

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

**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

|                                                                                     |                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析 .....                                                       | 陈卓, 刘峻峰, 陶玮, 陶澍 (2815)                     |
| 中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单 .....                                                          | 刘海彪, 孔少飞, 王伟, 严沁 (2823)                    |
| 基于长时间序列的北京 PM <sub>2.5</sub> 浓度日变化及气象条件影响分析 .....                                   | 苗蕾, 廖晓农, 王迎春 (2836)                        |
| 2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征 .....                                                      |                                            |
| 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 魏强, 孙彤卉, 王步英, 富佳明, 何乐为, 程兵芬, 皮帅, 马立光, 崔继宪, 孟凡 (2847)             |                                            |
| 抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析 .....                                                  |                                            |
| 周静博, 李治国, 路娜, 徐曼, 杨鹏, 高康宁, 王建国, 靳伟 (2855)                                           |                                            |
| 成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征 .....                                                         | 蒋燕, 贺光艳, 罗彬, 陈建文, 王斌, 杜云松, 杜明 (2863)       |
| 嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析 .....                                                  |                                            |
| 沈利娟, 王红磊, 李莉, 吕升, 袁婧, 张孝寒, 章国骏, 王翥 (2871)                                           |                                            |
| 泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析 .....                                                         | 张棕巍, 胡恭任, 于瑞莲, 刘贤荣, 胡起超, 王晓明 (2881)        |
| 城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险: 以贵阳市为例 .....                                                 | 李晓燕, 汪浪, 张舒婷 (2889)                        |
| 桂林市酸雨变化特征及来源分析 .....                                                                | 郭雅思, 于爽, 黎泳珊, 孙平安, 何若雪 (2897)              |
| 农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮 (NH <sub>3</sub> 和 N <sub>2</sub> O) 减排效果比较: 以夏玉米季为例 .....         | 范会, 姜姗姗, 魏茨, 蒋静艳 (2906)                    |
| 青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤 CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O 通量的观测 ..... | 吴建国, 周巧富 (2914)                            |
| 三峡库区香溪河秋末至中冬 CO <sub>2</sub> 和 CH <sub>4</sub> 分压特征分析 .....                         | 张军伟, 雷丹, 肖尚斌, 张成, 穆晓辉, 刘佳, 李迎晨 (2924)      |
| 气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析 .....                                                        | 张晨, 刘汉安, 高学平, 张文娜 (2932)                   |
| 三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应: 以兰陵溪小流域为例 .....                                          |                                            |
| 吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄, 韩黎阳 (2940)                                                       |                                            |
| 入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究: 以洱海北部流域为例 .....                                               | 项颂, 庞燕, 储昭升, 胡小贞, 孙莉, 薛力强 (2947)           |
| 库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响: 以草堂河为例 .....                                                  | 王晓彤, 罗光富, 操满, 王雨春, 汪福顺, 邓兵 (2957)          |
| 农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析 .....                                                          | 李如忠, 黄青飞, 钱靖, 殷晓曦, 韦林 (2964)               |
| 农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究 .....                                                       | 李强坤, 胡亚伟, 宋常吉, 彭聪 (2973)                   |
| 三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨 .....                                             |                                            |
| 柴雪思, 雷利国, 江长胜, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2979)                                                  |                                            |
| 重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究 .....                                                        | 刘静, 郑丙辉, 刘录三, 马迎群, 林岗璇, 汪星, 夏阳 (2989)      |
| 深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究 .....                                                     | 崔晓宇, 张鸿, 罗骥, 张若冰 (3001)                    |
| 柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价 .....                                                    | 卫亚宁, 潘佳钊, 宋玉梅, 郭鹏然, 王毅 (3007)              |
| 北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析 .....                                                     | 陈永娟, 胡玮璇, 庞树江, 王晓燕 (3017)                  |
| 昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义 .....                                                      | 王启栋, 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 曹磊 (3026)          |
| 甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示 .....                                                            | 廖昱, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 张远瞩 (3034)              |
| 漳沱河冲洪积扇地下水中酚类化合物的污染现状与分布特征 .....                                                    | 昌盛, 赵兴茹, 刘琰, 耿梦娇, 肖晋翠 (3041)               |
| 雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析 .....                                                        | 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 赵瑞一, 梁作兵 (3049)          |
| Zn 系 LDHs 覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制 .....                                                    | 张翔凌, 黄华玲, 郭露, 陈巧珍, 阮聪颖, 冷玉洁 (3058)         |
| Ce <sup>3+</sup> 与 Cu <sup>2+</sup> 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究 .....                      | 张剑桥, 迟惠中, 宋阳, 罗从伟, 江进, 马军 (3067)           |
| Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究 .....                                                         | 丁文川, 向星光, 曾晓岚, 厉晓宇, 梁国强, M. M. Mian (3073) |
| 石墨烯-TiO <sub>2</sub> 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解 .....                                     | 徐琪, 周泽宇, 王洪涛 (3079)                        |
| 单偶氮染料 AY17 的光催化降解动力学及机制 .....                                                       | 阳海, 魏宏庆, 胡乐天, 胡倩, 阳立平, 刘华杰, 易翔, 易兵 (3086)  |
| 硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性 .....                                                            | 马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (3094)        |
| 膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能 .....                                                    | 刘春, 于长富, 张静, 陈晓轩, 张磊, 杨景亮 (3101)           |
| ABR 工艺 ANAMMOX 耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水 .....                                               | 吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良, 张婷 (3108)          |
| 活性污泥厌氧 Fe(III) 还原氨氧化现象初探 .....                                                      | 李祥, 林兴, 杨朋兵, 黄勇, 刘恒蔚 (3114)                |
| 低浓度氨氮废水单级自养脱氮 EGSB 反应器的快速启动 .....                                                   | 顾书军, 方芳, 李凯, 刘勇, 郭劲松, 陈猷鹏, 蒋甫阳 (3120)      |
| 超低溶解氧条件下的 EBPR 系统除磷性能 .....                                                         | 马娟, 宋璐, 俞小军, 李璐, 孙雷军, 孙洪伟, 李光银 (3128)      |
| 活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响 .....                                                      | 何志江, 赵媛, 张源凯, 王洪臣, 齐鲁, 尹训飞, 张晓军 (3135)     |
| 山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估 .....                                                    |                                            |
| 王菲, 吴泉源, 吕建树, 董玉龙, 曹文涛, 康日斐, 曹见飞 (3144)                                             |                                            |
| 电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征 .....                                                        | 赵科理, 傅伟军, 叶正钱, 戴巍 (3151)                   |
| 我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究 .....                                                   | 冯璞阳, 李哲, 者渝芸, 黄杰, 梁东丽 (3160)               |
| 流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征 .....                                                          | 李鑫, 杨军, 饶伟, 王代长, 杜光辉, 化党领, 刘世亮, 刘红恩 (3169) |
| 聚羟基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中 Cu <sup>2+</sup> 、Zn <sup>2+</sup> 的吸附特性 .....                  | 朱健, 雷明婧, 王平, 张伟丽, 陈仰 (3177)                |
| 新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价 .....                                                         | 王文东, 刘荟, 张银婷, 杨生炯 (3186)                   |
| 纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附 .....                                                         | 朱倩, 李正魁, 张一品, 韩华杨, 王浩 (3192)               |
| 鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中 PAHs 的生物有效性 .....                                             |                                            |
| 张亚楠, 杨兴伦, 卞永荣, 谷成刚, 王芳, 王代长, 蒋新 (3201)                                              |                                            |
| 不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响 .....                                                     | 景新新, 苏志忠, 邢红恩, 王发园, 石兆勇, 刘雪琴 (3208)        |
| 中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究 .....                                                           | 王晓南, 闫振广, 余若祯, 王婉华, 陈丽红, 刘征涛 (3216)        |
| 贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响 .....                                                     | 林文芳, 陈胜, 万堃, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (3224)           |
| 不同氮水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响 .....                                                  | 吕玉, 周龙, 龙光强, 汤利 (3229)                     |
| 《环境科学》征订启事 (3025) 《环境科学》征稿简则 (3057) 信息 (3072, 3085, 3143)                           |                                            |

# 昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义

王启栋<sup>1,2</sup>, 宋金明<sup>1\*</sup>, 李学刚<sup>1</sup>, 袁华茂<sup>1</sup>, 李宁<sup>1</sup>, 曹磊<sup>1</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所生态与环境科学重点实验室, 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 利用伽马谱仪测定了昌邑滨海湿地表层沉积物以及沉积物岩芯中放射性核素含量, 根据放射性核素的分布, 探讨了其对物质来源、人类活动以及其他沉积环境演变事件的指示作用, 并估算了研究区域的沉积速率。结果表明, 表层沉积物中自然放射性核素<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra和<sup>40</sup>K的平均含量分别为(54.4 ± 11.7)、(57.9 ± 9.7)、(28.6 ± 4.3)和(542 ± 21) Bq·kg<sup>-1</sup>, 表层沉积物放射性水平的区域差异反映了物质来源的不同以及人类活动对沉积物特性的影响。根据岩芯中过剩<sup>210</sup>Pb的分布, 计算出近百年来沉积环境稳定的高沼区沉积速率为0.23 cm·a<sup>-1</sup>。在沉积物岩芯中,<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th和<sup>226</sup>Ra具有较高的变异系数, 根据<sup>238</sup>U和<sup>226</sup>Ra及其比值的垂直分布, 沉积过程可被分为4个阶段: 缓慢沉积阶段, 受黄河河道迁徙影响下的沉积环境剧烈变化阶段, 黄河归流后的稳定阶段, 以及在人类活动的影响下的退化、增长交替阶段。放射性核素的变化反映了滨海湿地沉积环境的演变过程, 具有重要的环境指示意义。

**关键词:** 放射性核素; 沉积速率; 环境演变; 滨海湿地; 昌邑

中图分类号: X145; X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3026-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.025

## Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland

WANG Qi-dong<sup>1,2</sup>, SONG Jin-ming<sup>1\*</sup>, LI Xue-gang<sup>1</sup>, YUAN Hua-mao<sup>1</sup>, LI Ning<sup>1</sup>, CAO Lei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The radionuclides contents in the surface sediments and sediment cores were determined by gamma spectrometry method. The distribution of radionuclides and its indication to material sources, human activities and other sedimentary environmental evolution events were discussed and the sedimentation rate was estimated. The results showed that the average activity concentrations of <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra and <sup>40</sup>K in the surface sediment were (54.4 ± 11.7), (57.9 ± 9.7), (28.6 ± 4.3) and (542 ± 21) Bq·kg<sup>-1</sup>, respectively. Regional differences of radioactivity level reflected the material sources and influences of human activities on the sediment characteristics. According to the vertical distribution of excess <sup>210</sup>Pb, the sedimentation rate of high tidal areas was estimated at 0.23 cm·a<sup>-1</sup>. In the sediment core, the variable coefficients of <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th and <sup>226</sup>Ra contents were high. According to the vertical profiles of <sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra and <sup>238</sup>U/<sup>226</sup>Ra ratio, the process of sedimentation could be divided into four periods: period of slow deposition, period of dramatic change in sedimentary environment caused by great migration of the Yellow River channels, period of stable deposition after the Yellow River ran into one single channel, and period of alternate degradation and growth under the influence of human activities. The vertical variation of radionuclides in the sediment core could serve as an effective environmental indicator since it could record the environmental evolution processes of the coastal wetland.

**Key words:** radionuclides; sedimentation rate; environmental evolutions; coastal wetlands; Changyi

放射性核素广泛存在于空气、水、土壤和沉积物等地球环境中<sup>[1,2]</sup>。放射性核素的研究受到人们的关注, 不仅由于其可能造成的放射性污染威胁人类健康, 还由于其作为地球化学指标在海洋学及地质学领域的广泛应用<sup>[3~6]</sup>。例如, 具有漫长半衰期的<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra和<sup>40</sup>K等核素在环境中的含量水平主要取决于地质条件及土壤或沉积物的形成状况<sup>[7]</sup>, 可以揭示物质的来源; 半衰期为22.3年的<sup>210</sup>Pb, 可用于百年尺度的沉积物岩芯的计年和沉积速率的研究。此外, 人类核试验还产生了<sup>137</sup>Cs等人工核素, 也被应用于沉积速率及土壤侵蚀等的研究。因此, 沉积物岩芯中放射性核素的分布记录着沉积

过程变化的历史, 并为重大历史事件提供时标, 具有重要的环境指示作用。

滨海湿地地处海陆相互作用最为活跃的潮间带区域, 是陆源物质和海源物质堆积的重要场所, 其环境受到海洋及陆地双重作用以及人类活动的影响, 是地球上最为复杂的生态系统之一。随着全球气候变化的加剧以及人类社会的发展, 滨海湿地的环境

收稿日期: 2015-11-16; 修订日期: 2016-03-21

基金项目: 国家基金委-山东省联合基金项目(U1406403); 青岛国家海洋实验室“鳌山人才”卓越科学家专项项目

作者简介: 王启栋(1990~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为滨海湿地生物地球化学过程和同位素地球化学, E-mail: tdxzwqd@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: jmsong@qdio.ac.cn

压力不断加大,其在全球可持续发展中扮演的角色也愈加重要。然而我国滨海湿地的研究多集中于景观生态学、生物多样性、重金属污染以及生态功能评价等方面<sup>[8~12]</sup>,对滨海湿地地质环境演变的研究十分缺乏,而搞清楚滨海湿地的演化历史、规律和驱动机制恰恰是开发治理湿地生态环境、确保其可持续发展的前提<sup>[13]</sup>。

莱州湾南岸是中国滨海湿地分布最集中的海岸段之一<sup>[14]</sup>。近年来,卤水开采、盐田、水产养殖等经济开发活动使该区域自然湿地受到严重改造,许多学者已从不同的角度对莱州湾南岸滨海湿地的变化展开了研究,如景观格局的变化<sup>[15]</sup>、生物多样性特征<sup>[10]</sup>、海水入侵和水环境变化<sup>[16,17]</sup>以及湿地退化的现状和原因<sup>[14,18]</sup>等,但尚未有学者从地学的角度对该区域的沉积环境演变进行研究。本文以莱州湾南岸最典型的昌邑怪柳林滨海湿地为研究对象,首次利用放射性核素的方法、从沉积物的角度探究了滨海湿地的环境演变过程并且探讨了放射性核素的环境指示意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域及样品采集

研究区域位于莱州湾南岸、山东省昌邑市沿海的昌邑怪柳林滨海湿地。为保护以怪柳为主要植被的滨海湿地生态系统,2007 年该区域获批成立山东省首个国家级海洋生态特别保护区。保护区中心坐

标为 37°06'15"N,119°22'00"E,总面积 29.3 km<sup>2</sup>,而天然怪柳林面积高达 20.7 km<sup>2</sup><sup>[19]</sup>。莱州湾潮汐为正规半日潮,并受风暴潮影响。为保护盐田等产业,2000 年保护区内沿海修建了一条人工堤坝,使得高沼区与潮汐隔绝,而低沼区淹水更甚。

2012 年 6 月,在保护区内从陆地向海洋的方向设置了 3 条断面共计 19 个站位采集表层沉积物样品(如图 1)。在每个站位,布置了一个 1 m × 1 m 的样方,在样方内随机采集 3 个 0 ~ 10 cm 的表层样品,充分混合后于聚乙烯袋中密封保存。此外,选取 3 个站位 A5、A8 和 A9 采集沉积物岩芯样品。在每一个选取的站点挖掘土壤剖面,然后从表层开始按 2 cm 间隔采集至 1 m 深度左右(A9 由于淹水采至 60 cm 左右)。采集完成后将所有的样品带回实验室进行测定。

### 1.2 样品的测定

在实验室内将样品烘干磨细,装入聚乙烯样品管中密封放置 3 周,以达到长期平衡,然后用美国 Canberra 公司生产的 HPGe 伽马谱仪测量样品的放射性同位素的活度。效率刻度用核工业北京地质研究院提供的标准源完成,标准源粒径和密度与样品接近。测量每种核素所用的伽马射线特征峰分别为:<sup>238</sup>U,63.2 keV 和 92.6 keV; <sup>232</sup>Th,338.7 keV、911.2 keV 和 968.8 keV; <sup>226</sup>Ra,295.2 keV、351.9 keV 和 609.3 keV; <sup>40</sup>K,1 460.5 keV; <sup>210</sup>Pb,46.5 keV; <sup>137</sup>Cs,661.6 keV。峰面积采用全能峰面积法计算。测量结

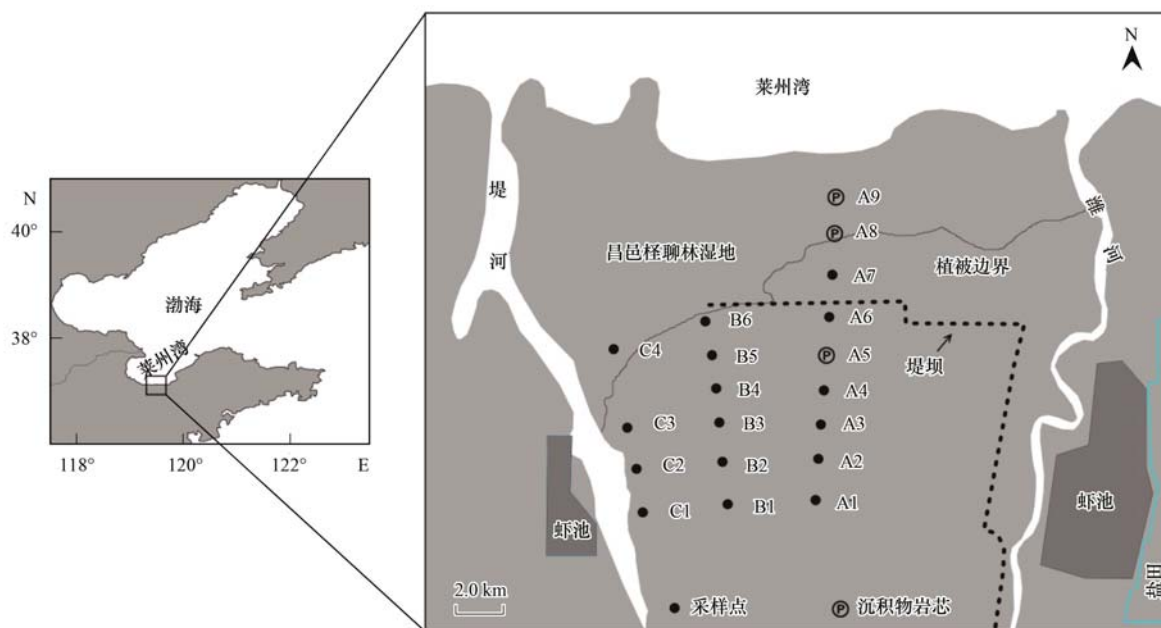


图 1 研究区域及采样站位示意

Fig. 1 Study area and sampling sites

果以活度表示,除以样品质量得到比活度.

2 结果与讨论

2.1 放射性核素<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra和<sup>40</sup>K的水平分布

昌邑柁柳林湿地表层沉积物中自然放射性核素<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra、<sup>40</sup>K的平均含量(算术平均值±标准差)分别为(54.4±11.7)、(57.9±9.7)、(28.6±4.3)、(542±21)Bq·kg<sup>-1</sup>. 表1列出了昌邑湿地和其他区域的放射性核素含量的比较. 同国内其他

潮间带区域相比,昌邑湿地的<sup>238</sup>U和<sup>232</sup>Th含量处于较高水平,而<sup>226</sup>Ra和<sup>40</sup>K含量则相对较低. 昌邑湿地和黄河口湿地沉积物母质都是近代黄河冲积物,因此放射性核素含量十分接近. 沉积环境中自然放射性核素的水平主要取决于不同岩性区域岩石的种类和地质组成<sup>[20,21]</sup>,总体来看中国土壤的放射性核素含量平均值(尤其是<sup>232</sup>Th和<sup>40</sup>K)要高于世界平均值,并且远高于地中海区域,这体现了不同陆地的土壤母质的岩性差异.

表1 昌邑滨海湿地表层沉积物放射性核素含量同其他区域比较

Table 1 Comparison of radionuclide content between Changyi coastal wetland and other areas

| 研究区域          | 放射性核素/Bq·kg <sup>-1</sup> |                   |                   |                 | 文献   |
|---------------|---------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|------|
|               | <sup>238</sup> U          | <sup>232</sup> Th | <sup>226</sup> Ra | <sup>40</sup> K |      |
| 昌邑柁柳滨海湿地      | 54.4                      | 57.9              | 28.6              | 542             | 本研究  |
| 黄河口湿地         | 60.5                      | 57.7              | 28.0              | 687.3           | [22] |
| 黄河口水下三角洲      | 37.4                      | 41.4              | 37.3              | —               | [23] |
| 胶州湾潮间带        | 42.5                      | 37.4              | 26.6              | 655             | [24] |
| 厦门潮间带         | 40.2                      | 69.3              | 32.4              | 692             | [6]  |
| 兴化湾西岸潮间带      | 45.4                      | 61.2              | 31.4              | 804             | [25] |
| 土耳其爱琴海沿岸      | 12.46                     | 10.75             | 10.41             | 422.6           | [7]  |
| 希腊 Patras 湾近岸 | 21.8                      | 24.5              | 22.6              | 497             | [26] |
| 埃及红海海滩        | 25.3                      | 31.4              | 24.7              | 427.5           | [27] |
| 中国平均          | 38.5                      | 54.6              | 37.6              | 584             | [28] |
| 世界平均          | 35                        | 30                | 35                | 400             | [29] |

昌邑湿地放射性核素含量的水平分布如图2所示. 4种自然放射性核素中,<sup>238</sup>U的水平分布波动最大,<sup>40</sup>K的水平变化最小,而<sup>232</sup>Th和<sup>226</sup>Ra则呈现出相类似的水平分布模式. 在不同的断面中,核素的分

布也存在较大差异. 在A断面中,<sup>238</sup>U的含量变化剧烈,而<sup>232</sup>Th和<sup>226</sup>Ra也呈现出无明显规律的高低变化;在B断面中,从B1~B6,也即从陆地向海洋的方向,<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th和<sup>226</sup>Ra的含量均逐渐增加;而在C

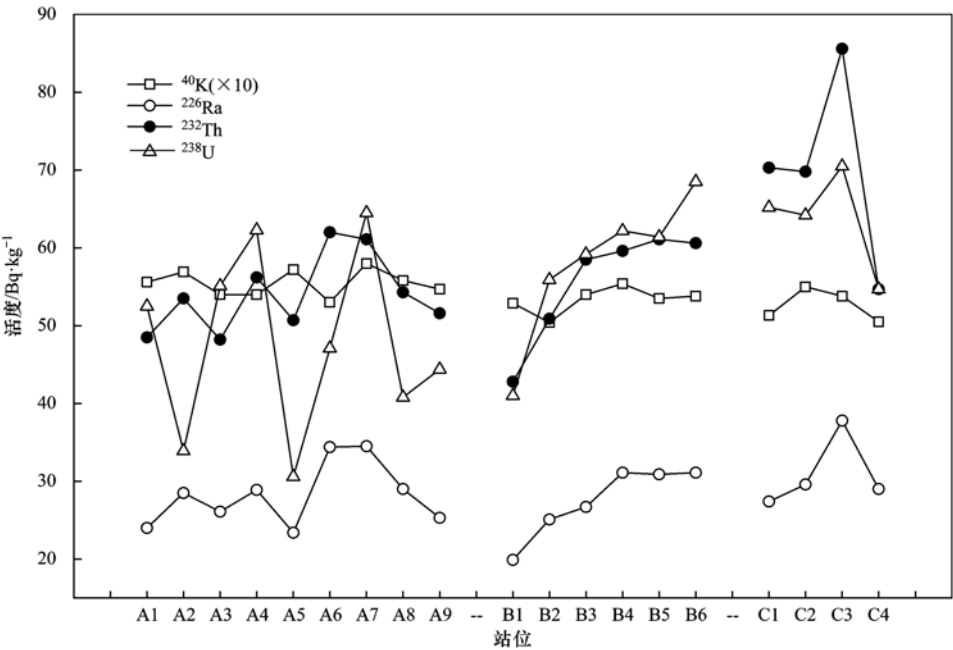


图2 昌邑湿地表层沉积物中<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra、<sup>40</sup>K的水平分布

Fig. 2 Horizontal distributions of <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra and <sup>40</sup>K in the surface sediment of Changyi wetland

断面中,  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 和 $^{226}\text{Ra}$ 均在 C3 站位有极大值. 不同核素之间的相对含量在不同断面之间也有较大差异. 例如, B 断面中 $^{238}\text{U}$ 含量高于 $^{232}\text{Th}$ , C 断面则相反, 而在 A 断面中二者的相对含量则交替变化.

沉积物中的自然放射性核素含量主要取决于形成沉积物的母系岩石或者土壤, 但沉积后会在多种理化因子的影响下发生不同程度的迁出或富集<sup>[30,31]</sup>. 人类活动所造成的环境改变以及物质输入也会对放射性核素的含量水平产生显著的影响. 为了便于比较, 计算了当量 Ra 活度含量  $\text{Ra}_{\text{eq}}$ <sup>[32]</sup> ( $\text{Ra}_{\text{eq}} = A_{\text{Ra}} + 1.43A_{\text{Th}} + 0.077A_{\text{K}}$ , 式中,  $A_{\text{Ra}}$ 、 $A_{\text{Th}}$ 、 $A_{\text{K}}$  分别为 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{40}\text{K}$ 的活度含量), 如图 3 所示. 从中可以看出, 不同站位的放射性水平有明显差异. 总的来看, C 断面的放射性核素平均含量高于 A 断面和 B 断面. 而 C 断面靠近河流, 这说明河流物质输入是昌邑湿地沉积物中放射性核素的重要来源. 上游河道输入的放射性含量较高的物质, 如由于施加磷肥而导致的高 $^{226}\text{Ra}$ 含量的耕地土壤、放射性核素较高的矿业废弃物等, 在河口滨海湿地堆积, 从而提升了湿地沉积物中放射性核素的含量水平. 而在 A 和 B 断面中, 靠近人工堤坝的 A6、A7 及 B6 站位放射性水平也相对较高. 这是由于修建堤坝所使用的水泥等材料的放射性核素含量相对较高, 这些站位受建造施工的影响, 表层沉积物的放射性水平得到提升. 此外, 在堤坝内侧很难受到潮水影响的区域, 还纵横交错的修建了许多道路和沟渠, 离这些人为改造区域较近的站位 (如 A2、A4 等), 核素水平相对较高, 而距离较远的站位 (如 A1、A3、A5 等) 核素水平则相对较低. 因此, A 断面放射性核素含量的水平分布呈现出高低值的交替变化. 可以看出, 人类活动对湿地表层沉积物的放射性核素含量水平

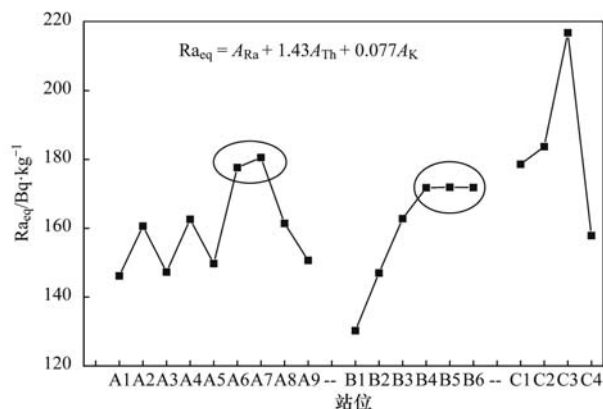


图 3 昌邑湿地表层沉积物中  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  的水平分布

Fig. 3 Horizontal distributions of  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  in the surface sediment of Changyi wetland

有明显的改变. 反过来说, 表层沉积物中的放射性核素含量的变化可以在一定程度上反映人类活动对湿地环境所产生的影响大小.

## 2.2 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 的垂直分布与沉积速率

天然放射性核素 $^{210}\text{Pb}$ 和人工核素 $^{137}\text{Cs}$ 常被用于近海海洋及潮间带沉积物测年的研究. 沉积物中总的 $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ ) 除了与母体 $^{226}\text{Ra}$ 保持平衡的部分 ( $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$ ) 外, 还有一部分来源于大气沉降, 该部分 $^{210}\text{Pb}$ 被称作过剩 $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ). 利用 $^{210}\text{Pb}$ 定年的依据是沉积物中的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  随着深度的增加呈指数衰减. 而人工核素 $^{137}\text{Cs}$ 主要是由人类核试验释放到环境中, 在沉积物中的最大检出深度对应的时间为 1954 年, 而在核试验最为密集的 1963 年所对应的沉积物深度,  $^{137}\text{Cs}$ 的含量会出现峰值; 此外 1986 年的切尔诺贝利核事故也会在很多区域的沉积物中产生 $^{137}\text{Cs}$ 含量的峰值. 以这些峰值出现的深度及其对应的时间为标尺, 即能计算出一段时期内的平均沉积速率. 在本研究测定了沉积物岩芯 A5 中 $^{210}\text{Pb}$ 垂直分布 (图 4) 以及 A5、A8 和 A9 中 $^{137}\text{Cs}$ 的垂直分布 (图 5), 以便对昌邑怪柳林湿地的沉积速率及沉积过程进行分析.

站点 A5 处于昌邑湿地的高沼区, 近年来又受到了人工堤坝的保护, 因此沉积环境相对稳定. A5 沉积物岩芯中,  $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$  以及 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  的垂直分布如图 4 所示. 从图 4(b) 可以看出, 随着深度增加 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  基本呈指数衰减模式, 尤其在 25 cm 以浅, 表明该阶段沉积速率稳定, 因此可以根据恒定初始浓度 (CIC) 的 $^{210}\text{Pb}$ 计年模式, 计算出 A5 岩芯 25 cm 以浅的沉积速率为  $0.23 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ . A5 岩芯中 $^{137}\text{Cs}$ 的分布如图 5 所示, 最大检出深度为 21 cm, 而峰值出现在表层 3 cm 处. 很显然, 3 cm 处的 $^{137}\text{Cs}$ 峰值既不能对应 1963 年, 也不可能是 1986 年, 无法用于沉积速率的计算; 而根据最大检出深度对应的 1954 年计算出的沉积速率为  $0.37 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ , 明显高于 $^{210}\text{Pb}$ 的计年结果. 由于 $^{210}\text{Pb}$ 的垂直分布更有规律, 因此  $0.23 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$  的沉积速率更接近真实值.  $^{137}\text{Cs}$ 的分布可能受到了其他过程的干扰, 例如表层较高的有机碳含量可能对 Cs 产生了富集, 从而导致 $^{137}\text{Cs}$ 的峰值出现在浅层, 而深层的 $^{137}\text{Cs}$  则可能发生了向下的迁移<sup>[33,34]</sup>. A8 和 A9 站位受到潮汐、极端气候以及人为活动等的干扰, 沉积过程较为复杂. 在 A8 岩芯中, 在 19 cm 深度才开始检测到有 $^{137}\text{Cs}$ 的存在, 而峰值出现在 29 cm, 最大检出深度更是深达 51 cm, 这说明 A8 岩芯的沉积过程受到了严重的干扰. 在采



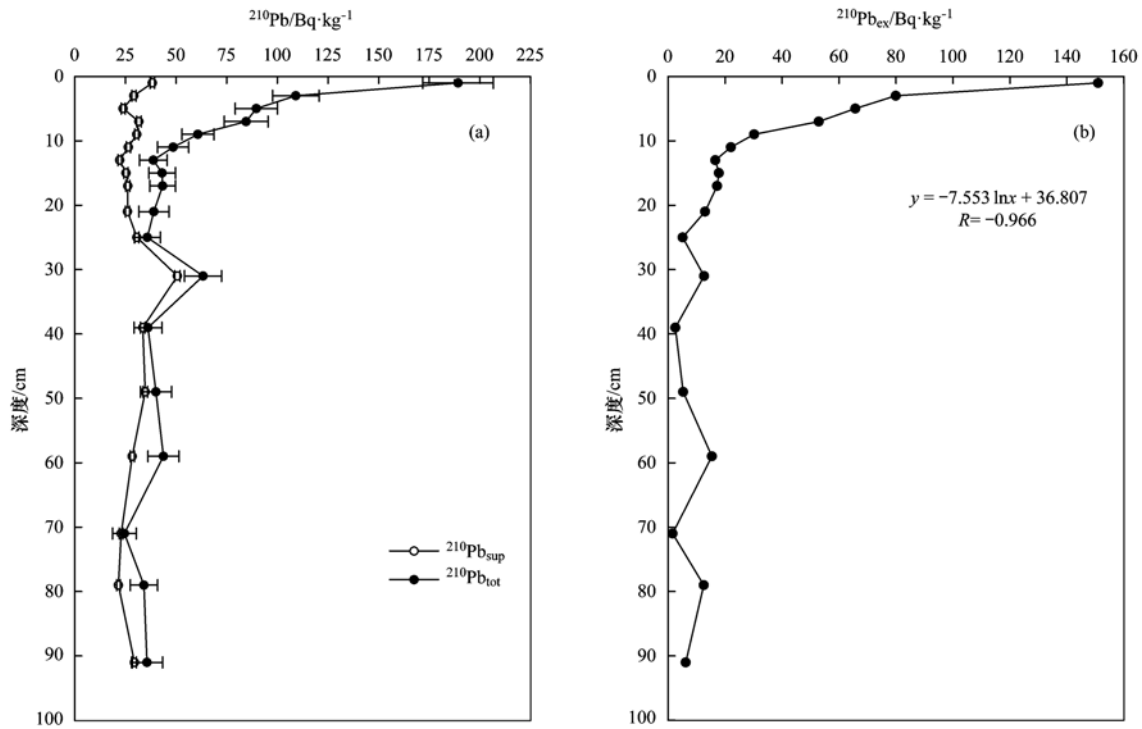


图4 A5岩芯中 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$ 以及 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of  $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ ,  $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  in the sediment core A5

样过程中发现,A8岩芯在20 cm深度左右有大量的植物碎屑存在,而且沉积物有机碳含量也在此深度出现极大值,再结合A8十分接近植被覆盖区域的地理位置,笔者推断该站所处的区域曾经发生泥沙对植被的掩埋,而这种掩埋极有可能是由风暴潮等极端天气条件造成的. A9岩芯中, $^{137}\text{Cs}$ 在5 cm深度开始检测出,并在19 cm出现最大值. A9位于光滩,受不规则半日潮影响每天被淹没两次. 由于退潮时海水流速减缓,潮水携带的颗粒物质会在此处堆积,所以A9站表层沉积物会得到不断的更新,这是表层没有检测到 $^{137}\text{Cs}$ 存在的重要原因之一. 此外,盐度的升高会增加沉积物中 $^{137}\text{Cs}$ 的解析<sup>[3]</sup>,而且大量的 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 等阳离子也会置换出结合在颗粒物表面的 $\text{Cs}^{+}$ ,使 $^{137}\text{Cs}$ 的迁移性增强<sup>[35]</sup>. 因此,位于光滩的低沼区沉积物中,水动力对 $^{137}\text{Cs}$ 分布的影响远大于大气沉降. 总的来看,A8和A9的沉积过程受到了不同程度的干扰,难以通过放射性核素 $^{137}\text{Cs}$ 的分布计算沉积速率.

### 2.3 放射性核素 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 和 $^{40}\text{K}$ 的垂直分布及环境指示意义

由于不同区域的土壤、岩石及沉积物等物质具有不同的放射性核素含量,因而沉积物岩芯中的放射性核素的分布可以指示沉积过程中的物质来源. 此外,有研究认为自然核素在土壤剖面中的变化可

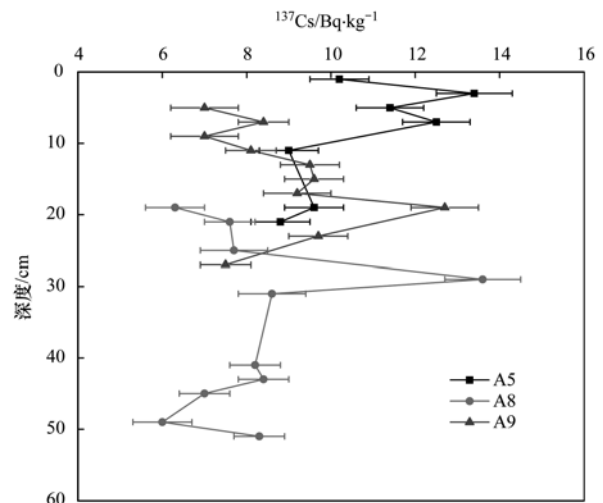


图5 沉积物岩芯中 $^{137}\text{Cs}$ 的垂直分布

Fig. 5 Vertical profiles of  $^{137}\text{Cs}$  in the sediment core

以反映土壤中发生的变化,而且还可以通过测量核素的活度来估计土壤随深度的异质性<sup>[36]</sup>. 为此,本研究测定了可以准确计年的A5岩芯中的放射性核素含量. 表2列出了4种核素的统计数据,可以看出 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 和 $^{226}\text{Ra}$ 这3种核素的含量变化较大,极大值远高于平均值,而 $^{40}\text{K}$ 含量的垂直变化则相对较小.  $^{40}\text{K}$ 是唯一可用伽马谱仪测量的天然存在的不成系长寿命核素,其含量随深度变化不大则符合其在沉积物岩芯中的典型分布特征,而 $^{232}\text{Th}$ 的垂直分布

与 $^{238}\text{U}$ 基本相似,因此笔者以垂直分布具有明显变化的同系核素 $^{238}\text{U}$ 和 $^{226}\text{Ra}$ 为例,探讨滨海湿地沉积物岩芯中放射性核素含量变化的环境指示意义。

表 2 A5 岩芯中的放射性核素含量统计

| 核素                | 统计值/ $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ |      |       |      | 变异系数<br>/% |
|-------------------|-------------------------------------|------|-------|------|------------|
|                   | 最大值                                 | 最小值  | 算术平均值 | 标准差  |            |
| $^{238}\text{U}$  | 104.5                               | 48.6 | 72.6  | 13.5 | 18.6       |
| $^{232}\text{Th}$ | 97.1                                | 47.6 | 61.9  | 10.5 | 17.0       |
| $^{226}\text{Ra}$ | 53.1                                | 21.6 | 32.0  | 7.7  | 24.1       |
| $^{40}\text{K}$   | 623                                 | 509  | 570   | 26   | 4.6        |

$^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 及其比值的垂直分布如图 6 所示。总体来看, $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 的垂直分布由深层至浅层分为 4 个阶段(图 6 中由 3 条虚线分隔开)。第一个阶段, $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 的含量缓慢增加,而 $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ 却逐渐减小。 $^{238}\text{U}$ 和 $^{226}\text{Ra}$ 主要来自于陆源物质的输入,但 $^{238}\text{U}$ 的迁移性主要受氧化还原环境的影响<sup>[37]</sup>,而作为碱土金属, $^{226}\text{Ra}$ 的吸附与解吸则与离子强度密切相关,吸附在沉积物上的 $^{226}\text{Ra}$ 极易被其他碱土金属阳离子置换<sup>[38]</sup>。尽管盐度的增大也会导致 $^{238}\text{U}$ 的解吸增强<sup>[39]</sup>,但是离子强度的增强会导致 $^{226}\text{Ra}$ 更大程度的流失<sup>[40,41]</sup>,因此海水入侵应该会导致 $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ 的升高。所以这一阶段 $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 及 $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ 的变化特征表明,陆源物质在逐渐堆积,滨海湿地缓慢向海

延伸,从而使这一区域受潮汐的影响减弱。第二阶段, $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 的含量及其比值剧烈变化,反映了物质来源以及沉积环境的剧烈改变。由上文计年结果可知,该阶段处于 1850 年左右。1855 年,黄河在河南铜瓦厢决口改道,之后黄水北徙夺大清河入渤海,结束了长达 700 多年的夺淮水入黄海的局面,并且使北方成为大片漫流区,整个渤海南部沿岸受黄河冲淤影响严重<sup>[42,43]</sup>。黄河冲淤使滨海湿地变成大面积泥滩,严重破坏了沿海地区的生态环境,给近岸区域的沉积环境带来剧烈的变化。此后的数十年间,黄河下游不断发生决溢,使现行河口三角洲及周围大片区域受灾不断。昌邑湿地沉积物岩芯中这一阶段 $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 含量及其比值的剧烈变化反映了此次重大历史事件对滨海湿地沉积环境的影响。此阶段黄河泥沙快速淤积,沉积速率应该较高,因此图 6 中所标注的 1900 年以前的年份应该更晚。而上文中提到, $^{210}\text{Pb}$ 的分布在 25 cm 以前分布十分规律,而在 25 cm 以下波动较大,这与此处的结论相一致。第三阶段对应 1900 年以后,改道后的黄河逐渐归流入股,位于现行入海口南部的莱州湾沿岸受其影响减弱,沉积环境趋向于稳定,因此放射性核素的含量分布也趋于一致,没有大的变化。第四阶段,从十几厘米左右的深度至表层,放射性核素的含量又经历了一次先增大后减小又增大的变化。这段深度对应的

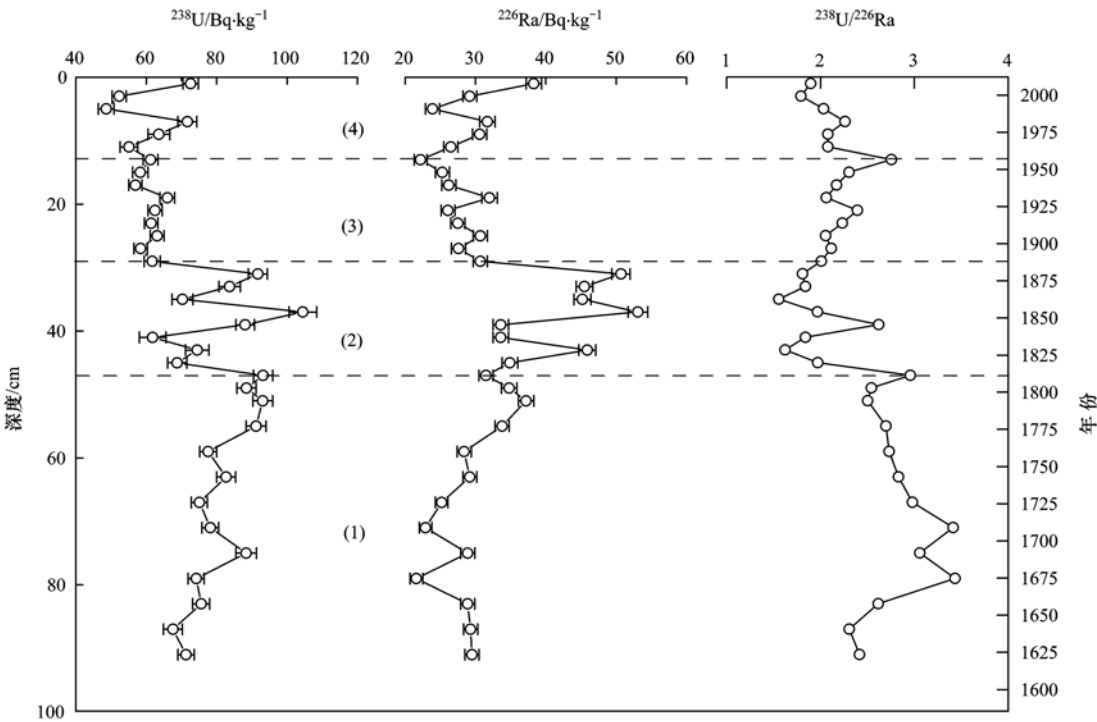


图 6 沉积物岩芯 A5 中 $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 及其比值 $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ 的垂直分布  
Fig. 6 Vertical profiles of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  ratio in sediment core A5



时期为建国后至现在. 在建国初的二三十年间, 随着社会经济的发展和人类活动增强, 排放到环境中的放射性物质的含量也有所提升, 例如采矿、农业施肥等都会增加环境的放射性载荷, 在沉积物中就表现为几种自然放射性核素含量的缓慢升高. 然而, 自 20 世纪 60 年代以来, 莱州湾南岸掀起了海洋开发的热潮, 对海洋资源大规模的开发逐渐导致滨海湿地的退化<sup>[10]</sup>. 至 20 世纪 70 年代, 莱州湾南岸多条入海河流的上游兴建水库, 再加上 1977 年以来研究区域连续 20 年的干旱, 输入到滨海湿地的水量严重不足, 导致莱州湾南岸滨海湿地严重退化<sup>[8]</sup>, 咸海水入侵加剧. 而在较高的盐度和离子强度下, 放射性核素的解吸加强, 因此海水的侵蚀会导致沉积物中放射性核素含量的降低<sup>[39~41]</sup>. 自 20 世纪 90 年代以来, 虽然自然湿地仍在不断萎缩, 但是人工湿地的面积增长迅速, 与此同时, 环境污染也进一步加剧; 至 21 世纪, 随着人们生态环境保护意识的增强, 湿地生态逐渐得到恢复, 昌邑柵柳林湿地更是建成国家级海洋生态保护区. 人工湿地的增长, 环境污染的加剧, 以及湿地生态环境的逐渐稳定使海水侵蚀减弱等因素使得沉积物中放射性物质的含量又逐渐提高. 此外, 在三、四阶段,  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  整体上变化不大, 说明了该阶段潮汐影响的变化不大, 很可能意味着这一时期海岸线并没有较大程度的后退或者延伸.

总的来看, 沉积物岩芯中的放射性核素含量的变化与沉积环境的变化相一致, 可以在一定程度上反映重大的历史沉积事件, 物质来源的改变以及在人类活动的影响下滨海湿地生态环境的演变, 具有重要的环境指示意义.

### 3 结论

(1) 昌邑柵柳林湿地表层沉积物 4 种核素  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  的平均含量分别为  $(54.4 \pm 11.7)$ 、 $(57.9 \pm 9.7)$ 、 $(28.6 \pm 4.3)$ 、 $(542 \pm 21) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 同国内其他潮间带相比,  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$  的含量偏高而  $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  的含量偏低. 在湿地的不同区域, 表层沉积物放射性水平差异显著, 靠近河流堤坝、沟渠、道路的区域放射性水平明显偏高, 反映了物质来源的差异以及人类活动对沉积物特性的影响.

(2) 在沉积物岩芯中,  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  的垂直分布表明, 湿地高沼区百年尺度内沉积环境稳定, 沉积速率为  $0.23 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 而受到严重干扰的  $^{137}\text{Cs}$  分布则表明过渡区域及光滩的沉积过程则较为复杂. 在高沼区

沉积物岩芯中,  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  和  $^{40}\text{K}$  的含量分别为  $48.6 \sim 104.5$ 、 $47.6 \sim 97.1$ 、 $21.6 \sim 53.1$  和  $509 \sim 623 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  含量的变异系数较高. 根据  $^{238}\text{U}$  和  $^{226}\text{Ra}$  及其比值的垂直分布, 沉积过程可被分为 4 个阶段: 缓慢沉积阶段, 受黄河河道迁徙影响下的沉积环境剧烈变化阶段, 黄河归流后的稳定阶段, 以及在人类活动的影响下的退化、增长交替阶段. 在不同的阶段, 放射性核素含量的变化反映了重大的历史沉积事件, 物质来源的改变以及人类活动等对滨海湿地沉积环境的影响, 具有重要的环境指示意义.

### 参考文献:

- [1] Al-Trabulsi H A, Khater A E M, Habbani F I. Radioactivity levels and radiological hazard indices at the Saudi coastline of the Gulf of Aqaba[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2011, **80** (3): 343-348.
- [2] Ramasamy V, Paramasivam K, Suresh G, *et al.* Role of sediment characteristics on natural radiation level of the Vaigai river sediment, Tamilnadu, India[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, **127**: 64-74.
- [3] Gulina S B, Gulina L V, Sidorov I G, *et al.*  $^{40}\text{K}$  in the Black Sea: a proxy to estimate biogenic sedimentation [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, **134**: 21-26.
- [4] Yang W F, Chen M, Zhang X X, *et al.* Thorium isotopes ( $^{228}\text{Th}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) and applications in reconstructing the Yangtze and Yellow River floods [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2013, **28**(4): 588-595.
- [5] Zebracki M, Eyrolle-Boyer F, Evrard O, *et al.* Tracing the origin of suspended sediment in a large Mediterranean river by combining continuous river monitoring and measurement of artificial and natural radionuclides [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 122-132.
- [6] 陈锦芳, 刘广山, 黄奕普. 厦门潮间带表层沉积物天然放射系不平衡研究[J]. *台湾海峡*, 2005, **24**(3): 274-282.
- [7] Aközcan S. Distribution of natural radionuclide concentrations in sediment samples in Didim and Izmir Bay (Aegean Sea-Turkey) [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2012, **112**: 60-63.
- [8] 王永丽, 于君宝, 董洪芳, 等. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析[J]. *地理科学*, 2012, **32**(6): 717-724.
- [9] 翟万林, 龙江平, 乔吉果, 等. 长江口滨海湿地景观格局变化及其驱动力分析[J]. *海洋学研究*, 2010, **28**(3): 17-22.
- [10] 徐宗军, 张绪良, 张朝晖, 等. 莱州湾南岸滨海湿地的生物多样性特征分析[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(2): 367-372.
- [11] 刘志杰, 李培英, 张晓龙, 等. 黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1182-1188.
- [12] 丁冬静, 李玫, 廖宝文, 等. 海南省滨海自然湿地生态系统服务功能价值评估[J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(9): 1472-

- 1477.
- [13] 叶思源, 丁喜桂, 袁红明, 等. 我国滨海湿地保护的地质问题与研究任务[J]. 海洋地质前沿, 2011, **27**(2): 1-7.
- [14] 吴珊珊, 张祖陆, 陈敏, 等. 莱州湾南岸滨海湿地变化及其原因分析[J]. 湿地科学, 2009, **7**(4): 373-378.
- [15] 张绪良, 张朝晖, 徐宗军, 等. 莱州湾南岸滨海湿地的景观格局变化及累积环境效应[J]. 生态学杂志, 2009, **28**(12): 2437-2443.
- [16] 姜爱霞, 李道高. 莱州湾南岸滨海平原咸水入侵区浅层地下水水化学特征[J]. 海洋学报, 1997, **19**(4): 142-147.
- [17] 张绪良, 于冬梅, 丰爱平, 等. 莱州湾南岸滨海湿地的退化及其生态恢复和重建对策[J]. 海洋科学, 2004, **28**(7): 49-53.
- [18] 张绪良, 谷东起, 夏东兴. 莱州湾南岸湿地水文环境变化与可持续的水资源管理对策[J]. 湿地科学, 2005, **3**(3): 235-240.
- [19] 汤爱坤, 刘汝海, 许廖奇, 等. 昌邑海洋生态特别保护区土壤养分的空间异质性与植物群落的分布[J]. 水土保持通报, 2011, **31**(3): 88-93.
- [20] Nenadović S, Nenadović M, Kljajević L, *et al.* Vertical distribution of natural radionuclides in soil: assessment of external exposure of population in cultivated and undisturbed areas[J]. Science of the Total Environment, 2012, **429**: 309-316.
- [21] Krmar M, Varga E, Slivka J. Correlations of natural radionuclides in soil with those in sediment from the Danube and nearby irrigation channels [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2013, **117**: 31-35.
- [22] 王启栋, 宋金明, 李学刚, 等. 黄河口新生湿地沉积物放射性核素及其对沉积过程变化指示作用解析[J]. 地质论评, 2014, **60**(3): 635-645.
- [23] 康兴伦, 顾德隆, 张经, 等. 多种核素在沉积物中的垂直和平面分布[J]. 海洋与湖沼, 2002, **33**(1): 47-54.
- [24] 刘广山, 李冬梅, 易勇, 等. 胶州湾沉积物的放射性核素含量分布与沉积速率[J]. 地球学报, 2008, **29**(6): 769-777.
- [25] 纪丽红, 李超, 刘广山. 兴化湾西岸潮间带沉积物岩心放射性核素分布与沉积速率[J]. 海洋学研究, 2009, **27**(3): 1-7.
- [26] Papaefthymiou H, Papatheodorou G, Moustakli A, *et al.* Natural radionuclides and  $^{137}\text{Cs}$  distributions and their relationship with sedimentological processes in Patras Harbour, Greece [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2007, **94**(2): 55-74.
- [27] El Mamoney M H, Khater A E M. Environmental characterization and radio-ecological impacts of non-nuclear industries on the Red Sea coast[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2004, **73**(2): 151-168.
- [28] Wang Z Y. Natural radiation environment in China [J]. International Congress Series, 2002, **1225**: 39-46.
- [29] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation, report to the general assembly with scientific annexes [R]. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000.
- [30] El-Reefy H I, Badran H M, Sharshar T, *et al.* Factors affecting the distribution of natural and anthropogenic radionuclides in the coastal Burullus Lake [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2014, **134**: 35-42.
- [31] Narayana Y, Rajashekara K M. The importance of physico-chemical parameters on the speciation of natural radionuclides in riverine ecosystems[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2010, **101**(11): 958-964.
- [32] Beretka J, Matthew P J. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products[J]. Health Physics, 1985, **48**(1): 87-95.
- [33] Forsberg S, Rosén K, Fernandez V, *et al.* Migration of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in undisturbed soil profiles under controlled and close-to-real conditions[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2000, **50**(3): 235-252.
- [34] Teramage M T, Onda Y, Patin J, *et al.* Vertical distribution of radiocesium in coniferous forest soil after the Fukushima nuclear power plant accident [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2014, **137**: 37-45.
- [35] Gjelsvik R, Steinnes E. Geographical trends in  $^{137}\text{Cs}$  fallout from the Chernobyl accident and leaching from natural surface soil in Norway[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2013, **126**: 99-103.
- [36] Fujiyoshi R, Sawamura S. Mesoscale variability of vertical profiles of environmental radionuclides ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$ ) in temperate forest soils in Germany[J]. Science of the Total Environment, 2004, **320**(2-3): 177-188.
- [37] Barnes C E, Cochran J K. Uranium geochemistry in estuarine sediments: controls on removal and release processes [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, **57**(3): 555-569.
- [38] Charette M A, Sholkovitz E R. Trace element cycling in a subterranean estuary: Part 2. Geochemistry of the pore water [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, **70**(4): 811-826.
- [39] 蔡平河, 黄奕普, 邱雨生. 九龙江河口区水体中 $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{Th}$ 地球化学行为的研究[J]. 海洋学报, 1996, **18**(5): 52-60.
- [40] Li Y H, Chan L H. Desorption of Ba and  $^{226}\text{Ra}$  from river-borne sediments in the Hudson estuary [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1979, **43**(3): 343-350.
- [41] 施文远, 邱晓晖, 黄奕普. 九龙江—厦门湾河口区溶解 $^{226}\text{Ra}$ 的分布[J]. 海洋学报, 1993, **15**(4): 50-55.
- [42] 庞家珍, 司书亨. 黄河河口演变——I. 近代历史变迁[J]. 海洋与湖沼, 1979, **10**(2): 136-141.
- [43] 廖永杰, 范德江, 刘明, 等. 1855 年黄河改道事件在渤海的沉积记录[J]. 中国海洋大学学报, 2015, **45**(2): 88-100.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                       |                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China .....                                                                                                              | CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)                |
| Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China .....                                                                             | LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)           |
| Diurnal Variation of PM <sub>2.5</sub> Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date .....                                            | MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)                       |
| Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015 .....                                                                                                  | CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)     |
| Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang .....                                                                   | ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)                 |
| Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain .....                                                                    | JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)                |
| Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City .....                        | SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)              |
| Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City .....                                                                                             | ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)        |
| Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case .....                                                                    | LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)                         |
| Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin .....                                                                                                             | GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)                 |
| Assessment of Gaseous Nitrogen (NH <sub>3</sub> and N <sub>2</sub> O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation .....       | FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)              |
| Soil CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons ..... | WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)                                      |
| Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir .....                                                               | ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)          |
| Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir .....                                                                                                    | ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)            |
| Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed .....                    | WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)             |
| Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai .....                                                                                        | XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)            |
| Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River .....                                              | WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)           |
| Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream .....                                                                   | LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)          |
| Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch .....                                                                                | LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)          |
| Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir .....                                            | CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)      |
| Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area .....                                                                       | LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)            |
| Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region .....                                                                               | CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)                 |
| Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China .....                        | WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)         |
| Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River .....                                                                            | CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)     |
| Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland .....                                                                    | WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)        |
| Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers .....                                                                                       | LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)              |
| Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan .....                                                             | CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)              |
| Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season .....                                                                               | ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)          |
| Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands .....                                     | ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)        |
| Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce <sup>3+</sup> and Cu <sup>2+</sup> Ions .....                                                         | ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)       |
| Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor .....                                                                                                             | DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073) |
| Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol .....                                                | XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)                               |
| Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO <sub>2</sub> in Aqueous Solution .....                                                      | YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)              |
| Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine .....                                                                     | MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)                   |
| Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater .....                                                                           | LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)               |
| Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor .....                                                                 | WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)          |
| Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment .....                                                                     | LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)              |
| Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia .....                                               | GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)                   |
| Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition .....                                                                                        | MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)                   |
| Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid .....                                                                            | HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)         |
| Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province .....                                                                 | WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)             |
| Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics .....                                                                    | ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)           |
| Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties .....                                                                            | FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)                |
| Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method .....                                                                                                      | LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)                       |
| Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions .....                | ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)              |
| Preparation and NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges .....                                                               | WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)          |
| Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions .....                                                                                                    | ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)            |
| Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid .....                                                     | ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)     |
| Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization .....                                                        | JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)        |
| Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA .....                                                                                              | WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)      |
| Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance .....                                                              | LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)               |
| Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils .....                                                | LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)              |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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  
赵进才 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8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 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)<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     | 赵进才                                                                                                                                                                 | Editor-in -Chief |    | ZHAO Jin-cai                                                                                                                                                                                                            |
| 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   | 中国国际图书贸易集团有限公司<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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行