

环境科学高科技特色丛书 3

环境科学与生物芯片

高志贤 主 编



科学出版社
www.sciencep.com

环境科学高科技特色丛书 3

环境科学与生物芯片

主 编 高志贤

副主编 周焕英 陈忠斌

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书论述了生物芯片技术及其在环境科学中的应用。首先介绍环境污染与环境分析,然后依次介绍生物芯片、环境毒理学与毒理芯片、环境化学污染与免疫芯片、环境生物污染与基因芯片、环境蛋白质组学与生物质谱芯片、环境基因组学与基因芯片、生物传感器技术与环境科学。

本书可作为环境科学、生物科学相关专业教学人员和科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

环境科学与生物芯片/高志贤主编. —北京:科学出版社, 2005

(环境科学高科技特色丛书;3/戴树桂主编)

ISBN 7-03-015974-8

I. 环… II. 高… III. 生物-芯片-应用-环境科学 IV. ①Q78 ②X

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 083040 号

责任编辑:杨 震 吴伶伶 王国华 / 责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 9 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005 年 9 月第一次印刷 印张:11

印数:1—3 000 字数:195 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

《环境科学高科技特色丛书》序

21 世纪科技发展趋势的一个鲜明特点是多学科的交叉与综合。这种特点在环境科学研究中体现得尤为突出。现代高新技术的应用促进着自然科学和工程各学科的加速发展,而各种科学技术学科领域本身也在不断地进步中衍生出应用现代高新技术的新事物。

在环境科学与相关高新技术学科的交叉和融合过程中,近年来出现和形成了不少具有高科技特色的新内容并外延产生了很多新的研究方向。

为了将这些国内外近年发展的新知识、新研究的进展和动向介绍给从事环境科学及相关领域的科技工作者或用于培养相应专业的人才,我们迫切需要编著一套《环境科学高科技特色丛书》。

本套丛书包括:《数字环境》、《超临界流体技术在环境科学中的应用》、《环境科学与生物芯片》、《环境分子毒理学》、《环境有机污染修复技术》、《现代环境分析技术》、《手性技术与环境科学》等。它们是现代信息和遥感技术、现代生物科学与技术、物理、化学等理论和技术的新发展与环境科学交叉产生的新研究领域,在学术和实际应用两方面都显示出巨大的生命力与开拓前景。

例如,数字环境是在一个时空参照系中,具有多层次时间和空间组织结构、高分辨率的海量环境空间数据、宽带网络数据传输,以环境时空分析模拟和智能推理为内核,并且三维显示的环境空间技术系统。它的研究目标是将人类或生物生存空间的相关环境信息全部数字化,基于环境科学与工程基本原理,实现环境管理的可试验模拟和可操作,辅助环境空间决策,保障人类社会的可持续发展。《数字环境》一书将讲解数字环境基础,阐述数字环境技术,介绍数字环境应用。该书构思新颖,内容丰富,是一次开拓创新的尝试。

又如,在物质分离、化学分析、有机化学合成、环境污染控制等方面均已获得广泛研究和应用的超临界流体技术,目前尚无一本专门论述此种颇具特色的技术在环境科学中应用的专著。《超临界流体技术在环境科学中的应用》一书从超临界流体的特殊理化性质讲起,涉及其在环境分析、废物处理、清洁生产和绿色化学化工、纳米微粒制备、资源综合利用等多方面应用的原理、技术和示例。

“生物芯片”是近年从生物技术中开发出来的一种崭新技术。《环境科学与生物芯片》一书在介绍生物芯片的基础知识后将分别讨论毒理芯片、蛋白芯片、基因芯片、生物质谱芯片、生物传感芯片等,及其在环境科学、生命科学、卫生学多种领域的应用。

“环境分子毒理学”是环境科学与分子生物学和毒理学交叉所形成的一个新的学科方向。《环境分子毒理学》一书将阐述该领域的基础理论、研究方法和应用。内容将涉及外源化合物与生物大分子结合,自由基与氧化损伤机理,生物标志物及其检测方法,多组分联合致毒以及各类环境污染物的分子毒理学行为等备受关注的热点问题。

丛书的其余组成部分皆体现新的特点,富有高新技术内涵。不再依次赘述。

总之,本套《环境科学高科技特色丛书》将以具有高新技术特色,崭新的环境科学研究领域的新知识技能面世,以满足相关领域的读者对新知识的渴求。

本套丛书主要由南开大学环境科学与工程学院的教师负责编写,也邀请了部分校外专家参编,适合于高等院校环境科学与工程学科本科生、研究生、教师以及对环境保护感兴趣的科技人员阅读和参考。

本书的编写出版过程得到了科学出版社杨震编辑等的大力支持和帮助,特此致谢。

限于学识水平,书中错误在所难免,恳请读者批评指正。

戴树桂

2005年3月

前 言

人类对自然界破坏而产生的一系列后果严重的公害事件,给人类敲响了警钟,环境污染问题已经对人类的生存和发展产生了严重威胁。加强对各种环境污染物的监测,预防和处理各种环境污染,对于保护人类共同生存的环境具有重要而深远的意义。目前对环境污染物较常用的检测方法包括:针对化学污染物的化学分析法、色谱分析法、电化学分析法、光谱分析法、各种联用技术如液质和气质联用等;针对生物污染物的直接镜检、分离培养、生化试验、免疫分析、分子生物学检测等。近年来生物技术发展迅猛,其中生物芯片技术由于具有其他方法无法比拟的高通量、微量化、自动化、低成本等特点,在各个领域的应用研究正方兴未艾。将生物芯片技术应用于环境科学领域的研究也不断深入,针对各种环境污染物检测的生物芯片如毒理芯片、免疫芯片、基因芯片、生物质谱芯片、微流控芯片以及生物传感技术等文献报道不断出现。

本书在收集大量文献资料的基础上,结合作者的工作经验和体会而编写。由于生物芯片在环境科学各个领域的应用和发展速度并不一致,所以各章介绍的篇幅不同。本书力求介绍生物芯片技术的基本概念、发展现状和特点,尽可能反映现代环境科学的新进展,希望可以使广大读者对环境科学的现状以及生物芯片技术在环境科学领域的应用有较全面的了解。

在本书编写过程中,南开大学环境科学与工程学院戴树桂教授、军事医学科学院卫生学环境医学研究所李文选教授提出了许多宝贵的意见和建议,特此表示感谢。

本书共分八章,各章编写分工如下:第一章,张彦峰;第二章,陈忠斌;第三章,周焕英;第四章,高志贤、张彦峰、王红勇;第五章、第七章,靳连群;第六章,张蕾、周焕英;第八章,房彦军、欧国荣、严守雷、任杰、刘楠;生物芯片及环境科学的相关网址有朱胜坚提供。

由于生物芯片技术发展迅速,编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请广大同行和读者批评指正。

高志贤

《环境科学高科技特色丛书》

编辑委员会

主 编:戴树桂

副主编:孙红文

编 委(按拼音顺序为序):

陈 威 戴树桂 高志贤 金朝晖

聂庆华 漆新华 孙红文 王玉秋

张智超 朱 琳 庄源益

《环境科学与生物芯片》

编辑委员会

主 编:高志贤

副主编:周焕英 陈忠斌

编 委(按拼音顺序为序):

房彦军 靳连群 刘 楠 欧国荣

任 杰 王红勇 严守雷 张 蕾

张彦峰 朱胜坚

目 录

第 1 章 环境污染与环境分析	1
1.1 环境和环境问题	1
1.2 环境污染物	2
1.2.1 环境污染和环境污染物	2
1.2.2 环境化学污染物	3
1.2.3 环境生物污染物	6
1.2.4 食品安全和生物安全	8
1.3 生物净化和生物降解	10
1.4 环境分析	11
1.4.1 环境分析化学和环境监测	11
1.4.2 化学污染物分析	12
1.4.3 生物污染物分析	14
参考文献	16
第 2 章 生物芯片	17
2.1 生物芯片技术概述	17
2.2 生物芯片制作及检测分析	18
2.2.1 基因芯片制作及检测分析	18
2.2.2 蛋白质芯片的制作与检测	22
2.2.3 芯片实验室	24
2.3 生物芯片在环境分析中的应用	25
参考文献	26
第 3 章 环境毒理学与毒理芯片	28
3.1 环境毒理学概述	28
3.2 环境毒理学评价方法	29
3.2.1 具有毒理学意义的环境污染	29
3.2.2 环境污染物对机体作用的医学后果	32
3.2.3 环境污染物与机体的交互作用	33
3.2.4 环境污染物的定性和定量分析	34
3.2.5 环境污染物对机体毒性作用的评定方法	35

3.2.6 基因水平上的研究	38
3.2.7 细胞水平的研究	39
3.3 环境毒理学展望	40
3.4 毒理芯片技术	40
3.5 毒理芯片在环境毒理学中的应用	42
3.5.1 毒理芯片在致突变检测中的应用	42
3.5.2 毒理芯片在毒物靶标的筛选中的应用	44
3.5.3 毒理芯片在污染物的分类与分级中的应用	44
3.5.4 毒理芯片确定毒性机制及剂量效应关系	45
3.5.5 毒理芯片改进生物评价方法	46
参考文献	48
第4章 环境化学污染与免疫芯片	49
4.1 环境样品的前处理技术	49
4.2 环境化学污染物的免疫分析	50
4.2.1 免疫分析原理	50
4.2.2 抗原的合成	53
4.2.3 抗体的制备	56
4.2.4 免疫分析实例	57
4.2.5 免疫芯片研制与使用实例	59
参考文献	62
第5章 环境生物污染与基因芯片	64
5.1 环境生物污染概述	64
5.1.1 空气的生物污染	64
5.1.2 水中的生物污染	68
5.1.3 食品的生物污染	70
5.2 基因芯片在检测环境生物污染中的应用	73
5.2.1 微生物基因组	73
5.2.2 细菌的检测与鉴定	77
5.2.3 病毒的检测与鉴定	77
5.3 基因芯片检测环境中的病原菌	79
5.3.1 检测靶基因的扩增	79
5.3.2 基因芯片的制备	80
5.3.3 杂交检测	81
5.3.4 杂交结果的检测与分析	81

5.3.5 分离菌株的综合鉴定	81
5.3.6 结果	81
5.3.7 讨论	85
参考文献	86
第6章 环境蛋白质组学与生物质谱芯片	88
6.1 环境蛋白质组学概述	88
6.2 几种生物质谱芯片	90
6.2.1 MassARRAY™ 芯片系统	91
6.2.2 SELDI 芯片系统	92
6.2.3 生物传感芯片质谱	95
6.3 微流控芯片与质谱检测技术	97
6.3.1 微流控分析芯片简介	97
6.3.2 微流控芯片与质谱检测联用技术	98
6.4 生物质谱芯片在环境蛋白质组学中的应用	100
参考文献	102
第7章 环境基因组学与基因芯片	103
7.1 环境基因组学概述	103
7.1.1 环境基因组与环境基因组计划	103
7.1.2 环境基因组学的研究内容	104
7.1.3 环境基因组学研究对预防医学发展的影响	105
7.1.4 我国环境基因组学有关研究的情况	106
7.2 基因芯片与基因多态性研究	107
7.2.1 单核苷酸多态性的概念	107
7.2.2 SNP 的特点和在遗传学研究中的用途	108
7.2.3 利用基因芯片技术分析 SNP	110
7.2.4 用基因芯片分析 SNP 的实例	112
参考文献	114
第8章 生物传感器技术与环境科学	115
8.1 生物传感器技术及其在环境污染检测中的应用	115
8.2 生物传感器的组成及分类	115
8.3 生物传感器的特点和不足	116
8.3.1 生物传感器的特点	116
8.3.2 生物传感器的不足	117
8.4 生物传感器的性能提高及相关技术	117

8.5 几种新型生物传感器	118
8.5.1 乐甫波传感器概述	118
8.5.2 分子印迹-仿生传感器	122
8.5.3 表面等离子体共振生物传感器	134
8.5.4 双层类脂膜生物传感器	139
8.6 生物传感器在环境监测中的应用	142
8.6.1 用于水环境分析和监测的生物传感器	142
8.6.2 用于大气环境分析和监测的生物传感器技术	147
8.6.3 生物传感器在其他环境监测方面的应用	148
8.7 应用展望	149
参考文献	149
附录 1 环境科学相关机构网址	151
附录 2 生物芯片相关网址	156

第 1 章 环境污染与环境分析

1.1 环境和环境问题^[1,2]

环境是相对于某一中心事物而言的周围事物，环境科学所研究的环境是以人类为中心的周围事物，包括自然环境和社会环境。

人类出现以后，不断地改造自然和改善自己的生存条件。工业革命以来，特别是第二次世界大战以后，随着人口的不断增长和社会生产力的迅速发展，大量的废气、废水和废渣排入环境中，造成了严重的环境污染。地球上产生了一系列后果严重的公害事件，给人类敲响了警钟。环境问题已经对人类的生存和发展产生严重威胁。

环境问题既包括环境污染问题，也包括生态破坏问题。目前，全球性重大环境问题主要有：

(1) 温室效应与气候变暖。大气中二氧化碳 (CO_2) 等温室气体以及悬浮颗粒物浓度的迅速增加，改变了地球对太阳能的吸收和辐射平衡，由此引起的气温变化将会影响全球气候。

(2) 臭氧层破坏。从人类社会排入环境的氯氟烃 (CFC) 等物质，破坏了大气平流层的臭氧层，使过量的紫外线穿透大气层到达地球表面，危害人类的身体健康。

(3) 酸雨。大气中的二氧化硫 (SO_2) 和氮氧化物 (NO_x) 发生光化学反应，并和水汽结合，形成 $\text{pH} < 5.6$ 的酸雨，使得土壤酸化和建筑物被腐蚀。

(4) 有毒有害物质污染。在人类的工农业生产和日常生活过程中，大量的“三废”物质（废气、废水和废渣），以及有毒有害的化学品进入环境中，直接或间接地对生态系统和人类健康产生影响。

(5) 生态环境破坏。人类对自然资源的过度开发和利用引起了水土流失、土地荒漠化、地面沉降等问题，由此引起的水旱灾害、沙尘暴等对生产和生活产生了极大的影响。

(6) 生物多样性锐减。由于过度开发和捕杀、气候变化等自然或人为原因，相当数量的植物和动物种类已经或即将灭绝，物种多样性和生态系统多样性急剧减少。

(7) 海洋污染。海洋连续不断地接纳来自陆地的大量污染物，已经遭受到日

益严重的环境污染，特别是石油污染和近海赤潮，对整个海洋生态系统产生极大影响，给海洋渔业、水产业和旅游业带来巨大损失。

在人类逐步认识环境问题的过程中，发生了一系列具有重要历史意义的事件：

(1) 1962 年，环境保护的先行者美国科学家蕾切尔·卡逊 (Rachel Karson) 出版了《寂静的春天》一书，引发了人类对环境问题的关注和对自身行为的反思。

(2) 1972 年，在斯德哥尔摩召开了联合国人类环境会议，大会通过了《人类环境宣言》，唤起了各国政府对环境问题，特别是对环境污染问题的觉醒和关注。

(3) 1972 年，罗马俱乐部 (The Club of Rome) 发表了研究报告《增长的极限》，报告所表现出的对人类前途的“严肃忧虑”引起了国际社会的强烈反响。

(4) 1987 年，由挪威前首相布伦特兰夫人 (G. H. Brundland) 任主席的世界环境与发展委员会向联合国大会提交了研究报告——《我们共同的未来》，提出了解决人类重大经济、社会和环境问题的“可持续发展”道路，实现了人类有关环境与发展思想的重要飞跃。

(5) 1992 年，在巴西的里约热内卢召开了联合国环境与发展大会，通过了《里约环境与发展宣言》和《21 世纪议程》。大会高举可持续发展旗帜，使人类对环境与发展的认识提高到一个崭新阶段，成为人类历史上环境与发展事业的里程碑。

中国政府高度重视环境问题，从 1997 年开始，每年在全国人民代表大会和全国政治协商会议“两会”期间召开人口资源环境工作座谈会。中国政府认真履行 1992 年联合国环境与发展大会决议，在世界上率先于 1994 年发表了《中国 21 世纪议程》，表明了中国在解决环境与发展问题上的决心和信心，《中国 21 世纪议程》也成为中国实施可持续发展战略的行动纲领。

1.2 环境污染物

1.2.1 环境污染和环境污染物

环境污染是指由于自然或人为的原因，有害物质或因子进入环境，并在环境中扩散、迁移、转化，破坏了环境系统正常的结构和功能，降低了环境质量，对人类及其他生物的生存和发展产生不利影响的现象。在现阶段，环境污染问题是环境问题最突出、最集中的表现。

环境污染物是指进入环境后使环境的正常组成、结构、状态和性质发生变化，直接或间接有害于人类的生存和发展的物质。环境污染物有的是由自然界产

生的,但大部分是由人类的生产和生活活动产生的。

几十年来,人类为了控制各种有害的生物,如虫害、杂草、啮齿类动物以及病原体等,合成了大量的有机化合物,并将它们引入到环境中去。与此同时,在人类的生产生活过程中,大量的化学物质以一定水平进入我们的环境。它们并不是有目的地引入到环境中,而是通过泄漏、排放等形式进入环境中,如化石燃料中的烃类通过石化、能源、交通等工业活动释放到环境中。这些人工合成的化学物质,有很大一部分给人类带来了形形色色的环境问题,有的毒害作用很大,有的排放量很大,有的极低剂量就产生生物活性。所有这些污染物都会产生显著的生态问题。

环境污染物的种类多种多样,按污染物所影响的环境要素可分为大气污染物、水体污染物和土壤污染物;按污染物的形态可分为气体污染物、液体污染物和固体污染物;按污染物的性质可分为物理污染物、化学污染物和生物污染物。1976年,美国环境保护署(EPA)就制订并公布了水中的优先控制污染物(priority pollutant)名单,列出了129种污染物。欧洲经济共同体于1975年列出了污染物“黑名单”和“灰名单”。1998年,中国国家环境保护局(现国家环境保护总局)等四部委局联合颁布了《国家危险废物名录》,包括了47大类废物的类别、来源和常见危害组分。

目前,在国内生产总值和人口持续增长的情况下,全国各项主要污染物排放量呈持续减少趋势,但是,中国的环境污染问题依然严重,形势仍不容乐观。2004年6月,中国国家环境保护总局发布的《2003年中国环境状况公报》显示^[3]:2003年,水环境方面,全国七大水系407个重点监测断面中,38.1%的断面满足Ⅰ~Ⅲ类水质要求,32.2%的断面属Ⅳ、Ⅴ类水质,29.7%的断面属劣Ⅴ类水质。2003年,全国工业和城镇生活废水排放总量为460.0亿t,比上年增长4.7%;废水中氨氮排放总量129.73万t,比上年增长0.7%;大气环境方面,城市空气质量达到国家空气质量二级标准的城市占41.7%,比上年增长7.9%,但城市空气污染仍然严重。部分区域酸雨污染进一步加重。黄海近岸海域污染加重;渤海和东海近岸海域水质有所改善,但污染仍重;南海近岸海域水质与上年持平。全国海域全年共发生赤潮119次,累计面积约为14 550 km²。

1.2.2 环境化学污染物

环境化学污染物形态各异,种类繁多,对人类的健康和生产生活产生严重危害,是环境污染物中备受关注的对象。环境中受到关注的环境化学污染物有:含氯有机化合物,如多氯二苯并二噁英(PCDD)和多氯二苯并呋喃(PCDF)、多氯联苯(PCB)、氯代脂肪烃;多环芳烃(PAH),如苯并(a)芘[B(a)P];农药,包括杀虫剂、除草剂在内的有机氯、有机磷等各类农药,如滴滴涕

(DDT)、阿特拉津 (atrazine)、林丹 (lindane); 有机金属化合物, 如有机汞、有机锡化合物; 有毒的重金属和非金属元素及其化合物, 如镉 (Cd)、砷 (As) 及其化合物。常见的大气污染物包括气体污染物和颗粒物, 如氮氧化物、二氧化硫、挥发性有机污染物 (VOC)、臭氧 (O_3)、一氧化碳 (CO)、颗粒物 (PM)、铅 (Pb) 等。持久性有机污染物 (POPs) 是一类难以通过物理、化学或生物途径被降解的有机化合物的总称。由于 POPs 具有低水溶性、高脂溶性、半挥发性和难降解性, 会在较长时间内存在于环境介质中, 并在环境介质之间跨界面迁移, 从而具有污染范围大、持续时间长的特点。2001 年 5 月, 《斯德哥尔摩公约》签署生效, 它主要针对 12 种持久性有机污染物, 其中大部分是有机氯杀虫剂, 如艾氏剂 (aldrin)、氯丹 (chlordan)、狄氏剂 (dieldrin)、DDT、异狄氏剂 (endrin)、七氯 (heptachlor)、灭蚁灵 (mirex)、毒杀芬 (toxaphene) 和六氯苯 (hexachlorobenzene), 另外还有工业化学品 PCB 和工业生产的副产物 PCDD 和 PCDF。

对环境产生危害的化学污染物可概括为九类^[4]。

(1) 元素类: 包括单质和离子, 如铅 (Pb)、镉 (Cd)、铬 (Cr)、汞 (Hg)、As、铍 (Be) 等金属和非金属的单质或离子, 卤素的单质和离子, O_3 , 放射性核素等。

(2) 无机化合物类: 包括卤素、氮 (N)、碳 (C)、磷 (P)、硫 (S)、硅 (Si) 等元素的氢化物、氧化物、含氧酸及其盐, 如 F^- 、 Cl^- 、 CN^- 、 NH_4^+ 、 PH_3 、 H_2S 、CO、 NO_x 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 SO_2 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、石棉等。

(3) 烃类: 包括饱和或不饱和的脂肪烃、芳香烃和脂环烃, 如石油烃、苯系物 (BETX)、烃类溶剂、PAH 等。

(4) 有机金属和有机非金属化合物类: 如四乙基铅、三丁基锡 (TBT)、三苯基锡 (TPT)、甲基胂酸、甲基汞等。

(5) 含氧有机化合物类: 包括醇、酚、醚、醛、酮、酸、酯等含有氧元素的工业化学品, 如甲醛 (HCHO)、壬基酚聚氧乙烯醚 (NPEO)、双酚 A (bisphenol A)、邻苯二甲酸酯等。

(6) 有机氮化合物类: 包括芳香胺、硝基芳烃、硝基酚、亚硝胺、氨基甲酸酯类农药、偶氮染料等, 如苯胺、三硝基甲苯 (TNT)、硝基苊、涕灭威 (aldicarb) 等。

(7) 有机卤化物类: 包括氯代溶剂、有机氯农药等, 如四氯化碳 (CCl_4)、氯仿 ($CHCl_3$)、卤代乙酸、氯代乙烯、氯代苯酚、PCB、多氯三联苯 (PCT)、多溴联苯 (PBB)、二噁英类 (PCDD/PCDF)、多溴二苯醚 (PBDE)、DDT、林丹 (γ -HCH)、三卤甲烷化合物 (THM)、氯氟烃 (CFC) 等。

(8) 有机硫化合物类: 包括硫醇、硫醚、硫酸酯和芳香族磺酸等, 如二甲基

硫醚、硫酸甲酯、苯磺酸、萘磺酸、十二烷基磺酸钠 (SDS)、链烷基苯磺酸钠 (LAS) 等。

(9) 有机磷化合物类：包括磷酸酯、麟酸酯和有机磷农药等，如甲胺磷、对硫磷、沙林等。

随着环境科学研究的不断深入，近年来出现了一些受到广泛关注的“新”污染物^[5,6]。

(1) As：主要来自天然源的释放，以多种有毒形态存在，低剂量长期暴露就可引起人体癌症。2001 年美国环境保护署将饮用水中 As 的最大允许浓度从 50 $\mu\text{g/L}$ 降低到 10 $\mu\text{g/L}$ ，As 污染重新成为研究重点。

(2) 有机锡 (organotin)：丁基锡和苯基锡分别被用作船舶的防污漆和聚氯乙烯塑料的热稳定剂，其毒性对海洋生态产生重要影响，同时可能从塑料自来水管中渗滤出来，威胁人类饮用水。研究表明，有机锡对海洋螺类产生内分泌干扰作用。

(3) 化学战剂 (chemical warfare agent)：2001 年“9·11”事件以后，由于受到恐怖主义袭击的威胁，化学战剂的分析方法研究成为环境分析化学关注的焦点之一。

(4) 药物 (pharmaceutical compound)：包括人类和畜禽使用的各种激素、抗生素等药物，它们通过生物体排入环境，不能被城市污水处理设备完全去除，威胁饮用水源。这类污染物极低剂量就可以产生生物活性，已经开始引起人们的关注。

(5) 内分泌干扰物 (endocrine-disrupting compound, EDC)：干扰动物的内分泌系统，影响正常的生殖发育，包括排入环境的天然动植物激素、药物激素和具有内分泌干扰作用的多种化学合成物质，种类包罗万象。

(6) 藻毒素 (algal toxin)：由蓝绿藻等藻类产生，是神经毒素或肝毒素。“水华”暴发时，产生大量的微囊藻毒素 (microcystin) 等藻毒素，使鱼类、贝类和其他动物死亡，并污染人类饮用水，属于生物污染物。

(7) 甲基叔丁基醚 (methyl *tert*-butyl ether, MTBE)：汽油添加剂，是全球生产量较大的工业化学品之一，随着汽油储罐的泄露或船舶燃料排放进入环境中。它具有显著的水溶性而又难以生物降解，所以容易污染地下水和地表水。

(8) PBDE：用作家具、纺织品、塑料等多种商品中的阻燃剂，表现出与二噁英 (dioxin) 类物质相类似的生物活性。它是一种持久性有机污染物，已经从许多环境和生物样品中检出。

(9) 表面活性剂 (surfactant) 及其代谢物：广泛用于造纸、日用化工等工业生产中，主要通过各种废水进入环境，是最普遍大量的水体污染物之一，壬基酚聚氧乙烯醚 (nonylphenol ethoxylate, NPEO) 及其代谢物壬基酚 (nonyl-