

• 城镇给排水 •

应对冬季高氨氮原水的饮用水组合处理工艺选择与工程案例分析

许嘉炯^{1,2} 马 军¹ 肖敏杰² 范玉柱² 芮 旻²

(1 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 2 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200433)

摘要 目前冬季时期季节性高氨氮水质净化已成为饮用水处理工艺的区域性难点问题, 将去除氨氮有较为显著效果的人工湿地、生物预处理、砂滤和臭氧—活性炭深度处理工艺等进行组合优化所形成的处理工艺, 是应对冬季季节性高氨氮原水的较好选择。通过对冬季高氨氮原水水质特点和处理工艺的研究与分析, 提出新的优化工艺布置形式, 并结合工程实例, 对运行中存在的问题进行分析讨论。

关键词 冬季 氨氮 人工湿地 生物预处理 砂滤 臭氧—活性炭

1 冬季高氨氮原水水质特点

高氨氮是微污染原水的主要特点之一, 其本身虽然对人体没有危害, 但对净水工艺存在一定影响, 可与水中锰离子形成络合物, 增加锰离子去除难度, 同时高氨氮往往伴随有机污染和金属污染, 使氨氮成为原水微污染程度的指示指标之一。给水常规处理和深度处理工艺可去除部分氨氮, 一般适应于水温不低于 10 °C、氨氮含量低于 3 mg/L 时, 可基本保证出水氨氮低于 0.5 mg/L。当原水连续出现氨氮高于 3 mg/L 时, 一般建议增加生物预处理工艺, 提高氨氮去除效果, 确保出水水质达标。我国东部和北部地区部分地表水源, 在春、夏、秋三个季节水量充沛, 水温高于 10 °C, 氨氮一般在 0.5 mg/L 左右, 常规处理和深度处理工艺可以保证出水水质, 实施生物预处理工艺挂膜效果差; 冬季水量较少, 水温低于 5 °C, 氨氮浓度连续高于 3 mg/L, 即使在常规处理和深度处理工艺前增加生物预处理工艺, 短期内也无法保证出水氨氮达标。

表 1 为浙江某地表水源水部分指标年度水质检测统计。

从表 1 可以看出该水源原水水质较差, 主要超标物质:

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07403003); 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司科研专项(K2012K012)。

表 1 浙江某地表水源水部分指标年度水质检测统计

编号	项目	GB 3838—2002 ² Ⅲ类水限值	年检测指标统计		
			最大	最小	平均
1	水温/°C		27	4	18.9
2	pH	6~9	7.8	7.1	7.41
3	溶解氧/mg/L	≥5	8.3	0.5	3.2
4	COD/mg/L	6	9.92	4.45	6.65
5	BOD ₅ /mg/L	4	8.95	2.38	4.14
6	氨氮(NH ₃ -N) /mg/L	1.0	4.14	0.44	1.68
7	总磷(以 P 计) /mg/L	0.2	0.66	0.15	0.33
8	总氮/mg/L	1.0	8.12	2.75	4.81
9	挥发酚/mg/L	0.005	0.004	<0.002	0.003
10	石油类/mg/L	0.05	0.20	0.06	0.10
11	阴离子表面活性剂 /mg/L	0.2	0.15	<0.1	<0.1
12	铁/mg/L	0.3	3.08	0.26	1.35
13	锰/mg/L	0.1	0.85	0.13	0.36

(1) 有机物污染严重, 原水中有关有机物指标均大幅超标。

a. NH₃-N 最高值达 4.14 mg/L, 最低值为 0.44 mg/L, 平均值为 1.68 mg/L, 变化幅度很大, 年检测指标中高于Ⅲ类水 1.0 mg/L 限值的水质占到检测总数的 77.0%, 年检测指标中高于 3 mg/L 的氨氮值的水质均连续出现在每年 1 月和 2 月。

b. COD_{Mn} 最高值达 9.92 mg/L, 最低值为 4.45 mg/L,

平均值为 6.65 mg/L, 年检测指标中高于 III 类水 6 mg/L 限制的水质占到检测总数的 86.6%。

c. 总氮最高值达 8.12 mg/L, 最低值为 2.75 mg/L, 平均值超过 4.81 mg/L, 远高于 III 类水 1.0 mg/L 限值, 污染情况严重。

d. 溶解氧最高值达 8.3 mg/L, 最低值为 0.5 mg/L, 平均值为 3.2 mg/L, 年检测指标中低于 III 类水限值 5.0 mg/L 的水质占到检测总数 60% 以上, 这也从侧面表明水体有机物污染较重, 严重影响了水体的自净能力。

(2) 铁锰超标, 铁最高值达 3.08 mg/L, 最低值为 0.26 mg/L, 平均值达 1.35 mg/L, 年检测指标几乎均超过集中式生活饮用水地表水源地补充项目 0.3 mg/L 限值; 锰最高值为 0.85 mg/L, 最低值为 0.13 mg/L, 平均值超过 0.36 mg/L, 超过集中式生活饮用水地表水源地补充项目 0.1 mg/L 限值。

(3) 总磷最高值为 0.66 mg/L, 最低值为 0.15 mg/L, 平均值达 0.33 mg/L, 年检测指标几乎均超过 III 类水 0.2 mg/L 限值。

可见, 该水源原水水质有机物污染和铁锰等金属污染物均较为严重, 其中冬季季节性高氨氮已成为净水工艺的区域性难点问题。

2 除氨氮工艺特点分析

从类似工程经验分析, 对于去除氨氮有较为显著效果的净水工艺主要有人工湿地、生物预处理、砂滤和臭氧—活性炭深度处理工艺。

2.1 人工湿地去除氨氮

人工湿地技术是近年来受到广泛关注的生物处理和修复技术, 其目的是建立一个综合的生态系统, 应用生态系统中物种共生、物质循环再生原理, 建立结构与功能协调, 在促进水中污染物质良性循环的条件下, 充分发挥各类资源的生产潜力, 防止环境的再污染, 获得净水处理与资源化的最佳效益。目前, 人工湿地技术开始应用于水源生态湿地修复工程, 浙江类似地表河道水源已有此类工程经验, 参考工程将整个水厂水源生态湿地治理工程大致分为 4 个区块, 它们分别是 I 缓冲自净区、II 湿地根孔生态净化区、III 植物园净化区、IV 引水区。工艺流程见图 1。

人工湿地出水部分水质指标见表 2。

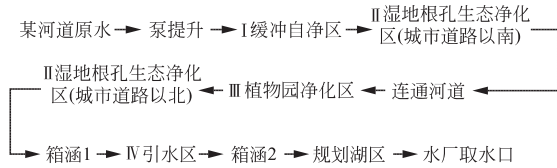


图 1 水源生态湿地修复工程工艺流程

表 2 浙江某水厂水源人工湿地部分水质统计

编号	项目	GB 3838—2002 III 类水限值	年湿地进水			年湿地出水		
			最大	最小	平均	最大	最小	平均
1	水温/°C		29	6	19	33	4	19
2	pH	6~9	7.6	7.0	7.3	7.6	7.2	7.5
3	溶解氧/mg/L	≥5	8.6	0.4	3.4	10.01	2.71	5.88
4	COD _{Mn} /mg/L	6	9.80	3.26	5.79	8.81	3.31	5.56
5	BOD ₅ /mg/L	4	6.30	<2	3.28	4.91	<2	2.50
6	NH ₃ -N/mg/L	1.0	4.34	0.12	1.27	3.76	<0.02	0.86
7	总磷/mg/L	0.2	0.61	0.26	0.43	0.58	0.18	0.33
8	总氮/mg/L	1.0	6.38	1.93	4.17	7.38	1.48	3.58
9	阴离子表面活性剂/mg/L	0.2	0.12	<0.05	0.13	0.13	<0.05	<0.05
10	铁/mg/L	0.3	2.97	0.21	1.17	2.69	0.10	0.96
11	锰/mg/L	0.1	1.21	0.03	0.28	0.95	<0.05	0.23

从表 2 可以看出经过人工湿地后, 原水溶解氧、氨氮、BOD₅、总氮、总磷等指标均有明显改善, 且其生物处理延伸作用显著, 可有效地提高后续常规处理构筑物对有机物的去除效果, 尤其在改善后续混凝沉淀和滤池去除氨氮方面效果显著。水源人工湿地工程实施后, 在控制原水有机物污染和改善原水营养化趋势方面将有较为显著的效果, 经过人工湿地处理后, 出水氨氮可控制在 4 mg/L 以下。

2.2 生物预处理去除氨氮

生物预处理工艺一般设置在常规的净水工艺流程之前, 主要利用生物填料上微生物的氧化分解及转化功能, 以水中有机物(少数以无机物)作为微生物的营养, 通过微生物的新陈代谢作用, 对水中的有机污染物、氨氮、亚硝酸盐及铁、锰等无机污染物进行初步去除降解, 其中对氨氮的去除效果尤为明显。通过生物预处理既可改善原水的混凝沉淀性能, 也可利用其生物延伸作用减轻常规处理和后续处理过程的负荷。同时, 通过可生物降解的有机物的去除,

还能减少水中“三致”物前体物的含量,减少消毒剂需要量及消毒副产物生成量,增加饮用水的生物稳定性。目前比较成熟的、能用于大规模净水厂实际运行的生物预处理工艺有:弹性填料生物接触氧化池、生物滤池、悬浮填料生物接触氧化池和轻质滤料生物滤池。

对类似水源的 N 水厂生物接触氧化预处理氨氮去除效果进行分析,见图 2。一年多的生产运行结果表明:生物池氨氮的去除效果主要受水温影响,水温较高时($>10\text{ }^{\circ}\text{C}$),一年的 3~10 月,该时期内氨氮平均去除率为 75.58%,水温较低时($5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$),11 月~次年 2 月,生物池氨氮平均去除率为 50.5%左右。运行一年来原水氨氮最大值 4.14 mg/L,平均值 1.62 mg/L,生物池出水氨氮平均值 0.51 mg/L,生物池氨氮平均去除率为 67.3%,出水氨氮浓度比较稳定。

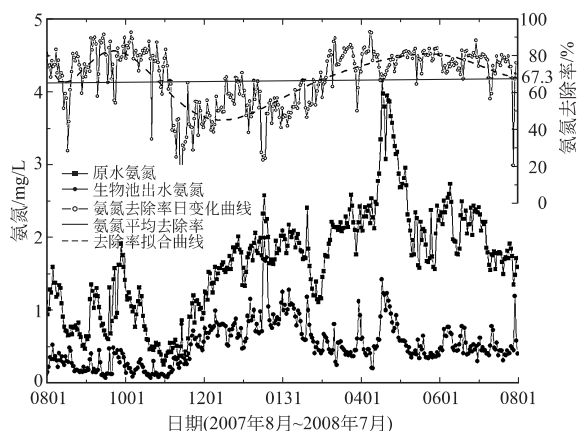


图 2 N 水厂生物池氨氮去除效果

2.3 砂滤去除氨氮

在溶解氧充分且无前加消毒措施条件下,砂滤可通过生物作用具备一定的除氨氮和铁锰等金属离子的能力。根据同个类似水源取水的冬季 S 水厂砂滤池(经生物预处理)和 K 水厂砂滤池(未经生物预处理)的出水水质对比看,砂滤池去除氨氮的效果较显著,相关检测值见表 3。S 水厂和 K 水厂相比,K 水厂的砂滤池去除氨氮绝对值较大,在 1 mg/L 以上;S 水厂去除氨氮绝对值较低,但出水氨氮值更低。

2.4 臭氧—活性炭工艺去除氨氮

臭氧—活性炭工艺对氨氮的去除有一定作用,

表 3 冬季 S 水厂、K 水厂砂滤池去除氨氮比较

日期	水温/ $^{\circ}\text{C}$	氨氮/mg/L			
		K 水厂砂滤出水	去除值	S 水厂砂滤出水	去除值
2009 年 12 月	5 及以下(2 d)	0.54	1.15	0.30	0.94
	6~10(28 d)	0.56	1.11	0.38	0.76
	11 及以上(1 d)	0.31	1.11	0.25	0.61
	月平均值	0.55	1.11	0.37	0.77
2010 年 1 月	5 $^{\circ}\text{C}$ 及以下(8 d)	0.27	1.11	0.27	0.68
	6~10(23 d)	0.25	1.19	0.16	0.78
	月平均值	0.26	1.17	0.19	0.76

但在运行初期也存在波动因素。图 3 和图 4 是前述 N 水厂生物活性炭对氨氮的去除效果分析,可以看出,活性炭出水氨氮浓度平均在 0.12 mg/L,活性炭出水氨氮比进水降低 76.8%,而且去除率一直比较稳定。臭氧接触池在运行初期会造成氨氮浓度大量反弹,估计是由于催化氧化材料的存在促进了有机物氧化导致氨氮释放所致,运行稳定后,臭氧接触池基本不会影响出水氨氮浓度的变化。臭氧—生物活性炭联用工艺出水氨氮平均去除率为 63.2%。出水再经过序批气水反冲洗滤池过滤之后氨氮可以满足国家《生活饮用水卫生标准》的要求。

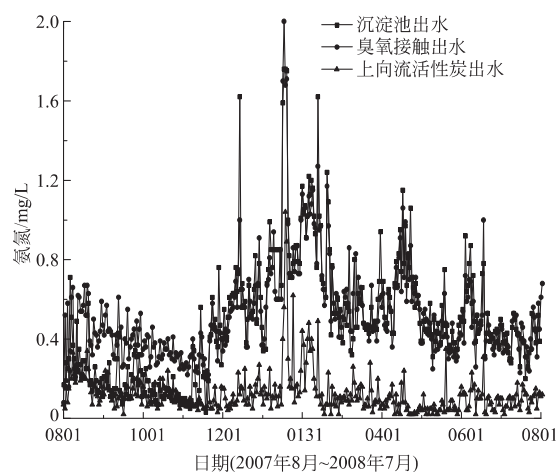


图 3 N 水厂生物活性炭对氨氮的去除效果

3 应对冬季高氨氮水质的净化工艺组合分析

前述 N 水厂一期工程将上述除人工湿地外的除氨氮措施进行组合,布置处理工艺流程如图 5 所示。

该处理工艺流程各个环节对于污染物的去除

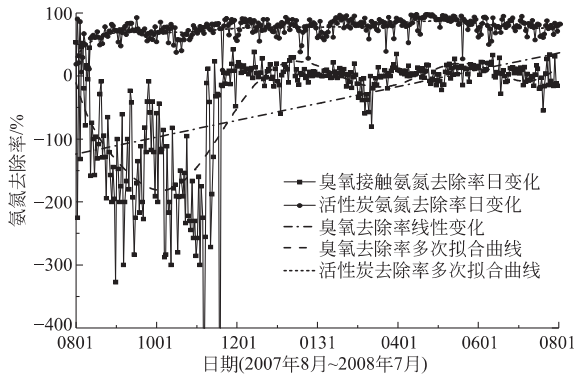


图 4 N 水厂生物活性炭对氨氮的去除率

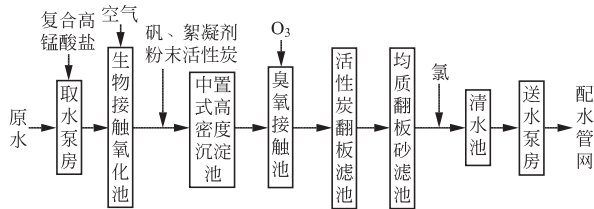


图 5 N 水厂一期处理工艺流程

都有一定针对性,首先通过生物预处理先降解去除氨氮,然后由中置式高密度沉淀池去除浊度,再由生物活性炭深度处理去除有机物,最后由投加助滤剂的砂滤作为确保生物安全性和浊度达标的最终保障。

N 水厂在投产初期(2007 年 8 月)、冬季(2008 年 2 月)和夏季(2008 年 7 月)的原水、预处理、沉淀、氧化、炭滤和砂滤出水的氨氮和锰的变化及其一年来出厂水指标的出现概率见图 6 和图 7。

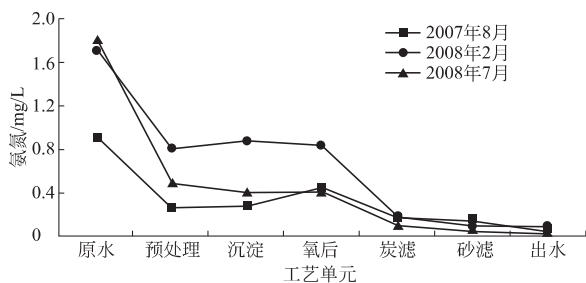


图 6 水中氨氮沿处理工艺流程变化

通过上述图表分析,鉴于 N 水厂运行初期原水氨氮一般在 2 mg/L 以下,虽然有机物含量较高,综合生物预处理—强化混凝沉淀—生物活性炭—深化过滤的全流程工艺,随运行时间延续逐步发挥生物—物理—化学协同作用的效果,可以满足出水水质目标。但 2008 年下半年以后,N 水厂原水水质出

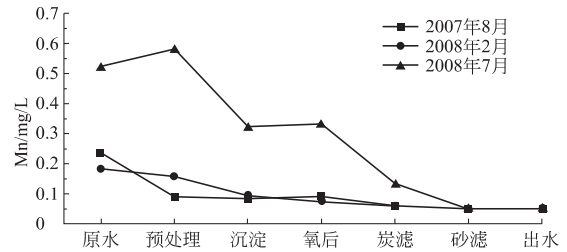


图 7 水中 Mn 浓度沿处理工艺流程变化

现一定的变化, COD_{Mn} 、氨氮、总磷、总氮和铁锰等指标明显提高,尤其是冬季高氨氮污染的加剧以及生物预处理工艺运行中出现的填料沉积和水生动物控制方面等问题,导致现有处理工艺流程在处理成本和日常管理要求上有所提高。

为了使 N 水厂二期工程的工艺选择适应原水水质变化的要求,考虑在 N 水厂水源建设人工湿地净化工程,同时进一步对一期处理工艺流程进行优化,即利用在建的水源生态湿地治理工程出水为原水,不设生物预处理池,在沉淀后部增加生物滤池,利用其固化去锰和去除氨氮有机物的作用,形成二期预氧化—混凝—沉淀—生物过滤—臭氧—生物活性炭—砂滤的全新处理工艺流程。沉淀以后的两级过滤与其中间设置的臭氧—生物活性炭组合,形成去除有机物和铁锰并有效控制出水浊度的多级组合反应器,作为水厂出水水质保障的核心,以避免生物预处理池处理效果受气温变化影响,成为二期工程在工艺组合上的强化与创新。二期工艺结合水源生态湿地预处理先以廉价的生物作用尽量去除水中的氨氮和 $<3\ 000$ 的亲水性有机物,再结合化学预氧化以平流沉淀池去除水中的悬浮物、相对分子质量 $>10\ 000$ 胶体有机物和相对分子质量在 $1\sim 10\ 000$ 可能胶体形态的有机物,然后在生物滤池中通过投加助滤剂尽可能去除有机物、氨氮和铁锰,再通过臭氧氧化将相对分子质量 $1\sim 10\ 000$ 的亲水性有机物降解成小分子有机物以利活性炭吸附,最后以投加助滤剂的砂滤池作为最后屏障,截留可能脱落的活性炭生物膜、臭氧氧化后生成的悬浮物,砂滤池生成的生物膜还能截留活性炭漏网的小分子亲水有机物,确保出厂水浊度小于 $0.1\ NTU$,最大可能降低水中微量有机物的含量。在大部分有机物去除的条件下,冬季剩余少量氨氮通过加氯形成氯胺,可有效延

长消毒时间,确保管网水质安全。

4 N 水厂二期工艺主要构筑物介绍

N 水厂二期工程采用机械混合、折板絮凝平流沉淀—生物滤池—臭氧—生物活性炭—砂滤池为核心的加强常规处理工艺和深度处理组合工艺,污泥处理采用带式压滤机脱水工艺,其工艺流程见图 8。

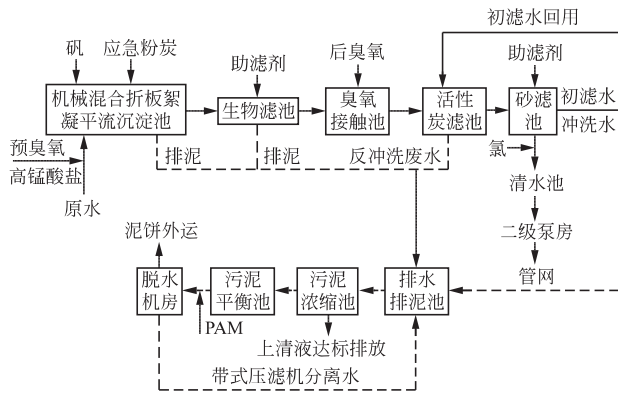


图 8 N 水厂二期工程工艺流程

4.1 机械混合折板絮凝平流沉淀池—叠合清水池

二期设沉清叠合池 1 座,上部设机械混合折板絮凝平流沉淀池,下部叠建清水池,处理规模 15 万 m^3/d ,包括机械混合池 2 座,混合时间 30 s;折板絮凝平流沉淀池 1 座,采用混凝土折板,絮凝时间约 20 min,平流沉淀池停留时间约 104 min;沉淀池出水渠加宽,布置曝气盘和弹性填料,向水中曝气补充溶解氧,出水接入生物滤池进水管。

4.2 生物滤池

二期设生物滤池 1 座,规模 15 万 m^3/d ,分 8 格,双排布置,单格过滤面积为 105 m^2 ,设计滤速 7.8 m/h 。采用石英砂均质滤料,有效粒径 0.95 mm,不均匀系数 $k_{80} \leq 1.4$,厚度 1.5 m;支承层粒径 2.0~4.0 mm,厚度 0.10 m。生物滤池过滤周期为 24 h,反冲洗方式为气水反冲加表面扫洗,布水布气采用预制滤板、长柄滤头。

在滤池 2 侧进水端各设 1 座混合池用于助滤剂投加。每座混合池停留时间 30 s,内设快速搅拌机和环形加矾管。

4.3 提升泵房、臭氧接触池及臭氧发生器间

提升泵房与臭氧接触池合建,提升泵房设 4 台潜水混流泵,3 用 1 备,均变频。潜水混流泵采用敞

口井筒式安装,单泵出口为小隔仓设计,通过溢流堰出流渠道连接至臭氧接触池。臭氧接触池分 2 格,接触时间 17 min,采用三阶段反应,最后经跌落出水至活性炭滤池。臭氧发生器间设计最大投加量为 4 mg/L ,其中前臭氧 0.5~1 mg/L ,通过管道混合器投加在取水泵房出水管路上;后臭氧 2.5~3 mg/L ,通过臭氧曝气盘投加。

4.4 活性炭/砂滤池

设 1 座组合滤池,设计规模 15 万 m^3/d ,双排布置。北面为上向流活性炭滤池,南面为砂滤池,均为 9 格,共用中间管廊。

4.4.1 上向流活性炭滤池

臭氧接触池出水进入上向流活性炭滤池,通过下部面包管配水配气后,自下而上经活性炭层吸附,利用上部指形槽出水。炭滤池出水后通过渠道汇总,进入助凝剂混合区,快速搅拌机混合 20 s,经连通管接入砂滤池进水管。

活性炭滤池滤速 11.6 m/h ,炭层停留时间 13 min,活性炭层厚度 2.5 m,砾石支承层厚度 0.45 m。

4.4.2 砂滤池

砂滤池采用 V 型滤池形式,滤速为 7 m/h 。滤层由上而下为:石英砂 $D=0.85$ mm,不均匀系数 1.4,厚度 1.2 m;支承层 $D=2.0\sim 4.0$ mm,厚度 0.10 m。

砂滤池过滤周期为 48 h,反冲洗方式为气水反冲加表面扫洗,布水布气采用预制滤板、长柄滤头。

5 存在问题与分析

5.1 出水氨氮的控制问题

N 水厂二期工艺流程的目的之一,是通过加长生物去除氨氮的处理工艺流程,从而在冬季水温较低、生物活性较差时也能最大程度地降低出厂水的氨氮值。

在实际工程运行过程中,原水水温降低和氨氮值升高速度较快时,出厂水氨氮值控制最为困难。此时可通过适当提高各种药剂的投量,强化各道工艺的处理效果以及出厂水氯胺消毒等措施,将出厂水氨氮合格率控制在水司考核范围内。

5.2 碱度控制的问题

N 水厂原水水质的 pH 不高,二期工程的工艺流程中包含有 2 个滤池和 1 个活性炭吸附池,对于

原水中碱度的消耗大于常规水厂的工艺流程,因此出厂水稳定性是整个生产运行管理的重点环节之一。

实际运行中可采取多点加碱的措施,生物滤池和活性炭吸附池由于生物作用具有一定调节能力,其进水碱度的控制以保证池体运行效果为宗旨,进水可少量加碱甚至不加;工艺流程最后的砂滤池肩负出厂水生物安全、浊度和稳定性控制的重任,建议按照生产需要足量加碱。

5.3 流程布置的问题

从工艺流程布置方面分析,二期工程属于处理工艺中的“长流程”,整个工艺消耗的水头较大,其中生物活性炭工艺中臭氧接触池需要足够跌落水头来降低出水臭氧余量,活性炭吸附池的进出水配水系统和滤料层损失亦需要足够的水位差,而其后续的清水库和二级泵房往往受事故溢流条件和土建建设条件影响,不可能低于厂区地坪很多。

实际布置时,除非厂区地势存在一定高差可供利用,否则应考虑沉淀池高架并与其他构筑物叠合或采用池深较深的池型,且设置一级中间提升泵房,优化池型布置并采取高效率提升泵,尽量减少提升水损。

6 结论

(1) 氨氮对净水工艺存在一定影响,可与水中锰离子形成络合物,增加锰离子去除难度,同时高氨氮水质往往伴随着有机污染和金属污染,冬季季节性高氨氮已成为净水工艺的区域性难点问题。

(2) 对于去除氨氮有较为显著效果的净水工艺主要有人工湿地、生物预处理、砂滤和臭氧—活性炭深度处理工艺,经过相关研究和生产实践,去除氨氮效果显著,将这些措施组合优化形成的处理工艺,是应对冬季季节性高氨氮原水的较好选择。

(3) N 水厂二期工程利用在建的水源生态湿地治理工程出水为原水,不设生物预处理池,在沉淀后部增加生物滤池,利用其固化除锰和去除氨氮有机物的作用,形成二期预氧化—混凝—沉淀—生物过滤—臭氧—生物活性炭—砂滤的全新处理工艺流程。

(4) 原水水温降低和氨氮值升高速度较快时,出厂水氨氮值控制最为困难。此时可通过适当提高各种药剂的投加量,强化各道工艺的处理效果以及

出厂水氯胺消毒等措施,将出厂水氨氮合格率控制在水司考核范围内。

(5) N 水厂原水水质的 pH 不高,二期工程的工艺流程中包含有 2 个滤池和 1 个活性炭吸附池,对于原水中碱度的消耗大于常规水厂的工艺流程。实际运行中可采取多点加碱的措施,生物滤池和活性炭吸附池由于生物作用具有一定调节能力,其进水碱度的控制以保证池体运行效果为宗旨,进水可少量加碱甚至不加;工艺流程最后的砂滤池肩负出厂水生物安全、浊度和稳定性控制的重任,建议按照生产需要足量加碱。

(6) 从工艺流程布置方面分析,N 水厂二期工程属于处理工艺中的“长流程”,考虑沉淀池高架并与其他构筑物叠合或采用池深较深的池型,且设置一级中间提升泵房,优化池型布置并采取高效率提升泵,尽量减少提升水损。

参考文献

- 1 戚盛豪,汪洪秀,王家华,等. 给水排水设计手册(第 3 册),城镇给水. 第 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2004
- 2 聂梅生,戚盛豪,严熙世,等. 水工业工程设计手册 水资源及给水处理. 北京:中国建筑工业出版社,2001
- 3 聂梅生,王占生,刘文君. 微污染源饮用水处理. 北京:中国建筑工业出版社,1999
- 4 何文杰,李伟光,张晓健,等. 安全饮用水保障技术. 北京:中国建筑工业出版社,2006
- 5 乐林生,吴今明,高乃云,等. 太湖流域安全饮用水保障技术. 北京:化学工业出版社,2007
- 6 查人光,韩帮军,马军,等. 臭氧多相催化氧化技术在水厂深度处理中的应用. 中国给水排水,2007,23(17):1~5,10
- 7 许建华,许嘉炯. 生化工程的延伸效应对富营养化水库的生物修复作用. 净水技术,2003,22(3):1,2,5
- 8 许嘉炯,马军,韩红军,等. 人工湿地技术在给水工程中的应用. 给水排水,2012,38(5):44~48
- 9 许嘉炯,范玉柱. 深度处理工艺的系统选择研究. 给水排水,2012,38(8):9~14

○ 通讯处:200433 上海市国权路 98 号国阳大厦 6 楼 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司 第一设计研究院
电话:(021)51298227
E-mail:xu_jj_gp1@smedi.com
收稿日期:2013-07-04