

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)
华北地区大气细颗粒物(PM _{2.5})年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应	杨伟, 姜晓丽 (2995)
郑州市民运会期间大气PM _{2.5} 改善效果评估	王申博, 姜亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)
成都夏冬季PM _{2.5} 中水溶性无机离子污染特征	冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析	雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱	徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱	周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)
郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估	齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响	牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面O ₃ 污染特征及敏感性	欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性	顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霞 (3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析	卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征	谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程NO _x 排放特征对比分析	李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别	宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响	魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源	赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析	田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析	齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析	齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应	王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾珺杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析	王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献	张慧, 王世亮, 余杨 (3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征	李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险	吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律	路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征	王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析	刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)
海水中的红毒素与营养盐对微藻的复合影响	王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律	温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析	徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)
分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控	闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾克宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响	毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型	刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制	崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe ⁰ /WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制	计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)
一硫代肟在针铁矿上的吸附及影响因素	廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)
生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响	张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响	邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性	高春娣, 张娜, 韩微, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化	董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)
城镇河流CO ₂ 及CH ₄ 排放与市政排水管网污水输入的关联影响	李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土N ₂ O排放的影响	姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放	张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)
不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异	黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)
锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响	孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响	曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)
叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响	杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)
《环境科学》征订启事 (3011)	《环境科学》征稿简则 (3084)
信息 (3174, 3185, 3391)	

辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析

齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾

(国家海洋环境监测中心, 大连 116023)

摘要:以辽河口为研究区域,利用遥感影像数据、现状调查数据和历史监测数据,系统地分析了辽河口沉积物质量历史变化趋势和空间分异规律,并进一步研究不同海域使用类型和不同植被演替阶段对沉积物环境要素分异特征的影响。结果表明,辽河口区域沉积物质量总体良好,各要素平均含量均符合一类沉积物质量要求;沉积物营养元素呈现显著的带状分布规律,重金属元素空间分布具有一定随机性,未呈现显著规律;不同海域使用类型对沉积物污染物富集的影响具有一定差异显著性,说明重金属及污染物的分布受到人类活动的影响,具有一定的随机性;植被不同演替阶段下主控因子具有显著差异,初级阶段主要受盐度控制,随着由盐生植被向陆生植被逐渐过渡,植被分布特征与总有机碳(TOC)、总氮(TN)和总磷(TP)的内在联系逐渐增大,同时重金属等污染物含量与植被群落内在联系并不显著。

关键词:沉积物;时空动态变化;海域使用类型;植被演替;辽河口

中图分类号:X55 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2020)07-3175-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910041

Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohe Estuary and the Related Influencing Factors

QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, WU Nan, FU Yuan-bin

(National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Abstract: Remote sensing images, field survey data, and historical monitoring data are collected to analyze the historical change trend and spatial variation rules of sediment quality of the Liaohe Estuary and further investigate the effects of sea-area utilization type and vegetation succession stage on the variation patterns of environmental elements in the sediments. The results showed that the quality of the sediments in the Liaohe Estuary is overall favorable, and the average contents of various elements all satisfy the quality standards of first-grade sediments. The nutritive elements in the sediments exhibit obvious zonal distribution patterns, while heavy metals are randomly distributed and exhibit no obvious patterns. The effect of sea-area utilization type on the enrichment of pollutants in the sediments exhibits certain significant differences, suggesting that the distributions of heavy metals and pollutants are subject to human activities and exhibit certain randomness. The main control factors are significantly different at different vegetation succession stages. Specifically, the vegetation distribution in the initial succession stage is mainly affected by salinity; with the transition from halophytic vegetation to terrestrial vegetation, the inherent correlation between vegetation distribution characteristics and the contents of total organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus increase gradually. Meanwhile, the content of heavy-metal pollutants exhibits no significantly inherent correlation between the distributions of the plant community.

Key words: sediments; temporal and spatial dynamic variation; sea area utilization type; vegetation succession; the Liaohe Estuary

地球表面系统在自然力与社会经济共同作用下正在发生着改变^[1~3]。河口海岸地区作为沿海国家拓展陆域和缓解人地矛盾的主要场所之一^[4],在改变地球表面系统海陆交错带的格局中发挥着重要作用^[5]。河口地区人类开发利用在中国已经有一千多年的历史,荷兰、德国、朝鲜和英国等国的围填海等人类开发活动也有几百至近千年的历史^[6,7],随着人类活动干扰强度的增加,开发后的河口生态环境问题日益显露。在中国,政府将海岸带划为沿海水陆交错带生态脆弱区^[5,8],河口海岸地区的生态环境变化越来越受到人们关注^[9]。

目前,关于河口海岸带沉积物和生物特征的研究多从研究对象自身出发,研究其时空分布和变化。沉积物特征方面,学者研究了土壤微量元素变化^[10]、化学元素流失^[11]、重金属分布^[12]、重金属富集^[13]以及沉积物空间分布^[14,15],杨劲松等^[16]的研

究发现海岸带土壤养分空间变异受到结构性因素与随机因素的双重作用。生物特征方面,张林海等^[17]研究了河口湿地植被群落和生物量特征,冯剑丰等^[18]的研究发现海岸工程、污染物排放和围垦养殖等人为干扰因素是造成近岸海域生物丰度降低和生物群落空间分布不均匀变化的主要原因。

植被与沉积物元素、土地利用方式之间的关系已经被广泛讨论^[19~21],特别是在不同控制因子协同作用下的沉积物与植被因子之间的关系研究。da Silva等^[22]的研究发现火烧增加了群落的空间异质性和物种多样性,Reddy等^[23]研究了蛇纹石土壤地区土壤化学因子对植被群落结构和物种多样性的影

收稿日期: 2019-10-09; 修订日期: 2020-01-13

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201505012)

作者简介: 齐玥(1991~),女,硕士,工程师,主要研究方向为海洋生态环境保护管理,E-mail:yqi@nmemc.org.cn

响,Wang 等^[24]研究了不同土地利用管理方式对植被群落特征、物种多样性和植被生产力的影响.但是对在不同控制因子作用下,河口及其近岸海域的沉积物环境要素的空间分异特征研究较少.

本文以辽河口为实证研究区域,重点关注辽河口沉积物营养元素、污染物时空动态变化及其规律,探讨不同海域使用类型对沉积物营养元素和污染物的影响,进一步分析不同植被演替阶段与沉积物营养元素和污染物之间的内在联系,旨在为辽河口生态脆弱性评估干扰指标、沉积物敏感性指标的选择提供基础理论支撑.

1 研究区概况

本文以早期遥感影像为依据,以滨海湿地陆域边界为外缘线,确定辽河口研究区靠近陆域一侧滨海湿地的外缘线;以河口入海向两侧过渡平缓区为边界线,并参考案例区所在行政界线,确定辽河口案例区东西两侧边界线;向海一侧外缘线,以河口生态系统完整性为依据,以河口水系前水舌入海至海洋生态系统为边界;最终确定辽河口研究区范围如图 1 所示.

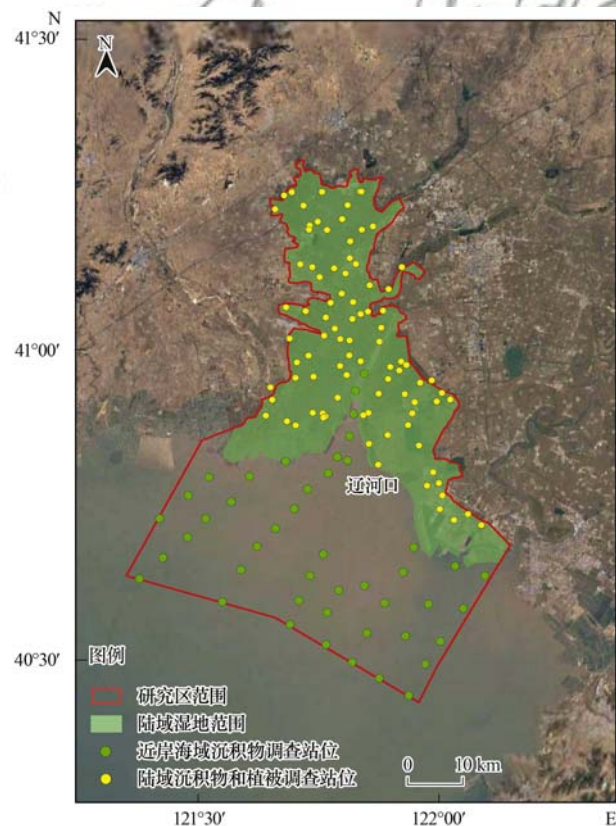


图 1 研究区范围及调查站位分布示意

Fig. 1 Research area and survey station distribution map

2 材料与方法

2.1 数据获取与处理

2.1.1 遥感影像处理

以 2014 年 SPOT5 高分辨率遥感影像为数据

源,选择 5 月底植被生长期清晰且无云的遥感影像进行目视解译,将辽河口区域划分为开放海域、芦苇群落、盐地碱蓬、泥滩、河流、开放式养殖用海、人工鱼礁用海、水产养殖、水田、围海养殖用海、船舶工业用海、港口用海和交通用地等 20 个类型.对解译结果进行现场验证,91 个现场采样点中,84 个与解译结果一致,总体精度优于 92%.修正误判区,得到辽河口海域使用类型数据,见图 2.

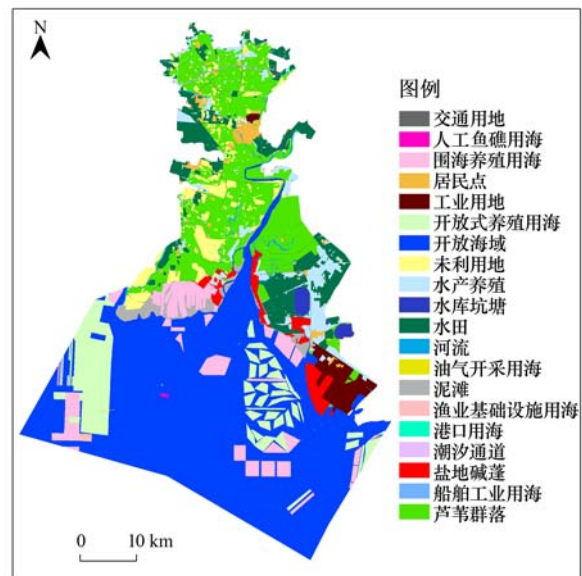


图 2 辽河口海域使用类型

Fig. 2 Illustration of utilization modes in the Liaohe Estuary

2.1.2 生态环境要素现状调查数据

2014 年 7 月,在研究区开展生态环境要素现状调查,共布设 91 个植被群落和陆域沉积物调查样方、45 个近岸海域沉积物调查站位,调查站位见图 1.

(1) 植被群落空间分布 在 91 个样方调查数据基础上,分析了辽河口陆域湿地植被群落空间分异特征,包括植被生物量、盖度、密度和植株平均高度等群落特征.

(2) 陆域沉积物环境质量空间分布 在 91 个调查站位数据基础上,分析了辽河口陆域沉积物环境质量空间分异特征,包括沉积物营养盐和重金属空间分布特征.

(3) 近岸海域沉积物环境质量特征分析 在 45 个调查站位数据基础上,分析了近岸海域沉积物环境质量空间分异特征.

2.1.3 沉积物要素历史调查数据

本文搜集了 1998 年和 2008 年辽河口生态监控区沉积物要素历史调查数据,包括硫化物、有机质、油类和重金属元素等.

2.2 分析方法

2.2.1 对比分析方法

采用时间序列及动态分析法,比较同一总体条

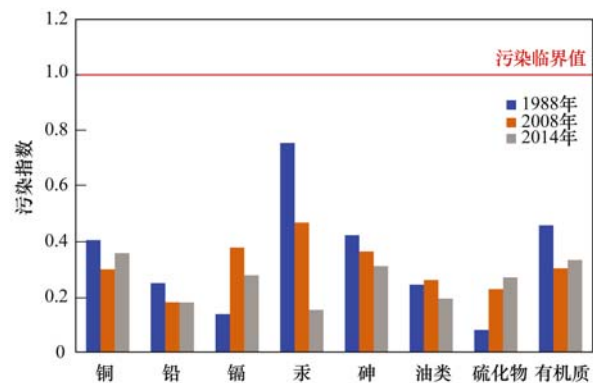


图3 辽河口区域1988、2008和2014年沉积物污染情况

Fig. 3 Pollution status of the sediments in the Liaohe Estuary in 1998, 2008, and 2014

件、不同时期的沉积物特征变化及趋势；利用箱式图,比较同一时间、不同海域使用类型下沉积物特征差异。

2.2.2 典范对应分析法

采用典范对应分析方法,分析植被盖度、植被高度和植被生物量与陆域沉积物环境质量要素之间的典范对应关系.典范对应分析方法将对应分析与多元回归分析相结合,可以同时结合多个环境因子在同一排序图上反映群落、生物种类与环境之间的关系,结果明确直观,是分析生物群落与环境因子关系的有效工具^[25].

2.2.3 差异显著性分析法

多元方差分析用于两个及两个以上样本均数差别的显著性检验,通过分析不同来源的变异对总变异的贡献大小,确定可控因素对研究结果影响力的大小.本文采用单因素方差分析,比较成组的多个样本均值,采用完全随机设计的方差分析,研究海域使用类型和植被演替是否对沉积物特征有显著影响.

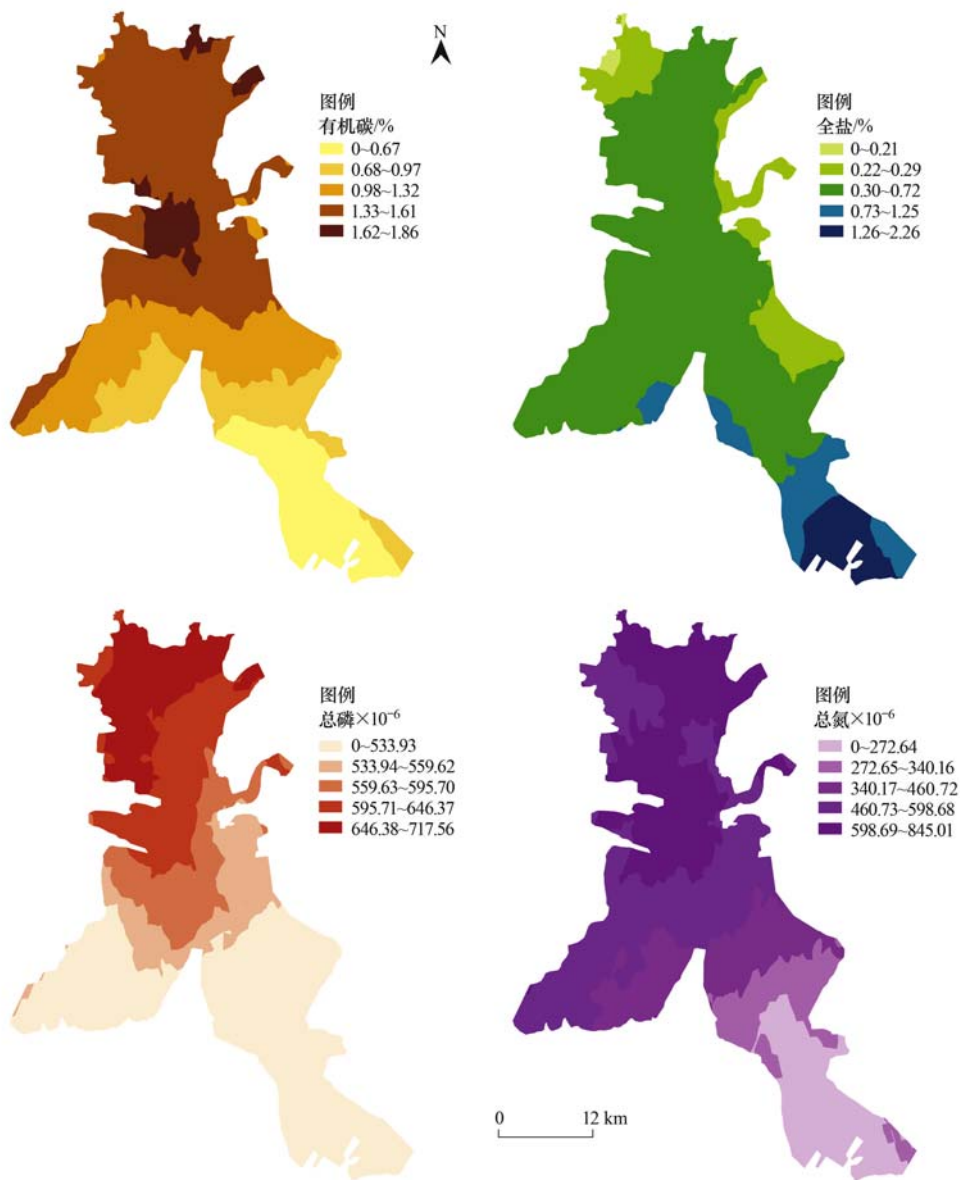


图4 沉积物营养盐含量分布特征

Fig. 4 Spatial distribution patterns of nutritive salts in the sediments of the Liaohe Estuary

在方差分析的基础上,采用多重比较检验,实现对各个水平下沉积物要素总体均值的逐对比较,进一步确定海域使用和植被覆被的类型对沉积物特征的影响程度.

3 结果与分析

3.1 辽河口沉积物质量时间变化分析

以各站位污染要素含量平均值与一类沉积物质量标准^[26]之间的比值作为该污染因子的污染指数^[27,28],比较 1988 年、2008 年和 2014 年各主要污染物的污染指数,见图 3.

从图 3 中可以看出:辽河口湿地区域沉积物较为清洁,1988、2008 和 2014 年各要素平均含量均符合一类沉积物质量要求.从污染状况的时间演化

趋势来看,从 1988 ~ 2008 年再到 2014 年,污染程度平稳中略有减轻,除镉和硫化物两项指标污染指数有所上升外,其余指标污染指数总体上均出现了不同程度的下降.

3.2 辽河口沉积物质量空间分异特征分析

研究区陆域沉积物营养盐 TOC 含量(质量分数,下同)介于 $0.42\% \sim 1.86\%$,由陆向海呈现显著带状分布且含量逐渐降低,在芦苇分布区域呈现高值;TP 含量介于 $447.17 \times 10^{-6} \sim 717.56 \times 10^{-6}$,TN 含量介于 $57.40 \times 10^{-6} \sim 845.01 \times 10^{-6}$,呈显著带状分布,并由陆向海方向逐渐降低;全盐含量介于 $0.17\% \sim 2.26\%$,地带性分布较为不明显,但也表现出由陆向海逐渐升高趋势(图 4).

进一步分析研究区陆域沉积物重金属污染物分

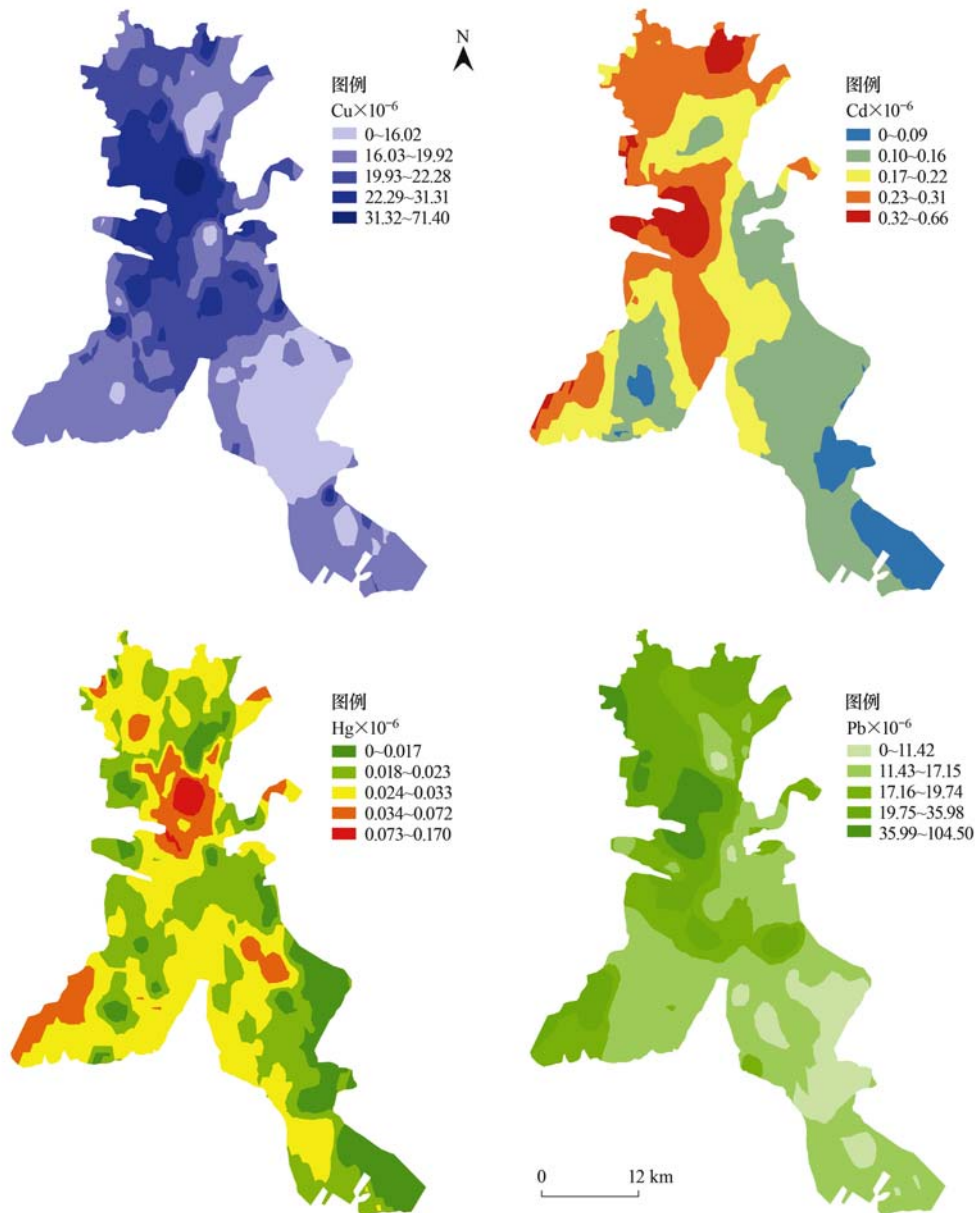


图 5 陆域沉积物重金属空间分异特征

Fig. 5 Spatial distribution patterns of heavy metals in the sediments of the Liaohe Estuary

布情况,结果显示,铜(Cu)、镉(Cd)、汞(Hg)和铅(Pb)的含量空间分异地带性不明显,并未表现出由陆向海的带状分布空间特征(图5);重金属污染物与营养盐空间分异的差异,可能与重金属污染物的迁移转化途径有关,也可能与海域使用类型有关。

近岸海域沉积物污染物油类、滴滴涕(DDT)、六六六(HCH)、多氯联苯(PCB)、Pb和砷(As)在空间分布上,具有一定的随机性。特别是DDT、HCH和PCB空间分布未呈现空间聚集性,而油类、Pb和As在空间上呈现出一定的聚集性,但未呈现出带状分布(图6)。

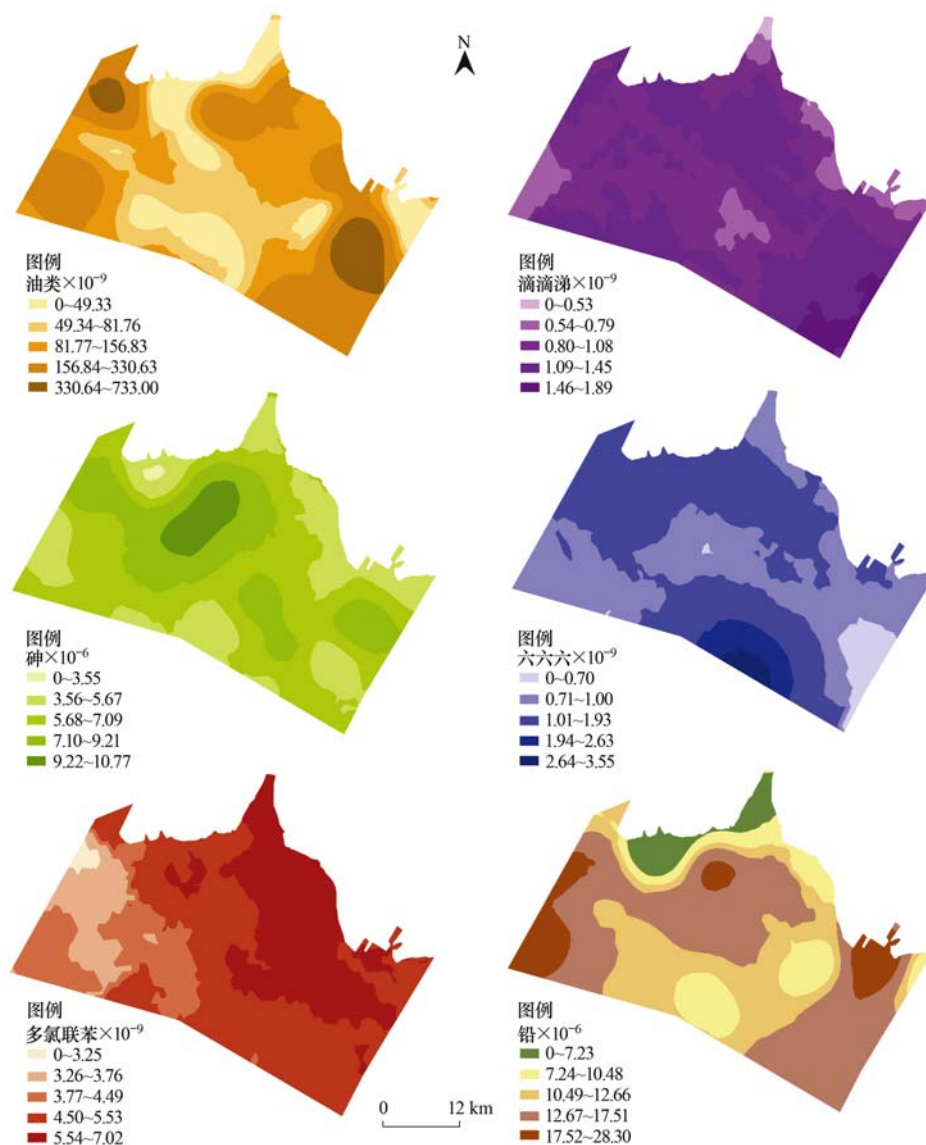


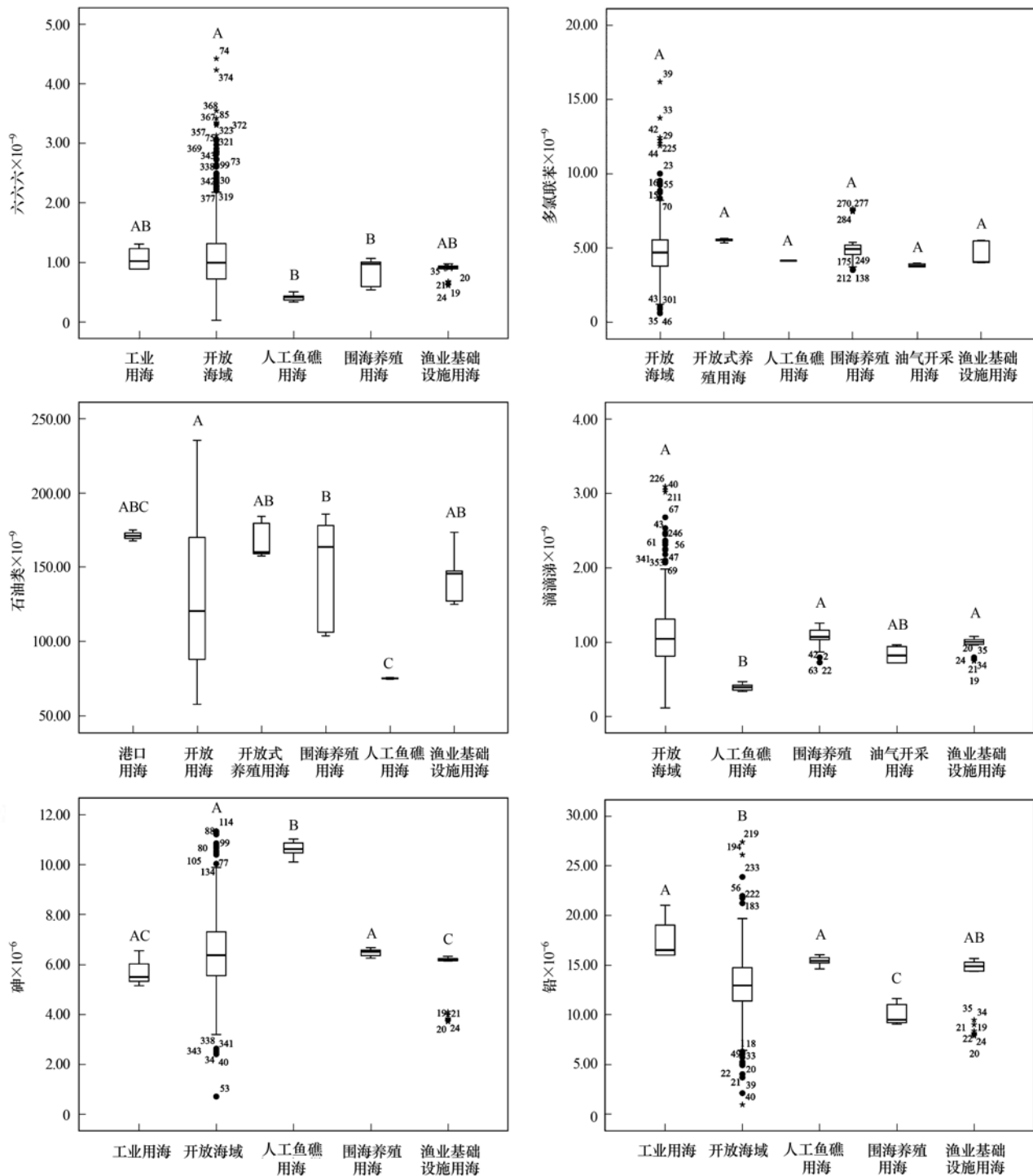
图6 近岸海域沉积物质量空间分布特征

Fig. 6 Spatial distribution patterns of the quality of the sediments of the Liaohe Estuary

3.3 不同海域使用类型下沉积物质量分异特征分析

为进一步识别海域使用类型对沉积物质量是否有显著影响,本文采用多元方差统计方法分析了不同海域使用类型下污染物差异性。结果显示,HCH含量在开放海域最高,人工鱼礁用海最低,开放海域与其他用海类型HCH含量具有显著差异,其他用海类型之间HCH含量差异不显著;PCB含量在开放海域最高,油气开采用海最低,各用海类型PCB含量差异不显著;石油类含量平均值最高是港口用海,人工鱼礁用海石油类含量最低,石油类含量开放用海和人工鱼礁用海与其他各类型含量

均具有显著差异;DDT含量围海养殖用海含量最高,人工鱼礁用海DDT含量最低,且人工鱼礁用海除与油气开采差异不显著外,与其他用海类型的DDT含量均具有显著差异,而其他用海类型DDT含量差异不显著;As含量人工鱼礁用海最高,工业用海As含量最低,且开放海域、人工鱼礁用海和渔业基础设施用海As含量具有显著差异;沉积物中Pb含量工业用海最高,围海养殖用海沉积物中Pb含量最低,且工业用海、开放海域和围海养殖用海类型沉积物中Pb含量具有显著差异(图7)。



大写字母用以区分是否具有显著性差异,显著性水平为 $P < 0.05$

图7 不同海域使用类型沉积物质量特征分析

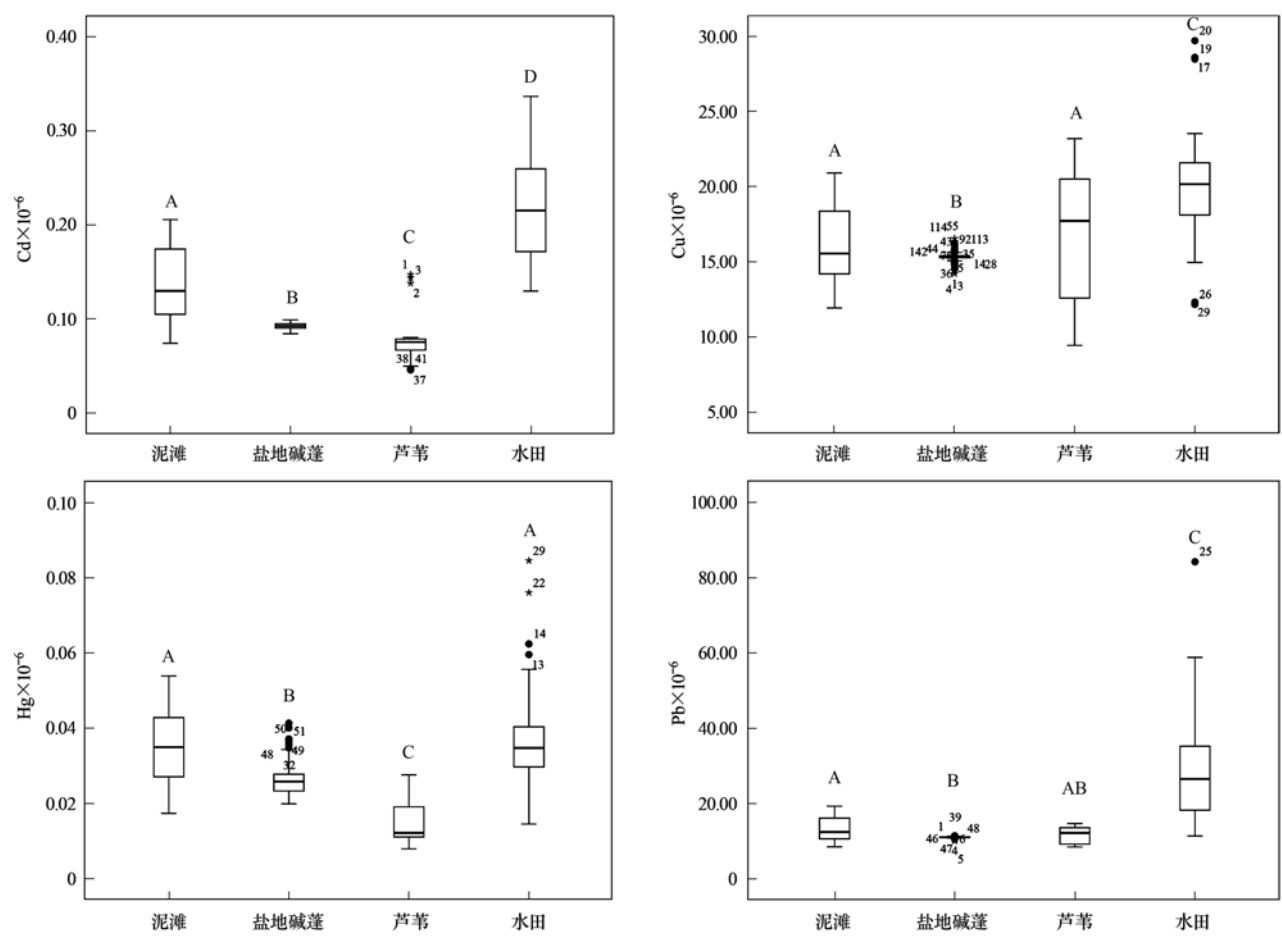
Fig. 7 Analysis of the quality of the sediments in sea areas with different utilization modes

3.4 不同植被演替阶段沉积物环境要素分异特征分析

沉积物质量与植被覆盖具有密切的联系,本文将辽河口植被群落划分为4个阶段:泥滩(原生阶段)、盐地碱蓬(先锋群落)、芦苇(盐生向陆生过渡阶段)、水田(陆生阶段)。不同演替阶段Cd含量具有显著差异,其中水田Cd含量平均值最高,芦苇最低;Cu含量水田最高,水田、芦苇和盐地碱蓬Cu含

量具有显著差异,而芦苇与泥滩Cu含量差异不显著;Hg含量水田最高,芦苇含量最低,水田、芦苇和盐地碱蓬Hg含量具有显著差异,而水田和泥滩的Hg含量差异不显著;Pb水田含量最高,盐地碱蓬最低,水田、泥滩和盐地碱蓬Pb含量差异显著,泥滩和盐地碱蓬差异显著,盐地碱蓬和芦苇差异不显著(图8)。

水田沉积物中TN的含量最高,芦苇群落最低,



大写字母用以区分是否具有显著性差异,显著性水平为 $P < 0.05$

图 8 不同植被演替阶段沉积物重金属含量特征分析

Fig. 8 Analysis of the contents of heavy metals in the sediments of the Liaohe Estuary at different vegetation succession stages

泥滩、盐地碱蓬、芦苇和水田 TN 含量均具有显著差异; TP 含量水田最高,芦苇最低,泥滩、盐地碱蓬、芦苇和水田 TP 含量均具有显著差异; TOC 水田含量最高,盐地碱蓬最低,泥滩 TOC 含量与其他类型具有显著差异,而盐地碱蓬、芦苇和水田 TOC 含量差异不显著; 全盐含量芦苇最高、水田最低; 泥滩、盐地碱蓬、芦苇和水田沉积物全盐含量均具有显著差异(图 9).

3.5 沉积物营养要素、重金属与植被群落 CCA 分析

排序结果表明(图 10),植被分布特征主要影响因素相关性 r 值大小依次为: $r(\text{全盐}) > r(\text{TOC}) > r(\text{TP}) > r(\text{TN}) > r(\text{Zn}) > r(\text{Cd}) > r(\text{Hg}) > r(\text{Cu}) > r(\text{Pb})$. 全盐含量与总株数呈显著正相关,这主要由于随着盐分的增高,植被群落主要以盐地碱蓬为主; 全盐含量与总生物量呈显著负相关,与平均株高和总盖度也呈显著负相关; TOC、TN 和 TP 与总生物量、植被平均株高和植被盖度呈显著正相关; 重金属 Zn、Cd、Cu、Hg 和 Pb 与平均株高、总盖度和总生物量呈显著正相关,与总株数呈显著负相关,且 Zn 与植被群落特征相关性最大,而 Pb 与植被群落

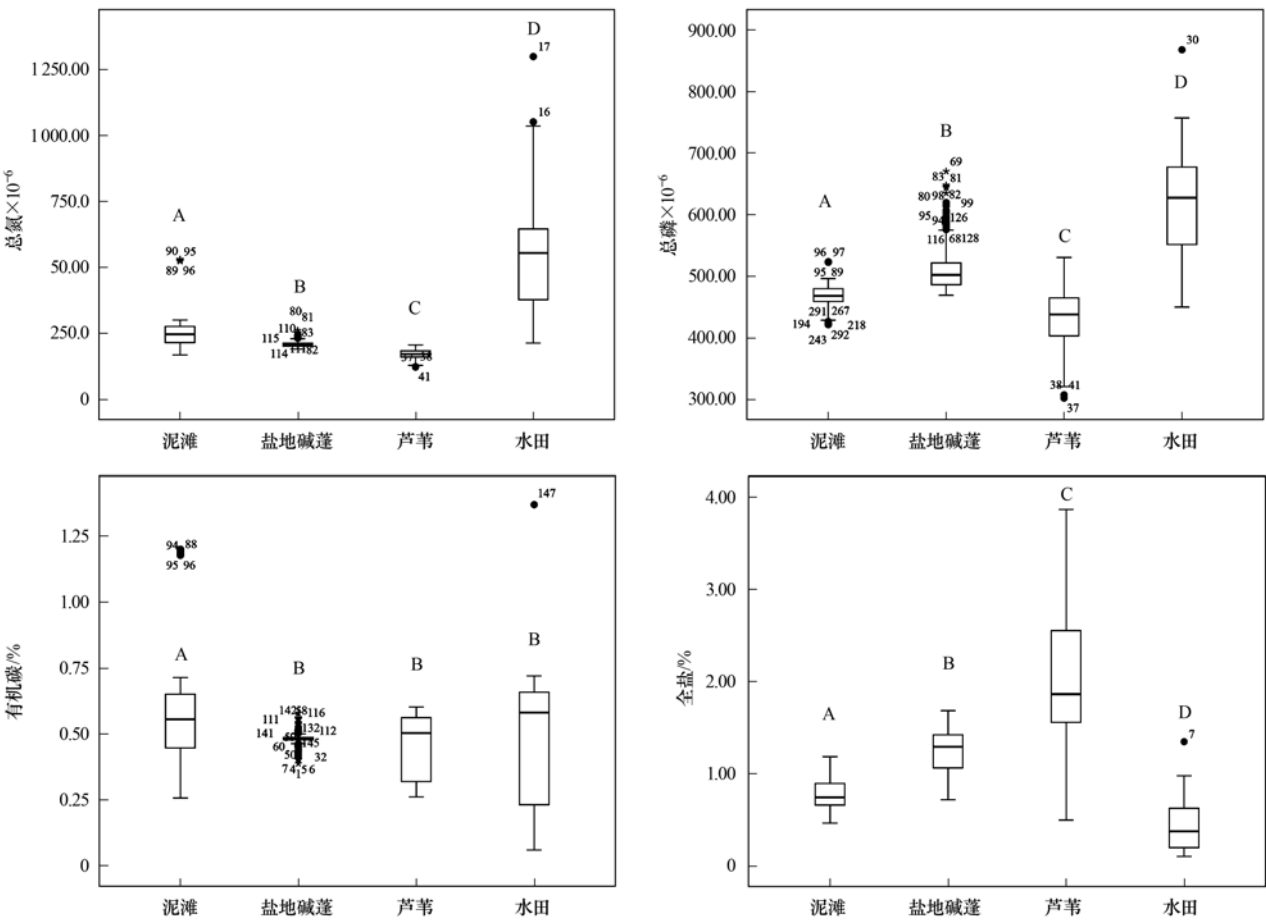
特征相关性最小. 总体而言,研究区植被群落分布特征主要受全盐、TOC、TN 和 TP 的含量控制.

进一步分析不同演替阶段植被群落与沉积物环境质量要素之间的关系,发现不同演替阶段其主控影响因素具有显著差异; 盐地碱蓬及芦苇混生群落主要受到全盐含量的影响,与全盐含量相关性显著; 芦苇群落和芦苇优势种的混生 I 群落与 TOC、TN 和 TP 等影响因素相关性最为显著; 以陆生植被牛筋草为优势群落的混生 II 群落主要受到 TOC、TN 和 TP 等影响因素的影响; 沉积物重金属含量对不同演替阶段植被群落特征分布影响较小(图 11).

4 讨论

4.1 河口沉积物环境要素空间分异规律

本文研究了沉积物的环境质量要素(状态变量)和污染物(外来干扰变量)的空间分异规律. 研究发现研究区陆域沉积物营养盐 TOC 含量由陆向海呈现显著带状分布且逐渐降低, TN 和 TP 含量也呈显著带状分布,并由陆向海方向逐渐降低; 全盐含量地带性分布较为不明显,但也表现出由陆向海



大写字母用以区分是否具有显著性差异,显著性水平为 $P < 0.05$

图9 不同植被演替阶段沉积物质量特征分析

Fig. 9 Analysis of the quality of the sediments in the Liaohe Estuary at different vegetation succession stages

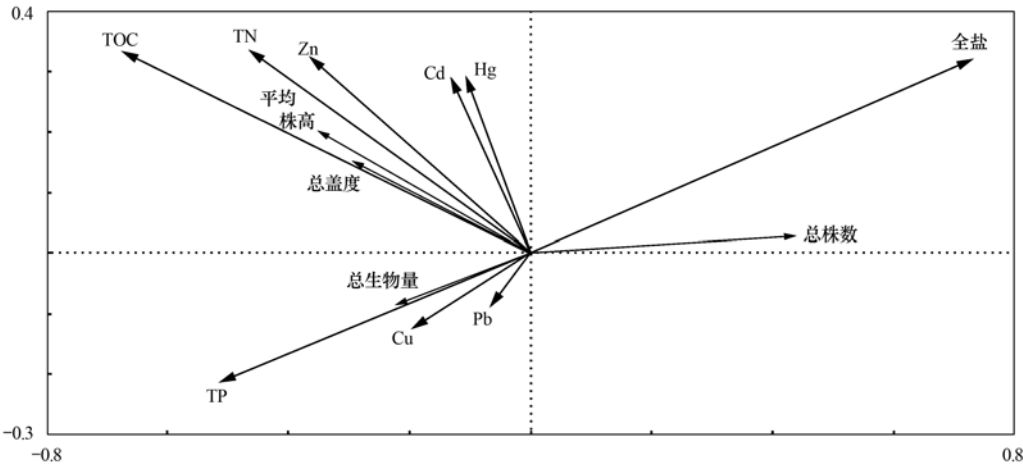


图10 植被群落特征与沉积物质量要素 CCA 排序

Fig. 10 Sorted results based on CCA analysis results between the quality factors in the sediments and the distribution characteristics of the plant community

逐渐升高趋势. 这与以往 Sun 等^[29]和慎佳泓等^[30]在长江口研究的结果相类似,说明沉积物环境质量要素受到河口地区高程控制,其营养元素呈现显著带状分布规律,这为沉积物环境敏感性分析提供了理论支撑.

本文对河口沉积物的研究发现,油类、DDT、

HCH、PCB、As、Cu、Cd、Hg 和 Pb 的含量空间分异地带性不明显,并未表现出由陆向海的带状分布空间特征,与营养盐空间分异的有所不同. 这可能与重金属污染物的迁移转化途径有关,也可能与人类活动类型有关. 因为污染物属于外来干扰源所导致的结果,因此其在空间分异上规律并不明显,说明河口地

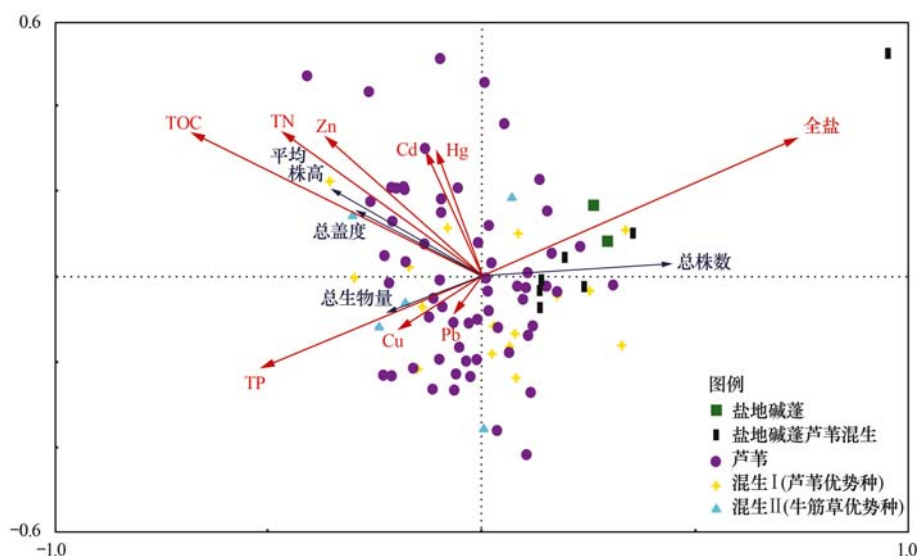


图 11 不同演替阶段群落与沉积物质量要素 CCA 排序

Fig. 11 Sorted results based on CCA analysis results between the quality factors in the sediments and the distribution characteristics of the plant community at different vegetation succession stages

区污染物空间分布受到高程控制的影响不大,具有一定的随机性,这为开展生态脆弱性评估提供了理论支撑.

4.2 不同海域使用类型对沉积物环境要素分异特征的影响

在河口地区土地使用类型对沉积物营养元素具有显著影响, Sun 等^[29] 已经进行深入研究,发现长江口围垦区对土壤营养元素影响较大的是土地利用方式和围垦时间. 上述研究主要集中于围垦区,本研究将研究范围扩展至近岸海域,重点关注不同用海类型下,沉积物营养元素和污染物含量是否存在显著差异. 总体而言,研究区污染物受到不同海域使用类型的影响有一定差异显著性,因为不同海域使用类型造成不同的污染物富集效应,验证了重金属及污染物的分布主要受到人类活动的影响,具有一定的随机性. 这为研究区生态脆弱性干扰指标和沉积物质量指标的选择提供了基础支撑.

4.3 植被不同演替阶段与沉积物环境质量内在关联规律

植被覆盖与沉积物环境要素之间的关系受到学者们广泛关注,针对不同植被覆盖演替阶段沉积物环境要素开展了大量研究工作. Sun 等^[29] 识别了长江口围垦区植被群落与土壤环境要素之间的关系,发现植被群落分布主要受到盐度、TOC、TN 和 TP 含量的影响. 本研究将辽河口植被群落划分为 4 个阶段:泥滩(原生阶段)、盐地碱蓬(先锋群落)、芦苇(盐生向陆生过渡阶段)、水田(陆生阶段). 与以往研究不同的是,本研究发现沉积物重金属含量、营养元素含量在各不同演替阶段下具有显著差异. 进一

步分析发现,植被不同演替阶段下主控因子具有显著差异,结果显示植被演替初级阶段主要受盐度控制,随着由盐生植被向陆生植被逐渐过渡,植被分布特征逐渐与 TOC、TN 和 TP 的内在联系逐渐增大,同时发现重金属等污染物含量与植被群落内在联系并不显著. 这说明植被群落主要受营养元素影响,而重金属元素在植被群落演替过程中影响较小.

5 结论

本文以遥感影像数据、现状调查数据和历史调查数据为数据源,采用空间分析方法、统计分析、多元方差分析和典范对应分析方法,重点分析了辽河口沉积物环境要素和污染物历史变化过程和空间分异规律,在此基础上分析了不同海域使用类型下和不同植被演替阶段沉积物环境要素和污染物之间的影响与关系. 结果显示,不同海域使用类型对沉积物污染物富集具有一定的显著影响;植被不同演替阶段主要受沉积物全盐和营养元素的影响,受重金属及污染物的含量影响不大. 通过本文研究,识别出沉积物营养元素能够反映植被群落特征,而污染物能够反映人类干扰状况,进而为确定辽河口生态脆弱性评估指标提供基础理论支撑.

参考文献:

- [1] Forman R T T. Some general principles of landscape and regional ecology[J]. *Landscape Ecology*, 1995, **10**(3): 133-142.
- [2] Fu B J, Zhang Q J, Chen L D, et al. Temporal change in land use and its relationship to slope degree and soil type in a small catchment on the Loess Plateau of China[J]. *CATENA*, 2006, **65**(1): 41-48.
- [3] 王开存, 王灿, 李龙辉, 等. 全球变化驱动下陆表自然和人文要素相互作用及区域表现[J]. *中国基础科学*, 2017, **19**(5): 23-28.

- Wang K C, Wang C, Li L H, *et al.* The interaction between natural and anthropogenic factors with their regional performance driven by global change [J]. *China Basic Science*, 2017, **19** (5): 23-28.
- [4] 李加林, 杨晓平, 童亿勤. 潮滩围垦对海岸环境的影响研究进展[J]. *地理科学进展*, 2007, **26**(2): 43-51.
- Li J L, Yang X P, Tong Y Q. Progress on environmental effects of tidal flat reclamation[J]. *Progress in Geography*, 2007, **26** (2): 43-51.
- [5] 徐惠民, 丁德文, 石洪华, 等. 基于复合生态系统理论的海湾生态监控区划指标框架研究[J]. *生态学报*, 2014, **34** (1): 122-128.
- Xu H M, Ding D W, Shi H H, *et al.* Research of index system framework in marine ecology monitoring & regulation areas division based on complex ecosystem of nature-human-society [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(1): 122-128.
- [6] Pethick J. Estuarine and tidal wetland restoration in the United Kingdom: policy versus practice [J]. *Restoration Ecology*, 2002, **10**(3): 431-437.
- [7] 宋红丽. 围填海活动对黄河三角洲滨海湿地生态系统类型变化和碳汇功能的影响[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2015.
- Song H L. Influence of reclamation activities on ecosystem type and carbon sink function of the coastal wetland in the Yellow River estuary[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [8] 翟俊, 肖桐, 杨旻, 等. 中国沿海不透水地表变化特征分析[J]. *资源科学*, 2016, **38**(5): 814-824.
- Zhai J, Xiao T, Yang M, *et al.* Characteristics of impervious surface changes across coastal China[J]. *Resources Science*, 2016, **38**(5): 814-824.
- [9] 蔡文倩, 周娟, 林岩璇, 等. 基于底栖生物指数的辽东湾生态质量状况评价[J]. *海洋科学*, 2016, **40**(10): 105-112.
- Cai W Q, Zhou J, Lin K X, *et al.* Ecological quality status of Liaodong Bay using benthic indices[J]. *Marine Sciences*, 2016, **40**(10): 105-112.
- [10] de Vos J A, Raats P A C, Feddes R A. Chloride transport in a recently reclaimed Dutch polder [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, **257**(1-4): 59-77.
- [11] Spijker J, Vriend S P, van Gaans P F M. Natural and anthropogenic patterns of covariance and spatial variability of minor and trace elements in agricultural topsoil[J]. *Geoderma*, 2005, **127**(1-2): 24-35.
- [12] 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 等. 三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2607-2614.
- Fang Z Q, Chen Q Y, Yin D L, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in the sediments of the estuary of the tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (6): 2607-2614.
- [13] Hesterberg D, de Vos B, Raats P A C. Chemistry of subsurface drain discharge from an agricultural polder soil[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, **86**(1-2): 220-228.
- [14] 李艳, 史舟, 王人潮. 基于GIS的土壤盐分时空变异及分区管理研究——以浙江省上虞市海涂围垦区为例[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(3): 121-124, 129.
- Li Y, Shi Z, Wang R C. Study on spatio-temporal variability of soil salinity and site-specific management zones based on GIS—A case study on coastal saline region in Zhejiang province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, **19**(3): 121-124, 129.
- [15] 吴明, 邵学新, 胡锋, 等. 围垦对杭州湾南岸滨海湿地土壤养分分布的影响[J]. *土壤*, 2008, **40**(5): 760-764.
- Wu M, Shao X X, Hu F, *et al.* Effects of reclamation on soil nutrients distribution of coastal wetland in south Hangzhou Bay [J]. *Soils*, 2008, **40**(5): 760-764.
- [16] 杨劲松, 姚荣江. 苏北海涂围垦区土壤质量综合评价研究[J]. *中国生态农业学报*, 2009, **17**(3): 410-415.
- Yang J S, Yao R J. Evaluation of soil quality in reclaimed coastal regions in North Jiangsu province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, **17**(3): 410-415.
- [17] 张林海, 曾从盛, 仝川. 闽江河口湿地芦苇和互花米草生物量季节动态研究[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2008, **3**(2): 25-33.
- Zhang L H, Zeng C S, Tong C. Study on biomass dynamics of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* in the Wetlands of Minjiang River Estuary [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2008, **3**(2): 25-33.
- [18] 冯剑丰, 王秀明, 孟伟庆, 等. 天津近岸海域夏季大型底栖生物群落结构变化特征[J]. *生态学报*, 2011, **31**(20): 5875-5885.
- Feng J F, Wang X M, Meng W Q, *et al.* Variation characteristics of macrobenthic communities structure in Tianjin coastal region in summer [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31** (20): 5875-5885.
- [19] Ukpong I E. Vegetation and its relation to soil nutrient and salinity in the Calabar mangrove swamp, Nigeria [J]. *Mangroves and Salt Marshes*, 1997, **1**(4): 211-218.
- [20] El-Ghani M M A, Amer W M. Soil-vegetation relationships in a coastal desert plain of southern Sinai, Egypt [J]. *Journal of Arid Environments*, 2003, **55**(4): 607-628.
- [21] Critchley C N R, Chambers B J, Fowbert J A, *et al.* Plant species richness, functional type and soil properties of grasslands and allied vegetation in English environmentally sensitive areas [J]. *Grass and Forage Science*, 2002, **57**(2): 82-92.
- [22] da Silva D M, Batalha M A. Soil-vegetation relationships in cerrados under different fire frequencies [J]. *Plant and Soil*, 2008, **311**(1-2): 87-96.
- [23] Reddy R A, Balkwill K, McLellan T. Plant species richness and diversity of the serpentine areas on the Witwatersrand [J]. *Plant Ecology*, 2009, **201**(2): 365-381.
- [24] Wang W Y, Wang Q J, Wang H C. The effect of land management on plant community composition, species diversity, and productivity of alpine Kobersia steppe meadow [J]. *Ecological Research*, 2006, **21**(2): 181-187.
- [25] 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 等. 汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 922-927.
- Wang Y F, Zhao X L, He B H, *et al.* Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environmental factors in Hanfeng Lake [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 922-927.
- [26] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [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] 潘萃, 黄晓荣, 魏晓娟, 等. 三种常用水质评价方法的对比分析研究[J]. *中国农村水利水电*, 2019, (6): 51-55.

- Pan L, Huang X R, Wei X Y, *et al.* A comparative analysis of three common water quality evaluation methods[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019, (6): 51-55.
- [29] Sun Y G, Li X Z, Mander ü, *et al.* Effect of reclamation time and land use on soil properties in Changjiang River Estuary, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2011, **21**(4): 403-416.
- [30] 慎佳泓, 胡仁勇, 李铭红, 等. 杭州湾和乐清湾滩涂围垦对湿地植物多样性的影响[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2006, **33**(3): 324-328, 332.
- Shen J H, Hu Y Y, Li M H, *et al.* Influence of reclamation on plant diversity of beach wetlands in Hangzhou Bay and Yueqing Bay in East China[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2006, **33**(3): 324-328, 332.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2019年11月19日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2018年度中国科技论文统计结果。统计结果显示《环境科学》2018年度总被引频次11 644,影响因子2.130,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列。



CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)