

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 9 期 Vol.32 No.9 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 9 期

2012 年 5 月 (半月刊)

目次

不同土地覆被格局情景下多种生态系统服务的响应与权衡——以雅砻江二滩水利枢纽为例	葛菁, 吴楠, 高吉喜, 等 (2629)
放牧对小嵩草甸生物量及不同植物类群生长率和补偿效应的影响	董全民, 赵新全, 马玉寿, 等 (2640)
象山港日本对虾增殖放流的效果评价	姜亚洲, 凌建忠, 林楠, 等 (2651)
城市景观破碎化格局与城市化及社会经济发展水平的关系——以北京城区为例	仇江啸, 王效科, 逯非, 等 (2659)
江河源区高寒草甸退化序列上“秃斑”连通效应的元胞自动机模拟	李学玲, 林慧龙 (2670)
铁西区城市改造过程中建筑景观的演变规律	张培峰, 胡远满, 熊在平, 等 (2681)
商洛低山丘陵区农林复合生态系统光能竞争与生产力	彭晓邦, 张硕新 (2692)
基于生物量因子的山西省森林生态系统服务功能评估	刘勇, 李晋昌, 杨永刚 (2699)
不同沙源供给条件下柽柳灌丛与沙堆形态的互馈关系——以策勒绿洲沙漠过渡带为例	杨帆, 王雪芹, 杨东亮, 等 (2707)
桂西北喀斯特区原生林与次生林凋落叶降解和养分释放	曾昭霞, 王克林, 曾馥平, 等 (2720)
江西九连山亚热带常绿阔叶林优势种空间分布格局	范娟, 赵秀海, 汪金松, 等 (2729)
秦岭山地锐齿栎次生林幼苗更新特征	康冰, 王得祥, 李刚, 等 (2738)
极端干旱环境下的胡杨木质部水力特征	木巴热克·阿尤普, 陈亚宁, 等 (2748)
红池坝草地常见物种叶片性状沿海拔梯度的响应特征	宋璐璐, 樊江文, 吴绍洪, 等 (2759)
改变 C 源输入对油松人工林土壤呼吸的影响	汪金松, 赵秀海, 张春雨, 等 (2768)
啮齿动物捕食压力下生境类型和覆盖处理对辽东栎种子命运的影响	闫兴富, 周立彪, 刘建利 (2778)
上海闵行区园林鸟类群落嵌套结构	王本耀, 王小明, 王天厚, 等 (2788)
胜利河连续系统中蜉蝣优势种的生产量动态和营养基础	邓山, 叶才伟, 王利肖, 等 (2796)
虾池清塘排出物沉积厚度对老鼠簕幼苗的影响	李婷, 叶勇 (2810)
澳大利亚亚热带不同森林土壤微生物群落对碳源的利用	鲁顺保, 郭晓敏, 芮亦超, 等 (2819)
镜泊湖岩溶台地不同植被类型土壤微生物群落特征	黄元元, 曲来叶, 曲秀春, 等 (2827)
浮床空心菜对氮循环细菌数量与分布和氮素净化效果的影响	唐莹莹, 李秀珍, 周元清, 等 (2837)
促分解菌剂对还田玉米秸秆的分解效果及土壤微生物的影响	李培培, 张冬冬, 王小娟, 等 (2847)
秸秆还田与全膜双垄集雨沟播耦合对半干旱黄土高原玉米产量和土壤有机碳库的影响	吴荣美, 王永鹏, 李凤民, 等 (2855)
赣江流域底泥中有机氯农药残留特征及空间分布	刘小真, 赵慈, 梁越, 等 (2863)
2009 年徽州稻区白背飞虱种群消长及虫源性质	刁永刚, 杨海博, 瞿钰锋, 等 (2872)
木鳖子提取物对朱砂叶螨的触杀活性	郭辉力, 师光禄, 贾良曦, 等 (2883)
冬小麦气孔臭氧通量拟合及通量产量关系的比较	佟磊, 冯宗炜, 苏德·毕力格, 等 (2890)
专论与综述	
基于全球净初级生产力的能源足迹计算方法	方恺, 董德明, 林卓, 等 (2900)
灵长类社会玩耍的行为模式、影响因素及其功能风险	王晓卫, 赵海涛, 齐晓光, 等 (2910)
问题讨论	
中国伐木制品碳储量时空差异分析	伦飞, 李文华, 王震, 等 (2918)
研究简报	
森林自然更新过程中地上氮贮量与生物量异速生长的关系	程栋梁, 钟全林, 林茂兹, 等 (2929)
连作对芝麻根际土壤微生物群落的影响	华菊玲, 刘光荣, 黄劲松 (2936)
刈割对外来入侵植物黄顶菊的生长、气体交换和荧光的影响	王楠楠, 皇甫超河, 陈冬青, 等 (2943)
不同蔬菜种植方式对土壤固碳速率的影响	刘杨, 于东升, 史学正, 等 (2953)
巢湖崩岸湖滨基质-水文-生物一体化修复 陈云峰, 张彦辉, 郑西强 (2960)	

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 336 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-05



封面图说: 在交配的雨蛙——雨蛙为两栖动物, 世界上种类达 250 种之多, 分布极广。中国的雨蛙仅有 9 种, 除西部一些省份外, 其他各省(区)均有分布。雨蛙体形较小背面皮肤光滑, 往往雄性绿色, 雌性褐色, 其指、趾末端多膨大成吸盘, 便于吸附攀爬。多生活在灌丛、芦苇、高秆作物上, 或塘边、稻田及其附近的杂草上。白天匍匐在叶片上, 黄昏或黎明频繁活动, 捕食能力极强, 主要以昆虫为食。特别是在下雨以后, 常常 1 只雨蛙先叫几声, 然后众蛙齐鸣, 声音响亮, 每年在四、五月份夜间发情交配。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjlw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201103290404

木巴热克·阿尤普, 陈亚宁, 郝兴明, 李卫红, 苏芮. 极端干旱环境下的胡杨木质部水力特征. 生态学报, 2012, 32(9): 2748-2758.

Ayoupu Mubareke, Chen Y N, Hao X M, Li W H, Su R. Xylem hydraulic traits of *Populus euphratica* Oliv. in extremely drought environment. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(9): 2748-2758.

极端干旱环境下的胡杨木质部水力特征

木巴热克·阿尤普, 陈亚宁*, 郝兴明, 李卫红, 苏 芮

(荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆生态与地理研究所, 中国科学院, 乌鲁木齐 830011)

摘要:胡杨作为我国西北干旱区重要的乔木树种, 研究其木质部水力特征对了解此树种适应极端干旱环境的生物学背景具有重要意义。以塔里木河下游的胡杨成株和 2 年生胡杨幼株为研究材料, 对其木质部最大导水能力($k_{s(\max)}$)和自然栓塞程度(PLC)等木质部水力特征及其水力特征有关的木质部导管(或管胞)数量特征进行研究。结果表明, 成株胡杨多年生枝条和侧根($2 \leq d < 5$ mm)木质部自然栓塞程度均较高, PLC 均值高于 50%, 其中多年生枝条栓塞程度具有一定的日变化规律, 6:30—7:30 的 PLC 均值(58%)小于 14:00—15:00 的(67%); 河道边上成株胡杨侧根的均 $k_{s(\max)}$ 和 PLC 均值都小于距河道 200 m 处的。随着土壤干旱程度的加剧, 幼株胡杨侧根的 PLC 均值随之增加, 而叶片气孔导度随之降低, 土壤含水率与侧根 PLC 均值, 叶片气孔导度之间分别存在显著负相关关系($R = -0.9$, $R = -0.811$)。在统一直径范围内($2 \leq d < 5$ mm), 成株胡杨侧根均导管直径(d_{mean})和水力直径($d_{95\%}$ 、 d_h)均大于胡杨幼株, 而导管密度胡杨幼株高于成株胡杨; 胡杨侧根木质部 $k_{s(\max)}$ 与均导管直径、水力直径之间具有显著正相关关系($R > 0.9$)。

关键词:多年生枝条; 侧根; 最大导水效率; 自然栓塞程度; 木质部导管数量特征

Xylem hydraulic traits of *Populus euphratica* Oliv. in extremely drought environment

AYOUPU Mubareke, CHEN Yaning*, HAO Xingming, LI Weihong, SU Rui

State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

Abstract: During evolution, plant species developed various mechanisms to enhance their drought adaptation, including physiological adjustment and structural modification. Plants under arid conditions regulate their water status using several tactics such as leaf biochemical and stomata characteristics as well as xylem sap flux. According to the cohesion-tension theory, water moves through the xylem under tension during transpiration and therefore, rapid transpiration during the drought season increases the risk of xylem cavitations. This study was carried out on *Populus euphratica* Oliv., the main poplar species distributed in arid land of northwestern China. Two-year old seedlings of *P. euphratica* were cultivated *in-situ* at the ecological observation station and mature *P. euphratica* trees selected from the natural stands along the river bank on the lower reaches of Tarim River, southern Xinjiang, China. Xylem hydraulic traits including xylem maximum hydraulic conductivity ($k_{s(\max)}$), natural embolism level (PLC, %), as well as lateral root anatomical structure were determined. Results revealed that the native embolism level in lateral roots and branches ($2 \leq d < 5$ mm) of mature *P. euphratica* trees were relatively higher with mean PLC value of more than 50%. Morning native embolism at branch level (PLC 58%) was lower than in the afternoon (PLC 67%), but there were no significant differences ($P > 0.05$) between the morning and afternoon native branch xylem embolism. The $k_{s(\max)}$ value and native embolism level in lateral roots of mature *P. euphratica*

基金项目:国家自然科学基金(91025025); 国家 973 项目(2010CB951000); 中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-Q10-3-3); 中国科学院“西部之光”项目(RCPY200903)

收稿日期:2011-03-29; **修订日期:**2011-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

trees at 200 m from the river bank were higher than those at the river bed, and there were significant differences ($P < 0.05$), between the native embolism level but not the $k_{s(max)}$ value. With the an increased stress from soil drought, the lateral root native embolism level of *P. euphratica* seedlings increased while stomata conductance decreased, and there was a significant negative correlation between them ($R = -0.9$, $R = -0.811$). Anatomical structure of xylem in lateral roots in the same diameter class ($2 \leq d < 5$ mm) revealed that mean vessel diameter (d_{mean}) and mean hydraulic diameter ($d_{95\%}$, d_h) of mature trees were significantly higher ($P < 0.01$) than that of its seedlings, and seedlings had higher vessel density than mature trees. Maximum hydraulic conductivity were closely correlated with mean vessel diameter and hydraulic diameter in lateral roots ($R > 0.9$). Generally, *P. euphratica* growing at the arid land had relatively higher native embolism level, which is beneficial since it aids in preventing excessive water loss during transpiration and therefore affects positively the water status of the plant. This study of xylem hydraulic traits and its anatomical structure facilitates understanding of the biological background of *P. euphratica* and acclimatization to drought environment.

Key Words: Lateral roots; maximum hydraulic conductivity; native embolism; xylem anatomical structure

植物在不同环境条件下进行光合作用和生存能力不仅仅表现在叶片生物化学和气孔特征方面的适应性^[1],而且还体现在向叶片持续输送水分的能力^[2-5]。根据内聚力-张力假说^[6-7],植物体内的水分在张力(负压)下是以液态形式向上运输的。因此,在干旱季节强烈的蒸腾需求将会加剧木质部空穴化的发生。空穴化是在张力下液态水突变成为水蒸气的现象^[8]。空穴化一旦发生,就会使整个管道分子被气体填充,即形成栓塞,导致木质部导水率的下降,进而影响植物的其它生理过程^[2,9]。

目前国内外关于植物木质部抗栓塞能力与抗旱性之间的关系方面存在分歧,较多的国外学者认为,植物木质部抗栓塞能力与植物抗旱性之间可能有较密切的关系^[8,10-14],抗旱能力强的植物木质部在低水压下仍然可以保持导水能力。但也有一种意见认为,植物木质部抗栓塞能力与植物抗旱性之间的关系并不明显。不同的植物面对干旱胁迫具有不同的生存策略,抗栓塞能力强的植物并不一定是抗旱能力强的植物,植物根系的分布深度、土壤类型、生长型等都对植物的干旱忍耐力有影响^[15],而且适当的木质部栓塞可能对植物在干旱胁迫下的生长有利,并且有可能是植物体在干旱环境下节约水分的一种耐旱策略^[16-19]。Miranda 等^[20]的研究指出,生长在半干旱气候区的 6 种灌木种类的木质部抗栓塞能力较低,自然栓塞程度高,说明植物对干旱环境的适应性不一定是表现在发育抗栓塞能力强的木质部,较低的抗栓塞能力是通过其它水分利用策略来得到补充。

胡杨作为我国西北干旱区内陆河流域的本土优势物种,其木质部水力特性对于干旱胁迫环境具有什么样的响应方式,目前国内尚缺乏相关研究报道。

本研究以极端干旱区塔里木河下游本土树种-成株胡杨和 2 年生胡杨幼株为研究材料,对其木质部导水率及自然栓塞程度以及水力特性相关的木质部导管(或管胞)数量特征进行研究,研究目的以下:1)自然生长的成株胡杨多年生枝条和侧根的自然栓塞程度以及在不同地下水埋深下的成株胡杨侧根水力特征的差异;2)不同水分处理对胡杨幼株木质部水力特征及叶片气孔导度的影响;3)成株和胡杨幼株侧根木质部导管(或管胞)数量特征与其导水能力之间的定量关系等。

1 材料与方法

1.1 研究对象与试验设计

研究对象为成株胡杨与 2 年生胡杨幼株,其中,在塔里木河下游生态观测站内(34 团)对胡杨幼株进行盆栽试验;成株胡杨则选择自然生长在塔里木河下游英苏断面(距离 34 团 30 km)河道边上(地下水埋深为 1.5—2.5 m)和距离河道 200m 处(地下水埋深为 4.5—6 m)的成年植株。研究区域地处在塔克拉玛干沙漠与库鲁克沙漠之间,属于典型的干旱荒漠气候,年平均降水量为 17—42 mm,年均潜在蒸发量为 2500—3000 mm,日平均气温在 13—17℃。

1.2.1 盆栽试验设计

2010年3月初,将10株2年生胡杨幼株栽植在尺寸为0.3m×0.8m的PVC管中。PVC管内土壤为胡杨生长地取回来的土壤,土质主要以沙土和沙壤土为主。待幼株适应生长3个月之后,2010年7月17日开始进行水分处理。10个幼株分成2个水分处理组,第一组正常灌溉,整个水分处理过程中,土壤重量含水率保持在25%—30%;第二组是干旱胁迫组,从水分处理试验开始到8月18日一直未进行灌水,测定当天PVC管内土壤平均含水率在10%—14%之间。整个水分处理试验期间,每天清晨利用土壤湿度计(HH2 moisture Metter, US)对土壤表层(0—10 cm)体积含水量进行测量。对正常灌溉组进行10 d的正常灌水,而对于干旱胁迫组30 d的自然脱水(大部分叶片变成黄色),然后进行导水率及栓塞程度的测定。每测定日清晨,对统一灌溉组的两株幼株进行测量。首先用大黑塑料袋把整个幼株包起来以减少叶片蒸腾,然后将PVC管切开,测量管内不同深度(0—10, 20, 40, 60, 80 cm)土壤重量含水率;然后将整个根系小心地挖出来,迅速放入事先准备好的有少量自来水的水桶里,在水里剪去毛根尖部分,避免已栓塞导管的恢复,准备导水率及栓塞程度的测定。土样装铝盒,每个土层取3个重复并测湿重,带回实验室烘干后二次称重,从而计算出各土层的含水率。

叶片气孔导度:于2010年7月20日—8月6日期间选择晴天,每天于8:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00, 18:00, 20:00点,采用AP4-动态气孔计测定正常灌溉和干旱胁迫处理组胡杨叶片的气孔导度。每株选取3片功能叶进行测定。取个测定日对应时刻的平均值进行结果分析。

1.1.2 野外试验设计

2010年7月和8月份中旬对塔里木河下游英苏断面成株胡杨侧根($2 \leq d$ (直径) < 5 mm)导水率及栓塞程度进行测定。英苏断面设计2个测量点,一是河道边上(地下水埋深1.5—2.5 m)的成株胡杨;二是距离河道200 m处(地下水埋深为4.5—6 m)的成株胡杨。

测定时,选择长势良好,大小相似的2—3株成年胡杨(树高为8—11 m,胸径为23—35 cm),切取直径在2—5 mm,长度为25—35 cm左右的6—8条新鲜侧根,迅速放在水里并剪去两端2—3 cm部分,最大限度地减少人为造成木质部栓塞化。然后用铝箔纸包好放在黑塑料袋中,带回试验站立即进行测定。取根的同时,测量土壤含水率。测量多年生枝条方法同上。

1.2 木质部导水率及栓塞程度的测定

用木质部导水率及栓塞测量系统(XYLEM® xylem embolism meter, Bronkhorst, Montigny-les-cormeilles, France)对胡杨不同部位木质部导水率及栓塞程度进行测定。预实验结果表明(表1,图1),胡杨枝条平均最大导管长度较长,属于长导管植物,但是,带叶片的长枝条样品在测量过程中出现堵塞现象和冲洗液从叶柄和茎干节点处漏水现象,这直接导致其导水率的降低。因此,正式测量时将每一株幼株的侧根(总长度约在15—25 cm之间)和茎干部分在水里截成以4—6 cm长度的样段,而成株多年生枝条被截成5—8 cm长度的样段(表2)。木质部导管长度从同化枝到多年生枝条,再到根部方向出现逐渐变长的趋势^[21],鉴于此,成株胡杨侧根被截成10—15 cm的长度并用刀片将两切端平整之后,用冲洗液进行冲洗。为了降低样品冲洗过程中胶质效应的影响,在冲洗液中加了1 mmol/L CaCl₂^[22]。冲洗之后,迅速把样品放入木质部导水率及栓塞测量系统的多支管中,将样品测量的水压高度调整到不引起导管栓塞恢复的水平。通过预实验,确定了胡杨根和茎干导水率测定的水压高度分别为0.5 kPa和1 kPa。

表1 不同年龄胡杨枝条木质部最大导管长度

Table 1 Branch xylem maximum vessel length of *P. euphratica* in different age class

胡杨枝条 Branch of <i>P. euphratica</i>	幼株枝条($n=15$) Branch of <i>P. euphratica</i> seedlings	青年胡杨枝条($n=10$) Branch of young <i>P. euphratica</i> tree	成株胡杨枝条($n=8$) Branch of mature <i>P. euphratica</i> tree
总长度 Total length/cm	58±8.3	81±13	24±2.9
最大导管长度 Maximum vessel length/cm	15±4.4	68±15	8.7±2.6
外径 Outer diameter/mm	3±0.3	4±0.05	2±0.2

样品起始导水率(k_{init} : $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1}$)的测定:在 0.5 kPa 或 1 kPa 水压高度下,通过滤孔径为 0.22 μm 过滤器,用 10 mmol/L KCl 和 1 mmol/L CaCl_2 冲洗液(pH 值 6)进行测定;然后在 150 KPa 压力下用同样的冲洗液排除已堵塞导管的气泡(至少进行了 2 次冲洗)。冲洗时间的长短根据气泡停止时间的长短来确定,最后确定最大导水率(k_{max} : $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1}$)。样品比导率(specific conductivity, k_s)和水分损失率(percentage loss of hydraulic conductivity, PLC)通过下面的换算公式来分别计算,即, $k_s=k(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1})\times$ 样品长度(m)/样品横截面积(m^2)。 $\text{PLC}=100(1-k_{s(\text{init})}/k_{s(\text{max})})$ 。

1.3 木质部最大导管长度的测定

通过空气灌注技术(air-perfusion technique)确定木质部最大导管长度。方法如下,将末端枝条切口段放入一个装满自来水的水容器中,用 0.1 MPa 的压力吹气从枝条的最远处开始在水里剪掉 1 cm,重复这个操作,一直到出现气泡为止。留下来的枝条长度为此枝条的最大导管长度^[23-24]。

预实验结果表明,平均总长度为 58 cm 的胡杨幼株多年生枝条其木质部均最大导管长度为 15cm,比成株胡杨(林龄约为 20—30)多年生枝条的最大导管长度长(总长度为 24 cm,最大导管长度为 8.7 cm)。河道内生长的青年胡杨(林龄约为 7—12)多年生枝条,其最大导管长度比幼株和成株胡杨的长(表 2)。相关分析结果表明,胡杨枝条总长度越长,其木质部的最大导管长度也越长,两个之间具有极显著正相关关系($R=0.855$)(图 1)。

1.4 根木质部解剖结构

测定完导水率及栓塞程度之后,对正常灌溉组幼株胡杨和成株胡杨侧根($2\leq d<5\text{ mm}$),进行木质部解剖结构的研究。取中部 3 cm 根片,在 FAA(体积分数 5:5:9)里固定。石蜡切片(切片厚度为 6—8 μm)用番红—固绿对染,采用光学显微镜(光学显微 Olympus, BX51)进行观测,拍照(数码相机 Olympus DP70),用图像处理系统(MP5.1CCD)对 8 个成株胡杨侧根与 8 个胡杨幼株侧根进行木质部导管(或管胞)数量,导管直径,木质部横截面积等进行统计。

表 2 测量木质部导水率及栓塞程度所用胡杨根、枝条长度、样品外径和样品数量

Table 2 The number, length, outer diameter of *P. euphtatica* branch and lateral root samples used to measure xylem hydraulic conductivity and embolism

项目 Item	均长度 Mean length/cm	均外径 Mean outer diameter/mm	数量 Number
成株胡杨侧根 Lateral root of mature <i>P. euphtatica</i> tree	12±2.1	3±1	57 条(12 株)
成株胡杨多年生枝条 Branch of mature <i>P. euphtatica</i> tree	8.4±2.7	4±1	55 条(7 株)
胡杨幼株侧根 Lateral root of <i>P. euphtatica</i> seedlings	5.0±0.8	3±2	40 条(10 株)
胡杨幼株主干 Main stem of <i>P. euphtatica</i> seedlings	5.5±1.6	6±3	34 条(10 株)

数据为平均值±标准差

通过图像处理系统所得到的原数据计算出均导管直径(d_{mean} , μm)、水力直径(d_h 和 $d_{95\%}$, μm)等。在每个根横切面上总导管数量成株胡杨 137—434, 胡杨幼株 202—428 个。导管直径(d_{mean} , μm)取最大,最小直径的平均值。水力直径(d_h 和 $d_{95\%}$, μm)能够提供导管(或管胞)对样品水分导度贡献率方面的信息。目前一般以 $d_{95\%}$ 和 d_h 来表达水力直径。 $d_{95\%}$ (μm)是贡献于木质部导水率 95% 的平均导管直径,计算步骤如下:首先把整个导管直径按降序排序,计算每个导管直径的四次方,求和($\sum D^4$),然后重新求和导管直径的四次方,

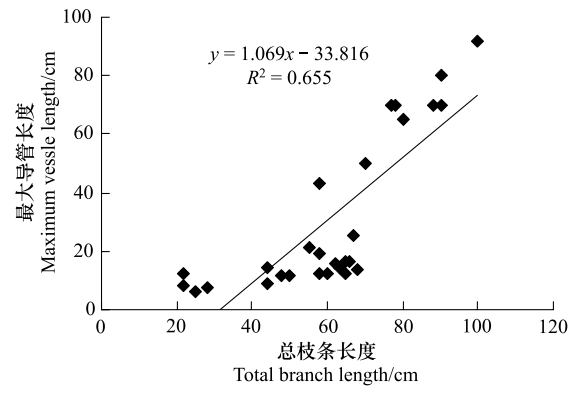


图 1 胡杨多年生枝条(2<d<5 mm)总长度与最大导管长度之间的关系

Fig.1 The relations between total branch length and maximum vessel length of *P. euphratica*'s branch(2<d<5 mm)

一直求和到等于总 $\sum D^4$ 的95%为止,最后计算贡献于木质部导水率95%的导管的平均直径,此平均直径为 $d_{95\%}$ 。 $d_h(\mu\text{m})$ 是按照公式 $D_h = \sum d^5 / \sum d^4$ 来计算^[25-26]。

2 结果与分析

2.1 成株胡杨木质部最大导水率及自然栓塞程度

2.1.1 成株胡杨侧根和枝条木质部自然栓塞的日变化

实验结果表明,在塔里木河下游英苏距河200 m处的成株胡杨多年生枝条($2 \leq d < 5 \text{ mm}$)7月份的平均最大导水率, $k_{s(\text{max})}$ 值,为 $(3.34 \pm 1.11) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ (均 $\pm$ SD),自然栓塞程度较高,即PLC均值为 $(63.99 \pm 21.11) \%$ (均 $\pm$ SD)。成株胡杨侧根($2 \leq d < 5 \text{ mm}$)7月份的均 $k_{s(\text{max})}$ 值为 $(31.33 \pm 18.66) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$,PLC均值为 $(96.71 \pm 7.8) \%$ 。方差分析结果表明,塔里木河下游成株胡杨多年生枝条和侧根($2 \leq d < 5 \text{ mm}$)的 $k_{s(\text{max})}$ 值与PLC值之间存在极显著差异性($P < 0.01$),即侧根的自然栓塞程度和最大导水率明显高于多年生枝条。

7月份胡杨多年生枝条($2 \leq d < 5 \text{ mm}$)自然栓塞程度具有一定的日变化规律,即6:30—7:30的PLC均值约为58%,而14:00—15:00的PLC均值为67%。在同一观测点上,成株胡杨侧根($2 \leq d < 5 \text{ mm}$)6:30—7:30和14:00—15:00的PLC均值分别为96.79%和99.79%(表3)。而且胡杨多年生枝条和侧根在6:30—7:30与14:00—15:00PLC均值之间的差异性均没有通过显著性检验($P \geq 0.5$)。

由表4可知,7月份塔里木河下游成株胡杨取根层(50—130 cm)的平均土壤含水率在6:30—7:30和14:30—15:30两个时间段内没有显著性差异($P = 0.355$)。

表3 7月份塔里木河下游成年胡杨多年生枝条和侧根自然栓塞程度的日变化
Table 3 Daily variation in root and branch xylem embolism of *P. euphratica* in July

部位 Organ	时间 Time	均 PLC 值 $\pm$ 标准差 Mean PLC value $\pm$ SD	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	数量 Number
枝条 Branch	6:30—7:30	57.87 $\pm$ 16.62	85.52	20.59	26
	14:00—15:00	67.30 $\pm$ 22.70	99.65	26.07	29
侧根 Lateral root	6:30—7:30	96.79 $\pm$ 7.88	100	92.91	22
	14:00—15:00	99.79 $\pm$ 0.30	100	99.54	24

表4 7月份塔里木河下游成株胡杨取根层(50—130 cm)土壤重量含水率的清晨与正午差异

Table 4 Daily variation in soil water content of *P. euphratica*'s lateral root distribution layer (50—130 cm) in lower reaches of Tarim River in July

胡杨取根层 Lateral root distribution layer of <i>P. euphratica</i>	均土壤重量含水率(%) $\pm$ 标准差 Mean soil water content (%) $\pm$ SD	最大值/% Maximum value	最小值/% Minimum value
6:30—7:30	8.77 $\pm$ 4.8	18.08	3.01
14:00—15:00	7.32 $\pm$ 2.6	11.22	2.94

2.1.2 不同地下水埋深下的成株胡杨侧根水力特征

在塔里木河下游英苏河道边上(地下水埋深约在1—2.5 m之间)和距河道200 m处(地下水埋深约为4.5—6m之间)的成株胡杨侧根的 $k_{s(\text{max})}$ 均值为 $(28.62 \pm 20.35) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ (均 $\pm$ SD),PLC均值为 $(88.32 \pm 13.1) \%$ 。河道边上成株胡杨侧根的PLC均值为 $(83.34 \pm 13.1) \%$,小于距河道200m处胡杨的PLC均值 $(96.7\% \pm 7.9\%)$;河道边上胡杨侧根的 $k_{s(\text{max})}$ 均值为 $(26.50 \pm 21.62) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$,小于距河道200 m处的胡杨 $(31.34 \pm 18.65) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ (图2)。方差分析结果表明,河道边上与距河道200 m处胡杨侧根PLC均值之间存在显著性差异($P < 0.01$),但其 $k_{s(\text{max})}$ 值没有通过显著性检验($P = 0.378$)。

2.2 胡杨幼株木质部最大导水效率及自然栓塞程度

2.2.1 不同土壤水分处理对幼株胡杨木质部水力特性的影响

试验结果表明,正常灌溉组(土壤平均含水率为23%—32%)胡杨幼株侧根和主干的PLC均值分别为

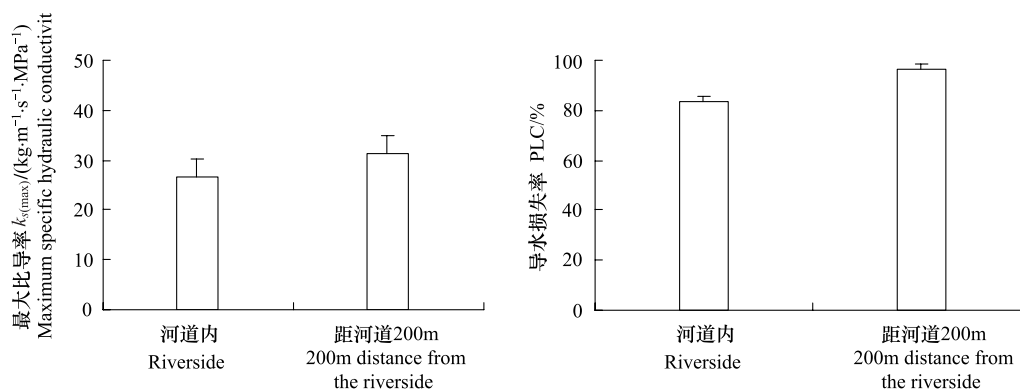


图2 不同地下水埋深下的成株胡杨侧根 $k_{s(max)}$ 均值, PLC 均值的变化

Fig. 2 $k_{s(max)}$, PLC value in lateral root xylem of *P. euphratica* in different water gradient

(50.85 ± 20.27)%、(46.69 ± 21.81)% (平均值 $\pm$ SD), 小于干旱胁迫组(土壤平均含水率为10%—14%)胡杨幼株的 PLC 均值(56.52 ± 22.56)%、(54 ± 24.78)% (图3)。方差分析结果表明, 正常灌溉组和干旱胁迫组胡杨幼株 PLC 均值之间没有显著性差异($P > 0.05$)。两种水分处理胡杨幼株侧根的 $k_{s(max)}$ 均值为(6.14 ± 2.25) $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1}$, 明显大于主干的(1.58 ± 0.88) $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1}$, 它们之间具有显著性差异($P < 0.01$) (图4)。

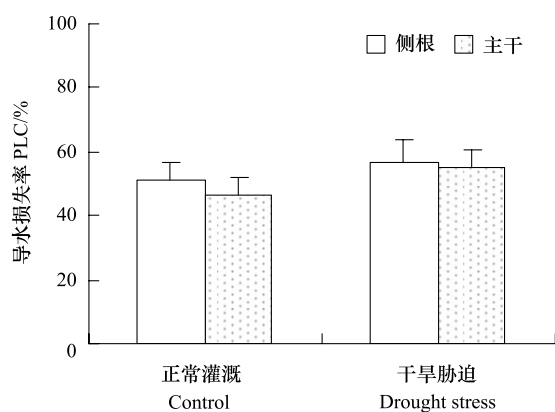


图3 不同水分处理下的幼株胡杨主干和侧根自然栓塞程度

Fig. 3 native lateral root and main stem xylem embolism of *P. euphratica* seedlings in different water treatment

数据为平均值和标准误

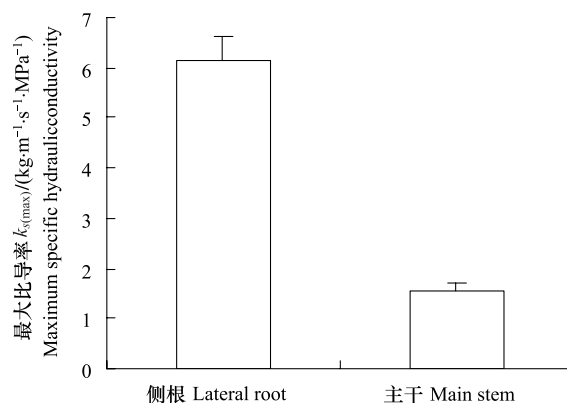


图4 不同水分处理下的幼株胡杨主干和侧根的 $k_{s(max)}$ 均值

Fig. 4 mean $k_{s(max)}$ value of lateral root and main stem of *P. euphratica* seedlings in different water treatment

数据为平均值和标准误

胡杨幼株侧根($2 < d < 5 \text{ mm}$)的自然栓塞程度与其侧根分布土层(0—80 cm)平均土壤含水率之间存在较密切的关系, 即随着土壤含水率的降低, 胡杨幼株侧根的栓塞程度随之增加, 之间存在显著负相关关系 (Spearman, $R = -0.9$), 决定系数 R^2 为 0.65。PVC 管土壤平均含水率在 10%—27% 时, 幼株胡杨侧根的 PLC 均值在 50%—72% 之间波动 (图5)。

2.2.2 不同水分处理对胡杨幼株叶片气孔导度的影响

在不同土壤水分处理条件下, 胡杨幼株叶片气孔导度的日变化总体上呈一致的变化趋势, 即 10:00 达到最高值 (正常灌溉和干旱胁迫处理的平均气孔导度分别为 105 和 67.08 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 之后一直降低, 到 16:00 又出现一个峰值, 之后又继续下降, 到 20:00 点达到最低值 (正常灌溉和干旱胁迫处理的平均气孔导度分别为 37.62 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 和 28.22 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (图6)。

正常灌溉处理条件下,胡杨幼株叶片气孔导度值均高于干旱胁迫处理的(图6),即正常灌溉处理的胡杨幼株日平均气孔导度为 $70 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,而干旱胁迫处理的为 $47.13 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。在8:00和10:00点,正常灌溉和干旱胁迫处理的胡杨幼株气孔导度值之间存在显著差异性($P < 0.01$),而其它时刻没有表现出显著的差异性($P > 0.05$)。

胡杨幼株叶片气孔导度与侧根的自然栓塞程度,即PLC均值之间存在较密切的关联,即随着侧根木质部导水损失率的加剧(栓塞程度值的增加),其叶片气孔导度也随之降低(图7)。相关分析结果表明,胡杨叶片气孔导度与侧根的栓塞程度值之间存在显著负相关关系,决定系数 $R^2 = 0.687$ ($\alpha_{0.05} = 0.8116$, Spearman, $r = -0.829$)。

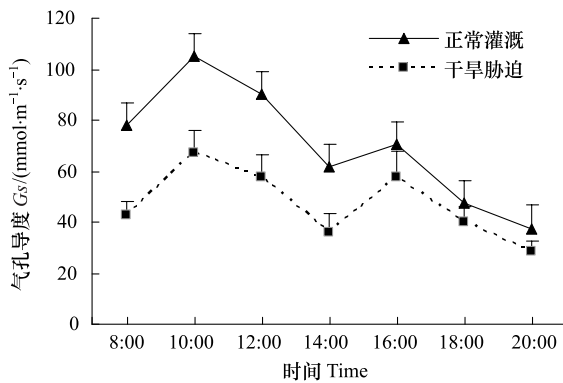


图6 不同水分处理条件下胡杨幼株叶片气孔导度的日变化特征

Fig. 6 Daily stomatal conductance's changes of *P. euphratica* seedlings in different water treatment conditions

数据为平均值和标准误

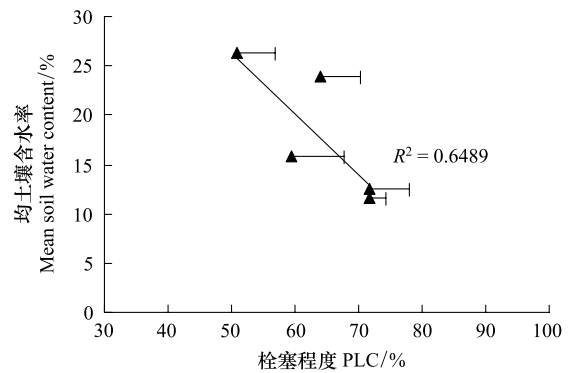


图5 幼株胡杨黄色侧根的均 PLC 值与侧根分布层土壤含水率之间的关系

Fig. 5 The relationship between the yellow lateral root mean PLC value of *P. euphratica* seedlings and soil water content

数据为平均值和标准差

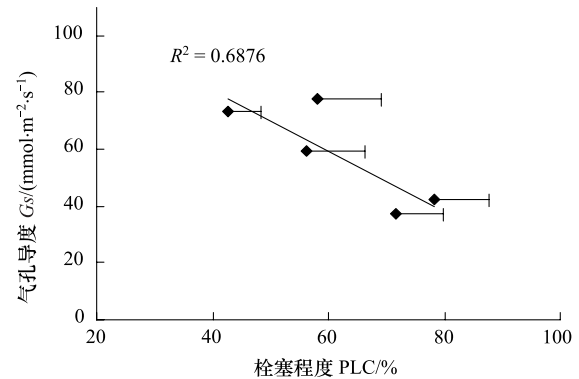


图7 胡杨幼株叶片气孔导度与其侧根栓塞程度之间的关系

Fig. 7 Relationship between the leaf stomatal conductance and lateral root native embolism level of *P. euphratica* seedlings

数据为平均值和标准误

2.3 胡杨侧根木质部导管数量特征与其导水能力之间的关系

从成株和胡杨幼株侧根($2 \leq d < 5 \text{ mm}$)木质部导管(或管胞)分布图8可知,胡杨幼株侧根的直径在10—80 μm 的导管(或管胞)数量约占总导管数量的97.5%,而成株胡杨侧根的直径在10—130 μm 的导管(或管胞)数量约占总导管数量的99%。

胡杨幼株侧根实际测量的平均导管直径(d_{mean})、通过计算所得到的平均水力直径(d_h 和 $d_{95\%}$)分别为(41.99 ± 17.12) μm (平均值 $\pm$ SD)、(49.75 ± 11.4) μm 和(42.72 ± 8.2) μm 小于成株胡杨侧根,即 d_{mean} 为(54.60 ± 30.02) μm 、 d_h 为(112.17 ± 26.65) μm 、 $d_{95\%}$ 为(86.48 ± 18.96) μm ($P < 0.01$);胡杨幼株侧根的平均导管密度为227.17根/ mm^2 (导管数量/木质部横截面积),大于成株胡杨侧根的平均导管密度(104.64根/ mm^2 , $P < 0.01$)(表5)。

木质部最大导水率 $k_{s(\text{max})}$,是评价植物木质部导水效率大小的重要指标,因此对木质部均导管直径(d_{mean})、均水力直径(d_h , $d_{95\%}$)、导管密度(DV)与木质部 $k_{s(\text{max})}$ 值之间进行了Spearman相关分析。结果表明,木质部最大导水能力与均导管直径(d_{mean})、水力直径($d_{95\%}$)之间具有极显著正相关关系($R = 0.969$, $R = 0.987$),与水力直径(d_h)之间具有显著正相关关系($R = 0.955$);木质部最大导水效率与导管密度(DV)之间

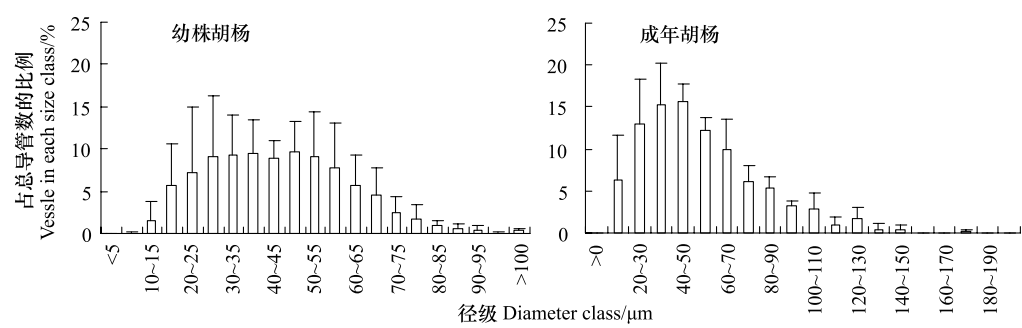


图 8 成株和幼株胡杨侧根($2 \leq d < 5$ mm)木质部导管(或管胞)直径分布

Fig. 8 Distribution of vessel diameter in lateral roots($2 \leq d < 5$ mm) of mature *P. euphratica* trees and seedlings

数据为平均值和标准误

存在一定负相关关系,但相关性没有达到显著性水平(表 6)。

表 5 胡杨幼株与成年胡杨根($2 \leq d \leq 4$ mm)木质部导管量(或管胞)数量特征

Table 5 Lateral root ($2 \leq d \leq 4$ mm) xylem anatomical structure of mature <i>P. euphratica</i> and seedlings		
胡杨木质部导管数量特征 Root xylem anatomical characteristics of <i>P. euphratica</i>	幼株侧根($n=8$) Lateral root of seedlings	成株侧根($n=8$) Lateral root of mature trees
平均导管直径 Mean vessel diameter/ μm	41.99 $\pm$ 17.12	54.60 $\pm$ 30.02
平均水力直径 Mean hydraulic diameter/ μm	49.75 $\pm$ 11.4	112.17 $\pm$ 26.65
平均 $d_{95\%}$ Mean $d_{95\%}$ / μm	42.72 $\pm$ 8.2	86.48 $\pm$ 18.96
平均导管密度 Mean vessel density/(根/ mm^2)	227.17 $\pm$ 73.91	104.64 $\pm$ 27.15

表 6 胡杨侧根木质部导管数量特征与最大导水效率之间的 Spearman 相关分析

Table 6 Spearman correlation analysis between xylem anatomical structure and $k_{s(\max)}$ value in lateral root <i>P. euphratica</i>					
	均导管直径(d_{mean}) Mean vessel diameter	水力直径(d_h) Hydraulic diameter	$d_{95\%}$	导管密度 DV	$k_{s(\max)}$
均导管直径(d_{mean}) Mean vessel diameter	1				
水力直径(d_h) Hydraulic diameter	0.923 *	1			
$d_{95\%}$	0.963 **	0.987 **	1		
导管密度 DV	-0.437	-0.566	-0.595	1	
$k_{s(\max)}$	0.969 **	0.955 *	0.987 **	-0.609	1

* * 显著性 0.05 水平(双尾), * 显著性 0.01 水平(双尾)

3 讨论与结论

3.1 干旱胁迫环境下的成株胡杨木质部水力特征

木质部栓塞是木本植物在遭受水分胁迫时普遍存在的一种现象,与植物体的含水量与水势一样,植物木质部栓塞也存在日变化和季节性变化规律^[27-28]。根据本实验结果,极端干旱区塔里木河下游成株胡杨多年生枝条(外径(4.1 $\pm$ 0.7)mm)(均 $\pm$ S)在清晨和正午的 PLC 均值分别为 58% 和 67%,即木质部栓塞具有一定的日变化规律,而距河道 200 m 处成株胡杨侧根栓塞程度在清晨与正午之间没有较明显的差异性($P>0.05$),而且自然栓塞程度较高,达到 90% 以上(表 3)。

出现这种情况的原因可能是:1)胡杨枝条的最大导管长度较长(表 2),根作为植物吸收和运输水分的主要部位,其最大导管长度可能会更长。在本试验中野外取根长度约在 25—35 cm,而在室内实际测量的根样长度为 10—15 cm,此长度可能小于它原有的最大导管长度。因此,在测量过程中已切开的导管口与大气接触造成其原始栓塞程度偏大。2)对塔里木河下游而言,胡杨侧根($d<10\text{mm}$)主要集中分布在土壤 0.8—1.3 m

深度范围内,因此取根样时间较长,气候炎热;3)实验地点胡杨取根层(0.5—1.3 m)土壤平均含水率较低,其清晨和正午的平均土壤含水率分别为 8.8% 和 7.3% (表 4),之间也没有显著性差异。这些外界环境因素也可能造成胡杨侧根实际栓塞程度的偏高,从而导致侧根木质部栓塞表现为清晨与正午无明显差异。

地下水是干旱区荒漠河岸林植被唯一赖以生存的水分来源,其地下水埋深的深浅控制荒漠河岸林植被的生理活动^[29-32]。塔里木河下游英苏河道边上成株胡杨侧根的 PLC 均值约为 83.34%,小于距河道 200 m 处的(地下水埋深为 5—6 m)96.7% (图 2)。理论上说,在水分充足的条件下,河道边上胡杨侧根的栓塞程度应该比此栓塞值低。Hukin 等^[33]的研究表明,对于干旱胁迫处理过的胡杨幼株再进行 10 d 的复水处理后,主干和根仍然保持在严重干旱胁迫处理时的栓塞水平,栓塞没有恢复。对于本研究区,塔里木河下游于 2008 和 2009 年河道断水,2010 年向塔里木河下游生态输水,河道有水,作者认为,虽然在测量期间河道有充分的水源,但由于之前的缺水而引起的已栓塞化的胡杨侧根并未发生恢复,因此实际的栓塞程度也较高。

不同植物木质部导水率对环境条件的变化响应也不同。生长在干旱地区的西部黄松(*ponderosa pine trees*)的比导率值比生长在寒冷而湿润地处的高^[34];相反,在湿润区域生长的桉树木质部导水率高于干旱区域^[35]。除此之外,葡萄(*Vitis uinifera*),北美红栎(*Quercus rubra*),北美鹅掌楸(*Liriodendron tulipifera*)等的幼株木质部最大导水率与土壤水分条件也有密切的关系^[36-38]。根据本实验结果,塔里木河下游距离河道 200m 处胡杨侧根的 $k_{s(max)}$ 值高于河道边上的成株胡杨。作者认为,在水分亏缺和强列的蒸腾条件下,胡杨可能是通过增大其木质部导水效率来加速输水速率,从而保持根系吸水和叶片蒸腾之间的水量平衡。从一定意义上说,增大其导水率可能是胡杨应付干旱胁迫环境的另外一种水分策略。

3.2 不同土壤水分处理对幼株胡杨木质部水力特性的影响

由结果可知,在两种水分处理条件下(土壤含水率为 10%—27%),幼株胡杨侧根、主干自然栓塞程度之间的差异不明显($P>0.01$) (图 3),但侧根的自然栓塞程度与土壤平均含水率之间的相关性($R=-0.9$, $R^2=0.65$) (图 5)表明,胡杨木质部自然栓塞程度随着土壤干旱程度的加剧而增大。本实验期间研究区阴天频率较高,30 d 的自然脱水使管内土壤含水率只能降低到 10%—14%,没有达到严重干旱胁迫水平对应的土壤含水量,从而影响了其不同水分处理组之间的差异性。

目前,叶片气孔关闭公认为有利于防止植物过度栓塞的发生,最近发表的一些研究成果也表明植物叶片气孔导度与木质部栓塞程度之间存在不同程度的负相关关系^[28,39]。根据本实验结果,幼株胡杨叶片气孔导度与侧根的栓塞程度之间存在较好的负相关关系,即随着侧根 PLC 值的增加,其叶片气孔导度随之降低(图 6)。虽然幼株胡杨叶片气孔导度与侧根栓塞程度之间存在一定的关系,但值得注意的是,叶片气孔对侧根栓塞的发生不是很敏感,即侧根栓塞开始发生到约 40% 之后,气孔才开始关闭。Hukin 等^[20]的结果也表明,胡杨幼株叶片气孔关闭之前其主干部已经发生显著的栓塞化现象,从而可以得出胡杨木质部栓塞的发生不是通过叶片气孔的调节来严格控制的。

3.3 胡杨侧根木质部导水能力与木质部导管(或管胞)数量特征之间的关系

根据 Hagen-Poiseuille 定律,在其它条件一致时,水在导管中的输水速率与导管直径的 4 次方成正比,即导管直径越大,导管运输水分的能力越强,导水速率越大。有关木质部结构与导水率方面的研究结果也证明,植物木质部最大导水率与木质部导管直径间确实存在较密切的关系^[2,40-42]。这种关系也被证明在本研究中,成株和胡杨幼株侧根木质部导管直径与木质部最大导水能力之间存在极显著正相关关系(表 6)。虽然导管密度与最大导水效率之间的关系没有达到显著性水平,但是其存在一定的负相关关系,这可能是因为在单位面积木质部横切面上导管直径越大,所容纳的导管数量就越少有关。

3.4 胡杨木质部水力特性及其对于干旱胁迫环境的适应性

Hukin 等^[33]的研究表明,胡杨幼株在水力结构上表现出较差的耐旱性,认为它是属于抗栓塞能力较低的木材树种。据本研究结果,在极端干旱区塔里木河下游自然生长的成株胡杨和栽培的胡杨幼株木质部自然栓塞程度均比较高,即 PLC 均值在 50% 以上。本研究在一定程度上扩展和补充了 Hukin 等的研究成果。

Miranda 等^[20]认为,植物对于干旱环境的适应性不一定是表现在发育抗栓塞能力强的木质部,较低的抗栓塞能力是通过其它水分利用策略来得到补充。本研究表明,地下水位较深地域生长的成株胡杨侧根最大导水效率高于地下水位较浅地域生长的,暗示改变其木质部导水能力可能是胡杨适应不同水分环境的生理可塑性反应之一。

总之,生长在极端干旱环境的胡杨,虽然其木质部水力特征上没有表现出较强的抗旱能力,但在干旱胁迫环境下适当的木质部栓塞可能防止使它过度蒸腾失水,有利于胡杨保持其体内水分平衡。

References:

- [1] Givnish T J. Optimal stomatal conductance, allocation of energy between leaves and roots, and the marginal cost of transpiration//Givnish T J, ed. On the Economy of Plant Form and Function. Cambridge: Cambridge University Press, 1986: 171-213.
- [2] Zimmermann M H. Xylem Structure and the Ascent of Sap. New York: Springer Press, 1983.
- [3] Hacke U G, Sperry J S, Pockman W T, Davis S D, McCulloh K A. Trends in wood density and structure are linked to prevention of Xylem implosion by negative pressure. *Oecologia*, 2001, 126(4): 457-461.
- [4] McCulloh K A, Sperry J S, Adler FR. Murray's law and the hydraulic versus mechanical functioning of wood. *Functional Ecology*, 2004, 18(6): 931-938.
- [5] Pittermann J. Constraints on Hydraulic Efficiency in Conifer Xylem[D]. Salt Lake City: The University of Utah, 2006: 167-167.
- [6] Tyree M T. The cohesion-tension theory of sap ascent: current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 1997, 48(10): 1753-1765.
- [7] Steudle E. The cohesion-tension theory mechanism and the acquisition of water by plant roots. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 2001, 52(1): 847-875.
- [8] Cruziat P, Cochard H, Améglio T. Hydraulic architecture of tree: main concepts and results. *Annals of Forest Science*, 2002, 59(7): 723-752.
- [9] Tyree M T, Sperry J S. Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1989, 40(1): 19-36.
- [10] Tyree M T, Ewers F W. The hydraulic architecture of trees and other woody plants. *New Phytologist*, 1991, 119(3): 345-360.
- [11] Pockman W T, Sperry J S. Vulnerability to xylem cavitation and the distribution of Sonoran desert vegetation. *American Journal of Botany*, 2000, 87(9): 1287-1299.
- [12] Maherali H, Pockman W T, Jackson R B. Adaptive variation in the vulnerability of woody plants to xylem cavitation. *Ecology*, 2004, 85(8): 2184-2199.
- [13] Ennajeh M, Tounekti T, Vadel A M, Khemira H, Cochard H. Water relations and drought-induced embolism in olive (*Olea europaea*) varieties 'Meski' and 'Chemlali' during severe drought. *Tree Physiology*, 2008, 28(6): 971-976.
- [14] Cochard H, Barigah S T, Kleinhentz M, Eshel A. Is xylem cavitation resistance a relevant criterion for screening drought resistance among *Prunus* species?. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 165(9): 976-982.
- [15] Lopez O R, Kursar T A, Cochard H, Tyree M T. Interspecific variation in xylem vulnerability to cavitation among tropical tree and shrub species. *Tree Physiology*, 2005, 25(12): 1553-1562.
- [16] Zhang S X, Shen W J, Zhang Y Y, Zhou X X. The vulnerability of xylem embolism in twigs of some drought-resistant tree species. *Journal of Northwest Forestry University*, 1997, 12(2): 1-6.
- [17] Tyree M T, Zimmermann M H. Xylem Structure and the Ascent of Sap. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2002: 278-278.
- [18] An F, Zhang S X. Studies of roots and shoots vulnerability to xylem embolism in seven woody plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1928-1933.
- [19] Shen W J, Peng S L, Zhang S X. Studies on the xylem drought-tolerant characteristics of three drought-tolerant tree species. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(6): 1-6.
- [20] Miranda J D, Padilla F M, Martínez-Vilalta J, Pugnaire F I. Woody species of a semi-arid community are only moderately resistant to cavitation. *Functional Plant Biology*, 2010, 37(9): 828-839.
- [21] Zimmermann M H, Potter D. Vessel-length distribution in branches, stem and roots of *Acer rubrum* L. *IAWA Bulletin n. s.*, 1982, 3(2): 103-110.
- [22] Cochard H, Herbette S, Hernández E, Hölttä T, Holttä T, Mencuccini M. The effects of sap ionic composition on xylem vulnerability to cavitation. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(1): 275-285.
- [23] Zimmermann M H, Jeje A A. Vessel-length distribution in stems of some American woody plants. *Canadian Journal of Botany*, 1981, 59(10):

1882-1892.

- [24] Choat B, Ball M, Luy J, Holtum J. Pit membrane porosity and water stress-induced cavitation in four co-existing dry rainforest tree species. *Plant Physiology*, 2003, 131(1): 41-48.
- [25] Hacke U G, Sperry J S, Pittermann J. Drought experience and cavitation resistance in six shrubs from the Great Basin, Utah. *Basic and Applied Ecology*, 2000, 1(1): 31-41.
- [26] Jacobsen A L, Agenbag L, Esler K J, Pratt R B, Ewers F W, Davis S D. Xylem density, biomechanics and anatomical traits correlate with water stress in 17 evergreen shrub species of the Mediterranean-type climate region of South Africa. *Journal of Ecology*, 2007, 95(1): 171-183.
- [27] Moreshet S, Green G C. Seasonal trends in hydraulic conductance of field-grown 'Valencia' orange trees. *Scientia Horticulturae*, 1984, 23(2): 169-180.
- [28] Domec J C, Scholz F G, Bucc S J, Meinzer F C, Goldstein G, Villalobos-Vega R. Diurnal and seasonal variation in root xylem embolism in neotropical savanna woody species: impact on stomatal control of plant water status. *Plant, Cell and Environment*, 2006, 29(1): 26-35.
- [29] Chen Y N, Chen Y P, Li W H, Zhang H F. The response of proline accumulation of *Populus euphratica* Oliv. on changes of groundwater table in the lower reaches of Tarim River. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(9): 958-961.
- [30] Li X, Hou P, Yang P N. Analysis on the respond of the tree-rings of *Populus euphratica* to the change of moisture conditions in the lower reaches of the Tarim River. *Arid Zone Research*, 2006, 23(1): 26-31.
- [31] Fu A H, Chen Y N, Chen Y P. Changes of stem water potential of *Tamarix ramosissima* under drought stress in lower reaches of Tarim River. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(4): 532-538.
- [32] Chen Y P, Chen Y N, Li W H, Zhang H F. Analysis on the physiological characteristic of *Populus euphratica* under drought stress in the lower reaches of Tarim River. *A Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(10): 1943-1948.
- [33] Hukin D, Cochard H, Dreyer E, Thiec DL, Triboulot M B B. Cavitation vulnerability in roots and shoots: does *Populus euphratica* Oliv., a poplar from arid areas of central Asia, differ from other poplar species?. *Journal of experimental botany*, 2005, 56(418): 2003-2010.
- [34] Maherali H, DeLucia E H. Xylem conductivity and vulnerability to cavitation of ponderosa pine growing in contrasting climates. *Tree Physiology*, 2000, 20(13): 859-867.
- [35] van der Willigen C, Pammenter N W. Relationship between growth and xylem hydraulic characteristics of clones of *Eucalyptus* spp. at contrasting sites. *Tree Physiology*, 1998, 18(8/9): 595-600.
- [36] Shumway D L, Steiner K C, Kolb T E. Variation in seedling hydraulic architecture as a function of species and environment. *Tree Physiology*, 1993, 12(1): 41-54.
- [37] Schultz H R, Matthews M A. Resistance to water transport in shoots of *Vitis vinifera* L; relation to growth at low water potential. *Plant Physiology*, 1988, 88(3): 718-724.
- [38] Lovisolo C, Schubert A. Effects of water stress on vessel size and xylem hydraulic conductivity in *Vitis vinifera* L. *Journal of Experimental Botany*, 1998, 49(321): 693-700.
- [39] Sperry J S, Alder N N, Eastlack S E. The effect of reduced hydraulic conductance on stomatal conductance and xylem cavitation. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44(6): 1075-1082.
- [40] Ewers F W, Fisher J B, Chiu S T. Water transport in the liana *Bauhinia fassoglensis* (Fabaceae). *Plant Physiology*, 1989, 91(4): 1625-1631.
- [41] Calkin H W, Gibson A C, Nobel P S. Xylem water potentials and hydraulic conductance in eight species of ferns. *Canadian Journal of Botany*, 1985, 63(3): 632-637.
- [42] Willigen C V, Sherwin H W, Pammenter N W. Xylem hydraulic characteristics of subtropical trees from contrasting habitats grown under identical environmental conditions. *New Phytologist*, 2000, 145(1): 51-59.

参考文献:

- [16] 张硕新, 申卫军, 张远迎, 周新霞. 几个抗旱树种木质部栓塞脆弱性的研究. *西北林学院学报*, 1997, 12(2): 1-6.
- [18] 安锋, 张硕新. 7 种木本植物根和小枝木质部栓塞的脆弱性. *生态学报*, 2005, 25(8): 1928-1933.
- [19] 申卫军, 彭少麟, 张硕新. 三个耐旱树种木质部栓塞化脆弱性及其恢复能力. *生态学杂志*, 2000, 19(6): 1-6.
- [29] 陈亚宁, 陈亚鹏, 李卫红, 张宏锋. 塔里木河下游胡杨脯氨酸累积对地下水位变化的响应. *科学通报*, 2003, 48(9): 958-961.
- [30] 李霞, 侯平, 杨鹏年. 塔里木河下游胡杨对水分条件变化的响应. *干旱区研究*, 2006, 23(1): 26-31.
- [31] 付爱红, 陈亚宁, 陈亚鹏. 塔里木河下游干旱胁迫下多枝怪柳茎水势的变化. *生态学杂志*, 2008, 27(4): 532-538.
- [32] 陈亚鹏, 陈亚宁, 李卫红, 张宏锋. 塔里木河下游干旱胁迫下的胡杨生理特点分析. *西北植物学报*, 2004, 24(10): 1943-1948.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 9 May, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Responses and weigh of multi-ecosystem services and its economic value under different land cover scenarios: a case study from Ertan water control pivot in Yalong River	GE Jing, WU Nan, GAO Jixi, et al (2629)
Influence of grazing on biomass, growth ratio and compensatory effect of different plant groups in <i>Kobresia parva</i> meadow	DONG Quanmin, ZHAO Xinquan, MA Yushou, et al (2640)
Stocking effectiveness of hatchery-released kuruma prawn <i>Penaeus japonicus</i> in the Xiangshan Bay, China	JIANG Yazhou, LING Jianzhong, LIN Nan, et al (2651)
The spatial pattern of landscape fragmentation and its relations with urbanization and socio-economic developments: a case study of Beijing	QIU Jiangxiao, WANG Xiaoke, LU Fei, et al (2659)
Cellular automata simulation of barren patch connectivity effect in degradation sequence on alpine meadow in the source region of the Yangtze and Yellow rivers, Qinghai-Tibetan Plateau, China	LI Xueling, LIN Huilong (2670)
Evolution law of architectural landscape during the urban renewal process in Tiexi District	ZHANG Peifeng, HU Yuanman, XIONG Zaiping, et al (2681)
Competition for light and crop productivity in an agro-forestry system in the Hilly Region, Shangluo, China	PENG Xiaobang, ZHANG Shuoxin (2692)
Evaluation of forest ecosystem services based on biomass in Shanxi Province	LIU Yong, LI Jinchang, YANG Yonggang (2699)
Research on the morphological interactions between <i>Tamarix ramosissima</i> thickets and Nebkhas under different sand supply conditions; a case study in Cele oasis-desert ecotone	YANG Fan, WANG Xueqin, YANG Dongliang, et al (2707)
Litter decomposition and nutrient release in typical secondary and primary forests in karst region, Northwest of Guangxi	ZENG Zhaoxia, WANG Kelin, ZENG Fuping, et al (2720)
Spatial patterns of dominant species in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Jiulian Mountain Jiangxi Province, China	FAN Juan, ZHAO Xiuhai, WANG Jinsong, et al (2729)
Characteristics of seedlings regeneration in <i>Quercus aliena</i> var. <i>acuteserrata</i> secondary forests in Qinling Mountains	KANG Bing, WANG Dexiang, LI Gang, et al (2738)
Xylem hydraulic traits of <i>Populus euphratica</i> Oliv. in extremely drought environment	AYOUPU Mubareke, CHEN Yaning, HAO Xingming, et al (2748)
Response characteristics of leaf traits of common species along an altitudinal gradient in Hongchiba Grassland, Chongqing	SONG Lulu, FAN Jiangwen, WU Shaohong, et al (2759)
Changes of carbon input influence soil respiration in a <i>Pinus tabulaeformis</i> plantation	WANG Jinsong, ZHAO Xiuhai, ZHANG Chunyu, et al (2768)
Effects of different habitats and coverage treatments on the fates of <i>Quercus wutaishanica</i> seeds under the predation pressure of rodents	YAN Xingfu, ZHOU Libiao, LIU Jianli (2778)
Nested analysis of urban woodlot bird communities in Minhang District of Shanghai	WANG Benyao, WANG Xiaoming, WANG Tianhou, et al (2788)
Production dynamics and trophic basis of three dominant mayflies in the continuum of Shenglihe Stream in the Bahe River Basin	DENG Shan, YE Caiwei, WANG Lixiao, et al (2796)
Effects of sedimentation thickness of shrimp pond cleaning discharges on <i>Acanthus ilicifolius</i> seedlings	LI Ting, YE Yong (2810)
Utilization of carbon sources by the soil microbial communities of different forest types in subtropical Australia	LU Shunbao, GUO Xiaomin, RUI Yichao, et al (2819)
Soil microbial community characteristics under different vegetation types at the Holocene-basalt Platform, Jingpo Lake area, Northeast China	HUANG Yuanyuan, QU Laiye, QU Xiuchun, et al (2827)
Effect of <i>Ipomoea aquatica</i> Floating-bed on the quantity and distribution of nitrogen cycling bacteria and nitrogen removal	TANG Yingying, LI Xiuzhen, ZHOU Yuanqing, et al (2837)
Effects of microbial inoculants on soil microbial diversity and degrading process of corn straw returned to field	LI Peipei, ZHANG Dongdong, WANG Xiaojuan, et al (2847)

Effects of coupling film-mulched furrow-ridge cropping with maize straw soil-incorporation on maize yields and soil organic carbon pool at a semiarid loess site of China	WU Rongmei, WANG Yongpeng, LI Fengmin, et al (2855)
Residues and spatial distribution of OCPs in the sediments of Gan River Basin ...	LIU Xiaozhen, ZHAO Ci, LIANG Yu, et al (2863)
Analysis on population fluctuation and properties of the white-backed planthopper in Huizhou in 2009	 DIAO Yonggang, YANG Haibo, QU Yufeng, et al (2872)
Evaluation acaricidal activities of <i>Momordica cochinchinensis</i> extracts against <i>Tetranychus cinnabarinus</i>	 GUO Huili, SHI Guanglu, JIA Liangxi, et al (2883)
Stomatal ozone uptake modeling and comparative analysis of flux-response relationships of winter wheat	 TONG Lei, FENG Zongwei, Sudebilige, et al (2890)

Review and Monograph

Calculation method of energy ecological footprint based on global net primary productivity	 FANG Kai, DONG Deming, LIN Zhuo, et al (2900)
Behavioral patterns, influencing factors, functions and risks of social play in primates	 WANG Xiaowei, ZHAO Haitao, QI Xiaoguang, et al (2910)

Discussion

Spatio-Temporal changing analysis on carbon storage of harvested wood products in China	 LUN Fei, LI Wenhua, WANG Zhen, et al (2918)
---	---

Scientific Note

Variations in allometrical relationship between stand nitrogen storage and biomass as stand development	 CHENG Dongliang, ZHONG Quanlin, LIN Maozi, et al (2929)
Effect of continuous cropping of sesame on rhizospheric microbial communities	 HUA Juling, LIU Guangrong, HUANG Jinsong (2936)
Effects of clipping on the growth, gas exchange and chlorophyll fluorescence of invasive plant, <i>Flaveria bidentis</i>	 WANG Nannan, HUANGFU Chaohe, CHEN Dongqing, et al (2943)
Influence of vegetable cultivation methods on soil organic carbon sequestration rate	 LIU Yang, YU Dongsheng, SHI Xuezheng, et al (2953)
Integrated matrix-hydrology-biological remediation technology for bank collapse lakeside zone of Chaohu Lake	 CHEN Yunfeng, ZHANG Yanhui, ZHENG Xiqiang (2960)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 9 期 (2012 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 9 (May, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元