

# 辽西半干旱区森林土壤大孔隙特征研究

吕刚<sup>1</sup>, 王洪禄<sup>2</sup>, 黄龙<sup>3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 资源与环境工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 铁岭市国土资源局, 辽宁 铁岭 112000; 3. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:** 根据水分穿透曲线和 Poiseuille 方程, 研究了辽西半干旱区 8 种植被类型下土壤大孔隙的半径范围、个数及分布情况。结果表明, 不同植被下土壤大孔隙半径分布在 0.5~2.3 mm, 加权平均半径在 0.61~1.85 mm, 均值为 0.95 mm, 均值为粗通气孔隙标准的近 2 倍, >1.4 mm 的特大孔隙仅为大孔隙总数的 2.73%, 0.5~1.4 mm 的孔隙占 97.27%, 表现出大半径孔隙少而小半径孔隙多的特点。不同植被下土壤大孔隙度在 0.95%~5.24%, 仅占土壤体积很小的一部分, 但大孔隙平均半径与稳定出流速率和饱和导水率之间有显著线性相关关系, 决定了稳定出流速率 71% 的变异和饱和导水率 50% 的变异。

**关键词:** 大孔隙; 水分穿透曲线; Poiseuille 方程; 辽西半干旱区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)05-0176-06

中图分类号: S152.5, S157.5

## A Study on Macropore Properties of Forest Soil in Semi-arid Region of Western Liaoning Province

LÜ Gang<sup>1</sup>, WANG Hong-lu<sup>2</sup>, HUANG Long<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environment Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. Tieling Bureau of Land Resource Survey and Planning, Tieling, Liaoning 112000, China; 3. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The radius, number and distribution of soil macropores under eight types of vegetation in the semi-arid region of western Liaoning Province were investigated using water breakthrough curve and Poiseuille equation. Results showed that under the different vegetations, the radii of soil macropores ranged from 0.5 to 2.3 mm; weighted mean radii varied from 0.61 to 1.85 mm; and the overall mean value was 0.95 mm, nearly two times the coarse aeration porosity standard. The macropores with the radius larger than 1.4 mm accounted for only 2.73% of total macropore number and between 1.5 and 1.4 mm, 97.27%, which showed that large radius pores were more than small radius pores. Soil macroporosity under the different vegetations ranged from 0.95% to 5.24%, which means that soil macropores constituted a small portion of soil volume. However, the mean radius of soil macropores was significantly correlated with steady effluent rate and saturated hydraulic conductivity. The mean radius determined 71% variances of steady effluent rate and 50% of saturated hydraulic conductivity.

**Keywords:** soil macropore; water breakthrough curve; Poiseuille law; semi-arid region of western Liaoning Province

辽西地处半干旱区, 是辽宁省生态环境最脆弱的地区, 植被退化和水土流失都很严重, 因此, 加快该区森林植被恢复与重建并充分发挥其涵养水源功能是当前面临的首要问题<sup>[1]</sup>。

土壤是森林生态系统水分的主要蓄库, 系统中的水文过程大多是通过土壤而发生的, 是形成森林植被水文功能的核心媒介。森林土壤的水文过程与植被响应对植被—大气, 大气—土壤和土壤—植被 3 个界面物质和能量的交换过程有明显的控制作用, 直接影

响到土壤水分入渗、林地蒸散和流域产流, 其能力对调节洪水和干旱、减弱及防止土壤侵蚀具有重要作用。土壤的胀缩、土壤动物的活动和植物根系死亡后形成的大孔隙是森林土壤中存在的普遍现象。由于研究方法和目的的不同, 土壤大孔隙的划分标准不统一, 一般认为土壤大孔隙的孔径在 0.03~3 mm。大孔隙的存在使得水分在运动过程中不能与土体发生充分的相互作用, 而是以优势流的形式快速地进入土壤深层, 成为土壤深层水分来源的唯一通道<sup>[2]</sup>, 从而

收稿日期: 2010-12-03

修回日期: 2011-09-21

资助项目: 辽宁省教育厅科学技术研究项目“辽西半干旱区林地土壤大孔隙特征及其对根层贮水和坡面产流的影响”(2008289)

作者简介: 吕刚(1979—), 男(汉族), 吉林省九台市人, 讲师, 博士, 主要从事水土保持与生态水文的教学和科研工作。E-mail: lvgang2637@126.com。

对林地地表径流的产生、深层土壤水分的贮蓄产生影响。

国内外学者为此开展了大量的研究工作,取得了一些研究成果<sup>[3-8]</sup>,这对于进一步认识森林与水的关系,深入开展土壤学、水文学和生态学之间的交叉学科研究具有重要的推动作用。森林土壤大孔隙具有重要的生态水文效应,因此,研究辽西半干旱区森林土壤大孔隙特征,有助于认识辽西半干旱区植被的生态水文特征和深层土壤水的补给方式。

## 1 研究区概况

研究地点选在阜新蒙古族自治县县城东北部的老鹰窝山自然保护区,地理坐标为 121°30′—121°41′E, 42°13′—42°30′N,保护区规划面积 6 405.3 hm<sup>2</sup>,属北温带大陆性半干旱季风气候,夏季炎热,年蒸发量 1 942 mm,年均气温 7.6 °C,≥10 °C 年积温 3 350 °C,无霜期 156 d,年均日照 2 865.5 h,年均风速 3.4 m/s,年均降水量约 500 mm,且多集中于 7、8 月。保护区位于努鲁儿虎山余脉与医巫闾山北段相结地带,又处于华北、长白、蒙古 3 个植物区系交错地

带,现有高等植物有 100 科 456 属 851 种,是辽西现存的较为平衡、和谐、完整的生态系统。经过几十年来封山育林、植树造林形成了天然次生林和人工林群落相结合的新的森林群落。

## 2 研究方法

### 2.1 标准地布设

选择区内的侧柏(*Platycladus orientalis*)人工林,油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林,蒙古栎(*Quercus mongolica*)天然次生林,椴树(*Tilia tuan*)天然次生林,榆树(*Ulmus Pumila*)林,山杨(*Populus davidiana*)天然次生林,落叶松(*Larix gmelinii*)人工林和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林共计 8 种植被下的土壤为研究对象。

在各林地内选择有代表性的地段设置 20 m×20 m 的标准地,记录各林型的海拔、坡向、坡位、坡度、枯枝落叶层厚度、树高和胸径、水土流失情况、乔木郁闭度和植物总盖度。标准地基本概况如表 1 所示。试验时间为 2010 年 5 月 23 日—2010 年 6 月 2 日。

表 1 标准地概况

林分类型	坡度/ (°)	坡向	坡位	海拔/ m	平均胸径/ cm	平均树高/ m	枯枝落叶层 厚度/cm	乔木层郁 闭度/%	植物总 盖度/%
侧柏林	10	SW	下	415	17.8	11.2	2.8	95	98
油松林	13	N	中	487	18.7	15.3	4.6	88	95
蒙古栎林	18	NE	中上	485	11.2	8.7	1.7	70	95
椴树林	25	NE	中下	490	10.1	9.6	2.7	87	90
榆树林	16	SE	上	499	9.0	8.6	2.0	78	92
山杨林	20	NE	上	469	8.6	9.0	2.0	70	95
刺槐林	18	S	下	411	4.8	5.4	1.1	78	92
落叶松林	9	NE	下	439	11.2	12.6	1.4	70	90

### 2.2 土壤大孔隙测定的理论基础

本研究的重点是田间持水量到饱和含水量之间土壤大孔隙的具体孔径范围。土壤达到田间持水量以后,土壤的基质势几乎为 0,入渗速率主要受供水强度控制。由于土壤水分运动的速率较慢,处于层流的范围,在假设土壤孔隙为圆形的情况下可利用 Poiseuille 方程建立流量和孔径之间的关系:

$$Q = \pi r^4 \Delta p / 8 \eta \tau L \quad (1)$$

$$\text{对于稳态水流,公式为: } Q = \pi r^2 \tau L / t \quad (2)$$

由土壤学基本原理可知,田间持水量到饱和含水量之间的排水过程首先是大孔隙排水,然后排水孔隙的孔径逐渐减小。对某一固定土样,最大孔隙半径就是第一次出水时的半径;而土样的最小半径就是当水流开始达到稳定时的半径。结合式(1)—(2),即可计算出大孔隙的当量孔径  $r$ :

$$r = \tau L / [8 \eta / (t \Delta p)]^{1/2} \quad (3)$$

式中:  $Q$ ——单位流量 (cm<sup>3</sup>/s);  $r$ ——孔隙半径 (cm);  $\tau$ ——水流实际路径与土柱长度的比值,一般取 1.2;  $L$ ——土柱长度 (cm);  $\eta$ ——水的黏滞系数 [g/(cm·s)];  $\Delta p$ ——压力水头 (cm);  $t$ ——从第一次加水开始记时的时间 (s)。通过对任意时间排水量进行观测,可利用式(3)计算出相应的孔隙半径,将 2 个孔隙半径之间按照 0.1~0.5 的间隔,形成一定的孔隙范围,其计算值则为范围的平均值。假设某个孔径的孔隙面积为  $A$  (cm<sup>2</sup>),水流速率为  $V$  (cm/s),则与流量之间存在式(4)的关系:

$$Q = nAV = n\pi r^2 V \quad (4)$$

因此,计算出当量孔径后,可用(4)式计算不同孔径范围的大孔隙数量  $n$ 。Raulovich 等<sup>[9]</sup>将这种方法称作水分的穿透曲线法。此方法实质上测定的是孔隙“瓶颈”大小,有其局限性,但仍为大孔隙大小、数量、分级等的研究提供了定量依据。

### 2.3 样品采集与土壤水分穿透曲线制作

(1) 样品采集。采用环刀法(直径 6.9 cm,高 5.1 cm的大环刀)在标准地内选择地面较平坦,具有代表性的 3 个样点,首先去除表土上的枯枝落叶和半分解的腐殖质(去除时,用小型平铲小心作业,尽量不破坏土壤上层的结构和孔隙),分别从 0—10,10—20,20—40,40—60 cm 土层取原状土。

(2) 水分穿透曲线制作。室外用大环刀取原状土,在其达到田间持水量的时候,用马氏瓶定水头测量,水头保持在 1 cm。记录开始放入水到第 1 次出水的时间。

然后测量间隔为 5 s 的流量,直到流速达到稳定。根据 Poessuille 方程计算从开始排水到饱和稳定流阶段大孔隙的大小分布。根据水流稳定后的流量计算饱和导水率  $K_s$ ,为了消除温度对水黏滞系数的影响,统一换算为 10 °C 的饱和导水率  $K_{10}$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同植被下土壤水分穿透曲线比较

土壤水分穿透曲线反映在田间持水量和饱和含水量之间的土壤孔隙对水流运动的影响。根据流速和时间,作出不同植被下土壤水分穿透曲线(见图 1)。

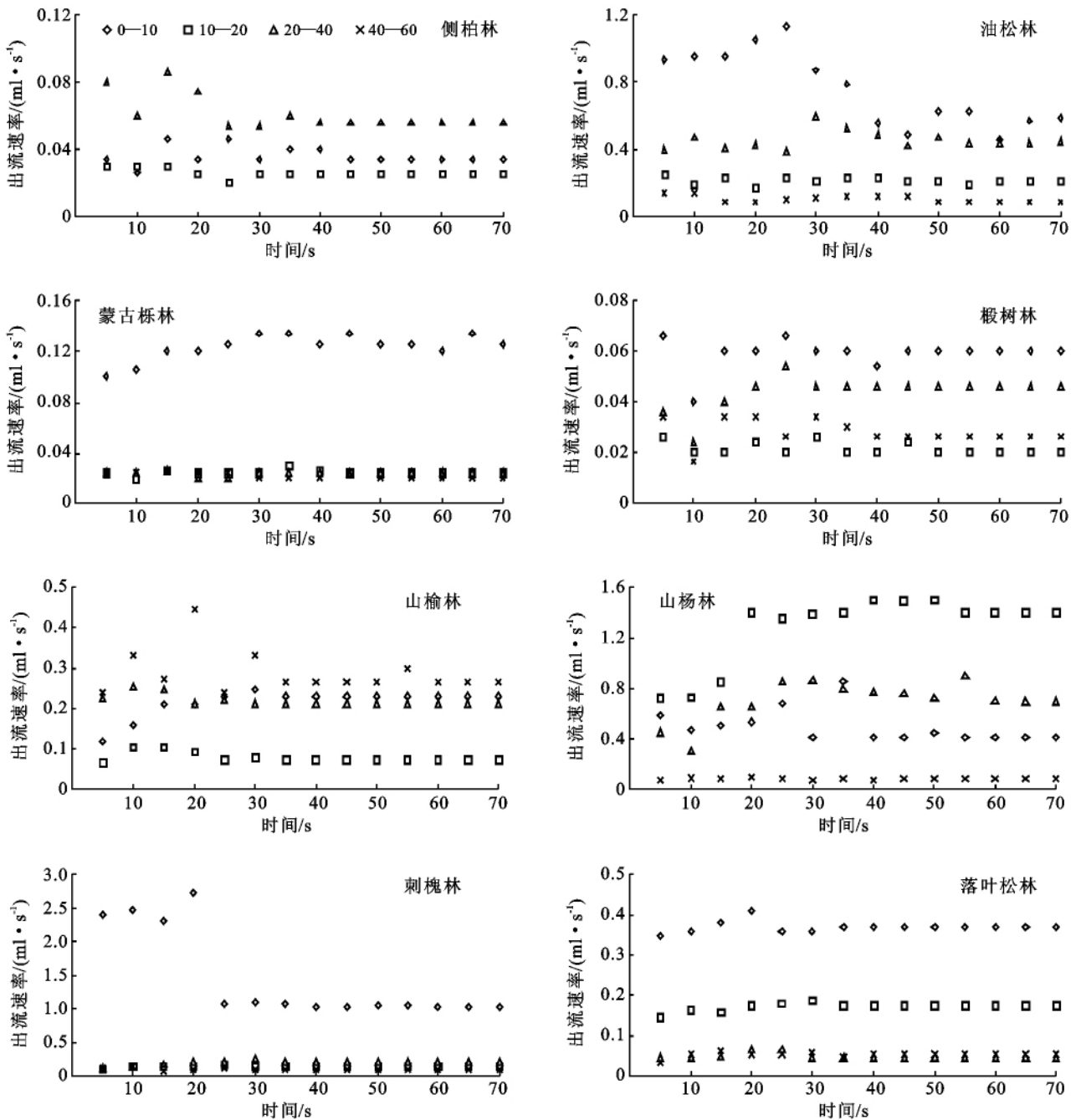


图 1 各林型土壤水分穿透曲线

从图 1 可以看出,在田间持水量和饱和含水量之间,侧柏林、落叶松林、山榆林、椴树林、蒙古栎林水流在约 40 s 时间内就达到了稳定,不同层次水分出流速之间波动范围较小。而刺槐林、油松林、山杨林水流在大约在 70 s 时才达到了稳定,不同土层水分出流速波动范围较大,其中,山杨林 10—20 cm 水分稳定出流速率几乎是 40—60 cm 的 20 倍。

由于植被和土层深度的不同,不同植被下其水分穿透曲线也表现出明显的差异。侧柏林土壤稳定出流速率 0—10 cm 为 0.03 ml/s, 10—20 cm 为 0.026 ml/s, 20—40 cm 为 0.056 ml/s, 表现为 20 cm 土层范围内稳定出流速率基本一致, 20—40 cm 稳定出流速率大于 20 cm 土层; 油松林和刺槐林土壤稳定出流速率均表现为土层 0—10 cm > 20—40 cm > 10—20 cm > 40—60 cm, 蒙古栎林土壤稳定出流速率 0—10 cm 为 0.13 ml/s, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 均为 0.02 ml/s, 说明蒙古栎林土壤的大孔隙在 10 cm 以下的剖面上发育比较均一; 椴树林以林龄 50~60 a 的天然次生糠椴为主, 以 0—10 cm 最大, 也仅为 0.06 ml/s; 榆树林乔木层郁闭度仅为 60%, 0—10 cm 土层内砾石含量较高, 砾石之间孔隙较大, 稳定出流速率为 0.23 ml/s, 20—40 cm, 40—60 cm 的稳定出流速率分别为 0.214 ml/s 和 0.266 ml/s, 与表层相差不大; 山杨林 0—10 cm 土层稳定出流速率相对较低, 为 0.41 ml/s, 10—20 cm 土层水流运动速度很快, 达到了 1.4 ml/s, 是 8 种植被下最大的, 随着土层深度的增加, 20—40 cm 土层为 0.7 ml/s, 40—60 cm 仅为 0.08 ml/s, 整个剖面呈现先增大后减小的规律; 落叶松林稳定出流速率 0—10 cm 为 0.37 ml/s, 并随深度增加而降低, 10—20 cm 为 0.174 ml/L, 20—40 cm 和 40—60 cm 水分穿透曲线几乎重合, 稳定出流速率约为 0.05 ml/s。

### 3.2 不同植被下土壤大孔隙的范围与数量

根据土壤的水分穿透曲线和 Poiseuille 方程计算出辽西半干旱区 8 种植被下土壤大孔隙的半径范围和个数。从表 2 可知, 土壤大孔隙半径分布在 0.5~2.3 mm, 主要集中在 0.6~1.5 mm, 各个土层土壤大孔隙的加权平均半径变化在 0.61~1.85 mm, 均值为 0.95 mm, 均值为粗通气孔隙标准的近 2 倍。本研究取土壤大孔隙半径范围的近似中间值(1.4 mm)来区分不同孔径的大小, 研究区不同植被下土壤 > 1.4 mm 的特大孔隙仅为大孔隙总数的 2.73%, 0.5~1.4 mm 的孔隙占 97.27%, 表现出大半径孔隙少而小半径孔隙多的特点, 例如, 山杨林 0.6~0.9 mm 大孔隙数量为 62 个, 而 > 1.4 mm 的大孔隙数量为 23 个。

表 2 不同植被下土壤大孔隙范围及数量

林型	土层/ cm	大孔隙半径 范围/mm	平均半 径/mm	数量/ 个	加权平均 半径/mm	大孔隙 度/%
侧柏林	0—10	0.8~0.7	0.75	38	0.70	2.94
		0.7~0.6	0.65	33		
	10—20	0.8~0.7	0.75	18	0.69	1.77
	20—40	0.7~0.6	0.65	27		
		1.0~0.9	0.95	25	0.95	1.89
油松林	0—10	1.7~1.5	1.60	5	1.33	4.62
		1.5~1.3	1.40	11		
		1.3~1.1	1.20	16		
	10—20	1.3~1.1	1.20	16	1.14	2.94
		1.1~1.0	1.05	11		
		20—40	1.4~1.3	1.35	6	
		1.3~1.1	1.20	16	1.18	3.94
		1.1~1.0	1.05	11		
	40—60	1.2~1.0	1.10	9	0.95	2.79
		1.0~0.8	0.90	27		
蒙古栎林	0—10	1.0~0.9	0.95	11	0.89	1.74
		0.9~0.8	0.85	15		
	10—20	0.8~0.6	0.70	23	0.61	1.85
		0.6~0.5	0.55	37		
20—40	0.8~0.7	0.75	20	0.69	1.98	
	0.7~0.6	0.65	30			
	40—60	0.8~0.6	0.70	26	0.70	1.06
椴树林	0—10	1.0~0.8	0.90	26	0.77	3.59
		0.8~0.6	0.70	45		
	10—20	0.8~0.7	0.70	17	0.62	2.45
		0.7~0.5	0.60	58		
	20—40	0.8~0.7	0.75	20	0.75	0.95
		0.8~0.7	0.75	18		
	40—60	0.7~0.6	0.65	27	0.69	1.82
		1.0~0.9	1.00	11	0.89	1.74
		0.9~0.8	0.85	15		
山榆林	10—20	1.0~0.8	0.90	14	0.81	1.89
		0.8~0.7	0.75	20		
	20—40	1.3~1.2	1.25	7	1.08	3.60
		1.2~1.0	1.10	17		
	40—60	1.0~0.9	0.95	13		
		1.2~1.1	1.15	8	1.09	1.81
		1.1~1.0	1.05	10		
山杨林	0—10	1.5~1.2	1.35	13	1.13	4.67
		1.2~1.0	1.10	18		
		1.0~0.9	0.95	13		
	10—20	2.2~1.5	1.85	5	1.36	5.24
		1.5~1.3	1.40	12		
		1.3~1.1	1.20	17		
20—40	1.5~1.4	1.45	6	1.22	5.07	
	1.4~1.2	1.30	14			
	1.2~1.0	1.10	21			
	40—60	0.9~0.8	0.85	15	0.74	2.80
		0.8~0.6	0.70	47		
刺槐林	0—10	2.3~2.0	2.15	3	1.85	4.71
		2.0~1.8	1.90	6		
		1.8~1.6	1.70	8		
	10—20	1.1~1.0	1.05	11	1.05	1.06
		1.1~1.0	1.05	9		
	20—40	1.0~0.9	0.95	12	0.99	1.80
1.1~1.0		1.05	10			
	40—60	1.0~0.8	0.90	28	0.94	2.77
落叶松林	0—10	1.3~1.2	1.25	7	1.14	2.85
		1.2~1.0	1.10	19		
	10—20	1.2~1.0	1.10	17	0.98	3.59
		1.0~0.8	0.90	27		
	20—40	0.9~0.8	0.85	20	0.85	1.19
		0.8~0.7	0.75	22		
	40—60	0.9~0.8	0.85	20	0.85	1.19
		0.8~0.7	0.75	22	0.75	1.06

对不同植被下土壤大孔隙平均半径深度分布特征的分析表明,油松林地、刺槐林地和落叶松林地表现为大孔隙的半径大小随着土壤深度的增加呈减小趋势,这可能是由于上层土壤受植物根系和土壤动物活动影响多于下层,腐殖质含量高有关;侧柏林 0—20 cm 土层内大孔隙平均半径相同,20 cm 以下土层高于上层,为 0.95 mm;蒙古栎林和榆树林土壤大孔隙平均半径呈现先减小后增大的趋势,波动范围在 0.2 mm 以内,但对水分出流速率影响却较大,这可能与土壤中根系空间分布有关;椴树林不同土层土壤大孔隙平均半径之间相差较小,均值仅为 0.71 mm;山杨林 0—40 cm 土层土壤大孔隙平均半径均在 1.1 mm 以上,比 40 cm 以下土层高出 0.4 mm,这与山杨根系广布于该层有关。不同植被下大孔隙度在

0.95%~5.24%,大部分小于 5%,只有山杨林 10—20 cm 和 20—40 cm 土层略大于 5%,这与大孔隙只占整个土壤体积的 0.1%~5.0%的结论一致<sup>[10]</sup>。

### 3.3 土壤大孔隙对水分出流速率和饱和导水率的影响

森林土壤大孔隙中运动的水流可不与周围土壤母质中的水分发生相互作用,在极短的时间内移动到深层土壤中。虽然研究区不同植被下土壤大孔隙只占整个土壤体积的 0.95%~5.24%,但对水的入渗通量和再分布有着深刻的影响。土壤大孔隙平均半径与稳定出流速率和饱和导水率之间存在极显著性相关关系(图 2)。土壤的大孔隙一般仅约占土壤体积的 5%,却决定稳定出流速率 71%的变异和饱和导水率 50%的变异,说明土壤大孔隙对水流运动具有重要的影响。

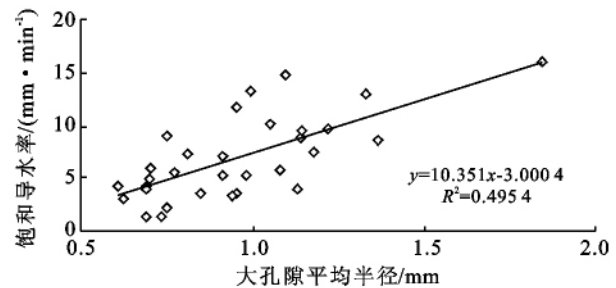
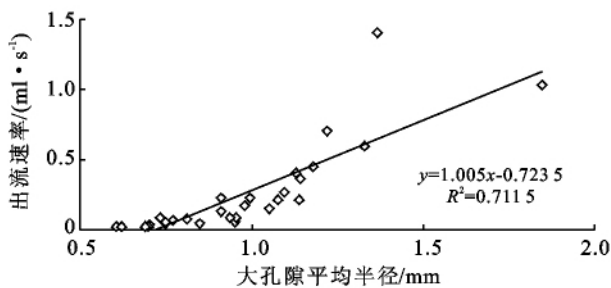


图 2 大孔隙平均半径与稳定出流速率和饱和导水率的关系

## 4 讨论

油松和刺槐作为我国北方地区的主要造林树种,多以水土保持林和防护林被应用,二者抗旱能力特别强,长势良好。林下枯枝落叶层厚度达 4 cm 以上,土壤表层腐殖质含量高,表层土壤动物活动频繁,大孔隙数量在 0—10 cm 分布较多,稳定出流速率最高,水流沿根系伸展的根孔进行运动,水流速率也较高,而 40—60 cm 土层腐殖质含量较低,土壤结构紧密,导致其水流速率最低。椴树林地坡度在 26°左右,存在一定程度的水土流失,枯枝落叶层较薄,腐殖质含量较低,这可能是稳定出流速率在整个剖面上均较低的原因。榆树林 20—40 cm,40—60 cm 稳定出流速率与表层相差不大,这种现象的发生可能是因为榆树根系主要分布在 20 cm 以下的土层,而 20 cm 以上主要为草被层根系占据<sup>[11]</sup>,榆树根系发达,促进了大孔隙的发育,同时也说明了 10—20 cm 仅为 0.074 ml/s 的原因。山杨林是水土保持的良好树种,根系广布于较肥沃的表层中<sup>[12]</sup>,但由于受到放牧的影响,表层土壤较为板结有微度的水土流失,表现为 0—10 cm 土层稳定出流速率相对较低,而 10—20 cm 土层由于根

系分布广,密度大,水流运动速度很快。落叶松林林龄在 50 a 左右,平均胸径在 29 cm 左右,林下枯枝落叶层较厚,土壤微生物主要在表层活动频繁,土壤疏松,孔隙大,导致表层稳定出流速率较大,并随深度增加而降低。

研究区不同植被下土壤大孔隙最小的孔隙半径为 0.5 mm,这与土壤学中土壤通气孔中的粗孔隙半径范围(孔径大于 0.3 或 0.2 mm)一致<sup>[13]</sup>。这说明不同植被土壤大孔隙主要是孔径大于 0.5 mm 的粗通气孔隙,略高于以往岷江上游森林土壤(大孔隙最小孔隙半径为 0.3 mm)<sup>[4]</sup>、黄土丘陵区人工油松林地土壤(大孔隙最小孔隙半径为 0.2 mm)<sup>[5]</sup>、六盘山典型植被森林土壤(大孔隙最小孔隙半径 0.4 mm)<sup>[7]</sup>和四面山阔叶林土壤(大孔隙最小孔隙半径为 0.3 mm)<sup>[8]</sup>关于大孔隙最小孔隙半径的研究结果,这种孔隙的排水更为迅速,可能成为深层土壤水分和坡地壤中流的主要来源,对于增强森林土壤生态水文功能具有重要意义。

## 5 结论

(1) 土壤水分穿透曲线反映在田间持水量和饱

和含水量之间的土壤孔隙对水流运动的影响,在田间持水量和饱和含水量之间,侧柏林、落叶松林、山榆林、椴树林、蒙古栎林水流在约 40 s 时就达到了稳定,不同层次水分出流速之间波动范围较小,而刺槐林、油松林、山杨林水流在约 70 s 时才达到了稳定,不同层次水分出流速之间波动范围较大;除榆树林土外,其他 7 种植被下土壤稳定出流速率均以 40~60 cm 最低。

(2) 不同植被下土壤大孔隙半径分布在 0.5~2.3 mm,主要集中在 0.6~1.5 mm,各个土层土壤大孔隙的加权平均半径变化在 0.61~1.85 mm,均值为 0.95 mm,均值为粗通气孔隙标准的近 2 倍,>1.4 mm 的特大孔隙仅大孔隙总数的 2.73%,0.5~1.4 mm 的孔隙占 97.27%,表现出大半径孔隙少而小半径孔隙多的特点;不同植被下大孔隙度在 0.95%~5.24%,大部分小于 5%。

(3) 土壤大孔隙平均半径与稳定出流速率和饱和导水率之间存在极显著线性相关关系,决定了稳定出流速率 71% 的变异和饱和导水率 50% 的变异。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 吕刚,曹小平,卢慧. 辽西海棠山森林枯落物持水与土壤贮水能力研究[J]. 水土保持学报,2010,24(3):203-208.
- [2] German P, Edwards W M, Owens L M. Profiles of bromide and increased soil moisture infiltration into soils with macropore[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984, 48(2):237-244.
- [3] Flury M, Flühler H, Jury W A, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study[J]. Water Resources Research, 1994,30(7): 1945-1954.
- [4] 石辉,陈凤琴,刘世荣. 岷江上游森林土壤大孔隙特征及其对水分出流速率的影响[J]. 生态学报,2005,25(3): 507-511.
- [5] 石辉,王峰,李秧秧. 黄土丘陵区人工油松林地土壤大孔隙定量研究[J]. 中国生态农业学报,2007,15(1):28-32.
- [6] 李伟莉,金昌杰,王安志. 长白山主要类型森林土壤大孔隙数量与垂直分布规律[J]. 应用生态学报,2007,18(10):2179-2184.
- [7] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏. 六盘山典型植被下土壤大孔隙特征[J]. 应用生态学报,2007,18(12):2675-2680.
- [8] 王伟,张洪江,程金花. 四面山阔叶林土壤大孔隙特征与优先流的关系[J]. 应用生态学报,2010,21(5):1217-1223.
- [9] Radulovich R, Solorzano E, Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989,53(2):556-559.
- [10] 希勒尔 D. 土壤和水[M]. 北京:农业出版社,1981:127-129.
- [11] 李红丽,董智,王林和,等. 浑善达克沙地榆树根系分布特征及生物量研究[J]. 干旱区资源与环境,2002,16(4):99-105.
- [12] 林伯群,祝宁,关继义. 山杨林下土壤条件与林木生长的关系[J]. 土壤,1975(2):85-90.
- [13] 朱祖祥. 土壤学:上册[M]. 北京:农业出版社,1983:57-63.
- [9] Singh B, Sharma K N. Tree growth and nutrient status of soil in a poplar (*Populus deltoids* Bartr.)-based agroforestry system in Punjab, India[J]. Agroforest Syst., 2007,70(2):125-134.
- [10] 胡景田,马琨,王占君,等. 荒地不同压砂年限对土壤微生物区系、酶活性与土壤理化性状的影响[J]. 水土保持通报,2010,30(3):53-58.
- [11] Fisher R F, Binklet D. Ecology and management of forest soils[M]. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, 2000:282-284.
- [12] 丁绍兰,扬宁贵,赵串串,等. 青海省东部黄土丘陵区主要林型土壤理化性质[J]. 水土保持通报,2010,30(6):1-6.
- [13] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.
- [14] Askin T, Kizilkaya R. The spatial variability of urease activity of surface agricultural soils within an urban area[J]. Journal of Central European Agriculture, 2005, 6(2):161-166.
- [15] 孙启祥,张建锋, Franz M. 不同土地利用方式土壤化学性状与酶学指标分析[J]. 水土保持学报,2006,20(4):98-101.
- [16] 章家恩. 生态学常用实验研究方法[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [17] 郑伟,霍光华,骆昱春,等. 马尾松低效林不同改造模式土壤微生物及土壤酶活性的研究[J]. 江西农业大学学报,2010,32(4):743-751.
- [18] 李庆梅,侯龙鱼,刘艳,等. 黄河三角洲盐碱地不同利用方式土壤理化性质[J]. 中国生态农业学报,2009,17(6):1132-1136.
- [19] 邢尚军,张建锋,宋玉民,等. 黄河三角洲盐碱地不同土地利用方式下土壤化学性状与酶活性的研究[J]. 林业科技,2008,33(2):16-18.
- [20] 朱延林,贡超,赵蓬晖. 杨树人工林土壤生态环境分析[J]. 上海农业学报,2010,26(2):53-57.
- [21] 刘瑜,梁永超,褚贵新,等. 长期棉花连作对北疆棉区土壤生物活性与酶学性状的影响[J]. 生态环境学报,2010,19(7):1586-1592.
- [22] 崔晓东,侯龙鱼,马风云,等. 黄河三角洲不同土地利用方式土壤养分特征和酶活性及其相关性研究[J]. 西北林学院学报,2007,22(4):66-69.

(上接第 175 页)