

工程实例

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.10.020

小型水厂去除硝酸盐应急改造工程实例

许兵¹, 张旭¹, 刘佳², 高志敏³, 成小翔¹

(1. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 2. 济南水务集团有限公司, 山东 济南 250118; 3. 中建八局第一建设有限公司设计研究院, 山东 济南 250100)

摘要: 滨州市农村供水中心相周水厂的原水硝酸根离子出现季节性超标,而现有处理工艺无法在超标期间向周围居民提供安全饮用水。为降低水中硝酸盐的污染,利用水厂现有构筑物,采用投加结构重构树脂的工艺改造方案,可以很好地去除原水中的硝酸根离子,出水硝酸根浓度可以控制在10 mg/L以下。该方案无需增设额外处理设施,适用于占地面积小、资金短缺等情况下对水质的应急处理,可为各类水厂的应急改造提供参考。

关键词: 小型水厂; 硝酸盐; 应急改造; 吸附

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)10-0120-05

Example of Emergency Reconstruction Project for Nitrate Removal in Small Waterworks

XU Bing¹, ZHANG Xu¹, LIU Jia², GAO Zhi-min³, CHENG Xiao-xiang¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Jinan Water Group Co. Ltd., Jinan 250118, China; 3. Design & Research Institute, the First Company of China Eighth Engineering Bureau Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: When the nitrate ion in the raw water of Xiangzhou rural water supply center in Binzhou City exceeded the standard seasonally, the waterworks cannot provide safe drinking water to the surrounding residents by the existing treatment process. In order to reduce the pollution of nitrate in water, the existing structures in the waterworks were employed to reconstruct the process by adding structural reconstruction resin. Thus, the nitrate ion in raw water can be removed well, and the effluent concentration of nitrate can be controlled below 10 mg/L. The process requires no additional treatment facilities, and is adaptable to the emergency treatment of water quality in waterworks under the condition of small footprint and funds shortage, which provides a reference for the emergency reconstruction of all kinds of waterworks.

Key words: small waterworks; nitrate; emergency reconstruction; adsorption

近年来,随着人民生活水平的不断提高,饮用水的卫生安全问题受到广泛的关注,特别是城市供水突发性水质污染问题,已经严重影响到人们的日常生活。当水中硝酸盐含量过高时,会导致人体发生

地方性甲状腺肿,严重时还会对人体的心血管系统造成损害^[1-3]。硝酸盐进入水体后,会使藻类及其他浮游植物大量繁殖,水中溶解氧含量下降,鱼类大量死亡,并进一步造成严重的水体富营养化^[4-5]。

基金项目: 山东省自然科学基金博士基金资助项目(ZR2019BEE058)

现阶段,对水中硝酸盐的去除主要包括化学法^[6-8]、生物脱氮法^[9-10]、离子交换法^[11]、反渗透法^[12]等。上述方法可以很好地去除水中的硝酸盐,但是均需建造处理设施,并需投入相应的空间和资金,因此会增加水厂的日常运行负担。

山东省滨州市博兴县农村供水中心相周水厂去除饮用水中硝酸盐应急处理改造工程,利用水厂现有构筑物,采用投加结构重构树脂的工艺改造方案取得成功,可为小型水厂工艺应急改造提供参考。

1 改造背景

1.1 水厂概况

该水厂建成于2010年5月,其取水水源地为北部黄河流域附近的小型水库。主体处理工艺为絮凝池→沉淀池→砂滤池→加氯池(见图1),占地约3.33 hm²,供水量为2 500 m³/d。主要供应周边乡镇日常生活饮用水及部分工业用水。

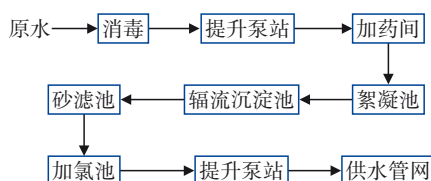


图1 水厂原处理工艺流程

Fig.1 Original process of the waterworks

1.2 存在的问题

自来水厂正常运行期间,其出水水质满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。当夏季水源地原水突发硝酸盐超标时,一般硝酸根离子的浓度为20 mg/L,硝酸根超标一般持续10~15 d,时间较短;同时,突发超标污染时间具有不确定性,多集中在夏季。该水厂由于建设时间较早,现有占地面积比较紧凑,可增加用地面积有限,增设新的处理构筑物较为困难,且企业运营资金也较为紧张,如采用反渗透或离子交换柱等新型设备会面临建设和日常维护运行方面的资金问题。同时,该水厂已规划两年后进行工艺升级改造,目前也不适合增加处理设备。因此,必须采取一种新的应急处理方法来解决硝酸盐超标问题。

水厂受污染期间原水水质见表1。

水厂采用前置加氯(ClO₂)消毒工艺,会产生少量三氯甲烷消毒副产物,浓度为0.026 6 mg/L,同时经检测发现水中含有微量的挥发酚类物质,其浓度

远低于标准限值(0.002 mg/L)。由于有机物浓度较低,对硝酸盐吸附的影响较小,因此考虑采用吸附法应急处理硝酸盐超标问题。

表1 原水水质

Tab.1 Raw water quality

项 目	数值
温度/°C	15
色度/度	6.2
浊度/NTU	0.47
pH	7.86
硝酸盐(以N计)/(mg·L ⁻¹)	11.72~19.31
菌落总数/(CFU·mL ⁻¹)	28
SO ₄ ²⁻ /(mg·L ⁻¹)	208
Cl ⁻ /(mg·L ⁻¹)	124.3

1.3 水厂改造原则

根据水厂现有条件的局限性,对其进行供水改造要充分考虑占地面积、资金、不造成二次污染以及不影响周边村落日常饮用水的需求。改造遵循以下原则:

- ① 不增加新的处理工艺,所有的改造都基于目前已有的处理设备。
- ② 在进行硝酸盐处理改造期间,要确保水厂供水不间断以及水质安全。

工艺改造主要利用现有处理构筑物去除硝酸根^[13]。通过对树脂进行结构重构,形成絮体状树脂,絮体状树脂可在沉淀池中停留更长时间,更好地发挥树脂的吸附作用,提高对硝酸根的吸附效率。具体工艺流程是利用现有的处理构筑物投加D209粉末状硝酸根专用吸附树脂,通过增加絮凝剂投加量,使粉末状树脂形成絮体状树脂,进入沉淀池后发挥对硝酸盐的吸附作用,并以此研究投加结构重构树脂工艺对超标硝酸根的应急处理效果。

2 水厂改造方案及实施效果

2.1 中试

2.1.1 结构重构树脂材料特性

试验选用D209粉末状树脂,其粒径小于0.1 mm,为硝酸根专用吸附树脂。硝酸根选择性系数为硫酸根的1 000倍左右,两者选择性系数差别很大,因此不会吸附硫酸根,不会发生硝酸根“倾泻”问题。试验采用去离子水,测得粉末状树脂对硝酸根的吸附量为30 mg/g。

结构重构树脂吸附曲线如图2所示。

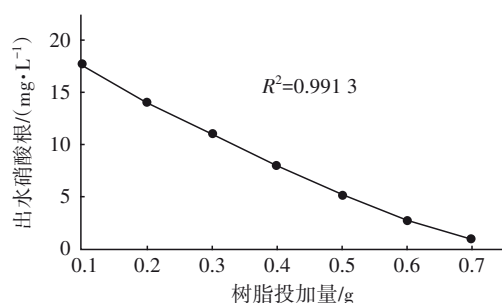


图2 结构重构树脂吸附曲线

Fig.2 Adsorption curve of structural reconstruction resin

2.1.2 投加结构重构树脂去除硝酸根中试

参照传统水处理工艺系统,设计结构重构树脂投加点。两种投加方式:A为直接投加于配水井,通过提升泵湿式投加;B为与絮凝剂一起投加。

中试装置及流程见图3。

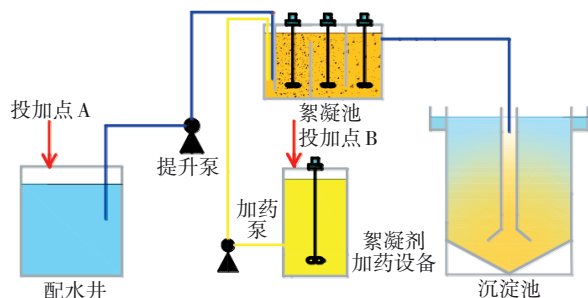


图3 中试工艺流程

Fig.3 Flow chart of pilot-scale experiment

参考水厂的工艺流程,设计硝酸根离子浓度为20 mg/L,通过中试验证树脂对硝酸根的吸附效果和投加节点的优劣。试验分不同投加节点,以此设计增加树脂的投加量和絮凝剂投加量,并对出水效果进行分析。中试处理效果见图4。

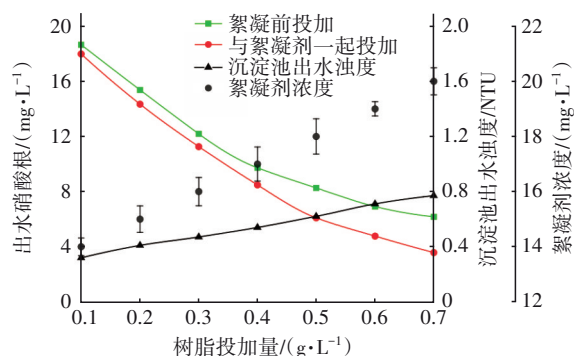


图4 中试处理效果

Fig.4 Treatment effects of pilot-scale experiment

从图4可以看出,采用不同的树脂投加方式对硝酸根的吸附量均低于其饱和吸附量,并且随着树

脂投加量的增大,树脂对硝酸根的吸附效率呈下降趋势,主要是因为树脂采用湿式投加,过量的树脂粉末间相互聚合结团,分散性变差,比表面积减小,导致其吸附效率降低。

树脂和絮凝剂一起投加,其去除效果略高于絮凝前投加,主要是因为粉末状树脂粒径微小,投进絮凝前段的水体时,树脂在水中的分散效果很差,严重时会出现结团现象,树脂结团后其比表面积要远远低于原粉末状,进而会减少与水中硝酸根离子的接触面积,结团后的树脂沉降速率过快,并进一步降低了树脂的吸附效率。而与絮凝剂一起投加可以有效解决树脂分散不均匀的问题。通过搅拌可以使树脂粉末和絮凝剂充分接触,降低了结团的几率,并形成絮状体树脂,因而去除效果略高于在絮凝前投加。

试验过程中,随着树脂投加量增大,应适当提高絮凝剂的浓度。当树脂在水中数量较多时,分散的细微颗粒不易沉降,会对后续处理工艺造成极大的负荷。中试通过适当提高絮凝剂的浓度,可以有效促进絮体的形成和控制结构重构树脂的沉降速度,并且沉淀池的出水浊度始终保持在1 NTU以下,不会对出水水质造成影响。

2.2 改造运行结果及分析

2.2.1 水厂改造工艺控制

在工艺控制过程中,充分利用现有的水厂设备来进行试验。选用粉末状树脂,采用湿式投加方式,在絮凝加药间与聚合氯化铝通过搅拌器混合后投加。所形成的树脂絮体可在沉淀池中缓慢沉降,完成对硝酸根离子的吸附去除,而细小不易沉降的絮体在后续的砂滤工艺中得到最终的去除,保证水体中不含有树脂杂质,减少对水体造成的二次污染。同时,在进行工程试验过程中,可以增加聚合氯化铝的用量,以促进絮体的沉淀,并在试验过程中检测各构筑物出水的硝酸根浓度以及浊度、pH等常规参数。

2.2.2 投加树脂工艺效果分析

参考中试效果,对水厂的受污染原水投加树脂进行吸附处理。该水厂的供水量为2 500 m³/d,硝酸根离子浓度为10~20 mg/L。根据该厂硝酸根离子的浓度变化梯度,设计树脂最大投加量,通过分析最终出水浓度变化,确定投加结构重构树脂方式的可行性和最大处理效率。试验效果见表2。

表2 水厂投加树脂后的运行效果

Tab.2 Operation effect of the waterworks after adding resin

项 目	硝酸根浓度/(mg·L ⁻¹)	10	12	14	16	18	20
超标原水 (加药混凝阶段)	树脂最大投加量/(kg·d ⁻¹)	833.3	1 000	1 166.7	1 333.3	1 500	1 666.7
	PAC投加浓度/(mg·L ⁻¹)	15	16	17	18	19	20
	pH	8.02	8.13	8.44	8.32	8.14	8.26
	加药后水浊度/NTU	152	171	188	197	223	289
出水	沉淀池出水浊度/NTU	42.1	48.1	50.3	50.9	51.1	51.8
	出水硝酸根浓度/(mg·L ⁻¹)	2.26	3.26	4.02	4.67	5.11	5.65
	硝酸根去除率/%	77.3	72.8	71.3	70.8	71.6	71.7
	砂滤池出水浊度/NTU	0.46	0.51	0.55	0.64	0.61	0.71
	浊度去除率/%	99.789	99.778	99.761	99.675	99.726	99.754
	出水 pH	7.23	7.54	7.53	7.42	7.31	7.22

从表2可以看出,投加树脂后最终出水硝酸根浓度为10 mg/L以下,最低为2 mg/L左右。在应用结构重构树脂进行应急吸附处理时,需要提高聚合氯化铝的投加量,改变树脂在沉淀池的沉降速度。因为结构重构树脂中的少量细微颗粒在水中不易沉降,会造成水中浊度升高,所以需要增加絮凝剂的浓度促进树脂的沉降,并以此来降低水体浊度。从检测结果可知,在沉淀池后检测的水体浊度为40~50 NTU,说明絮体的沉降性能提高,并有效降低了后续构筑物的处理负荷。经过砂滤处理后,出水浊度均在1 NTU以下,符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。试验结果表明,通过向水中投加结构重构树脂进行硝酸根离子的应急吸附可以达到很好的处理效果。资金有限的小型水厂突发硝酸根污染时,可以采用此种方法进行改造。

2.2.3 排泥水处理流程

投加结构重构树脂,可以有效促进水中超标硝酸根离子的去除,但会产生大量污泥,因此,在进行应急处理时,应适当增加排泥频率。根据现场试验,污泥主要集中在沉淀池和砂滤池,可根据原水受污染程度选择合适的树脂投加量来减少污泥产量。富含树脂的污泥按照水厂原处理工艺进行处理,流程如图5所示。

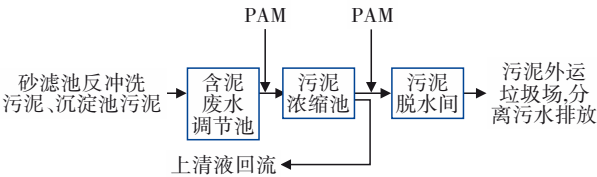


图5 污泥处理流程

Fig.5 Sludge treatment process

2.2.4 改造后的运行成本

工艺改造的成本仅包括加药费用,按照水厂供水量为2 500 m³/d计,成本费用见表3。

表3 工艺改造成本

Tab.3 Cost of process modification

硝酸根浓度/ (mg·L ⁻¹)	树脂最大用量/ (kg·d ⁻¹)	最高成本费用/ (元·d ⁻¹)
10	833.3	6 666.4
12	1 000	8 000
14	1 166.7	9 333.6
16	1 333.3	10 666.4
18	1 500	12 000
20	1 666.7	13 333.6

注: D209树脂价格为8 000 元/t。

从表3可知,树脂投加量是根据水中硝酸根浓度和树脂饱和吸附量确定的。为进一步降低水厂运营成本,可以进行如下优化:在保证出水硝酸根浓度满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的前提下,适量减少树脂的投加量,使水中硝酸根离子的浓度降至标准水平以下即可,同时可进一步降低水厂的污泥产量,树脂无需回收利用。该优化方法可有效提高树脂的吸附效率,减少沉淀池、砂滤池等后续工艺的处理负荷以及污泥产量,并进一步节约经济成本。

3 结论

采用结构重构树脂与絮凝剂混合投加的方法,可应急去除小型水厂微量超标的硝酸根离子。水厂实际工艺改造和运行实践表明,该方法可有效控制出水硝酸根浓度在10 mg/L以下,符合国家水质标准要求。该工艺改造充分利用水厂原有设施,无

需增设新构筑物,可有效满足小型水厂在占地面积有限、资金短缺情况下应急处理的需求。

参考文献:

- [1] ASLAN S, ÇAKICI H. Biological denitrification of drinking water in a slow sand filter [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 148(1):253–258.
- [2] LIU Lei, ZHANG Xiuying, XU Wen, *et al.* Global estimates of dry ammonia deposition inferred from space-measurements [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 730:139189.
- [3] ADIMALLA N. Spatial distribution, exposure, and potential health risk assessment from nitrate in drinking water from semi-arid region of South India [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2020, 26(2):310–334.
- [4] 吴玲,秦红益,朱梦圆,等. 太湖富营养化湖区秋季水体和沉积物中硝化微生物分布特征及控制因素[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(6):1312–1323.
- WU Ling, QIN Hongyi, ZHU Mengyuan, *et al.* Distribution characteristics and controlling factors of nitrifying microorganisms in freshwater and sediment of eutrophic zones in Lake Taihu in autumn [J]. *Journal of Lake Science*, 2017, 29(6):1312–1323 (in Chinese).
- [5] KIM S, PARK S R, KANG Y H, *et al.* Usefulness of tissue nitrogen content and macroalgal community structure as indicators of water eutrophication [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2014, 26:1149–1158.
- [6] 张星星,孟凡生,王业耀,等. 零价铁修复硝酸盐污染地下水的的影响因素[J]. *环境工程*, 2010(增刊):70–73.
- ZHANG Xingxing, MENG Fansheng, WANG Yeyao, *et al.* Research on influencing factors of nitrate removal of groundwater by ZVI [J]. *Environment Engineering*, 2010 (S1):70–73 (in Chinese).
- [7] ZWOLIŃSKA E, SUN Y X, CHMIELEWSKI A G, *et al.* Removal of high concentrations of NO_x and SO_2 from diesel off-gases using a hybrid electron beam technology [J]. *Energy Reports*, 2020, 6:952–964.
- [8] ZHANG X, ZHANG N, ZHOU Y, *et al.* Insight on the microbial activity and microbiome in partial nitrification systems: CuO nanoparticles impact under different pH levels [J]. *Environmental Engineering Research*, 2020, 25(6):960–968.
- [9] LIU J, LI J, WANG X D, *et al.* Rapid aerobic granulation in an SBR treating piggery wastewater by seeding sludge from a municipal WWTP [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 51(1):332–341.
- [10] LIU Y C, SHI H C, XIA L, *et al.* Study of operational conditions of simultaneous nitrification and denitrification in a Carrousel oxidation ditch for domestic wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(3):901–906.
- [11] 童桂华,彭昌盛,贾永刚,等. 离子交换树脂去除水中硝酸盐的研究[J]. *工业用水与废水*, 2008, 39(4):73–76.
- TONG Guihua, PENG Changsheng, JIA Yonggang, *et al.* Removal of nitrate from water by ion exchange resin [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2008, 39(4):73–76 (in Chinese).
- [12] 曹国民,盛梅,迟峰,等. 反渗透法脱除地下水中硝酸盐的中试试验[J]. *净水技术*, 2011, 30(5):7–10.
- CAO Guomin, SHENG Mei, CHI Feng, *et al.* Pilot test for nitrate removal from ground water by reverse osmosis process [J]. *Water Purification Technology*, 2011, 30(5):7–10 (in Chinese).
- [13] 许小燕,张荣,俞蕴芳,等. 源水镍污染的应急处理研究[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(17):130–132.
- XU Xiaoyan, ZHANG Rong, YU Yunfang, *et al.* Emergency treatment of source water accidentally contaminated by nickel [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(17):130–132 (in Chinese).

作者简介:许兵(1977–),男,山东济南人,博士,副教授,主要从事污水生态化处理、雨水综合利用方向的研究。

E-mail: xubing1977@sdjzu.edu.cn

收稿日期:2020-11-04

修回日期:2021-01-04

(编辑:衣春敏)