

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

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

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗烜,袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂, Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)	

黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布

李光耀¹, 金军^{1,2*}, 何畅¹, 王英¹, 马召辉¹, 李明园¹

(1. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081; 2. 北京市食品环境与健康工程技术研究中心, 北京 100081)

摘要: 从青藏高原到黄河入海口, 采集了黄河流域不同地区 15 个采样点的表层沉积物, 使用 GC-MS 测定了表层沉积物中类二噁英多氯联苯 (DL-PCBs) 的浓度水平, 黄河流域 15 个采样点 $\sum$ DL-PCBs 浓度范围 (以 dw 计, 下同) 为 2.3 ~ 14.8 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$, 毒性当量在 0.001 4 ~ 0.023 1 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 0.007 3 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$, 与国内外其他河流的研究相比, 黄河沉积物中 DL-PCBs 水平和毒性当量处于较低水平. 黄河沉积物中 DL-PCBs 同族体主要以四氯代和五氯代为主, 其中黄河流经的乡村与经济欠发达地区沉积物中 DL-PCBs 同族体组分较为相似, 而流经工业发达、人口众多地区的沉积物中 DL-PCBs 同族体分布相似. 研究表明石化企业及水利水电设施影响沉积物中 DL-PCBs 同族体的组成分布, 并且黄河表层沉积物中 $\sum$ DL-PCBs 的浓度与当地人均 GDP 显著相关, 黄河流经经济发达地区的沉积物中的 DL-PCBs 水平高于偏远地区.

关键词: 类二噁英多氯联苯; 黄河流域; 沉积物; 同族体

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3358-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.09.016

Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River

LI Guang-yao¹, JIN Jun^{1,2}, HE Chang¹, WANG Ying¹, MA Zhao-hui¹, LI Ming-yuan¹

(1. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China; 2. Engineering and Technology Research Center of Food Environment and Health, Beijing 100081, China)

Abstract: The levels of DL-PCBs in the surface sediments collected in 15 different sampling sites from the Tibetan Plateau to the Yellow River estuary along the Yellow River were measured using the GC-MS. The concentrations of $\sum$ DL-PCBs ranged from 2.3 to 14.8 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ and the TEQs of DL-PCBs were between 0.001 4 and 0.023 1 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$, with an average of 0.007 3 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$. Compared with other domestic and foreign rivers, the DL-PCBs and TEQ levels of the Yellow River were at low levels. The main DL-PCBs congeners in the Yellow River sediments were tetra and penta chlorinated biphenyls. The DL-PCBs congener composition of rural and underdeveloped areas was similar, and there was similar congeners composition between the industry developed areas and the populous areas. Petrochemical industries and hydropower facilities may affect the distribution of DL-PCBs congener in the sediments. A significant correlation between concentrations of DL-PCBs and GDP per capita was found. It indicated that the contamination extent of DL-PCBs in the Yellow River was related with the local economic development, DL-PCBs levels in developed areas were higher than those in remote rural areas.

Key words: dioxin-like polychlorinated biphenyls; the Yellow River basin; sediment; congener

多氯联苯 (polychlorinated biphenyl, PCBs) 物理化学性质极为稳定, 具有良好的电绝缘性和耐热性, 曾经大量生产用于变压器和电容器内的绝缘介质、热交换剂、润滑剂、增塑剂等, 被广泛应用于电力工业、塑料加工业、化工和印刷等领域^[1]. 其化学性质极其稳定, 在环境中难以被降解. PCBs 在水中的溶解度很低, 其 K_{ow} 在 $10^4 \sim 10^8$ 之间. 较强的亲脂性使得水体中的 PCBs 被悬浮颗粒物中的有机物或生物体脂肪组织所吸附, 并逐渐沉降进入沉积物中, 所以沉积物是 PCBs 重要的汇.

当今国内对于几大水系中毒性最大的类二噁英 PCBs (DL-PCBs) 的单独研究相对较少, 都是零散的监测流域一小段的 DL-PCBs 状况^[2~4], 或是针对不同 PCBs 同族体的研究^[4,5]. 特别是黄河全流域的 DL-

PCBs 的整体状况, 其数据是缺失的. 本研究从青藏高原到黄河入海口, 采集了黄河流域不同地区的黄河表层沉积物, 通过分析黄河沉积物 DL-PCBs 的水平, 以期反映黄河流域 DL-PCBs 的整体污染分布状况.

1 材料与方法

1.1 采样地点

本研究中的采样地点从海拔 3 479 m 的位于青藏高原东端、“黄河第一弯”的甘肃省玛曲县到海拔

收稿日期: 2013-12-02; 修订日期: 2014-03-11

基金项目: 中央民族大学一流大学一流学科建设项目 (YLDX01013); 高等学校学科创新引智计划 (B08044); 新世纪优秀人才计划 (NCET-10-0106)

作者简介: 李光耀 (1988 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为持久性有机污染物, E-mail: lixi689@163.com

* 通讯联系人, E-mail: junjin3799@126.com

2 m 的黄河入海口山东省东营市,共设置了 15 个采样点,采样点分布及其信息如表 1 所示。

表 1 采样点分布及其地理信息

Table 1 Distribution and geographic information of sampling points

编号	采样点	省份	纬度(N)	经度(E)	海拔/m	人口 ¹⁾ (万人) ^[6]	GDP ¹⁾ (亿元) ^[6]
Y1	玛曲	甘肃	33°57'20"	102°02'53"	3 479	5.5	12.5
Y2	贵德	青海	36°02'26"	101°23'17"	2 233	10.8	29.6
Y3	什川桥	甘肃	36°09'13"	103°59'34"	1 482	127.8	546.1
Y4	青城桥	甘肃	36°21'26"	104°13'20"	1 448	40.4	145.6
Y5	白银	甘肃	36°25'00"	104°23'15"	1 429	28.8	128.9
Y6	青铜峡	宁夏	37°54'25"	106°00'21"	1 142	27.2	104.5
Y7	银古公路桥	宁夏	38°13'31"	106°15'55"	1 122	23.7	115.7
Y8	石嘴山	宁夏	38°48'42"	106°40'02"	1 103	65.9	409.1
Y9	都思图河入黄口	宁夏	39°04'53"	106°51'42"	1 094	29.1	99.8
Y10	巴彦淖尔	内蒙古	40°38'19"	107°19'08"	1 042	171.3	603.4
Y11	包头	内蒙古	40°29'05"	109°41'31"	1 005	268.3	3 409.2
Y12	吴堡	陕西	37°27'30"	110°44'45"	642	8.8	25.3
Y13	三门峡	河南	34°48'02"	111°15'40"	376	224.9	1 148.3
Y14	开封	河南	34°54'18"	114°16'29"	75	467.7	1 212.5
Y15	东营	山东	37°36'34"	118°32'30"	2	203.8	3 000.6

1)人口与 GDP 均为采样当年数据

1.2 采样时间和方法

于 2011 年 7 月 11 ~24 日和 2012 年 6 月 28 日 ~8 月 15 日用柱状采样器(BEEKER, Eijkelkamp)分别采集黄河表层 15 个沉积物(0 ~5 cm)样品,样品保存于不锈钢金属盒中,送到实验室置于 - 20℃ 下保存,直至分析。

1.3 仪器和试剂

仪器:Agilent 6890-5975N 气质联用仪(Agilent, USA); 旋转蒸发仪(上海亚荣生化仪器厂); BF2000 氮气吹干仪(北京八方世纪科技有限公司); 精密电子天平(日本岛津公司)。柱状采样器(BEEKER, Eijkelkamp)。

试剂:硅胶 100 ~200 目(德国 MERCK 公司); 丙酮(J. T. Baker 公司)、正己烷(J. T. Baker 公司)、二氯甲烷(J. T. Baker 公司)均为农残级; 浓硫酸(分析纯); 无水硫酸钠(分析纯),450℃ 灼烧 5 h; 高纯氮气(北京诚为信公司); 氦气(北京诚为信公司),甲烷气体(北京氦普公司); 内标混合液 ¹³C₁₂-PCBs(PCB-81、-77、-123、-118、-114、-105、-126、-167、-156、-157、-169、-189)购自 Cambridge Isotope Laboratories。

1.4 样品前处理

将冻干干燥后的沉积物过 200 目筛后,称取的 20.00 g(干重),并加入 ¹³C₁₂-PCBs 内标混合液(640 pg),用 200 mL 正己烷:丙酮(1:1,体积比)在索氏提取器中提取,加热回流 24 h。将提取液采用旋转

蒸发法将提取液浓缩至 1 ~2 mL,然后用酸碱硅胶复合柱[自下而上依次填充 1 g 中性硅胶,4 g 碱性硅胶(30% NaOH 1 mol·L⁻¹,质量比),1 g 中性硅胶,8 g 酸性硅胶(44% 浓硫酸,质量比),2 g 中性硅胶,4 g 无水硫酸钠]分离纯化,上样前用 50 mL 正己烷活化硅胶柱,然后上样,用 18 mL 正己烷预淋洗,再用 100 mL 正己烷-二氯甲烷的混合液(97:3,体积比)进行洗脱,将接取的洗脱液旋转蒸发至 1 ~2 mL,然后转入定量管中,加入 100 μL 壬烷,氮吹定容至 100 μL,进行 GC-MS 测定。

1.5 仪器条件

色谱条件:色谱柱 DB-5MS 柱(30 m ×0.25 mm i. d. ×0.1 μm, Agilent Technologies, Palo Alto, CA, USA)。程序升温:初始温度为 100℃,保持 3 min,然后以 5℃·min⁻¹的速率升至 250℃。以高纯氦气为载气,载气流速为 1.0 mL·min⁻¹,前进样口温度为 320℃,采用不分流进样,进样量 1 μL。

质谱条件:反应气为甲烷,离子源(负化学电离源 NCI)、四级杆温度均为 150℃。PCB-81、-77 选择扫描监测离子为(*m/z*) 290、292; PCB-123、-118、-114、-105、-126 选择扫描监测离子为(*m/z*) 326、328; PCB-167、-156、-157、-169 选择扫描监测离子(*m/z*) 360、362; PCB-180、-170、-189 选择扫描监测离子为(*m/z*) 394、396; ¹³C₁₂-PCBs 内标选择扫描监测离子(*m/z*)与 ¹²C₁₂-PCBs 相对应,依次增加 12。

1.6 质量控制

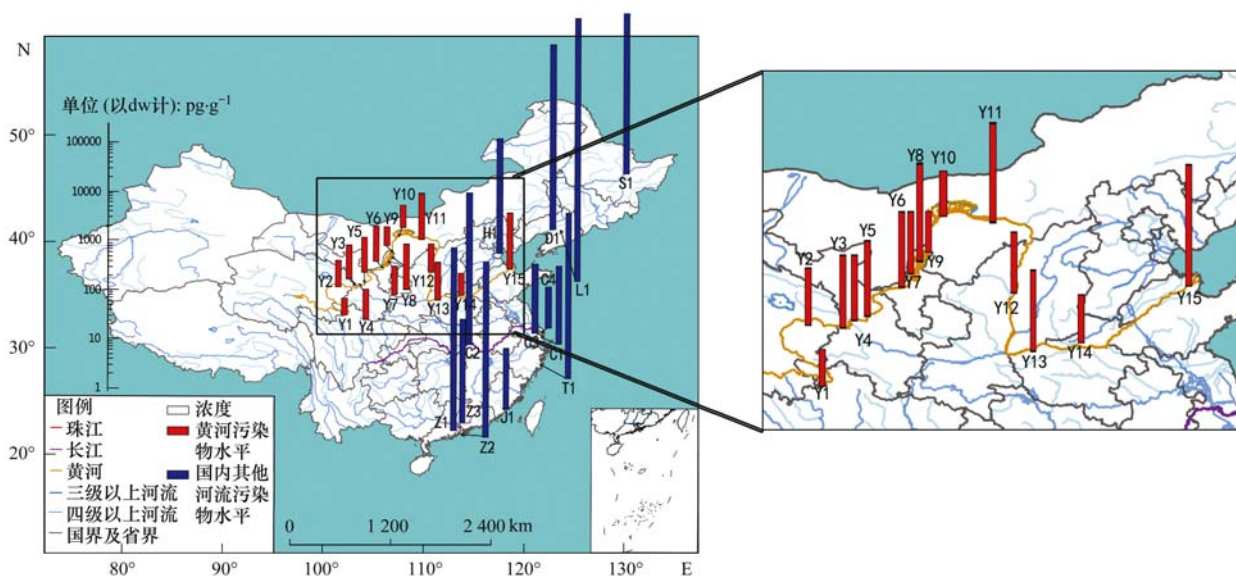
PCB-81、-77、-123、-118、-114、-105、-126、-167、-156、-157、-169、-180、-170、-189 采用同位素稀释内标法定量,PCBs 各同族体的五点校正曲线相关系数 $r \geq 0.9998$. PCB-81、-77、-123、-118、-114、-105、-126、-167、-156、-157、-169、-180、-170、-189 采用 10 倍信噪比定量,最低检出限为 0.1 pg,方法检出限为 1 ~ 1.3 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$. 样品各 ^{13}C 内标的回收率为 70.3% ~ 103.1%. 每批样品做一个空白对照,空白样品结果满足质量保证的要求.

2 结果与讨论

2.1 黄河沉积物中的 DL-PCBs 浓度水平分析

本研究中黄河流域沉积物中的 12 种 DL-PCBs (PCB-81、-77、-123、-118、-114、-105、-126、

-167、-156、-157、-169、-189) 的浓度 (以 dw 计,下同) 范围在 2.3 ~ 14.8 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 浓度最低点为甘肃玛曲县 (Y1) 浓度为 2.3 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 最高点为黄河入海口的山东东营市 (Y15) 浓度为 14.8 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 15 个采样点的浓度水平见图 1. 其中列举了本研究中采样点的 DL-PCBs 浓度水平与国内河流沉积物近年来 DL-PCBs 水平的比较情况. 从中可以看出: Y1 (甘肃玛曲)、Y2 (青海省贵德)、Y9 (宁夏都思图河入黄口)、Y10 (内蒙古巴彦淖尔)、Y12 (陕西吴堡) 是由于地广人稀, 加上当地经济组成以农业为主, 工业不发达, DL-PCBs 的浓度相对较低. 而 Y8 (宁夏石嘴山)、Y11 (内蒙古包头)、Y13 (河南三门峡)、Y15 (山东东营) 这 4 个点较高的 DL-PCBs 水平则与当地处于较发达的经济地区与当地发达的工业分不开.



Y1 ~ Y15 为本研究黄河 (2011、2012); Z1. 珠海珠江 (2010)^[11]; Z2. 香港珠江口 (2008)^[12]; Z3. 广东东江 (2007)^[13]; C1. 上海长江口 (2004)^[5]; C2. 武汉长江 (2005)^[4]; C3. 太仓长江 (2004)^[5]; C4. 上海崇明长江 (2004)^[5]; D1. 辽宁大辽河 (2007)^[14]; L1. 辽宁辽河 (2004)^[15]; H1. 天津海河 (2009)^[16]; J1. 厦门九龙江 (2007)^[17]; S1. 哈尔滨松花江 (2007)^[18]; T1. 台州椒江 (2006)^[19]

图 1 黄河 15 个采样点沉积物中 DL-PCBs 的浓度水平及我国其他主要河流污染状况的比较

Fig. 1 Concentrations of DL-PCBs in the sediments of 15 sampling sites along the Yellow River and comparison with the other major rivers in China

对比 He 等^[2] 2004 年黄河河南段沉积物测得的数据 (2 440.1 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$) 和 Hui 等^[3] 2004 年研究黄河河口沉积物 DL-PCBs 的数据 (21.7 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$), 选取与本研究采样点位置相近的采样点的数据进行比较, 本研究中 Y14 (开封, 3.7 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$) 和 Y15 (东营, 14.8 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$) 黄河沉积物 DL-PCBs 的水平有所降低, 黄河 DL-PCBs 水平较 2004 年呈现下降的趋势. Yang 等^[5] 的研究也认为由于 2000 年以后对环境污

染采取了一系列措施, 使得长江口沉积物中 PCBs 的污染水平有所下降. 图 1 表明, 黄河沉积物中 DL-PCBs 整体污染水平低于过去 10 年间报道的长江、珠江、海河、松花江、辽河等河流沉积物中 DL-PCBs 的水平. 对比近年来一些国外河流的研究, 发现黄河沉积物中 DL-PCBs 浓度低于埃及尼罗河^[7]、韩国汉江^[8]、德国易北河沉积物^[9]、美国萨吉诺河沉积物^[10]中 DL-PCBs 的水平.

2.2 黄河沉积物中的 DL-PCBs 同族体分布

PCB-77、PCB-118、PCB-105 是黄河沉积物中主要的同族体,其中 PCB-118、PCB-105 的检出率为 100%,而 PCB-81、PCB-123、PCB-114、PCB-126、PCB-189 均未检出,各采样点的 DL-PCBs 同族体分布情况见图 2。

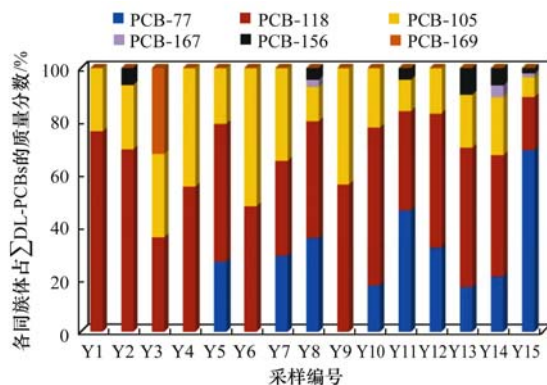


图2 黄河各采样点沉积物中 DL-PCBs 同族体分布情况

Fig. 2 Congener distribution pattern of DL-PCBs in each sampling point sediment of Yellow River

对照图 1 和图 2 可以看出,PCBs 同族体检出率较高的采样点主要位于经济发达、人口众多的地区,其中 Y8(石嘴山)是西北的工业重镇和主要的产煤基地,而 Y15(东营市)则是中国第二大油田胜利油田所在地,是山东省的石化工业中心,两个地区的能源工业都十分发达,而 Y14(开封)则是由于人口众多,生产生活活动复杂,这可能是导致三地 DL-PCBs 同族体检出率较高的原因。相比而言乡村偏远地区和经济欠发达地区则同族体组成较为简单、浓度较低,主要为四氯代和五氯代同族体。

以 DL-PCBs 同族体占 $\sum$ DL-PCBs 百分比为变量做主成分分析,主成分 1 和主成分 2 的累积贡献率为 65.4%。通过图 3 可以看出, Y1(玛曲)、Y4(青城桥)、Y6(青铜峡)、Y9(都思图河入黄口)这些受人类活动影响较弱的采样点位于图中 A 区,其 DL-PCBs 的成分组成相似,以四氯代和五氯代 PCBs 同族体为主。由于低氯代 PCBs 在环境中易降解,高氯代的 PCBs 难挥发性,相比而言中间氯代(四氯代和五氯代)的多氯联苯更具迁移能力^[20],由此可见,上述乡村偏远地区沉积物中的 PCBs 主要受到外来来源的影响。而 B 区主要包括经济欠发达地区的 Y5(白银)、Y7(银古公路桥)、Y10(巴彦淖尔)、Y12(吴堡)这 4 个采样点。而 C 区中两个采样点 Y2(贵德)和 Y13(三门峡)虽然同族体检出率不高但

都检出了 PCB-156。而两个采样点附近都有大型水电站——龙羊峡水电站和三门峡水电站,其中龙羊峡水电站于 1987 年投入运行,而三门峡水电站于 1973 年投入运行。在我国, PCBs 主要用于电力变压器和电容器^[21], PCB-77、PCB-105、PCB-118、PCB-156 是这些变压器油中的 DL-PCBs 主要的同族体^[22]。尽管 PCBs 在我国 1974 年就禁止生产,但到 80 年代初才基本停止生产,世界上停止生产 PCBs 则是在 1993 年^[23]。但是由于当时一些人为原因,禁止生产 PCBs 之后,仍继续使用和进口含 PCBs 的设备^[24]。由此可见,上述两个采样点沉积物中 PCBs 的成分可能受到的水电站的影响。图 3 中 D 区中: Y8(石嘴山)、Y11(包头)、Y14(开封)、Y15(东营)这 4 个采样点均位于工业发达、人口众多的地区,其沉积物中 DL-PCBs 的组成彼此差异较大,说明该区域内 PCBs 的来源较多,影响因素也非常复杂。在整个黄河 15 个采样点中,仅在位于兰州市下游的 Y3(什川桥)检出了 PCB-169,这与其他采样点不同, Xie 等^[25]研究了黄河三角洲土壤中 PCBs 的来源,发现当地石化工业的贡献率为 77.1%,而什川桥位于我国西部最大的炼油化工企业兰州石化的下游, PCB-169 是否为石化工业产生的特征同族体有待进一步研究。

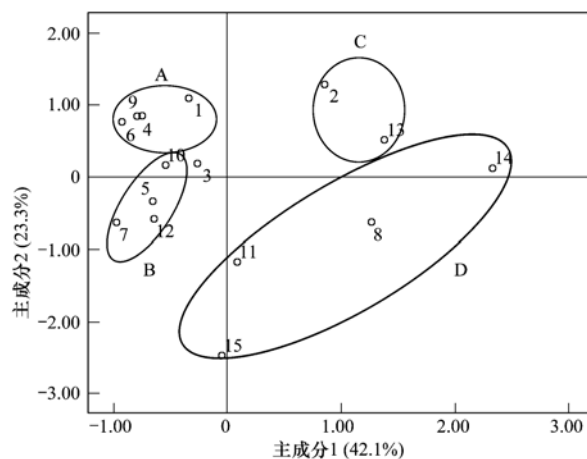


图3 黄河各采样点沉积物中 DL-PCBs 组分主成分(PCA)得分图

Fig. 3 Principle component analysis (PCA) score plot of the component of DL-PCBs of each sampling point sediment in Yellow River

2.3 黄河流域 $\sum$ DL-PCBs 的毒性当量及生态风险评价

采用世界卫生组织(WHO)规定的 12 种类二噁英多氯联苯的毒性因子^[26],计算黄河流域沉积物的

$\sum$ DL-PCBs 的类二噁英毒性当量(以 dw 计,下同)在 $0.0014 \sim 0.0231 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,平均毒性当量为 $0.0073 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$. 毒性当量最低点为玛曲 ($0.0014 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$), 最高点为东营 ($0.0231 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$). Ren 等^[13] 研究中分析了广东东江的沉积物中 $\sum$ DL-PCBs 的水平,其 TEQ 为 $0.039 \sim 0.44 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$, Li 等^[16] 研究中海河的沉积物中 $\sum$ DL-PCBs 的 TEQ 为 $0.07 \sim 0.53 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 孙炯辉^[17] 分析厦门九龙湾及西港沉积物中的 $\sum$ DL-PCBs,其 TEQ 的范围 $0.0024 \sim 0.0945 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$, Hui 等^[3] 研究了长江口沉积物中的 $\sum$ DL-PCBs 的 TEQ 范围为 $0.11 \sim 1.01 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 上述河流的 $\sum$ DL-PCBs 的毒性当量均高于本研究. 而埃及尼罗河沉积物中的 $\sum$ DL-PCBs 毒性当量为 $0.06 \sim 0.37 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[7], 韩国的汉江沉积物中为 $0.005 \sim 0.626 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[8], 德国易北河沉积物为 $0.0007 \sim 46.8 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[9], 美国萨吉诺河沉积物为 $1.4 \sim 82.6 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[10], 这些国外河流均明显高于本研究. 近年来国内外研究中沉积物 DL-PCBs 的 TEQ 均值和本研究中均值的比较见图 4. 从中可见黄河流域 DL-PCBs 的毒性当量在世界范围内处于较低水平. Hemming 等^[27] 提出了针对沉积物中 PCDD/Fs 对生物的风险评价标准:认为当 TEQ 值为 $0 \sim 10 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,对生物没有风险(no risk),而 TEQ 值为 $10.01 \sim 20 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $20.01 \sim 30 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $30.01 \sim 50 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $50.01 \sim 80 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时分别对应低风险(lowest possible risk level)、可能有风险(possible

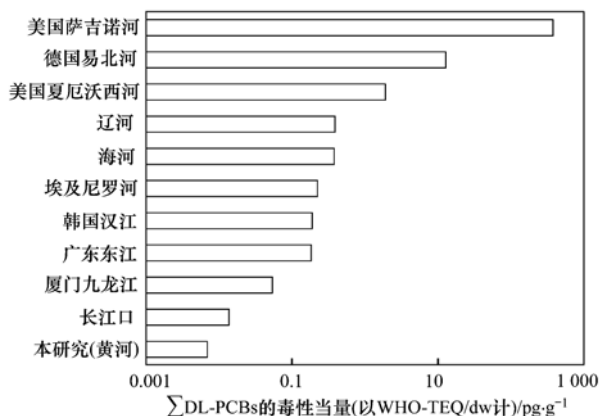


图 4 不同河流沉积物中 DL-PCBs 的毒性当量 (TEQ) 均值的比较

Fig. 4 Comparison of the mean TEQ of DL-PCBs among the sediments of different rivers

risk)、风险可能性大(probable risk)、对某些物种存在风险(risk to some portion of populations of special concern to the service). 参照其标准,本研究认为黄河沉积物中 DL-PCBs 的毒性较低,并不会对生物产生威胁.

2.4 黄河流域 $\sum$ DL-PCBs 水平与人均 GDP 的相关性

PCBs 最主要的来源就是各种工业的生产过程及生活消费,很多研究^[8,18,27]表明 PCBs 的浓度在经济发达地区的浓度要高于偏远地区,所以 $\sum$ DL-PCBs 水平很可能与当地的经济发展情况有关,而人均 GDP 则是反映地区经济发展情况的重要指标. 本研究中各采样点的采样当年人均 GDP(采样点如果位于乡村地区则选择采样点所属县的经济数据,如果采样点位于城市则选择该城市市辖区的经济数据)与 $\sum$ DL-PCBs 水平相关性见图 5(按人均 GDP 大小排序). 整体来看, $\sum$ DL-PCBs 的水平随着人均 GDP 的升高而上升. $\sum$ DL-PCBs 水平与人均 GDP 呈现显著性相关[Pearson 相关系数 $r = 0.888 (P < 0.001)$],说明 $\sum$ DL-PCBs 的浓度和当地的经济发展状况显著相关,与当地的生产生活活动有关.

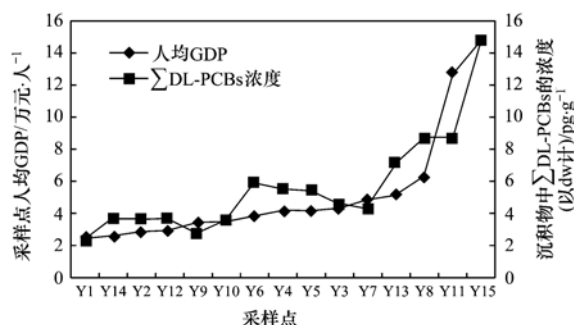


图 5 黄河流域沉积物中 $\sum$ DL-PCBs 水平与黄河各采样点人均 GDP 的相关性

Fig. 5 Correlation between the concentrations of $\sum$ DL-PCBs in the Yellow River's sediments and the GDP per capita

3 结论

(1) 总体来看黄河流域沉积物中 DL-PCBs 浓度及毒性当量低于国内外其它河流,且近年来其浓度有下降的趋势.

(2) 黄河底泥中 DL-PCBs 同族体主要以四氯代和五氯代的为主,其中 PCB-105 和 PCB-118 的检出率为 100%,乡村地区的 DL-PCBs 成分组成较为简

单,主要受到外来源的影响. 经济欠发达地区的 DL-PCBs 成分组成较为相近,而工业发达、人口众多地区的 DL-PCBs 成分组成复杂,地区之间差异较大. 当地的石化企业或者水利水电设施可能对沉积物 DL-PCBs 的组分产生影响.

(3) 研究中发现 $\sum$ DL-PCBs 的浓度与人均 GDP 具有显著相关性,说明黄河流域 DL-PCBs 的污染水平和当地经济发达程度有关,经济发达地区的 $\sum$ DL-PCBs 水平高于偏远地区.

参考文献:

- [1] USEPA. PCBs: Cancer Dose-response Assessment and Application to Environmental Mixtures [S]. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 1996.
- [2] He M C, Sun Y, Li X R, *et al.* Distribution patterns of nitrobenzenes and polychlorinated biphenyls in water, suspended particulate matter and sediment from mid-and down-stream of the Yellow River (China) [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(3): 365-374.
- [3] Hui Y M, Zheng M H, Liu Z T, *et al.* PCDD/Fs and dioxin-like PCBs in sediments from Yellow Estuary and Yangtze Estuary, China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, **83**(4): 614-619.
- [4] Yang Z F, Shen Z Y, Gao F, *et al.* Occurrence and possible sources of polychlorinated biphenyls in surface sediments from the Wuhan reach of the Yangtze River, China [J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(11): 1522-1530.
- [5] Yang H Y, Zhuo S S, Xue B, *et al.* Distribution, historical trends and inventories of polychlorinated biphenyls in sediments from Yangtze River Estuary and adjacent East China Sea [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **169**: 20-26.
- [6] 中华人民共和国国家统计局. [http://www. stats. gov. cn/](http://www.stats.gov.cn/).
- [7] El-Kady A A, Abdel-Wahhab M A, Henkelmann B, *et al.* Polychlorinated biphenyl, polychlorinated dibenzo-*p*-dioxin and polychlorinated dibenzofuran residues in sediments and fish of the River Nile in the Cairo region [J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(9): 1660-1668.
- [8] Kim K S, Lee S C, Kim K H, *et al.* Survey on organochlorine pesticides, PCDD/Fs, dioxin-like PCBs and HCB in sediments from the Han river, Korea [J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(5): 580-587.
- [9] Gotz R, Bauer O H, Friesel P, *et al.* Vertical profile of PCDD/Fs, dioxin-like PCBs, other PCBs, PAHs, chlorobenzenes, DDX, HCHs, organotin compounds and chlorinated ethers in dated sediment/soil cores from flood-plains of the river Elbe, Germany [J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(3): 592-603.
- [10] Kannan K, Yun S H, Ostaszewski A, *et al.* Dioxin-like toxicity in the Saginaw River Watershed: polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins, dibenzofurans, and biphenyls in sediments and floodplain soils from the Saginaw and Shiawassee Rivers and Saginaw Bay, Michigan, USA [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, **54**(1): 9-19.
- [11] Zhao B, Zhou Y W, Chen G Z. The effect of mangrove reforestation on the accumulation of PCBs in sediment from different habitats in Guangdong, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, **64**(8): 1614-1619.
- [12] Wang H S, Du J, Leung H M, *et al.* Distribution and source apportionments of polychlorinated biphenyls (PCBs) in mariculture sediments from the Pearl River Delta, South China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **63**(5-12): 516-522.
- [13] Ren M, Peng P A, Chen D Y, *et al.* Patterns and sources of PCDD/Fs and dioxin-like PCBs in surface sediments from the East River, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **170**(1): 473-478.
- [14] Zhao X F, Zhang H J, Fan J F, *et al.* Dioxin-like compounds in sediments from the Daliao River Estuary of Bohai Sea: distribution and their influencing factors [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **62**(5): 918-925.
- [15] Zhang H J, Zhao X F, Ni Y W, *et al.* PCDD/Fs and PCBs in sediments of the Liaohe River, China: levels, distribution, and possible sources [J]. *Chemosphere*, 2010, **79**(7): 754-762.
- [16] Li C, Zheng M H, Gao L R, *et al.* Levels and distribution of PCDD/Fs, dl-PCBs, and organochlorine pesticides in sediments from the lower reaches of the Haihe River basin, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(2): 1175-1187.
- [17] 孙炯辉. 厦门九龙江河口及西港表层沉积物中 PCDD/Fs、DL-PCBs 的含量分布、组成及来源 [D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [18] You H, Ding J, Zhao X S, *et al.* Spatial and seasonal variation of polychlorinated biphenyls in Songhua River, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2011, **33**(3): 291-299.
- [19] Liu J S, Liu W P. Distribution of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans (PCDDs/Fs) and dioxin-like polychlorinated biphenyls (dioxin-like PCBs) in the soil in a typical area of eastern China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **163**(2-3): 959-966.
- [20] Wania F, Dugani B C. Assessing the long-range transport potential of polybrominated diphenyl ethers: A comparison of four multimedia models [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, **22**(6): 1252-1261.
- [21] 郑明辉, 刘鹏岩, 包志成, 等. 二噁英的生成及降解研究进展 [J]. *科学通报*, 1999, **44**(5): 455-464.
- [22] 吴水平, 印红玲, 刘碧莲, 等. 废弃电容器封存点及旧工业场地多氯联苯的污染特征 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3277-3283.
- [23] Breivik K, Sweetman A, Pacyna J M, *et al.* Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners-a mass balance approach: 1. Global production and consumption [J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, **290**(1-3): 181-198.
- [24] Shao C. Status and prevention strategies of PCBs in China [A].

- In: Memoirs of Seminar on Persistent Organic Pollutants [C]. Beijing: SEPA, 2001. 70.
- [25] Xie W J, Chen A P, Li J Y, *et al.* Topsoil dichlorodiphenyltrichloroethane and polychlorinated biphenyl concentrations and sources along an urban-rural gradient in the Yellow River Delta [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(9): 1655-1661.
- [26] Van den Berg M, Birnbaum L S, Denison M, *et al.* The 2005 World Health Organization reevaluation of human and Mammalian toxic equivalency factors for dioxins and dioxin-like compounds [J]. Toxicological Sciences, 2006, **93**(2): 223-241.
- [27] Hemming J M, Brim M S, Jarvis R B. A survey of dioxin and furan compounds in sediments of Florida Panhandle Bay systems [J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, **46**(4): 512-521.
-

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjcx.ac.cn>)。该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用。目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行。作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可。如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系。

邮政地址:北京市海淀区双清路18号《环境科学》编辑部

邮 编:100085

电 话:010-62941102,010-62849343

传 真:010-62849343

E-mail:hjcx@rcees.ac.cn

网 址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i> (3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i> (3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i> (3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i> (3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i> (3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i> (3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i> (3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i> (3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i> (3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i> (3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i> (3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i> (3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i> (3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i> (3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i> (3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i> (3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i> (3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i> (3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i> (3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i> (3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i> (3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i> (3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(Ⅲ) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i> (3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i> (3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i> (3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i> (3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i> (3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i> (3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i> (3632)

《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9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 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

国内外公开发行人