

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.19.015

# 水生植物腐解过程中溶解性有机质的释放特征

张国正<sup>1,2,3</sup>, 赵敏<sup>4</sup>, 李勇<sup>1,2</sup>, 应炎杰<sup>1,2,3</sup>, 路学军<sup>5</sup>, 潘继征<sup>3</sup>

(1. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州科技大学 江苏省环境科学与工程重点实验室, 江苏 苏州 215009; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 4. 国家东中西区域示范区<连云港徐圩新区>管理委员会, 江苏 连云港 222000; 5. 连云港市环境监测中心站, 江苏 连云港 222001)

**摘要:** 通过室内模拟实验,研究了宛山荡生态修复示范区4种水生植物的腐解过程,并分析了其溶解性有机质(DOM)的释放特征。结果表明:4种水生植物腐解均可造成水中溶解性有机碳(DOC)浓度呈先增加再迅速下降的趋势;且随着腐解时间的增加,腐殖质和含不饱和C=C键的芳香族化合物含量升高。腐解前期,水鳖、穗花狐尾藻和水葫芦残体的DOM以富里酸为主,分别在第16、29和22天后以胡敏酸为主;而芦苇残体腐解水中的DOM始终以富里酸为主。利用三维荧光-平行因子法(EEMs-PARAFAC)分析可知,4种水生植物腐解过程中产生了3种荧光有机物,主要包括类腐殖质组分C1、C2和类蛋白质组分C3,且类腐殖质组分占主导地位。通过主成分分析识别到的两个主成分,分别占4种水生植物腐殖水总方差的79.9%、72.6%、83.0%和83.6%,反映了植物腐解过程对水体DOM特征、荧光组分等方面造成的差异。

**关键词:** 水生植物; 腐解; 溶解性有机质; 释放; 三维荧光光谱

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)19-0093-09

## Release Characteristics of Dissolved Organic Matter during Decomposition of Aquatic Plants

ZHANG Guo-zheng<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Min<sup>4</sup>, LI Yong<sup>1,2</sup>, YING Yan-jie<sup>1,2,3</sup>, LU Xue-jun<sup>5</sup>, PAN Ji-zheng<sup>3</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4. National East, Central and West Regional Demonstration Zone <Lianyungang Xuwei New District> Management Committee, Lianyungang 222000, China; 5. Lianyungang Environmental Monitoring Station, Lianyungang 222001, China)

**Abstract:** The decomposition process of four different aquatic plants was investigated and the

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07204-5); 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心项目; 江苏省自然资源发展专项基金(海洋科技创新)资助项目(JSZRHYKJ202110)

通信作者: 潘继征 E-mail: jzhpan@niglas.ac.cn

release characteristics of dissolved organic matter (DOM) in Wanshandang ecological restoration demonstration area was analyzed by laboratory simulation experiments. The concentration of dissolved organic carbon (DOC) in water increased first and then decreased rapidly due to the decomposition of four kinds of aquatic plants. The contents of humus and aromatic compounds containing unsaturated C=C bonds increased with the increase in decomposition time. The DOMs released from *Hydrocharis dubia*, *Myriophyllum spicatum* and *Eichhornia crassipes* residues were dominated by fulvic acid in the early stage of decomposition, and humic acid was dominated after 16, 29 and 22 days, respectively. However, the DOM in decomposed water released from *Phragmites australis* residue was always dominated by fulvic acid. According to the results of three-dimensional fluorescence and parallel factor analysis (EEMs-PARAFAC), three kinds of fluorescent organic compounds were produced during the decomposition of four kinds of aquatic plant, which mainly included humus-like components C1, C2 and protein-like components C3, and humus-like substances were dominant. The two principal components identified by principal component analysis accounted for 79.9%, 72.6%, 83.0% and 83.6% of the total variance of the four aquatic plants decomposed water, respectively, which showed the differences in DOM characteristics and fluorescence components of water caused by plant decomposition processes.

**Key words:** aquatic plant; decomposition; dissolved organic matter; release; three-dimensional fluorescence spectrum

水生植物具有同化吸收水体中氮磷等营养物质、富集重金属和降解有机物等功能。利用水生植物处理污水具有成本低、效益好、管理方便等优势,因此水生植物在湖泊富营养化预防和治理过程中发挥着重要的作用,但是水生植物进入衰亡期以后,其残体腐解会释放大量的有机质和营养物质,对氮磷的影响可能由“汇”转变为“源”,易造成水体的二次污染。其中,水生植物残体释放的溶解性有机质(DOM)能与水中的有机污染物和金属元素相结合,影响水体中各类生物的生长代谢。有研究表明,水生植物腐解是草型湖泊内源DOM的最主要来源<sup>[1]</sup>。此外,水生植物腐解既受外界环境因素如光照、温度、pH的影响,又受自身质量、组织结构和纤维含量的影响。

目前,国内外对水生植物腐解释放DOM的研究主要聚焦在环境因素、植物自身的不同部位、植物残体的C/N和C/P以及纤维素含量等对腐解过程的影响。然而,对于水生植物自身腐解过程中DOM释放特征的研究并不多,且水生植物腐烂分解在浅水湖泊中普遍存在。因此,对水生植物自身腐解过程中DOM释放特征进行研究十分必要。

宛山荡位于江苏省无锡市,地处大运河以东、望虞河以西、太湖-伯渎港以北、锡北运河以南,属

于太湖流域湖区水系,是由海湾-泻湖演化而来的湖荡。笔者选取宛山荡生态修复示范区4种水生植物为研究对象,运用紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱对水生植物腐解过程中DOM的释放特征进行表征,并以此来解释水生植物腐解过程中释放有机质和营养盐的规律,旨在为宛山荡及类似湖荡进行生态修复提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 样品采集与预处理

2019年6月在宛山荡生态工程修复区采集挺水植物芦苇(*Phragmites australis*)、沉水植物穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、浮水植物水鳖(*Hydrocharis dubia*)和水葫芦(*Eichhornia crassipes*)。由于植物组分不同,其分解速率、养分动态也不同。为了增加研究结果的可比性,仅选取水生植物的茎、叶部分作为实验材料。采集后的样品先用自来水缓慢冲洗去除附着在植物茎叶表面的杂质,然后用去离子水清洗干净,置于通风处自然晾干,在105℃烘箱杀青30 min后,调至65℃,烘干24~48 h至恒质量,粉碎并过40目筛网备用。

### 1.2 实验设计

实验设置水鳖、穗花狐尾藻、水葫芦、芦苇4个处理组,各处理组均以玻璃烧杯为反应器,烧杯内

加入5 L去离子水,称取1.25 g植物残体置于200目网孔分解袋中(规格为5 cm×5 cm),并将其分别投入各烧杯中,每组设置3个平行。整个反应过程在避光条件下进行,实验中损失的水分用去离子水补充,温度控制在25℃左右。

### 1.3 样品分析

pH和DO采用HACH HQ40d水质测试仪测定。检测溶解性总氮(DTN)、溶解性总磷(DTP)、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 时,先将水样经过0.45  $\mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜过滤,所得滤液参照《水和废水监测分析方法》(第4版)进行检测。采用550℃灼烧的GF/F膜过滤水样,滤液用总有机碳测定仪检测溶解性有机碳(DOC),其他检测仪器还包括紫外-可见分光光度计、三维荧光光谱仪。

## 2 结果与讨论

### 2.1 pH、DO、DOC的变化

水鳖、穗花狐尾藻、水葫芦和芦苇腐解过程中pH、DO和DOC浓度的变化如图1所示。可知,4个处理组的pH呈先快速降低后波动式增高的趋势,最终稳定在7.1左右。水体DO浓度先快速下降,在第11天达到最低值,其中水鳖组、穗花狐尾藻组和水葫芦组的DO浓度趋近于0,芦苇组的DO浓度为1.33 mg/L,随后缓慢上升,最终浓度分别为4.41、4.74、5.02和5.66 mg/L。pH、DO浓度的变化均与水生植物腐解速率有关。腐解初期,水生植物体内部分不稳定有机物在微生物作用下分解并释放出 $\text{CH}_4$ 和 $\text{CO}_2$ ,导致pH下降<sup>[2]</sup>,同时植物在其分解过程中释放出的营养物质可为水中微生物提供丰富的碳源和氮源,增强了其呼吸作用,促进了水体中氧的消耗,造成了水体DO浓度显著下降。腐解后期,水生植物腐解速率减缓,DO浓度升高,从而有利于pH的升高。

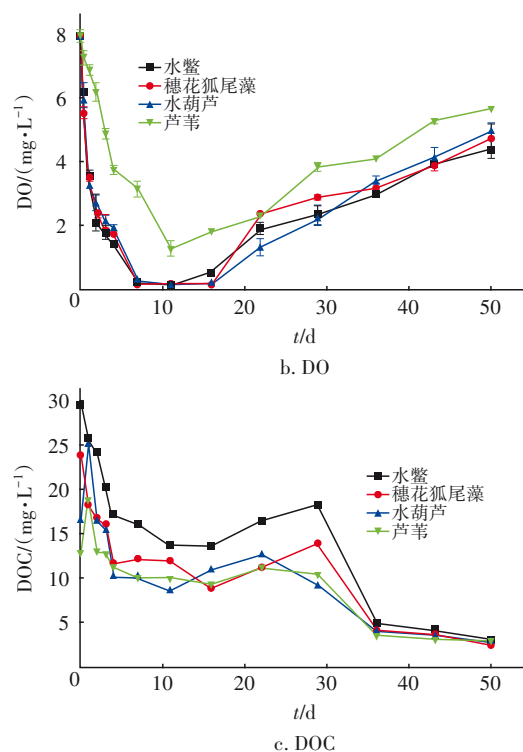
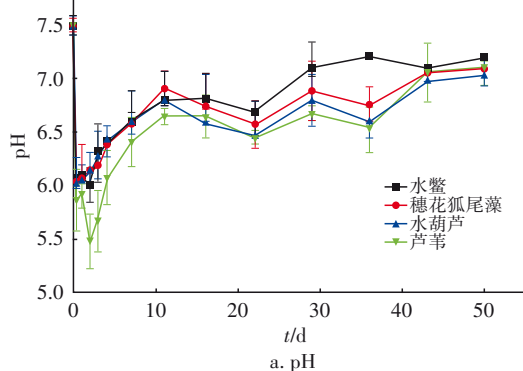


图1 4种植物腐解水中pH、DO和DOC浓度的变化

Fig.1 Changes of pH, DO and DOC concentration in the water during decomposition of four aquatic plants

水生植物腐烂分解的初始阶段主要是有机酸、蛋白质和糖类等淋溶性物质的快速淋溶释放与易被微生物利用的物质在微生物作用下快速分解,因此DOC浓度在此阶段快速上升,如图1(c)所示。其中,水鳖和穗花狐尾藻组DOC浓度在第8小时达到最大值,分别为29.6和23.9 mg/L。水葫芦和芦苇组在第24小时达到最大值,分别为25.3和18.9 mg/L。可见0~8 h是水鳖和穗花狐尾藻DOM释放的初始阶段,0~24 h是水葫芦和芦苇DOM释放的初始阶段。

随后各组DOC浓度下降,水葫芦的DOC浓度在第11天开始回升,其他3种植物的DOC浓度在第16天开始回升,水葫芦和芦苇在第22天出现第二个峰值,分别为12.72和11.30 mg/L,水鳖和穗花狐尾藻的DOC浓度在第29天出现第二个峰值,分别为18.27和14.11 mg/L。这是由于此时DOM的来源逐渐过渡为不易分解的大分子物质,如半纤维素和纤维素等,由于植物细胞壁中木质素与半纤维素通过多种键进行共价键连接,并将细胞壁中的纤维素包裹在其中,因此纤维素、半纤维素和木质素相互交织的复合体相对较难降解。随后DOM的浓度逐渐

下降,第36天时趋于稳定,此时4种植物浓度均小于4 mg/L。

## 2.2 营养盐的变化

水鳖、穗花狐尾藻、水葫芦和芦苇腐解过程中DTP、DTN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的变化见图2。从图2(a)可知,各组DTP均呈先增加后减小再增加最终趋于平稳的趋势。水鳖和穗花狐尾藻组DTP浓度峰值出现在第8小时,分别为0.35、0.42 mg/L。水葫芦和芦苇组的峰值出现在第24小时,分别为0.29和0.21 mg/L。这表明植物腐解初期释放磷的速度相当快,主要是由于腐解初期植物体内物质在短时间内迅速溶出所致,这与Rejmankova等<sup>[3]</sup>的研究结果一致。

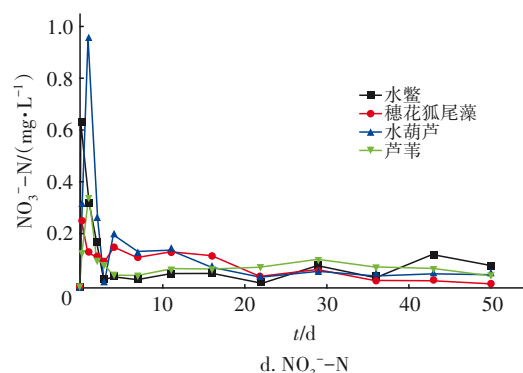
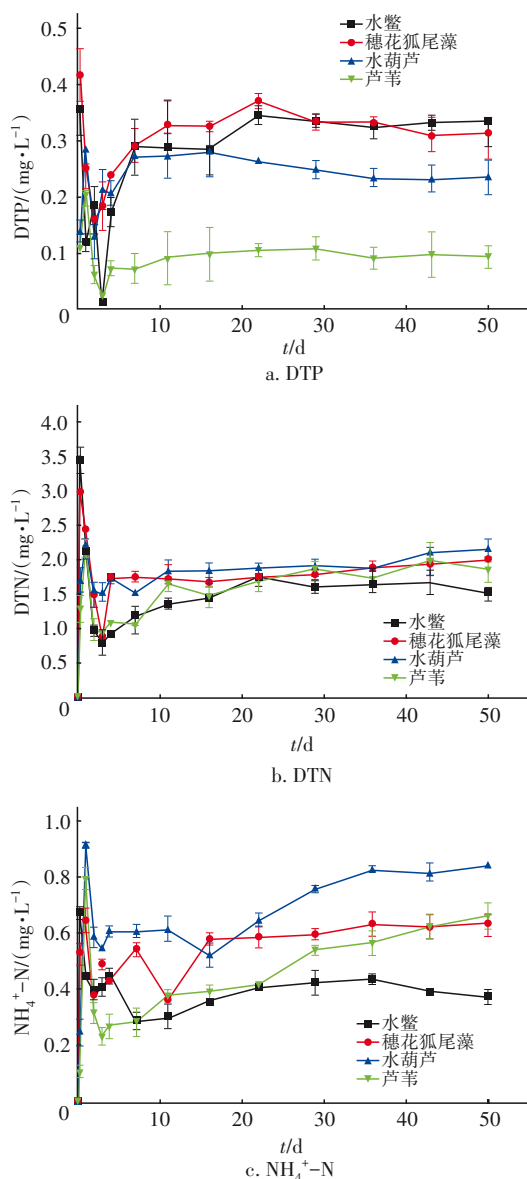


图2 4种植物腐解水中DTP、DTN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的变化

Fig.2 Variations of DTP,DTN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  concentration in the water during decomposition of four aquatic plants

随后DTP浓度开始下降,至实验结束时,水鳖、穗花狐尾藻、水葫芦和芦苇4组中DTP浓度分别为0.34、0.32、0.24和0.10 mg/L。蓝艳等<sup>[4]</sup>认为,水生植物的C/N、C/P和N/P在不同程度上影响着残体的分解速率。芦苇的氮、磷含量较低且分解速率慢。本实验中,水鳖和穗花狐尾藻的磷释放量最大,芦苇的磷释放量最小,且显著低于另外3组。

DTN和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度峰值出现时间与DTP一致,水鳖和穗花狐尾藻组峰值出现在第8小时,水葫芦和芦苇的峰值出现在第24小时,浓度趋势均呈现先上升后下降的规律,在第11天基本达到平衡。水鳖、穗花狐尾藻、水葫芦和芦苇组的DTN浓度峰值分别为3.45、2.98、2.21和2.17 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度峰值分别为0.64、0.26、0.96和0.35 mg/L。水鳖组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度峰值出现在第8小时,为0.67 mg/L,穗花狐尾藻、水葫芦和芦苇组峰值出现在第24小时,分别为0.65、0.91和0.79 mg/L,第29天后均趋于稳定。上述结果表明,腐解初期为快速淋溶释放阶段,这一阶段植物腐解释放的大量有机物加速了微生物的生长繁殖,提高了植物腐解速率,因此水中DTN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度快速上升,随着腐解时间的增加,水中DO浓度下降,硝化作用减弱,反硝化作用加强, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度下降, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度升高。第29天后,水体中氮浓度趋于稳定,可能是因为难分解物质如木质素、纤维素等进入缓慢分解阶段。

## 2.3 紫外-可见光谱特征值的变化

DOM的紫外吸收主要与有机分子结构中不饱和和共轭双键有关,4种植物腐解水的DOM紫外吸收



光谱相似。在200~400 nm范围,随着波长的增加吸收系数迅速下降,在400~600 nm范围,吸收曲线趋于稳定,吸收系数逐渐趋于0。随着水生植物腐解时间的变化,水中DOM浓度增加,DOM成分中结构简单、增强分子荧光强度的取代基—OH、—NH<sub>2</sub>等逐渐被较复杂、减弱荧光强度的—COOH、—C=O所代替<sup>[5]</sup>。4种植物浸泡后期在280 nm附近存在吸收系数的肩峰,这一肩峰表征氨基酸、核酸和一些酚类化合物,因为植物腐解释放的芳香族或酚类化合物等发色基团的C=C和C=O共轭双键在这一波长范围内有较强的吸光度。

腐解过程中SUVA<sub>254</sub>、 $\alpha(350)$ 、 $S_{275-295}$ 和 $E_2/E_3$ ( $E_2/E_3$ 为250 nm与365 nm处吸光度的比值)的变化如图3所示。

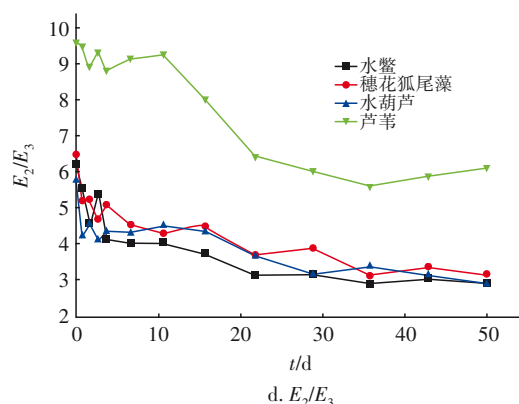
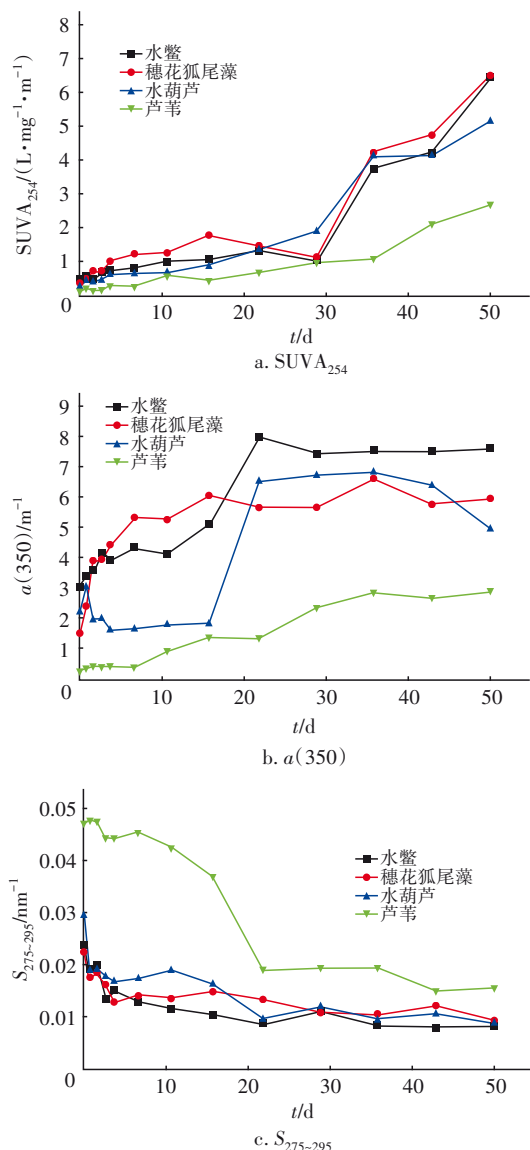


图3 腐解过程中SUVA<sub>254</sub>、 $\alpha(350)$ 、 $S_{275-295}$ 和 $E_2/E_3$ 的变化  
Fig.3 Variations of SUVA<sub>254</sub>,  $\alpha(350)$ ,  $S_{275-295}$  and  $E_2/E_3$  in water during decomposition of the four aquatic plants

SUVA<sub>254</sub>可以用来表征有机质的相对分子质量、腐殖质化水平和芳香性<sup>[6]</sup>,且随着DOM中芳香族和不饱和共轭双键结构的增多,相对分子质量增大,则SUVA<sub>254</sub>值越大。由图3(a)可以看出,随着腐解时间的增加,4种植物的SUVA<sub>254</sub>逐渐增大,表明随着腐解的进行,易分解物质被逐步消耗,从而使富含芳香环结构的腐殖质所占比例逐步升高,第29天水鳖和穗花狐尾藻出现低峰。李翠兰等<sup>[7]</sup>对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质数量动态变化的研究表明,分解期间腐殖质的数量会在15 d左右开始减少,因此推断水中腐殖质数量的减少导致了SUVA<sub>254</sub>值的降低。实验结束时,水鳖组DOM的SUVA<sub>254</sub>值为6.48 L/(mg·m)、穗花狐尾藻组为6.53 L/(mg·m)、水葫芦组为5.19 L/(mg·m)、芦苇组为2.69 L/(mg·m),水鳖和穗花狐尾藻DOM的腐殖质化程度最高,芦苇芳香化程度最低且不饱和结构相对较少,这可能与芦苇中纤维素含量较高有关,纤维素是难降解物质,其结构稳定,降解相对困难。

$\alpha(350)$ 为水鳖、穗花狐尾藻、水葫芦和芦苇在350 nm处的吸收系数,反映了DOM的丰度。由图3(b)可知,4种植物的 $\alpha(350)$ 随腐解时间的延长基本呈现上升的趋势,且芦苇的 $\alpha(350)$ 显著低于另外3种植物。水鳖的 $\alpha(350)$ 从第8小时开始升高,第22天达到峰值,此后趋于稳定。腐解过程中,水鳖的DOM丰度始终高于水葫芦。穗花狐尾藻的DOM丰度从第8小时至第7天呈逐步上升的趋势,第7~50天基本稳定,这段时间 $\alpha(350)$ 平均值为5.80 m<sup>-1</sup>。第11天芦苇的DOM明显得以释放, $\alpha(350)$ 值逐步上升,至第36天以后趋于稳定,第36~50天的

$a(350)$ 平均值为 $2.80 \text{ m}^{-1}$ 。

$S_{275-295}$ 与 $E_2/E_3$ 值均能反映DOM的相对分子质量大小, $S_{275-295}$ 与 $E_2/E_3$ 值越高,DOM的分子质量越小。从图3(c)和(d)可以看出, $S_{275-295}$ 与 $E_2/E_3$ 呈现相同的变化趋势,均随时间的延长而减小,其中水鳖、穗花狐尾藻和水葫芦的 $S_{275-295}$ 与 $E_2/E_3$ 从第8小时开始下降,芦苇的 $S_{275-295}$ 从第7天开始下降, $E_2/E_3$ 从第11天开始下降。4种植物腐解释放前期以相对分子质量较小的物质为主,并逐步变为相对分子质量较大的物质。

此外, $E_2/E_3$ 也被用于区分不同来源的DOM特性<sup>[8]</sup>。当 $E_2/E_3 < 3.5$ 时,主要反映DOM中胡敏酸的

吸收特性;当 $E_2/E_3 > 3.5$ 时,主要反映富里酸的吸收特性。水鳖在前16 d的 $E_2/E_3$ 均大于3.5,此后小于3.5;穗花狐尾藻在前29 d大于3.5,此后小于3.5;水葫芦在前22 d大于3.5,此后小于3.5;芦苇始终大于3.5。表明在腐解过程中,水鳖、穗花狐尾藻和水葫芦的DOM分别在前16、29和22 d以富里酸为主,此后以胡敏酸为主,芦苇腐解过程中DOM始终以富里酸为主。

## 2.4 三维荧光光谱分析

对4种植物残体腐解过程中DOM的三维荧光光谱进行平行因子分析(PARAFAC),结果分离出3种荧光组分,如图4所示。

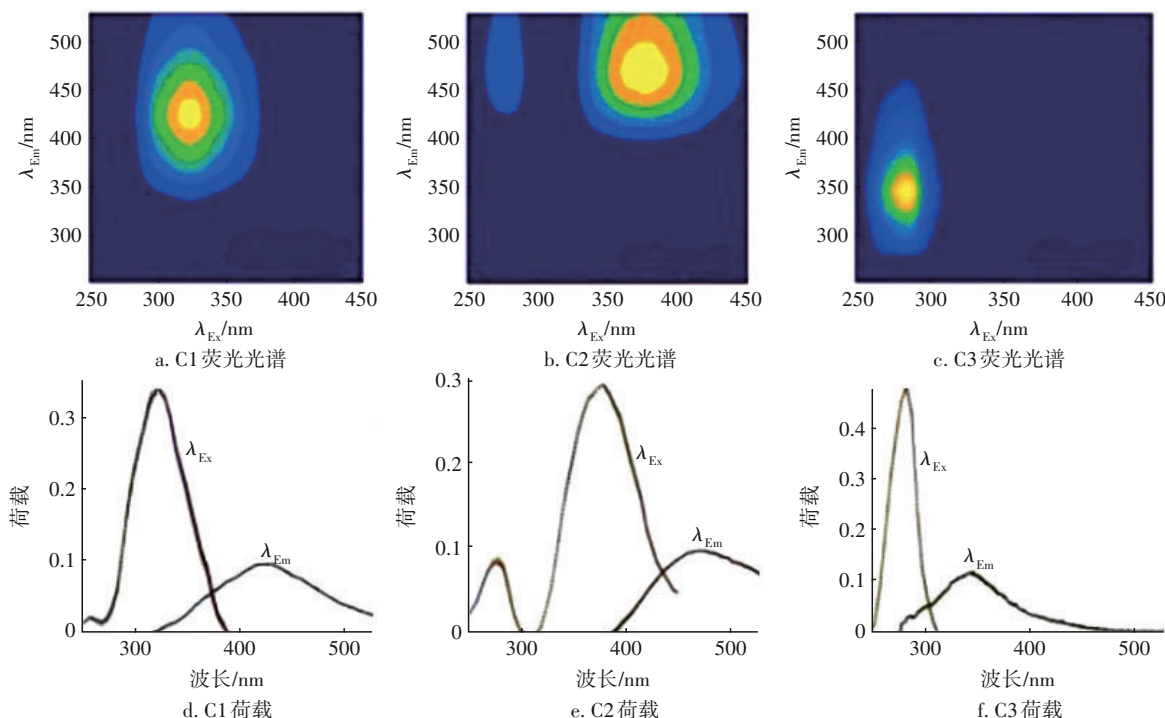


图4 平行因子组分荧光光谱

Fig.4 Fluorescence components identified by the PARAFAC model

以激发波长和发射波长相似度得分超过0.95为约束条件,与相关文献进行对比。其中,C1峰出现在激发波长为325 nm和发射波长为422 nm处,峰型为C峰,该峰代表与生物活性密切相关的类腐殖质的荧光<sup>[9]</sup>。C2峰出现在激发波长为375 nm和发射波长为470 nm处,峰型为C峰<sup>[10]</sup>。C3峰出现在激发波长为285 nm和发射波长为346 nm处,峰型为T峰,荧光物质类型为类色氨酸和类蛋白质<sup>[11]</sup>。

利用PARAFAC分析4种植物腐解过程中的三维荧光光谱,荧光峰值强度( $F_{\max}$ )如图5所示。可以

看出,随着腐解的进行,4种植物 $F_{\max}$ 的变化趋势不同。4种植物的C1组分均呈现先上升后下降再上升的变化趋势。其中,水鳖、水葫芦和芦苇的 $F_{\max}$ 在第22天之后超过腐解初期出现的峰值。水鳖的C2组分先下降后上升,水葫芦的C2组分呈现先上升后下降再上升的变化趋势,但均在第22天达到最大值之后缓慢下降,穗花狐尾藻和芦苇的C2组分变化趋势相似,即先平稳,升高之后再次平稳。C3组分的变化趋势相似,均为缓慢升高至最大值后逐渐下降,穗花狐尾藻的最大值出现在第7天,水葫芦和芦

苇出现在第 22 天,水鳖出现在第 36 天。

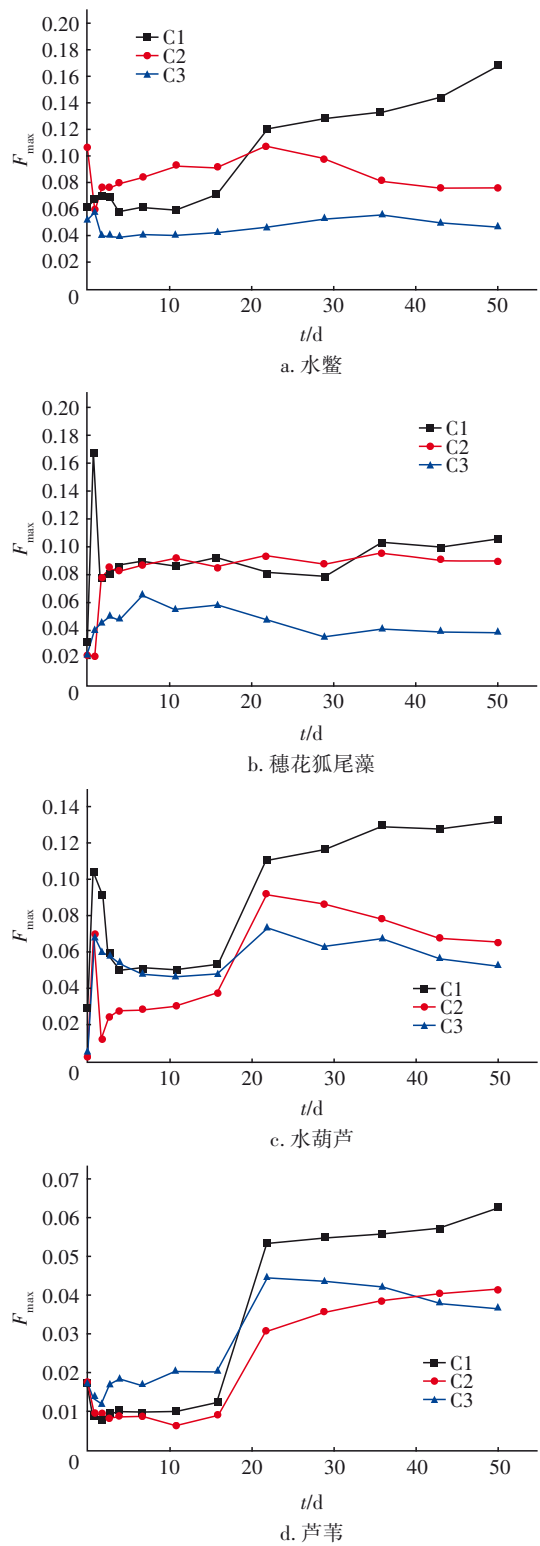


图5 植物腐解水中3种荧光组分含量的变化  
Fig.5 Changes of three-fluorescent components in water during decomposition of the four aquatic plants  
实验初期,3种组分含量的差异不显著,实验结

束时类腐殖质含量明显高于类色氨酸和类蛋白质。腐解过程中最初的DOM主要由类腐殖质组成<sup>[11]</sup>,随着实验的进行,产生了抗降解的色氨酸和芳香族蛋白并浓缩,这类物质在降解过程中消耗水中溶解氧,并被证明可以增强紫外线的吸收能力。

4种植物腐解过程中腐殖化指数(HIX)和自生源指数(BIX)的变化见表1。可知,水鳖、穗花狐尾藻、水葫芦和芦苇的HIX分别介于1.05~1.88、0.39~1.59、0.42~1.15和0.41~0.83之间,BIX分别介于0.61~1.36、0.24~1.08、0.32~1.40和0.98~1.05之间。

表1 植物腐解水中HIX和BIX的变化  
Tab.1 Changes of HIX and BIX in water during decomposition of the four aquatic plants

时间/ d	水鳖		穗花狐尾藻		水葫芦		芦苇	
	HIX	BIX	HIX	BIX	HIX	BIX	HIX	BIX
1	1.05	0.61	0.39	0.24	0.42	0.32	0.41	0.98
16	1.24	0.90	1.13	0.97	0.98	0.78	0.48	1.01
50	1.88	1.36	1.59	1.08	1.15	1.40	0.83	1.05

随着腐解时间的增加,HIX呈上升趋势,说明水中DOM腐殖化程度逐渐增加。Huguet等<sup>[12]</sup>指出,当HIX>16时,代表DOM具有强腐殖化特征,以陆源输入为主;HIX在6~10之间代表较强腐殖化特征,以较弱自生源为主;HIX在4~6之间代表较弱腐殖化特征,且有较强自生源特征;当HIX<4时,表示以自生源为主。4种植物的HIX指数均小于4,说明DOM的腐殖化程度较低。

BIX同样随时间的延长呈上升趋势。Huguet等<sup>[12]</sup>指出,当BIX在0.6~0.7时,说明DOM具有较少的自生成分;当BIX在0.7~0.8时具有中度新近自生源特征;当BIX在0.8~1.0时具有较强自生源特征;当BIX>1.0时由微生物活动产生。本实验中,BIX在第50天时均大于1.0,表明4种水生植物腐解产生的DOM极易成为水体自生源DOM的重要贡献源。腐解过程中,DOM始终为内源贡献且腐殖化程度较低,稳定性不强,其中芦苇腐解释放的DOM在水中的存在时间相对最短。

2.5 主成分分析

为了进一步研究4种植物腐解过程中DOM的释放特征,对相关的水质参数与DOM光谱特征参数进行主成分分析(PCA),结果如图6所示。可知,PCA中产生的两个主成分(PCs)分别占4种植物总

方差的79.9%、72.6%、83.0%和83.6%。PC1与DTP、DTN、氨氮、 $\alpha(350)$ 、 $SUVA_{254}$ 、C1、C2、C3、HIX呈正相关关系,与 $E_2/E_3$ 、 $S_{275-295}$ 呈负相关关系,这与刘堰杨等<sup>[13]</sup>的研究结果相似。C1、C2、C3与DTP、DTN、氨氮存在相关关系,说明N、P与DOM密切相关。芦苇的BIX与PC1呈负相关关系,腐殖化趋势较弱,其余3种植物的BIX与PC1呈正相关关系,表明腐殖化趋势大于芦苇。PC2与DTN、DTP、DOC呈正相关关系,与 $\alpha(350)$ 、 $SUVA_{254}$ 、BIX呈负相关关系,反映了DOM的腐殖化水平。可见,主成分分析可以侧面解释4种植物腐解水体的DOM组分和特征差异。

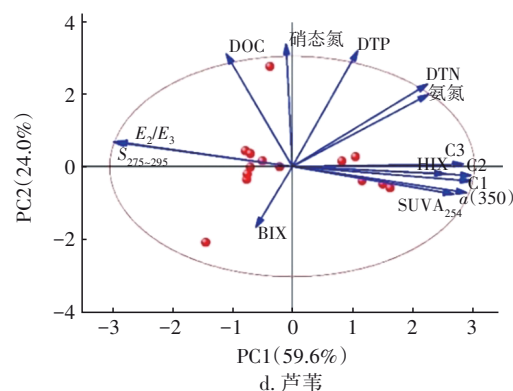
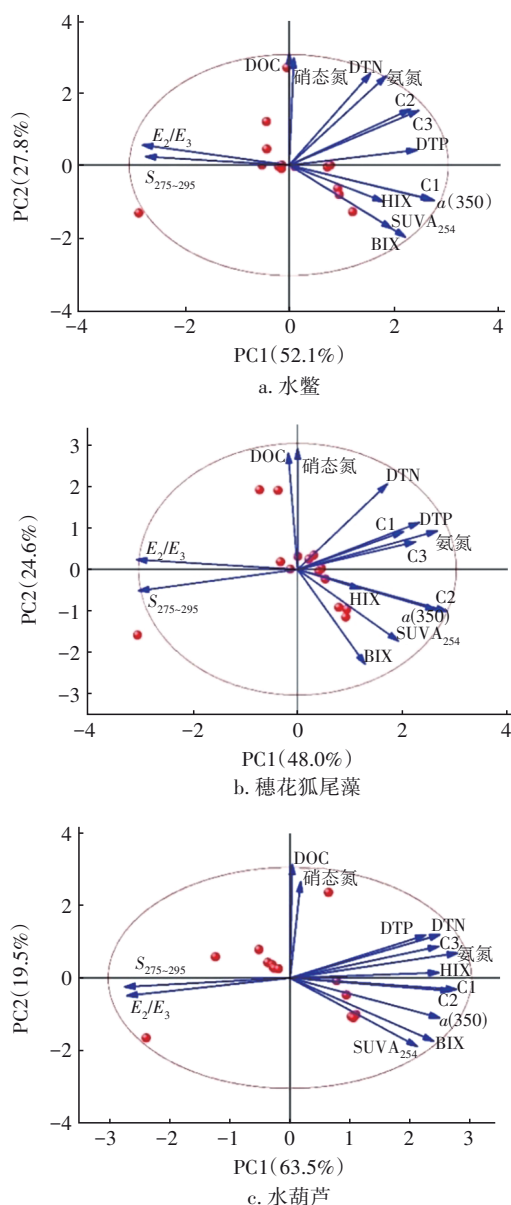


图6 4种植物腐解水中DOM特征及水质参数的主成分分析

Fig.6 Principal component analysis of DOM characteristics and water quality parameters of four aquatic plants decomposition water

### 3 结论

① 4种典型水生植物DOM的释放过程包括快速溶出阶段、微生物对水中DOM分解消耗阶段和DOM再次释放阶段。其中,水鳖和穗花狐尾藻快速淋溶阶段为0~8 h,芦苇和水葫芦为0~24 h;微生物分解消耗阶段,水中溶解性有机碳、氮和磷均快速降低;水葫芦从第11天起进入DOM再次释放阶段,其余3种植物则是从第16天开始。

② 4种植物残体腐解释放产生2种类腐殖质荧光组分C1、C2,以及1种类蛋白质、类色氨酸荧光组分C3。其中,类腐殖质占主导地位。此外,相对于其他水生植物,芦苇中荧光有机物的含量最低。

③ 4种植物腐解过程中DOM自生源特征在第16天后逐渐显著,生物可利用性高,易参与微生物循环过程。其中,芦苇腐解过程中DOM腐殖化程度最低,稳定性不强,在水中存在时间相对最短。

④ PCA分析中两个主成分(PCs)分别占水鳖、穗花狐尾藻、水葫芦和芦苇4种植物总方差的79.9%、72.6%、83.0%和83.6%,其中PC1与DTP、DTN、氨氮、 $\alpha(350)$ 、 $SUVA_{254}$ 、C1、C2、C3、HIX呈正相关关系,与 $E_2/E_3$ 、 $S_{275-295}$ 呈负相关关系;PC2与DTN、DTP、DOC呈正相关关系,与 $\alpha(350)$ 、 $SUVA_{254}$ 、BIX呈负相关关系。

### 参考文献:

- [1] ZHANG Y L, LIU X H, WANG M Z, *et al.* Compositional differences of chromophoric dissolved organic matter derived from phytoplankton and macrophytes [J]. *Organic Geochemistry*, 2013, 55:



- 26-37.
- [2] 李旭,崔康平,汤海燕,等. 沉水植物苦草腐解对水体水质的影响[J]. 中国给水排水, 2020, 36(7): 60-67.
- LI Xu, CUI Kangping, TANG Haiyan, *et al.* Effect of decomposition of submerged plants (*Vallisneria spiralis*) on water quality[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(7): 60-67(in Chinese).
- [3] REJMANKOVA E, SIROVA D. Wetland macrophyte decomposition under different nutrient conditions: relationships between decomposition rate, enzyme activities and microbial biomass [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(2): 526-538.
- [4] 蓝艳,崔保山,韩祯,等. 白洋淀台田沟渠水生植物营养盐特征及其影响因子分析[J]. 湿地科学, 2013, 11(2): 276-281.
- LAN Yan, CUI Baoshan, HAN Zhen, *et al.* Characteristics of nutrients and influence factors of aquatic macrophytes in the ditches of raised fields in Baiyang Lake [J]. Wetland Science, 2013, 11(2): 276-281(in Chinese).
- [5] 李必才,杨敏,何连生,等. 不同密度沉水植物腐解过程中水体DOM变化特征[J]. 环境工程学报, 2013, 7(5): 1754-1760.
- LI Bicai, YANG Min, HE Liansheng, *et al.* Characteristics of water DOM change in process of decomposition of submerged plant in different densities [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(5): 1754-1760(in Chinese).
- [6] 朱文飞,李晓洁,刘长风,等. 沈阳市黑臭水体表层水DOM紫外光谱特征分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3): 569-576.
- ZHU Wenfei, LI Xiaojie, LIU Changfeng, *et al.* Analysis of DOM ultraviolet spectrum characteristics of surface water in black and odorous water body of Shenyang City, China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(3): 569-576(in Chinese).
- [7] 李翠兰,张晋京,窦森,等. 玉米秸秆分解期间土壤腐殖质数量动态变化的研究[J]. 吉林农业大学学报, 2009, 31(6): 729-732.
- LI Cuilan, ZHANG Jinjing, DOU Sen, *et al.* Dynamic change in amounts of soil humic and fulvic acid during corn stalk decomposition [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2009, 31(6): 729-732 (in Chinese).
- [8] 张春华,黄廷林,方开凯,等. 同温混合初期主库区沉积物间隙水DOM的光谱特征——以周村水库为例[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10): 3048-3055.
- ZHANG Chunhua, HUANG Tinglin, FANG Kaikai, *et al.* Spectral characteristics of DOM in sediment interstitial water of the main reservoir area during the initial stage of isothermal mixing: a case study of Zhoucun Reservoir [J]. China Environmental Science, 2016, 36(10): 3048-3055(in Chinese).
- [9] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(24): 5701-5710.
- [10] WHEELER K I, LEVIA D F, HUDSON J E. Tracking senescence-induced patterns in leaf litter leachate using parallel factor analysis (PARAFAC) modeling and self-organizing maps [J]. Journal of Geophysical Research, 2017, 122(9): 2233-2250.
- [11] WALKER S A, AMON R M W, STEDMON C A. Variations in high-latitude riverine fluorescent dissolved organic matter: a comparison of large Arctic rivers [J]. Journal of Geophysical Research, 2013, 118(4): 1689-1702.
- [12] 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.
- [13] 刘堰杨,孙辉,刘琛,等. 川西高原河流水体CDOM的光化学降解特性[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5318-5329.
- LIU Yanyang, SUN Hui, LIU Chen, *et al.* Characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in natural rivers of Western Sichuan Plateau [J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5318-5329(in Chinese).

作者简介:张国正(1996-),男,安徽亳州人,硕士研究生,主要研究方向为环境污染与控制。

E-mail:2592720316@qq.com

收稿日期:2020-08-04

修回日期:2020-09-27

(编辑:任莹莹)