

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化	薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源	周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)
利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布	刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析	王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气 $PM_{2.5}$ 的污染水平及来源解析	林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晚芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征	刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立	陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试	胡月琪,郭晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价	王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
CoCuMnO ₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学	孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化	张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征	史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用 $\delta^{15}N-NO_3^-$ 和 $\delta^{18}O-NO_3^-$ 示踪北京城区河流硝酸盐来源	赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析	王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响	陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究	王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究	冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例	张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素	任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价	王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价	蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险	陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芳宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例	王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素	黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(<i>Bacteroides</i>) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例	张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征	梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成	刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究	丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素	董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析	程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学	郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选	李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米 Fe ₃ O ₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究	钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能	宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放通量的影响	郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解 CH ₄ 与 N ₂ O 浓度特征	侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克氏针茅草原 N ₂ O 排放的影响	杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制	曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局	高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响	史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险	赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析	刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米 TiO ₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响	张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学	马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响	宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响	黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析	王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响	郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征	林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)	

大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化

张雷^{1,2}, 曹伟^{1,2}, 马迎群^{1,2}, 韩超南^{1,2}, 秦延文^{1,2*}, 赵艳民^{1,2}, 刘志超^{1,2}, 杨晨晨^{1,2}

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院水环境研究所, 环境保护河口与海岸带环境重点实验室, 北京 100012)

摘要: 根据 2013 年 8 月和 11 月大辽河感潮河段及近岸河口区水质的实测数据, 对水体中不同形态氮、磷含量的季节和空间分布特征进行了研究, 并对水体潜在性富营养化程度进行了评价。结果表明, 2013 年丰水期和枯水期, 从大辽河感潮河段至近岸河口区, 硝酸盐是水体无机氮存在的主要形态, 其约占总无机氮的 55%; 颗粒态磷 (TPP-P) 是水体磷营养盐的主要存在形式, 其含量占水体磷营养盐的 50% 以上。空间上, 从大辽河感潮河段至近岸河口区, 水体的氮、磷形态的浓度表现为逐渐降低的趋势, 相关性分析结果显示, 水体大多数氮、磷形态与盐度呈显著的负相关关系, 说明海水物理稀释相比其它环境因子对水体氮、磷形态空间分布起着主要作用; 季节上, 大辽河感潮河段及近岸河口区水体氮、磷含量表现为“枯水期 > 丰水期”, 这主要与感潮河段季节性陆源输入情况不同有关。大辽河感潮河段及近岸河口区水体 DIN-N 浓度均大于 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, N/P 大于 60, 均表现为磷限制潜在富营养化水平。

关键词: 大辽河感潮河段及河口区; 氮磷; 空间分布; 时间分布; 富营养化

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1677-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.05.011

Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication

ZHANG Lei^{1,2}, CAO Wei^{1,2}, MA Ying-qun^{1,2}, HAN Chao-nan^{1,2}, QIN Yan-wen^{1,2*}, ZHAO Yan-min^{1,2}, LIU Zhi-chao^{1,2}, YANG Cheng-cheng^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Estuarine and Coastal Environment, Water Research Institute, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on the monitoring data in the tidal reach and estuary of the Daliao river in August and November, 2013, the seasonal and spatial distribution of the nitrogen and phosphorus forms were studied, and the degree of eutrophication was evaluated. The results showed that nitrate nitrogen was the main chemical species and occupied about fifty-five percent of inorganic nitrogen, and the particulate phosphorus was the main chemical species and occupied about fifty percent of total phosphorus in the tidal reach and estuary of the Daliao river in wet and dry seasons, 2013. The concentrations of nitrogen and phosphorus nutrients decreased in the direction from tidal reach to estuary of the Daliao river. Correlation analysis showed that there was a significant negative correlation between the nitrogen and phosphorus forms and salinity in most of the water body, which illustrated that physical dilution of seawater played a major role in the spatial distribution of nitrogen and phosphorus forms. The concentrations of nitrogen and phosphorus nutrients in the dry season were higher than those in the wet season, this was mainly related to the seasonal terrestrial input of the tidal reach. The concentration of the dissolved inorganic nitrogen was higher than $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the value of N/P was higher than 60, which indicated that $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ was the nutrient limiting phytoplankton growth in the tidal reach and estuary of the Daliao river in August and November, 2013.

Key words: the tidal reach and estuary of the Daliao river; nitrogen and phosphorus; spatial distribution; temporal distribution; eutrophication

在陆海生物地球化学循环中,生源要素主要通过河流输送至海洋中。河口作为海洋与陆地河流的交汇结合处,是生源要素陆海输送必经之地。由于大多数近岸河口人类活动频繁,河口会接收和存储大量来自上游河流水体中的污染物质。然而,河口具有每天涨退潮的不稳定环境特性,导致水体污染物质不断震荡,难以扩散,从而河口水环境污染加

剧,水生生态系统失衡^[1~3],以往研究表明^[4],氮磷是河口区水质的主要污染因子。

收稿日期: 2015-11-02; 修订日期: 2015-12-21

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07503-002)

作者简介: 张雷 (1975 ~), 男, 高级工程师, 主要研究方向为环境工程、环境化学, E-mail: zhang_lei@craes.org.cn

* 通讯联系人, E-mail: qinyw@craes.org.cn

关于河口水体氮磷的研究,国内外学者已有大量报道. Boynton 等^[5]研究表明非点源的氮磷的输入是美国帕塔森特河河口区的主要污染源输入;近 10 年来,美国密西西比河河口区氮磷污染导致其富营养化越来越严重^[6,7]; Kress 等^[8]研究发现 Nicoya 湾内的营养盐浓度高于湾外,河口附近浓度高于其他区域,并且雨季 Nicoya 湾区域内营养盐浓度高于旱季; Zee 等^[9]研究了比利时 Scheldt 河口和感潮河段水环境中溶解态和颗粒态氮、磷的分布,研究结果表明主要影响 Scheldt 河口和感潮河段水体氮、磷形态转化的过程包括磷的吸附-解吸作用,海藻摄取作用和硝化作用;李磊等^[10]研究发现长江口海域营养盐浓度具有明显的季节变化特点,且富营养化严重^[11];蔡阳扬等^[12]研究发现珠江口海域在夏秋季基本上属中度至重度富营养化海域;赵骞等^[13]研究发现辽东湾海域氮磷浓度均表现为河口大于远海,秋季大于夏季的特征,且富营养化非常严重.

大辽河作为辽东湾海域较大的人海河流之一,沿岸人类活动频繁和工农业活动发达,大量的氮、磷等营养物质输入至感潮河段继而排泄入海,导致大辽河口水体富营养化程度逐渐加剧. 目前大辽河口区水体营养盐的分布规律研究已引起广大研究

人员的关注. 张晋华等^[14]研究表明辽河口水体 NO_3^- -N、DIN-N、TN-N 在 4、7 和 11 月的河口混合过程中均呈保守型, PO_4^{3-} -P 在 4、7 月为保守的,在 11 月不保守. 殷林春等^[15]研究发现大辽河主要污染因子为氨氮和有机污染物,冬季、春季大辽河水水质污染比夏季严重,落潮时污染比涨潮时严重. 然而,这些研究主要集中于大辽河上游河流或者口外海域,对于大辽河感潮河段及近岸河口区水体营养盐不同形态的分布特征以及潜在性富营养化程度缺乏系统分析. 本研究通过对 2013 年 8 月和 11 月大辽河河口区水样进行监测分析,分析水体中不同形态氮、磷含量的季节和空间分布特征,并且评价水体潜在性富营养化程度,以期为大辽河河口区有关营养盐的进一步研究提供参考.

1 材料与方法

1.1 采样站位和采样时间

大辽河由浑河、太子河在三岔河汇流后起始,整体流向西南,途经下坎子、石佛、赏军台、田庄台、水源,至荣兴农场附近,流向折向东南,经鸭岛进入营口市汇入渤海(图 1). 大辽河流域面积 1 936 km^2 , 河长 94 km. 由于河口区的潮流上溯能到达三岔河以上,故而大辽河全河均为感潮河段.

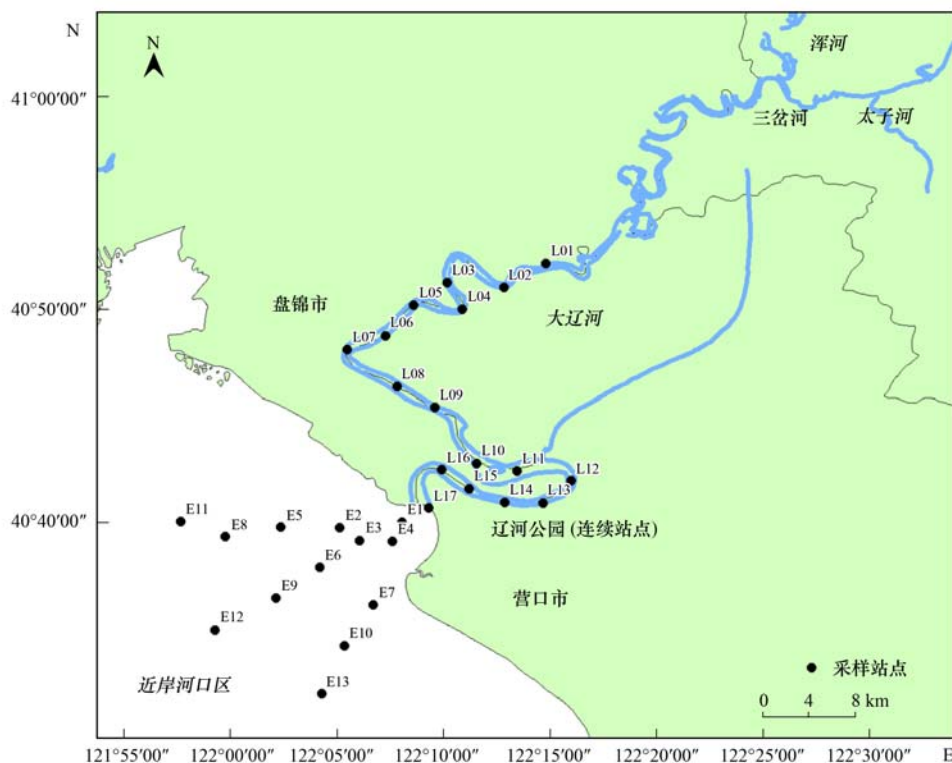


图 1 采样站点示意

Fig. 1 Sampling sites

2013 年 8 月(丰水期)和 11 月(枯水期)对大辽河感潮河段及近岸河口区(40°34′11″N ~ 40°52′11″N、121°59′54″E ~ 122°16′00″E)开展两次野外调查,设置 30 个采样站点,其中大辽河感潮河段设置 17 个(L1 ~ L17),近岸河口区设置 13 个(E1 ~ E13). 采样站位如图 1 所示.

1.2 样品采集及预处理

现场采样时先放掉少量水样,混匀后,取一部分水样立即装于聚乙烯瓶中,4℃冷藏保存;取一部分水样立即经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤,滤液装于聚乙烯瓶中,加入 2 滴氯仿,进行 4℃冷藏保存;另取 250 mL 水样立即经 0.70 μm 玻璃纤维滤膜过滤,−20℃冷冻保存滤膜.

水体氮、磷营养盐的测定:取经 0.45 μm 滤膜过滤并加氯仿冷藏保存的水样,使用 QUAATRO 型营养盐自动分析仪(德国 BRAN LUEBBE 公司)测定溶解态无机氮含量(DIN-N),包括氨氮(NH₄⁺-N)、亚硝酸盐(NO₂⁻-N)、硝酸盐(NO₃⁻-N)含量;使用磷钼蓝分光光度法测定水样中活性磷酸盐(PO₄³⁻-P)含量. 分别取过滤后水样和未过滤原水样,采用碱性过硫酸钾法消解后使用 QUAATRO 型营养盐自动分析仪测定总溶解态氮(TDN-N)和总氮(TN-N)的含量;采用过硫酸钾法消解后使用磷钼蓝分光光度法分别测定总溶解态磷(TDP-P)和总磷(TP-P)的含量.

水体 pH 值、水温、氧化还原电位、盐度、溶解氧等常规水质参数的测定:现场使用 YSI 便携式多参数水质监测仪(美国 YSI 6600V2 型)直接读取.

水体叶绿素 a 的测定:取经 0.70 μm 玻璃滤膜过滤后的滤膜,使用 F-4500 型荧光光谱仪(日本 HITACHI 公司)测定.

水体悬浮颗粒物含量的测定:水样经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤,称量留在滤膜上的悬浮物质的重量,计算水中的悬浮颗粒物浓度.

各营养盐参数的测定严格按照《海洋监测规范》GB 17378-1998 的有关要求进行.

2 结果与讨论

2.1 水质参数分布特征

大辽河感潮河段与近岸河口区每天两次的涨潮退潮过程,影响着水体 pH 值、水温、溶解氧、氧化还原电位、盐度、悬浮颗粒物含量和叶绿素 a 等水质指标,继而影响着水体各形态氮、磷营养盐分布. 大辽河感潮河段及近岸河口区水质参数分布如表 1 所示,可以看出:空间上,大辽河感潮河段与近岸河口区水体 pH 值、水温、溶解氧含量差异不大,而盐度、氧化还原电位、悬浮颗粒物含量和叶绿素 a 含量具有一定差异性,尤其以枯水期差异更为显著;季节上,丰水期和枯水期,水体水温、溶解氧、悬浮颗粒物含量和叶绿素 a 含量变化比较大.

表 1 大辽河感潮河段及近岸河口区水质参数

Table 1 Water quality parameters of the tidal reach and estuary of the Daliao River

时期	区域	pH 值	水温 /℃	溶解氧 /mg·L ⁻¹	盐度 /‰	氧化还原电位 /mV	悬浮颗粒物 /mg·L ⁻¹	叶绿素 a /μg·L ⁻¹
丰水期	感潮河段	7.32	24.40	3.22	0.16	82.18	344.67	18.26
	近岸河口	7.69	26.51	3.90	7.67	78.77	105.27	20.93
枯水期	感潮河段		5.72	10.97	0.99	85.36	64.98	24.93
	近岸河口	7.83	5.79	10.46	17.14	42.65	133.54	2.28

2.2 水体中 N 营养盐含量

2013 年丰水期(8 月),大辽河感潮河段水体 TN-N 浓度在 5.81 ~ 7.78 mg·L⁻¹,平均浓度为 6.79 mg·L⁻¹;近岸河口区水体 TN-N 浓度在 3.67 ~ 6.54 mg·L⁻¹,平均浓度为 5.13 mg·L⁻¹. 枯水期(11 月),大辽河感潮河段水体 TN-N 浓度在 4.97 ~ 10.07 mg·L⁻¹,平均浓度为 9.19 mg·L⁻¹;近岸河口区水体 TN-N 浓度在 1.61 ~ 5.84 mg·L⁻¹,平均浓度为 3.48 mg·L⁻¹. 大辽河感潮河段及近岸河口区水体 TN-N 的组成均以 TDN-N 为主,占 85% 以上;TDN-N 的组成均以 DIN-N 为主,占 80% 以上;DIN-N 的

组成均以 NO₃⁻-N 为主,占 65% 以上,其中大辽河感潮河段及近岸河口区水体中不同形态氮的含量分布如表 2 所示.

同国内外其他河流或河口水体氮含量相比(表 2),大辽河感潮河段及近岸河口区水体 NO₂⁻-N、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度处于较高的水平,其浓度明显高于世界其他河流河口. 同《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)Ⅲ类水质标准氨氮浓度(以 N 计,1.00 mg·L⁻¹)相比,丰水期和枯水期大辽河感潮河段大多数站点水体 NH₄⁺-N 浓度均不超标. 同《海水水质标准》(GB

3097-1997)Ⅳ类水质标准非离子氨浓度(以N计,0.02 mg·L⁻¹)相比,枯水期大辽河近岸河口区84.60%站点水体NH₄⁺-N浓度均超标,而丰水期仅位于东部海域的个别站点(E4、E10和

E13)超标;同《海水水质标准》(GB 3097-1997)Ⅳ类水质标准无机氮浓度(以N计,0.50 mg·L⁻¹)相比,丰水期和枯水期大辽河近岸河口区水体所有站点DIN-N浓度均超标.

表2 大辽河口及世界其他河口水体营养盐含量/mg·L⁻¹

Table 2 Content of the nutrients in Daliaohe estuary and other estuaries in the world/mg·L⁻¹

时期	区域	NO ₂ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TDN-N	TN-N	PO ₄ ³⁻ -P	TDP-P	TP-P
丰水期	感潮河段	0.43	0.50	3.92	5.96	6.79	0.04	0.07	0.15
	近岸河口区	0.58	0.17	3.74	4.64	5.13	0.03	0.04	0.13
枯水期	感潮河段	1.78	0.82	5.26	9.03	9.19	0.08	0.16	0.41
	近岸河口区	0.83	0.63	2.87	3.96	3.48	0.06	0.09	0.32
The Humber-Ouse Estuary, UK ^[16]		0.014~0.126		0.002~9.8		0.155~0.465			
Mississippi River ^[17]				1.099		0.0496			
Ebro Estuary ^[18]		0.012	0.0168	2.040		0.186			
黄河口 ^[19]		0.060	0.058			0.021			
珠江口 ^[20]		0.0178	0.024	0.685		0.016			
大辽河口 ^[14]		0.049~0.117	0.061~2.818	1.327~3.578		0.029~0.053			

2.3 水体中P营养盐含量

2013年丰水期(8月),大辽河感潮河段水体TP-P浓度在0.07~0.32 mg·L⁻¹,平均浓度为0.15 mg·L⁻¹;近岸河口区水体TP-P浓度在0.05~0.18 mg·L⁻¹,平均浓度为0.13 mg·L⁻¹.枯水期(11月),大辽河感潮河段水体TP-P浓度在0.28~0.62 mg·L⁻¹,平均浓度为0.41 mg·L⁻¹;近岸河口区水体TP-P浓度在0.16~0.53 mg·L⁻¹,平均浓度为0.32 mg·L⁻¹.大辽河感潮河段及近岸河口区水体中TP-P的组成均以TPP-P为主,占50%以上;TDP-P的组成均以PO₄³⁻-P为主,占55%以上.

从表2可以看出,大辽河感潮河段及近岸河口区水体PO₄³⁻-P浓度处于国内外其他河流河口浓度之间,但明显低于欧美一些污染和富营养河流河口,高于黄河口和珠江口.同《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)Ⅲ类水质标准总磷浓度(以P计,0.20 mg·L⁻¹)相比,丰水期大辽河感潮河段大多数站点水体总磷浓度不超标,而枯水期大辽河感潮河段所有站点均超标.同《海水水质标准》(GB 3097-1997)Ⅳ类水质标准活性磷酸盐浓度(以P计,0.045 mg·L⁻¹)相比,丰水期大辽河近岸河口区所有站点水体活性磷酸盐浓度均不超标,而枯水期大辽河近岸河口区69.20%站点超标.

2.4 水体营养盐的时空分布特征

在空间分布上,2013年丰水期和枯水期,从大辽河感潮河段到近岸河口区,水体中NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TDN-N、TN-N、PO₄³⁻-P、TDP-P和TP-P含量基本上均呈现出逐渐降低的空间分布特征(见图

2~9).海水物理稀释作用是导致此种氮、磷营养盐分布的主要原因.大辽河感潮河段因接收上游来水和沿途污染源的营养盐输入而成为富营养盐河水,经过入海口流入近岸河口区时,富营养盐河水受到大量贫营养盐海水的稀释作用,使得近岸河口区水体中各种形态氮、磷浓度降低,此种分布规律是近岸河口区的自生表现形式,与其它学者对闽江河口^[21]、九龙江河口^[22]、长江口^[23]、黄河口^[24]等水体营养盐的空间分布规律一致.通过相关性分析也得到枯水期,大辽河感潮河段及近岸河口区水体NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TDN-N、TN-N、PO₄³⁻-P、TDP-P和TP-P含量均与盐度呈显著的负相关关系;丰水期,水体TDN-N、TN-N、TDP-P和TP-P与盐度的负相关关系显著(见表3).枯水期大辽河感潮河段及近岸河口区水体氮、磷形态与盐度的相关关系比丰水期明显,这可能是受到丰水期雨水汇入后河流径流量较大的影响.

而NH₄⁺-N浓度的空间分布却不如其它氮形态规律,呈齿状分布,原因是水体中NH₄⁺-N浓度受到沿途工业废水、生活污水、有机垃圾和家畜家禽粪便点源污染以及农业施肥面源污染输入的影响十分敏感^[25].

同时,大辽河近岸河口区E4、E7、E10、E13站点水体中NO₂⁻-N、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TDN-N、TN-N、PO₄³⁻-P、TDP-P和TP-P的浓度大多数位于峰顶,高于近岸河口区内的其余站点.E4、E7、E10、E13站点均位于大辽河近岸河口区的东部海域,说明大辽河河口东部海域氮、磷污染相比中部、西部严重,此结果与雷坤等^[26]的研究结果一致.

表 3 大辽河感潮河段及近岸河口区水体氮磷与盐度的相关性分析

项目	NO ₂ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TDN-N	TN-N	PO ₄ ³⁻ -P	TDP-P	TP-P
丰水期盐度	-0.045	-0.166	-0.312	-0.834 **	-0.855 **	-0.079	-0.446 *	-0.422 *
枯水期盐度	-0.926 **	-0.255	-0.944 **	-0.989 **	-0.990 **	-0.851 **	-0.928 **	-0.441 *

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

在季节分布上,大辽河感潮河段水体 NO₂⁻-N、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TDN-N、TN-N、PO₄³⁻-P、TDP-P 和 TP-P 含量的分布相似,均表现为“枯水期含量 > 丰水期含量”。这主要受大辽河感潮河段上游水体营养盐陆源输入季节性不同的影响。大辽河感潮河段水体中氮主要来源于上游浑河、太子河的汇流输入以及沿途点源和农业面源污染输入,丰水期相比枯水期因大量雨水汇入上游来水而稀释了氮、磷输入浓度,从而导致枯水期感潮河段不同形态氮、磷含量较高。

大辽河近岸河口区水体 NO₂⁻-N、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P、TDP-P 和 TP-P 含量的季节分布与感潮河段相同,然而近岸河口区水体 NO₃⁻-N、TDN-N 和 TN-N 含量的季节分布相反,表现为“丰水期含量 > 枯水期含量”。原因可能是水体中氮形态从感潮河段经过入海口输入至河口区的过程中,海水物理稀释作用弱化了陆源输入季节性不同的影响,从而突显了近岸河口区水体浮游植物生长代谢情况季节性差异对水体氮形态分布的影响。丰水期相比枯水期水温较高,近岸河口区中部真光层光照充足,浮游植物生长代谢旺盛,生长量多同时死亡残骸也较多,经过细菌分解作用、氨化作用和硝化作用等,近岸河口区水体中溶解态的 NO₃⁻-N、DIN-N 含量增加,从而丰水期近岸河口区水体 NO₃⁻-N、TDN-N 和 TN-N 含量较高。

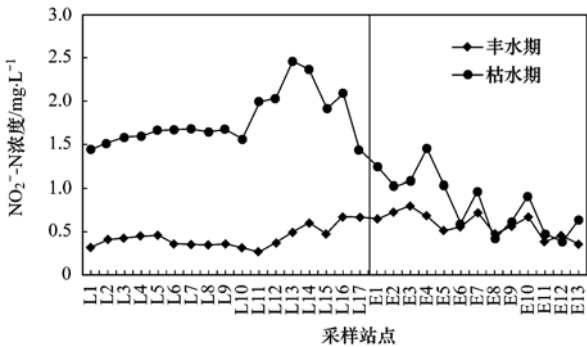


图 2 大辽河感潮河段及近岸河口区水体 NO₂⁻-N 浓度的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of NO₂-N in the tidal reach and estuary of the Daliao river

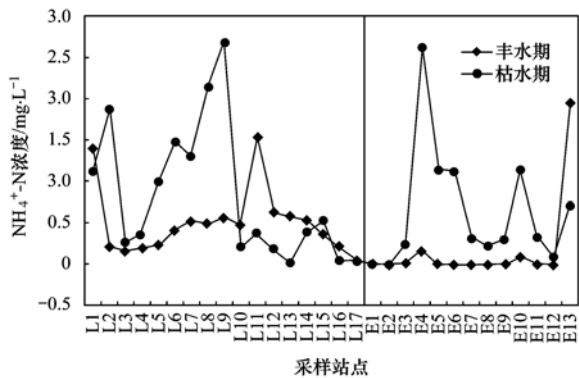


图 3 大辽河感潮河段及近岸河口区水体 NH₄⁺-N 浓度的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of NH₄⁺-N in the tidal reach and estuary of the Daliao river

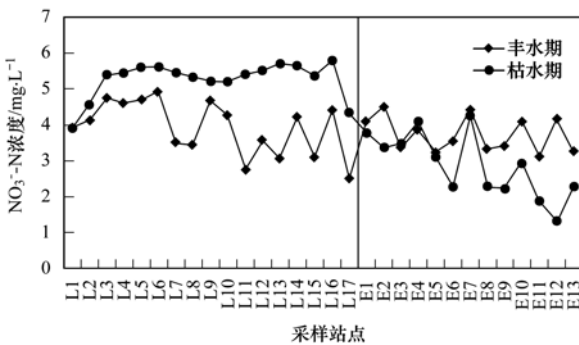


图 4 大辽河感潮河段及近岸河口区水体 NO₃⁻-N 浓度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of NO₃-N in the tidal reach and estuary of the Daliao river

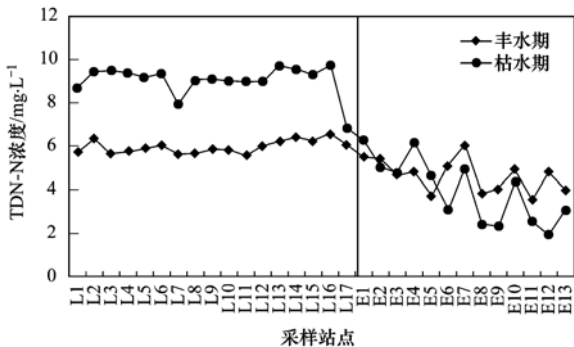


图 5 大辽河感潮河段及近岸河口区水体 TDN-N 浓度的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of TDN-N in the tidal reach and estuary of the Daliao river

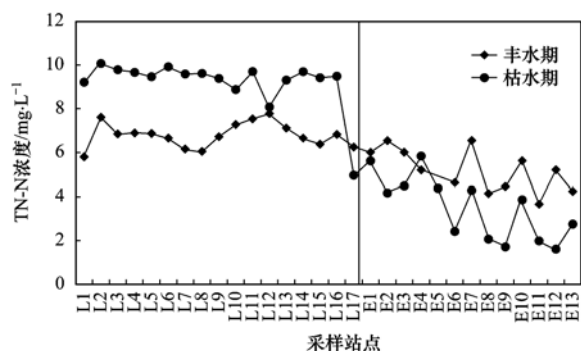


图6 大辽河感潮河段及近岸河口区水体 TN-N 浓度的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of TN-N in the tidal reach and estuary of the Daliao river

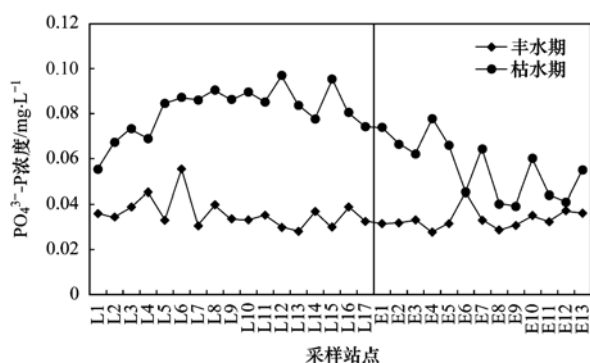
图7 大辽河感潮河段及近岸河口区水体 PO_4^{3-} -P 浓度的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of PO_4^{3-} -P in the tidal reach and estuary of the Daliao river

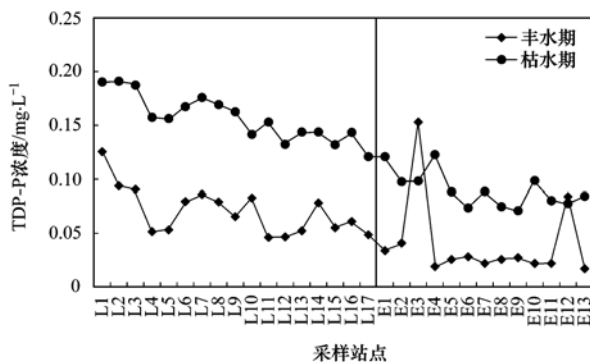


图8 大辽河感潮河段及近岸河口区水体 TDP-P 浓度的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of TDP-P in the tidal reach and estuary of the Daliao river

2.5 大辽河近岸河口区潜在性富营养化评价

海水中相对过剩的营养盐并不能被浮游植物所利用,仅代表一种潜在的富营养化,只有在水体得到足够的最大限制性氮或磷补充使得水体 N/P 值接近 Redfield 值,这部分过剩的磷或氮对水体富营养化的实质性贡献才得以表现^[27,28]。这就是研究学者提出潜在性富营养化评价法^[29]的基本观点,此方法

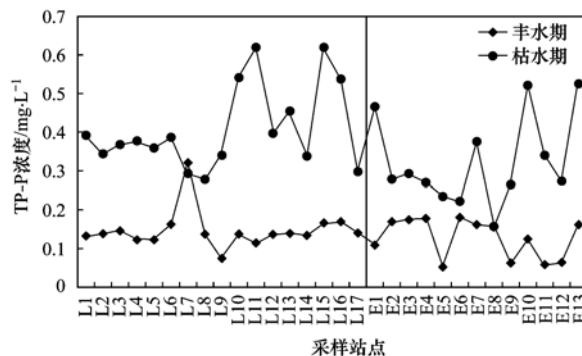


图9 大辽河感潮河段及近岸河口区水体 TP-P 浓度的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of TP-P in the tidal reach and estuary of the Daliao river

多数用于评价近岸河口和海洋水体营养程度及限制因子,营养盐分级标准如表4所示。本研究选用该方法对大辽河近岸河口区水体的潜在性富营养状态进行了评价。

评价结果显示,2013年丰水期,大辽河近岸河口区水体 DIN 浓度、 PO_4^{3-} -P 浓度和 N/P 量比的平均值分别为 $4.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 301.25; 枯水期,大辽河近岸河口区水体 DIN 浓度、 PO_4^{3-} -P 浓度和 N/P 量比的平均值分别为 $4.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 166.27。对照表3中潜在性富营养化评价标准得到:2013年丰水期和枯水期,大辽河近岸河口区水体均表现为磷限制潜在性富营养。

通过查阅近些年大辽河河口区水体氮、磷方面的研究成果(表5),分析了大辽河河口区水体潜在性富营养化状态的历史变化趋势。从1992~2013年,大辽河河口区水体富营养化的限制因子均为磷限制,其中2007年之后大辽河近岸河口区水体均表现为磷限制潜在性富营养化状态。从表5可以看出,2007年7月之前大辽河近岸河口区水体 DIN-N 浓度基本小于 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,2007年7月之后无机氮浓度均大于 $3.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。同时,大辽河近岸河口区水体 PO_4^{3-} -P 浓度也呈现波动性增大的趋势,其原因之一可能是近些年从大辽河感潮河段输入近岸河口区的陆源氮、磷营养盐的数量相比之前逐渐增加,导致水体 DIN-N 和 PO_4^{3-} -P 浓度增大,原因之二可能是不同时期、不同学者、不同实验室、不同仪器测定氮、磷含量等必然会引入一定的实验误差和数据误差。从1992~2013年,大辽河近岸河口区水体 N/P 量比值波动性变化,不同季节水体 N/P 量比值不同,这主要受到不同年代、不同季节水体动力学条件和水体物理、化学和生物因素等的共同影响。

表 4 潜在性富营养化评价标准
Table 4 Classification of potential eutrophication levels

海区等级	营养级	DIN-N/mg·L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ -P/mg·L ⁻¹	N/P 量比
I	贫营养	<0.20	<0.03	8~30
II	中度营养	0.20~0.30	0.03~0.045	8~30
III	富营养	>0.30	>0.045	8~30
IV _P	磷限制中度营养	0.20~0.30		>30
V _P	磷中等限制潜在性富营养	>0.30		30~60
VI _P	磷限制潜在性富营养	>0.30		>60
IV _N	氮限制中度营养		0.03~0.045	<8
V _N	氮中等限制潜在性富营养		>0.045	4~8
VI _N	氮限制潜在性富营养		>0.045	<4

表 5 大辽河感潮河段及近岸河口区潜在性富营养化的历史趋势
Table 5 Historical trend of potential eutrophication in the tidal reach and estuary of the Daliao River

时间	DIN-N /mg·L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ -P /mg·L ⁻¹	N/P 量比	海区等级	营养级	文献
1992 年 8 月	0.71	0.04	35.73	V _P	磷中等限制潜在性富营养	[30]
2002 年 6~9 月	0.21	0.01	50.77	IV _P	磷限制中度营养	[31]
2003 年 9 月	0.31	0.034	20.31	II~III	介于中度营养与富营养之间	[26]
2007 年 7 月	0.53	0.013	88.91	VI _P	磷限制潜在性富营养	[32]
2009 年 7 月	3.42	0.043	174.36	VI _P	磷限制潜在性富营养	[33]
2010 年 4 月	4.19	0.053	176.24	VI _P	磷限制潜在性富营养	[14]
2010 年 7 月	3.34	0.028	307.94	VI _P	磷限制潜在性富营养	[14]
2010 年 9 月	3.46	0.032	242.55	VI _P	磷限制潜在性富营养	[14]
2011 年 10 月	3.81	0.10	84.36	VI _P	磷限制潜在性富营养	[34]
2012 年 5 月	5.88	0.09	144.67	VI _P	磷限制潜在性富营养	[34]
2012 年 8 月	5.52	0.06	203.71	VI _P	磷限制潜在性富营养	[34]
2013 年 8 月	4.69	0.04	296.84	VI _P	磷限制潜在性富营养	本研究
2013 年 11 月	6.33	0.07	200.36	VI _P	磷限制潜在性富营养	本研究

3 结论

(1)2013 年丰水期和枯水期,从大辽河感潮河段输入至近岸河口区水体 TN-N 组成以 TDN-N 为主,占 85% 以上,其中 TDN-N 中 DIN-N 所占质量分数超过 80%,DIN-N 中 NO₃⁻-N 所占质量分数超过 65%。从感潮河段输入至近岸河口区水体 TP-P 中 TPP-P 所占质量分数占 50% 以上,TDP-P 中 PO₄³⁻-P 所占质量分数大于 55%。

(2)2013 年丰水期和枯水期,空间分布上,从大辽河感潮河段到近岸河口区,水体中 NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TDN-N、TN-N、PO₄³⁻-P、TDP-P 和 TP-P 含量基本上均呈现出逐渐降低的空间分布特征,NH₄⁺-N 浓度的空间分布不如其它氮形态规律,呈齿状分布。季节分布上,大辽河感潮河段及近岸河口区水体氮、磷形态表现为“枯水期含量>丰水期含量”。

(3)2013 年丰水期和枯水期,大辽河近岸河口区水体 DIN-N 浓度均大于 0.30 mg·L⁻¹,N/P 大于

60,均表现为磷限制潜在富营养化水平。从 1992~2013 年,大辽河近岸河口区水体富营养化的限制因子均为磷限制,水体 N/P 量比波动性上下变化,而无机氮、活性磷酸盐浓度均呈波动性上升的趋势。

参考文献:

[1] Newman M C, Roberts M H Jr, Hale R C. 郑丙辉,王丽平,雷坤,译. 河口与海岸带风险评价[M]. 北京:海洋出版社,2011. 1-4.

[2] 白军红,邓伟. 中国河口环境问题及其可持续管理对策[J]. 水土保持通报,2001,21(6): 12-15.

[3] Billen G, Somville M, De Becker E, et al. A nitrogen budget of the Scheldt hydrographical basin[J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1985, 19(3-4): 223-230.

[4] 全为民,沈新强,韩金娣,等. 长江口及邻近水域氮、磷的形态特征及分布研究[J]. 海洋科学,2010,34(3): 76-81.

[5] Boynton W R, Hagy J D, Cornwell J C, et al. Nutrient budgets and management actions in the Patuxent River Estuary, Maryland [J]. Estuaries and Coasts, 2008, 31(4): 623-651.

[6] Alexander R B, Smith R A, Schwarz G E. Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico[J]. Nature, 2000, 403(6771): 758-761.

[7] Rabalais N N, Turner R E, Wiseman W J, et al. Nutrient

- changes in the Mississippi river and system responses on the adjacent continental shelf[J]. *Estuaries*, 1996, **19**(2): 386-407.
- [8] Kress N, Coto S L, Brenes C L, *et al.* Horizontal transport and seasonal distribution of nutrients, dissolved oxygen and chlorophyll-*a* in the Gulf of Nicoya, Costa Rica: a tropical estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 2002, **22**(1): 51-66.
- [9] Van Der Zee C, Roelvros N, Chou L. Phosphorus speciation, transformation and retention in the Scheldt estuary (Belgium/The Netherlands) from the freshwater tidal limits to the North Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2007, **106**(1-2): 76-91.
- [10] 李磊, 沈新强. 春、夏季长江口海域营养盐的时空分布特征及营养结构分析[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(12): 2941-2947.
- [11] Chen Y X, Liu R M, Sun C C, *et al.* Spatial and temporal variations in nitrogen and phosphorous nutrients in the Yangtze River Estuary[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, **64**(10): 2083-2089.
- [12] 蔡阳扬, 岑竞仪, 欧林坚, 等. 夏秋季珠江口水域 COD、DO、营养盐分布特征及其富营养化评价[J]. *暨南大学学报(自然科学与医学版)*, 2014, **35**(3): 221-227.
- [13] 赵骞, 张志锋, 王立军, 等. 2011 年夏秋季辽东湾营养盐分布及环境容量研究[J]. *海洋开发与管理*, 2011, (11): 89-96.
- [14] 张晋华, 于立霞, 姚庆祯, 等. 不同季节辽河口营养盐的河口混合行为[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 569-576.
- [15] 殷林春, 王作敏, 李晓敏. 大辽河水质污染规律及污染趋势分析[J]. *辽宁城乡环境科技*, 2004, **24**(1): 16-18.
- [16] Uncles R J, Howland R J M, Easton A E, *et al.* Seasonal variability of dissolved nutrients in the Humber-Ouse estuary, UK[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1998, **37**(3-7): 234-246.
- [17] Shiller A M. A mixing rate approach to understanding nutrient distributions in the plume of Mississippi River[J]. *Marine Chemistry*, 1993, **43**(1-4): 211-216.
- [18] Falco S, Niencheski L F, Rodilla M, *et al.* Nutrient flux and budget in the Ebro estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, **87**(1): 92-102.
- [19] 张继明, 刘霜, 张琦, 等. 黄河口附近海域营养盐特征及富营养化程度评价[J]. *海洋通报*, 2008, **27**(5): 65-72.
- [20] 林以安, 苏纪兰, 扈传昱, 等. 珠江口夏季水体中的氮和磷[J]. *海洋学报*, 2004, **26**(5): 63-73.
- [21] 刘四光, 高爱国, 陈岚, 等. 闽江河口咸淡水混合过程中营养盐含量的变化特征[J]. *台湾海峡*, 2012, **31**(3): 345-352.
- [22] 黄海宁, 林彩, 暨卫东, 等. 九龙江河口区营养盐分布特征及其影响因素分析[J]. *海洋通报*, 2012, **31**(3): 290-296.
- [23] 李玲玲, 于志刚, 姚庆祯, 等. 长江口海域营养盐的形态和分布特征[J]. *水生态学杂志*, 2009, **2**(2): 15-20.
- [24] 廖巍, 张龙军, 陈洪涛, 等. 2001-2011 年黄河口营养盐变化及入海通量估算[J]. *中国海洋大学学报*, 2013, **43**(1): 81-86.
- [25] 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 1-6.
- [26] 雷坤, 郑丙辉, 孟伟, 等. 大辽河口 N、P 营养盐的分布特征及其影响因素[J]. *海洋环境科学*, 2007, **26**(1): 19-22, 27.
- [27] 李桂菊, 马玉兰, 李伟, 等. 春季渤海湾营养盐分布及潜在性富营养化评价[J]. *天津科技大学学报*, 2012, **27**(5): 22-27.
- [28] 董兆远, 娄安刚, 崔文连. 胶州湾海水营养盐的分布及潜在性富营养化研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2010, (3): 149-156.
- [29] 郭卫东, 张小明, 杨逸萍, 等. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价[J]. *台湾海峡*, 1998, **17**(1): 64-70.
- [30] 蒋岳文, 关道明, 陈淑梅, 等. 辽河口水域夏季营养盐分布与变化特征[J]. *海洋通报*, 1996, **15**(3): 92-96.
- [31] 曲丽梅, 姚德, 丛丕福. 辽东湾氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养化评价[J]. *环境科学*, 2006, **27**(2): 263-267.
- [32] 王焕松. 辽东湾海岸带生态环境压力评价与效应研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2010. 29-32.
- [33] 于立霞, 简慧敏, 王兆锟, 等. 夏季辽河口各形态营养盐的河口混合行为[J]. *海洋科学*, 2011, **35**(12): 68-74.
- [34] 周高煜. 大辽河氮、磷输送平衡研究[D]. 上海: 东华大学, 2013. 58-59.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行