Huang F, Xia Z Q, et al. Assessing the ecological effects of water transport to a lake in arid regions: a case study of Qingtu Lake in Shiyang River basin, northwest China. [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(1): 145-145.
- [17] 郭树江, 杨自辉, 王强强, 等. 青土湖干涸湖底风沙流结构及输沙粒径特征[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(4): 1166-1176. [Guo S J, Yang Z H, Wang Q Q, et al. The structure and grain size of wind-sand flow in the dry bottom of Qingtu Lake. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(4): 1166-1176.]
- [18] 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. [Hu H J, Wei Y X. *Freshwater algae in China: system, classification, and ecology*. Beijing: Science Press, 2006.]
- [19] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物与底栖动物图谱[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011. [Zhou F X, Chen J H. *Atlas of freshwater microorganisms and benthic animals*. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.]
- [20] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准: GB 3838-2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002. [State environmental protection administration. *Environmental quality standards for surface water: GB3838-2002*. Beijing: Standards Press of China, 2002.]
- [21] 孟诗, 商乃萱, 袁素强, 等. 安徽通江湖泊 4 种典型生境浮游植物群落结构特征及其影响因子[J]. *安徽农业大学学报*, 2022, 49(1): 122-131. [Meng S, Shang N X, Yuan S Q, et al. Characteristics of phytoplankton community structure and influencing factors in four typical habitats of Tongjiang Lake, Anhui. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2022, 49(1): 122-131.]
- [22] 陈红, 刘清, 潘建雄, 等. 濡河城市段浮游生物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2019, 39(1): 173-184. [Chen H, Liu Q, Pan J X, et al. Spatial and temporal variation of the plankton community and its relationship with environmental factors in the city section of the Ba River. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(1): 173-184.]
- [23] 饶科, 郭雯淇, 汪平. 后官湖浮游生物群落结构特征及其环境驱动因子[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(4): 23-29. [Rao K, Guo W Q, Wang P. Characteristics of the plankton community and driving environmental factors in Houguan Lake. *Journal of Hydroecology*, 2022, 43(4): 23-29.]
- [24] Liang D W, Wang Q, Wei N, et al. Biological indicators of ecological quality in typical urban river-lake ecosystems: the planktonic rotifer community and its response to environmental factors[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106127-106127.
- [25] 董正武, 赵晓英, 陈丽华, 等. 新疆艾比湖精河入湖口退化湿地恢复过程中浮游植物群落的变化[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(3): 395-400. [Dong Z W, Zhao X Y, Chen L H, et al. Phytoplankton community changes during wetland restoration in Jinghe Estuary, Lake Ebinur, Xinjiang. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(3): 395-400.]
- [26] 罗杨, 程如丽, 王梦, 等. 普里河浮游生物群落结构、生物多样性及鱼类资源现状[J]. *重庆师范大学学报 (自然科学版)*, 2023, 40(2): 54-64. [Luo Y, Cheng R L, Wang M, et al. Community structure and biodiversity of plankton and fish resources of the Puli River. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2023, 40(2): 54-64.]
- [27] 张兴安. 水生生物学在生态环境保护中的应用研究进展[J]. *环境与发展*, 2020, 32(2): 185-186. [Zhang X A. Research progress on application of aquatic biology in ecological environment protection. *Environment and Development*, 2020, 32(2): 185-186.]
- [28] Nalewajko C, Murphy T P. Effects of temperature, and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of anabaena and microcystis in Lake Biwa, Japan: an experimental approach[J]. *Limnology*, 2001, 2(1): 45-48.
- [29] 史楠楠, 王智超, 程勇, 等. 新疆巴里坤盐湖浮游生物群落特征分析[J]. *水产学杂志*, 2023, 36(6): 78-86. [Shi N N, Wang Z C, Cheng Y, et al. Characteristics of plankton community structure in Barkol Salt Lake, Xinjiang. *Chinese Journal of Fisheries*, 2023, 36(6): 78-86.]
- [30] 陶陶. 呼兰河口湿地浮游生物群落及环境因子的相关性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2023. [Tao T. Study on correlation between plankton community and environmental factors in Hulanhe Wetland. Harbin: Harbin Normal University, 2023.]
- [31] 朱冲冲, 李秋华, 陈文生, 等. 贵州草海后生浮游动物群落季节动态特征及与环境因子的关系[J]. *生态科学*, 2018, 37(6): 131-138. [Zhu C C, Li Q H, Chen W S, et al. Metazooplankton community structure and its relationship with environmental factors of Caohai, Guizhou Province, China. *Ecological Science*, 2018, 37(6): 131-138.]
- [32] Ni L X, Li H Y, Zhou L, et al. Structural characteristics of zooplankton communities in Hongze Lake driven by water environmental factors from 2016 to 2020[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2023, 195(12): 1503.
- [33] 李强, 田华, 姜民, 等. 淀山湖浮游动物群落结构特征及其影响因子[J]. *水生态学杂志*, 2015, 36(4): 69-77. [Li Q, Tian H, Jiang M, et al. Community structure of zooplankton and influencing factors in Dian-shan Lake of Shanghai. *Journal of Hydroecology*, 2015, 36(4): 69-77.]
- [34] Slater W L, Pierson J J, Decker M B. et al. Fewer copepods, fewer anchovies, and more jellyfish: how does hypoxia impact the Chesapeake Bay zooplankton community[J]. *Diversity*, 2020, 12(1): 35-35.
- [35] 侯恩光, 商书芹, 关思思, 等. 济南市济西湿地浮游生物群落时空分布及功能群特征[J]. *大连海洋大学学报*, 2023, 38(3): 482-493. [Hou E G, Shang S Q, Guan S S, et al. Spatial and temporal distribution and functional group characteristics of plankton community in Jixi Wetland, Jinan City. *Journal of Dalian Ocean University*, 2023, 38(3): 482-493.]

- [36]郭杰, 王珂, 段辛斌, 等. 长江荆江段浮游生物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(9): 1954-1964. [Guo J, Wang K, Duan X B, et al. Characteristics of plankton community and its relationships with environmental factors in the Jingjiang reach of the Yangtze River. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(9): 1954-1964.]
- [37]陈君, 宋芬, 彭祺, 等. 洪湖自然保护区浮游生物空间分布及与水质关系[J]. 水生生态学杂志, 2022, 43(1): 63-70. [Chen J, Song F, Peng Q, et al. Spatial distribution of plankton and their relationship with water quality in Honghu Nature Reserve. Journal of Hydroecology, 2022, 43(1): 63-70.]
- [38]Neal C, House W A, Jarvie P H, et al. The water quality of the River Dun and the Kennet and Avon Canal[J]. Journal of Hydrology, 2006, 330(1): 155-170.
- [39]董文涛, 侯文久, 于洪贤, 等. 黑龙江挠力河国家级自然保护区退耕的恢复湿地浮游植物群落结构特征[J]. 湿地科学, 2022, 20(5): 655-665. [Dong W T, Hou W J, Yu H X, et al. Characteristics of phytoplankton community structures of restoration wetlands from reclaimed farmlands in Heilongjiang Naoli River National Nature Reserve. Wetland Science, 2022, 20(5): 655-665.]
- [40]Shi J H, Ni L X, Liu J M, et al. Spatiotemporal distribution of phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in Hongze Lake, China[J]. Urban Climate, 2023, 52: 101746-101746.
- [41]Albay M, Akcaalan R. Factors influencing the phytoplankton steady state assemblages in a drinking-water reservoir[J]. Hydrobiologia, 2003, 502(1-3): 85-95.
- [42]赵秀侠, 方婷, 杨坤, 等. 安徽沱湖夏季浮游植物群落结构特征与环境因子关系[J]. 植物科学学报, 2018, 36(5): 687-695. [Zhao X X, Fang T, Yang K, et al. Community structure characteristics of phytoplankton and related environmental factors in summer in Tuohu Lake, Anhui, China. Plant Science Journal, 2018, 36(5): 687-695.]
- [43]陈昕. 连环湖两个水体浮游生物群落结构特征及水生生态评价[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020. [Chen X. Characteristics of plankton community structure and evaluation on hydroecological status of two waters of Lianhuan Lake. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.]
- [44]Roman M R, Brandt S B, Houde E D, et al. Interactive effects of hypoxia and temperature on coastal pelagic zooplankton and fish[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 139-149.
- [45]孙尚省, 杜彩丽, 卢迪, 等. 合肥市十八联圩湿地夏季水体浮游动物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2022, 41(11): 2199-2207. [Sun S S, Du C L, Lu D, et al. Community characteristics of zooplankton and its relationship with environmental factors in Shibalianwei Wetland of Hefei City in summer. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(11): 2199-2207.]
- [46]Leland H V, Porter S D. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use[J]. Freshwater Biology, 2000, 44(2): 279-301.
- [47]王文侠, 陈非洲, 谷孝鸿. 南京市 5 座中型水库浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2017, 29(1): 216-223. [Wang W X, Chen F Z, Gu X H, et al. Community structures of zooplankton and its relation to environmental factors in five medium reservoirs in Nanjing City. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(1): 216-223.]
- [48]Guo Y T, Shao J L, Zhang Q L, et al. Relationship between water surface area of Qingtu Lake and ecological water delivery: a case study in northwest China. [J]. Sustainability, 2021, 13(9): 4684-4684.
- [49]刘泓江, 文增坤. 地表水中溶解氧的周期性变化规律研究[J]. 化工管理, 2022(26): 32-34. [Liu H J, Wen Z K. Seasonal correlation and causes of dissolved oxygen content in surface water. Chemical Management, 2022(26): 32-34.]
- [50]赵洋雨, 马静军, 杨树生, 等. 宁波市亭下水库总氮超标情况成因分析[J]. 水利技术监督, 2010, 18(5): 13-15. [Zhao Y Y, Ma J J, Yang S S, et al. Analysis of the causes of total nitrogen exceedance in Tingxia Reservoir, Ningbo City. Water Conservancy Technology Supervision, 2010, 18(5): 13-15.]

Plankton community structure and its relationship with environmental factors in the Qingtu Lake wetland

Wang Lijuan¹, Du Yanyan², Zhang Shihu³, Zhang Yanping², Wang Tai²

(1. School of Animal Science and Technology, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, P.R.China; 2. Gansu Provincial Key Laboratory of Cold-Water Fish Germplasm Resources and Genetic Breeding, Gansu Fisheries Research Institute, Lanzhou 730030, Gansu, P.R.China; 3. Forestry and Grassland Bureau of Minqin County, Wuwei 733300, Gansu, P.R.China)

Abstract: To comprehend the composition of plankton community in the Qingtu Lake wetland and its correlation with environmental factors, 14 sampling points were set up for plankton surveys in May (spring), August (summer), and November (autumn) 2021. The results showed that a total of 114 species of phytoplankton were identified from 64 genera and 7 phyla, predominantly consisting of bacillariophyta (57.02%) and chlorophyta (24.56%). The prevailing species throughout the year were *Navicula radiosa*, *Navicula gregaria*, *Synedra acus* and *Synedra ulna*. And 48 species of zooplankton were identified from 37 genera and 5 categories, with rotifers (50%) and protozoa (33.33%) being the predominant groups, and rotifers being the primary dominant group. The abundance and biomass of plankton exhibited substantial seasonal fluctuations. The annual average abundance and biomass of phytoplankton were 5.88×10^3 ind./L, and 2.52×10^{-2} mg/L, respectively, with both peaking in summer. The annual average abundance and biomass of zooplankton were 34.87 ind./L and 21.24×10^{-2} mg/L, with peaking in autumn and summer, respectively. The results of the comprehensive assessment using Shannon-Wiener diversity index, Margalef richness index, and Pielou evenness index indicated that the water quality of the Qingtu Lake was classified as unpolluted to moderately polluted. Redundancy analysis indicated that the primary environmental factors influencing the distribution of phytoplankton communities were the levels of dissolved oxygen, ammonia nitrogen, pH, and total nitrogen. The key environmental factors influencing the distribution of zooplankton communities were the levels of dissolved oxygen, total nitrogen, conductivity, and ammonia nitrogen. Ecological water transport is an effective measure to maintain plankton diversity in the Qingtu Lake wetland, and the research results can provide data support for ecological restoration and early warning of monitoring in the Qingtu Lake wetland.

Keywords: plankton; community structure; environmental factors; biodiversity; the Qingtu Lake wetland