

# 晋西不同土地利用方式下土壤 饱和导水率的影响因素

张君玉<sup>1,2</sup>, 程金花<sup>1</sup>, 吕湘海<sup>3</sup>, 张友焱<sup>4</sup>, 王彬俨<sup>1,5</sup>, 孙龙<sup>1,6</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京良乡蓝鑫水利工程设计所, 北京 102488;  
3. 中国国际工程咨询公司, 北京 100044; 4. 中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091; 5. 中国科学院  
水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 6. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为了更好地了解晋西不同土地利用方式下的土壤水分特性, 利用土壤水分渗透仪测定饱和导水率( $K_s$ ), 室内测定土壤物理化学性质, 分析了饱和导水率与各项土壤物理化学性质指标的相关关系。研究结果表明, 土壤饱和导水率随土层深度增加而下降; 土壤饱和导水率表现为: 林地 > 地埂 > 农地; 土壤饱和导水率与容重、非毛管孔隙度、>0.25 mm 水稳性团聚体、土壤有机质含量等土壤理化特性存在显著相关关系。晋西地区应合理配置林地、地埂、农地, 减少荒地, 改善土壤的通气透水特性, 改良土壤结构。

**关键词:** 土地利用方式; 饱和导水率; 影响因素; 晋西地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)06-0057-05

中图分类号: S715.3

## Influence Factors of Saturated Hydraulic Conductivity in Different Landuse Types in Western Shanxi Province

ZHANG Jun-yu<sup>1,2</sup>, CHENG Jin-hua<sup>1</sup>, LÜ Xiang-hai<sup>3</sup>, ZHANG You-yan<sup>4</sup>, WANG Bin-yan<sup>1,5</sup>, SUN Long<sup>1,6</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083,  
China; 2. Beijing Liangxiang Lanxin Hydraulic Engineering & Design, Beijing 102488, China;  
3. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100044, China; 4. Institute of

Desertification Studies, CAF, Beijing 100091, China; 5. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS,  
Chengdu, Sichuan 610041, China; 6. Institute of Soil and Water Conservation, CAS, MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to better understand the characteristics of soil water under different land use modes, the physical and chemical properties of the soil was analyzed with the saturated hydraulic conductivity( $K_s$ ) tested in laboratory by soil water lysimeter and the correlations between the soil saturated hydraulic conductivity and its physical and chemical properties was achieved. The saturated hydraulic conductivity of the soil was decreased with soil depth while the  $K_s$  was in the decreasing order in the forestland, field ridge and farmland. The  $K_s$  had the significant relationship with the soil bulk density, non-capillary porosity and water-stable aggregates(>0.25 mm) and organic content. It is suggested that the forestland, filed ridge, farmland should be deployed rationally with the reduction of the abandoned land to improve the permeability and texture of the soil.

**Keywords:** landuse types; saturated hydraulic conductivity; influence factors; Western Shanxi Province

土壤饱和导水率是土壤重要的水力参数之一<sup>[1]</sup>。坡面近地表土壤水分条件对径流形成和侵蚀发生有重要的影响<sup>[2]</sup>。近年来, 国内外学者对土壤饱和导水率的研究有了一定的成果, Helalia<sup>[3]</sup>认为, 田间土壤入渗土壤的有效孔隙度与饱和导水速率之间存在显

著的相关关系, 蒋定生等<sup>[4]</sup>研究认为, 随土壤深度的增加, 土壤入渗能力急剧下降, 土壤入渗能力与表层土壤容重关系密切, 在渗透率较大的坡面上, 入渗速率与坡度成反比关系。袁建平<sup>[5]</sup>研究认为, 土地利用方式不同, 坡面土壤稳渗速率存在较大差异。赵西

收稿日期: 2013-02-21

修回日期: 2013-03-03

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: 张君玉(1987—), 女(汉族), 吉林省通化市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: zhuzhu@bjfu.edu.cn.

通信作者: 程金花(1979—), 女(汉族), 山东省东阿县人, 副教授, 主要从事土壤侵蚀、植被恢复研究。E-mail: Jinhua\_cheng@126.com.

宁等<sup>[6]</sup>研究发现,坡面耕作措施可有效地提高土壤入渗速率,延缓坡面径流,是控制坡耕地水土流失的有效措施。

在黄土丘陵区,植被是影响土壤性质最积极的因素<sup>[7]</sup>,特别是土壤密度,饱和导水率等土壤物理性质。合理的植被措施的实施可以有效改善土壤水力特性<sup>[8]</sup>。本研究针对晋西黄土丘陵区多级生物防护体系中,林地、农地、地埂、荒地 4 种土地利用方式下的土壤,研究其表层饱和导水率的影响因素,为提出适于该区坡面水土保持生物防护技术体系和生物防护技术措施优化配置模式提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山西省中阳县的车鸣峪林场,属黄河流域典型的半干旱黄土丘陵区,东经 111°04′—111°21′、北纬 37°03′—37°20′。该区属暖温带干旱区,具明显的大陆性季风气候,多年平均降水量为 500~550 mm,降雨集中在 7—9 月份(占全年降水量

的 70%以上),平均蒸发量为 1 019.7 mm,年平均气温 6℃,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),无霜期 125~150 d,≥10℃年积温为 2 500~3 000℃。土壤以褐土居多,其次是棕壤,发育差、水土流失严重。植被区划上属于森林草原灌丛植被区。多级生物防护体系是指针对坡耕地所处的不同地貌部位及其对阻控水土流失的要求与差异,形成坡面顶部和坡面上部集流防止击溅侵蚀和面蚀,坡面中部防蚀保土、坡面中下部蓄水拦土、沟道防止下切侵蚀和重力侵蚀的防护体系。晋西黄土丘陵区多级生物防护体系可以归纳为,一级生物防护是坡上林地防护,大部分为人工林,现有树种少,林地大部分是疏林地,林分稳定性差;二级生物防护是坡中梯田农耕地及生物地埂防护,农作物的间作模式非常多;三级生物防护是指坡底林地灌木防护,黄土区侵蚀情况非常严重,沟底形态各异,有平坦地势地区也被种植农作物,大部分为荒地裸地,自然生长小乔木、小灌木和各类草本。研究区环境因子详见表 1。

表 1 研究区环境因子

土地利用方式	林地类型	坡向	坡度/°	海拔/m	郁闭度
林地	灌木	西偏南 15°	15	1389	0.65
	油松	南偏西 40°	20	1424	0.70
	刺槐	南偏西 50°	28	1443	0.50
地埂	地埂类型	埂宽/m	埂高/m	平均株高/m	平均株间距/m
	枣树地埂	2.60	0.58	8.30	4.50
	桑树黄花菜地埂	3.00	0.37	—	—
	黄花菜地埂	1.00	0.50	0.48	密
农地	农地间作类型	海拔/m	乔木平均高/m	间作平均比例	
	核桃土豆	849	6.10	5 : 427	
	苹果绿豆	853	5.30	5 : 528	
	核桃玉米	1 061	3.43	4 : 179	
荒地	苹果玉米	1 029	6.67	6 : 107	
荒地	—	—	—	—	

### 1.2 研究方法

1.2.1 土样采集与理化性质测定 在每块样地的坡上、坡中和坡下随机布设 3 个土壤采样点,开挖土壤剖面,按照 0—20 cm,20—40 cm 分 2 层进行土样采集(环刀 192.42 cm<sup>3</sup>,规格直径 7 cm,高 5 cm)。室内测定土壤的物理化学性质<sup>[9]</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。采用环刀浸透法测定土壤容重、毛管孔隙度和非毛管孔隙度。采用人工筛分法测定土壤结构。经风干、磨

细、过筛后,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定。

1.2.2 饱和导水率的测定 采用定水头饱和导水率测定法测定<sup>[10]</sup>,测定装置如图 1 所示。首先使用 ST-70A 型渗透仪专用环刀(高 3.85 cm,直径 6.15 cm)在样地取土,然后在室内靠近水源处安装 ST-70A 型土壤水分渗透仪,以马氏瓶控制水头,水头高度 23.1 cm,安装完毕后放水开始渗透。前 3 min 每隔 10 s 测定水分出流体积,接下来 2 min 每隔 30 s 测定

水分出流体积,此后每 5 min 测定水分出流体积至稳定为止。

根据下式可计算土壤饱和导水率  $K_s$  :

$$K_s = \frac{V L}{t A H} \quad (1)$$

式中:  $H$ ——进水口的水头高度 (cm);  $V$ ——出水口水分出流量 (ml);  $t$ ——水分出流时间 (s);  $L$ ——土柱长度 (cm);  $A$ ——土样横截面积 (cm<sup>2</sup>)。

各样地的试验在不同温度下进行,为了使温度条件对所测得的饱和导水率的值影响降低,按公式 (2) 将试验测得对应温度为  $t$  °C 下的饱和导水率换算成 10 °C 时的饱和导水率  $K_{10}$ 。

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

式中:  $K_{10}$ ——温度为 10 °C 时的饱和导水率 (mm · min<sup>-1</sup>);  $K_t$ ——温度为  $t$  °C 时的饱和导水率 (mm/min)。

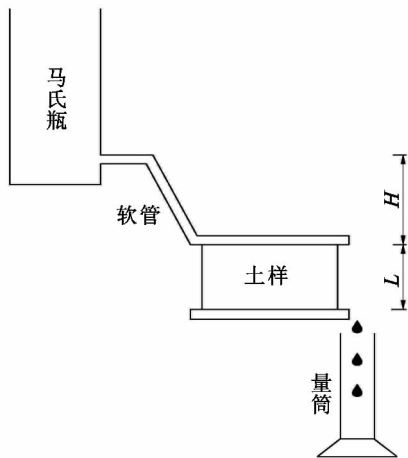


图 1 定水头法测定土壤饱和导水率装置

1.2.3 数据处理 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)。以用 Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关分析法分析土壤因子与土壤饱和导水率之间的相关性<sup>[11-12]</sup>。应用多元逐步回归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, Sigma plot 12.0 和 SPSS 20.0 统计软件完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 饱和导水率实验结果

土壤不同层次、不同土地利用方式以及不同样地的平均饱和导水率分别如图 2—4 所示。由图中可以看出: (1) 在 4 种土地利用方式下,浅层土壤相比于更深层土壤,均表现出较高的饱和导水率; (2) 对于

同一土壤层次而言,林地土壤的饱和导水率最大,地埂和农地土壤次之,荒地土壤最小; (3) 林地土壤的饱和导水率在不同土层间的差异较大,而地埂和农地土壤的这一差异并不十分明显,荒地土壤的这一差异则更小; (4) 而农地中不同的作物种植模式下的数值差异较大,典型的 4 种间作方式相比较,苹果玉米的间作方式对土壤饱和导水率的响应值比较大,另外地埂类型下混合地埂的土壤表层  $K_s$  数值相对较大,单一植物地埂次之。

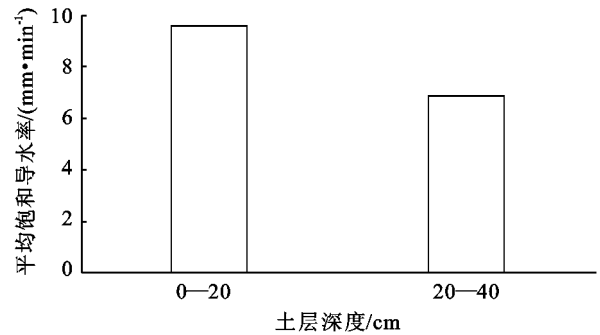


图 2 土壤不同层次平均饱和导水率

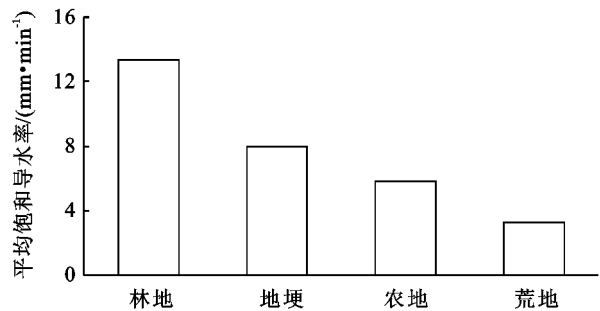


图 3 不同土地利用方式下土壤平均饱和导水率

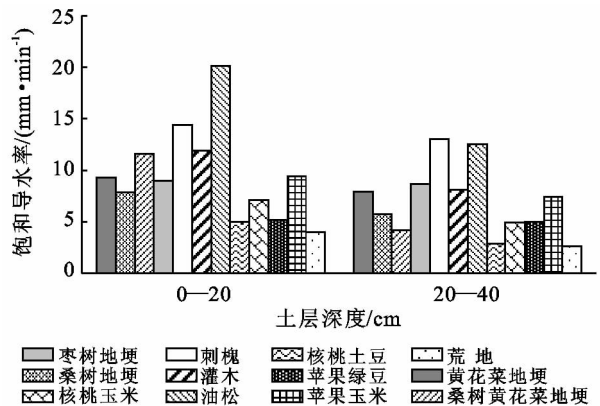


图 4 不同土地利用方式下土壤各层次饱和导水率

### 2.2 饱和导水率与土壤理化性质的关系

2.2.1 饱和导水率与土壤物理因子的关系 相关分析表明,土壤饱和导水率与各土壤物理因子之间有不同程度的相关性<sup>[13]</sup>,受土壤有效孔隙分布、容重、质地以及有机质含量等因素的影响<sup>[14]</sup>。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。为了筛选出影响饱和导水率变化的相对重要的因子,以饱和导水率为因变量,选取土壤容重、初始含水率、干筛 $<0.25\text{ mm}$ 砂粒含量、 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度等 7 个指标作为预测变量,采用数理统计方法进行多项逐步回归,拟合结果为:

$$Y=75.414-22.189X_1-29.177X_2-28.296X_3$$

式中: $Y$ ——饱和导水率( $\text{mm}/\text{min}$ );  $X_1$ ——非毛管孔隙度( $\%$ );  $X_2$ ——容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $X_3$ —— $>0.25\text{ mm}$ 水稳性颗粒含量( $\%$ )。  $d_f=71$ ,  $R^2=0.840$ ,  $\text{sig.}<0.001$ ,表明方程达到显著水平,该多元线性回归结果表明非毛管孔隙度、土壤容重和 $<0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量是影响饱和导水率的主要因子。

非毛管孔隙又称大孔隙,主要是土壤中直径大于 $0.1\text{ mm}$ 的孔隙。回归分析表明非毛管孔隙度是影响土壤饱和导水率最显著的因素,二者成正相关关系,相关系数为 $0.62$ 。其原因在于,大孔隙是因土壤颗粒大、排列疏松而形成,其数量取决于土壤的结构性。大孔隙经常充满空气,仅在重力水大量存在时才有水分填充,不具有持水能力,一般而言,较多的大孔隙能使土壤通气、透水。

土壤容重是单位体积自然状态下土壤的干重。容重越小土壤结构就越松,水分就可以更流畅地沿土壤层次延垂直方向向下运动,对这种水分的垂直运动土壤起到的拦截作用减弱,从而提高了土壤水分入渗速率,也提高了土壤饱和导水速率。通过数据分析表明,土壤容重与饱和导水率成显著的负相关关系,相关系数为 $-0.532$ 。

水稳性团聚体是抗水力分散的土壤团聚体,持水性能良好,水分不易通过,水稳性团聚体( $>0.25\text{ mm}$ )的含量越高越容易持水,导致水分入渗速率降低,从而降低了土壤饱和导水率。通过数据分析表明,土壤容重与饱和导水率成显著的负相关性,相关系数为 $-0.526$ 。

通常情况下土壤的初始含水率越小,水分入渗的速率就越大,但是随着时间的推移,其对最终达到稳

渗的速率影响不大,所以在对饱和导水率与初始含水率做相关分析时,不能得出显著的相关关系,土壤的初始含水率对入渗的过程有重要的影响。

一般来说,土壤质地越粗,水分渗透特性越强。通过对研究地砂土、粉土、壤土的饱和导水率分析,可以看出不同土壤质地的饱和导水率排序为:砂土 $>$ 粉土 $>$ 壤土。

2.2.2 饱和导水率与土壤有机质的关系 土壤中形成的和外部加入的所有动、植物残体不同分解阶段的各种产物和合成产物的总称,是土壤固相部分的重要组成部分。对土壤饱和导水率与有机质做 Pearson 相关性检验,饱和导水率的大小与有机质含量呈显著的正相关关系,分析可能的原因在于,一是有机质的增加可以改善土壤的通气透水性能,改变土壤的容重、孔隙度,使水分更易入渗;二是有机质的增加可以改变土壤颗粒组成,通过有机大分子胶结土壤颗粒,使土壤大颗粒含量增加、颗粒间孔隙增大,使水分更易入渗,从而提高土壤饱和导水率,所以说土壤的有机质含量通过影响饱和导水率的物理性质而成为影响的根本动力。

### 2.3 不同土地利用方式对土壤饱和导水率的影响

由图 2 可以看出,分析产生这种现象可能的原因与土壤表层随深度增加土壤的物理化学性质产生了变化,随土壤深度增加,土壤容重增加,土壤孔隙度减少,土壤有机质含量下降;分析图 3 可知,林地的浅层土壤的饱和导水率最高,可能的原因是它有枯枝落叶层,枯落物为腐殖化过程提供了充足的物质来源,有机质含量多,使总团聚体含量高,土壤变得松散,孔隙度增加,所以导水率最高。

不同土地利用方式土壤的饱和导水率、容重、非毛管孔隙度、 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量、有机质含量的平均值如表 2 所示。有机质含量排序为:林地 $>$ 地埂 $>$ 农地 $>$ 荒地,容重大小顺序为:荒地 $>$ 地埂 $>$ 农地 $>$ 林地,非毛管孔隙度排序为:林地 $>$ 农地 $>$ 荒地 $>$ 地埂,小于 $0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量排序为:荒地 $>$ 农地 $>$ 地埂 $>$ 林地,也可以很直观地看出土壤物理化学性质通过数理统计分析得出的影响结果。

表 2 不同土地利用方式土壤的饱和导水率及其影响因子

土地利用方式	饱和导水率/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	有机质/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	非毛管 孔隙度	大于 $0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量
林地	13.35	12.56	1.20	0.057 2	0.874 8
地埂	8.00	8.50	1.26	0.034 8	0.935 2
农地	5.85	8.29	1.25	0.040 2	0.948 1
荒地	3.31	5.60	1.36	0.038 3	0.971 7

注:数据为平均值。

### 3 结论

(1) 土壤饱和和导水率随深度增加而下降。各地类土壤饱和和导水率大小表现为:林地>地埂>农地;土壤饱和和导水率与非毛管孔隙呈显著正相关关系,与土壤容重呈显著负相关关系,与<0.25 mm 水稳性团聚体含量呈显著负相关关系。土壤饱和和导水率与土壤有机质含量呈显著正相关关系,有机质可以改善土壤的通气透水性能,改变土壤颗粒组成,有机质含量还通过影响饱和和导水率的物理性质而成为影响的根本动力。

(2) 土壤饱和和导水率是表征土壤通透性的一个综合指标,通过对晋西黄土丘陵区多级生物防护体系下不同土地利用方式土壤饱和和导水率的观测和实验,仅从这一指标的几个影响因子上来进行改良应因地制宜地进行人工林的营建。一级防护中的林地营建应该加强,而二级防护的坡耕地应增加地埂植物篱的防护,三级防护中选择沟底平坦肥沃的土地种植农田,为减少荒地可选择栽植人工灌木林或播撒草籽。不同的生物防护级别通过对植被分布配置的改变使土壤物理化学性质得以改良。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 霍丽娟,李一菲,钱天伟. 定水头法和降水头法测定黄土的饱和和导水率[J]. 太原科技大学学报,2010,31(3):256-259.
- [2] 张玉斌,郑粉莉. 近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 中国水土保持科学,2007,5(2):8-13,20.
- [3] Helalia A M. The relationship between soil infiltration and effective porosity in different soils[J]. Agricultural Water Management, 1993,24(8):39-47.
- [4] 蒋定生,黄国俊,谢永生. 黄土高原土壤入渗能力野外测试[J]. 水土保持通报,1984,4(4):7-9.
- [5] 袁建平,雷廷武,郭索彦,等. 黄土丘陵区小流域土壤入渗速率变异性[J]. 水利学报,2001,10(5):88-92.
- [6] 赵西宁,吴发启,王万忠. 黄土高原沟壑区坡耕地土壤入渗规律研究[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(4):109-112.
- [7] 朱显谟. 黄土高原土地的国土政治问题[J]. 水土保持学报,1984,4(4):1-4.
- [8] 刘春利,邵明安. 黄土高原六道沟流域不同土地利用方式下土壤水力特性及其对土壤水分的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(11):2400-2407.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 迟春明,王志春. 沙粒对碱土饱和和导水率和盐分淋洗的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(1):101-104,118.
- [12] 张桂萍,张峰,茹文明. 山西绵山植被木本植物优势种群种间关联[J]. 生态学杂志,2006,25(3):67-70.
- [13] 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):97-101.
- [14] 胡克林,李保国,陈研. 表层土壤饱和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):65-71.