

# 重庆市四面山典型林分土壤饱和导水率研究

王 贤, 张洪江, 程金花, 张 焜, 孙 龙, 马西军

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

**摘 要:** 采用恒定水头法测定了重庆市四面山地区典型人工林和天然次生林剖面土壤饱和导水率( $K_s$ ), 并运用多元回归和通径分析方法探讨了其与土壤物理因子和有机质的相关性。结果表明, 土壤饱和导水率从表层到深层呈现出负指数形式的递减规律。各林分对饱和导水率均有显著提高, 由高到低的顺序为: 天然针阔混交林 > 天然阔叶林、楠竹林、针叶林 > 人工阔叶林、混交林、针叶林 > 荒地。土壤黏粒、容重、非毛管孔隙度和大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量是影响该地区饱和导水率的主要因子。各林分对土壤有机质含量均有提高作用, 有机质含量与饱和导水率符合二次曲线的关系。在植被经营过程中, 建议营造针阔复层混交类型的树种配置模式。

**关键词:** 四面山; 典型林分; 土壤饱和导水率( $K_s$ ); 物理因子; 土壤有机质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)02-0029-06

中图分类号: S152.7+2

## Saturated Hydraulic Conductivity in Soils Under Typical Forests in Simian Mountains of Chongqing City

WANG Xian, ZHANG Hong-jiang, CHENG Jin-hua, ZHANG Kun, SUN Long, MA Xi-jun

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** On the soil profiles under typical planted and natural secondary forests in Simian Mountains of Chongqing City, soil saturated hydraulic conductivity( $K_s$ ) was measured by the constant-hydraulic head method, and the correlations between  $K_s$  and soil physical features and organic matter contents were established using multivariate regression and path analysis. The results show that, the values of  $K_s$  decreased negatively exponentially with increasing soil depths. Comparing to the control,  $K_s$  was significantly improved in all the forests, with effects in a descending order as: natural secondary Conifer × Broadleaf forest land > natural secondary Broadleaf forest, Phyllostachys pubescens forest, Conifer forest land > Broadleaf plantation, Conifer × Broadleaf plantation, Conifer plantation land > wasteland. Soil clay content, bulk density, non-capillary porosity and >0.25 mm aggregate content were the key factors affecting  $K_s$ . The Forests encouraged effectively the accumulation of organic matters in the soils. The relationship between  $K_s$  and organic matter was well described with quadratic equations. Mixed mode of Conifer × Broadleaf with multiple layers is recommended in forest plantation and management.

**Keywords:** Simian Mountains; typical forest; soil saturated hydraulic conductivity( $K_s$ ); physical factors; soil organic matter

饱和导水率( $K_s$ , saturated hydraulic conductivity)是指土壤全部孔隙都充满水的情况下,在单位梯度作用下,通过垂直于水流方向的单位面积土壤的水流量或渗流速度<sup>[1]</sup>。饱和导水率对于一定土壤是一个常数<sup>[2]</sup>,其大小制约着地表径流的产生和发展,是研究水分、溶质在土壤中运动规律时的重要水力参数<sup>[3]</sup>。一些非饱和导水率推测模型,如 Brooks-co-rey<sup>[4]</sup>, Mualem<sup>[5]</sup>, van Genuchten<sup>[6]</sup>,也需要事先确定

饱和导水率。因此,对土壤饱和导水率进行定量研究具有重要意义。

很多学者对土壤饱和导水率的空间变异<sup>[7-8]</sup>、测定方法<sup>[9]</sup>以及不同土地利用方式和生物结皮对其影响<sup>[10-12]</sup>等方面做了研究,但是这些研究多集中于耕地,而且仅分析了饱和导水率与土壤物理因子的简单关系,难以探明驱动饱和导水率的关键因子。重庆市四面山位于三峡工程库区尾端,是地球同纬度地区仅

收稿日期: 2011-04-27

修回日期: 2011-07-10

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划“三峡库区典型区段长防林建设及质量调控技术”(2011BAD38B0403); 国家自然科学基金项目(30900866); 国家公益性行业科研专项(201204212); 中央高校基本科研业务费专项(TD2011-2)

作者简介: 王贤(1987—)女(汉族),山东省邹城市人,硕士研究生,研究方向为水土保持。E-mail: sdnydx.wangxian@163.com。

通信作者: 张洪江(1955—)男(汉族),河北省易县县人,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。

存的原始常绿阔叶林带<sup>[13]</sup>。本研究以四面山地区不同林地土壤为研究对象,分析了剖面土壤饱和和导水率变化规律及其与相关物理因子的关系,为进一步研究该地区土壤水分运动规律提供理论依据,也为该区植被类型的构建和调控提供一定的参考。

## 1 试验区概况

试验区选择在重庆市四面山的张家山和大窝铺,地理坐标为东经 106°17′—106°31′、北纬 28°31′—28°46′,距重庆市区 138 km,海拔 900~1 500 m,地势南高北低。属于中亚热带湿润性季风气候区,年均温 10~14℃,年均降雨量 1 221~1 530 mm,相对湿度高达 80%~90%,多年平均日照时数 1 082.7 h。研究区地处中亚热带湿润富铁土、常湿雏形土区<sup>[14]</sup>,主要森林土壤类型为黄壤和黄棕壤,土壤质地为砂壤土

(国际制)。植被具有典型的亚热带常绿阔叶林群落特征,群落优势树种以杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、石栎(*Lithocarpus glaber*)、木荷(*Schima superba*)等为主,竹类大约有 20 余种,以楠竹(*Phyllostachys pubescens*)为主<sup>[13]</sup>。

在对试验区进行全面踏勘的基础上,根据植被生长年限、林分结构和群落物种组成,选取有代表性的人工和天然次生林典型样地,包括人工针叶林、阔叶林和混交林(人工林的造林时间为 1998 年春季,初植密度为 2 500 株/hm<sup>2</sup>,造林后基本上没有人为干扰及实施抚育管理措施),天然次生针叶林、阔叶林、混交林和楠竹林(次生林林龄由样地优势树种的标准木年龄确定),并以荒地作为对照(CK),测定时间为 2008 年 7 月。设立标准样地,进行植被调查。各林分标准地的基本情况详见表 1—2。

表 1 标准地基本状况

样地类型	立地因子			林型				枯落物储量/(t·hm <sup>-2</sup> )		
	海拔/m	坡向	坡度/(°)	起源	林龄	郁闭度	灌草盖度/%	未分解	半分解	分解
针叶林(I)	1 161	东北	36.0	人工	10	0.27	70	2.17	6.65	30.90
阔叶林(I)	1 160	西北	38.5	人工	10	0.60	75	2.44	2.57	86.80
针阔混交林(I)	1 170	西北	28.8	人工	10	0.50	70	0.90	10.81	52.76
针叶林(II)	1 185	东南	17.0	天然次生	30	0.60	80	3.94	0.86	186.80
阔叶林(II)	1 195	东北	28.0	天然次生	30	0.85	85	2.44	2.57	197.90
针阔混交林(II)	1 181	西北	29.8	天然次生	30	0.90	95	5.29	3.89	237.76
楠竹林(II)	1 175	西南	19.0	天然次生	30	0.87	55	3.68	7.55	124.14
荒地	1 183	西北	31.2							

表 2 林地植物基本组成

林地类型	乔木	下木	地被物
针叶林(I)	杉木	周毛悬钩子( <i>Rubus amphidasys</i> )	五节芒( <i>Miscanthus floridulus</i> )
	马尾松( <i>Pinus massoniana</i> )	山莓( <i>Rubus corchorifolius</i> )	蕨( <i>Pteridium aquilinum</i> )
阔叶林(I)	枫香树( <i>Liquidambar formosana</i> )	黄毛櫨木( <i>Aralia chinensis</i> )	楮头红( <i>Sarcopyramis nepalensis</i> )
	木荷	杜鹃( <i>Rhododendron simsii</i> )	茜草( <i>Rubia cordifolia</i> )
	石栎	野蔷薇( <i>Rosa multiflora</i> )	小花叶底红( <i>Phyllagathis fordii</i> )
针阔混交林(I)	杉木	五味子( <i>Schisandra chinensis</i> )	菝葜( <i>Smilax china</i> )
	马尾松( <i>Pinus massoniana</i> )	酸枣( <i>Ziziphus jujuba</i> )	乌蕨( <i>Stenoloma chusanum</i> )
	木荷		
针叶林(II)	杉木	杜茎山( <i>Maesa japonica</i> )	中华里白( <i>Diplazium chinensis</i> )
	马尾松( <i>Pinus massoniana</i> )	分株紫萁( <i>Osmunda cinnamomea</i> )	芒( <i>Miscanthus sinensis</i> )
	福建柏( <i>Fokienia hodginsii</i> )	紫花杜鹃( <i>Rhododendron amesiae</i> )	
阔叶林(II)	木荷	胡枝子( <i>Lespedeza bicolor</i> )	蕨( <i>Pteridium aquilinum</i> )
	石栎	周毛悬钩子( <i>Rubus amphidasys</i> )	三脉紫菀( <i>Aster ageratoides</i> )
	香樟( <i>Cinnamomum camphora</i> )	雪胆( <i>Hemsleya chinensis</i> )	紫萁( <i>Osmunda japonica</i> )
针阔混交林(II)	杉木	新木姜子( <i>Neolitsea aurata</i> )	绣线菊( <i>Spiraea salicifolia</i> )
	马尾松( <i>Pinus massoniana</i> )	江南越橘( <i>Vaccinium mandarinorum</i> )	中华里白( <i>Hicriopteris chinensis</i> )
	木荷	贵州毛柃( <i>Eurya kweichowensis</i> )	堇菜( <i>Viola verecunda</i> )
	栲( <i>Castanopsis fargesii</i> )	湖南悬钩子( <i>Rubus hunanensis</i> )	紫萁( <i>Osmunda japonica</i> )
楠竹林(II)	楠竹	山梅花( <i>Philadelphus incanus</i> )	楮头红( <i>Sarcopyramis nepalensis</i> )
		绣球( <i>Hydrangea macrophylla</i> )	棕叶狗尾草( <i>Setaria palmifolia</i> )

## 2 研究方法

### 2.1 土样采集与测定

沿每块样地 (20 m × 20 m) 的坡上、坡中和坡下随机布设 3 个土壤采样点, 挖掘土壤剖面, 按照 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 分 3 层进行土样采集, 每层重复取样 3 次。室内测定土壤的性质<sup>[15]</sup>。土壤颗粒组成采用简易比重计法, 并参照国际制来划分土壤质地类型。利用环刀法测定土壤容重、毛管孔隙度和非毛管孔隙度。水稳性团聚体用原状土, Yoder 湿筛法测定, 粒径分别为: >5 mm、5~2 mm、2~1 mm、1.0~0.5 mm、0.5~0.25 mm。经风干、磨细、过筛 (0.25 mm) 后, 土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定。

### 2.2 土壤饱和导水率测定

使用 ST-70A 型土壤水分渗透仪, 以定水头法测定各类土壤各土层的饱和导水率。定水头法是在测定过程中维持进口端水头不变的情况下测定土壤导水率的方法<sup>[16]</sup>。根据公式 (1) 可计算温度为  $t$  (°C) 时的土壤饱和导水率 ( $K_t$ ):

$$K_t = \frac{V}{tA} \cdot \frac{L}{H} \quad (1)$$

式中:  $H$ ——进口端水头;  $V$ ——水分出水量;  $t$ ——水分出流时间;  $L$ ——土柱长度;  $A$ ——土柱横截面积。

为了使不同温度下所测得的饱和导水率的值便于比较, 按公式 (2) 换算成 10 °C 时的饱和导水率  $K_{10}$ <sup>[17]</sup>。

$$K_{10} = \frac{K_t}{0.7 + 0.03t} \quad (2)$$

式中:  $K_{10}$ ——温度为 10 °C 时的饱和导水率 ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $K_t$ ——温度为  $t$  (°C) 时的饱和导水率 ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ );

$t$ ——测定时水的温度 (°C)。

### 2.3 数据分析

采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 进行显著性分析, 并在差异显著时进行多重比较 ( $p < 0.05$ , LSD  $t$  检验)。应用多元逐步回归和通径分析对饱和导水率与土壤物理因子的关系进行分析, 比较各因子的作用大小。实验数据采用 Excel 2007 和 SPSS 18.0 统计软件完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤饱和导水率特征

由图 1 可以看出, 从土壤表层到深层, 土壤  $K_s$  垂直递减特征明显 ( $p < 0.005$ ), 平均值分别为 5.49、3.60 和 2.67  $\text{mm}/\text{min}$ , 且变异系数大小依次为: 天然次生林 > 人工林 > 荒地。随土层深度增加  $K_s$  表现出负指数形式的递减规律 (公式 3), 这是因为土层越深, 容重增大, 孔隙度减小, 有机质含量降低, 土壤矿物质成分比例相应增加的缘故。

$$K_s = 6.442e^{-0.018Z} \quad (R^2 = 0.990) \quad (3)$$

式中:  $K_s$ ——饱和导水率;  $Z$ ——土层深度。

各林分平均  $K_s$  均比荒地有显著提高, 按差异的显著性可分为 3 级: 第一级为天然针阔混交林 (比荒地提高 117%), 第二级为天然阔叶林、楠竹林、天然针叶林 (分别比荒地提高 79%、70% 和 66%); 第三级为人工阔叶林、人工混交林、人工针叶林 (分别比荒地提高 51%、47% 和 38%)。植被是影响土壤的重要因素之一, 随着植物群落的生长, 林分结构复杂化, 物种丰富度提高, 植物通过与土壤之间的相互作用, 会对土壤的发育产生影响。此外, 有学者<sup>[18]</sup> 研究发现, 植物根系所形成的大孔隙 (>1 mm) 中优先流的存在也是土壤的导水能力显著增大的原因。

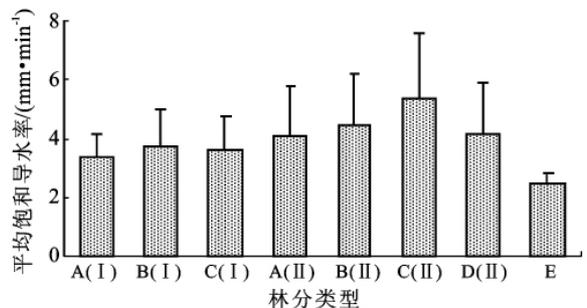
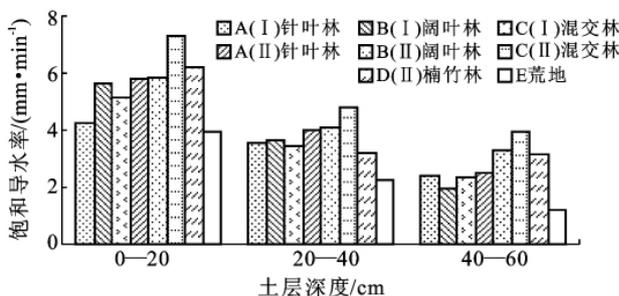


图 1 土壤饱和导水率剖面分布和平均饱和导水率比较

注: 图中字母不同表示在 0.05 水平上差异显著 (LSD 检验), 下同。从土壤表层到深层, 次生混交林、阔叶林、楠竹林、针叶林的变异系数 ( $C_v$ ) 分别为 0.42、0.41、0.41、0.40; 人工阔叶林、混交林、针叶林变异系数 ( $C_v$ ) 分别为 0.33、0.31、0.22; 荒地  $C_v = 0.13$ 。

天然林与人工林差异显著, 主要与林龄有关。相比人工林, 恢复年限更长的天然林具有更大的生产力

和更稳定的林分结构, 郁闭度更高, 灌草覆盖度更大, 根系分布更深、范围更广, 土壤中团聚体含量提高, 土

壤结构得到改善,通气性和透水性增强,这是天然次生林  $K_s$  比人工林显著提高的原因。

天然林分中,以混交林土壤  $K_s$  最大,这是因为混交林具有更稳定的林分结构,灌草种类最多、覆盖度最大(覆盖度达到 90%),再加上地处阴坡,大量的枯落物(尤其是分解层枯落物储量达到 237.76 t/hm<sup>2</sup>)不仅有利于有机质含量的提高和土壤养分的富集,而且促进了地下生物量的积累和根系的周转,使得土壤结构更加稳定。枯落物作为森林生态系统中联系地上植被与土壤的中间载体,在维持土壤肥力、养分循环和土壤结构等方面起着重要作用。但是人工林之间土壤  $K_s$  差异却不显著,可能是由于研究区降雨频繁,年降雨量较大,造成针、阔叶树的枯落物分解速率没有明显的差异所引起<sup>[19]</sup>。

### 3.2 土壤物理性质对饱和导水率的影响

饱和导水率与土壤的基本物理特征有关<sup>[20]</sup>,受土壤质地、容重、孔隙分布以及有机质含量等的影响,空间变异强烈<sup>[8]</sup>。相关分析表明,饱和导水率与各土壤物理因子之间有不同程度的相关性,受因子间相互影响的作用,简单的相关系数往往不能正确反映它们之间的关系。为了筛选出影响  $K_s$  变化的相对重要的因子,以饱和导水率为因变量,选择了砂粒、粉粒、黏

粒、土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和 >0.25 mm 水稳性团聚体含量 7 个因子作为自变量,采用数理统计的方法作多元逐步回归,拟合结果为:

$$Y = 7.142 - 0.067X_3 - 4.841X_4 + 0.123X_6 + 0.026X_7$$

$$(d_f = 71, F = 28.149 > F_{0.01} = 5.200, R^2 = 0.912, p < 0.001)$$

式中:  $Y$ ——土壤饱和导水率(mm/min);  $X_1$ ——砂粒(2~0.2 mm)含量(%);  $X_2$ ——粉粒(0.2~0.02 mm)含量(%);  $X_3$ ——黏粒(0.02~0.002 mm)含量(%);  $X_4$ ——土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);  $X_5$ ——毛管孔隙度(%);  $X_6$ ——非毛管孔隙度(%),  $X_7$ ——大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量(%)。经检验,方程达到显著水平,多元线性回归结果表明黏粒、容重、非毛管孔隙度和 >0.25 mm 团聚体含量是影响  $K_s$  的主要因子。为了判断这些因子对  $K_s$  的影响程度,进一步进行通径分析。表 3 中直接通径系数和间接通径系数分别表示某一变量对因变量的直接效应和通过其它变量对因变量的间接综合效应。通径分析结果进一步表明了各因子的作用大小及方向(剩余通径系数为 0.40, Durbin—Watson 统计量为 2.27, 接近于 2),绝对值由大到小依次为:容重 > 非毛管孔隙度 > 黏粒含量 > 水稳性团聚体含量(表 3)。

表 3 土壤物理因子对土壤饱和导水率的通径系数

因子	相关系数	直接通径系数	间接通径系数				小计
			$X_3 \rightarrow Y$	$X_4 \rightarrow Y$	$X_6 \rightarrow Y$	$X_7 \rightarrow Y$	
黏粒含量( $X_3$ )	0.126	-0.263		-0.100	-0.037	-0.047	-0.184
容重( $X_4$ )	-0.800**	-0.664	-0.040		-0.176	-0.122	-0.337
非毛管孔隙度( $X_6$ )	0.659**	0.369	0.026	0.316		0.117	0.459
团聚体含量( $X_7$ )	0.532*	0.249	0.049	0.325	0.173		0.547

注:  $X_3, X_4, X_6, X_7, Y$  分别表示黏粒含量、土壤容重、非毛管孔隙度、>0.25 mm 水稳性团聚体含量和饱和导水率  $K_s$ ; \* 表示在 0.05 水平上相关性显著; \*\* 表示在 0.01 水平上相关性显著。

各物理因子中,土壤容重的直接通径系数绝对值最大(-0.644),说明容重对  $K_s$  产生的直接负效应最强,是影响  $K_s$  的主导因子。同时,容重的间接通径系数为 -0.337,表明容重通过非毛管孔隙度和团聚体对  $K_s$  影响也较大(间接通径系数分别为 -0.176 和 -0.122)。容重反映了土壤紧实程度及气相比,随着容重的增大,土壤变得紧密坚实,团粒结构丧失,土壤孔隙减小,土壤内部的连通性变差,再加上遇水作用后的土体的膨胀会使气相比进一步减小,过水面积的减少导致水流在其中流动受到较大的阻力,因此单位时间单位梯度下的水流通量(饱和导水率)会相应降低。

一般来说,剖面孔隙度高的土壤入渗率大,孔隙

度低的土壤入渗率小。由表 3 可知,非毛管孔隙度对  $K_s$  的直接作用和间接作用都较强(直接通径系数为 0.369,通过容重影响  $K_s$  的间接通径系数为 0.316),而毛管孔隙度却没有进入回归方程,对  $K_s$  影响较小。说明土壤孔隙能够提高饱和导水率,但是不仅与孔隙多少有关,还与孔隙的大小关系密切。非毛管孔隙是直径 >0.1 mm 的土壤孔隙,又称通气孔隙,是重力水移动的主要通道。在饱和土壤水分运动中,非毛管孔隙的作用要大于毛管孔隙,因此孔隙度高而且连通性好、孔径较大的土壤才具有较高的饱和导水率。

黏粒含量对  $K_s$  的影响为直接负效应,即随着黏粒含量的升高土壤  $K_s$  降低。原因在于,作为土壤重要组成部分的黏粒具有更大的比表面积,对水分子具

有较强的吸附能力(黏滞力),在土壤孔隙比相同的情况下,孔隙尺寸更小,与接触面水膜的毛细管压力作用降低了水的势能,使其保持在土壤孔隙中不易排出,进而降低了土壤中的水流速度,同时,细小黏粒对较大孔隙的填充也对土壤中的水流通道有阻挡作用。

由表3可以看出, $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量的间接通径系数为0.547(通过黏粒、容重和非毛管孔隙度影响 $K_s$ 的间接通径系数分别为0.05、0.33、0.17),对 $K_s$ 有较强的正效应。团聚体内部以毛管孔隙分布为主,而团聚体之间以非毛管孔隙分布为主,水稳性团聚体的增加使得作为重力水运动主要通道的非毛管孔隙增多,也可以胶结凝聚分散的黏粒,降低土壤容重,改善土壤结构,进而提高了土壤 $K_s$ 。

### 3.3 土壤有机质与饱和导水率的关系

如图2所示 $0\text{--}60\text{ cm}$ 土层各林分土壤平均有机

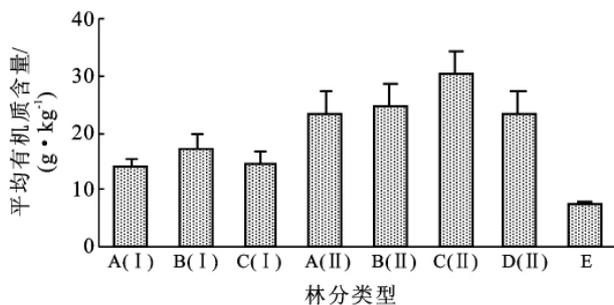


图2 土壤平均有机质含量及有机质与饱和导水率的关系

## 4 结论

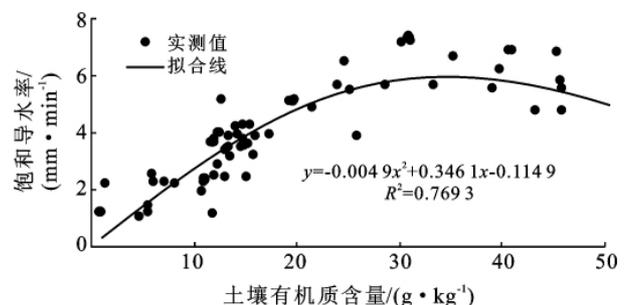
(1) 土壤饱和导水率从土壤表层到深层呈现出负指数形式的递减规律,与荒地相比,各林分对饱和导水率均有显著提高,天然次生林的提高作用大于人工林。植被生长对于土壤饱和导水率的提高具有重要作用。同林龄的天然次生林中,以混交林对土壤饱和导水率提高作用最大,在树种配置上建议营造针阔复层混交类型。

(2) 土壤黏粒、容重、非毛管孔隙度和 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量是影响该地区饱和导水率的主要因子。容重是土壤水分物理性质的综合反映,是影响饱和导水率的最为直接的因素;作为重力水运移主要通道的非毛管孔隙度对 $K_s$ 有提高作用;黏粒含量对 $K_s$ 呈负效应;团聚体主要是通过降低容重、增加非毛管孔隙间接提高饱和导水率。吕殿青<sup>[10]</sup>、方堃<sup>[11]</sup>、迟春明<sup>[17]</sup>、梁向峰<sup>[21]</sup>等也得出了相似的结论。

(3) 各典型林分对土壤有机质含量均有提高作用,土壤饱和导水率随着有机质含量增加而相应提高,但是当有机质含量高于一定程度( $35.3\text{ g/kg}$ )时,

质含量均比荒地有不同程度的提高,大小顺序与饱和导水率一致,表现为:天然针阔混交林 $>$ 天然阔叶林、楠竹林、针叶林 $>$ 人工阔叶林、混交林、针叶林 $>$ 荒地。有机质含量与 $K_s$ 的关系符合二次曲线( $R^2 = 0.769$ )。土壤有机质含量的增加对土壤有两方面的作用。一方面促进土壤结构的形成,使容重减小,孔隙度增加,土壤通气状况和透水能力的改善相应地 $K_s$ 会提高;另一方面,改善了土壤的胶体状况,使土壤的吸附作用增强,表现出较强的疏水性<sup>[21]</sup>,阻碍或延缓土壤水的入渗速度。

由图2可以看出, $K_s$ 随着有机质含量的增加而增大,说明孔隙度对导水性能的促进作用大于土壤胶体吸附作用的抑制能力,但是在土壤有机质含量超过 $35.3\text{ g/kg}$ 以后,饱和导水率增加趋势不明显,随着有机质含量的提高,饱和导水率则逐渐趋向于稳定。



有机质对于饱和导水率的提高作用不明显, $K_s$ 则趋向于稳定。这与梁向峰<sup>[21]</sup>、单秀枝<sup>[22]</sup>、彭舜磊<sup>[23]</sup>等研究结论相似,但极值不尽相同,可能是地区差异造成的。

(4) 重庆市四面山地处亚热带地区,降雨量多且强度大,土壤饱和导水率的提高有利于地表水分下渗,延长径流形成时间,增加土壤水库的储水量,对减小土壤流失量和防治自然灾害具有重要意义。本研究仅对几种典型林分土壤剖面饱和导水率特征及影响因子做了初步分析,没有考虑不同季节和降雨条件下剖面饱和导水率的变化,今后需要在更大范围内深入开展不同气候和不同植被条件下土壤界面水分运动时空过程的研究。

### [参考文献]

- [1] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [2] 马履一,翟明普,王勇.京西山地棕壤和淋溶褐土饱和导水率的分析[J].林业科学,1999,35(3):109-112.
- [3] 郑纪勇,邵明安,张兴昌.黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J].水土保持学报,2004,18

- (3): 53-56.
- [4] Brooks R H ,Corey A T. Properties of porous media affecting fluid flow[J]. J. Irrig Drain Div. ,1996 ,92( 2) : 61-88.
- [5] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media [J]. Water Resour. Res. ,1976 ,12: 593-622.
- [6] Van Genuchten M T. A closed-form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. ,1980 ,44( 5) : 892-898.
- [7] 廖凯华,徐绍辉,程桂福. 大沽河流域土壤饱和导水率空间变异特征[J]. 土壤, 2009 ,41( 1) : 147-151.
- [8] 胡克林,李保国,陈研. 表层土壤饱和导水率的空间变异对农田水分渗漏的影响[J]. 水利学报, 2006 ,37( 10) : 1217-1223.
- [9] 朱安宁,张佳宝,陈德立. 土壤饱和导水率的田间测定[J]. 土壤, 2000( 4) : 215-218.
- [10] 吕殿青,邵明安,刘春平. 容重对土壤饱和水分运动参数的影响[J]. 水土保持学报, 2006 ,20( 3) : 154-157.
- [11] 方堃,陈效民,张佳宝,等. 红壤地区典型农田土壤饱和导水率及其影响因素研究[J]. 灌溉排水学报, 2008 ,27( 4) : 67-69.
- [12] Zimmermann B ,Elsenbeer H. Spatial and temporal variability of soil saturated hydraulic conductivity in gradient of disturbance[J]. Journal of Hydrology ,2008 ,361( 1/2) : 87-95.
- [13] 刘国花,谢吉容. 重庆四面山风景区森林植被调查研究[J]. 渝西学院学报:自然科学版, 2005 ,4( 1) : 90-92.
- [14] 龚子同,张甘霖,陈志诚,等. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [15] 中国科学院南京土壤所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [16] 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.
- [17] 迟春明,王志春. 沙粒对碱土饱和导水率和盐分淋洗的影响[J]. 水土保持学报, 2009 ,23( 1) : 99-102, 106.
- [18] 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.
- [19] 王海燕,张洪江,杨平,等. 不同水土保持林地土壤有机碳研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010 ,19( 5) : 535-539.
- [20] 王伟,张洪江,李猛,等. 重庆市四面山林地土壤水分入渗特性研究与评价[J]. 水土保持学报, 2008 ,22( 4) : 95-99.
- [21] 梁向峰,赵世伟,张扬,等. 子午岭植被恢复对土壤饱和导水率的影响[J]. 生态学报, 2009 ,29( 2) : 636-642.
- [22] 单秀枝,魏由庆,严慧峻,等. 土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响[J]. 土壤学报, 1998 ,35( 1) : 1-9.
- [23] 彭舜磊,由文辉,沈会涛. 植被群落演替对土壤饱和导水率的影响[J]. 农业工程学报, 2010 ,26( 11) : 79-84.
- 
- ( 上接第 28 页)
- [5] 张晓艳,王立,黄高宝,等. 保护性耕作防治坡耕地水土流失效应的研究[J]. 安徽农业科学, 2008 ,36( 6) : 2520-2521, 2538.
- [6] 郑文杰,郑毅,Fullen M A,等. 模拟降雨条件下秸秆编织地表覆盖物对土壤侵蚀和小麦产量的影响[J]. 土壤通报, 2006 ,37( 5) : 969-972.
- [7] 王育红,姚宇卿,吕军杰. 残茬和秸秆覆盖对黄土坡耕地水土流失的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2002 ,20( 4) : 109-111.
- [8] 王晓燕,高焕文,杜兵,等. 保护性耕作的不同因素对降雨入渗的影响[J]. 中国农业大学学报, 2001 ,6( 6) : 42-47.
- [9] 陈光荣,张国宏,高世铭,等. 粮草豆隔带种植保护性耕作对坡耕地水土流失的影响[J]. 水土保持学报, 2009 ,23( 4) : 54-58.
- [10] 赵廷祥. 农业保护性耕作与生态环境保护[J]. 农村牧区机械化, 2002( 4) : 7-8.
- [11] Kaspar T C ,Radke J K ,Lafren J M. Small grain cover crops and wheel traffic effects on infiltration ,runoff ,and erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation , 2001 ,56( 2) : 160-164.
- [12] 郭贤仕,杨如萍,马一凡. 保护性耕作对坡耕地土壤水分特性和水土流失的影响[J]. 水土保持通报, 2010 ,30( 4) : 1-5.
- [13] 朱显谟. 黄土高原脱贫致富之道: 三论黄土高原的国土整治[J]. 水土保持学报, 1998 ,4( 3) : 1-5.
- [14] 呼有贤,李立科. 小麦高留茬少耕全程覆盖防止水土流失的效果[J]. 麦类作物, 1998 ,18( 4) : 57-58.
- [15] 李昱,李问盈. 冷凉风沙区机械化保护性耕作技术体系试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2004 ,9( 3) : 16-20.