

现代环境监测新技术译丛

水质评价中的生物分析工具

Bioanalytical Tools in Water Quality Assessment

[澳大利亚] 贝亚迪·埃舍尔 弗雷德里克·洛伊施 著
Beate Escher Frederic Leusch

李丹 李娟英 译

何苗 Janet Tang 审校

中国建筑工业出版社

现代环境监测新技术译丛

水质评价中的生物分析工具

Bioanalytical Tools in Water Quality Assessment

[澳大利亚]贝亚迪·埃舍尔 弗雷德里克·洛伊施 著

Beate Escher

Frederic Leusch

李丹 李娟英 译

何苗 Janet Tang 审校

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2013-8247 号

图书在版编目 (CIP) 数据

水质评价中的生物分析工具/ (澳) 埃舍尔, 洛伊施著; 李丹, 李娟英译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 8

(现代环境监测新技术译丛)

ISBN 978-7-112-18205-3

I. ①水… II. ①埃…②洛…③李…④李… III. ①水质分析—生物监测 IV. ①X832

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 131175 号

Bioanalytical Tools in Water Quality Assessment/ Beate Escher and Frederic Leusch with contributions by Heather Chapman and Anita Poulsen, ISBN 9781843393689

Copyright ©2012 IWA Publishing

This translation of *Bioanalytical Tools in Water Quality Assessment* is published by arrangement with IWA Publishing of Alliance House, 12 Caxton Street, London, SW1H 0QS, UK, www.iwapublishing.com

Chinese Translation Copyright ©2015 China Architecture & Building Press

Through Vantage Copyright Agency of China

All rights reserved.

本书经广西万达版权代理中心代理, IWA Publishing 正式授权中国建筑工业出版社独家翻译、出版

责任编辑: 姚荣华 董苏华 张文胜

责任设计: 董建平

责任校对: 李美娜 刘 钰

现代环境监测新技术译丛

水质评价中的生物分析工具

[澳大利亚] 贝亚迪·埃舍尔 弗雷德里克·洛伊施 著

Beate Escher Frederic Leusch

李 丹 李娟英 译

何 苗 Janet Tang 审校

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 14 $\frac{3}{4}$ 字数: 268 千字

2016 年 9 月第一版 2016 年 9 月第一次印刷

定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-18205-3

(27426)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

过去的几十年里，引起水环境或饮用水污染的有机物风险评价研究与日俱增。然而，目前大多数研究都聚焦在利用化学分析手段对单一化学物进行识别和定量评价上，近几年出现基于效应的测试方法，可以补充化学分析中基于暴露的化学物质风险评价。这些新的基于效应的测试方法，包括体外生物测试（生物分析工具），而且越来越多的生物分析工具在水质评价中有巨大应用前景。

这本书的目的是为非专业人员总结生物分析工具在水质评价应用的科学背景，并总结前沿科学。重点评价对象为饮用水，也包含其他水质，如地表水、城市循环水、工业废水、煤层气水和雨水。

第1章讲述了关于各化学品的背景资料概述。重点是有机物及其在环境和工程系统中的转化产物，例如农药、医药、个人护理品、消费品和工业化学品。

第2章介绍了风险评估和化学品的国际法规。本章讨论了生物分析工具在目前风险评估中所扮演的角色和它们在将来的发展前景。

第3章基于风险对各种类型的水体制定了标准和指导值。对全排水水毒性评估（WET）（也称为直接毒性评估）的应用进行了探讨。全排水水毒性评估是一种经典方法，已纳入很多国家的监管框架。尽管如此，WET很少作为监管工具，主要在研究中使用。WET通常与生态毒理分析一起开展，同时，体外测试分析也有相关应用。案例研究说明了它们不同之处。

接下来的章节介绍生物分析工具的科学依据。第4章将读者带入细胞水平机制，介绍作用方式分类和毒性通路，这对生物分析工具的设计和应用至关重要。这些细胞水平的效应是影响人类健康（第5章）和水生态系统（第6章）的共同根源。第5章总结了化学品暴露触发细胞水平影响所导致的潜在健康风险，并介绍了相关评价终点。第6章扩展了第4章，引入毒性通路概念，反推结果通路，使细胞效应与环境生物、种群和生态系

统的影响关联起来。

第7章介绍剂量响应评估、数据报告和基准值的推导。还介绍了衡量混合物效应的毒性当量浓度计算的数学背景。

第8章概述了混合毒性的概念，总结了化学物质在混合物中相互作用的方式。本章引入了毒性当量的概念，这是一种评估混合物毒性的方法，它应用了简单的度量和毒性当量浓度计算所支撑的科学原理（第7章介绍）。

第9章概述了如何开发一个生物分析方法，展示了水质评估常用的生物分析方法的概况。

生物分析工具的应用需要严格的质量控制和质量保证，这在第10章中进行了讨论。此外，第10章还介绍了较好的样品预处理方法。

在第11章，优选了地表水质量评估、废水、再生水处理和饮用水案例，对生物分析工具的使用和优势进行阐述。

第12章提供了未来该领域的发展前景。由于该跨学科领域的术语十分广泛，所有用到的缩写和术语都整理在术语表中。我们希望您能喜欢这本书，如同我们写这本书时一样心情愉悦。

致 谢

这本书得益于澳大利亚城市水安全研究联盟（UWSRA）的慷慨资助，该组织是昆士兰州政府、CSIRO 水与健康国家组织、格里菲斯大学和昆士兰大学的合作伙伴。该联盟成立的宗旨是解决东南昆士兰新兴城市的水问题，主要关注水安全和回用。特别要感谢联盟的主任唐贝·格比，一个生物学分析工具的倡导者，在本书校审过程中，不仅提供了研究机会，从道义上给予了支持和建议。

我们感谢 UWSRA 项目“生物分析工具和风险沟通”的项目专家组，负责人为格雷格·杰克逊，他们不断地鼓励我们，使我们看到了监管者和从业者的需求。该专家组由迈克尔·巴克汤、凯利·菲尔丁、大卫·哈利韦尔、迈克尔·劳伦斯、理查德·林、茱莉亚·普莱福德，安妮雅·鲁、路易·特伦布莱，希瑟·汶兹和克里斯汀·伊斯特组成。我们要特别感谢格雷格·杰克逊，凯莉·菲尔丁、安妮雅·鲁、大卫·哈利韦尔对本书各章草稿的校审。

我们要特别感谢我们的合作作者：撰写第 2 章和第 3 章的希瑟·查普曼，以及安尼塔·波尔森在语言上帮助精炼所有的章节和术语。我们非常感谢有您二位与我们一起书写这本书！

我们也感谢我们的研究组及相关机构，即国家环境毒理学研究中心（Entox）的艾达·阿布·巴卡尔、卡罗琳·高斯、伊娃·格林、玛丽塔·古德温、金灵、马蒂·郎、米罗斯拉娃·麦克娃，艾琳·梅林、本·麦博，约亨·穆勒，皮特·尼尔、珍妮特·邓，汉娜·梭曼和瓦萨·维克拉马辛，昆士兰大学先进水资源管理中心的朱利安·润枸特、玛丽亚·琼斯·菲儿、克莉斯特·乐科尔、沃尔夫冈·哥嘉克，智能水研究中心（格里菲斯大学）的艾瑞克·普查科娃、维基·罗斯和菲尔·斯科特，感谢他们每天的工作热情，在一种严格和更广泛的意义上，他们影响了生物分析工具的开发和应用，他们帮助审阅各章节草稿。

对担任我们目标受试者的朋友和同事表示衷心的感谢：罗尔夫·阿尔

滕堡、珍妮特·卡明、梅格塞德拉克和迈克尔·沃恩。

保罗·尼特尔帮助我们设计封面。IWA 的玛吉·史密斯在出版过程中提供巨大支持。

还有很多人要感谢，因为他们是团队的重要部分，他们支持和鼓励我们。在此不再一一列举，非常高兴和你们一起工作。

最后，感谢我们的家庭，让我们很多周末投入到本书撰写中。虽然我们在写书过程中有很多乐趣，但现实生活给予我们的远不止书写一本书。随着该领域的不断进步，我们期待更新的未来版本。

贝亚迪·埃舍尔

弗雷德里克·洛伊施

2011年8月于布里斯班

译者的话

近年来，我国水环境污染严重，水中有毒有害污染物对人体健康和生态环境污染造成严重危害。现有的水质标准及监测技术以化学分析为主，但化学分析法无法测定和评价水中所有污染物及其毒性危害，且不能反映污染物之间的相互作用，而生物分析方法能有效弥补化学分析的不足，已成为保障水环境安全的重要技术支持。目前，国内缺乏相关中文专著，因此我们引进了国外权威专著。

本书综合评价了水质评价中用到的各种生物分析工具，评价对象包括饮用水、再生水、常规及深度水处理工艺等。书中不仅详细介绍了生物分析工具的应用程序，还深入解析了与之相关的毒理学/生态毒理学背景知识，以便于更好地在水质评价中使用这些分析工具。本书内容新颖、详实，素材丰富，可作为环境科学与工程等专业本科生及研究生的教材或教学参考书，也可作为水质监管机构专家、顾问、研究人员及水务部门管理者的重要参考工具，也可以是环境工程师、分析化学家和毒理学家的参考手册。

在本书翻译过程中，感谢参加初稿翻译的研究生，潘程程（第1，12章），汪用志（第6章和术语），朱天鸿（第3，4章），王建森（第7，10章），李丹完成了第2，5，8，9，11章的翻译，与李娟英一起完成全书的统稿和第二稿校审。何苗和 Janet Tang 完成本书终稿的修改和校审。

限于译者的知识范围和学术水平，可能在翻译中会有一些不确切甚至讹误之处，诚请广大同行专家和广大读者不吝指出，以免贻误读者，译者不胜感激。

李丹 复旦大学
李娟英 上海海洋大学
何苗 清华大学
Janet Tang 澳大利亚
2015年8月

目 录

前言

致谢

译者的话

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 有机微量污染物	2
1.2.1 定义	2
1.2.2 转化产物	3
1.2.3 低浓度和混合物	5
1.3 环境毒理学	5
1.4 环境风险评估	5
1.5 生物分析工具	6
1.5.1 体内和体外生物测试法	6
1.5.2 细胞的生物测试法	9
1.5.2.1 原生细胞	9
1.5.2.2 转基因细胞	10
1.5.3 毒性作用模式	10
1.6 生物测试方法选择和成组测试法设计	11
1.6.1 基于保护目的的成组测试方案设计	12
1.6.2 基于化学物质类型的成组测试设计	12
1.7 生物分析工具在水质评价中的应用	13
1.8 化学分析和生物测试是互补的监测工具	14
第 2 章 化学物质的风险评估	17
2.1 引言	17
2.2 化学品风险评估现状	18
2.2.1 危害识别	19

2.2.2 效应评估	19
2.2.2.1 剂量效应关系	19
2.2.2.2 生物体内积累和毒性 (PBT) 评定	21
2.2.3 暴露评价	21
2.2.4 风险表征	21
2.2.5 风险管理	22
2.3 生物分析工具在化学物质风险评估中的应用	22
2.3.1 弥补数据空白	22
2.3.2 成组测试方案	23
2.3.3 动物替代试验方法	24
2.3.4 体外测试方法	24
2.3.5 生物分析技术在定量风险评估中的应用前景及方向	25
2.4 结论	26
第3章 水质评估和全排水毒性测试	28
3.1 引言	28
3.2 用水类型	29
3.2.1 饮用水	29
3.2.2 再生水、雨水和含水层补给	30
3.3 水生生态系统	31
3.4 全排水毒性测试 (WET)	32
3.4.1 水生生态毒理学测试系统在 WET 测试中的应用	33
3.4.2 原位 WET 测试	35
3.4.3 生态学终点	35
3.4.4 WET 测试中的生物标志物	36
3.4.5 利用生物分析工具进行 WET 测试	36
3.4.6 案例研究 1——悉尼市政污水 WET 测试	37
3.4.7 案例研究 2——利用鱼类胚胎试验进行水质筛查	37
3.5 结论	39
第4章 毒性作用方式及毒性通路	40
4.1 引言	40
4.2 毒物代谢动力学	41
4.2.1 吸收、分布和消除	41
4.2.2 外源性物质代谢	41
4.2.3 化学物质暴露的毒物代谢动力学指示物	42
4.2.4 基于细胞的生物测试表征毒物代谢动力学	43

4.3	毒效动力学过程：毒性通路	44
4.4	作用模式分类	46
4.4.1	非特异性毒性	48
4.4.2	特异性毒性作用方式	49
4.4.2.1	酶抑制作用	49
4.4.2.2	干扰能量产生	50
4.4.2.3	神经毒性	50
4.4.2.4	内分泌功能调节	51
4.4.3	反应性毒性	52
4.4.3.1	直接遗传毒性	52
4.4.3.2	作用于蛋白质的非特异性反应	53
4.4.3.3	氧化应激	53
4.4.3.4	脂质过氧化反应	54
4.5	适当平衡的保持：一般应激响应通路	54
4.6	结论	57
第5章 化学品对人体的毒性通路		58
5.1	引言	58
5.2	暴露途径	59
5.3	基础细胞毒性	60
5.4	靶器官毒性	60
5.4.1	肝毒性	60
5.4.2	肾毒性	63
5.4.3	心血管毒性	63
5.4.3.1	心脏毒性	63
5.4.3.2	血管毒性	64
5.5	非器官直接毒性	64
5.5.1	致癌性	65
5.5.2	发育毒性	65
5.6	系统毒性	66
5.6.1	血液毒性	66
5.6.2	免疫毒性	67
5.6.3	神经毒性	69
5.6.4	内分泌毒性	70
5.6.5	生殖毒性	72

5.7 结论	72
第6章 化学品在水生生物中的毒性通路	74
6.1 引言	74
6.2 从细胞水平到生态系统	74
6.3 对水生生物不良效应通路	76
6.3.1 对藻类的结局通路	76
6.3.1.1 基线毒性	76
6.3.1.2 除草剂对光合作用的抑制	76
6.3.2 对水蚤的不良结局通路	77
6.3.2.1 基线毒性	77
6.3.2.2 杀虫剂的活性	77
6.3.3 对鱼的不良结局通路	78
6.3.3.1 基线毒性	78
6.3.3.2 雌激素活性	79
6.4 采用体外测试研究水生生物中的毒性通路	80
6.5 结论	80
第7章 剂量效应评价	81
7.1 引言	81
7.2 剂量效应评价	81
7.2.1 剂量效应曲线	81
7.2.2 毒性延续	83
7.2.3 描述效应的基准值	84
7.3 毒性当量概念	87
7.3.1 相对毒性效力 (REP)	87
7.3.2 相对富集因子 (REF) 和毒性当量浓度 (TEQ)	88
7.3.3 TEQ 概念在水质评价应用中的局限性	91
7.4 结论	91
第8章 混合物及毒性当量概念	93
8.1 引言	93
8.2 特定混合物的毒性	94
8.2.1 独立作用	94
8.2.2 浓度或剂量相加作用	95
8.2.3 协同和拮抗效应	96
8.2.4 化学品分类	97
8.2.5 “无中生有”	98

8.3	利用毒性当量概念评估浓度相加效应	100
8.4	风险评估中的混合物	101
8.4.1	概念	101
8.4.2	风险评估中是否需要考虑复合效应	102
8.4.3	现有法规	103
8.5	混合物和水体质量	104
8.5.1	成千上万种低浓度化学品存在的水样会出现什么类型的 混合效应?	104
8.5.2	缩小混合物化学分析和生物测试的差距: TEQ _{chem} 和 TEQ _{bio}	104
8.6	结论	105
第9章	水质评价中生物分析工具研究现状	106
9.1	引言	106
9.2	细胞生物检测法的基本原理	107
9.3	一套合理的生物检测方法设计	109
9.4	指示非特异性毒性的生物测试法	110
9.4.1	细菌测试法	110
9.4.2	酵母测试法	111
9.4.3	鱼细胞系测试法	112
9.4.4	哺乳动物和人细胞系	113
9.5	指示反应性毒性的生物测试法	113
9.5.1	具有遗传毒性的致癌物	113
9.5.2	非遗传毒性亲电机制	117
9.5.3	外遗传致癌物	118
9.5.4	氧化应激	118
9.6	特异性作用模式的生物测试法	119
9.6.1	靶器官毒性	119
9.6.1.1	肝毒性	119
9.6.1.2	肾毒性	120
9.6.1.3	心血管毒性	121
9.6.2	非器官直接毒性	121
9.6.2.1	致癌性	121
9.6.2.2	发育毒性	121
9.6.3	系统毒性	122
9.6.3.1	血液毒性	122
9.6.3.2	免疫毒性	122

9.6.3.3 神经毒性	123
9.6.3.4 内分泌效应	125
9.6.3.5 生殖毒性	128
9.6.4 植物毒性	129
9.7 结论	130
第 10 章 质量保障和质量控制 (QA/QC)	131
10.1 引言	131
10.2 方法验证	131
10.2.1 准确度	132
10.2.2 精密度	132
10.2.3 鲁棒性	132
10.2.4 选择性	132
10.2.5 灵敏度	133
10.2.6 特异性	133
10.2.7 样品稳定性	133
10.3 实验室质量控制	133
10.3.1 重复性	133
10.3.1.1 板内重复性	133
10.3.1.2 板间重复性	134
10.3.1.3 再现性	135
10.3.1.4 真实样品检测的重复性	135
10.3.2 质量控制样品	135
10.3.2.1 标准曲线	135
10.3.2.2 阳性质控	137
10.3.2.3 阴性质控	137
10.3.2.4 现场和实验室空白	137
10.3.2.5 组间样品	138
10.3.3 质控图及固定控制标准	138
10.3.3.1 质控图	138
10.3.3.2 固定控制标准	139
10.3.4 标准化及存档	139
10.4 样品处理的重要性	139
10.5 结论	140
第 11 章 应用生物分析工具进行水质评价的案例研究	141
11.1 引言	141

11.1.1	历史背景	141
11.1.2	生物测试组合方法设计要素	144
11.1.3	生物检测法有效性评估	146
11.1.4	案例研究概述	146
11.2	应用生物分析工具评估微污染物在城市水循环系统中的 去除效果	147
11.2.1	城市水循环:从污水到饮用水	147
11.2.2	一些实际问题	148
11.2.3	水循环系统的水质基准	148
11.2.4	处理技术基准检测	152
11.2.5	化学分析和生物分析方法对比	152
11.3	不同类型水域的人体健康风险基准	154
11.4	利用臭氧处理工艺的污水处理厂生态风险评价	157
第 12 章	生物分析工具的发展前景	160
12.1	引言	160
12.2	目前取得的成就	160
12.2.1	选择基于毒性通路概念框架的生物测试的良好指导	160
12.2.2	更加综合的化学污染物范围测量	161
12.3	未来研究的需求及机遇	161
12.3.1	基质效应和萃取法	162
12.3.2	综合生物分析和化学分析	162
12.3.3	综合生物分析和整体动物试验	163
12.3.4	需要进一步发展的生物测定	163
12.3.5	组学技术	164
12.3.6	三维细胞系统可以更好地模拟完整有机体反应	164
12.3.7	生物分析工具就像“煤矿中的金丝雀”	164
12.4	通往监管使用之路	165
12.4.1	选项一:未稀释水样的无观测效应	165
12.4.2	选项二:定义基于效应的触发值	166
12.4.3	选项三:再定义基于效应的指导方针	167
12.5	结束语	167
术语解释	168
参考文献	188

第 1 章

绪 论

1.1 引言

化学监测为水样中单一有机污染物浓度提供定量评价，却无法提供水中存在的未知化学物质（如转化产物），非目标化学物质（即此前未知其存在）以及化学物质之间相互作用的相关信息。基于生物监测可以为化学分析提供补充信息，并根据毒性强弱（即毒性强的化学物质比毒性弱的化学物质更重要）提供样品中所有具有生物活性效应的微量污染物信息。

传统用于水质评价的水生毒性实验包括鱼类和水生无脊椎生物活体试验，以死亡率、生长、繁殖和取食反应等作为测试终点。生态系统层面的评价基于整个生态体系功能和结构进行，如物种多样性和基因结构。早期生命阶段实验（如斑马鱼胚胎毒性试验）比成鱼试验在伦理道德上更能被接受，而且大大提高了体内测试的敏感性。体外分子和细胞水平的测试敏感度高、花费少且耗时短，可作为动物试验的替代。水体测试中，人类和其他哺乳动物细胞系的应用促进了用于人类健康损害的毒性终点评估。

本书中将“生物分析工具”定义为可指示特定人类和/或环境健康的终点，且基于细胞和低复杂性的体外生物测定方法。这些工具包括完整细胞和转基因细胞测定，这两种测定注重强调自然特征，以加强检测敏感性；或者加入指示元件特征，使效果视觉化。此外，其他的测试包括单细胞生物体，如海藻、酵母、细菌以及某些酶也列入其中，但不包括其他无细胞测定（免疫分析和直接受体测定）。

生物分析工具主要优点之一。是可以检测出已知和未知化合物的复合毒性，而化学分析只能定量分析已知目标化学物质，无法确定毒性。生物测试可以通过混合毒性测定来衡量样品的风险，因为它可以清晰地说明不同化学物质的毒性差异及混合物中不同化学物质的相互作用。许多生物测试可以就某一特定毒性作用模式给出专门信息，而不是仅仅提供细胞接触

样品后的存活情况。这些信息可以通过一系列同时表征不同毒性作用模式的生物测定获得。因此,综合性生物组合测试可以提供水样中生物活性物质毒性测定的完整方法。单一生物测试也可用于特定目标保护,比如保持激素平衡。

本书特定关注有机化学品。尽管书中讨论的许多生物测试同样适用于金属和无机污染物,但有机物和无机物样品处理和数据分析方法不同。此外,虽然存在几百万种有机化学物质,但大部分从来没有通过化学分析识别出,检测出的有限种类使金属和无机化学物质得到综合化学分析,降低了基于效应的分析需要。

1.2 有机微量污染物

1.2.1 定义

有机微污染物是一组人造化学物质,如杀虫剂、工业化学品、消费品和药物,也包括天然化学物质,如激素(Schwarzenbach et al, 2006)(表 1.1)。正如其名,微污染物在水体和环境中出现在微克每升的浓度范围($1\mu\text{g}/\text{L}=10^{-6}\text{g}/\text{L}=0.000001\text{g}/\text{L}$),甚至低至纳克(ng)、皮克(pg)($1\text{ng}/\text{L}=10^{-9}\text{g}/\text{L}$; $1\text{pg}/\text{L}=10^{-12}\text{g}/\text{L}$)。

水体中常见的有机污染物(改编自 Schwarzenbach et al, 2006) 表 1.1

来源/用途	种类	选例
工业化学品	溶剂	四氯化碳
	中间物	甲基特丁基醚
	石油化学品	苯系物(苯, 甲苯, 乙苯, 二甲苯)(BTEX)
	增塑剂	
	添加剂	
	润滑剂	多氯联苯(PCBs)
	阻燃剂	多溴化二苯醚(PBDEs)
消费品	清洁剂	壬基酚聚氧乙烯醚
	药物	抗生素
	激素	乙炔雌二醇
	个人护理产品	紫外防晒剂
	爆炸物	
生物杀灭剂	杀虫剂	二氯二苯三氯乙烷(DDT), 三丁基锡, 莠去津
	非农用杀虫剂	三氯生
	味道和气味化合物	土嗅味素, 甲基异苊醇