

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.13.006

自备井置换区域管网水质风险评估

赵蓓^{1,2}, 张海祥¹, 李礼^{1,2}, 曹文鹏¹, 李玉仙^{1,2}

(1. 北京市自来水集团有限责任公司, 北京 100031; 2. 北京市供水水质工程技术研究中心, 北京 100192)

摘要: “南水北调”工程全面通水后,受水区城市供水保证率提高。为保护地下水资源,北方某市正在逐步推进自备井区域水源置换工作。该市不同区域自备井水源置换后,碱度、硬度、硝酸盐、氯化物和硫酸盐含量均明显降低,用户水质得到改善,但部分小区在水源置换初期存在浊度和总铁含量升高现象。经管垢取样分析,老旧管道内管垢层厚且疏松,基本以针铁矿为主,稳定性较差,水源置换后管垢中的铁易释放。采用水质差异度指数计算方法,并结合管道现状、新水源消毒剂浓度和用水量调整情况,所确定的“黄水”发生风险级别与实际监测结果基本一致。自备井模拟水源置换试验结果表明,对于管龄>20年的铸铁管,停滞时间为4h时出水浊度和总铁的增加量需3个月才可趋于稳定并达标,管垢内的主要成分在508d试验期间基本与初始相同,稳定性无提高,当水质变化时有再次发生“黄水”的风险。

关键词: 地下水; 自备井; 水源置换; 管垢; 铁释放

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)13-0032-08

Risk Assessment for Water Quality of Distribution Network in Areas Using Self-supply Wells after Water Source Replacement

ZHAO Bei^{1,2}, ZHANG Hai-xiang¹, LI Li^{1,2}, CAO Wen-peng¹, LI Yu-xian^{1,2}

(1. Beijing Waterworks Group Co. Ltd., Beijing 100031, China; 2. Beijing Engineering Research Center for Drinking Water Quality, Beijing 100192, China)

Abstract: After the South-to-North Water Diversion Project completely finished, the water supply guarantee rate of intake cities had been improved. In order to protect groundwater resource, the city in northern China was promoting the water source replacement in areas using self-supply wells. For obvious decrease of the alkalinity, hardness, nitrate, chloride and sulfate, the water quality of consumers in different areas using self-supply wells had all been significantly improved after water source replacement, while the turbidity and total iron of tap water increased in some communities during the initial stage. By analyzing of pipe scales, the corrosion layers in old pipes were thick, loose, and mainly goethite with poor stability, which were tending to release iron after water source replacement. The prediction risk level of “red water”, determined by the water quality diversity index, as well as combining the pipe condition, the disinfectant concentration of new water source and the water consumption, was conformed to the actual monitoring results. According to simulated water source displacement test, it took 3 months for the increased turbidity and total iron in the tap water in cast iron pipes with age greater than 20 years to

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07108002)

stabilize and meet the standard when the stagnation time was 4 h. The main component of pipe scales was basically as same as the initial ones during 508 days of operation, which meant high risk of “red water” recurring when water quality changed.

Key words: groundwater; self-supply well; water source replacement; pipe scale; iron release

自备井在管网建设相对滞后时期,是保障城市供水的重要组成部分。但是,随着城市发展,地下水位下降,设施老化,管理分散,自备井供水突发事件和隐患较多^[1]。特别是受过量开采、地质条件以及人为污染的影响,自备井水质参差不齐,如总硬度、硝酸盐、菌落总数和总大肠菌群合格率较低,供水水质存在风险^[2-3]。为保障居民用水安全,加强地下水资源保护和水源涵养,自备井区域水源置换为公共供水及供水设施改造的需求日益迫切。同时,“南水北调”工程全面通水,不仅缓解了受水区40多座大中城市水资源短缺的局面,提高了市政供水保证率,也为自备井置换提供了充足的水源保障。北方某市正在逐步推进自备井区域水源置换工作,提升自备井用户水质保障水平,充分利用“南水北调”优质水资源,并确保地下水资源可持续利用。

前期研究发现,由于地下水与地表水水质不同,如硬度、硝酸盐等浓度相对较高,而溶解氧(DO)浓度较低,管道内壁形成的腐蚀层较薄且疏松,无硬壳层,在水源切换后,原配水管网对新水源不适应,易出现“黄水”等水质问题^[4-7]。此外,与市政地下水厂不同,自备井供水区域大部分消毒剂浓度低或者未采取消毒措施,管道内的氧化还原状态和微生物群落结构与市政配水管线的差别较大,而这二者对于管垢组成形态,特别是水源置换时管垢的稳定性有直接影响^[8-9]。综上所述,在自备井置换过程中应对管网水质风险进行评估,重点关注水源变化对输水水质的影响。

因此,笔者对该市不同水质特点的自备井供水小区开展水源置换前后主要水质指标的调查,对水源置换风险进行评估及方法优化,并跟踪监测水源置换后自备井管道出水水质和管垢变化,以期对管垢问题突出的自备井管道系统平稳置换提供指导。

1 材料与方

1.1 水样采集及测定

在该市自备井置换区域中选取不同小区的6个管网监测点,对水源置换前后主要水质指标进行监

测。取样前放水5 min,现场测定浊度、余氯和DO浓度;使用聚乙烯瓶于4℃下保存水样,在实验室测定总碱度(以CaCO₃计)、总硬度(以CaCO₃计)、总铁、硫酸盐、氯化物和硝酸盐(以N计)浓度。

浊度:便携式浊度计;总氯、余氯:N,N-二乙基-1,4-苯二胺分光光度法;DO:便携式溶解氧仪;总碱度:酸碱指示剂滴定法;总硬度:EDTA滴定法;总铁:邻菲罗啉分光光度法;硫酸盐、氯化物和硝酸盐:离子色谱法。

1.2 管垢取样与分析

在管道改造施工现场,截取原自备水供水管道,采集管垢样品,用自封袋密封后带回实验室,置于厌氧箱内充分研磨,经真空冷冻干燥后,采用X射线衍射仪(XRD)分析管垢中的晶态物质组成。

1.3 管段试验装置与运行

在上述自备井置换小区中,选取一处管龄20年以上、DN100无内衬铸铁管(编号:G2),采集分析管壁内的管垢后,运送至中试基地,以实际地表水厂出厂水为试验进水,跟踪监测水源置换后管道出水水质和管垢变化。在管道截取、运输过程应减少敲击和振动,防止管道内部管垢脱落,以免影响试验结果。模拟自备井水源置换的试验系统如图1所示。管道进水端装有流量计和阀门控制流速,模拟白天连续通水阶段。模拟夜间停滞阶段时,关闭进、出水阀门,打开出水端进气阀,从位于出水端的取样口处取停滞时间为4 h的出水,检测出水水质。

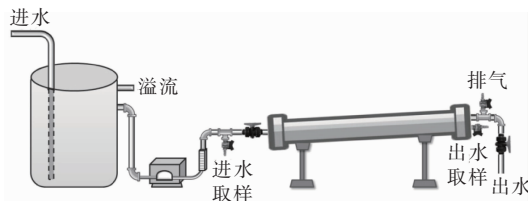


图1 管道试验系统

Fig.1 Schematic diagram of pipe test system

1.4 水质差异度指数计算方法

水质差异度指数(WQDI)计算公式^[10-11]如下:

$$WQDI = \sqrt{|-0.74171A^2 + 0.0790B^2 + |-0.13071C^2 + 0.0652D^2} \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 C 和 D 分别为原通水的 DO、拉森指数(LR)、硝酸盐和总硬度与新水源相应水质指标的标准化数值之差。水质数据标准化采用“Min - Max 法”,即标准化数值 = (原数据 - 极小值)/(极大值 - 极小值)。

2 结果与分析

2.1 自备井置换前后水质跟踪调查

该市地下水主要为浅层水、深层水和基岩水三类,北部地区的水质好于南部地区。因此,结合该市自备井置换计划,分别在东、南、西、北四个方向共选取 5 处,监测自备井置换前后正常用水(非隔夜停滞)水质,基本水质指标汇总如表 1 所示。5 个自备

井供水小区,除 G1 点为 UV 消毒外,其他点均无含氯消毒剂检出。由地下水置换为以“南水”为主的地表水供水后,碱度(以 CaCO_3 计)、硬度(以 CaCO_3 计)、硝酸盐、氯化物和硫酸盐浓度均大幅降低,分别比原地下水源降低至少 53%、48%、43% (除 G5)、69% (除 G3) 和 26%; DO 浓度均提高,比原地下水源提高 25% 以上。一方面,水中溶解性盐类减少,水结垢量减少,用户水质得到改善;另一方面,虽然氯化物和硫酸盐浓度降低,水的腐蚀性降低^[12-13],但是碱度、硬度的降低,会导致管垢的稳定性下降^[8,14]。总之,置换后的水源与原自备井水源的水质差别较大。

表 1 自备井区域水源置换前后基本水质指标比较

Tab. 1 Comparison of water quality parameters in areas using self-supply wells before and after water source replacement

项 目		浊度/ NTU	总铁/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	余氯/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	DO/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	碱度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	硬度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	硝酸盐/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氯化物/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	硫酸盐/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
G1	置换前	0.10	0.01	—	5.89	328	569	17.80	193.0	145.0
	置换后	0.31	0.15	0.06	7.37	97.4	137	0.99	12.2	30.4
G2	置换前	0.17	0.03	—	3.35	270	329	5.47	44.9	58.8
	置换后	0.51	0.22	0.09	7.00	128	148	2.63	13.9	44.3
G3	置换前	0.61	0.03	—	2.90	238	301	2.97	27.7	76.6
	置换后	0.07	0.02	0.09	7.68	109	155	0.76	30.2	38.9
G4	置换前	0.18	0.07	—	7.61	305	400	2.05	55.9	132.0
	置换后	0.23	0.10	0.52	14.00	125	150	1.16	9.38	28.4
G5	置换前	17.60	4.07	—	1.21	355	370	0.06	98.0	67.6
	置换后	0.30	0.02	0.12	7.72	115	140	1.32	17.8	32.5

上述 5 个自备井小区中,G1 和 G2 小区内管道管龄大于 20 年且未更新,在日间放水 30 min 后浊度和总铁均高于置换前,在日间非用水高峰和次日清晨的停滞水浊度、总铁同时升高且超标,存在“黄水”问题。G3 的支管和室内管分别为 5 年内球墨铸铁和镀锌钢管,在水源置换后 10 d 内,日间非用水高峰期的浊度(0.01 ~ 0.97 NTU)和总铁(0.01 ~ 0.23 mg/L)有波动,但均达到了《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求,并且随着置换时间的延长逐渐降低。G4 对部分老旧管道进行更新,因此在水源置换一周后,浊度和总铁在日间非用水高峰期略高于置换前,但均达标。G5 置换前自备井水质较差,放水取样过程中浊度、色度和总铁多次突然升高,对小区内老旧管道改造更新、置换市政供水后,在日间非用水高峰期浊度、总铁均优于置换前而且均达标。

由上述自备井置换前后水质跟踪调查结果可见,对于未进行管道改造更新的自备井小区,置换市政供水后存在浊度和总铁升高现象,非用水高峰时段停滞水易出现“黄水”问题。

2.2 自备井区域管垢分析

该市自备井供水方式始自 20 世纪 70 年代,因为建设年代较早,所采用的管材除了部分为 ABS、PVC、PE 等塑料管材之外,主要为灰口铸铁管和镀锌管,而且产品质量参差不齐^[4]。灰口铸铁管和镀锌管不仅容易腐蚀、结垢,而且因为长期输送无氯消毒的自备井水,内壁管垢层厚且疏松,瘤状管垢(如图 2 所示)也与输送地表水管道内所形成的管垢不同,外壳层薄而且容易破碎,内外层差别不大。因此,由于缺少地表水管垢中大量存在的坚硬致密外壳层的保护,自备井管垢在置换为地表水时容易被破坏而导致铁释放。

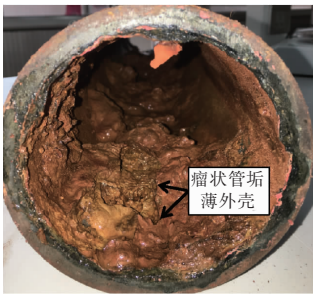


图 2 自备井区域管垢形貌
Fig.2 Photo of pipe scale in an area using self-supply well

在水源置换前,G1、G2、G4 和 G5 这 4 处自备井

小区管道改造施工时,对原通水管道内管垢现场取样,管垢物相组成见表 2。管垢样品中 G2 内/外层和 G4 的内层均基本为针铁矿,G1 内/外层、G4 外层和 G5 管垢内/外两层虽有磁铁矿存在,但含量均低于针铁矿,并有部分纤铁矿和菱铁矿。对于管垢稳定性,有研究提出^[6]磁铁矿与针铁矿质量比(M/G)是腐蚀程度和管垢生长成熟程度的标志,通地下水的管垢 $M/G < 1.0$,未生长成熟的管垢中有较高含量不稳定铁氧化物,水源切换后发生“黄水”风险高。由表 2 可见,这 4 处自备井 M/G 值均小于 1.0,管垢稳定性较差,水源水质变化时管垢内铁释放的风险较高。

表 2 自备井供水区域管垢中各主要晶体形态组分及含量

Tab.2 Main crystals and relative percentages of pipe scales from areas using self-supply wells

项 目	磁铁矿/%	针铁矿/%	纤铁矿/%	菱铁矿/%	绿锈/%	石英/%	方解石/%	高岭石/%	M/G
G1	外层	17	52	14	17	—	—	—	0.33
	内层	11	65	12	12	—	—	—	0.17
G2	外层	—	100	—	—	—	—	—	0.00
	内层	—	95	—	—	5	—	—	0.00
G4	外层	11	42	—	26	—	—	21	0.26
	内层	—	71	—	29	—	—	—	0.00
G5	外层	29	36	—	—	35	—	—	0.63
	内层	15	24	9	15	11	—	26	0.00

综合上述,自备井区域管道内管垢层厚且疏松,瘤状管垢外壳层薄且易破碎,M/G 值均小于 1.0,管垢稳定性较差,水源置换后管垢内铁易释放,导致“黄水”现象发生。

2.3 自备井区域水源置换水质风险评估

运用研究团队前期建立的水质差异度指数(WQDI)的风险判定方法和 5 级分级标准^[10-11],分别计算上述自备井小区水源置换后发生“黄水”的风险,结果见表 3。上述自备井小区置换为地表水后,新通水水质与原自备井水源相比差异度均较大,水质差异度指数均大于 0.35,发生“黄水”的计算风

险均为 1 级,即输送水在管网停滞 2~4 h,水中总铁浓度超标,且程度较严重^[11]。与实际风险级别对照,G1 和 G2 与预测结果基本一致,2 处均为余氯较低、用水量小的管网末端,且小区内管道管龄均大于 20 年。G4 虽然预测结果判定发生“黄水”风险较高,但因新水源余氯较高,小区用水量中等,并且更换了小区内楼前供水管道,因此,浊度和总铁在下午非用水高峰期比置换前虽有升高,但也均达标。G3 支管和室内管分别为 5 年内球墨铸铁和镀锌钢管且用水量大,G5 小区楼前管全部更新,这 2 个小区虽然置换后余氯较低,但无“黄水”现象发生。

表 3 自备井区域水源置换后发生“黄水”风险预测

Tab.3 Risk of “red water” in areas using self-supply wells after water source replacement

项 目	置换后余氯/ (mg · L ⁻¹)	位置	用水量	管道情况	WQDI	风险级别		
						计算值	实际值	调整后
G1	0.06	末端	小	老	0.693	1	2	1
G2	0.09	末端	小	老	0.362	1	1	1
G3	0.09	末端	大	较新	0.397	1	5	4
G4	0.52	前端	中	老,部分更新	0.581	1	4	4
G5	0.12	末端	小	全部更新	0.539	1	5	4

预测结果与实际存在差异,主要有三方面原因: 首先,WQDI 是建立在管壁及管壁内腐蚀层与输送

水水质间化学平衡的基础上,当管道发生变化时,则应以管道更新情况为优先考虑因素,对于全新或管龄短的较新管道,应将发生“黄水”风险分别记为5级和4级。其次,WQDI建立时是针对水源切换前后消毒剂浓度变化较小的市政供水,对于无氯消毒的自备井区域,置换为采用次氯酸钠或氯胺消毒的市政供水,特别是新水源余氯较高的情况,氧化还原电位(ORP)较之前明显升高,可抑制管垢中铁的释放^[8],应结合邻近市政供水区余氯浓度,对计算级别进行1~2级调整。此外,还需考虑用水量的影响。结合实际管道现状、新水源余氯浓度和用水量,对5个自备井小区的风险级别进行调整,调整后的结果见表3,与置换后实际水质监测结果较符合。

综上所述,预测自备井置换小区发生“黄水”风险,不仅需监测置换前后水质,还应根据实际管道现状、新水源消毒剂浓度和用水量的调查和预估结果,对WQDI指数的计算风险级别进行修正,以更好地指导自备井置换工作开展。

2.4 自备井供水管段模拟水源置换试验

2.4.1 出水水质随运行时间的变化情况

试验采用从自备井供水 G2 小区截取的 DN100 铸铁管,通入以地表水为水源、氯胺消毒(总氯平均值为0.56 mg/L)的出厂水,进水其他基本水质指标与表2中G2置换后的水质基本相同。水源置换初期(110 d内),与进水相比,试验管段停滞4 h的出水浊度、总铁增加量和总氯、DO消耗量随运行时间的变化情况见图3。

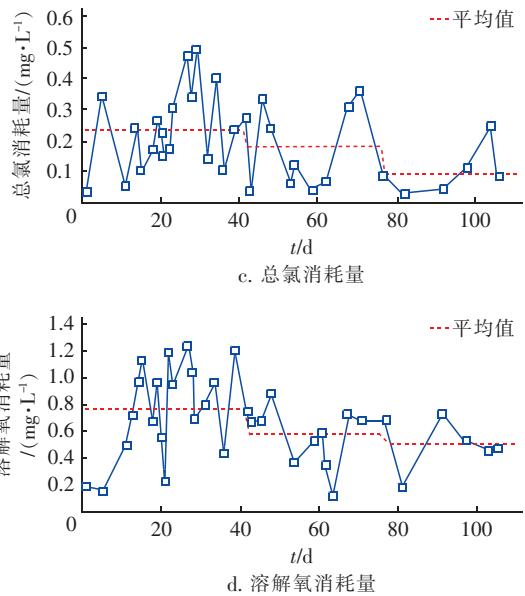
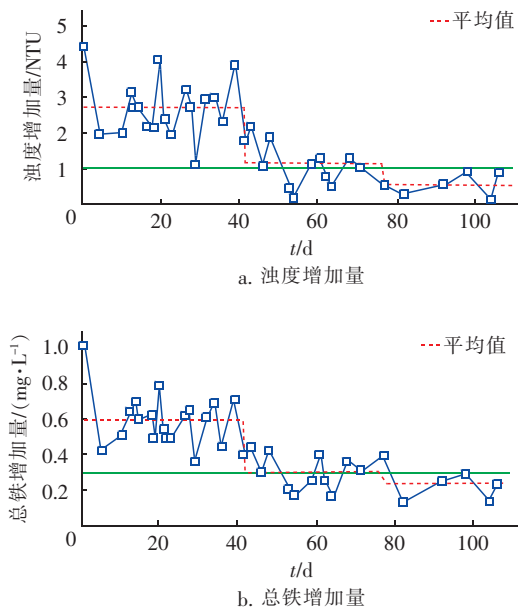


图3 试验管段出水水质指标随运行时间的变化

Fig. 3 Variation of effluent quality parameters from the test pipe with operating time

由图3(a)、(b)可见,试验管段的水源由自备井水置换为地表水后,按浊度和总铁增加量的变化可分为波动期、下降期和趋稳期3个阶段。首先,在模拟试验开始运行的40 d波动期内,停滞4 h的出水浊度和总铁增加量均处于较大幅度波动状态,二者的平均值分别为2.72 NTU和0.60 mg/L,均超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)限值。这表明波动期内,在夜间用水量低、停滞时间长的情况下,该自备井区域发生“黄水”的风险较高,与实地监测结果一致。在下降期(41~75 d),相同停滞时间的出水浊度和总铁增加量波动下降,二者的平均值分别为1.14 NTU和0.305 mg/L,接近标准限值。最终,在76~110 d的趋稳期,出水浊度增加量(平均值为0.52 NTU)和总铁增加量(平均值为0.24 mg/L)基本降至标准限值以下,管垢铁释放量和出水水质趋于稳定。由试验结果可知,水源置换后,自备井管道管垢中铁的释放是一个长期的过程,无调控改造直接置换,对用户水质的影响时间会较长。进入趋稳期后,在第111天打开试验管段并取管垢,由于取样破坏管垢层,之后经240 d的运行,出水浊度和总铁的增加值才再次稳定并达标。

由图3(c)、(d)可见,在第1阶段浊度和总铁增加量的波动期,总氯和DO的消耗量也较大,随着运行时间的延长,浊度和总铁的增加值下降并趋于稳

定后,总氯和 DO 的消耗量也相应降低。这表明在水源置换初期,管垢中释放出的铁离子会消耗水中的总氯和 DO。这是由于管垢中的铁多以溶解性较高的二价铁离子 $\text{Fe}(\text{II})$ 的形式释放进入水中,遇到氧化性强的物质如总氯和 DO,会被氧化成三价铁 $\text{Fe}(\text{III})$ 而沉淀。有研究发现,在一定范围内增加余氯和 DO,有利于管内微环境处于较高氧化态,以阻止管垢中的 $\text{Fe}(\text{III})$ 被还原为 $\text{Fe}(\text{II})$,维持管壁腐蚀层的稳定,抑制管垢中铁的释放^[13,15]。因此,在条件允许的情况下,提高进水含氯消毒剂和 DO 浓度,有利于抑制自备井水源置换初期管网铁的释放。

2.4.2 管垢随运行时间的变化情况

在水源置换前后,跟踪取样分析自备井 G2 管段内管垢随运行时间的变化情况。因该管段内管垢分为薄层外壳和软质内核,故分别取样进行 XRD 和扫描电子显微镜(SEM)分析,结果见表 4 和图 4。

表 4 试验管段管垢物相组成和结晶度随时间的变化

Tab.4 Variation of main crystals and crystallinity degree of pipe scales from the test pipe with operating time

项 目	运行时间/d	物相分析/%		结晶度/%
		针铁矿	石英	
薄层外壳	0	100	—	44
	111	100	—	53
	508	100	—	53
软质内核	0	95	5	50
	111	100	—	57
	508	100	—	59

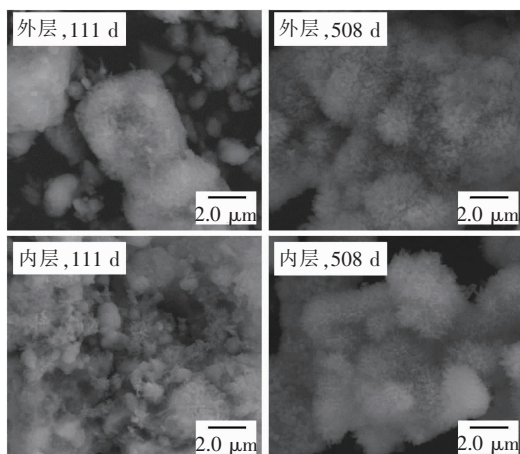


图 4 试验管段管垢微观形态随水源置换时间的变化

Fig.4 SEM images of pipe scales from the test pipe at different operating time

该管段内管垢薄层外壳和软质内核的主要成分均为针铁矿($\alpha - \text{FeOOH}$),无磁铁矿(Fe_3O_4)存在。

前期研究发现^[16],针铁矿与氯化物、碱度、电导率和钙硬度都显著正相关,其中与碱度的相关性最强。这与该处管道长期输送水的氯化物、碱度、电导率和钙硬度较高一致。水源置换后第 111 和 508 天内外两层的主要成分均仍为针铁矿($\alpha - \text{FeOOH}$),但结晶度提高,由 SEM 图片也可以看出,晶体生长更充分,晶体外形也更完整。

由此可见,水源置换后,虽然浊度和总铁增加量经 3 个月左右趋于稳定,但管道内已存在管垢物相组成的变化是一个长期且缓慢的过程,管垢与新水源重新达到相对稳定的化学平衡状态也需要较长时间。由于上述管垢仍为不稳定的类型,当水质再次较大波动时,如夏季余氯、DO 浓度较低时,仍有较大的周期性发生“黄水”的风险。

综上所述,自备井区域因原通水与置换后水源的水质差别大,建议在置换前运用水质差异度指数,结合消毒剂浓度、用水量和管道情况,预测“黄水”发生风险,并对预测的高风险区域,进行管垢取样分析或水源切换模拟试验。对经上述步骤确定的“黄水”发生风险高且管垢稳定性差的区域,建议根据实际条件,通过新水源和原水源配水供水、提高消毒剂浓度等方式维持和促进水源置换初期管垢稳定。对于采用冷镀锌管、无内衬铸铁管的老旧管线,为保证水源置换后水质能快速、持续稳定达标,消除后期水质季节性波动时周期性发生“黄水”的隐患,建议优先采取喷涂或改造更换管道等措施。

3 结论

① 自备井供水区域水源置换后,碱度、硬度、硝酸盐、氯化物和硫酸盐均明显降低,水结垢量减少,用户水质得到改善。但因水质差别大,水源置换初期存在浊度和总铁升高现象,非用水高峰时段停滞水易出现“黄水”问题。

② 自备井区域管道内管垢层厚且疏松,瘤状管垢外壳层薄且易破碎,M/G 值均小于 1.0,管垢稳定性较差,水源置换后管垢内铁易释放。

③ 自备井小区置换后新通水与原水源的水质差异度指数均大于 0.35,发生“黄水”风险的预测结果均为 1 级,结合实际管道现状、新水源消毒剂浓度、用水量的调查和预估结果调整后的风险等级,与置换后实际监测结果较符合,可为自备井置换工作的开展提供指导。

④ 自备井试验管段停滞 4 h 的出水浊度和总

铁的增加量经3个月左右趋于稳定并达标,但水源置换508 d后,该管道管垢的主要成分仍为针铁矿,稳定性较低,有周期性发生“黄水”的风险。

⑤ 对于经预测“黄水”发生风险高且管垢稳定性差的自备井区域,建议根据实际条件,通过新水源和原水源配水供水、提高消毒剂浓度等方式维持和促进水源置换初期管垢稳定,特别是对于采用冷镀锌管、无内衬铸铁管的老旧管线,建议优先采取喷涂或改造更换管道等措施消除隐患。

参考文献:

- [1] 张美云,赵艳玲,王富嵩,等. 北京市朝阳区自备井集中式供水系统风险评估[J]. 中国预防医学杂志, 2017,18(11):810-813.
ZHANG Meiyun, ZHAO Yanling, WANG Fusong, *et al.* Risk assessment for centralized well water supply in Chaoyang District of Beijing [J]. China Preventive Medicine, 2017, 18(11): 810-813 (in Chinese).
- [2] 张熙遥,张灿,史云,等. 我国北方地区四省份自备井水质卫生学调查风险评价[J]. 中华疾病控制杂志, 2019,23(3):345-350.
ZHANG Xiyao, ZHANG Can, SHI Yun, *et al.* Investigation and risk assessment for water quality hygiene in self-supply well water in four northern provinces of China [J]. Chinese Journal of Disease Control & Prevention, 2019, 23(3): 345-350 (in Chinese).
- [3] 张海祥,李嘉铭. 北京市自备井置换存在的问题及应对建议[J]. 给水排水, 2017,43(11):24-27.
ZHANG Haixiang, LI Jiaming. The problem and suggestion of the replacement for self-supply wells in Beijing [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(11): 24-27 (in Chinese).
- [4] 张艳亭. 自备井置换中存在的问题分析及措施[J]. 给水排水, 2016,42(8):33-35.
ZHANG Yanting. The analysis of existing problems and measures for the replacement for self-supply wells [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(8): 33-35 (in Chinese).
- [5] 郭浩,田一梅,张海亚,等. 铁质金属供水管道的内腐蚀研究进展[J]. 中国给水排水, 2020,36(12):70-75.
GUO Hao, TIAN Yimei, ZHANG Haiya, *et al.* Research progress on internal corrosion of iron-metal pipes of water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 70-75 (in Chinese).
- [6] YANG F, SHI B Y, GU J N, *et al.* Morphological and physicochemical characteristics of iron corrosion scales formed under different water source histories in a drinking water distribution system [J]. Water Research, 2012, 46(16): 5423-5433.
- [7] 米子龙,张晓健,郭慧婷,等. 水源切换引发供水管网腐蚀产物释放的控制对策[J]. 中国给水排水, 2013, 29(22):44-48.
MI Zilong, ZHANG Xiaojian, WU Huiting, *et al.* Control of release of corrosion products caused by water source switch in drinking water distribution systems [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(22): 44-48 (in Chinese).
- [8] 米子龙. 水源切换对给水管网水质铁稳定的影响及控制特性研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
MI Zilong. Characteristics of Iron Stability Caused by Water Source Switch and Iron Release Control in Drinking Water Distribution Systems [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015 (in Chinese).
- [9] LI X, WANG H, HU C, *et al.* Characteristics of biofilms and iron corrosion scales with ground and surface waters in drinking water distribution systems [J]. Corrosion Science, 2015, 90: 331-339.
- [10] 赵蓓,李玉仙,王敏,等. 北方某市供水管网对丹江口水适应性预测方法研究[J]. 给水排水, 2015, 41(4):104-109.
ZHAO Bei, LI Yuxian, WANG Min, *et al.* Study on the prediction method on the adaptability of the water supply network on the raw water from Danjiangkou Reservoir in a North China city [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(4): 104-109 (in Chinese).
- [11] 赵蓓,李礼,游晓旭. 多水源供水模式下市政管网水质风险评估[J]. 城镇供水, 2020(4):75-81.
ZHAO Bei, LI Li, YOU Xiaoxu. Study on the water quality risk assessment of municipal pipe network under the mode of multi-source water supply [J]. Journal of China Urban Water Association, 2020(4): 75-81 (in Chinese).
- [12] BENSON A S, DIETRICH A M, GALLAGHER D L. Evaluation of iron release models for water distribution systems [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2012, 42(1): 44-97.
- [13] 刘东坡,靳军涛,张金松. 供水管网“黄水”发生机理及控制措施研究综述[J]. 环境工程, 2017, 35(增刊):204-211, 275.
LIU Dongpo, JIN Juntao, ZHANG Jinsong. Control

- measures and emergency mechanism of red water release in drinking water distribution systems: a review [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35 (S): 204 – 211, 275 (in Chinese).
- [14] 王洋. 给水管网铁稳定性特性及控制技术研究[D]. 北京:清华大学, 2009.
WANG Yang. Characteristics of Iron Stability and Red Water Control in Drinking Water Distribution Systems [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009 (in Chinese).
- [15] 孙慧芳, 石宝友, 吴永丽, 等. 硫酸根、溶解氧和余氯对管垢铁释放的影响[J]. 中国给水排水, 2013, 29 (22): 58 – 63.
SUN Huifang, SHI Baoyou, WU Yongli, *et al.* Effects of sulphate, dissolved oxygen and residual chlorine on iron release from cast iron pipes with different scale characteristics [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29 (22): 58 – 63 (in Chinese).
- [16] 于琳可, 石宝友, 宛云杰, 等. 给水管网铸铁管道的管垢组成与通水水质特征的关系[J]. 中国给水排水, 2014, 30 (20): 32 – 37.
YU Linke, SHI Baoyou, WAN Yunjie, *et al.* Relationship between water quality characteristics and iron corrosion scale composition in drinking water distribution system [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30 (20): 32 – 37 (in Chinese).
-
- 作者简介: 赵蓓 (1983 –), 女, 河南开封人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为供水管网水质保障技术。
E – mail: zhaobei_10@126.com
收稿日期: 2020 – 07 – 29
修回日期: 2020 – 09 – 01

(编辑: 刘贵春)

(上接第 31 页)

- model simulation based on BioWin and dynamic analyses on advanced nitrate nitrogen removal in deep bed denitrification filter [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2019, 42 (2): 199 – 212.
- [4] HUSBAND A, SLATTERY L, GARRETT J, *et al.* Full-scale operating experience of deep bed denitrification filter achieving <3 mg/L total nitrogen and <0.18 mg/L total phosphorus [J]. *Water Science & Technology*, 2012, 65 (3): 519 – 524.
- [5] ZHENG X W, ZHANG S Y, ZHANG J B, *et al.* Advanced nitrogen removal from municipal wastewater treatment plant secondary effluent using a deep bed denitrification filter [J]. *Water Science & Technology*, 2018, 77 (11): 2723 – 2732.
- [6] 张自杰, 林荣忱, 金儒霖. 排水工程[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
ZHANG Zijie, LIN Rongchen, JIN Rulin. *Sewerage Engineering* [M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999 (in Chinese).
- [7] YING D, PENG J, XU X, *et al.* Treatment of mature landfill leachate by internal micro-electrolysis integrated with coagulation: a comparative study on a novel sequencing batch reactor based on zero valent iron [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 229/230: 426 – 433.
- [8] 张亮平. 深床反硝化滤池在市政污水深度处理中的应用[J]. 净水技术, 2015, 34 (5): 109 – 111.
ZHANG Liangping. Application of deep bed filter of denitrification for advanced treatment of municipal wastewater [J]. *Water Purification Technology*, 2015, 34 (5): 109 – 111 (in Chinese).
-
- 作者简介: 张玲玲 (1978 –), 女, 河北唐山人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事水和废水处理技术研究。
E – mail: zll65211@163.com
收稿日期: 2020 – 07 – 20
修回日期: 2020 – 08 – 10

(编辑: 刘贵春)