

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.03.011

再生水源补给水体中DOM的分布规律与来源解析

王赭枫, 朱正, 徐崇轩, 朱婷, 张艺悬, 梁文艳
(北京林业大学 环境科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 再生水是城市水体的重要补充水源,其中所含的溶解性有机物(DOM)以难降解有机物为主,易造成受纳水体的污染,且夏季尤为严重。以完全受再生水补充的圆明园景观水体为研究对象,利用化学检测和光谱学方法分析各项特征指数,对夏季再生水回用过程中有机物的空间变化规律与主要来源进行研究。结果显示,研究区域内水体的COD浓度呈现西低东高的分布规律,且在宽阔和相对封闭水域呈现富集、累积的特点。水生植物修复区域对COD有明显的降解作用,平均降解率为27.28%。水体中的主要有机组分包括类色氨酸、类腐殖质和类酪氨酸三类,DOM的主要来源是生物源,与再生水回用过程中的微生物代谢产物及水体中植物和微生物的代谢活动有关。相关性分析结果显示,COD与类酪氨酸的相关性较高,说明有机物超标问题是由难降解有机物的累积作用造成的;另外,COD与水生植物覆盖密度呈负相关关系,说明水生植物及其周围的微生物对COD的降解有积极作用。

关键词: 再生水源; 城市水体; 溶解性有机物; 荧光光谱; 水生植物修复

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)03-0070-08

Distribution Patterns and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter in Water Bodies Recharged with Reclaimed Water

WANG Zhefeng, ZHU Zheng, XU Chongxuan, ZHU Ting, ZHANG Yixuan,
LIANG Wenyan

(College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Reclaimed water is a crucial supplementary source for urban water bodies. The dissolved organic matter (DOM) it contains is primarily composed of refractory organic compounds, which can lead to pollution of the receiving water bodies, especially during summer. This study investigated the Yuanmingyuan landscape water body, which is entirely replenished by reclaimed water. Chemical analysis and spectroscopic methods were employed to examine characteristic indices, aiming to understand the spatial distribution patterns and primary sources of organic matter during reclaimed water reuse in summer. The results showed that the COD concentration within the study area followed a distribution pattern of lower values in the west and higher values in the east, with enrichment and accumulation occurring in both broad and relatively enclosed water areas. The aquatic phytoremediation zones demonstrated a clear degradative effect on COD, with an average degradation rate of 27.28%. The

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51672028); 圆明园水质持续改善措施研究项目[圆(服)2022-122]

通信作者: 梁文艳 E-mail: lwy@bjfu.edu.cn

main organic components in the water body included tryptophan-like, humic-like, and tyrosine-like substances. The primary source of DOM was biological, associated with microbial metabolites from the reclaimed water reuse process as well as the metabolic activities of plants and microorganisms within the water body. Correlation analysis revealed a strong positive correlation between COD and tyrosine-like substances, indicating that the organic matter exceedance was caused by the accumulation of refractory organic compounds. Additionally, COD showed a negative correlation with aquatic plant coverage density, suggesting that aquatic plants and their associated microorganisms played a positive role in COD degradation.

Keywords: reclaimed water source; urban water body; dissolved organic matter (DOM); fluorescence spectroscopy; aquatic phytoremediation

再生水作为缺水地区的“第二水源”,在北京市等缺水城市中对缓解“水荒”和保障城市用水起到了积极作用。城市水体采用再生水作为补充水源已成为我国再生水回用的有效途径之一。虽然再生水水质符合《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)标准,但仍含有一定的污染物。其中,再生水中的溶解性有机物(DOM)多为难降解有机组分,具有相对分子质量高、不易降解的特点,包括多糖、蛋白质、腐殖质等成分^[1]。这部分DOM长期存在于回用水体中,会给水体带来富营养化和水质恶化甚至危害人类健康等问题^[2]。

圆明园景观水体属于典型的再生水补给型城市水体,自2007年开始再生水成为园区唯一的补充水源,由于水体流动性较差,呈半封闭状态,其COD指标无法达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类水质要求,且夏季超标情况尤为严重。虽然再生水补水中的COD浓度并不高,但是在流入园区水体后,在不同区域会呈现不同程度的升高现象,导致出现COD超标问题。研究表明,园区长期采取水生植物修复措施,水体中的DOM呈现内源性特征,与再生水中的溶解性微生物代谢产物以及园区水体中的微生物代谢活动有关^[3]。基于此,以圆明园水体为研究对象,分析夏季再生水入园后水体COD浓度的变化规律,以此探究再生水源补给型城市水体中有机污染物的空间变化规律,并运用光谱学方法分析水体中DOM浓度、特征与来源;最后,通过相关性分析研究COD的变化与水体DOM各组分及光谱特征参数的关系,进一步解析水体中有机物浓度升高的主要原因,以期为再生水资源的利用与污染控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域如图1所示,按水流方向分为西北部水系(N区)、中部水系(H区)和东部水系(F区),共设置了23个采样点,其中N1点是再生水入口处。水流自西北向东南分成两个方向,一条流经园区北部N区,另一条流经H区由西向东通过F1和F3处汇入福海。各点位的水生植物覆盖密度如下:N1~N8分别为90%、80%、90%、25%、15%、5%、80%、75%,H1~H7分别为5%、10%、15%、80%、80%、25%、90%,F1~F8分别为15%、30%、15%、20%、5%、30%、0、0。其中N7—F2、H4—H5和H3—H7是四处具有水体流动的修复区域。

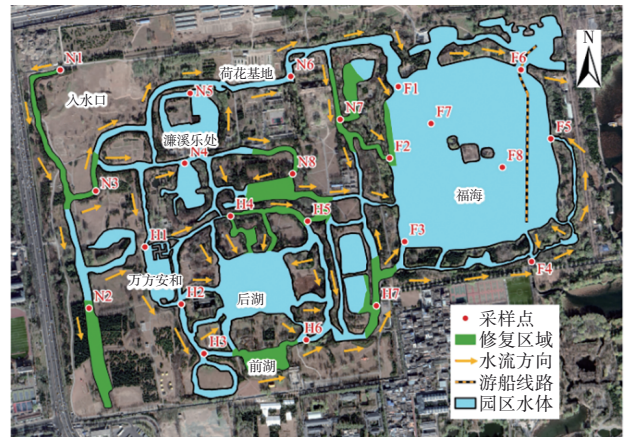


图1 研究区域概况与采样点位分布

Fig.1 Overview of study area and distribution of sampling points

1.2 水样采集与测定

分别于2023年6月、7月和8月通过有机玻璃采水器采集水面下15~20 cm的表层水样,样品放入聚

乙烯瓶中避光保存,并于48 h内采用快速测定法(HJ 924—2017)检测COD浓度;水样经0.45 μm聚醚砜滤膜过滤后进行紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱(EEM)分析。

1.3 紫外-可见吸收光谱分析方法

采用紫外-可见分光光度计和1 cm比色皿测定DOM吸光度。扫描前以超纯水作为空白对照,扫描范围为200~800 nm,间隔为1 nm。紫外吸收系数可用来表征水体中DOM的相对浓度,本研究选择350 nm通过式(1)计算DOM的吸收系数 $a(350)$ 。

$$a(\lambda) = 2.303 \times D(\lambda)/r \quad (1)$$

式中: $a(\lambda)$ 为波长 λ 处的DOM吸收系数, m^{-1} ; $D(\lambda)$ 为扣除700 nm处吸光度后的吸光度值; r 为比色皿路径长度,即 1×10^{-3} m。

光谱斜率比 S_R 是指波长范围在275~295 nm与350~400 nm的光谱斜率之比。 $S_R > 1$ 时,说明生物源是DOM的主要来源; $S_R < 1$ 时则表示以陆源DOM输入为主^[4]。光谱斜率 $S_{275-295}$ 和 $S_{350-400}$ 采用指数函数分别对275~295 nm和350~400 nm波段的吸收光谱进行非线性拟合得到,其计算公式如下:

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \times \exp S_{\lambda_0-\lambda} \quad (2)$$

式中: λ_0 为参考波长,本研究选择的是波长范围内的中心波长, nm。

M 值是指250 nm和365 nm处的吸收系数比值,常用来表征水体中有机物的相对分子质量, M 值的大小与DOM分子质量成反比^[5],具体计算方法如式(3)所示:

$$M = a(250)/a(365) \quad (3)$$

1.4 三维荧光光谱分析方法

三维荧光光谱采用日立F-7000分子荧光光谱仪进行测定。扫描条件设置激发波长(λ_{ex})为200~500 nm,扫描间距为5 nm;发射波长(λ_{em})为220~600 nm,扫描间距为5 nm;扫描速度为1 200 nm/min,PMT电压设为700 V。测定前使用超纯水作为空白背景进行校正。

荧光指数(FI)是指激发波长为370 nm时,发射波长在470 nm与520 nm处的荧光强度之比,用来表示DOM的陆地来源和微生物来源。FI<1.4时,DOM主要是陆源产生;FI>1.9时则表示DOM主要来源于水体生物;而1.4≤FI≤1.9则是两者共同作用的结果^[6]。

生物源指数(BIX)是指激发波长为310 nm时,发射波长在380 nm与430 nm处的荧光强度比值,可反映新产生的有机质占比。BIX指数在(0.6,0.7]、(0.7,0.8]和(0.8,1.0]区间时,分别表示水体中DOM具有较少、中度和较多的新近自生源特征^[7]。

腐殖化指数(HIX)是指激发波长为254 nm时,发射波长在435~480 nm范围内的荧光强度积分与其在300~345 nm范围内的荧光强度积分之比,用以反映有机物中腐殖质含量或其腐殖化程度。

新鲜度指数($\beta:\alpha$)是指激发波长为310 nm时,发射波长在380 nm与在420~435 nm之间的荧光强度最大值之比,用来反映水体中新近有机物的占比,其中 β 代表新产生的DOM, α 代表降解程度较高的DOM^[8]。

三维荧光光谱扫描后的矩阵由SigmaPlot 14.0软件进行分析,并制成荧光谱图;光谱参数的计算由Excel和Origin 2021软件完成。

1.5 平行因子分析

平行因子分析采用MATLAB软件完成。将夏季所采样品数据导入DOMFluor工具包,进行三维荧光组分解。鉴定并去除异常值后,利用最小平方和误差决定组分个数,并利用折半分析、残差分析和载荷分析保证数据结果的有效性。最终确定DOM组分数为3。

1.6 地统计学分析与相关性分析

使用ArcGIS 10.5软件建立圆明园水体的矢量地图,根据GPS定位建立采样点位图层,使用含障碍的核插值法对地图进行插值分析,从而获得空间分布图。

相关性分析主要研究COD浓度、植物密度、DOM各组分以及光学特征参数之间的相关关系,通过Origin 2021软件中的Correlation Plot工具包完成,设置相关性分析类型为皮尔逊相关分析,显著水平为0.05。

2 结果与讨论

2.1 景观水体中COD浓度的变化规律

圆明园景观水体中COD浓度的变化如图2所示。再生水在入水口处N1点位的COD浓度处于6.3~15.4 mg/L之间,低于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水限值(20.0 mg/L)。但随着水体向前流动,COD浓度呈现出不同程度的上升趋

势。除入水口点位外,其他点位的COD浓度均存在高于Ⅲ类水甚至Ⅳ类水限值(30.0 mg/L)的现象。研究表明,水体中的微生物活动会产生有机物^[9]。



图2 景观水体中COD浓度的变化

Fig.2 Changes in COD concentration in landscape water body

由于N区与入水口的距离较近,因此COD浓度的上升幅度并不明显,平均浓度为19.6 mg/L。设置的修复区域(N7—F2)位于F区的入水口,N7的COD浓度为18.7~36.3 mg/L,经过修复后降至12.1~32.4 mg/L,平均修复率为18.45%。位于中游的H区COD平均浓度较高,为30.8 mg/L。其中,H1和H2为一处封闭小湖,水体流动速度极慢,水禽和鱼类栖息于此,其啃食导致水生植物几乎无法在此处生长,该区域的COD浓度高达25.6~57.3 mg/L,但是水体在流经H区北部的修复区(H4—H5)后,COD浓度降至14.1~34.2 mg/L,平均修复率为33.60%。H区南部水体经过H3时的COD浓度为25.6~54.1 mg/L,在经过修复区域(H3—H7)后,COD浓度降至17.7~25.1 mg/L之间,平均修复率为29.81%。上述结果说明,水生植物对COD具有明显的降解效能,平均降解率在27.28%左右。

F区的水体分别由N区和H区的水流汇集而成,整个F区水生植物覆盖度较低,水力停留时间较长。入水口处(F1和F3)的COD浓度在23.6~34.0 mg/L之间,但F区中央的COD浓度却高达28.5~41.6 mg/L,这说明没有水生植物的修复作用,水体无法降解上游排入的COD。另一方面,游船螺旋桨的扰动作用使大量沉积物表面颗粒再悬浮并进行垂向迁移,促进了底质中DOM的释放,导致了COD浓度的增加^[7]。

2.2 紫外-可见吸收光谱分析

紫外-可见吸收光谱中的各项数据能够综合反映水体有机污染物的分子质量和内外源差异等

同时,再生水中也会携带部分难降解有机物进入水体,而这种有机物的累积作用也会使水体的COD浓度升高^[10]。

特征。对 $a(350)$ 、 S_R 和 M 值的月平均值进行插值分析,得到如图3所示的各指标空间分布情况。由图3(a)可知,N区的 $a(350)$ 处于2.107~5.758 m^{-1} 之间,属于较低水平;H区的 $a(350)$ 为5.450~11.323 m^{-1} ,且DOM主要集中在西南部水域;F区的 $a(350)$ 升至4.606~12.129 m^{-1} 之间,且呈现出西低东高的分布规律。逐步升高的 $a(350)$ 值说明水中的DOM随着水流方向逐渐积累,而且呈现出上游累积、中游降解和下游富集分布特性。水体在流经H1—H5时 $a(350)$ 由8.368 m^{-1} 降至5.450 m^{-1} ,经过H3—H7处的修复区域后由10.364 m^{-1} 降至6.141 m^{-1} ,说明水生植物对水体中DOM具有明显的降解作用。此外,水生植物修复区的 $a(350)$ 值为3.147~6.640 m^{-1} ,明显低于非修复区域的2.802~12.191 m^{-1} 。

如图3(b)所示,夏季各采样点的 S_R 值在0.94~2.22之间,90%以上监测点位的 S_R 值均大于1,说明夏季再生水体的内源作用明显。修复区各点夏季的 S_R 平均值高达1.40~2.22,高于非修复区的1.30~1.96,说明水生植物及其周围微生物的代谢活动增加了水体中内源性DOM的浓度,但结合前文COD浓度和 $a(350)$ 在修复区域下降的结果,说明园区水体中所产生的内源性有机物对整体有机物的累积作用影响不大,同时反映出植物与微生物对难降解有机物的降解作用。

如图3(c)所示,N区的 M 值在4.24~5.05之间,H区下降至3.11~3.78,F区继续下降至1.80~3.48。可以看出, M 值的空间分布呈现出沿水流方向逐渐下降的趋势,这说明水体中DOM的分子质量逐渐增

大。植物修复区各点的 M 值始终保持在较高水平 (3.573~5.906), 这说明水生植物的修复作用可以降低水体中 DOM 的分子质量。有研究表明, 水生植

物能够将水体中的大分子有机物如半纤维素和纤维素等降解为小分子有机物, 从而进一步被其表面附着的微生物所利用^[11]。

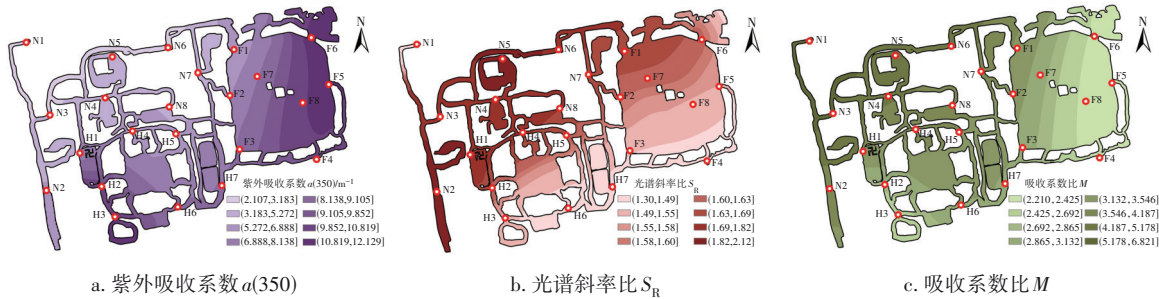


图 3 紫外-可见吸收光谱参数的空间变化

Fig.3 Spatial variation of UV-Vis spectroscopy parameters

2.3 平行因子分析

通过三维荧光光谱的平行因子分析, 得到 3 种荧光组分, 分别是类色氨酸 C1 ($\lambda_{Ex}=235$ 和 275 nm, $\lambda_{Em}=340$ nm)、类腐殖质 C2 ($\lambda_{Ex}=245$ nm, $\lambda_{Em}=440$ nm) 和类酪氨酸 C3 ($\lambda_{Ex}=225$ 和 275 nm, $\lambda_{Em}=330$ nm)。C1 和 C3 均属于芳香族氨基酸, 与水中微生物、浮游植物等的代谢产物及残体分解有关^[12]; C2 主要与微生物对类腐殖酸的再处理有关, 常见于湿地与农业环境中^[13-14]。圆明园景观水体属于仿自然人工湿地, 水体中存在大量浮游植物和微生物, 容易产生上述几类有机物。

各采样点 3 种有机组分的占比情况如图 4 所示。C1 与 C3 组分之和表示水体中的内源性有机物, 平均占比为 68.55%; C2 组分代表的类腐殖质是一种大分子有机物, 在再生水处理过程中不容易被

去除, 平均占比为 31.45%。由图 4 可知, N1 入水口处的 C1 和 C3 组分占比相当, 且明显低于 C2 组分。由图 4(a) 可知, N7、N8 和 H5 的 C1 组分含量明显高于其他点位, 说明水生植物与微生物在降解 COD 的过程中会释放大量的类色氨酸。图 4(b) 显示, 在 7 月, 植物修复区采样点如 N3、N8、H4、H5、H6 和 H7 的 C1 组分含量几乎接近于零, 而此时这些点位的 C2 组分占比却非常高, 说明修复效能的下降会伴随腐殖质的增加。综合 3 个月的结果可以发现, C1 与 C2 组分没有明显的变化趋势, 说明类色氨酸和类腐殖质的含量与当月水体中植物和微生物的活性以及状态有关, 易受到环境条件的影响; 而 C3 组分在各区域均随水流方向呈明显升高的趋势, 说明 C3 组分随水流方向不断富集, 并且在 F 区的东部沉积, 这可能是导致水体 COD 浓度升高的原因之一。

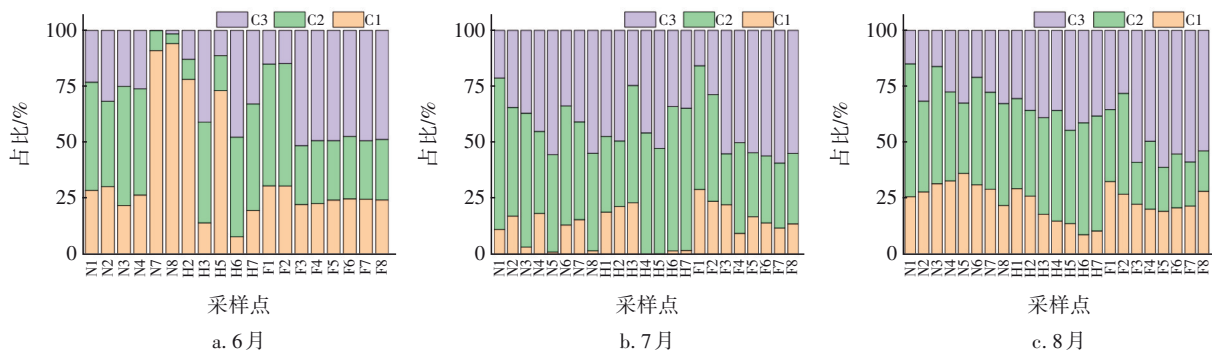


图 4 各采样点 3 种有机物组分占比

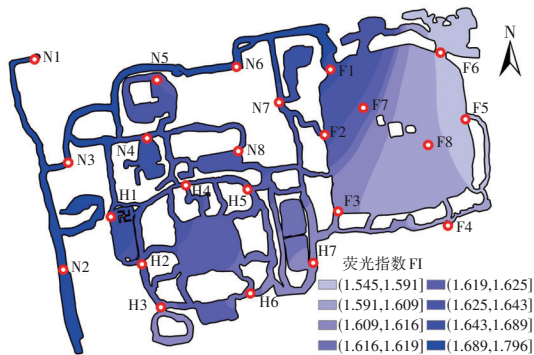
Fig.4 Proportion of three organic components at each sampling point

2.4 三维荧光光谱分析

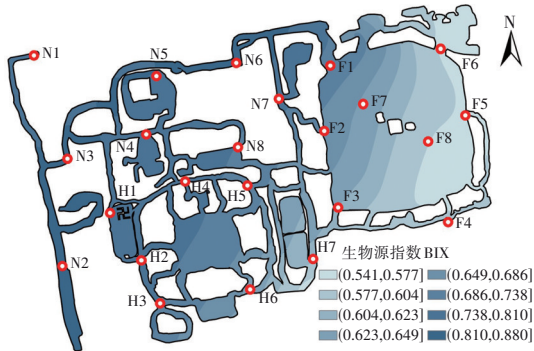
三维荧光光谱特征参数可解释水体中 DOM 的来源与特性。圆明园景观水体的三维荧光光谱参数空间分布情况如图 5 所示。由图 5(a) 可知, 夏季

圆明园景观水体的 FI 平均值在 1.587~1.667 之间, 说明夏季园区大部分水体中的有机物是生物源与陆源输入的共同结果^[6]。修复区域的 FI 平均值为 1.600~1.796, 而非修复区为 1.545~1.749, 这表明

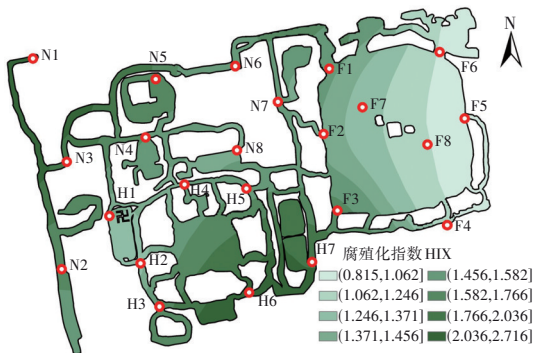
修复区域的DOM的生物源贡献程度高于非修复区,DOM主要来自水生植物及周围微生物的代谢作用^[11]。H区的FI值略低于N区,这是因为水体周围有游客行走,在此过程中陆源性有机组分随着扬起的土壤与灰尘等通过大气沉降作用进入水体中,从而增加水体中DOM的陆源输入占比。另外,周围陆地植物枯萎腐烂的枝叶落入水体,也会使外源输入比例增加。F区水生植物稀少,因此生物源DOM占比较低,另一方面,东部游船线路(见图1)的扰动作用,会使外源DOM输入比例明显上升,导致F区的FI值低于其他区域^[7]。



a. 荧光指数FI



b. 生物源指数BIX



c. 腐殖化指数HIX

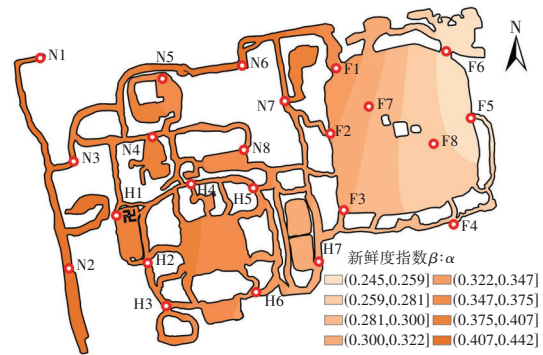
d. 新鲜度指数 $\beta:\alpha$

图5 三维荧光光谱参数的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of three dimensional fluorescence spectrum parameters

如图5(b)所示,研究区域的BIX值整体介于0.461~0.791之间,属于低、中度新近自生源特征。但是,修复区域的BIX值在0.639~0.880之间,呈现出中、高度新近自生源特性,而非修复区的BIX值为0.541~0.876。这是因为水生植物可以利用再生水中的DOM,其根系的代谢产物和枯败残体在腐烂分解过程中也会为微生物提供营养,增强微生物的活性,因此BIX值也会随之上升^[15]。此外,外部扰动不利于微生物稳定代谢,所以受游客扰动较大的南部区域BIX值相比于北部区域呈现降低趋势^[7]。

由图5(c)可知,夏季圆明园景观水体的HIX平均值为1.519,表明水体中DOM整体呈现出弱腐殖质特征,以自生源为主。值得注意的是,H区南部修复区域的HIX值偏高,这是因为H区水面较浅,夏季的蒸发作用会破坏沉水植物的生存环境,导致其腐败甚至死亡,进而释放腐殖质类物质^[15]。

由图5(d)可知,夏季圆明园景观水体的 $\beta:\alpha$ 平均值为0.236~0.431,且呈现西高东低的趋势,N区和H区的 $\beta:\alpha$ 值高于F区。F区离入水口较远,接收了来自上游的难降解有机物,这些有机物在水体中的停留时间较长,因此使F区水体的 $\beta:\alpha$ 值降低。同时,由于植物修复程度的不同,修复区域的 $\beta:\alpha$ 值(0.338~0.442)高于非修复区域(0.245~0.436),它们之间的差异是由于水生植物能通过自身的光合作用和呼吸作用,利用水体中原有的溶解性有机物合成自身代谢产物,从而对水体中的有机物起到更新作用。

2.5 相关性分析

为了解COD浓度与有机物组分和光学特征参

数之间的关系,进行了皮尔逊相关性分析,结果如图 6 所示(*表示 $p \leq 0.05$)。C1、C2 和 C3 三种有机组分互相之间不存在显著相关性($p > 0.05$),但是 C3 组分与 COD 存在正相关性($p \leq 0.05$),说明有机污染物的升高与类酪氨酸含量存在直接关联。COD 与水生植物密度呈负相关性($p \leq 0.05$),说明水生植物密度越高,COD 浓度越低,表明修复区域对 COD 的降解产生了积极效果。另一方面,水生植物密度与 M 值和 FI 值均呈正相关关系($p \leq 0.05$),表明丰富的水生植物群落会促进微生物的代谢,同时修复区域可以降低 DOM 的分子质量,使其更容易被其他微生物降解利用。FI 指数与 BIX 指数、 $\beta:\alpha$ 指数均呈正相关性($p \leq 0.05$),但与 COD 浓度呈负相关性($p \leq 0.05$),说明水生植物以及微生物和藻类的代谢活动等生物源会为水体提供新的有机物,但与 COD 浓度的升高无关。BIX 与 $\beta:\alpha$ 指数之间的正相关关系($p \leq 0.05$)表明水生植物降解再生水输入的有机物的同时会合成新的代谢产物,使得在 BIX 和 $\beta:\alpha$ 指数升高的前提下降低了 COD 浓度,这证明水生植物对有机污染物具有良好的降解效能。COD 浓度与 $\alpha(350)$ 呈正相关性且与 M 值呈负相关性($p \leq 0.05$),说明在 COD 浓度较高的水域,难降解的大分子有机物贡献较大,它们主要来自直接输入的再生水中的大分子有机物。

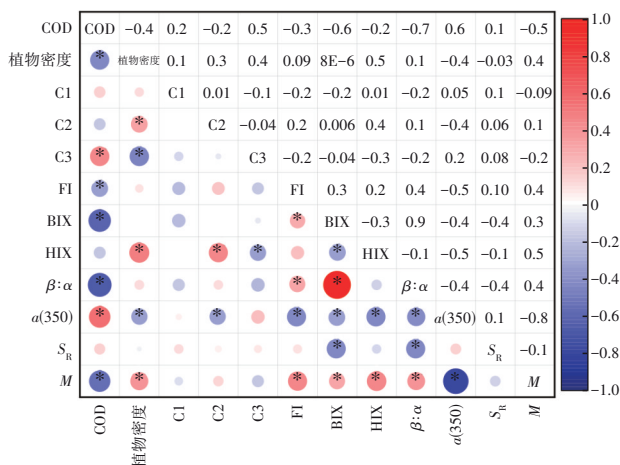


图 6 圆明园景观水体各项指标间的相关性分析
Fig.6 Correlation analysis among various index of landscape water body in Yuanmingyuan

3 结论

① 圆明园景观水体中的 COD 浓度呈现西低东高的空间分布规律,并且当水流汇入宽阔水域和

相对封闭水域时,COD 浓度会明显升高。当水流经过水生植物修复区域后,COD 浓度有所下降,说明水生植物对 COD 有明显的降解作用,平均降解率为 27.28%。

② 水体中的 DOM 是内源与外源共同作用的结果,内源主要来自微生物的代谢产物,并且多为再生水处理过程中所产生的剩余物质,贡献占比约为 68.55%;植物残体、沉积物释放和旅游活动则是外源有机物的来源,占比约为 31.45%。未来可通过改进再生水处理工艺降低剩余产物量,从而进一步降低水体中内源性难降解有机物的浓度。

③ 通过平行因子分析可知水体中主要含有 3 种有机组分,分别是类色氨酸、类腐殖质和类酪氨酸。类酪氨酸具有明显的随水流方向累积的特征,且 COD 浓度也与类酪氨酸含量呈正相关关系,说明水体中 COD 浓度的上升与类酪氨酸类有机组分的累积作用有关,进一步表明再生水处理过程中的剩余难降解有机物会在接纳水体中累积,使水体受到有机污染。

④ 水生植物对再生水中有机物的去除机制是基于水生植物及周围微生物的协同代谢作用,将水体中的 DOM 作为碳源营养吸收,或是通过降低 DOM 的分子质量,使其更容易被二次降解或随水流外排,从而实现 COD 的降解与去除。

参考文献:

[1] HU H Y, DU Y, WU Q Y, et al. Differences in dissolved organic matter between reclaimed water source and drinking water source [J]. Science of the Total Environment, 2016, 551/552: 133-142.

[2] 刘健,程丽华,王明月,等.不同水源的再生水中溶解性有机物的特性[J].中国给水排水,2019,35(21):92-96.

LIU J, CHENG L H, WANG M Y, et al. Characteristic of dissolved organic matter of reclaimed water from different sources [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(21): 92-96 (in Chinese).

[3] 蒋丹阳,彭玮瑄,廖思颖,等.再生水补给型城市景观水体中溶解性有机物的分布及特征:以圆明园为例[J].环境科学学报,2021,41(6):2201-2211.

JIANG D Y, PENG W X, LIAO S Y, et al. Biological community of aquatic organism in urban landscape water supplied by reclaimed water: taking Yuanmingyuan Park

- as an example [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(6): 2201-2211 (in Chinese).
- [4] ALBRECHT R, LE PETIT J, TERROM G, et al. Comparison between UV spectroscopy and nirs to assess humification process during sewage sludge and green wastes co-composting [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 102(6): 4495-4500.
- [5] 吕伟伟,姚昕,张保华,等.太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义[J].*环境科学*, 2018, 39(5): 2056-2066.
- LÜ W W, YAO X, ZHANG B H, et al. Fluorescent characteristics and environmental significance of particulate organic matter in Lake Taihu, China [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(5): 2056-2066 (in Chinese).
- [6] HUGUET A, VACHER L, RELEXANS S, et al. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(6): 706-719.
- [7] 何杰,朱学惠,魏彬,等.基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源[J].*环境科学*, 2021, 42(4): 1889-1900.
- HE J, ZHU X H, WEI B, et al. Spectral characteristics and sources of dissolved organic matter from landscape river during flood season in Suzhou based on EEMs and UV-vis [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(4): 1889-1900 (in Chinese).
- [8] PARLANTI E, WÖRZ K, GEOFFROY L, et al. Dissolved organic matter fluorescence spectroscopy as a tool to estimate biological activity in a coastal zone submitted to anthropogenic inputs [J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(12): 1765-1781.
- [9] 贾世琪,杨芳,王希欢,等.白洋淀秋季溶解性有机质组分与浮游植物的关系研究[J].*环境污染与防治*, 2021, 43(9): 1101-1107.
- JIA S Q, YANG F, WANG X H, et al. Relationship between DOM components and phytoplankton in Baiyangdian Lake in autumn [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, 43(9): 1101-1107 (in Chinese).
- [10] 董春娟,吕炳南.污水生物处理中的溶解性微生物产物(SMP)[J].*中国给水排水*, 2004, 20(1): 22-25.
- DONG C J, LÜ B N. Soluble microbial products (SMP) in biological treatment of wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(1): 22-25 (in Chinese).
- [11] LI J H, YANG X Y, WANG Z F, et al. Comparison of four aquatic plant treatment systems for nutrient removal from eutrophied water [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 179: 1-7.
- [12] 俞晓琴,孟先强,吴华武,等.青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析[J].*环境科学*, 2022, 43(2): 826-836.
- YU X Q, MENG X Q, WU H W, et al. Source and optical dynamics of chromophoric dissolved organic matter in the watershed of Lake Qinghai [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(2): 826-836 (in Chinese).
- [13] LIU Q, JIANG Y, TIAN Y, et al. Impact of land use on the DOM composition in different seasons in a subtropical river flowing through a region undergoing rapid urbanization [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 212: 1224-1231.
- [14] 周蕾,周永强,张运林,等.重要饮用水源地天目湖水水库有色可溶性有机物来源与组成特征[J].*环境科学*, 2021, 42(8): 3709-3718.
- ZHOU L, ZHOU Y Q, ZHANG Y L, et al. Characterizing sources and composition of chromophoric dissolved organic matter in a key drinking water reservoir Lake Tianmu [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(8): 3709-3718 (in Chinese).
- [15] 谭凯婷,柳君侠,王志红,等.沉水植物修复富营养化景观水体的研究进展[J].*水处理技术*, 2019, 45(6): 15-18, 27.
- TAN K T, LIU J X, WANG Z H, et al. Research progress of eutrophic landscape water restoration by submersed macrophyte [J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(6): 15-18, 27 (in Chinese).

作者简介:王赭枫(1997—),男,北京人,硕士,研究方向为水污染控制与水资源利用。

E-mail: wangzhefeng1017@126.com

收稿日期:2024-07-10

修回日期:2024-09-19

(编辑:刘贵春)