

王琦, 陈鑫, 张旻, 等. 工业园区污水厂上游企业排水三维荧光光谱档案的建立与溯源[J]. 净水技术, 2026, 45(5): 115-122,136.

Wang Q, Chen X, Zhang M, et al. Establishment and traceability of 3D fluorescence spectral archives for upstream enterprises' drainage in WWTP of industrial park[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(5): 115-122,136.

## 工业园区污水厂上游企业排水三维荧光光谱档案的建立与溯源

王琦<sup>1,\*</sup>, 陈鑫<sup>2</sup>, 张旻<sup>1</sup>, 邵经纬<sup>2</sup>

(1. 无锡市政公用环境检测研究院有限公司, 江苏无锡 214000; 2. 无锡市市政公用产业集团<宜都>高新建设有限公司, 湖北宜昌 443311)

**摘要** 【目的】 工业园区污水厂常受上游工业企业不明污染物来水冲击, 导致进水水质不稳定, 严重影响污水厂运行管理。因此, 针对污水厂特征有机污染物开展及时检测、预警及风险溯源, 对保障污水厂稳定运行具有重要现实意义, 本文旨在通过建立科学方法实现这一目标。【方法】 以某工业园区污水厂上游企业为研究对象, 围绕特殊有机污染物的筛查与溯源展开研究; 首先采集各上游企业的排水样品, 基于三维荧光光谱技术建立各企业排水的特征荧光光谱档案; 随后在进水上游溯源试验中, 采用寻峰值法识别特征荧光峰, 结合荧光示踪参数分析, 判断混合水样中污染物的来源, 同时辅以平行因子分析法验证溯源结果, 形成完整的溯源技术流程。【结果】 通过寻峰值法可精准匹配混合水样与上游企业特征荧光峰的对应关系, 结合荧光示踪参数能进一步明确污染物贡献占比。平行因子分析法验证结果显示, 该溯源方法可有效识别混合水样的污染来源, 且结果稳定性良好, 证明以寻峰值法和平行因子分析法为基础的溯源技术具有实际应用可行性。【结论】 本文建立的有机污染物溯源方法, 可有效解决工业园区污水厂上游不明污染物溯源难题, 为污水厂及时应对污染冲击、优化运行管理提供技术支撑, 对提升工业园区水环境风险防控能力具有参考价值。

**关键词** 工业园区 污水厂(WWTP) 三维荧光 光谱档案 溯源

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)05-0115-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.05.015

## Establishment and Traceability of 3D Fluorescence Spectral Archives for Upstream Enterprises' Drainage in WWTP of Industrial Park

Wang Qi<sup>1,\*</sup>, Chen Xin<sup>2</sup>, Zhang Min<sup>1</sup>, Shao Jingwei<sup>2</sup>

(1. Wuxi Municipal Public Environment Testing and Research Institute Co., Ltd., Wuxi 214000, China;

2. Wuxi Municipal Public Industry Group <Yidu> High New Construction Investment Co., Ltd., Yichang 443311, China)

**Abstract** [Objective] Wastewater treatment plants (WWTPs) in industrial parks are often impacted by incoming water containing unknown pollutants from upstream industrial enterprises, which leads to unstable influent quality and seriously affects the operation and management of the WWTPs. Therefore, conducting timely detection, early warning, and risk traceability of characteristic organic pollutants in WWTPs is of great practical significance for ensuring the stable operation of the WWTP. This paper aims to achieve this goal by establishing a scientific method. [Methods] Taking the upstream enterprises of a WWTP in an industrial park as the research objects, this paper focused on the screening and traceability of special organic pollutants. Firstly, drainage samples from each upstream enterprise were collected, and characteristic fluorescence spectrum profiles of each enterprise's drainage were established based on three-dimensional fluorescence spectroscopy technology. Subsequently, in the upstream influent traceability experiment, the peak-finding method was used to identify characteristic fluorescence peaks, and combined with fluorescence tracing parameter analysis, the source of pollutants in the mixed water samples was determined. Meanwhile, parallel factor analysis was used to verify the traceability result, forming a complete traceability technical process. [Results] The peak-finding method could accurately match the

[收稿日期] 2023-11-17

[通信作者] 王琦(1989—), 男, 工程师, 主要从事水污染治理理论与技术研究等工作; E-mail: 263608892@qq.com.

corresponding relationship between the mixed water samples and the characteristic fluorescence peaks of upstream enterprises, and the combination with fluorescence tracing parameters could further clarify the contribution ratio of pollutants; the verification result of PARAFAC showed that this traceability method could effectively identify the pollution source of mixed water samples with good result stability, proving that the traceability technology based on the peak-finding method and PARAFAC was practically applicable.

[ **Conclusion** ] The organic pollutant traceability method established in this paper can effectively solve the problem of tracing unknown pollutants upstream of WWTPs in industrial parks, provide technical support for WWTPs to respond to pollution impacts in a timely manner and optimize operation management, and has reference value for improving the water environment risk prevention and control capabilities of industrial parks.

**Keywords** industrial park wastewater treatment plant(WWTP) 3D fluorescence spectral archive traceability

在工业废水处理过程中,由于溶解性有机物(DOM)的构成和比例十分复杂<sup>[1]</sup>,其浓度也会发生波动,因此,仅仅依靠常规的化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)和总有机碳这些指标来衡量废水的净化效果是不够的。而当污水厂水污染事件发生时,将无法判断其成分及来源种类。污水中的污染源分类主要成分包括腐殖质、氨基酸、色氨酸、酪氨酸以及其他特殊的化合物。这些化合物可以通过发出荧光被检测出来,而这些化合物的种类及其含量都会影响到环境的质量。除了日常的饮用水,还可以是环境污染源,例如农药、化肥、塑料制品、涂料、油漆、涂料添加剂、纤维素、芳香烃等<sup>[2]</sup>。

通过研究这些污染源的分类,发现它们对多种化学物质都非常敏感,并且通过观察刚体结构或大共轭体系以及它们的荧光来识别它们的存在,并使用它们来实现对有害化学品的快速、准确地监控。近年来,三维荧光光谱技术已经发展到一个前所未有的地步,它能够准确地识别和分析水体中的有机污染物,并且由于其特殊的选择性、灵敏度、低采集量以及便捷操作性,使得它在各种领域都得到了普遍的使用,并且在技术上也取得了长足的进步,已经成为检测DOM的首选方法。但目前多数研究还只用于监测水体中的有机物浓度,用来识别污染来源

的报道并不多<sup>[3-4]</sup>。

三维荧光光谱技术在污染控制领域发挥着重要的作用,它的优点为:准确的定位、快速的响应速度、大规模的采集、低的采集难度和短的采集时长,使得它在各种环境下都能够被普遍使用,并且在实验室和工业生产领域都得到了广泛的应用。当前,对于污水偷排行为的有效检测与分析,已经不再是一项简单的任务,而是一项极具挑战性的任务,因此,有必要采用一种先进的在线监测技术。

上游工业企业可能存在不明污染物来水的冲击,导致工业污水厂水质不稳定,影响企业运营,受到政府、环保主管单位及企业的特别关注。及时、有效地对污水厂中的特征有机污染物进行检测、预警及风险溯源具有重要的现实意义。

本文针对某工业园区污水厂上游企业开展特殊有机污染物的筛查与溯源,减少对工业污水厂运行的冲击,分析主要排污企业及其可能的原水特性,建立各企业的污水档案,并给出实际水样的溯源案例。

## 1 材料与方法

### 1.1 上游企业水质特性

采集上游企业的出水进行三维荧光图谱分析,建立光谱档案。表1为各企业的水质特性信息。

表1 上游企业排水水质特性

Tab. 1 Wastewater Quality Characteristics of Upstream Enterprise Drainage

企业编号	企业名称	实际工业废水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	排水主要污染物
1	A公司	87	醇类、间苯二酚类、三氯甲苯、水杨酸异辛酯类
2	B公司	640	石油类、氟化物等
3	C公司	8 000	COD、氨氮、总磷(TP)、悬浮物(SS)、氟化物
4	D公司	—	石油类
5	E公司	14	二氯乙烷、石油类、2-氯丙烯基异硫氰酸酯
6	F公司	86	氯离子、砷化物等

## 1.2 试验分析方法

本试验荧光数据使用的处理方法是寻峰值法及区域积分法。根据三维荧光的分析图谱,常见的主要污染物可以大致分为 9 大部分。紫外光区类富里酸(A 峰),类蛋白(类酪氨酸)(B 峰),可见光区类富里酸(C 峰),土壤类腐植酸(D 峰和 E 峰),类蛋白(类色氨酸)(T 峰),类色氨酸(T1 峰)以及海洋来源类腐殖质荧光峰(M 峰),DOM 代谢产物(N 峰)。各个物质峰的详细荧光区域如表 2 所示,荧光常用示踪参数如表 3 所示。

## 1.3 试验设备

本文所用三维荧光光谱仪型号为日立 F-7000。技术原理为:随着在激发光谱下的曝光,溶质的结构

表 2 不同荧光物质相关分区

峰值	荧光物质类型	激发波长 $\lambda_{ex}/nm$	发射波长 $\lambda_{em}/nm$
A 峰	紫外光区类富里酸	230~260	370~460
B 峰	类蛋白(类酪氨酸)	225~230	305~310
C 峰	可见光区类富里酸	310~360	370~480
D 峰	土壤类腐植酸	350~440	430~510
E 峰	土壤类腐植酸	280~288	420~450
T 峰	类蛋白(类色氨酸)	225~230	320~350
T1 峰	类色氨酸	275	340
M 峰	海洋来源类腐殖质荧光峰	330~350	380~420
N 峰	DOM 代谢产物	280	375

表 3 常见 DOM 光谱示踪参数

Tab. 3 Spectral Tracing Parameters of Common DOM

种类	定义	意义
腐殖化指数(HIX)	$\lambda_{ex}$ 为 370 nm 时, $\lambda_{em}$ 为 450 nm 与 500 nm 处的荧光强度比值	DOM 腐殖化程度
自生源指数(BIX)或新鲜度指数(FrI, $\beta : \alpha$ )	$\lambda_{ex}$ 为 254 nm, $\lambda_{em}$ 为 380 nm 处的荧光强度与 $\lambda_{ex}$ 为 254 nm, $\lambda_{em}$ 为 440 nm 处的荧光强度比值	微生物活动产生荧光溶解性有机质(FDOM)的相对贡献
荧光指数(FI)	$\lambda_{ex}$ 为 370 nm, $\lambda_{em}$ 为 450 nm 的荧光强度与 $\lambda_{ex}$ 为 370 nm, $\lambda_{em}$ 为 500 nm 的荧光强度比值	DOM 的来源(约 1.4 以陆地来源为主,约 1.9 以微生物来源为主)
荧光组分强度[类蛋白质-酪氨酸型(IB)、类蛋白质-色氨酸型(IT)、类腐殖质-A 型(IA)、类腐殖质-C 型(IC)、类腐殖质-M 型(IM)]	对应 B 峰、T 峰、A 峰、C 峰、M 峰的荧光强度	类蛋白质(B 峰、T 峰)、类腐殖质(A 峰、C 峰、M 峰)的荧光强度
类腐殖质组分比值(M : C)	M 峰的荧光强度与 C 峰的荧光强度比值	生物活动新生成 DOM 的贡献,或光降解程度
比荧光强度[类腐殖质-C 型组分的比荧光强度(spC)、类腐殖质-M 型组分的比荧光强度(spM)、类蛋白质-色氨酸型组分的比荧光强度(spT)等]	C 峰、M 峰、T 峰荧光强度与溶解有机碳含量的比值	单位碳含量时的荧光团丰度

中的发色基团就从一开始的状态跃迁至第一激发状态,这时就会释出大部分的能量,从而使之从第一激发状态的最低振动状态跃迁至第一次激发状态,并且这一跃迁的过程也伴随着一系列的荧光现象。利用先进的光谱技术,能够准确地识别出某种物体的荧光峰,并且能够根据三维空间中的变化来精确地计算每个峰的位置、振幅、温度、密度、折射率、折射率,从而获取该物质的相关信息。

## 2 结果与讨论

### 2.1 上游企业排水光谱档案建立

#### 2.1.1 C 公司光谱档案

三维荧光图显示 C 公司特征峰位置在  $\lambda_{ex} =$

255 nm, $\lambda_{em} = 415$  nm 处(图 1),在位置上属于类腐殖质溶解有机物。C 公司排水的典型特征  $\lambda_{em}$  峰值在 420 nm 处,发射荧光强度为 0.48。图 2 为 C 公司排水特征荧光峰强度及荧光指数。从荧光特征指数 B、T、A、M、C、D 及 N 对比看出(图 2),A 峰指数是峰指数中最大的,HIX 为 0.782,FrI,  $\beta : \alpha$  与 BIX 分别为 0.971 与 1.064,FI 为 2.558。HIX 指标表明 C 公司水样腐殖化程度较轻,FrI,  $\beta : \alpha$  与 BIX 指标说明 DOM 主要来自微生物的活动分解,FI 证明最终分解的 DOM 以芳香族化合物为主。

#### 2.1.2 D 公司光谱档案

如图 3 所示,D 公司特征峰位置在峰一  $\lambda_{ex} =$

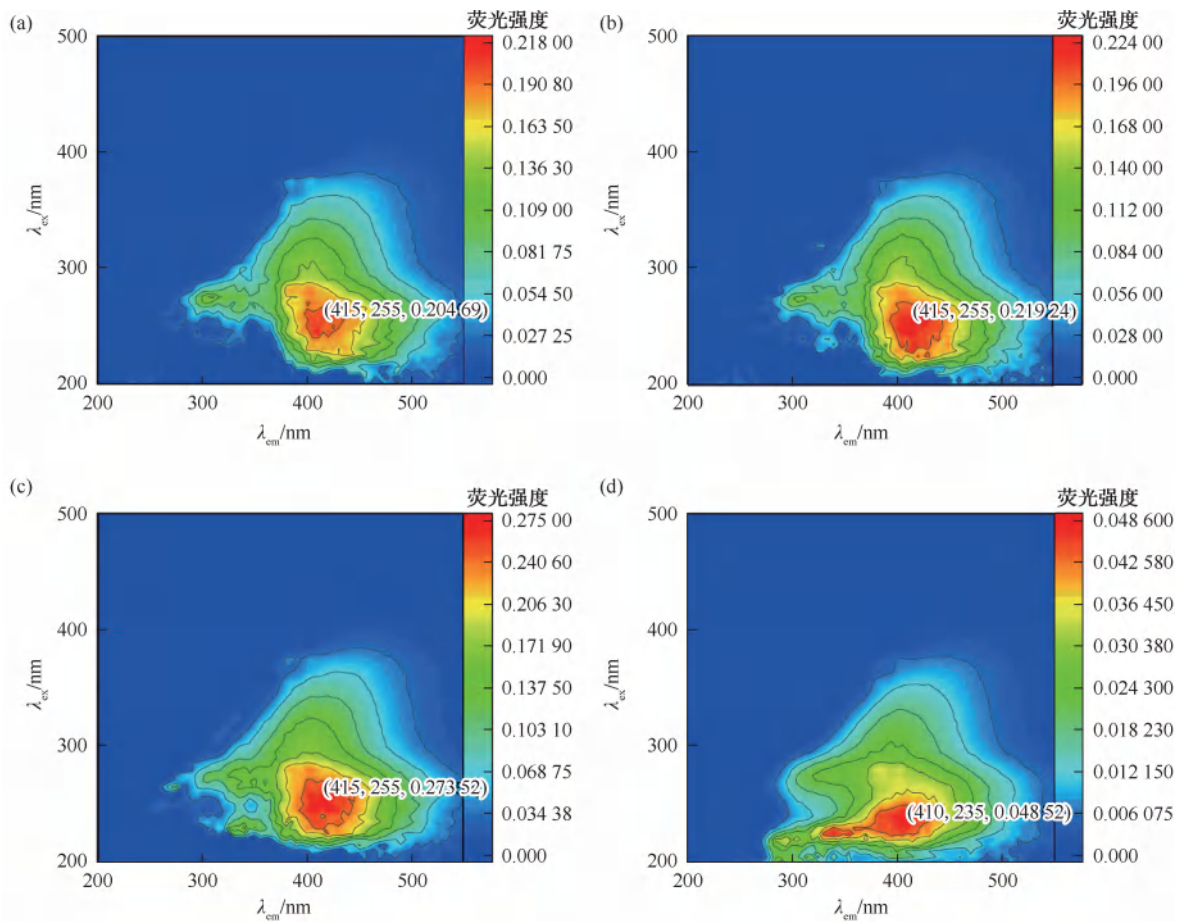


图1 C公司不同批次排水三维荧光光谱

Fig. 1 3D Fluorescence Spectroscopy of Company C Drainage in Different Batches

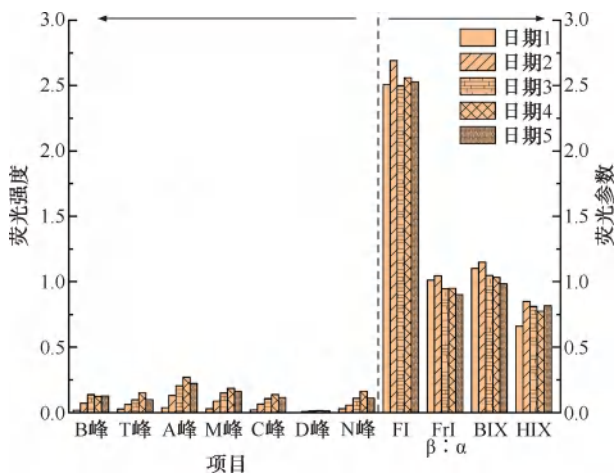


图2 C公司不同取样日期(日期1~日期5)排水荧光峰强度及荧光指数

Fig. 2 Fluorescence Peak Intensity and Index of Company C Drainage on Different Sampling Dates (Date1—Date5)

325 nm、 $\lambda_{em} = 410$  nm 及峰二  $\lambda_{ex} = 260$  nm、 $\lambda_{em} = 425$  nm 分别为可见及紫外区腐植酸,D公司水样典

型的  $\lambda_{em}$  峰值也在 420 nm,与 C 公司  $\lambda_{em}$  区别在 305~355 nm 激发时发射峰蓝移至 400 nm 且荧光强度为 0.10~0.15,相对更低。从荧光特征指数上(图4),峰 A、M、C 指数均较大,HIX 为 0.924,FrI,  $\beta : \alpha$  与 BIX 分别为 0.898 与 0.995,FI 为 2.776,说明腐殖化程度较低,DOM 包括类腐殖质及类富里酸,主要来源于微生物活动分解。

### 2. 1. 3 A 公司光谱档案

如图 5 所示,A 公司特征峰位置在峰一  $\lambda_{ex} = 245$  nm、 $\lambda_{em} = 405$  nm 及峰二  $\lambda_{ex} = 280$  nm、 $\lambda_{em} = 385$  nm 均为紫外区腐植酸。A 公司水样典型的  $\lambda_{em}$  峰值在 385 nm 及 405 nm,在 370 nm 前的发射不明显,为该水样 DOM 的特征,峰荧光强度为 0.20~0.25。

如图 6 所示,从荧光特征指数上分析,A 公司排水的峰 A、M 指数均较大,HIX 为 0.872,FrI,  $\beta : \alpha$  与 BIX 分别为 0.990 与 1.075,FI 为 2.833,说明腐

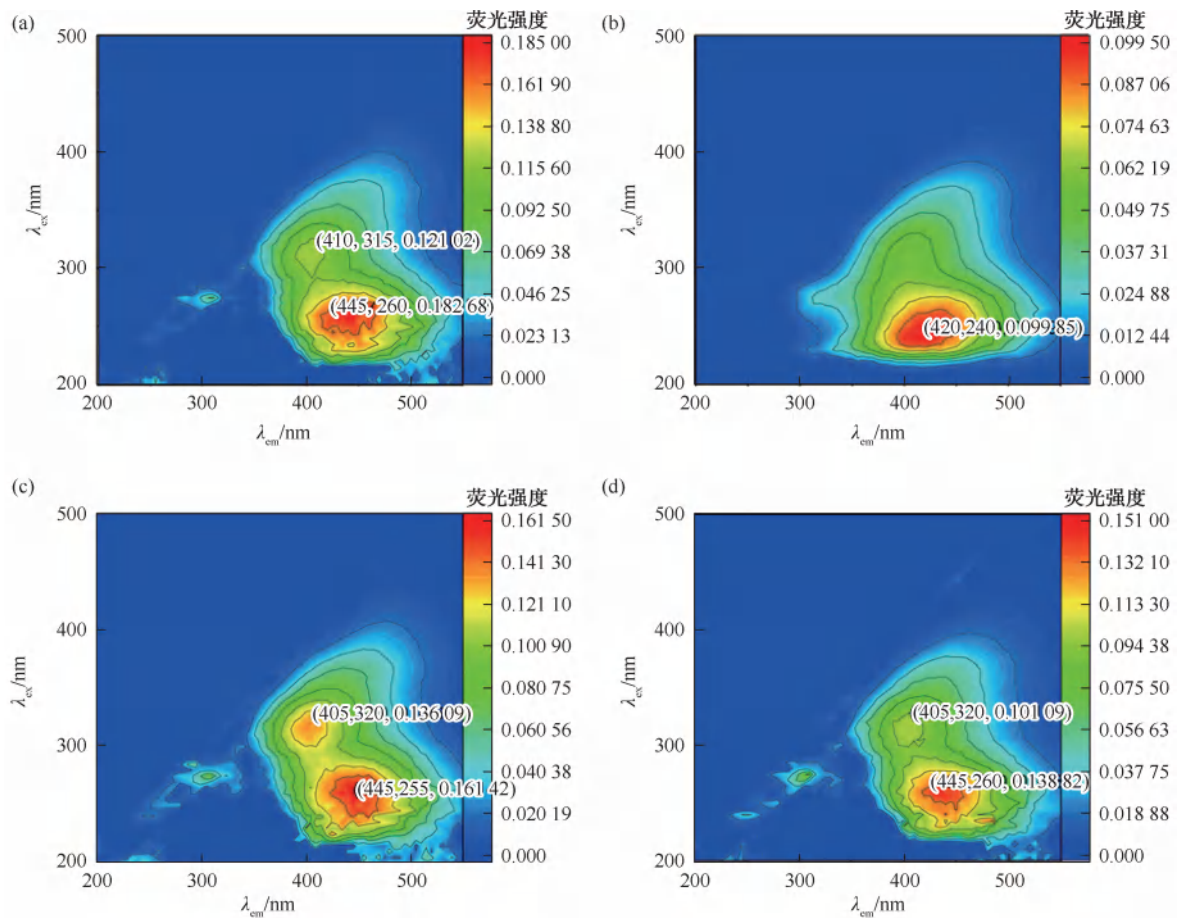


图3 D公司不同批次排水三维荧光光谱

Fig. 3 3D Fluorescence Spectroscopy of Company D Drainage in Different Batches

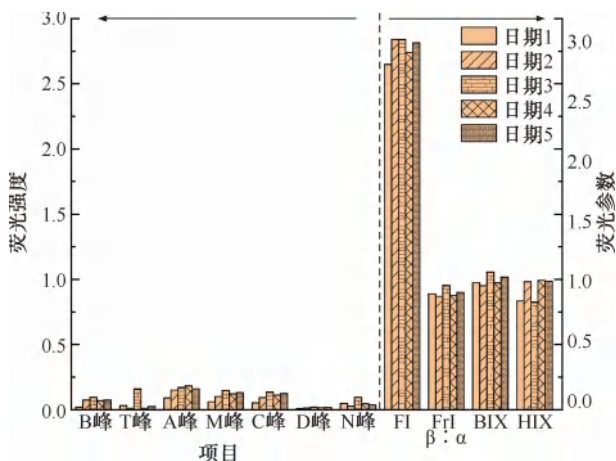


图4 D公司不同取样日期(日期1~日期5)排水荧光峰强度及荧光指数

Fig. 4 Fluorescence Peak Intensity and Index of Company D Drainage on Different Sampling Dates (Date1—Date5)

殖化程度较低, DOM 包括类腐殖质, 主要来源于微生物活动分解。

#### 2.1.4 E公司光谱档案

E公司排水有较明显的特征峰位置(峰一  $\lambda_{ex} = 325 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{em} = 400 \text{ nm}$ ; 峰二  $\lambda_{ex} = 225 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{em} = 400 \text{ nm}$ ), 如图7所示。

在 DOM 的类别中, 富里酸和腐植酸是主要的成分。富里酸的分子量相对较小, 但其酮羰基和羟基的含量超过了腐植酸。这些特性与 E 公司排放的 2-氯丙烯基异硫氰酸酯物质相匹配, 因此, E 公司的排放特性污染物记录已经确认。

#### 2.1.5 B公司光谱档案

B公司特征峰位置出现在  $\lambda_{ex} = 250 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{em} = 410 \text{ nm}$ , 如图8所示, 为类腐植酸物质, 应属于其排水污染物中石油类污染物及其微生物代谢产物, 最后的荧光光谱代表当时 B 公司的排水出现了异常, 出现了  $\lambda_{ex} = 280 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{em} = 315 \text{ nm}$  的物质峰, 这代表类色氨酸物质出现在了当日企业排水中。B 公司的特征排水污染物经调研环境影响评价资料表明存在

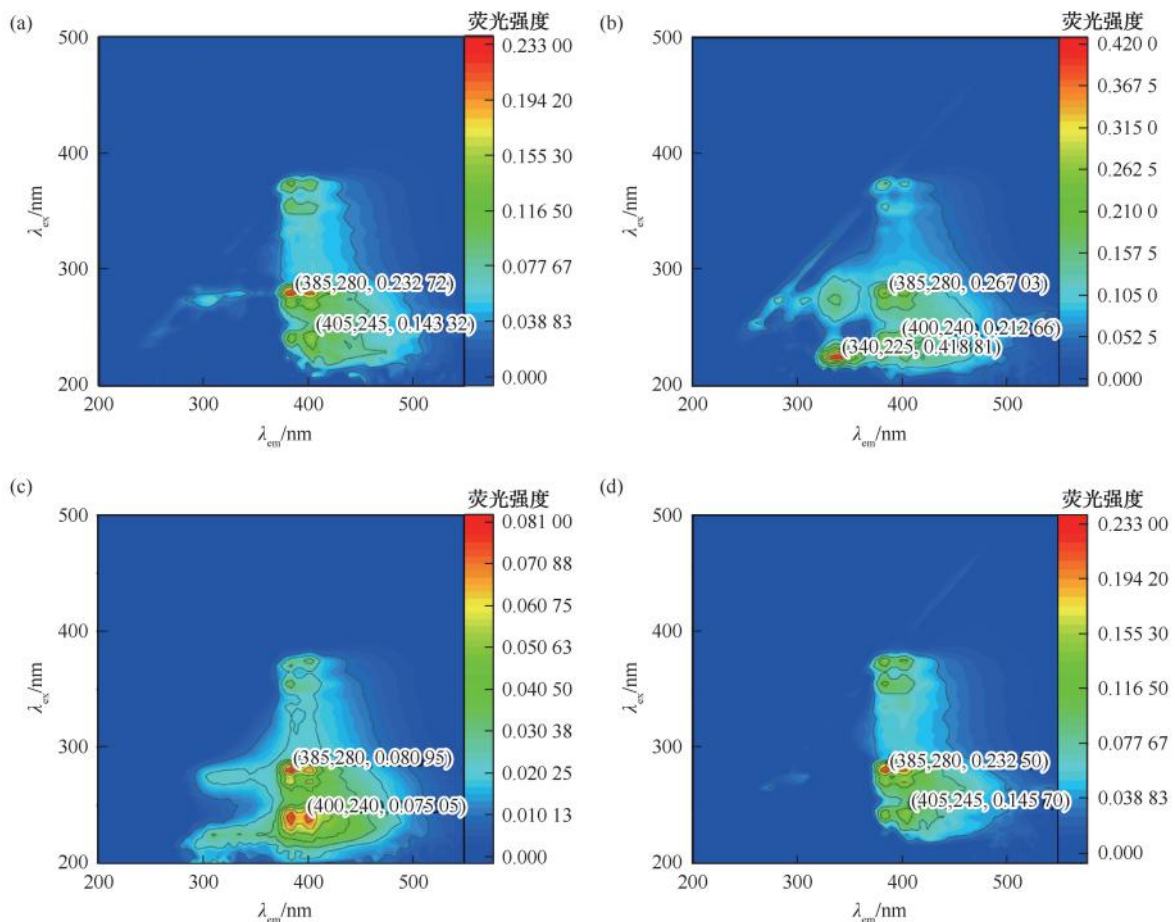


图 5 A 公司不同批次排水三维荧光光谱

Fig. 5 3D Fluorescence Spectroscopy of Company A Drainage

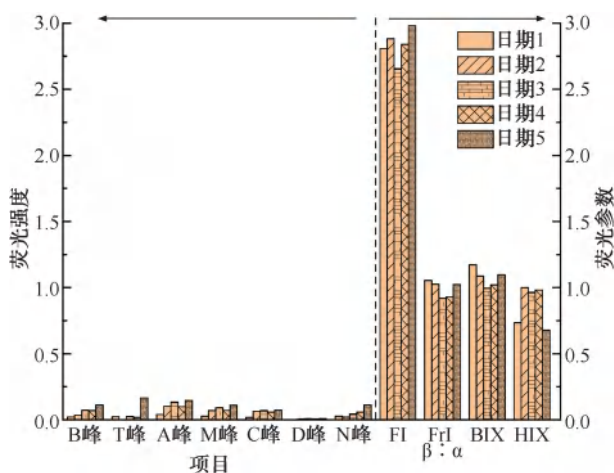


图 6 A 公司不同取样日期(日期 1~日期 5)排水特征  
荧光峰强度及荧光指数

Fig. 6 Fluorescence Peak Intensity and Index of Company A  
Drainage on Different Sampling Dates (Date1—Date5)

氟化物,而其余上游公司并不明显,因此可通过检测  
氟含量间接判断上游是否存在 B 公司排水污染。

## 2.2 污水厂进水上游溯源

建立光谱档案后,监测及溯源的重点过程即为  
将各个监测点的光谱信息与光谱档案进行比对,通  
通过对 F 公司、D 公司、E 公司 2023 年某日排水水样  
进行三维荧光光谱检测分析,并进行溯源方法的验  
证。其中 F 公司的特征峰  $\lambda_{ex} = 265 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{em} =$   
 $350 \text{ nm}$ ;峰二  $\lambda_{ex} = 260 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{em} = 425 \text{ nm}$ 。

### 2.2.1 峰位置相似验证

将 F 公司排水(h)与 D 公司排水(x)混合得到  
混合水样 1,而后与 A 公司排水(y)混合得到混合水  
样 2,将 x 与 y 混合得到水样 3,3 种混合水样的三  
维荧光光谱如图 9(d)、图 9(e)及图 9(f)所示。从峰  
位置上可以看出,混合水样 1 存在峰一  $\lambda_{ex} = 265 \text{ nm}$ 、  
 $\lambda_{em} = 350 \text{ nm}$ ;峰二  $\lambda_{ex} = 260 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{em} = 425 \text{ nm}$ ,可判  
断出来自 F 公司排水[图 9(a)]、D 公司排水[图 9  
(b)]。混合水样 2 存在峰一  $\lambda_{ex} = 265 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{em} =$   
 $350 \text{ nm}$ ;峰二  $\lambda_{ex} = 260 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{em} = 425 \text{ nm}$ ;峰三  $\lambda_{ex} =$

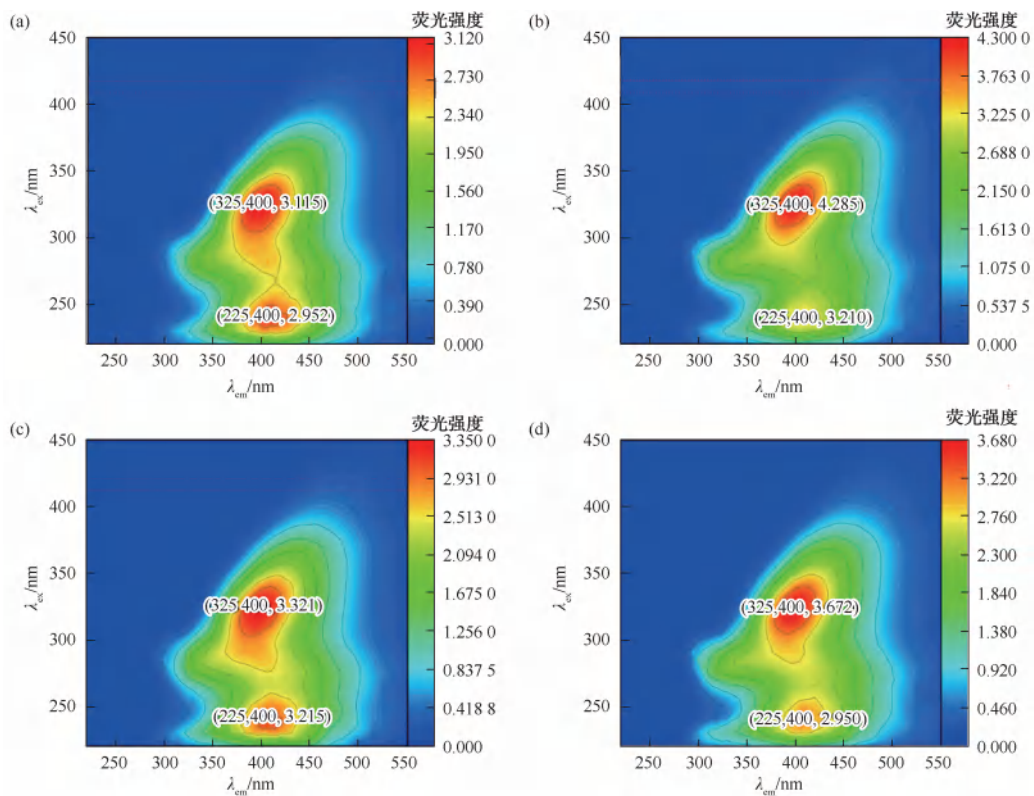


图 7 E 公司不同批次排水三维荧光光谱

Fig. 7 Fluorescence Peak Intensity and Index of Company E Drainage in Different Batches

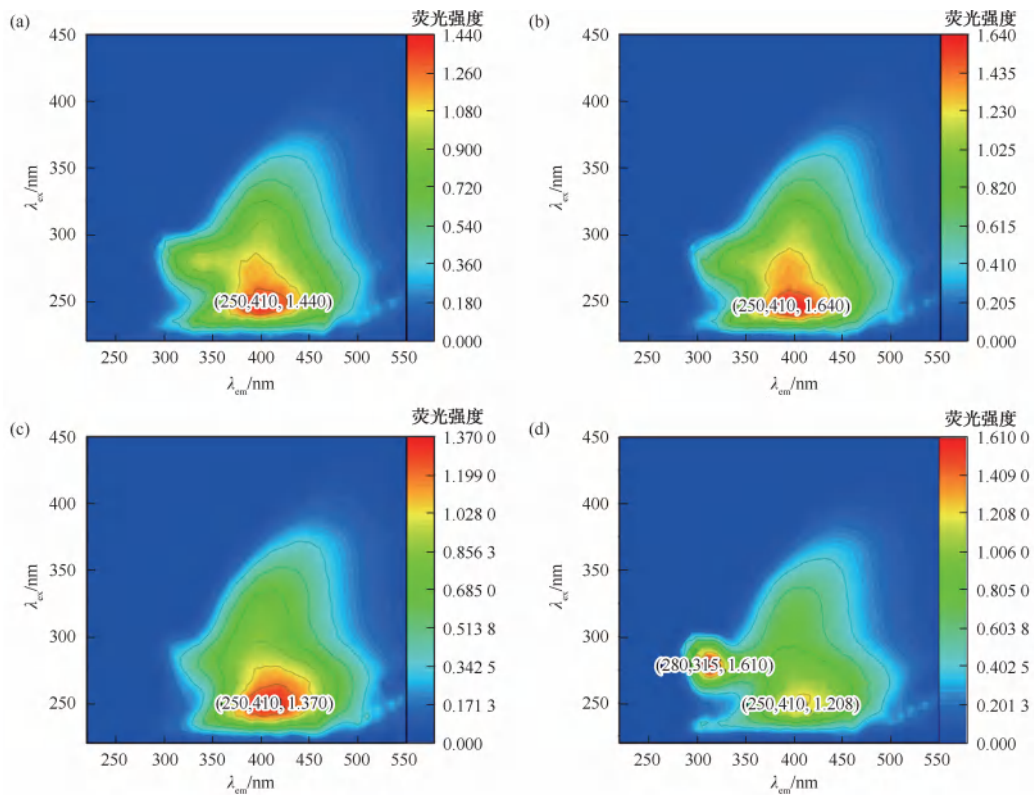
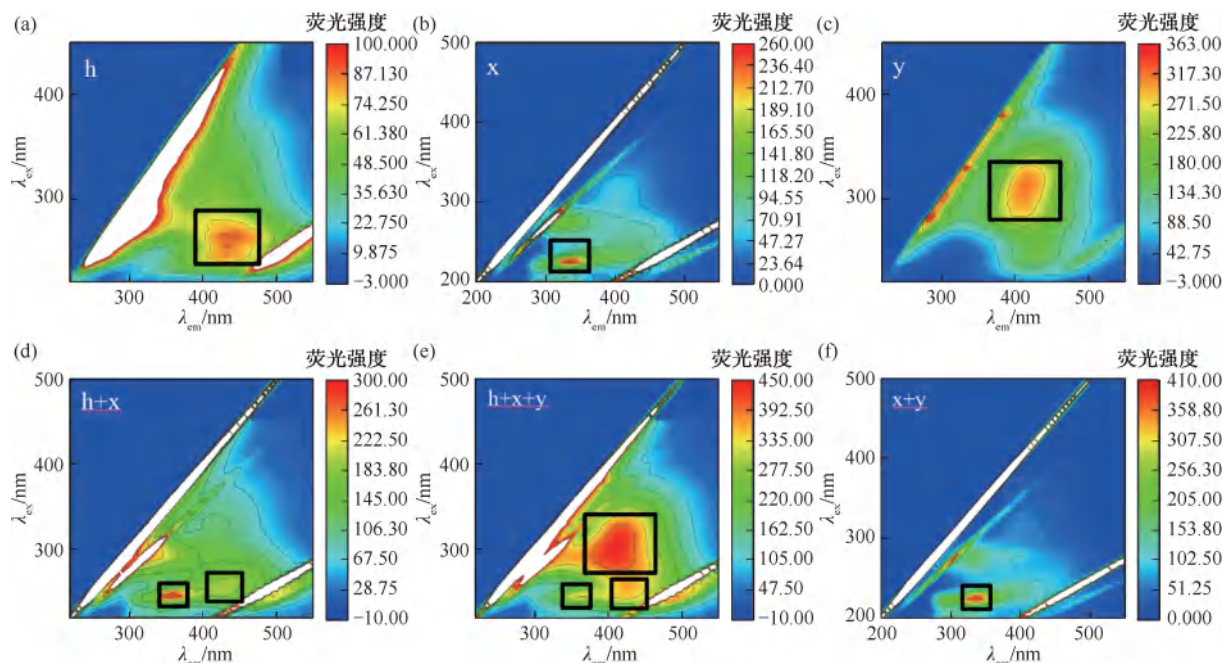


图 8 B 公司不同批次排水三维荧光光谱

Fig. 8 Fluorescence Peak Intensity and Index of Company B Drainage in Different Batches

310 nm、 $\lambda_{em} = 410$  nm,可判断来自 F 公司排水 [图 9(a)]、D 公司排水 [图 9(b)]、A 公司排水 [图 9(c)]。混合水样 3 中只显示了来自 x 水样的特征峰位置,而 y 水样的特征峰消失不见,这说明其

中的有机物在混合过程中荧光特性有所猝灭,应通过荧光参数进一步分析,因此在溯源过程中设置节点判断有无猝灭可作为分析是否有 D 公司排水与 A 公司排水混合的佐证。



注:h 表示 F 公司排水水样,x 表示 D 公司排水水样,y 表示 A 公司排水水样。

图 9 溯源方法峰位置验证

Fig. 9 Peak Position Verification of Traceability Method

### 2.2.2 荧光参数相似验证

本节将从荧光示踪参数进行验证,将 D 公司排水(x)与 A 公司排水(y)混合得到混合水样 3,如图 9(f)所示。混合水样 1 峰强度为 300,排除 E 公司排水(峰强度为 360,相差较大);FI=2.7,故推断不存在 C 公司排水(FI=2.5,相差较大);HIX=0.93,故推断存在 D 公司排水(HIX=0.92,相差较小)。

对混合水样 1 的水质参数进行调查,判断存在 D 公司排水,不存在 C 公司、E 公司、A 公司排水,且峰位置与 B 公司排水不符合,即可以识别混合排水的来源至少包括 D 公司排水,其图谱多参数与 D 公司不完全符合,故其应来自 F 公司、D 公司混合排水。

混合水样 3 峰强度为 410,存在 A 公司排水;FI=2.8,故推断不存在 C 公司排水(FI=2.5);峰 T 荧光强度为 0.09,与 D 公司排水相关性高,故推断存在 D 公司排水;HIX 与峰 D 相关性较弱,故不存在 E 公司排水。对混合水样 3 的水质参数进行调

查,判断存在 A 公司、D 公司排水,不存在 E 公司、C 公司排水,且峰位置与 B 公司、F 公司排水不符合,故其应为 A 公司、D 公司混合排水。

### 3 结论

通过三维荧光光谱、发射光谱的溯源方法捕捉了 5 家企业排水的三维荧光指纹,构建了各企业特征荧光光谱档案。

在进水上游溯源试验中,通过寻峰值法和荧光示踪参数对比可判断出混合水样来源,证明了以寻峰值法和平行因子分析法为基础的溯源方法有效可行。

### 参考文献

- [1] 梁月清,刘会来,崔康平,等. 基于三维荧光光谱-平行因子分析法的工业园区污水溶解性有机物溯源与归趋[J]. 环境工程学报, 2022, 16(4): 1238-1247.  
Liang Y Q, Liu H L, Cui K P, et al. Tracing and regression of dissolved organic matter in wastewater from the industrial park based on 3D-fluorescence spectrum-parallel factor analysis[J].

(下转第 136 页)

- 京: 中国环境科学出版社, 2014.
- Zhao X G, Duan X L. Exposure factors handbook of Chinese population[M]. Beijing: China Environmental Press, 2014.
- [27] Ahmed W, Vieritz A, Goonetilleke A, et al. Health risk from the use of roof-harvested rainwater in southeast Queensland, Australia, as potable or nonpotable water, determined using quantitative microbial risk assessment [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76(22): 7382-7391.
- [28] Ryan M O, Haas C N, Gurian P L, et al. Application of quantitative microbial risk assessment for selection of microbial reduction targets for hard surface disinfectants [J]. American Journal of Infection Control, 2014, 42(11): 1165-1172.
- [29] Dean K, Mitchell J. Reverse QMRA for *Pseudomonas aeruginosa* premise plumbing to inform risk management [J]. Journal of Environmental Engineering, 2020, 146(3): 04019120. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001641.
- [30] Organization W H. Dracunculus: background document for the WHO guidelines for drinking-water quality [M]. Geneva: World Health Organization, 2025.
- [31] Viasus D, Gaia V, Manzur-Barbur C, et al. Legionnaires' disease: Update on diagnosis and treatment [J]. Infectious Diseases and Therapy, 2022, 11(3): 973-986.
- [32] Diederer B M W. *Legionella* spp. and legionnaires' disease [J]. Journal of Infection, 2008, 56(1): 1-12.
- [33] Hamilton K A, Ahmed W, Palmer A, et al. Public health implications of *Acanthamoeba* and multiple potential opportunistic pathogens in roof-harvested rainwater tanks [J]. Environmental Research, 2016, 150: 320-327. DOI: 10.1016/j.envres.2016.06.017.
- [34] Wang H, Masters S, Falkinham III J O, et al. Distribution system water quality affects responses of opportunistic pathogen gene markers in household water heaters [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(14): 8416-8424.
- [35] Bartram J, Chartier Y, Lee J V, et al. Legionella and the prevention of legionellosis [M]. Geneva: World Health Organization, 2007.
- [36] Evans C A, Coombes P J, Dunstan R H. Wind, rain and bacteria: The effect of weather on the microbial composition of roof-harvested rainwater [J]. Water Research, 2006, 40(1): 37-44.
- [37] Delafont V, Rodier M H, Maisonneuve E, et al. *Vermamoeba vermiformis*: A free-living amoeba of interest [J]. Microbial Ecology, 2018, 76(4): 991-1001.
- [38] Kim M, Han M. Role of biofilms in improving microbial quality in rainwater tanks [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 53(10): 2579-2584.
- [39] Evans C A, Coombes P J, Dunstan R H, et al. Extensive bacterial diversity indicates the potential operation of a dynamic micro-ecology within domestic rainwater storage systems [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(19): 5206-5215.
- [40] 葛承轩. 干旱区农村雨水集蓄饮用水安全现状分析与对策 [J]. 农业科技与信息, 2012(24): 18-19.
- Ge C X. Analysis and countermeasures of drinking water safety in rural rainwater collection in arid areas [J]. Agricultural Science-Technology and Information, 2012(24): 18-19.

## (上接第 122 页)

- Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(4): 1238-1247.
- [2] 付嘉琦, 桂双林, 易其臻, 等. 基于三维荧光及平行因子分析的南昌市某河可溶性有机物溯源及治理策略 [J]. 环境工程学报, 2023, 17(11): 3487-3496.
- Fu J Q, Gui S L, Yi Q Z, et al. Dissolved organic matter source identification and treatment strategies of a river in Nanchang based on three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(11): 3487-3496.
- [3] 智国铮. 三维荧光光谱技术在水环境中的研究与应用进展 [J]. 四川环境, 2021, 40(5): 257-261.
- Zhi G Z. Research progress and application of three dimensional fluorescence spectra technique in water environment [J]. Sichuan Environment, 2021, 40(5): 257-261.
- [4] 方小云, 檀海兵, 赵龙海, 等. 基于三维荧光光谱技术的水域水污染溯源检测方法研究 [J]. 环境科学与管理, 2021, 46(12): 138-140.
- Fang X Y, Tan H B, Zhao L H, et al. Traceable detection method for water pollution based on 3D fluorescence spectroscopy [J]. Environmental Science and Management, 2021, 46(12): 138-140.