

# 饮用水强化处理技术及工程实例

刘宏远 张 燕 编著



化学工业出版社  
环境科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

饮用水强化处理技术及工程实例/刘宏远, 张燕编著.

北京: 化学工业出版社, 2005. 2

ISBN 7-5025-6634-1

I. 饮… II. ①刘…②张… III. 饮用水-水处理

IV. TU991. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 007572 号

---

饮用水强化处理技术及工程实例

刘宏远 张 燕 编著

责任编辑: 管德存 邹 宁

文字编辑: 刘莉□

责任校对: 陈 静 于志岩

封面设计: 于剑凝

\*

化学工业出版社 出版发行

环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 17½ 字数 444 千字

2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6634-1/X·581

定 价: 40.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

我国多年平均水资源总量虽然居世界第 6 位，但人均占有水资源量只有  $2400\text{m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ ，约为世界人均水资源量的  $1/4$ ，是水资源量较低的国家之一。北方、沿海城市尤其是岛屿缺水情况严重，制约了地区经济和社会的发展。我国不仅水资源贫乏，在工农业快速发展的同时，还伴随着日益严重的饮用水资源环境污染问题。而且随着经济的发展、人口的增长和人们物质文化生活水平的提高，对水的需求也日益增长。这种需求的增长包含两方面的内容，一方面是对水量需求的增长，另一方面是对水质要求的提高。

常规净水工艺系统的混凝、澄清工艺主要去除水中悬浮物和胶体物质，该过程对水中难溶物和胶态有机物等去除率很高，但对溶解性有机物去除率却很低，难以有效地降低水中有机污染物的含量，而且传统的液氯消毒还可能导致三致物质的产生。水的供需矛盾迫切要求水的强化处理工艺，即更为有效地利用现有的水资源，提高产水率、改善水质，并开发新的水资源。

本书以饮用水处理工艺为主线，在大量收集归纳国内外同类研究及应用资料的基础上，结合作者的研究及应用，较全面地介绍了饮用水强化处理技术。其中第 1 章对水资源的概况及其污染现状进行了综述；第 2 章是对传统的饮用水处理技术的介绍；第 3 章介绍了常规饮用水处理工艺的强化技术；第 4 章介绍了微污染地表水的处理技术；第 5 章介绍了微污染地下水的处理技术；第 6 章则是针对我国北方以及南方以水库水或湖泊水为饮用水水源时，原水低温低浊的问题，介绍了相应的处理工艺；第 7 章是针对地球上淡水资源有限，尤其是我国的具体情况，为根本上解决水资源严重紧缺的问题，对开发海水资源以及海水淡化技术进行了探讨；第 8 章列举了比较典型的饮用水强化处理的工程实例。各章内容完整可独立成文，同时各章节之间也存在着有机的联系，使全书成为一体。

本书在写法上注重学科交叉，力求深入浅出和实用，可作为从事饮用水处理的有关科研、工程技术人员、行政管理人员及给水排水专业师生（尤其是博士生和硕士生）的参考书。

本书主要编著人员有刘宏远（第 1~3 章）和张燕（第 4~8 章），全书由刘宏远统一修改和定稿。本书在杨万东博士的鼓励和无私帮助下才得以成稿，作者借鉴了前辈、同行学者、昔日老师和同学的大量研究成果和文献，在此，向他们表示衷心的感谢。这些参考文献在书中予以介绍，如有遗漏，深表遗憾。

由于作者的水平和能力所限，书中定有许多遗漏和不当之处，敬请读者批评指正。

编著者

2004 年 10 月于西子湖畔

# 目 录

1	概述	1
1.1	水资源	1
1.2	水资源污染的普遍性	3
1.3	水质污染的危害	4
1.3.1	水资源环境微污染对常规净水工艺系统及水质的影响	4
1.3.2	饮用水源污染与健康	5
1.4	水污染与饮用水水质标准	5
1.5	饮用水强化处理主要技术概述	6
1.5.1	强化传统工艺	7
1.5.2	吸附工艺	7
1.5.3	化学氧化技术	7
1.5.4	生物处理技术	8
1.5.5	生物修复技术	8
1.5.6	海水淡化技术	9
2	饮用水处理工艺的原理与技术	10
2.1	传统饮用水处理工艺的去对象	10
2.2	胶体的稳定性	11
2.3	混凝的机理	13
2.4	混凝药剂和混凝设备	15
2.4.1	混凝剂	16
2.4.2	助凝剂	19
2.4.3	混凝的常用设备	20
2.5	沉淀	24
2.5.1	沉淀的理论	24
2.5.2	沉淀池内水流稳定性的判定	27
2.5.3	沉淀设备或构筑物形式	27
2.6	澄清池	30
2.7	过滤	31
2.7.1	过滤的基本理论	31
2.7.2	过滤设备和构筑物	32
2.8	消毒	36
2.8.1	氯消毒原理	37

2.8.2	氯胺、漂白粉和次氯酸钠消毒原理	38
<b>3</b>	<b>常规工艺强化</b>	<b>39</b>
3.1	混凝的强化	39
3.1.1	混凝动力学的研究进展	39
3.1.2	混凝技术的进展	43
3.1.3	混凝剂和助凝剂的发展	46
3.1.4	自动投药技术的研究进展	51
3.2	沉淀的强化	59
3.2.1	沉淀理论的研究	60
3.2.2	斜板、斜管沉淀池的发展	61
3.3	过滤的强化	64
3.3.1	影响过滤效果的因素	64
3.3.2	过滤的方式	74
3.3.3	慢滤池的应用	76
3.3.4	生物活性过滤	77
3.3.5	磁滤技术	83
3.3.6	膜过滤设施	84
3.4	消毒的强化	84
3.4.1	ClO <sub>2</sub> 消毒	85
3.4.2	臭氧 (O <sub>3</sub> ) 消毒	87
3.4.3	紫外线消毒	88
<b>4</b>	<b>微污染地表水处理技术</b>	<b>90</b>
4.1	地表水资源污染现状及其危害	90
4.1.1	微污染水体中的有机污染物	90
4.1.2	微污染水源水的主要危害	92
4.2	微污染水体的预处理技术	96
4.2.1	水库贮存	96
4.2.2	吸附预处理技术	97
4.2.3	空气吹脱法	98
4.2.4	化学氧化预处理技术	99
4.2.5	生物预处理技术	101
4.3	微污染水体的深度处理技术	114
4.3.1	生物活性炭深度处理技术	114
4.3.2	臭氧-生物活性炭 (O <sub>3</sub> -BAC) 联用深度处理技术	117
4.3.3	膜法深度处理技术	122
4.4	微污染水体的处理新技术	124
4.4.1	光氧化	124
4.4.2	大梯度磁滤技术	127
4.4.3	原位修复技术	130

4.4.4	生物活性滤池	130
4.5	小结	131
<b>5</b>	<b>微污染地下水主要去除技术</b>	<b>133</b>
5.1	地下水污染现状及其途径	133
5.1.1	地下水资源利用概况	133
5.1.2	地下水污染现状	137
5.1.3	地下水污染的途径	138
5.2	地下水污染的防治	141
5.3	原位修复技术	142
5.3.1	原位修复技术概述	142
5.3.2	原位修复技术方法	143
5.3.3	原位修复技术的影响因素	146
5.4	除铁除锰技术	147
5.4.1	地下水中铁、锰的污染及其危害	148
5.4.2	除铁理论与工艺	149
5.4.3	除锰理论与工艺	154
5.4.4	生物除铁除锰	158
5.4.5	存在的问题及发展	163
5.4.6	生物除铁除锰实例	164
5.5	硝酸盐去除技术	166
5.5.1	地下水中硝酸盐污染	166
5.5.2	地下水中硝酸盐污染的危害	167
5.5.3	地下水中硝酸盐污染的来源	168
5.5.4	地下水中硝酸盐主要去除技术	171
5.6	有机物去除技术	191
5.6.1	抽出-处理系统	193
5.6.2	水力隔离系统	194
5.6.3	地下水曝气技术	194
5.6.4	渗透反应格栅法	198
<b>6</b>	<b>低温低浊度水处理理论与技术</b>	<b>203</b>
6.1	低温低浊度水的特点	203
6.2	低温低浊度水处理的难点	205
6.2.1	低温对絮凝的影响	205
6.2.2	低温对混凝剂水解速率的影响	205
6.2.3	低温对沉淀效果的影响	205
6.2.4	低温对过滤的影响	206
6.2.5	低浊度对混凝的影响	206
6.2.6	有机物的影响	206
6.3	低温低浊度水的处理理论与技术	207

6.3.1	混凝剂与助凝剂的研究 .....	207
6.3.2	提高混凝效果的理论探讨 .....	209
6.3.3	提高处理效果的技术 .....	211
<b>7</b>	<b>海水淡化技术 .....</b>	<b>217</b>
7.1	海水淡化概述 .....	217
7.1.1	海水淡化的意义 .....	217
7.1.2	海水淡化的可行性 .....	219
7.2	海水淡化技术的现状及发展 .....	219
7.2.1	海水淡化技术的应用 .....	219
7.2.2	海水淡化技术的概述 .....	221
7.3	蒸馏法 .....	223
7.3.1	多效蒸发法 .....	224
7.3.2	多级闪蒸法 .....	225
7.3.3	压气蒸馏法 .....	226
7.4	电渗析技术 .....	227
7.5	反渗透法 .....	230
7.5.1	反渗透法的原理 .....	230
7.5.2	反渗透膜组件 .....	231
7.5.3	反渗透法的应用 .....	233
7.6	膜蒸馏技术 .....	234
7.7	太阳能海水淡化 .....	236
7.8	海水淡化的其他技术 .....	238
7.8.1	海水淡化的其他技术 .....	238
7.8.2	海水综合利用的资源和节能集成系统开发 .....	238
7.8.3	将发电、淡化、制盐和其他产品回收相结合的新工艺 .....	239
7.9	海水淡化预处理技术 .....	240
7.9.1	预处理技术 .....	241
7.9.2	预处理技术选用 .....	243
7.10	海水淡化的理论耗能量 .....	245
<b>8</b>	<b>工程实例 .....</b>	<b>247</b>
8.1	石臼漾水厂生物接触氧化预处理工艺 .....	247
8.1.1	工程概况 .....	247
8.1.2	预处理池设计参数及主要设备 .....	247
8.1.3	运行效果 .....	248
8.2	吉林市自来水公司二水厂扩建工程设计 .....	249
8.2.1	工程概况 .....	249
8.2.2	工艺简介 .....	249
8.2.3	运行状况 .....	250
8.3	涡旋混凝低脉动沉淀给水处理技术处理低温低浊高碱水 .....	250

8.3.1	低温低浊高碱水的水质特点 .....	250
8.3.2	技术改造 .....	251
8.3.3	运行情况 .....	251
8.4	气浮技术在水库水处理中的应用 .....	251
8.4.1	工程概况 .....	251
8.4.2	卧虎山水库的水质特点 .....	251
8.4.3	工艺设计 .....	252
8.4.4	气浮池的运行情况 .....	252
8.5	高锰酸钾-粉末活性炭联用组合工艺在微污染水源水处理中的应用 .....	253
8.5.1	概况 .....	253
8.5.2	改造后生产工艺流程 .....	254
8.5.3	运行情况 .....	254
8.6	嵊山 500m <sup>3</sup> /d 反渗透海水淡化示范工程 .....	255
8.6.1	项目概述 .....	255
8.6.2	总体设计及设备研制 .....	256
8.6.3	运行情况 .....	258
8.6.4	成本与效益分析 .....	258
参考文献 .....		260

# 1 概述

---

## 1.1 水资源

水是人类生活和生产活动中不可缺少的重要物质，水资源是人类赖以生存的最重要的自然资源之一，更是不可替代的重要自然资源。由于人们对水资源研究和开发利用角度不同，对水资源概念的理解也不同。对于水资源概念，基本上可归纳为以下三种。

① 广义概念 水资源指包括海洋、地下水、冰川、湖泊、土壤水、河川径流、大气水等在内的各种水体。

② 狭义概念 水资源指上述广义水资源范围内逐年可以得到恢复更新的那一部分淡水资源。

③ 工程概念 水资源仅指上述狭义水资源范围内可以恢复更新的淡水资源中，在一定技术经济条件下，可以为人们所用的那一部分水以及少量被利用的海水。工程概念的水资源被认为是目前赖以生存的重要资源，也是从事水处理工作研究的主要课题。人类目前利用的尤其是饮用水的来源主要是陆地上的水资源，一般以地表水和地下水两种形式存在。地表水体包括河流、湖泊、沼泽和冰川水；地下水是水资源的重要组成部分，是指贮存于地下含水层中的水体，主要由大气降水和河流下渗补给。陆地上水资源的存在状态，在时空上相互转化，随着人类活动的介入，这种转化表现得更为频繁。

全球广义水资源总量约为  $135.6 \times 10^{16} \text{ m}^3$ ，其中除海水、冰川、深层高矿化地下水外，可开发利用的且逐年更新的淡水资源（即狭义的水资源）总量约为  $47 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，仅占水资源总量的  $0.03\%$ ，而在一定技术经济条件下可以为人们取用的水量则更少。

随着经济发展、人口增长和人们物质文化生活水平的提高，世界各地对水的需求日益增长，一些国家和地区在 20 世纪 60 年代开始发生了水危机，水的问题引起了当代世界各国的普遍关注。联合国在第一次环境与发展大会上指出：“石油危机之后，下一个危机就是水。”目前世界上有 80 个国家约 15 亿人口面临淡水不足，其中 26 个国家约 3 亿人完全生活在缺水状态。缺水问题将严重制约着 21 世纪经济和社会的发展，并可能导致国家间的冲突。世界上约 300 条主要河流经过一些国家的边界，这里居住着 40% 的世界人口，曾经已有 140 个大小地区因水供应不足而出现紧张局势，如印度和孟加拉国之间的恒河水之争、以色列和阿拉伯国家之间的中东战争，均是为了争夺水资源。水资源的危机已威胁着人类社会的生存与发展。1999 年 10 月世界人口已达到 60 亿，据联合国人口与发展委员会第 32 次会议消息，到 2050 年世界人口将超过 90 亿，而据近几年的数字统计得出，全世界淡水消耗量自 20 世纪初以来，增加了 6~7 倍，远远超过了人口增长的速度。

我国水资源总量初步估算为  $28124 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中河川径流总量为  $27115 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占全世界径流量的 5.8%，占亚洲径流量的 18.8%；地下水资源量为  $8700 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。河川水资源与地下水资源水量有重复，其中可更新的地下淡水资源量为  $8700 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，微咸水  $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；地下淡水开采资源为  $2900 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，微咸水开采资源  $130 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。我国地表水与地下水资源情况如下。

### (1) 地表水资源量

以 2000 年为例，长江片地表水资源量  $16048.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，折合年径流深 612.4mm。其中长江流域地表水资源量  $9923.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，折合年径流深 555.2mm；西南诸河地表水资源量  $6125.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，折合年径流深 735.4mm。

长江流域按行政区统计，2000 年径流深最大为广西 1222.7mm，最小为青海 127.8mm。与常年比，有 14 个行政区变化幅度超过 10.0%，其中 6 个行政区比常年小，按减少幅度大小排列依次为浙江 33.1%、甘肃 27.4%、安徽 21.1%、陕西 17.7%、江苏 15.3%、广东 14.6%；8 个行政区比常年大，依次为河南 87.8%、西藏 37.5%、上海 26.3%、青海 14.7%、贵州 14.4%、云南 12.4%、重庆 11.5%、广西 11.1%。按流域分区统计，年径流深最大的是鄱阳湖水系 871.5mm，最小为三角洲平原 304.8mm。与常年比，有 5 个二级区变化幅度超过 10.0%，偏多的区依次为金沙江 19.0%、乌江 15.1%、上游干流 10.8%；偏少的依次为下游干流 21.9%、三角洲平原 17.8%。

西南诸河按行政区统计，年径流深最大为云南 772.5mm，最小为新疆 64.0mm。与常年比，有 3 个行政区变化幅度超过 10.0%，其中广西偏少 36.6%，西藏、云南分别偏多 17.2%、11.9%。按流域分区统计，年径流深最大为依洛瓦底江 1483.9mm，次大为藏南诸河 1426.3mm，最小为藏西诸河 128.5mm。与常年比，除红河偏少 18.8%外，其余均偏多，偏多幅度超过 10.0% 的依次为澜沧江 32.9%、怒江 30.1%、雅鲁藏布江 21.8%、藏西诸河 17.6%。

### (2) 地下水资源量

2000 年长江片地下水资源量  $4209.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中长江流域  $2518.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，西南诸河  $1691.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。就长江片 18 个流域二级区而言，地下水资源模数在  $(3.39 \sim 44.38) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$  之间，最大为依洛瓦底江  $44.38 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ，最小为藏西诸河  $3.39 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ；地下水资源量以洞庭湖  $533.2 \times 10^8 \text{ m}^3$  最大，金沙江  $528.9 \times 10^8 \text{ m}^3$  次之，藏西诸河  $19.9 \times 10^8 \text{ m}^3$  最小。2000 年长江片地下水资源总补给量比上年减少 3.7%。

我国自然条件的地区差异导致地下水资源分布的地区差异，地下水资源分布与降水的区域变化规律一致，南方水资源丰富，北方水资源贫乏。约占全国总面积 60% 的北方 15 省（自治区、直辖市）地下水补给资源约  $2600 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，占全国的 30%；特别是约占全国 1/3 面积的西北地区，地下水补给资源和开采资源分别为  $1125 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  和  $430 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，各占全国地下水补给资源量和开采资源量的 13%；而占全国面积 40% 的南方地区，地下水补给资源为  $6100 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，约占全国的 70%；东南及中南地区，面积仅占全国的 13%，地下水补给资源为  $2600 \text{ m}^3/\text{a}$ ，占全国的 30%。我国地下水资源的分布在宏观上具有由北向南，由西向东逐渐增加的规律，地下水资源的地区分布主要受降水控制，其次还受地表水体、岩性、地形地貌及植被条件等因素的影响。

总体上，我国水资源主要受降水的控制，在时空上分布很不均匀。在地域上，我国北方水资源贫乏，南方水资源较丰富，南北相差悬殊。从地区来看，水资源总量的 81% 集中分布于长江及其以南地区，其中 40% 以上又集中于西南五省区。从人均占有量来看，人均占

有淡水资源量南方最高值和北方最低值可以相差十倍，西部比东部可以高达五六百倍，这是我国北方属于资源型缺水的根本原因。南方地区水资源虽然比较丰富，但雨季易成洪涝灾害，而旱季会发生水资源短缺，而且由于水体污染，水质型缺水也相当严重。

我国多年平均水资源总量居世界第 6 位，但人均占有水资源量只有  $2400\text{m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ ，约为世界人均水资源量的  $1/4$ ，仅为世界人均用水量的  $30\%$  左右，是各国水资源量较低的国家之一。据对 149 个国家和地区的最新统计，中国人均水资源量已退居世界第 110 位。目前联合国已将中国列为全球 13 个最缺水的国家之一。

中国的 666 座城市中，有 333 座城市缺水，其中严重缺水 108 座，日缺水量达  $1600 \times 10^4\text{m}^3$ ，因缺水造成的年工业经济损失达两千三百多亿元，全国有 7000 万人和 6000 万头牲畜饮水困难。2000 年天津、青岛、大连等大城市用水告急，不得不采用紧急调水来解救，供水不足已成为制约城市经济发展的重要因素。北京市统计资料证实，北京已成为我国严重缺水的 30 个大城市中的一个特大型城市。目前，北京年人均水资源量不足  $400\text{m}^3$ ，只有全国平均水平的  $1/7$ ，世界水平的  $1/25$ ，在世界一百二十多个国家中排名百位之后。北京到 2000 年需水量为  $(45\sim 48) \times 10^8\text{m}^3$ ，到 2020 年需水量为  $(60\sim 63) \times 10^8\text{m}^3$ ；全市到 2000 年缺水量为  $(4\sim 13) \times 10^8\text{m}^3$ ，到 2020 年缺水量将达到  $(22\sim 31) \times 10^8\text{m}^3$ 。水资源缺乏已成为北京及中国其他城市的经济与社会发展重要的制约因素。到 21 世纪中期，全国总的用水量将从过去的五千多亿立方米增加到八千亿立方米左右，占我国可利用水资源总量的  $28\%$  以上。按国际上的经验，一个国家用水量超过其水资源可利用量的  $20\%$ ，就很可能发生水危机，因此我国水资源紧缺的问题相当严峻。

## 1.2 水资源污染的普遍性

我国不仅水资源贫缺，而且还伴随着日益严重的饮用水资源环境污染问题。2000 年据环保部门监测，全国  $90\%$  以上的城市水域受到严重污染，约  $50\%$  的重点城市的水源不符合饮用水水源标准。全国地表水近  $60\%$  以上的水质降为 IV 类以下，已完全失去作为饮用水水源的功能。主要地面水源水体水质污染程度见表 1-1。与此同时，我国湖泊、水库水富营养化程度加剧，在评价的 24 个湖泊中，9 个湖泊水质符合或优于 III 类水，4 个湖泊部分水体受到污染，11 个湖泊水污染严重。国家重点治理的“三湖”情况为：太湖 II、III 类水质断面占  $12\%$ ，IV 类水质断面占  $64\%$ ，V 类水质断面占  $12\%$ ，劣于 V 类水质断面占  $12\%$ ，中营养水平的水域占太湖总面积的  $16.5\%$ ，富营养水平的占  $83.5\%$ ，富营养程度略有加重；云南滇池水质劣于 V 类，处于富营养状态；巢湖东半湖水质为 III 类，西半湖水质为 V 类，东西半湖均处于富营养状态。在评价的 139 座主要水库中，有 118 座水库水质良好，达到 II、III 类水质标准。在未达到地面水 III 类的水库中，水污染极为严重的劣于 V 类水质水库有 8 座，分别是山西册田和关河水库，山东墙夼、雪野、黄前、尼山和田庄水库以及新疆柳沟水库。对 93 座水库进行了营养化程度评价，处于贫营养状态的水库 14 座，处于中营养状态的水库 65 座，处于富营养状态的水库 14 座。全国  $97\%$  的大中城市地下水受到严重污染，其中尤以北京、沈阳、包头、天津、西安、锦州、太原、保定污染为重，在调查的 118 个城市中只有 3 个城市的地下水未受污染。

据报道，我国自来水中已检测出有机物 800 多种，已经定性的有 218 种，已经定量的有 51 种，其中具有三致作用且已超标的为氯仿、六氯苯、多氯联苯、菲、葱、芘等。尽管传统

表 1-1 我国主要江河水系目前水质分类情况

水质类别	长江	黄河	珠江	淮河	海河	辽河	松花江
I类/%	4	0	29	0	5	4.5	0
II类/%	67	24	36	11	19	2.3	0
III类/%	4	5	7	17	4	4.5	4
IV类/%	11	47	22	18	10	22.7	67
V类/%	10	12	2	6	9	4.6	21
劣V类/%	4	12	4	48	53	61.4	8

饮用水处理工艺在保证饮用水水质方面起到重要作用，但它不能有效地去除水源水中微量可溶性有机污染物，并且氯化消毒工艺过程又产生了许多卤代有机物。

## 1.3 水质污染的危害

从目前的状况来看，水资源环境污染日益严重，受污染的水源范围日益扩大。近年来，虽然我国在水污染防治方面做了许多工作，但不少江河湖泊的水质仍在逐渐变差，并呈发展势头，工业发达地区水域的污染尤为严重。

### 1.3.1 水资源环境微污染对常规净水工艺系统及水质的影响

目前，水源普遍存在着溶解性有机物增多、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度高、水体有异味、色度增高、藻类大量繁殖等问题。我们通常把这些受到污染、但通过特殊工艺处理后尚可使用的水源水称为微污染源水。我国目前六大水系中有 80% 的水域受到污染，39% 的水源已不能满足地面水环境质量 III 类标准，属微污染源水。在这种情况下，随着人口的快速增长和工农业生产的迅速发展，要想使受到污染水源的水质在短期内恢复是不可能的。在我国淡水资源本来就十分紧缺的前提下，完全不使用受到污染的淡水水源越来越不可能，也就是说，我国自来水厂不得不面临着使用更多的水质不符合要求的受污染源水作为生活饮用水和其他用途的水。由于水厂水源受到污染，许多出厂水水质已不能达到国家生活饮用水水质标准。水源水质的污染也带来了新的问题，例如投加的化学混凝剂量大量增加、过滤出水浊度不能达标、出水有较明显的臭味等问题。另外，氯耗增加，出厂水余氯过低，难以保证出厂水余氯达最低限制值，并且随着氯耗的增加，出厂水有机卤化物含量升高，不利于饮水安全。研究证实，各自来水厂处理后的出厂水水质，其致突变阳性率均高于未经处理的原水水质。可见，常规净水工艺不但不能去除原水致突变物，如 THMs、MX 等，而且加氯处理后，其出厂水的致突变阳性经常高于未经处理的原水。

常规净水工艺系统只适用于一般较清洁水源水的处理，如果水源水被污染，则处理效果将很不理想。主要集中体现在三个方面：

① 水中有机污染物大多是带负电荷的化合物，它们的存在使水的  $\zeta$  电位升高，要保证一定的出水水质，需要投加过量的混凝剂和氯，从而增加了水处理成本，而且常规净水工艺无法去除某些有机污染物，同时还可能产生新的污染物；

② 现有的常规净水系统对有机物的去除率一般为 20%~50%，对氨氮的去除率为 15% 左右，出水中有机物含量仍然很高，并且其中某些有机物具有致癌性；

③ 有机污染物在输水管网中被管壁上附着的微生物所利用，它们在氯化消毒之后，仍然存活，比一般的微生物有更大的危害，在出水管网中形成非生物稳定的水，具有三致特性。

### 1.3.2 饮用水源污染与健康

由于饮用水源污染日益严重，常规净水工艺系统不能有效地去除污染物，导致饮用水水质不断恶化。据联合国有关统计数字，目前全球有 17 亿人喝不到干净的饮用水，每天约有 2.5 万人因水质低劣而死亡。在发展中国家已出现了由于供水不足和环境卫生恶劣而造成的令人不安的征兆：

- ① 在发展中国家，80%的疾病和 30%的死亡是由于不洁饮用水造成的；
- ② 每年有 1.2 亿人因不洁饮用水和恶劣的环境卫生条件而生病；
- ③ 每年有 400 万以上的儿童死于由水传染的疾病；
- ④ 15%的儿童在 5 岁前由于腹泻而夭折，如果有合理的供水和相应的卫生条件，这种死亡是可以避免的。

世界卫生组织和国际癌症机构从大量的材料中得出结论，现有的癌症约 50%是饮食不当造成的，特别是饮用水的水质与癌症发病的关系很大。我国有关研究得出，癌症发病率与水源水的污染程度呈正相关关系。受污染的水还会传播肠道疾病，如伤寒、痢疾等。统计表明，我国不足 11%的人能饮用符合卫生标准的水，有 65.4%的人口在饮用浑浊、苦咸、受工业污染或能传播疾病的水，约 7 亿人饮用大肠杆菌超标的水，1.7 亿人在饮用受有机物污染的水，其中近 4 千万人的饮用水污染尤其严重，主要分布在长江沿岸及人口稠密的地区。

## 1.4 水污染与饮用水水质标准

饮用水水质指标的发展经历了一个由人的感官和生活经验的感性认识到科学方法严格测定并量化的历程。随着科学技术的发展，人民生活质量的要求越来越高，水源水质的不断恶化迫使人们不断地修订规范和水质标准，并将所关注的重点水质指标转移。供水水质指标归纳起来可以分为三类：细菌学指标、有毒有害物质指标及感官性指标。细菌学指标是极为重要的，因为它能在同一时间造成大片人群发病或死亡；有毒有害物指标是防止长期积累导致慢性疾病或癌症的指标，确定的原则是人终身摄入是否有无觉察的健康风险；感官性水质不良，可能为水质污染的反映，虽然不一定危害健康，但会导致消费者对供水水质安全性发生怀疑，甚至产生厌恶。

各国所关注的重点从以往的浊度、臭和味等感官指标及无机离子、重金属等指标转移至 20 世纪 80 年代的有机污染指标，并且显著地增加了必须限制浓度的有机物的种类。美国《国家饮用水基本法则》对饮用水中 78 项污染物指标定出了最大污染物浓度（MCL）和最大污染物浓度目标值（MCLG），其中有机物指标达 54 种之多；日本《生活饮用水水质标准》对有机污染物指标规定达 49 项；欧洲经济共同体供水联合会（EUREAU）于 1991 年底提出的修改饮用水水质指令 80/778/EC 的建议，要求明确限定农药、多环芳烃、酚类化合物等的种类和浓度。世界卫生组织（WHO）在对饮用水水质提出的标准中对 88 种有机物提出了限制浓度。

我国 20 世纪 50 年代着重考虑浊度、色度、臭和味等感官性指标；60~70 年代开始重视金属等毒理学指标；80 年代以来，随着分析手段的提高，开始关注有机污染物指标。我国现行的《生活饮用水卫生标准》（GB 5749—85）中水质指标共 35 项，是根据我国现实国情于 1985 年提出的，规定的有机物指标仅有 7 项：挥发酚（以苯酚计）（ $\leq 0.002\text{mg/L}$ ）、氯仿（ $\leq 0.06\text{mg/L}$ ）、四氯化碳（ $\leq 3\mu\text{g/L}$ ）、苯并[a]芘（ $\leq 0.01\mu\text{g/L}$ ）、DDT（ $\leq 1\mu\text{g/L}$ ）、

六六六 ( $\leq 5\mu\text{g/L}$ ) 和阴离子合成洗涤剂 ( $\leq 0.3\text{mg/L}$ )。我国的饮用水标准检测项目少、标准低, 缺乏的是对有毒物质的控制, 其中有些可能是三致物质, 为此, 1993 年中国城镇供水协会制定了《城市供水行业 2000 年技术进步发展规划》, 对一类水司的水质指标调整为 88 项, 其中有机物指标增加到 38 项; 二类水司的水质指标为 51 项, 有机物指标增加到 19 项。我国最新的《生活饮用水卫生标准》(待批准, 中华人民共和国国家标准) 则在附录中对饮用水水源中 32 种有机污染物最高允许浓度做出了规定, 同时对原生活饮用水卫生标准 (GB 5749—85) 规定的 35 项水质指标进行了修改, 增加了铝 ( $0.2\text{mg/L}$ ) 和粪大肠杆菌 ( $0$  个/ $100\text{mL}$ ) 两个指标。报批稿中较大的改进是规定了饮用水源水中有害物质的最高允许浓度, 如表 1-2 所示, 其中有机物 50 项, 占总数的 80%。

表 1-2 饮用水源水中有害物质的最高容许浓度 (待批准)

项 目	标准/(mg/L)	项 目	标准/(mg/L)	项 目	标准/(mg/L)
乙腈	5.0	四氯苯	0.02	硫化物	0
丙烯腈	2.0	六氯苯	0.05	黄磷	0.003
乙醛	0.05	异丙苯	0.25	钼	0.07
三氯乙醛	0.01	苯乙烯	0.02	钴	1.0
甲醛	0.5	苯胺	0.1	铍	0.002
丙烯醛	0.1	三乙胺	3.0	硼	0.3
二氯甲烷	0.02	己内酰胺	3.0	锑	0.05
1,2-二氯乙烷	0.03	丙烯酰胺	0.0005	镍	0.02
环氧氯乙烷	0.02	氯乙烯	0.005	钡	0.7
二硫化碳	2.0	三氯乙烯	0.07	钒	0.05
苯	0.01	四氯乙烯	0.04	钛	0.1
甲苯	0.7	氯丁二烯	0.002	铊	0.001
二甲苯	0.5	二乙基己基邻苯二甲酸酯	0.008	马拉硫磷 (4049)	0.25
乙苯	0.3	水合肼	0.01	内吸磷(E059)	0.03
氯苯	0.03	四乙基铅	0	对硫磷(E605)	0.003
二氯苯	0.02	石油(包括煤油、汽油)	0.3	甲基对硫磷(E505)	0.02
二硝基苯	0.5	吡啶	0.2	乐果	0.08
硝基氯苯	0.05	松节油	0.2	林丹	0.002
二硝基氯苯	0.5	苦味酸	0.5	百菌清	0.01
三氯苯	0.02	丁基黄原酸盐	0.005	西维因	0.05
三硝基甲苯	0.5	活性氯	0	臭氟菊酯	0.02

在饮用水水源短缺、水源普遍性污染以及人们对饮用水水质要求日益提高的今天, 在原有处理工艺的基础上, 开发饮用水除污染新技术、对饮用水进行强化处理、提高饮用水的安全性已刻不容缓。

## 1.5 饮用水强化处理主要技术概述

水源水中存在的有机物对胶体具有保护作用, 提高了胶体的稳定性, 使给水处理增加了一定的难度, 另外水中有毒有机物难以降解, 具有生物积累性和三致作用(致癌、致畸、致突变)或慢性毒性。某些有机物特别是天然有机物(NOM), 经常规处理氯消毒后所产生的有机卤化物, 其中有许多已被确认为是直接致癌物或诱发物, 对人体健康有极大的潜在危害。

我国目前城市给水处理普遍采用常规处理工艺，即“混凝→沉淀→过滤→消毒”工艺流程。该工艺流程具有投资省、运行稳定、维护管理简便等优点，但由于受其净化功能的限制，对水中有机物的去除能力较低，尤其是对水中可溶性低分子有机物的去除效果更差。同时，随着人民生活质量的不断提高，对饮用水水质标准提出了更加严格的要求。因此，传统的常规净水工艺系统很难适应从污染的水源水中除去有害人体健康的污染物，不能给人们提供安全、可靠的饮用水。为此，除采取严格措施控制污染源外，迫切需要研究开发高效、经济及方便可行的除污染新工艺。

国内外受污染水的处理，按净化机理可分为物理吸附、化学吸附、化学氧化、生物降解和截留分离等，按其净化工艺可以分为强化常规处理工艺、生物（氧化）预处理-常规处理工艺、常规处理-深度处理工艺、生物（氧化）预处理-常规处理-深度处理或膜处理工艺等。但是对于饮用水的强化处理技术而言，不仅仅限于强化常规处理工艺，针对饮用水水质标准的提高和水源污染日益加重的实际情况，它应包括对传统工艺各方面的改善上，例如对设计原则的修改、改变传统应用的药剂以及引入新工艺等。根据对传统饮用水处理技术的强化作用，将其分为强化传统工艺、吸附工艺、化学氧化技术、生物处理技术、生物修复技术以及作为开发新型水资源的海水淡化技术等。

### 1.5.1 强化传统工艺

改变投药方式、投药条件和采用新型混凝剂强化混凝效果降低浊度，是目前控制水厂去除水中有机物最经济、最有效的手段；采用高效的斜板沉淀工艺是强化沉淀效果的有力措施，气浮工艺的开发与应用给系统沉淀工艺改造提供了一个新的思路；采用双层或多层过滤，以及新型滤料，如硅藻土材料等，是降低滤池出水浊度的有效途径；生物活性过滤以及磁分离技术等更是近年来强化过滤的发展方向。研究开发新型的消毒剂是强化传统饮用水处理工艺的另一个研究方向，传统的消毒剂为氯气、次氯酸钠和次氯酸钙，水源污染后，氯消毒与有机污染物生成具有有害作用的副产物，因此，必须开发和使用其他替代氯消毒的方法，以满足人们对饮用水安全性的要求。很多实验表明，不含氯的纯净  $\text{ClO}_2$  不会与腐殖酸或富里酸反应生成三氯甲烷。有研究认为，甚至  $\text{ClO}_2$  本身的氧化作用也能去除 THM 的前体物。 $\text{ClO}_2$  是优良的替代消毒剂，不过有研究者认为，采用  $\text{ClO}_2$  消毒时，水中将会存在  $\text{ClO}_2$ ，对人体健康危害如何尚有待于研究。 $\text{ClO}_2$  消毒虽具有一系列优点，但生产成本高（总制水成本约为氯消毒的 1.27 倍），且生产需即制即用，不能贮存，故难以推广。目前，研究较多的消毒方式还有  $\text{O}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ -UV 以及 UV- $\text{TiO}_2$  等联合工艺。

### 1.5.2 吸附工艺

活性炭因原材料来源丰富，比表面积大，对色、臭、味、农药和氯化物等其他有机物具有良好的去除作用而被广泛重视。活性炭主要用于饮用水的深度处理，能够有效地去除水中的致突变物质，使 Ames 试验阳性水变为阴性水，是控制合成有机物、三卤甲烷和卤化乙酸的有效方法。树脂吸附法是近年发展起来的一种新技术，采用高分子合成的树脂空隙多、细孔分布窄、比表面积大，具有溶胀性好、过流条件优、再生方便等优点，对水中色、臭、味以及各种微量污染物去除效率高，具有广阔的应用前景。

自 20 世纪末世界各国采用了臭氧生物活性炭净化受污染水技术以来，使活性炭净化从单一的吸附功能上升到具有生物氧化分解和物化吸附的综合净化功能，扩大了活性炭的应用范围。

### 1.5.3 化学氧化技术

化学氧化技术是通过在给水处理工艺中投加氧化剂强化处理效果的一类处理措施。化学

氧化的目的主要有以下几个方面，去除微量有机污染物，除藻、臭味，控制氯化消毒副产物，氧化助凝以及去除铁锰等作用。

化学氧化技术在给水处理中可以分为药剂氧化法和光氧化法两大类技术。药剂法是向水中投加氧化剂，氧化废水中的有毒有害物质使其转化为无毒无害或毒性小的化合物。水处理中常用的氧化剂有双氧水 ( $H_2O_2$ )，高锰酸盐 ( $MnO_4^-$ ) 和氯化试剂 (包括  $Cl_2$ 、液氯、漂白粉、次氯酸钠和二氧化氯等)。光氧化法作为一种高级氧化技术，以光为潜在的辐射源，激发半导体催化剂，产生空穴和电子对，具有很强的氧化还原作用。当用于降解水中有机物时，光生空穴将产生  $\cdot OH$  等强氧化性自由基，可以成功地分解水中包括难降解有机物在内的大多数污染物。

#### 1.5.4 生物处理技术

水中有机污染物可分为可生物降解性有机物和难生物降解性有机物。对于可生物降解有机物，可以利用微生物将其分解成稳定的无机物，从而达到削减消毒副产物前体物的目的。生物处理技术包括生物活性炭、生物滤塔、生物接触氧化、生物流化床、生物转盘等几种形式。

受污染水源水生物处理是借助于微生物的新陈代谢活动，将水中的有机污染物、氨氮、亚硝酸盐氮以及铁、锰等有效除去，并明显改善饮用水中的色、臭、味的方法。生物处理单元可作为预处理，能够有效地改善水的混凝沉淀性能，并显著减少混凝剂和液氯用量；对于富营养化湖泊水，可以完全替代预氯化工艺，并且避免了预氯化引起的卤代有机物的生成，有利于降低水的致突变活性和控制三卤甲烷物质的生成。生物处理工艺设在沉淀工艺之后，可以降低后续处理的负荷，延长过滤或活性炭吸附等物化处理工艺的使用周期，最大可能地发挥水处理工艺的整体作用，降低水处理费用。

#### 1.5.5 生物修复技术

生物修复 (bioremediation) 技术是利用特定的生物 (植物、微生物或原生动物) 吸收、转化、清除或降解污染物，使其完全无害化，从而使污染了的土壤或地下水能够部分或完全恢复到初始状态的生物措施。生物修复技术又可分为原位修复技术和异位修复技术。所谓原位生物修复技术就是利用微生物对污染土壤不经搅动、在原位和易残留部位之间进行现场处理的方法，该技术应用于被石油类碳氢化合物所污染的地下水治理已经有多年历史，但是直接用于治理被其他污染物污染的地下水或地表水的时间较短。原位生物修复技术的研究结果一方面加深了对该技术使用过程中一些限制因素的理解，同时也为使用其他相关的生物、化学和水力参数等提供了帮助。异位修复技术是将被污染介质搬动或移至其他位置进行处理的方法。

生物修复技术与物理、化学修复技术相比，具有多种优点。生物修复技术的主要特点有：

- ① 处理效果好，微生物的吸附和降解作用能有效地去除污染物，可以使其残留量达到很低水平；
- ② 对环境的影响小，无二次污染，生物修复可以矿化地下水中的有机物，使之转化为对环境无害的水和  $CO_2$ ；
- ③ 可以就地处理，避免了集输过程的二次污染，节约了处理费用；
- ④ 反应条件简单，投资省，运行费用低，生物过程是以酶促反应为基础的，通常是在常温、常压下进行，另外，酶对底物有高度的特异性，而使得该过程效率高，副产物少，与需要高温、高压条件的化工过程相比，反应条件大大简化，因而投资省、费用少、消耗低；
- ⑤ 生物修复过程稳定、操作简便。

### 1.5.6 海水淡化技术

针对淡水资源紧缺的问题，我国采取了节水、拦蓄降水、开采地下水以及大规模的“远程调水工程”，但水源紧缺的问题却日益加重，这主要是淡水资源存在着以下问题：

- ① 降水地区分布不均匀，陆地上有大量荒漠和半荒漠地区，这些地区雨量稀少，严重缺水，不少水源含盐量较高，不能直接饮用，也不能供工农业利用；
- ② 降水时间分配不均匀，雨季降水集中，难于大量贮存；
- ③ 城市人口与工业集中，用水量高度集中；
- ④ 某些特殊场合，如船舶、荒岛等，无法使用雨水；
- ⑤ 由于排放污水造成严重的环境污染，这也是造成水源不足的重要原因之一。

解决这一矛盾的根本途径是寻找和开发新的水资源，而地球上存在的未被开发和利用的海水资源数量是淡水资源的 34 倍以上。

海水淡化技术目前发展很快，其种类很多，使用较广的主要有反渗透法、蒸馏法和电渗析法，并已经达到了工业规模的生产应用。海水淡化作为一种高新技术具有不受时空和气候影响，水质好、供水稳定等特点，非常符合环境保护的要求。淡化后的水质清洁无菌，犹如纯净水，含盐量远低于普通饮用水，可以很好地解决人们尤其是沿海地区居民的饮水问题。利用海水淡化水作为城市生活和工业用水的中水，可以大量节约新鲜淡水。海水淡化能使陆地上淡水资源总量增加，有利于陆地水环境的改善，与规模浩大的南水北调东线相比（见表 1-3），由于有丰富的储量，海水淡化技术是解决水资源短缺更为有效的途径。

表 1-3 沿海地区使用引江水与海水淡化比较

项 目	南水北调东线	海 水 淡 化
一次性投资	过黄河 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右的中等规模，黄河以北投资 60 亿元人民币	海水淡化项目投资很大，如果沿渤海湾建立若干大型海水淡化厂，年产淡水总量达到 $(2 \sim 3) \times 10^8 \text{ m}^3$ ，估计投资约 150 亿元人民币
成本	0.5~1.0 元/ $\text{m}^3$	5~8 元/ $\text{m}^3$
水质	II ~ III 类水质	可达到 I 类 1 级水质
供水范围	沿海及内陆城市，还可以包括农村，东线可供水面积约为 $4.5 \times 10^4 \text{ km}^2$	局限于沿海城市和附近小城镇，对应东线调水范围，合理的供水面积（以距海岸 100km 计）约为 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$
运行管理	管理较复杂，需要政策和法律支持，需要政府协调	供水系统可大可小，每个系统可独立运行，易管理；便于依靠市场机制筹建和运行管理
对经济和社会的影响	线路占用耕地，需要少量房屋拆迁和移民；给沿线带来一些就业机会；促进受水区整体经济社会的发展	很少占地；解决沿海严重缺水地区的饮水问题和工业发展用水
对生态环境的影响	对调出区可能存在一些不利影响；对受水区生态环境改善有很大好处，包括恢复地下水和湿地，改善水污染等	基本无不利影响；有利于用水城市生态环境的改善

上述各种对受污染水的净化处理方法以及海水淡化技术，除本身具有一定利弊和适用条件的限制，如造价的高低、管理维护的难易、能耗药耗的多少、设备的复杂程度、净化效果的稳定性等因素外，更重要的是各种方法对水中各类有机物的去除具有非常明显的选择性和针对性，因此在选择水处理工艺时应针对原水的实际情况，有目的地选择。