

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.04.019

湿生植物根系泌氧能力与其结构相关性研究

张 权^{1,2}, 杨柳燕^{1,2}, 高 燕^{1,2}, 甘 琳^{1,2}, 宋晓骏^{1,2}

(1. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210023; 2. 南京大学环境学院, 江苏 南京 210023)

摘要:为了更好地了解湿生植物对湿地基质供氧能力,对西伯利亚鸢尾、风车草、芦竹和腺柳根系泌氧能力进行研究,并计算湿地植物泌氧能力,为人工湿地不同植物选择提供参考数据。结果表明:在26℃、3000 lux光照的水培条件下,芦竹根系干重泌氧率最高,达到0.201 mmol/(g·h)。湿生植物植株干重泌氧速率与根重-根长比及植株-根系干重比呈显著正相关($p < 0.01$),也与根系孔隙度呈显著正相关。除木本植物腺柳外,西伯利亚鸢尾、风车草和芦竹单植株干重的泌氧率与通气组织面积占比呈显著正相关($p < 0.01$),而与根系表皮层平均厚度呈显著负相关($p < 0.01$),因此,通气组织发育程度和根系表皮层厚度也是影响湿生植物根系泌氧能力的重要因素。基于试验条件,湿地芦竹泌氧率为38.4 g/(m²·d),湿地腺柳泌氧率为98.3 g/(m²·d),都高于西伯利亚鸢尾和风车草泌氧率。因此,腺柳和芦竹有利于提高湿地基质中氧含量,其根际易于形成好氧环境。

关键词:湿生植物;根系泌氧;根系结构;西伯利亚鸢尾;风车草;芦竹;腺柳

中图分类号:Q945.79 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)04-0117-05

Oxygen release abilities of wetland plants' roots and relation with root structures

ZHANG Quan^{1,2}, YANG Liuyan^{1,2}, GAO Yan^{1,2}, GAN Lin^{1,2}, SONG Xiaojun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Nanjing 210023, China;

2. School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to obtain a better understanding of wetland plants' ability of to provide oxygen to wetland substrate, the oxygen release abilities of roots of wetland plants including *Iris sibirica* L., *Cyperus alternifolius* L., *Arundo donax* L., and *Salix chaenomeloides* Kimura were examined. The wetland plants' abilities to release oxygen were calculated, providing references for properly selecting plants for artificial wetlands. The results show that *Arundo donax* L. had the highest root oxygen release rate per root dry weight, which was 0.201 mmol/(g·h) at 26 °C and 3000 lux. The oxygen release rate per root dry weight had a significantly positive correlation with the ratio of the root weight to the root length and the ratio of the plant dry weight to the root dry weight ($p < 0.01$), and it also had a significantly positive correlation with the root porosity. The root oxygen release rates per plant dry weight of *Iris sibirica* L., *Cyperus alternifolius* L., and *Arundo donax* L. had significantly positive correlations with proportional area of aerenchyma ($p < 0.01$), and significantly negative correlations with the average thickness of the epidermis ($p < 0.01$), indicating that the development of aerenchyma and the thickness of the epidermis are also important factors influencing the root oxygen release ability of wetland plants. Under the experimental conditions, the oxygen release rates of *Arundo donax* L. and *Salix chaenomeloides* Kimura were 38.4 g/(m²·d) and 98.3 g/(m²·d), respectively, both of them being higher than those of *Iris sibirica* L. and *Cyperus alternifolius* L. Thus, planting *Salix chaenomeloides* Kimura and *Arundo donax* L. helps improve the oxygen content in the wetland substrate, forming the aerobic environment in the rhizosphere.

Key words: wetland plants; root oxygen release; root structure; *Iris sibirica* L.; *Cyperus alternifolius* L.; *Arundo donax* L.; *Salix chaenomeloides* Kimura

基金项目:太湖水污染治理专项(TH2014205);国家水体污染控制与治理重大专项(2012ZX07101006)

作者简介:张权(1991—),男,硕士研究生,研究方向为污染水体的生态治理。E-mail:766118010@qq.com

通信作者:杨柳燕,教授。E-mail:yangly@nju.edu.cn

湿地具有净化水质、提高水环境质量和保护水资源的功能,利用人工湿地能有效地去除污水处理厂的尾水中氮、磷,实现对低污染水的深度净化。湿生植物作为湿地的重要组成部分,对湿地功能的发挥着重要作用^[1]。在湿地中,湿生植物的根系不仅能吸收水体中氮、磷等营养元素或通过分泌多种小分子有机物为根部微生物生长提供碳源^[2],还能通过根系通气组织将光合作用产生的氧气输送到根际基质中。植物根系泌氧能使根系周围基质环境处于好氧状态,改变根际区域的氧化还原电位,有利于根际好氧菌群的生长,促进根际有害物质如 PAHs、除草剂和杀虫剂等污染物的生物降解^[3-4]。水培植物根系溶解氧浓度变化也明显影响其对水溶液中砷等金属吸收^[5]。因此,湿生植物根系泌氧对基质环境有很大的影响,研究不同湿生植物根系泌氧能力具有十分重要意义。

西伯利亚鸢尾(*Iris sibirica* L.)、风车草(*Cyperus alternifolius* L.)、芦竹(*Arundo donax* L.)和腺柳(*Salix chaenomeloides* Kimura)是湿地中常见的湿生植物。这4种植物的植株和根系形态存在显著差异。西伯利亚鸢尾为鸢尾科多年生草本,根状茎粗壮,侧根呈绳索状,有皱缩的横纹^[6]。风车草属莎草科,多年生草本,丛生,根状茎短且须根木质化^[7]。芦竹为禾本科多年生植物,具发达根状茎,茎节具侧根。腺柳属杨柳科柳属,为须根型的小乔木。植物根系形态如根系直径、根长、根系孔隙度及生物量的差异对植物的生长产生明显影响^[8-9]。笔者通过对4种植物根系泌氧能力及与根系结构相关性的研究,了解不同湿生植物泌氧能力差异及其影响因素,探索不同湿生植物对湿地基质氧含量影响,为人工湿地构建中植物的选择提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验所用的湿生植物西伯利亚鸢尾、风车草、芦竹和腺柳均采自南京大学仙林校区天籟河,用纯水洗净植株根系后,将植物放入含有0.1倍霍格兰德营养液的烧瓶中,在恒温光照植物培养箱内水培预培养2个月。培养箱设置温度为26℃,光照强度为3000 lux,光照与黑暗时间比为16 h:8 h,预培养期间每4 d更换一次充氧营养液。

1.2 试验方法

1.2.1 试验条件

为研究温度对植物根系泌氧能力的影响,参考湿地植物生长期的环境温度,设定试验温度为17℃、26℃和32℃,培养箱光照强度为3000 lux。

1.2.2 根系结构测定

取4种湿生植物根系较发达的植株各2株,将根系用超纯水洗净,选取其中粗壮根系,在距根尖50 mm处切长5 mm左右的根段,FAA液固定1 d,随后用乙醇梯度脱水并干燥^[10],固定喷金后用SEM(S-3400N II,日立公司,日本)观察根系截面结构。

1.2.3 根系孔隙度测定

采用 Kludze 的方法测定根系孔隙度^[11]。吸去植物根系表面水分后,取0.3 g根系,将25 mL比重瓶装满水称重,记为 P ,将0.3 g根系置入比重瓶中,称重记为 P_r 。然后将装有根系的比重瓶抽真空2 h,取出根系用研钵磨碎后放入比重瓶,装满水后称重记为 P_{gr} 。则根系孔隙度可以表示为

$$P_{or} = \frac{P_{gr} - P_r}{r + P - P_r} \times 100\%$$

式中: P_{or} 为根孔隙度,%; r 为根重,g。

1.2.4 根系泌氧量的测定

采用柠檬酸钛比色法对植物根系泌氧量进行测定^[12]。在500 mL烧瓶中加入195 mL 0.1倍的霍格兰德营养液,通入高纯氮15 min除去营养液中氧气。每种植物取生长情况相近的预培养2个月的植株3株,将其所有根系浸没于培养液中进行光照培养,同时设一组无植物的空白对照。在营养液表面缓慢倒入约2 cm厚的液状石蜡,用移液枪吸取5 mL柠檬酸钛溶液,枪头伸入石蜡层下加入并轻微晃匀,上述操作均在氮气吹扫条件下进行。植物组及对照组在恒温培养箱中按设定温度培养3 h后,取营养液样品3 mL在527 nm处进行比色分析,然后计算根系的泌氧量。

1.2.5 根长与植株及根系干重

试验结束后将试验植株洗净,每株植物随机选取10条根系,自根系基部或茎节处测量根系长度,用平均长度表示,长度单位为mm。切下植株根系并将主根和侧根分开,然后分别放入烘箱于70℃烘至恒重。分别称量植株干重、根系干重或侧根干重,质量单位为g。

1.3 数据分析及计算

1.3.1 测量及数据分析

采用 AutoCAD 2008 对植物根系扫描电镜图的植物根系剖面表皮层厚度和通气组织面积进行测量分析,表皮层厚度用平均值表示。由于植物的光合作用强弱会影响植物氧气由地上部分向根系的输送量,植株干重的泌氧能力比根系干重泌氧能力更能反映植物类型对泌氧能力的影响,因此,利用 SPSS 19.0 对4种植物植株干重泌氧速率与植株-根系干量比、根重-根长比和根系孔隙度进行 Kendall 和

Spearman 相关关系分析。

1.3.2 湿地湿生植物泌氧率计算

根据植物根系泌氧速率 (root oxygen release rate, R_{or})、植株质量 (m) 等在湿地环境中影响湿生植物泌氧量的主要因素, 计算湿地湿生植物泌氧率 (oxygen release per unit area, O_{ra}):

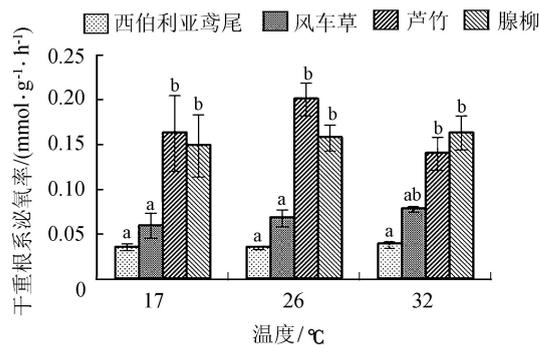
$$O_{ra} = \frac{R_{or} m t p M \alpha}{1000}$$

式中: t 为时间转换系数, d^{-1} ; ρ 为种植密度, 株/ m^2 ; M 为氧气分子量, 32 g/mol ; α 为湿地半年生植株质量与试验植株质量比, 半年生植株采自稳定运行的人工湿地, 晾干后称重。

2 结果和讨论

2.1 湿生植物根系泌氧能力

由于植株生长情况与根系发达程度存在差异性, 植物根系泌氧率 (R_{or}) 分别采用根系干重泌氧率 R_{orr} 和植株干重泌氧率 R_{orp} 2 个指标来衡量。在 17°C 、 26°C 和 32°C 条件下, 4 种湿生植物根系泌氧率如图 1 所示。由图 1 可以看出, 芦竹的根系干重泌氧率最高, 在 26°C 达到最大值 $0.201 \text{ mmol}/(\text{g} \cdot \text{h})$, 其次是腺柳, 在 32°C 可以达到 $0.163 \text{ mmol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。西伯利亚鸢尾和风车草根干重最大泌氧量分别是 $0.079 \text{ mmol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 和 $0.039 \text{ mmol}/(\text{g} \cdot \text{h})$, 分别为芦竹泌氧率的 $2/5$ 和 $1/5$ 。若以植株干重泌氧率进行比较, 在 26°C 、 3000 lux 培养条件下, 西伯利亚鸢尾、风车草、芦竹和腺柳 4 种植物的植株干重泌氧率分别达到 0.117 、 0.145 、 0.232 和 $0.242 \text{ mmol}/(\text{g} \cdot \text{h})$, 这 4 种湿生植物间泌氧率差异相对变小, 腺柳具有较高的植株干重泌氧率。除芦竹外, 在不同温度下相同湿生植物植株干重泌氧率无显著性差异, 因此, 在 $17 \sim 32^\circ\text{C}$ 范围内温度变化对湿生植物泌氧能力影响较小。

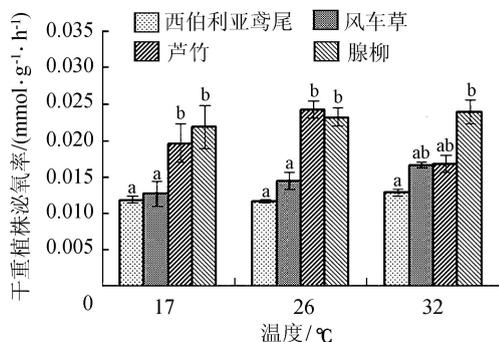


注: 图中字母表示不同植物间的差异性

图 1 不同温度下湿生植物干重根系泌氧率

2.2 湿生植物的根系外部结构特征与泌氧率关系

4 种湿生植物植株干重、根系干重、平均根长、植株-根系干重比和根重-根长比如表 1 所示。西



注: 图中字母表示不同植物间的差异性

图 2 不同温度下湿生植物干重植株泌氧率

伯利亚鸢尾和芦竹属于根茎型植物, 因而采用侧根的干重作为植物根系干重指标。

表 1 湿生植物植株干重、根系干重、平均根长、植株-根系干重比和根重-根长比

植物名称	根系总干重/g	植株总干重/g	平均根长/cm	植株-根系干重比	根重-根长比
西伯利亚鸢尾	2.81±0.02	8.57±1.02	8.65	3.04	0.29
风车草	3.1±0.01	14.53±0.17	10.27	4.68	0.30
芦竹	2.78±0.01	22.42±0.23	5.02	8.30	0.54
腺柳	3.03±0.06	20.60±0.40	3.54	6.80	0.86

西伯利亚鸢尾和风车草属于低矮丛生型植物, 植株-根系干重比分别为 3.04 和 4.68; 而芦竹和腺柳植株-根系干重比则分别为 8.30 和 6.80, 植株生长末期更高大, 芦竹植株株高可达 2 m, 腺柳株高可达 1.5~2.5 m。因此, 植株越高大, 其植株-根系干重比越大。4 种湿生植物根系形态差异较大。根据 Chen 等^[8] 的分类, 挺水植物可以分为须根型植物和根状茎植物。芦竹、鸢尾为根状茎植物, 其地下生物量多数为根状茎, 占比可达 80%^[13-14]。根状茎类植物根系与土壤的接触面积有限, 但也使得植物对厌氧环境有了更强的适应能力^[15]。因此, 它们为了提高与土壤接触面积, 形成发达的侧根, 如芦竹一级侧根上还会生长大量能够提高根表面积的第二级侧根。风车草和腺柳根系属于须根型, 这种类型植物的根系往往具有较大的根表面积, 有利于其对无机营养盐的吸收^[16], 为微生物提供附着面积也更大^[17]。根系发达的须根型植物具有更大的有效泌氧根系面积, 一些植物发达的根系也使得须根型植物根系与土壤接触面积更大, 能更有效地提高根际湿地的氧含量^[18]。同时, 腺柳浸没在水中的枝条会生长大量的不定根, 有利于泌氧。

4 种湿生植物的泌氧能力与植株-根系干量比和根重-根长比的相关性分析结果见表 2。根据相关性分析结果, 湿生植物植株干重泌氧速率与根重-根长比呈显著正相关 ($p < 0.01$)。根重-根长比越大, 其根系中侧根的数量往往越多, 有效泌氧根系面

积就越大,根系外部特征能够有效增加植物的根系泌氧率。植株-根系干重比表征植物光合作用的强弱,与 R_{op} 值也呈现较强的正相关。本研究表明在人工湿地植物选择中,种植须根型植物腺柳以及根系具第二级侧根的湿生植物芦竹更加有利于其根际形成好氧环境。

表2 湿生植物泌氧能力与植株-根系干质量比、根重-根长比和根系孔隙度的相关性

方法	参数	植物-根系干重比	根重-根长比	根系孔隙度
Kendall	r	0.667	1.000*	1.000*
	p	0.174	0.000	0.000
Spearman	r	0.800	1.000**	1.000**
	p	0.200	0.000	0.000

注: * 为双尾检验在 $p < 0.05$ 水平上显著, ** 为双尾检验在 $p < 0.01$ 水平上显著。

2.3 湿生植物的根系内部结构特征与泌氧率关系

利用 SEM 对 4 种湿生植物的根系截面进行扫描(图 3)。对根系中部维管束的面积和根系表皮层的平均厚度进行测量,并计算维管束中通气组织面积占比(表 3)。由图 2 和表 3 可知,4 种湿生植物的根系结构存在显著差异,西伯利亚鸢尾的根表皮层壁厚最大,平均为 $90 \mu\text{m}$,其表皮层细胞排列紧密;而风车草根系表皮层细胞体积较大,排列疏松;芦竹的表皮层细胞排列较为松散,且在根系表面有很多直径 $2 \sim 4 \mu\text{m}$ 的第二级侧根,这有别于其他 3 种植物根系。根系表皮细胞层厚度越小、表皮细胞体积越大意味着径向泌氧屏障越小,芦竹根系的结构越有利于氧气由根系内部向外扩散。因此,除腺柳外,湿生植物西伯利亚鸢尾、风车草和芦竹植株干重泌氧速率与根系表皮层平均厚度呈显著负相关

($p < 0.01$)。

表3 湿生植物根系孔隙度、通气组织面积占比及根系表皮层平均厚度

植物名称	根系表皮层平均厚度/ μm	通气组织面积占比/%	根系孔隙度/%
西伯利亚鸢尾	90	10.38	34.9±12
风车草	60	10.65	41.5±5
芦竹	52	20.54	50.9±9
腺柳	84	15.97	52.6±4

植物根系内的通气组织发育程度与其面积占比呈正相关^[19]。根系通气组织面积占比越高,植物通过根系向下输送氧气的的能力越强。在 4 种湿生植物根系中,芦竹根系中通气组织的面积比例最大,达到 20.54%,而西伯利亚鸢尾和风车草只有其一半。植物的根系孔隙度主要与植物根系结构以及生长环境有关。西伯利亚鸢尾、风车草、芦竹和腺柳的植株干重的 R_{op} 与通气组织面积占比呈显著正相关($p < 0.01$),腺柳根系结构与红树属根系类似,在根系成熟区通气组织面积占比变大,有利于根系泌氧^[20]。

4 种湿生植物根系孔隙度在 34.9% ~ 52.6% 之间,其中风车草和芦竹在根系成熟区皮质层会形成空腔,增大孔隙度。McDonald 测得的芦竹根系孔隙度为 32.6%,而本研究利用相同方法测量的芦竹根系孔隙度为 50.9%,产生差异的主要原因在于两个试验中植物的水培时间不同。常淹水、基质紧实的湿地中植物泌氧能力比未淹水地区植物要高^[21-22]。相较于土培,水培的植株根系有更发达的通气组织,以适应水体缺氧环境,水培时间越久的植物,根系内通气组织发育越完善^[19]。4 种湿生植物的泌氧能力与根系孔隙度的相关性见表 2。根据 Spearman 相关性分析结果,湿生植物植株干重泌氧速率与根系孔隙度呈显著正相关($p < 0.01$)。其中,根系孔隙度反映了植物根系通气组织的发达程度,与根系向下输氧能力密切相关,能够有效影响植物的根系泌氧率。腺柳虽然根系表皮层厚度达到 $84 \mu\text{m}$,但其根系泌氧能力却高于其他植物,可能孔隙率高是一个重要原因。因此,通气组织发育程度、根系表皮层厚度和孔隙率是影响湿地植物根系泌氧能力的重要因素。

2.4 湿地湿生植物泌氧率

根据湿生植物泌氧率和湿地植物的生物量,计算得到湿地西伯利亚鸢尾、风车草、芦竹的泌氧率分别为 5.6 、 9.1 和 $38.4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,湿地腺柳泌氧率高达 $98.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。种植 4 种植物的湿地中,种植腺柳和芦竹湿地产氧率相对较高,尤其是种植腺柳湿地,其存在有利于提高人工湿地基质中溶解氧含量。在不同的试验条件和试验方法下,得到的植物泌氧率差异较大,如成水平等^[23]研究表明湿生植

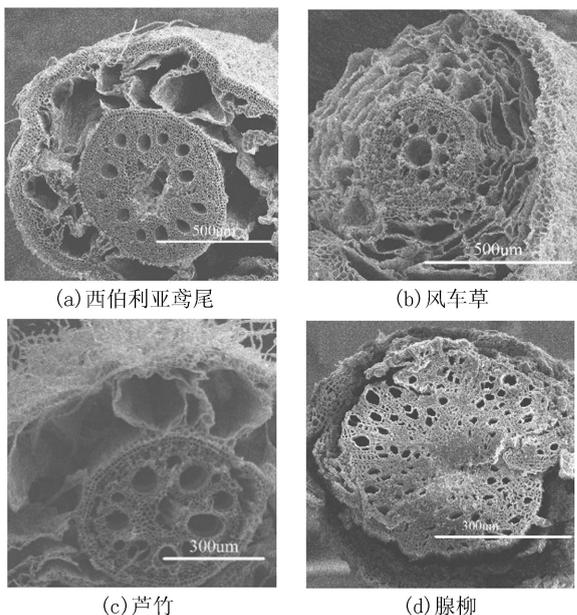


图3 湿生植物根系剖面扫描电镜图

物泌氧率约为 $5 \sim 45 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 而美国 EPA 给出的同类数据为 $0 \sim 3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ [24]。由于湿地实际运行中自然条件复杂多样, 因此, 植物根系泌氧率也会有所差异 [25]。本研究表明种植腺柳和芦竹能向湿地基质中分泌较多的氧气, 有利于基质物质的好氧转化或降解。

3 结论

a. 在 26°C 、 $3\ 000 \text{ lux}$ 培养条件下, 西伯利亚鸢尾、风车草、芦竹和腺柳 4 种植物的植株干重泌氧率分别达到 0.117 、 0.145 、 0.232 和 $0.242 \text{ mmol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。芦竹和腺柳具有较高的根系泌氧率。

b. 在不同植物根系类型中, 须根型植物腺柳以及具第二级侧根的植物芦竹泌氧量更高。影响根系泌氧量的因素除了根系形态, 还有植株-根系干重比、根重-根长比、根系表皮层厚度和根系孔隙度, 其中最主要影响因素为植物根系的孔隙度和根系的根重-根长比。

c. 芦竹根系泌氧率约为 $38.4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 腺柳根系泌氧率约为 $98.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 较西伯利亚鸢尾和风车草根系泌氧率高, 因此, 在人工湿地中腺柳和芦竹等根系发达的植物能更有效提高湿地基质氧含量, 有利于根际好氧微生物群落的形成和对污染物的好氧降解。

参考文献:

[1] 周艳丽, 余宗莲, 孙文杰. 水平潜流人工湿地脱氮除磷研究进展 [J]. 水资源保护, 2011, 27(2): 42-48. (ZHOU Yanli, SHE Zonglian, SUN Wenjie. Progress of research on removal of nitrogen and phosphorus in horizontal sub-surface flow constructed wetlands [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(2): 42-48. (in Chinese))

[2] 陆松柳, 张辰, 徐俊伟. 植物根系分泌物分析及对湿地微生物群落的影响研究 [J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 676-680. (LU Songliu, ZHANG Chen, XU Junwei. Root exudates of wetland plants and the influence on the microbial community in constructed wetlands [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(4): 676-680. (in Chinese))

[3] 吕晓磊. 有毒污染物在小清河人工湿地的时空分布特征及土壤微生物的环境响应 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

[4] SMITH K E, LUNA T O. Radial oxygen loss in wetland plants: potential impacts on remediation of contaminated sediments [J]. Journal of Environmental Engineering, 2013, 139(4): 496-501.

[5] MEI X Q, YE Z H, WONG M H. The relationship of root porosity and radial oxygen loss on arsenic tolerance and

uptake in rice grains and straw [J]. Environmental Pollution, 2009, 157(8): 2550-2557.

[6] 王冠群. 德国鸢尾耐寒性与根状茎生长发育化学调控研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

[7] 陈章和, 陈芳, 刘谓诚, 等. 测定潜流人工湿地根系生物量的新方法 [J]. 生态学报, 2007, 27(2): 668-673. (CHEN Zhanghe, CHEN Fang, LIU Xucheng, et al. A new method for root biomass measurement in subsurface flow gravel-bed constructed wetlands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 668-673. (in Chinese))

[8] CHEN Weiyin, CHEN Zhanghe, HE Qifan, et al. Root growth of wetland plants with different root types [J]. Acta ecologica sinica, 2007, 27(2): 450-457.

[9] CHEN Zhanghe, CHEN Fang, CHEN Xiuyan, et al. Researches on macrophyte roots in the constructed wetlands (a review) [J]. Current Topics in Plant Biology, 2004, 5: 131-142.

[10] PIRANI C, BUONAVOGLIA A, CIRULLI P P, et al. The effect of the NRT files instrumentation on the quality of the surface of the root canal wall [J]. Journal of Applied Biomaterials & Biomechanics, 2012, 10(2): 136-140.

[11] KLUDZE H K, DELAUNE R D, PATRICK W H. A colorimetric method for assaying dissolved oxygen loss from container-grown rice roots [J]. Agronomy Journal, 1994, 86(3): 483-487.

[12] RASKIN I. A method for measuring leaf volume, density, thickness, and internal gas volume [J]. Hort Science, 1983, 18(5): 698-699.

[13] TANNER C C. Growth and nutrient dynamics of soft-stem bulrush in constructed wetlands treating nutrient-rich wastewaters [J]. Wetlands Ecology and Management, 2001, 9(1): 49-73.

[14] CHENG X Y, CHEN W Y, GU B H, et al. Morphology, ecology, and contaminant removal efficiency of eight wetland plants with differing root systems [J]. Hydrobiologia, 2009, 623(1): 77-85.

[15] KYAMBADDE J, KANSIIME F, GUMAELIUS L, et al. A comparative study of *Cyperus papyrus* and *Miscanthidium violaceum*-based constructed wetlands for wastewater treatment in a tropical climate [J]. Water Research, 2004, 38(2): 475-485.

[16] LAI W L, WANG S Q, PENG C L, et al. Root features related to plant growth and nutrient removal of 35 wetland plants [J]. Water Research, 2011, 45(13): 3941-3950.

[17] 李丽. 11 种湿地植物在污染水体中的生长特性及对水质净化作用研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2011.

[18] OSEM Y, CHEN Y, LEVINSON D, et al. The effects of plant roots on microbial community structure in aerated wastewater-treatment reactors [J]. Ecological Engineering, 2007, 29(2): 133-142.

(下转第 141 页)

46. (LU Wenxi, LI Di, ZHANG Lei, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation based on AHP in water quality evaluation [J]. Water Saving and Irrigation, 2011 (3): 43-46. (in Chinese))
- [12] 冯斌. 模糊综合评价的熵权法在地下水水质评价中的应用 [J]. 中国水运, 2012, 12 (7): 186-187. (FENG Bin. Fuzzy comprehensive evaluation of entropy method in groundwater quality evaluation [J]. China Water Transport, 2012, 12 (7): 186-187. (in Chinese))
- [13] 乔雨, 梁秀娟, 王宇博, 等. 组合权重模糊数学法在水质评价中的应用 [J]. 人民黄河, 2015, 37 (5): 77-79. (QIAO Yu, LIANG Xiujuan, WANG Yubo, et al. Evaluation of groundwater quality using combined weight fuzzy mathematical method [J]. Yellow River, 2015, 37 (5): 77-79. (in Chinese))
- [14] 孙学颖, 唐德善, 张新娇. 改进物元分析模型在北之江流域水质评价中的应用 [J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12 (3): 55-58. (SUN Xueying, TANG Deshan, ZHANG Xinjiao. Application of improved matter-element model in water quality assessment of Beizhijiang Drainage Basin [J], South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12 (3): 55-58. (in Chinese))
- [15] 马飞, 蒋莉. 河流水质监测断面优化设置研究: 以南运河为例 [J]. 环境科学与管理, 2006, 31 (8): 171-172. (MA Fei, JIANG Li. Research of optimized setting of water quality monitoring sections in rivers: take South Canal as an example [J]. Environmental Science and Management, 2006, 31 (8): 171-172. (in Chinese))
- [16] 杨静. 改进的模糊综合评价法在水质评价中的应用 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014. (收稿日期: 2015-09-13 编辑: 王芳)
-
- (上接第 121 页)
- [19] MCDONALD M P, GALWEY N W, COLMER T D. Similarity and diversity in adventitious root anatomy as related to root aeration among a range of wetland and dryland grass species [J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25 (3): 441-451.
- [20] PI N, TAM N F Y, WU Y, et al. Root anatomy and spatial pattern of radial oxygen loss of eight true mangrove species [J]. Aquatic Botany, 2009, 90 (3): 222-230.
- [21] JACKSON M B, ARMSTRONG W. Formation of aerenchyma and the processes of plant ventilation in relation to soil flooding and submergence [J]. Plant Biology, 1999, 1 (3): 274-287.
- [22] PEZESHKI S R. Wetland plant responses to soil flooding [J]. Environmental and Experimental Botany, 2001, 46 (3): 299-312.
- [23] 成水平, 吴振斌, 夏宜琤. 水生植物的气体交换与输导代谢 [J]. 水生生物学报, 2003, 27 (4): 413-417. (CHENG Shuiping, WU Zhenbin, XIA Yizheng. Review on gas exchange and transportation in macrophytes [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2003, 27 (4): 413-417. (in Chinese))
- [24] U S Environmental Protection Agency. Constructed wetlands treatment of municipal waste waters [EB/OL]. [2015-06-08]. <https://www.epa.gov/wetlands/constructed-wetlands>.
- [25] 程康睿, 朱伟, 董婵, 等. 水力条件对芦苇湿地系统 DO 质量浓度的影响 [J]. 水资源保护, 2014, 30 (3): 76-80. (CHENG Kangrui, ZHU Wei, DONG Chan, et al. Effects of different hydraulic conditions on DO concentration in Phragmites australis wetland [J]. Water Resources Protection, 2014, 30 (3): 76-80. (in Chinese)) (收稿日期: 2015-10-15 编辑: 徐娟)

欢迎订阅《水资源保护》杂志

中国科学引文数据库来源期刊 中国科技核心期刊
RCCSE 中国核心学术期刊 中国高校特色科技期刊
ISSN 1004-6933 CN 32-1356/TV

《水资源保护》是由河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会联合主办的科技期刊。本刊针对我国水资源短缺、水环境污染、水生态恶化等突出问题, 探讨水资源管理、水环境治理、水生态修复等理论和技术, 主要栏目有水资源、水环境、水生态, 并根据需要开设“特约专家论坛”“水事观察”等栏目。

《水资源保护》是中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中国核心学术期刊、中国高校特色科技期刊, 已被美国化学文摘 (CA) 数据库、美国《剑桥科学文摘》(CSA) 数据库、波兰哥白尼索引 (IC) 数据库等收录和引用, 长期以来一直都是水利界和环保部门备受关注的重点期刊, 2012 年、2014 年连续被教育部科技司授予“中国高校特色科技期刊”称号。

《水资源保护》主要读者对象为全国从事与水资源保护工作有关的工程技术人员、科研人员、管理人员以及大专院校师生, 邮发代号: 28-298, 双月刊, 96 页, 20 元/期, 全年共计 120 元, 每逢单月 20 日出版。可向当地邮局订阅, 若无法从邮局订阅, 亦可在本刊网站下载征订单。

编辑部地址: 南京市西康路 1 号 邮政编码: 210098 电话/传真: (025) 83786642 E-mail: bh1985@vip.163.com; bh@hhu.edu.cn <http://www.hehaiqikan.cn/szybh/ch/index.asp>