

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.01.008

基于水量水质的污水收集处理系统效能分析

黄志伟^{1,2}, 温婧^{1,2}, 崔飞剑^{1,2}, 覃光雄^{1,2}, 房怀阳^{1,2}, 曾凡棠^{1,2},
杜宏伟^{1,2}

(1. 生态环境部华南环境科学研究所 国家环境保护水环境模拟与污染控制重点实验室,
广东 广州 510530; 2. 广东省水与大气污染防治重点实验室, 广东 广州 510530)

摘要: 从流域治理角度提出了一种基于水量水质的污水收集处理系统效能分析方法,并以沙河流域为例,系统调查典型排水户、管网及污水处理厂的水量水质特征,分析污染物沿程“损失”率,计算各片区污水及污染物的实际收集处理率,识别出重点问题区域,以期为流域治理及提质增效提供参考。研究表明,沙河流域的污水处理厂总体进水浓度偏低,其中管网是造成污染物沿程“损失”的关键环节,“损失”率在61%~69%;降雨对污水厂进水量和水质影响较大,部分片区没有处理超量混合污水的能力,雨季溢流污染问题突出;污水及污染物收集处理率可作为城市污水收集处理系统效能定量评价的重要参考,经计算,沙河流域的污水收集处理率为71%,COD、NH₃-N、TN和TP的收集处理率分别为59%、50%、55%和62%,符合流域水环境质量及污水管网建设的实际情况。

关键词: 污水收集处理系统; 水量水质; 效能分析; 沙河流域

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)01-0049-09

Efficiency Analysis of Sewage Collection and Treatment System Based on Water Quantity and Quality

HUANG Zhi-wei^{1,2}, WEN Jing^{1,2}, CUI Fei-jian^{1,2}, QIN Guang-xiong^{1,2},
FANG Huai-yang^{1,2}, ZENG Fan-tang^{1,2}, DU Hong-wei^{1,2}

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Water Environmental Simulation and
Pollution Control, South China Institute of Environmental Sciences, MEE, Guangzhou 510530,
China; 2. Guangdong Key Laboratory of Water and Air Pollution Control, Guangzhou 510530,
China)

Abstract: From the perspective of watershed management, this paper proposed a method for efficiency analysis of sewage collection and treatment system based on water quantity and quality. The water quantity and quality characteristics of typical drainage households, sewer networks and wastewater treatment plants in Shahe River basin were systematically investigated, the “loss” rate of pollutants along the sewer system was analyzed, the actual collection and treatment rates of sewage and pollutants in each drainage subarea were calculated to identify the key area, so as to provide reference for watershed management and improvement of quality and efficiency. The influent concentration of wastewater

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2020B1111350001); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07301006)

通信作者: 杜宏伟 E-mail: duhongwei@scies.org

treatment plants in Shahe River basin was generally low, and the sewer network was the key factor that caused the “loss” of pollutants along the drainage system, which contributed to the loss rate of 61%–69%. Rainfall had a great impact on the influent quantity and quality of wastewater treatment plants. Some areas did not have the capacity to treat excess mixed wastewater, and overflow pollution was a serious problem in rainy season. The collection and treatment rate of pollutants in wastewater could be used as an important reference for quantitative evaluation of the efficiency of urban sewage collection and treatment system. The collection and treatment rate of sewage in Shahe River basin was calculated to be 71%, and the collection and treatment rates of COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP were 59%, 50%, 55% and 62% respectively, which was in line with the water environment quality of the basin and the actual situation of sewer network construction.

Key words: sewage collection and treatment system; water quantity and quality; efficiency analysis; Shahe River basin

城市污水系统是城市基础设施的主要组成部分,包括污水管网、污水处理厂等,主要功能为污水收集、运输及处理后排放。我国污水处理事业始于20世纪70年代末,在城镇化推进与环境保护需求的推动下不断发展壮大,特别是过去20年发展迅猛^[1],污水处理能力已具备一定规模,但城镇水污染问题仍旧严重,水体黑臭与污水厂低质低效、合流制溢流污染严重与污水收集率低等矛盾愈发突出。为此,国家相继发布了《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021年)》《城镇生活污水处理设施补短板强弱项实施方案》等重要文件,明确提出了污水收集处理系统提质增效、补短板强弱项的要求,也表明了污水收集处理行业从“规模增长”向“质量提升”“效益提升”的转变趋势^[2]。但由于缺乏规范系统的建设及管理,现状排水管网底数不清,存在隐蔽性强、监测排查难度大,运行状态不清、分析诊断困难等问题^[3]。目前已有学者在城市排水系统问题诊断和定量分析方面开展了一些研究,包括水量水质监测及平衡分析法^[4]、夜间最小流量法^[5]、特征因子法^[6]、管道视频检测技术^[7-8]等,但大多数方法仅适用于小范围、小区域,均存在一定局限性。笔者结合污水收集处理系统提质增效的根本目的,从流域治理的角度提出了一种基于水量水质分析的污水收集处理系统效能分析方法,按照“区域—干管—支管—排水户”的研究思路,全面系统地量化评估了流域污水收集处理系统存在的问题,并以沙河流域为例进行分析,以期对污水系统提质增效及流域水环境长治久清提供参考。

1 研究方法

1.1 流域特征

沙河是东江一级支流,流域范围主要覆盖博罗县横河、湖镇、长宁、龙华、园洲、福田、石湾7个镇和罗浮山管委会,流域常住人口为46.70万人,集雨面积为1 031.27 km²,河流全长89 km。沙河水质在2018年为劣V类,2019年攻克工业、生活、禽畜养殖污染“三座大山”后,实现水质“三连跳”,污染物年平均值达到Ⅲ类水质标准,但仍有部分月份水质不能稳定达标,尤其是雨季会出现较大反弹,其中污水收集处理设施低质低效、雨季合流制溢流污染严重是存在的主要问题,为保障水质稳定达标及进一步提升,迫切需要全面开展沙河流域管网排查及修复,实施污水收集处理设施提质增效。流域内现状城镇排水体系以合流制为主,截至2019年共建成13座污水厂,合计处理规模17.75×10⁴ m³/d,涉及管网752.78 km,其中合流管网476.32 km、污水管网276.46 km,管网长、节点多,流域中下游地势平坦、河网复杂、地下水位高,如何在流域尺度上高效精准、经济可行地开展污水收集处理系统的问题排查及诊断分析,是流域治理迫切需要解决的难点。

1.2 调查方法

综合考虑污水处理厂位置、配套管网分布以及土地利用现状,划分沙河流域城镇排水分区(如图1所示),系统调查各片区排水户、管网及污水处理厂的水量水质,其中排水户采样点位为入户管出口,本次共调查流域内典型排水户50个;管网主要针对主管及一级支管进行全面调查,按照200~300 m间

隔布点,共布设采样点位1352个,各点位按早(07:00—09:00)、中(11:00—14:00)、晚(18:00—23:00)用水高峰期分别采集水样1次,监测指标包括COD、NH₃-N、TN、TP,调查管道时采用管道流量计同步采集水位、流速及流量数据。收集调查各污水处理厂2020年的进出水水量和水质,用以分析污水厂进水水质特征及区域污水和污染物处理量。

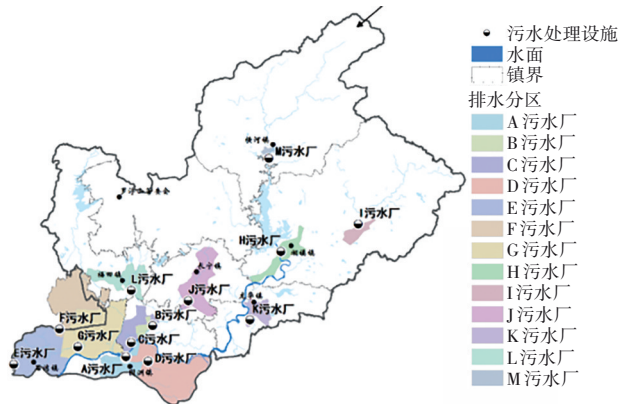


图1 沙河流域排水分区划分情况

Fig.1 Drainage division of Shahe River basin

1.3 数据分析

根据水量平衡原理,在忽略管道破损产生的渗漏量情况下,区域污水收集处理系统应满足式(1),水量平衡分析模型如图2所示。

$$Q_{WTP} = Q_{BWF} + Q_{GWI} + Q_{RDI} + Q_{RDI} - Q_{DOF} \quad (1)$$

式中: Q_{WTP} 为污水处理厂实际处理量; Q_{BWF} 为管网基本入流量; Q_{GWI} 为地下水入渗量; Q_{RDI} 为降雨导致的入流渗量; Q_{RDI} 为河湖水倒灌入渗量; Q_{DOF} 为未进入城市污水收集处理系统而外排的污水量。

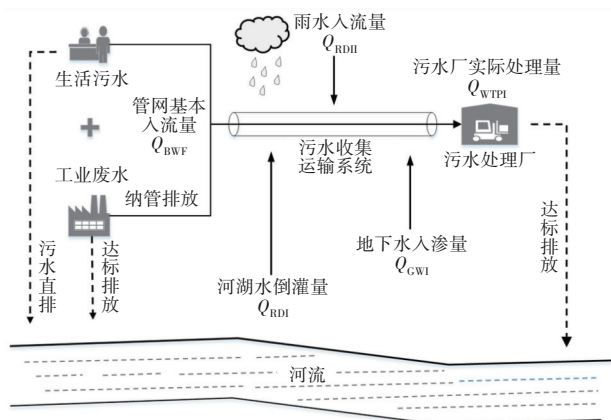


图2 区域污水收集处理系统水量平衡分析模型

Fig.2 Water balance analysis model of regional sewage collection and treatment system

1.3.1 管网基本入流量 Q_{BWF}

管网基本入流量主要指来自住宅区、商业、工业和政府机构的生活污水和生产废水。污水处理厂在设计时常采用人口数、人均用水定额以及污水排放系数计算区域综合污水产生量,考虑到不同地区用水习惯差异大,同时存在工业废水纳管排放等情况,本研究采用实际日均用水量及排污系数计算污水产生总量,其中生活污水排放系数参考2011年版《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)取值0.85,工业废水排放系数根据流域重点设施企业用排水量分析取值0.70,再扣减工业企业自行处理达标排入水体的水量(根据环保统计数据计算),从而计算得到实际排入城市污水系统的污水量。根据典型排水户污水浓度平均值,可计算得到区域污染物产生量。

1.3.2 地下水入渗量 Q_{GWI}

地下水入渗量是指从管道接口、管道裂缝及检查井壁中渗入污水管的地下水量,其大小取决于污水管道系统的管材、管道接口及检查井情况、地下水位和土壤的渗透性能等。地下水入渗量通常可以用3种方式来计算,分别是单位管长的地下水入渗量、单位(服务)面积的地下水入渗量,或以占设计污水量的百分比来表示^[5]。当前我国在工程设计上大多采用以占污水量的百分比来估算地下水入渗量,通常取10%~15%。然而当前已建的污水管网系统的地下水入渗量通常远大于这个数值,尤其在降雨丰沛、地下水位较高的地区,地下水入渗量可达10%~30%甚至更高。由于直接测算地下水入渗量需要大量管段节点连续实测数据,数据获取难度大,本研究结合管网建成运营时间、排查到的管网破损情况以及其他相关文献,拟采用旱季污水厂处理水量占比进行估算,其中A、B、E等老旧城区取值为20%,G、H、I、J、K、L等取值为15%,C、D、F、M等新建管段及运营情况较好片区取值为10%。

1.3.3 雨水入流渗量 Q_{RDI}

雨水入流渗量是指由于降雨导致的入流渗量,研究者常采用现场调查法、模型分析法等进行计算^[9-10],考虑到针对合流制排水体系,雨季少量的雨水进入城市管网系统属于正常现象,本研究选取枯水期数据进行分析计算, Q_{RDI} 取值为0。

1.3.4 河湖水倒灌入渗量 Q_{RDI}

河湖水倒灌入渗量指由于总口截污截入的低

浓度沟渠水水量,或者河流水位过高导致溢流口出现河水倒灌,或者拍门、过河、沿河管线、箱涵等破损导致河水倒灌等进入城市污水管网系统。本研究基于管网排查实测及水量平衡对河湖水倒灌入渗量进行计算及校核,其中已明确倒灌点的直接采用THWater便携式管道流量计实测,其他隐蔽的倒灌点则采用上下游节点水量差值进行估算。

1.3.5 外排污水量 Q_{DOF}

外排污水量是指未进入城市污水收集处理系统的污水量,主要是生活污水或工业废水直排入河、合流制溢流口晴天发生溢流、因管道发生塌陷或破损等结构性损伤时污水外渗、雨污错接导致污水直排入河(不适用于雨污合流管)等污水外排。本研究基于排污口排查结果及区域水量平衡进行计算校核,其中排污口采用THWater便携式管道流量计实测,因管道发生塌陷或破损等结构性损伤时污水外渗则采用上下游节点水量差值进行估算。

1.3.6 污水及污染物收集处理率

传统的污水收集处理率常采用污水厂处理水量与区域污水产生量之比进行表征,由于受到大量河湖倒灌水、地下水以及工业废水的影响,存在较大误差。本研究基于水量平衡计算,在扣除城市污水收集系统外水(包括 Q_{CWI} 、 Q_{RDI} 、 Q_{RDI})后对实际污

水收集处理率进行校核。同时,考虑到污水处理厂作为城镇生活污水处理的终端,核心目标是污染物削减,在排放标准控制下,基于污染物排放及处理总量核算实际污染物收集处理率[见式(2)],可作为流域污水收集处理系统效能分析的重要指标^[11]。

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{F}_i} \times C_{\text{F}_i})}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{排}_i} \times C_{\text{排}_i})} \quad (2)$$

式中: E 为流域(区域)污染物收集处理率; Q_{F_i} 为污水厂枯水期实际污水处理量; C_{F_i} 为污水厂枯水期进水浓度; $Q_{\text{排}_i}$ 为区域理论污水产生量; $C_{\text{排}_i}$ 为典型排水户生活污水中污染物平均浓度; n 为排水分区数量。由于污染物在管道中沿程会发生自然沉降及转化,并可能在发生冲刷或再悬浮作用时再次进入污水处理系统,因此本公式未考虑污染物沿程衰减及转化等复杂过程。

2 结果与讨论

2.1 典型污染源水质特征

本研究共调查典型排水户50个,其中住宅小区19个、餐饮店9个、洗车店2个、农村总口3个、企业7个、居民平房10个,各排水户的污水水质特征见表1。

表1 排水户水质监测结果

Tab.1 Sewage quality monitoring results of each drainage unit

项 目	COD		NH ₃ -N		TP		TN	
	平均浓度/(mg·L ⁻¹)	变异系数/%	平均浓度/(mg·L ⁻¹)	变异系数/%	平均浓度/(mg·L ⁻¹)	变异系数/%	平均浓度/(mg·L ⁻¹)	变异系数/%
餐饮店	331±49.68	15	43.47±11.18	26	5.09±1.51	30	53.99±11.93	22
居民平房	283±92.88	33	44.71±17.21	38	4.88±2.76	57	52.79±11.75	22
农村总口	182±19.14	10	34.37±9.57	28	3.92±1.80	46	39.17±12.54	32
企业	110±41.82	38	29.93±8.26	28	26.24±32.57	124	31.70±13.50	43
洗车店	205±125.87	61	0.69±0.40	59	5.61±0.95	17	11.22±12.44	111
住宅小区	338±221.08	66	48.02±16.42	34	5.78±3.49	60	58.21±21.91	38
平均值	282±164.67	58	41.52±17.25	42	7.85±12.86	164	50.00±20.04	40

由表1可知,沙河流域典型污染源水质浓度如下:COD为282 mg/L、NH₃-N为41.52 mg/L、TP为4.96 mg/L、TN为50.00 mg/L(其中TP指标统计时剔除了高浓度工业企业废水的影响),不同类型污染源水质差异较大,COD浓度由高到低排序为:住宅小区、餐饮店、居民平房、洗车店、农村总口、企业,因受南方地区用水习惯影响,且采样点位于隔污

池、化粪池等构筑物后,总体浓度值属于典型城市污水水质低或中等范围,结合其他学者的研究^[12-13]可知,化粪池等构筑物对污染物具有一定的去除作用,对SS、COD、BOD₅的去除率可达到20%~85%。流域内住宅小区因人口密集而导致总体排放污染物浓度较高,COD浓度范围为56~974 mg/L,但部分小区因入住率低或存在雨污错接,导致污水浓度值

偏低;部分企业排放的废水中含有高浓度磷污染物,可能会对污水处理厂造成较大的冲击负荷,建议应加强工业废水纳管排放监管。

2.2 管网水质调查结果

管网是污水及污染物的收集运输通道,其运行状况将直接影响到污水处理厂的效能水平。管网开井目视检测及水量水质监测结果显示,沙河流域各片区管网水质平均水平如下:COD 为 130 mg/L、NH₃-N 为 25.59 mg/L、TP 为 3.25 mg/L、TN 为 34.34 mg/L(见表 2),与排水户水质浓度相比均下降明显,这主要受到 48 个约 28.65 km 管段水质浓度偏低(COD<100 mg/L)的影响,结合进一步溯源排查或 CCTV/QV 检测结果,清水混入管段主要受到 3 处供水管破裂、19 处河湖水倒灌点、12 处总口截污点、2 处施工基坑降水、32 处地下水入渗点的影响。从 COD 浓度来看,B、C、E、G 片区均低于 100 mg/L,其中 C 为新建片区,主要是配套管网不完善,河水倒灌、总口截污及沟渠水接入问题严重;E、G 片区则呈现 COD 偏低、TN 较高,属于新建片区,居民入住率不高,且存在一定比例企业废水纳管排放;B 片区主要是旧城区,以合流箱涵为主,污染物沿程降解及地下水入渗问题严重。流域内共计存在淤积淤塞管段 22 km,有水无流(流速低于最小设计流速 0.6 m/s)管段 35 km,污染物在流经上述管段过程中均可能出现较为严重的“损失”,特别是易吸附于大颗粒物上的有机物^[14]。

表 2 各片区管网水质监测结果

Tab.2 Sewage quality monitoring results of pipe network in each subarea

排水片区	COD	NH ₃ -N	TP	TN
A	146	25.63	3.66	36.42
B	78	21.73	7.92	26.96
C	47	8.30	1.22	12.47
D	136	27.17	3.49	34.04
E	98	32.05	1.25	40.25
F	147	36.42	3.69	45.33
G	91	21.91	2.99	31.78
H	174	28.98	3.66	39.09
I	229	44.32	4.77	46.56
J	102	19.52	1.78	27.10
K	150	22.43	2.69	38.77
L	140	18.70	1.82	27.42
M	148	25.45	3.33	40.22
平均值	130	25.59	3.25	34.34

2.3 污水厂进水水量水质特征

合流制排水系统由于同时受污染源水质,配套管网完善程度,雨水、地下水、沟渠水等外水稀释,以及污染物降解转化作用等复杂因素影响,污水处理厂进水浓度总体水平较低^[15]。沙河流域 13 座污水处理厂 2020 年日均处理水量为 14.47×10⁴ m³/d,负荷率为 73%,平均进水 COD、BOD₅、NH₃-N、TN、TP 分别为 103、27.85、14.20、19.91、2.58 mg/L,与广东省珠三角地区镇区污水处理厂平均进水浓度相比^[11],总体进水浓度偏低;另外,BOD₅/COD 约为 0.27、BOD₅/TN 约为 1.40、BOD₅/TP 约为 10.80,表明进水中存在难生物降解性污染物,生物脱氮除磷所需有机碳源不足,为确保出水水质稳定达标,均需投加外碳源。从年内水量水质变化趋势看,随着问题管网的修复及配套管网的不断完善,处理水量总体呈上升趋势,其中在雨季(5 月—9 月)由于受雨水入渗入流影响,水量波动较大,在 10 月—12 月呈小幅下降趋势;相应地,进水 COD 平均浓度在 5 月—9 月低于 100 mg/L,在 10 月—12 月呈小幅上升趋势。

表 3 对比分析了流域各污水处理厂旱季和雨季的进水水量水质特征。

表 3 沙河流域各污水厂旱季、雨季进水情况对比

Tab.3 Comparison of influent of WWTPs in dry season and rainy season in Shahe River basin

排水片区	运行负荷率/%		COD/(mg·L ⁻¹)		BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)		SS/(mg·L ⁻¹)	
	雨季	旱季	雨季	旱季	雨季	旱季	年均	雨季
A	107	96	86.25	102.27	23.24	59.78	26.72	58.36
B	69	60	55.37	72.15	15.34	34.57	17.36	30.60
C	52	65	31.34	54.21	9.19	30.37	11.21	57.02
D	98	103	94.19	139.00	24.52	84.03	30.18	51.86
E	87	79	74.01	121.33	22.82	43.52	24.79	40.38
F	75	71	135.15	106.09	35.09	31.70	34.74	76.04
G	74	67	75.56	75.38	23.56	38.52	24.99	137.26
H	90	76	135.20	192.75	32.12	106.75	39.23	66.42
I	22	18	59.83	177.10	17.08	64.02	21.55	31.35
J	97	97	46.05	76.59	12.45	39.88	15.06	24.46
K	98	95	91.28	100.98	23.68	86.67	29.68	392.31
L	91	94	173.76	143.60	47.48	43.47	47.10	274.25
M	27	32	182.69	138.22	45.74	38.40	44.97	52.64
均值	76	73	92.89	115.41	25.08	53.66	27.85	94.15

从表 3 可以看出,雨季进水量略高于旱季,其中 A、D、J、K、L 等片区污水厂旱季已基本处于满负荷

运行,不具备处理超量混合污水的能力,易造成沿程溢流污染、厂前溢流或者厂内超越等问题,对周边水体造成短期冲击性污染;B、C、G、I片区由于配套管网不足,旱季负荷率低于75%;M片区污水处理规模则存在超量建设问题,运行负荷率较低。COD、BOD₅浓度均呈现雨季明显低于旱季的特征,表明雨水入渗流量是影响污水处理厂进水浓度的主要因素,而SS浓度则呈现雨季明显升高的现象,这主要与初期雨水冲刷效应有关,包括雨水径流冲刷地表以及管道冲刷沉积物的再悬浮现象所产生的高浓度SS^[16]。总体上,沙河流域污水处理厂进水水质受降雨等因素的影响较大,若采用单一的设计参数来指导污水处理厂管理调控,可能会影响其正常的生产运行。

2.4 污染物沿程变化规律

根据各自典型排水户水质、管网水质以及污水厂进水浓度,可分析得出沙河流域各片区污水收集处理系统污染物的沿程变化规律,见表4。

表4 沙河流域各片区污染物沿程变化率
Tab.4 Variation rate of pollutants along pollution source to WWTPs in Shahe River basin %

排水片区	污染物沿程“损失”率				
	COD	NH ₃ -N	TP	TN	平均值
A	50	71	65	62	62
B	75	69	70	71	71
C	81	86	86	83	84
D	61	75	70	69	69
E	78	43	50	47	55
F	65	41	85	44	59
G	93	78	88	79	85
H	43	31	55	36	41
I	69	55	67	41	58
J	78	80	82	83	81
K	80	69	60	56	66
L	62	73	67	77	70
M	56	60	32	50	50
平均值	69	64	67	61	65

从表4可以看出,污水在“排水户—管网—污水厂”流动过程中主要污染物均呈现出沿程“损失”的现象,COD沿程损失率前五的区域分别为:G、C、K、E、J,不同污染物“损失”率排序:COD>TP>NH₃-N>TN,其中COD变化最大,下降了102~362 mg/L,平均降幅达到69%,主要是由于有机物在管道输送过程中同时受到悬浮态有机物沿程物理沉降、污水中生

物絮体和管道内壁生物膜的生物降解作用等影响;其次为总磷,下降了2.05~4.57 mg/L,平均降幅为67%,由于磷的去除主要通过聚磷菌厌氧释磷和好氧吸磷才能完成,因此输送过程中磷的生化作用较小,但磷较易吸附于微小颗粒物上从而发生沉降转移至沉积物中,因此磷的降低主要是物理沉降及受低浓度外水稀释影响,此外,部分片区(E、H和L)存在高浓度总磷工业废水纳管,这会在一定程度上减少TP的沿程“损失”;氮类污染物总体变化率较小,由于地下管道以厌氧条件为主,在一定程度上抑制了硝化-反硝化作用的发生,因此氨氮及总氮污染物的降低均以低浓度外水稀释为主,这也是部分学者将TN作为特征因子进行外水入渗流平衡计算的原因^[17]。

管网系统是造成沙河流域污水处理厂进水浓度偏低的关键环节,污染物在管网输送过程中的沿程“损失”需得到重视。外水混入侵占污水收集处理空间,易造成污水溢流污染;污染物沿程沉积降解一方面会减小管道的过水能力,容易造成局部堵塞及污水溢流污染^[18],另一方面此类管段极易产生甲烷、硫化氢等有毒有害气体^[19],对城市居民的生命安全构成威胁,同时硫化氢等强腐蚀性气体会腐蚀破坏管道,降低污水管网使用寿命。

2.5 区域外水量估算及分析

根据式(1)对沙河流域各排水片区进行水量平衡计算,结果如表5所示。以A片区为例,根据用水量及排放系数进行核算, Q_{BWF} 为 $2.58 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;排查发现河水倒灌点及总口截污点3个,流量合计约 $0.98 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;因A片区管网建成时间较长(超过5年),以合流制为主而且缺乏常态化维护,地下水入渗系数取20%,则 Q_{GWI} 为 $0.79 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;污水直排口7个,老旧管网破损渗漏点4个,直排或渗漏污水量共计 $0.26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,经核算仍存在 $0.13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 未纳入管网系统(采用一体化污水处理设施或渗漏直排入河),则污水溢流或直排水量 Q_{DOR} 为 $0.39 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。通过水量平衡分析得出,A片区污水收集处理系统的外水量占比为45%,溢流直排污水量占污水产生量的15%。

总体上各片区计算结果差异较大,其中各片区旱季混入城市污水收集处理系统的外水量($Q_{GWI}+Q_{RDI}$)占比为15%~73%,合计约 $5.79 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,外水混入最为严重的5个片区分别为:B、C、G、J、A;各片

区溢流、直排或渗漏污水量占比为4%~73%,合计约 $3.49\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,全流域共排查发现污水直排或溢流口108个,部分溢流或直排污水已通过一体化污水处理设施、河道强化处理工程等进行处理,其中污水直排问题最为严重的5个片区分别为:G、I、C、B、F。通过区域水量平衡估算,可量化评估区域污水直排及外水混入程度,识别城市污水收集处理系统需重点实施提质增效的区域,为流域管网修复整治及规划建设提供支撑。但在污染物总量方面,由于存在较为复杂的沿程降解、转化及再悬浮释放过程,因此难以实现污染物总量的平衡。

表5 沙河流域各片区水量平衡计算结果
Tab.5 Calculation results of water balance in each subarea of Shahe River basin $10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$

排水分区	旱季实际处理量 Q_{WTPI}	管网基本入流量 Q_{BWF}	地下水入渗量 Q_{GWI}	河湖水倒灌量 Q_{RDI}	外排污水量 Q_{DOF}
A	3.96	2.58	0.79	0.98	0.39
B	0.66	0.31	0.07	0.41	0.12
C	0.79	0.52	0.08	0.40	0.21
D	1.61	1.15	0.16	0.53	0.23
E	2.37	2.23	0.47	0.28	0.62
F	0.79	0.91	0.08	0.10	0.31
G	0.75	1.35	0.11	0.29	0.99
H	0.81	0.80	0.12	0.00	0.11
I	0.05	0.12	0.01	0.01	0.08
J	0.93	0.62	0.14	0.28	0.11
K	0.94	0.93	0.14	0.12	0.25
L	0.47	0.38	0.07	0.11	0.07
M	0.17	0.14	0.02	0.02	0.01
平均值	14.30	12.05	2.26	3.53	3.49

注：河湖水倒灌量含总口截污混入清水量。

2.6 流域污水收集处理效能分析

按传统污水收集率计算方法,沙河流域污水收集率超过100%。本研究通过扣除污水直排量或混入外水量核算实际污水收集处理率,通过污染物产生量及处理量计算区域污染物收集处理率,结果见表6。可知,流域污水收集处理率为71%,各片区污水收集效率差异较大,总体在27%~96%之间,其中G、I片区配套管网严重不足,污水直排问题尤为突出,M片区为流域上游水源地保护区,污水收集率高达96%,近乎污水全收集处理;从污染物收集处理率来看,COD和TP的收集处理率要高于氮素污染物,但各类污染物空间差异趋势基本一致,由于污染物存在沿程降解及转化,因此污染物收集处理率

比污水收集处理率要低。总体上,与传统污水收集处理率计算方法相比,采用本研究方法计算得到的实际污水收集处理率及污染物收集处理率更符合流域水环境质量及污水管网建设的实际情况。

表6 沙河流域各片区污水及污染物收集处理率
Tab.6 Collection and treatment rate of sewage and pollutants in each subarea of Shahe River basin %

排水片区	污水收集处理率	污染物收集处理率			
		COD	NH ₃ -N	TP	TN
A	85	78	55	57	59
B	61	67	31	35	61
C	60	45	37	26	43
D	80	92	63	71	71
E	72	55	59	72	70
F	66	46	28	95	25
G	27	27	37	34	31
H	86	68	59	98	76
I	33	27	16	27	24
J	82	63	23	53	29
K	73	29	43	39	47
L	77	89	64	88	83
M	96	79	67	72	73
流域合计	71	59	50	62	55

3 结论

- ① 典型排水户水质调查结果显示,不同类型污染源水质浓度呈现住宅小区>餐饮店>居民平房>洗车店>农村总口>企业的特征,部分小区因入住率低或存在雨污错接,污水浓度偏低,另外,存在高浓度含磷废水纳管排放,这可能会对污水处理厂造成较大冲击负荷,因此,建议加强小区雨污错接整改及工业废水纳管排放监管。
- ② 各片区管网水质浓度与排水户出口水质浓度相比均下降明显,主要受到约28.65 km管段水质浓度偏低的影响,其中,C片区配套管网不完善,河水倒灌、总口截污及沟渠水接入问题严重;B片区主要是旧城区,以合流箱涵为主,污染物沿程降解及地下水入渗问题严重。此外,约22 km淤积淤塞管段及约35 km有水无流管段也对所输送污染物造成了一定的“损失”。
- ③ 沙河流域13座污水处理厂进水浓度偏低,受降雨影响雨季水量上升,SS浓度升高,有机物及氮、磷污染物浓度则明显下降,A、D、J、K、L等片区旱季已基本满负荷运行,无处理超量混合污水的能

力,易造成沿程溢流污染、厂前溢流或者厂内超越等问题。

④ 城市污水收集处理系统中的污染物以沿程“损失”为主,各污染物“损失”率排序:COD>TP>NH₃-N>TN,影响因素包括外水稀释、物理沉降、生物降解等;管网是造成污染物“损失”的关键环节,应优先“剥离清水”,同时淤积淤塞及有水无流问题也需重视,一方面会降低管道的过水能力,造成局部堵塞及污水溢流污染,另一方面会产生有毒有害物质,存在安全隐患,影响管道使用寿命。

⑤ 通过水量平衡分析,可计算得出沙河流域城市污水收集处理系统合计混入外水量约5.79×10⁴ m³/d,平均占比约为40%,溢流或直排污水量约为3.49×10⁴ m³/d,平均占污水产生量的29%,其中,B、C、G、J、A片区建议实施“清水剥离”,G、I、C、B、F片区建议围堵污水直排,实施精准截污。在污染物总量方面,由于存在较为复杂的沿程降解、转化及再悬浮释放过程,难以实现污染物总量的平衡,后续仍需进一步加强污染物在管道最后迁移转化规律的研究。

⑥ 经核算,沙河流域污水收集处理率为71%,COD、NH₃-N、TP及TN收集处理率分别为59%、50%、62%和55%。从流域治理角度来看,与传统污水收集处理率计算方法相比,核算后的实际污水收集处理率及污染物收集处理率更符合流域水环境质量及污水管网建设的实际情况。

参考文献:

- [1] QU J H, WANG H C, WANG K J, *et al.* Municipal wastewater treatment in China: development history and future perspectives [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13(6): 3-9.
- [2] 孙永利. 城镇污水处理提质增效的内涵与思路[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(2): 1-6.
SUN Yongli. Connotation and way of quality and efficiency improvement of municipal wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(2): 1-6 (in Chinese).
- [3] 郭效琛, 李萌, 赵冬泉, 等. 城市排水管网监测点优化布置的研究与进展[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(4): 26-31.
GUO Xiaochen, LI Meng, ZHAO Dongquan, *et al.* Research and progress on optimal layout of monitoring points in urban drainage networks [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(4): 26-31 (in Chinese).
- [4] 徐祖信, 王诗婧, 尹海龙, 等. 基于节点水质监测的污水管网破损位置判定方法[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(12): 3678-3685.
XU Zuxin, WANG Shijing, YIN Hailong, *et al.* Locating the sewer network defect based on marker investigation at pipe manholes [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(12): 3678-3685 (in Chinese).
- [5] 郭帅, 张土乔, David Z. Zhu. 地下水渗入排污管道的定量方法[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(4): 21-25.
GUO Shuai, ZHANG Tuqiao, David Z. Zhu. Quantitative methods for groundwater infiltration into sewer system [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(4): 21-25 (in Chinese).
- [6] XU Z X, WANG L L, YIN H L, *et al.* Source apportionment of non-storm water entries into storm drains using marker species: modeling approach and verification [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 61 (Part 2): 546-557.
- [7] 郭翔. CCTV管道检测在扬州污水提质增效行动中的应用[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(20): 67-70, 76.
GUO Xiang. Application of CCTV pipeline inspection in Yangzhou sewage quality improvement and efficiency enhancement action [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(20): 67-70, 76 (in Chinese).
- [8] 吴文俊, 管运涛, 陈波, 等. 老城区排水系统效能诊断技术探讨[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(20): 59-63, 68.
WU Wenjun, GUAN Yuntao, CHEN Bo, *et al.* Preliminary study on diagnostic techniques of drainage system performance in old towns [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(20): 59-63, 68 (in Chinese).
- [9] 徐祖信, 王诗婧, 尹海龙, 等. 污水管网中雨水混接来源的高效诊断方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(3): 384-390.
XU Zuxin, WANG Shijing, YIN Hailong, *et al.* Cost-effective locating inappropriate rainfall inflow into urban sewer network [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(3): 384-390 (in Chinese).
- [10] 边兆生, 蔡甜, 戴慧奇. 合流制分区排水系统溢流污染负荷评估与治理[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(21): 115-120.
BIAN Zhaosheng, CAI Tian, DAI Huiqi. Assessment and treatment of overflow pollution load in combined

- partition drainage system [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(21): 115-120 (in Chinese).
- [11] 朱家亮, 蔡美芳, 贾滨洋, 等. 基于污染物受纳量的城镇生活污水处理率指标研究[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(7): 3130-3136.
- ZHU Jialiang, CAI Meifang, JIA Binyang, *et al.* Use the indicator of received pollutant to evaluate domestic sewage treatment status [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(7): 3130-3136 (in Chinese).
- [12] 蒙语桦. 化粪池与人工湿地联用处理湖南农村地区生活污水研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- MENG Yuhua. Study on Domestic Wastewater Treatment of Rural Area in Hunan Province by Using Septic Tank Coupled with Constructed Wetland [D]. Changsha: Hunan University, 2016 (in Chinese).
- [13] 蔡正泉. 处理农户生活污水的“四格一体化”装置设计与效果研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- CAI Zhengquan. Study on the Designing and Effect of Domestic Sewage Treatment with Improved Septic Tank+ Constructed Wetland Integration Facility for Rural Areas [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019 (in Chinese).
- [14] 朱铁才, 刘舸, 马少杰, 等. 广东省城镇污水处理厂进水水质特征分析[J]. *中国资源综合利用*, 2019, 37(5): 67-69.
- ZHU Tiecai, LIU Ge, MA Shaojie, *et al.* Analysis of influent water quality characteristics of urban wastewater treatment plants in Guangdong Province [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2019, 37(5): 67-69 (in Chinese).
- [15] SHI X, NGO H H, SANG L T, *et al.* Functional evaluation of pollutant transformation in sediment from combined sewer system [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 85-93.
- [16] 刘智晓, 刘龙志, 王浩正, 等. 流域治理视角下合流制雨季超量混合污水治理策略[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(8): 20-29.
- LIU Zhixiao, LIU Longzhi, WANG Haozheng, *et al.* Watershed management and control strategies for urban combined sewer overflows during peak wet weather flow conditions [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(8): 20-29 (in Chinese).
- [17] SUN J, HU S H, SHARMA K R, *et al.* Degradation of methanethiol in anaerobic sewers and its correlation with methanogenic activities [J]. *Water Research*, 2015, 69: 80-89.
- [18] SHELTON J M, KIM L, FANG J S, *et al.* Assessing the severity of rainfall-derived infiltration and inflow and sewer deterioration based on the flux stability of sewage markers [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(20): 8683-8690.
- [19] 李亚芹, 杨静, 张志强, 等. 营造光照环境控制污水管道中有害气体的研究[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(11): 28-35.
- LI Yaqin, YANG Jing, ZHANG Zhiqiang, *et al.* Control of harmful gas in sewage pipeline through creating light environment [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(11): 28-35 (in Chinese).

作者简介: 黄志伟(1990—), 男, 广东梅州人, 硕士, 助理研究员, 主要从事流域面源污染模拟及控制研究。

E-mail: huangzhiwei@sceis.org

收稿日期: 2021-03-19

修回日期: 2021-06-21

(编辑: 刘贵春)

全面推行河长制湖长制, 维护河湖健康生命