



文章栏目：工程创新与行业动态

DOI 10.12030/j.cjee.202009044

中图分类号 X703

文献标识码 A

张勤, 王哲晓, 李灿. 超磁分离水体净化技术在黑臭水体治理中的应用案例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9): 3133-3141.
ZHANG Qin, WANG Zhexiao, LI can. Application case of ReCoMag technology in the polluted urban rivers control[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(9): 3133-3141.

超磁分离水体净化技术在黑臭水体治理中的应用案例

张勤, 王哲晓*, 李灿

中建环能科技股份有限公司, 成都 610000

第一作者: 张勤(1984—), 女, 大学本科, 高级工程师。研究方向: 水处理工程项目及技术管理。E-mail: 2608010419@qq.com

*通信作者: 王哲晓(1983—), 男, 硕士, 高级工程师。研究方向: 水污染控制工程。E-mail: jorywang@126.com

摘要 超磁分离即在污水中投加磁性物质, 使不带磁性的污染物被赋予磁性, 再通过磁性设备实现固液分离, 达到水体净化的目的。分析超磁分离净化技术的原理、技术优势等, 确立基本工艺路线, 梳理该技术在黑臭水体治理各环节的应用工程。通过汇总因地制宜的案例经验, 总结了该技术存在的优势及不足: 处理效率高、占地面积小、施工周期短、运行维护简单等优点, 以及出水可生化性差、某些水质指标去除能力有限等不足。相关案例可为超磁分离技术水污染控制工程中的应用提供参考。

关键词 超磁分离; 黑臭水体; 水质净化; 技术应用案例

2015年4月, 国务院颁布《水污染防治行动计划》(水十条), 确定我国水污染防治目标^[1]: 即2017年底前, 直辖市、省会城市、计划单列市建成区基本消除黑臭水体; 到2020年, 地级及以上城市建成区的黑臭水体均控制在10%以内; 到2030年, 城市建成区黑臭水体总体消除。2015年9月, 住建部发布《城市黑臭水体整治工作指南》(“工作指南”), 提出“控源截污、内源治理; 活水循环、清水补给; 水质净化、生态修复”是城市黑臭水体整治的基本技术路线^[2-3]。

暴雨径流产生的城市面源污染是城市水体重要污染源, 污染负荷可占10%以上^[4]。暴雨初期雨水流量大, 且往往含有大量污染物^[5-6]。城市排水管网建设和改造滞后, 许多老城区排水管网难以进行分流制改造, 使得许多城市将长期面临城市面源导致的水体污染问题。以黑臭水体治理为目标, 开发针对城市面源初期雨水的快速高效一体化设备, 尽可能削减入河污染负荷, 对于维持城市河湖水体水质安全和水生态功能具有重要意义。

超磁分离即在污水中投加磁性物质, 使不带磁性的污染物被赋予磁性, 再通过磁性设备实现固液分离, 达到水体净化的目的。笔者团队基于超磁技术, 自主研发了超磁分离水体净化技术和成套设备, 在国内多个黑臭水体治理工程中得到成功应用。本文介绍超磁分离装备的技术原理和设备概况, 通过梳理其在黑臭水体治理各环节的应用工程, 总结了其停留时间短、净化效率高、容积负荷高、高度集成化等工艺特点。该技术在工程应用中可因地制宜设计、快速投产应

用, 可为河湖水体质量改善、功能恢复和水生态健康提供参考。

1 超磁分离技术的工艺原理及流程

1.1 工艺原理

污水中存在大量质量较轻的胶体和细小悬浮物颗粒。这些微小物质在水中受水分子热运动的碰撞而做无规则布朗运动。其中, 悬浮颗粒都带有同性电荷, 颗粒间的静电斥力阻止其彼此接近, 而不能聚合成较大颗粒; 胶体中带电荷的胶粒和反离子易与周围水分子发生水化作用, 在其外层产生水化壳, 阻碍胶体间的聚合。胶体的胶粒带电越多, 其电位就越大; 扩散层中反离子越多, 水化作用也越大, 水化层也越厚, 因此扩散层也越厚, 稳定性越强^[7]。

超磁分离水体净化技术即向污水中投入磁粉和混凝剂, 降低或破坏污水中胶体的电位降, 从而破坏颗粒稳定态(即脱稳); 脱稳的颗粒聚集成为较大颗粒, 形成以磁粉为核心的微絮团; 再通过高强磁场力作用至微絮团中的磁粉, 使微絮团克服流体阻力和自身重力, 快速定向运动并吸附至磁盘表面; 然后用设备的卸渣装置将泥渣与水体分离, 实现水质的净化; 最后, 再将磁性污泥送至磁粉回收设备中, 以实现磁粉与污泥的分离。分离出来的磁粉可返回前端循环利用, 参与下一次水质净化过程; 分离出的非磁性污泥因其含水量较低, 无需浓缩即可送至脱水系统处理, 脱水后的干泥外运处置。超磁分离技术的基本原理如图1所示。

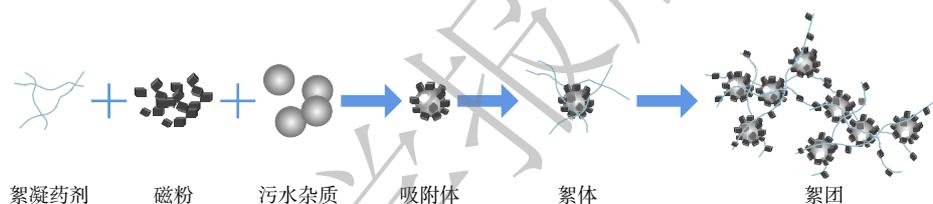


图1 超磁分离技术原理

Fig. 1 Principles of ReCoMag technology

1.2 工艺流程

超磁分离技术工艺流程(见图2)有4步: 1) 污水经提升或自流进入混凝反应器, 并投加一定浓度的磁粉充分混合; 2) 在混凝剂和助凝剂作用下, 水体中的磁粉与非磁性悬浮物相结合形成微磁

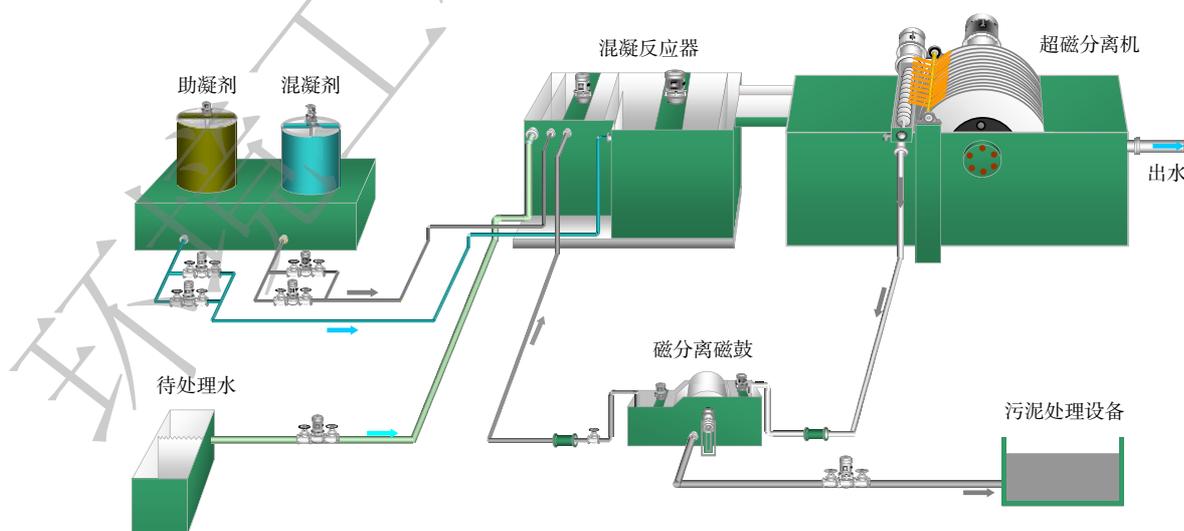


图2 超磁分离技术工艺流程图

Fig. 2 Process flow diagram of ReCoMag Technology

絮团；3) 混凝反应后的污水自流入超磁分离设备，通过高强度磁场的作用，形成磁性微絮团，再从磁盘打捞出水，使微磁絮团与水体分离开，出水可排放或进入下一步工艺；4) 从磁盘分离出来的微磁絮团通过磁回收系统处理，将磁粉和非磁性污泥分离开，磁粉可循环再利用，污泥则进入下一步的污泥处理系统。

1.3 技术优势

笔者团队经过多年实践，开发的集成处理设备在污水处理工程中展现了较好的应用效果，呈现5个方面的技术优势：1) 磁粉加入后形成的带磁核的高密度均匀微絮团，提高了混絮凝反应的效率。该技术的分离效率为重力沉淀法的数百倍，在4~6 min内即可实现较好的处理效果；而反应时间仅为高密度沉淀及加砂沉淀技术的5%~10%；2) 集成处理设备结构紧凑，占地面积小，为传统工艺的1/6~1/8。设备可用卡车装载，便于整体移动，应用灵活(见图3)；3) 系统的耐负荷和抗水量波动冲击的能力强，出水水质较好，SS去除率能达到90%~95%，藻类去除率 \geq 95%，TP去除率为80%~90%，COD去除率为40%~60%；4) 集成设备的自动化程度高，运行费用低，磁种回收率可达98%以上。系统装机容量小，耗电量低，低碳节能；5) 从污泥处理的角度来说，工艺的排泥浓度高，含水率 \leq 95%，在无需浓缩的前提下即可直接进入脱水机处理^[7]。



图3 移动车载式超磁分离设备

Fig. 3 Mobile ReCoMag device

2 超磁分离技术在黑臭水体治理中的应用案例

根据住建部“工作指南”指导意见，结合超磁分离技术和装备自身优势，提出黑臭水体治理的基本思路以及因地制宜、“一水一策”的应用策略，具体分为“控源截污”“内源治理”“活水循环”“清水补给”“水质净化、生态修复”等方面。

2.1 控源截污典型应用案例

针对排污口的直排污水、泵站(污水厂)溢流水、初期雨水及其他需应急治理的污水问题，采取截污净化的方式，从源头上控制污染物进入水体，实现清水入河。控源截污和内源治理是消除黑臭水体的基础与前提^[2]。其中，“控源”的对象包括未纳管直排污水、初期雨水、泵站(污水厂)溢流水以及应急排污等，以下为应用案例。

2.1.1 未纳管直排污水处理的应用案例

北京清河沿岸有多个污水直排口(如图4)，未经处理的污水直排入清河导致河水发黑发臭。水体质量差不仅使周围居民的生活环境变差，还进一步污染河道周边的土壤及地下水。经调研，清河沿岸的污水直排现象有：城中村污水直排、管网未覆盖地区的雨污合流排污、采沙场洗砂废水直排等。结合项目实际情况，采取建设临时治污工程措施来治理因直排导致的黑臭问题。

根据调研情况，最终确定沿岸建设3个应急治理站：河北村应急治理站，处理规模为 $2\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ；外环跌水闸应急治理站，处理规模为 $20\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ；沙总排排污口应急治理站，处理规模为 $15\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。工程以去除黑臭、提升感官效果为目标，设计采用流程简单、占地面积小、工程建设周期短、启动迅速、去除效率较高的超磁净化处理工艺，达到了初步改善城区段清河水质环境质量的的目的。建成后，每年可削减 $2\,210\text{ t}$ 悬浮物、 $1\,530\text{ t}$ 有机污染物(以COD为指标)和 18 t 含磷污染物(以TP为指标)。治理后出水效果如图5所示。



图4 排污口

Fig. 4 Sewage outfall



图5 治理后照片

Fig. 5 Photos after treatment

对于类似情况的未纳管直排污水，可以采用一体化超磁分离设备临时应急处理的方式，即能快速响应、应急治理，待管网完善、污水纳管处理后，设备还可以挪至其他地方继续使用。

2.1.2 初期雨水处理的应用案例

江西省萍乡市中心城区人口密集，部分排水管为合流制，存在排水管径较小，管材严重老化且排水系统不全的情况。由于城区排水不畅，部分地区常受内涝之灾。为解决城区现状积水较严重的路段排水及近几年即将实施的道路排水问题，对萍乡市西门内涝区进行综合整治。

综合整治工程内容包括在萍乡市公交西站内修建3#和4#调蓄池储存初期雨水。由于在降雨初期，雨水溶解了空气中大量的污染性气体，降落地面时，又冲刷屋面、道路等固化面，所以初期的雨水中含有大量污染物。晴天经雨污合流制管道外排时又混入大量生活污水，使得调蓄池储水中混入大量污染物。若未经处理直接外排，会给水环境造成严重污染。由于此次整治为老城区改造，可用地面积极其有限。故将初雨净化站点设置在小西门桥头处三角地带，实际可用地面积仅260 m²。

经比选，最终采用处理能力10 000 m³·d⁻¹，占地面积仅有113 m²的集成式超磁分离设备(见图6)。设备运行至今，已实现对调蓄池排水的长期处理。设备长期进水水质指标平均值：SS为180 mg·L⁻¹，COD为100 mg·L⁻¹，TP为2 mg·L⁻¹。出水水质指标平均值：SS小于20 mg·L⁻¹，COD小于50 mg·L⁻¹，TP小于0.5 mg·L⁻¹。水中污染物被大幅削减，就近排入河道，亦可对其进行补水，以改善河道水环境。



图6 萍乡市综合整治项目中超磁分离设备布置图及现场照片

Fig. 6 Comprehensive renovation project of ReCoMag equipment layout and site photos in Pingxiang city

对于海绵城市的“渗、滞、蓄、净、用、排”，超磁分离可利用自身占地面积小、处理效率高的优势，配套调蓄池，针对海绵城市的“蓄、净”2个环节有效结合，对初期雨水收集净化处理后外排。

2.1.3 泵站(污水厂)溢流水处理的应用案例

杭州市余杭区及临平副城污水处理系统的污水输送泵站长期高水位运行,致使地势低洼地段经常发生污水满溢现象。溢流污水通过雨水管排入河道,导致河道水质变差。余杭区政府拟对区域内管网进行升级改造。管网建成前,需采用应急处理的方式将各泵站超量污水中的污染物进行快速削减,然后再外排。为避免污水溢流对河道造成污染,应急处理设施需赶在汛期来临前建设完成,并通水运行。

为节省投资、保证项目工期,拟将应急处理设备布置在各泵站旁,故需选用建设周期短、占地面积小、可移动式的工艺设备。经比选后,最终选用集成式超磁分离设备,对溢流污水中的污染物进行快速削减。污泥采用吸粪车定期送至污水厂集中脱水处理。该项目共建设6个站点,总规模 $9.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。项目在30 d内(含土建)即建成通水,体现了超磁分离设备建设周期短、占地面积小、出水效果稳定的优势。近年来,浙江省提出“五水共治,治污先行”的水环境改善路线。余杭区的污水量也逐年增加。为提高区域内各污水应急治理点的处理能力,并确保达标排放,决定通过改造和新建应急处理点,使外排水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级B标准。

在对乔司永玄路站点进行提标改造中,系统出水主要考核指标有COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、SS、TP。现有超磁分离工艺为物化处理方法,主要去除水中SS、TP及悬浮性COD。因此,为进一步去除水中COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等污染物,需增加二级生物处理段。经工艺比选,最终选用“超磁分离技术(现有)+无堵塞曝气生物滤池”。无堵塞曝气生物滤池采用独创的气水分布滤砖技术,克服了传统曝气生物滤池滤头易堵塞的问题,是一种新型生物膜法污水处理滤池系统。

系统处理规模为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。由于项目性质为应急治理,工期紧,滤池主体结构采用钢材焊接而成(设计效果图见图7),45 d实现通水调试。系统正常运行后,出水优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级B标准(TN指标除外),系统进、出水水质见表1。

超负荷的泵站(污水厂)溢流水,在污水厂扩容工程建成前,可采用超磁分离设备进行临时应急处理;或采用“超磁分离+生化处理系

统”,进行全指标处理。

2.2 内源治理典型应用案例

黑臭水体的内源治理即垃圾清理、清淤疏浚等处理措施。清淤疏浚主要清理底泥中的污染物。通过清除底泥,可实现黑臭水体污染源负荷的迅速降低,减少底泥污染物向水体中的释放。底泥清理方式有机械清淤、水力清淤等。机械清淤产生的污泥经脱水后外运处置,滤液回灌至水体。由于滤液依然存在浊度、总磷等污染指标较高的问题,为避免滤液对水体造成二次污染,需同时配套滤液净化设备,对滤液净化处理后再排入水体。

四川省绵阳市木龙河流域中污染物超标严重。对该流域水环境特点和水质污染现状进行调研后发现,河道受到农田废水污染、村庄生活污水污染、沉积淤泥内源污染、缺乏生态基流等的影



图7 乔司永玄路站点的设计效果图

Fig. 7 Design renderings of the Josi Yongxuan Road station

表1 乔司永玄路站点进、出水水质的月均值

Table 1 Influent and effluent quality of the Josi Yongxuan Road station $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	SS	TP	$\text{NH}_3\text{-N}$
进水	200	218	4.6	60
出水	55	10	0.5	7

响。针对以上具体问题,采用“控源截污—内源清淤—超磁透析净化—原位生态修复”的技术路线。其中,需对2 km河段进行机械清淤,清淤厚度为0.2~0.3 m,淤泥量约为8 000 m³。清淤产生的污泥经脱水后用于绿化种植。滤液经净化处理后再回灌至河道。由于脱水后的滤液浓度高,且河边可用地面积小,故采用集成度高、处理效率高的车载移动式超磁分离设备。净化后滤液的SS低于20 mg·L⁻¹、TP低于0.5 mg·L⁻¹。清淤工作完成后,超磁分离设备可运至其他站点继续使用。

2.3 活水循环典型应用案例

对于断头河、胡泊等封闭水体,水体流动性差,易发生富营养化现象,变得浑浊不堪。严重时水体甚至变绿、变臭、发黑,影响水景观赏效果和周边生活环境。采取循环透析的方式,以快速削减水中污染物,提高水体流动性,从而实现水质长效保持。

北京总装航天城的人工湖湖区总面积有2×10⁴ m²,湖区平均水深1.05 m,水体的总库容量为2.1×10⁴ m³。由于水体流动性差,湖区水体浑浊不堪,透明度低(30~40 cm),亟需整治^[4]。为提高水体流动性,采用超磁循环透析技术,从湖体一端取水,经超磁分离净化后,出水排至湖体另一端,以实现对湖水进行透析式循环处理,将湖水快速净化,并达到长效保持的目的。配合湖区生态修复技术,系统正常运行后,水质保持在《地表水环境质量标准》IV类水标准以上。项目现场照片如图8所示。



图8 北京总装航天城人工湖区的超磁净化站
Fig. 8 ReCoMag Station rendering of Beijing Assembly of space city artificial lake area

2.4 清水补给典型应用案例

针对景观用水、功能性用水等需要引水补给的情况,首先需要确保引水水源的水质达标,避免污染物进入后续用水段。

苏州市同里古镇家家临水、户户通舟。古镇里因水成街、因水成路、因水成市、因水成园。古镇景区内的水源为同里湖引水补给而入。近年来,由于古镇周围工业和生活污水部分排入同里湖,湖区内累积了大量污染物。同里湖水体的自净能力已不能保证湖区水质,导致水体发生富营养化,产生臭异味,导致景区内水体透明度和感官效果日益下降。春夏季水体中蓝藻滋生,影响到景区水环境观感。

为改善水质现状,恢复、保持水乡特色,通过大量调研、试验和技术论证,最终选用单套处理能力大(3.6×10⁴ m³·d⁻¹)、后期运行成本低(每吨水0.18元)、占地面积小(336 m²)、出水效果稳定的超磁分离水体净化成套工艺技术来改善景区河道水质。现场设备将同里湖西侧河口水经由提升泵提升至超磁分离净化站,净化后的水通过出水口至景区饮马桥闸口流出。随着此处清水源源不断的补给,实现了景区内水活、水清的目标。景区内水质感观发生明显变化,浊度由进水的29.8,降至出水5.3;透明度由0.35 m提升至1.6 m;TP由0.127 mg·L⁻¹降至0.031 mg·L⁻¹;COD由14.9 mg·L⁻¹降至9.4 mg·L⁻¹;SS由69 mg·L⁻¹降至12 mg·L⁻¹;治理前后效果对比如图9。项目的实施有效控制住了高温期



图9 治理前后同里古镇内的效果对比
Fig. 9 Comparison of effects before and after treatment in Tongli town

河道中藻类、浮萍的生长及爆发。

对于此类引水工程，超磁分离单套处理能力大、占地面积小、可有效去除 SS、TP，提高透明度，可作为河道、景观水“引清给清，生态补水”的重要手段。

2.5 “水质净化、生态修复”典型应用案例

针对流域治理，需要在做好控源截污、内源治理等多项措施的前提下，在水质净化的同时，结合生态修复、曝气复氧等手段进行综合治理。

安徽省淮北市共有 8 条河道。经现场踏勘，跃进河、西向阳沟、西流河、东向阳沟、宁王沟河道水污染严重，水质均处于劣五类。基于超磁分离技术，运用“超磁循环透析+生态修复+曝气复氧”的治理思路(工艺流程见图 10)，进行淮北市城市河道综合整治工程。对河水进行循环透析，以快速削减水中 COD、SS、TP 等污染物，提升水体透明度，提高河水感官效果。结合河道清淤、生

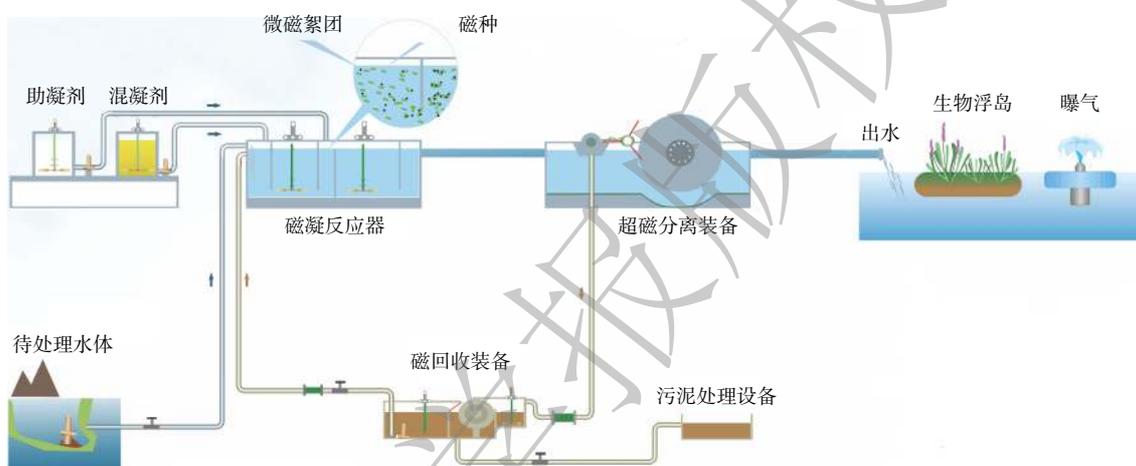


图 10 安徽淮北市城市河道综合整治的工艺流程

Fig. 10 Process flow of Urban River comprehensive treatment project in Huaibei City

态修复和曝气复氧等措施，可进一步去除水中 N、P 等指标，打造完整水生态系统，丰富河道生物的多样性，并达到长效保持水体水质的目的。

该项目于 2017 年 6 月动工。先进行河道清淤和驳岸建设，之后在西向阳沟、西流河、东向阳沟等地建设 3 座超磁分离净化站，于 2017 年底建成并通水。生态修复及曝气设施陆续施工，并于



图 11 安徽淮北市城市河道综合整治工程的现场照片

Fig. 11 The scene of comprehensive improvement of watercourse in Huaibei City

2018 年 6 月前完成该综合治理项目的整体建设(现场照片见图 11)。长期监测显示，河道水质指标 DO 大于 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TP 小于 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 小于 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、透明度大于 100 cm。

3 结语

超磁分离技术具备处理效率高、占地面积小、施工周期短、运行维护简单等优点,但也存在出水可生化性差、某些水质指标(如氨氮、总氮、溶解性有机物等)去除能力有限等不足^[1]。围绕城市水体“控源”、黑臭水体治理等需求,超磁分离技术可为多种场景灵活提供方案,尤其是在未纳管污水直排、泵站(污水厂)溢流排污、初期雨水净化、河道清淤脱水滤液净化、活水循环、河道及景观补给水净化等场景的应用。对于更高的水质维持和水生态保护目标,超磁分离技术可与其他物化、生化和生态等单元工艺和工程措施结合,实现河湖水环境综合治理与改善。

参考文献

- [1] 王谦,高红杰.我国城市黑臭水体治理现状、问题及未来方向[J].环境工程学报,2019,13(3):507-510.
- [2] 住房和城乡建设部,环境保护部.关于印发城市黑臭水体整治工作指南的通知[N/OL].(2015-08-28).http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201509/t20150911_224828.html
- [3] 赵越,姚瑞华,徐敏,等.我国城市黑臭水体治理实践及思路探讨[J].环境保护,2015,43(13):27-29.
- [4] 桂晗亮,张春萍.城市面源污染研究现状及展望[J].环境保护前沿,2019,9(6):775-781.
- [5] 汉京超,王红武,马鲁铭,等.城市雨水径流污染总量核算[J].复旦学报(自然科学版),2013,52(6):811-816.
- [6] 汪迎春,刘贵平.城市雨水径流年污染总量核算[J].土木建筑与环境工程,2012,34(4):118-124.
- [7] 王哲晓,吕志国,张勤.超磁分离水体净化技术在水环境领域典型应用综述[A].国际水生态安全中国委员会、河海大学环境学院、中国疏浚协会、浙江省生态经济促进会、浙江省水利学会.加强城市水系综合治理 共同维护河湖生态健康——2016第四届中国水生态大会论文集[C].国际水生态安全中国委员会、河海大学环境学院、中国疏浚协会、浙江省生态经济促进会、浙江省水利学会:北京沃特咨询有限公司,2016:10.

(责任编辑:靳炜)

Application case of ReCoMag technology in the polluted urban rivers control

ZHANG Qin, WANG Zhexiao*, LI can

CscecScimee Sci.& Tech.Co., Ltd., Chengdu 610000, China

*Corresponding author, E-mail: jorywang@126.com

Abstract ReCoMag technology is a water quality purification technology, and the principle is: by adding magnetic substances in sewage, non-magnetic pollutants becomes magnetic. Through ReCoMag separation equipment, the solid pollutant will be separated from the liquid one. The magnetic substances take away the pollutants from the water, and so the purification is achieved. Through analyzing the principles and technological strengths about ReCoMag technology, the author of this article wants to explore the application of this technology in the polluted urban rivers control and to set the basic rules of the technology. Through analyzing the whole process of application of ReCoMag technology in polluted urban rivers control, the author collects case studies of different areas and shows the advantages and disadvantages of this technology. The advantages of this technology are high efficiency, less land occupying, shorter construction period, easier maintenance, while the disadvantages are poorer biodegradability of effluent, inefficiency of purification in certain indicators such as Ammonia nitrogen, total nitrogen, dissolved organic matter, etc. This article lists cases for the application of ReCoMag technology in the polluted urban rivers control and exploits new technology in polluted water containment.

Keywords ReCoMag technology; the polluted urban rivers; water quality improvement; case study