

# 晋西黄土丘陵区主要人工林土壤饱和导水率研究

刘宇<sup>1</sup>, 张洪江<sup>1</sup>, 张友焱<sup>2</sup>, 王月东<sup>3</sup>, 程金花<sup>1</sup>, 张东旭<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学院 荒漠化研究所, 北京 100091; 3. 山西省吕梁山国有林管理局 车鸣峪林场, 山西 吕梁 033400)

**摘要:** 饱和导水率是表征土壤入渗能力的重要参数之一, 研究饱和导水率对土壤入渗过程分析具有重要的意义。对晋西黄土丘陵区主要人工林土壤饱和导水率( $K_s$ )进行了分析, 并利用方差分析(ANOVA)和主成分分析方法探讨了其与土壤物理因子和有机质的相关性, 得出影响饱和导水率的主导因子。结果表明, 与荒地相比, 各林分对饱和导水率均有显著提高; 土壤饱和导水率随着土层深度加深呈现负指数递减规律; 影响该地区人工林地土壤饱和导水率的主导因子为容重、毛管孔隙度、 $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量、土壤有机质及土壤质地。土壤有机质含量的提高可改善土壤容重、团聚体含量等物理性质; 在植被经营过程中, 建议采用适宜的混交类型, 树种可选择白桦、落叶松等。

**关键词:** 黄土丘陵区; 人工林; 土壤饱和导水率( $K_s$ ); 主导因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)04-0302-05

中图分类号: S152.7

## Saturated Hydraulic Conductivity of Soil Under Main Planted Forests in Loess Hilly Region of Western Shanxi Province

LIU Yu<sup>1</sup>, ZHANG Hong-jiang<sup>1</sup>, ZHANG You-yan<sup>2</sup>, WANG Yue-dong<sup>3</sup>,  
CHENG Jin-hua<sup>1</sup>, ZHANG Dong-xu<sup>1</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Institute of Desertification Studies, CAF, Beijing 100091, China;

3. Chemingyu Forestry Farm, Forestry Management Bureau of Lüliang Mountain, Lüliang, Shanxi 033400, China)

**Abstract:** The study of soil saturated hydraulic conductivity( $K_s$ ), one of the parameters describing soil water infiltration capacity, is very important for the soil infiltration process. Based on the analysis of  $K_s$  of soil under the main planted forests in the loess hilly region of Western Shanxi Province, the correlations between  $K_s$  and the physical properties and organic matter contents of soil was established using analysis of variation (ANOVA) and principal component analysis, the dominant factor affecting the  $K_s$  was figured out. The results showed that  $K_s$  was significantly higher in all forest types than the barren land and decreased negatively exponential with the increase of soil depths; The dominant factors affecting  $K_s$  were soil bulk density, capillary porosity, aggregate content larger than 0.25 mm, soil organic matter content and soil texture; Soil physical properties such as soil bulk density, capillary porosity could be improved by increase of soil organic matter content; Suitable mixed forest types with species such as *Betula platyphylla* Suk. and *Larix gmelinii* Rupr. chosen for afforestation were recommended.

**Keywords:** loess hilly region; planted forest; saturated hydraulic conductivity; dominant factors

土壤的饱和导水率  $K_s$  是土壤被水饱和时, 单位水势梯度下单位时间内通过单位面积的水量<sup>[1-2]</sup>。它是土壤的重要物理性质之一。对于一定的土壤, 土壤的饱和导水率是一个常数, 它是评价土壤透水性能的

重要指标<sup>[3]</sup>。饱和导水率是影响黄土高原地区坡地产流产沙的重要因素, 对坡地土壤入渗性能和抗侵蚀能力具有重要影响<sup>[4]</sup>, 因此, 对饱和导水率的定量研究具有重要的意义。

收稿日期: 2012-12-03

修回日期: 2013-01-21

资助项目: “十二五”农村领域国家科技计划项目“晋西黄土丘陵沟壑区节水防蚀水土保持林研究与示范”(2011BAD38B0602; 2011BAD31B02); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(TD2011-2); 国家自然科学基金项目(41271300; 30900866)

作者简介: 刘宇(1989—), 男(汉族), 湖北省宜昌市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: liuyu0710@bjfu.edu.cn。

通信作者: 张洪江(1955—), 男(汉族), 河北省易县市人, 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。

土壤饱和导水率的大小,决定于土壤的性质和水的黏度<sup>[5]</sup>。因此,很多因素都会对土壤的饱和导水率产生影响,比如土壤的质地、孔隙状况、温度、有机质以及土地利用方式等。国内学者对饱和导水率测定方法、不同土地利用方式和生物结皮对其影响<sup>[6-8]</sup>等方面做了研究。马履一,翟明普等<sup>[9]</sup>对京西山地棕壤和淋溶褐土的饱和导水率进行了分析;白冰,陈效民等<sup>[10]</sup>研究和分析了黄河三角洲滨海盐渍土的饱和导水率。这些研究分析了土壤饱和导水率对不同措施的响应,或仅通过相关分析得出其他土壤物理性质与土壤饱和导水率的简单关系<sup>[6]</sup>,很难探明影响饱和导水率的关键因素。本研究以晋西黄土丘陵区不同林地土壤为研究对象,综合分析饱和导水率的剖面变化规律及土壤性质对其的影响,为深入研究该地区林地土壤水分运动规律提供依据,也为晋西地区防护林构建提供一定参考。

## 1 试验区概况

研究区位于山西省中阳县车鸣峪林场,地处中纬偏南地带,属黄河流域典型的半干旱黄土丘陵区,海拔 890~1 400 m,地理坐标为东经 111°04′—111°21′,北纬 37°03′—37°20′。该区属温暖亚干旱

区,为暖温带大陆性气候,四季分明。年平均气温 6~10℃,极端最高气温 35.6℃(1994 年 6 月 16 日),极端最低气温 -24.3℃(1980 年 1 月 30 日);年降水量平均 460~600 mm,全年降雨集中在 7—9 月,占全年降雨量的 70%,年均蒸发量 1 019.7 mm;无霜期 120~200 d,≥10℃积温可达 3 000℃。主要森林土壤以褐土居多,其次是棕壤。该区属于森林草原灌丛植被区,林地大部分是疏林地,稳定性较差。乔木以人工林为主,主要有油松(*Pinus tabulaeformis*)纯林、白桦(*Betula platyphylla* Suk)纯林、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)纯林、杨树(*Populus*)纯林等,林下主要野生灌木有胡枝子(*Leapedeza bicolor*)、丁香(*Syzygium aromaticum*)、杠柳(*Periploca sepium*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等;草本植物以菊科和禾本科为主。

2012 年 7 月在试验区全面踏勘的基础上,以植被生长年限、结构、群落组成和当地居民访问为依据,选取具有代表性的人工林典型样地,分别为油松纯林、刺槐纯林、白桦纯林、辽东栎纯林、落叶松纯林、油松刺槐混交林、灌木林黄刺玫和柠条,并以荒地作为对照(CK)。设立标准样地,进行植被调查。各标准样地基本情况详见表 1。

表 1 不同林分样地基本情况

林分类型	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	灌草覆盖度/%	未分解	半分解
油松	1 205	西南	20	人工	22	0.80	80	9.88	12.56
刺槐	1 201	西南	20	人工	22	0.75	80	2.72	4.08
油松×刺槐	1 203	西南	20	人工	22	0.84	85	7.48	15.14
辽东栎	1 180	东南	25	人工	19	0.90	85	5.90	10.26
落叶松	1 182	西北	30	人工	20	0.75	70	3.85	14.13
白桦	1 184	西北	26	人工	18	0.75	75	4.64	28.58
柠条	1 190	东北	25	—	—	—	70	10.17	5.56
黄刺玫	1 201	东北	23	—	—	—	80	2.09	5.15
荒地	1 193	西南	19	—	—	—	—	—	—

## 2 研究方法

### 2.1 土样采集与植被调查

在山西省中阳县车鸣峪林场每种林地内分别选取一个 20 m×20 m 的样地,在每块样地上按 S 形布设 5 个土壤采样点并挖掘 1 m 深的土壤剖面,分 5 层取土壤样品:0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm,80—100 cm。同时取环刀样和原状土带回实验室进行分析。

在 20 m×20 m 样地内进行每木检尺,实测胸径、树高、郁闭度等;在该样地对角线上均匀选取 5 个灌

木样方(5 m×5 m),5 个草本样方(1 m×1 m)进行统计、计算,得出灌草覆盖度<sup>[11]</sup>。

### 2.2 土壤基本理化性质测定

土壤基本理化性质包括土壤容重、毛管孔隙度、机械组成、有机质含量等。土壤容重、毛管孔隙度及总孔隙度用环刀法测定;土壤机械组成采用简易比重计法测定,并按照国际制来划分质地类型;水稳性团聚体用原状土,Yoder 湿筛法测定,粒径为>5 mm,5~3 mm,3~1 mm,1~0.5 mm,0.5~0.25 mm;土样经风干、磨细,过筛(0.25 mm),采用重铬酸钾容量法—稀释放热法测定有机质含量<sup>[12]</sup>。

### 2.3 土壤饱和导水率测定

采用定水头法测定,所用仪器为 ST-70A 型土壤水分渗透仪。陈效民<sup>[2]</sup>等得出饱和导水率( $K_s$ )是通过某一土层的水量与渗透横断面积、时间和水头差呈正比,与渗透距离呈反比的比例常数。因此可以采用公式(1)计算温度为  $t$  的土壤饱和导水率:

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

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

由于温度对饱和导水率有影响,所以必须通过计算进行校正,按公式(2)换算成 10 °C 时的饱和导水率:

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

式中: $K_{10}$ ——温度为 10 °C 时的饱和导水率 (mm/min);  $K_t$ ——温度为  $t$  时的饱和导水率 (mm/min);  $t$ ——测定时水的温度(°C)。

### 2.4 数据分析

用 SPSS 统计软件中的主成分分析法分析影响饱和导水率的主导因子;采用单因素方差分析(One-way ANOVA)进行显著性分析。

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同林地土壤饱和导水率分级

不同人工林的各个土层的饱和导水率皆处在 0.005~0.147 cm/min。为了说明  $K_s$  的大小程度,将饱和导水率进行分级。华孟分级方法<sup>[1]</sup>详见表 2,据此可以推出,除了柠条、荒地 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100 cm 土壤层饱和导水率属于低级别,其他林分各个土层饱和导水率均属于中高级别,落叶松、白桦林地 0—20 cm 土层饱和导水率属于很高级别。土壤饱和导水率华孟分级的结果可以直观反映土壤渗透性质,饱和导水率属于低级别的土壤入渗能力较弱,饱和导水率属于中高级别的土壤具有较强的入渗能力,能够减少地表径流,增加土壤水库的蓄水量,有效地减少水土流失。

### 3.2 不同林地土壤饱和导水率特征

图 1 为不同林地土壤容重和有机质含量随土壤剖面深度变化图。由图 1 可以看出,随着土壤深度增加,每种林地土壤容重增加,以表层土壤容重最小;土壤有机质含量随着剖面深度增加而逐渐减小,以表层有机质含量最高。土壤容重与有机质含量的变化也间接影响到了饱和导水率的大小。

表 2 土壤饱和导水率的分级

$10^{-2}$  cm/min

华孟分级	很小	低	中	高	很高
$K_s$	<0.42	0.42~1.11	1.11~2.78	2.78~6.94	>6.94

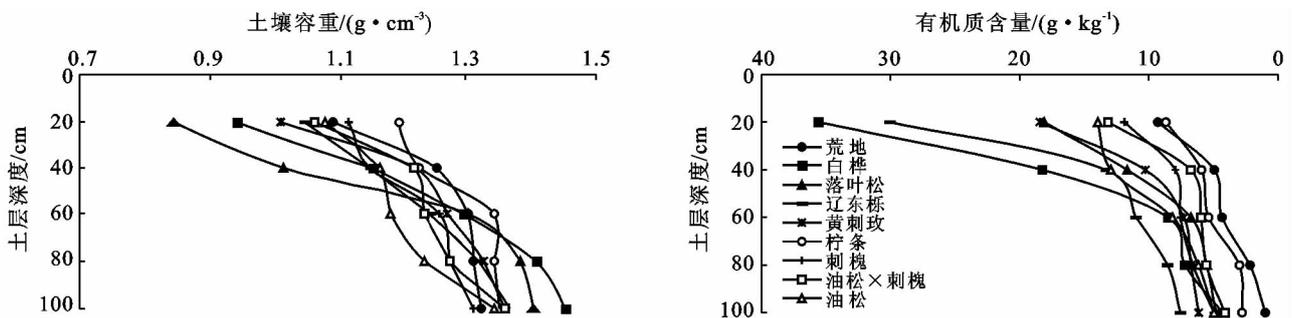


图 1 不同林地土壤容重和有机质含量随土壤深度变化

不同林地土壤饱和导水率剖面分布结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,饱和导水率的垂直变化非常明显,在 0—100 cm 范围内,所有林地  $K_s$  变化规律一致,但不同土壤  $K_s$  差异状况有所不同,随着土层深度增加, $K_s$  呈现出负指数递减规律(公式 3)明显( $p = 0.001 < 0.05$ )(如图 1 所示),这是因为随着土层深度增加,有机质含量降低,土壤容重变大,孔隙度相应降低。0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100 cm 土层  $K_s$  的平均值分别为  $6.49 \times 10^{-2}$

cm/min,  $3.65 \times 10^{-2}$  cm/min,  $2.20 \times 10^{-2}$  cm/min,  $2.01 \times 10^{-2}$  cm/min,  $1.86 \times 10^{-2}$  cm/min。

$$K_s = 7.265 8e^{-0.015X} \quad (R^2 = 0.998 6) \quad (3)$$

式中: $K_s$ ——饱和导水率; $X$ ——土层深度。

不同林地土壤平均饱和导水率如图 3 所示。由图 3 可以看出,各林分 0—100 cm 土层的平均  $K_s$  均高于荒地,究其原因,植被是影响土壤入渗的重要因素。枯枝落叶层积累可以防止地表结皮的形成,其分解同时增加了土壤有机质含量,改良了土壤理化性

质;同时,植物根系的穿透作用,增加了土壤孔隙度,降低了容重,从而改善了土壤结构。

与其他乔木林地相比,灌木柠条对土壤饱和和导水率的提高程度最低,比荒地提高了 25.7%,这是因为灌木林地结构比较单一,根系分布相对于乔木林地不广泛,导致土壤结构紧实,土壤容重较大;平均  $K_s$  最高的林分为白桦,相比荒地提高了 344%;除此之外,对比油松纯林、刺槐纯林、油松刺槐混交林可以发现,混交林的  $K_s$  比油松纯林、刺槐纯林分别提高了 56.1%和 21.4%,这是因为混交林具有更稳定的林分结构,灌草覆盖度大(达到了 85%),可以形成复杂的植物群落,不仅如此,油松刺槐混交林和白桦纯林能具有较高低的饱和导水率,也与大量的枯落物储量有很大关系,枯落物储量相对于其他林分很大,分别达到了 22.62 和 33.22 t/hm<sup>2</sup>,枯落物作为联系植被和土壤的中间载体,在截持降雨、抑制水分蒸发、提供土壤养分、维持土壤结构方面都有极其重要的作用,其分解形成的有机质改善了土壤结构,提高了刺槐油松混交林和白桦纯林的饱和导水率。

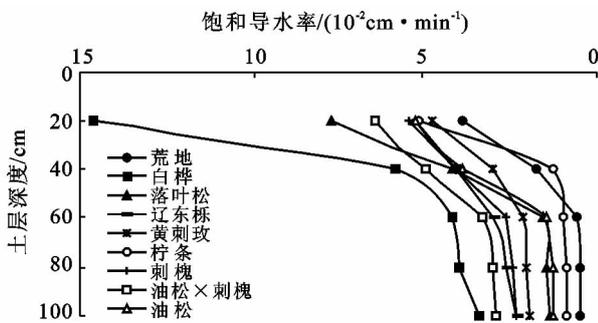


图 2 不同林地饱和导水率剖面分布

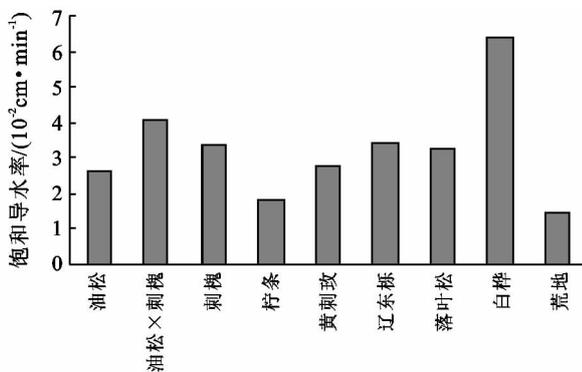


图 3 不同林地的平均饱和导水率

### 3.3 影响土壤饱和导水率的主导因子分析

影响饱和导水率的因子较多,土壤理化性质与饱和导水率有不同程度的相关性,而且土壤的理化性质之间还会有相互作用,因此土壤性质对饱和导水率的作用特别复杂,因此简单的相关系数不能直观全面地

反映它们之间的关系。用 SPSS 软件中的主成分分析方法来分析土壤理化性质对饱和导水率的影响,进一步了解影响饱和导水率的主导因子。影响饱和导水率的主导因子载荷详见表 3。由表 3 可以看出,前 3 个主成分累计贡献率已经达到了 85.947%,因此可以综合反映影响  $K_s$  的主导因子。其中,第一主成分范畴的特征值为 3.809,贡献率为 49.608%,以土壤孔隙度、容重、 $>0.25$  mm 水稳性团聚体和有机质为主导影响因子,经过显著性检验,这 4 个因子与  $K_s$  均在 0.01 水平上达到了显著相关,除容重为负相关以外,其他 3 个因子呈现正相关。第二主成分范畴的特征值为 1.457,贡献率为 21.212%,以黏粒和粉粒为主导影响因子,经检验,粉粒含量与  $K_s$  在 0.01 水平上显著相关,而黏粒与  $K_s$  在 0.05 水平上显著相关;第 3 主成分贡献率达到了 15.127%,砂粒的载荷值为 0.921,与  $K_s$  在 0.01 水平上显著相关,因此砂粒也是主导影响因子。总体看来,影响  $K_s$  的主导因子为土壤结构(容重、孔隙度)和水稳性团聚体含量、有机质含量以及土壤质地。

经分析得出,土壤物理性质对  $K_s$  影响较大,土壤容重载荷较大,与  $K_s$  呈显著负相关关系(图 1),随着土层深度的增加,容重变大,意味着土壤孔隙度减少和团粒结构丧失,土壤通透性变差,遇水后土体膨胀进一步使土壤变得紧实,从而导致  $K_s$  降低。而毛管孔隙度、总孔隙度均对  $K_s$  有积极的影响,它们的增大相当于减小了土壤容重,砂粒含量与  $K_s$  呈现正相关,载荷值最大,达到了 0.921,而粉粒和黏粒均与  $K_s$  呈现负相关关系,载荷值也较大,分别达到了 -0.896 和 -0.698,可能是由于砂粒含量多的土壤,土壤结构膨松,水分易于疏导,相反,黏粒较多可能会因为其吸水膨胀或运移而堵塞土壤孔隙,从而降低了土壤饱和导水率。水稳性团聚体含量高的土壤,由于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非毛管孔隙增多,改善了土壤结构,也同样提高了  $K_s$ 。表 3 中显示,土壤有机质含量在主成分中的载荷值达到了 0.891。土壤有机质含量直接影响到  $K_s$  的大小,因为其不仅是土壤中养分的主要来源之一,也有利于土壤的良好结构的形成,进而影响到土壤通气性能和透水性能。另一方面,有机质改善了土壤的胶体状况,使土壤吸附作用增强,表现出较强的疏水性质<sup>[13]</sup>,减缓了水分的入渗速度。土壤有机质与  $K_s$  的拟合结果如图 4 所示, $K_s$  与有机质存在明显的线性相关关系, $K_s$  随着有机质含量增加而增加,因此,土壤有机质有效的改善了土壤饱和导水率。

表3 主成分中不同影响因素载荷

特征值	贡献率/ %	主成分	毛管孔隙 度%	总孔隙 度%	容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	砂粒/ %	粉粒/ %	黏粒/ %	>0.25 mm 水 稳性团聚体	有机质/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )
3.809	49.608	1	0.875	0.924	-0.910	-0.020	0.154	-0.486	0.555	0.891
1.457	21.212	2	0.066	0.034	-0.106	0.019	-0.896	-0.698	0.376	0.093
0.983	15.127	3	0.150	0.139	-0.078	0.921	-0.162	0.200	0.536	0.024

注:表中原始数据已消除量纲影响,即已经标准化,方法为 Z-score 标准化。

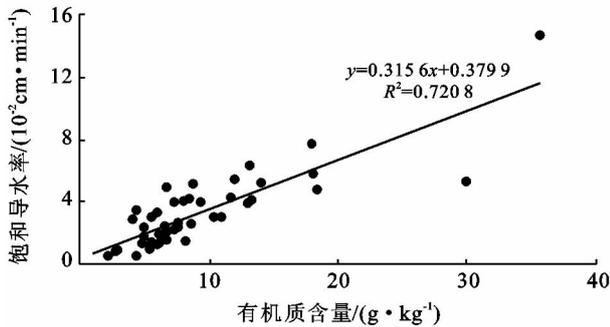


图4 土壤有机质含量与饱和导水率的关系

## 4 结论

(1) 与荒地相比,林地的饱和导水率均有较大程度的提高,这主要是因为植被改善了土壤结构与土壤有机质含量,根据华孟分级<sup>[1]</sup>方法,除了柠条、荒地40—60 cm 土壤层饱和导水率属于低级别,其他林分各个土层饱和导水率均属于中高级别,以白桦的0—20 cm 土层的饱和导水率最高。

(2) 在0—60 cm 土层范围内,从土壤表层到深层,土壤饱和导水率呈现出负指数形式的递减规律。相比于油松纯林和刺槐纯林,油松刺槐混交林提高了饱和导水率,因此混交林对提高土壤饱和导水率具有重要作用,可以考虑多营造混交林,形成更加复杂和稳定的植物群落。

(3) 对影响饱和导水率主导因子的主成分分析得出,土壤结构(土壤孔隙度、土壤容重)、>0.25 mm 水稳性团聚体含量和土壤有机质含量是影响饱和导水率的主导因子,土壤质地也是不可忽略的因子之一。容重与黏粒含量对饱和导水率为负效应,孔隙度,砂粒含量有机质含量、>0.25 mm 水稳性团聚体含量均为正效应;团聚体主要通过降低容重间接来改善饱和导水率,吕殿青<sup>[14]</sup>、方堃<sup>[7]</sup>、迟春明<sup>[15]</sup>、梁向峰<sup>[13]</sup>都得出过相似结论。饱和导水率随着土壤有机质含量的增加而增加,因为有机质改善了土壤的通气性和透水性能,形成好了良好的土壤结构。

(4) 中阳县地处晋西黄土丘陵区,降雨集中且强度大,产流方式多为超渗产流,即降雨强度超过了水分的入渗速率。本研究能为营造适合于晋西地区的

防护林提供合理的依据,营造防护林有利于土壤饱和导水率的提高,混交林相对于纯林能更有效的提高土壤饱和导水率,从而有助于水分下渗,增加土壤水库的储水量,对减少水土流失量和防治地质灾害具有重要意义。

## [参考文献]

- [1] 华孟,王坚. 土壤物理学[M]. 北京:北京农业大学出版社,1993,280-290.
- [2] 陈效民,潘根兴,王德建. 太湖地区农田生态环境中土壤饱和导水率研究[J]. 水土保持通报,2000,20(5):11-13.
- [3] 许绣云. 黏质红壤的导水率[J]. 土壤,1994(1):22-25.
- [4] 王治国,魏忠义. 黄土残塬区人工降雨条件下坡耕地水蚀的研究(I):影响细沟侵蚀因素的综合分析[J]. 水土保持学报,1995,9(2):51-57.
- [5] 于德芬,徐福安. 介绍一种土壤饱和导水率测定仪[J]. 土壤,1990(2):103-106.
- [6] 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[J]. 水土保持学报,2006,20(3):154-157.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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,1993,35(3):109-112.
- [10] 白冰,陈效民,秦淑平. 黄河三角洲滨海盐渍土饱和导水率的研究[J]. 2005,36(3):321-323.
- [11] 李新荣,张新时. 鄂尔多斯高原荒漠化草原与草原化荒漠灌木类群生物多样性的研究[J]. 1999,10(6):665-669.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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[J]. 水土保持学报,2006,20(3):154-157.
- [15] 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.