

水环境综合整治

城镇污水处理提质增效的内涵与思路

孙永利

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 污水管道旱季高水位、低流速导致的颗粒物沉降是我国独有的现象,也是我国城镇污水处理厂进水污染物浓度低、碳氮磷比例失调的根本原因;入渗/入流污水管道的清水、低浓度污水排口截流,以及排入雨水管道并经末端截流进入污水管网的施工降水或基坑排水,是城镇污水处理厂旱季进水污染物浓度偏低、处理水量远超污水排放量的重要原因;降雨期间大量雨水涌入污水管道和合流制管道,冲刷并携带旱季沉积物进入城镇水体,是水体雨后黑臭、底泥问题无法彻底根除的核心缘由,也是大部分城镇“生活污水集中收集率”偏低的直接根源。结合城镇污水处理提质增效工作的实施,从污水处理行业监管、收集设施效能评估、雨污水管网建设改造、降雨污染控制和工业废水管控等方面提出了重点工作方向。明确指出,全面恢复市政污水管网旱季流速、降低清水入渗入流量、推进降雨污染控制是根治现阶段我国特有城镇水环境问题的最现实、有效的途径。

关键词: 城镇污水处理; 提质增效; 污水管道旱季流速; 污染总量削减

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)02-0001-06

Connotation and Way of Quality and Efficiency Improvement of Municipal Wastewater Treatment

SUN Yong-li

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: Settlement of particles in wastewater pipeline caused by high water level and low flow rate in dry season is common in China but rare in developed countries, which leads to low influent organics concentration and imbalance ratio of carbon, nitrogen and phosphorus of the wastewater treatment plants. Infiltration/inflow clear water, closure of low concentration wastewater, and drainage of construction works or foundation pit discharged into rainwater pipeline and then into wastewater pipeline through end interception, inevitably results in the lower concentration of influent and larger amount of wastewater than that is discharged. Particle sediment in wastewater and combined pipelines flushed and carried by rainfall flowing into urban water body is the core reason of recurring black-and-odor water and sludge issue which cannot be completely resolved after rain, which also directly leads to the low centralized collection rate of domestic wastewater in most cities and towns. Based on quality and efficiency improvement of wastewater collection and treatment, key work directions were put forward from aspects of wastewater industry supervision, effectiveness evaluation of collecting facilities, construction and transformation of drainage pipeline, pollution control of rainfall, and industrial wastewater discharge control. It was suggested that the most realistic and effective way to completely solve the water environment problems in China was to fully restore design flow rate of wastewater pipeline, reduce the

infiltration/inflow of clear water, and promote the control of rainfall pollution.

Key words: urban wastewater treatment; quality and efficiency improvement; dry flow rate of sewage pipeline; total pollution reduction

经国务院同意,2019年4月29日住房和城乡建设部、生态环境部、国家发展改革委联合印发了《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021年)》(以下简称《三年行动方案》),明确提出加快补齐城镇污水收集和处理设施短板,尽快实现污水管网全覆盖、全收集、全处理的总体要求,提出地级及以上城市建成区基本消除“生活污水直排口”“生活污水收集处理设施空白区”“黑臭水体”,最终实现“生活污水集中收集效能”显著提升的工作目标,并从“推进生活污水收集处理设施改造和建设”“健全排水管网长效机制”“完善激励支持政策”“强化责任落实”4个方面提出了13项工作任务,为我国城镇污水处理行业提质增效工作指明了方向。为此,正确理解文件的出台背景,系统分析城镇污水处理设施效能低下的原因,科学梳理引发城镇水体污染的“真问题”,合理选择工程措施和技术手段,对症下药,快速实现污水收集效能提升,是城镇污水处理行业亟需解决的问题。

1 行业监管由“污水处理”转向“污水收集”

城镇污水处理率是一个重要的行业监管指标,对快速推进城镇污水处理工程建设,实现污水处理设施全面普及发挥了重要作用。统计结果显示,2000年以来我国城镇污水处理能力以每年不低于 $500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的规模快速增长,尤其是2001年—2009年污水处理率的年增长幅度均超过5个百分点;到2018年,75%以上的设市城市污水处理率超过90%,40%以上超过95%,部分城镇的污水处理量甚至远远超过供水量,表明我国大部分城镇污水处理设施能力可以满足居民生活污水处理需求。

污水处理率是指城镇污水处理厂实际处理水量与城镇生产生活排放污水量的比值,但由于城镇污水处理厂处理的水中掺混了地表水、地下水、山溪水、施工降水等,该比值已经难以满足行业质量管控和效能评价的需求。首次通过《三年行动方案》提出的“生活污水集中收集率”指标,以城镇污水处理设施收集的污染物总量与居民生活排放的污染物总量之比作为统计计算依据,更好地反映了城镇污水的收集普及水平和管网的转输能力。统计结果表

明,虽然很多设市城市的“污水处理率”处于较高水平,但“生活污水集中收集率”指标多处于相对较低水平,也就是说污水处理厂虽然处理了很多“污水”,但“污染物”的处理水平并不高,“污染物”外排环境水体的问题仍普遍存在,盲目扩大污水处理规模和提高污水处理厂排放标准并不一定能化解我国的水环境污染问题,城镇污水处理行业需要由“规模增长”向“质量提升”“效益提升”转变,全面提升城镇污水管网的运行性能是城镇污水处理提质增效的核心和关键。

“生活污水集中收集率”指标测算公式中的污水处理设施收集污染物总量,主要是通过城镇污水处理厂处理水量与污染物平均浓度计算的。虽然从公式的表达形式看,污水处理量越大,生活污水集中收集率就会越高,但这并不代表可以通过扩大污水处理规模,多处理污水来实现生活污水集中收集率指标的提升^[1],因为《三年行动方案》也明确了进水 $\text{BOD}_5 < 100 \text{ mg/L}$ 的污水处理厂是提质增效的核心,也是未来行业关注的重点。盲目扩建城镇污水处理厂来提升生活污水集中收集率,必将引发污水处理厂进水污染物浓度偏低的问题,并非明智之举。

2 管网考评由“工程建设”转向“建管运维”

2.1 提高管道流速是提升生活污水收集率的前提

流量、充满度、流速是排水管道的重要设计参数,而流速是管道运行效果的最主要评价指标,直接决定了污水中的颗粒物是否会发生沉降。对于给定的污水管道,在恒定流量的情况下,充满度越高意味着过水断面面积越大,流速越低。实际水量低于设计水量,而充满度高于设计充满度的管网,实际流速必然低于设计流速,甚至可能低于不沉降流速的控制要求,出现明显的颗粒物沉积问题。按高充满度设计,而实际水量已经接近甚至超过设计水量的污水管道,满管流并不一定会引起管道的低流速沉积问题。与分流制污水管道相比,合流制管道旱季高充满度运行时的流速问题更加突出,颗粒物沉积问题更加严重。

管道沉积物以泥沙等无机固体和大分子有机物(COD或 BOD_5)为主,旱季污水的COD或 BOD_5 大

量沉淀在管道内,是我国城镇污水处理率较高,但居民生活污水收集率偏低的根本原因;虽然沉淀物中也含有氮磷有机物,但溶解性的氨氮、磷酸盐等物质通常不会沉淀,而长期沉积在管道内的含氮含磷有机物还可能发生水解反应,向水中释放氨氮、磷酸盐等溶解性物质,这是我国城镇污水处理厂进水碳氮磷比例失调、脱氮除磷所需碳源不足的重要原因。 COD/TN 或 COD/NH_3-N 是污水管网颗粒物沉降问题的最佳识别因子,指标值降低是污水管道低流速运行,大分子有机物沉淀导致的 COD 降低,而溶解性氮并未因沉淀而降低的最佳说明。降低管道运行水位,多数情况下只会提高 COD 或 BOD_5 浓度,但不会引起氮磷浓度的明显增加,有助于缓解污水处理厂碳源不足问题。降雨期间,大量雨水涌入分流制污水管道和合流制管道,导致管道流速增加,冲刷并携带旱季沉积的有机物排入城市水体,严重影响了城市水体的治理效果,增加了水体水质维持的难度。

上述结果表明,旱季流速是管道运行状况的重要考核指标,不能合理控制管道旱季水位和流速,再好的管道质量也无法彻底解决低流速导致的颗粒物沉积问题。通过降低充满度和运行水位,将管道实际流速恢复至不低于设计流速或最小沉降流速是解决旱季沉降问题的最有效措施,也是快速提升居民生活污水集中收集率指标的最佳途径。

2.2 降低管道水位是避免污水冒溢的有效途径

污水管道处于非满管状态时,水面之上仍具有较大的蓄水空间,可以有效解决居民用水高峰期间的排水水量冲击问题。而污水管网处于满管状态时,就失去了这种缓冲水量冲击的能力,只要上游输入水量超过下游输送能力,就会经常性发生管道沿线污水冒溢问题。分流制污水管道和合流制管道长期“满管流”是很多城市排水口或溢流口阶段性污水冒溢的根本原因,降低管道运行水位是避免居民生活污水排放量波动引起的污水冒溢问题的重要措施。

2.3 降低泵池运行水位是实现管道低水位的前提

污水管道水位和下游提升泵站水位之间遵循连通器原理,通常情况下管道流速越高则上下游之间的水位差越大,因此上游管道的水位一般明显高于下游提升泵站的运行水位;但对于长期低流速运行、坡度相对较小的城市污水干管而言,管道沿程的水

位差并不明显,污水管道的运行水位实际上主要受下游提升泵站和污水处理厂集水井的运行水位控制。提升泵站和污水处理厂集水井过高的运行水位是城市污水管道“满管流”的最重要原因,只有将其降低至管道控制水位线以下才可能真正意义上实现管道的低水位运行。

2.4 定期清淤是提升污水管网健康水平的保障

为保障污水管网的正常运行和设施效能的稳定发挥,欧美等发达国家通常将管道淤积深度控制在不超过管道直径的5%。但我国真正定期实施管道清通养护工作的城市并不多见,大部分污水管道处于年久失修状态,再加上长期低流速运行导致的颗粒物沉降,污水管道多数存在底泥淤积问题,部分管道淤积深度甚至超过管道直径的50%,不仅影响了过水能力,还是导致检查井周边区域空气质量差的重要原因。积泥深度控制是管道运行状况的重要保障,应将污水管道清通养护水平和管道积泥深度作为城镇排水管网检测维护和质量考评的重要指标。

3 管网建设由“全面建设”转向“补齐短板”

3.1 强化居民小区污水直排和管网错接混接治理

城镇排水和污水收集管网是重要的市政基础设施,通常与市政道路等工程同步实施,因此多数城市并不存在市政主干管网空白区问题。但小区内部管网错接混接、小区管网与市政管网断接,以及历史遗留的老旧城区、城中村、城乡结合部区域和城市快速扩张形成的市政设施未覆盖的居住区,通常是市政管网的薄弱环节,也是造成“生活污水直排口”“生活污水收集处理设施空白区”问题的关键,是管网建设工作的最大难点和痛点。

管网错接混接是分流制排水系统独有的,居民楼宇的错接混接多数是因为洗衣机或厨房搬迁至阳台导致的污水错接入雨水立管的问题。这个问题在南方地区较为普遍,也是小区错接混接改造的重点。小区错接混接改造工程经验表明,将原雨水立管简单改造为污水管道,并增设雨水立管的方式并不能杜绝错接混接问题再次发生,管道喷涂颜色或增加标识也不能彻底解决上述问题。参照空调排水管道设计思路,在每一楼层合理预设接驳口,是避免错接混接反复的重要保障措施。

3.2 加强生活污水直排的源头治理和分类处理

生活污水直排口不应一截了之,更不能直接采

取截流污水全部就近排入市政管网,纳入污水处理厂的极端做法。城镇污水管网和污水处理厂都有其设计输送和处理能力,当污水量超过管网输送能力或污水处理厂处理能力时,截流并排入市政管网的污水会在管网沿线或污水处理厂前形成直排或溢流排放问题。生活污水直排口截污前应加强对拟排入管网和污水处理厂冗余能力的分析,不具有冗余处理能力时,需考虑采取临时措施进行处理排放,并同步规划启动永久性治理工程建设。

污水管道“满管流”造成的“生活污水直排”问题,原则上只能通过降低管道运行水位,腾挪足够的缓冲空间,接纳居民生活污水峰值排放量的方式解决;感潮河段落潮期间产生的溢流排污问题,是涨潮顶托城市水体水位上涨并淹没排水口,形成水体倒灌的必然结果,必须通过倒灌口的合理设计改造和控制才能彻底根除。

现有城镇污水处理能力不足、污水处理厂长期超负荷运行,“生活污水直排口”“生活污水收集处理设施空白区”等问题相对突出的城市,应将生活污水全收集、全处理作为当前的主要任务,在污水处理厂扩建和提标所需占地面积不足、新建工程选址和建设难度较大时,优先推进污水处理厂扩建工程建设,彻底解决污水管道或污水处理厂前旱季溢流或直排问题,全面提升城镇居民生活污水收集率,实现城镇生活污染总量减排。

4 管网改造由“雨污分流”转向“清污分流”

4.1 以污染总量削减为目标构建合流制排水系统

不论是合流制还是分流制排水系统,都有其自身的优点,也必然有其不足。合流制并不是我国独有的,东京、巴黎、华盛顿等发达国家大都市的老城区同样也是以合流制为主,德国全国的合流制占比甚至超过了50%。雨污不分是老旧城区的通病,但运行良好的合流制排水管道可将旱季排入收集系统的所有污染物输送至污水处理厂,不管这些污染物是小区居民通过雨水立管排入,还是沿街商铺通过雨水算子排入。因此只要是合流制管网全覆盖,排水管道运行良好的区域,原则上应不存在旱季直排或冒溢问题。管道建设的空白区和长期“满管流”是合流制排水区域污水直排和冒溢问题的根源。

我国的合流制排水系统与发达国家的最大差距是降雨溢流污染控制问题。目前,欧美、日本等发达国家合流制区域多数按截流倍数设置了污水处理厂

雨季处理能力,部分城市甚至在合流制管网入河口设置了快速净化设施,有效解决了合流制排水系统降雨期间的颗粒物冲刷入河导致的水体污染和河道底泥沉积问题。我国绝大部分城市并不具备降雨污染控制能力,再加上降雨冲刷导致的旱季管道沉积污染入河,是我国合流制排水区域城市水体雨后黑臭的最大根源,也是未来城市水体治理应关注的重点方向。

4.2 加强分流制系统末端截流的“清水入流”管控

我国城镇排水管道错接混接、沿街商铺违法排污、工业企业偷排等问题较为普遍,分流制雨水管道成为藏污纳垢的重要场所。雨水管道旱季能形成径流时,会在下游入河口产生污水直排问题;不能形成径流的,会存留在管道内并在降雨期间被冲刷至城市水体。有瑕疵的分流制系统并不能彻底解决我国的水环境问题。

处于大建设阶段的中国城市,借雨水管道排放施工降水和基坑排水成为无法回避的难题。雨水管网沿线存在错接至污水管网的情况时,施工降水和基坑排水会通过错接混接点进入污水管网;或即使无错接混接问题,施工降水和基坑排水本身含有的泥沙叠加源头错接混接和沿线商铺排污,也会使雨水口成为新的排污口,雨水口末端截污成为很多地方的无奈之举。施工降水和基坑排水成为很多城镇污水处理厂最大的“清水”来源,不仅稀释了污水处理厂进水浓度,而且增加了处理水量压力。

4.3 科学识别清水来源是“清污分流”的基本保证

污水管道的“清水入渗”问题并非中国独有,欧美等发达国家同样存在。科学推进“清污分流”是城镇污水处理提质增效、污水管网系统改造修复的重要工作方向。

污水管道“清水”来源识别是科学推进“清污分流”工作的前提和基础,“水往低处流”是最基本的生活常识,“清水入渗”也不可能违背这个科学规律。在进行管道“清水”来源识别时,应通过关键节点污水管道水位与周边可能产生入流/入渗问题的地下水、浅层地下水、地表水(含山溪水等)的水位关系及其季节变化特征分析,明确污水管道中的“清水”来源并制定切实可行的技术策略。过高的城市水体水位导致的地表水入流或倒灌污水管道问题应引起排水行业的广泛关注。盲目将地下水或地表水认定为污水管道中“清水”的主要来源,将管道

质量差认定为清水入渗的根源,可能并不利于污水管道“正本清源”工作的科学推进。

考虑到多数入渗/入流污水管网的“清水”通常处于相对较低的 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 浓度水平,且 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 值通常不受管道沉积影响,实际工作中可将 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 作为“清水入渗”问题的识别指标,通过管网沿线各关键节点的 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 变化情况分析,粗略估算“清水”入渗的来源和入渗比例。

5 降雨污染由“达标排放”转向“总量减排”

5.1 可快速启动技术是降雨污染控制的最好选择

不管合流制还是分流制排水系统,降雨污染控制都是无法回避的现实需求,我国分流制的城市同样存在小区和管网沿线错接混接导致的污水管道溢流污染和小散乱排污导致的雨水管道冲刷污染问题。与居民生活污水连续排放不同,降雨并非连续发生的事件,如采取生物处理技术,不仅需要在降雨来临前进行生物培养,还需要考虑降雨后的生物污泥处理处置问题。片面追求降雨污染控制设施的高排放标准,要求使用生物处理技术对降雨污染进行净化,在技术、经济等方面都存在不合理之处。

降雨属于短期行为,需要的是反应周期短、见效速度快、水量负荷大、抗冲击能力强的处理设施,欧美等发达国家实际上也通常选用以 SS、COD 和 TP,尤其是可沉淀颗粒物为主要去除对象,停留时间相对较短的化学混凝沉淀、加砂沉淀、介质过滤等物化处理技术装备,并通过相对较大的设施规模,快速高效削减降雨溢流污染总量,降低降雨污染对受纳水体的影响。

5.2 海绵城市“渗、蓄、净”强化降雨污染总量削减

除可采取处理设施对已排入管道中的雨污水进行净化处理外,实际工作中也可考虑充分发挥海绵设施的“渗、蓄”功能,通过海绵设施将雨水截留在城市土壤中,以减少排入管道的雨水量,降低合流制管道溢流量和错接混接造成的分流制污水管道冒溢量,实现降雨污染总量削减。

调蓄池作为雨水的临时存储设施,在欧美等发达国家的降雨污染控制方面发挥了重要作用。但我国的合流制溢流水、分流制污水管道冒溢水和雨水管道冲洗水都存在比较严重的沉积底泥冲刷污染问题,泥沙和有机物含量过高的水进入调蓄池,对调蓄池的恶臭控制和雨后冲洗维护提出更高要求。另外,如何为调蓄池配套高标准污水处理设施,确保雨

后处理达标排放也是重大的技术难题。在调蓄池前设置快速净化设施,有效去除其中的颗粒物,在此基础上适当延长调蓄池的排空周期要求,并通过下游污水处理厂的冗余能力对调蓄池污水进行处理达标排放,是调蓄池在我国稳定运行的最合理、可行的方案。但国内多数城镇污水处理厂并不具备这种冗余能力,南方降雨频繁地区多数也不具有延长调蓄池排空时间的条件。

6 工业废水由“达标排入”转向“限期清退”

6.1 工业废水排入影响城镇污水处理厂稳定达标

工业企业自建污水预处理设施,将工业废水处理至满足下水道纳管标准后排入城市下水道,是我国城镇排水工程设计的传统做法,在城镇污水处理厂污染物排放标准相对较低、污水处理后直接排放的时期得到广泛应用,对全面实现污染总量减排起到重要作用。

但是厂内预处理达到排入下水道标准的工业废水中通常含有大量不可生物降解的溶解性有机物,尤其是有机氮磷。一级 A,尤其是准 IV、准 III 类排放标准中的 COD、 BOD_5 、TP 等指标的限值已经与生活污水中不可生物降解溶解性有机物和有机磷的量基本相当,如果再叠加工业废水中不可生物降解的溶解性有机物和有机氮磷的影响,常规污水处理工艺很难确保稳定达标,实际工程中不仅需要考虑延长停留时间、增加曝气强度等生物处理措施,甚至需要增设臭氧、芬顿等高级氧化工艺单元,或活性炭、活性焦等物理吸附工艺单元,增加工程投资和运行成本的同时,还存在随时超标的风险。

工业废水达到城市下水道标准后排入城镇污水处理厂处理,并非经济有效的减排措施。工业废水通过工业企业自建设施处理达标,实际上是高浓度污染物的去除过程,去除单位污染物所需的能耗物耗并不高。但工业废水排入城镇污水处理厂并被城镇污水稀释后,就演变成大水量低浓度污染物的去除过程,不仅面临着处理水量的成倍增加,还涉及到低浓度物质去除所需的能耗物耗的成倍增加。也就是说与工业企业自建设施达标排放相比,工业废水排入城镇污水处理厂处理会面临更大的社会成本。

工业废水达到排入城市下水道相关标准一般也采用生物处理技术,因此将排入城市下水道的 COD 控制标准由 500 mg/L 降低到 300 mg/L 甚至更低水平,所去除的仍然以可生物降解有机物为主,最终排

入城镇污水处理厂的不可生物降解有机物总量并没有实质性降低。因此降低工业废水排入城市下水道标准的做法,通常难以彻底解决难生物降解有机物引起的城镇污水处理厂难达标的问题。

6.2 工业废水排入影响再生水和污泥的安全利用

除含有大量不可生物降解有机物外,排入城市下水道的工业废水通常还含有不能通过生物净化去除的重金属、有毒有害物质,这些物质会“穿透”整个城镇污水处理系统,最终随出水排入周边水体,对城市水体的生态安全性形成潜在影响;或通过吸附、沉淀等工艺单元进入剩余污泥,增加了污泥处理处置和生态利用的风险;采用各种化学强氧化工艺技术与装备进行不可生物降解有机物的极限去除,还有可能出现新的副产物和中间体,引发新的环境污染和生态风险问题。

部分食品工业废水因富含有机物,被很多城镇污水处理企业遴选为低成本的廉价碳源。作为高排放标准城镇污水处理厂的外部碳源,不仅需要关注其有机物含量,也包括其碳、氮、磷比例,以及不可生物降解有机物、重金属和有毒有害物质含量,避免因小失大,将食品工业废水作为补充碳源的同时,大量引入不可生物降解有机物、高氮磷物质、重金属或有毒有害污染物,对污水处理工艺运行和出水水质稳定达标造成影响。

6.3 工业企业退出城镇污水处理厂获得政策支持

国务院颁布实施的《水污染防治行动计划》明确规定:城市建成区内现有钢铁、有色金属、造纸、印染、原料药制造、化工等污染较重的企业应有序搬迁改造或依法关闭。《三年行动方案》也明确要求:地方各级人民政府或工业园区管理机构要组织对进入市政污水收集设施的工业企业进行排查,地方各级人民政府应组织有关部门和单位开展评估,经评估认定污染物不能被城镇污水处理厂有效处理或可能影响城镇污水处理厂出水稳定达标的,要限期退出。一系列政策文件为工业企业退出城镇污水处理厂提供了政策和技术保障。

7 结语

经过多年的快速建设,我国的城镇污水处理设施已经基本实现全面普及,绝大多数城市现有污水处理厂的处理能力基本上可以满足城镇居民生活排水的处理要求。但排水管网不健全、不完善、管网质

量差、运行不规范、养护不及时等导致的收集效能低下、污水处理厂进水浓度偏低的问题较为突出,已经成为影响行业发展和质量提升的重大问题,只有在《三年行动方案》及一系列政策和技术文件的指引下,科学识别引发城镇排水设施效能低下的实际问题,围绕核心问题,对症下药,通过各种工程措施和技术手段,快速实现污水收集效能提升,才能顺利完成《三年行动方案》提出的城镇居民生活污水收集率和城镇污水处理厂浓度提升的双重目标要求,实现城镇污水处理行业由“规模增长”向“质量提升”和“效益提升”的科学转变。

参考文献:

- [1] 孙永利,郑兴灿,高晨晨,等. 城镇居民人均日生活污水污染物产生量测算之方法构建[J]. 中国给水排水, 2019, 35(24): 1-4.

Sun Yongli, Zheng Xingcan, Gao Chenchen, et al. Calculation method construction of daily domestic pollutant production of urban residents per capita [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(24): 1-4 (in Chinese).



作者简介:孙永利(1975—),男,山东威海人,博士,教授级高级工程师,主要从事城市水体和污水处理的技术与政策研究,承担国家和省部级科研课题、子课题 20 余项,获中国专利优秀奖 1 项,国际水协(IWA)科技创新全球最高奖 1 项,省部级科技进步一等奖 3 项、二等奖 4 项、三等奖 6 项。授权专利 38 项,其中发明专利 20 项。

E-mail: tjsunyongli@163.com

收稿日期:2019-11-25