

DOI: 10.5846/stxb201901100087

芦康乐, 杨萌尧, 武海涛, 管强, 张科. 黄河三角洲芦苇湿地底栖无脊椎动物与环境因子的关系研究——以石油开采区与淡水补给区为例. 生态学报, 2020, 40(5): 1637-1649.

Lu K L, Yang M Y, Wu H T, Guan Q, Zhang K. Composition of benthic invertebrate communities in reed (*Phragmites australis*) wetlands of the Yellow River Delta: Comparisons between oil exploitation and freshwater recharge areas. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1637-1649.

黄河三角洲芦苇湿地底栖无脊椎动物与环境因子的关系研究

——以石油开采区与淡水补给区为例

芦康乐^{1,2}, 杨萌尧^{1,3}, 武海涛^{1,*}, 管强^{1,2}, 张科¹

1 中国科学院湿地生态与环境重点实验室/中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 浙江农林大学环境与资源学院, 杭州 311300

摘要: 分别于 2018 年 5 月和 8 月对黄河三角洲芦苇湿地 19(淡水补给区 11 处, 石油开采区 8 处)处采样点的底栖无脊椎动物和水体理化指标进行调查采样, 运用统计方法分析两个区域物种组成、优势种、多样性、群落结构以及与环境因子的关系。结果表明: 两季共采集到底栖无脊椎动物 54 种, 主要以水生昆虫、腹足纲和软甲纲为主, 淡水补给区和石油开采区各类群组成差异明显。独立样本 T 检验表明淡水补给区和石油开采区水体理化指标间差异显著 ($P < 0.05$)。双因子方差分析显示, 昆虫纲和腹足纲密度在两区域差异显著 ($P < 0.05$), 软甲纲和腹足纲密度在季节上差异明显 ($P < 0.05$)。底栖无脊椎动物优势种共 10 种, 淡水补给区指示物种 8 种, 而石油开采区未发现有指示物种。聚类和非参数多维排序 (nMDS) 显示, 底栖无脊椎动物群落结构相似性较低; RDA 结果表明: 淡水补给区底栖无脊椎动物群落结构主要受 Cond, TDS, Sal, pH, Eh, HCO_3^- , SO_4^{2-} 等环境因子的影响。石油开采区底栖无脊椎动物群落结构影响较大的环境因子为 HCO_3^- 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 。

关键词: 底栖无脊椎动物; 群落结构; 环境因子; 典范对应分析; 黄河三角洲

Composition of benthic invertebrate communities in reed (*Phragmites australis*) wetlands of the Yellow River Delta: Comparisons between oil exploitation and freshwater recharge areas

LU Kangle^{1,2}, YANG Mengyao^{1,3}, WU Haitao^{1,*}, GUAN Qiang^{1,2}, ZHANG Ke¹

1 Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China

Abstract: The benthic invertebrates and environmental factors were sampled and analyzed in May and August, 2018 from 19 sites of reed wetlands (11 freshwater recharge areas and 8 oil exploitation areas) in the Yellow River Delta. Multivariate analysis methods were used to analyze the composition, dominant species, biodiversity, community of benthic invertebrate assemblages, as well as their relationships to the environmental factors. The results showed that 54 taxa collected by two samplings were mainly composed by Aquatic Insect, Gastropoda and Mollusca. There are obvious differences in composition

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0505901); 国家青年科学基金项目 (41801084); 吉林省科技发展计划项目 (20180101080JC); 中国博士后科学基金项目 (194419)

收稿日期: 2019-01-10; 网络出版日期: 2019-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wuhaitao@iga.ac.cn

of benthic invertebrates between freshwater recharge and oil exploitation area. Independent-Samples T Test showed that freshwater recharge area and oil exploitation area were significant different in environmental factors ($P < 0.05$). Two-way ANOVA analysis showed that there were significant differences in insect and Gastropoda density between the two regions ($P < 0.05$). The seasonal variations of Mollusca density and Gastropoda density were both significant ($P < 0.05$). Ten species of benthic invertebrates were dominant in the study area. Eight species of benthic invertebrate were tested to be the indicator species in freshwater recharge area, but no indicator species were found in oil exploitation area. Cluster and nMDS analysis indicated the low similarity of the benthic invertebrate community between the freshwater recharge area and oil exploitation area. The RDA results showed that the community structure of benthic invertebrates in freshwater recharge area was mainly affected by Cond, TDS, Sal, pH, Eh, HCO_3^- , SO_4^{2-} and the influential environmental factor in oil exploitation areas were HCO_3^- and $\text{NH}_4\text{-N}$.

Key Words: benthic invertebrate; community structure; environmental factor; CCA; the Yellow River Delta

底栖无脊椎动物是湿地生态系统的一个重要类群,在环境扰动下,底栖无脊椎动物多样性、稳定性和群落结构会发生改变,对外界环境和生态系统的变化响应敏感,是湿地生态系统的良好指示类群^[1-3]。作为湿地食物网的重要环节,既可以取食植物、有机碎屑等,同时又被水鸟、鱼类等高等动物捕食,参与了湿地生态系统的能量流动、物质循环和信息传递,维系着生态系统结构和功能的稳定^[4-5]。是开展一些生态学研究不容忽视的理想生物类群。

黄河三角洲湿地是中国暖温带地区最广阔、最完整的河口新生湿地生态系统,其地理位置独特,孕育着丰富的生物多样性,作为东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙的“中转站、越冬栖息地和繁殖地”,黄河三角洲湿地具有典型的原生性、脆弱性、稀有性以及国际重要性等特征。其中,芦苇(*Phragmites australis*)湿地是其重要的湿地类型。

同时黄河三角洲湿地蕴藏着丰富的油气资源,是我国第二大油田——胜利油田的产油区。油田部分油气资源区与黄河三角洲保护区在地域上交叉严重,湿地保护和石油开发矛盾突出,油区生态环境普遍脆弱。石油开采及其修建的道路造成黄河三角洲芦苇湿地景观破碎化^[6-8],影响了湿地的水文连通性,湿地栖息地逐渐消失,生物多样性降低,湿地生态系统结构和功能面临威胁^[9-10],制约湿地生境完整性和生物多样性的维持^[6,11]。

为了抑制湿地退化,自 2002 年以来黄河三角洲国家自然保护区分批次、有计划地对退化芦苇湿地实施了不同规模的淡水补给工程,以补充湿地淡水资源,改善了湿地生境及生态功能。芦苇湿地通过淡水补给增加了湿地的水文连通,改善了水盐条件,湿地植被和生物得到一定程度的恢复^[5]。

目前,黄河三角洲芦苇湿地相关研究报道多集中于石油开采对湿地植物幼苗生长的影响方面^[12]。有关石油开采活动对该区域底栖无脊椎动物群落结构的研究鲜有报道。本文选择黄河三角洲典型芦苇湿地作为研究对象,通过对石油开采区与淡水补给区底栖无脊椎动物群落调查,来探讨石油开采对黄河三角洲芦苇湿地底栖无脊椎动物群落结构的影响,以期进行湿地恢复时采取科学和有效的恢复措施提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区和调查样点概况

研究区位于黄河三角洲国家级自然保护区内,该区属暖温带大陆性季风气候,年平均气温为 12.3—12.8℃,年降水量为 530—630 mm,降水多集中在夏季,年蒸发量为 1900—2400 mm,属暖温带落叶阔叶林区。柽柳(*Tamarix chinensis*)灌丛、芦苇草甸、翅碱蓬(*Suaeda heteroptera*)群落是该区主要的自然植被类型。其中,我们选择黄河三角洲芦苇湿地 19 处(淡水补给区 11 处,石油开采区 8 处),分别于 2018 年 5 月和 10 月进行了底栖无脊椎动物和水体理化指标的采集,采样点示意图见图 1。

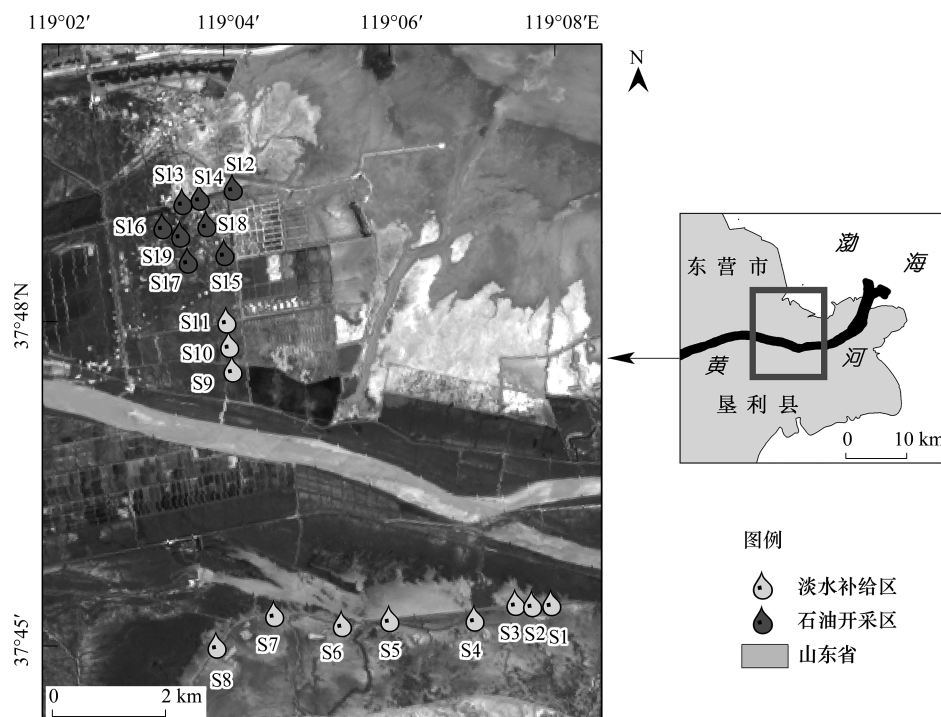


图1 黄河三角洲芦苇湿地采样点位示意图

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

S: 样点, Site

1.2 样品采集与理化指标测定

在研究区 19 处样点,采用 1 mm 网眼、直径为 35 cm 的 D 型网采集底栖无脊椎动物。在每处样点,随机选取 4 个点,从水体内部向岸边垂直拖动 D 型网 1 m,保持 D 型网底部与湿地基底表面接触。将每个样点 4 个点的样品混合为一个样品,倒入贴有标签的塑料袋中,加入 95% 酒精固定,带回实验室。在实验室中,参照相关文献^[13-15],对样品进行分离、鉴定,水生昆虫和软体动物鉴定至属或种;甲壳纲、多毛类、寡毛类鉴定至科,记录各分类单元的个体数量。并统计 1 m×0.35 m 面积内的底栖无脊椎动物数量。

水体理化指标采用现场测定和实验室分析相结合的方法。采用便携式水质分析仪(YSI-556MPS, USA)现场测定了采样点水体的 pH、电导率、盐度、溶解氧等,并采集 1 L 混合水样,带回实验室。在实验室中,参照《地表水环境质量标准》^[16]中的方法,测定水样中的总氮、硝态氮、氨氮等含量。

1.3 优势种和多样性分析

采用物种优势度指数(Y)确定底栖无脊椎动物优势物种,采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 物种丰富度指数(d_M)和 Pielou 均匀度指数(J)对物种多样性进行分析,计算公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^s (n_i/N) \ln(n_i/N)$$

$$d_M = (S - 1) / \ln N$$

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

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i$$

式中, f_i 表示第 i 种在各采样点的出现频率, n_i 表示第 i 种的个体数, N 表示样品中总个体; S 表示样品的种类总数;当 $Y > 0.02$ 时,定为优势种^[17]。

1.4 统计分析

底栖无脊椎动物与水环境因子的排序分析在 Canoco for windows 4.5 软件包上进行。进入排序的底栖无脊椎动物要经过筛选,出现频率在 15%以上的物种才予以考虑^[18]。分析前对物种数据及水环境数据(除 pH 外)进行 $\log(x+1)$ 转换,对转换后的数据矩阵进行 DCA 分析,若 DCA 分析结果中最大的梯度长度大于 4.0,则使用 CCA 单峰模型分析,小于 3.0 则使用 RDA 线性模型分析,介于 3.0—4.0 之间两者均可^[19]。底栖无脊椎动物物种相似性聚类分析和非参数多维尺度分析在 PRIMER 7.0^[20] 软件中进行;利用 PCORD 5 进行指示物种筛选与分析;方差分析在 SPSS 19.0 进行;Excel 2010 进行基础数据处理与统计。

2 结果与分析

2.1 底栖无脊椎动物组成

2018 年春季(5 月)和夏季(8 月)两季共采集底栖无脊椎动物 3659 头,经鉴定,共有 54 个分类单元,隶属 3 门 4 纲 14 目 40 科(表 2)。主要以水生昆虫、腹足纲和软甲纲为主,分别占总分类单元数的 57.41%、25.93% 和 14.81%。昆虫纲 6 目 22 科 31 种,其中鞘翅目 6 科 10 种、双翅目 9 科 12 种、蜻蜓目 3 科 5 种;软体动物 1 纲 3 目 10 科,主要为腹足纲;环节动物主要为多毛纲。其中,春季采集底栖无脊椎动物 1249 头,共 38 个分类单元,夏季采集底栖无脊椎动物 2365 头,共 39 个分类单元,两季有 23 个共同分类单元(表 2)。

春季在淡水补给区采集鉴定底栖无脊椎动物 3 门 4 纲 10 目 32 科 40 种,石油开采区 3 门 4 纲 9 目 16 科 24 种;夏季在淡水补给区采集鉴定底栖无脊椎动物 2 门 3 纲 12 目 29 科 37 种,石油开采区 2 门 3 纲 9 目 15 科 18 种。淡水补给区和石油开采区各类群组成见图 2。

表 2 底栖无脊椎动物名录

Table 2 List of benthic invertebrates species

编号 No.	分类单元 Taxa	春季 Spring	夏季 Summer	编号 No.	分类单元 Taxa	春季 Spring	夏季 Summer
	节肢动物门 Arthropoda				半翅目 Hemiptera		
	昆虫纲 Insecta			sp28	负子蝽科 Belostomatidae	+	++
	鞘翅目 Coleoptera			sp29	划蝽科 Corixidae	+++	+++
	水龟甲科 Hydrophilidae				蜉蝣目 Ephemeroptera		
sp1	<i>Berosus</i> sp.	+	—	sp30	细蜉属 <i>Caenis</i> sp.	+	+++
sp2	<i>Enochrus</i> sp.	+	—		毛翅目 Trichoptera		
sp3	<i>Laccobius</i> sp.	+	+	sp31	径石蛾科 Ecnomidae	+	—
sp4	<i>hydrochus</i> sp.	+	+		软甲纲 Malacostraca		
sp5	<i>Hydrobius</i> sp.	+	—	sp32	窄异跳钩虾 <i>Allorchestes angustus</i>	—	+++
	龙虱科 Dytiscidae			sp33	秀丽白虾 <i>Palaemon modestus</i>	—	++
sp6	<i>Ilybius</i> sp.	+	+	sp34	葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i>	—	++
sp7	隐翅甲科 Staphylinidae	+	—	sp35	锯齿长臂虾 <i>Palaemon serrifer</i>	—	++
sp8	沼甲科 Scirtidae	+	—	sp36	中国毛虾 <i>Acetes chinensis</i>	—	+++
sp9	沼梭科 Haliplidae	+	—	sp37	鼠妇属 <i>Porcellio</i> sp.	++	+++
sp10	象甲科 Curculionidae	—	+	sp38	中华急游水虱 <i>Tachaea chinensis</i>	+	+
	双翅目 Diptera			sp39	浪飘水虱属 <i>Ciolaridae</i> sp.	—	+
sp11	长足虻科 Dolichopodidae	+	—		环节动物门 Annelida		
	摇蚊科 Chironomidae				多毛纲 Polychaeta		
sp12	长足摇蚊亚科 <i>Tanypodinae</i> sp.	+++	+	sp40	小头虫科 Capitellidae	+	—
sp13	伪长足摇蚊属 <i>Psectrotanypus</i> sp.	+	—		角吻沙蚕科 Goniadidae		
sp14	摇蚊亚科 <i>Chironominae</i> sp.	++	++	sp41	寡节甘吻沙蚕 <i>Phyllodoceimorpha</i>	+	—
sp15	直突摇蚊亚科 <i>Orthocladiinae</i> sp.	—	+		软体动物门 Mollusca		
sp16	大蚊科 Tipulidae	+	+		腹足纲 Gastropoda		

续表

编号 No.	分类单元 Taxa	春季 Spring	夏季 Summer	编号 No.	分类单元 Taxa	春季 Spring	夏季 Summer
sp17	蚊科 Culicidae	—	+	sp42	尖口圆扁螺 <i>Hippeutis cantori</i>	+++	+++
sp18	水虻科 Stratiomyidae	+	++	sp43	凸旋螺 <i>Gyraulus convexusculus</i>	++	+
sp19	虻科 Tabanidae	+	+	sp44	萝卜螺属一种 <i>Radix</i> sp	+++	++
sp20	螻蛄科 Ceratopogonidae	+	+	sp45	绯拟沼螺 <i>Assiminea latericea</i>	—	+
sp21	水蝇科 Ephydriidae	++	++	sp46	光滑狭口螺 <i>Stenothyra glabra</i>	+	++
sp22	蝇科 Muscidae	+	—	sp47	蚯蚓螺科一种 <i>Siliquariidae</i> sp.	+	—
	蜻蜓目 Odonata			sp48	多齿砂螺 <i>Gastrocopta armigerella</i>	—	+
sp23	伪蜉科 Corduliidae	+	+	sp49	钉螺 <i>Oncomelania hupensis</i>	—	+
sp24	蜻科 Libellulidae	++	+	sp50	狭长琥珀螺 <i>Succinea feifferi</i>	—	++
	螳科 Coenagrionidae			sp51	展开琥珀螺 <i>Succinea evoluta</i>	—	++
sp25	<i>Cercion</i> sp.	+++	++	sp52	琥珀螺一种 <i>Succinea</i> sp.	+	—
sp26	<i>Enallagma</i> sp.	++	+++	sp53	小恰里螺 <i>Kaliella minuta</i>	—	+
sp27	<i>Agriocnemis</i> sp.	+	+	sp54	<i>Pupilla</i> sp.	—	+

+++为个体数占总数的5%以上; ++为个体数占总数的1%—5%; +为个体数占总数的1%以下; —表示为未见

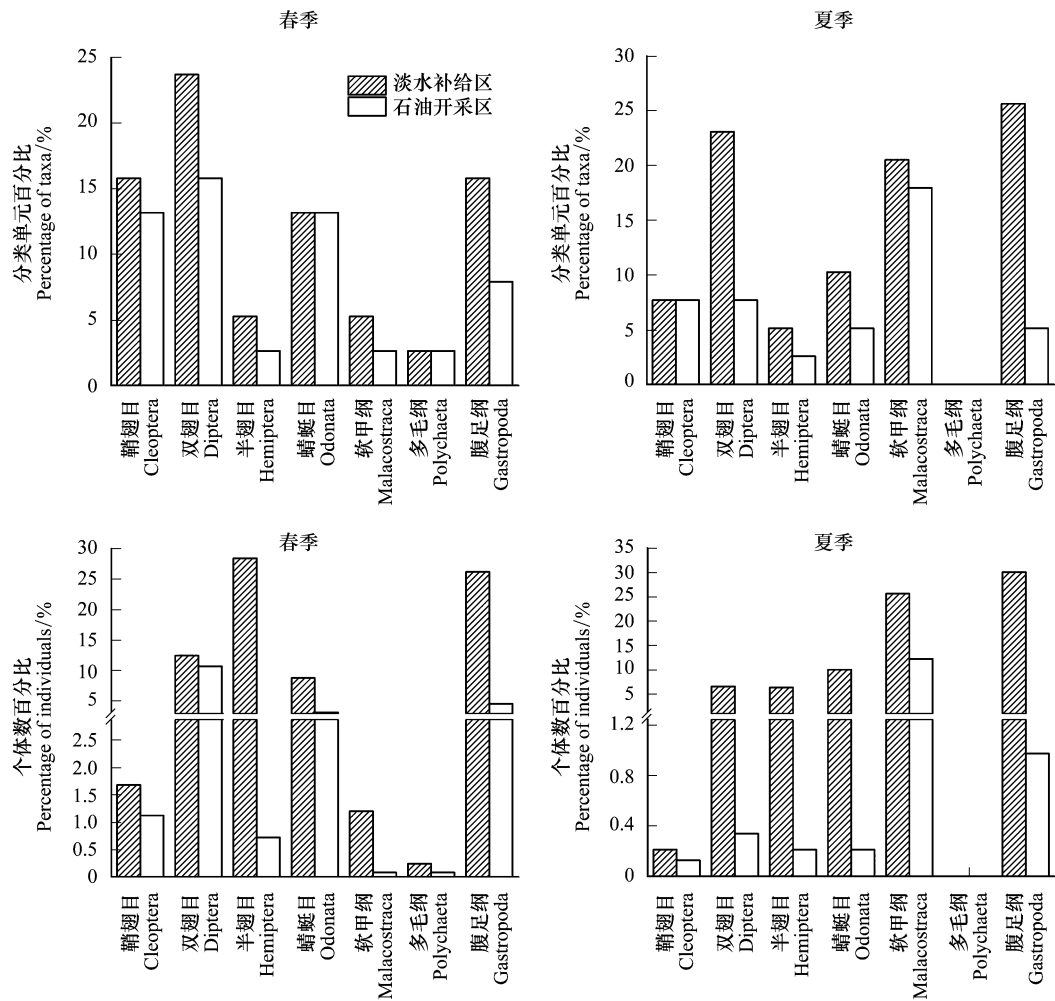


图 2 2018 年春季和夏季淡水补给区和石油开采区底栖无脊椎动物群落结构组成
Fig.2 Benthic invertebrate community structure in spring and summer of 2018

2.2 水体理化特征

根据国家《地表水环境质量标准》^[16],对水体理化因子进行评价,pH 值最高达 8.96,TN 最高达 2.16 mg/L,盐度最高达 30.20 ppt;DO 的含量介于 6.57—10.59 mg/L,氨氮含量介于 0—0.98 mg/L。其中 TN 的最大值远大于国家地表水质量标准 V 类水标准值;根据美国环境保护总署(EPA)^[21],盐度平均值显示,淡水补给区为寡盐度(盐度介于 0.5—5 ppt)水域,而石油开采区为中盐度(5—18 ppt)水域。独立样本 T 检验表明,淡水补给区和石油开采区在 Cond、TDS、Sal、TN、SO₄²⁻、NO₃-N、NH₄-N 等水体理化指标差异显著(图 3, $P<0.05$)。

2.3 底栖无脊椎动物密度及优势种

黄河三角洲芦苇湿地底栖无脊椎动物平均密度为 65.51±46.34 个/m²,其中,水生昆虫平均密度为(29.70±24.66)个/m²,腹足纲平均密度(20.92±23.49)个/m²,软甲纲平均密度(14.81±15.57)个/m²,其他类群平均密度较小。双因子方差分析结果显示,底栖无脊椎动物物种密度在 2 个区域及 2 个采样季节间均不存在显著差异,但昆虫纲和腹足纲密度在各区域差异显著,软甲纲和腹足纲密度季节差异显著,且腹足纲密度在区域和季节上都差异显著(表 3, $P<0.05$)。

不同季节出现的优势物种不同,且同一优势物种在不同季节上的优势度也不同(表 4)。底栖无脊椎动物优势物种共 10 种。其中春季优势物种为长足摇蚊亚科 1 种 *Tanypodinae* sp. ($Y = 0.105$),划蝽科 1 种

表 3 各类群底栖无脊椎动物密度及双因子方差分析

Table 3 Density of benthic invertebrates and two-way ANOVA for testing of sampling site and season

样区 Area	季节 Season	昆虫纲 Insecta	软甲纲 Malacostraca	腹足纲 Gastropoda	其他 Others	总计 Total
淡水补给区	春季 Spring	41.21±29.39	0.97±1.30	21.23±26.11	0.19±0.62	64.61±49.19
Freshwater recharge areas	夏季 Summer	46.3±39.47	39.42±33.53	46.17±35.31	—	131.88±74.84
石油开采区	春季 Spring	17.5±18.05	0.09±0.24	5±11.90	0.09±0.24	22.68±22.72
Oil exploitation areas	夏季 Summer	1.88±3.13	29.40±28.66	2.05±4.64	—	29.82±29.56
双因子方差分析(P 值)Two-way ANOVA (P-value)						
样区 Area		0.001	0.360	0.007	0.666	<0.001
季节 Season		0.554	<0.001	0.047	0.249	0.044
样区×季节 Area×Season		0.314	0.421	0.021	0.666	0.100

—:无数据;黑体字表示存在差异显著($P<0.05$)

表 4 淡水补给区和石油开采区各季节优势物种及优势度

Table 4 Dominant species and dominance degree in freshwater recharge and oil exploitation area in different seasons

优势种 Dominant species	淡水补给区 Freshwater recharge areas		石油开采区 Oil exploitation areas	
	春季 Spring	夏季 Summer	春季 Spring	夏季 Summer
长足摇蚊亚科 1 种 <i>Tanypodinae</i> sp.	0.089		0.148	
摇蚊亚科 1 种 <i>Chironominae</i> sp.			0.024	
划蝽科 1 种 <i>Corixidae</i> sp.	0.226	0.057		
细蟚蛄属 1 种 <i>Caenis</i> sp.		0.051		
<i>Cercion</i> sp.	0.048			
<i>Enallagma</i> sp.		0.090		
窄异跳钩虾 <i>Allorchestes angustus</i>		0.031		0.095
葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i>				0.045
中国毛虾 <i>Acetes chinensis</i>		0.074		0.290
鼠妇属 1 种 <i>Porcellio</i> sp.		0.039		
萝卜螺属 1 种 <i>Radix</i> sp.	0.107	0.027		
尖口圆扁螺 <i>Hipppeutis cantori</i>	0.100	0.138	0.072	
狭长琥珀螺 <i>Succinea feifferi</i>		0.036		
钉螺 <i>Oncomelani ahupensis</i>				0.025

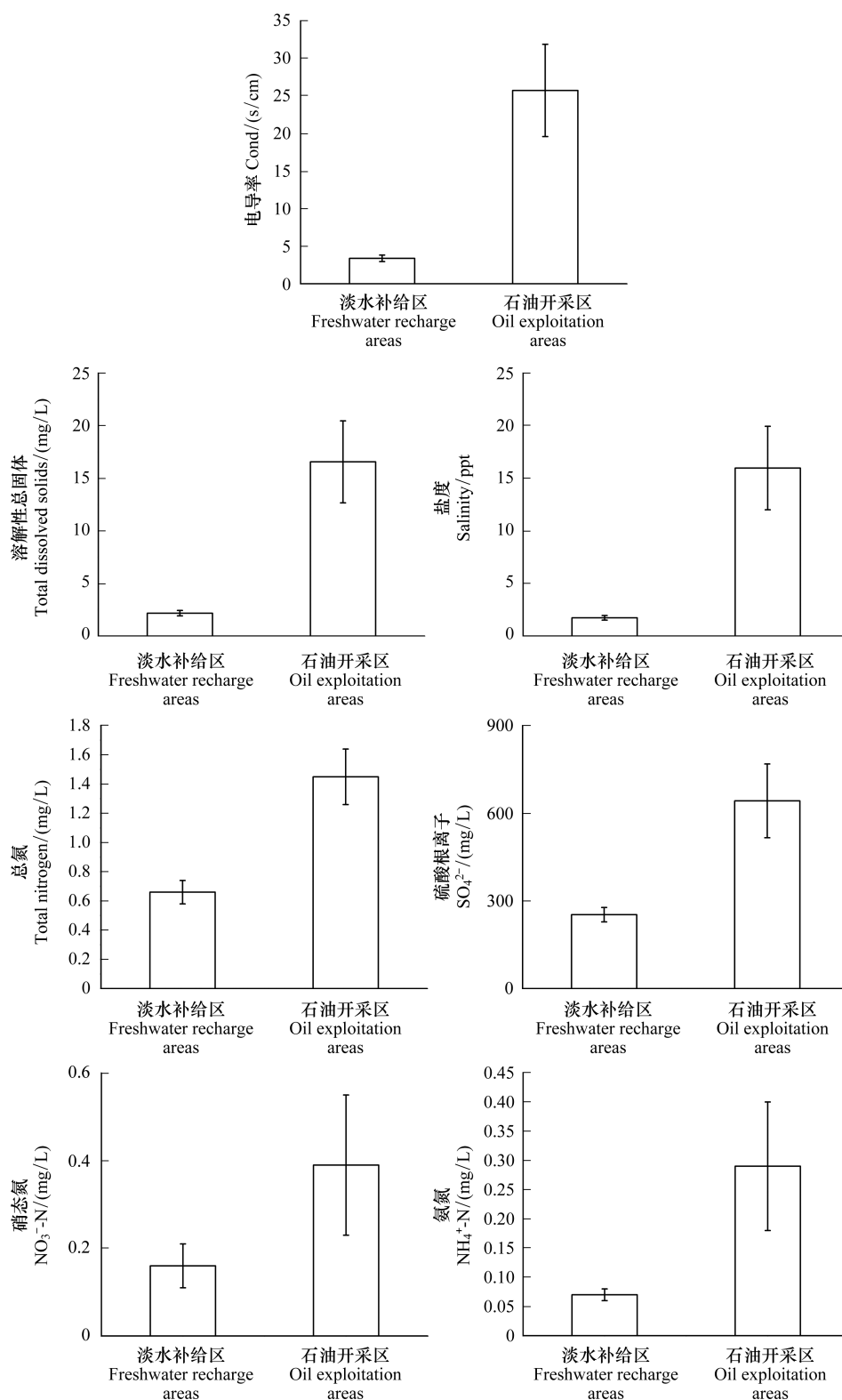


图3 淡水补给区和石油开采区具有显著差异的水体理化指标(平均值±标准误差)

Fig.3 Significant difference of water environmental factor between freshwater recharge and oil exploitation area (Average±SE)

Corixidae sp. ($Y = 0.138$), 螳科 1 种 *Cercion* sp. ($Y = 0.031$), 尖口圆扁螺 *Hippeutiscantori* ($Y = 0.055$), 萝卜螺属 1 种 *Radix* sp. ($Y = 0.090$); 夏季优势种为细蟚蛄属 1 种 *Caenis* sp. ($Y = 0.026$), 划蝽科 1 种 *Corixidae* sp.

($Y = 0.044$), 螳科一种 *Enallagma* sp. ($Y = 0.054$), 窄异跳钩虾 *Allorchestes angustus* ($Y = 0.040$), 鼠妇属 1 种 *Porcellio* sp. ($Y = 0.025$), 中国毛虾 *Acetes chinensis* ($Y = 0.106$), 尖口圆扁螺 *Hippeutis cantori* ($Y = 0.076$)。夏季出现优势种多于春季, 表明夏季底栖无脊椎动物群落结构相对较为复杂。淡水补给区和石油开采区各季节优势物种及优势度见表 4, 其中淡水补给区主要以水生昆虫和腹足纲的螺类为主, 而石油开采区主要以摇蚊和软甲纲的虾类为主。

2.4 底栖无脊椎动物多样性

生物多样性是衡量生态系统环境状态的重要评价参数。黄河三角洲芦苇湿地底栖无脊椎动物种类数 (S)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Margalef 物种丰富度指数 (d_M) 在不同区域间差异均显著 (S : $P < 0.001$; d_M : $P < 0.001$; H' : $P < 0.001$), 而季节间差异不显著 ($P > 0.05$)。黄河三角洲芦苇湿地 2 个湿地区中, 淡水补给区种类数显著大于石油开采区。Margalef 物种丰富度指数 (d_M)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 的大小均为淡水补给区大于石油开采区 (图 4)。

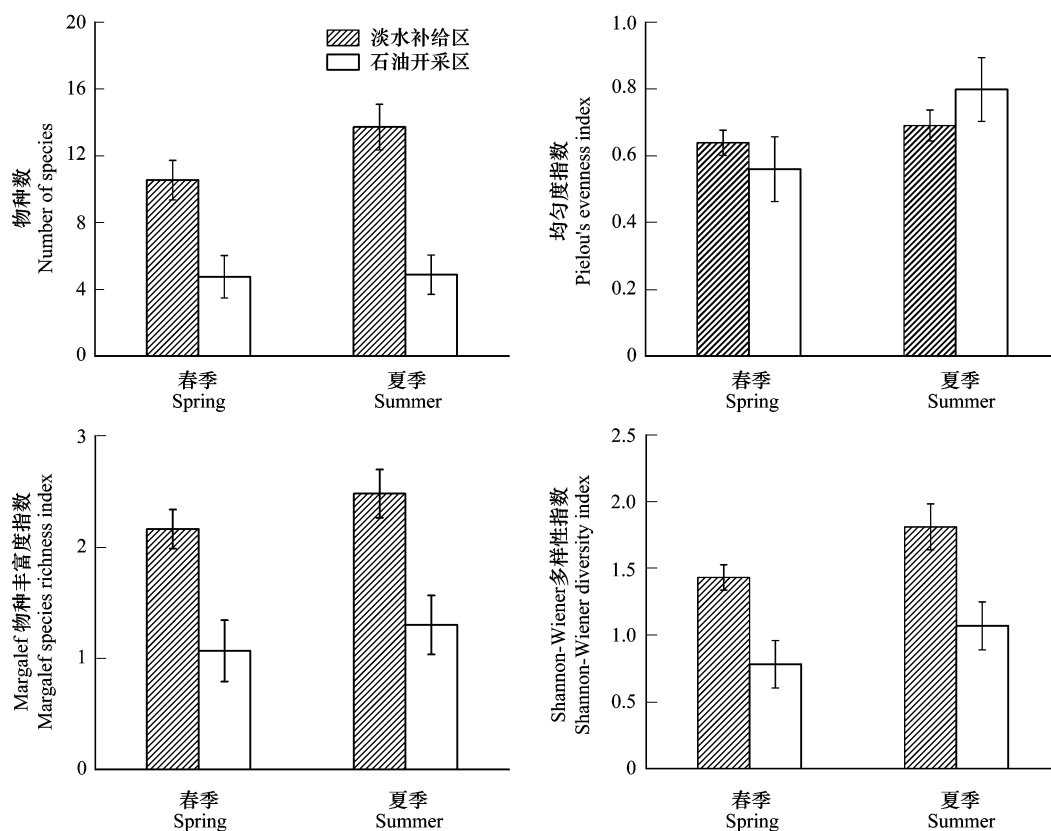


图 4 各季节底栖无脊椎动物多样性指数 (平均值±标准误差)

Fig. 4 Four diversity index of benthic invertebrates in different Season (Average±SE)

2.5 底栖无脊椎动物群落聚类分析和指示物种筛选

依据聚类结果得到 nMDS 图, 拟合度 (2D stress) 为 0.16。nMDS 分析表明, 研究区内各样点底栖无脊椎动物群落结构相似性较低。以 35% 的相似度划分 (图 5), 淡水补给区 S1—S8 为一组; 淡水补给样点 S9、S10、S11 和石油开采区样点 S15、S17 为一组, 剩余的石油开采区样点 S13、S16、S18 和 S19 组合为不同一组, 表明总体上淡水补给区的底栖无脊椎动物群落组成与石油开采区之间有较明显的差异。指示物种分析表明: 8 种底栖无脊椎动物物种为淡水补给区的指示物种 ($P < 0.05$), 石油开采区未发现有指示物种 (表 5)。

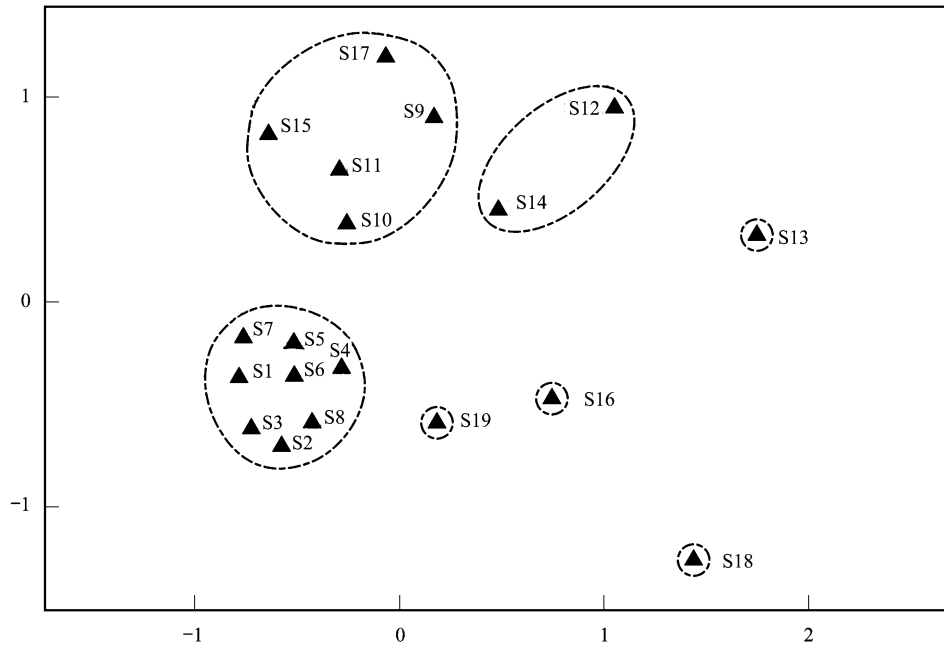


图 5 淡水补给区和石油开采区芦苇湿地底栖无脊椎动物集合的非度量多维标度标序图

Fig.5 nMDS ordination of benthic invertebrates abundance (Bray-Curtis similarity) found in reed wetlands

S1—S11 为淡水补给区样点,S12—S19 为石油开采区样点

表 5 不同区域芦苇湿地的底栖无脊椎动物指示物种

Table 5 Indicator species of different types of reed wetlands

样区 Area	物种 Species	指示值 Indicators values	P
淡水补给区 Freshwater recharge areas	水虻科 1 种 <i>Stratiomyidae</i> sp.	56.7	0.0356
	细蜉属 1 种 <i>Caenis</i> sp.	69.6	0.0064
	划蝽科 1 种 <i>Corixidae</i> sp.	86.9	0.0002
	<i>Leucorrhinia</i> sp.	57.6	0.0332
	<i>Cercion</i> sp.	65.9	0.0176
	<i>Enallagma</i> sp.	75.7	0.0020
	尖口圆扁螺 <i>Hippeutis cantori</i>	92.9	0.0004
	光滑狭口螺 <i>Stenothy raglabra</i>	63.6	0.0110
石油开采区 Oil exploitation areas	—	—	—

—:无数据

2.6 底栖无脊椎动物与环境因子的关系

运用 Canoco 4.5,根据底栖无脊椎动物在样点出现频度 $\geq 15\%$ 的物种和水环境因子进行 CCA 分析。用于 CCA 分析中的物种编号见表 1。结果显示淡水补给区最大梯度长度为 2.236,石油开采区最大梯度长度为 2.661,均小于 3,因此选择 RDA 分析。表 6 为 RDA 分析的统计信息。结果显示,淡水补给区前两轴的特征值分别为 0.352 和 0.173,共解释了底栖无脊椎动物群落变异程度的 52.5%,石油开采区前两轴的特征值分别为 0.315 和 0.254,共解释了底栖无脊椎动物群落变异程度的 56.8%,物种和环境因子相关系数都达到 1,表明排序能够较好地反映物种与水环境因子间的关系。

淡水补给区底栖无脊椎动物群落结构主要受 Cond、TDS、Sal、pH、Eh、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 等环境因子的影响。其中,pH、Eh、 HCO_3^- 均与轴 1 呈负相关,相关系数分别为-0.7786、-0.8214、-0.562; Cond 、TDS、Sal、 SO_4^{2-} 与轴 1 呈正相关,相关系数分别为 0.6481、0.6675、0.6807、0.5061。石油开采区底栖无脊椎动物群落结构影响较大的环

境因子为 HCO_3^- 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 。其中, HCO_3^- 与轴 2 呈负相关, 相关系数分别为 -0.6396 ; $\text{NH}_4\text{-N}$ 与轴 2 呈正相关, 相关系数为 0.8847 。

表 6 淡水补给区和石油开采区底栖无脊椎动物 RDA 分析的统计信息
Table 6 Summary statistics for the axes of RDA of freshwater recharge and oil exploitation area

统计信息 Statistical information 轴 Axes	淡水补给区 Freshwater recharge areas		石油开采区 Oil exploitation areas	
	1	2	1	2
特征值 Eigenvalue	0.352	0.173	0.315	0.254
物种与环境的相关性 Species-environment correlation	1.000	1.000	1.000	1.000
物种-环境变异累计百分数 Cumulative percentage variance of species environment correlation	35.2	52.5	31.5	56.8

图 5 和图 6 分别为淡水补给区和石油开采区物种与水环境因子的 RDA 排序图, 物种在排序图中的位置是所处环境因素综合反映的结果^[22]。由图 5 可知, 底栖无脊椎动物的大部分物种均分布在第二排序轴的左侧, 与 Cond 、 TDS 、 Sal 、 SO_4^{2-} 呈正相关, 与 pH 、 Eh 、 HCO_3^- 等呈负相关。图 6 中, 底栖无脊椎动物的大部分物种均分布在第二排序轴的右侧。与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 呈正相关, 与 HCO_3^- 等呈负相关; 在排序图中位置比较接近的物种 (如图 6 腹足纲和软甲纲部分物种), 表明它们在生态适应性上较为相似, 而同一目下的底栖无脊椎动物各科属对环境的要求也可能存在一定差异, 如图 7 水生昆虫 (尤其蜻蜓目类群) 在排序图中的分布比较分散, 表明不同种类对水环境因子的适应性差异明显, 表现出对生境资源的不同依赖性。

3 讨论

3.1 石油开采对底栖无脊椎动物群落结构的影响

石油开采会对湿地生态系统结构与功能造成了强烈的影响^[23]。目前, 关于石油开采对黄河三角洲芦苇湿地底栖无脊椎动物群落结构影响的研究尚未见报道。不同底栖无脊椎动物类群对于生境选择具有不同的要求^[24], 生境的改变会影响底栖无脊椎动物群落的组成、分布以及多样性^[25]。两季共获取底栖无脊椎动物 54 种, 主要以水生昆虫、腹足纲和软甲纲为主。其中, 淡水补给区发现底栖无脊椎动物 3 门 3 纲 12 目 36 科 49 种, 维持了相对较高的物种多样性; 石油开采区共发现 3 门 4 纲 12 目 24 科 34 种, 石油开采活动带来的一系列人为扰动引起生境破碎化, 切断了湿地间的连通性, 阻碍了底栖无脊椎动物的自然迁移, 同时石油污染物的堆积, 造成了物种多样性的减少和群落结构稳定性的下降。主要表现在石油开采区在底栖无脊椎动物物种数、密度、物种多样性方面均明显低于淡水补给区。nMDS 分析表明, 整体上淡水补给区底栖无脊椎动物群落为一组, 空间异质性较高, 而石油开采区受到不同程度的胁迫, 底栖无脊椎动物群落变异性很大, 没有一个完整的规律。

优势类群主导底栖无脊椎动物群落分布格局^[2], 我们的研究发现, 淡水补给区优势物种组成差异较大, 不同季节出现的优势物种不同, 且同一优势物种在不同季节上的优势度也不同, 一定程度上反映了季节间生境的异质性。而石油开采区主要以摇蚊和软甲纲的虾类为主, 主要是由于湿地受到石油类污染物的影响, 群落物种丰富度和多样性受到直接和间接影响, 摇蚊科常在敏感类群缺失的时候占据优势地位^[26]。指示物种分析表明 8 种底栖无脊椎动物物种为淡水补给区湿地的指示物种 ($P<0.05$), 石油开采区湿地未发现有指示物种的存在, 石油开采活动导致了芦苇湿地栖息地环境的改变, 底栖无脊椎动物的优势种的分布及其生物学特征也存在差异。

3.2 环境因子对底栖无脊椎动物群落分布的影响

CCA 排序图能较好地解释物种与环境因子的关系, 同时能够反映出不同物种在生态习性上的异同。根

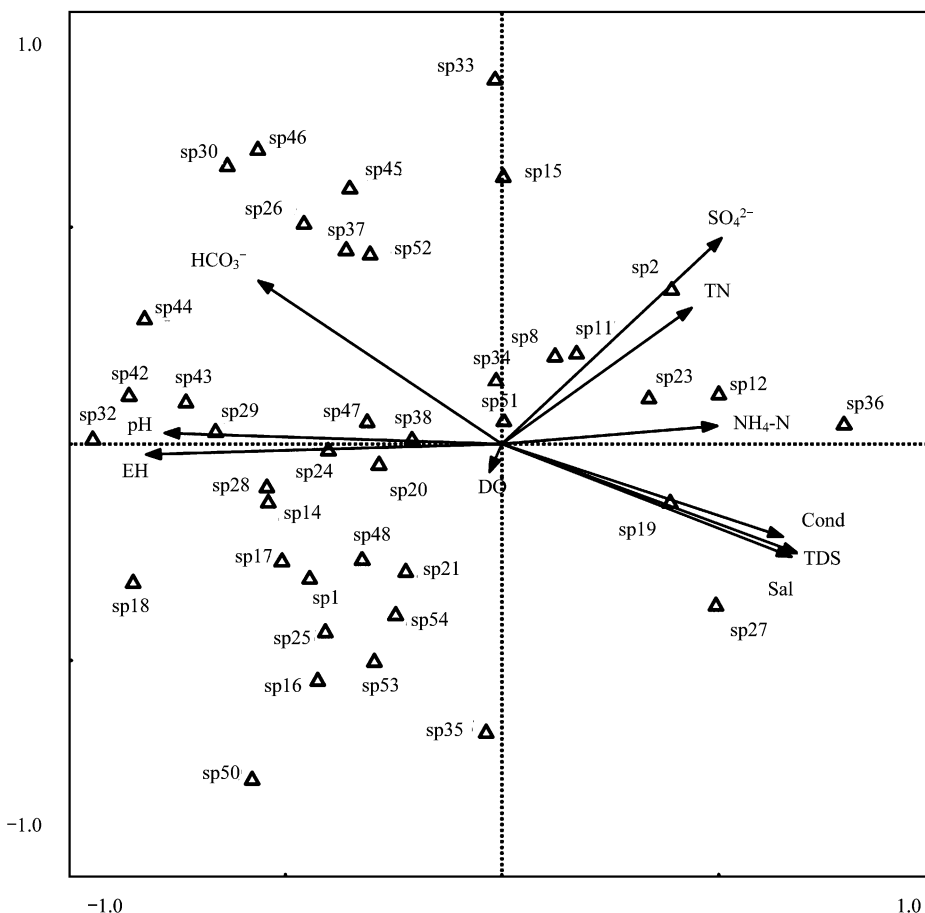


图6 淡水补给区底栖无脊椎动物与环境因子的 RDA 排序图

Fig.6 RDA ordination diagram of benthic invertebrate and environmental factors

Cond: 电导率; TDS: 总溶解固体; Sal: 盐度; DO: 溶解氧; Eh: 氧化还原电位

据底栖无脊椎动物与环境因子的相关性分析,淡水补给区底栖无脊椎动物群落变化主要受 Cond、TDS、Sal、pH、Eh、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 等因子的影响。已有研究表明:电导率可显著影响底栖无脊椎动物类群的空间分布^[27],这与本研究结果较为一致。氮氮作为重要的营养盐指标显著影响着底栖无脊椎动物的物种组成及分布^[28];水体的 pH 是影响底栖无脊椎动物分布的一个主要环境因子,不同的底栖无脊椎动物,其适宜的 pH 不同,因而分布也不同。悬浮物浓度、悬浮颗粒等阻碍了光照,造成水体的初级生产力下降,进而影响了底栖无脊椎动物的生长^[29]。石油开采区底栖无脊椎动物群落变化影响较大的环境因子为 HCO_3^- 、 $\text{NH}_4\text{-N}$,石油开采活动加剧了水体的有机污染程度,进而影响底栖无脊椎动物群落结构,这些环境因子主要以反映水体有机污染程度的指标为主,同样佐证了这一点。

底栖无脊椎动物对环境因子的变化较为敏感^[30],我们的研究也表明:底栖无脊椎动物对淡水补给生境和石油开采生境表现出不同的偏好,每一种环境都支持着一组特定的底栖无脊椎动物群落。且两组生境的多数环境因子间存在显著差异,这可能是导致两组生境底栖无脊椎动物分布差异的关键所在。

CCA 分析结果能较好地解释物种与环境因子的关系,但在整体上却难以区分人类活动与自然环境因子对物种群落结构空间变异贡献的大小。本研究中涉及到的环境因子变量有限,不足以解释物种的大多数变化。RDA 分析结果显示有近 45% 的物种组成和水环境因子间的相关性并未解释。因此,在今后的研究中还要着重考虑底质组成^[31]、植被类型^[32]、样点周围干扰程度^[33]、物种间相互作用^[34]、人类活动强度^[35]等环境变量对底栖无脊椎动物群落结构及其分布的影响,加强黄河三角洲芦苇湿地底栖无脊椎动物与环境因子的调

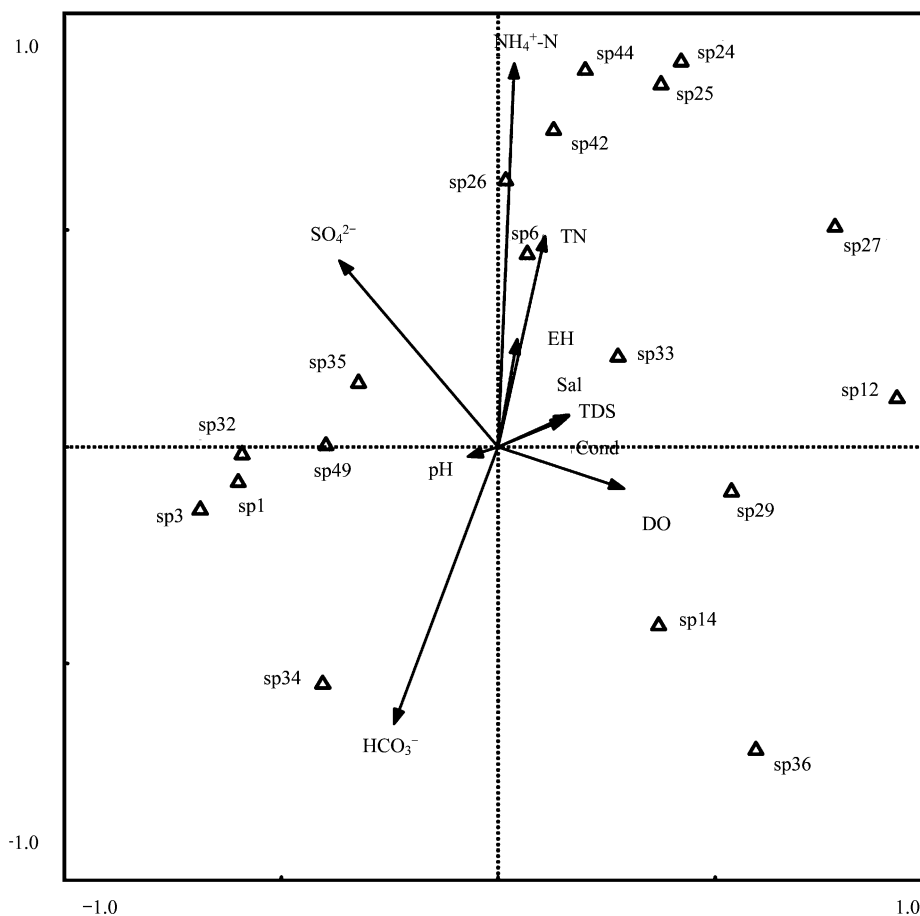


图7 石油开采区底栖无脊椎动物与环境因子的 RDA 排序图

Fig.7 RDA ordination diagram of benthic invertebrate and environmental factors

查、监测及研究。

参考文献 (References):

- [1] Pelletier MC, Gold AJ, Heltshe JF, Buffum HW. A method to identify estuarine macroinvertebrate pollution indicator species in the Virginian Biogeographic Province. *Ecological Indicators*, 2010, 10(5): 1037-1048.
- [2] Murphy JF, Nagorskaya LL, Smith JT. Abundance and diversity of aquatic macroinvertebrate communities in lakes exposed to Chernobyl-derived ionizing radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2011, 102(7): 688-694.
- [3] Wu HT, Guan Q, Lu XG, Batzer DP. Snail (Mollusca: Gastropoda) assemblages as indicators of ecological condition in freshwater wetlands of Northeastern China. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 203-209.
- [4] Wu HT, Batzer DP, Yan XM, Lu XG, Wu DH. Contributions of ant mounds to soil carbon and nitrogen pools in a marsh wetland of Northeastern China. *Applied Soil Ecology*, 2013, 70: 9-15.
- [5] Yang W, Li XX, Sun T, Yang ZF, Li M. Habitat heterogeneity affects the efficacy of ecological restoration by freshwater releases in a recovering freshwater coastal wetland in China's Yellow River Delta. *Ecological Engineering*, 2017, 104: 1-12.
- [6] Hua YY, Cui BS, He WJ, Cui YZ. Identifying potential restoration areas of freshwater wetlands in a river delta. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 438-448.
- [7] Liu XQ, Gippel CJ, Wang HZ, Leigh C, Jiang XH. Assessment of the ecological health of heavily utilized, large lowland rivers: example of the lower Yellow River, China. *Limnology*, 2017, 18(1): 17-29.
- [8] 韩广轩, 牛振国, 栾兆擎, 王光美, 张俪文, 管博. 河口三角洲湿地健康生态圈构建: 理论与方法. *应用生态学报*, 2018, 29(8): 2787-2796.

- [9] Ottinger M, Kuenzer C, Liu GH, Wang SQ, Dech S. Monitoring land cover dynamics in the Yellow River Delta from 1995 to 2010 based on Landsat 5 TM. *Applied Geography*, 2013, 44: 53-68.
- [10] Yang W, Sun T, Yang ZF. Does the implementation of environmental flows improve wetland ecosystem services and biodiversity? A literature review. *Restoration Ecology*, 2016, 24(6): 731-742.
- [11] Wong BBM, Keogh JS, McGlashan DJ. Current and historical patterns of drainage connectivity in eastern Australia inferred from population genetic structuring in a widespread freshwater fish *Pseudomugil signifer* (Pseudomugilidae). *Molecular Ecology*, 2004, 13(2): 391-401.
- [12] 于君宝, 阙兴艳, 王雪宏, 韩广轩, 管博, 谢文军, 林乾新. 黄河三角洲石油污染对湿地芦苇和碱蓬幼苗生长影响的模拟研究. *地理科学*, 2012, 32(10): 1254-1261.
- [13] 刘月英, 张文珍, 王跃先, 王恩义. 中国经济动物志: 淡水软体动物. 北京: 科学出版社, 1979.
- [14] 何志辉, 严生良, 杨和荃. 淡水生物学. 北京: 农业出版社, 1982.
- [15] Morse JC, Yang LF, Tian L. *Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality*. Nanjing: Hohai University Press, 1994.
- [16] 国家环境保护总局. GB3838-2002 地表水环境质量标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] Lampitt RS, Wishner KF, Turley CM, Angel MV. Marine snow studies in the northeast Atlantic Ocean: distribution, composition and role as a food source for migrating plankton. *Marine Biology*, 1993, 116(3): 689-702.
- [18] 王备新, 徐东炯, 杨莲芳, 沈丽娟, 虞晖. 常州地区太湖流域上游水系大型底栖无脊椎动物群落结构特征及其与环境的关系. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(2): 47-51.
- [19] Yu HC, Xian WW. The environment effect on fish assemblage structure in waters adjacent to the Changjiang (Yangtze) River estuary (1998-2001). *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27(3): 443-456.
- [20] Clarke KR, Gorley RN. *PRIMER v7: User Manual/Tutorial*. Plymouth: PRIMER-E, 2015.
- [21] U.S. Environmental Protection Agency. *Estuarine and Coastal Marine Waters: Bioassessment and Biocriteria Technical Guidance*. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, Office of Water, 2000.
- [22] 李喆, 霍堂斌, 唐富江, 王念民. 松花江哈尔滨段冰下浮游生物群落结构与环境因子的相关分析. *水产学杂志*, 2014, 27(6): 44-50.
- [23] Chesney EJ, Baltz DM, Thomas RG. Louisiana estuarine and coastal fisheries and habitats: perspectives from a fish's eye view. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 350-366.
- [24] Oertli B, Indermuehle N, Angélibert S, Hinden H, Stoll A. Macroinvertebrate assemblages in 25 high alpine ponds of the Swiss National Park (Cirque de Macun) and relation to environmental variables. *Hydrobiologia*, 2008, 597(1): 29-41.
- [25] 殷旭旺, 韩洁, 王博涵, 金文, 杨璐, 陈海, 吴丹. 太子河流域底栖动物群落结构及其与环境因子的关系. *水产学杂志*, 2017, 30(3): 40-44.
- [26] 李黎, 王瑜, 林岩璇, 朱延忠, 刘录三. 河流生态系统指示生物与生物监测: 概念、方法及发展趋势. *中国环境监测*, 2018, 34(6): 26-36.
- [27] Miserendino ML. Macroinvertebrate assemblages in Andean Patagonian Rivers and streams: environmental relationships. *Hydrobiologia*, 2001, 444(1/3): 147-158.
- [28] 殷旭旺, 徐宗学, 高欣, 白海锋, 武玮, 宋进喜. 渭河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 218-226.
- [29] 韩洁, 张志南, 于子山. 渤海大型底栖动物丰度和生物量的研究. *青岛海洋大学学报*, 2001, 31(6): 889-896.
- [30] Yamada K, Tanaka Y, Era T, Nakaoka M. Environmental and spatial controls of macroinvertebrate functional assemblages in seagrass ecosystems along the Pacific coast of northern Japan. *Global Ecology and Conservation*, 2014, 2: 47-61.
- [31] 段学花, 王兆印, 程东升. 典型河床底质组成中底栖动物群落及多样性. *生态学报*, 2007, 27(4): 1664-1672.
- [32] 闫云君, 李晓宇, 梁彦龄. 草型湖泊和藻型湖泊中大型底栖动物群落结构的比较. *湖泊科学*, 2005, 17(2): 176-182.
- [33] 张莹, 吕振波, 徐宗法, 刘义豪, 靳洋. 山东半岛南部海湾底栖动物群落生态特征及其与水环境的关系. *生态学报*, 2011, 31(15): 4455-4467.
- [34] Englund G, Sarnelle O, Cooper SD. The importance of data-selection criteria: meta-analyses of stream predation experiments. *Ecology*, 1999, 80(4): 1132-1141.
- [35] Zampella PA, Bunnell JF, Procopio NA, Bryson D E. Macroinvertebrate assemblages in black water streams draining forest land and active and abandoned cranberry bogs. *Wetlands*, 2008, 28(2): 390-400.