

## 4 种土壤入渗测定方法的比较

朱良君<sup>1</sup>, 张光辉<sup>1,2</sup>, 任宗萍<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 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, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 入渗是土壤的基本物理性状, 与降雨产流、侵蚀、非点源污染等过程密切相关, 快速、准确测定土壤入渗速率具有重要的意义。以黄土高原沟壑区安塞水土保持综合试验站大豆地的黄土为测试土壤, 利用双环、单环、圆盘入渗仪、Hood 入渗仪 4 种方法测定了土壤入渗性能, 并以双环法测定的稳渗速率、Hood 仪测定的饱和导水率、单环/双环和圆盘测定的累积入渗量为基础, 比较分析了 4 种方法各自的优劣。结果表明, 单环、圆盘、Hood 测定的稳渗速率分别为双环的 116%, 111% 和 225%, 双环、单环、圆盘测定的饱和导水率分别为 Hood 的 65.8%, 75.1% 和 105%, 双环、单环、圆盘达到稳渗时间分别为 100, 80 和 30 min。说明圆盘测得的稳渗速率、饱和导水率最接近标准值, 而且省时省力省水, 更适用于野外实验。

**关键词:** 土壤入渗; 双环法; 单环法; 圆盘入渗仪; Hood 入渗仪

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0163-05

中图分类号: S152.72

### Comparing Four Methods for Soil Infiltration Measurement

ZHU Liang-jun<sup>1</sup>, ZHANG Guang-hui<sup>1,2</sup>, REN Zong-ping<sup>1</sup>

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Infiltration, as one of the fundamental physical properties, is closely related to many processes including rainfall-runoff, soil erosion and non-point pollution. It is critical to measure soil infiltration rate quickly and accurately. Soil infiltration rates were measured using four methods of double-ring, single-ring, disc permeameter, and Hood infiltrometer on the loess-derived soil with planted soybean at the Ansai Research Station of Soil and Water Conservation, which is located in the hill-gullied area of the Loess Plateau. The results were evaluated based on the measured steady infiltration rate by double-ring method and saturated conductivity by Hood infiltrometer. The results showed that the steady infiltration rates of single-ring, disc, and Hood methods were 116%, 111%, and 225% of that of double-ring method, respectively. The saturated conductivities of double-ring, single-ring, and disc method were 65.8%, 75.1%, and 105% of that of Hood method, respectively. The times of reaching the steady infiltration were quite different, approximately 100, 80, and 30 minutes for double-ring, single-ring and disc method, respectively. The disc permeameter was more suitable to measure soil infiltration on hillslope for not only the savings in time, labor and water, but also the accuracy in estimating the steady infiltration rate and saturated conductivity.

**Keywords:** soil infiltration; double-ring; single-ring; disc permeameter; Hood infiltrometer

朱显漠先生曾在黄土高原国土整治“28 字方略”中提到“全部降水就地入渗拦蓄”, 而土壤渗透性影响“入渗拦蓄”过程。因此认识黄土高原的土壤入渗特征对于洪水预报和土壤侵蚀预测预报, 以及对制定水土保持措施, 均有十分重要的意义<sup>[1]</sup>。

目前测定土壤入渗速率的方法主要有注水法(如双环法)、水文法和人工降雨法<sup>[2]</sup>, 测定饱和导水率方法则很多<sup>[3]</sup>, 如定水头渗透仪法、变水头渗透仪法、盘式入渗仪法等。众多方法中, 双环法被认为最准确的方法, 实际应用最多。

收稿日期: 2011-12-03

修回日期: 2012-02-08

资助项目: 中国科学院“百人计划”择优支持项目“土壤侵蚀水动力学机制研究”; 国家自然科学基金项目“输沙对坡面侵蚀的影响及其水动力学机理研究”(412712887)

作者简介: 朱良君(1990—), 男(汉族), 山东省滕州市人, 硕士研究生, 现从事土壤侵蚀过程模拟研究。E-mail: zhulj@mail.bnu.edu.cn。

通信作者: 张光辉(1969—), 男(汉族), 甘肃省静宁县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与土壤侵蚀研究。E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn。

国内外许多研究均涉及了土壤入渗测定方法的比较<sup>[4-9]</sup>,虽然双环法是田间测定土壤渗透性能最常用、最经典的方法,也是判断其他方法测定结果的基础,但双环法一般只是测定土壤表层入渗能力,而且耗水量大、耗时间长<sup>[3]</sup>,为了保持双环内水头深度一致,当利用双环法测定坡地土壤入渗时,需要平整地表,这种扰动可能对测定结果影响很大,而土壤入渗速率主要取决于土壤表层的性状,双环安装时的地表扰动自然会对试验结果产生影响,且这种影响随着坡度的增大而增大。因此需要选择一种相对既省时省力又准确方便的方法来替代双环法进行坡面土壤入渗过程的测定。

## 1 研究区概况与实验方法

### 1.1 研究区概况

中国科学院安塞水土保持综合试验站地处黄土高原腹地(109°19′23″E,36°51′30″N),属中温带大陆性半干旱季风气候区,年均气温 8.8℃,年均降水量 549 mm,降水多以短历时暴雨为主,降雨在年内分布集中,6—9 月的降水量占到全年降水量的 70%以上。实验在试验站平坦川地的大豆地内的无雨天连续进行,土壤为黄绵土,属于典型的粉壤土,砂粒含量为 26.33%,粉粒含量为 67.02%,黏粒含量为 5.51%,土壤容重为 1.081 kg/m<sup>3</sup>,有机质含量为 0.9%<sup>[10]</sup>。

### 1.2 实验方法

1.2.1 单环和双环法测定方法 双环实验的内径 35 cm,外径 50 cm,高度均为 18.5 cm。在实验区选较为平坦的样地,去除地表作物,将圆环用橡胶锤缓慢均匀地打入土中 12.5 cm,尽量保持土壤结构不受破坏。利用直径为 25 cm 的马氏瓶为圆环供水,当内环和外环中的水层厚度达到 3 cm 时,开始用秒表计时,并分别在 0.0,0.5,1,2,3,5,7,10,15,20,25 和 30 min 及之后每 10 min 读取供水桶标尺刻度值,实验过程中保持内外环水面高度为 3 cm,读数时一并读取水温。单环实验用双环的内环来完成,实验过程与双环法相同。

1.2.2 圆盘入渗仪测定方法 圆盘入渗仪为澳大利亚生产的 CSIRO 圆盘入渗仪(disc permeameter),由储水管、调压管和入渗盘组成。实验时选择平整样地,去除地表作物,同时在样地周围用环刀取样,测定土壤初始含水量及容重。将半径 10 cm、高 3 mm 的钢环安置在测定点,环内铺满过 0.25 mm 筛子的细沙,用钢尺刮平,并将钢环移走;用注射器调整恒压管

中水位高度为 20 mm,将圆盘入渗仪放入水桶中,用抽气筒给储水管充满水后关闭阀门;取出入渗仪,轻拍入渗盘使其中的气泡溢出,擦干圆盘上的水;将圆盘放置于吸水物上,确保储水管没有气泡产生,记录储水管水位初始高度,将仪器小心放在测定点,使其与沙面紧密接触;当储水管中产生气泡时开始计时,前 10 次读数时间间隔为 0.5 min,随后 5 次读数间隔为 2 min,8 次读数间隔为 5 min,最后读数间隔为 10 min,直至达到稳定入渗,读数时一并读取水温。实验结束后,移开入渗仪,立刻铲去部分沙层,取表层 2~3 mm 土壤约 30 g,测定土壤含水量。

1.2.3 Hood 入渗仪测定方法 Hood 入渗仪为德国 UGT 公司生产的 Hood IL-2700 型入渗仪,由 Hood 水罩(直径 17.6 cm 或 24.8 cm)、U 形管压力计、导水管路、储水管等组成。实验时尽量选择平整样地,去除地表作物,安置钢圈并部分压入土壤,将水罩放置在钢圈内,并在水罩和钢圈之间用过 0.5 mm 筛子的饱和湿沙密封;给 U 形管注水,使液面平于 0 刻度线处;连接管路,关闭所有阀门,然后给内、外管注水,外管水面低于内管;配合阀门和调压管调节水罩中间水柱高度与 U 形管液面差,此二者之差即为水罩中施加于土壤表层的压力值,本实验调出 0 和 4 cm 两个压差。开始计时,液面每下降 5 mm 记录 1 次时间,直至观测值达到稳定,读数时一并读取水温。

以上实验各进行 3 次,将 3 次实验数据平均,进行土壤稳渗速率、土壤饱和导水率的计算。

### 1.3 数据处理方法

数据处理、制图分别采用 Excel,SPSS 和 Origin 等软件进行。其中,为了检验双环、单环、圆盘累积入渗量在变化趋势和数值方面的差异性,利用 SPSS 17.0 软件,选取双环、单环、圆盘在 10,15,20,30,40,50,60,70 和 80 min 时累积入渗量(mm)进行 Pearson 相关性分析和独立样本 *T* 检验。

## 2 土壤初渗速率、稳渗速率、饱和导水率的计算

### 2.1 土壤初渗速率

由于初始观测阶段读数误差和系统误差无法估测,所以初始入渗速率  $f_0$  (mm/min),计算公式为:

$$f_0 = \frac{q_0}{t_0} \quad (1)$$

式中: $q_0$ ——入渗开始 3 min 的实测累积入渗量(mm); $t_0$ ——3 min。

### 2.2 土壤稳渗速率

单环和双环法计算公式为:

$$f_s = \frac{0.510\Delta h}{\Delta t(0.7+0.03)T} \quad (2)$$

式中:  $f_s$ ——10 °C 标准水温时土壤入渗速率(mm/min);  $\Delta h$ ——某时段  $\Delta t$  供水桶读数差值(mm);  $\Delta t$ ——时段(min);  $T$ ——某时段的平均水温(°C)。

圆盘入渗仪计算公式为:

$$f_s = \frac{\Delta h D_2^2}{\Delta t D_1^2 (0.7+0.03)T} \quad (3)$$

式中:  $D_1$ ——入渗盘的有效直径(cm);  $D_2$ ——储水管直径(cm)。

Hood 入渗仪计算公式为:

$$f_s = \frac{\Delta h}{\Delta t(0.7+0.03)T} f \quad (4)$$

式中:  $f$ ——横切面面积指数,即储水管截面积与入渗面积之比,小 Hood 罩为 0.313,大 Hood 罩为 0.156。

### 2.3 土壤饱和导水率

土壤导水率  $K_s$  与压力  $h$  间的关系可以用 Gardner 指数函数<sup>[11]</sup>描述:

$$K(h) = K_s \exp(\alpha h) \quad (5)$$

式中:  $K(h)$ ——给定压力下的导水率(mm/min);  $K_s$ ——饱和导水率(mm/min);  $\alpha$ ——与土壤结构和毛管吸力有关的因子;  $h$ ——压力值(cm)。

Wooding<sup>[12]</sup> 研究发现稳态入渗量( $Q, \text{cm}^3/\text{min}$ )与圆形入渗面(半径为  $r, \text{cm}$ )的关系为:

$$Q = \pi r^2 K(h) \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha}\right) \quad (6)$$

式中:  $Q$ ——可由累积入渗水量( $\text{cm}^3$ )与累积时间(min)做回归曲线求得,曲线线性部分的斜率即为稳态入渗水量( $\text{cm}^3/\text{min}$ )。

将(5)式代入(6)式得:

$$Q = \left(\pi r^2 + \frac{4r}{\alpha}\right) K_s \exp(\alpha h) \quad (7)$$

公式(7)为圆盘入渗仪饱和导水率计算公式。而对于单环/双环法其饱和导水率由公式(8)计算<sup>[5,13]</sup>:

$$K_s = \frac{R_s}{\frac{H}{C_1 L + C_2 D_1} + \frac{1}{\alpha(C_1 L + C_2 D_1)} + 1} \quad (8)$$

式中:  $H$ ——水头高度(cm);  $L$ ——内环入土深度(cm);  $D_1$ ——内径(cm);  $C_1, C_2$ ——无量纲经验常量,其值分别为  $0.316\pi$  和  $0.184\pi$ 。Parlang<sup>[13]</sup> 发现公式(5)中的  $\alpha$  满足  $\alpha = \alpha(h)$ , Philip 研究指出在多数情况下令  $\alpha$  为常数,仍能有效地表达  $K(h)$ ,因此对于单环/双环法,令  $\alpha = 0.2 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[6,14]</sup>,即可利用公式(8)进行计算。

对公式(7)两边取对数:

$$\ln Q = \alpha h + \ln\left[\left(\pi r^2 + \frac{4r}{\alpha}\right) K_s\right] \quad (9)$$

公式(9)为 Hood 入渗仪饱和导水率的计算公式,式中  $\ln Q$  与  $h$  呈线性关系,其中  $\alpha$  用公式(10)计算<sup>[13,15]</sup>:

$$\alpha = \frac{\ln Q_1 - \ln Q_2}{h_1 - h_2} \quad (h_1, h_2 < 0) \quad (10)$$

## 3 结果与讨论

### 3.1 入渗性能比较分析

对 4 种不同方法测定土壤入渗量进行计算分析,得到入渗性能比较(表 1),同时根据过程点数据利用 Origin 软件绘制入渗过程图(图 1)。

表 1 4 种不同方法入渗性能比较

测定方法	初渗速率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	稳渗速率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	饱和导水率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	达到稳渗 时间/min
双环	8.90	0.67	0.37	100
单环	6.86	0.77	0.42	80
圆盘	2.38	0.74	0.59	30
Hood	—	1.49	0.56	—

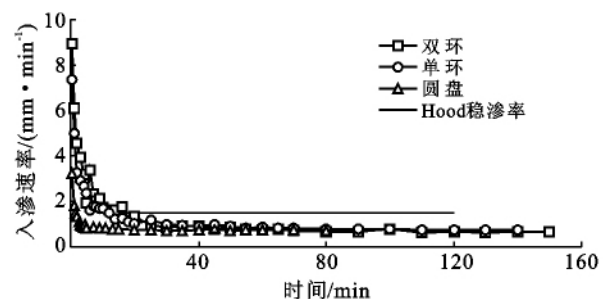


图 1 不同测定方法入渗过程比较

由表 1 可以看出,不同方法测定的初渗速率、稳渗速率、饱和导水率和达到稳定的时间,均存在显著差异。

就初渗速率而言,双环、单环、圆盘存在较大差异,可能是由于圆盘接触面积小且与土表间有干土层、单环/双环环壁与土体之间缝隙等导致的。

稳渗速率是反映土壤渗透性能的主要指标,也是判断不同土壤、不同土地利用条件下土壤入渗性能差异的基础,对其准确测量具有重要的意义。从表 1 可知,与双环法测定结果相比,单环由于存在明显的侧渗现象,稳渗速率偏大,为双环测定结果的 116%,这与 Wu<sup>[7]</sup> 等的研究结果一致;与单环法类似,圆盘入渗仪也存在一定侧渗,稳渗速率也较双环法为大,平均稳渗速率为双环的 111%,这与许明祥<sup>[5]</sup> 等人的研究结果相反,造成这种差异的原因可能在于土壤性质的时空变异及计算公式的不同;用 Hood 仪法测定土壤入渗时存在很大的侧渗现象,从而导致 Hood 入

仪测定的稳渗速率为双环的 225%。

饱和导水率是土壤渗透性能的另一种量化表述,在土壤物理学、坡面水文过程及侵蚀过程模拟中应用极为广泛。由表 1 可知,由于单环/双环、圆盘法均使用了经验参数参与计算,而 Hood 仪法均使用实测值,所以以 Hood 仪值为标准,双环测值为 Hood 的 65.8%,这与 Bodhinayake 的研究结果一致<sup>[6]</sup>;单环测值为 Hood 的 75.1%;圆盘测值为 Hood 的 105%。

实验耗时是野外实验需要考虑的比较重要的因素,由表 1 可知达到稳定入渗的时间上双环约为 100 min,单环约为 80 min,圆盘约为 30 min,而 Hood 仪考虑调压过程总时间约为 30 min。综合来看,圆盘入渗仪法在稳渗速率和饱和导水率上均靠近标准值,而且用时最短。

由图 1 可以看出,入渗初期双环的入渗速率大于单环的入渗速率,但在 25 min 前后开始小于单环,并持续到稳渗阶段,直到实验结束。实验初期(20 min)土壤入渗速率较大且读数间隔短,供水桶水面波动增

大了水位观测的随机误差,因此单环和双环的测定结果存在较大波动,且双环法波动性更大。与单环和双环入渗仪相比,圆盘入渗仪用水量很小,实验时间短,供水管水位变化相对比较稳定,测定结果一直比较稳定,但由于 50 min 左右换盘的影响,导致入渗曲线略有上升趋势。

### 3.2 累积入渗量对比分析

不同方法测定的累积入渗量均随着入渗时间的延长而增加(图 2),但受入渗达到稳定时间(表 1)的影响,不同方法间土壤累积入渗量与时间的关系曲线存在明显差异。前 20 min 单环/双环增长速度较快,且双环大于单环,之后趋于平稳增长。在 80 min 前后单环累积入渗量开始大于双环,且稳定后的单环增长率大于双环。由于圆盘入渗仪达到稳定的时间短,累积入渗量只在前 5 min 内迅速的增加,而后基本保持平稳增长。表 2 给出了不同方法入渗过程特征点的累积入渗量,从表中可以看出随着时间的延长,单环与双环、圆盘与双环、圆盘与单环的比值逐渐增大,并有继续增大的趋势。

表 2 不同方法入渗过程特征点累积入渗量对比

mm

序号	时间/min	双环	单环	圆盘	单环/双环	圆盘/双环	圆盘/单环
1	10	53.23	43.88	15.79	0.82	0.30	0.36
2	15	67.47	55.19	21.54	0.82	0.32	0.39
3	20	76.19	64.63	27.02	0.85	0.36	0.42
4	30	91.16	83.16	37.48	0.91	0.41	0.45
5	40	105.95	99.32	48.01	0.94	0.45	0.48
6	50	119.90	115.65	58.74	0.97	0.49	0.51
7	60	132.99	130.10	69.69	0.98	0.52	0.54
8	70	144.90	144.22	80.22	1.00	0.55	0.56
9	80	155.61	157.99	90.64	1.02	0.58	0.57

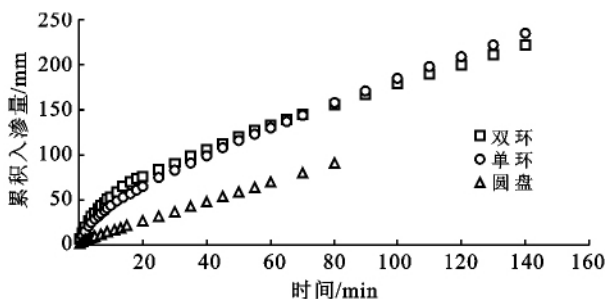


图 2 不同测定方法累积入渗量比较

以不同方法入渗过程特征点累积入渗量(表 2)为基础,进行相关性和差异性分析,发现双环、单环和圆盘的两两组合均具有极强的相关性。

对于  $T$  检验,“双环—单环”组合  $p$  值大于 0.05,说明单环/双环差异性不显著,而“双环—圆盘”和“单

环—圆盘”量种组合  $p$  值均小于 0.05,则说明其中二者差异显著。

由此说明,3 种方法测定的累积入渗量在趋势上具有很强相关性,而数值方面圆盘和单环、双环之间差异性显著,同时也从侧面说明了圆盘入渗仪适合在黄土丘陵区进行土壤入渗测定。

### 3.3 其他相关方面的比较分析

除了量化比较外,结合前人的相关研究成果<sup>[5]</sup>和实验经验,列举了 4 种方法在用水量、实验耗时、对地表的扰动程度、实验误差、实验原理、入渗面积及有无侧渗等诸多方面的定性比较(表 3)。从表 3 可以看出,圆盘入渗仪在上述诸多方面,都具有一定的优势,从而表明圆盘入渗仪在黄土高原土壤入渗测定中具有很强的优越性。

表3 4种土壤入渗方法定性比较

项目	双环/单环	圆盘入渗仪	Hood入渗仪
用水量	费力费水,野外操作不便	轻便,省水省力便于野外实验	较省水,较轻便可随时加水调压
实验耗时	费时,稳渗约需100 min	省时,一般30 min即可稳渗	较省时,稳渗时间短,但调压复杂
对地表的扰动程度	铁环入土极易破坏表土,实验起始迅速加水易破坏表土结构	不扰动表土,需粒径<0.25 mm的干沙	不扰动表土,需粒径<0.5 mm饱和湿沙
读数误差	读数误差较大,尤其初始阶段,数据点较不稳定	读数相对准确,尤其能较准确测定初始入渗过程	读数相对准确,但是几乎没有过程数据
原理	有压入渗水头高度可控	入渗水压可调可负压入渗	负压入渗
入渗面积	入渗深度、面积大代表性强	入渗面积小,深度浅,代表性差	入渗面积较小,深度较浅,代表性较差
有无侧渗	垂直入渗,双环可防侧渗,单环在环外稍有侧渗	有侧渗	侧渗较大

## 4 结论

利用实测土壤入渗数据,比较了双环法、单环法、圆盘法和 Hood 入渗仪测定的稳渗速率、累积入渗量的差异,结果发现圆盘法测定的稳渗速率为双环的 111%,饱和导水率为 Hood 的 105%,均最接近标准值;单环/双环、圆盘 3 种方法测定的累积入渗量趋势上在 99%置信区间内显著相关,单环和双环数据上差异不显著,而单环、双环与圆盘差异显著;圆盘法实验耗时平均约为 30 min,约为双环和单环法实验耗时的 1/3,单位面积上实验用水仅为双环法的 1/2 左右;圆盘法不扰动表土,读数相对准确。综合比较 4 种测定方法,圆盘法具有省时、省力、省水、准确等优势,可以替代双环法进行坡面土壤渗透性的测定。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 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.
- [2] 赵西宁,吴发启.土壤水分入渗的研究进展和评述[J].西北林学院学报,2004,19(1):42-45.
- [3] 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):114-119.
- [4] 闵雷雷,于静洁,张广英,等.三种方法测估的林地稳渗率对比初探[J].南水北调与水利科技,2010,8(5):36-38.
- [5] 许明祥,刘国彬,卜崇峰,等.圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究[J].农业工程学报,2002,18(4):54-58.
- [6] Bodhinayake W, Si Bingcheng, Kosuke N. Determination of hydraulic properties in sloping landscapes from tension and double-ring infiltrometers[J]. Vadose Zone Journal, 2004,3(3):964-970.
- [7] Wu L, Pan L, Roberson M J, et al. Numerical evaluation of ring-infiltrometers under various soil conditions [J]. Soil Sci., 1997,162(11):771-777.
- [8] 来剑斌,罗毅,任理.双环入渗仪的缓冲指标对测定土壤饱和导水率的影响[J].土壤学报,2010,47(1):19-25.
- [9] Wahl N A, Bens O, Schafer B, et al. Impact of changes in land-use management on soil hydraulic properties: hydraulic conductivity, water repellency and water retention[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28(33):1377-1387.
- [10] Zhang Guanghui, Tang Mingke, Zhang Xingchang. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the Loess Plateau of China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, 34(9):1302-1309.
- [11] Gardner W R. Some steady-state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table[J]. Soil Science, 1958, 85(4):228-232.
- [12] Wooding R A. Steady infiltration from a shallow circular pond[J]. Water Resources Research, 1968, 4(6):1259-1273.
- [13] Reynolds W D, Elrick D E. Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(3):633-639.
- [14] 朱安宁,张佳宝,陈德立.土壤饱和导水率的田间测定[J].土壤,2000,32(4):215-218.
- [15] Schwarzel K, Punzel J. Hood infiltrometer: A new type of tension infiltrometer[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007,71(5):1438-1447.