

城镇污水再生利用技术选择

文 / 方先金 戴前进 邵辉煌 (北京市市政工程科学技术设计研究院)

一、引言

近年来,随着经济和城市化的快速发展,我国污水处理能力大大提高。2009年底我国运行的城镇污水处理厂约1900座,处理能力已达1亿 m^3/d ,约是2005年我国城镇污水处理能力的两倍,是2000年污水处理能力的4倍。同时,2009年底统计资料表明,在建污水污水处理厂约2000座,处理能力为5500—6000万 m^3/d ,待这些在建工程完成后,我国将有城镇污水处理厂近4000座,处理能力可达1.6亿 m^3/d ,在这些污水处理厂中,70%以上建于我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)发布以后,大部分污水处理厂出水能达到国家排放标准一级B标准。自2007年底,我国许多地方开始对污水处理厂进行升级改造,进一步提高污水处理厂出水水质,使污水处理厂出水达到国家一级A标准。污水处理设施的快速发展,产生了大量城镇生活污水经过二级生物处理后的污水处理厂出水,这些二级出水可以作为再生水水源,为城镇污水再生利用创造了有利条件,经过适当处理后均可再次利用。这就需要在技术层面上改变现有的技术路线和目标,将城镇污水处理厂的建设功能目标由单一的达标排放转变

为包含达标排放、再生利用和生态需求在内的综合目标,从而为城市污水的再生利用奠定工程基础。

实践表明:城镇污水再生利用是水资源贫乏地区增加供水能力,实现水资源可持续利用的重要环节。城镇生活污水经过污水处理厂的二级处理可成为再生水资源,进一步经过再生处理后可供作物灌溉、工业冷却水、绿化用水、环境用水等。同时,城镇生活污水数量非常巨大,污染比海水轻得多,再生利用具有就近可得的特点,比长距离引水、海水淡化、雨水利用更为实际可行。近十年来,面对严峻的水资源形势,我国提出了“节流优先、治污为本、多渠道开源”的城市水资源可持续开发利用的新战略,推动了污水再生利用的快速发展,北方缺水地区污水再生利用水量迅速增加,对缓解干旱缺水形势起到了积极的作用,再生水已成为干旱缺水地区重要的水资源。如北京市目前再生水利用量已超过地表水利用量,已成为北京市重要的城市水源之一,直接参与城市水资源调配,每年再生利用量已超过6亿 m^3 ;再生水已广泛用于工业、城市绿化、补充城市水体、改善城市水环境等,对保证北京市经济社会可持

续稳定发展、提高北京城市的水环境质量起着重要作用。为此,北京还根据自身地表水资源有限,城市水体补充水源不足的特点,积极探索进一步提高再生水水质的技术措施,以提高城市水体的环境质量,相关工程正在建设中。

城镇污水再生利用的发展需要相应技术支撑,尽管我国在城镇污水再生利用技术研究与工程实践方面取得了一定的进展,但总的来说还处于发展阶段,城镇污水再生利用规模还较小,与当前污水再生利用多元化的需求不相称。在技术层面上,我国城镇污水再生利用还存在许多不足之处,已建设的工程中绝大部分工艺技术较单一,不能适应生产高品质再生水的需要,没有形成全方位的污水再生利用安全保障体系。城镇污水再生利用应该根据不同用水目标和特点选择相应的技术,通过技术革新提高再生水利用量,保障污水再生利用的安全性。

二、技术选择的原则

城镇污水再生利用工程中,单元技术一般很难保证出水达到再生水水质要求,常需要多种水处理技术的合理组合。目前,人们普遍采用常规处理工艺,即混

凝、沉淀或澄清、过滤和加氯消毒，该工艺能够有效地去除二级处理出水中的悬浮物、胶体杂质和细菌，使再生水拥有广泛的适用范围，具有较好的经济价值。但是该工艺有一定的局限性，它不能有效地去除色度、浊度、臭味和溶解性有机物，且氯化消毒过程会导致有机卤化物的形成。为了满足用户对水质的不同要求，许多新技术被应用到污水再生利用工程中，与其他水处理技术一起组成了许多新工艺。如以膜技术为主的组合工艺：二级处理出水→混凝→沉淀→膜分离→消毒，应用较广的膜技术有微滤膜(MF)、超滤膜(UF)、纳滤膜(NF)和反渗透膜(RO)等；以活性炭技术为主的组合工艺：二级处理出水→活性炭吸附或氧化铁微粒过滤→超滤或微滤→消毒；氨吹脱和臭氧氧化等技术被用来满足对再生水水质的特殊要求。但是不同的单元技术具有去除特定污染物的功能，在技术选择时应注意以下基本原则：

(1) 应对再生水水源严格控制：再生水水源应以城镇生活污水和二级处理出水为主，与生活污水类似的工业废水也可作为再生水水源，前提是排污单位对其进行有效的预处理，达到相关标准后排入城镇下水道。重金属、有毒有害物质超标的污水不得排入污水收集系统，不得作为再生水水源。严禁放射性废水作为再生水水源。

(2) 应满足再生水利用的变化要求：在城镇再生水技术选择

前应详细分析不同回用对象的用水量和水质要求，分析不同回用对象用水量的年际变化、月际变化及日变化，以保证技术选择满足再生水使用量的变化。

(3) 应充分考虑再生水使用的安全性：再生水处理技术应确保公众、操作人员的健康安全以及周边的环境安全，尤其要有效地控制病原菌的污染和传播。

(4) 应满足再生水利用的标准要求：城镇污水再生利用技术应确保处理出水达到国家和地方规定的再生水水质标准，保障再生水供水的可靠性和安全性。

(5) 应充分考虑技术的合理性和经济性：城镇污水再生利用技术选择与工程实施要考虑国情、实际条件和用户需求，应综合考虑污水再生利用规模、处理程度、处理流程、输水方式、使用用途等，既要满足要求，又要经济合理。

(6) 应尽可能在二级处理阶段将氮的去除达到再生水使用要求：在目前的技术条件下，氮的去除主要依赖生物处理技术。常用的再生水深度处理技术对有机物、SS和磷的去除技术较多，处理效果较好，除反硝化滤池外其他技术对氮的去除效果都有限。因此，氮的去除应尽可能在二级处理过程中通过强化脱氮技术来实现，必要时应对污水处理的二级处理进行强化生物脱氮改造。

三、再生利用技术选择

各种再生水处理单元技术去除的污染物是不同的，在城镇污

水再生利用工程中仅使用单元技术很难满足用户对水质的要求，必须针对不同再生利用目标采用不同的组合工艺进行处理。目前我国已制定了污水再生利用系列标准，为再生水利用于不同的对象提供了技术选择依据。实际工程中应根据国内外技术发展现状和国内污水再生利用工程经验，针对再生水使用对象和国家再生水水质标准，选择相应的处理技术和工艺。

1、再生水用于城市杂用

根据《城市污水再生利用城市杂用水水质》标准(GB/T 18920—2002)，城市杂用水包括城市绿化、建筑施工、洗车、道路洒水、厕所冲洗用水等。城市杂用水水质标准与国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)主要水质指标差异如下：

BOD指标：一级A排放标准全部满足城市杂用标准；但一级B排放标准只能满足城市绿化水质要求，并不能满足冲刷、道路清扫、消防、车辆冲洗和建筑施工的用水要求，需要后续处理去除BOD约50%。**氨氮指标：**一级A和一级B（水温>12℃时）排放标准全部满足城市杂用标准；但冬季一级B（水温≤12℃时）排放标准不能满足道路清扫、消防和车辆冲洗的水质要求，需在低温条件下再去氨氮20%左右。

再生水用于城市杂用时，应尽量减少其与人体的直接接触。根据《城市污水再生利用 生活杂用水水质》标准，每升再生水中

总大肠菌群数不应超过3个，因此需要足够的投氯量并延长消毒时间，以保证病毒或寄生虫卵灭活或死亡。亦可采用其他消毒方法，但一定要保证输水布水系统管网末端的余氯不小于0.2mg/L。

因此，再生水作为城市杂用水时，技术选择上首先应提高二级生物处理在低温条件下的硝化效果，然后在深度处理技术选择时采用过滤技术，包括砂滤、机械过滤、快滤等，过滤前一般应投加混凝剂或助凝剂，如混凝沉淀过滤、微絮凝过滤、磁共沉技术等；最后对出水进行消毒技术处理。

2、再生水用于景观环境用水

根据《城市污水再生利用 景观环境用水水质》标准（GB/T 18921—2002），景观环境用水包括观赏性景观环境用水和娱乐性景观环境用水，水体分为河道、湖泊和水景三类。景观环境用水水质标准与污水处理排放标准主要水质指标差异如下：

BOD指标：一级A排放标准仅满足观赏性河道类景观环境用水水质要求，而不能满足其他景观环境用水水质要求；一级B排放标准低于观赏性和娱乐性景观环境用水水质要求，需要再生水后续处理去除BOD约70%。**SS指标：**一级A排放标准满足景观环境用水水质要求；但一级B排放标准只能用于观赏性河道类景观环境用水，不满足观赏性景观环境用水的湖泊类和水景类水质要求，需进一步去除SS约50%。

氨氮指标：只有一级A排放标准（水温 $>12^{\circ}\text{C}$ 时）满足景观环境用水水质要求，一级A排放标准（水温 $\leq 12^{\circ}\text{C}$ 时）和一级B排放标准都不能达到景观环境用水的标准，需再生水后续处理时再去除氨氮37%—67%。**TN指标：**一级A排放标准满足景观环境用水水质要求，但一级B排放标准不满足景观环境用水标准，需再生水后续处理时再去除TN25%以上。**TP指标：**一级A排放标准满足景观环境用水水质要求，但一级B排放标准只能满足河道类景观环境用水水质要求，不满足湖泊类和水景类景观环境用水标准，需再生水后续处理时再去除TP50%以上。另外，二级处理出水难于满足景观环境用水对浊度、粪大肠菌群等指标要求。

景观环境用水的关键是控制富营养化，为此，需尽可能降低再生水中的氮、磷含量，同时必须保持水体的流动。景观环境用水标准中要求，对于完全使用再生水作为景观河道类水体水力停留时间宜在5天之内，湖泊类水体水温 $>25^{\circ}\text{C}$ 时水体静止停留时间不宜超过3天。但再生水用于景观环境水体一般都是在地表水供用不足地区，同时河道和湖泊一次换水量较大，使得从控制水体富营养化角度考虑提出的上述水体流动要求难于实现，因此，目前部分地区（如北京）提出高品质再生水的要求，即将再生水质提高到类似地表水IV标准。

综上所述，二级处理出水难于满足景观环境用水水质要求，

再生水处理需进一步去除BOD和SS，尽可能地降低氮和磷，并进行相应的消毒处理。因此，在再生水处理技术选择中，应首先提高二级处理过程的生物脱氮和硝化效果，如采用多级A/O技术、增加缺氧段停留时间、提高内回流比、在好氧池中增加填料等，再生水处理采用反硝化滤池技术。对于BOD、SS和TP去除，再生水处理可选择混凝沉淀过滤、微絮凝过滤、磁共沉等技术，以满足景观环境用水水质标准要求；对于北方城镇水体地表水供用不足地区，应提高再生水的水质，可选择膜技术，包括MF、UF、RO和MBR技术。对于浊度的改善可选择活性炭吸附和臭氧氧化技术。消毒可选择臭氧消毒、紫外线消毒或氯消毒。工程中应对上述技术进行优化组合，从控制水体富营养化角度可选择强化二级处理+臭氧氧化+曝气生物滤池+反硝化滤池+消毒的技术路线，或强化二级处理+膜技术+消毒的技术路线。

3、再生水用于工业用水水源

根据《城市污水再生利用 工业用水水质》标准（GB/T 19923—2005），工业用水包括冷却用水、洗涤用水、锅炉补给水和工艺与生产用水。比较工业用水水质标准与排放标准，可以发现，主要水质指标如COD、BOD、氨氮和总磷等一级A排放可满足工业用水水质要求，一级B排放标准尚需后续处理去除BOD约50%，去除氨氮 $\geq 20\%$ 。

再生水用于冷却用水和锅炉补水时，若水质不能满足需要，将会影响系统的运行，导致结垢、腐蚀、生物增长等。结垢是由残余的有机物、钙及镁盐的沉积造成的。再生水中的高TDS、溶解性气体及高氧化态金属会导致锅炉和冷却系统腐蚀。同时，为防止结垢和腐蚀，还应对铁、锰、氯、二氧化硅含量，及硬度、碱度、硫酸盐、TDS和粪大肠菌群数进行控制。根据上述分析，再生水作为工业用水水源可选择强化二级处理技术（如在曝气池添加填料，提高硝化效果），后续处理可采用混凝沉淀过滤+消毒的技术，也可采用膜技术来提高处理效果并同时去除二级处理出水中的重金属，但膜处理+消毒技术工程投资和运行费用都较高。防止结垢、腐蚀的方法中一般采用化学法及沉淀法，如加酸酸化或加阻垢剂（如铬酸盐、多磷酸盐）等。

4、再生水用于农业

根据《城市污水再生利用农田灌溉用水水质》（GB/T 20922—2007），农田灌溉用水包括纤维作物、旱地谷物、油料作物、水田作物和露地蔬菜等灌溉用水。将再生水用于农业灌溉，应确保卫生安全，并防止土壤退化或盐碱化等。含盐量是再生水用于农业灌溉最重要的水质指标之一，标准中规定了非盐碱土地区及盐碱土地区的含盐量标准。另外，还应防止重金属及有害物质在土壤中富集，并通过食物链积累于农作物中。如果再生

水采用喷灌，尚需要控制悬浮物，以防堵塞喷头。对于纤维作物、旱地谷物和油料作物，二级处理加消毒即可满足要求，对于水田作物和露地蔬菜，需采用常规二级处理加混凝、沉淀、过滤等补充处理技术才能达标。

5、再生水用于地下水回灌

根据《城市污水再生利用地下水回灌水质》标准（GB/T 19772—2005），地下水回灌包括地表回灌和井灌两种。井灌对水质的要求比地表回灌要高。再生水回灌于地下含水层，补充地下水，用以防止因过量开采地下水而造成的地面沉降和海水侵入，但回灌于地下的再生水可能被重新提取用作农业灌溉用水或生活饮用水水源。

城镇污水处理厂的二级出水仍可能含有有机微污染物、痕量重金属、粪大肠菌、致病菌或病毒等有害物质。为防止对地下含水层的污染，提供清洁水链，对于地下水回灌的再生水水质要求较其他回用领域要严格。在地下水回灌再生处理技术选择中，需要采取多种单元技术组合才能满足回灌地下水水质要求。目前较常用选择的技术有：多层滤料过滤、臭氧氧化、反渗透、氯化、硅藻土过滤、混凝沉淀、活性炭吸附；消毒技术有臭氧消毒和氯消毒。

四、结语

城镇污水再生利用技术直接关系到再生水使用的安全性，技术选择除考虑满足再生水水质标

准外，应特别注意所选技术的安全性，尤其是再生水用于地下水回灌和地表水紧缺地区的景观环境用水时，需尽可能地提高再生水水质。在实际工程中，首先应比较作为再生水水源的污水处理厂二级出水 and 回用对象所要求的水质指标差异，分析再生处理需去除的主要污染物，根据不同的再生处理要求选择相应的技术。对于氮的去除目前主要采用生物处理方法，因此应首先考虑改造二级处理工艺，采用强化生物脱氮和提高硝化效果的技术，必要时可在后续再生处理工艺流程中增加反硝化滤池，提高氮的去除效果。对于有机物和磷的去除目前可供选择的再生处理技术较多，技术选择时应充分考虑所选技术的稳定性、合理性、经济性和安全性。