

移栽胁迫对 3 种湿地植物的影响*

柏祥^{1,2}, 陈开宁^{2**}, 黄蔚², 古小治², 陈效民¹

(1: 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 湿地植物的移栽是人工湿地修复的主要组成部分, 移栽期间, 植物从起苗、运输到栽植时间的长短等都直接影响到湿地植物移栽后的成活率和生长状况。以南四湖人工湿地中芦竹 (*Arundo donax*)、芦苇 (*Phragmites communis*) 和香蒲 (*Typha latifolia*) 为研究对象, 研究了移栽胁迫在起苗后 24h 内对 3 种植物的影响。结果表明: 起苗后, 芦苇的生物量和叶绿素含量下降速率最小, 芦竹的叶绿素含量下降最快; 叶绿素荧光方面, 芦竹光合系统 II (PS II) 的潜在活性 (F_v/F_o) 和潜在最大光合能力 (Y) 最大, 光保护能力 (NPQ) 也最强; 香蒲的实际光合效率 (Φ_{PSII}) 最大; 3 种湿地植物的光化学淬灭 (qP)、光保护能力和实际光合效率在 5h 左右即降至最低, 而潜在最大光合能力下降至 22h 后达到稳定的较低值; 芦苇的 Φ_{PSII} 、 Y 、 qP 、 NPQ 和香蒲的 Φ_{PSII} 、 qP 均与叶绿素含量的减少呈极显著的正相关关系 ($P < 0.01$)。以上结果表明, 移栽胁迫对 3 种湿地植物产生了严重的影响, 且影响程度为芦苇 > 香蒲 > 芦竹, 起苗后栽植时间分别不宜超过 4-6h、6-8h 和 14-16h, 以保证移栽后的植物成活率和正常生长。

关键词: 移栽胁迫; 湿地植物; 叶绿素荧光; 南四湖; 人工湿地

Effects of transplanting stress on three types of hydrophyte

BAI Xiang^{1,2}, CHEN Kaining², HUANG Wei², GU Xiaozhi² & CHEN Xiaomin¹

(1: College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, P. R. China)

(2: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

Abstract: Transplantation of hydrophytes is an important conduct during the construction of constructed wetland. Transplanting stress could influence the survival ratio and growth of hydrophyte. The change of transplanting stress with time after lifting on *Arundo donax*, *Phragmites communis* and *Typha latifolia* in Lake Nansi, Shandong Province was studied in this paper. The results were as follows: *P. communis* had the least decrease in biomass and chlorophyll content among the 3 hydrophytes, while the chlorophyll content of *A. donax* decreased rapidly after lifting. In terms of the chlorophyll fluorescence, *A. donax* had the largest latent activity (F_v/F_o) of Photosynthesis System II (PS II), latent maximum photosynthesis capacity (Y) and light protective capacity (NPQ). *T. latifolia* had the highest actual photosynthesis efficiency (Φ_{PSII}) synchronously. Photochemical quenching, light protective capacity and actual photosynthesis efficiency of the 3 hydrophytes all decreased to the lowest in 5 hours after lifting. However, the latent maximum photosynthesis capacity reached the lowest after 22 hours. The Φ_{PSII} , Y , qP , NPQ of *P. communis* and Φ_{PSII} , qP of *T. latifolia* showed remarkable positive correlation with the change of chlorophyll content ($P < 0.01$). The results showed that the transplanting stress had great effects on the 3 hydrophytes, and the degree of influence was following as *P. communis* > *T. latifolia* > *A. donax*, indicating the plants should be planted in 4-6h, 6-8h and 14-16h after lifting respectively, to sustain high survival ratio and natural growth.

Keywords: Transplanting stress; hydrophytes; chlorophyll fluorescence; Lake Nansi; constructed wetland

人工湿地 (Constructed Wetland, CW) 是模拟自然湿地的结构和功能, 通过构建动植物群落来满足人类

* 南水北调东线南四湖生态恢复与综合整治技术开发项目 (2006BAC10B03)、太湖贡湖北部底泥环保疏浚与生态修复技术研究项目 (BS2007161) 和江苏典型水源地湖泊受损湿地生态修复应用技术研究 (BE2008690) 联合资助。2009-03-13 收稿; 2009-07-28 收修改稿。柏祥, 男, 1984 年生, 硕士研究生。

** 通讯作者; E-mail: knchen@niglas.ac.cn.

需求的一种人工设计、建造的湿地^[1],是20世纪70年代发展起来的一种末端污水处理技术,是利用湿地生态系统中的物理、化学和生物等因素的协同作用来达到净化污水的目的^[2]. 湿地植物作为人工湿地生态系统中不可缺少的一员,在水体修复、维持生态平衡和生物多样性方面具有十分重要的作用^[3]. 在人工湿地建设过程中,湿地植物的移栽是整个工程不可缺少的步骤,种植后其成活率是决定人工湿地建设成败的关键. 湿地植物的移栽包括起苗、分级、包装、运输、栽植等一系列过程,期间受到诸如断根、失水、高低温、光照不足、光周期紊乱、缺氧、擦伤、振动、根际环境改变等各种胁迫. 李继东等将移栽期间各种因子对移栽植物生长发育造成的不良影响统称为移栽胁迫^[4]. 移栽胁迫不仅影响湿地植物的成活率,而且不一定会随着植物移栽后的成活或恢复生长而消失,可能会持续一段或相当长的时间. 了解这些因素对湿地植物的影响,可以指导人工湿地建设.

南四湖地处山东省西南部(34°27′-35°20′N,116°34′-117°21′E),为西北-东南走向的狭长水域,是山东省最重要的水源地和生物多样性保护区,也是南水北调东线工程重要的调蓄枢纽之一^[5]. 山东省环境保护局提出了“治、用、保”措施,在南四湖下级湖——新薛河入湖口东侧建设人工湿地和保护修复自然湿地330余公顷,人工湿地中种有芦竹(*Arundo donax*)、芦苇(*Phragmites communis*)、香蒲(*Typha latifolia*)等多种湿地植物,净化水质的同时也成为当地农民增收的主要途径.

Kautsky 和 Hirsch 于 1931 年首次发现了叶绿素荧光动力学现象(Kautsky effect),此后特别是 Schreiber 和同事把叶绿素荧光动力学技术转变成仪器以来,大量研究表明,叶绿素荧光动力学与植物的生长密切相关,是表征植物生长好坏的重要特征,在植物的光合作用、逆境生理、组织衰老等生理生态学方面研究具有重要作用^[6-7]. 叶绿素荧光以光合作用理论为基础,光合作用受到伤害的最原初部位是与 PS II 系统紧密相连的^[8],任何逆境对光合作用产生的影响都可以通过叶绿素荧光的变化反映出来,因此叶绿素荧光参数可作为逆境条件下植物抗逆反应的指标之一. 失水胁迫是移栽胁迫中最主要的因素,同时也是抑制植物光合作用最主要的环境因子之一^[9],因此移栽胁迫对植物的影响可以通过叶绿素荧光参数的变化表现出来. 目前,关于移栽胁迫对湿地植物的叶绿素荧光参数的影响尚未见报道,为此,本文以南四湖人工湿地主要植物芦竹、芦苇和香蒲为研究对象,探讨植物起苗后不同时间内生物量、叶绿素、叶绿素荧光动力学指标的胁迫响应,以期为人工湿地的建设和自然湿地的恢复提供理论依据.

1 材料与方法

试验于2008年10月10-11日进行,选取南四湖人工湿地中正常生长的芦竹、芦苇和香蒲,在10日16时从湿地中挖出,冲洗掉根部的泥土,立即取样测定叶绿素含量,并同时进行生物量和叶绿素荧光的测定. 之后叶绿素含量分别在起苗后的8h、16h、24h进行测定;生物量变化和叶绿素荧光在24h内每隔2h测定一次,共计13次.

1.1 叶绿素含量的测定

以无水乙醇:丙酮=1:1的混合液为浸提液,浸提24h后进行分光光度比色^[10].

1.2 植株生物量变化的测定及表示方法

按照试验设置的时间对植株的鲜重(*FW*)进行称量测定(精确到0.1g),于试验结束时将植株放入80℃的烘箱中烘至恒重后称量测定其干重(*DW*),干湿比计算公式为:

$$\text{干湿比} = DW/FW_i$$

其中, FW_i ($i=1,2,\dots,13$)表示每次测定时的植株鲜重.

1.3 叶绿素荧光的测定

叶绿素荧光采用水下调制荧光仪 DIVING-PAM(德国, WALZ)进行测定. 植株叶片经10min暗适应后打开测量光($1\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)再打开饱和脉冲($3000\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$),测定本底荧光 F_0 和最大荧光 F_m , 然后照射光化光($157\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)30s后打开饱和脉冲,测定实时荧光 F 和光照状态下的最大荧光 F_m' , 通过测定出的荧光值,按以下公式计算其它叶绿素荧光参数:

$$\text{实际量子产量: } \Phi_{\text{PSII}} = \Delta F/F_m' = (F_m' - F)/F_m', \text{ 最大量子产量: } Y = F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m,$$

光化学淬灭: $qP = (Fm' - F) / (Fm' - Fo)$, 非光化学淬灭: $NPQ = (Fm - Fm') / Fm'$.

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 进行统计分析和制图.

2 结果与分析

试验期间天气以晴为主,最低气温 10.6℃,最高气温 22.7℃,分别出现在起苗后的 8h 和 22h,即 0 点和 14 点,日平均气温 15.99 ± 2.81 ℃. 大气相对湿度变化范围为 32% - 73%,出现时间与温度正好相反(图 1).

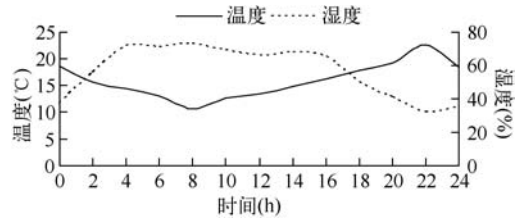


图 1 试验期间的温度和湿度变化

Fig. 1 Changes of temperature and humidity during the experiment

2.1 起苗后 3 种湿地植物植株干湿比的变化

起苗后植株干湿比的变化反映了起苗后植株体内水分的变化情况. 3 种湿地植物在同一时间内的干湿比大小依次为芦苇 > 芦竹 > 香蒲,即这 3 种湿地植物中芦苇的含水量最小,香蒲最大,芦竹居中,起苗时芦苇、香蒲和芦竹的含水量分别为 113.5%、343.2% 和 203.3% 也说明了这一点. 起苗后 24h 内,芦竹的干湿比变化最大,为 $0.010h^{-1}$,大于芦苇和香蒲(两者均为 $0.007h^{-1}$),24h 后芦苇、香蒲和芦竹的含水量分别达到 60.2%、152.2% 和 74.5%. 20h 后 3 种湿地植物的干湿比变化均表现出加快的现象,即植株体内的水分散失速率加快,芦竹大于芦苇和香蒲(图 2a).

2.2 叶绿素含量的变化

芦苇的叶绿素含量最高,为 1.79mg/g(FW),其次为香蒲和芦竹,分别为 1.08mg/g(FW) 和 0.63mg/g(FW). 起苗后的 24h 内,芦竹叶绿素含量下降最快,下降量达 0.27mg/g(FW),其次为香蒲(0.26mg/g(FW)),芦苇叶绿素含量下降最为缓慢,仅为 0.08mg/g(FW),且起苗后 16h 内基本无变化(图 2b). 说明芦苇的叶绿素在三者之中最稳定,下降最慢,而芦竹的叶绿素下降最快,香蒲居中. 但通过统计分析可知,3 种湿地植物的叶绿素在 24h 内的下降量均未达到显著水平($P > 0.05$).

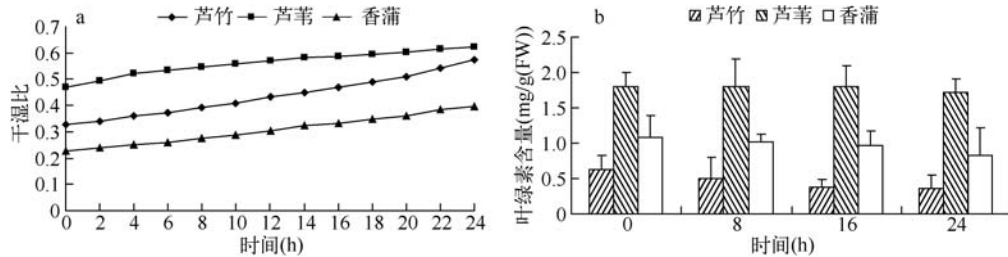


图 2 起苗后 3 种湿地植物的干湿比(a)和叶绿素含量(b)变化

Fig. 2 Changes of DW/FW ratio(a) and chlorophyll content(b) of 3 hydrophytes after lifting

2.3 叶绿素荧光的变化

2.3.1 实际量子产量 Φ_{PSII} 的变化 由实时荧光 F 和光照状态下的最大荧光 Fm' 计算得到的实际量子产量 Φ_{PSII} 反映了植物的实际光合效率^[11]. 3 种湿地植物的 Φ_{PSII} 在起苗后 24h 内均有明显的下降,特别是前 6h 内(图 3a). 其中芦竹的 Φ_{PSII} 下降最快,起苗后的 2h 内下降了 72.2%;其次为芦苇,下降了 60.7%;而香蒲仅下降了 39.7%,但 6h 时已降至 3 种中的最低值,8h 时接近于 0. 而芦竹和芦苇的 Φ_{PSII} 接近于 0 的时间分别为 16h 和 18h,期间芦竹和芦苇出现交替变化,4 - 12h 内芦竹高于芦苇,其余时间内芦苇均高于芦竹. 总体来看,芦竹和芦苇的实际光合效率在起苗后无明显差异($P > 0.05$),但在 5h 内明显小于香蒲,5h 后三者趋于一致.

2.3.2 最大量子产量 Y 的变化 通过暗适应后测量得到的本底荧光 Fo 和最大荧光 Fm 计算得到的最大量子产量 Y 反映了 PS II 反应中心内禀光能转换效率,或称最大 PS II 的光能转换效率^[12],是植物的潜在最大光

合能力的表征^[9]. 3种植物的 Y 在起苗后的下降过程表现出较大的差异. 起苗时, 3种植物的 Y 基本相同, 香蒲略高于其它 2 种植物. 2h 后开始出现明显差异: 芦竹和香蒲基本保持稳定, 分别直到 12h 和 10h 后才开始下降, 而芦苇于 2h 后便开始出现明显下降, 8h 后下降趋势变缓. 18h 时, 3种植物的 Y 趋于接近, 在此后的下降过程中, 芦竹明显快于其它 2 种, 并呈现继续快速下降的趋势, 而芦苇和香蒲表现出相对缓慢下降趋势. 同时, $Y = F_v/F_m$ 也表征了 PS II 原初光能转化效率, 其大小表征了叶绿体把捕获的光能转化为化学能, 为光合碳同化能力提供速度和效率^[13-14]. 通常 F_v/F_m 的暗适应值在 0.70-0.85 之间, 多数植物的最适值在 0.83 左右^[15], 当 F_v/F_m 下降时, 表征植物受到了胁迫. 3种植物起苗时的 F_v/F_m 在 0.8 左右, 芦苇的下降明显快于芦竹和香蒲. 芦竹、芦苇和香蒲的 F_v/F_m 降至 0.7 以下的时间分别为 14h、4h 和 12h (图 3b).

2.3.3 光化学淬灭 qP 的变化 光化学淬灭 qP 反映了植物光合活性的高低^[16]. 起苗后, 芦苇和香蒲的 qP 在 2h 内分别由 0.88 和 0.70 缓慢下降至 0.60 左右, 之后急剧下降, 4h 时, 芦苇的 qP 已小于 0.05; 香蒲稍迟一些, 于 6h 时降至 0.05 以下. 芦竹的 qP 下降速率较为平缓且小于其它 2 种植物, 10h 时仍为 0.09, 14h 时下降至 0.05 以下. 在下降至 0.05 的范围内后, 3种植物的 qP 便在 0-0.10 的范围内波动变化 (图 3c).

2.3.4 非光化学淬灭 NPQ 的变化 非光化学淬灭 NPQ 反映了植物耗散过剩光能为热的能力, 即光保护能力的高低^[16]. 起苗后芦竹和芦苇的 NPQ 先有一个上升阶段, 分别到 4h 和 6h 时开始下降, 香蒲则一直呈下降趋势. 芦竹的 NPQ 下降速率小于其它 2 种植物, 但在下降的过程中出现较明显的波动变化, 16h 时趋于 0. 起苗 2h 后芦苇的 NPQ 急剧下降, 由 2h 的 1.2470 下降至 4h 的 0.0835, 并在 6h 时趋于 0. 香蒲的 NPQ 下降过程可分为 6h 前的匀速下降、6-10h 的稳定阶段和 10-14h 的匀速下降 3 个阶段, 14h 时趋于 0 (图 3d). 这说明禾本科的芦竹和芦苇在受到移栽胁迫时, 光保护能力起初有一个小的提高阶段, 而后开始下降; 香蒲科的香蒲在受到移栽胁迫时, 光保护能力一直呈现下降趋势.

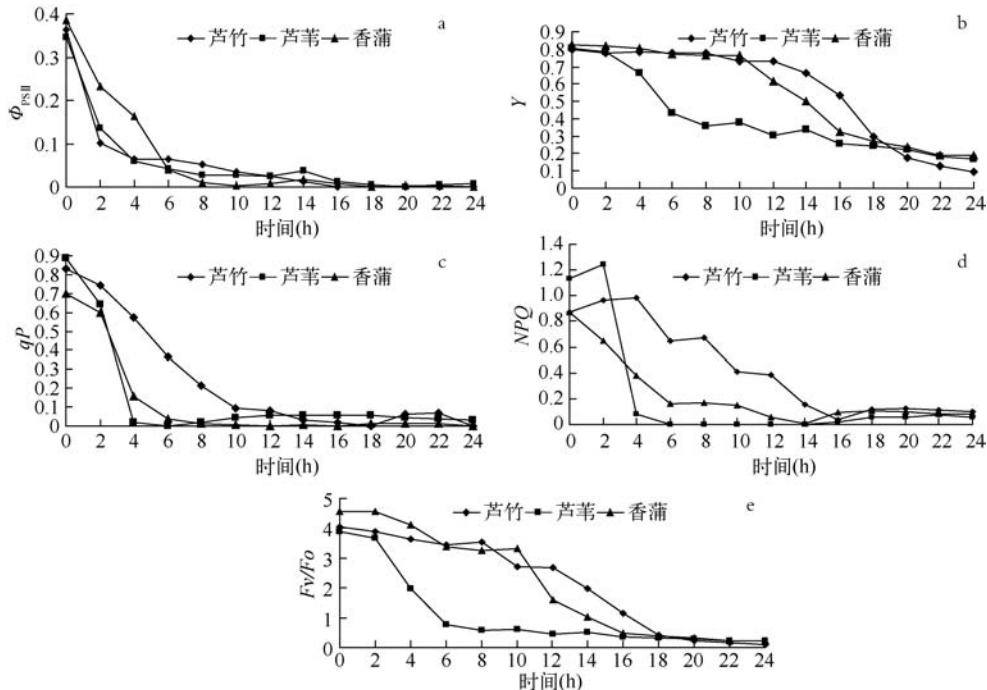


图 3 起苗后 3 种湿地植物的 Φ_{PSII} (a)、 Y (b)、 qP (c)、 NPQ (d) 和 F_v/F_o (e) 变化

Fig. 3 Changes of Φ_{PSII} (a), Y (b), qP (c), NPQ (d) and F_v/F_o (e) of 3 hydrophytes after lifting

2.3.5 F_v/F_o 的变化 F_v/F_o 反映了 PS II 的潜在活性^[17]. 3种植物的 F_v/F_o 与 Y 的变化趋势基本一致. 起苗后芦竹和芦苇的 F_v/F_o 基本一致, 在 4.0 左右, 低于香蒲 (相差 0.5 左右). 2h 后变化趋势开始出现差异, 芦苇急剧下降, 6h 后下降速率明显放缓; 芦竹和香蒲缓慢下降, 分别在 12h 和 10h 后开始快速下降. 到 18h

时, 3种植物的 F_v/F_o 趋于一致, 约 0.5 左右(图 3e).

2.3.6 叶绿素荧光参数与叶绿素含量变化的相关性分析 随着叶绿素含量的下降, 叶绿素荧光参数也表现出明显的变化. 3种湿地植物起苗后的叶绿素荧光参数的变化与叶绿素含量下降之间的相关性分析(表 1)表明, 芦苇的 Φ_{PSII} 、 Y 、 qP 和 NPQ 与香蒲的 Φ_{PSII} 和 qP 的变化均与叶绿素含量的变化呈极显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 芦竹的 Φ_{PSII} 与香蒲的 Y 和 NPQ 的变化与叶绿素含量的变化之间的正相关关系达到了显著水平 ($P < 0.05$), 3种植物 F_v/F_o 的变化与叶绿素含量变化之间的差异不显著 ($P > 0.05$). 这说明同一植物不同叶绿素荧光参数和不同植物同一叶绿素荧光参数的变化与叶绿素含量的变化间存在着一定的差异.

表 1 叶绿素荧光参数与叶绿素含量变化的相关性分析

Tab.1 Correlation analysis of the changes between chlorophyll fluorescence parameters and chlorophyll content

植物种类	Φ_{PSII}	Y	qP	NPQ	F_v/F_o
芦竹	$y = 1.3112x - 0.5052$ $r = 0.9323^*$	$y = 2.133x - 0.4386$ $r = 0.8103$	$y = 3.0346x - 1.1446$ $r = 0.9562$	$y = 3.5455x - 1.2039$ $r = 0.9736$	$y = 14.161x - 4.3742$ $r = 0.9348$
芦苇	$y = 1.5885x - 2.718$ $r = 0.3807^{**}$	$y = 3.9281x - 6.5671$ $r = 0.5547^{**}$	$y = 3.7923x - 6.4761$ $r = 0.3534^{**}$	$y = 4.3213x - 7.3599$ $r = 0.3079^{**}$	$y = 18.246x - 31.101$ $r = 0.4094$
香蒲	$y = 1.1446x - 1.0146$ $r = 0.6731^{**}$	$y = 2.6106x - 2.0177$ $r = 0.9147^*$	$y = 2.0749x - 1.8472$ $r = 0.6671^{**}$	$y = 2.4364x - 2.0701$ $r = 0.7146^*$	$y = 16.639x - 14.079$ $r = 0.8748$

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, 无标记 $P > 0.05$.

3 讨论

移栽植物起苗后受到了诸如水分、温度、光照、氧气等多种因素构成的环境胁迫, 在短时间内植物可以通过某些生理调节机制来适应这种不良环境, 但是随着时间的延长, 环境胁迫影响累积增加, 超过了植物所能承受的程度和范围, 则植物会受到严重伤害, 最终导致植物栽植后成活率下降. 因此, 研究移栽植物起苗后不同时间内所受到的移栽胁迫的影响, 探讨植物对胁迫因素的响应机制, 可以为移栽植物过程中的运输和贮藏提供依据, 对植物移栽后成活率的提高具有重要意义. 目前, 有关这方面的研究多集中于陆生木本植物, 而关于环境胁迫因素对湿地植物在移栽期间的影响, 特别是不同时间内植物的变化情况鲜有报道.

Levitt 将胁迫定义为: 任何环境因子对生物能构成的潜在伤害, 这些伤害或变化可以是生理的或化学的, 如果严重到一定程度, 生物会遭受严重伤害或死亡^[18]. 起苗后, 植物脱离了其原来生活的环境, 各种环境因子发生了很大的变化, 并对植物产生了胁迫. 失水是移栽过程中最容易发生的伤害, 其中的任一环节都有可能造成苗木失水, 即使是快速的随起随栽, 也会引起失水, 因此水分胁迫是植物移栽期间受到的主要胁迫^[19-20]. 湿地植物由于其对水分环境的适应性, 体内含有大量的通气组织, 并且对水分的利用效率相对较低^[21], 因此起苗后水分散失很快. 本研究中起苗后 24h 内 3 种湿地植物干湿比的变化均在 $0.007h^{-1}$ 以上, 植株含水量的变化也在 47.0% 以上, 其中芦竹高达 63.4%. 另外, 植物不同器官间的失水速率也存在很大差异, 根、茎、叶的失水速率极不相同^[22], 关于湿地植物各器官间水分散失速率情况还有待于进一步的研究. 总之, 与陆生植物相比, 湿地植物在起苗后受到的水分胁迫更大, 更不利于栽植后的成活.

湿地植物在起苗后的胁迫也会引起植株体内叶绿素的降解. 叶绿素的降解主要有酶降解和光降解两大途径^[23]. 黄持都等的研究表明, 叶绿素的降解速率与光强、氧气有关, 随光强和氧气浓度的增加而加快; $60^{\circ}C$ 以下的温度变化对叶绿素的降解影响不大^[24]. 水分的散失不但会引起叶绿素的降解, 并且也会影响叶绿素的生物合成, 这主要是由于水分亏缺使各种细胞器, 特别是叶绿体和线粒体受到伤害所致, 植物通过包括减少色素含量在内的一系列方法来减少叶片对光能的捕获, 达到保护的目的^[25]. 同时, 叶绿素含量与植物组织的衰老程度间有显著的负相关关系, 因此叶绿素的降解可以作为组织衰老的重要生理指标^[26]. 在本研究中, 芦竹的叶绿素含量下降最快, 芦苇下降最慢, 说明在同样条件下, 从叶绿素含量方面考虑, 移栽胁迫对芦竹的影响大于芦苇, 而香蒲居于其中.

叶绿素荧光与光合作用密切相关, 它是以植物体内叶绿素为内在探针来研究和探测植物光合生理状况及各种外界因子对其细微影响的新型植物活体测定和诊断技术, 极易受到逆境的影响, 任何逆境对光合作

用各过程产生的影响都可通过体内叶绿素荧光变化反映出来。因此,叶绿素荧光参数可作为逆境条件下植物抗逆反应的指标之一,是快速、灵敏、无损伤地研究和探测逆境胁迫对植物光合作用影响的理想方法^[11,17,27]。除前述的应用领域外,在植物移栽方面也有相关的应用报道^[9,28],如移栽胁迫对枣苗叶片叶绿素 a 荧光的影响研究表明^[9],移栽胁迫下枣树的 Φ_{PSII} 、 F_v/F_m 和 F_v/F_o 均呈下降趋势,且随胁迫程度的加重下降加快;另外,对小麦和皂荚等苗木的研究也表明, Φ_{PSII} 、 F_v/F_m 和 F_v/F_o 及 qP 、 NPQ 在水分胁迫条件下均有所下降;但对苗木核桃和冬小麦的研究却表明,在水分胁迫条件下其 NPQ 表现出上升的趋势^[29,31]。所有高等植物都有较为完善的非光化学淬灭机制,在逆境条件下可以通过非辐射性热耗散来吸收过剩光能,防御过剩光能的破坏,从而避免光合器官受到损伤。 NPQ 正是反映这一热耗散程度的指标。湿地植物对水分的要求很高,因此在本研究所选用的叶绿素荧光参数 Φ_{PSII} 、 Y 、 qP 、 NPQ 、 F_v/F_m 和 F_v/F_o 中,3 种湿地植物在起苗后受到失水胁迫时,除芦竹和芦苇的 NPQ 外,其他参数均呈现持续下降的趋势,且下降速度均较快,说明移栽胁迫在 4-18h 时间内对 3 种湿地植物光合作用的光化学过程造成了严重的影响,而芦竹和芦苇在短时间(4h)内可以通过增加热耗散来避免光合器官受到损伤。

综上所述,移栽胁迫在起苗后的 24h 内对芦竹、芦苇和香蒲的光合生理造成了一定的影响,移栽胁迫对 3 种湿地植物的影响为芦苇 > 香蒲 > 芦竹。从本研究结果看,芦竹、芦苇和香蒲 3 种植物起苗后适宜栽植的时间分别为 14-16h、4-6h 和 6-8h 以内。因此,湿地植物起苗后在条件允许的情况下应尽快进行栽植。同时采取一定的措施如根系带土、合理包装、喷洒植物激素等,可以在一定程度上减轻移栽胁迫对植物的影响。然而,本文只从叶的角度对湿地植物的移栽进行了研究,主要针对工期短、栽后立即见效的湿地工程。试验所选用的湿地植物都可以进行营养繁殖,超过试验得出的栽植时间后,植株可以利用自身储存的营养物质萌发出新的植株,相关的研究还有待于进一步的加强和深入。

4 参考文献

- [1] Donald A Hammer. Constructed wetlands for wastewater treatment: municipal, industrial, and agricultural. CRC Press, 1989: 12-13.
- [2] 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.
- [3] 张洪刚, 洪剑明. 人工湿地中植物的作用. 湿地科学, 2006, 4(2): 146-154.
- [4] 李继东, 毕会涛, 武应霞等. 移栽期间胁迫对苗木影响的研究进展. 林业科学, 2008, 44(6): 125-136.
- [5] 张祖陆, 辛良杰, 梁春玲. 近 50 年来南四湖湿地水文特征及其生态系统的演化过程分析. 地理研究, 2007, 26(5): 957-966.
- [6] Horton P, Ruban AV, Walters RG. Regulation of Lightharvesting in Green Plants. *Plant Physiology*, 1994, 106: 415-420.
- [7] Maxwell K, Johnson GN. Chlorophyll fluorescence-a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(345): 659-668.
- [8] Michelh, Florence Tardy. Temperature-dependent adjustment of thermal stability of photosystem II in vivo: possible involvement of xanthophyll-cycle pigments. *Plants*, 1996, 198: 324-333.
- [9] 毕会涛, 李继东, 黄付强等. 移栽胁迫对枣苗叶片叶绿素 a 荧光参数的影响. 安徽农业科学, 2007, 35(34): 10992-10994, 10996.
- [10] 朱广廉, 钟海文, 张爱琴. 植物生理学实. 北京: 北京大学出版社, 1990: 51-54.
- [11] Schreiber U, Bilger W, Neubauer C. Chlorophyll fluorescence as a non-intrusive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis. In: Schulze ED, Caldwell MM eds. *Ecophysiology of photosynthesis*. Berlin: Springer-Verlag, 1994: 49-70.
- [12] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. 植物学通报, 1999, 16(4): 444-448.
- [13] 张其德, 卢从明, 冯丽洁等. CO₂ 加富对紫花苜蓿光合作用原初光能转换的影响. 植物学报, 1996, 38(1): 77-82.
- [14] 林世青, 许春辉, 张其德等. 叶绿素荧光动力学在植物抗性生理学、生态学和农业现代化中的应用. 植物学通报, 1992, 9(1): 1-16.
- [15] 张燕琴, 李 方, 郭延平等. 叶片叶绿素荧光参数用作采后切花菊衰老指标. 浙江大学学报(农业与生命科学)

- 版), 2005, **31**(6): 683-688.
- [16] Müller P, Li XP, Niyogi KK. Non-photochemical quenching: a response to excess light energy. *Plant Physiology*, 2001, **125**: 1558-1566.
- [17] 陈建明, 俞晓平, 程家安. 叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用. *浙江农业学报*, 2006, **18**(1): 51-55.
- [18] Levitt J. Responses of plants to environmental stresses. 2nd edition. Volume 1. Chilling, Freezing, and high Temperature Stresses. London: Academic Press, 1980: 1-497.
- [19] Wilson SJ, Clark RJ. Changes in water relations of Eucalyptus niteas nursery stock during and after lifting and transplanting. *New Forests*, 1998, **16**: 199-211.
- [20] Radoglou K, Raftoyannis Y. Effects of desiccation and freezing on vitality and field performance of broadleaved tree species. *Annals of Forest Science*, 2001, **58**(1): 59-68.
- [21] 孙 刚, 祝廷成. 芦苇光合作用与蒸腾作用的日进程. *生物学杂志*, 1999, **16**(3): 24-26.
- [22] McKay M. A review of the effect of stresses between lifting and planting on nursery stock quality and performance. *New Forests*, 1996, **13**: 363-393.
- [23] 陈文峻, 蒯本科. 植物叶绿素降解. *植物生理学通讯*, 2001, **37**(4): 336-338.
- [24] 黄持都, 陈计峦, 胡小松等. 光对采后果蔬叶绿素降解动力学研究. *农业工程学报*, 2008, **24**(10): 233-238.
- [25] 曹 响, 王国祥. 土壤水分含量对菖蒲(*Acorus calamus*) 萌发及幼苗生长发育的影响. *生态学报*, 2007, **27**(5): 1748-1755.
- [26] Martin C, Thimann KV. The role of protein synthesis in the senescence of leaves. *Plant Physiology*, 1972, **49**: 64-71.
- [27] 赵会杰, 邹 琦, 于振文. 叶绿素荧光分析技术及其在植物光合机理研究中的应用. *河南农业大学学报*, 2000, **34**(3): 248-251.
- [28] 王沙生, 沈应柏. 活体叶绿素荧光诱导曲线的原理和应用. *植物生理学通讯*, 1989, (1): 54-58.
- [29] 杨晓青, 张岁岐, 梁宗锁等. 水分胁迫对不同抗旱类型冬小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响. *西北植物学报*, 2004, **24**(5): 812-816.
- [30] 史胜青, 袁玉欣, 杨敏生等. 水分胁迫对 4 种苗木叶绿素荧光的光化学淬灭和非光化学淬灭的影响. *林业科学*, 2004, **40**(1): 168-173.
- [31] 张秋英, 李发东, 刘孟雨等. 水分胁迫对小麦旗叶叶绿素 a 荧光参数和光合速率的影响. *干旱地区农业研究*, 2002, **20**(3): 80-84.