

三种湿地植物的生长及根系溶解性有机碳分泌物研究

李海燕^{a,b}, 陈章和^{b*}

(华南师范大学, a. 化学与环境学院; b. 生命科学学院, 广州 510631)

摘要:研究了美人蕉(*Canna indica* Linn.)、风车草(*Cyperus flabelliformis* Rottb.)和水鬼蕉(*Hymenocallis littoralis* (Jack.) Salisb.) 3种湿地植物在人工气候室水培条件下的根系溶解性有机碳分泌物分泌量及其与生长的关系。结果表明,风车草和美人蕉的植株总生物量和根系生物量接近,根系溶解性有机分泌物分泌量也接近。水鬼蕉的总生物量和根系生物量显著低于风车草和美人蕉($P < 0.01$),根系溶解性有机分泌物分泌量也显著低于风车草和美人蕉($P < 0.01$)。但美人蕉、风车草和水鬼蕉根系单位质量的溶解性有机碳分泌物的分泌量接近,分别为 $4.21 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、 $5.28 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 和 $4.03 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 。3种湿地植物的根系溶解性有机碳分泌物分泌量与植株总生物量和根系生物量均呈极显著的正相关($P < 0.01$)。

关键词: 湿地植物; 生物量; pH; 根系; 溶解性有机碳分泌物

中图分类号: Q945.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2011)06-0536-07

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2011.06.008

Growth and Dissolved Organic Carbon Exudates from Roots of Three Wetland Plants

LI Hai-yan^{a,b}, CHEN Zhang-he^{b*}

(a. School of Chemistry and Environment; b. College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: Three wetland species, *Canna indica* Linn., *Cyperus flabelliformis* Rottb., and *Hymenocallis littoralis* (Jack.) Salisb., were grown in solution culture systems in a climate chamber, and the growth characteristics and dissolved organic carbon exudates (DOC) of roots were studied. The results showed that *Canna indica* and *Cyperus flabelliformis* had similar total biomass and root biomass, and similar amount of DOC, which were significantly higher than those of *H. littoralis* ($P < 0.01$). However, production of DOC per unit root biomass was similar for the three species. DOC of the three wetland plants were positively correlated with total biomass ($P < 0.01$) and root biomass ($P < 0.01$).

Key words: Wetland plant; Biomass; pH; Root system; Dissolved organic carbon exudates

湿地植物是人工湿地的重要组成部分。植物的生长量与植物的氮、磷等营养元素的累积量密切相关^[1],植物对营养元素的吸收、吸附和富集作用与植株的根系发达程度密切相关^[2],因而不同植物构成的人工湿地对污水的净化效果存在着差

异^[3-4]。植物在人工湿地中的作用绝大部分是通过它的根系来体现的。植物根系不仅是一个强大的吸收器官,也是一个活跃的代谢、合成器官,并且还是一个积极的分泌器官^[5-6]。根系分泌物为根际微生物提供营养和能源,使微生物大量繁殖,根际微

收稿日期: 2011-02-18

接受日期: 2011-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(30470346); 广东省自然科学基金项目(06025056)资助

作者简介: 李海燕(1985~),女,硕士研究生,研究方向为环境生态学, email: haiyan.li1985@gmail.com

* 通讯作者 Corresponding author, email: chenzzh@scnu.edu.cn

生物活性的提高和数量的增加促进了其产生的酶的活性,酶活性的提高可以促进有机化合物的分解和矿化作用,从而促进植物对养分的吸收利用^[7]。

植物根系分泌物是在一定的生长条件下,活的且未被扰动的根释放到根际环境中的有机物的总称^[8]。根系分泌物是植物与外界进行物质交流的重要媒介,研究根系分泌物对于明确和协调植物和环境之间的关系有很大的理论和实践意义。近年来,根系分泌物的研究从一般根系分泌物到特定的根系分泌物。关于根系分泌物在植物生长、连作障碍等方面的研究也逐步深入,力求从根本上探明根系分泌物的作用机理。可是,目前很少关于人工湿地植物根系可溶性有机分泌物及其作用机理的研究。

本文选取美人蕉(*Canna indica* Linn.)、风车草(*Cyperus flabelliformis* Rottb.)、水鬼蕉(*Hymenocallis littoralis* (Jack.) Salisb.)为研究材料。美人蕉为观赏性植物,生长速度较快,是我国目前应用最多的人工湿地植物之一,美人蕉人工湿地系统对生活污水中的各项污染物都有较好的去除效果^[9]。风车草也是我国常用的人工湿地植物,有研究表明,风车草人工湿地对污染物有很强的去除能力^[10]。水鬼蕉具有一定的耐荫能力,适度的荫蔽有利于其生长,在构建多种人工湿地植物群落时有较好的应用前景^[11],且水鬼蕉人工湿地系统对悬浮物(SS)、总氮(TN)、总磷(TP)、生化需氧量(BOD₅)的去除效果相当不错^[12]。本文通过研究美人蕉、风车草、水鬼蕉在水培系统中的生长状况、根系分泌物水溶液的pH值、根系溶解性有机碳分泌物的分泌量及分泌物种类的初步分析,探讨不同湿地植物根系溶解性有机分泌物的差异,分析植物生长、营养去除与根系溶解性有机碳分泌物的关系,为研究人工湿地对污染物的去除机理、为提高人工湿地污水净化效果提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 实验设置

从华南师范大学生物标本园的人工湿地中选取生物量、个体大小一致的美人蕉、风车草、水鬼蕉的健康幼株各3株,先用自来水将泥土冲洗干净,再用去离子水清洗3遍,用薄泡沫板固定,放入装有Hoagland营养液的6 L塑料小桶中进行培养,每小桶1株。每种植物3个重复。用黑色塑料袋对小桶进行遮光处理,以避免藻类的生长。

塑料小桶置于人工气候室内,室内昼夜温度为30℃/20℃,光暗时间为12 h/12 h。白昼光照强度为100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,用德国Testo-545照度计校准测定,相对湿度为50%。每周更换1次营养液,水培试验从2010年7月开始,12月结束。

1.2 生长和生物量测定

实验结束时,测定每株植物根、茎、叶的鲜重,于80℃烘箱烘至恒重,用电子天平称量植物总生物量和根系生物量。生长过程中,每30 d用台秤称量整株植物的鲜重1次,根据实验结束时各种植物的干重/鲜重比,换算为各种植株的干重生物量。

1.3 根系溶解性有机碳分泌物(DOC)分泌量测定

采用岛津制作所TOC-V总有机碳分析仪测定。在水培过程中,每月定期将植物从塑料小桶中取出,将根部洗净,用高纯水(高纯水取自Aquapro系列AFZ-2000-U实验室超纯水机)冲洗,放入2 L高纯水中培养4 h后,经0.45 μm 滤膜过滤,测定高纯水中的DOC浓度。每种植物3个重复。结合植物根系的质量,将高纯水的DOC浓度换算为每天根系单位质量的分泌量。

1.4 DOC的组成分析

采用荧光光谱法测定,用激发波长(Ex)进行扫描表征。植物生长6个月,取50 mL溶液样品进行测定,采样方法与DOC分泌量测定的采样方法相同。白天采样时间为8:00–12:00,夜间采样时间为20:00–24:00。用日本日立公司FL-2500荧光分光光度计、氙灯进行分子荧光分析测定。每种植物3个重复。

在植物生长过程中,每月中旬把植物取出,用蒸馏水将根系冲洗干净,置于2 L高纯水中培养1 d,取培养液样品50 mL,用雷磁PHS-3C型精密pH计测定培养液的pH值。

1.5 数据统计与分析

数据分析使用Microsoft Excel 2003和Origin 7.5软件,利用单因素方差分析进行种间显著性差异分析,利用线性回归分析进行根系溶解性有机碳分泌物(DOC)与植物总生物量及与根系生物量相关性分析。

2 结果和分析

2.1 植物生长

实验的前90 d,美人蕉的生物量增长显著高于

风车草和水鬼蕉的增长(图 1)。90 d 后开始出现枯叶,生物量增长速度和风车草接近。水鬼蕉生物量增长较慢,从 30 d 起,生物量增长显著慢于美人蕉和风车草。

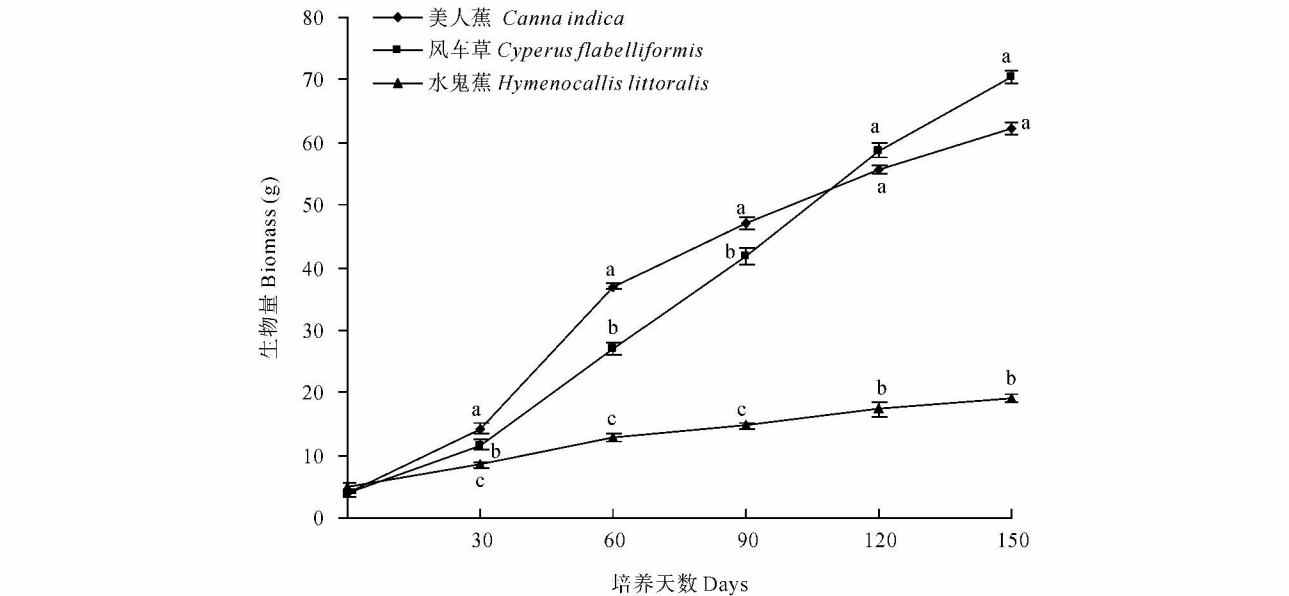


图 1 3 种湿地植物的生物量增长。不同字母表示差异显著($P<0.05$)。
Fig. 1 Biomass growth of three wetland plants grown in solution culture systems in a climate chamber. Different letters indicate significant differences at 0.05 level.

实验结束时,风车草和美人蕉的总生物量和根系生物量较大,水鬼蕉的较小(表 1)。美人蕉的总生物量和根系生物量分别为(62.25 ± 0.89) g 和(7.29 ± 0.69) g;风车草的总生物量和根系生物量分别为(70.47 ± 0.84) g 和(7.30 ± 0.86) g;水鬼蕉的总生物量

和根系生物量分别为(18.72 ± 0.64) g 和(4.93 ± 0.17) g。美人蕉和风车草的总生物量和根系生物量均显著高于水鬼蕉($P<0.01$),美人蕉和风车草的总生物量和根系生物量均无显著差异(表 1)。

表 1 3 种湿地植物培养 150 d 后的生物量

Table 1 Biomass of 3 wetland plants grown in solution culture systems in a climate chamber for 150 days

	美人蕉 <i>Canna indica</i>	风车草 <i>Cyperus flabelliformis</i>	水鬼蕉 <i>Hymenocallis littoralis</i>
总和 Total (g)	62.25 ± 0.89A	70.47 ± 0.84A	18.72 ± 0.64B
根 Root (g)	7.29 ± 0.69A	7.30 ± 0.86A	4.93 ± 0.17B

$n=3$; 同一行数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。
 $n=3$; Data followed different letters within line indicate significant differences among species at 0.05 level.

2.2 根系溶解性有机碳分泌物(DOC)

在培养的前 60 d,美人蕉根系 DOC 分泌最多,培养液中 DOC 浓度为 1.76 mg L^{-1} ,显著高于风车草和水鬼蕉。60 d 后,美人蕉的根系 DOC 分泌量仍缓慢上升,至 120 d 后呈下降的趋势(图 2)。风车草实验前 30 d 和水鬼蕉接近,第二个月以后,显著高于水鬼蕉($P<0.05$)。90 d 后与美人蕉接近,150 d 时,显著高于美人蕉。水鬼蕉的根系 DOC 分泌量增加较慢(图 2)。

6 个月后试验结束,3 种湿地植物的 DOC 分泌量存在极显著差异($P<0.01$),但根系单位质量的 DOC 分泌量接近,美人蕉、风车草、水鬼蕉分别为 $4.21 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、 $5.28 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 和 $4.03 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 。

3 种植物的根系分泌物水溶液的 pH 值也存在显著性差异($P<0.05$),美人蕉、风车草、水鬼蕉根系分泌物水溶液的 pH 值分别为 5.40 ± 0.28 、 6.81 ± 0.18 和 7.17 ± 0.21 。风车草的呈中性,水鬼蕉的呈弱碱性,而美人蕉的则呈较强的酸性。

2.3 植物根系分泌物的荧光光谱分析

图 3 为 3 种植物在高纯水中静置 4 h 后的荧光光谱分析图,左图为植物白天的根系分泌物的荧光激发波长扫描表征图,右图为植物黑夜的根系分泌物的荧光激发波长扫描表征图。从图中可以看出,美人蕉、风车草和水鬼蕉的根系分泌物均有 4 个相

似的峰型,峰的激发波长范围分别为 Ex(225 ~ 235 nm),Ex(275 ~ 295 nm),Ex(300 ~ 335 nm)和 Ex(360 ~ 380 nm)。植物白天和夜间的分泌物的荧光光谱相同,但分泌量有所差异。美人蕉白天根系分泌量要稍高于夜间;风车草白天分泌量略低于夜间分泌量;水鬼蕉的根系分泌量白天和夜间无明显变化。

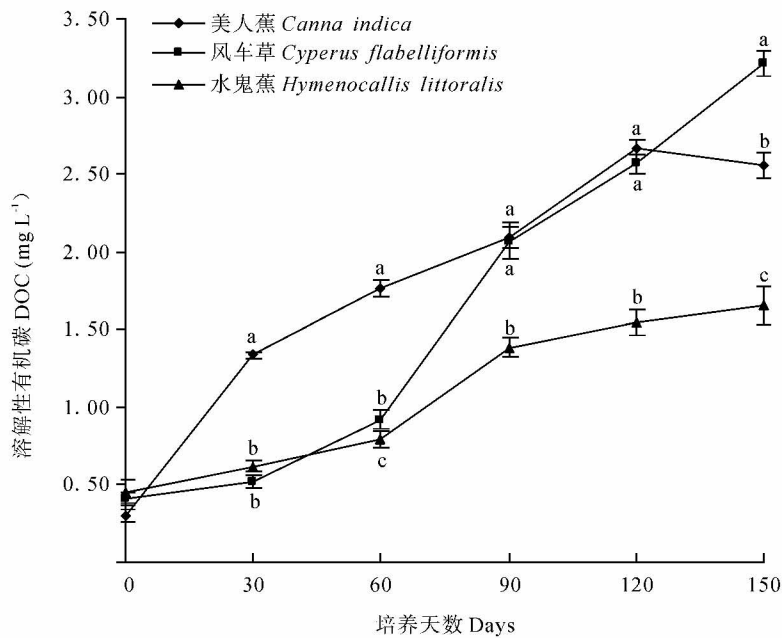


图 2 3 种湿地植物根系溶解性有机碳(DOC)含量。不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。
Fig. 2 Content of dissolved organic carbon (DOC) in roots of three wetland plants. Different letters indicate significant differences among the three plants at 0.05 level.

2.4 根系 DOC 分泌量与植物生长的关系

对 3 种湿地植物的根系 DOC 分泌量与植株总生物量及与根系生物量的相关性分析表明,美人蕉、风车草和水鬼蕉 3 种湿地植物根系的 DOC 分泌量与植株总生物量呈显著正相关($P < 0.01$),相关系数(r^2)分别为 0.929、0.974 和 0.908。它们与根系生物量也呈显著正相关($P < 0.01$),相关系数(r^2)分别为 0.925、0.966 和 0.871。

3 讨论

植物根系能向周围环境中释放的可溶性有机物种类繁多,数量各异,不仅有糖、有机酸、氨基酸等初生代谢产物,还有酮酚和胺等次生代谢产物及其它代谢物^[13],其中很多低分子量的化合物可作为化感物质影响植物根际土壤的微生物群落^[14-15]、土壤酶活性及土壤养分的含量^[16]。据文献报道,波长范围为 Ex (225 ~ 235 nm)/Em (220 ~ 400 nm), Ex (275 ~ 295 nm)/Em (220 ~ 400 nm), Ex (300 ~ 335 nm)/Em

(220 ~ 400 nm), Ex (360 ~ 380 nm)/Em (220 ~ 400 nm)的荧光物质,分别表征小分子有机酸(苹果酸、酒石酸、草酸等)^[17],色氨酸类和酪氨酸类芳香族蛋白质^[18],类腐殖酸^[19-20],维生素类等。可见,本研究的 3 种植物 DOC 的主要组成是小分子有机酸和类腐殖酸等物质。3 种植物的根系分泌物的荧光强度差别不大,表明 3 种植物的根系可溶性有机分泌物的化学组成相似。但本研究也表明,不同的湿地植物,根系 DOC 分泌量的昼夜格局可能存在差异。
湿地植物根系 DOC 不仅是湿地基质中微生物的碳源和能源^[21],其中的维生素也可能对微生物的生长产生重要的作用。Darrah^[22]模拟了可溶性碳与根际微生物量的水平和垂直分布,结果表明,根际微生物的分布与沿根的可溶性碳的分布有关,微生物生物量的积累依赖于根系分泌物的释放,分泌物越多,微生物生长越旺盛。因此,湿地植物根系的 DOC 有可能通过影响基质微生物的种类、数量和分布影响人工湿地的营养去除^[23]。

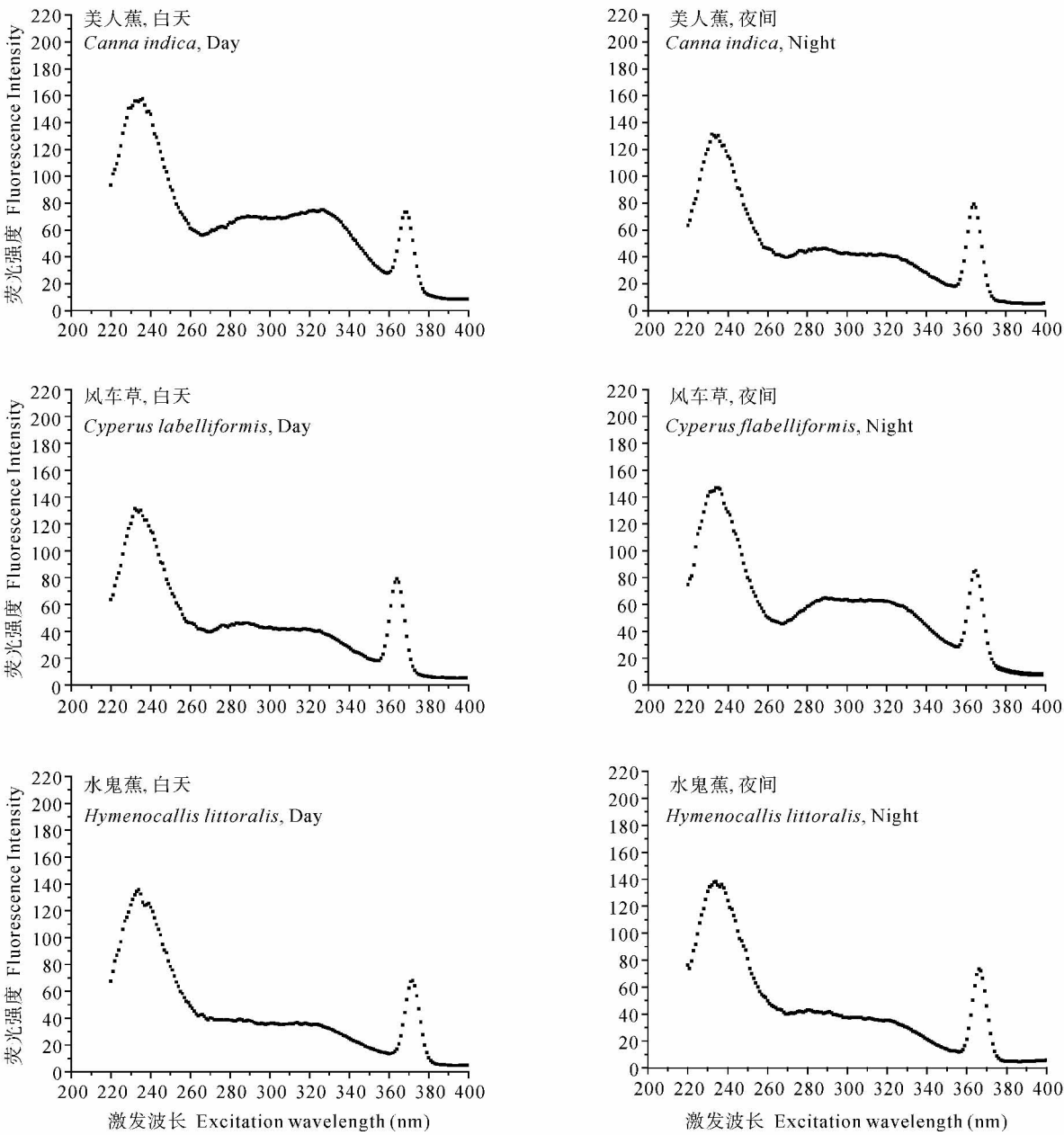


图 3 3 种湿地植物培养液的荧光光谱
Fig. 3 Fluorescence spectrum of culture solution of 3 wetland plants

湿地植物根系 DOC 不同的 pH 也可能对基质微生物的生命活动和物质代谢产生重要影响。根际微生物一般有细菌、真菌和放线菌。在 pH 中性条件下,细菌特别旺盛,而在酸性条件下,真菌的比例较高。本研究结果表明,3 种湿地植物的根系分泌物水溶液具有显著不同的 pH,风车草植物根系分泌物水溶液呈中性,水鬼蕉呈弱碱性,而美人蕉呈较强的酸性。很多研究表明,人工湿地基质的酸碱性能显著影响人工湿地的营养去除^[24-25]。人工湿地反硝化作用的最适 pH 为 7~8,超出此范围,反硝

化作用会受到抑制^[26]。此外,植物根际微环境的酸碱变化还影响土壤重金属的化学行为。当金属元素进入土壤,便在固液界面发生多重反应,进行吸附与解吸、络合与解络、沉淀与溶解的平衡反应。金属离子或与有机质螯合,或形成溶解性很小的碳酸盐、磷酸盐、硫化物或氢氧化物而被固定,或以 M^{n+} 、 $M(OH)_m^{n-m}$ 等离子形态被固定在土壤颗粒表面。影响吸附的最关键因子是 pH,吸着量随 pH 的增加而增加^[27]。pH 值对根际土壤中 Fe、Mn 和 Al 等金属的溶解度有显著影响,中性和碱性土壤上,

根际 pH 下降会使一些金属如铁、锌的溶解性升高。在当 pH 升高时,有些金属如铝和铁能形成水解产物,当溶液 pH 呈偏中性时溶解度又增加^[28]。因此,人工湿地植物根系分泌物的 pH 是值得注意的,3 种植物中,以风车草根分泌物水溶液的 pH 对基质微生物和营养元素和金属离子的去除最为有利。

不同的湿地植物,根系 DOC 分泌量可能有较大的差异。刘雯等^[17]的研究结果表明,美人蕉比茭白(*Zizania caduciflora*)根系分泌更多的 DOC。本研究也显示,不同湿地植物根系 DOC 分泌量具有显著的差异,湿地植物根系的 DOC 分泌量与植株总生物量呈极显著的正相关($P < 0.01$),与根系生物量也呈极显著的正相关($P < 0.01$)。这就表明,植物总生物量和根系生物量较大的湿地植物,可能具有较多的根系 DOC 分泌量。但 3 种湿地植物的根系单位质量 DOC 的分泌量差别不大。因此,要深入了解湿地植物根系 DOC 分泌量的种间差异,需要对更多的植物进行比较研究。

尽管湿地植物根系 DOC 能影响湿地基质的微生物的生长、分布和生命活动,影响营养元素和重金属元素的溶解度,从而可能影响人工湿地的净化效果,但关于湿地植物根系 DOC 与人工湿地净化效果的直接研究很少。美人蕉和风车草具有相近的 DOC 分泌量,据我们多年的研究,其污水净化效果也接近,而水鬼蕉的 DOC 分泌量显著低于前者,其净化效果也显著低于前者,这也许在一定程度上反映了 DOC 分泌量与净化效果的关系。但要准确认识湿地植物根系 DOC 分泌量与人工湿地净化效果的关系,需要进行更深入的研究。此外,要了解湿地植物根系 DOC 在人工湿地污染物去除中的作用,特别需要研究 DOC 的化学组成及主要组分的作用。

致谢 感谢华南师范大学化学与环境学院王伟杰同学在荧光光谱分析、根系有机碳分泌物分析过程中给予的帮助和技术支持。

参考文献

- [1] Li J N(李建娜), Hu Y L(胡曰利), Wu X F(吴晓美), et al. Nitrogen and phosphorus removal capacity of plant species in constructed wetlands for treating municipal wastewater [J]. Environ Pollut Control(环境污染与防治), 2010, 19(1): 506–509.(in Chinese)
- [2] Cheng S, Grosse W, Karrenbrock F, et al. Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals [J]. Ecol Eng, 2001, 18(3): 317–325.
- [3] Shi L(石雷), Yang Y(杨璇). Phytomass and its impact on the pollutant removal ability of constructed wetland [J]. Ecol Environ Sci(生态环境学报), 2010, 19(1): 28–33.(in Chinese)
- [4] Cheng S P(成水平), Wu Z B(吴振斌), Kuang Q J(况琪军). Macrophytes in artificial wetland [J]. J Lake Sci(湖泊科学), 2002, 14(2): 179–184.(in Chinese)
- [5] Chen L C(陈龙池), Liao L P(廖利平), Wang S L(汪思龙). A review for research of root exudates ecology [J]. Chin J Ecol(生态学杂志), 2002, 21(6): 57–62.(in Chinese)
- [6] Zhang X B(张小冰). Root exudates and their function [J]. Biol Teach(生物学教学), 2004, 29(11): 6–7.(in Chinese)
- [7] Ezekiel B, Emile B, Armand G. Impact of artificial root exudates on the bacterial community structure in bulk soil and maize rhizosphere [J]. Soil Biol Biochem, 2003, 35(9): 1183–1192.
- [8] Zhang F S, Shen J, Li L, et al. An overview of rhizosphere processes under major cropping systems in China [J]. Plant Soil, 2004, 260(1): 89–99.
- [9] Cao Y M(曹优明). Canna artificial wetlands for urban wastewater treatment [J]. Environ Sci Technol(环境科学与技术), 2009, 32(7): 120–124.(in Chinese)
- [10] Ayaz S C, Akca I. Treatment of wastewater by constructed wetland in small settlements [J]. Water Sci Technol, 2000, 41(1): 69–72.
- [11] Tan W F(谭卫锋), Chen W Y(陈文音), Chen Z H(陈章和). Influence of light intensity on the growth and ecophysiological characteristics of *Hymenocallis littoralis* [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2009, 29(3): 1320–1329.(in Chinese)
- [12] Prapa S, Andrew J, Suntud S. Seafood wastewater treatment in constructed wetland: Tropical case [J]. Bioresour Technol, 2008, 99(5): 1218–1224.
- [13] Liu H S(刘洪升), Song Q H(宋秋华), Li F M(李凤民). The roles of root exudation on rhizosphere nutrient and rhizosphere microorganisms [J]. Acta Bot Boreal-Occid Sin(西北植物学报), 2002, 22(3): 693–702.(in Chinese)
- [14] Kong C H, Wang P, Zhao H, et al. Impact of allelochemical exuded from allelopathic rice on soil microbial community [J]. Soil Biol Biochem, 2008, 40(7): 1862–1869.
- [15] Corey D B, Amanda K B, Joy B, et al. Root exudates regulate soil fungal community composition and diversity [J]. Appl Environ Microbiol, 2008, 74(3): 738–744.
- [16] Georgea T S, Gregorya P J, Wood M, et al. Phosphatase activity and organic acids in the rhizosphere of Potential agroforestry species and maize [J]. Soil Biol Biochem, 2002, 34(10): 1487–1494.
- [17] Liu W(刘雯), Qiu J R(丘锦荣), Wei Z B(卫泽斌), et al. Effects of different plants and plant root exudates on wastewater purification [J]. Chin J Environ Eng(环境工程学报), 2009, 3(6): 971–976.(in Chinese)
- [18] Liu Z G(刘智广), Chen Z Y(陈镇援). Quick determination of tryptophan in proteins with fluorimetry [J]. J Fourth Mil Med Univ(第四军医大学学报), 1993, 14(4): 314–316.(in Chinese)

- [19] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37(24): 5701–5710.
- [20] Xue S(薛爽), Zhao Q L(赵庆良), Wei L L(魏亮亮), et al. Spectroscopic studies of hydrophobic acid with different origins [J]. *Acta Sci Circumst(环境科学学报)*, 2010, 30(10): 2035–2042. (in Chinese)
- [21] Liu M(柳敏), Yu W T(宇万太), Jiang Z S(姜子绍), et al. Influencing factors and ecological effects of dissolved organic carbon in soil [J]. *Chin J Soil Sci(土壤通报)*, 2003, 20(2): 119–123. (in Chinese)
- [22] Darrah P R. Model of the rhizosphere [J]. *Plant Soil*, 1991, 138: 147–158.
- [23] Hu Z Y(胡智勇), Lu K H(陆开宏), Liang J J(梁晶晶). Role of rhizosphere microorganisms of aquatic plants in phytoremediation of wastewater [J]. *Environ Sci Technol(环境科学与技术)*, 2010, 33(5): 75–80. (in Chinese)
- [24] Zhang Z(张志), Ren H Q(任洪强), Zhang R R(张蓉蓉), et al. Influence of pH value on simultaneous nitrification and denitrification process of aerobic granule sludge [J]. *China Environ Sci(中国环境科学)*, 2005, 25(6): 650–654. (in Chinese)
- [25] Yang S S(杨莎莎), Song Y H(宋英豪), Zhao Z S(赵宗升), et al. Study on influences of pH values and C/N ratio on denitrification via nitrite [J]. *Chin J Environ Eng(环境工程学报)*, 2007, 1(12): 15–19. (in Chinese)
- [26] Jiang Y H(姜应和), Li C(李超). Preliminary study on denitrification capacity of constructed wetlands filled by bark [J]. *Environ Sci(环境科学)*, 2011, 32(1): 158–164. (in Chinese)
- [27] Ji Z H(纪智慧). Construction of the plant system and prospects in constructed wetlands for treating municipal wastewater [J]. *Environ Sci Manag(环境科学与管理)*, 2008, 33(11): 92–95. (in Chinese)
- [28] Li H F(李花粉). Heavy metals pollution in rhizosphere [J]. *Rev China Agri Sci Technol(中国农业科技导报)*, 2000, 2(4): 54–59. (in Chinese)