

油松、侧柏苗木水力结构特征的对比研究

翟洪波¹, 李吉跃¹, 姜金璞²

(1. 北京林业大学资源与环境学院, 国家林业局重点开放性实验室 100083; 2. 北京林业大学妙峰山教学实验林场)

摘要:油松侧柏是分属两个不同耐旱类型的树种, 为了进一步了解其在水分运输和耐旱机理方面的特点, 应用水力结构的基本理论, 在正常水分条件下, 用改良的冲洗法测定 4 年生油松侧柏苗木各部位的水力结构参数。实验和模拟的结果表明, 油松和侧柏苗木都存在限速区; 在非限速区, 二者各部分木质部的导水率、比导率、叶比导率和胡伯尔值都随功能木质部直径的增加而增大, 但表现出不同的变化趋势, 这些变化能较好地说明油松和侧柏苗木耐旱的生态策略。在功能木质部直径相同的情况下, 油松苗木水力结构的各参数均较侧柏大。

关键词:油松; 侧柏; 冲洗法; 水力结构

Comparative Study on Hydraulic Architecture Characteristic of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* Seedlings

ZHAI Hong-Bo¹, LI Ji-Yue¹, JIANG Jin-Pu² (1. College of Resources and Environment, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China; 2. Miaofengshan forest center, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China) *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11): 1890~1895.

Abstract: *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* are two different types of drought-tolerant tree species. In order to further understand the mechanisms of water transportation and drought tolerance, the present study, using the basic theory of hydraulic architecture, measured and analyzed the hydraulic architecture parameters of *P. tabulaeformis* and *P. orientalis* seedlings (4 years old) using improved flushing method with normal water supply. The results showed that both *P. tabulaeformis* and *P. orientalis* seedlings had constriction area. The stem diameter of seedlings in constriction area was higher than that in non-constriction area, while the hydraulic conductivity in constriction area was lower than that in non-constriction area. The existence of the constriction area is in favor of trunks and tops of trees for water capturing because the constriction area raises the resistance of water transportation of ramification, which is propitious to competition for survival of individual seedling. The hydraulic conductivities of *P. tabulaeformis* and *P. orientalis* seedlings increased with functional xylem diameter of stems, indicating that the water transportation capacity of thicker branches was higher than that of thinner ones. In the same size of functional xylem diameter, the hydraulic conductivity of *P. tabulaeformis* seedling was higher than that of *Platycladus orientalis*, suggesting that the water transportation capacity of *P. tabulaeformis* seedling was higher than that of *P. orientalis*. The specific conductivities of *P. tabulaeformis* and *P. orientalis* seedlings increased logarithmically with functional xylem diameter of stems, indicating that porosity and water transportation efficiency of thicker branches were higher than that of thinner ones. The leaf specific conductivities of *P. tabulaeformis* and *P. orientalis* seedlings increased linearly with functional xylem diameter of stems. It is one of the important ecology strategies of drought tolerance for seedlings to survive in water stress, in which thinner, smaller and distal branches are harder to capture water than thicker ones, and they will be removed away from a "water-supply list" in order to guarantee the survival

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30070637); 教育部高等学校博士点基金及骨干教师资助项目。

收稿日期: 2002-05-08

作者简介: 翟洪波(1971~), 男, 河北承德人, 博士。主要从事树木生理学、生态学研究。

of the bigger apparatuses, such as trunks and thicker branches. The Huber value of *P. tabulaeformis* and *P. orientalis* seedlings increased linearly with functional xylem diameter, suggesting that the thicker the branches, the more the stem issues were involved in supplying water for distal leaf. In the same size of functional xylem diameter, the specific conductivity, leaf specific conductivity and Huber value of *P. tabulaeformis* were higher than those of *P. orientalis* seedlings. It suggested that *P. tabulaeformis* seedlings had higher efficiency of water transportation, lower water potential gradient and more stem issue involvement in supplying water for distal leaf than *P. orientalis* seedlings if water supply was enough and transpiration was the same.

Key words: *Pinus tabulaeformis*; *Platycladus orientalis*; flushing method; hydraulic architecture

文章编号:1000-0933(2002)11-1890-06 中图分类号:S718.45 文献标识码:A

20 世纪 70 年代以来,在研究树木耗水问题时,通过应用水力结构^[1,2]的基本理论来考察和模拟植物木质部的水分生理特征,即整树水力结构模型的建立问题,已成为树木耐旱机理研究中的热点问题之一。我国从 20 世纪 80 年代初开始对树木的耐旱特性及其机理进行了大量研究^[3~5],并已注意到木质部空穴和栓塞对树木的严重影响^[6],但对树木水力结构的研究尚属空白。根据李吉跃的研究^[3,4],油松侧柏分别属于高水势延迟脱水耐旱和低水势忍耐脱水耐旱树种,二者在耐旱特点及耐旱机理上均存在较大差异,在干旱胁迫的条件下,油松以独特的、强有力的节持水能力从而避免原生质脱水为其主要的耐旱特征,并在干旱过程中保持高的组织水势,而侧柏则以强有力的吸水潜力和原生质耐脱水能力为其主要耐旱特征,并辅以较强的节持水能力及避免和忍耐饥饿的能力,使其光合器官在相当严重的干旱条件下不致遭受彻底破坏。树木的耐旱特性与其输水机理及水力结构特征有很密切的关系,本文将从树木水力结构的角度对二者的水分运输特点和耐旱生态策略进行比较分析。

1 材料与方法

1.1 材料

选择油松和侧柏苗木(4 年生)进行盆栽培养,3 个月后将开始实验。

1.2 方法

1.2.1 苗木处理 将供试苗木始终正常浇水,4 株重复。

1.2.2 测定内容 用标签将待测苗木编号,详细记录苗干和各分枝的长度、侧枝的分枝角度,汇制成图。在全苗中均匀选取不同部位的茎段,测定枝段的长度和带皮直径,直径取茎断面上相互垂直的两个方向数值的平均值。茎段末端的叶干重用烘干法(105℃,8h)测定。所测茎段末端的叶干重用 A_l 表示。针叶面积用公式^[7]计算:

$$A = 2L(1 + \pi/n) \sqrt{nV/\pi L}$$

其中, A 为叶面积; V 为针叶体积(用排水法测定); n 为每束针叶数; L 为针叶长度。本文给出油松和侧柏的叶面积和叶干重间的转换关系:油松叶面积(cm^2) = $165 \times$ 叶干重(g),侧柏叶面积(cm^2) = $161 \times$ 叶干重(g)。

根据 Zimmermann^[8]和 Sperry 等^[9]的测定方法,水力结构参数采用改良的“冲洗法”测定。本实验的冲洗液使用 10 mmol/L 的草酸溶液,以免导水率在测量过程中下降。压力梯度(ΔP)定义为水压(MPa)除以茎段长度。在测量过程中,因功能木质部直径不便于测量,直接测定了茎段的带皮直径,然后从全部供试苗木中选取一定比例的茎段,通过有色溶液冲洗染色的方法来确定功能木质部(木质部中导水的部分,大树一般指边材)的直径,油松和侧柏苗木大样本实验模拟的结果表明,功能木质部直径与带皮直径之间呈较好的线性相关:

$$y = 0.8694x - 0.9240 \quad (r = 0.9935, n = 116)$$

$$\text{万方数据} \quad y = 0.7923x - 0.0388 \quad (r = 0.9982, n = 108)$$

其中, y 为功能木质部直径; x 为带皮直径; r 为相关系数; n 为样本数。

苗木叶水势在黎明前用压力室测定。

1.2.3 数据分析 所测数据用 Microsoft Excel 软件来处理。

2 结果与分析

2.1 导水率 (K_h) 的变化

通常具有较高 K_h 值的茎段,导水能力强^[1,2]。研究表明,导水率的大小主要受 3 个因子的影响:茎段所在区域、茎段功能木质部直径(D)和小枝水势。在供水良好的条件下,苗木水势处于正常状态,对水力结构参数影响很小,所以这里不再讨论。

2.1.1 茎段所在区域对导水率的影响 在苗木的分叉部位,即枝迹处称之为水分运输的限速区,其它部分则称之为非限速区。在限速区,茎段直径一般比同一分叉后若干厘米的正常部位(非限速区)大,但其导水率却比相应的非限速区小。图 1 和图 2 表明,当油松限速区茎段功能木质部直径在 2.13~6.43mm 范围内时,其对应非限速区的功能木质部直径变动在 2~5.23mm 的范围内,限速区的导水率变动在 0.002~0.113g·m·MPa⁻¹·min⁻¹内,而非限速区的导水率变动在 0.014~0.219g·m·MPa⁻¹·min⁻¹范围内;当侧柏苗木限速区茎段功能木质部直径在 3.66~9.86mm 范围内时,其非限速区的功能木质部直径变动在 3.16~7.26mm 的范围内,限速区的导水率变动在 0.015~0.131g·m·MPa⁻¹·min⁻¹内,而非限速区的导水率变动在 0.048~0.509g·m·MPa⁻¹·min⁻¹范围内,非限速区导水率显然高于限速区,而且非限速区茎段功能木质部直径越大,其导水率和对非限速区茎段的绝对差值越大,如油松苗木在限速区茎段功能木质部直径分别为 2.13mm 和 6.43mm 时,其导水率与对应非限速区(直径分别为 2mm 和 5.23mm)的绝对差值分别为 0.007 和 0.106g·m·MPa⁻¹·min⁻¹;侧柏苗木在限速区茎段功能木质部直径分别为 3.66mm 和 9.87mm 时,其导水率与对应非限速区(直径分别为 3.16mm 和 7.24mm)的绝对差值分别为 0.033 和 0.378g·m·MPa⁻¹·min⁻¹。限速区的存在,增大了水分在分枝特别是多级分枝中运输的阻力,从而使苗木在水分分配上有利于主干和顶梢。当密度较大时,苗木顶端的枝条对于其与其它苗木竞争光照和空间是至关重要的,限速区的存在,显然对苗木顶端枝条的生存竞争有利。

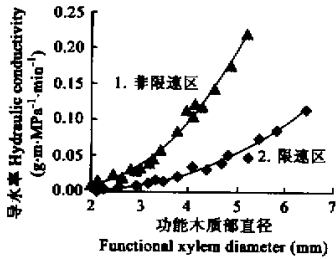


图 1 油松苗木茎段所在区域对导水率的影响

Fig. 1 Effect of area stem segment of *Pinus tabulaeformis* seedlings located on hydraulic architecture

1. constriction area; 2. non-constriction area

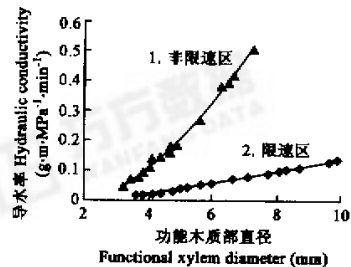


图 2 侧柏苗木茎段所在区域对导水率的影响

Fig. 2 Effect of area stem segment of *Platycladus orientalis* seedlings located on hydraulic conductivity

1. constriction area; 2. non-constriction area

2.1.2 茎段直径对导水率的影响 从图 3 可以看出,在非限速区,油松和侧柏苗木的导水率都随功能木质部直径的增加而增大,用二项式可以较好的模拟出二者之间的相关关系:

$$y = 0.0327x^2 - 0.1541x + 0.2146 \quad (x \in [2, 18], r = 0.979, n = 82)$$

$$y = 0.0166x^2 - 0.0553x + 0.062 \quad (x \in [2, 20], r = 0.996, n = 85)$$

其中, y 为导水率; x 为功能木质部直径; r 为相关系数; n 为样本数。

实验和模拟数据表明,在功能木质部直径相同的情况下,油松的导水率高于侧柏,分别以功能木质部直径 2mm、6mm 和 18mm 的茎段为例,油松的导水率 (0.021 g·m·MPa⁻¹·min⁻¹, 0.467g·m·

$\text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, $8.019 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) 分别较侧柏 ($0.018 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, $0.328 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, $4.445 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) 高 16.7%, 42.4% 和 80.4%。说明油松苗木功能木质部的导水能力强于相同直径的侧柏苗木。在限速区, 油松和侧柏苗木导水率随功能木质部直径的变化可以分别用二项式和线性方程来模拟:

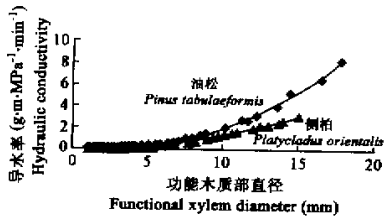


图 3 油松侧柏苗木功能木质部直径和导水率的关系
Fig. 3 The relation of functional xylem diameter of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* seedlings and hydraulic conductivity

$$y = 0.0056x^2 - 0.0232x + 0.0283 \quad (x \in [2.13, 6.43], r = 0.990, n = 18)$$

$$y = 0.0194x - 0.0597 \quad (x \in [3.66, 9.87], r = 0.997, n = 17)$$

其中, y 为导水率; x 为功能木质部直径; r 为相关系数; n 为样本数。

不难看出, 在功能木质部直径相同的情况下, 非限速区内油松的导水率同样高于侧柏, 以功能木质部直径 5 毫米的茎段为例, 油松的导水率 ($0.052 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) 较侧柏 ($0.0373 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) 高 40.5%。说明在非限速区内, 油松苗木功能木质部的导水能力也强于相同直径的侧柏苗木。

2.2 比导率(K_s)的变化

在水力结构参数中, 比导率(K_s)反映的是单位茎段边材横截面积(A_w, cm^2)的导水率, 即: $K_s = Kh/A_w$, 它标志着该茎段孔隙值的大小。比导率反映出树木各部分输水系统的效率, 在茎段边材横截面积一定的情况下, K_s 越大, 说明该部分木质部的孔隙度越大, 输水效率越高, 单位有效面积的输水能力越强^[1,2]。

从图 4 可以看出, 在正常水分条件下, 油松和侧柏苗木非限速区内功能木质部直径和比导率之间呈对数相关:

$$y = 0.8991 \ln(x) + 0.1124 \quad (x \in [2, 18], r = 0.975, n = 82)$$

$$y = 0.554 \ln(x) + 0.1416 \quad (x \in [2, 20], r = 0.945, n = 85)$$

其中, y 为比导率; x 为功能木质部直径; r 为相关系数; n 为样本数。

根据实验和模拟的结果, 苗木功能木质部直径越大, 其导水效率越高, 在正常水分条件下, 油松苗木功能木质部直径 10mm 茎段的比导率 ($2.183 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) 是 2mm ($0.736 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) 茎段比导率的 2.97 倍, 侧柏苗木功能木质部直径 10mm 茎段的比导率 ($1.417 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) 是 2mm ($0.526 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) 茎段比导率的 2.7 倍, 这说明粗枝的孔隙度和水分运输效率远远高于细枝。一般来说, 相同直径油松苗木木质部的比导率高于侧柏苗木, 这种趋势随着茎段直径的增加而越发明显, 这说明油松苗木木质部的孔隙度和水分运输效率高于侧柏苗木。

2.3 叶比导率(LSC)的变化

叶比导率是水力结构中表征茎段末端叶供水状况的重要指标, 当 K_h 被茎段末端的叶干重(W, g)或叶面积(LA, cm^2)除时, 可得到 LSC , 即:

$$LSC = Kh / LA$$

如果已知道茎段上叶平均蒸腾流密度($E, \text{kg} \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), 在忽略叶水势变化时由于水容量造成的含水量变化的情况下, LSC 越高, 说明茎段末端单位叶面积的供水情况越好, 需要由茎给其末端叶供水所需的压力梯度越小^[1,2]。

从图 5 可以看出, 正常水分条件下, 油松侧柏苗木非限速区内功能木质部直径和叶比导率之间呈较好的线性相关:

$$y = 0.0081x - 0.0108 \quad (x \in [2, 18], r = 0.997, n = 82)$$

$$\text{万方数据} \quad y = 0.0029x - 0.0005 \quad (x \in [2, 20], r = 0.986, n = 8)$$

其中, y 为叶比导率; x 为功能木质部直径; r 为相关系数; n 为样本数。

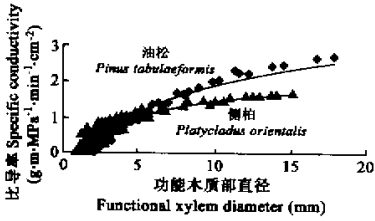


图 4 油松侧柏苗木功能木质部直径和比导率的关系
Fig. 4 The relation of functional xylem diameter of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* seedlings and specific conductivity

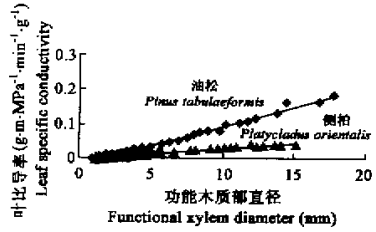


图 5 油松侧柏苗木功能木质部直径和叶比导率的关系
Fig. 5 The relation of functional xylem diameter of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* seedlings and leaf specific conductivity

实验和模拟的结果表明,随着功能木质部直径的增加,油松和侧柏苗木的叶比导率增大,例如,油松苗木功能木质部直径 17.84 mm 的叶比导率(0.133g · m · MPa⁻¹ · min⁻¹ · g⁻¹)是直径 2mm 叶比导率(0.005g · m · MPa⁻¹ · min⁻¹ · g⁻¹)的 26.6 倍,侧柏苗木功能木质部直径 19.12 mm 的叶比导率(0.0446g · m · MPa⁻¹ · min⁻¹ · g⁻¹)是直径 2.48mm 叶比导率(0.005m · MPa · min⁻¹)的 8.92 倍,这意味着在平均蒸腾流密度 *E* 相同的情况下,侧柏 2mm 茎段水分运输所需克服的阻力是 19mm 径段的近 8.92 倍,显然,较粗的枝条较多次分枝的末端细小枝条更易获得水分。油松和侧柏苗木中,水分运输的主要阻力集中于那些细小的末端分枝,这样,苗木在水分胁迫的情况下,将首先牺牲那些光合积累较小的枝条,而尽可能保证主干和力枝等光合积累较大器官的供水和存活,这是油松侧柏苗木抵御干旱胁迫的重要生态策略之一。但就相同功能木质部直径的茎段而言,油松苗木的叶比导率高于侧柏苗木,以功能木质部直径 6mm 的茎段为例,油松苗木的叶比导率(0.0378g · m · MPa⁻¹ · min⁻¹ · g⁻¹)是侧柏苗木(0.0169g · m · MPa⁻¹ · min⁻¹ · g⁻¹)的 2.24 倍,这说明在平均蒸腾流密度 *E* 相同的情况下,相同直径的油松苗木较侧柏苗木更易获得水分。

2.4 胡伯尔值(HV)的变化

胡伯尔值(HV)反映的是供给单位茎末端叶面积(或叶干重)水分的边材横截面积(如环孔材,或有时是茎横截面积,如散孔材及针叶树),即后者被前者除:

$$HV = Aw/ LA$$

胡伯尔值越大,说明维持单位叶面积水分供给的茎干组织越多^[1,2]。

从图 6 可以看出,用线性方程可以较好的模拟油松和侧柏苗木非限速区内功能木质部直径和胡伯尔值之间的相关关系:

$$y = 0.0022x + 0.0191 \quad (x \in [2,18], r = 0.975, n = 82)$$

$$y = 0.0012x + 0.0077 \quad (x \in [2,20], r = 0.953, n = 85)$$

其中,*y* 为胡伯尔值;*x* 功能木质部直径;*r* 为相关系数;*n* 为样本数。

实验和模拟的结果表明,随着功能木质部直径的增加,油松和侧柏苗木的胡伯尔值呈线性增加,比如,油松苗木功能木质部直径 18mm 的茎段,其胡伯尔值(0.059cm · g⁻¹)是直径 2mm 茎段胡伯尔值(0.024cm · g⁻¹)的 2.46 倍;侧柏苗木功能木质部直径 20mm 的茎段,其胡伯尔值(0.0317cm · g⁻¹)是直径 2mm 茎段胡伯尔值(0.0101cm · g⁻¹)的 3.14 倍。说明功能木质部直径越粗的枝条,其为单位末端叶供给水分所投入的茎干组织越多。但就相同功能木质部直径的茎段而言,油松苗木的胡伯尔值高于侧柏苗木,以功能木质部直径 6mm 的茎段为例,油松苗木的胡伯尔值(0.0323cm · g⁻¹)是侧柏苗木(0.0149cm · g⁻¹)的 2.17 倍,说明油松苗木为单位末端叶供给水分所投入的茎干组织较侧柏苗木多。

3 结论

(1)油松和侧柏苗木都存在水分运输的限速区,在限速区,尽管其功能木质部直径高于对应非限速区,但其导水率却低于对应非限速区。限速区的存在,增大了分枝水分运输的阻力,使苗木的水分分配更有利于主干和顶梢等分枝较少的部位,有利于苗木个体的生存竞争。

(2)无论在限速区还是在非限速区,油松和侧柏苗木的导水率都随功能木质部直径的增加而增大,但在功能木质部直径相同的情况下,油松苗木的导水率高于侧柏苗木,说明油苗木松功能木质部的导水能力高于侧柏苗木。在非限速区,可以用二项式来模拟导水率和茎段直径的相关关系,在限速区则可用线性方程模拟二者之间的相关关系。

(3)油松和侧柏苗木的比导率都随功能木质部直径的增加而呈对数增长,说明粗枝的孔隙度和水分运输效率远远高于细枝。同时油松的比导率高于侧柏,说明在功能木质部直径相同的情况下,油松苗木木质部的孔隙度和水分运输效率较侧柏苗木高。

(4)油松和侧柏苗木的叶比导率都随功能木质部直径的增加而呈线性增长,这说明较粗的枝条较多次分枝的末端细小枝条更易获得水分。在油松和侧柏苗木中,水分运输的主要阻力集中于那些细小的末端分枝,这样,苗木在水分胁迫的情况下,将首先牺牲那些光合积累较小的枝条,而尽可能保证主干和力枝等光合积累较大器官的供水和存活,这是油松侧柏苗木抵御干旱胁迫的重要生态策略之一。但油松的叶比导率高于侧柏,说明在平均蒸腾流密度 E 相同的情况下,相同直径的油松苗木较侧柏苗木更易获得水分。

(5)油松和侧柏苗木的胡伯尔值都随功能木质部直径的增加而呈线性增长,说明功能木质部直径越粗的枝条,其为单位末端叶供给水分所投入的茎干组织越多。同时油松的胡伯尔值高于侧柏,则说明油松苗木为单位末端叶供给水分所投入的茎干组织较侧柏苗木多。

参考文献

- [1] Li J Y(李吉跃), Zhai H B(翟洪波). Hydraulic architecture and drought resistance of woody plants. *Chin. J. Appl. Ecol.* (in Chinese)(应用生态学报), 2000, **11**(2): 301~305.
- [2] Tyree M T & Ewers F W. The hydraulic architecture of trees and other woody plants. *New Phytol.* 1991, **119**: 345~360.
- [3] Li J Y(李吉跃). Studies on drought tolerance of some main tree species used in afforestation in Taihang Mountain Region. *J. Beijing For Univ.* (in Chinese)(北京林业大学学报) (I)~(VI), 1991, **13**(supp. 1~2): 1~24; 230~280.
- [4] Li J Y(李吉跃), Zhang J G(张建国), Jiang J P(姜金璞). Studies on classification models and mechanisms of drought tolerance of chief afforestation species in the northern part of China. *J. Beijing For Univ.* (in Chinese)(北京林业大学学报) (I), 1993, **15**(3): 1~9.
- [5] Zhang J G(张建国), Li J Y(李吉跃), Jiang J P(姜金璞). A study on water parameters of plantations in mountain areas of west Beijing(I)~(III). *J. Beijing For Univ.* (in Chinese)(北京林业大学学报), 1994, **16**(1): 1~12.
- [6] Zhang S X(张硕新), Richter H. The refilling of embolized xylem in *Taxus baccata*. *J. Northwest For College*(in Chinese)(西北林学院学报), 1996, **11**: 6~8.
- [7] Li J L(李家龙). The method for rapidly measuring conifer leaf area. *Chin. For Sci. Tech. Com.* (in Chinese)(林业科技通讯), 1985, (10): 3.
- [8] Zimmermann M H. Hydraulic architecture of some diffuse-porous trees. *Can. J. Bot.*, 1978, **56**: 2286~2295.
- [9] Sperry J R, Tyree M T. A method for measuring hydraulic conductivity and embolism in xylem. *Plant, Cell and Environment*. 1988, **11**: 35~40.

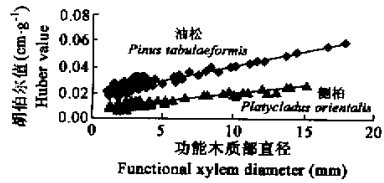


图6 油松侧柏苗木功能木质部直径和胡伯尔值的关系

Fig. 6 The relation of functional xylem diameter of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* seedlings and Huber value