[8] Chai G, Governale L, McMahon AW, et al. Trends of outpatient prescription drug utilization in US children, 2002 – 2010[J]. Pediatrics, 2012, 130(1): 23 – 31.
[9] 宫建. 循证医学中"循证"问题的探讨[J]. 西部医学, 2012, 24(11): 2237 – 2239.
[10] 吴明智, 姜洋, 宫建. "证据"在临床药学研究领域的可视化引文分析[J]. 中国药师, 2015, 18(3): 503 – 505.
[11] 宫建. 药物流行病学研究中的无应答问题及解决方案[J]. 药物流行病学杂志, 2012, 21(3): 142 – 145.
[12] Kaliamoorthy K, Sankaralingam R, Punniyakotti S, et al. Drug utilization evaluation of third generation cephalosporins using core drug use indicators[J]. Pak J Pharm Sci, 2012, 25(2): 339 – 342.
[13] Zhou Q, Zhu LL, Yan XF, et al. Drug utilization of clarithromycin for gastrointestinal disease treatment[J]. World J Gastroenterol, 2008, 14(39): 6065 – 6071.
[14] 薛菊兰, 王向荣, 艾彪, 等. 神经内科患者下呼吸道感染病原体监测及耐药性分析[J]. 中华医院感染学杂志, 2014, 24(20): 5016 – 5018.
[15] 陈兰, 王婷, 朱英. 医院感染细菌分布及耐药性分析[J]. 中国公共卫生, 2013, 29(11): 1715 – 1716.

收稿日期: 2017-01-25　　(周欣琳编辑　吴少慧校对)

· 综　　述 ·

国内外饮用水消毒技术应用与优化研究进展*

吕佳, 岳银玲, 张岚

摘　要: 饮用水消毒是去除水中病原微生物, 防止介水传染病传播, 保障饮水卫生安全的有效途径。美国和欧洲等发达国家最先尝试进行消毒技术的优化和改进, 在消毒技术的应用上较为成熟。本文总结目前国际普遍应用的饮用水消毒技术方法, 分析美国、欧盟地区饮用水消毒技术应用的模式和案例, 结合中国目前饮用水消毒技术的应用现状, 对中国城市和农村饮用水消毒技术的应用模式前景和优化方向进行展望, 并提出一些建议。

关键词: 饮用水; 消毒技术; 消毒副产物
中图分类号: R 181.2　**文献标志码:** A　**文章编号:** 1001-0580(2017)03-0428-04　DOI: 10.11847/zgggws2017-33-03-23

Overseas and domestic research progress in application and optimization of drinking water disinfection technology

LÜ Jia, YUE Yin-ling, ZHANG Lan (*Institute of Environmental Health and Related Product Safety, China Center for Disease Control and Prevention, Beijing* 100051, China)

Abstract: Drinking water disinfection is an effective way for removing pathogenic microorganisms in water, preventing infectious disease spread through water, and protecting the safety of drinking water. Developed countries such as the United States and some European countries conducted disinfection technology optimization and improvement first and had more experiences of application of the technology. This article summarizes current international application of drinking water disinfection technology, analyzes the mode and cases of drinking water disinfection technology application in the United States and European Union countires. The prospective of application and the trend of optimization of drinking water disinfection technology in urban and rural China are discussed with some suggestions considering current domestic application of the technology.

Key words: drinking water; disinfection technology; disinfection by-product

饮用水消毒是去除水中病原微生物, 防止如霍乱、伤寒、痢疾等介水传染病传播的有效途径。为达到理想的消毒效果, 人们对消毒技术的选取和应用进行探索和改进, 从传统的单一氯消毒, 到其他消毒技术的采用, 再到消毒技术方法的联合应用[1-2]。目前中国饮用水消毒, 特别是大中型水厂的饮用水消毒大多数采用传统的氯化消毒, 但是面临着水源水的污染破坏、水体中污染物种类的复杂化和新的消毒副产物的产生, 传统的消毒方法遇到很大挑战。本文分析美国等发达国家饮用水消毒技术的应用与优化模式, 以期对中国饮用水消毒技术的选择和应用有所借鉴。

1　饮用水消毒方法及其应用范围

1.1　化学消毒方法(表 1)　19 世纪中期微生物理论被证明后, 化学消毒剂能够灭活水中微生物从而

* **基金项目:** "十二五"农村领域国家科技计划课题(2012BAJ25B03 – 03)
作者单位: 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所水质安全监测室, 北京 100051
作者简介: 吕佳(1989 –), 女, 北京市人, 研究实习员, 硕士, 研究方向: 环境卫生及理化检验。
通讯作者: 张岚, E-mail: zl67672004@sina.com
数字出版日期: 2016 – 4 – 28 15:58
数字出版网址: http://www.cnki.net/kcms/detail/21.1234.R.20160428.1558.008.html

减少介水传染病传播的能力广为人知[1]，根据世界卫生组织饮用水卫生安全报告，化学消毒方法广泛应用于国内外集中式供水和分散式供水，国际上普遍应用的化学消毒方法包括氯、二氧化氯、氯胺、臭氧消毒。20 世纪初，氯被发现是一种有效的饮用水消毒剂，氯消毒主要通过次氯酸起作用[2]，氯进入水中发生水解、电离反应形成次氯酸，渗透到带负电的细菌表面，并穿透细胞壁进入细菌内部，通过氧化作用破坏细菌酶系统而使细菌死亡，液氯是最常用的氯消毒剂。氯对微生物的杀灭能力较强，具有持续消毒作用，使用方便，消毒成本低，因此氯消毒是目前应用最广泛的消毒方法。但是，氯消毒过程会产生具有致癌作用等危害的消毒副产物[3-4]，无法有效灭活隐孢子虫卵囊[5]，杀菌效果受 pH 值影响较大，无法完全遏制输水中微生物的再生长，氯与某些有机物反应生成难闻的氯酚味，且氯气或液氯消毒具有一定的不安全性[6]，因此，人们越来越注重研究可以取代氯消毒的其他消毒方法和优化技术。

二氧化氯是一种广谱高效消毒剂，与氯相比，对水中病原微生物的杀灭效果好，作用速度快，能够有效灭活贾第鞭毛虫和隐孢子虫[7-8]，受温度和 pH 的影响小，受有机物影响小，几乎不产生三卤甲烷及其它卤化物[9]。二氧化氯用于饮用水消毒行业推广难的主要原因是，二氧化氯气体不稳定，贮存运输比较困难，稳定型制剂的生产成本较高。二氧化氯消毒会产生无机消毒副产物 ClO_2^-，研究表明，高浓度的 ClO_2^- 对动物具有一定的潜在毒性[10-12]。

臭氧与氯相比具有更强的消毒能力，pH 适用范围广，投加量小，杀病毒、灭菌、杀孢子的作用比氯快，消毒后臭氧被还原成氧，可以提高水中的溶解氧，无氯酚味，且不产生含氯消毒副产物[13]。但是，臭氧会产生消毒副产物甲醛[14]和溴酸根离子，如果溴离子（Br^-）与天然有机物（natural organic material，NOM）共存于水体，臭氧首先将 Br^- 氧化成次溴酸（hypobromous acid，HOBr），HOBr 再将 NOM 氧化成溴化二卤甲烷，卤乙酸，卤代乙酯和溴化氰[15]，若要降低臭氧消毒副产物，会大大提高消毒成本。臭氧消毒需现制现用，受半衰期所限无持久消毒能力，大中型管网系统采用臭氧进行消毒时，需要依靠其他消毒剂（氯和二氧化氯）来维持管网中持续的消毒效果，臭氧发生器装置复杂，设备昂贵，占地面积大。当水量和水质变化时，调节臭氧投加量比较困难。

氯胺作为饮用水消毒剂，1916 年首次在加拿大渥太华应用，氯胺消毒的有效成分一氯胺在水中衰减慢，分散性好，但是氯胺灭活水中微生物的效果比自由氯和其他消毒剂低，因此其应用受到影响。近年来研究表明，卤代消毒副产物的生成量直接与游离氯有关，如果投加化合态氯，可以使卤代消毒副产物的产生量明显减少，同时还可以增加配水管网中剩余消毒剂的稳定性[16]。氯胺在水中不与酚类物质发生反应，不产生氯酚臭。但最近有研究发现，氯胺亦可能存在致突变性[17]。

表 1　国际常用饮用水化学消毒技术方法应用范围

消毒技术	应用范围	成本
氯消毒	普遍应用于集中式供水和分散式供水	低
二氧化氯消毒	比氯化消毒的普遍性小，通过酸化亚氯酸盐或氯酸盐的方法用于中小型集中式供水。	较高
臭氧消毒	不如氯消毒普遍，大多数分布在欧洲，用于集中式供水，	较高
氯胺消毒	不如氯消毒普遍，常作为二次消毒剂应用于大型集中式供水	中

1.2　*物理消毒技术方法*　物理消毒技术由于其不产生副产物而受到人们的广泛关注。目前，国际上普遍应用的物理消毒技术是紫外线消毒。由于紫外线消毒技术能在相对较低的剂量水平下高效灭活（99.9%）具有抗氯性的隐孢子虫和贾第鞭毛虫，自 1993 年在美国爆发隐孢子虫病后倍受青睐[18]。紫外线消毒技术应用简单，可在较低的剂量和很短的停留时间下有效灭活饮用水中微生物[19]，与化学消毒法相比较，紫外线消毒不会损害管网水质生物稳定性，也不会产生有害的消毒副产物，紫外线灯消毒系统广泛应用于社区和住户的饮用水消毒。紫外线消毒没有持续的消毒作用，在管网内细菌容易重新繁殖，所以单纯的紫外线消毒一般用于小水量处理后水立刻被使用的情况，或者原水的生物稳定性好、配水管网不存在二次污染的情况。紫外消毒对进水水质要求较高，通常水质浑浊或者水中某些溶解物会干扰紫外线对微生物的灭活效率，紫外线灯需要稳定且可支付的电力来源，需要定期清洗，尤其对于水下紫外线灯系统，紫外线灯受寿命所限需要定期更换。

2　国内外饮用水消毒技术应用分析

2.1　*美国饮用水消毒技术应用（表 2）*　美国于 1908 年开始使用氯对饮用水进行消毒，随着美国安全饮用水法的修订，法案中对微生物污染物和消毒副产物方面的规定更加严格。为了更加有效地杀灭水中微生物，并且减少饮用水消毒过程中产生的消毒副产物，人们开始探索对传统氯消毒技术进行改进。传统氯消毒过程包括主要消毒（primary disin-

中国公共卫生 CPH

fection）和二次消毒（secondary disinfection）过程[20]。主要消毒是饮用水处理的常规工艺环节，通常是在饮用水过滤后投加氯进行消毒，有时为了抑制沉淀池中藻类的生长，会在水常规处理工艺前加氯进行预处理氧化；二次消毒是为了保障饮用水通过供水管网到达水龙头过程中的水质，而在饮用水进入管网前进行第二次加氯消毒。美国饮用水消毒技术的改进，通常是在主要消毒过程采用臭氧、二氧化氯或紫外线消毒技术代替氯消毒，在二次消毒过程用氯胺代替氯消毒。在美国，有很多水厂采用氯胺代替氯进行二次消毒，与氯相比，用氯胺进行二次消毒更加有效地控制了管网中生物膜的生长，同时，可有效减少消毒副产物的形成[21]。一些水厂用臭氧代替氯作为主要消毒剂，采用臭氧进行主要消毒的饮用水出厂水水质微生物指标明显优于氯消毒的出厂水，但是受不具备持续消毒能力的影响[22]，往往需要采用氯或氯胺进行二次消毒，以保障供水管网中的生物稳定性。部分水厂采用二氧化氯代替氯进行主要消毒，二氧化氯对水中隐孢子虫属具有很强的消毒能力，与其他消毒剂相比，二氧化氯对铁侵蚀效果较低，可以有效控制供水管道中生物膜的生成[23]。紫外线消毒技术在过去 5 ~ 10 年广受关注，紫外线消毒可有效灭活水中微生物孢囊和卵囊，且不产生消毒副产物，但是紫外线消毒没有持续的消毒效果，因此，通常采用紫外线消毒技术与氯或氯胺消毒联合应用的方式进行饮用水消毒。有研究表明，紫外线联合氯或者氯胺的消毒模式无法有效灭活水中的某些病毒，为解决这一问题，人们开始研究光量子与工程纳米结构的联合应用消毒技术[24]。

表 2　消毒技术在美国水厂的应用比例

消毒技术	所占水厂比例（%）	
	地表水水源	地下水水源
氯	84.6	92.5
二氧化氯	6.4	0.4
氯胺	17.9	1.3
臭氧	3.8	0.1
紫外线	2.1	0.2

注：由于水厂可能会采用多种消毒技术，因此上述比例加和不一定为 100%。

2.2　欧洲饮用水消毒技术应用　在欧洲，饮用水消毒最受关注的问题之一是消毒副产物的产生。大多数消毒剂是氧化性物质，能够与水中天然化合物反应生成对人群健康具有潜在影响的物质，由于地表水中有机物（例如腐殖酸和富里酸）浓度更高，因此以地表水为水源的水处理过程更可能形成消毒副产物。欧洲国家采取的主要饮用水消毒方法受到水源水质量、财力、科技和历史应用等因素的影响。采用氯和次氯酸钠作为消毒剂的消毒技术在欧洲普遍应用。在波兰等国家，氯消毒是公共供水系统饮用水消毒的主要方式，氯胺和漂白粉（含有 30% 以上的有效氯）通常在井水和个人供水系统中使用[26]。在俄罗斯、乌克兰等原苏联新独立国家，氯消毒是最常使用的消毒技术，通常采用直接投加氯气的方法进行消毒[25]。在阿尔巴尼亚、亚美尼亚、爱沙尼亚、希腊、立陶宛、摩尔多瓦共和国、罗马尼亚、乌克兰的很多案例中，由于设备老化、手动设备的限制等因素，水质在氯化作用不连续时会受到影响，为此，可连续投加次氯酸钠的自动设备在一些城市被应用[25]。在挪威、比利时、法国的一些小型供水规模水厂，由于没有充分的消毒或者不进行消毒，饮用水中微生物污染问题较为突出，对于 < 100 人供水规模的水厂而言，很难做到保障饮用水质量合格同时解决消毒成本问题。

当水源水用氯消毒会产生不好的味道和臭味时，通常会选择臭氧替代氯进行消毒。在德国、法国、荷兰、瑞士、比利时等国家，臭氧消毒是优先选择的消毒技术[25]，可以有效灭活贾第鞭毛虫和隐孢子虫，进行臭氧消毒后，会对饮用水进行低浓度水平的氯化消毒，以保障持续的消毒作用。臭氧消毒技术的限制在于它的成本很高，且会产生具有潜在致癌性的溴酸盐副产物。二氧化氯消毒技术在比利时、法国、德国、意大利、英国的一些城市被应用。使用二氧化氯消毒时，水中氯酸盐和亚氯酸盐的浓度会升高，高铁血红蛋白血症、无尿、腹痛、肾衰竭通常与氯酸盐毒性有关系[26]。欧洲的一些国家普遍使用紫外线消毒，例如列支敦士登高山地区使用地下水的居民，以及使用地表水水源的冰岛人。紫外线消毒技术通常以单独使用或者与化学消毒技术联合应用的模式被用于小型水厂。

2.3　中国饮用水消毒技术应用（表 3）　中国城市供水主要采用氯消毒技术[27]。水源水在进行常规处理前进行预氯化，再通过混凝、澄清、过滤等常规处理工艺后，投加氯进行消毒，然后进入供水管网。预氯化可以防止水厂构筑物中滋生青苔，还可以氧化破坏有机胶体表面的保护膜、提高混凝沉淀效果，在以含藻类高的水库为水源的水厂中曾一度受到重视。近年来，中国城市水源污染严重，水中有机物含量增高，预氯化过程会造成氯与水中有机物反应形成大量的三卤甲烷等副产物[28]。对于供水管网距离比较长的水厂，通常在出水时投加氯，以保障管网

余氯。随着水源水中化学污染物种类和数量的增加,水中出现的病原微生物的种类和数量也在不断增多,一些在水中新出现的病原微生物靠氯消毒方法无法解决,同时预氯化和氯化消毒产生三氯甲烷等消毒副产物的问题也亟待解决,这需要应用新的消毒技术。上海、北京、深圳等一些大城市的自来水厂开始采用新的消毒技术模式,提出采用臭氧或二氧化氯等进行预处理氧化,并在主要消毒工艺前采用臭氧生物活性炭处理等工艺,主要消毒过程仍然以氯消毒为主,部分水厂用氯或者氯胺进行二次消毒,以保障供水管网中的消毒残余。与紫外线消毒技术在国外的普遍应用相比,中国的紫外线消毒技术还存在一些问题,例如紫外线消毒效果易受水中悬浮颗粒影响,对原水水体的要求较高,不能提供持续消毒能力,石英套管外壁不易清洗受紫外线灯光源强度和使用寿命影响要定期更换灯管等[29]。紫外线消毒技术在中国给水方面的应用较少,尚处于起步阶段。

中国农村乡镇水厂,由于受用途和供水范围的限制,规模基本上是中小型,供水量少,管网短,水与消毒介质不能保证都有足够的接触时间。大部分农村地区经济不富裕,水厂管水员文化水平普遍不高,因此,农村水厂选择的消毒技术和设备通常具有消毒作用迅速,易于操作,建设和运行成本低廉等特点[30]。氯消毒是农村水厂采用的主要消毒技术[31],主要采用次氯酸钠进行消毒[32],应用的主要设备是采用电解食盐法的次氯酸钠发生器,次氯酸钠杀菌作用较强,能充分保证其浓度和杀菌性,其原料采购方便、操作简单、设备投资较低、不存在运输及储存问题。也有一些农村水厂仍然采用漂白粉或原白粉精片手工加药或简单设备加药的方式进行消毒。液氯由于其在运输、储存方面的安全性要求较高,在农村中小型供水工程中采用相对较少,只有靠近气源、管理完善的水厂才采用液氯。为保证农村分散式供水水质的安全,井水的消毒通常采用每天向井内投加漂白粉(或漂白粉精)溶液的方式进行消毒。自 20 世纪 90 年代后,中国越来越多的村镇中小型供水工程开始采用二氧化氯进行消毒。目前饮用水二氧化氯消毒方法多采用盐酸和氯酸钠反应的复合型二氧化氯发生器[33],该发生器所需原料中的氯酸钠是一种强氧化剂,受碰撞极易发生爆炸,而盐酸属于强酸,腐蚀性较大,二者均属危险品,在运输和保存上在一定的安全问题。目前主要面临的问题是着力研究如何控制好二氧化氯的安全投加量,提高复合二氧化氯发生器原料的转化率、残液分离技术,达到更好的消毒效果。由于农村地区经济条件和技术的限制,臭氧消毒技术和紫外线消毒技术的应用较少。

表 3　中国部分大城市水厂的饮用水消毒技术的应用模式

供水单位	消毒技术应用模式
A	地表水源水→常规处理(混凝、澄清、过滤)→臭氧活性炭深度处理、超滤膜深度处理→氯化消毒→供水管网
B	地表水源水→高锰酸钾、次氯酸钠预处理→常规处理→清水池前加入次氯酸钠和硫酸铵的氯胺消毒→供水管网
C	地表水源水→预氯化→常规处理→清水池前加氯加氨的氯胺消毒→供水管网
D	地表水源水→臭氧预处理→常规处理→臭氧活性炭深度处理→紫外线消毒→清水池前加入次氯酸钠和硫酸铵的氯胺消毒→供水管网
E	地表水源水→预臭氧化→常规处理→臭氧生物活性碳深度处理→氯化消毒→供水管网

3　结　论

饮用水消毒技术的应用要保障能够有效去除水中病原微生物,又不产生对人体有害的物质,同时需要考虑设备投入和运行成本、操作和使用安全等问题。由于氯化消毒技术具有消毒效果好、成本低廉等特点,因此,目前仍然是主流的消毒技术。各国在消毒技术应用模式上的改进和优化,通常是采取臭氧、紫外线、二氧化氯、氯胺等消毒技术替代氯化消毒技术,以控制氯化消毒副产物的产生。在美国、欧洲的发达国家和地区,有水厂采用臭氧、紫外线代替氯进行主要消毒,采用氯胺代替氯进行二次消毒。中国部分大城市水厂,已经开始改进氯化消毒模式,以控制氯化消毒副产物的产生,比较具有应用发展潜力的消毒技术优化模式包括:在氯化消毒前添加臭氧预处理颗粒活性炭、超滤膜等处理工艺;采用臭氧、高锰酸钾等代替氯进行预处理氧化;氯胺消毒技术代替氯进行二次消毒,维持管网消毒残余;紫外线消毒、氯消毒、氯胺消毒技术等联合应用。经济不发达地区的中小型水厂,消毒成本是消毒技术选取与

应用的主要限制因素，中国农村地区同样面临这样的问题，由于经济和技术的限制，水厂消毒技术普遍落后。二氧化氯消毒技术由于原料简单、使用方便等优势，十一五期间在中国农村水厂得到广泛应用，应着力研究如何控制好二氧化氯安全投加量，提高复合二氧化氯发生器原料的转化率、残液分离技术，以达到更好的消毒效果。

参考文献

[1] 刘文君. 给水处理消毒技术发展展望[J]. 城市给排水，2004，30(1)：2－5.

[2] 金涛，唐非. 饮用水氯化消毒副产物及其对健康的潜在危害[J]. 中国消毒学杂志，2013，30(3)：255－258.

[3] Legay C, Rodriguez MJ, Sérodes JB, et al. The assessment of population exposure to chlorination by-products: a study on the influence of the water distribution system[EB/OL]. Environmental Health, http://link. springer. com/article/10. 1186/1476－069X－9－59/fulltext. html. 2010－10－7.

[4] 林辉，刘建平，宋建勇，等. 饮水氯消毒暴露与膀胱癌联系的病例对照研究[J]. 中国公共卫生，2002，18(4)：397－399.

[5] 周美芝. 饮用水源水中“两虫”检测方法及其健康风险评价研究[D]. 杭州：浙江科技大学，2013.

[6] 郭一飞，朱新锋，田艳兵. 饮用水消毒技术发展现状[J]. 中国消毒学杂志，2005，22(2)：215－216.

[7] Chauret CP, Radziminski CZ, Lepuil M, et al. Chlorine dioxide inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts and bacterial spore indicators[J]. Environmental Microbiology, 2001, 67(7): 2993－3001.

[8] 李东力，陈春田，刘希真，等. 二氧化氯对地表水消毒效果的实验研究[J]. 中国公共卫生，2001，17(7)：615－616.

[9] 黄君礼，吴明松. 饮用水二氧化氯消毒技术的现状[J]. 净水技术，2010，29(4)：16－18.

[10] 王立民，宋肖垚，曹曦予，等. 亚氯酸钠对大鼠中枢神经系统 MBP、S100B 蛋白影响[J]. 中国公共卫生，2013，29(5)：707－709.

[11] 吴明松，张玉玲，李绍峰，等. 亚氯酸盐对大鼠仔鼠的运动神经毒理学影响[J]. 哈尔滨工业大学学报，2012，44(10)：53－55.

[12] 罗凡，董滨，何群彪. 饮用水消毒技术的应用及其研究进展[J]. 环境科学与技术，2010，33(12)：393－396.

[13] 曹德康，王民，胡冰冰. 臭氧在水消毒中的应用[J]. 中国公共卫生，2005，21(5)：629－631.

[14] 王华然，杨忠委，王尚，等. 臭氧消毒饮水中甲醛生成规律及控制方法[J]. 中国公共卫生，2011，27(9)：1211－1212.

[15] Buffle MO, Galli S, von Gunten U. Enhanced bromate control during ozonation: the chlorine-ammonia process[J]. Environmental Science and Technology, 2004, 38(19): 5187－5195.

[16] Boulos, Baribeau H, Singer PC, et al. Formation and decay of THMs and HAAs in distribution systems: results of five case studies, In: AWWA Water Quality Technology Conference[C]. Philadelphia, USA, 2003.

[17] Speight PCS. Association between residual chlorine and reduction in haloacetic acid concentrations in distribution systems[J]. Journal of American Water Works Association, 2003, 97(2): 82－91.

[18] 王擎，梁爽，郑爽英，等. 饮用水消毒技术研究与应用[J]. 中国消毒学杂志，2006，23(4)：349－351.

[19] 蔡璇，张云，李然，等. 饮用水紫外线消毒研究进展[J]. 中国公共卫生，2012，28(4)：562－564.

[20] Office of Water. 2006 Community Water System Survey[EB/OL]. USEPA Ground Water and Drinking Water, 2009－3.

[21] 战威，梁增辉，李君文. 氯胺和二氧化氯联合消毒饮水三卤甲烷形成的研究[J]. 中国公共卫生，1999，15(1)：24－25.

[22] LeChevallier MW, Welch NJ, Smith DB. Full-scale studies of factors related to coliform regrowth in drinking water[J]. Environmental Microbiology, 1996, 62(7): 2201－2211.

[23] Eisnor GA, Gagnon C, Volk, et al. Impact of chlorine dioxide on corrosion in a model distribution system. In: AWWA Water Quality Technology Conference[C]. Nashville, USA, 2001.

[24] Mark AS, Paul WB, Menachem E, et al. Science and technology for water purification in the coming decades[J]. Nature, 2008, 452(20): 301－309.

[25] Bartram J, Thyssen N, Gowers A, et al. Water and health in Europe[R]. Europe Environment Agency and WHO Regional Office for Europe, 2002: 89－93.

[26] Hall T. Water treatment processes and practices[M]. 2nd. Swindon, Water Research Centre, 1997.

[27] 林辉，刘建平. 饮水氯化消毒及其副产物的研究进展及展望[J]. 中国公共卫生，2001，17(11)：1042－1043.

[28] 梁锡念，黄小伟，林祖兴，等. 饮用水氯化消毒副产物污染控制研究[J]. 中国公共卫生，2004，20(3)：331－332.

[29] 姚振兴，王明泉，孙韶华，等. 紫外线消毒技术在饮用水处理中的应用[J]. 城镇供水，2013，(2)：13－17.

[30] 刘文君，孙文俊. 农村地区饮用水消毒技术的应用[J]. 中国水利，2005，19：23－26.

[31] 刘丽颖，陈晓东，陈小岳，等. 南方某地农村集中供水消毒副产物水平检测[J]. 中国公共卫生，2014，30(11)：1432－1434.

[32] 李新杰，包训祥，唐淑娟. 中小型(农村)自来水厂消毒技术现状及发展[J]. 化工标准计量·质量，2001，12：16－20.

[33] 李文. 适宜村镇供水的消毒技术[D]. 河北工程大学，2012.

收稿日期： 2015－08－11　　（吴少慧编校）

中国公共卫生 CPH