

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                                     |                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究 .....                                                            | 王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)             |
| 北京城区 PM <sub>2.5</sub> 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析 .....                                     | 陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)        |
| 北京地区冬春 PM <sub>2.5</sub> 和 PM <sub>10</sub> 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 .....                | 赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)                  |
| 北京市 PM <sub>2.5</sub> 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析 .....                                        | 王艳慧,肖瑶 (428)                               |
| 杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征 .....                                                           | 谢小芳,孙在,杨文俊 (436)                           |
| 春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征 .....                                                            | 王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽峰,杨洋 (442)                |
| 南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征 .....                                                        | 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳琳 (451)                |
| 忻州市环境空气 PM <sub>10</sub> 中有机碳和元素碳污染特征分析 .....                                       | 史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)             |
| 广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征 .....                                               | 青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)                     |
| 燃煤电厂锅炉 PM <sub>2.5</sub> 排放危害度评价模型建立及案例分析 .....                                     | 史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)          |
| 中国南海大气降水化学特征 .....                                                                  | 肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)                  |
| 临安本底站酸雨长期观测特征分析 .....                                                               | 李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)                        |
| 北京城区大气氮湿沉降特征研究 .....                                                                | 贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)                      |
| 烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势 .....                                                         | 贾龙,徐永福 (495)                               |
| 祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征 .....                                                      | 董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)               |
| 生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究 .....                                                             | 羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)                 |
| 生物滴滤塔处理苯酚气体研究 .....                                                                 | 何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶纪宏,罗雨薇,魏在山 (520)              |
| 国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究 .....                                                | 楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)                        |
| 翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响 .....                                                      | 赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合峰 (533)           |
| CuBr <sub>2</sub> 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究 .....                                         | 胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)               |
| 浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究 .....                                                       | 张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)               |
| 基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例 .....                                                         | 贾海峰,郭羽 (555)                               |
| 北京平原区第四系地下水污染风险评价 .....                                                             | 郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)                 |
| 不同季节辽河口营养盐的河口混合行为 .....                                                             | 张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)                       |
| 太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征 .....                                                            | 马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)             |
| 亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价 .....                                                      | 陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)                   |
| 潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究 .....                                                          | 白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)                   |
| 凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响 .....                                                      | 周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国峰 (597)                    |
| 不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响 .....                                                 | 田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)                |
| 溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用 .....                                                         | 李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)                   |
| 四环素光催化降解特性与选择性研究 .....                                                              | 宋晨怡,尹大强 (619)                              |
| 微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究 .....                                                         | 符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)                  |
| 市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全 .....                                               | 杨赛,周启星,华涛 (633)                            |
| 膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究 .....                                                        | 李彬,王志刚,安莹,吴志超 (643)                        |
| 臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究 .....                                                    | 刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)             |
| 厌氧生物法处理果胶废水的研究 .....                                                                | 陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)                   |
| 氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究 .....                                                             | 赵兴兴,于水利,王哲 (663)                           |
| 平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能 .....                                                            | 胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)                   |
| 基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征 .....                                                          | 王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)              |
| 广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价 .....                                                        | 郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳钊 (684)                |
| 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究 .....                                                         | 张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)                       |
| 废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价 .....                                                 | 周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704) |
| 深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究 .....                                                          | 章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)                        |
| 洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策 .....                                                           | 谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)                |
| 施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响 .....                                              | 曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)                        |
| 螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征 .....                                                  | 尹雪,陈家军,吕策 (733)                            |
| <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 的锰氧化特性研究 .....                                         | 周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)          |
| $n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响 ..... | 陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)              |
| 杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究 .....                                                             | 龚婍娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)                  |
| 鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究 .....                                                           | 赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)           |
| 黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究 .....                                                         | 朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)              |
| 3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究 .....                                                  | 王艳,马泽民,吴石金 (770)                           |
| 新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价 .....                                                       | 李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)                       |
| 黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究 .....                                                       | 李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)                  |
| 农田土壤 N <sub>2</sub> O 产生的关键微生物过程及减排措施 .....                                         | 朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)                   |
| 《环境科学》征订启事 (691) 《环境科学》征稿简则 (800) 信息 (489,519,591,791)                              |                                            |

# 不同季节辽河口营养盐的河口混合行为

张晋华<sup>1</sup>, 于立霞<sup>1</sup>, 姚庆祯<sup>1\*</sup>, 田琳<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

**摘要:** 分别于2010年4、7、11月对大辽河口水域进行了3个航次的调查, 测定了水体中各形态营养盐的浓度。结果表明, 各形态氮、磷浓度的季节变化明显。PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、DOP、DTP和TP平均含量的季节分布相似: 均为4月最高, 11月次之, 7月最低; 而PP平均含量由大到小依次为11、4、7月。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的含量为7月最高, 4月最低; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、DON、PN的含量为4月最高, 7月最低。4月NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N为TN的主要存在形态, 而7、11月NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N为N的主要存在形态。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、DIN、TN在3个季节的河口混合过程中均呈保守性; 而NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、DON在4、11月也是保守性的, 但在7月为非保守性, 在河口内部存在添加源。3个季节大辽河口水域的硅酸盐均呈现保守行为, 11月平均含量最高, 4月最低。

**关键词:** 大辽河口; 营养盐; SPM; 浓度; 季节变化

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0569-08

## Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary

ZHANG Jin-hua<sup>1</sup>, YU Li-xia<sup>1</sup>, YAO Qing-zhen<sup>1</sup>, TIAN Lin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The distribution and species of nutrients in the Daliaohe Estuary were studied in April, July and November, 2010. Concentrations of nutrients displayed obviously seasonal variability in the Daliaohe Estuary. Highest concentrations of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, DOP, DTP and TP were in April, and the lowest were in July. While the highest PP was in November, the lowest was in July. The contents of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N reached the highest point in July, and the lowest was in April; however, the highest NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, DON and PN were in April and the lowest were in November. The main existing form of TN was NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in April, while in July and November NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N was the dominant. The behavior of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, DIN and TN was conservative in various seasons; the behavior of NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and DON was conservative in April and November, while nonconservative in July, which indicated the exist of the extra source in the interior of the estuary. The SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup> of the Daliaohe Estuary was conservative, with the highest average concentration in November and the lowest in April.

**Key words:** Daliaohe Estuary; nutrient; SPM; concentration; seasonal variation

河口地区是河流生态系统和海洋生态系统之间的生态交错带, 具有独特的环境特征和重要的生态服务功能。在生源要素向海洋的输送中, 河流一直扮演着至关重要的角色<sup>[1, 2]</sup>。辽河是渤海海域较大的人海河流之一, 沿岸工农业发达, 大量的营养物质排泄入海, 导致辽河口已普遍受到氮、磷等营养物质的点源污染和面源污染, 富营养化程度严重。引起大辽河口及邻近海域浮游植物和其他水生植物异常繁殖, 初级生产力急剧增加, 水体溶解氧下降, 水质恶化。

关于河口地区及其海域营养盐的分布变化规律, 已有不少研究报道<sup>[3-9]</sup>。蒋岳文等<sup>[10]</sup>对辽河口营养盐分布及变化规律进行分析得出, 溶解无机氮和硅酸盐主要受海水稀释扩散作用控制, 其行为是保守的, 磷酸盐行为变化与季节有关; 王继龙等<sup>[11]</sup>

的研究也表明辽河口溶解无机氮具有良好的保守行为, 而磷酸盐存在吸附-解吸作用; 雷坤等<sup>[12]</sup>也发现N营养盐(硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮)保守性较好, 磷酸盐由于其缓冲特征, 保守性较差。

尽管对大辽河口营养盐的行为已有一些研究, 但这些研究大多集中于河口之外的海域, 对淡咸水混合区营养盐的形态及行为缺乏系统的分析。本研究拟通过对大辽河口春(4月)、夏(7月)、秋(11月)不同季节营养盐浓度的分析, 探讨营养盐浓度的季节变化及其影响因素。

收稿日期: 2013-05-03; 修订日期: 2013-07-22

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-003); 山东省自然科学基金项目(ZR2010DM003)

作者简介: 张晋华(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋生物地球化学, E-mail: zhangjinhua2050@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: qzhyao@ouc.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 采样站位

分别于2010年4、7和11月,对大辽河口水域进行现场调查,用聚乙烯瓶采集表层水样,调查水域及具体采样站位位置见图1所示。

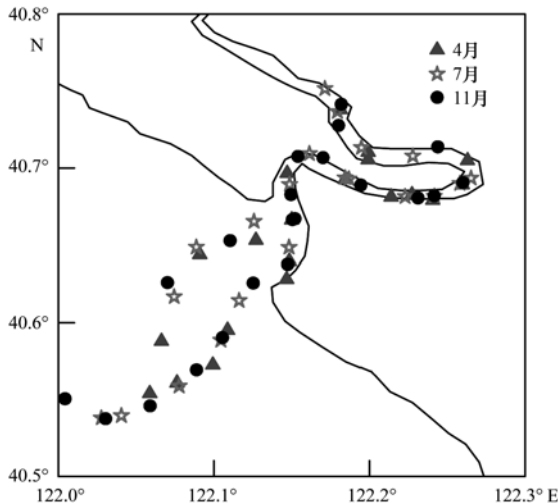


图1 2010年4、7、11月大辽河口采样站位示意  
Fig. 1 Schematic map of sampling stations in April, July, November, 2010 at Daliaohe Estuary

### 1.2 样品处理及测定方法

预先准备好醋酸纤维滤膜(将其浸泡在1:1 000 HCl中24 h,之后再用 Milli-Q 水将其洗至中性)和聚乙烯瓶(将其浸泡在1:5 HCl中24 h,之后再用去离子水将其洗至中性)。之后将水样用准备好的0.45  $\mu\text{m}$  醋酸纤维滤膜进行过滤,过滤完毕后将滤液分别装在2个准备好的100 mL 聚乙烯瓶中。其中一个需保存在 $-20^{\circ}\text{C}$ 的冷冻环境中,以便于之后对磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ )、硝酸盐( $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ )、亚硝酸盐( $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ )、氨氮( $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ )、溶解态总磷(DTP)和溶解态总氮(DTN)的测定;另准备聚醚砜膜(将其进行和醋酸纤维膜相同的处理,处理完后要将其烘干,

并称重以用于对水体中悬浮颗粒物的测定),取另一份水样用聚醚砜膜进行过滤,过滤完后将滤膜在 $-20^{\circ}\text{C}$ 下的环境下进行冷冻保存以用于测定颗粒态磷(PP)、颗粒态(PN)。

德国 BRAN + LUEBBE 公司生产的 QUAATRO 型营养盐自动分析仪可以在实验室用来对无机态营养盐进行测定,测定的检出限分别为: $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  为  $0.01 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$  为  $0.02 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$  为  $0.02 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$  为  $0.03 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  为  $0.04 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。利用碱性过硫酸钾氧化法对颗粒态磷、颗粒态氮、溶解态总磷和溶解态总氮进行消化<sup>[13, 14]</sup>,同时利用德国 BRAN + LUEBBE 公司生产的 AA III 型营养盐自动分析仪进行测定。溶解有机磷  $\text{DOP} = \text{DTP} - (\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ , 溶解有机氮  $\text{DON} = \text{DTN} - \text{DIN}$ , 总磷  $\text{TP} = \text{DTP} + \text{PP}$ , 总氮  $\text{TN} = \text{DTN} + \text{PN}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 SPM 的季节变化特征

水中悬浮物含量是衡量水污染程度的指标之一,悬浮物是造成水浑浊的主要原因。大辽河口表层水体中悬浮颗粒物含量很大,2010年4、7、11月表层水体中悬浮颗粒物的含量变化范围比较大,分别是  $0.12 \sim 0.81$ 、 $0.33 \sim 0.50$ 、 $0.044 \sim 0.44 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值分别是  $0.41$ 、 $0.16$ 、 $0.22 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。4月水体中悬浮颗粒物含量最大,7月最小。2010年4、11月表层水体中悬浮颗粒物的含量远大于四类海水水质标准<sup>[15]</sup>。4月盐度 $<13$ 时,SPM 浓度在  $0.40 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  上下波动,盐度为13时出现 SPM 最低值,可能是由于河口区悬浮细颗粒物发生絮凝作用,加速了悬浮物的沉降<sup>[3, 16]</sup>;在盐度 $>13$ 后,随盐度增加 SPM 浓度有逐渐增大的趋势,海水端达到最大值,这主要由于大辽河口水浅且当天口门风力很强,水体扰动加剧了底层

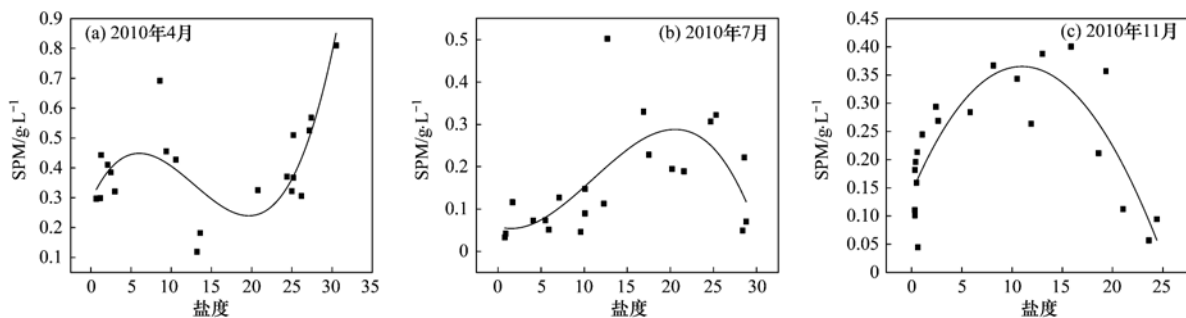


图2 2010年4、7、11月大辽河口 SPM 与盐度的关系

Fig. 2 Relationships between salinity and SPM in April, July and November of 2010 at Daliaohe Estuary

颗粒物的再悬浮和表层颗粒物的不易沉降. 7 月盐度 <12.7 时,随盐度增加 SPM 浓度有逐渐增大的趋势,盐度为 12.7 时达到最大值,随后 SPM 浓度逐渐降低; 11 月盐度 <10 时 SPM 浓度随盐度增加逐渐增大,后随盐度增加有减小趋势. 这主要由于盐度 15 左右是咸淡水强烈混合区,水体扰动造成高的 SPM 浓度,往海水端由于混合减弱 SPM 浓度逐渐降低.

2.2 叶绿素季节的变化特征

4、7、11 月叶绿素含量范围分别为 2.07 ~ 11.5、1.54 ~ 54.4、1.48 ~ 95.8  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 平均含量分别为 6.80、28.0、48.7  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 11 月叶绿素含量最高, 7 月次之, 4 月最低,原因可能是经过一个夏天浮游植物的迅速增长时期,使得 11 月大辽河口水体的叶绿素浓度达到一个较大的水平. 4 月、11 月叶绿素的最高值出现在淡水端,含量随盐度增加而降低; 7 月最高值出现在海水端,含量随盐度增加而升高.

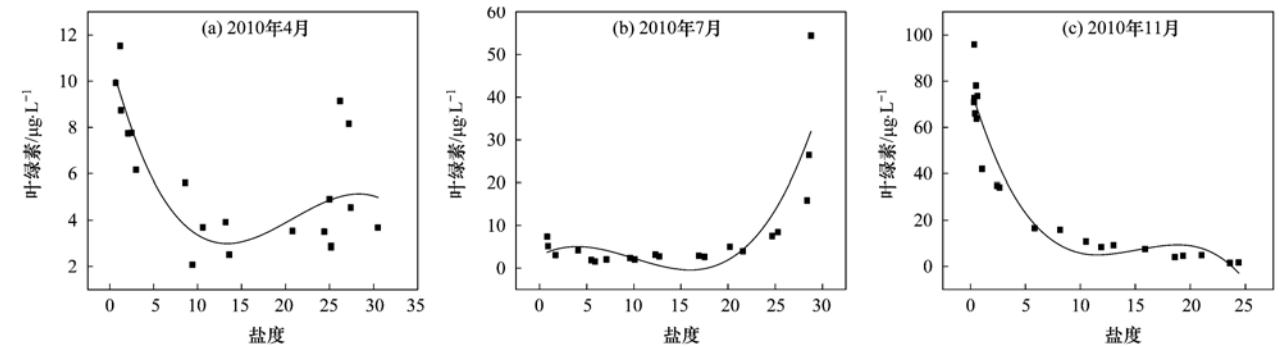


图3 2010 年 4、7、11 月大辽河口叶绿素与盐度的关系

Fig. 3 Relationships between salinity and chlorophyll in April, July and November of 2010 at Daliaohe Estuary

2.3 各形态磷的季节变化及分布

4 月,PP 占 TP 的比例为 28% ~ 50%,平均值为 40%; DTP 占 TP 的比例为 50% ~ 72%,平均值为 60%,即 DTP 为 TP 的主要存在形态. 在 DTP 中, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  占 DTP 的比例为 14% ~ 74%,平均值为 43%; DOP 占 DTP 的比例为 26% ~ 86%,平均值为 57%,即大多数站位 DOP 为 DTP 的主要存在形态. 在所调查水域,磷酸盐、DOP、PP 三者的含量相差并不大. 7 月,大辽河口水域大多数站位 DOP 为 DTP 的主要存在形态,DTP 为 TP 的主要存在形态.

11 月,DOP 仍为 DTP 的主要存在形态.

大辽河口水域  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、DOP、DTP、TP 平均含量的季节分布相似,均为 4 月最高,11 月次之,7 月最低(表 1). 4 月由于农业灌溉及化肥施用等导致  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  含量最高; 7 月温跃层的出现导致水体垂直混合较差,底层的  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  无法到达表层水体及大量浮游植物对磷酸盐的吸收<sup>[17-19]</sup> 导致其含量最低. 11 月由于夏季大量繁殖的浮游生物死亡分解后,DOP 转换为  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ,在海水中不断积累,此外沉积物再悬浮释放出  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ,所以  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的浓度也比较高.

表1 2010 年 4、7、11 月大辽河口各形态磷的含量/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Concentrations of different P species in April, July and November of 2010 at Daliaohe Estuary/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

| 类型                          | 4 月          |      | 7 月         |      | 11 月        |      |
|-----------------------------|--------------|------|-------------|------|-------------|------|
|                             | 变化范围         | 平均值  | 变化范围        | 平均值  | 变化范围        | 平均值  |
| $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ | 0.27 ~ 3.13  | 1.70 | 0.08 ~ 1.78 | 0.92 | 0.30 ~ 1.74 | 1.02 |
| DOP                         | 0.57 ~ 5.19  | 2.11 | 0.01 ~ 1.81 | 1.02 | 0.87 ~ 2.99 | 1.72 |
| DTP                         | 1.11 ~ 6.86  | 3.82 | 0.74 ~ 3.24 | 1.95 | 2.20 ~ 3.50 | 2.74 |
| PP                          | 0.94 ~ 3.71  | 2.43 | 0.88 ~ 1.87 | 1.35 | 0.86 ~ 4.47 | 3.16 |
| TP                          | 2.05 ~ 11.65 | 6.50 | 2.09 ~ 5.12 | 3.38 | 3.06 ~ 7.37 | 5.90 |

不同季节、不同形态磷的河口行为相差很大. DOP、DTP 浓度在 4、11 月皆表现为淡水端浓度较高,随着盐度的增加浓度逐渐降低,其行为是保守的; 而 7 月,DOP、DTP 在淡水端浓度较低,随着盐度增加而逐渐升高,至盐度 15 左右达到最高值,后

随着盐度增加浓度逐渐降低; 4、7 月  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  分布趋势为:海水端低,淡水端高,其行为是保守的,主要受海水对淡水的稀释作用控制; 11 月活性磷酸盐的含量随水体中盐度增大变化的规律比较复杂,其原因是受到某种缓冲机制的控制(图 4). 在河口地

区,磷酸盐会与悬浮颗粒物发生固-液界面的吸附-解吸作用,从而产生缓冲现象<sup>[18~20]</sup>;此外这种分布特征还可能受沿岸人类生活及含磷废水排放的影响,活性磷酸盐<sup>[21, 22]</sup>、石油类等是近岸水质的主要污染因子。但是前者可能是主要原因,所以,辽河口水域活性磷酸盐的分布变化,除了物理混合过程外,

也存在化学和生物过程的影响以及其他转移的可能<sup>[23~25]</sup>。

与《海水水质标准》(GB 3097-1997)比较,4月有10个站位活性磷酸盐超过四类水质( $1.45 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ );7月仅有1个站位超过四类水质;11月有5个站位超过四类水质。

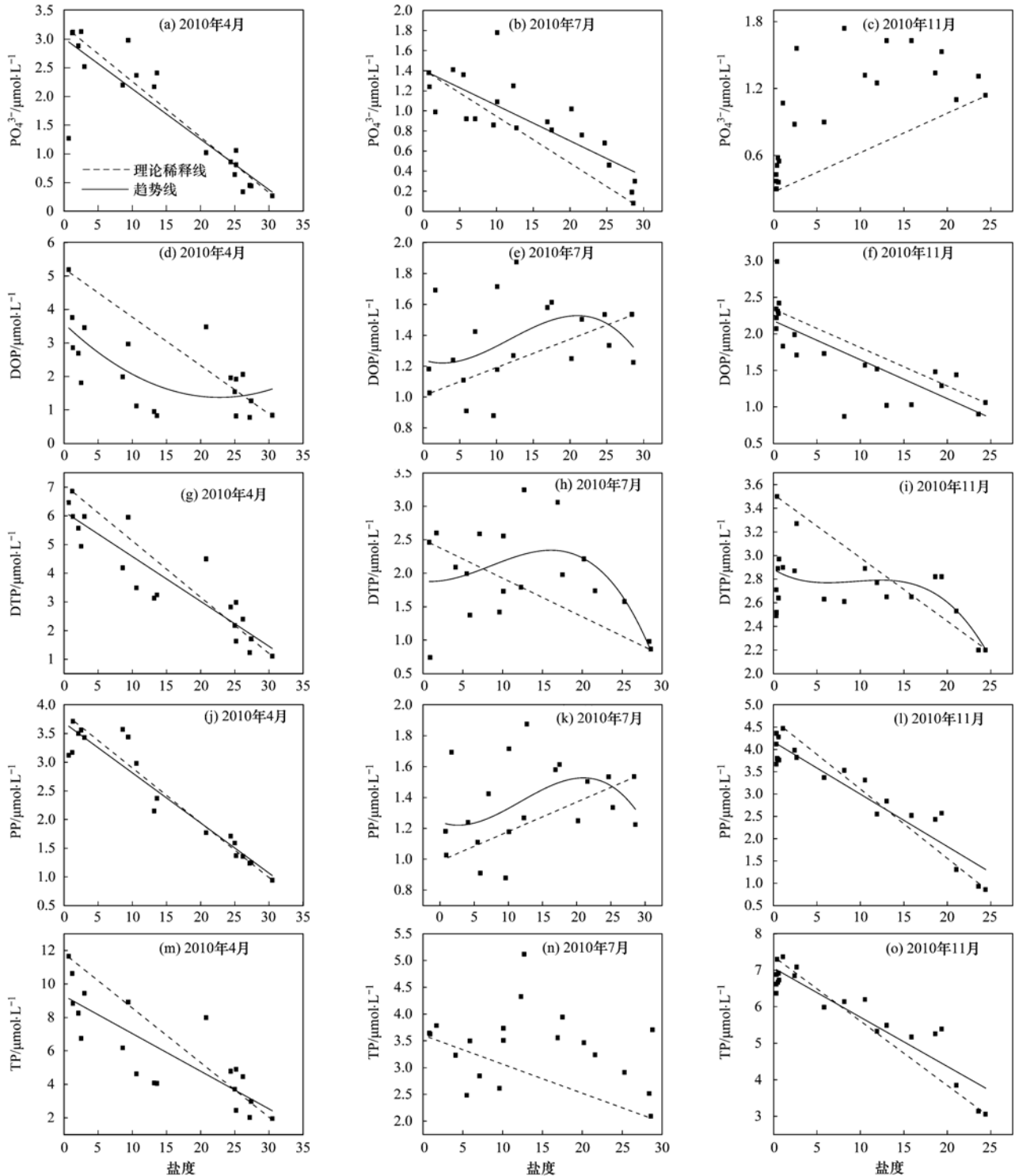


图4 2010年4、7、11月大辽河口各形态磷与盐度的关系

Fig. 4 Relationships between salinity and different forms of phosphorus in April, July and November of 2010 at Daliaohe Estuary

2.4 各形态氮的季节变化及其分布

大辽河口水域 4 月, 氨氮占 DIN 的比例为 5%~82%, 平均值为 66%, 大部分站位在 50% 以上, 氨氮为 DIN 的主要存在形态(A20 站除外, 该站位氨氮只占 5%, 硝酸盐是 DIN 的主要存在形态); 硝酸盐占 DIN 的比例为 17%~91%, 平均值为 33%; 亚硝酸盐占 DIN 的比例为 1%~4%, 平均值为 2%, 即亚硝酸盐在 DIN 中所占的比例最小. DIN 占 DTN 的比例为 34%~94%, 平均值为 70%; 即大多数站位 DIN 为 DTN 的主要存在形态(表 2).

PN 占 TN 的比例为 15%~67%, 平均值为 33%; DTN 占 TN 的比例为 33%~85%, 平均值为 67%, 大多数站位 DTN 为 TN 的主要存在形态. 在调查的大部分水域, 氨氮为 TN 的主要存在形态, 其余依次是 PN、DON、硝酸盐、亚硝酸盐.

7 月硝酸盐占 DIN 的比例为 86%~98%, 平均值为 93%, 为 DIN 的主要存在形态; 亚硝酸盐和氨氮占 DIN 的比例相近, 亚硝酸盐稍大; DIN 为 DTN

的主要存在形态, DTN 为 TN 的主要存在形态, 各形态氮平均含量由大到小依次为硝酸盐、DON、PN、亚硝酸盐、氨氮.

11 月硝酸盐占 DIN 的比例为 73%~84%, 平均值为 77%, 为 DIN 的主要存在形态; 亚硝酸盐和氨氮占 DIN 的比例相近, 亚硝酸盐稍大, DIN 为 DTN 的主要存在形态. DTN 为 TN 的主要存在形态, 各形态氮平均含量由大到小依次为硝酸盐、DON、PN、氨氮、亚硝酸盐.

大辽河口各形态氮浓度存在明显的季节变化,  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 浓度 7 月最高, 4 月最低;  $\text{NH}_4^+$ -N、DON、PN 的含量分布与  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 相反, 4 月最高, 7 月最低. 2010 年 4 月大辽河口水体中氨氮含量的异常高值, 仅氨氮的平均含量就达到  $201 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 是 11 月氨氮平均含量的 4 倍, 7 月氨氮平均含量的 50 倍之多, 可能主要是由于春季沿岸农业生产基地化肥施用和灌溉用水退水所致. 大辽河口 DIN 含量相当高, 远远高于长江口<sup>[26, 27]</sup>、珠江口<sup>[28]</sup>、黄河口<sup>[29]</sup>等河口.

表 2 2010 年 4、7、11 月大辽河口各形态氮的含量/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

| 类型                 | 4 月         |       | 7 月         |       | 11 月        |       |
|--------------------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
|                    | 变化范围        | 平均值   | 变化范围        | 平均值   | 变化范围        | 平均值   |
| $\text{NO}_3^-$ -N | 9.67~210.2  | 94.8  | 37.4~418.4  | 225.6 | 72.8~310.4  | 190.7 |
| $\text{NO}_2^-$ -N | 0.02~10.2   | 3.48  | 1.58~17.2   | 8.33  | 2.83~11.6   | 7.31  |
| $\text{NH}_4^+$ -N | 11.4~462.4  | 201.3 | 0.93~8.19   | 4.37  | 11.1~79.7   | 49.4  |
| DIN                | 30.3~654.1  | 299.6 | 43.4~428.1  | 238.3 | 86.7~391.2  | 247.4 |
| DON                | 19.6~248.7  | 88.9  | 6.70~110.2  | 59.25 | 4.38~202.9  | 85.6  |
| DTN                | 79.4~807.5  | 410.8 | 62.7~503.7  | 283.6 | 121.4~511.0 | 327.7 |
| PN                 | 143.4~169.3 | 159.3 | 27.8~61.9   | 40.6  | 28.0~71.1   | 53.9  |
| TN                 | 240.8~936.2 | 570.1 | 112.7~503.6 | 324.2 | 150.7~572.1 | 381.6 |

不同季节、不同形态氮的河口行为相差很大(图 5).  $\text{NO}_3^-$ -N、DIN、DTN 皆表现为淡水端浓度最高, 随着盐度的增加浓度逐渐降低, 其行为是保守的, 浓度主要受淡咸水混合过程控制.  $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N、DON 浓度在 4、11 月皆表现为淡水端浓度较高, 随着盐度的增加浓度逐渐降低, 其行为是保守的; 而 7 月,  $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 和 DON 的分布则不同, 表现为盐度 < 20 时随盐度增加含量增大, 说明河段及河口陆源输入对大辽河水域表层  $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 和 DON 有影响; 盐度 > 20 后随盐度增大含量减小, 而叶绿素此时迅速增加, 说明主要是由于这段水体浮游植物量迅速增多, 加速了对  $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 和 DON 的吸收以及海水的稀释作用. 由图 5 所示,  $\text{NO}_2^-$ -N (7 月)、 $\text{NH}_4^+$ -N (7 月) 有添加行为, 而

同期  $\text{NO}_3^-$ -N 未发现有移出现象,  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度平均含量  $225.6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而  $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 的平均含量还不足  $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 即使有移出行为也不会 在数据上表现出来.

与《海水水质标准》比较, 水域所测站位溶解无机氮含量较高, 虽然这 3 个月硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮这 3 种形态所占比例相差很大, 但溶解无机氮含量相差不大; 除 4 月一个站位外, 其余站位溶解无机氮均超过四类《海水水质标准》( $35.7 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 由此可见大辽河口水域溶解无机氮的含量严重超标.

2.5 硅酸盐的季节变化及其分布

大辽河口水域 4、7、11 月硅酸盐的浓度变化范围是 10.4~206.4、7.14~121.5、43.9~189.4

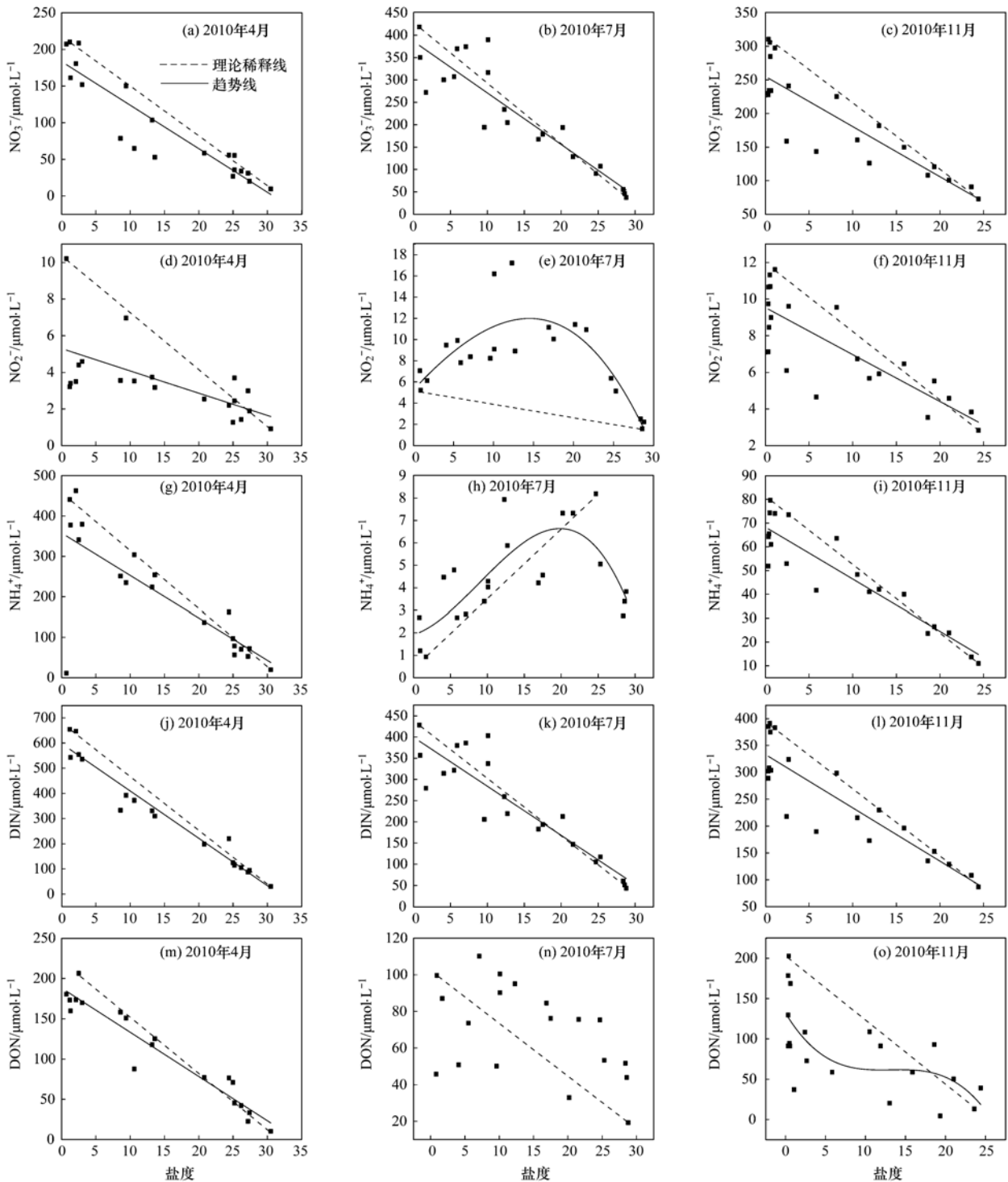
$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为 106.4、70.7、125.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 11 月的硅酸盐平均含量最高, 4 月最低 (图 6).

这 3 个月大辽河口水域的硅酸盐浓度呈现出了随水体盐度值增大而递减的趋势, 均呈现保守行为. 于立霞<sup>[30]</sup>的研究与本研究结果基本一致, 认为生物和化学作用对大辽河口水域硅酸盐分布变化的影响甚微, 而起着主要影响作用的是辽河水和海水的物

理混合过程.

## 2.6 辽河口水域营养盐结构

在对水体中的营养盐结构进行考察时, 往往需要用到 N/P 值这一重要指标. 在海水中, N/P 值的正常比一般为 16:1<sup>[31]</sup>, 而浮游植物元素组分的  $C_N/C_P$  往往也处于同一水平, N/P 值的波动会对浮游生物的生长产生一定的影响. 所以,  $C_N/C_P$  比值 16 被称为 Redfield 比值, 可以用来判断生态环境中氮或



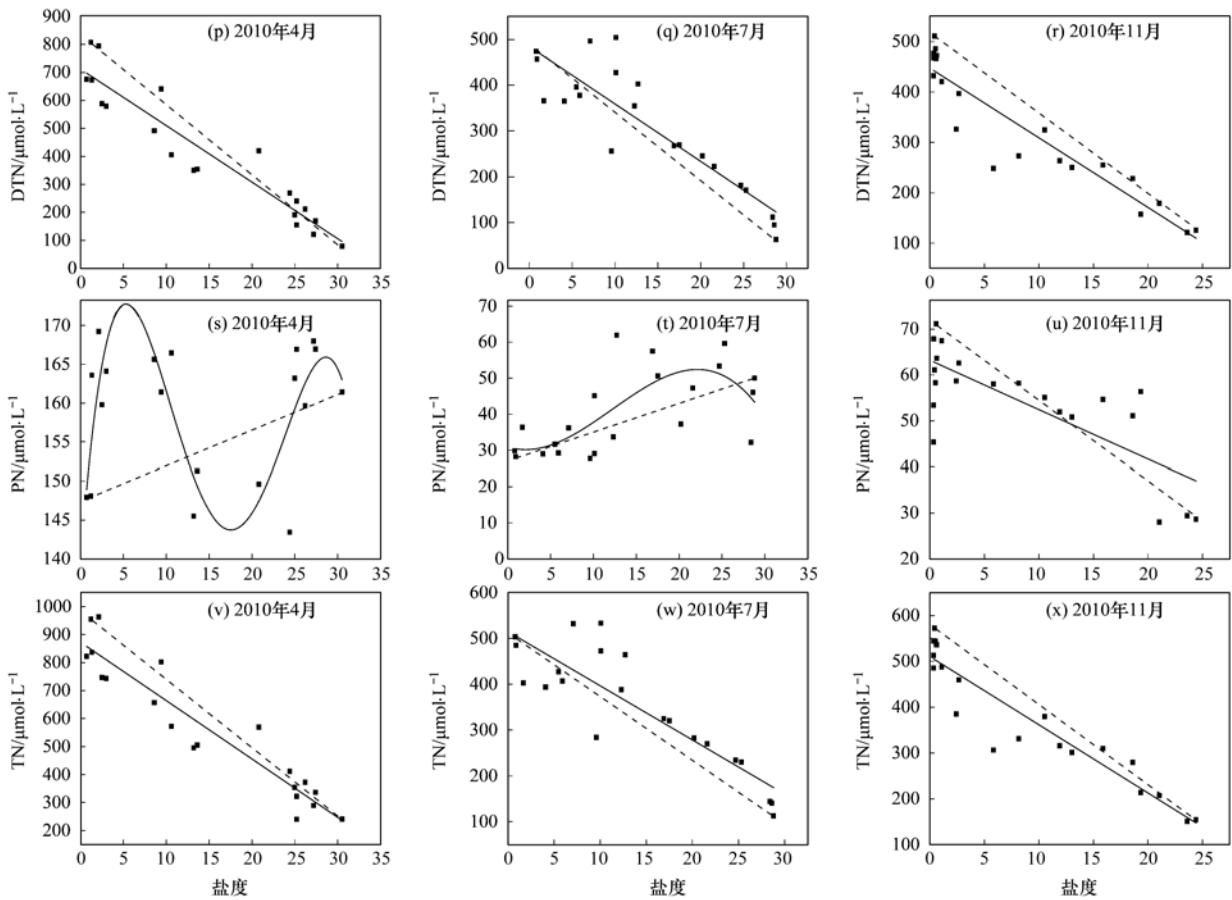


图5 2010年4、7、11月大辽河口各形态氮与盐度的关系

Fig. 5 Relationships between salinity and different forms of nitrogen in April, July and November of 2010 at Daliaohe Estuary

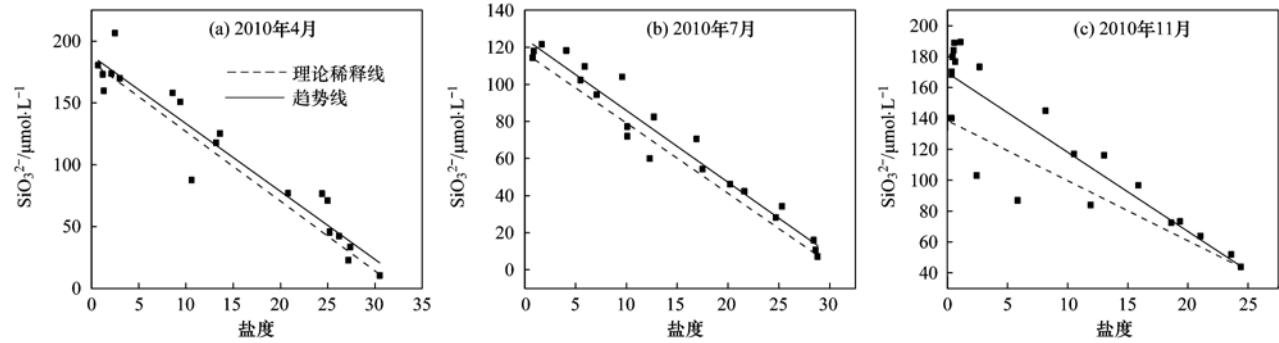


图6 2010年4、7、11月大辽河口硅酸盐与盐度的关系

Fig. 6 Relationships between salinity and silicate in April, July and November of 2010 at Daliaohe Estuary

磷是否处在缺乏状态。

有研究者提出一个系统评估每一种营养盐化学计量限制的标准<sup>[32]</sup>:①若  $Si/P > 22$  和  $N/P > 22$ , 则  $PO_4^{3-}-P$  为限制因素;②若  $N/P < 10$  和  $Si/N > 1$ , 则无机氮为限制因素;③若  $Si/P < 10$  和  $Si/N < 1$ , 则  $SiO_3^{2-}-Si$  为限制因素。

随着盐度值的增大,  $DIN/P$  和  $Si/P$  随之逐渐下降, 直到在海水端到达最低值。通过表3可以看出,

在4、7和11月, 辽河口的  $N/P$  的比例严重的失调,  $N/P$  值远远大于 Redfield 比值, 初步推断对该水域中浮游植物的生长起重要作用的是  $PO_4^{3-}-P$ 。通过以上分析, 可以得出这样的结论: 大辽河口水域是受磷限制的。

### 3 结论

(1) 大辽河口水域各形态磷含量的季节变化明

表 3 2010 年 4、7、11 月大辽河口营养盐的比值

Table 3 Ratio of nutrients in April, July and November of 2010 at Daliaohe Estuary

| 类型    | 4 月           |       | 7 月           |       | 11 月           |       |
|-------|---------------|-------|---------------|-------|----------------|-------|
|       | 变化范围          | 平均值   | 变化范围          | 平均值   | 变化范围           | 平均值   |
| DIN/P | 111.0 ~ 313.8 | 212.4 | 146.0 ~ 616.8 | 381.4 | 75.8 ~ 1 282.2 | 679.0 |
| Si/P  | 37.0 ~ 142.6  | 89.8  | 24.0 ~ 129.2  | 76.6  | 38.4 ~ 566.3   | 302.4 |
| Si/N  | 0.24 ~ 0.79   | 0.52  | 0.16 ~ 0.5    | 0.33  | 0.44 ~ 0.58    | 0.51  |

显,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、DOP、DTP、TP 含量春季最高,夏季最低;不同季节不同形态磷的河口行为相差很大,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 在 4、7 月为保守的,在 11 月行为是非保守的;DOP、DTP 在 4、11 月是保守的,在 7 月是非保守的。

(2)硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮这 3 种形态在 3 个季节所占比例相差很大,但溶解无机氮含量相差不大,大辽河口水域溶解无机氮的含量严重超标.不同季节不同形态氮的河口行为相差很大,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、DIN、TN 的行为在 3 个季节的行为都是保守的;NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、DON 的行为在 4、11 月皆是保守的,而在 7 月其行为是非保守的,在河口内部存在添加源,同时也受生物活动的影响。

(3)硅酸盐含量为 11 月最高,4 月最低;3 个季节其行为皆是保守的。

(4)大辽河口的营养盐结构严重失调,N/P 值远远大于 Redfield 比值,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 可能成为该水域浮游植物生长的限制因子之一。

参考文献:

[1] Benitez-Nelson C R. The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, **51**(1-4): 109-135.

[2] Shen Z L, Liu Q, Zhang S M, *et al.* A nitrogen budget of the Changjiang River catchment[J]. *AMBIO*, 2003, **32**(1): 65-69.

[3] 李军,高抒. 长江口悬浮颗粒体粒度特征及其季节性差异[J]. *海洋与湖沼*, 2003, **34**(5): 499-509.

[4] 王毅,张天相. 辽河湾北部至辽西沿岸海域营养盐的分布特征及水质状况评价[J]. *海洋环境科学*, 2001, **20**(2): 63-70.

[5] 刘际弟. 海水中磷氮不同形态的同时测定[J]. *东海海洋*, 2003, **21**(3): 47-53.

[6] 王玉衡. 夏冬季东海营养盐的分布及水系化学特征的初步研究. 黑潮调查研究论文选(四)[M]. 北京:海洋出版社, 1992. 280-288.

[7] 王保栋,王桂云,郑昌洙,等. 南黄海营养盐的平面分布及横向运输[J]. *海洋学报*, 1999, **21**(6): 124-129.

[8] Struyf E, Van Damme S, Meire P, *et al.* Possible effects of climate changes on estuarine nutrient fluxes: a case study in the highly nitrified Schelde estuary (Belgium, The Netherlands)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, **60**(4): 649-661.

[9] Gao L, Li D J. Nutrient budgets averaged over tidal cycles off the Changjiang Estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, **77**(3): 331-336.

[10] 蒋岳文,陈淑梅,关道明,等. 辽河口营养盐要素的化学特性

及其入海通量估算[J]. *海洋环境科学*, 1995, **14**(4): 39-45.

[11] 王继龙,郑丙辉,秦延文,等. 辽河口水域溶解氧与营养盐调查与分类[J]. *海洋技术*, 2004, **23**(3): 92-96.

[12] 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.

[13] 王江涛,赵卫红,谭丽菊,等. 海水中胶体有机碳的测定——高温燃烧法和紫外-过硫酸钾法的比较[J]. *海洋学报*, 2000, **22**(2): 67-70.

[14] 谭加强,于志刚,林桂焱,等. 过硫酸盐氧化法测定海水中溶解总磷[J]. *青岛海洋大学学报(自然科学版)*, 2001, **31**(2): 256-262.

[15] GB 3097-1997, 海水水质标准[S].

[16] Yang S L, Eisma D, Ding P X. Sedimentary processes on an estuarine island within the turbidity maximum zone of the Yangtze River mouth[J]. *Geo-marine Letters*, 2000, **20**(2): 87-92.

[17] 宋树林. 车由岛附近海域营养盐分布特征[J]. *黄渤海海洋学报*, 1994, **12**(3): 50-55.

[18] 张正斌,陈镇东,刘莲生,等. 海洋化学原理和应用——中国近海的海洋化学[M]. 北京:海洋出版社, 1999.

[19] 姚庆祯,于志刚. 调水调沙对黄河下游营养盐变化规律的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3534-3540.

[20] 石晓勇,史致丽,于恒,等. 黄河口磷酸盐缓冲机制的探讨[J]. *海洋与湖沼*, 1999, **30**(2): 193-198.

[21] 张晟,郑坚. 三峡水库入库支流水体中营养盐季节变化及输出[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 58-63.

[22] 叶红,潘蔚. 辽河口沿岸水质污染的光谱检测研究[J]. *水土保持研究*, 2006, **13**(6): 188-194.

[23] 李峥,沈志良. 长江口及其附近海域磷的分布变化特征[J]. *海洋科学*, 2007, **31**(1): 28-36.

[24] 周菊珍,谷国传. 长江口夏季营养盐的分布、变化及锋面对营养盐的影响[J]. *广州环境科学*, 2002, **17**(1): 1-5.

[25] 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.

[26] 石晓勇,王修林. 长江口邻近海域营养盐分布特征及其控制过程的初步研究[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(7): 1086-1092.

[27] 周俊丽,刘征涛. 长江口营养盐浓度分布及变化特征[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(6): 139-144.

[28] 林以安,苏纪兰. 珠江口夏季水体中的氮和磷[J]. *海洋学报*, 2004, **26**(5): 63-73.

[29] 张继民,刘霜. 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): 65-71.

[30] 于立霞. 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.

[31] Pilson M E Q. Annual cycles of nutrients and chlorophyll in Narragansett Bay, Rhode Island [J]. *Journal of Marine Research*, 1985, **43**(4): 849-873.

[32] 张均顺,沈志良. 胶州湾营养盐结构变化的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1997, **28**(5): 529-535.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                              |                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China .....                                                                                                                                          | WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> ( 401 )         |
| Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> and Source Analysis in Beijing .....                                                                                                    | TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> ( 411 )        |
| Temporal and Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing ..... | ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> ( 418 )         |
| Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM <sub>5.0</sub> Inhalable Particulate in Beijing .....                                                                                             | WANG Yan-hui, XIAO Yao ( 428 )                                        |
| Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring .....                                                                                                 | XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun ( 436 )                          |
| Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing .....                                                                                                                                    | WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> ( 442 )           |
| Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles .....                                                                                                                 | WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> ( 451 )     |
| Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM <sub>10</sub> in Xinzhou City .....                                                                                                                   | SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> ( 458 )          |
| Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou .....                                                                        | QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> ( 464 )                    |
| Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis .....                                                                                                      | SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> ( 470 )            |
| Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea .....                                                                                                                                           | XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> ( 475 )         |
| Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data .....                                                                                           | LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> ( 481 )             |
| Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area .....                                                                                                                           | HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> ( 490 )          |
| Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation .....                                                                                           | JIA Long, XU Yong-fu ( 495 )                                          |
| Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China .....                                                                          | DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> ( 504 )             |
| Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area .....                                                                                                                                 | QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> ( 513 )          |
| Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter .....                                                                                                                                                       | HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> ( 520 )     |
| Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends .....                                                                                              | LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> ( 526 )              |
| Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting .....                                                                                          | ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> ( 533 )     |
| Oxidation of Mercury by CuBr <sub>2</sub> Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition .....                                                                                          | HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> ( 541 )             |
| Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian .....                                                                                 | ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> ( 547 )   |
| Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study .....                                                                                     | JIA Hai-feng, GUO Yu ( 555 )                                          |
| Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain .....                                                                                                                               | GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> ( 562 )                  |
| Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary .....                                                                                                                                    | ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> ( 569 )        |
| Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary .....                                                                                                                                  | MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> ( 577 )       |
| Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area .....                                                                           | CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> ( 585 )             |
| Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands .....                                                                                               | BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> ( 592 )       |
| Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> ( Mart. ) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i> .....                                       | ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> ( 597 )           |
| Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water .....                                                                            | TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> ( 605 )               |
| Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide ( CPB )-Modified Zeolite .....                                                                                                   | LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> ( 611 )             |
| Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride .....                                                                                                            | SONG Chen-yi, YIN Da-qiang ( 619 )                                    |
| Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System .....                                                                                                       | FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> ( 626 )          |
| Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety .....                                                                          | YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao ( 633 )                               |
| Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment .....                                                                                                                     | LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> ( 643 )                  |
| Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter .....                                                                                                                       | LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> ( 651 )       |
| Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process .....                                                                                                                                         | CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> ( 657 )       |
| Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes .....                                                                                                                                                    | ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe ( 663 )                          |
| Biosorption Characteristics of Cu <sup>2+</sup> by Spent Substrate of <i>Pleurotus</i> Oyster .....                                                                                                          | HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> ( 669 )      |
| Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition .....                                                                                                               | WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> ( 678 )                 |
| Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou .....                                                                                          | GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> ( 684 )      |
| Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China .....                                                                                                                      | ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> ( 692 ) |
| Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site .....                                                                                     | ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> ( 704 )      |
| Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China .....                                                                                       | ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> ( 711 )          |
| Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River .....                                                                                                       | TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> ( 719 )            |
| Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants .....                                                                   | ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> ( 727 )             |
| Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites .....                                                          | YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce ( 733 )                                  |
| Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 .....                                                                                                                                | ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> ( 740 )        |
| Effects of the Ratio of NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N to NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture .....                                    | CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> ( 746 )        |
| Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou .....                                                                                                                                      | GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> ( 753 )          |
| Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhammolid Reverse Micelles .....                                                                                                                            | ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> ( 759 )    |
| Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea .....                                                                                                     | ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> ( 764 )           |
| Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i> .....                                                                                                   | WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin ( 770 )                               |
| Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System .....                                                                                         | LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> ( 780 )            |
| Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary .....                                                                  | LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> ( 786 )         |
| Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies .....                                                                                                      | ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> ( 792 )     |

# 《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行