

• 科技信息综述 •

再生水补充饮用水的水质要求及处理工艺发展趋势

杨 扬¹ 胡洪营^{1,2} 陆 韵¹ 吴乾元^{1,2} 时孝磊¹

(1 清华大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084;

2 清华大学深圳研究生院国家环境保护环境微生物利用与安全控制重点实验室,深圳 518055)

摘要 城市污水经深度处理后补充饮用水是实现水资源循环利用的有效方法之一,保障健康安全是再生水补充饮用水的关键。其水质常规指标难以满足健康安全要求,还需关注微量有毒有害污染物、病原微生物等,世界上许多国家和地区提出了严格的水质标准以保障再生水安全性和公众健康。目前,再生水补充饮用水在美国、欧洲、新加坡等国家和地区均有成功应用,且范围逐渐扩大,相关研究不断深入。再生水工艺也从早期的二级处理后增加单一消毒工艺发展为双膜工艺(微滤/超滤一反渗透)和高级氧化工艺的组合。再生水补充饮用水还面临许多新的挑战,深入研究新兴有毒有害化学污染物和高风险病原微生物的健康风险及其在水处理工艺中的去除机制和控制技术具有重要意义。

关键词 污水再生利用 再生水补充饮用水 再生水水质标准 微滤/超滤一反渗透工艺 新兴污染物 高风险病原微生物

0 前言

随着人口的增加、工农业生产的发展以及水环境污染程度的日趋恶化,许多国家和地区出现了水资源危机,严重制约了社会、经济的发展。全世界范围内,有 11 亿人缺少足够的饮用水,饮用水供应短缺已经成为越来越多国家和地区面临的重要问题,将城市污水再生利用补充饮用水成为一种重要的解决方法。

城市污水获取方便、数量稳定、水质变化小,且其中杂质只占 0.1%,绝大部分是可再利用的清水。随着污水处理技术的发展,再生水水质不断提高,其已经广泛应用于农业灌溉、工业生产、城市杂用和景观环境等方面,但是由于水质健康安全和公众接受力等问题,补充饮用水水源的比例相对较小。再生水作为城市饮用水的第二水源,能够减少对新鲜水资源的开采量,减轻城市供水压力,实现水资源的循环利用,是缓解饮用水危机的有效方法。本文主要介绍了目前再生水补充饮用水的主要方式,并结合案例分析及处理工艺的发展变化,总结了以补充饮用水为目的的再生水水质安全标准。

国家自然科学基金重点项目(51138006);国家杰出青年科学基金项目(50825801);环保公益性行业科研专项(201109015)。

1 再生水补充饮用水的主要方式

再生水补充饮用水可以分为直接补充饮用水、无计划间接补充饮用水和有计划间接补充饮用水 3 种方式。

直接补充饮用水是指再生水处理厂出水经过管对管的连接,直接作为城市饮用净水厂的进水,单独或与天然水源水以一定的比例进行混合,再经过净水处理工艺后进入饮用水管网(见图 1a)。在一些极度缺水的城市或地区,由于需水量不断增大、替代水源短缺或旱季的延长,再生水短期或长期直接用于补给饮用水。纳米比亚首都温得和克市是世界上为数不多的几个案例之一。温得和克市从 1968 年起将再生水直接补充饮用水,将经过滴滤/活性污泥法—稳定塘工艺处理后的生活污水,与当地的 Goreangab 水库水按 1:3.5 的比例混合,经过混凝、气浮、砂滤、臭氧氧化、活性炭吸附等处理工艺后,又与其他天然饮用水水源混合作为饮用水。该再生水厂经 2002 年改建后,处理规模已达 2.1 万 m³/d,旱季可满足城内 50% 的日常饮用水需要^[1,2]。

无计划间接补充饮用水普遍存在于大型河流域,例如欧洲的莱茵河、中国的长江、澳大利亚的墨

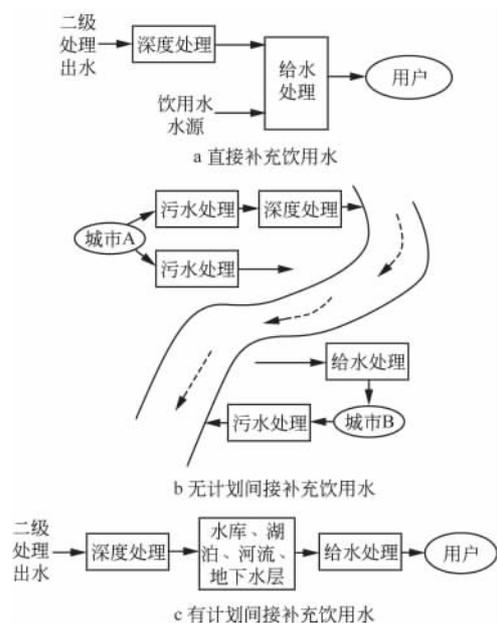


图 1 再生水补充饮用水的主要形式

累河、美国的密西西比河等。上游城市向河流、湖泊中排放处理后的污水，下游城市从接纳大量污水的江河、湖泊中取水作为饮用水水源(见图 1b)。在澳大利亚内陆地区，堪培拉污水排放到墨累河流至马兰比吉河，该流域的居民直接提取该水源为饮用水^[3]。

有计划间接补充饮用水是将城市污水经深度处理后，排到地表或地下水源地中，将处理后的污水与地表水或地下水混合，然后经过饮用水处理系统，进入饮用水管网(见图 1c)。河流、湖泊、水库和地下蓄水层等环境缓冲水体是自然界最佳的水资源储存系统，在一定条件下，再生水中残留的有毒有害污染物能够通过紫外线、微生物等的物理、生物作用得到部分降解或通过稀释作用降低再生水的安全风险。因此通过科学、合理地设计和管理，环境缓冲水体的存在可为有计划间接补充饮用水提供一道有效的天然屏障。有计划间接补充水源一方面最大限度地使用再生水，并能够更好地控制出水水质，保证饮用水安全；另一方面环境自然净化过程更容易被公众所接受，因此将成为再生水补充饮用水的主要方式。

2 再生水间接补充饮用水的水质标准

由于污水中污染物含量高、种类复杂，存在许多潜在的风险因子，若未经严格处理，水中的有毒

有害污染物、重金属和病原微生物很可能污染饮用水，并通过摄入途径进入人体，从而引发潜在健康风险。因此对补充饮用水的水质要求很高，通常需达到饮用水水质标准。需要关注的水质包括有机物、色度、臭味、浊度/悬浮颗粒物、营养物质、余氯、病原微生物、有毒有害有机物、重金属等^[4]。表 1 给出了不同国家和地区再生水间接补充饮用水的水质标准。

色度、臭味和浊度等与感官效果是评价水质的直观水质指标，也是再生水补充饮用水的必要指标。再生水补充地表水水源时，需要控制和去除氮磷等营养元素，防止水源地富营养化等问题。补充地下水水源时，需要控制氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮等含氮化合物，从而防止硝酸盐在人体唾液和胃肠道内经微生物作用后被还原成有毒的亚硝酸盐，危害人体健康。再生水中病原微生物、有毒有害有机物、重金属的控制也是保证补充饮用水安全的重要环节。

除了常见的水质指标，新兴污染物也逐渐受到高度关注。2003 年起，加利福尼亚州健康服务部(DHS)规定在再生水工程启用的第一年，必须检测的项目包括：未受管理的化学品、有毒消毒副产物的前体物、达到国家法律规定浓度的化学物质、其他 DHS 列出的化学物质。DHS 列出的其他化学物质有 N-亚硝基二乙胺硝基钠(N-Nitrosodiethylamine, NDEA)和 N-亚硝基吡咯烷(N-Nitrosopyrrolidine)等。

3 再生水补充饮用水的工艺发展

随着再生水补充饮用水作为一种有效缓解饮用水供应危机的手段越来越被人们所接受和重视，再生水的处理工艺也得到了不断地发展，以应对严格的水质安全标准，保障再生水水质健康风险控制要求。

从 20 世纪 60 年代早期的美国蒙特贝地下水补给工程到 21 世纪初的新加坡 NEWater 再生水工程，经历了 40 多年的发展，再生水补充水源的处理工艺发生了显著变化(见图 2)。1956~1957 年，美国堪萨斯州 Chanute 市为了应对短期的严重干旱，将二级处理出水经过氯胺等消毒工艺处理后补充地下水水源，这就是最初级的以补充饮用水为目的的再生水处理工艺。随着再生水补充饮用水工程的实

表 1 再生水间接补充饮用水的相关水质指标

项目	USEPA			佛罗里达州			华盛顿州	马萨诸塞州
	渗透进入 饮用水含水层	向饮用水 含水层布水 补给地下水	补给地表水	补充饮用 水地表水源	快速地下回灌	回灌地下水 (TDS>3 000 mg/L)		
pH		6.5~8.5	6.5~8.5					6~9
BOD ₅ /mg/L	30			20		20	5	<10
TOC/mg/L		≤3	≤3	≤3(月平均) 5(单个样品)			1.0	
TOX/mg/L		≤0.2				≤0.2(月平均) 0.3(单个样品)		
TSS/mg/L	30			5	5	5	5	<5
浊度/NTU		2	2				0.1(月平均) 0.5(最大值)	<2
总氮/mg/L				10	10	10		<10
余氯*/mg/L		1	1				1	
粪大肠菌群/个/L		不可检出						<140
总大肠杆菌/个/L			不可检出			10(7 d 中位值) 50(单个样品)		
处理工艺要求	二级处理、 消毒	二级处理、 过滤、消毒、 深度处理	二级处理、 过滤、消毒、 深度处理	二级处理、 过滤、高级 消毒	二级处理、 过滤、高级 消毒	二级处理、 过滤、高级 消毒	氧化、混 凝、过滤、 反渗透处 理、消毒	二级 处理、过 滤、消毒

注：*接触时间大于 30 min 测定。

施,处理工艺也得到发展,逐步增加了化学澄清、再碳酸化、过滤以及活性炭吸附等处理单元,以去除再生水中的悬浮颗粒物、有毒有害有机物、重金属等污染物。随着工艺进步、经济发展以及水质标准的不断提高,目前再生水补充饮用水工程项目大都选择了微滤/超滤—反渗透工艺(俗称双膜工艺)和高级氧化的组合工艺。美国的华盛顿州甚至规定,将再生水用于饮用水水源的地下水补给时,必须采用反渗透工艺^[2]。

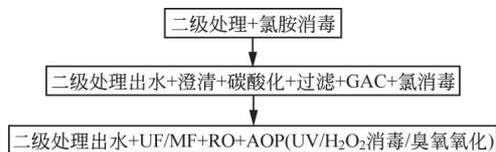


图 2 再生水补充饮用水的处理工艺发展趋势

反渗透(RO)工艺对无机物和有机物都有良好的分离去除效果,无机离子的去除效果随价数的增高而增加;对于有机物相对分子质量超过 200 的物质能够基本去除,相对分子质量在 100~200 的物质能够部分去除。同时采用超滤或微滤作为反渗透的前处理单元,能够稳定 RO 进水水质、降低运行成

本、延长反渗透系统的使用寿命。双膜工艺对溶解性有机物、溶解盐类、金属离子、病原微生物、胶体物质等均有很强的去除能力,后续加入的高级氧化工艺能够降解出水中剩余的中性小分子有机污染物,可达到饮用水水源标准的要求,确保再生水补充饮用水水源的安全性。

将再生水补充地表水水源和地下水水源,在国外,特别是在美国、欧洲以及新加坡等国家和地区已经得到了成功的应用。加利福尼亚州将再生水间接补给饮用水已经有 40 多年的历史,也是美国拥有再生水间接补给饮用水工程实例最多的州。在美国的其他州,例如亚利桑那州、德克萨斯州以及佛罗里达州等也有多个再生水补给饮用水示范工程或实际应用工程^[5]。美国再生水占水源水的比例平均达到 10%左右,其中上奥柯昆再生水在旱季时可达 80%~90%。21 世纪,再生水厂是加州最早的再生水补充地下水水源工程,最初的产水量仅为 1.9 万 m³/d,经过 2004~2007 年的工艺改进后,目前的地下水补充系统产水量达到 26.5 万 m³/d,占地下水量的 18%,

为橘子县 230 万居民提供饮用水^[6]。美国再生水补充饮用水的工艺发展代表了再生水处理工艺的变化趋势,20 世纪 70 年代建成的上奥柯昆再生水厂、21 世纪再生水厂等早期工艺均由石灰澄清、再碳酸化、过滤、活性炭吸附、氯消毒等处理单元组成,然而目前这些再生水厂已经逐渐实现了以膜处理系统和高级氧化技术取代原有处理工艺的转变。

在欧洲的许多城市,虽然再生水补充饮用水的现象屡见不鲜,旱季时,无计划的间接补充水源占城市饮用水源的 70%,但是有计划的将再生水补充水源的案例仍然较少。比利时 Wulpen 再生水厂作为少数的几个有计划再生水补充饮用水工程,最初将 90% 反渗透出水 and 10% 微滤出水混合注入地下,但是随后发现微滤出水中含有除草剂对出水水质产生影响,2004 年 5 月起仅以反渗透出水作为地下水的唯一补充水源^[7, 8]。

新加坡 NEWater 再生水工程于 2000 年正式启用,Bedock 等 4 座再生水厂产水量约为 20 万 m³/d,通过微滤—反渗透工艺产生的出水与水库水混合后,为 50 多家高技术产业和半导体工业提供纯净水。2002 年起,新加坡将一部分再生水补充地表水源,占饮用水供应量的 1%,并有望在 2012 年达到 2.5%^[9,10]。这些新建成的再生水厂都直接采用双膜处理工艺,实现污染物的高效去除。

4 结语

再生水补充饮用水是污水自然循环的人工强化过程,也是解决饮用水危机的有效方法之一。再生水补充饮用水工程经历 40 多年的发展,已经形成一套高效、安全的再生水处理工艺,可有效保障再生水水质安全。

但是,近年来,消毒抗性病原微生物、病毒^[11]、病原虫和抗生素抗性菌^[12]等高风险病原微生物以及高毒性消毒副产物、持久性有机污染物(POPs)、内分泌干扰物(EDCs)^[13]和药品及个人护理用品(PPCPs)等新兴有毒有害化学污染物^[11]不断被发现,给再生水水质安全保障带来新的挑战。深入、系统研究再生水的潜在健康风险以及新兴污染物在污水再生处理工艺、水源地和饮用水工艺中的去除与转化机制,开发高效新型控制技术,对保障公共健康安全具有重要的意义。

参考文献

- 1 Asano T, Burton F L, Leverenz H L, et al. Water Reuse: Issues, technologies and applications. Now York: Metcalf & Eddy, 2007
- 2 美国环境保护署. 污水再生利用指南. 胡洪营, 魏东斌, 王丽莎, 等译. 北京: 化学工业出版社, 2008
- 3 Marks J S. Taking the public seriously: the case of potable and non-potable reused. *Desalination*, 2006, 187(1-3):137~147
- 4 胡洪营, 吴乾元, 黄晶晶, 等. 再生水水质安全评价与保障原理. 北京: 科学出版社, 2010
- 5 Wade Miller G. Integrated concepts in water reuse: managing global water needs. *Desalination*, 2007, 187(1-3):65~75
- 6 Daugherty J L, Deshmukh S S, Patel M V, et al. Employing advanced technology for water reuse in Orange County. Orange County Water District: Fountain Valley, California, USA, 2005. 12
- 7 Van Houtte E, Verbauwhe J. The IWVA Torreele water reuse plant: operational experiences (IWVA). In: Proceeding of ultra-and nanofiltration in water treatment operational experience and research results, Aachen, Germany, 2006
- 8 Bixio D, De heyder B, Cikurel H, et al. Municipal wastewater reclamation: where do we stand? An overview of treatment technology and management practice. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2005, 5(1): 77~85
- 9 Seah H, Poon J, Leslie G, et al. Singapore's NEWater demonstration project: another milestone in indirect potable reuse. *Water*, 2003, 30:43~46
- 10 Khan S, Poser D. Risk assessment and health effects of indirect potable reuse schemes; Centre for water and waste technology. Report NO: 207/01. Centre for Water and Waste Technology School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales; New South Wales, Australia, 2007
- 11 吴乾元. 再生水中有毒有害污染物和病毒的风险评价:[博士后出站报告]. 北京: 清华大环境学院, 2012. 27~48
- 12 黄晶晶. 基于基因控制的再生水安全消毒研究:[学位论文]. 北京: 清华大学环境学院, 2012. 6~15
- 13 孙艳. 污水及再生水中雌激素活性物质的污染水平与生态风险评估[博士后出站报告]. 北京: 清华大环境学院, 2010. 1~3

○ 通讯处: 100084 清华大学环境学院 胡洪营
电话: (010)62794005
E-mail: hyhu@tsinghua. edu. cn
收稿日期: 2012-07-31
修回日期: 2012-08-10