

西北太平洋海域表层浮游动物群落结构与其环境因子的关系

辛全栋^{1,2}, 李向阳², 肖雪艳², 于小涛², 陈聚法²,
王新良², 胡清静², 江涛^{2,3*}, 母昌考¹

(1. 宁波大学 海洋学院, 浙江 宁波 315832; 2. 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 山东 青岛 266071;
3. 烟台大学 海洋学院, 山东 烟台 264005)

摘要: 2020年5月底至8月初在西北太平洋海域(41°11'24"—48°06'09"N, 162°15'52"—169°34'09"E)进行了27个站位的浮游动物大面积调查, 共鉴定出6个门类, 28个浮游动物的主要类群, 浮游动物的平均丰度为 66.61 ind·m⁻³。该海域浮游动物的优势种为桡足类中的新哲水蚤(*Neocalanus plumchrus*)和太平洋哲水蚤(*Calanus pacificus*), 其出现频率分别为 88.9% 和 92.6%。浮游动物的平均丰度总体上呈现由北向南降低的趋势, 多样性指数高值区主要位于调查海域中东部和东南部。浮游动物群落丰度与环境中的叶绿素 *a* (Chl *a*)、PO₄³⁻、SiO₃²⁻ 具有正相关性, 与温度和盐度具有负相关性。研究表明, 该海域浮游动物的分布特征与水文环境特征契合度较高, 其中温度、盐度及营养盐的分布差异是构成浮游动物空间格局分布差异的主要原因。

关键词: 西北太平洋; 浮游动物; 群落结构; 生物多样性指数

中图分类号: Q958.8

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 02-0023-08

浮游动物作为次级生产者, 承接海洋食物网中初级生产者和更高营养级^[1], 是海洋食物链中非常重要的一环, 在海洋生态系统中起着物质循环和能量流动的重要作用。浮游动物对环境变化具有迅速响应的特点, 可以作为环境监测的重要指标^[2]。同时, 浮游动物是许多经济鱼类的开口饵料, 对渔业资源的可持续发展具有重要作用^[3]。因此, 对渔场海域内浮游动物的组成、生物量、分布及其影响因素进行分析是了解该海域生态系统功能和渔业发展的有效手段。

西北太平洋海域辽阔、海底地理环境复杂^[4]。该海域受黑潮暖流和亲潮寒流交汇的作用, 海水发生扰动, 海底大量营养盐物质涌到海面。丰富的营养盐给该海域浮游生物的生长创造了条件, 进而为海洋动物(如鱼类等)提供了丰富的饵料, 尤其是秋刀鱼生物量在西北太平洋非常丰富^[5]。近年来, 徐兆礼等^[6]、朱清澄等^[7]、靳少非等^[8]先后于2001年、2005年、2010年对西北太平洋海域的浮游动

物进行了调查分析。但总体看, 先前研究中存在调查环境指标不够全面、调查区域面积较小等不足, 且缺少近10年的相关调查资料。这些年西北太平洋海域的秋刀鱼产量出现明显的下降趋势, 而有关当前该海域浮游动物种群及生物量特征等基本信息尚不明确。

为此, 本文对西北太平洋秋刀鱼渔场海域开展了浮游动物的调查和研究, 分析了该航次海域浮游动物种类的组成、丰度、分布及其与环境因子之间的关系, 了解了该海域浮游动物的生态特点。相关结果可以为该海域浮游动物种群的长期演变及其可能对秋刀鱼渔业资源的影响等方面的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 站位设置与样品采集

本研究于2020年5月27日至8月3日, 搭载中国水产总公司舟山远洋渔业有限公司的“明华

收稿日期: 2022-03-29.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓”专项(2019YFD0901401); 中国水产科学研究院黄海水产研究所基本科研项目(20603022020006)。

第一作者: 辛全栋(1999-), 男, 山东日照人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 海洋生态环境。E-mail: xqd9901@163.com

*通信作者: 江涛(1978-), 男, 山东潍坊人, 教授, 主要研究方向: 海洋生态环境。E-mail: jiangtaojnu@163.com

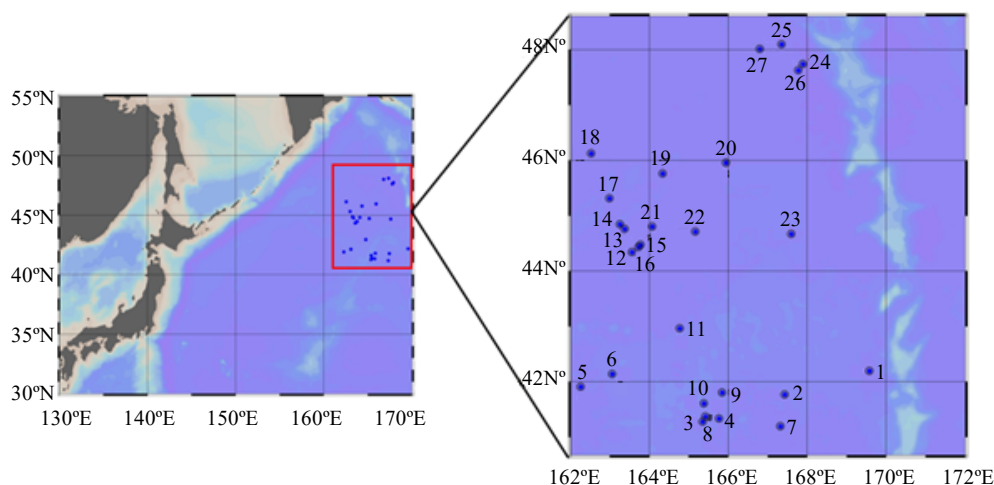


图1 西北太平洋调查站位分布

号”秋刀鱼捕捞船,调查海域为西北太平洋水域(41°11'24"—48°06'09"N, 162°15'52"—169°34'09"E),随机设置27个站位(图1)。

现场对1 m和10 m水层的温度、盐度等环境参数采用SBE37 MicroCAT温盐记录仪(美国劳雷海洋系统有限公司)进行测定。水体样品的采集采用Niskin采水器(美国General Oceanics公司),采集1 m和10 m水层水各5 L,取1.0 L水经GF/F滤膜过滤,将滤膜放入液氮罐,用于光合色素分析;取过滤水体150 mL置于高密度聚乙烯瓶内,放置于-20℃冰箱保存,用于营养盐分析。另外,取500 mL水样于塑料瓶中,加入6 mL鲁哥试剂固定,使用OLYMPUS BX51体式显微镜对浮游植物进行分类鉴定和数量统计。浮游动物样品采用WWWC2-1浮游生物网I型(网口内径为50 cm,总长140 cm),垂直拖网采集10 m上层水体,保存于5%甲醛溶液中。为了与浮游动物样品的拖网深度相对应,将温度、盐度、营养盐、叶绿素 a (Chl a)和浮游植物等环境参数取1 m和10 m水层的平均值进行分析。

1.2 样品处理与分析

水体营养盐测定采用SEAL QuAAtro分析仪(德国水尔仪器分析有限公司),按照文献[9]方法进行测定,检测5种营养盐:溶解态无机氮(DIN)、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} ,其中DIN包括 NO_2^- 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 的总和。浮游植物样品经自然沉降浓缩后(浓缩至10 mL),于光学显微镜下观察记录。浮游动物样品使用日本体式显微镜进行分类鉴定计数。采用HPCL法进行光合色素测定^[10],低温破碎滤膜后,

加入95%甲醇冰水浴超声提取,提取液进行HPCL测定,共测定23种光合色素,测定方法参见文献[10]。本文仅使用Chl a 的分布进行分析。

1.3 多样性指标评价

物种优势度(Y)、生物多样性指数(采用香农-威尔多样性指数(H'))、生态丰富度指数(采用马卡列夫指数(d_{Ma}))、物种均匀度指数(采用Pielou指数(J))。多样性指标的计算公式为^[11-14]:

$$Y = (n_i / N) f_i,$$

$$H' = -\sum_{i=1}^n (P_i \ln P_i),$$

$$d_{\text{Ma}} = (S - 1) / \ln N,$$

$$J = H' / \log_2 S,$$

式中: N 为所有个体总数之和; n_i 为第 i 种生物的个体数; f_i 为第 i 种生物出现的频度; P_i 为第 i 种生物的个体数与总个体数之和的比值; S 为浮游动物种类的总数目。

1.4 统计分析

使用Surfer 19软件绘制生物、环境及浮游动物等分布图。使用SPSS 25软件进行相关性分析,采用Pearson相关系数分析浮游动物种群丰度与环境因子之间的关系。使用Canoco 5软件对浮游生物种群与环境因子进行冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 水文与化学环境特征

2020年夏季,调查海域表层水体的平均温度

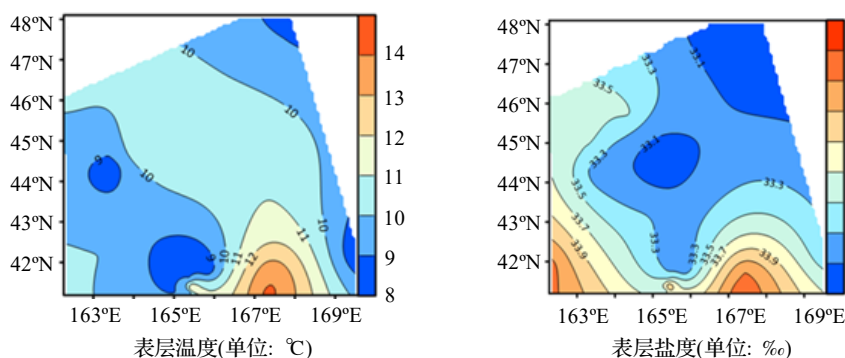


图2 西北太平洋温度、盐度分布

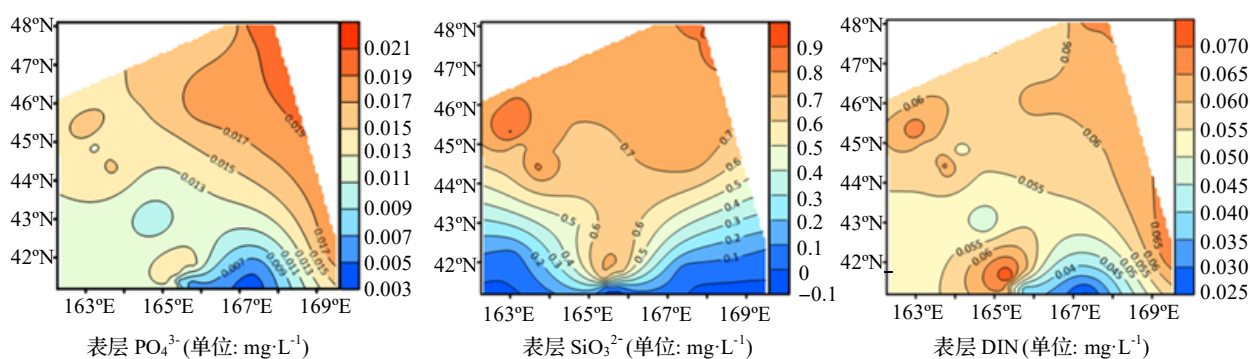


图3 西北太平洋营养盐分布

为 10.06 °C, 位于南部的 2、5、7 号站位的温度最高, 其中 7 号站位的温度达到 14.25 °C, 总体表层温度呈现以 7 号站点为高温中心向四周降低的趋势. 该海域的平均盐度为 33.51‰, 其中位于海域南侧的 4、5、7 号站点盐度最高, 均超过 34‰, 而低盐中心位于北侧的 24、25、26、27 号站点, 盐度均低于 33‰, 总体上表层盐度分布呈现由南向北递减的趋势(图 2).

该海域水体在 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-} 、DIN 空间分布趋势相似, 总体呈现南低北高分布(图 3). PO_4^{3-} 平均含量为 0.013 6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最高值是北侧的 24 号站点, 含量为 0.020 4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. SiO_3^{2-} 的平均含量为 0.525 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最高值同样是 24 号站点, 为 0.917 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. DIN 的最高值站点比较分散, 最低值出现在 7 号站点, 含量为 0.023 7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 显著低于其他站点.

2.2 生物环境特征

调查海域表层 Chla 含量总体呈现南北两侧高, 东西两侧低的分布趋势, 平均为 26.53 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中 2、5、7、27 号站位的 Chla 水平显著高于其他站点, 最高含量达到 92.90 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (27 号站点), 最低含量为 2.85 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (16 号站点)(图 4).

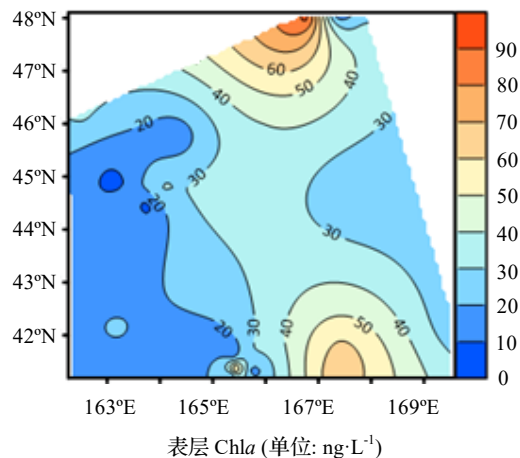


图4 西北太平洋 Chla 分布

该海域表层水体总浮游植物的平均细胞丰度为 $3.27\times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$, 包括硅藻、甲藻和一种难以定种的鞭毛藻类(细胞粒径 4~7 μm , 本文称其为鞭毛藻)构成, 平均细胞丰度分别为 2.19×10^4 、 6.03×10^3 、 $9.27\times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$, 分别占总浮游植物的 58.93%、16.18%、24.89%. 在浮游植物的密度分布上, 硅藻、甲藻、鞭毛藻及总浮游植物在低温、低盐的北部存在密度较高值, 并呈现由北向南递减的分布趋势(图 5).

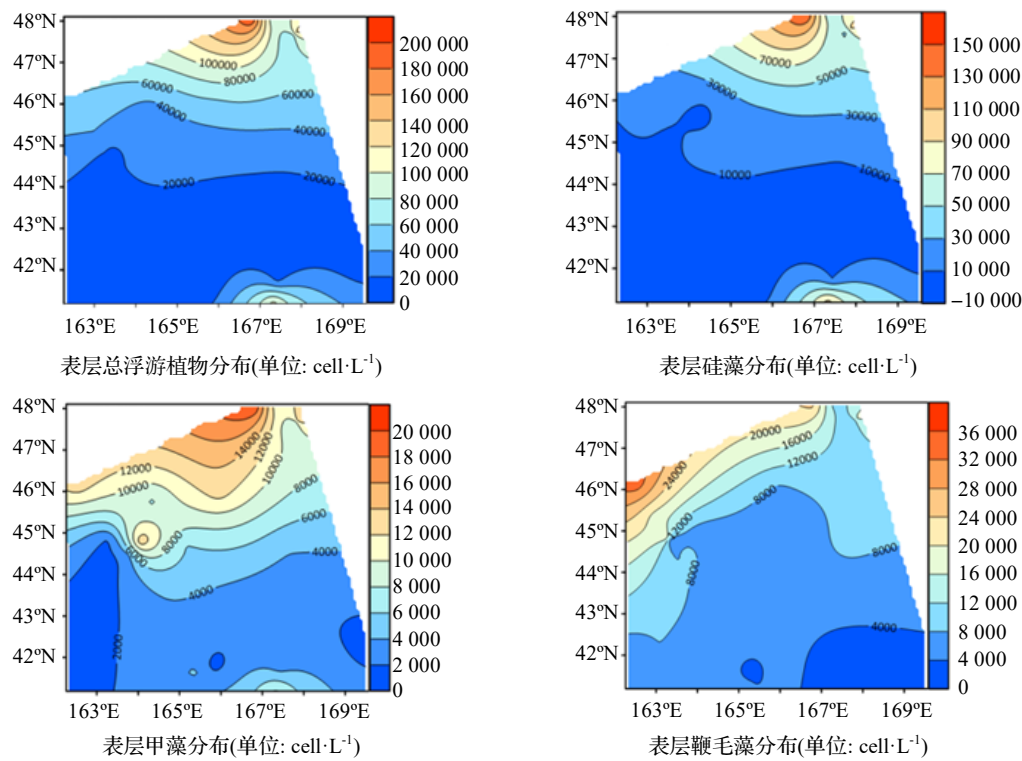


图5 西北太平洋浮游植物分布

2.3 浮游动物种类组成与分布

本航次共记录浮游动物 6 个门类(包括节肢动物门、腔肠动物门、环节动物门、脊索动物门、毛颚动物门、刺胞动物门), 28 个种类, 其中成体 24 个种类, 季节性浮游幼虫 4 个种类, 详见表 1.

表 1 西北太平洋浮游动物种类组成及其丰度

门类	类群	种类数/个	平均丰度/ (ind·m ⁻³)
节肢动物门	桡足类	12	56.02
	甲壳动物	2	0.55
	磷虾类	1	4.51
腔肠动物门	水母类	2	0.30
环节动物门	多毛类	1	0.03
脊索动物门	被囊动物	2	0.55
毛颚动物门	毛颚类	1	3.74
刺胞动物门	栉水母动物	1	0.03
	季节性浮游幼体	4	0.81
	其他	2	0.07
合计		28	66.61

节肢动物门占比最高, 达 62.5%, 其中桡足类出现 12 种(最多), 主要包括新哲水蚤(*Neocalanus plumchrus*)、太平洋哲水蚤(*Calanus pacificus*)、小

伪哲水蚤(*Pseudocalanus minutus*)、太平洋长腹水蚤(*Metridia pacifica*)、长纺锤水蚤(*Acartia longiremis*)等. 调查中 4 种季节性浮游幼体为长腕幼虫(*Ophiopluteus larvae*)、藤壶无节幼体(*Balanus larvae*)、腹足类幼体(*Gastropods larvae*)和短尾类幼体(*Brachyura larvae*). 此外, 在个别站位检出少量的鱼卵和幼鱼(归属为其他类群).

从浮游动物种群看, 本次调查结果中桡足类占比最高, 达 42.8%, 平均丰度为 56.02 ind·m⁻³, 其次为季节性浮游幼体, 占比 14.3%, 平均丰度 3.74 ind·m⁻³. 桡足类中新哲水蚤和太平洋哲水蚤是该海域中绝对优势种, 出现频率分别达到 88.9% 和 92.6%, 平均丰度分别为 30.04 ind·m⁻³ 和 21.39 ind·m⁻³, 优势度分别达到 0.40 和 0.30, 详见表 2.

表 2 西北太平洋浮游动物优势种的平均丰度及优势度

优势种	平均丰度/(ind·m ⁻³)	出现频率/%	优势度
新哲水蚤	30.04	88.9	0.40
太平洋哲水蚤	21.39	92.6	0.30
小伪哲水蚤	2.47	59.3	0.02
秀箭虫	3.74	70.4	0.04
磷虾卵	4.51	33.3	0.02

新哲水蚤的高值出现在 9、24、25 号站位, 最高丰度为 $162.2 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$, 但在 3、4、18 号站位未检出新哲水蚤; 太平洋哲水蚤的高值位于 19 号站位, 丰度达 $135.2 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$, 而 3、10 号站位未检出太平洋哲水蚤. 秀箭虫(*Sagitta elegant*)出现频率较高, 达到 70.4%, 但是数量较少, 平均丰度仅为 $3.74 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$. 磷虾卵(Krill egg)出现频率为 33.3%, 但是平均丰度达 $4.51 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$, 这是因为在 23、24 号站位磷虾卵集中出现, 其他种类占比分散, 仅在个别站位有所检获.

本研究海域表层水体浮游动物的平均丰度为 $66.6 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$, 丰度最高值出现在 24 号站位, 高达 $235.2 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$, 最低值在 3 号站位, 仅为 $1.5 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$. 少数浮游动物贡献了总丰度的绝大部分, 其中新哲水蚤和太平洋哲水蚤分别占总丰度的 45.1% 和 32.1%, 并在该海域中广泛分布. 秀箭虫主要分布在北部区域, 在南部区域未检出. 整体看, 浮游动物丰度分布与浮游植物存在差异, 呈现中部高于四周的特点(24 号站位除外), 如图 6 所示.

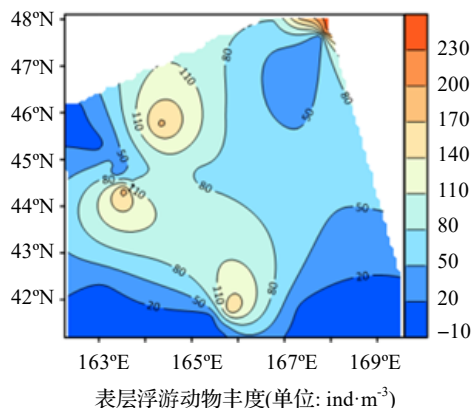


图 6 西北太平洋浮游动物丰度分布

该海域浮游动物 Shannon-Wiener 指数范围为 0.69~1.86, 平均值为 1.09, 高值区主要位于调查海域中东部和东南部, 低值区位于南部(图 7). 在生态丰富度分布上, d_{Ma} 的变化范围为 0.76~3.31, 平均 1.67, 总体分布呈现南部高、北部低的分布趋势, 高值区与高温、高盐海域重合. 均匀度指数的变化范围为 0.18~0.69, 平均 0.45, 其分布呈现中间海域低于四周的特点.

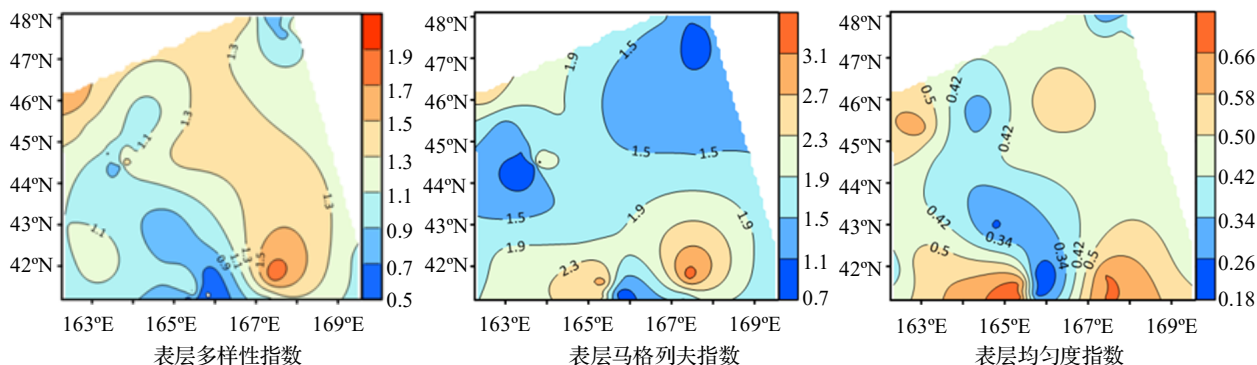


图 7 西北太平洋生物多样性指数

表 3 西北太平洋浮游动物 Pearson 相关性分析结果

影响因子	丰度					
	总丰度	新哲水蚤	太平洋哲水蚤	小伪哲水蚤	秀箭虫	其他
温度	-0.392 ¹⁾	-0.444 ¹⁾	-0.090	0.207	-0.214	-0.350
盐度	-0.582 ²⁾	-0.518 ²⁾	-0.214	-0.394 ¹⁾	-0.528 ²⁾	-0.301
Chla	0.536 ²⁾	0.422 ¹⁾	0.295	0.388 ¹⁾	0.426 ¹⁾	0.270
PO ₄ ³⁻	0.490 ²⁾	0.380	0.270	0.386 ¹⁾	0.417 ¹⁾	0.242
SiO ₃ ²⁻	0.562 ²⁾	0.440 ¹⁾	0.316	0.076	0.431 ¹⁾	0.287
DIN	-0.130	-0.042	-0.195	0.419 ¹⁾	-0.135	-0.056
硅藻	0.252	0.287	-0.084	0.372	0.097	0.291
甲藻	0.284	0.181	0.127	0.443 ¹⁾	0.205	0.303
总浮游植物	0.274	0.278	-0.043	0.410 ¹⁾	0.113	0.327

注: 1)表示 $P < 0.05$, 2)表示 $P < 0.01$.

2.4 浮游动物物种丰度与环境因子的相关性分析

对浮游动物各种类丰度特征与环境因子、生物因子进行 Pearson 相关性分析, 结果见表 3. 从表 3 可见, 浮游动物总丰度与 Chla 、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} 呈极显著正相关($P<0.01$), 与盐度呈极显著负相关($P<0.01$), 与温度呈显著负相关($P<0.05$), 与 DIN、硅藻、甲藻、总浮游植物不存在显著相关性($P>0.05$). 新哲水蚤丰度与盐度呈极显著负相关($P<0.01$), 与温度呈显著负相关($P<0.05$), 与 Chla 、 SiO_3^{2-} 呈显著正相关($P<0.05$). 太平洋哲水蚤出现频率高、优势度大, 但其丰度与环境因子并无明显相关性($P>0.05$). 小伪哲水蚤丰度与盐度呈显著负相关($P<0.05$), 与 PO_4^{3-} 、DIN 呈显著正相关($P<0.05$); 同时与 Chla 、甲藻、总浮游植物分布呈显著正相关($P<0.05$). 秀箭虫丰度与盐度呈极显著负相关($P<0.01$), 而与 Chla 、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-} 呈显著正相关($P<0.05$). 其他浮游动物丰度与环境因子及生物因子并无明显的相关性($P>0.05$).

环境因子变化是造成生态系统中浮游动物生物量变化的主要因素. 通过冗余分析探究浮游动物与环境因子的相关关系, 结果如图 8 所示. 从图 8 可见, 新哲水蚤、太平洋哲水蚤、秀箭虫及总浮游动物丰度与 SiO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 Chla 具有正相关性, 与温度、盐度、DIN 具有负相关性; 小伪哲水蚤及其他浮游动物与总浮游植物、硅藻的分布具有正相关性.

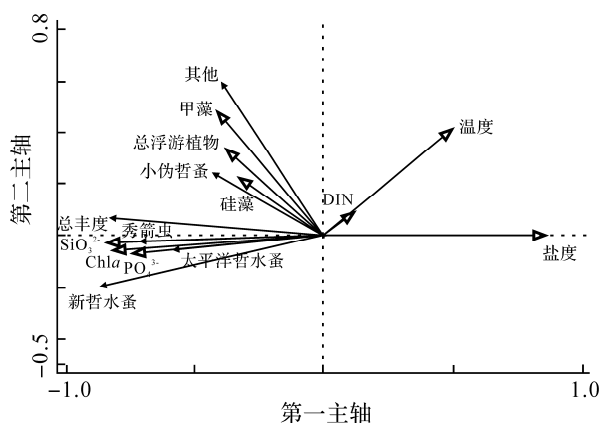


图 8 西北太平洋主要浮游动物群落 RDA 分析结果

3 讨论

研究海域位于千岛群岛东部, 受北上黑潮暖流和南下千岛寒流交汇的影响, 冷暖水交汇, 导致

该海域营养盐丰富, 从而具备良好的浮游植物和浮游动物生长条件, 这也是该海域成为秋刀鱼及鱿鱼渔场的重要原因^[15]. 复杂多样的影响因素共同决定了浮游动物的生长, 其中温度、盐度、营养盐及浮游植物等因素起着关键作用^[16]. 针对以往该海域的调查研究中站位相对较少、环境指标不够丰富等缺陷, 本文共设置调查站位 27 个, 覆盖海域跨度较大. 同时结合环境因素(温度、盐度、营养盐)和生物因素(Chla 、总浮游植物、硅藻、甲藻)等, 针对西北太平洋秋刀鱼渔场海域的浮游动物种群特点以及时空分布规律进行了较为详细的综合分析.

3.1 浮游动物种类的组成与丰度

已有研究表明^[17], 在亚北极太平洋表层水域范围, 主导浮游动物生物量的多为桡足类新哲水蚤, 且其丰度的分布特征与温度密切相关. 在本次调查中, 共鉴定各类浮游动物 28 种, 其中桡足类 12 种, 占绝对优势种.

本次调查中浮游动物多为暖水性物种, 这与靳少非等^[8]在 2010 年对该调查海域西南部(38° — 45°N , 152° — 159°E)的调查结果基本相同. Sun 等^[18]在 2014 年夏季对西太平洋(160°E)浮游动物群落纬度分布进行了调查, 表明该地区浮游动物丰度在 0° — 50°N 纬度上呈现递增趋势, 这也与本文的调查结果相吻合.

新哲水蚤和太平洋哲水蚤是西北太平洋海域的主要桡足类动物^[19], 是本次调查中主导浮游动物的主要生物量, 占浮游动物总丰度的 45.1% 和 32.1%. Sun 等^[18]在 2014 年的调查中发现, 太平洋哲水蚤是本海域的优势种, 而新哲水蚤作为本次调查出现的另一种优势种, 其原因可能与环境因子的变化有关.

朱清澄等^[20]于 2005 年在本文调查海域以西的 20 个站位(43° — 48°N , 156° — 162°E)获得的桡足类和箭虫类浮游动物的平均丰度分别高达 $1080 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $81.2 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$. 靳少非等^[8]于 2010 年在本文调查海域西南区域, 获得浮游动物总平均丰度为 $641 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$. 相比可见, 本次调查所得的浮游动物的平均丰度为 $66.6 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$, 低于朱清澄等^[20]和靳少非等^[8]的调查结果. 原因之一可能是前者采用了底层拖网方式(150 m), 而本研究采用表层(10 m)

拖网,不同的拖网方式造成调查结果的差异;再者,两次调查的间隔时间较长,使得环境因素变化较大,也是造成浮游动物丰度大幅变化的原因之一。

另外,付菲雨等^[21]于2019年在本文调查海域南侧31°N附近对浮游动物进行了采样调查,结果显示,动物平均丰度仅为22.2 ind·m⁻³,明显低于本文的调查结果。究其原因,可能是付菲雨等^[21]调查时间为3月,而本文调查时间为5月底至8月初,不同季节造成了不同调查结果中浮游动物丰度数据的差异。

总体看,2020年夏季西北太平洋海域表层水体浮游动物丰度值偏低,而本年度秋刀鱼渔获量也明显低于往年(未发表数据),二者是否存在一定的相关性,有待进一步研究。

3.2 浮游动物类群与环境因子的关系

从图8和表3可知,浮游动物类群的空间分布与水体环境因素密切相关。已有研究表明^[22-24],温度和盐度是影响浮游动物群落结构的重要环境因子。该海域最显著的水文特点是位于北侧的低温、低盐水体和位于中南侧的高温、高盐水体。根据浮游动物总丰度与环境因子的相关性分析和RDA可以得出,温度和盐度与浮游动物丰度呈显著负相关,而与Chla、PO₄³⁻、SiO₃²⁻及浮游植物等因素呈显著正相关。与此相似,王珊珊等^[25]在2014年秋季对渤海、黄海海域浮游动物的群落特征调查中也得出浮游动物丰度与温度和盐度呈负相关。因此推测,调查海域北部区域低温、低盐以及高营养盐的环境特征为浮游动物的繁殖和生长提供了良好条件。

新哲水蚤是亚北极太平洋及其周边海域的主要桡足类浮游动物^[26],主要以各种浮游植物、微浮游植物、微浮游动物和下沉颗粒为食^[18]。虽然新哲水蚤在本文调查中与太平洋哲水蚤构成了物种丰度的主要组成部分,但是根据相关性分析可知,环境因子对于两种物种的影响程度相差较大,新哲水蚤丰度与温度、盐度的分布呈显著负相关,与Chla、SiO₃²⁻呈显著正相关;而太平洋哲水蚤与各环境因子均无显著相关性,说明太平洋哲水蚤对环境依赖性不高,分布范围更广。小伪哲水蚤和秀箭虫在本次调查中其物种丰度占比不高,多在高营养盐区域生长繁殖。

4 结语

本研究在西北太平洋研究海域,共检获28种浮游动物的主要类群,其中新哲水蚤和太平洋哲水蚤两类占绝对优势,优势度分别达到0.40和0.30,浮游动物的平均丰度为66.6 ind·m⁻³。大部分浮游动物类群遵循低温、低盐、高营养盐分布规律,而太平洋哲水蚤的分布规律较为分散,说明其生存条件与环境因子的关系不大。

参考文献:

- [1] 李奕璇,葛汝平,叶振江,等. 南黄海近岸海域初夏浮游动物的群落特征[J]. 海洋科学, 2020, 44(4):33-43.
- [2] Taylor A H, Allen J I, Clark P A. Extraction of a weak climatic signal by an ecosystem[J]. Nature, 2002, 416(6881): 629-632.
- [3] 王晓,王宗灵,蒲新明,等. 夏季南黄海浮游动物分布及其影响因素分析[J]. 海洋学报, 2013, 35(5):147-155.
- [4] Dortch Q, Rabalais N N, Turner R E, et al. Impacts of changing Si/N ratios and phytoplankton species composition[M]//Coastal and Estuarine Studies. Washington D C: American Geophysical Union, 2001:37-48.
- [5] 晏磊. 北太平洋公海秋刀鱼渔场分布特征及其环境关系[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- [6] 徐兆礼,崔雪森,黄洪亮. 北太平洋柔鱼渔场浮游动物数量分布及与渔场的关系[J]. 水产学报, 2004, 28(5): 515-521.
- [7] 朱清澄,马伟刚,刘昊,等. 夏季西北太平洋公海秋刀鱼渔场浮游动物数量分布初步研究[J]. 上海水产大学学报, 2008, 17(1):118-122.
- [8] 靳少非,唐峰华,戴立峰,等. 2010年北太平洋柔鱼渔场浮游动物多样性[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(4): 503-508.
- [9] GB/T 12763.6-2007. 海洋调查规范 第6部分: 海洋生物调查[S].
- [10] Lu L, Jiang T, Xu Y, et al. Succession of phytoplankton functional groups from spring to early summer in the central Bohai Sea using HPLC-CHEMTAX approaches[J]. Journal of Oceanography, 2018, 74(4):381-392.
- [11] 孙军,刘东艳,钱树本. 一种海洋浮游植物定量研究方法——Uterm hl 方法的介绍及其改进[J]. 黄渤海海洋, 2002, 20(2):105-112.
- [12] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27(4):623-656.
- [13] Margalef D R. Information theory in ecology[J]. Society for General Systems Research, 1958, 3:36-71.

- [14] Pielou E C. An introduction to mathematical ecology[J]. Bioscience, 2011, 24(2):7-12.
- [15] 苏程程, 汪金涛, 陈新军. 基于环境因子的西北太平洋秋刀鱼资源量评估研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(S1):10-18.
- [16] 林青, 由文辉, 徐凤洁, 等. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2014, 34(23): 6918-6929.
- [17] 刘镇盛, 杜明敏, 章菁. 国际海洋浮游动物研究进展[J]. 海洋学报(中文版), 2013, 35(4):1-10.
- [18] Sun D, Wang C S. Latitudinal distribution of zooplankton communities in the Western Pacific along 160°E during summer 2014[J]. Journal of Marine Systems, 2017, 169: 52-60.
- [19] Fujioka H A, Machida R J, Tsuda A. Early life history of *Neocalanus plumchrus* (Calanoida: Copepoda) in the western subarctic Pacific[J]. Progress in Oceanography, 2015, 137:196-208.
- [20] 朱清澄, 夏辉, 花传祥, 等. 西北太平洋公海秋刀鱼夏季索饵场浮游动物的分布[J]. 水产学报, 2008, 32(6): 890-898.
- [21] 付菲雨, 卜心宇, 沈鑫绿, 等. 西北太平洋亚热带海域浮游动物种类组成与分布[J]. 应用生态学报, 2022, 33(2):544-550.
- [22] 杜明敏, 刘镇盛, 王春生, 等. 中国近海浮游动物群落结构及季节变化[J]. 生态学报, 2013, 33(17):5407-5418.
- [23] Wang C S, Chen X Q, Liu Z S. Marine Biology and Ecology in China Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 2012: 479-599.
- [24] Liu G X. Zooplankton community structure in Yangzi river estuary and adjacent sea in summer 2006[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2009, 45(4):393-398.
- [25] 王珊珊, 李浩然, 陈洪举, 等. 2014年秋季渤、黄海浮游动物的群落结构与分布特征[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(5):917-926.
- [26] Mackas D L, Tsuda A. Mesozooplankton in the eastern and western subarctic Pacific: Community structure, seasonal life histories, and interannual variability[J]. Progress in Oceanography, 1999, 43(2/3/4):335-363.

Community structure of zooplankton and its relationship with environmental factors in the surface waters of the Northwest Pacific Ocean

XIN Quandong^{1,2}, LI Xiangyang², XIAO Xueyan², YU Xiaotao², CHEN Jufa²,
WANG Xinliang², HU Qingjing², JIANG Tao^{2,3*}, MU Changkao¹

(1. School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315832, China;

2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Science, Qingdao 266071, China;

3. School of Marine Sciences, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: In the present study, a field investigation was carried out to reveal the community structure of zooplankton in the Northwest Pacific Ocean (41°11'24"—48°06'09"N, 162°15'52"—169°34'09"E) during June to August 2020. The results showed that zooplankton comprised 6 phyla and the average abundance of zooplankton was 66.60 ind·m⁻³. The dominant species of zooplankton in this sea area were *Neocalanus plumchrus* and *Calanus pacificus* in copepods, with their occurrence frequencies reaching 88.9% and 92.6% respectively. The average abundance of zooplankton generally decreased from north to south. The high diversity index was mainly located in the middle-east and southeast of the study area. Zooplankton community abundance was positively correlated with Chl_a, PO₄³⁻ and SiO₃²⁻, and negatively correlated with temperature and salinity of the seawater. The study suggested that the distribution of zooplankton was tightly coupled with the environmental factors, with temperature, salinity and nutrients as the main controlling elements for its distribution.

Key words: Northwestern Pacific Ocean; zooplankton; community structure; biodiversity index

(责任编辑 史小丽)