

当代给水与废水处理原理

许保玖 编著



高等教育出版社

180859

X703

38

当代给水与废水处理原理

许保玖 编著

许保玖 龙腾锐 孟宪庭 王志石 编

高等教育出版社

一九九〇·五

本书是一部风格独特的,高层次的水处理理论著作。它的独特风格在于用反应器的观点贯穿全书始终,以生物化学工程的概念贯穿废水的生化处理;对于水处理方法的逻辑推理作了较全面的阐述;注重理论和概念表达的严格性,重视微观分析和数学表达的水平;所用资料新颖独到。

全书包括绪论和化学动力学,反应器,活性炭吸附,传质及曝气,常规分离过程与膜分离,生物化学工程基础——应用微生物生物化学,生物化学工程基础——废水的生物化学处理,活性污泥法,生物膜法,厌氧生物处理法,废水的脱氮与脱磷等十一章。附录中介绍了活性污泥法动力学公式等内容。

本书可作环境工程、水处理专业研究生教材,也可供从事以上两专业工作的科研及工程技术人员学习参考。

(京)112号

当代给水与废水处理原理

许保玖 编著

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 28.5 字数 650 000

1991年4月第1版 1992年4月第2次印刷

印数 1 406—2 816

ISBN7-04-003247-3/K·156

定价 8.85 元

序

为中国读者编一本具有独特风格的水处理高层次理论读物是作者多年的愿望。近年来，由于受到国内广大读者多种形式的支持与鞭策，促使作者完成了本书的编写。

本书与同类书籍不同之处大致有下列几点。第一，以反应器的概念贯穿全书，以生物化学工程的概念贯穿废水的生化处理，这是作者关于建立水处理学科理论体系的观点；第二，揭示水处理方法的逻辑基础(相当于英语 rationale)；第三，重视理论和概念表达的严格性，重视微观分析和数学表达的水平；第四，选用独具匠心的内容，罕见的甚至在水处理书中尚未出现过的内容。这几点的具体含义将在下面各章内容介绍的过程中反映出来。这些含义也就是作者所谓的独特风格，并在书名中冠以当代一词以示强调的原因。

全书包括绪论和十一章，由许保玖编著。龙腾锐(重庆建筑工程学院)、孟宪庭(北京工业大学)和王志石(清华大学)三位中年老师参与了第五章到第十一章部分内容的编写工作。绪论和各章的内容特点大致如下。

绪论中提出了水处理学科发展的观点，水质处理的整体概念，介绍了废水回用于生活饮用水的情况，讨论了有关饮用水水质的问题。

第一章化学动力学。本章介绍了有关化学动力学的基本知识，为本书的后面章节以及阅读现代水处理文献所涉及的动力学问题做准备。本章还专设一节论述水处理中的氧化和沉淀两者有关的动力学问题。

第二章反应器。这是代表本书特色的主要章。本章以较多的篇幅对现代有关反应器的理论进行了有份量的介绍。有关停留时间函数、混合与反应三者间的讨论是本章的重点部分。读者可从这部分内容中体会出水处理反应器中尚未解决的根本性问题以及进行研究的方法。本章中专设一节论述无量纲化，这个水处理书中尚未出现过的题目实际是很重要的。

第三章活性炭吸附。重点内容是在活性炭性能的烧杯搅拌试验结果与吸附柱的生产运行结果间找出逻辑基础。

第四章传质及曝气。本章首先对亨利定律进行了展开的论述，收集了一些水处理实用的而又在文献中难以找到的亨利常数。气-液传质过程中的液膜与气膜的阻力问题也有较详细的讨论。关于相似准数的内容属于本章的重点。书中以相似准数贯穿有关传质过程的内容，并结合现代水处理文献中所涉及的相似准数，进行了独特的讨论。章末的吹脱塔有关内容介绍了设计的基础知识，这也是现代给水处理所需的内容。

第五章常规分离过程与膜分离，由许保玖与王志石合编。常规分离过程指混凝、沉淀(包括浓缩)与过滤。本章的重点是对现代混凝与过滤的理论进行足够深刻的阐述，这部分是由王志石编写的。Kynch的沉淀理论反映了巧妙的思维过程，本章也给以较详细的讨论。

第六章生物化学工程基础的应用微生物生物化学部分,孟宪庭与许保玖合编,主要工作是孟宪庭完成的。这是代表本书特色的另一主要章。本章为废水处理的生化处理提供基础理论。作者认为,没有微生物和微生物有关的生物化学的基本知识,就无法从微观的水平来理解生化处理过程和分析有关的现象,因此不惜用较大的篇幅来写这一章。本章按水处理中的微生物、细菌生理和生物处理与代谢作用三个大标题来叙述内容。本章为从事生化处理而又无机会专门学习生物化学的读者提供了适合的教材。

第七章到第九章均为许保玖与龙腾锐合编。

第七章为生物化学工程基础的废水生物化学处理部分。把废水的生物处理归入生物化学工程学科是本书的一个独特观点,这一提法在水处理的书中尚未出现过。本章的重点内容是介绍生物化学工程中,如何建立单个细菌以及生物膜或生物絮体的数学模型,为后面各章做准备。

第八章活性污泥法。本章先建立活性污泥法有关 MLSS 增长速率与 BOD_L 减少速率两个基本公式的逻辑基础,然后分别论述 CSTR 型与活塞流型活性污泥法。逻辑基础沟通了微生物基础理论与工程实际间的关系,也是本书的一个内容特点。本章在书后的附录中设了一节介绍活性污泥法动力学的公式,更细致地表达各种因素间的相互关系,可供读者更深一步的参考。

第九章生物膜法。本章以较详细的方式介绍了 Atkinson 的滴滤池数学模型,是为了生物化学工程在生化处理中的应用列举典型的例子。这一模型也反映了现代的水处理方法中,分析问题所述的微观尺度和定量表达的数学水平。本章还设一节介绍生物流化床,这是生物膜法的新发展。

第十章为厌氧生物处理法,第十一章为废水的脱氮与脱磷,均由龙腾锐编。这两章对废水的厌氧处理与脱氮脱磷进行了较系统地论述,比较完整地反映近年来的研究和实践成果。

本书的取材,得力于许多西方著作。在每章末已列出了一些取材的主要文献,但在每章正文中只对所直接引用的图、数据表和例题等的来源注出文献号。对此,特向书中取材引用过的文献的作者致以谢意。

许保玖

1990年4月于北京清华大学

目 录

<p>绪论.....1</p> <p> § 0-1 水处理的学科方法学.....1</p> <p> § 0-2 给水与废水处理.....2</p> <p> § 0-3 废水的再生与饮用水水质.....7</p> <p> 参考文献.....11</p> <p>第一章 化学动力学.....12</p> <p> § 1-1 反应速率与反应级数.....12</p> <p> § 1-2 简单的基元反应.....15</p> <p> § 1-3 较复杂的反应.....19</p> <p> § 1-4 速率常数 k 与温度的关系.....27</p> <p> § 1-5 非基元反应的动力学模型.....30</p> <p> § 1-6 水处理有关的动力学问题.....33</p> <p> 习题.....36</p> <p> 参考文献.....37</p> <p>第二章 反应器.....39</p> <p> 物料衡算方程与 Fick 第一扩散定律.....40</p> <p> § 2-1 物料衡算方程.....41</p> <p> § 2-2 浓度与扩散速度.....41</p> <p> § 2-3 Fick 第一扩散定律.....43</p> <p> 多相反应与均相反应.....47</p> <p> § 2-4 氧气在水膜内的扩散和反应.....48</p> <p> § 2-5 多孔丸模型.....51</p> <p> 连续均相反应器.....55</p> <p> § 2-6 活塞流反应器.....55</p> <p> § 2-7 连续搅拌反应器.....56</p> <p> § 2-8 阶式 CSTR.....58</p> <p> 停留时间函数、混合与反应.....62</p> <p> § 2-9 停留时间函数.....62</p> <p> § 2-10 实验方法.....66</p> <p> § 2-11 $E(t)$ 函数的组合.....72</p> <p> § 2-12 液龄分布函数的统计参数.....75</p> <p> § 2-13 $E(t)$、混合与反应动力学.....76</p> <p> 分散模型.....81</p> <p> § 2-14 无量纲化.....81</p> <p> § 2-15 分散模型.....84</p> <p> 反应器的容积.....89</p> <p> § 2-16 反应器的设计.....89</p>	<p> § 2-17 各种反应器容积的比较.....92</p> <p> 习题.....95</p> <p> 参考文献.....98</p> <p>第三章 活性炭吸附.....99</p> <p> § 3-1 活性炭的性能.....99</p> <p> § 3-2 吸附等温线.....102</p> <p> § 3-3 Langmuir 公式的推导.....104</p> <p> § 3-4 吸附公式的应用.....106</p> <p> § 3-5 吸附柱的设计.....110</p> <p> 习题.....119</p> <p> 参考文献.....120</p> <p>第四章 传质及曝气.....122</p> <p> § 4-1 亨利定律.....123</p> <p> § 4-2 气-液传质模型.....125</p> <p> § 4-3 相似现象与相似准数.....134</p> <p> § 4-4 曝气设备的充氧能力.....142</p> <p> § 4-5 气泡的传质性能.....145</p> <p> § 4-6 鼓泡曝气.....151</p> <p> § 4-7 机械曝气.....153</p> <p> § 4-8 水膜的传质性能.....156</p> <p> § 4-9 吹脱塔.....159</p> <p> 习题.....162</p> <p> 参考文献.....163</p> <p>第五章 常规的分选过程与膜分离.....165</p> <p> 凝聚与絮凝.....165</p> <p> § 5-1 基本概念.....165</p> <p> § 5-2 胶体颗粒的基本性质.....166</p> <p> § 5-3 憎液胶体的稳定性.....172</p> <p> § 5-4 絮凝动力学.....178</p> <p> § 5-5 水处理中的凝聚与絮凝.....185</p> <p> 沉淀试验.....193</p> <p> § 5-6 离散颗粒的沉淀试验.....193</p> <p> § 5-7 絮凝颗粒的沉淀试验.....196</p> <p> § 5-8 浓悬浮液的沉淀试验.....198</p> <p> § 5-9 Kynch 的沉淀理论.....201</p> <p> 浓缩池.....207</p> <p> § 5-10 利用 Kynch 理论确定浓缩池面积.....208</p>
---	--

§ 5-11 利用固体通量曲线确定浓缩池面积	210
滤床过滤	212
§ 5-12 滤床过滤的流体力学	212
§ 5-13 单个滤料上颗粒的沉积效率	215
§ 5-14 水处理中的滤床过滤	222
膜分离	227
§ 5-15 膜分离法	227
§ 5-16 反渗透	228
§ 5-17 超滤	231
习题	234
参考文献	236

第六章 生物化学工程基础
——应用微生物生物化学 238

水处理中的微生物	238
§ 6-1 原核细胞微生物	238
§ 6-2 真核细胞微生物	242
§ 6-3 病毒	245
细菌的生理	248
§ 6-4 细菌的成分	248
§ 6-5 细菌的营养	260
§ 6-6 细菌的生物催化剂——酶	263
§ 6-7 分批培养物的生长规律	269
§ 6-8 细菌生长的环境条件	272
§ 6-9 细菌的呼吸与生物氧化	275
§ 6-10 生物氧化中的能量代谢	279
生物处理与代谢作用	286
§ 6-11 需氧和厌氧代谢	287
§ 6-12 大分子有机物的水解	289
§ 6-13 单糖的代谢	294
§ 6-14 氨基酸、脂肪酸和甘油的代谢	304
§ 6-15 核酸的代谢	309
§ 6-16 微生物的生物合成	312
习题	318
参考文献	318

第七章 生物化学工程基础
——废水的生物化学处理 320

§ 7-1 单个细菌的模型	321
§ 7-2 细菌的连续增殖	323
§ 7-3 细菌增殖速率与底物消耗速率关系式	326
§ 7-4 BOD 与 T _{OD}	328

§ 7-5 微生物集团的模型	334
§ 7-6 微生物膜的阻力和厚度	340
习题	343
参考文献	344

第八章 活性污泥法 345

§ 8-1 活性污泥法的基本概念	345
§ 8-2 CSTR 型活性污泥法	353
§ 8-3 CSTR 型活性污泥法的设计	359
§ 8-4 活塞流型活性污泥法	365
§ 8-5 硝化	371
§ 8-6 污泥需氧消化反应器	373
习题	375
参考文献	378

第九章 生物膜法 379

§ 9-1 生物膜法的基本概念	379
§ 9-2 滴滤池法	380
§ 9-3 Atkinson 的滴滤池数学模型	381
§ 9-4 滴滤池的设计	387
§ 9-5 生物转盘	392
§ 9-6 生物流化床	392
习题	397
参考文献	397

第十章 厌氧生物处理法 398

§ 10-1 厌氧生物处理法的基本原理和流程	398
§ 10-2 厌氧过程动力学	403
§ 10-3 厌氧活性污泥法	405
§ 10-4 厌氧生物膜法	414
§ 10-5 厌氧处理法的运行与管理	418
习题	419
参考文献	419

第十一章 废水的脱氮与脱磷 421

§ 11-1 生物脱氮和脱磷的基本原理	421
§ 11-2 生物脱氮系统	425
§ 11-3 生物脱磷系统	432
习题	434
参考文献	434

附录一 $\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$ 的解	435
--	-----

附录二 活性污泥法动力学	438
--------------	-----

附录三 (9-8)式的解	445
--------------	-----

绪 论

§ 0-1 水处理的学科方法学

给水与废水处理简称水处理。50年代起,一些学者为了建立各种水处理方法间的理论联系,提高学科的理论水平,先引用了化学工程中单元操作(unit operation)及单元过程(unit process)的概念。70年代,又引入了反应器(reactor)的理论。这就是本节所指的学科方法学的涵义。为了更好地理解这些新内容对于水处理学科理论所起的作用,最好从它们的原始涵义讲起。本节先讨论有关单元操作与单元过程的问题,在第二章中再讨论反应器的问题。

任何化工生产过程都可以分解为许多步对物料所采取的行动,每一步行动产生一种独特的效果。当这种行动不包含产生任何化学反应时,则称为单元操作,当这种行动产生了化学反应时,则称为单元过程。单元操作往往带有物理变化,但是也有不产生物理变化的单元操作。早期的化工生产过程主要是由一些单元操作组成的。例如食盐的生产过程只包括下列几种单元操作:固体和液体的输送、传热、蒸发、结晶、干燥及筛选。在这些单元操作中,蒸发及结晶都产生了物理变化;传热过程可能产生物理变化,也可能不产生物理变化。但固体及液体的输送、干燥及筛选则完全没有物理变化。水处理中用的一些方法,如混合、沉淀、浮升、浓缩、过滤,也是化工中的一些单元操作。

单元操作的概念是1915年出现的。这一概念把各种化工生产中基于同样的理论设计出来的、具有同样功能的设备抽象出来,进行统一的研究,使各种不同的化工生产间出现了共性。单元操作这一学科的出现使化学工程足以成为一门独立的工程分支。在1915年以后的40年中,单元操作一直是化学工程有别于其它工程学的特征学科。后来由于化学反应工程学科的出现,才取代了单元操作的这种特殊地位。

单元过程这一概念是在30年代类比于单元操作的概念提出来的。聚合、氧化、水解、硝化都是一些单元过程。水处理中,化学沉淀、离子交换、消毒、脱氯等也应归入单元过程之中。单元过程由于包含了化学反应,就不易象单元操作那样,定义得很清楚,同时也难于完全脱离物料来论述。单元操作一直是化学工程的基本课程,教材和专著很多,单元过程则未具有类似的情况,原因可能就在这里。50年代以后,由于发展了化学反应工程这一新学科,把化学反应与有关的其它过程结合起来研究,这无疑又降低了单元过程这一概念原来所起的作用。

水处理著作中,首先引入单元操作这一概念的,可能是1954年出版的Fair与Geyer两氏的《给水与废水处置》(Water Supply and Wastewater Disposal)一书。但这本书把包含化学反应的单元过程也包括在单元操作这一概念内。这本书后来由Okun参加编写,分两卷出版,在第二卷《给水净化与废水处理》(Water Purification and Wastewater Treatment)中,仍然采用原

来的术语。因此,在这些著作中,单元操作的涵义可以理解为单元方法。

Rich 分别于 1961 年及 1963 年发表了《卫生工程的单元操作》(Unit Operations of Sanitary Engineering)及《卫生工程的单元过程》(Unit Processes of Sanitary Engineering)两本书,按化工的观点来引用单元过程这一术语。Metcalf 与 Eddy 公司编写的《废水工程》(Wastewater Engineering, 1972 及 1979 年版)又把单元过程区分为化学单元过程(包含化学反应)及生物单元过程(包含生化反应)两条术语,单元操作则称为物理单元操作。

Rich 等人的著作虽然都引用了单元操作及单元过程等概念,但实际上并没有把水处理过程完全按单元操作及单元过程的体系来论述,这些概念只是作为把传统的水处理方法分成两大类(Rich)或三大类(Metcalf 与 Eddy)的大致依据。这样做是为了便于论述和理解。例如曝(读 pù, 见 § 8-1)气池包括了气和水的输送(单元操作)、气体传递(单元操作)及生物氧化(单元过程)等内容,它与二次沉淀池(单元操作)组成了活性污泥法。Rich 及 Metcalf 与 Eddy 都是把活性污泥法作为一完整的处理方法来论述的,这和一般的废水处理著作的做法并无差别,只是分别把这一方法归入单元过程(Rich)或生物单元过程(Metcalf 与 Eddy)一类而已。

因此,单元操作与单元过程等两个概念的引入,对于水处理的学科理论并没有起重大的贡献,不象单元操作这一概念对于化学工程所起过的那种突出贡献。原因可能是,化工生产包括了很多的完全不同的工业,单元操作这个概念使这些完全不同的工业之间产生了联系,在理论上有了突破。但是,水处理只是生产水的一种工业,单元操作与单元过程的那种概念特点便不存在了。

应该说,引入反应器的理论对于提高水处理的学科理论是有较大的贡献的,而且大有发展的前景,这将从第二章起看出来。

§0-2 给水与废水处理

50 年代以前,给水处理与废水处理涵义的划分是很清楚的。从天然水源取水,为供生活或工业的使用(特别是生活使用)而进行的处理,称为给水处理。为了排除的目的,对于使用过的水所进行的处理,称为废水处理。自从水的污染日益严重,水源逐渐紧张以来,给水处理与废水处理间的界限也就逐渐模糊起来。现在,废水可以作为水源,经处理后以供工业用水甚至生活的用水。水的再用(reuse)以及再生(revonation)这类术语的出现就反映了这种情况。为了废水的再生或再用所进行的处理,就其水质说是废水处理,就其处理的目的说则为给水处理。在这种新形势下,使用水处理或水质控制这样的术语,不再划分给水与废水,可能较为方便;而水源、水处理与用水三者之间应作为一个整体来看待,如图 0-1 所示。在天然水源逐渐紧张、水质逐渐恶化的今天,这种对于水的全面观点尤其重要。

水的处理的目的不外三种:(1)去除水中的影响使用水质的杂质以及污泥的处置,这是最主要的内容;(2)为了满足用水的要求,在水中加入新的成分以改变水的化学性质,如食用水中加氟以防止龋齿病,循环冷却水中加缓蚀剂及缓垢剂以控制腐蚀及结垢等;(3)改变水的物理性质的处理,如水的冷却,降低水的粘滞度等。本书只讨论去除水中杂质的方法。

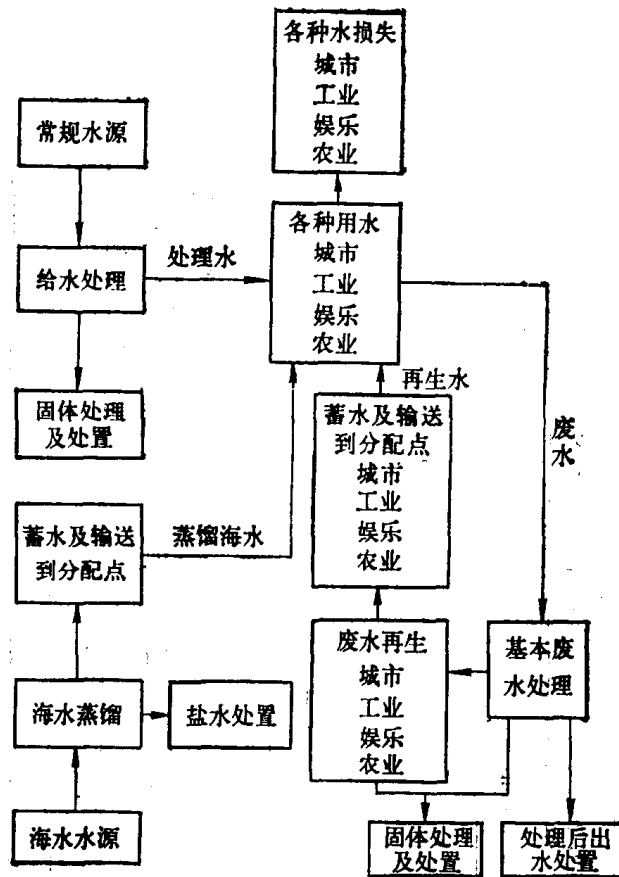


图 0-1 水的使用、处理和处置系统[7]*

去除水中杂质的方法属于化工中分离过程(separation process)的范畴。分离方法和杂质的性质与粒度有密切的关系，这由图 0-2 表示出来。图 0-2 中只给出一些常见的水处理方法，另外一些水处理方法可参看下面的图 0-3，这些方法可以分成物理化学法和生物法两大类。

水处理的物理化学方法包括下列三种情况：(1)在处理过程中只发生物理变化；(2)在处理过程中只发生化学变化；(3)在处理过程中同时发生物理及化学变化。物理化学法很多，图 0-2 及 0-3 不能完全列出，例如，利用离心力作用的旋风分离、离心沉淀，利用磁力作用的磁化处理及高梯度磁力处理，等等，都是一些物理化学方法，但没有在图中列出来。下面就图 0-2 中所列的方法略加说明。

从图 0-2 可以看出，除图中第三行所示属于生物法外，其它的处理方法均属于物理化学方法，在图中第二行所示的处理方法中，反渗透用以去除水中的溶解无机离子以及小分子，超滤用以去除水中的大分子，前者完全是一种物理化学过程，后者在低浓度时为筛除作用，属于物理过程，但在高浓度时则属于物理化学过程，两者都属于膜滤方法。微滤完全是利用筛除的物理作用。

图 0-2 最后两行所示的处理方法中，化学氧化指通过化学的氧化反应过程来去除水中杂质。

• [7]为本章末所附参考文献之序号。

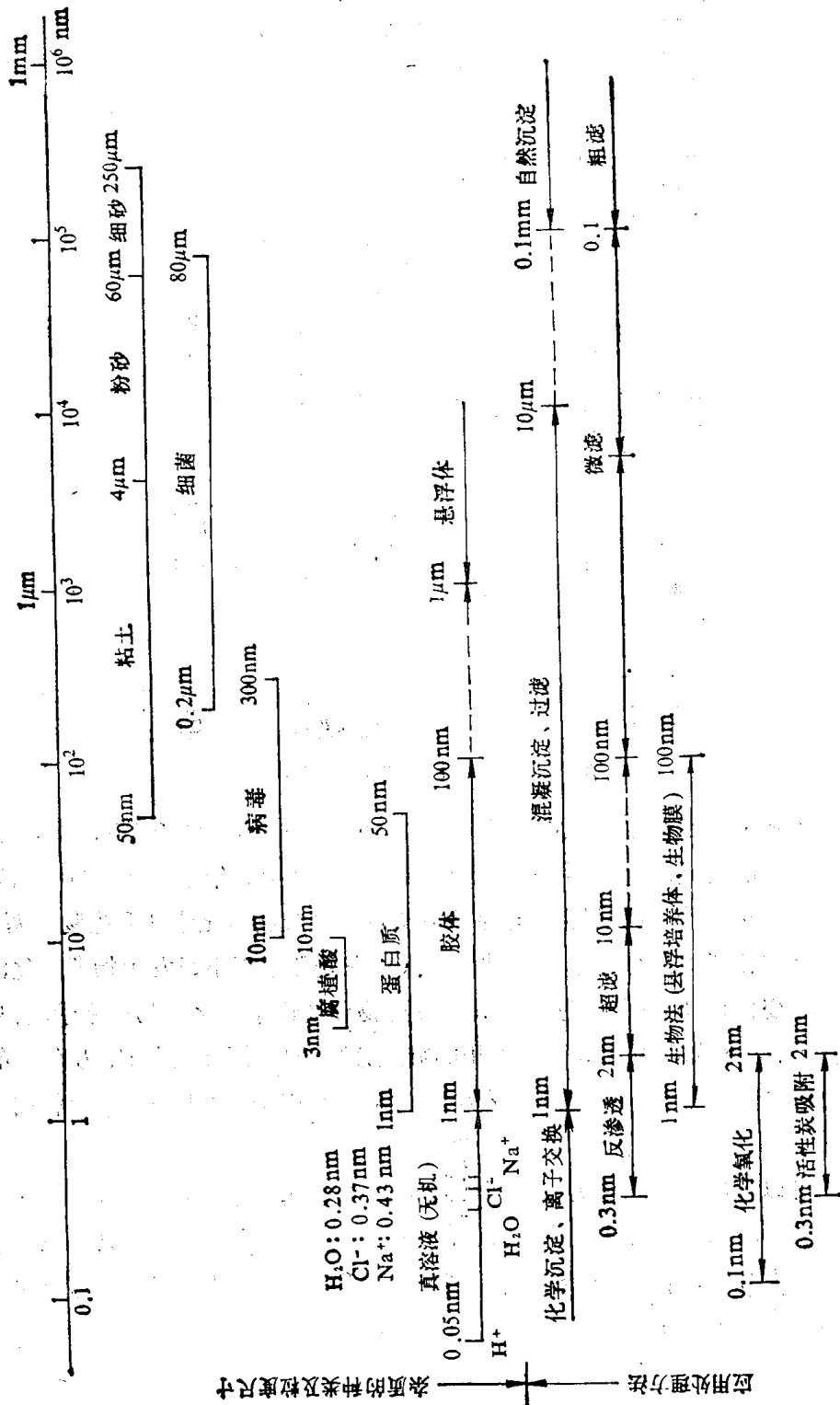


图 0-2 水中的杂质与处理方法

化学氧化可以用于有机物及无机物。用于有机物的氧化剂包括过锰酸钾，氯及臭氧等。化学氧化可以氧化水中产生臭及味的有机物，以及部分分解难于降解的有机物质，如酚类化合物等。从图0-2可以看出，化学氧化与活性炭吸附所适用的粒度范围基本一致。活性炭吸附主要用于去除水中的有机物质。因此，有机物的化学氧化及有机物的活性炭吸附往往作为比较方法来选择。无机物的化学氧化典型例子为使 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} ， Mn^{2+} 氧化为 Mn^{4+} ，这是除铁及除锰的基本反应。

在物理化学方法中，化学沉淀、离子交换、反渗透、化学氧化以及活性炭吸附等是用于去除水中溶解物质的方法，混凝沉淀及过滤则为去除胶体以及较大颗粒的方法，这可以由图0-2中的粒度尺寸看出来。

生物法也称生化法，主要是通过微生物的生命过程把废水中的有机物转化为新的微生物细胞以及简单形式的无机物，从而达到去除有机物的目的。应用的微生物主要是细菌。生物处理法的应用形式可分成悬浮培养体(suspended culture)及生物膜(film flow)两类。悬浮培养体法以活性污泥法为典型代表，它的特征是起水处理作用的细菌培养体呈处于悬浮状态的絮体。生物膜法以滴滤池为典型代表，它的特征是起水处理作用的细菌培养体呈一层膜固定在填料表面上。采用这两条术语的好处在于它们具有较广泛的概括性。如活性污泥法、曝气塘都属于悬浮培养体法，而生物膜法可包括滴滤池及生物转盘等方法。

主要利用藻类的水处理方法有兼性塘(facultative pond)、需氧塘(aerated pond)及净化塘(maturation pond)三种。兼性塘一般深1—2.5米，它实际上只是一个储存废水的池子，其大小足以让其中自然生长的藻类群体产生满意的氧气浓度。藻类在水面附近生长，并通过光合作用向上层水提供氧气。进水中的废水固体以及藻类、细菌、植物等死后所产生的有机固体则下沉到塘底，由厌氧细菌分解。介于水面与塘底间的中间层，氧的供应较紧张，其中溶解的及胶体的有机物则被细菌氧化。这种废水塘的设计要点是使有机物分解需氧的速度不超过藻类产生氧气的速度，否则废水塘就会完全变成厌氧的，因而产生臭气。需氧塘的水深小于1米，由藻类的光合作用提供足够的氧气，故使厌氧区微不足道。但是由于这种塘的出水带有大量的藻类，所以很罕用。净化塘用于处理经过生物法处理后的出水，它藉藻类的光合作用以及再曝气作用供给氧气，也称精处理塘(polishing pond)。另外，用于废水处理的塘还有厌氧塘(anaerobic pond)。厌氧塘实际是一种原始的厌氧消化池，最适宜于处理肉类加工的废水。这种废水中所含的高浓度脂肪，在塘的水面处形成厚约2厘米以上的一层浮渣，起保温以及防止大量的硫化物的还原化合物逸出的作用。

接近20年的观点，可以把废水的生物处理包括在生物化学工程的学科范围内，本书即按这种观点编写的，并对生物化学工程的基础较详细地加以介绍。

图0-3进一步按去除杂质的种类列出了废水处理过程中可能采用的各种方法，这些方法实际上基本代表了水处理可能采用的全部方法，而其中大部分方法，一般情况下并不采用。图0-3也可以看作是一个水处理流程，其中的去除粗粒固体、去除悬浮固体、去除溶解的有机物及消毒四步连起来即组成了常规的废水生化处理流程。如果对沉淀加上凝聚，连同过滤、消毒几步即组

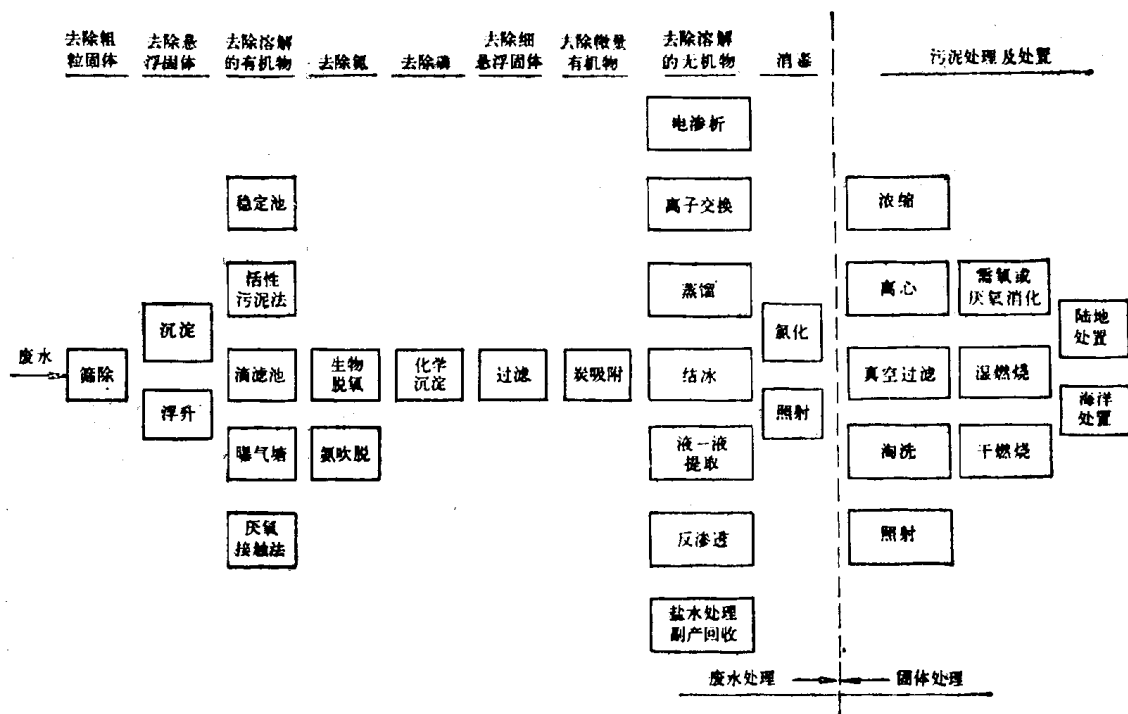


图 0-3 废水处理及固体处理的各种方法[9]

表 0-1 废水经二级处理及高级处理后的水质[7]

二级处理	二级处理后面的处理	典型水质						
		悬浮固体 (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	总氮 (mg/L)	PO ₄ (以P计 mg/L)	浊度 (度)	色度 单位
活性污泥法	无	20-30	15-25	40-80	20-60	6-15	5-15	15-80
	粒状介质过滤	<5-10	<5-10	30-70	15-35	4-12	0.3-5	15-60
	过滤、活性炭吸附	<3	<1	5-15	15-30	4-12	0.3-3	5
	凝聚及沉淀	<5	<5-10	40-70	15-30	1-2	<10	10-30
	凝聚及沉淀、过滤	<1	<5	30-60	15-30	0.1-1.0	0.1-1.0	10-30
	凝聚、沉淀、过滤	<1	<5	30-60	2-10	0.1-1.0	0.1-1.0	10-30
	氨吹脱	<1	<1	1-15	2-10	0.1-1.0	0.1-1.0	<5
陆地处理	灌溉	<1	<2	—	3	0.3		
	快渗透	2	2	—	10	3		
	漫地水流	10	10	—	3	2		
滴滤池或生物转盘	无	20-40	15-35	40-100	20-60	6-15	5-15	15-80
	粒状介质过滤	10-20	10-20	30-70	15-35	6-15	<10	15-60
	曝气、沉淀、过滤	<5-10	<5-10	30-60	15-35	4-12	0.5-5	15-60

注：灌溉、快渗透(rapid filtration)及漫地水流(overland flow)为陆地处理的三个主要方法。

成了一个常规的给水处理流程。

60年代以后,由于为了满足废水再用的水质要求或排放的标准,出现了对于常规废水处理后的出水进一步处理的过程,称为废水的高级处理(advanced wastewater treatment)。高级处理虽然可以包括很广泛的处理内容,但一般则具体指去除氮与磷的处理,与废水的三级处理(tertiary treatment)为同义语。同时又出现一级处理(primary treatment)与二级处理(secondary treatment)这两条新术语。一级处理指去除大部分悬浮固体的过程,采用的方法为沉淀与浮升。二级处理指去除废水中有机物并进一步降低悬浮固体含量的处理过程。由于这一处理通常是藉生物法来完成的,所以往往把生物处理与二级处理看作同义语。但应该指出,近年来已开始用物理化学方法来去除溶解的及胶体的有机物,主要用混凝、过滤及活性炭吸附。在特殊的情况,还可采用反渗透、超滤、真空过滤、离心以及蒸馏等方法。

废水经三级处理后的水质变化见表 0-1。

§ 0-3 废水的再生与饮用水水质

1. 废水的再生

由于在世界范围内可用的天然淡水日趋紧张,生活废水作为生活饮用水水源的问题已得到广泛的重视和研究。事实上已有两处实践的经验。一处是短期的美国 Chanute 城的小型经验。由于长期干旱,取水的河流枯竭,被迫将经生化处理后的生活废水作为给水水源。处理过的废水先在贮水池中停留 14 天,再经石灰软化等处理后作为生活饮用水。生活废水又重复上述过程。这样循环使用的过程,共运行了五个月,相当于约 7 次循环。在这段期间虽然未发现水传播疾病和有碍健康的情况,但处理后的水带味、嗅和色,水质的感官性较差。

非洲纳米比亚首都温得和克(Windhoek)城的经验,是唯一的长期用经过处理的生活废水作为生活饮用水水源的例子,而且也是仍在这样实践的例子。温得和克城的实践可分为两个阶段。从 1968 年到 1973 是它的原始阶段,其处理流程见图 0-4。生活废水经过常规处理(即需氧生物氧化处理)后即作为原水进入生活饮用水处理流程。这一流程因此称再生水厂的处理流程。产

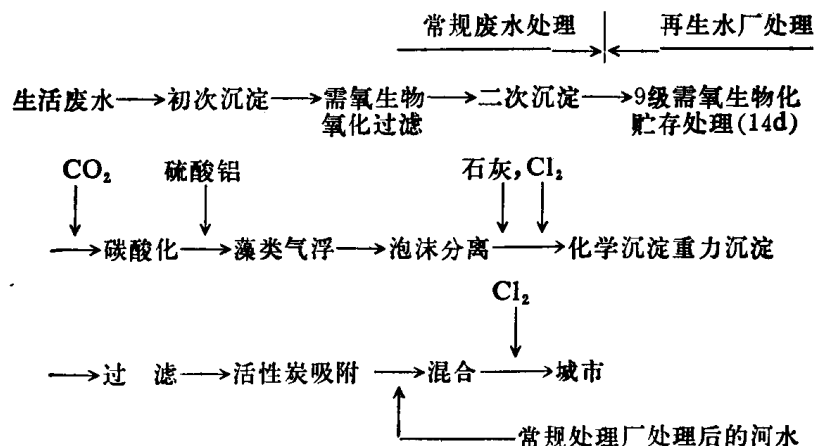


图 0-4 温得和克城以经处理的生活废水为水源的再生水厂原始处理流程

生量为 4500m³/d。经再生水厂处理的水最后掺入从常规自来水管网的来水中,再经加氯后进入城市自来水管网。

当开始使用时,这一阶段的再生水厂每年运行超过 8 个月,产水量平均占温得和克城总用水量的 13.5%,水质完全符合世界卫生组织的标准,也为公共所接受。后来由于旱情减轻,以及从经济上的考虑,到 1973 年时每年只运行了 70 天。经济上的原因有两方面,一是由于经过贮存处理的水含氨量很高,用氯量很大;二是一次性药剂粉状活性炭的价格高涨。这使运转费用增加。经过试验研究,采用 NH₃ 吹脱及改用粒状活性炭吸附并再生的工艺,改建后的流程如图 0-5 所示。脱氨的原理是,当水的 pH 经投加高剂量石灰上升到高于 11 后,溶解的氨基本以 NH₃ 形式存在,在水向下喷洒,空气向上流动的过程中,NH₃ 进入空气中随之流出,改建后每年的运行时间增加到 9 至 10 个月。再生水占供水总量的 20—50%。

图 0-4 中的数字代表取水样处。冬季的来水水质较差,其处理效果见表 0-2。

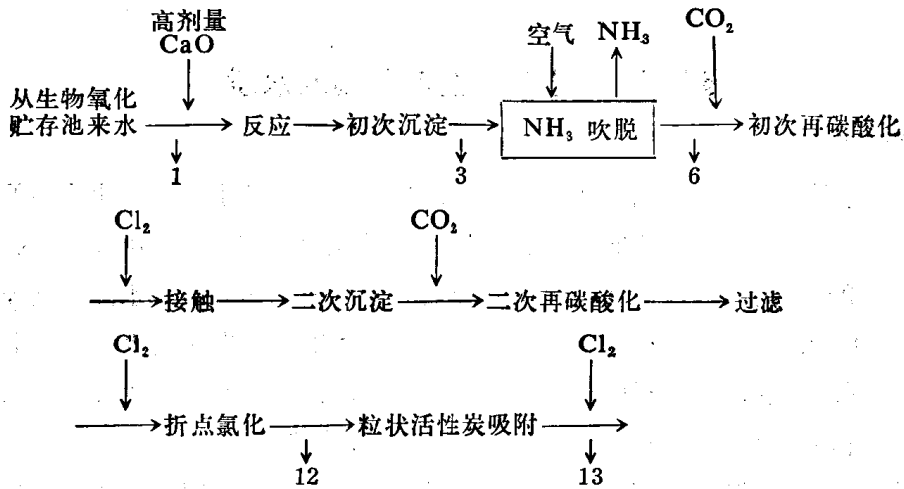


图 0-5 温得和克城以经处理的生活废水为水源的再生水厂改建后处理流程[10]

表 0-2 改建后温得和克再生水厂的冬季处理效果[10]

参 数	取 样 处				
	1	3	6	12	13
pH	7.7	11.6	11.5	6.5	
TDS(mg/L)	564	570	587	592	
PO ₄ (mg/L)	41.8	0.49	—	0.54	
Ca(mg/LCaCO ₃)	117	120	107	117	
Mg(Mg/LCaCO ₃)	47.9	9.5	—	21.9	
总碱度(mg/LCaCO ₃)	236	224	184	50.7	
NH ₃ -N(mg/L)	16.5	15.1	7.6	0.19	0.12
基耶达N(mg/L)	19.0	17.0	9.2	0.87	
NO ₃ -N(mg/L)	11.1				
	0.54	—	—	0.61	0.15
COD(mg/L)	55.6	—	—	25.1	7.4

按废水处理的语言,温得和克再生水厂的流程可称为废水的高级处理流程。美国的South

Tahoe 湖高级废水处理厂、21 世纪水工厂(Water Factory 21) 都采用了类似的流程。21 世纪水工厂还采用了反渗透以去除水中的溶解固体。最后还应该提到的是美国的两处再生水水厂。一个是 Denver 再生水饮用验证厂。这个厂的处理流量为 $3800\text{m}^3/\text{d}$ ，专为研究将经常规生化处理后的生活废水处理，直接用为生活饮用水，整个计划预计耗资 3 千万美元。这座厂所采用的处理方法与 21 世纪水工厂等价。1984 年元月开始运行，计划 1986—1990 进行五年研究，头两年研究过程的优化，最后两年半用试验动物进行从急性到慢性的各种健康影响的研究。另一个是美国加州 San Diego 的称为总资源回收计划(total resource recovery program)的项目，实际也是有关回收生活废水作为生活饮用水的研究。

2. 生活饮用水水质的现在和未来

长期以来，自来水保证了饮用水的水质安全性。但不幸的是，现在的自来水水质成分中，不断出现许多新的不安全因素，有属于病原体的，有属于化学物质的。

新的病原体是针对伤寒、霍乱、痢疾、传染性肝炎和小儿麻痹症等公认的水传疾病的病原体说的。据 1946—1980 的美国水传疾病资料，在 672 次总暴发次数中，有 198 次是由 9 种新的病原体传播的，75 次是由三种公认的旧病原体传播的；在病原体和化学物质两类暴发原因中未能定性的有 350 次，其中可能还包括一些尚未发现过的新病原体。近数年来自来水的文献重点报导了贾第虫病、军团病和隐孢子虫病等三种新水传疾病，只有头一种出现在上述的统计资料中，这进一步说明，现代自来水水质安全性的严峻形势。

贾第虫病是一种腹泻病。由于 1974 和 1975 连续两年在美国的流行病暴发所引起的研究，确定了病因为兰伯氏贾第虫(*Giardia lamblia*)。这种原生动物的胞囊通过饮用水进入人体，然后发育成成虫。现在认为，凡是用地表水，特别是以低浊度山区河流为水源的自来水，贾第虫胞囊几乎都是一种潜在的威胁。

在 1976 年 7 月参加美国宾州退伍军人协会(Legion)年会的 221 人中，暴发了一次神秘的肺炎，导致 34 人死亡。这种病后来就称为军团病(Legionellosis)。病原体是一种杆状菌，现定名为嗜肺军团菌(*Legionella pneumophila*)。军团病是通过吸入带有这种病菌的水的气溶胶而感染的。浴室蓬蓬头下的水雾中，就很可能带有这种病菌。

隐孢子虫病(Cryptosporidiosis)也是一种腹泻病，病因是小隐孢子虫(*Cryptosporidium Parvum*)。这种原生动物的卵囊通过饮用水进入人体，引起感染。迄至 1988 年止，美国确认为由于饮用水引起的隐孢子虫病的流行性暴发只有两次，分别在 1984 和 1987 年，病例总计 15000 人。隐孢子虫的感染首先是在一些有免疫性缺陷的患者中发现的，并且和艾滋病的出现同时引起医学界的注意。免疫性健康的隐孢子虫病患者在染病 30 天后就能痊愈。但是，当艾滋病的患者兼染上隐孢子虫病时，就永远不能脱离这种病了。现认为，隐孢子虫卵囊的水传播可能性相当于或超过贾第虫的胞囊。

饮用水中不断发现新的病原体，既反映了水质检验技术的进步，同时也反映了现代文明的一个侧面：人类空前规模的生活和生产活动对于自然环境所起的干扰以及彼此间的高度频繁接触为许多病原体的迅速增殖和传播创造了适宜的条件。类似的原因使自来水中不断出现新的沾污

化学物质。

据 1977 年的报导, 1970 年以前在水中检查出 100 种有机化合物, 1975 年末, 数目已超过 1500 种, 其中 400—500 种在世界范围内的饮用水中发现过。另据 1981 年报导, 根据世界范围内的调查结果, 在饮用水中已出现 765 种合成有机化合物, 其中有 117 种是属于致癌的或致癌有关的物质。另有文献还报导说, 近年来自来水中出现了许多沾污物, 包括挥发性有机化合物、杀虫剂、消毒副产物, 其它合成有机物以及氡等放射性核素。似乎约每一个月就能找到一种新的重要的自来水沾污物。当然, 水中的沾污物还有无机化学物质, 只是数量少得多而已。

在美国 1946—1980 暴发的水传播疾病中, 由化学物质引起的虽然只占 49 次, 但饮用水中的一些化学沾污物质还会在人体内累积起来, 其危害性目前往往难于估计。根据中国和美国的资料, 人体脂肪中已检出 DDT 和六六六两种农药, 最高含量可达约 70ppb。另据报导, 在美国某项研究的血液标本中, 有 35% 含 DDT, 平均浓度 3.3ppb。化学物质的这种累积作用, 尤其应该特别重视。人体内的累积化学物质, 一般约有 20% 来源于饮用水。

为了控制这些不断增加的不安全因素的数量, 每个国家的饮用水水质标准中所列的水质参数项目, 也就必然相应地迅速地增加。中国 1959 年实施的第一个生活饮用水水质标准只包括 16 项水质参数, 1976 年的修订标准订为 23 项, 1985 年的 GB5749—85 号标准已增加到 35 项。美国的变化尤其突出。1914 年的美国饮用水水质标准只有两个项目, 在 1925、1942、1946 和 1962 的四次修订中, 分别增加成 11、18、19 和 28 个项目, 但 1976 年的标准则猛增成 47 个项目。1976 年的标准是根据 1974 年的《安全饮用水法案》的要求制定的。从 1980 年起, 美国环保局还计划用 6 年的时间编制一个新饮用水水质标准, 定出 71 种成分的最大沾污浓度。这些沾污物分成 6 类: (1) 微生物和浊度共 6 项, 包括总大肠菌类、浊度、贾第虫、标准平板计数、病毒和军团菌; (2) 无机化学物 15 项; (3) 有机化学物 28 项; (4) 放射性核素 6 项; (5) 挥发性有机化学物 9 项; (6) 消毒副产物 7 项。

为了加快新的标准的出现, 美国国会在 1986 年又通了一项《安全饮用水法案》的修正案, 把上述(1)—(5)类沾污物增加成 83 项, 比原来多出 20 项, 要求环保局在 1988 年 6 月订出这些成分的最大沾污浓度。这一修正案还要求环保局从 1988 年 1 月起, 每 3 年编出一份 25 种新增加的沾污物的最大允许浓度并进行管制。修正案还要求列出推荐能满足新标准的, 可能获得的最佳自来水处理技术。

在美国政府采取行动的同时, 一种称为用水点和进水点工业的新工业也就蓬勃发展起来。这些工业推出一些小型的, 大多是用于家庭的给水处理装置, 采用诸如滤芯过滤、活性炭、离子交换以及反渗透这些常规处理以外的技术, 以解决具体的水质超标问题。用水点装置接在室内的一个水龙头上, 专为处理饮用水用。进水点装置则接在室外的进户管上, 故能保证全户用水的安全性。虽然环保局不认为这种分散式的处理办法是一种长久之计, 但也认为, 对某些小的自来水公司和用户说, 为了满足《安全饮用水法案》修正案的水质要求, 也不失为一种过渡性的可取措施。这一官方的看法进一步推动了用水点和进水点装置的销售量。据南加州大都会供水区的调查, 该区有 13% 的用户装有这类装置, 这是一个代表 1300 万人口的调查。在加拿大, 按 1988 年的