

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第17期 Vol.31 No.17 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 17 期

2011 年 9 月 (半月刊)

目 次

海洋生态资本理论框架下海洋生物资源的存量评估·····	任大川,陈 尚,夏 涛,等 (4805)
内生真菌对羽茅生长及光合特性的影响·····	贾 彤,任安芝,王 帅,等 (4811)
基于遥感图像处理技术胡杨叶气孔密度的估算及其生态意义·····	蒋圣淇,赵传燕,赵 阳,等 (4818)
水文变异下的黄河流域生态流量·····	张 强,李剑锋,陈晓宏,等 (4826)
黄河三角洲重度退化滨海湿地盐地碱蓬的生态修复效果·····	管 博,于君宝,陆兆华,等 (4835)
浙江省某 PCBs 废物储存点对其邻近滩涂生态系统的毒性风险·····	何闪英,陈昆柏 (4841)
鄱阳湖苔草湿地甲烷释放特征·····	胡启武,朱丽丽,幸瑞新,等 (4851)
三峡库区银鱼生长特点及资源分析·····	邵晓阳,黎道峰,谭 路,等 (4858)
低温应激对吉富罗非鱼血清生化指标及肝脏 HSP70 基因表达的影响 ···	刘 波,王美珏,谢 骏,等 (4866)
Cd ²⁺ 对角突臂尾轮虫和曲腿龟甲轮虫的急性毒性和生命表统计学参数的影响 ·····	许丹丹,席貽龙,马 杰,等 (4874)
圈养梅花鹿 BDNF 基因多态性与日常行为性状的关联分析 ·····	吕慎金,杨 燕,魏万红 (4881)
华北平原玉米田生态系统光合作用特征及影响因素 ·····	同小娟,李 俊,刘 渡 (4889)
长期施肥对麦田大型土壤动物群落结构的影响 ·····	谷艳芳,张 莉,丁圣彦,等 (4900)
蚯蚓对湿地植物光合特性及净化污水能力的影响·····	徐德福,李映雪,王让会,等 (4907)
三种农药对红裸须摇蚊毒力和羧酸酯酶活性的影响 ·····	方国飞 (4914)
六星黑点豹蠹蛾成虫生殖行为特征与性趋向·····	刘金龙,宗世祥,张金桐,等 (4919)
除草剂胁迫对空心莲子草叶甲种群的影响及应对策略·····	刘雨芳,彭梅芳,王成超,等 (4928)
荒漠植物准噶尔无叶豆结实、结籽格局及其生态适应意义 ·····	施 翔,王建成,张道远,等 (4935)
限水灌溉冬小麦冠层氮分布与转运特征及其对供氮的响应·····	蒿宝珍,姜丽娜,方保停,等 (4941)
准噶尔盆地梭梭、白梭梭植物构型特征 ·····	王丽娟,孙栋元,赵成义,等 (4952)
基于地表温度-植被指数关系的地表温度降尺度方法研究 ·····	聂建亮,武建军,杨 曦,等 (4961)
岩溶区不同植被类型下的土壤氮同位素分异特征 ·····	汪智军,梁 轩,贺秋芳,等 (4970)
施氮量对麻疯树幼苗生长及叶片光合特性的影响 ·····	尹 丽,胡庭兴,刘永安,等 (4977)
黄土丘陵区羔沟流域典型植物叶片 C、N、P 化学计量特征季节变化 ·····	王凯博,上官周平 (4985)
克隆整合提高淹水胁迫下狗牙根根部的活性氧清除能力·····	李兆佳,喻 杰,樊大勇,等 (4992)
低覆盖度固沙林的乔木分布格局与防风效果·····	杨文斌,董慧龙,卢 琦,等 (5000)
东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价·····	莫 菲,李叙勇,贺淑霞,等 (5009)
11 种温带树种粗木质残体分解初期结构性成分和呼吸速率的变化 ·····	张利敏,王传宽,唐 艳 (5017)
连栽第 1 和第 2 代杉木人工林养分循环的比较·····	田大伦,沈 燕,康文星,等 (5025)
最优化设计连续的自然保护区·····	王宜成 (5033)
基于自然地理特征的长江口水域分区·····	刘录三,郑丙辉,孟 伟,等 (5042)
煤电一体化开发对锡林郭勒盟环境经济的影响·····	吴 迪,代方舟,严 岩,等 (5055)
专论与综述	
生态条件的多样性变化对蜜蜂生存的影响·····	侯春生,张学锋 (5061)
研究简报	
胶州湾潮间带大型底栖动物次级生产力的时空变化·····	张崇良,徐宾铎,任一平,等 (5071)
湿地公园研究体系构建·····	王立龙,陆 林 (5081)
基于生态足迹的半干旱草原区生态承载力与可持续发展研究——以内蒙古锡林郭勒盟为例·····	杨 艳,牛建明,张 庆,等 (5096)
学术信息与动态	
恢复与重建自然与文化的和谐——2011 生态恢复学会国际会议简介 ···	彭少麟,陈蕾伊,侯玉平,等 (5105)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 302 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2011-09	



封面图说: 相当数量的降雪与低温严寒是冰川发育的主要因素,地球上的冰川除南北两极外,只有在高海拔的寒冷山地才能存在。喜马拉雅山造山运动使中国成为了世界上中低纬度冰川最为发育的国家,喜马拉雅山地区雪峰连绵、冰川四溢,共有现代冰川 17000 多条,是世界冰川发育的中心之一。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

何闪英, 陈昆柏. 浙江省某 PCBs 废物储存点对其邻近滩涂生态系统的毒性风险. 生态学报, 2011, 31(17): 4841-4850.

He S Y, Chen K B. Toxicity risks to the closed tidal flat ecosystem of a PCBs waste savepoint at the coast of Zhejiang. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(17): 4841-4850.

浙江省某 PCBs 废物储存点对其邻近 滩涂生态系统的毒性风险

何闪英, 陈昆柏*

(浙江工商大学 环境科学与工程学院, 杭州 310012)

摘要:在浙江省沿海某化工厂内含 PCBs 废物储存点邻近滩涂上设 6 个采样点,用 GC-MS 方法检测各采样点水样、滩涂泥样及大弹涂鱼样品中毒性最强的 12 种二噁英类 PCB(DL-PCB)异构体的含量。结果表明,所有样品 DL-PCBs 检出率、样品单邻位异构体 PCB118 和非邻位异构体 PCB81 检出率均为 100%,且 PCB118 和 81 的含量均与总 DL-PCBs 量有较好的相关性,在水样、泥样和鱼样品中,PCB118 与总 DL-PCBs 含量的相关系数(r)分别为 0.97、0.95 和 0.91,PCB81 与总 DL-PCBs 含量的相关系数(r)分别为 0.93、0.99 和 0.98。环境样品中以低氯异构体(PCB81 和 77)为主,而生物样品中高氯异构体(PCB118 和 105)含量较高。采样区域内大弹涂鱼从水体和泥土中的平均富集系数分别为 392.54 和 14.03,且鱼体 PCBs 含量与沉积物中 DL-PCBs 浓度高度相关($r=0.97$)。在距堆场水沟入海口 150 m 内水体和沉积物中 DL-PCBs 含量已处于较高污染水平(分别大于 599.34 ng/L 和 10.97 ng/g),且采样区域内大弹涂鱼 PCBs 含量(均大于 59.19 ng/g 脂重)显著高于其它地区。毒性当量研究表明,非邻位的 PCB126 和 PCB169 是样品总 TEQs 的主要贡献者,且所有水样和鱼样的 TEQs 都分别显著超过日本水环境限值 1 pg TEQ/L 和欧盟水产品标准值 8 pg TEQ/g 湿重($P<0.001$);应用 MacDonald 沉积物毒性评价方法研究表明,1—4#泥样已具有较高毒性风险。综合 DL-PCBs 含量和毒性当量分析表明,清挖 4a 后,该 PCBs 废物堆场仍对周边滩涂生态系统具有一定毒性风险,对人体健康存在潜在危害。

关键词:PCBs 储存点;异构体分布;滩涂生态系统;风险评价

Toxicity risks to the closed tidal flat ecosystem of a PCBs waste savepoint at the coast of Zhejiang

HE Shanying, CHEN Kunbai*

College of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012, China

Abstract: Polychlorinated biphenyls (PCBs) have been widely used in production fields for their excellent chemical characteristics. However, PCBs can be accumulated through the food chain, which directly endangers human health. In May 2004, the Global Environment Facility initiated the demonstration project of PCBs management and treatment in China, specifying Zhejiang Province as the demonstration province, and carried out checking, monitoring, cleaning, treating and managing the PCBs savepoints thoroughly in Zhejiang Province. However, the poor storage conditions and improper managements of savepoints will lead to PCBs leaking and contaminating the surroundings. For this reason, 6 sampling sites were chosen to collect water, sediment and important edible and marine environmental monitoring fish-*Boleophthalmus pectinirostris* samples in the surrounding areas of a PCBs savepoint located in the coast of Zhejiang Province in August 2009. Contents of the most toxic 12 kinds of the Dioxin-like PCB (DL-PCB) congeners were determined by using GC-MS method. The results showed that all samples contained DL-PCBs. The total DL-PCBs concentrations of water, sediment and B.

基金项目:浙江省自然科学基金(Y5080149);浙江省高等学校创新团队项目(T200912)

收稿日期:2010-08-01; **修订日期:**2010-12-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bestwal@163.com

pectinirostris samples were 88.82 — 971.73 ng/L (with the average of 541.71 ng/L), 1.96 — 57.24 ng/g (with the average of 26.10 ng/g) and 59.19 — 301.62 ng/g lipid (with the average of 148.54 ng/g lipid) respectively. The detection rate of the mono-ortho congener PCB118 and the non-ortho congener PCB81 in all samples reached 100%. Contents of both the PCB118 and PCB81 had significant correlations with the total DL-PCBs. For water, sediment and fish samples, the correlation coefficient (r) values between PCB118 and total DL-PCBs were 0.97, 0.95 and 0.91 respectively, and the r values between PCB81 and total DL-PCBs were 0.93, 0.99 and 0.98 respectively. The level of low chloride congeners (PCB81 and 77) was higher in environmental samples, while high chloride congeners (PCB118 and 105) were the main components of biological samples. The average concentration coefficient for *B. pectinirostris* from the waters and sediments around the PCBs savepoint were 392.54 and 14.03-fold respectively, and there was a high correlation between the DL-PCBs contents of fish and sediments ($r=0.97$). Waters and sediments within 150 m away from the estuary site had a high level of PCBs concentration (exceed 599.34 ng/L and 10.97 ng/g, respectively), and all the PCBs contents of *B. pectinirostris* exceeded 59.19 ng/g lipid, which was markedly higher than other areas. The toxic equivalency (TEQ) study indicated that the non-ortho congeners PCB126 and PCB169 were the main contributors for the total TEQs, and all the TEQs values of water and fish samples largely exceeded the Japanese water environment standard (1 pg TEQ/L) and the European Union's aquatic standard (8 pg TEQ/g) ($P<0.001$). By means of MacDonald's sediment toxicity assessment, the 1—4# sediment samples were revealed at a certain degree of toxicity risks. Considering both the PCBs content and toxic equivalency analysis, after 4 years of being dug and cleaned, this PCBs savepoint still had toxicity risks to the surrounding tidal flat ecosystem and was a potential threat to human health. The results also revealed that it was very necessary and urgent to conduct research on the environmental distributions of PCBs and assess PCBs toxicity risks to the wildlife and human health in surrounding areas of the PCBs savepoints.

Key Words: PCBs savepoint; congeners distribution; tidal flat ecosystem; risk assessment

多氯联苯 (PCBs) 自 1929 年首次在美国合成后,因其良好的化学稳定性、热稳定性、惰性和介电特性被广泛应用于各生产领域。但由于 PCBs 具有难降解性、生物毒性、生物蓄积性和远距离迁移性,可通过食物链富集直接危害人类健康,成为 2001 年首批列入《斯德哥尔摩公约》受控名单的 12 种持久性有机污染物 (POPs) 之一,而中国是首批签署公约的国家之一。2004 年 5 月,全球环境基金正式批准中国 PCBs 管理与处置示范项目,并确定浙江省为示范省,进行浙江省 PCBs 封存点的清查、监测、清运、低浓度污染物处理及管理等活动。

当 PCBs 储存点储存条件差或管理不当时,则会发生 PCBs 泄漏并污染其周围环境。本文以浙江省沿海某化工厂内 PCBs 废物堆场为研究对象,该堆场地理位置为 N29°06.265', E121°30.918', 由该化工厂自 1996 至 2003 年生产过程中产生的副产品堆积而成,总堆放面积约 800 m²,堆放深度为 3.1—4.6 m 不等,总量为 2500 余 t,无任何保护措施,有强烈刺激性气味,且堆放处距离最近民居仅约 30 m。这些副产品包括铁粉、精馏残渣、焦油类物质、废包装桶、锅炉渣等,其中铁粉泥和残渣中含有 PCBs 等有害物质。2005 年浙江省环境监测中心站对其进行清挖(图 1),但清挖后堆场泥土中仍有大量 PCBs 在土壤中残留,0—100 cm 土壤中 PCBs 浓度约为 25 μg/g,且该堆场右侧有一约 2 m 宽,60 cm 深的水沟与海水相通,每日由潮水冲刷,并汇入海湾。

我国有大量的 PCBs 废物储存点都位于沿海,堆场中无意产生的 PCBs 从污染源经过迁移逐渐扩散到陆地和海洋中,必将导致 PCBs 在海水及海底沉积物中累积,并通过海洋食物链逐级放大。而食物摄入是人体暴露于 POPs 的一条主要途径^[1],因此研究作为人类主要食物来源之一的海产品对 PCBs 的富集具有重要意义。大弹涂鱼 (*Boleophthalmus pectinirostris*) 为近岸暖温性小型海洋鱼类,盛产于我国南方沿海滩涂。大弹涂鱼营养丰富,肉质鲜美,经济价值高,颇受广大消费者喜爱,在东南亚地区素有“水中人参”的美誉,是名特优海水养殖种类。研究表明^[2-3],有机污染物对大弹涂鱼有很大的毒理效应,且会导致其资源衰退。同时,由于



图 1 清挖后废物堆场(A)及其右侧通入海湾的水沟(B)

Fig. 1 The PCBs waste yard after dug and cleaned (A) and the ditch on the right side of the yard (B)

大弹涂鱼营穴居生活,活动范围很小,且食物链较短,其生理指标能反应环境的较快变化,因此在海洋环境监测,尤其是近岸养殖水体监测方面能够起到重要作用。

因此,本文通过对含 PCBs 废物堆场周围水体、滩涂泥样和大弹涂鱼中 PCBs 浓度和异构体分布进行检测,为研究 PCBs 废物堆场对周边环境的综合影响、保护当地生态系统安全和人体健康提供理论依据,并为 PCBs 废物堆场清运范围的确认、以及 PCBs 废物储存点和沿海养殖场的合理选址提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

于浙江沿海某化工厂内含 PCBs 废物储存点右侧水沟的入海口处设置 1#采样点,入海口距堆场约 50 m。从 1#采样点为基点,在滩涂上每隔 50 m 设 1 采样点,共设 6 个采样点(图 2)。于 2009 年 8 月同步采集各采样点水样、滩涂泥样及大弹涂鱼样品。每个采样点取水样 2 L,泥样 1 kg,采集后密封带回实验室;每个采样点采集鱼样品量 1 kg,冲洗后用铝箔纸包好,装入密封塑料袋,置冰盒中,−20 ℃ 冷藏立即带回实验室。

1.2 样品 PCBs 提取及鱼体含水量和脂质含量测定

(1)水样前处理 水样经 0.45 μm 纤维滤膜过滤后,通过树脂柱吸附,用丙酮洗脱,正己烷(色谱纯,美国 TEDIA)萃取,通过硅胶混合层析柱脱水(层析用硅胶:粗孔,粒径 0.098—0.154 mm)、正己烷净化、氮气吹拂浓缩,洗脱液经氢氧化钾-甲醇溶液碱解,浓缩后进行 GC-MS 分析。《海洋监测规范》(GB17378.4—2007)中水样品的 PCBs 测定方法。

(2)滩涂泥样前处理 泥样风干称重,剔除杂质,粉碎至全部通过 80 目筛,过 80 目金属筛后,用四分法分取样品,每份样品 50 g,用索氏提取法提取 PCBs 于正己烷-丙酮溶剂中,经佛罗里土净化、微型活性碳层析柱分离,洗脱液用 K-D 浓缩器收集,用正己烷定容至 1 mL,进行 GC-MS 分析。具体操作方法采用《海洋监测规范》GB17378.5—2007 中沉积物样品的 PCBs 测定方法。

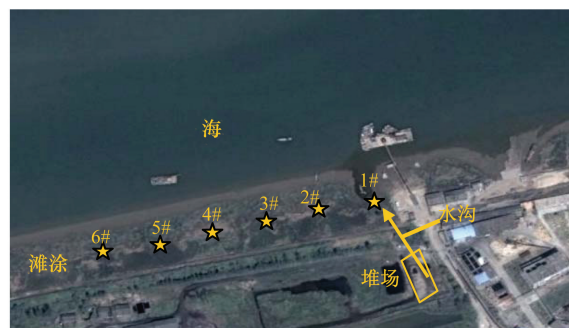


图 2 废物堆场与采样点

Fig. 2 The PCBs seal site and the sampling sites

→表示水流方向 底图取自 Google Earth,退潮时

大弹涂鱼称重后,整鱼匀浆混匀,冷冻干燥后研磨,并计算鱼体含水量。样品在快速溶剂萃取仪(ASE200)(Dionex, USA)中用正己烷提取脂质,用 Turbo Vap II 型浓缩仪(Zymark, USA)蒸发溶剂,直至恒重,测定脂质含量。准确称取 10 g(± 0.1 g)匀浆样放入烧杯中,并按重量比加 4—5 倍的硫酸钠,混匀。放入索氏提取器中,加 150 mL 正己烷-丙酮溶剂提取,于 75—80 °C 水浴中回流萃取 8 h 得到提取液,冷至室温后,用 K-D 浓缩器浓缩至 1 mL,经佛罗里土柱净化后,用微型活性碳柱分离,洗脱液用 K-D 浓缩器收集,用正己烷定容至 1 mL,进行 GC-MS 分析。采用《海洋监测规范》GB17378.6—2007 中生物样品的 PCBs 测定方法。

1.3 GC-MS 分析

用 GC-MS 方法检测环境及生物样中 12 种毒性最强的二噁英类(Dioxin-like, DL)PCB(无邻位:PCB77, PCB81, PCB126, PCB169;单邻位:PCB105, PCB114, PCB118, PCB123, PCB156, PCB157, PCB167, PCB189)的含量及异构体分布特征,并根据世界卫生组织(WHO)规定的毒性当量因子(TEFs)^[4]计算毒性当量值(TEQ)。

色谱条件:气相色谱仪(Agilent 6890),带⁶³Ni 电子捕获检测器,HP-5 石英毛细管柱;进样口温度 280 °C;载气为氦气,纯度大于 99.99%;进样方式不分流进样,进样量 1 μ L;升温程序,80 °C 保持 15 min,以 12 °C/min 升到 220 °C,以 3 °C/min 升到 280 °C。质谱条件:质谱仪(Agilent 5973),四级杆温度 150 °C;离子源温度 230 °C;离子源 EI 源电压 70 eV;定性分析以全扫描方式,扫描范围 m/z 为 35—500;定量分析选择离子检测方式,检测器电压为 1.6 kV。

1.4 质量控制

12 种 PCB 异构体标准品均购自德国 Dr. Ehrenstorfer GmbH 公司。在分析过程中,增加 QA/QC 控制样品分析:方法空白,加标空白,样品平行样。QA/QC 样品的整个分析流程与实际样品相同。采用外标法对样品进行定量。目标化合物的回收率:PCB77 为 75.3%—89.1%,PCB81 为 86.6%—93.5%,PCB105 为 80.4%—92.5%,PCB114 为 79.7%—93.8%,PCB118 为 83.4%—95.7%,PCB123 为 89.6.3%—100.4%,PCB126 为 73.1%—86.4%,PCB156 为 80.9%—96.8%,PCB157 为 83.8%—95.2%,PCB167 为 87.3%—110.9%,PCB169 为 88.0%—105.8%,PCB189 为 76.2%—98.8%。

1.5 统计分析

每个样品取 5 个平行样($n=5$),所有数据以平均值 $\pm$ 标准差表示,并采用单因素方差分析(ANOVA)。正态性分析采用 KS(Kolmogorov-Smirnov)检验方法,方差齐性采用 Bartlett 检验,组间差异比较采用多样本重复比较检验法(Post-hoc LSD)。所有统计分析使用 SPSS16.0 软件。

2 结果与分析

2.1 水体中 PCBs 的含量与异构体分布

如表 1 所示,所有水样的 DL-PCBs 检出率为 100%,总 DL-PCBs 为 88.82—971.73 ng/L,平均为 541.71 ng/L。在被检 12 种异构体中,PCB81、169、114、118 和 123 检出率均达 100%;检出量最高的为 PCB81,占总 DL-PCBs 检出量的 19.86%,其次为 PCB118、77 和 123,分别占总 DL-PCBs 检出量的 16.06%、9.69% 和 8.55%。

2.2 滩涂泥样 PCBs 含量与异构体分布

各采样点滩涂泥样的 DL-PCBs 含量见表 2。DL-PCBs 检出率为 100%,总 DL-PCBs 为 1.96—57.24 ng/g,平均为 26.10 ng/g。PCB77、81 和 118 检出率为 100%;检出量最高的为 PCB81,占总 DL-PCBs 检出量的 17.30%,其次为 PCB118、77 和 114,分别占总 DL-PCBs 检出量的 13.83%、9.66% 和 8.82%。

2.3 大弹涂鱼中 PCBs 含量与异构体分布

匀浆前重量与冷冻干燥后重量测定表明,大弹涂鱼平均含水率 76.25%。如表 3 所示,各采样点鱼体的 DL-PCBs 检出率为 100%,总 DL-PCBs 为 59.19—301.62 ng/g 脂重,平均为 148.54 ng/g 脂重。12 种异构体中,PCB81、123 和 118 检出率均达 100%,其次为 PCB77、105 和 157,检出率均为 83.33%;检出量最高的为

PCB118, 占总 DL-PCBs 检出量的 23.47%, 其次为 PCB105、77 和 81, 分别占总 DL-PCBs 检出量的 20.03%、14.38% 和 8.05%。

表 1 各采样点水样的 DL-PCBs 含量/(ng/L)

Table 1 DL-PCBs contents in water samples

化合物	采样点 Sampling site					
	1#	2#	3#	4#	5#	6#
PCB77	83.52±11.05	106.20±9.66	74.12±7.32	52.15±6.30	2.45±0.69	—
PCB81	231.21±16.74	228.01±23.60	77.45±5.21	91.43±9.99	8.84±1.52	15.71±3.09
PCB126	55.23±6.54	21.32±1.85	65.30±6.24	—*	5.67±0.39	3.69±0.49
PCB169	74.55±9.16	70.56±7.00	10.04±2.38	11.77±2.03	9.83±2.42	10.04±1.08
PCB105	39.62±4.63	50.45±5.09	24.12±2.57	108.57±6.89	3.37±1.00	—
PCB114	57.47±10.20	44.44±5.24	35.55±5.14	87.10±9.05	4.49±0.58	5.78±1.89
PCB118	158.30±19.49	137.75±15.45	112.68±9.00	70.49±4.61	27.02±4.30	21.67±2.45
PCB123	71.07±6.51	46.98±8.29	87.79±10.85	53.78±5.22	8.30±2.73	13.04±3.64
PCB156	62.66±7.30	55.59±4.37	48.44±6.12	19.19±3.11	12.47±1.65	—
PCB157	78.80±7.38	52.18±6.51	60.00±4.06	54.37±6.45	—	9.41±2.01
PCB167	26.24±5.95	29.24±7.15	36.45±3.10	28.34±4.62	9.38±0.09	—
PCB189	33.06±8.32	39.03±5.33	20.87±4.01	22.15±3.17	—	9.48±1.22
Total DL-PCBs	971.73±17.85	881.75±21.26	652.81±17.88	599.34±20.11	91.32±5.79	88.82±15.87
WHO-TEQs /(ng/L)	6.43±0.76	2.96±0.27	6.74±0.66	0.24±0.03	0.68±0.07	0.48±0.06

n=15; —: 未检出

表 2 各采样点泥样的 DL-PCBs 含量/(ng/g)

Table 2 DL-PCBs contents in sediment samples

化合物	采样点 Sampling site					
	1#	2#	3#	4#	5#	6#
PCB77	5.33±0.67	5.27±1.02	3.02±0.03	0.96±0.27	0.44±0.11	0.10±0.07
PCB81	10.44±3.32	9.95±3.74	4.81±1.51	1.30±0.19	0.25±0.08	0.34±0.09
PCB126	3.30±0.45	5.05±0.89	2.61±0.97	1.56±0.31	0.03±0.00	—
PCB169	4.31±1.28	3.79±0.55	3.20±0.77	0.21±0.03	—	0.07±0.01
PCB105	5.04±0.76	3.37±0.34	—	0.93±0.04	0.23±0.05	0.55±0.12
PCB114	4.76±1.49	4.45±1.10	3.44±1.08	1.03±0.03	—	0.13±0.04
PCB118	6.08±1.31	6.71±2.05	5.99±1.69	2.20±0.40	0.33±0.06	0.35±0.18
PCB123	5.32±0.90	3.42±0.61	1.31±0.45	0.65±0.31	—	0.37±0.10
PCB156	3.76±0.12	3.70±0.28	2.62±0.99	—	0.65±0.03	—
PCB157	4.41±1.33	2.32±0.77	2.61±0.62	0.90±0.04	—	0.16±0.03
PCB167	1.29±0.10	0.96±0.09	2.84±0.55	1.23±0.22	0.03±0.01	—
PCB189	3.20±0.81	2.06±0.11	0.81±0.09	—	—	0.05±0.01
总 DL-PCBs	57.24±5.23	51.05±4.20	33.26±2.54	10.97±0.89	1.96±0.67	2.12±0.15
WHO-TEQ /(pg/g)	383.12±60.05	551.22±96.36	298.96±106.43	159.68±31.45	3.45±0.05	1.02±0.19

n=15; —: 未检出

3 讨论

3.1 各区域环境及生物样中 PCBs 含量比较

PCBs 污染的空间分布与当地水文地质地貌条件、社会经济发展水平、历史及管理等因素有关。如表 4 所示, 本研究中各采样点水样的 PCBs 平均含量与国内其他水域相比处于中等水平, 但距水沟入海口 150 m (1—4# 采样点) 内滩涂水样的 DL-PCBs 含量大于 599.34 ng/L, 处于较高水平; 虽然国内的地表水环境标准中没有 PCBs 的相关规定, 但本研究结果显示, 在距该 PCBs 储存点水沟入海口 250 m 范围内, 滩涂水样 PCBs 含量均显著超过美国环保局海水 PCBs 标准 30 ng/L ($P<0.05$)。1—4# 采样点滩涂泥样的 PCBs 含量均高于加拿大用来为保持水生生态系统的长期稳定健康设立的污染物浓度值 (Interim Sediment Quality Guideline, ISQG)

2.15 ng/g,且1—3#采样点已高于《海洋沉积物质量标准》(GB18668—2002)的第一类标准 20 ng/g。此外,与国内其它地区河口或海湾沉积物中的 PCBs 含量相比(表4),本研究堆场周围地区滩涂泥样的 PCBs 含量也处于较高水平。说明该 PCBs 废物堆场经清挖 4 年后仍为较严重的 PCBs 污染源,堆场残留的 PCBs 经水流入海湾并在滩涂泥土中沉积,严重污染了近岸海域,且对该地的海产养殖有潜在威胁。国家环保总局与意大利环境与领土部的合作项目——“多氯联苯清单方法学和削减/处置初步战略开发”项目中,在 2005 年已查明,浙江省共有 43 个 PCBs 废物堆场,其中很多堆场都存在 PCBs 泄漏现象,这将严重威胁堆场周围的生态环境和人体健康。

表 3 各采样点大弹涂鱼的 DL-PCBs 浓度/(ng/g 脂重)
Table 3 DL-PCBs contents in *B. pectinirostris* samples

化合物	采样点 Sampling site					
	1#	2#	3#	4#	5#	6#
PCB77	54.12±9.32	37.98±5.61	11.71±1.65	11.39±2.69	—	12.98±2.08
PCB81	21.58±6.24	18.04±4.60	13.09±2.34	6.96±2.05	7.59±2.45	4.43±1.36
PCB126	5.18±1.38	4.11±1.33	2.53±0.58	—	3.71±1.33	—
PCB169	3.01±0.09	—	—	3.80±1.00	8.86±1.46	—
PCB105	73.43±7.67	57.29±7.92	30.07±2.37	—	8.55±2.60	9.18±2.32
PCB114	41.08±9.10	13.93±3.21	7.60±0.09	5.06±0.54	—	—
PCB118	59.19±6.25	55.39±6.66	49.37±6.45	8.55±1.36	20.89±4.78	15.83±2.01
PCB123	11.71±3.45	17.72±2.33	11.08±2.00	10.44±2.09	4.75±1.62	3.48±0.99
PCB156	17.41±1.70	—	—	15.83±3.61	15.60±2.59	8.55±3.04
PCB157	12.38±2.09	26.90±4.18	103.30±8.67	3.48±1.37	—	4.75±0.25
PCB167	2.53±0.06	16.46±1.97	—	2.22±0.85	—	—
PCB189	—	9.18±2.00	—	—	—	—
总 DL-PCBs	301.62±9.34	257.00±12.22	135.78±6.45	67.73±8.10	69.95±5.90	59.19±4.06
WHO-TEQ /(pg/g)	605.56±148.64	451.14±139.63	319.98±63.86	53.94±13.59	471.58±150.04	11.24±2.52

n=5; —: 未检出

表 4 国内各地区水体和沉积物中 PCBs 的含量

Table 4 PCBs contents in water and sediments of different areas in China

水域 Waters location	PCBs 平均含量 (ng/L) PCBs average content	参考文献 Reference	泥样 Sediment location	PCBs 含量/(ng/g) PCBs content	参考文献 Reference
长江九段沙	58.80	[5]	黄河口	1.30	[13]
太湖	631.00	[6]	长江九段沙	1.77—4.51	[11]
闽江口	985.00	[7]	锦州湾	5.84	[14]
九龙江口	355.00	[8]	伶仃洋	10.40—12.50	[15]
第二松花江	13.00	[9]	九龙江口	6.18	[16]
厦门港	0.74	[10]	长江口潮滩	18.12	[17]
珠江广州段	2.30	[11]	大连湾	19.10	[11]
大连老虎滩	33.55	[12]	闽江口	19.18	[14]
连云港东连岛	65.43	[12]	珠江口	52.20	[18]
福州平潭	416.80	[12]	太湖	1.35—13.80	[19]
珠海淇澳岛	474.92	[12]	长江江苏段	5.00—20.00	[20]
香港黄金海滩	58.78	[12]	珠江	12.50—485.50	[21]
本研究	541.71	—	本研究	1.96—57.24	—

2008 年张振中等^[5]报道了长江九段沙地区检测的鱼类 PCBs 含量(包括 PCB28、52、101、118、138、153、180,7 种单体)为 0.12—4.44 ng/g 脂重,平均为 1.68 ng/g 脂重,其中大弹涂鱼 PCBs 含量平均为 1.87 ng/g 脂重;2008 年 8 月何闪闪等在浙江省象山、宁海、三门、椒江、玉环采集的大弹涂鱼样品检测的 PCBs 含量(7

种单体)分别为 2.31、1.75、2.61、2.06、2.55 ng/g 脂重^[22],与张振中等的调查结果相似;而本研究中,在含 PCBs 废物堆场周围采集的大弹涂鱼样品 PCBs 含量(12 种单体)为 59.19—301.62 ng/g 脂重,平均值为 148.54 ng/g 脂重,已明显高于其它地区同种鱼类的 PCBs 含量($P < 0.001$)。

2001 年 Senthil 等^[23]报道了印度各类鱼中总 DL-PCBs 含量(12 种单体)为 4.13—32.64 ng/g 脂重,平均为 13.74 ng/g 脂重;2008 年 Paul 等^[24]调查表明,Ontario 湖的鳟鱼和亚洲胡瓜鱼中总 DL-PCBs 含量(12 种单体)分别为 1638.46 ng/g 脂重和 542.22 ng/g 脂重;2009 年张晓岭^[25]等在电子废弃物拆解区检测的鲫鱼和泥鳅样品中总 DL-PCBs 含量(12 种单体)分别为 2530.31—8841.22 ng/g 脂重和 1972.76—8118.43 ng/g 脂重。表明本研究中的大弹涂鱼样品 PCBs 含量在各类水产品中处于中等水平。

由表 1 和表 3 可知,各采样点大弹涂鱼从水体和沉积物中对 PCBs 的富集系数分别达到 113.1—765.99 和 4.08—35.69,平均富集系数分别为 392.54 和 14.03。表明大弹涂鱼对 PCBs 具有较高的富集能力,可以较好地指征环境的 PCBs 污染状况。如图 3 所示,PCBs 含量在各采样点鱼样和水样、鱼样和泥样以及水样和泥样的相关系数(r)分别为 0.86、0.97 和 0.93,表明大弹涂鱼 PCBs 含量与其所处的沉积物中的浓度高度相关,这也符合大弹涂鱼喜穴居和刮食底栖硅藻和滩涂泥中有机碎屑的生活习性。

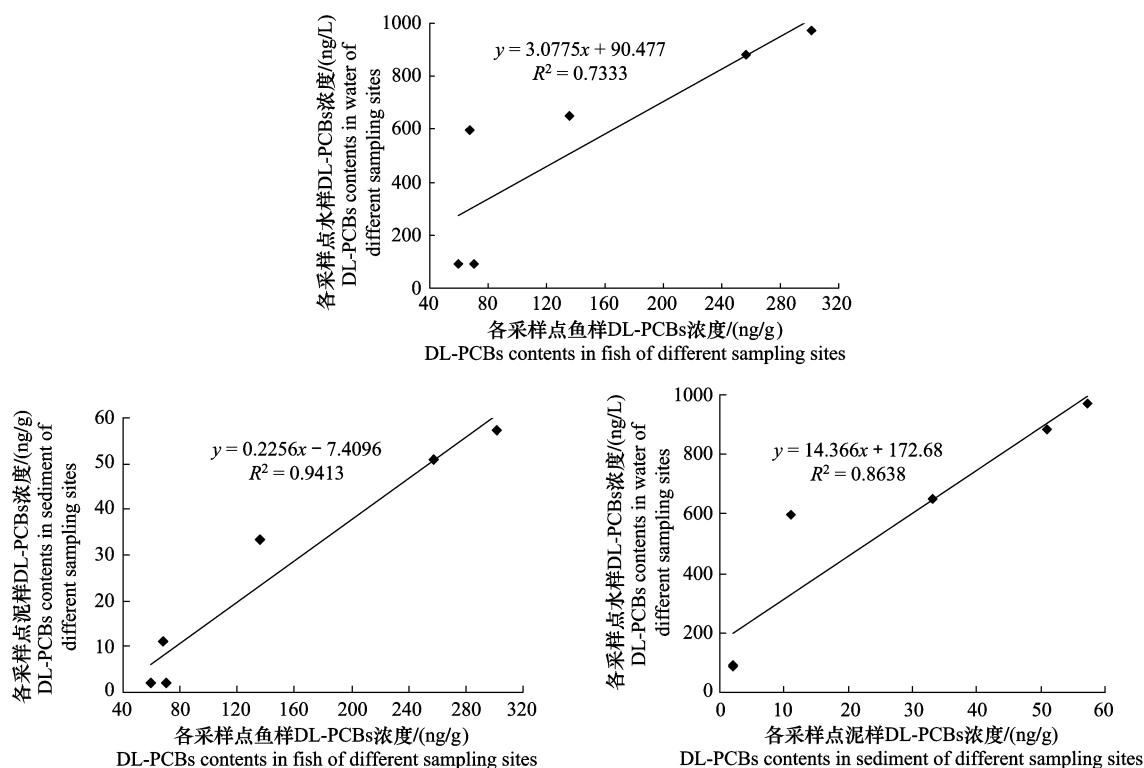


图 3 各采样点鱼样和水样、鱼样和泥样、水样和泥样总 DL-PCBs 含量的相关性

Fig. 3 Correlation of the DL-PCBs contents of fish with water samples, fish with sediment samples, and water with sediment samples

3.2 环境及生物样中 PCB 单体的分布

各采样点水样和滩涂泥样中总单邻位 DL-PCBs 含量分别占总 DL-PCBs 检出量的 51.68%—74.08% 和 52.87%—75.94%,其中水样中贡献率最高的为五氯联苯 PCB118 和 123,占总单邻位 DL-PCBs 量的 27.99%—58.45% (PCB118+PCB123),泥样中贡献率最高的为五氯联苯 PCB118 和 114,占总单邻位 DL-PCBs 量的 26.61%—48.06% (PCB118+PCB114)。水样和泥样中总非邻位异构体分别占总 DL-PCBs 含量的 25.92%—48.32% 和 24.06%—47.13%,且均以四氯联苯 PCB81 和三氯联苯 PCB77 为主,在水样和泥样中分别占总非邻位 DL-PCBs 量的 42.14%—92.43% 和 57.40%—95.83% (PCB81+PCB77),而毒性较高的五氯联苯 PCB126 和六氯联苯 PCB169 含量较低。

各采样点大弹涂鱼体内总单邻位 DL-PCBs 含量占总 DL-PCBs 检出量的 70.59%—79.87%, 其中五氯联苯 PCB118 和 105 为二噁英类 PCBs 的主要异构体, 在总 DL-PCBs 含量中占 12.62%—58.51% (PCB118+PCB 105), 这与张晓岭等在电子废物污染区^[25]、EL-Kady 等^[26]在尼罗河地区以及 Bhavsar 等^[27]在加拿大安大略湖水生生物调查结果都相似。总非邻位异构体对鱼体 PCBs 浓度贡献相对较小, 在各采样点鱼体中的含量占总 DL-PCBs 量的 20.13%—32.71%, 其中 PCB77 是生物体内主要的非邻位异构体, 其贡献率高达 64.50%, 这与 Wan^[28]和 Naito 等^[29]的研究结果一致。

相关性分析表明, 所有样品中检出率均达 100% 的单邻位异构体 PCB118 和非邻位异构体 PCB81 与总 PCBs 含量具有较好的相关性, 在水样、泥样和鱼样品中, PCB118 与总 DL-PCBs 含量的相关系数(r)分别为 0.97、0.95 和 0.91, PCB81 与总 DL-PCBs 含量的相关系数(r)分别为 0.93、0.99 和 0.98 (图 4)。此外, 本研究与其它报道^[24,29]相似, 均显示出环境样品中低氯异构体(3—4 氯)含量较高, 而生物样品中以高氯异构体为主要成分(5 氯), 这可能与 PCBs 在环境和生物体中的代谢不同有关^[30], 且鱼类对高氯联苯的富集系数高于低氯联苯^[31]。

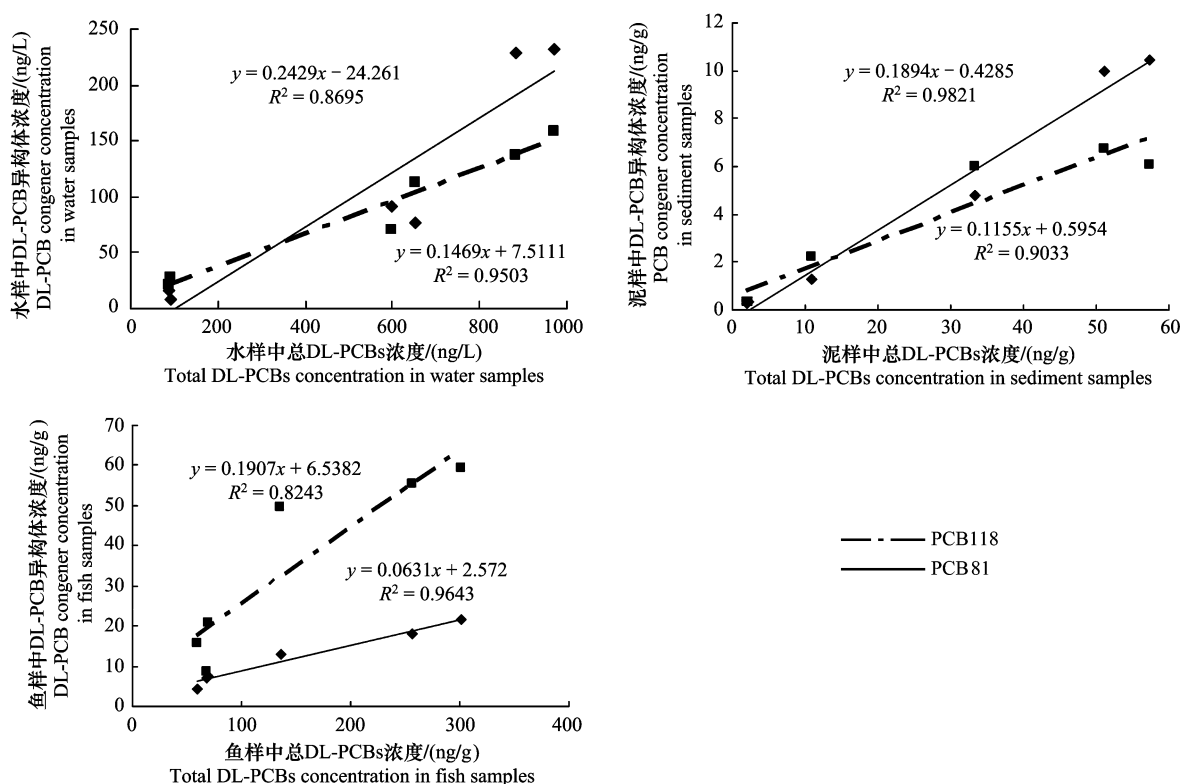


图 4 水样、泥样和鱼样中 PCB118 和 81 与总 DL-PCBs 含量的相关性

Fig. 4 Correlation of PCB118 and PCB81 with the total DL-PCBs contents of water samples, sediment samples and fish samples

3.3 PCBs 毒性风险评价

毒性当量分析显示, 虽然五氯联苯 PCB126 和六氯联苯 PCB169 含量较低, 但由于其毒性较高, 因此, 非邻位的 PCB126 和 PCB169 是总 TEQs 的主要贡献因子 (表 1—表 3), 这与张晓玲^[25]和 Kumar^[32]的研究结果不同。

由表 1 可见, 所有水样都超出日本水环境标准 1 pg TEQ/L 的 240 倍以上, 水域具有高毒性风险。此外, 如表 2 所示, 所有泥样均未超过日本土壤环境标准值 1000 pg TEQ/g, 但 MacDonald 等^[30]通过对不同评价方法进行了一致性评估, 将沉积物的 PCBs 毒性分为临界效应含量 (TEC, 35 ng/g)、中等效应含量 (MEC, 340 ng/g) 和极端效应含量 (EEC, 1600 ng/g), 若评价目标未超过 TEC, 基本认为无毒性, 若含量大于 EEC, 可认为毒性风险较高, 而介于两者之间的 MEC 风险百分比大于 50%。本研究中 1# 和 2# 泥样 DL-PCBs 含量均已超过

MEC。如果考虑这 12 种异构体一般占实际 PCBs 总量的 20%—50%^[33],则若放大 5 倍,3#和 4#泥样 PCBs 总量也将超过中等效应值,而 1#和 2#泥样的 PCBs 总量更是处于较高毒性风险水平。此外,若采用毒性当量评价,则 1—4#泥样 TEQs $\geq$ 159.68 pg TEQ/g。这些数据表明,距水沟入海口 150m 内的滩涂沉积物已具有一定的毒性风险;此外,在进行 PCBs 生态风险评价时,同时考虑污染物总含量和毒性当量更为有效。

将各采样点鱼体的 PCBs 含量转化为湿重计,其值均 $\leq$ 1.23 μ g/g,未超过美国食品和药物管理局(FDA)以及我国《食品中污染物限量》(GB2762—2005)规定的限量值 2 μ g/g。但鱼体 PCBs 的 TEQs 值均大于 10 pg TEQ/g 脂重,换算为湿重计,则均大于 45 pg TEQ/g 湿重,远远高于欧盟 No. 1881—2006 规定的水产品 PCBs 的限值 8 pg TEQ/g 湿重($P<0.001$),且 1—3#鱼样品的 TEQs 值已超过 300 pg TEQ/g 脂重,表明该区域的大弹涂鱼具有较高的 PCBs 毒性风险,而大弹涂鱼是当地较受欢迎的海产品,所以 PCBs 可通过食物链进入人体,对人体健康造成潜在的危害。所有结果表明,在 PCBs 废物储存点周围地区开展 PCBs 环境浓度调查以及它们对野生生物和人体健康的风险评价是必需和紧迫的。

References:

- [1] Naito W, Jin J C, Kang Y S, Yamamuro M, Masunaga S, Nakanishi J. Dynamics of PCDDs/DFs and coplanar-PCBs in an aquatic food chain of Tokyo Bay. *Chemosphere*, 2003, 53(4): 347-362.
- [2] Feng T, Zheng W Y, Hong W S, Zhang Q Y. Effects of benzo(a)pyrene exposure on aryl hydrocarbon hydroxylase activities in the liver of *Boleophthalmus pectinirostris*. *Journal of Fisheries of China*, 2001, 25(2): 156-160.
- [3] Feng T, Guo X Q, Zheng W Y, Yuan D X. Detection of DNA strand breaks in the liver of *Boleophthalmus pectinirostris* treated with benzo(a)pyrene. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, 71(2): 263-269.
- [4] van Den Berg M, Bimbaum L, Bosveld A T, Brunström B, Cook P, Feeley M, Giesy J P, Hanberg A, Hasegawa R, Kennedy S W, Kubiak T, Larsen J C, van Leeuwen F X, Liem A K, Nolt C, Peterson R E, Poellinger L, Safe S, Schrenk D, Tillitt D, Tysklind M, Younes M, Waern F, Zacharewski T. Toxic equivalency factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for humans and wildlife. *Environmental Health Perspectives*, 1998, 106: 775-792.
- [5] Sun Z Z, Qi J Y, Zeng Z C, Zhang Y P, Sun J, Hao Y M. Polychlorinated biphenyls in the water, soil and aquatic animals from the Jiuduansha wetland of Yangtze River Estuary. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(3): 92-97.
- [6] Que M X, Wen Q, Liu G M, Li Y F. Distribution and treatment process of polychlorinated biphenyls in natural waters. *China Water and Wastewater*, 2006, 22(24): 10-14.
- [7] Zhang Z L, Hong H S, Yu G. Preliminary study on persistent organic pollutants (POPs)-PCBs in multi-phase matrices in Minjiang River Estuary. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(6): 788-791.
- [8] Zhang Z L, Chen W Q, Khalid M, Zhou J L, Xu L, Hong H S. Study on PCBs in water of Jiulong River Estuary. *Yunnan Environmental Science*, 2000, 19(S1): 124-127.
- [9] Yang Y H, Fu J M, Sheng G Y, Min Y S. Pollution of micropollutants in waters of the Pearl River Delta region. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18(3): 271-277.
- [10] Zhang Z L, Hong H S, Khalid M, Zhou J L, Chen W Q, Xu L. Study on organochlorine pesticide and PCBs at surface water in Xiamen Harbour. *Marine Environmental Science*, 2000, 19(3): 48-51.
- [11] Nie X P, Lan C Y, Luan T G, Huang M H, Mai Z D. Polychlorinated biphenyls in the waters, sediments and benthic organisms from Guangzhou Reach of Pearl River. *China Environmental Science*, 2001, 21(5): 417-421.
- [12] Luo H, Wang X H, Tang L, Hong L Y, Wu S P, Xie W. Distributions of dissolved organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in China coastal waters. *Marine Environmental Science*, 2010, 29(1): 115-120.
- [13] Wu Y, Zhang J, Zhou Q. Persistent organochlorine residues in sediments from Chinese river Estuary systems. *Environmental Pollution*, 1999, 105(1): 143-150.
- [14] Li H, Fu Y Z, Zhou C G, Xu H Z. Distribution characteristics of organic chlorine pesticide and PCB in the surface sediments in Dalian Bay and Jinzhou Bay. *Marine Environmental Science*, 1998, 17(2): 73-76.
- [15] Mai B X, Lin Z, Zhang G, Sheng G Y, Kang Y H, Peng P A. The pollution situation and risk assessment of toxic organic compounds in sediments from Pearl River Delta. *Research of Environmental Science*, 2001, 14(1): 19-23.
- [16] Xing Y, Lu Y L, Liu W B, Shi Y J, Luo W, Ren H C. Assessment of PCB pollution in spatial distribution and analysis of the PCB sources in sediments in China. *Environmental Science*, 2006, 27(2): 228-234.
- [17] Chen M R, Yu L Z, Xu S Y, Feng K. Research of PCBs pollution in tidal flat sediments of Yangtze River Estuary. *Environmental Science and Technology*, 2004, 27(5): 24-27.
- [18] Kang Y H, Sheng G Y, Fu J M, Mai B X, Lin Z, Zhang G, Min Y S. Preliminary study on the distribution and characterization of polychlorinated biphenyls in some of surface sediments from Pearl River Delta. *Environmental Chemistry*, 2000, 19(3): 262-269.
- [19] Zhang Q H, Jiang G B. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans and polychlorinated biphenyls in sediments and aquatic organisms from the Taihu Lake China. *Chemosphere*, 2005, 61(3): 314-322.
- [20] Jiang X, Xu S F, Martens D, Wang L S. Polychlorinated organic contaminants in waters, suspended solids and sediments of the Nanjing section,

- Yangtze River. *China Environmental Science*, 2000, 20(3): 193-197.
- [21] Ho K C, Hui K C C. Chemical contamination of the East River (Dongjiang) and its implication on sustainable development in the Pearl River Delta. *Environment International*, 2001, 26(5/6): 303-308.
- [22] He S S, He S Y, Wang X Y. Detection and analysis of polychlorinated biphenyls in marine aquatic animals of Zhejiang coast. *Journal of Hydroecology*, 2010, 3(4): 96-101.
- [23] Kumar K S, Kannan K, Paramasivan O N, Sundaram V P S, Nakanishi J, Masunaga S. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans, and polychlorinated biphenyls in human tissues, meat, fish, and wildlife samples from India. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35(17): 3448-3455.
- [24] Helm P A, Gewurtz S B, Whittle D M, Marvin C H, Fisk A T, Tomy G T. Occurrence and biomagnification of polychlorinated naphthalenes and non-and mono-ortho PCBs in Lake Ontario sediment and biota. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(4): 1024-1031.
- [25] Zhang X L, Yang F X, Wen S, Jin S W, Hui Y, Xu Y. Congener pattern and toxicity of polychlorinated biphenyls in aquatic organisms from an electronic and electrical waste area. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, 33(5): 812-817.
- [26] El-Kady A A, Abdel-Wahhah M A, Henkelmann B, Belal M H, Morsi M K, Galal S M, Schramm K W. Polychlorinated biphenyl, polychlorinated dibenzo-p-dioxin and polychlorinated dibenzofuran residues in sediments and fish of the River Nile in the Cairo region. *Chemosphere*, 2007, 68(9): 1660-1668.
- [27] Bhavsar S P, Fletcher R, Hayton A, Reiner E J, Jackson D A. Composition of dioxin-like PCBs in fish: An application for risk assessment. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(9): 3096-3112.
- [28] Wan Y, Hun J Y, Yang M, An L H, An W, Jin X H, Hattori T, Itoh M. Characterization of trophic transfer for polychlorinated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans, non-and mono-ortho polychlorinated biphenyls in the marine food web of Bohai Bay, North China. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(8): 2417-2425.
- [29] Borgià K, Fisk A T, Hargrave B, Hoekstra P F, Swackhamer D, Muir D C G. Bioaccumulation factors for PCBs revisited. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(12): 4523-4532.
- [30] Fisk A T, Hobosen K A, Norstrom R J. Influence of chemical and biological factors on trophic transfer of persistent organic pollutants in the Northwest Plynny marine food web. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35(4): 732-738.
- [31] Macdonald D D, Dipinto L M, Field J, Ingersoll C G, Lvon E R, Swartz R C. Development and evaluation of consensus-based sediment effect concentrations for polychlorinated biphenyls. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2000, 19(5): 1403-1413.
- [32] Kumar K S, Bowerman W W, DeVault T L, Takasuga T, Rhodes O E Jr, Lehr Brisbin I Jr, Masunaga S. Chlorinated hydrocarbon contaminants in blood of black and turkey vultures from Savannah River Site, South Carolina, USA. *Chemosphere*, 2003, 53(2): 173-182.
- [33] Kannan N, Tanabe S, Okamoto T, Tatsukawa R, Phillips D J H. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments in Hong Kong: a congener-specific approach to the study of coplanar PCBs in aquatic ecosystems. *Environmental Pollution*, 1989, 62(2/3): 223-235.

参考文献:

- [2] 冯涛, 郑微云, 洪万树, 张其永. 苯并(a)芘对大弹涂鱼肝脏芳烃羟化酶活性的影响. *水产学报*, 2001, 25(2): 156-160.
- [5] 孙振中, 戚隼渊, 曾智超, 张玉平, 孙骥, 郝永梅. 长江口九段沙水域环境及生物体内多氯联苯分布. *环境科学研究*, 2008, 21(3): 92-97.
- [6] 阙明学, 温青, 刘广明, 李一凡. 多氯联苯在自然水体中的分布现状与处理工艺. *中国给水排水*, 2006, 22(24): 10-14.
- [7] 张祖麟, 洪华生, 余刚. 闽江口持久性有机污染物—多氯联苯的研究. *环境科学学报*, 2002, 22(6): 788-791.
- [8] 张祖麟, 陈伟琪, 哈里德, 周俊良, 徐立, 洪华生. 九龙江口水体中多氯联苯的研究. *云南环境科学*, 2000, 19(S1): 124-127.
- [9] 杨燕红, 傅家谟, 盛国英, 闵育顺. 珠江三角洲一些城市水体中微量有机污染物的初步研究. *环境科学学报*, 1998, 18(3): 271-277.
- [10] 张祖麟, 洪华生, 哈里德, 周俊良, 陈伟琪, 徐立. 厦门港表层水体中有机氯农药和多氯联苯的研究. *海洋环境科学*, 2000, 19(3): 48-51.
- [11] 聂湘平, 蓝崇钰, 栾天罡, 黄铭洪, 麦志勤. 珠江广州段水体、沉积物及底栖生物中的多氯联苯. *中国环境科学*, 2001, 21(5): 417-421.
- [12] 罗慧, 王新红, 汤丽, 洪丽玉, 吴水平, 谢卫. 中国部分沿海海域水体中溶解态有机氯农药和多氯联苯的残留分布特征. *海洋环境科学*, 2010, 29(1): 115-120.
- [14] 李洪, 付宇众, 周传光, 徐恒振. 大连湾和锦州湾表层沉积物中有机氯农药和多氯联苯的分布特征. *海洋环境科学*, 1998, 17(2): 73-76.
- [15] 麦碧娴, 林峥, 张干, 盛国英, 康跃惠, 彭平安. 珠江三角洲沉积物中毒害有机物的污染现状及评价. *环境科学研究*, 2001, 14(1): 19-23.
- [16] 邢颖, 吕永龙, 刘文彬, 史雅娟, 罗维, 任鸿昌. 中国部分水域沉积物中多氯联苯污染物的空间分布、污染评价及影响因素分析. *环境科学*, 2006, 27(2): 228-234.
- [17] 陈满荣, 俞立中, 许士远, 封克. 长江口 PCBs 污染及水环境 PCBs 研究趋势. *环境科学与技术*, 2004, 27(5): 24-27.
- [18] 康跃惠, 盛国英, 傅家谟, 麦碧娴, 林峥, 张干, 闵育顺. 珠江三角洲一些表层沉积物中多氯联苯的初步研究. *环境化学*, 2000, 19(3): 262-269.
- [20] 蒋新, 许士奋, Martens D, 王连生. 长江南京段水、悬浮物及沉积物中多氯有毒有机污染物. *中国环境科学*, 2000, 20(3): 193-197.
- [22] 何闪闪, 何闪英, 王晓宇. 浙江沿海海洋水产动物的多氯联苯检测分析. *水生态学杂志*, 2010, 3(4): 96-101.
- [25] 张晓岭, 杨方星, 闻胜, 金士威, 惠阳, 徐盈. 电子废物污染地区水生生物体内多氯联苯的异构体分布特征和毒性. *水生生物学报*, 2009, 33(5): 812-817.

CONTENTS

Marine ecological capital: valuation of standing stock of marine living resources	REN Dachuan, CHEN Shang, XIA Tao, et al (4805)
Effect of Endophytic fungi on growth and photosynthetic characteristics of <i>Achnatherum sibiricum</i>	JIA Tong, REN Anzhi, WANG Shuai, et al (4811)
Based on image processing technology estimating leaves stomatal density of <i>Populus euphratica</i> and analysis of its ecological significance	JIAN Shengqi, ZHAO Chuanyan, ZHAO Yang, et al (4818)
Evaluation of the ecological instream flow in the Yellow River basin with hydrological alterations	ZHANG Qiang, LI Jianfeng, CHEN Xiaohong, et al (4826)
The ecological effects of <i>Suaeda salsa</i> on repairing heavily degraded coastal saline-alkaline wetlands in the Yellow River Delta	GUAN Bo, YU Junbao, LU Zhaohua, et al (4835)
Toxicity risks to the closed tidal flat ecosystem of a PCBs waste savepoint at the coast of Zhejiang	HE Shanying, CHEN Kunbai (4841)
Methane emission from a <i>Carex</i> -dominated wetland in Poyang Lake	HU Qiwei, ZHU Lili, XING Ruixin, et al (4851)
The study on Ice-fish Resources in the Three Gorges Reservoir	SHAO Xiaoyang, LI Daofeng, TAN Lu, et al (4858)
Effects of acute cold stress on serum biochemical and immune parameters and liver HSP70 gene expression in GIFT strain of Nile tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>)	LIU Bo, WANG Meiyao, XIE Jun, et al (4866)
Acute toxicity and effect of Cd ²⁺ on life table demography of <i>Brachionus angularis</i> and <i>Keratella valga</i>	XU Dandan, XI Yilong, MA Jie, et al (4874)
The association of BDNF gene polymorphisms with normal behavior traits in house-hold sika deer (<i>Cervus nippon</i>)	LÜ Shenjin, YANG Yan, WEI Wanhong (4881)
Characteristics and controlling factors of photosynthesis in a maize ecosystem on the North China Plain	TONG Xiaojuan, LI Jun, LIU Du (4889)
The soil macrofaunal community structure under a long-term fertilization in wheat field	GU Yanfang, ZHANG Li, DING Shengyan, et al (4900)
Effect of earthworms on the photosynthetic characteristics of wetland plants and their capacity to purify wastewater	XU Defu, LI Yingxue, WANG Ranghui, et al (4907)
Toxicity of three pesticides and their effects on carboxylesterase activity of <i>Propiloscerus akamusi</i>	FANG Guofei (4914)
Reproductive behavior character and sexual tendency of the adult <i>Zeuzera leuconotum</i> Butler (Lepidoptera: Cossidae)	LIU Jinlong, ZONG Shixiang, ZHANG Jintong, et al (4919)
Effects of herbicides stress on the population of alligator weed flea beetles, <i>Agasicles hygrophila</i> (Col.: Chrysomelidae) and corresponding strategies	LIU Yufang, PENG Meifang, WANG Chengchao, et al (4928)
Patterns of fruit and seed production and ecological significance in desert species <i>Eremosparton songoricum</i> (FABACEAE)	SHI Xiang, WANG Jiancheng, ZHANG Daoyuan, et al (4935)
Effect of different nitrogen supply on the temporal and spatial distribution and remobilization of canopy nitrogen in winter wheat under limited irrigation condition	HAO Baozhen, JIANG Lina, FANG Baoting, et al (4941)
Plant architecture characteristics of <i>Haloxylon ammodendron</i> and <i>Haloxylon persicum</i> in Zhungar Basin	WANG Lijuan, SUN Dongyuan, ZHAO Chengyi, et al (4952)
Downscaling land surface temperature based on relationship between surface temperature and vegetation index	NIE Jianliang, WU Jianjun, YANG Xi, et al (4961)
Differential characteristics of soil $\delta^{15}\text{N}$ under varying vegetation in karst areas	WANG Zhijun, LIANG Xuan, HE Qiufang, et al (4970)
Effect of nitrogen application rate on growth and leaf photosynthetic characteristics of <i>Jatropha curcas</i> L. seedlings	YIN Li, HU Tingxing, LIU Yongan, et al (4977)
Seasonal variations in leaf C, N, and P stoichiometry of typical plants in the Yangou watershed in the loess hilly gully region	WANG Kaibo, SHANGGUAN Zhouping (4985)
Clonal integration enhances the ability to scavenge reactive oxygen species in root of <i>Cynodon dactylon</i> subjected to submergence	LI Zhaojia, YU Jie, FAN Dayong, et al (4992)
Pattern of flow-covered sand-fixing woodland and its windbreak effect	YANG Wenbin, DONG Huilong, LU Qi, et al (5000)
Evaluation of soil and water conservation capacity of different forest types in Dongling Mountain	MO Fei, LI Xuyong, HE Shuxia, et al (5009)
Changes in structural components and respiration rates of coarse woody debris at the initial decomposition stage for 11 temperate tree species	ZHANG Limin, WANG Chuankuan, TANG Yan (5009)
Characteristics of nutrient cycling in first and second rotations of Chinese fir plantations	TIAN Dalun, SHEN Yan, KANG Wenxing, et al (5025)
The optimal design of a connected nature reserve network	WANG Yicheng (5033)
Sub-areas compartmentalization of Changjiang Estuary based on the natural geographical characteristics	LIU Lusan, ZHENG Binghui, MENG Wei, et al (5042)
The environmental and economic influence of coal-electricity integration exploitation in the Xilingol League	WU Di, DAI Fangzhou, YAN Yan, et al (5055)
Review and Monograph	
The influence of diversity changes of ecological conditions on the survival of honey bees	HOU Chunsheng, ZHANG Xuefeng (5061)
Scientific Note	
The spatio-temporal change in the secondary production of macrozoobenthos in the intertidal zone of Jiaozhou Bay	ZHANG Chongliang, XU Binduo, REN Yiping, et al (5071)
The studying system construction of wetland parks	WANG Lilong, LU Lin (5081)
Ecological footprint analysis of a semi-arid grassland region facilitates assessment of its ecological carrying capacity: a case study of Xilinguole League	YANG Yan, NIU Jianming, ZHANG Qing, et al (5096)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 17 期 (2011 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 17 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元