

环境因子对唐山湾海域浮游动物群落结构的驱动作用

李志伟^{1*} 崔力拓²

(¹河北农业大学海洋学院, 河北秦皇岛 066003; ²河北环境工程学院, 河北秦皇岛 066004)

摘要 为研究唐山湾海域浮游动物群落结构与环境因子的关系,于2015年4月(春季)、7月(夏季)、10月(秋季)和12月(冬季)对唐山湾海域浮游动物群落结构、环境因子进行航次调查,并利用多元统计分析和相关分析法分析了浮游动物群落结构的时空变化及其主要环境驱动因子。结果表明:影响唐山湾海域浮游动物丰度的主要环境因素为无机氮(DIN)、悬浮物(SS)、水温(T)和叶绿素a(Chl a);唐山湾海域浮游动物群落结构的空间差异主要受溶解氧(DO)、T和Chla的驱动;在唐山湾不同海域中,影响浮游动物群落结构的因素存在差异,其中乐亭海域和三岛海域浮游动物群落结构的主要影响因素为物理因素,曹妃甸海域则主要受化学因素的影响。这表明在唐山湾人类活动影响强度大的海域,浮游动物群落结构更多地受化学因素影响(DIN、活性磷酸盐),而人类活动影响小的海域则更多地受物理因素的影响(T、SS)。

关键词 浮游动物;群落结构;污染影响;驱动因子;唐山湾

Environmental control of zooplankton community structure in Tangshan Bay, China. LI Zhiwei^{1*}, CUI Li-tuo² (¹College of Ocean, Agricultural University of Hebei, Qinhuangdao 066003, Hebei, China; ²Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao 066004, Hebei, China).

Abstract: In order to study the relationship between zooplankton community structure and environmental factors in Tangshan Bay, the zooplankton community structure and environmental factors were investigated in 2015 April (spring), July (summer), October (autumn) and December (winter). The temporal and spatial variation of zooplankton community structure and its main environmental driving factors were analyzed by means of multivariate analysis and correlation analysis. The results showed that the main environmental factors affecting the abundance of zooplankton in Tangshan Bay were DIN, SS, temperature and Chla. Multivariate analysis indicated that DO, temperature and Chl a were the principal factors driving spatial differentiation of zooplankton community structure in Tangshan Bay. In different waters of Tangshan Bay, the environmental factors affecting zooplankton community structure were different. The main influencing factors were physical variables for Laoting and Sandao sea areas, while chemical variables for Caofeidian sea area, respectively. The results revealed the zooplankton community structure was more influenced by chemical variables (DIN, SRP) in sea areas heavily affected by human activity, while it was more influenced by physical variables (T, SS) in sea areas less affected by human activity.

Key words: zooplankton; community structure; pollution effects; driving factors; Tangshan Bay.

本文由河北省应用基础研究计划重点项目(15963301D, 13963302D)和河北省科学技术研究与发展计划项目(12453571)资助 This work was supported by the Key Basic Application Research Program of Hebei Province (15963301D, 13963302D) and the Scientific Research and Development Program of Hebei Province (12453571).

2017-06-07 Received, 2017-07-15 Accepted.

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhiweili1975@163.com

浮游动物是海洋生态系统的重要组成部分,在生态系统的物质和能量流动过程中发挥着重要的作用^[1].在海洋生态系统中,浮游动物群落结构的时空变化受到生物和非生物因素的驱动,如:盐度、水温、溶解氧、悬浮物、叶绿素等^[2-7].在这些因素中,由于淡水汇入形成的低盐度及其所产生的由河流到海域的盐度梯度一直被认为是河口浮游动物群落结构变化的重要驱动因子^[2,8-9].但是,随着近岸海域人类活动强度的加大,海域环境不断发生变化,例如:海水污染导致近岸海域形成更加明显的环境梯度,浮游动物群落结构变化的驱动因子也就更加复杂^[10].

唐山湾是河北省沿海地区人口稠密、快速工业化的区域之一.随着唐山湾沿海的开发,尤其是“四点一带”开发战略的实施,该区域海洋开发利用强度逐步加大,各种围填海工程、滨海旅游、围海养殖、临海工业等快速发展,人口不断向沿海聚集,人类活动强度不断加大,各种工业废水、生活污水的入海量也日益增加.自 2000 年以来,唐山湾近岸海域污染程度不断加重^[11-12].近年来,已有相关的项目开展了唐山湾海域人类活动对海洋生态系统、海洋资源的影响等研究,但这些都是基于水质参数、浮游植物群落、渔业资源等角度开展的^[13-15],关于唐山湾海域浮游动物群落的研究报道尚不多见,仅有王红等^[16]对曹妃甸海域浮游动物群落和环境因子进行了调查,尚缺乏对浮游动物群落结构变化的驱动因子的分析,难以深入探讨浮游动物群落的适应性变化.因此,本文对唐山湾海域浮游动物群落和环境因子进行周年季节性调查研究,目的是探明唐山湾海域浮游动物群落结构的时空变化及其主要环境驱动因子,为进一步探讨唐山湾海域浮游动物对环境因子的适应性变化及其调控措施提供科学基础.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

唐山湾(38.5°—39° N, 118°—119° E)位于渤海湾北部,岸线长 229 km,沿岸有滦河、陡河、双龙河、大清河等 14 条河流汇入.2000 年以来,随着海洋经济的发展,唐山湾沿岸开发如火如荼,主要开发活动集中在 3 个区域:乐亭海域、三岛海域和曹妃甸海域.其中,乐亭海域主要指京唐港至滦河口之间的海域,有唐山湾流量最大河流——滦河汇入,水深 0~20 m;该海域在 3 个区域中开发程度最低,海域利用方式以渔业用海为主,海水水质较好,满足二类水质要求^[13].三岛海域是指石臼坨岛、月坨岛和祥云岛

及其周边海域,区域内有青河、大清河等河流汇入,水深 1.2~18.0 m.由于三岛旅游区建设,海域利用方式主要以休闲娱乐用海为主,人类活动强度较高,海水受到一定程度的污染,主要污染物为无机氮和磷酸盐,水质介于二类和三类之间^[13].曹妃甸海域主要是指曹妃甸工业区及其周边海域,有双龙河、青龙河等河流汇入,平均水深 20 m.该海域通过围海造地形成曹妃甸港,海域利用方式以工矿用海和交通运输用海为主.由于陆源输入以及曹妃甸新区的建设,该海域人类活动日益频繁,海水污染程度呈现逐步加重的趋势,主要污染因子为氮、磷和石油类,已经超过三类水质^[13].

1.2 采样与分析方法

采样时间为 2015 年 4 月(春季)、7 月(夏季)、10 月(秋季)和 12 月(冬季),采样站位布设见图 1,其中乐亭海域布设 4 个站位(即 1~4),三岛海域布设 3 个站位(即 5~7),曹妃甸海域布设 6 个站位(8~13).

浮游动物样品采集采用浅水 II 型浮游生物网,在每个站位由底层到表层垂直拖网,所取得的样品置于 500 mL 塑料瓶中,用 5% 甲醛固定.所取得的各站点样品在实验室内浓缩至 50 mL,在体式镜和显微镜下根据《海洋调查规范》(GB/T 12763.6—2007)^[17],对浮游动物样品进行分类和计数,计算浮游动物的丰度(ind·m⁻³).

利用多参数水质仪(U-5000 型, HORIBA Ltd., Kyoto, Japan)在距海水表层约 0.5 m 处现场测定海水温度(T)、盐度(S)、pH 和溶解氧(DO).用于海水营养盐分析的水样采自表层 0.5 m 处,样品首先经 0.45 μm 滤膜过滤, -20 °C 保存,带至实验室用营养盐自动分析仪(AA3, Bran+Luebbe, German)进行测试分析,主要测定水样中无机氮(DIN, 为 NO₃⁻、NO₂⁻和 NH₄⁺之和)、活性磷酸盐(SRP, 以 PO₄³⁻计)、

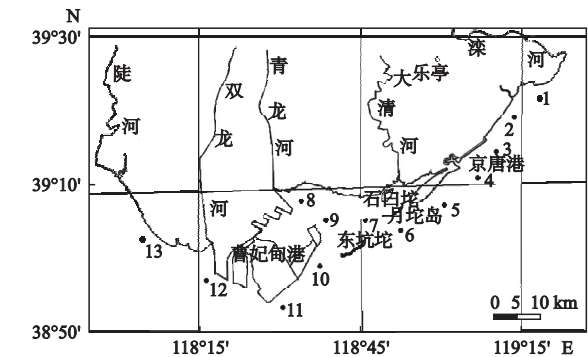


图 1 唐山湾海域采样站位分布
Fig.1 Distribution of sampling stations in Tangshan Bay.

硅酸盐 (SRSi, 以 SiO_3^{2-} 计); 海水中化学需氧量 (COD)、悬浮颗粒物 (SS) 等水质参数按照《海洋调查规范》(GB/T 12763.4—2007)^[17] 中规定的方法进行采样分析. 叶绿素 a (Chl a) 用荧光光度计 (Turner-Designs700 型) 进行测定, 先将所采集的 500 mL 水样用 0.45 μm 滤膜抽滤, 用 90% 丙酮溶液于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中浸提 24 h (黑暗), 然后 800 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 取上清液, 测定酸化前后 Chl a 的含量^[17].

1.3 数据分析

浮游动物群落优势种根据物种出现的频率及个体数量来确定, 计算方法: $Y=f_iP_i$, 其中: Y 为优势度; f_i 为第 i 个物种的出现频率; P_i 为第 i 个物种个体数量占总个体数量的比例. 当 $Y>0.02$ 时, 确定为优势种.

利用群落排序和相关分析对浮游动物丰度和环境数据进行分析, 以区分不同时空条件下驱动浮游动物丰度和群落结构的主要环境因子. 文中所有分析都是在对丰度数据进行对数转换的基础上进行的. 首先, 利用 Pearson 相关分析来确定不同季节唐山湾 3 片海域 (乐亭海域、三岛海域和曹妃甸海域) 浮游动物丰度与环境因子关系. 其次, 确定同一季节驱动 3 片海域浮游动物群落结构异质性的环境因子; 先对唐山湾海域春、夏、秋、冬浮游动物丰度数据进行去趋势对应分析 (DCA), 结果表明, 各季节排序轴最大梯度长度均小于 3, 选用冗余分析 (RDA) 线性模型进行排序分析. 在选择参与 RDA 分析的环境因子时, 只选择 Monte Carlo 检验 ($P<0.05$) 中与浮游动物群落结构明显相关的因子. 再次, 确定驱动各海域浮游动物群落结构季节变化的环境因素, 分析模型的选择确定方法同上, 共进行了 3 片海域 4 个季节 12 次 RDA 分析. 同样用于分析的环境因子须经 Monte Carlo 检验 ($P<0.05$) 对浮游动物群落结构有明显影响的因子. 在本文中, 参与分析的环境因子包括 DIN、SRP、COD、DO、SRSi、SS、T、S、Chla. 采用 SPSS 19.0 及 CANOCO 4.5 对数据进行统计分析.

2 结果与分析

2.1 环境因子与浮游动物群落特征

唐山湾的乐亭海域、三岛海域和曹妃甸海域环境因子变化如图 2 所示. 表层海水盐度 S 在各季节间未表现出显著差异, 但 DO、DIN、SRP、SS、T、Chl a 季节间差异显著. 其中, DIN 在夏季含量显著低于其他季节; SRP 在冬季显著高于春、秋季; SS 冬季含量显著高于其他季节; 冬、春季 DO 显著高于夏、秋季; 水温以夏季最高, 冬季最低; Chl a 则以秋季最高. 在空间上, 春季 3 片海域各环境因子均差异显著; 夏季除 DO、SRSi 和 S 外, 3 片海域其他环境因子均差异显著; 秋季除 S 外, 3 片海域其他环境因子差异均显著; 冬季 S 、DIN、T 和 Chl a 在 3 片海域中差异显著, 其他环境因子差异均不显著. 在空间分布上, DIN、T、SRSi、SS 平均含量均表现为由乐亭海域到曹妃甸海域逐渐升高的趋势, 而 Chl a、DO 含量在空间上的变化与之相反; SRP 含量以曹妃甸海域最高, 与三岛海域和乐亭海域差异均显著, 但三岛海域和乐亭海域间 SRP 含量差异则不显著.

与环境因子变化特征类似, 唐山湾 3 片海域浮游动物丰度也表现出时空变化特征. 在 3 片海域中, 浮游动物丰度峰值均出现在夏季, 最低值均出现在冬季 (图 3). 在春季、秋季和冬季, 浮游动物丰度分布表现为乐亭海域>三岛海域>曹妃甸海域, 其中春季、夏季差异显著, 秋、冬季节不显著. 浮游动物群落结构在乐亭海域、三岛海域和曹妃甸海域之间也表现出一定的差异. 其中, 在乐亭海域, 拟长腹剑水蚤 (*Oithona similis*) 为全年优势种, 尤其在春季其丰度最高, 占浮游动物总丰度的 43.4%; 小拟哲水蚤 (*Paracalanus parvus*) 是夏季、秋季均出现的优势种, 其在秋季丰度最高; 冬季的优势种为拟长腹剑水蚤和强壮箭虫 (*Sagitta crassa*); 双毛纺锤水蚤 (*Acartia bifilosa*) 是仅出现在春季的优势种. 在三岛海域, 强壮箭虫是全年的优势种, 尤其在冬季丰度最高; 小拟

表 1 唐山湾不同海域浮游动物优势种
Table 1 Dominant species of zooplankton community in different sea areas of Tangshan Bay

季节 Season	乐亭 Laoting	三岛 Sandao	曹妃甸 Caofeidian
春季 Spring	拟长腹剑水蚤 <i>Oithona similis</i> (43.4%) 双毛纺锤水蚤 <i>Acartia bifilosa</i> (13.9%)	腹针胸刺水蚤 <i>Centropages abdominalis</i> (56.8%) 强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i> (8.4%)	小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i> (43.0%) 双毛纺锤水蚤 <i>Acartia bifilosa</i> (15.9%)
夏季 Summer	拟长腹剑水蚤 <i>Oithona similis</i> (33.5%) 小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i> (17.6%)	小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i> (45.9%) 双毛纺锤水蚤 <i>Acartia bifilosa</i> (19.4%)	小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i> (41.4%) 双毛纺锤水蚤 <i>Acartia bifilosa</i> (8.3%)
秋季 Autumn	拟长腹剑水蚤 <i>Oithona similis</i> (40.4%) 小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i> (25.9%)	小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i> (53.1%) 强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i> (11.2%)	夜光虫 <i>Noctiluca scintillans</i> (57.1%) 小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i> (11.5%)
冬季 Winter	拟长腹剑水蚤 <i>Oithona similis</i> (36.6%) 强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i> (22.2%)	强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i> (33.6%) 小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i> (21.3%)	小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i> (33.0%) 强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i> (17.2%)

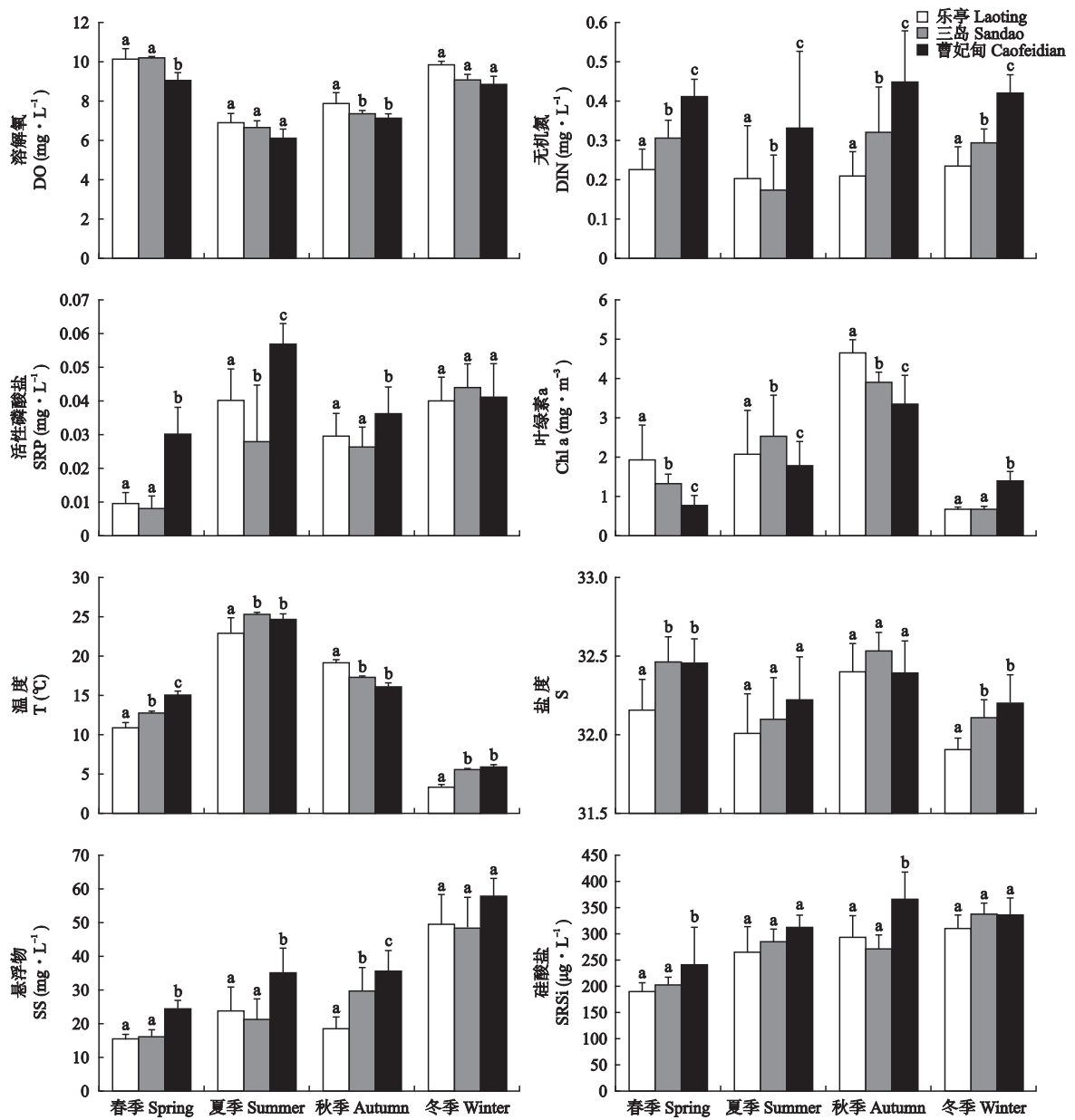


图2 唐山湾乐亭海域、三岛海域和曹妃甸海域环境因子变化
Fig.2 Environmental variables of Laoting Sea, Sandao Sea and Caofeidian Sea in Tangshan Bay.

不同小写字母表示海域间差异显著 ($P<0.05$) Different letters indicated significant difference among different sea areas at 0.05 level. 下同 The same below.

哲水蚤是夏、秋、冬季的优势种,尤其在秋季丰度最高.在曹妃甸海域,小拟哲水蚤是全年的优势种,其中春季丰度最高;双毛纺锤水蚤是春、夏季的优势种,春季丰度最高;夜光虫(*Noctiluca scintillans*)是秋季的优势种,其占总丰度的 57.1%,占有绝对优势(表 1).

2.2 环境因子与浮游动物群落的关系

2.2.1 环境因子与浮游动物丰度相关性的季节变化

Pearson 相关分析表明,影响唐山湾海域浮游动物丰度的环境因子随季节而变化.春季浮游动物丰度

与 DO 呈正相关,与水温、COD 和 DIN 呈负相关;夏季浮游动物丰度与水温 and Chl a 呈正相关,与 DIN、SRP、SS 呈负相关;秋季浮游动物丰度与水温 and Chl a 呈正相关,与 DIN 和 SS 呈负相关;冬季浮游动物丰度与 T、Chl a 呈正相关,与 SS 呈负相关(表 2).

2.2.2 影响浮游动物群落空间差异的环境因素

RDA 分析表明,影响唐山湾浮游动物群落空间差异的环境因素有明显的季节变化(图 4).春季,曹妃甸海域浮游动物群落与乐亭海域、三岛海域的差异取决于 DIN(28%)和 SRP(6%),而乐亭海域和三岛海

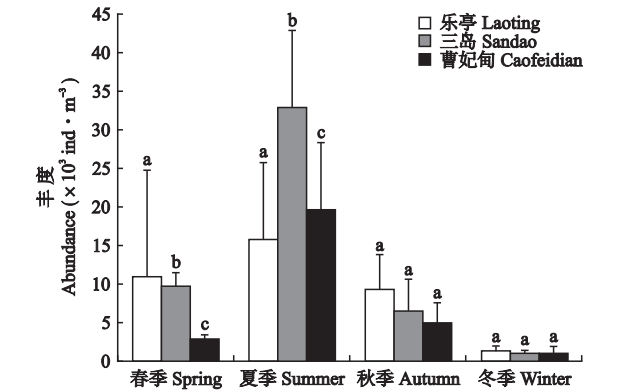


图3 唐山湾不同海域浮游动物丰度变化
Fig.3 Abundance of zooplankton in different sea areas of Tangshan Bay.

域浮游动物群落的差异取决于盐度(11%)和水温(4%).夏季乐亭海域浮游动物群落与曹妃甸海域、三岛海域的差异取决于 Chl a(16%)和水温(7%),而曹妃甸海域和三岛海域浮游动物群落差异取决于 SS(12%)和 DIN(4%).秋季乐亭海域浮游动物群落与曹妃甸海域、三岛海域的差异取决于 Chl a(15%)和水温(8%),而曹妃甸海域和三岛海域浮游动物群落差异取决于 SS(10%)和 DIN(6%).冬季 Chl a

表2 唐山湾海域环境因子与浮游动物丰度的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between environmental variables and abundance of zooplankton in Tangshan Bay

变量 Variable	丰度 Abundance			
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
DO	0.707 **	ns	ns	ns
COD	-0.601 *	ns	ns	ns
pH	ns	ns	ns	ns
DIN	-0.673 *	-0.669 *	-0.642 *	ns
SRP	ns	-0.618 *	ns	ns
Chl a	ns	0.668 *	0.741 **	0.660 *
T	-0.555 *	0.716 **	0.661 *	ns
S	ns	ns	ns	ns
SS	ns	-0.588 *	-0.561 *	-0.689 **
SRSi	ns	ns	ns	ns

ns: $P>0.05$; * $P<0.05$; ** $P<0.01$.

(12%) 和 DIN(5%) 是曹妃甸海域与乐亭海域和三岛海域浮游动物群落差异的主要驱动因素,而水温(9%)和盐度(7%)则是乐亭海域与三岛海域浮游动物群落差异的驱动因素.

2.2.3 影响各海域浮游动物群落结构的环境因素
RDA 分析显示,浮游动物群落结构与环境因素有明显的关系,且存在时空差异.在乐亭海域,春季和冬季影响浮游动物群落结构的主要因素为水温,而SS

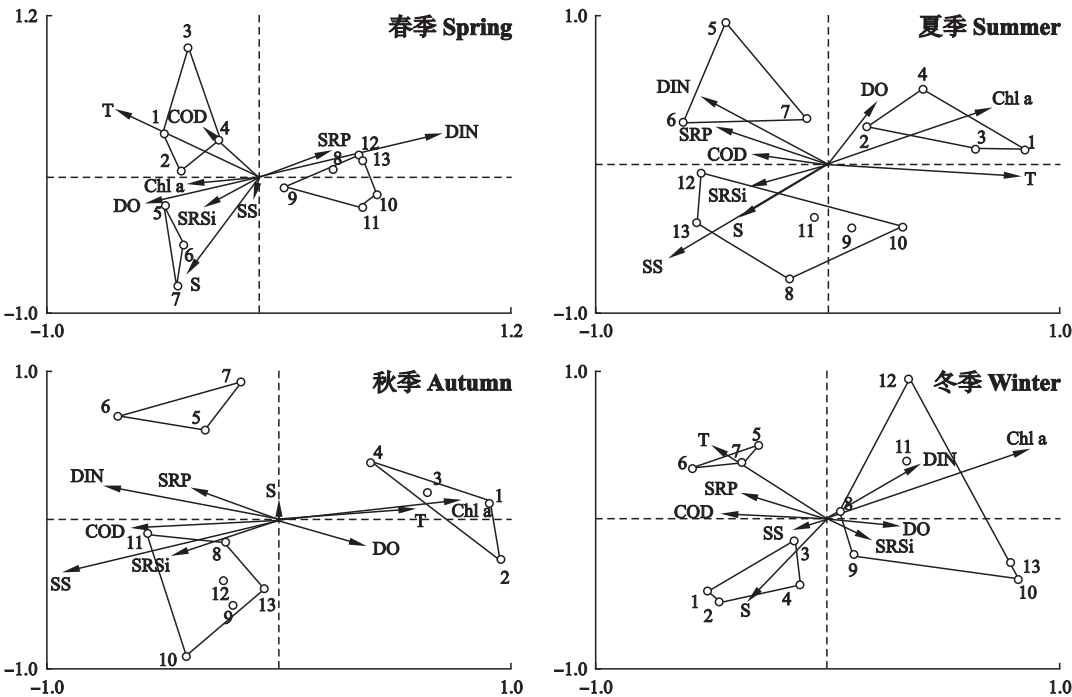


图4 唐山湾海域不同季节浮游动物与环境因子 RDA 分析排序图
Fig.4 RDA ordination diagrams of zooplankton abundance and environmental variables in four seasons in Tangshan Bay.
DIN: 无机氮 Inorganic nitrogen; SRP: 活性磷酸盐 Soluble reactive phosphorus; DO: 溶解氧 Dissolved oxygen; COD: 化学需氧量 Chemical oxygen demand; S: 盐度 Salinity; SS: 悬浮物 Suspended solid; SRSi: 活性硅酸盐 Soluble reactive silicate; Chl a: 叶绿素 a Chlorophyll a; T: 水温 Water temperature.

则是影响夏季和秋季浮游动物群落结构的主要因素(表3).在三岛海域,影响夏季和秋季浮游动物群落结构的主要因素为SS,而春季和冬季影响群落结构的主要因素分别为DO和T(表4).在曹妃甸海域,DIN是影响冬季和春季浮游动物群落结构的主要因素,而夏季和秋季的主要影响因素分别为SS和SRP

表 3 显著影响乐亭海域浮游动物群落结构的环境因子排序
Table 3 Ranking of environmental variables that significantly influenced the community structure of zooplankton in Laoting Sea area

季节 Season	解释变量 Explanatory variable	变量解释量 Variability explained	<i>P</i>	<i>F</i>
春季 Spring	T	0.43	0.002	12.13
	SRP	0.12	0.002	4.71
夏季 Summer	DO	0.04	0.010	4.30
	SS	0.39	0.002	7.72
	DO	0.20	0.006	5.51
秋季 Autumn	DIN	0.08	0.012	2.42
	SS	0.45	0.002	10.12
	SRP	0.07	0.002	6.01
冬季 Winter	Chl a	0.07	0.006	3.81
	T	0.41	0.002	5.12
	Chl a	0.13	0.002	4.05
	S	0.08	0.010	1.86

表 4 显著影响三岛海域浮游动物群落结构的环境因子排序
Table 4 Ranking of environmental variables that significantly influenced the community structure of zooplankton in Sandao Sea area

季节 Season	解释变量 Explanatory variable	变量解释量 Variability explained	<i>P</i>	<i>F</i>
春季 Spring	DO	0.33	0.002	5.13
	SRP	0.12	0.002	3.78
	DIN	0.11	0.012	3.05
夏季 Summer	SS	0.43	0.002	4.28
	DIN	0.11	0.002	3.15
	DO	0.05	0.018	2.21
秋季 Autumn	SS	0.44	0.002	6.81
	T	0.12	0.002	4.89
	Chl a	0.12	0.006	3.67
	COD	0.07	0.010	2.34
冬季 Winter	T	0.41	0.002	6.51
	Chl a	0.13	0.002	4.25
	COD	0.06	0.010	2.18

(表5).总体上,物理因素是影响乐亭海域和三岛海域浮游动物群落结构的主要因素,而化学因素则是影响曹妃甸海域浮游动物群落结构的主要因素(表6).

表 5 显著影响曹妃甸海域浮游动物群落结构的环境因子排序
Table 5 Ranking of environmental variables that significantly influenced the community structure of zooplankton in Caofeidian Sea area

季节 Season	解释变量 Explanatory variable	变量解释量 Variability explained	<i>P</i>	<i>F</i>
春季 Spring	DIN	0.52	0.002	10.41
	SRP	0.12	0.002	3.43
	Chl a	0.04	0.012	3.05
	SRSi	0.03	0.016	2.19
夏季 Summer	SRP	0.33	0.002	10.92
	Chl a	0.14	0.002	3.51
	SRSi	0.14	0.018	2.21
	SS	0.04	0.018	1.78
秋季 Autumn	SS	0.36	0.002	6.81
	Chl a	0.17	0.002	4.89
	DO	0.04	0.006	3.67
	S	0.04	0.010	2.34
	COD	0.04	0.008	1.88
冬季 Winter	DIN	0.42	0.002	4.28
	Chl a	0.12	0.002	2.95
	SS	0.08	0.006	2.46
	DO	0.06	0.010	2.18
	SRP	0.02	0.018	1.89

表 6 全年各海域物理、化学和生物因素对浮游动物群落结构的解释量
Table 6 Total variability explained by physical/chemical/biological variables on zooplankton community structure of each sea area in four seasons

海域 Sea area	变量解释量 Variability explained		
	化学类变量 Chemical variable	生物类变量 Biological variable	物理类变量 Physical variable
乐亭 Laoting	0.51	0.20	1.68
三岛 Sandao	0.85	0.25	1.40
曹妃甸 Caofeidian	1.75	0.47	0.49

3 讨 论

唐山湾海域浮游动物丰度和群落结构随季节和区域而变化,与该海域环境污染状况的空间分布一致.污染最重的曹妃甸海域浮游动物群落结构的主要影响因素为化学因素(DIN和SRP);而污染最轻的乐亭海域浮游动物群落结构的影响因素则为物理因素(T和SS);三岛海域的污染程度介于曹妃甸海域和乐亭海域之间,其浮游动物群落结构很大程度上受物理因素的影响(T和SS).这一结果说明,在污染较轻的乐亭海域和三岛海域温度和悬浮物是影响浮游动物群落结构的主要因素,与胶州湾浮游动物群落结构影响因素类似^[18].同时,这种差异也说

明曹妃甸海域污染程度比乐亭海域和三岛海域严重。

尽管在一些监测方法中 Chl a 被看作是水体富营养化的生物指标, 且与浮游动物群落关系密切^[19], 但本研究显示, Chl a 含量与海域营养状态关系并不密切, 而是与悬浮物含量密切相关, 这与其他受人类活动影响程度较大的近岸海域研究结果相似^[20]。同时本研究中 Chl a 不是影响唐山湾海域中浮游动物群落结构的主要因素, 表明唐山湾海域浮游植物与浮游动物之间直接的营养联系相对较弱, 类似的现象也出现在富营养化的海域^[21]。由于唐山湾不同海域人类活动强度的差异, 自乐亭海域、三岛海域到曹妃甸海域 Chl a 的含量随着悬浮物含量的升高呈降低趋势, 这与胶州湾海域的研究结果一致^[18]。RDA 分析显示, 唐山湾 3 片海域中 Chl a 对于曹妃甸海域浮游动物群落空间分布的解释量高于乐亭海域和三岛海域(表 6)。这可能是由于高 Chl a 含量对于浮游动物摄食而言是过量的, 因此 Chl a 不再是浮游动物生长的限制因子; 其次是其他因素的影响远远超过了 Chl a 对浮游动物群落的影响, 如: 污染较重的曹妃甸海域的 DIN 的影响。

唐山湾不同海域浮游动物优势种存在一定的差异。尽管乐亭海域和曹妃甸海域温度和盐度差别不大, 但乐亭海域浮游动物优势种为拟长腹剑水蚤, 曹妃甸海域浮游动物优势种则为小拟哲水蚤。小拟哲水蚤是偏暖温带近海分布较广的小型桡足类, 是渤海常见生物种类, 适宜生长的温度范围为 13~24℃。有研究表明, 小拟哲水蚤的分布除受水温、盐度等因素的影响外, 还受海水中营养盐含量的影响^[22]。在春季、夏季和冬季的曹妃甸海域浮游动物群落中, 小拟哲水蚤都是第一优势种(相对丰度分别为 63%、41.4% 和 33%), 而且在这 3 个季节中, 化学因素决定了浮游动物群落的空间分布。这也说明在 3 片海域中曹妃甸海域污染相对较重。

参考文献

- [1] Karsenti E, Acinas SG, Bork P, *et al.* A holistic approach to marine eco-systems biology. *PLoS Biology*, 2011, **9**: 100–117
- [2] Mouny P, Dauvin JC. Environmental control of mesozooplankton community structure in the Seine estuary (English Cannel). *Oceanologica Acta*, 2002, **25**: 13–22
- [3] David V, Sautour B, Chardy P, *et al.* Long-term Changes of the zooplankton variability in turbid environment: The Gironde eatury (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, **64**: 171–184
- [4] Reaugh ML, Roman MR, Stoecker DK. Changes in plankton community structure and function in response to variable freshwater flow in two tributaries of the Chesapeake Bay. *Estuaries and Coasts*, **30**: 403–417
- [5] Moderan J, Bouvais P, David V, *et al.* Zooplankton community structure in a highly turbid environment (Charente estuary, France): Spatio-temporal patterns and environmental control. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, **88**: 219–232
- [6] Mialet B, Azemar F, Maris T, *et al.* Spatial spring distribution of the copepod *Eurytemora affinis* (Copepoda, Calanoida) in a restoring estuary, the Scheldt (Belgium). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, **88**: 116–124
- [7] Li KZ, Yin JQ, Huang LM, *et al.* Spatial and temporal variations of mesozooplankton in the Pearl River estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, **67**: 543–552
- [8] Gao Q, Xu ZL, Zhuang P. The relation between distribution of zooplankton and salinity in the Changjiang Estuary. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2008, **26**: 178–185
- [9] Taghialatela S, Ruiz J, Prieto L, *et al.* Seasonal forcing of image-analysed mesozooplankton community composition along the salinity gradient of the Guadalquivir estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, **149**: 244–254
- [10] Uriarte I, Villate F. Differences in the abundance and distribution of copepods in two estuaries of the Basque coast (Bay of Biscay) in relation to pollution. *Journal of Plankton Research*, 2005, **27**: 863–874
- [11] Tangshan Municipal Bureau of Sattistics (唐山市统计局). Tangshan Statistics Yearbook (2013). Beijing: China Statistics Press, 2013 (in Chinese)
- [12] Tangshan Municipal Bureau of Sattistics (唐山市统计局). Tangshan Statistics Yearbook (2001). Beijing: China Statistics Press, 2001 (in Chinese)
- [13] Li Z-W (李志伟), Cui L-T (崔力拓). Nutrient composition changes in coastal waters of Tangshan Bay, Hebei, China under anthropogenic influence. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27** (1): 307–314 (in Chinese)
- [14] Li Z-W (李志伟), Cui L-T (崔力拓). Assessment method for determining the influence of intensive sea use on marine resources. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35** (16): 5458–5466 (in Chinese)
- [15] Du X (杜肖), Han Z-Q (韩志强), Wang Y-X (王依昕), *et al.* Study on the community diversity of fisheries resources in Tangshan Bay. *Journal of Fisheries of China* (水产学报), 2014, **38** (5): 697–705 (in Chinese)
- [16] Wang H (王红), Shi Y-J (石雅君), Liu X-H (刘西汉), *et al.* Research on the long-term variation of zooplankton community in the coastal area of Caofeidian, Hebei Province. *Marine Science Bulletin* (海洋通报), 2015, **34** (1): 95–101 (in Chinese)

[17] Administration of Quality Supervision of China (国家质量监督检验检疫总局). The Specifications for Marine Monitoring (GB 17378-2007). Beijing: China Standards Press, 2007 (in Chinese)

[18] Shi H-H (石洪华), Li Y (李 艳), Wang Y-Y (王媛媛), *et al.* Phytoplankton distribution and the relationship to environment in southern waters of Miaodao Archipelago in autumn in 2012. *Marine Environmental Science* (海洋环境科学), 2015, **34**(5): 692-699 (in Chinese)

[19] Nixon SW. Coastal marine entrophication: A definition, social cause, and future concerns. *Ophelia*, 1995, **41**: 199-219

[20] Guinder VA, Popovich CA, Perillo GM. Paticulatr suspended matter concentrations in the Bahia Blanca Estuary, Argentia; Implication for the development of phytoplankton blooms. *Estuarine, Coastal and Shelf Sci-*

ence, 2009, **85**: 157-165

[21] Chen M, Chen B, Harrison P, *et al.* Dynamics of mesozooplankton assemblages in dubtropical coastal waters of Hong Kong: A comparative study between a eutrophic estuarine and a mesotrophic coastal site. *Continental Shelf Research*, 2011, **31**: 1075-1086

[22] Dou Y (窦 勇), Wang Y (王 悠), Tang X-X (唐学玺). Reaearch advances in influence of UV-B enhancement and environment factor change on marine zooplankton. *Marine Science* (海洋科学), 2011, **35**(8): 89-74 (in Chinese)

作者简介 李志伟, 女, 1975 年生, 硕士研究生. 主要从事海洋生态环境修复技术与安全评价研究. E-mail: zhiweili1975@163.com

责任编辑 肖 红