

## 木材中非等温水分迁移的研究

李贤军 张璧光 李文军 李延军

(北京林业大学材料科学与技术学院)

**摘要:**为研究微波真空等高强度干燥过程中,温度梯度对木材中水分迁移的影响程度,该文通过试验测定了封闭马尾松木材试件在短期温度梯度作用下,木材内部温度场和含水率场的分布,含水率梯度与温度梯度比值的大小( $dM/dT$ )及其影响因素。试验结果表明:在短期温度梯度的作用下,木材内部的水分会从热端向冷端迁移,使冷端的木材含水率高于热端,形成方向相反的温度梯度场和含水率梯度场,且 $dM/dT$ 在 $0.9\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下;木材内温度、初始含水率和作用时间是影响 $dM/dT$ 的重要因素;随着木材温度和初始含水率的增加,木材中的 $dM/dT$ 越大;随着作用时间的延长,木材中的 $dM/dT$ 增加。

**关键词:**微波真空, 非等温水分迁移, 温度梯度, 含水率梯度

**中图分类号:**S781.3   **文献标识码:**A   **文章编号:**1000-1522(2005)02-0096-05

LI Xian-jun; ZHANG Bi-guang; LI Wen-jun; LI Yan-jun. **Nonisothermal moisture movement in wood.** *Journal of Beijing Forestry University* (2005) 27(2) 96-100 [Ch, 22 ref.] College of Material Science and Technology, Beijing Forestry University, 100083, P.R.China.

In order to study the effect of temperature gradient on moisture movement during high intensive drying such as microwave-vacuum drying, the authors measured the temperature and moisture content profiles in sealed wood whose opposite faces were subjected to temperature gradient for a short time. Then the absolute value of the ratio of the moisture content gradient to the temperature gradient ( $dM/dT$ ) was calculated. The initial moisture content, temperature range and experimental period are all important factors affecting the experiment. The results indicated that moisture fluxed into the wood from the warm surface to the cold one even if opposite faces of the sealed wood assembly were exposed continuously to different but constant temperatures for a short period, the moisture content in cold surface was higher than that in the warm face, the moisture content gradient opposite to the temperature gradient was established, and the  $dM/dT$  is below  $0.9\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Some factors, such as experimental time, temperature and initial moisture content in wood, had significant effects on  $dM/dT$ , which was found to increase with these factors.

**Key words** microwave-vacuum, nonisothermal moisture movement, temperature gradient, moisture content gradient

木材干燥是一个非常复杂的热、质传递过程,利用数学模型预测木材干燥时间和干燥过程中木材内部水分、温度的分布,实现对干燥过程进行数学模拟控制具有重要的意义。长期以来,众多学者对木材中水分的迁移机理进行了深入的研究,提出了许多不同的观点,建立了一些不同类型的水分迁移模型<sup>[1]</sup>。一般研究认为,在常规对流干燥中,直接采用傅立叶传导方程和斐克(Fick)扩散定律建立起来的热、质传递模型能够较好地定量描述木材的干燥过程。该模型把水分扩散和热量传递分别看成两个独立的过程,而未考虑彼此间的耦合作用,即忽略了温

度梯度所引起的质迁移(Soret 效应)和水分迁移引起的热迁移(Dufor 效应)。同时该模型不能较好地模拟高频、微波等一些高强度快速干燥方法的干燥过程。于是一些学者在原有菲克扩散模型的基础上对其进行修正,加入了热扩散项,认为在微波真空等一些高强度的干燥过程中应考虑温度梯度对水分扩散的影响<sup>[2-6]</sup>。但有些学者认为热扩散对质迁移的影响很小,在实际中可以忽略不计,甚至认为不存在热扩散现象<sup>[7,8]</sup>。为了验证热扩散是否存在以及它的影响有多大,国外一些学者对此进行了初步的试验研究和理论探讨<sup>[9-11]</sup>。结果表明,木材在长时间温

收稿日期:2004-05-25

http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(59876005)。

第一作者:李贤军,博士生,讲师。主要研究方向:木材干燥。电话:010-62391683 Email:lxjmu@sohu.com 地址:100083 北京林业大学材料科学与技术学院。

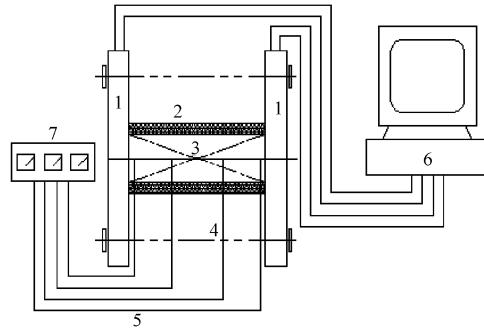
责任作者:张璧光,教授,博士生导师。主要研究方向:木材干燥。电话:010-62337960 Email:zhbguang@sohu.com 地址:同上。

度梯度的作用下,其内部确实存在热扩散现象,其大小因木材温度、含水率不同而异。由于试验时间很长(单一试件至少试验5个星期以上),所做试件的数量有限,其规律性有待进一步考证。并且对于微波真空等高强度干燥而言,其总的干燥时间是以分或小时计算。对于在短期温度梯度的作用下,木材中是否存在热扩散,温度梯度对木材中水分迁移的影响程度有多大,目前国内外报道均较少。本文主要通过试验研究木材试件在短期温度梯度的作用下,木材中是否存在热扩散效应,热扩散效应的大小及其影响因素,以期为探索微波真空等高强度干燥过程中的水分迁移机理和建立干燥过程的数学模型提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料及试件准备

本试验所用马尾松木材采自广西柳州。将原木加工成2 m长的木段,再锯制成30 mm厚的标准径切板,在大气条件下缓慢干燥至含水率在纤维饱和点以下(约为25%),再将板材加工成24 mm×24 mm×24 mm的立方体试件。将不同组试验试材分别放置在磨口玻璃瓶中密封保存1个半月,以便使同组试验的不同木材试件具有相同的初始含水率(研究含水率对热扩散效应影响的试件除外)。



1 水浴锅 2 保温层 3 木材试件 4 张紧装置  
5 热电偶 6 计算机 7 多点温度检测仪

FIGURE 1 Schematic diagram showing the experimental setting for nonisothermal moisture movement

### 1.2 仪器与设备

试验系统见图1。恒温加热装置,主要由两个恒温水浴锅和张紧装置构成,其温度控制精度为±1°C;4通道的温度巡检仪及热电偶,热电偶直径为1 mm,温度测量精度为±1°C;游标卡尺,精度为0.02 mm;电子天平(日本岛津AY120),精度为0.0001 g。

### 1.3 方法与过程

将平衡好的试件用环氧树脂和铝箔把6个表面全部封闭,以保证在试验过程中木材与外界之间不发生水分的交换。再将封闭好的试件在磨口玻璃瓶中放置两天,待树脂充分固化后用直径为1 mm的

钻头在试件弦面上沿横纹方向等距的钻4个孔,孔的深度为试件厚度的一半,然后埋入直径为1 mm的铠装镍铬-康铜热电偶,再用705硅橡胶封闭热电偶与孔之间的微小缝隙,用聚乙烯保温材料紧密包裹4个表面(两个相对的径面不包裹),尽量使这4个表面与外界不发生热量交换。最后将包裹好的试件夹紧在由两个恒温水浴锅组成的恒温加热装置中(装入试件前两水浴锅已经分别升温至不同的试验设定温度,且左端高于右端),使试件的两个径切面与两水浴锅的壁面紧密接触,在试件两径切面之间营造一个稳定的温度场,使热量和水分都沿木材弦向迁移。

试验开始后,每隔1 h 纪录木材中4个测点的温度;当试验到规定时间时,最后1次纪录温度值。再从试验装置中取下试件,立即用锋利的刀,从试件冷端开始将试件沿水分迁移和热量传导方向(弦向)等分成11块,测量新劈开面与热端的距离及每1小试片的含水率。每组试验重复3次,取其平均值作为试验结果。

## 2 理论分析

Skaar 和 Siau 基于活化水分子浓度梯度( $dM/dX$ )推导出了木材横纹方向吸着水迁移的稳态扩散方程,该方程在 Fick 第一定律的基础上加入了热扩散项<sup>[12,13]</sup>,将吸着水范围内木材中水分的移动驱动势归结为两种驱动力,一种为含水率梯度(或为水势梯度),另一种为温度梯度。其具体的迁移方程可用下式表达:

$$J = \frac{K_m M}{RT - M \partial E_b / \partial M} \left[ \frac{E_b}{T} \frac{dT}{dX} + \frac{RT - M \partial E_b / \partial M}{M} \frac{dM}{dX} \right] \quad (1)$$

式中,  $J$  是水分流量,  $g/(cm^2 \cdot s)$ ;  $K_m$  是基于含水率梯度的水蒸气迁移系数,  $g/(cm \cdot s \cdot \%)$ ;  $M$  是含水率, %;  $T$  是开尔文温度, K;  $R$  是普适气体常数, 8.37 J/(mol · K);  $E_b$  是吸着水活化能, J/mol。

当木材含水率在5%~25%之间时,  $E_b$  与  $M$  之间具有下列线性关系<sup>[14]</sup>:

$$E_b = 9200 - 70 M \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得到下式:

$$J = - \frac{K_m M}{RT + 70 M} \left[ \frac{9200 - 70 M}{T} \frac{dT}{dX} + \frac{RT + 70 M}{M} \frac{dM}{dX} \right] \quad (3)$$

如图1所示,当木材试件在外界恒定温度梯度作用下达到稳定状态时,木材中因温度梯度而产生的由左向右的水分流量将被因含水率梯度而产生的由右向左的水分流量所抵消,此时木材中任意点的温度和含水率将不再发生变化,其净水分流量为零,

即:

$$J = 0 \quad (4)$$

将式(3)与式(4)联立,可以得到:

$$\frac{dM}{dT} = -\frac{9200 - 70M}{RT^2 + 70T} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,当木材含水率在纤维饱和点以下,且木材含水率不为零时,若木材在恒定外界温度梯度的作用下处于平衡状态,则木材中任意点的  $dM/dT$  都不会为零。这从理论上证明了木材内部温度梯度的存在确实能引起水分的迁移,即产生了热扩散效应,并且木材内温度梯度的方向与含水率梯度的方向相反。即只要存在足够的温度梯度,木材中的水分就能从低含水率区域向高含水率区域迁移。

### 3 结果与讨论

考虑到在用高频、微波真空等高强度干燥方法干燥木材时,其干燥时间基本在 12 h 以内,在本试验中除了研究时间对热扩散效应的影响外,其余所有试件的试验时间都取 12 h。根据试验测试和计算出来的数据,绘制不同条件下木材试件内部的温度和含水率分布曲线,如图 2~4。

试验发现温度场在木材内部的传播速度很快,在所有试验中,试件内温度场在试验开始后的 2 h 内都能达到稳定状态,且各点温度与  $X$ (距热端的距离)具有很明显的线性关系,其相关系数的平方( $R^2$ )都在 0.99 以上。试件内各点含水率与  $X$  的关系则因试验时间的不同而表现出对数和指数关系。从这些图中可以看出,试件的热端到冷端,木材含水率随着温度的逐渐降低而升高,在试件内部出现与温度梯度相反的含水率梯度场。这证明了即使在较短的时间内木材中也发生了热扩散现象,其大小用  $dM/dT$  表示。

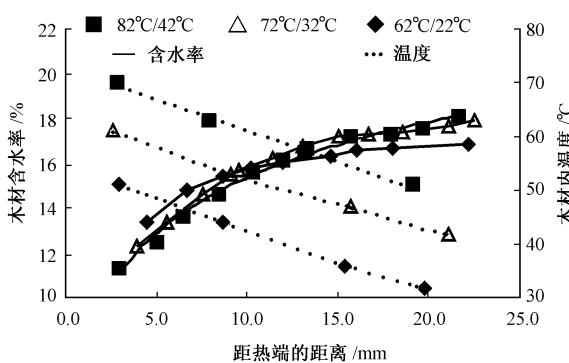


图 2 不同温度时木材内部温度与含水率的分布

FIGURE 2 Temperature and moisture content distributions in samples at different temperatures

#### 3.1 温度对 $dM/dT$ 的影响

为研究温度对热扩散效应的影响,使试件两端保持相同的温度差(40°C),即所有试件受相同温度

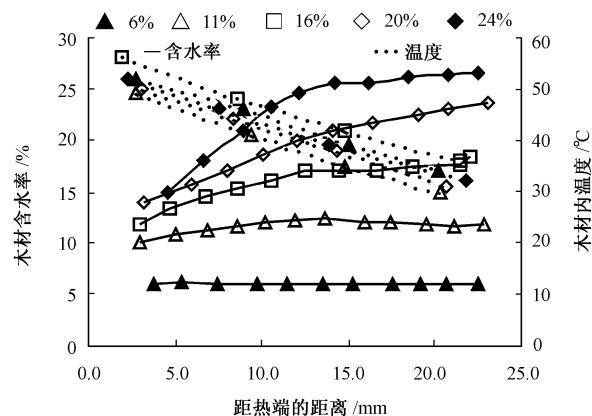


图 3 不同初含水率时木材内部温度与含水率的分布

FIGURE 3 Temperature and moisture content distributions in samples at different initial moisture contents

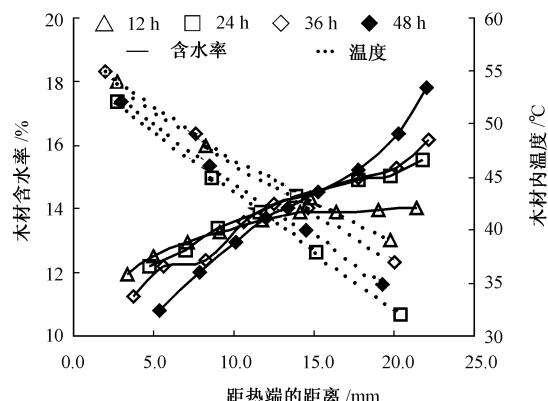


图 4 不同时间时木材内部温度与含水率的分布

FIGURE 4 Temperature and moisture content distributions in samples at different time

梯度的作用,但分别具有不同的热端和冷端温度(62°C/22°C、72°C/32°C、82°C/42°C),试验时间为 12 h,试件初含水率为 15.24%~15.57%。试验结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,木材试件温度越高,木材中热端的含水率越低,而冷端的含水率越高,形成的含水率梯度越大;且当木材温度升高时,木材内的温度梯度基本不变。因此,随着温度的增加,  $dM/dT$  增大,热扩散效应越明显。

在本试验中,当木材试件冷、热端温度为 62°C/22°C、72°C/32°C、82°C/42°C 时,其  $dM/dT$  值分别为 0.219 1、0.380 6、0.435 6%/°C。这表明温度的高低对热扩散效应有很明显的影响。这是因为随着温度的提高,木材中的水分子能获得更多的能量,有更多数目的水分子能克服木材中吸着点对它的束缚而产生迁移<sup>[15]</sup>,而木材中水分迁移的速率正比于木材中超过束缚能的水分子的数量<sup>[11]</sup>,因此,在其他条件相同时,温度越高,  $dM/dT$  值越大。

### 3.2 含水率对 $dM/dT$ 的影响

从图3中可以看出,当木材平均初始含水率较高时(试件热端和冷端温度分别为62°C/22°C),木材试件冷端与热端的含水率差值越大,而温度梯度基本保持不变,所以其热扩散效应越明显,相应的  $dM/dT$  值也越大,表现出热扩散随木材含水率增加而更加明显的趋势。

根据 Dent 水分吸着理论<sup>[16-18]</sup>,木材中的吸着水分为初级吸着水和次级吸着水,初级吸着水分子被直接吸着在木材细胞壁中的初级吸着点上(如木材细胞壁中的羟基),具有较高的束缚能,其水分的迁移能力很弱;而次级吸着水分子被吸着在次级吸着点上,束缚能较低,其水分的迁移能力较强。当木材含水率很低时(10%以下),木材中的全部或者绝大部分吸着水分子为初级吸着水分子,被牢牢地吸着在初级吸着点上,具有很高的束缚能,所以水分的迁移能力很弱,  $dM/dT$  自然就很小。因此,在本试验中当木材含水率为6%左右时,我们几乎观察不到热迁移现象。随着木材含水率的升高,次级吸着水从无到有,并逐渐增厚形成由多层次次级吸着水分子层构成的次级吸着水。次级吸着水分子与次级吸着点之间的结合比较弱,在获得外界能量后容易摆脱次级吸着点的束缚而产生迁移。在本试验中表现为木材中的水分子在获得能量后,更容易从热端向冷端迁移。

当木材初始含水率为6%、11%、16%、20%、24%时,其  $dM/dT$  值分别为0.0112、0.0906、0.3569、0.5796、0.8812%/°C。所以木材初始平均含水率越高,其热扩散效应越明显,  $dM/dT$  值越大。

### 3.3 时间对 $dM/dT$ 的影响

为了进一步了解短期内,木材内温度与含水率场、热扩散效应随时间的变化规律,将试验时间分别设为12、24、36、48 h,试件的初含水率为13.18%~13.70%,热端和冷端的温度分别为62、22°C。

从图4中可以看出,随着时间的延长,试件内部的温度分布仍然维持线性状态(即  $T$  与  $X$  保持线性关系),且内部各点温度基本保持恒定。这说明热量在木材内部的传导较快,在外界稳定温度场的作用下,木材内部能在较短的时间内重新建立相应的稳定温度场,这一结论与前人的研究成果一致<sup>[11]</sup>;而木材内的含水率场则随着时间的延长而缓慢发生变化,试验时间越长,热端的含水率越低,冷端的含水率越高,整个试件的含水率梯度越大,热扩散效应越显著。当试验时间为12、24、36、48 h时,木材中  $dM/dT$  值分别为0.1616、0.2333、0.2468、0.3504%/°C。

对不同试验条件下木材内部含水率与  $X$  的关系进行回归,发现其含水率分布曲线逐渐由对数形式向指数形式过渡。当试验时间在24 h以内时,用

对数函数对含水率的分布曲线进行拟合,其拟合程度较高( $R^2$  在0.96以上);当试验时间达到48 h时,用指数函数对试验数据点进行拟合,其  $R^2$  在0.95以上。

## 4 结 论

1)木材试件即使在外界短期温度梯度的作用下,木材内部水分也会沿着与含水率梯度相反的方向移动,产生热扩散现象,含水率梯度与温度梯度的比值在0.9%/°C以下,且方向相反。

2)在外界稳定温度梯度的作用下,木材中温度场的分布能在很短的时间内(1~2 h)重新达到稳定状态,并呈线性分布;而木材中含水率场则需要很长的时间才能重新达到稳定状态,其含水率的分布曲线随着时间的变化逐渐由对数形式向指数形式过渡。

3)热迁移效应的大小与木材试件的温度、初含水率、作用时间等因素密切相关。随着木材温度、木材初含水率的增加和作用时间的延长,木材中的热扩散效应越明显,  $dM/dT$  越大。

本研究考虑了温度、木材初含水率和作用时间对热扩散效应的影响规律,关于温度梯度、树种、不同纹理方向对热扩散效应的影响将另文论述。

## 参 考 文 献

- [1] MUJUMDAR A. *Advances in drying* [M]. New York: Springer-Verlag, 1987: 199~240.
- [2] PERRE P, TURNER I W. The use of numerical simulation as a cognitive tool for studying the microwave drying of softwood in an over-sized waveguide [J]. *Wood Science and Technology*, 1999, 33: 445~464.
- [3] JUMAH R Y, RAGHAVAN G S V. Analysis of heat and mass transfer during combined microwave-convective spouted-bed drying [J]. *Drying Technology*, 2001, 19(3/4): 485~506.
- [4] JOSEPH R G, PERALTA P N. Nonisothermal radiofrequency drying of red oak [J]. *Wood and Fiber Science*, 2001, 33(3): 476~485.
- [5] DEMIREL Y, SANDAL S I. Linear-nonequilibrium thermodynamics theory for coupled heat and mass transport [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44, 2: 439~2 451.
- [6] HARTNETT J P, MINKOWYCZ W J. Assessment of mass and heat transfer mechanisms in unsaturated soil [J]. *Int Comm Heat Mass Transfer*, 2002, 29(4): 531~545.
- [7] BRAMHALL G. Sorption diffusion in wood [J]. *Wood Sci*, 1979, 12(1): 3~13.
- [8] NELSON R M. Diffusion of bound water in wood [J]. *Wood Science and Technology*, 1986, 20, 309~328.
- [9] CHOONG E T. Movement of moisture through a softwood in the hygroscopic range [J]. *Forest Products Journal*, 1963, 13(11): 489~498.
- [10] QUARLES S L, ERICKSON R W. Examples of nonisothermal moisture movement in wood [J]. *Wood and Fiber Science*, 1990, 22(3): 314~325.
- [11] PERALTA P N, SKAAR C. Experiments on steady-state nonisothermal moisture movement in wood [J]. *Wood and Fiber Science*, 1993, 25(2): 124~135.

- [12] SIAU J F, BABIAK M. Experiments on nonisothermal moisture movement in wood [J]. *Wood and Fiber Science*, 1983, 15(1): 40-46.
- [13] SIAU J F, JIN Z. Nonisothermal moisture diffusion experiments analyzed by four alternative equations [J]. *Wood Science and Technology*, 1985, 19: 151-157.
- [14] SIAU J F. *Transport processes in wood* [M]. New York: Springer-Verlag, 1984: 161-163.
- [15] CHOONG E T. Diffusion coefficients of softwoods by steady and theoretical methods [J]. *Forest Products Journal*, 1956, 15(1): 21-27.
- [16] DENT R W. A multilayer theory for gas sorption I. Sorption of single gas [J]. *Text Res J*, 1977, 40: 145-152.
- [17] SKAAR C. *Wood-water relations* [M]. New York: Springer-Verlag, 1982: 89-93.
- [18] 赵广杰. 木材细胞壁中吸着水的介电弛豫 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2002: 20-33.
- ZHAO G J. *Dielectric relaxation of water adsorbed on wood cell wall* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002.
- [19] TIEN C L, MAJUMDAR A. Experimental and numerical study of microwave drying in unsaturated porous material [J]. *Int Comm Heat Mass Transfer*, 2001, 28(5): 605-616.
- [20] NI H, DATTA A K, TORRANCE K E. Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: a multiphase porous media model [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, 42, 1: 501-512.
- [21] 伊松林, 张璧光, 常建民. 木材真空-浮压干燥过程中自由水迁移特性 [J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(4): 59-63.
- YI S L, ZHANG B G, CHANG J M. Characteristics of free water movement in wood drying process under vacuum-floating pressure [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, 25(4): 59-63.
- [22] 伊松林, 张璧光, 常建民. 木材真空-浮压干燥过程中吸着水迁移特性分析 [J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(6): 60-63.
- YI S L, ZHANG B G, CHANG J M. Analysis of characteristics of adsorbed water movement in wood drying process under vacuum-floating pressure [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, 25(6): 60-63.

(责任编辑 董晓燕)

## 核桃种间杂交育种新成果

王哲理

(河南省洛宁县林业局)

半个多世纪来国外利用黑核桃与核桃杂交选育出的良种具有抗逆性强、生长快的特点,已应用于营造速生硬阔用材林或果材兼用林。我国在提高核桃品质和早实丰产等性状的良种选育工作中已取得了显著成效,许多新的优良品种已应用于生产;而在以培育核桃优质用材,提高其适应性为目标的良种选育工作方面尚处于起步阶段,尤其以速生用材为目的的种间杂交育种研究尚未见有报道。

笔者出于对科学的执着和责任感,自选项目、自筹经费于1992年开始进行核桃杂交育种研究。研究基地设于河南省洛宁县马店乡胡原村的坡地上。笔者对核桃属植物采用种间单杂交方法进行了杂交育种研究工作,经过十余年的努力取得了以下新成果:

1) 魁核桃(*J. major*)和强特勒核桃(*J. regia* cv. *Chandler*)杂交,获得少量杂交种(代号“黑杂1号”),栽植在洛宁县马店乡胡原村朱家坡的一个土壤比较贫瘠的山坡上。

2) 我国的铁核桃(*J. sigillata*)与美国的东部黑核桃(*J. nigra*)杂交,获得的首批杂交子代(代号“黑杂2号”),已分别栽植于洛阳、郑州和太原市等地。

这些杂交种表现的共同特点是:①生长快:“黑杂1号”三年生树高3.1 m、胸径3.8 cm,七年生树高达7 m、胸径8 cm、材积0.0105 m<sup>3</sup>,十年生树高10.6 m、胸径17 cm、材积0.0161 m<sup>3</sup>,分别为同一立地条件下生长的东部黑核桃(*J. nigra*)优势木的226%、192%、113%、222%和132%、174%,材积分别为509%和708%;而且树干通直;栽植在洛阳市邙岭干旱黄土坡上的“黑杂2号”当年树高1.1 m,地径3.5 cm,第二年生树高3.1 m,地径7.5 cm,其速生性可与杨树相媲美。②适应性较强:较耐旱瘠薄(成活后从未浇水、施肥),1997年试区遇到了少有的旱灾,4~8月份生长期降雨量仅260 mm,旱地秋作物绝收,在同样条件下生长的核桃、黑核桃、刺槐和杨树等,叶片发黄并出现大量落叶,生长缓慢,而“黑杂1号”叶片依然浓绿,当年高生长超过了2 m;这些杂交种比较耐寒,在河南、北京、山西等地均可安全越冬。③病虫害较少:连续十年观察,杂交树植株未发现树干害虫和病害,也无严重的食叶害虫,因而从未用过农药。

该项研究与国外相比,虽然起步晚了数十年,但我们毕竟迈出了第一步。这些杂交种核桃将是营造农用林、优质速生硬阔用材林和城乡绿化的新一代优良树种,在我国西部和北方生态与经济建设中有广阔的发展前景。