

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

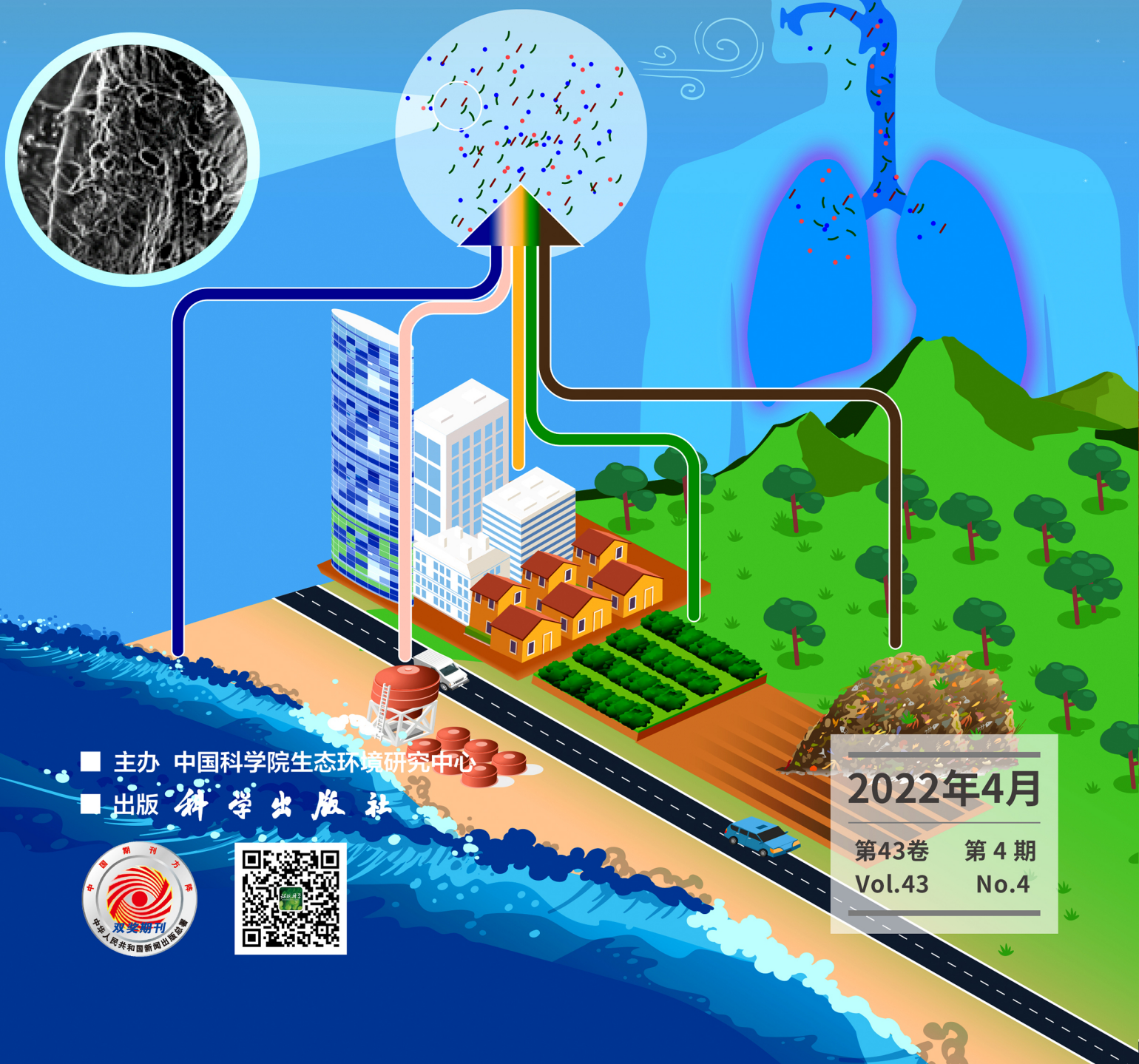
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	《环境科学》征稿简则(1975)
信息(1996, 2029, 2080)	

小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响

张晶晶¹, 王玉珏², 李凡³, 刘珂⁴, 王英¹, 于洋¹, 高彦洁¹, 肖晓彤⁴, 吕振波^{1*}

(1. 鲁东大学滨海生态高等研究院, 烟台 264025; 2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241; 3. 山东省海洋资源与环境研究院, 山东省海洋生态修复重点实验室, 烟台 264006; 4. 中国海洋大学深海圈层与地球系统前沿科学中心, 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 为了明确小清河流域专项治理对莱州湾环境因子和浮游植物群落结构的影响, 于2018年8月(治理后丰水期)对莱州湾近海环境因子、叶绿素 a(Chla)、浮游植物丰度和群落结构空间分布进行了综合调查。结果表明, 小清河进行专项治理后调查海域可溶性无机氮(DIN)、可溶性无机硅(DSi)、NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 浓度明显降低, 仅为临近2017年同期(专项治理前)的40.1%~60.4%; 可溶性无机磷(DIP)和NH₄⁺ 浓度则呈现明显上升趋势, 分别是2017年同期的2.5倍和1.4倍。环境因子空间分布发生明显变化, 小清河河口附近海域营养盐明显降低。浮游植物细胞丰度为21.5 × 10⁶ cell·m⁻³, 与历史同期接近, 但ρ(Chla)(2.43 μg·L⁻¹)明显降低; 镜检法和浮游植物色素分类法均显示, 莱州湾浮游植物群落结构变化明显, 由硅藻占优势转变为硅、蓝藻共同占优势。小清河污染专项治理前莱州湾历史同期常见的旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)和大洋角管藻(*Cerataulina pelagica*)等优势种占比明显降低, 平裂藻(*Merismopedia* sp.)和针杆藻(*Synedra* spp.)等淡水优势种丰度明显升高。冗余分析(RDA)分析显示, 小清河流域专项治理后主要浮游植物类群和优势种与氮营养盐、磷酸盐(负相关)和盐度(负相关)呈现明显的相关关系, 说明河流径流输入营养盐浓度和结构的变化可能是影响浮游植物群落结构主要原因。

关键词: 莱州湾; 环境因子; 浮游植物; 小清河; 污染治理

中图分类号: X834 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-1997-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108128

Effects of Pollution Control of Xiaoqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay

ZHANG Jing-jing¹, WANG Yu-jue², LI Fan³, LIU Ke⁴, WANG Ying¹, YU Yang¹, GAO Yan-jie¹, XIAO Xiao-tong⁴, LÜ Zhen-bo^{1*}

(1. Institute for Advanced Study of Coastal Ecology, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Restoration for Marine Ecology, Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China; 4. Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The spatial distribution of environmental factors, chlorophyll a (Chla), phytoplankton abundance, and community structure in the Laizhou Bay were investigated in August 2018 (wet season after pollution control) to clarify the effects of the pollution control of the Xiaoqing River, which is a major source of pollution, on environmental factors and phytoplankton community structure in this area. The results showed that the environmental factors changed significantly after pollution control of the Xiaoqing River. The concentrations of dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic silicon (DSi), NO₃⁻, and NO₂⁻ decreased significantly, with values only 40.1% to 60.4% of those from the same period of in 2017 (the nearest year before the pollution control), whereas dissolved inorganic phosphorus (DIP) and NH₄⁺ increased by 2.5 and 1.4 times that of their concentrations in 2017. The spatial distribution of environmental factors changed significantly, with the nutrient concentrations around the Xiaoqing River estuary noticeably decreasing. The abundance of phytoplankton cells was 21.5 × 10⁶ cell·m⁻³, which was close to the results of a previous study, whereas the ρ(Chla) was 2.43 μg·L⁻¹, which decreased obviously. Both microscopic analysis and pigment taxonomy suggested that phytoplankton community structure in the Laizhou Bay changed clearly, with the dominant community shifting from diatoms alone to the co-dominance of diatoms and cyanobacteria. *Chaetoceros curvisetus*, *Skeletonema costatum*, and *Cerataulina pelagica*, which were commonly observed in the Laizhou Bay before pollution control of the Xiaoqing River, decreased in 2018, whereas the abundance of common dominant freshwater species (e. g., *Merismopedia* sp. and *Synedra* spp.) increased significantly. Redundancy analysis (RDA) showed that the phytoplankton community was significantly related to nitrogen, phosphate (negative correlation), and salinity (negative correlation) after pollution control of the Xiaoqing River, indicating that the variation in nutrient concentration and the structure of river runoff input may be the main factors affecting phytoplankton community and dominant species structure.

Key words: Laizhou Bay; environmental factors; phytoplankton; Xiaoqing River; pollution control

莱州湾位于渤海南部, 是渤海三大海湾之一, 也是我国最重要的产卵场、索饵场和渔场之一^[1]。莱州湾河网密集, 大量淡水和营养物质的输入使莱州湾海域具有极高的初级生产力和适宜的产卵环境, 其生物发生量和资源补充量对整个渤海海洋生物资源的可持续性具有极其重要的影响^[2~4]。近半个世纪以来, 高氮低磷淡水的持续输入, 使莱州湾可溶性

无机氮显著升高, 营养盐结构失衡; 环境因子的变化显著影响了浮游植物丰度、群落结构及其空间分

收稿日期: 2021-08-12; 修订日期: 2021-08-31

基金项目: 国家自然科学基金-山东省人民政府联合基金项目(U1706219); 国家自然科学基金项目(41776126, 31800011)

作者简介: 张晶晶(1983~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为海洋生态学, E-mail: hpj2006@163.com

* 通信作者, E-mail: ytlvzhenbo@163.com

布^[5-7]. 特别是最近 20 年, 入海河流污染程度加剧, 导致莱州湾水环境不断恶化^[8,9], 赤潮频发, 生物资源持续下降^[10].

小清河是莱州湾无机氮和污染物的主要来源^[11], 其入海口位于莱州湾西南部海岸凹陷处, 海水交换弱, 陆源营养物质入海后难以向海外扩散^[12], 截至到 2017 年, 小清河河口附近海域已连续 8 a 的四季均出现劣 4 类水质区^[13]. 持续呈现高营养盐状态, 使该区域浮游植物生物量明显高于莱州湾内其它区域, 且生物多样性低, 是赤潮频发的区域^[14,15], 也是莱州湾污染治理的重点区域. 为了彻底解决该区域生态环境的问题, 在“清河行动”的基础上, 山东省于 2018 年对小清河流域开展专项治理, 清除主要干支流两侧影响水环境的排污口、垃圾堆、违法鱼塘和畜禽养殖场等, 改善干支流水质, 严控入海总氮. 专项治理后, 小清河入海口羊口监测站水质得到明显改善, 主要污染物浓度呈现下降趋势^[16], 但小清河专项治理及入海总氮控制对莱州湾环境和浮游植物的影响尚不可知.

为了摸清小清河污染专项治理对莱州湾生态环境的影响, 本研究在 2018 年 8 月 (治理后丰水期) 对莱州湾海域环境因子和浮游植物进行了跟踪调查, 分析了莱州湾环境因子、叶绿素 a (Chla) 和浮游植物群落空间分布特征, 通过与历史同期数据进行对比, 探讨了小清河流域治理后莱州湾水环境和浮游植物群落结构变化特征, 并结合冗余分析 (RDA) 对莱州湾浮游植物和水环境的关系进行考察, 分析了驱动浮游植物变化的关键环境因子, 揭示入海河流污染防治对莱州湾水环境和浮游植物群落的影响, 以为莱州湾海域生态环境保护和渤海综合治理提供重要基础资料和理论支持.

1 材料与方法

1.1 样品采集

选择了 2018 年 8 月河流输入影响较大的丰水期, 对莱州湾水域开展了生态环境综合调查, 共设置调查站位 26 个 (图 1). 每个站位取表层水样监测温度、盐度、溶氧和 pH 值; 取 500 mL 海水用甲醛溶液固定用于浮游植物鉴定 (站位 A14 样品运输中不慎撒落); 同时用醋酸纤维滤膜过滤 200 mL 水样用于营养盐分析, 另取水样经 GF/F 膜过滤后于 -20℃ 下避光保存用于浮游植物色素测定, 样品采集严格按照《海洋调查规范》(GB/T 12763-2007) 进行.

1.2 样品分析

环境因子分析严格按照《海洋监测规范》

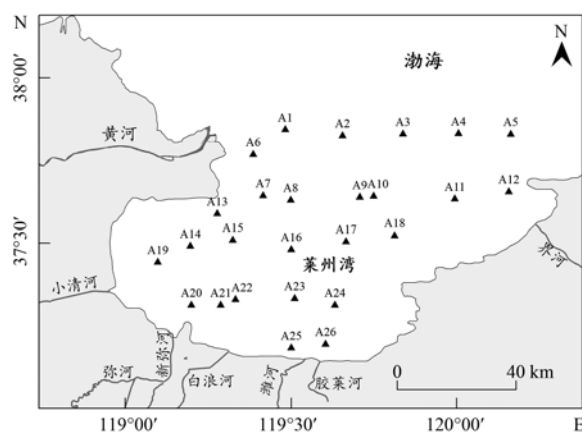


图 1 采样站位示意

Fig. 1 Sampling sites

(GB17378-2007) 操作要求. 温度、盐度、pH 值和水深使用船载 CTD (Seabird 911) 测定, 溶解氧 (DO) 采用碘量法. 硝酸盐 (NO_3^-)、亚硝酸盐 (NO_2^-)、铵盐 (NH_4^+)、磷酸盐 (DIP, 即 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 和硅酸盐 (DSi, 即 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$) 使用营养盐自动分析仪 (QuAAtro AutoAnalyzer 39) 测定.

为了准确分析调查区域浮游植物组成, 避免重要的小粒径浮游植物在显微镜下漏检. 浮游植物样品分别采用显微镜计数法和色素分类法进行分析. 浮游植物显微镜计数采用 Utermöhl^[17] 方法, 固定好的浮游植物样品摇匀, 取 25 mL 放入 Utermöhl 计数框, 静置 24 h, 在 OLYMPUS CKX53 倒置显微镜下 (200 ~ 400 倍) 进行浮游植物的计数, 单位为 $\text{cell}\cdot\text{L}^{-1}$. 浮游植物色素分类法是通过测定浮游植物中具有指示意义的特征色素的含量, 根据特征色素的含量与特定浮游藻类群存在数量关系, 用数学分析方法将样品特征色素的信息解析为不同浮游藻类群对 Chla 的贡献量, 从而解释藻类浮游类群组成的方法. 色素分类法能够大大提高浮游植物监测的效率, 还可以检测一些光学显微镜下很难鉴定的微型和微微型浮游植物^[18], 是近年来浮游植物功能类群监测研究的重要方法^[19,20]. 浮游植物色素采用 HPLC 方法测定^[21], 色素标准品购自丹麦水资源与环境研究所, 内标 8'-Apo-beta-carotenol 购自 ChromaDex 公司. 色素数据利用 Chemtax 软件进行分析, 初始比率矩阵参考我国海域先前开展的色素分类研究构建^[22,23]. 为了提高计算的准确性, 使用初始色素比率矩阵中每个单元乘以随机因子 F , 生成 60 个新矩阵, 60 个比率矩阵均作为 Chemtax 优化的起点. 利用残差最小的解来估计分类丰度, 选取结果中最好的 10% ($n = 6$) 计算丰度估计的平均值^[24]. F 由以下公式得出:

$$F = 1 + S \times (R - 0.5)$$

式中, S 为比例因子(通常选 0.7), R 为使用 Microsoft Excel RAND 函数生成的 0 ~ 1 之间的随机数。

1.3 统计分析

采用物种优势度指数(Y)指示某种浮游植物在种群中的优势地位,当 $Y \geq 0.02$ 时,即认为该种为优势种^[25]。

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

式中, n_i 为第 i 种的总个体数, N 为采集到的生物个体总数, f_i 为 i 物种在所有站点上出现频率。

海水环境因子、Chla、浮游植物丰度和群落结构数据使用 SPSS 22.0 进行正态性检验,对不符合正态分布的数据进行 $\lg(x+1)$ 转换。转换后的环境因子、Chla 和浮游植物丰度数据进行皮尔森(Pearson)相关性分析;环境因子、Chla 和浮游植物群落结构数据进行趋势的对应分析(DCA),结果显示 4 个轴最大梯度的长度小于 3,因而选择 RDA 分析研究环境因子和浮游植物群落结构的相关性。站位图和浮游植物群落分布使用 Arcgis10.7 绘制,环

境因子空间分布图使用 Surfer10 绘制。

2 结果与分析

2.1 莱州湾环境因子的时空分布特征

2.1.1 温度、盐度、pH 和 DO

2018 年 8 月,调查海域表层水温变化范围为 24.31 ~ 31.39℃,平均值为 29.17℃,整体呈现由近岸向湾外逐渐降低的趋势,高值区出现在调查海南侧[图 2(a)],范围大概在近岸 40 km 范围内,低值区出现在莱州湾和渤海交界处。盐度变化范围为 27.65‰~31.79‰,平均值为 30.61‰,整体呈现明显的经度梯度,低值区出现在莱州湾西部小清河和黄河一侧的海域[图 2(b)]。pH 值变化范围为 7.85 ~ 7.96,平均值为 7.96,高值区在莱州湾北部离岸海域和胶莱河口西北侧近岸海域,低值区则在莱州湾西南侧和东侧近岸海域[图 2(c)]。DO 的变化范围为 5.32 ~ 7.40 mg·L⁻¹,平均值为 6.31 mg·L⁻¹,高值区分布与 pH 值类似,但低值区则在小清河东侧胶莱河以西的近岸海域[图 2(d)]。

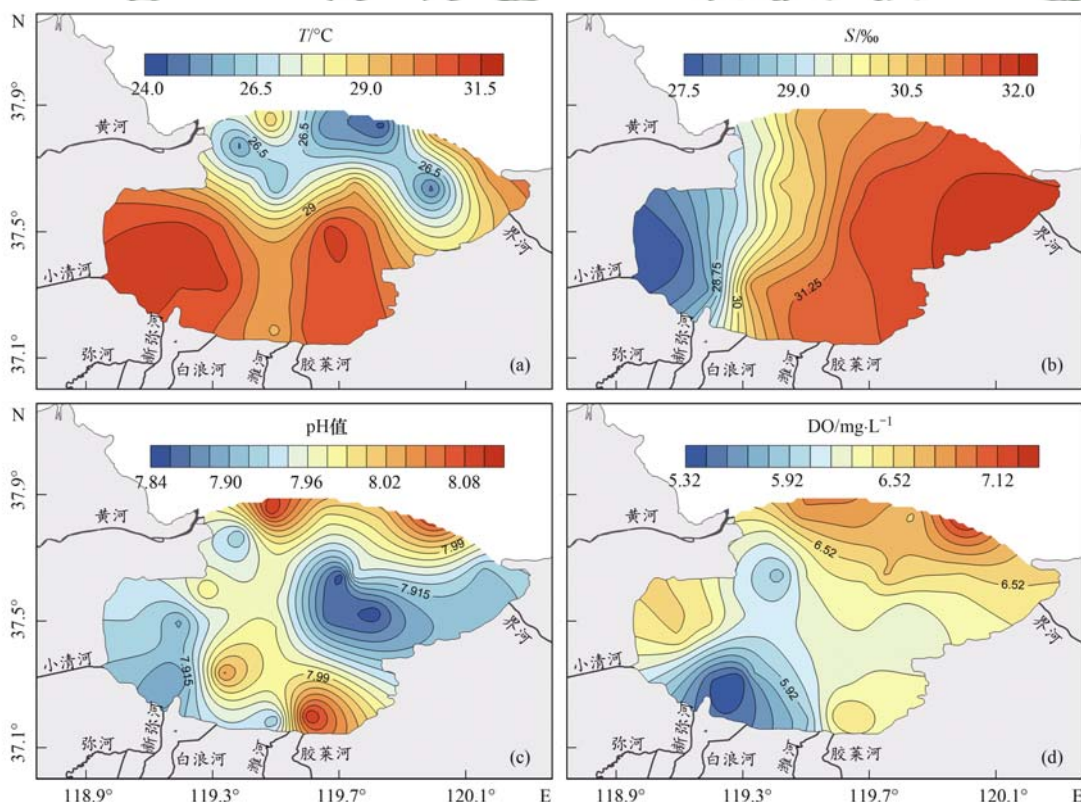


图 2 2018 年 8 月莱州湾温度(T)、盐度(S)、pH 值和溶解氧(DO)的空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of temperature, salinity, pH, and DO in the Laizhou Bay in August 2018

2.1.2 营养盐

2018 年 8 月莱州湾 DIN 整体呈现西高东低的趋势[图 3(a) ~ 3(d)]。NO₃⁻ 是最主要的氮营养盐, $c(\text{NO}_3^-)$ 变化范围为 0.39 ~ 40.57 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,高值区主要分布在莱州湾西北侧黄河口附近海域;

NH₄⁺ 次之,其浓度变化范围为 0.05 ~ 4.16 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,高值区主要分布在小清河和新弥河河口附近; $c(\text{NO}_2^-)$ 变化范围为 2.10 ~ 20.39 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,高值区介于两者之间,主要分布在小清河河口附近。 $c(\text{DIP})$ 变化范围为 0.11 ~ 1.75 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为

$0.43 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. 与 DIN 不同, DIP 整体呈现南高北低的趋势, 高值区主要分布在潍河河口及其西北部近岸海域[图 3(e)]. $c(\text{DSi})$ 变化范围为 $1.94 \sim 27.46$

$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $11.08 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 其空间分布与 DIN 类似, 整体呈现西高东低的趋势, 高值区分别位于黄河口东侧和新弥河河口北侧海域[图 3(f)].

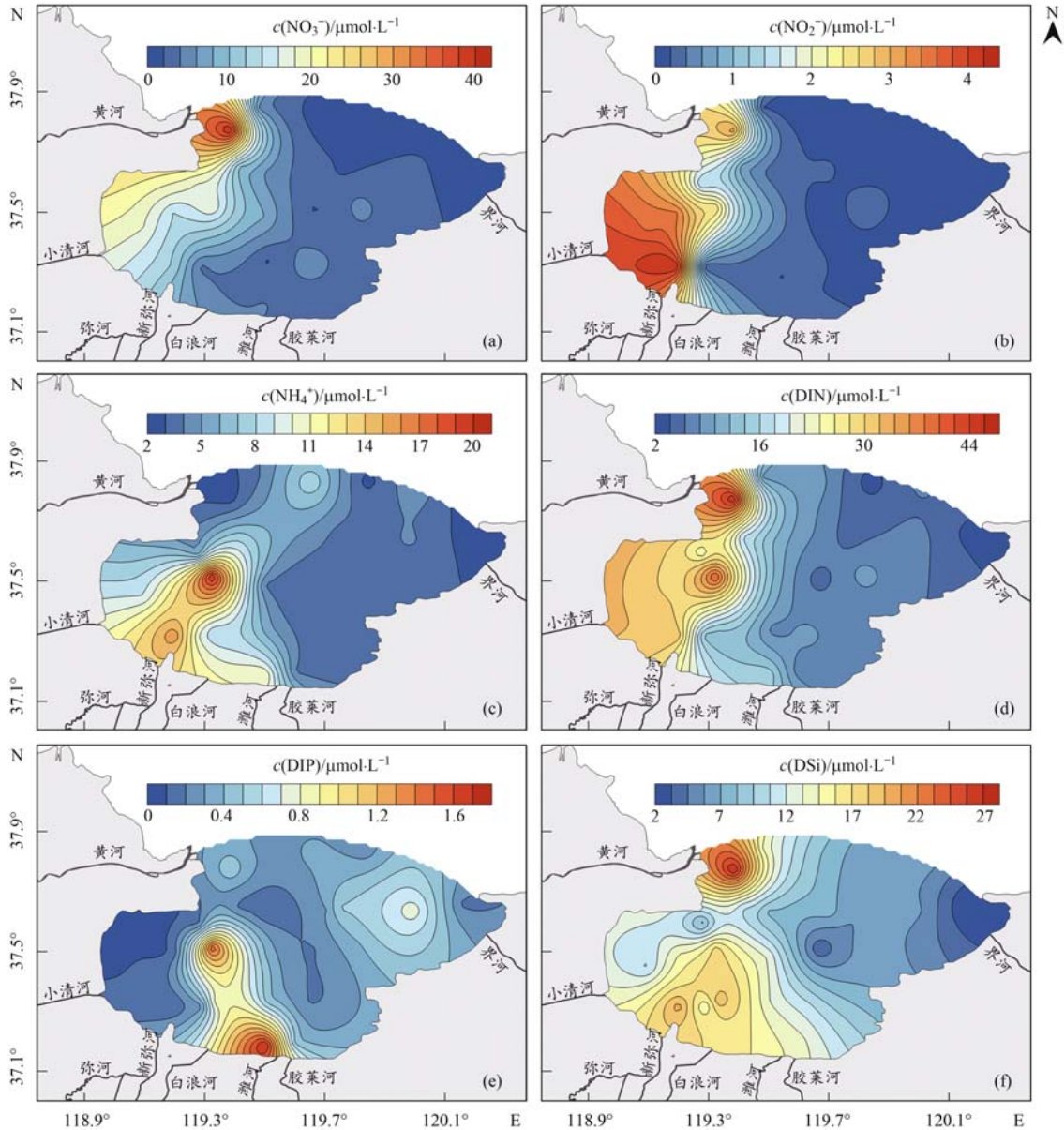


图 3 2018 年 8 月调查海域营养盐的空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution of nutrients in the Laizhou Bay in August 2018

2.2 浮游植物空间分布特征及其与环境因子的相关性

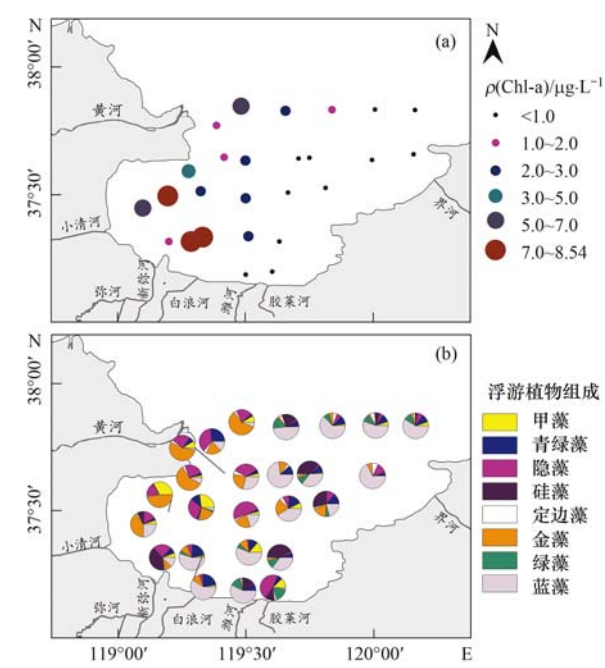
2.2.1 色素分类法

色素分类法用 Chla 指示浮游植物生物量, 用不同类群对 Chla 的贡献率指示浮游植物组成. 2018 年 8 月, 调查水域 $\rho(\text{Chla})$ 变化范围为 $0.08 \sim 8.54 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $2.43 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Chla 空间分布整体呈现西高东低的趋势, 高值区出现在莱州湾西南部海域[图 4(a)], 蓝藻、金藻和青绿藻是 Chla 的主要贡献者[图 4(b)], 贡献率分别为 39.3%、21.3% 和 15.8%, 低值区出现在莱州湾东

侧海域[图 4(a)], 金藻(28.3%)、蓝藻(26.7%) 和隐藻(18.4%) 是 Chla 的主要贡献者[图 4(b)]. 浮游植物群落结构空间差异明显, 黄河口附近海域, 隐藻、金藻占比较高; 其它海域蓝藻明显占优势.

2.2.2 显微镜检法

2018 年 8 月, 显微镜检法共检测到浮游植物 5 门 28 种, 其中硅藻 20 种, 是主要浮游植物种类, 占总物种数的 71.4%; 其次为绿藻门 3 种(10.7%); 再次为蓝藻门 2 种(7.1%); 金藻门、隐藻门和甲藻门各 1 种, 分别占 3.6%. 浮游植物细胞丰度变化



(a) Chla, (b) 浮游植物组成

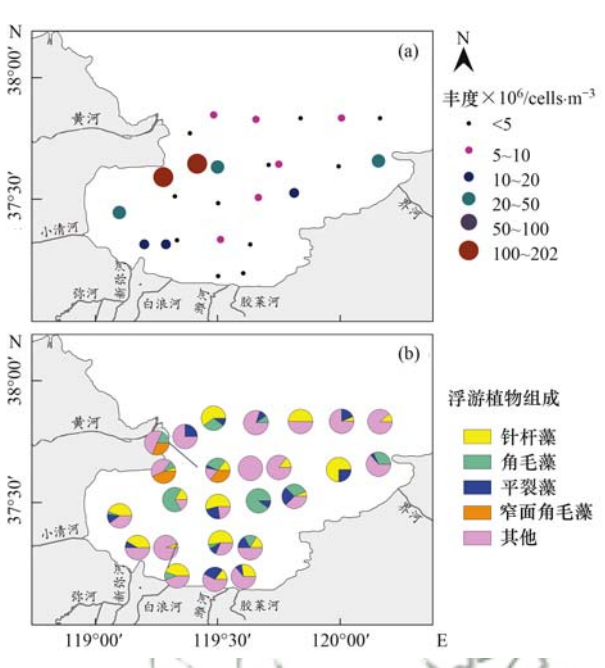
图 4 2018 年 8 月调查海域 Chla 浓度和浮游植物群落的空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of Chla and phytoplankton communities in August 2018

范围为 $2.6 \times 10^6 \sim 202 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值为 $21.5 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$. 优势种 ($Y \geq 0.02$) 共 4 种, 分别为针杆藻 (*Synedra* spp.)、角毛藻 (*Chaetoceros* sp.)、平裂藻 (*Merismopedia* sp.) 和窄面角毛藻 (*Chaetoceros paradoxus*). 细胞丰度的空间分布与 Chla 不同, 高值区出现在莱州湾西北部黄河三角洲附近海域[图 5(a)], 以窄面角毛藻和角毛藻为主[图 5(b)].

2.2.3 环境因子、Chla 和浮游植物细胞丰度的相关关系

为了研究小清河专项治理后影响莱州湾浮游植



(a) Chla, (b) 浮游植物组成

图 5 浮游植物丰度及优势种空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of phytoplankton abundance and dominant species in the Laizhou Bay

物生物量的主要环境因素,对 2018 年 8 月莱州湾环境因子、Chla 和浮游植物细胞丰度进行了 Pearson 相关性分析(表 1). 结果显示,浮游植物细胞丰度与所有环境因子均没有显著的相关性; Chla 与 DSi 呈现显著正相关关系,与盐度呈显著负相关关系; 盐度与 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 NO_2^- 和 DIN 存在极显著的负相关关系,与 DSi 呈显著负相关关系,与 DIP 呈现不显著的正相关关系.

2.2.4 RDA 分析

为了进一步研究莱州湾环境因子与浮游植物群落结构的相关关系,分别对环境因子与浮游植物色素分类结果和镜检结果进行了 RDA 分析(图 6).

表 1 环境因子、Chla 和浮游植物细胞丰度间 Pearson 相关系数¹⁾

Table 1 Pearson correlation coefficient between environmental factors, Chla, and phytoplankton abundance												
	丰度	Chla	T	S	pH	DO	NO_3^-	NH_4^+	NO_2^-	DIN	DIP	DSi
丰度	1.000											
Chla	0.116	1.000										
T	0.013	0.229	1.000									
S	-0.365	-0.503 *	-0.154	1.000								
pH	0.112	0.308	0.067	-0.022	1.000							
DO	-0.191	-0.386	-0.234	0.381	0.261	1.000						
NO_3^-	0.244	0.192	-0.104	-0.682 **	-0.134	-0.227	1.000					
NH_4^+	0.008	0.300	0.259	-0.571 **	0.012	-0.493 *	0.227	1.000				
NO_2^-	0.099	0.217	0.141	-0.881 **	-0.208	-0.331	0.770 **	0.572 **	1.000			
DIN	0.195	0.278	0.033	-0.814 **	-0.117	-0.387	0.913 **	0.602 **	0.893 **	1.000		
DIP	-0.255	-0.073	0.046	0.134	-0.048	-0.141	0.072	0.492 *	0.019	0.240	1.000	
DSi	-0.140	0.420 *	0.050	-0.499 *	0.128	-0.489 *	0.661 **	0.468 *	0.601 **	0.731 **	0.328	1.000

1) * 表示呈显著相关关系($P < 0.05$), ** 表示呈极显著相关关系($P < 0.01$)

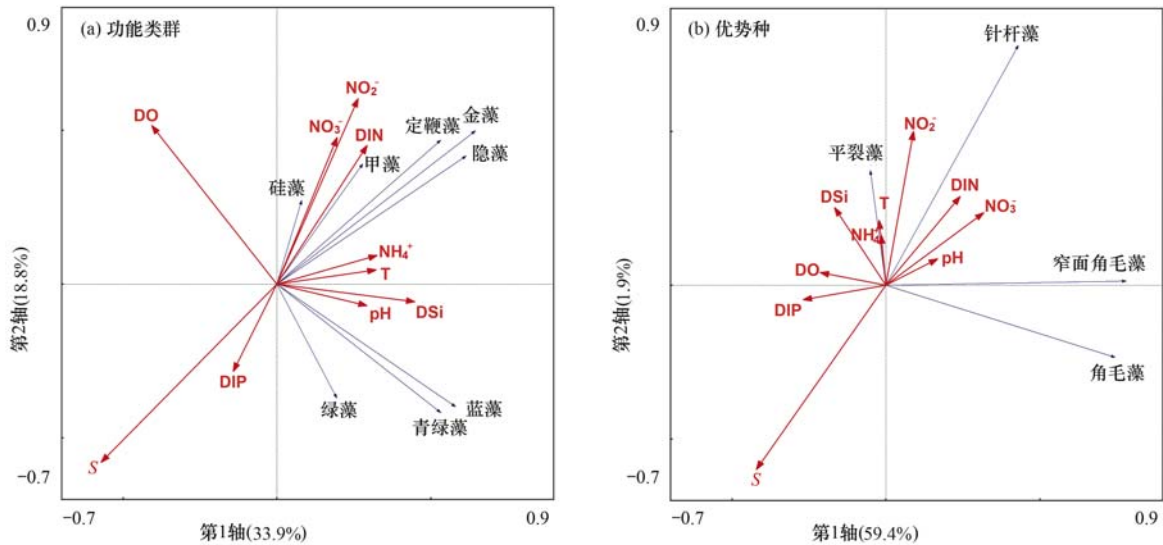


图 6 调查海域浮游植物与环境因子的 RDA 排序

Fig. 6 RDA ordination plot between phytoplankton composition and environmental factors in the study area

环境因子与浮游植物色素分类结果的 RDA 分析显示,排序图第 1 轴和第 2 轴分别解释了 33.9% 和 18.8% 的物种变化[图 6(a)]. 影响排序轴 1 的环境因子主要是 DSI 和盐度(负相关);影响排序轴 2 的环境因子主要是 NO_2^- 和 DO. 盐度与大部分营养盐呈现明显的负相关关系,但与磷酸盐呈正相关关系. 浮游植物与环境因子的相关性关系大致可以分为两类,一类是金藻、隐藻、定鞭藻、甲藻和硅藻,他们与温度和氮营养盐呈现正相关关系,与盐度呈现明显的负相关关系;另一类是蓝藻、青绿藻和绿藻,他们与 DO 呈现明显的负相关关系,与氮营养盐没有明显的相关关系.

环境因子与镜检浮游植物优势种的 RDA 分析显示,排序图第 1 轴和第 2 轴分别解释了 59.4% 和 1.9% 的物种变化[图 6(b)]. 影响排序轴 1 的环境因子主要是 NO_3^- 和 DIN;影响排序轴 2 的环境因子主要是 NO_2^- 和盐度. 盐度与营养盐的相关关系与色素分类结果类似,说明无机氮和硅酸盐与盐度呈现明显的负相关,但与磷酸盐呈正相关. 针杆藻和平裂藻与盐度呈现明显的负相关关系;窄面角毛藻和角毛藻则与 NO_3^- 和 DIN 呈现明显的正相关关系,与 DIP、DSi 和 DO 呈现负相关关系.

3 讨论

3.1 小清河流域专项治理后莱州湾环境因子空间分布特征及其影响因素

通过对 2018 年 8 月(治理后)莱州湾环境因子空间分布特征进行跟踪调查发现,小清河流域专项治理后莱州湾海域环境因子及其空间分布与治理前同期相比发生明显变化.

2018 年 8 月,莱州湾海域 NO_2^- 、 NO_3^- 、DIN 和 DSI 与历史同期相比整体呈现明显下降的趋势^[14,26],平均值仅为临近 2017 年份同期的 40.1%~60.4%(表 2),这与 2018 年 8 月小清河入海口羊口监测站水质明显提升、入海口水质呈好转状态、营养盐明显下降的研究结果相符^[16,27],说明小清河流域专项治理和入海总氮控制能够有效降低莱州湾主要营养盐浓度. 与其他营养盐不同,DIP 浓度呈现明显增加的趋势,DIN 的降低和 DIP 的升高使调查海域 DIN/DIP 明显降低,DSi/DIN 升高,在一定程度上优化了莱州湾海域营养盐结构. Pearson 相关性分析和 RDA 分析均显示盐度与大部分营养盐呈现明显的负相关关系,但与磷酸盐呈正相关关系(表 1),说明河流淡水输入是莱州湾营养物质的主要来源,但磷酸的来源可能与其他营养盐不同.

2018 年调查海域营养盐空间分布与莱州湾先前的研究类似^[5,7,12,15,26],莱州湾西南部仍然是营养盐较高的海域,一方面可能是由于夏季莱州湾逆时针环流主要影响黄河口和莱州湾东部海域(图 7),莱州湾西南部受环流影响较小,扩散较慢^[28~31];另一方面,莱州湾东部为扇贝养殖区,扇贝的滤食作用也在一定程度上降低了营养物质浓度^[15]. 与历史同期相比,莱州湾西南部海域营养盐浓度降低幅度明显高于莱州湾其他海域^[5,7],说明小清河流域专项治理和入海总氮控制是解决莱州湾西南侧水动力较弱区域营养盐超标的有效手段.

此外,本次调查还发现黄河口东南侧海域存在一个明显的 NO_3^- 、DIN 和 DSI 的高值区,而 2017 年(未调水调沙年)同期黄河口附近海域并未出现营养盐高值区^[15],2018 年夏季调水调沙期间大量富

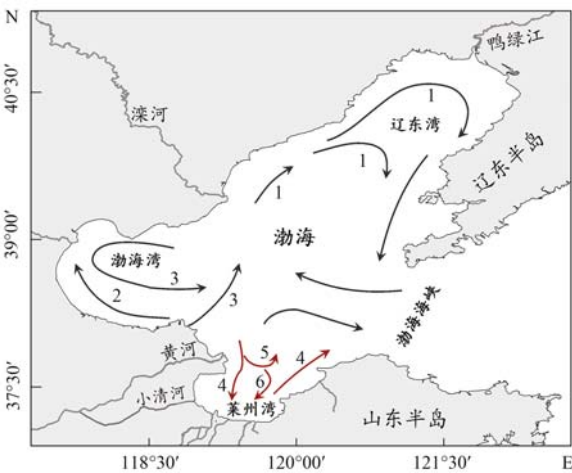
含氮、硅营养盐随黄河口顺时针环流输送到莱州湾可能是该高值区出现的原因^[32],同时也说明黄河也是莱州湾重要的氮营养盐来源^[23,33],且黄河对莱州湾的影响可能随径流量变化存在明显差异.从 DIN 组成来看,黄河口附近 NO_3^- 浓度较高,而 NO_2^- 和 NH_4^+ 高值则主要分布在小清河附近,

这说明黄河输入莱州湾的氮营养盐主要以 NO_3^- 为主,而小清河则是 NO_2^- 和 NH_4^+ 的主要来源.由于丰水期黄河径流量较大,且极易随莱州湾逆时针环流和黄河口顺时针环流影响莱州湾水环境,因此,开展莱州湾环境治理时应充分考虑黄河径流输入量的影响.

表 2 莱州湾海域 8 月环境因子的变化

Table 2 Variation in environmental factors in the Laizhou Bay in August						
项目	2012 年 8 月 ^[5]	2013 年 8 月 ^[5]	2014 年 8 月 ^[26]	2015 年 8 月 ^[26]	2017 年 8 月 ^[15]	2018 年 8 月(本研究)
$T/^{\circ}\text{C}$	—	—	—	—	27.8 ~ 30.8/29.3 ¹⁾	24.31 ~ 31.39/29.17
S	—	—	—	—	23.29 ~ 31.29/29.77	27.65 ~ 31.79/30.61
pH 值	—	—	—	—	—	7.85 ~ 7.96/7.96
$\text{DO}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	—	—	7.47	7.34	—	5.32 ~ 7.40/6.31
$c(\text{NO}_3^-)/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	—	—	—	—	3.96 ~ 85.71/18.35	0.39 ~ 40.57/7.35
$c(\text{NO}_2^-)/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	—	—	—	—	0.03 ~ 11.43/1.7	0.05~4.16/0.90
$c(\text{NH}_4^+)/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	—	—	—	—	0.14 ~ 16.50/4.27	2.10 ~ 20.39/6.44
$c(\text{DIN})/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	35.53	25.36	15.00 ~ 109.28/28.57	15.00 ~ 74.28/27.85	5.86 ~ 94.29/24.32	3.13 ~ 46.32/14.70
$c(\text{DIP})/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.29	0.22	0 ~ 0.48/0.07	0 ~ 0.48/0.11	0.03 ~ 0.44/0.17	0.11 ~ 1.75/0.43
$c(\text{DSi})/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	—	—	—	—	5.89 ~ 60.36/19.36	1.94 ~ 27.46/11.08
DIN/DIP	99.8	117.9	675.1	—	—	8.87 ~ 244.07/59.62
DSi/DIN	—	—	0.6	—	—	0.31 ~ 2.06/0.96

1) 最小值 ~ 最大值/平均值



1 表示辽东湾顺时针环流, 2 和 3 表示渤海湾逆时针和顺时针环流, 4 表示莱州湾逆时针环流, 5 和 6 表示黄河口逆时针和顺时针环流, 改自文献[25,26]

图 7 渤海环流示意

Fig. 7 Marine flow-current patterns in the Bohai Sea

3.2 小清河流域专项治理后莱州湾浮游植物空间分布特征及其影响因素

环境因子的变化能够显著影响浮游植物丰度和群落结构^[34],小清河流域专项治理后莱州湾浮游植物丰度和群落结构空间分布与历史同期相比也发生了明显变化.

2018 年 8 月,调查海域大部分营养盐浓度明显低于历史同期,浮游植物细胞丰度与历史同期接近^[7,35],但 Chla 浓度明显低于历史同期^[36](表 3),这可能与小粒径浮游植物占比明显升高有关. Chla

高值区出现在莱州湾西南部凹陷处,主要受小清河高浓度营养物质输入影响,这与该海域先前的研究基本重合^[14].浮游植物细胞丰度高值区则出现在黄河口附近海域,可能与区域黄河输入大量营养物质有关. Chla 浓度和浮游植物丰度高值区产生差异的主要原因可能是浮游植物群落组成存在差异,作者分析了莱州湾西南部 Chla 高值区浮游植物组成,发现该区域珊藻和平裂藻等多细胞团聚类浮游植物占比较高,计数时通常以群体计,其单个群体 Chla 含量明显高于小粒径单细胞浮游植物^[37,38],因此该区域呈现高 Chla 浓度、低藻细胞丰度的现象.

小清河流域专项治理后,调查海域浮游植物群落结构发生了明显变化,色素分类法和镜检法的结果均证实绿藻、蓝藻、金藻的种类和占比明显升高,整个区域由硅藻占绝对优势转变为硅藻、蓝藻共同占优.这一方面可能是由于先前的研究多采用网采法采样,很多粒径较小的种群容易被漏采^[39];另一方面,小清河流域专项治理后,莱州湾海域营养盐结构发生变化,DIN/DIP 降低, $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 升高,蓝藻在这种条件下具有更高的竞争力^[40,41],因此浮游植物群落结构逐渐由硅藻向蓝藻转变.

浮游植物功能类群与环境因子的 RDA 分析显示,大部分浮游植物类群与氮营养盐呈现明显的正相关关系,与盐度呈现明显的负相关关系,这与河流径流输入的氮营养盐是促使该海域浮游植物生长的重要原因的研究结果类似^[7,14,26].此外,与历史同期

相比明显增多的蓝藻和绿藻与氮营养盐和盐度没有明显的相关性,但与 DO 呈现明显的负相关关系,这说明浮游植物群落结构的变化还可能和溶氧相关,但由于缺少夏季莱州湾溶氧变化的历史数据,两者是否有直接关系仍需要进一步研究. 浮游植物优势种与环境因子的 RDA 分析显示,4 种优势种与环境因子的相关关系虽然存在一定差别,但总体呈现与

氮、硅营养盐正相关,与盐度和磷酸盐负相关的关系,这与适宜温度范围内氮营养的升高有利于角毛藻生长研究相符^[42],同时也说明小清河污染治理后,陆源营养物质输入仍然是影响浮游植物变化的重要因素;而营养盐浓度和结构的变化可能是针杆藻和平裂藻等淡水水库的常见优势种^[43,44]丰度明显升高的主要影响因素.

表 3 莱州湾海域浮游植物丰度和优势种/属的变化¹⁾

Table 3 Variation in phytoplankton abundance and dominant species/genera in the Laizhou Bay

日期 (年-月)	Chla / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	细胞丰度 $\times 10^6$ /cell $\cdot\text{m}^{-3}$	优势种/物种优势度指数(Y)	文献
2010-08	—	—	中肋骨条藻(<i>Skeletonema costatum</i>)和大洋角管藻(<i>Cerataulina pelagica</i>)	[7]
2011-08	—	—	透明辐杆藻(<i>Bacteriastrum hyalinum</i>)、洛氏角毛藻(<i>Chaetoceros lorenzianus</i>)、高齿状藻(<i>Odontella regia</i>)、中肋骨条藻和大洋角管藻	[7]
2012-08	—	—	旋链角毛藻(<i>Chaetoceros curvisetus</i>)、拟旋链角毛藻(<i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>)、琼氏圆筛藻(<i>Coscinodiscus jonesianus</i>)和中肋骨条藻	[7]
2013-08	—	—	旋链角毛藻、冕袍角毛藻(<i>Chaetoceros diadema</i>)和拟旋链角毛藻	[7]
2013-09	—	20.8	角毛藻/0.04、圆筛藻(<i>Coscinodiscus</i> sp.)/0.08、小环藻(<i>Cyclotella</i> sp.)/0.04、条纹小环藻(<i>C. striata</i>)/0.03、小等次硅鞭藻(<i>Dicthyocha fibula</i>)/0.03、薄壁几内亚藻(<i>Guinardia flaccida</i>)/0.06、舟形藻(<i>Navicula</i> spp.)/0.08、菱形藻(<i>Nitzschia</i> spp.)/0.03、曲舟藻(<i>Pleurosigma</i> sp.)/0.04 和海链藻(<i>Thalassiosira</i> sp.)/0.02	[35]
2014-08	—	—	卡氏角毛藻(<i>Chaetoceros castracanei</i>)、旋链角毛藻、洛氏角毛藻和伏氏海线藻(<i>Thalassionema frauenfeldii</i>)	[7]
2015-08	4.63	—	—	[36]
2017-08	—	28.0	尖刺拟菱形藻(<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>)/0.49 和大洋角管藻/0.08	[15]
2018-08	2.43	21.5	针杆藻/0.08、角毛藻/0.07、平裂藻/0.02 和窄面角毛藻/0.03	本研究

1) 文献[7]中没有对应的优势度指数

4 结论

(1)小清河流域专项治理后,丰水期莱州湾 DIN、DSi、NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 浓度比治理前明显降低,DIP 浓度呈上升趋势但总体仍在较低水平,营养盐结构得到一定程度优化.

(2)小清河流域专项治理后,丰水期浮游植物的生物量总体与治理前接近,但 Chla 浓度明显降低;浮游植物群落结构及空间分布发生一定变化,浮游植物由硅藻占绝对优势转变为硅、蓝藻共同占优势,出现蓝藻优势种.

(3)RDA 分析发现:小清河流域专项治理后,盐度和氮营养盐与大部分浮游植物类群和主要优势种呈现明显的相关性,陆源输入营养盐浓度和结构的变化可能是莱州湾浮游植物群落结构变化的主要影响因素.

参考文献:

- [1] 杨建强,朱永贵,宋文鹏,等. 基于生境质量和生态响应的莱州湾生态环境质量评价[J]. 生态学报, 2014, **34**(1): 105-114.
Yang J Q, Zhu Y G, Song W P, et al. The eco-environmental evaluation based on habitat quality and ecological response of Laizhou Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(1): 105-114.
- [2] 黄建涛. 近 30 年莱州湾滨海湿地景观格局变化及主要驱动

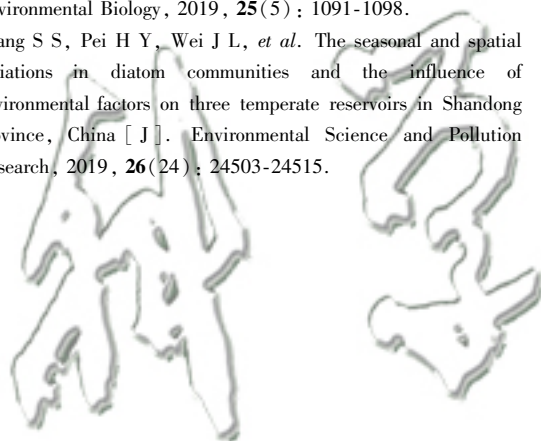
因素分析[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.

Huang J T. Landscape pattern change and main driving factors of coastal wetland in Laizhou Bay in recent 30 years[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019.

- [3] Tang Q S, Jin X S, Wang J, et al. Decadal-scale variations of ecosystem productivity and control mechanisms in the Bohai Sea[J]. Fisheries Oceanography, 2003, **12**(4-5): 223-233.
- [4] Jin X S, Shan X J, Li X S, et al. Long-term changes in the fishery ecosystem structure of Laizhou Bay, China[J]. Science China Earth Sciences, 2013, **56**(3): 366-374.
- [5] 姜会超,王玉珏,李佳蕙,等. 莱州湾营养盐空间分布特征及年际变化趋势[J]. 海洋通报, 2018, **37**(4): 411-423.
Jiang H C, Wang Y J, Li J H, et al. Annual variation and spatial distribution of nutrients in the Laizhou Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2018, **37**(4): 411-423.
- [6] 蒋红,崔毅,陈碧鹃,等. 渤海近 20 年来营养盐变化趋势研究[J]. 海洋水产研究, 2005, **26**(6): 61-67.
Jiang H, Cui Y, Chen B J, et al. The variation trend of nutrient salts in the Bohai Sea[J]. Marine Fisheries Research, 2005, **26**(6): 61-67.
- [7] Jiang H C, Liu D Y, Song X K, et al. Response of phytoplankton assemblages to nitrogen reduction in the Laizhou Bay, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, **136**: 524-532.
- [8] 赵玉庭,刘霞,李佳蕙,等. 2013 年莱州湾海域营养盐的平面分布及季节变化规律[J]. 海洋环境科学, 2016, **35**(1): 95-99.
Zhao Y T, Liu X, Li J H, et al. Distribution and seasonal variation in nutrients in Laizhou Bay, 2013 [J]. Marine Environmental Science, 2016, **35**(1): 95-99.

- [9] 国家海洋局. 2017 年中国海洋生态环境状况公报[R]. 青岛: 国家海洋局, 2018.
- [10] 李凡, 张焕君, 吕振波, 等. 莱州湾游泳动物群落种类组成及多样性[J]. 生物多样性, 2013, **21**(5): 537-546.
Li F, Zhang H J, Lü Z B, *et al.* Species composition and community diversity of nekton in Laizhou Bay, China [J]. Biodiversity Science, 2013, **21**(5): 537-546.
- [11] 孙丕喜, 王波, 张朝晖, 等. 莱州湾海水中营养盐分布与富营养化的关系[J]. 海洋科学进展, 2006, **24**(3): 329-335.
Sun P X, Wang B, Zhang Z H, *et al.* Relationship between nutrient distributions and eutrophication in seawater of the Laizhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2006, **24**(3): 329-335.
- [12] He X Q, Chen G J, Fang Z Y, *et al.* Source identification of chromium in the sediments of the Xiaoqing River and Laizhou Bay: a chromium stable isotope perspective[J]. Environmental Pollution, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114686.
- [13] 刘瑜婷, 韩美, 潘彬, 等. 小清河下游水质评价及污染物入海通量研究[J]. 水文, 2020, **40**(3): 88-96.
Liu Y T, Han M, Pan B, *et al.* Water quality assessment and pollutant fluxes into the sea in the lower reaches of Xiaoqing River [J]. Journal of China Hydrology, 2020, **40**(3): 88-96.
- [14] 孙慧慧, 刘西汉, 孙西艳, 等. 莱州湾浮游植物群落结构与环境因子的时空变化特征研究[J]. 海洋环境科学, 2017, **36**(5): 662-669.
Sun H H, Liu X H, Sun X Y, *et al.* Temporal and spatial variations of phytoplankton community and environmental factors in Laizhou Bay [J]. Marine Environmental Science, 2017, **36**(5): 662-669.
- [15] 张欣泉, 姜会超, 马元庆, 等. 2017 年丰水期莱州湾环境因子分布特征及网采浮游植物的响应[J]. 海洋环境科学, 2020, **39**(4): 614-621, 629.
Zhang X Q, Jiang H C, Ma Y Q, *et al.* The spatial distribution of environmental factors and the response of net-phytoplankton in the Laizhou bay during wet-season in 2017 [J]. Marine Environmental Science, 2020, **39**(4): 614-621, 629.
- [16] 李昶, 陈丽贵, 何造胜. 莱州湾小清河入海口水质变化及成因分析[J]. 环境与发展, 2020, **32**(11): 118-119, 121.
Li C, Chen L G, He Z S. Analysis of water quality change and causes of Xiaoqing River estuary in Laizhou Bay [J]. Environment and Development, 2020, **32**(11): 118-119, 121.
- [17] Utermöhl H. Zur Vervollkommenung der quantitativen phytoplankton methodik [J]. Mitteilungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie, 1958, **9**: 1-38.
- [18] Wright S W, Jeffrey S W. Pigment markers for phytoplankton production[A]. In: Volkman J K (Ed.). Marine Organic Matter: Biomarkers, Isotopes and DNA [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. 71-104.
- [19] Yao P, Yu Z G, Deng C M, *et al.* Spatial temporal distribution of phytoplankton pigments in relation to nutrient status in Jiaozhou Bay, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, **89**(3): 234-244.
- [20] Schüller S E, Allison M A, Bianchi T S, *et al.* Historical variability in past phytoplankton abundance and composition in Doubtful Sound, New Zealand[J]. Continental Shelf Research, 2013, **69**: 110-122.
- [21] Zapata M, Rodríguez F, Garrido J L. Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C₈ column and pyridine-containing mobile phases[J]. Marine Ecology Progress Series, 2000, **195**: 29-45.
- [22] Yao P, Yu Z G, Deng C M, *et al.* Spatial-temporal distribution of phytoplankton pigments in relation to nutrient status in Jiaozhou Bay, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, **89**(3): 234-244.
- [23] Zhu Z Y, Ng W M, Liu S M, *et al.* Estuarine phytoplankton dynamics and shift of limiting factors: a study in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent area [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, **84**(3): 393-401.
- [24] Wright S W, van den Enden R L, Pearce I, *et al.* Phytoplankton community structure and stocks in the Southern Ocean (30-80° E) determined by CHEMTAX analysis of HPLC pigment signatures[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2010, **57**(9-10): 758-778.
- [25] Lampitt R S, Wishner K F, Turley C M, *et al.* Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: distribution, composition and role as a food source for migrating plankton [J]. Marine Biology, 1993, **116**(4): 689-702.
- [26] Wang Y B, Liu G H, Yu G, *et al.* Evaluation of the spatial heterogeneity in marine organic pollution and land-based influencing factors: a case study of the marine area of Laizhou Bay, China[J]. Regional Studies in Marine Science, 2021, **45**, doi: 10.1016/j.rsma.2021.101867.
- [27] 范新风, 韩美, 王磊, 等. 小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1619-1628.
Fan X F, Han M, Wang L, *et al.* Analysis of water quality change and its driving factors of the Xiaoqing River estuary in recent ten years [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1619-1628.
- [28] 赵鹏, 江文胜, 毛新燕, 等. 2000-2005 年莱州湾盐度的变化及其主要影响因素[J]. 海洋与湖沼, 2010, **41**(1): 12-23.
Zhao P, Jiang W S, Mao X Y, *et al.* Salinity change and influencing factor in the Laizhou Bay from 2000 to 2005 [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, **41**(1): 12-23.
- [29] Li M K, Zhu S Y, Ouyang T P, *et al.* Magnetic fingerprints of surface sediment in the Bohai Sea, China[J]. Marine Geology, 2020, **427**, doi: 10.1016/j.margeo.2020.106226.
- [30] Qiao S Q, Shi X F, Zhu A M, *et al.* Distribution and transport of suspended sediments off the Yellow River (Huanghe) mouth and the nearby Bohai Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, **86**(3): 337-344.
- [31] Hu N J, Huang P, Liu J H, *et al.* Characterization and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments in the Yellow River Estuary, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **71**(2): 873-883.
- [32] Zhang J J, Li F, Lv Q M, *et al.* Impact of the water-sediment regulation scheme on the phytoplankton community in the Yellow River estuary[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **294**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126291.
- [33] 刘喜惠, 刘方, 丁页, 等. 渤海环流对近岸海域无机氮分布特征的影响[J]. 中国环境监测, 2019, **35**(6): 78-84.
Liu X H, Liu F, Ding Y, *et al.* Influence of circulation on the distribution characteristics of inorganic Nitrogen in the Bohai Coastal Sea[J]. Environmental Monitoring in China, 2019, **35**(6): 78-84.
- [34] Gímez M I, Piola A R, Kattner G, *et al.* Biomass of autotrophic dinoflagellates under weak vertical stratification and contrasting chlorophyll levels in subantarctic shelf waters [J]. Journal of Plankton Research, 2011, **33**(8): 1304-1310.
- [35] 孙慧慧. 黄河口邻近海域浮游植物群落结构时空变化及其对调水调沙的响应[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2017.

- Sun H H. Temporal and spatial variations of phytoplankton community in response to the water-sediment regulation event in the adjacent sea of the Yellow River Estuary[D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [36] 郭富, 王保栋, 辛明, 等. 2015 年春、夏季莱州湾营养盐分布特征[J]. 海洋科学进展, 2017, **35**(2): 258-266.
- Guo F, Wang B D, Xin M, *et al.* Nutrient distributions in the Laizhou Bay in spring and summer of 2015 [J]. *Advances in Marine Science*, 2017, **35**(2): 258-266.
- [37] Takahashi M, Bienfang P K. Size structure of phytoplankton biomass and photosynthesis in subtropical Hawaiian waters[J]. *Marine Biology*, 1983, **76**(2): 203-211.
- [38] Hallegraeff G M, Jeffrey S W. Tropical phytoplankton species and pigments of continental shelf waters of North and North-West Australia[J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 1984, **20**(1-2): 59-74.
- [39] Le Quéré C, Harrison S P, Prentice I C, *et al.* Ecosystem dynamics based on plankton functional types for global ocean biogeochemistry models[J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(11): 2016-2040.
- [40] Glibert P M, Wilkerson F P, Dugdale R C, *et al.* Pluses and minuses of ammonium and nitrate uptake and assimilation by phytoplankton and implications for productivity and community composition, with emphasis on nitrogen-enriched conditions[J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, **61**(1): 165-197.
- [41] Glibert P M. Eutrophication, harmful algae and biodiversity-Challenging paradigms in a world of complex nutrient changes [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **124**(2): 591-606.
- [42] 王朝晖, 齐雨藻, 陈菊芳, 等. 大亚湾角毛藻细胞数量波动及其与环境因子关系的多元分析[J]. 生态学报, 2006, **26**(4): 1096-1102.
- Wang Z H, Qi Y Z, Chen J F, *et al.* Population dynamics of *Chaetoceros* spp. and multivariate analysis of its relationship with environmental factors in Daya Bay, South China Sea [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(4): 1096-1102.
- [43] 刘陈, 魏南, 王庆, 等. 广东汕头南澳岛近岸海域浮游植物群落结构与环境特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25**(5): 1091-1098.
- Liu C, Wei N, Wang Q, *et al.* Phytoplankton community and environmental characteristics in the coastal waters of Nanao Island, Shantou, Guangdong [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2019, **25**(5): 1091-1098.
- [44] Zhang S S, Pei H Y, Wei J L, *et al.* The seasonal and spatial variations in diatom communities and the influence of environmental factors on three temperate reservoirs in Shandong province, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(24): 24503-24515.



CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaoqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)