

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.08.002

基于污水管网清污混流定量诊断的常规指标遴选

高晨晨, 穆莹, 刘钰, 孙永利, 李思雨, 陈子璇, 王诣达
(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 城市污水管网清水入流入渗问题是导致污水处理厂进水污染物浓度偏低、处理水量较高的重要原因,对污水收集处理设施的运行效能造成了严重影响。借鉴国际上普遍采用的化学质量平衡模型,以常规水质指标形成的36个指标组合为基础,遴选满足污水管网清污混流比例定量测算的水质指标。结果表明,电导率与其他常规水质指标组合对污水量比例测算结果的准确度和稳定性相对较优,其中电导率指标具有测算结果稳定、测量方法简便快捷、测试成本较低等优势,建议优先选择该指标进行污水管网中清水入流入渗问题的定量诊断。

关键词: 污水收集; 清污混流; 化学质量平衡; 定量诊断

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)08-0011-06

Selection of Conventional Indicators Based on Quantitative Diagnosis of Sewage Pipe Network Mixed Flow

GAO Chen-chen, MU Ying, LIU Yu, SUN Yong-li, LI Si-yu, CHEN Zi-xuan,
WANG Yi-da

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

Abstract: The inflow and penetration of clean or slightly-polluted water in the urban sanitary sewer system is an important reason for low influent pollutant concentration and high wastewater treatment demand in the wastewater treatment plant, which will lead to lower operation efficiency of wastewater collection and treatment facilities. Taking the commonly used chemical mass balance model (CMBM) as a reference, 36 combined indicators consisting of conventional wastewater indicators were adopted to select the appropriate indicators to quantify the mixing ratio of sanitary sewer systems. The results demonstrated that the combination of conductivity and other conventional wastewater indicators showed higher sensitivity and stability in the calculation of the proportion of sewage. The conductivity indicator has the advantages of relatively stable results, simple and fast measurement, and low test cost. It is suggested that the combination indicator of conductivity should be preferred to quantitative diagnosis of clean water mixing inflow and penetrating in sewage systems.

Key words: sewage collection; clean water and sewage mixed flow; chemical mass balance; quantitative diagnosis

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3203204)

通信作者: 孙永利 E-mail: tjsunyongli@163.com

我国诸多城市污水收集管网存在清水入流入渗问题,尤其在河网水系发达、地表水水位较高、城市浅层地下水位相对较高的地区,污水处理厂进水中往往掺混了大量的低浓度非生活污水,严重影响了污水收集处理系统效能的正常发挥^[1]。近年来,随着污水处理提质增效工作的不断推进,各地积极开展排水管网的问题排查,但由于污水收集管网属于“地下工程”,且系统庞大复杂,在基础底数尚不清晰的情况下,大范围开展管网排查和管道检测费时费力,成本投入与成果产出往往不成正比^[2]。因此,亟需研究高效便捷的技术手段对污水管网清水入流入渗问题进行诊断评估,为科学推进“清污分流”、实现污水收集系统效能提升提供支撑。

针对雨污水管网错接混接、地下水入流入渗问题的诊断,美国国家环保局提出了以化学质量平衡模型(Chemical Mass Balance Model, CMBM)为基础的水质特征因子法,以使工程技术人员能够获得相对准确的管网外来水入流入渗比例的量化数据^[3-4]。但大部分研究采用的特征水质因子还主要局限于咖啡因、金属离子、阴离子表面活性剂、同位素、微生物指标等能够表征某种来源的特殊水质指标^[5-7]。在开展实际排水管网中清水混流问题的诊断时,尤其是监测样品量较大的情况,同位素、咖啡因等指标的分析检测相对昂贵,实验室分析所需周期较长,同时特征指标还与居民生产生活习惯、入渗水源类型等直接相关,需在掌握实际情况的基础上再进行选取。以国际上普遍采用的CMBM法为基础,优选化验成本较低、测试周期较短、能够快速获得检测结果的常规水质指标作为特征指标,以期对污水管网清污混流问题的诊断提供技术依据。

1 研究方法

1.1 CMBM基本原理

CMBM是化学质量平衡模型的简称,即通过监测管网受外水入流入渗前后特征水质因子的污染物浓度,建立污水管网入流和出流的污染物质量守恒方程,定量测算污水管网的外水入流入渗比例。质量平衡关系式如下:

$$\sum_{j=1}^n C_{ij} X_j = \rho_i \quad (1)$$

式中: ρ_i 为污水管道受外水入流入渗后的第*i*个水质特征因子浓度,即管道出流处的污染物浓度; C_{ij} 为污水管道中第*j*个混接来源的第*i*个水质特征因

子质量浓度; X_j 为污水管道中第*j*个混接来源入流水量的比例; n 为污水管道中混接水源的数量。

1.2 指标遴选方案设计

为模拟实际污水管网的外水入流入渗情况,以河水为污水管网的入流入渗水源,生活污水量和河水量混合比例见表1。正式试验前对两种水源的水量比例进行了初步分析,发现清水比例对测算结果和指标选择的影响并不明显,因此,以生活污水量占比较高的情况进行模拟试验研究。在5种设计掺混梯度下,分别测定管网入流和出流处的COD、SCOD、BOD₅、TN、TP、NH₃-N、PO₄³⁻-P、ORP、电导率,通过式(1),将上述每2个指标建立一个联立方程组,测算各指标组合下污水和河水的掺混比例,通过对比测算结果与设计掺混比例的偏差,确定较为合适的指标与指标组合。

表1 模拟试验中河水和污水的混合比例

Tab.1 Mixing ratio of sewage and river in the simulation test %

来源	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组
污水	90	80	70	60	50
河水	10	20	30	40	50

为了进一步评估常规水质指标的准确性,通过对比“测算值”与“实际值”的差值平方和的方法,判断测算结果和实际结果的离散程度。

1.3 质量平衡方程建立

建立了36个方程组对9项指标进行遴选,以COD和ORP指标组合为例,根据入流管道的河水和污水的水质、水量建立如下质量平衡方程组:

$$\begin{cases} C_{\text{污水,COD}} X_{\text{污水}} + C_{\text{河水,COD}} X_{\text{河水}} = \rho_{\text{COD}} \\ C_{\text{污水,TN}} X_{\text{污水}} + C_{\text{河水,TN}} X_{\text{河水}} = \rho_{\text{TN}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ_{COD} 、 ρ_{TN} 分别为管道出流处的COD和TN浓度,mg/L; $C_{\text{污水,COD}}$ 、 $C_{\text{河水,COD}}$ 分别为管道入流处污水和河水的COD浓度,mg/L; $C_{\text{污水,TN}}$ 、 $C_{\text{河水,TN}}$ 分别为污水管道入流处污水和河水的TN浓度,mg/L; $X_{\text{污水}}$ 、 $X_{\text{河水}}$ 分别为管道中污水和河水的入流量比例,%。

通过水质监测仪器测定 $C_{\text{污水,COD}}$ 、 $C_{\text{河水,COD}}$ 、 ρ_{COD} 、 $C_{\text{污水,TN}}$ 、 $C_{\text{河水,TN}}$ 、 ρ_{TN} 浓度,代入式(2)可求解 $X_{\text{污水}}$ 、 $X_{\text{河水}}$ 。

1.4 原水来源与水质

试验所用污水来源于华北地区某城市的市政污水管道,河水取自管道周边地表水。污水与河水初始水质情况如表2所示。

表2 管道入流处污水与河水水质情况

Tab.2 Sewage and river quality conditions at the inflow of the pipeline

来源	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SCOD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	BOD ₅ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NH ₃ -N/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	PO ₄ ³⁻ -P/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	TDS/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	ORP/mV
污水	544	241	340	72.18	7.79	60.41	4.67	1 059	522	-70
河水	16	16	6	3.12	0.25	1.38	0.14	504	244	214.1

1.5 试验装置与化验方法

试验模拟实际条件下污水管道受河水入流入渗的影响状况,模拟测试管道直径为 200 mm,充满

度为 60%,保障试验在室温下避光进行,且不与空气直接接触。

试验装置示意图见图 1。

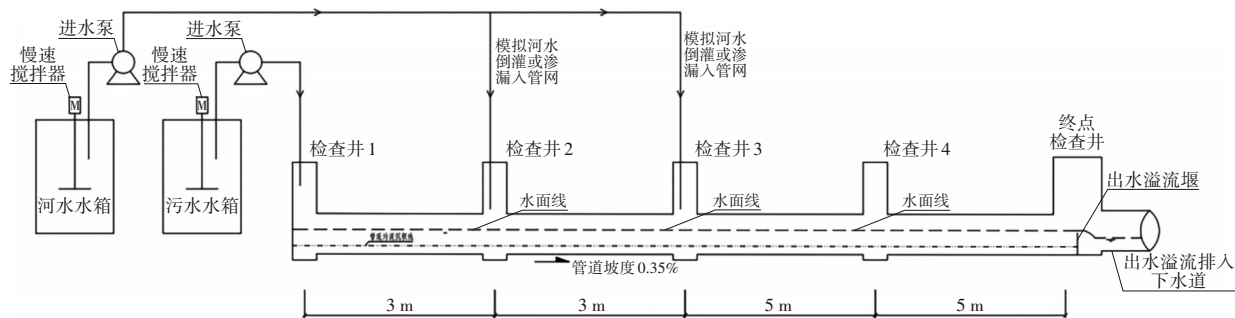


图 1 污水管道模拟示意

Fig.1 Schematic diagram of sewerage simulation

主要水质指标的监测分析方法参考《水和废水监测分析方法(第四版)》,其中 COD 和 SCOD 采用重铬酸钾法测定;BOD₅ 采用稀释接种法测定;TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定;NH₃-N 采用纳氏试剂分光光度法测定;TP 和 PO₄³⁻-P 采用钼锑抗分光光度法测定;ORP、TDS 和电导率采用多参数水质分析仪 HACH HQ40d 测定。

2 结果与讨论

2.1 不同水源的测算结果对比

以每两种常规水质指标组合后建立质量平衡方程,分别获得管道中污水和河水水量占比的测算值,由于电导率与 TDS 存在明显的相关关系,且两个指标与其他指标组合获得的测算结果基本一致,因此,仅列出电导率指标组合的测算结果。36 组水质指标组合的测算值与实际值对比结果如表 3 所示,当测算值与实际值差值的绝对值不大于 5 个百分点时,认为该指标组合测算结果相对准确,属于合理范围,可作为污水管网清污混流定量诊断的参考数据。

对比污水与河水水量占比的测算结果,发现污水量占比测算结果的准确率相对较高。污水量占比测算值属于合理范围的占比为 57.2%,而河水量占比测算值的分布范围较为离散,与实际值相差较

多,属于合理范围的占比仅为 14.4%,且部分结果出现超过 100% 或为负值的情况。分析原因主要是由于河水中各类污染物的浓度相对较低,尤其是 COD、BOD₅、SCOD、TN、NH₃-N 等指标,其浓度水平与生活污水相比均不在一个数量级别,因此,在测算过程中河水量占比的测算结果就需要更大的误差范围来平衡。

从测算结果的分布情况来看,对污水量占比的测算结果属于合理范围的数据主要集中在电导率和 ORP 指标组合上,其他指标组合仅有少部分测算结果满足要求。对河水量占比的测算结果属于合理范围的数据几乎都分布在电导率指标组合上,而 ORP 指标组合的测算结果准确率较低,说明河水量占比测算结果的准确率与电导率指标具有较强的相关性。

国内外诸多研究学者在报道中明确提出,不同水源之间的特征因子浓度应存在显著差异^[7-8]。在模拟实验过程中,发现 COD、BOD₅、SCOD、TN、NH₃-N、TP、PO₄³⁻-P 等水质指标均满足上述要求,即这些指标在生活污水与河水中的浓度存在明显差异,但通过上述指标组合建立联立方程组获得的水量占比测算值与实际值差距较大,并不能满足定量诊断需求。

表 3 不同指标组合测算值与实际值的对比

Tab.3 Comparison between caculated value and actual value of different combinations

%

指标组合	第一组测算值		第二组测算值		第三组测算值		第四组测算值		第五组测算值	
	污水占比	河水占比	污水占比	河水占比	污水占比	河水占比	污水占比	河水占比	污水占比	河水占比
COD/BOD ₅	58*	703*	73**	672*	69***	63*	62***	0*	45***	219*
COD/PO ₄ ³⁻ -P	-518*	20 295*	785*	-23 512*	83*	-408*	33*	967*	-97*	5 043*
COD/SCOD	67*	403*	105*	-388*	73***	-66*	64***	-66*	39*	402*
COD/TN	53*	887*	118*	-843*	63**	288*	51**	362*	40**	383*
COD/TP	2*	2 618*	217*	-4 215*	55*	545*	38*	807*	24*	905*
COD/NH ₃ -N	121*	-1 444*	22*	2 410*	77**	-195*	60***	43***	70*	-630*
PO ₄ ³⁻ -P/BOD ₅	42*	1 604*	93*	-440*	70***	41*	61***	44***	41**	441*
PO ₄ ³⁻ -P/TN	89***	57*	76***	127*	62**	317*	52**	336*	48***	183*
PO ₄ ³⁻ -P/TP	154*	-2 122*	51*	960*	47*	801*	39*	764*	60**	-204*
PO ₄ ³⁻ -P/NH ₃ -N	82**	283*	69*	350*	77**	-212*	59***	117*	59**	-179*
SCOD/BOD ₅	62*	476*	88**	-132*	71***	-35*	63***	-50*	42**	358*
SCOD/PO ₄ ³⁻ -P	88***	94*	81***	-28*	73***	-61*	65***	-82*	44**	330*
SCOD/TN	86***	115*	87**	-117*	87*	-277*	81*	-321*	38*	414*
SCOD/TP	78*	230*	85***	-89*	76**	-114*	68**	-134*	42**	363*
SCOD/NH ₃ -N	85***	125*	77***	34*	75***	-86*	63***	-49*	50***	247*
TN/BOD ₅	56*	803*	88**	-146*	67***	184*	58***	195*	43**	307*
TP/BOD ₅	52*	1 059*	89**	-235*	68***	152*	59***	150*	42**	346*
TP/TN	71*	471*	83***	-31*	66***	226*	56***	255*	45***	257*
TP/NH ₃ -N	94***	-267*	66*	490*	72***	20**	55***	265*	59**	-185*
NH ₃ -N/BOD ₅	10*	3 417*	112*	-1 525*	64**	388*	63***	-55*	26*	1 291*
NH ₃ -N/TN	85***	136*	73**	206*	70***	132*	56***	259*	54***	56**
COD/电导率	77*	36*	93*	-9*	70***	29***	60***	44***	50***	52***
SCOD/电导率	93***	2**	77***	25***	66***	38**	56***	54*	64*	19*
PO ₄ ³⁻ -P/电导率	90***	10***	79***	21***	70***	30***	61***	43***	53***	45***
TP/电导率	85***	20**	81***	16***	72***	26***	63***	39***	52***	46***
NH ₃ -N/电导率	88***	14***	77***	25***	72***	26***	60***	44***	54***	42**
TN/电导率	90***	8***	81***	17***	74***	25***	65***	34**	54***	41**
BOD ₅ /电导率	69*	53*	85***	8*	70***	30***	61***	43***	48***	55***
电导率/ORP	74*	44*	65*	50*	58*	55*	52**	59*	45***	62*
COD/ORP	77*	45*	91*	59*	70***	59*	60***	61*	49***	63*
SCOD/ORP	91***	49*	75***	53*	65***	57*	55***	60*	62*	67*
PO ₄ ³⁻ -P/ORP	89***	49*	78***	54*	70***	58*	60***	61*	52***	63*
TP/ORP	84**	47*	80***	55*	71***	59*	62***	62*	51***	64*
TN/ORP	89***	48*	79***	55*	73***	64*	64***	62*	54***	64*
NH ₃ -N/ORP	87***	48*	76***	53*	60**	61*	61***	41***	54***	64*
BOD ₅ /ORP	69*	43*	84***	56*	70***	59*	61***	61*	47***	62*

注：*表示测算值与实际值差值的绝对值>10个百分点；**表示5个百分点<测算值与实际值差值的绝对值≤10个百分点；***表示测算值与实际值差值的绝对值≤5个百分点。

2.2 常规水质指标的遴选

进一步分析表 3 中各指标组合的测算结果,发现电导率指标与其他指标组合获得的测算结果准确率相对较高,大多属于合理范围。聚焦该指标所

属组合的 8 组数据发现,污水量占比的测算结果属于合理范围的比例为 80%,河水量占比的测算结果属于合理范围的比例为 57.5%。

为了更加清楚地了解电导率与其他常规水质

指标组合所得测算结果的可靠性与稳定性,通过绘制雷达图对比测算值与实际值的重合程度,结果如图2所示。常规水质指标与电导率指标组合,在5种掺混比例下生活污水量占比测算值与实际值的重合性均较好,测算结果相对稳定。从对比结果来看,河水量占比的测算值波动性仍比较明显,但与其他指标相比,结果的准确性有明显提高。

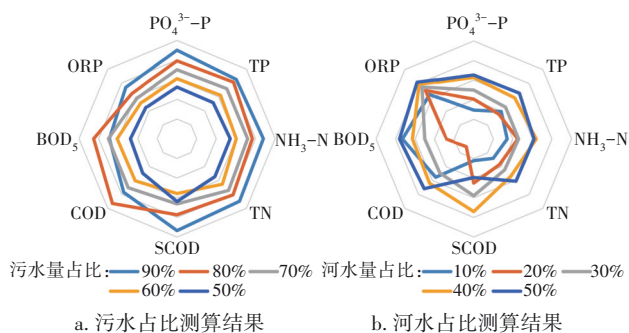


图2 电导率指标组合的测算值与实际值对比

Fig.2 Comparison between actual value and calculated value of conductivity combination

一般情况下,利用特征因子法进行入流入渗水量的核算时,选择的水质指标其质量浓度还应相对稳定,不易发生物理、化学或生物反应而引起显著的浓度变化^[8]。由于电导率指标与TDS有明显的关系,且通过仪器法测量的TDS是以水中可导电物质的质量浓度进行表征,因此,通过对比两种水源混合后TDS的理论测算值和实际测量值,验证了电导率或TDS指标的稳定性。

TDS实际测量值与测算值对比如图3所示。

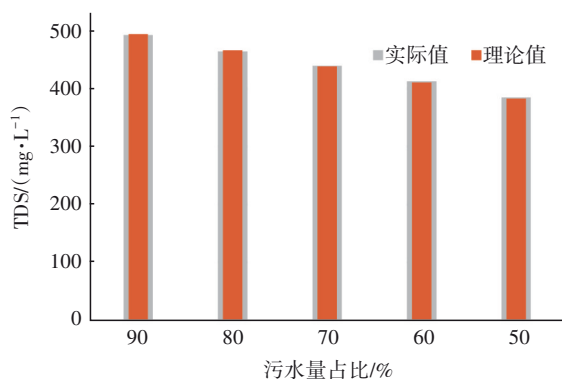


图3 TDS实际测量值与测算值对比

Fig.3 Comparison between actual value and calculated value of TDS

由图3可以看出,TDS在污水与河水混流前后的数值变化基本来源于两种水源的混合稀释,其实际测量浓度值与按混合比例测算的浓度值差值非

常小,说明电导率或TDS指标的稳定性较好。同时,电导率或TDS指标具有易测量、检测成本相对较低等优点,即通过美国哈希(HACH)、德国WTW等厂家的便携式水质参数仪均可快速完成测试,数据结果的准确率较高、测量误差较低。

国内也有学者采用电导率指标对排水系统外水入渗问题进行了诊断研究,刘旭辉等^[9]采用污水总流量和电导率测算了深圳某排水片区的地下水入渗量,用拟合流量代替了一种水质指标,也可以获得混流量比例,但由于污水管道为非满管流,准确监测污水流量数据存在一定难度。程珣等^[10]通过在线监测电导率等指标的波动分析了降雨过程对污水管网的影响,这种方法能够定性判断污水管网清污混流情况,但还不能确定雨水入渗污水管网的实际比例。通过对电导率及其指标组合准确性的验证,以期经济高效地测算污水管网清污混流比例提供支撑。

2.3 优选水质指标组合排序

采用常规水质指标对污水管网清污混流情况进行定量诊断时,应尽可能选择对各类水源测算结果较为准确的指标组合,因此,为了综合比较各指标组合对两种试验水源水量占比测算结果的准确性,以5种掺混比例下两种水源获得测算值与实际值差值的平方和进行指标组合的遴选,差值平方和越小,说明测算值与实际值的差距越小、结果稳定性越好。

研究结果(见图4)表明,电导率与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN指标组合获得的测算结果与实际数据更接近,电导率组合测算结果的准确性排序为: $\text{PO}_4^{3-}\text{-P} > \text{TP} > \text{NH}_3\text{-N} > \text{TN} > \text{SCOD} > \text{COD} > \text{BOD}_5 > \text{ORP}$ 。

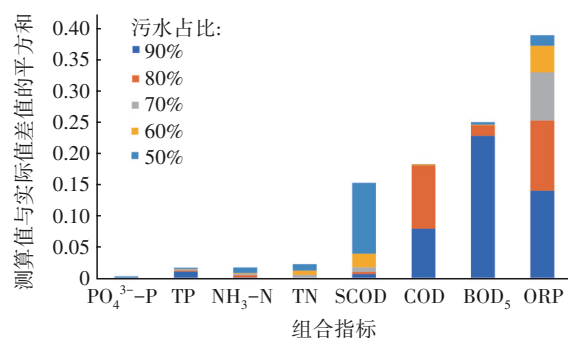


图4 电导率指标组合的测算值与实际值差值的平方和

Fig.4 Sum of squares of difference between calculated value and actual value of conductivity combination

3 结论

① 在CMBM基础上,通过遴选满足污水管网清污混流比例定量测算的常规水质指标测试研究,发现COD、BOD₅、SCOD、TN、NH₃-N、TP、PO₄³⁻-P等常规水质指标能满足不同来源水质浓度差异显著的要求,但通过上述指标建立联立方程组获得的测算值与实际值差距较大,难以满足定量诊断需求。

② 在36组常规水质指标组合中,电导率对污水量占比测算结果的准确率和稳定性相对较优,电导率指标具有测算结果相对稳定、测量简便快捷、测试成本较低等优势,建议优先作为污水管网清污混流问题的定量诊断指标。

③ 电导率与PO₄³⁻-P、TP、NH₃-N、TN等水质指标组合时,获得水量占比的测算结果与实际值更接近,建议在实际测算中优先选择电导率与磷酸盐、氨氮等指标组合进行污水混合比例的测算。

参考文献:

- [1] 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).
- [2] 刘战广, 谭学军, 陈嫣. 基于水量平衡分析的城镇污水管网定性诊断研究[J]. 给水排水, 2020, 46(9): 113-118.
LIU Zhanguang, TAN Xuejun, CHEN Yan. Qualitative diagnosis of urban sewage network based on water balance analysis [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(9): 113-118(in Chinese).
- [3] 徐祖信, 汪玲玲, 尹海龙, 等. 基于特征因子的排水管网地下水入渗分析方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 593-599.
XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong, et al. Quantification of groundwater infiltration into urban drainage networks based on marker species approach [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(4): 593-599 (in Chinese).
- [4] JENSSEN K, TOMMY J, GEORG O. Infiltration and inflow (I/I) to wastewater systems in Norway, Sweden, Denmark, and Finland[J]. Water, 2018, 10: 1696.
- [5] 周广宇, 刘广奇, 程小文, 等. 基于特征离子法的污水管网清污混合解析[J]. 中国给水排水, 2020, 36 (13): 130-138.
ZHOU Guangyu, LIU Guangqi, CHENG Xiaowen, et al. Analysis of clean water and sewage mixing in urban drainage network based on characteristic ion method [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (13): 130-138 (in Chinese).
- [6] KURISSERY S, KANAVILLIL N, VERENITCH S. Caffeine as an anthropogenic marker of domestic waste: a study from Lake Simcoe watershed [J]. Ecological Indicators, 2012, 23: 501.
- [7] SHELTON J M, KIM L, FANG J, 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 and Technology, 2011, 45: 8683-8690.
- [8] 徐祖信, 汪玲玲, 尹海龙. 基于水质特征因子和 Monte Carlo 理论的雨水管网混接诊断方法 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(11): 1715-1727.
XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong. Quantification of non-storm water flow entries into storm drains using Monte Carlo based marker species approach [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(11): 1715-1727(in Chinese).
- [9] 刘旭辉, 张金松, INIAL G. 深圳市排水系统地下水渗入量初步研究[J]. 中国给水排水, 2013, 29(3): 77-79.
LIU Xuhui, ZHANG Jinsong, INIAL G. Groundwater infiltration in Shenzhen drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(3): 77-79(in Chinese).
- [10] 程珣, 张明凯, 刘艳臣, 等. 污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析[J]. 环境科学, 2016, 37 (5): 1845-1851.
CHENG Xun, ZHANG Mingkai, LIU Yanchen, et al. Wastewater quantity and quality fluctuation characteristics of typical area of hybrid sewage system [J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1845-1851 (in Chinese).

作者简介:高晨晨(1986-),女,黑龙江哈尔滨人,硕士,高级工程师,主要从事城镇排水和污水处理的政策与技术研究工作。

E-mail:hellogcc@126.com

收稿日期:2022-09-27

修回日期:2022-11-08

(编辑:丁彩娟)