

“十二五”国家重点图书

水体污染控制与治理科技重大专项

# 饮用水厂膜法处理技术

贾瑞宝 李星 高乃云 等编著

中国建筑工业出版社

”国家重点图书  
控制与治理科技重大专项

# 饮用水厂膜法处理技术

贾瑞宝 李 星 高乃云 等编著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

饮用水厂膜法处理技术/贾瑞宝等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 9

“十二五”国家重点图书. 水体污染控制与治理科技重大专项

ISBN 978-7-112-19474-2

I. ①饮… II. ①贾… III. ①饮用水-膜法-水处理  
IV. ①TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 121664 号

本书为国家水污染控制与治理科技重大专项饮用水主题研究成果之一, 针对我国不同流域水质污染特征, 以保障水厂稳定运行和水质达标为目标, 提出了适合我国不同水源水质特征的膜处理组合技术和工艺参数, 探索了膜污染控制的有效技术手段, 列举了不同膜组合技术的工程应用案例。

本书共分 10 章: 第 1 章 饮用水处理技术现状; 第 2 章 膜分离技术发展现状; 第 3 章 膜处理技术试验研究; 第 4 章 膜生物反应器技术试验研究; 第 5 章 超滤膜替代沉淀—过滤技术; 第 6 章 超滤膜与常规工艺联用技术; 第 7 章 膜与臭氧—活性炭联用技术; 第 8 章 膜法水处理技术的其他应用; 第 9 章 膜污染控制及运行维护技术; 第 10 章 展望。

责任编辑: 俞辉群 石枫华

责任校对: 王 瑞

“十二五”国家重点图书  
水体污染控制与治理科技重大专项

饮用水厂膜法处理技术

贾瑞宝 李 星 高乃云 等编著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

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: 787×1092 毫米 1/16 印张: 19 字数: 436 千字

2018 年 7 月第一版 2018 年 7 月第一次印刷

定价: 69.00 元

ISBN 978-7-112-19474-2  
(28728)

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

近年来,随着我国经济社会的不断发展,饮用水水源污染问题日趋严峻,饮用水安全保障已成为目前国际社会高度关注的环境和健康问题。而另一方面随着我国新版《生活饮用水卫生标准》于2012年7月1日起强制实施,传统的饮用水处理工艺和技术方法已难以保证饮用水的安全和时代发展需要,因此,在城市供水行业全面实施饮用水处理工艺的提标改造势在必行。

以膜技术为核心的新一代饮用水处理工艺凭借其优越的颗粒、胶体和病原性微生物截留效能,以及少投入甚至不投入化学药剂,占地面积小,便于实现自动化等优点,被称为“21世纪的水处理技术”。随着膜成本的降低,膜技术将越来越多地应用在饮用水净化工程中。但膜组合工艺选择、膜污染等问题严重阻碍了膜技术在饮用水处理领域进一步推广。因此,研究饮用水厂膜法净化处理关键技术并应用推广,对于解决膜技术在饮用水净化处理中的共性问题,提高供水水质,保障居民饮用水安全,具有重要示范推广价值。

“十一五”期间,国家水体污染控制与治理科技重大专项(下简称“水专项”)饮用水主题组织开展了膜法水处理技术研究,针对我国不同水系水源污染特点及城市自来水厂处理工艺相对落后的现状,结合国内外该领域的相关研究进展,围绕膜运行参数优化、膜组合工艺优选、膜污染控制等技术进行了研究,研发了适于我国供水现状的饮用水膜法净化处理关键技术,并在黄河流域、太湖流域等典型水厂进行了大规模示范性应用,有力带动了膜工艺水厂的改造及供水水质提升,也为我国膜产业的高速发展提供了巨大的市场和应用前景。

山东省(济南)供排水监测中心、北京工业大学、同济大学、哈尔滨工业大学、浙江大学、清华大学深圳研究生院、河海大学、城市水资源开发利用(南方)国家工程研究中心、东营市自来水公司、无锡市自来水公司、上海市自来水市南有限公司等课题单位有关技术人员,先后在实验室、水专项中试基地、示范工程水厂开展了试验研究,从小试到生产性试验,付出了大量的心血和汗水,凝聚了各课题组成员的集体智慧和辛勤劳动。

本书共分10章:

第1章阐述了我国水源水质现状,介绍了国内外水质标准的对比及发展趋势,并针对现有饮用水处理工艺存在的问题,提出了膜技术在饮用水处理中的技术可行性和经济可行性。

第2章系统梳理了膜技术的发展概况,膜的分类与特性,膜材料与性能以及膜组件结



构, 阐述了不同膜技术的基本理论, 介绍了膜技术在不同领域的应用现状, 着重论述了膜技术在饮用水厂中的应用及案例。

第3章重点介绍了在饮用水处理中不同参数对膜运行参数的影响, 提出了针对不同水质问题的微絮凝—超滤工艺、混凝—沉淀—超滤工艺、活性炭—超滤工艺、预氧化—超滤工艺技术, 为我国各地膜工程示范建设提供了相应的技术支撑。

第4章阐述了饮用水处理中膜生物反应器技术, 并就膜生物反应器的启动条件、组合工艺优化进行了系统介绍。

第5章介绍了超滤膜替代过滤技术、超滤膜替代沉淀—过滤技术, 依托上海徐泾水厂、南通芦泾水厂工程案例, 对相应工程案例的工艺设计参数、运行效果及工艺运行成本进行了详细阐述。

第6章介绍了超滤膜与常规工艺联用技术, 依托东营南郊水厂工程案例, 对相应工程案例的工艺设计参数、运行效果及工艺运行成本进行了详细阐述。

第7章介绍了超滤膜与臭氧生物活性炭工艺联用技术, 依托无锡中桥水厂工程案例, 对相应的工程案例的工艺设计参数、运行效果及工艺运行成本进行了详细阐述。

第8章介绍了膜技术在高盐潮汐水处理和苦咸水淡化的应用, 对相应的工程案例进行了系统阐述。

第9章针对膜技术在饮用水处理过程中的膜污染问题, 对膜污染的机理、影响因素、控制措施以及膜的运行维护技术进行了系统说明。

第10章针对我国水源污染现状及膜产业快速发展情况, 提出了膜技术在膜材料开发及饮用水领域的应用展望。

本书由水专项副总师邵益生研究员主审, 贾瑞宝、李星、高乃云等编著。各章节作者: 第1章, 贾瑞宝、孙韶华、李圭白、梁恒、瞿芳术、陈欢林撰写; 第2章, 贾瑞宝、孙韶华、李星、杨艳玲、王明泉、杨晓亮撰写; 第3章, 李星、梁恒、张锡辉、陈卫、陶辉、张永吉、夏圣骥、范小江、郭建宁、吴启龙、雷颖撰写; 第4章, 梁恒、李圭白、瞿芳术撰写; 第5章, 张东、张明德、高炜、严克平、任汉文、王盛、王铮、周文琪、夏萍撰写; 第6章, 贾瑞宝、李圭白、李星、梁恒、杨艳玲、瞿芳术、纪洪杰撰写; 第7章, 高乃云、楚文海、戎文磊、周圣东撰写; 第8章, 陈欢林、陈军、张林、李刚、沈志林、吴礼光、周志军、陈水超、陈霄翔、陈小洁撰写; 第9章, 贾瑞宝、孙韶华、宋武昌、杨晓亮、杨艳玲撰写; 第10章, 贾瑞宝、孙韶华、陈欢林撰写。

本书汇集了水专项“十一五”研究期间在膜法水处理领域的大量优秀研究成果和成功工程案例, 编写的内容和形式都具有自己的风格和特色。书籍的出版得到了国家水体污染控制与治理科技重大专项饮用水主题的资助。邵益生、杨敏、邓志光、张土乔、尹大强、刘文君、张金松、崔福义等主题组专家在本书的编写过程中给予了大力指导和帮助, 在此

表示衷心感谢。书中所确定的研究内容均与示范工程相结合，在技术和理论研究的基础上，提供了相应的工程案例，希望对全国类似水源水厂的膜工艺升级改造有一定的借鉴作用。

饮用水膜法处理技术涉及面广，限于编著者的专业和文字水平，对诸多问题的认识还不够深刻，难免存在疏漏之处，敬请读者批评指正。

本书编写组

2018 年 6 月

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 饮用水处理技术现状 .....      | 1  |
| 1.1 水源水污染现状 .....          | 1  |
| 1.1.1 水中污染物分类及危害 .....     | 1  |
| 1.1.2 我国水源污染现状 .....       | 6  |
| 1.2 水质标准现状 .....           | 9  |
| 1.2.1 国际饮用水水质标准发展历程 .....  | 9  |
| 1.2.2 我国饮用水水质标准发展 .....    | 12 |
| 1.2.3 国内外水质标准比较及发展趋势 ..... | 14 |
| 1.3 饮用水处理技术发展及问题 .....     | 16 |
| 1.3.1 常规处理技术 .....         | 16 |
| 1.3.2 深度处理技术 .....         | 19 |
| 1.4 饮用水处理技术发展方向 .....      | 22 |
| 1.4.1 膜技术 .....            | 22 |
| 1.4.2 高级氧化技术 .....         | 23 |
| 1.5 膜技术可行性 .....           | 24 |
| 1.5.1 技术可行性 .....          | 24 |
| 1.5.2 经济可行性 .....          | 28 |
| 第 2 章 膜分离技术发展现状 .....      | 30 |
| 2.1 膜技术发展概况 .....          | 30 |
| 2.2 膜的分类和特性 .....          | 31 |
| 2.3 膜的材料及性能 .....          | 32 |
| 2.3.1 无机膜 .....            | 33 |
| 2.3.2 有机膜 .....            | 33 |
| 2.4 膜组件结构 .....            | 35 |
| 2.4.1 管式膜 .....            | 36 |
| 2.4.2 板框式膜 .....           | 36 |
| 2.4.3 螺旋卷式膜 .....          | 37 |
| 2.4.4 中空纤维式膜 .....         | 38 |

|            |                     |            |
|------------|---------------------|------------|
| 2.5        | 膜分离技术基本理论           | 39         |
| 2.5.1      | 微滤和超滤               | 39         |
| 2.5.2      | 反渗透与纳滤              | 43         |
| 2.6        | 膜技术的应用              | 44         |
| 2.6.1      | 膜技术在生产生活中的应用        | 44         |
| 2.6.2      | 膜技术水处理中的应用          | 46         |
| 2.7        | 饮用水处理应用现状及典型案例      | 47         |
| 2.7.1      | 国外应用现状及典型案例         | 48         |
| 2.7.2      | 国内应用现状及典型案例         | 52         |
| <b>第3章</b> | <b>膜处理技术试验研究</b>    | <b>55</b>  |
| 3.1        | 膜运行参数优化             | 55         |
| 3.1.1      | 膜运行方式优化             | 56         |
| 3.1.2      | 温度对膜运行的影响           | 70         |
| 3.1.3      | 膜通量优化               | 73         |
| 3.1.4      | 小结                  | 75         |
| 3.2        | 超滤膜处理组合工艺           | 76         |
| 3.2.1      | 微絮凝—超滤工艺            | 77         |
| 3.2.2      | 混凝—沉淀—超滤工艺          | 96         |
| 3.2.3      | 活性炭—超滤 (PAC-UF) 工艺  | 101        |
| 3.2.4      | 预氧化—超滤工艺            | 121        |
| 3.2.5      | 超滤膜组合工艺优选           | 141        |
| <b>第4章</b> | <b>膜生物反应器技术试验研究</b> | <b>142</b> |
| 4.1        | MBR 启动特性            | 142        |
| 4.1.1      | MBR 的启动性能           | 142        |
| 4.1.2      | 突发污染对 MBR 的影响       | 144        |
| 4.1.3      | MBR 的强化启动方法         | 146        |
| 4.2        | 混凝—MBR 组合工艺         | 151        |
| 4.2.1      | 试验设计                | 151        |
| 4.2.2      | 试验结果                | 152        |
| 4.2.3      | 小结                  | 154        |
| 4.3        | 混凝—沉淀—MBR 组合工艺      | 154        |
| 4.3.1      | 试验设计                | 155        |
| 4.3.2      | 试验结果                | 155        |
| 4.3.3      | 小结                  | 158        |



|       |                |     |
|-------|----------------|-----|
| 4.4   | 混凝—气浮—MBR 组合工艺 | 158 |
| 4.4.1 | 试验设计           | 159 |
| 4.4.2 | 试验结果           | 159 |
| 4.4.3 | 小结             | 161 |
| 4.5   | 生物活性炭—MBR 组合工艺 | 162 |
| 4.5.1 | 试验设计           | 162 |
| 4.5.2 | 试验结果           | 163 |
| 4.5.3 | 小结             | 166 |
| 4.6   | 无药剂一体化 MBR     | 166 |
| 4.6.1 | 试验设计           | 166 |
| 4.6.2 | 试验结果           | 167 |
| 4.6.3 | 小结             | 169 |
| 4.7   | 双膜法膜生物反应器      | 169 |
| 4.7.1 | 试验设计           | 169 |
| 4.7.2 | 试验结果           | 170 |
| 4.7.3 | 小结             | 172 |
| 4.8   | 组合工艺对比         | 173 |

## 第 5 章 超滤膜替代沉淀—过滤技术 174

|       |           |     |
|-------|-----------|-----|
| 5.1   | 替代过滤技术    | 174 |
| 5.1.1 | 水厂概况      | 174 |
| 5.1.2 | 中试试验研究    | 177 |
| 5.1.3 | 工程建设及运行   | 185 |
| 5.2   | 替代沉淀—过滤技术 | 189 |
| 5.2.1 | 水厂概况      | 189 |
| 5.2.2 | 中试试验研究    | 190 |
| 5.2.3 | 工程建设及运行   | 192 |

## 第 6 章 超滤膜与常规工艺联用技术 196

|       |         |     |
|-------|---------|-----|
| 6.1   | 水厂概况    | 196 |
| 6.1.1 | 原水水质特征  | 196 |
| 6.1.2 | 原有工艺问题  | 198 |
| 6.2   | 中试试验研究  | 198 |
| 6.2.1 | 中试系统简介  | 199 |
| 6.2.2 | 中试试验结果  | 199 |
| 6.3   | 工程建设及运行 | 201 |

|            |                     |            |
|------------|---------------------|------------|
| 6.3.1      | 工艺流程及运行参数           | 201        |
| 6.3.2      | 运行效果评价              | 203        |
| 6.3.3      | 投资及运行成本分析           | 212        |
| <b>第7章</b> | <b>膜与臭氧—活性炭联用技术</b> | <b>213</b> |
| 7.1        | 工程概况                | 213        |
| 7.1.1      | 原水水质特征              | 213        |
| 7.1.2      | 原有工艺问题              | 214        |
| 7.2        | 中试研究                | 214        |
| 7.2.1      | 中试系统简介              | 214        |
| 7.2.2      | 中试研究结果              | 215        |
| 7.3        | 工程建设及运行             | 219        |
| 7.3.1      | 工艺流程及运行参数           | 219        |
| 7.3.2      | 工程运行情况              | 222        |
| 7.3.3      | 工程投资及增加运行成本         | 228        |
| <b>第8章</b> | <b>膜法水处理技术的其他应用</b> | <b>229</b> |
| 8.1        | 高盐潮汐水处理             | 229        |
| 8.1.1      | 原水水质分析              | 229        |
| 8.1.2      | 中试试验研究              | 230        |
| 8.1.3      | 工程建设及运行             | 233        |
| 8.2        | 苦咸水淡化               | 241        |
| 8.2.1      | 原水水质分析              | 241        |
| 8.2.2      | 工程建设及运行             | 242        |
| <b>第9章</b> | <b>膜污染控制及运行维护技术</b> | <b>247</b> |
| 9.1        | 膜污染机理               | 247        |
| 9.1.1      | 膜污染成因分析             | 247        |
| 9.1.2      | 膜污染数学模型             | 249        |
| 9.2        | 膜污染影响因素             | 252        |
| 9.2.1      | 原水化学性质              | 252        |
| 9.2.2      | 膜自身性质               | 255        |
| 9.2.3      | 操作条件                | 257        |
| 9.3        | 膜污染控制措施             | 258        |
| 9.3.1      | 强化预处理               | 258        |

9.3.2 优化操作条件..... 264

9.3.3 膜清洗..... 264

9.4 膜运行维护技术 ..... 270

9.4.1 膜组件保养..... 270

9.4.2 膜完整性检测..... 271

第 10 章 展望 ..... 278

10.1 膜材料的性能改进..... 278

10.1.1 高强度 ..... 278

10.1.2 大通量 ..... 279

10.1.3 耐污染 ..... 279

10.1.4 抗氧化 ..... 280

10.2 膜法处理技术拓展..... 281

参考文献 ..... 283

后记 ..... 292

# 第 1 章 饮用水处理技术现状

水是生命之源，水资源是人类生产和生活不可缺少的自然资源，也是各种生物赖以生存的环境资源。全球上有 71% 的表面都被水覆盖，但绝大部分为不可直接饮用的海水，淡水资源有限。中国水资源总量很多，但人均占有量低，淡水资源总量为 2.8 万亿  $\text{m}^3$ ，居世界第六位，但人均水量只相当世界人均占有量的 1/4，在全球 149 个国家中排名 110 位。另一方面，由于我国水资源主要来源于降水，而降水的时空分布十分不均：主要集中在 7~9 月，旱季、雨季分明，且南方的降水量远多于北方。据统计，目前全国年缺水总量巨大，我国 600 多个城市中，400 多个城市存在供水不足问题，全国城市总缺水量为 60 亿  $\text{m}^3$ ，每年因水资源匮乏影响的工业产值高达 2300 亿元。

近年来，我国有限的水资源正面临着越来越严峻的污染威胁。随着经济社会的迅速发展，尤其是石油化工、有机化工、农药、医药、杀虫剂及除草剂等工业产品生产量的迅速增长，有机化合物种类和排放量不断增加，各种生产废水和生活污水未达排放标准就直接进入水体，对水环境造成了极大的污染，水源水质也因此急剧下降。

另一方面，2006 年我国颁布了《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)，水质指标由以前的 35 项增加至 106 项，尤其是增加了许多有机物指标。面对水源污染不断加剧及饮用水卫生标准日益提升的重大挑战，必须研究和发展高效、经济的饮用水深度处理技术，保障饮用水的安全性，解决水源污染加剧和水质标准提高之间的矛盾。

## 1.1 水源水污染现状

### 1.1.1 水中污染物分类及危害

水污染物质广泛存在于受污染水源水体中，其中包括胶体颗粒、无机离子、藻类个体、溶解性有机物、不溶性有机物、病原体等，它们之间并不是一个个完全独立的子系统，而是相互联系、密不可分的一个复杂的污染物体系。根据国际上通行的分类标准，从污染物质的属性来区分，将水源水中的污染物按以下几类划分：有机物、无机物、生物、放射性物质等。它们在性质上互相渗透和影响，在水处理过程中需要作为一个整体来考虑。原水中不同种类的污染物，会造成不同程度的危害，具体内容如下：

#### 1. 生物污染

19 世纪，欧美一些城市由于污水、粪便和垃圾的排放使地表水和地下水受到污染，造成霍乱、痢疾、伤寒等生物介水传染疾病的多次大规模爆发和蔓延，夺去成千上万人的

生命。20 世纪初,比利时开始对饮用水进行连续氯化消毒,伤寒病死亡率大幅度下降。人类在与水源污染及由此引起的疾病所做的长期斗争中发展和完善了最早的饮用水处理工艺,消毒技术解决了长期威胁着人类的生命和健康的问题。现已发现因水源污染可能导致介水传染的疾病有:伤寒、痢疾、霍乱、隐孢子虫病、蓝伯氏贾第鞭毛虫胞囊病等,介水传染病一旦发生,往往会在短时间内大量发病,引起流行。近年来世界上多次爆发的大规模介水传染疾病,促使人们进一步关注饮用水的生物安全性问题。1993 年,美国密尔沃基爆发了历史上规模最大的隐孢子虫病,共有 40.3 万人发病(占供水总人口 47.6%),其中 4400 人入院治疗,69 人死亡(多数是艾滋病感染者)。调查研究认定原因是该市南部市政供水系统遭隐孢子虫污染所致,污染源是养牛污水、屠宰废水、生活污水中的隐孢子虫卵囊随暴雨径流进入密执安湖水源。摇蚊幼虫、剑水蚤类浮游动物抗氧化性较强,具有游动性,很容易穿透滤池进入管网,常规水处理的消毒工艺难以将其完全杀灭。一些城市已发生过多起管网水中出现摇蚊幼虫、剑水蚤的事故,不仅给用户带来了不良的感官影响,引起用户对水质信心的下降与恐慌,更为重要的是浮游动物是诸如血吸虫、线虫等水中致病生物的中间宿主,从而成为传播疾病的重要媒介,给人们的用水安全带来了潜在的威胁。在许多国家和城市,湖泊水、水库水是重要的甚至唯一的饮用水水源,水源水的富营养化直接导致的藻类滋生,而藻类的大量繁殖将给饮用水生产带来很多不利的影响,主要体现在藻类及其分泌物产毒、致臭,影响混凝过滤的处理效果,增加药耗以及降低出水水质等。因此在水源水藻类高发阶段,必须采用有效的技术措施来去除藻类以保证饮用水的安全性。生物可同化有机碳(AOC)和微生物可利用磷(MAP)从性质上分类应归属于无机污染指标和有机污染指标,但二者同是微生物的营养指标,与生物污染的发生有密切关系。国际上普遍以 AOC 作为饮用水生物稳定性的评价指标。AOC 是指生物可降解溶解性有机碳(BDOC)中被转化成细胞物质的那部分,主要与低分子量的有机物(如丙酮酸、二羧乙酸等)含量有关。一般认为在保持适当余氯的条件下,出厂水 AOC 浓度在  $50\sim 100\mu\text{g/L}$  或不加氯时保持在  $10\sim 20\mu\text{g/L}$ ,可以达到水质的生物稳定。目前国际上也没有立法规定水中 AOC 的浓度,只有一些研究者根据自己的研究成果提出了一些建议值。常规工艺对 AOC 去除效果较差,出厂水 AOC 仍然较高,即使加氯消毒后,细菌仍可以在配水管网中生长繁殖。

最近的一些研究表明,饮用水中的 AOC 与微生物生长之间的相关性比较弱,MAP 与微生物生长之间存在着较强的相关性。一些研究认为,磷可作为饮用水生物稳定性的限制因子。但是磷在饮用水处理过程中并不作为一项常规检测指标,关于磷在饮用水处理过程中去除情况的研究开展得较少。

## 2. 有机物污染

水源水中的有机污染物可分为两类:天然有机物(NOM)和人工合成有机物(SOC)。NOM 是指动植物在自然循环过程中经腐烂所产生的物质,包括腐殖质、微生物分泌物、溶解的动植物组织及动物的废弃物等。SOC 大多为有毒有机污染物,其中包括“三致”有机污染物。

### 1) NOM

NOM不仅会导致水的色度、异臭味、配水管网腐蚀和沉淀问题，而且在加氯消毒过程中与氯反应产生的消毒副产物（DBPs）会增加饮用水的致癌、致突变性，对人体健康有长期的影响。国内外的研究证明：消毒副产物是多种癌症的致癌因子，具有很强的“三致”作用。其中，腐殖酸类物质广泛存在于自然界的土壤和水体中，它也是天然水体中有机物的主要成分，约占水中总有机物的50%~90%（质量分数）。一般认为腐殖质（腐殖酸和富里酸）的分子量在500~2000道尔顿（Da）。腐殖酸作为自然胶体而具有大量官能团和吸附位，如羟基、羧基、酚羟基、醌、内酯、醚醇等。它们对各种阳离子或基团存在极强的吸附能力或结合反应能力，尤其对一些极性有机化合物或极性基团在水环境的行为产生重要影响，同水中有机污染物形成“络合体”，成为有毒的物质。另外有机微污染物是水环境中的“增溶剂”和运载工具，使腐殖质在水中的溶解度增大，迁移能力增强，分布范围更广，毒性更强。

### 2) SOC

随着流行病学研究以及检测技术的发展，SOC不断地在水体中被发现，其中很多是有毒有害有机物，具有持久性、高毒性、生物蓄积性等特点，对人体健康具有较大的危害，如持久性有机物（POPs）、环境激素等物质。各个国家根据本国水质及检测技术情况列出了具体的清单和检测项目。在美国国家环保局制定的129种环境优先检测污染物指标中，有毒有害的有机物占114种；在我国国家环保局制定的68种环境优先检测污染物指标中，有毒有害的有机物占58种。2001年《生活饮用水卫生规范》中毒害有机物的检测项目为75项，2005年6月颁布的《城市供水水质标准》中毒害的有机物的检测项目为70项。

SOC的另一个危害是其在生产或运输过程中，当出现突发事故时，会对水源产生严重的污染。例如，1986年11月1日瑞士巴塞爾附近一家装满农药的仓库发生火灾，灭火的水将1万多吨有毒化学品冲入莱茵河，使下游数百公里河段的鱼、鳗鲡和大型无脊椎动物死亡，饮用水源受到了严重污染；同时莱茵河冲积蓄水层中的地下水也受到了严重的污染。我国的水污染突发事故发生也较频繁，如1993年广西桂江、1994年淮河中下游水体污染等。影响较大的污染事件有：2005年11月13日，我国吉化公司双苯厂爆炸导致松花江水体受到苯和硝基苯严重污染，沿江城市和工矿企业用水安全受到严峻的挑战；下游城市哈尔滨400万人停水4d，给哈尔滨市人民生活与生产造成十分严重的影响和后果。对于上述有毒化学品突发水污染事件，已经引起了有关部门和专家学者的重视，相关法律法规正在酝酿制定之中。

## 3. 无机物污染和放射性污染

### 1) 重金属

重金属对人体危害极大。水体中的重金属污染主要是由于工业废水如电镀废水、皮革废水、合金工业废水等大量排入水体造成的。资料表明，饮用水中的重金属成分与某些疾病有一定的相关性，对身体健康构成潜在威胁。例如镉与心血管病有因果关系，人饮用含



铅量  $0.03\text{mg/L}$  以上的水会导致慢性中毒，同时铅与其他金属可发生协同作用并能使其他金属的毒性增大。关于重金属污染造成的中毒事件已有很多报道。20 世纪中期，在日本熊本县水俣湾附近的化工厂，生产甲醛时排放的汞和甲基汞废水造成“水俣病”，受害者达 1 万多人。富山县神通川流域的镉污染地区发生“痛痛病”，先后引起数十人死亡，上万人受害。2005 年 12 月 5 日至 14 日，广东省韶关冶炼厂在设备检修期间超标排放含镉废水，造成了广东北江上游河段水体镉污染，污染河段的长度接近  $100\text{km}$ ，英德市及北江中下游多个城市饮用水水源受到污染。上述重金属水污染事件已经严重影响人们的生产和生活。

## 2) 氨氮 ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )

氨氮是饮用水中一项反应水质污染特别重要的指标，不仅与饮用水受近期的生活污染有关，而且与饮用水中细菌指标也有关联。当水体含有过量氨氮时，易使水体富营养化，藻类大量繁殖、富集，消耗水中溶解氧，导致水体发臭。同时氨氮能够促进一些自养性细菌在水处理设施中的滋生，增加了水处理难度，间接地提高了净水厂出水有机质的含量，使消毒时投氯量加大。目前，日趋严重的水体富营养化已成为全球性的环境问题，水华发生的频率与严重程度都呈现迅猛的增长趋势，发生的地点遍布全球各地。藻类在代谢过程中释放出藻毒素 (MC-LR)，MC-LR 是一组环状七肽物质，结构稳定，能抵抗极端 pH 值和  $300^\circ\text{C}$  高温，具有明显的肝毒性，毒性较大，分布广泛，是目前研究较多的一族有毒化合物。此毒素是蛋白磷酸酶 1 和 2A 的强烈抑制剂，是迄今已发现的最强肝肿瘤促进剂。流行病学调查显示饮水中的 MC-LR 与肝癌的发病率高度相关。

## 3) 硝酸盐氮 ( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )

硝酸盐氮污染主要存在于地下水中，但一些地表水的污染也在加重。当硝酸盐氮浓度超过  $10\text{mg/L}$  时，可能会诱发婴儿患高铁血红蛋白血症，使组织出现缺氧现象。同时硝酸盐氮会在人胃中被还原为亚硝酸氮，与人胃中的仲胺或酰胺作用形成亚硝胺，具有致癌、致畸、致突变作用。

## 4) 氟

氟是人体生理所需要的微量元素之一，氟对增高骨质的硬度、神经的传导和酶系统有一定作用，人类摄入氟的量约有  $60\%\sim 70\%$  来自饮用水。长期饮用氟含量低的水，易患龋齿；但如果人体每日摄取的氟过多，则会产生急性或慢性的氟中毒。例如儿童可患氟斑牙，成人可患氟骨症，严重者会造成终生残疾，丧失工作能力。全球 40~50 个国家和地区均有饮用高氟水的问题。

## 5) 铁、锰

铁、锰在水体中广泛存在，人们日常饮食就可以满足对铁、锰的需求，因此饮用水中的铁、锰含量越少越好。铁、锰是典型的金属氧化还原元素，铁、锰的化学性质极其相近，在自然界中常常共存并共同参与物理、化学和生物化学的反应。地下水常常含有过量的铁和锰，严重影响其使用价值，且过量摄入会对人体造成慢性毒害，锰的生理毒性比铁严重。最近的研究表明，过量的铁、锰会损伤动脉内壁和心肌，形成动脉粥样斑块，造成

冠状动脉狭窄而致冠心病。当人体铁的浓度超过血红蛋白的结合能力时,会形成沉淀,致使机体发生代谢性酸中毒,引起肝脏肿大、肝功能受损和诱发糖尿病。但是生活饮用水对铁、锰的去除,并非是毒理学上的要求。因为铁、锰的异味很大,而且污染生活器具,使人们难以忍受,在远未达到慢性毒害的程度前早已不能饮用了。

#### 6) 硫化物

水中硫化物包括溶解性的  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{HS}^-$ 、 $\text{S}^{2-}$  等。 $\text{H}_2\text{S}$  易从水中逸散于空气,产生臭味,且毒性很大。许多用户的井水中含有硫化氢,水有臭鸡蛋味,人畜不能饮用。硫化物能造成管网的腐蚀和水质变黑。

#### 7) 砷

天然水环境中的砷主要来源于自然界的砷循环转化及人类活动造成的砷污染。砷在天然水中质量浓度通常在  $1\sim 2\mu\text{g/L}$ ,但在含砷高的地区,水中砷的含量可高达  $12\text{mg/L}$ 。当人类以受砷污染的水作为饮用水水源时,可发生急慢性砷中毒。毒理学及流行病学的研究表明,长期饮用含砷水会引发神经衰弱、腹泻、呕吐、肝痛等症状,并有可能导致皮肤癌、肺癌、膀胱癌等癌症发病率升高。在英国,曾发生饮用含砷  $2\sim 4\text{mg/L}$  啤酒而发生 6000 人中毒,其中 70 人死亡的事故。中国台湾曾进行大规模饮用水中砷浓度与皮肤癌和黑脚病关系的调查,共调查饮用含高砷自流井水的 4 万居民,水中砷的平均浓度为  $0.5\text{mg/L}$ ,皮肤癌发病率为  $18.4\%$ ,皮肤过度角化为  $7.1\%$ ,黑脚病为  $0.9\%$ 。而邻近地区水中砷的平均浓度为  $0.015\text{mg/L}$ ,7500 居民无一例发生上述疾病。因此,WHO、USEPA 等机构对饮用水标准中砷的浓度限制更为严格。

#### 8) 放射性物质

放射性物质的来源有天然和人工两种。天然来源包括宇宙射线产生的宇生放射性核素(随雨水和径流进入水中)以及在岩石和土壤中存在的天然放射性核素,如铀 238、镭 226、氡 222 等。人为来源的放射性核素,包括来自核武器的落下灰、核电站、医学和其他方面应用的放射性物质。饮用水所致受照射剂量只占人体受照射总剂量的很小一部分,这部分剂量主要来自天然放射性核素及其衰变产物。USEPA 认为多年饮用放射性物质超标的水,可增加致癌风险,高剂量可致死。

### 4. 给水处理副产物

给水处理副产物主要是指净水厂在生产过程中产生的一些副产物,按照产生的来源可分为以下两个部分:一是生产过程自身产生的副产物,例如生产废水及生产污泥;二是原水中没有,但在工艺过程中投加某些药剂如消毒剂、铝盐、PAM 而在水中残留的副产物。因此生产过程副产物包括消毒副产物、生产废水及生产污泥、铝、丙烯酰胺等污染物。净水厂生产废水含有较多的悬浮固体,其中浓缩了原水中含有的原生动物。如直接排入江河水体,会成为水体的重要污染源。废水中的污泥含水率很高,呈凝胶状,质轻且蓬松,常处于半流化状,直排水体会造成严重的水污染问题,危害环境。如果水厂的生产废水经过简单处理后,上清液回流,可能会导致兰伯氏贾第鞭毛虫孢囊和隐孢子虫卵囊的富集等安全性问题,因此,回流水的安全性十分重要。水厂常用铝盐作为混凝剂,混凝后的

铝盐呈不溶性而沉淀或滤去。此过程也不可避免铝残留在水中。因此在给水处理中,用铝盐作混凝剂是饮用水中铝含量增加的主要原因。1984年 Richard 调查英国净水厂发现,原水中的铝和投加铝盐混凝剂引入的铝,经过常规处理工艺后,大约有 11% 仍然残留于出厂水中。出厂水铝含量高于原水 40%~50%, 数值为 0.01~2.37mg/L。

医学方面的报告表明人体摄入铝量过多对健康极为不利。1984年世界卫生组织指出铝含量与阿耳茨海默氏病之间有一定联系,这引起了医务工作者的极大兴趣。因铝可积累于人体脑组织及神经元细胞内,使人思维迟钝,判断能力衰退,甚至导致神经麻痹。在一些神经性疾病如退化性脑变性症、老年性痴呆等病症的患者身上发现他们脑组织内的铝含量要高于正常人。出厂水中铝的沉积也带来许多问题:铝质在输配水管网中沉积下来,降低管网的输水能力,增加饮用水浊度,削弱消毒效果,微生物大量繁衍,恶化了水质。同时水处理产生的高铝含量污泥,又带来了铝向天然水体中的排放问题。聚丙烯酰胺主要是水厂净化常用的絮凝剂或助凝剂,其在水处理过程中的残留单体为丙烯酰胺。IARC 将丙烯酰胺划为 2B 组致癌物,根据其模型得出饮用水中丙烯酰胺的质量浓度为 0.05 $\mu$ g/L、0.5 $\mu$ g/L、5 $\mu$ g/L 时,患癌危险度分别为 1/10<sup>6</sup>、1/10<sup>5</sup>、1/10<sup>4</sup>。

### 1.1.2 我国水源污染现状

近年来,随着我国社会经济的发展及人民生活水平的不断提高,我国的供水行业也取得了长足的发展。1990年我国城市总供水能力为 5867 万 m<sup>3</sup>/d,至 2000 年为 12161 万 m<sup>3</sup>/d,而到 2014 年已增加至 2.87 亿 m<sup>3</sup>/d,服务人口已达 4.35 亿人。在我国城市供水需求不断增长的背景下,我国水资源短缺及水体污染情况也在不断加剧。随着大量工业废水和生活污水未经处理或只经简单处理便向天然水体持续排放、广大农村地区不合理地使用化肥、农药等农用化学物质对地表水造成的非点源污染,导致我国水环境污染的日益加剧,水源水质不断下降,许多饮用水源地水体水质已达到劣 V 类,对我国给水处理技术提出了严峻的考验。严重威胁着我国居民身体健康,制约着社会经济的发展。

根据我国《2014 中国环境状况公报》显示,我国水源水质污染现状严峻,地表水、地下水等水源均受到不同程度的污染。

#### 1. 河流

我国地表水总体水质属中度污染。水环境污染加剧的重要表现首先是地表水污染的蔓延。大量含氮磷营养物质、难降解的有机物和有毒物质的工业废水、生活污水以及农村面源污水未经处理就直接排入环境,造成受纳水体的富营养化和严重污染,进而威胁饮用水的安全。据《2014 中国环境状况公报》公布的水环境状况表明,2014 年全国工业和城市排放生活废水化学需氧量(COD)排放总量为 2294.6 万 t,氨氮排放总量为 235.8 万 t。

地表水污染首先表现在河流污染严重如图 1-1 所示。2015 年国家环保总局公告了 2014 年河流的污染状况,长江、黄河、珠江、松花江、淮河、海河、辽河等七大流域和浙闽片河流、西北诸河、西南诸河的国控断面中,Ⅰ类水质断面占 2.8%;Ⅱ类占 36.9%;Ⅲ类占 31.5%;Ⅳ类占 15.0%;Ⅴ类占 4.8%,劣Ⅴ类占 9.0%。主要污染指标