

三峡库区濒危植物疏花水柏枝 的生理生化特性研究

陈芳清^{1,2}, 谢宗强²

(1. 三峡大学 生态与环境科学研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国科学院
植物研究所 植被与环境变化重点实验室, 北京 100093)

摘要: 对三峡库区特有濒危植物疏花水柏枝的光合作用、蒸腾作用、水势等生理特性以及丙二醛(MDA)、过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO)活性等进行分析测定。结果显示, 疏花水柏枝在水淹胁迫后, 能快速地恢复其光合与蒸腾生理作用。植株在秋季和夏初的光合作用和蒸腾作用的日动态呈单峰曲线, 最高值出现在中午。夏初的光合强度与蒸腾强度一般高于秋季, 表明夏初是该物种的生长旺季。该物种 10 月份水势的日动态在-0.97~1.82 MPa 之间变动, 水势与光合作用与蒸腾作用呈显著负相关。该物种虽是一种对水淹和干旱胁迫适应能力较强的物种, 但土壤水分状况仍对植物的生长有较大影响。植株的生长发育阶段对疏花水柏枝的抗逆性有影响, 在花前的抗逆性总体高于花后。还对疏花水柏枝的迁地保护提出了相应的建议。

关键词: 光合作用; 蒸腾作用; 水分生理; 抗逆性; 消落带

中图分类号: Q945, Q946 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2008)03-0367-06

Physiological and biochemical characteristics of *Myricaria laxiflora*, an endangered species in the Three Gorges Reservoir Area

CHEN Fang-Qing^{1,2}, XIE Zong-Qiang²

(1. Center of Ecology and Environmental Science, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Vegetation and Environment Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: In order to discover the physiological and biochemical characteristics in *Myricaria laxiflora*, an endangered species in Three Gorges Reservoir Area, the transpiration, photosynthesis, water potential of plant planted in two kinds of soils were tested in different growing seasons. Results showed that changes of transpiration, photosynthesis and water potential in a day all showed "single curve". Transpiration and photosynthesis could reach the maximum of a day at noon whereas water potential fall to the minimum. Transpiration changed with the fluctuation of photosynthesis. The photosynthesis and transpiration of plants in May were higher than that in October due to the plants in October just recover from the dormancy induced by flooding. PV-curve and relative water parameters, including Ψ_{100} (maximum osmotic potential at water saturation point), Ψ_0 (osmotic potential when a plasmolysis just emerge), ROWC (relative osmotic water content), RWC (relative water content), AWC (relative water content in apoplast) and RDW (relative dry weight) of the plants grown in sandy soil, red soil and submerged soil were measured. Plants at submerge sandy soil having low Ψ_{100} , Ψ_0 , AWC and high ROWC and RDW implied that submersion could promote plants to develop a good ability resisting dry stress. The biochemical contents related with stress resistance were test-

收稿日期: 2007-02-12 修回日期: 2007-08-10

基金项目: 国家科技部科技攻关计划(2006BAC10B04-2)[Supported by Technologies Research and Development Program of State Ministry of Science and Technology(2006BAC10B04-2)]

作者简介: 陈芳清(1963-), 男, 江西清江人, 博士, 教授, 主要从事植物资源保护和退化生态系统生态恢复的研究, (E-mail) fqchen@ctgu.edu.cn.

ed in different growing seasons. Malondialdehyde (MDA) content, peroxidase (POD) activity, Polyphenol oxidase (PPO) activity and total soluble sugar content decreased after flower and fructification. It suggested that the plant resistance declined after fruit. Some suggestions finally were put forward for the population transplant to conserve this species according to its physiological and biochemical characteristics.

Key words: photosynthesis; transpiration; water physiology; endurance; water-fluctuating zone

消落带又称消涨带,指河流、海洋、湖泊、水库与陆地交错的地带。消落带植被常受洪水淹没和干旱两种极端环境的胁迫,经过长期的进化后,仍有大量的植物在形态、结构、生活史、生理生化等方面形成各种适应,幸存在消落带(Armstrong 等,1994; Blom 等,1994; Parolin,2001; Chen 等,2003),形成各种植被景观。消落带生态系统是一种比较脆弱的生态系统,常因受到洪水、干旱胁迫以及水电工程的修建等人类活动的干扰而发生退化,物种多样性因此而流失。开展消落带植被的生态恢复与重建及其濒危物种的保护因此而成为目前生态学的一个研究热点。消落带植物生理生态特性的研究也就成为该热点的重要内容(Anella & Whitlow,2000; Islam,2003; Glaz 等,2004)。

疏花水柏枝(*Myricaria laxiflora*)是柽柳科(Tamaricaceae)水柏枝属的一种多年生灌木植物,是三峡地区长江干流消落带植被的优势物种,主要分布于海拔70~155 m的河滩地(吴金清等,1998; 王勇等,2003; 陈芳清等,2005a,b)。每年6~11月疏花水柏枝的生境地都要被长时间淹没,最长的可达4~6个月。随着水位的逐渐退落,疏花水柏枝露出水面,枝叶开始萌发生长,同时进入开花结果阶段,果实脱落后,进入旺盛的营养生长阶段,这个过程持续到第二年的6月。当洪水季节来临时,无论是否被水淹没,植物枝叶都会枯落进入休眠。三峡工程修建后,三峡库区的最低水位将提高到140 m,即或有少量残留的生境地,其成陆时间与疏花水柏枝的生长季节不吻合,也不再适宜其生长。因此疏花水柏枝将丧失其全部的生境地(长江水利委员会,1997; 吴金清等,1998)。同时按以防洪和发电为主要目的水库水位调节方案,库区将在海拔145~175 m间形成消落幅度30 m的夏旱—冬涝的消落带,新的消落带因此不再适宜疏花水柏枝的生长发育。物种的迁地保护成为拯救该物种的有效途径(王勇等,2003; 陈芳清等,2005a,b)。然而,对于疏花水柏枝的水分、光合及其对环境胁迫的耐受机理的研究目前仍为空白。本实验引种栽培了一些疏花水柏枝的幼苗,对其光合作用、蒸腾作用等生理特性以及一

些与植物抗逆性相关的生化成分的变化进行了测定,以求了解该物种的生理生化特性,为开展疏花水柏枝的引种驯化栽培以及该物种在其它水电工程消落带植被生态恢复与重建中的应用提供科学依据。

1 研究材料与方法

1.1 研究材料

2003年11月洪水消退后在重庆忠县的长江河滩上,选择长势相近的疏花水柏枝母株5~8株,在其周围带土采集疏花水柏枝二年生幼苗,苗高约10 cm左右。采回的幼苗种植于三峡大学生态与环境研究中心的实验地,基质为从长江宜昌段河床上的细沙土和采自于山坡的红壤。使用255 mm×175 mm(开口面积0.024 m²)型号的塑料花钵种植幼苗,每钵2株。其中红壤种植12钵,沙土种植36钵。种植于红壤上的植株用于比较不同土壤条件对植株水分与光合生理的影响。

从2004年7月,植株进入休眠,把实验材料放入塑料大盆中进行水淹处理(水位淹及土壤表面)。9月3日,除6钵用细沙土栽培的植物仍维持水淹外,其它材料都取出,植株逐渐开始恢复生长。上述实验各处理在非淹水阶段实验过程中每天换水(对照浇水)一次,其它时间每3 d浇水一次,没有进行肥力的补充。

1.2 光合与水分生理测定

分别在2004年夏季水淹前的5月20日和水淹过后的10月24日测定各水淹处理的植株的光合与蒸腾作用日动态,每个处理每次重复测5次。光合作用和蒸腾作用的测定用LI-6400测定。考虑到疏花水柏枝的叶片极小而短,难以准确测定其叶面积,叶片两面的同化组织又相近,且其幼枝都呈绿色,具有一定的光合能力,植物光合作用和蒸腾作用的测定都是用其顶部细嫩枝条测定,并用所测枝条的生物量代替叶面积来表示光合作用和蒸腾作用的大小。

1.3 PV-曲线以及相关水分生理参数测定

2004年10月24日测定水势的日动态和各处理植株的PV曲线及其相关水分生理参数。水势的

测定取植株顶部幼嫩枝条在水势仪(PMS1000)上进行。水势日动态通过在每个时间段重复测定3次植株水势未获得。不同生长条件下水势的变化则在相同的时间段,取不同处理的植株材料进行测定,每个处理重复测定3次。PV-曲线按 Tyree & Hammel(1972)的方法制作。以所加压力的倒数为纵坐标,以样品饱和差为横坐标作图,将PV-曲线的直线部分延长与纵坐标相交所得的值为水饱和时总体原初渗透势的倒数,直线延长部分与横坐标相交,所得的值为水饱和时渗透水的原初含量。相对渗透水含量(ROWC)按下式计算: $ROWC = (V_0 - V_e) V_0 \times 100\%$;相对含水量(RWC)按下式计算: $RWC = (V_t - V_e) / V_t \times 100\%$;质外体水的相对含量(AWC)按下式计算: $AWC = (V_t - V_0) / V_t \times 100\%$;相对干重

RDW 按下式计算: $RDW = DW / (SW - DW) \times 100\%$ 。其中 V_t 为总的含水量,包括渗透水含量 V_0 和质外体水的含量 V_e , DW 为干重, SW 为鲜重。

1.4 生化分析

分别在植物开花前、花果期及花果后对植株进行与抗逆性相关的生化特性测定。每株植物按根、茎、叶各占 1/3 的比例取材,其中茎、根分别取比较细嫩部分,混合后分别测定下述的生理生化指标。每个处理重复三次。另外在花果期还把植株分根、茎、叶和花等不同部分,取样分别测定下述生理生化指标。过氧化物酶(POD)活性的测定用愈创木酚氧化法,根系活力的测定用 α -萘胺氧化法,多酚氧化酶(PPO)活性的测定用茶酚氧化比色法,丙二醛(MDA)的测定用硫代巴比妥酸比色法,植物体可溶

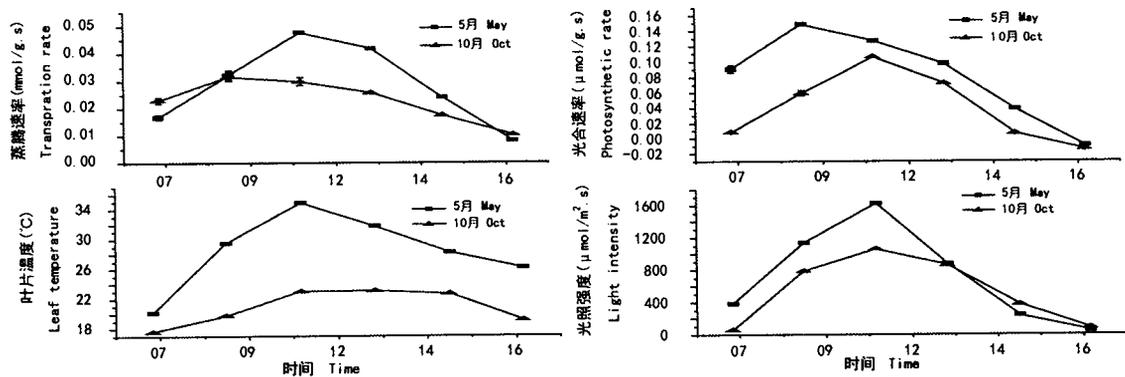


图1 疏花水柏枝幼嫩顶枝的蒸腾作用、光合作用在5月和10月的日进程及其相关环境因子的日动态
Fig. 1 Transpiration and photosynthesis daily dynamics of *Myricaria laxiflora* young terminal shoot with the changes of relative environmental factors in May and October

性糖的测定用蒽酮法(邹琦,1995)。

2 结果与分析

2.1 不同生长季节疏花水柏枝的日蒸腾与日光合进程

自然分布的疏花水柏枝在夏季因被水淹而处于生长停滞(休眠)期。从每年10月开始到次年6月植株露出水面进行生长发育。疏花水柏枝在生长季节的日蒸腾与日光合进程均呈单峰变化(图1,2)。蒸腾强度与光合强度呈显著相关性($P < 0.001$),随着光照强度的增加和减少,光合强度与蒸腾强度发生相应的变化。但光合强度一般在上午9:00~10:00到达高值,而蒸腾强度则在中午12:00左右达到高值。不同季节疏花水柏枝的光合与蒸腾能力不同,在相近的光照条件下,5月份的光合与蒸腾强度大于10月份的光合和蒸腾强度,这可能与这两个

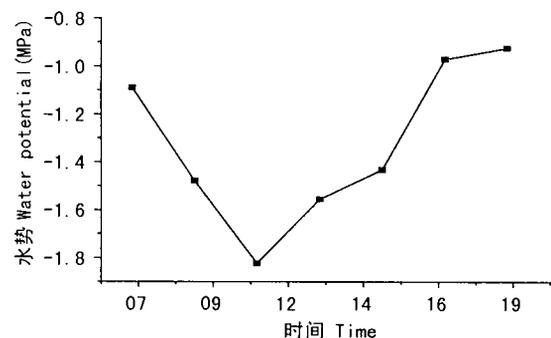


图2 疏花水柏枝顶部幼枝在10月的水势日动态
Fig. 2 Water potential daily dynamics of *Myricaria laxiflora* in October

季节疏花水柏枝的植株状况有关。10月份疏花水柏枝刚度过夏季的生长停滞(休眠),枝条大多是新形成的,而5月份的疏花水柏枝则是经过了秋冬季的生长,枝条的生长发育比较充分,因此5月份疏花

水柏枝的光合能力与蒸腾强度一般高于10月。

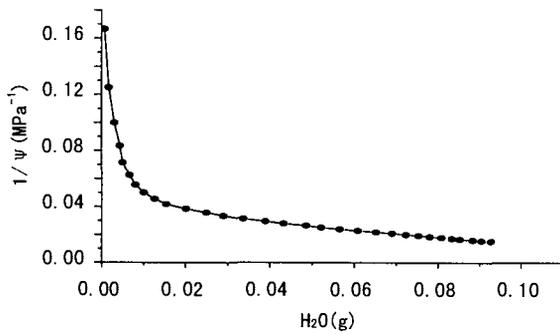


图3 水淹状态下疏花水柏枝植株幼枝的PV-曲线
Fig. 3 PV-curve of *Myricaria laxiflora* plants under submergence

2.2 疏花水柏枝生长季节水势的日变化规律

图2为10月份测定的疏花水柏枝水势的日变化。水势日动态呈清晨和晚上高,中午低的“单峰型”变化。清晨的水势为-1.09 MPa,然后逐渐下降,近中午水势达到最低值-1.82 MPa,其后水势逐渐升高,到傍晚水势恢复到最高值-0.97 MPa。结

合同期的日光合与蒸腾作用强度分析可知,水势的日变化与其光合和蒸腾呈显著负相关($P < 0.001$)。光照强度通过蒸腾作用使植物体消耗大量水分,从而间接地影响植株的水势变化,水势的变化与蒸腾和光合的变化呈相反的趋势。当光照强度和大气温度升高时,植株的光合作用与蒸腾作用迅速加强,使得植物体内水分胁迫随之加重,水势逐渐减低。而当光照强度和大气温度下降时,植株的光合作用与蒸腾作用随之下降,植株体内的水势逐渐回升。

2.3 疏花水柏枝的PV-曲线及相关的水分生理指标

图3为10月份水淹条件下疏花水柏枝植株的PV-曲线。根据同样的方法可得到其它几种土壤条件下疏花水柏枝植株的PV-曲线。再以此为基础可求得相应的水分生理参数(表1)。在水淹或非水淹条件下疏花水柏枝植株的各项水分生理指标的差异较大,水淹条件中生长的植株其最高水势、最低水势、AWC、 Ψ_{100} 和 Ψ_0 都比非水淹条件下的植株低,表明生长在水淹条件下植株所形成组织的抗旱能力强一些。生长在通气条件好一些的土壤(沙土)中的植株其最高水势与最低水势间的范围比生长在通气

表1 不同生长条件下疏花水柏枝植株的水分参数

Table 1 Water parameters of *Myricaria laxiflora* plants in different growing condition

土壤环境 Soil environment	最低水势 LWP	最高水势 HWP	水饱和时总体 原初渗透势 Ψ_{100}	细胞初始质壁 分离的水势 Ψ_0	相对渗透 水含量 ROWC	相对含 水量 RWC	质外体水的 相对含量 AWC	相对干重 RDW
沙土 Sandy soil	-1.43	-0.42	-1.24	-1.50	81.01	90.79	51.51	26.20
沙土(淹) Flooded sandy soil	-1.83	-1.05	-2.45	-2.80	82.73	87.32	26.53	49.37
红壤 Red soil	-1.32	-0.60	-1.21	-1.65	71.54	83.55	42.19	37.85

表2 引种栽培的疏花水柏枝植株不同器官的生理生化特性

Table 2 Physiological and biochemical characteristics of reintroduced *Myricaria laxiflora* plant organs

器官 Organ	丙二醛 MDA ($\mu\text{mol/g}$) Mean \pm s	多酚氧化酶 PPO (0.01 Δ OD/min) Mean \pm s	可溶性总糖 TS (%) Mean \pm s	蔗糖 Sucrose (%) Mean \pm s	过氧化物酶 POD (D470/g \cdot min) Mean \pm s
茎 Stem	2.07E-02 \pm 4.52E-03	0.441 \pm 1.38E-01	3.569 \pm 2.20	1.881 \pm 1.266	0.135 \pm 4.13E-02
根 Root	1.81E-02 \pm 1.67E-03	0.303 \pm 0.1137	3.243 \pm 1.554	2.282 \pm 1.119	0.196 \pm 0.1218
花 Flower	4.70E-03 \pm 6.24E-04	0.150 \pm 4.38E-02	8.878 \pm 4.904	7.367 \pm 3.910	0.117 \pm 7.25E-02
叶 Leaf	6.44E-03 \pm 1.08E-03	0.211 \pm 6.33E-02	5.091 \pm 3.775	3.354 \pm 2.217	2.23E-02 \pm 6.09E-03
	F=139.888; df=3; Sig.=0.000	F=20.614; df=3; Sig.=0.000	F=22.689; df=3; Sig.=0.000	F=34.724; df=3; Sig.=0.000	F=18.073; df=3; Sig.=0.000

条件差一些的土壤(红壤)大,表明土壤类型对植株所形成的组织对水分胁迫的适应能力有影响。但是两者的 Ψ_{100} 和 Ψ_0 的值却比较接近,表明两者的抗旱能力相差不大。

2.4 引种栽培的疏花水柏枝植株的一般生理生化特点

疏花水柏枝植株不同部位的生理生化特性不同。表2为引种栽培的疏花水柏枝成年植株在花果

期的几种生理生化成分含量,一般情况下植株丙二醛的含量和多酚氧化酶活性具有茎>根>叶>花的规律,过氧化物酶活性具有根>茎>花>叶的规律,蔗糖及可溶性总糖含量具有花>叶>茎、根的规律(其中茎与根的含量一般较近)。

在不同的生长发育阶段,疏花水柏枝植株的上述生理生化成分会发生比较明显的变化(图4)。多

酚氧化酶活性在花前、花期及花后三者之间有显著差异 ($P < 0.05$), 以花前为最高, 花后最低; 过氧化物酶活性以及蔗糖与总糖含量在花后与花前、花后与花期之间有显著差异 ($P < 0.05$), 花前与开花期间的差异不显著, 以开花时最高, 花后最低; 根系活力则在三个生长阶段之间都有显著差异 ($P < 0.001$), 以开花时最高, 花后最低; 丙二醛 (MDA) 的含量在三个时期的差异不显著。

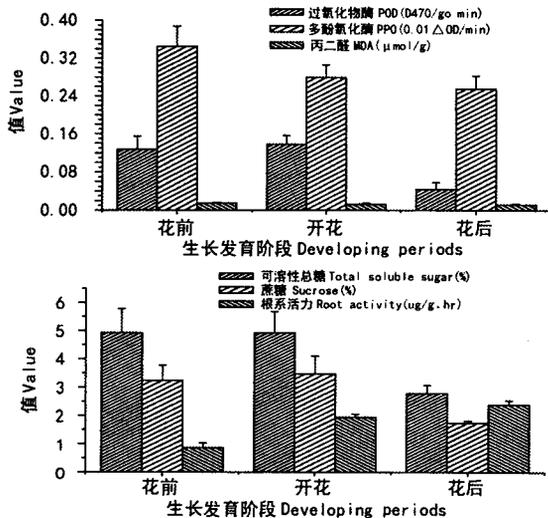


图 4 引种栽培的疏花水柏枝植株在不同发育阶段阶段的生理生化变化

Fig. 4 Physiological and biochemical changes of *Myricaria laxiflora* plants during different growing period

3 讨论

在环境胁迫下, 植物的光合、蒸腾及水分利用效率常常发生相应的变化以适应环境 (黄玉清等, 2006)。疏花水柏枝的光合和蒸腾日动态均呈“单峰”曲线。这是因为植株通过休眠躲避了夏季高温季节, 其生长季节的温度和光照比较适宜, 光合和蒸腾作用不会受到高温的影响。疏花水柏枝不同季节间光合与蒸腾能力的差异来自于不同季节植株的生长状态。5 月份的植株水分与光合生理活动强于 10 月份, 是因为每年的 10 月份开始植株刚从夏季生长停滞 (休眠) 状态开始恢复生长, 所形成的枝条比 5 月份的细嫩, 其植株水分与光合生理活动因此而低于 5 月份植株的光合与水分生理活动。因此疏花水柏枝在春季的营养生长旺于秋季。

疏花水柏枝在水淹条件下的水势日变动幅度在

-0.97 ~ -1.82 MPa 范围内。与其它分布于沙漠地区的柽柳属植物相比, 疏花水柏枝的耐旱性要差, 但其对干旱的适应方式却与它们一致。疏花水柏枝的上述水分生理参数在不同生长条件下的差异较大, 这可能与植株在这些生态环境中的生长发育的差异有关。Ψ₀、Ψ₁₀₀、AWC、RDW 等都显示在水淹条件下生长发育植株比生长在非水淹的沙土和红壤上的植株具有更好的抗旱能力。

柽柳科植物多分布于河滩地, 一般具有十分发达的根系, 植株有大量根系通过毛细管作用和地下水接触, 是一类地下水湿生植物, 具有抗旱和耐淹的生态习性 (郑雄等, 2003)。枝叶的总水势以及通过 PV-曲线求得的一系列水分参数能比较好的显示植物组织内部的水分组成、潜在的组织最大渗透势和对水分胁迫的反馈调节能力及忍耐能力 (李庆梅等, 1992)。曾凡江等 (2002) 和 Fahn (1964) 的研究表明柽柳属为少浆液植物, 具有很高的渗透压和低的水势, 能够有效地从含水量少的土壤中吸取水分。柽柳 (*Tamarix chinensis*) 日水势一般在 -0.9 MPa ~ -2.6 MPa 之间变动, 正午水势几乎没有出现高于 -2 MPa 的时候, 而且还经常出现 -4 MPa 左右的水势, 这是柽柳的根系和地下水保持联系的结果 (Anderson, 1982; Busch 等, 1992)。郑雄等 (2003) 对多枝柽柳 (*T. ramosissima*) 的研究显示, 该物种在很低的水势条件下 (-4.59 MPa) 仍能进行光合作用。上述研究表明柽柳科的植物对水分胁迫具有较强的适应能力。

疏花水柏枝在生理生化方面也对环境胁迫与变化产生了适应。总糖、可溶性糖的含量与多酚氧化酶、过氧化物酶的活性被认为是与植物抗逆性质密切相关的一些生化成分 (Yordanova 等, 2004; 朱立武等, 2001)。疏花水柏枝植株花前的总糖、可溶性糖的含量与多酚氧化酶、过氧化物酶的活性强于花后。这既是植物对生态环境的一种生态响应, 也是植物正常的生理变化。疏花水柏枝一般在 9 月份随着洪水的消退而逐渐恢复生长与开花结果。受水淹胁迫的诱导, 植株过氧化物酶系统活性提高, 以保护植物免受氧化损伤 (Monk 等, 1987)。植物体内的淀粉也多转化为可溶性糖以用于抵抗环境胁迫。同时由于花前河流的水位仍有反复, 保持较强的抗性有助于植物抵御洪水的再次胁迫。而花后由于植物营养物质向花果的转移与集中, 植株体内的总糖与可溶性糖含量下降, 多酚氧化酶、过氧化物酶也下

降,植株抗性下降。

疏花水柏枝因为三峡工程的修建而丧失了所有的生境,成为濒危物种。在进行该物种的迁地保护过程中,根据其上述的生理生态学特征,应该选择河流的河滩地作为种群的重建地以满足植物对水分的需求。疏花水柏枝在河滩地上能通过形成发达的根系来吸收水分,同时每年洪水的适度水淹也有利于植物躲避夏季的高温干旱,并快速恢复生长。由于该物种对干旱和水淹都有较强的耐受能力,因此不用过于考虑生长季节沙滩上所出现的两种逆境的影响。但是在种群迁移初期,由于植株根系还未充分发育,植株扎于土壤中的深度不够,这是植物对干旱和洪水冲刷的能力还较低,仍需加强植株的水分和防护洪水冲刷管理,提高成活率。特别是在春季,植株的营养生长处于旺盛时期,通过各种管理措施促进植株根系发育和营养物质积累,有利于增强植物对即将来临的洪水的抵抗能力。

参考文献:

- 长江水利委员会. 1997. 三峡工程生态环境影响研究[M]. 武汉:湖北科学技术出版社:54-75
- 邹琦. 1995. 植物生理与生化实验指导[M]. 北京:中国农业出版社:36-398
- Anderson J E. 1982. Factors controlling transpiration and photosynthesis in *Tamarix chinensis*[J]. *Ecology*, **63**(1):46-50
- Anella L B, Whitlow T H. 2000. Photosynthetic response to flooding of *Acer rubrum* seedlings from wet and dry sites[J]. *Am Mid Nat*, **143**(2):330-342
- Armstrong W, Brandle R, Jackson M B. 1994. Mechanisms of flood tolerance in plants[J]. *Act Bot Neerl*, **43**:307-358
- Blom C W P M, Voesenek L A C J, Banga M, et al. 1994. Physiological ecology of riverside species; adaptive responses of plants to submergence[J]. *Ann Bot*, **74**:253-263
- Busch D E, Ingraham N L, Smith S D. 1992. Water uptake in woody riparian phreatophytes of the Southwestern United States; a stable isotope study[J]. *Ecol Appl*, **2**:450-459
- Chen FQ(陈芳清), Xie ZQ(谢宗强), Xiong GM(熊高明), et al. 2005a. Reintroduction and population reconstruction of an endangered plant *Myricaria laxiflora* in the Three Gorges Reservoir Area(三峡濒危植物疏花水柏枝的回归引种和种群重建)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **25**(7):1 811-1 817
- Chen FQ(陈芳清), Xie ZQ(谢宗强), Xiong GM(熊高明). 2005b. Effects of density on seedling survival and growth of an endangered species *Myricaria laxiflora*(密度对濒危物种疏花水柏枝幼苗存活与生长的影响)[J]. *Biodiversity Sci*(生物多样性), **13**(4):332-338
- Chen H, Qualls R G, Miller G C. 2003. Adaptive responses of *Lepidium latifolium* to soil flooding; biomass allocation, adventitious rooting, aerenchyma formation and ethylene production[J]. *Environm & Exp Bot*, **50**(1):29-41
- Cheung Y W S, Tyree M T, Dainty J. 1975. Water relations parameters on single leaves obtained in a pressure bomb and some ecological interpretations[J]. *Can J Bot*, **53**:1 342-1 346
- Clark J S. 1998. Why trees migrate so fast: confronting theory with dispersal biology and the paleorecord[J]. *Am Nat*, **152**:204-224
- Glaz B, Morris D R, Daroub S H. 2004. Sugarcane photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance due to flooding and water table[J]. *Crop Sci*, **44**(5):1 633-1 672
- Huang YQ(黄玉清), Wang XY(王晓英), Lu SH(陆树华), et al. 2006. Studies of photosynthesis, transpiration and water use efficiency of some dominant species in rocky desert area, Guangxi, China(岩溶石漠化治理优良先锋植物种类光合、蒸腾及水分利用效率的初步研究)[J]. *Guihaia*(广西植物), **26**(2):171-177
- Islam M A. 2003. Responses of black spruce(*Picea mariana*) and tamarack(*Larix laricina*) to flooding and ethylene[J]. *Tree Physiol*, **23**(8):545-553
- Li QM(李庆梅), Xu HC(徐化成). 1992. The changes of main water parameters in *Pinus tabulaeformis* with season and provenance(油松 P-V 曲线主要水分参数随季节和种源的变化)[J]. *Acta Phytoecol Sin*(植物生态学报), **16**(4):326-335
- Monk L S, Brandle R, Crawford R M M. 1987. Catalase activity and post-anoxic injury in monocotyledonous species[J]. *J Exp Bot*, **38**:233-246
- Parolin P. 2001. Morphological and physiological adjustments to waterlogging and drought in seedlings of Amazonian flood plain trees[J]. *Oecologia*, **128**(3):326-335
- Pereira J S, Kozłowski T T. 1977. Variations among woody angiosperms in relation to flooding[J]. *Physiol Plant*, **41**:184-192
- Tyree M T, Hammel H T. 1972. The measurement of the turgor pressure and the water relations of plants by the pressure-bomb technique[J]. *J Exp Bot*, **23**:267-282
- Wang Y(王勇), Wu JQ(吴金清), Tao Y(陶勇), et al. 2003. Natural distribution and *ex situ* conservation of endemic species *Myricaria laxiflora* in water-level-fluctuation zone within Three-Gorges reservoir area of Changjiang River(三峡库区消涨带特有植物疏花水柏枝的自然分布及迁地保护研究)[J]. *J Wuhan Bot Res*(武汉植物学研究), **21**(5):415-422
- Wu JQ(吴金清), Zao ZE(赵子恩), Jin YX(金义兴), et al. 1998. Investigation and study on the endemic plant *Myricaria laxiflora* in the Three Gorges reservoir area(三峡库区特有植物疏花水柏枝的调查研究)[J]. *J Wuhan Bot Res*(武汉植物学研究), **16**(2):111-116
- Yordanova R Y, Christov KN, Popova L P. 2004. Antioxidative enzymes in barley plants subjected to soil flooding[J]. *Environ & Exp Bot*, **51**(2):93-102
- Zeng FJ(曾凡江), Andrea F, Li XY(李向义), et al. 2002. A preliminary study on the effect of irrigation on water physiology of *Tamarix ramosissima* in Cele oasis(策勒绿洲多枝柽柳灌溉前后水分生理指标的初步研究)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **13**(7):849-853
- Zheng X(郑雄), Li XM(李小明), Zhang XM(张希明), et al. 2003. Studies on gas exchange of *Tamarix ramosissima*(多枝柽柳气体交换研究)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **23**(1):180-187
- Zhu LW(朱立武), Li SW(李绍稳), Liu JF(刘加法), et al. 2001. Physiological and biochemical characteristics of plum resistance to adverse circumstances and their correlation(李抗逆性生理生化指标及其相关性的研究)[J]. *Acta Hort Sin*(园艺学报), **28**(2):164-166