



文章栏目: 水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202006114

中图分类号 X523

文献标识码 A

胡大洲, COORAY Titus, 郑利兵, 等. 斯里兰卡 CKDu 病区地下水水质分析及纳滤膜技术在该地区饮用水处理中的应用[J]. 环境工程学报, 2021, 15(6): 1937-1945.

HU Dazhou, COORAY Titus, ZHENG Libing, et al. Water quality analysis of and application of nanofiltration membrane technology in treating groundwater in CKDu affected areas of Sri Lanka[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(6): 1937-1945.

斯里兰卡 CKDu 病区地下水水质分析及纳滤膜技术在该地区饮用水处理中的应用

胡大洲^{1,2,3}, COORAY Titus^{1,2,3,4}, 郑利兵^{1,2}, 钟慧^{1,2}, WERAGODA Sujithra⁵, WEERASOORIYA Rohan⁶, 魏源送^{1,2,3,*}

1. 中国科学院生态环境研究中心, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100085

2. 中国科学院生态环境研究中心水污染控制实验室, 北京 100085

3. 中国科学院大学, 北京 100049

4. 乌瓦韦拉萨大学应用地球科学系, 班杜拉 90000, 斯里兰卡

5. 斯里兰卡供水和排水委员会, 康提 20800, 斯里兰卡

6. 斯里兰卡国家基础科学研究院, 康提 20000, 斯里兰卡

第一作者: 胡大洲(1993—), 男, 硕士研究生。研究方向: 饮用水净化。E-mail: dzhu_st@rcees.ac.cn

*通信作者: 魏源送(1969—), 男, 博士, 研究员。研究方向: 水处理等。E-mail: yswei@rcees.ac.cn

摘要 针对斯里兰卡 CKDu 病区饮用水安全保障的需求, 分别在雨季和旱季调查了斯里兰卡 CKDu 病区北中省 Anuradhapura 地区的地下水水质。结果表明, 地下水中硬度和 F 的平均质量浓度分别超过 $250.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均高于斯里兰卡饮用水标准(SLS 614-2013), 且溶解性有机物(DOC)平均质量浓度大于 $4.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在斯里兰卡 Anuradhapura 地区 Sirimapura 村援建以纳滤(NF)膜技术为核心的地下水源饮用水站, 于 2018 年 9 月投入运行。运行结果表明, NF 水站可有效去除地下水的硬度、F 和 DOC, 硬度、F 的平均截留率分别达 80% 和 85%, DOC 可完全去除, 产水水质满足斯里兰卡国家饮用水水质标准(SLS 614-2013)。NF 水站具有易于操作、便于维护、产水水质优异等优点, 产水呈弱碱性($\text{pH}=7.3$), 且可保留部分对人体有益的矿物质。

关键词 斯里兰卡; CKDu 病区; 地下水; 溶解性有机物; 纳滤

斯里兰卡地处印度洋的核心区域, 是东西方海运的必经之地和“一带一路”沿线的支点国家^[1]。20 世纪 90 年代, 斯里兰卡北中省(North Central Province, NCP)发现了一种不明原因慢性肾病(chronic kidney diseases of uncertain etiology, CKDu), 患者年龄跨度为 17~70 岁, 其中重症患者多为 30~60 岁的男性农民^[2], 但其致病原因至今尚不清楚。世界卫生组织(World Health Organization, WHO)研究表明^[3], 饮用水是影响 CKDu 的主要因素之一, 并推荐为当地居民提供安全饮用水是预防 CKDu 的一种有效方法。地下水是 NCP 干区(dry zone)居民最主要的饮用水水源。已有研究表

收稿日期: 2020-06-18; 录用日期: 2020-10-15

基金项目: 国家自然科学基金中斯国际合作项目(2181101007); ANSO 联合研究项目(ANSO-CR-KP-2020-05)

明, 硬度、F和溶解性有机物 (dissolved organic matter, DOM) 是该地区地下水中最主要的超标污染物^[4-5]。据统计, 2018年斯里兰卡供水管网覆盖率为50.5%, 且主要集中在首都科伦坡和康提等大城市^[6]; 农村地区人口密度低, 居住分散, 市政管网供水覆盖率低, 供水由社区组织 (Community Based Organization, CBO) 提供^[7]。为解决CKDu病区安全饮用水问题, 斯里兰卡政府在CKDu病区大力推广应用反渗透 (reverse osmosis, RO) 膜技术。2016年, CKDu病区已建成700多座RO膜饮用水站^[8], 处理规模 $0.5\sim 3\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。RO水站主要由砂滤、活性炭、微滤 (microfiltration, MF) 和RO构成, 通常采用间歇操作模式, 但存在如下主要问题: 1) RO膜高压运行^[9]和膜污染^[10]造成了水站操作复杂, 维护成本高; 2) RO膜去除了水中包括单价盐类的绝大部分物质, 影响了口感, 致使当地民众对RO产水认可度不高; 3) 大多数RO水站由个人或CBO运营, 其水站运营维护和管理缺乏可遵循的统一规范^[11]。因此, CKDu病区迫切需要引入操作简便、易于维护、水质安全可口、经济高效的饮用水处理技术。

本研究通过现场调研, 考察旱季和雨季条件下斯里兰卡CKDu病区地下水水质特征, 明确主要超标水质参数 (硬度、F和有机碳) 的特征, 据此开发基于纳滤膜的地下水源饮用水处理技术与设备, 以期为斯里兰卡CKDu病区饮用水安全保障提供参考。

1 当地水质情况分析

1.1 采样区域

为调查CKDu病区的地下水水质特征, 分别于雨季 (2016年12月) 和旱季 (2017年5月) 在斯里兰卡北中省Anuradhapura地区进行水质调查。根据人口和CKDu发病率确定采样点, 主要采集浅井、管井及泉水样品, 采样点分布如图1所示。高CKDu发病率区的采样点有35个, 中CKDu发病率区的采样点有26个, 低CKDu发病率区的采样点有17个; 在无CKDu病例的Monaragala和Kandy地区各采集5个水样作为空白点。共计采集水样88个。

1.2 水质分析方法

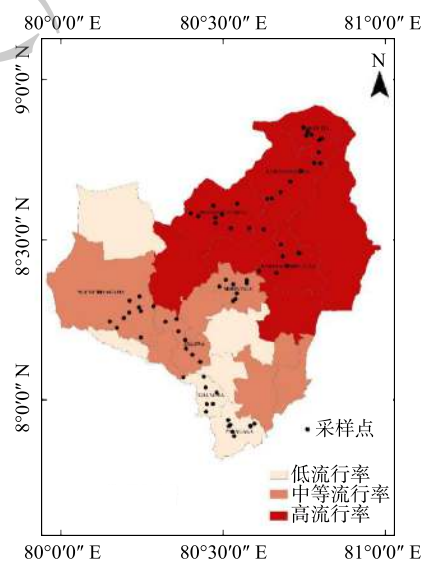
采用便携式水质分析仪 (WTW, Weilheim, Germany) 测量pH值、电导率EC、水温。水样中的金属元素由电感耦合等离子发射光谱 (ICP-OES, Optima 2100 DV, Perkin Elmer, USA) 和电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Agilent 8800, Agilent, USA) 测定; 阴离子由离子色谱 (IC, ICS-1000, Di-onex, USA) 测定; 在此基础上计算硬度浓度 (采用钙和镁离子计算, 如式(1)所示)。水样中溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 的质量浓度通过总有机碳分析仪 (TOC, Elementra, Langensfeld, Germany) 进行分析。

$$H = 2.449C_{\text{Ca}} + 4.11C_{\text{Mg}} \quad (1)$$

式中: H 为硬度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C_{Ca} 为钙离子质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C_{Mg} 为镁离子质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.3 CKDu水质特征分析

水质调查结果显示, CKDu病区地下水的硬度、F、DOC质量浓度较高, 其分布如图2所示。



注: 地图数据来源于斯里兰卡科伦坡卫生部肾脏疾病预防和研究所 (Renal Disease Prevention and Research Unit, Ministry of Health, Colombo, Sri Lanka)。

图1 斯里兰卡CKDu病区地下水水质采样点分布图
Fig. 1 Distribution of groundwater samples sites in CKDu areas of Sri Lanka

如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 在 Anuradhapura 地区, 旱季地下水中硬度较雨季有所升高。雨季地下水硬度均小于 $350.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 而旱季地下水中硬度浓度鲜有小于 $250.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在 Nochchiyagama、Mihintale 和 Kahatagasdigiliya 地区, 地下水中硬度浓度超过 $350.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 超标率在 50% 以上。地下水硬度是指地下水中钙镁离子总浓度, 包括碳酸盐硬度和非碳酸盐硬度。Wasana 在北中省地下水的水质调查报告中显示^[12], 高 CKDu 发病率区和低 CKDu 发病率区地下水中 CaCO_3 浓度为 $121\sim 180 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在无 CKDu 地区, CaCO_3 浓度则为 $61 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; DHARMA-WARDANA 等也报告了类似结果^[13]。在采集的 24 个地下水样品中, 有 23 个样品总硬度 (以 CaCO_3 计) 超过 $140 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这表明北中省地下水中硬度是常见超标污染物, 这可能是因为北中省在旱季高温少雨, 蒸发造成了离子质量浓度的增加^[14]。

研究区域内大部分地下水中 F 的质量浓度较高, 平均浓度超过斯里兰卡饮用水标准 (SLS 614-2013) 中 F 的质量浓度限值 2.5 倍以上。由图 2(c) 和图 2(d) 可知, 无论旱季雨季, 地下水中 F 的质

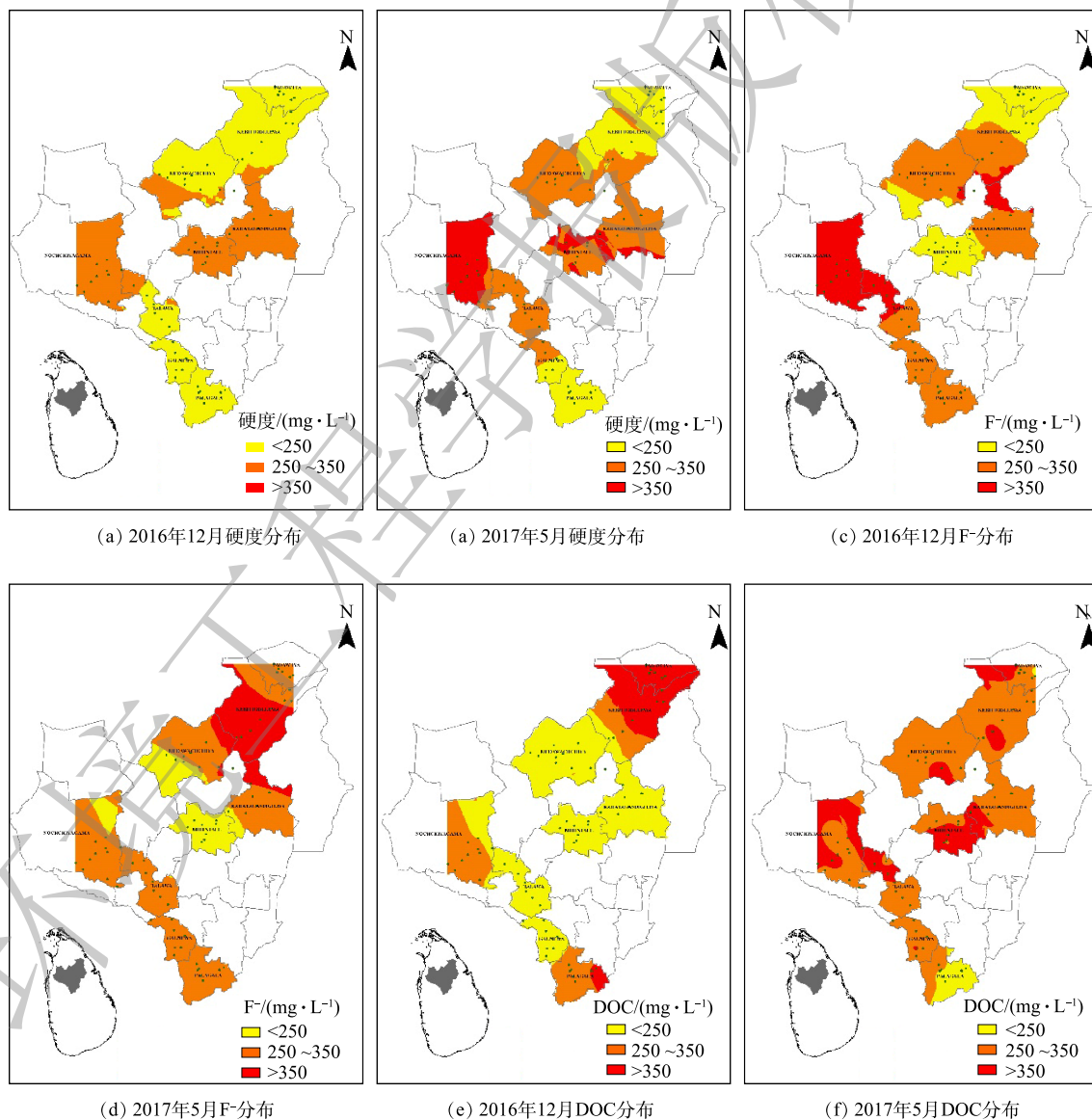


图 2 雨季和旱季时 CKDu 地区地下水中硬度、F⁻、DOC 的分布

Fig. 2 Distribution of hardness, fluorine and DOC in groundwater in CKDu areas in the wet and dry seasons

量浓度大部分大于 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在雨季, F 的质量浓度大于 $3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的区域主要是 Nochchiyagama 地区, 而 Galanewa 和 Mihintale 部分地区地下水中 F 的质量浓度较低 ($1.49\sim 2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); Padawiya、Kebitigollewa 和 Kahatagasdigiliya 部分地区地下水在旱季 F 的质量浓度升高, Nochchiyagama 地区地下水中 F 的质量浓度略下降。在斯里兰卡 CKDu 病区, 很多研究都发现地下水中 F 的质量浓度超标^[15-16]。CHANDRAJITH 等^[17] 研究发现, 在干区大多数地下水中 F 的质量浓度高于 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 超过 50% 地下水水井中 F 的质量浓度高于 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。WICKRAMARATHNA 等^[18] 利用同位素方法分析地下水中的 F, 结果显示在依赖地下水为饮用水水源的 Girandurukotte, Nikawewa, Medawachchiya 和 Padaviya 地区, 地下水中 F 的质量浓度分别为 2.14、5.30、4.90 和 $1.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 个别地区 F 的质量浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均超过斯里兰卡饮用水标准规定的 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。因此, 气候变化、地下水蒸发及过度取用是 F 质量浓度增加的主要原因^[14]。

采样区域地下水中 DOC 分布如图 2(e) 和图 2(f) 所示。DOC 的质量浓度主要集中在 $4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上, 极少数地区地下水中 DOC 的质量浓度小于 $4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在雨季, Padawiya 和 Kebitigollewa 地区地下水中 DOC 的质量浓度为 $8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 明显高于旱季; 相比于雨季, 旱季地下水中 DOC 的质量浓度有所下降。其中, DOC 的质量浓度集中在 $4.0\sim 8.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在其他研究中也有关于 CKDu 病区地下水中 DOC 质量浓度较高的报告^[18]。MADHUBHASHINI 等^[19-20] 在北中省 Anuradhapura 地区的水质分析结果显示, 地下水中 DOC 分子质量为 $900\sim 1\ 800 \text{ Da}$, 主要为难生物降解和高芳香性的有机化合物(包括富里酸、色氨酸和络氨酸)。在高 CKDu 发病率区, 地下水中 DOC 质量浓度为 $(1.68\pm 0.69) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 在无 CKDu 发病率区, DOC 的质量浓度为 $(2.08\pm 0.74) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而最低 DOC 的质量浓度出现在低 CKDu 发病率区, 为 $(1.35\pm 0.17) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

综上所述, Anuradhapura 地区地下水中硬度、F 及 DOC 是 CKDu 病区常见超标污染物, 并随雨季和旱季的转变, 地下水水质发生较为明显变化。表明 Anuradhapura 地区地下水需要经过进一步处理后才可以作为饮用水使用。研究人员采用水质指数分析(water quality index, WQI)对 CKDu 地下水进行水质评价^[21]。在计算 WQI 值时, 将 pH、总硬度、F 和 DOC 等参数考虑在内, 结果显示 CKDu 地区雨季和旱季采集的样品中, 分别只有 3.8% 和 2.6% 水样水质显示为优良, 其余均低于优良水质标准。

2 纳滤水站设计及运行效果

2.1 纳滤饮用水站

基于膜通量、硬度和 DOC 截留率及运行稳定性等参数的实验室研究结果^[4], 本研究选择超低压选择性纳滤膜 DF-90(DF-90404, 北京碧水源)应用于 NF 膜饮用水站(设计规模 $20 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$)。由于单一膜处理技术的使用不足以支撑 NF 膜水站长时间的稳定运行, 故饮用水的流程中包含了预处理。多数情况下, 选择 MF 与 NF、超滤(ultrafiltration, UF)与 NF^[22-23] 等相结合的膜技术作为预处理步骤, 有助于减少膜结垢并延长膜的使用寿命; 使用阳离子交换树脂可以减少水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 降低膜表面的无机结垢; 砂滤器和活性炭吸附也可作为纳滤前的预处理技术, 用于去除颗粒和胶体物质。基于以上原理, 该纳滤水站的工艺流程示意图如图 2 所示。NF 膜饮用水站采用集成化设计, 占地小、方便运输。原水经前置过滤器去除水中较大颗粒, 再经由输水管路送至原水箱, 进水泵将原水箱内水送至多介质过滤器, 利用活性炭和阴离子交换树脂部分去除水中 DOC 和 F 等物质; 多介质过滤器出水送至自动软化器, 软化器内阳离子交换树脂部分去除原水中钙镁等硬度离子。一、二级精密过滤器采用 PP 棉, 依次去除原水中粒径为 $10 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$ 的杂质。最后, 利用高压泵将处理后的水送至 NF 膜过滤, 产水储存于净水箱(箱内有臭氧发生器, 消毒确保水质), 经过紫外消毒后取用。考虑到长期运行, 为进一步减少膜污染, NF 饮用水站设有加药系统和化学清洗系统。加药系统为 NF 膜投加阻垢剂, 防止出现结垢, 盐箱用于树脂再生, 清洗水箱为预处理单元

和NF膜提供化学清洗, 延长膜的使用寿命。

该纳滤饮用水站于2018年9月19日在斯里兰卡 Anuradhapura 的 Sirimapura 村 (纬度-8.159, 经度-80.241/141472E, 328148N) 正式投入运行。该村将抽取的地下水输送至15 m高的水塔 (有效容积75 m³), 通过管道将原水输送至NF膜饮用水站处理。NF膜饮用水站可为该村164户居民 (约750人) 和附近小学1300名学生提供优质饮用水。工艺流程如图3所示。

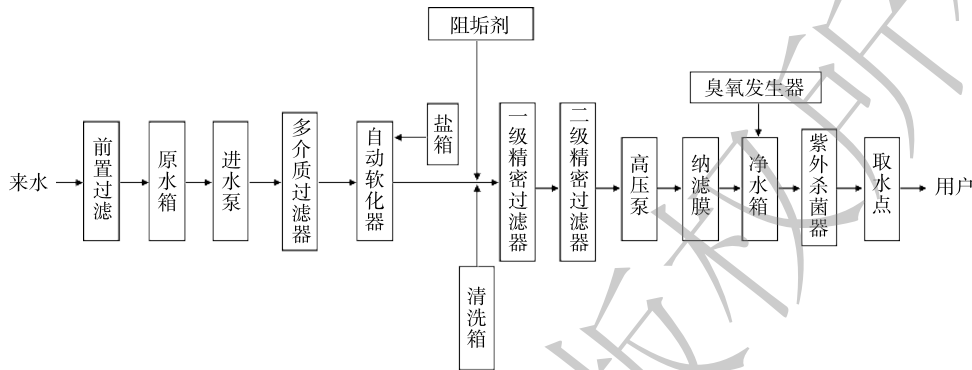


图3 NF水站的工艺流程示意图

Fig. 3 Schematic flow of the pilot NF plant

典型RO水处理工艺一般由砂滤、活性炭、MF和RO膜技术构成, 少有消毒过程。进水泵将原水送至砂滤进行预处理, 经由活性炭吸附后送至MF膜组件, MF出水由压力泵送至RO膜过滤, 产水储存在饮用水箱取用。

2.2 纳滤膜饮用水站运行效果

NF水站的运行压力0.5 MPa, 产水量0.85 m³·h⁻¹。根据斯里兰卡国家供排水委员会 (National Water Supply and Drainage Board, NWSDB) 对该NF水站的水质检测结果, NF水站运行一年多以来, 产水水质稳定, 且对原水中硬度、F和DOC保持了较高的去除率, 结果如图4所示。

如图4所示, NF水站已运行超过547 d (截至2020年3月13日), 产水中pH、硬度和F等指标基本保持稳定。由图4(a)可知, 进水pH为6.5~8, 出水pH多为弱碱性(7.0~7.8), 浓水的pH为6~8.2; 硬度过高会引起饮用水口感较差, 造成设备管路堵塞, 硬水中的钙离子易与食物中的草酸等发生反应, 形成草酸钙、磷酸钙等沉淀, 导致肾结石发病率增加^[24]。由图4(b)可知, NF水站进水中硬度较高 (均大于100 mg·L⁻¹, 部分超过280 mg·L⁻¹), 产水硬度均小于50 mg·L⁻¹, 浓水硬度为

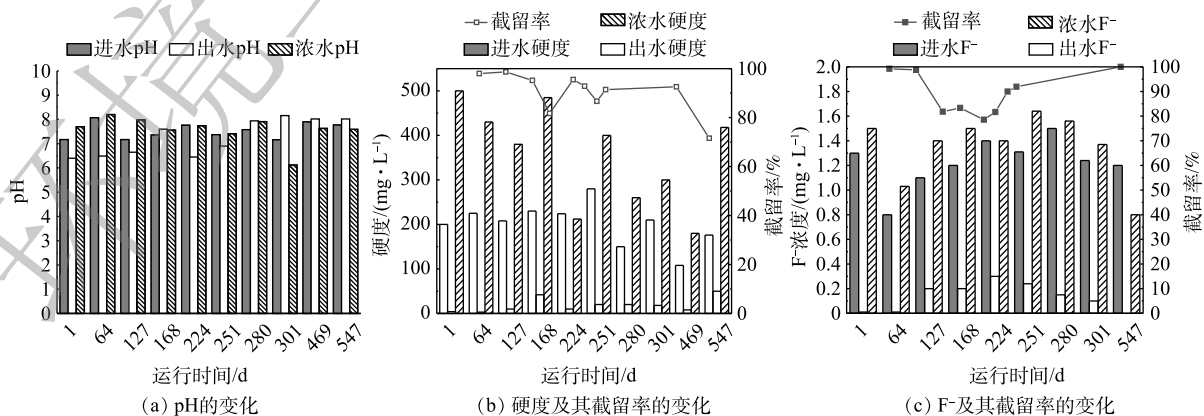


图4 NF水站运行效果

Fig. 4 Performance of the NF plant

200~500 mg·L⁻¹, NF 车站对硬度的截留率可达到 80% 以上, 部分可达 95%。这表明 NF 车站去除了大部分 Ca²⁺、Mg²⁺等离子。长期饮用 F 超标的饮用水会导致氟中毒, 主要表现为氟斑牙和氟骨症^[25]。由图 4(c) 可知, 进水中 F 的质量浓度为 0.8~1.5 mg·L⁻¹, 产水中 F 的质量浓度均小于 0.3 mg·L⁻¹, 浓水 F 的质量浓度大于 1.0 mg·L⁻¹, NF 车站对 F 的截留率在 85% 以上, 部分可达到 95%。这表明 NF 车站可有效去除 F⁻。由于斯里兰卡当地缺少 DOC 检测设备, 因此日常监测过程中并未对水中 DOC 进行监测。本研究将 NF 车站产水样品带回中国进行分析, 结果显示, 经 NF 车站处理后, 原水中的 DOC 几乎被完全去除。

综上所述, 本研究以 NF 膜技术为核心的饮用水车站, 在 CKDu 病区地下水的水质复杂和波动情况下, 不仅有效降低了水中的硬度、F 的质量浓度和 TOC 等指标, 而且保留了一部分人体所需的矿物质和微量元素, 获得了优质安全的饮用水, 满足了当地民众的安全饮用水需求。

2.3 纳滤膜饮用水站与反渗透膜饮用水站的比较

CKDu 病区 RO 车站的日常管理和运营由个人或社区组织负责。例如, 斯里兰卡海军运营的 RO 车站为民众免费提供饮用水, 其他个人和 CBO 管理的 RO 车站, 水的售价为每升 0~0.16 元不等。而 NF 车站产水的售价为 0.04 元, 故 NF 车站产水的价格在当地民众中接受率高。另外, RO 车站需每天进行人工反冲洗, NF 车站的日常维护过程则为自动化, 这也极大地减少了人为因素引起的操作问题。考虑到水压及长期运行, NF 车站将水回收率设置为 40%。

为比较 RO 车站与 NF 车站的产水水质, 本研究分别从 Medawacchiya、Thirappane、Monragala1、Monragala、Monragala、Palagala、Rajangaaya 等 8 个区域收集了 RO 车站的产水, 并与 NF 车站的产水进行对比(见表 1)。大多数 RO 车站产水 pH 为弱酸性。长期饮用弱酸性饮用水会破坏人体 pH 酸碱平衡, 导致免疫力下降, 从而进一步引发各类疾病^[26]。同时, RO 车站的产水几乎完全去除了离子, 而 NF 车站降低了水中大部分硬度、F⁻质量浓度和 DOC, 保留了一部分人体所必需矿物质, 而浓水用做建筑和灌溉用水, 节约了后续处理成本。

表 1 RO 车站与 NF 车站产水比较
Table 1 Comparison of produced water quality in RO and NF plants

处理工艺及水质标准	pH	EC/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	碱度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	硬度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	F ⁻ /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Ca/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	DOC/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
RO ¹⁾	6.48±0.63	37.94±29.52	11.06±8.3	3.2±3.2	0.87±1.16	1.21±1.12	0.87±0.78
NF	7.35±0.7	40.26±35	20±10.95	23.2±15.8	0.17±0.06	11.4±12.85	未检出
SLS 614-2013 ²⁾	6.5-8.5	750	200	250	1	300	—

注: 1) 8个RO车站产水水质的均值±标准偏差; 2) SLS 614-2013为斯里兰卡饮用水水质标准。

综上所述, NF 车站达到了预期设计目标, 为该地区人民提供了安全优质的饮用水。然而, 尽管 NF 车站的设计处理规模为 20 t·d⁻¹, 但由于当地居民居住分散, 加之交通不便, 车站覆盖范围有限等原因, NF 车站实际产水仅为 1.5 t·d⁻¹。因此, 下一步可因地制宜, 建造更加小型的 NF 车站或户用纳滤饮水设备, 以便能更好地解决当地饮用水问题。

3 结论

1) 斯里兰卡北中省 CKDu 病区地下水水质调查结果表明, 该地区地下水的主要水质问题是硬度、氟化物和 DOC 等指标较高, 超过了斯里兰卡饮用水标准 (SLS 614-2013)。

2) 以纳滤膜技术为核心开发了地下水源饮用水处理技术与设备, 并在斯里兰卡 CKDu 病区建设了一座 NF 车站。车站的水质监测结果表明, 运行一年多以来, NF 车站性能稳定, 运行状况良好, 产水符合斯里兰卡国家饮用水标准 (SLS 614-2013)。NF 车站具有易于操作、便于维护、产水水

质优异等优点, 产水呈弱碱性 (pH=7.3), 且能保留一部分对人体有益的矿物质。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国. 商务部国际贸易经济合作研究院对外投资合作国别(地区)指南: 斯里兰卡2019[EB/OL]. [2019-09-01]. <http://www.mofcom.gov.cn/dl/gbdqzn/upload/srilanka.pdf>, 2019.
- [2] NANAYAKKARA S, KOMIYA T, RATNATUNGA N, et al. Tubulointerstitial damage as the major pathological lesion in endemic chronic kidney disease among farmers in North Central Province of Sri Lanka[J]. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 2012, 17(3): 213-221.
- [3] WHO. Chronic kidney disease of uncertain aetiology (CKDU) Sri Lanka[EB/OL]. (2012-02-13)[2020-06-01]. <https://www.dh-web.org/place.names/posts/WHO-on-CKDU.pdf>, 2012.
- [4] COORAY T. Characterization and treatment of groundwater by nanofiltration for CKDu prevailing areas of Sri Lanka[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [5] MAKEHELWALA M. Characterization of DOC and its interaction with calcium in shallow groundwater of CKDu zones in Sri Lanka[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [6] NWSDB. National Water Supply & Drainage Board: Annual Report 2018[R]. Sri Lanka, 2018. [2020-06-01] http://waterboard.lk/web/index.php?option=com_content&view=article&id=197&Itemid.
- [7] KAFLE K, BALASUBRAMANYA S, HORBULYK T. Prevalence of chronic kidney disease in Sri Lanka: A profile of affected districts reliant on groundwater[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 694: 133767.
- [8] JIANG S, LI Y, LADEWIG B P. A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 595: 567-583.
- [9] JAYASUMANA C, RANASINGHE O, RANASINGHE S, et al. Reverse osmosis plant maintenance and efficacy in chronic kidney disease endemic region in Sri Lanka[J]. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 2016, 21(6): 591-596.
- [10] SCHULTE-HERBRUGGEN H M A, SEMIAO A J C, CHAURAND P, et al. Effect of pH and pressure on uranium removal from drinking water using NF/RO membranes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(11): 5817-5824.
- [11] COORAY T, WEI Y, ZHANG J, et al. Drinking-water supply for CKDu affected areas of Sri Lanka, using nanofiltration membrane technology: From laboratory to practice[J]. *Water*, 2019, 11(12): 2512.
- [12] WASANA H M S, ALUTHPATABENDI D, KULARATNE W M T D, et al. Drinking water quality and chronic kidney disease of unknown etiology (CKDu): Synergic effects of fluoride, cadmium and hardness of water[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2016, 38(1): 157-168.
- [13] DHARMA-WARDANA M W C, AMARASIRI S L, DHARMAWARDENE N, et al. Chronic kidney disease of unknown aetiology and ground-water ionicity: Study based on Sri Lanka[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, 37(2): 221-231.

- [14] WIMALAWANSA S J. Molecular and cellular toxicity of fluoride in mystery, tubulointerstitial chronic kidney disease: A systematic review[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 2020, 19(1): 117-147.
- [15] NANAYAKKARA S, SENEVIRATHNA S T M L D, HARADA K H, et al. The Influence of fluoride on chronic kidney disease of uncertain aetiology (CKDu) in Sri Lanka[J]. *Chemosphere*, 2020, 257: 127186.
- [16] KULATHUNGA M R D L, WIJAYAWARDENA M A A, NAIDU R, et al. Chronic kidney disease of unknown aetiology in Sri Lanka and the exposure to environmental chemicals: A review of literature[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, 41(5): 2329-2338.
- [17] CHANDRAJITH R, NANAYAKKARA S, ITAI K, et al. Chronic kidney diseases of uncertain etiology (CKDu) in Sri Lanka: Geographic distribution and environmental implications[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2011, 33(3): 267-278.
- [18] WICKRAMARATHNA S, BALASOORIYA S, DIYABALANAGE S, et al. Tracing environmental aetiological factors of chronic kidney diseases in the dry zone of Sri Lanka: A hydrogeochemical and isotope approach[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2017, 44: 298-306.
- [19] MAKEHELWALA M, WEI Y, WERAGODA S K, et al. Characterization of dissolved organic carbon in shallow groundwater of chronic kidney disease affected regions in Sri Lanka[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 865-875.
- [20] MAKEHELWALA M, WEI Y, WERAGODA S K, et al. Ca^{2+} and SO_4^{2-} interactions with dissolved organic matter: Implications of groundwater quality for CKDu incidence in Sri Lanka[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 88: 326-337.
- [21] COORAY T, WEI Y, ZHONG H, et al. Assessment of groundwater quality in CKDu affected areas of Sri Lanka: Implications for drinking water treatment[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(10): 1698.
- [22] CHANG H, LIU B, YANG B, et al. An integrated coagulation-ultrafiltration-nanofiltration process for internal reuse of shale gas flowback and produced water[J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 211: 310-321.
- [23] TOUATI K, GZARA L, MAHFOUDHI S, et al. Treatment of coastal well water using ultrafiltration-nanofiltration-reverse osmosis to produce isotonic solutions and drinking water: Fouling behavior and energy efficiency[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 200: 1053-1064.
- [24] ABEYWICKARAMA B, RALAPANAWA U, CHANDRAJITH R. Geoenvironmental factors related to high incidence of human urinary calculi (kidney stones) in Central Highlands of Sri Lanka[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2016, 38(5): 1203-1214.
- [25] XI B, WANG X, LIU W, et al. Fluoride and arsenic removal by nanofiltration technology from groundwater in rural areas of China: Performances with membrane optimization[J]. *Separation Science and Technology*, 2014, 49(17): 2642-2649.
- [26] FRASSETTO L, BANERJEE T, POWE N, et al. Acid balance, dietary acid load, and bone effects: A controversial subject[J]. *Nutrients*, 2018, 10(4): 517.

(责任编辑: 靳炜)

Water quality analysis of and application of nanofiltration membrane technology in treating groundwater in CKDu affected areas of Sri Lanka

HU Dazhou^{1,2,3}, COORAY Titus^{1,2,3,4}, ZHENG Libing^{1,2}, ZHONG Hui^{1,2}, WERAGODA Sujithra⁵, WEERASOORIYA Rohan⁶, WEI Yuansong^{1,2,3,*}

1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2. Laboratory of Water Pollution Control Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4. Department of Applied Earth Sciences, Uva Wellasa University, Badulla 90000, Sri Lanka

5. National Water Supply and Drainage Board, Kandy 20800, Sri Lanka

6. Natl Inst Fundamental Studies, Hantana Rd, Kandy 20000, Sri Lanka

*Corresponding author, E-mail: yswei@rcees.ac.cn

Abstract For the provision of safe drinking water supply in CKDu affected areas in Sri Lanka, this study investigated the groundwater quality of Anuradhapura, North Central Province, Sri Lanka in both wet and dry seasons, and developed a nanofiltration (NF) membrane-based water supply technology for CKDu prevalence zones. Results showed that the average concentrations of hardness and F^- exceeded the limit values by the Sri Lankan Potable Water Standards (SLS 614-2013) ($250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ respectively), and the average concentration of dissolved organic matter (DOC) was higher than $4.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in most samples. A pilot NF-based groundwater treatment plant was developed and installed in Sirimapura village of Anuradhapura, Sri Lanka in September 2018, and its performance over one year showed that the NF-based plant can not only effectively remove hardness and F^- in groundwater at their average rejection rates of 80% and 85%, respectively, but also nearly completely remove the DOC. The produced water quality of the NF-based plant was excellent and met the SLS 614-2013. The NF-based plant has advantages of easy operation & maintenance, excellent water quality of produced water with pH at 7.3 and keeping minerals and trace elements beneficial for human health.

Keywords Sri Lanka, CKDu affected area of Sri Lanka; groundwater; dissolved organic matter; nanofiltration