

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.02.001

轮叶黑藻腐解过程营养物质释放及微生物胞外酶活性变化规律

张松贺,张丽莎,韩冰,严玲玲,周甜甜

(河海大学环境学院,江苏南京 210098)

摘要: 通过轮叶黑藻腐解模拟试验,分析了底泥和砂石 2 种基质条件下营养物质释放和微生物胞外酶活性变化特征。结果表明,试验结束时底泥组和砂石组的轮叶黑藻质量损失率分别为 64.62% 和 62.15%。植物腐解过程释放的营养物质使得水体溶解氧含量迅速降低,TN、TP 质量浓度迅速增加。试验结束时(146 d),上覆水体的水质基本恢复初始水平。水体有机质在 56 d 以色氨酸类蛋白质为主,之后逐渐以类富里酸和类腐殖酸类物质为主。植物腐解过程与微生物胞外酶活性具有一定的响应关系,跟水体水质及植物本身的特性相关。纤维素酶、蔗糖酶密切相关($r=0.70, P<0.05$),且受植物 TOC 和 水体 TN 的影响,过氧化氢酶与水体的 DO 和 EC 相关($P<0.05$),碱性磷酸酶及脲酶则分别受 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的抑制调节($P<0.05$)。

关键词: 轮叶黑藻;植物腐解;底泥;砂石;胞外酶

中图分类号:X131.2;X172 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2019)02-0095-07

Changes of nutrients and enzyme activity during the decomposition process of *Hydrilla verticillatum*

ZHANG Songhe, ZHANG Lisha, HAN Bing, YAN Lingling, ZHOU Tiantian

(College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The release of nutrients and microbial enzyme activities were monitored during the decomposition of *Hydrilla verticillatum* incubated in tanks with sediments or sands. It can be found that the decomposition rates of sediment and sand substrates were 64.62% and 62.15%, respectively. And during the plant decomposition, abundant nutrients were released into overlying water, and the dissolved oxygen concentrations and oxidation-reduction potential values decreased while the concentrations of total nitrogen and total phosphorus rapidly increased. At the end of decomposition (146 d), the quality of overlying water was recovered back to the initial level. The aromatic protein was the main dissolved organic matter into overlying water at first, then the humic acid- and fulvic acid-like refractory organic compounds increased gradually. The decomposition process of plant has a relationship with microbial enzyme activities, which is related to the water quality and the characteristics of plant itself. Cellulase and sucrase have a close relationship ($r=0.70, P<0.05$), which is affected by total organic carbon and total nitrogen. Meanwhile, the catalase has a significant correlation between dissolved oxygen and electrical conductivity in overlying water ($P<0.05$), while alkaline phosphatase and urease had a negatively correlation with the total phosphorus and the ammonia nitrogen respectively ($P<0.05$).

Key words: *Hydrilla verticillatum*; decomposition of plant; sediment; sand; enzymes

基金项目: 国家自然科学基金(51579075);江苏省自然科学基金优秀青年基金(BK20160087)

作者简介: 张松贺(1977—),男,教授,博士,主要从事水生态修复与河湖水环境治理研究。E-mail:shzhang@hhu.edu.cn

引用本文: 张松贺,张丽莎,韩冰,等.轮叶黑藻腐解过程营养物质释放及微生物胞外酶活性变化规律[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(2):95-101.

ZHANG Songhe, ZHANG Lisha, HAN Bing, et al. Changes of nutrients and enzyme activity during the decomposition process of *Hydrilla verticillatum*[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(2): 95-101.

在湿地生态系统中,以沉水植物为主导的水生植物生态修复已经成为富营养化湖泊治理的重要途径^[1-2]。然而当沉水植物集中衰败、死亡时,会释放大量营养物质,使水体营养物质含量升高,溶解氧含量降低,造成水质恶化,甚至形成“湖泛”现象^[3]。水生植物腐解过程分为快速分解阶段和缓慢分解阶段^[4],水体营养物质、水文条件等因素均会对腐解过程产生影响^[5]。研究发现,陆生植物落叶腐解过程中微生物的数量会明显增多,且微生物间的相互作用对降解有机物质及系统碳代谢具有一定的影响^[6]。微生物的作用主要依赖于其胞外酶系统,不同微生物的酶系统有所不同,分泌同种酶的微生物种类也有所不同,如产生纤维素酶的微生物种类较广泛,而产木质素酶的微生物很少。因而,充分了解沉水植物腐败过程微生物胞外酶活性的动态特征及其对水环境的影响,对沉水植物的控制和管理具有重要意义^[7]。轮叶黑藻(*Hydrilla verticillatum*)具有较强的再生能力,被广泛应用于湖泊和人工湿地的生态恢复中。砂石是常用的人工湿地基质,而底泥沉积物通常作为自然湿地的基质。因此,笔者选取底泥沉积物和砂石作为试验基质,模拟分析自然条件下轮叶黑藻腐败过程营养物质的释放及微生物酶活性的变化规律,以期为人工湿地和湖泊生态修复中水生植物的管理提供重要的参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

沉水植物轮叶黑藻和表层沉积物(0~5 cm)取自江苏省南京市高淳水生植物基地。自然风干后,将表层沉积物样品研磨并过 100 目网筛,以去除底泥内植物的残体及杂物。用去离子水将收集的植物样品进行清洗,去除根部保留茎叶并切成 3~5 cm 的小段,置于 105℃烘箱中杀青 10 min,再在 80℃下烘干至恒重。

1.2 试验设计

轮叶黑藻通常在 11 月底进入衰亡期,4 月残体腐解逐步消失。为了模拟自然衰败过程,自 2016-11-24 至 2017-04-13 进行试验,共计 146 d。环境温度变化范围为 4.20~22.76℃,以 5 L 聚丙烯塑料桶(15 cm×25 cm×21 cm)作为反应器。取 500 g 的干燥底泥或细砂石(粒径均小于 0.1 cm)和 4 L 的自来水放在反应器中静置 3 d。称取 20 g 植物样品放入微米网袋(孔径 25 μm,规格 20 cm×20 cm)并放在反应器中,以不加植物作为对照。每个处理设定 3 个平行反应器,试验全程采取避光处理。在第 7 天、第 14 天、第 21 天、第 28 天、第 35 天、第 42 天、第 49 天、第 56 天、第 96 天、第 146 天采集植物、上覆水以及基质样品。现场用多参数水质分析仪(HQ30d,HACH,美国)测定水体电导率(EC)、氧化还原电位(ORP)和溶解氧(DO)。植物样品晾干后于 80℃下烘干至恒重以测定其残体量,采样时注意尽量避免引起水体扰动。

1.3 试验方法

总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)和总磷(TP)的测定均采用国际标准法;植物总有机碳(TOC)采用 TOC 分析仪(Multi 3100)测定。将水体样品通过 0.45 μm 滤膜(GF/F, Whatman, UK)放置于 F-7000 荧光分光光度计(日本 HITACHI 公司)中进行荧光光谱分析水体有机质。设置激发波长为 200~500 nm,狭缝宽为 5 nm;发射波长为 200~500 nm,狭缝宽为 1 nm。脲酶活性的测定使用 Solomon 等^[8]方法进行优化。纤维素酶、过氧化氢酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶的测定均选用南京建成生物工程研究所提供的酶类测试盒。

1.4 统计分析

分解速率常数采用 Olson 指数衰减模型^[9]进行计算,腐烂分解 50% 的时间 $t_{50}=0.693/k$,其中 k 为分解速率常数。采用 SPSS19.0 和 Origin9.0 软件进行数据分析,采用 Person 相关系数进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 植物腐解过程中上覆水的动态变化

与对照组相比,试验初期处理组水体 DO 质量浓度和 ORP 均迅速下降,在 14 d 达到最低(图 1(a)(b)),这与轮叶黑藻腐解初期释放营养物质导致微生物快速繁殖和消耗水体中氧气有关^[10]。大量营养物质释放,使得处理组水体 EC 迅速升高(图 1(c))。随着水体营养物质被分解,后期水体 DO 质量浓度和 ORP 逐渐上升。相关性分析表明,水体 DO 质量浓度和 ORP 之间均呈显著正相关关系($P<0.01$),这与王博等^[10]的研究结果总体一致。

氮、磷是引起水体富营养化的主要营养元素,了解水体氮、磷的迁移转化对水体的净化和富营养化湖泊

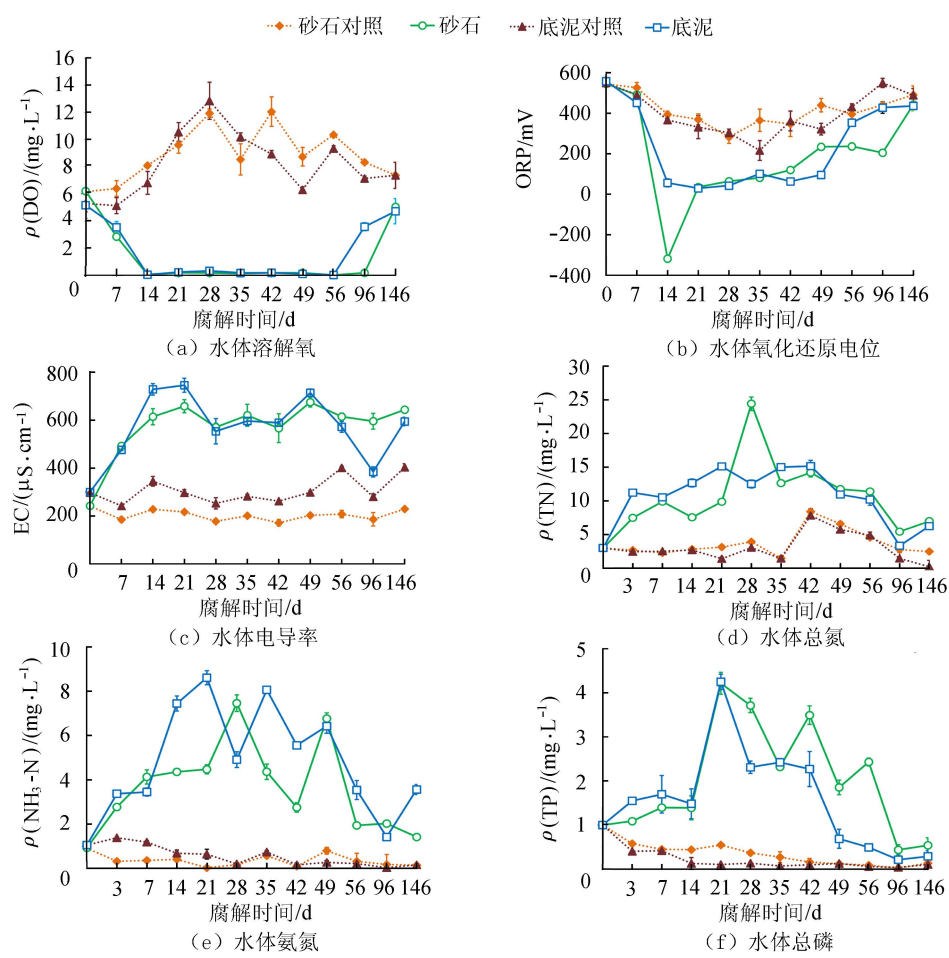


图 1 轮叶黑藻腐解过程中水体 $\rho(\text{DO})$ 、 ORP 、 EC 、 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 的变化

Fig.1 Dissolved oxygen, oxidation-reduction potential, electrical conductivity, total nitrogen, ammonia nitrogen and total phosphorus during the decay process of *H. verticillatum*

的管理防治等方面具有重要意义^[11]。对照组水体 TN 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 质量浓度始终低于处理组,且一直保持较低水平(图 1(d)(e)(f)),说明植物腐解过程向水体释放了大量的氮和磷。试验结束时,植物腐解释放到水体的氮、磷在硝化、反硝化作用及微生物的吸收利用下逐渐降低^[10],使得处理组水体的氮、磷含量与初始时相差不大。试验发现,轮叶黑藻腐解使水体处于缺氧状态,大量营养物质的释放使水体氮、磷浓度在短期内(21~28 d)升高,水体发黄发臭,极易诱发水华现象。但之后由于腐解的稳定化和水体中微生物作用,水体中的氮、磷经生物和物理化学作用逐渐下降,水体环境逐渐恢复。

2.2 植物残体内碳、氮变化特征

随着轮叶黑藻的腐解,处理组植物残体剩余质量逐渐减少(图 2(a))。植物腐解初期为快速释放期,此阶段主要以细胞溶解性大分子有机物(如溶解性糖、蛋白质、DNA 等)的释放为主^[12],之后进入缓慢分解期。试验结束时,底泥组和基质组的分解速率常数分别为 0.0071 d^{-1} 和 0.0067 d^{-1} , t_{50} 分别为 97.38 d 和 104.14 d。结果表明,与砂石基质相比,底泥基质更有利于轮叶黑藻腐解。

轮叶黑藻残体内 TN 含量的变化趋势呈现先降低后升高再降低的趋势,试验结束时砂石组和底泥组中植物体内的 TN 质量比分别减少了 44.18% 和 61.33%(图 2(b)),这与戚美侠等^[13]对春季芦苇和狭叶香蒲腐解的研究结果基本一致。植物腐败初期,淋溶作用下可溶性无机盐流失导致植物 TN 含量下降^[14];之后微生物固定作用对植物 TN 的累积率大于同期植物残体损失率致使植物 TN 含量增加^[15]。在 146 d 的试验周期内轮叶黑藻体内的碳被矿化并释放,至试验结束时其体内的 TOC 含量较初始时砂石组和底泥组分别减少了 18.25% 和 26.94%(图 2(c))。与底泥组相比,前期砂石组植物内碳的释放较快,这种变化与基质类型和微生物相关。砂石初始携带的微生物量和营养物质比底泥少,在初期底泥能够为植物表面微生物提供部分碳源,降低其对植物残体内碳的利用。经过 146 d 的试验,底泥组和砂石组轮叶黑藻的残体剩余量为

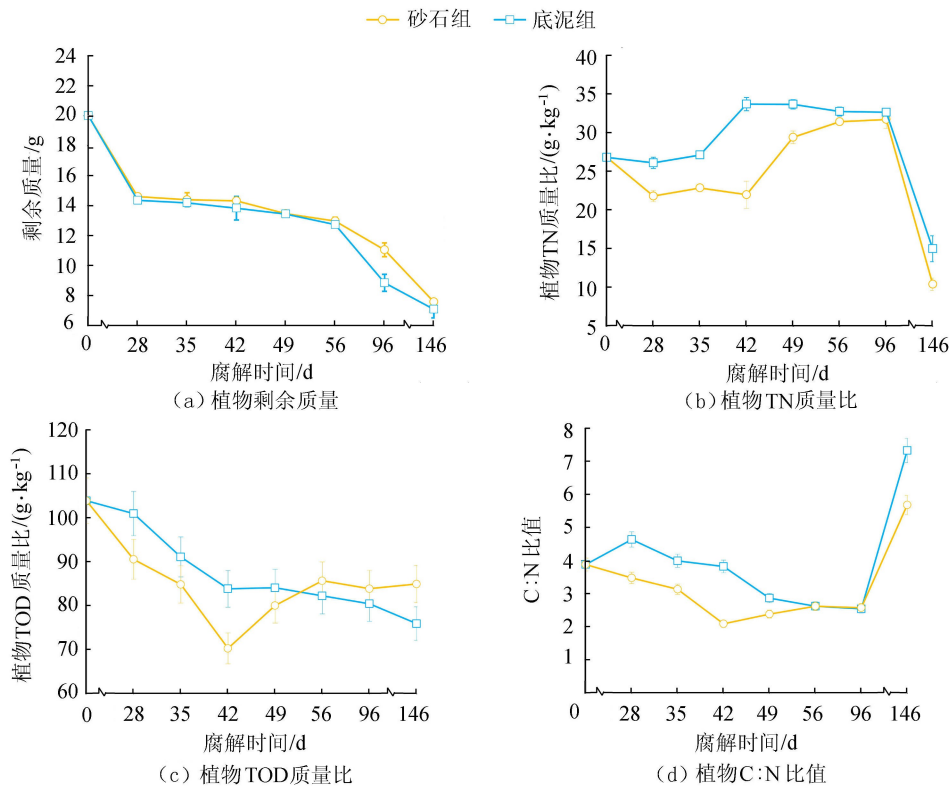


图2 植物残体质量、植物体 TN 和有机碳质量浓度及 C : N 比值变化

Fig.2 Change of residual quality, total nitrogen, total organic carbon and C : N value in the residual plants

35.38% 和 37.85%, 这与植物体内的碳、氮含量密切相关。腐解试验结束时,底泥组和砂石组植物体内C : N 值分别为 7.33 和 5.68,显著高于初始 C : N 值(3.88)(图 2(d))。已有研究表明,植物体内碳、氮和相互之间的比值会影响植物的腐解速率^[16]。随着植物的腐解,植物残体的碳被逐渐释放,大量的营养物质使植物表面微生物增加,加快对植物内氮的分解利用。而可溶性的碳逐渐减少,大部分碳多存在于植物体内难以腐烂的纤维素和木质素部分^[3],使得后期轮叶黑藻的分解率降低,C : N 值升高。

2.3 植物腐解过程荧光有机质的变化

溶解性有机质(DOM)对水环境中营养物质(特别是氮、磷等元素)的迁移和分配起着重要作用。三维荧光光谱技术(3D-EEM)能够定性地表达水体中所含物质,而被广泛应用于湖泊沉积物、水体及植物 DOM 组成结构及迁移转化规律研究^[17]。对比已有研究(表 1)^[18-19]可知,植物腐解过程中,色氨酸类蛋白质(II)和溶解性微生物代谢产物(IV)的荧光峰在前 56 d 较强(图 3),表明植物腐解过程中,以氨基酸为代表的水溶性物质最先被释放、分解。溶解性微生物代谢产物(IV)的荧光峰强度在 96 d 比 146 d 高,但仍低于 28 d 和 56 d 的荧光峰强度(图 3)。溶解性微生物代谢产物的变化,间接反映了微生物活性的变化^[20]。随着植物的不断腐解,类富里酸(III)和类腐殖酸(V)2 种物质的荧光峰强度增加,说明难降解性物质在逐步增加。综上,水生植物腐解过程中,首先向水体释放易生物降解的色氨酸类蛋白质物质,随着腐解过程的继续,水体中逐渐出现难以降解的类富里酸以及类腐殖酸等物质。

2.4 植物腐解过程微生物胞外酶活性及其对环境的响应

在整个腐解试验期间,底泥组和砂石组的纤维素酶均无显著差异(图 4(a),图中星号表示底泥组和砂石组的显著性差异,* : $P<0.05$,** : $P<0.01$)。植物腐解初期先向水体释放易降解的可溶性物质,随着腐解过程的进行,纤维素、半纤维素、木质素等难降解的物质被逐步降解^[14]。随着腐解的进行,可溶性的有机质

表1 溶解性有机质的主要荧光峰及相应位置
Table 1 Major fluorescence peaks and their spectral position of dissolved organic matter nm

区域	类型	λ_{Ex}	λ_{Em}
I	络氨酸类蛋白质	220 ~ 250	280 ~ 330
II	色氨酸类蛋白质	220 ~ 250	330 ~ 380
III	类富里酸	220 ~ 250	380 ~ 550
IV	溶解性微生物代谢产物	250 ~ 380	280 ~ 380
V	类腐殖酸	250 ~ 380	380 ~ 550

注: λ_{Ex} 为激发波长, λ_{Em} 为发射波长。

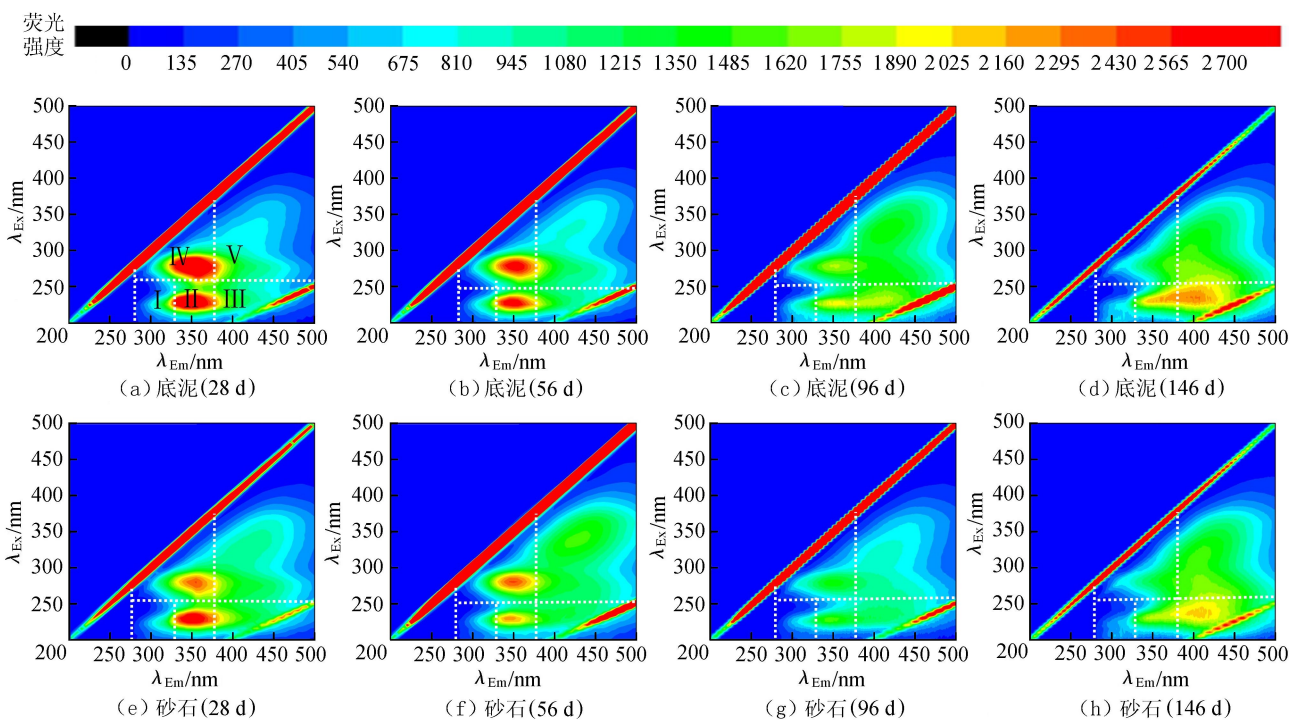


图 3 轮叶黑藻腐解过程中水体有机质三维荧光光谱

Fig. 3 Fluorescence spectrum of DOM in overlying water during the decay process of *H. verticillatum*

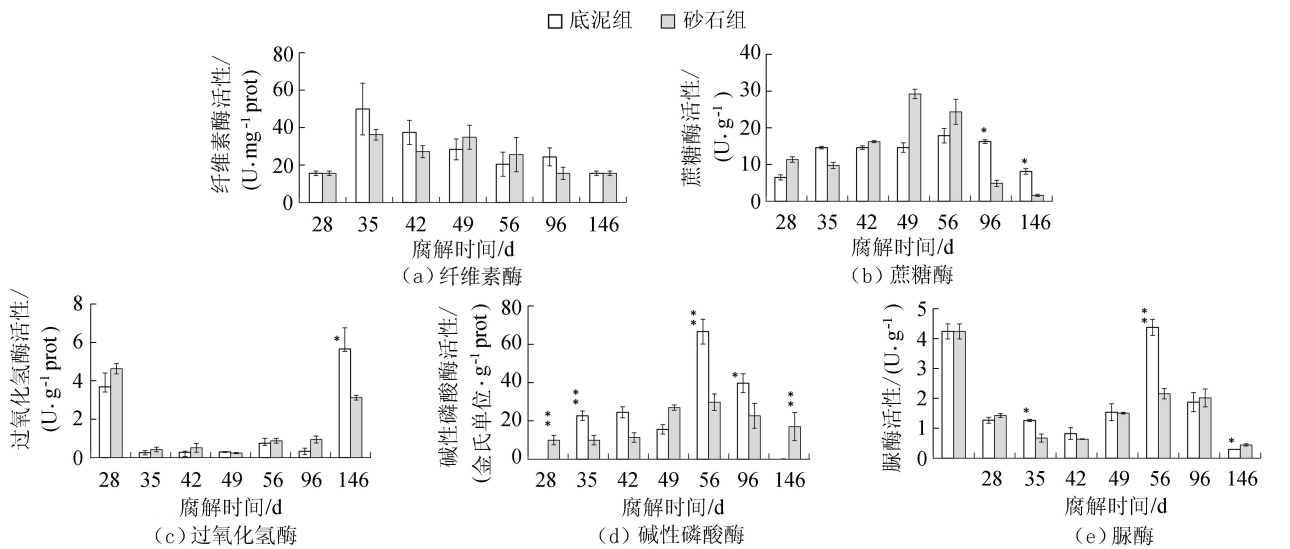


图 4 轮叶黑藻腐解过程中生物酶活性变化

Fig. 4 Change of enzymes during the decomposition process of *H. verticillatum*

释放减少,大量纤维类的有机质存在刺激微生物的生长代谢而大量产生相应的酶类,因此处理组的纤维素酶活性在腐解 35 d 达到最大值。与纤维素酶活性变化相比,蔗糖酶活性在 49 d 和 56 d 达到最高值,具有一定的滞后效应(图 4(b))。纤维素酶将纤维素分解为多糖及单糖,而蔗糖酶主要分解蔗糖等二糖^[21]。纤维素酶的活性与蔗糖酶的活性密切相关($r=0.70, P<0.05$)。纤维素酶活性的增加,分解不溶性纤维素成葡萄糖的活动加强;微生物的大量繁殖对营养的需求加强,逐步开始分解植物体内的蔗糖,因此蔗糖酶活性逐渐增加。腐解后期植物残体量和碳源的不足导致纤维素酶和蔗糖酶活性降低。根据相关性分析结果显示,纤维素酶活性与水体 DO 质量浓度呈显著负相关关系($r=-0.73, P<0.05$),与水体 EC、TN 及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度呈显著正相关关系($r=0.77、0.74、0.80, P<0.05$)。腐解前期,水体 DO 质量浓度显著降低,EC、TN 及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度显著增加(图 1),纤维素酶活性增加(图 4(a)),表明腐解初期微生物分解纤维素类大分子物质的活性增强,消耗了大量氧气,释放了大量的营养物质。而后期随着腐解的稳定化,纤维素类物质逐渐减少,纤

纤维素酶活性降低,水体环境逐步恢复正常。

过氧化氢酶分解细胞代谢过程中产生过氧化氢,可以避免或减轻过氧化氢对细胞产生的毒性。初期植物体可溶性营养物质的快速释放和末期溶解氧质量浓度增加后导致大量微生物的繁殖,从而使得过氧化氢酶在腐解初期和末期活性较高(图 4(c))。而中间时期由于植物内叶绿体、线粒体、内质网的破裂及低溶解氧浓度下好氧微生物难以生存^[22],导致腐解中过氧化氢酶一直处于较低水平。湖泊水体中,当溶解性磷的浓度较低时,植物、细菌体中的碱性磷酸酶被诱导大量产生,从而通过酶的作用水解水体中的有机化合物释放出磷^[23]。腐解初期水体的初始磷浓度较低(1 mg/L),碱性磷酸酶的活性被激发、增加,植物中的有机磷化合物被水解,向水体释放出磷,使得水体的 TP 质量浓度迅速升高。随着水体中 TP 质量浓度的增加抑制碱性磷酸酶的活性($r=-0.72, P<0.05$),使得植物中磷的分解、释放速率减缓,再加上藻类、细菌的利用导致水体中 TP 质量浓度逐渐减少,最终又使得水体中碱性磷酸酶的活性逐渐增加,这种循环往复的波动如图 4(d)所示。2 种基质的脲酶活性之间的差异出现在 35 d、56 d 和 146 d(图 4(e))。脲酶活性表现为 146 d 活性最低,这可能是由于在腐解末期,轮叶黑藻衰亡趋于结束,植物残体中氮、磷含量降低,微生物的营养来源减少。与 Solomon 等^[24]研究浮游植物体内脲酶活性结果相似,脲酶的活性与水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈显著负相关($r=-0.72, P<0.05$), $\text{NH}_3\text{-N}$ 的增加会抑制脲酶的活性。

在腐解初期由于底泥组引入微生物来源,且可提供部分营养来源,这对微生物的适应能力、种类和数量都造成一定的影响。底泥组和砂石组的各生物酶活性的差异,表明基质的类型对微生物存在一定的影响,继而对植物的腐解造成一定的差异。微生物胞外酶主要来源为微生物次级代谢产物。腐解过程中酶活性复杂变化表明,一种微生物可以迅速利用另一种微生物的代谢产物,菌群间的互利共生或竞争性抑制的复杂关系可使微生物群落的生长得到平衡并维持复杂微生物群落结构和功能的稳定,从而达到腐解的顺利进行。

3 结 语

到 146 d 试验结束时,底泥组和砂石组植物的分解率分别达 0.0071 d^{-1} 和 0.0067 d^{-1} ,基质对轮叶黑藻残体的腐解率存在一定影响,底泥沉积物更有利于轮叶黑藻的腐解。2 种基质条件下轮叶黑藻腐解会向水体中释放大量的有机质使得水体的 DO、ORP 迅速降低,TN、TP 浓度迅速增加,其后由于微生物作用及腐解的稳定化,水质基本恢复初始水平。植物在腐烂过程中首先向水体释放易降解的色氨酸类蛋白质等物质,随着腐解过程的进行,色氨酸类蛋白质逐渐减少,水体中逐渐出现难以降解的类富里酸以及类腐殖酸等物质。植物腐解过程与微生物胞外酶活性具有一定的响应关系。植物腐解过程中,纤维素酶和蔗糖酶活性在腐解第 35 d 和 49 d 达到最高,且受植物 TOC 和水体 TN 的影响,过氧化氢酶与水体的 DO 和 EC 相关,碱性磷酸酶及脲酶则分别受 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的抑制调节。底泥组和砂石组的生物酶活性具有一定的差异,继而对植物的腐解造成影响。

参考文献:

[1] MASIFWA W E, OKELLO W, OCHIENG H, et al. Phosphorus release from decomposing water hyacinth and effects of decomposition on water quality[J]. Uganda Journal of Agricultural Sciences, 2004, 9: 389-395.

[2] 王寿兵,徐紫然,张洁. 滇池高等沉水植物 50 年变迁状况对生态修复的启示[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 1-5. (WANG Shoubing, XU Ziran, ZHANG Jie. Dynamic changes of higher submerged macrophytes in Dianchi Lake in recent 50 years and implication for ecological restoration[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 1-5. (in Chinese))

[3] LI Chuhua, WANG Bo, YE Chun, et al. The release of nitrogen and phosphorus during the decomposition process of submerged macrophyte (*Hydrilla verticillata* Royle) with different biomass levels[J]. Ecological Engineering, 2014, 70: 268-274.

[4] ACOSTAMARTÍNEZ V, BELL C W, BEL M, et al. Long-term soil microbial community and enzyme activity responses to an integrated cropping-livestock system in a semi-arid region[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, 137(3): 231-240.

[5] POLECHOŃSKA L, SAMECKA-CYMERMAN A. The effect of environmental contamination on the decomposition of European frog-bit (*Hydrocharis morsus-ranae* L.) in natural conditions[J]. Aquatic Botany, 2015, 127(1): 35-43.

[6] MILLELINDBLOM C, TRANVIK L J. Antagonism between bacteria and fungi on decomposing aquatic plant litter[J]. Microbial Ecology, 2003, 45(2): 173-182.

- [7] BALASUBRAMANIAN D, ARUNACHALAM K, DAS A K, et al. Decomposition and nutrient release of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. under different trophic conditions in wetlands of eastern Himalayan foothills[J]. Ecological Engineering, 2012, 44: 111-122.
- [8] SOLOMON C M, ALEXER J A, GLIBERT P M. Measuring urease activity in aquatic environmental samples[J]. Limnology & Oceanography Methods, 2007, 5(5): 280-288.
- [9] OLSON J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems[J]. Ecology, 1963, 44(2): 322-331.
- [10] 王博, 李法云, 范志平. 初春马来眼子菜分解对水体和底泥碳、氮和磷积累及释放的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2014(2): 80-86. (WANG Bo, LI Fayun, FAN Zhiping. Effect of decomposition of *Potamogeton malaianus* on accumulation and release of carbon, nitrogen and phosphorus in water and sediment at early spring [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2014(2): 80-86. (in Chinese))
- [11] 华祖林, 王苑. 水动力作用下河湖沉积物污染物释放研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 95-105. (HUA Zulin, WANG Yuan. Advance on the release of pollutants in river and lake sediments under hydrodynamic conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(2): 95-105. (in Chinese))
- [12] KÖNIG R, HEPP L U, SANTOS S. Colonisation of low and high-quality detritus by benthic macroinvertebrates during leaf breakdown in a subtropical stream[J]. Limnologica, 2014, 45(3): 61-68.
- [13] 戚美侠, 王红萍, 陈杰. 冬、春季芦苇(*Phragmites australis*)和狭叶香蒲(*Typha angustifolia*)的腐解过程及其对水质的影响[J]. 湖泊科学, 2017, 29(2): 420-429. (QI Meixia, WANG Hongping, CHEN Jie. Decomposition of *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* and their effects on the water quality in winter and spring[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(2): 420-429. (in Chinese))
- [14] YANG Jisong, LIU Jingshuang, YU Junbao, et al. Decomposition and nutrient dynamics of marsh litter in the Sanjiang Plain, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1297-1301.
- [15] GESSNER M O. Breakdown and nutrient dynamics of submerged *Phragmites* shoots in the littoral zone of a temperate hardwater lake[J]. Aquatic Botany, 2000, 66(1): 9-20.
- [16] FOG K, ARING R E. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter[J]. Biological Reviews, 2010, 63(3): 433-462.
- [17] OSBURN C L, HANDSEL L T, MIKAN M P, et al. Fluorescence tracking of dissolved and particulate organic matter quality in a river-dominated estuary[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(16): 8628-8636.
- [18] MURPHY K R, BUTLER K D, SPENCER R G M, et al. Measurement of dissolved organic matter fluorescence in aquatic environments: an interlaboratory comparison[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(24): 9405-9412.
- [19] CORY R M, MCKNIGHT D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(21): 8142-8149.
- [20] 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.
- [21] 张利平, 文江祁, 杨成德, 等. 白兰瓜子叶衰老过程中蔗糖酶同工酶的分离及其活性变化[J]. 植物生理学报, 1993(1): 17-22. (ZHANG Liping, WEN Jiangqi, YANG Chengde, et al. Isolation and activity changes of sucrase isozyme in the senescence of orchid[J]. Acta Phytophysiologica, 1993(1): 17-22. (in Chinese))
- [22] 黄凯旋, 张云, 欧林坚, 等. 春季海南岛近岸海域尿素与浮游生物的脲酶活性[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4575-4582. (HUANG Kaixuan, ZHANG Yun, OU Linjian, et al. The distribution of urea concentrations and urease activities in the coastal waters of Hainan Island during the spring[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4575-4582. (in Chinese))
- [23] 张云, 黄凯旋, 欧林坚, 等. 大亚湾海域尿素与浮游生物脲酶活性研究[J]. 热带海洋学报, 2014, 33(1): 90-96. (ZHANG Yun, HUANG Kaixuan, OU Linjian, et al. Distributions of urea concentration and urease activity in the Daya Bay [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2014, 33(1): 90-96. (in Chinese))
- [24] SOLOMON C M, GLIBERT P M. Urease activity in five phytoplankton species[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2008, 52: 149-157.

(收稿日期:2018-01-03 编辑:刘晓艳)