

# 坡度对3种单环法测量坡地饱和导水率的影响

雍晨旭<sup>1</sup> 樊军<sup>1,2†</sup> 王胜<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 712100 陕西杨凌; 2. 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, 712110 陕西杨凌)

**摘要:** 为探寻坡地土壤饱和导水率( $K_s$ )的田间测量方法,利用基于水平地面发展而来的单环双水头法、单环单水头法和单环BEST法测量3种类型土壤(风沙土、黄绵土和壤土)的 $K_s$ ,分析坡度( $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ )对3种测量方法所测定 $K_s$ 值的影响。结果表明:3种方法测定的不同类型土壤 $K_s$ 大小顺序一致,但是单环BEST法显著高于单环双水头法与单环单水头法( $P < 0.05$ );单环双水头法测得 $K_s$ 值均随坡度的增加而增加,而单环BEST法测量结果与之相反,随着土壤质地由粗变细,坡度的影响程度(回归线斜率)有降低趋势;单环单水头法(10 cm)测量 $K_s$ 值与单环双水头法完全一致,在土壤水力学参数确定后,可替代单环双水头法。当坡度 $< 10^\circ$ 时,3种方法测量的 $K_s$ 与无坡度 $K_s$ 无显著差异,当坡度 $> 10^\circ$ 时,差异显著( $P < 0.05$ )。因此,坡度显著影响3种测量方法测算的 $K_s$ 值,单环BEST法不适合测量坡地 $K_s$ ,当坡度 $< 10^\circ$ 时,单环双水头法与单环单水头法(10 cm)可测量计算3种类型土壤 $K_s$ 。

**关键词:** 入渗; 饱和导水率; 坡度; 单环双水头法; 单环BEST法

中图分类号: S152.7<sup>+</sup>2 文献标志码: A 文章编号: 2096-2673(2018)02-0024-07

DOI: 10.16843/j.sswc.2018.02.004

## Effects of slope gradient on the soil saturated hydraulic conductivity of sloping land measured by three single-ring infiltrometers

YONG Chenxu<sup>1</sup>, FAN Jun<sup>1,2</sup>, WANG Sheng<sup>2</sup>

(1. School of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi, China

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

**Abstract [Background]** Soil saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) of sloping field is a key parameter to predict soil and water losses, but  $K_s$  is mostly measured on the flat land. Therefore, directly measuring saturated hydraulic conductivity on slopes is practically important. The objective of this paper is to study the effect of slope gradient on  $K_s$  by three single-ring infiltrometer methods in order to select a suitable method for slope land. **[Methods]** The slope gradients of  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  and  $20^\circ$  in sandy soil, Loessial soil and Lou soil were selected and  $K_s$  was measured by three single-ring infiltrometer methods (i. e., two-ponding depth, one-ponding depth and BEST methods), which usually were used for flat lands. All measurements were conducted on undisturbed soil. **[Results]** 1) On flat soil surface, all three methods obeyed the same order for  $K_s$  of different soils as sandy soil  $>$  Loessial soil  $>$  Lou soil.

收稿日期: 2017-11-10 修回日期: 2018-03-14

项目名称: 国家自然科学基金重点项目“水蚀风蚀交错区灌草植被对降雨入渗过程的影响与模拟”(41571224); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目“黄土高原关键带水土过程与生态系统服务功能模拟”(41571130082)

第一作者简介: 雍晨旭(1991—)男, 硕士研究生。主要研究方向: 土壤水热循环。E-mail: 912714869@qq.com

†通信作者简介: 樊军(1974—)男, 研究员。主要研究方向: 土壤水分养分循环。E-mail: fanjun@ms.iswc.ac.cn

The  $K_s$  of three soils by single-ring BEST infiltrometer were 2.9, 2.1 and 4.5 times, which were larger than those by single-ring two-ponding depth infiltrometer. If cutting-ring infiltrometer was taken as standard, single-ring BEST infiltrometer significantly overestimated the  $K_s$  of the Loessial and Lou soil, but the results by single-ring two-ponding depth infiltrometer and single-ring one-ponding depth (10 cm) infiltrometer were close to that by cutting-ring infiltrometer. 2)  $K_s$  measured by single-ring two-ponding depth infiltrometer increased with the increase of slope gradient and there was a significant linear correlation between them. The  $K_s$  of three soils by single-ring BEST infiltrometer decreased with the increase of slope gradients and this method was affected distinctly by slope gradient due to the change of the ponded water area inside the ring. 3) Under flat ground condition, the results of single-ring one-ponding depth (10 cm) infiltrometer were comparable to single-ring two-ponding depth infiltrometer, but the single-ring one-ponding depth (5 cm) infiltrometer overestimated the results. 4) In sandy soil, Loessial soil and Lou soil, there was no significant difference of  $K_s$  between slope  $< 10^\circ$  and flat land by above 3 methods, but significant while slope  $> 10^\circ$  ( $P < 0.05$ ). [Conclusions] Therefore, single-ring BEST infiltrometer is not suitable for measuring  $K_s$  in sloping field. Single-ring two-ponding depth infiltrometer or single-ring one-ponding (10 cm) depth infiltrometer can be used to correctly measure  $K_s$  if the slope is  $< 10^\circ$ . Furthermore, the calculating equations for saturated hydraulic conductivity by these single-ring methods should be revised for the three soils in the loess regions if the slope gradient is  $> 10^\circ$ .

**Keywords:** infiltration; soil saturated hydraulic conductivity; slope gradient; single-ring two-ponding depth infiltrometer; single-ring BEST infiltrometer

饱和导水率( $K_s$ )是描述土壤水分运动的重要参数,涉及地表水的入参与产流、地下水补给、溶质迁移、灌溉与排水等方面的测量与模拟<sup>[1]</sup>。由于土壤侵蚀强度和土地利用方式的不同,沿坡面上各点土壤入渗速率差异很大,从而给山坡和流域水土、养分流失的准确预报带来困难<sup>[2]</sup>;因此,坡地 $K_s$ 的直接测量在坡地水分运动与土壤侵蚀研究方面具有重要意义。

国内外众多研究涉及土壤入渗测定方法<sup>[2-5]</sup>。目前野外土壤入渗测定常见方法主要有以下 4 类:单环法<sup>[3]</sup>、人工模拟降雨器法<sup>[2]</sup>、双环法<sup>[4]</sup>和盘式入渗仪法<sup>[5]</sup>。此外,根据实际降雨资料也可确定土壤入渗值。单环法测定过程快速而简单,但尺寸小,插入环时扰动土壤,存在沿环壁的边际流等影响。人工模拟降雨器法具有降雨强度、雨滴大小可调,更接近天然降雨情况,可在坡地测量等优点,但其体积大,不易野外操作,费工费时,造价高<sup>[2]</sup>。虽然双环法是田间测定土壤入渗性能的经典方法,但双环法一般只是测定土壤表层入渗能力,而且耗水量大、耗时长<sup>[4]</sup>,无法在坡地上操作。盘式入渗仪测定导水率快速简单,但应用盘式入渗仪测定 $K_s$ 有 2 个难点:一是经典的应用盘式入渗仪理论是基于 Woo-ling 或 Philip 入渗理论,并不能应用于有水头条件下,不满足 $K_s$ 测定的必要条件<sup>[6]</sup>;二是在正压或零

压力下用在盘与地面之间的沙层可能阻碍水分入渗<sup>[7]</sup>,另外在坡地上,盘式入渗仪的放置也是一个难题。以上测量方法,除人工模拟降雨器法,均是基于平地发展来的测量方法。目前尚缺乏直接用于坡地土壤入渗测定的便捷方法,即使有一些关于坡地测量的文章报道<sup>[8]</sup>,也仅是在坡地上选择地势较平坦的位置进行测定,无法代表坡地入渗的真实情况。本文采用基于水平地面发展来的单环双水头法、单环单水头法与单环 BEST 法进行野外试验,选取粗质地的砂质土和砂壤土及细质地的粉质黏壤土,设置不同坡度( $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ )处理,分析坡度对 3 种方法测量 $K_s$ 结果的影响,评价 3 种方法的适用性,为坡地 $K_s$ 的田间原位测量提供理论与技术支持。

## 1 研究区概况

本试验在西北农林科技大学神木侵蚀与环境试验站选取风沙土、黄绵土进行试验,2017 年 7 月 15 日—8 月 1 日测定风沙土,2017 年 8 月 5 日—8 月 25 日测定黄绵土,2017 年 9 月 1 日—9 月 20 日在西北农林科技大学水土保持研究所测定壤土,每种土壤不同坡度进行试验 5 次。神木侵蚀与环境试验站位于陕西省神木市以西 14 km 处的西沟乡六道沟小流域( $E 110^\circ 26'$ ,  $N 38^\circ 49'$ )。地貌类型为片沙覆

盖的梁峁状黄土丘陵,土壤质地较粗。水土保持研究所位于陕西省咸阳市杨凌示范区,地处关中平原腹地,主要土壤类型为壤土,质地黏重。

## 2 材料与方 法

### 2.1 野外试验

试验选取风沙土、黄绵土与壤土为供试土壤,主要物理性质见表 1。选取地势平坦,土质均匀的地块,除去 0~20 cm 的表土层,修建 0°、5°、10°、15°、20°等 5 个坡度的试验小区,采取挖方的方式修筑,避免因填方造成的土壤结构改变。单环双水头法与单环单水头法的试验具体操作步骤

为:将单环垂直坡面砸入土壤,在 5 cm 水头达到稳定入渗后,增加水头到 10 cm,再次达到稳定入渗后停止试验,换另一个点位,如此重复试验至少 5 次。单环 BEST 法试验具体步骤为<sup>[9]</sup>:将单环砸入土壤中,砸入深度为 1 cm,单环内径为 10 cm。在砸入单环的附近取土带回室内测初始含水率以及其他物理化学性质。量取一定量的水小心并快速倒入单环中,当水刚好渗透完毕时记录时间,并倒入第 2 杯等量的水。重复以上过程直到入渗稳定为止(连续 3 杯水的入渗时间相同)。试验结束后在单环中用环刀取土,用烘干法测定土壤含水率和密度。

表 1 供试土壤的主要物理化学性质

Tab. 1 Main physical and chemical properties of soil

土壤性质 Soil properties	风沙土 Sandy soil	黄绵土 Loessial soil	壤土 Lou soil
总孔隙度 Total porosity/%	39.40 ± 1.05	44.00 ± 1.50	48.23 ± 0.73
砂粒 Sand/%	84.25 ± 1.05	52.50 ± 2.41	2.33 ± 0.02
粉粒 Silt/%	6.46 ± 0.66	35.79 ± 2.52	64.24 ± 2.19
黏粒 Clay/%	9.29 ± 0.39	11.71 ± 0.11	33.43 ± 1.69
密度 Bulk density/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.61 ± 0.03	1.48 ± 0.04	1.37 ± 0.02
有机质 Organic matter/%	0.19 ± 0.02	0.22 ± 0.19	1.84 ± 0.03

注:样本数  $n = 5$ 。Notes: The number of samples  $n = 5$ 。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 单环双水头法

单环双水头法是基于水平地面发展来的一种测量  $K_s$  的方法,单环中的水分入渗属于积水条件下的三维运动过程。Reynolds 等建立了利用单环入渗法计算土壤  $K_s$  的方法<sup>[10]</sup>。

$$Q_s = \frac{r}{G} (K_s H + \Phi_m) + \pi r^2 K_s; \quad (1)$$

$$G = 0.316 \frac{d}{r} + 0.184。 \quad (2)$$

式中:  $Q_s$  为稳态通量,  $\text{cm}^3/\text{min}$ ;  $r$  为入渗环半径  $r = 7.5 \text{ cm}$ ;  $H$  为入渗环内积水深度,  $\text{cm}$ ;  $d$  为入渗环插入地下的深度  $d = 6.0 \text{ cm}$ ;  $\Phi_m$  为土壤基质势通量,  $\text{cm}^2/\text{min}$ ;  $K_s$  为土壤饱和导水率,  $\text{cm}/\text{min}$ 。采用双水头入渗法,在 2 个积水深度( $H$ ) 条件下获取对应的稳态通量( $Q_s$ ) 解二元一次方程组求算  $K_s$  和  $\Phi_m$ 。本文依据 Nimmo 等提出的简化公式进行计算<sup>[11]</sup>。此外,也可以依据单水头方法计算  $K_s$ <sup>[12]</sup>。

#### 2.2.2 单环 BEST 法

BEST 法是由 Beerkan 法发展过来的,二者原理一致,也是一种基于水平地面测量  $K_s$  的方法。Beer-

kan 的方法计算土壤水文性质最开始由 Haverkamp 等提出<sup>[13]</sup>。Beerkan 的方法具体可以分为 BEST-slope 和 BEST-intercept 2 种方法,本文采用 BEST-slope 法<sup>[14]</sup>。

#### 2.2.3 数据统计分析

采用 DPS 7.05 软件对 3 种类型土壤各坡度处理测量的  $K_s$  试验数据进行数据统计分析与显著性检验( $P < 0.05$ )。采用 Excel 2010 软件制表、Origin 2016 软件作图。

## 3 结果与分析

### 3.1 坡度对单环双水头法测量的影响

风沙土、黄绵土、壤土的  $K_s$  分别在 0.070 4 ~ 0.231 7  $\text{cm}/\text{min}$  之间、0.058 6 ~ 0.126 1  $\text{cm}/\text{min}$  之间与 0.015 5 ~ 0.073 4  $\text{cm}/\text{min}$  之间。3 种土壤 20° 比 0°  $K_s$  依次大 2.3 倍、1.0 倍与 3.7 倍(表 2~4)。

3 种类型土壤测量的  $K_s$  值与坡度存在极显著的线性正相关关系(图 1)。坡度对单环双水头法测量 3 种类型土壤的  $K_s$  影响显著(表 2~4),小于 10° 的处理间无显著差异,大于 10° 的处理显著高于小于 10° 的处理( $P < 0.05$ ),说明坡度改变了环内积水入

渗的三维过程,导致单环双水头法测定的坡地  $K_s$  值出现偏差。

产生上述结果的原因可能有: 1) 随着坡度的增加,入渗面积未发生改变,但环内入渗积水发生变化,环内下部积水深度增加,上部积水深度减小,整个入渗面的入渗水头也相应改变,从而导致该方法计算的  $K_s$  变大。2) 随着入渗过程的推进,重力作用

逐渐增强,有坡度条件下,入渗过程产生向下坡方向的倾斜椭球体,与无坡度相比,其最大入渗深度大于无坡度,另外随着入渗时间增加,重力作用增加的幅度变大,从而导致有坡度的稳定入渗率要大于无坡度<sup>[15]</sup>(表 2~4),使得有坡度  $K_s$  大于无坡度,这种影响在粗质地土壤上,要比细质地强。以上因素导致当坡度  $< 10^\circ$  时,各处理间无显著差异,仍可采用无

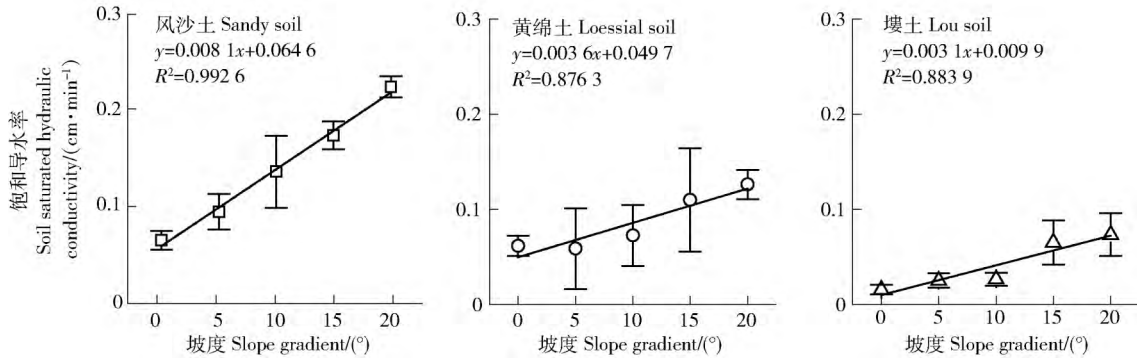


图 1 坡度对单环双水头法测量  $K_s$  的影响

Fig. 1 Effects of slope gradient on  $K_s$  measured by single-ring two-ponding depth infiltrometer

表 2 坡度对单环双水头、单环单水头法测量结果的影响(风沙土)

Tab. 2 Effect of slope gradient on  $K_s$  measured by single-ring two-ponding depth infiltrometer and single-ring one-ponding depth infiltrometer (Sandy soil)

坡度 Slope gradient/ (°)	稳定入渗率(单环单水头法) Stable infiltration rate (Single-ring one-ponding depth infiltrometer)		饱和导水率(单环单水头法) Soil saturated hydraulic conductivity (Single-ring one-ponding depth infiltrometer)		饱和导水率(单环双水头法) Soil saturated hydraulic conductivity (Single-ring two-ponding depth infiltrometer)
	5 cm	10 cm	5 cm	10 cm	
0	0.199 3 ± 0.046 7b	0.233 9 ± 0.043 8d	0.106 2 ± 0.024 9c	0.069 9 ± 0.021 6b	0.070 4 ± 0.010 1d
5	0.145 8 ± 0.024 9b	0.250 5 ± 0.121 9d	0.077 8 ± 0.013 3c	0.080 5 ± 0.043 3b	0.100 5 ± 0.037 8d
10	0.246 7 ± 0.148 6b	0.503 5 ± 0.084 3c	0.228 2 ± 0.048 8b	0.095 6 ± 0.052 1b	0.142 4 ± 0.014 6c
15	0.573 5 ± 0.153 9a	0.673 0 ± 0.076 9b	0.360 1 ± 0.069 9a	0.195 6 ± 0.058 4a	0.180 6 ± 0.096 7b
20	0.730 7 ± 0.072 1a	0.895 3 ± 0.090 8a	0.305 8 ± 0.038 4a	0.176 4 ± 0.023 8a	0.231 7 ± 0.011 1a

注: 不同的小写字母表示不同坡度处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 样本数  $n = 5$ , 下同。Notes: Different lowercase letters indicate significant differences among different slope treatments ( $P < 0.05$ ), and the number of samples  $n = 5$ . The same as below.

表 3 坡度对单环双水头、单环单水头法测量结果的影响(黄绵土)

Tab. 3 Effect of slope gradient on  $K_s$  measured by single-ring two-ponding depth infiltrometer and single-ring one-ponding depth infiltrometer (Loessial soil)

坡度 Slope gradient/ (°)	稳定入渗率(单环单水头法) Stable infiltration rate (Single-ring one-ponding depth infiltrometer)		饱和导水率(单环单水头法) Soil saturated hydraulic conductivity (Single-ring one-ponding depth infiltrometer)		饱和导水率(单环双水头法) Soil saturated hydraulic conductivity (Single-ring two-ponding depth infiltrometer)
	5 cm	10 cm	5 cm	10 cm	
0	0.352 4 ± 0.014 3b	0.380 5 ± 0.009 4b	0.104 6 ± 0.004 2a	0.062 4 ± 0.001 5a	0.061 7 ± 0.010 7b
5	0.357 3 ± 0.045 9ab	0.389 9 ± 0.064 6b	0.106 0 ± 0.013 6a	0.068 6 ± 0.021 7a	0.058 6 ± 0.042 4b
10	0.442 2 ± 0.064 9a	0.477 4 ± 0.072 5ab	0.120 8 ± 0.018 3a	0.071 7 ± 0.010 5a	0.072 4 ± 0.032 1b
15	0.368 6 ± 0.016 5ab	0.459 0 ± 0.054 0ab	0.109 4 ± 0.004 9a	0.072 5 ± 0.009 9a	0.109 7 ± 0.054 1ab
20	0.429 0 ± 0.081 6ab	0.526 6 ± 0.061 9a	0.127 3 ± 0.024 2a	0.086 4 ± 0.010 2a	0.126 1 ± 0.015 4a

表 4 坡度对单环双水头、单环单水头法测量结果的影响(壤土)

Tab. 4 Effect of slope gradient on  $K_s$  measured by two-ponding depth of single-ring infiltrometer and one-ponding depth of single-ring infiltrometer( Lou soil)

坡度 Slope gradient/ (°)	稳定入渗率(单环单水头法) Stable infiltration rate (Single-ring one-ponding depth infiltrometer)		饱和导水率(单环单水头法) Soil saturated hydraulic conductivity (Single-ring one-ponding depth infiltrometer)		饱和导水率(单环双水头法) Soil saturated hydraulic conductivity (Single-ring two-ponding depth infiltrometer)
	5 cm	10 cm	5 cm	10 cm	
	cm/min				
0	0.031 7 ± 0.011 8c	0.039 5 ± 0.011 9b	0.018 6 ± 0.007 2c	0.015 8 ± 0.004 8b	0.015 5 ± 0.005 1b
5	0.038 6 ± 0.010 2bc	0.056 0 ± 0.013 3b	0.026 8 ± 0.008 7c	0.019 3 ± 0.005 3b	0.025 2 ± 0.007 5b
10	0.030 3 ± 0.003 8c	0.048 4 ± 0.014 9b	0.019 5 ± 0.002 3bc	0.022 4 ± 0.006 0b	0.026 4 ± 0.006 8b
15	0.051 7 ± 0.010 5ab	0.083 3 ± 0.016 4a	0.031 8 ± 0.006 4ab	0.033 3 ± 0.006 6a	0.065 1 ± 0.023 3a
20	0.063 1 ± 0.017 6a	0.095 8 ± 0.027 0a	0.038 8 ± 0.010 8a	0.038 3 ± 0.010 8a	0.073 4 ± 0.022 6a

坡度计算公式进行求算,但当坡度  $> 10^\circ$  时,差异显著,方法不再适用。试验中还发现测定结果中出现部分异常值(负值或者极端值)且都出现在有坡度条件下,3 种类型土壤共 75 个试验点,出现异常值 8 个,其中风沙土 5 个,黄绵土 3 个。异常值的出现可能原因有<sup>[16]</sup>: 1) 未达到稳定入渗状态,导致出现  $i_{s2} < i_{s1}$  ( $i_s$  为稳定入渗率,  $i_{s1}$  为 5 cm 水头下稳定入渗率,  $i_{s2}$  为 10 cm 水头下稳定入渗率)的情况,得到负的  $K_s$ ; 2) 入渗过程中发生优先流等非正常土壤导水现象。

### 3.2 坡度对单环单水头法测量的影响

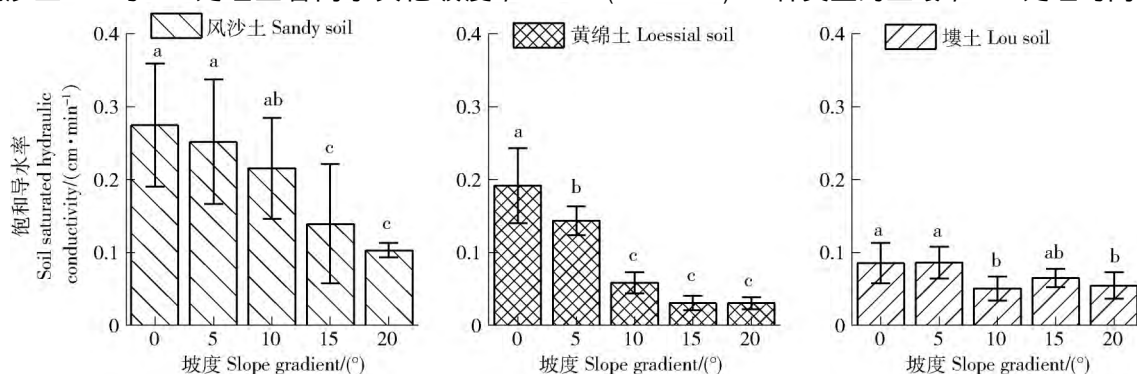
分别对 3 种类型土壤 5、10 cm 水头单独求算不同坡度的  $K_s$  进行统计分析,结果如表 2~4 所示 ( $P < 0.05$ ): 1) 5 cm 水头,风沙土  $15^\circ$  与  $20^\circ$  处理显著高于其他坡度,  $0^\circ$  与  $5^\circ$  无显著差异;黄绵土各处理之间差异没有达到显著水平;壤土  $20^\circ$  显著高于  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ ,  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$  处理无显著差异。2) 10 cm 水头,风沙土  $15^\circ$  与  $20^\circ$  处理显著高于其他坡度,  $0^\circ$ 、

$5^\circ$ 、 $10^\circ$  坡度间无显著差异;黄绵土各坡度处理之间无显著差异,壤土规律与风沙土一致。

3 种类型土壤测试结果均表明,单环单水头法测量的坡地  $K_s$  随坡度的增加而增加,这与单环双水头法测量结果一致。比较无坡度测量结果,单环单水头法(5 cm)测量 3 种类型土壤  $K_s$  分别是单环双水头法的 1.5、1.7 与 1.2 倍,但单环单水头法(10 cm)测量 3 种类型土壤  $K_s$  分别是单环双水头法的 99%、1.01 倍与 1.02 倍。在特定土壤条件下,土壤水力参数( $C$ : 形状因子;  $\alpha^*$ : 土壤饱和导水率与土壤基质势通量的比值)确定后,单环单水头法(10 cm)可以替代单环双水头法测量土壤  $K_s$ 。

### 3.3 坡度对单环 BEST 法测量结果的影响

风沙土、黄绵土、壤土  $K_s$  分别在 0.103 1 ~ 0.274 6 cm/min 之间、0.030 6 ~ 0.191 5 cm/min 之间与 0.050 4 ~ 0.086 2 cm/min 之间。 $K_s$  与坡度成极显著的线性负相关关系(图 2)。统计分析显示(图 2) ( $P < 0.05$ ): 3 种类型的土壤  $0^\circ$ 、 $5^\circ$  处理均高于其他



不同的小写字母表示不同坡度处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。样本数  $n = 5$ 。Different lowercase letters indicate significant differences among different slope treatments ( $P < 0.05$ ), the number of samples  $n = 5$ .

图 2 坡度对单环 BEST 法测量 3 种土壤  $K_s$  的影响Fig. 2 Effects of slope gradient on  $K_s$  of three kinds of soils by single-ring BEST infiltrometer

处理, 15°与 20°处理无显著差异。侧渗对  $K_s$  的影响随土质变细而增强<sup>[17]</sup>, 有坡度的处理, 等量的水倒入环中, 随着入渗, 入渗面积越来越小, 入渗缓慢, 侧渗量减小, 随着坡度的增加, 入渗面积减小的速率增加, 从而导致测量的  $K_s$  随坡度增加而减小。当坡度 > 10°时, 测量的  $K_s$  值与无坡度差异显著, 导致此方法不再适用。

### 3.4 3 种方法测量的土壤饱和和导水率差异

无坡度测量结果显示 3 种方法测量的 3 种类型土壤的  $K_s$  大小顺序一致, 均为风沙土 > 黄绵土 > 壤土(表 5)。但是, 3 种不同类型土壤, 单环 BEST 法测得  $K_s$  均显著高于单环双水头法, 分别大 2.9 倍、2.1 倍、4.5 倍; 单环 BEST 法测得  $K_s$  均显著高于单环水头法(5 cm), 分别大 1.6 倍、0.8 倍、3.4 倍, 也显著高于单环单水头法(10 cm), 分别大 2.9 倍、2.1 倍、4.4 倍( $P < 0.05$ )。以环刀取原状

土室内定水头法作为比较标准, 单环 BEST 法显著高估了 2 种土壤的  $K_s$ , 而与单环双水头法与单环单水头法(10 cm)一致。有研究表明简单降水头法测得的  $K_s$  高于单环压力仪法<sup>[18]</sup>, 这与本研究单环 BEST 法高于单环双水头法一致, 导致这种结果的原因可能有: 1) 单环双水头法耗时多于单环 BEST 法, 长时间的入渗过程会促进短期膨胀现象从而减少大孔隙<sup>[18]</sup>; 2) 单环 BEST 法是短时间瞬态测量  $K_s$  而单环双水头法是长时间稳态测量  $K_s$ , 从而单环 BEST 法测定值高于单环双水头法, 这与 Bagarello 等<sup>[19]</sup>的研究一致; 3) 湿润速度影响  $K_s$ , 湿润速度越快  $K_s$  越低, 湿润速度对  $K_s$  的影响机理主要是水流在土体中运动产生的剪切力破坏了土壤团聚结构, 湿润速度越大, 产生的剪切力也越大, 土壤团聚体结构破坏越完全, 从而导致土壤导水能力显著下降<sup>[20]</sup>。

表 5 不同方法测量土壤  $K_s$  差异  
Tab. 5 Differences of  $K_s$  measured by different methods cm/min

土壤类型 Soil type	单环单水头法 Single-ring one-ponding depth infiltrometer		单环双水头法 Single-ring two-ponding depth infiltrometer	单环 BEST 法 Single-ring BEST infiltrometer	环刀法 Cutting-ring infiltrometer
	5 cm	10 cm			
	风沙土 Sandy soil	0.106 2 ± 0.010 1Ab	0.069 9 ± 0.021 6Ab	0.070 4 ± 0.010 1Ab	0.274 6 ± 0.084 2Ab
黄绵土 Loessial soil	0.104 6 ± 0.010 7Ab	0.062 4 ± 0.001 5Ab	0.061 7 ± 0.010 7Ab	0.191 5 ± 0.051 5Ba	0.106 9 ± 0.021 3Ab
壤土 Lou soil	0.019 5 ± 0.005 1Bb	0.015 8 ± 0.004 8Bb	0.015 5 ± 0.005 1Bb	0.085 1 ± 0.027 7Ca	0.010 4 ± 0.003 9Bb

注: 不同大写字母表示相同方法不同土壤各指标数值差异显著, 不同小写字母表示相同土壤不同方法各指标数值差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Notes: Different capital letters indicate significant differences among index values between different soils by the same method, and different lowercase letters indicate significant differences among index values between different methods in the same soil ( $P < 0.05$ ).

## 4 结论

单环双水头法和单环 BEST 法测得  $K_s$  结果均为风沙土 > 黄绵土 > 壤土, 但是单环 BEST 法测量 3 种类型土壤的  $K_s$  值比单环双水头法分别大 2.9、2.1、4.5 倍。单环单水头法(10 cm)测量结果与单环双水头法接近。单环双水头法与单环单水头法(10 cm)测量坡地  $K_s$  随坡度的增加而线性增加, 但是单环 BEST 法呈现出相反的趋势。当坡度 < 10°时, 这 2 种方法均可以测量计算 3 种类型土壤的  $K_s$ , 但当坡度超过 10°时,  $K_s$  被显著高估, 2 种方法不再适用。

## 5 参考文献

[1] BAGARELLO V, CASTELLINI M, IOVINO M. Influence of the pressure head sequence on the soil hydraulic conductivity determined with tension infiltrometer [J].

Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(3): 383.

[2] 袁建平, 蒋定生, 文妙霞. 坡地土壤降雨入渗试验装置研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(1): 24.

YUAN Jianping, JIANG Dingsheng, WEN Miaoxia. Research on rainfall penetration testing device of slopland [J]. Bulletin of Soil & Water Conservation, 1999, 19(1): 24.

[3] BAGARELLO V, SGROI A. Using the single-ring infiltrometer method to detect temporal changes in surface soil field-saturated hydraulic conductivity [J]. Soil & Tillage Research, 2004, 76(1): 13.

[4] 樊军, 邵明安, 王全九. 田间测定土壤导水率的方法研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 114.

FAN Jun, SHAO Ming'an, WANG Quanjiu. Development about methods of soil hydraulic conductivity determination in fields [J]. Science of Soil & Water Conservation, 2006, 4(2): 114.

[5] 樊军, 王全九, 邵明安. 盘式吸渗仪测定土壤导水率

- 的两种新方法[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 14.
- FAN Jun, WANG Quanjiu, SHAO Ming'an. New methods for determining soil hydraulic conductivity by disc tension infiltrometers [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(10): 14.
- [6] REYNOLDS W D, ELRICK D E. Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer [J]. Science Society of America Journal, 1991, 55: 633.
- [7] REYNOLDS W D, ZEBCHUK W D. Use of contact material in tension infiltrometer measurements [J]. Soil Technology, 1996, 9(3): 141.
- [8] 康绍忠, 张书函, 聂光镛, 等. 内蒙古敖包小流域土壤入渗分布规律的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(2): 38.
- KANG Shaozhong, ZHANG Shuhan, NIE Guangyong, et al. Research on soil infiltration distribution of Aobao water basin in Inner Mongolia [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1996, 2(2): 38.
- [9] LASSABATERE L, ANGULO-JARAMILLO R, UGALDE J, et al. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments-BEST [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(2): 521.
- [10] REYNOLDS W D, ELRICK D E. Pondered infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow [J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(5): 1233.
- [11] NIMMO J R, SCHMIDT K M, PERKINS K S, et al. Rapid measurement of field-saturated hydraulic conductivity for areal characterization [J]. Vadose Zone Journal, 2009, 8(1): 142.
- [12] ELRICK D E, REYNOLDS W D, TAN K A. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses [J]. Groundwater Monitoring & Remediation, 1989, 9(3): 184.
- [13] HAVERKAMP R, ARRUE J, VANDERVAERE J, et al. Hydrological and thermal behaviour of the vadose zone in the area of Barrax and Tomelloso (Spain): Experimental study, analysis and modeling [J]. Project UEn. EV5C-CT, 1996, 92: 00.
- [14] MINASNY B, MCBRATNEY A B. Estimating the water retention shape parameter from sand and clay content [J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(4): 1105.
- [15] DUŠEK J, DOHNAL M, VOGEL T, et al. Numerical analysis of ponded infiltration experiment under different experimental conditions [J]. Soil & Water Research, 2009(4): S22.
- [16] BRAGARELLO V, IOVINO M, LAI J. Field and numerical tests of the two-ponding depth procedure for analysis of single-ring pressure infiltrometer data [J]. Pedosphere, 2013, 23(6): 779.
- [17] HILLS R C. Lateral flow under cylinder infiltrometers: A graphical correction procedure [J]. Journal of Hydrology, 1971, 13: 153.
- [18] BRAGARELLO V, BAIAMONTE G, CASTELLINI M, et al. A comparison between the single ring pressure infiltrometer and simplified falling head techniques [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(18): 4843.
- [19] BRAGARELLO V, IOVINO M, ELRICK D E. A simplified falling-head technique for rapid determination of field-saturated hydraulic conductivity [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 28(18): 4843.
- [20] 韩冬, 魏占民, 于健, 等. 湿润速度对土壤饱和导水率的影响机理 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 43.
- HAN Dong, WEI Zhanmin, YU Jian, et al. Influence mechanisms of wetting rate on soil saturated hydraulic conductivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 43.