

DOI: 10.20103/j.stxb.202301090072

武俐, 来梦媛, 杨萌, 付纪薇, 赵同谦, 王亮. 小浪底水库早春溶解性有机质光谱特征对浮游植物群落变化的响应. 生态学报, 2025, 45(4): 1736-1747.

Wu L, Lai M Y, Yang M, Fu J W, Zhao T Q, Wang L. Relationship between dissolved organic matter spectral characteristics and phytoplankton in early spring in Xiaolangdi Reservoir. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1736-1747.

# 小浪底水库早春溶解性有机质光谱特征对浮游植物群落变化的响应

武俐<sup>1</sup>, 来梦媛<sup>1</sup>, 杨萌<sup>1</sup>, 付纪薇<sup>1</sup>, 赵同谦<sup>1,\*</sup>, 王亮<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454000

<sup>2</sup> 河南省济源生态环境监测中心, 济源 454650

**摘要:** 浮游植物群落组成变化能有效地改变水体溶解性有机质(DOM)组成特征, 研究黄河小浪底水库 DOM 光谱特征和浮游植物群落的响应关系, 可为库区水资源管理和水生态环境保护提供科学依据。采用三维荧光光谱结合平行因子分析法, 分析 DOM 的光谱特征及来源; 探究浮游植物群落结构特征, 运用多样性指数评价库区水质, 利用冗余分析探讨影响浮游植物群落的关键环境因子; 利用相关性分析探究 DOM 组成与浮游植物群落的关系。结果表明: 共鉴定出浮游植物 6 门 73 属 110 种, 库区群落结构和相对丰度以金藻门、硅藻门和绿藻门为主。空间上, 相对丰度表现为中游>坝前>上游>坝后, 群落特征存在明显空间异质性。多样性指数评价结果表明库区水质为中污型, 其中, 中游和坝前多样性指数显著高于上游和坝后, 群落结构更复杂, 说明筑坝拦截后浮游植物生物活性增强。冗余分析结果显示, 叶绿素 a、总有机碳、总氮、溶解氧和 pH 是影响库区浮游植物群落结构的主要驱动因子。DOM 主要由紫外区类腐殖质(C1)和类色氨酸(C2)组成, 受陆源输入和内源贡献的综合影响, 其中, 藻类和浮游植物释放等内源贡献较大。相关性分析表明, 浮游植物群落结构与类蛋白质正相关, 优势种与自生源指数显著正相关, 说明库区水体浮游植物对 DOM 具有重要贡献。

**关键词:** 小浪底水库; 浮游植物; 溶解性有机质; 群落结构; 环境因子

## Relationship between dissolved organic matter spectral characteristics and phytoplankton in early spring in Xiaolangdi Reservoir

WU Li<sup>1</sup>, LAI Mengyuan<sup>1</sup>, YANG Meng<sup>1</sup>, FU Jiwei<sup>1</sup>, ZHAO Tongqian<sup>1,\*</sup>, WANG Liang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

<sup>2</sup> Henan Jiyuan Ecological Environment Testing Center, Jiyuan 454650, China

**Abstract:** Changes in phytoplankton community composition can effectively change the composition characteristics of dissolved organic matter (DOM) in water. By studying the spectral characteristics of DOM and the response relationship of phytoplankton community in Xiaolangdi Reservoir of the Yellow River, this study aims to provide a scientific basis for water resources management and water ecological environment protection in the reservoir area. Three-dimensional fluorescence spectroscopy combined with parallel factor analysis was used to analyze the spectral characteristics and sources of DOM. To explore the structural characteristics of phytoplankton community, the diversity index was used to evaluate the water quality of the reservoir area, and the key environmental factors affecting phytoplankton community were explored by redundancy analysis. Correlation analysis was used to explore the relationship between DOM composition and phytoplankton community. The results showed that a total of 110 species of phytoplankton in 6 phyla, 73 genera were identified, and the community

**基金项目:** 国家自然科学基金(U23A2016); 河南省自然科学基金面上项目(232300421248); 河南省高等学校重点科研项目计划(22A610002)

**收稿日期:** 2023-01-09; **网络出版日期:** 2024-11-06

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaotq69@163.com

structure and relative abundance of phytoplankton were mainly found in the phylum Chrysophyta, Bacillariophyta, and Chlorophyta. Spatially, the relative abundance showed obvious spatial heterogeneity in the community characteristics before the middle reaches>in front of the dam>in the upstream>behind the dam. There was obvious spatial heterogeneity in the community characteristics. The results of diversity index evaluation showed that the water quality in the reservoir area was medium pollution type, and the diversity index in the middle and before the dam was significantly higher than that in the upstream and behind the dam, and the community structure was more complex, indicating that the biological activity of phytoplankton was enhanced after dam construction. The results of redundancy analysis showed that chlorophyll a, total organic carbon, total nitrogen, dissolved oxygen, and pH were the main driving factors affecting phytoplankton community structure in the reservoir area. DOM is mainly composed of humus (C1) and tryptophan (C2) in the ultraviolet region, which are affected by the comprehensive influence of terrestrial input and endogenous contribution, and contribute greatly to the endogenous such as algae and phytoplankton. Correlation analysis showed that phytoplankton community structure was positively correlated with protein-like substances, and dominant species were significantly positively correlated with biological index, indicating that phytoplankton in the reservoir area had an important contribution to DOM.

**Key Words:** Xiaolangdi reservoir; phytoplankton; dissolved organic matter; community structure; environmental factors

溶解性有机质(Dissolved Organic Matter, DOM)广泛存在于天然水体中,DOM的组成和结构影响着水环境中食物网的动态变化、有机污染物的吸附解析以及重金属的迁移过程<sup>[1]</sup>,在生物地球化学循环中扮演着重要作用<sup>[2]</sup>。水体DOM主要受外源输入和内源释放影响,外源主要来源于降雨和径流输入,内源主要来源于水生动植物的生长释放和消亡降解等过程<sup>[3-4]</sup>。因此,研究DOM的组成特征及其来源可为进一步揭示水生生态系统的碳循环过程提供理论支撑。

DOM是浮游植物生长的重要碳源,也是浮游植物代谢的主要产物。浮游植物作为水生生态系统的重要初级生产者,其群落结构、生物量和多样性等可反映水环境状况<sup>[5]</sup>,并影响着DOM组分发生变化<sup>[6]</sup>。DOM中含有氮和磷等,这些养分被浮游植物利用可能会使藻类大量繁殖<sup>[7]</sup>,引发水体富营养化的风险。有研究发现,DOM含量较高的水体通常浮游植物的生物量也较高<sup>[8]</sup>。春季是浮游植物生长的复苏期,随着温度的升高,水体环境开始变得更适合其生长<sup>[9]</sup>。在浮游植物的生长过程中,营养盐和DOM组分等因素均会对其造成影响。因此,研究DOM与浮游植物群落间的关系,对监控和研究水生生态系统中水质变化规律提供参考依据。

水库调蓄改变了河流的水动力条件,影响着浮游植物的种类组成和群落特征<sup>[5]</sup>。小浪底水库是黄河流域最后一个峡谷型水库,对调控黄河中下游的径流和泥沙起到关键作用。目前针对该水库的研究主要集中在水环境要素<sup>[10]</sup>、径流调控<sup>[11]</sup>、重金属污染<sup>[12]</sup>等方面,虽然有学者开展了小浪底下游浮游生物对水沙调控的响应规律研究<sup>[13]</sup>,但对DOM和浮游植物群落间的关系仍关注较少。本研究以小浪底水库为研究对象,分析早春时期库区水体DOM的光谱特征和浮游植物群落特征之间的关系,利用多样性指数评估浮游植物群落的稳定性和库区水质状况,并探究影响水库浮游植物群落的关键环境因子,为小浪底水库水生生态系统的保护和治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与采样点布设

小浪底水库位于黄河中游三门峡至花园口段,水库总长130 km,最大库容为 $1.27 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[14]</sup>。属温带大陆性季风气候,春季气温回升快、多风少雨,夏日炎热多雨,冬季寒冷干燥<sup>[15]</sup>。据资料统计,研究区年平均气温 $13.1^\circ\text{C}$ ,年平均降雨量为613 mm,相对湿度为60%—70%,全年无霜期平均235 d<sup>[16]</sup>。根据小浪底水库地貌特征和水流方向,在主要入库支流交汇处设置8个采样点(图1)。其中,采样点S1和S2是上游,S3到S5

为中游,S6 和 S7 为坝前,S8 是坝后。

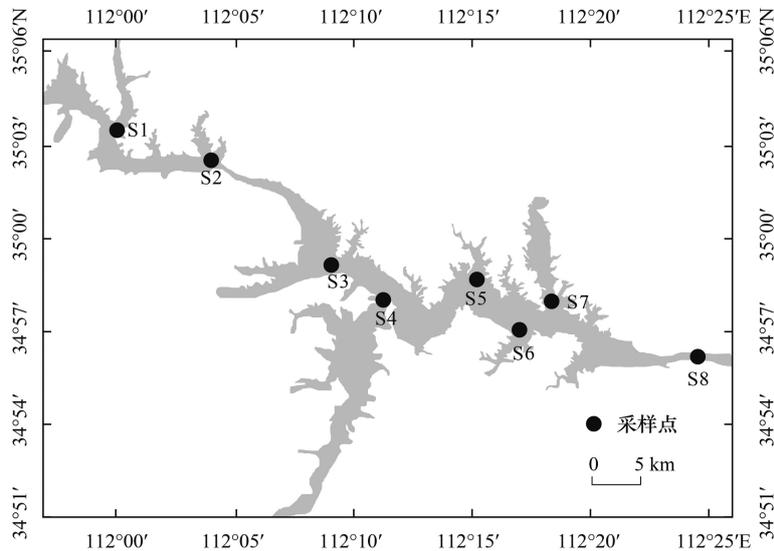


图1 小浪底水库采样点示意图

Fig.1 Schematic diagram of the sampling sites in Xiaolangdi Reservoir

S: 采样点 Sample site

## 1.2 样品采集与处理

于2022年2月28日对小浪底水库进行样品采集,采集水面下0.5 m处表层水样。使用SX800便携式多功能水质分析仪现场测定水温(WT)、pH和溶解氧(DO),采用0.45 μm Whatman GF/F型玻璃纤维滤膜(450 °C,灼烧5 h)过滤水样,按照《水和废水监测分析方法》<sup>[17]</sup>测定叶绿素a(Chl.a)、总氮(TN)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)以及总磷(TP);溶解性有机碳(DOC)浓度采用总有机碳分析仪(Vario TOC select, Elementar, 德国)测定。

根据《淡水浮游生物研究方法》<sup>[18]</sup>采集浮游植物样品。使用25号浮游生物网在0.5 m水深处“∞”形反复拖曳采集浮游植物样品,加入4%甲醛溶液固定保存。DNA的提取和高通量测序参照文献<sup>[19]</sup>,由上海美吉生物医药科技有限公司完成,对原始序列进行预处理,选取高质量的序列进行分析。

利用荧光分光光度计(F-7000, Hitachi, 日本)测定三维荧光光谱,其中激发波长(*E<sub>x</sub>*)和发射波长(*E<sub>m</sub>*)扫描范围分别是220—420 nm(间隔5 nm)和240—600 nm(间隔2 nm),狭缝宽度为5 nm,扫描速度为12000 nm/min。

## 1.3 统计分析

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*)来分析库区浮游植物生物多样性并进行水质评价<sup>[9, 20]</sup>。依据优势度指数(*Y*)确定浮游植物群落优势种<sup>[9]</sup>,将*Y* ≥ 0.02的浮游植物定为优势种。计算公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^N \left( \frac{N_i}{N} \right) \ln \left( \frac{N_i}{N} \right) \quad (1)$$

$$d = \frac{S-1}{\ln N} \quad (2)$$

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

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

式中,*N<sub>i</sub>*为第*i*种的个体数;*N*为所有种类总个数;*S*为样品中浮游植物总种类数;*f<sub>i</sub>*为第*i*种藻类在所有样品中出现的频率。

浮游植物生物多样性指数水质评价标准见表1<sup>[21]</sup>。

表 1 生物多样性指数水质评价标准

Table 1 The assessment standard of the biodiversity indexes water quality

Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index		Margalef 丰富度指数 Margalef richness index		Pielous 均匀度指数 Pielous evenness index	
数值范围 Numerical range	评价标准 Evaluation criteria	数值范围 Numerical range	评价标准 Evaluation criteria	数值范围 Numerical range	评价标准 Evaluation criteria
0—1	重污型	0—1	重污型	0—0.3	重污型
1—3	中污型	1—3	中污型	0.3—0.5	中污型
>3	寡污型	>3	寡污型	>0.5	寡污型

利用荧光指数(FI)、生物源指数(BIX)及腐殖化指数(HIX)来评估 DOM 的来源和性质<sup>[22]</sup>,各光谱参数计算过程见表 2。

表 2 三维荧光光谱参数描述

Table 2 Description of fluorescence spectrum parameters

光谱参数 Fluorescence parameters	参数定义 Parameter definitions	参数相关描述 Parameter descriptions
FI	Ex = 370 nm 时, Em = 450 nm 和 Em = 500 nm 处的荧光强度比值;	常用于表征 DOM 中腐殖质的来源, FI < 1.4 以陆源输入为主, FI > 1.9 以自生源为主。
BIX	Ex = 310 nm 时, Em = 380 nm 与 Em = 430 nm 处的荧光强度比值;	常用于表征 DOM 自生源相对贡献, BIX < 0.7 表明自生源贡献较少, 以陆源输入为主, BIX 在 0.7—1.0 之间表明 DOM 来源受自生源和陆源共同影响, BIX > 1 时主要为生物或细菌等内源贡献。
HIX	Ex = 255 nm 时, Em 在 435—480 nm 和 300—350 nm 间区域积分面积的比值;	常用于表征 DOM 腐殖化程度, HIX < 4 表明 DOM 呈微弱腐殖化特征, 具有近期自生源, HIX 值在 4—6 之间表示 DOM 呈强腐殖质特征, 具有微弱的新进自生源, HIX > 6 表明 DOM 呈强腐殖质特征, 陆源贡献明显。
Fn(280)	Ex = 280 nm 时, Em 在 340—360 nm 间最大的荧光强度;	表征类蛋白质物质相对浓度水平。
Fn(355)	Ex = 355 nm 时, Em 在 440—470 nm 间最大的荧光强度;	表征类腐殖质物质相对浓度水平。

DOM: 溶解性有机质 Dissolved organic matter; FI: 荧光指数 Fluorescence index; BIX: 生物源指数 Biological index; HIX: 腐殖化指数 Humification index

## 1.4 数据处理

采用 Matlab R2023a 和 DOM flour 工具箱对三维荧光光谱进行平行因子分析(PARAFAC);采用单因素方差分析(ANOVA)检验环境因子在空间上的差异;利用 Mantel test 相关性分析检验浮游植物群落结构与 DOM 组成特征的关系;采用 CANOCO 5.0 软件对浮游植物与环境因子进行除趋势对应分析(DCA),得出第一轴长度值 < 3,利用冗余分析(RDA)探究环境因子与浮游植物群落的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 水环境因子

研究区水环境因子监测结果见表 3。从表中可以看出, pH 为 7.73—8.37, 整体呈弱碱性, 其原因可能是春季气温回暖, 温度升高有利于浮游植物进行光合作用, Chl.a 浓度增加时光合作用也越强, 使更多的 CO<sub>2</sub> 被消耗, 造成水体 CO<sub>2</sub> 含量降低, pH 值升高<sup>[23]</sup>。DO 均值为 11.34 mg/L, 各采样点间差异显著 ( $P < 0.05$ )。DOC 均值为 3.95 mg/L, 最高值出现在坝前。NH<sub>3</sub>-N 和 TP 浓度均值分别为 0.33 mg/L 和 0.025 mg/L, 其中 S4 采样点的浓度最高, 与人为干扰有关, 该点位于始祖山风景区内, 有研究表明人为干扰(如旅游开发、渔业养殖等)对氮磷营养盐的影响最大<sup>[24]</sup>。一般认为, 富营养型水体的浓度是 TN 浓度 > 0.2 mg/L, TP 浓度 > 0.02 mg/L<sup>[25]</sup>, 研究区水体 TN 平均浓度为 5.08 mg/L, 处于较高水平, 而 TP 浓度整体上低于 0.02 mg/L, 结合各采样点 TN/TP 均大于 30, 说明小浪底水库浮游植物生长受磷限制, 存在发生水体富营养化的潜在风险。

表 3 各采样点水体理化性质

Table 3 Physicochemical characteristics of water at each sampling point

环境因子 Environmental factors	采样点 Sampling points							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
水温 WT/℃	7.3	11.4	8.87	9.77	7.5	9.53	8.1	8.3
pH	7.73	8.2	8.37	8.37	8.27	8.31	8.24	8.07
溶解氧 DO/(mg/L)	10.44	6.47	12.09	12.7	13.31	13.05	13.15	9.47
叶绿素 a Chl.a(mg/L)	0.36	0.46	0.55	0.36	0.43	0.48	0.49	0.91
溶解性有机碳 DOC(mg/L)	3.46	4.21	4.3	3.32	4.4	4.12	4.69	3.08
总氮 TN(mg/L)	5.3	4.79	4.87	5.41	4.77	4.7	4.95	5.89
氨氮 NH <sub>3</sub> -N(mg/L)	0.39	0.21	0.24	0.76	0.16	0.15	0.15	0.54
总磷 TP(mg/L)	0.01	0.01	0.02	0.09	0.02	0.01	0.01	0.03
氮磷比 TN/TP	530	479	243.5	60.1	238.5	470	495	196.3

WT: 水温 Water temperature; DO: 溶解氧 Dissolved oxygen; Chl.a: 叶绿素 a Chlorophyll a; DOC: 溶解性有机碳 Dissolved organic carbon; TN: 总氮 Total nitrogen; NH<sub>3</sub>-N: 氨氮 Ammonia nitrogen; TP: 总磷 Total phosphorus

## 2.2 浮游植物群落结构特征

### 2.2.1 物种组成

小浪底水库共鉴定出浮游植物 6 门 73 属 110 种,其中绿藻门(Chlorophyta)种类最多,为 42 属 58 种;硅藻门(Bacillariophyta)次之,有 18 属 34 种;金藻门(Chrysophyta)6 属 9 种;黄藻门(Xanthophyta)4 属 5 种;隐藻门(Cryptophyta)为 2 属 3 种;甲藻门(Pyrrophyta)最少,为 1 属 1 种。

水库浮游植物在门水平上的相对丰度见图 2,金藻门(47.5%)、绿藻门(26.6%)和硅藻门(23%)丰度较高。空间上,库区内以金藻门为主,其次为硅藻门和绿藻门,其中硅藻门和绿藻门沿水流方向其相对丰度逐渐增加;坝后以硅藻门为主,其次为绿藻门。小浪底水库早春浮游植物群落特征整体呈金藻-硅藻-绿藻型,坝后为硅藻-绿藻型。

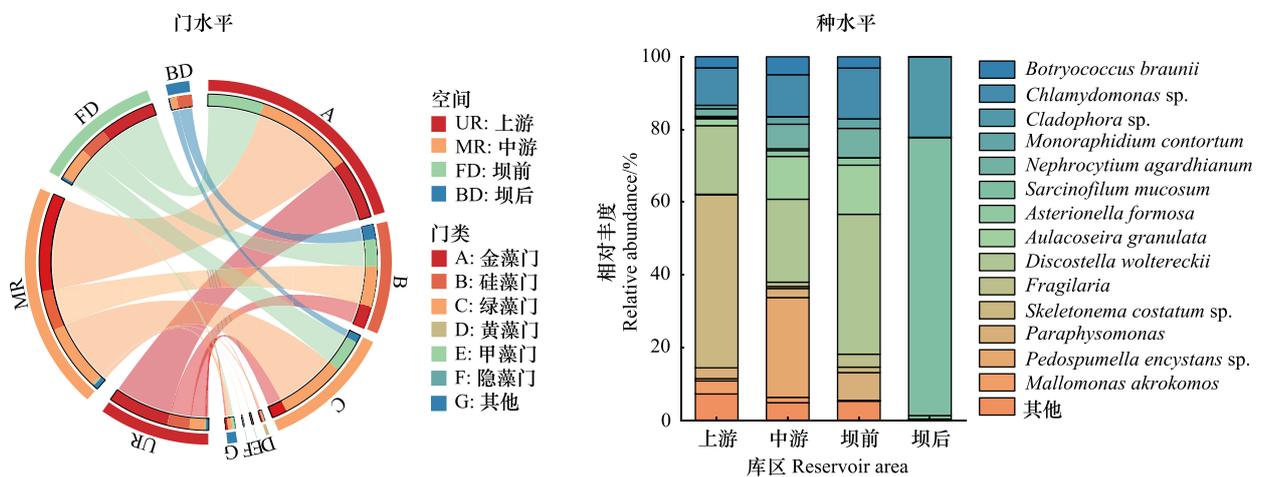


图 2 小浪底水库浮游植物群落结构空间变化

Fig.2 Spatial Change of Phytoplankton Community Structure in Xiaolangdi Reservoir

种水平上浮游植物的主要类群如图 2 所示,除未定藻外,颗粒直链藻(*Aulacoseira granulata*)和星纹星盘藻(*Discostella woltereckii*)在库区内沿水流方向相对丰度呈增加趋势,中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)相对丰度在上游最高,丝藻(*Sarcinofilum mucosum*)相对丰度在坝后较高,坝后浮游植物群落结构与库区水体差异显著。

### 2.2.2 优势种

研究期间库区浮游植物优势种见图 3,共鉴定出 3 门 10 属 11 种(除未定藻外),其中绿藻门有 5 属 5 种,

硅藻门有 3 属 4 种,其余为金藻门。优势种在空间分布上存在差异,上游以硅藻门和绿藻门为主;中游和坝前的优势种较多,种类数重叠率达 55.6%;坝后以绿藻门为主。其中,衣藻 (*Chlamydomonas* sp.)、索囊藻 (*Choricystis* sp.) 和星纹星盘藻在上游、中游和坝前均有出现。颗粒直链藻和肾形藻 (*Nephrocytium agardhianum*) 是中游和坝前的共同优势种。

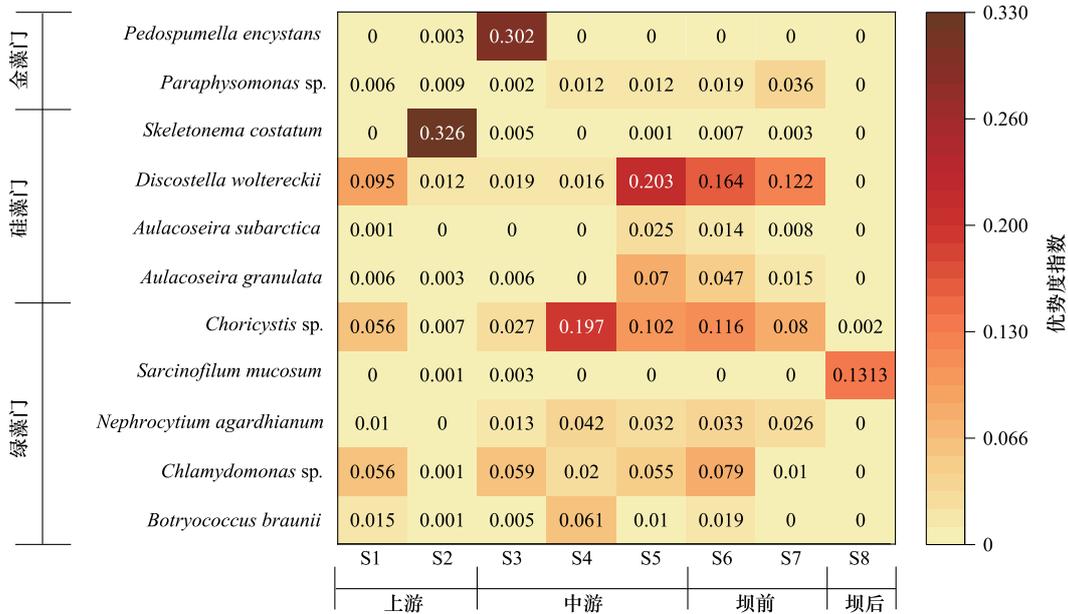


图 3 浮游植物优势种及优势度指数

Fig.3 Dominant species and dominance index of phytoplankton

2.2.3 多样性指数及水质评价

小浪底水库浮游植物生物多样性指数变化见表 4。整体上,生物多样性指数  $H'$ 、 $d$  和  $J$  的变化趋势相似,表现为中游>坝前>上游>坝后,说明库区中部的浮游植物群落结构更复杂、稳定,对于外部环境变化具有较强的抵抗能力。各采样点生物多样性指数  $H'$  介于 1.04—2.53 之间,均值为 1.76; $d$  的范围为 3.22—9.74,均值为 6.15; $J$  介于 0.31—0.55 之间,均值为 0.43。对照生物多样性指数水体营养状况标准,小浪底水库水质评价结果为中污型。

表 4 小浪底水库浮游植物特征指数

Table 4 Characterization indexes of phytoplankton in Xiaolangdi Reservoir

采样点 Sampling points	Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ ) Shannon-Wiener diversity index	Margalef 丰富度指数( $d$ ) Margalef richness index	Pielou 均匀度指数( $J$ ) Pielou evenness index
S1	1.59	5.19	0.41
S2	1.21	5.51	0.31
S3	2.53	9.74	0.55
S4	1.63	5.34	0.41
S5	2.25	7.23	0.52
S6	2.35	6.96	0.55
S7	1.46	5.96	0.36
S8	1.04	3.22	0.31

2.3 DOM 光谱特征分析

2.3.1 荧光参数

小浪底水库水体 DOM 荧光参数如图 4 所示,FI 范围为 1.76—2.19,均值为 1.91,说明库区水体 DOM 受陆源输入和内源贡献双重影响,以内源贡献为主;HIX 范围为 1.75—2.85,均值为 2.12,表明 DOM 的腐殖化程度

较弱,生物活性较强;BIX 变化范围为 0.95—1.32,均值为 1.09,说明 DOM 组分具有强自生源特征且生物可利用化程度较高。 $F_n(280)$  和  $F_n(355)$  的均值分别为 925.2 和 322.9,表明类蛋白质物质相对浓度高于类腐殖质。 $FI$ 、 $F_n(280)$  与  $F_n(355)$  值沿水流方向呈先降低后增加的趋势,说明库区内受陆源影响逐渐增加。BIX 在上游高于中游( $P<0.05$ ),说明与上游相比中游内源贡献降低,腐殖化程度增加。HIX 值变化呈先增加后降低趋势,中游最高,说明中游水体具有较弱的近期自生源特征。

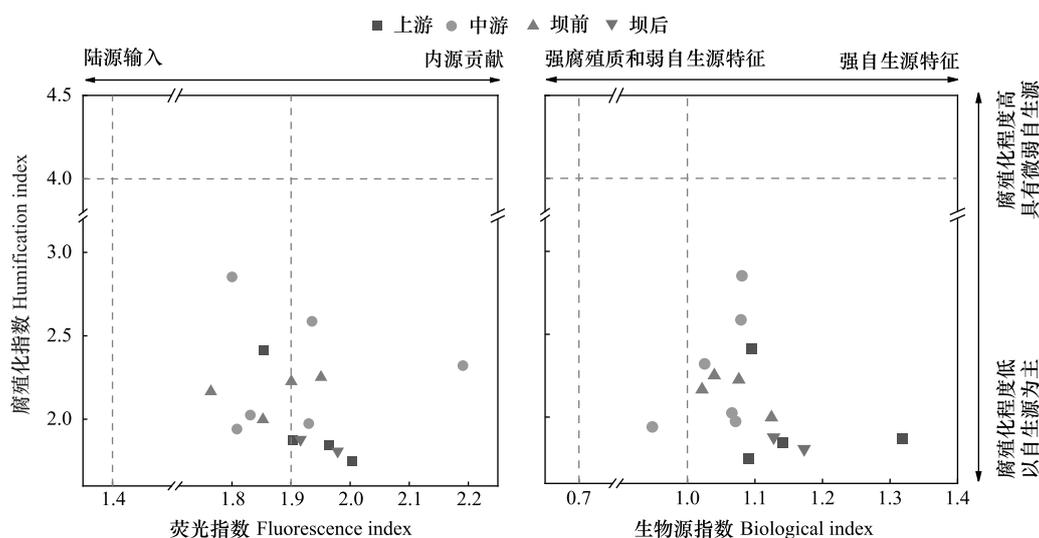


图 4 小浪底水库水体 DOM 荧光参数分布

Fig.4 Distribution of fluorescence indices of DOM in sediments from Xiaolangdi Reservoir

DOM: 溶解性有机质

### 2.3.2 荧光组分特征

利用 PARAFAC 法对小浪底水库 DOM 三维荧光光谱数据进行解析,结果如图 5 所示。共解析出 2 种荧光组分,分别是 C1 组分( $E_x/E_m = 250/408$  nm)和 C2 组分( $E_x/E_m = 235(280)/336$  nm)。其中,C1 组分荧光峰对应传统 A 峰,为紫外区类腐殖质荧光峰,分子量较低且不易被微生物分解利用,受陆源有机质影响较大<sup>[26]</sup>;C2 组分具有两个荧光峰,均对应传统 T 峰,分别为低激发区类色氨酸和高激发区类色氨酸,该组分为游离氨基酸或蛋白质结合类物质,主要来源于微生物降解<sup>[27]</sup>。研究区水体 DOM 总荧光强度为  $(14736.41 \pm 136.91)$  R.U.,坝后最高,中游最低。C1 组分和 C2 组分最大荧光强度  $F_{max}$  均值分别为  $(915.21 \pm 82.11)$  和  $(926.85 \pm$

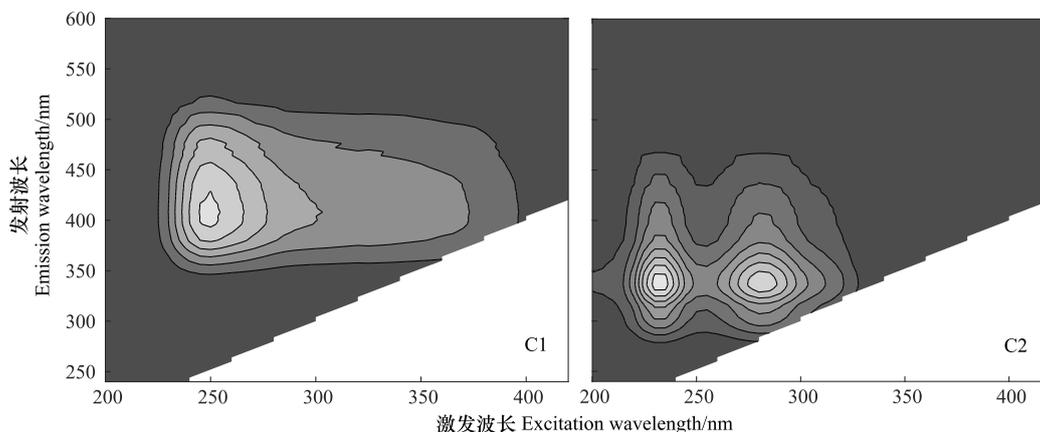


图 5 小浪底水库水体 DOM 荧光光谱特征

Fig.5 Fluorescence spectral characteristics of DOM in Xiaolangdi Reservoir

109.40) R.U., 各荧光组分占比在空间上不存在显著差异 ( $P>0.05$ )。

### 2.4 浮游植物群落结构影响因素研究

#### 2.4.1 环境因子与浮游植物的关系

将门水平下浮游植物群落结构与环境因子进行 RDA 分析 (DCA, 梯度长度 0.9) (图 6)。前两轴的总解释

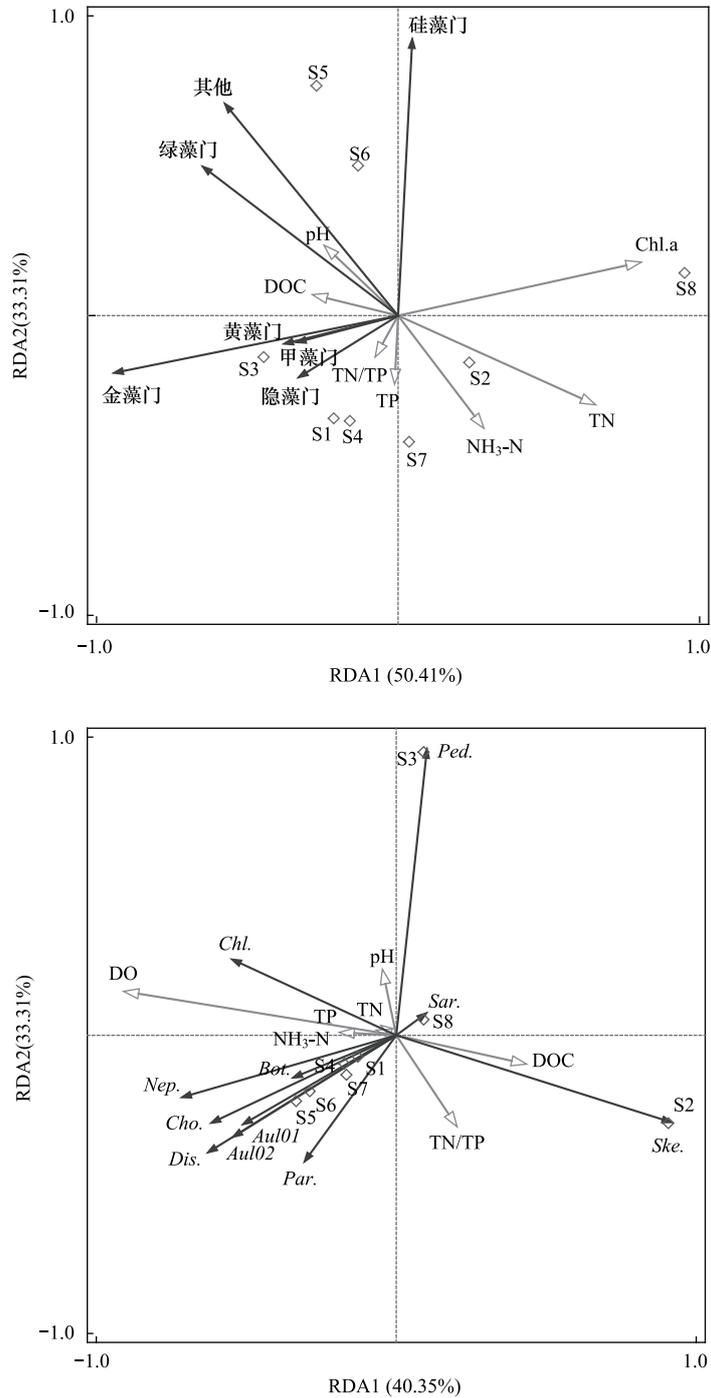


图 6 浮游植物与环境因子的 RDA 排序图

Fig.6 RDA ordination map of phytoplankton and environmental factors

Bot.: 布朗葡萄藻 *Botryococcus braunii*; Chl.: 衣藻 *Chlamydomonas* sp.; Nep.: 肾形藻 *Nephrocytium agardhianum*; Sar.: 丝藻 *Sarcinofilum mucosum*; Cho.: 索囊藻 *Choricystis* sp.; Aul01: 颗粒直链藻 *Aulacoseira granulata*; Aul02: 亚北极直链藻 *Aulacoseira subarctica*; Dis.: 星纹星盘藻 *Discostella woltereckii*; Ske.: 中肋骨条藻 *Skeletonema costatum*; Par.: 近囊胞藻 *Paraphysomonas* sp.; Ped.: *Pedospumella encystans*; TP: 总磷; TN: 总氮; DOC: 溶解性有机碳; RDA: 冗余分析

率为 83.72%, 其中, Chl.a 与硅藻门呈正相关, 与其他藻类均呈负相关; DOC 和 pH 与浮游植物群落均呈正相关, TN 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  与浮游植物群落均呈负相关, 这些环境因子对绿藻门和硅藻门影响最大; TP 和 TN/TP 与绿藻门和硅藻门呈负相关, 与其他藻类呈正相关, 对硅藻门和金藻门影响最大。8 个采样点样本较分散, 说明不同采样点中影响浮游植物群落结构的主要环境因子存在差异。

优势种与环境因子的 RDA 分析(DCA, 梯度长度 1.20) 结果见图 6。前两轴的总解释率为 73.76%, 能较好地反映优势种与环境因子的关系。DO 是影响库区浮游植物优势种的重要因子, 其次为 TN/TP 和 DOC。丝藻与 DO 呈显著负相关( $P < 0.01$ ), 与 TN/TP 和 DOC 呈正相关。DO 与丝藻、中肋骨条藻、*Pedospumella encystans* 呈显著负相关( $P < 0.01$ ), 与其他优势种呈正相关; TN/TP 与近囊胞藻(*Paraphysomonas sp.*)、丝藻、星纹星盘藻及亚北极直链藻(*Aulacoseira subarctica*) 呈正相关, 与其他门类均呈正相关。DOC 与丝藻和中肋骨条藻呈正相关, 与其他优势种呈负相关。

#### 2.4.2 DOM 与浮游植物的关系

采用 Mantel test 评估水体 DOM 与浮游植物群落结构的影响, 分析结果见图 7。C1 组分与 Fn(355) 呈显著正相关性( $P < 0.05$ ); C2 组分与 Fn(280) 和 Fn(355) 呈显著正相关性( $P < 0.05$ ), C2 组分与多样性指数均呈显著负相关性( $P < 0.05$ ); Fn(280)、Fn(355) 与  $H'$  和  $d$  呈显著负相关性( $P < 0.05$ )。浮游植物优势种与 BIX 和 Fn(280) 显著正相关( $P < 0.05$ )。

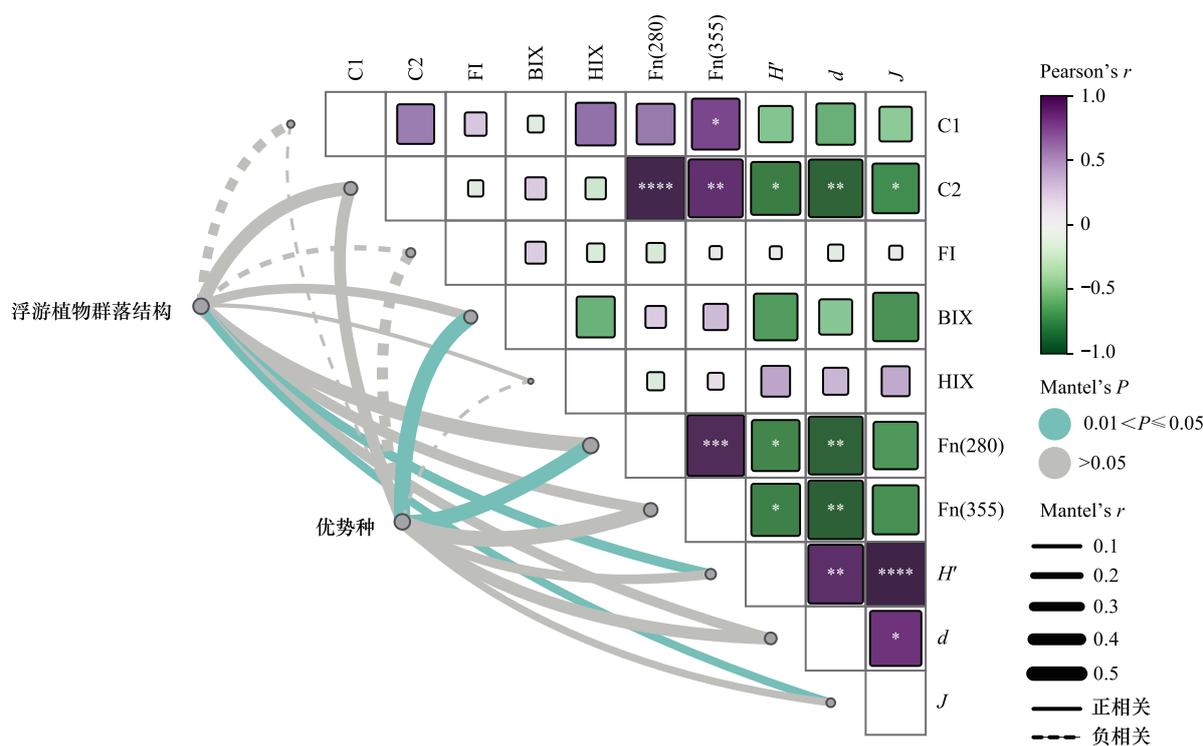


图 7 DOM 与浮游植物群落、多样性指数、优势种的相关性热图

Fig.7 Correlation analysis of DOM with environmental factors and phytoplankton communities

C1: 组分 1 Component 1; C2: 组分 2 Component 2; FI: 荧光指数 Fluorescence index; BIX: 生物源指数 Biological index; HIX: 腐殖化指数 Humification index; Fn(280): 激发波长为 280 nm 且发射波长在 340—360 nm 时的最大荧光强度 Maximum fluorescence intensity at excitation wavelength of 280 nm and emission wavelength of 340—360 nm; Fn(335): 激发波长为 335 nm 且发射波长在 440—470 nm 时的最大荧光强度 Maximum fluorescence intensity at excitation wavelength of 335 nm and emission wavelength of 440—470 nm;  $H'$ : Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index;  $d$ : Margalef 丰富度指数 Margalef richness index;  $J$ : Pielou 均匀度指数 Pielous evenness index

### 3 讨论

#### 3.1 浮游植物群落结构特征分析

近年来, 小浪底水库浮游植物群落结构组成存在一定的变化。水库建库后浮游植物有 7 门 47 属, 以硅藻

门占绝对优势,绿藻门次之<sup>[28]</sup>。王亚妮<sup>[29]</sup>研究发现小浪底水库浮游植物共 7 门 49 属 71 种,绿藻门和硅藻门种类最多。本研究中小浪底水库浮游植物群落结构有较明显变化,群落组成主要为金藻门、硅藻门和绿藻门,且浮游植物种类为 110 种,与前人研究相比浮游植物种类较多。以绿藻为主的水体多为富营养型,以硅藻为主的水体多属于中营养型,而以金藻占优势的水体多为贫营养型<sup>[30]</sup>。从小浪底水库浮游植物群落组成特征来看,2019 年以前属于绿藻-硅藻型,水体水质介于中营养型和富营养型之间。本次调查发现,库区水体浮游植物物种组成表现为金藻-硅藻-绿藻型,说明水库水质有逐步变好的趋势。

各门类浮游植物的相对丰度和群落结构存在明显的空间差异性。中游和坝前的相对丰度较高,上游和坝后较低,可能是受大坝拦截作用影响,为浮游植物生长提供了适宜的环境<sup>[31]</sup>;坝后水体的扰动程度增加,浮游植物受冲刷影响,不宜生长。在群落结构上,库区内以金藻门为主,坝后以硅藻门和绿藻门为主。早春水温较低,受水体自净作用的影响,水体透明度增加,有利于金藻生长。金藻门是较清洁水体的指示藻类<sup>[32]</sup>,说明库区内水质较好。坝后水流速度较快,水动力扰动改变了浮游植物群落结构,影响其光能利用效率<sup>[33]</sup>,而硅藻对水温和流速有着更强的适应能力,在坝后是优势藻类。因此,小浪底水库浮游植物群落组成受水环境因子和水动力学条件等因素影响明显。

小浪底水库主要优势种为中肋骨条藻、*Pedospumella encystans*、星纹星盘藻、索囊藻、丝藻及衣藻。在库区上游以中肋骨条藻占绝对优势,推测上游区域在渔业养殖过程中投加了饵料微藻,造成水体出现了中肋骨条藻。*Pedospumella encystans* 在中游占绝对优势,其生长在有机质含量较低、透明度较好的水体<sup>[34]</sup>。坝前各采样点中星纹星盘藻优势度沿程呈降低趋势,可能是因为水库的滞留效应导致原有水动力减弱,流速对其生长有一定的影响<sup>[35]</sup>。坝后的优势种是丝藻,与其他采样点间存在显著差异,主要与水体剧烈扰动,导致泥沙发生再悬浮,促进了内源营养盐的释放与扩散,为丝藻提供了营养物质<sup>[33]</sup>有关。

### 3.2 浮游植物多样性与水质评价

浮游植物多样性指数能反映水生态环境的改变,是衡量群落结构演替和稳定程度的重要指标<sup>[9]</sup>。本研究多样性指数最高值出现在中游,坝后最低,说明中游浮游植物群落结构较为复杂,具有较强抵抗外界环境变化的能力<sup>[36]</sup>,水动力条件变化造成浮游植物细胞机械损伤或抑制藻类的分裂增殖,造成坝后藻类生物多样性较低。根据浮游植物群落多样性指数标准分析水质状况发现,库区整体水质状况为中污型。其原因与水库位于峡谷河段,库面狭长弯曲,汇入支流较多,受外源性输入影响较大有关。非汛期水库蓄水后,造成流速减慢、悬浮物沉积及水温升高等,有利于藻类的生长繁殖,对浮游植物的群落结构具有较大影响<sup>[9]</sup>。

### 3.3 浮游植物与环境因子之间的关系

浮游植物群落结构受多种环境因子共同影响。RDA 分析结果表明,Chl.a、TN、DOC 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  是影响浮游植物群落分布的关键因子,DO、pH 和 TN/TP 对优势种影响较大。Chl.a 是反映水体富营养化的重要指标,与浮游植物丰度密切相关,其浓度影响浮游植物对有效光源的利用,与浮游植物生长呈负相关<sup>[37]</sup>,与本研究结果一致。DOC 与浮游植物群落呈正相关,与浮游植物在生长代谢和消亡等过程释放 DOC 有关<sup>[38]</sup>。DO 含量直接影响浮游植物群落结构,其含量较低时可能导致浮游植物群落大量死亡<sup>[39]</sup>。DO 与优势种呈显著正相关性,说明早春浮游植物在表层水体的光合作用大于呼吸作用,产生大量氧气。pH 通过影响浮游植物的光合作用和呼吸作用进而对浮游植物群落结构产生影响<sup>[40]</sup>,有研究发现,碱性水体有利于浮游植物进行光合作用,使其具有较高的初级生产力<sup>[41]</sup>。TN/TP 与部分优势种呈负相关,库区水体磷浓度的增加会促进浮游植物生长。

### 3.4 浮游植物与 DOM 之间的关系

C1 组分与 Fn(355)呈显著正相关,C2 组分与 Fn(280)和 Fn(355)呈显著正相关关系,说明水体中腐殖质主要来源于陆源有机质输入,而类蛋白质受内源贡献和外源输入影响;与前人研究发现水体腐殖质含量受水文过程控制,而类蛋白质主要受水生生物新陈代谢作用影响一致<sup>[42]</sup>。C2 组分与多样性指数显著负相关,可能是因为浮游植物直接利用亲水性 DOM 供给自身生长<sup>[43]</sup>。浮游植物群落与 Fn(280)呈正相关,说明浮游

植物群落结构与类蛋白质正相关,与浮游植物产生并释放高分子量有机质,经微生物分解可转化为小分子物质<sup>[44]</sup>有关。优势种与 BIX 和 Fn(280) 显著正相关,说明水体 DOM 以新近自生源为主且受优势种影响较大。上述分析表明,DOM 中的类腐殖质和类蛋白质与浮游植物变化密切相关,库区内源 DOM 是浮游植物生长的重要养分来源,可促进其生长和繁殖,也是浮游植物代谢物的重要汇。

#### 4 结论

(1) 小浪底水库共鉴定出浮游植物 6 门 73 属 110 种,库区水体以金藻-硅藻-绿藻为主,坝后以硅藻-绿藻为主;浮游植物相对丰度呈先增加后降低趋势,最高值出现在中游,与库区蓄水为其生长提供有利环境有关。

(2) 库区水体 DOM 由紫外区类腐殖质和类色氨酸组成,受陆源输入和内源贡献影响,以内源为主;DOM 生物活性较强,具有强自生源特征且生物可利用化程度较高。

(3) RDA 分析和相关性分析表明,营养盐、pH、DO 和 Chl.a 是影响库区浮游植物群落演替及空间分布的关键因子;浮游植物群落是影响 DOM 中类蛋白物质的主要因素。

#### 参考文献(References):

- [1] 倪茂飞,刘睿,王志康,张静,苑浩达,徐溶. 典型喀斯特河流汛期溶解性有机质空间变化及其光学参数的耦合关系. 生态学报, 2022, 42(7): 2822-2833.
- [2] 王永强,卢少勇,黄蔚,韩镇阳,国晓春. 太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析. 环境科学, 2023, 44(9): 4906-4914.
- [3] Asmala E, Haraguchi L, Jakobsen H H, Massicotte P, Carstensen J. Nutrient availability as major driver of phytoplankton-derived dissolved organic matter transformation in coastal environment. Biogeochemistry, 2018, 137(1): 93-104.
- [4] Raina J B, Lambert B S, Parks D H, Rinke C, Siboni N, Bramucci A, Ostrowski M, Signal B, Lutz A, Mendis H, Rubino F, Fernandez V I, Stocker R, Hugenholtz P, Tyson G W, Seymour J R. Chemotaxis shapes the microscale organization of the ocean's microbiome. Nature, 2022, 605(7908): 132-138.
- [5] 汪欣澜,郭印,李丰,王文婷,申利亚,陈立婧. 基于时间序列分析的青草沙水库浮游植物群落结构的变化. 环境科学: 1-16.
- [6] Tada Y Y, Nakaya R, Goto S, Yamashita Y, Suzuki K. Distinct bacterial community and diversity shifts after phytoplankton-derived dissolved organic matter addition in a coastal environment. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2017, 495: 119-128.
- [7] 钱玺亦,李金彪,敖文,庞博,包萨茹,王琪,刘波,王增龙. 呼伦湖浮游植物群落季节动态及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2022, 34(6): 1816-1829.
- [8] Kissman C E H, Williamson C E, Rose K C, Saros J E. Nutrients associated with terrestrial dissolved organic matter drive changes in zooplankton: phytoplankton biomass ratios in an alpine lake. Freshwater Biology, 2017, 62(1): 40-51.
- [9] 丁一桐,潘保柱,赵耿楠,韩谓,刘智琦. 黄河干流全河段浮游植物群落特征与水质生物评价. 中国环境科学, 2021, 41(2): 891-901.
- [10] 黄新莹,姚鹏,宋国栋,王春禹,吴丹,杨建斌,陈霖,刘素美. 小浪底水库关键水体环境要素的时空变化特征及其影响因素. 中国海洋大学学报: (自然科学版), 2020, 50(4): 111-120.
- [11] 张晓彤,张红梅,吴念,宋国栋,丁帅,刘素美. 黄河中下游干流及水库系统营养盐变化研究. 海洋环境科学, 2023, 42(5): 653-661.
- [12] 程柳,毛宇翔,麻冰涓,张永领,宋党育. 小浪底水库沉积物中重金属污染及生态风险评价. 环境化学, 2014, 33(8): 1412-1413.
- [13] 宋劫,易雨君,周扬,贾文飞,高艳宁,李军华. 小浪底水库下游浮游生物及细菌群落对水沙调控的响应规律. 水利学报, 2020, 51(9): 1121-1130.
- [14] Zhao Q H, Ding S Y, Geng Z H, Lu X L, Hong Z D, Liu Y, Yu J H. Concentration, health risk, and hydrological forcing of heavy metals in surface water following water-sediment regulation of the Xiaolangdi Dam in the Yellow River. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(9): 5713.
- [15] Kong D X, Miao C Y, Wu J W, Borthwick A G L, Duan Q Y, Zhang X M. Environmental impact assessments of the Xiaolangdi Reservoir on the most hyperconcentrated laden river, Yellow River, China. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(5): 4337-4351.
- [16] 葛怀凤. 基于生态-水文响应机制的大坝下游生态保护适应性管理研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [17] 李正飞,蒋小明,王军,刘振元,张君倩,熊雄,谢志才. 南水北调中线水源地河流大型无脊椎动物物种多样性及其维持机制. 湖泊科学, 2023, 35(6): 2059-2070, 后插 1-后插 16.
- [18] 章宗涉,黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [19] 贺玉晓,郑永坤,李卫国,张志纯,马永霞,赵同谦,任玉芬. 丹江口水库早春真核浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系. 环境

科学学报, 2021, 41(6): 2192-2200.

- [20] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I  $\alpha$  多样性的测度方法(下). 生物多样性, 1994, (4): 231-239.
- [21] 孙瑞欣, 徐丽, 梁荣昌, 蔡启佳, 马千里, 耿征颜, 林兴周, 杨裕茵, 姚玲爱, 赵瑞. 鹤地水库不同生境浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系. 环境科学, 2024, 45(10): 5822-5832.
- [22] 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赟. 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征. 环境科学, 2022, 43(2): 847-858.
- [23] 张伟, 孙健, 聂红涛, 姜国强, 陶建华. 珠江口及毗邻海域营养盐对浮游植物生长的影响. 生态学报, 2015, 35(12): 4034-4044.
- [24] 刘双爽, 袁兴中, 王晓锋, 周李磊. 不同水位期汉丰湖和高阳湖上覆水时空分异特征. 中国环境科学, 2020, 40(11): 4965-4973.
- [25] 王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江. 天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究. 环境科学, 2015, 36(7): 2465-2471.
- [26] Ryan K A, Palacios L C, Encina F, Graeber D, Osorio S, Stubbins A, Woelfl S, Nimptsch J. Assessing inputs of aquaculture-derived nutrients to streams using dissolved organic matter fluorescence. *Science of the Total Environment*, 2022, 807(Pt 2): 150785.
- [27] Murphy K R, Stedmon C A, Waite T D, Ruiz G M. Distinguishing between terrestrial and autochthonous organic matter sources in marine environments using fluorescence spectroscopy. *Marine Chemistry*, 2008, 108(1/2): 40-58.
- [28] 王玥劫, 张敏敏, 张宁, 郭正. 小浪底水库建库前后生物种群数量变化调查与分析. 安徽农业科学, 2013, 41(18): 7916, 8080.
- [29] 王亚妮. 小浪底水库(山西段)浮游植物群落特征及水质评价. 山西水利科技, 2016(3): 123-126.
- [30] 朱圣潮, 何爱兰. 浙江瓯江开潭水库库区浮游植物与水质的关系. 湖泊科学, 2003, 15(4): 353-358.
- [31] 张萍, 国超旋, 俞洁, 权秋梅, 姚建良, 王吉毅, 叶小锐, 朱梦圆, 孙起亮, 朱广伟. 钱塘江干流夏季浮游植物群落结构特征及其对水文气象的响应. 湖泊科学, 2022, 34(2): 418-432.
- [32] 胡俊, 沈强, 陈明秀, 池仕运, 胡菊香. 基于因子分析的南湾水库水源地浮游植物生物完整性评价. 生态学报, 2019, 39(10): 3759-3769.
- [33] 周健, 秦伯强. 风浪对湖泊浮游生物影响的研究进展. 水科学进展, 2018, 29(2): 293-300.
- [34] 谢树莲, 冯佳. 中国淡水金藻门植物研究进展. 世界科技研究与发展, 2007, 29(6): 1-6.
- [35] 张春霞, 贺玉晓, 郭晓明, 孟红旗, 武俐, 黄进, 李卫国, 赵同谦. 丹江口水库夏冬季真核浮游植物群落结构变化及其驱动因素. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2022, 41(6): 110-122.
- [36] 王世欢, 张生, 武蓉, 史小红, 赵胜男, 孙标. 寒旱区湖泊浮游植物特征及其对营养状态的指示作用. 中国环境科学, 2023, 43(1): 311-320.
- [37] 王东伟, 陈永进, 周彦锋, 张敏莹, 俞振飞. 淮河流域种质资源保护区浮游植物功能群演替特征及其驱动因子. 生态学杂志, 2023, 42(11): 2646-2654.
- [38] 侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中. 不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系. 环境科学, 2022, 43(12): 5616-5626.
- [39] Jakobsen H H, Blanda E, Staehr P A, Højgård J K, Rayner T A, Pedersen M F, Jepsen P M, Hansen B W. Development of phytoplankton communities: implications of nutrient injections on phytoplankton composition, pH and ecosystem production. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2015, 473: 81-89.
- [40] Zhang X J, Wang G Q, Tan Z X, Wang Y T, Li Q. Effects of ecological protection and restoration on phytoplankton diversity in impounded lakes along the eastern route of China's South-to-North Water Diversion Project. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148870.
- [41] Wu X, Duan H Q, Bi N S, Yuan P, Wang A M, Wang H J. Interannual and seasonal variation of chlorophyll-a off the Yellow River Mouth (1997—2012): dominance of river inputs and coastal dynamics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 183: 402-412.
- [42] Zhang Y M, Yang F, Liao H Q, Hu S G, Yu H B, Yuan P, Li B, Cui B. Variation in spectral characteristics of dissolved organic matter and its relationship with phytoplankton of eutrophic shallow lakes in spring and summer. *Water*, 2022, 14(19): 2999.
- [43] Zhang X S, Chen S Q, Han X R, Su, R G, Zhang C S, Liang S K, Yang R, Wang X L, Li, K Q. Effects of organic nitrogen components from terrestrial input on the phytoplankton community in Jiaozhou Bay. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 147: 113316.
- [44] Benner R, Amon R M W. The size-reactivity continuum of major bioelements in the ocean. *Annual Review of Marine Science*, 2015, 7: 185-205.