

水质恶化影响下香蒲·水葱叶片的光合响应

赵湘江¹, 杨兰² (1. 贵州省林业调查规划院, 贵州贵阳 550003; 2. 贵州省旱粮研究所, 贵州贵阳 550006)

摘要 [目的]从叶片光合生理角度,探讨水葱和香蒲对水质恶化的响应。[方法]以香蒲和水葱为研究对象,设置试验组(污水生长环境培养)和对照组(中水生长环境培养),处理90 d后,用Li-6400便携式光合测定仪测定植物叶片的光合作用光响应曲线和叶绿素荧光参数。[结果]香蒲叶片最大净光合速率(P_{max})、光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)、有效荧光产量(Yield)、电子传递速率(ETR)、光化学淬灭系数(qP)和非光化学淬灭系数(NPQ)在2种处理间差异不显著($P > 0.05$),但试验组叶片的暗呼吸速率(R_d)显著低于对照组($P < 0.05$),表观量子效率(AQY)显著高于对照组($P < 0.05$);试验组水葱叶片的 P_{max} 、AQY、 R_d 、LSP、Yield、ETR、qP显著高于对照($P < 0.05$),LCP显著低于对照组($P < 0.05$),而NPQ差异不显著($P > 0.05$)。[结论]试验用污水超过V类,香蒲和水葱均具有较强的耐污能力,水葱对水质恶化的反映较香蒲敏感。

关键词 水质恶化;香蒲;水葱;光合作用光响应曲线;叶绿素荧光参数

中图分类号 X52 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)20-0077-04

Photosynthetic Response of *Typha orientalis* and *Scirpus tabernaemontani* Leaves under Water Quality Deterioration

ZHAO Xiang-jiang¹, YANG Lan² (1. Forest Inventory and Planning Institute of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550003; 2. Guizhou Institute of Upland Crops, Guiyang, Guizhou 550006)

Abstract [Objective] From the angle of leaf photosynthetic physiology, discuss the response and adaptation of *Typha orientalis* and *Scirpus tabernaemontani* on water quality deterioration. [Method] Taking *Typha orientalis* and *Scirpus tabernaemontani* as the research object, set the test group (sewage growth environment training) and control group (water environment training), after 3 months, the photosynthesis, light response curve and chlorophyll fluorescence parameters of plant leaves were measured by Li-6400 portable photosynthetic apparatus. [Result] *Typha orientalis* leaves' P_{max} , LCP, LSP, Yield, ETR, qP and NPQ were no significant differences under two different treatments ($P > 0.05$), but the R_d of experimental group was significantly smaller than that of control group ($P < 0.05$), AQY was significantly bigger than that of control group ($P < 0.05$). *Scirpus tabernaemontani* leaves' P_{max} , AQY, R_d , LSP, Yield, ETR, qP were significantly bigger than that of control group ($P < 0.05$), LCP was significantly smaller than that of control group ($P < 0.05$), but NPQ was no significant differences each other ($P > 0.05$). [Conclusion] The sewage that used in experiment exceeded V class, showing that *Typha orientalis* and *Scirpus tabernaemontani* all have strong tolerance abilities to sewage, *Scirpus tabernaemontani*'s responses are more sensitive than *Typha orientalis* to certain range of water quality deterioration.

Key words Water quality deterioration; *Typha orientalis*; *Scirpus tabernaemontani*; Light response curves of photosynthesis; Chlorophyll fluorescence parameters

水污染是我国湿地面临的最严重威胁之一^[1]。随着经济快速发展,高强度的人类活动中工业废水和生活污水大量不合理排放,以及农业面源污染等使许多河湖湿地及沿海水域水质恶化^[2]。近年来,我国东部平原和云贵高原湖区湖泊富营养化的数量和面积逐年增加的趋势较为严重^[3]。湿地植物在治理湿地水污染中具有举足轻重的作用,湿地植物对水质恶化的响应是湿地生态学的研究热点之一。

植物叶片光合作用特性研究中,净光合速率对光的响应曲线是一项重要内容^[4-5]。通过光合作用光响应曲线的测定及模拟,可获得光合作用表观量子效率(AQY)、暗呼吸速率(R_d)、光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)和最大净光合速率(P_{max})等重要生理参数^[6-8]。叶片光合作用过程中叶绿素荧光动力学技术对反映光系统在光能的吸收、传递、转换、耗散、分配等方面具有独特的作用,叶绿素荧光参数与“表现性”的气体交换指标相比,更具有反映“内在性”的特点,被称为测定叶片光合功能的快速、无损伤探针,环境因子对光合作用的影响可通过叶绿素荧光动力学反映出来^[9-11],因此叶片光合作用光响应曲线和叶绿素荧光动力学研究可反映环境要素(干旱胁迫等)对植物产生的影响。

香蒲(*Typha orientalis*)、水葱(*Scirpus tabernaemontani*)是

高原湿地常见的优势挺水植物,在高原湿地植物研究中具有典型性和代表性。目前,有关湿地挺水植物对水质恶化响应的研究多集中于植物对污水中TN、TP、COD等的去除效果、重金属降解能力等方面^[12-13],而从植物光合生理特性方面探讨植物对污水的适应研究不多,且这些研究局限于光合作用的表观气体交换指标,并未对环境适应机理进行深入研究。笔者模拟了香蒲、水葱叶片的光合作用光响应曲线,测定叶片的叶绿素荧光特征参数,阐明香蒲、水葱在污水环境下的光合响应和适应机制,旨在为高原湿地生态系统的科学管理及生态修复提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 滇池流域位于云贵高原中部,地处长江、红河、珠江三大水系分水岭地带,面积2 920 km²,滇池水域占10.35%,北亚热带湿润季风气候具有低纬山原季风气候特征,冬干夏润、干湿分明。试验地(102°45' E, 25°04' N)位于昆明,海拔1 946 m,春季干燥少雨,日温差大;夏季雨量集中(占全年雨量的60%以上),平均气温22℃;秋冬季天晴少雨,月晴天约20 d,日照时数约230 h,雨日约4 d;年平均气温15℃,年均日照时数2 200 h,年降水量1 035 mm。

1.2 试验材料 通过对高原湿地生态系统中挺水植物群落分布情况进行调查研究,选取典型高原湿地滇池湖滨带分布广泛、有代表性的优势挺水植物——香蒲和水葱为研究对象。

1.3 试验设计 2013年4月上旬,在滇池湖滨带选取长势优良一致、无病虫害的香蒲、水葱移栽到试验池(2.0 m × 1.2 m × 0.8 m),基质为砂土(田间持水量为19%,速效氮、磷、钾含量分别为28.14、2.25、25.76 mg/kg, pH 7.2),厚度15 cm,株行距15 cm,常规栽培管理(12月刈割),于2014年8月中旬(此时已适应中水环境,且生长旺季基本结束)开始试验。设置对照组和试验组,对照组继续常规管理(中水生

长环境培养),试验组用校园生活污水处理,保持植物其他生长环境因子一致。试验期间每隔10 d分别用中水和污水更换对照池和试验池水体,保持水深一致(约20 cm),试验处理90 d(试验组植物已适应所添加的污水环境)。2014年11月下旬用Li-6400光合仪分别测定试验组和对照组香蒲、水葱叶片的光合作用、光响应曲线和叶绿素荧光特征参数。试验所添加污水和中水水质基本指标情况见表1。

表1 试验用水5种主要水质指标含量

Table 1 Major indexes on tested water with five concentration gradient

处理 Treatments	总氮 Total nitrogen (TN)	总磷 Total phosphorus (TP)	氨氮 Ammonia nitrogen (NH ₄ ⁺ - N)	硝氮 Nitrate nitrogen (NO ₃ ⁻ - N)	化学需氧量 Chemical oxygen demand(COD)
试验组 Test group	36.68 ± 1.92	3.12 ± 0.17	25.72 ± 2.17	0.53 ± 0.07	189.60 ± 7.50
对照组 Control	15.73 ± 0.24	0.15 ± 0.03	10.17 ± 0.86	0.27 ± 0.04	22.00 ± 2.65

1.4 测定方法

1.4.1 水质基本指标含量测定。根据国家标准,TN含量用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;TP含量用钼酸铵分光光度法测定;NH₄⁺ - N含量用纳氏试剂比色法测定;NO₃⁻ - N含量用酚二磺酸分光光度法测定;COD含量用重铬酸钾氧化法测定。

1.4.2 叶片光响应曲线测定。2014年11月下旬,用Li-6400便携式光合作用测定系统的红蓝光源叶室控制光有效辐射[2 000、1 800、1 500、1 200、1 000、800、500、300、200、100、80、50、30、20、10、0 μmol/(m²·s)],测定不同光强所对应的试验组和对照组香蒲、水葱叶片净光合速率,测定部位为距离叶片顶端约20 cm。绘制光合速率对光有效辐射的光响应曲线,采用非直角双曲线模型进行模拟,通过光合助手Photosyn Assistant和Photosynthesis Work Bench程序^[14-17],计算一定CO₂浓度下P_{max}、R_d、AQY、LCP、LSP。

1.4.3 叶片叶绿素荧光参数测定。叶绿素荧光参数用Li-6400便携式光合作用测定系统的荧光叶室进行测定,分荧光光反应和荧光暗反应2步进行。荧光光反应测定于晴天11:00(叶片处于光适应状态)左右进行,即打开活化光[与外界光强基本一致,约1 000 μmol CO₂/(m²·s)],将事先标记过的叶片置于荧光叶室内,测定光下最小荧光(Fo')、最大荧光(Fm')、稳态荧光(Ft);荧光暗反应测定于光反应测定当天23:00(叶片已进行充分的暗适应)左右进行,测定已标记叶片最小初始荧光(Fo)和最大荧光(Fm)。根据Bilger等^[18]和

Roháček等^[19]的研究,叶绿素荧光特征参数按以下公式计算:
光化学最大量子效率(Fv/Fm): $Fv/Fm = (Fm - Fo)/Fm$
有效荧光产量(Yield): $Yield(\Delta Fv/Fm) = (Fm' - Ft)/Fm'$

电子传递速率(ETR): $ETR = Yield \times PAR \times 0.84 \times 0.50$
光化学淬灭系数(qP): $qP = (Fm' - Ft)/(Fm' - Fo')$
非光化学淬灭系数(NPQ): $NPQ = (Fm - Fm')/Fm' = Fm/Fm' - 1$

1.5 数据处理 采用Excel 2003及SPSS 11.5进行数据分析和制图,采用LSD法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同水环境下香蒲、水葱的光响应特征参数 一定环境条件下,叶片P_{max}可反映出植物叶片的最大光合能力^[20]。由表2可知,试验组香蒲和水葱叶片的P_{max}均较对照组高,香蒲叶片P_{max}在2种水质下差异不显著(P > 0.05),而水葱叶片P_{max}在2种水质下差异显著(P < 0.05)。AQY是反映植物在弱光下吸收、转换和利用光能能力的指标,是光合作用中光能转化效率的重要指标之一,值越大说明叶片光能转化效率越高^[21]。由表2可知,试验组香蒲和水葱叶片的AQY分别显著高于对照组(P < 0.05)(表2)。R_d反映的是植物在没有光照条件下的呼吸速率,该特征值主要与叶片的生理活性有关^[22]。表2显示,试验组香蒲叶片的R_d明显低于对照组(P < 0.05),而试验组水葱叶片的R_d却显著高于对照组(P < 0.05)。LCP是植物利用弱光能力大小的重要指

表2 不同处理下香蒲、水葱叶片光合作用光响应特征参数

Table 2 Characteristic parameter of Pn-PAR of *Typha orientalis* and *Scirpus tabernaemontani* leaves under different treatments

植物种类 Plant species	组别 Groups	最大净光合速率(P _{max}) Maximum net photosynthetic rate μmol CO ₂ /(m ² ·s)	表观量子效率(AQY) Apparent quantum efficiency μmol/μmol	暗呼吸速率(R _d) Dark respiration rate μmol CO ₂ /(m ² ·s)	光补偿点(LCP) Optical compensation point μmol CO ₂ /(m ² ·s)	光饱和点(LSP) Light saturation point μmol CO ₂ /(m ² ·s)
香蒲 <i>Typha orientalis</i>	试验组	17.69 ± 0.94 a	0.049 ± 0.012 a	0.62 ± 0.09 a	16.00 ± 2.74 a	1 264.00 ± 31.26 a
	对照组	14.76 ± 1.25 a	0.025 ± 0.006 b	2.35 ± 0.36 b	16.00 ± 3.13 a	1 280.48 ± 40.72 a
水葱 <i>Scirpus tabernaemontani</i>	试验组	9.44 ± 0.78 a	0.017 ± 0.004 a	1.90 ± 0.06 a	27.99 ± 4.62 a	1 187.55 ± 36.85 a
	对照组	1.22 ± 0.31 b	0.007 ± 0.002 b	1.17 ± 0.18 b	66.04 ± 7.64 b	273.17 ± 20.28 b

注:同列数据不同小写字母表示在0.05水平差异显著

Note: The different small letters in same column indicate significant difference at P < 0.05 level

标,该值越小,表明利用弱光的能力越强。LSP 是植物利用强光能力大小的指标^[23]。试验中,香蒲叶片的 LCP 和 LSP 在 2 种不同处理下差异不显著($P > 0.05$),而试验组水葱叶片的 LCP 显著低于对照组($P < 0.05$),试验组水葱叶片 LSP 显著大于对照组($P < 0.05$)。

2.2 不同水环境下香蒲、水葱的叶绿素荧光特征参数

表 3 不同处理下香蒲、水葱叶片叶绿素荧光参数

Table 3 Fluorescence parameters of *Typha orientalis* and *Scirpus tabernaemontani* leaves under different treatments

植物种类 Plant species	组别 Groups	光化学最大量子效率 Maximum quantum efficiency of photochemistry (F_v/F_m)	有效荧光产量 Effective fluorescence yield ($Yield$)	电子传递速率 Electron transfer rate (ETR)	光化学猝灭系数 Photochemical quenching coefficient (qP)	非光化学猝灭系数 Non photochemical quenching coefficient (NPQ)
香蒲 <i>Typha orientalis</i>	试验组	0.82 ± 0.007 a	0.19 ± 0.034 a	81.44 ± 14.301 a	0.34 ± 0.072 a	1.54 ± 0.190 a
	对照组	0.79 ± 0.008 b	0.17 ± 0.032 a	70.55 ± 13.340 a	0.33 ± 0.035 a	1.92 ± 0.528 a
水葱 <i>Scirpus tabernaemontani</i>	试验组	0.83 ± 0.007 a	0.12 ± 0.018 a	48.31 ± 7.716 a	0.22 ± 0.038 a	2.30 ± 0.051 a
	对照组	0.81 ± 0.014 b	0.06 ± 0.008 b	23.55 ± 3.248 b	0.12 ± 0.017 b	2.06 ± 0.301 a

注:同列数据不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercases in same column indicated significant differences at 0.05 level

3 讨论与结论

采用非直角双曲线模型对香蒲和水葱光合作用光响应曲线进行模拟,结果显示,各方程的决定系数均在 0.95 以上,说明该模型适合于不同水质环境下香蒲和水葱,能够较好地反映叶片光合作用对光的响应过程。该研究中,香蒲叶片的 P_{max} 在 2 种不同水环境处理中无明显差异,均具有较大的最大光合能力;污水生长环境培养下香蒲叶片的 AQY 显著大于对照组(中水生长环境培养),而 Rd 明显小于对照组,说明污水生长环境培养可提高香蒲叶片的光能转化效率,但是会降低叶片的生理活性(叶肉细胞活性下降,导致叶片光合作用能力降低),这是造成试验组(污水生长环境培养)香蒲叶片的 P_{max} 低于韩刚等^[24]研究中对对照组的原因。研究表明,植物对光环境的适应性较强时,其光补偿点较低,而光饱和点较高;相反,植物对光照的适应性较弱时,其光补偿点较高,而光饱和点较低。该研究发现,试验组和对照组香蒲叶片的 LCP 均较小,而 LSP 均较大,且 2 个指标在不同处理下差异不显著($P > 0.05$),说明香蒲叶片在 2 种不同水质环境处理中均具有较强的光环境适应性,且适应性相当,这也可能是香蒲叶片的 P_{max} 在 2 种不同水环境处理中无明显差异的原因之一。试验组水葱叶片的 P_{max} 、AQY、Rd、LSP 均显著大于对照组,而 LCP 显著小于对照组,说明水质恶化(污水生长环境培养)处理对水葱光合响应特性产生显著影响,可增大水葱叶片的最大光合能力,增强水葱叶片的光环境适应性,提高水葱叶片光能转化效率,同时叶片生理活性也大大提高。根据国家水质分类标准,试验组处理中所用污水 5 项指标均远远超过国家地表水 V 类水质标准,而污水的长期培养处理未对香蒲叶片的光合作用光响应特性产生较大影响,但是明显提高了水葱叶片的光合作用光响应特性,表明水葱对一定范围内水质恶化的反映较香蒲敏感,香蒲和水葱均具有较强的耐污能力。张小勤^[25]研究表明,云南高原湿地常见优势挺水植物(如香蒲、水葱等)是喜营养植

物,具有较强的耐污性,一定范围内的水质恶化(N、P 等含量增加)并不会对其产生较大的负面影响;成水平等^[26]研究指出,通常水平的城镇污水达不到香蒲的耐受负荷,不会对香蒲产生严重伤害;Clarke 等^[27]研究表明,污水中氨浓度不超过 100 mg/L 时不会抑制香蒲和水葱的生长。这些研究均与该研究结果一致。

试验中污水生长环境培养下香蒲和水葱叶片的 F_v/F_m 明显高于对照组,但是香蒲叶片 F_v/F_m 为 0.79 ~ 0.82,水葱为 0.81 ~ 0.83,最小值均不低于 0.75,说明在污水环境中香蒲和水葱不受逆境胁迫;香蒲叶片其他叶绿素荧光参数指标(Yield、ETR、qP、NPQ)在试验组和对照组之间无明显差异,说明水质恶化未损伤到香蒲叶片光合系统 PSII,可知一定范围内的水质恶化对香蒲叶片叶绿素荧光特性影响不大,香蒲对一定范围内的水质恶化反映不敏感,这支持了上述香蒲具有较强耐污能力的结论。水葱叶片的叶绿素荧光参数中 NPQ 在试验组和对照组中差异不显著,表明热耗散光能量并无较大变化,而试验组水葱叶片 qP、Yield 和 ETR 值显著大于对照组,说明污水生长环境培养提高了水葱叶片光电子固定能力和光能的吸收转化效率,可知一定浓度范围内水质恶化有利于水葱生长,可显著提高水葱叶片的光合作用效率,有利于水葱生物量的积累。

参考文献

- [1] 赵旭,裕振,刘丽萍. 湿地保护区水环境评价方法及其应用[J]. 勘察科学技术,2008,26(1):30-32,61.
- [2] 宋晓林,吕宪国. 中国退化河口湿地生态恢复研究进展[J]. 湿地科学,2009,7(4):379-384.
- [3] 许其功,曹金玲,高如泰,等. 我国湖泊水质恶化趋势及富营养化控制阶段划分[J]. 环境科学与技术,2011,34(11):147-151.
- [4] 张力文,钟国成,张利,等. 3 种鼠尾草属植物光合作用-光响应特性研究[J]. 草业学报,2012,21(2):70-76.
- [5] 祁娟,师尚礼,徐长林,等. 4 种披碱草属植物光合作用光响应特性的比较[J]. 草业学报,2013,22(6):100-107.
- [6] 王荣荣,夏江宝,杨吉华,等. 贝壳砂生境干旱胁迫下杠柳叶片光合响应模型比较[J]. 植物生态学报,2013,37(2):111-121.
- [7] LAROCQUE G R. Coupling a detailed photosynthetic model with foliage distribution and light attenuation functions to compute daily gross photo-

- synthesis in sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) stands [J]. Ecological modelling, 2002, 148(3): 213–232.
- [8] 冷寒冰, 秦俊, 叶康, 等. 不同光照环境下荷花叶片光合光响应模型比较[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2855–2860.
- [9] MASSACCI A, NABIEV S M, PIETROSANTI L, et al. Response of the photosynthetic apparatus of cotton (*Gossypium hirsutum*) to the onset of drought stress under field conditions studied by gas-exchange analysis and chlorophyll fluorescence imaging [J]. Plant physiology and biochemistry, 2008, 46(2): 189–195.
- [10] EFEÖĞLU B, EKMEKÇI Y, ÇIÇEK N. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery [J]. South African journal of botany, 2009, 75(1): 34–42.
- [11] 裴斌, 张光灿, 张淑勇, 等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1386–1396.
- [12] 袁东海, 高士祥, 任全进, 等. 几种挺水植物净化生活污水总氮和总磷效果的研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 77–80, 92.
- [13] 李琳, 刘娜娜, 达良俊, 鸢尾和菖蒲不同器官对富营养化水体中氮磷的积累效应[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(12): 901–903, 907.
- [14] FARQUHAR G D, VON C S, BERRY J A. Models of photosynthesis [J]. Plant physiology, 2001, 125(1): 42–45.
- [15] 蔡艳飞, 李世峰, 解玮佳, 等. 不同光照环境对‘薇安’铁线莲光合特性的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(7): 1377–1384.
- [16] 杨婷, 许琨, 严宁, 等. 三种高山杜鹃的光合生理生态研究[J]. 植物分类与资源学报, 2013, 35(1): 17–25.
- [17] 蒋馥蔚, 江洪, 李巍, 等. 酸雨胁迫下黑壳楠 *Lindera megaphylla* Hemsl. 幼苗在夏季和秋季的生理生态特性[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2374–2380.
- [18] BILGER W, BJÖRKMANN O. Role of the xanthophyll cycle in photoprotection elucidated by measurements of light-induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canariensis* [J]. Photosynthesis research, 1990, 25(3): 173–185.
- [19] ROHÁČEK K. Chlorophyll fluorescence parameters: The definitions, photosynthetic meaning and mutual relationships [J]. Photosynthetica, 2002, 40(1): 13–29.
- [20] TARTACHNYK I I, BLANKE M M. Effect of delayed fruit harvest on photosynthesis, transpiration and nutrient remobilization of apple leaves [J]. New phytologist, 2004, 164(3): 441–450.
- [21] 许大全. 光合作用效率 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002: 33–51.
- [22] 张淑勇, 周泽福, 夏江宝, 等. 不同土壤水分条件下小叶扶芳藤叶片光合作用对光的响应[J]. 西北植物学报, 2007, 27(12): 2514–2521.
- [23] 伍维模, 李志军, 罗青红, 等. 土壤水分胁迫对胡杨、灰叶胡杨光合作用-光响应特性的影响[J]. 林业科学, 2007, 43(5): 30–35.
- [24] 韩刚, 赵忠. 不同土壤水分下4种沙生灌木的光合光响应特性[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4019–4026.
- [25] 张小勤. 几种水生植物对污水胁迫的生理响应[D]. 昆明: 西南林业大学, 2012.
- [26] 成水平, 况琪军, 夏宜铮. 香蒲、灯心草人工湿地的研究: I. 净化污水的效果[J]. 湖泊科学, 1997, 9(4): 351–358.
- [27] CLARKE E, BALDWIN A H. Responses of wetland plants ammonia and water level [J]. Ecological engineering, 2002, 18(3): 257–264.

(上接第72页)

别为94.6%、91.9%、91.4%；3种植物对TP的去除能力从大到小依次为水葱、翠芦莉、花叶芦竹，去除率分别为93.8%、92.0%、91.3%；对COD的去除能力从大到小依次为翠芦莉、花叶芦竹、水葱，去除率分别为89.8%、81.7%、78.7%。通过构建微型潜流人工湿地，发挥挺水植物和湿地基质的共同净污效应，发现3种植物中翠芦莉对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP、COD总体表现出较高的净污能力^[19]。

(2) 当种植株数为8时，植物对污染物的去除率总体最高，这表明污染物的去除率一般随植物株数的增多而增大。

(3) 污染物的去除率随停留时间的延长而增大，且前96 h的去除速率明显比后72 h要大，这与介质的吸附和植物与微生物的生长有关。

(4) 2种污水处理后的水质均满足广东省水污染物排放限(DB 44/26—2001)第2时段一级标准，说明该研究具有广阔实际应用前景。

参考文献

- [1] 高松. 农村水污染特征及治理分析[J]. 绿色科技, 2016(24): 55–56.
- [2] 严岩, 孙宇飞, 董正举, 等. 美国农村污水管理经验及对我国的启示[J]. 环境保护, 2008(15): 65–67.
- [3] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报[R]. 2010.
- [4] 李娟, 张龙庄, 段亮, 等. 人工湿地废水处理技术的研究现状及展望[J]. 南方农业学报, 2011, 42(1): 69–73.
- [5] 徐德福, 李映雪. 用于污水处理的人工湿地的基质、植物及其配置[J]. 湿地科学, 2007, 5(1): 32–38.
- [6] 何云晓, 陈娟, 艾明. 农村污水治理中人工湿地植物系统的研究[J]. 江苏农业科学, 2010(5): 498–500.
- [7] 刘晓璐, 牛宏斌, 闫海, 等. 农村生活污水生态处理工艺研究与应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 184–191.
- [8] 裴亮, 孙莉英. 水生植物在人工湿地处理农村生活污水中的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(10): 26–29.
- [9] 高廷耀, 顾国维, 周琪. 水污染控制工程: 下册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 267.
- [10] 谢龙, 汪德耀. 花叶芦竹潜流人工湿地处理生活污水的研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(5): 89–91.
- [11] 蔡汉, 王小明. 园林新优宿根花卉——翠芦莉[J]. 中国花卉园艺, 2008(10): 24–25.
- [12] 刘旭富, 石青. 五种水生植物对富营养化水体净化能力的研究[J]. 北方园艺, 2012(22): 54–56.
- [13] 刘文杰, 许兴原, 何欢, 等. 4种湿地植物对人工湿地净化生活污水的影响比较[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6313–6319.
- [14] 任照阳, 邓春光. 生态浮床技术应用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(S1): 261–263.
- [15] 胡勇有, 王鑫, 张太平, 等. 用低浓度生活污水筛选适于华南人工湿地的植物[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(9): 111–116.
- [16] 李龙山, 倪细炉, 李志刚, 等. 5种湿地植物生理生长特性变化及其对污水净化效果的研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1625–1632.
- [17] 张晓斌. 植物修复在水环境污染治理中的研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2007.
- [18] 聂磊, 贺漫媚. 观赏挺水植物在河涌污水中的生长及净化效果研究[J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(4): 832–838.
- [19] 聂磊, 贺漫媚, 代色平. 十种湿地挺水植物净化广州河涌污水的生理生态效应分析[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(9): 1776–1780.