

内循环厌氧膨胀床反应器颗粒污泥特性

陈敏, 吴静, 陆正禹, 吴伟伟

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要:研究了内循环厌氧膨胀床反应器(the internal circulation anaerobic expanded bed reactor, ICAEB reactor)的颗粒污泥特性。结果表明,该反应器在平均 COD 容积负荷 $28.2 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 下稳定运行时,平均 COD 去除率为 89.0%,内循环比约 12.5。反应器中培养出普通颗粒污泥和悬浮颗粒污泥。位于反应器第 2 反应区液面的悬浮颗粒污泥层具有动态稳定性,相对稳定的运行条件可降低其对反应器的不利影响,必要时也可采取适当的措施予以清除。

关键词:内循环厌氧膨胀床反应器;内循环;厌氧颗粒污泥;悬浮颗粒污泥

中图分类号:X703 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2004)06-0127-05

Characteristics of Granular Sludge of the Internal Circulation Anaerobic Expanded Bed Reactor

CHEN Min, WU Jing, LU Zheng-yu, WU Wei-wei

(Department of Environment Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Granular sludge characteristics of the Internal Circulation Anaerobic Expanded Bed (ICAEB) reactor is reported. Experimental results show that the mean COD removal was 89.0% and the internal circulation flow rate was about 12.5 when the reactor running steadily with the mean COD volumetric loading rate $28.2 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$. General granular sludge and suspended granular sludge are cultured in the reactor. The suspended granular sludge layer found in the fluid level of the second reaction section is dynamically stable. Keeping comparative steady operational condition could reduce the adverse influence of the suspended granular sludge layer, if necessary, suitable measure could be adopted to remove the overabundant suspended granular sludge off.

Key words: internal circulation anaerobic expanded bed reactor; internal circulation; granular sludge; suspended granular sludge

UASB 反应器是目前应用最广的高效厌氧反应器,但该反应器内部泥水混合较差,有碍反应器内全部微生物作用的发挥以及微生物和有机物间的传质;当反应器内液相和气相上升流速较高时,常出现颗粒污泥流失,导致运行不稳定,这些不足限制了反应器有机负荷或水力负荷的进一步提高^[1~3]。在 UASB 反应器的基础上发展起来的内循环厌氧(IC)反应器通过内循环系统和分级处理技术解决了这些问题:IC 反应器的流体循环在第 1 反应区造成较高的液相和气相上升流速,提高了泥水混合程度,强化了微生物和有机物间的传质;液相和气相上升流速较低的第 2 反应区既能继续降解有机物,也避免了颗粒污泥流失,保证了 IC 反应器出水水质和运行稳定性,但是内循环厌氧反应器存在构造较复杂的不足^[3,4]。本研究借鉴了 IC 反应器的内循环和分级处理的概念,设计了一种结构较为简单的新型厌氧反应器——内循环厌氧膨胀床反应器(the internal circulation anaerobic expanded bed reactor, ICAEB reactor),并获得实用新型专利。关于 ICAEB 反应器的运行和颗粒污泥的特性尚未见报道。

1 ICAEB 反应器的结构与原理

ICAEB 反应器由第 1 反应区(高负荷初处理区)、第 2 反应区(低负荷精处理区)、升流管、降流区、气液分离区和沉淀区组成。第 2 反应区与沉淀区合建。第 2 反应区不设三相分离器和第 1 反应区三相分离器简化等措施的采用使 ICAEB 反应器与 IC 反应器相比,具有结构简单、造价较低和操作管理方便等优点。ICAEB 反应器结构示意图 1。

ICAEB 反应器的工作方式:进水从反应器底部进入第 1 反应区与颗粒污泥及回流液混合,进水有机物在第 1 反应区被部分降解后随混合液经升流管进入第 2 反应区被继续降解;脱气后的部分泥水混合液由导流筒下端的窄缝进入沉淀区进行泥水分离,上清液由出水管排出,沉淀下的颗粒污泥下滑到第 2 反应区下部随其他泥水一起回流到反应器底

收稿日期:2003-11-11;修订日期:2004-01-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50308013)

作者简介:陈敏(1980~),女,安徽阜阳人,硕士研究生,主要研究方向为废水厌氧生物处理。

部,与进水混合重新进入循环;收集的沼气从气液分离区顶部经沼气管导出。

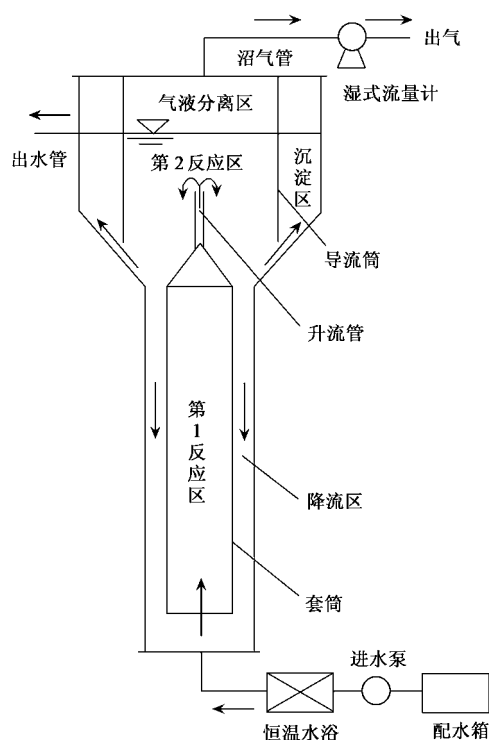


图1 内循环膨胀床反应器试验流程

Fig.1 Flow process chart of the ICAEB reactor

2 试验材料与方法

(1) 试验装置 本试验采用的反应器由有机玻璃制成,有效容积 9.7 L,总高度 1.7 m.反应器内水温维持在 35 ~ 37 °C.具体流程见图 1.

(2) 试验用水 试验用水为葡萄糖配水,按 COD : N : P = 150 : 5 : 1 的比例加入葡萄糖、尿素和磷酸二氢钾,同时加入微量元素 (Fe = 0.25 mg/L, Co = 0.05 mg/L, Mo = 0.05 mg/L, Ni = 0.05 mg/L) 和酵母膏 (170 mg/L),并加入碳酸氢钠调节进水 pH 值在 7.0 左右.

(3) 接种污泥 种泥为某啤酒厂 UASB 反应器内的颗粒污泥,黑色,粒径以 0.4 ~ 1.4 mm 为主,最大比产甲烷速率为 504 mL/(g·d),VSS/SS = 0.682.接种后用葡萄糖自配水浸泡 24 h 后连续进水.

(4) 检测项目及方法 COD:YL-IA 型 COD 速测仪^[2];内循环量:COD 法^[2];SS、VSS:重量法;厌氧颗粒污泥活性:污泥最大比产甲烷速率表示^[5];颗粒污泥粒径分布:湿式筛法^[2];颗粒污泥比重:湿密度测量法^[6];颗粒污泥平均沉降速率:1 m 水柱法^[2];颗粒污泥微生物相:扫描电子显微镜观察.

3 试验结果与讨论

3.1 试验结果

ICAEB 反应器运行共 143 d,根据反应器进水 COD 容积负荷和 COD 去除率分为 3 个运行阶段,分别为启动阶段(第 1 ~ 56 天)、提高负荷阶段(第 57 ~ 113 天)和稳定运行阶段(第 114 ~ 143 天).反应器进水 COD 浓度、COD 容积负荷、出水 COD 浓度和 COD 去除率随运行时间的变化规律如图 2 所示.

启动阶段的第 1 ~ 14 天,进水 COD 浓度为 3000 mg/L 左右,因进水泵故障进水为 1.7 ~ 2.9 L/h,波动较大,进水 COD 容积负荷平均为 18.2 kg/(m³·d),COD 去除率低于 30%;在第 15 天,将 COD 浓度降低为 2000 mg/L 左右,流量约 2.3 L/h, COD 去除率逐渐升高,在第 42 天,COD 容积负荷为 11.4 kg/(m³·d),COD 去除率升高到 51%,观察到稳定连续内循环.第 48 天,COD 容积负荷约 11.0 kg/(m³·d),出水 COD 浓度 371 mg/L,COD 去除率达到 81.4%.持续运行 8 d 后,启动阶段结束.

第 57 ~ 113 天为提高负荷阶段,通过增大进水 COD 浓度的方式提高反应器容积负荷,在第 83 天,COD 容积负荷为 19.3 kg/(m³·d),COD 去除率 81.6%,内循环比为 6.1;第 101 天,COD 容积负荷为 24.2 kg/(m³·d),COD 去除率 83.7%,内循环比为 9.7.

第 114 ~ 143 天为稳定运行期,进水 COD 浓度约 5000 mg/L,平均 COD 容积负荷为 28.2 kg/(m³·d),平均内循环比约 12.5,平均 COD 去除率为 89.0%.在第 123 天,进水流量过大使配水箱内配水提前用完,导致反应器进水停止并泵入大量空气,进而导致此后反应器运行状况恶化,但 COD 去除率仍在 80% 左右.

3.2 颗粒污泥特性

ICAEB 反应器中培养出 2 种颗粒污泥,即普通颗粒污泥和悬浮颗粒污泥.

3.2.1 颗粒污泥的物理性质和生物活性

2 种颗粒污泥外观及剖面如图 3 所示.普通颗粒污泥外观为不规则椭球形,黑灰色,表面较粗糙,且都有裂痕,个别表面有明显的孔洞,剖面较为密实平整,粒径以 0.6 ~ 1.0 mm 为主,比重约 1.08,平均沉降速率为 23.2 ~ 53.7 m/h,粒径与平均沉降速率呈明显的正线性相关.其活性相对较高,最大比产甲烷速率稳定在 800 mL/(g·d) 左右.

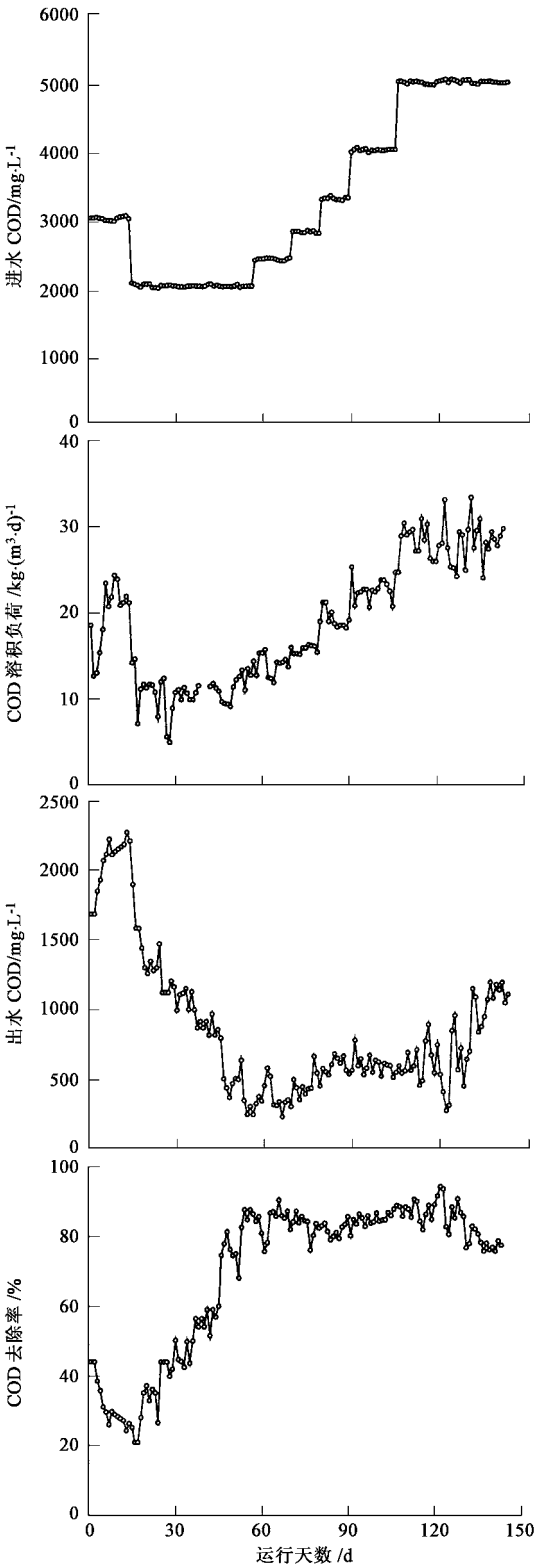


图2 进水 COD 浓度、COD 容积负荷、出水 COD 浓度、COD 去除率随运行时间的变化

Fig.2 Time course of influent COD concentration, COD volumetric loading rate, effluent COD concentration and COD removal

在第 2 反应区液面聚集的悬浮颗粒污泥呈黑

色,为光滑不规则椭球形,剖面松散,裂痕较丰富,中心有较大的孔洞,孔洞一般不与表面连通,粒径以 0.8~1.4 mm 为主,比重约 0.78,在水中呈悬浮状态,不具有沉降性能.其活性相对较低,最大比产甲烷速率约 400 mL/(g·d) .

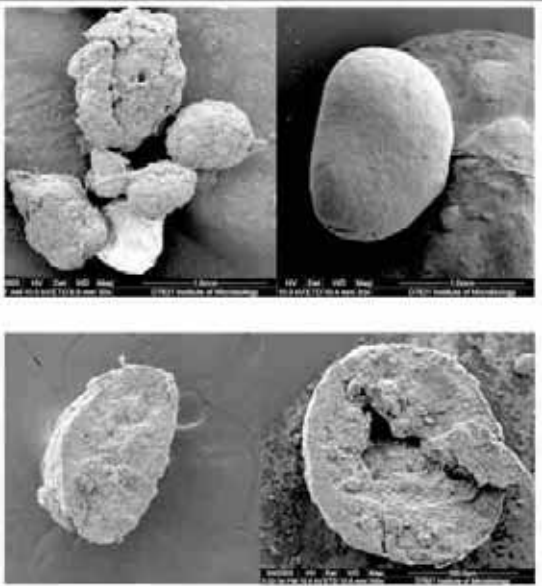


图3 颗粒污泥外观

Fig.3 Appearance of granular sludge

3.2.2 颗粒污泥的微生物相

普通颗粒污泥表面及剖面微生物相照片如图 4 所示.表面菌群呈分区分布,各区菌种相对单一,菌体饱满,排列较紧密,有分别以丝状菌、竹节状杆菌和短杆菌为优势菌种的聚集区(图 4a、b、c).剖面菌种呈分层分布:表面以丝状菌、竹节状杆菌和短杆菌为优势菌种;剖面边缘内侧主要为短杆菌(图 4d);剖面 1/2 处以短杆菌、竹节状杆菌为优势菌种,有少量的八叠球菌,并有大量死亡的菌体(图 4e);剖面中心短杆菌为优势菌种(图 4f) .

悬浮颗粒污泥电镜照片如图 5 所示.表面菌群混杂分布,以丝状菌和链球菌为主,夹杂有短杆菌、球菌和少量竹节状杆菌,较松散,并有死亡菌体(图 5a、b).剖面菌种分层分布现象不明显:剖面边缘内侧以球菌和短杆菌为主,菌体较饱满(图 5c);剖面 1/2 处以球菌和八叠菌为优势菌种(图 5d);剖面中心一般为孔洞,洞壁为成片的死亡菌体残留下来的细胞壁,其中夹杂有一定数量的球菌、短杆菌(图 5e),局部区域以菌体饱满的竹节状杆菌为主(图 5f),这种结构也是导致悬浮颗粒污泥具有悬浮性能的原因之一.

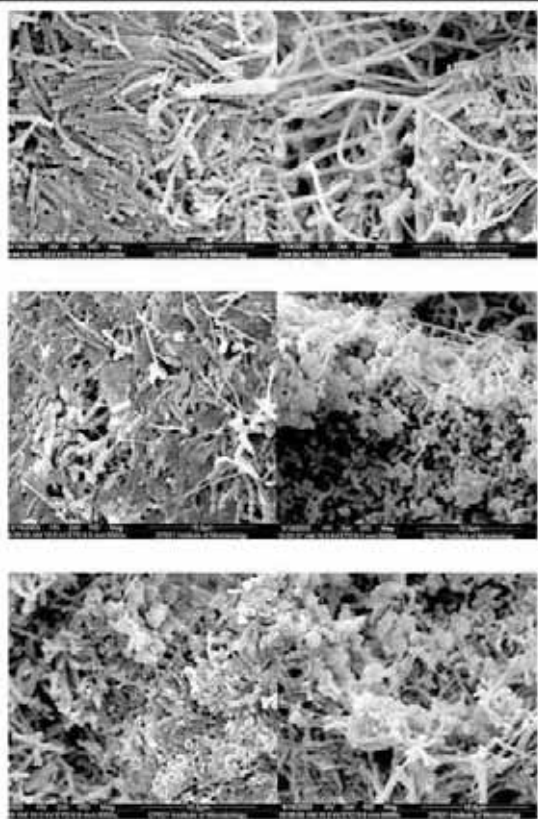


图 4 普通颗粒污泥微生物相

Fig. 4 Microorganism photograph of general granular sludge

3.2.3 悬浮颗粒污泥形成原因及其影响

脱气性能不好的厌氧颗粒污泥沉降性能较差,会漂浮到反应器的液面,故在 UASB 和 IC 反应器中也曾发现少量悬浮颗粒污泥随出水排出。在 ICABE 反应器第 2 反应区液面出现的悬浮颗粒污泥由少到多,逐渐聚集成层,其厚度曾达到 80 mm 左右。悬浮颗粒污泥层对进水 COD 的去除率占 COD 总去除率的 0.4%~6.7%。

悬浮颗粒污泥层的形成可以分为 3 个阶段:第 1 阶段为悬浮颗粒污泥层的初始形成阶段,即少量普通颗粒污泥脱气性能不好,导致比重较小,进入第 2 反应区后,由于反应器结构及运行特点,这些颗粒污泥不能随第 2 反应区的混合液向下进入降流区或沉淀区,只能在第 2 反应区液面积累,形成初始的悬浮颗粒污泥层;第 2 阶段为悬浮颗粒污泥层的成长和发展阶段,当悬浮颗粒污泥层不断变厚时,第 2 反应区液面的通气效果下降,反应产生的沼气会连续不断地突破污泥层的薄弱点逸出,并将部分悬浮颗粒污泥和少量非悬浮颗粒污泥带出第 2 反应区液面,散落在悬浮颗粒污泥层上,使悬浮颗粒污泥层向

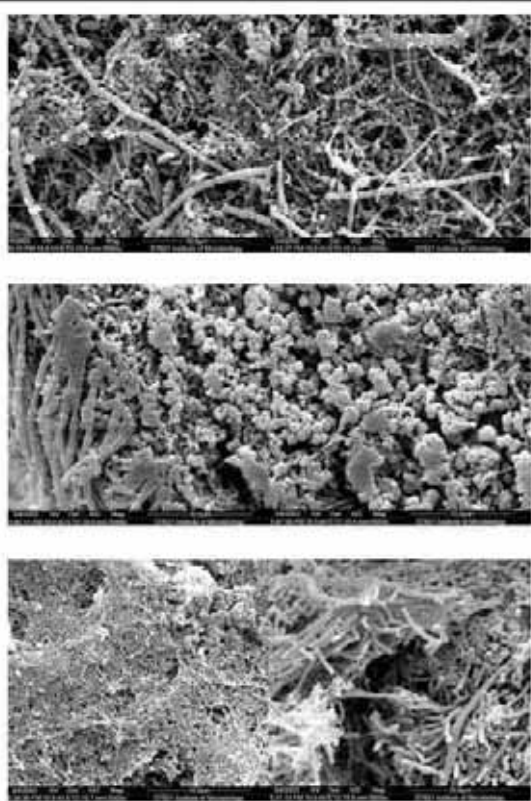


图 5 悬浮颗粒污泥微生物相

Fig. 5 Microorganism photograph of suspended granular sludge

气液分离区发展,另外悬浮颗粒污泥层也向液面以下发展,甚至到达升流管上端出口以下位置,这时悬浮污泥层也会截留部分普通颗粒污泥,由于停留时间长,此部分颗粒污泥继续长大,内部菌体难以得到充足的营养,导致内部菌体死亡(见图 5e),也转化为悬浮颗粒污泥;第 3 个阶段是悬浮颗粒污泥层的动态稳定阶段,向气液分离区发展的悬浮颗粒污泥层由于受出水水位的限制,向上增长到一定高度就停止增长,而液面以下的悬浮颗粒污泥层到达升流管以下的特定部位后,新形成的悬浮颗粒污泥会被脱气后的混合液携带进入沉淀区排出,或随回流液进入第 1 反应区并在第 1 反应区和升流管内被破碎,所产生的碎片作为形成新的普通颗粒污泥的核心。悬浮颗粒污泥层的稳定阶段是一个动态的过程,悬浮颗粒污泥层的厚度随反应器的容积负荷等运行条件的改变而变化。在一定的范围内保证相对稳定的运行条件(不发生经常性地很长时间地停止进水 and 突然大幅度降低容积负荷等状况),可以使悬浮颗粒污泥层处于稳定阶段,从而降低其对反应器运行的不利影响,必要时也可以采取适宜的工程措施予

以清除。

4 结论

(1) ICAEB 反应器在处理葡萄糖配水、进水 COD 浓度 5 000 mg/L、平均 COD 容积负荷 28.2 kg/(m³·d) 时能够稳定运行, 平均 COD 去除率为 89.0%, 内循环比约 12.5 左右。反应器内培养出普通颗粒污泥和悬浮颗粒污泥。

(2) 普通颗粒污泥物理及生化特性与 UASB、IC 反应器内培养的颗粒污泥相似, 微生物相呈分层分区分布, 最大比产甲烷速率约为 800 mL/(g·d)。

(3) 悬浮颗粒污泥呈黑色, 为光滑不规则椭圆形, 粒径以 0.8 ~ 1.4 mm 为主, 密实度差, 中心有较大的不与表面连通的孔洞, 不具有沉降性能, 表面微生物混杂分布, 中心一般为孔洞, 洞壁上存在大片死亡菌群, 最大比产甲烷速率约 400 mL/(g·d)。

(4) 部分颗粒污泥脱气性能不好和 ICAEB 反应器结构与运行特点是 ICAEB 反应器中悬浮颗粒污泥层形成的原因, 相对稳定的运行条件可以降低其对反应器的不利影响, 必要时也可以采取适宜的工程措施予以清除。

参考文献:

- [1] Pereboom J H F, Vereijken T L F M. Methanogenic granule development in full scale internal circulation reactors[J]. Wat. Sci. Tech., 1994, 30(8): 9 ~ 21.
- [2] 黄建东. 内循环厌氧反应器处理 COD3000 mg/L 葡萄糖自配水试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2002. 3 ~ 21.
- [3] 吴静, 陆正禹, 胡纪萃, 顾夏声. 新型高效内循环(IC)厌氧反应器[J]. 中国给水排水, 2001, 17(1): 26 ~ 27.
- [4] 张忠波, 陈吕军, 胡纪萃. IC 反应器技术的发展[J]. 环境污染与防治, 2000, 22(3): 39 ~ 41.
- [5] 吴唯民, 胡纪萃, 顾夏声. 厌氧污泥的最大比 COD 去除速率的间歇试验测定法[J]. 中国给水排水, 1985, 1(4): 30 ~ 36.
- [6] 刘安波. 常温下 UASB 反应器中颗粒污泥的形成及其性能研究[D]. 北京: 清华大学, 1988. 41 ~ 42.

中美两国面向斯德哥尔摩公约的持久性有机污染物 (POPs) 控制决策管理和科学研究沟通研讨会

持久性有机污染物具有长期残留性、生物蓄积性, 并可沿食物链传播, 通过挥发和沉积在全球范围内迁移, 已被国际社会视为必须立即采取行动的全球性环境问题。中国政府已于 2001 年 5 月 23 日在瑞典首都斯德哥尔摩签署了《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》。作为化学品生产大国, 中国在 POPs 的控制决策管理和科学研究方面仍面临巨大挑战。

控制 POPs 的行动需要科学家、决策者、企业界、非政府组织等各相关方的共同参与, 因此需要建立科学研究和决策的信息沟通平台以改进 POPs 的控制行动, 保障国家履约计划的实施。针对以上问题, 中国国家环境保护总局、中国科学院、美国国家科学院、美国环境保护局、中国科学技术协会等单位于 2004 年 6 月 7 日至 10 日在北京联合召开了“面向斯德哥尔摩公约的中美持久性有机污染物 (POPs) 控制决策管理和科学研究沟通研讨会”。中国国家环境保护总局副局长汪纪戎、中国科学院副院长李静海院士、美国国家环保局首席科学家 Bruce Rodan 博士、美国科学院副院长 Richard Bissell 博士等 80 多位中美代表出席了会议。会议由中国科学院生态环境研究中心吕永龙教授和美国 Michigan 州立大学 John Giesy 教授共同主持。

本次大会的主要议题是: POPs 暴露、风险、对环境与人体健康影响以及相关替代、削减技术; POPs 管理控制政策及履行斯德哥尔摩公约面临的机遇和挑战; POPs 决策管理和科学研究的信息交流。近 40 位代表踊跃投稿, 并在大会上做了学术报告。大会收集的部分优秀学术论文经专家评审通过后, 将发表于 2005 年的《Chemosphere》专刊上。通过本次会议增强了 POPs 管理决策者和相关科学家间的交流, 为 POPs 污染控制政策的制定提供了科学支持, 提高了中国履行 POPs 国际公约的能力。中美双方在这些方面的交流与合作将对国际公约的履行产生积极的影响。

(供稿: 中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室环境管理与政策研究组)

(联系人: 罗维、史雅娟 电话: 62849118, E-mail: luow@mail.rcees.ac.cn)