

中国林学会造林学会第二届  
学术讨论会

# 造林论文集

中国林学会编

中国林业出版社

中国林学会造林学会第二届  
学术讨论会

# 造林论文集

中国林学会编

中国林业出版社

1990

主 编 沈国舫  
副 主 编 高尚武 石家琛  
编 委 齐宗庆 杨耀先 印嘉佑 胡 涌  
责任编辑 周 峰 胡 涌 颜 帅  
张仕固 李维勤  
插图绘制 张仕固 陈荣璋

中国林学会造林学会第二届学术讨论会

## 造 林 论 文 集

中 国 林 学 会 编

中国林业出版社出版（北京西城区刘海胡同7号）  
新华书店北京发行所发行 北京林业大学印刷厂印刷

787×1092毫米16开本 15.75印张 380千字

1990年1月第一版 1990年1月第一次印刷

印数1—3,000册 定价5.00元

ISBN 7-5038-0667-2/S·0307

## 序 言

中国林学会造林学会于1988年11月在湖南省长沙市召开了第二届学术讨论会，这是继1984年在乌鲁木齐市召开的第一届造林学会讨论会之后的又一次造林学界的盛会。会议收到了全国各地的造林教学、科研和生产单位的科技人员寄来的论文130余篇，反映了近年来造林科技的发展和成就。由于会议的报告时间所限，仅从中遴选了54篇论文在学术讨论会的大、小会议上进行了宣读交流。本论文集就是这次学术讨论会所征集的论文通过评选、编辑、加工后的成果。

这本造林论文集涉及了造林学科各个方面，也反映了各个地区的造林问题。这里既有宏观的有关造林规划决策、技术指导和系统工程方面的探讨，又有微观的有关造林树种生理生态特性、造林与土壤水分、养分状况关系的研究；既有理论性较强的有关合理密度、混交间作关系、立地评价等方面的研究报告，又有反映各种不同类型地区的具体造林技术的文章。从论文涉及面的广度和深度来看，这几年我国造林学科的发展又取得了显著的进步。这次学术讨论会上涌现出一些年青的造林科技工作者，他们宣读了一些质量较高的论文，给人以后继有人的感觉。这都是值得庆幸的。这本论文集可以在造林研究发展趋势、研究思路和方法、解决造林实际问题的具体办法等多方面给各地的造林科技工作者提供参考与启迪。

由于论文集篇幅的限制，我们不可能把所有收集到的论文都全文发表。经编委会慎重研究，根据论文本身的重要性的质量，适当照顾地区及岗位的特点，将全部论文分为四类，分别作全文发表、压缩成简报发表、只发表摘要及只纳入论文目录四种处理。个别论文篇幅太长，虽作为全文发表处理，实际上也进行了一定的压缩。由于编者的水平和时间所限，有些处理可能有失当之处，希各方予以谅解。

沈国舫

1989年7月26日

# 目次

## 序言

|                                                      |                                    |
|------------------------------------------------------|------------------------------------|
| <b>第一部分 论文、研究报告</b> .....                            | ( 1 )                              |
| 京西山区主要造林树种抗旱特性的研究 ( I ) .....                        | 沈国舫 李吉跃 武康生 ( 3 )                  |
| 系统科学与造林工程.....                                       | 石家琛 王政权 ( 13 )                     |
| 关于植物种群合理密度的研究.....                                   | 吴增志 ( 17 )                         |
| 刺槐、毛白杨苗木水分状况及其对造林成活效果的影响.....                        |                                    |
| .....                                                | 梁玉堂 邢黎峰 樊宝敏 ( 25 )                 |
| 辽宁省朝阳地区低山丘陵农田防护林营造技术及效益研究.....                       |                                    |
| .....                                                | 姜凤岐 周新华 杨瑞英 ( 33 )                 |
| 杉樟混交林营造技术研究初报.....                                   | 许绍远 吴祖映 ( 40 )                     |
| 北京西山地区油松人工混交林的研究 ( I ) ——混交林的生产力、根系及养分循环<br>的研究..... | 沈国舫 翟明普 刘春江 姚延椿 ( 48 )             |
| 内蒙古自治区赤峰市防护林体系建设考察报告.....                            | 齐宗庆 姜太铎 ( 55 )                     |
| 低丘红壤树种对比及造林技术的研究.....                                |                                    |
| .....                                                | 柴锡周 钟哲科 罗永进 孟赐福 孔繁根 陈庆余 詹黎明 ( 61 ) |
| 大范围绿化工程对环境质量的作⽤—— ( I ) 绿化工程对沙尘控制作⽤的研究.....          |                                    |
| .....                                                | 高尚武 程致力 王志刚 ( 69 )                 |
| 数量化—Fuzzy聚类森林立地定量评价与分类方法的研究.....                     |                                    |
| .....                                                | 张康健 孙长忠 王 蓝 ( 76 )                 |
| 大兴安岭林区采伐迹地更新造林的研究.....                               | 丁炳录 ( 82 )                         |
| 农田防护林更新技术的研究.....                                    | 曲志义 刘 涛 ( 87 )                     |
| 发展湖南营林生产的几个问题.....                                   | 张玉石 ( 94 )                         |
| 树立全面造林质量观, 重视造林工作的宏观指导.....                          | 俞新安 ( 96 )                         |
| 紫椴种子快速催芽育苗试验研究.....                                  | 罗丽芬 王凤霞 赵垦田 叶 莹 ( 99 )             |
| 落叶松人工林重茬更新效果的研究.....                                 | 陈乃全 尹建道 王义延 耿 山 ( 105 )            |
| 杉木连栽林地土壤腐殖质组成及特性的研究.....                             | 俞新安 张其水 ( 114 )                    |
| 关于长白山区次生林冠下更新红松的探讨.....                              | 张国连 李 平 罗正阳 ( 121 )                |
| 柞树在辽西地区的适⽣性及提高造林保存率的研究.....                          | 赵荣慧 胡承海 ( 129 )                    |
| 盐渍地泡桐地膜覆盖造林技术的研究.....                                | 倪善庆 周友仁 韦平和 ( 133 )                |
| 广西马尾松林分经营密度曲线的绘制与应用.....                             | 赵绍文 秦武明 ( 140 )                    |
| 白蜡条栽培.....                                           | 王广钦 樊 巍 赵裕后 郭 良 金烈谊 ( 147 )        |
| 亳州市泡桐与药材间作模式的调查研究.....                               |                                    |
| .....                                                | 于光明 于一苏 傅 军 孙桂英 韩福义 ( 154 )        |
| 干旱地区沙枣能源林的研究.....                                    | 马文元 ( 158 )                        |
| 洞庭湖平原窄带林网的试验研究.....                                  | 袁正科 刘光化 ( 165 )                    |

|                           |              |
|---------------------------|--------------|
| <b>第二部分 研究简报</b> .....    | ( 171 )      |
| 论黑龙江省林木种子生产的技术改造问题.....   | 宋有义 ( 173 )  |
| 干旱灌区群众杨分期造林研究.....        | 朱灵益等 ( 175 ) |
| 珍稀树种——翅荚木营造技术的研究.....     | 陈永密等 ( 177 ) |
| 杨树速生丰产林栽培技术探讨.....        | 邴桂荣 ( 179 )  |
| 宜春地区次生林主要类型及改造措施探讨.....   | 张新文 ( 183 )  |
| 改进成活率计算方法 提高造林成效.....     | 于洪生 ( 185 )  |
| 对干旱地区发展节水林业的初步探讨.....     | 苏文锬 ( 186 )  |
| 佳木斯地区混交林考察报告.....         | 郭太升等 ( 188 ) |
| 对荒漠灌区防护林营造问题的研究.....      | 狄心志 ( 189 )  |
| 试论造林工程管理.....             | 王新明 ( 191 )  |
| 樟子松在沙地上的生长和造林展望.....      | 王占义等 ( 193 ) |
| 贵州高寒山区华山松生长及凌冻为害调查研究..... | 陈廉杰 ( 196 )  |
| 黄土丘陵区抗旱造林技术探讨.....        | 景载肃等 ( 198 ) |
| 固定沙地的水分状况与沙地造林.....       | 蒲庸昌等 ( 202 ) |
| 柏桧混交林造林技术研究.....          | 黄森木 ( 204 )  |
| <b>第三部分 部分论文摘要</b> .....  | ( 209 )      |
| <b>第四部分 部分论文题录</b> .....  | ( 241 )      |



# CONTENTS

|                                                                                                                                                                          |                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Studies on the Drought Resistance of Chief Afforestation Species in Mountain Area, West Beijing, China ( I ) .....                                                       | Shen Guofang, Li Jiyue, Wu Kangsheng ( 3 )                 |
| System Science and Silviculture Engineering .....                                                                                                                        | Shi Jiashen, Wang Zhengquan ( 13 )                         |
| A Study on the Proper Density of Plant Populations—A Proper Density Is An Important Approach to Raising the Productivity of Plantations.....                             | Wu Zengzhi ( 17 )                                          |
| A Research on the Moisture Content of <i>Robinia pseudoacacia</i> and <i>Populus tomentosa</i> Seedlings and Its Affection to the Survival Percent of Afforestation..... | Liang Yutang, Xing Lifeng, Fan Baomin ( 25 )               |
| Afforestation Technology and Benefit of the Forest for Conservation of Farmland in Hilly Area, Chaoyang Prefecture, Liaoning Province, China.....                        | Jiang Fengqi, Zhou Xinhua, Yang Ruiying ( 33 )             |
| A Study on the Afforestation Technology of Mixed Forest of <i>Cunninghamia Lanceolata</i> and <i>Sassafras tzumu</i> .....                                               | Xu Shaoyuan ( 40 )                                         |
| Studies on <i>Pinus tabulaeformis</i> Mixed Plantations in Xishan Region, Beijing, China ( I ) Research on Productivity, Root System and Nutrient Cycling .....          | Shen Guofang, Zhai Mingpu, Liu Chunjing, Yao Yantao ( 48 ) |
| An Investigation Report on the Structure of Conservation Forest Systems in Chifeng, Inner Mongolia, China.....                                                           | Qi Zongqing, Jiang Taiduo ( 55 )                           |
| Contrast Among Tree Species and Their Afforestation Technology on Red Soil of Hilly Land.....                                                                            | Chai Xizhou, Zhong Zheke, Luo Yongjin ( 61 )               |
| The Affection of Large-range Afforestation Engineering to Environmental Quality ( I ) Keeping Sands and Dust Under Control .....                                         | Gao Shangwu, Cheng Zhili, Wang Zhigang ( 69 )              |
| Applied Quantitative Fuzzy Cluster Analysis to the Evaluation and Classification of Forest Sites.....                                                                    | Zhang Kangjian, Sun Changzhong, Wang Lan ( 76 )            |
| A Research on Cutting-blanks Regeneration in Daxing'anling Mountain Region.....                                                                                          | Ding Binglu ( 82 )                                         |
| A Study on the Regeneration Technology of the Forest for Conservation of Farmland.....                                                                                   | Qu Zhiyi, Liu Tao ( 87 )                                   |
| A Discussion on the Development of Forest Management in Hunan                                                                                                            |                                                            |

- Province, China.....Zhang Yushi ( 94 )
- Fostering A Total Quality Outlook and Attaching Great Importance to  
the Macrostructure Guide of Afforestation.....Yu Xintuo ( 96 )
- Culture Seedlings of *Tilia amurensis* by Promoting Its Seeds' Fast Ger-  
minating.....Luo Lifen, Wang Fengxia, Zhao Kentian, Ye Ying ( 99 )
- A Research on the Effect of Repetitional Regeneration of *Larix* Plan-  
tation.....Chen Naiquan, Yin Jiandao, Wang Yiting, Gen Shan ( 105 )
- A Study on the Soil Humus Component and Characteristic of Continu-  
ing Planted *Cunninghamia lanceolata* Woodland.....  
.....Yu Xintuo, Zhang Qishui ( 114 )
- A Research on the Regeneration of *Pinus koraiensis* Under the Crown  
of Secondary Forests in Changbai Mountain Region, China.....  
.....Zhang Guoliang, Li Ping, Luo Zhengyang ( 121 )
- A Study on the Adaptability of *Quercus acutissima* and the Technology  
to Raising the Survival Percent of *Quercus acutissima* Plantations in  
West Liaoning Province, China.....Zhao Ronghui, Hu Chenghai ( 129 )
- A Research on *Paulownia* Afforestation Using the Technology of Cover-  
ing Ground With Plastic Film.....  
.....Ni Shanqing, Zhou Youren, Wei Pinghe ( 133 )
- Pinus massoniana* Stands Management Density Curve and Its Application  
in Guangxi Zhuang Autonomous Region, China .....  
.....Zhao Shaowen, Qin Wuming ( 140 )
- The Culture of *Fraxinus chinensis* .....  
.....Wang Guangqin, Fan Wei, Zhao Yuhou ( 147 )
- A Research on the Models of Intercropping *Fraxinus chinensis* and Medi-  
cinal Herbs in Bozhou City, China .....  
.....Yu Guangming, Yu Yisu, Fu Jun ( 154 )
- A Study on *Hippophae rhamnoides* Forests as An Energe Source in  
Drought Area.....Ma Wenyuan ( 158 )
- A Research on the Narrow-strip Forest Network Experiment in Dongt-  
ting Lake Plain, China.....Yuan Zhengke, Liu Guanghua ( 165 )



# 第 一 部 分

## 论文、研究报告



# 京西山区主要造林树种抗旱特性的研究(I)

沈国舫 李吉跃(执笔人) 武康生

(北京林业大学)

(山西省林科所)

京西山区位于太行山北段,严重的季节性干旱是影响该地区造林成活及林木生长的关键因子。解放以来,该地区营造了大面积的人工林,当时人们认为油松、侧柏、刺槐、元宝枫等都是比较耐旱的树种,因此,在低山阳坡造林时大都选择它们作为主要造林树种。近10年来,尤其是1979~1985年,该地区遭受了多年不遇的连续大旱,这些树木的生长发育都由此而受到不同程度的影响,通过观察发现,油松、刺槐的受害较严重,而侧柏、栓皮栎、元宝枫则表现出较强的耐旱能力〔1~6〕。这些宏观观察丰富了对这些树种生态生物学特性的认识,同时也提出了深入研究这些树木耐旱能力的问题。但仅仅从林木生长好坏来评价树木的耐旱能力,从树木的外在表现来判断树木的耐旱机理,已不能完满地回答生产上提出的问题,也不能满足干旱条件下适地适树的要求,还必须应用先进的实验手段和技术,研究这些树种的水分生理生态特点,以及它们的耐旱机制,为生产实际提供科学的理论依据。为此,我们从1984年开始了对京西山区主要造林树种的耐旱性及其机理的比较全面、系统的研究。先后投入研究的树种有油松、侧柏、栓皮栎、刺槐、元宝枫、白蜡、紫穗槐、沙棘等,本文仅以前3个树种的初步研究成果进行阐述。

## 一、材料与方 法

油松和侧柏于1985年春在苗圃播种,1986年春移入塑料薄膜容器中,在温室及室外培养、恢复3个月以后进行干旱处理。栓皮栎是1986年9月直播在塑料薄膜容器中,一直在温室中生长发育,1987年春开始干旱处理。

部分油松、侧柏苗木是在人工气候室内模拟大气干旱条件下,通过每天浇水控制不同的土壤干旱梯度进行干旱处理的,栓皮栎和另一部分油松、侧柏苗木则是在温室自然干燥条件下进行的干旱处理。

利用压力室测定苗木水势及PV曲线,以获得多种水分参数;在室内条件下取鲜叶后每隔一定时间称重,直到基本恒重为止以测定叶保水力;利用GXH-201型红外线光合作用测定仪测定光合作用;用SF-30植物生产力荧光计测定叶绿素a荧光强度;用万分之一电子天秤快速称重测定油松、侧柏苗木的蒸腾作用;用QK-1气孔计和L-1600气孔计测定栓皮栎苗木的蒸腾作用;土壤含水量用烘干法测定,土壤水势通过土壤水分特征曲线来查,土壤水分特征曲线用压力膜法测定。

## 二、结果与讨论

### (一) 油松、侧柏和栓皮栎苗木水分生理特征

1. 苗木水势与土壤水势的关系 在现代植物水分关系研究中, 水势是最为普遍接受的植物水分状况指标。业已证明, 植物水势都随土壤水势的降低而下降〔10~12〕, 但其下降趋势因树种不同而异。对油松、侧柏苗木来说, 土壤水势的临界阈值为 $-0.45\text{MPa}$  ( $1\text{MPa}=10\text{bar}$ ) 左右, 当土壤水势在 $-0.04\sim-0.45\text{MPa}$  时, 油松、侧柏苗木水势没有多大变化, 一旦土壤水势超过这个临界水势范围, 油松、侧柏苗木水势就有较大幅度的下降〔5〕。然而, 我们从图1可以看出, 当土壤水势低于 $-0.10\text{MPa}$  时, 栓皮栎苗木水势就以 $2.10\text{MPa}/\text{MPa}$  的速度急剧下降, 一直持续到土壤水势 $-0.45\text{MPa}$  左右, 然后趋于平缓 (下降速度降为 $0.4\text{MPa}/\text{MPa}$ )。这表明栓皮栎苗木水势对土壤水势的反应较油松和侧柏都敏感, 因而会较早地受到土壤干旱的影响。当土壤水势低于 $-2.00\text{MPa}$  时, 这3种苗木的水势又突然急剧下降, 但侧柏和栓皮栎苗木水势的下降速度 (侧柏为 $5.40\text{MPa}/\text{MPa}$ ; 栓皮栎为 $2.60\text{MPa}/\text{MPa}$ ) 都远大于油松 ( $1.60\text{MPa}/\text{MPa}$ )。即使在相当严重的土壤干旱条件下 (土壤水势低于 $-3.30\text{MPa}$ ), 油松都始终保持较高的苗木水势 ( $-2.15\text{MPa}$  左右), 而栓皮栎和侧柏的苗木水势则降得很低 (栓皮栎为 $-5.40\text{MPa}$  左右, 侧柏为 $-5.60\text{MPa}$  左右), 表明侧柏、栓皮栎属于低水势耐旱机理的树种, 而油松则属于高水势耐旱机理的树种。这两种耐旱机理的主要差别是: 低水势耐旱机理主要以保持膨胀和忍耐脱水为其耐旱特征, 而高水势耐旱机理则主要以减少水分丧失和保持水分吸收为其耐旱特征〔13〕。油松和侧柏苗木在耐旱机理上的差异已得到证实〔5〕, 而栓皮栎的耐旱机理虽然与侧柏同类, 但由于针阔叶树种之间存在着众多的差异, 因此, 栓皮栎的耐旱机理又会有自身的特点。

我们在研究中还发现, 当土壤比较干旱时 (土壤水势低于 $-1.00\text{MPa}$ ), 油松的苗木水势便开始高于土壤水势, 这种现象在我们研究的其它树种中都未发现。从能量平衡的观点来看, 这时的油松苗木不但不能再从土壤中吸收水分, 反而应该向土壤“吐水”, 如果情况真是如此, 油松苗木就会随着土壤水势的急剧下降而很快死亡, 然而事实上随着土壤水势的降低, 油松苗木水势仍然保持较高而与土壤水势的差值越来越大, 当土壤水势低于 $-4.00\pm 0.30\text{MPa}$ 、油松苗木水势为 $-2.65\pm 0.10\text{MPa}$  时, 油松才开始死亡 (表2), 这充分表明:

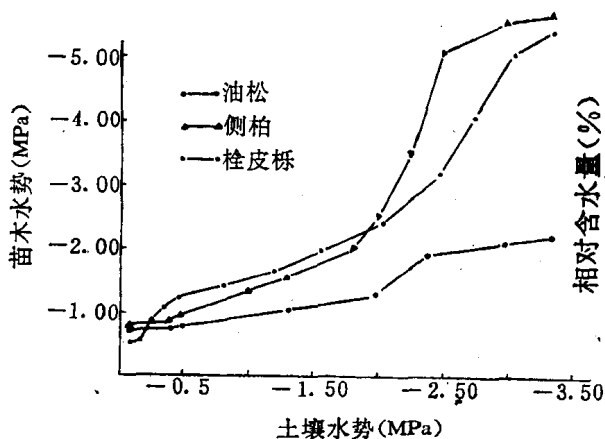


图1 油松、侧柏、栓皮栎苗木水势与土壤水势的关系

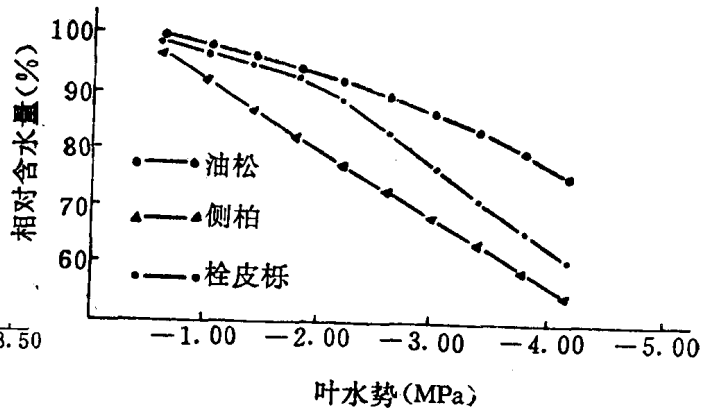


图2 油松、侧柏、栓皮栎苗木水分释放曲线

在干旱过程中，虽然油松处于低水势的大气和土壤之中，但由于某种生物物理的保护机制，使得油松并不象单纯的物理过程那样不断地向大气和土壤中失水，而是把水分牢牢保持在体内。这种生物物理的保护机制是如何起作用的，目前尚不清楚。但这一现象进一步证明，延迟脱水是油松最主要的耐旱机制，而这种被动的耐旱机制也许正是限制油松耐旱能力的原因。

2. 水分释放曲线的变化 人们早已注意到光合组织的水分释放曲线的斜率与抗旱性的关系<sup>[13]</sup>。水分释放曲线是通过相对含水量 ( $RWC$ ) 与对应的水势 ( $\Psi_w$ ) 而绘制的关系曲线 (即  $RWC-\Psi_w$  曲线)。由于水分释放曲线的斜率大小与许多因素有关，比如：充分膨胀时的渗透势大小 ( $\Psi_s^{100}$  值)；组织含水量下降时积累溶质的能力 (渗透调节)；组织的弹性 (弹性模量  $e$ ) 以及自由水与束缚水比例等等，因此，可根据不同树种之间的  $RWC-\Psi_w$  曲线斜率的差异，来初步了解各树种的水分生理生态特点。通常认为  $RWC-\Psi_w$  曲线的斜率较小的植物，其含水量在一定范围内具有较大的水势梯度而有利于吸收水分，因而具有较强的抗旱性<sup>[13]</sup>。

图2表明，油松的水分释放曲线的斜率最小，侧柏最大，栓皮栎居中。但是，依据水分释放曲线来评价抗旱性，如果比较不同的生命形式或具有不同的抗旱机理的植物是没有意义的<sup>[13]</sup>。由于油松与侧柏、栓皮栎具有不同的抗旱机理，因此，用水分释放曲线来比较油松与侧柏、栓皮栎的耐旱性强弱已失去意义，但是，从水分释放曲线的斜率差异上，更进一步说明油松的水分生理生态特点与侧柏、栓皮栎有很大差异，而这些水分生理生态特点集中反映在影响水分释放曲线斜率大小的因素上，对这些因素的作用和变化还需要进一步的探讨。栓皮栎的水分释放曲线很有特点，当苗木水势高于  $-2.00\text{MPa}$  左右时，其斜率与油松相差不大，大大小于侧柏，一旦苗木水势低于  $-2.00\text{MPa}$  时，它的斜率又稍大于侧柏。这说明在比较干旱的条件下，栓皮栎表现出较侧柏更为有利的耐旱特点，而在严重的干旱条件下，栓皮栎便失去了耐旱的优势，而侧柏则表现出较栓皮栎更强的耐旱能力。栓皮栎的水分释放曲线的独特变化也说明，栓皮栎不但具有低水势耐旱机理的特点，同时也兼有高水势耐旱机理的某些特征。

3. 保水力的比较 业已证明，2年生油松苗具有很强的抗脱水能力，而2年生侧柏苗的抗脱水能力相对较差<sup>[5]</sup>。图3更加充分地说明了这一点。在同一年龄条件下，保水力大小的排序总是油松 > 侧柏 > 栓皮栎。虽然栓皮栎缺乏抗脱水能力，但在受旱时却可以通过落叶的方式来保持体内的水分平衡。另外，随着年龄的增加，油松的抗脱水能力减弱，而侧柏

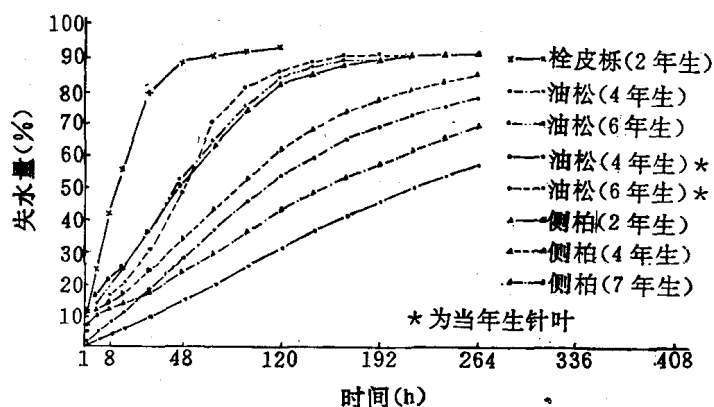


图3 油松、侧柏、栓皮栎保水力比较

注：4年生油松和侧柏及2年生栓皮栎为盆栽苗木

的抗脱水能力则有所加强。这对于以抗脱水为主要耐旱特征的油松来说,抗脱水能力的降低无疑会削弱油松的耐旱能力,而对侧柏来说,抗脱水能力的提高有助于增强耐旱的能力。据此,我们初步推断,随着年龄的增加,油松的耐旱能力可能会有所下降,而侧柏则有所增强。

## (二) 油松、侧柏、栓皮栎苗木对干旱逆境的生理反应

1. 蒸腾作用 植物受旱是由于环境中缺水导致吸水不足或失水过多而使组织脱水,影响生理生化过程,以致组织受害,甚至死亡。失水主要是由于蒸腾,植物可借增加吸水或减少蒸腾来抵抗干旱。Ausscnae and Levy (1983) 发现,当土壤水势稍微降低, *Quercus rober* 的蒸腾速率就会大幅度下降,气孔阻力迅速增加<sup>[10]</sup>。Kramer 也认为,因蒸腾大于水分吸收而受害或死亡的植物多于其它原因所造成的危害和死亡<sup>[14]</sup>。但是,蒸腾作用与

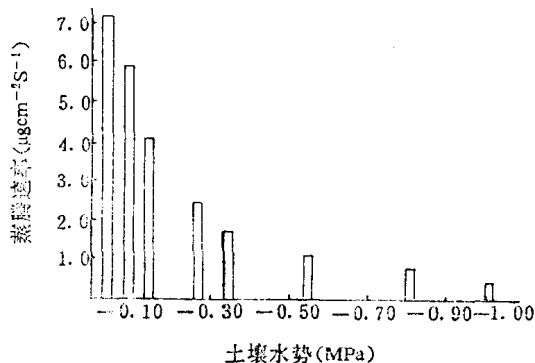


图4 栓皮栎苗木蒸腾速率的变化

耐旱性的关系比较复杂,一般认为旱生植物在干旱时期蒸腾作用较弱,但在水分充足的条件下又表现出显著的蒸腾量<sup>[15~17]</sup>。油松和侧柏苗木的蒸腾作用都随土壤水势的降低而下降,其下降趋势与其苗木水势的降低趋势是一致的。当土壤水势在 $-0.04 \sim -0.45$  MPa时油松、侧柏苗木的蒸腾速率下降缓慢,一旦土壤水势低于 $-0.45$  MPa,其蒸腾速率就急剧下降<sup>[5]</sup>。而图4表明,栓皮栎苗木蒸腾速率的下降趋势也与其苗木水势的下降趋势一致,但

其急剧下降时的土壤水势( $-0.10$  MPa左右)却远高于油松和侧柏,说明栓皮栎苗木的蒸腾作用对土壤干旱的反应与其苗木水势一样都较油松和侧柏敏感,即当土壤轻度干旱时,栓皮栎苗木就迅速降低其蒸腾而减少水分的丧失,这充分表明栓皮栎苗木具有高水势耐旱机理中减少水分损失的耐旱特性。

2. 气孔调节 随着水分逆境的发展,气孔关闭是植物蒸腾下降的主要原因<sup>[18]</sup>,这就是所谓气孔调节,它是陆生植物在适应干旱环境过程中发展的一套气孔反馈体系<sup>[19, 20]</sup>。在水分亏缺时,可以通过关闭气孔来减少和防止继续失水,这种调节在植物耐旱性中占有重要的地位<sup>[21]</sup>。气孔调节有两种反应方式:反馈式反应和正向式反应。反馈式反应是气孔对叶水势变化的反应,它的反馈作用在于叶子水势低于临界值后就气孔关闭,气孔关闭反过来又防止水分丧失,有助于叶水势的恢复。正向式反应是气孔对空气相对湿度变化的反应,当空气湿度下降,引起气孔关闭,此时叶子其余部分水势并无多大变化,从而防止叶子进一步失水<sup>[8]</sup>。油松的气孔反馈式反应较侧柏敏感,其气孔关闭的临界水势为 $-1.60 \pm 0.40$  MPa (土壤水势为 $-2.30 \pm 0.40$  MPa),侧柏气孔关闭的临界水势低于 $-5.33$  MPa左右(土壤水势为 $-2.76$  MPa)<sup>[5]</sup>。而从图4我们可以看出:当栓皮栎苗木水势为 $-1.50 \pm 0.05$  MPa (土壤水势为 $-1.00 \pm 0.20$  MPa)时,其蒸腾速率就下降了95%左右(从 $7.20 \mu\text{g cm}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$ 降到 $0.44 \mu\text{g cm}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$ ),说明此时气孔已经关闭,表明栓皮栎苗木的气孔反馈式反应较油松和侧柏更为灵敏,这对于减少水分丧失、保持体内水分平衡是有利的,但是,较早地关闭气孔也会截断 $\text{CO}_2$ 的供应而影响光合作用。侧柏在比较低的叶水势下才关闭,在一定程度上反映了侧柏气孔对水分亏缺有较大的忍耐能力。

在叶子水分亏缺的初始阶段,远没达到萎蔫之前,由于保卫细胞的膨压逐渐降低(低于

表皮细胞膨压时)，气孔便开始关闭〔9〕。油松和栓皮栎气孔关闭的临界水势值都远高于膨压为零时的水势值 ( $\Psi_0$ )，(油松的 $\Psi_0$ 值为 $-3.35 \pm 0.10$ MPa，栓皮栎为 $-3.50 \pm 0.15$ MPa)，表明它们在膨压丧失前就关闭了气孔，这在很大程度上可能是由于保卫细胞的失水而降低其膨压所致。而对于侧柏来说，气孔关闭则是在膨压完全丧失之后 (其 $\Psi_0$ 值为 $-3.40 \pm 0.15$ MPa，远高于气孔关闭的临界水势值)，目前的研究表明：引起气孔关闭的原因除了保卫细胞的直接作用以外，激素ABA在气孔调节中也起着重要作用〔7〕。干旱引起ABA累积有利于气孔关闭和增加根对水的透性〔8〕。Pierce和Raschke (1978) 指出ABA逐渐的累积是膨压降低的函数〔22〕，玉米、高粱中ABA开始累积时相当于零膨压〔23〕，菜豆、苍耳等叶子失去膨压后ABA及其代谢产物菜豆酸等也都在累积〔24〕。由此我们认为，侧柏的气孔关闭可能与ABA或其它激素的作用有关。应当指出的是，仅用蒸腾作用的减弱来判断气孔的关闭是不全面的，特别是在严重的干旱条件下更应谨慎。因为在严重的干旱条件下，气孔关闭已不是导致蒸腾降低的唯一原因，植物体内本身相当缺水 (如侧柏) 也能引起蒸腾的大幅度下降。当然，对于象油松和侧柏这样难观察到气孔运动的树种来说，利用蒸腾作用或气孔阻力等因素来判断气孔的开闭仍具有一定的参考价值。

3. 光合作用 在干旱条件下，随着叶子不断失水，光合作用逐渐下降，当水分亏缺严重时，光合作用可以下降到零〔25, 26〕。但是，开始降低光合作用的临界土壤水势因树种不同而异。有些树种当土壤发生轻度干旱时其光合作用就开始降低 (Kozłowski, 1949, 1962; Bormann, 1953; Havranek & Benecke, 1978)，也有些树种在大部分土壤可利用水耗尽之前，光合作用不会有明显降低 (Allmendinger, 1943)〔9〕。实验表明，油松、侧柏和栓皮栎皆属于前一类树种 (见图5)。当土壤水势降至 $-0.45$ MPa时，油松、侧柏苗木的水势和蒸腾并无多大变化，但光合作用却分别下降17%和35%左右，表明在干旱初期，油松、侧柏的光合能力首先受到影响，而栓皮栎苗木的光合作用与其苗木水势和蒸腾是同步受到影响的，在相应阶段其光合速率下降了28%左右。随着干旱逆境的发展，栓皮栎较早地开始关闭气孔，因而当土壤水势降 $-1.16$ MPa左右时 (此时为栓皮栎气孔关闭的临界土壤水势)，其光合作用急剧下降了90%左右，而油松和侧柏的光合作用的下降趋势却较缓和，这充分说明气孔调节虽然有利于控制蒸腾，减少水分的丧失，但同时也影响了光合作用，这种双重作用对植物的耐旱性究竟是利多弊少还是相反，目前尚不十分清楚。

光合作用与耐旱性的关系也比较复杂，通常认为适应干旱地区生长的植物比中生植物能

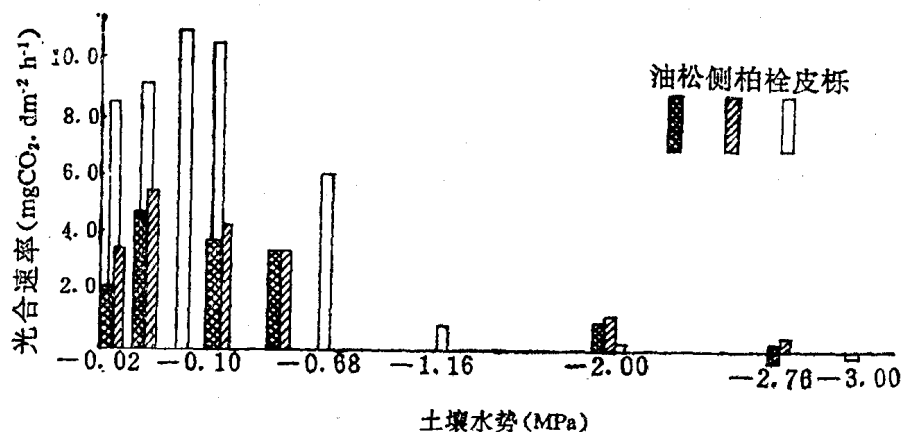


图5 油松、侧柏、栓皮栎光合作用比较



在更低的水势条件下进行光合作用。现在常用水合补偿点（即植物净光合速率为零时的植物水势或土壤水势）来表示光合作用与耐旱性的关系。水合补偿点越低，植物的耐旱性就越强〔5〕。对于不同耐旱机理的树种来说，仅用植物水合补偿点来说明耐旱性是不全面的，虽然油松的植物水合补偿点（ $-2.20 \pm 0.20\text{MPa}$ ）大大高于栓皮栎（ $-4.30 \pm 0.10\text{MPa}$ ），但它的土壤水合补偿点（ $-2.80 \pm 0.40\text{MPa}$ ）却与栓皮栎（ $-2.85 \pm 0.15\text{MPa}$ ）相差不大，表明油松和栓皮栎的耐旱能力并没有显著差异。侧柏的植物水合补偿点（ $-7.00 \pm 0.20\text{MPa}$ ）和土壤水合补偿点（ $-4.00 \pm 0.20\text{MPa}$ ）都远低于油松和栓皮栎，因而表明侧柏具有较油松和栓皮栎更强的耐旱能力。

4. 叶绿素 a 荧光 叶绿素 a 荧光是研究光合作用能量传递的重要手段，70年代末人们才开始用荧光方法研究植物对各种逆境的抗性。Govindjee等（1981）在研究中发现，当欧洲夹竹桃受到水分胁迫时， $F_0$ 并无显著变化，而 $F_v$ 有所降低。当叶水势为 $-8\text{bar}$ 时， $P/O$ 值为4；当叶水势降至 $-39\text{bar}$ 时， $P/O$ 值下降为1.1，重新浇水可使之恢复。因此，他们认为 $P/O$ 值可作为叶水势的数量指标〔27〕。但我们的实验表明（见表1）：当油松、侧柏和栓皮栎苗木遭受土壤干旱时，其荧光产量都不会直接下降， $P/O$ 值的变化总趋势都是先上

表1 油松、侧柏、栓皮栎叶绿素a荧光与水势的关系

| 油 松    |        |       |      | 侧 柏    |        |       | 栓 皮 栎               |        |       |
|--------|--------|-------|------|--------|--------|-------|---------------------|--------|-------|
| 土壤水势   | 苗木水势   | $P/O$ |      | 土壤水势   | 苗木水势   | $P/O$ | 土壤水势                | 苗木水势   | $P/O$ |
| (-MPa) | (-MPa) | 当年生叶  | 老叶   | (-MPa) | (-MPa) |       | (-MPa)              | (-MPa) |       |
| 0.06   | 0.87   | 1.40  | 1.30 | 0.06   | 0.80   | 1.35  | 0.09                | 0.64   | 2.00  |
| 0.61   | 1.11   | 1.60  | 1.33 | 3.17   | 4.76   | 1.42  | 1.57                | 1.74   | 2.06  |
| 3.31   | 1.67   | 1.58  | 1.45 | 3.55   | 5.08   | 1.38  | 2.63 $\Delta$       | 3.16   | 1.00* |
| 4.43   | 2.16   | 1.62  | 1.53 | 3.83   | 5.50   | 1.36  |                     |        | 1.84  |
| 4.32   | 2.48   | 1.36  | 1.48 | 4.00   | 7.06   | 1.25  | 2.81 $\Delta$       | 4.67   | 1.01* |
| 4.35   | 2.70*  | 1.09  | 1.25 | 4.33   | >8.00  | 1.17  |                     |        | 1.56  |
| 2.95   | 3.12*  | 1.10  | 1.29 | 4.43   | >8.00  | 1.12  | 3.57                | 3.27   | 2.11  |
| 2.90   | 3.61*  | 1.03  | 1.18 | 4.50   | >8.00  | 1.06  | 3.53**              | 5.88   | 2.04  |
| 4.50   | 4.08*  | 1.13  | 1.25 | 4.68*  | >8.00  | 1.03  |                     |        | 1.00* |
| 4.35   | >8.00* | 1.08  | 1.16 | 4.72*  | >8.00  | 1.01  | 3.45 $\Delta\Delta$ | 6.08   | 0.99  |

注：\* 复水后不能再复活的苗木。

\* 受旱后变色叶子。

\*\*同一叶片，一半变色，一半色泽基本正常。

$\Delta$ 同一植株上不同叶子。

$\Delta\Delta$ 受旱很严重，但叶子还始终稍带绿色。

升，然后到某一临界值时才下降。这与武宝珩等的研究结果是一致的〔28〕。在正常水分条件下，栓皮栎的 $P/O$ 值（ $2.00 \pm 0.20$ ）高于油松和侧柏（油松当年生针叶为 $1.40 \pm 0.15$ ，油松老叶为 $1.30 \pm 0.10$ ，侧柏为 $1.35 \pm 0.10$ ），表明栓皮栎的光合潜力大于油松和侧柏，油松当年生叶的光合潜力大于老叶。随着土壤干旱逆境的发展，它们的 $P/O$ 值都开始上升（均上升0.20左右），这可能是由于干旱导致光合作用的暗反应受阻，使光能大都以荧光释放，因而 $P/O$ 值提高。当油松达到水合补偿点以后， $P/O$ 值仍保持在较高水平上，说明此时虽然光合作用已经完全停止，但是光合器官并未受到严重破坏，仍具有进行光合作用的潜力。而当油松苗木水势低于 $-2.70\text{MPa}$ 时， $P/O$ 值就突然下降至 $1.10 \pm 0.07$ 左右，此时复水已不能使 $P/O$ 值再回升了，说明其光合器官已遭受不可逆转的彻底破坏，此时的油松苗木也基本上不

能再复活了(见表2)。对于侧柏苗木来说,在接近水合补偿点时 $P/O$ 值就略有下降,当达到水合补偿点时,大部分苗木的 $P/O$ 值下降较快(降为 $1.10 \pm 0.05$ ),但此时复水能使 $P/O$ 值回升到原来的水平。一旦土壤水势低于 $-4.50\text{MPa}$ 左右,侧柏苗木的光合器官就开始遭受严重破坏,而使 $P/O$ 值降至 $1.05 \pm 0.02$ ,此时有部分苗木不能再复活了(见表2)。栓皮栎的荧光变化更有特点, $P/O$ 值的变化与水势的关系并不十分明显。在水合补偿点左右时,大部分植株上的部分叶片(大部分为老叶,已有变色迹象)的 $P/O$ 值降至最低点(1.00左右),一旦重新浇水这些叶片便很快变色、死亡和脱落,而同株上未变色叶片(大部分为当年长出的新叶)的 $P/O$ 值仍然保持对照水平左右。有趣的是,在同一片叶子上,虽然变色的一半叶子已经死亡,但另一半未变色叶仍有较高的 $P/O$ 值。在严重的干旱条件下,即使未变色叶的 $P/O$ 降至最低点1.00左右,只要叶片还稍带有灰绿色,复水后 $P/O$ 值仍能回升到对照水平。这种光合器官并未遭受严重破坏而 $P/O$ 值又降得很低的原因,可能是PSⅡ的电子供体(水)一侧的电子流被截断,使Q不能还原所造成<sup>[27]</sup>。虽然叶绿素a荧光的 $P/O$ 值对油松、侧柏和栓皮栎的受旱程度有一定指示作用,但由于这些树种的 $P/O$ 值较小,而且 $P/O$ 比值本身比较粗放,因此,用 $P/O$ 值作为水势的数量指标是不恰当的。另外,我们认为,用叶绿素a荧光研究针叶树对环境胁迫的反应较阔叶树更有意义。前面的研究结果表明,针叶树的针叶光合器官的破坏往往意味着整株植物的死亡。光合作用虽然可以反映植物光合能力的大小,但却不能说明光合器官的受害程度,而叶绿素a荧光强度的变化却可以起到这样的作用。因此,用叶绿素a荧光比光合作用更能准确反映针叶树受到干旱逆境的危害情况。但是,对阔

表2 油松、侧柏、栓皮栎苗木存活能力比较

| 油松(4年生)   |        |                |                |          | 栓皮栎(2年生)       |        |                |          | 侧柏(4年生)   |        |                |             |          |
|-----------|--------|----------------|----------------|----------|----------------|--------|----------------|----------|-----------|--------|----------------|-------------|----------|
| 复水<br>时间  | 编<br>号 | 土壤水势<br>(-MPa) | 苗木水势<br>(-MPa) | 调查<br>情况 | 复水<br>时间       | 编<br>号 | 土壤水势<br>(-MPa) | 调查<br>情况 | 复水<br>时间  | 编<br>号 | 土壤水势<br>(-MPa) | 荧光<br>(P-O) | 调查<br>情况 |
| 7月<br>12日 | 16     | 4.34           | >8.00          | -        | 6月<br>12日<br>* | 13     |                | +        | 6月<br>23日 | 11     | 4.54           | 302         | +        |
|           | 14     | 4.56           | 3.53           | -        |                | 20     |                | +        |           | 14     | 4.50           | 113         | +        |
|           | 07     | 2.89           | 3.61           | -        |                | 11     |                | +        |           | 18     | 4.72           | 48          | -        |
|           | 02     | 4.47           | >8.00          | -        |                | 18     |                | +        |           | 13     | 4.60           | 156         | +        |
|           | 04     | 4.50           | 4.08           | -        |                | 10     | <3.08          | +        | 7月<br>1日  | 12     | 4.84           | -19         | --       |
|           | 12     | 4.68           | 2.72           | +        |                | 03     |                | +        |           | 05     | 4.11           | 255         | +        |
|           | 01     | 3.67           | 2.61           | +        |                | 19     |                | +        |           | 08     | 4.51           | 493         | +        |
|           | 13     | 4.35           | 2.70           | -        |                | 07     | 3.60           | +        |           | 17     | /              | 37          | -        |
| 7月<br>23日 | 15     | 4.54           | 3.12           | -        | 6月<br>23日      | 23     | 3.71           | -        | 7月<br>12日 | 09     | 4.94           | -16         | -        |
|           | 17     | /              | 1.78           | +        |                | 17     | 3.59           | -        |           | 03     | 4.68           | 46          | -        |
|           | 09     | /              | 2.42           | +        |                | 14     | 3.62           | +        |           | 15     | 4.72           | 112         | -        |
|           | 03     | /              | 2.37           | +        | 7月<br>12日      | 08     | 3.44           | +        |           | 02     | 4.71           | 137         | -        |
|           | 08     | /              | 2.85           | -        |                | 26     | 3.61           | -        |           | 07     | 4.72           | 128         | -        |
|           | 10     | /              | 2.25           | +        |                | 16     | 3.57           | -        |           |        |                |             | -        |

说明: ①干旱处理从1988年6月4日在温室自然干燥条件下进行。

②6月11日遇到突然的高温(室温超过 $50^{\circ}\text{C}$ ),栓皮栎受害较严重,但仍能全部复活;侧柏稍有发干;油松则没有异常现象。

③油松存活时间长,这主要是由于叶量少,土壤失水缓慢所致。

④复水前的栓皮栎、侧柏苗木水势均低于 $-8.00\text{MPa}$ 。

⑤“+”表示复活,“-”表示死亡。

\*苗木水势高于 $-5.00\text{MPa}$ 。