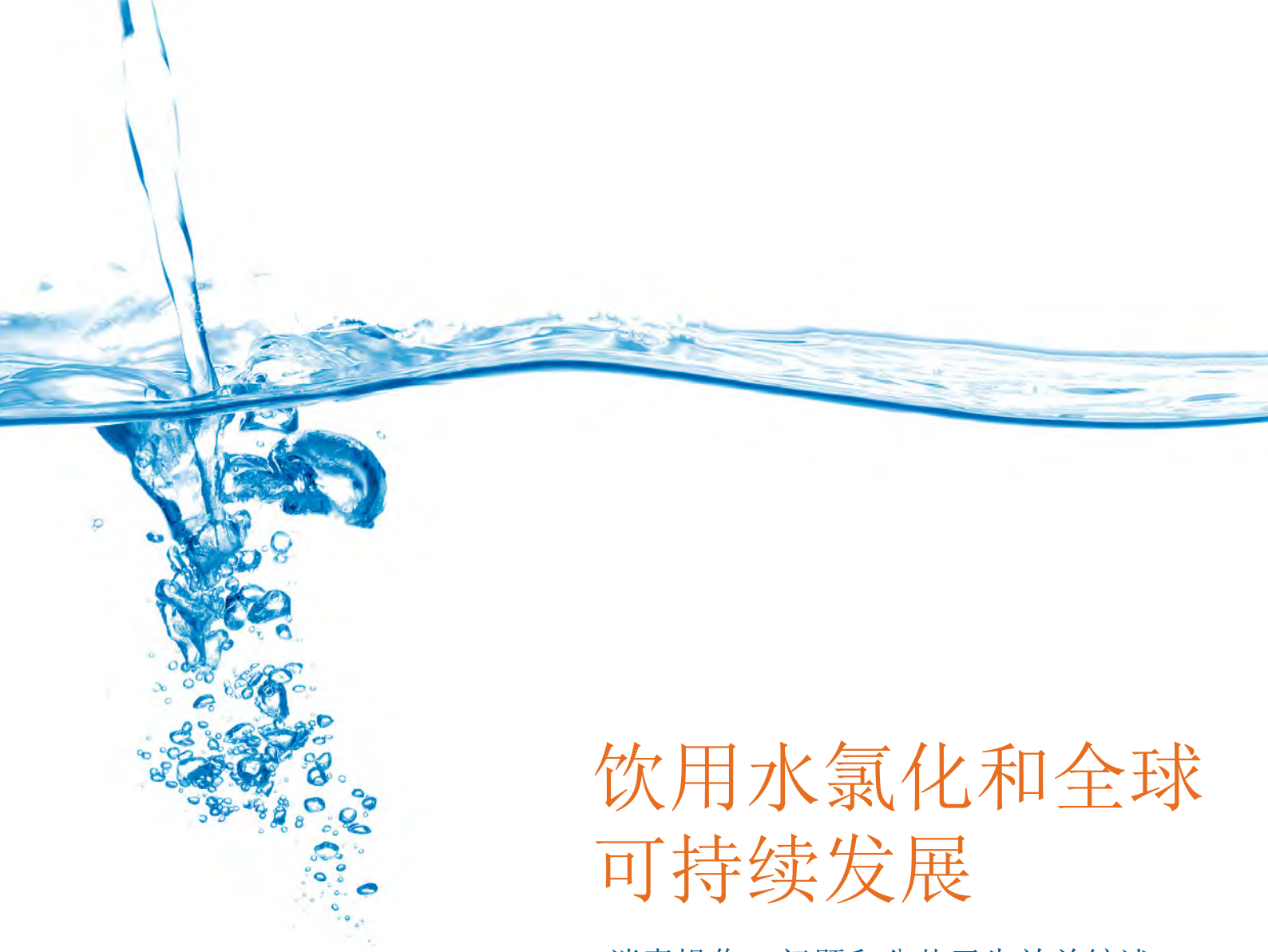


饮用水氯化和全球可持续发展

消毒操作、问题和公共卫生效益综述

American® Chemistry Council

目录

前言 2

执行摘要 3

1 氯化与公共卫生 5

2 氯：消毒剂的首选 7

3 水传播疾病的风险 8

4 消毒副产物所带来的挑战 12

5 饮用水与安全 15

6 消毒方法的对比 16

7 氯消毒的前景 19

词汇表 20

缩略语 22

参考文献 23

图

1-1 美国历史上伤寒导致的死亡率 5

1-2 饮用水处理基础 6

3-1 美国每年报告的 928 起与饮用水相关的疾病爆发的原因 10

3-2 有报告的美国水传播疾病爆发、病例、以及病因 . 11

表

4-1 对单个 THM 化合物的国际癌症研究机构（IARC）命名，以及相应的世卫组织饮用水准则和美国环境保护署最大污染物水平目标 (MCLGS) 摘要. 13

框注

2-1 氯是如何杀死病原体的 7

3-1 加拿大沃克顿和新西兰哈夫洛克北部暴发的疫情 . 11

4-1 上世纪 90 年代拉丁美洲的霍乱流行 14

7-1 安全用水——可持续发展的基石 19

前言

2015 年，联合国 (UN) 宣布了 17 项可持续发展目标 (SDG)，这是联合国 2030 年议程的核心内容。这些可衡量、相互关联的目标构成了直至 2030 年的未来蓝图，为的是让所有人过得更好，实现更可持续的发展。为实现促进繁荣、健康、教育、社会正义和环境保护的具体目标，为完成这些目标所有国家的企业、政府和人民都将面临新的挑战。

6 号可持续发展目标，“保障所有人都能用上清洁的水源，并实现可持续发展”，其他 16 个可持续发展目标中，也有几个直接与氯化学有关。价格合理、可靠的氯基消毒剂是全球范围内，保证饮用水安全卫生的关键因素。氯基饮用水消毒剂能从最小的家庭使用点扩展到社区加氯器，再扩展到区域内最先进的水处理设施，因其良好的可扩展性，往往是首选的消毒剂。它还能保持独有的消毒剂残留水平，这种消毒剂添加到水中很长时间后仍能继续起效。这一特点有助于保持水的安全性，因为水存储于水箱或通过管道分配系统流向用户。

一个多世纪以来，在饮用水中加氯彻底减少了水传播疾病。发达国家已将氯基消毒广泛应用于饮用水处理，这几乎消除了这些国家的水传播疾病。但世界上仍有数百万人未能用上氯基消毒剂和其他消毒剂，无法喝上安全的饮用水。致使水传播疾病泛滥，导致大范围的死亡、疾病和困苦。据世界卫生组织（世卫组织，2018a）估计，饮用受污染的水每年可致 50 多万人死于腹泻，其中大多数是发展中国家的儿童。

随着全世界共同为实现联合国可持续发展目标而努力，饮用水加氯将是实现第 6 号可持续发展目标，以及其他几个关键可持续发展目标的核心。例如，让人们用上安全的氯化饮用水将有助于实现 1 号可持续发展目标，即“消除贫困”，通过提高贫困、服务不足社区的卫生标准，使居民能够实现教育和就业。此外，当安全的饮用水进入每家每户，随处可见时，年轻女孩上学的机会就会增大，不必像今天许多女孩那样，背负艰巨的取水任务，从遥远的水源处为家人挑水。这将是实现 5 号可持续发展目标“性别平等”的重要一步。

本手册概述了饮用水加氯的实际操作和相关问题，其关注重点是美国 (U.S.)。本手册讨论了接触水传播病原体所带来的公共卫生风险、平衡消毒需求与消毒副产品管理、饮用水处理安全，以及氯化消毒的前景。以《饮用水氯化：对美国消毒实践和问题的回顾》为依据[1]。本手册旨在作为参考，而不是作为任何特定氯化饮用水消毒应用的规定性指南。

1 https://www.elementofsurprise.org/wp-content/uploads/2018/10/ACC_Overview_2018_WEB_r2b.pdf.

执行摘要

安全饮用水处理和饮用水分配是二十世纪最伟大的成就之一。20 世纪初，当时城市还没有开始对水进行常规的氯化处理，每年有数千人死于霍乱、伤寒、痢疾和肝炎等疾病。随着越来越多的社区开始加氯和过滤（物理去除颗粒物）饮用水，相应的死亡也迅速下降。

提供清洁、安全的饮用水需采用多重屏障法，包括保护水源不受污染、适当过滤、消毒和处理原水，并确保将处理后的水安全输送至消费者的水龙头。

在常规处理过程中，氯以元素氯（氯气）、次氯酸钠溶液（漂白剂）或干次氯酸钙的形式添加到饮用水中。添加到水中后，这些消毒方都会在水中形成游离氯，从而杀灭病原（致病）微生物。

在全球范围内，大多数饮用水处理厂会单独使用，或与臭氧、紫外线（UV）辐射等消毒剂合并使用某种氯基工艺。水系统根据各自现场的特定需求和资源选择消毒方法。除了控制致病微生物外，饮用水氯化还有其他好处，包括：

- 减少多种令人不适的味道和气味；
- 去除供水水库中常见的粘液细菌、霉菌和藻类；
- 控制和减少含有生物膜的微生物；以及
- 去除阻碍消毒的化合物

还有一点很重要，即，只有氯基化学物质才能达到所需的残留消毒剂水平，以控制和减少分配系统中微生物的生长和繁殖。

水传播疾病的风险

2015 年，全世界有 8.84 亿人无法获取基本的饮用水服务，23 亿人甚至缺乏最基本的卫生设施，如洗手间或厕所，（世卫组织，2018a，b）。因此，这些人容易患上水传播疾病。

即使在广泛实行饮用水处理的地方，也需要时刻警惕，防止由细菌、病毒、原生动物和产毒藻类引起的水传播疾病的爆发。许多具有重大影响的水传播疾病为人畜共患病；也就是说，由病原体引起的感染可以从动物传播到人类。

众所周知的细菌性病原体，如产毒大肠杆菌、伤寒沙门氏菌、霍乱弧菌以及大部分病毒，都很容易用氯化法控制，但在消毒不充分或没有消毒的情况下，这些病原体和病毒可引起有害疫情，甚至致命的疾病暴发。2000 年 5 月，加拿大安大略省沃克顿镇出现了这样一个案例。由于大肠杆菌和其他细菌污染了城市地下供水，致使 7 人死亡，2300 多人患病。就在不久之前的 2016 年 8 月，新西兰 Havelock North 发生了一起类似疫情，因地下水被弯曲杆菌污染，14000 名居民中有 5000 人因饮用未经处理的地下水而患病。那次疫情爆发差点夺去 4 个人的生命。如果能保持适当的余氯消毒剂水平，上述两场疫情都可以得到预防。

水中的军团菌可导致严重的呼吸道感染，人们称之为军团菌病——它对住院患者、老年人等易感人群而言，是一种致命的肺炎。当人们吸入被军团菌污染的家庭管道、冷却塔、淋浴器、装饰性游泳池、装饰性瀑布以及热浴缸中的悬浮微粒或雾气时，就可能会接触军团菌。美国疾病控制与预防中心（CDC，2017a）确认军团菌是 2009 年至 2014 年美国饮用水相关水传播疾病爆发的最常见原因，也是唯一一次导致死亡的疾病爆发。军团菌可以通过保持建筑物内水的活性氯或氯胺浓度加以控制。

消毒副产物所带来的挑战

尽管预防急性微生物污染是首要任务，饮用供水系统还必须控制消毒副产物（DBP)-即，氧化剂（如氯和其他消毒剂）与水源水中的天然有机物发生反应后，无意中形成的化合物。1974年，美国环境保护署（USEPA）的科学家兼荷兰研究人员独立鉴定出饮用水氯化会产生一组被称为三卤甲烷（THM）的消毒副产物，其中包括氯仿。美国环境保护署于 1979 年为三卤甲烷制定了首个监管限制。

尽管集体研究没有明确表明饮用水中的消毒副产物会对人体健康造成不利影响，但这些高浓度的化学物质也是不可取的。可采用经济有效的方法来减少消毒副产物的形成，并进一步去除消毒副产物，并在必要的情况下使用这些方法。然而，世卫组织（2017 年；第 173 页）严正警告：

在对消毒副产物浓度加以控制时，应保证消毒效率不受影响，并保持整个分配系统的消毒剂残留水平，这一点至关重要。

1991 年至 1993 年间，霍乱，一种由霍乱弧菌引起的急性致命腹泻病，在拉丁美洲肆虐，夺去了近 9000 人的生命，导致近 100 万人患病。为应对霍乱的首次出现，泛美卫生组织立即发布了一项指令，促使对所有配水和输供水系统进行连续氯化。然而，当地官员开始遭遇秘鲁和其他国家个别卫生官员的抵制，这些抵制似乎是源于人们对消毒副产物的担忧。为了满足含有消毒副产物的饮用水的最新标准，许多处理厂的操作人员在消毒前对水源水中天然有机物的含量加以限制，并且/或者已经选择使用氯胺（由氯和氨混合产生）以供剩余消毒。

用水安全

饮用水处理为生活提供了一项最基本的要素-安全可靠的供水。对这些关键性的基础设施系统加以保护、限制访问，在供水系统的规划和运行中已逐渐成为标准操作。

消毒本身对供水系统的安全至关重要，它能提供即时、持久的保护，让供水系统免受生物污染。传统的过滤和消毒工艺可去除或减少由大量潜在生物恐怖剂所带来的威胁。然而，即使采用多重常规处理屏障，也不能完全确保安全性，屏蔽生物攻击。

作为脆弱性评估的一部分，每个供水系统都应充分考虑水处理化学品的运输、储存和使用，这些化学品同时也属于关键资产（提供安全用水所必需的资产），具有潜在的脆弱性（化学品的泄露可造成重大险情）。应考虑到每个系统的独特特性和资源，包括权衡每种备选方案的风险性，应权衡并优先考虑所有与安全相关的备选方案。

比较消毒剂、氯消毒的前景

氯用途广泛，它能带来的好处众所周知，尽管对它的质疑声不绝于耳，此起彼伏，氯化饮用供水系统仍将是全球范围内预防水传播疾病和保护公共卫生的基石。尽管有替代性消毒剂（包括氧化剂二氧化氯、臭氧和紫外线辐射）可供使用，甚至在某些情况下，在发达国家中这些替代性消毒剂大行其道——特别是在与氯和氯胺技术结合的情况下。尽管如此，所有的消毒方法都有其独特的优点、局限性和成本。任何一种消毒方法都无法适用于所有情况。供水系统的管理者和其他决策者必须考虑这些因素，设计出一种消毒方法，以匹配每个系统的特点、需求、资源和水源水质。

从全球层面看，安全饮用水继续被联合国、世卫组织和其他国际组织视为可持续发展的重要组成部分，特别是在 2015 年制定的 6 号可持续发展目标“确保人人都能获得清洁的水，使用卫生设施”。饮用水氯化具有可扩展性——它能为偏远的农村、中型社区和大城市提供可靠、经济、有效的消毒方法，有助于让所有人都能用上放心水。

1 氯化与公共卫生

在通过科学技术取得的所有进步中，为获得安全用水所做的水处理的确是最伟大的进步之一。充足、清洁的水对公共卫生至关重要。没有水，人类无法生存；其实，我们的身体的 67% 都是由水构成的！美国国家工程院（2018 年）将水处理列为上个世纪最重要的进步之一。如果没有消毒和过滤，通过物理方法去除颗粒物的风险很高——用户有极高的风险感染和传播水传播疾病。

消毒是一种化学过程，其目的是通过杀死或灭活致病微生物（病原体），使其无法繁殖，从而控制致病微生物（病原体），这无疑是饮用水处理中最重要的一步。到目前为止，饮用水消毒最常见的常规方法是氯化消毒。

在 1908 年之前，没有美国市政供供水系统对饮用水进行化学消毒。在一些城市中，已经通过过滤降低了饮用水中的细菌含量，但这还远远不够。相应的，水传播疾病在全国范围内造成了重大疫情，多人死亡。

在城市饮用水供应中只需添加不到百万分之一（ppm 或 mg/l）的氯，就从实际上消除了美国的水传性伤寒。1908 年 9 月，饮用水氯化在美国新泽西州泽西市的首次出现，使该市伤寒率明显下降（McGuire，2013 年）。

图 1-1 显示了 1908 年美国饮用供水系统引入氯后，伤寒导致的死亡率迅速下降。随着城市越来越多地对水进行氯化，由水传播疾病导致的死亡率急剧下降。在世界范围内，公共卫生和生活质量的显著改善与饮用水过滤和氯化的广泛采用直接相关。《生活杂志》（匿名作者，1997 年）记录了这一成功，其文章称：“对饮用水进行过滤，以及氯的使用可能是近千年以来公共卫生方面最重大的进步。”

提供安全的饮用水：多重屏障法

为了实现保证饮用水清洁、安全的目标，需要采用多重屏障方法，包括保护未经处理的水源水不受污染，适当处理原水，并确保将经过处理的水安全输送至用户的水龙头。

水源保护　水源水包括用作原水的地表水（河流、湖泊）或地下水。每一滴雨滴，每一片融化的雪花，如果落在地上后再也不进入大气层，就会在引力的不断作用下，进入地球表面，形成相互连接的巨大的地下水系统。

降水最终将汇聚到称为流域或汇水盆地的地理区域，其形状由一个地区的地形决定。

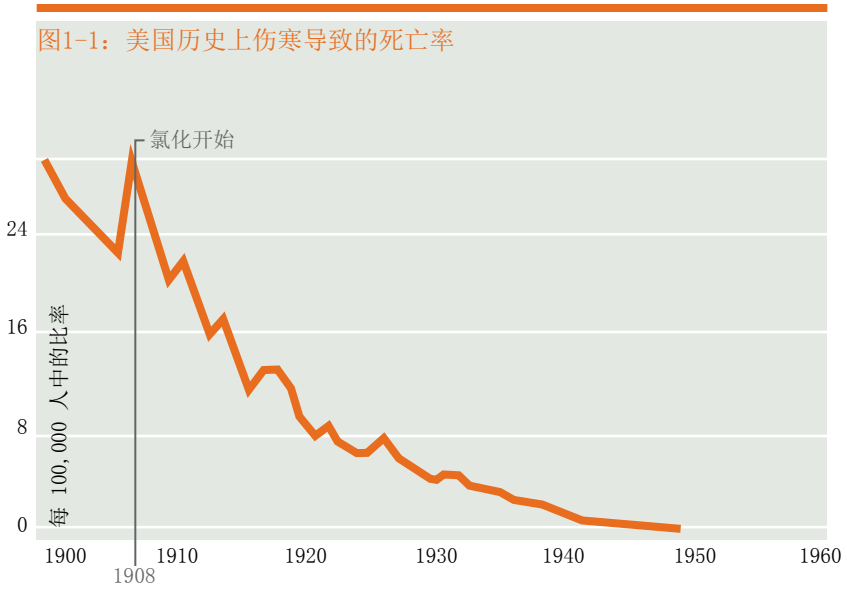


图1-1：美国历史上伤寒导致的死亡率

来源：CDC，1997 年。

世界上某些地区，社区越来越多地实施流域管理计划，以保护水源不受污染和生态破坏。例如，一种被称为河岸带的植被河流缓冲区可以作为河流、现有农业区、牧区或开发区之间的自然边界。此外，可以通过土地规划，尽量减少道路、停车场等不透水地面的总面积，因为此类地面都会阻碍水渗入地表。通过对废水进行消毒、禁止化粪池系统排放、限制暴雨合并化粪池系统溢出、驱赶鸟类、限制牲畜、家养宠物甚至野生动物进入，可以保护像水库这样的地表水体免受污染，因为这些动物的粪便可能是有害原生动物寄生虫，如贾第鞭毛虫和隐孢子虫的来源。由于水源水质会影响饮用水所需的处理，通常认为，流域管理规划是提供安全饮用水的可持续、经济有效的步骤。

水处理　在最基本的术语中，该词的含义是水经过处理，以使其适合人类的使用与消耗。尽管主要目标是生产在生物（消毒）上和化学上安全的产品，但也必须满足其他要求，包括去除令人讨厌的味道或气味、脱色和降低浊度（浑浊度）以及保持化学稳定性（无腐蚀性、不结垢）。

水处理可将未经处理的地表水和地下水转化为安全的饮用水。常规水处理包括两种工艺：物理去除固体（主要是矿物和有机颗粒物质）和化学消毒（杀死/灭活微生物）。可采用单独饮用供水系统定制处理，以应对某些原水供水所特有的自然污染特性和人为污染特性。处理地表水处常比处理地下水难度更大，因为地下水从沉积物中渗透时会经过自然过滤。地表水通常含有有机物和矿物颗粒物，可能含有抗氯隐孢子虫等寄生性原生动物。

图 1-2 说明了饮用水处理的基本原理。尽管不同设施的操作各有不同，在常规的饮用水处理中，包括处理过后的水的储存和分配，有 4 种普遍接受的基本工艺。

图1-2：饮用水处理基础

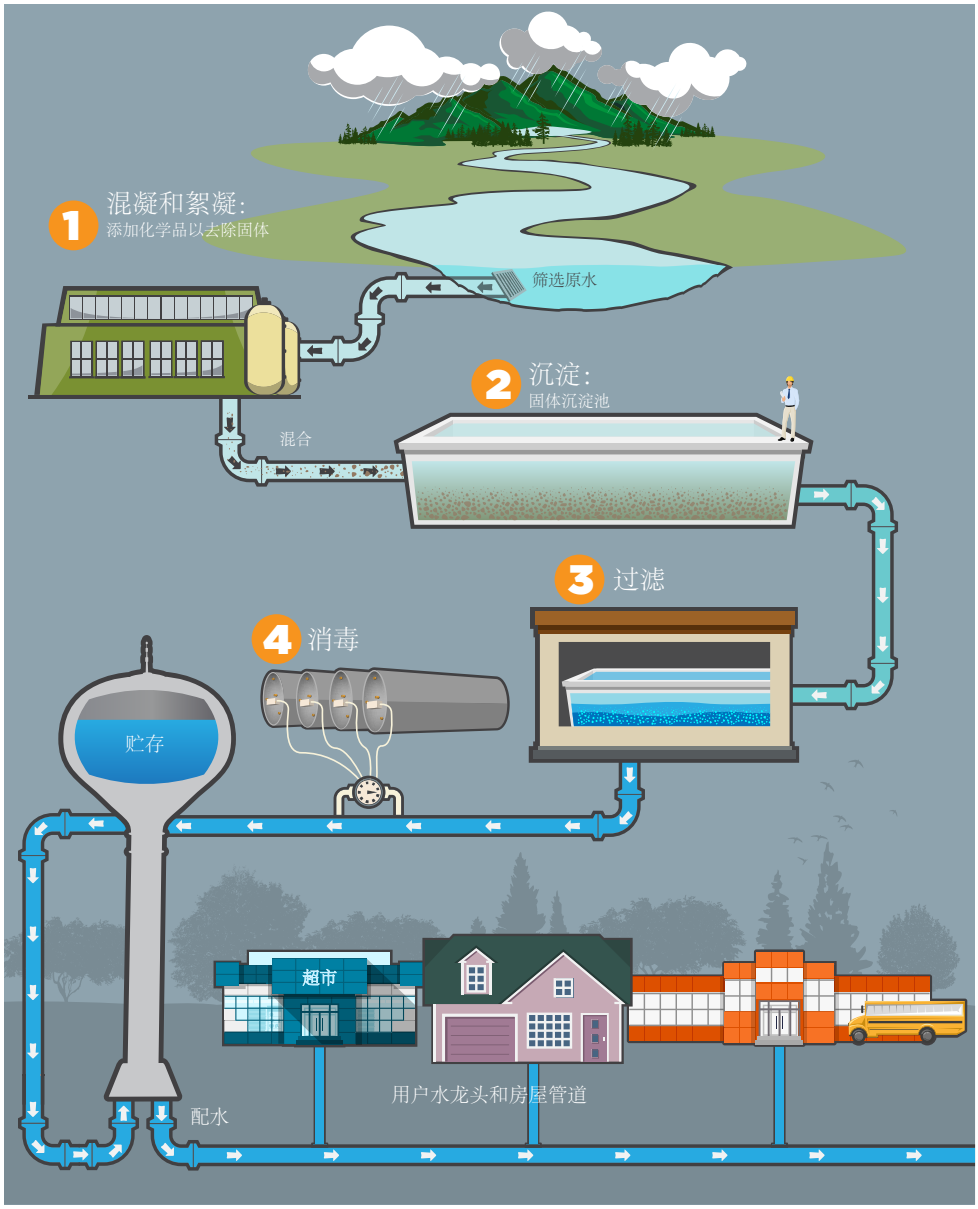
1. 混凝和絮凝可去除原水中的污垢、其他颗粒物以及一些天然有机物。明矾（硫酸铝）或其他金属盐被添加到原水中，形成凝聚的粘性物质，称为絮状物，它能吸引其他颗粒。在随后的混合和沉淀过程中，它们的组合重量会导致絮状物下沉。

2. 通过重力将凝聚的重颗粒沉淀到固体沉淀池底部。

3. 迫使水通过沙、砾石、煤、活性炭或膜来去除先前未通过沉淀去除的较小固体颗粒，在沉淀池中对水进行过滤。

4. 加氯消毒会杀灭或灭活在上述处理过程后残留的微生物。可使用额外的氯或氯胺以确保在整个配供水系统的储存、在运输至每个社区的家庭、学校和企业时有足够的消毒剂残留。

在储存和配水过程中，必须避免饮用水受到微生物污染。然而，通常情况下，在管道和储存容器的内壁上，会形成含有微生物的生物膜，并持续存在（Falkingham 等人，2015 年；NRC，2006 年）。尽管在消毒技术中，氯化是一种独特的技术，因为会为经处理的水，预先设定一定的氯浓度值，作为在水离开饮用供水系统后，防止微生物（再）生长的措施。如果由于主水管泄漏或破裂而导致病原体大量侵入，则平均余氯水平将不足以对受污染的水进行消毒。在这种情况下，所监测到的游离氯残留量的突然下降，为饮用水供水系统操作员提供了一个重要的警告提示，即配供水系统中存在污染源。



2 氯：消毒剂的首选

在饮用水中添加氯，以杀灭病原（致病）微生物。有以下几种应用形式：元素氯（氯气）、次氯酸钠溶液（漂白剂）和干次氯酸钙。

在全球范围内，几乎所有对饮用水进行消毒的系统都使用某种基于氯的消毒方法，要么单独使用，要么与其他氯和非氯消毒剂结合使用。当应用于水时，每一种消毒方法都会形成游离氯（**见框注 2-1**，氯如是何杀死病原体的）。一磅元素氯气提供的游离有效氯大约与一加仑次氯酸钠（通常为12.5% 的溶液）或大约 1.5 磅次氯酸钙（65% 的强度）相同。尽管这些形式的氯中的任何一种都能有效地对饮用水进行消毒，但当应用于特定处理时，每一种都有其明显的优势和局限性。

氯消毒剂的好处

强力杀菌剂——氯消毒剂可以降低许多致病微生物的水平，尤其是饮用水中的细菌和病毒，使其达到无法检出的水平。

味道和气味控制——氯消毒剂可减少许多令人不快的味道和气味。氯能氧化许多自然产生的气味，如硫化物的臭味和腐烂植物的气味。

生物生长控制——氯消毒剂有助于消除供水水库中常见的粘液细菌、霉菌和藻类，并有助于控制和减少配水系统中带有生物膜的微生物。

化学控制——氯消毒剂可以与氨水和其他含氮化合物发生反应，去除这些化合物的难闻气味，促进消毒。氯消毒剂还有助于去除原水中的铁和锰。

残留消毒-延续到水龙头的保护

许多国家要求或建议对管道中的水进行残留消毒，以防止微生物生长或再生，这样做有助于保护整个配供水系统中的净化水。美国环境保护署（1998 年）规定的最大残留消毒水平为 4 mg/l（氯气和氯胺），0.8 mg/l（二氧化氯）。尽管通常自来水中的残留氯含量明显较低（介于 0.2 至 0.5 mg/l 之间），不会造成不良健康影响的风险，留出了足够的安全裕度（世卫组织，2017 年），但对某些人来说，还是会产生令人不快的味道或气味。

氯气消毒的因素：浓度和接触时间

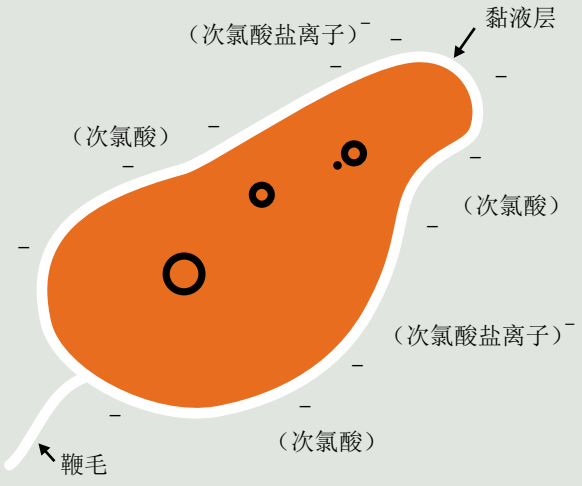
为了建立更结构化的水处理消毒操作标准，C×T 概念于 1980 年开始使用。 C×T值——其中 C 为最终游离氯浓度 (mg/l)，T 为最小接触时间（以分钟为单位）—该数值可为水处理操作员提供指导，以确定在给定温度下对水进行消毒所需的氯浓度和接触时间的有效组合。

框注 2-1：氯是如何杀死病原体的

在微生物学上，饮用水是安全的（已消毒），因为病原体要么死亡，要么失去繁殖能力（被灭活），所以它们无法感染人类宿主。但氯是如何发挥其众所周知的作用，让人们可以安全饮水的呢？在水中添加氯后，会形成两种化学物质，合称游离氯。这些化学物质—次氯酸（HOCl，电中性）和次氯酸盐离子（OCl^-，电负性）的行为大有不同。次氯酸不仅比次氯酸盐离子更具活性，而且是一种较强的消毒剂和氧化剂。虽然次氯酸盐离子的反应性较低，但较长的接触时间可使其发挥足够的杀菌活性和消毒作用。

水中次氯酸与次次氯酸盐离子的比例由 pH 值决定。当 pH 值低（低于 7.5）时，次氯酸占主导地位，而在 pH 值高（刚好高于中性）时，次氯酸盐离子占主导地位。因此，氯消毒的速度和效果会受到处理水的 pH 值影响。好在，细菌和病毒在 pH 值的大部分范围中，相对容易受到氯化作用的影响。然而，处理地表供水系统的操作员，在处理受到抗氯化贾第鞭毛虫污染的原水时，通常会利用 pH-次氯酸关系来降低 pH 值，确保杀灭原生动物寄生虫。由于病毒和细菌在 pH 值较低的条件下更容易受到氯消毒的影响，因此操作员可以将pH 值保持在低水平。隐孢子虫是一种原生动物寄生虫，不受传统饮用水氯化作用的影响，必须通过紫外线进行专门过滤或灭活。

在饮用水处理工艺中保持次氯酸占主导地位的另一个原因是，细菌病原体表面通常带有自然的负电荷，因此相对于带负电荷的次氯酸盐离子而言，其表面更容易被不带电的中性次氯酸穿透



资料来源：改编自康奈尔大学，1996 年。

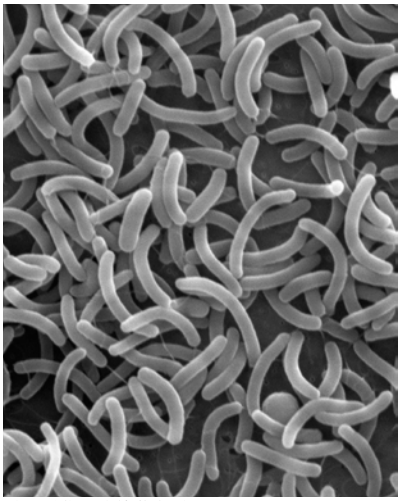
3 水传播疾病的风险

如未经足够过滤和加氯，受污染的饮用水可带来持久的重大公共卫生风险。 从一个多世纪以前开始，当时的新泽西州泽西市还没有开始使用氯进行消毒，霍乱、伤寒、痢疾和甲型肝炎的水传播病原体每年能杀死数千名美国居民（McGuire，2013 年）在美国和其他发达国家，前文提到的病原体以及其他通过水传播的病原体已经得到常规控制；然而，我们应记住，一旦多重屏障法出现问题，无法供应安全的饮用水——尤其是在水处理厂、储水设施、配供水系统的氯消毒不充分时，这些病原体随时可能卷土重来。

与水传播病原体相关的疾病

在全球范围内，至少有 20 亿人的饮用水水源受粪便污染，此类水源可传播慢性（地方性疾病）和急性疾病（疾病暴发），如腹泻、霍乱、痢疾、伤寒和脊髓灰质炎（世卫组织，2017 年）。 据估计，受污染的饮用水每年造成 50 多万人死于腹泻，其中大多数是儿童（世卫组织，2018b）。与 6 号联合国可持续发展目标“确保人人都能获得清洁的水，使用卫生设施”相关的具体、可衡量目标将有助于向所有人提供安全饮用水（世卫组织，2018a）。许多重要的水传播疾病和新兴疾病是由病原体引起的人畜共患病，在自然条件下，病原体可以在动物和人类之间传播—野生动植物环境通常是重要的储水地。

饮用水中的病原体通常可以分为 3 个主要类别：细菌、病毒、和寄生原生动物（世界卫生组织，2017 年）。在世界上很多发展中地区，寄生蠕虫（worms）往往是重要的水传播病原体。细菌和病毒污染地表水和地下水，而原生动物主要出现在地表水中。消毒的目的是杀死或灭活微生物，使其无法繁殖并感染人类宿主。通过氯化作用可以很好地控制细菌和病毒；相比之下，对具有环境抗性形式的原生动物加以控制可能需要额外的过滤或替代消毒。



霍乱弧菌（达特茅斯学院/L. Howard）

细菌

细菌是由单个细胞组成的微生物，其形状包括棒状、球形或螺旋状结构。美国未对饮用水进行广泛过滤和氯化时，霍乱弧菌、伤寒沙门氏菌和几种志贺氏菌等细菌可分别引起霍乱、伤寒和痢疾等严重疾病（McGuire，2013 年）。在 2000 年和 2016 年，在强降雨之后，由于致病细菌污染饮用水导致了大规模的疾病爆发，分别导致拿大沃克顿和新西兰哈维洛克北部的数千人患病，当时这些居民的饮用水供水没有经过充分氯化（见本章末尾框注 3-1）。尽管发达国家已通过使用氯和其他消毒剂，大大消除了通过水传播的细菌病原体，但发展中国家仍在与这些公共卫生问题作斗争（Pandey 等人，2014 年；世卫组织，2017 年）。

*军团菌—军团菌*感染可导致军团菌病，包括庞蒂亚克热和军团菌病。绝大多数在疾病爆发的环境中接触*军团菌*的人都会患上庞蒂亚克热—这是一种类似流感的疾病，没有肺炎的迹象。相比之下，军团病是一种严重的肺炎，对易感人群，包括住院患者、老年人（尤其是吸烟者）和慢性肺病或免疫系统减弱的人来说，这是一种致命疾病（Berjeaud 等人，2016 年）。*军团菌*自然存在于水和土壤中，在温水中可生长至很高的水平，并积累在生物膜中。

当人们从受污染的热浴缸、冷却塔、管道系统、淋浴装置和装饰性水池中吸入悬浮微粒或雾气时，就可能接触到*军团菌*。军团病不是由摄入受军团菌污染的水或人与人之间传播引起的。*军团菌*是一种机会性病原体，可以在住宅、学校和其他建筑物内的家庭（房屋）管道中持续生长。疾病控制和预防中心（CDC，2015，2017a）将*军团菌*认定为美国近期内水传播疾病爆发的最常见原因，主要是在医院和医疗环境中。2013 年至 2014 年期间，即美国疾控中心最近的监测期，共报告了42 起疾病爆发事件，其中 57% 与饮用水相关，且全部 13 起死亡事件的原因均为军团菌

病毒

病毒是只能在活的宿主细胞内繁殖的传染源。过滤器可以过滤细菌，但病毒极小，可以穿过过滤装置。肠道病毒，如甲型肝炎病毒、诺病毒和轮状病毒，会从受感染个体的粪便中排出，并可能污染饮用水（Gall 等人，2015 年）。肠道病毒可感染胃肠道或呼吸道，并能引起一系列的疾病，包括腹泻、发烧、肝炎、瘫痪、脑膜炎和心脏病。饮用水中的氯能有效去除大多数病毒。

原生动物寄生虫

原生动物寄生虫是单细胞微生物，以其他微生物、多细胞有机组织、以及残渣为食。几种原生动物寄生虫通过休眠、抗环境形式在水中传播，这些寄生虫称为包囊和卵囊（Fletcher等人，2012年）。因体积小，物理去除包囊和卵囊对于传统饮用水处理工艺来说有一定难度。 人隐孢子虫（原名 Parvum）、肠贾第鞭毛虫（原名十二指肠和兰氏鞭毛虫）和其他动物源性原生动物通过动物和人类的粪便污染（世卫组织，2017 年）进入世界各地的水域。地表水中持续存在类似寄生虫，使这些微生物体对常规饮用水氯化具有抗性。有些寄生虫，如贾第鞭毛虫，在保证接触时间的情况下，可通过足够剂量的氯进行处理，但另一些寄生虫，如隐孢子虫，则具有很强的抵抗力。水处理厂需采取适当过滤和消毒措施处理原水，即可成功去除或灭活原生动物寄生虫。

*人隐孢子虫—隐孢子虫*是一种高度耐氯的的动物源性原生动物病原体，存在于人、哺乳动物和鸟类身上，对于免疫功能低下的患者可危及生命（Fletcher 等人，2012 年；Vanathy 等人，2017 年）。据报告，该寄生虫曾引发美国历史上最大规模的饮用水疫情，1993 年，威斯康星州密尔沃基市的 40 多万人受到了影响，死亡人数超过 100 人。

*肠胃贾第鞭毛虫—贾第鞭毛虫*是一种具有一定耐氯性的动物源性原

大肠杆菌（NIAID，NIH）

生动物，可以通过饮用水传播给人类，但最常见的传播方式是人与人之间的传播（Adam 等人，2016 年；世卫组织，2017 年）。然而，如今普遍认为，所有温血动物和一些其他动物都能携带并传播贾第鞭毛虫。虽然一些*贾第鞭毛虫*物种也对人类具有感染性，但对于健康人来说腹泻疾往往是自限性疾病（隐孢子虫病也是如此），但对免疫系统受损的人来说，它会带来更为严重的后果（Fletcher 等人，2012 年；世卫组织，2017 年）。

福勒（氏）耐格里原虫—原发性阿米巴脑膜脑炎是一种十分罕见，但却知名的疾病，由经水传播的*福勒（氏）耐格里原虫*所引起-是一种自然发生的单细胞原生动物，活跃在土壤、温暖的水域中（如湖泊，河流，池塘，和温泉）（美国疾病预防控制中心，2018年）。如果水中含有这种微生物，喜欢户外环境的人们可能容易受到感染，这些微生物可能被人被动吸入，使用洗鼻壶进行鼻腔冲洗时也可能被感染。在这些情况下，耐格里原虫可沿着嗅

嗜肺军团菌（CDC/PHIL）

神经进入大脑，破坏脑组织，导致脑肿胀，通常会导致死亡。 大多数感染发生夏季温暖的气候中，温度较高且水位较低。

藻类

流动缓慢、营养负荷高且长期暴露于阳光下的水域中，往往会繁殖大量的藻类和蓝藻（也称蓝绿藻）（美国疾病预防控制中心，2017b；世卫组织，2017）。虽然藻类和蓝藻本身并不属于水传播病原体，但某些赤潮可产生一种或多种毒素，如微囊藻毒素，这些赤潮通常被称为有害赤潮。饮用水处理厂可使用游离氯和其他一些氧化剂，用于与许多毒素发生化学反应，使其变性，并减少人体接触。氯和臭氧也能溶解（撕裂破坏）藻类细胞，但由于这种做法也能释放细胞毒素，因此控制赤潮和毒素的最佳做法是：（1）在加氯之前通过过滤去除藻类细胞，（2）在整个配供水系统中保持游离氯残留。赤潮也会产生令人不快的味道和气味物质，如二甲萘烷醇和二甲基异莰醇，氯气会使情况恶化，这也是氯化前最大限度去除藻细胞的另一个原因。过滤前加入粉末、颗粒活性炭和高锰酸钾也可用于强化藻类毒素控制。

遵循美国环境保护署（USEPA）条例，控制水传播疾病

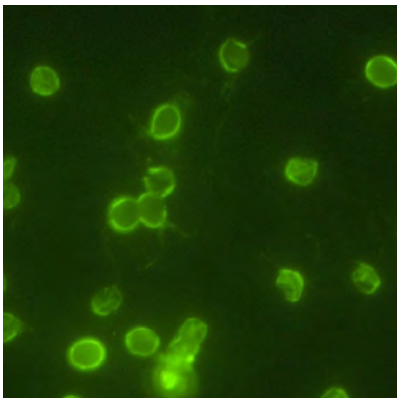
长期 2 号强化地表水处理条例—美国环境保护署制定了相关法规，以解决作为饮用水供水源的地表水中隐孢子虫和其他耐氯病原体对健康的影响，并降低与之相关的风险。美国环保署 LT2 号条例规定（美国环境保护署，2005 年）的关键条款，是在 USEPA 长期 1 号强化地表水处理（LT1）条例（美国环境保护署，2002 年）的基础上制定的，以图解决地表水和地下水受地表水影响的问题。条例包括：隐孢子虫的水源水监测，未过滤系统的双重消毒剂灭活，以及基于水源水隐孢子虫浓度的过滤系统的潜在额外处理的规定（美国环保署，2005 年）。无论采用何种主要消毒方法，处理厂必须继续保持其配供水系统中的消毒剂的余氯水平。

地下水条例—2006 年，美国环保署颁布了《地下水条例》，旨在降低地下水饮用水源中可能存在的粪便污染的风险。该条例建立了一种风险应对战略，通过对指征性生物和病毒的检测来识别具有高污染风险的饮用水水源。地下水条例还规定了何时需要采取纠正措施，包括氯消毒等措施，来保护用户免受细菌和病毒的侵害（美国环保署，2006a）。

总大肠菌群修订条例—美国环保署 2013 年的总大肠菌群修订条例（RTCR）通过消除总大肠菌群（包括大肠杆菌在内的一组肠道细菌）的最大污染水平（MCL）修改了现有规则，这表明存在粪便污染和水处理的有效性（NRC，2004 年）。RTCR 为大肠杆菌设定了一个最大污染水平，并使用大肠杆菌和总大肠菌群启动一种有针对性的（“查找和修复”）方法来解决可能进入配水系统的粪便污染。与最初的总大肠菌群规则相似，它要求所有公共饮用供水系统（1）根据系统大小进行监测；（2）跟踪检测以确定原因；以及（3）识别卫生缺陷并随后采取措施纠正（美国环保署，2013 年）。

美国水传播疾病趋势

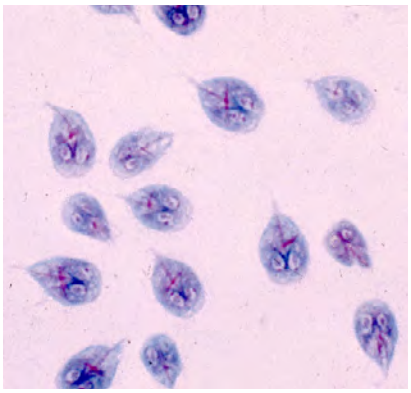
美国疾病预防控制中心和美国环境保护署合作，跟踪由微生物和化学物质引起的水传播疾病的爆发。在美国，自 1971 年（2001 年开始收集并总结军团菌属细菌相关数据）以来，人们就开始收集并总结了饮用水相关污染的数据，但必须强调的是，还有许多水传播疾病的暴发



人隐孢子虫（USEPA/H.D.A. Lindquist）

是没有被检测，或报告的。

下图来源于最新数据（美国疾病预防控制中心，2017a）。图 3-1 显示了 1971 年至 2014 美国与饮用水有关的疫情次数。可以看到，报告的疫情数量在 1980 年达到峰值，但随着时间的推移，总体上有所减少，而*军团菌*相关的暴发有所



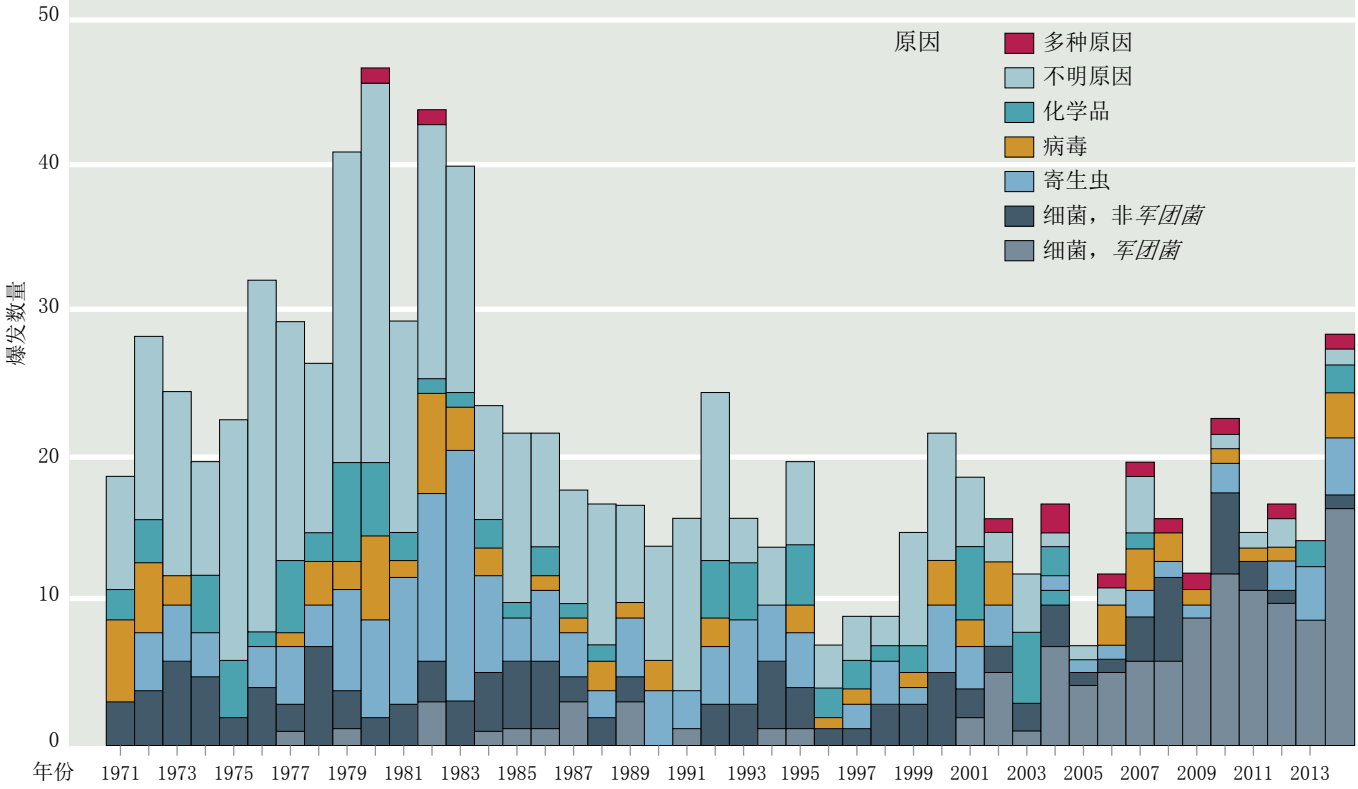
肠贾第虫（CDC）

增加。除了下图的数据外，美国疾病预防控制中心数据库中还有一个重要发现，即 2013 年和 2014 年，美国水传播疾病导致 13 人死亡，124 人住院。卫生保健机构报告的所有与疫情爆发相关的死亡事件和疫情爆发本身都是由*军团菌*引起的（美国疾病预防控制中心，2017a）。

此外，如图 3-2 所示，军团菌在 2013 年和 2014 年报告的美国水传播疾病暴发中占 57%，在所有疾病病例中占 13%。这些数据说明了，竭力加强军团菌监测、缓解疫情、加强建筑给供水系统风险沟通—尤其是在卫生保健和相关设施建设的供水系统的风险沟通至关重要。总的来说，美国的疫情数据凸显了饮用水供水系统性能监测的重要性，应确保处理设施内有足够的氯消毒，并始终在整个配水系统中保持足够的余氯水平。美国疾病预防控制中心（2017a；p. 1216）着重强调：

有效的水处理以及相关法规可保障美国的公共饮用水供应，快速检测、查明原因，并对疾病报告作出反应，可减少传染病原体、有害化学品和毒素的传播。

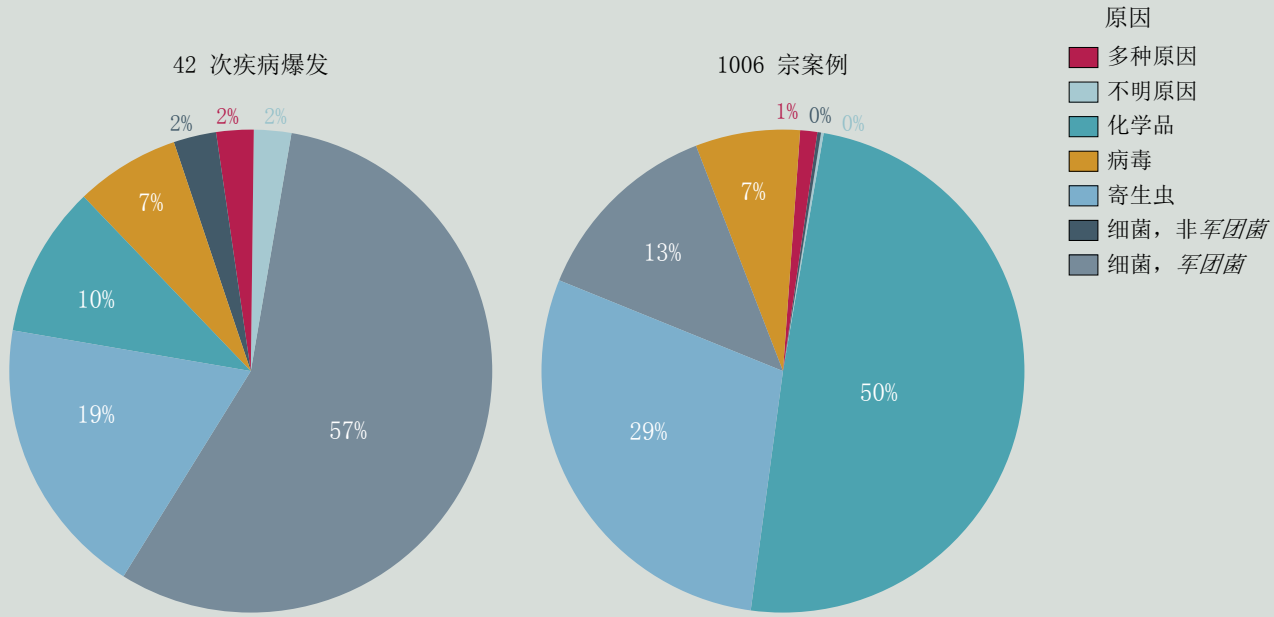
图 3-1：美国每年报告的 928 起与饮用水相关的疾病爆发的原因
根据 1971-2014 年，美国疾病预防控制中心数据*



*“2001 年，疾病预防控制中心的水传播疾病和疫情监测系统，首次出现关于军团病疫情的报告；2007-2008 年报告期间，加入了关于 2001 年之前军团病疫情的回顾性内容。”

资料来源：改编自疾病预防控制中心 2017a

图 3-2：有报告的美国水传播疾病爆发、病例、以及病因
根据 2013-2014 年度疾病预防控制中心数据



资料来源：改编自疾病预防控制中心 2017a

框注 3-1：加拿大沃克顿和新西兰哈夫洛克北部暴发的疫情

2000 年春天，安大略省沃克顿小镇的饮用水，因氯化不足导致了一场悲剧。根据安大略省司法部长部（2002 年）发布的一份报告，多年来，该镇的公共事业委员会运营商未能遵守加拿大环境部制定的有关加氯、监测和记录氯残留物以及定期记录微生物取样的准则。报告指出，操作员知道他们的做法是“是令人难以容忍的，行为违反了加拿大环境部的指导方针和指令”。

2000 年 5 月初，几天的强降雨过后，用作农田土壤肥料的粪肥泄漏到镇上附近的一口水井中。井水加氯机因维护不当无法运行，致使粪肥中未经处理的病原菌污染了井水。由于该井中的受污染水进入了一般供水系统，现有的游离氯水平被有机物和细菌的突然涌入所淹没。不久后，学校空无一人，急诊室挤满了出现腹泻和其他胃肠道症状的儿童和老年人。当查明疫情源于该镇市政供水受到污染时，该镇的许多居民已经病得很重。随后进行的 DNA 分型研究显示水中含有致病性大肠杆菌 O157:H7和空肠弯曲杆菌，粪便中存在的细菌菌株与人类疫情中流行的菌株一致。这场疫情的爆发造成 7 人死亡，约 2300 人患病。

综合 2002 年报告的结论表明，“通过使用连续余氯和浑浊度监测仪”，沃克顿疫情可以得到预防。由于未能正确监测氯残留水平，供水操作员未能阻止城镇供水中的氯浓度骤降，成为水传播疾病大爆发的基础。

2016 年 8 月，新西兰北岛黑斯廷斯市郊区哈夫洛克北部发生了一系列与沃克顿疫情极为相似的事件。至该月月底，该镇 14000 名居民中有三分之一以上的人因饮用水被弯曲杆菌污染而患病，最终导致多达 4 人死亡。

在疫情出现的几天前，该地区下了一个星期的大雨，一周内的降雨量达到三个月的累积量。与沃克顿所爆发的疫情不同，北哈夫洛克故意不加氯，因为当地的地下水被认为是“安全的”，不会受到污染。政府在对北哈夫洛克饮用水的调查中（2017a）发现，未经处理的受污染饮用水中含有弯曲杆菌，导致数千人患病。 此外，细菌可能来源于绵羊的粪便，这些细菌被冲进农场池塘，进入蓄水层，随后被泵入附近的社区服务公共水井。

两阶段的疫情调查引起了人们对新西兰公共水源管理的关注，包括是否应对所有社区供水应进行氯化处理（北哈夫洛克饮用水政府调查，2017b）。这两起疫情为人们敲响了警钟：公共卫生官员必须时刻保持警惕，保障水源不受污染，与此同时采取适当的消毒措施。

4 消毒副产物所带来的挑战

近年来，研究人员、监管机构和公众越发关注饮用水中的化学污染物对健康产生的潜在危害。物发生反应时，会无意中形成浓度极低、成分复杂的化合混合物。

尽管经过几十年的研究（和辩论），尚未出现证据能够确立饮用水中的消毒副产物与影响人类潜在不良健康之间的因果关系，高含量的化学物质仍是不可取的。在许多国家，采用最经济的方法减少消毒副产物的形成是可行的，也是法规所要求的。然而，世卫组织饮用水质量准则（世卫组织，2017年；第 173页）严重警告：

在控制消毒副产物浓度时，最重要的是保证消毒效率不受影响，并且在整个配水系统中保持适当的消毒剂残留水平。

20 世纪 70 年代初，荷兰酿酒厂化学家约翰·鲁克，兼环保署科学家独立确定了饮用水氯化可以形成一组称为三卤甲烷（THM）的副产品，包括（1）氯仿、（2）溴二氯甲烷（BDCM）、（3）二溴氯甲烷（DBCM）和（4）三溴甲烷（溴仿）。氯仿、溴二氯甲烷、二溴氯甲烷和三溴甲烷浓度之和称为三卤甲烷总量或三卤甲烷总量。虽然数据有限，但担心这些化学物质可能使人类致癌，美国环境保护署在 1979 年制定了对三卤甲烷总量的第一个监管限制，即三卤甲烷总量条例。自此之后，大量的研究提高了我们对三卤甲烷、卤乙酸（HAA）和其他消毒副产物的理解。尽管我们已知所有化学消毒剂都会形成副产品，迄今为止对于氯消毒所产生的消毒副产物所进行的研究最为深入（见 Hrudey 等人，2015 年；Li 和 Mitch，2018 年）。

三卤甲烷的致癌性正在受到质疑，但三卤甲烷总量和HAA5（一氯乙酸、二氯乙酸、三氯乙酸、溴乙酸和二溴乙酸）水质标准可被视为同时产生的其他消毒副产物存在的群体指标（美国环境保护署，2015；LI 和 MITCH，2018；WRF，2017a）。对于其他消毒副产物（未受管控的），应采用与管控消毒副产物同样的限制举措。这种方法同一种使用已久，且现在仍在采用的方法类似，即将无害的大肠杆菌作为粪便病原体和水处理效果的指标（NRC，2004 年）。三卤甲烷总量和HAA5（一氯乙酸、二氯乙酸、三氯乙酸、溴乙酸和二溴乙酸）标准也可被视为水处理技术的驱动因素，可减少许多其他消毒副产物。

目前的美国环境保护署规定三卤甲烷总量最大污染物水平为 80 ppb。必须强调的是，目前（2017 年）世卫组织的指导方针，根据氯仿和大多数其他三卤甲烷在饮用水中出现的水平分，将其划分为非致癌物或“临界致癌物”。也就是说，证据表明氯仿没有遗传毒性，在饮用水浓度下不会损害或导致 DNA 突变。

在消毒之前，通过控制自然产生的有机物的数量，美国的大多数供水系统都能满足美国环境保护署对于三卤甲烷总量和 HAA5 的标准；许多其他供水系统使用一氯胺作为二级消毒剂（在配水系统中），以减少消毒副产物的形成（见第 6 章和 WRF，2017a）。保障微生物保护仍然是首要任务。一氯胺是由氯和氨反应生成的。

消毒副产物科学，以及法规/准则

虽然早期研究报告称，食用玉米油的实验动物体内高剂量的三卤甲烷会导致实验动物患癌，但后来使用饮用水的研究并不支持这些发现。尽管在饮用水中常见的低水平含量所带来的风险都很轻微，美国环境保护署认为大多数个体的三卤甲烷和卤乙酸有可能甚至大概是人类致癌物，在回顾了完整的健康影响研究之后，世卫组织国际化学品安全方案（IPCS，2000 年；第 376 页）作出了这样的结论：

迄今为止所研究的加氯消毒副产物中，没有一种在饮用水中常见的浓度下是有效的致癌物。

表 4-1 总结了目前国际癌症研究机构（IARC）对单个 THM 化合物的命名，以及相应的世卫组织饮用水准则和美国环境保护署最大污染物水平目标（MCLGS）。

流行病学

关于三卤甲烷总量的法规，美国已经实施了近 40 年，随着时间的推移，饮用水中的三卤甲烷总量和其他消毒副产物的含量也大大减少。许多饮用水处理设施已将游离氯转化为氯胺残留物，以帮助满足更严格的美国环保署消毒副产物条例（WRF，2017b）。

一些流行病学研究指出，氯化饮用水与某些癌症风险的轻微升高之间存在关联，而其他研究则没有发现关联（Hrudey 等人，2015 年；Li 和 Mitch，2018 年）。Cotruvo 和 Amato（2019）做了这一项生态学研究，该研究涉及 8 个发达国家数据，旨在探明消毒实践和膀胱癌发病率的趋势。研究认为，如果饮用经消毒的水会导致一例膀胱癌风险，这种风险是很小的，许多其他更大的因素，如吸烟、糖尿病，或其他在特定国家状况等所带来的风险更大。

美国国家环境保护局（2005 年、2016 年）评估了现有的癌症流行病学研究，发现只有膀胱癌与氯化水的关系在某种程度上是一致的，尽管众所周知膀胱癌与吸烟、年龄和接触某些工业化学品密切相关（Hrudey 等人，2015 年）。即使在实证研究中，癌症风险相对较小，且与测量的三卤甲烷总量水平不一致，表明不能排除其他（混杂）因素（Craun 等人，2001）。

这一发现与国际化学品安全规划小组所得出（2000）的结论一致，即消毒副产物与癌症增加之间的因果关系仍然是一个悬而未决的问题。

发育和生殖效应

几项相关流行病学研究报告了消毒副产物与不良生殖结果之间的可能联系，包括自然流产（流产）（见 USEPA，2016 年评论）。

《美国安全饮用水法案》的更新

自 20 世纪 70 年代末以来，美国环境保护局一直在对饮用水中的消毒副产物进行管控

美国环保署《消毒剂与消毒副产物条例》第一阶段

1998 年，第一阶段的消毒副产物条例得以建立，将三卤甲烷总量的最大污染物水平从 100 降到 80 ppb（美国环保署，1998，2001）。它还建立了新的三卤甲烷总量最大污染物水平标准和强化混凝和强化软化处理技术，以减少天然消毒副产物前体，进一步减少消毒副产

表 4-1：对单个 THM 化合物的国际癌症研究机构（IARC）命名，
以及相应的世卫组织饮用水准则和美国环境保护署最大污染物水平目标（MCLGS）摘要

三卤甲烷	国际癌症研究机构命名	世卫组织准则（ppb）	美国环境保护署最大污染物水平目标(ppb)
氯仿	2B	300	70
二溴一氯甲烷	3	100	60
溴二氯甲烷	2B	60	零
溴仿	3	100	零

第 2B 组=可能对人类致癌。第 3 组=其对人类的致癌性无法分类
来源：美国环境保护署，2018 年；世卫组织 2017 年。

物暴露。三卤甲烷总量的最大污染物水平适用于所有添加氯、氯胺或二氧化氯作为消毒剂的系统。除了降低三卤甲烷总量最大污染物水平外，第 1 阶段 DBP 条例还为 HAA5 设定了 60 ppb 的强制最大污染物水平、100 ppb 的亚氯酸盐（对于使用二氧化氯消毒剂的工厂）和 10 ppb的溴酸盐（对于使用臭氧消毒的工厂）（见 USEPA，2010 年）。

20 世纪 90 年代末，美国环保署在制定 DBP 第一阶段条例时，对鼓励使用替代消毒剂持谨慎态度。环保署认识到替代消毒剂可能会减少三卤甲烷总量和HAA5，但会产生其他尚不了解的副产品。环保署没有提出建议，来鼓励公用事业，特别是小型系统，降低目前正在实施的消毒水平。

美国环保署第二阶段消毒剂和消毒副产物规则

2006 年颁布了段消毒副产物条例的第 2 阶段，补充了美国环境保护局 1998 年制定的消毒副产物条例第 1 阶段（美国环境保护局，2006b）。消毒副产物条例第 2 阶段旨在通过限制接触三卤甲烷总量和HAA5 来减少接触消毒副产物。该条例仍然要求美国的水处理厂添加氯、氯胺或二氧化氯作为消毒剂，以符合相同的三卤甲烷总量（80 ppb）和 HAA5（60 ppb）的最大污染物水平要求，但改变了测量依从性的方式，认识到处于配水系统较远位置的“老水”，往往比距离水处理厂较近位置的水中含有更高水平的消毒副产物。因为合规要求更为严格，导致三卤甲烷总量和 HAA5 的最大污染物水平可能超标。

平衡消毒副产物和微生物风险

1996 年《安全饮用水法案》(SDWA) 修正案要求美国环境保护局制定条例，以平衡微生物病原体和消毒副产物之间的风险。为维持该平衡，世卫组织的 IPC（2000 年；第 375 页）作出如下警告：

消毒的确是处理饮用水供水的最重要步骤。不应因担心消毒剂和消毒副产物的长期潜在影响，而降低饮用水中的微生物标准。 接触饮用水中的病原体导致疾病和死亡的风险比接触消毒剂和消毒副产物的风险大得多。

大约 20 年后，世卫组织的饮用水指南仍然在强调权衡这些风险的重要性（世卫组织，2017 年；第 173 页）：

在控制消毒副产物浓度时，最重要的是保证消毒效率不受影响，并且在整个配水系统中保持适当的消毒剂残留水平。

无法权衡这些风险可导致广泛的公共卫生后果，上世纪 90 年代拉丁美洲霍乱的流行就是一个令人心痛的例子，参见插图（框注4-1）。

自 1976 年美国安全饮用水法案实施以来，美国报告的水传播疾病疫情的发生率一直在下降——很大程度上是因为相关法规推动了水处理厂改进操作，州监管机构加强监督。然而，由于微生物生长、再生、泄漏、重大断裂和管道腐烂事件，导致配水系统，包括管道基础设施出现缺陷，从而使其他疾病的爆发比例有所增加。此类缺陷会导致残留氯水平下降，增加由微生物病原体所带来的风险。如前所述，军团菌被认为是当今美国可引起饮用水相关疾病的风险中最严重的一种，吸入房屋管道、水疗中心或冷却塔中的受污染的悬浮微粒，可感染此病菌。（美国疾病预防控制中心，2017a）。

消毒副产物控制

为饮用水供水机构提供有效而经济的处理技术，以最大限度地提高饮用水安全性和质量，同时最大限度地降低由消毒副产物构成的 潜在风险。相关消毒副产物控制策略可分为三类：（1）去除消毒副产物前体（2）优化处理和消毒操作，以尽量减少消毒副产物的形成，（3）去除已形成的消毒副产物（WRF，2017C）。一般而言，通过控制前体天然有机物（以总有机碳 TOC 表示），将三卤甲烷和卤乙酸浓度保持在监管或准则规定值以下，将可充分控制其他氯化副产品（世卫组织，2017 年）。

在消毒之前，有三种处理工艺可有效去除天然有机化合物：

1. 混凝澄清
许多饮用水系统优化了其混凝工艺以降低浑浊度（去除颗粒）。但是，混凝工艺也可以使用更大剂量的无机混凝剂（如明矾或铁盐）和优化 pH 值，来去除天然有机物前体，达到优化工艺的目的。

2. 吸附作用
可以使用活性炭吸附天然有机物(TOC)，这些天然有机物会和消毒剂反应，形成消毒副产物。然而，这种方法造价高昂。生物活性炭，通常包括臭氧和颗粒活性炭，在某种情况下使用更为经济。

3. 膜技术
膜技术通常被用于淡化盐水，随着技术的进步，膜技术仍能在去除天然有机物方面展现出良好的效果。膜工艺采用液压，让水强行通过一张可阻挡大多数污染物的半透明

框注 4-1：上世纪 90 年代拉丁美洲的霍乱流行

霍乱是一种急性致命的腹泻病，1991 年至 1993 年间，这种疾病曾在整个拉丁美洲肆虐，仅乌拉圭和加勒比地区未受其害。那场疫情夺去了近 9000 人的生命，致使近 100 万人患病。

在 1991 年爆发的这场疫情之前的数年间，泛美卫生组织(PAHO)一直在推动社区供水系统的消毒。主要通过位于秘鲁利马的卫生工程和环境科学中心，泛美卫生组织与各国合作进行了几乎所有消毒方法的示范和试点项目，以确定这些项目在各种文化和经济情况下的相对效率性、经济性和实用性。有些方法效果良好，而另一些方法则以失败告终。通常认为氯化法是最为可靠、最具经济的方法。

应对霍乱疫情的首次出现，泛美卫生组织反应迅速。其中包括向每个泛美卫生组织成员国办事处发出指令，以促进对所有配水和供水系统进行连续氯化。这一决定合乎逻辑：氯在消灭霍乱弧菌病原体方面功效卓著；所有国家都熟悉氯化技术；氯产品很容易获得；且氯化是成本最低的消毒方法。

令人惊讶的是，鼓励水氯化的指令发出后不久，泛美卫生组织的当地官员开始遭遇秘鲁和其他国家少数卫生官员的抵制。这种抵制源于对公众接触消毒副产物的担忧，该问题在新闻中被反复强调，发达国家的环保机构也广泛发布了关于该问题的科研结果。

有人指出，当霍乱弧菌存在于供水系统中时，会产生直接感染该疾病的风险，由此引起的流行病可能导致数千人死亡。相比之下，消毒副产物造成的假设健康风险超过世卫组织建议的水平，但仅为每 10 万人在 70 年的时间内额外死亡一次。不幸的是，这些出于善意，但不了解情况的官员，在了解到这一巨大的风险比例差异后，方能接受现实。

（摘自《上世纪 90 年代拉丁美洲霍乱流行：知情人说》，Fred M.Reiff，PE；WQHC，2015）。

膜。这项技术包括反渗透、纳米过滤（低压反渗透）、超滤和微滤（与传统的砂滤相比）。

其他传统的消毒副产物控制策略包括在去除部分 TOC 后，将加氯点改为后期处理过程中的加氯点（见图 1-2），并使用氯胺进行残留消毒，其与消毒副产物前体的反应性远低于游离氯。通过使用一个或多个此类工艺，美国大多数的供水系统已符合最新的消毒副产物 法规要求。

供水系统管理者和决策者也可以考虑以一种或多种替代性消毒剂来替代氯，以降低三卤甲烷总量，并减少HAA5的形成。然而，所有消毒剂都会形成一些消毒副产物，其中许多仍为未知的消毒副产物，而多组相关消毒副产物（如含氮消毒副产物）已被继续识别出来（水研究基金会，2017b）。与氯化相关的消毒副产物相比，我们队替代性消毒剂所能产生的副产知之甚少。况且，每种消毒方法都有各自的优缺点。第 6 章讨论了供水系统管理者在选择一种或多种消毒方法时应考虑的一些关键问题。

5 饮用水与安全

水处理和配水系统为生命提供了最基本的要素之一——安全、可靠的饮用水。在 2001 年 9 月 11 日的恐怖袭击发生以前，大多数美国供水系统的安全措施主要是为了应对恶作剧和故意破坏，避免设施和设备受损。如今，对通向这些关键系统的通道加以保护和控制，已经成为供水系统规划和运行的标准做法。

消毒和生物恐怖主义

消毒对供水系统的安全来说同样至关重要，为防止事故性或蓄意微生物污染的发生。应保持供水系统的灵活性，增加消毒剂量，应对特定的威胁。正常的过滤和消毒可以减少或消除一些潜在的生物恐怖剂所带来的威胁。然而，即使采用多个常规屏障也无法保证切实阻挡一切生物攻击，而且对于许多潜在的生物恐怖剂来说，采用氯或其他消毒剂，能将生物恐怖剂降低到何种水平，这方面的科学信息还十分有限。

保护氯和其他处理用化学品

脆弱性评估是对饮用水系统潜在威胁的综合分析，包括评估供水的化学污染或生物污染，以及评估水处理中断或配水中断。作为脆弱性评估的一部分，每个饮用水系统还应仔细考虑其处理化学品的运输、储存和使用。些化学品同时也属于关键资产（提供安全用水所必需的），具有潜在的脆弱性（化学品的释放可造成重大险情）。例如，氯的释放会对系统操作员造成直接威胁，而大量释放可能会对周围社区构成危险。

作为脆弱性评估的一部分，使用氯的饮用水系统应确定现有的保护层是否足够。如果不够，系统应该考虑采取额外的措施来降低攻击的可能性或减轻潜在的后果。

P为解决饮用水处理系统中氯安全问题，可采取的措施包括加强物理屏障（例如，建造安全的化学品储存设施）；政策变更（例如，制定接收化学品装运的额外安全程序）；减少现场储存的消毒剂数量；或考虑使用替代消毒方法，包括就地生产次氯酸钠（见第 6 章）。然而，由于每种消毒剂都有其独特的优点和局限性，因此，改变消毒技术并不一定能提高整体安全性和可靠性。

为保证用氯安全，供水系统官员应结合每种备选方案，评估风险利弊。例如，减少现场储存的化学品数量会同时降低系统应对化学品供应中断的能力。 应考虑到每个系统的独特特性和资源，应权衡并优先考虑所有与安全相关的备选方案。

6 消毒方法的对比

直至 20 世纪 70 年代末为止，实际上氯都是美国，乃至国际上唯一用于处理饮用水的消毒剂。氯长期以来被认为是一种几乎理想的消毒剂，因为它可以消灭大多数病原体，并提供残留消毒剂，有助于防止微生物在整个配水系统中的生长和再生。此外，氯还是：

- 一种强力氧化剂和消毒剂，可解除某些化学品的毒性。
- 适合各种水质条件
- 易于监控
- 成本低廉

此外，饮用水供应商仍将面临诸多新挑战，而且这些挑战还将不断演进，包括：

- 处理耐氯病原体，如隐孢子虫和贾第虫
- 日益严峻的军团菌、生物膜和房屋给排水的问题
- 最大限度地减少消毒副产物的形成并控制新生消毒副产物
- 新的环境和安全法规、标准和准则
- 加强处理设施的安全

为了应对这些挑战，配水系统管理者和决策者必须设计独特的消毒方法，以匹配每个系统的特点、水源水质和资源。尽管氯化仍然是最常用的消毒方法，但在一些国家，饮用水系统越来越多地采用替代消毒剂或组合消毒剂，包括氯和氯胺、二氧化氯、臭氧和紫外线辐射。任何一种消毒方法都无法适用于所有情况。水系统可以使用多种方法作为多重屏障，以达到饮用水设施的整体消毒目标，并在整个储存和配水系统中提供残留消毒保护。

以下章节对传统和替代消毒技术进行了总结和比较，并对每个选项相关的一些主要优势和局限性进行了讨论。

氯化

氯以下列三种主要形式之一应用于水：元素氯（氯气）、次氯酸钠溶液（液体漂白剂）或干次氯酸钙。氯化异氰尿酸盐也用于一些饮用水的处理（更常见于泳池消毒）。所有这些消毒剂都会在水中产生游离氯（见框注 2-1）。

优势

- 对细菌和病毒性水传播病原体和一些原生动物具有很强的杀伤力。
- 提供残留水平的消毒剂，有助于防止微生物生长和再生，并有助于控制配水系统中的生物膜生长。
- 易于应用、控制和监控
- 操作简单且可靠度高
- 成本低廉的消毒剂

局限性

- 会形成消毒副产物（即，三卤甲烷，卤乙酸）
- 在水中使溴化物和次溴酸盐发生氧化，产生溴化消毒副产物
- 对*隐孢子虫*无效
- 需要运输和储存化学品

元素氯　元素氯气（Cl2）仍然是饮用水系统中最常见的氯气形式之一。它在压力下以液化气的形式运输和储存。例如，北美的水处理设施通常使用 100 磅和 150 磅的钢瓶或 1 吨容器规格的氯一些大型饮用水系统使用铁路罐车或油罐车输送氯气。

优势

- 在所有氯基消毒剂中成本最低，最节能的
- 无限保质期
- 不添加溴酸盐
- 可与藻类和蓝藻所产生的毒素发生反应。

局限性

- 危险加压气体，需特殊处理，操作员需经过培训
- 可能需满足额外的监管要求和报告要求。

次氯酸钠　次氯酸钠或漂白剂（NaOCl 的水溶液）是通过向氢氧化钠中添加元素氯来产生的。通常，用于水处理的次氯酸盐溶液含有 12% 到 15% 的氯，装在1000 到 5000 加仑的容器中进行运输。

优势

- 该溶液比元素氯（气体）危险性小，易于搬运。
- 培训要求和规定比氯气少
- 可与藻类和蓝藻所产生的毒素发生反应。

局限性

- 保质期有限；随着时间的推移缓慢降解为氯酸盐，然后在储存期间（特别是在温暖的温度下）降解为高氯酸盐。
- 在前体盐中电解溴化物时可含有溴酸盐。
- 对某些材料有腐蚀性，比大多数溶液化学品更难储存。
- 由于运输（水）重量（~85%），成本高于元素氯。

次氯酸钙　次氯酸钙（$Ca(OCl)_2$）主要用于小型水处理。它是一种白色、干燥的固体，含有约 65% 的氯，称颗粒状或片剂形态。

优势

- 相对于次氯酸钠更稳定，存储时间更长
- 培训要求和规定比元素氯少
- 可与藻类和蓝藻所产生的毒素发生反应。

局限性

- 干化学品比次氯酸钠的搬运要求更高。
- 溶液中形成的沉淀固体使化学给料更为复杂
- 化学品成本高于元素氯
- 如处理不当，有发生火灾或爆炸的危险。
- 可含有氯酸盐、亚氯酸盐和溴酸盐

就地生产次氯酸盐

近年来，一些美国的城市安装了次氯酸盐就地发生器，该设备可使用电解槽和盐水（盐水）溶液，生产弱次氯酸盐溶液（约 0.8%）

优势

- 对盐进行储存和运输，而无需储存或运输氯气或次氯酸钠溶液

局限性

- 电解和系统维护增加耗电量，进而导致资本和运营成本增加
- 工艺更为复杂，需要更高水平的维护和技术专业知识。
- 盐的质量需仔细控制
- 弱溶液要求大量的化学给料和控制工作
- 处理系统出现故障时，需提供备用消毒剂。

氯基替代消毒剂

氯胺（一氯胺）

氯胺是水中的氯和氨按照特定比例结合形成的化合物。一氯胺（NH_2Cl）为必需的形式，二氯胺和三氯胺为不良的无效消毒剂，因此必须仔细控制配比和工艺。因为氯胺和氯相比是一种弱消毒剂，所以它几乎从未被用作主要消毒剂。氯胺可达到持久残留的效果，因为它比氯气或次氯酸钠反应性小得多。因此，它经常被用作二级消毒剂，特别是用在范围广泛的配水系统中。氯胺可以减少氯化消毒副产物的形成，但也会产生不同的、研究较少的含氮消毒副产物，可能还会产生硝酸盐和亚硝酸盐。它也可以减少一些和游离氯相关的味道和气味问题。

优势

- 它也可以减少一些和游离氯相关的味道和气味问题。
- 不会将溴化物氧化成次溴酸盐；因此，不会形成溴化消毒副产物。
- 和游离氯相比，可提供更稳定、更持久的残留
- 和游离氯相比，与剂量有关的味道和气味问题更少。
- 良好的二级消毒剂；在控制配水系统中的指示菌和生物膜方面可能比游离氯更有效。
- 减少生物膜中的军团菌，有助于保护配水免受生物膜相关微生物活动的影响。

局限性

- 和氯相比，消毒力和氧化力更弱，相差几个数量级
- 与游离氯相比，需要更长的接触时间和更高的 C×T 值
- 产生亚硝胺和其他含氮消毒副产物的潜力更大
- 可促进硝化作用，尤其是在长时间滞留在配水系统中时。
- 除氯化化学品外，还需要装运和搬运氨气或氨气化合物。
- 氨水和氯胺对鱼有毒，除非去除这些物质，否则会构成问题，但此类去除工作比去除游离氯残留物更困难。
- 用于肾脏透析时，必须将该物质从水中去除。
- 不会与藻类和蓝藻所产生的毒素发生反应

二氧化氯

二氧化氯（ClO_2）是一种气体，产生自氯酸钠，采用特别设计的发生器在饮用水处理设施处就地产生。产生二氧化氯的一种常见方法是将氯气溶解在水中，产生次氯酸和盐酸，然后使酸与亚氯酸钠反应。

二氧化氯的性质与游离氯有很大不同。在溶液中，它是一种溶解性比氯低的气体。 与氯不同的是，二氧化氯不会在水中水解，尽管它会在水中生成亚氯酸盐和氯酸盐；因此，二氧化氯的杀菌活性在较广的酸碱度范围内相对恒定。二氧化氯是挥发性的，很容易从溶液中剥离出来，是一种很强力的一级消毒剂和选择性氧化剂。其主要无机副产物是亚氯酸盐和氯酸盐。虽然二氧化氯能产生足够的残余物，但很难维持，这就是为什么它很少用于此目的。

优势

- 对*隐孢子虫*有效
- 在灭活贾第虫时，比元素氯快 5 倍
- 消毒效果只受 pH 值的轻微影响
- 不直接形成氯化消毒副产物（例如，三卤甲烷、卤乙酸）
- 不会将溴化物氧化成次溴酸盐（但在阳光下会形成溴酸盐）
- 在处理一些味道和气味问题上，比元素氯更有效。

- 可用于锰氧化的选择性氧化剂

局限性

- 形成无机消毒副产物（亚氯酸盐、氯酸盐）
- 高挥发性残留物
- 需要现场发生器设备和妥善的化学品处理（亚氯酸钠和潜在氯、次氯酸钠或盐酸）
- 需要先进的技术能力来操作和监控设备、产品和残留物。
- 偶尔会因为气相反应产生独特的气味和味道。
- 存在职业性吸入毒性风险
- 运营成本较高（亚氯酸钠成本较高）
- 不会与藻类或蓝藻所产生的毒素发生反应

非氯替代消毒剂

臭氧　通过使干氧气或空气通过高压电机系统，臭氧（0_3）气体在饮用水系统中现场产生。臭氧是当今最强的氧化剂和消毒剂之一。但由于其反应活性高、溶解性低，在饮用水处理中难以应用和控制。接触室完全封闭，且非吸附臭氧必须在释放之前销毁，以避免造成腐蚀性和吸入毒性条件。臭氧通常用于氧化而不是单独用于消毒。

优势

- 可供使用的最强的氧化剂/消毒剂
- 不直接生产氯化消毒副产物
- 对隐孢子虫有效
- 单独使用或在高级氧化工艺中使用，可氧化有机化合物
- 可与藻类和蓝藻所产生的毒素发生反应。

局限性

- 工艺操作和维护要求更高水平的技术能力。
- 无残留消毒
- 通过在水中氧化溴化物形成溴化消毒副产物
- 形成非卤化消毒副产物（例如醛）
- 降解更复杂的有机物；更多可生物降解的化合物可促使配水系统中的微生物生长和再生，并在化学消毒过程中增加消毒副产物的形成。
- 由于资金成本高、空气或氧气需求成本和电力成本，总成本高于氯化成本。
- 难以控制和监控，尤其是在可变负载条件下

紫外线辐射　由水银弧光灯产生的紫外线辐射是一种非化学消毒剂。当紫外线穿透生物体的细胞壁时，它会破坏遗传物质，杀死细胞或阻止生殖。以证明使用足够剂量、适当波长的紫外线能有效灭活许多病原体。效果取决于用量、水的透射率、灯的光谱输出和强度。关于紫外辐射产生的消毒副产物的研究正在进行中。

优势

- 在适当剂量下能有效灭活大多数病毒、细菌孢子和原生动物包囊。
- 无需生成化学品生成，无需储存或搬运
- 低剂量对隐孢子虫有效
- 以适当的剂量和波长直接光解亚硝胺和其他一些微量化学品

局限性

- 无残留消毒
- 需要更高剂量的紫外线照射来灭活某些病毒
- 在饮用水系统中难以监测紫外线剂量和性能
- 受辐射的生物体可以保持休眠，有时可自我修复，并通过一个称为光激活的过程逆转紫外线辐射的破坏作用。
- 通常需要额外的预处理步骤，以保持高澄清度的水，以最大限度地进行紫外线消毒。
- 无法进行氧化、无法对味道和气味进行控制
- 扩充备用/应急消毒能力的成本高
- 水银灯可能带来饮用水和环境毒性风险；其输出随着使用时间的推移而下降。
- 无法与藻类和蓝藻所产生的毒素发生反应

7 氯消毒的前景

前几章讨论了在消毒方面，饮用水供应商面临的机遇与挑战。为了应对不断增多的法规、关于微生物污染物和消毒副产物的新兴科学以及与处理化学品有关的安全和安保问题，水系统管理人员和研究人员将根据氯和其他消毒方法的特殊情况继续进行评估。尽管存在质疑声，但许多因素表明，饮用水氯化仍然是水传播疾病预防和公共卫生保护的基石。

- 消毒无疑是饮用水处理中最重要的一步，任何其他消毒剂都无法达到氯的广泛功效和成本效益。
- 如果将水源水中可产生味道的有机物最小化，则需要较低的一级消毒氯剂量，并且保持较低的游离氯残留量。化合氯残留物比游离氯残留物有更高的味觉阈值（IPCS，2000年）。
- 军团菌是美国水传播疾病爆发的最常见原因（美国疾病预防控制中心，2015，2017a），当人们吸入被污染的淋浴设施、冷却塔、水疗中心和房屋管道中的水蒸气或雾气时，会导致呼吸道疾病。适当的氯基消毒有助于防止未来军团菌的爆发。这包括短期的冲生更为重要。
- 世界各国领导人越发认识到安全饮用水是可持续发展的关键组成部分（见框注 7-1）。氯可以以几种不同的形式应用，可以是偏远的农村和大城市中经济有效的消毒措施，具有可扩展性，有助于为有需要的人提供放心水。

框注 7-1：安全用水——可持续发展的基石

2000 年，联合国（联合国）通过了一系列，共 8 条千年发展目标(MDG)，旨在于 2015 年之前，为地球上最贫困的人民改善生活（联合国，2015 年）。尽管 7 号千年发展目标项下的饮用水目标提前 5 年实现，但与目标相比的，总体进展喜忧参半。世卫组织（2018a，b，c）报告称，2015 年：

- 全球 71% 的人口（52 亿人）可享用经安全管理的饮用水服务，即，位于房屋内，可按需使用，未经污染的饮用水。
- 全球 89% 的人口（65 亿人）至少可享用基本服务；也就是说，在 30 分钟的往返行程内，能到达经改善的饮用水水源。
- 8.44 亿人甚至无法享用基本的饮用水服务
- 全球 68% 的人口（50 亿人）可享受基本的卫生服务
- 23 亿人甚至缺乏最基本的卫生设施，如洗手间或厕所。
- 至少有 20 亿人所使用的饮用水源受到粪便污染。
- 受污染的饮用水可传播腹泻、霍乱和脊髓灰质炎等疾病，估计每年造成 50.2 万以上的人死于腹泻，其中大多数是发展中国家的儿童。

随着千年发展目标的时间表在 2015 年底接近尾声，国际社会的代表为 2015 年后的可持续发展目标议程制定了一套新的可持续发展目标，共 17 条，也称为联合国 2030 年议程。新的可持续发展目标建立在千年发展目标之上，但更具体、科学和可衡量。6 号目标，“确保所有人都能用上经过可持续管理、卫生达标的水”，其中包括多个目标和指标，例如通过减少污染改善水质，以及减少未经处理的废水返回环境的比例。

作为一种经验证、可扩展且成本低廉的消毒技术，氯化消毒可用于家庭使用点、小型社区和大型市政供水系统，饮用水加氯将有助于在世界各地的社区中实现 6 号可持续发展目标。从农村家庭的使用水平来看，有几种产品可用于保证原水的安全。例如，一种价格低廉，粉末状的水处理剂，每小包 4 克。每个一次性小包装中装有足够的氯基消毒剂和其他处理化学品，可净化多达 10 公升的水，符合世界卫生组织的相关准则。随着复杂程度的提高，发展中国家中型社区的加氯器通过使用固体氯基消毒剂处理大型固定水箱中的原水。社区居民通过在加氯器站填充储水容器并将其运回家的方式，获取安全用水。值得注意的是，以氯为基础的使用点产品，和社区加氯器都采用了与传统管道市政系统相同的消毒化学品，以保障饮水安全。

其独特用途的关键在于持久的保护性氯残留——在世界上某些地区，如果该地区因间断供水，以及多用途供水而必须设置蓄水设施，或有明显爆发微生物污染事故，和疾病疫情的风险，则必须具有保护性氯残留。

词汇表

吸附：物质在固体表面的附着。

含水层：一种天然的地下层，通常由含水的沙子或砾石构成。

细菌：由单个细胞组成的微生物，其 DNA 不被内膜分离。细菌可以根据许多不同的方式分类，例如根据其形状或其在革兰氏染色试验中对紫色染料的反应（革兰氏阳性细菌与革兰氏阴性细菌）。

生物膜：附着在水管和储水箱内表面的微生物、有机物和无机物的聚积物。无论水质特征和管道材料如何，所有配水系统中都存在生物膜，生物膜为分子复制创造了环境，可对抗消毒剂。

生物恐怖主义：使用生物制剂的恐怖主义。

氯化：在水中加入某种形式的氯进行消毒和/或氧化的过程。

澄清：通过重力沉淀去除水中的悬浮固体，并辅以化学絮凝剂。

混凝：颗粒不可逆的结合或聚集，形成更大的质量，促进沉降（沉淀）。

大肠菌群：存在于环境、所有温血动物 以及人类的粪便中的细菌。大肠菌群计数为供水系统卫生状况的一般指示，但不一定表示粪便污染。

化合氯：与氨或其它活性氮化合物反应形成氯胺的氯。水中的氯胺与游离氯平衡。化合氯作为一级消毒剂的效果比氯差得多，但可提供更持久的残留保护。

接触时间：C×T（毫克/升×分钟）是消毒剂在特定温度和 pH 值下的残留浓度(C) 和接触时间 (T) 的乘积，单位为毫克/升。接触时间是比较各种消毒剂对特定微生物效果的一致性指标。

消毒：通过化学杀菌剂或物理措施（如加热或紫外线辐射）使有害微生物失活。

消毒副产物 (DBP)：消毒剂与水中的有机化合物和一些无机化合物反应生成的化合物。

配水系统：从处理厂到用户管道系统的管道网络。

新兴病原体：新发现的致病有机体，或某种传染性增强的有机体，因此引起人们对公众健康关注。

流行病学：研究健康相关状态或事件（包括疾病）的分布和决定因素，并将此研究应用于控制疾病和其他健康问题的学科。

过滤：将悬浮固体从液体（或气体）中分离出来，迫使混合物通过多孔屏障的操作。这个过程是通过排除尺寸来进行的，并且可以通过粒子和过滤介质之间的电荷相互作用进行辅助。过滤器可以为颗粒或膜。

絮凝：一种粘附和接触的过程，其中分散颗粒通过混合形成更大的团簇，在重力作用下沉降更快。

游离氯：次氯酸和次氯酸盐离子的总和，通常以 mg/L 或 ppm 单位表示。

地下水：含水层（地下天然水库）中的水。地下水是一种常见的饮用水来源。地下水受微生物污染的可能性通常小于地表水，其化学成分反映了当地的地质情况，并可能受到地表活动的影响。

卤乙酸：一组消毒副产物，其中包括一氯乙酸、二氯乙酸、三氯乙酸、溴乙酸和二溴乙酸。这组消毒副产物被称为 HAA5，目前由环境保护署监管。

危险：在某种程度上接触某种物质时，该物质造成伤害的固有能力

最大污染水平 (MCL)：美国环境保护署允许的饮用水污染物的法定临界值。最大污染水平被设定为，在使用最佳的、可行的处理技术并考虑成本的情况下，尽可能接近最大污染物水平目标 (MCLG)。最大污染水平是强制执行标准，认为可以保障安全和公共卫生的。

最大污染物水平目标 (MCLG)：由美国环境保护署确定的污染物水平，包括适当的安全范围，在该范围内不会对人类健康造成已知或预期的风险。该目标在经济上或技术上有时并不可行，且该目标不是法律强制执行标准。

微生物污染：水源受到细菌、病毒和原生动物等微生物的污染。

微生物：活体，通常是单细胞的有机体，只有借助显微镜才能看到。一些微生物，可通过饮用水，或饮用饮用水造成健康问题；也称为微生物。

纳米过滤：一种压力驱动的膜分离工艺，可去除纳米范围内的物质。

亚硝胺：与胺结合的具有亚硝基的化合物；含氮化合物与某些氧化剂/消毒剂反应时可形成的含氮消毒副产物类。

硝化：将氨和类似的氮化合物转化为亚硝酸盐 (NO_2) 然后再转化为硝酸盐 (NO_3) 的微生物过程。在用氯胺处理过的水系统中，硝化作用可能发生，当温度较低且水的使用量较低时，硝化作用最大。

有机物：来源于生物体的物质，如动物和植物；通常以有机碳总量 (TOC)的形式计量。

氧化：原子失去电子并获得正价的过程。

寄生原生动物：以动物等多细胞生物为宿主的单细胞微生物。

病原体：一种可引起疾病的微生物。

pH值：水溶液的酸碱度的测量。水中氢离子浓度的负log10，介于 0 到 14 之间。酸性溶液的酸碱度低于 7；碱性溶液的酸碱度高于 7。

房屋给排水：房屋、学校、卫生保健设施和其他建筑物内的给排水。

原（源）水：在进行任何处理之前，处于自然状态的水。

残留：处理后水中持续存在氯或其他消毒剂。

反渗透：一种压力驱动的膜分离过程，可以去除离子、盐和不易挥发的有机物。

风险：物质在某种暴露与某条件下可能产生不良影响的概率或可能性。

地表水：从河流、湖泊和水库等开放的水源中获得的水。美国饮用水生产大部分采用了地表水源中的水。地表水比地下水更容易受到污染，通常需要进行更多处理。

三卤甲烷（THMs）：一组受管控的的消毒副产物，每个消毒副产物由三个卤素原子（如氯、溴）和一个结合到单个碳原子上的氢原子组成。包括氯仿、溴二氯甲烷、溴甲烷和二溴氯甲烷。

浑浊度：由于存在可漫射光线的小颗粒而引起的水的浑浊现象。高浑浊度会干扰化学消毒或紫外线消毒效果。

超滤：一种由压力驱动的膜分离过程，去除亚微米 (μ) 颗粒和溶解溶质。

紫外线辐射 (UV)：电磁波谱范围内的辐射，包括 100 至 400 纳米的波长。

病毒：只能在活的宿主细胞内繁殖的微小传染源。

水传播疾病：由微生物污染引起的疾病，如水中的细菌、病毒和原生动物。水中的化学物质也会引起疾病。

分水岭（或集水区）：水流入溪流、河流或水库的陆上区域。

人畜共患病：可以从动物身上传播到人类的疾病；可能由病毒、细菌、寄生虫和真菌引起。

缩略语

BDCM	溴二氯甲烷
CDC	美国疾病预防控制中心
DBA	二溴乙酸
DBCM	二溴一氯甲烷
DBP	消毒副产物
HAA	卤乙酸
HAA5	五种调节盐乙酸所组成的一组
IARC	国际癌症研究机构
IPCS	国际化学品安全规划小组（世卫组织）
LT1	长期1号强化地表水处理规则（USEPA）
LT2	长期1号强化地表水处理规则（USEPA）
MCL	最大污染物水平
MCLG	最大污染物水平目标
MDG	千年发展目标（联合国）
NRC	国家研究委员会
PAHO	泛美卫生组织
PAM	原发性阿米巴脑膜脑炎
ppb	十亿分之一（微克/升）
ppm	百万分之一（微克/升）
RTCR	总大肠菌群条例修正
SDG	可持续发展目标（联合国）
SDWA	安全饮用水法案（美国）
THM	三卤甲烷
TTHM	三卤甲烷总量
TOC	有机碳总量
UN	联合国
U.S.	美国
USEPA	美国环境保护署
UV	紫外线
WHO	世界卫生组织
WRF	水研究基金会（美国）
WQHC	水质与健康委员会（美国）

参考文献

Adam, E.A., Yoder, J.S., Gould, L.H.等人.(2016). 美国贾第鞭毛虫病爆发, 1971 - 2011. *《流行病学与传染》*144(13):2790 - 2801.

匿名作者 (1997年).千禧年：100条头条事件：第46号；水的净化*《生活杂志特刊》*。

Berjeaud, J.M., Chevalier, S., Schlusselhuber, M等人。(2016)。*《军团菌属嗜肺》*：一种高度敏感的机会主义水传播病原体能够在环境中持续存在的悖论。*《微生物学前沿》* 8(7):1 - 15。

CDC (美国疾病预防控制中心) (1997 年)。应呈报疾病摘要。

美国疾病预防控制中心 (2015)。2011-2012 年美国饮用水相关的水传播疾病暴发监测。*《MMWR 监督总结》* 64(31):842 - 848.

美国疾病预防控制中心 (2016)。饮用水和其他非娱乐性水传播疾病暴发的不足分类（在线）。网址: https://www.cdc.gov/healthywater/surveillance/deficiency-classification.html（2018 年 10 月 9 日评估）。

美国疾病预防控制中心 (2017a)。与饮用水有关的水传播疾病暴发的监测—美国，2013 - 2014 年. *《MMWR 监督总结》* 66(44):1216 - 1221.

美国疾病预防控制中心 (2017b)。有害赤潮 (HAB) 相关疾病（在线）。网址：https://www.cdc.gov/habs/index.html (accessed 8-9-18).

美国疾病预防控制中心 (2018).《福勒（氏）耐格里原虫》—P原发性阿米巴脑膜脑炎（PAM）-阿米巴脑炎[在线].网址: http://www.cdc.gov/parasites/naegleria/ (accessed 8-9-18).

Connell, G.F. (1996). *《氯化/氯胺化手册》*。美国自来水厂协会 (AWWA)：丹佛市, 科罗拉多, 美国

Cotruvo, J.A. 和 Amato, H. (2019)。膀胱癌和三卤甲烷在饮用水中的全国趋势：回顾和多国家生态研究，剂量反应 [在线]。网址：https://journals.sage-pub.com/doi/full/10.1177/1559325818807781

Craun, G.F., Hauchman, F.S., 和 Robinson D.E.(Eds.) (2001)。*《饮用水中微生物病原体及消毒副产物：健康影响与风险管理》*.会议结论 (pp. 533 - 545)。ILSI 出版社：华盛顿特区，美国

Falkingham, J.O., Pruden, A., 和 Edwards, M. (2015)。机会主义房屋给排水中的病原体：饮用水中日益严峻的的病原体形式。*《病原体》* 4(2):373 - 386.

Fletcher, S.M., Stark, D., Harkness, J.等人。(2012).发达国家的肠道原生动物：公共卫生观点。*《临床微生物学回顾》* 25(3):420 - 449.

Gall, A.M., Marinas, B.J., Lu, Y.等人。(2015). 水传播病毒：安全饮用水的屏障。*《PLoS 病原体》* 11(6):e1004867.

Guthmann, J.P. (1995)。拉丁美洲流行性霍乱：传播和传播途径。*《热带医学与卫生杂志》* 98(6):419 - 427。

Hrudey, S., Backer, L., Humpage, A.等人。(2015).评估人类膀胱癌与饮用水氯化消毒副产品相关的证据。*《毒理学与环境卫生杂志，B部分》* 18:213 - 241.

北哈夫洛克饮用水政府调查 (2017a) *《北哈夫洛克饮用水调查报告：第一阶段》*。内务部：新西兰奥克兰

北哈夫洛克饮用水政府调查 (2017b). *《北哈夫洛克饮用水调查报告：第二阶段》*。内务部：新西兰奥克兰

IPCS 国际化学品安全方案) (2000)。*《消毒剂和消毒副产品，环境卫生标准 216》*世卫组织：日内瓦，瑞士。

Li, X.F., 和 Mitch, W.A. (2018)。饮用水消毒副产品 (DBP) 和人类健康影响：多学科的挑战和机遇. *《环境科学技术》* 52(4):1681 - 1689。

McGuire, M.J. (2013). *《氯革命：水消毒和拯救生命的斗争》*.AWWA：丹佛市，科罗拉多州，美国。

国家工程院 (2018)。20世纪最伟大的工程成就[在线]。网址: http://www.greatachievements.org（2018 年 8 月 2 日评估）。

NRC (国家研究委员会) (2004). *《水性病原体指标》*.国家学术出版社：华盛顿特区，美国。

国家研究委员会 (2006). *《饮用水分配系统:评估和降低风险》*.国家科学院出版社：华盛顿特区，美国。

安大略省部总检察长(2002). *《第一部分:总结:沃克顿调查报告:2000年5月事件及相关问题》*.安大略出版物:多伦多,加拿大。

Pandey, P.K., Kass, P.H., Soupir, M.L.等人.(2014). 病原菌对水资源的污染。*《AMB快讯》* 4:51.

UN (联合国) (2015). *《2015年千年发展目标报告》*.联合国:纽约，纽约。

USEPA (美国环境保护署) (1998).国家一级饮用水法规：消毒剂和消毒副产物；最终条例。63 Fed.Reg. 69478 (1998年12月16日).

美国环境保护署 (2001). *《第一阶段消毒剂和消毒 副产物条例》*。美国环境保护署816-F-01-014.美国环境保护署水管理办公室:华盛顿，美国。

美国环境保护署 (2002)。国家一级饮用水法规：长期 1 强化地表水处理规则；最终条例。67 Fed.Reg. 1812 (2002年1月14日)。

美国环境保护署 (2005)。*《长期1强化地表水处理规则》*。美国环境保护署 815-F-05-002.美国环境保护署水管理办公室：华盛顿特区。

美国环境保护署 (2006a)。国家一级饮用水法规：地下水条例；最终条例。71 Fed.Reg. 65574 (2006年11月8日).

美国环境保护署 (2006b)。国家一级饮用水法规：第二阶段消毒剂和消毒副产品条例。71 Fed.Reg. 388 (2006年1月4日)。

美国环境保护署 (2010)。*《综合消毒剂和消毒副产品规则（第一阶段和第二阶段）：快速参考指南》*。美国环境保护署 816-F-10-080.美国环境保护署水管理办公室：华盛顿特区。

美国环境保护署 (2013)。国家一级饮用水法规：总大肠菌群规则的修订；最终条例78 Fed.Reg. 10270 (2013年2月13日)。

美国环境保护署 (2015)。州和公共水系统的饮用水要求：第一阶段和第二阶段消毒剂和消毒副产品条例[在线].网址: https://www.epa.gov/dwreginfo/stage-1-and-stage-2-disinfectants-and-disinfection-byproducts-rules（2018 年 8 月 13 日评估）。

美国环境保护署 (2018)。管理饮用水污染物表 [在线]。网址: https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations（2018 年 10 月 9 日评估）。

Vanathy, K., Parija, S.C., Mandal, J. 等人。(2017)。隐孢子虫病：一个小综述。*《热带寄生虫学》*。7(2):72 - 80.

世卫组织 (2017)。*《饮用水质量指南》*，第4版，包括第一次补遗.世卫组织出版社：日内瓦，瑞士。

世卫组织 (2018a)。SDG 6 *《2018年水和卫生综合报告》* 联合国：纽约，纽约，美国。网址: http://www.unwater.org/publication_categories/sdg-6-synthesis-report-2018-on-water-and-sanitation/（2018 年 1 月 23 日评估）。

世卫组织 (2018b)。饮用水情况说明书[在线]。网址: http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water（2018 年 10 月 9 日评估）。

世卫组织 (2018c)。卫生情况说明书 [在线]。网址: http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/sanitation（2018 年 10 月 9 日评估）。

WRF (水研究基金会) (2017a)。消毒副产物：控制消毒副产物 [在线]。网址: http://www.waterrf.org/knowledge/dbps/FactSheets/DBP-Regulated-Fact-Sheet.pdf（2018 年 10 月 9 日评估）。

水研究基金会 (2017b)。消毒副产物：新型消毒副产物[在线]。网址: http://www.waterrf.org/knowledge/dbps/FactSheets/DBP-Emerging-FactSheet.pdf（2018 年 10 月 9 日评估）。

WRF (2017c)。消毒副产物：控制策略[在线]。网址: http://www.waterrf.org/knowledge/dbps/FactSheets/DBP-ControlStrategies-FactSheet.pdf（2018 年 10 月 9 日评估）。

WQHC (2015)。1990年代拉丁美洲霍乱流行：我的内部观点[在线]。网址: https://waterandhealth.org/safe-drinking-water/latin-american-cholera-epidemic-1990s-view/ （2018 年 8 月 2 日评估）。

华盛顿特区
东北地区第二街700号
美国化学理事会氯化学部
邮编 20002
电话 202.249.6709
americanchemistry.com

2019 年 3 月