

DOI: 10.12264/JFSC2024-0140

黄河源区浮游植物群落结构特征及其环境驱动因素

吴湘香^{1,2}, 马宝珊¹, 茹辉军¹, 王宏³, 杨尖拉毛³, 张燕¹, 吴凡¹, 杨传顺¹, 李云峰¹

1. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 湖北 武汉 430223;
2. 华中农业大学水产学院, 湖北 武汉 430070;
3. 甘肃省玛曲青藏高原土著鱼类自然保护区管理局, 甘肃 玛曲 747300

摘要: 为探究黄河源区初级生产者浮游植物群落结构特征及其环境驱动因素, 于 2023 年春季(4—5 月)和夏季(8—9 月), 对黄河源区干流和支流(曲麻莱-兴海, 河段约 1200 km)进行了 2 次调查, 共采集了 33 个站点水样。鉴定出浮游植物 7 门 235 种(属), 平均密度 182.75×10^4 cells/L, 平均生物量 55.35×10^{-3} mg/L, 其中硅藻门为优势类群, 种类数占比 72.31%。从时间上, 物种组成和丰度存在季节差异, 浮游植物物种数、平均密度春季均高于夏季, 平均生物量春季低于夏季, 但差异均不显著; 从空间上, 浮游植物物种数、平均密度和生物量干流均高于支流, 浮游植物物种数下游最高, 浮游植物平均密度和生物量中游最高, 但差异不显著。黄河源区浮游植物 Shannon- Wiener 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(d)和 Pielou 均匀度指数(J)均值分别为 2.87 ± 0.66 、 6.65 ± 0.94 和 0.77 ± 0.17 , 春季均低于夏季, 且季节差异极显著。浮游植物优势度 $Y \geq 0.02$ 的优势种共 9 种, 主要为硅藻门藻类, 春、夏两季均为优势种的藻类包括中型脆杆藻(*Fragilaria intermedia*)、二头脆杆藻(*Fragilaria biceps*)、肘状针杆藻(*Synedra ulna*)、念珠状等片藻(*Diatoma moniliforme*)、胀大桥弯藻(*Cymbella turgidula*)。浮游植物群落与环境因子的相关性分析表明, 黄河源区春季和夏季浮游植物群落结构的影响因素不同, 在春季浮游植物密度和生物量主要影响因素有海拔(ASL)、河宽(RW)、流速(FV)等因素, 而夏季主要有高锰酸盐指数(COD_{Mn})、叶绿素 a(Chl.a)、悬浮物(SS)、透明度(SD)等因素。本研究成果可为黄河流域水生态保护的科学决策提供重要基础数据。

关键词: 黄河源区; 浮游植物; 群落结构; 生物多样性

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2024)09–1015–12

浮游植物不仅为水生态系统提供生产力, 其长期动态变化还将影响气候过程、生物地球化学循环^[1]。浮游植物因个体小、繁殖快、生命周期短等特点, 对环境变化敏感^[2], 能快速反映水环境动态。作为水生态系统最底层群落, 浮游植物群落结构的组成及变化影响其他水生生物群落动态, 甚至整个水生态系统的稳定性^[3]。基于浮游植物在生态系统中的功能定位、个体特征及群落特点, 在河流健康监测和评估中, 浮游植物种类组成、丰度、多样性等指标, 既可作为河流水环境变化的监测指标, 又常用于评估河流生态系统结

构和功能的完整性^[4–5], 在河流监测评估和生境保护中具有重要的理论和实践意义。

黄河是我国第二大河流, 干流全长 5464 km, 落差 4480 m, 流域总面积 79.5 万 km²。水文学上以宏观自然区划为基础, 根据水系状况、水文情势以及流域管理的便利性, 通常将龙羊峡以上流域作为黄河源区^[6]。黄河源区主要位于“世界第三极”青藏高原东部, 区域自然环境复杂, 气候条件独特, 高寒、缺氧、辐射强、降水少, 流域内水资源呈现地区分布不均、年内及年际变化大等特点, 生态环境脆弱性高^[6–8]。近年来, 日益频繁的人类

收稿日期: 2024-06-27; 修订日期: 2024-07-23.

基金项目: 农业农村部财政专项“黄河渔业资源与环境调查”; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2023TD09).

作者简介: 吴湘香(1981–), 女, 博士研究生, 研究方向为水生生物学. E-mail: wuxiangxiang2007@163.com

通信作者: 李云峰, 副研究员, 研究方向为渔业生态环境监测与研究. E-mail: lyf086@yfi.ac.cn

活动叠加气候变化的影响,使得黄河源区流域内的生态环境保护与修复问题成为社会关注焦点^[7,9]。关于黄河流域水环境监测和评估,不同单位基于各自目的,在不同尺度上开展了基于浮游植物群落特征评估河流环境的研究工作,但研究主要集中在黄河干流上、中、下游及黄河口三角洲地带^[10-14],而地处高寒区域、生态脆弱性程度高的黄河源区,相关研究极度匮乏,因此十分有必要针对河源区的浮游植物群落进行系统调查研究,为河流源区水生生态系统健康评估和生境保护工作的开展保驾护航。

为落实习近平生态文明思想,推动黄河流域水生生物多样性保护工作,促进黄河流域的高质量发展,2021—2023 年农业农村部组织开展了“黄河渔业资源与环境调查”工作,以摸清黄河流域渔业资源与环境“家底”,为黄河流域发展和生态保护决策提供支撑。本研究依托黄河渔业资源与环境调查工作,开展黄河源区浮游植物群落调查,通过分析浮游植物种类组成、丰度及多样性与水

环境之间关系,初步探讨河源区浮游植物群落结构的驱动机制,以期为黄河流域水生态保护的决策提供数据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

黄河有南北二源,南支卡日曲,北支约古宗列渠,二者均发源于巴颜喀拉山。本研究区域以北支约古宗列渠为源,经纬度范围 $34^{\circ}59'25.55''\text{N}$ ~ $35^{\circ}29'58.06''\text{N}$, $96^{\circ}54'44.93''\text{E}$ ~ $100^{\circ}4'35.33''\text{E}$,海拔范围 2756.8~4576.7 m。流域内具有高原亚寒带半湿润气候和高原温带半湿润气候,年降水量约 300 mm,多年平均年水温 $3.4\sim 7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[7-8]。

本研究根据河流地形地貌特征及水文条件布设调查站位,在黄河河源区干流和支流(曲麻莱-兴海,河段约 1200 km)共设置了调查站位 33 个(图 1),于 2023 年 4—5 月(春季)和 8—9 月(夏季)进行浮游植物样品采集及水体理化环境指标的测定。

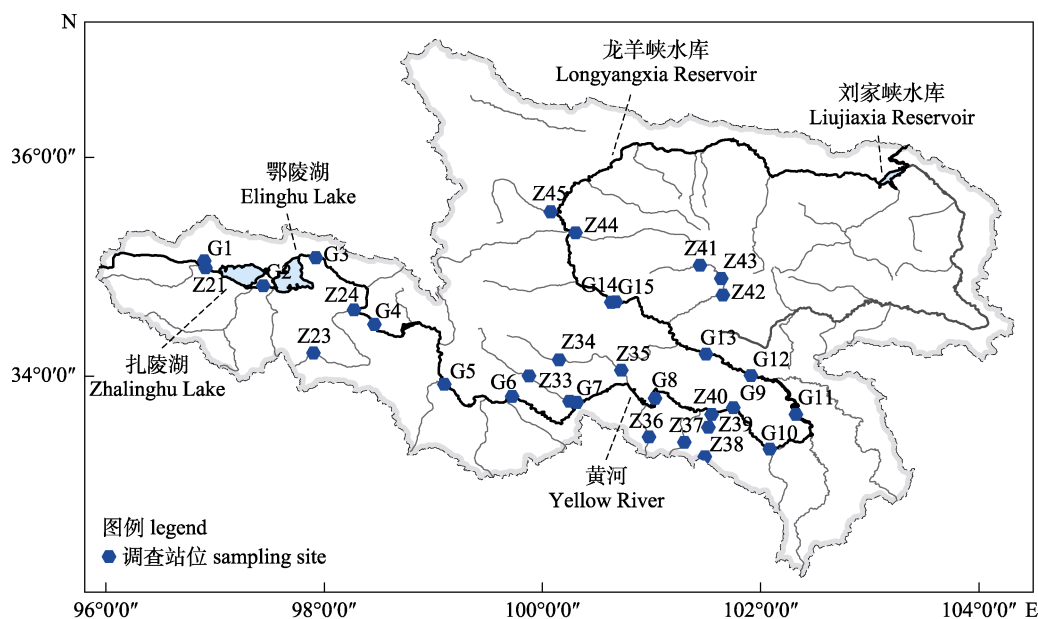


图 1 黄河源区调查站位分布

G1~G15 干流采样站位; Z21~Z24, Z32~Z45 支流采样站位。

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the source region of the Yellow River

G1~G15: sampling sites in the main stem; Z21~Z24, Z32~Z45: sampling sites in the tributaries.

1.2 样品采集

1.2.1 浮游植物样品采集与处理 根据《淡水浮游生物研究方法》^[15]中规定的调查方法,采集浮

游植物定性和定量样品。定性样品采用 25#浮游生物网(网孔直径 0.064 mm)水面下 0.5 m 处作“∞”形捞取 8~10 min,过滤浓缩至 50 mL,装入

标本瓶, 并立即用 4% 甲醛溶液固定保存。定量样品采用有机玻璃采水器, 在水面下 0.5 m, 采集 1 L 混合水样, 并立即用鲁哥氏碘液固定, 沉淀 48 h 后浓缩至 30 mL, 加入 4% 甲醛溶液固定保存, 带回实验室进行种类鉴定和计数。

1.2.2 环境参数采集 现场使用 YSI 多参数水质分析仪(型号: YSI 6600)测定指标包括水温(WT)、溶解氧(DO)、电导率(Cond)、浊度(Turb)、pH、叶绿素 a (Chl.a)、悬浮物(SS); 使用 Decatur 流速仪(型号: SVR 3D)在河流各采样站位等距离测定河流流速(FV); 使用 Trueyard 测距仪(型号: SP-2000H)测定河流宽度(RW); 使用塞奇式圆盘法测定透明度(SD)。以上环境参数指标在每个站位测量 3 次, 取平均值。手持 Garmin GPS (型号: GARMIN GPS72)记录采样站位的海拔(ASL)和经纬度。现场测定的同时, 在采样点取 1 L 水样, 4 °C 冷藏保存带回实验室, 进行水化学指标的测定, 指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})。测定方法参照《水与废水监测分析方法》(第四版)^[16]。

1.3 土地覆盖类型分析

利用 ArcGIS 10.8 软件, 综合考虑河宽、流量、坡度、地表覆盖变化等因素, 分别以 33 个调查站位为中心, 采用缓冲区(buffer)空间分析的方法, 统计每个采样点 5 km 半径范围内的土地覆盖类型。土地覆盖类型数据来自清华大学研发的全球首套 10 m 分辨率地表覆盖图(finer resolution observation and monitoring of global land cover, FROM-GLC), 共包括森林、草地、湿地、农田、城市等 10 种土地覆盖类型^[17]。

1.4 浮游植物样品鉴定

定性样品带回实验室后直接镜检。定量样品需在实验室静置 48 h 后, 定容至 30 mL 再进行种类鉴定和计数。物种鉴定参照《中国淡水藻类—系统、分类及生态》^[18]《中国淡水生物图谱》^[19]等资料进行。

1.5 多样性分析

选择 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(d)、Pielou 均匀度指数(J)和

物种优势度指数($Y \geq 0.02$ 为优势种), 对浮游植物群落的物种多样性进行分析, 各指数计算公式分别为:

$$d = (S - 1) / \ln S \quad (1)$$

$$H' = -\sum (n_i / N) \ln (n_i / N) \quad (2)$$

$$J = H' / \ln S \quad (3)$$

$$Y = (n_i / N) \times f_i \quad (4)$$

式中, S 为总物种数; N 为同一样点中个体总数; n_i 为第 i 种的个体数; f_i 为第 i 种物种出现的频率。

1.6 数据处理

所有数据整理在 Excel 2016 中完成, 统计分析在 SPSS 26 中完成, 多样性指数计算在 Primer 6.0 中完成, 绘图在 Origin 2021 中完成, 除趋势对应分析在 Canoco5.0 中完成, 地图绘制在 ArcGIS 10.8 中完成。

对浮游植物的密度数据进行除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA), 在 DCA 结果中, 如果最大梯度长度 > 4, 选择典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA), 如果最大梯度长度 < 3, 则选择冗余分析(redundancy analysis, RDA), 如果介于 3 ~ 4 之间, CCA 和 RDA 选择一个即可。

除 pH 外, 所有数据在分析之前, 均进行 $\log(x+1)$ 转换, 以提高数据正态性。

2 结果与分析

2.1 环境特征

2.1.1 水环境因子 黄河源区在春季和夏季环境因子如表 1 所示。不同环境因子季节差异程度不同, 其中 WT、pH、DO、Chl.a、RW 差异极显著($P < 0.01$), SD 和 COD_{Mn} 差异显著($P < 0.05$), 其他环境因子季节之间差异不显著。

2.1.2 土地覆盖类型 黄河源区 33 个调查站点的土地覆盖类型面积占比情况如图 2 所示, 整个源区以草地为主, 平均占比达 82.75% (10.61%~99.74%), 其次为裸地, 平均占比达 11.12% (0.03%~84.38%), 其他森林、沼泽、农田、裸地、冰山、硬化地等占比均小于 3%。

表 1 春、夏季节黄河河源环境特征

Tab. 1 The environmental characteristics in the source region of the Yellow River in spring and summer

环境指标 environmental index	春季 spring	夏季 summer	<i>P</i>
水温/℃ WT	8.53±2.88**	12.05±2.65	0.00
酸碱度 pH	8.59±0.15**	8.35±0.15	0.00
溶解氧/(mg/L) DO	7.06±0.45**	7.71±1.15	0.00
电导率/(mS/cm) Cond	489.88±187.00	485.15±174.94	0.92
透明度/m SD	37.92±28.78*	24.56±18.62	0.03
叶绿素 a/(mg/m ³) Chl.a	12.06±10.41**	2.74±1.92	0.00
浊度/NTU Turb	72.42±102.57	109.46±91.73	0.13
流速/(m/s) FV	0.79±0.34	0.66±0.46	0.23
河宽/m RW	66.31±67.39**	136.44±112.27	0.00
海拔/m ASL	3781.90±448.99	3727.80±454.47	0.63
总磷含量/(mg/L) TP	0.18±0.24	0.14±0.18	0.38
总氮含量/(mg/L) TN	1.16±1.51	1.48±1.18	0.35
悬浮物浓度/(mg/L) SS	112.06±175.11	143.12±145.59	0.44
高锰酸盐/(mg/L) COD _{Mn}	3.86±2.19*	2.63±1.44	0.01

注: *季节差异显著($P<0.05$), **季节差异极显著($P<0.01$).

Note: * means the significant difference in season ($P<0.05$), ** means the extremely significant difference in season ($P<0.01$).

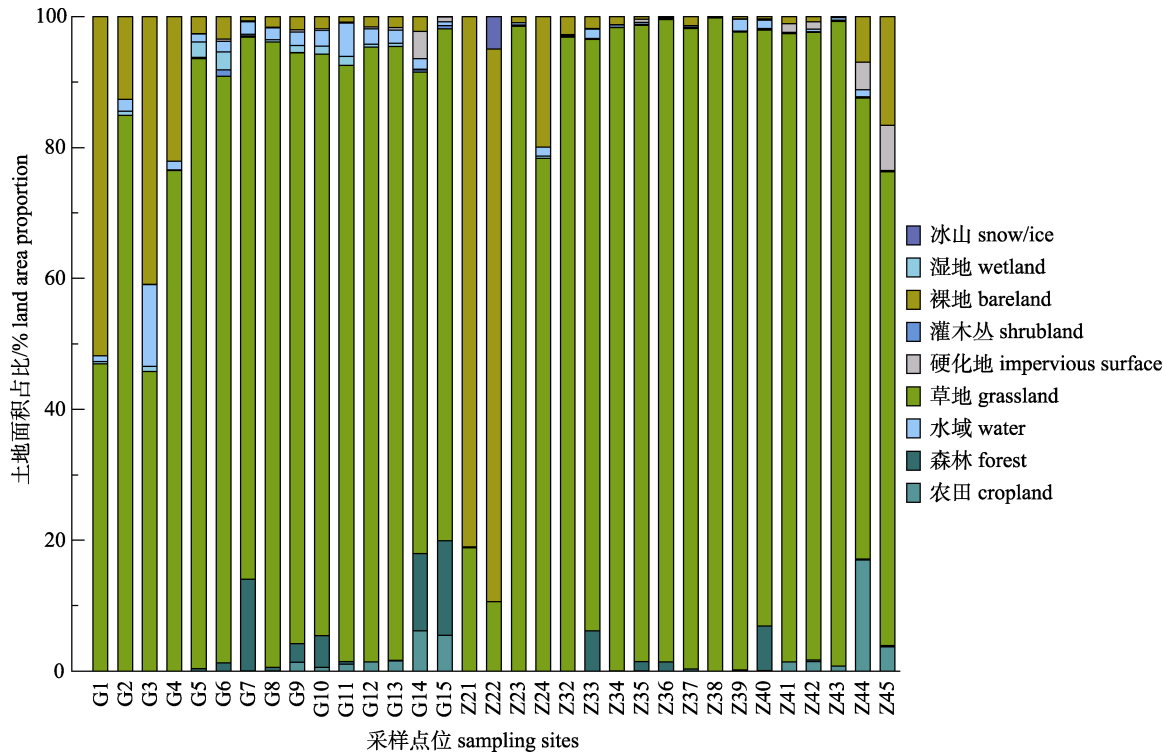


图 2 黄河源区土地覆盖类型面积占比

Fig. 2 The proportions of land cover types in the source region of the Yellow River

2.2 浮游植物群落结构特征

2.2.1 物种组成时空变化 由图 3 可知, 春夏两季共调查并鉴定出浮游植物 7 门 235 种(属), 硅藻

门为主要种类, 167 种(72.31%), 其次为绿藻门, 34 种(14.05%), 其他各门占比均低于 10%。从季节上来看, 春季浮游植物种类数和夏季基本持平,

但种类构成存在差异, 夏季绿藻和蓝藻占比高于春季。春季硅藻类占比 79%, 绿藻类 10%, 蓝藻类 6%, 其他藻类均低于 5%; 夏季硅藻类占比下降至 72%, 绿藻类上升到 14%, 蓝藻类上升至 9%。从空间上看, 干流浮游植物种类数略高于支

流, 干流浮游植物平均 83 种(61~113 种), 支流 81 种(66~95 种), 下游高于上游和中游, 下游平均 88 种(69~113 种), 上游 84 种(71~100 种), 中游 77 种(61~94 种); 硅藻类在所有断面平均占比 86.80% (80.85%~95.83%)。

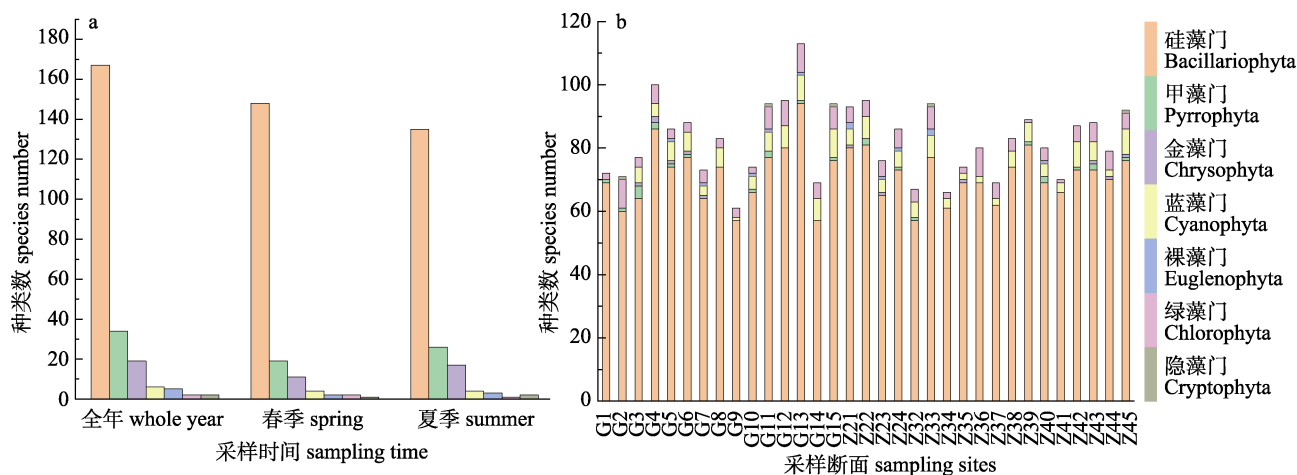


图3 黄河源区浮游植物种类组成

a: 不同时间段物种种类数; b: 各断面全年物种种类数; G1~G15 干流采样站位, Z21~Z24, Z32~Z45 支流采样站位。

Fig. 3 The species composition of phytoplankton in the source region of the Yellow River

a: Species numbers in different periods of time; b: Annual number of species of every sampling site in the whole year; G1~G15: sampling sites in the main stem; Z21~Z24, Z32~Z45: sampling sites in the tributaries.

2.2.2 密度和生物量时空变化 黄河源区浮游植物平均密度 182.75×10^4 cells/L ($94.23 \times 10^4 \sim 677.39 \times 10^4$ cells/L), 硅藻类平均密度占比 84.46%, 平均生物量 55.35×10^{-3} mg/L ($31.14 \times 10^{-3} \sim 206.02 \times 10^{-3}$ mg/L), 硅藻类平均生物量占比 93.37%。从季节上看, 春季平均密度(186.36×10^4 cells/L)高于夏季(170.94×10^4 cells/L), 春季平均生物量(54.00×10^{-3} mg/L)低于夏季(57.56×10^{-3} mg/L)。从空间上看, 干流平均密度(182.75×10^4 cells/L)高于支流(173.20×10^4 cells/L), 干流平均生物量(58.41×10^{-3} mg/L)高于支流(55.47×10^{-3} mg/L), 河流中游平均密度(219.63×10^4 cells/L)和平均生物量(66.20×10^{-3} mg/L)均高于上游(平均密度 141.44×10^4 cells/L, 平均生物量 45.86×10^{-3} mg/L)和下游(平均密度 162.35×10^4 cells/L, 平均生物量 51.81×10^{-3} mg/L)。黄河源区浮游植物密度和生物量的时空分布见图 4。

2.3 多样性指数

浮游植物 H' 平均值 2.87 ± 0.66 , d 平均值

6.65 ± 0.94 , J 平均值 0.77 ± 0.17 , 各指数季节和空间变化见图 5。从季节上看, 春季 H' 、 d 和 J 平均值均低于夏季, 且季节间差异均极显著。从空间上看, 干流 J 、 d 平均值和支流没有显著差异, 干流 H' 平均值高于支流, 且差异显著。

2.4 浮游植物优势种

浮游植物优势度 $Y \geq 0.02$ 的优势种共 9 种(表 2), 春季和夏季优势种类均为 7 种。优势种主要为硅藻类, 包括中型脆杆藻(*Fragilaria intermedia*)、肘状针杆藻(*Synedra ulna*)、二头脆杆藻(*Fragilaria biceps*)、念珠状等片藻(*Diatoma moniliforme*)、胀大桥弯藻(*Cymbella turgidula*)、小环藻(*Cyclotella* sp.)、短小舟形藻(*Navicula exigua*)、舟形藻(*Navicula* sp.)、小颤藻(*Oscillatoria tenuis*), 在春、夏季均为优势种的藻类有 *Fragilaria intermedia*、*Synedra ulna*、*Fragilaria biceps*、*Diatoma moniliforme*、*Cymbella turgidula*。

2.5 浮游植物群落结构与环境因子关系

按照季节将浮游植物物种数、密度、生物量、

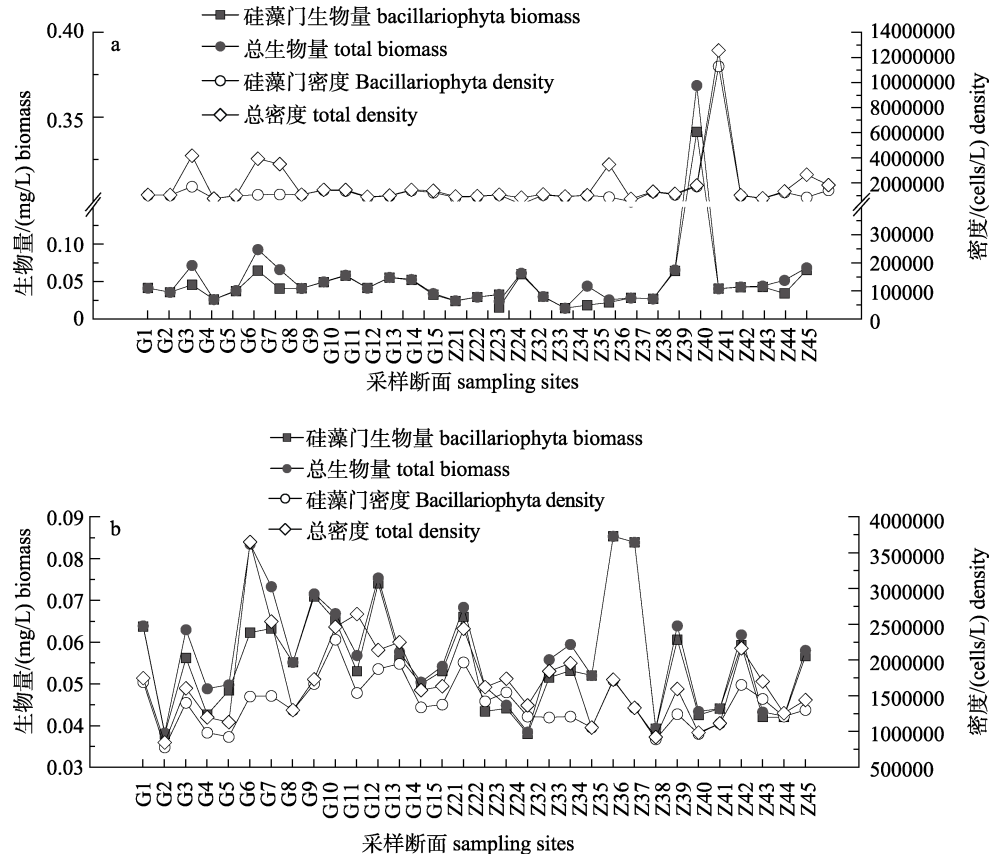


图 4 (a)春季和(b)夏季黄河源区浮游植物密度和生物量分布
G1~G15 干流采样站点, Z21~Z24, Z32~Z45 支流采样站点。

Fig. 4 Distributions of phytoplankton density and biomass in the source region of the Yellow River in Spring (a) and summer (b); G1–G15: sampling sites in main stem, Z21–Z24, Z32–Z45: sampling sites in tributaries.

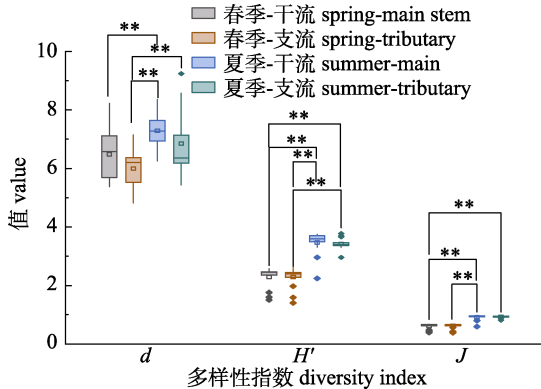


图 5 黄河源区浮游植物多样性指数
*表示指数差异显著, **表指数差异极显著;
d: Margalef 丰富度指数; H': Shannon-Winener
多样性指数; J: Pielou 均匀度指数.

Fig. 5 The diversity indices of phytoplankton in the source region of the Yellow River

*means the difference of index is significant, **means the difference of index is extremely significant;
d: Margalef's richness index; H': Shannon-Winener diversity index; J: Pielou's evenness index.

表 2 黄河源区春季和夏季浮游植物优势种类
Tab. 2 Dominant species of phytoplankton in spring and summer in the source region of the Yellow River

优势种 dominant species		优势度 dominance degree	
		春季 spring	夏季 summer
中型脆杆藻	<i>Fragilaria intermedia</i>	0.023	0.032
二头脆杆藻	<i>Fragilaria biceps</i>	0.027	0.021
肘状针杆藻	<i>Synedra ulna</i>	0.034	0.035
念珠状等片藻	<i>Diatoma moniliforme</i>	0.036	0.021
胀大桥弯藻	<i>Cymbella turgidula</i>	0.022	0.022
小环藻	<i>Cyclotella</i> sp.	0.023	—
短小舟形藻	<i>Navicula exigua</i>	0.038	—
舟形藻	<i>Navicula</i> sp.	—	0.022
小颤藻	<i>Oscillatoria tenuis</i>	—	0.021

注: —表示此处没有数值。
Note: — means no value.

多样性指数等群落结构特征与水环境理化因子和空间特征进行相关性分析, 结果表明浮游植物群

落结构受水环境和地理空间影响较大(图 6)。在春季, 种类数与 RW 呈极显著相关; 密度与 ASL 呈显著相关; 多样性指数 H' 与 RW 呈显著相关, J 、 d 与 FV 呈显著相关。在夏季, 浮游植物种类与 Chl.a

和 SS 显著相关; 密度与 SS、 COD_{Mn} 和 SD 显著相关; 多样性指数 J 与 SW、RW 显著相关, J 和 d 与 FV 极显著相关, J 与 COD_{Mn} 显著相关, d 与 COD_{Mn} 极显著相关。

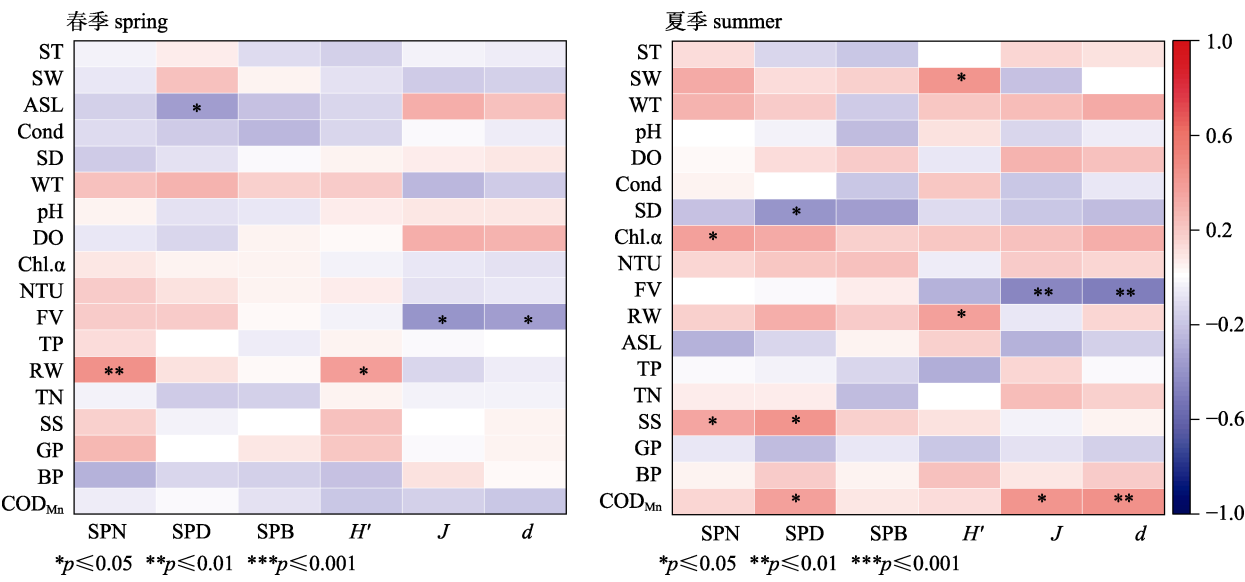


图 6 春、夏季节浮游植物群落结构与环境因子的关系

横轴为物种参数, 纵轴为环境参数, 红色到蓝色表示由高到低; SPN: 物种种类数, SPB: 物种生物量, SPD: 物种密度, H' : Shannon-Wiener 多样性指数, J : Pielou 均匀度指数, d : Margalef 丰富度指数, GP: 草地占比, BP: 裸地占比。

Fig. 6 The correlation between community structure of phytoplankton and environment factors in spring and summer The horizontal axis indicates species parameters, and the vertical axis indicates environmental parameters; the color from red to blue indicates high to low correlation degree, respectively. SPN: species numbers, SPB: species biomass, SPD: species density, H' : Shannon-Wiener diversity index, J : Pielou's evenness index, d : Margalef's richness index, GP: grassland proportion, BP: bareland proportion.

通过对春夏两季浮游植物主要优势种($Y>0.01$) 密度数据进行 DCA 分析, 发现春、夏季最大梯度长度分别为 1.07 和 1.30, 故选择冗余分析(RDA) 方法探究多种环境因子对浮游植物群落的影响(图 7)。春季第一轴和第二轴累计解释率为 53.9%, ASL 和 SW 为春季优势种密度分布主要环境影响因子, 影响的物种包括显喙舟形藻、桥弯藻、胀大桥弯藻、披针桥弯藻和小环藻, 其中桥弯藻受 ASL 影响最大, 披针桥弯藻受 SW 影响最大。夏季第一轴和第二轴累计解释率为 58%, RW 和 DO 为夏季优势种密度分布主要影响因子, 影响的物种主要包括肘状针杆藻、短小舟形藻、喙头舟形藻和舟形藻, 其中舟形藻受 DO 影响最大, 短小舟形藻受 RW 影响最大。

3 讨论

3.1 黄河源区浮游植物群落结构特征

河源区特殊的生境, 其浮游植物群落结构特征和河流其他河段存在差异。关于黄河浮游植物已有研究表明, 黄河上游主要以硅藻门为主, 硅藻种类数在 14~110 种, 硅藻占比在 39.1%~55.2%, 而中游、下游硅藻占比则明显下降, 部分河段以绿藻门为主^[11-12,15,20-22]。本研究中黄河河源区硅藻类 167 种, 占比达 72.31%, 明显高于黄河其他河段, 分析认为原因主要来自几方面, 第一, 因本研究调查河段相对其他调查覆盖范围更广; 第二, 黄河源区水体透明度相对中游和下游来说更高, 物种种类数多; 第三, 黄河源区区域环境具

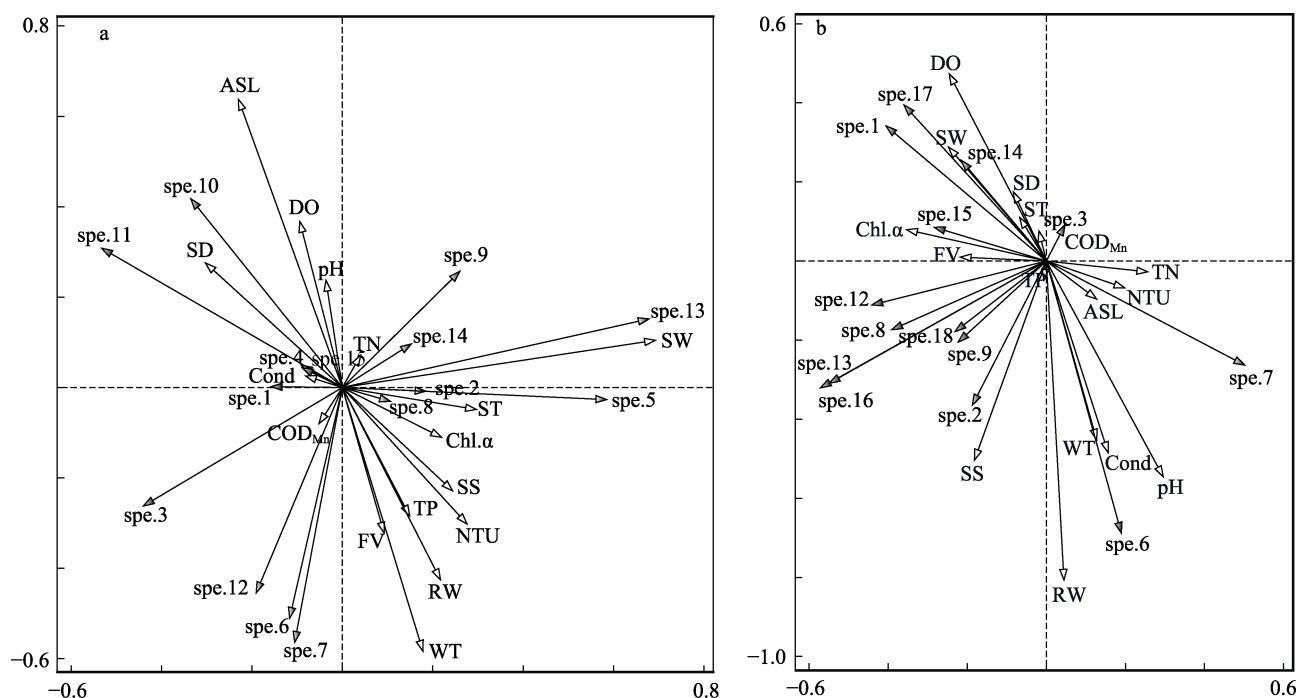


图 7 春、夏季浮游植物与环境因子冗余分析

- a. 春季冗余分析, b. 夏季冗余分析; spe.1: 肘状针杆藻; spe.2: 二头脆杆藻; spe.3: 中型脆杆藻; spe.4: 显喙舟形藻; spe.5: 系带舟形藻; spe.6: 短小舟形藻; spe.7: 喙头舟形藻; spe.8: 念珠状等片藻; spe.9: 普通等片藻; spe.10: 桥弯藻; spe.11: 膨胀桥弯藻; spe.12: 胀大桥弯藻; spe.13: 披针形桥弯藻; spe.14: 近棒形异极藻; spe.15: 小环藻; spe.16: 小颤藻; spe.17: 舟形藻; spe.18: 绿色羽纹藻。

Fig. 7 Redundancy analysis of phytoplankton and environment factors in spring and summer

- a. Redundancy analysis in spring, b. Redundancy analysis in summer; spe.1: *Synedra ulna*; spe.2: *Fragilaria biceps*; spe.3: *Fragilaria intermedia*; spe.4: *Navicula perrostrata*; spe.5: *Navicula cincta*; spe.6: *Navicula exigua*; spe.7: *Navicula rhynchocephala*; spe.8: *Diatoma moniliforme*; spe.9: *Diatoma vulgare*; spe.10: *Cymbella* sp.; spe.11: *Cymbella tumida*; spe.12: *Cymbella turgidula*; spe.13: *Cymbella lanceolata*; spe.14: *Gomphonema subclavatum*; spe.15: *Cyclotella* sp.; spe.16: *Oscillatoria tenuis*; spe.17: *Navicula* sp.; spe.18: *Pinnularia viridis*.

有更高的空间异质性, 导致该区域浮游植物群落具有更高的物种多样性。

长江源区相关研究结果显示, 硅藻类为长江源区河流浮游植物主要种类, 其次分别为蓝藻门、绿藻门^[23-24]。本研究浮游植物群落呈现典型的河流硅藻-绿藻群落特征, 与长江源区河流浮游植物在种类组成上基本一致。李伟等^[25]对长江源区浮游植物调查研究发现, 长江源区浮游植物密度较低, 最高 92.50×10^4 cells/L, 最低 8×10^4 cells/L, 处于贫营养状态。本研究黄河源区浮游植物平均密度 177.25×10^4 cells/L ($94.23 \times 10^4 \sim 677.39 \times 10^4$ cells/L), 黄河源区浮游植物密度明显高于长江源区, 分析认为一方面因为本研究所调查的黄河源区相对李伟等所调查的长江源区调查站点更多(涉及干、支流共 33 个), 另一方面是因为本研究所调查的区

域人类活动相对更频繁, 导致部分河段具有更高的初级生产力, 黄河源区浮游植物平均密度相对较高。

3.2 黄河源区浮游植物群落结构影响因素分析

河流浮游植物时空动态影响因素复杂, 水体物理化学因素如光照、流速、水温、电导率、溶氧、总磷、总氮、COD 等, 生物因素如捕食、种间竞争等, 这些因素均会对浮游植物群落结构形成和动态变化产生影响^[26-27]。不同水体浮游植物影响因素不同, 各因素对浮游植物影响程度和方式也存在差异^[28-29]。长江源区相关研究显示, 影响长江源区浮游植物的主要环境因素有水温、溶解氧及营养类^[23-25]。本研究中, 黄河源区春季和夏季浮游植物群落结构的影响因素不同, 在春季浮游植物密度和生物量主要影响因素有海拔、河

宽、流速等因素,而夏季主要有高锰酸盐指数、叶绿素 a、悬浮物、透明度等因素。

水温是影响浮游植物生长的重要环境因子^[2]。各门藻类的适宜生长水温存在差异性,蓝藻、绿藻喜高温,而具有高度硅质化细胞壁的硅藻,耐低温能力高于蓝藻、绿藻类^[30]。本研究中,黄河源区春季平均水温 8.53 °C,夏季平均水温 12.05 °C,春季硅藻种类占比高于夏季。

海拔决定了一个地区的气候环境条件,与物种分布有一定相关性^[31]。已有研究发现,海拔在河流浮游植物群落结构影响因素中经常占据主导地位^[23,31-32]。本研究显示,黄河源区春季浮游植物种类数、密度和多样性指数与海拔相关性显著,但夏季海拔对浮游植物群落影响并不显著,这也解释了各环境因子对浮游植物的影响程度和方式会随着时空推移而发生改变。

泥沙通过直接影响水体透明度和氮、磷等营养盐类在水体中的分布转化^[33-34],从而间接影响浮游植物群落结构。栾青杉等^[35]对长江口夏季浮游植物群落研究发现,其丰度与浊度呈负相关。本研究中春季浮游植物丰度主要影响因素有浊度,而夏季丰度影响因素有悬浮物和透明度,3 个指标与水体的泥沙含量均相关,间接说明泥沙限制光的可利用性,进而成为黄河源区浮游植物群落结构构成的限制性因素。

3.3 黄河源区浮游植物群落的物种多样性

物种多样性与生态系统稳定性密切相关^[36], Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数常被用于浮游植物群落的物种多样性分析^[37]。多样性指数越高,群落结构更复杂,系统更稳定^[36,38]。本研究中,黄河源区的浮游植物 Shannon-Wiener 指数均值 2.87, Simpson 多样性指数均值 6.65, Pielou 均匀度指数均值 0.77,多样性指数较高,该群落结构复杂,物种丰富度高且分布均匀,对群落内部波动和外部干扰抵抗能力强,系统处于稳定状态。

群落的物种多样性影响因素包括空间异质性、捕食和干扰等,水温是浮游植物群落物种多样性季节变动的主要驱动因素^[26]。本研究中,黄河源区春季 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef

丰富度指数和 Pielou 均匀度指数季节间差异极显著,各指数平均值春季均低于夏季,正是由于春、夏季节水温差异显著。

3.4 结论与建议

本研究发现,黄河源区浮游植物 235 种,硅藻门藻类为绝对优势种,占比 72.31%,平均密度 182.75×10^4 cells/L,平均生物量 55.35×10^{-3} mg/L,群落结构呈现典型的河流特征。根据本研究环境与群落结构分析结果,黄河源区浮游植物群落结构主要环境影响因素包括海拔、河宽、水温、浊度、透明度和悬浮物等物理因素,水热和光的可利用性是黄河源区浮游植物群落的限制性条件。

水生态系统的健康离不开系统各要素的完善,深入开展黄河源区浮游植物调查,掌握其群落结构特征,探索其环境驱动因素,为黄河源区高寒水域生态系统的保护提供基础数据,对于落实黄河流域生态保护战略,构建黄河生态安全屏障具有重要的现实意义。黄河源区生态脆弱性程度高,生态环境退化修复难度大,未来可通过控制人类活动强度、草场休牧轮牧、山水林田湖草沙冰一体化系统管理等综合措施,保护河源区生态环境和水生生物资源。

参考文献:

- [1] Boyce D G, Lewis M R, Worm B. Global phytoplankton decline over the past century[J]. *Nature*, 2010, 466: 591-596.
- [2] Reynolds C S. Variability in the provision and function of mucilage in phytoplankton: Facultative responses to the environment[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 578(1): 37-45.
- [3] Jiang Y, Peng Q Z, Liao J Y, et al. Advances and prospects for research into phytoplankton and river habitats[J]. *Resource Science*, 2013, 35(3): 461-472. [江源, 彭秋志, 廖剑宇, 等. 浮游藻类与河流生境关系研究进展与展望[J]. *资源科学*, 2013, 35(3): 461-472.]
- [4] Wu N C, Schmalz B, Fohrer N. Distribution of phytoplankton in a German lowland river in relation to environmental factors [J]. *Journal of Plankton Research*, 2011, 33(5): 807-820.
- [5] Bai H F, Wang Y R, Song J X, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of phytoplankton community structure in the Shaanxi Section of Weihe River, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(8): 3290-3301. [白海锋, 王怡睿, 宋进喜, 等. 渭河陕西段浮游植物群落结构时空变化与影响因子分析[J]. *环境科学学报*,

- 2021, 41(8): 3290-3301.]
- [6] Yang J P, Ding Y J, Chen R S, et al. Synthetical Research of Eco-environmental Changes in the Source Region of the Changjiang and Huanghe Rivers[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006. [杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 长江黄河源区生态环境变化综合研究[M]. 北京: 气象出版社, 2006.]
- [7] Ding Y T, Pan B Z. The aquatic organisms resources in the Yellow River Basin: Assessment and problem diagnosis[J]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38(1): 1-13. [丁一桐, 潘保柱. 黄河流域水生生物资源评估及问题诊断[J]. 中国环境监测, 2022, 38(1): 1-13.]
- [8] Yuan B, Zhou X D, Song C, et al. Analysis of water temperature changes and influencing factors in the alpine zone of Yellow River Upstream[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(12): 59-65. [袁博, 周孝德, 宋策, 等. 黄河上游高寒区河流水温变化特征及影响因素研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(12): 59-65.]
- [9] Zuo Q T. Research framework for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2019, 41(11): 1-6, 16. [左其亭. 黄河流域生态保护和高质量发展研究框架[J]. 人民黄河, 2019, 41(11): 1-6, 16.]
- [10] Feng H. The study of aquatic biodiversity and the evaluation of ecosystem health in Huanghe River Upper Reach from Longyangxia to Liujiaxia[D]. Xi'an: Northwest University, 2009. [冯慧. 黄河上游龙羊峡—刘家峡河段水生生物多样性研究及生态系统健康评价[D]. 西安: 西北大学, 2009.]
- [11] Zhang J Y, Zhang J J, Yang X Z, et al. Characteristics of plankton community structure in Maqu section at upper reaches of Yellow River in spring[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(5): 983-987. [张军燕, 张建军, 杨兴中, 等. 黄河上游玛曲段春季浮游生物群落结构特征[J]. 生态学杂志, 2009, 28(5): 983-987.]
- [12] Wang Y, Wang H J, Zhao W H, et al. Phytoplankton assemblage characteristics and their indication of water quality in the mainstream of the Yellow River[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(5): 700-707. [王勇, 王海军, 赵伟华, 等. 黄河干流浮游植物群落特征及其对水质的指示作用[J]. 湖泊科学, 2010, 22(5): 700-707.]
- [13] Chen Y Q, Shen Z X, Liu Y T. Phytoplankton community structure and diversity assessment in the upper reach of the Yellow River during spring and autumn[J]. Journal of Hydroecology, 2014, 35(5): 52-59. [陈燕琴, 申志新, 刘玉婷. 黄河上游龙羊峡至积石峡段春秋浮游植物群落结构及多样性评价[J]. 水生态学杂志, 2014, 35(5): 52-59.]
- [14] Ding Y T, Pan B Z, Zhao G N, et al. Phytoplankton in the mainstem of the Yellow River: Community characteristics and bioassessment of water quality[J]. China Environmental Science, 2021, 41(2): 891-901. [丁一桐, 潘保柱, 赵耿楠, 等. 黄河干流全河段浮游植物群落特征与水质生物评价[J]. 中国环境科学, 2021, 41(2): 891-901.]
- [15] Zhang Z S, Huang X F. Research Methods of Freshwater Plankton[M]. Beijing: Science Press, 1991. [章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [16] "Monitoring and Analysis Method of Water and Wastewater" Editorial Board of State Environmental Protection Administration of China. Monitoring and Analysis Methods of Water and Wastewater[M]. The fourth edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [17] Gong P, Liu H, Zhang M N, et al. Stable classification with limited sample: Transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017[J]. Science Bulletin, 2019, 64(6): 370-373.
- [18] Hu H J, Wei Y X. The Freshwater Algae of China: Systematics, Taxonomy and Ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006. [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.]
- [19] Han M S, Shu Y F. Atlas of Freshwater Biota in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 1995: 2-352. [韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1995: 2-352.]
- [20] Wang S Y, Zhang X X, Tian S M, et al. Study on phytoplankton community structure characteristics and its influencing factors of lakes in arid regions of the Yellow River Basin during ice-sealing period[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1070-1079. [王司阳, 张笑欣, 田世民, 等. 黄河流域干旱区湖泊冰封期浮游植物群落结构特征及影响因素研究[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1070-1079.]
- [21] Yuan Y F, Li Y D, Zhang L L, et al. Investigation & research on hydrobios resources in the middle and upper reaches of main Yellow River[J]. Journal of Hydroecology, 2009, 2(6): 15-19. [袁永锋, 李引娣, 张林林, 等. 黄河干流中上游水生生物资源调查研究[J]. 水生态学杂志, 2009, 2(6): 15-19.]
- [22] Hui J, Jie Z L, He H Z, et al. Ecological characteristics and temporal-spatial distribution of plankton in Henan section of the Yellow River[J]. Hebei Fisheries, 2018(5): 37-43. [惠筠, 介子林, 贺海战, 等. 黄河河南段浮游生物生态特性与时空分布[J]. 河北渔业, 2018(5): 37-43.]
- [23] Han X, Pan B Z, Zhao G N, et al. Phytoplankton community structure and distribution characteristics in the source region of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(11): 2621-2631. [韩谔, 潘保柱,

- 赵耿楠, 等. 长江源区浮游植物群落结构及分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11): 2621-2631.]
- [24] Min M, Chai Y B, Chen X F, et al. Relation between phytoplankton community characteristics and water environmental factors in the source region of Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(12): 28-33. [闵敏, 柴元冰, 陈欣佛, 等. 长江源区浮游植物群落特征与水环境因子关系研究[J]. 长江科学院报, 2020, 37(12): 28-33.]
- [25] Li W, Li L D, Li H, et al. Difference in the characteristics of phytoplankton community in headwaters of the Yangtze River and its interaction with environmental factors[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(12): 39-45. [李伟, 李鲁丹, 李欢, 等. 长江三源浮游植物群落特征差异与环境因子关系[J]. 长江科学院报, 2021, 38(12): 39-45.]
- [26] Padisák J, Hajnal É, Naselli-Flores L, et al. Convergence and divergence in organization of phytoplankton communities under various regimes of physical and biological control[J]. Hydrobiologia, 2010, 639(1): 205-220.
- [27] Abonyi A, Ács É, Hidas A, et al. Functional diversity of phytoplankton highlights long-term gradual regime shift in the middle section of the Danube River due to global warming, human impacts and oligotrophication[J]. Freshwater Biology, 2018, 63(5): 456-472.
- [28] Nielsen S L, Sand-Jensen K, Borum J, et al. Phytoplankton, nutrients, and transparency in Danish coastal waters[J]. Estuaries, 2002, 25(5): 930-937.
- [29] Yan G H, Yin X Y, Wang X, et al. Effects of environmental factors on the composition of phytoplankton community in Sankou of the Yangtze River and the Western Dongting Lake[J]. China Environmental Science, 2019, 39(6): 2532-2540. [严广寒, 殷雪妍, 汪星, 等. 长江三口-西洞庭湖环境因子对浮游植物群落组成的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(6): 2532-2540.]
- [30] Sun X, Li X, Gou M M. Phytoplankton community structure characteristics and its influencing factors before and after freezing and thawing in Wuliangsu Lake[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(4): 812-821. [孙鑫, 李兴, 勾芒芒. 乌梁素海冻融前后浮游植物群落结构特征及其影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2019, 28(4): 812-821.]
- [31] Ma B S, Xu B, Wei K J, et al. Phytoplankton community structure and its relation to environmental conditions in the middle Anning River, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3332-3341. [马宝珊, 徐滨, 魏开金, 等. 安宁河中游浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2020, 39(10): 3332-3341.]
- [32] Yang S Q, Zu T X, Wang H B, et al. Relationship between the structure of phytoplankton community and environmental factors in the Zhangye section of Heihe River[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(1): 159-170. [杨宋琪, 祖廷勋, 王怀斌, 等. 黑河张掖段浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2019, 31(1): 159-170.]
- [33] Wang H Y, Shen Z Y, Guo X J, et al. Ammonia adsorption and nitrification in sediments derived from the Three Gorges Reservoir, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(8): 1653-1660.
- [34] Wu X X, Li Y F, Shen Z W, et al. Relationship between phytoplankton community structure and aquatic environmental factors in the Chishui River, a protected tributary of the Yangtze River[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(2): 361-368. [吴湘香, 李云峰, 沈子伟, 等. 赤水河浮游植物群落结构特征及其与水环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2014, 21(2): 361-368.]
- [35] Luan Q S, Sun J, Song S Q, et al. Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environment in the Yangtze River Estuary, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 445-450. [栾青杉, 孙军, 宋书群, 等. 长江口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 445-450.]
- [36] Chen J Q, Zhao K, Cao Y, et al. Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Poyang Lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6644-6658. [陈佳琪, 赵坤, 曹玥, 等. 鄱阳湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6644-6658.]
- [37] Sun J, Liu D Y. The application of diversity indices in marine phytoplankton studies[J]. Haiyang Xuebao, 2004, 26(1): 62-75. [孙军, 刘东艳. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用[J]. 海洋学报, 2004, 26(1): 62-75.]
- [38] Chen J Z, Meng S L, You Y, et al. Characteristic of phytoplankton community in Lake Wuli, Lake Taihu[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(4): 1358-1367. [陈家长, 孟顺龙, 尤洋, 等. 太湖五里湖浮游植物群落结构特征分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1358-1367.]

Dynamics and environmental drivers of the phytoplankton community in the source region of the Yellow River

WU Xiangxiang^{1,2}, MA Baoshan¹, RU Huijun¹, WANG Hong³, YangJianlamao³, ZHANG Yan¹, WU Fan¹, YANG Chuanshun¹, LI Yunfeng¹

1. Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China;

2. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

3. Gansu Maqu Tibetan Plateau Indigenous Fish Nature Reserve Administration, Maqu 747300, China

Abstract: The source region of the Yellow River is located in the eastern region of the Qinghai-Tibet Plateau and the ecological environment in the basin is fragile. The climate in this area is classified as plateau sub-cold zone, semi-humid and plateau temperate zone, semi-humid. The annual rainfall is approximately 300 mm, and the average annual water temperature is 3.4–7.2 °C. As the global climate is changing and human activities are increasing, the ecological environment of the basin is confronting great pressure. The protection and restoration of the environment around the Yellow River has become the focus of human society. To explore the characteristics of the phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors, two comprehensive investigations were undertaken in the main stem and tributaries of the Yellow River in the spring and summer of 2023, respectively. The total length of the survey site of the river was 1200 km. Phytoplankton samples were collected from 33 survey stations along the source region of the Yellow River. The environmental parameters including water temperature, dissolved oxygen level, conductivity, turbidity, pH, chlorophyll a level, suspended solid levels, flow velocity, river width, transparency, altitude, latitude, and longitude were collected in the field. One liter of water was collected in a polytetrafluoride bottle and returned to the laboratory for analyses of water quality indices, including total nitrogen and total phosphorus levels and the potassium permanganate index. In total, 235 species of phytoplankton belonging to seven genera were identified, with an average density and biomass of 182.75×10^4 cells/L and 55.35×10^{-3} mg/L, respectively. Diatoms were the dominant species, accounting for 72.31% of all species. Seasonal changes in species composition and abundance existed, but were not significant. From the perspective of spatial dynamics, the phytoplankton species and their abundance in the main stem proceeded to the tributaries. The number of phytoplankton species was highest in the downstream area, and the average density and biomass of phytoplankton were highest in the middle reaches. The Shannon-Wiener diversity index, Margalef's richness index, and Pielou's evenness index values were 2.87 ± 0.66 , 6.65 ± 0.94 , and 0.77 ± 0.17 , respectively. Biodiversity analysis showed that the diversity index values of the phytoplankton community were higher in spring than in summer, and these seasonal differences were highly significant. There were nine dominant species of phytoplankton, mainly belonging to Bacillariophyta. The dominant species in both spring and summer were *Fragilaria intermedia*, *Fragilaria biceps*, *Synedra ulna*, *Diatoma moniliforme*, and *Cymbella turgidula*. Correlation analyses between the phytoplankton community structure and environmental factors showed that the influencing factors of the phytoplankton community structure were different in spring and summer in the source region of the Yellow River. The main factors affecting phytoplankton density and biomass in spring were altitude, river width, and flow velocity, while in summer the main factors were the potassium permanganate index value, chlorophyll a level, suspended solid level, and transparency. The results of this study provide an important foundation for scientific decision-making regarding basin ecological environment protection and management in the Yellow River.

Key words: the source region of the Yellow River; phytoplankton; community structure; biodiversity

Corresponding author: LI Yunfeng. E-mail: lyf086@yfi.ac.cn