

# 重庆市四面山几种人工林地土壤水分特性研究

王冉<sup>1</sup>, 张洪江<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 杜士才<sup>2</sup>, 程金花<sup>1</sup>, 吴煜禾<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 重庆市林业局, 重庆 401147)

**摘 要:** 采用压力膜仪法测定了重庆市四面山 5 种人工林地(杉木人工纯林, 杉木×马尾松人工混交林, 木荷×香樟×思栎×枫香人工混交林, 木荷×思栎人工混交林, 杉木×马尾松×木荷人工混交林)的土壤水分特征曲线, 并据此对这 5 种人工林地的土壤水分特性进行了分析。结果表明, 采用 Gardner 于 1970 提出的经验方程  $\theta = aS^{-b}$  能够较好地模拟这 5 种人工林的土壤水分含量与土壤水吸力间的关系, 且拟合后的决定系数均达到 0.99; 通过对拟合参数  $a$  值的比较得出, 5 种人工林地的持水能力的顺序为: 木荷×杉木×马尾松人工林( $a=0.328$ )>木荷×香樟×思栎×枫香人工林( $a=0.248$ )>杉木人工林( $a=0.225$ )>木荷×思栎人工林( $a=0.218$ )>杉木×马尾松人工林( $a=0.206$ ); 通过拟合方程计算得出 5 种人工林土壤有效水上限吸力值为 0.03 MPa 比较合适, 而根据比水容量的计算显示, 吸力值为 0.15 MPa 时, 植物所能吸收到的土壤水量显著减少, 故把此吸力值作为易有效水与难有效水的界限; 通过比较  $ab$  值(即拟合参数  $a$  与  $b$  的乘积, 土壤水吸力  $S=1.00 \times 10^5$  Pa 时的比水容量)和易有效水含量两个指标得出, 5 种林地不同土层的供水性能变化规律性不明显, 但 5 种人工林地整体的供水性能顺序为: 木荷×香樟×思栎×枫香人工林( $ab=0.065$ , 易有效水 11.704)>杉木人工林( $ab=0.062$ , 易有效水 10.677)>木荷×思栎人工林( $ab=0.058$ , 易有效水 10.485)>木荷×杉木×马尾松人工林( $ab=0.058$ , 易有效水 10.003)>杉木×马尾松人工林( $ab=0.056$ , 易有效水 9.980)。

**关键词:** 四面山; 土壤水分特征曲线; 持水能力; 供水能力

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)02-0088-07

中图分类号: 152.7

## Soil Water Characteristics of Different Plantations in Simian Mountain of Chongqing City

WANG Ran<sup>1</sup>, ZHANG Hong-jiang<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, DU Shi-cai<sup>2</sup>, CHENG Jin-hua<sup>1</sup>, WU Yu-he<sup>1</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Chongqing Forestry Bureau, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** Soil water characteristic curves were determined using a pressure-membrane extraction apparatus for the soils collected on five different plantations, i. e., pure fir forest(*Cunninghamia lanceolata*), fir and pine(*Pinus massoniana*) mixed forest, and three other mixed broad-leaved forest(*Schima superba*×*Cinnamomum camphora*×*Lithocarpus glaber*×*Liquidambar formsana*, *Schima superba*×*Lithocarpus glaber* and *Cunninghamia lanceolata*×*Pinus massoniana*×*Schima superba*) in Simian Mountain of Chongqing City. The results show that the empirical equation ( $\theta = aS^{-b}$ ) proposed Gardner (1970) described well the relationship between soil moisture contents and soil water suctions for all the soils from the five forests with coefficients of determination greater than 0.99. In terms of the fitting parameter  $a$  values, the soil water retention capability of the five forest soils as in order from high to low were *Cunninghamia lanceolata*×*Pinus massoniana*×*Schima superba* ( $a=0.328$ ), *Schima superba*×*Cinnamomum camphora*×*Lithocarpus glaber*×*Liquidambar formsana* ( $a=0.248$ ), *Cunninghamia lanceolata* ( $a=0.225$ ), *Schima superba*×*Lithocarpus glaber* ( $a=0.218$ ), and *Cunninghamia lanceolata*×*Pinus massoniana* ( $a=0.206$ ), respectively. According to the regression equations, the soil water suction upper limit of soil available water was approximately 0.03 MPa. The specific water capacity indicated that soil available water decreased substantially when the suction is

收稿日期: 2010-08-25

修回日期: 2010-09-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(40771042; 30900866); “十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAD03A1304)

作者简介: 王冉(1986—), 男(汉族), 河北省邯郸市人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持与森林土壤。E-mail: bjfu\_wangran@126.com。

通信作者: 张洪江(1955—), 男(汉族), 河北省易县人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为土壤侵蚀与流域管理。E-mail: zhanghj@bjfu.edu.cn。

greater than 0.15 MPa, which implies that 0.15 MPa might be the critical value for differentiation of readily available water and slowly available water. According to the  $a \times b$  values (the product of fitting parameter  $a$  and  $b$ , which equals to the specific water capacity when the soil suction  $S=1.00 \times 10^5$  Pa) and readily available water contents, although no obvious trend has been identified in the variations of soil water supply capability for different soil layers of five plantations, the soil water supply capability of five plantations in order from high to low were as followed: *Schima superba*  $\times$  *Cinnamomum camphora*  $\times$  *Lithocarpus glaber*  $\times$  *Liquidambar formsana* ( $ab=0.065$ , readily available water 11.704)  $>$  *Cunninghamia lanceolata* ( $ab=0.062$ , readily available water 10.677)  $>$  *Schima superba*  $\times$  *Lithocarpus glaber* ( $ab=0.058$ , readily available water 10.485)  $>$  *Cunninghamia lanceolata*  $\times$  *Pinus massoniana*  $\times$  *Schima superba* ( $ab=0.058$ , readily available water 10.003)  $>$  *Cunninghamia lanceolata*  $\times$  *Pinus massoniana* ( $ab=0.056$ , readily available water 9.980).

**Keywords:** Simian Mountain; soil water characteristic curve; water retention capability; water supply capability

土壤水分是植被恢复与建设的重要因素之一,因此对林地土壤水分特性研究对于生态环境建设是非常重要的问题之一。土壤水分特征曲线是表述土壤水分特征的基本方法,它表示了土壤水分能量和水分数量之间的基本关系,常用于研究土壤水分的保持和运动<sup>[1]</sup>。国内已有大量关于土壤水分特性的研究,但对于该研究区人工林的土壤水分特性研究较少。

本研究从测定土壤水分特征曲线入手,并利用经验方程的拟合,分析了该区的杉木人工纯林、杉木  $\times$  马尾松人工混交林、木荷  $\times$  枫香  $\times$  思栎  $\times$  香樟人工混交林、木荷  $\times$  思栎人工混交林、杉木  $\times$  马尾松  $\times$  木荷人工混交林这 5 种人工林地的土壤持水性、供水性能及水分的有效性,为该人工植被建设提供一定的理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于重庆市四面山森林资源管理局的张家山管护区,其地理坐标为东经  $106^{\circ}17' - 106^{\circ}31'$ ,北纬  $28^{\circ}31' - 28^{\circ}46'$ ,海拔 900~1 500 m。属亚热带季风性湿润区,多年平均降水量 1 522.3 mm,日最大降雨量 160.5 mm,雨季集中在 5—9 月,占年平均降雨量的 62.17%。多年平均气温  $13.7^{\circ}\text{C}$ ,月平均最高气温为 8 月份,达  $31.5^{\circ}\text{C}$ ,月平均最低气温为 1 月

份,为  $-5.5^{\circ}\text{C}$ ,全年无霜期 285 d。年平均日照时数为 1 082.7 h,生长季 5—9 月份的日照时数约为全年日照时数的 64%。

研究区内林地土壤主要由白垩纪夹关组砖红色长石、石英砂岩夹砖红色、紫红色粉砂岩等风化残积物、冲积物发育而成,主要土壤类型有:黄棕壤、黄壤等。该区地势较陡,土层厚度一般在 10~70 cm 之间,多成呈微酸性至酸性。

植被具有典型的亚热带常绿阔叶林特征。植被主要有杉木 (*Cunninghamia lanceolata*),马尾松 (*Pinus massoniana*),思栎 (*Lithocarpus glaber*),木荷 (*Schima superba*),福建柏 (*Fokienia hodginsii*),香樟 (*Cinnamomum camphora*),枫香 (*Liquidambar formsana*),紫花杜鹃 (*Rhododendron backii*),杜茎山 (*Maesa japonica*),野蔷薇 (*Rosa multiflora* Thunb)等,还有约 20 种竹类植物,以楠竹 (*Phyllostachys pubescens*)最为常见。

### 1.2 标准地选择

在研究区内选取杉木人工纯林、杉木  $\times$  马尾松人工混交林、木荷  $\times$  枫香  $\times$  思栎  $\times$  香樟人工混交林、木荷  $\times$  思栎人工混交林、杉木  $\times$  马尾松  $\times$  木荷人工混交林共 5 种类型林地作为研究对象,并建立标准地进行土壤取样、进行土壤水分特性研究,标准地的基本情况见表 1。

表 1 标准地基本状况

林地类型	海拔/m	坡度/( $^{\circ}$ )	坡向	郁闭度	枯落物储量/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )		
					未分解层	半分解层	分解层
杉木人工纯林	1 171.0	27.0	西北	0.52	2.17	6.65	30.90
杉木 $\times$ 马尾松人工混交林	1 160.9	36.0	东北	0.27	3.94	0.86	197.99
木荷 $\times$ 枫香 $\times$ 思栎 $\times$ 香樟人工混交林	1 160.0	38.5	西南	0.10	2.44	2.57	186.80
木荷 $\times$ 思栎人工混交林	1 166.0	36.0	东北	0.10	5.29	3.89	237.76
杉木 $\times$ 马尾松 $\times$ 木荷人工混交林	1 170.0	28.8	西北	0.50	0.90	10.81	52.76

### 1.3 土壤物理性质测定

在所研究的 5 种人工林林地内分别开挖土壤剖面,由于当地土层较薄(0~70 cm),故剖面深度为 60

cm,分为 0—20 cm,20—40 cm 和 40—60 cm 共 3 个土壤层次采取土样。土样带回实验室分别测定其土壤容重,孔隙度,土壤颗粒组成,质地等物理性质(表 2)<sup>[2]</sup>。

表 2 土壤物理性质

林地类型	层次/ cm	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/%		砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	质地
			毛管孔隙度	非毛管孔隙度				
杉木人工纯林	0—20	0.711	46.18	20.48	71.661	18.607	9.732	砂壤土
	20—40	1.086	22.19	20.49	65.147	21.400	13.453	砂黏壤土
	40—60	1.178	25.73	18.69	66.512	17.483	16.005	砂壤土
杉木×马尾松 人工混交林	0—20	1.002	39.56	5.16	69.137	18.093	12.771	砂壤土
	20—40	1.059	34.63	8.89	66.701	20.652	12.648	砂黏壤土
	40—60	1.229	23.41	7.32	60.001	26.772	13.228	砂黏壤土
木荷×枫香×思栎 ×香樟人工混交林	0—20	0.951	37.60	16.72	71.554	14.430	14.016	砂壤土
	20—40	1.042	30.47	16.16	68.317	18.526	13.157	砂壤土
	40—60	1.106	35.61	14.07	61.737	23.879	14.384	砂黏壤土
木荷×思栎 人工混交林	0—20	0.942	36.21	13.62	77.373	9.693	12.934	壤砂土
	20—40	1.167	32.56	13.03	66.429	16.769	16.802	砂壤土
	40—60	1.307	42.16	7.73	74.751	18.623	6.626	砂壤土
杉木×马尾松× 木荷人工混交林	0—20	1.005	43.43	12.64	65.891	16.970	17.139	砂黏壤土
	20—40	1.252	47.39	7.68	66.107	22.673	11.220	砂黏壤土
	40—60	1.452	35.09	11.26	58.457	20.005	21.537	砂黏壤土

注:土壤颗粒组成按美国制划分。

### 1.4 土壤水分特征曲线测定

使用环刀在不同林地的 0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm 这 3 个土壤层次中进行取样,重复 2 次。将非扰动的土壤样品密封后带回实验室,用 Soilmoisture 公司生产的 1500F1 型 15bar 压力膜仪测定脱湿土壤水分特征曲线。将土样饱和 24 h 后放入压力膜仪中,然后依次设定不同压力值:0.1,0.3,0.5,1.0,1.5,2.0,3.0,4.5,6.0,12.0,15.0 bar(1 bar=0.1 MPa)。当每一个压力平衡后(2~3 d 内出水口不挂水珠即达到平衡)取出土样,用电子天平(精度 0.01g)称重。然后继续把土样放入压力膜仪内,进行下一级压力值的测定,直到最后一级压力值测定完毕。最后将土样取出放入烘箱,在 105℃ 下烘烤 12 h,取出称重,获得每个土样的干土质量。按照公式(1)计算每一级压力下的土壤体积含水量。每级压力下土壤含水量是两个重复土样的平均值。

$$V_i = \frac{(M_{usi} - M_s) / \rho_w}{M_s / \rho_s} \quad (1)$$

式中: $V_i$ ——在压力值  $i$  下的某个土样的体积含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $M_{usi}$ ——压力值  $i$  下某个土样的湿土质量(g); $M_s$ ——某个土样干土质量(g); $\rho_w$ ——水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $\rho_s$ ——某个土样的容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

### 1.5 土壤水分有效性分类方法

土壤水分有效性是指土壤水分能否被植物利用

及其被利用的难易程度<sup>[3]</sup>,据此可将土壤水分划分为有效水和无效水,其中有效水又分为易有效水和难有效水。在大量研究工作中,常将毛管孔隙最大持水量和稳定凋萎湿度之间保持的水分视为对植物可以利用的,称为有效水<sup>[4]</sup>,并且多数研究者把稳定凋萎湿度(即有效水的下限)定为 1.5 MPa 时的含水量,但对于有效水的上限的确定并不一致。

本研究采用 1.5 MPa 作为有效水的下限吸力值,而有效水的上限吸力值通过把各林地不同层次的毛管孔隙最大持水量代入表 3 中的拟合方程计算出其对应的吸力值并求平均值来确定。此外,又通过计算各林地不同层次土壤比水容量并且根据其变化特点确定易有效水和难有效水的界限吸力值。最后,利用上述确定后的界限吸力值代入经验方程得出界限含水量,从而得到各林地不同层次土壤有效水、易有效水、难有效水和无效水的含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同林地土壤水分特征曲线

图 1 为 5 种人工林地不同土壤层次的水分特征曲线,图 2 为 5 种人工林地土壤水分特征曲线比较(5 种人工林地土壤水分特征曲线的土壤含水量是各土层土壤含水量的平均值)。由图 1 可看出,在土壤水吸力相同时,5 种人工林的土壤含水量随深度变化的

规律有所不同:杉木人工林是由上到下土壤的含水量逐渐减少,且相差比较明显;杉木×马尾松人工林为 0—20 cm 层和 20—40 cm 层的土壤含水量明显高于 40—60cm 层,但 0—20cm 和 20—40cm 两层的含水量数值接近,在图上反映出两层的曲线基本重合;木荷×香樟×思栎×枫香人工林 40—60 cm 层的土壤含水量最低,而 0—20 cm 层土壤含水量略大于 20—40 cm 层土壤含水量;木荷×思栎人工林 0—20 cm 层土壤含水量最高,其次是 20—40 cm 层,40—60 cm 层土壤含水量最低;木荷×杉木×马尾松人工林 0—20 cm 层和 20—40 cm 层土壤含水量相近,曲线基本重合,40—60 cm 层含水量略低,其曲线位置稍低,但含水量减小的趋势逐渐变缓,含水量逐渐接近 0—20 cm 和 20—40 cm 两层的土壤含水量。

由图 2 可看出,在相同土壤水吸力下,木荷×杉木×马尾松人工林土壤含水量最高,其次是木荷×香樟×思栎×枫香人工林;木荷×思栎人工林,杉木人工林,杉木×马尾松人工林含水量都较少。总的来看,在相同水吸力下,针阔混交林土壤含水量要高于针叶林的。土壤水分特征曲线的变化规律主要与土壤的本身性质有关<sup>[5]</sup>,因此,土壤的物理性质对其有着重要的影响。研究表明,在低水吸力范围内,土壤所能保持或释放出的水量取决于土壤毛管孔隙的分布,主要是毛管力起作用;而在中高水吸力段主要决定于土壤质地,主要是土壤颗粒表面吸附起作用<sup>[6]</sup>。还有的研究认为,有机质含量多的土壤持水量要多一些<sup>[7]</sup>。此外,可从图 1—2 看出,无论是不同土壤层次之间,还是不同人工林之间,各土壤水分特征曲线都具有相似的形状特点,即在低吸力段(<0.1 MPa),曲线陡直,而在中高吸力段(0.1~1.5 MPa),曲线逐渐趋于平缓。这也说明土壤水分特征曲线主要受土壤物理特性的影响,但植被对其也会产生一定的影响,而这种影响也可能是因为不同植被对土壤的物理性质的改变而产生的。

### 2.2 不同林地的土壤持水性能

土壤水分特征曲线可以反映出土壤的持水性,因此,为了更加明确土壤水吸力与土壤含水量的关系,采用 Gardner<sup>[8]</sup>于 1970 提出的经验方程进行拟合:

$$\theta = aS^{-b} \quad (2)$$

式中: $\theta$ ——体积含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $a, b$ ——拟合参数;  $S$ ——土壤水吸力(MPa)。

利用公式(2)结合实测数据来描述土壤含水量与土壤水吸力的关系,其形式简单,待定参数较少且参数具有明确的意义<sup>[9]</sup>。其中参数  $a$  值决定了曲线的高低,表示土壤持水能力的大小,  $a$  值越大表明土壤的

持水能力越强;而参数  $b$  值决定了曲线的走向,反映了土壤含水量随土壤水吸力增加(或说随土壤基质势减小)而递减的快慢,即当  $a$  值相同时,  $b$  值越大曲线就会越接近水吸力坐标轴<sup>[10]</sup>。

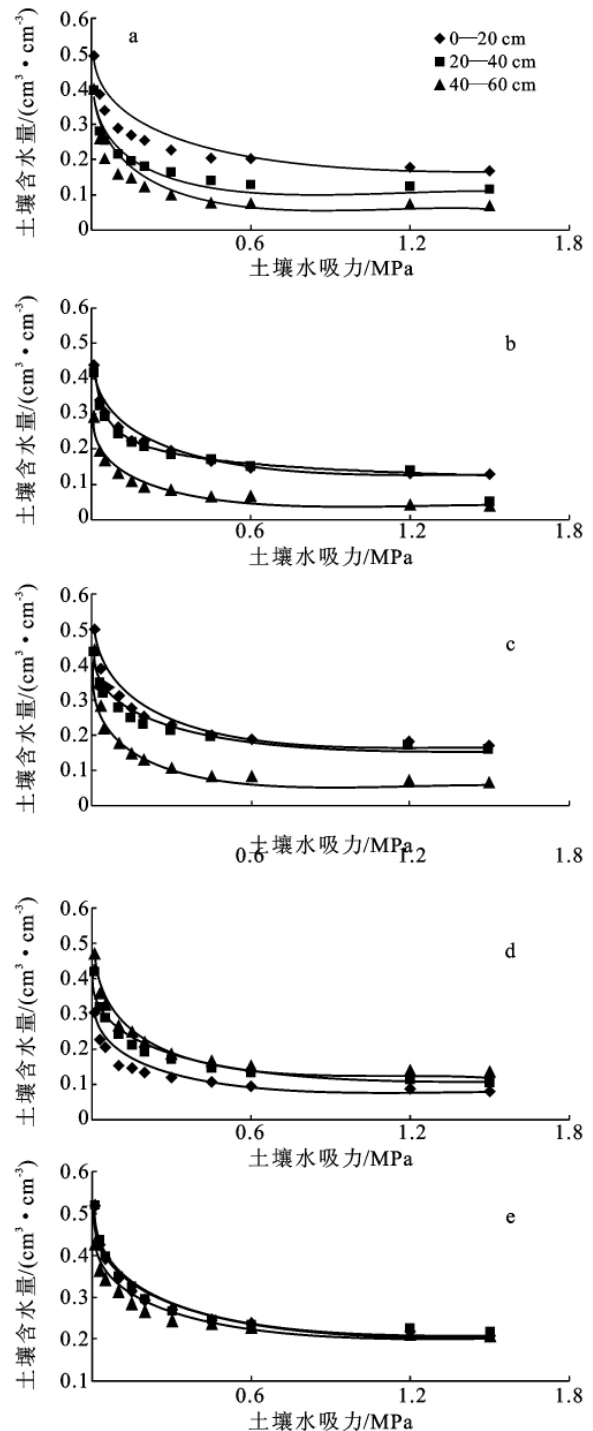


图 1 5 种林地不同土层的土壤水分特征曲线

注: a 杉木人工纯林; b 杉木×马尾松人工混交林; c: 木荷×香樟×思栎×枫香人工混交林; d 木荷×思栎人工混交林; e 木荷×杉木×马尾松人工混交林

表 3 列出了 5 种林地土壤水分特征的拟合方程及其拟合参数。其中所有决定系数  $R^2$  均很高,说明

经验方程  $\theta = aS^{-b}$  很好地描述了各林地及其不同土层的土壤含水量与土壤水吸力之间的关系。由表 3 还可以看出,杉木人工林、杉木×马尾松人工林、木荷×香樟×思栎×枫香人工林的 40—60 cm 层  $a$  值明显小于 0—20 cm, 20—40 cm 两层的  $a$  值,所以这 3 种人工林的底层土壤持水能力要远低于中上层土壤;木荷×思栎人工林各土层的  $a$  值由上而下依次增大,所以其 40—60 cm 层 ( $a=0.261$ ) 最强, 0—20 cm 层 ( $a=0.163$ ) 持水能力最弱, 20—40 cm 层 ( $a=0.231$ ) 次之;杉木×马尾松人工林 0—20 cm 层  $a, b$  值 ( $a=0.251, b=0.248$ ) 与 20—40 cm 层的  $a, b$  值 ( $a=0.243, b=0.237$ ) 差别不大,表明这两层持水能力相当,而 40—60 cm 层 ( $a=0.124$ ) 持水能力最弱,同样木荷×杉木×马尾松人工林 0—20 cm 层 ( $a=0.338, b=0.188$ ) 与 20—40 cm ( $a=0.342, b=0.185$ ) 层持水能力相当,而其 40—60 cm 层 ( $a=0.302$ ) 持水能力低于这两层。

表 3 5 种林地土壤含水量与土壤水吸力关系

林地类型	层次/cm	$a$	$b$	拟合方程	决定系数 $R^2$
杉木人工纯林	0—20	0.294	0.221	$\theta=0.294S^{-0.221}$	0.997
	20—40	0.217	0.212	$\theta=0.217S^{-0.212}$	0.995
	40—60	0.161	0.393	$\theta=0.161S^{-0.393}$	0.992
	整体值	0.225	0.275	$\theta=0.225S^{-0.275}$	0.995
杉木×马尾松人工混交林	0—20	0.251	0.248	$\theta=0.251S^{-0.248}$	0.992
	20—40	0.243	0.237	$\theta=0.243S^{-0.237}$	0.998
	40—60	0.124	0.375	$\theta=0.124S^{-0.375}$	0.995
	整体值	0.206	0.270	$\theta=0.206S^{-0.270}$	0.998
木荷×香樟×思栎×枫香人工混交林	0—20	0.298	0.224	$\theta=0.298S^{-0.224}$	0.991
	20—40	0.270	0.207	$\theta=0.270S^{-0.207}$	0.997
	40—60	0.171	0.409	$\theta=0.171S^{-0.409}$	0.997
	整体值	0.248	0.263	$\theta=0.248S^{-0.263}$	0.996
木荷×思栎人工混交林	0—20	0.163	0.274	$\theta=0.163S^{-0.272}$	0.996
	20—40	0.231	0.274	$\theta=0.231S^{-0.274}$	0.993
	40—60	0.261	0.260	$\theta=0.261S^{-0.260}$	0.992
	整体值	0.218	0.266	$\theta=0.218S^{-0.266}$	0.996
木荷×杉木×马尾松人工混交林	0—20	0.338	0.188	$\theta=0.338S^{-0.188}$	0.996
	20—40	0.342	0.185	$\theta=0.321S^{-0.186}$	0.990
	40—60	0.302	0.153	$\theta=0.302S^{-0.153}$	0.990
	整体值	0.328	0.177	$\theta=0.328S^{-0.177}$	0.994

注:整体值是根据各土层含水量的平均值拟合得出。

### 2.3 不同林地的土壤供水性能

土壤持水性能主要是指土壤吸持水分的能力,但土壤吸持的水分并不能全部释放供植物利用,因此,需要进一步分析不同林地的土壤供水能力。而土壤水分特征曲线的斜率,即比水容重  $C_\theta$ , 恰恰表示单位吸力变化时单位质量(体积)土壤可释放或储存的水量,是评价土壤水分有效性、供水性和耐旱性的重要指标<sup>[11]</sup>。比水容重可以通过对经验方程  $\theta = aS^{-b}$  进

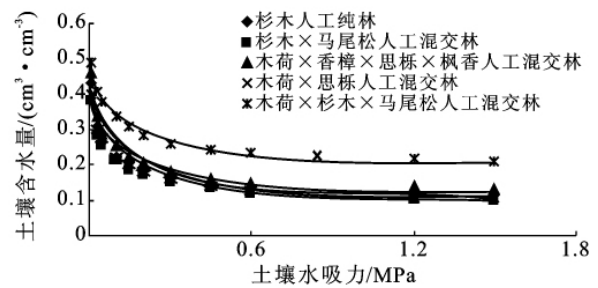


图 2 5 种林地土壤水分特征曲线

此外,由表 3 可以看出,木荷×杉木×马尾松人工林 ( $a=0.328$ ) 持水能力最强,其次是木荷×香樟×思栎×枫香人工林 ( $a=0.248$ ),而杉木人工林 ( $a=0.225$ ),木荷×思栎人工林 ( $a=0.218$ ),杉木×马尾松人工林 ( $a=0.206$ ) 持水能力较弱。这一结论与图 1—2 中土壤特征曲线的变化规律相吻合。

行求导得到式(3),即:

$$C_\theta = \frac{d\theta}{d\psi} = -\frac{d\theta}{dS} = abS^{-(b+1)} \quad (3)$$

式中: $\theta$ ——土壤含水量; $\psi$ ——基模势; $S$ ——土壤水吸力; $S = -\psi$ ;  $ab$  为 Gardner 经验公式中拟合参数  $a$  与  $b$  的乘积,同时也表示土壤水吸力  $S = 1.00 \times 10^5$  Pa 时的比水容量,当  $ab$  值越大时,表明土壤的供水性或耐旱性越好<sup>[12]</sup>。

表 4 列出了不同水吸力下土壤的比水容量,其中整体值是利用表 3 中拟合参数( $a, b$ )值代入式(3)计算得出的。从表 4 可以看出,无论是同一林地不同土层,还是各个林地的整体情况,在不同的吸力阶段,比水容重的变化幅度不同;当吸力在 0.01~0.15 MPa 内,比水容重减小的幅度比较大,数量级由  $10^0$  到  $10^{-1}$  再到  $10^{-2}$ ,土壤释放水分较多;在 0.15~1.5 MPa 内,比水容量减小的幅度较小,数量级由  $10^{-2}$  到  $10^{-3}$ ,土壤释放的水量比较少。这表明植物若以相同的力量来吸水,则在不同的吸力段从土壤中所吸收到的水分会很大的差别。

通过比较表 4 中所列  $ab$  值可知,同一林地不同土层间,杉木人工林 20—40 cm 层供水能力最弱;杉木×马尾松人工林 0—20 cm 层供水能力最强,40—60 cm 层最弱;木荷×香樟×思栎×枫香人工林 20—40 cm 层供水能力最弱,40—60 cm 层最强;木荷×思栎人工林 0—20 cm 层供水能力最弱,40—60 cm 层最强;木荷×杉木×马尾松人工林 40—60 cm 层供水能力最弱,0—20 cm 层与 20—40 cm 层供水能力相当。不同人工林地上,整体的供水性能由强到弱为:木荷×香樟×思栎×枫香人工林,杉木人工林,木荷×思栎人工林,木荷×杉木×马尾松人工林,杉木×马尾松人工林。

表 4 土壤的比水容量

林地类型	土层/ cm	ab	b+1	土壤水吸力/MPa										
				0.01	0.03	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.45	0.60	1.2	1.5
杉木人工 纯林	0—20	0.065	1.22	1.082	0.283	0.152	$6.504 \times 10^{-2}$	$3.964 \times 10^{-2}$	$2.790 \times 10^{-2}$	$1.701 \times 10^{-2}$	$1.037 \times 10^{-2}$	$7.295 \times 10^{-3}$	$3.130 \times 10^{-3}$	$2.383 \times 10^{-3}$
	20—40	0.046	1.21	0.748	0.198	0.16	$4.592 \times 10^{-2}$	$2.809 \times 10^{-2}$	$1.982 \times 10^{-2}$	$1.213 \times 10^{-2}$	$7.419 \times 10^{-3}$	$5.235 \times 10^{-3}$	$2.260 \times 10^{-3}$	$1.724 \times 10^{-3}$
	40—60	0.063	1.39	1.560	0.338	0.166	$6.312 \times 10^{-2}$	$3.588 \times 10^{-2}$	$2.403 \times 10^{-2}$	$1.366 \times 10^{-2}$	$7.766 \times 10^{-3}$	$5.202 \times 10^{-3}$	$1.981 \times 10^{-3}$	$1.452 \times 10^{-3}$
	整体值	0.062	1.28	1.166	0.287	0.150	$6.188 \times 10^{-2}$	$3.690 \times 10^{-2}$	$2.557 \times 10^{-2}$	$1.525 \times 10^{-2}$	$9.092 \times 10^{-3}$	$6.300 \times 10^{-3}$	$2.604 \times 10^{-3}$	$1.959 \times 10^{-3}$
杉木×马 尾松人工 混交林	0—20	0.062	1.25	1.101	0.280	0.148	$6.220 \times 10^{-2}$	$3.750 \times 10^{-2}$	$2.619 \times 10^{-2}$	$1.579 \times 10^{-2}$	$9.519 \times 10^{-3}$	$6.647 \times 10^{-3}$	$2.799 \times 10^{-3}$	$2.118 \times 10^{-3}$
	20—40	0.058	1.24	0.995	0.256	0.136	$5.763 \times 10^{-2}$	$3.490 \times 10^{-2}$	$2.445 \times 10^{-2}$	$1.481 \times 10^{-2}$	$8.967 \times 10^{-3}$	$6.282 \times 10^{-3}$	$2.665 \times 10^{-3}$	$2.022 \times 10^{-3}$
	40—60	0.046	1.38	1.086	0.241	0.120	$4.633 \times 10^{-2}$	$2.658 \times 10^{-2}$	$1.793 \times 10^{-2}$	$1.029 \times 10^{-2}$	$5.902 \times 10^{-3}$	$3.979 \times 10^{-3}$	$1.540 \times 10^{-3}$	$1.134 \times 10^{-3}$
	整体值	0.056	1.27	1.036	0.257	0.134	$5.562 \times 10^{-1}$	$3.323 \times 10^{-2}$	$2.306 \times 10^{-2}$	$1.378 \times 10^{-2}$	$8.235 \times 10^{-3}$	$5.715 \times 10^{-3}$	$2.370 \times 10^{-3}$	$1.785 \times 10^{-3}$
木荷×香 樟×思栎 ×枫香人 工混交林	0—20	0.067	1.22	1.116	0.291	0.156	$6.665 \times 10^{-2}$	$4.058 \times 10^{-2}$	$2.853 \times 10^{-2}$	$1.737 \times 10^{-2}$	$1.057 \times 10^{-2}$	$7.436 \times 10^{-3}$	$3.183 \times 10^{-3}$	$2.423 \times 10^{-3}$
	20—40	0.056	1.21	0.900	0.239	0.129	$5.585 \times 10^{-2}$	$3.423 \times 10^{-2}$	$2.419 \times 10^{-2}$	$1.483 \times 10^{-2}$	$9.090 \times 10^{-3}$	$6.423 \times 10^{-3}$	$2.782 \times 10^{-3}$	$2.125 \times 10^{-3}$
	40—60	0.070	1.41	1.795	0.382	0.186	$7.000 \times 10^{-2}$	$3.954 \times 10^{-2}$	$2.636 \times 10^{-2}$	$1.489 \times 10^{-2}$	$8.409 \times 10^{-3}$	$5.607 \times 10^{-3}$	$2.111 \times 10^{-3}$	$1.542 \times 10^{-3}$
	整体值	0.065	1.26	1.195	0.298	0.157	$6.522 \times 10^{-2}$	$3.908 \times 10^{-2}$	$2.718 \times 10^{-2}$	$1.629 \times 10^{-2}$	$9.759 \times 10^{-3}$	$6.786 \times 10^{-3}$	$2.827 \times 10^{-3}$	$2.133 \times 10^{-3}$
木荷×思 栎人工 混交林	0—20	0.044	1.27	0.612	0.174	0.097	$4.391 \times 10^{-2}$	$2.761 \times 10^{-2}$	$1.987 \times 10^{-2}$	$1.250 \times 10^{-2}$	$7.858 \times 10^{-3}$	$5.654 \times 10^{-3}$	$2.559 \times 10^{-3}$	$1.982 \times 10^{-3}$
	20—40	0.063	1.27	1.163	0.287	0.150	$6.190 \times 10^{-2}$	$3.693 \times 10^{-2}$	$2.560 \times 10^{-2}$	$1.527 \times 10^{-2}$	$9.110 \times 10^{-3}$	$6.314 \times 10^{-3}$	$2.611 \times 10^{-3}$	$1.965 \times 10^{-3}$
	40—60	0.068	1.26	1.214	0.307	0.162	$6.795 \times 10^{-2}$	$4.090 \times 10^{-2}$	$2.853 \times 10^{-2}$	$1.717 \times 10^{-2}$	$1.034 \times 10^{-2}$	$7.210 \times 10^{-3}$	$3.027 \times 10^{-3}$	$2.289 \times 10^{-3}$
	整体值	0.058	1.22	1.070	0.266	0.140	$5.799 \times 10^{-2}$	$3.471 \times 10^{-2}$	$2.411 \times 10^{-2}$	$1.443 \times 10^{-2}$	$8.637 \times 10^{-3}$	$6.001 \times 10^{-3}$	$2.495 \times 10^{-3}$	$1.881 \times 10^{-3}$
木荷×杉 木×马尾 松人工混 交林	0—20	0.064	1.18	0.957	0.262	0.144	$6.354 \times 10^{-2}$	$3.941 \times 10^{-2}$	$2.808 \times 10^{-2}$	$1.742 \times 10^{-2}$	$1.080 \times 10^{-2}$	$7.698 \times 10^{-3}$	$3.402 \times 10^{-3}$	$2.616 \times 10^{-3}$
	20—40	0.064	1.20	1.002	0.269	0.146	$6.380 \times 10^{-2}$	$3.929 \times 10^{-2}$	$2.785 \times 10^{-2}$	$1.715 \times 10^{-2}$	$1.056 \times 10^{-2}$	$7.485 \times 10^{-3}$	$3.267 \times 10^{-3}$	$2.502 \times 10^{-3}$
	40—60	0.046	1.15	0.657	0.185	0.103	$4.622 \times 10^{-2}$	$2.896 \times 10^{-2}$	$2.079 \times 10^{-2}$	$1.302 \times 10^{-2}$	$8.160 \times 10^{-3}$	$5.857 \times 10^{-3}$	$2.634 \times 10^{-3}$	$2.036 \times 10^{-3}$
	整体值	0.058	1.18	0.873	0.024	0.131	$5.806 \times 10^{-1}$	$3.602 \times 10^{-2}$	$2.568 \times 10^{-2}$	$1.593 \times 10^{-2}$	$9.886 \times 10^{-3}$	$7.046 \times 10^{-3}$	$3.116 \times 10^{-3}$	$2.397 \times 10^{-3}$

土壤水分的有效性也是评价土壤供水性能的重要指标。根据本研究提出的土壤水分有效性分类方法,把 1.5 MPa 作为有效水的下限吸力值,而计算得出有效水上限吸力值为 0.03 MPa。此外,由表 4 可知,当水吸力达到 0.15 MPa 时,比水容重达到  $10^{-2}$  数量级,此时供植物吸收的水分显著减少,水分有效程度降低,故可把 0.15 MPa 定为易有效水与难有效水的界限吸力值,最后再结合表 3 中的拟合方程,对各林地不同土层的土壤水分有效性进行分类(表 5)。

由表 5 可以看出,同一林地不同土层间,杉木人工林土壤易有效水含量为 20—40 cm 层(12.082%)最

高,20—40 cm 层(8.457%)最低;杉木×马尾松人工林易有效水含量 0—20 cm 层(11.127%)最高,40—60 cm 层(8.558%)最低;木荷×香樟×思栎×枫香人工林 20—40 cm 层(9.812%)易有效水含量最低,40—60 cm 层(13.505%)最高;木荷×思栎人工林 0—20 cm 层(8.059%)易有效水最低,40—60 cm 层(12.223%)最高;木荷×杉木×马尾松人工林易有效水含量由高到低依次为:20—40 cm 层(11.107%)>0—20 cm 层(10.950%)>40—60 cm 层(7.951%)。不同人工林地上,土壤易有效水含量由高到低的顺序为:木荷×香樟×思栎×枫香人工林(11.704%)>杉木人工林

(10.677%)>木荷×思栎人工林(10.485%)>木荷×杉木×马尾松人工林(10.003%)>杉木×马尾松人工林(9.980%)。上述比较与比水容量体现的供水性能强弱的规律是基本一致的。

表 5 土壤水分有效性分类及其含量

林地类型	层次/ cm	有效水	易有效水	难有效水	无效水
		0.03~ 1.5 MPa	0.03~ 0.15 MPa	0.15~ 1.5 MPa	>1.5 MPa
杉木人工 纯林	0—20	22.216	11.492	10.723	<16.184
	20—40	17.217	8.457	8.759	<10.743
	40—60	20.234	12.082	8.152	<5.543
	平均值	19.889	10.677	9.212	<10.823
杉木×马 尾松人工 混交林	0—20	20.999	11.127	9.872	<12.807
	20—40	19.536	10.255	9.281	<12.812
	40—60	14.782	8.558	6.224	<4.623
	平均值	18.439	9.980	8.459	<10.081
木荷×香 樟×思栎× 枫香人工 混交林	0—20	22.745	11.795	10.951	<16.220
	20—40	19.233	9.812	9.420	<15.382
	40—60	22.350	13.505	8.845	<5.656
	平均值	21.443	11.704	9.739	<12.420
木荷×思栎 人工混交林	0—20	14.859	8.059	6.800	<22.208
	20—40	20.708	11.172	9.536	<11.063
	40—60	22.825	12.223	10.602	<12.660
	平均值	19.464	10.485	8.980	<15.311
木荷×杉木 ×马尾松人 工混交林	0—20	21.703	10.950	10.753	<20.747
	20—40	21.882	11.107	10.775	<21.777
	40—60	15.643	7.951	7.692	<20.679
	平均值	19.743	10.003	9.740	<21.068

注:表中含水量为体积含水量(%)。

### 3 结论

(1) 采用 Gardner 于 1970 提出的经验方程  $\theta = aS^{-b}$  拟合实测数据,结果表明该方程能够很好地模拟所研究的 5 种人工林的土壤含水量与土壤水吸力之间关系,且拟合后决定系数均达到 0.99。

(2) 根据实验测定的土壤水分特征曲线以及拟合参数  $a$  值的比较可知,对于同一林地不同土层:杉木人工林、杉木×马尾松人工林、木荷×香樟×思栎×枫香人工林底层土壤持水能力要低于中、上层土壤;木荷×思栎人工林土壤持水能力依次增大;杉木×马尾松人工林和木荷×杉木×马尾松人工林都呈现为 0—20 cm 层与 20—40 cm 层持水能力相当,40—60 cm 层持水能力最弱。不同林地的持水能力呈现为:木荷×杉木×马尾松人工林( $a=0.328$ )>木荷×香樟×思栎×枫香人工林( $a=0.248$ )>杉木人工林( $a=0.225$ )>

木荷×思栎人工林( $a=0.218$ )>杉木×马尾松人工林( $a=0.206$ )。

(3) 通过各林地不同层次的毛管孔隙最大持水量代入表 3 中的拟合方程计算得出,5 种人工林土壤有效水上限吸力值定为 0.03 MPa;而比水容重达到  $10^{-2}$  数量级时,供植物吸收的水分显著减少,因此把此时吸力值 0.15 MPa 定为易有效水与难有效水的界限。

(4) 通过比较  $ab$  值(即拟合参数  $a$  与  $b$  的乘积,土壤水吸力  $S=1.00 \times 10^5$  Pa 时的比水容量)和易有效水含量两个指标得出,各林地不同土层的供水性能的变化并没有一致的规律性,但各林地整体的供水性能由强到弱依次为:木荷×香樟×思栎×枫香人工林( $ab=0.065$ ,易有效水 11.704)>杉木人工林( $ab=0.062$ ,易有效水 10.677)>木荷×思栎人工林( $ab=0.058$ ,易有效水 10.485)>木荷×杉木×马尾松人工林( $ab=0.058$ ,易有效水 10.003)>杉木×马尾松人工林( $ab=0.056$ ,易有效水 9.980)。

#### [参 考 文 献]

- [1] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000:141-142.
- [2] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978:466-526.
- [3] 林大仪.土壤学[M].北京:中国林业出版社,2002:123-128.
- [4] 赵丽娅,赵哈林.我国沙漠化过程中的植被演替研究概述[J].中国沙漠,2000(20):7-14.
- [5] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:67-69.
- [6] 华孟,王坚.土壤物理学[M].北京:北京农业大学出版社,1993:61-63.
- [7] 庄季平,王伟.土壤低吸力段持水性能及其与早期土壤干旱的关系研究[J].土壤学报,1986,23(4):306-313.
- [8] Gardner W R, Hiuel D, Benyamini Y. Post irrigation movement of water: I Redistribution[J]. Water Resour. Res., 1970, 6: 851-861.
- [9] 姚其华,邓银霞.土壤水分特征曲线模型及其预测方法的研究进展[J].土壤通报,1992,23(3):142-144.
- [10] 李笑吟,毕华兴,张建军,等.晋西黄土区土壤水分有效性研究[J].水土保持研究,2006,13(5):206-211.
- [11] 陈志雄,汪仁真.中国几种土壤的持水性质[J].土壤学报,1979,16(3):277-281.
- [12] 沈思渊,席承藩.淮北主要土壤持水性能及其与颗粒组成的关系[J].土壤学报,1990,27(1):34-42.