



分子植物育种  
*Molecular Plant Breeding*  
ISSN 1672-416X, CN 46-1068/S

## 《分子植物育种》网络首发论文

题目：两种水生植物光合特性及其对氮磷去除效果  
作者：余红兵，肖润林，杨知建  
网络首发日期：2018-11-14  
引用格式：余红兵，肖润林，杨知建. 两种水生植物光合特性及其对氮磷去除效果 [J/OL]. 分子植物育种.  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20181113.1010.006.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

## 研究报告

## Research Report

# 两种水生植物光合特性及其对氮磷去除效果<sup>1</sup>

余红兵<sup>1\*</sup> 肖润林<sup>2</sup> 杨知建<sup>3</sup>

1 湖南城市学院建筑与城市规划院, 益阳, 413000; 2 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙, 410125 ; 3 湖南农业大学农学院, 长沙, 410128

\*通讯作者, 522594881@qq.com

**摘要** 为了探讨沟渠水生植物的光合特性及其氮磷去除效果, 为水生植物应用于沟渠污染水体的生态修复及物种选择提供理论依据。以生态沟渠水生美人蕉(*Canna glauca*)与铜钱草(*Hydrocotyle vulgaris*)两种水生植物为试验材料, 在晴天采用便携式CID-340光合仪进行自然条件下净光合速率( $P_n$ )等生理生态指标(光合有效辐射( $PAR$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间 $CO_2$ 浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $Tr$ ))的测定, 并测定沟渠水体氮磷含量。分析结果表明: 水生美人蕉和铜钱草在自然条件下叶片净光合速率日变化均呈双峰曲线, 中午光合“午休”现象明显, 其中, 水生美人蕉叶片净光合速率( $P_n$ )日均值大于铜钱草, 且水生美人蕉净光合速率受气孔导度的影响最大; 而光合有效辐射和气孔导度对铜钱草净光合速率的影响较大; 另外, 铜钱草和水生美人蕉的净光合速率与沟渠总氮的去除效果呈显著正相关, 但与总磷去除效果无显著正相关。因此, 净光合速率( $P_n$ )可作为净化沟渠水体植物选择的重要依据之一, 水生美人蕉总氮的去除率与铜钱草相比有较大提高, 可作为净化沟渠水体的优选植物, 所以研究沟渠水生植物的光合特性对氮磷去除效果具有重要意义。

**关键词** 铜钱草, 水生美人蕉, 光合特性, 氮磷, 去除效果

## Plant Photosynthetic of Two Aquatic Characteristics and Their Removal Effects on Nitrogen and Phosphorus

Yu Hongbing<sup>1\*</sup> Xiao Runlin<sup>2</sup> Yang Zhijian<sup>3</sup>

1 College of Architecture and Urban Planning, Hunan City University, Yiyang, 413000; 2 Institute of Subtropical Agriculture and Ecology Chinese Academy of Sciences, Hunan, 410125; 3 College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, 410128

\* Corresponding author, 522594881@qq.com

**Abstract** In order to study the photosynthetic characteristics of aquatic plants in ditches and their removal effects on nitrogen and phosphorus, it provides theoretical basis for the ecological restoration and species selection of aquatic plants used in ditches. Using *Canna glauca* and *Hydrocotyle vulgaris* of ecological ditches as materials, CID-340 Portable photosynthetic system was employed to measure the net photosynthetic rate etc. physiological and ecological indexes (such as photosynthetically active radiation, stomatal conductance and transpiration rate) of *Canna glauca* and *Hydrocotyle vulgaris* under natural conditions in sunny days, and measure the content of nitrogen and phosphorus in water. The results were as follows: the net photosynthetic rate of *Canna glauca* and *Hydrocotyle vulgaris* changed in a double-peak curve, both of them appears a photosynthetic “midday depressions” at noon; but the *Canna glauca*'s net photosynthetic rate was greater than the *Hydrocotyle vulgaris*'s. Stomatal conductance ( $G_s$ ) and photosynthetically active radiation ( $PAR$ ) were the important factors that affected the *Hydrocotyle vulgaris*'s net photosynthetic rate, and the stomatal conductance ( $G_s$ ) was the main affective factor for the *Canna glauca*'s net photosynthetic rate. Both plants' net photosynthetic rate had obviously positive correlation with ditch nitrogen's purifying effect, while had no obviously relationship with phosphorus removal rate. Because the higher net photosynthetic rate of the *Canna glauca* could be the best choice, Therefore, it is significance to study the photosynthetic characteristics of aquatic plants in ditches for removing nitrogen and

<sup>1</sup> 基金项目: 本研究由“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD14B05)、湖南省战略性新兴产业成果转化项目(2015GK1014)和湖南省教育厅项目(17C0291)共同资助

phosphorus.

**Keywords** Hydrocotyle vulgaris, Canna glauca, Photosynthetic characteristics, Nitrogen and phosphorus, Removal effect

利用水生植物净化水体是湖泊、沟渠等污染水体治理研究的热点,多集中在水生植物对沉积物底泥氮磷、有机质的吸附方面(俞振飞等, 2012; 李振国等, 2014)。

水生美人蕉为多年生湿地植物,其叶大花艳,株形优美,园林用价值极高。同时,因其根系发达,具有很高的生态应用价值,吸附能力强,对环境有较强的适应能力,属河道修复常见植物。对水生美人蕉的研究多集中在其对水体和土壤中的重金属、氮磷有机污染物的吸收与富集能力上,且因水生美人蕉生长快,生物量大而备受关注(蔡秋亮等, 2005; Bose et al., 2008; Li et al., 2009; 李睿华等, 2009)。

而铜钱草为多年生湿地植物,植株较矮,春夏生长茂盛,根系发达,对水中总氮、总磷均有较好的去除效果。对铜钱草的研究主要集中在其对湖泊和河道中受污染水体的适应性和净化能力上(陈友媛等, 2011; 张凤娥等, 2011),其中,在新型植物对河道受污染水体中 TN、TP 去除效果的研究中,铜钱草对水中 TN 的去除效率达到 63%,当初始 TN 浓度增加时,铜钱草对 TN 的去除效率变为 87.8%,在四种植物中铜钱草对 TN 的吸收能力较好。另外,研究表明在五种水生植物中,水生美人蕉吸收氮磷量最强,而铜钱草吸收氮磷量最弱(余红兵等, 2012),但对水生美人蕉、铜钱草的光合特性与其脱氮去磷效果等方面少见报道。为此研究水生美人蕉、铜钱草两水生植物光合特性和氮磷净化效果具有重要意义。

本试验的目的是以生态沟渠水生美人蕉和铜钱草两种水生植物为材料,研究其净光合速率( $P_n$ )等生理生态指标的日变化及其之间的关系,探讨光合特性对氮磷去除效果的影响,为水生植物应用于沟渠污染水体的生态修复及沟渠科学利用与选择水生植物提供理论依据和参考。

## 1 结果与分析

### 1.1 水生美人蕉和铜钱草两种水生植物各生理生态因子的日变化

生态沟渠湿地中水生美人蕉和铜钱草光合有效辐射(PAR)变化呈现为中午高(11:00 时)早晚低的趋势,日变化呈单峰曲线,该变化趋势与光照强度及晴朗天气有关。两种水生植物的光合有效辐射(PAR)与气温( $T_a$ )的最高值(41.4°C),和出现时间同步,且气温( $T_a$ )与叶温( $T_l$ )的最高值出现时间也同步(图 1A, 图 1B)。而大气相对湿度(RH)与叶周围空气温度变化则相反,早上(9:00 时)相对湿度值最大,在 13:00~15:00 降至最低(图 1A, 图 1B),是随太阳辐射的加强和气温的上升而有所下降。大气相对湿度,因为 8 月份生态沟渠比较湿润,两种水生植物生长旺盛,大气相对湿度(53.97%~86.13%)比较高。

水生美人蕉和铜钱草的气孔导度( $G_s$ )与胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )的日变化呈现不一样的曲线变化(图 1D, 图 1E)。水生美人蕉气孔导度( $G_s$ )日变化则呈双峰曲线,其日变化大体与净光合速率( $P_n$ )的变化趋势相同,上午,水生美人蕉气孔导度( $G_s$ )因气孔的缓慢关闭,气孔导度下降,而因气孔的缓慢开放,气孔导度随之增加(图 1C, 图 1D)。

铜钱草胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )的变化趋势总体呈凹形。其胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )的日变化曲线与气孔导度( $G_s$ )变化曲线相反,其胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )呈现先下降,后逐渐上升的趋势,于 13:00 降至最低。分析气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )的变化,即细胞间隙  $CO_2$  浓度的高低受叶肉光合活性大小的影响,其原因与已研究的分析一致(李卫民, 2003)。水生美人蕉胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )则呈现先缓慢下降后逐渐上升趋势,上午有起伏变化,在 13:00 左右出现最低值。而铜钱草的气孔导度( $G_s$ )呈单峰曲线变化,气孔导度( $G_s$ )峰和净光合速率( $P_n$ )谷的出现时间一致(图 1A, 图 1D)。

气孔导度( $G_s$ )出现早晨缓慢升高,随气孔开放度于 11:00 后再增加,于 13:00 后又缓慢下降的趋势(图 1D)。水生美人蕉和铜钱草两种水生植物蒸腾速率  $Tr$  日变化一致,均呈单峰曲线变化。水生美人蕉蒸腾速率  $Tr$  最高值为  $5.95 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且其日均值高于铜钱草的日均值(图 1F)。铜钱草蒸腾速率  $Tr$  的日均值为  $2.91 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最高值( $4.62 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )和其净光合速率  $P_n$  的最高值同时出现。

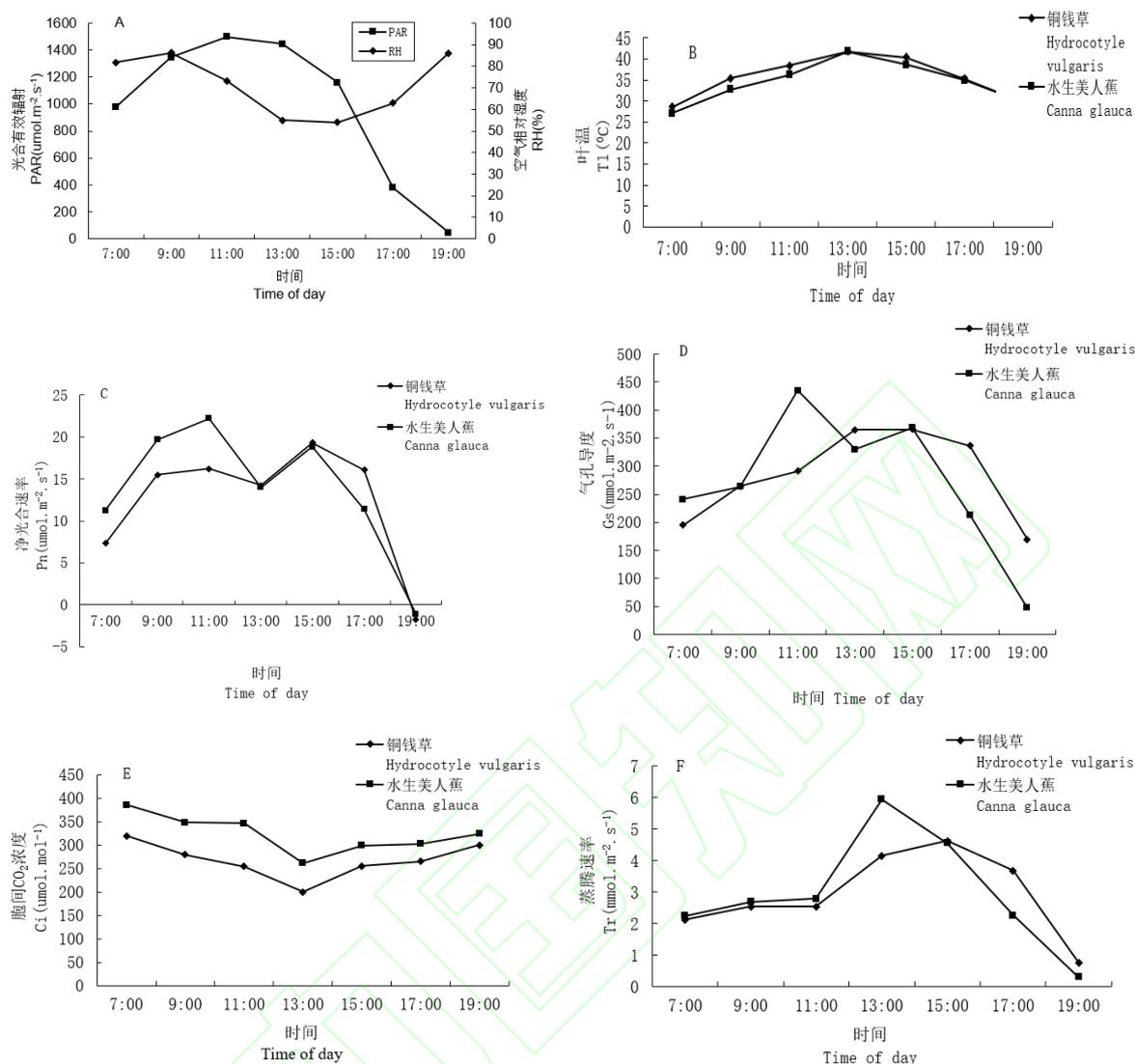


图1 水生美人蕉和铜钱草净光合速率与生态因子的日变化

Figure 1 Diurnal change of the net photosynthetic rates and ecological and physiological factors of *Canna glauca* and *Hydrocotyle vulgaris*

### 1.2 水生美人蕉和铜钱草两种水生植物叶片净光合速率的日变化

水生美人蕉和铜钱草中午光合“午休”现象明显，其叶片净光合速率日变化均呈双峰曲线(图1C)。铜钱草净光合速率在15:00左右出现主峰( $19.32 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )，次峰( $16.21 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )在11:00出现，于13:00左右降至谷值( $14.23 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )，光合“午休”现象出现。而水生美人蕉主峰与次峰出现的时间则与之相反，即主峰( $22.20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )出现在11:00左右，次峰( $19.83 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )出现在15:00(图1C)，光合作用也出现明显的“午休”现象。结果表明，水生美人蕉净光合速率日均值大于铜钱草净光合速率日均值。

### 1.3 净光合速率与主要因子及氮磷去除效果的相关因素分析

为了进一步了解两种水生植物净光合速率与主要因子及氮磷去除效果之间的相互关系，对各生理生态因子、净光合速率与总氮总磷去除率的相关系数进行分析(表1)。

从相关分析可以看出，水生美人蕉的净光合速率与气孔导度呈极显著正相关，与光合有效辐射也呈极显著正相关，与蒸腾速率呈显著正相关，而与空气相对湿度呈负相关，与胞间二氧化碳浓度不相关(表1)。铜钱草的净光合速率与其蒸腾速率、光合有效辐射、气孔导度分别有极显著正相关。相反，其净光合速率与胞间二氧化碳浓度和空气相对湿度呈显著负相关(表1)。这结果表明水生美人蕉和铜钱草的净光合速率的变化是在其生理生态因子的综合作用下进行的，其光合作用是一个复杂的过程(付为国等, 2006)，不同因素在不同阶段的影响是不同的，甚至是相反的(郭天财等, 2002)。

表 1 水生美人蕉和铜钱草净光合速率与主要因子及氮磷去除效果的相关分析

Table 1 Correlated analysis between net photosynthetic rate and its factors, nitrogen and phosphorus removal efficiency

植物 Plants	因素 Factors	光合有效 辐射 PAR	净光合速 率 Pn	蒸腾速 率 Tr	气孔导 度 Gs	胞间CO <sub>2</sub> 浓 度 Ci	空气相对 湿度 RH	总氮去除率 Nitrogen removal efficiency	总磷去除率 Phosphorus removal efficiency	
铜钱草 <i>Hydrocotyle vulgaris</i>	光合有效辐射 PAR	1								
	净光合速率 Pn	0.666**	1							
	蒸腾速率 Tr	0.471	0.798**	1						
	气孔导度 Gs	0.468	0.837**	0.904**	1					
	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 Ci	-0.502	-0.573*	0.955**	-0.843**	1				
	空气相对湿度 RH	-0.276	-0.643*	-0.912**	-0.887**	0.298	1			
	总氮去除率 Nitrogen removal efficiency	0.717**	0.890**	0.632*	0.723**	-0.741**	-0.628*	1		
	总磷去除率 Phosphorus removal efficiency	0.660**	0.059	0.679**	0.780**	-0.839**	-0.698**	0.980**	1	
	水生美人蕉 <i>Canna glauca</i>	光合有效辐射 PAR	1							
		净光合速率 Pn	0.872**	1						
		蒸腾速率 Tr	0.722**	0.575*	1					
		气孔导度 Gs	0.880**	0.919**	0.706**	1				
胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 Ci		0.000	0.0471	-0.603*	-0.103	1				
空气相对湿度 RH		-0.276	-0.325	-0.796**	-0.527	0.779**	1			
总氮去除率 Nitrogen removal efficiency		0.749**	0.812**	0.737**	0.843**	-0.465	-0.602*	1		
总磷去除率 Phosphorus removal efficiency		0.663**	0.141	0.759**	0.776**	-0.575*	-0.679**	0.984**	1	

注: \*: 显著水平; \*\*: 极显著水平

Note: \*: Indicated significant level; \*\*: Indicated very significant level

结果显示,水生美人蕉和铜钱草的净光合速率与总氮去除率呈极显著正相关,说明植物可提高湿地氮素去除率。而水生美人蕉和铜钱草净光合速率与总磷的去除率无显著关系(表 1),表明植物净光合速率与去磷效果的关系不大。

#### 1.4 逐步多元回归分析

因为净光合速率受很多因素的影响,在某些情况下用简单的二元变量相关分析很难准确真实地反映二元变量之间的关系,为了建立净光合速率与众多因子的“最优”回归方程,采用逐步多元回归分析法,能有效地从众多生理生态因子中筛选出对净光合速率  $P_n$  贡献大的因子(吴瑞云,2007)。

水生美人蕉的逐步多元回归方程为:  $P_n=1.1986\ 93+0.044\ 097\ G_s$ ( $R=0.768$ ),铜钱草的逐步多元回归方程为:  $P_n=-5.456\ 13+0.006\ 797\ PAR+0.050\ 099\ G_s$ ( $R=0.868$ ),此结果表明,影响水生美人蕉净光合速率的主要因子是气孔导度。而气孔导度和光合有效辐射对铜钱草的净光合速率的影响较大,影响顺序为:  $G_s>PAR$ ,这两因子是影响其净光合速率的主要因子。

## 2 讨论

水生美人蕉和铜钱草在自然条件下中午光合“午休”现象明显,且其净光合速率日变化呈双峰型。主要是因为气孔限制和非气孔的限制是造成植物中午净光合速率下降和光合“午休”现象的主要因素,均为植物自身因素,气孔限制即为植物气孔部分的关闭,非气孔的限制即为植物叶肉细胞自身活性下降。气孔部分的闭合降低了细胞间二氧化碳的浓度,而叶肉细胞活性的降低则提高了细胞间二氧化碳的浓度(许大全,1997)。在 11:00、9:00 时分别达到高峰后,水生美人蕉和铜钱草叶片净光合速率开始下降。同时两种植物胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )呈现先下降,后逐渐上升的趋势,于 13:00 降至最低。这表明气孔限制可能是造成两种水生植物净光合速率下降的主要因素,即二氧化碳不足。

另外,植物中午光合“午休”现象可能受温度、光照、胞间  $CO_2$  浓度、湿度等环境因子的影响,即受中午高温、强光照、胞间二氧化碳浓度亏缺的影响,其中,低的空气湿度也是光合午休的一个重要因素(苏培玺等,2002),该研究结果与其一致(图 1),空气湿度在中午迅速下降到最低点。该试验表明,植物自身因素与环境因子等因素导致了两种植物光合“午休”现象明显。

简单相关分析表明,水生美人蕉的净光合速率与气孔导度和光合有效辐射分别有极显著正相关,逐步回归分析结果也表明,气孔导度是影响水生美人蕉净光合速率的主要影响因子,这充分表明水生美人蕉光合作用固碳受气孔行为的影响,其气孔行为发挥了主导和控制作用。

铜钱草净光合速率( $P_n$ )和气孔导度( $G_s$ )呈极显著正相关,气孔导度( $G_s$ )和光合有效辐射( $PAR$ )对铜钱草净光合速率( $P_n$ )有较大影响,影响顺序为:  $G_s>PAR$ ,简单相关分析与逐步回归分析结果均表明气孔导度( $G_s$ )对铜钱草净光合速率( $P_n$ )有较大影响,铜钱草光合作用的改变也受气孔导度改变的影响,与已研究结果一致(赵平等,2000)。虽然气孔的开张受各种因素影响,但只会降低耗水量以维持二氧化碳的供应(苏培玺等,2002)。以上均表明植物的光合作用和生理过程与细胞活性和结构的变化密切相关。

湿地植物通过光合作用产生氧气,增加水体中的溶解氧,并向水体释放,从而改善了湿地的氧气环境,促进了污染物的净化(雒维国等,2006;黄娟等,2006)。实验结果表明,水生美人蕉和铜钱草的净光合速率与湿地氮素去除率呈正相关,这是因为湿地的氧气环境通过植物的光合作用可以改善,植物的根际效应能使其硝化和亚硝化过程顺利进行,其根际微生物对氮进行分解去除,湿地氮素去除率由此提高。而磷的去除与植物产氧的关系不大,主要是通过沟渠底泥沉积物物理化学作用,因此植物净光合速率与去磷效果的关系不大。且夏季 11:00~15:00 时,水生美人蕉与铜钱草 TN 去除率均达到全天最高值,呈现与植物净光合速率  $P_n$  相似的变化规律,明显高于其它时段,因为短时间的温度变化对微生物活性影响不大,故可推测植物光合作用对微生态的间接影响。而植物净光合速率  $P_n$  与各污染物去除率的相关性存在差异,这与湿地内各污染物的去除机理有关,也反映出各类污染物降解对湿地溶解氧的依赖程度。

无论从提高各污染物的去除效果还是改善湿地供氧水平的角度出发,植物净光合速率  $P_n$  均可作为湿地植物筛选的一项重要指标(黄娟等,2006)。本研究比较了水生美人蕉和铜钱草两种植物于夏季晴朗天气的日净光合速率峰值及日平均值,发现相同条件下水生美人蕉净光合速率峰值和平均值均明显高于铜钱草,从而水生美人蕉能有效改善湿地系统内溶解氧环境,提高污染物去除率。因此,在沟渠系统中,水生美人

蕉对总氮的去除率效果更好。

最终, 本试验得出以下几个结论:

(1)水生美人蕉和铜钱草中午均出现明显的光合“午休”现象, 净光合速率的日变化呈现出不对称的双峰型, 水生美人蕉净光合速率日均值大于铜钱草。水生美人蕉主峰( $22.20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 在11:00左右出现, 在15:00出现次峰( $19.83 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。而铜钱草净光合速率主峰与次峰出现的时间则与之相反, 其主峰( $19.32 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )在15:00左右出现, 次峰( $16.21 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )在11:00出现。

(2)水生美人蕉净光合速率的主要影响因子是气孔导度。而气孔导度和光合有效辐射对铜钱草的净光合速率影响较大, 影响顺序为:  $G_s > \text{PAR}$ , 这两因子是影响其净光合速率的主要因子。

(3)水生美人蕉和铜钱草的净光合速率与沟渠总氮的去除效果呈显著正相关, 但与总磷去除效果无显著正相关。

(4)因此, 根据上述规律, 净光合速率(Pn)可作为净化沟渠水体植物选择的重要依据之一, 水生美人蕉总氮的去除率与铜钱草相比有较大提高, 可作为净化沟渠水体的优选植物。

### 3 材料与方法

#### 3.1 试验材料

试验以生态沟渠铜钱草和水生美人蕉为材料, 沟渠按工艺要求进行了工程改造和水生植物种植, 是中国科学院城郊农业区环境质量修复与功能提升技术与示范基地。周边地区以稻田为主。整个试验区域通过沟渠系统与外部进行水交换。

#### 3.2 光合速率检测

于植物生长的季节, 在8月中旬对光合作用日变化进行测定。在晴朗天气选择株型较一致的3株水生美人蕉, 取每株的第3片叶(从顶部向下), 并选铜钱草植株能受自然光照且生长旺盛的成熟叶3片, 每片叶测3次, 测定净光合速率等生理生态指标。每2h测定一次(从早上7:00到晚上19:00), 分别取平均值作为此时测量值。

采用便携式CID-340光合仪(美国CID公司生产的CID-340光合测定系统), 利用其开路法分别对铜钱草和水生美人蕉叶片进行测定, 直接获得数据有: 叶室面积( $6.25 \text{ cm}^2$ )及各生理生态因子(空气 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_a$  ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )、气温 $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ )、叶温 $T_l$  ( $^{\circ}\text{C}$ )、胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_i$  ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )、空气相对湿度 $\text{RH}(\%)$ 、净光合速率 $P_n$  ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )、蒸腾速率 $T_r$  ( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )、光合有效辐射 $\text{PAR}$  ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )和气孔导度 $G_s$  ( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。用SPSS软件进行统计分析。

#### 3.3 铜钱草和水生美人蕉对氮、磷的净化能力检测

水样取样时间也每2h一次, 与光合作用测定时间同步, 分别在铜钱草和水生美人蕉植物区的入口和出口取样。为分析铜钱草、水生美人蕉对氮、磷的净化能力用如下指标进行衡量:

$$R_1 = \frac{(C_{\lambda\text{口}1} - C_{\text{出口}2})}{C_{\lambda\text{口}1}}; \quad R_2 = \frac{(C_{\lambda\text{口}3} - C_{\text{出口}4})}{C_{\lambda\text{口}3}}$$

式中:  $R_1$ 为铜钱草净化水体氮或磷的能力(TN或TP去除率);  $C_{\lambda\text{口}1}$ 为铜钱草的入口水样氮、磷浓度( $\text{mg}/\text{L}$ );  $C_{\text{出口}2}$ 为铜钱草的出口水样氮、磷浓度( $\text{mg}/\text{L}$ );  $R_2$ 为水生美人蕉净化水体氮或磷的能力(TN或TP去除率);  $C_{\lambda\text{口}3}$ 为美人蕉入口水样氮、磷浓度( $\text{mg}/\text{L}$ );  $C_{\text{出口}4}$ 为水生美人蕉的出口水样氮、磷浓度( $\text{mg}/\text{L}$ )。

用流动分析仪测定水样TN(用碱性过硫酸钾消化); 用钼锑抗分光光度法测定水样TP(过硫酸钾消解)。

#### 作者贡献

余红兵是本研究的实验设计和实验研究的执行人, 完成数据分析, 论文初稿的写作, 实验设计, 试验结果分析; 肖润林、杨知建是项目的构思者及负责人, 指导实验设计, 数据分析, 论文写作与修改。全体作者都阅读并同意最终的文本。

#### 致谢

本研究由“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD14B05)、湖南省战略性新兴产业成果转化项目(2015GK1014)和湖南省教育厅项目(17C0291)共同资助。感谢中国科学院亚热带农业生态研究所提供科研平台, 得以试验顺利进行。

#### 参考文献

Bose S., Jain A., Rai V., and Ramanathan A. L., 2008, Chemical fractionation and translocation of heavy metals in

- Canna indica* L. grown on industrial waste amended soil, *J Hazard Mater*, 160(1): 187-193
- Cai Q.L., Lin D.J., He J.W., He Z.Z., Zhu Y.P., Zeng Z.J., and Liu S.Z., 2005, Floating phytoremediation system by planting *Canna generalis* for dual purposes of purification of piggery wastewater and nursery, *Nongye Gongcheng Xuebao (Transactions of the CSAE)*, 21(S): 178-180 (蔡秋亮, 林东教, 何嘉文, 何臻铸, 朱宇鹏, 曾湛均, 刘士哲, 2005, 去污和苗圃功能兼具的美人蕉漂浮植物修复系统研究, *农业工程学报*, 21(S): 178-180)
- Chen Y.Y., Cui X., Dong B., Yang S.Y., Hu G.X., and Li Y.P., 2011, Study on purification effect of experimental wastewater by three aqua-cultured ornamental plants, *Shuitu Baochi Xuebao (Journal of Soil and Water Conservation)*, 25(2): 253-257 (陈友媛, 崔香, 董滨, 杨世迎, 胡广鑫, 李亚平, 2011, 3种水培观赏植物净化模拟污水的试验研究, *水土保持学报*, 25(2): 253-257)
- Fu W.G., Li P.P., Bian X.M., Wu Y.Y., and Cao Q.Y., 2006, Diurnal photosynthetic changes of *Phragmites communis* in the wetland lying in Beigushan mountain of Zhengjian Prefecture, *Xibei Zhiwu Xuebao (Acta Bot Boreal-occident Sinica)*, 26(3): 496-501 (付为国, 李萍萍, 卞新民, 吴沿友, 曹秋玉, 2006, 镇江北固山湿地芦苇光合日变化研究, *西北植物学报*, 26(3): 496-501)
- Guo T.C., Wang Z.J., and Wang Y.H., 2002, Study on diurnal changes of flag leaf photosynthetic rate for two spike-type cultivars of wheat, *Xibei Zhiwu Xuebao (Acta Bot Boreal-occident Sinica)*, 22(3): 554-560 (郭天财, 王之杰, 王永华, 2002, 不同穗型小麦品种旗叶光合作用日变化的研究, *西北植物学报*, 22(3): 554-560)
- Huang J., Wang S.H., Luo W.G., Yan L., and Zhong Q.S., 2006, Influence of plant photosynthetic characteristics on DO distribution, purification effect in constructed wetlands, *Huanjing Kexue Xuebao (Acta Scientiae Circumstantiae)*, 26(11): 1829-1832 (黄娟, 王世和, 雒维国, 鄢璐, 钟秋爽, 2006, 植物光合特性及其对湿地 DO 分布, 净化效果的影响, *环境科学学报*, 26(11): 1829-1832)
- Li R.H., Guang Y.T., He M., Hu H.Y., and Jiang Z., 2009, Pilot scale study on *Canna glauca* L. riparian zone for treatment of polluted river water, *Zhongguo Jishui Paishui (China Water and Wastewater)*, 25(9): 66-69 (李睿华, 管运涛, 何苗, 胡洪营, 蒋展, 2009, 美人蕉河岸带处理受污染河水的中试研究, *中国给水排水*, 25(9): 66-69)
- Li S.G., Zhang K.F., Zhou S.Q., Zhang L., and Chen Q., 2009, Use of de-watered municipal sludge on canna growth in pot experiments with a barren clay soil, *Waste Manag*, 29: 1870-1876
- Li Z.G., Wang G.Q., Zhang J., Ma J.Y., Wei H.N., and Yu Z.F., 2014, Effects on phosphorus fraction distribution in sediment by roots of *Vallisneria natans*, *Huanjing Kexue (Environmental Science)*, 35(4): 1304-1310 (李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞, 2014, 苦草(*Vallisneria natans*)根系对沉积物中各形态磷的影响, *环境科学*, 35(4): 1304-1310)
- Luo W.G., Wang S.H., Huang J., Yan L., and Huang J., 2006, Influence of plant photosynthesis and transpiration character on nitrogen removal effect in wetland, *Zhongguo Huanjing Kexue (China Environmental Science)*, 26(1): 30-33 (雒维国, 王世和, 黄娟, 鄢璐, 黄俊, 2006, 植物光合及蒸腾特性对湿地脱氮效果的影响, *中国环境科学*, 26(1): 30-33)
- Su P.X., Du M.W., Zhang L.X., Bi Y.R., Zhao A.F., and Liu X.M., 2002, Changes of photosynthetic characteristics and response to rising CO<sub>2</sub> concentration in Strawberry in solar greenhouse, *Yuanyi Xuebao (Acta Hort Sin)*, 29(5): 423-426 (苏培玺, 杜明武, 张立新, 毕玉蓉, 赵爱芬, 刘新民, 2002, 日光温室草莓光合特性及对 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应, *园艺学报*, 29(5): 423-426)
- Wu R.Y., 2007, Correlation analysis between photosynthetic rate and some ecological factors of *Populus deltoides* CL. 'Zhongjia 8', *Yaredai Zhiwu Kexue (Subtropical Plant Science)*, 36(4): 16-19 (吴瑞云, 2007, 欧美杨杂交种“中嘉 8”净光合速率与若干生态因子的相关分析, *亚热带植物科学*, 36(4): 16-19)
- Xu D.Q., 1997, Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis, *Zhiwu Shenglixue Tongxun*

(Plant Physiology Communications), 33(4): 241-244 (许大全, 1997, 光合作用气孔限制分析中的一些问题, 植物生理学通讯, 33(4): 241-244)

Yu H.B., Xiao R.R., Yang Z.J., Zhang S.N., and Liu F., 2012, Biomass and effects of five aquatic plants uptake of nitrogen and phosphorus in ecological ditch, Henong Xuebao (Journal of Nuclear Agricultural Sciences), 26(5): 0798-0802 (余红兵, 肖润林, 杨知建, 张树楠, 刘锋, 2012, 五种水生植物生物量及其对生态沟渠氮磷吸收效果的研究, 核农学报, 26(5): 0798-0802)

Yu Z.F., Wang G.X., Wang L.Z., Li Z.G., Hang Z.Q., and Wei H.N., 2012, Effects of macrophytes *Vallisneria natans* and *Hydrilla verticillata* on the vertical distribution of different phosphorus fractions in sediments, Hupo Kexue (Journal of Lake Sciences), 24(3): 378-383 (俞振飞, 王国祥, 王立志, 李振国, 杭子清, 魏宏农, 2012, 苦草(*Vallisneria natans*)和黑藻(*Hydrilla verticillata*)对沉积物各形态磷垂直分布的影响, 湖泊科学, 24(3): 378-383)

Zhang F.E., Zhang X., and Liu Y., 2010, Research on the removal efficiency of TN and TP for contaminated river water by new plants, Zhongguo Nongcun Shuili shuidian (China Rural Water and Hydrop), (6): 56-58 (张凤娥, 张雪, 刘义, 2010, 新型植物对河道受污染水体中 TN, TP 去除效果的研究, 中国农村水利水电, (6): 56-58)

Zhao P., Sun G.C., and Zeng X.P., 2000, A comparative study on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence and diurnal course of leaf gas exchange of two ecotypes of banyan, Yingyong Shengtai Xuebao (Chinese Journal of Applied Ecology), 11(3): 327-332 (赵平, 孙谷畴, 曾小平, 2000, 两种生态型榕树的叶绿素含量, 荧光特性和叶片气体交换日变化的比较研究, 应用生态学报, 11(3): 327-332)