

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

**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

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究 ..... 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)

南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析 ..... 薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)

2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征 ..... 李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)

结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟 ..... 郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)

2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析 ..... 沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翡 (1662)

移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO<sub>2</sub> 的时空分布 ..... 李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)

秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成 ..... 刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)

连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制 ..... 窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)

我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平 ..... 于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)

巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响 ..... 马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)

京杭大运河(杭州段)典型断面水生生物多样性调查及其与水环境相关性研究 ..... 陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)

合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价 ..... 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)

重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算 ..... 潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)

千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价 ..... 唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)

九龙江流域潜在病原菌污染分析 ..... 侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)

江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响 ..... 刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)

鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征 ..... 简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)

典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征 ..... 姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)

基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析 ..... 席庆, 李兆富, 罗川 (1773)

混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究 ..... 孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)

不同波长和强度光照对水体汞还原的影响 ..... 李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)

地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响 ..... 杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)

溴化铍可见光催化降解高效氯氟菊酯的研究 ..... 彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)

石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究 ..... 常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)

电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究 ..... 卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)

典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋 ..... 甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)

颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制 ..... 何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)

石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究 ..... 周贵忠, 王兆丰, 王绚, 李文倩, 李少香 (1832)

靛基氯甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用 ..... 张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)

FePMo<sub>12</sub> 催化电化学反应降解染料废水的研究 ..... 王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)

实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究 ..... 杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)

SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究 ..... 龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)

不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响 ..... 尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)

黄原酸化废弃污泥吸附 Cu<sup>2+</sup> 研究 ..... 岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)

轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究 ..... 薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)

不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对萘的吸附性能 ..... 黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)

北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究 ..... 李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)

泰州市区重金属污染的藜袋法与路尘法评价研究 ..... 陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)

放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响 ..... 王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)

苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响 ..... 王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)

重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究 ..... 王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)

上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征 ..... 奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)

不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: <sup>13</sup>C 连续标记法 ..... 谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)

污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究 ..... 郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)

石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究 ..... 李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)

大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究 ..... 虞俊超, 王宝盛, 王亚韡, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)

应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性 ..... 周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)

氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究 ..... 王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)

吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制 ..... 黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立涛, 王惜若 (1974)

牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究 ..... 焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)

针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响 ..... 杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)

城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究 ..... 王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)

铈插层黏土负载铁催化剂在 H<sub>2</sub>S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究 ..... 孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)

脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征 ..... 祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)

固定污染源排气中 PM<sub>2.5</sub> 采样方法综述 ..... 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)

产甲烷微生物研究概况 ..... 李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)

《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)

# 大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究

虞俊超<sup>1,2</sup>, 王宝盛<sup>2\*</sup>, 王亚韡<sup>2</sup>, 孟梅<sup>2</sup>, 陈茹<sup>1,2</sup>, 江桂斌<sup>2</sup>

(1. 山东大学环境研究院, 济南 250100; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境化学与生态毒理学国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 在大连市金石滩采集海产品, 使用 GC/ECNI-LRMS 技术对样品中短链氯化石蜡 (SCCPs) 的累积和分布特征进行了研究. 结果表明,  $\sum$  SCCPs 在香螺样品中含量最低, 毛蚶样品中含量最高, 干重浓度分别为  $77 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $8\ 250 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ .

$\sum$  SCCPs 在鱼类、虾蟹和贝类中的干重浓度分别为  $100 \sim 3\ 510$ 、 $394 \sim 5\ 440$  和  $77 \sim 8\ 250 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ . 总体上看, 海产品中 SCCPs 碳原子同族体以  $\text{C}_{10}$  和  $\text{C}_{11}$  为主, 约占总量的 61.1%,  $\sum$  SCCPs 含量越高的海产品倾向于累积更高比重的  $\text{C}_{12}$  和  $\text{C}_{13}$ .  $\text{Cl}_7$ 、 $\text{Cl}_8$  和  $\text{Cl}_6$  为主要的氯原子同族体, 约占总量的 87.6%. 除了  $\text{Cl}_5$  与  $\text{Cl}_{10}$ , 样品中 SCCPs 各碳(氯)同族体之间均存在显著相关性, 这表明它们可能有着相同的来源和相似的生物蓄积以及迁移转化过程.

**关键词:** 短链氯化石蜡; 海产品; 累积; 分布; 相关性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1955-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.05.046

## Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seafood from Dalian, China

YU Jun-chao<sup>1,2</sup>, WANG Thanh<sup>2</sup>, WANG Ya-wei<sup>2</sup>, MENG Mei<sup>2</sup>, CHEN Ru<sup>1,2</sup>, JIANG Gui-bin<sup>2</sup>

(1. Environment Research Institute, Shandong University, Ji'nan 250100, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Seafood samples were collected from Dalian, China to study the accumulation and distribution characteristics of short chain chlorinated paraffins (SCCPs) by GC/ECNI-LRMS.  $\sum$  SCCPs (dry weight) were in the range of  $77\text{-}8\ 250 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , with the lowest value in *Scapharca subcrenata* and highest concentration in *Neptunea cumingi*. The concentrations of  $\sum$  SCCPs (dry weight) in fish, shrimp/crab and shellfish were in the ranges of  $100\text{-}3\ 510$ ,  $394\text{-}5\ 440$ , and  $77\text{-}8\ 250 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , respectively. Overall, the  $\text{C}_{10}$  and  $\text{C}_{11}$  homologues were the most predominant carbon groups of SCCPs in seafood from this area, and a relatively higher proportion of  $\text{C}_{12\text{-}13}$  was observed in seafood with higher concentrations of  $\sum$  SCCPs. With regard to chlorine content,  $\text{Cl}_7$ ,  $\text{Cl}_8$  and  $\text{Cl}_6$  were the major groups. Significant correlations were found among concentrations of different SCCP homologues (except  $\text{Cl}_5$  vs.  $\text{Cl}_{10}$ ), which indicated that they might share the same sources and/or have similar accumulation, migration and transformation processes.

**Key words:** short-chain chlorinated paraffins (SCCPs); seafood; accumulation; distribution; correlation

氯化石蜡 (chlorinated paraffins, CPs) 又称氯烃, 是一类正构烷烃的氯代衍生物, 被广泛运用于工业生产活动 (如作为金属加工液、阻燃剂和密封剂等), 具有电绝缘性、耐火性、稳定性和低挥发性<sup>[1]</sup>. 相对于中链氯化石蜡 (碳链长度为 14 ~ 17) 和长链氯化石蜡 (碳链长度为 18 ~ 30), 短链氯化石蜡 (碳链长度为 10 ~ 13, short-chain chlorinated paraffins, SCCPs) 因其较强的生物累积特性和更高的毒性而受到公众的广泛关注. 已有的报道表明 SCCPs 在全球多地区生物和人类母乳样本中均有检出<sup>[2-4]</sup>. 在高暴露剂量条件下, SCCPs 可造成老鼠和虹鳟鱼肝损伤<sup>[5,6]</sup>. 目前 SCCPs 已经被列入了斯德哥尔摩公约候选 POPs 名单.

作为世界上第一大氯化石蜡生产国, 2007 年中

国氯化石蜡年产量已经增长到 60 万 t, 生产工厂超过 140 家<sup>[7]</sup>. 近年来我国有关 SCCPs 环境行为研究逐渐增多, 但主要集中在大气、土壤、底泥等环境介质中<sup>[8,9]</sup>, Zeng 等<sup>[10]</sup> 发现污水处理厂是 SCCPs 的一个重要点源, 在其下游湖中采集到的湖水、底泥和水生生物样品中均检测到相对高含量的 SCCPs. 但是对于我国居民膳食中 SCCPs 的研究仍非常缺乏. 有限的信息表明, 2009 年北京市日常食品中 SCCPs 的浓度相比于 1993 年提高了两个数量

收稿日期: 2013-09-17; 修订日期: 2013-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21007085, 21222702); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2009CB421605)

作者简介: 虞俊超 (1989 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境分析化学, E-mail: yjc15165086915@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: bswang@rcees.ac.cn

级<sup>[11]</sup>. Yuan 等<sup>[12]</sup>调查了中国环渤海区域 9 个沿海城市软体动物样品中 SCCPs 浓度水平,发现其在我国海产品中可普遍被检出.

大连是中国重要的旅游和海港城市,海鲜等食品摄入是该区域居民主要的污染物暴露途径之一.为进一步了解该区域近海海产品中 SCCPs 的累积和分布特征,笔者在大连市金石滩采集了鱼类、虾蟹和贝类等样品,使用气相色谱-低分辨电子捕获负化学离子源质谱联用仪(GC/ECNI-LRMS)对这些海产品中 SCCPs 含量进行测定,以期评估我国居民通过膳食消费摄取 SCCPs 的潜在健康风险.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

2012 年 8 月在大连市金石滩采集 20 种海产品(将大小和体重无明显差异的同种海产品混合均匀,共组成 20 个样品),包括①鱼类:老板鱼( $n=2$ )、大黄鱼( $n=15$ )、黄鱼( $n=6$ )、黑鱼( $n=4$ )、鲈鱼( $n=5$ )、鳊鱼( $n=2$ );②虾蟹类:海虾( $n=10$ )、飞蟹( $n=5$ )、花盖蟹( $n=4$ );③贝类:毛蚶( $n=4$ )、小文蛤( $\sim 125$  g 肉质湿重,下同)、白蛤( $\sim 97$  g)、黄蛤( $\sim 179$  g)、香螺( $n=14$ )、紫贻贝( $\sim 245$  g)、栉空扇贝( $\sim 251$  g)、日月贝( $\sim 315$  g);④其它:章鱼( $n=3$ )、管蛆( $\sim 220$  g)、海胆( $n=4$ ).样品采集后,用铝箔包好,装入自封袋中密封,运输途中用冰袋冷藏,返回实验室后于  $-20^{\circ}\text{C}$  冷冻保存.

### 1.2 实验试剂与材料

$^{13}\text{C}_{10}$ -trans-chlordane ( $100\text{ ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$ , 溶于环己烷)标准品购自 Cambridge Isotope Laboratories (Andover, USA). 3 种不同氯含量(质量分数: 51.5%、55.5%和 63.0%)的 SCCPs 标准样品和  $\epsilon$ -六氯环己烷( $\epsilon$ -HCH,  $10\text{ ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$ )均购自 Ehrenstorfer GmbH (Augsburg, Germany).

实验所用的有机溶剂均为农残级.二氯甲烷和正己烷购于 Fisher (Hampton, NH),环己烷购于 Tedia Company Inc. (Fairfield, OH, USA).浓硫酸(优级纯)购于北京化工厂.无水硫酸钠(分析纯)购于天津津科精细化工研究所,使用前在马弗炉中  $660^{\circ}\text{C}$  活化 6 h.硅胶( $63\sim 100\ \mu\text{m}$ )和弗罗里土( $150\sim 250\ \mu\text{m}$ )均购于 Merck 公司(Whitehouse Station, NJ),使用前分别在马弗炉中  $550^{\circ}\text{C}$  活化 12 h 和  $140^{\circ}\text{C}$  活化 7 h.

### 1.3 样品前处理与脂肪含量测定

海产品室温下解冻后用二次蒸馏水清洗干净,

取其肉质冷冻干燥至恒重,用高速粉碎机磨成粉末.各种海鲜样品含水率( $M, \%$ )的计算如式(1)

$$M = (m_1 - m_2) \frac{1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $m_1$  代表样品清洗干净后的重量(g); $m_2$  代表样品冷冻干燥至恒重的重量(g).

准确称 1 g 鱼类或虾蟹/0.5 g 贝类和 10 g 无水硫酸钠混合均匀,加入  $10\ \mu\text{L}\ ^{13}\text{C}_{10}$ -trans-chlordane ( $0.1\text{ ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$ , 溶于环己烷)作为回收率内标.使用加速溶剂萃取仪(ASE350, Dionex)对样品进行萃取,条件如下:萃取溶剂为正己烷/二氯甲烷(1:1, 体积比)混合溶液;萃取温度  $100^{\circ}\text{C}$ ;系统压力 1 500 psi;加热时间 5 min;静态时间 10 min;循环 3 次;冲洗体积 60%;吹扫时间 120 s.萃取结束后,往提取液中加入适量的酸性硅胶(40%, 质量分数)除去脂肪,然后通过 5 g 无水硫酸钠小柱进行过滤.滤液旋转蒸发至约 2 mL,转移至复合硅胶柱(内径 1 cm)进一步净化.其中复合硅胶柱从下往上依次为 3 g 弗罗里土,2 g 中性硅胶,5 g 酸性硅胶(30%, 质量分数),4 g 无水硫酸钠.加样前用 50 mL 正己烷对柱子进行预淋洗.上样后先用 35 mL 正己烷进行预淋洗,然后用 100 mL 正己烷/二氯甲烷混合溶液(1:1, 体积比)进行洗脱.洗脱液旋转蒸发浓缩至约 2 mL,氮吹定容为  $200\ \mu\text{L}$ ,转换溶剂为环己烷并转移至进样小瓶中.仪器分析前加入  $10\ \mu\text{L}\ \epsilon$ -HCH ( $1\text{ ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$ , 溶于环己烷)进样内标,涡轮振荡均匀.

使用重量法测定海鲜产品的脂肪含量<sup>[13]</sup>.

①取干净圆底烧瓶记录空瓶重量.②将样品萃取液转移至圆底烧瓶中经旋转蒸发、氮吹吹干,然后待圆底烧瓶平衡至恒重记录此时的重量.③前后重量差即为可提取脂肪含量.

### 1.4 仪器条件

气相色谱(Agilent 7890A),色谱柱为 HP 5-MS 毛细管柱( $30\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\ \mu\text{m}$ , J&W Scientific),进样口温度  $250^{\circ}\text{C}$ ,进样体积  $1\ \mu\text{L}$ ,不分流模式.升温程序:柱箱初始温度  $100^{\circ}\text{C}$ ,保持 1 min;以  $30^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升至  $160^{\circ}\text{C}$ ,保持 5 min;最后以  $30^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升至  $310^{\circ}\text{C}$ ,保持 17 min.高纯氦气作为载气,恒流模式,载气流速为  $36\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

三重四级杆质谱(Agilent 7000A),电子捕获负化学离子源模式(ECNI),甲烷作为反应气,离子源温度  $200^{\circ}\text{C}$ ,传输线温度  $275^{\circ}\text{C}$ .使用选择性离子监测模式(SIM)检测 $^{13}\text{C}_{10}$ -trans-chlordane 离子、 $\epsilon$ -HCH

离子和 SCCPs 相对丰度较高的  $[M-Cl]^-$  离子。

### 1.5 质量保证与质量控制(QA/QC)

参考文献[12,14]的方法对 SCCPs 进行定量,其中 SCCPs 总响应因子与 ECNI-LRMS 测得的氯含量显著线性相关( $R^2 = 0.97$ )。所有玻璃仪器使用前均在 400℃ 烘 6 h 并用二氯甲烷清洗 3 次。前处理过程中每批样品(8 个)包括一个实验空白(10 g 无水硫酸钠)用于检测可能存在的实验室空白。结果表明生物样品  $^{13}C_{10}$ -trans-chlordane 回收率在 73% ~ 89% 之间。平行样实验( $n = 3$ )用于评价样品分析的精确性,标准偏差为  $\pm 5\%$ ,表明所采用的方法重现

性良好。方法检测限(MDL)定义为平均空白加上 3 倍标准偏差约为  $48 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $C_{10}$  (46%) 和  $C_{11}$  (30%) 为主要背景干扰物,实际样品报道结果均经过空白校正。

## 2 结果与讨论

### 2.1 各类海产品中 $\sum$ SCCPs 的含量

$\sum$  SCCPs 在所有海产品中均有检出,其干重浓度范围为 77 ~ 8 250  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 含水率为 74% ~ 88%, 氯含量介于 59.9% ~ 63.8% 之间,如表 1 所示。

表 1 大连市金石滩海产品脂肪含量、含水率、氯含量、 $\sum$  SCCPs 和各碳原子同族体干重浓度水平/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 1 Lipid content, moisture content, chlorine content and concentrations of  $\sum$  SCCPs and their congener groups in seafood collected from Golden Pebble Beach, Dalian (dry weight)/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

样品种类	脂肪含量/%	含水率/%	氯含量/%	$\sum C_{10}$	$\sum C_{11}$	$\sum C_{12}$	$\sum C_{13}$	$\sum$ SCCPs
老板鱼	4.2	78	60.5	28.5	26.7	25.4	29.4	110
大黄鱼	10.8	77	60.8	30.2	33.5	16.6	19.7	100
黄鱼	9.7	77	61.1	401	386	370	232	1 390
黑鱼	18.2	74	61.0	46.4	25.5	17.5	14.7	104
鲶鱼	20.9	74	61.2	75.4	42.7	31.8	23.2	173
鳊鱼	44.5	76	63.5	776	1 840	1 690	1 060	3 510
海虾	4.4	76	61.5	153	156	148	126	394
飞蟹	10.4	78	59.9	854	718	1 920	3 770	5 440
花盖蟹	16.5	77	61.5	665	886	898	828	2 210
毛蚶	4.6	84	61.3	2 160	2 760	3 920	3 330	8 250
小文蛤	9.0	88	63.4	1 030	739	348	267	1 560
白蛤	5.0	78	62.5	2 850	2 910	2 400	1 880	6 660
黄蛤	4.7	86	63.5	977	687	268	204	1 400
香螺	3.1	80	61.3	54.6	27.3	18.1	11.0	77
紫贻贝	10.6	85	63.8	905	596	246	186	1 260
栉空扇贝	10.1	83	63.8	880	594	232	180	1 230
日月贝	11.5	81	62.5	441	241	86.1	56.6	1 010
章鱼	7.6	86	61.3	1 780	2 300	2 350	1 700	8 130
管蛆	8.0	83	61.8	2 430	2 730	2 690	2 280	7 040
海胆	25.1	79	63.8	198	139	37.5	30.2	262

6 种鱼类的鱼肉中  $\sum$  SCCPs 干重浓度范围为 100 ~ 3 510  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 平均值为 898  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 顺序为: 鳊鱼 > 黄鱼 > 鲶鱼 > 老板鱼 > 黑鱼 > 大黄鱼。该区域鱼体内  $\sum$  SCCPs 平均浓度低于 Zeng 等<sup>[10]</sup>报道的高碑店湖中鱼类  $\sum$  SCCPs 平均浓度范围(1 000 ~ 3 500  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )。如果利用含水率进行校准,鱼类  $\sum$  SCCPs 的湿重浓度范围则为 23 ~ 842  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 平均值为 214  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 高于来自北欧地区鱼类肌肉中  $\sum$  SCCPs 湿重浓度(7 ~ 13  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )<sup>[15]</sup>。在虾蟹类样品中,海虾  $\sum$  SCCPs 干重浓度为 394  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。而

飞蟹和花盖蟹中  $\sum$  SCCPs 浓度明显高于海虾,分别为 5 440  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  和 2 210  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。采集到的 8 种贝类中  $\sum$  SCCPs 干重浓度介于 77 ~ 8 250  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  之间,其平均值为 2 680  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 顺序为: 毛蚶 > 白蛤 > 小文蛤 > 黄蛤 > 紫贻贝 > 栉空扇贝 > 日月贝 > 香螺。整体上贝类中  $\sum$  SCCPs 平均浓度与之前 Yuan 等<sup>[12]</sup>的结果相当,香螺中  $\sum$  SCCPs 浓度最低为 77  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 但本研究所采集的毛蚶和白蛤中  $\sum$  SCCPs 浓度(8 250  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  和 6 660  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 比文献 2009 年的样品有明显增加。章鱼、管蛆和海胆这 3 种海产品中  $\sum$  SCCPs 干重浓度分别为 8 130、7 040 和 262

ng·g<sup>-1</sup>. 以上结果显示,不同种类海产品  $\sum$ SCCPs 含量有很大的差异,其原因可能是由于它们各自有着不同的栖息场所和捕食习惯. Houde 等<sup>[16]</sup>调查了安大略湖和密歇根湖中几种水生生物体内 SCCPs、PCBs 和 OCPs 的浓度分布,发现样品中  $\sum$ SCCPs 的浓度要远低于  $\sum$ PCBs 和  $\sum$ DDT. 然而与其它持久性有机污染物(OCPs、PCBs 和 PBDEs)相比,大连市软体动物中  $\sum$ SCCPs 呈现出更高的浓度水平,这可能和 SCCPs 在中国生产和使用量有关,也可能是因为各类 POPs 环境调查采用了不同的实验方法导致结果差异<sup>[17]</sup>.

2.2 脂肪含量对样品  $\sum$ SCCPs 影响

所检测样品中,鳕鱼脂肪含量最高达到 44.5%,香螺脂肪含量最低只有 3.1% (表 1). 除鳕鱼外,其它鱼类脂肪含量范围为 4.2% ~ 20.9%, 贝类脂肪含量介于 3.1% ~ 11.5% 之间, 虾蟹脂肪含量为 4.4% ~ 16.5%, 与以前的报道结果处于同一水平<sup>[18,19]</sup>. 大量研究已经表明生物体内 PCBs、PBDEs 等高辛醇-水分配系数(lgK<sub>ow</sub>)的亲脂性 POPs 浓度与脂肪含量有着很好的相关性<sup>[18,20]</sup>. Higler 等<sup>[21]</sup>测定人工合成 SCCPs 的 lgK<sub>ow</sub> 范围在 4.10 ~ 8.67 之间,暗示 SCCPs 也是一类亲脂性化合物,具有较大的生物富集潜力. 尽管鱼类样品中  $\sum$ SCCPs 干重浓度与脂肪含量没有显著的相关性 (Spearman  $R = 0.371, P = 0.47$ , 图 1),但随着脂肪含量的增加,鱼体内  $\sum$ SCCPs 呈现上升的趋势,表明脂肪含量可能是影响  $\sum$ SCCPs 在鱼类体内富集

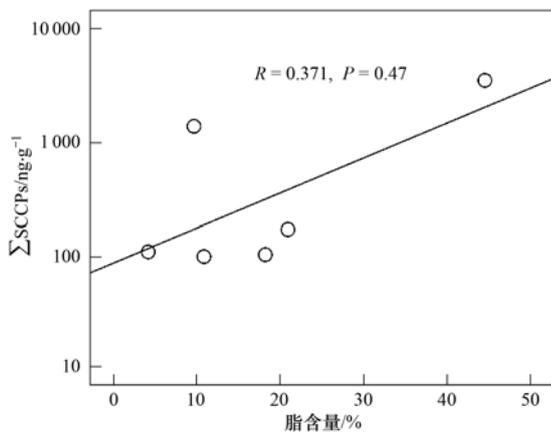


图 1 鱼类脂肪含量与  $\sum$ SCCPs 干重浓度相关性

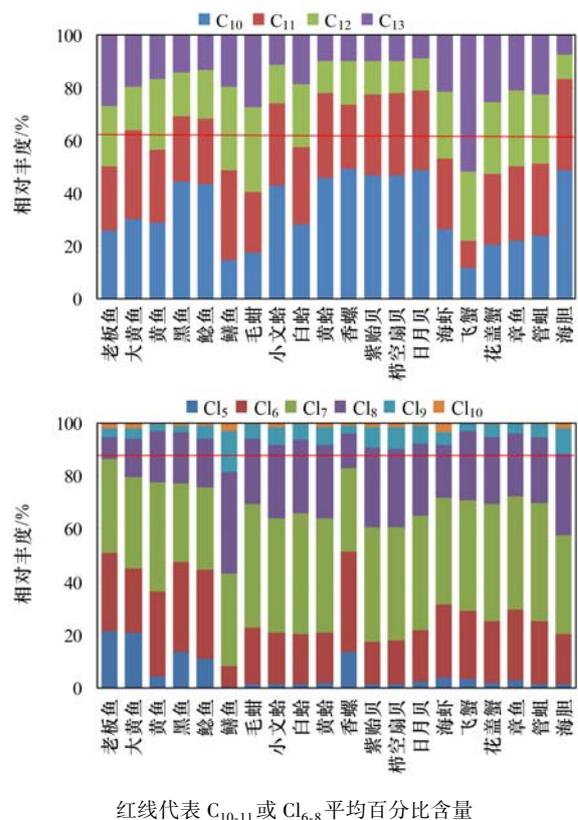
Fig. 1 Relationship between lipid content and  $\sum$ SCCPs levels (dry weight) in fish samples

的重要因素. 同样地,采集的贝类样品中  $\sum$ SCCPs 干重浓度与脂肪含量也没有显著相关性 ( $P = 0.96$ ),这可能是受到生物体种间差异的影响.

2.3 SCCPs 同族体组成

如图 2 所示,不同海产品中 SCCPs 碳原子同族体组成存在差异. 在鱼类(除老板鱼和鳕鱼)、贝类(除毛蚶)和海胆中,C<sub>10</sub>和 C<sub>11</sub>为其主要碳原子同族体,平均约占总量的 42.1% 和 29.5%. 然而在虾蟹和其他海产品中,C<sub>12</sub>和 C<sub>13</sub>的比例有了明显的提高,其在海产品中的百分比含量与  $\sum$ SCCPs 干重浓度具有一定正相关性 (Spearman  $R = 0.502, P < 0.05$  图 3). 相对于低浓度的海产品,高浓度海产品 ( $\sum$ SCCPs > 2 000 ng·g<sup>-1</sup>) 中 C<sub>12-13</sub> 的比例有了明显提高,平均百分比含量可达 54.7%,与以前的研究结果相一致<sup>[12]</sup>,这表明在类似的近海区域中,  $\sum$ SCCPs 富集能力强的鱼、虾蟹和贝类等海洋生物可能倾向于累积更多碳链长度更长的 SCCPs (C<sub>12</sub> 和 C<sub>13</sub>).

总体上,所有海产品中 SCCPs 碳原子同族体平



红线代表 C<sub>10-11</sub>或 Cl<sub>6-8</sub>平均百分比含量  
图 2 海产品中 SCCPs 碳原子同族体 (C<sub>10</sub> ~ C<sub>13</sub>) 和氯原子同族体 (Cl<sub>5</sub> ~ Cl<sub>10</sub>) 组成图

Fig. 2 Composition profiles for SCCP carbon homologues (C<sub>10</sub>-C<sub>13</sub>) and chlorine homologues (Cl<sub>5</sub>-Cl<sub>10</sub>) in seafood

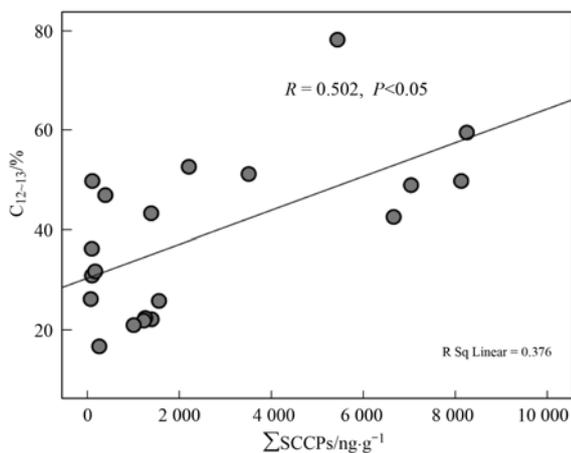


图3 海产品中  $\sum$  SCCPs 干重浓度与  $C_{12-13}$  百分比含量相关性

Fig. 3 Correlation between  $\sum$  SCCPs concentrations (dry weight) and the percentages of  $C_{12-13}$  in seafood

均相对丰度顺序为  $C_{10} > C_{11} > C_{12} \approx C_{13}$ ,  $C_{10-11}$  约占总量的 61.1%. Coelhan<sup>[22]</sup> 曾发现在市场采购的鱼类样品中,  $C_{10}$  是其主要的 SCCPs 同族体. 然而在底特律河、波罗的海及北海采集的鱼和贝类样品中  $C_{11}$  和  $C_{12}$  为其主要的 SCCPs 同族体<sup>[2,23]</sup>. 这种区域间的差异很可能是由于当地排放源不同或各地区使用不同类型的氯化石蜡混合物造成. 中国主要使用的工业 CPs 混合物为 CP-42、CP-52 和 CP-70, 其中 CP-42 和 CP-52 占到生产总量的 80% 以上<sup>[24]</sup>. Gao 等<sup>[25]</sup> 报道了 CP-42、CP-52 和 CP-70 中 SCCPs 分布, 发现  $C_{10}$  是其主要的碳原子同族体, 这与大连市海产品中的调查结果相一致. 海产品 SCCPs 氯原子同族体组成比例十分接近. 总体而言,  $Cl_7$ 、 $Cl_8$  和  $Cl_6$

是最主要的同族体, 其平均比例分别达到了 39.8%、23.9% 和 23.8%,  $Cl_{6,8}$  约占总量的 87.6%. 其次,  $Cl_9$ 、 $Cl_5$  和  $Cl_{10}$  的平均百分比含量分别为 5.6%、5.6% 和 1.2%. 海产品中 SCCPs 同族体组成与中国各地区大气监测结果相似<sup>[26,27]</sup>, Tomy 等<sup>[28]</sup> 也发现海洋哺乳动物体内更短碳链同族体 ( $C_{10}$  和  $C_{11}$ ) 在  $\sum$  SCCPs 中占有更高的比重, 这可能是由于  $C_{10}$  和  $C_{11}$  有着更高的蒸气压, 便于长距离传输.

## 2.4 相关性分析

为了分析海产品中 SCCPs 各同族体间内在关系, 对各同族体干重浓度进行了 Spearman 相关性分析. 如表 2 所示, 各碳原子同族体间均存在显著正相关性 ( $P < 0.01$ ), 相关系数 ( $r$ ) 范围为 0.839 ~ 0.979,  $C_{10}$ 、 $C_{11}$ 、 $C_{12}$  和  $C_{13}$  相邻同族体相关系数分别为 0.919、0.959 和 0.979. 除  $Cl_5$  与  $Cl_{10}$ , 各氯原子同族体间也存在显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 相关系数在 0.620 ~ 0.977 之间,  $Cl_5$ 、 $Cl_6$ 、 $Cl_7$ 、 $Cl_8$ 、 $Cl_9$  及  $Cl_{10}$  相邻相关系数分别为 0.820、0.971、0.977、0.959 和 0.881. 有研究报道活性污泥中 SCCPs 碳(氯)原子同族体之间存在很强线性相关性 ( $r$  为 0.90 ~ 0.97,  $P < 0.05$ )<sup>[29]</sup>. Li 等<sup>[26]</sup> 调查了东亚地区大气 SCCPs 浓度分布, 发现中国大气中 SCCPs 各碳原子同族体之间存在显著相关性 ( $r$  为 0.732 ~ 0.971,  $P < 0.01$ ), 这可能与 SCCPs 在中国大量生产使用以及氯化石蜡工业混合物中包含各种 SCCPs 单体有关. 海产品中 SCCPs 同族体之间显著相关性表明它们可能拥有相同的来源和相似的生物蓄积以及迁移转化过程.

表 2 海产品中 SCCPs 各碳(氯)原子同族体之间 Spearman 相关性分析<sup>1)</sup>

Table 2 Spearman's correlations among different SCCP homologues in seafood

	$Cl_6$	$Cl_7$	$Cl_8$	$Cl_9$	$Cl_{10}$	
	0.820 **	0.789 **	0.713 **	0.620 **	0.394	$Cl_5$
$C_{11}$	<b>0.919</b> **	0.971 **	0.944 **	0.883 **	0.687 **	$Cl_6$
$C_{12}$	<b>0.877</b> **	<b>0.959</b> **	0.977 **	0.950 **	0.797 **	$Cl_7$
$C_{13}$	<b>0.839</b> **	<b>0.929</b> **	<b>0.979</b> **	0.959 **	0.809 **	$Cl_8$
	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$		0.881 **	$Cl_9$

1) 黑色数字代表 SCCPs 各碳原子同族体之间相关系数, 非黑色数字为 SCCPs 各氯原子同族体之间相关系数, \*\* 表示  $P < 0.01$

## 3 结论

(1) 大连市金石礁海产品  $\sum$  SCCPs 干重浓度范围在 77 ~ 8 250  $ng \cdot g^{-1}$ , 鱼、虾蟹和贝类等样品中  $\sum$  SCCPs 浓度存在较大的差异, 这可能是由于它们各自不同的栖息场所和生活习惯所导致.

(2) 海产品中 SCCPs 以短碳链长度 ( $C_{10-11}$ ) 和中等氯代 ( $Cl_{6,8}$ ) 单体为主,  $\sum$  SCCPs 含量越高的物种倾向于累积更高比例的  $C_{12-13}$ .

(3) 该区域海产品中 SCCPs 各碳(氯)同族体之间显著相关性, 表明它们可能有着相同的来源和相似的生物蓄积以及迁移转化过程.

## 参考文献:

- [ 1 ] 王亚韡, 蔡亚岐, 江桂斌. 斯德哥尔摩公约新增持久性有机污染物的一些研究进展 [J]. 中国科学(B辑):化学, 2010, **40**(2): 99-123.
- [ 2 ] Tomy G T, Stern G A, Muir D C G, *et al.* Quantifying C<sub>10</sub>-C<sub>13</sub> polychloroalkanes in environmental samples by high-resolution gas chromatography electron capture negative ion high resolution mass spectrometry [J]. Analytical Chemistry, 1997, **69**(14): 2762-2771.
- [ 3 ] Borgen A R, Schlabach M, Kallenborn R, *et al.* Polychlorinated alkanes in fish from Norwegian freshwater [J]. The Scientific World Journal, 2002, **2**: 136-140.
- [ 4 ] Thomas G O, Farrar D, Braekevelt E, *et al.* Short and medium chain length chlorinated paraffins in UK human milk fat [J]. Environment International, 2006, **32**(1): 34-40.
- [ 5 ] Nilsen O G, Toftgård R, Glaumann H. Changes in rat liver morphology and metabolic activities after exposure to chlorinated paraffins [J]. Developments in Toxicology and Environmental Science, 1980, **8**: 525-528.
- [ 6 ] Cooley H M, Fisk A T, Wiens S C, *et al.* Examination of the behavior and liver and thyroid histology of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to high dietary concentrations of C<sub>10</sub>-, C<sub>11</sub>-, C<sub>12</sub>- and C<sub>14</sub>-polychlorinated n-alkanes [J]. Aquatic Toxicology, 2001, **54**(1-2): 81-99.
- [ 7 ] Fiedler H. Short-chain chlorinated paraffins: production, use and international regulations [A]. In: De Boer J (Ed.). Chlorinated Paraffins. The Handbook of Environmental Chemistry vol. 10[M]. Springer, 2010. 1-40.
- [ 8 ] Wang Y, Li J, Cheng Z N, *et al.* Short-and medium-chain chlorinated paraffins in air and soil of subtropical terrestrial environment in the Pearl River Delta, South China; distribution, composition, atmospheric deposition fluxes, and environmental fate [J]. Environmental Science and Technology, 2013, **47**(6): 2679-2687.
- [ 9 ] 高媛, 王成, 张海军, 等. HRGC/ECNI-LRMS 测定大辽河入海口表层沉积物中短链氯化石蜡 [J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1904-1908.
- [ 10 ] Zeng L X, Wang T, Wang P, *et al.* Distribution and trophic transfer of short-chain chlorinated paraffins in an aquatic ecosystem receiving effluents from a sewage treatment plant [J]. Environmental Science and Technology, 2011, **45**(13): 5529-5535.
- [ 11 ] Harada K H, Takasuga T, Hitomi T, *et al.* Dietary exposure to short-chain chlorinated paraffins has increased in Beijing, China [J]. Environmental Science and Technology, 2011, **45**(16): 7019-7027.
- [ 12 ] Yuan B, Wang T, Zhu N L, *et al.* Short chain chlorinated paraffins in mollusks from coastal waters in the Chinese Bohai Sea [J]. Environmental Science and Technology, 2012, **46**(12): 6489-6496.
- [ 13 ] Simonich S L, Hites R A. Vegetation-atmosphere partitioning of polycyclic aromatic-hydrocarbons [J]. Environmental Science and Technology, 1994, **28**(5): 939-943.
- [ 14 ] 袁博, 王亚韡, 傅建捷, 等. 氯化石蜡分析方法的研究及土壤样品中氯化石蜡的测定 [J]. 科学通报, 2010, **55**(19): 1879-1885.
- [ 15 ] Reth M, Ciric A, Christensen G N, *et al.* Short-and medium-chain chlorinated paraffins in biota from the European Arctic-differences in homologue group patterns [J]. Science of the Total Environment, 2006, **367**(1): 252-260.
- [ 16 ] Houde M, Muir D C G, Tomy G T, *et al.* Bioaccumulation and trophic magnification of short-and medium-chain chlorinated paraffins in food webs from Lake Ontario and Lake Michigan [J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(10): 3893-3899.
- [ 17 ] Wang Y W, Wang T, Li A, *et al.* Selection of bioindicators of polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated biphenyls, and organochlorine pesticides in mollusks in the Chinese Bohai Sea [J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(19): 7159-7165.
- [ 18 ] Xia C H, Lam J C W, Wu X G, *et al.* Polychlorinated biphenyls (PCBs) in marine fishes from China; levels, distribution and risk assessment [J]. Chemosphere, 2012, **89**(8): 944-949.
- [ 19 ] Zhu N L, Li A, Wang T, *et al.* Tris (2, 3-dibromopropyl) Isocyanurate, hexabromocyclododecanes, and polybrominated diphenyl ethers in mollusks from Chinese Bohai Sea [J]. Environmental Science and Technology, 2012, **46**(13): 7174-7181.
- [ 20 ] Asante K A, Takahashi S, Itai T, *et al.* Occurrence of halogenated contaminants in inland and coastal fish from Ghana: levels, dietary exposure assessment and human health implications [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, **94**: 123-130.
- [ 21 ] Bettina H, Hermann F, Wolfgang V, *et al.* Effects of chain length, chlorination degree, and structure on the octanol-water partition coefficients of polychlorinated n-alkanes [J]. Environmental Science and Technology, 2011, **45**(7): 2842-2849.
- [ 22 ] Coelhan M. Determination of short chain polychlorinated paraffins in fish samples by short column GC/ECNI-MS [J]. Analytical Chemistry, 1999, **71**(20): 4498-4505.
- [ 23 ] Reth M, Zencak Z, Oehme M. First study of congener group patterns and concentrations of short-and medium-chain chlorinated paraffins in fish from the North and Baltic Sea [J]. Chemosphere, 2005, **58**(7): 847-854.
- [ 24 ] 唐恩涛, 姚丽芹. 氯化石蜡行业现状及发展趋势 [J]. 中国氯碱, 2005, (2): 1-3.
- [ 25 ] Gao Y, Zhang H J, Su F, *et al.* Environmental occurrence and distribution of short chain chlorinated paraffins in sediments and soils from the Liaohe River Basin, P. R. China [J]. Environmental Science and Technology, 2012, **46**(7): 3771-3778.
- [ 26 ] Li Q L, Li J, Wang Y, *et al.* Atmospheric short-chain chlorinated paraffins in China, Japan, and South Korea [J].

- Environmental Science and Technology, 2012, **46**(21): 11948-11954.
- [27] Wang T, Han S L, Yuan B, *et al.* Summer-winter concentrations and gas-particle partitioning of short chain chlorinated paraffins in the atmosphere of an urban setting [J]. Environmental Pollution, 2012, **171**: 38-45.
- [28] Tomy G T, Muir D C G, Stern G A, *et al.* Levels of C<sub>10</sub>-C<sub>13</sub> polychloro-n-alkanes in marine mammals from the Arctic and the St. Lawrence River estuary [J]. Environmental Science and Technology, 2000, **34**(9): 1615-1619.
- [29] Zeng L X, Wang T, Ruan T, *et al.* Levels and distribution patterns of short chain chlorinated paraffins in sewage sludge of wastewater treatment plants in China [J]. Environmental Pollution, 2012, **160**: 88-94.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站([www.hjxx.ac.cn](http://www.hjxx.ac.cn))进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:  
**期刊**:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.  
**图书**:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.  
**会议文集**:作者.论文名[A].见(In);编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.  
**学位论文**:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.  
**报告**:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.  
**专利**:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.
11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:[hjxx@rcees.ac.cn](mailto:hjxx@rcees.ac.cn);网址:[www.hjxx.ac.cn](http://www.hjxx.ac.cn)

## CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region .....	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing .....	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011 .....	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region .....	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013 .....	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO <sub>2</sub> with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China .....	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion .....	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical .....	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities .....	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu .....	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal .....	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City .....	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjinghu Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period .....	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers .....	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed .....	HOU Li-yuan, HU An-yi, Ma Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake .....	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland .....	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems .....	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method .....	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration .....	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System .....	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron .....	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light .....	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /Graphene Oxide Nanoparticles .....	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism .....	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China .....	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment .....	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes .....	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater .....	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FePMo <sub>12</sub> Adopted Catalyst .....	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment .....	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor .....	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process .....	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu <sup>2+</sup> by Xanthate-Functionalized Waste Sludge .....	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L. ....	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene .....	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals .....	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LI Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area .....	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe .....	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors .....	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing .....	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs .....	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous <sup>13</sup> C Labeling .....	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area .....	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge .....	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China .....	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake .....	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice .....	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i> .....	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate .....	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW) .....	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process .....	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H <sub>2</sub> S over Supported Fe Catalysts on CeO <sub>2</sub> -Intercalated Laponite Clay .....	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites .....	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM <sub>2.5</sub> from Stationary Sources: a Review .....	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens .....	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

# 《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5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 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) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行