

盘式吸渗仪吸渗率计算方法比较^{*}

付秋萍^{1,2} 王全九¹ 樊军¹

(1. 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;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

【摘要】 选用盘径为 5 cm 和 15 cm 的盘式吸渗仪, 对杨凌壤土(粘土)和神木砂黄土(砂壤土)两种质地的土壤在 0、-3、-6、-9、-12 cm 水头 5 种负压下进行了室内吸渗实验, 分析了不同盘径和负压对累积吸渗量的影响; 并选用 4 种吸渗率公式对这两种质地土壤吸渗率进行了计算, 以 Vandervaere 法为参考方法对该 4 种方法的适用性进行了分析。结果表明, 在相同的时间内, 两种土壤 5 cm 盘径下的累积吸渗量均大于 15 cm 盘径下的累积吸渗量, 砂黄土累积吸渗量大于相同负压下壤土累积吸渗量; 在 4 种吸渗率计算方法中, 无论壤土还是砂黄土, Haverkamp 公式所得吸渗率值与参考方法最接近。

关键词: 吸渗率 盘式吸渗仪 计算方法

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A

Comparison among Permeability Methods of Disc Infiltrometer

Fu Qiuping^{1,2} Wang Quanjiu¹ Fan Jun¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract

Disc infiltrometer with two diameters (diameter of 5cm and 15cm) and two distinctly textured soil (Yangling caly soil and Shenmu sandy loam soil) were used to carry out disc 3-D laboratory infiltration experiment under five pressure heads (0, -3, -6, -9, -12 cm). The effects of different disc diameters and pressures on cumulative infiltration were studied. Four methods of estimating sorptivity were applied to calculate permeability of these two soils and their applicability were analyzed according to Vandervaere equation. The results are as followed: the cumulative infiltration capacity of 5cm disc diameter is bigger than that of 15cm disc diameter in the same while. The cumulative infiltration capacity of Shenmu soil is higher than that of Yangling soil under the same pressure. Among these four methods, Haverkamp equation provides the closest estimate to the references for the two textured soil.

Key words Soil permeability, Disc infiltrometer, Calculation methods

引言

盘式吸渗仪目前已成为一种常用的田间测定土壤水力参数的仪器^[1~5], 由于其快速简单, 便于测定田间表层土壤水力特征, 因此近年来有很多该方

面的研究报道。Angulo 等对有关研究进行了评述, 并指出盘式吸渗仪将成为未来田间测定表层土壤水力参数的重要手段^[6]。此仪器是以一定的负压通过一圆盘界面向土壤入渗水分, 通过将水头的负压维持在不同值, 估计大孔隙在水分入渗中所起的作

收稿日期: 2008-08-15 修回日期: 2008-12-16

^{*}国家自然科学基金资助项目(50879067)和国家“973”重点基础研究发展计划资助项目(2005CB121103)

作者简介: 付秋萍, 博士生, 主要从事土壤物理研究, E-mail: caufuqiuping@126.com

通讯作者: 王全九, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: wquanjiu@163.com

用,计算低基质吸力下的导水参数。使用盘式吸渗仪可以计算的导水参数有吸渗率、导水率和宏观毛管上升高度等^[7]。土壤吸渗率表示土壤依靠毛管力吸收或释放液体能力的量度。吸渗率是土壤的重要参数之一,其他的水力参数,如宏观毛管上升高度和导水率的确定往往依赖于吸渗率。因此,精确确定吸渗率尤为重要。目前,计算吸渗率的方法很多,包括理论公式和经验公式(忽略重力影响),但大多计算复杂繁琐,需要测定扩散率等参数。一般情况下,当吸渗开始时,在很短时间内,吸渗过程可以简单看作一维过程,即忽略重力作用和扩散作用^[8],因而可以根据 Philip 一维水平吸渗公式计算吸渗率,然而用此种方法计算的吸渗率存在时间短、用作计算的点很少,并且公式应用的时间尺度也很难确定等缺点^[9~10];此外,因为忽略了重力与侧向毛管力的作用,这种方法计算的吸渗率可能比实际偏大。虽然 Philip^[11]也提出了一个描述入渗过程累积入渗量与时间函数关系的具有物理意义的二项式模型,但当入渗时间较长时,该公式也存在一定的偏差^[12]。针对 Philip 二项代数模型的一些缺点,一些专家在其基础上发展了新的确定吸渗率模型。这些模型建立的基础均是累积入渗量与时间平方根的函数关系。而有研究表明^[13],利用入渗资料建立累积入渗量和时间平方根关系,所得吸渗率值与真实值最接近。Minasny 等对上述模型进行了总结,大致有 5 种方法,并指出无论在野外田间实验还是室内实验,无论是何种土质以及是否在铺砂条件下, Vandervaere 法确定的吸渗率值均与实际值最接近^[13]。文献[10]亦验证了 Vandervaere 法是一种较准确的确定吸渗率的方法,并由于其计算简单被选为标准方法应用。由于不同的模型基于不同的假设,也就有一定的适用范围。本文将以 Vandervaere 法为参考,对其他公式的适用性进行探讨,为各方法的正确使用提供参考。

1 基本公式

1.1 方法 1(Philip 公式)

在实验初期,土壤毛管力起主导作用,盘式吸渗仪的吸渗过程可近似描述为

$$\lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{Q(t)}{r^2} \right] = \frac{1}{2} S t^{-0.5}$$

上式对时间求积分,得

$$I = S \sqrt{t} \quad (1)$$

式中 I ——一定供水压力下的累积吸渗量,cm

t ——吸渗时间,s

S ——一定供水压力下的吸渗率,cm/s^{0.5}

对早期吸渗数据中的 I 与 \sqrt{t} 进行线性回归,斜率即为所求的吸渗率^[14~15]。

式(1)为 Philip 一维水平吸渗公式,对于盘式吸渗仪下的负压吸渗过程,在前期阶段重力和侧向毛管力作用可以忽略不计,因而认为实验初期阶段可以将 Philip 一维水平吸渗公式移植到盘式吸渗仪的吸渗率确定中。主要应用于实验初期阶段。

1.2 方法 2(Haverkamp 公式)

Smettem 等^[16]根据 Wooding's 稳定流方程、非线性弥散方程等提出了线性方程说明轴对称几何水流的边界效应

$$I_{3D} - I_{1D} = \frac{S^2}{r_0 \left(\frac{0-i}{j} \right)}$$

式中 $\frac{S^2}{r_0}$ ——比例常数 r_0 ——吸渗盘半径

$0, i$ ——初始和最终含水率

下标 3D、1D 表示轴对称的三维与一维入渗过程。

基于上述方程, Haverkamp 等^[17]建立了具有物理意义的盘式吸渗仪三维吸渗情况时的吸渗公式

$$I_{3D} = S t^{0.5} + \left[\frac{2-i}{3} K + \frac{S^2}{r_0 \left(\frac{0-i}{j} \right)} \right] t$$

式中, $S t^{0.5}$ 对应垂直毛管作用项, $\frac{S^2}{r_0 \left(\frac{0-i}{j} \right)} t$ 对应

侧向毛管作用项, $\frac{2-i}{3} K t$ 对应重力作用项。为一常数。对上式进行简化,得

$$I = S \sqrt{t} + (A + B) t$$

其中 $A = \frac{2-i}{3} K$ $B = \frac{S^2}{r_0 \left(\frac{0-i}{j} \right)}$

令 $A = A + B$, 于是得

$$I = S \sqrt{t} + A (\sqrt{t})^2 \quad (2)$$

式(2)为 Haverkamp 在未铺设砂层时建立的具有物理意义的盘式吸渗仪吸渗公式,该公式考虑了三维吸渗情况及其作用力,可以应用到整个实验过程。

1.3 方法 3(Smiles 公式)

Philip 二项入渗模型为

$$I = S t^{0.5} + C t \quad (3)$$

Philip 指出,该方程适用于入渗时间不长的实验中,对于实验后期,可以表示为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dI}{dt} = K_0 \quad (4)$$

式(3)为描述一维垂直入渗的 Philip 级数解的前 2 项,其第 3 项为 $t^{1.5}$,在入渗过程中存在一段时间,在该段时间内, $t^{1.5}/(Ct)$ 值很小, $I t^{-0.5}$ 与 $t^{-0.5}$ 呈线性关系。随后入渗可以用式(4)描述,而 $I t^{-0.5}$ 与 $t^{-0.5}$ 之间关系曲线为 $I = K_0 t$ 的渐近线。

综合上述结果,Smiles等^[18]提出了描述整个入渗过程的模型

$$\frac{I}{\sqrt{t}} = S + C\sqrt{t} \quad (5)$$

该式针对 Philip 二项式对于计算后期入渗的不足,提出了计算实验后期的公式,联合得出式(5)。该式可以用于实验全阶段,亦可截取实验过程中任意时间段的数据来计算。

1.4 方法4

在方法2中,由于公式右边两项均含有时间 t ,从数学形式上看,由于 S 和 A 具有相互补偿作用,不利于实验中辨别 S 和 A 影响因素(重力、毛管力等)^[19],因此,将方法2对 t 求导,得入渗率表达式

$$\frac{dI}{dt} = \frac{S}{2\sqrt{t}} + A \quad (6)$$

式(6)是 I 和 t 微分的非线性表达式,可以应用到时间不长的实验全过程。

1.5 参考方法(Vandervaere公式)

为了考虑接触砂层对吸渗的影响,Vandervaere等对式(2)进行了修正,得

$$I = I_c + S\sqrt{t - t_c} + A(t - t_c) \quad (7)$$

式中 I_c 、 t_c ——湿润接触砂层所需的水量及时间

通过对 \sqrt{t} 求导,式(7)变为

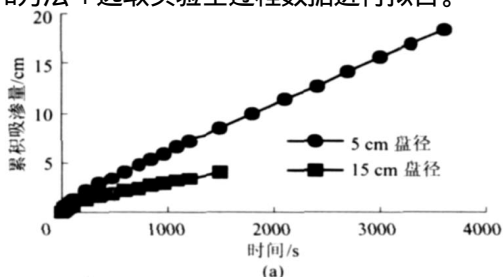
$$\frac{dI}{d\sqrt{t}} = S\sqrt{\frac{t}{t - t_c}} + 2A\sqrt{t} \quad (8)$$

该式消除了 I_c 因素,随着吸渗时间增加, t_c 相对于 t 变得越来越小,可以忽略不计,于是得

$$\frac{dI}{d\sqrt{t}} = S + 2A\sqrt{t} \quad (9)$$

式(9)是由Vandervaere等人^[20]提出的适用于实测数据为直线的情况,同时可以消除实验初期接触层的影响,可以截取实验过程中任意时间段的数据。

按各公式对实验数据的适用情况,对方法1、方法3和方法5选取实验数据为直线的数据段进行拟合,对方法2和方法4选取实验全过程数据进行拟合。



2 实验材料及方法

实验土样采用陕西省杨凌塬土和神木砂黄土,土样经碾压、粉碎、风干、过1 mm筛后,备用。土样按国际分类分别属于粘土和砂壤土。两种土壤容重密度均为 1.4 g/cm^3 。把供试土样分层(每层5 cm)装入 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 的铁皮箱内。利用盘式吸渗仪进行水力性质测定的一个重要方面就是保持盘面与土壤在吸渗过程中一直处于良好的接触状态^[7]。这可以通过在吸渗仪和土壤表层之间放置合适的“接触砂层”来实现,这对于土表不平的田间实验及质地较粘重的土壤尤为重要。为了保持吸渗盘与土壤之间的良好接触,实验过程中在土表铺设砂层。接触砂层厚度为2 mm。实验采用两种规格的盘式吸渗仪,其盘径分别为5 cm和15 cm。对每一种土壤,选取5种不同的负压进行单盘、单压吸渗实验,负压分别为0、-3、-6、-9、-12 cm水头。在吸渗过程中,记录累积吸渗量和时间的关系,当连续相等的时间内吸渗量相等时,即视为吸渗稳定并停止实验。在吸渗的前3 min内,每10 s读数一次,而后每1 min读数一次。当吸渗至稳定状态时,迅速移走盘式吸渗仪,刮去表层砂子提取表层土样,用烘干法测定含水率,每种盘径、每个负压条件下重复3次实验,并取其平均值作为该盘径和负压下的测定值。

3 结果分析

3.1 盘径对累积吸渗量的影响

为了分析盘径对不同质地土壤吸渗特性的影响,以壤土和砂黄土-6 cm水头下的吸渗实验为例,分别绘出吸渗仪盘径为5 cm和15 cm对应的吸渗过程曲线(图1)。

由图1可以看出,在相同时间内,无论哪种土壤,5 cm盘径下测得的累积吸渗量均大于15 cm盘径下的累积吸渗量,即随着吸渗盘径的增大,相同时间内的累积吸渗量逐渐减小。这是因为实际的盘

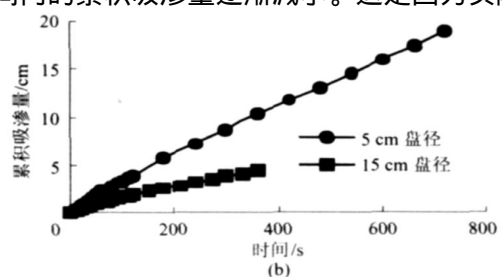


图1 不同盘径下累积吸渗量随时间的变化曲线

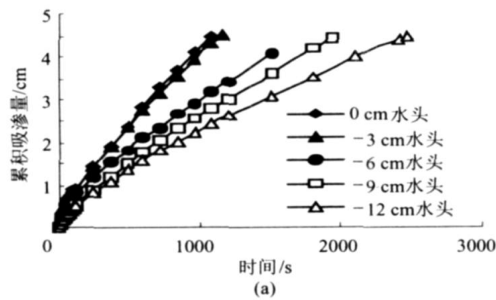
Fig. 1 Variation of the cumulative infiltration capacity with the change of time in disc infiltrometer with different diameters

(a) 壤土 (b) 砂黄土

式吸渗仪的吸渗是一个三维过程,包括垂向和侧向两部分,垂向吸渗量随圆盘面积的增加呈线性增加,而侧渗量则大致与圆盘周长成正比,所以用单位面积计算的垂向吸渗与盘径无关,侧渗量则与盘径成反比,盘径越小,侧渗越大,吸渗过程越接近点源;盘径越大,侧渗越小,也越接近一维条件下的吸渗。

3.2 负压对累积吸渗量的影响

对于不同质地的土壤在不同负水头下进行吸



渗,由于水头、土壤结构及颗粒组成的差异,吸渗历时必有所变化。为了分析不同负压对不同质地土壤吸渗特性的影响,选取壤土与砂黄土,以 15 cm 盘径、负压为 0、-3、-6、-9、-12 cm 水头下的累积吸渗过程为例进行分析(图 2)。

由图 2 可以看出,无论壤土还是砂黄土,随着负压的增加,累积吸渗量逐渐变小。根据毛管理论,土壤孔隙由一系列不同尺寸的毛管组成,一定的负压

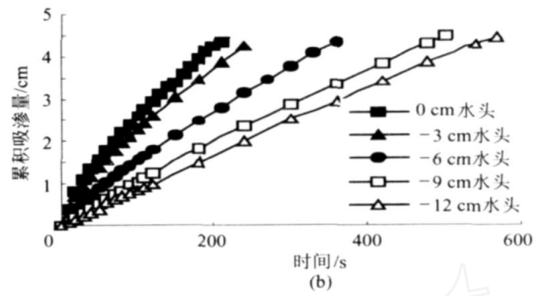


图 2 不同负压下累积吸渗量随时间的变化曲线

Fig. 2 Variation of the cumulative infiltration capacity with the change of time under different pressures

(a) 壤土 (b) 砂黄土

或土壤吸力对应着特定尺寸的毛管,在一定的土壤水势或负压下,大于一定尺寸的毛管水分将全部排空,能够传输水分的仅是更小尺寸的充水孔隙,随着土壤水势或负压的进一步降低,充水的毛管孔隙依尺寸由大到小依次排空水分,导水的孔隙或土壤过水断面进一步减少,所以土壤的吸渗率会随着负压水头的增加而逐渐减小。从图中还可以看出,对于壤土而言,0 cm 和 -3 cm 水头下相同时间内累积吸渗量相差不大,当负压增加到 -6 cm 水头时才对土壤吸渗产生较大的影响,这可能由于 0 cm 和 -3 cm 水头之间对应的土壤孔隙对土壤导水在壤土中所占比例很小,其对吸渗的作用可以忽略。

3.3 吸渗率计算方法对比分析

为了分析上述 4 种确定吸渗率方法的适用性,选取盘径为 5 cm 的盘式吸渗仪在 -6 cm 水头下实测的壤土吸渗数据为例进行分析。分别用上述 5 种方法对实测的累积吸渗量与时间的关系曲线进行拟合,结果如图 3 所示。如前所述,对式(1)、式(3)和式(5)选取直线段的实测数据进行拟合,对式(2)和式(4)选取实验全过程数据进行拟合。

由图 3 可以看出,5 种方法拟合相关系数均在 0.88 以上,说明 5 种方法对实测数据拟合均有较好的结果。但 Bristow 和 Savage^[21]研究表明,一种好的方法不仅需对实测数据有较好的拟合结果,更需要得出较合理参数。按以上方法,对 5 cm 和 15 cm

盘径的吸渗仪在 0、-3、-6、-9、-12 cm 水头下实测的壤土和砂黄土吸渗数据均进行了拟合,结果列于表 1。

从表 1 可以看出,无论壤土还是砂黄土,在各盘径和负压情况下,拟合相关系数均在 0.8 以上,说明各方法对实测资料均有较好的拟合结果。两种质地的土壤在相同盘径下,随着负压的增加,5 种方法所得吸渗率均逐渐降低;在相同负压下,5 cm 盘径吸渗率普遍大于 15 cm 盘径的吸渗率。这与本文前面分析的盘径和负压对累积吸渗量的影响相一致。从表 1 还可以看出,在这 4 种方法中,无论壤土还是砂黄土,方法 1 显著高估吸渗率值;方法 4 也较参考方法高;对于这 2 种质地的土壤,方法 2 和方法 3 确定的吸渗率值与参考方法最为接近。从数值上看,方法 2 较方法 3 与参考方法所得吸渗率值更为接近,而从相关系数也可以看出,方法 2 拟合结果较好,相关系数均在 0.999 以上。因此从上述分析可以得出,无论壤土还是砂黄土,方法 2 为确定吸渗率的较好方法。

为了进一步说明 4 种方法的计算精度和适用性,以 Vandervaere 公式计算结果作为标准,对其他 4 种方法的计算结果进行了对比分析。图 4 显示了壤土和砂黄土 5 cm 和 15 cm 盘径下其他 4 种计算吸渗率方法与 Vandervaere 公式计算结果间的关系。

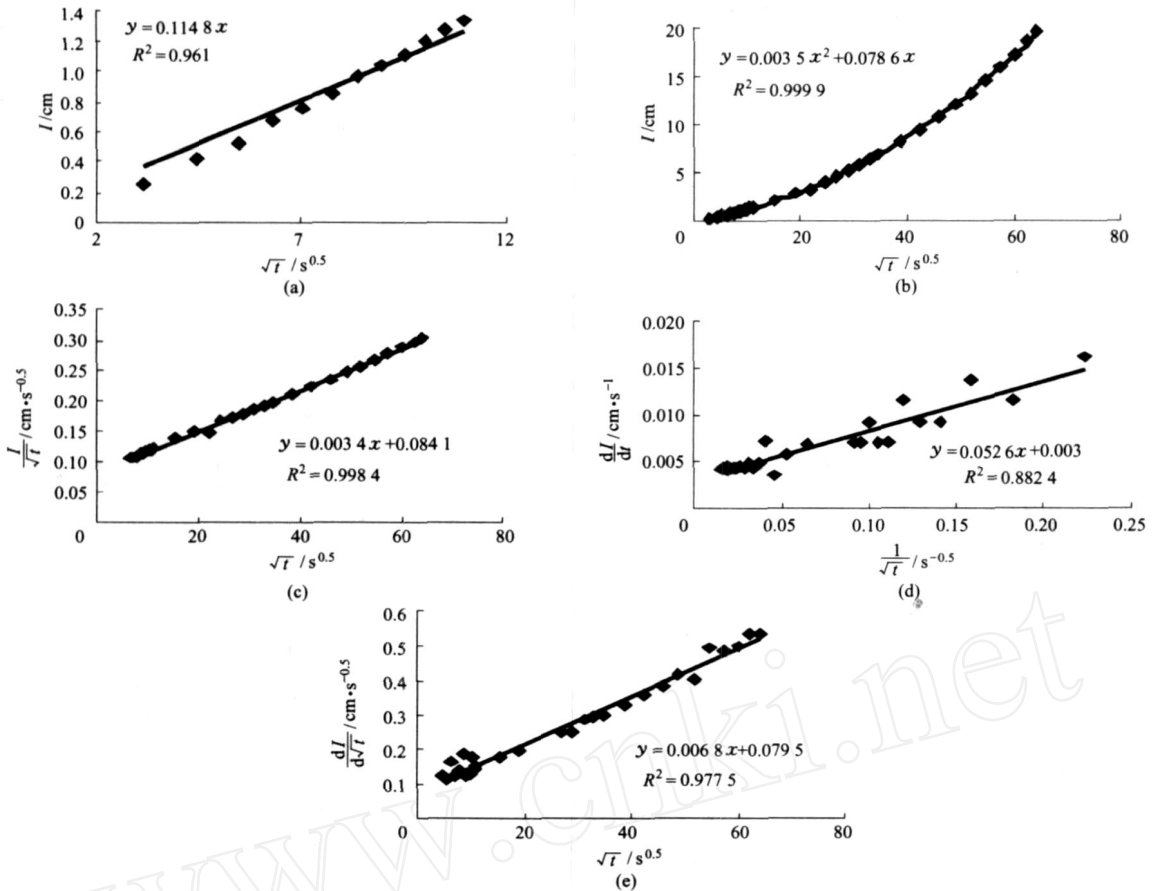


图3 不同形式累积吸渗量与时间的关系及5种方法对其拟合的结果

Fig. 3 Relationship between cumulative infiltration capacity, time and the simulated results using the five methods

(a) 方法1 (b) 方法2 (c) 方法3 (d) 方法4 (e) 参考方法

表1 5种方法确定的吸渗率值

Tab. 1 Results of the calculated permeability values using five methods

土壤	盘径 /cm	水头 /cm	参考方法		方法1		方法2		方法3		方法4	
			S/cm s ^{-0.5}	R ²	S/cm s ^{-0.5}	R ²	S/cm s ^{-0.5}	R ²	S/cm s ^{-0.5}	R ²	S/cm s ^{-0.5}	R ²
壤土	5	0	0.090 0	0.984 2	0.166 8	0.907 9	0.088 9	0.999 7	0.089 7	0.996 9	0.121 6	0.946 6
		- 3	0.088 4	0.983 7	0.140 2	0.907 1	0.088 3	0.999 4	0.089 0	0.998 1	0.116 2	0.917 2
		- 6	0.079 5	0.977 5	0.114 8	0.961 0	0.078 6	0.999 9	0.084 1	0.998 4	0.105 2	0.882 4
		- 9	0.074 2	0.982 9	0.113 9	0.975 7	0.072 8	0.998 7	0.078 8	0.993 9	0.082 8	0.912 5
		- 12	0.042 0	0.993 7	0.062 1	0.887 5	0.040 9	0.999 9	0.043 6	0.999 5	0.058 8	0.959 9
壤土	15	0	0.062 3	0.961 0	0.082 9	0.991 1	0.062 9	0.999 8	0.060 3	0.999 0	0.073 6	0.970 7
		- 3	0.059 5	0.910 3	0.072 1	0.987 9	0.059 5	0.999 4	0.062 6	0.985 6	0.069 6	0.911 9
		- 6	0.058 8	0.963 7	0.071 7	0.960 1	0.056 9	0.999 2	0.056 8	0.995 9	0.068 0	0.961 5
		- 9	0.037 6	0.981 9	0.045 6	0.921 0	0.037 1	0.999 5	0.035 4	0.994 8	0.042 6	0.948 9
		- 12	0.033 5	0.988 7	0.043 6	0.904 7	0.033 0	0.999 4	0.032 3	0.996 0	0.038 8	0.926 4
砂黄土	15	0	0.182 8	0.983 8	0.443 3	0.894 4	0.183 9	0.999 9	0.180 0	0.999 3	0.277 0	0.971 7
		- 3	0.165 0	0.992 2	0.433 5	0.856 6	0.168 0	0.999 9	0.168 2	0.999 2	0.244 8	0.941 2
		- 6	0.161 9	0.989 5	0.401 2	0.863 2	0.162 0	0.999 9	0.161 1	0.999 5	0.241 4	0.948 8
		- 9	0.160 8	0.994 5	0.370 5	0.871 9	0.161 5	0.999 9	0.160 8	0.999 4	0.233 2	0.949 4
		- 12	0.117 6	0.995 4	0.305 9	0.852 7	0.113 8	0.999 6	0.112 9	0.998 6	0.205 0	0.917 5
砂黄土	15	0	0.147 3	0.927 8	0.247 8	0.931 5	0.142 8	0.999 4	0.144 0	0.997 1	0.228 6	0.884 1
		- 3	0.146 7	0.943 7	0.236 4	0.920 3	0.142 1	0.998 0	0.137 3	0.982 3	0.190 8	0.913 4
		- 6	0.066 7	0.926 8	0.192 1	0.892 1	0.066 0	0.999 1	0.068 8	0.997 9	0.118 6	0.914 6
		- 9	0.023 3	0.974 3	0.094 0	0.820 8	0.023 2	0.999 0	0.022 2	0.995 4	0.086 8	0.919 5
		- 12	0.008 7	0.985 7	0.075 2	0.820 2	0.008 2	0.999 1	0.009 6	0.996 4	0.054 0	0.885 9

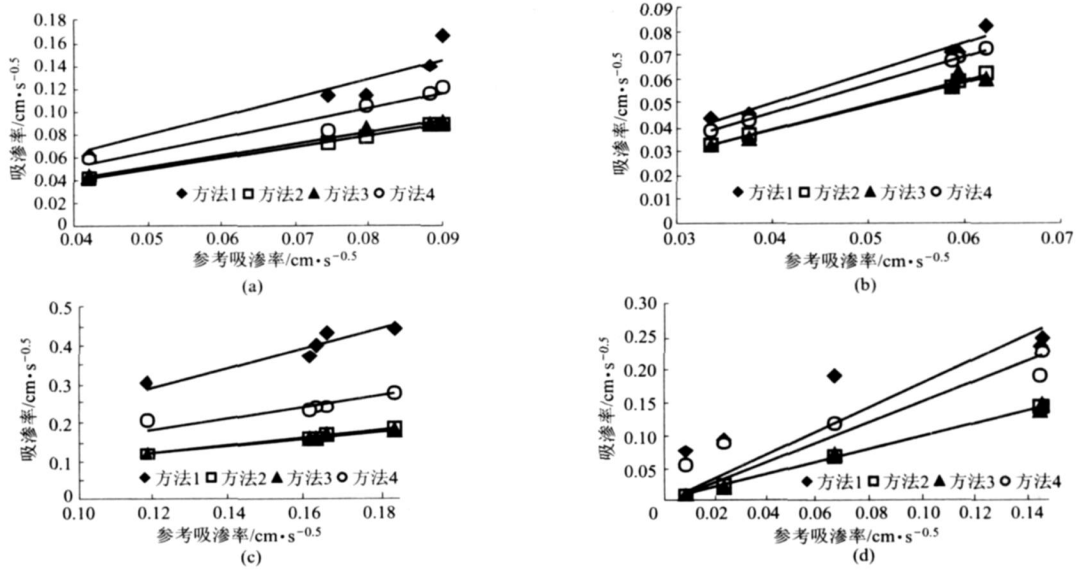


图 4 4 种方法与 Vandervaere 法计算结果的对比

Fig. 4 Comparison of the computed result of four methods with that of Vandervaere method
(a) 壤土, 5 cm 盘径 (b) 壤土, 15 cm 盘径 (c) 砂黄土, 5 cm 盘径 (d) 砂黄土, 15 cm 盘径

由图 4 可以看出,其他 4 种方法计算结果与 Vandervaere 公式计算结果存在明显的线性关系,因此对图中数据进行线性拟合

$$S_x = m S_v \quad (10)$$

式中 S_x ——其他 4 种方法计算所得吸渗率值
 S_v ——Vandervaere 公式确定的吸渗率值

用式(10)对图 4 进行拟合,拟合结果如表 2 所示。表 2 同时列出了各方法计算结果与 Vandervaere 公式计算结果的相对误差 S 、相关系数 R^2 。其中相对误差中正值表示该方法计算结果大于 Vandervaere 法计算结果,负值表示该方法计算结果小于 Vandervaere 法计算结果。

表 2 4 种方法与 Vandervaere 法的线性回归系数与相对误差

Tab. 2 Coefficient of linear regression and relative error between four methods and Vandervaere method

土壤	盘径 /cm	方法 1			方法 2			方法 3			方法 4		
		m	R^2	$S/\%$	m	R^2	$S/\%$	m	R^2	$S/\%$	m	R^2	$S/\%$
壤土	5	1.613 0	0.880 4	61.30	0.988 8	0.999 0	- 1.12	1.027 1	0.984 0	2.71	1.294 5	0.915 0	29.45
	15	1.255 7	0.969 1	25.57	0.991 8	0.995 3	- 0.82	0.986 5	0.974 3	- 1.35	1.164 8	0.997 3	16.48
砂黄土	5	2.474 1	0.862 7	147.41	1.003 0	0.991 3	0.30	0.994 7	0.985 8	- 0.53	1.515 1	0.673 4	51.51
	15	1.798 4	0.513 4	79.84	0.971 2	0.999 9	- 2.88	0.963 9	0.997 3	- 3.61	1.492 5	0.732 7	49.25

由表 2 可知,对两种质地土壤而言,无论何种盘径,方法 2 计算的吸渗率值与 Vandervaere 公式计算结果的相关系数均大于 0.99,其与 Vandervaere 公式的相对误差在 - 2.88 % ~ 0.30 % 之间,较其他方法的相对误差都小,说明方法 2 确定的吸渗率值与参考方法最为接近,方法 2 可以很好地用来确定不同质地土壤的吸渗率。方法 3 计算的吸渗率值与 Vandervaere 公式计算结果的相关系数也均大于 0.97,其与 Vandervaere 公式的相对误差在 - 3.61 % ~ 2.71 % 之间,该相对误差也较小,仅略大于方法 2 与 Vandervaere 公式的相对误差,因此,方法 3 也可用于确定吸渗率值,适用性略次于方法 2。而方法 1 和方法 4 无论从相关系数还是相对误差来

看,其结果均较差,因此应避免用于计算吸渗率。

4 结束语

采用 2 种不同质地的土壤(杨陵壤土和神木砂黄土)进行了盘式吸渗仪三维吸渗实验,探讨了不同盘径和负压对累积吸渗量的影响,对比分析了 4 种确定吸渗率方法的适用性。研究结果表明,在相同的时间内,2 种土壤 5 cm 盘径下的累积吸渗量均大于 15 cm 盘径下的累积吸渗量,即随着吸渗盘半径的增大,在相同的时间内累积吸渗量逐渐减小;无论壤土还是砂黄土,随着负压的增大,累积吸渗量逐渐变小。在相同的时间内,砂黄土累积吸渗量大于相同负压下壤土累积吸渗量;在 4 种确定吸渗率公

式中,无论壤土还是砂黄土,方法1显著高估吸渗率值;方法4也较参考方法计算结果高;对于这两种质地的土壤,方法2所得吸渗率值与参考方法最相近。方法3确定的吸渗率值略次于方法2。而从相关系

数和相对误差也可得出上述结论。因此,无论对于粘土还是砂壤土,方法2为较好的确定吸渗率方法,具有较普遍的适用性,可为精确确定吸渗率提供参考。

参 考 文 献

- 1 Ankeny M D, Ahmed M, Kasper T C, et al. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity[J]. SSSAJ, 1991, 55(2): 467 ~ 470.
- 2 Clothier B E, White I. Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field[J]. SSSAJ, 1981, 45(1): 241 ~ 245.
- 3 Reynolds W D, Elrick D E. Determination of hydraulic conductivity using a matric suction infiltrometer[J]. SSSAJ, 1991, 55(3): 633 ~ 639.
- 4 Smettem K R J, Clothier B E. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disc permeameters[J]. J. Soil Sci., 1989, 40: 563 ~ 568.
- 5 White I, Sully M J. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration[J]. Water Resour. Res., 1987, 23(8): 1514 ~ 1522.
- 6 Angulo J R, Vandervaere J P, Roulier S, et al. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers — a review and recent developments[J]. Soil Tillage Res., 2000, 55(1 ~ 2): 1 ~ 29.
- 7 Perroux K M, White I. Designs for disc permeameters[J]. SSSAJ, 1988, 52(1): 1205 ~ 1215.
- 8 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 30 ~ 131.
- 9 Cook F J, Broeren A. Six methods for determining sorptivity and hydraulic conductivity with disc permeameters[J]. Soil Sci., 1994, 157(1): 2 ~ 11.
- 10 Jacques D, Mohanty B P, Feyen J. Comparison of alternative methods for deriving hydraulic properties and scaling factors from single-disc tension infiltrometer measurements[J]. Water Resour. Res., 2002, 38(7): 1120 ~ 1129.
- 11 Philip J R. Some recent advances in hydrologic physics[J]. J. Inst. Eng. Aust., 1954, 26: 255 ~ 259.
- 12 Philip J R. Theory of infiltration[J]. Adv. Hydrosci., 1969, 5: 215 ~ 305.
- 13 Minasny B, McBratney A B. Estimation of sorptivity from disc-permeameter measurements[J]. Geoderma, 2000, 95(3 ~ 4): 305 ~ 324.
- 14 Philip J R. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations[J]. Soil Sci., 1957, 84(3): 257 ~ 264.
- 15 Philip J R. Linearized unsteady multidimensional infiltration[J]. Water Resour. Res., 1986, 22(12): 1717 ~ 1727.
- 16 Smettem K, Parlange J, Ross P J, et al. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: A capillary-based theory[J]. Water Resour. Res., 1994, 30(11): 2925 ~ 2929.
- 17 Haverkamp R, Ross P, Smettem K, et al. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: Physically based infiltration equation[J]. Water Resour. Res., 1994, 30(11): 2931 ~ 2935.
- 18 Smiles D E, Knight J H. A note on the use of the Philip infiltration equation[J]. Aust. J. Soil Res., 1976, 14(1): 103 ~ 108.
- 19 Vandervaere J P, Vauclin M, Dave E, et al. Transient flow from tension infiltrometers: the two-parameter equation[J]. SSSAJ, 2000, 64(4): 1263 ~ 1272.
- 20 Vandervaere J P, Peugeot C, Vauclin M, et al. Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrometers and minitensiometers[J]. J. Hydrol., 1997, 188 ~ 189: 209 ~ 223.
- 21 Bristow K L, Savage M J. Estimation of parameters for the Philip two-term infiltration equation applied to field soil experiments[J]. Aust. J. Soil Res., 1987, 25(4): 369 ~ 375.