



综述

二噁噁的主要来源、排放量及相关环境和健康标准

王敬贤 吴文忠

(中国科学院水生生物研究所;淡水生态与生物技术国家重点实验室,武汉 430072)

THE MAJOR SOURCES, ANNUAL EMISSION OF PCDD/F TO THE GLOBE AND RELATIVE STANDARDS FOR ENVIRONMENT AND HEALTH

WANG Jing-xian and WU Wen-zhong

(The State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology; Institute
of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072)

关键词:二噁噁;来源;排放;标准

Key words: Dioxins; Sources; Emission; Standards

中图分类号:X-652 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3207(2002)03-0286-09

二噁噁类化合物是一类氯代三环芳烃类化合物(PCDD/F),二噁噁具有致癌性和类似生物激素的作用,极小剂量的二噁噁就可能造成激素分泌的紊乱,影响青春期发育和引起神经、免疫系统损害。二噁噁的危害已得到公认,控制二噁噁的产生和排放乃是当前亟待解决的问题之一。二噁噁是工业生产或垃圾焚烧过程中的副产物,因此,不可能通过禁止生产或使用的方式来消除二噁噁,必须使用间接措施减少二噁噁进入环境,使其环境暴露水平减至最低。欲达此目的,关键是须了解PCDD/F的排放源及排放量,然后通过改进技术和限制排放等措施减少或消除二噁噁排放源。

由于二噁噁特殊的物理、化学、抗生物降解特性,它们能在环境中长时间地积累,能通过大气和水体长距离地迁移,并沉积和分散于整个环境介质中,因此,二噁噁几乎存在于全球生态系统所有的环境介质中,可以说地球上每一个人每一时刻都受到二噁噁化合物的暴露。二噁噁是高脂溶性而非水溶性,可在脂肪组织中进行生物积累和生物放大。因此,了解二噁噁在环境中迁移转化及最终危及人类的途径是非常重要的,它能帮助人们来减少二噁噁的危害,并使其对人类的危害达到最低水平提供科学依据。

收稿日期:2001-04-02; **修订日期:**2001-11-20

基金资助:国家自然科学基金(20077032);中国科学院(KZCX2410)资助项目

作者简介:王敬贤(1968—),女,湖北省仙桃市人;工程师;从事内分泌干扰物的研究

通讯作者:吴文忠(1968—),E-mail Address: wuwz@ihb.ac.cn

1 二噁噁的来源

有机物燃烧时能与无处不在的氯离子结合生成氯代甲烷和有机氯化物,因此自然界的燃烧过程有可能产生二噁噁。Bumb 等^[1]曾提出自然燃烧形成 PCDD/F 的观点。Nestrick 和 Sheffield 等人的研究^[2-3]证明森林和灌木起火是环境中二噁噁的一个重要来源。因为大多数森林火灾是由雷电引起的,因此有理由认为生态环境中痕量的二噁噁古已有之^[4],早期的 PCDD/F 可能是森林火灾、煤、碳等的燃烧产生。估计生物燃烧(包括木材)向大气释放 PCDD/F 的量约占大气总沉降量的 3%^[5],因此二噁噁的自然来源并不大。对湖泊底泥中 PCDD/F 的研究表明大约在 1935 年以前,PCDD/F 并没有在大范围内出现^[6]。有相当一部分来自湖泊沉积物的研究资料表明,环境中 PCDD/F 的丰度于 1935 至 1970 年之间至少比 1935 年以前增加了 25 倍^[7]。美国 EPA 对二噁噁的重新评估得出结论,环境中近几十年大量增加的 PCDD/F 主要来自人类活动^[8],特别是含氯废物的燃烧是 PCDD/F 进入环境的主要来源^[9]。根据人类活动方式和各国二噁噁研究资料,可将二噁噁来源划分为十大类:

钢铁厂:包括铸造、熔炼、焦炭厂

有色金属厂:铜、锌、铅、铝的一段、二段生产厂

电厂:以煤、天然气、原油、木材为燃料的发电厂

工业燃烧厂:以煤、天然气、原油、污泥、生物为燃料的在线生产的工厂

小型燃烧单元:大多数以煤、油、天然气为燃料的家用炉子和烟囱

废物焚烧:包括城市固废、危险废物、污泥、医院废物、废木材和火葬厂

道路交通:以含铅或无铅汽油或柴油为燃料的客车、巴士、卡车等

矿物质生产:水泥、石灰、玻璃、砖等的生产

化学工业:氯碱和有机氯等化工生产

其他:破碎、沥青混合、绿色草秆干燥、事故火灾、特殊燃烧和沉积物再释放等

从我国目前的工业结构和垃圾处理方式来分析,我国二噁噁的主要来源与西方国家有所不同。由于我国城市垃圾焚烧处理所占比例很小,因此二噁噁主要排放源来自化工生产的副产物,例如氯碱工业生产废渣、其他化工产品生产过程中的副产物、血吸虫防区大量使用的灭钉螺剂、五氯酚钠中的杂质、造纸废水等。

2 一些国家二噁噁的排放量及控制标准^[10]

为了控制二噁噁污染,建立全球二噁噁现存量数据库是非常必要的。大多数发达国家已调查了排入空气中二噁噁的量,有少数几个国家调查了向水、土壤介质排放二噁噁的量(表 1),从表 1 可看出进入水体介质中二噁噁的量与大气、土壤相比是较少的。

表 2 为欧洲 15 个国家二噁噁不同来源统计表,从表中可见废物焚烧是这些国家二噁噁的主要来源,占总排放量的 70%。认识到废物焚烧是重要的二噁噁排放源,采取强有力的措施,并制定了严格的排放标准(表 1)。因此随着控制措施的加强和技术的提高,可以相信未来垃圾焚烧产生二噁噁的总趋势将会不断下降。近年来在发达国家随着对城市固体废弃物焚烧技术的提高以及安装更先进的除尘装置,焚烧排放二噁噁的量将急剧下降。欧洲许多国家最近几年焚烧产生的二噁噁排放量较最初时期下降了 100—1000 倍^[11],

表 1 一些国家已知二噁英生成源向大气、水、土壤的年均排放量

(1995 年前后的资料)及垃圾焚烧排放标准

Tab. 1 PCDD/F annual fluxes of some countries from known sources into air, water, soil. (reference year 1995)
and emission standards of waste incineration

国家 Country	向大气的年排放量 Annual emissions to atmosphere (g I-TEQ/a)	向水体的年排放量 Annual emissions to water (g I-TEQ/a)	向土壤的年排放量 Annual emissions to soil (g I-TEQ/a)	垃圾焚烧排放标准 Emission standards of waste incineration (ng/m³)
美国	1200—7900	20	208	0.14—0.21
瑞典	22—88	1.6—5.1	35—52	0.1
丹麦	39—50	0.188	122.1—126.1	0.1
加拿大	290	5	173	—
比利时	661	3.77	485	0.1
奥地利	29			0.1
澳大利亚	150—2300			—
瑞士	181			0.1
法国	674—2737			0.1
德国	334			0.1
匈牙利	112			0.1
日本	3981—8436			0.5
荷兰	486			0.1
斯洛伐克	42			0.1
英国	569—1099	1.6—32.0	1500—12 000	0.1
年流量	10 514			—
芬兰	100—200			—
韩国	10.8			—
挪威	9.15			—
克罗地亚	95.5			—

表 2 一些国家二噁英的主要排放源(1995 年前后的资料)

Tab. 2 Major souces of PCDD/F emissions in some country (referencing approximately year 1995)

单位:gI-TEQ/a

国家 Country	钢铁厂 Iron and steel	有色金属厂 Nonfer- rous metals	电厂 Power plants	工业燃烧厂 Ind. comb plants	小型燃烧 单元 Small comb units	废物焚烧 废物 incine- ration	道路交通 Road trans- port	矿物质生 产 Mineral production	其他 Others	总计 Sum
奥地利	10.36	—	—	1.5	16.7	0.179	0	—	0.024	28.8
澳大利亚	10.0	1.0	—	35.5	15.1	1.70	0.35	0.18	86.5	150
比利时	59.6	107	2.31	7	122	303	1.7	54.2	4.66	661
瑞士	9.2	1.9	—	1.6	27.4	127	0.9	0.7	12.7	181
加拿大	53.6	0.2	4.6	15.6	42.7	156	8.7	2.8	5.7	290
德国	181	91.6	5.3	6.2	7.1	32.1	4.8	2.4	2.9	334
丹麦	7.63	—	2	—	3.17	25.3	0.2	0.08	0.26	38.7
法国	420	27	—	23	—	402	1	—	—	873
匈牙利	12.2	0.7	13.1	—	27.2	46.5	0.27	—	12.32	112
日本	250	—	—	—	—	3645	0.07	—	86.2	3981
荷兰	26	4	16.7	2.7	—	402	7	—	27.5	486
瑞典	2.01	4.43	—	—	4.25	3.01	0.88	2.86	4.82	22.3
斯洛伐克	7.83	1.17	6.82	—	—	26	0.35	0.04	0.19	42.4
英国	34	5.0	6.4	—	25.4	483	1.0	0.3	14.6	569
美国	—	560	—	...	62.5	1589	39.8	171	211	2744

美国近期焚烧产生二噁噁的排放量也较 20 世纪 80 年代末至 90 年代初下降了 30%^[12]。自 70 年代中期以来,美国东部 Great Lake 沉积物中 PCDD/F 浓度降低了 50%,欧洲许多国家牛奶、蔬菜、生物体等所含的二噁噁浓度近 20 多年来也有明显下降^[13—14]。

3 空气中二噁噁含量及质量标准

研究表明全球 90% 的二噁噁主要来源于含氯化合物的燃烧,因此,大气成为二噁噁主要的第一受纳体。西方国家许多大中城市早在 20 世纪 80 年代就陆续开展了空气中二噁噁背景值的调查研究,并先后制定了二噁噁空气质量标准。一些国家空气中 PCDD/F 的测定结果和制定的标准见表 3。

表 3 各国空气中 PCDD/F 的浓度 (pg/m³)

Tab.3 PCDD/F concentration in air of some countries

国家 Country	测定年度 Determined year	测定地区 Determined district	浓度(均值) Concentration	标准 Standard	资料来源 Reference source
日本	1990-1994	工业区附近住宅	0.01—1.30(0.59)		
		大城市	0.02—1.76(0.53)		
		中等城市	0.01—1.36(0.47)	0.8	[15]
		背景值	0.00—0.32(0.06)		
美国	1989	城市	0.08—0.18		
	1994	农村	0.05	0.60	[15-16]
		工业区	0.15		[15][17]
德国	1990	城市	0.07—0.35		
		农村	0.03—0.07	0.12	
	1990	Hessen	0.048—0.146		[18]
	1990	Hamburg	0.040—0.093		[19]
英国	1993	城市	0.04—0.10		[15]
	1994	Manchester	0.086		[20]
		London	0.067		
瑞典	1991	城市	0.024		
		城郊	0.013		[15]
荷兰	1993	工业区	0.015—0.125		[21]
		背景值	0.010—0.015		
斯洛伐克	1990	brno	0.02		[22]
加拿大				0.22	[16]
中国	1999	武汉市背景值	0.034		[23]

值得注意的是在远离工业区的极地地区——大西洋北部远海区和南极洲均测出了二噁噁。Join 等人于 1996 年 3 月至 1997 年 8 月在大西洋北部地区的 Bermuda 测得其空气中

PCDD/F 的平均浓度为 $15 \pm 7 \text{ fg/m}^3$, 同期在该地区的 Barbados 测得的值为 $27 \pm 7 \text{ fg/m}^3$ 。因此, 远海地区二噁英的平均背景浓度为 20 fg/m^3 ^[24]。Lugar 等人于 1993 至 1994 年期间在南极洲测得其空气中二噁英的背景浓度为 $2\text{--}50 \text{ fg/m}^3$ ^[25]。

4 全球二噁英的质量平衡

Brzuzy 和 Hites 研究证明了土壤可以用来估测来自大气沉降的 PCDD/F 的量^[6], 接着他们就通过研究测定全球范围的 107 个土壤样品。根据气候、地理因素将地球划分为五个沉降带, 测得二噁英平均沉降速率范围为 $18 \sim 610 \text{ ng.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ (表 4)。从大气沉降到陆地的全球沉降量为 $12500 \pm 1300 \text{ kg/a}$ ^[26]。

表 4 不同气候带二噁英平均沉降量

Tab. 4 Climate zone names, areas of climate zones, average total fluxes of PCDD/F to each zone, and confidence limit of average flux

气候带名称 Climate Zone	面积 Area 10^9 km^2	平均沉降量 Average Flux $\text{ng.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$	90% 置信度 90% Confidence Level
亚热带 Subtropical	0.4	610	90
温带 Temperate	2.4	280	52
北极 Polar/Boreal	2.2	41	6
热带 Tropical	5.5	25	7
干旱地区 Arid	3.7	18	8
总陆地面积 Total Land Area	14		

John 等人于 1993—1997 年间在远海地区 Bermuda 和 Barbados 两个监测站共采集 59 个空气样品, 估算 PCDD/F 进入世界海洋的干沉降速率为 $200 \pm 80 \text{ kg/a}$, 湿沉降速率为 $900 \pm 300 \text{ kg/a}$, 合计为 $1100 \pm 380 \text{ kg/a}$ ^[24], 对 Brzuzy 等人的研究进行了较好的补充, 因此全球沉降总量约为 13000 kg/a 。为了测定全球 PCDD/F 大气输入与大气沉降输出是否平衡, 需要统计全球向大气排放二噁英的量。该排放可分为两大类: 燃烧排放(主要)和化学排放(次要)。

PCDD/F 从来没有通过化学工业进行生产, 但它们却是其他化学品生产中的副产品, 如氯酚和氯碱^[27]。PCDD/F 另一化学来源是用氯进行木浆漂白, 结果, 使用该流程工艺的纸浆厂外底泥被 PCDD/F 污染^[28—29]。另外, 通过漂白木浆制作的纸产品如咖啡滤纸和牛奶桶已发现被 PCDD/F 污染^[30—31]。PCDD/F 的化学来源能引起局部环境污染, 除非这些化学品被焚烧, 否则其污染是不会扩散的, 因此, 化学污染将不在全球质量平衡中考虑。

燃烧过程被认为是环境被 PCDD/F 污染的原因, 一旦进入大气, PCDD/F 能被长距离传输, 最终通过干、湿沉降和化学转化而从大气中被转移。表 5^[26]列出了全球大气中 PCDD/F 的主要来源、排放因子和每年的排放量, 可见全球总的排放量约为 $3000 \pm 600 \text{ kg/a}$ 。但由于存在很多不确定因素, 如前苏联、中国、印度等国家没有有关排放的资料, 该数据可能低估了全球的二噁英排放。将排放与沉降($13000 \pm 2000 \text{ kg/a}$)相比, 沉降

量约为排放量的四倍以上,这种不平衡表明目前使用的估算方法有可能高估了沉降或低估了排放。另外,需要进一步提高测量的灵敏度和质量,需要提高对从大气向植物、水体、土壤沉降过程的了解,在比较排放和沉降中提高监测的置信水平。

表 5 主要二噁噁大气源排放因子、全球产生量、平均排放量(90% 置信水平)

Tab. 5 Emission factors, global production rates, average emissions,
and 90% confidence limits for major PCDD/F sources to atmosphere

排放源 Emission Source	排放因子 Emission Factor ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	产生量 Production Rate (10^9 kg/a)	排放量 Average Emission (kg/a)	90% 置信度 90% Confidence Level
城市固废焚烧	13	87	1,130	450
生物燃烧	0.04	8 700	350	140
铁金属生产	0.5	700	350	140
水泥窑(燃危险废物)	2.6	260	680	280
水泥窑(非危险废物)	0.2	1 600	320	130
二次铜熔炼	39	2	78	31
医院废物焚烧	22 ^a	4	84	35
无铅燃料燃烧	320 ^b	3,800 ^b	1	0.4
含铅燃料燃烧	2 800 ^b	3 800 ^b	11	5
合计(kg PCDD/F/a)			3 000	600
Total g I-TEQ/a			50 000	10 000

注:a:排放因子和产生量的数据仅适用于美国;b:排放因子的单位为 $\mu\text{g}/\text{kg}$,产生量的单位为 kg/a 。(1990 年的监测数据)

5 二噁噁对人的暴露途径、暴露水平和安全限值

PCDD/F 能直接通过大气传输而进入各种环境介质,如土壤、江河湖泊和海洋等。大气沉降可直接进入植物表面或进入土壤,土壤中的 PCDD/F 又能通过挥发、蒸腾吸收或颗粒物再悬浮附着在植物表面而被植物有效利用,土壤中的 PCDD/F 也可直接被植物地下部分——根吸收。进入水体的二噁噁大部分将沉积在底泥中,通过海藻、海草、真菌等富集,而后进入水体食物链;土壤沉积的二噁噁通过直接摄取,如蚯蚓、放牧动物的摄食作用进入食物链,最终导致二噁噁对人体的暴露。

PCDD/F 对食物的污染主要由农田里各种沉积物引起的二次污染、淤泥的不恰当使用,随意放牧,牛、鸡、鱼食用饲料的污染,以及氯漂白包装材料中污染物的转移等^[32]。很显然,二噁噁类化合物在目前环境中的存在水平,已经引起了大范围内野生动物体内的高水平积累,尤其是食鱼的鸟类和海洋动物^[33—35],最重要的影响表现为对内分泌系统、生长发育、生殖、神经、免疫功能的干扰破坏。

人群对二噁噁的接触具有不同的途径,包括直接通过吸入空气与摄入空气中的细粒子、污染的土壤及皮肤的吸收接触、食物消费等。人体接触二噁噁 90% 以上是通过饮食接触的,而动物性食品是其主要来源。二噁噁类化合物在生物组织中的持久性和累积性(特别是在动物体内),以及人体摄取含有微量二噁噁食物,导致了人群中二噁噁暴露的广

泛性和低剂量特征。人的二噁噁暴露途径可归纳为:空气→沉降→作物/牧草/土壤/水体→放牧动物/鱼→肉/奶→人类饮食。

欧洲和美国等工业化国家人群的二噁噁暴露水平为 $1\sim 3\text{pg TEQ/kg/d}$ ^[36],加上共平面PCBs的量则达 $2\sim 6\text{pg TEQ/kg/d}$;日本国人的二噁噁平均暴露水平与欧洲和美国基本相同或略低,为 0.96pg TEQ/kg/d ,加上PCBs的量则达到 2.41pg TEQ/kg/d 。

有关二噁噁引起健康问题的报道主要见之于职业暴露,如从事2,4,5-T生产的工人,和偶然的污染事故,如1976年Seveso工厂的污染事故,十几年后该地区成年人癌症死亡率明显增加;越南战争中从事喷洒橙剂(主要成分为2,4,5-T)的老兵出现代谢功能紊乱等症状;日本Yusho污染事件^[36]及中国鸭儿湖地区的污染现状^[37~38]等。到目前为止,还未见关于环境背景水平下的二噁噁暴露引起明显的人体健康问题的报道,但很多二噁噁毒性结果检验表明,非常低剂量的二噁噁就会引起毒性效应。为了对人接触二噁噁进行危险性评价,世界卫生组织(WHO)建立了重要的评价指标——每日耐受量(TDI),它是指人以此速率每日摄入二噁噁,通过一生在其体内富集,不致引起有害健康的安全阈值。1998年WHO根据所取得的最新毒理学研究成果,尤其是对神经系统和内分泌系统的毒性效应研究,规定二噁噁的每日耐受量(TDI)为 $1\sim 4\text{pg TEQ/kg/d}$ 。发达国家人群的平均二噁噁暴露水平基本在此范围之内,但应强调的是WHO最终目标是将人体摄入二噁噁的量减少到 1pg TEQ/kg/d 之下,因此在二噁噁监测和控制方面尚需要人们做大量而艰巨的工作。

参考文献:

- [1] Bumb R R, Crummett W B, Cutie S S, et al. Trace Chemistries of Fire: A Source of Chlorinated Dioxins [J]. *Science*, 1980, **210**: 385—390
- [2] Nestrick T J, Lamparski L L. Isomer-specific determination of chlorinated dioxins for assessment of formation and potential environmental emission for wood combustion [J]. *Anal. Chem.*, 1982, **54**: 2292—2299
- [3] Sheffield A. Sources and releases of PCDD's and PCDF's to the Canadian environment [J]. *Chemosphere*, 1985, **14**: 811—814
- [4] Gribble G W. The natural production of chlorinated compounds [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1994, **28**: 310A—319A
- [5] Anonymous. Response to Comment on "Global Mass Balance for Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans" [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1996, **30**: 3647—3648
- [6] Brzuzy L P, Hites R A. Estimating the Atmospheric Deposition of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans from Soil [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1995, **29**: 2090—2097
- [7] Hites R H. Environmental Behavior of Chlorinated Dioxins and Furans [J]. *Acc. Chem. Res.*, 1990, **23**: 194—201
- [8] Anonymous. EPA's Dioxin and Reassessment [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1995, **29**: 26A—28A
- [9] Karasek F W, Hutzinger O. Report: Incineration, Dioxin formation [J]. *Anal. Chem.*, 1986, **58**: 633A—640A
- [10] United Nations Environment Programme. Dioxin and Furane Inventories: National and Regional Emissions of PCDD/F [M]. Geneva, Printed at United Nations, 1999
- [11] Rappe C. Dioxin Patterns and Source Identification [J]. *Fresenius J. Anal. Chem.*, 1994, **348**: 63—75
- [12] Thomas V M, Spiro T G. The US dioxin inventory: are there missing sources? [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1996, **30**: 82A—85A
- [13] Alcock R E, Jones K C. Dioxins in the Environment: A Review of Trend Data [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1996, **30**: 3133—

3145

- [14] Alcock R E, McLachlan M S, Johnson A E, et al. Evidence for the Presence of PCDD/F in the Environment Prior to 1900 and Further Studies on Their Temporal Trends[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1998, **32**: 1580—1587
- [15] 孙宗光,齐文启,李国刚,关于二噁噁[J]. 环境监测管理与技术,1998,6:43—45
- [16] 蒋可. 燃烧排放物中的有毒二噁噁及类二噁噁多氯联苯[J]. 化学进展,1995,3:30—46
- [17] Prinz B, Krause G H M, Radermacher L. Standards and guidelines for PCDD/PCDF – an integrated approach with special respect to the control of ambient air pollution [J]. *Chemosphere*, 1993, **27**: 491—500
- [18] Johann Konig, Jochen Theisen, Werner J Gunther, et al. Ambient air levels of polychlorinated dibenzofurans and dibenzo(p) dioxins at different sites in Hessen[J]. *Chemosphere*, 1993, **26**: 851—861
- [19] Peter Bruckmann, Karlheinz Hackhe, Johann Konig, et al.. A comparative study for the determination of polychlorinated dibenzofurans and dibenzo(p)dioxins in ambient air[J]. *Chemosphere*, 1993, **27**: 707—720
- [20] Peter J Coleman, Robert G M Lee, Ruth E Alcock, et al. Observation on PAH, PCB, and PCDD/F Trends in U.K. Urban Air, 1991-1995[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1997, **31**: 2120—2124
- [21] Bolt A, de Jong APJM. Ambient air dioxin measurement in the Netherlands[J]. *Chemosphere*, 1993, **27**: 73—81
- [22] Ivan Holoubek, Anton Kocan, Jan Petrik, et al. The fate of selected organic compounds in the environment part VII. PCBs, PCDDs and PCDF in ambient air in Czechoslovakia – 1990[J]. *Chemosphere*, 1991, **23**: 1345—1348
- [23] 王敬贤,霍任峰,吴文忠,等. 武汉市空气悬浮颗粒物中二噁噁的测定[C]. 中西南地区色谱学术报告会文集, 2000
- [24] Join I, Baker, Ronald A Hites. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in the remote north Atlantic marine atmosphere[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1999, **33**: 14—20
- [25] Robert M L, Robert L H, Aubry E D, et al. Results of Monitoring for Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans in Ambient Air at McMurdo Station, Antarctica[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1996, **30**: 553—561
- [26] Louis P, Brzuzy, Ronald A Hites. Global mass balance for polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1996, **30**: 1797—1804
- [27] 徐盈,张庆华,吴文忠,等. 我国石墨电解废渣中二噁噁类化合物的浓度指纹特征[J]. 科学通报,2000,45(1): 578—582
- [28] Swanson S E, Rappe C, Maelstrom J, et al. Emissions of PCDDs and PCDFs from the Pulp Industry [J]. *Chemosphere*, 1988, **17**: 681—686
- [29] Zhang Q H, Xu Y, Wu W Z, et al. PCDDs and PCDFs in the Wastewater from Chinese Pulp and Paper Industry[J]. *Bull Environ Contam & Toxicol* 2000, **64**(3): 35—43
- [30] Beck H, Echart K, Mathar W, et al. Occurrence of PCDD and PCDF in Different Kinds of Paper[J]. *Chemosphere*, 1988, **17**: 51—57
- [31] Wilberg K, Lundstrom K, Glas B, et al. PCDDs and PCDFs in Consumers' Paper Products[J]. *Chemosphere*, 1989, **19**: 735—737
- [32] Gilman A, Newhook R, Birmingham B. An Updated Assessment of the Exposure of Canadians to Dioxins and Furans [J]. *Chemosphere*, 1991, **23**: 1661—1667
- [33] Wu Wen-zhong . Environmental Behavior and Ecotoxicological Impact of Persistent Organic Pollutants (POP) in Wildlife, with Special Emphasis on the Aquatic Ecosystem[M]. Herbert Utz Verlag GmbH, Printed at Munich, Germany, 1999
- [34] Wu W Z, Zhang Q H, Schramm K-W, et al. Distribution, Transformation and Long-term Accumulation of PCDD/F in Different Tissues of Fish and Piscivorous Bird[J]. *Ecotoxicol. Environ. Safety.*, 2000, **46**: 252—257

- [35] Wu W Z, Schramm K-W, Kettrup A. Bioaccumulation of Polychlorinated Dibenz-p-Dioxins and Dibenzofurans in the Foodweb of Ya-Er Lake Area, China[J]. *Water Research*. 2001, **35**: 1141—1148
- [36] R Masho Ph. D. Memorandum on Tolerable Daily Intake (TDI) of Dioxin and related compounds[R]. Printed at Japan Tokyo, June 1999
- [37] Wu W Z, Schramm K-W, Xu Y, et al. Survey on PCDD/Fs in sediments and soil in Ya-Er Lake Area, China[J]. *Oceanology and Limnology*, 1998, **16**(1): 45—53
- [38] 吴文忠, 徐盈, 张甬元, 等. 鸭儿湖地区多氯代苯并二噁英多氯代二苯并呋喃(PCDD/F)和多氯联苯(PCBs)的污染状况及其来源归宿的初步研究. *环境科学学报*, 1998, **18**(4): 415—420