

## 基坑排水对城市内河水体溶解性有机质的影响研究

史传奇<sup>1,2</sup>, 李艳<sup>3,4</sup>, 于少鹏<sup>1\*</sup>, 胡宝忠<sup>1,2</sup>, 王慧<sup>1</sup>, 金梁<sup>4</sup>

1. 哈尔滨学院, 黑龙江省寒区湿地生态与环境研究重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150086
2. 东北农业大学生命科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150038
3. 东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150038
4. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097

**摘要** 工程施工时基坑排水是保障基坑安全的必要措施, 排出水进入城市内河, 对内河及下游水生态安全产生影响。该研究采集哈尔滨市何家沟欧亚之窗公园段建筑工程施工过程中基坑排水(W1)、排水口上游100 m处(W2)、排水口处(W3)、排水口下游50 m处(W4)、排水口下游100 m处(W5)、排水口下游200 m处(W6)的水体样品, 应用三维荧光光谱-平行因子分析方法, 测定溶解性有机质(DOM)的荧光光谱特征, 分析DOM的组成和来源, 探究基坑排水对城市内河水体环境的影响。结果表明: 内河水体腐殖化指数(HIX)在0.337~0.381范围内, 腐殖化程度低, W1, W3~W6的HIX差异不显著, 均显著低于W2, 说明排水进一步降低了内河水体腐殖化程度。荧光指数(FI<sub>370</sub>)介于2.330~2.900范围内, 生物指数(BIX)在0.897~1.140范围内, W1和W2的FI<sub>370</sub>和BIX均显著高于W3~W6, 两者具有极强的自生源特征, 说明排水使下游水体自生源特征降低。水体样品DOM中共识别出2类4种有机组分: 可见类富里酸组分(C1)、类色氨酸组分(C2)、紫外类富里酸组分(C3)和类酪氨酸组分(C4), 即类富里酸物质(C1、C3)和类蛋白质(C2、C4), 两者间成负相关关系。FI<sub>370</sub>与4种有机组分间均呈极显著的相关性, 说明DOM组成简单。W2具有相对较高的DOM浓度, 而排水口下游水体DOM浓度低, 基本保持稳定。类蛋白质在上游水体中占有相对较高的比重, 在W4中, 4种有机组分相对比重差异不显著, W5和W6类富里酸物质的相对比重有升高趋势, 同样说明基坑排水导致内河水体自生源特征降低。除pH值升高外, 下游水体样品溶解氧(DO)、总氮、总磷等理化指标含量均降低, pH值与类富里酸物质呈正相关, 与类蛋白质呈负相关, 而DO、化学需氧量及水体养分指标与之相反。水体DOM有机组分与理化指标的相关性不同, 可直接或间接影响DOM组成。因此, 工程施工基坑排水可降低城市内河水体DOM浓度, 改变了水体DOM组成。

**关键词** 三维荧光光谱; 城市内河; 排水; 溶解性有机质

**中图分类号:** X522 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)02-0498-07

### 引言

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是指能通过0.45 μm孔径滤膜的一系列结构复杂、具有多种活性官能团的有机分子综合体, 广泛存在于水体、土壤环境及植物体中<sup>[1-2]</sup>。自然水体中DOM来源于降水、地表径流等外源性输入和内源性水生生物腐烂分解、微生物代谢活动<sup>[3-4]</sup>, 常与水体氮、磷营养盐具有相关关系<sup>[5]</sup>。DOM可作为水体污

染程度的评价指标<sup>[3, 6]</sup>, 可参与水体重金属、多环芳烃污染物的迁移、转化以降解污染, 为水体环境中异养微生物提供营养和能量, 并作为可溶性有机碳和可溶性有机氮的载体对生态系统碳循环和氮循环具有重要作用<sup>[7-8]</sup>。

三维荧光光谱技术结合平行因子分析方法, 可用于测定水体DOM中所包含有机组分的荧光特征, 通过荧光峰位置可判别荧光组分的类型, 而荧光强度可用于表征各荧光组分的含量<sup>[8-9]</sup>, 利用荧光指数(fluorescence index, FI<sub>370</sub>)、生物指数(biological index, BIX)及腐殖化指数(humification

收稿日期: 2021-01-28, 修订日期: 2021-02-25

基金项目: 黑龙江省寒区湿地生态与环境研究重点实验室开放课题项目(201906), 国家自然科学基金项目(41977095), 黑龙江省教育教学改革重点委托项目(SJGZ20190034)资助

作者简介: 史传奇, 1986年生, 哈尔滨学院讲师, 东北农业大学生命科学学院博士后 e-mail: chuanqi0730@163.com

\* 通讯作者 e-mail: wetlands1972@126.com

index, HIX)可判定自生源特征及腐殖化程度,  $FI_{370}$  可用于表征自生源有机质与总有机质的比例, 反映水体 DOM 的来源, BIX 可表征 DOM 中自源性与外源性有机质间的比例<sup>[7]</sup>, 因此, 三维荧光光谱-平行因子分析模型常被应用于水体 DOM 组成及来源的研究中。张广彩等<sup>[7]</sup>利用该方法, 发现蘑菇湖上覆水 DOM 包含富里酸物质、色氨酸物质和腐殖酸物质,  $FI_{370}$  平均值小于 1.9, DOM 组成以微生物内源代谢产物为主, BIX 平均值大于 0.8, 即上覆水具有较强的自生源特征, HIX 平均值小于 4, 上覆水腐殖化程度低。张欢等<sup>[10]</sup>同样利用该方法, 发现派河水体 DOM 包含类蛋白物质和类富里酸物质, 水体 DOM 来源具有明显的生物源特征, 水体腐殖化程度较低, 并结合紫外-可见吸收光谱分析结果进一步评价了派河水体环境质量。

何家沟位于黑龙江省哈尔滨市主城区, 包括东河沟、西河沟, 合为干流汇入松花江, 全长 32.59 km, 对哈尔滨市主城区蓄洪抗旱、调节径流、排污净水具有重要作用, 其水体环境质量直接影响城市及周边生态安全。东河沟源头位于哈达屯, 主要汇集自然降水、工业尾水及周边居民生活污水, 水量不足。建筑工程施工过程中, 为防止基坑土壁塌方, 增加地基承载力, 在开挖基坑时需要及时排除地下水和流入基坑内的地表水, 以保障施工安全。本研究采集何家沟东河沟欧亚之窗公园段体育馆建设施工过程中基坑排水时的水体样品, 应用三维荧光光谱-平行因子分析方法, 测定基坑排水、排水口处及上下游水体样品中 DOM 的荧光光谱, 表征水体样品中 DOM 的组成及来源, 结合水体理化指标, 分析对 DOM 有机组分含量的影响因素, 以揭示工程施工基坑排水对城市内河水体环境质量的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 水体样品

水体样品采集河段内主要植被为香蒲 (*Typha orientalis* Presl)、芦苇 [*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.]、酸模叶蓼 (*Polygonum lapathi folium* L.), 均为结实期。于 2020 年 10 月 30 日上午 10:00, 采集基坑排水 (W1)、排水口上游 100 m 处 (W2)、排水口处 (W3, 126°36'03.11"E, 45°41'54.43"N)、排水口下游 50 m 处 (W4)、排水口下游 100 m 处 (W5)、排水口下游 200 m 处 (W6) 水体样品 (图 1)。采集内河横断面中部, 距离水面 5~10 cm 处水体样品。使用洁净的有机玻璃采集器 (采集前用欲采水体润洗 3 次) 采集水体样品, 每个采集点设置 3 次重复, 每次重复间隔 1 min 取 1 L, 装入洁净的聚乙烯塑料桶 (装入前用欲采水体润洗 3 次) 中, 依次编号, 低温 (4 °C) 遮光条件下立即带回实验室。

### 1.2 方法

依据参考文献<sup>[2]</sup>和<sup>[6]</sup>, 水体样品经过玻璃纤维滤膜 (孔径 0.45 μm) 过滤处理, 使用荧光光谱仪 (Japan, Hitachi F-7000 型) 表征水体样品 DOM 三维荧光光谱。激发光源: 450 W 氙弧灯; PMT 电压: 700 V; 扫描范围: 激发波长 (Ex) 200~600 nm, 发射波长 (Em) 200~600 nm; 扫描速度:

2 400 nm · min<sup>-1</sup>, 扫描间隔: 5 nm, 狭缝宽度: 5 nm。Milli-Q 超纯水作为空白样品, 进行散射校正。

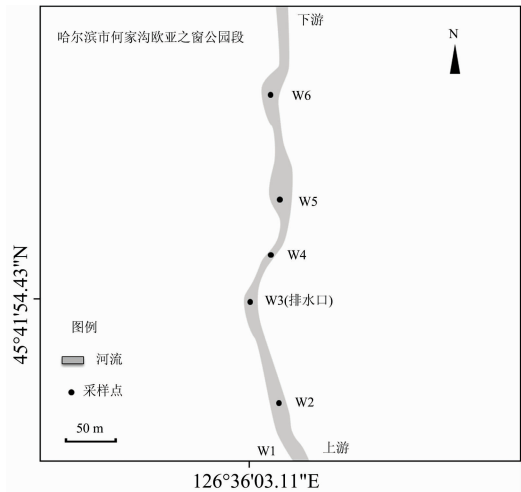


图 1 水体样品采样点分布

Fig. 1 Distribution of water sampling points

利用溶解氧仪 (衡欣 AZ8403 型) 在水体样品采集时测定溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 含量及温度。实验室内采用 pH 仪 (雷磁 PHB-4 型) 测定水体样品 pH 值, 总有机碳 (total organic carbon, TOC) 含量采用 TOC 分析仪 (Germany, Jena Multi N/C 2100 型) 测定, 总磷 (total P, TP) 含量采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定, 总氮 (total N, TN) 含量采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定, 氨氮 (ammonia N, AN) 含量采用纳氏试剂分光光度法测定, 化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD) 采用重铬酸钾法测定。各项理化指标重复测定 3 次。

### 1.3 数据分析

依据参考文献<sup>[11]</sup>和<sup>[12]</sup>, 采用荧光光谱测定仪软件 (Perkin Elmer FL WinLab software) 收集数据, 采用 Matlab R2013a 软件 Removescatter 工具包进行去散射, DOMFluor 工具包进行平行因子分析, 对半分析和残差分析检验模型的可靠性, 确定有机组分种数, 绘制三维荧光图谱。利用 Origin 2019b 软件对去散射数据中激发波长 254 nm 时发射波长在 435~480 与 300~345 nm 范围内的荧光峰面积的比值计算 HIX。采用 Excel 2016 对去散射数据中激发波长  $Ex=370$  nm 时发射波长 450 nm : 500 nm 条件下的荧光强度比值计算  $FI_{370}$ , 激发波长  $Ex=310$  nm 时发射波长 380 nm : 430 nm 条件下的荧光强度比值计算 BIX。采用 SPSS 17.0 软件对水体样品 DOM 的光谱指数、有机组分的荧光强度和相对比重及水体理化指标分别进行单因素方差分析 (Duncan 多重比较), 对有机组分与理化指标间进行 Pearson 相关性分析。采用 Excel 2016 对 DOM 有机组分最大荧光强度与  $FI_{370}$  进行线性拟合。采用 Canoco for Windows 4.5 软件分析水体样品 DOM 各有机组分与理化指标间相关性, Monte Carlo 置换检验 (置换次数  $n=999$ ) 方法检验理化指标对各有机组分影响的显著性, 并使用 CanoDraw for windows 4.0 作图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水体 DOM 的荧光光谱指数

采用去散射数据, 计算水体样品 DOM 荧光光谱指数(表 1)。水体样品的 HIX 在 0.337~0.381 范围内, 依据文献[10]和[13]中所参考的标准, 本研究中 HIX 的平均值均小于 1.5, 即所取水体样品的腐殖化程度低。W2 的 HIX 显著

表 1 水体 DOM 荧光光谱指数

Table 1 Fluorescence spectrum indexes of water DOM

水体样品	HIX	FI <sub>370</sub>	BIX
W1	0.344±0.008b	2.770±0.113a	1.083±0.002a
W2	0.378±0.003a	2.680±0.202a	1.115±0.035a
W3	0.346±0.003b	2.410±0.061b	0.926±0.001b
W4	0.350±0.006b	2.477±0.058b	0.915±0.015b
W5	0.344±0.004b	2.393±0.055b	0.926±0.019b
W6	0.347±0.003b	2.437±0.055b	0.922±0.023b

注: 表中数据为平均值±标准差。不同字母代表数据间差异显著( $p < 0.05$ )

Note: The values are mean ± standard deviation. Different letters represent significant difference in data ( $p < 0.05$ )

( $p < 0.05$ ) 高于其余样品, 而其余样品间差异不显著, 说明排水口上游腐殖化程度比排水口处及下游的高。排水口处(与排水水)及下游水体的腐殖化程度相接近, 说明排水后, 内河水体腐殖化程度降低。

由表 1 可知, FI<sub>370</sub> 介于 2.330~2.900 范围内, 均大于自生源特征值(FI<sub>370</sub> = 1.9), 说明水体 DOM 的来源主要由微生物代谢活动产生。W1, W2 的 FI<sub>370</sub> 显著( $p < 0.05$ ) 高于其余样品, 即两个水体样品的自生源特性更强, 而排水口处及下游水体自生源特征差异不显著, 说明排水后内河水体 DOM 的来源仍主要呈现自生源特征, 但自生源特征降低。

本研究 BIX 范围为 0.897~1.140, 其中 W1 和 W2 具有极强的自生源特征(BIX > 1), 而排水口处及下游水体呈现较强( $0.8 < BIX < 1$ ) 的自生源特征。说明排水口上游水体中 DOM 更多的来自于微生物代谢活动, 而排水显著( $p < 0.05$ ) 降低了内河水体 DOM 的自生源特征。

### 2.2 水体 DOM 的荧光光谱特征

基于平行因子分析法绘制三维荧光光谱(图 2), 参考[2]和[10]对荧光组分的鉴定方法, 本研究水体样品 DOM 中共识别出 2 类 4 种有机组分。其中, C1 鉴定为类富里酸物质[图 2(a)](可见类富里酸)组分(Ex/Em = 280~310 nm/380~455 nm), 对应 C 峰, 且与腐殖酸类物质(胡敏酸)相近; C2 鉴定为类蛋白质(类色氨酸)组分[图 2(b)](Ex/Em = 270

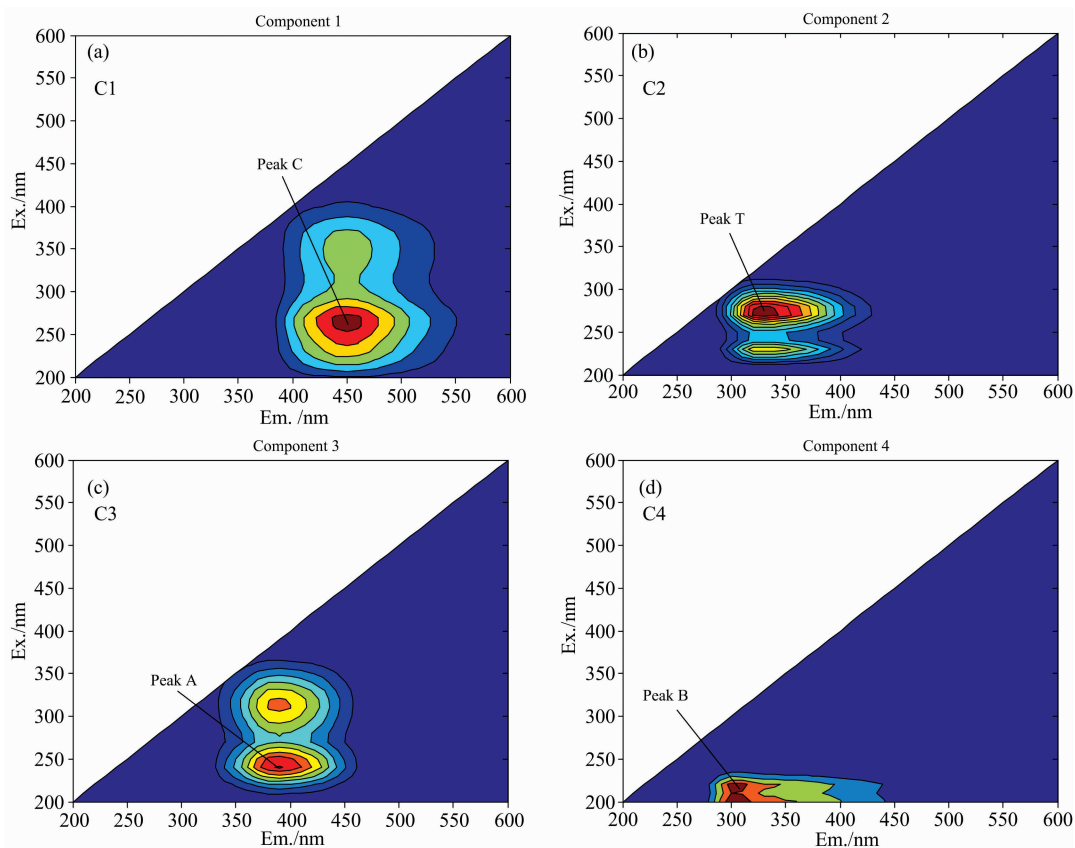


图 2 水体 DOM 三维荧光组分

(a): 可见富里酸组分; (b): 类色氨酸组分; (c): 紫外富里酸组分; (d): 类酪氨酸组分

Fig. 2 Three dimensional fluorescence components of water DOM

(a): Visible fulvic-like component; (b): Tryptophan-like component; (c): Ultraviolet fulvic-like component; (d): Tyrosine-like component

~285 nm/322~340 nm), 对应 T 峰; C3 鉴定为类富里酸物质(紫外类富里酸)组分[图 2(c)](Ex/Em = 235~260 nm/355~455 nm), 对应 A 峰; C4 鉴定为类蛋白质(类酪氨酸)组分[图 2(d)](Ex/Em = 225~237 nm/309~321 nm), 对应 B 峰。2 类 4 种有机组分常见于河流<sup>[4]</sup>、湖泊<sup>[5]</sup>及水库<sup>[6]</sup>等水体。

对水体样品 DOM 中 4 种有机组分的荧光强度(浓度)进行方差分析(表 2), 类富里酸物质(C1、C3)在 W3~W6 中浓度显著( $p < 0.05$ )高于 W1, W2 中最低, 类蛋白质(C2、C4)在 W2 中最高( $p < 0.05$ ), 即大分子外源性 DOM 有机组

分在下游水体中含量更高, 而上游水体在微生物代谢活动作用下小分子内源性 DOM 有机组分较多, 自生源特性明显。

总组分和方差分析结果反映出 W2 中 DOM 浓度最高( $p < 0.05$ ), W1 与 W3、W4 差异不显著, W4 与 W5、W6 差异不显著, 这在一定程度上说明排水口及下游水体 DOM 浓度基本稳定。总体上看, 排水显著( $p < 0.05$ )降低了内河水体 DOM 浓度。张广彩等<sup>[7]</sup>认为荧光强度较高可能与 DOM 含有结构简单、相对分子质量小的有机组分有关, 本研究结果同样证明了这一观点。

表 2 水体 DOM 中各有机组分的荧光强度

Table 2 Fluorescence intensity of organic components of water DOM

水体样品	C1	C2	C3	C4	总组分和
W1	717.78±7.45d	1 452.80±89.31b	698.30±25.98c	229.48±14.58d	3 098.37±67.97c
W2	315.22±11.27e	2 119.54±111.16a	494.88±98.65d	2 293.41±196.37a	5 223.06±221.97a
W3	1 196.92±17.85b	511.51±42.21d	1 108.22±22.20a	293.56±32.30cd	3 110.22±110.48c
W4	1 042.12±11.57c	950.19±232.16c	861.46±92.77b	715.78±229.75b	3 569.55±357.10bc
W5	1 234.09±16.82a	849.54±226.91c	1 051.16±103.72a	572.94±189.91bc	3 707.72±311.35b
W6	1 267.75±38.81a	869.08±275.96c	1 121.26±76.21a	602.55±236.83bc	3 860.63±458.48b

注: 表中数据为平均值±标准差。(a, b, c, d, e)不同字母代表数据间差异显著( $p < 0.05$ )

Note: The values are mean±standard deviation. (a, b, c, d, e) Different letters represent significant difference in data ( $p < 0.05$ )

对水体 DOM 中 4 种有机组分的相对比重做方差分析, 结果表明(表 3), C2 组分占有相对较高的比例, 尤其在 W2 中最高( $p < 0.05$ ), 而 C4 占比相对较低。类富里酸物质(C1、C3)占总组分和的 49.22%, 类蛋白质(C2、C4)占总组分和的 50.78%, 即 2 类有机组分的总组分和相接近。

W2 中类蛋白质相对比重显著( $p < 0.05$ )高于类富里

酸物质, W3 中 4 种有机组分的相对比重  $C1 > C3 > C2 > C4$ 。在 W4 中, 4 种有机组分的相对比重差异不显著。其后下游水体中类富里酸物质的相对比重有升高趋势, 而类蛋白物质的相对比重呈下降趋势, 这同样表明排水导致下游水体中自生源特征降低。

表 3 水体 DOM 中 4 种有机组分的相对比重

Table 3 Relative proportions of the four organic components of water DOM

有机组分	水体样品						占总组分和的比例/%
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	
C1	717.78±7.45b	315.22±11.26b	1 196.92±17.85a	1 042.12±11.57a	1 234.09±16.82a	1 267.75±38.81a	25.58
C2	1 452.80±89.31a	2 119.54±111.16a	511.51±42.21c	950.19±232.16a	849.54±226.91bc	869.08±275.96bc	29.92
C3	698.30±25.98b	494.88±98.65b	1 108.22±22.20b	861.46±92.77a	1 051.16±103.72ab	1 121.26±76.21ab	23.64
C4	229.48±14.58c	2 293.41±196.37a	293.56±32.30d	715.78±229.75a	572.94±189.91c	602.55±236.83c	20.86

注: 表中数据为平均值±标准差。不同字母代表数据间差异显著( $p < 0.05$ )

Note: The values are mean±standard deviation. Different letters represent significant difference in data ( $p < 0.05$ )

### 2.3 内河水体 DOM 各有机组分与 $FI_{370}$ 相关性

DOM 有机组分与  $FI_{370}$  相关性越高, 说明 DOM 的组成就越简单, 分子缩合度及芳香度也就越大<sup>[7]</sup>。依据线性拟合结果(图 3),  $FI_{370}$  与内河水体样品(W2~W6)的 4 种 DOM 有机组分的  $F_{max}$  值之间均具有极显著相关性( $p < 0.01$ ), 即内河水体样品中 DOM 组成简单, 更进一步说明腐殖化程度低。

$FI_{370}$  与大分子类富里酸物质(C1、C3)之间成负相关, 而与小分子类蛋白质(C2、C4)之间呈正相关, 上游水体  $FI_{370}$  显著高于下游水体(表 1), 即外源性类富里酸物质主要存在

于下游水体中, 而上游水体 DOM 以自生源小分子类蛋白质为主。

### 2.4 水体 DOM 有机组分与理化指标相关性

排水后, 除 pH 值升高外, 下游水体各项理化指标均呈显著的( $p < 0.05$ )降低趋势。如表 4, 水体样品 pH 值近中性, 其中 W2 最低( $p < 0.05$ ), 排水后下游水体 pH 值逐渐接近于 7, 但差异不显著。DO 受水体温度、流速及水深影响<sup>[14]</sup>, 本研究中水温变化范围较小(1.2~1.4 °C), W1 的 DO 含量较高, 可能与排水管道水体流速快有一定关系。W2 中 TOC, TN, TP 等指标均显著( $p < 0.05$ )高于其他水体样

品, 而 W1 偏低, 即上游水体的养分含量高, 而排出水中养分含量低, 使下游水体养分含量降低。同时, W2 中 COD 显

著高于其余水体样品, 说明排水后下游水体较上游水体的水质变好。

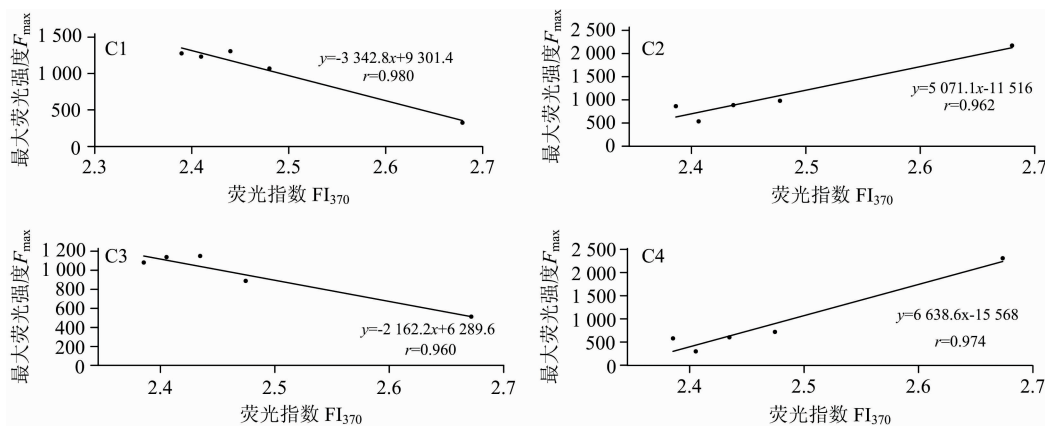


图 3 内河水体 DOM 中各有机组分(C1, C2, C3, C4)与 FI<sub>370</sub> 相关性

Fig. 3 Correlation between water DOM (C1, C2, C3, C4) organic components and FI<sub>370</sub> of inland river

表 4 水体样品理化指标

Table 4 Physiochemical properties of water samples

水体样品	pH	DO/ (mg · L <sup>-1</sup> )	TOC/ (mg · L <sup>-1</sup> )	TN/ (mg · L <sup>-1</sup> )	AN/ (mg · L <sup>-1</sup> )	TP/ (mg · L <sup>-1</sup> )	COD/ (mg · L <sup>-1</sup> )
W1	6.72 ± 0.01b	10.30 ± 0.36a	21.97 ± 0.85b	1.64 ± 0.02d	0.25 ± 0.02c	0.07 ± 0.02d	20.19 ± 1.79c
W2	6.55 ± 0.06c	8.57 ± 0.28c	41.77 ± 0.96a	14.58 ± 0.27a	0.62 ± 0.01a	0.21 ± 0.01a	30.31 ± 1.63a
W3	6.98 ± 0.08a	9.46 ± 0.38b	11.79 ± 0.49d	5.06 ± 0.06b	0.60 ± 0.02a	0.15 ± 0.01b	23.98 ± 1.21b
W4	6.93 ± 0.05a	7.39 ± 0.12d	15.13 ± 0.78c	1.94 ± 0.03c	0.36 ± 0.02b	0.13 ± 0.01bc	23.93 ± 1.32b
W5	6.99 ± 0.08a	7.63 ± 0.24d	12.80 ± 0.77d	1.85 ± 0.02c	0.35 ± 0.02b	0.12 ± 0.01c	23.68 ± 1.45b
W6	7.04 ± 0.09a	7.48 ± 0.36d	13.14 ± 0.72d	1.91 ± 0.04c	0.37 ± 0.03b	0.13 ± 0.02bc	22.94 ± 1.99bc

注: 表中数据为平均值 ± 标准差。不同字母代表数据间差异显著 ( $p < 0.05$ )

Note: The values are mean ± standard deviation. Different letters represent significant difference in data ( $p < 0.05$ )

利用水体 DOM 的 4 种有机组分的  $F_{max}$  值, 结合 7 项水体理化指标做冗余分析 (redundancy analysis, RDA), 如图 4, 前两个排序轴解释总变量的 96.5%, 能够很好地反映出水体理化指标与 DOM 有机组分的相关关系。6 个水体样品中, W1, W2 和 W3 相对分散, 而其余水体样品相对集中, 说明排水口下游水体样品在 DOM 有机组分种类和浓度上接近。DO 对 W1 的影响最大, 而多数水体养分指标对 W2 的影

响更大。

结合表 5 可知, 水体样品 DOM 中 C1, C2 和 C3 间具有极显著的 ( $p < 0.01$ ) 相关性, 与 C4 的相关性不显著。C1 与 C3 之间、C2 与 C4 之间均呈正相关关系, 说明其来源可能相同。类富里酸物质与类蛋白质物质呈负相关关系, 即排水后, 水体外源性类富里酸物质含量升高, 小分子类蛋白质物质含量降低。

pH 值与类富里酸物质呈正相关, 而与类蛋白质物质呈负相关, 但与 C4 相关性不显著 (表 5)。与 pH 值的相关关系不同, 其余 6 项理化指标均与类富里酸物质成负相关, 而与类蛋白质物质成正相关。杜士林等<sup>[4]</sup>认为水体碳源充足时微生物代谢活跃, 类蛋白质物质含量增加。本研究中 TOC 对 C3、C4 均有显著 ( $p < 0.05$ ) 相关关系, 对占总组分和较高的 C1、C2 的相关性达到极显著 ( $p < 0.01$ ), 即 TOC 与水体 DOM 具有显著或极显著的相关性。TOC 与 C2、C4 均成正相关, 与 C1、C3 均成负相关, 表明上游水体 TOC 含量高 (表 4), 有助于微生物代谢活动, 提升类蛋白质物质含量, 而下游水体 TOC 含量低, 有利于类富里酸物质积累。TN、TP 只与 C4 有显著 ( $p < 0.05$ ) 正相关关系, COD 与 C4 的正相关关系达到极显著 ( $p < 0.01$ ), 而 DO、AN 与 4 种有机组分的相关性均不显著, 说明本研究中这几项理化指标不是影响水体 DOM 组成的

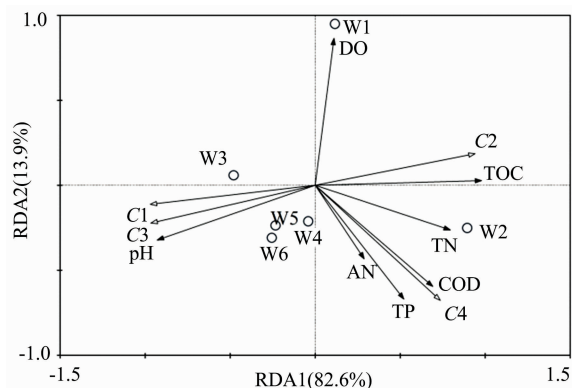


图 4 水体 DOM 有机组分与理化指标相关性

Fig. 4 Correlation between water DOM organic components and physicochemical indexes

表5 水体DOM有机组分间及有机组分与理化指标间相关系数

Table 5 Correlation coefficients between DOM organic components and between organic components and physicochemical indexes

有机组分	C1	C2	C3	C4	pH	DO	TOC	TN	AN	TP	COD
C1	1.000	-0.959**	0.978**	-0.749	0.995**	-0.398	-0.965**	-0.771	-0.301	-0.411	-0.571
C2		1.000	-0.948**	0.794	-0.949**	0.223	0.965**	0.723	0.175	0.386	0.567
C3			1.000	-0.695	0.972**	-0.334	-0.916*	-0.660	-0.149	-0.301	-0.489
C4				1.000	-0.703	-0.201	0.884*	0.910*	0.588	0.843*	0.938**

注：\* 显著相关性 ( $p < 0.05$ )，\*\* 极显著相关性 ( $p < 0.01$ )

Note: \* significant difference ( $p < 0.05$ ), \*\* very significant difference ( $p < 0.01$ )

直接因素，但仍可能通过影响水体微生物代谢活性而产生间接影响。

### 3 结论

利用三维荧光光谱-平行因子分析方法，可有效表征水体样品中DOM组成，并可进一步分析其来源及影响因素，该方法可作为城市内河水体环境研究的重要手段。本研究采集哈尔滨何家沟水体DOM包括2类4种有机组分，分别为类富里酸物质(可见类富里酸、紫外类富里酸)和类蛋白物

质(类色氨酸、类酪氨酸)，水体腐殖化程度低，自生源特性强。

工程施工基坑排水对哈尔滨何家沟水体DOM浓度和组成具有影响，DOM有机组分的总组分和降低，排水口下游水体类蛋白质浓度降低，而类富里酸物质浓度升高，水体腐殖化程度降低，DOM自生源特征下降。

工程施工基坑排水影响下游水体理化性质，pH值升高，而DO、TN和COD等指标均降低。水体DOM有机组分与理化指标具有不同的相关关系，pH值、TOC对有机组分具有直接影响，DO、TN和COD等可间接影响DOM组成。

### References

- [1] Butturini A, Herzsprung P, Lechtenfeld O J, et al. Water Research, 2020, 173(6): 115532.
- [2] SHEN Zhao-ying, GONG Xiao-feng, JIANG Liang, et al(申钊颖, 弓晓峰, 江良, 等). Environmental Science & Technology(环境科学与技术), 2019, 42(5): 196.
- [3] BU Ji-ming, HE Jia, JIAO Li-xin, et al(卜鸡明, 何佳, 焦立新, 等). Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报), 2020, 40(8): 2795.
- [4] DU Shi-lin, LI Qiang, DING Ting-ting, et al(杜士林, 李强, 丁婷婷, 等). Environmental Chemistry(环境化学), 2019, 38(9): 2027.
- [5] SUN Wei, HU Hong, ZHAO Qian, et al(孙伟, 胡泓, 赵茜, 等). Research of Environmental Sciences(环境科学研究), 2020, 33(9): 2084.
- [6] LÜ Chun-jian, GAO Hong-jie, LI Xiao-jie, et al(吕纯剑, 高红杰, 李晓洁, 等). Chinese Journal of Environmental Engineering(环境工程学报), 2019, 13(3): 559.
- [7] ZHANG Guang-cai, YU Hui-bin, XU Ze-hua, et al(张广彩, 于会彬, 徐泽华, 等). Journal of Ecology and Rural Environment(生态与农村环境学报), 2019, 35(7): 933.
- [8] ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, et al(周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 等). Journal of Lake Sciences(湖泊科学), 2019, 31(2): 493.
- [9] Zhang Y P, Zhang B, He Y L, et al. Science of the Total Environment, 2019, 686: 276.
- [10] ZHANG Huan, CUI Kang-ping, ZHANG Qiang, et al(张欢, 崔康平, 张强, 等). Research of Environmental Sciences(环境科学研究), 2019, 32(2): 227.
- [11] SHI Chuan-qi, LI Yan, YU Shao-peng, et al(史传奇, 李艳, 于少鹏, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2020, 40(11): 3472.
- [12] Li S Y, Li M, Wang G X, et al. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2019, 6(1): 20.
- [13] Qin X Q, Yao B, Jin L, et al. Aquatic Geochemistry, 2020, 26: 71.
- [14] HU Peng, YANG Qing, YANG Ze-fan, et al(胡鹏, 杨庆, 杨泽凡, 等). Journal of Hydraulic Engineering(水利学报), 2019, 50(6): 679.

# Study on the Effect of Foundation Pit Drainage on Water Dissolved Organic Matter in Urban River

SHI Chuan-qi<sup>1, 2</sup>, LI Yan<sup>3, 4</sup>, YU Shao-peng<sup>1\*</sup>, HU Bao-zhong<sup>1, 2</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, JIN Liang<sup>1</sup>

1. Heilongjiang Province Key Laboratory of Cold Region Wetland Ecology and Environment Research, Harbin University, Harbin 150086, China

2. College of Life Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150038, China

3. College of Resource and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150038, China

4. Plant Nutrition and Resources Institute, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

**Abstract** In engineering construction, foundation pit drainage is a necessary measure to ensure the safety of the foundation pit. The water discharged into the urban inland river impacts the ecological safety of the inland rivers and downstream water. In this study, the drainage water from the foundation pit (W1), 100 m upstream of the drainage outlet (W2), the drainage outlet (W3), 50 m downstream of the drainage outlet (W4), 100 m downstream of the drainage outlet (W5) and 200 m downstream of the drainage outlet (W6) were collected in the process of construction in Eurasian Window Park reach of Hejia river, Harbin city. Three-dimensional fluorescence spectrum - parallel factor analysis method was used to determine the fluorescence spectrum characteristics of dissolved organic matter (DOM), analyze the composition and source of DOM, and explore the impact of foundation pit drainage on the urban inland water environment. The results showed that the humification index (HIX) of inland water was in the range of 0.337~0.381, and the humification degree was low. There was no significant difference in the HIX of W1, W3~W6, which was significantly lower than W2, indicating that drainage further reduced the humification degree of inland water. The fluorescence index (FI<sub>370</sub>) was in the range of 2.330~2.900, and the biological index (BIX) was 0.897~1.140. The FI<sub>370</sub> and BIX of W1 and W2 were significantly higher than those of W3~W6. Both of them had strong autochthonous characteristics, which indicated that the drainage reduced the autochthonous characteristics of the downstream water. The water DOM identified two types of four organic components; visible fulvic-like component (C1), tryptophan-like component (C2), ultraviolet fulvic-like component (C3) and tyrosine-like component (C4), namely fulvic-like substance (C1, C3) and protein-like substance (C2, C4). There was a negative correlation between the two types of substance. The correlation between FI<sub>370</sub> and four organic components was very significant, indicating that DOM's composition was simple. W2 had a relatively high DOM concentration, while the DOM concentration downstream of the outlet was low and stable. Protein-like substances occupied a relatively high proportion in the upstream water. In W4, there was no significant difference in the relative proportion of the four organic components. In W5 and W6, the relative proportion of fulvic-like substance increased later, which also indicated that the drainage of the foundation pit led to the decrease in the autochthonous characteristics of inland water. Except for the increase in pH value, the contents of dissolved oxygen (DO), total N, total P and other physicochemical indexes of downstream water samples decreased. pH value was positively correlated with fulvic-like substance and negatively correlated with protein-like substance, while DO, chemical oxygen demand and water nutrient indexes were contrary. The correlation between water DOM components and physicochemical indexes was different, directly or indirectly affecting the DOM composition. Therefore, in engineering construction, the drainage of the foundation pit reduced the DOM concentration and changed the DOM composition of urban inland water.

**Keywords** Three-dimensional fluorescence spectroscopy; Urban river; Drainage; Dissolved organic matter

(Received Jan. 28, 2021; accepted Feb. 25, 2021)

\* Corresponding author