

# 基于特征因子的食品工业废水排放追踪方法

尹海龙<sup>1</sup>, 郭龙天<sup>1</sup>, 解 铭<sup>2</sup>, 徐祖信<sup>1</sup>, 赵东华<sup>3</sup>, 石泽敏<sup>3</sup>

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092;

3. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

**摘要:** 针对雨水管网中工业废水接入导致的混接污染排放, 以及污水管网中工业废水突发的非正常排放冲击问题, 选择我国典型农副食品加工及食品制造企业, 通过对企业排放废水中候选水质特征因子的稳定性及显著性分析, 得出钾、钠、氯化物等无机盐对食品行业废水具有较普遍的表征性, 且与电导率具有良好的相关性, 为废水排放实时监控提供了可行性。在此基础上, 给出了识别食品行业废水排放的无机盐质量浓度和电导率参照值, 提出了基于节点水质监测的雨污水管网中工业废水排放追踪定位方法。

**关键词:** 工业废水; 水质特征因子; 污染追踪; 参照质量浓度; 电导率

**中图分类号:** X52; TU992

**文献标志码:** A

perspective of conservative and significant behavior. Specially, potassium and chloride have a good positive relationship with electric conductivity, providing feasibility for real-time monitoring of industrial wastewater discharge. With these markers, benchmark concentrations to indicate industrial flow of food manufacturing were presented. Accordingly, the method to locate industrial flow source was also proposed based on monitoring at manholes or junctions of urban drainage network.

**Key words:** industrial wastewater; chemical markers; pollution source tracking; benchmark concentration; electric conductivity

## Source Tracking of Food Industry Wastewater Discharge into Sewers Using Marker Species

YIN Hailong<sup>1</sup>, GUO Longtian<sup>1</sup>, XIE Ming<sup>2</sup>, XU Zuxin<sup>1</sup>, ZHAO Donghua<sup>3</sup>, SHI Zemin<sup>3</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract:** Misconnected industrial wastewater entry into rainwater pipe network results in the direct sewage discharge into rivers. Additionally, sudden industrial sewage discharge into sewers without treatment would disturb the normal operation of wastewater treatment plants. To trace the unexpected industrial discharge sources, with food manufacturing as the typical industrial trades, the chemical markers to indicate such kind of contamination were screened. For the selected agricultural and sideline processing or food manufacturing enterprises in China, it was found that potassium, sodium and chloride were ideal markers from the

当前, 我国城市雨污水管网系统的运行管理面临着两大问题: 一是雨水管网中的污水混接问题, 污水经由雨水管道直排河道, 造成城区河道严重污染<sup>[1-3]</sup>; 二是污水处理厂受废水冲击性排放污染问题, 造成污水厂运行效率降低甚至无法正常运行<sup>[4]</sup>。上述两种情形都与工业废水接入有关, 具体表现在: 一, 经处理或者未经处理的工业废水混接排入雨水管网; 二, 未经处理的高浓度工业废水短时间内集中排入污水收集管网, 造成污水厂进水浓度超出设计值。为了解决这一问题, 需要建立工业废水排放的追踪方法。

混接或者突发性的工业废水排放识别与追踪, 其前提是找到表征该种污染排放类型的水质特征因子。美国环保局在 1993 年、2004 年等发布的雨水管网混接调查与改造技术指南等技术文件中, 提出了基于水质特征因子对生活 and 工业污染源不恰当接入雨水管网进行诊断的技术方法<sup>[5-6]</sup>。近年来, 对地表水体、地下水和雨水管网中生活污染来源进行识别的水质特征因子研究已有较多报道, 如采用人工甜

收稿日期: 2018-12-06

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07304-002); 中央高校基本科研业务费专项资金(22120180304)

第一作者: 尹海龙(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为城市水环境系统工程。E-mail: yinhailong@tongji.edu.cn

通信作者: 徐祖信(1956—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为城市水环境系统工程。E-mail: xzx@stcsn.gov.cn

味剂、总氮、类菌体、药物和化妆类化学品、同位素、固醇等生活污染源进行识别<sup>[7-17]</sup>,以及采用表面活性剂、荧光增白剂、硼、茶氨酸等对生活、商业等灰水排放进行表征等<sup>[16-19]</sup>。但是对工业废水排放进行识别的研究则不多见。美国环保局在 1993 年的技术指南中给出了表征不同行业工业废水排放的水质特征因子,但是没给出对应特征因子的质量浓度范围及其与生活污水相比的参照值<sup>[5]</sup>。在 2004 年发布的技术指南中,虽然给出了表征工业废水排放的参照值,包括氨氮、电导率、硬度、pH、钾、浊度等的参照值,但是总体上是一个原则性的数据,没有明确到具体的工业企业行业门类<sup>[6]</sup>。尹海龙等<sup>[20]</sup>针对电子类企业工业废水排放,提出了将氟化物等作为电子类企业废水的水质特征因子,在上海市中心城区某排水系统的混接调查中得到了有效应用,但是没有涉及管网中工业废水突发性排放的动态溯源监控问题。

目前我国一些经济发达的地区,工业企业众

多,城区或者镇区内呈现工业污染和生活污染排放复合排放的特点,污水管网受到工业废水潜在冲击的风险较大,雨污混接问题也较突出。针对各种典型的行业类型,有必要分别识别其污染排放的特征因子并加强动态监控。根据前期调研,作者发现食品工业是城区内普遍存在的一种行业类型,为此以食品工业废水排放为例,在识别其主要特征因子的基础上,开展排水管网中工业废水排放追踪方法研究。

## 1 研究方法

### 1.1 研究对象的选择

本文在我国南方地区两个城市,针对食品加工与制造业的 6 个子行业类型,选择了 10 家排水量大且具有典型代表性的工业企业进行监测。各工业企业信息如表 1 示。

表 1 监测工业企业相关信息

Tab.1 Information of selected enterprises

行业中类	监测企业编号	排水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	生产信息
水产品加工业	企业 1	100~200	海产品清洗、加工
植物油加工业	企业 2	600~700	大豆、玉米、芝麻等植物油生产加工
焙烤食品制造业	企业 3	200~300	以土豆为原料,生产薯片及膨化食品
	企业 4	30~95	蛋糕面包烘焙
豆制品加工业	企业 5	700~800	主要以大豆为原料,生产豆干、豆腐等绿色豆制品
	企业 6	210	大型豆制品生产加工
乳制品制造业	企业 7	1 000~1 500	以牛奶为原料生产酸奶、纯奶、奶粉、奶酪及奶片等乳制品
	企业 8	20~115	
方便食品制造业	企业 9	1 000	以糯米、猪肉、赤豆等农副产品为主要原料专业生产、销售粽子
	企业 10	300	

### 1.2 水质特征因子选择基本原则

理想的水质特征因子需满足三个条件:①与其他混接水源指标质量浓度存在显著性差异;②性质稳定,基本不发生物理、化学及生物反应;③灵敏度高,易于检测<sup>[20]</sup>。

对于水质特征因子的保守性分析,国内外相关研究多采用对比污水处理设施进出水前后污染物质量浓度变化,认为去除率较低的物质其保守性较好<sup>[21-23]</sup>。本研究引入  $R_i$  量化表征污染物质量浓度稳定性,即

$$R_i = \frac{\rho_{\text{ef}}}{\rho_{\text{in}}} \quad (1)$$

式中: $\rho_{\text{in}}$ 、 $\rho_{\text{ef}}$ 分别为企业预处理设施进出水污染物质量浓度。

Jelic 等<sup>[24]</sup>的研究表明,相对于质量浓度值在监测和采样过程中的不确定性,指标平均去除率介于—10%~10%之间的可以考虑忽略其变化。在管网

输送过程中去除率几乎不变(—10%~10%)或轻微变化(<30%)的化合物,可作为污水流行病学方法中的稳定特征因子<sup>[24-25]</sup>。根据 Kasprzyk-Hordern 等<sup>[26]</sup>、Yang 等<sup>[27]</sup>的研究,低去除率(<50%)的化合物可以被选作污水的稳定性指示指标。参考上述研究,本研究以平均去除率不超过 30%(即  $R_i \geq 0.7$ )为依据,筛选保守性水质指标。

对工业废水水质指标的显著性分析,是针对生活污水而言的,引入  $R_s$  表征。

$$R_s = \frac{\rho_{\text{ef}}}{\rho_{\text{s}}} \quad (2)$$

式中: $\rho_{\text{s}}$ 为生活污水中污染物质量浓度。当  $R_s > 1$  时,认为可以通过该指标区分工业废水和生活污水。

### 1.3 采样方法

#### 1.3.1 工业企业采样

第一阶段针对企业 1~企业 5,在各企业处理设施的进水口和出水口各采集 10 个水样,08:00—

18:00 间每小时采样一次,每次采集 1.5 L 水样.在第一阶段采样的基础上,考虑到采样的企业排水量较大且生产工艺流程稳定,第二阶段针对企业 6~企业 10,在每家企业采集 8 个水样(进出水各 4 个),每小时采样一次,每次采集 1.5 L 水样.

### 1.3.2 生活污水采样

为了分析工业废水指标的显著性,在某生活小区采集了生活污水水样.该居住小区为 20 世纪 70 年代建设的小区,小区内有一根黑水管和一根灰水管,分别接纳厕所马桶冲洗水和其他生活污水(洗衣、洗浴和厨房混合污水).在小区黑水和灰水管道的出口处,分别持续采样 48 h,每 3 h 取样一次,每个样品 1.5 L,总计采集 16 个黑水水样和灰水水样.

### 1.4 水质监测指标

农副食品加工和制造业废水主要来自原料清洗、工艺制造等过程.通过对食品行业不同中类生产过程中所用原料及其生产工艺过程的了解与分析<sup>[28]</sup>,确定食品行业废水的候选水质特征因子包括氨氮、总氮、油脂、钠、钾、氯化物、蛋白质、总糖、淀粉等 9 项.此外,考虑到在线监控的可行性,针对第二阶段监测的企业 6~企业 10 以及生活污水水样,进一步增加了电导率的监测.

上述候选指标中,油脂、氯化物、氨氮、总氮、钾、钠、电导率的分析方法参考相关行业标准,其余指标

分析方法参照相关文献,具体如表 2 所示.

表 2 水质监测指标分析方法

Tab.2 Methods for analyzing selected water quality indicators

指标	测试方法	参考标准
油脂	红外分光光度法	HJ637—2012
钠、钾	ICP-AES(电感耦合等离子体发射光谱法)	HJ776—2015
氯化物	离子色谱法	HJ/T84—2001, HJ669—2013
蛋白质	BCA(蛋白质检测试剂法)	文献[29]
总糖	蒽酮比色法	文献[30]
淀粉	浓硫酸苯酚比色法	文献[31]
总氮	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	HJ636—2012
氨氮	纳氏试剂分光光度法	HJ535—2009
电导率	电导率仪自动分析法	HJ/T97—2003

## 2 结果与讨论

### 2.1 水质特征因子的筛选与确定

#### 2.1.1 稳定性分析

各监测企业处理设施进水口和排放口水质质量浓度平均值对比如图 1 所示,其中直线  $R_i=0.7$  表示判断水质指标稳定性的基准线.图 1 表明,钠、钾、氯化物是保守性的水质指标,其  $R_i$  值基本均高于 0.7,是潜在的食品行业水质特征因子.而氨氮、蛋白

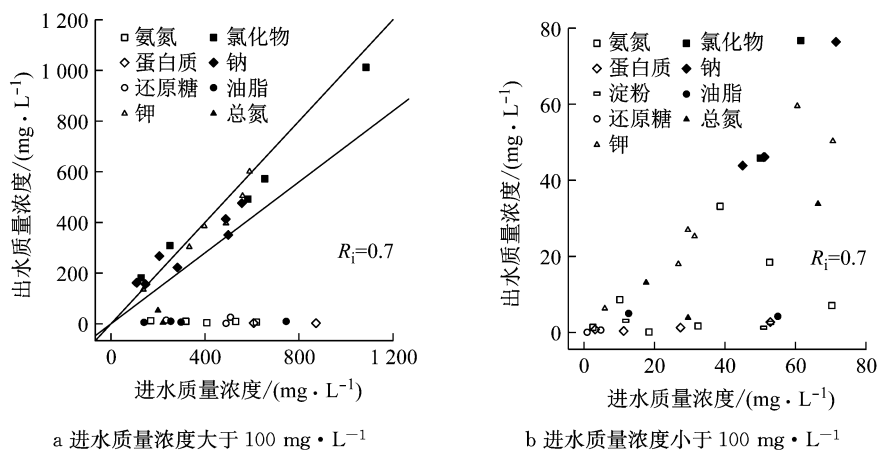


图 1 食品行业水质特征因子稳定性分析

Fig.1 Conservative behavior of candidate markers associated with food processing industry for influent concentrations

质、还原糖、淀粉、油脂等指标,总体去除率明显大于 30%,不适合作为水质特征因子.

#### 2.1.2 显著性分析

对上述满足稳定性条件的指标再进行显著性分析,各指标在工业企业处理设施排放口和生活污水中水质质量浓度对比如表 3 所示.

钾、钠离子是最为显著性的水质特征指标.由于豆制品制作原料中富含钾离子,原料清洗及制作工艺废水中钾含量通常较高,故其在植物油加工、焙烤食品制造(膨化)、豆制品加工及乳制品制造 4 个行业中类废水中的  $R_s$  值均超过 10,具有较为普遍的适用性.水产品加工废水主要来自于水产品加工过程

中的原料解冻及清洗工序,具有钠离子含量高的特点<sup>[32]</sup>。大多数食品工业企业生产过程中使用食盐等调味品,故排放废水中钠离子含量高。因此,钠离子在水产品加工、焙烤食品制造(膨化)、豆制品加工 3 个行业中类废水中的  $R_s$  值均超过 7。

氯化物是仅次于钠、钾离子的显著性指标,食品

行业中氯化物主要来源于海产品的含盐量及食用盐的使用,其在水产品加工、焙烤食品制造(膨化)及豆制品加工业中具有显著的指示性。

考虑到市政管网中输送的生活污水中灰水比例大约为 70%~75%<sup>[33]</sup>,则钾、钠及氯化物与生活污水之间的显著性差异性将更加明显。

表 3 食品工业企业处理设施排放口和生活污水水质对比

Tab.3 Comparison of measured marker concentrations in treated food industry wastewater and sanitary sewage

企业类型	$\rho(\text{钾})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 均值±标准差	$R_s(\text{钾})$	$\rho(\text{钠})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 均值±标准差	$R_s(\text{钠})$	$\rho(\text{氯化物})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 均值±标准差	$R_s(\text{氯化物})$
水产品加工	135±4	3.55	350±70	7.78	1 012±90	5.35
植物油加工	397±23	10.45	56±15	1.24	140±10	0.74
焙烤食品制造(膨化)	505±17	13.29	476±32	10.58	582±107	3.08
焙烤食品制造(糕点)	18±2	0.47	162±29	3.60	77±7	0.41
豆制品加工	525±135	13.82	376±71	8.36	573±38	3.03
乳制品制造	386±22	10.16	46±5	1.02	46±4	0.24
方便食品制造	52±20	1.37	164±84	3.64	257±70	1.36
黑水	38±8		45±10		189±23	
灰水	24±7		39±12		68±8	

### 2.1.3 在线监测的可行性分析

电导率是一种可以快速实时监测的指标,且相对与其他指标的在线监测,具有成本低廉和维护简单的特点,便于大范围推广应用。针对测定的生活污水和食品行业废水中无机盐(钾、钠、氯化物)质量浓度与电导率之间进行相关性分析,如图 2 示。

综上,综合候选水质特征因子稳定性及显著性分析,确定食品行业水质特征因子如表 4 所示。

图 2 中,氯化物和钾离子与电导率的相关性相对最为显著,相关系数分别达到 0.85 和 0.81。钠离子与电导率间的相关性虽低于氯化物和钾离子,但总体上也具有较好的表征性;当电导率数据出现异常时,也能够反映工业废水排放量的突然变化。

因此,从监控工业废水突发性排放的角度,基于电导率间接表征食品行业废水排放具有可行性。如污水管网中出现食品行业废水大量接入时,相应污水电导率值也随之增大,且波动性增强。依此可以借助电导率在线监测及时反馈,实现溯源追踪。

### 2.1.4 工业废水接入的基准值判定

综上,综合候选水质特征因子稳定性及显著性分析,确定食品行业水质特征因子如表 4 所示。

如前所述,随着城市化和工业化进程的发展,城区内呈现工业污染和生活污染排放复合排放的特点。从表 3 中可以看出,对所筛选的水质特征因子指标,生活污水中黑水的质量浓度值均高于灰水的质量浓度值,与食品或者添加剂中含有上述物质有关。表 5 给出了区分食品行业废水和生活污水排放的特

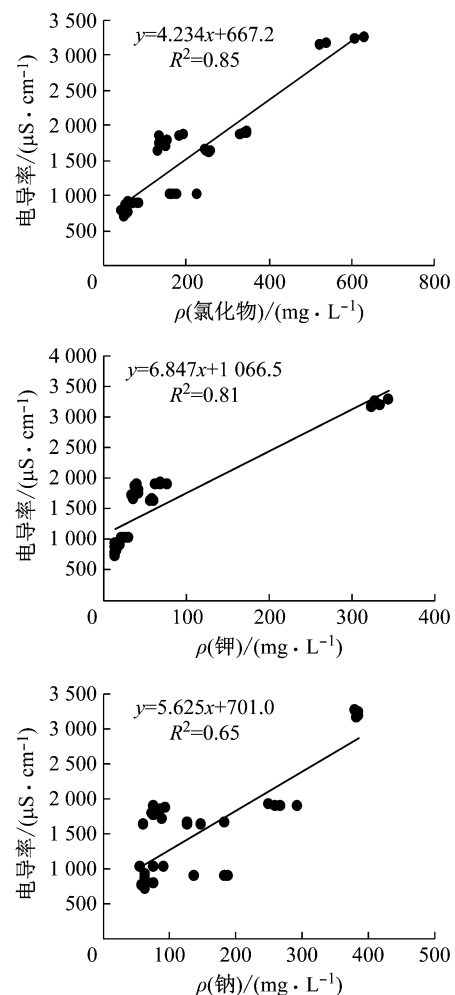


图 2 水质特征因子与电导率相关性  
Fig.2 Conductivity versus chloride, potassium and sodium



$\text{L}^{-1}$ ,电导率由  $1\,033\,\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  升高至  $2\,051\,\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,上述两个区域存在食品工业废水接入.在两条支线汇合后的节点13下游至管网末端排口,钾离子质量浓度有所下降,与生活污水接入有关,不存在食品工业废水接入的问题.

可见,节点4~节点5和节点11~节点12之间的区域为食品工业废水接入的区域,通过节点水质特征因子调查并结合食品工业废水接入的质量浓度参照值,可以实现工业废水来源的溯源追踪.具体来说,对于雨水管网,可以确定工业废水混接的区域;对于污水管网,可以对工业废水接入的区域进一步重点加强动态监控,如在上下游节点安装在线监测仪器(电导率仪等),通过实施的数据变化,监管可能存在的工业废水突发性超标排放问题.

### 3 结论与建议

(1) 以城区内较为普遍存在的食品类工业企业为例,总体上钾、钠、氯化物等3种无机盐指标是普适性的用于表征食品工业废水接入的特征指标.

(2) 相对生活污水而言,表征食品工业废水接入的特征因子瞬时质量浓度参照值为: $\rho(\text{钾})\geq 60\,\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\rho(\text{钠})\geq 70\,\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\rho(\text{氯化物})\geq 240\,\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;日平均质量浓度参照值为: $\rho(\text{钾})\geq 30\,\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\rho(\text{钠})\geq 45\,\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\rho(\text{氯化物})\geq 110\,\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .由此,可根据上述参照值,基于节点水质监测对雨水管网中食品类工业废水混接进行诊断溯源.

(3) 电导率与钾、钠、氯化物等3种无机盐指标具有良好的相关性.当电导率的瞬时值大于  $2\,000\,\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  时,指示有工业废水接入.因此从污水管网中食品工业废水突发排放监控或者水量动态波动的角度,采用电导率进行实时动态监控是可行的,这为基于智慧水务对污水管网中工业废水排放有效监管提供了一种技术方法.

(4) 后续研究中将对城区内较为普遍存在的其他工业行业类型包括医药、纺织、电子等行业进一步开展监测,分析表征不同行业工业企业的水质特征因子指标,尤其是无机离子指标及其与电导率的相关性,从而更好地对雨污水管网中工业废水混接排放或者突发排放问题进行有效监管.

#### 参考文献:

[1] 徐祖信,张辰,李怀正.我国城市河流黑臭问题分类与系统化治理实践[J].给水排水,2018,44(10):1.

XU Zuxin, ZHANG Chen, LI Huaizheng. Classification and systematic treatment of black-odorous urban water bodies in China [J]. Water & Wastewater, 2018,44(10):1.

[2] 张厚强,尹海龙,金伟,等.分流制雨水系统混接问题调研的技术体系[J].中国给水排水,2008,24(14):95.

ZHANG Houqiang, YIN Hailong, JIN Wei, *et al.* Investigation technology study on non-stormwater entries into separate storm drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(14):95.

[3] YIN H, LU Y, XU Z, *et al.* Characteristics of overflow pollution of storm drains with inappropriate sewage entry [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24 (5):4902.

[4] 郑伟.城市污水管网有毒物质溯源监控技术研究[D].重庆:重庆大学,2011.

ZHENG Wei. Study on traceability control technology about toxic substances in urban sewerage system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.

[5] Environmental Protection Agency. Investigation of inappropriate pollutant entries into storm drainage systems: a user's guide[R]. Washington D C: Environmental Protection Agency, 1993.

[6] Environmental Protection Agency. Illicit discharge detection and elimination: a guidance manual for program development and technical assessments[R]. Washington D C: Environmental Protection Agency, 2004.

[7] 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.

XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong. Quantification of non-storm water flow entries into storm drains using Monte Carlo based maker species approach [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2015, 43(11): 1715.

[8] 徐祖信,王诗婧,尹海龙,等.基于节点水质监测的管网破损位置判定方法[J].中国环境科学,2016,36(12):3678.

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.

[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.

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.

[10] 尹海龙,邱敏燕,徐祖信.一种基于微生物指示菌的雨水管网混接污染识别新方法[J].中国给水排水,2014,16(30):39.

YIN Hailong, QIU Minyan, XU Zuxin. Investigation of inappropriate non-stormwater entries into storm drainage system based on microbial indicator [J]. China Water & Wastewater, 2014,16(30):39.

[11] BURGER I J, BUSER H R, KAHLE M, *et al.* Ubiquitous occurrence of the artificial sweetener acesulfame in the aquatic environment: an ideal chemical marker of domestic wastewater in groundwater [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(12):4381.

- [12] TRAN N H, HU J Y, LI J H, *et al.* Suitability of artificial sweeteners as indicators of raw wastewater contamination in surface water and groundwater [J]. *Water Research*, 2014, 48(1): 443.
- [13] 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 & Technology*, 2011, 45(20): 8683.
- [14] AHMED W, STEWART J, POWELL D, *et al.* Evaluation of Bacteroides markers for the detection of human faecal pollution [J]. *Applied Microbiology*, 2008, 46(2): 237.
- [15] XU Z, WANG L, YIN H, *et al.* Source apportionment of non-storm water entries into storm drains using marker species: modeling approach and verification[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 546.
- [16] LIM F, ONG S, HU J. Recent advances in the use of chemical markers for tracing wastewater contamination in aquatic environment: a review [J]. *Water*, 2017, 9(2): 143.
- [17] YIN H, XIE M, ZHANG L, *et al.* Identification of sewage markers to indicate sources of contamination: low cost options for misconnected non-stormwater source tracking in stormwater systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 125.
- [18] BARRETT M, HISCOCK K, PEDLEY S, *et al.* Marker species for identifying urban groundwater recharge sources: a review and case study in Nottingham, UK [J]. *Water Research*, 1999, 33 (14): 3083.
- [19] 孟莹莹, 冯沧, 李田, 等. 不同混接程度分流制雨水系统旱流水量及污染负荷来源研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(12): 3527.  
MENG Yingying, FENG Cang, LI Tian, *et al.* Identifying dry-weather flow and pollution load sources of separate storm sewer systems with different degrees of illicit discharge [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(12): 3527.
- [20] 尹海龙, 徐祖信, 李怀正, 等. 电子企业水质特征因子与雨污混接诊断研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(9): 2713.  
YIN Hailong, XU Zuxin, LI Huaizheng, *et al.* Tracer parameters to identify and quantify electronic industrial flow entries into storm drains [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(9): 2713.
- [21] GAN Z, SUN H, FENG B, *et al.* Occurrence of seven artificial sweeteners in the aquatic environment and precipitation of Tianjin, China [J]. *Water Research*, 2013, 47(14): 4928.
- [22] 干志伟. 人工甜味剂在环境中的分布、迁移转化及光降解机理研究[D]. 天津: 南开大学, 2014.  
GAN Zhiwei. Distribution, fate, and photolysis mechanism of artificial sweeteners in environment [D]. Tianjin: Nankai University, 2014.
- [23] BUERGE I J, BUSER H R, KAHLE M D, *et al.* Ubiquitous occurrence of the artificial sweetener acesulfame in the aquatic environment: an ideal chemical marker of domestic wastewater in groundwater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(17): 4381.
- [24] JELIC A, RODRIGUEZ-MOZAS S, BARCELO D, *et al.* Impact of in-sewer transformation on 43 pharmaceuticals in a pressurized sewer under anaerobic conditions [J]. *Water Research*, 2015, 68(1): 98.
- [25] OBRIEN J W, THAI P K, EAGLESHAM G, *et al.* A model to estimate the population contributing to the wastewater using samples collected on census day [J]. *Environment Science & Technology*, 2014, 48(1): 517.
- [26] KASPRZYK-HORDERN B, DINSDATE R M, GUWY A J. Illicit drugs and pharmaceuticals in the environment-forensic applications of environmental data, part2: pharmaceuticals as chemical markers of fecal water contamination [J]. *Environment Pollution*, 2009, 157(6): 1778.
- [27] YANG Y Y, LIU W R, LIU Y S, *et al.* Suitability of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and artificial sweeteners (ASs) as wastewater indicators in the Pearl River Delta, South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 590: 611.
- [28] 解铭. 典型工业行业水质特征因子分析与雨污混接识别研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.  
XIE Ming. Study on markers to identify illicit industrial wastewater discharge into storm drains [D]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [29] DIANZANI C, BRUCALO L, GALLICCHIO M, *et al.* Celecoxib modulates adhesion of HT29 colon cancer cells to vascular endothelial cells by inhibiting ICAM-1 and VCAM-1 expression[J]. *British Journal of Pharmacology*, 2008, 153 (6): 1153.
- [30] 黄满红, 李咏梅, 顾国维. 生活污水中糖类测试方法研究[J]. *环境污染与防治*, 2006, 28(5): 393.  
HUANG Manhong, LI Yongmei, GU Guowei. Analytical methods for sugar in domestic wastewater[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2006, 28(5): 393.
- [31] 吴永云. 比色法测定淀粉浓度[J]. *非金属矿*, 1997(6): 24.  
WU Yongyun. Determination of starch contents by colorimetry [J]. *Non-metallic Mines*, 1997(6): 24.
- [32] 毛友同. 水产品加工业污染物排放标准的初步研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2009.  
MAO Youtong. Preliminary study on the discharge standard of pollutants for aquatic product [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2009.
- [33] YI L L, JIAO W T, CHEN X N, *et al.* An overview of reclaimed water reuse in China [J]. *Journal of Environment Science*, 2011, 23(10): 1585.