

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.13.022

# 基于特征离子法的排水管网清污混合解析

周广宇<sup>1</sup>, 刘广奇<sup>1</sup>, 程小文<sup>1</sup>, 赵鹏<sup>2</sup>, 崔诺<sup>2</sup>, 赵玉炜<sup>2</sup>

(1. 中国城市规划设计研究院, 北京 100037; 2. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 城市排水清污混合是导致污水处理厂进水浓度偏低的重要原因, 准确判断清污混合的水质成分、锁定清污混合的主要位置是解决上述问题的关键。为此, 建立了基于水质特征离子法的排水管网水质成分解析方法, 并将其应用于案例城市, 准确识别了排水管网各处水质成分、构成比例、沿程变化以及清污混合关键位置, 发现地表景观水、工地基坑排水以及河道引水是该案例城市排水管道中清水的主要来源, 这可有效指导后期的清污分离工程。

**关键词:** 城市排水; 清污分离; 特征离子法; 管网溯源

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)13-0130-05

## Analysis of Clean Water and Sewage Mixing in Urban Drainage Network Based on Characteristic Ion Method

ZHOU Guang-yu<sup>1</sup>, LIU Guang-qi<sup>1</sup>, CHENG Xiao-wen<sup>1</sup>, ZHAO Peng<sup>2</sup>, CUI Nuo<sup>2</sup>,  
ZHAO Yu-wei<sup>2</sup>

(1. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100037, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The mixing of clean water and sewage in urban drainage system is an important reason for low influent concentration of wastewater treatment plants. The key to resolve the above problem is to accurately judge the composition of the mixing drainage water and locate the mixing position in the drainage network. A mixing drainage water composition analytical method based on water quality characteristic ion method was developed, and the method was applied in a case city to identify the drainage water composition, quantity proportion, content change and mixing positions in the drainage network. It was found that surface landscape water, foundation pit drainage and river diversion were the main sources of clean water in the urban drainage pipeline of the case city. The findings can effectively guide the later clean water and sewage diversion project and provide reference for other cities to solve similar problems.

**Key words:** urban drainage; clean water and sewage diversion; characteristic ion method; tracing the source of pipe network

2019年4月,《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021年)》正式印发,方案将全面提

基金项目: 中国城市规划设计研究院科技创新基金资助重点研究项目

升现有设施效能、实施清污分离、城市污水厂进水 BOD 浓度低于 100 mg/L 的要明确整治作为重要内容,国内各省、市也纷纷出台相应行动方案落实上述任务。然而,城市排水清污混合问题复杂,涉及生活污水、地表水、地下水等不同来源,清水进入管网与污水充分混合并经长距离输送后,在污水处理厂端已难以判断清水类型和来源。

目前,已有研究指出地表水中的主要离子为  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$  等,其含量受大气降水、山川、海洋等的影响<sup>[1]</sup>;地下水中含量较多的离子除  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$  外,还常存在  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  离子<sup>[2]</sup>;生活污水由于人为因素的影响,除含有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  等常规离子外,还常含有洗涤剂以及阴离子表面活性剂(LAS)、甜味剂、药物、化妆品类等特征物质<sup>[3-6]</sup>。受此启发,笔者尝试识别地表水、地下水和生活污水中各自独有的或浓度水平差异巨大的特征离子,通过管道内混合水样的特征离子浓度推断管道水质成分及比例,结合管道全程水质检测确定清水侵入管道的主要位置,以期有效指导案例城市的清污分离工程,为其他城市解决类似问题提供一定借鉴。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品采集

案例城市位于雅鲁藏布江支流形成的河谷平原,市区地势平坦,年均降雨量为 440 mm,夏、秋两季降雨量占全年的 80%~90%,干湿季节分明。市

区内有自雅鲁藏布江支流引水及山洪沟发育形成的多条河渠,包括北干渠、中干渠、南干渠、流沙河等。

分别采集排水管道、河道及市区地下水水样,其中,排水管道和河道的水样采集依靠自动采样器,地下水水样为人工打井取样,取样周期持续一个月,取样时间为每天中午。检测区域内,污水总量为  $31 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,污水厂进水 COD 年均浓度约为 85 mg/L。

每个取样点每次采集 3 组平行水样,装入聚乙烯瓶中密封运回实验室,用 0.45  $\mu\text{m}$  的微孔滤膜进行过滤,除去水样中的悬浮物、沉淀及其他微生物等,并加入浓硫酸酸化水样至 pH 值 < 2,然后将水样在 2~5  $^{\circ}\text{C}$  下冷藏保存以待检测。

### 1.2 分析方法

采用 XZ-0178 型水质分析测试仪对水样进行分析检测,检测步骤及预处理方法均按照国标及仪器相关要求进行操作。为反映检测仪器的稳定性,配制混合标准溶液,连续检测 10 次,各项检测指标相对标准偏差控制在 1% 以内,另外各指标加标回收率均在 84%~101% 之间,分析工作具有较高的精密度和准确性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 特征离子识别

汇总不同检测对象(河道清水、管道生活污水、地下水)的各项指标检测结果,如表 1 所示。为排除各检测对象之间相互掺混的影响,河道清水取入市面断面清水、生活污水取建筑小区排水。

表 1 不同水样的水质检测结果

Tab. 1 Quality of different water samples

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD	$\text{NH}_3 - \text{N}$	TP	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Mn}^{2+}$	LAS
河道清水	6~19	0.14~1.40	0.01~0.85	16.95~33.62	2.13~6.87	0.0019~0.1282	未检出
建筑小区生活污水	124~449	5.44~25.33	0.63~6.42	20.65~30.70	3.57~7.80	0.0227~0.0813	1.60~2.54
地下水	5.1~14.3	0.07~1.86	0.01~0.07	35.01~269.00	6.23~23.61	8.69~47.91	未检出

根据检测结果,不同水样的 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP 以及  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子浓度范围都有一定重叠,而  $\text{Mn}^{2+}$  离子、LAS 的浓度分布范围差异显著:河道清水和建筑小区生活污水中的  $\text{Mn}^{2+}$  离子最高浓度分别为 0.128 2、0.081 3 mg/L,而地下水中的  $\text{Mn}^{2+}$  离子最低浓度为 8.69 mg/L;仅建筑小区生活污水中检出 LAS 为 1.60~2.54 mg/L,河道清水以及地下水中均未检出此指标。

根据以上分析,可以进一步推断:若某一检测点检出较高浓度的  $\text{Mn}^{2+}$  离子,即可判断该检测点水样

中含有较高比例的地下水;若某一检测点检出较高的 LAS 浓度水平,即可判断该处水样受生活污水影响较大;若某一检测点同时具备较低的  $\text{Mn}^{2+}$  离子和 LAS 浓度水平,即可判断该处水样以河道清水为主。即  $\text{Mn}^{2+}$  离子为地下水特征指标、LAS 为生活污水特征指标。另外,本研究中建筑小区生活污水中的 LAS 日检结果差异小且在其他水样中未检出,而 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP 日检结果变化幅度大且在其他水样中有检出,故选择 LAS 作为生活污水特征指标。

采用这一方法,可进一步对清污混接严重的管

道进行成分解析。

## 2.2 管道水成分解析

管道或河道中各种成分的占比可参照以下方法推算：

在管道水中,  $Mn^{2+}$  离子质量平衡关系为：

$$Q_{p-mix} \times C_{p-Mn-mix} = Q_{p-r} \times C_{Mn-r} + Q_{p-u} \times C_{Mn-u} + Q_{p-w} \times C_{Mn-w} \quad (1)$$

则管道水中地下水的占比为：

$$\frac{Q_{p-u}}{Q_{p-mix}} = \frac{Q_{p-u} \times C_{p-Mn-mix}}{Q_{p-r} \times C_{Mn-r} + Q_{p-u} \times C_{Mn-u} + Q_{p-w} \times C_{Mn-w}} \quad (2)$$

由于河道水和生活污水中的本底  $Mn^{2+}$  离子含量远低于地下水, 则式(2)可简化为：

$$\frac{Q_{p-u}}{Q_{p-mix}} = \frac{Q_{p-u} \times C_{p-Mn-mix}}{Q_{p-u} \times C_{Mn-u}} = \frac{C_{p-Mn-mix}}{C_{Mn-u}} \quad (3)$$

式中:  $Q_{p-mix}$ 、 $Q_{p-r}$ 、 $Q_{p-u}$ 、 $Q_{p-w}$  分别为管道取样点处的实际流量以及河水、地下水、生活污水各成分所占流量;  $C_{p-Mn-mix}$ 、 $C_{Mn-r}$ 、 $C_{Mn-u}$ 、 $C_{Mn-w}$  分别为管道取样点处实测  $Mn^{2+}$  离子浓度以及河水、地下水、生活污水中的本底  $Mn^{2+}$  离子水平。

同理, 管道水中生活污水的占比为：

$$\frac{Q_{p-w}}{Q_{p-mix}} = \frac{C_{p-LAS-mix}}{C_{LAS-w}} \quad (4)$$

式中:  $C_{p-LAS-mix}$ 、 $C_{LAS-w}$  分别为管道取样点处实测 LAS 水平以及生活污水中的本底水平。

管道水中河水的占比为：

$$\frac{Q_{p-r}}{Q_{p-mix}} = 1 - \frac{Q_{p-u}}{Q_{p-mix}} - \frac{Q_{p-w}}{Q_{p-mix}} \quad (5)$$

根据上述方法, 可以推算各检测点处管道水中的地下水、河水、生活污水的实际占比, 详见表 2。考虑到河水和地下水中的  $Mn^{2+}$  离子本底水平接近, 在表 2 中, 若实测  $Mn^{2+}$  离子水平低于河水和地下水中的  $Mn^{2+}$  离子本底水平高值(0.128 2 mg/L), 则不计地下水占比。由表 2 可知, 管道水中, 河水所占比例普遍较高, 各检测点处比例均高于 30%、局部检测点处比例超过 90%; 另外, 管道水中的地下水成分较少, 各检测点处比例均不高于 1.5%。由此表明, 案例城市清污混合现象普遍, 排水管网沿程各处均有大量河水进入管道是主要原因, 这一现象必然导致污水厂进水浓度持续偏低。

表 2 管道水成分解析

Tab. 2 Composition analysis of urban drainage water

管道检测点	$Mn^{2+}$ 月均浓度/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	地下水占比/ %	LAS 月均浓度/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	生活污水占比/ %	河水占比/ %
JCJ1	0.031 7	—	0.49	23.67	76.33
JCJ2	0.016 7	—	0.72	34.78	65.22
JCJ3	0.035 1	—	0.52	25.12	74.88
JCJ4	0.089 0	—	0.85	41.06	58.94
JCJ5	0.037 5	—	0.21	10.14	89.86
JCJ6	0.032 6	—	0.43	20.77	79.23
JCJ7	0.094 9	—	0.24	11.59	88.41
JCJ8	0.024 8	—	0.77	37.20	62.80
JCJ9	0.047 4	—	0.86	41.55	58.45
JCJ10	0.007 8	—	0.65	31.40	68.60
JCJ11	0.030 2	—	0.97	46.86	53.14
JCJ12	0.036 0	—	0.65	31.40	68.60
JCJ13	0.014 4	—	0.72	34.78	65.22
JCJ14	0.424 1	1.50	0.26	12.56	85.94
JCJ15	0.009 8	—	0.81	39.13	60.87
JCJ16	0.053 1	—	0.39	18.84	81.16
JCJ17	0.035 5	—	0.25	12.08	87.92
JCJ18	0.000 9	—	0.47	22.71	77.29
JCJ19	未检出	—	0.26	12.56	87.44
JCJ20	0.036 3	—	0.26	12.56	87.44
JCJ21	0.136 6	0.48	0.21	10.14	89.37
JCJ22	0.125 9	—	0.13	6.28	93.72
JCJ23	0.056 8	—	0.20	9.66	90.34
JCJ24	0.064 2	—	0.20	9.66	90.34
JCJ25	0.114 0	—	0.31	14.98	85.02
JCJ26	0.136 4	0.48	0.29	14.01	85.51
JCJ27	0.093 3	—	0.24	11.59	88.41
JCJ28	0.178 1	0.63	0.96	46.38	52.99
JCJ29	0.154 7	0.55	0.92	44.44	55.01
JCJ30	0.115 9	—	0.86	41.55	58.45
JCJ31	0.295 4	1.04	0.97	46.86	52.10
JCJ32	0.326 2	1.15	1.01	48.79	50.06
JCJ33	0.343 6	1.21	1.40	67.63	31.15
JCJ34	0.197 5	0.70	1.30	62.80	36.50
JCJ35	0.327 0	1.16	1.03	49.76	49.09
JCJ36	0.206 5	0.73	1.41	68.12	31.15

## 2.3 清污混合溯源

基于表 2 中的数据, 结合各检测点位置关系, 可以进一步推断河水侵入管道的若干主要位置, 为后续清污分离工程锁定作业段。如图 1 所示, 典型河水侵入位置有 4 处, 分别为 JCJ4 ~ JCJ6、JCJ13 ~ JCJ16、JCJ29 ~ JCJ22、JCJ31&32 ~ JCJ23&24, 4 段管

道内河水占比的增长情况分别为由 58.94% 增至 79.23%、由 65.22% 增至 81.16%、由 55.01% 增至

93.72%、由 50.06% ~ 52.10% 增至 90.34% ,河水侵入现象非常突出。

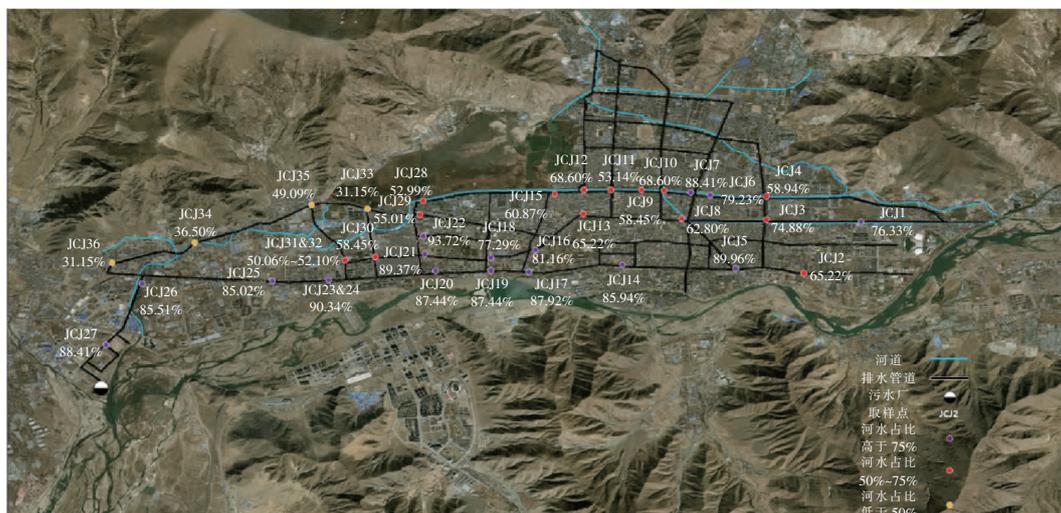


图1 管道各处检测点河水侵入比例

Fig. 1 Quantity proportion of river water in the urban drainage

图1所示区域内,污水厂进水COD浓度年均值为85 mg/L,以收集污染物计(表1中建筑小区排水COD均值约为286 mg/L),则区域内污水收集率为29.72%,目前,区域内污水处理总量约为 $31 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,则进厂清水量为 $21.79 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

同时经现场调查,在JCJ4~JCJ6之间发现河道与排水管网直接连通位置1处,实测河水至管道流量为 $2034 \text{ m}^3/\text{d}$ ;在JCJ13~JCJ16之间发现地表景观水体排水渠直接接入排水管网位置1处,实测清水进入管道流量达 $34885 \text{ m}^3/\text{d}$ ;在JCJ29~JCJ22之间发现工地基坑排水直接进入排水管网位置1处,实测排水量为 $6231 \text{ m}^3/\text{d}$ ,基坑来水为临近河道侧渗水;在JCJ31&32~JCJ23&24之间同样发现基坑排水进入管网1处,实测排水量达 $36896 \text{ m}^3/\text{d}$ 。仅上述4处位置,河水侵入总量已达到 $80046 \text{ m}^3/\text{d}$ ,相当于进厂清水量的36.74%,按此方法,可有效确定管网清污混合主要位置,指导后期清污分离作业。

### 3 结论

① 排水管网清污混接是导致污水厂进水浓度持续偏低的重要原因,采用特征离子法,可以有效判断管道水成分、定位清水侵入的主要位置、指导后期清污分离工程。

② 特征离子法、清污混合溯源,都需要充分的管道及河道水质检测,建议采用自动采样和实验室

化验方式,保证取样点数量充足、化验结果准确。

③ 在本案例城市中,地表景观水、工地基坑排水以及河道引水是管道清水的主要来源,目前,市住建局正新建景观水排水渠、严格要求基坑排水净化后就近入河、改造沿河管道口并增设防河水倒灌装置。该案例的解决办法具有一定借鉴意义。

### 参考文献:

- [1] 韩知明,贾克力,孙标,等. 呼伦湖流域地表水与地下水离子组成特征及来源分析[J]. 生态环境学报, 2018,27(4):744-751.  
Han Zhiming, Jia Keli, Sun Biao, et al. Component characteristics and sources of ions in surface water and groundwater of Hulun Lake basin [J]. Ecology and Environment Sciences, 2018, 27 (4): 744 - 751 (in Chinese).
- [2] 李圣品,李文鹏,殷秀兰,等. 全国地下水水质分布及变化特征[J]. 水文地质工程地质,2019,46(6):1-8.  
Li Shengpin, Li Wenpeng, Yin Xiulan, et al. Distribution and evolution characteristics of national groundwater quality from 2013 to 2017 [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2019, 46(6): 1 - 8 (in Chinese).
- [3] 孟莹莹,李田,王溯. 上海市分流制小区雨水管道混接污染源分析[J]. 中国给水排水,2011,27(6):12-15.

(下转第138页)