

# 层状土壤饱和导水率影响的试验研究

曹瑞雪<sup>1</sup>, 邵明安<sup>2</sup>, 贾小旭<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学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; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 以壤土(Y)、黄绵土(L)、风沙土(S)3种土壤为供试土样,进行室内层状土柱实验,进行3种土样两两组合的两层性土柱实验和风沙土—黄绵土累次叠加的多层性土柱实验,共11个处理组合。采用定水头法,测定其饱和导水率( $K_s$ )。具体处理为两层土:Y+S, Y+L, L+S, L+Y, S+Y, S+L(先后顺序分别表示土层上下);风沙土—黄绵土(S+L)作为层状组合,逐次叠加至5层。结果表明:两层性土壤中,细质地土壤在下时,其有效 $K_s$ 显著低于粗质地土壤在下时的有效 $K_s$ 值,而两层土壤有效 $K_s$ 主要由细质地土壤导水特性决定;对于两层土壤的多次叠加, $K_s$ 值随分层数目的增加有增大的趋势。

**关键词:** 土壤质地; 层状土壤; 饱和导水率; 土柱模拟

中图分类号:S152.7+2 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2015)03-0018-04

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2015.03.004

## Experimental Study on Effects of Layered Soils on Saturated Hydraulic Conductivity

CAO Ruixue<sup>1</sup>, SHAO Mingan<sup>2</sup>, JIA Xiaoxu<sup>3</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

**Abstract:** Three different textured soils: Lou soil (heavy loam, Y), loessial soil (mediate loam, L) and sandy soil (sandy loam, S), were selected as experimental soils in this study. 11 treatments of different combinations of layered soils were established to determine soil saturated hydraulic conductivity by soil column simulation method. In 6 treatments, soil columns included two soil layers (Y+S, Y+L, L+S, L+Y, S+Y, S+L) and in the rest 5 treatments, soil columns contained multi-layered soil, which filled with mediate loam soil and sandy loam soil layers repeatedly from 1 times to 5 times ((S+L)×1, (S+L)×2, (S+L)×3, (S+L)×4, (S+L)×5). The letter order indicates the sequencing of layered soils from upper to lower levels in soil columns. The results showed that in the treatments of 2 soil layers, when soil layer of finer texture was below the other soil layer, the equivalent saturated hydraulic conductivity was significantly lower than the value when the 2 soil layers were switched. The equivalent saturated hydraulic conductivity of two-layer soil columns were mainly affected by hydraulic conductivity of the finer textured soil layer. For the multi-layered soil columns, the equivalent saturated hydraulic conductivity tended to increase with the increasing number of soil layers.

**Key words:** soil texture; layered soils; saturated hydraulic conductivity; soil column simulation

土壤饱和导水率( $K_s$ )是重要的土壤水力参数之一,影响着水分、溶质在土壤中的运移<sup>[1]</sup>。层状土壤结构是自然界中一种常见的土体构型。例如,河床随不同年份、季节水量周期性变化,泥沙多次淤积,在整个剖面上土壤出现质地分层和交替叠加现象<sup>[2]</sup>;大气降尘过程中,不同粒径、不同厚度沙尘沉积,形成的层状结构也对土壤水分蒸发和盐分运移产生影响<sup>[3]</sup>。层状土壤的水分运动和养分迁移不同于均质土壤,其

孔隙结构的不同也会影响到土层含水率、水力梯度和传导度<sup>[4-5]</sup>,比如砂质夹层的存在,有可能起到阻水和减渗作用<sup>[6-7]</sup>。层状土体结构在实际应用中常用来进行水分和环境污染等溶质运移的管理。如在道路建设中,需要将多种质地土壤、材料分层铺设,以达到稳固、排水等目的;农田水肥管理中,人工防渗层能有效提高上层土壤水分含量,提升水分和养分利用率。层状土壤导水特性的研究,能对矿区的水土保持和生

收稿日期:2014-12-19

基金项目:国家自然科学基金项目“黄土高原小流域土壤水分植被承载力模拟研究”(51179180)

第一作者:曹瑞雪(1993—),女,硕士研究生,主要从事土壤物理研究。E-mail:irisrcrx@163.com

通信作者:邵明安(1956—),男,博士,研究员,主要从事土壤物理与农业生态研究。E-mail:mashao@ms.iswc.ac.cn

态恢复、田间土壤的水肥精准管理提供科学依据,对道路建设和城市排水设计也具有应用参考价值。

Fok<sup>[8]</sup>根据土层内饱和水流通量各处相等、水头损失为各层土壤水头损失之和的假定,获得了整个土层有效  $K_s$  的概念和计算方法。然而就实际测定而言,由于土层之间孔隙大小的连续性及连通性等问题,会导致实际  $K_s$  的测定结果与理想假设的计算结果有差别。已有研究表明,细质土层下垫有粗粒土层时,其持水能力与细质土单独存在的情况下的持水能力(相当于该土层的最小持水量)相比提升显著,细质土层湿润到最小持水量后会得到一定补充性的水量,形成毛管支持悬着水,上下两土层土壤孔隙大小的差别愈大时,则上层在湿润到最小持水量之后所得到的补充水量也就愈多,而不影响下部粗粒土层的持水性能<sup>[9]</sup>。Colman 等<sup>[10]</sup>研究认为,无论细质土垫底还是粗质土垫底,对于入渗而言,土壤都可看成是均质的,且由细质土控制入渗过程。目前关于层状土导水特性的相关研究多集中于入渗过程和夹砂层、夹粘层的研究。王全九等曾对 Green-Ampt 公式在砂层阻水、浑水入渗、降雨入渗、间歇入渗方面的应用进行分析,探讨了其参数的确定方法<sup>[11]</sup>。由于层状土水分运动过程较为复杂,且自然界除了夹砂层外,亦有河床反复沉积形成的多层层状结构,降雨、间歇入渗过程形成的致密层等,因此多种质地层状土壤结构的研究更

具科学意义和应用价值。甘永德等曾研究了3种土壤不同分层组合对土壤入渗特性的影响,结果表明,垂直入渗条件下,分层土壤入渗特征由土壤分层组合方式决定<sup>[12]</sup>。汪志荣等研究了间歇入渗所形成的致密层对入渗过程的影响,主要归因于对  $K_s$  的影响<sup>[13]</sup>。然而,关于多种质地层状和分层多次叠加的土体构型的土壤  $K_s$  的相关研究鲜有报道。本研究对自然界中常见的层状土壤结构进行室内土柱模拟,以杨凌壤土、洛川黄绵土、神木风沙土为供试土样,两两组合模拟不同质地层次分布下的两层层状土壤结构,并将风沙土与黄绵土进行多层排列模拟河床泥沙淤积、道路建设等复合层状结构,测定不同土柱有效  $K_s$ ,研究质地的层状分布对  $K_s$  的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

土壤样品分别采自陕西省杨凌区西北农林科技大学农作一站田地(土壤类型为壤土,钙积土垫旱耕人为土,记作 Y)、洛川苹果园(土壤类型为黄绵土,记作 L)、神木(土壤类型为风沙土,记作 S)。取样时,去除样点处表层 0—20 cm 土壤后,挖取深度为 20—30 cm,将土壤样品带回实验室,自然风干,然后研磨并通过 1 mm 筛孔,由经典烘干法(将土样置于 105 °C 的烘箱内烘干 8 h 以上)测定其初始含水率。3 种供试土样物理特性参数见表 1<sup>[14]</sup>。

表 1 供试土样的机械组成

土样	采集 样点	各粒级含量/%			土壤 质地	干容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	饱和导水率/ ( $cm \cdot min^{-1}$ )
		砂粒 (1~0.05 mm)	粉粒 (0.05~0.002 mm)	粘粒 (<0.002 mm)			
壤土	陕西杨凌	5.2	65.4	29.4	粉壤土	1.45	0.00237
黄绵土	陕西洛川	8.6	73.8	17.6	粉壤土	1.40	0.03038
风沙土	陕西神木	57.9	35.5	6.6	粉壤土	1.50	0.10163

### 1.2 试验处理与试验设置

根据质地不同,将供试土壤两两混合作为对照处理,改变 3 种供试土壤在土柱中的上下位置,进行排列组合,每种组合进行 5 次重复。试验中出现的组合方式如图 1 所示。多层性层状土柱组合方式如图 2 所示。

在室内测定饱和导水率一般用渗透仪。研究采用南京土壤仪器厂生产的 TST-55A 型渗透仪,通过定水头法测定土壤饱和导水率<sup>[15]</sup>;供水装置使用马氏瓶,具体试验装置如图 3。

### 1.3 饱和导水率测定方法

土壤饱和导水率是在饱和土壤中单位势梯度下单位时间内通过土壤横截面积的水流体积,可根据达西定律获得<sup>[15]</sup>。在测定过程中,维持进口端水头  $H$  不变,测定一定时间  $T$  内的出水量  $V$ ,测量得土柱长度  $L$  和横截面积  $A$ ,就由公式(1)计算土壤的饱和导水率  $K_s$ :

$$K_s = \frac{QL}{ATH} \quad (1)$$

式中: $H$  为水流路径始末的总水头差(cm); $L$  为水流路径的直线距离(cm); $K_s$  为单位梯度下的通量,也即饱和导水率( $cm/min$ ); $Q$  为出流量(ml); $A$  为水流经过的横截面积( $cm^2$ ); $T$  为流出时间(min)。

土壤水分的运动与温度有关,为了便于统一对比,通常都按 10 °C 时的测定结果为标准,其他温度下所测得的导水率要换算成为标准温度下的导水率,具体换算方法采用哈赞公式进行:

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

式中: $K_{10}$  为 10 °C 时的饱和导水率( $cm/min$ ); $K_t$  为  $t$  °C 时的饱和导水率( $cm/min$ )。为方便表述起见,下文中 10 °C 时的饱和导水率统一用  $K_s$  表示。

试验采用直径约为 4 cm 的有机玻璃柱,用游标卡

尺精确测量各土柱直径,并计算土柱横截面积  $A$ ;将研磨过筛后的土样分层装入有机玻璃管中,实验用扰动土样容重按照供试原状土壤容重控制(壤土、风沙土、黄绵土依次为  $1.45, 1.40, 1.50 \text{ g/cm}^3$ );最后,将试验土柱饱和 12 h,在恒定水头下测定饱和导水率,按公式(1)和公式(2)计算  $K_s$  值,取每组重复的平均值。



注:S指神木风沙土,L指洛川黄绵土,Y指杨凌壤土。下同。

图 1 两层土柱组合

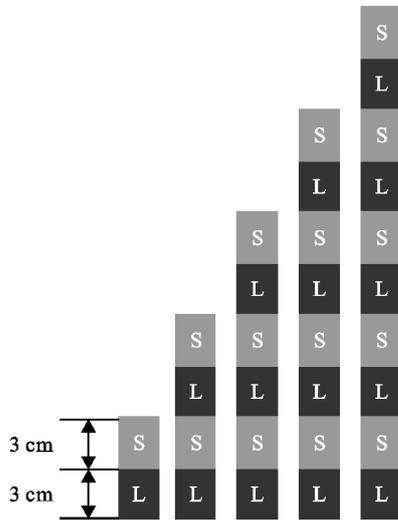


图 2 2种质地多层土柱模拟

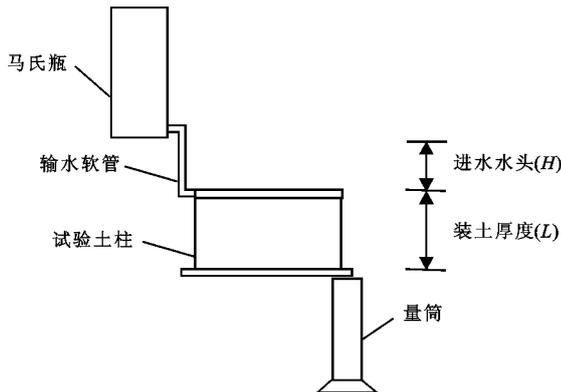


图 3 饱和导水率测量装置图

### 1.4 层状土壤饱和导水率计算方法

稳定水流穿过含有  $m$  层厚度分别为  $L_j$ , 饱和导水率分别为  $K_j (j=1, 2, \dots, m)$  的分层土柱,假定土层的总厚度为  $L$ ,整个土层的有效导水率为  $K_{eff}$ ,则整个土层的有效饱和导水率与各层导水率之间的关系式<sup>[15]</sup>为:

$$K_{eff} = \frac{L}{\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \dots + \frac{L_m}{K_m}} \quad (3)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 两层层状土壤饱和导水率 $K_s$

两层土壤的 6 种组合其测定和计算结果见图 4。

为讨论方便,将细质地土壤在上而粗质地土壤在下时的有效饱和导水率记为  $K_{s\text{细}+\text{粗}}$ ,反之,记为  $K_{s\text{粗}+\text{细}}$ 。对于图 1 中 6 种组合依次记为: S+L, S+Y, Y+S, Y+L, L+Y 和 L+S。将混合土柱标记为 SL, SY, LY。由图 4 可知,  $K_{s\text{粗}+\text{细}} > K_{s\text{混合}} > K_{s\text{细}+\text{粗}}$ ,表明质地的层次性及其层次的顺序对饱和导水率均有显著影响。

由层状土壤有效导水率公式(3)可知,层状土壤有效饱和导水率是各层土壤饱和导水率  $K_j$  与厚度  $L_j$  的函数,因此,不论两层土壤在土柱中如何上下构型,理论上,其有效饱和导水率  $K_{eff}$  均相同。然而,图 4 表明,虽然 2 种质地混合土的  $K_s$  都与理论值接近,但层状土壤有效导水率公式(3)对 2 种质地土壤上下位置变化实用性较差。此外,相对粗质地而言,细质地土壤的饱和导水率在粗细 2 种质地上下叠加的层状饱和导水率的确定上处于主导地位,这与 Colman 等<sup>[10]</sup>在入渗实验中的结论一致。

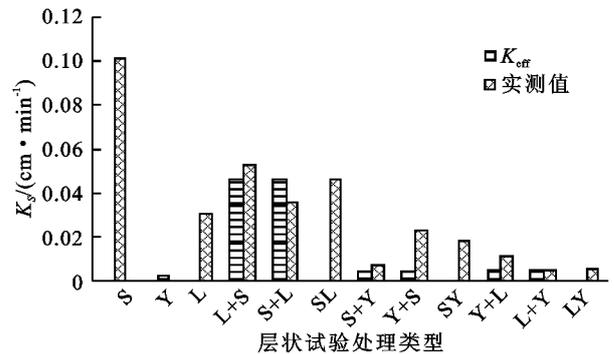


图 4 不同层状处理的  $K_s$

为阐明 6 种组合下分层顺序及质地粗细对有效饱和导水率的影响,本文以  $x_1$  和  $x_2$  分别表示上层和下层土样的饱和导水率,  $y$  表示所测得的  $K_s$ ,即  $y_{(上+下)} = ax_1 + bx_2 + c$ ,其系数大小可反映相应质地饱和导水率对有效导水率的影响。回归结果由表 2 显示。由表 2 可以看出,细质土在整个两层土柱的有效  $K_s$  中占主导地位。对系数进行单样本 K-S 检验结果符合正态分布,因此可进行方差分析。单因素方差分析结果是:质地较细的土壤和质地较粗的土壤两组系数之间  $\text{Sig.} = 0.028 < 0.05$ ,差异显著。可以看出,对于壤质较细土壤在上的组合,2 种土壤质地差别越大(质地差别:  $Y+S > L+S > Y+L$ ),2 种质地土壤对有效  $K_s$  的影响权重差别也越大。

土壤孔隙大小不同,其对水流有不同的促进力和抑制力。由于层次性土壤中边界条件比较复杂,这 2 种力量达到平衡状态的方式更为复杂。以往研究表明,在入渗过程中,分层土壤入渗特性受各层土壤基质势和各层土壤导水率的共同作用,砂土与上层壤土质地差别较小时,基质吸力较大,质地差别对水流运动的影响相应变大。此外,当粘土层刚接触水分时,

由于小孔隙的吸力大,可能吸水很快,有利于水向下渗,但由于小孔隙中水分子之间和水分子与土粒之间的摩擦力很大,水分运行速度很快减慢。因此多种质地层次试验的水势平衡状态较为复杂,其饱和和导水率变化与粘土层厚度、土层间质地差别有关。本次试验所采用土层厚度和质地差异得到的结果有一定的局限性,不同质地差别状况下的两层性结构土壤  $K_s$  需要进一步研究。

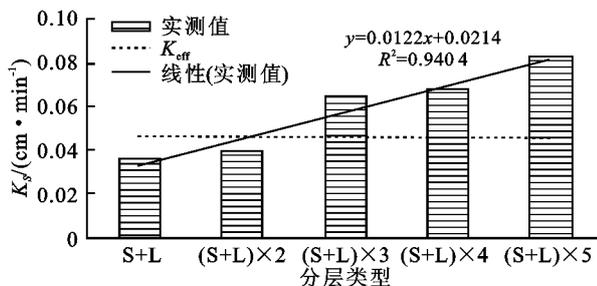
表2 两层土柱线性回归结果

处理	重壤土系数	轻壤土系数	常数	$R^2$
L+S	2.333(L)	1.047(S)	-0.125	0.929
S+L	0.611(L)	0.137(S)	0.005	0.521
S+Y	0.447(Y)	0.023(S)*	0.006	0.596
Y+S	2.310(Y)	0.062(S)	-0.125	0.313
Y+L	0.909(Y)	0.075(L)	0.007	0.500
L+Y	3.680(Y)	0.533(L)	-0.125	0.701

注: \*表示系数取绝对值。

## 2.2 2种叠加下多层性层状土的 $K_s$

由于自然与人为活动的作用,自然界中常存在多层性土壤构型,层数越复杂,其  $K_s$  变化越紊乱。公式(3)对多层土壤的有效饱和和导水率的计算是否有效?研究多层性层状土的导水特性具有科学和实践意义。为了简化试验,本文用2种质地土壤按粗细顺序多次叠加来进行探索。假定层数越多,土壤连续性越差,有效饱和和导水率越小。本文按上层S+下层L的组合进行多次叠加,分别设置(S+L)×1,(S+L)×2,(S+L)×3,(S+L)×4,(S+L)×5共5组实验(图3)。饱和和导水率测定结果见图5。结果表明,与假设的计算结果相反,随着土层层数的增加,实测的有效  $K_s$  反而增大,且有效饱和  $K_s$  实测值大于理论计算的有效值  $K_{eff}$ 。随着组合层数的增加,多层土有效饱和  $K_s$  实测值接近于粗质地土壤的  $K_s$ 。本研究结果揭示了一个未知的现象,在理论上也对公式(3)提出了挑战与质疑,相关研究很有进一步探索的必要。

图5 2种质地下多层性土柱  $K_s$  的变化

## 3 结论

(1) 2种质地组成的层状土,其有效饱和和导水率主要由细质地土壤的饱和和导水率控制,其大小还与细

质地土壤上下位置有关,层状土壤有效饱和和导水率的公式没有反映层次顺序问题。

(2) 细质地土壤置于土柱下层时,其有效饱和和导水率明显小于粗质地在下时  $K_s$  的值。对于壤质较细土壤在上的组合,2种土壤质地差别越大,2种质地土壤对有效  $K_s$  的影响权重差别也越大。

(3) 对于质地多次叠加的多层性土壤,其有效饱和和导水率有增加趋势,且层数越多,  $K_{eff}$  越接近粗质土的  $K_s$ 。

## 参考文献:

- [1] Fares A, Alva A K, Nkedi-Kizza P, et al. Estimation of soil hydraulic properties of a sandy soil using capacitance probes and guelph permeameter[J]. Soil Science, 2000, 165(10):768-777.
- [2] 赵培培. 黄土高原小流域典型坝地土壤水分和泥沙空间分布特征[D]. 北京:中国科学院研究生院,2010.
- [3] 孙艳伟,李生宇,徐新文,等. 大气降尘沉积对塔克拉玛干沙漠腹地土壤水盐运移的影响[J]. 应用生态学报, 2009,20(8):1905-1911.
- [4] 李韵珠,胡克林. 蒸发条件下粘土层对土壤水和溶质运移影响的模拟[J]. 土壤学报,2004,41(4):493-502.
- [5] 刘福汉,王遵亲. 潜水蒸发条件下不同质地剖面的土壤水盐运动[J]. 土壤学报,1993,30(2):173-181.
- [6] 曲晨晓,王伟. 土壤剖面中砂质夹层的储水作用及机理研究[J]. 华中农业大学学报,1997(5):43-50.
- [7] 王文焰,张建丰,汪志荣,等. 砂层在黄土中的阻水性及减渗性的研究[J]. 农业工程学报,1995,11(1):104-110.
- [8] Fok Y S. One-dimensional infiltration into layered soils[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1970,96(2):121-129.
- [9] 赵沛伦. 母质的两层性对土壤持水性能的影响[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊:土壤分水与土壤肥力研究专集,1985(2):38-46.
- [10] Colman E, Bodman G. Moisture and energy conditions during downward entry of water into moist and layered soils[J]. Proceeding of Soil Sci. Soc. Am., 1945,9:3-11.
- [11] 王全九,邵明安,汪志荣,等. Green-Ampt 公式在层状土入渗模拟计算中的应用[J]. 水土保持学报,1999,5(4):66-70.
- [12] 甘永德,贾仰文,仇亚琴,等. 降雨条件下分层土壤入渗特性[J]. 水土保持学报,2012,26(5):217-219,223.
- [13] 汪志荣,王文焰,王全九,等. 浑水波涌灌溉入渗机制及其 Green-Ampt 模型[J]. 水利学报,1998(10):45-49.
- [14] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997:23-25.
- [15] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:70-96.