

圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究

许明祥, 刘国彬, 卜崇峰, 贾海燕

(中国科学院 水利部水土保持研究所)

摘 要: 介绍了一种田间定量测定土壤渗透性的新方法——圆盘入渗仪法。应用该法和双环法对黄土丘陵区土壤不同利用方式(果园、农地、灌木、草地、林地)下的土壤渗透性进行了对比研究, 并对比分析了该方法的优缺点。结果表明: 在该试验条件下, 不同利用方式下土壤的孔性及渗透性有明显差别。土壤有效孔径以灌木地最大, 为农地的 5.7 倍, 果园的 3.5 倍; 其次为林地和草地, 为农地的 4 倍多, 果园的 2.5 倍多。果园的最初入渗率最大, 是林地的 3 倍, 草地的 5 倍。稳定入渗率大小顺序为: 果园> 农地> 灌木> 草地> 林地。灌木地的导水率是农地的 1.5 倍, 是林地的 3 倍多; 草地和果园的土壤导水率是农地的 1.2 倍, 是林地的 2.8 倍。两种方法测定的入渗率结果具有显著的线性相关性。说明圆盘入渗仪法适合于黄土丘陵区各种利用类型土壤的入渗测定。

关键词: 土壤渗透性; 圆盘入渗仪; 土壤利用方式

中图分类号: S152.7+2

文献标识码: A

文章编号: 100226819(2002)0420054205

土壤入渗是指水分进入土壤形成土壤水的过程, 它是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化过程中的一个重要环节。土壤渗透性是描述土壤入渗快慢的极为重要的土壤物理特征参数之一。土壤渗透性越好, 地表径流就会越少, 土壤流失量就相应减少。目前, 土壤渗透性的测定方法较多, 如双环法、环刀法、定水头渗透仪法、变水头渗透仪法、模拟降雨法、土柱法、钻孔法、稳定通量法及渗透桶法, 但田间测定土壤渗透性一直是土壤水动力学研究中的一大难题, 虽然双环法比较通用, 但耗水耗时而且费力, 野外测定十分不便^[1~3]。

本文介绍一种田间定量测定土壤渗透性能的新方法——圆盘入渗仪法(Disc permeameter)^[4], 并应用该法和双环法对黄土丘陵区土壤不同利用方式下土壤渗透性能进行了对比研究。

1 原理和方法

1.1 原理

圆盘入渗仪由蓄水管、恒压管和圆盘组成(见图 1)。恒压管是依据马斯瓶原理起恒压作用的。

当土壤表面有积水面时, 入渗的初始阶段受土壤毛细管特性控制, 随着时间的延长, 水源大小和几何形状以及重力均影响水流速率。对于均质土壤, 入渗速率最终会达到稳定值。这一稳定流速是由毛细

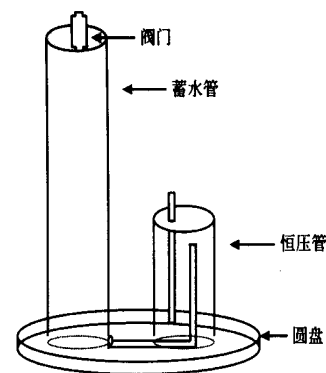


图 1 圆盘入渗仪示意图

Fig 1 Schematic diagram of disc permeameter

管特性、重力、积水面大小及水压大小所控制。

圆盘入渗仪法利用初始入渗速率和稳定入渗速率来区分受毛细管力及重力所控制的土壤入渗流。此外, 通过选择水压大小, 可以计算出与入渗过程有关的土壤孔隙的大小。

对于均质土壤, 表面有一半径为 r_0 (mm) 的圆形积水, 水势为 W 时, 稳定入渗速率 q 为

$$q = Pr_0^2(k_0 - k_n) + 4r_0W \quad (1)$$

公式右边第一项为重力势项, 第二项为基膜势项(受毛细管控制)。 q ——稳定入渗通量, $\text{mm}^3 \text{ s}^{-1}$; k_0 ——水势为 W (mm) 时的土壤导水率, mm s^{-1} ; k_n ——初始土壤水势为 W 时的土壤导水率, 对于相对较干的土壤, k_n 远小于 k_0 , 可忽略; W ——基质势, 它与导水率的关系为

$$W = k_0 K \quad (2)$$

式中 K ——毛细管长度, 它与土壤吸水率及导水率有关^[5~7]。

$$K = b_s \sqrt{\frac{2}{H - H_0}} k_0 \quad (3)$$

收稿日期: 2001209221

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000018606);

中国科学院知识创新项目(KZCX1206)

作者简介: 许明祥(1972-), 男, 汉族, 助研, 博士生, 主要从事土壤质量及流域生态系统健康诊断研究。陕西杨凌 西北农林科技大学中科院水利部水土保持研究所, 712100

式中 H ——测定前初始土壤体积含水率(土水势为 W); H ——水势为 W 时的土壤体积含水率;
 s_0 ——初始土水势为 W , 入渗水势为 W 时的土壤吸水率; b ——无量纲常数, 其值在 $10^2 \sim 10^4$ 之间, 对于大田土壤, b 的平均值取 0.55 为佳。

这样, 可得到

$$q = Pr_0 k_0 + 4r_0 b s_0^2 \frac{\partial}{\partial t}(H - H) \tag{4}$$

$$k_0 = q \frac{\partial}{\partial t} Pr_0 - 4b s_0^2 \frac{\partial}{\partial t} Pr_0 (H - H) \tag{5}$$

在圆盘入渗初期, 毛管力控制的入参与积水面积(圆盘面积)大小无关, 在较短的入渗期内, 近似为一维入渗, 这样, 累积入渗量与土壤吸力有以下关系^[5]

$$Q \propto Pr_0^2 = s_0 t^{1/2} \tag{6}$$

式中 Q ——总入渗量; t ——入渗时间; s_0 (土壤吸水率)——累积入渗量对 $t^{1/2}$ 的曲线斜率。

K (宏观毛管长度, mm) 为平均孔隙长度, 它是一个概化值, 它简化了多维土壤入渗的计算^[8, 9]。 K 越大, 毛细管对入渗的影响就越大(相对于重力的影响而言)。Philip (1987) 通过简单毛细管理论将 K 与 K_e (有效孔径, mm) 相关联^[2]

$$K = R \frac{Q}{Q_e} K_e \tag{7}$$

式中 R ——土壤水表面张力; Q ——水的密度;
 g ——重力加速度。在 20℃ 时, 对纯水, 有

$$K = 7.4 \frac{Q}{g} K_e \tag{8}$$

在野外, 有 2 种方法可以计算 K , 方法之一是通过(3)式来计算, 方法之二是利用提供不同的水压, 测定 2 次吸力, 可得

$$K = \frac{2b}{g} W \left[(s_+ - s_-)^2 - 1 \right] \tag{9}$$

1.2 操作步骤

- 1) 选择测定点, 尽量除去地表植被(< 3 mm)及石头, 整理出半径大于 10 cm 的平整地面; 在距测定点约 25 cm 处用环刀取样, 测土壤初始含水率(H)及容重;
- 2) 将半径为 10 cm、高 3 mm 的钢环放在测定点上并压紧, 环内铺满细沙(3 mm 厚)并用刚尺刮平, 然后将钢环移走;
- 3) 用带有塑料管的注射器调节恒压管水位, 设置水势(W)。在本试验中, W 设为- 10 mm 水柱;
- 4) 将圆盘入渗仪(圆盘在测定前应在水中浸泡数小时以确保其气密性)放入水桶中, 用气管子抽气使蓄水管充满水后关闭阀门;
- 5) 取出入渗仪, 轻轻拍打圆盘以赶走其中气泡; 擦干圆盘上的水;
- 6) 检验气密性。将入渗仪置于一吸水物上, 看蓄水管中是否有气泡产生, 如果有气泡, 则需仔细检

- 查仪器, 查明漏气之处, 确保仪器的气密性;
- 7) 记录蓄水管中水位高度(H_0), 并将仪器小心放在测定点上, 使其与沙面紧密接触;
- 8) 打开阀门, 等湿润峰通过沙层后立即开始计时(开始计时尽早不尽晚)。入渗初期, 尽可能增加读数次数(如每 15 s 读数一次); 此后可以减少读数次数, 连续纪录直至稳定入渗阶段(相同时间间隔内入渗水量相等)(至少读数 10 次);
- 9) 入渗结束时, 移开入渗仪, 尽快铲去部分沙层, 取表层 2~ 3 mm 土壤(土样应在水层消失时尽快取, 且不能低于表层 5 mm), 放在密闭容器中, 称质量, 测其含水率(H)。

1.3 双环法及其与圆盘入渗仪法的差异

双环法即大渗透筒法。内筒直径 35.5 cm、高 18.5 cm, 外筒直径 50 cm、高 18.5 cm。具体原理及方法见文献[2, 3]。
表 1 对比分析了两种测定方法的优缺点。可以看出, 尽管圆盘入渗仪法测定面积小, 入渗深度浅, 但该法省力、省水、省时、准确, 对于测定表层 0~ 30 cm 土壤的入渗特性有很大的优越性。

表 1 两种测定方法之比较

| Table 1 Comparison of two measurement methods | |
|------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 双环法 | 圆盘入渗仪法 |
| 费力, 费水, 野外操作不便 | 轻便, 省力, 省水, 野外操作容易 |
| 双环入土时, 对土壤结构有破坏, 尤其是破坏表土。试验开始时, 向双环中加水容易破坏表土结构 | 不扰动表土 |
| 读数误差较大, 尤其是初始入渗阶段。不便定量研究土壤初始入渗过程 | 读数准确, 尤其能准确测定初始入渗过程。可以定量研究土壤初始入渗过程 |
| 费时, 需 2~ 6 h 才能达到稳定入渗 | 省时, 30 min 左右即可达到稳定入渗 |
| 有压入渗, 不符合实际情况 | 入渗水压可调节, 可以以负水压入渗 |
| 入渗深度大(50 cm 以下), 入渗面积大, 代表性强 | 入渗面积小(直径 20 cm), 深度浅(20~ 30 cm), 代表性较差 |
| 垂直入渗, 外环可防止侧渗 | 稍有侧渗 |

1.4 试验设计

试验在黄土丘陵沟壑区中科院安塞水土保持综合试验站进行, 土壤为黄绵土(堆垫旱耕人为土)。2000 年 5 月在试验站川地试验场分别选取了农地(黄豆)、林地(柳树, 无地被物)、灌木地(沙棘)、草地(苜蓿)、果园地(苹果)各 1 块, 重复 3 次, 用圆盘入渗仪法和双环法对不同利用类型土壤的渗透性进行了对比研究。试验时水温为 22℃。

2 结果分析

2 1 不同利用方式土壤的孔性

土壤总孔隙度、孔隙大小分布及弯曲度——即土壤孔隙的几何性状,对土壤导水率及持水特性有直接的影响。土壤学中所说的孔隙直径,是指与一定的土壤水吸力相当的孔径,叫做当量孔径或有(实)效孔径。有效孔径与土壤水吸力呈反比,孔隙愈小则土壤水吸力愈大。每一当量孔径与一定的土壤水吸力相对应。宏观毛管长为平均孔隙长度,它是一个概化值,它简化了多维土壤入渗的计算。宏观毛管长越大,毛细管对入渗的影响就越大(相对于重力的影响而言)。土壤孔性受其质地、土粒排列松紧及有机质含量影响。

在本试验条件下,土壤不同利用方式下土壤孔性有明显差别(见表 2)。草地的孔隙度最大,农地和灌木地次之,果园较小,林地最小。有效孔径以灌木地最大,为农地的 5.7 倍,果园的 3.5 倍;其次为林地和草地,为农地的 4 倍多,果园的 2.5 倍多;果园较小,农地最小。就宏观毛管长而言,农地>果园>草地、林地>灌木。以上结果表明,灌木地和草地的土壤水吸力最小,而农地和果园的土壤水吸力较大。相对于灌木地和草地,农地和果园的土壤水入渗受土壤毛管的影响更大。

表 2 土壤不同利用方式下表层土壤孔性

Table 1 The characteristics of top soil pore in different land use types

| 利用方式 | 初始含水率 θ_0 | 终止含水率 θ_g | 容重 $\rho_g \cdot \text{cm}^{-3}$ | 孔隙度 θ | 有效孔径 \bar{a}_{nm} | 宏观毛管长 \bar{a}_{mm} |
|------|------------------|------------------|----------------------------------|--------------|---------------------|----------------------|
| 农地 | 0.025 | 0.370 | 0.880 | 0.457 | 0.101 | 75.3 |
| 草地 | 0.081 | 0.491 | 0.782 | 0.517 | 0.434 | 17.1 |
| 果园 | 0.052 | 0.411 | 0.923 | 0.430 | 0.168 | 47.4 |
| 灌木 | 0.035 | 0.376 | 0.897 | 0.446 | 0.580 | 12.8 |
| 林地 | 0.052 | 0.350 | 0.992 | 0.388 | 0.469 | 16.6 |

从终止含水率和孔隙度测定结果可知,入渗结束时,农地和灌木地的充水孔隙占总孔隙的 80% 以上,草地、果园和林地的充水孔隙比例在 90% 以上。说明此时土壤已接近饱和。

2 2 不同利用方式土壤的入渗特性

在本试验条件下,不同利用方式土壤的入渗特性有较大差异(见表 3)。就入渗率而言,果园的最初入渗率(开始 3 min 平均入渗率)最大,是林地的 3 倍,草地的 5 倍。尔后,农、果、灌、林的土壤入渗率迅速下降,入渗 15 min 时,降幅分别为 36.7%、46.2%、36.9% 和 44.2%。而草地的入渗率则增加了 67%。入渗 15~30 min 期间,各利用方式土壤入渗率约下降了 20%。

表 3 不同利用方式土壤的入渗特性(圆盘入渗仪法)

Table 3 Soil infiltration characteristics in different land use types (measured using disc permeameter)

| 土地利用方式 | 农地 | 草地 | 果园 | 灌木 | 林地 |
|----------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 开始 3 min 平均入渗率 $\bar{q}_{nm} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ | 2.665 | 0.605 | 3.032 | 1.833 | 0.999 |
| 开始 15 min 平均入渗率 $\bar{q}_{nm} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ | 1.686 | 1.012 | 1.631 | 1.156 | 0.557 |
| 开始 30 min 平均入渗率 $\bar{q}_{nm} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ | 1.353 | 0.816 | 1.249 | 1.02 | 0.433 |
| 稳定入渗率 $\bar{q}_{nm} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ | 1.129 | 0.860 | 1.135 | 0.999 | 0.325 |
| 土壤吸水率 $\bar{q}_{nm} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1} \cdot 10^2$ | 5.224 | 2.997 | 4.652 | 2.607 | 1.726 |
| 导水率 $\bar{q}_{nm} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ | 0.563 | 0.713 | 0.723 | 0.859 | 0.251 |

注:导水率指水势 W_0 为 -10 mm 时的土壤导水率。

通常,在相同的土壤和供水情况下,最初入渗率主要由土壤湿润程度决定,如果开始入深时土壤较为湿润,在湿润前锋的吸力梯度小,最初入渗速率较低,随后入渗速率降低也较缓慢。如开始入渗的土壤干燥,吸力梯度大,则最初入渗速率较高,以后随时间延长入渗速率降低也快。从表 1 可知,草地的初始含水量较高,所以其最初入渗速率较低。此外,由于草地表面有一层较细较干的有机物,透水性较差,影响最初入渗,导致最初入渗速率偏低。

随着入渗的进行,草地和林地最先接近稳定入渗(见图 2),至 30 min 时,各利用方式土壤基本达到稳定入渗。稳定入渗率大小顺序为:果园>农地>灌木>草地>林地。

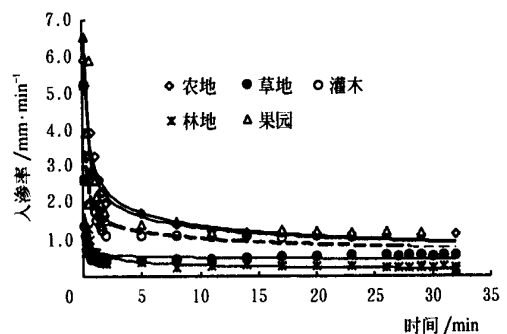


图 2 不同利用方式土壤入渗率

Fig. 2 Soil infiltration rate in different land use types

土壤吸水率是基质势的反映,基质吸力是由于水对土壤颗粒表面和毛管孔隙的物理亲和形成的。有效孔径与土壤水吸力呈反比,孔隙愈小则土壤水吸力愈大。从表 2 可见,农地和果园的土壤有效孔径较小,所以其土壤吸水率较大。这也是农地和果园土壤最初入渗速率较大的原因之一。

对入渗过程的拟合结果表明,各利用方式下土壤入渗率随时间的变化具有显著的幂函数关系(图 2) ($y_{\text{农地}} = 2.9186x^{-0.326}$, $R^2 = 0.916$; $y_{\text{果园}} =$

$2.6922x^{-0.3129}, R^2 = 0.7625; y_{\text{灌木}} = 1.8321x^{-0.2416}, R^2 = 0.8321; y_{\text{林地}} = 0.6937x^{-0.364}, R^2 = 0.8097; y_{\text{草地}} = 0.6383x^{-0.0975}, R^2 = 0.7014。$

导水率是土壤渗透性研究中重要的物理参数之一。在相同的供水条件下, 导水率的影响因素是土壤孔隙的几何形状(孔隙度、孔隙大小分布及弯曲度)。在本试验条件下, 灌木地的土壤导水率最大, 其次是草地和果园, 农地的较小, 林地最小。灌木地的导水率是农地的 1.5 倍, 是林地的 3 倍多; 草地和果园的土壤导水率是农地的 1.2 倍, 是林地的 2.8 倍。

以上试验结果是就表层 0~ 30 cm 土壤而言, 对于深层土壤, 结果可能会有所不同。此外, 在本研究中, 林地的稳定入渗率及导水率均为最低, 这是因为所测的林地试验站内, 表层土壤几乎无有机质累积, 且土壤紧实(容重最大, 为 0.992 g/cm³), 其测定结果不具有广泛的代表性。

试验中所测定的导水率是水势 W 为- 10 mm 时上层土壤(传导层)的导水率。在淹水条件下的均质土壤中, 它接近于饱和导水率。

2.3 不同方法测定结果比较

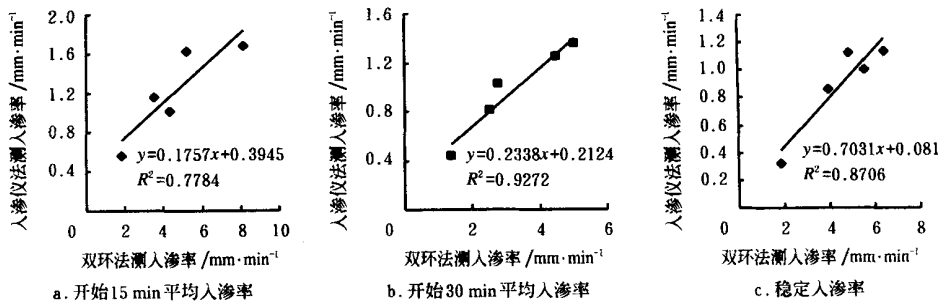


图 3 两种方法测定的入渗率相关性

Fig. 3 Correlation of infiltration rate measured using two methods

3 结 论

1) 在本试验条件下, 土壤不同利用方式下土壤孔性有明显差别。土壤有效孔径以灌木地最大, 为农地的 5.7 倍, 果园的 3.5 倍; 其次为林地和草地, 为农地的 4 倍多, 果园的 2.5 倍多。相对于灌木地和草地, 农地和果园的土壤水入渗受土壤毛管的影响更大。

2) 不同利用方式土壤的入渗特性有较大差异。果园的最初入渗率最大, 是林地的 3 倍, 草地的 5 倍。稳定入渗率大小顺序为: 果园> 农地> 灌木> 草地> 林地。在本试验条件下, 灌木地的导水率是农地的 1.5 倍, 是林地的 3 倍多; 草地和果园的土壤导水率是农地的 1.2 倍, 是林地的 2.8 倍。

从表 4 可以看出, 用双环法测定的不同利用方式土壤的入渗率与用入渗仪法测定之结果(表 3)有类似的规律。但从入渗 15~ 30 min 期间, 双环法测定的平均入渗率下降幅度与入渗仪法所测结果有所不同, 双环法测定的农地、草地、果园、灌木、林地入渗率分别下降 37.8%、41.9%、13.6%、23.4%、24.9%。

表 4 不同利用方式土壤的入渗率(双环法)

| types(measured by double rings) | mm · m in ⁻¹ | | | | |
|---------------------------------|-------------------------|------|------|------|------|
| 土地利用类型 | 农地 | 草地 | 果园 | 灌木 | 林地 |
| 开始 15 min 平均入渗率 | 8.19 | 4.37 | 5.21 | 3.54 | 1.85 |
| 开始 30 min 平均入渗率 | 5.09 | 2.54 | 4.50 | 2.77 | 1.39 |
| 稳定入渗率 | 1.24 | 1.00 | 1.63 | 1.41 | 0.47 |

回归分析结果表明, 两种方法测定的入渗率结果具有显著的线性相关性(图 3)。说明圆盘入渗仪法适合于黄土丘陵区各种利用类型土壤的入渗测定。但由于本试验中双环法所测的样点数较少, 回归分析结果仅作定性分析之参考, 两种方法测定结果之定量关系尚需进一步研究。

3) 两种方法测定的入渗率结果具有显著的线性相关性。说明圆盘入渗仪法适合于黄土丘陵区各种利用类型土壤的入渗测定。该法省力、省水、省时、准确, 对于测定表层 0~ 30 cm 土壤的入渗特性有很大的优越性。

致谢: 本文得到蒋定生研究员的指正, 在此表示衷心感谢。

[参 考 文 献]

[1] 于东升, 史学正. 用 Gueph 法研究不同土地利用方式下富铁土的土壤渗透性[J]. 水土保持学报, 1998, 4 (4):
[2] 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究[J]. 土壤学报, 1986(4): 299~ 304
[3] 王文焰, 张建丰. 田间土壤入渗试验装置的研究[J]. 水

- 土保持学报, 1991(4): 38~ 44
- [4] CSIRO Disc Permeameter Instruction Manual [Z]. Canberra, 1988
- [5] White I, Sully M J, Perroux K M. The disk permeameter[J]. Water Resources Research, 1989
- [6] White I, Sully M J. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration[J]. Water resource Research, 1987, 23: 1514~ 1522
- [7] D 希勒尔著 土壤物理学概论[M]. 尉庆丰等译 西安: 陕西人民出版社, 1988
- [8] Philip J R. Comments on "Steady infiltration from spherical cavities"[J]. Soil Sci Soc Am J, 1985, 49: 788 ~ 789
- [9] Wooding R A. Steady infiltration from a shallow circular pond [J]. Water Resource Research, 1968, 4: 1259~ 1273

Experimental Study on Soil Infiltration Characteristics

Using Disc Permeameter

Xu Mingxiang, Liu Guobin, Bu Chongfeng, Jia Haiyan
(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,
Northwestern Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract A new kind of soil infiltration measurement method in field, i.e., disc permeameter, was introduced in this paper. Soil infiltration characteristics of different land use types in the loess hilly-gullied area were studied using this new method and traditional double rings method. The advantages and disadvantages of these two methods were also compared. The result showed that the characteristics of soil pore and infiltration were obviously different with different land use types in the condition of the experiment. Shrub land had the highest soil characteristic mean pore size, which was 5.7 times of that in cropland and 3.5 times of that in orchard. Compared with shrub land, soil characteristic mean pore size in woodland and grassland was in the next place, which was 4 times of cropland and more than 2.5 times of orchard. Orchard has the highest infiltration rate, which was 3 times of woodland and 5 times of grassland. The sequence of stable infiltration rate in different land use types was orchard > cropland > shrub land > grassland > woodland. The soil hydraulic conductivity in shrub land was 1.5 times of cropland and 3 times of woodland. The soil hydraulic conductivity in grassland and orchard was 1.2 times of cropland and 2.8 times of woodland. The results on soil infiltration rate measured using these two methods had significantly linear correlation. The experimental result showed that disc permeameter was suitable for soil infiltration measurement in different land use types in the loess hilly-gullied area. The new method had great advantage in measuring top soil infiltration of 0~ 30 cm with its merit of labour saving, water saving, time saving and accuracy.

Key words: soil infiltration characteristics; disc permeameter; land use types