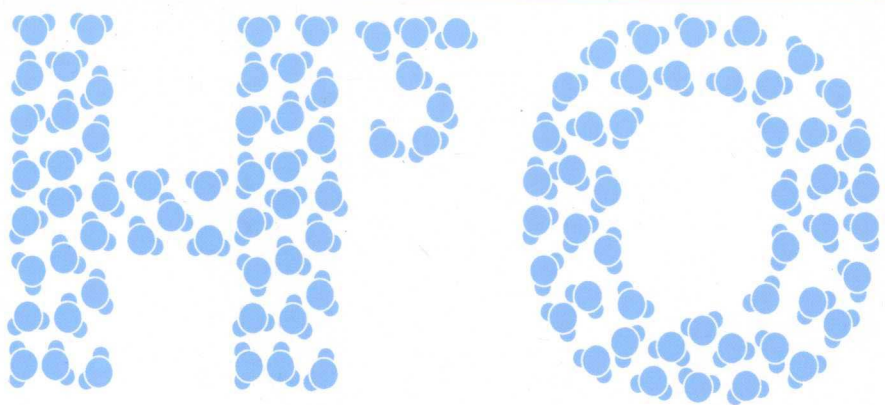
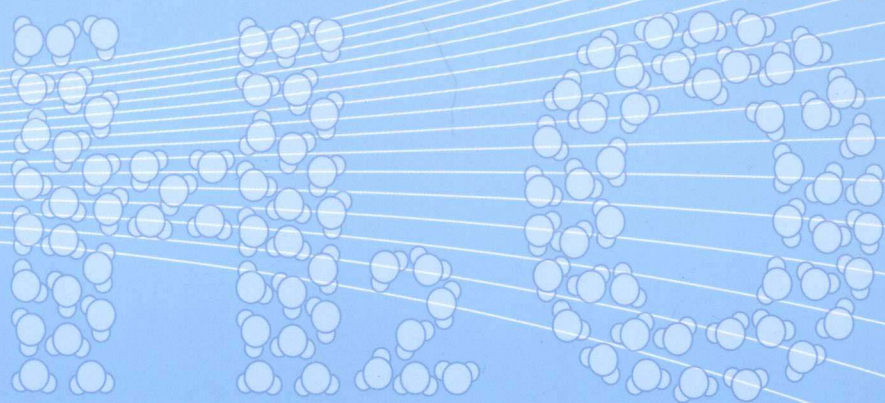




现代水处理设备 与方法

[加] 亚历山大·奥梅利琴科
[乌] 亚历山大·皮沃瓦罗夫 编
[英] 吉 姆·斯 温 德

郭建博 杨景亮 等译

现代水处理设备与方法

[加] 亚历山大·奥梅利琴科

[乌] 亚历山大·皮沃瓦罗夫 编

[英] 吉 姆·斯 温 德

郭建博 杨景亮 等 译

Translation from the English language edition;
Modern Tools and Methods of Water Treatment for Improving Living Standards
by Alexander © Omelchenko, Alexander A. Pivovarov, and W. Jim Swindall
Copyright ©2005 Springer, The Netherlands
as a part of Springer Science+Business Media
All Rights Reserved

Chinese translation copyright © China Meteorological Press 2009
All Rights Reserved

英文版版权©斯普林格出版社 2005

中译本(简体中文)版权©气象出版社 2009
保留所有权利

图书在版编目(CIP)数据

现代水处理设备与方法/(加)奥梅利琴科等著;郭建博等译.—北京:气象出版社,2009.6
ISBN 978-7-5029-4766-8

I. 现… II. ①奥…②郭… III. ①水处理设施②水处理-技术 IV. TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 083881 号

北京市版权局著作权合同登记:图字 01-2008-0301 号

现代水处理设备与方法

Xiandai Shui Chuli Shebei yu Fangfa

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:胡育峰

封面设计:翟劲松

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:352 千字

版 次:2009 年 6 月第 1 版

印 数:1~2000

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@263.net

终 审:章澄昌

责任技编:吴庭芳

印 张:13.75

印 次:2009 年 6 月第 1 次印刷

定 价:45.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

译者序

21 世纪, 饮用水的安全是人们关注的热点和焦点, 为人类提供安全的饮用水是现代
社会最重要的课题之一。同时,《国家环境保护“十一五”规划》指出:开展饮用水水源地
环境状况普查,编制饮水安全保障规划和管理办法及饮用水水源地环境保护规划。加强饮
用水水源保护区水土保持、水源涵养,控制面源污染。严格限制在饮用水水源保护区上游
建设水污染严重的化工、造纸、印染等类企业。开展地下水污染状况调查,编制地下饮用
水水源地保护规划,防治地下水污染。重视对水体中持久性有机污染物的研究和防范。
健全饮用水水源安全预警制度,制订突发污染事故的应急预案。完善饮用水水源地监测
和管理体系,每年对集中式饮用水水源地至少进行一次水质全分析监测,并及时公布水环
境状况。从而将饮用水的安全问题提到一个新的高度和日程。本书正是基于此而被选定
和翻译的。

在上述动力的推动下,近年世界各国饮用水科学和技术得到了迅速发展。特别是保
护水源、控制水源污染以保障饮用水安全,控制输配水过程二次污染确保用户终端水质安
全,优化和强化传统常规处理工艺去除水中污染物,对微量有毒有害污染物的深度处理加
强饮用水安全等方面取得一定的进展和丰硕成果。本书就是这些成果的集中体现。

本书的特点是突出的新颖性和实例性,可以作为环境科学,环境工程等专业的教学科研参考书。

本书由郭建博主译,具体翻译分工为:前言和第一部分(柳广飞,大连理工大学),第二
部分(郭建博,李再兴),第三部分(郭建博,刘春),第四部分(宋智勇,中石化胜利油田胜利
采油研究院微生物研究中心)。全书由郭建博和杨景亮译校、统稿和定稿。此外,河北省
水文水资源勘测局李红亮高工参与了此书的译校工作;河北科技大学环境科学与工程学
院的王向宁、张立辉、李晓霞、尹明、王晓磊、苗志加、马俊科和康丽等硕士研究生,在资
料查阅、书稿翻译、校对等方面做了大量工作,在此一并表示衷心感谢。

由于本书内容涉及专业面宽和译者英语水平有限,因此在翻译过程中肯定存在不妥
和错误之处,敬请读者不吝指正。

本书的出版得到河北科技大学创新团队基金和河北省自然科学基金(E200700063)的
资助,气象出版社的编辑胡育峰先生在成书前后给予热情帮助和大力支持,在此深表谢
意。

译者
河北科技大学中校区
2008 年 10 月

前言

为地球上的人类提供安全的饮用水是现代社会最大的挑战之一。正基于此,联合国与联合国教科文组织宣布 2003 年为国际淡水年。

2003 年 11 月 19—22 日,北约“改善生活水平现代水处理设备与方法”高级研讨会在乌克兰的第聂伯罗彼得罗夫斯克举行。来自保加利亚、加拿大、克罗地亚、捷克、丹麦、意大利、立陶宛、摩尔多瓦、波兰、罗马尼亚、俄罗斯、英国、乌克兰、美国和乌兹别克斯坦等 15 个国家的 31 名代表与会。会议讨论了与水的纯化、消费、节约和保护相关的复杂的社会、经济和生态问题的科学概念与实际解决手段。与会科学家、专业人士建立了进一步合作和交流的合作网。

对本次研讨会地点的选择是经过一番甄选后才作出决定的。第聂伯罗彼得罗夫斯克位于第聂伯河畔,拥有 130 万人口。作为最大的工业中心之一,它具有当代乌克兰所面临的所有环境问题。2001 年,来自乌克兰工业和饮用水供水系统的七分之一水样达不到卫生标准。十二分之一水样达不到微生物学标准。2000 年,对乌克兰最大的两个城市——基辅和哈尔科夫所进行的水质分析表明,所有的水样都表现出一定程度的毒性。饮用水的化学和微生物污染严重降低了人民的生活标准。饮用水的水质也被认为是乌克兰的国家安全要素之一。

研讨会分为四个部分。第一部分,“水的纯化与特殊处理及水质监测的最新进展”,与会者了解到了美国饮用水处理,英国冷却塔的生物控制以及利用放射性核素 Pb-210 和 Cs-137 监测加拿大北极圈污染的最新进展,还包括利用生物传感器移动分析测试技术监测水质,饮用水中细菌的快速监测方法等 3 个报告。第二部分,“用于科学、工业和公共健康各领域的现代特殊水处理技术的发展”,报告讲述了一些新颖的方法和设备,如电化学刺激吸附和吸附—膜法,泡沫提取法,纤维吸附剂,原位氧帘技术,离子交换膜,电化学生成银和铜离子及胶体金用于水纯化和纯化后处理。第三部分,“实现水纯化和废水处理高技术参数的设备与方法”,讨论了有关废水处理的研究进展,其中包括丹麦的工业水回用和水循环,生物灭菌剂聚合物作为一种新尝试在水处理中的应用,废水纯化的电化学过程,利用低温等离子纯化含化学污染物、细菌和病毒的废水。第四部分,“水资源的管理,水处理的计划、培训和教育”,该报告讲述了来自英国、保加利亚、波兰、克罗地亚和罗马尼亚的水资源管理的许多案例研究,也讨论了工业—大学合作进行研究生教育和水处理领域的培训这一重要议题。

本书包括了上述所有内容,我们相信,此书对从事水处理、纯化、节约和保护研究的科学家、专业人士及学生会有所帮助。

遗憾的是,本书仅包括了研讨会上的正式报告,而所有热烈的讨论、信息交流及非正式会谈内容未能在其中有所反映。备感欣慰的是,会议中形成的合作网,以及来自北约及其成员国的科学家和专家们之间所建立的友谊都远远超过了会议本身。

感谢乌克兰国立化工大学的学生志愿者:Tatyana Bolva, Boris Dubina, Oksana Holovko, Dmitri Misnyankin, Dmitri Pshinnik, Andriy Reshetnikov 和 Natalia Vedyakina, 以及他们的导师 Anna P. Tischenko 博士对本次会议的大力支持。同时,非常感谢国际心血管科学学会的 Naranjan S. Dhalla 博士和 Ivan Berkowitz 先生,以及圣波尼费斯总医院研究中心的 John Foerster 博士的大力帮助。我们还要向北约环境安全规划主管 Alain H. Jubier 博士及其助理 Lynn Campell-Nolan 女士致以最真诚的感谢。特别感谢 Kluwer 学术出版社北约出版部的 Annelies Kersbergen 女士给予的持续关注和耐心指导。

编 者:

亚历山大·奥梅利琴科(Alexander Omelchenko)(加拿大马尼托巴大学)

亚历山大·皮沃瓦洛夫(Alexander A. Pivovarov)(乌克兰国立化工大学)

吉姆·斯温德(W. Jim Swindall)(英国贝尔法斯特女王大学)

目 录

译者序

前言

第一部分 水的纯化与特殊处理及水质监测的最新进展

美国饮用水处理进展·····	(3)
应用放射性核素 Pb-210 和 Cs-137 测定加拿大湖泊沉积物的沉积性质·····	(7)
水质监测生物传感器·····	(33)
饮用水中细菌的快速检测·····	(45)
废水处理厂中移动分析测试的应用·····	(50)
“活性水”混合氧化剂溶液对冷却塔生物控制的功效评价·····	(55)

第二部分 用于科学、工业和公共健康各领域的特殊现代水处理技术的发展

纤维性吸附剂在水质净化中的应用·····	(65)
利用原位氧帘技术对提高地下水生物除污的研究·····	(71)
关于电化学活性吸附和吸附膜方法去除水中杂质离子的研究·····	(75)
新水质净化方法及装置的改进·····	(88)
膜反应器在水处理中的应用潜力·····	(96)
银离子和铜离子以及胶体金在水消毒中的应用·····	(101)

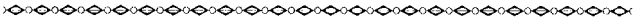
第三部分 实现水纯化和废水处理高技术参数的设备与方法

纺织工业节水及废水再利用·····	(109)
废水处理的新机遇——高分子生物杀菌剂·····	(122)
电镀废水处理工艺优化·····	(125)
污水处理中硝化和反硝化效率的研究·····	(132)
不同导电性颗粒流化床净化污水的电化学过程·····	(138)
污水净化新方法——低温等离子体净化·····	(148)
含有机化合物和细菌工业污水的净化·····	(154)

第四部分 水资源的管理、水处理的计划、培训和教育

水处理领域企业与大学联合对研究生的教育和培训·····	(161)
英国西部河流信托基金:主要河流流域的修复与再生先导计划·····	(167)
波兰人工湿地污水处理最新研究进展·····	(175)
水资源和公共卫生:将立法作为提高生活质量的手段·····	(185)
保加利亚共和国城市污水处理厂建设国家计划·····	(192)
罗马尼亚工业污水防治·····	(197)
两种用于人工湿地的挺水植物的表面脂类组成·····	(203)
附录·····	(207)

第一部分



水的纯化与特殊处理及 水质监测的最新进展



美国饮用水处理进展

S C Gutierrez, R C Haught, D A Lytle, E W Rice, M M Williams

美国国家环保署供水与水资源部, 国家风险管理研究实验室, 俄亥俄州辛辛那提市, 美国

摘要:美国饮用水的公共健康保护目标是:到 2005 年,向 95%的使用公共饮用水系统的人口提供达标的饮用水,并保障其健康。2002 年,已有 94%的人口能够饮用到符合 85 项健康标准的饮用水。这一重大成就正是源于对饮用水供水系统的严格管理和技术支持。为了组织对饮用水中一种或一组污染物进行控制的相关研究,负责饮用水管理的工程与风险管理研究计划制定了《饮用水污染物管理框架》。最近饮用水中砷含量水平的下降就是这一框架的具体应用实例。包括对 DNA 分析技术应用在内的新研究领域正在不断涌现,这些新技术将促进我们对饮用水中微生物污染和水安全的认识。而实时监测技术还需取得重大进步才可作为饮用水保护的依赖。

1 引言

美国坚决保证向公民提供安全的饮用水。这一政策被编入《联邦安全饮用水法案》(Safe Drinking Water Act, SDWA)。美国环保署(EPA)对这一法案的履行负责。国家对饮用水的目标是:到 2005 年,向 95%的使用公共饮用水系统的人口提供达标的饮用水,并保障其健康(EPA 1999)。公共供水系统是指在 1 年中至少有 60 天为 15 户或 25 人服务的社区装置。目前,以健康为基础的,包括微生物、放射性核素和化学物质的饮用水标准有 85 项。到 2002 年,已有 94%的人口能够饮用到符合上述 85 项健康标准的饮用水(EPA 2003)。这一重大成就的取得正是源于过去 29 年对服务于超过 2.6 亿人口的 17 万个饮用水供水系统的严格管理和技术支持。

本文将讨论包括水源保护,附加处理,配水系统效应和残留物管理在内的控制饮用水中污染物的研究方法;并将这些研究方法应用到新颁布的饮用水砷标准中;讨论配水系统中生物膜特性的最新进展,并概述关于水系统安全的优先研究。

2 饮用水污染物管理框架

保证饮用水保护规划成功的一个关键因素就是对水系统进行持续的有关控制方法和工程技术方面的研究,以使其符合管理要求。位于俄亥俄州辛辛那提市的美国环保署供水与水资源部和国家风险管理研究实验室对这方面的研究提供了重要的支持。

最近,供水与水资源部建立了一个概念模型,用来确定饮用水中需要控制的任一个或一组污染物的研究差距。这一方法被称为饮用水污染物管理框架(Schmelling 和 Gutierrez 2002)。该框架确定了开发一个控制策略所必须考虑的四项内容:(1)水源保护,(2)附加处理,(3)配水系统效应,(4)残留物管理。将这四项内容的研究与评估结果列入投资效益考量,可用来开发合格的控制选项。需要指出的是,并非每个控制点都会与单个或一组污染物相关。

为了确定水源保护相关控制的效益,框架分析过程首先要对相关研究进行说明。水源保护方法包括确定一些不需要附加处理来控制某种污染物的经济、可靠的方法。最优方法是以对饮用水中某种或某组污染物的“零处理”为前提的。“零处理”即在最低的整体投资下获得最大的公共健康利益。由于可能存在的人为或机械故障,使得在保证公共健康保护方面所需要的附加处理方法更不确定,且在短期和长远来看都可能需更多投资。对地表水或地下水的水源管理可通过多种措施来实现。这些措施包括对受某种化学物质污染的地下水的修复,或消除微生物污染源,如在水道上杜绝家畜养殖。其他可能的干预措施包括对饮用水源有关区域内某种受关注的污染物的不连续使用,以及消除其他可被“绿色化学”方法生产的低毒物质所替代的污染物。

附加处理的研究包括开发新处理技术,优化现存处理工艺以及对可商业化技术的应用验证。比较理想的是,附加处理应当以最简单、低成本且不产生废物残留或对配水系统带来负面影响的方式控制污染物。在进行分析时,应首先对现存处理工艺展开评价,确定其是否能将目标污染物控制在所希望的水平上。如果分析结果不理想,就需考虑进一步处理。新增加的处理方法不应干扰或降低原有工艺的效果。同时应该了解新工艺在各级别(小试,中试和正式投产)上的效果。

附加处理工艺有多种分类方式:包括物理—化学去除(化学和微生物污染物),消毒(微生物污染物)和转化过程(化学污染物)。

物理—化学去除过程并不破坏污染物,比如絮凝、沉淀、过滤、离子交换、软化、膜过程和改性碳吸附等。针对微生物污染物的消毒处理工艺包括氯化、氯胺化、臭氧化、紫外照射和二氧化氯消毒等。转化化学污染物的处理技术包括生物处理和电化学降解工艺等。消毒法是在美国应用最普遍的处理方法(EPA 1999)。

上述处理方法已被业界广泛接受和采用。对任何需要附加处理的污染物,在采用新技术时务必小心谨慎。为了帮助业界和各州接受新技术,环保署推出了环境技术验证程序(EPA 2000)。这一程序是用来验证在解决全国性重大问题中即将商业化的技术应用性能。验证协议是通过由利益相关人推动的一个开放过程制定的。饮用水系统中心在测试隐孢子虫过滤、消毒和除砷等一系列技术方面一直很积极。所有的验证报告和协议书都可在环保署的网站(<http://epa.gov.etv/>)上查到。

研究框架的另一要素是了解配水系统中污染物的最终归宿。如果有证据表明目标污染物对配水系统存在影响,那么在输配过程中就应当采取相关的控制措施或管理办法。

研究框架的第四个要素是对所选择的处理工艺产生的一切液态或固态残留污染物进行定性。要有足够信息以确定如何对它们进行管理,若其需要处理,还应了解其长期的环境影响。最后,分配四个主要领域的成本,形成可接受的处理工艺以实现控制目标。

3 案例研究:饮用水中的砷

最近,对饮用水中砷含量的允许标准下调至 $10 \mu\text{g L}^{-1}$,这是应用研究框架的一个极好案例。为支持新标准的颁布而进行的优先研究主要集中在对现有处理工艺、附加处理技术和残留物管理问题的优化上(EPA 1998)。研究规划中并未包括通过水源保护来控制污染,也没有强调配水系统的影响。

最近启动了针对可能的水源保护措施和输配影响的研究。源头控制污染物的措施包括对

将地下高含砷水区域设为隔离区的可行性进行考察,以及利用抽吸方法将砷水平降至新标准以下。

对输配系统影响的研究也正在进行。在中西部的一个中型饮用水设施中,科研人员对含砷饮用水输配系统中固体的释放情况进行了记录(Reiber 2000)。调查结果表明,在砷指标升高期间,所采集到的砷主要吸附于金属微粒上,而用户所抱怨的水体颜色恰恰是这些金属微粒所致。美国环保署最近的一项研究已证实了这一现象,研究表明配水系统中的颗粒含有大量的砷。固体中砷的含量与水源或处理后水中砷的浓度以及固体的主要组成成分都无关。相关研究表明,暴露于含低浓度($<10 \mu\text{g L}^{-1}$)砷的水中的固体仍然可以富集相对大量的砷(Lytle 2003)。根据《砷规程》的要求,应在配水系统的进口处进行砷的监测(EPA 2001),因而用户龙头出水中砷浓度的升高的可能是由输配系统所释放的固体引起的。在今后修订《砷规程》时,将对这一新发现进行评估。

以上案例体现了在框架背景下考虑饮用水污染物控制的价值。

4 新兴技术

确保饮用水安全的一项基本措施是对其进行例行的采样与细菌特性分析。这些评价所采用的方法大多是以培养为基础的技术。然而,重要的致病生物,如嗜肺军团菌(*Legionella pneumophila*)很难从环境样品中进行分离生长和计数。而近年来基于 DNA 的分子生物学分析技术的发展将对饮用水中生物种类提供更深层次的信息。

最近,位于俄亥俄州辛辛那提的美国环保署的测试与评估研究室利用这些新技术开展了一些研究(Meckes 1999)。研究室配有一个配水系统模拟装置,包括 6 个独立的可弯曲铁质环路,使用来自 Greater Cincinnati Water Works 的自来水。这些研究的目的在于通过对所构建的克隆文库的 16S rDNA 的直接序列分析而更好地理解模拟装置中的微生物群落结构(Williams 等 2003)。该研究表明, α 变形菌门在水系统中占统治地位,此外还有两种不同的消毒剂残留物。残留物从氯到单氯胺的转变可能在细菌群落动力学中发挥着重要作用。

新关注的另一个领域是饮用水安全。在全球对饮用水可能人为污染的广泛关注下,对这一新领域的研究凸显出相关知识的差距。对饮用水安全的潜在威胁甚至引发了人们对一些最基本的饮用水保护措施质疑。例如,当饮用水在输配过程中受到污染或处理过程失效时,将会发布将饮用水烧开的警告。通常建议公众将水烧开以保证其安全。最近,美国环保署进行了一项研究,模拟一名普通的水消费者将水烧开,考察炭疽芽孢杆菌(*Bacillus anthracis*)的内生孢子和三株球形芽孢杆菌(*Bacillus sphaericus*)对沸水过程的抗性(Rice 2003)。通过研究初始时刻的内生孢子水平,结果表明,在敞口容器中滚沸 1~3 分钟,并不足以使炭疽芽孢杆菌的内生孢子失活。在封闭容器中加热煮沸 5 分钟就足以使 4 个数量级以上的炭疽芽孢杆菌、蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)和苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*)的内生孢子失活。然而,在敞口容器中却不会有上述效果。

其他与水系统安全相关的研究工作,还包括对评估饮用水安全性监测技术进行持久性和可靠性的测试。美国环保署的研究主要关注于评估各种仪器以及开发在线监测仪器的性能标准(Haught 2003)。传统参数包括温度、溶解氧、氧化还原电位、余氯、pH 和浊度。因为这些参数即使通过远程遥感测量也是可靠的,所以环保署优先确定了这些参数。新的检测技术更多地关注于这些传统参数。尽管推荐了很多新技术,可以提供更及时的针对饮用水中各种

化学和微生物成分的监测,但要用它们提供即时结果对供水商进行预警仍需时日。

参考文献

- Haught R. 2003. Evaluation of Water Monitoring Instrumentation at EPA's Water Awareness Technology Evaluation Research Center. *Proceedings of the American Water Works Association Water Quality Technology Conference*, Philadelphia, Pennsylvania.
- Lytle D. 2003. Personal Communication, Update on Arsenic Distribution System Research.
- Meckes M C. 1999. Effect of pH Adjustments on Biofilm in a Simulated Water Distribution System. *Proceedings of American Water Works Association Water Quality Technology Conference*.
- Reiber S. 2000. Disinfection and Arsenic Concentration in a Groundwater Based Distribution System. *Proceedings Inorganic Contaminants Workshop*, Albuquerque, New Mexico.
- Rice E W. 2003. The Effect of Boiling on the Survival of Endospores of *Bacillus anthracis*. *B. cereus and B. thuringiensis*.
- Schmelling S and Gutierrez S. 2002. Internal Meeting on Management of Arsenic in Drinking Water, Cincinnati, Ohio.
- U. S. Environmental Protection Agency. 1998. Arsenic Research Plan, EPA.
- U. S. Environmental Protection Agency. 1999. Report 25 Years of the Safe Drinking Water Act: History and Trends, EPA 816-R-99-007. Office of Water, Washington, DC.
- U. S. Environmental Protection Agency. 2001. Final Arsenic in Drinking Water Rule. www.epa.gov/safewater/ars/arsenic_finalrule.html.
- U. S. Environmental Protection Agency. 2003. Draft Report on the Environment, Technical Document, EPA 600-R-03-050. Washington, DC.
- Williams M M and Braun-Howland E B. 2003. Growth of *Escherichia coli* in model distribution system biofilms exposed to hypochlorous acid or monochloramine. *Appl. Environ. Microbiol.* 69(9): 5463-5471.

应用放射性核素 Pb-210 和 Cs-137 测定加拿大湖泊沉积物的沉积性质

A Omelchenko², W L Lockhart¹, P Wilkinson¹

1 加拿大淡水研究所渔业与海洋部, 温尼伯, 加拿大

2 马尼托巴大学生理学院圣卜尼法斯综合医院研究中心心血管科学系, 温尼伯, 加拿大

摘要: 污染物大气输入通量的地域差异对于理解大气污染的含义非常重要。在工农业发达地区, 某些污染物的自然分配可能会受现有的化学物质点源影响。加拿大的地理位置和国土面积, 为研究不受当地点源影响的气载物质的地域差异提供了机会。加拿大 53% 的国土为人烟稀少的亚北极地区, 因此其大部分地区都不受人为点源影响。多数污染物的负荷变化反应了区域性大气输入的变化。这方面最可信服的一些证据包括人工合成有机化合物从未在北极地区使用。为了重建过去 150 年间化学品污染的历史, 我们考察了 20 个湖泊的沉积纪录。利用放射性核素 Pb-210 (半衰期 22.26 年) 和 Cs-137 (半衰期 30 年) 测定年代法, 分析了采集自 1987—1993 年间的 54 个沉积岩芯样品。借此获得了包括沉淀速率、混合深度、沉淀的地质年代学、放射性核素总量和通量等许多沉积性质。我们假设来自无当地生产生活源干扰的湖盆的沉淀可作为自然采集系统, 记录了来自大气的净输入量。由于沉积物中放射性核素总量受物理、化学及地质条件影响, 我们对沉积物聚焦因数进行了估算。聚焦因数通过实测岩芯中的超量 Pb-210 通量除以预测的超量 Pb-210 的大气通量计算。所预测的通量值经陆地土壤数据试验验证。

1 引言

污染物大气输入通量的地域差异对于理解大气污染的含义非常重要。加拿大的地理位置和国土面积, 为研究不受当地点源影响的气载物质的地域差异提供了机会。加拿大 53% 的国土为人烟稀少的亚北极地区, 因此其大部分地区都不受人为点源影响。多数污染物负荷变化反应了区域性大气输入的变化。

湖底沉淀是污染物的天然贮藏地, 经常被用来研究环境污染的历史 (Charles 等 1987, Oliver 等 1989, Eisenreich 等 1989, Krempler 等 1992, Sanders 等 1992)。沉积物中所埋藏的污染物可作为反映其沉积年代的一个地层学纪录。过去 100~200 年的工业化进程改变了污染物的输入。通常用 Pb-210 和 Cs-137 (半衰期分别为 22.26 年和 30 年) 来估算沉淀地层的沉积历史。但表观年代学受后沉淀移动性 (包括生物混合和扩散) 和沉积物聚焦的影响, 因此在发生沉淀混合的地方, 沉淀数据会受到干扰。

聚焦反应了湖盆更深处沉积物的大量累积 (Davis 等 1984)。这通常会因侵蚀和季节性洪水而从分水岭区域带来额外的放射性核素和污染物 (Eakins 等 1984)。沉积物的聚焦取决于多种因素: 湖泊几何形状、气候条件 (沉淀物量、风浪情况)、分水岭内的土壤侵蚀、分水岭面积与湖泊面积的比率、已沉淀的沉积物的重悬、沉积速率、岩芯与湖泊进出流的相对位置、周围土

壤和沉积物的化学性质等。聚焦会给污染物输入变化的解读带来困难。湖泊聚焦因数的知识有助于我们区分局域和区域事件,也使我们能够计算经过面积修正的净污染物大气通量。

本研究的主要目标是估算加拿大湖泊的聚焦因数。由于对北极土壤数据知之甚少,我们从大气放射性核素降尘所估算的聚焦因数主要依据北半球的数据,输入量根据土壤数据测得。

本研究是一项规划的一部分,该规划旨在重建加拿大湖泊输入污染物(重金属、有机氯和多环芳烃)的历史——记录于湖泊沉积物中。

2 材料与方法

2.1 湖泊的地理位置和物理特性

被研究的湖泊的位置及其湖泊学性质列于表1中。平均深度是湖泊体积与其面积的比值。水系面积不包括湖泊本身面积。研究区域中最南部的湖泊位于安大略西北的加拿大边界上。375和382两个湖泊位于实验湖泊区域(Experimental Lakes Area, ELA)中的前寒武纪花岗岩边界的北部森林中(Brunskill 和 Schindler 1971)。水质通常较软(电导率 = $20 \sim 100 \mu\text{S cm}^{-1}$),呈腐殖质色,贫营养(Armstrong 和 Schindler 1971)。表1中的一些地质学和气象学数据引自 Brunskill 和 Schindler 的研究(1971)。

红湖区的 Green, Linge, Musclow, Orange, Sydney 和 Trout 等几个湖泊位于 ELA 以北 150 km, 马尼托巴/安大略的边界上。那里的湖泊与 ELA 的湖泊整体上相似(前寒武纪边界地质学、寒带大陆性气候和低电导率(Fee 和 Hecky 1992))。与 ELA 湖泊一样,这些湖泊只能飞行到达,流域内无永久居民。

Nipigon 湖是考察对象中最大的一个,具有与大湖相似的地质学和湖泊学性质(Fee 和 Hecky 1992)。

Far 和 Hawk 两个湖位于 Saqvaquac, 那里是渔业和海洋部在 Hudson 湾西北岸的一个研究点。它提供了有关 Saqvaquac 的地质学、植被、气候和湖泊学信息(Welch 1985)。Saqvaquac 在地质学上类似于 ELA, 有很多小湖泊。它们位于前寒武纪边界树线以上,为源自冰川的冰蚀湖。水质通常为贫营养、低电导率($40 \sim 100 \mu\text{S cm}^{-1}$)的软水。尽管 Saqvaquac 位于北极圈以南(66°N),但其具有中北极海洋性气候(Welch 1985)。该区域位于连续 300 m 的永冻层之下,八月份活性层平均约为 1 m。一年中有 9 个月为湖面冰封期。

Sophia 和 Amituk 湖位于北极圈内 Cornwallis 岛的沉积性石灰岩床上。Sophia 湖的永滞层中含高盐浓度的水(盐度大约为海水的 2.5 倍)(Page 等 1984)。

Ellesmere 岛上 Hazen 湖,是北极圈以北最大的湖泊。它位于 Hazen 高原的古生代沉积岩上(Deane 1958, 1959)。其湖盆可能是由地质断层和冰川侵蚀联合作用的结果,由于其海拔较高(海拔 158 m),在冰河期之后并未被海水淹没。

北极湖泊为我们应用放射性核素年代测定技术提供了一个有趣的机会。北极的大多数岛屿都被永冻冰雪覆盖。Amituk 和 Sophia 湖一年中只有 6 周无冰。Hazen 湖在北极短暂的夏季接受其分水岭内的冰川融水,并经常处于冰封状态。广阔的冰盖可以减少放射性核素的大气输入。另一方面,冰封期间往往伴随着水体静止,为对污染物具有强吸附能力的细小颗粒的沉淀创造了更好的机会。

Belot 和 Colville 湖位于内陆平原西北部 Mackenzie 低地的 Inuvik 地区,与其他内陆平原

相似, Mackenzie 低地被巨大的冰川时期 Agassiz 湖岩面上积累的黏土和淤泥所覆盖。

Yukon 地区的湖泊位于 Yukon 高原南部, 这是一个 600~900 m 高的类盆地区域。它们都属于 Yukon 河水系。由于其高海拔、高纬度, 南部 Yukon 每年有 45 天的无霜期。St. Elias 和海岸山脉所形成的屏障也造就了南部 Yukon 的独特气象条件。

所考察的湖泊在大小上差别巨大, 最小的为 Far 湖(表面积 3.7 ha), 最大的为 Nipigon 湖(表面积 484 800 ha)。除了 Amituk, Sophia, 尤其是 Laberge 湖之外, 其他湖泊具有大致相似的分水岭/湖面积比率。湖的深度由浅(Far 湖, 最大深度 8.9 m)而深(Hazen 湖, 263 m)。湖盆形状规则, $Z : Z_{\max} = 0.24 \sim 0.45$, Fox 湖(0.61)和 Little Atlin 湖(0.01)除外。

表 1 被研究湖泊的位置及其湖泊学性质

湖泊位置	纬度	经度	平均深度 (Z)/m	最大深度 ($Z_{\max}$)/m	$Z : Z_{\max}$	湖泊面积 (A_0)/ha	流域面积 (A_d)/ha	$A_d : A_0$	体积/ km^3
安大略湖西北部									
375	48°45'N	93°47'W	11.6	30	0.39	18.7	210	11.2	—
382	49°42'N	93°41'W	5.8	13	0.45	37.1	204.5	5.5	2.15×10^{-3}
Green	51°N	94°W	7.7	19	0.40	89	234	2.6	6.82×10^{-3}
Linge	51°15'N	94°18'W	8.4	23	0.36	7.6	2 980	4.2	5.91×10^{-3}
Musclo	51°24'N	94°57'W	19.2	46	0.42	2 220	32 850	14.8	0.427
Orange	51°N	94°W	14.4	29	0.50	167	1 100	6.6	2.40×10^{-2}
Sydney	50°41'N	94°25'W	20.0	73	0.27	5 750	46 400	8.1	1.15
Trout	51°15'N	93°15'W	13.6	49	0.28	24 700	71 800	2.1	4.72
Nipigon	49°50'N	88°31'W	58.8	143	0.41	484 800	2 450 000	5.1	284
Yukon 地区									
Fox	61°14'N	135°28'W	28.6	47	0.61	1 660	—	—	0.470
Kusawa	60°20'N	136°22'W	54.0	140	0.39	14 222	—	—	7.72
Laberge	61°11'N	135°12'W	54.0	146	0.37	20 100	2 538 500	126.3	10.8
Little Atlin	60°15'N	133°57'W	0.6	47	0.01	37 900	—	—	2.27×10^{-2}
Nunavut									
Far	63°42'N	90°40'W	3.6	8.9	0.40	3.7	16.6	4.5	1.34×10^{-4}
Hawk	63°38'N	90°42'W	11.7	34.2	0.34	24.3	299.4	12.3	2.83×10^{-2}
Amituk	75°03'N	93°48'W	10.0	42	0.24	58.8	22 900	38.9	5.88×10^{-3}
Sophia	75°07'N	93°35'W	20.0	55	0.36	330	6 120	18.5	6.60×10^{-2}
Hazen	81°45'N	71°30'W	85.0	263	0.32	53 570	400 000	7.5	45.5
西北部地区									
Belot	66°53'N	126°16'W	—	—	—	30 250	—	—	—
Colville	67°10'N	126°00'W	—	—	—	45 230	—	—	—

2.2 沉积物收集、预处理和分析

采样点的选择由湖泊及其周边区域的等深图和地形图来确定。多数情况下, 假定沉积区域为最接近湖泊入流的湖泊最深处。可能的话, 在其他最深的等高线(FOX2, LAT2)和不同深度等高线(L382 KB 岩芯)进行采样。如果可能, 应采集双重岩芯(如 LAB1 和 LAB2)。

用 4 种不同的设备采集岩芯样品(表 2), 这些设备针对不同沉积类型设计, 可以采集每个切片中不同量的样品。我们原来的取芯器是一个直径为 5.1 cm 的 KB 类型重力岩芯器。1 cm 间隔的沉淀切片每片顶端产生少量(0.3~1.0 g)的干材料, 其中包含着大多数 Pb-210 数据记录的历史。尽管对放射化学研究来说, 这些材料已经足够, 但是对于其他分析却所剩不多。因此, 我们设计了直径分别为 10 cm 和 16 cm 的 KB 取芯器, 每切片可采集更大量的沉积