

DOI: 10.20103/j.stxb.202211183338

陈莉, 陈琳琳, 董志远, 倪艳梅, 孙德斌, 赵业, 李宝泉. 黄河三角洲典型潮沟系统水文连通性对大型底栖动物群落结构的影响. 生态学报, 2023, 43(22): 9232-9246.

Chen L., Chen L. L., Dong Z. Y., Ni Y. M., Sun D. B., Zhao Y., Li B. Q. Influence of hydrological connectivity of typical tidal creek system on macrobenthos community structure in the Yellow River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9232-9246.

黄河三角洲典型潮沟系统水文连通性对大型底栖动物群落结构的影响

陈 莉^{1,2}, 陈琳琳^{2,*}, 董志远², 倪艳梅², 孙德斌², 赵 业¹, 李宝泉²

1 烟台大学海洋学院, 烟台 264003

2 中国科学院烟台海岸带研究所 海岸带生物学与生物资源保护实验室, 烟台 264003

摘要: 潮沟系统水文连通是滨海湿地的关键生态过程, 也是维护和修复滨海湿地的重要途径。了解水文连通性如何影响生物在生境之间的扩散潜力, 对于恢复和维持区域和局地生物多样性至关重要。分别于 2021 年春季(5 月)和秋季(10 月)对黄河三角洲湿地三条水文连通梯度明显的潮沟进行野外调查和原位观测, 探讨不同水文连通梯度下大型底栖动物群落的时空变化特征及其影响因素。结果表明: 调查共采集大型底栖动物 50 种, 隶属 4 门 8 纲 39 科 45 属, 包括环节动物 23 种、软体动物 18 种、节肢动物 5 种和纽形动物 1 种; 大型底栖动物群落密度、生物量和多样性指数春季高于秋季, 春季以体型小、适应能力较强的软甲类、多毛类和双壳类为主, 秋季以活动能力较强的甲壳类、腹足类为主; 大型底栖动物群落物种数、密度及生物量和多样性随水文连通性的升高有升高趋势, 最高值出现在中等水文连通区域。研究表明潮沟系统水文连通性对大型底栖动物的栖息生境和群落结构及多样性均具有明显的影响, 但群落结构及多样性随水文连通梯度的变动规律在季节间存在差异。研究结果有助于进一步了解滨海湿地水文连通对生物群落的影响机制, 并为湿地环境保护和修复提供一定科学依据。

关键词: 大型底栖动物; 水文连通; 生物多样性; 群落结构; 黄河三角洲; 潮沟系统

Influence of hydrological connectivity of typical tidal creek system on macrobenthos community structure in the Yellow River Delta

CHEN Li^{1,2}, CHEN Linlin^{2,*}, DONG Zhiyuan², NI Yanmei², SUN Debin², ZHAO Ye¹, LI Baoquan²

1 School of Ocean, Yantai University, Yantai 264003, China

2 Key Laboratory of Coastal Biology and Bioresource Utilization, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

Abstract: The hydrological connectivity of tidal creek system is a key ecological process of coastal wetlands, and also an important way to maintain and repair coastal wetlands. Understanding how hydrological connectivity affects the diffusion potential of organisms between habitats is crucial for restoring and maintaining regional and local biodiversity. In this study, the field investigation and in-situ observation were conducted on three tidal gully with obviously hydrological connectivity gradient in the Yellow River Delta wetland in spring (May) and autumn (October) of 2021, respectively. We aimed to explore the spatial-temporal variation characteristics of macrobenthic community and their influencing factors under different hydrological connectivity gradients. The results showed that a total of 50 species of macrobenthos were collected, belonging to 4 phyla, 8 classes, 39 families and 45 genera, including 23 species of annelids, 23 species of Annelida, 18 species of

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42176160); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项“美丽中国生态文明建设科技工程”(XDA23050202); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2021MD084)

收稿日期: 2022-11-18; **采用日期:** 2023-03-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: llchen@yic.ac.cn

Mollusca, 5 species of Arthropoda and 1 species of Nemertina. The community density, biomass and diversity index of macrobenthos were higher in spring than in autumn. In spring, Malacostraca, Polychaeta and Bivalvia with small size and strong adaptability were dominant, while in autumn, Crustacea and Gastropoda with strong activity were dominant. The species number, density, biomass and diversity of macrobenthic community tended to increase with the increase of hydrological connectivity, and the highest value appeared in the medium hydrological connectivity area. The study showed that the hydrological connectivity of the tidal creek system had significant effects on the habitat, community structure and diversity of macrobenthos, but the variation pattern of community structure and diversity with the gradient of hydrological connectivity existed the seasonal differences. This study will help to further understand the mechanism of hydrological connectivity of coastal wetlands on biological communities, and provide a scientific basis for wetland environmental protection and restoration.

Key Words: macrobenthos; hydrological connectivity; bio-diversity; community structure; the Yellow River Delta; tidal creek system

滨海湿地位于海陆交错区域,咸淡水交汇作用下,生境条件复杂,生物多样性丰富,具有重要的生态服务功能^[1-2]。近年来,受气候变化和人类活动的双重影响,湿地面积急剧萎缩,湿地生态功能严重受损^[3-6]。湿地生长和衰退的本质是人类活动和气候变化对水文循环的破坏^[7-8]。水文连通是指以水为介质的物质、能量及生物在水文循环各要素内和各要素之间进行传输的过程^[9-10]。水文连通影响着湿地重要环境因子的变化,影响着生物的定居、迁移扩散和繁殖等行为,进而影响着湿地的生物多样性及生物连通性^[11-12]。大型底栖动物是湿地生态系统的重要组成部分,是湿地食物链中的关键环节^[13-15]。由于大型底栖动物活动区域性强、迁移能力弱,且对环境条件的变化比较敏感,通常将其作为滨海湿地生态结构与功能完整性的关键指标,其群落结构的变化特征能直接反映生态系统的稳定与变化。因此,明确大型底栖动物群落结构及多样性分布与水文连通性的关系,不仅有助于更好的发挥大型底栖动物的生物监测作用,而且对湿地生物多样性保护及生态修复具有指导意义。

完整的水文连通能够促进营养物质及能量的循环,并通过影响湿地重要环境因子来影响生物行为,进而影响湿地生物群落结构^[11, 16]。连通性的降低通常意味着湿地生态功能的退化及内部能量流动和养分循环的扰乱。生境中水文连通性的变化会对大型底栖生物群落及其生态功能产生重大的影响^[17],多流域研究表明,水文连通性较好的区域大型底栖动物群落多样性较高,大型底栖动物的密度和丰富度随水文连通强度增加而增加,且不同类群的大型底栖生物对水文连通性有不同响应^[18-21]。潮沟是由海洋和河流动力形成的潮汐水道,是潮滩上陆海相互作用最活跃的微地貌单元^[22],潮沟通过潮汐涨落促进潮滩与外界海域进行物质、能量与信息的交换^[23-24],是陆地与海洋生态系统能量、物质和基因交流的重要通道^[25]。潮沟网络的分布和发育直接影响到湿地生态环境的变化和生物的空间分布规律^[26-27],水文连通性是潮滩区域大型底栖动物群落结构功能的主要驱动因素^[28],提高潮沟水文连通性,对潮滩内的泥沙、水体、营养物质循环流动及生物的定殖、迁移扩散起到非常积极的作用^[29],能够提高大型底栖动物的丰富度和多样性^[30],有利于保持栖息地生物群落的稳定性和提高群落对外界干扰的抵抗力^[12]。

黄河三角洲作为暖温带保存最广阔、最完善、最年轻的湿地生态系统,因其原始性、脆弱性和国际重要性而备受关注^[31-32]。近些年,气候变化和人类活动影响下,黄河三角洲湿地水文连通受阻,潮沟数量和空间分布都发生明显变化。目前,关于黄河三角洲潮沟水文连通性与大型底栖动物的研究主要分析了水文连通性对大型底栖动物分布和生物多样性影响^[33],缺少潮沟水文连通性对生态环境的影响分析以及大型底栖动物群落结构的时空分布规律及季节变化特征研究。因此,本研究分别于2021年春季(5月)和秋季(10月)对黄河三角洲湿地三条水文连通梯度明显的潮沟进行野外调查和原位观测,分析其水文连通特征和不同水文连通梯度下典型环境因子及大型底栖动物群落的分布规律及季节变化特征。旨在掌握黄河三角洲典型潮沟系统水

文连通性对生态环境以及大型底栖动物群落结构的影响,增强水文连通对生态过程作用机制的认识,这对黄河三角洲区域水文连通性的维护、生物多样性的维持、水生态环境的保护及湿地生态健康的发展具有一定意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域和采样点设置

研究区域位于山东省黄河三角洲国家级自然保护区内(图1),该区域北靠渤海,南邻莱州湾,属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温为11.7—12.6℃,年降水量为530—630mm,降水集中在夏季,年蒸发量为1900—2400mm。受黄河入海河段与渤海共同作用影响,该区域形成了一个高度动态、复杂且敏感的湿地生态系统,发育了宽广的潮滩及密集的潮沟体系^[34]。

采样点的设置结合现场观测及相关资料,考虑了黄河口潮间带湿地中潮沟系统形态特征及发育水平、潮沟水文连通结构、区域降水及潮汐情况等,基于样点设置的代表性、目标性、连续性及安全性原则,在潮沟发育程度较为稳定的黄河北岸区域选择了一条水文连通梯度明显、发育成熟的潮沟系统设为采样区域,地理坐标为119°6′00″E—119°6′50″E、37°47′00″N—37°48′50″N。该潮沟系统与海直接相连,由海向陆延伸,采用Horton-Strahler分级原则对潮沟系统进行分级^[35],将最小的、末端不再分支的支流定义为一級潮沟,多个一级潮沟汇聚形成的次支流为二级潮沟,多个二级潮沟或一级和二级潮沟连接形成的主支与海相连,为三级潮沟。

选定了潮沟系统中三条级别梯度明显的潮沟并划分为三个采样段,分别为一级潮沟S1、二级潮沟S2、三级潮沟S3(图1),根据各采样段生境特点及水文特征设置2个采样点,于2021年春季(5月)和秋季(10月)开展大型底栖动物和水体理化指标的样品采集。

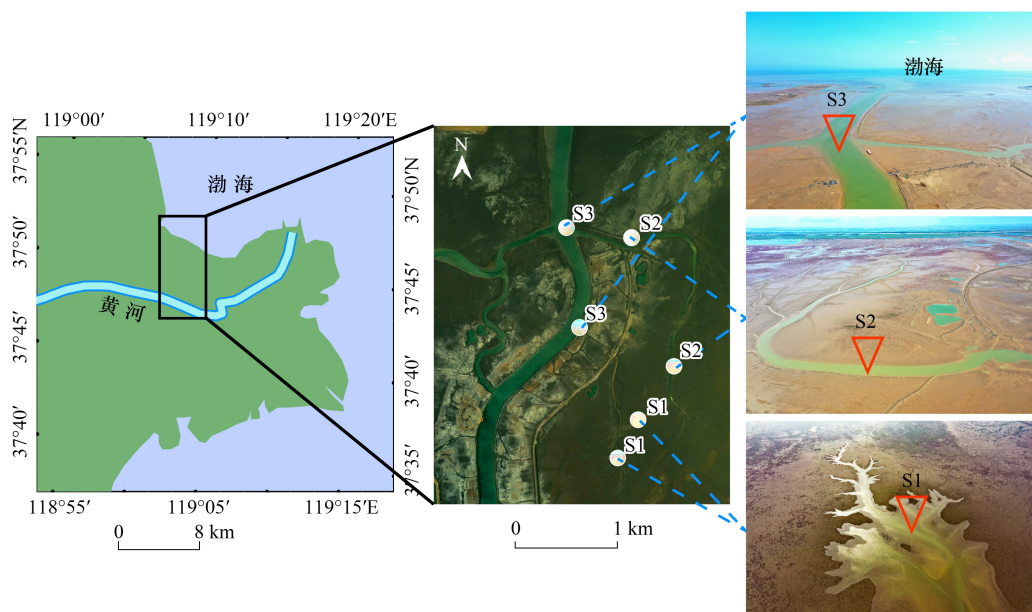


图1 黄河口潮间带湿地采样点示意图

Fig.1 Sample sites of intertidal wetland in the Yellow River Delta

S1:一级潮沟 First-level tidal creek; S2:二级潮沟 Second-level tidal creek; S3:三级潮沟 Third-level tidal creek

1.2 样品采集与处理

1.2.1 大型底栖动物采集与鉴定

定量采集大型底栖动物用于群落分析,在采样点位选取5m×5m的样方,使用Vanveen采泥器采集沉积物样品,采集3个沉积物样品混合后合并为一个样品,累计采集面积为0.09m²,使用0.5mm孔径的网筛分选沉

积物样品后用 75% 乙醇固定所获大型底栖动物样品,每个采样点进行 3 次平行采样。样品采集后,带回实验室进行种类鉴定、个体计数和湿重称量。

全部样品置于显微镜下进行下一步挑拣、观察、分类、计数及鉴定。将生物个体鉴定到可能的最小分类单元(通常为种),对于水生昆虫、多毛类和寡毛类等部分物种只鉴定到目、科或者属;不同物种之间分别进行计数,易断的寡毛类和多毛类动物按头部计数,软体动物的死壳不计数,软体动物不去壳;用滤纸吸干表面水分后用 0.001g 生物电子秤称量物种湿重。所得个体数与质量除以相应的样方面积得到大型底栖动物单位面积的栖息密度(个/m²)和生物量(g/m²)。

1.2.2 环境因子测定

利用 YSI 现场测定水体底层环境因子温度(T)、电导率(SPL)、溶解氧(DO)、盐度(SAL)、酸碱度(pH)等指标。利用 Rhizon sampler 间隙水采样器现场采集抽滤间隙水,通过 0.45μm 的滤膜后以 50mL 塑料瓶冷冻保存采集到的沉积物间隙水样品并带回实验室,进行测定水环境指标,包括沉积物间隙水的磷酸盐(PO₄-P)、硅酸盐(SiO₃-Si)、亚硝酸盐(NO₂-N)、硝酸盐(NO₃-N)和铵盐(NH₄-N)浓度。利用 50ml 去头一次性医用注射器采集沉积物表层 5cm 样品,每个采样点进行 3 次平行采样,将沉积物样品冷冻保存并带回实验室,根据测定标准,剔除样品中砾石、动植物残体等杂质,进行冷冻干燥研磨处理,测定沉积物理化性质,包括沉积物粒径(D)、总氮(TN)、总碳(TC)及有机碳(TOC)含量。

1.3 数据分析

采用相对重要性指数(IRI)来判定群落的优势种^[36],计算公式如下:

$$IRI = (N + W)F \times 10^4$$

其中, N 为某一种的个数占总数的百分比, W 为某一种的质量占总质量的百分比, F 为某一种出现的站位数占调查总站数的百分比。定义 IRI 值>1000 的物种为优势种。

采用国际评价生物多样性最常见的 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 物种丰富度指数(D)、Pielou 物种均匀度指数(J)来表征大型底栖动物群落多样性进行分析^[15],各指数计算公式如下:

Shannon-Wiener 多样性指数(H'):

$$H' = - \sum P_i \times \log_2 P_i$$

Margalef 物种丰富度指数(D):

$$D = (S - 1) / \log_2 N$$

Pielou 物种均匀度指数(J):

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

其中, P_i 为该站位第 i 种的个体数占总个体数的比例, S 为样品物种数, N 为所有物种个体数之和。

分别对不同季节、不同水文连通级别潮沟的大型底栖动物数据及环境理化性质进行单因素方差分析(one-way ANOVA),统计分析中显著性水平 $P < 0.01$ 时,认为差异极显著; $P < 0.05$ 时,认为差异显著; $P > 0.05$ 时,认为无显著差异。大型底栖动物与环境因子的排序分析前先进进行 DCA 分析,结果显示第一轴长度<3,因此选用 RDA 分析对影响大型底栖动物群落结构的环境因子进行排序分析。采用 Excel 2007、SPSS 23.0、ArcGIS 10.4、Canoco 5、R 3.6.3 软件对数据进行统计分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 不同级别潮沟间生态环境特点的时空差异

潮沟流速采用 TCM-4 倾斜流速仪测定,一级潮沟至三级潮沟分别为 3.75cm/s、14.70cm/s、21.32cm/s,结合现场勘测和影像资料可知三条潮沟的宽度、深度、断面面积及流速均表现为 $S1 < S2 < S3$,根据潮沟相关研究^[33, 37-39],可知水文连通性由一级潮沟至三级潮沟依次递增,即 $S1 < S2 < S3$ 。

不同级别潮沟共测定 14 种环境理化指标,包括水体温度、电导率、盐度、溶解氧、pH、流速、沉积物的粒

径、总碳、总有机碳及总氮以及间隙水营养盐(表1),除间隙水磷酸盐外,测定的14种环境理化指标在不同级别潮沟间及不同季节间均具有显著差异($P<0.01$)。

其中不同级别潮沟间水体电导率、盐度、溶解氧沿水文连通梯度递增而递减,表现为 $S3<S2<S1$ ($P<0.01$);季节方面,水体电导率、盐度、温度春季>秋季($P<0.01$),溶解氧、pH 秋季>春季($P<0.01$)。

不同级别潮沟间沉积物粉砂比例沿水文连通梯度递增而递减,表现为 $S3<S2<S1$ ($P<0.01$),沉积物总碳、总有机碳及总氮在S1最高、S2最低,表现为 $S2<S3<S1$ ($P<0.01$);沉积物粒径在不同季节间存在显著差异($P<0.01$),秋季沉积物中粉砂及砂比例更高。

间隙水硝酸盐、铵盐在不同级别潮沟间存在显著差异($P<0.01$);间隙水硅酸盐、亚硝酸盐、硝酸盐和铵盐在不同季节间存在显著差异($P<0.01$),其中春季硅酸盐、硝酸盐更高,秋季铵盐更高,除S3外,其他级别潮沟春季磷酸盐更高、亚硝酸盐更低。

表1 研究区域环境理化指标

Table 1 Physical and chemical indicators of the study area

指标 Index		潮沟级别 Tidal creek level							
		S1		S2		S3			
		春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn		
水体 Water	T/℃	21.40	17.75	20.10	18.05	20.70	17.20		
	Cond/(mS/cm)	79.00	36.84	71.05	35.36	68.40	32.31		
	DO/%	64.70	101.90	46.46	95.90	44.00	87.00		
	SAL/(g/L)	43.88	23.37	30.22	22.33	28.44	20.22		
	pH	8.25	8.51	8.31	8.42	8.29	8.50		
沉积物 Sediment	粘土(<4.000μm)比例/%	11.19±2.02	18.36±1.57	6.39±1.90	11.95±3.25	14.44±6.82	10.56±1.17		
	粉砂(4.00—63.00μm)比例/%	64.62±3.20	68.87±2.14	60.47±6.20	67.57±3.52	59.22±3.02	62.57±5.82		
	砂(>63.000μm)比例/%	24.19±5.05	12.76±2.61	33.14±7.32	20.49±6.49	26.34±8.88	26.87±4.86		
	TC/(g/kg)	8.76±1.30	8.30±0.40	6.44±0.40	7.37±0.85	7.51±1.34	7.38±0.62		
	TOC/(g/kg)	0.72±0.21	0.66±0.07	0.40±0.10	0.59±0.07	0.66±0.30	0.49±0.09		
	TN/(g/kg)	0.1±0.05	0.09±0.02	0.04±0.01	0.06±0.02	0.08±0.04	0.07±0.03		
间隙水 Interstitial water	PO ₄ -P/(μg/L)	9.20±12.12	25.35±13.58	1.98±1.46	24.40±22.92	50.68±2.74	12.15±12.84		
	SiO ₂ -Si/(mg/L)	64.31±3.77	1.54±0.77	109.30±31.68	1.39±0.35	13.89±1.62	1.15±0.35		
	NO ₂ -N/(μg/L)	3.965±0.08	1.66±0.25	3.56±0.13	1.08±0.67	3.57±0.05	1.83±0.55		
	NO ₃ -N/(μg/L)	51.63±0.93	115.76±5.99	32.98±0.84	68.13±31.56	90.81±0.80	49.33±4.25		
	NH ₄ -N/(μg/L)	0.31±0.06	9.69±1.17	0.50±0.02	9.08±1.06	0.51±0.03	68.50±36.04		

T:温度 Temperature; Cond:电导率 Conductivity; DO:溶解氧 Dissolved oxygen; SAL:盐度 Salinity; pH:酸碱度 Potential of hydrogen; TC:总碳 Total carbon; TOC:总有机碳 Total organic carbon; TN:总氮 Total nitrogen; PO₄-P:磷酸盐 Phosphate; SiO₂-Si:硅酸盐 Silicate; NO₂-N:亚硝酸盐 Nitrite; NO₃-N:硝酸盐 Nitrate; NH₄-N:铵盐 Ammonium salt; S1:一级潮沟 First-level tidal creek; S2:二级潮沟 Second-level tidal creek; S3:三级潮沟 Third-level tidal creek

2.2 大型底栖动物群落物种组成

2021年春季(5月)、秋季(10月)共采集大型底栖动物50种,隶属4门8纲39科45属(表2),其中:多毛纲动物22种,占全部物种的44%;腹足纲动物13种,占全部物种的26%;双壳纲动物5种,占全部物种的10%;软甲纲动物和昆虫纲动物各3种,各占全部物种的6%;甲壳纲动物2种,占全部物种的4%;寡毛类动物和纽形动物各1种,各占全部物种的2%。春秋两季环节动物多毛类均是该区域大型底栖动物群落的优势类群,其次为软体动物。

物种组成在不同级别潮沟间、不同季节间均存在差异(图2)。春季群落物种数S1(14种)<S3(18种)<S2(34种),环节动物多毛类在各级潮沟中均为优势类群,其次为软体动物;秋季群落物种数S1(7种)<S2(24种)<S3(26种),与春季相同,S2、S3潮沟大型底栖动物类群仍以环节动物多毛类和软体动物为主,但秋季S1中节肢动物成为优势类群。不同季节间,S1、S2总物种数均为春季>秋季,S3反之。

表 2 研究区域大型底栖动物名录
Table 2 List of macroinvertebrates collected in the study area

门 Phylum	纲 Class	种 Species	春季 Spring			秋季 Autumn		
			S1	S2	S3	S1	S2	S3
软体动物 Mollusca	腹足纲	光滑狭口螺 <i>Stenothyra glabrata</i>	+	+	+			+
	腹足纲	文雅罕愚螺 <i>Fluviocingula elegantula</i>	+	+	+			+
	腹足纲	微黄镰玉螺 <i>Euspira gilva</i>	+	+				
	腹足纲	纵肋饰孔螺 <i>Decorifer matusimanus</i>		+	+			+
	腹足纲	纵肋织纹螺 <i>Nassarius variciferus</i>		+				
	腹足纲	琵琶拟沼螺 <i>Assiminea lutea</i>		+	+			
	腹足纲	绯拟沼螺 <i>Assiminea latericea</i>		+			+	+
	腹足纲	马丽亚瓷光螺 <i>Eulima maria</i>		+				
	腹足纲	泥螺 <i>Bullacta caurina</i>		+				
	腹足纲	伶鼬小球螺 <i>Conotalopia mustelina</i>		+			+	+
	腹足纲	托氏昌螺 <i>Umbonium thomasi</i>						+
	腹足纲	淡路齿口螺 <i>Brachystomia omaensis</i>					+	+
	腹足纲	强卷螺 <i>Agadina stimpsoni</i>						+
	双壳纲	光滑河篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>		+	+	+	+	+
	双壳纲	脆壳理蛤 <i>Theora fragilis</i>		+	+			
	双壳纲	薄壳绿螂 <i>Glaucome primeana</i>	+	+	+			+
	双壳纲	四角蛤蜊 <i>Macra veneriformis</i>					+	+
	双壳纲	鸭嘴蛤 <i>Laternula anatina</i>					+	+
节肢动物 Arthropoda	软甲纲	河螺赢蜚 <i>Corophium acherusicum</i>	+	+	+	+	+	+
	软甲纲	黑褐新糠虾 <i>Neomysis awatschensis</i>	+		+	+		
	软甲纲	跳钩虾 <i>Orchestra gammarellus</i>					+	
	甲壳纲	日本大眼蟹 <i>Macrophthalmus japonicus</i>		+			+	+
	甲壳纲	天津厚蟹 <i>Helice tientsinensis</i>					+	
	昆虫纲	襁翅目 Plecoptera		+				
	昆虫纲	蜻蜓目 Odonata		+		+		
	昆虫纲	双翅目 Diptera				+		
环节动物 Annelida	多毛纲	日本刺沙蚕 <i>Neanthes japonica</i>	+	+	+		+	
	多毛纲	双齿围沙蚕 <i>Perinereis aibuhitensis</i>	+	+	+	+	+	+
	多毛纲	多齿围沙蚕 <i>Perinereis nuntia</i>		+				
	多毛纲	寡鳃齿吻沙蚕 <i>Nephtys oligobranchia</i>	+	+				
	多毛纲	寡节甘吻沙蚕 <i>Glycinde gurjanovae</i>	+	+	+		+	+
	多毛纲	长双须虫 <i>Eteone longa</i>	+	+	+			+
	多毛纲	锦绣双须虫 <i>Eteone ornata</i>		+				
	多毛纲	色斑神须虫 <i>Eteone maculata</i>		+				
	多毛纲	巧言虫 <i>Eulalia viridis</i>		+	+		+	+
	多毛纲	丝异蚓虫 <i>Heteromastus filiformis</i>	+	+	+			
	多毛纲	中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>	+	+	+	+	+	+
	多毛纲	背蚓虫 <i>Notomastus latericeus</i>		+			+	+
	多毛纲	海稚虫属一种 <i>Spionidae</i> sp.		+	+			+
	多毛纲	长锥虫 <i>Haploscoloplos elongatus</i>		+	+		+	+
	多毛纲	拟节虫 <i>Praxillella praetermissa</i>		+				
	多毛纲	持真节虫 <i>Euclymene annandalei</i>		+			+	+
	多毛纲	异足索沙蚕 <i>Lumbricomereis heeropoda</i>					+	
	多毛纲	膜质伪才女虫 <i>Pseudopolydora kemp</i>						+
	多毛纲	深钩毛虫 <i>Sigambra bassi</i>					+	+
	多毛纲	矛毛虫 <i>Phylo felix</i>					+	
	多毛纲	角管虫属一种 <i>Ditrupa</i> sp.					+	
	多毛纲	渤海格鳞虫 <i>Gattyana pohainsis</i>					+	
	寡毛纲	霍普水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	+	+				
纽形动物 Nemertean	纽虫	纽虫 Nemertinea					+	+
合计 Total			14	34	18	7	24	26

物种组成差异韦恩图显示(图3),不同级别潮沟春秋两季共调查到的总物种数表现为S1(17种)<S3(31种)<S2(45种);各级潮沟均采集到的物种有11种,各级潮沟特有物种数为S1(1种)<S3(3种)<S2(14种),S1与S2有15种共有物种、与S3有12种共有物种,S2与S3有27种共有物种。不同季节潮沟系统调查到的大型底栖动物总物种数春季(35种)与秋季(36种)相近,其中有21种大型底栖动物在两季均有出现。

2.3 大型底栖动物群落优势种

研究区域大型底栖动物群落春季优势种为双齿围沙蚕和河螺赢蜚,秋季优势种为双齿围沙蚕和光滑河篮蛤。春季不同潮沟优势种数为S2<S1<S3,秋季S2优势种数高于S1和S3(表3)。双齿围沙蚕在不同季节不同级别潮沟均为优势物种,总优势度最高,河螺赢蜚次之。

2.4 大型底栖动物密度和生物量

调查发现研究区域大型底栖动物总平均密度为116个/m²,两季总平均密度季节差异显著($P<0.05$),分别为174个/m²、49个/m²,不同级别潮沟间平均密度均为春季>秋季,其中:春季各级潮沟总平均密度为S3(103个/m²)<S1(179个/m²)<S2(211个/m²);秋季各级潮沟总平均密度为S1(8个/m²)<S2(27个/m²)<S3(81个/m²)(表4)。

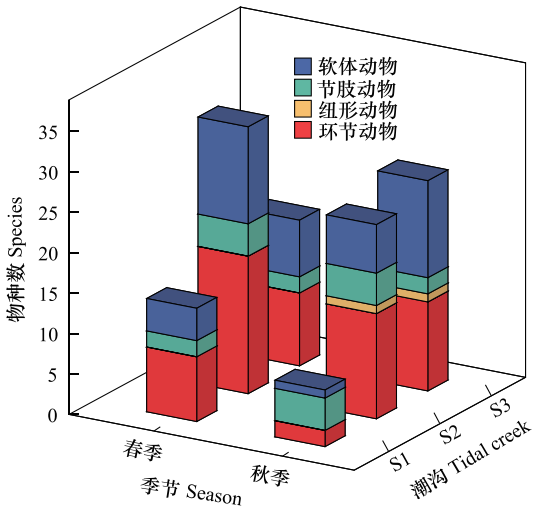


图2 研究区域大型底栖动物群落物种组成与分布
Fig.2 Species composition and distribution of macrobenthos community in the study area

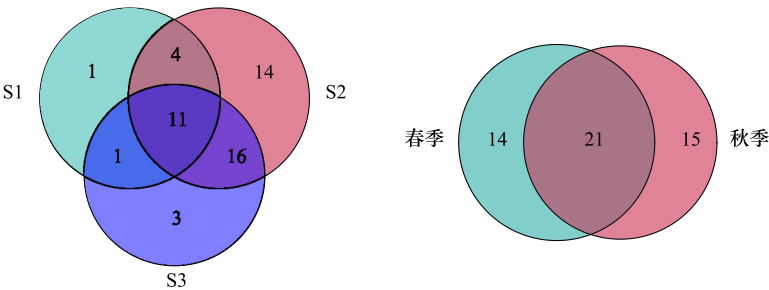


图3 研究区域大型底栖动物群落物种组成差异韦恩图
Fig.3 Venn chart of species composition differences of macrobenthos community in the study area

表3 研究区域大型底栖动物群落优势种

门 Phylum		相对重要性指数 Index of relative importance						
		春季 Spring			总计 Total	秋季 Autumn		
		S1	S2	S3		S1	S2	S3
软体动物 Mollusca	文雅罕愚螺 <i>Fluviocingula elegantula</i>	3080.53		2521.65				
	光滑河篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>			1003.04		6915.39	3013.03	
	薄壳绿螂 <i>Glauconme primeana</i>			2344.86				
	脆壳理蛤 <i>Theora fragilis</i>			3057.45				
节肢动物 Arthropoda	河螺赢蜚 <i>Corophium acherusicum</i>	4932.87	5114.37		4529.18		1012.47	
	黑褐新糠虾 <i>Neomysis awatschensis</i>	3415.47						
	日本大眼蟹 <i>Macrophthalmus japonicus</i>							1186.55
环节动物 Annelida	双齿围沙蚕 <i>Perinereis aibuhitensis</i>	1516.83	6945.60	3036.98	5677.94	2576.96	4541.48	1609.00
	日本刺沙蚕 <i>Neanthes japonica</i>			1290.30				
	巧言虫 <i>Eulalia viridis</i>		1009.67					

研究区域大型底栖动物总平均生物量为 $1.03\text{g}/\text{m}^2$, 两季总平均生物量差异不显著 ($P>0.05$), 分别为 $0.86\text{g}/\text{m}^2$ 、 $1.22\text{g}/\text{m}^2$, 不同级别潮沟间平均生物量除 S3 外均为春季>秋季, 其中: 春季各级潮沟总平均生物量为 $S1(0.37\text{g}/\text{m}^2)<S3(0.92\text{g}/\text{m}^2)<S2(1.03\text{g}/\text{m}^2)$; 秋季各级潮沟总平均生物量为 $S1(0.09/\text{m}^2)<S2(0.38\text{g}/\text{m}^2)<S3(2.30\text{g}/\text{m}^2)$ (表 4)。

表 4 研究区域大型底栖动物平均密度和平均生物量

Table 4 Average density and biomass of macroinvertebrates in the study area

潮沟 Tidal creek	密度 Density/(个/ m^2)		生物量 Biomass/(g/m^2)	
	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn
S1	179	8	0.37	0.09
S2	211	27	1.03	0.38
S3	103	81	0.92	2.30
合计 Total	174	49	0.86	1.22
	116		1.03	

不同季节、不同潮沟间大型底栖动物群落中各类群的密度存在差异 (图 4)。两季大型底栖动物各类群密度存在显著差异 ($P<0.05$), 春季软甲类、多毛类及双壳类的密度相对较高, 秋季甲壳类、腹足类的密度相对较高。不同级别潮沟间大型底栖动物类群密度不同, 其中: 春季 S2 大型底栖动物密度最高, 其多毛类、软甲类、寡毛类以及双壳类动物密度相对较高, S1 中软甲类、腹足类动物密度相对较高, S3 中双壳类动物密度相对较高; 秋季 S3 大型底栖动物密度最高, 其甲壳类和腹足类密度相对较高, S1、S2 大型底栖动物类群密度整体分布较为均匀。

2.5 大型底栖动物群落多样性

调查发现研究区域大型底栖动物多样性指数季节间差异不显著 ($P>0.05$), 但存在一定的分布规律 (图 5)。除 S3 外, 不同季节间各级潮沟的多样性指数变化趋势一致, 即 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 和均匀度指数 (J) 春季>秋季、物种丰富度指数 (D) 秋季>春季。

不同潮沟间的物种丰富度指数 (D) 存在显著差异 ($P<0.05$), Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 和均匀度指数 (J) 差异不显著 ($P>0.05$), 在不同级别潮沟间具有不同分布规律, 其中: Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 春季为 $S1<S2<S3$, 秋季为 $S1<S3<S2$; 物种丰富度指数 (D) 两季均为 $S1<S3<S2$; 均匀度指数 (J) 春季为 $S2<S1<S3$, 秋季为 $S3<S2<S1$ 。

2.6 大型底栖动物密度与环境因子相关性分析

采用 RDA 分析对研究区域春季、秋季中影响大型底栖动物群落结构的环境因子进行排序, 选取物种密度排名前十的大型底栖动物进行 PCA 分析 (图 6)。春季、秋季 RDA 排序中, 第一轴、第二轴物种与环境因子相关性分别为 0.9992、0.9912 和 1、0.9996, 证明排序结果均可靠; 两季 RDA1 和 RDA2 解释率分别为 82.31%、10.80% 和 74.65%、17.17%, 两轴能解释大型底栖动物群落结构变异的 93.11% 和 91.82%。

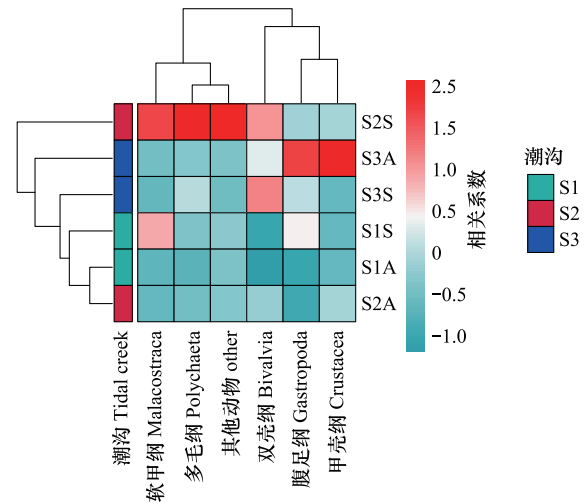


图 4 研究区域大型底栖动物类群密度分组聚类热图

Fig.4 Cluster heat map of macrobenthos group density in the study area

S1S: 一级潮沟春季数据 Spring data of first-level tidal creek; S2S: 二级潮沟春季数据 Spring data of second-level tidal creek in spring; S3S: 三级潮沟春季数据 Spring data of third-level tidal creek in spring; S1A: 一级潮沟秋季数据 Autumn data of first-level tidal creek; S2A: 二级潮沟秋季数据 Autumn data of second-level tidal creek; S3A: 三级潮沟秋季数据 Autumn data of third-level tidal creek

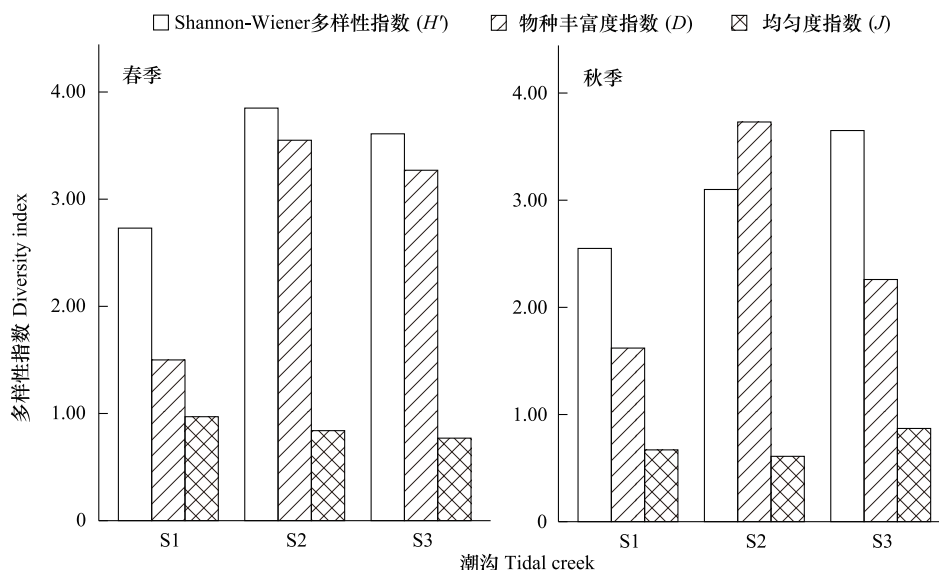


图5 研究区域大型底栖动物多样性指数

Fig.5 The diversity index of macrobenthos in the study area

春季 RDA 排序显示显著影响春季大型底栖动物群落的主要环境因子以沉积物和间隙水指标为主 ($P < 0.05$), 包括粘土、硅酸盐、总氮、总碳和总有机碳, 对群落组成变异的解释度分别为 52.8%、14.9%、9.2%、6.2%、6.2%。春季密度较高的物种分布较集中, 其中河螺赢蜆 (rj1) 和大部分多毛类物种 (dm) 与硅酸盐具有显著正相关关系。不同站位群落变异程度较大, 无明显规律。

秋季 RDA 排序显示显著影响秋季大型底栖动物群落的主要环境因子以水体指标为主 ($P < 0.05$), 包括溶解氧、pH、温度、盐度、磷酸盐和有机碳, 对群落组成变异的解释度分别为 53.4%、21.4%、6.5%、6.6%、5.4%、1.3%。秋季密度较高的物种分布较集中, 其中河螺赢蜆 (fj1)、光滑河篮蛤 (sq1) 和背蚓虫 (dm12) 与沉积物中砂比例具有显著正相关关系, 部分腹足类与铵盐具有显著正相关关系。S1 群落结构较为相似, 其组成与多数环境因子有正相关关系; S2 群落分布较为分散, 变异性较大; S3 群落分布较为集中, 与铵盐具有正相关关系。

3 讨论

3.1 潮沟系统水文连通性对栖息生境的影响

本研究中潮沟系统环境理化性质具有时空差异, 潮沟间的异质性程度突出, 与该区域潮沟研究结论一致^[40], 且部分指标在水文连通梯度上具有一定的规律, 证实潮沟系统水文连通性能够影响栖息生境的理化性质。潮沟宽度、深度、断面面积及流速等水文因素沿水文连通梯度递增而递增, 水体的溶解氧、电导率、盐度、流速以及沉积物中粉砂的含量等环境理化性质沿水文连通梯度递增而递减, 而沉积物中碳氮等营养物质沿水文连通梯度递增而先减后增, 最高值为水文连通性最低的一级潮沟。一级潮沟水文连通性最低, 生境具有高营养水平、高溶解氧、高电导率、高盐度及表面低渗透性等特点, 三级潮沟水文连通性最高, 生境具有沉积物大颗粒高比例、高流速等特点, 这与国内外相关研究结果一致: 高连通性生境水体交换频率高、底质表面粗糙、渗透性高等特点, 低连通性生境水体相对停滞、孤立, 具有高有机质泥及高营养水平^[41-42]。潮沟系统内的水体来自于海洋, 因此潮沟水文连通性受海陆距离影响明显^[43], 三级潮沟与海洋直接相连, 水文连通性最好, 受海水冲击作用最强, 其宽度、深度和断面面积最大, 具有最大的水量和流速, 水体交换最频繁, 底质冲刷作用最强, 因此土壤中大颗粒含量高, 渗透性强, 营养物质补给循环效率高; 而距海距离越远, 潮汐冲刷越少, 水动力条件越弱, 因此越靠近陆端、水文连通性越低, 水量和流速显著减小, 生境底质更不易被冲刷, 孔隙度减小、渗透性下降, 表层的粘性沉积物含量增加^[44], 阻碍营养物质循环, 导致水文连通性最低的一级潮沟具有高营养

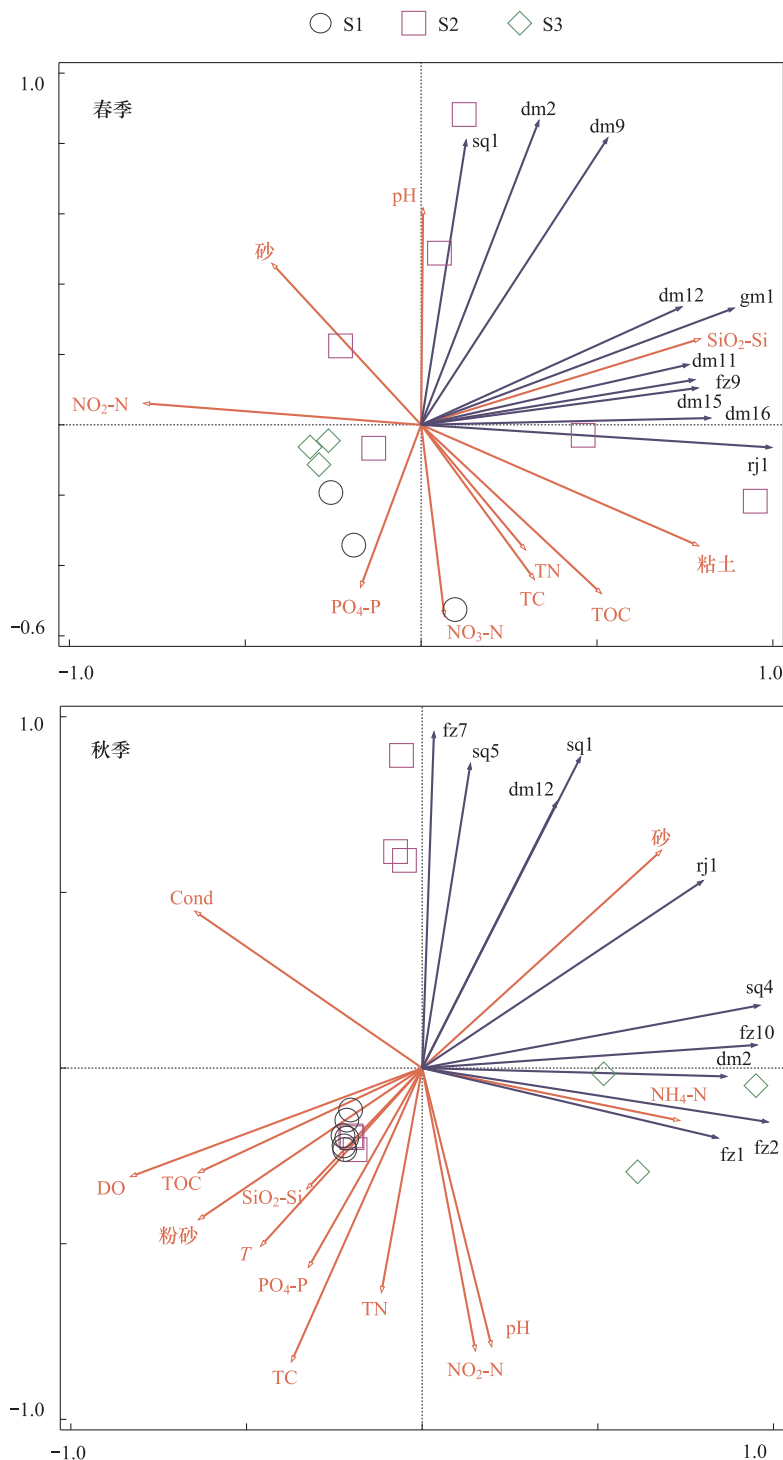


图 6 研究区域大型底栖动物与环境因子 RDA 排序图

Fig.6 RDA ordination diagram of macrobenthos in the study area

fz1: 光滑狭口螺 *Stenothyra glabrata*; fz2: 文雅罕愚螺 *Fluviocingula elegantula*; fz7: 排拟沼螺 *Assiminea latericea*; fz9: 泥螺 *Bullacta caurina*; fz10: 伶鼬小球螺 *Conotolopia mustelina*; sq1: 光滑河篮蛤 *Potamocorbula laevis*; sq4: 四角蛤蜊 *Macraa veneriformis*; sq5: 鸭嘴蛤 *Laternula anatina*; rj1: 河螺赢蜚 *Corophium acherusicum*; dm2: 双齿围沙蚕 *Perinereis aibuhitensis*; dm9: 巧言虫 *Eulalia viridis*; dm11: 中蚓虫 *Mediomastus californiensis*; dm12: 背蚓虫 *Notomastus latericeus*; dm15: 拟节虫 *Praxillella praetermissa*; dm16: 持真节虫 *Euclymene annandalei*; gm1: 霍普水丝蚓 *Limnodrilus hoffmeisteri*

水平的特点。

春季为黄河枯水期,降水量和径流流量处于较低的水平,因此其水文连通性变化的波动较小,影响群落的主要环境因子为粘土、硅酸盐等沉积物及沉积物间隙水指标,秋季为黄河丰水期,径流量和降水量都增多,增加了流域水文连通性的波动变化^[45],影响群落的主要环境因子为溶解氧、pH 等水体指标,此时河水对海水的冲淡作用增强,因此秋季水体盐度、温度、电导率低于春季,溶解氧、pH 高于春季,与区域水体季节特征一致^[46]。氨氮在亚硝化细菌及硝化细菌的作用下,先被氧化为亚硝酸氮,亚硝酸氮不稳定,最后转化为稳定的硝酸氮,且氨氮转化速率与温度相关^[47],秋季水温低,氨氮转化速率慢,导致秋季间隙水铵盐及亚硝酸盐含量比春季高、硝酸盐含量比春季低。硅酸盐含量与泥沙颗粒有密切关系^[48],秋季径流量增大,水体冲刷作用增强,因此秋季沉积物中小颗粒比例及间隙水中硅酸盐、磷酸盐降低,这与黄河三角洲区域沉积物及营养盐呈现相同季节规律^[46, 49—50]。

3.2 水文连通性对大型底栖动物群落结构影响

大部分大型底栖生物活动能力较弱,生活范围受限或营固着生活,与游泳和浮游生物等其他生物相比,区域性更强,对环境条件的变化更为敏感、受环境影响更为深刻^[51],因此可以利用底栖生物的种群结构、优势种类、数量等群落结构的变化特征将直接反映生态系统的稳定性与变异性^[52—54]。不同级别潮沟间大型底栖动物群落结构存在差异,水文连通性较好的二级潮沟、三级潮沟中物种种类较多、生物量和密度较高,水文连通性最低的一级潮沟中生物种类、生物量及密度最低、季节差异小,其物种大多为潮沟区域共有物种,主要类群为环节动物多毛类、节肢动物软甲类等个体较小的物种,部分优势种的优势度显著高于其他种,说明物种生态地位相对失衡,生物群落较为脆弱^[55]。这与国内^[42, 56]、国外^[28, 30]等研究结论一致:水文连通性较好的区域,大型底栖动物的物种种类更丰富、密度及生物量更高,水文连通性是大型底栖动物群落组成空间转换的关键驱动力,低水文连通性会对大型底栖动物群落产生负面影响。

二级潮沟物种最丰富,具有最多特有物种,其中春季为各级潮沟中物种数、生物量和密度最高的区域,潮沟主要类群为环节动物多毛类、软体动物及节肢动物,优势类群以环节动物多毛类、节肢动物软甲类及软体动物双壳类的大型底栖动物为主,其群落结构季节差异较大。春季影响群落的主要环境因子为粘土、硅酸盐等沉积物及沉积物间隙水指标,其中软甲类的虾、多毛类以及寡毛类等二级潮沟中的优势类群与这些环境指标有显著正相关关系,这些物种个体较小、适应能力较强,摄食的物种多为小型生物,春季各类生物一般正处于早期发育阶段,易被这些体型较小的大型底栖动物摄食。因此,春季大型底栖动物物种最丰富、生物量和密度最高的区域为中等水文连通性的二级潮沟,其次为水文连通性最高的三级潮沟,最后是水文连通性最低的一级潮沟,支持中度干扰假说^[57],中等水文连通性的区域大型底栖动物种类更丰富,在本研究区域、长江流域及世界不同流域^[33, 58—61],有学者也得到了类似的研究结论。

三级潮沟中物种相对较多,但特有物种较少,秋季为各级潮沟中物种数最多、生物量和密度最高的区域,潮沟主要类群为软体动物、环节动物多毛类及节肢动物,春季优势类群为软体动物及环节动物多毛类,秋季优势种为节肢动物甲壳类及环节动物多毛类等生物个体较大、活动能力较强或生存能力较强的大型底栖动物,群落的栖息密度及生物量季节变动较大,与各优势种类数量季节变动有关^[62]。秋季处于径流量及降雨量增多的丰水期,整体水文连通性波动较大,在强烈的水动力作用下,三级潮沟水文连通性最高,其小颗粒沉积物更易被冲刷,生境表层沉积物孔隙增大,更有利于植被的定殖、生长和发育,因此适合活动能力较强、活动范围更广、且需要植被庇护的甲壳类、腹足类生物的生长^[56, 63],秋季各类生物进一步生长发育,活动能力增强,不易捕食,因此春季优势类群在秋季的竞争能力低于个体较大的甲壳类生物^[64],这也使得秋季物种最丰富、生物量和密度最高的区域变为水文连通性最高的三级潮沟, Gallardo 的研究也证实了不同的大型底栖动物类群会对水文连通性有不同的响应:在水文连通性更好的区域中,甲壳类生物更丰富,双壳类、多毛类生物在水文连通性较低的区域中更易生长发育^[19]。秋季时,潮沟中的大型底栖动物物种数、生物量和密度沿水文连通梯度递增而递增,在我国和欧洲、美洲、非洲等世界其他区域^[7, 19, 30, 65]开展的研究也有一致的结论。

3.3 水文连通性对大型底栖动物多样性影响

水文连通变化将影响湿地生态系统生物多样性,水文连通结构越复杂,越有利于生物的定殖与扩散,同时增强维持种群的稳定性以及生态系统抵抗外来干扰和恢复的能力^[66],而水文连通的中断或受阻将降低物种在不同生境间的迁移能力^[67-68],增加物种种群的孤立^[69-70],严重影响栖息地生物的物种稳定性以及群落结构的抵抗力^[71],使得生物多样性下降。一级潮沟大型底栖动物群落的生物多样性指数在两季均为最低值,群落的物种数量较少、分布较均匀,多样性较低,因此证明维持一定的水文连通不仅有利于水体流动、营养物质循环以及生物迁徙^[72],而且有利于促进大型底栖动物多样性的提高。

二级潮沟、三级潮沟物种较为丰富,其多样性指数也处于较高值,二级潮沟的 Shannon-Wiener 多样性指数和均匀度指数在春季低于三级潮沟、秋季高于三级潮沟。研究表明,高流量会降低物种丰富度和丰度,但会增加群落生物多样性^[73],因此春季三级潮沟的物种丰富度、丰度及生物量虽然低于二级潮沟,但其群落生物多样性更高、分布更加均匀。过高的流速也不利于大型底栖动物的生长,此时生物多样性会降低^[74],因此在径流量增大、流速较高的秋季,二级潮沟群落生物多样性更高、分布更加均匀。物种丰富度指数在不同级别潮沟间存在显著差异,两季均表现为二级潮沟最高、一级潮沟最低,说明中等水文连通性区域的物种最丰富,其次为水文连通性最高的三级潮沟,水文连通性最低的一级潮沟物种最少。

生境中水文连通性的强弱和不同的水文条件会导致环境理化性质产生差异,使得群落多样性产生差异,总体而言,在适宜的流速下,水文连通性越好,大型底栖动物群落的物种越丰富,多样性越高、分布越均匀。

综上所述,黄河三角洲大型底栖动物栖息生境与群落结构及多样性在不同的水文连通梯度间及季节间均存在差异:春季,处于枯水期,水文连通性波动较小,底表沉积物的理化性质对大型底栖动物群落产生影响更大;而秋季,处于丰水期,水文连通性波动较大,水体的理化性质对群落结构产生的影响更大,因此大型底栖动物群落结构具有明显季节变化,并且大型底栖动物不同类群对水文连通梯度有不同响应特征,进而导致大型底栖动物群落结构与多样性对水文连通梯度的响应规律也具有季节差异。

4 结论

研究表明,水文连通性对栖息生境及大型底栖动物群落结构与多样性都有显著影响。水文连通变化使得潮沟间的异质性程度突出,且部分理化性质在水文连通梯度上具有显著变化规律,水文连通性通过改变水文条件,对底质表面粗糙程度、渗透性以及生境营养水平等性质产生影响。生境的变化会影响生物群落,随水文连通性的梯度变化,大型底栖动物群落结构及多样性也具有一定的变动规律,较高的水文连通性能够促进大型底栖动物群落的生长发育及群落多样性的提高,尤其在中等水文连通强度下,大型底栖动物群落生物种类最丰富。

因此,在黄河三角洲潮沟系统中维持一定的水文连通性,对区域生物多样性的提高、湿地环境保护和修复具有积极意义。未来研究中,还需增强研究尺度、延长研究周期并扩展研究类群,以进一步揭示滨海湿地水文连通对生物群落与生物多样性的影响机制,评估、预测水文连通性变化对湿地的影响,为湿地生态系统管理与修复及生物多样性保护提供一定的科学依据。

参考文献 (References):

- [1] 张晓龙,李培英,李萍,徐兴永. 中国滨海湿地研究现状与展望. 海洋科学进展, 2005, 23(1): 87-95.
- [2] 李伟,崔丽娟,赵欣胜,张曼胤,马牧源,康晓明,王义飞. 中国滨海湿地及其生态系统服务功能研究概述. 林业调查规划, 2014, 39(4): 24-30.
- [3] Rogers K, Kelleway J J, Saintilan N, Megonigal J P, Adams J B, Holmquist J R, Lu M, Schile-Beers L, Zawadzki A, Mazumder D, Woodroffe C D. Wetland carbon storage controlled by millennial-scale variation in relative sea-level rise. *Nature*, 2019, 567(7746): 91-95.
- [4] Newton A, Carruthers T J B, Icely J. The coastal syndromes and hotspots on the coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 96(1): 39-47.
- [5] Thorne K, MacDonald G, Guntenspergen G, Ambrose R, Buffington K, Dugger B, Freeman C, Janousek C, Brown L, Rosencranz J, Holmquist

- J, Smol J, Hargan K, Takekawa J. U.S. Pacific coastal wetland resilience and vulnerability to sea-level rise. *Science Advances*, 2018, 4(2): eaao3270.
- [6] Xiao R, Liu Y, Fei X F, Yu W X, Zhang Z H, Meng Q X. Ecosystem health assessment: a comprehensive and detailed analysis of the case study in coastal metropolitan region, Eastern China. *Ecological Indicators*, 2019, 98(5): 363-376.
- [7] Dou P, Cui B S, Xie T, Dong D Z, Gu B H. Macrobenthos diversity response to hydrological connectivity gradient. *Wetlands*, 2016, 36(1): 45-55.
- [8] Ala-aho P, Soulsby C, Pokrovsky O S, Kirpotin S N, Karlsson J, Serikova S, Manasypov R, Lim A, Krickov I, Kolesnichenko L G, Laudon H, Tetzlaff D. Permafrost and lakes control river isotope composition across a boreal Arctic transect in the Western Siberian Lowlands. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(3): 034028.
- [9] Pringle C. Hydrologic connectivity and the management of biological reserves: a global perspective. *Ecological Applications*, 2001, 11(4): 981-998.
- [10] Bracken L J, Wainwright J, Ali G A, Tetzlaff D, Smith M W, Reaney S M, Roy A G. Concepts of hydrological connectivity: research approaches, pathways and future agendas. *Earth-Science Reviews*, 2013, 119: 17-34.
- [11] 高常军, 高晓翠, 贾朋. 水文连通性研究进展. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(3): 586-594.
- [12] 崔保山, 蔡燕子, 谢湑, 宁中华, 华妍妍. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(6): 738-746.
- [13] 陈琳琳, 王全超, 李晓静, 周政权, 李宝泉. 渤海南部海域大型底栖动物群落演变特征及原因探讨. *中国科学: 生命科学*, 2016, 46(9): 1121-1134.
- [14] Li B Q, Li X J, Bouma T J, Soissons L M, Cozzoli F, Wang Q C, Zhou Z Q, Chen L L. Analysis of macrobenthic assemblages and ecological health of Yellow River Delta, China, using AMBI & M-AMBI assessment method. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 119(2): 23-32.
- [15] 李宝泉, 姜少玉, 吕卷章, 陈琳琳, 闫朗, 刘春云, 李晓静, 宋博, 李新正. 黄河三角洲潮间带及近岸浅海大型底栖动物物种组成及长周期变化. *生物多样性*, 2020, 28(12): 1511-1522.
- [16] 张梦嫒, 吴秀芹. 近 20 年白洋淀湿地水文连通性及空间形态演变. *生态学报*, 2018, 38(12): 4205-4213.
- [17] Dewson Z S, James A B W, Death R G. A review of the consequences of decreased flow for instream habitat and macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 2007, 26(3): 401-415.
- [18] Obolewski K, Glińska-Lewczuk K, Bąkowska M. From isolation to connectivity: the effect of floodplain lake restoration on sediments as habitats for macroinvertebrate communities. *Aquatic Sciences*, 2018, 80(1): 4.
- [19] Gallardo B, Dolédec S, Paillex A, Arscott D B, Sheldon F, Zilli F, Méricoux S, Castella E, Comín F A. Response of benthic macroinvertebrates to gradients in hydrological connectivity: a comparison of temperate, subtropical, Mediterranean and semiarid river floodplains. *Freshwater Biology*, 2014, 59(3): 630-648.
- [20] Khedhri I, Djabou H, Afli A. Does increased connectivity with the Mediterranean Sea improve the ecological status of the macroinvertebrates in the lagoon of Boughrara (SW Mediterranean)? *Community Ecology*, 2016, 17(2): 156-166.
- [21] Pan B Z, Wang Z Y, Xu M Z. Macroinvertebrates in abandoned channels: assemblage characteristics and their indications for channel management. *River Research and Applications*, 2012, 28(8): 1149-1160.
- [22] Vandenbruwaene W, Meire P, Temmerman S. Formation and evolution of a tidal channel network within a constructed tidal marsh. *Geomorphology*, 2012, 151/152: 114-125.
- [23] Teal J M. Energy flow in the salt marsh ecosystem of Georgia. *Ecology*, 1962, 43(4): 614-624.
- [24] 陈勇, 何中发, 黎兵, 赵宝成. 崇明东滩潮沟发育特征及其影响因素定量分析. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2013, 43(1): 212-219.
- [25] Naiman R J, Decamps H, Pollock M. The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity. *Ecological Applications*, 1993, 3(2): 209-212.
- [26] Chrzanowski T H, Spurrier J D. Exchange of microbial biomass between a *Spartina alterniflora* marsh and the adjacent tidal creek. *Estuaries*, 1987, 10(2): 118-125.
- [27] 赵欣胜, 崔保山, 孙涛, 贺强. 黄河三角洲潮沟湿地植被空间分布对土壤环境的响应. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1855-1861.
- [28] Castella E, Béguin O, Besacier-Monbertrand A L, Hug Peter D, Lamouroux N, Mayor Siméant H, McCrae D, Olivier J M, Paillex A. Realised and predicted changes in the invertebrate benthos after restoration of connectivity to the floodplain of a large river. *Freshwater Biology*, 2015, 60(6): 1131-1146.
- [29] 于小娟, 薛振山, 张仲胜, 宋晓林, 张红日. 潮沟对黄河三角洲湿地典型景观格局的影响. *自然资源学报*, 2019, 34(12): 2504-2515.
- [30] Paillex A, Dolédec S, Castella E, Méricoux S. Large River floodplain restoration: predicting species richness and trait responses to the restoration of hydrological connectivity. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46(1): 250-258.

- [31] 孙志高, 牟晓杰, 陈小兵, 王玲玲, 宋红丽, 姜欢欢. 黄河三角洲湿地保护与恢复的现状、问题与建议. 湿地科学, 2011, 9(2): 107-115.
- [32] 胡建明, 李乐, 苏艳红, 韩萌, 关生辉. 东营市黄河三角洲湿地保护存在问题及保护对策. 山东国土资源, 2016, 32(3): 56-60.
- [33] 王新艳, 闫家国, 白军红, 崔保山. 黄河口滨海湿地水文连通对大型底栖动物生物连通的影响. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2544-2553.
- [34] 牟奎南, 宫兆宁, 邱华昌. 黄河三角洲潮沟网络形态特征的时空分异规律及其发育过程. 地理学报, 2021, 76(9): 2312-2328.
- [35] Strahler A N. Dynamic basis of geomorphology. Geological Society of America Bulletin, 1952, 63(9): 923-938.
- [36] 李新正, 李宝泉, 王洪法, 王少青, 王金宝, 张宝琳. 南沙群岛渚碧礁大型底栖动物群落特征. 动物学报, 2007, 53(1): 83-94.
- [37] 吕亭豫, 龚政, 张长宽, 耿亮, 张茜. 粉砂淤泥质潮滩潮沟形态特征及发育演变过程研究现状. 河海大学学报: (自然科学版), 2016, 44(2): 178-188.
- [38] 骆梦, 王青, 邱冬冬, 施伟, 宁中华, 蔡燕子, 宋振峰, 崔保山. 黄河三角洲典型潮沟系统水文连通特征及其生态效应. 北京师范大学学报: (自然科学版), 2018, 54(1): 17-24.
- [39] 武亚楠, 王宇, 张振明. 黄河三角洲潮沟形态特征对湿地植物群落演替的影响. 生态科学, 2020, 39(1): 33-41.
- [40] 于小娟, 张仲胜, 薛振山, 宋晓林, 张红日, 武海涛. 1989 年以来 7 个时期黄河三角洲潮沟的形态特征及连通性研究. 湿地科学, 2018, 16(4): 517-523.
- [41] Obolewski K. Macrozoobenthos patterns along environmental gradients and hydrological connectivity of oxbow lakes. Ecological Engineering, 2011, 37(5): 796-805.
- [42] 董芮, 王玉玉, 吕偲, 雷光春, 薛彬林, 陈乾阔. 水文连通性对西洞庭湖大型底栖动物群落结构的影响. 生态学报, 2020, 40(22): 8336-8346.
- [43] 徐嘉仪, 李玉凤, 邱春琦, 刘红玉, 周奕, 宋庆男, 吴涵. 基于水体盐度和水文结构的滨海湿地海陆水文连通性. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1643-1652.
- [44] 伊锋, 李雪艳, 许国纯, 战超, 张俊斌, 董程, 王庆. 潮滩干湿转换的地貌发育物理模型及动力机制. 海洋通报, 2020, 39(3): 372-380.
- [45] 冯久格, 李谦维, 梁晨, 张晓雅, 乐艺, 高俊琴. 基于景观指数的黄河口湿地水文连通动态分析. 北京师范大学学报: (自然科学版), 2021, 57(1): 12-21.
- [46] 张鹏, 邹立, 姚晓, 郭新宇, 高会旺, 山口一岩. 黄河三角洲潮间带营养盐的输送通量研究. 海洋环境科学, 2011, 30(1): 76-80, 104.
- [47] 何大为, 丁廷华, 赵振华. 河水中无机氮化合物转化规律的研究. 环境科学, 1979, (3): 28-32.
- [48] 张晓晓, 姚庆祯, 陈洪涛, 米铁柱, 谭加强, 于志刚. 黄河下游营养盐浓度季节变化及其入海通量研究. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(7): 82-88.
- [49] Bai J H, Wang J J, Yan D H, Gao H F, Xiao R, Shao H B, Ding Q Y. Spatial and temporal distributions of soil organic carbon and total nitrogen in two marsh wetlands with different flooding frequencies of the Yellow River Delta, China. CLEAN-Soil, Air, Water, 2012, 40(10): 1137-1144.
- [50] 刘玉斌, 韩美, 刘延荣, 潘彬, 倪杰. 黄河三角洲土壤盐分养分空间分异规律研究. 人民黄河, 2018, 40(2): 76-80, 87.
- [51] 李新正, 李宝泉, 王洪法, 王金宝, 张宝琳. 胶湾潮间带大型底栖动物的群落生态. 动物学报, 2006, 52(3): 612-618.
- [52] 蔡立哲, 马丽, 高阳, 郑天凌, 林鹏. 海洋底栖动物多样性指数污染程度评价标准的分析. 厦门大学学报: 自然科学版, 2002, 41(5): 641-646.
- [53] 胡知渊, 鲍毅新, 葛宝明, 李欢欢. 围垦滩涂潮沟秋季大型底栖动物群落和生态位分析. 动物学报, 2006, 52(4): 800-809.
- [54] Xu Y, Sui J X, Ma L, Li X Z, Wang H F, Zhang B L. Temporal variation of macrobenthic community zonation over nearly 60 years and the effects of latitude and depth in the southern Yellow Sea and East China Sea. The Science of the Total Environment, 2020, 739: 139760.
- [55] 龚成, 池仕运, 夏纬, 汪红军, 胡俊, 陈威, 胡菊香. 天鹅洲长江段底栖动物的群落结构与季节变化. 水生态学杂志, 2021, 42(1): 66-74.
- [56] Yin S, Bai J H, Wang X, Wang X Y, Zhang G L, Jia J, Li X W, Liu X H. Hydrological connectivity and herbivores control the autochthonous producers of coastal salt marshes. Marine Pollution Bulletin, 2020, 160: 111638.
- [57] Connell J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs; High diversity of trees and corals is maintained only in a nonequilibrium state. Science, 1978, 199(4335): 1302-1310.
- [58] Pan B Z, Wang H J, Liang X M, Wang H Z. Macrozoobenthos in Yangtze floodplain lakes: patterns of density, biomass, and production in relation to river connectivity. Journal of the North American Benthological Society, 2011, 30(2): 589-602.
- [59] 潘保柱, 王海军, 梁小民, 王宗兴, 舒凤月, 王洪铸. 长江故道底栖动物群落特征及资源衰退原因分析. 湖泊科学, 2008, 20(6): 806-813.
- [60] Obrdlik P, Fuchs U. Surface water connection and the macrozoobenthos of two types of floodplains on the upper Rhine. Regulated Rivers: Research & Management, 1991, 6(4): 279-288.
- [61] Tockner K, Schiemer F, Baumgartner C, Kum G, Weigand E, Zweimüller I, Ward J V. The Danube restoration project: species diversity patterns

- across connectivity gradients in the floodplain system. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1999, 15(1/2/3): 245-258.
- [62] 张舒怡, 何雪宝, 王建军, 林和山, 黄雅琴, 林俊辉, 牟剑锋, 刘坤, 郑成兴. 福建洛阳河口潮间带大型底栖甲壳动物群落及其功能群研究. *生态学报*, 2017, 37(18): 5961-5972.
- [63] 王天慈, 王芳, 渠晓东. 中国典型河口湿地底栖动物优势类群比较. *中国环境监测*, 2021, 37(3): 134-150.
- [64] 刘春云, 姜少玉, 宋博, 闫朗, 张建设, 李宝泉, 陈琳琳. 烟台养马岛潮间带大型底栖动物食物网结构特征. *海洋与湖沼*, 2020, 51(3): 467-476.
- [65] Larsen S, Karaus U, Claret C, Sporka F, Hamerlik L, Tockner K. Flooding and hydrologic connectivity modulate community assembly in a dynamic river-floodplain ecosystem. *PLoS One*, 2019, 14(4): e0213227.
- [66] Obolewski K. Composition and density of plant-associated invertebrates in relation to environmental gradients and hydrological connectivity of wetlands. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 2011, 40(4): 52-63.
- [67] Liu J K, Engel B A, Wang Y, Zhang G F, Zhang Z M, Zhang M X. Multi-scale analysis of hydrological connectivity and plant response in the Yellow River Delta. *The Science of the Total Environment*, 2020, 702: 134889.
- [68] Perkin J S, Gido K B, Cooper A R, Turner T F, Osborne M J, Johnson E R, Mayes K B. Fragmentation and dewatering transform Great Plains stream fish communities. *Ecological Monographs*, 2015, 85(1): 73-92.
- [69] Hiatt M, Passalacqua P. Hydrological connectivity in river deltas: the first-order importance of channel-island exchange. *Water Resources Research*, 2015, 51(4): 2264-2282.
- [70] Li X W, Hou X Y, Song Y, Shan K, Zhu S Y, Yu X B, Mo X Q. Assessing changes of habitat quality for shorebirds in stopover sites: a case study in Yellow River Delta, China. *Wetlands*, 2019, 39(1): 67-77.
- [71] Miyata S, Gomi T, Sidle R C, Hiraoka M, Onda Y, Yamamoto K, Nonoda T. Assessing spatially distributed infiltration capacity to evaluate storm runoff in forested catchments: implications for hydrological connectivity. *The Science of the Total Environment*, 2019, 669: 148-159.
- [72] Jiang Y X, Wang Y Z, Zhou D M, Ke Y H, Bai J H, Li W W, Yan J G. The impact assessment of hydro-biological connectivity changes on the estuary wetland through the ecological restoration project in the Yellow River Delta, China. *The Science of the Total Environment*, 2021, 758: 143706.
- [73] 董芮. 水文连通性对西洞庭湖大型底栖动物群落的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [74] Wang H Z, Xu Q Q, Cui Y D, Liang Y L. Macrozoobenthic community of Poyang Lake, the largest freshwater lake of China, in the Yangtze floodplain. *Limnology*, 2007, 8(1): 65-71.