

清澈之路：污水处理的生态奇迹

Road to clean water: The ecological miracle of sewage treatment

■文 / 蓝虹



最近，生态环境部推出了一系列环保设施向公众开放活动。朋友问我，为什么要将环保设施向公众开放呢？我说，为了让大家了解大气、水、土壤治理是怎么实施的呀，这是一种面向大众的实地科普和生态环境教育，对于提升大家的环保意识和形成生态文化，非常有帮助。

我对朋友说，你知道吗？我还曾经到污水处理厂当过工人呢。朋友表示怀疑，调侃说我散发着一身不合时宜的学究气，不像是在污水处理厂工作过的人。我说，当真如此。我觉得，要想真正掌握生态环境知识，到污水处理厂、垃圾焚烧发电厂去当工人，或者去自然保护区当一段时间的护林工，都是极好的途径。亲自与环保设施打交道，近距离了解和学习，甚至亲手操作，是理解环保理念和技术的最直接方式。

一、我在污水处理厂当工人

有幸亲身体会基层工作的艰辛与乐趣，这是我职业生涯中的一段特殊经历。那时，我的导师为了让我对污水处理厂和污水处理设施有更深入的了解，就委托他的朋友、当时正担任排水集团总工程师的王老师带带我。可是，王老师工作实在太繁忙，就把我交给了他的徒弟秦工程师，来负责我的实习指导。

秦工对待工作非常认真。他对我说，如果要对污水处理设施、技术和工艺流程有深入了解，光靠听介绍和看书肯定是不够的，而是需要到污水处理厂扎扎实实地当工人。起初，我对当工人有点不服气，“我怎么也应该当技术员，怎么只能当工人？”秦工只是笑。于是，我开始跟着他在各个工段当工人。

我的实习是从初级处理开始

的。在这里，污水通过格栅去除固体颗粒，先流经粗格栅，较大的固体垃圾如垃圾袋、树枝等被拦截去除；再进入细格栅，便能去除更小的固体垃圾。经过初级处理后，污水进入沉砂池，利用重力使砂粒沉淀，并通过砂水分离器进行分离，以防止无机砂粒影响后续的二级处理。

在生活污水处理工段，我目睹了污水中的各种污染物，那确实在感官上令人不快。秦工提醒我，作为一名环保工作者，必须克服这些不适，因为只待在书斋里看书是没法做环保工作的。我是畲族人，是在山里长大的，冬天烤火的材料就是牛粪，所以对这样的环境很快就适应了。

进入第二个工段，污水已经在外观上有了很大的改观。但秦工告诉我，污水里面仍含有很多非固体的人工合成有机物，这些

有机物对人体具有致癌、致畸、致突变的严重危害,并且难以被微生物所降解,在自然界的降解需要几百年甚至上千年,还将不断富集,浓度不断增大,会给人体健康和生态环境带来严重影响。显然这仅仅用物理处理是不能清除的,而是需要使用生物处理法。这个工段采取的是活性污泥法。什么是活性污泥法呢?秦工给我进行了详细解释。活性污泥法主要依赖于好氧微生物,在有氧条件下,通过连续培养和混合,分解污水中的有机污染物。通俗地说,就是用含有好氧微生物的活性污泥,来吸取和分解污水中的有机污染物。他告诉我,活性污泥里的微生物主要含有可以分解、吞噬和吸附有机物的细菌、原生动物和藻类。原生动物?在我心里,动物都挺大的。秦工笑了,说原生动物主要指的是可以吞噬污水中人工有机物的盾纤虫、漫游虫、吸管虫、变形虫等动物。他说,活性污泥是一个复杂的微生物世界,就光是活性污泥都足够我当工人学习很久呢。他说,你看,原生动物以有机物为食物,可以增加絮状物并澄清污水,加速可以分解有机物的细菌的生长,提高细菌活力;当细菌生长到一定程度后会凝聚成絮状物,又为原生动物提供了生长环境。

在曝气池和好氧池中,污水与活性污泥混合,并通入空气以提供氧气,从而促进微生物的生长和有机物的分解。秦工告诉我,好的活性污泥应呈黄褐色,有泥土的味道,如果颜色发黑或发臭,就说明产生了厌氧菌,如果颜色发淡,那就是微生物培养不足。

污水在生化池待上12个小时,去除掉有机污染物后就进入二次沉淀池进行泥水分离。活性污泥絮体在这里沉降,而澄清的水则会排出。我用玻璃杯取了水观察,发现经过活性污泥处理后,水确实清澈了许多。秦工解释说,活性污泥有良好的凝聚和沉降性能,能有效去除污水中的有机物、悬浮固体、磷和氮等污染物。

尽管水看起来清澈,但在味道上仍需处理。秦工程师带我参观了出水净化工序,其中包括砂滤池,这是一种被动式的过滤装置,由砾石、砂子及活性炭组成,能进一步去除浊度和有机物。秦工说,不要小看这个砂滤池,最初的污水处理厂主要就是靠砂滤池,减少了80%的霍乱和伤寒发病率呢。

秦工分享了一个历史故事。农业社会也有污水,但水体有自我净化能力,加上农业社会人口居住较分散,排放的污水较少。但工业革命时期,由于人口的剧增和城市的聚合与扩张,这时,人们开始密集地向河湖等水体排放大量的污水,而这远远超出了河流湖泊的自我净化能力。河流湖泊的水质开始下降,水污染严重,导致水中伤寒病菌剧增,很多人因为伤寒而死。在当时的科技和医疗条件下,人们毫无办法,只能期待上帝的怜悯。那时的麻省理工学院所在的劳伦斯镇也陷入伤寒的侵袭,发病率甚至是周边城市的四倍,致死率也非常高。

当时麻省理工学院的微生物学专家塞奇威克教授通过显微镜观察和化学分析,发现上游城市直接排放的生活污水含有大量病菌,这是瘟疫爆发的关键原因。他

随即推动政府修建水处理站,这就是被行业称为水科技圣地的劳伦斯污水处理站。为了研究更有效地去除水污染的技术,塞奇威克教授和麻省理工学院的两位同事及一批工程师共同组成了一个研发小组。他们发现砂滤池可以去除污水中的悬浮颗粒和浑浊物质,净化水质。因此,他们开始在多条河流流域安装砂滤池,结果发现,这些区域在安装砂滤池后,不仅水质变清了,伤寒病例也减少了。他们因此发现了砂滤池在隔离病菌方面的独特优势。研发小组采取砂滤池和氯气消毒相结合的方法,进一步净化了水质。随着劳伦斯站的建成并投入使用,人们惊喜地发现,整个城市的伤寒发病率竟然降低了80%。经过50年的水污染处理技术推广应用,美国的人均寿命由1900年的47岁提高到了63岁,水污染治理在其中发挥了很大作用。

我感受到了污水处理厂的重要性,没有污水处理厂,就没有真正意义上的现代化城市,就没有居民的健康,人们的生命就会受到死亡的威胁。

我花了很多时间在污水处理厂学习,每天跟着不同工段的工人一起上班,其中有辛苦也有开心。污水处理厂是三班倒的,我也要跟着上夜班,晚上和工人们一起在污水处理厂奔波,一起取样、送样。经过一段时间的学习后,我可以熟练地绘制出工艺流程图,还能发现并讨论工段中出现的問題,提出解决方案。秦工告诉我,我已经胜任了污水处理厂的工人角色,接下来应该去再生水厂继续我的学习之旅了。

二、喝下一杯再生水

我接着转战再生水厂。再生水,是指已经经过污水处理厂净化过的水,但还需进一步提标净化。其目的不仅是消灭因水污染引起的疾病和死亡等健康问题,而且通过进一步净化,实现污水的资源化再利用,比如用于工业、城市杂用和农林灌溉等。再生水可用于工业冷却、洗涤、锅炉用水和工艺用水等,用于生态环境可作为景观用水、河道补水和地下水回灌等,用于城市杂用可作为城市绿化、冲厕、道路清扫、车辆冲洗、建筑施工和消防等用水,用于农林灌溉可作为农田灌溉和造林育苗等用水。

然而,再生水的进一步提标净化是需要成本的。我个人觉得,在水源充足的南方,这似乎不太经济。过去,由于人口少、资源多,人们没有中水回用的需求,污水处理厂的作用主要是净化回排到江河湖海的污水,注重的是污水的无害化处理。但随着工业的发展,用水需求激增,特别是在水源并不充足的北方地区,水资源日益稀缺,中水回用就变得很重要了。

再生水又叫中水,其水质介于自来水(上水)与排入管道内的污水(下水)之间,因此被称为“中水”。在美国、日本、以色列等国家,中水被广泛用于厕所冲洗、园林和农田灌溉、道路保洁、洗车、城市喷泉和冷却设备补充用水等。北京是缺水严重的城市,人均水资源占有量仅为100立方米,远低于国际公认的缺水警戒线1000立方米,所以再生水就成为主要的水源之一。

污水深度处理首先使用的是活性炭吸附。活性炭由木材、煤、果壳等含碳物质在高温缺氧条件下活化制成,它具有巨大的比表面积,可以不断吸附水中的溶质,直到吸附平衡即溶质浓度不再改变为止。它能去除水中产生臭味的物质和有机物,如酚、苯、氯、农药、洗涤剂、三卤甲烷等。此外,其对银、镉、铬酸根、氟、锑、砷、铋、锡、汞、铅、镍等离子也有吸附能力。

接下来是臭氧氧化处理,利用臭氧作为强氧化剂,氧化水或废水中的有机物或无机物,以达到消毒、氧化或脱色的目的,进一步去除水中的COD、BOD、酚、氟、铁、锰等。不过臭氧价格比较高,一般只在再生水处理阶段使用。

然后是超滤膜超滤。超滤膜用于超滤过程,是一种能将一定大小的高分子胶体或悬浮颗粒从溶液中分离出来的高分子半透膜,以压力为驱动力。超滤膜柱里有一根根超滤膜丝,每根膜丝上都布满了无数个0.02微米的小孔,通过这些小孔,可将水里的杂质和悬浮物再次过滤,对水质进行进一步净化。

秦工告诉我,超滤起源于1748年,德国专家威力·鲍尔德·斯密斯用棉花胶膜或珞膜分滤溶液,当施加一定压力时,溶液(水)透过膜,而蛋白质、胶体等物质则被截留下来,其过滤精度远远超过滤纸,于是他提出超滤概念。1896年, Martin制出了第一张人工超滤膜;20世纪60年代,分子量级概念的提出,是现代超滤的开始;20世纪70年代和80年代是高速发展期,20世纪90年代

以后开始趋于成熟。

然后是反渗透,即一种以压力差为推动力,从溶液中分离出溶剂的膜分离操作。对膜一侧的料液施加压力,当压力超过它的渗透压时,溶剂会逆着自然渗透的方向作反向渗透,从而在膜的低压侧得到透过的溶剂,即渗透液,高压侧得到浓缩的溶液,即浓缩液。秦工介绍说,如果用反渗透处理海水,在膜的低压侧得到淡水,在高压侧得到卤水。由于反渗透膜对进水要求较高,运用反渗透技术对废水进行深度处理时,废水一定是已经经过了活性炭吸附等流程的。反渗透具有低能耗、高效率等优点,因此在再生水的处理中运用非常广泛。

之后是消毒处理,通过紫外线消毒等方法,杀灭可能的细菌和病毒等病原体。

经过深度处理的再生水,已经清澈透明,无色无味,非常洁净。秦工取了一个杯子,接了一点经过深度净化处理的再生水,竟然慢慢喝了下去。我很惊讶。我知道再生水是可以用于浇灌公园和城市绿化带的绿植、充实护城河水源的,但是,秦工竟然喝下去了。秦工说,这个再生水已经净化到可以喝了。他告诉我,最早研发出可以喝的再生水的国家是新加坡。

秦工说,水资源的短缺,使越来越多国家开始重视再生水的利用。经过二次处理的污水,在消毒、除臭等高度处理后,可用于冲厕、植物浇灌、道路冲洗、冷却水补水和景观用水等,少数还会作为饮用水使用。他说,在亚洲,新加坡是最早将再生水净化到可以

饮用的国家,原因就是新加坡是极度缺乏淡水的国家。新加坡位于马六甲海峡附近,这个地区被热带雨林气候区支配,年降水量高达2350毫米,可以说是最不缺水的地区了。但对于国土面积仅有697平方千米的新加坡来说,这么多雨水也只是匆匆过客。新加坡境内没有完整的独流大河,更缺乏体量足够的湖泊。每年雨季从天而降的淡水只能变成积水白白流走,无法收集和利用。

而且新加坡地质条件脆弱,全国几十年来都面临土地沉降问题,海水经常倒灌。小河流里好不容易存下来点淡水,也很快就被海水给污染了。天上下的留不住,地上流的喝不了,新加坡人均水资源量仅有211立方米,位居全世界倒数第二。在这种情况下,发展再生水回用技术就显得非常迫切。早在1974年,新加坡第一座实验性水供回收厂于裕廊设立。但是当时净化废水的技术成本过高,也不稳定。直到2002年,新加坡公用事业局正式启动再生水计划,并将这些经过二级污水处理而来的水命名为“NEWater”,意为“新生水”。在缺水危机的逼迫下,新加坡的科学家成功让再生水的水质达到了世界级饮用水标准。在2002年新加坡的建国日,当时的新加坡总理为了向民众和全球展示其污水处理技术,当众将一杯再生水一饮而尽,“NEWater”因此举世闻名,蜚声世界。

秦工说,我们现在的再生水也已经可以达到饮用水水平了。他拿了另一个杯子,给我也倒了一小杯再生水。我知道,他是想让我喝下去。我已经看过水质检

测数据,知道这杯再生水确实是可以喝的。尽管这段时间,我跟踪了污水处理厂和再生水厂的所有工段,亲眼看到它由含着粪便、废纸、充满臭气的生活污水,一步步净化到现在清洁清澈的再生水,作为一名生态环保学者,所有理性都在告诉我,这是一杯可以喝的水,但我的内心在抵触我喝下这杯水。

秦工看出了我的犹豫,又倒了一杯再生水,当着我的面喝了一大口,然后,用鼓励的眼神看着我。我端着这杯再生水,心里想,我是环保人呀,我应该有环保人的理性和情怀。我端起杯子,慢慢喝下了第一口,其实,味道还是不错的,甚至有点甜。我于是将一整杯再生水喝下,然后,就看到秦工脸上的笑容。

三、污水处理技术的发展

从当年我在污水处理厂当工人到现在,已经过去很长一段时间了。在这期间,污水处理技术不断发展。让我感触最深的是,现在的污水处理更加封闭化、自动化了。如今再去污水处理厂,已看不到我当初所见到的粪便等在水池翻滚的景象了,取而代之的是封闭或半封闭的处理方式,而且实现了自动化处理,我也看不到当初的工段了,只有少数工人在操作台上完成各种流程。

同时,在气候危机的压力下,污水处理也正走向低碳。现在,污水处理技术的研发不仅关注水处理质量,还关注能耗,各种高能效技术、设施和设备被研发出来,污泥的处理也更加无害化和资源化。以前的污泥处置,

多是脱水填埋,而现在,不仅要脱水,还会通过化学调质加板框压滤,添加石灰等药剂使污泥性质改变,再通过板框压滤机进行处理;利用微生物分解有机物,产生沼气等可利用资源;将污泥干化后进行焚烧处理,大幅减少污泥体积并杀死病原体;将污泥与其他有机物混合,通过好氧或厌氧堆肥方式进行处理,从而产生有机肥料等。

为了节省土地,现在的很多污水处理厂都建在地下或者半地下。上面是公园,风和日丽,阳光明媚,绿草如茵,孩子们在里面嬉戏玩耍,而公园的下面,就是污水处理厂。因为地下建了污水处理厂,地面承重受限,不能盖高楼,所以一般都建成公园了。

这些年,我跑遍了全国很多污水处理厂,为它们设计绿色金融融资方案,亲自见证了污水处理厂的诸多变化。我的朋友是一家污水处理厂的总工程师,我去她那里时,天气正热,我很渴,她递给我一瓶纯净水,我品尝后感觉口感很好,仔细一看,竟然是她们的再生水产品。过去,再生水又叫中水,就是因为其水质介于自来水(上水)与排入管道内的污水(下水)之间。但现在,再生水已不能再被称为中水了,因为一些再生水经过深度净化后,其水质已经优于自来水。

而且,在大规模推动污水处理厂和设施建设的背景下,基于自然的各种水处理方案也得到了广泛应用,比如利用湿地技术处理农业面源污染。我在贵州省贵安新区挂职担任绿色金融管委会主任时,就参与设计推出了月亮

湖湿地公园项目。

月亮湖是贵州省贵安新区的水源地,由原汪官水库扩建而成,水域面积达2115亩。芦官村地处月亮湖上游,村里上百户人家每天都会产生大量的生活污水和养殖废水。由于沪昆高铁和湖磊铁路横亘于村落与项目之间,无法统一截污纳管,传统的污水处理技术无法经济高效地解决支流汇入、农村农业等污水处理问题,这导致月亮湖水质严重退化,影响了贵安新区生活饮用水的安全供应。

我们首先对月亮湖的污染源和污染物进行了调研考察,发现其主要污染源是生活污水和养殖废水,主要污染物是氨氮。因此,可以通过湿地或植树造林等基于自然的方案来解决。通过研究讨论,我们设计建设了湿地公园,运用湿地植物吸收氨氮的功能来解决月亮湖的水污染问题。

湿地是陆地与自然水域的过渡地带,兼具丰富的陆生和水生动植物资源,形成了其他任何单一生态系统都无法比拟的天然基因库和环境。其特殊的水文、土壤和气候条件,为动植物群落提供了复杂且完备的生态系统,对于保护物种、维持生物多样性具有不可替代的生态价值。同时,湿地具有强大的降解污染功能,许多在湿地自然生长的植物、微生物通过自身的物理过滤、生物吸收、化学合成与分解等生命活动,将人类排入湖泊、河流等水域的有毒有害物质转化为无毒无害甚至有益的物质,为各种水生动植物提供了良好的生存保障。

我们根据当地水质情况,选

择了芦苇和荷花等湿地植物来净化水质。芦苇被称为大自然的天然水质净化器,它的叶、茎、根状茎都有通气组织,具备很强的净水能力,不仅能净化水中的漂浮物和铅、汞等重金属,还能净化水中的氯化物等有机物污染。事实上,在很多城市湿地,都能看到浑浊且有异味的雨污混合水,这些污水经过芦苇湿地之后,流向河道的水明显变得干净,基本可以达到四类水质标准。莲藕通过吸收和转化各种有机和无机物质,改善水质,保护水生生态系统健康。莲藕的根部和叶片具有过滤和吸附作用,可以有效去除水中悬浮和溶解的有机与无机物质,其叶片和茎腐殖质分解可以使水体中的溶解氧增加,从而改善水体环境,促进水体生态系统的恢复和发展。而且,芦苇和荷花的景观极具美感,是人们休闲、摄影的胜地,莲藕还可以作为食物出售,这些都能带来极好的收益。

但这个项目需要将水质提升到三类水,因此我们专门培养了特殊的湿地植物群。例如,在入湖口,利用地势构建了一个大约2000平方米的水下森林,用水里种植的苦草、狐尾藻等沉水植物进行生态提标净化,既能保持里面的含氧量,又能同时去除水中的氨氮、磷等有害元素,使水质达到三类标准后排入月亮湖。水排入月亮湖后,又通过在湖中通氧气以及设置植物悬浮岛等方式,进一步净化水质。

这个项目虽然是农业面源污染治理的全公益性项目,但我们依然依托各种湖光水色、森林及人工湿地等资源,在湿地公园内

设计了茶室、咖啡屋等设施,将这个环境工程项目打造成了一个兼具生态旅游和生态教育功能的项目,既增加了项目收益,又让公众在休闲旅游中学习了湿地植物净化水质的原理和作用。

所以,生态环境部推出环保设施向公众开放的活动,我深感其非常必要。让大家参观和感受马桶水如何一步步变成可以喝的水,这种神奇的过程体验,会增加大家对环保的热爱,也会让更多的孩子成为环保人,让大家更深刻地体会到环保人的艰辛和不易,这是生态环保教育的重要环节,也是生态文化形成的重要推动力。

我现在不仅自己可以毫无心理障碍地喝下再生纯净水,还积极通过再生纯净水向大家介绍和科普水污染处理技术。就在昨天晚上,我和朋友们一起聚会,我的污水处理厂的朋友就带来了再生纯净水,我立即带头喝,并把我的故事讲给大家听。朋友们立即被吸引住了,觉得在污水处理厂外喝再生纯净水感觉还是差了点,纷纷预约环保设施公众参观,说要看完污水处理的所有流程,见证马桶水转化为纯净水的神奇过程后,再品尝再生纯净水,一定会有不一样的感受。

踏马行舟,斗转星移,可是,环保人,始终在奋斗的征程,守护着我们的地球家园。我们是地球卫士,那种自豪的感觉,总是从心底,油然而生。

作者介绍:中国人民大学环境学院教授、博士生导师,中国散文学会会员