

上海交通大学学术出版基金资助

城市供水管网 水质安全保障技术

白晓慧 孟明群 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

上海交通大学学术出版资金资助

城市供水管网水质 安全保障技术

白晓慧 孟明群 编著

上海交通大学出版社

内 容 简 介

全书共分七章,以城市供水管网水质安全保障为核心,以管网水质生物稳定性和化学稳定性评价指标体系与控制、供水管网生物膜中的微生物生长与种群多样性、城市供水管网中的硝化现象、供水系统中的微生物变化规律与控制等为主要内容,以水厂净水工艺、输配干管和二次供水系统为研究对象,系统阐述了供水系统对末端水质的影响与控制途径。

本书可作为高等院校环境与市政工程专业研究生,城市水务、卫生监督及环境管理等相关部门的科技工作者和管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

城市供水管网水质安全保障技术/白晓慧,孟明群编著.
—上海:上海交通大学出版社,2012
ISBN 978-7-313-07791-2

I. 城... II. ①白... ②孟... III. 城市供水—管
网—水质管理—研究 IV. TU991.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 204302 号

城市供水管网水质安全保障技术

白晓慧 孟明群 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

常熟市华通印刷有限公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:15.25 字数:375 千字

2012 年 2 月第 1 版 2012 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-07791-2/TU 定价:68.00 元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话:0512-52391383

前 言

水是人类生存的基本要素,是社会和经济发展的基本保障。饮用水水质污染问题具有多样性和复杂性。向用户提供安全优质的饮用水,供水企业必须面向整个供水系统,从水源、水厂、管网到龙头全过程采取相应的安全保障措施,寻求系统化的技术解决方案。而密布于地下的供水管网和二次供水系统虽位于供水系统的末端,却是安全供水中的关键和薄弱环节,同时也是饮用水安全保障研究的难点。

当前我国城市供水水质在水厂出水时总体是好的,但进入配水管网后就不同程度地发生了水质下降。特别对于我国目前以地表水源为主要原水的供水系统中,由于水源污染、净水工艺中各种药剂的添加(氧化剂、混凝剂、消毒剂)和传统净水工艺本身的技术局限性,致使所谓“净化水”进入配水管网后,在其长时间的输送过程中与管材内表面发生了各种复杂的物理、化学和生物作用,并表现为物理沉积、电化学腐蚀、生物膜生长与生物腐蚀及微小动物生长等,同时各种腐蚀产物、微生物又与水中投加的各种消毒剂、水质净化过程中带入出厂水的各种金属盐类及外源污染物发生相互作用,从而导致管网水质发生变化,造成管网水质下降。给水管网中出现的各种水质问题已引起有关专家和业者高度重视,管网水质问题将是 21 世纪对世界各国供水行业的极大挑战,给水管网中的水质保障技术已经成为研究热点。研究饮用水安全输配技术对保持水厂净水效果、保证管网末端饮用水水质安全具有重要意义。

本书将结合作者所在实验室近年来的研究工作和国内外饮用水输配过程中产生的各种水质问题的相关进展,以管网水质保持为核心,以管网水质稳定性评价指标体系与控制;供水管网生物膜中的微生物生长与种群多样性;城市供水管网中的硝化现象;供水系统中的微生物变化规律与控制等为主要内容,以水厂净水工艺、输配干管和二次供水系统为研究对象,系统研究供水系统对末端水质的影响及其控制途径。

本书由上海交通大学水质科学与工程实验室白晓慧副教授编著,上海市供水调度监测中心孟明群教授参与编著。感谢上海交通大学学术出版基金的支持,感谢国家水体污染控制与治理重大专项给予的支持,感谢上海市供水企业给予的配合与支持,感谢本实验室邬凡、周斌辉、支兴华、冯铭卿等在本书中所做的工作。

由于作者水平和时间有限,本书不足之处恳请各位同仁批评指正。

白晓慧

2011 年 4 月 8 日于上海交通大学

目 录

第一章 绪论	1
第一节 城市供水系统组成与功能	2
第二节 饮用水水质标准的发展	3
第三节 饮用水水质安全保障技术	11
第四节 管网水质主要问题及对策	23
参考文献	29
第二章 管网水质生物稳定性评价指标与控制技术	30
第一节 水质生物稳定性评价指标	30
第二节 常规水处理工艺对水质生物稳定性的影响	41
第三节 供水管网中水质生物稳定性变化规律	44
第四节 管网输配过程中微生物生长控制的生态学机制	45
参考文献	50
第三章 供水管网生物膜中微生物的生长特征	53
第一节 供水管网生物膜研究概述	53
第二节 上海供水管网管壁微生物的生长特征	59
第三节 供水管网管壁微生物的菌群结构	72
参考文献	87
第四章 城市供水管网中的硝化现象与调控机制	94
第一节 供水管网硝化现象概述	94
第二节 上海市供水管网中硝化现象研究	102
第三节 供水管网生物膜中氨氧化细菌对氯胺消毒效果的影响	121
参考文献	127
第五章 供水系统中的微生物变化规律与控制	135
第一节 管网水质微生物安全保障技术研究现状	135
第二节 水厂净水工艺微生物特征分析	139
第三节 管网输配过程中微生物特征变化分析	149
第四节 二次供水系统微生物特征分析	155
第五节 输配管网消毒剂衰减变化规律分析	161
参考文献	169

第六章 管网水质化学稳定性评价指标与控制技术	172
第一节 水质化学稳定性评价指标.....	172
第二节 上海市供水系统中水质化学稳定性变化规律.....	180
第三节 饮用水水质化学稳定性的调控技术.....	201
参考文献.....	217
第七章 饮用水中致嗅物质在供水系统中的迁移规律	219
第一节 饮用水中主要致嗅物质.....	219
第二节 饮用水中土味素和二甲基异冰片的检测.....	224
第三节 致嗅物质在供水系统中的迁移变化规律.....	231
参考文献.....	237

第一章 绪 论

城市供水是国家高度重视的生命线工程。供水安全直接关系到人民群众的健康和经济社会的可持续发展,做好城市供水安全保障工作是落实科学发展观的基本要求和构建和谐社会的重要组成部分。

当前,城市供水中存在的水质问题,主要表现为管网末梢龙头水的浑浊度、色度、嗅味和微生物等指标的超标。这是由于一方面水源污染程度加剧,常规水质净化工艺难以完全去除水中的有机物,甚至微生物,从而增加了管网中的微生物增长风险;另一方面由于电化学反应,水中微量的溶解性离子在管道这个特殊的反应器中沉淀析出并结垢,以上两方面的因素造成了出厂水的生物稳定性、化学稳定性的下降。此外由于管网输配系统和二次供水设施设计维护不当、管网漏失、负压抽吸等,末端用户还存在各种微小动物如红虫等无脊椎动物的污染现象。

为了保证在管网输送过程中的水质,供水企业一方面不断改进净水工艺,更新供水管道材质及开发科学维护调控技术;另一方面普遍采用维持管网水中余氯浓度用以灭菌抑菌的氯消毒技术。但是因缺乏相关深入研究和水质监测、调控技术,用户终端还会出现水质下降的问题。

饮用水水质污染问题具有多样性和复杂性。向用户提供安全优质的饮用水,供水企业必须面向整个供水系统,从水源、水厂、管网到龙头全过程采取相应的安全保障措施,寻求系统化的技术解决方案。而密布于地下的供水管网和二次供水系统虽位于供水系统的末端,却是安全供水中的一个关键和薄弱环节,同时也是饮用水安全保障研究的一个难点。当前我国城市供水水质在水厂出水时总体是好的,但进入配水管网后就不同程度地发生了水质下降。特别对于我国目前以地表水源为主要供水水源的各城市供水系统中,由于水源污染、净水工艺中各种药剂的添加(高锰酸钾、铁铝盐絮凝剂、氨、液氯)和传统净水工艺本身的技术局限性,致使所谓“净化水”进入配水管网后,在其长时间的输送过程中与管材内表面发生了各种复杂的物理、化学和生物作用,并表现为物理沉积、电化学腐蚀、生物膜生长与生物腐蚀及微小动物生长等,同时各种腐蚀产物、微生物又与水中投加的各种消毒剂、水质净化过程中带入出厂水的各种金属盐类及外源污染物发生相互作用,从而导致管网水质发生变化,造成管网水质下降。美国科学家在 2003 年 IWA 年会的报告中指出,给水管网中出现的各种水质问题将是 21 世纪对世界各国供水行业的极大挑战,给水管网中的水质保障技术已经成为研究热点。研究饮用水区域安全输配技术对保持水厂净水效果、保证管网末端饮用水质安全具有重要意义^[1-4]。

“十一五”期间,依据《国家中长期科学和技术发展规划纲要》、《国家“十一五”科学技术发展规划》和《863 计划“十一五”发展纲要》,863 计划资源环境技术领域在环境污染治理新技术专题两次设立探索导向类课题支持饮用水水质安全保障技术,其中包括配水管网水质保持技术。针对我国小城镇饮用水安全保障工程建设中亟待解决的问题,“十一五”国家科技支撑计划重点项目《小城镇饮用水安全保障关键技术研究》也设立了小城镇供水管网水质稳定性关键技术研究。‘十一五’至‘十三五’期间,国家又设立了水体污染控制与治理科技重大专项,投资数百亿元开展水体污染防治与饮用水水质保障研究与示范,在饮用水主题中,饮用水安全输配

是重要组成部分,可见国家科技支撑之重视。

饮用水输配管网和二次供水设施是供水系统的重要组成部分,研究饮用水区域安全输配技术对保持水厂净水效果、保障管网末端饮用水质安全具有重要意义。

第一节 城市供水系统组成与功能

城市供水系统是保证城镇、工矿企业等用水的各项构筑物和输配水管网组成的系统。根据系统的性质,可分类如下^[5]:

- * 按水源种类,分为地表水(江河、湖泊、蓄水库、海等)和地下水(潜层地下水、深层地下水、泉水等)给水系统。

- * 按供水方式,分为自流系统(重力供水)、水泵供水系统(压力供水)和混合供水系统。

- * 按使用目的,分为生活饮用给水系统、生产给水系统和消防给水系统。

- * 按服务对象,分为城镇给水系统和工业给水系统。

给水系统由相互联系的一系列构筑物和输配水管网组成。它的任务是从水源取水,按照用户对水质的要求进行处理,然后将水输送到给水区,并向用户配水。

为了完成上述任务,给水系统常由下列工程设施组成:

- * 取水构筑物,用以从选定的水源(包括地表水和地下水)取水,并输往水厂。

- * 水处理构筑物,用以将从取水构筑物的来水加以处理,以符合用户对水质的要求。这些构筑物常集中布置在水厂范围内。

- * 泵站,用以将所需水量提升到要求的高度,可分为抽取原水的一级泵站、输送清水的二级泵站和设于管网中的增压泵站等。

- * 输水管渠和管网,输水管渠是将原水送到水厂或将水厂的水送到管网的管渠,其给水系统由相互联系的一系列构筑物和输配水管网组成。它的任务是从水源取水,按照用户对水质的要求进行处理,然后将水输送到给水区,并向用户配水。其主要特点是沿线无流量分出。管网则是将处理后的水送到各个给水区的全部管道(主要指直径较大的干管)。

- * 调节构筑物,它包括各种类型的贮水构筑物,例如高地水池、水塔、清水池等,用以贮存和调节不均匀的用水量。高地水池和水塔兼有保证水压的作用。大城市通常不用水塔。中小城镇或企业以及企业内部,为了贮备水量和保证水压,常设置水塔。根据城镇地形特点,水塔可设在管网起端、中间和末端,分别构成网前水塔、网中水塔和对置水塔的给水系统。

泵站、输水管、配水管网和调节构筑物等总称为输配水系统,从给水系统整体来说,它是投资最大的子系统。

图 1-1 表示以地表水为水源的给水系统。相应的工程设施为:取水构筑物 1 从江河取水,经一级泵站 2 送往水处理构筑物 3,处理后的清水贮存在清水池 4 中。二级泵站 5 从清水池取水,经输水管 6 送往管网 7 供应用户。有时,为了调

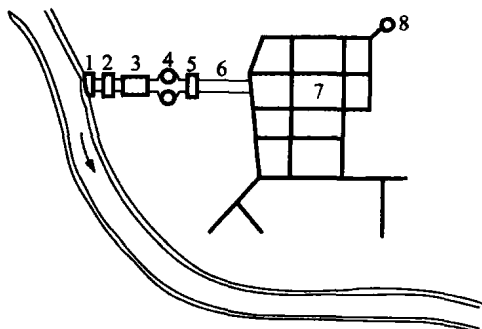


图 1-1 给水系统示意

1—取水构筑物;2—一级泵站;3—水处理构筑物;4—清水池;5—二级泵站;6—输水管;7—管网;8—调节构筑物

节水量和保持管网的水压,可根据需要建造水库泵站、高地水池或水塔 8。一般情况下,从取水构筑物到二级泵站都属于水厂的范围。

给水管网 7 遍布整个给水区,根据管道的功能,可划分为干管和分配管。前者主要用以抽水,管径较大,后者用于配水到用户,管径较小。给水管网设计和计算往往只限于干管。但是干管和分配管并无明确的界限,须视管网规模而定。大管网中的分配管,在小型管网中可能是干管。大城镇可略去不计的管道,在小城镇可能不允许略去。

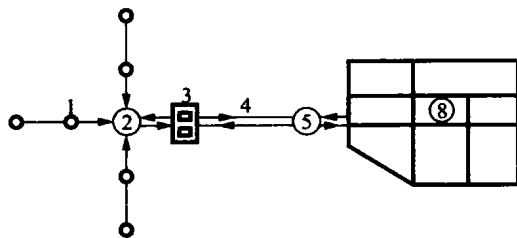


图 1-2 地下水源的给水系统

1—管井群;2—集水池;3—泵站;4—输水管;5—水塔;6—管网

以地下水为水源的给水系统,常凿井取水,因地下水水质良好,一般可省去水处理构筑物而只需加氯消毒,使给水系统大为简化,如图 1-2 所示。图中水塔非必需,视城镇规模大小而定。

第二节 饮用水水质标准的发展

水质标准是用水对象(包括饮用和工业用水等)所要求的各项水质参数应达到的指标和限值,是控制饮用水水质的重要依据和目标。水质参数指能反映水的使用性质的量,但不涉及具体数值,如水中各种溶解离子等;另一种水质参数,如水的色度、浊度、总溶解固体等称“替代参数”。它们并不代表某一具体成分,但能直接或间接反映水的某一方面使用性质。不同用水对象、要求的水质标准不同。随着科学技术的进步和水源污染日益严重,水质标准总是在不断修改、补充之中。

生活饮用水水质与人类健康和生活直接相关,故世界各国对饮用水水质标准极为关注。由于水源污染日益严重,也由于水质检测技术及医学科学的不断发展,饮用水水质标准也总是在不断地修改、补充。

一、国际饮用水水质标准的发展

目前,国际上具有权威性、代表性的饮用水水质标准主要有 3 部:世界卫生组织(WHO)的《饮用水水质准则》、欧盟(EC)的《饮用水水质指令》和美国环保局(USEPA)的《国家饮用水水质标准》,其他国家和地区多以这 3 个标准为基础或重要参考来制订本国饮用水标准。

1. 世界卫生组织《饮用水水质准则》

1983~1984 年,世界卫生组织出版了《饮用水水质准则》(第 1 版),第 1 版中涵盖指标 31 项,其中微生物学指标 2 项,具有健康意义的化学指标 27 项(无机物 9 项,有机物 18 项),放射性指标 2 项;准则中对这些指标均给出了指导值;另有 12 项指标提出了感官推荐阈值,以保证水质感官性状良好。

1993~1997 年,世界卫生组织分 3 卷出版了《饮用水水质准则》(第 2 版),其中包括:第 1 卷,建议书(1993);第 2 卷,健康标准及其他相关信息(1996);第 3 卷,公共供水的监控(1997),1998、1999 和 2002 年分别出版了附录部分,内容为化学物和微生物;此外还出版了《水中的毒

性蓝藻》，并针对一些关键性问题编写了专家综述。第2版中涵盖指标135项，其中微生物学指标2项，具有健康意义的化学指标131项（无机物36项，有机物37项，消毒剂及副产物28项），放射性指标2项，准则中对98项指标给出了指导值，另有31项指标提出了感官推荐阈值。

2004年，世界卫生组织出版了《饮用水水质准则》（第3版），鉴于近年来在微生物危险性评价及与之有关的风险管理方面所取得的重大进展，此版中大幅修订了确保微生物安全性的方法。第3版中包括水源性疾病病原体27项（细菌12项，病毒6项，原虫7项，寄生虫2项），具有健康意义的化学指标148项（尚未建立准则值的指标55项，确立了准则值的指标93项），放射性指标3项，另有28项指标提出了感官推荐阈值。

世界卫生组织《饮用水水质准则》的特点：

（1）指出了微生物是威胁饮水安全的首要问题。第3版中大量的篇幅用于表述如何确保饮水中的微生物安全性，同时保留了前2版中的部分内容，如设置多级屏障方法，强调了水源保护的重要性。其配发的文件同时描述了如何满足微生物安全性的要求，并就如何确保安全性提供了指导意见。

（2）在制定化学物质指导值时，既考虑到直接饮用部分，又考虑到沐浴时皮肤接触或易挥发物质通过呼吸摄入的部分。

（3）提供了确定优先控制污染物的方法和内容。第3版及其配发文件中对如何确定本地应优先重点控制的化学物质以及如何管理可造成大规模公共卫生危害的化学物质提出了指导意见。

（4）提供了准则在特定环境下的适用原则，并就如何处理这些情况配发了专文进行详尽的阐述。

2. 欧盟《饮用水水质指令》

欧洲共同体水质指令最早发布于1980年（80-778-EC），检测项目包括微生物指标、毒性指标、一般理化指标、感官指标等，绝大部分项目既设定了指导值又制定了最大允许浓度。

1998年1月，欧盟通过了新指令98-83-EC。指标从66项减少至48项（瓶装或桶装饮用水为50项），其中微生物学指标2项（瓶装或桶装饮用水为4项），化学指标26项，感官性状等指标18项，放射性指标2项。新指令更加强调整标值的科学性和与WHO《饮用水水质准则》中规定的准则值的一致性。与80-778-EC相比，98-83-EC作了较大修订，新增指标19项，删减36项，17项指标的标准值发生变化。

欧盟《饮用水水质指令》的特点：

（1）对水质超标时要采取的行动做出了原则性规定。明确指出，一旦水质发生不达标情况，立刻由相应部门开展调查；如水质有害健康，立即停止使用；当水中某种化学物质含量超标时，只有在下述情况得到满足时才允许继续供水：补救计划得到权威部门认可并开始实施；水质不再对人体健康产生危害；及时向用户通报水质情况。

（2）要求所有欧盟国家对水处理过程使用的材料和化学品建立审批制度。水处理和输配过程中可能向饮水中溶入某些微量化学物质，然而，无论在技术方面还是经济方面，都不大可能对每一种物质都制定相应的限值标准，对此新指令要求建立适当的审批制度。

（3）对水质检测指标和频率提出指导意见。新指令认为，并非每一个指标都需要频繁地检

测,对于容易检测又较能反映问题的主要指标,如大肠杆菌数、浑浊度和 pH 值,检测频率较高;一些次要指标的检测频率可适当降低。如果主要指标出现超标,则应马上进行全面的检测。

(4)对采样和检验方法的灵敏度提出要求。但是除了对分析方法和结果之间存在明确相关性的微生物指标提出建议方法之外,为便于新技术的发展,新指令对大多数水质指标的采样和化验方法并未作硬性规定。

(5)要求向社会公布检测数据和结果,并说明水质达标和安全与否,要求每个欧盟国家发布水质年报。

(6)要求供水企业和当地的医疗机构建立密切的联系以应对可能出现的水质恶化。

3. 美国《国家饮用水水质标准》

《安全饮用水法》发布前美国最早的饮用水水质标准是颁布于 1914 年的《公共卫生署饮用水水质标准》,后来分别于 1925 年、1942 年、1946 年和 1962 年被修订和重新颁布,1914 年的标准中只有细菌学的 2 个指标;1925 年的标准中增加了感官性状和无机物方面的几项指标,对细菌学指标要求更为严格;1942 年、1946 年的修订内容变化不大;对水体污染及其对健康影响的认识首次得到较明显反映的是在 1962 年颁布的水质标准中,在该标准中,合成洗涤剂、氯仿、一些重金属和放射性物质首次出现在标准内容中。

严格来说,美国早期的这些水质标准对自来水厂等一些供水行业并不具有全国性的法律约束力。该标准强制实施的程度取决于各州当地的法律规定。可以说,在《安全饮用水法》颁布以前,美国还没有适用于全国饮用水供水行业的有关水质标准方面的国家立法。

《安全饮用水法》发布后的美国饮用水水质标准在美国饮用水水质标准的发展史上,具有里程碑标志的是 1974 年国会通过的《安全饮用水法》(SDWA)。《安全饮用水法》适用于连接管达到 15 个以上,或服务人数超过 25 人的供水系统。该法特别授权美国环保局(USEPA)开展有关污染物最大允许浓度的研究,并监督《安全饮用水法》的实施。根据《安全饮用水法》,美国环保局于 1975 年 3 月提出了具有强制性的《国家饮用水一级标准》,除了与健康有关的强制标准以外,美国环保局 1979 年还提出了具有非强制性的《饮用水二级标准》。

现行的美国饮用水水质标准颁布于 2006 年,标准中包括强制执行的一级饮用水规程指标 98 项,其中有机物 63 项,无机物 22 项,微生物 8 项,放射性 5 项;作为非强制性的二级饮水规程指标 15 项,主要是指水中会对人体容貌(皮肤,牙齿变色),或对水体感官(如色、嗅、味)产生影响的污染物。

美国《国家饮用水水质标准》的特点:

(1)具有法律支撑。《安全饮用水法》和《1986 年安全饮用水法修正条款》奠定了保证饮用水安全的法律框架,国家一级和二级饮水标准确定了需要控制的水中污染物的详尽指标和要求。

(2)严格的动态修订。《安全饮用水法》和《1986 年安全饮用水法修正条款》要求美国环保局每隔 3 年要从最新的《重点污染物目录》中选 25 种进行规则制定,并且要对以前发布的标准进行审查,以便于水质标准能及时吸收最新的科技成果。

(3)对每一种污染物提出最大污染物浓度(MCL)、最大污染物浓度目标(MCLG)和最可行处理技术(BAT)。其中 MCL 是强制性的,是供水系统供给用户的水中污染物的最大允许

浓度。MCLG 是对推荐最大污染物浓度(RMCL)的重新定义,为非强制性目标值,侧重于水中污染物浓度对人体健康的影响,并不涉及污染物的方法检出限和水处理技术。

(4)对微生物的人体健康风险高度关注。2006 年版的美国饮用水一级规程中规定的微生物学指标共有 8 项,其中隐孢子虫、贾第鞭毛虫、军团菌、病毒等指标在其他国家水质标准中并不常见,体现出美国对致病微生物的研究深入、细致;另外美国把浑浊度列入微生物学指标中,反映了认识上对浑浊度相关属性的改变。

(5)对饮水消毒副产物的人体健康影响十分重视。早在 20 世纪 70 年代初,美国就率先开展了饮水消毒副产物方面的研究,确认了加氯消毒产生有机卤代物的健康风险,现行的水质标准中,消毒副产物是一个独立的细则,即“消毒与消毒副产物条例”。美国不仅关注氯消毒副产物,对其他的消毒剂及其副产物也提出了最大浓度限定或监控要求,进行有关的毒理学试验,这反映其对药剂消毒副作用的认识达到了一个新的阶段。

(6)标准下分很多细则。每一细则都由以下内容组成:主要条款、监控要求、分析要求、合格要求、通告要求、差别和豁免规定。

表 1-1 三大饮用水水质标准中水质指标数目

水质标准 指标	世界卫生组织《饮用水水质准则》(第二版)	欧盟《饮用水水质指令》(98/83/EC)	美国 EPA《美国饮用水水质标准》(2001 年)
1. 物理感官性	31	15	15
2. 微生物	2	5	7
3. 无机物	24	13	16
4. 有机物	31	9	34
5. 农药	41	2	19
6. 消毒剂及消毒副产物	28	2	7
7. 放射性	2	2	4
合计	157	48	100

注:WHO 标准中铜、锰在无机物指标、感官指标中重复出现,只计一次;USEPA 标准中铜、氟化物重复出现,只计一次。

4. 国际饮用水水质标准发展趋势

1)对微生物指标重要性的认识越来越深刻

目前饮用水的主要风险还是微生物指标(细菌、病毒、原生动物或其他生物来源),世界卫生组织制定的《饮用水水质准则》第 3 版中也明确提出,无论在发展中国家还是发达国家,与饮用水有关的安全问题大多来自于微生物,并将微生物问题列为首位,其后依次是消毒、化学物问题、放射性问题 and 可接受性问题。《饮用水水质准则》中还强调,就改善和保护公众健康而言,不同的参数可能有不同的优先重点。一般来说,优先顺序如下:①确保充足供应在微生物方面安全的饮用水,并保证水的可接受性,以防止消费者饮用在微生物方面有潜在不安全因素的水;②管理已知的对人体健康有不良影响的重要化学污染物;③控制其他的一般化学污染物。由此可见,饮水中微生物引起的危害被普遍认为是威胁饮水安全的首要问题,因此必须充分认识微生物的重要性,并应对微生物的人体健康风险给予高度重视。在水质指标方面,虽然隐孢子虫、贾第鞭毛虫、军团菌、病毒等指标在 WHO、EC 以及许多国家水质标准中还不常见,但在美国、英国等少数发达国家已将其列为重要的控制项目,此外美国还把浑浊度列入微生物学指标,主要是从控制微生物风险方面来考虑,而不仅仅考虑水的感官性状。

表 1-2 三大饮用水水质标准中的共同指标

序号	指 标	WHO 《饮用水水质标准》 (第二版)	EC 《饮用水水质指令》 (98/83/EC)	USEPA 《美国饮用水水质标准》 (2001 年)
1	丙烯酰胺/($\mu\text{g/L}$)	0.5	0.10	*
2	锑/($\mu\text{g/L}$)	5	5.0	6
3	砷/($\mu\text{g/L}$)	10	10	50
4	苯/($\mu\text{g/L}$)	10	1.0	5
5	苯并[a]芘/($\mu\text{g/L}$)	0.7	0.010	0.2
6	溴酸盐/($\mu\text{g/L}$)	25	10	10
7	镉/($\mu\text{g/L}$)	3	5.0	5
8	铬/($\mu\text{g/L}$)	50	50	100
9	铜/(mg/L)	2	2.0	1.3
10	氰化物/($\mu\text{g/L}$)	70	50	200
11	1,2-二氯乙烷/($\mu\text{g/L}$)	30	3.0	5
12	氟化物/($\mu\text{g/L}$)	1500	1.5	4
13	铅/($\mu\text{g/L}$)	10	10	15
14	汞/($\mu\text{g/L}$)	1	1.0	2
15	硝酸盐/(mg/L)	50	50	10
16	亚硝酸盐/(mg/L)	3(短时间) 0.2(长时间)	0.50	1
17	硒/($\mu\text{g/L}$)	10	10	50
18	四氯乙烯/($\mu\text{g/L}$)	40	10	5
	三氯乙烯/($\mu\text{g/L}$)	70		5
19	三卤甲烷(总)/($\mu\text{g/L}$)	每一项的浓度与它相对应的指标值的比率不能超过 1	100	80
20	氯乙烯/($\mu\text{g/L}$)	5	0.50	2
21	农药/($\mu\text{g/L}$)	**	0.10	**

注：* 在饮用水中使用丙烯酰胺时，丙烯酰胺=0.05%，剂量为 1mg/L；

** 分物质说明。

2)对消毒剂及其副产物对人体健康的影响越来越重视

世界卫生组织的《饮用水水质准则》中将消毒问题列于第 2 位,仅次于微生物问题,优先于化学物问题、放射性问题和可接受性问题。在安全饮用水的供应过程中,消毒无疑是很重要的。美国 EPA 的《国家饮用水基本规则》中明确规定,饮用水必须经过消毒。在饮用水处理上,消毒对多种病原体,尤其是细菌,作用显著。但是越来越多的研究表明,在杀灭细菌,保证微生物安全的同时,消毒又带来了新的问题,那就是消毒过程中所产生的副产物对人体健康的

影响问题。美国早在 20 世纪 70 年代初就率先开展了消毒副产物方面的研究工作,确认了加氯消毒会产生有机卤化物的健康风险,并专门制定了《消毒与消毒副产物条例》。在 2001 年 3 月颁布水质标准中,要求自 2002 年 1 月起,饮用水中总的三卤甲烷浓度由 0.1mg/L 降为 0.08 mg/L,并增加了卤乙酸的浓度不超过 0.06mg/L 的规定。

3)对指标的规定越来越全面、严格

从各国的标准发展历程不难看出,饮用水标准的修订过程也是一个指标数量不断递增的过程。以世界卫生组织的《饮用水水质准则》为例,第 1 版中仅包括微生物指标 2 项,确立准则值的具有健康意义的化学指标 27 项,放射性指标 2 项,另有感官性状指标 12 项。第 3 版中指标数量大幅度增加,其中水源性疾病病原体 27 项,确立准则值的具有健康意义的化学指标 93 项,放射性指标 3 项,另有感官性状指标 28 项。美国 EPA 的标准更是如此。1914 年的标准中仅包括 2 项细菌学指标,2006 年的标准中指标数量已经增加至 113 项,其中一级饮用水规程中规定项目 98 项,二级饮水规程中规定项目 15 项。

除了指标数量的大幅增加之外,指标限值要求也越来越严格,如美国已将砷的限值由 1975 年的 50 $\mu\text{g/L}$ 降至 10 $\mu\text{g/L}$ (2001 年 1 月 1 日实施)。欧盟的 98-83-EC 指令中将铅的限值从 1980 年的 50 $\mu\text{g/L}$ 降至 10 $\mu\text{g/L}$,并要求在 15 年内(即 2013 年 12 月以前)更换含铅配水管。

二、我国饮用水水质标准的发展^[9,10]

我国目前与生活饮用水水质有关的标准有以下 4 种:

国家标准,即《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—85)(以下简称“水质标准”),2006 年卫生部对此标准进行了第一次全面修订和完善,新的国标(GB 5749—2006)已于 2007 年 7 月 1 日正式实施。

行业标准,2001 年卫生部颁布的《生活饮用水水质卫生规范》(以下简称“规范”)。

行业标准,2005 年建设部颁布的《城市供水水质标准》(CJ/T 206—2005)。

行业标准,2005 年建设部颁布的《饮用净水水质标准》(CJ 94—2005)。

此外,国家标准《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)增加了“集中式生活饮用水地表水源地补充项目”和“集中式生活饮用水地表水源地特定项目”。

国际上对饮用水水质标准非常重视,标准修订的频率越来越快,检测项目不断增多。目前,世界上多数国家的饮用水标准检测项目都在 100 项以上。与国际先进的饮用水水质标准相比,我国的饮用水水质标准存在指标少、限值低的问题;另一方面,GB 5749—85 国家标准长达 21 年未变化,说明我国在饮用水水质标准的制定、修订和颁布上还没有严格的法制程序,没有建立起常设机构和组织专门人员来具体开展这项关系到全民健康的工作。

1. 《城市供水水质标准》

建设部编制的行业标准《城市供水水质标准》(以下简称《标准》)于 2005 年 2 月 5 日发布,并于同年 6 月 1 日施行。

《标准》主要对供水水质要求、水质检验项目及其限值做了规定,适用于城市公共集中式供水、自建设施供水和二次供水。《标准》对供水水质保障的系统性做出明确规定,水质评价点是“龙头水”。因此,从水源、水厂、配水管网到二次供水设施的各个环节必须严格控制。标准检

测项目共 93 项,常规检验项目为 42 项,非常规检验项目为 51 项,包括分量检测,总项目达 103 项,主要增加了有机污染物项目、耗氧量以及微囊藻毒素的检验。

与“规范”相比,《标准》在常规检验项目(34 项)的基础上,增加了敌敌畏、林丹、滴滴涕、丙烯酰胺、二氧化氯、亚氯酸盐、溴酸盐和甲醛 8 项指标的检测。感官性状和一般化学指标变化较小,仅有浑浊度 1 项限值相同,但在特殊情况下有所不同(特殊情况下“规范”中浊度 $\leq 5\text{NTU}$,《标准》中浊度 $\leq 3\text{NTU}$,这一特殊情况包括水源水质和净水技术等)。

目前,许多大城市供水浊度已小于 1NTU ,因此各供水企业达到这一标准是可行的。由于我国水源水质类型多和水源条件限制,经常规处理后出厂水浑浊度难以稳定控制在 1NTU 以下,允许短时间内控制浊度 $\leq 3\text{NTU}$ 。毒理学指标中,《标准》制定的砷、镉、硝酸盐的限值比“规范”更严格。删掉了氯仿 1 项,新增 8 项中有 5 项是“规范”中的非常规检验项目,其余 3 项(三氯甲烷、敌敌畏和溴酸盐)为新增项目,增加项目多为有机污染物和农药类指标。毒理学指标变动较大,反映了我国对饮用水中有机污染控制的重视。将一些非常规检验项目放到常规检验项目中,成为强制性指标,促使企业改进工艺或引进高精密仪器实现对这些污染物的检测和控制。

《标准》将细菌学指标修改为微生物学指标,去掉了粪大肠菌群,增加了耐热大肠菌群。耐热大肠菌群比总大肠菌群更能准确反映饮用水受人和动物粪便的近期污染及污染程度,较为实用、可行,对饮用水水质更有针对性。根据不同消毒剂的使用现状,增加了二氧化氯指标。

在非常规检测项目中,一个重要的变化就是《标准》比“规范”增加了微生物学指标 3 项,即原虫类的检测项目在标准中有所体现。一般化学指标方面,鉴于氨氮对供水管道的影响,增加了氨氮检测项目。在毒理学指标方面,对 8 项有机物的限值做了更加严格的规定,增加的 TOC 能较准确地反映水中有机物的数量,但考虑到各地情况的差异,暂定为试行。消毒副产物由“规范”中的 1 项增加到 3 项[包括在氯酚(总量)中],体现出《标准》对消毒副产物的重视。农药类增加了甲胺磷 1 项,指标暂定为 0.001mg/L 。其他增加的 3 项指标也均为有机物指标。

《标准》中水质指标的增加及限值的修订,都反映出我国供水行业将有机、有毒污染物作为控制重点的趋势,对水源水质要求、检验项目数量、限量值、检验频率和合格率要求都提高了很多。

随着《标准》的施行,供水企业将面临较大的压力。目前,除上海、北京、深圳等大城市的供水企业外,多数的中小城市供水企业尚不具备标准所要求的检测能力。在一些地区,由于水源污染、设施陈旧以及管理粗放,还难以达到《标准》的要求。对一些污染严重的城市饮用水源,还必须进行深度净化处理,如采用先进的臭氧-活性炭工艺,才能达到标准的要求。

2. 《生活饮用水卫生标准》

“规范”和《城市供水水质标准》均属于行业标准。2006 年,21 年未变的国家标准《生活饮用水卫生标准》终于进行了第一次全面修订和完善。该标准由卫生部下属的中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所负责起草,参加起草的单位包括水利部下属的中国水利水电科学研究院、国家环境保护总局环境标准研究所以及和建设部有关的中国城镇供水排水协会等,体现了涉水部门的共同参与。

修订后的新标准(GB 5749—2006)规定了生活饮用水水质卫生要求、生活饮用水水源水

质卫生要求、集中式供水单位卫生要求、二次供水卫生要求、涉及生活饮用水卫生安全产品卫生要求、水质监测和水质检验方法等;删除了水源选择和水源卫生防护两部分内容;简化了供水部门的水质检测规定,部分内容列入《生活饮用水集中式供水单位卫生规范》;放宽了对农村小型集中式供水和分散式供水的 14 项水质指标限值,其中微生物指标 1 项、毒理指标 3 项、感官性状和一般化学指标 10 项。

新标准的主要变化有:水质检测指标由原来的 35 项增至 106 项,修订 8 项,增加 71 项,其中水质常规指标为 38 项,消毒剂常规指标为 4 项,非常规指标为 64 项。

微生物学指标由 2 项增至 6 项,增加了大肠埃希氏菌、耐热大肠菌群、贾第鞭毛虫和隐孢子虫等项,修订了总大肠菌群指标。

饮用水消毒剂由 1 项增至 4 项,增加了一氯胺、臭氧、二氧化氯等 3 项指标。

毒理学指标中,无机化合物由 10 项增至 21 项,增加了溴酸盐、亚氯酸盐、氯酸盐、锑、钡、铍、硼、钼、镍、铊、氯化氰等指标;修订了砷、镉、铅、硝酸盐的限值;有机化合物由 5 项增至 53 项,增加了甲醛、三卤甲烷、二氯甲烷、三溴甲烷、1,2-二氯乙烷、1,1,1-三氯乙烷、一氯二溴甲烷、二氯一溴甲烷、环氧氯丙烷、氯乙烯、1,1-二氯乙烯、1,2-二氯乙烯、三氯乙烯、四氯乙烯、六氯丁二烯、二氯乙酸、三氯乙酸、三氯乙醛、2,4,6-三氯酚、苯、甲苯、二甲苯、乙苯、苯乙烯、氯苯、1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、三氯苯、邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯、丙烯酰胺、微囊藻毒素-LR、灭草松、百菌清、溴氰菊酯、乐果、2,4-滴、七氯、六氯苯、林丹、马拉硫磷、对硫磷、甲基对硫磷、五氯酚、莠去津、呋喃丹、毒死蜱、敌敌畏、草甘膦等 38 项;修订了四氯化碳的限值。

感官性状和一般理化指标由 15 项增加至 20 项,增加了耗氧量、氨氮、硫化物、钠、铝等 5 项指标,修订了浑浊度指标。

放射性指标中,修订了总 α 放射性指标。对于以往污染小的清洁水源,水处理的主要任务是去除水中浊度和细菌病毒。但目前我国水源水质污染主要是有机物污染,因此新标准中新增加的毒性指标更多关注于此。加氯消毒是我国城市供水传统的主流消毒方式,研究表明加氯消毒方式会对水质安全造成负面影响。因此,新标准在水处理工艺上重新考虑加氯消毒方式对供水安全的影响,并增加了与此相关的检测项目。

由于检测手段还不能完全跟上,所以新标准中有些水质指标(如贾第鞭毛虫、隐孢子虫、三卤甲烷、微囊藻毒素-LR 等 4 项指标)将分段实施。全部指标最迟于 2012 年 7 月 1 日后统一执行新标准。

三、与国外饮用水水质标准的比较^[11]

目前,国际上具有权威性、代表性的饮用水水质标准有三部,即世界卫生组织(WHO)的《饮用水水质准则》、欧盟(EC)的《饮用水水质指令》以及美国环保局(USEPA)的《国家饮用水水质标准》。其他国家或地区的饮用水标准大都以这三种标准为基础,如越南、泰国、马来西亚、印度尼西亚、菲律宾、巴西、阿根廷、南非、匈牙利、捷克等国均采用 WHO 的饮用水标准;欧洲的法国、德国、英国(英格兰、威尔士和苏格兰)等均以 EC 指令为指导;其他一些国家如澳大利亚、加拿大、俄罗斯、日本等国则同时参考 WHO、EC、USEPA 标准。

国际组织和发达国家的饮用水标准较科学完善,主要表现在:①标准先进、实用,且不断复审修订;②标准与法律法规结合紧密,执行有力;③标准执行配套措施健全,建立了完善的饮用水标准实施保障体系,如全国统一标准、检验方法、检验仪器以及培训检验员。

美国现行饮用水水质标准是在 1996 年《安全饮用水法修正案》的框架内制定的,该标准于 2001 年 3 月颁布,2002 年 1 月 1 日起执行。该标准制定了两个浓度值,即污染物最大浓度目标值(Maximum Contaminant Level Goals, MCLGs)和污染物最大浓度值(Maximum Contaminant Levels, MCLs)。其中 MCLGs 不要求强制执行,其制定是为了保证足够的安全余量,即在该浓度下污染物不会对人体产生任何已知的或可能的伤害。MCLGs 的制定不考虑经济因素,即不考虑达到该浓度值所需的成本。MCLs 是强制性指标,制定时要考虑水处理工艺、成本收益分析、最佳可行性技术、检测分析方法等方面的因素。该标准分一级标准(NPDWRs)和二级标准(NSDWRs),前者是强制性标准,适于公用给水系统,它限制了那些有害公众健康的、已知的或在公用给水系统中出现过的污染物浓度,包括 7 项微生物指标、7 项消毒剂 and 消毒副产物指标、16 项无机物指标、53 项有机物指标、4 项放射性核素指标,合计 87 项。后者为非强制性标准,用于控制水中对美容(皮肤、牙齿变色)或感官(如嗅、味、色度)有影响的污染物浓度,共有 15 项指标。USEPA 为给水系统推荐二级标准但没有规定必须执行,各州可选择采纳作为强制性标准,并可根据实际情况进行修订。

鉴于持久性有机污染物(POPs)具有长期残留性、生物蓄积性、半挥发性和高毒性,NPDWRs 规定:多氯联苯(PCBs)的 MCLGs 为零,MCLs 为 0.0005mg/L;六氯苯的 MCLGs 为零,MCLs 为 0.001 mg/L;异狄氏剂的 MCLGs 和 MCLs 均为 0.002 mg/L。NP2DWRs 对内分泌干扰物质(EDCs)也做出了相关规定,这些内分泌干扰物质主要来自杀虫剂、除草剂、杀菌剂、防腐剂等。美国现行饮用水水质标准是目前世界上最安全的饮用水水质标准之一,其制定原则和方法可为我国水质标准的制定及修改提供参考。

分析世界卫生组织、美国、欧盟及日本等制定的饮用水水质标准指标发现,有机物指标均超过水质指标总数的 2/3 左右,特别是消毒副产物项目的增加,反映了对控制有害有毒有机物认识的加深及其相关分析检测技术的进步。目前,我国实施的生活饮用水水质卫生规范、城市供水水质标准和新的生活饮用水卫生标准,与国外饮用水水质标准项目相比,从指标数量看基本与世界接轨,表明我国的饮用水卫生标准向前迈出了一大步;从检测项目看,增加了大量有机污染物的毒理学指标,某些指标值的修订更加严格,这与国际上水质标准的总体发展趋势相一致。我国修订后的生活饮用水水质卫生标准总体上克服了以前标准中有毒有害项目偏少、指标值不严、对感官项目重视不够、微生物项目尤其是致病原生物指标过于简单的缺点。

第三节 饮用水水质安全保障技术

一、饮用水水源选择与保护^[12-14]

我国于 2007 年 7 月 1 日开始实施了新的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006),新的国家标准在很大程度上参考借鉴了世界卫生组织(WHO)的水质准则,检测项目由 35 项增至 106 项,大幅增加了微量有机物、消毒副产物等毒理性指标。一方面是饮用水卫生标准的大幅提高,另一方面是饮用水水源水质的普遍恶化、各种突发性水污染事件频繁发生,我国现有的技术体系难以适应饮用水安全保障目标的实际需求。所有这一切都对水质监控、水源保护与管理、水厂工艺改造等供水技术、水质监测、预警及应急处理以及政府和企业多层次的管理工作都提出了更高的要求 and 更大的挑战。