干旱胁迫对苏北沙质海岸 3 个树种水分光合生理特性的影响

徐世伟，胡海波，陈 鑫，姚 洋

（南京林业大学 南方现代林业协同创新中心，江苏 南京 210037）

摘 要：[目的] 为了了解苏北沙质海岸 3 个造林树种的耐旱能力，为沿海防护林体系建设提供理论依据和技术支持。[方法] 通过盆栽苗木水分胁迫试验，着重分析了在水分胁迫条件下榉树、弗吉尼亚栎、女贞 2 a 实生苗的水分生理和光合作用日变化特征。[结果] (1) 随时间推移和胁迫程度加强，3 个树种的叶片相对含水量均呈递减趋势，榉树的下降幅度高于女贞和弗吉尼亚栎；胁迫 58 d 的重度水分胁迫处理下，3 个树种相对含水量分别比对照下降了 78.8%，61.9%和 65.5%，弗吉尼亚栎和女贞的相对含水量变化较小；(2) 3 个树种叶片净光合速率日变化曲线在 CK，60%和 45%含水量条件下均呈双峰型；在正常和轻度水分胁迫下，弗吉尼亚栎蒸腾速率和气孔导度表现出双峰特征，而榉树和女贞则为：典型的单峰曲线；随着胁迫程度加强，3 个树种的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率的日均值均为：CK＞60%含水量＞45%含水量＞30%含水量；同一水分条件下，4 个指标的日均值呈现出：榉树＜女贞＜弗吉尼亚栎的规律。[结论] 3 个树种的抗旱能力由强至弱依次为：弗吉尼亚栎＞女贞＞榉。沿海防护林的建设中应优先选择弗吉尼亚栎。

关键词：干旱胁迫；光合特性；相对含水量；沙质海岸

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2015)01-0111-07 **中图分类号**：Q945.11

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.021

Effects of Water Stress on Water Photosynthetic Physiology Characteristics of Three Tree Species in Sandy Shores of Northern Jiangsu Province

XU Shiwei, HU Haibo, CHEN Xin, YAO Yang

(*Collaborative Innovation Center of the Southern Modern Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu* 210037, *China*)

Abstract: [Objective] To study the drought tolerance of three afforestation trees on the sandy shores of Northern Jiangsu Province. [Methods] Based on the experiment of water stress in pots, the index variation of water physiological characteristics and daily dynamics of photosynthetic characteristics of 2-year-old *Zelkova schnideriana*, *Quercus virginiana* and *Ligustrum lucidum* under water stress were analyzed. [Results] (1) With time and stress intensity increasing, the relative water content in leaves of the three tree species all decreased, and the decreasing range of *Zelkova schnideriana* was bigger than that of *Quercus virginiana* and *Ligustrum lucidum*; water content of the three tree species decreased by 78.8%, 61.9% and 65.5% under severe water stress of 58 days, and the relative water contents of *Quercus virginiana* and *Ligustrum lucidum* changed a little. (2) Under treatments of CK, 60% and 45% water content, the diurnal curves of the photosynthetic rate of the three tree species were "double-peak". Under normal and light water stress, the diurnal curves of the transpiration rate and stomatal conductance of *Quercus virginiana* were "double-peak", while the same curves of *Zelkova schnideriana* and *L igustrum lucidum* were "single-peak". With increasing stress, the order of P_n, T_r, G_s and WUE of the three tree species was: CK＞60% water content＞45% water content＞30% water content. In the same soil water grades, the daily averages of the four indexes of *Zelkova schnideriana* were relatively small, followed by *Ligustrum lucidum*, whereas those of *Quercus virginiana* were the largest. [Conclusion] The drought tolerance characteristics of *Zelkova schnideriana* were relatively

收稿日期：2014-01-10 **修回日期**：2014-01-20

资助项目：国家科技部项目"防侵蚀和防污染沿海防护林体系研究与示范"(2009BADB2B0601)

第一作者：徐世伟(1989—)，女(汉族)，江苏省盐城市人，硕士，研究方向为林业生态工程。E-mail:731654381@qq.com。

通信作者：胡海波(1964—)，男(汉族)，江苏省宝应县人，博士，博士生导师，主要从事水土保持、林业生态工程和城市生态方面的研究。E-mail:huhb2000@aliyun.com。

small, followed by *Ligustrum lucidum*, whereas those of *Quercus virginiana* were the largest.

Keywords: drought stress; photosynthetic characteristics; relative water content; sandy shores

中国海岸侵蚀具有普遍性、多样性和加剧发展等特点。目前侵蚀岸线约占总的大陆岸线的 1/3 以上。海岸侵蚀范围大和后退速度快的地区,主要是渤海沿岸和江苏北部的平原海岸[1]。江苏省拥有漫长的海岸线,全长 953.9 km,其中沙质海岸约占 40%。据调查,江苏省几乎 1/3 的海岸处于侵蚀状态[2-3]。沿海防护林可以调节气候,改良土壤,固岸护坡,抵御台风等自然灾害,可产生巨大的生态、经济和社会效益。

近几年苏北地区夏季出现了严重干旱现象,所以植物的抗旱能力成为当前人们关注的重要问题。且沙质海岸土壤沙粒大,非毛管孔隙大,保水保肥能力极差,干旱贫瘠一直是制约沙质海岸造林的主要因素[4]。因此,对沿海造林树种耐旱特性进行研究十分必要。目前沿海防护林树种单调,耐旱植物资源的收集和评价工作成为当务之急。在适地适树,实现生物多样性的基础上,以"常绿和落叶结合,耐旱耐盐碱相结合"的基本原则选择了 3 个参试树种。榉树(*Zelkova schneideriana*)是珍贵的落叶阔叶乔木,能够改善土壤透气性和结构,是很好的水土保持树种,国内外对榉树的研究,一直以来主要集中在栽培和生物学特性等方面[5]。弗吉尼亚栎(*Quercus virginiana*)是常绿阔叶高大乔木,能忍耐高强度的盐雾及土壤盐胁迫并具有很强的抗风特性,2000 年引种至中国,在浙江、上海、江苏等地沿海滩涂表现出良好的适应性[6],相关研究单位对其耐盐性及耐盐机制进行了研究[7]。但弗吉尼亚栎是否能够耐受干旱胁迫,目前还未见报道。女贞(*Ligustrum lucidum*)是不可多得的常绿阔叶绿化树种。目前,有关女贞栽培方面的研究主要集中在苗木繁殖[8],病虫害防治[9]等方面,而对其抗逆性的研究报道却很少[10]。为此,笔者通过盆栽试验,研究苏北地区主要造林树种的耐旱生理特性,着重分析了在水分胁迫条件下,榉树、弗吉尼亚栎、女贞苗木的水分生理及光合作用指标的变化特征,并以此为依据,对苗木耐旱特性进行综合评价,期望为沿海防护林体系建设提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为榉树、弗吉尼亚栎、女贞 3 个树种的 2 a 实生苗,均取自盐城市射阳县苗圃基地。采用盆栽方法,盆底部有孔,其口径 30 cm,高 30 cm,在盆中加入等量的基质(3 kg),基质为腐殖质土、草炭、珍珠岩按照 1∶3∶1(体积比)混合,基质用多菌灵消毒处理。试验在南京林业大学温室大棚内进行,定期浇水抚育培养。选择植株生长良好,长势基本一致的供试材料进行抗旱性对比试验。

1.2 试验设计

2013 年 4 月将各树种定植,先将苗木正常管理,缓苗 3 个月后开始逐盆测定土壤含水量,以获取控水基础数据。7 月 29 日对生长期幼苗开始控水处理,处理前先充分浇水,任其自然干旱,然后进行控水。将每种幼苗均设 4 个处理,使土壤含水量保持在田间最大持水量的 75%(CK),60%(T_1),45%(T_2),30%(T_3)共 4 个梯度(田间最大持水量为 24.58%)。每个树种在每一个梯度下种植 15 株苗木,3 次重复,每个重复 5 株。尽量保持各组幼苗生长均匀一致。各处理于 8 月 15 日先后达到处理要求,每天下午用 6430FS_TDR 300 土壤水分测定仪,对花盆逐个进行土壤含水量的测定并补充损失水分,以保持土壤含水量在设定范围内至胁迫结束。试验分 3 次进行采样,采样时间为 8 月 29 日,9 月 12 日和 10 月 12 号。摘取植株成熟叶片,迅速放入密封袋,在实验室测定鲜叶水分生理指标,设 3 次重复,并且选择典型晴天进行光合日变化参数测量。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 水分生理指标测定 采用浸泡、烘干法进行测定。采样后立刻称取鲜叶质量,然后在蒸馏水中浸泡 12 h 后称取饱和鲜质量,最后在 105 ℃下烘干至恒质量,称取干质量。相对含水量=(鲜质量-干质量)/(饱和鲜质量-干质量)×100%[11]。

1.3.2 光合作用的测定 干旱胁迫 26 d 后,于 2013 年 9 月 10 日 8∶00—18∶00 于自然光照下,用 LI-6400XT 便携式光合测定仪对各处理的苗木进行观测。选取 3 个树种植株中上部生长状况良好且近似的叶片,每株选 3 片,分别挂牌标记,测定时保持叶片自然生长角度不变。测定参数主要包括:净光合速率 P_n(μmol/m^2/s)、蒸腾速率 T_r(mmol/m^2/s)、气孔导度 G_s(mmol/m^2/s)等,每隔 2 h 测定 1 次。每个处理 3 次重复,取平均值。叶片瞬时水分利用效率(WUE)由公式 $WUE=P_n/T_r$[12]计算。

1.4 数据处理

所测得数据应用 Excel 和 SPSS 19.0 进行处理。

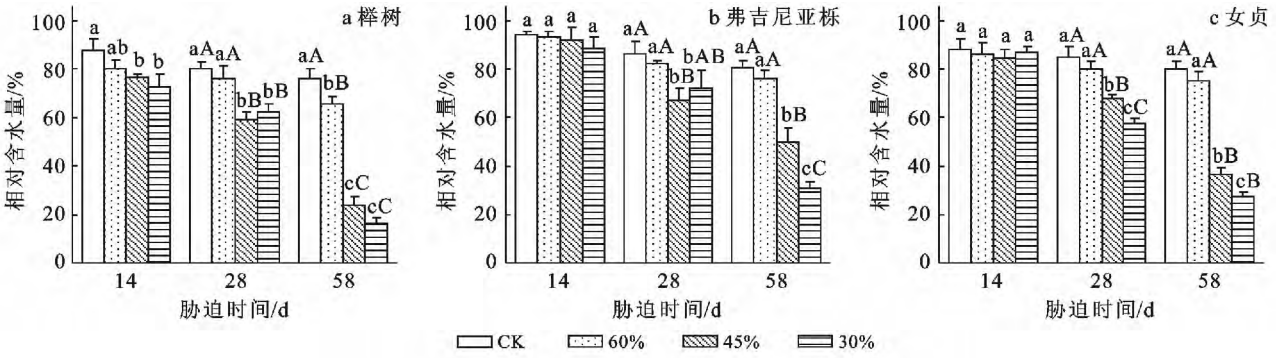
2 结果与分析

2.1 土壤干旱对 3 个树种水分生理特性的影响

干旱胁迫下,当植物中叶片含水量下降时植物体

内各种代谢活动都会因此而受到影响,从而阻碍其正常生长发育[13]。图 1 显示了不同土壤水分条件下,3 个树种的叶片相对含水量均随时间推移和胁迫程度加强呈递减趋势。在最后一次采样时,3 个树种重度胁迫下含水量达最小值,分别为 16.155%,2.558% 和 1.477%。水分胁迫 28 和 58 d 时榉树、弗吉尼亚栎和女贞在中度和重度胁迫处理下的相对含水量与对照、轻度胁迫处理差异均达到了显著水平($p<0.05$);除了榉树在水分胁迫 14 d 时中度和重度胁迫处理与对照差异均达到了显著水平($p<0.05$),弗吉尼亚栎和女贞 4 种水分梯度间的差异均不显著($p>0.05$)。即同一水分条件下,榉树在干旱胁迫 14 d 后相对含水量就开始下降,且幅度显著高于弗吉尼亚栎和女贞,说明榉树叶片细胞膜的受伤害程度较大。

同时,多重比较分析表明,在 4 种水分条件下,胁迫 58 d 时弗吉尼亚栎女贞在轻度胁迫时差异未达到显著水平,抗旱性较好;榉树在每个抗旱梯度下都达极显著水平,抗旱性能较差。植物组织的水分分为自由水与束缚水 2 种,植物体内的自由水与植物的结构物质结合不牢固,很容易散失到植物体外;束缚水是亲和细胞胶体的水,不易蒸腾,与植物抗旱能力有关。在重度水分胁迫时 3 个树种分别比对照下降了 78.8%,61.9%和 65.5%,弗吉尼亚栎和女贞的相对含水量变化较小,表明其束缚水的含量较高,对干旱胁迫有一定的适应能力,而榉树叶片的相对含水量急剧下降,表明其自由水的含量较高,蒸腾强烈,抗旱能力弱。



注:不同小写和大写字母分别表示水分处理间在 0.05 和 0.01 水平下存在显著差异。下同。

图 1　干旱胁迫对 3 个树种叶片相对含水量的影响

2.2　干旱胁迫条件下 3 个树种叶片光合作用参数日变化特征

2.2.1　干旱胁迫对净光合速率的影响　植物的光合作用受各种生理、生态和生化因素的影响,而这些因素时刻发生着变化,使光合作用呈现出复杂的日变化。抗旱性较高的树种能维持较高的光合速率。由图 2 可知,3 个树种叶片的光合速率日变化曲线在 CK,T_1 和 T_2 条件下均呈双峰型,土壤水分对光合作用日变化具有明显的影响。随着土壤水分胁迫程度加强 3 个树种净光合速率整体均呈递减趋势。第一峰值均出现在 10∶00 左右,之后出现一个“午休”低谷,然后逐渐升高,达到第二峰值。之所以有“午休”现象是因为中午光合有效辐射较强,叶片吸收光能过剩,同时伴随空气 CO_2 供应不足、气孔阻力和暗呼吸速率的增加等因素所致。第二峰均出现在 14∶00 左右,除榉树外,弗吉尼亚栎和女贞第一峰值均比第二峰高,为一天中的最大值。在 T_3 条件下,3 个树种 P_n 的日变化趋势较为平缓,无“双峰”特征,且各时间段的值均处于较低状态。由表 1 可知,在 4 种土壤水分梯度下,榉树、弗吉尼亚栎和女贞 P_n 的日均值表现为 CK>T_1>T_2>T_3,榉树日均值最大值 4.33 μmol/(m² · s),最小值 2.09 μmol/(m² · s),不同处理间净光合速率的日平均值差异达到显著水平($p<0.01$);弗吉尼亚栎日均值最大值 6.61 μmol/(m² · s),最小值 3.35 μmol/(m² · s),不同处理间净光合速率的日平均值差异达到显著水平($p<0.01$);女贞日均值最大值 5.54 μmol/(m² · s),最小值 2.51 μmol/(m² · s),不同处理间净光合速率的日平均值差异达到显著水平($p<0.01$)。

2.2.2　干旱胁迫对蒸腾速率的影响　蒸腾作用影响着植物的水分状况,在一定程度上反映其调节水分损失的能力及适应干旱环境的方式。由图 3 可以看出,蒸腾速率随着胁迫强度的加剧而下降。不同水分处理榉树和女贞叶片蒸腾速率的日变化呈现规律的变化,为典型的单峰曲线,各处理的蒸腾速率均在 10∶00左右出现峰值;在正常和轻度水分胁迫下,弗吉尼亚栎蒸腾速率则表现出双峰特征,但轻度胁迫较不明显,弗吉尼亚栎各处理出现峰值的时间是10∶00 和 14∶00。在重度胁迫条件下,弗吉尼亚栎蒸腾速率变化趋势不明显,基本处于稳定状态,各时间段值均较低。这是由于在土壤水分严重不足时,叶片水分亏缺提早出现。在中午之前叶肉细胞间隙的水气饱

和程度明显降低，张开度明显减小甚至关闭，T_r 就开始下降，并难以恢复到较高水平。

由表 1 可知，不同水分处理蒸腾速率日变化的平均值由大到小的顺序依次为：CK＞T_1＞T_2＞T_3，榉树水分胁迫下的蒸腾速率日平均值比 CK 分别降低 4.96%(T_1)，19.01%(T_2)和 41.32%(T_3)，T_2，T_3 蒸腾速率的日平均值与 CK 比较，差异达到显著水平(p＜0.05)，CK，T_1，T_3 与 T_2 差异不显著(p＞0.01)；弗吉尼亚栎水分胁迫下的蒸腾速率日平均值比 CK 分别降低 15.28%(T_1)，22.92%(T_2)和 43.06%(T_3)，T_1，T_2，T_3 的蒸腾速率日平均值与 CK 差异显著(p＜0.05)，而 CK 与 T_1 差异不显著(p＞0.01)；女贞水分胁迫下的蒸腾速率日平均值比 CK 分别降低 9.92%(T_1)，19.85%(T_2)和 43.51%(T_3)，T_3 的蒸腾速率日平均值与 CK，T_1，T_2 差异显著(p＜0.01)，而 CK，T_1，T_2 差异不显著(p＞0.01)；在同一土壤水分条件下，蒸腾速率日均值的大小顺序为：榉树＜女贞＜弗吉尼亚栎。

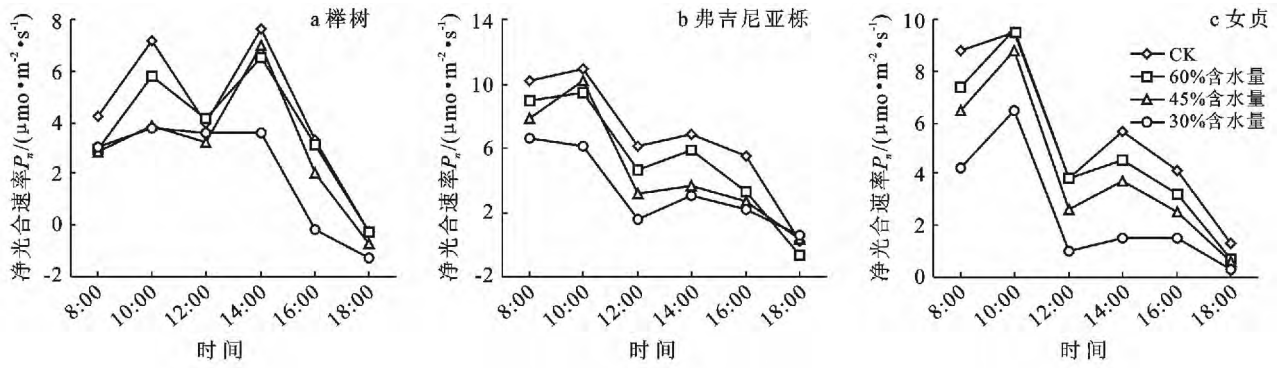


图 2 干旱胁迫下 3 个树种叶片净光合速率的日变化趋势

表 1 土壤水分对 3 个树种叶片光合作用参数日平均值的影响

品 种	处理	净光合速率 P_n/(μmol·m⁻²·s⁻¹)	蒸腾速率 T_r/(mmol·m⁻²·s⁻¹)	气孔导度 G_s/(mmol·m⁻²·s⁻¹)	水分利用效率 WUE/(μmol·mmol⁻¹)
榉树	CK	4.33±0.200aA	1.21±0.090aA	0.057±0.016aA	3.58±0.089aA
	T_1	3.72±0.308bB	1.15±0.181abA	0.049±0.013aAB	3.24±0.180bB
	T_2	3.02±0.303cC	0.98±0.157bAB	0.026±0.010bBC	3.08±0.164bcBC
	T_3	2.09±0.312dD	0.71±0.147cB	0.018±0.013bC	2.94±0.155cC
弗吉尼亚栎	CK	6.61±0.289aA	1.44±0.217aA	0.085±0.007aA	4.59±0.115aA
	T_1	5.26±0.201bB	1.22±0.214bAB	0.068±0.009abAB	4.36±0.114bB
	T_2	4.69±0.246cC	1.11±0.157bB	0.054±0.007bcBC	4.22±0.087bcB
	T_3	3.35±0.269dD	0.82±0.148cC	0.038±0.004cC	4.09±0.142cB
女贞	CK	5.54±0.185aA	1.31±0.128aA	0.063±0.010aA	4.23±0.154aA
	T_1	4.87±0.184bB	1.18±0.201abA	0.059±0.007aA	4.13±0.070aAB
	T_2	4.13±0.171cC	1.05±0.104bA	0.050±0.013abA	3.93±0.238bB
	T_3	2.51±0.079dD	0.74±0.113cB	0.034±0.007bA	3.40±0.095cC

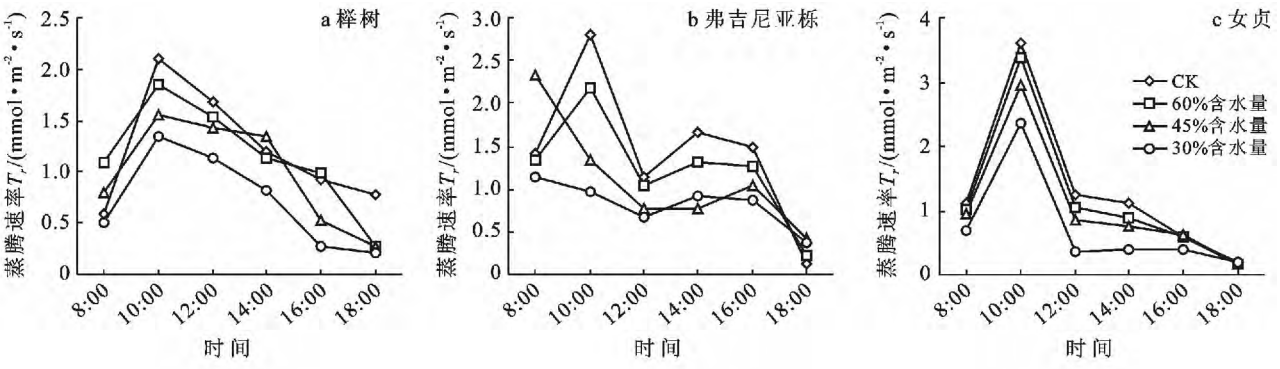


图 3 干旱胁迫下 3 个树种叶片蒸腾速率的日变化趋势

2.2.3　**干旱胁迫对气孔导度的影响**　气孔导度是反映叶片气孔交换的重要指标,气孔运动对土壤水分反应极为敏感[14]。由于气孔导度与蒸腾速率峰值和波谷出现的时间点是基本一致的,所以气孔导度日变化趋势与蒸腾速率基本一致,说明 G_s 对水分亏缺的反映敏感程度与 T_r 是相似的。图 4 显示了弗吉尼亚栎呈双峰型,而榉树和女贞呈单峰型。弗吉尼亚栎在 CK 和 T_1 条件下的气孔导度在 10∶00 和 14∶00 出现两个峰值,第 1 个峰值比第 2 个峰值大,中度胁迫时气孔导度值大幅下降,重度胁迫下 G_s 日变化趋势较为平缓,总体表现较低的水平;榉树和女贞所有处理的 G_s 在早晨 10∶00 左右达到全天的最大值,其后随着温度的增加和湿度的下降,G_s 降低。由表 1 可知,在 4 种土壤水分梯度下,榉树、弗吉尼亚栎和女贞 G_s 的日均值表现为 CK＞T_1＞T_2＞T_3,榉树变化范围在 0.018～0.057 mmol/(m^2 · s),T_2,T_3 气孔导度的日平均值与 CK 比较,差异达到显著水平(p＜0.01),CK,T_1 和 T_2,T_3 之间差异不显著(p＞0.01);弗吉尼亚栎变化范围在 0.038～0.085 mmol/(m^2 · s),不同处理间气孔导度的日平均值差异显著水平和榉树相同;女贞变化范围在 0.034～0.063 mmol/(m^2 · s),T_3 气孔导度的日平均值与 CK,T_1,T_2 比较,差异达到显著(p＜0.05);相同水分条件下,气孔导度日均值:榉树＜女贞＜弗吉尼亚栎。

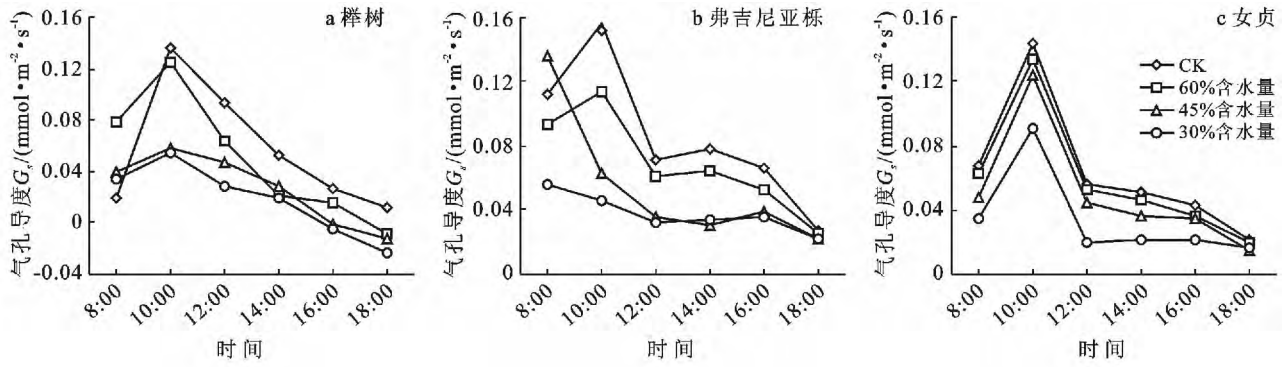


图 4　干旱胁迫下 3 个树种叶片气孔导度的日变化趋势

2.2.4　**干旱胁迫对水分利用效率的影响**　植物叶片水分利用效率的大小与土壤水分含量的关系决定了其节水能力和水分生产力水平[15],可反映植物气体(CO_2 和 H_2O)代谢功能和植物生长与水分利用之间的关系,所以研究水分胁迫对 3 个树种的水分利用效率影响意义重大。图 5 表明,随着干旱胁迫程度的加重,3 种植物 WUE 总体上呈下降趋势。榉树 CK,T_2,T_3 处理叶片水分利用效率均在 8∶00 出现第 1 个峰值,而 T_1 处理推迟到 10∶00。各处理在 14∶00 出现第 2 个峰值,一天中最大值分别为 7.203,6.022,5.792 和 5.195 μmol/mmol。弗吉尼亚栎 CK,T_1 处理叶片水分利用效率分别在 8∶00 和 12∶00 达到全天的第 1 个和第 2 个峰值,T_2,T_3 胁迫处理则推迟到 10∶00 和 14∶00,最大值分别为 7.021,6.627,7.551 和6.351 μmol/mmol。女贞不同水分处理叶片水分利用效率均在 8∶00 达到全天的第 1 个峰值,T_2,T_3 胁迫处理在 14∶00 出现第 2 个峰值,CK,T_1 推迟到16∶00,其最大值分别为 7.772,7.252,6.85 和 6.105 μmol/mmol。在 8∶00—10∶00 时段,女贞各处理均表现出下降的趋势,且下降幅度较大,降幅分别为 65.99%(CK),60.84%(T_1),56.67%(T_2)和 55.22%(T_3)。榉树和弗吉尼亚栎 CK,T_1 也表现为降低的趋势,但降幅较小,这与清晨 CO_2 浓度高,空气湿度较大等因素有关系,为了维持适宜的光照速率,蒸腾速率相对降低,从而使水分利用率在此阶段呈现下降的趋势。

由表 1 可知,在 4 种土壤水分梯度下,榉树、弗吉尼亚栎和女贞 P_n 的日均值表现为:CK＞T_1＞T_2＞T_3。P_n 日均值榉树变化范围在 2.937～3.58 μmol/mmol,T_1,T_2,T_3 水分利用效率的日平均值与 CK 比较,差异达到显著水平(p＜0.01),T_2 和 T_1,T_3 之间差异不显著(p＞0.01)。弗吉尼亚栎 P_n 日均值变化范围在 4.09～4.593 μmol/mmol,T_1,T_2,T_3 水分利用效率的日平均值与 CK 比较,差异达到显著水平(p＜0.01),T_1,T_2,T_3 之间差异不显著(p＞0.01)。女贞 P_n 日均值变化范围在 3.396～4.227 μmol/mmol,T_2,T_3 水分利用效率的日平均值与 CK 比较,差异达到显著水平(p＜0.01),T_1 与 CK 之间差异不显著(p＞0.01)。相同水分条件下,水分利用效率日均值:榉树＜女贞＜弗吉尼亚栎。

2.3　**各指标相关分析**

由表 2 各测定指标的相关系数可知,实测的各项

指标之间相关系数都较大，其中与净光合速率相关系数最大的指标为蒸腾速率（0.984）和气孔导度（0.969），表明蒸腾速率和气孔导度与净光合速率关系密切。

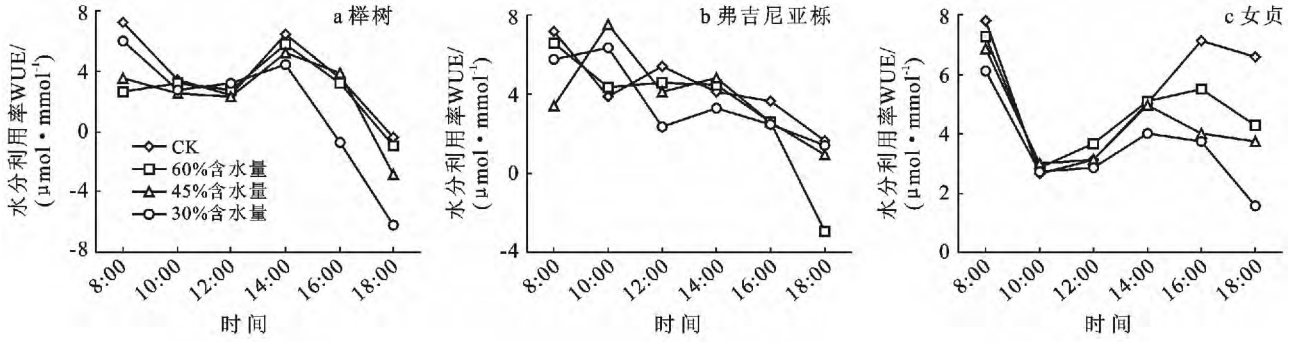


图 5 干旱胁迫下 3 个树种叶片水分利用率的日变化趋势

表 2 各测定指标的相关系数

指 标	净光合速率 P_n/（μmol·m^{-2}·s^{-1}）	蒸腾速率 T_r/（mmol·m^{-2}·s^{-1}）	气孔导度 G_s/（mmol·m^{-2}·s^{-1}）	水分利用效率 WUE/（μmol·mmol^{-1}）
净光合速率	1.000	0.984	0.969	0.867
蒸腾速率	0.984	1.000	0.942	0.911
气孔导度	0.969	0.942	1.000	0.730
水分利用效率	0.867	0.911	0.730	1.000

3 讨讨与结论

当植物蒸腾速率超过水分吸收速率时，植物发生干旱胁迫。植物胁变中的生理过程是复杂的，各生理参数之间既相互联系又相互制约，以保持植物在逆境中得以生长。因此要判断某一植物对环境的抗逆性，既要考虑植物对环境的适应方式，又要综合分析不同的耐旱生理指标才能做出准确的判断[16]。因此本文从苗木水分生理和生理代谢指标等层面上对苏北沙质海岸 3 个造林树种的耐旱生理特性进行了对比研究。

（1）3 个树种对土壤干旱的水分生理响应特性。叶片相对含水量是指示叶片保水力的一个常用指标，当植物体内水分供应不足，水分代谢受到抑制时，相对含水量愈小说明水分亏缺愈严重。干旱胁迫条件下，抗旱性强的植物叶片含水量下降速度比抗旱性弱的植物迟缓，从而维持其正常生命活动所需的水分条件。本试验中，3 个树种的叶片相对含水量均随时间推移和胁迫程度加强呈递减趋势，这与史小玲等[17]的研究一致。且榉树的下降幅度远高于女贞和弗吉尼亚栎；除了榉树在水分胁迫 14 d 时 T_2 和 T_3 处理与 CK 差异均达到了显著水平（$p<0.05$），弗吉尼亚栎和女贞 4 种水分梯度间的差异均不显著（$p>0.05$）。胁迫 58 d 时重度水分胁迫处理下 3 个树种分别比对照下降了 78.8%，61.9%和 65.5%，弗吉尼亚栎和女贞的相对含水量变化较小，这些均表明弗吉尼亚栎和女贞有较强的保水储水能力，抗旱能力优于榉树。

（2）3 个树种对土壤干旱胁迫的光合作用日变化特性。光合作用是植物重要的生理生态过程，它对土壤水分胁迫的响应是判断植物抗旱能力的重要指标[18]。水分胁迫在抑制蒸腾的同时几乎总是引起光合作用的抑制，蒸腾和光合相互关联。根的水分供应影响蒸腾作用，因为供水不足可引起脱水和气孔关闭。气孔是植物进行水气交换的通路，它通过调节蒸腾，降低或抵抗干旱胁迫对植物生理活动的影响，G_s 大小对 P_n 及 T_r 均有一定制约。高水分利用效率是植物适应干旱环境的一种重要的特征，水分利用效率越高，说明植物抗旱能力越强。本试验结果表明，随着胁迫程度加强 3 个树种的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率均下降。景茂等[19]的研究也验证了这一点。各指标的日均值均呈现出：榉树＜女贞＜弗吉尼亚栎的规律。

本研究通过对水分生理和光合生理方面的综合分析，可以看出弗吉尼亚栎抗旱能力比女贞和榉树强，而榉树最弱。沿海防护林的建设中应优先选择弗吉尼亚栎。

[参 考 文 献]

[1] 李震，雷怀彦. 中国砂质海岸分布特征与存在问题[J]. 海洋地质动态，2006，22(6)：1-4.

[2] 戴亚南,张鹰. 江苏沿海地区海洋灾害类型及其防治探讨[J]. 生态环境,2006,15(6):1417-1420.
[3] 赵育鹏,鲁小珍,艾鹏,等. 江苏省沿海沙质海岸现状及防护林防蚀耐盐树种选择基本原则[J]. 安徽农业科学,2013,41(10):4433-4435.
[4] 万福绪,韩玉洁. 苏北沿海防护林优化模式研究[J]. 北京林业大学学报,2004,26(2):31-36.
[5] 汪灵丹,张日清. 榉树的研究进展[J]. 广西林业科学,2006,34(4):188-191.
[6] 陈益泰,陈雨春,黄一青,等. 抗风耐盐常绿树种弗吉尼亚栎引种初步研究[J]. 林业科学研究,2007,20(4):542-546.
[7] 王树凤,陈益泰,孙海菁,等. 盐胁迫下弗吉尼亚栎生长和生理生化变化[J]. 生态环境,2008,17(2):747-750.
[8] 孙金环. 金叶女贞扦插生根试验研究[J]. 河北林业科技,2005,2(1):9-10.
[9] 蔡平,毛建萍,陆小燕,等. 金叶女贞假尾孢病害的生物学特性和杀菌剂筛选[J]. 江苏林业科技,2005,32(2):5-7.
[10] 樊后保,臧润国. 女贞种子和幼苗对模拟酸雨的反应 3[J]. 林业科学,2000,36(6):90-94.
[11] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
[12] Fischer R A, Turner N C. Plant productivity in the arid and semiarid zones[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1978,29(1):277-317.
[13] Mukherjee S P, Choudhuri M A. Implication of hydrogen peroxide-ascorbate system on membrane permeability of water stressed Vigna seedlings[J]. New Phytologist, 1985,99(3):355-360.
[14] 房全孝,陈雨海,李全起,等. 灌溉对冬小麦水分利用效率的影响研究[J]. 农业工程学报,2004,20(4):34-39.
[15] 狄晓艳,朱小琪,马建平,等. 土壤水分胁迫对 5 个种源油松光合特性的影响[J]. 植物研究,2009(5):539-543.
[16] 刘淑明,陈海滨,孙长忠,等. 黄土高原主要造林树种的抗旱性研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2003,31(4):149-153.
[17] 史小玲,薛立,任向荣,等. 华南地区 4 种阔叶幼苗水分胁迫条件下的抗旱性初探[J]. 林业科学研究,2012,24(6):760-767.
[18] 王瑞霞,王素琴,李少宏,等. 不同扦插处理对爬地柏成活率的影响[J]. 现代农业科技,2009(19):220-220.
[19] 景茂,曹福亮,汪贵斌,等. 土壤水分含量对银杏光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2005,29(4):83-86.

(上接第 106 页)

[15] 齐华,刘明,张卫健,等. 深松方式对土壤物理性状和玉米根系分布的影响[J]. 华北农学报,2012,27(4):191-196.
[16] 田大伦,陈书军. 樟树人工林土壤水文—物理性质特征分析[J]. 中南林学院学报,2005,25(2):1-6.
[17] Singer M J. Physical properties of arid region soils[M]. Skujins J(ed). Semiarid and deserts: soil resource and reclamation New York: Marcel Dekker, 1991:81-109.
[18] 王国梁,刘国彬,周生路. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J]. 自然资源学报,2003,18(5):529-535.
[19] 龙怀玉,蒋以超,李韵珠. 褐土与潮土吸附动力学研究[J]. 土壤学报,2000,37(4),563-568.
[20] 王喜艳,张亚文,冯燕,等. 玉米秸秆深层还田技术对土壤肥力和玉米产量的影响研究[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(6):103-107.
[21] 朱利群,张大伟,卞新民. 连续秸秆还田与耕作方式轮换对稻麦轮作田土壤理化性状变化及水稻产量构成的影响[J]. 土壤通报,2011,42(1):81-85.
[22] 杨帆,李荣,崔勇,等. 我国南方秸秆还田的培肥增产效应[J]. 中国土壤与肥料,2011(1):10-14.
[23] 董水丽,王海仓. 焚烧秸秆对土壤养分及水分的影响[J]. 陕西农业科学,2011,57(3):90-92.

(上接第 110 页)

[12] 肖德全,孙继文,邵振海. 玉米施硅钙肥效果分析[J]. 植保技术,2005(6):8-9.
[13] 贺立源,江世文. 小麦施用硅钙肥效应的研究[J]. 土壤肥料,1999(3):8-11.
[14] 安钰,李明,张清云,等. 外援钙对甘草种子萌发及幼苗生长的影响研究[J]. 宁夏农林科技,2011,52(9):89-90,94.
[15] 张清云,李强,蒋齐,等. 氮磷钾互作效应对甘草产量影响的研究[J]. 土壤通报,2009,40(5):1119-1122.
[16] 王巧娥,沈金灿,于文佳,等. 甘草中甘草酸的微波萃取[J]. 中草药,2003,34(5):407-409.
[17] 李炳奇,汪河滨,李学禹,等. 超声法联合提取甘草黄酮和甘草酸的研究[J]. 山东中医杂志,2005,24(1):38-40.
[18] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[S]. 北京:化学工业出版社,2001:65-66.