

DOI: 10.5846/stxb201303120401

李华超, 陈宗晶, 陈章和. 六种湿地植物根际氧化还原电位的日变化. 生态学报, 2014, 34(20): 5766-5773.

Li H C, Chen Z J, Chen Z H. Daily variation of the rhizosphere redox potential of six wetland plants. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20): 5766-5773.

六种湿地植物根际氧化还原电位的日变化

李华超, 陈宗晶, 陈章和*

(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, 广州 510631)

摘要: 在野外条件下, 研究人工湿地植物根际氧化还原电位(ORP)随时间的变化及其与主要环境因子的关系。研究了美人蕉(*Canna indica* Linn.)、风车草(*Cyperus flabelliformis* Rottb.)、芦苇(*Phragmites australis* Trin. ex Steud.)、水鬼蕉(*Hymenocallis littoralis* (Jack.) Salisb.)、紫芋(*Colocasia tonoi* Nakai.)和鸢尾(*Iris tectorum* Maxim.) 6种植物在潜流人工湿地中的根际 ORP 及其日变化。6 种植物的根际 ORP 日变化曲线相似, 均为双峰型, 双峰值出现在 11:00—14:00 之间, 最大值出现在 14:00。各植物的根际 ORP 日变化基本在 130—350 mV 之间, 以水鬼蕉的变幅最大, 风车草和芦苇的变幅较小。不同植物的根际 ORP 有较大差异, 风车草和紫芋的日平均值最大, 显著高于鸢尾、美人蕉和水鬼蕉($P < 0.05$); 芦苇显著高于鸢尾和美人蕉($P < 0.05$)。ORP 与光照强度和气温呈正相关, 尤与气温的正相关最为显著。ORP 日平均值与植物生物量有显著的正相关性, 尤与地下部分生物量相关性最显著。结果表明, 人工湿地植物根际 ORP 因不同植物、一天中不同的时间有较大差异, 后者与光照和气温等环境因子密切相关。

关键词: 湿地植物; 人工湿地; 氧化还原电位; 光照强度; 气温

Daily variation of the rhizosphere redox potential of six wetland plants

LI Huachao, CHEN Zongjing, CHEN Zhanghe*

Key Laboratory of Ecology and Environmental Science in Guangdong Higher Education, College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

Abstract: The objective of this study was to assess the daily variation of the rhizosphere redox potential (ORP) of wetland plants in constructed wetlands (CWs). Eighteen (18) small-scale monoculture subsurface-flow wetlands were constructed (80 cm×50 cm×45 cm, upper diameter×lower diameter×height) stocked with six wetland plant species (*Canna indica* Linn., *Cyperus flabelliformis* Rottb., *Phragmites australis* Trin. ex Steud., *Hymenocallis littoralis* (Jack.) Salisb., *Colocasia tonoi* Nakai and *Iris tectorum* Maxim.) with three replicates for each plant species. The CWs were fed 30 L of domestic wastewater weekly. ORP was measured during sunny days (in early October) for the matured plants, ca. 1 m of *C. indica*, *C. flabelliformis*, *P. australis* and *C. tonoi*, and ca. 0.7 m of *I. tectorum*, and ca. 0.5 m of *H. littoralis*, in all the wetlands during the first growing season. ORP were measured at the position of 10 cm beneath the water surface and 2 mm off the new roots every 1 h from 07:00 to 19:00 with an ORP meter at the 5th day after the domestic wastewater irrigation. Light intensity and air temperature were measured at 20 cm above the shoot using the light meter and the stem thermometer. All the wetland plants showed a large variation in daily ORP, with the ORP values at midday time significantly higher than those at early morning and late afternoon. The ORP of plants also showed similar bimodal variation patterns. The peak values appeared at 11:00—14:00, with 14:00 being the highest. The ORP ranged from 130 mV to 350 mV in a daily measurement, with greater daily variation in *H. littoralis* than *C. flabelliformis* and *P. australis*. *C. flabelliformis* and *C. tonoi* exhibited significantly higher ORP values than those of *I. tectorum*, *C. indica* and *H. littoralis* ($P < 0.05$) while *P. australis* showed a

收稿日期: 2013-03-12; 修订日期: 2014-05-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenzhh@scnu.edu.cn

significantly higher value than those in *I. tectorum* and *C. indica* ($P < 0.05$). The ORP was positively correlated with air temperature, plant biomass and light intensity, especially for the air temperature and below-ground biomass. Results from this study indicated that the ORP of the wetland plants in the CWs varied greatly among species and during a daily cycle, and was significantly affected by the air temperature and light intensity.

Key Words: wetland plants; constructed wetland; rhizosphere redox potential; light intensity; air temperature

研究表明,湿地植物在湿地污染物去除中主要发挥间接的作用,植物通过吸收营养物直接从湿地中去除的污染物占湿地去除污染物总量的很小一部分^[1-2]。但植物是湿地生态系统的重要组成部分,它们的存在也已被证明能显著提高污染物的去除率^[3-6],其中一个主要的作用是植物通过根系释放一部分氧气到根际,在植物根区的还原态介质中形成氧化态的微环境,使湿地床的氧化还原电位(ORP 或 Eh)提高^[7-8],这种现象称为根的泌氧作用^[9]。湿地植物根系泌氧最重要的作用可能是影响根际微生物的种类组成、分布及生命活动^[1,10]。微生物作用是人工湿地去除污染物的主要机制之一^[11-12],大量的研究表明,人工湿地生态系统中,微生物对营养元素以及有机污染物的转化和矿化作用大于植物^[2,13],湿地中大部分的氮素是通过微生物的生命活动被去除的,特别是反硝化作用^[14]。微生物数量在很大程度上反映了人工湿地净化污水的能力,而每种微生物都有其适宜生长的氧化还原条件^[15],适宜的氧化还原电位是维持化学反应和微生物生长的重要因素,因而根放氧影响了存在于根际的微生物种类^[1]。其他的很多研究也表明,在人工湿地的植物根际区域,微生物的密度、活性和多样性都提高了^[16-18]。因此,研究湿地植物的 ORP,对深入探讨人工湿地污染物去除机理及提高去除能力有重要的意义。

综观国内外关于根泌氧作用及根际氧化还原电位的研究,已有众多的研究证明植物的存在提高了根际的氧化还原电位^[19-20]。但大多数研究是在实验室条件下测定的,野外的测定工作较少。此外,大部分文献集中在对湿地床氧化还原电位的空间变化研究上^[21-24],对植物根际的 ORP 随时间的变化以及 ORP 变化过程中与光照、温度等环境因子的相互关系研究较少。本研究以 6 种常见的人工湿地植物为实验材料,研究植物的生长及植物根际的氧化还原电位日变化及其与光照、温度等的关系,为深入研究

人工湿地对污水的净化机理及人工湿地植物群落的构建提供参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 小型潜流人工湿地的构建

实验地点位于广州市华南师范大学生物标本园(以下简称标本园)的人工湿地研究基地。广州市属于亚热带季风气候,年平均温度为 21.4—21.9℃,年降雨量平均为 1623.6—1899.8 mm,10—11 月受副热带高压下沉气流影响,多晴朗天气。

本实验的小型潜流人工湿地(图 1)以 18 个陶瓷大缸(80 cm × 50 cm × 45 cm,上直径 × 下直径 × 高)构成,大缸壁厚 5 cm,以直径为 2 cm 左右的砾石填满整个湿地作为植物生长基质,相邻的大缸间隔 10 cm。污水来源于华南师范大学继续教育学院宿舍楼所排放的生活污水,生活污水进入沉淀池(8 m × 2 m × 0.8 m,长 × 宽 × 高)沉淀后,再经抽水机抽出,用塑料桶定量输入湿地床。污水灌溉每周 1 次,先把各湿地床内的水排干,然后往每一湿地灌溉污水 30 L。污水水质指标如下:化学需氧量(COD_{Cr}) 140—250 mg/L,生化需氧量(BOD₅) 50—80 mg/L,总氮(TN) 25—45 mg/L,总磷(TP) 2.5—5.5 mg/L,氨氮(NH₄-N) 25—35 mg/L。

2012 年 3 月,选取 6 种植物材料(美人蕉(*Canna indica* Linn.)、风车草(*Cyperus flabelliformis* Rottb.)、芦葦(*Phragmites australis* Trin. ex Steud.)、水鬼蕉(*Hymenocallis littoralis* (Jack.) Salisb.)、紫芋(*Colocasia tonoi* Nakai.)和鸢尾(*Iris tectorum* Maxim.)大小基本一致(高度为(50 ± 10) cm)、健康的小苗。在每个湿地随机栽种 1 株,每种 3 个湿地。为减少湿地间连立遮光等影响,全部湿地成单行排列。在各湿地靠近植株的位置,安放一个由不锈钢网制成的高 50 cm、直径 20 cm、网孔为 2 cm × 2 cm 的网柱,方便测定向网柱内生长的植物根系的根际

氧化还原电位(ORP)。



图1 用于本实验的人工湿地装置

Fig.1 The constructed wetlands used in the study

1.2 实验测定方法

1.2.1 植物根际 ORP 日变化的测定

实验时间选在 10 月上旬,此时多晴朗无雨天气,各植物生长稳定,便于实验。此时,美人蕉、风车草、紫芋、芦苇等植物都高约 1 m,鸢尾高约 0.7 m,水鬼蕉高约 0.5 m。实验测定前,把湿地床的水排干,把湿地床不锈钢网柱里离液面 12 cm 内的碎石小心取出,使根表面裸露,重新灌溉生活污水 30 L,5 d 后开始测定。测定时,把 ORP 测量仪的电极探头置于液面下约 10 cm 的新生根或根毛混杂区处测定。从 07:00—19:00,每小时测 1 次根际 ORP、植物冠层上方 20 cm 处光照强度和气温。ORP 的测定用 3-Star 型 ORP 测量仪(Thermo Scientific Orion,美国);光照强度测定用 Testo-545 照度计(testo AG,德国);气温测定用 COK 10C 温度计(JNDA,中国)。

1.2.2 植物生物量的测定

2012 年 11 月将植物的地上部分全部收割,把地下部分从碎石中挖出冲洗干净,分别测定鲜重,然后置于鼓风干燥箱内于 80 °C 下烘 48 h 后,用精确度为 0.0001 g 的电子天平称干重。

1.2.3 数据的处理与分析

采用 Microsoft Excel 2003 软件计算各指标的平均数和标准差,并采用此软件做图;方差分析(ANOVA)、多重比较和相关性分析采用统计软件 PASW Statistics 18.0 来完成。

2 结果与分析

2.1 湿地植物根际 ORP 的日变化

6 种植物根际 ORP 日变化呈现相似的趋势,具体表现均为“双峰型曲线”,峰值出现于中午前后(图 2)。但不同植物的峰值出现时间有所不同,风车草和芦苇的峰值出现在 11:00 和 14:00,其他植物的峰值分别在 12:00 和 14:00。6 种植物根际的 ORP 日变化基本在 130—350 mV 之间,以水鬼蕉的日变化幅度最大,风车草和芦苇的日变化幅度较小。

不同植物的根际 ORP 日变化相互之间均无显著差异,其中风车草与鸢尾的差异最大($P=0.402$)。一天之中,各湿地植物的根际 ORP 变化均极显著($P<0.01$):14:00、15:00、12:00、11:00、16:00、13:00 的根际 ORP 均极显著大于 07:00、08:00、09:00、18:00。

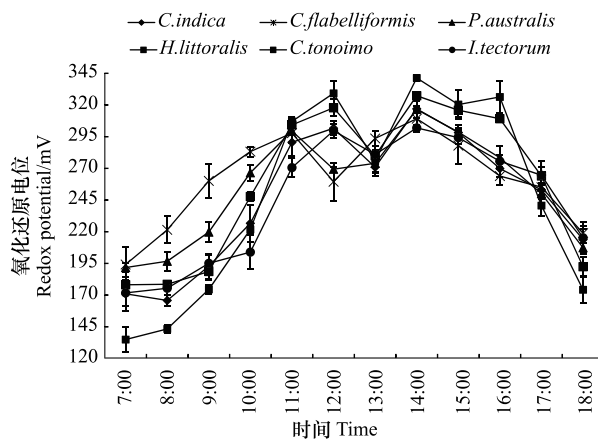


图2 晴朗夏日人工湿地中 6 种植物的根际氧化还原电位日变化(平均值±标准差, $n=3$)

Fig.2 Daily variation of rhizosphere redox potential of six wetland plants during sunny summer days in the constructed wetlands (Mean±SD, $n=3$)

C. indica: *Canna indica* Linn., *C. flabelliformis*: *Cyperus flabelliformis* Rottb., *P. australis*: *Phragmites australis* Trin. ex Steud., *H. littoralis*: *Hymenocallis littoralis* (Jack.) Salisb., *C. tonoimo*: *Colocasia tonoimo* Nakai., *I. tectorum*: *Iris tectorum* Maxim

6 种植物的根际 ORP 最高值均出现在 14:00 (图 2),最高的是水鬼蕉(341.4 mV),其余从大到小依次为紫芋(327.3 mV)、美人蕉(317.0 mV)、芦苇(316.5 mV)、风车草(309.2 mV)、鸢尾(301.9 mV)。水鬼蕉极显著高于其他 5 种植物($P<0.01$),紫芋极显著高于鸢尾、风车草($P<0.01$),显著高于芦苇、美人蕉($P<0.05$);美人蕉极显著高于鸢尾($P<0.01$),

与芦苇、风车草无显著差异;芦苇极显著高于鸢尾($P<0.01$),与风车草无显著差异;风车草与鸢尾无显著差异。

6种植物的根际 ORP 最低值基本都出现在 07:00(图 2),最低的是水鬼蕉(134.9 mV),其余从小到大依次为美人蕉(165.8 mV)、鸢尾(171.7 mV)、紫芋(178.1 mV)、芦苇(191.7 mV)、风车草(194.1 mV)。水鬼蕉显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)低于其余 5 种植物;风车草与芦苇无显著差异,但均显著高于美人蕉、鸢尾($P<0.05$);紫芋与其余 4 种植物均无显著差异;鸢尾与美人蕉无显著差异。

6种植物的根际 ORP 日平均值大小依次为风车草(262.1 mV)>紫芋(258.7 mV)>芦苇(255.7 mV)>水鬼蕉(249.1 mV)>美人蕉(247.6 mV)>鸢尾(245.7 mV)(图 3)。风车草和紫芋显著高于鸢尾、美人蕉、水鬼蕉($P<0.05$);芦苇显著高于鸢尾、美人蕉($P<0.05$),与水鬼蕉无显著差异;而鸢尾、美人蕉、水鬼蕉之间无显著差异。

2.2 植物根际 ORP 的日变化与光照强度、气温日变化的关系

从 08:00 开始,植株顶端的光照强度快速上升,

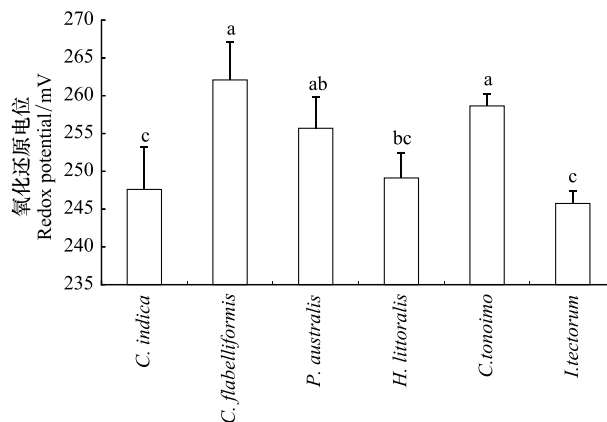


图 3 晴朗夏日人工湿地中 6 种植物的根际氧化还原电位日平均值(平均值 $\pm$ 标准差, $n=3$; 不同字母表示不同植物间存在显著差异)

Fig.3 Daily average of redox potential of six wetland plants' rhizosphere during sunny summer days in the constructed wetlands (Mean $\pm$ SD, $n=3$. Different letters on bars indicate significant differences between plant species)

到 12:00 达到最高值 100000 lx 左右,午后又急剧下降(图 4)。从表 1 可看出,6 种植物的根际 ORP 日变化与光照强度日变化呈正相关,其中,风车草、美人蕉和芦苇达到显著水平($P<0.05$)。

表 1 晴朗夏日 6 种植物的根际 ORP 日变化与光照强度和气温的相关性

Table 1 Correlations between daily variation of ORP values of six wetland plants and light intensity and air temperature during sunny summer days in the constructed wetlands

参数 Parameter	美人蕉 <i>C. indica</i>	风车草 <i>C. flabelliformis</i>	芦苇 <i>P. australis</i>	水鬼蕉 <i>H. littoralis</i>	紫芋 <i>C. tonioimo</i>	鸢尾 <i>I. tectorum</i>
光照强度 Light intensity	0.334 *	0.473 **	0.354 *	0.292	0.279	0.226
温度 Air temperature	0.891 **	0.894 **	0.872 **	0.856 **	0.859 **	0.791 **

** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; $P<0.01$; * $P<0.05$

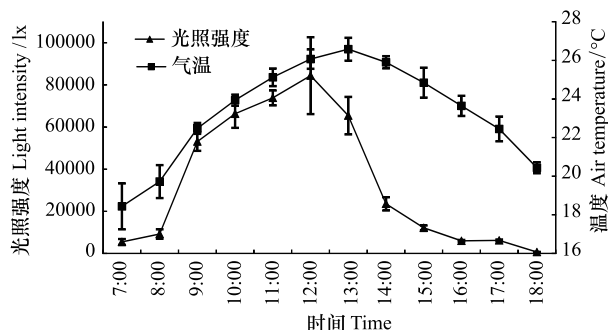


图 4 晴朗夏日标本园的气温日变化和六种植物冠层光照强度的平均日变化(平均值 $\pm$ 标准差, $n=3$)

Fig.4 Average daily variation of air temperature and leaf light intensity of six wetland plants during sunny summer days in the Botanical Garden (Mean $\pm$ SD, $n=3$)

气温变化的曲线与光照强度变化曲线大致相同,上午较低(18.4 °C),平缓上升至 13 时达最高温(26.6 °C),午后平缓下降(图 4)。6 种植物的根际 ORP 日变化与气温日变化的相关性要高于其与光照强度日变化的相关性(表 1)。其中,风车草的相关度最高($P<0.01$),其余 5 种植物与气温日变化也都成极显著正相关($P<0.01$)。

2.3 植物生物量与根际 ORP 日变化的关系

2.3.1 植物的生物量

6 种植物的地上部分生物量从大到小依次为风车草>美人蕉>芦苇>鸢尾>紫芋>水鬼蕉(表 2)。其中,风车草显著高于美人蕉($P<0.05$),极显著高于其余 4 种植物($P<0.01$);美人蕉和芦苇极显著高于水

鬼蕉、紫芋和鸢尾($P<0.01$),美人蕉与芦苇之间无显著差异;鸢尾、紫芋和水鬼蕉三者之间无显著差异。

6种植物的地下部分生物量从大到小依次为风车草>美人蕉>芦苇>紫芋>水鬼蕉>鸢尾(表2)。其中,风车草极显著高于其它5种植物($P<0.01$);美人蕉、芦苇、紫芋三者间无显著差异;美人蕉和芦苇显著高于水鬼蕉、鸢尾($P<0.01$);紫芋显著高于鸢尾($P<0.05$),但与水鬼蕉之间无显著差异;水鬼蕉与鸢

尾无显著差异。

2.3.2 植物生物量与植物根际 ORP 的相关性

6种植物的根际 ORP 日平均值与各生物量都有一定的相关性(表3)。其中,根际 ORP 日平均值与地下部分生物量极显著相关($P<0.01$),与总生物量显著相关($P<0.05$),而与地上部分生物量无显著相关。

表2 人工湿地中6种植物的生物量(平均值±标准差, $n=3$)

Table 2 Biomass of six wetland plants in the constructed wetlands (Mean ± SD, $n=3$)

植物种 Plant species	地上部分生物量/g Aboveground biomass/g	地下部分生物量/g Belowground biomass/g	总干重/g Total biomass/g
美人蕉 <i>C.indica</i>	301.38±53.54b	35.41±0.86b	336.79±53.74b
风车草 <i>C.flabelliformis</i>	403.04±118.32a	83.11±6.62a	486.15±124.78a
芦苇 <i>P.australis</i>	230.14±5.45b	31.04±1.34b	261.19±6.63b
水鬼蕉 <i>H.littoralis</i>	33.22±7.40c	18.05±0.83cd	51.27±8.21c
紫芋 <i>C.tonoimo</i>	33.90±14.55c	26.22±10.57bc	51.27±24.98c
鸢尾 <i>I.tectorum</i>	76.05±11.71c	15.33±3.59d	91.38±15.27c

同一列中不同字母表示各植物的生物量存在显著差异($P<0.05$)

表3 人工湿地中植物的根际 ORP 日平均值与生物量的相关性

Table 3 Correlations between daily variation of ORP values and biomass of six wetland plants in the constructed wetlands

参数 Parameter	总生物量 Total biomass	地上部分生物量 Above ground biomass	地下部分生物量 Below ground biomass
ORP 日平均值 Daily variation of ORP values	0.473 *	0.433	0.658 **

* * 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** $P<0.01$; * $P<0.05$

3 讨论

3.1 不同湿地植物的根际 ORP 日变化过程

许多研究认为,不同植物有不同的根泌氧量,根际 ORP 值也有不同的昼夜变化情况^[2,5,25-26]。本实验得出相似的结果,不同植物的根际 ORP 日平均值有较大差异,其中风车草和紫芋最大。而6种植物的根际 ORP 日变化曲线相似,相互之间无显著性差异,具体表现均为“双峰型曲线”,其中,风车草和芦苇的根际 ORP 日变化相对较平缓,水鬼蕉的根际 ORP 日变化幅度最大。

一般认为微生物硝化-反硝化作用是湿地脱氮的主要途径^[27-29],另外,微生物对磷的去除包括它们对磷的正常同化和对磷的过量积累^[30],系统中厌氧、好氧环境的交替出现,使微生物的脱氮作用及对磷的释放和过量积累得以完成^[31]。本研究发现,各植物根际的 ORP 一天内的变化差异极显著,中午前

后的 ORP 要极显著大于早晨和傍晚时分的($P<0.01$),使根际呈现出“氧化态”和“还原态”相互交替的环境,据此猜测湿地微生物的除氮过程和对磷的过量积累将得以顺利进行^[1,15]。

3.2 湿地植物的根际 ORP 日变化与光照强度及气温的关系

普遍认为光合作用强弱会改变根系泌氧量,使植物的根际 ORP 值也得以改变^[32-33]。Białowiec 等^[32]发现杨柳的根际 ORP 值昼夜变化幅度比芦苇大,在夜间杨柳的根际 ORP 值大幅下降。众多研究认为^[34-36],有植物的人工湿地系统的氧化还原电位昼夜差异明显,白天平均高于夜晚 100 mV 以上,这主要是由于白天植物光合作用增强,根系输氧增大所致。本实验得到较一致的结果,6种植物根际的 ORP 日变化基本都在 130—350 mV 之间。

光照和气温是植物生长发育的两个重要因素,也决定着植物光合作用的强弱。本实验中,温度较

低且无光照或光照较弱的情况下根际 ORP 较低,随着光照强度及温度的上升,根际 ORP 也较快增长,说明光合作用强弱对植物根际 ORP 值的影响明显。不同植物的根际 ORP 值在光照强度、温度的变化下也呈现出不同的变化。

普遍的研究认为,随着光照强度的提高,植物根系的泌氧量也会随之增加^[33,37-38]。Laskov 等^[37]研究表明,水生植物 *Myriophyllum spicatum* 在光照及水溶液氧饱和的条件下,根系泌氧量最大;在黑暗及水溶液氧饱和的条件下,根系泌氧量次之;而在黑暗及水溶液氧缺乏的条件下,根系泌氧量最小。Sorrell^[39]报道,灯心草的根放氧量受光照强度的积极影响:在低光照强度下,灯心草的根际呈现较低的氧化还原电位($Eh \approx -250$ mV),但在高光照强度下能达到适度的氧化状态($Eh \approx 230$ mV)。本实验得到一致的结果,6 种湿地植物根际 ORP 的日变化与光照强度日变化成正相关,说明植物根际的 ORP 值受光照强度的积极影响。

Allen 等^[25]发现种有 *Carex utriculata* 或 *Schoenoplectus acutus* 的湿地微型生态系统白天氧化还原电位的平均值在 4℃ 下比在 24℃ 下高。其他不少研究有相似的结果,他们认为温度升高对植物根系的泌氧有消极作用^[26,40],但也有不少研究认为气温升高使植物根系泌氧增加,从而使根际 ORP 值上升^[24,41-42]。在本实验中,湿地植物的根际 ORP 日变化与温度呈极显著正相关($P < 0.01$),且比光照强度对根际 ORP 值的影响更为显著,说明在适中的范围内温度升高对植物根际 ORP 值有明显的积极作用。

3.3 湿地植物的根际 ORP 日变化与植物生物量的关系

众多研究认为湿地植物的生物量大小与污染物的去除有直接的、积极的作用^[5,24],但湿地植物的生物量大小与根系泌氧及根际 ORP 值的关系这方面的报道还较少。Lai 等^[43]对 35 种植物进行根系泌氧的研究,发现根泌氧量与植物总生物量、地上生物量、叶生物量、 $d \leq 1$ mm 的根生物量显著正相关,Tanaka 等^[40]也得到类似结果。本实验中,6 种植物的根际 ORP 日平均值与地下部分和总生物量有显著相关($P < 0.05$),这与 Lai 和 Tanaka 的结果一致,由此可见,地下部分生物量或总生物量可以用来评价植物的根系泌氧量和根际的 ORP 值,另外,植物根

系类型的外观表征也可以作为人工湿地植物筛选的一个参考性指标^[44]。

3.4 湿地植物根际 ORP 值与营养去除率的关系

湿地中 C、N 的净化过程实质上是电子得失、价态变换的过程,通常需要在不同的环境条件下经过一系列的氧化还原反应才能完成,在很大程度上受环境的氧化还原电位的影响^[36,45-46],因而人工湿地的氧化还原环境对微生物活性及群落分布、系统硝化与反硝化作用都有着重要影响^[47-48],同时也决定了有机污染物和营养物质的净化过程与效率^[33,49]。至今直接测定人工湿地根际 ORP 与人工湿地营养去除的研究较少,本研究也没有在相同湿地直接测定 ORP 与营养去除关系,但在本实验室有关的工作中,赖闻玲^[9]对 35 种湿地植物的污水净化率的研究中发现,风车草对 TN、TP 的净化率在 35 种植物中均较高,芦苇与水鬼蕉次之,而鸢尾最低,同时得到 TN、TP 的去除率与根系泌氧量显著正相关。程秀云^[50]的研究也有较一致的结果,风车草在四个季节中对各污染物的净化效果基本上均优于芦苇、香根草和菖蒲。在室内测得 6 种植物对 TN 去除率最大的为风车草,其余依次为紫芋、美人蕉、芦苇、水鬼蕉和鸢尾。本实验中,各植物根际日平均 ORP 的大小和以上研究测定的营养去除率高低基本是一致的,说明植物根际的 ORP 与人工湿地的营养去除有明显的正相关关系。

References:

- [1] Faulwetter J L, Gagnon V, Sundberg C, Chazarenc F, Burr M D, Brisson J, Camper A K, Stein O R. Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review. *Ecological Engineering*, 2009, 35(6): 987-1004.
- [2] Stottmeister U, Wießner A, Kusch P, Kappelmeyer U, Kästner M, Bederski O, Müller R A, Moormann H. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, 2003, 22(1/2): 93-117.
- [3] Fraser L H, Carty S M, Steer D. A test of four plant species to reduce total nitrogen and total phosphorus from soil leachate in subsurface wetland microcosms. *Bioresource Technology*, 2004, 94(2): 185-192.
- [4] Picard C R, Fraser L H, Steer D. The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms. *Bioresource Technology*, 2005, 96(9): 1039-1047.
- [5] Cheng X Y, Liang M Q, Chen W Y, Liu X C, Chen Z H. Growth and Contaminant Removal Effect of Several Plants in Constructed

- Wetlands. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, 51(3): 325-335.
- [6] Lai W L, Wang Y B, Peng C L, Chen Z H. Growth Characteristics of Four Species in Surface-flow Constructed Wetlands. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2010, 18(3): 238-244.
- [7] García J, Ojeda E, Sales E, Chico F, Píriz T, Aguirre P, Mujerio R. Spatial variations of temperature, redox potential and contaminants in horizontal flow reed beds. *Ecological Engineering*, 2003, 21(2/3): 129-142.
- [8] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, 1997, 35(5): 11-17.
- [9] Lai W L. Growth, Root Radial Oxygen Loss and Contaminant Removal of 35 Wetland Plants [D]. Guangzhou: South China Normal University, 2010.
- [10] Ottová V, Balcarová J, Vymazal J. Microbial characteristics of constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5): 117-123.
- [11] Ragusa S R, McNevin D, Qasem S, Mitchell C. Indicators of biofilm development and activity in constructed wetlands microcosms. *Water Research*, 2004, 38(12): 2865-2873.
- [12] Popko D A, Han S, Lanoil B, Walton W E. Molecular Ecological Analysis of Planktonic Bacterial Communities in Constructed Wetlands Invaded by *Culex* (Diptera: Culicidae) Mosquitoes. *Journal of Medical Entomology*, 2006, 43(6): 1153-1163.
- [13] Vacca G, Wand H, Nikolausz M, Kusch P, Kästner M. Effect of plants and filter materials on bacteria removal in pilot-scale constructed wetlands. *Water Research*, 2005, 39(7): 1361-1373.
- [14] Howarth R W, Billen G, Swaney D, Townsend A, Jaworski N, Lajtha K, Downing J A, Elmgren R, Caraco N, Jordan T, Berendse F, Freney J, Kudeyarov V, Murdoch P, Zhu Z L. Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences. *Biogeochemistry*, 1996, 35: 75-139.
- [15] Su G Q. Redox Potential Characteristics of Organic Wastewater Treatment [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2009.
- [16] Collins B, McArthur J V, Sharitz R R. Plant effects on microbial assemblages and remediation of acidic coal pile runoff in mesocosm treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 2004, 23(2): 107-115.
- [17] Dai Y Y, Yang X P, Zhou L X. Effect of Reed Rhizosphere on Nitrogen and COD Removal Efficiency in Subsurface Flow Constructed Wetlands. *Environmental Science*, 2008, 29(12): 3387-3392.
- [18] Zhang Z, Fu R B, Yang H Z, Gu G W. Comparison of organic matter removal in subsurface horizontal-flow wetlands based on water budget. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(3): 363-367.
- [19] Wießner A, Kappelmeyer U, Kusch P, Kästner M. Influence of the redox condition dynamics on the removal efficiency of a laboratory-scale constructed wetland. *Water Research*, 2005, 39(1): 248-256.
- [20] Fennessy M S, Cronk J K, Mitsch W J. Macrophyte productivity and community development in created freshwater wetlands under experimental hydrological conditions. *Ecological Engineering*, 1994, 3(4): 469-484.
- [21] Dušek J, Pícek T, Čížková H. Redox potential dynamics in a horizontal subsurface flow constructed wetland for wastewater treatment: Diel, seasonal and spatial fluctuations. *Ecological Engineering*, 2008, 34(3): 223-232.
- [22] Pennington M R, Walters M B. The response of planted trees to vegetation zonation and soil redox potential in created wetlands. *Forest Ecology and Management*, 2006, 233(1): 1-10.
- [23] Thomas C R, Miao S L, Sindhoj E. Environmental factors affecting temporal and spatial patterns of soil redox potential in Florida Everglades wetlands. *Wetlands*, 2009, 29(4): 1133-1145.
- [24] Fu R B, Zhu Y P, Yang H Z, Gu G W. Do and ORP conditions and their correlation with plant root distribution in a continuous-flow constructed wetland treating eutrophic water. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(10): 2036-2041.
- [25] Allen W C, Hook P B, Biederman J A, Stein O R. Temperature and wetland plant species effects on wastewater treatment and root zone oxidation. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(3): 1010-1016.
- [26] Stein O R, Hook P B. Temperature, Plants, and Oxygen: How Does Season Affect Constructed Wetland Performance? *Journal of Environmental Sciences and Health*, 2005, 40(6/7): 1331-1342.
- [27] Green M, Friedler E, Safrai I. Enhancing nitrification in vertical flow constructed wetland utilizing a passive air pump. *Water Research*, 1998, 32(12): 3513-3520.
- [28] Bai J H, Ouyang H, Deng W, Wang Q G. A review on nitrogen transmission processes in natural wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 326-333.
- [29] Liang W, Wu Z B. A review on constructed wetlands for wastewater nitrogen and phosphorus removal mechanisms. *Environmental Science Trends*, 2000, (3): 32-37.
- [30] Liang W, Wu Z B, Cheng S P, Zhou Q H, Hu H Y. Roles of substrate microorganisms and urease activities in wastewater purification in a constructed wetland system. *Ecological Engineering*, 2003, 21(2/3): 191-195.
- [31] Kong F X, Yi D Q, Yan G A. *Environmental Biology*. Beijing: Higher Education Press, 2000: 349-350.
- [32] Białowiec A, Davies L, Albuquerque A, Randerson P F. Nitrogen removal from landfill leachate in constructed wetlands with reed and willow: Redox potential in the root zone. *Journal of Environmental Management*, 2012, 97: 22-27.
- [33] Ávila C, Reyes C, Bayona J M, García J. Emerging organic contaminant removal depending on primary treatment and operational strategy in horizontal subsurface flow constructed wetlands: Influence of redox. *Water Research*, 2013, 47(1): 315-325.

- [34] Austin D, Lohan E, Verson E. Nitrification and denitrification in a tidal vertical flow wetland pilot //Proceedings of the Water Environment Technical Conference 2003. Los Angeles, California: Water Environment Federation, 2003: 333-357.
- [35] Maltais-Landry G, Chazarenc F, Comeau Y, Troesch S, Brisson J. Effects of artificial aeration, macrophyte species, and loading rate on removal efficiency in constructed wetland mesocosms treating fish farm wastewater. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2007, 6(4): 409-414.
- [36] Tao M, He F, Xu D, He Q L, Liang W, Wu Z B. Redox character and purification of different function units in integrated vertical-flow constructed wetland. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(2): 291-294.
- [37] Laskov C, Horn O, Hupfer M. Environmental factors regulating the radial oxygen loss from roots of *Myriophyllum spicatum* and *Potamogeton crispus*. *Aquatic Botany*, 2006, 84(4): 333-340.
- [38] Inoue T M, Tsuchiya T. Interspecific differences in radial oxygen loss from the roots of three *Typha* species. *Limnology*, 2008, 9(3): 207-211.
- [39] Sorrell B K. Effect of external oxygen demand on radial oxygen loss by *Juncus* roots in titanium citrate solutions. *Plant, Cell and Environment*, 1999, 22(12): 1587-1593.
- [40] Tanaka N, Yutani K, Aye T, Jinadasa K B S N. Effect of broken dead culms of *Phragmites australis* on radial oxygen loss in relation to radiation and temperature. *Hydrobiologia*, 2007, 583(1): 165-172.
- [41] Armstrong J, Armstrong W. A convective through-flow of gases in *Phragmites australis* (Cav.) Trin.ex Steud. *Aquatic Botany*, 1991, 39(1/2): 75-88.
- [42] Armstrong J, Armstrong W. Light-enhanced convective throughflow increases oxygenation in rhizomes and rhizosphere of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. *New Phytologist*, 1990, 114(1): 121-128.
- [43] Lai W L, Wang S Q, Peng C L, Chen Z H. Root features related to plant growth and nutrient removal of 35 wetland plants. *Water Research*, 2011, 45(13): 3941-3950.
- [44] Chen Z H, Chen F, Cheng X Y, Liu X C, Zhou X Y. Researches on macrophyte roots in the constructed wetlands (A review). *Current Tropic in Plant Biology*, 2004, 5: 131-142.
- [45] Vepraskas M J, Craft C B, Richardson J L. *Wetland Soils: Genesis, Hydrology, Landscapes, and Classification*. Florida: CRC Press, 2002.
- [46] Vanderzalm J L, Page D W, Barry K E, Dillon P J. Application of a probabilistic modelling approach for evaluation of nitrogen, phosphorus and organic carbon removal efficiency during four successive cycles of aquifer storage and recovery (ASR) in an anoxic carbonate aquifer. *Water Research*, 2013, 47(7): 2177-2189.
- [47] Shrestha J, Clément J C, Ehrenfeld J G, Jaffe P R. Effects of Vegetation Removal and Urea Application on Iron and Nitrogen Redox Chemistry in Riparian Forested Soils. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, 220(1/4): 213-223.
- [48] Sun G Z, Zhu Y F, Saeed T, Zhang G X, Lu X G. Nitrogen removal and microbial community profiles in six wetland columns receiving high ammonia load. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 203: 326-332.
- [49] Wu M Y, Franz E H, Chen S L. Oxygen Fluxes and Ammonia Removal Efficiencies in Constructed Treatment Wetlands. *Water Environment Research*, 2001, 73(6): 661-666.
- [50] Cheng X Y. Growth and Contaminant Removal Effect of Several Plants in Constructed Wetlands [D]. Guangzhou: South China Normal University, 2009.

参考文献:

- [6] 赖闻玲, 王玉彬, 彭长连, 陈章和. 四种湿地植物在人工湿地的生长特性研究. *热带亚热带植物学报*, 2010, 18(3): 238-244.
- [9] 赖闻玲. 35种湿地植物的生长、根系泌氧和污水净化效果研究[D]. 广州: 华南师范大学, 2010.
- [15] 苏高强. 有机废水处理工程中的氧化还原电位的特性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- [17] 戴媛媛, 杨新萍, 周立祥. 芦苇根际微环境对潜流人工湿地氮与COD去除性能的影响. *环境科学*, 2008, 29(12): 3387-3392.
- [18] 张政, 付融冰, 杨海真, 顾国维. 水量衡算条件下人工湿地对有机物的去除. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(3): 363-367.
- [24] 付融冰, 朱宜平, 杨海真, 顾国维. 连续流湿地中DO、ORP状况及与植物根系分布的关系. *环境科学学报*, 2008, 28(10): 2036-2041.
- [28] 白军红, 欧阳华, 邓伟, 王庆改. 湿地氮素传输过程研究进展. *生态学报*, 2005, 25(2): 326-333.
- [29] 梁威, 吴振斌. 人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展. *环境科学动态*, 2000, (3): 32-37.
- [31] 孔繁翔, 尹大强, 严国安. *环境生物学*. 北京: 高等教育出版社, 2000: 349-350.
- [36] 陶敏, 贺锋, 徐栋, 何起利, 梁威, 吴振斌. 复合垂直流人工湿地氧化还原特征及不同功能区净化作用研究. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(2): 291-294.
- [50] 程秀云. 人工湿地植物生长特性与污水净化效果研究[D]. 广州: 华南师范大学, 2009.