

人类药品、激素和香料

——城市水资源管理中微污染物的挑战

Human Pharmaceuticals, Hormones and Fragrances
The challenge of micropollutants in urban water management

托马斯·A.特内斯 阿德里亚诺·乔斯 著
周雪飞 张亚雷 译 赵建夫 校



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

人类药品、激素和香料

——城市水资源管理中微污染物的挑战

Human Pharmaceuticals, Hormones
and Fragrances

The challenge of micropollutants in urban water management

Edited by Thomas A. Ternes and Adriano Joss

周雪飞 张亚雷 译 赵建夫 校

 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

人类药品、激素和香料:城市水资源管理中微污染物的挑战/(德)特内斯(Ternes, T. A.), (瑞士)乔斯(Joss, A.)著;周雪飞,张亚雷译. —上海:同济大学出版社,2009.7

书名原文: Human Pharmaceuticals, Hormones and Fragrances: The Challenge of Micropollutants in Urban Water Management

ISBN 978-7-5608-4029-1

I. 人… II. ①特… ②乔… ③周… ④张… III. ①城市用水—水资源管理—研究 ②城市用水—水污染—研究 IV. TU991.31 X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 070250 号

© IWA Publishing 2006 together with the following acknowledgement: "This translation of Human Pharmaceuticals, Hormones and Fragrances: The challenge of micropollutants in urban water management is published by arrangement with IWA Publishing of Alliance House, 12 Caxton Street, London, SW1H 0QS, UK, www.iwapublishing.com"

人类药品、激素和香料

——城市水资源管理中微污染物的挑战

Edited by Thomas A. Ternes and Adriano Joss

周雪飞 张亚雷 译 赵建夫 校

责任编辑 江 岱 责任校对 杨江淮 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787 mm×960 mm 1/16

印 张 26.5

印 数 1—2100

字 数 513 600

版 次 2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-4029-1

定 价 80.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

中文版序

对于专著《人类药品、激素和香料》中文本的出版,我们课题组的每位成员都非常高兴,对译者表示衷心感谢!

药品和个人护理用品在环境中的残留对城市水资源管理是一大挑战。但是由于其浓度、迁移转化规律和生态毒理学数据,缺乏在 PPCPs 的污染机制方面的研究,该问题的重要程度仍未确定,也缺乏相应的污染控制理论与技术。“海神计划”(POSEIDON project)得到欧盟第五研发框架计划的支持,主要目标是“水资源管理及水质”,主要研究内容包括整个欧洲范围内的药品和个人护理用品的消费和现状、在水资源中残留的数据、分析方法、环境风险评价、废水处理、饮用水处理和间接可用水的回用、去除 PPCP 的最优水循环工艺、源头控制与分离等。

本专著《人类药品、激素和香料——城市水资源管理中微污染物的挑战》主要基于“海神计划”2001—2005 年的研究成果,出版的目的是为水回用过程中如何处置有机微污染物,为各行各业保证充足的水量提供科学依据和参考。环境和人体健康需要对环境 and 饮用水中的污染物开展讨论、寻找预防及解决的办法,这就需要掌握从源头到消费各个环节的污染物毒理学知识和在水处理过程中的去除技术。

希望本书在中国的翻译出版,能够为中国从事水科学、技术、管理等领域的人员提供研究、应用和决策方面的支持,进而推动中国开展更深入的工作,达到城市水资源管理可持续发展的目的。



德国联邦水文研究所



瑞士联邦水科学与技术研究所

2009 年 5 月 13 日

译者序

药物和个人护理用品(Pharmaceuticals and Personal Care Products, 简称 PPCPs)被称为正在暴露的环境污染物,正逐渐引起科学家和公众的关注。PPCPs 是一个非常庞大的化合物体系,药物,如止痛药、抗生素、镇定剂、调血脂药等,其化合物种类超过3 000多种,化学原料药全世界年产量接近 2×10^6 吨;个人护理用品,如护肤品、牙膏、肥皂、防晒用品、护发用品等,其化合物种类也在几千种以上,全世界年产量超过 1×10^6 吨。2003 年中国已成为世界上最大的药物生产国,生产的化学原料药近1 500种,其消费量远高于其他国家。PPCPs 以及其代谢产物持续不断的进入水体、土壤和大气等环境介质之中,并成为继典型环境污染物质(PCBs、DDT、二氧(杂)芑和农药等)之后又一个研究的焦点。由于 PPCPs 本身具有较强的持久性、生物活性、生物累积性和缓慢生物降解性的特点,使得它们长期暴露于人体和水生、陆生生物体,因此这类物质的残留对环境产生长期潜在的影响将是必然的。

“海神计划”(POSEIDON project)得到欧盟研究计划的支持,主要目标是“水资源管理及质量”(Water Management and Quality),计划建立整个欧洲范围内的药品和个人护理用品在水资源中残留的数据,并对它们可能产生的风险以及预防污染的可能性进行评价,并评估最佳的废水处理和饮用水处理技术。专著《人类药品、激素和香料——城市水资源管理中微污染物的挑战》即是课题组多年研究成果的结晶,在世界上具有广泛的影响力。

本书在中国的翻译出版定将有助于我国在 PPCPs 的污染机制方面的研究,推动我国 PPCPs 控制理论与技术的发展。本书由周雪飞、张亚雷译,研究生曾旭、李飞、张彦浩、董黎静、张娴、石璐、桑文静、陈家斌等参与了翻译和校对工作。上海和国家科技计划、人才计划(072307007, 2006BAJ08800, NCET-07-0627)提供资助。在此,谨向各位原著作者、国际水协出版公司 Ian Morgan 先生、同济大学出版社江岱女士的支持和帮助表示衷心的感谢。

译者

2009 年 6 月于上海

前言

一个新的环境问题——“环境中药品和个人护理用品的残留”被选定为欧盟第五研发框架计划(European Union 5th Framework Programme for Research, 1998—2002)优先研究的课题。虽然已经证实在水资源中存在这些化合物,但是由于缺乏其浓度、迁移转化规律和生态毒理学数据,该问题的重要程度仍未确定。为了解决这个问题,在整个欧洲范围内开展了“海神计划”(POSEIDON project)^①,该计划由欧盟第五研发框架计划提供支持,核心议题是“水资源管理及水质”(Water Management and Quality)。

该计划的总目标是在整个欧洲范围内建立水资源中残留药品和个人护理用品的数据,并对他们可能产生的风险以及防止污染的可能性进行评价。因此,其目的在于评估最佳的废水处理和饮用水处理技术。海神计划在欧洲药物集群化(Pharma-Cluster)项目的筹建中起到主导作用,该项目也包括欧盟资助的制药废水生态毒理学评价与去除技术项目(Ecotoxicological assessments and removal technologies for Pharmaceuticals in wastewaters, REMPHARMA WATER)^②和污泥中兽药的环境风险评价项目(Environmental risk assessment of veterinary medicines in sludge, ERAVMIS)^③。

药物集群化项目最初的活动之一就是在2003年4月由法国国立农业研究中心(Cemagref)组织了“关于环境中人类和畜类药品的欧洲会议”(European Conference on Human and Veterinary Pharmaceuticals in the Environment)。参加这次会议的人员范围甚广,包括欧洲的科学家人、利益相关者、管理者,以及来自世界各地的科学家和管理机构人员。

① 为了避免抗生素进入环境,可以在处理过程中去除这些污染物。例如,德国不伦瑞克废水处理厂的实例。参见: <http://www.eu-poseidon.com>, <http://poseidon.bafg.de>。——译者注

② 关于废水中抗生素的评价与去除技术参见: www.unina.it/~rmnarotta。——译者注

③ 旨在研究环境中兽药抗生素的行为及效应。参见: www.cranfield.ac.uk/ecochemistry/eravmis。——译者注

药物集群化项目对该研究领域的发展及理论创新作出了重要贡献。另外,其研究结果已经对人类和畜类药品以及个人护理用品的残留物所造成的环境污染的预防提供了可能的解决办法。2003年6月,成功地出版了该项目的所有成果^①,这提高了欧洲科学家在此领域的主导作用,并在世界范围内发表了百余篇相关论文。

另外,海神计划——通过特殊的培训(TRITON)——也对培养年轻的欧洲科学家作出卓越贡献,其主要目的是向与项目有关的科学团队以及最终用户广泛地传授相关的方法和技术。

海神计划和其他药物集群化项目的优点是在欧洲范围内用科学可靠的数据使环境中药物残留的问题引起决策者和管理者的注意。但是,由于我们对该问题的认识有限,仍然缺乏环境中不同生物对残留药物的毒理学知识。ERA-PHARM——一个进行中的欧盟第六研发框架计划(FP6)在此方向上继续推进,同时海神计划和其他药物集群化项目的一些研究人员也积极参与其中。

我们确信这项研究计划的重要性,整个环境和人类健康都将从中受益。

Kirsi Haavisto

Andrea Tilche

^① 本书中涉及的涵盖13个欧洲国家的3项欧洲研究计划为: ERAVMIS、REMPHARMA WATER和海神计划。参见: http://www.waternunc.com/gb/dg11en84_2003.htm。——译者注

致 谢

本书的科学内容主要源于欧盟的海神计划(合同号 EVK1-CT-2000-00047, 2001 年 1 月 1 日—2004 年 6 月 30 日), 该计划由欧共体委员会第五届能源、环境和可持续发展计划框架提供资助。海神计划的部分捐款来自于瑞士, 由瑞士联邦环保局 (Swiss Federal Office for the Environment, FOEN), 以及瑞士的阿尔高州 (Aargau)、巴塞尔乡村半州 (Basel Land)、伯尔尼州 (Bern)、卢塞恩州 (Luzern)、沙夫豪森州 (Schaffhausen)、施维茨州 (Schwyz)、圣加仑州 (St. Gallen)、提契诺州 (Ticino)、图尔高州 (Thurgau) 和苏黎世州等 (Zurich) 的环保局共同资助。

感谢伯克利大学 (Berkeley) 的 David Sedlak、Ed Kolodziej、Lorien Fono、Mong Hoo Lim、Tim Durbin、Eva Agus 和瑞士联邦水科学与技术研究所 (Eawag) 的 Willi Gujer 对本书稿的校对, 感谢 Med. Richard Cathomas 和 Christoph Ort 博士对本书部分内容提供了巨大帮助。另外, 感谢 Lydia Zweifel 对图表的编排, Yvonne Lehnhard 所做的封面设计, Tarek ElAref 对附录工作的贡献。

感谢海神计划的科学主任 Kirsi Haavisto 对整个项目给予强有力的支持。

下面列出了海神计划的人员以及为本书做出贡献的人员名单。

欧盟海神计划的科学主任 Kirsi Haavisto

海神计划的合作者

德国, 科布伦茨, 联邦水文研究所; 威斯巴登, ESWE-水资源和水处理技术研究所

Federal Institute of Hydrology (BfG), Koblenz; ESWE-Institute for Water Res. and Water Technology, Wiesbaden, Germany

Matthias Bonerz, Derek McDowell, Guido Fink, Nadine Herrmann, Burkhard Hoffmann, Dirk Löffler, Jeanette Stüber, Rolf-Dieter Wilken, Thomas A. Ternes

瑞士,迪本多夫,瑞士联邦水科学与技术研究所 (Eawag) (LSMD)

Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag) Dübendorf, Switzerland

Alfredo Alder, Silvio Canonica, Adriano Joss, Anke Göbel, Marc Huber, Elvira Keller, Christa McArdell, Angela Thomsen, Urs von Gunten, Walter Giger, Hansruedi Siegrist

芬兰,坦佩雷,坦佩雷工业大学

Tampere University of Technology, Tampere, Finland

Susanna Korhonen, Niina Lindqvist, Sari Kuusisto, Jari Lehtiranta, Tuula Tuhkanen

奥地利,维也纳,维也纳工业大学

Vienna University of Technology, Vienna, Austria

Manfred Clara, Oliver Gans, Birgit Strenn, Birgit Vogel, Norbert Kreuzinger

西班牙,圣地亚哥-德孔波斯特拉,圣地亚哥-德孔波斯特拉大学

University of Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, Spain

Marta Carballa, Maria Llompарт, Francisco Omil, Juan M. Lema

波兰,格利维采,西里西亚工业大学

Silesian University of Technology, Gliwice, Poland

Joanna Surmacz-Górska, Sebastian Zabczynski, Korneliusz Miksch

德国,ECT Oekotoxikologie 股份有限公司

ECT Oekotoxikologie GmbH, Germany

Markus Liebig, Johann F. Moltmann, Thomas Knacker

法国,苏伊士集团水与环境国际研发中心-环境

CIRSEE-Environment, France

Auguste Bruchet, Marie-Laure Janex-Habibi

海神计划的最终用户

德国,Biebesheim 水厂

Waterworks Biebesheim, Germany

Lilo Weber

德国,WEDECO 环境技术股份有限公司

WEDECO Umwelttechnologie GmbH, Germany

Achim Ried

德国,不伦瑞克废水协会

Wastewater Association Braunschweig, Germany

Bernhard Teiser

芬兰,凯美拉公司

Kemira, Finland

Jukka Jokela

最初的 POSEIDON 团队中未包括的本书作者

德国联邦环保局

German Federal Environmental Agency

Jan Koschorrek, Petra Appel (第 4a 章)

德国,慕尼黑大学, Walther-Straub 学院

Ludwig Maximilian University Munich, Germany, Walther-Straub-Institut

Harald Mückter (第 5 章)

瑞士,迪本多夫,瑞士联邦水科学与技术研究所 (Eawag)

Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag) Dübendorf, Switzerland

Judit Lienert (第 9 章)

德国,乌尔姆应用科学大学

University of Applied Science Ulm, Germany

Ursula Klaschka (第 9 章)

瑞典,斯德哥尔摩县议会

Stockholm County Council, Sweden

Ake Wennmalm (第 9 章)

贡 献 者

- Alfredo C Alder**, Eawag, Ueberlandstr. 133, PO Box 611, 8600 Dübendorf, Switzerland
- Petra Apel**, Umweltbundesamt (Federal Environmental Agency), Dpt. IV 1.2, PO Box 1406, 06813 Dessau, Germany
- Auguste Bruchet**, SUEZ ENVIRONNEMENT-CIRSEE, 38 rue du Pdt Wilson, 78230 Le Pecq, France
- Marta Carbala**, Universidad de Santiago de Compostela, ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIERIA, 15782 Santiago de Compostela, Spain
- Manfred Clara**, Umweltbundesamt, Spittelauer Lände 5, 1090 Wien, Austria
- Walter Giger**, Eawag, Ueberlandstr. 133, PO Box 611, 8600 Dübendorf, Switzerland
- Anke Göbel**, Eawag, Ueberlandstr. 133, PO Box 611, 8600 Dübendorf, Switzerland
- Willi Gujer**, Eawag, Ueberlandstr. 133, PO Box 611, 8600 Dübendorf, Switzerland
- Kirsi Haavisto**, European Commission, DG RTD-D1. 2, rue de la Loi 200, BE-1049 Brussels, Belgium
- Marie-Laure Janex-Habibi**, SUEZ ENVIRONNEMENT-CIRSEE, 38 rue du Pdt Wilson, 78230 Le Pecq, France
- Adriano Joss**, Eawag, Ueberlandstr. 133, PO Box 611, 8600 Dübendorf, Switzerland
- Ursula Klaschka**, Fachhochschule Ulm, Prittwitzstrasse 10, 89075 Ulm, Germany
- Thomas Knacker**, ECT Oekotoxikologie GmbH, Böttgerstr. 2-14, 65439 Flörsheim am Main, Germany
- Jan Koschorreck**, Umweltbundesamt (Federal Environmental Agency), Dpt. IV 1.2, PO Box 1406, 06813 Dessau, Germany
- Norbert Kreuzinger**, Vienna University of Technology, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Karlsplatz 13/226, 1040 Wien, Austria
- Valentina Lazarova**, SUEZ ENVIRONNEMENT-CIRSEE, 38 rue du Pdt Wilson, 78230 Le Pecq, France
- Markus Liebig**, ECT Oekotoxikologie GmbH, Böttgerstr. 2-14, 65439 Flörsheim am Main, Germany
- Judit Lienert**, Eawag, Ueberlandstr. 133, PO Box 611, 8600 Dübendorf, Switzerland
- Dirk Löffler**, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, Germany
- Christa S. McArdell**, Eawag, Ueberlandstr. 133, PO Box 611, 8600 Dübendorf, Switzerland
- Korneliusz Miłsch**, TU Slesia, Department of Environmental Biotechnology, Akademicka 2, 44101 Gliwice, Poland
- Johann F. Moltmann**, ECT Oekotoxikologie GmbH, Böttgerstr. 2-14, 65439 Flörsheim am Main, Germany
- Harald Mückter**, Walther-Straub-Institut, Goethestrasse 33, D-80336 München, Germany

Francisco Omil, Universidad de Santiago de Compostela, ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIERIA,
15782 Santiago de Compostela, Spain

David Sedlak, 609 Davis Hall, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California,
Berkeley, CA 94720-1716, USA

Hansruedi Siegrist, Eawag, Ueberlandstr. 133, PO Box 611, 8600 Dübendorf, Switzerland

Marc J. -F. Suter, Eawag, Ueberlandstr. 133, PO Box 611, 8600 Dübendorf, Switzerland

Thomas A. Ternes, Bundesanstalt für Gewasserkunde, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, Germany

Andrea Tilche, European Commission, DG RTD-D1.2, rue de la Loi 200, BE-1049 Brussels, Belgium

Tuula Tuhkanen, TU Tampere, PO Box 541, 33101 Tampere, Finland

Urs von Gunten, Eawag, Ueberlandstr. 133, PO Box 611, 8600 Dübendorf, Switzerland

Lilo Weber, Hessenwasser GmbH Zentrallabor, Z-OP-Probenahme+Betriebstechnik, Grafenhäuser Straße 118,
64293 Darmstadt, Germany

Ake Wennmalm, Drug Management and Informatics (Läkemedelsenheten), POBox 4027, SE-141 04

Sebastian Zabczynski, TU Slesia, Department of Environmental Biotechnology, Akademicka 2, 44101 Gliwice, Poland

目 录

中文版序

译者序

前言

致谢

贡献者

1 引言	1
1.1 城市水循环	1
1.2 对暴露于 PPCPs 的关注	2
1.3 本书目的	4
1.4 目标物质：药品和个人护理用品	5
1.5 所选 PPCPs	6
1.6 章节内容	7
参考文献	11
2 消费和出现	13
2.1 消费	13
2.1.1 药物/2.1.2 个人护理用品	
2.2 所选药物的排泄速度	17
2.3 人类使用的药物和麝香香料的暴露途径	20
2.4 在医院和城市废水、地表水、地下水、饮用水和污泥中出现的 PPCPs	21
2.4.1 医院废水/2.4.2 处理后废水和地表水中的 PPCPs 浓度/	
2.4.3 地下水/2.4.4 饮用水/2.4.5 污水污泥	
2.6 预测浓度模型	33
2.6.1 城市污水原水中药物浓度的预测/2.6.2 污水处理厂出水和	

地表水中的药物浓度预测/2.6.3 案例：处理后污水和地表水中环丙沙星 PEC 和 MEC 的比较	
2.7 结论	39
参考文献	40
3 分析方法	51
3.1 引言	51
3.2 取样	52
3.3 萃取和富集	57
3.3.1 固体样品/3.3.2 液体样品/3.3.3 净化	
3.4 衍生化	66
3.4.1 乙酰化/3.4.2 甲基化/3.4.3 五氟苯甲基转化/3.4.4 硅烷化	
3.5 色谱	67
3.5.1 气相色谱/3.5.2 高效液相色谱	
3.6 质谱	69
3.6.1 GC/MS/3.6.2 LC/MS/3.6.3 质谱检测	
3.7 质量保证	73
3.7.1 综述/3.7.2 实例：污泥和沉积物中的雌激素	
3.8 分析方法	78
3.8.1 液体样品/3.8.2 污泥样品	
参考文献	85
4a 国外的药品环境风险评价立法背景及法规简述——欧盟、美国、日本、澳大利亚和加拿大	99
4a.1 引言	99
4a.2 欧盟的情况	99
4a.2.1 立法要求/4a.2.2 规范	
4a.3 美国的情况	101
4a.3.1 立法要求/4a.3.2 规范	
4a.4 日本的情况	103
4a.4.1 立法要求/4a.4.2 规范	
4a.5 澳大利亚的情况	104
4a.5.1 立法要求/4a.5.2 规范	
4a.6 加拿大的情况	105
4a.6.1 立法要求/4a.6.2 规范	

4a.7	地区之间数据的协调一致	105
4a.8	结论	106
	参考文献	107
4b	环境风险评价	109
4b.1	引言	109
4b.2	环境风险评价的方法和性能	111
	4b.2.1 危害性评价/4b.2.2 暴露量评价/4b.2.3 效应评价/	
	4b.2.4 风险表征/4b.2.5 根据 EMEA(2005)进行的 PPCPs 环境	
	风险评价概述/4b.2.6 对 EMEA(2005)环境风险评价程序的考虑	
4b.3	结论	127
	参考文献	128
5	某些水溶性药品的人体和动物毒理学	133
5.1	引言	133
5.2	作为环境污染物药品的分类、浓度和化学稳定性	135
5.3	雌激素和类雌激素化合物	138
	5.3.1 雌激素和相关类固醇/5.3.2 外雌激素(内分泌干扰物)	
5.4	抗感染药剂	146
	5.4.1 磺胺类药和二氨基嘧啶/5.4.2 氟喹诺酮类药/5.4.3 氯霉	
	素类药/5.4.4 大环内酯类及其相关药物/5.4.5 四环素类药/5.4.6	
	硝基咪唑类药/5.4.7 β -内酰胺类抗生素/5.4.8 氨基糖苷类药	
5.5	抗肿瘤药物	159
5.6	不透光射线剂(X射线造影剂)	162
5.7	抗惊厥药剂	163
5.8	肾上腺素能药物	164
5.9	讨论	165
5.10	风险最小化的预防性措施	167
5.11	展望	168
5.12	附录:引用的药物在药理学、毒理学和代谢动力学方面的详述	168
	5.12.1 雌激素/5.12.2 磺胺类药和二氨基嘧啶/5.12.3 氟喹诺	
	酮类药/5.12.4 氯霉素类药/5.12.5 大环内酯类及其相关药物/	
	5.12.6 四环素类药/5.12.7 硝基咪唑类药/5.12.8 β -内酰胺抗	
	生素/5.12.9 氨基糖苷类药/5.12.10 抗肿瘤药/5.12.11 放射性	
	不透明物质(造影剂)/5.12.12 抗惊厥药/5.12.13 肾上腺素能药	
5.13	数据和参考书目	211

参考文献	211
6 废水处理	219
6.1 引言	219
6.2 PPCP 的去除机理	220
6.2.1 污泥吸附/6.2.2 气提/6.2.3 生物转化	
6.3 在完整系统中 PPCP 的去除	234
6.3.1 完整系统：取样和物料平衡/6.3.2 在完整系统中去除率模型/6.3.3 在完整系统中的去除效果/6.3.4 絮凝过滤中的生物活性/6.3.5 污泥的厌氧消化/6.3.6 提高去除效果的方法	
6.4 污水在管道系统中的流失	249
6.4.1 合流制下水道溢流/6.4.2 污水向外的渗漏	
6.5 高级处理技术	250
6.5.1 臭氧/6.5.2 高级氧化工艺(AOP)/6.5.3 膜过滤/6.5.4 活性炭	
6.6 结论	255
参考文献	256
7 饮用水处理中 PPCP 的去除	261
7.1 饮用水管理	261
7.2 饮用水生产的多级系统	262
7.2.1 水源/7.2.2 去除微污染物的处理工艺	
7.3 物理化学常数：评价药物去除效率的工具	263
7.3.1 药物的氧化/7.3.2 药物的活性炭吸附	
7.4 减小药物浓度的处理单元的评价	276
7.4.1 岸滤/7.4.2 混凝/絮凝/7.4.3 GAC/PAC 过程/7.4.4 膜工艺	
7.5 工业规模的饮用水处理	280
7.5.1 工业规模自来水厂处理工艺的评价/7.5.2 结论	
7.6 总述	283
参考文献	283
8 饮用水间接回用	287
8.1 引言	287
8.1.1 饮用水回用的作用/8.1.2 饮用水回用的水质/8.1.3 “海神计划”在水回用中的主要目标和结果	

8.2	计划性间接饮用水回用的水质要求和现有标准	291
8.3	计划性间接饮用水回用的处理要求和个案研究	291
8.3.1	美国的经验/8.3.2 欧洲的经验/8.3.3 欧洲“海神计划”的个案研究	
8.4	PPCPs 被用作地下水的人为示踪剂	299
8.5	间接饮用水回用的管理方法	301
8.5.1	废水计划内间接饮用水回用的重点是 PPCPs 的去除	
	参考文献	306
9	源控制与源分离	311
9.1	引言	311
9.2	源控制	312
9.2.1	药物在环境方面的分类/9.2.2 生态标签/9.2.3 药品的靶向治疗(非预防性的或经验性的消费)	
9.3	源分离	326
9.3.1	工业、医院和疗养院:现场处理/9.3.2 尿源分离/9.3.3 废弃药物的处理	
9.4	结论	329
	参考文献	330
10	结论及展望	339
10.1	结论	339
10.2	展望	344
	参考文献	344
	附录	347
A.1	缩写	347
A.2	变量和符号	348
A.3	单位	349
A.4	术语表	349
A.5	化合物一览表	355
	索引	393