

四种挺水植物生理生态特性和污水净化效果研究

赖闻玲^{1,2}, 胡菊芳¹, 陈章和^{1*}

(1. 华南师范大学生命科学学院, 广东省高等学校生态与环境科学重点实验室, 广东省植物发育生物工程重点实验室, 广州 510631; 2. 赣南师范学院化学与生命科学学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 采用人工气候室水培系统以人工污水培养慈姑(*Sagittaria trifolia*)、花皇冠(*Echinodorus berteroi*)、菖蒲(*Acorus calamus*)和芦苇(*Phragmites australis*) 4种挺水植物, 比较它们的根和地上部分生物量、根长、根寿命、根孔隙度、根径向泌氧量(ROL)、光合作用等生理生态特性及对总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)的去除效果。结果表明, ROL与根孔隙度、光合速率、地上生物量呈显著正相关($P < 0.05$), 与根长极显著正相关($P < 0.01$); TP的去除与光合速率、COD的去除与ROL显著正相关; TN的去除与生物量极显著正相关($P < 0.01$), 但与根生物量和地上部分生物量的比值(根茎比)显著负相关($P < 0.05$)。慈姑和花皇冠拥有庞大生物量和发达的根系, 根孔隙度、ROL和光合作用等生理指标较高, 在水培系统中的污水净化效果接近甚至优于菖蒲和芦苇, 是构建人工湿地的优良植物。

关键词: 挺水植物; 生物量; 根形态结构; 根径向泌氧; 光合作用; 净化效果

中图分类号: Q945.79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2010)04-0421-07

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2010.04.016

Eco-physiological Characteristics and Decontamination Efficiency of Four Emergent Macrophytes

LAI Wen-ling^{1,2}, HU Ju-fang¹, CHEN Zhang-he^{1*}

(1. Key Laboratory of Ecology and Environmental Science in Guangdong Higher Education, Guangdong Provincial Key Laboratory of Biotechnology for Plant Development, College of Life Sciences, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

2. College of Chemistry and Life sciences, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Four emerged Macrophytes, *Sagittaria trifolia*, *Echinodorus berteroi*, *Acorus calamus* and *Phragmites australis*, were cultured with synthetic wastewater in phytotron hydroponic system. The eco-physiological characteristics, such as biomass, root length, root lifespan, root porosity, root radial oxygen loss (ROL), photosynthesis and decontamination efficiency of total nitrogen, total phosphorus and COD were compared. The results showed that ROL positive correlated to root porosity, photosynthetic rate and biomass ($P < 0.05$), and significant to root length ($P < 0.01$). The removal rate of TP and COD correlated to photosynthetic rate and ROL, respectively, while the removal rate of TN significantly positive correlated to biomass ($P < 0.01$), and it is negative to root/shoot ratio. Compared with *A. calamus* and *P. australis*, *S. trifolia* and *E. berteroi* had large biomass, well-developed root system, relatively high physical index in root porosity, ROL and photosynthesis, and a closer or even better decontamination efficiency. It suggested that *S. trifolia* and *E. berteroi* might be excellent species for constructing wetlands.

Key words: Emergent macrophyte; Biomass; Root morphology; Radial oxygen loss; Photosynthesis; Decontamination efficiency

收稿日期: 2010-01-11

接受日期: 2010-03-15

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: 赖闻玲(1973~), 理学博士, 从事植物生态学和环境生态学研究, email: lwenling@sina.com

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

人工湿地作为一种高效、经济、环保的方法用于污水处理已经有 50 多年的历史了。人工湿地污水净化机理非常复杂,一般认为,基质、植物、微生物是人工湿地发挥净化作用的 3 个主要因素,其中植物是人工湿地的核心^[1]。在人工湿地净化污水过程中,植物的作用有 3 个重要的方面:直接吸收利用污水中可利用态的营养物质、吸附和富集重金属和一些有毒有害物质;为根区好氧微生物输送氧气,为微生物提供吸附面;增强和维持介质的水力传输^[2]。挺水植物是构建人工湿地植被系统的主要植物,挺水植物除具有上述功能外,还有拦截、过滤污染物的作用,选择适当的挺水植物是构建人工湿地的关键^[2-3]。国外最常用的有芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha* sp.)和灯心草(*Juncus effuses*)^[4-6],以及黑三棱(*Sparganium* sp.)、水葱(*Schoenoplectus lacustris*)等^[7]。国内除上述植物之外^[8-9],还有香根草(*Chrysopogon zizanioides*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、茭白(*Zizania latifolia*)、苔草(*Carex* sp.)、风车草(*Cyperus alternifolius*)、美人蕉(*Canna indica*)、池杉(*Taxodium ascendens*)等^[10-12]。

芦苇和菖蒲是种植地域较广、人工湿地中运用较多、实际验证污水净化效果较好的两种挺水植物。花皇冠(*Echinodorus berteroi*)是一种引进的观赏挺水植物,和慈姑(*Sagittaria trifolia*)同为泽泻科,在国内常被作为水景植物,但未见作为人工湿地污水处理植物应用的报道。我们在湿地植物调查中,观察到花皇冠和慈姑在富营养化的水体中生长良好,推测其有较好的去污功能。植物对污水的净化效果与植株的生长状况和根系发达程度、植物的光合作用及根径向泌氧量(radial oxygen loss, ROL)等生理生态特性密切相关^[11,13-14]。本文以污水处理人工湿地常用的芦苇和菖蒲为对照,比较花皇冠和慈姑的生理生态特性和污水净化效果,为筛选优良的人工湿地植物和探讨污水净化效果和植物生理生态之间的关系提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料和处理

本实验在微型人工湿地系统中进行,由用于盛污水的塑料桶和用于固定植物的泡沫板构成。桶为市售蓝色的塑料桶(上口内径 23 cm,桶底内径 19 cm,桶高 23 cm),泡沫板厚度 2 cm,直径与桶的上口直径接近。桶中装污水,用海绵包裹住植株的

基部固定于泡沫板上,置于塑料桶中培养。

实验植物有菖蒲(*Acorus calamus*)、芦苇(*Phragmites australis*)、慈姑(*Sagittaria trifolia*)、花皇冠(*Echinodorus berteroi*)。实验在人工气候室中进行,室内温度白天(7:00~19:00)为 $28.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$,夜晚 $18.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$,相对湿度(80 ± 10)%,白天光照强度 $360 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (所有条件均指距地面 1 m 处)。挑选长势良好、大小均匀的幼苗(株高约 20 cm,鲜重约 15 g),移栽至塑料桶内,每桶种 1 株,每种 5 个重复。20 株植物随机排列于人工气候室中。植物移栽至塑料桶后先灌自来水进行适应性培养,1 周后灌浓度 50% 的人工配制污水,待适应一周后灌浓度 100% 的人工配制污水。每桶灌污水 5 L,每 5 d 换水 1 次。人工配制污水配方参照 Wießner 等^[15]的方法,污水主要污染物浓度(mg L^{-1})为:化学需氧量 COD_{Cr} 326,总氮 TN 61.6,总磷 TP 5。在广州,通常以每年的 2 月至次年的 1 月作为植物室外生长的年周期,每年的 4~9 月,植物处于最旺盛的生长期。本实验在人工气候室中进行,实验植物第 5 周起株高生长、分蘖迅速,第 9 周时植物的株高就与室外 7~9 月时的相近,花皇冠开花,因此认为此实验条件下培养 9 周左右植物达旺盛生长期。12 周以后,多数植物的根系生长受益体积限制,所以从灌污水起实验共进行 12 周。

1.2 根的形态、结构

每 10 d 记录植株最大根长度,每株标记 5 条根,定期观察生长情况,记录其成活时间。取每株植物的成熟根 2~3 g,用浮力法测定根的孔隙度^[16],取 5 株的平均值。

1.3 根径向泌氧量和光合作用

根径向泌氧量(ROL)测定采用极谱法^[17],所用仪器包括极谱仪、圆筒状铂电极和 Ag/AgCl 电极(均由英国赫尔大学 Armstrong 教授提供)和列表式记录仪。第 10~11 周每天 9:00~15:00 进行测定,测定时被测植物置于气候室一固定位置,每株植物选取 1 条长 9~11 cm、直径小于 0.15 cm 的成熟根于距根尖 0.5 cm 处测定。

同时,用 LI6400 便携式光合作用测定系统于距地面 1 m 处测定植物净光合速率,每株植物测 5 片正常叶,每片叶重复 3 次,取平均值。

1.4 污水净化效果

在最后一周测定处理后(48 h)的 TN(碱性过硫

酸钾-紫外分光光度法)、TP(过硫酸钾氧化-钼蓝比色法)、COD_{Cr}(重铬酸钾法)的含量^[18],计算植物对 3 种指标的去除率。

1.5 植物的生物量

实验结束时收获植物,枝叶部分和根系分开,根用清水冲洗干净。植物各器官均于 80℃ 下烘至恒重后称其干重,精确至 0.001 g。

1.6 数据分析

运用 SPSS 13.0 (Statistical Package for the Social Sciences)和 Microsoft Excel 2003 软件计算平均值和标准差,并生成图表。采用 One-Way ANOVA 和 LSD 检验(双尾)进行种间比较的方差分析及差异性分析。

2 结果和分析

2.1 生物量和根的形态结构

4 种植物的根生物量、地上部分生物量和总生物量均是花皇冠 > 菖蒲 > 慈姑 > 芦苇(图 1)。其中花皇冠的各部分生物量均极显著大于其它 3 种植

物($P < 0.01$),菖蒲和慈姑之间差异不显著,而芦苇则极显著小于其它 3 种植物($P < 0.01$)。而且,4 种植物都有大量细小不定根。但从根和地上部分的生物量比值(根茎比)来看,花皇冠最低(0.25),菖蒲最高(0.41),它们之间差异极显著($P < 0.01$),其它 2 种植物之间、各自和花皇冠、菖蒲都无显著差异。

花皇冠和慈姑的最大根长很接近,达到了 36 cm 和 34 cm,极显著大于其它 2 种植物($P < 0.01$)。芦苇和菖蒲的根长都小于 25 cm,芦苇的根最短,极显著小于其它 3 种植物(表 1)。根寿命和根长不同,芦苇的根寿命最长,其次是花皇冠,菖蒲根寿命最短,4 种植物之间差异极显著($P < 0.01$)。4 种植物根的孔隙度差异极显著($P < 0.01$),慈姑最高,达到了 53%,其次是芦苇(40%),菖蒲最小(26%)(表 1)。

2.2 根径向泌氧量和光合作用

花皇冠和慈姑根的 ROL 能力接近,分别为 151.00 ng cm⁻² min⁻¹ 和 146.23 ng cm⁻² min⁻¹,均大于芦苇和菖蒲($P < 0.05$)(图 2)。

表 1 4 种植物的根长、根寿命和根孔隙度

Table 1 Root length, root lifespan and root porosity of four species

植物 Species	根长 Root length (cm)	根寿命 Root lifespan (d)	根孔隙度 Root porosity (%)
菖蒲 <i>Acorus calamus</i>	23B	32D	25.98D
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	15C	54A	40.16B
慈姑 <i>Sagittaria trifolia</i>	36A	39C	52.57A
花皇冠 <i>Echinodorus berteroi</i>	34A	46B	35.62C

不同小写和大写字母分别表示差异显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)。Data followed different small and capital letters indicate significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively.下同。The same as following Tables and Figures.

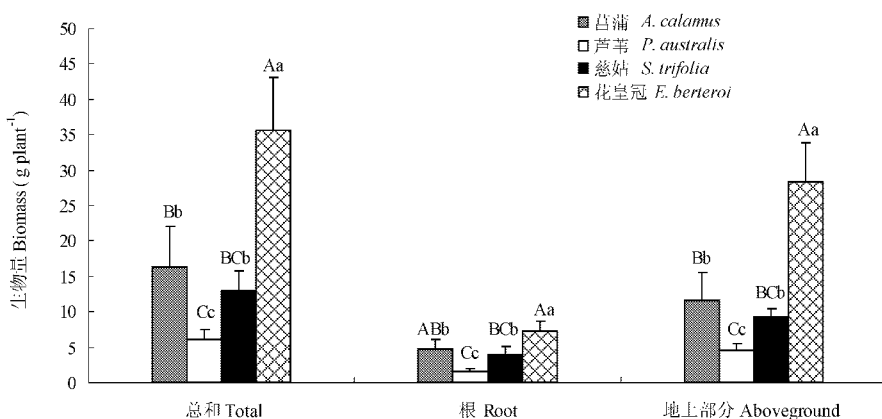


图 1 4 种植物的生物量

Fig. 1 Biomass of four species (n=5)

4 种植物的净光合速率存在差异,慈菇最高,菖蒲次之,芦苇最小。慈菇的光合作用显著大于其它 3 种植物($P < 0.01$),菖蒲的光合作用显著大于花

皇冠和芦苇($P < 0.01$),花皇冠和芦苇差异不显著(图 2)。

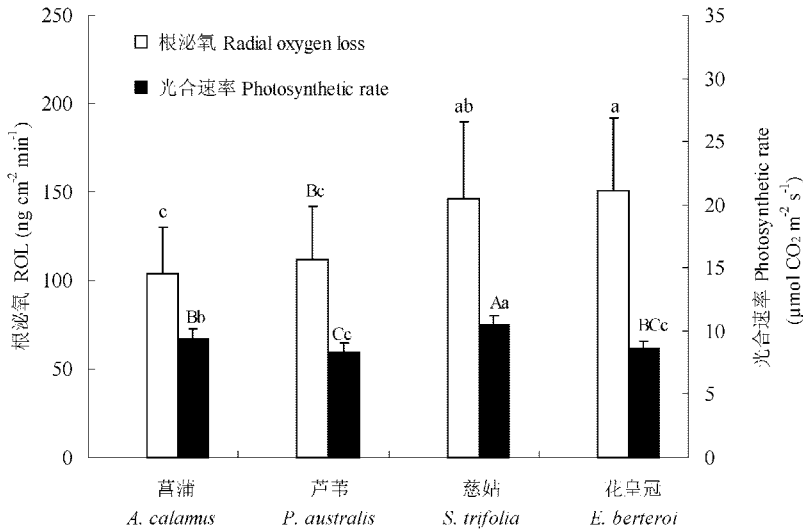


图 2 4 种植物的根泌氧量和光合速率

Fig. 2 ROL and photosynthetic rate of four species

2.3 污水净化效果

4 种植物的 TN、COD 的去除效果没有显著差异。TN 的去除率在 80%~90% 之间,花皇冠略高于其它植物;COD 的去除率在 68%~83% 之间,芦

苇最高,菖蒲最低。TP 的去除率在 44%~63% 之间,其中慈菇、花皇冠较高,慈菇显著高于菖蒲和芦苇($P < 0.05$),花皇冠显著高于芦苇($P < 0.05$),慈菇和花皇冠、菖蒲和芦苇之间差异不显著(图 3)。

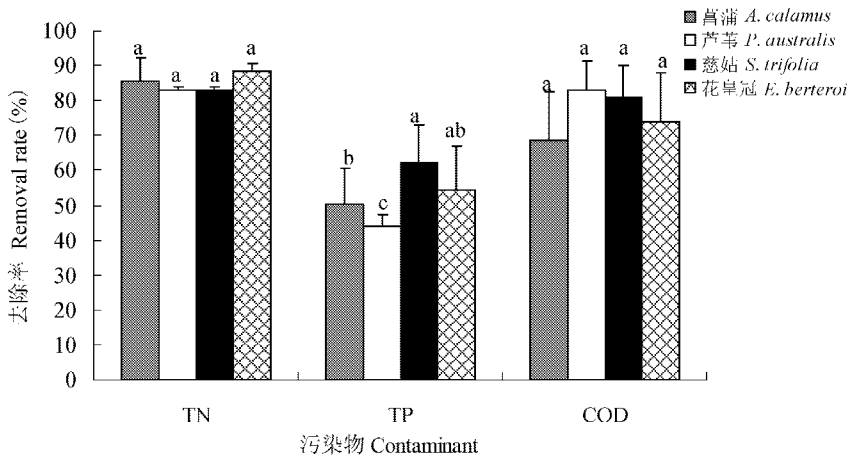


图 3 4 种植物污染物去除率

Fig. 3 Contaminant removal rate of four species

2.4 污水净化效果和各生理生态指标的相关性

根生物量、地上部分生物量、总生物量与根长呈极显著正相关($P < 0.01$),根长与根寿命呈负相关;ROL 与地上生物量显著相关($P < 0.05$),但与根茎比负相关;根长、根孔隙度、光合速率都与 ROL 显著正相关($P < 0.05$);光合速率与根长、根孔隙度显著正相关($P < 0.05$),与根寿命极显著负相关($P <$

0.01)(表 2)。

TN 的去除率与各部分生物量显著正相关($P < 0.01$),却与根茎比显著负相关($P < 0.05$);TP 的去除率与根长极显著正相关($P < 0.01$),与光合速率显著正相关($P < 0.05$);而 COD 的去除与孔隙度和 ROL 都显著正相关($P < 0.05$)(表 2)。

表 2 污染物去除率与生理生态指标间的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between contaminant removal rate and physiological parameters

	总磷 TP	化学需 氧量 COD	总生 物量 Total biomass	根生 物量 Root biomass	地上 生物量 Shoot biomass	根茎比 Root / Shoot	根孔隙 度 Root porosity	根长 Root length	根寿命 Root lifespan	根泌氧 ROL	光合 速率 Photosyn- thetic rate
总氮 TN	0.167	-0.099	0.648**	0.590**	0.648**	-0.450*	-0.340	0.034	-0.085	0.163	-0.172
总磷 TP		0.053	0.099	0.100	0.107	-0.114	0.374	0.594**	-0.271	0.363	0.440*
化学需氧量 COD			-0.076	-0.202	-0.055	-0.244	0.380*	0.013	0.351	0.384*	0.051
总生物量 Total biomass				0.945**	0.995**	-0.409*	-0.283	0.552**	-0.092	0.360	-0.155
根生物量 Root biomass					0.910**	-0.122	-0.322	0.517**	-0.281	0.256	-0.067
地上生物量 Shoot biomass						-0.493*	-0.256	0.566**	-0.048	0.381*	-0.165
根茎比 Root /Shoot							-0.110	-0.352	-0.350	-0.312	0.201
根孔隙度 Root porosity								0.408*	0.272	0.410*	0.442*
根长 Root length									-0.349	0.594**	0.514*
根寿命 Root lifespan										0.103	-0.577**
根泌氧 ROL											0.507*

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$; $n = 20$

3 讨论

大量研究表明,植物的吸收、吸附和富集作用与植株的生长状况和根系发达程度密切相关^[11,19]。根系发达、根系较长的植物能够大大扩展人工湿地净化污水的空间,有利于微生物特别是好氧细菌向湿地深部分布^[20],可以分泌较多的根分泌物,为微生物的生存创造良好的条件,促进根际的生物降解,从而提高其净化污水的能力^[21-22],Anderson 等的研究表明,植物根际的分泌物可以促进微生物转化,加速污染物的生物降解^[23]。本研究也表明 TN 的去除与根生物量和地上生物量显著正相关($P < 0.01$)。因此在选择湿地植物时,要充分考虑其根系的生长情况。在本研究的 12 周内,花皇冠和慈姑的地上生物量、根生物量大于菖蒲和芦苇。

从根的结构看,孔隙度较高的植物容易形成较深的根系和具有较强的耐浸水能力^[24]。本研究中,4 种植物都有大量细小不定根,花皇冠的根系生物量、地上生物量远大于慈姑、菖蒲、芦苇,而且前二者的根孔隙度和根长也远大于后二者。相关性分析表明根孔隙度和根长之间呈显著正相关,但根长与根寿命呈负相关。可见,慈姑和花皇冠可以更好地适应长期淹水的环境。

根系 ROL 被认为是湿地植物的重要特性,ROL 能改善根周围湿地缺氧状态,在根周围形成富氧至缺氧的逐渐变化的环境,促进微生物的硝化和

反硝化作用,从而促进 N 的去除。光合作用被看作是湿地植物的一项很重要的生理生态指标,因为光合作用是湿地植物生长繁殖和污水净化的重要能量来源。光合作用还可能会影响植物根部泌氧,间接影响湿地中 NH_4^+ 的硝化。有研究指出芦苇的产氧输氧能力最强,为湿地首选植物^[14,25]。本研究表明,植物的 ROL 与光合速率、根孔隙度显著正相关,这和光合作用影响根部泌氧、孔隙度影响气体传送的结论一致^[26-27],ROL 还与地上部分生物量显著正相关,这也与 Sorrell 等结论一致^[28]。本研究慈姑和花皇冠的 ROL 显著大于菖蒲和芦苇,慈姑的光合速率显著大于其它种。

黄娟、雒维国等的研究表明,净光合速率影响湿地脱氮效果,植物净光合速率与湿地 COD、TN 去除率显著正相关^[29-30]。本研究表明 TP 的去除与光合速率显著正相关,而有机物(COD)的去除与 ROL 显著正相关,相关性分析表明 TN 的去除与根生物量和地上部分生物量都极显著正相关,说明氮的去除主要反映植物的吸收作用。同时 TN 的去除与根茎比呈显著负相关,而且 ROL 也与根茎比负相关,这与 Peter 等的结果相似^[31],这可能是因为低根茎比使根的呼吸耗氧少而气体传输能力强。这样看来,选择植物时不但要考虑该种的生物量大小,还要尽可能选择根茎比较低的植物。虽然植物的生物量、根的孔隙度、ROL 和光合作用会受到外

界因素的影响,但它们仍可以作为评价湿地植物的重要指标。虽然花皇冠和慈姑的地上生物量、根生物量、光合速率、ROL 显著大于菖蒲和芦苇,但仅 TP 的去除效果显著大于菖蒲和芦苇, TN 的去除与光合速率、ROL 没有显著相关性,这可能与水培系统没有提供大量微生物的基质有关。有研究认为氮的去除主要依靠基质的吸附、沉淀作用及植物吸收和微生物的硝化、反硝化作用,而很大部分取决于微生物的硝化和反硝化作用^[32-34]。慈姑和花皇冠在有基质的人工湿地中的净化效果还有待进一步研究。

陈文音等报道水培系统中,多种植物的最大根长约为 24 cm^[35],但在人工湿地中,植物根系往往扩展不力,不能形成庞大的根系,无法抵达底部,人工湿地得不到充分的利用。Edwards 的研究表明,经过两个生长季节之后,人工湿地中藨草(*Scirpus triquetus*)的根系主要集中在 0.12~0.15 m 以上的表层,只占据了 5% 左右的基质^[36]。香蒲和灯心草的根系主要分布在 25 cm 的区域^[37],而两栖榕(*Ficus sp.*)的主根在湿地中只能伸入地下 20 cm 左右^[38],因而认为湿地中根的分布主要在 25 cm 深度内。本研究中,花皇冠和慈姑经 12 周培养,最大根长达 36 cm 和 34 cm,由于实验装置的限制和水培系统的局限性,根系长度对净化效果的影响不能完全体现出来,而在有基质的湿地中,它们的根能否达到 30 cm 以上的深度,根系所达的深度对净化效果的影响等都还有待进一步研究。

芦苇是国内外应用最早、最多的湿地植物,并公认其有较好的污水净化效果。菖蒲也是应用较多、去污效果较好的植物^[4-6,10-11]。从本研究结果看,同为泽泻科的花皇冠和慈姑拥有庞大生物量和发达的根系,根孔隙度、ROL 和光合作用等生理指标较高,在无基质时污水净化效果接近甚至优于菖蒲和芦苇;在湿地植物调查时,广州炎热的夏季花皇冠和慈姑在富营养化水体中也长势良好,植株剪度高。我们在广州市白云区马洞村富营养化池塘生态修复工程中运用花皇冠作为去污植物之一,效果良好。花皇冠和慈姑可考虑作为重点研究的人工湿地的优良种,尤其是花皇冠,作为观赏植物,在去污的同时还有很好的美化景观的作用。

参考文献

[1] Xia H P (夏汉平). Mechanisms and efficiencies on wastewater treatment with constructed wetland [J]. Chin J Ecol(生态学杂志),

2002, 21(4): 51-59.(in Chinese)

- [2] 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)
- [3] Kantawanichkul S, Pilaila S, Tanapiyanich W, et al. Wastewater treatment by tropical plants in vertical-flow constructed wetlands [J]. Water Sci Techn, 1999, 40(3): 173-178.
- [4] Haberl R, Perfler R, Mayer H. Constructed wetlands in Europe [J]. Water Sci Techn, 1995, 32(3): 306-315.
- [5] Kadlec R H, Knight R L. Treatment Wetlands [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1996: 179-180.
- [6] Bankston J L. Degradation of trichloroethylene in wetland microcosms containing broad-leaved cattail and eastern cottonwood [J]. Water Res, 2002, 36: 539-1546.
- [7] Vymazal J. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic 10 years experience [J]. Ecol Eng, 1998, (18): 633-646.
- [8] Zhang J Y (张甲耀), Cui K H (崔克辉). Growth characteristics of reed in the subsurface flow constructed wetlands wastewater treatment system and its purification capability [J]. Techn Water Treat(水处理技术), 1998, 24(6): 363-367.(in Chinese)
- [9] Yang C S (阳承胜), Lan C Y (蓝崇钰), Shu W S (束文圣). Purification of Pb/Zn mine wastewater with *Typha latifolia* man-made wetland [J]. J Shenzhen Univ(深圳大学学报), 2000, 17(2): 51-57.(in Chinese)
- [10] Wu Z B (吴振斌), Chen H R (陈辉蓉), He F (贺锋), et al. Primary studies on the purification efficiency of phosphorus by means of constructed wetland system [J]. Acta Hydrobiol Sin(水生生物学报), 2001, 25(1): 28-35.(in Chinese)
- [11] Cheng S P (成水平), Kuang Q J (况琪军), Xia Y Z (夏宜峙). Studies on artificial wetland with cattail (*Typha angustifolia*) and rush (*Juncus effusus*): I. The performance of purifying wastewater [J]. J Lake Sci(湖泊科学), 1997, 9(4): 351-358.(in Chinese)
- [12] Gao J X (高吉喜), Ye C (叶春), Du J (杜娟), et al. Study of removing ability of macrophytes to N, P in run-off [J]. Chin Environ Sci(中国环境科学), 1997, 17(3): 247-251.(in Chinese)
- [13] Reddy K R, Patrick Jr W H, Lindau C W. Nitrification-denitrification at the plant root-sediment interface in wetlands [J]. Limnol Oceanogr, 1989, 34: 1004-1013.
- [14] Huang J (黄娟), Wang S H (王世和), Luo W G (雒维国), et al. Influence of plant photosynthetic characteristics on DO distribution, purification effect in constructed wetlands [J]. Acta Sci Circumst(环境科学学报), 2006, 26 (11): 1828-1832. (in Chinese)
- [15] Wießner A, Kappelmeyer U, Kuschik P, et al. Influence of the redox condition dynamics on the removal efficiency of a laboratory-scale constructed wetland [J]. Water Res, 2005, 39: 248-256.
- [16] Eric J W, Visser L, Gerard M B. Measurement of porosity in very small samples of plant tissue [J]. Plant Soil, 2003, 253: 81-90.

- [17] Armstrong W. Aeration in higher plants [C]// Woolhouse H W W. *Advances in Botanical Research*. London: Academic Press, 1979: 226–332.
- [18] The Environment Bureau of the State(国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会). *Methods for Water Analysis* [M]. 4th ed. Beijing: Environment Science Press, 2002: 210–285.(in Chinese)
- [19] Cheng S P(成水平). *Advances in biological fundamental studies on artificial wetland wastewater treatment system* [J]. *J Lake Sci(湖泊科学)*, 1996, 8(3): 268–272.(in Chinese)
- [20] Cheng S P(成水平), Wu Z B(吴振斌), Xia Y C(夏宜峥). Review on gas exchange and transportation in macrophytes [J]. *Acta Hydrobiol Sin(水生生物学报)*, 2003, 27(4): 413–417.(in Chinese)
- [21] Wu J Q(吴建强), Ruan X H(阮晓红), Wang X(王雪). Selection and function of aquatic plants in constructed wetlands [J]. *Water Resour Prot(水资源保护)*, 2005, 21(1): 1–6.(in Chinese)
- [22] Zhang H(张鸿), Chen G R(陈光荣), Wu Z B(吴振斌), et al. The study on the relationship between N, P removing rates and the distribution of bacteria in two artificial wetlands [J]. *J C China Norm Univ(华中师范大学学报)*, 1999, 33(4): 575–578.(in Chinese)
- [23] Anderson T A, Cuthie E A, Walton B T. Bioremediation in the rhizosphere [J]. *Environ Sci Techn*, 1994, 27: 2630–2636.
- [24] Justin S H F W, Armstrong W. The anatomical characteristics of roots and plant response to soil flooding [J]. *New Phytol*, 1987, 106: 465–495.
- [25] Sorrell B K, Brix H. Effects of water vapour pressure deficit and stomatal conductance on photosynthesis, internal pressurization and convective flow in three emergent wetland plants [J]. *Plant Soil*, 2003, 253: 71–79.
- [26] Colmer T D. Aerenchyma and an inducible barrier to radial oxygen loss facilitate root aeration in upland, paddy and deepwater rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Ann Bot*, 2003, 91: 301–309.
- [27] Pezeshki S R. Wetland plant responses to soil flooding [J]. *Environ Exp Bot*, 2001, 46: 299–312.
- [28] Sorrell B K. Effect of external oxygen demand on radial oxygen loss by juncus roots in titanium citrate solutions [J]. *Plant Cell Environ*, 1999, 22: 1587–1593.
- [29] Huang J(黄娟), Wang S H(王世和), Luo W G(雒维国), et al. The Influence of photosynthesis on wastewater treatment of several plants in constructed wetlands [J]. *Safety Environ Eng(安全与环境工程)*, 2006, 13(2): 55–57.(in Chinese)
- [30] Luo W G(雒维国), Wang S H(王世和), Huang J(黄娟), et al. Influence of plant photosynthesis and transpiration character on nitrogen removal effect in wetland [J]. *Chin Environ Sci(中国环境科学)*, 2006, 26(1): 30–33.(in Chinese)
- [31] Peter M B, Marleen K, Chris B, et al. Radial oxygen loss, a plastic property of dune slack plant species [J]. *Plant Soil*, 2005, 271: 351–364.
- [32] Zhu T, Sikra F J. Ammonium and nitrate removal in vegetated and unvegetated gravel bed microcosm wetlands [J]. *Water Sci Techn*, 1995, 32(3): 219–228.
- [33] Reddy K R, D'angelo E M. Soil process regulating water quality in wetlands [M]// Mutsch W J. *Global Wetlands: Old World and New*. Amsterdam: Elsevier, 1994: 309–324.
- [34] Cooker J G. Nutrient transformations in a natural wetland receiving sewage effluent and the implications for waste treatment [J]. *Water Sci Techn*, 1994, 29: 209–217.
- [35] Chen W Y(陈文音), Chen Z H(陈章和), He Q F(何其凡), et al. Root growth of wetland plants with different root types [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2007, 27(2): 450–458.(in Chinese)
- [36] Edwards G S. Root distribution of soft-stem bulrush (*Scirpus validus*) in a constructed wetland [C]// TVA Cooperation Forest Study Program, TVA. *Forestry Bulid*, Norris, TN 37828, USA. 29054194G, 1992: 239–243.
- [37] Cheng S P(成水平), Xia Y Z(夏宜峥). Artificial wetland with cattail (*Typha angustifolia*), rush (*Juncus effusus*) II. Purifying space [J]. *J Lake Sci(湖泊科学)*, 1998, 10(1): 62–66.(in Chinese)
- [38] Jing Y X(靖元孝), Yang D J(杨丹菁), Chen Z H(陈章和), et al. Growth characteristics and sewage purifying effect of amphibious banyan in constructed wetland [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2003, 23(3): 614–619.(in Chinese)