

老旧城区合流制排水管道旱季溢流污染物特征分析

杜翔

中国市政工程西北设计研究院有限公司贵州分公司 贵州 贵阳 550000

【摘要】：老旧城区合流制排水管道旱季溢流的污染物较多，为溢流污染控制提供科学依据，本研究以南方某老旧城区合流制管网为研究对象，通过现场采样与实验室检测，系统分析旱季溢流液中 COD、NH₃-N、TP、SS 及重金属等污染物的浓度水平、相关性及粒径分布特征。结果表明，该区域合流制管网旱季溢流污染物浓度波动较大，COD、NH₃-N、TP、SS 平均浓度分别为 386.2mg/L、29.7mg/L、4.8mg/L、268.5mg/L，均远超城镇污水处理厂进水水质标准；污染物以颗粒态为主，SS 与 COD、TP 的相关性显著，相关系数分别达 0.85 和 0.79；颗粒态污染物中，粒径 0.075~0.25mm 区间的污染物占比最高，累计占比达 45.1%；重金属 Zn、Cu、Pb 平均浓度分别为 1.42mg/L、0.41mg/L、0.15mg/L，主要富集于细颗粒组分中。研究表明，老旧管网沉积物冲刷、高湿度环境下管道腐蚀渗漏及生活污水错接混排是旱季溢流污染的主要来源，建议通过定期清淤、优化管网维护策略、强化源头管控等措施控制旱季溢流污染。

【关键词】：老旧城区；合流制排水管道；旱季溢流；污染物特征；颗粒态污染物；南方城市

DOI:10.12417/2811-0536.26.03.004

1 引言

我国南方多数老旧城区因历史建设原因，普遍采用合流制排水系统，该系统在雨季可适配南方集中降雨特点，实现雨污快速排放，但旱季时受管网老化渗漏、高湿度环境加速管道腐蚀、沉积物累积冲刷、沿街商户污水偷排及生活污水错接混排等因素影响，易发生溢流现象。合流制旱季溢流污水直接排放至南方密集的河网水体，会导致水体溶解氧下降、富营养化加剧，甚至引发重金属污染，严重威胁水生态环境安全及河网生态系统稳定性。目前国内外针对合流制溢流污染的研究多集中于雨季，对旱季溢流污染的关注相对不足。南方老旧城区管网服役年限长、受高湿度与酸雨影响管道腐蚀更为严重、管内流态受生活用水波动影响显著，其旱季溢流污染物特征与北方及新建管网存在显著差异。因此，开展南方老旧城区合流制排水管道旱季溢流污染物特征研究，明确污染物浓度水平、形态分布及来源，对制定针对性的污染控制措施具有重要现实意义。本文以南方某省会城市老旧城区合流制管网为研究对象，通过现场采样与实验室分析，系统研究旱季溢流污染物的核心特征，为南方老旧城区水环境质量改善提供技术支撑。

2 材料与方法

2.1 研究区域概况

研究区域位于南方某省会城市老旧城区，建成于 20 世纪 50 年代末，总面积约 7.6km²，常住人口 13.2 万人，管网密度约 7.2km/km²。区域内排水系统为截流式合流制，主干管管径 300~900mm，管材以混凝土

管和铸铁管为主，平均服役年限超过 45 年，受南方高湿度、酸雨及地下水位较高影响，约 42% 的管道存在严重腐蚀、接口松动、破裂及渗漏等问题。区域内主要业态包括密集型居民住宅、小型餐饮、生鲜零售、洗车行等，无大型工业企业。旱季（当年 11 月至次年 3 月）平均日污水排放量约 0.95 万 m³/d，截流倍数为 1.2，因旱季仍存在间歇性小雨，部分初期雨水会混入管网，加剧溢流污染风险。

2.2 样品采集

根据研究区域管网分布特征及河网汇水特点，选取 5 个代表性采样点，分别位于管网主干管溢流口、居民密集区支管溢流口、商业街区支管溢流口及临近河道的溢流口，编号为 S1~S5。采样时间为旱季（当年 11 月至次年 3 月），共采集样品 35 组，每个采样点每月采集 2~3 组样品，规避间歇性小雨后 24h 内采样，确保样品代表性。采样时采用自动采样器，连续采集 24h 混合水样，采样体积为 2L，采样后立即加入硫酸调节 pH 至 2 以下，置于 4℃ 冷藏箱中运输至实验室，24h 内完成检测分析。

2.3 检测指标与方法

检测指标包括常规污染物和重金属污染物，常规污染物为 COD、NH₃-N、TP、SS，重金属污染物为 Zn、Cu、Pb、Cd。检测方法均采用国家标准方法，具体检测指标、方法及依据见表 1。

表 1 具体检测指标、方法及依据

检测指标	检测方法	依据标准
------	------	------

COD	重铬酸盐法	GB11914-89
NH ₃ -N	纳氏试剂分光光度法	HJ535-2009
TP	钼酸铵分光光度法	GB11893-89
SS	重量法	GB11901-89
Zn、Cu、Pb、Cd	电感耦合等离子体质谱法	HJ700-2014

注：续表 1。

为分析颗粒态污染物粒径分布特征，采用标准筛法对 SS 进行粒径分级，分为>1mm、0.25~1mm、0.075~0.25mm、<0.075mm 四个粒径区间，分别测定各区间颗粒质量占比及对应区间内 COD、TP 的含量。

2.4 数据处理

采用 Excel2019 和 SPSS26.0 软件对检测数据进行统计分析，包括描述性统计、相关性分析等，显著性水平设为 0.05。

3 结果与分析

3.1 旱季溢流常规污染物浓度水平

研究区域合流制管网旱季溢流常规污染物浓度检测结果见表 2。由表 2 可知，各污染物浓度波动较大，变异系数均超过 35%，其中 SS 的变异系数最大，达 72.6%，表明旱季溢流污染物浓度受管网运行状态、沉积物冲刷及间歇性小雨混入等因素影响显著。

表 2 旱季溢流常规污染物浓度水平

污染物指标	COD	NH ₃ -N	TP	SS
浓度范围(mg/L)	158.6~762.4	10.2~63.5	1.6~9.8	75.3~568.2
平均值(mg/L)	386.2	29.7	4.8	268.5
标准差(mg/L)	128.7	11.5	1.9	195.9
变异系数(%)	33.3	38.7	39.6	72.6
城镇污水处理厂进水标准均值倍数	2.57	2.97	4.80	4.48

与《城镇污水处理厂污染物排放标准》中进水标准相比，COD、NH₃-N、TP、SS 平均值分别为标准值的 2.57 倍、2.97 倍、4.80 倍、4.48 倍，其中 TP 超标最为严重。这是因为南方老城区地下水水位较高，管道渗漏严重，周边受污染土壤及浅层地下水携带大量磷元素渗入管网；同时，管网内长期处于潮湿环境，沉积物累积速度快，旱季时管网内水流速度变化会导致沉积物冲刷，释放大量的磷污染物；此外，区域内小型餐饮、生鲜零售、洗车行等业态的污水偷排现象突

出，进一步增加了溢流污水中污染物浓度。

3.2 常规污染物相关性分析

为明确各常规污染物之间的关联及来源相关性，对 COD、NH₃-N、TP、SS 进行 Pearson 相关性分析，结果见表 3。由表 3 可知，SS 与 COD、TP 均呈极显著正相关，相关系数分别为 0.85 和 0.79，表明 COD 和 TP 主要以颗粒态形式存在于溢流污水中，其浓度变化与 SS 浓度密切相关。NH₃-N 与 SS 的相关系数为 0.46，呈显著正相关，说明部分 NH₃-N 可能吸附于悬浮颗粒表面；而 NH₃-N 与 COD、TP 的相关性相对较弱，相关系数分别为 0.34 和 0.31，表明 NH₃-N 的来源与 COD、TP 存在一定差异，可能主要来源于密集型居民生活污水中的含氮有机物分解，而 COD、TP 则更多来源于管网沉积物冲刷、管道渗漏及商业污水排放。

表 3 相关性分析

污染物指标	COD	NH ₃ -N	TP	SS
COD	1.00	0.34*	0.69**	0.85**
NH ₃ -N	0.34*	1.00	0.31	0.46*
TP	0.69**	0.31	1.00	0.79**
SS	0.85**	0.46*	0.79**	1.00

注：*表示 P<0.05，显著相关；**表示 P<0.01，极显著相关。

3.3 颗粒态污染物粒径分布特征

旱季溢流污水中 SS 的粒径分布及各粒径区间 COD、TP 占比结果见表 4。由表 4 可知，颗粒态污染物以中细颗粒为主，0.075~0.25mm 粒径区间的颗粒质量占比最高，达 45.1%；其次是<0.075mm 的细颗粒，占比为 30.2%；0.25~1mm 和>1mm 的粗颗粒占比分别为 18.7%和 6.0%。这是因为南方老旧管网内湿度大，粗颗粒易与管内腐蚀产物结合沉积于管底，且管网内水流速度受生活用水波动影响，整体平均流速较低，难以带动粗颗粒迁移；而中细颗粒则易随水流迁移，且受间歇性小雨混入影响，进一步增加了中细颗粒的迁移能力，形成溢流污染。

表 4 颗粒态污染物粒径分布特征

粒径区间(mm)	颗粒质量占比(%)	COD 占比(%)	TP 占比(%)
>1	6.0	3.5	3.2
0.25~1	18.7	16.8	15.4

0.075~0.25	45.1	48.2	50.3
<0.075	30.2	31.5	31.1

注：续表4。

从各粒径区间 COD 和 TP 占比来看，0.075~0.25mm 粒径区间的 COD 和 TP 占比最高，分别达 48.2% 和 50.3%；<0.075mm 粒径区间的 COD 和 TP 占比分别为 31.5% 和 31.1%。这表明中细颗粒是 COD 和 TP 的主要载体，其原因在于中细颗粒具有更大的比表面积，能够吸附更多的有机污染物和磷元素，且南方潮湿环境下，颗粒表面吸附能力进一步增强。因此，在控制旱季溢流污染时，重点去除中细颗粒污染物可有效降低 COD 和 TP 的排放负荷。

4 讨论

4.1 旱季溢流污染物浓度超标成因细化分析

本研究检测结果显示，研究区域合流制管网旱季溢流污水中 COD、NH₃-N、TP、SS 四项常规污染物平均浓度均远超《城镇污水处理厂污染物排放标准》进水标准，其中 TP 超标倍数达 4.80 倍，为超标最严重指标。研究区域管网以混凝土管和铸铁管为主，平均服役年限超 45 年，受南方高湿度、酸雨及地下水位较高（年均地下水位埋深不足 2m）影响，约 42% 的管道存在不同程度腐蚀、接口松动及破裂问题。旱季地下水位相对稳定，管道破损处形成水位差，周边受污染土壤及浅层地下水持续渗入管网，土壤中因长期积累的磷、有机物及悬浮颗粒通过渗漏通道进入管内，直接抬高溢流污水中 TP、COD 及 SS 浓度。尤其区域内历史上存在小型食品加工、五金维修等作坊式生产活动，土壤中残留的磷素、重金属通过渗漏进一步加剧了污染程度。旱季管网日均流量约 0.95 万 m³/d，管内平均水流速度仅 0.2~0.4m/s，远低于管道自清流速（0.6~1.0m/s），且南方潮湿环境加速了管内沉积物累积，沉积物主要由有机颗粒、无机泥沙及吸附态污染物组成，其中磷含量达 2.8~6.5g/kg，远高于普通城市

参考文献：

- [1] 杨广平,何梦男,陈诚,等.城市闸控河流汛期溢流污染特征及影响因素[J].环境科学学报,2025,45(03):221-230.
- [2] 王增术.老城区排水管道改造地箭式微顶管技术应用研究[J].价值工程,2024,43(31):115-117.
- [3] 刘宇轩,安欣琪,林炳权,等.长江流域平原河网地区合流制排水系统溢流污染特征研究[J].给水排水,2024,60(04):62-69.
- [4] 刘宇轩,安欣琪,林炳权,等.长江流域平原河网地区合流制排水系统溢流污染特征研究[J].给水排水,2024,60(04):62-69.
- [5] 吴俊.排水管道中雨污水颗粒物沉降速率特征分析[J].环境工程,2023,41(04):1-9.

土壤。

4.2 颗粒态污染物主导特征与控制核心路径

Earson 相关性分析结果显示，SS 与 COD、TP 的相关系数分别达 0.85 和 0.79，呈极显著正相关，且 0.075~0.25mm 及 <0.075mm 的中细颗粒贡献了 85% 以上的 COD 和 TP 负荷，充分表明颗粒态是旱季溢流污染物的主要存在形式。针对南方老旧城区溢流口分散、水量波动大且受间歇性小雨影响的特点，建议采用“源头预处理+小型化一体化处理设备”的控制路径。在居民密集区、商业街区等污染负荷较高的溢流口前端，增设格栅和沉砂池，预处理去除粗颗粒污染物；核心处理单元选用一体化混凝沉淀-过滤设备，适配南方水量波动特征，选用聚合氯化铝（PAC）与聚丙烯酰胺（PAM）复合药剂，通过絮凝作用将细颗粒团聚成大絮体，进一步提升去除效率。需注意的是，设备应具备防雨、防潮功能，避免南方高湿度环境影响设备运行，同时应定期清理设备内截留的污染物，防止二次污染。

5 结论

结合上述研究可知，南方某老旧城区合流制管网旱季溢流常规污染物浓度波动较大，COD、NH₃-N、TP、SS 平均浓度分别为 386.2mg/L、29.7mg/L、4.8mg/L、268.5mg/L，均远超城镇污水处理厂进水标准，其中 TP 超标最为严重。溢流污染物以颗粒态为主，SS 与 COD、TP 呈极显著正相关，相关系数分别为 0.85 和 0.79；颗粒态污染物中，0.075~0.25mm 粒径区间的颗粒质量占比最高，且是 COD 和 TP 的主要载体。溢流污水中检测出 Zn、Cu、Pb、Cd 四种重金属，均未超标但存在潜在风险，且主要富集于细颗粒中，<0.075mm 细颗粒中 Zn、Cu、Pb 的占比均超过 62%。南方老旧管网沉积物冲刷、高湿度环境下管道腐蚀渗漏、商业污水偷排及间歇性小雨扰动是旱季溢流污染的主要来源，建议通过定期清淤、修复破损管网、强化源头管控及采用适配南方特点的小型化处理设备等措施控制旱季溢流污染。