

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.14.003

国外再生水饮用回用的案例分析与启示

陈梓豪, 许 萍

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 水环境国家级实验教学示范中心, 北京 100044)

摘 要: 由于全球水资源的持续紧张,如何更加高效地利用再生水成为亟需解决的问题。近年来再生水饮用回用成为国际研究热点,其具有无需在城市内单独新建配水管网,同时又能提高再生水利用效率等优点。目前,再生水饮用回用在水资源长期短缺的国家已有实际应用,但其尚未在我国引起广泛的关注与重视,也无应用案例。在简要回顾全球再生水饮用回用概况的基础上,分别选取国外间接饮用回用和直接饮用回用的典型案例,对其主要工艺与出水水质、风险管控措施、成本与能耗进行剖析,在此基础上对我国再生水饮用回用提出思考与启示,以期对再生水饮用回用在我国的发展起到借鉴作用。

关键词: 水资源短缺; 再生水饮用回用; 再生水处理工艺

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)14-0013-11

Case Analysis and Enlightenment on Potable Reuse of Reclaimed Water Abroad

CHEN Zi-hao, XU Ping

(National Experimental Teaching Demonstration Center of Water Environment, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Due to the continuous shortage of global water resources, how to use the reclaimed water more efficiently has become an urgent problem to be solved. In recent years, potable reuse of reclaimed water has become an international research hotspot. It has the advantages of no need to build a new distribution network in the city, and can improve the utilization efficiency of reclaimed water. At present, potable reuse of reclaimed water has been practically applied in countries with long-term shortage of water resources, but it has not attracted widespread attention and taken into account in China, and there are no application cases. Based on a brief review of the global overview of potable reuse of reclaimed water, the typical cases of indirect potable reuse and direct potable reuse of reclaimed water in foreign countries were selected, and the main processes and effluent quality, risk control measures, cost and energy consumption were analyzed. On this basis, thinking and enlightenment for potable reuse in China are proposed, which may provide a reference for the development of potable reuse in China.

Key words: water resources shortage; potable reuse of reclaimed water; treatment process of reclaimed water

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110-008-006)
通信作者: 许萍 E-mail: xuping@bucea.edu.cn

污水再生利用被视为有效解决水资源短缺的策略之一,并已成为全球可持续水资源管理的重要组成部分。目前,我国城市再生水主要用于冲厕、绿化或改善生态环境等,但在城市建成区新建再生水管网不仅投资巨大,且实施的难度也较高。此外,不同的再生水用户对水质标准的要求也不同,且易出现与供水管网混接等事故,这些因素在一定程度上限制了我国城市再生水的推广与利用。根据住房和城乡建设部发布的统计年鉴,2018年我国再生水平均利用率仅为17.2%,西部地区更是仅为8.8%。近年来,再生水饮用回用作为一种新的利用途径引起了国际社会的广泛关注与重视^[1-3],而类似的自然回用现象早已在全球普遍存在,即上游城市污水经处理达标后排入河流,下游城市从该河流取水作为饮用水^[4]。

目前,美国、澳大利亚、新加坡、南非和纳米比亚等国家已有再生水饮用回用的实践^[3,5-7],而我国尚无实际应用案例。为此,分别选取国外间接和直接饮用回用的典型案例,对其主要工艺、出水水质、风险管控措施、成本和能耗等展开分析,为扩展我国再生水回用的思路与途径提供参考。

1 再生水饮用回用概况

再生水饮用回用可分为间接饮用回用(Indirect Potable Reuse, IPR)与直接饮用回用(Direct Potable Reuse, DPR)。其中,IPR指有目的地将深度处理后的污水,注入特定的地表或地下水体,经自然净化缓冲后,再进入给水处理系统的回用方式^[4];DPR则指将经过深度处理后的再生水与其他水源混合,直接进入给水处理系统,或直接进入供水管网的回用方式。

1.1 全球再生水饮用回用的主要分布

据不完全统计,全球目前有报道的正在运行的再生水饮用回用项目共24处,每年产水量约 $9.211 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[3]。美国是目前世界上再生水饮用回用量最高的国家,其回用量约占全球的62.68%;新加坡次之,占23.99%;澳大利亚占10.65%,其他国家占2.68%。美国早在1962年便已有再生水饮用回用的先例^[5],因此其是再生水饮用回用实践较早、经验也较为丰富的国家。目前全球再生水饮用回用的主要方式为IPR,其回用量约占全球的98.90%,而DPR仅占1.10%。由于IPR的环境缓冲区对污染物具有稀释、混合和衰减等自然净化效果,并具有较

长的停留时间^[8],因而公众接受度更高。此外,在实际建成的运行项目中,IPR也具有更大的规模,其平均产水量为 $14.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,而DPR仅为 $1.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[3,9],所以IPR能满足更多的用水需求。但也有研究者指出^[10],在IPR过程中,经过深度处理的再生水水质较优,但当环境缓冲区水质较差时,通过低质量的环境缓冲区会导致再生水水质变差,进入后续的给水系统再次处理也会浪费能源与资源,故DPR的效率会更高。然而,DPR再生水虽直接进入给水处理系统或供水管网,但其并不能作为独立水源,仍需与当地其他水源结合使用^[5],因而会导致其在实际应用中受到限制。

1.2 全球再生水饮用回用的主要工艺

目前,再生水饮用回用的主要工艺有微滤(MF)/超滤(UF)+反渗透(RO)+高级氧化(AOP)、臭氧+生物活性炭(BAC)/颗粒活性炭(GAC)或二者混合组成的工艺。其中,应用最广泛的工艺为(MF/UF)+RO+AOP,无论是IPR或是DPR,运用该工艺的再生水饮用回用项目占比均超过50%,而该工艺也被称为“完全高级处理”(Full Advanced Treatment, FAT),被认为是再生水饮用回用的标准工艺^[11]。但是RO在产水过程中会产生高盐浓水,其对地表水、地下水和土壤均会造成较大影响。沿海地区可以将高盐浓水就近排入海中,处置成本相对较低,但在内陆地区往往只能依靠蒸发浓缩、膜蒸馏或深井注入等方式解决,从而大大增加了建设成本与能耗^[12]。这也是目前再生水饮用回用项目较多集中在沿海地区的原因,如在美国共有31个再生水饮用回用项目位于沿海地区,约占其全部的63%^[3]。

2 再生水间接饮用回用案例分析

IPR的实施方式根据环境缓冲区的不同,主要包括地下水补给与地表水补给两类。二者均对再生水水质有着较高要求,以避免对地下水造成污染或导致封闭地表水体富营养化等^[13-14]。并且,为保障IPR的安全性,需要建立有效的安全保障体系。此外,成本和能耗也是IPR的重要影响因素。因此结合实际工程案例,对上述问题展开分析。

2.1 主要工艺与出水水质

美国作为应用再生水饮用回用最为广泛的国家,其于1962年便在加利福尼亚州(以下简称加州)洛杉矶地区建立了全美第一个IPR工程。而在

2004 年建立的加州橙郡地下水补给系统 (Ground Water Replenishment System, GWRS), 更被证明是再生水饮用回用的黄金标准, 甚至发展成为一种国际模式与设计基础^[8, 15-16]。GWRS 的前身为 1976 年建立的 21 号水厂, 规模为 $5.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[3], 用于 IPR 工程进行地下含水层补给, 主要作用是抵御海水入侵和增加供水水源。目前, GWRS 规模已达 $37.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 并计划在 2023 年扩至 49.2×10^4

 m^3/d ,以满足更大的用水需求^[17]。

GWRS 项目生产的再生水需要得到加州公共卫生部和加州区域水质控制委员会的批准才可进行饮用回用。而 GWRS 的进水为污水处理厂二级出水, 故为确保该项目水质满足高品质要求, GWRS 项目采用典型的“完全高级处理”, 主要工艺包括 MF、RO 和 AOP(UV + H₂O₂) 等。工艺流程如图 1 所示, 组成概况见表 1。

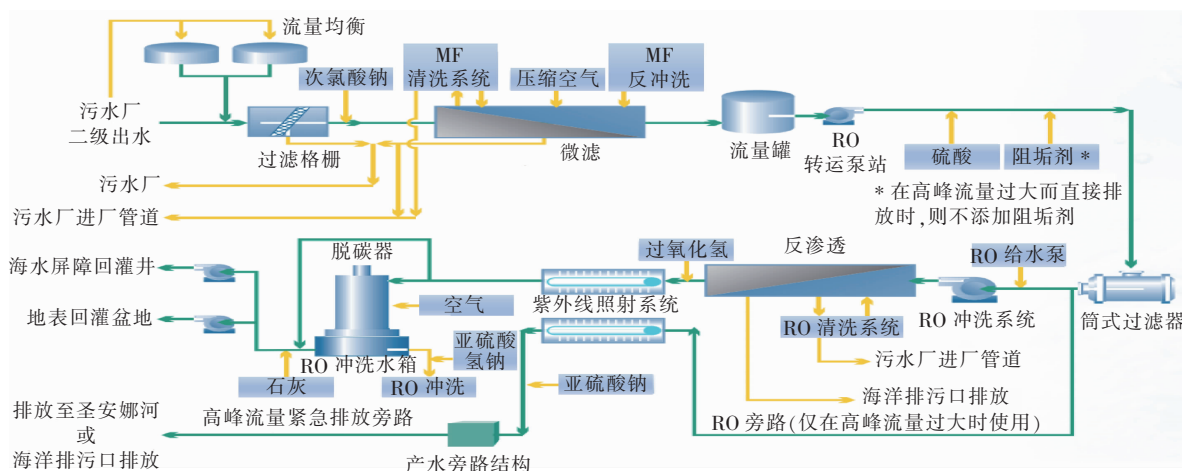


图1 加州橙郡 GWRS 项目工艺流程

Fig. 1 Process flow of GWRS project in Orange County, California

表1 GWRS 主要工艺组成概况

Tab. 1 Overview of the main process components of GWRS

工艺	材料	孔径/ μm	数量	流量/ $(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	回收率/%
MF	聚丙烯中空纤维膜	0.2	34 个	最大总流量:59.43; 平均总流量:44.67	90
	聚偏二氟乙烯中空纤维膜	0.1	2 个		
RO	复合聚酰胺膜	—	20 个工作单元,1 个备用单元, 每个单元包含 150 个压力容器	每个单元:1.89	85
UV/H ₂ O ₂	低压高输出灯	—	共 13 列,每列串联 6 个反应器, 每个反应器 72 盏灯	总流量:43.06	—

GWRS 采用 MF 作为预处理工艺,并在进水中添加次氯酸钠,防止 MF 膜被生物污染。为使 MF 发挥最大效用,其进水浊度保持在 3 ~ 5 NTU,进料压力保持在 0.020 ~ 0.086 MPa。在对 MF 维护方面,每个 MF 单元每 22 min 进行一次反冲洗,以最大程度恢复膜通量,并且每 21 天便会进行一次全面的化学清洗。对 MF 的严格维护,使得 MF 对浊度的平均去除率可达到 97.5%。

在 RO 工艺中,每个 RO 单元由 150 个压力容器组成,分列三级,扩建前的 15 个单元以 78 : 48 : 24 的阵列配置,扩建的 6 个单元以 77 : 49 : 24 的阵列配置。而在高峰流量过大时,进水可以绕过 RO 系

统,排出水厂。GWRS 使用电导率(EC)和总有机碳(TOC)作为证明 RO 有效性的监测指标,当 RO 出水的 $EC < 60 \mu S/cm$ 、 $TOC \leq 0.1 \text{ mg/L}$ 时,说明 RO 工艺正常运行。此外,GWRS 还使用硫酸和阻垢剂对 RO 的进水进行化学预处理,以减缓膜污染的生成,延长使用时间。

GWRS 采用 AOP(UV + H₂O₂) 对再生水进行消毒,对病原体可达到 6-lg 级的去除率。同时,H₂O₂ 在紫外线的光照下会产生羟基自由基,加强氧化效果,从而降解抗紫外线的污染物,如 N - 亚硝基二甲胺(NDMA)和 1,4 - 二噁烷等。

由于 GWRS 在 RO 前添加了硫酸,致使水中二

氧化碳积累,pH 值降低;同时,RO 在去除盐分的过程中降低了出水的碱度。所以,GWRS 通过 6 个汽提脱碳器和添加氢氧化钙(粉末状熟石灰)提高碱度,并将出水 pH 值维持在 6~9,以免管道腐蚀并减少结垢。

最终,GWRS 产水量的 2/3 与加州圣安娜河水混合后(其中再生水占比约为 30%),输送至地表回灌点补给地下含水层,其余 1/3 的再生水则通过井灌注入海水屏障。并且,由于 GWRS 项目临近海

边,RO 产生的高盐浓水可直接通过海洋排污口排出,从而避免了高能耗的浓水处置方式,若其采用蒸发塘或机械浓缩的方式,能耗将会增长 37.5% 或 300.9%^[3]。

在水质方面,不完全统计了 2019 年 GWRS 的进、出水水质以及加州区域水质控制委员会(CRWQCB)所规定的 GWRS 水质许可要求,并与我国《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)进行对比,结果如表 2 所示。

表 2 2019 年 GWRS 水质部分参数与我国地下水质量标准的对比

Tab. 2 Comparison of water quality parameters of GWRS in 2019 and China groundwater quality standards

项 目	进水水质	出水水质	CRWQCB 的水质许可要求	GB/T 14848—2017	
				Ⅲ类标准	I 类标准
浊度/NTU	1.6	0.07	<0.2 或 <0.5	≤3	≤3
pH 值	7.3	8.5	≤6~9	6.5~8.5	6.5~8.5
溶解性总固体(TDS)/(mg·L ⁻¹)	986	49	≤500	≤1 000	≤300
总硬度(CaCO ₃)/(mg·L ⁻¹)	312	33.9	≤240	≤450	≤150
钠/(mg·L ⁻¹)	232	5.7	≤45	≤200	≤100
氯化物/(mg·L ⁻¹)	298	5.2	≤55	≤250	≤50
硫酸盐/(mg·L ⁻¹)	188	0.5	≤100	≤250	≤50
硝酸盐(以氮计)/(mg·L ⁻¹)	8.64	0.67	≤3	≤20	≤2
亚硝酸盐(以氮计)/(mg·L ⁻¹)	0.691	0.033	≤1	≤1	≤0.01
铁/(μg·L ⁻¹)	302	<5	≤300	≤300	≤100
锰/(μg·L ⁻¹)	52.6	<1	≤50	≤100	≤50
铝/(μg·L ⁻¹)	6.2	1.0	≤200	≤200	≤10
钡/(μg·L ⁻¹)	45.3	<1	≤1 000	≤700	≤10
镉/(μg·L ⁻¹)	<1	<1	≤5	≤5	≤0.1
铬(六价)/(μg·L ⁻¹)	0.3	<1	≤50	≤50	≤5
铜/(μg·L ⁻¹)	7.9	<1	≤1 000	≤1 000	≤10
铅/(μg·L ⁻¹)	<1	<1	≤15	≤10	≤5
汞/(μg·L ⁻¹)	<1	<1	≤2	≤1	≤0.1
镍/(μg·L ⁻¹)	4.7	<1	≤100	≤20	≤2
银/(μg·L ⁻¹)	<1	<1	≤100	≤50	≤1
锌/(μg·L ⁻¹)	15.3	<1	≤5 000	≤1 000	≤50
砷/(μg·L ⁻¹)	0.6	<1	≤10	≤10	≤1
氰化物/(μg·L ⁻¹)	3.1	<5	≤150	≤50	≤1
氟化物/(μg·L ⁻¹)	0.97	<0.1	≤2	≤1 000	≤1 000
硒/(μg·L ⁻¹)	1.1	<1	≤50	≤10	≤10
色度(未过滤)/度	na	<3	≤15	≤15	≤5
表面活性剂(MBAS)/(mg·L ⁻¹)	0.20	<0.02	≤0.5	≤0.3	不得检出
总大肠菌群数/(MPN·100 mL ⁻¹)	294.196	<1	≤2.2	≤3.0	≤3.0
三卤甲烷总量/(μg·L ⁻¹)	0.3	3.4	≤80	≤60(三氯甲烷)	≤0.5(三氯甲烷)
氨氮/(mg·L ⁻¹)	3.62	0.43	N/A	≤0.5	≤0.02
总氮/(mg·L ⁻¹)	12.0	0.8	≤5	—	—
高氯酸盐/(μg·L ⁻¹)	na	<2.5	≤6	—	—
电导率/(μS·cm ⁻¹)	1 699	98	≤900	—	—
紫外线透射率@254 nm/%	na	na	>90	—	—
总有机碳(未过滤)/(mg·L ⁻¹)	9.53	0.11	≤0.5	—	—

注: na 表示未检测,N/A 表示未做要求。

根据表 2 各项指标数据,相较于加州区域水质控制委员会的水质许可要求,GWRS 的进水浊度、TDS、总硬度、钠、氯化物、硫酸盐、硝酸盐氮、铁、锰、总大肠菌群数、电导率、总氮和总有机碳等指标偏高,需要着重去除。而经处理后,出水中包括消毒副产物在内的各项水质指标检测值均满足加州区域水质控制委员会的水质许可要求,并实现了无药物残留(检测水平 < 10 ng/L)。而且,所采用工艺对浊度、盐、总有机碳及铁锰等金属元素的去除效果优异,去除率可达 90% 以上,同时对大肠菌群的去除率达到了 99.66%。

表 3 2019 年 GWRS 的每日最低病原体的对数去除量结果

Tab.3 Summary of GWRS minimum pathogen log reduction credits achieved in 2019

lg

项 目	最小对数去除量要求	各处理过程对病原体的对数去除量结果					
		二级处理	MF/次氯酸钠	RO	UV/AOP	地下停留	总计
贾第鞭毛虫包囊	10	0	4.14	1.90	6.00	0	12.3
隐孢子虫卵	10	0	4.14	1.90	6.00	0	12.3
病毒	12	0	0	1.90	6.00	4(5)	12.0

注: 此处二级处理的去除量 GWRS 未计入结果,故数值为 0;各单项和总计值均为最低去除量的单日测量值。

GWRS 监测指标超过 500 种,均可达到或优于州和联邦制定的饮用水标准^[8]。GWRS 项目运行至今,该地区尚未有因其而引发的水源性疾病暴发情况,也没有任何消费者投诉或出现重大水质安全事故^[17]。

2.2 风险管控措施

GWRS 项目采用了包括源头控制、多级处理、运行监控、水质监测和环境缓冲等在内的多屏障安全工程系统,以确保水质安全。在源头控制方面,GWRS 仅收集生活和商业污水,工业废水单独收集并在另一污水厂内处理后排入海洋。并且,GWRS 项目在处理过程中,在 MF、RO 和 AOP 等位置建立了严格的危害分析关键控制点(Hazard Analysis Critical Control Point, HACCP)与关键限值,以证明每日病原体减少量符合地下水补给法规,并连续在线监控。

GWRS 项目 HACCP 设置参数指标、位置点及目标范围等详情如表 4 所示。

此外,根据加州法规第 22 条中的地下水补给准则规定,再生水在地下含水层中每停留 1 个月,即可减少 1-lg 的病毒量;美国环境保护署(US EPA)也规定,再生水在环境缓冲区内的停留时间至少应在 2 个月以上。而 GWRS 在实施期间,其地下停留时间最短在 4 个月以上,通常均会超过 6 个月。

对比我国《地下水质量标准》可知,GWRS 的出水水质也符合我国地下水质量Ⅲ类标准要求,达到了我国集中式生活饮用水水源及工农业用水水质要求。此外,除亚硝酸盐、汞、氰化物、表面活性剂、三卤甲烷和氨氮外,其他指标甚至符合要求更为严格的地下水质量Ⅰ类标准。

对于饮用水安全的重点关注对象病原体而言,GWRS 的出水同样可满足加州对再生水饮用回用病原体去除量的要求。

2019 年 GWRS 最低病原体对数去除量具体结果如表 3 所示。

表 4 GWRS 项目的 HACCP 设置详情

Tab.4 HACCP setting details for GWRS project

项目	参数指标	目标范围	位置点
MF	余氯/(mg·L ⁻¹)	3~5	MF 进水
	浊度/NTU	<5(最佳) ≤20(膜保养) >20(不超过 4 h) <50(任何时间)	MF 进水
	操作压力/psi	3~12.5	MF
	日常压力衰减测试(PDT)/(psi·min ⁻¹)	>0.25(发出工作指令) <0.5(任何时间)	MF
	浊度/NTU	<0.15(最佳) >0.2(不超过 4 h) ≤0.5(任何时间)	MF 出水
RO	余氯/(mg·L ⁻¹)	<5	RO 进水
	电导率/(μS·cm ⁻¹)	<60(单个 RO 单元<110)	RO 产水
	总有机碳(TOC)/(mg·L ⁻¹)	≤0.1	RO 产水
	浊度/NTU	0.1~0.15	RO 产水
AOP	紫外线透过率/%	最小 95(254 nm)	UV/AOP
	电能剂量(EED)/(kW·h·m ⁻³)	最低 0.06	UV/AOP
	平均每列 UV 功率/kW	最低 74	UV/AOP
	每列紫外线剂量计算值/(mJ·cm ⁻²)	最小 111	UV/AOP
出厂水	pH 值	<9	最终产水

注: 1 psi≈0.006 895 MPa;EED 用于证明符合减少 6-lg 病毒量。

2.3 成本与能耗概况

再生水饮用回用的建设成本因地点、产水规模和附属设施而异。GWRs项目由于规模较大导致成本较高,其初始建设成本为31.43亿元,后扩建花费9.35亿元,总成本高达40.78亿元^[3]。其中,GWRs的年运行和维护费用(O&M成本)高达2.75亿元^[12]。通常,基于膜处理的O&M成本为2.95~3.26元/m³,由于膜处理能耗较高,电费能占到O&M成本的41%^[3]。在单位成本方面,不包括管道输送与高盐浓水处置成本时,GWRs项目的单位成本为3.44~3.52元/m³,若包括以上两种成本,其单位成本将会上升至4.06~9.92元/m³^[18]。

GWRs项目在2008年—2016年的平均能耗为1.135 kW·h/m³^[19],该能耗包括MF、RO、AOP、泵送注入和水质实验室能耗。与当地其他替代水源相比,GWRs项目能耗不及从北加州工程调水的1/2,且仅为海水淡化的1/3。同时,与其他常规再生水系统相比,GWRs项目的能耗也相对较低,如Chang等^[20]研究得出韩国的集中式再生水系统能耗为1.224~1.914 kW·h/m³,北京北小河再生水厂MBR+RO工艺能耗总和为1.37 kW·h/m³^[21]。2018年GWRs年度报告显示,其能耗较低的原因是RO采用了新型复合聚酰胺膜,使得RO能以相对较低的压力运行,同时还提高了污染物的去除效果。此外,其AOP仅以0.06 kW·h/m³的能耗,实现对病毒6-lg级的去除量^[19]。而若想大幅降低能耗,则可以采用非膜处理的臭氧-GAC/BAC工艺,可使能耗降至0.37 kW·h/m³左右^[3,22]。

3 再生水直接饮用回用案例

世界上最早的DPR项目在1969年建于纳米比亚的温得和克市。温得和克市位于撒哈拉沙漠以南,因没有合适的环境缓冲区,从而只能选择DPR。此外,美国德克萨斯州(以下简称德州)的大泉市,同样与沙漠相邻,高温干燥的气候条件使得蒸发率较高,环境水体流失速度快;并且其地表水与地下水中TDS含量均较高,作为环境缓冲区效果不佳;同时,当地再生水非饮用回用的大型用水户较少,用户分布密度低,输水距离远,致使新建再生水管网成本过高^[3]。所以,大泉市最终在2013年建造了其DPR项目,经过德州水务发展局详细且独立的评估后,表明其质量符合“饮用水标准”,足以作为供水水源之一^[23]。同时,该项目中再生水出水的TDS含

量远低于地表水源,二者混合后不仅增加了供水量,还改善了原有供水水源的质量。

3.1 主要工艺与出水水质

大泉市的DPR水厂(Raw Water Production Facility, RWPF)采用与加州GWRs相同的“完全高级处理”工艺,但产水规模仅为7 600 m³/d^[23],其主要工艺单元(见图2)包括MF、RO和AOP(UV+H₂O₂)。在MF阶段,其由两个单元组成,进水流量为9 463.52 m³/d,进水浊度要求小于10 NTU,若不能满足要求,进水将会再次回到二级污水厂处理,同时MF反冲洗水也回流至二级污水厂。在RO阶段,其同样包括两个单元,分列两级,以24:12的阵列配置,进水流量为9 009.28 m³/d,回收率为75%。AOP(UV+H₂O₂)则由两个串联UV反应器组成,每个反应器包含72盏灯。每个UV反应器的设计剂量为100 mJ/cm²,在设定透射率为81%的情况下,可达到2-lg的病毒去除量。但实际上UV透射率可达98%以上,故实际UV剂量远大于设计剂量,对病毒的实际去除效果也远高于预计情况。

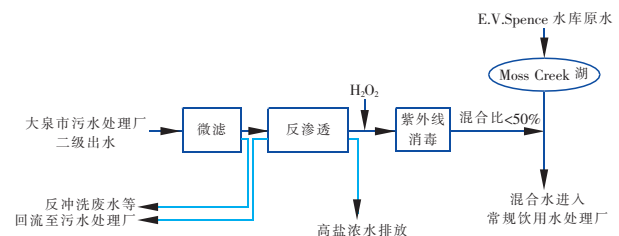


图2 大泉市RWPF直接饮用回用水厂主要工艺

Fig. 2 Main process flow of RWPF project in Big Spring

与大泉市RWPF项目不同,温得和克市的DPR水厂(Goreangab Water Reclamation Plant, GWRP)则采用非膜工艺“臭氧-GAC/BAC”处理,水量规模为 2.1×10^4 m³/d^[9],其工艺流程如图3所示。

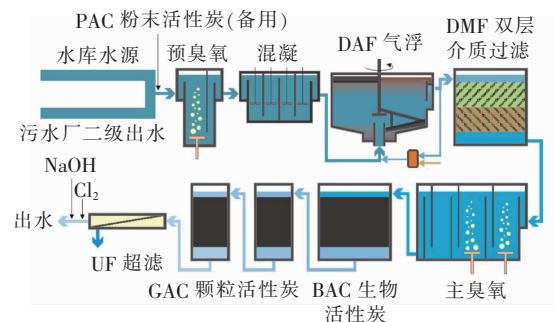


图3 温得和克市GWRP直接饮用回用水厂工艺流程

Fig. 3 Main process flow of GWRP project in Windhoek

温得和克市GWRP工艺设置目的如下^[7]:①预

臭氧主要针对铁、锰进行氧化;②主臭氧则主要针对病毒、细菌进行消毒,并对有机物进行氧化,加强污染物在 BAC 与 GAC 中的去除效果;③GWRP 采用三步式活性炭工艺,包括一座 BAC 滤池及两座 GAC 滤池,后接 UF 对颗粒污染物进行截留;④在再生水出厂前通入氯气并确保余氯含量不小于 1 mg/L,同时添加氢氧化钠以稳定出水。

温得和克市 GWRP 出厂的再生水与经过处理

的水库水及地下水混合后直接进入自来水管网,其中,再生水的平均混合比为 25%,最大混合比为 35%^[9]。而大泉市 RWPF 则将出厂的再生水与地表水在输水总管中混合后,再次进入常规自来水厂进行处理,方才供应。最初大泉市规定再生水混合比不高于 20%,后修改为 50%^[23]。

在水质方面,温得和克市 GWRP 的水质限值标准和实际出水水质^[9,24]如表 5 所示。

表 5 温得和克市 GWRP 水质参数情况

Tab. 5 GWRP water quality parameters in Windhoek

项 目	出水限值	实际出水 (50% 置信区间)	实际出水 (95% 置信区间)
COD/(mg·L ⁻¹)	10(15)	6.6	11
色度/度	8(10)	0.5	0.5
DOC/(mg·L ⁻¹)	3(5)	1.7	2.8
TDS/(mg·L ⁻¹)	1 000(1 200)	838	938
浊度/NTU	0.1(0.2)	0.05	0.10
UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	0.05(0.06)	0.015	0.027
铝/(mg·L ⁻¹)	0.15	0.005	0.05
氨/(mg·L ⁻¹)	0.10	0.05	0.18
铁/(mg·L ⁻¹)	0.05(0.10)	0.01	0.03
异养菌落平板计数(HPC)/(个·mL ⁻¹)	80(100)	0	4
大肠菌群数/(个·100 mL ⁻¹)	0	0	0
粪大肠菌群/(个·100 mL ⁻¹)	0	0	0
叶绿素 a/(μg·L ⁻¹)	1	0.27	2.58
贾第鞭毛虫/(个·100 L ⁻¹)	0 或 5-lg 去除量	0	0
隐孢子虫/(个·100 L ⁻¹)	0 或 5-lg 去除量	0	0
三卤甲烷/(μg·L ⁻¹)	20(40)	35	57

注: 括号内数值为最大允许量。

由于缺少大泉市 RWPF 水厂的基本出水水质信息,故使用同为“完全高级处理”工艺的加州 GWRS 项目与温得和克市的 GWRP 项目进行对比。根据表 5,GWRP 的出水水质在 50% 的置信区间下可以满足其出水限值要求,但在 95% 的置信条件下,其数值则普遍偏高,而氨、叶绿素 a 和三卤甲烷等则略微超出了其限值要求。相比于 GWRS 的出水水质,温得和克市 GWRP 的稳定性则有待提高。此外,采用臭氧-GAC/BAC 工艺的温得和克市 GWRP,对 COD、DOC、TDS、浊度和三卤甲烷的去除相对弱于加州 GWRS 项目,但在铁、锰和大肠菌群及粪大肠菌群的去除上则相对较好。

在重点关注的病原体去除方面,温得和克市 GWRP 项目对病毒的去除量为 12.4-lg~13.9-lg;对细菌的去除量为 15.2-lg~15.7-lg;对原生动物的去除量为 7.9-lg~9.4-lg^[9]。而大泉市 RWPF 项目的

病原体去除效果^[25]如表 6 所示。

表 6 大泉市 RWPF 项目的病原体对数去除量结果

Tab. 6 Summary of RWPF pathogen log reduction credits achieved in Big Spring lg

项 目		病毒对数 去除量	贾第鞭毛虫 对数去除量	隐孢子虫 对数去除量
RWPF	MF	0	4	4
	RO	0	0	0
	AOP	4+	8+	8+
SWTP		4	3	3
总计		8	15	15
德州 DPR 对病原 微生物的处理要求		8	6	5.5

注: SWTP 为常规饮用水处理厂;+ 表示通过两个串联的紫外线反应器实现,每个反应器的 LRV 分别为 2-lg(病毒)、4-lg(原生动物)。

温得和克市 GWRP 项目对病原体的去除同样可达到大泉市的去除要求,并在病毒去除方面优于

大泉市 RWPF 项目。而在对原生动物的去除方面,大泉市 RWPF 项目由于经过 SWTP 的再次处理而占据优势,可达到 15-lg 级的去除效果。

由于 DPR 没有环境缓冲,所以需要更加关注痕量化学物质的去除情况^[26]。在大泉市的 RWPF 项目中,对于痕量化学物质(药品、个人护理产品、全氟化合物、亚硝胺、常规消毒副产物等)的去除效果,德州水发展委员会和 WateReuse 研究基金会在其处理过程中进行了抽样研究^[27],结果表明,在大泉市 RWPF 项目中,药品及个人护理品(PPCPs)在 RO 出水中显著减少(除三氯蔗糖、甲丙氨酯、三氯卡班外),表明 RO 可以去除大部分溶解性的有机痕量成分。同时,经过高级氧化工艺处理后,最终出水中除三氯蔗糖、避蚊胺(浓度为 1 ng/L)外,其他 PPCPs 均未检出,而三氯蔗糖、避蚊胺含量则均低于地表原水的浓度水平。

大泉市 RWPF 对常规消毒副产物(DBPs)的处理也有着良好表现,如在大泉市二级出水中含有大量的三卤甲烷(THMs),而经过处理后则远低于地表水源含量。除了常规 DBPs 外,该项目对新型消毒副产物 N-亚硝基二甲胺(NDMA)及其前体物等 8 种亚硝胺的处理效果也较好。抽样检测结果表明,NDMA 浓度从二级出水的 7.6 ng/L 降至最终出

水的 3.3 ng/L,其前体物则从二级出水的 40 ng/L 降至最终出水的 5.0 ng/L 以下,NDMA 及其前体物在最终出水中的含量均低于地表水源(地表水源中 NDMA 浓度为 3.4 ng/L,其前体物浓度为 16 ng/L)。此外,在二级出水中,全氟化合物的浓度为 1~27 ng/L,而经过 RO 处理后则低于检出限。并且,在处理的全过程中均未检出雌激素化合物,而在地表水源的样品中则检测出了含量为 0.26 ng/L 的雌酮。

3.2 风险管控措施

一般 DPR 的多重屏障工程系统包括源头控制、再生水厂净化和(或)饮用水厂净化,由于缺少环境缓冲,所以 DPR 需要加强对源头的控制。如温得和克市的 GWRP 项目严格将生活污水与工业废水分开收集、分开处理,仅对生活污水进行再生。而德州则规定工业与商业用水户(非居民用水户)均需要满足德州污染物排放许可证(TPDES)的要求才可排放。相对而言,居民排放的有害污染物和汽车尾气等普遍存在的污染物则更加难以控制与监管,需要政府通过其他教育或法律途径进行约束。

在对再生水厂净化过程的风险管控措施中,最常用的是建立 HACCP^[4],大泉市 RWPF 的 HACCP 设置与控制要求^[23]如表 7 所示。

表 7 大泉市 RWPF 项目关键控制点详情

Tab. 7 HACCP setting details for RWPF project in Big Spring

关键控制点	危害风险	参数	临界限值	频率	保护措施
二级出水	增加病原体去除负荷	浊度/NTU	<10	实时在线	排出返回污水厂
MF	膜损坏导致原生动物透过	完整性测试	必须通过	每日及反冲洗后	脱机修复
		单个滤池出水浊度/NTU	<0.15	实时在线	触发额外的完整性测试
RO	膜损坏导致的病原体 and 化学污染物透过	渗透电导率	低于先前读数的 20% 或 40%	实时在线	脱机修复
UV/AOP	病原体不完全失活	紫外线剂量/(mJ · cm ⁻²)	>100	实时在线	停止供水并排放出水
		流量/(10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)	<2.8	实时在线	
		紫外线透过率/%	>40.3	每 3 小时	
		灯泡状态	≤2 盏灯坏	实时在线	
出水	化学物质超标	硝酸盐/(mg · L ⁻¹)	<10	每日	排放出水、调查原因和修复
		亚硝酸盐/(mg · L ⁻¹)	<1.0	工作日	
	存在病原体	大肠杆菌	不能检测到	每周	

为确保出水水质始终稳定可靠,德州环境质量委员会规定该项目必须连续监测膜出水的浊度和反渗透产水率,以间接证明处理过程的完整性与有效性,同时必须保存所有处理过程的记录。此外,DPR

还可以采用与传统的饮用水处理厂类似的做法,通过使用人工存储的方式——工程存储缓冲区(Engineered Storage Buffer,ESB)来监测和评估供水前的水质,通常主要的特定检测指标包括余氯、pH

值、温度和流量等^[23]。而ESB的停留时间则取决于水质快速检测能力,通常在数小时或数天^[28]。此外,ESB也起到传统饮用水厂调节池的作用以稳定水量变化。

3.3 成本与能耗情况

与IPR相比,由于DPR不需要建设环境缓冲区和额外的输水工程或抽水工程,所以在输送和混合上更具有成本效益,其成本可降低2.7%~17.1%^[29]。此外,由于无需建设再生水配水管网,因而DPR的成本仅为再生水非饮用回用的1/2,并且无论是DPR还是IPR,其成本均比海水淡化低约13.8%~45.0%^[18]。

温得和克市GWRP项目^[9]的单位成本为5.70元/m³,其中,输送和混合成本为1.11元/m³。此外,GWRP的生产成本还比远距离调水的成本低37%^[7]。GWRP项目主要采用臭氧+BAC/GAC工艺,相比于“完全高级处理”降低了运营维护成本与能耗,同时因不产生高盐浓水问题,故减少了相应的处理成本。有研究^[29]表明,DPR项目采用臭氧+BAC/GAC工艺,相比于采用RO工艺,其成本可降低25.2%~29.6%。

此外,在能耗方面,温得和克市GWRP的水处理能耗为0.88 kW·h/m³,供水输送能耗为0.46 kW·h/m³,总能耗为1.34 kW·h/m³^[9]。大泉市RWPF由于采用“完全高级处理”工艺,其能耗相对较高,为1.41 kW·h/m³,但若与大泉市常规的科罗拉多河引水工程相比,二者的总能耗则几乎相同^[3]。

4 对再生水饮用回用的思考与启示

从实际工程案例可以看出,目前再生水饮用回用具有一定可行性,其中IPR由于更高的公众接受度而更容易在大部分缺水地区开展应用;而DPR则更属于一种极端的再生水饮用回用方式,无需环境缓冲区而具有更高的效率,较适合于极端干旱、水环境条件较差的地区进行利用,如我国西北严重干旱地区或沙漠地区。在工艺方面,以RO为核心的“完全高级处理”工艺更加适合对水质要求较高的地区,其不仅对浊度、盐、铁和锰等常规污染物的去除表现优异,而且对PPCPs、DBPs等痕量污染物的去除表现良好,同时,通过多屏障安全工程可使得病原微生物满足水质安全要求。但目前再生水饮用回用的成本、能耗仍较高,在未来的推广中可能会对其应

用规模造成限制,故再生水饮用回用更加适合在需要其他水源来填补需求空缺的城市开展应用。此外,通过对国际上的成功案例进行分析可以对我国的再生水饮用回用形成以下几点思考与启示:

① 打破原有标准的限制壁垒,深入开展再生水饮用回用的全流程系统研究。目前我国尚未将再生水饮用回用明确纳入再生水利用范畴,也无相关标准,再生水饮用回用缺乏应用空间。同时,再生水饮用回用需包含源头控制、处理净化技术、水质替代检测指标、环境缓冲影响、相关风险评估、关键控制点、成本与能耗管理等方面,系统非常复杂,需要通过全面深入的研究,为有效预防危害发生、降低风险及保证安全提供技术支持。此外,不同地区可根据自身缺水情况和环境条件,结合再生水饮用回用的不同利用方式的特点,因地制宜地开展试点项目。

② 加强水质快速检测与痕量化合物检测技术的研发,提高安全风险快速反馈与综合评估能力。目前,除了氯等少量参数可采用在线检测仪器进行实时监测外,大多数指标仍需在实验室中检测,耗时较长,不利于水质风险的及时发现和控制,因此亟需研发适合更多参数的在线监测技术。同时,需要提高对药品、化妆品、内分泌干扰物等痕量污染物的检测水平,以在更大范围内了解并控制水质风险。此外,在风险综合评估方面,可参考美国国家水研究所的经验,建立一支由毒理学、化学、微生物学、水文地质学、环境工程、公共卫生和水处理技术等不同交叉学科专家组成的独立评估委员会,持续开展再生水饮用回用项目的定期科学评审,以确保水质的绝对安全。

参考文献:

- [1] ANGELAKIS A, ASANO T, BAHRI A, *et al.* Water reuse; from ancient to modern times and the future[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 6: 26–42.
- [2] DJAMEL G. Water Reuse (WR): the ultimate and vital solution for water supply issues [J]. *International Journal of Sustainable Development Research*, 2017, 3 (4): 36–46.
- [3] Environmental Protection Agency. Potable Reuse Compendium [R]. Washington DC: EPA Office of Water, 2017.
- [4] 胡洪营, 杜烨, 吴乾元, 等. 系统工程视野下的再生水饮用回用安全保障体系构建[J]. *环境科学研究*,

- 2018,31(7):1163–1173.
- HU Hongying, DU Ye, WU Qianyan, *et al.* Building the security guarantee system for water potable reuse in the vision of systematic engineering [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(7):1163–1173 (in Chinese).
- [5] National Research Council. Water Reuse: Potential for Expanding the Nation's Water Supply through Reuse of Municipal Wastewater [M]. Washington: the National Academies Press, 2012.
- [6] LEE H, TAN T P. Singapore's experience with reclaimed water; NEWater [J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2016, 32(4):611–621.
- [7] VAN RENSBURG P. Overcoming global water reuse barriers: the Windhoek experience [J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2016, 32(4):622–636.
- [8] BURGESS J, MEEKER M, MINTON J, *et al.* International research agency perspectives on potable water reuse [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2015, 1(5):563–580.
- [9] LAHNSTEINER J, VAN RENSBURG P, ESTERHUIZEN J. Direct potable reuse—a feasible water management option [J]. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2018, 8(1):14–28.
- [10] LEVERENZ H, TCHOBANOGLOUS G, ASANO T. Direct potable reuse: a future imperative [J]. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2011, 1(1):2–10.
- [11] GERRITY D, PECSON B, TRUSSELL R S, *et al.* Potable reuse treatment trains throughout the world [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua*, 2013, 62(6):321–338.
- [12] SCRUGGS C E, THOMSON B M. Opportunities and challenges for direct potable water reuse in arid inland communities [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, 143(10):04017064.
- [13] 陈卫平, 吕斯丹, 王美娥, 等. 再生水回灌对地下水水质影响研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(5):1253–1262.
- CHEN Weiping, LÜ Sidan, WANG Mei'e, *et al.* Effects of reclaimed water recharge on groundwater quality: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5):1253–1262 (in Chinese).
- [14] 郭瑾, 王淑莹. 国内外再生水补给水源的实际应用与进展 [J]. *中国给水排水*, 2007, 23(6):10–14.
- GUO Jin, WANG Shuying. Practical application and development of surface and underground water sources recharged with reclaimed water [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(6):10–14 (in Chinese).
- [15] HARRIS-LOVETT S R, BINZ C, SEDLAK D L, *et al.* Beyond user acceptance: a legitimacy framework for potable water reuse in California [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(13):7552–7561.
- [16] DUONG K, SAPHORES J D M. Obstacles to wastewater reuse: an overview [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2015, 2(3):199–214.
- [17] ORMEROD K J, SILVIA L. Newspaper coverage of potable water recycling at Orange County Water District's groundwater replenishment system, 2000–2016 [J]. *Water*, 2017, 9(12):984.
- [18] RAUCHER B, CONSULTING S, TCHOBANOGLOUS G. The Opportunity and Economics of Direct Potable Reuse [M]. Alexandria, VA: WaterReuse Research Foundation, 2014.
- [19] SHAHRESTANI H. Feasibility Study for Utilization of Local Water Supplies for the City of Los Angeles: Indirect Potable Water Reuse [D]. California: California State Polytechnic University, 2018.
- [20] CHANG J, LEE W, YOON S. Energy consumptions and associated greenhouse gas emissions in operation phases of urban water reuse systems in Korea [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 141:728–736.
- [21] 李艺, 李振川. 北京北小河污水处理厂改扩建及再生水利用工程介绍 [J]. *给水排水*, 2010, 36(1):27–31.
- LI Yi, LI Zhenchuan. Introduction to the reconstruction and expansion of Beijing Beixiaohe sewage treatment plant and reclaimed water utilization project [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2010, 36(1):27–31 (in Chinese).
- [22] SCHIMMOLLER L, CH2M Hill Cos, KEALY M J, *et al.* Fit for Purpose Water: the Cost of Overtreating Reclaimed Water [M]. Alexandria, VA: WaterReuse Research Foundation, 2014.
- [23] STEINLE-DARLING E, SALVESON A, SUTHERLAND J, *et al.* Direct Potable Reuse Monitoring: Testing Water Quality in a Municipal Wastewater Effluent Treated to Drinking Water Standards [R]. Austin, TX: Texas Water Development Board, 2016.
- [24] DU PISANI P, MENGE J G. Direct potable reclamation

(下转第31页)