

## 子午岭植被恢复对土壤饱和导水率的影响

梁向锋<sup>1,3</sup>, 赵世伟<sup>1,2,\*</sup>, 张 扬<sup>1,3</sup>, 华 娟<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西杨凌 712100; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:**通过对子午岭林区不同植被的土壤性质进行实验室测定和野外调查,对饱和土壤水分运动的重要参数之一土壤饱和导水率( $K_s$ )及其相关因子进行了多元分析和通径分析,揭示了植被恢复提高土壤水分传输性能的机理,主要结论如下:土壤有机质是子午岭林区九种植被下土壤饱和导水率提高的主要驱动因子。不同植被下的土壤饱和导水率均随深度的增加而迅速降低,尽管草地和先锋草地在 5~10cm 深度有一强透水层。土壤饱和导水率在剖面上的平均值,从辽东栎、早期森林、灌丛、先锋草地、弃耕地到草地依次降低。灌丛与草地、弃耕地的差异达到显著水平,辽东栎顶级群落的饱和导水率最高,植被的恢复明显提高了土壤饱和导水率。土壤容重、毛管孔隙度、>0.25mm 团聚体含量及粘粒含量直接影响土壤饱和导水率。土壤有机质含量的提高能够改善容重、毛管孔隙度、团聚体含量等物理性质。

**关键词:**子午岭;植被恢复;土壤饱和导水率;饱和土壤水分运动

文章编号:1000-0933(2009)02-0636-07 中图分类号:Q142,Q948,S154.1 文献标识码:A

## Effects of vegetation rehabilitation on soil saturated hydraulic conductivity in Ziwuling Forest Area

LIANG Xiang-Feng<sup>1,3</sup>, ZHAO Shi-Wei<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Yang<sup>1,3</sup>, HUA Juan<sup>1,3</sup>

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi Province 712100, China

2 College of Resources and Environment, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and forestry, Yangling, Shaanxi Province 712100, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 0636 ~ 0642.

**Abstract:** Soil organic matter was the major driving force for improvement of soil saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) in nine stands of the secondary zone of Ziwuling Forest in the Loess Plateau. Values of soil saturated hydraulic conductivity quickly reduced with depth under different communities, though at 5–10 cm depth both *Bothriochloa ischaemum* and Vanward grassland had a permeable layer. The average  $K_s$  for each soil profile progressively declined from that for *Quercus liaotungensis* to early forest, to shrub, to Pioneer grass and to farmland abandoned to *Bothriochloa ischaemum*, respectively. Values for shrub land were significantly higher than for Vanward grassland and abandoned farmland. *Quercus liaotungensis* supported the highest values under the nine stands, with vegetative restoration notability improving  $K_s$ . Soil saturated hydraulic conductivity was directly affected by soil bulk density, capillary porosity, > 0.25mm aggregate content and clay content. Soil physical properties such as soil bulk density, capillary porosity and aggregate content were all improved by soil organic matter content.

**Key Words:** Ziwuling; vegetation rehabilitation; soil saturated hydraulic conductivity; the movement of saturated soil water

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划重大资助项目(2006BCA01A07);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金资助项目(10501-152)

收稿日期:2007-09-23; 修订日期:2008-05-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail:swzhao@ms.iswc.ac.cn

导水率  $K$  (hydraulic conductivity) 是表示孔隙介质透水性能的综合比例参数,即单位水势梯度下水的流量密度或渗流速度。土壤中的饱和水流是土壤水运动的最经典形式,表示土壤介质中饱和水流运动的最大能力。常见为地表积水或地表径流发生条件下的重力下渗水,这种饱和水流在土壤中的运动能力往往制约着地表径流的发生和发展,因此也决定了流域内诸径流过程的时空变化,用土壤饱和水流的运动能力来评价土壤的水文性质是很贴切的。饱和导水率( $K_s$ )对于一定的土壤是一个常数,非饱和导水率是变量。在土壤水分运动的数值计算中,饱和导水率和非饱和导水率是必须确定的重要水分参数,可以通过实验实测或数学模型获得。一些非饱和导水率推测模型 Burdine 模型<sup>[1]</sup>、Mualem 模型<sup>[2]</sup>、van Genuchten 模型<sup>[3]</sup>、Broadbridge-White 模型<sup>[4]</sup>,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的研究具有很重要的意义。

目前对于饱和土壤导水性能的研究主要集中在土壤表层<sup>[5-7]</sup>,在影响饱和水分运动的因素上,只是简单分析了与容重<sup>[8]</sup>、与有机质的关系<sup>[9]</sup>,对于森林土壤的研究则相对较少<sup>[10,11]</sup>,土壤饱和导水率在剖面上的变化对植被恢复的响应方面的研究更加缺乏,因此,对植被恢复下土壤剖面饱和导水率的影响及其相关因子进行探讨很有必要。

黄土高原水土流失不仅使得营养元素大量流失,而且使土壤物理性状急剧恶化。目前,黄土高原实施了大规模的退耕还林还草工程,取得了明显成效。子午岭林区是黄土高原最大的天然次生林之一,对该区的土壤剖面水分参数进行研究,具有对黄土高原植被建设及生态恢复的指导意义。同时,也为该区的水土保持和森林水文效益评价研究提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样点选择

研究区位于黄土高原子午岭北部甘肃省合水县连家砭林场,属于黄土高原丘陵沟壑区,海拔 1200 ~ 1600m,为半干旱季风气候。25a 平均气温 7.4℃,年平均降雨量 587.6mm,年平均相对湿度 63% ~ 68%,干燥度 0.97。土壤为原生(山坡)或次生(沟谷)黄土,厚度一般为 50 ~ 100m,其下为 80 ~ 100m 的红土。子午岭北部植被是在 1866 年当地人口外迁后,在弃耕地的基础上恢复起来的天然次生林,具有完整的植被演替序列,其主要森林群系有油松林、辽东栎林、山杨林和白桦林等,还有辽东栎林与白桦、山杨、油松等的混交林。其中,辽东栎林为该区顶级群落<sup>[12]</sup>。

2007 年 5 月,在野外踏查的基础上,根据植被的恢复年限、结构、群落组成和当地居民访问的结果,在子午岭植被演替序列中选择由弃耕地到辽东栎顶级群落的 9 个植被类型作为处理,分别为:弃耕地、先锋草地、白羊草草地、沙棘、狼牙刺、白桦、山杨、山辽混交、辽东栎纯林。选择当地林场进行长期林分监测的典型样地,在每个样地选择 3 个植被盖度较为一致的样方进行地上植被调查(样方大小乔木为 10m × 10m;灌木 5m × 5m;草地 1m × 1m)和土壤样品的采集。在每个样方中选择采样点挖 1m 深土壤剖面,分五层取样土壤样品:0 ~ 5cm、5 ~ 10cm、10 ~ 30cm、30 ~ 60cm、60 ~ 100cm。取样时同时取环刀样和原状土带回实验室分析,本文中用到的数据均为 3 次重复的平均值。土壤容重、饱和导水率、水分特征曲线、土壤水稳性团聚体用原状土,有机质过 0.25mm 筛孔,机械组成过 2mm 筛孔。

### 1.2 试验方法

土壤有机质采用重铬酸钾外加热法;土壤饱和导水率采用恒定水头法(结果换算成 10℃ 下的饱和导水率);机械组成采用 MS2000 颗粒光栅分析仪测定;土壤水分特征曲线采用离心机法;容重采用环刀法;土壤水稳性团聚体用风干土,应用改进的 yoder 湿筛法测定,即根据黄土特性,事先将土壤湿润,振动时间由 30min 改为 1min,粒径分别为: > 5mm、5 ~ 2mm、2 ~ 1mm、1 ~ 0.5mm、0.5 ~ 0.25mm。

### 1.3 孔隙度的计算

土壤容积含水量与土壤吸力之间关系符合幂函数  $\theta = AS^{-B}$ ,相关性极显著<sup>[13]</sup>。根据该函数换算得水吸力在  $-0.33 \times 10^5$  和  $-15 \times 10^5$  (此时水的平均密度为  $1.3\text{g/cm}^3$ ) 时的容积含水量,分别表示田间持水量和萎蔫含水量。土壤孔隙分为 3 级,即通气孔隙度、毛管孔隙度和无效孔隙度<sup>[14]</sup>,土壤总孔隙度通过容重换算(总孔隙度

$= (1 - \text{容重}/\text{比重}) \times 100\%$ , 黄土高原土壤比重取  $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ )。土壤毛管孔隙度为田间持水量与萎蔫含水量的差值, 通气孔隙度为总孔隙度与田间持水量之间的差值。

表 1 9 个样点基本状况

Table 1 Summary of nine typical communities

群落类型 Communities	植被类型 Vegetations	恢复年限 Ages (a)	坡度 Gradient	坡向 Orientation	海拔 Altitude (m)	植物高度 Height (m)	样本数 Sample number
辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	150	17	北偏东 48	1439	11.7	3
早期森林 Early forest	山辽混交 <i>Quercus liaotungensis</i> + <i>Populus davidiana</i>	110	11	北偏西 4	1434	11	3
	山杨 <i>Populus davidiana</i>	100	14	北偏东 45	1450	12.1	3
	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	100	10	北偏西 15	1420	10	3
灌丛 Shrub	沙棘 <i>Seabuckthorn</i>	30	12	北偏西 56	1411	1.3	3
	狼牙刺 <i>Sophora viciifolia</i>	45	23	南偏西 68	1342	4.4	3
白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	24	8	南偏西 85	1340	0.6	3
先锋草地 Vanward grassland	长芒草、达乌里胡枝子等 <i>Stipa bungeana</i> , <i>lespedeza</i>	17	19	北偏西 48	1347	0.7	3
弃耕地 Abandoned land	芨芨、铁杆蒿、长芒草等 <i>Artemisia giraidii</i> , <i>Artemisia</i> <i>sacrorum</i> , <i>Stipa bungeana</i> .	6	0	崩顶 0	1413	0.3	3

#### 1.4 数据处理

由于土壤饱和导水率与土壤结构、质地、孔隙度等物理因子有很好的相关性, 因此本文应用多元逐步回归和通径分析法对子午岭林区土壤饱和导水率与土壤结构、质地、孔隙度等物理因子的关系进行了分析, 以比较各因素对土壤饱和导水率的作用大小。多元分析和通径分析采用 DPS 数据处理软件<sup>[15]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 土壤饱和导水率

土壤饱和导水率是反映土壤入渗性能的一个重要指标, 是土壤质地、容重、孔隙分布特征的函数。同一质地土壤其入渗性能越大其土壤传输水分的能力就越大。

如图 1 所示, 饱和导水率的剖面分布, 一般是由上到下逐渐减小。辽东栎林地、早期森林(取山杨、白桦、山辽混交的平均)、灌丛(取沙棘、狼牙刺平均)土壤饱和导水率的剖面变化趋势一致, 均随深度的增加而迅速下降。草地和先锋草地饱和导水率在剖面上变化较为复杂, 在 5~10cm 处有一强透水层, 是根系活跃和土壤动物活动形成的大孔隙所致。弃耕地土壤饱和导水率在剖面上的变化比较小。表层土壤饱和导水率辽东栎最高, 为  $3.152\text{mm}/\text{min}$ , 白羊草最低为  $0.291\text{mm}/\text{min}$ 。根据蒋定生<sup>[16]</sup>对黄土高原土壤饱和导水率的分区, 稳定入渗率在  $1.35 \sim 3.5\text{mm}/\text{min}$  的属于入渗能力很强区。子午岭各个植被下的土壤除弃耕地外, 在整个土壤剖面中均有处于这个范围导水率的层次。

土壤饱和导水率在 60~100cm 土层在各个植被之间变化较小, 标准差为  $0.0698\text{mm}/\text{min}$ 。在讨论土壤饱和导水率在剖面上的变化时, 考虑 60cm 以内的变异即可。在以下的分析中采用 0~60cm 数据进行分析。

土壤饱和导水率剖面的平均值(0~5cm、5~10cm、10~30cm、30~60cm 4 个数值的算数平均值), 辽东栎最高, 为  $1.918\text{mm}/\text{min}$ ; 早期森林和灌丛次之, 分别为  $1.510\text{mm}/\text{min}$ 、 $1.360\text{mm}/\text{min}$ ; 先锋草地和弃耕地较低, 分别为  $1.024\text{mm}/\text{min}$  和  $0.818\text{mm}/\text{min}$ ; 草地最低  $0.625\text{mm}/\text{min}$ 。辽东栎是弃耕地的 2.34 倍, 是白羊草草地的 3.07 倍。辽东栎的  $K_s$  与其余乔灌的差别均达到 5% 的显著程度。从表 2 可以看到, 植被恢复到灌丛之后, 其饱和导水率已与草地、先锋草地、弃耕地之间达到差异显著性。说明植被恢复到灌丛阶段后, 其  $K_s$  已得到提高, 恢复到辽东栎顶级群落后,  $K_s$  达到最高。植被恢复可以明显提高土壤饱和导水率。

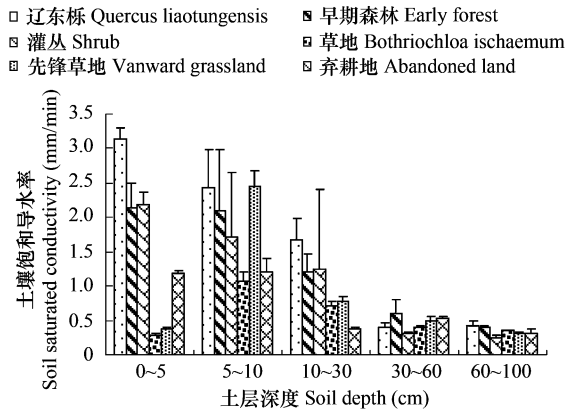


图 1 不同植被群落土壤饱和和导水率的剖面分布

Fig. 1 Soil saturated hydraulic conductivity of different communities

表 2 不同植被下  $K_s$  剖面均值的 LSD 比较

Table 2 Multiple comparisons of $K_s$ under different communities	
群落类型 Community	$K_s$ 平均 Mean 10°C mm/min
辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	1.9176 ± 0.0967 aA
早期森林 Early forest	1.5100 ± 0.245 b Ab
落丛 Shrub	1.3597 ± 0.342 b Bc
先锋草地 Vanward grassland (recovered for 17 years)	1.0240 ± 0.0328 c CD
弃耕地 Abandoned land (recovered for 17 years)	0.8179 ± 0.0408 cd D
白茅草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	0.6253 ± 0.0539 d D

### 2.2 $K_s$ 与土壤物理性质

为进一步分析影响土壤饱和和导水率变化的因子,采用数理统计的方法作了逐步回归(多元分析中剔除白茅草草地和先锋草地 0~5cm 层两个异常值)。土壤饱和和导水率与土壤孔隙数量、土壤质地和结构关系密切。现有的研究<sup>[9,17-19]</sup>也表明, $K_s$  与土壤孔隙度、容重、结构有很好的相关性。因此,选择了以下 7 个因素作为自变量进行分析:

因子  $X_1$ 容重( $g/cm^3$ ); $X_2 > 0.25mm$  土壤水稳性团聚体含量(%); $X_3$  毛管孔隙度(%); $X_4$  通气孔隙度(%); $X_5$  砂粒含量( $2 \sim 0.02mm <$  %); $X_6$  粉粒含量( $0.02 \sim 0.002 mm\%$ ); $X_7$  粘粒含量( $< 0.002mm \%$ );因变量为  $K_s$  (mm/min)。

$$Y = 2.0468 - 5.9210X_1 + 0.01493X_2 + 0.2841X_3 + 0.03421X_7 \quad (1)$$

影响土壤饱和和导水率的因子有容重、 $> 0.25mm$  土壤水稳性团聚体含量、毛管孔隙度、粘粒含量,这些因子可很好的对土壤饱和和导水率做出多元线形拟合(式 1)( $R = 0.8738, P = 0.0001$ )。由于各因子中量纲和指标值的差异,根据多元回归分析中各系数并不能直接判定各因子对土壤饱和和导水率的影响。因此需要进一步进行通径分析(表 3)。

通径分析的结果进一步说明了各因子对土壤饱和和导水率的作用方向及大小(剩余通径系数 0.4863, Durbin-Watson 统计量接近于 2,为 2.3054)。土壤饱和和导水率与相关因子的直接通径系数绝对值由大到小依次为:容重  $>$  毛管孔隙度  $>$  水稳性团聚体含量  $>$  粘粒含量。土壤容重的变化改变了土壤的孔隙状况和数量以及土壤导水能力,对土壤饱和和导水率有重大影响,土壤饱和和导水率随容重的增加而减小<sup>[8]</sup>。通径分析的结果也表明,容重的直接通径系数绝对值为 1.08,比其他间接通径系数都要大,其对土壤饱和和导水率的影响是直接的。土壤毛管孔隙度的影响弱于容重,且通过影响容重对土壤饱和和导水率间接影响要大于其直接影响,其与容重做用方向相反,即毛管孔隙度的增加降低土壤容重,从而提高饱和和导水率。这也说明了在饱和土壤水分运动中,毛管孔隙度的作用要强于通气孔隙度。土壤团聚体是土壤结构的基本单位,对土壤大孔隙的形成有很重要的贡献,是调节土壤中水、气运动的重要因素。土壤团聚体对土壤饱和和导水率也有一定的影响,而且其通过容重表现的间接作用大于直接作用。如上表所示,土壤粘粒含量直接作用与容重方向

表 3 各因子与土壤饱和和导水率之间的直接与间接作用

Table 3 Effects of soil physical properties on soil saturated hydraulic conductivity				
因子 Factors	直接作用 Direct effects	间接作用 Indirect effects		
		$\rightarrow X_1$	$\rightarrow X_2$	$\rightarrow X_7$
$X_1$	-1.0177		-0.0766	0.2740
$X_2$	0.1753	0.4448		0.0139
$X_3$	0.4823	-0.5781	0.0050	0.0404
$X_7$	0.1529	-0.6591	0.0018	0.1273

相反,通过容重表现的间接作用方向相同,间接作用远远大于直接作用。粘粒含量的降低可以降低容重,森林土壤的发育过程中,一般有粘粒淀积过程,从而在剖面的某个层次上形成粘化层。物理性粘粒含量与  $K_s$  有一定的关系<sup>[9]</sup>,在本研究中粘粒含量进入回归方程,说明植被恢复使得土壤粘粒含量在剖面中发生移动。

### 2.3 土壤有机质与土壤饱和和导水率

土壤有机质是土壤结构形成和稳定作用的核心物质,通过改善土壤结构、土壤胶体状况等,影响土壤饱和和导水率,起到调控水分运动的功能。

张鼎华<sup>[9]</sup>研究的结果表明,沙地土壤饱和和导水率与有机质和物理性粘粒含量呈明显的负相关关系,对沙地而言,降低土壤饱和和导水率有利于土壤水分保持。粘壤土土壤饱和和导水率随土壤有机质含量的变化是开口向下的抛物线<sup>[17]</sup>,并且在有机质含量 15g/kg 达到顶点值。

本研究表明二者间有很好的相关性相关系数达 0.7899(图 2)。有机质含量为 51.556g/kg 左右时,饱和和导水率达最高,2.434mm/min。当有机质含量小于 51.556g/kg 时, $K_s$  随有机质含量的增加,饱和和导水率增加,孔隙度增加对导水性能的促进作用大于吸附作用的抑制能力。当土壤有机质含量 51.556g/kg 时, $K_s$  反而随有机质含量的增加下降,孔隙度增加对导水性能的促进作用小于吸附作用的抑制能力。

可见,在不同的土壤质地条件下,土壤有机质改善土壤导水性能的作用有差别。在沙土区,有机质的作用是通过改善土壤胶体状况而降低土壤饱和和导水率,以减少水分的下渗损失,有利于土壤水分的保持。在轻壤区和粘壤区,土壤有机质则在一定范围内增加了土壤孔性,提高了土壤饱和和导水率。在高于某个范围时,土壤有机质对土壤水分的吸附作用将大于增加孔隙度的导水作用,而降低土壤入渗性能<sup>[17]</sup>。

### 3 结论与讨论

植被恢复有利于土壤饱和和导水率的提高,主要提高了 0~60cm 土层的土壤饱和和导水率。从弃耕地到辽东栎的各个植被演替阶段,土壤饱和和导水率不断提高,到辽东栎顶级群落达到最高值。

土壤的容重、毛管孔隙度、>0.25mm 水稳性团聚体含量及粘粒含量直接影响土壤饱和和导水率。土壤容重的大小与土壤孔隙的多少有着直接的关系,土壤孔隙是水分运移的通道,其数目的多少和大小分布会直接影响土壤饱和和导水率。土壤团聚体是土壤结构的基本单位,对土壤孔隙的形成有很重要的贡献,是调节土壤中水、气运动的重要因素。土壤团聚体对土壤饱和和导水率也有一定的影响。物理性粘粒含量与  $K_s$  有一定的关系<sup>[9]</sup>。粘粒含量的降低可以降低容重,在本研究中粘粒含量进入回归方程,说明植被恢复使得土壤粘粒含量在剖面中发生移动。

土壤有机质含量对土壤饱和和导水率产生重要影响。本研究表明有机质含量达到 51.556g/kg 以前,土壤饱和和导水率随有机质含量的增加而提高,可以认为它是土壤饱和和导水率提高的驱动因子。土壤有机质含量的增加可以降低土壤容重,改善土壤孔隙度、储水性和持水性等土壤物理性质<sup>[20~22]</sup>,增强土壤团聚体形成过程中最为重要的胶结作用<sup>[23]</sup>,胡敏酸对 >1mm 水稳性团聚体形成具有显著作用<sup>[24]</sup>,赵其国等<sup>[25]</sup>的研究也表明植被恢复过程中土壤有机碳促进了土壤团聚体的形成。由此,而其作用机理是通过改善土壤的物理特性和提高土壤结构稳定性,从而促进饱和和导水率的提高。但是,在高于 51.556g/kg 时,土壤有机质对土壤水分的吸附作用将大于增加孔隙度的导水作用<sup>[17]</sup>,而出现饱和和导水率下降的趋势。这可能是由于土壤有机碳含量达到一定程度后,就表现较强疏水性质,而土壤疏水性最基本特征就是阻碍或者延缓土壤水的入渗速度<sup>[26]</sup>,其作用机理需进一步研究。

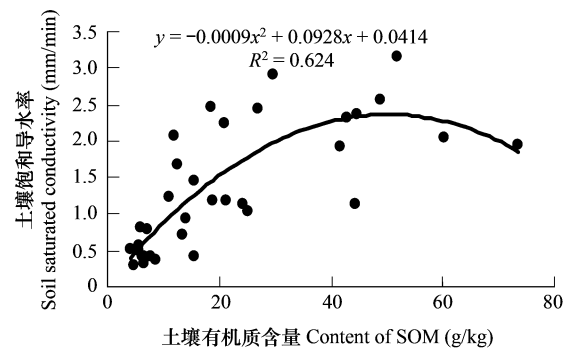


图2 土壤有机质和土壤饱和和导水率的关系

Fig. 2 The relationship between SOM and  $K_s$

在黄土高原,降雨集中且多强降雨,产流方式为超渗产流,即降雨强度超过了土壤水分入渗速率。因此,土壤饱和导水率的提高有利于降雨的就地转化,增加土壤水库储水量。在易产流的坡度较大的地方恢复植被能够更有效地将雨水转化。子午岭林区因其长期的天然次生林恢复,有机质含量在山杨群落达到了 73.47g/kg 的最高值,这在土地贫瘠、水土流失严重的黄土高原是极其少见的。土壤有机质含量过高表现的土壤疏水性在黄土高原也还没有见到类似报道,关于有机质在植被恢复过程中对水分运动的影响需进一步研究。

#### References:

- [ 1 ] Burdine N T. Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Tran AIME*, 1953,198: 71 – 77.
- [ 2 ] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res*, 1976,12: 593 – 622.
- [ 3 ] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc Am J*, 1980,44: 892 – 898.
- [ 4 ] Broadbridge P, White I. Constant rate rainfall infiltration: a versatile nonlinear model 1. analytic solution. *Water Resour. Res*, 1988, 24, (1): 145 – 154.
- [ 5 ] Zheng J Y, Shao M A, Zhang X C. Spatial variation of surface soil's bulk density and saturated hydraulic conductivity on slope in Loess Region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 53 – 56
- [ 6 ] Li B G, Hu K L, Chen D L, White R E. Conditional simulation of soil surface saturated hydraulic conductivity at field scale. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002,(2):36 – 40,46.
- [ 7 ] Hu K L, Li B G, Chen Y. Effect of spatial variability of surface soil saturated hydraulic conductivity on water drainage at field scale. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006,37(10):1217 – 1223.
- [ 8 ] Lü D Q, Shao M A, Liu C P. Effect of bulk density on soil saturated water movement parameters. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 154 – 157.
- [ 9 ] Zhang D H, Zhai M P, Jia L M, *et al.* Relationship between organic matter content in sandy soil and hydrodynamic parameters. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(1): 74 – 77.
- [ 10 ] Ma L Y, Zhai M P, Wang Y. Analysis of saturated soil hydraulic conductivity of mountain brown earth and eluvial cinnamon soil in Beijing Xishan. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999,35(3):109 – 112.
- [ 11 ] Zhang X B, Shanguan Z P. Effect of human-induced disturbance on physical properties of soil in artificial *Pinus tabulaeformis* Carr. Forests of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11):3685 – 3695.
- [ 12 ] Zou H Y, Liu G B, Wang H S. The vegetation development in north Ziwuling forest region in last fifty years. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2002, 22(1): 1 – 8.
- [ 13 ] Hua M, Wang J. *Soil physics*. Beijing:Beijing Agricultural University Press, 1993.
- [ 14 ] Huang C Y. *Pedology*. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 92.
- [ 15 ] Tang Q Y, Feng M G. *DPS data process system*. Beijing:Scientific Press, 2006.
- [ 16 ] Jiang D S. Regional division of soil infiltration Capacity in Loess Plateau. In: *Soil and agriculture in Loess Plateau*. Beijing: Agricultural Press, 1989.
- [ 17 ] Shan X Z, Wei Y Q, Yan H J, *et al.* Influence of organic matter content on soil hydrodynamic parameters. *Acta Pedologica Sinica*,1998, 35(1): 1 – 9.
- [ 18 ] He K N. Study on the physical characteristics of soil moisture in shelter forests. *Journal of Beijing Forestry University*,1995,17(3):44 – 50.
- [ 19 ] Chen X M, Pan G X, Wang D J, *et al.* A study on saturated hydraulic conductivity of farm land environment soil of Taihu lake region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 20(5): 11 – 13.
- [ 20 ] Huang C B, Liang H W. Investigation on soil hydro physical properties of forest soil at different geographic regions in Guangxi. *Soil and Environmental Sciences*, 1999, 8(2): 96 – 100.
- [ 21 ] Liu N N, Zhao S W, Yang Y H, *et al.* Study on water -holding capacity of the top soil of a steppe reserve in the Yunwu mountains, Guyuan, Ningxia Hui Autonomous region. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, 14(4): 338 – 342.
- [ 22 ] Zhao S W, Zhou Y D, Wu J S. Soil moisture characteristics of different vegetation in northern of Ziwuling. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(4): 119 – 123.
- [ 23 ] Institute of soil science academia sinica. *China soil*. Beijing: Scientific Press,1978. 45 – 47.

- [24] Liu G B. Vegetation restoration and improvement process of soil anti-scourability in Loess Plateau Ⅲ. Effect of vegetation restoration on soil Humus and Aggregations. *Research of Soil and Water Conservation*, 1997, 4(5): 122—128.
- [25] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetativer estoration on severely eroded red soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2176—2183.
- [26] Wallis M G, Home D J. soil water repellency. *Adv. Soil Sci.*, 1992, 92—146.

#### 参考文献:

- [5] 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. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 53~56.
- [6] 李保国, 胡克林, 陈德立, White R E. 农田土壤表层饱和导水率的条件模拟. *水利学报*, 2002, (2): 36~40, 46.
- [7] 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. *水利学报*, 2006, 37(10): 1217~1223
- [8] 吕殿青, 邵明安, 刘春平. 容重对土壤饱和和水分运动参数的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 154~157.
- [9] 张鼎华, 翟明普, 贾黎明, 等. 沙地土壤有机质与土壤水动力学参数的关系. *中国生态农业学报*, 2003, 11(1): 74~77.
- [10] 马履一, 翟明普, 王勇. 京西山地棕壤和林溶褐土饱和导水率分析. *林业科学*, 1999, 35(3): 109~112.
- [11] 张希彪, 上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响. *生态学报*, 2006, 26(11): 3685~3695.
- [12] 邹厚远, 刘国彬, 王晗生. 子午岭林区北部近 50 年植被的变化发展. *西北植物学报*, 2002, 22(1): 1~8.
- [13] 华孟, 王坚. 土壤物理学. 北京: 北京农业大学出版社, 1993.
- [14] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000. 92.
- [15] 唐启义, 冯明光. DPS 数据处理系统. 北京: 科学出版社, 2006.
- [16] 蒋定生. 黄土高原土壤入渗能力分区. 见: 黄土高原土壤与农业. 北京: 农业出版社, 1989.
- [17] 单秀枝, 魏由庆, 严惠峻, 等. 土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响. *土壤学报*, 1998, 35(1): 1~9.
- [18] 贺康宁. 水土保持林地土壤水分物理性质的研究. *北京林业大学学报*, 1995, 17(3): 44~50.
- [19] 陈效民, 潘根兴, 王德建, 等. 太湖地区农田生态环境中土壤饱和导水率研究. *水土保持通报*, 2000, 20(5): 11~13.
- [20] 黄承标, 梁宏温. 广西不同地理区域森林土壤水文物理性质研究. *土壤与环境*, 1999, 8(2): 96~100.
- [21] 刘娜娜, 赵世伟, 杨永辉, 等. 云雾山封育草原对表土持水性的影响. *草地学报*, 2006, 14(6): 338~342.
- [22] 赵世伟, 周印东, 吴金水. 子午岭北部不同植被类型土壤水分特征研究. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 119~123.
- [23] 中国科学院南京土壤研究所主编. 中国土壤. 北京: 科学出版社, 1978. 45~47.
- [24] 刘国彬. 黄土高原草地植被恢复与土壤抗冲性形成过程 Ⅲ. 植被恢复对土壤腐殖质物质及水稳性团聚体的影响. *水土保持研究*, 1997, 4(5): 122~128.
- [25] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2003, 23(10): 2176~2183.