

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2012.05.012

## 生态沟渠铜钱草光合日变化的研究

余红兵<sup>1,2</sup>, 肖润林<sup>3</sup>, 杨知建<sup>1</sup>, 张树楠<sup>3</sup>, 刘 锋<sup>3</sup>, 单武雄<sup>1\*</sup>

(1. 湖南农业大学 农学院, 长沙 410128; 2. 湖南城市学院 建筑与城市规划院,

益阳 413000; 3. 中国科学院 亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

**摘要:** 以生态沟渠铜钱草为材料, 采用便携式 CID-340 光合仪对铜钱草成熟叶片净光合速率( $P_n$ )以及胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )、光合有效辐射( $PAR$ )、气孔导度( $G_s$ )、气温( $G_s$ )、叶温( $T_l$ )和蒸腾速率( $T_r$ )等影响因子进行测定, 以探讨其光合生理生态特性, 旨在为修复沟渠湿地提供一定的理论依据。结果表明: (1) 铜钱草叶片净光合速率( $P_n$ )日变化曲线呈双峰型, 主峰( $19.32 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )出现在 15:00 左右, 次峰( $16.21 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )出现在 11:00, 中午出现光合“午休”现象。(2) 用逐步多元回归方法得到净光合速率日变化与主要生理生态因子的回归方程为:  $P_n = -5.45613 + 0.006797PAR + 0.050099G_s$  (复相关系数 0.868)。逐步回归结果表明  $P_n$  受  $PAR$  和  $G_s$  的影响较大。偏相关分析和通径分析的结果表明  $PAR$ 、 $G_s$  对铜钱草  $P_n$  日变化有重要影响, 是影响铜钱草  $P_n$  的主要因子, 影响大小的顺序为:  $G_s > PAR$ 。

**关键词:** 生态沟渠; 铜钱草; 净光合速率; 环境; 日变化

中图分类号: Q945 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2012)03-0340-05

Diurnal photosynthetic changes of *Hydrocotyle vulgaris* in the ecological ditchYU Hong-Bing<sup>1,2</sup>, XIAO Run-Lin<sup>3</sup>, YANG Zhi-Jian<sup>1</sup>,  
ZHANG Shu-Nan<sup>3</sup>, LIU Feng<sup>3</sup>, SHAN Wu-Xiong<sup>1\*</sup>

(1. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, 410128, China; 2. College of Architecture and Urban Planning, Hunan City University, Yiyang 431000, China; 3. Institute of Subtropical Agriculture and Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

**Abstract:** CID-340 Portable photosynthetic system was employed to measure the net photosynthetic rate, intercellular carbon dioxide concentration, photosynthetically active radiation, stomatal conductance, atmospheric temperature around the leaves, leaf temperature, and transpiration rate of *Hydrocotyle vulgaris* to study the photosynthetic characteristics in ecological ditch. The objective was to provide theoretic bases for ditch wetland restoration. The results were as follows: (1) The net photosynthetic rate of *Hydrocotyle vulgaris* changed in a double-peak curve with its peaks occurring separately at 11:00 ( $16.21 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and 15:00 ( $19.32 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), which indicated a photosynthetic “midday depressions” at noon. (2) The regression equation of the diurnal variation of  $P_n$  and its major physi-ecological factors attained by the method of stepwise multiple-regression was as follows:  $P_n = -5.45613 + 0.006797PAR + 0.050099G_s$  (multiple correlated coefficient 0.868). The results indicated that stomatal conductance ( $G_s$ ) and transpiration rate ( $T_r$ ) were the important factors that affected  $P_n$ . The analysis of partial correlation and path on  $P_n$  and factors showed that the diurnal variation of  $P_n$  had significant impact with photosynthetically active radiation ( $PAR$ ) and stomatal conductance

\* 收稿日期: 2012-01-07 修回日期: 2012-05-08

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-T07); 外国专家局项目(20100491005-8) [Supported by Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences(KZCX2-YW-T07); Bureau of Foreign Experts Project(20100491005-8)]

作者简介: 余红兵(1976-), 女, 湖南益阳人, 博士生, 主要从事园林植物及沟渠湿地植物净化研究, (E-mail)bingbingyu76@163.com。

\* 通讯作者: 单武雄, 博士, 主要研究方向为生态经济学, (E-mail)shanwuxiong@163.com。

( $G_s$ ), were the important factors which affected  $P_n$  and the order of effecting ability was  $G_s > PAR$ .

**Key words:** ecological ditch; *Hydrocotyle vulgaris*; net photosynthetic rate; environment; diurnal change

近年来,国内外利用植物修复技术净化水体的研究很多(付贵萍等,2008;Wang等,2002),取得了很好的效果。但高效净化水质的植物种类研究相对比较集中在芦苇(*Phragmites australis*)和香蒲属(*Typha*)等植物(曾林慧等,2009;吴晓丽等,2008;赵艳等,2010),但这类植物的利用途径少,大量长期堆放还能引起新的二次污染(胡绵好等,2007)。

利用观赏植物净化水体是目前湖泊、污染水体治理研究的热点。目前观赏植物净化污染水体研究相对较少,但从城市湖泊旅游景观的需求上看,具有一定的发展潜力。铜钱草(*Hydrocotyle vulgaris*)属伞形花科植物,为多年生挺水或湿生草本植物,其地下走茎极为发达,节间长出根和叶,生性强健,繁殖迅速,具有较好的观赏性。而有关铜钱草的研究主要集中在对河道及湖泊污染水体的适应性及水体净化能力上,结果表明对 TP 的去除效率为 81.7%、对 TN 的去除效率为 87.8%,能改善水体透明度和水体观感,适合水体对季节、水体深度处理的需要,可以作为水体景观设计的植物(张凤娥等,2011;陈友媛等,2010)。但对铜钱草的生理生态,如光合特性等方面的研究还未见报道。本文旨在研究铜钱草光合作用、蒸腾作用和相关指标的日变化,以及它们之间的关系,探讨环境因子对其光合作用的影响,为观赏植物铜钱草应用于湖泊、沟渠等污染水体的生态修复治理工程提供参考。

## 1 研究地概况与研究方法

### 1.1 研究地概况

试验区位于湖南省长沙县金井镇中国科学院亚热带农业生态研究所试验基地,在研究区选择一条生态沟渠作为城郊农业区环境质量修复与功能提升技术研究示范基地,试验前对该区的排水沟渠按工艺要求进行了工程改造以及植物种植。当地属于典型亚热带湿润季风气候,该区年平均降水量 1 300~1 400 mm,年平均气温 16.5~20.5 °C,年日照为 1 663 h,相对湿度 80%左右,1 月平均气温 11.9 °C,极端最低气温 -5.2 °C,7 月平均气温 27.9 °C,极端最高气温 39.1 °C,≥10 °C 的有效积温 6 539 °C。沟渠周边以农田为主,整个试验区与外界的水体交

换都通过沟渠系统,沟渠植物以水生植物铜钱草、美人蕉、花叶芦竹等为主。

### 1.2 研究与统计方法

在铜钱草长势旺盛的季节,于 8 月中旬选择晴朗天气和长势相近的铜钱草植株的成熟叶,保持叶片在植株上的自然受光态势,进行自然条件下光合速率等生理生态指标的测定。每张叶片测 3 次,分别取其均值,测定时间从早晨 7:00 到下午 19:00,每 2 h 测定 1 次,每张叶片取平均值作为该时刻的实测值。

测定仪器采用美国 CID 公司生产的 CID-340 光合测定系统,利用光合测定系统的开路法对所选植株叶片进行自动测定,其直接输出的数据有:叶室面积为 6.25 cm<sup>2</sup>,叶温  $T_l$ (°C),气温  $G_s$ (°C),空气 CO<sub>2</sub> 浓度  $C_a$ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),胞间 CO<sub>2</sub> 浓度  $C_i$ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),光合有效辐射  $PAR$ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),蒸腾速率  $Tr$ ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),空气相对湿度  $RH$ (%),净光合速率  $P_n$ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),气孔导度  $G_s$ ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。所有数据使用 Excel-2003 进行数据处理、绘图,并运用 SPSS 软件进行统计相关、回归、偏相关以及通径等一系列分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 铜钱草净光合速率及其生态因子的日变化

从图 1:A 可以看出铜钱草叶片净光合速率( $P_n$ )日变化呈双峰型, $P_n$  在 11:00 左右到达第 1 个峰值,为 16.21  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,随后  $P_n$  下降,至 13:00 左右降至谷值,为 14.23  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  形成 1 个低谷,出现光合“午休”现象,这与郭晓云等(2003)和李凌等(1995)研究的芦苇光合作用日变化结果相似。第 2 个主峰(19.32  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )出现在下午 15:00 左右,第一峰值低于第二峰值。

图 1:A、B 结果表明,生态沟渠湿地中铜钱草光合有效辐射( $PAR$ )日变化呈单峰曲线,变化趋势表现为中午高,早晚低,这与光照强度与晴朗天气有关,其中  $G_s$  最高值(41.4 °C),和  $PAR$  的最高值出现时间接近, $T_l$  最高值(41.8 °C)与气温最高值出现时间相同。而大气相对湿度( $RH$ )其变化趋势与叶周围空气温度变化不同,早上 9:00 时相对湿度值

最大,随着气温的上升和太阳辐射的加强而有所下降,在 13:00~15:00 降至最低。 $RH$  在 53.97%~86.13% 变化,由于生态沟渠 8 月比较湿润,铜钱草生长旺盛。

2.2 铜钱草净光合速率及其生理因子的日变化

图 2:A 为晴天生态沟渠铜钱草的生理因子气孔导度( $G_s$ )和胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )的日变化图。铜钱草的气孔导度( $G_s$ )日变化曲线是单峰曲线,并且

$G_s$  的峰和  $P_n$  的谷出现的时间基本吻合。早晨缓慢升高,11:00 过后随气孔开放度再度增加, $G_s$  增加,至 13:00 出现一个高峰,后又缓慢下降。铜钱草  $C_i$  曲线总体的变化趋势呈凹形的物线。铜钱草  $C_i$  的日变化曲线与  $G_s$  变化曲线相反,其  $C_i$  从早上开始呈现下降,至 13:00 降至最低,然后又逐渐回升。分析胞间  $CO_2$  浓度与  $G_s$  的变化,其原因同李卫民等(2003)分析的一致,即细胞间隙  $CO_2$  浓度较低意味

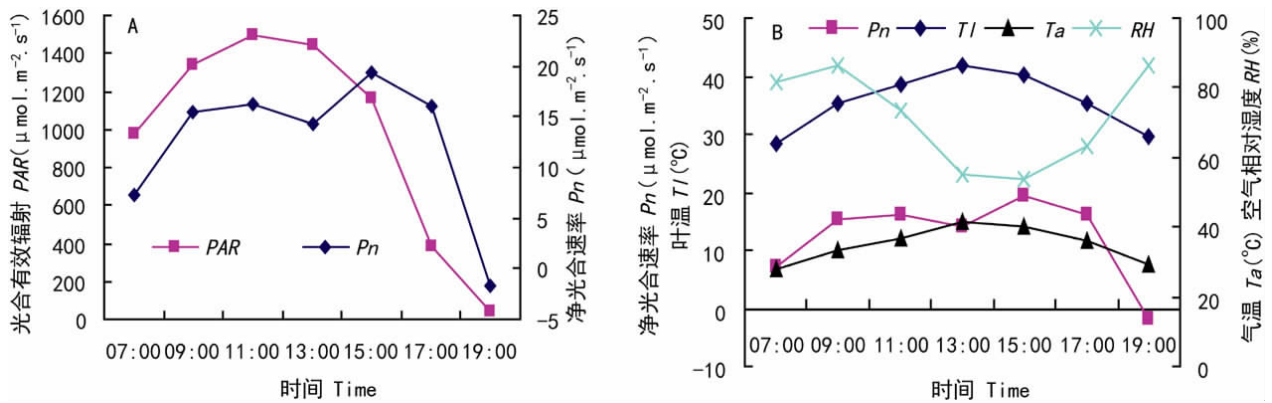


图 1 铜钱草净光合速率与生态因子的日变化

Fig. 1 Diurnal change of the net photosynthetic rates and ecological factors of *Hydrocotyle vulgaris*

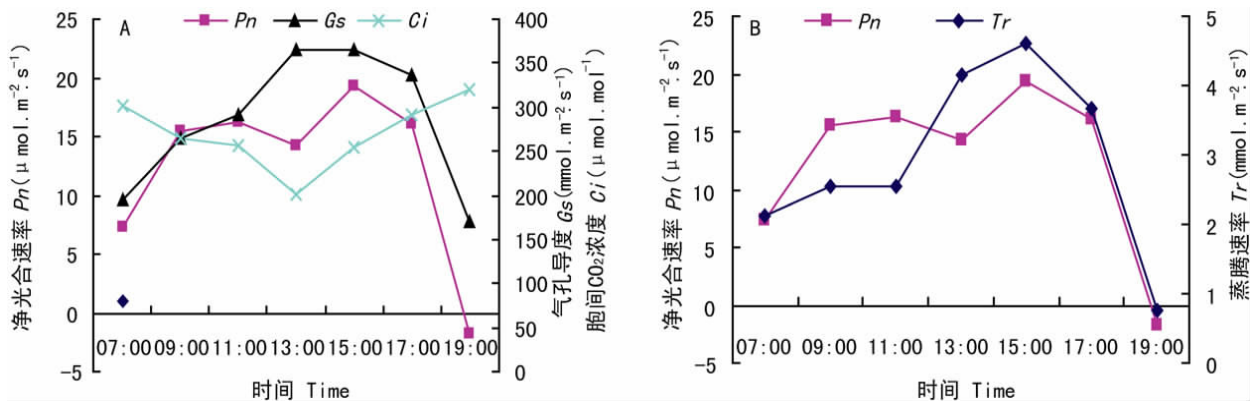


图 2 铜钱草净光合速率与生理因子日变化

Fig. 2 Diurnal change of the net photosynthetic rates and physiological factors of *Hydrocotyle vulgaris*

着叶肉光合活性较大,当气孔内侧细胞间隙中的  $CO_2$  浓度降低时,气孔导度增加,使更多的  $CO_2$  进入叶中,于是叶内  $CO_2$  浓度提高。

图 2:B 表明,  $T_r$  和  $P_n$  日变化不同,  $T_r$  日均为  $2.91 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 呈单峰线,  $T_r$  最高值 ( $4.62 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 和  $P_n$  的最高值同时出现。从图 2:A、B 比较  $G_s$  与蒸腾速率 ( $T_r$ ) 的变化发现: 午间随着  $G_s$  的增加,  $T_r$  也增加并且维持在较高的水平, 与王静等(2003)的研究结论相似。

2.3 铜钱草光合作用相关因素分析

2.3.1 铜钱草简单相关分析 为进一步了解铜钱草  $P_n$  与其生理生态因子的相互关系, 对各生态因子之间、生理因子之间以及各因子对  $P_n$  的影响进行了相关分析, 其相关系数如表 1。

从表 1 可以看出, 铜钱草  $P_n$  与  $T_r$ 、 $PAR$ 、 $G_s$ 、 $T_l$ 、 $G_s$  之间存在极显著正相关, 而与胞间  $CO_2$  浓度和空气  $RH$  呈极显著负相关, 与空气  $CO_2$  浓度呈显著负相关。另外, 各生理生态因子之间  $PAR$  与  $T_r$

表 1 铜钱草净光合速率与生理生态因子的相关分析  
Table 1 Correlated analysis between net photosynthetic rate and its physiological and ecological factors of *Hydrocotyle vulgaris*

因子 Factors	PAR	Tl	Pn	Tr	Gs	Ca	Ci	RH	Gs
PAR	1								
Tl	0.638**	1							
Pn	0.666**	0.789**	1						
Tr	0.471	0.787**	0.798**	1					
Gs	0.468	0.884**	0.837**	0.904**	1				
Ca	-0.830**	-0.800**	-0.513*	-0.409	-0.550**	1			
Ci	-0.502*	-0.922**	-0.573**	0.955**	-0.843**	0.966**	1		
RH	-0.276	-0.922**	-0.643**	-0.912**	-0.887**	0.365	0.298	1	
Gs	0.514*	0.980**	0.776**	0.849**	0.932**	-0.694**	-0.927**	-0.884**	1

注: \* 示显著水平; \*\* 示极显著水平。

Note: \* indicates significant level; \*\* indicates very significant level.

和  $G_s$  之间呈正相关,  $PAR$  和  $Tl$  及空气  $CO_2$  浓度之间极显著正相关。这表明铜钱草的光合作用是一个复杂的过程,是在其生理生态因子的共同作用下进行,  $P_n$  的变化是由各生理生态因子综合作用的结果,而不同阶段各因子的影响存在差异,甚至效应相反。

2.3.2 逐步回归分析 逐步回归分析影响  $P_n$  的因素很多,因此,二元变量的简单相关分析在某些情况下无法真实准确地反映变量间的关系。而逐步多元回归分析法能有效地从众多影响因素中挑选出对  $P_n(y)$  贡献大的因子,并建立  $y$  与这些因子的“最优”回归方程。逐步回归方程为:  $yP_n = -5.45613 + 0.006797PAR + 0.050099G_s$  ( $r = 0.868$ ),逐步回归结果表明,生理生态因子  $PAR$  和  $G_s$  对  $P_n$  的影响较大,可以对其  $P_n$  与主要影响因子进行偏相关分析和通径分析。

2.3.3 偏相关分析和通径分析 为进一步明确各生理、生态因子对  $P_n$  的直接和间接影响,对测定结果进行偏相关分析和通径分析。由表 2 可见,在通径分析中,从直接作用绝对值大小看,生态因子对铜钱草  $P_n$  影响的顺序为  $G_s > PAR$ 。通径分析的结果说明  $G_s$  对铜钱草  $P_n$  的影响除了自身的直接效应外,还通过  $PAR$  等的间接效应来实现。

### 3 结果与讨论

本试验中,在自然条件下,铜钱草叶片  $P_n$  的日变化为双峰曲线,中午有明显光合“午休”现象。主峰出现在 15:00 左右,为  $19.32 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,次峰出现在 11:00 ( $16.21 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。引起植物

叶片  $P_n$  午间降低的植物自身因素不外乎气孔的部分关闭(气孔限制)和叶肉细胞自身活性下降(非气孔限制)两类,前者使胞间  $CO_2$  浓度降低,而后者使胞间  $CO_2$  浓度增高。铜钱草叶片  $P_n$  在 11:00 达到顶峰后开始下降,同时胞间  $CO_2$  浓度也下降,这表明铜钱草  $P_n$  降低可能由于  $CO_2$  不足(气孔限制)引起。同时,也有许多学者认为,光合午休与中午光照强、温度高、空气相对湿度低及胞间  $CO_2$  亏缺等因素有关(苏培玺等,2002),本试验图 1 表明温度最高值与  $P_n$  最低值出现时间相同,表明温度高及胞间  $CO_2$  亏缺等因素可能使铜钱草中午出现明显光合“午休”现象。

表 2 主要因子对净光合速率的  
直接通径系数与偏相关系数

Table 2 Direct path coefficients and partial coefficients among main factors and  $P_n$

因子 Factors	偏相关系数 Partial coefficients	直接通径系数 Direct path coefficients
PAR	0.364	0.450
$G_s$	0.359	0.479

逐步回归与通径分析结果表明  $P_n$  受  $PAR$  和  $G_s$  的影响较大,影响大小的顺序为:  $G_s > PAR$ 。植物的光合生理过程总是与叶片组织细胞结构的变化有着密切的关系,经统计分析,铜钱草  $P_n$  与  $G_s$  之间有极显著的正相关关系,表明  $P_n$  受  $G_s$  的影响较大,也表明气孔行为对铜钱草光合作用碳的固定显示了明显的控制和主导作用。气孔作为气体交换的调节机构,其导度的变化可以影响植物的光合作用,调节蒸腾作用。本试验结果与赵平等(2000)的研究结果一致。尽管气孔的开张是受到多种因素影响的,但它的开张在一日内无论怎样变化都是为了以

尽可能少的水分消耗来维持尽可能多的 CO<sub>2</sub> 供应(苏培玺等,2002)。

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,雒维国等(2006)的研究结果表明,芦苇的光合作用、蒸腾作用对湿地脱氮效果影响较大,随 P<sub>n</sub> 和 T<sub>r</sub> 的增加,湿地中 DO 浓度上升,改善了湿地脱氮效果。黄娟等(2006)的研究结果也表明,在有芦苇、美人蕉、空心菜、富贵竹植物的人工湿地中,随着 P<sub>n</sub> 峰值的增加,湿地中溶氧(DO)的峰值也增加,P<sub>n</sub> 还与湿地 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除效果显著相关。本试验结果表明,铜钱草的叶片 P<sub>n</sub> 的日变化为双峰曲线,有明显光合“午休”现象,其 P<sub>n</sub> 主峰达到 19.32 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。比较黄娟等(2006)研究的芦苇、美人蕉、空心菜、富贵竹等植物的日 P<sub>n</sub> 峰值,发现铜钱草 P<sub>n</sub> 峰值稍低于芦苇 P<sub>n</sub>(21.70 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>),但均明显高于其它植物,因芦苇夏季(7月)中午 12:00~14:00,芦苇湿地 COD、TN 及 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率均分别达 85%、72%、70% 以上,能有效改善湿地系统内溶解氧环境,提高污染物去除率,而铜钱草因其具有较高的 P<sub>n</sub> 也不失为一种可尝试采用修复沟渠湿地、保持湿地高的污水净化能力的植物。

无论从改善湿地供水水平还是提高各污染物的去除效果的角度出发,植物 P<sub>n</sub> 可作为湿地植物筛选的一项重要指标。可见,在实际工程中,对深入探讨铜钱草光合生理特性以及维护沟渠湿地铜钱草良好的生长及生理状态尤为重要。

## 参考文献:

- Chen YY(陈友媛),Cui X(崔香),Dong B(董滨),*et al.* 2011. Study on purification effect of experimental wastewater by three aqua-cultured ornamental plants(3 种水培观赏植物净化模拟污水的试验研究)[J]. *J Soil Water Conserv*(水土保持学报), **25**(2):253-257
- Fu GP(付贵萍),Zhu WB(朱闻博),Li CF(李朝方),*et al.* 2008. Research on the ecological restoration project of the Qinhu channel the Guanlan river in Shenzhen(深圳观澜河清湖段生态修复工程研究)[J]. *Chin Rural Water & Hydrop*(中国农村水利水电), (5):58-61
- Gao HY(高辉远),Li WJ(李卫军),Xu J(徐江),*et al.* 1995. Diurnal course of photosynthesis and respiration in reed leaves of different growth forms *Phragmites communis* in plain desert area of northern Xinjiang(北疆平原荒漠不同生长型芦苇光合作用与呼吸作用日变化的研究)[J]. *Grassl Chin*(中国草地), (5):53-59
- Guo XY(郭晓云),Yang YF(杨允菲),Li JD(李建东). 2003. Studies on the photosynthetic characteristics of the leaves of *Phragmites communis* in different dry land habitats in the Songnen Plains in China(松嫩平原不同旱地生境芦苇的光合特性)[J]. *Acta Prat Sci*(草业学报), **12**(3):16-21
- Huang J(黄娟),Wang SH(王世和),Luo WG(雒维国),*et al.* 2006. Influence of plant photosynthetic characteristics on DO distribution, purification effect in constructed wetlands(植物光合特性及其对湿地 DO 分布、净化效果的影响)[J]. *Acta Sci Circum*(环境科学学报), **26**(11):1 829-1 832
- Hu MH(胡绵好),Ao YS(奥岩松),Yang XE(杨肖娥),*et al.* 2007. Comparative studies on purification ability of economic plants in different N level eutrophic water(不同 N 水平的富营养化水体中经济植物净化能力比较研究)[J]. *J Soil Wat Conserv*(水土保持学报), **21**(2):147-150
- Li WM(李卫民),Zhou LY(周凌云). 2004. Physiological and ecological responses of wheat leaves to soil water and nitrogen (II) effects of soil water and nitrogen on stoma of wheat leaves(水肥(氮)对小麦生理生态的影响(II)水肥(氮)对小麦叶片细胞间隙 CO<sub>2</sub> 浓度和气孔导度的影响)[J]. *Chin J Soil Sci*(土壤通报), **35**(3):271-274
- Luo WG(雒维国),Wang SH(王世和),Huang J(黄娟),*et al.* 2006. Influence of plant photosynthesis and transpiration character on nitrogen removal effect in wetland(植物光合及蒸腾特性对湿地脱氮效果的影响)[J]. *Chin Environ Sci*(中国环境科学), **26**(1):30-33
- Su PX(苏培玺),Du MW(杜明武),Zhang LX(张立新),*et al.* 2002. Changes of photosynthetic characteristics and response to rising CO<sub>2</sub> concentration in strawberry in solar greenhouse(日光温室草莓光合特性及对 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应)[J]. *Acta Hort Sin*(园艺学报), **29**(5):423-426
- Wang Q,Cui Y,Dong Y. 2002. Phytoremediation of polluted waters potentials and prospects of wetland plants[J]. *Acta Biotechnol*, **22**(1-2):199-208
- Wang J(王静),Cheng JM(程积民),Wan HE(万惠娥),*et al.* 2003. Initial study on the leaf photosynthesis and transpiration of *Achnatherum splendens* on the Loess Plateau(黄土高原芨芨草叶片蒸腾作用和光合作用的初步研究)[J]. *Acta Prata Sci*(草业学报), **12**(6):47-52
- Wu XL(吴晓丽),Luo YM(罗玉明),Xu YC(徐迎春). 2008. The kinetics characteristics of Cd<sup>2+</sup> absorption of *Typha angustifolia*(狭叶香蒲吸收 Cd<sup>2+</sup> 的动力学特征)[J]. *Guihaia*(广西植物), **28**(4):511-514
- Zeng LH(曾林慧),Li S(李松),Xu GX(徐国勋),*et al.* 2009. Treatment of rural domestic wastewater with soilless cultivated Plants(无土栽培植物对农村生活污水的净化特性研究)[J]. *Environ Sci & Tech*(环境科学与技术), **32**(8):48-52
- Zhao P(赵平),Sun GC(孙谷畴),Zeng XP(曾小平),*et al.* 2000. A comparative study on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence and diurnal course of leaf gas exchange of two ecotypes of banyan(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)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **11**(3):327-332
- Zhao Y(赵艳),Xu YC(徐迎春),Chai CC(柴翠翠),*et al.* 2010. Effect of Cu<sup>2+</sup> stress on the growth and physiological properties of *Typha angustifolia*(铜胁迫对狭叶香蒲生长及生理特性的影响)[J]. *Guihaia*(广西植物), **30**(3):367-372
- Zhang FE(张凤娥),Zhang X(张雪),Liu Y(刘义). 2010. Research on the removal efficiency of TN and TP for contaminated river water by new plants(新型植物对河道受污染水体中 TN、TP 去除效果的研究)[J]. *Chin Rural Water & Hydrop*(中国农村水利水电), (6):56-58