

利用线源入流测量方法对土壤入渗影响因素的研究

崔宇菲,李玉中,龚道枝,毛丽丽

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,农业部旱作节水农业重点开放实验室,北京 100081)

摘要:土壤入渗过程是农田水分循环的重要组成部分,其准确测量对设计与管理灌溉系统、研究降雨产汇流过程等有重要意义。土壤入渗过程受土壤本身及地表情况等因素的影响。本文利用线源入流测量方法研究了土壤初始含水量与地表坡度对土壤入渗过程的影响。室内试验选用壤土,设计了3组初始含水量(风干土、8.22%和16.3%)和3组地表坡度(0° 、 5° 和 15°),观测得到较为准确的土壤初始入渗过程。试验结果发现:3组含水量中8.22%的处理土壤入渗性能最高,稳定入渗率为 $39.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;土壤坡度对入渗过程的影响不大,3组坡度的土壤稳定入渗率分别为 43.1 、 $51.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $52.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。分析认为可能由于土壤太高或太低的含水量会导致水力梯度的降低或土壤团聚体的破坏而降低土壤入渗率。土壤初始含水量对入渗过程的影响还需在不同土壤类型进行试验而得到验证。

关键词:水分入渗;初始含水量;地表坡度;线源入流

中图分类号:S152.7⁺2 **文献标志码:**A

Effects of linear-source measurement method on the soil infiltration process

CUI Yufei, LI Yuzhong, GONG Daozhi, MAO Lili

(*Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Dry Land Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China*)

Abstract: Soil infiltration is an important part of water cycle. Accurate measurement of the soil infiltration process is of great importance for the irrigation management to study this process. Soil infiltration influenced by many factors such as soil properties and surface condition. In this study, the linear-source measurement method for soil infiltration was used to discuss the effects of initial soil water content and slope on the soil infiltration process. Lab experiments were conducted with loam soil. Three initial soil water contents (air-dry soil, 8.22% and 16.3%) and three surface slopes (0° , 5° and 15°) were selected in this study. The measured soil infiltration rates were fitted with the Philip Infiltration Model. The results showed that a critical soil water content related to the maximum soil infiltrability existed, the stable infiltration rate was $39.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. There was no obvious effect of slope on the soil infiltration according the results in this study, the stable infiltration rate of three surface slopes were 43.1 , $51.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ and $52.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Too high or too low soil water content decreased soil infiltrability due to higher soil water content lowered the hydraulic gradient, while soil aggregates might be destroyed with lower soil water content. More experiments were needed to verify this conclusion. The initial soil infiltration process was observed in this study, so the discussions about the effects of soil water content and slope were more convincing.

Keywords: water infiltration; initial water content; slope; linear source

土壤水分渗透(或称渗吸、入渗)描述的是水分进入土壤的过程,是水分循环的重要组成部分。由

于入渗过程中土壤基质吸力梯度下降,土壤入渗速度随时间按指数规律减小。水分在干燥土壤开始

渗透时,基质吸力梯度比较大,水流渗入土壤的速度很快。随着渗透的进行,湿润土层逐渐加厚,吸力梯度逐渐减小并趋近于零。渗透速度除了随时间变化外也受土壤的初始土壤含水率、地形地貌、植被覆盖、土壤盐碱化程度以及降雨强度和持续时间等的影响^[1-2]。

土壤含水量尤其是初始含水率是影响水分入渗和传导过程、改变土壤入渗速率的重要因子。土壤含水量对大田土壤入渗能力的影响主要表现在入渗的初始阶段,土壤含水量较高时入渗湿润锋处的吸力梯度相对较小,因而入渗率也小;但土壤含水量较低时,湿润锋前沿处吸力梯度大、入渗率也大。较高的初始含水量会降低土壤的吸力梯度,土壤内部由于含有大量的水分,孔隙度也大大降低,这都会降低土壤的初始入渗性能^[3-4]。研究不同初始含水量下土壤入渗过程有利于揭示降雨产流机制^[5],Hino等^[6]利用人工模拟降雨研究^[7-9]得到土壤入渗率与初始含水量具有非常高的相关性。贾志军等^[10]、王全九等^[11]、解文艳等^[12]、陈洪松等^[13]、刘金涛等^[14]、曹辰等^[15]、刘汗等^[16]分别在野外坡地或室内模拟环境下对土壤入渗模型参数及入渗过程与土壤初始含水率的关系进行了研究,得到随初始含水率的增高初始入渗率减小的结论。张俊等^[17]研究了初始含水量对新型地下灌溉方式——微润灌的影响,解文艳等^[12]研究了含水量为13.4%~32.7%之间的入渗过程,认为累积入渗量、稳定入渗率随土壤初始含水量的增加而降低,王全九等^[11]利用环刀法研究了含水量为2.25%~16.4%之间的土壤入渗过程,发现土壤饱和导水能力(稳定入渗率)随初始含水率增加而增大。Hillel^[4]发现土壤初始含水量对稳定入渗率的影响并不明显。Hawke等^[3]利用模拟降雨试验研究发现土壤累积入渗量随土壤含水量的增加而减小。虽然关于土壤初始含水量对入渗过程的影响研究很多,但迄今为止并没有得到一致的结论。

地表坡度对土壤入渗过程的影响有很多研究。Singer等^[17]和Mah等^[18]发现地表坡度与土壤入渗性能没有直接关系。Peosen^[19]研究发现,坡度越大,雨滴打击到地表的时候与地表的夹角越小,单位面积上对地表的打击作用越小,导致地表结皮现象减弱,进而得出土壤入渗率随坡度的增加而增大的结论。Janeau等^[20]得出过类似的结论。Chaplot等^[21]发现水流流速越快,地表水流深度越小,表明坡度越大,土壤入渗性能越低。Bobe^[22]利用圆盘人工降雨器完成了三种土壤(砂土、壤土及粘土)在坡

度5°、10°以及15°条件下的入渗试验,发现坡度对土壤入渗过程没有明显影响。

综上所述,迄今为止关于土壤初始含水量对稳定入渗率及累积入渗量、坡度对入渗过程的影响作用没有得到一致的结论。当向地表的供水达到或超过土壤的入渗能力时,土壤的实际入渗等于土壤的入渗能力,这是测量土壤入渗能力的基本条件。现有的研究受测量方法的限制,在入渗测量初始阶段很难满足充分供水的条件,因此土壤入渗的初始过程测量不够完整,不能准确揭示入渗过程影响因素、影响规律及其相互关系。同时,大部分传统的入渗试验测量方法对土壤有不同程度的破坏,得到的入渗过程综合了很多的影响因素,单一因素(如初始含水量、坡度等)对入渗过程的影响很难分析出来,这也是现有的关于土壤初始含水量和地表坡度对入渗影响作用结论不一致的原因之一。由于土壤初始含水量影响降雨入渗、产流过程,所以对土壤水分沿坡面的分布具有重要的作用,同时坡面的水分分布情况也影响坡面降雨入渗、产流过程^[8]。

Mao等^[23]提出的土壤入渗性能线源入流测量方法,在整个土壤入渗性能测量过程中供水强度不小于土壤入渗能力,满足了充分供水的条件。土壤入渗过程均由土壤本身的入渗能力控制,观测得到的入渗率不受供水强度的影响,能够反映土壤的入渗能力。从上述分析看出,土壤入渗过程的观测方法是研究各因素对土壤入渗影响机理的基础。本研究在提出的土壤入渗过程线源测量方法的基础上进行室内试验,研究土壤初始含水量和地表坡度对入渗过程的影响作用。由于测量方法本身的优势,可以得到完整的入渗过程,因此对土壤初始含水量及地表坡度对入渗过程的影响作用分析更为完整和准确。在此基础上,可以进一步分析其他因素对入渗过程的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验处理

本研究应用Mao等^[23]提出的土壤入渗性能线源入流测量方法进行土壤初始含水量和地表坡度单一因素对入渗过程的影响研究。室内测量系统由土槽、布水器、供水装置和测量装置组成,具体见图1。

土槽的长、宽、高分别为1 m×0.6 m×0.25 m,沿宽度方向分为3个同样尺寸的小槽作为3个重复。土槽的侧面固定带有刻度的标尺,用于记录水流在地表推进的过程。

试验所用土壤为壤土,其中砂粒(2~0.05 mm)占 53%、粉粒(0.05~0.002 mm)占 27%、黏粒(<0.002 mm)占 20%。设置了三个土壤含水量水平,分别为风干土、8.22%和 16.3%,风干土是将土样从野外取回后直接在室温下风干 2 个月,含水量维持在较稳定水平后再进行后续的过筛、配比含水量等处理,实验室测量风干土的含水量数值为 2.15%;设计供水强度分别为 4.69、4.08 L·h⁻¹及 3.04 L·h⁻¹;地表坡度设置为 0°、5°及 15°,设计供水强度分别为 4.64、4.20 L·h⁻¹及 4.35 L·h⁻¹。

1.2 试验方法

试验采用马氏瓶恒压供水,试验过程中利用数码相机记录地表湿润面积的变化过程。

试验先将土样风干后过 2 mm 筛,在 3 个小土槽底部分别装入一层 1.5 cm 厚的细砂,以形成透气性能较好的边界。将过 2 mm 筛的土样称重,并测定其初始含水量(2.15%),按照设定的两组初始含水量计算需要添加的水量。用喷壶将水均匀地喷洒在土样上,混合均匀后用塑料布密封放置 48 h,让水分充分分布,以保证土壤内部含水率基本均匀。

按天然容重即 1.26 g·cm⁻³将土样每 5 cm 为一层分层装入。土样放入土槽后,在不捣压的前提下用耙子整平,并在装入下一层土之前先将前次装入的土层表面用工具打毛,以避免上、下土层之间出现结构和水动力学特性突变等不必要的内边界。总装土深度为 20 cm。土样装入后,将土槽调整到设定坡度进行试验。

试验过程中的具体观测内容和记录、计算数据如下:

(1) 记录时间间隔:由秒表控制,分别按 1、2、5、10、15、30 min 的间隔来记录马氏瓶读数和拍照时间间隔;

(2) 时段内累计入渗水量:记录马氏瓶上初始与结束时刻的刻度,计算得到时段内的累积供水量即时段内流入地表的水量;

(3) 地表湿润面积:首先由数码相机拍摄试验中地表湿润过程照片,根据对应土箱两边的刻度记录,由计算机处理计算得到时段内增加的湿润面积。

(4) 土壤入渗率的计算:根据观测内容和记录数据,应用 Mao 等^[23]提出的计算公式,得到不同时间的入渗率为:

$$i_n = \frac{q_n - \sum_{j=1}^{n-1} i_j \Delta A_{n-j+1}}{\Delta A_1} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

式中, q 为供水流量(L·h⁻¹); i 为入渗率(mm·h⁻¹); ΔA 为时段内湿润面积增量; n 为对应的时段。

2 结果与讨论

2.1 初始含水量对入渗的影响

设定的三个初始含水量条件下,土壤表面湿润面积变化过程由照片记录。将得到的照片加载到 AutoCAD 中,对湿润面积在照片中的变形进行还原,计算得到地表湿润面积推进过程见图 2。

根据湿润面积随时间增加规律,并考虑试验最终得到稳定入渗率这一边界条件,利用毛丽丽等^[23]提出的拟合公式,将图 2 中的数据利用式(2)进行拟合。

$$A = M(1 - e^{-Nt}) \quad (2)$$

式中, A 为地表湿润面积(mm²); t 为时间(min); M 、 N 均为拟合常数。

如图 2 所示,在土壤入渗初始阶段,地表湿润面积随时间增加很快。各拟合曲线的斜率在初始阶段很大,随着时间的推进慢慢降低并最终趋于一致。这说明初始含水量对地表湿润面积增加的最终阶段影响不大,拟合参数及每组拟合结果的确定性系数见表 1。

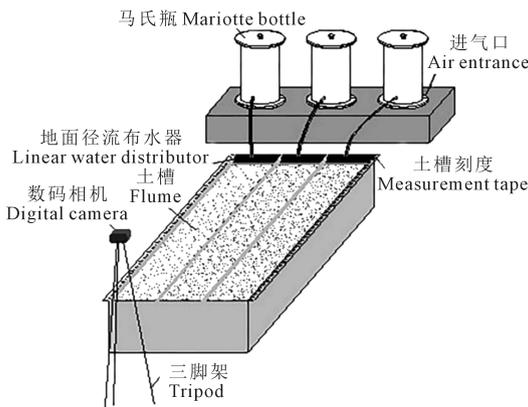


图 1 试验装置模型图

Fig.1 The experimental apparatus

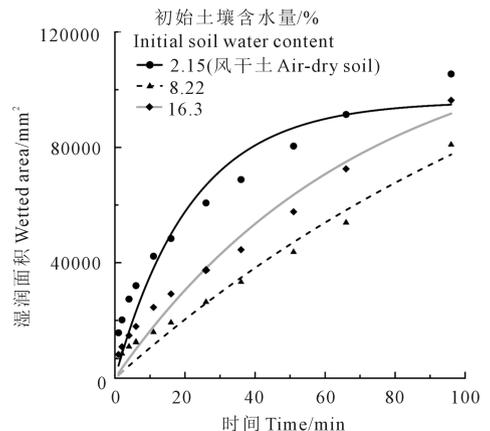


图 2 地表湿润面积推进过程

Fig.2 The wetted area as function of time

应用式(1)计算不同土壤初始含水量条件下的入渗率,得到的结果见图 3。

如图 3 所示,3 组不同初始含水量条件下的土壤入渗过程规律比较明显。含水量 8.22%的初始入渗率最高,风干土(含水量 2.15%)的初始入渗率最低。随着时间的推移,3 组土壤的入渗率逐渐接近,3 组稳定入渗率差别不大。Hillel^[4]指出土壤初始含水量越高,初始入渗性能就越低,入渗达到稳定的时间越短。本研究中,初始含水量最高(16.3%)的土壤初始入渗率比含水量为 8.22%的土壤低,符合 Hillel 提出的基本规律。这是由于初始含水量高的土壤吸力梯度较小,土壤孔隙也较少,因此水流进入土壤的过程比含水量低的土壤慢。同时,Levy 等^[24]指出,干燥土壤的快速湿润过程会导致土壤团聚体的破坏及地表结皮的形成,进而会降低土壤的入渗性能。本试验中风干土(2.15%)的初始入渗率比含水量最高(16.3%)的还要低,原因可能是快速湿润导致地表出现结皮,进而降低了土壤入渗率^[24]。由于应用其他传统入渗测量方法过程中出现的地表结皮及雨滴对地表的打击作用,导致土壤入渗过程的初始阶段观测不准确,无法准确分析土壤初始含水量对入渗过程初期的影响作用。本研究结果指出,风干土由于快速湿润导致地表出现结

皮,降低了入渗率;初始含水量最高的土壤由于土壤吸力较小,初始入渗率也较低。本试验中含水量居中(8.22%)的土壤初始入渗率最高,较高或较低的初始含水量均不利于水分在初始阶段迅速地渗入土壤。

Philip 入渗模型^[25]是现今为止应用比较多入渗模型,该模型具有明确的物理意义,首次提出利用数值方法解决土壤水流问题。Philip 入渗模型的简化公式为:

$$i(t) = \frac{1}{2}St^{-0.5} + A \quad (3)$$

式中, $i(t)$ 为入渗率($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); S 为土壤吸着力($\text{mm} \cdot \text{h}^{-0.5}$); t 为入渗时间(min); A 为常数($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)。

利用 Philip 入渗模型对试验结果进行了拟合,如图 4 所示,Philip 入渗模型与本研究得到的结果拟合效果非常好。但模型拟合的稳定入渗率均比测量得到的低。

不同土壤初始含水量条件下,测量得到的土壤初始入渗率与 Philip 入渗模型拟合回归得到的参数吸着力(S)具有相同的变化趋势。如表 2 所示,初始含水量为 8.22%的土壤拟合得到的初始入渗率比其他两组含水量的土壤高。图 4 中 Philip 入渗模型

表 1 湿润面积增加过程拟合参数

Table 1 The fitting parameters of the advancement of the wetted area

初始含水量/% Initial soil water content	M	N	R^2
2.15(风干土 Air-dry soil)	95956	0.0459	0.915
8.22	177193	0.00595	0.951
16.3	123498	0.0142	0.953

表 2 Philip 入渗模型拟合参数

Table 2 The parameters of the Philip Infiltration Model

含水量/% Initial soil water content	S $/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-0.5})$	i_i $/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	A $/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	i_f $/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	R^2
2.15(风干土 air-dry soil)	689.988	154.741	-4.613	32.9	0.992
8.22	1669.470	355.875	-59.847	39.8	0.952
16.3	1312.408	275.252	-54.714	24.9	0.942

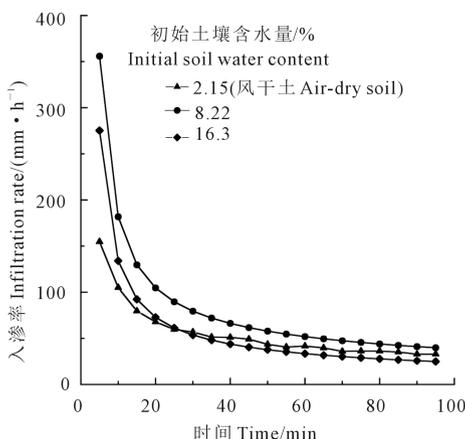


图 3 不同含水量条件下的土壤入渗过程
Fig.3 The infiltrability functions for soils with different initial moisture contents

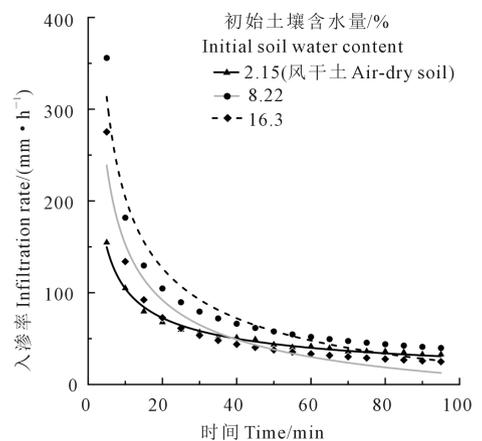


图 4 Philip 入渗模型拟合结果对比
Fig.4 The curves fitted by the Philip Infiltration Model

与测量得到的土壤初始入渗阶段拟合很好,但对稳定入渗阶段的拟合精度较差,拟合得到的稳定入渗率为负值。分析原因可能是 Philip 入渗模型公式中时间的指数设置为 (-0.5) 导致的。受该指数的影响,模拟过程中土壤初期的入渗率越高,拟合得到的稳定入渗率越低。由于传统土壤入渗率测量方法受供水等限制,测量得到的土壤初始入渗率比较低,因此在利用 Philip 入渗模型进行拟合时,拟合结果反而比较好,不会出现本研究中的模型指数设置问题。

2.2 地表坡度对入渗的影响

三个不同坡度条件下,利用土壤入渗性能线源入流测量方法得到的地表湿润面积累计增加过程见图 5。

利用式(2)对地表湿润面积推进过程进行拟合,具体拟合参数见表 3。式(2)与测量数据拟合非常好,拟合确定性系数都很高(表 3)。拟合结果中 e 的指数为负数,这表明随着时间的推移,地表湿润面积趋于一个稳定值,即拟合方程中的 M ,表明当入渗持续一段时间之后,地表湿润面积将不再继续增加,而是达到一个稳定值。入渗过程中的稳定入渗率可以直接从地表稳定入渗面积中估算,具体计算过程为:

$$i_{j0} = \frac{4.64}{107702} \times 10^6 = 43.06 \text{ (mm} \cdot \text{h}^{-1}) \quad (4)$$

$$i_{j5} = \frac{4.20}{81582 \cos 5} \times 10^6 = 51.68 \text{ (mm} \cdot \text{h}^{-1}) \quad (5)$$

$$i_{j15} = \frac{4.35}{85282 \cos 15} \times 10^6 = 52.81 \text{ (mm} \cdot \text{h}^{-1}) \quad (6)$$

从上面的计算结果看,3种坡度条件下的土壤稳定入渗率非常接近。这表明坡度对稳定入渗率影响较小。土壤入渗率随时间变化过程见图 6。

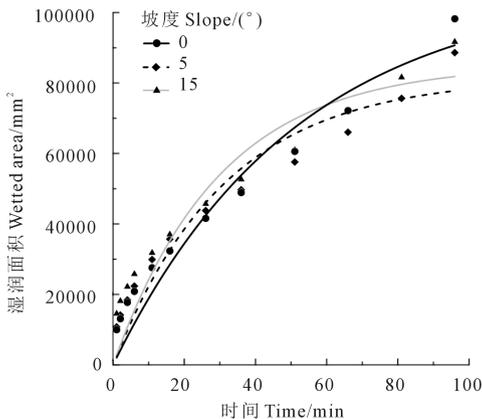


图 5 地表湿润面积随时间变化过程

Fig.5 The wetted area as function of time

如图 6 所示,3组不同坡度条件下的土壤入渗过程非常接近,并没有明显的差别。这表明坡度对土壤入渗过程的影响很小。Singer^[17]及 Mah 等^[18]通过试验得到了与本研究一致的结论,即坡度与土壤入渗率没有明显相关关系。

利用 Philip 入渗模型对本研究中不同坡度条件下的土壤入渗过程进行拟合,结果见图 7。利用 Philip 入渗模型拟合得到的三种坡度条件下的土壤入渗率变化过程基本没有区别,3组拟合曲线非常接近。具体拟合参数见表 4。如表 4 中所示,拟合方程的确定性系数均非常高,这表明 Philip 入渗模型可以很好地描述测量的入渗过程。Philip 入渗模型拟合得到的稳定入渗率(表 4)与实际计算得到的稳定入

表 3 地表湿润面积推进过程拟合参数

Table 3 The fitting parameters of the wetted areas

坡度 Slope/(°)	M	N	R^2
0	107701	0.019	0.929
5	81582	0.032	0.917
15	85282	0.033	0.888

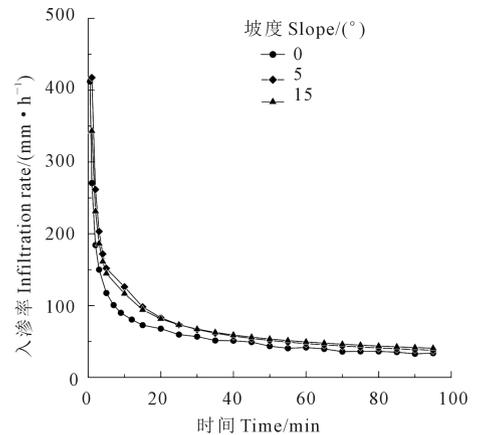


图 6 土壤入渗性能

Fig.6 Measured infiltrability changing with time

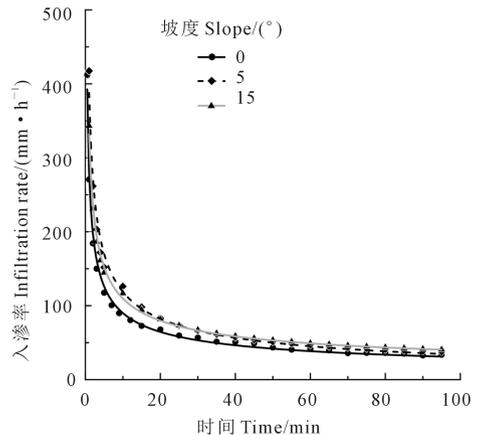


图 7 Philip 入渗模型拟合结果

Fig.7 The fitted curves of the Philip infiltration model

表4 Philip入渗模型拟合结果

Table 4 The parameters of the Philip's Infiltration Model

坡度 Slope/(°)	S /(mm·h ^{-0.5})	i _i /(mm·h ⁻¹)	A /(mm·h ⁻¹)	i _f /(mm·h ⁻¹)	R ²
0	275.480	412.0	2.966	43.1	0.994
5	393.299	417.5	-5.580	51.7	0.988
15	324.379	343.2	7.237	52.8	0.997

渗率相比均非常低,甚至出现负值。原因与之前分析一致,是由于 Philip 入渗模型中时间指数设定为(-0.5)及较高的土壤初始入渗性能导致的。如表4所示,土壤入渗性能线源入流测量方法得到的不同坡度条件下的稳定入渗率虽然差别不明显,但具有随坡度增加而增加的趋势。由于观测过程中没有受到雨滴打击作用及地表结皮的影响,得到的结果可以用来准确分析坡度对入渗过程的影响。

3 结 论

土壤入渗性能线源入流测量方法在保证充分供水及保持土壤结构不被破坏的条件下,测量得到的土壤入渗率为土壤的最大入渗性能。本研究中利用的线源入流测量方法不受供水流量的限制,可以准确得到各因素对土壤入渗过程的影响作用:

(1)本研究结果表明,过于干燥或湿润的土壤均不利于水分快速地渗入地表,中间含水量 8.22% 的土壤初始入渗率最高。过于干燥的土壤在入渗过程中由于快速湿润可能会导致土壤团聚体的破坏,进而形成结皮、降低土壤入渗性能。湿土相对于干土而言,用于存储入渗水量的孔隙较少,而且水力梯度较小。土壤初始含水量对稳定入渗率没有明显的影响。

(2)室内试验也表明地表坡度的变化对土壤入渗性能没有明显的影响。

(3)应用 Philip 入渗模型模拟了这两组室内试验,模型较好地拟合了试验数据并得到了一致的结论。

坡度和初始含水量对不同土壤类型的影响可能并不相同。更确切的土壤入渗性能影响因素的结论还需要进行更多的室内及野外试验获得。

参 考 文 献:

[1] 冯绍元,丁跃元,姚彬. 用人工降雨和数值模拟方法研究降雨入渗规律[J]. 水利学报, 1998, 29(11): 17-25.

[2] 吕刚,吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 494-499.

[3] Hawke R M, Price A G, Bryan R B. The effect of initial soil water content and rainfall intensity on near-surface soil hydrologic conductivity: A laboratory investigation [J]. Catena. 2006, 65:237-246.

[4] Hillel D. Environmental Soil Physics [M]. New York: Academic Press, 1998: 385-426.

[5] 刘目兴, 聂艳, 于婧. 不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程. 生态学报, 2012, 32(3): 871-878.

[6] Hino M, Odaka Y, Nadaoka K, et al. Effect of initial soil moisture content on the vertical infiltration process—a guide to the problem of runoff-ratio and loss[J]. Journal of Hydrology, 1988, 102:267-284.

[7] Peterson A E, Bubenzer G D. Intake rate: sprinkler infiltrometer [C] // Klute A. Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Madison. WI: American Society of Agronomy, 1986:784-810.

[8] Ogden C B, Van Es H M, Schindelbeck. Miniature rain simulator for measurement of infiltration and runoff [J]. Soil Science Society America Journal, 1997, 61:1041-1043.

[9] Morin J, Van Winkel J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation [J]. Soil Science Society America Journal, 1996, 60:1223-1227.

[10] 贾志军, 王贵平, 李俊义, 王小平. 土壤含水率对坡耕地入流入渗影响的研究[J]. 中国水土保持, 1987, (9): 25-27.

[11] 王全九, 叶海燕, 史晓南, 等. 土壤初始含水量对微咸水入渗特征影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 51-53.

[12] 解文艳, 樊贵盛. 土壤含水量对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(3): 272-275.

[13] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 44-47.

[14] 刘金涛, 李晓鹏, 陈喜, 等. 间歇降雨中土壤含水量分布及其对入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 96-100.

[15] 曾辰, 王全九, 樊军. 初始含水率对土壤垂直线源入渗特征的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 24-30.

[16] 刘汗, 雷廷武, 赵军. 土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土入渗性能的影响[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 1-6.

[17] Singer M J, Blackard J. Slope angle-interrill soil loss relationships for slopes up to 50% [J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46:1270-1273.

[18] Mah M G C, Douglas L A, Ringrose-Voase A J. Effects of crust development and surface slope on erosion by rainfall [J]. Soil Science, 1992, 154:37-43.

[19] Poesen J. Surface sealing as influenced by slope angle and position of simulated stones in the top layer of loose sediments [J]. Earth Surface Process and Landforms, 1986, 11:1-10.

[20] Janeau J L, Bricquet J P, Planchon O, et al. Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand [J]. European Journal of Soil Science, 2003, 54:543-553.

[21] Chaplot V, Le Bissonnais Y. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25:145-153.

[22] Bobe B W. Evaluation of soil erosion in the Harerge region of Ethiopia using soil loss models, rainfall simulation and field trials [D]. Pretoria: University of Pretoria, 2004.

[23] Mao L L, Lei T W, Li X, et al. A linear source method for soil infiltrability measurement and model representations [J]. Journal of Hydrology, 2008, 353:49-58.

[24] Levy G J, Levin J, Shainberg I. Pre-wetting rate and aging effect on seal formation and interrill soil erosion [J]. Soil Science. 1997, 162: 131-139.

[25] Philip J R. The theory of infiltration [J]. Soil Science. 1957, 83: 345-357.