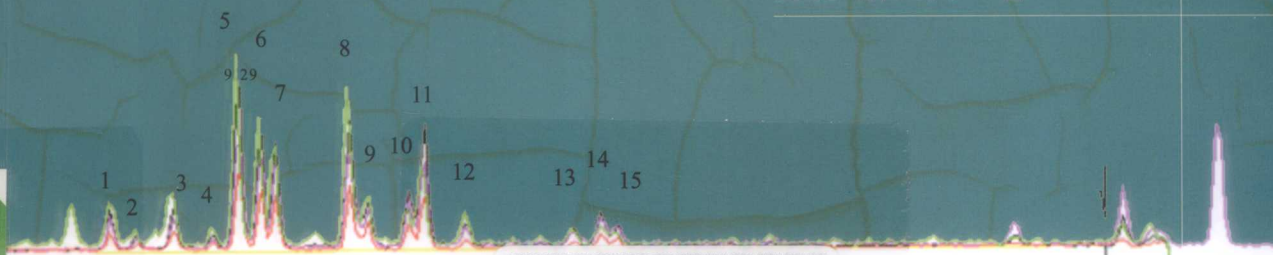


环境样品中 多氯联苯的分析

HUANJING YANGPIN ZHONG
DUOLULIANBEN DE FENXI

【美】解天民 著



NLIC2970876744

中国环境出版社

环境样品中多氯联苯的分析

[美] 解天民 著



NLIC2970876744

中国环境出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

环境样品中多氯联苯的分析/(美)解天民著. —北京:
中国环境出版社, 2013.2

ISBN 978-7-5111-1287-3

I. ①环… II. ①解… III. ①二氯联苯胺—环境污
染—污染物分析 IV. ①0625.63②X132

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第010167号

出 版 人 王新程
责任编辑 李卫民
责任校对 唐丽虹
封面设计 宋 瑞

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街16号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67112735 (环评与监察图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2013年2月第1版
印 次 2013年2月第1次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 7.75
字 数 150千字
定 价 20.00元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

序

作为 2001 年被联合国环境规划署《斯德哥尔摩公约》列入第一批被禁止使用的持久性有机污染物，多氯联苯（polychlorinated biphenyl, PCB）一直是环境化学分析中的重要内容。由于其特殊的化学结构、物化性质及环境影响，多氯联苯的分析涉及：多氯联苯产品混合物（Aroclor）、多氯联苯单体（congener）、多氯联苯共面体（coplanar）及多氯联苯同氯异构体（homologue）。目前国内环境监测站除少数进行多氯联苯单体分析外大多数只进行多氯联苯混合物分析，而共面体及同氯异构体的分析通常被视为较高难度的分析项目，只在高校及研究单位的专门实验室进行。相对于较广泛存在的多氯联苯污染状况，目前这种分析能力显然不能满足现实的需要。应当指出，这种分析能力的不足并非如一般人想象的是由于仪器的落后而引起，而是由于分析人员对于多氯联苯分析的了解不足。事实上目前大多数环境监测实验室都已配置了装有电子捕获器的毛细管柱气相色谱（GC/ECD）及气相色谱质谱联机（GC/MS），它们都应当有能力进行多氯联苯的全面分析，包括混合物、单体、共面体及同氯异构体。尽管由普通的 GC/ECD 或 GC/MS 所获得的数据无论是灵敏度还是准确度都无法与气相色谱高分辨率质谱联机（GC/HMS）相比，但它们却能满足几乎所有项目的需求。事实上在多氯联苯的日常监测工作中很少用到高分辨率质谱。因此提高多氯联苯的分析监测能力关键是提高分析人员的技术水平。在与国内环境监测的同人交流时，有人提出希望作者根据自己的经验向环境监测工作人员全面介绍一下可在普通环境分析实验室执行的有关多氯联苯分析的方法，这将有益于提高分析人员在这方面的技术水平。于是，这便成了作者编写这本小册子的初衷。也因此，本书所介绍的环境样品中的多氯联苯分析方法仅限于配备 GC/ECD 及 GC/MS 的常规实验室。

同其他环境有机污染物的监测一样，环境样品中多氯联苯的分析关键是样品制备，其中包括萃取及净化。其实质是将微量甚至痕量的多氯联苯从样品中提取出来，并在进入仪器分析前经净化去除干扰物和进一步浓缩，以获得高的检出灵敏度及准确度。目前行业中流行着各种样品前处理方法，例如固体样品萃取除经典的索氏提取方法外，还涌现了一些新的方法，如加速溶剂萃取、微波萃取、超临界流体萃取、快速索氏萃取和热解析等。本书中作者将主要介绍美国 EPA（美国环保局）标准中运用得较广的，并且易

于在国内一般实验室执行的一些方法。对于文献中报道的虽不是标准方法,但简便易行的,例如超声波水浴萃取,也做适当介绍,供读者参考。

在介绍样品制备时,为方便读者掌握,作者以样品的基质归类进行讲述。文中对于首次出现的技术做较详细的叙述,再次运用该技术时则简要带过。另外本书对于直接采用标准方法的技术叙述得比较简略,对于非标准方法中的内容则叙述得较为详细以方便读者使用。此外,多氯联苯各分析项目除共面体分析外,前处理都是相同的,而共面体分析是在单体分析的基础上进行的,即在单体分析完成后再将其萃取液进一步处理以做共面体分析。为方便读者阅读,共面体分析的最终一步前处理,即共面体与非共面体的分离被安排在共面体分析部分。

环境样品中 PCB 的分析,尤其是共面体及同氯异构体的分析,虽属于难度较高的环境监测项目,但一般能进行半挥发性有机污染物(semi-volatile organic compound, SVOC)及残余有机氯农药分析的实验室原则上都具备这方面的分析技术基础。分析人员只需适当扩充一些有关知识,并根据需要对实验室做适当改进就完全能胜任 PCB 的分析项目。本书的目的就是为具有 SVOC 及有机氯农药分析基础的分析人员提供一个简单明了、易读、易懂的实用指南,使他们能够在短时间内建立起自己实验室的 PCB 分析能力。

本书所介绍的分析方法,除超声波水浴萃取外,是作者实验室所执行的、在美国 EPA 标准或文献报道的方法基础上建立的方法,数据均出自作者实验室。这些操作程序并非完美,读者在建立自己的分析操作程序时不必生搬硬套,而应以之为参考,根据自己实验室具体的仪器、技术条件及工作习惯,因地制宜地建立起自己的分析操作程序及质控标准,当然这些质控标准首先要满足权威机构的有关规定。

多氯联苯的分析与近些年引起关注的环境污染物多氯萜、多溴二苯醚等非常相似,本书内容对于建立多氯萜同氯异构体或多溴二苯醚同溴异构体的分析方法也有参考价值。

由于本书的读者对象主要是有半挥发性有机物及有机氯农药分析经验的从业人员或科研人员,作者强调实际操作,而略去了一些基础知识,如仪器原理、检出限定义等,读者若有兴趣可参阅作者的其他有关作品。同时,作者曾在其他作品中部分介绍过有关多氯联苯混合物和单体的分析以及有关的样品前处理。考虑到内容的系统性及全面性,并为方便读者阅读,本书保留了这部分内容,并对这些内容做了更深入、细致的讲述。

在构思编写本书的过程中,中国环境出版社给予了作者很大鼓励,在此表示衷心感谢。

解天民

2013年2月3日

目 录

第一章 绪 论.....	1
第二章 多氯联苯分析样品前处理方法.....	15
2.1 概述.....	15
2.2 样品萃取技术.....	16
2.2.1 水样萃取方法.....	17
2.2.2 固体样品萃取方法.....	21
2.2.3 生物机体样品的萃取方法.....	23
2.2.4 气体样品的采集与萃取.....	24
2.3 萃取液的净化.....	25
2.3.1 水样萃取液的净化.....	26
2.3.2 固体样品萃取液的净化.....	27
2.3.3 生物样品萃取液的净化.....	29
2.3.4 气体样品萃取液的净化.....	30
2.3.5 废弃油样品前处理.....	30
第三章 多氯联苯仪器分析.....	32
3.1 概述.....	32
3.2 多氯联苯商品混合物分析.....	33
3.2.1 方法概述.....	33
3.2.2 仪器设置及性能检验.....	34
3.2.3 样品分析.....	35
3.2.4 方法质量控制与质量保证.....	41
3.3 多氯联苯单体分析.....	47
3.3.1 方法概述.....	47
3.3.2 仪器设置及性能检验.....	49

3.3.3	标准曲线的建立.....	52
3.3.4	样品分析.....	57
3.3.5	方法质量控制与质量保证.....	61
3.4	多氯联苯共面体单体分析.....	70
3.4.1	方法概述.....	70
3.4.2	共面体多氯联苯与非共面体多氯联苯的分离.....	72
3.4.3	样品分析.....	81
3.4.4	方法质量控制与质量保证.....	85
3.5	多氯联苯同氯异构体分析.....	88
3.5.1	方法概述.....	88
3.5.2	仪器设置及校准.....	91
3.5.3	同氯异构体选择离子检测时间窗的建立.....	94
3.5.4	标准曲线的建立.....	104
3.5.5	样品分析.....	106
3.5.6	质量控制与质量保证.....	115

第一章 绪 论

多氯联苯 (polychlorinated biphenyl, PCB) 是重要的环境污染物。它毒性强, 能危害人体的肝脏、神经系统、免疫系统及生殖系统, 并具有致癌作用。它十分稳定, 在环境中不易降解, 而且亲脂性强, 能通过食物链富集, 2001 年被联合国环境规划署《斯德哥尔摩公约》列入第一批被禁止使用的持久性有机污染物^[1]。

多氯联苯曾是重要的化学工业产品。它的化学惰性强, 不易与其他物质发生氧化、还原、加成或取代反应; 它的热容量高, 介电常数高, 导热性好, 又有良好的阻燃性能及绝缘性能, 它在水中的溶解度很低, 室温下蒸气压低。这些优秀的化学及物理性能使其曾经被广泛用于工业及生活的各个领域。例如作为变压器及电容器的冷却剂及绝缘剂、电介质; 直接用做润滑油、液压油、防湿密封材料; 塑料、油漆及黏合剂中的增塑剂; 建材及机器润滑油中用于阻燃的添加剂、稳定剂等。多氯联苯的广泛运用导致它在全球环境中的广泛传播, 在全世界任何一个国家和地区都能发现多氯联苯的踪影。人类生产多氯联苯始于 20 世纪 20 年代, 虽然早在 1937 年人们就在工业事故中发现了多氯联苯及其他氯代烃类化合物的毒性, 但直到 70 年代多氯联苯的生产及使用才受到限制。1968 年日本因 280 kg 多氯联苯泄漏而遭污染的米糠油致使 40 万家禽死亡及 14 000 名居民中毒^[2], 10 年后在中国台湾又发生了相同的中毒事件。这两起中毒事件引起了全世界对多氯联苯环境危害的强烈关注, 并进而导致了后来对多氯联苯的禁用。然而多氯联苯长期的广泛运用及不妥当的弃置, 造成了其世界范围内对环境的严重污染。由于多氯联苯在环境中极难降解, 虽经 40 多年的限制及清理, 目前历史遗留的多氯联苯污染仍十分严重, 那些遗留的污染地区变成了新的污染源。例如在美国, 虽然早已禁止生产及使用多氯联苯, 而且过去 30 多年来政府不断投入大量资金调查研究多氯联苯的污染状况, 并对重点污染区域进行治理、修复, 但迄今多氯联苯污染调查和整治的任务仍十分艰巨。笔者工作过的实验室就曾分析过许多 PCB 污染的样品, 其中有因 PCB 中毒而亡的鸟类样品, 并由之溯源至作为其食物的受 PCB 污染的蚯蚓及相关的被 PCB 污染的土壤; 还有多种受 PCB 污染鱼类, 及其洄游区域受 PCB 污染的底泥; 还分析过因食用被污染鱼类而被污染的海狮样品, 其脂肪中积累的 PCB 高达 mg/kg 级。可以说 PCB 分析始终是环境监测中的重要项目。

多氯联苯分子中可含 1~10 个氯原子, 共 10 种同氯异构体, 按氯原子的数目及位置不同共有 209 种单体, 但在多氯联苯工业产品中仅发现 130 种单体。工业产品的 PCB 是通过联苯氯化制得的, 所得到的是混合物, 根据氯化程度不同分类。各个国家的多氯联苯产品有不同的名称。美国 Monsanto 化学公司是多氯联苯最大的产家, 故其产品名称用得最广。Monsanto 的多氯联苯产品称为 Aroclor, 最常见的有 7 种, 是按其氯化程度的不同区分的, 其名称是在 Aroclor 后加上四个数字, 即: Aroclor 1016, Aroclor 1221, Aroclor 1232, Aroclor 1242, Aroclor 1248, Aroclor 1254 及 Aroclor 1260, 每种 Aroclor 均由许多单体组成。除 Aroclor 1016 外, 各品种的前两位数均是 12, 代表分子中的碳原子个数, 而后两位数则代表氯在混合物中的质量分数。例如 Aroclor 1260 表明混合物中各分子有 12 个碳原子, 而氯的含量占总量的 60%。然而 Aroclor 1016 的命名与其他不同, 它的每个分子也有 12 个碳原子, 而氯的含量占混合物总量的 42%。表 1-1 是各多氯联苯商品混合物中所含同氯异构体的比率。

表 1-1 常见多氯联苯商品混合物中所含同氯异构体的比率^[3]

同氯异构体	多氯联苯商品混合物				
	Aroclor 1016/%	Aroclor 1242/%	Aroclor 1248/%	Aroclor 1254/%	Aroclor 1260/%
一氯联苯	0.7	0.8	0	0	0
二氯联苯	17.5	15.0	0.4	0.2	0.1
三氯联苯	54.7	44.9	22.0	1.3	0.2
四氯联苯	26.6	32.6	56.6	16.4	0.5
五氯联苯	0.5	6.4	18.6	53.0	8.6
六氯联苯	0	0.3	2.0	26.8	43.4
七氯联苯	0	0	0.6	2.7	38.5
八氯联苯	0	0	0	0	8.3
九氯联苯	0	0	0	0	0.7
十氯联苯	0	0	0	0	0

由于各单体的化学稳定性, 多氯联苯产品的组成结构能长期保持不变。例如用于电器产品的 Aroclor 1254 及 Aroclor 1260 混合物在美国虽然主要运用于 1950 年之前, 但 1960 年后在废弃变压器油中及一些 Aroclor 1254 及 Aroclor 1260 的污染点的土壤及底泥样品中仍可被清晰检出。然而各种 Aroclor 都是由数十种单体组成的, 各种单体随着氯原子在分子中数量及位置的不同其挥发性、亲脂性及化学稳定性也不同。以量度化合物亲脂性的 $\log P$ 值 (化合物在正八碳醇-水系中的分配系数的对数) 为例, 多氯联苯单体的

$\log P$ 值在 $5\sim 8$ ^①，彼此间相差仍是较大的（表 1-2）。在环境体系中，若 Aroclor 长时间参与了液相及气相，或亲油相及亲水相间的分配平衡，经历了在生物、光、化学物质等因素作用下的化学变化，则它所包含的各单体在挥发性、亲脂性及化学稳定性上的差别就会显现出来。这种风化的过程使得 Aroclor 产品中单体组分比例失去原来的特征而难以鉴别，尤其是生物体中经过食物链富集的多氯联苯，很难再通过色谱指纹进行 Aroclor 产品分析，在这种情况下判断 PCB 的污染情况必须通过分析单体或同氯异构体进行。

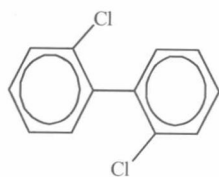
表 1-2 多氯联苯同氯异构体（Homolog）

PCB 同氯异构体	CAS 登记号	分子中氯原子数	$\log P^{[8, 9]}$	所含单体个数
联苯 Biphenyl	92-52-4	0	4.3	1
一氯联苯 Monochlorobiphenyl	27323-18-8	1	4.7	3
二氯联苯 Dichlorobiphenyl	25512-42-9	2	5.1	12
三氯联苯 Trichlorobiphenyl	25323-68-6	3	5.5	24
四氯联苯 Tetrachlorobiphenyl	26914-33-0	4	5.9	42
五氯联苯 Pentachlorobiphenyl	25429-29-2	5	6.3	46
六氯联苯 Hexachlorobiphenyl	26601-64-9	6	6.7	42
七氯联苯 Heptachlorobiphenyl	28655-71-2	7	7.1	24
八氯联苯 Octachlorobiphenyl	55722-26-4	8	7.5	12
九氯联苯 Nonachlorobiphenyl	53742-07-7	9	7.9	3
十氯联苯 Decachlorobiphenyl	2051-24-3	10	8.3	1

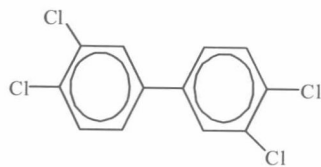
表 1-3 列出了多氯联苯可能有的 209 种单体。这些单体按其分子形状又分为共面体（coplanar）与非共面体（non-coplanar）两类。当相连的两个苯环在邻位上不含或只含一个氯原子时，两个苯环在分子结构中处于同一平面，而形成共面体。图 1-1（1）和图 1-1（2）分别为非共面体及共面体多氯联苯的结构示意图。多氯联苯的单体中有 68 个可形成共面体。共面体多氯联苯的结构类似多氯二噁英类化合物[图 1-1（3）]，其生理毒性远远强于非共面体多氯联苯。尤其是其中 12 个共面体（表 1-3 中阴影部分），它们含有 4 个或 4 个以上的氯原子，而且联苯分子的两个对位均为氯原子，同时分子中 4 个间位被两个或两个以上的氯原子所占据，这些多氯联苯共面体的毒性可类比于多氯二噁英类化合物，它们也被称为二噁英类多氯联苯，由于结构的特殊，它们的化学稳定

① 表 1-2 中数据是 4.7~8.3，这只是某实验室的测出结果，不同实验室的数据差别 0.1~0.2 是正常的，故此处只把范围定义在一位有效数字内，即 $5\sim 8$ 。

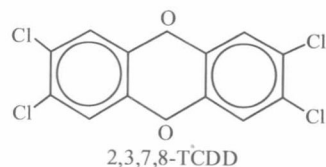
性更强, 在环境中更难降解, 因而受到特别的关注。表 1-4 (a), (b) 列出了这 12 个二噁英类多氯联苯单体与部分二噁英类化合物的毒性当量信息。显然了解环境样品中多氯联苯共面体的含量对于准确评价多氯联苯污染状况, 从而对污染区域采取最有效的应对措施是很重要的。



(1) 非共面体多氯联苯



(2) 共面体多氯联苯



(3) 多氯二噁英

图 1-1 多氯联苯及多氯二噁英结构示意图

表 1-3 多氯联苯可能有的 209 种单体^①

化学名称	单体代号	CAS 登记号	结构特征 ^②
Biphenyl	PCB0	92-52-4	—
2-Chlorobiphenyl	PCB1	2051-60-7	CP1
3-Chlorobiphenyl	PCB2	2051-61-8	CP0
4-Chlorobiphenyl	PCB3	2051-62-9	CP0
2,2'-Dichlorobiphenyl	PCB4	13029-08-8	—
2,3-Dichlorobiphenyl	PCB5	16605-91-7	CP1
2,3'-Dichlorobiphenyl	PCB6	25569-80-6	CP1
2,4-Dichlorobiphenyl	PCB7	33284-50-3	CP1
2,4'-Dichlorobiphenyl	PCB8	34883-43-7	CP1
2,5-Dichlorobiphenyl	PCB9	34883-39-1	CP1
2,6-Dichlorobiphenyl	PCB10	33146-45-1	—
3,3'-Dichlorobiphenyl	PCB11	2050-67-1	CP0, 2M
3,4-Dichlorobiphenyl	PCB12	2974-92-7	CP0
3,4'-Dichlorobiphenyl	PCB13	2974-90-5	CP0
3,5-Dichlorobiphenyl	PCB14	34883-41-5	CP0, 2M
4,4'-Dichlorobiphenyl	PCB15	2050-68-2	CP0, PP
2,2',3-Trichlorobiphenyl	PCB16	38444-78-9	—
2,2',4-Trichlorobiphenyl	PCB17	37680-66-3	—
2,2',5-Trichlorobiphenyl	PCB18	37680-65-2	—
2,2',6-Trichlorobiphenyl	PCB19	38444-73-4	—
2,3,3'-Trichlorobiphenyl	PCB20	38444-84-7	CP1, 2M

化学名称	单体代号	CAS 登记号	结构特征 ^②
2,3,4-Trichlorobiphenyl	PCB21	55702-46-0	CP1
2,3,4'-Trichlorobiphenyl	PCB22	38444-85-8	CP1
2,3,5-Trichlorobiphenyl	PCB23	55720-44-0	CP1, 2M
2,3,6-Trichlorobiphenyl	PCB24	55702-45-9	—
2,3',4-Trichlorobiphenyl	PCB25	55712-37-3	CP1
2,3',5-Trichlorobiphenyl	PCB26	38444-81-4	CP1, 2M
2,3',6-Trichlorobiphenyl	PCB27	38444-76-7	—
2,4,4'-Trichlorobiphenyl	PCB28	7012-37-5	CP1, PP
2,4,5-Trichlorobiphenyl	PCB29	15862-07-4	CP1
2,4,6-Trichlorobiphenyl	PCB30	35693-92-6	—
2,4',5-Trichlorobiphenyl	PCB31	16606-02-3	CP1
2,4',6-Trichlorobiphenyl	PCB32	38444-77-8	—
2,3',4'-Trichlorobiphenyl	PCB33	38444-86-9	CP1
2,3',5'-Trichlorobiphenyl	PCB34	37680-68-5	CP1, 2M
3,3',4-Trichlorobiphenyl	PCB35	37680-69-6	CP0, 2M
3,3',5-Trichlorobiphenyl	PCB36	38444-87-0	CP0, 2M
3,4,4'-Trichlorobiphenyl	PCB37	38444-90-5	CP0, PP
3,4,5-Trichlorobiphenyl	PCB38	53555-66-1	CP0, 2M
3,4',5-Trichlorobiphenyl	PCB39	38444-88-1	CP0, 2M
2,2',3,3'-Tetrachlorobiphenyl	PCB40	38444-93-8	4CL, 2M
2,2',3,4-Tetrachlorobiphenyl	PCB41	52663-59-9	4CL
2,2',3,4'-Tetrachlorobiphenyl	PCB42	36559-22-5	4CL
2,2',3,5-Tetrachlorobiphenyl	PCB43	70362-46-8	4CL, 2M
2,2',3,5'-Tetrachlorobiphenyl	PCB44	41464-39-5	4CL, 2M
2,2',3,6-Tetrachlorobiphenyl	PCB45	70362-45-7	4CL
2,2',3,6'-Tetrachlorobiphenyl	PCB46	41464-47-5	4CL
2,2',4,4'-Tetrachlorobiphenyl	PCB47	2437-79-8	4CL, PP
2,2',4,5-Tetrachlorobiphenyl	PCB48	70362-47-9	4CL
2,2',4,5'-Tetrachlorobiphenyl	PCB49	41464-40-8	4CL
2,2',4,6-Tetrachlorobiphenyl	PCB50	62796-65-0	4CL
2,2',4,6'-Tetrachlorobiphenyl	PCB51	68194-04-7	4CL
2,2',5,5'-Tetrachlorobiphenyl	PCB52	35693-99-3	4CL, 2M
2,2',5,6'-Tetrachlorobiphenyl	PCB53	41464-41-9	4CL
2,2',6,6'-Tetrachlorobiphenyl	PCB54	15968-05-5	4CL
2,3,3',4-Tetrachlorobiphenyl	PCB55	74338-24-2	CP1, 4CL, 2M
2,3,3',4'-Tetrachlorobiphenyl	PCB56	41464-43-1	CP1, 4CL, 2M

化学名称	单体代号	CAS 登记号	结构特征 ^②
2,3,3',5-Tetrachlorobiphenyl	PCB57	70424-67-8	CP1, 4CL, 2M
2,3,3',5'-Tetrachlorobiphenyl	PCB58	41464-49-7	CP1, 4CL, 2M
2,3,3',6-Tetrachlorobiphenyl	PCB59	74472-33-6	4CL, 2M
2,3,4,4'-Tetrachlorobiphenyl	PCB60	33025-41-1	CP1, 4CL, PP
2,3,4,5-Tetrachlorobiphenyl	PCB61	33284-53-6	CP1, 4CL, 2M
2,3,4,6-Tetrachlorobiphenyl	PCB62	54230-22-7	4CL
2,3,4',5-Tetrachlorobiphenyl	PCB63	74472-34-7	CP1, 4CL, 2M
2,3,4',6-Tetrachlorobiphenyl	PCB64	52663-58-8	4CL
2,3,5,6-Tetrachlorobiphenyl	PCB65	33284-54-7	4CL, 2M
2,3',4,4'-Tetrachlorobiphenyl	PCB66	32598-10-0	CP1, 4CL, PP
2,3',4,5-Tetrachlorobiphenyl	PCB67	73575-53-8	CP1, 4CL, 2M
2,3',4,5'-Tetrachlorobiphenyl	PCB68	73575-52-7	CP1, 4CL, 2M
2,3',4,6-Tetrachlorobiphenyl	PCB69	60233-24-1	4CL
2,3',4',5-Tetrachlorobiphenyl	PCB70	32598-11-1	CP1, 4CL, 2M
2,3',4',6-Tetrachlorobiphenyl	PCB71	41464-46-4	4CL
2,3',5,5'-Tetrachlorobiphenyl	PCB72	41464-42-0	CP1, 4CL, 2M
2,3',5',6-Tetrachlorobiphenyl	PCB73	74338-23-1	4CL, 2M
2,4,4',5-Tetrachlorobiphenyl	PCB74	32690-93-0	CP1, 4CL, PP
2,4,4',6-Tetrachlorobiphenyl	PCB75	32598-12-2	4CL, PP
2,3',4',5'-Tetrachlorobiphenyl	PCB76	70362-48-0	CP1, 4CL, 2M
3,3',4,4'-Tetrachlorobiphenyl	PCB77	32598-13-3	CP0, 4CL, PP, 2M
3,3',4,5-Tetrachlorobiphenyl	PCB78	70362-49-1	CP0, 4CL, 2M
3,3',4,5'-Tetrachlorobiphenyl	PCB79	41464-48-6	CP0, 4CL, 2M
3,3',5,5'-Tetrachlorobiphenyl	PCB80	33284-52-5	CP0, 4CL, 2M
3,4,4',5-Tetrachlorobiphenyl	PCB81	70362-50-4	CP0, 4CL, PP, 2M
2,2',3,3',4-Pentachlorobiphenyl	PCB82	52663-62-4	4CL, 2M
2,2',3,3',5-Pentachlorobiphenyl	PCB83	60145-20-2	4CL, 2M
2,2',3,3',6-Pentachlorobiphenyl	PCB84	52663-60-2	4CL, 2M
2,2',3,4,4'-Pentachlorobiphenyl	PCB85	65510-45-4	4CL, PP
2,2',3,4,5-Pentachlorobiphenyl	PCB86	55312-69-1	4CL, 2M
2,2',3,4,5'-Pentachlorobiphenyl	PCB87	38380-02-8	4CL, 2M
2,2',3,4,6-Pentachlorobiphenyl	PCB88	55215-17-3	4CL
2,2',3,4,6'-Pentachlorobiphenyl	PCB89	73575-57-2	4CL
2,2',3,4',5-Pentachlorobiphenyl	PCB90	68194-07-0	4CL, 2M
2,2',3,4',6-Pentachlorobiphenyl	PCB91	68194-05-8	4CL
2,2',3,5,5'-Pentachlorobiphenyl	PCB92	52663-61-3	4CL, 2M

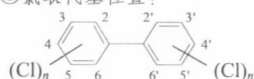
化学名称	单体代号	CAS 登记号	结构特征 ^②
2,2',3,5,6-Pentachlorobiphenyl	PCB93	73575-56-1	4CL, 2M
2,2',3,5,6'-Pentachlorobiphenyl	PCB94	73575-55-0	4CL, 2M
2,2',3,5',6-Pentachlorobiphenyl	PCB95	38379-99-6	4CL, 2M
2,2',3,6,6'-Pentachlorobiphenyl	PCB96	73575-54-9	4CL
2,2',3,4',5'-Pentachlorobiphenyl	PCB97	41464-51-1	4CL, 2M
2,2',3,4',6'-Pentachlorobiphenyl	PCB98	60233-25-2	4CL
2,2',4,4',5-Pentachlorobiphenyl	PCB99	38380-01-7	4CL, PP
2,2',4,4',6-Pentachlorobiphenyl	PCB100	39485-83-1	4CL, PP
2,2',4,5,5'-Pentachlorobiphenyl	PCB101	37680-73-2	4CL, 2M
2,2',4,5,6'-Pentachlorobiphenyl	PCB102	68194-06-9	4CL
2,2',4,5',6-Pentachlorobiphenyl	PCB103	60145-21-3	4CL
2,2',4,6,6'-Pentachlorobiphenyl	PCB104	56558-16-8	4CL
2,3,3',4,4'-Pentachlorobiphenyl	PCB105	32598-14-4	CP1, 4CL, PP, 2M
2,3,3',4,5-Pentachlorobiphenyl	PCB106	70424-69-0	CP1, 4CL, 2M
2,3,3',4',5-Pentachlorobiphenyl	PCB107	70424-68-9	CP1, 4CL, 2M
2,3,3',4,5'-Pentachlorobiphenyl	PCB108	70362-41-3	CP1, 4CL, 2M
2,3,3',4,6-Pentachlorobiphenyl	PCB109	74472-35-8	4CL, 2M
2,3,3',4',6-Pentachlorobiphenyl	PCB110	38380-03-9	4CL, 2M
2,3,3',5,5'-Pentachlorobiphenyl	PCB111	39635-32-0	CP1, 4CL, 2M
2,3,3',5,6-Pentachlorobiphenyl	PCB112	74472-36-9	4CL, 2M
2,3,3',5',6-Pentachlorobiphenyl	PCB113	68194-10-5	4CL, 2M
2,3,4,4',5-Pentachlorobiphenyl	PCB114	74472-37-0	CP1, 4CL, PP, 2M
2,3,4,4',6-Pentachlorobiphenyl	PCB115	74472-38-1	4CL, PP
2,3,4,5,6-Pentachlorobiphenyl	PCB116	18259-05-7	4CL, 2M
2,3,4',5,6-Pentachlorobiphenyl	PCB117	68194-11-6	4CL, 2M
2,3',4,4',5-Pentachlorobiphenyl	PCB118	31508-00-6	CP1, 4CL, PP, 2M
2,3',4,4',6-Pentachlorobiphenyl	PCB119	56558-17-9	4CL, PP
2,3',4,5,5'-Pentachlorobiphenyl	PCB120	68194-12-7	CP1, 4CL, 2M
2,3',4,5',6-Pentachlorobiphenyl	PCB121	56558-18-0	4CL, 2M
2,3,3',4',5'-Pentachlorobiphenyl	PCB122	76842-07-4	CP1, 4CL, 2M
2,3',4,4',5'-Pentachlorobiphenyl	PCB123	65510-44-3	CP1, 4CL, PP, 2M
2,3',4',5,5'-Pentachlorobiphenyl	PCB124	70424-70-3	CP1, 4CL, 2M
2,3',4',5',6-Pentachlorobiphenyl	PCB125	74472-39-2	4CL, 2M
3,3',4,4',5-Pentachlorobiphenyl	PCB126	57465-28-8	CP0, 4CL, PP, 2M
3,3',4,5,5'-Pentachlorobiphenyl	PCB127	39635-33-1	CP0, 4CL, 2M
2,2',3,3',4,4'-Hexachlorobiphenyl	PCB128	38380-07-3	4CL, PP, 2M

化学名称	单体代号	CAS 登记号	结构特征 ^②
2,2',3,3',4,5-Hexachlorobiphenyl	PCB129	55215-18-4	4CL, 2M
2,2',3,3',4,5'-Hexachlorobiphenyl	PCB130	52663-66-8	4CL, 2M
2,2',3,3',4,6-Hexachlorobiphenyl	PCB131	61798-70-7	4CL, 2M
2,2',3,3',4,6'-Hexachlorobiphenyl	PCB132	38380-05-1	4CL, 2M
2,2',3,3',5,5'-Hexachlorobiphenyl	PCB133	35694-04-3	4CL, 2M
2,2',3,3',5,6-Hexachlorobiphenyl	PCB134	52704-70-8	4CL, 2M
2,2',3,3',5,6'-Hexachlorobiphenyl	PCB135	52744-13-5	4CL, 2M
2,2',3,3',6,6'-Hexachlorobiphenyl	PCB136	38411-22-2	4CL, 2M
2,2',3,4,4',5-Hexachlorobiphenyl	PCB137	35694-06-5	4CL, PP, 2M
2,2',3,4,4',5'-Hexachlorobiphenyl	PCB138	35065-28-2	4CL, PP, 2M
2,2',3,4,4',6-Hexachlorobiphenyl	PCB139	56030-56-9	4CL, PP
2,2',3,4,4',6'-Hexachlorobiphenyl	PCB140	59291-64-4	4CL, PP
2,2',3,4,5,5'-Hexachlorobiphenyl	PCB141	52712-04-6	4CL, 2M
2,2',3,4,5,6-Hexachlorobiphenyl	PCB142	41411-61-4	4CL, 2M
2,2',3,4,5,6'-Hexachlorobiphenyl	PCB143	68194-15-0	4CL, 2M
2,2',3,4,5',6-Hexachlorobiphenyl	PCB144	68194-14-9	4CL, 2M
2,2',3,4,6,6'-Hexachlorobiphenyl	PCB145	74472-40-5	4CL
2,2',3,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	PCB146	51908-16-8	4CL, 2M
2,2',3,4',5,6-Hexachlorobiphenyl	PCB147	68194-13-8	4CL, 2M
2,2',3,4',5,6'-Hexachlorobiphenyl	PCB148	74472-41-6	4CL, 2M
2,2',3,4',5',6-Hexachlorobiphenyl	PCB149	38380-04-0	4CL, 2M
2,2',3,4',6,6'-Hexachlorobiphenyl	PCB150	68194-08-1	4CL
2,2',3,5,5',6-Hexachlorobiphenyl	PCB151	52663-63-5	4CL, 2M
2,2',3,5,6,6'-Hexachlorobiphenyl	PCB152	68194-09-2	4CL, 2M
2,2',4,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	PCB153	35065-27-1	4CL, PP, 2M
2,2',4,4',5,6'-Hexachlorobiphenyl	PCB154	60145-22-4	4CL, PP
2,2',4,4',6,6'-Hexachlorobiphenyl	PCB155	33979-03-2	4CL, PP
2,3,3',4,4',5-Hexachlorobiphenyl	PCB156	38380-08-4	CP1, 4CL, PP, 2M
2,3,3',4,4',5'-Hexachlorobiphenyl	PCB157	69782-90-7	CP1, 4CL, PP, 2M
2,3,3',4,4',6-Hexachlorobiphenyl	PCB158	74472-42-7	4CL, PP, 2M
2,3,3',4,5,5'-Hexachlorobiphenyl	PCB159	39635-35-3	CP1, 4CL, 2M
2,3,3',4,5,6-Hexachlorobiphenyl	PCB160	41411-62-5	4CL, 2M
2,3,3',4,5',6-Hexachlorobiphenyl	PCB161	74472-43-8	4CL, 2M
2,3,3',4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	PCB162	39635-34-2	CP1, 4CL, 2M
2,3,3',4',5,6-Hexachlorobiphenyl	PCB163	74472-44-9	4CL, 2M
2,3,3',4',5',6-Hexachlorobiphenyl	PCB164	74472-45-0	4CL, 2M

化学名称	单体代号	CAS 登记号	结构特征 ^②
2,3,3',5,5',6-Hexachlorobiphenyl	PCB165	74472-46-1	4CL, 2M
2,3,4,4',5,6-Hexachlorobiphenyl	PCB166	41411-63-6	4CL, PP, 2M
2,3',4,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	PCB167	52663-72-6	CP1, 4CL, PP, 2M
2,3',4,4',5',6-Hexachlorobiphenyl	PCB168	59291-65-5	4CL, PP, 2M
3,3',4,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	PCB169	32774-16-6	CP0, 4CL, PP, 2M
2,2',3,3',4,4',5-Heptachlorobiphenyl	PCB170	35065-30-6	4CL, PP, 2M
2,2',3,3',4,4',6-Heptachlorobiphenyl	PCB171	52663-71-5	4CL, PP, 2M
2,2',3,3',4,5,5'-Heptachlorobiphenyl	PCB172	52663-74-8	4CL, 2M
2,2',3,3',4,5,6-Heptachlorobiphenyl	PCB173	68194-16-1	4CL, 2M
2,2',3,3',4,5,6'-Heptachlorobiphenyl	PCB174	38411-25-5	4CL, 2M
2,2',3,3',4,5',6-Heptachlorobiphenyl	PCB175	40186-70-7	4CL, 2M
2,2',3,3',4,6,6'-Heptachlorobiphenyl	PCB176	52663-65-7	4CL, 2M
2,2',3,3',4,5',6'-Heptachlorobiphenyl	PCB177	52663-70-4	4CL, 2M
2,2',3,3',5,5',6-Heptachlorobiphenyl	PCB178	52663-67-9	4CL, 2M
2,2',3,3',5,6,6'-Heptachlorobiphenyl	PCB179	52663-64-6	4CL, 2M
2,2',3,4,4',5,5'-Heptachlorobiphenyl	PCB180	35065-29-3	4CL, PP, 2M
2,2',3,4,4',5,6-Heptachlorobiphenyl	PCB181	74472-47-2	4CL, PP, 2M
2,2',3,4,4',5,6'-Heptachlorobiphenyl	PCB182	60145-23-5	4CL, PP, 2M
2,2',3,4,4',5',6-Heptachlorobiphenyl	PCB183	52663-69-1	4CL, PP, 2M
2,2',3,4,4',6,6'-Heptachlorobiphenyl	PCB184	74472-48-3	4CL, PP
2,2',3,4,5,5',6-Heptachlorobiphenyl	PCB185	52712-05-7	4CL, 2M
2,2',3,4,5,6,6'-Heptachlorobiphenyl	PCB186	74472-49-4	4CL, 2M
2,2',3,4',5,5',6-Heptachlorobiphenyl	PCB187	52663-68-0	4CL, 2M
2,2',3,4',5,6,6'-Heptachlorobiphenyl	PCB188	74487-85-7	4CL, 2M
2,3,3',4,4',5,5'-Heptachlorobiphenyl	PCB189	39635-31-9	CP1, 4CL, PP, 2M
2,3,3',4,4',5,6-Heptachlorobiphenyl	PCB190	41411-64-7	4CL, PP, 2M
2,3,3',4,4',5',6-Heptachlorobiphenyl	PCB191	74472-50-7	4CL, PP, 2M
2,3,3',4,5,5',6-Heptachlorobiphenyl	PCB192	74472-51-8	4CL, 2M
2,3,3',4',5,5',6-Heptachlorobiphenyl	PCB193	69782-91-8	4CL, 2M
2,2',3,3',4,4',5,5'-Octachlorobiphenyl	PCB194	35694-08-7	4CL, PP, 2M
2,2',3,3',4,4',5,6-Octachlorobiphenyl	PCB195	52663-78-2	4CL, PP, 2M
2,2',3,3',4,4',5,6'-Octachlorobiphenyl	PCB196	42740-50-1	4CL, PP, 2M
2,2',3,3',4,4',6,6'-Octachlorobiphenyl	PCB197	33091-17-7	4CL, PP, 2M
2,2',3,3',4,5,5',6-Octachlorobiphenyl	PCB198	68194-17-2	4CL, 2M
2,2',3,3',4,5,5',6'-Octachlorobiphenyl	PCB199	52663-75-9	4CL, 2M
2,2',3,3',4,5,6,6'-Octachlorobiphenyl	PCB200	52663-73-7	4CL, 2M

化学名称	单体代号	CAS 登记号	结构特征 ^②
2,2',3,3',4,5',6,6'-Octachlorobiphenyl	PCB201	40186-71-8	4CL, 2M
2,2',3,3',5,5',6,6'-Octachlorobiphenyl	PCB202	2136-99-4	4CL, 2M
2,2',3,4,4',5,5',6-Octachlorobiphenyl	PCB203	52663-76-0	4CL, PP, 2M
2,2',3,4,4',5,6,6'-Octachlorobiphenyl	PCB204	74472-52-9	4CL, PP, 2M
2,3,3',4,4',5,5',6-Octachlorobiphenyl	PCB205	74472-53-0	4CL, PP, 2M
2,2',3,3',4,4',5,5',6-Nonachlorobiphenyl	PCB206	40186-72-9	4CL, PP, 2M
2,2',3,3',4,4',5,6,6'-Nonachlorobiphenyl	PCB207	52663-79-3	4CL, PP, 2M
2,2',3,3',4,5,5',6,6'-Nonachlorobiphenyl	PCB208	52663-77-1	4CL, 2M
Decachlorobiphenyl	PCB209	2051-24-3	4CL, PP, 2M

①氯取代基位置:



②CP0—联苯邻位无氯原子; CP1—联苯邻位只有一个氯原子; 4CL—联苯分子中氯原子数 ≥ 4 ; PP—联苯分子中两个对位均为氯原子; 2M—联苯分子中间位氯原子数 ≥ 2 。

表 1-4 二噁英类多氯联苯单体与部分二噁英类化合物的毒性当量比较

a) WHO 数据^[4]

化合物	缩写	毒性当量
多氯二苯二噁英 Polychlorinated dibenzodioxin		
四氯二苯二噁英 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzodioxin	TCDD	1
五氯二苯二噁英 1,2,3,7,8-Pentachlorodibenzodioxin	1,2,3,7,8-PeCDD	1
六氯二苯二噁英 1,2,3,4,7,8-Hexachlorodibenzodioxin	1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1
六氯二苯二噁英 1,2,3,6,7,8-Hexachlorodibenzodioxin	1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1
六氯二苯二噁英 1,2,3,6,7,9-Hexachlorodibenzodioxin	1,2,3,6,7,9-HxCDD	0.1
七氯二苯二噁英 1,2,3,4,6,7,8-Heptachlorodibenzodioxin	1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01
Octachlorodibenzodioxin	OCDD	0.000 1
多氯二苯呋喃 Polychlorinated dibenzofurans		
四氯二苯呋喃 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzofuran	2,3,7,8-TCDF	0.1
五氯二苯呋喃 1,2,3,7,8-Pentachlorodibenzofuran	1,2,3,7,8-PeCDF	0.05
五氯二苯呋喃 2,3,4,7,8-Pentachlorodibenzofuran	2,3,4,7,8-PeCDF	0.5
六氯二苯呋喃 1,2,3,4,7,8-Hexachlorodibenzofuran	1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1
六氯二苯呋喃 1,2,3,6,7,8-Hexachlorodibenzofuran	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1
六氯二苯呋喃 1,2,3,7,8,9-Hexachlorodibenzofuran	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1
六氯二苯呋喃 2,3,4,6,7,8-Hexachlorodibenzofuran	2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1
七氯二苯呋喃 1,2,3,4,6,7,8-Heptachlorodibenzofuran	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01
七氯二苯呋喃 1,2,3,4,7,8,9-Heptachlorodibenzofuran	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01