

植物耐水湿性研究综述

童伟平^{1,2}, 慕长龙², 黎燕琼², 陈俊华², 刘惠民^{1*}, 龚固堂², 李瑾宵²

(1. 西南林业大学, 云南 昆明 650224; 2. 四川省林业科学研究院, 四川 成都 610081)

摘要: 由于水岸造林植物经常遭水淹, 成活率较低, 因此其耐水湿性成为水岸景观防护林植物选择的难题, 选择较耐水淹的植物是水岸造林的重点。本文对植物耐水湿性机理、耐水湿性评价指标和植物耐水湿的主要评价方法等方面的研究进展和发展趋势分别进行了阐述, 并对今后的研究提出了一些看法。

关键词: 耐水湿; 机理; 指标; 评价方法

中图分类号: S682.32 文献标识码: A 文章编号: 1003-5508(2013)01-0023-06

A Summary of Waterlogging Tolerance of Plants

TONG Wei-ping^{1,2} MU Chang-long² LI Yan-qiong² CHEN Jun-hua²

LIU Hui-ming^{1*} GONG Gu-tang² LI Jin-xiao²

(1. Southwest China Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 61008, China)

Abstract: Waterfront afforestation plants were frequently flooded and thus their survival rates were low. So the water resistance became a problem in the selection of plants, the focus of the waterfront afforestation was to choose waterlogging resistant plants. In this paper, discussion was made on the research progress, development trend of the mechanism, evaluation indexes, and the main evaluation methods of plants waterlogging tolerance. Besides, some views were put forward for its future developmental tendency.

Key words: Waterlogging tolerance, Mechanism, Indicators, Evaluation methods

随着人类生活水平的日益提高, 人们关注的问题逐渐由温饱问题转向居住环境上来, 对城市生态环境的要求也越来越高。作为城市生态系统重要组成部分的城市水岸景观林带, 不仅使城市增色添彩, 为市民提供休闲游憩场所, 还具有防止水土流失、抵御土壤侵蚀、水湿润带、水质保护、物种保护等一系列功能^[1-2]。水岸景观防护林经常会遭水淹, 成活率一般都较低, 需要慎重选择。耐水湿物种选择的研究可以为水岸造林树种的选择提供良好的参考, 进一步提高造林成活率, 受到越来越多的关注。

目前对植物耐水湿性的研究主要包括耐水湿性机理的研究、耐水湿物种的选择研究、植物耐水湿性的评价以及耐水湿性的研究方法等。针对水岸景观

防护林树种的耐水湿的研究, 以相同树种不同种源的耐水湿能力的大小的比较研究较多, 研究方法主要是在野外自然条件下进行的现状观察、调查和人工控制水湿或水位的指标测定法。如汪廷芳、王云辉、何正安、李兆玉等都是在自然灾害后从野外实地进行调查研究^[3-6]; 汪贵斌^[7]等采用人工控制水位对银杏3品种部分生长及生理指标进行了比较研究, 结果表明: 在淹水条件下, 苗高生长明显受抑制, 叶片质膜透性、游离脯氨酸含量及黄酮含量在水胁迫下显著提高, 叶绿素含量和根系活力则明显降低。本文就植物耐水湿的相关研究进行阐述, 并对以后的发展趋势提出了一些看法。

收稿日期: 2012-10-29

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题: 城镇景观防护林体系构建技术研究(2011BAD38B03)

作者简介: 童伟平(1987-), 女, 江西鹰潭人, 硕士研究生, 主要从事经济林方面的研究。

* 通讯作者: 刘惠民(1957-), 男, 博士, 教授, 主要从事经济林方面的教学与科研工作, E-mail: hmliu@swfu.edu.cn。

1 耐水湿性机理

水分过多造成的伤害是间接作用造成的,即土壤水分过多时气相被液相取代使土壤中气体(氧气)亏缺,植物浸泡在大量水中,根系的大量矿质元素及重要中间产物淋溶丢失,以及在无氧呼吸中产生的有毒物质,如乙醇、乙醛等,使植物受害^[8-9](图1)。植物对湿害胁迫的适应机理主要可分为两类:一是形态适应,即通过诱导不定根和通气组织的形成途径维持根系氧的供给,避免缺氧;二是代谢适应,如保持稳定的发酵途径,维持一定的能量水平,积累苹果酸、谷氨酸等无毒物质,避免有毒物质积累和酸中毒等。

植物对湿害胁迫的形态适应主要表现为以下两个方面:一是植物水分过多导致厌氧胁迫下植物体的能量供应骤减,在此情况下植株通过减少生长来适应湿害胁迫。直观表现为:主根停止生长,茎叶失水,叶片发黄变红,加快脱落,新叶形成受阻^[10-12],而且随着淹水时间的延长及淹水深度的增加,这种伤害还会更大。植物的根尖变黑,活力下降。湿害使植物根冠比下降,说明根系受伤害程度大于地上部,直至主根死亡^[13-15]。在湿害快速发生的条件下,茎伸长增长速度减慢有利于植物适应环境,其原因是湿害后茎伸长越快的植物就越容易倒伏。Setter 和 Laureles^[16]表明,幼苗完全处于淹水状态时5个水稻基因型的生存和茎伸长呈负相关。二是在湿害下,植物根皮层细胞常发生程序性死亡,形成通气组织,建立避缺氧机制。通气组织和耐渍性的关系,不仅与其数量有关,更与其质量有关。Drew 等^[17]证明,在湿害状态下,植物不定根内通气组织的内部孔隙度的增加,且通气组织数量也增加,为不定根在湿害状态下的存活及生长提供了物质基础。Huang 和 Johnson^[18]对小麦的研究也表明,不定根丰富的通气组织形成以及孔隙度大幅度提高,保证了不定根在湿害状态下生存。而 Ding 和 Musgrav^[19]则对于湿害环境下通气组织形成是植物的一种积极反应的结论提出了质疑,因为他们在对小麦研究中发现,受湿害胁迫的根系,其通气组织形成与根上的 Fe、N 和 P 的附着有关,这些元素的附着与湿害条件下的作物产量呈负相关。

植物对湿害胁迫的代谢适应则主要是通过激素

调控。张学昆等^[20]的研究结果发现耐湿品种可在湿害下保持较高相关酶活性和稳定的膜结构。淹水逆境下,由于酶保护系统受到破坏,自由基的氧化作用造成膜脂过氧化,导致植物叶片内丙二醛(MDA)含量上升。据晏斌^[21]等研究,在涝渍胁迫下玉米体内正常的活性氧代谢平衡破坏,首先是 SOD 活性受抑制,导致 O_2^- 增生^[22]。Crawford 和 Braendle^[23]将这种内在机理分为诱导酶和抗氧化剂两类,抗氧化剂如抗坏血酸(Vc)、 α -生育酚(VE)及谷胱甘肽(GSH)等;酶类有超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)以及与抗氧化物质合成有关的脱氢抗坏血酸酶(DHAR)、单脱氢抗坏血酸还原酶(MR)等。MR 催化丙二醛(MDA)还原,DHAR 则在 H_2O_2 的解毒系统中起作用。此外,Biemelt 等^[24]报道,不同耐渍小麦品种之间的抗氧化剂及氧化还原酶水平差异显著,说明作物厌氧下抗氧化能力发生改变具有普遍性。厌氧下首先触发乙烯增加,诱导通气组织和次生根的形成,以缓解缺氧^[25]。湿害损伤通常是在湿害结束后发生的,这可能是活性氧自由基引起的。不过植物有活性氧防御系统,可以缓解湿害后的氧化损伤。

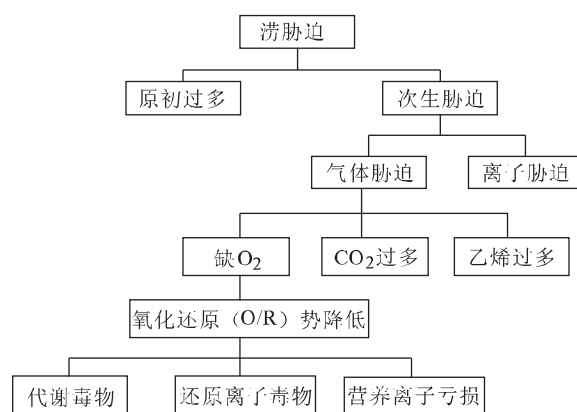


图1 涝诱导的胁迫种类(引自 Levitt, 1980)

2 耐水湿性评价指标

2.1 生长指标

早期对植物耐水湿的研究方法主要是以调查自然洪涝后的植物生长状况,主要有:生物量、成活率、落叶量、枯梢、萌芽率、树高、胸径、根系数量和长度、生长速度和叶面积等^[26-27]。

20世纪40年代至70年代中期,国外学者对不同树种抗洪涝灾害作过较广泛的调查和研究^[28-32],

其研究方法主要是在水涝受灾后调查树种的受害情况, 其中包括了水淹时间、成活率、枯梢量、落叶量、胸径、树高等。汪延芳^[33]、彭镇华^[34]、王云辉^[35]等为代表在过去几十年里以调查长江滨湖区、九江市区、淮河流域的 8 个县和湖南益阳市的庭院等为调查对象记录观察受害植物的生长状况, 包括落叶、枯梢、死亡率、萌芽率, 还有胸径、树高等指标。白祯、黄建国^[36]为筛选适宜三峡库区护岸林种植的耐湿耐淹树种, 采用人工水池对巴茅、池杉、水杉、麻柳、杨柳、意杨、楸、慈竹、麻竹、吊丝竹 10 种植物的耐湿耐淹性进行了研究, 并测定了 3 a 生护岸林在不同淹水条件下树种的苗高、耐淹零界值及叶片的营养特性。蒋小弟^[37]等于 1991 年和 1997 年通过胸径、树高及发芽率等指标对银荆在育苗和种植过程中的耐湿性进行了观察测定。任冰如^[38]等利用叶片单个复叶的鲜重、单位叶面积鲜重、叶片相对含水量、叶绿素含量等指标对黑莓赫尔品种扦插苗的耐水湿性进行了研究。Burkett^[39]等人于密西西比州比亚祖河国家野生动物保护区内对 3 种橡木进行监测, 从第三个生长季末到第五个生长季, 历时两年多, 海拔较低的样地在第一个生长季被淹 21 d, 而高海拔地区几乎未被淹, 发现淹水对橡木的成活率有影响, 低地、间歇性淹水地区的橡木存活率最高。近年来国内外一些学者逐步对植物地上部在淹水状态下发生的形态学变化开展了研究。利用同种植物不同淹水时间生物量和相对生长率(RGP) 差异为指示植物对水渍的反应, 这两个参数被视为重要的耐水渍指标^[40-41]。Angelov 等^[42]试验发现, 在连续 2 a 以上的根涝条件下, 美国蓝果树和美国枫香的苗木成活率达 95%, 而两种栎树在 1 a 之内全部死亡。农作物上也有采用单株产量为主要指标^[43], 因为湿害的最终表现是对产量的影响。

2.2 生理指标

随着试验方法和试验仪器的不断发展, 对植物耐水湿的研究逐渐发展到生理方面, 主要包括植物净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、叶绿素含量、SOD、POD 酶活性、可溶性糖、叶绿素、脯氨酸、色素、蛋白质等^[44-46] 生理指标的变化研究。

李纪元^[47]等将 MDA 法首次借鉴于乔木树种—枫杨(*Pterocarya stenoptera* C. DC.) 这一我国重要的乡土耐水湿树种的研究, 结果表明以 MDA 积累量作为枫杨的耐涝性衡量指标具有较高的可靠性, 并

能应用于早期筛选枫杨种源的耐涝潜力。张敦论、乔勇进、郝金标等^[48]在胶南市环海林场以刺槐等 8 种沙质海岸主要造林树种盆栽苗为研究对象, 测试了在水分胁迫下各树种的光合、呼吸和蒸腾速率的变化过程, 发现各树种的光合和蒸腾速率均随土壤含水量的下降, 通过由慢到快的下降过程, 而呼吸速率则有一峰值出现。罗祺等^[49]以游离脯氨酸和丙二醛含量及相对电导率为指标, 比较水淹条件下 10 个树种的耐水能力, 黄连木和石楠的耐水淹能力较弱; 蓝果树、薄壳山核桃、榉树和一球悬铃木具有一定的耐水淹能力; 乌桕和白蜡的耐水淹能力较强; 墨西哥落羽杉和花叶杞柳的耐水淹能力最强。罗芳丽、曾波、陈婷等^[50]对秋华柳的淹水试验发现: 水淹 40 d 后, 相同水淹深度处理秋华柳植株的净光合速率显著高于耐水湿环境的垂柳($p < 0.05$); 水淹 90 d 后, 全淹处理植株的光合能力较对照有显著的下降($p < 0.05$), 对照、水下 0.5 m 和水下 2 m 植株的净光合速率分别为 $13.2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $10.1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $8.05 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 同时全淹植株 PSII 的最大光化学效率也有一定程度的下降, 显著低于对照和水淹根部处理的植株($p < 0.05$)。李宏、王彬^[51]对 1 a 生实生盐桦苗的耐水湿能力进行研究, 表明在水湿处理后盐桦苗木的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均有不同程度的下降, 而胞间 CO_2 浓度有所上升, 光合作用的主要限制因素是非气孔因素。盐桦苗木在受到 9 个月的水湿处理后仍未死亡, 说明盐桦苗木具有一定的耐水湿的特性。李昌晓、钟章成^[52]通过模拟三峡库区消落带土壤水分变化特征, 研究水松当年实生幼苗在三峡库区消落带水位变化条件下的光合生理生态响应机理和适应性, 水松幼苗对土壤水分变化具有敏感的光合响应能力, 在充足和较多水分条件下表现出增益的正向光合响应, 显示出很强的耐水湿特点。Manes^[53]等人在对杉木的水分胁迫实验中发现, 适当的水分胁迫会降低植物的电导率、气体交换率、最大光化学产量及叶片水势, 但其暗光合作用会有一定增加。

3 植物耐水湿的主要研究方法与评价方法

3.1 植物耐水湿研究方法

植物耐水湿的研究方法有自然条件下进行野外

观察和调查法和人工控制水湿或水位指标测定法。

野外观察和调查法是通过植物在不同水湿条件下的表现进行观测从而判断其耐水湿能力的方法。方建初^[54]等根据长江中下游在1931年与1954年两年大水(持续时间平均两个月,最久者达5个月以上,水深1 m~2 m,最深处达38.3 m)后对115种树木的表现进行观察,包括水涝后生长正常、衰弱或死亡、树叶黄落现象、枝梢枯萎、新梢生长状况、萌发力等。黄德明^[55]于1998年夏季我国长江流域发生特大洪水之际,观察到湖北武汉地区的生长于江滨、堤岸、河滩等处的高大针叶树种池杉在水中淹浸长达80多天,仍正常生长发育,认为其耐水湿能力强,是高度耐水淹乔木。吴金清^[56]等对三峡库区特有植物疏花水柏枝进行了调查研究,发现其生境单一,在长江汛期常被洪水淹没,淹没时间随其生长于消涨带内的位置不同而有所差异,同时还发现其在静水区植株分布数目极少或没有,而在流水区植株生长却较多,表明疏花水柏枝喜湿耐涝,是很好的河岸绿化树种。张道远^[57]等对新疆境内怪柳属植物—刚毛怪柳(*Tamarix hisPida Willd*)的分布进行了研究,结果表明:刚毛怪柳喜盐耐水湿,是典型的潜水性中生植物,喜高水位(0.5 m~3 m),其在新疆的分布仅限于各大河流的河滩、低阶地及湖滨地带。

人工控制水湿或水位指标测定法:是指人工控制水位或者以人工模拟自然条件来对植物进行观察和测定从而判断其耐水湿能力的方法。衣英华、樊大勇等^[58]通过模拟淹水(50 d),利用最大净光合速率、光饱和曲线、二氧化碳饱和曲线和根系活力等指标,研究了水淹对两年生栓皮栎和池杉树苗生理生态过程的影响。屠娟丽、黄超群^[59]等以6种植物为研究对象,在人工控制的水淹条件下,观察其叶片水淹胁迫后的症状,分析其耐水淹能力,6种植物的耐水淹能力从高到低依次为小叶蚊母、水杨梅、花叶杞柳、滨柃、龟甲冬青和罗城石楠。蒋小弟^[38]等于1991年和1997年在人工控制水湿条件下对银荆在育苗和种植过程中的耐湿性进行了观察,测定了胸径、树高及发芽率,表明银荆小苗根部被淹24 h,发芽率为正常产苗量的1/10;受淹2d以上的苗木严重死亡,并影响全年高和径生长量。殷亚南^[60]等通过人工控制水位,对苏柳795、苏柳903这两个耐水湿新品种在滩涂的生长状况进行了研究,发现在海拔高程大于5.8 m,洪水淹没期小于50 d时,两柳树生长良

好;当滩涂海拔高程在5 m~5.8 m之间时,柳树的生长随高程的下降而受影响明显加大;当滩涂高程低于4.5 m时,柳树生长不良。

3.2 植物耐水湿主要评价方法

根据调查指标和研究目的、研究指标、研究对象等,目前对植物耐水湿性的评价方法主要有主成分分析法、动态聚类分析和隶属函数法等。周广生^[61]等把小麦各生理指标(MDA含量、chl含量、NRA活性、根系活力、Pro含量、游离氨基酸含量、可溶性糖含量、淀粉含量、相对含水量、叶片保水力及旗叶净光合速率)的耐湿系数作为小麦单项耐湿能力大小的指标,用主成分分析法将各单项耐湿系数综合成几个新的相互独立的综合指标。再利用隶属函数求出每一品种耐湿性的综合评价后,便可较准确地评价各品种的耐湿性,并且还利用隶属函数对所测指标进行分析,得出各小麦品种隶属函数值大小,对小麦品种的耐湿性进行排序,并用聚类分析将小麦品种的耐湿性划分为不同类型,分别为:高度耐湿、中度耐湿和不耐湿。王军等^[62]以各性状的耐湿系数作为衡量根系耐湿性的指标,应用主成分分析法,动态聚类分析和隶属函数法,对大麦DH群体165个系的耐湿性能力进行了分析研究。

由于植物耐水湿评价方法没有统一的标准,植物耐水湿等级标准的划分也不统一。一般常用的标准是以耐水湿(高度耐湿)、稍耐水湿(中度耐湿)、不耐水湿(极不耐湿)3个等级^[62],也有人以极耐水湿、较耐水湿、微耐水湿和不耐水湿4个等级来划分。王林海^[63]等就对芝麻发芽期耐湿性等级划分进行了研究,并将其分为:高耐(相对成苗率 $\geq 80\%$),耐湿($60\% \leq$ 相对成苗率 $< 80\%$),中耐($40\% \leq$ 相对成苗率 $< 60\%$),不耐($20\% \leq$ 相对成苗率 $< 40\%$),极不耐(相对成苗率 $< 20\%$)等共5个等级。

4 总结与展望

目前对耐湿性机理的研究大多集中在农作物上,农作物的生长周期短,个体较小,根系组织的观察比较方便;景观造林植物方面的植物则大多是多年生常绿植物,生长周期长,个体大,根系分布较宽,不易于观察测定。随着水培、组培、盆栽等技术的发展,为今后乔木、灌木等其耐湿性机理研究提供有利

条件。植物耐水湿性研究指标主要包括生长指标和生理指标两类。生长指标不适宜在短期的研究中测量,植物生长比较缓慢,测量的结果不明显,分析不准确。由于生长期较长,短期环境的影响对植物的生长影响可以忽略。生理指标则是在短时间内观察植物体内变化的良好方法,但是所需设备要求比较高。长指标与生理因素对耐水湿的研究评价都是重要的指标,两者相结合能更好的为耐水湿选择提供参考依据。

野外调查观察法可以直接反映出植物的耐水湿能力,较真实可靠,但观察受自然条件的限制,尤其受江、河、湖等水体自然消涨的水位变化限制,具有偶发性,操作性不强。指标测定法通常采用人工手段控制水湿条件,操作性较强,通过指标测定来判断植物的耐水湿能力可信度也更高,但是需要的设备较多,要求较高。耐水湿的评价方法大多是根据研究的指标运用隶属函数法来综合判断,植物耐水湿性强弱是影响水岸造林成活的重要因素,我们应该结合前人的研究成果,进一步深入的探讨,为更好的建设水岸景观防护林,更好的提升城市景观。

参考文献:

- [1] Shearer K S, Xiang W N. The Characteristics of Riparian Buffer Studies. *Journal of Environmental Informatics*. 2007. 9(1): 41 ~ 45
- [2] 孙启祥,彭镇华,於凤安. 滩涂立地条件造林树种选择研究[J]. *安徽农业大学学报*, 1998, 25(1): 18 ~ 22.
- [3] 汪廷芬,鄒垣,徐爱源. 赣北平原主要绿化树种耐水性能的调查[J]. *江西林业科技*, 1985, (6): 14 ~ 15
- [4] 王云辉,何建新. 湖区庭院常见绿化树种耐水淹性状调查[J]. *林业科技通讯*, 1998, (7): 31 ~ 32.
- [5] 何正安,陈卫东,高志军,等. 常见城镇绿化树种耐水淹性状调查研究[J]. *湖南林业科技*, 1997, 24(2): 70 ~ 72.
- [6] 李兆玉,王羊宝. 里下河地区不同树种耐水性的调查[J]. *江苏林业科技*, 1993, 20(1): 28 ~ 29
- [7] 汪贵斌,曹福亮,郭起荣. 淹水对银杏生长及生理的影响[J]. *江西农业大学学报*, 1998, 20(2):
- [8] 赵可夫,王韶堂. 作物抗性生理[M]. 北京: 农业出版社, 1990: 226 ~ 249.
- [9] 利容干,王建波. 植物逆境细胞及生理学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 53 ~ 70.
- [10] 张福锁,等. 环境胁迫与植物营养[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993
- [11] Scott HD, Angule J. D. Flood duration the effects on soybean growth and yield [J]. *Agronomy Journal*, 1989(81): 631 ~ 636
- [12] Malik A I, Colmer T D, Lambers H, et al. Short-term waterlogging has long-term the effects on the growth and Physiology of wheat [J]. *New Phytologist* 2002(153): 225 ~ 23
- [13] Choi B H, Lee J T, Chung K U. Influence of flooding time and duration on yield components And seedyield in growing groundnut (*Arachis hypogaea* L.) research report of the rural development administration [J]. *CroPs. Korea Republic*, 1986, 28: 175 ~ 179
- [14] Culati J M L, Lemka D, Jena S N. Root growth of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) as Influenced by irrigation schedules under different water tab. condition [J]. *Indian journal of Agricultural science*, 2000, 70(2): 122 ~ 124
- [15] Malik A I, Colmer T D, Lambers H, et al. Setter and marcus sehortemeyer, changes in Physiological and morphological traits of roots and shoots of wheat to different depths of waterlogging [J]. *Australia Plant Physiology* 2001, 28: 1121 ~ 1131
- [16] Setter T L, Laureles E V The beneficial effect of reduced elongation growth on submergence tolerance in rice 1996
- [17] Drew M C, Saglio P H, Pradet A Large adenylate energy charge and ATP/ADP ratios in aerenchymatous roots of *Zea mays* in anaerobic media as a consequence of improved internal oxygen transport 1985(01)
- [18] Huang B, Johnson W Root respiration and carbohydrate status of two genotypes in response to hypoxia 1995(04)
- [19] Ding N, Musgrave M E Relationship between mineral coating on roots and yield performance of wheat under waterlogging stress 1995
- [20] 张学昆,范其新,陈洁,等. 不同耐湿基因型甘蓝型油菜苗期对缺氧胁迫的生理差异响应[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(3): 485 ~ 491.
- [21] 晏斌,戴秋杰,刘晓忠,等. 玉米叶片涝渍伤害过程中超氧自由基的积累. *植物学报* [J], 1995: 37(9): 738 ~ 744.
- [22] 魏和平,利容干,王建波. 淹水对玉米叶片细胞超微结构的影响. *植物学报* [J] 2000, 4(28): 811 ~ 817.
- [23] Crawford R M M, Braendle R Oxygen deprivation stress in a changing environment 1996
- [24] Biemelt S, Keetman U, Albrecht C Re-aeration following hypoxia or anoxia leads to activation of the antioxidative defense system in roots of wheat seedlings 1998
- [25] Kieber J J The ethylene response pathway in arabidopsis 1997
- [26] 郑松发,陈玉军. 深水裸滩红树植物与落羽杉生长适应性研究[J]. *林业科学研究*, 2004, 17(5): 654 ~ 659
- [27] 肖强,郑海雷. 水淹对互花米草生长及生理的影响[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(9): 1025 ~ 1028
- [28] William L. Loucks. 耐涝的树木[J]. *植物学译文选辑*(第11辑), 1988, 58 ~ 62.
- [29] Sena Gomes A R, Kozłowski T T. Grow responses and adaptation of *Fraxinus pensylvanica* flooding [J]. *Plant Physiology*, 1980, (66): 267 ~ 271.
- [30] Kozłowski T T, Pallardy S G. Effects of flooding on metabolism, Academic Press [J]. NC, 1984, 5(1): 30 ~ 41.
- [31] Kozłowski T T. Soil aeration, flooding and tree growth [J]. *J. Arboric*, 1986, 11(3): 85 ~ 96.

- [32] Philipson JJ, Coutts PP. The tolerance of tree roots to waterlogging [J]. *New Phytologist*, 1980, 85: 489 ~ 531.
- [33] 汪延芬, 邵垣, 徐爱源. 赣北平原主要绿化树种耐水性能的调查 [J]. *江西林业科技*, 1985, (6): 14 ~ 15.
- [34] 彭镇华, 康忠铭. 安徽淮河流域耐水湿树种的聚类分析及布局研究 [J]. *安徽农业大学学报*, 1994, 21(2): 101 ~ 108.
- [35] 王云辉, 何建新. 湖区庭院常见绿化树种耐水淹性状调查 [J]. *林业科技通讯*, 1998, (7): 31 ~ 32.
- [36] 白祯, 黄建国. 三峡库区护岸林主要树种的耐湿性和营养特性 [J]. *贵州农业科学*, 2011, 39(6): 166 ~ 169.
- [37] 蒋小弟, 朱洪莲, 徐无双, 等. 银荆引种试验 [J]. *江苏林业科技*, 1999, 26(2): 17 ~ 20.
- [38] 任冰如, 李维林, 吴文龙, 等. 黑荀叶片对水分处理的生理反应 [J]. *植物资源与环境学报*, 2000, 9(2): 18 ~ 21.
- [39] Burkett V R, Rassa O, Draugelis-Dale, et al. Effects of Flooding Regime and Seedling Treatment on Early Survival and Growth of Nuttall Oak. *Restoration Ecology*, 2005, 13(3): 471 ~ 479.
- [40] Mekeven M R, Hillk D D and Rozelle A A. Adaptation In plants to Flooding and Waterlogging [A]. In: Messina M G and Conner W Heds. *Southern Forested wetland: Ecology and Management* [C]. 1998: 273 ~ 204.
- [41] Pezeshki S R, laune R D and Meederj. Carbon assimilation and biomass partitioning in *Avicennia germinans* and *Rhizophora mangle* seedlings in response to redox condition [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1997, 39(3): 162.
- [42] Angelov M N, Sung S J S, Dong R L, et al. Long and short-term flooding effects on survival and sink-source relationships of swamp-adapted tree species [J]. *Tree Physiology*, 1996, 16(5): 477 ~ 484.
- [43] 许如根. 大麦品种(系)间耐湿性的比较研究 [J]. *大麦科学*, 1997(2).
- [44] 刘寿峰, 周守标, 等. 陌上菅水淹后叶生理指标及地上部分营养成分恢复动态 [J]. *草业学报*, 18(2).
- [45] 李味乐, 孔维鹤, 等. 水淹胁迫对青竹复叶槭叶片部分生理指标的影响 [J]. *河南农业大学学报*, 2008, 42(1).
- [46] 肖强, 郑海雷, 等. 水淹对互华米草生长及生理的影响 [J]. *生态学杂志*, 2005, 24(9): 1025 ~ 1028.
- [47] 李纪元, 饶龙兵, 潘德寿, 等. 人工淹水胁迫下枫杨种源 MDA 含量的地理变异 [J]. *浙江林业科技*, 1999, 19(4): 22 ~ 26.
- [48] 张敦论, 乔勇进, 郝金标. 水分胁迫下 8 个树种几项生理指标的分析 [J]. *山东林业科技*, 2000(3).
- [49] 罗祺, 张纪林, 郝日明, 等. 水淹胁迫下 10 个树种某些生理指标的变化及其耐水淹能力的比较 [J]. *植物资源与环境学报*, 2007, 16(1): 69 ~ 73.
- [50] 罗芳丽, 曾波, 陈婷, 等. 三峡库区岸生植物秋华柳对水淹的光合和生长响应 [J]. *植物生态学报*, 2007, 31(5): 910 ~ 918.
- [51] 李宏, 王彬. 水湿处理对盐桦苗木光合特性的影响 [J]. *北方园艺*, 2010(14): 100 ~ 10.
- [52] 李昌晓, 钟章成. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化条件下水松幼苗的光合生理响应 [J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(3).
- [53] Manes F, Donato E, Vitale M. Physiological response of *Pinus halepensis* needles under ozone and water stress conditions. *Physiologia plantarum*, 2001, 113: 249 ~ 257.
- [54] 方建初, 冷平生. 城市植物生态学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [55] 黄德明. 耐水淹乔木—池杉 [J]. *植物杂志*, 1998(5): 24.
- [56] 吴金清, 赵子恩, 金大兴, 等. 三峡库区特有植物疏花水柏枝的调查研究 [J]. *武汉植物学研究*, 1998, 16(2): 111 ~ 116.
- [57] 张道远, 杨维康, 潘伯荣. 刚毛怪柳群落特征及其生态、生理适应性 [J]. *中国沙漠*, 2003, 23(4): 447 ~ 451.
- [58] 衣英华, 樊大勇, 谢宗强, 等. 模拟淹水对池杉和栓皮栎光合生理生态过程的影响 [J]. *生态学报*, 2008, 28(12).
- [59] 屠娟丽, 黄超群. 6 种灌木耐水淹能力分析 [J]. *江西农业学报*, 2011, 23(6): 71 ~ 72.
- [60] 殷亚南, 李文烨. 苏柳 795、苏柳 903 栽培试验初报 [J]. *江苏林业科技*, 2002, 29(5): 25 ~ 26.
- [61] 周广生, 梅方竹, 周竹青, 等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测 [J]. *中国农业科学*, 2003, 36(11): 1378 ~ 1382.
- [62] 王军, 周美学, 许如根, 等. 大麦耐湿性鉴定指标和评价方法研究 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(10): 2145 ~ 2152.
- [63] 王林海, 张艳欣, 黎冬华, 等. 湿害胁迫对发芽期芝麻的影响及耐湿性评价方法建立 [J]. *中国油料作物学报*, 2011, 33(6): 588 ~ 592.
- [64] 冯祥运, 张秀荣, 肖唐华. 芝麻种质资源耐渍性鉴定及评价 [J]. *中国油料作物学报*, 1991(3): 12 ~ 15.
- [65] 张秀荣, 冯祥运, 肖唐华. 国外芝麻种质资源耐渍性鉴定研究 [J]. *作物杂志*, 1992(3): 20 ~ 21.
- [66] 陶红, 沈会权, 陈和, 等. 大麦品种苗期湿害试验及品种耐湿性研究 [J]. *大麦科学*, 2004(4): 31 ~ 33.