

Philip 公式确定吸渗率时间尺度研究

付秋萍^{1,3}, 王全九^{1,2}, 樊军¹

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 西北农林科技大学水土保持研究所,
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. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 选用直径 5 cm 和 10 cm 的盘式吸渗仪, 对杨凌塬土(粘土)和神木砂黄土(砂壤土)两种质地的土壤在 1 cm、3 cm、6 cm、9 cm 和 12 cm 水头 5 种负压下进行了室内盘式吸渗仪三维吸渗实验, 选取 Vandervaere 公式作为参考模型, 对 Philip 公式确定吸渗率的时间尺度选取进行了分析。结果表明, 对两种质地的土壤, 在相同盘径下, 随着负压的降低, 吸渗率随之减小; 在相同负压下, 盘径越小, 吸渗率越大; 质地较砂的砂黄土吸渗率明显大于质地较粘的塬土的吸渗率。从相对误差来看, 两种质地土壤吸渗率均被高估; 在同一盘径下, 随着负压的减小, 误差值逐渐降低; 即在选取的时间范围内, 负压越低, 计算吸渗率的准确性越高。对塬土而言, 5 cm 盘径下 -12 cm 水头、10 cm 盘径下 -9 cm 水头和 -12 cm 水头时确定吸渗率的适宜时间分别为 30~40 s 和 40~50 s; 其余确定吸渗率的适宜时间均应小于 30 s; 对砂黄土而言, 10 cm 盘径下 -9 cm 水头和 -12 cm 水头时确定吸渗率的适宜时间分别为 30~40 s 和 40~50 s, 其余确定吸渗率的适宜时间也均应小于 30 s。对于质地较砂的土壤推荐使用大盘径进行盘式吸渗仪实验。

关键词: 盘式吸渗仪; 吸渗率; Philip 公式

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)04-0065-06

由于盘式吸渗仪快速简单, 便于测定田间表层土壤水力特征, 因此近年来在该方面的研究有了长足发展, 已成为一种常用的田间测定土壤水力参数的仪器^[1-5]。盘式吸渗仪可以确定的导水参数有吸渗率、导水率和宏观毛管上升高度等^[6]。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, 其它的水力参数, 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, 准确确定吸渗率显得尤为重要。目前, 计算吸渗率的方法很多, 其中最传统的方法为 Philip 一维吸渗法。即当吸渗开始时, 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^[7], 因而可以根据 Philip 一维水平吸渗公式计算吸渗率, 计算简单。然而, 其时间间隔的长短尺度把握对吸渗率的确定有直接影响^[8]。在已发表的文献中, 选取一维吸渗有效的时间差别很大, Perroux 和 White^[6]认为依土壤类型而异, 一维吸渗有效的时间为 6~2 450 s, Logsdon 和 Jaynes^[9]选取的时间为 15 s, 在一定程度上, 有效时间的选取具有很大的主观性。合理的时间尺度显著影响着吸渗率的值。因此, 用 Philip 公式确定吸渗率, 首先需对时间尺度进行分析。

本文选用陕西省杨凌塬土和陕西省神木县砂黄土两种质地土壤为实验材料, 进行了 5 cm 和 10 cm 两种盘径、5 种负压水头下室内盘式吸渗仪三维吸渗实验, 以 Vandervaere 公式为参考方法, 分别计算了不同盘径、不同负压下 Vandervaere 公式、Philip 公式不同时间尺度下的吸渗率值, 以确定 Philip 公式合理的选取时间。

1 基本理论

1.1 Philip 公式

在忽略重力和横向毛管作用力的情形下, 盘式吸渗仪的早期吸渗可以用下式表示:

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

式中, I 为在一定供水压力下的累积吸渗量(cm); t 为吸渗时间(s); S 为一定供水压力下的吸渗率($\text{cm}/\text{s}^{0.5}$)。对早期吸渗数据中的 I 与 t 进行线性回归, 斜率即为所求的吸渗率^[10]。

1.2 Vandervaere 公式

Haverkamp^[11]根据理论推导, 提出了无接触层条件下三维吸渗情况时吸渗率计算模型:

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

收稿日期: 2008-11-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2005CB121103); 国家自然科学基金项目(50879067)

作者简介: 付秋萍(1980—), 女, 新疆奇台人, 博士研究生, 主要从事土壤物理方面研究工作。E-mail: caufuqiuping@126.com。

通讯作者: 王全九(1964—), 男, 教授, 博导, 内蒙人, 主要从事农业水土工程方面研究工作。E-mail: wquanjiu@163.com。

式中, A 、 B 为常数, 且

$$B = \frac{\gamma S^2}{r_0(\theta_0 - \theta_n)}$$

式中, γ 为比例常数; r_0 为吸渗盘半径。 θ_0 和 θ_n 分别为初始和最终含水量。令 $A' = A + B$, 于是得:

$$I = S\sqrt{t} + A't$$

为了考虑接触砂层对吸渗的影响, Vandervaere^[12] 等对其进行了修正:

$$I = I_c + S\sqrt{t - t_c} + A'(t - t_c)$$

式中: I_c 和 t_c 分别为湿润接触砂层所需的水量及时间。

通过对 \sqrt{t} 求导, 上式变为

$$\frac{dI}{d\sqrt{t}} = S\sqrt{\frac{t}{t - t_c}} + 2A'\sqrt{t}$$

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

$$\frac{dI}{d\sqrt{t}} = S + 2A'\sqrt{t} \quad (2)$$

上式即为 Vandervaere 等确定吸渗率公式。Minasny 等^[13] 验证了无论在野外田间实验还是室内实验, 何种土质以及是否铺砂条件下, Vandervaere 公式确定的吸渗率值均与实际值最接近, 并由于其计算简单被选为标准方法应用^[14]。本文即以此模型作为参考方法, 根据吸渗率值确定 Philip 公式合理的时间尺度。

2 材料与方法

本试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。两种土壤容重均为 1.4 g/cm³。把供试土样分层(每层 5 cm)装入长宽高分别为 30 cm × 30 cm × 30 cm 的铁皮箱

内。利用盘式吸渗仪进行水力性质测定十分重要的一个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^[15]。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试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, 本文实验过程中在土表铺设砂层。接触砂层厚度为 2 mm。本实验采用两种规格的盘式吸渗仪, 其直径分别为 5 cm 和 10 cm。对每一种土壤, 选取 5 种不同的负压进行单盘单压吸渗, 负压分别为 1 cm、3 cm、6 cm、9 cm 和 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, 每隔 10 s 读数一次, 而后每 1 min 读数一次。当吸渗至稳定状态时, 迅速取下盘, 刮去表层砂子提取表层土样, 用烘干法测定土壤含水量, 每种盘径、每个负压条件下重复 3 次试验, 并取其平均值作为该盘径和负压下的测定值。

3 结果与分析

3.1 Vandervaere 公式确定吸渗率

Vandervaere 公式确定吸渗率, 按公式形式, 即对实测累积吸渗量与时间作 $\frac{dI}{d\sqrt{t}} \sim \sqrt{t}$ 曲线, 选取塬土和砂黄土 5 cm 盘径、12 cm 水头负压下实测数据, 点绘出 $\frac{dI}{d\sqrt{t}} \sim \sqrt{t}$ 关系图, 并用 Vandervaere 公式对其拟合, 如图 1 所示。由图 1 可以看出, 两种土壤拟合相关系数均大于 0.97, 说明实测数据较好地符合 Vandervaere 公式。按同样方法, 确定两种土壤 5 cm 和 10 cm 盘径、1 cm、3 cm、6 cm、9 cm 和 12 cm 水头负压下各吸渗率值, 如表 1 所示。

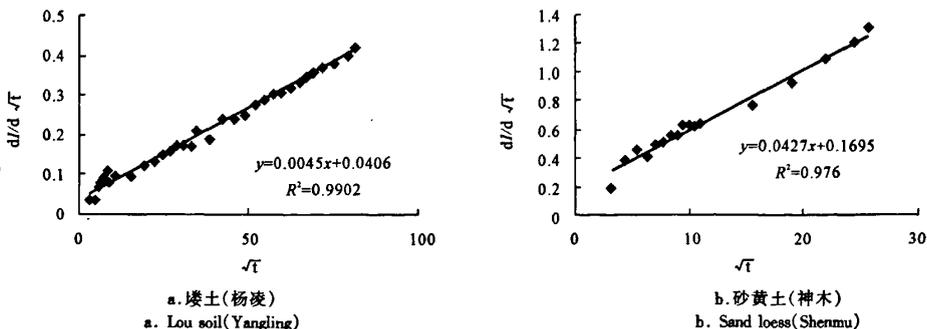


图 1 Vandervaere 公式确定吸渗率值

Fig.1 Soil sorptivity determined by Vandervaere equation

表 1 Vandervaere 法确定吸渗率值 (cm/s^{0.5})
Table 1 Soil sorptivity determined by Vandervaere equation

土质 Soil texture	盘径 (cm) Diameter of disc	压力 Pressure head									
		- 1 cm		- 3 cm		- 6 cm		- 9 cm		- 12 cm	
		S	R ²	S	R ²	S	R ²	S	R ²	S	R ²
垆土(杨凌) Lou soil(Yangling)	5	0.0992	0.9516	0.0935	0.9733	0.0801	0.9713	0.0770	0.9549	0.0406	0.9902
	10	0.0809	0.9790	0.0619	0.9773	0.0522	0.9686	0.0466	0.9851	0.0448	0.9665
砂黄土(神木) Sand loess(Shenmu)	5	0.1986	0.9937	0.1858	0.9886	0.1831	0.9928	0.1750	0.9724	0.1695	0.9760
	10	0.1742	0.9701	0.1597	0.9679	0.1569	0.9559	0.1375	0.9039	0.0881	0.9659

由表 1 可以看出,拟合相关系数均在 0.9 以上,验证了 Vandervaere 法的普遍适用性。无论垆土还是砂黄土,在相同盘径下,随着负压的降低,吸渗率也随之减小;在相同负压下,盘径越小,吸渗率越大。且质地较砂的砂黄土吸渗率值明显大于质地较粘的垆土的吸渗率值。

3.2 不同选取时间下 Philip 法确定吸渗率结果

Philip 公式即利用盘式吸渗仪吸渗数据对累积吸渗量和时间的平方根作图,其斜率即为吸渗率值。

为确定 Philip 法合理的时间尺度,选取不同时间进行计算。图 2 为垆土和砂黄土 10 cm 盘径、-6 cm 水头、60 s 时 Philip 法对实测资料的拟合。按该法对其他各情况亦进行了拟合,结果如表 2 和表 3 所示。

利用 Philip 公式对上表各情况下实测数据拟合,相关系数均大于 0.9,说明 Philip 法对各情况均有较好的拟合结果。然而 Bristow 和 Savage^[16] 研究表明,判断一种方法的好坏不仅要使该方法对实测数据有较好的拟合结果,更需要得出较合理的参数。

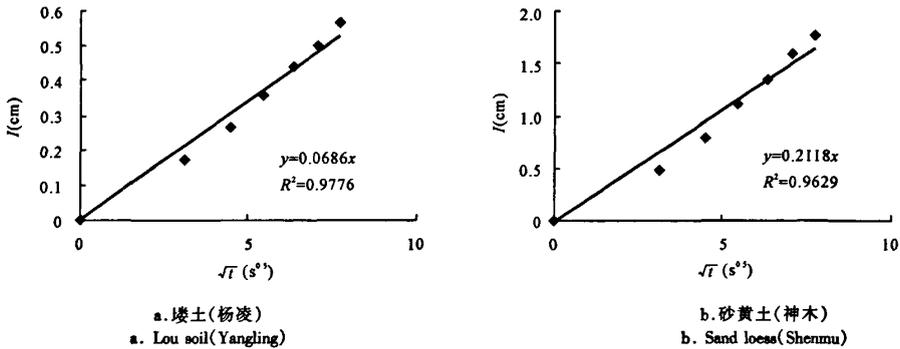


图 2 Philip 法确定吸渗率值

Fig.2 Soil sorptivity determined by Philip equation

表 2 垆土不同时间尺度下吸渗率计算结果 (cm/s^{0.5})

Table 2 Estimated sorptivity values of Lou soil(Yangling) under different time interval

盘径 (cm) Diameter of disc	压力 (cm) Pressure heads	选取时间 Time interval (s)										
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	240
5	-1	0.0994	0.1042	0.1108	0.1165	0.1218	0.1262	0.1301	0.1337	0.1370	0.1402	0.1506
	-3	0.0960	0.1030	0.1099	0.1151	0.1200	0.1243	0.1281	0.1320	0.1353	0.1384	0.1485
	-6	0.0939	0.1019	0.1038	0.1056	0.1074	0.1087	0.1103	0.1116	0.1128	0.1139	0.1186
	-9	0.0926	0.0978	0.1011	0.1036	0.1066	0.1087	0.1103	0.1120	0.1135	0.1148	0.1203
	-12	0.0391	0.0424	0.0457	0.0496	0.0530	0.0556	0.0576	0.0592	0.0607	0.0621	0.0657
10	-1	0.0947	0.0994	0.1015	0.1037	0.1059	0.1080	0.1099	0.1117	0.1133	0.1148	0.1206
	-3	0.0891	0.0899	0.0911	0.0922	0.0937	0.0948	0.0959	0.0968	0.0976	0.0982	0.1019
	-6	0.0616	0.0648	0.0669	0.0686	0.0705	0.0715	0.0727	0.0738	0.0747	0.0754	0.0781
	-9	0.0417	0.0452	0.0474	0.0497	0.0515	0.0532	0.0544	0.0557	0.0567	0.0576	0.0608
	-12	0.0412	0.0441	0.0467	0.0487	0.0505	0.0520	0.0532	0.0549	0.0569	0.0636	0.0710

表 3 砂黄土不同时间尺度下吸渗率计算结果 ($\text{cm/s}^{0.5}$)

Table 3 Estimated sorptivity values of Sand loess (Shenmu) under different time interval

盘径 (cm) Diameter of disc	压力 (cm) Pressure heads	选取时间 Time interval (s)										
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	240
5	-1	0.2979	0.3230	0.3435	0.3618	0.3780	0.3925	0.4058	0.4187	0.4310	0.4433	0.5206
	-3	0.2692	0.2956	0.3176	0.3365	0.3550	0.3705	0.3843	0.3978	0.4102	0.4219	0.4997
	-6	0.2520	0.2707	0.2869	0.3010	0.3138	0.3254	0.3366	0.3470	0.3565	0.3654	0.4012
	-9	0.2401	0.2607	0.2780	0.2912	0.3045	0.3164	0.3265	0.3366	0.3457	0.3540	0.3872
	-12	0.1700	0.1952	0.2171	0.2332	0.2486	0.2620	0.2742	0.2855	0.2962	0.3059	0.3548
10	-1	0.2367	0.2489	0.2595	0.2685	0.2764	0.2838	0.2903	0.2965	0.3028	0.3083	0.3457
	-3	0.1996	0.2151	0.2271	0.2368	0.2453	0.2532	0.2599	0.2663	0.2725	0.2784	0.3167
	-6	0.1852	0.1956	0.2049	0.2118	0.2186	0.2245	0.2302	0.2353	0.2403	0.2450	0.2675
	-9	0.1306	0.1473	0.1600	0.1699	0.1790	0.1876	0.1958	0.2032	0.2096	0.2157	0.2370
	-12	0.0768	0.0841	0.0907	0.0969	0.1023	0.1070	0.1111	0.1150	0.1186	0.1222	0.1349

由表 2、表 3 可以看出,无论垆土还是砂黄土,在两种盘径下,吸渗率都随着选取时间的增加而增大。这主要是由于随着时间的延长,垂直毛管力在吸渗中发挥的相对作用越来越小,而重力和横向毛管力在吸渗中发挥的相对作用越来越大的缘故。由表 2、表 3 还可以看出,无论是垆土还是砂黄土,在 5 cm 盘径下得到的吸渗率值普遍大于 10 cm 盘径下的吸渗率值。相对垆土而言,两个盘径下吸渗率值的差别在砂黄土表现得尤为明显,使得盘径对吸渗率的影响比负压的影响还大。这是因为盘径越小,周围的吸力面越大,侧向扩散更为明显,这种侧向扩散在质地较砂的砂黄土中比质地较粘的垆土中明显的多。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那些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大小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降低而逐渐减小。而负压的改变引起土壤毛管导水的改变小于盘径改变引起的吸渗,造成了盘径对吸渗率的影响比负压的影响还大。

3.3 不同时间尺度下 Philip 法确定吸渗率值相对误差分析

为了分析不同时间尺度下 Philip 法确定的吸渗率值的准确性,对其进行相对误差分析,利用参考方法 Vandervaere 公式作为标准,并引入相对误差分析,其计算公式为:

$$Error(\%) = \frac{[S_p - S] \times 100}{S}$$

式中: $Error(\%)$ 表示相对误差; S_p 和 S 分别为 Philip 公式和 Vandervaere 公式在相同土质时同盘径、同负压下得到的吸渗率值。相对误差为正值时表示高估,相对误差为负值时表示低估。相对误差的绝对值越大,表示准确度越差。按上述公式,对垆土和砂黄土各情况下吸渗率相对误差进行计算,结果如表 4、表 5 所示。

从表 4 可以看出,对垆土而言,除 5 cm 盘径下 -12 cm 水头、10 cm 盘径下 -9 cm 水头和 -12 cm 水头时吸渗率被低估外,其余均被高估。随着选取时间的延长,被高估的程度也越来越大。因此,使用 Philip 法确定吸渗率值时,选取时间不宜太长,从表 4 可以得出,5 cm 盘径下 -12 cm 水头、10 cm 盘径下 -9 cm 水头和 -12 cm 水头时确定吸渗率的适宜时间分别为 30 ~ 40 s 和 40 ~ 50 s,其余确定吸渗率的适宜时间均应小于 30 s。

从表 5 可以看出,对砂黄土而言,除 10 cm 盘径下 -9 cm 水头和 -12 cm 水头时吸渗率被低估外,其余也均被高估。随着选取时间的延长,被高估的程度也越来越大。因此,与垆土结果相似,使用 Philip 法确定吸渗率值时选取时间亦不能太长,从表 5 可以得出,10 cm 盘径下 -9 cm 水头和 -12 cm 水头时确定吸渗率的适宜时间分别为 30 ~ 40 s 和 40 ~ 50 s,其余确定吸渗率的适宜时间也均应小于 30 s。从表 5 还可以看出,在同一盘径下,随着负压的减小,被高估的程度越来越低。即在选取的时间范围内,负压越低,计算吸渗率的准确性越高。

表 4 黄土不同时间尺度下吸渗率相对误差 (%)

Table 4 Relative errors of estimated sorptivity of Lou soil (Yangling) under different time interval

盘径 (cm) Diameter of disc	压力 (cm) Pressure heads	选取时间 Time interval (s)										
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	240
5	-1	0.202	5.040	11.694	17.440	22.782	27.218	31.149	34.778	38.105	41.331	51.815
	-3	2.674	10.160	17.540	23.102	28.342	32.941	37.005	41.176	44.706	48.021	58.824
	-6	17.228	27.216	29.588	31.835	34.082	35.705	37.703	39.326	40.824	42.197	48.065
	-9	20.260	27.013	31.299	34.545	38.442	41.169	43.247	45.455	47.403	49.091	56.234
	-12	-3.695	4.434	12.562	22.167	30.542	36.946	41.872	45.813	49.507	52.956	61.823
10	-1	17.058	22.868	25.464	28.183	30.902	33.498	35.847	38.072	40.049	41.904	49.073
	-3	43.942	45.234	47.173	48.950	51.373	53.150	54.927	56.381	57.674	58.643	64.620
	-6	18.008	24.138	28.161	31.418	35.057	36.973	39.272	41.379	43.103	44.444	49.617
	-9	-10.520	-3.004	1.717	6.652	10.515	14.163	16.738	19.528	21.674	23.605	30.472
	-12	-8.036	-1.563	4.241	8.705	12.723	16.071	18.750	22.545	27.009	41.964	58.482

表 5 砂黄土不同时间尺度下吸渗率相对误差 (%)

Table 5 Relative errors of estimated sorptivity of sand loess (Shenmu) under different time interval

盘径 (cm) Diameter of disc	压力 (cm) Pressure heads	选取时间 Time interval (s)										
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	240
5	-1	50.000	62.638	72.961	82.175	90.332	97.633	104.330	110.830	117.020	123.210	162.130
	-3	44.887	59.096	70.936	81.109	91.066	99.408	106.840	114.100	120.780	127.070	168.950
	-6	37.630	47.843	56.690	64.391	71.382	77.717	83.834	89.514	94.702	99.563	119.120
	-9	37.200	48.971	58.857	66.400	74.000	80.800	86.571	92.343	97.543	102.290	121.260
	-12	0.295	15.162	28.083	37.581	46.667	54.572	61.770	68.437	74.749	80.472	109.320
10	-1	35.878	42.882	48.967	54.133	58.668	62.916	66.648	70.207	73.823	76.980	98.450
	-3	24.984	34.690	42.204	48.278	53.601	58.547	62.743	66.750	70.632	74.327	98.309
	-6	18.037	24.665	30.593	34.990	39.324	43.085	46.718	49.968	53.155	56.150	70.491
	-9	-5.018	7.127	16.364	23.564	30.182	36.436	42.400	47.782	52.436	56.873	72.364
	-12	-12.830	-4.540	2.951	9.989	16.118	21.453	26.107	30.533	34.620	38.706	53.121

无论黄土还是砂黄土,从相对误差来看,吸渗率值基本上均被高估,这与 Philip 模型的理论基础有关,由于该法是在假设重力和平行毛管力可忽略的情况下建立起来的,因此从理论上而言,把早期吸渗都归结为垂直吸渗率的贡献必定会在一定程度上使吸渗率的计算值偏大。另一方面可能是由于接触砂层的影响而导致吸渗率值高估。盘径对杨凌黄土和神木黄绵土的影响也不相同。对于前者而言,两种盘径下吸渗率计算值的相对误差差别不大,小盘径下的相对误差略小于较大盘径。而对于神木黄绵土而言,小盘径下的相对误差却明显大于较大盘径。

综上所述,在利用盘式吸渗仪测定吸渗率时,对于质地较砂的土壤(如神木砂黄土)而言,选取较大的盘径要好些,这与 Vandervaere 等^[17]的研究结论一致。对于质地较粘的土壤(如杨凌黄土)而言,盘径大小对结果的影响较小。田间试验时,由于受风等

的影响,大盘径相对稳定,因此对于大小盘径均可的情况下,一般选用大盘径进行试验。

4 结 论

本文选用两种不同质地的土壤(杨凌黄土和神木砂黄土),选用 5 cm 和 10 cm 两种盘径,1 cm、3 cm、6 cm、9 cm 和 12 cm 水头五种负压下,进行了室内盘式吸渗仪三维吸渗实验。选用 Vandervaere 公式为参考模型,对 Philip 法确定吸渗率的合理时间尺度选取进行了分析。结果表明:无论黄土还是砂黄土,在相同盘径下,随着负压的降低,吸渗率值也随之减小;在相同负压下,盘径越小,吸渗率越大。且质地较砂的砂黄土吸渗率值明显大于质地较粘的黄土的吸渗率值。从相对误差来看,两种质地土壤吸渗率值基本上都被高估。在同一盘径下,随着负压的减小,被高估的程度越来越低。即在选取的时

间范围内,负压越低,计算吸渗率的准确性越高。对垆土而言,5 cm 盘径下 -12 cm 水头、10 cm 盘径下 -9 cm 水头和 -12 cm 水头时确定吸渗率的适宜时间分别为 30 ~ 40 s 和 40 ~ 50 s,其余确定吸渗率的适宜时间均应小于 30 s。对砂黄土而言,10 cm 盘径下 -9 cm 水头和 -12 cm 水头时确定吸渗率的适宜时间分别为 30 ~ 40 s 和 40 ~ 50 s,其余确定吸渗率的适宜时间也均应小于 30 s。对于质地较砂的土壤推荐使用大盘径进行盘式吸渗仪实验。

参考文献:

- [1] Ankeny M D, Ahmed M, Kasper T C, et al. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1991, 55:467—470.
- [2] Clothier B E, White I. Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1981, 45:241—245.
- [3] Reynolds W D, Elrick D E. Determination of hydraulic conductivity using a matric suction infiltrometer[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1991, 55: 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: 1514—1522.
- [6] Ferroux K M, White I. Designs for disc permeameters[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1988, 52:1205—1215.
- [7] 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.
- [8] White I, Sully M J. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration [J]. *Water Resour Res*, 1987, 23: 1514—1522.
- [9] Logsdon S D, Jaynes D B. Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometer[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1993, 57: 1426—1431.
- [10] Philip J R. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations[J]. *Soil Sci*, 1957, 84:257—264.
- [11] Haverkamp R P J, Ross P J, Smettem, et al. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer, II. Physically based infiltration equation[J]. *Water Resour Res*, 1994, 30:2931—2935.
- [12] 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.
- [13] Minaany B, Alex B, Mc Bratney. Estimation of sorptivity from disc-permeameter measurements[J]. *Geoderma*, 2000, 95:305—324.
- [14] Jacques D, Mohanty B P, Feyen J. Comparison of alternative methods for deriving hydraulic properties and scaling factors from single-dimension infiltrometer measurements[J]. *Water Resour Res*, 2002, 38(7):1120—1129.
- [15] Miles D E, Knight J H. A note on the use of the Philip infiltration equation[J]. *Aust J Soil Res*, 1976, 14:103—108.
- [16] 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, 25:369—375.
- [17] Vandervaere J P, Vauclin M, Elrick D E. Transient flow from tension infiltrometers: II. four methods to determine sorptivity and conductivity[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64:1272—1284.

Study on the time scales of soil sorptivity determined by Philip equation

FU Qiu-ping^{1,3}, WANG Quan-jiu^{1,2}, 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 Resources, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Two diameters of disc infiltrometer (5 cm and 10 cm) and two distinctly textured soil (Yangling caly soil and Shenmu sandy loam soil) were used to carry out disc 3D laboratory infiltration experiment under five pressure heads (-1, -3, -6, -9, -12 cm H₂O). Vandervaere formula was chosen as standard model, and then the time scales of determining soil sorptivity by Philip formula were analyzed according to Vandervaere equation. The results are as followed, for the two textured soil, soil sorptivity reduces as pressure heads decrease at the same disc diameter; soil sorptivity becomes bigger as the disc diameter gets smaller. The soil sorptivity of Shenmu soil is obviously bigger than that of Yangling. The soil sorptivity of the two kinds of soil is nearly overrated. The overrated values of soil sorptivity decrease as pressure heads reduce. That is to say, the veracity of estimating soil sorptivity is higher as pressure heads become smaller within the chosen time. For Yangling soil, the proper time scales of determining soil sorptivity by Philip equation under the situation that the disc diameter is 5cm with -12 cm H₂O and the disc diameter is 10 cm with -9 cm H₂O and -12 cm H₂O are 30 ~ 40 s and 40 ~ 50 s respectively, while the proper time scales in other situation should be less than 30 s. For Shenmu soil, the proper time scales of determining soil sorptivity by Philip equation under the situation that the disc diameter is 10 cm with -9 cm H₂O and -12 cm H₂O are 30 ~ 40 s and 40 ~ 50 s respectively, while the proper time scales in other situation should be less than 30 s too. The bigger diameter of disc infiltrometer is recommended to determine soil sorptivity for the light soil.

Key words: disc infiltrometer; soil sorptivity; Philip equation