

# 3种湿地植物在水培条件下的生长状况及根系分泌物研究

陆松柳, 胡洪营\*, 孙迎雪, 杨佳

(清华大学环境科学与工程系, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 湿地植物是人工湿地的核心部分, 其根系分泌物是人工湿地的主要内部碳源。本研究分析了美人蕉、茭白、水柳等3种湿地植物在水培条件下的生长状况和根系分泌物特性。本实验条件下美人蕉、茭白、水柳在120 d的平均生物量/初始生物量分别为9.1、3.7和4.7。植物根系分泌物的量与生物量正相关, 分泌能力随生物量的增加而降低, 生长期中, 水柳的平均分泌能力为 $0.92 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ , 美人蕉为 $0.47 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ , 茭白为 $0.43 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 。通过三维荧光光谱分析, 3种植物的根系分泌物均以小分子有机酸和芳香族蛋白质为主。研究表明, 美人蕉、水柳为适宜的湿地植物。

**关键词:** 人工湿地; 湿地植物; 生物量; 根系分泌物; 分泌能力

中图分类号: X171.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)07-1901-05

## Study on the Growth Characteristics and Root Exudates of Three Wetlands Plants at Different Culture Conditions

LU Song-liu, HU Hong-ying, SUN Ying-xue, YANG Jia

(ESPC State Key Joint Laboratory, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Wetland plants are the important component of constructed wetlands and their root exudates provide the interior hydrocarbon for denitrification. In this study, the growth characteristics and root exudates of *Canna indica*, *Zizania caduciflora* and *Lythrum salicari* in different culture conditions were researched. The results showed that the average biomass initial/biomass in 120 days growth of *Canna indica*, *Zizania caduciflora* and *Lythrum salicari* were 9.1, 3.7, and 4.7, respectively. There was a positive correlation between the root exudates and the biomass of plants, but the release rate of root exudates decreased with the biomass increase. The root exudates release rates of unit biomass were  $0.92$ ,  $0.47$ ,  $0.43 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$  for *Lythrum salicari*, *Canna indica* and *Zizania caduciflora*, respectively. And the root exudates of those three plants are mainly organic acids and aryl protein based on the three-dimensional fluorescence spectrum analysis. The results of this study also indicate that *Canna indica* and *Lythrum salicari* are befitting wetlands plants.

**Key words:** constructed wetland; wetland plant; biomass; root exudates; release rate

植物是人工湿地的重要组成部分, 植物可以利用自身的光合作用为净化过程提供能量和载体, 还能通过根系向其周围的基质输送氧气, 在植物的根区形成好氧、缺氧和厌氧微区, 为根区的好氧、兼性及厌氧微生物提供了各自适宜的微环境<sup>[1-5]</sup>。湿地中微生物硝化-反硝化脱氮过程就主要发生在这一区域<sup>[6-13]</sup>。另外, 植物根系还能分泌多种供微生物生长的有机物(碳源)<sup>[14]</sup>。张鸿等<sup>[15]</sup>研究表明, 在种植水芹、凤眼莲的湿地中, 硝化和反硝化细菌数量均高于没有植物的湿地。Anderson等<sup>[16]</sup>的研究表明, 植物根际能分泌各类有机复合物, 为微生物的生存创造良好的条件, 促进根际的生物降解, 提高人工湿地的净化能力。但有关湿地植物分泌物的研究还处于起步阶段, 有待深入研究。

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<sup>[17]</sup>。根系分泌物广义上的分类可以按照分泌物的

性质分为3种: 细胞脱落物和裂解物; 高分子量的凝胶状物; 低分子量的有机化合物。也可以根据分泌物的来源分为3种<sup>[18-24]</sup>: 分泌物; 渗出物; 裂解物。

研究人工湿地中植物根系分泌物对于提高人工湿地污染物去除能力有十分重要的意义, 目前测定植物根系分泌物的方法主要是利用气相色谱和高效液相色谱(HPLC)等<sup>[23, 24]</sup>, 但是这2种方法都需要大型仪器, 分离纯化步骤复杂, 前者需要长时间的衍生化, 且高温易使被测有机酸分解<sup>[25]</sup>。本研究利用TOC测定仪测定总的根系分泌物量, 利用荧光光谱分析植物根系分泌物的种类, 具有操作简便、快速、高效等优点。

收稿日期: 2008-09-05; 修订日期: 2008-11-28

基金项目: “十五”国家科技支撑计划项目(2007BAC22B02)

作者简介: 陆松柳(1981~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为人工湿地水处理技术, E-mail: lusl@mails.tsinghua.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: hyhu@mail.tsinghua.edu.cn

本实验的目的是研究美人蕉、茭白、水柳在水培过程中生长情况、根系分泌物分泌量及分泌种类的变化,并进行植物间的比较,从而为湿地植物选择提供支持。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 水培装置

取6个5L的广口瓶作为水培容器,加入配制的营养液和去离子水.从湿地中取茭白、美人蕉、水柳3种植物的健康幼苗各2株,分别放入各广口瓶中进行培养.每个广口瓶中均接有曝气头,进行适量的曝气以防止植物烂根.用铝箔对广口瓶进行遮光处理,以避免广口瓶中藻类的大量生长.

### 1.2 水培方式

水培实验在温室内进行,将广口瓶放置在温室中,营养液中主要成分为氮磷等营养盐和少量微量元素,氮磷营养盐主要有  $\text{KNO}_3$ 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  各  $0.25 \text{ mmol L}^{-1}$ ,  $\text{MgSO}_4$   $0.2 \text{ mmol L}^{-1}$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $0.36 \text{ mmol L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$   $0.75 \text{ mmol L}^{-1}$ .并根据监测情况不定期往装置中添加营养物质来补充植物生长需要的营养元素,一般周期为2周,添加浓度为初始浓度的一半.水培试验从2006年5月下旬开始,于2006年12月结束.

### 1.3 分析方法

水质指标的测定参考文献[26].

水培液中的硝氮及亚硝氮变化,分别以紫外分光光度法和 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法测定.

溶解性有机碳(DOC)采用岛津 TOC-5000A 总有机碳分析仪测定.植株的生物量用电子天平测量.

荧光光谱采用日立 F-2500 荧光分光光度计进行分析,光源为150 W 氙灯.激发波长间隔5 nm,发射波长间隔1 nm.

### 1.4 植物分泌能力评价方法

在水培过程中,定期将植株从培养瓶中取出,将根部洗净,放入1L高纯水中培养4h后测定高纯水中的DOC浓度,计算可得水中有机物的量,这些有机物由植物根系分泌而得,从而可以得到某一植物单位生物量在单位时间内所分泌的有机物的量,此结果可作为植物分泌能力的评价指标.

## 2 结果与amp;讨论

### 2.1 植物在水培条件下的生长情况

图1为水培植物植株质量随时间变化曲线.可见在单株生物量上,美人蕉 > 茭白 > 水柳.由于植株

个体之间会存在一定的差异,因此不以单株生物量( $m$ )作为主要考察对象,而以生长过程中的生物量/初始生物量( $m/m$ )为指标进行主要分析.可得植株平均最终生物量/初始生物量的值分别为14.0、3.1、3.2,平均最大生物量/初始生物量分别为15.9、5.4、6.9.由图1可认为120d为3种植物的共同的生长期,此时的平均生物量/初始生物量的值分别为9.1、3.7、4.7.美人蕉的生物量增长速度远高于其他2种植物,而茭白和水柳两者基本相当.

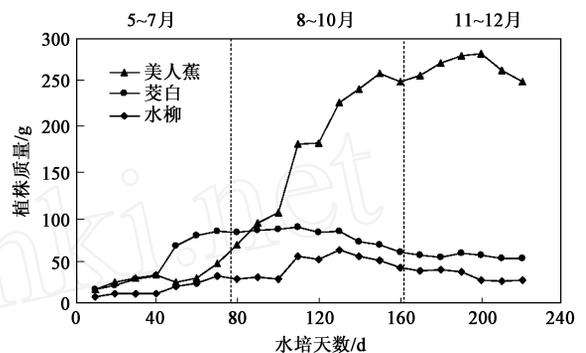


图1 水培植物植株质量变化曲线

Fig. 1 Weight variation curves of the cultured plants

由图1可见,在合适的温度和营养条件下,美人蕉的生长期较长,至少可以维持至10月,水柳的生长期次之,在9月底仍有一定增长,茭白较差,在9月初已经增长缓慢.

### 2.2 植物根系分泌物的分泌特性

湿地植物的根系分泌物是湿地内部的一个重要碳源,由于人工湿地在水处理过程中对碳源有着较大的需求,因此有机物分泌量是湿地植物的一个评价指标.

由于只有植物通过根系向水培系统中输入碳源,因此水培液中DOC的积累浓度反映了植物的分泌能力的强弱.

本研究中定期将植株从水培系统中取出,将根部洗净后置入1L高纯水中培养4h,并测定高纯水DOC浓度,变化曲线如图2所示.由于每次培养均采用高纯水,因此所测得DOC浓度间接反映了植物的分泌能力,其与高纯水体积的乘积即为该植株在4h内分泌的有机物的量.由图2可见,在120d,即9月中旬的时候达到最高点,此时亦为一般植物生长期的最后阶段.综合图1、2,可以得到这样的结论,单株植物根系分泌物的量与植物生长周期密切相关,呈相同的变化趋势.其原因可以认为在植物生长初期,由于生理活动旺盛,根系分泌物的量不断增大;随着植物

的不断成熟,生长速度放慢,但植株的生物量仍在不断增长,根系分泌物的量仍然呈增长趋势,但增长速度趋于缓慢;当植物进入衰亡期后,随着植株生物量的减少,根系分泌物的量呈下降趋势。

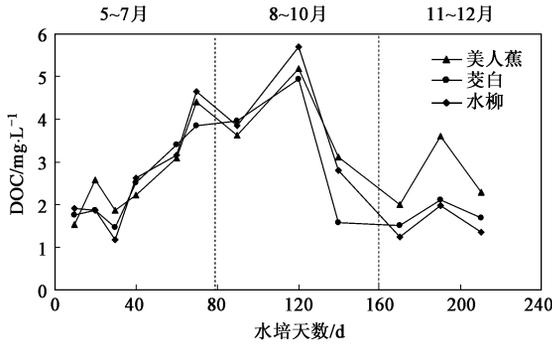


图2 高纯水中 DOC 浓度变化曲线

Fig. 2 Concentration variation curve of DOC in the high-purity water

由于植株之间存在质量差异,本研究引入单位生物量植株的分泌量作为植物分泌能力的评价指标.综合图 1、2 进行计算,得到植物的分泌能力随时间变化曲线,如图 3 所示。

由图 3 可见单位生物量的水柳,其根系分泌物的量要明显多于茭白和美人蕉,在生长期内的平均值约为  $0.92 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ .而相同条件下,美人蕉的分泌能力约为  $0.47 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ ,茭白的分泌能力约为  $0.43 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ ,两者能力相当.因此,从单位生物量分泌能力的角度考虑湿地植物筛选的话,以水柳为优。

同时,由图 3 可以看到分泌能力基本上随着时间的推移而降低,即植物的分泌能力随着生长

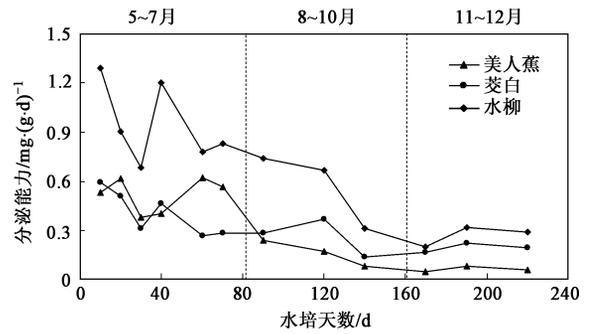


图3 水培植物分泌能力变化曲线

Fig. 3 Exudation ability variation curve of the cultured plants

周期而逐渐降低。

### 2.3 植物根系分泌物的种类分析

研究表明,植物光合作用的 28% ~ 59% 转移到地下,其中 4% ~ 70% 通过分泌作用进入土体<sup>[27]</sup>.植物根系分泌物种类繁多,不同种类的物质对于根际微生物的生长有着各自的影响.因此,本研究对于 3 种植物的根系分泌物进行初步分类鉴别,为人工湿地的植物选择提供参考。

图 4 ~ 6 分别为 3 种植物中 1 株在水培 10 ~ 60 d 期间进行高纯水培养后的三维荧光光谱等高线.从中可以看出,3 种植物所激发的荧光光强随时间推移显著增强,范围也显著增大,说明植物所分泌的有机化合物量显著上升,且可检出的种类也在增加.对图 4 ~ 6 中 60 d 的光谱等高线进行分析,可以看到 3 种植物均有 2 个主要峰且很相似,两峰范围分别为  $Ex(275 \sim 285 \text{ nm}) / Em(330 \sim 350 \text{ nm})$  和  $Ex(220 \sim 230 \text{ nm}) / Em(330 \sim 350 \text{ nm})$ .这 2 个峰分别表征了小分子有机酸和色氨酸类芳香族蛋白质.此外,由图可

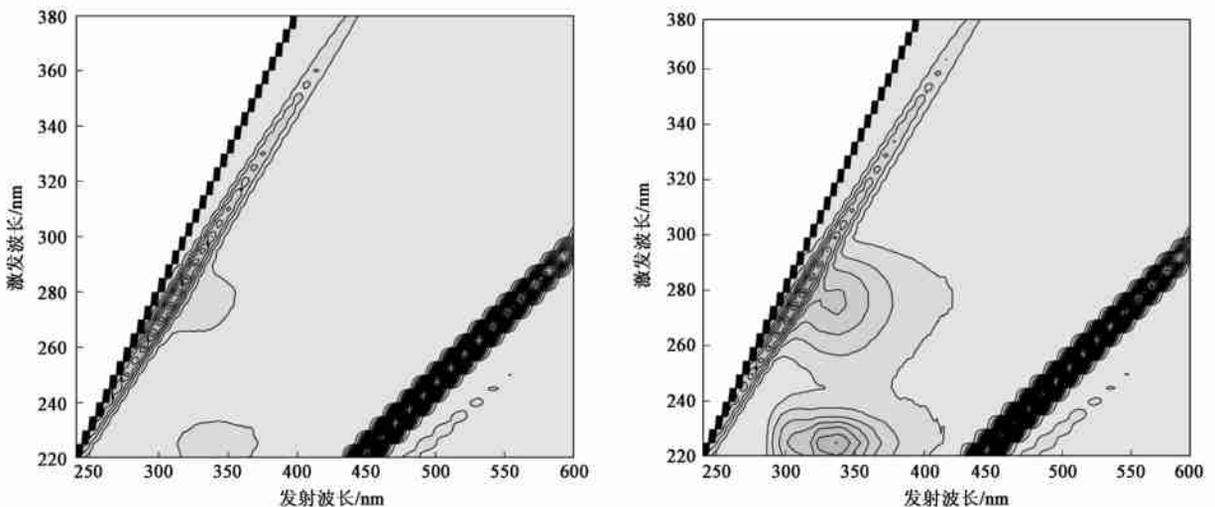


图4 美人蕉 A 高纯水培养液 10、60 d 三维荧光光谱等高线

Fig. 4 3-D fluorescent contour of the high-purity water culture media for *Canna indica* Linn A after 10 d and 60 d

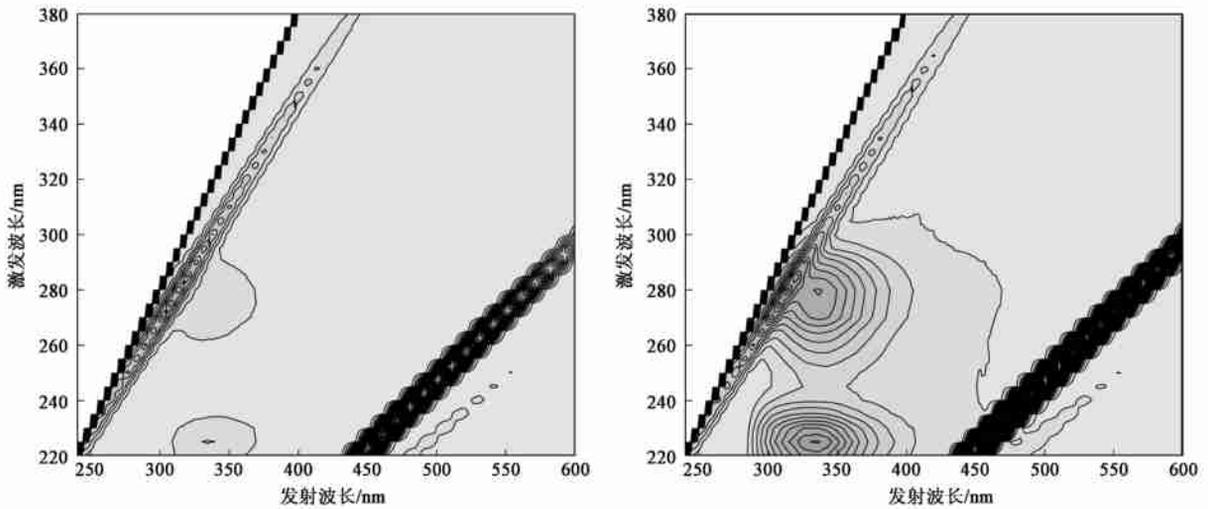


图 5 茭白 A 高纯水培养液 10、60 d 三维荧光光谱等高线

Fig. 5 3-D fluorescent contour of the high-purity water culture media for *Zizania caduciflora* A after 10 d and 60 d

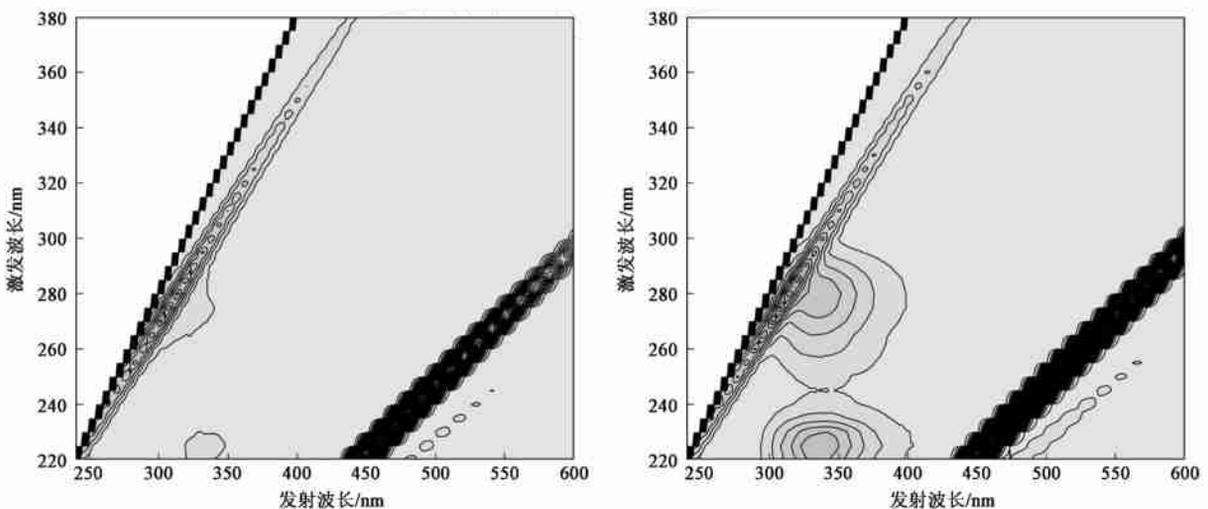


图 6 水柳 A 高纯水培养液 10、60 d 三维荧光光谱等高线

Fig. 6 3-D fluorescent contour of the high-purity water culture media for *Lythrum salicaria* A after 10 d and 60 d

以看到根系分泌物中还能检出酪氨酸类芳香族蛋白质和小部分腐殖酸和富里酸类物质。从荧光光谱的结果看,3种植物的主要根系分泌物种类基本相同。

### 3 结论

(1) 本实验条件下,美人蕉的生物量增长最大,茭白和水柳相当,120 d 时的生物量/初始生物量分别为 9.1、3.7、4.7,且 3 种植物的生物量变化规律与植物生长周期相吻合。

(2) 植物根系分泌物的分泌量与植物生物量正相关,且在植物生长期,植物的分泌能力随生物量的增加而降低。水柳在生长期内的平均分泌能力为

$0.92 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ ,美人蕉为  $0.47 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ ,茭白为  $0.43 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 。

(3) 通过荧光光谱分析,3种植物的根系分泌物均以溶解性微生物代谢产物和芳香族蛋白质为主,还能检出小部分腐殖酸和富里酸类物质。

(4) 美人蕉有着较大的生物量,水柳有着较强的分泌能力。由于美人蕉和水柳均有一定的观赏价值,因此在湿地建设中可以考虑 2 种植物综合使用。

### 参考文献:

- [1] Coleman J, Hench K, Carbutt K, et al. Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands[J]. Water, Air, Soil Pollut, 2001, 128: 283-295.

- [ 2 ] Sindilariu P D, Wölter C, Reiter R. Constructed wetlands as a treatment method for effluents from intensive trout farms [ J ]. *Aquaculture*, 2008, **277**:179-184.
- [ 3 ] Ji G D, Sun T H, Zhou Q X, *et al.* Constructed subsurface flow wetland for treating heavy oil produced water of the Liaohe Oilfield in China [ J ]. *Ecol Eng*, 2002, **18**:459-465.
- [ 4 ] Breen P F, Chick A J. Root zone dynamics in constructed wetlands receiving wastewater: A comparison of vertical and horizontal flow systems [ J ]. *Water Sci Technol*, 1999, **32**(3): 281-290.
- [ 5 ] Huett D O, Morris S G, Smith G, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands [ J ]. *Water Res*, 2005, **39**:3259-3272.
- [ 6 ] 刘超翔,董春宏,李峰民,等. 潜流式人工湿地污水处理系统硝化能力研究 [ J ]. *环境科学*, 2003, **24** (1): 80-83.
- [ 7 ] US EPA. Design manual of constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment [ S ]. EPA 625P1288P022, 1988. 23-25.
- [ 8 ] Stottmeister U, Wierner A, Kusch P, *et al.* Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment [ J ]. *Biotechnol Adv*, 2003, **22** (122): 93-117.
- [ 9 ] 卢少勇,张彭义,余刚,等. 农田排灌水的稳定塘-植物床复合系统处理 [ J ]. *中国环境科学*, 2004, **24**(5): 605-609.
- [ 10 ] 白军红,欧阳华,邓伟,等. 湿地氮素传输过程研究进展 [ J ]. *生态学报*, 2005, **25**(2):326-333.
- [ 11 ] 梁威,吴振斌. 人工湿地对污水中氮磷去除机制研究进展 [ J ]. *环境科学研究动态*, 2000, **3**: 32-37.
- [ 12 ] Ray A M, Inouye R S. Development of vegetation in a constructed wetland receiving irrigation return flows [ J ]. *Agriculture, Ecosystems and Environ*, 2007, **121**: 401-406.
- [ 13 ] Srivedhin T, Gray K A. Factors affecting denitrification rates in experimental wetlands: Field and laboratory studies [ J ]. *Ecol Eng*, 2006, **26**:167-181.
- [ 14 ] Chen S, Huang Y. Determination of respiration, gross nitrification and denitrification in soil profile using BaPS system [ J ]. *J Environ Sci*, 2006, **18**: 937-943.
- [ 15 ] 张鸿,陈光荣. 两种人工湿地氮、磷净化率与细菌分布关系的初步研究 [ J ]. *华中师范大学学报*, 1999, **3** (4):575-578.
- [ 16 ] Anderson T A, Cuthie E A, Walton B T. Bioremediation in the rhizosphere [ J ]. *Sci Technol*, 1994, **27**:2630-2636.
- [ 17 ] 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**(1-2): 89-99.
- [ 18 ] Nikolausza M, Kappelmeyera U, Szekely A, *et al.* Diurnal redox fluctuation and microbial activity in the rhizosphere of wetland plants [ J ]. *Eur J Soil Biol*, 2008, **44**:324-333.
- [ 19 ] 张淑香,高子勤. 连作障碍与根际微生态研究. 根系分泌物与酚酸物质 [ J ]. *应用生态学报*, 2000, **11**(1): 152-156.
- [ 20 ] Warembourg F R, Billes G. Estimating carbon transfers in the plant rhizosphere [ A ]. In: Harley J L, Russell R S. (eds). *The Soil-Root Interface* [ C ]. Academic Press, London, 1979. 183-196.
- [ 21 ] 陈文音,陈章和,何其凡,等. 两种不同根系类型湿地植物的根系生长 [ J ]. *生态学报*, 2007, **27**(2): 450-458.
- [ 22 ] Rovira A D, Foster R C, Martin J K. Origin, nature and nomenclature of the organic materials in the rhizosphere [ A ]. In: Harley J L, Russell R S. (eds). *The Soil-Root Interface* [ C ]. London: Academic Press, 1979. 1-4.
- [ 23 ] Mucha A P, Almeida C M R, Bordalo A A, *et al.* Exudation of organic acids by a marsh plant and implications on trace metal availability in the rhizosphere of estuarine sediments [ J ]. *Estuarine, Coastal Shelf Sci*, 2005, **65**(1-2): 191-198.
- [ 24 ] 魏俊岭,丁士明,张自立,等. 研究植物根系分泌物的方法 [ J ]. *植物生理学通讯*, 2003, **39**(1): 56-60.
- [ 25 ] 李德华,贺立源,李建生,等. 一种根系分泌物中有机酸的前处理和高效液相色谱检测方法 [ J ]. *植物生理学通讯*, 2004, **40**: 219-222.
- [ 26 ] 中国标准出版社第二编辑室. 水质分析方法国家标准汇编 [ M ]. 北京:中国标准出版社,1996.
- [ 27 ] Butler J L, Williams M A, Bottomley P J, *et al.* Microbial Community Dynamics Associated with Rhizosphere Carbon Flow [ J ]. *Appl Environ Microbiol*, 2003, **69**(11): 6793-6800.