

不同粘粒含量土壤水分入渗能力模拟试验研究

李卓¹, 吴普特², 冯浩², 赵西宁², 黄俊³

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为研究土壤粘粒含量对土壤入渗能力的影响, 通过向自然土壤中添加沙粒、人工粘土的方法配制不同粘粒含量土壤, 用土柱积水入渗模拟了人工配制土壤中粘粒含量对其入渗能力的影响。结果表明: (1) 土壤粘粒含量对土壤入渗能力有较大影响, 随粘粒含量增多, 入渗能力递减: < 0.001 mm 粘粒含量从 6% 增加至 40.4% 时, 稳定入渗速率从 0.0169 cm/min 降低至 0.0068 cm/min, 90 min 累积入渗量则从 3.66 cm 降低至 2.02 cm; (2) 稳定入渗速率、90 min 累积入渗量与粘粒及物理性粘粒含量分别呈幂函数负相关、指数负相关关系, 但与粘粒含量相关性更为显著; (3) 通过对 Green-Ampt 模型、Philip 模型及 Kostiakov 模型的参数拟合及累积入渗量计算, 发现在本试验中 Kostiakov 模型拟合精度最高, Philip 模型次之, Green-Ampt 模型较差, 说明 Kostiakov 模型对于均质土体是个比较实用的入渗模型。

关键词: 土壤水分入渗; 土壤粘粒含量; 入渗模型

中图分类号: S152.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)03-0071-07

土壤水分入渗是水分通过全部或部分地表向下流动进入土壤、在土壤中运动和存储, 形成土壤水的过程^[1,2], 是大气降水、地表水、土壤水和地下水相互转化的一个重要环节^[3]。对土壤水分入渗的研究不仅有助于促进非饱和带土壤水分入渗和迁移基础理论研究的发展, 而且可为综合评价地表、地下水资源, 合理确定农田灌溉技术参数提供科学依据^[4]。土壤入渗能力主要受土壤机械组成、水稳性团聚体含量、土壤容重、有机质含量及土壤初始含水量等的影响^[5~7]。作为土壤重要组成部分的粘粒, 巨大的比表面积使其具有很大的吸附能力而影响土壤中的水流速度, 同时, 细小粘粒对较大孔隙的镶嵌填充也对土壤中的水流通道有阻挡作用, 所以粘粒含量对土壤入渗能力必然有较大影响。

关于土壤质地对水分入渗的影响已有较多研究^[8~10], 但主要是采用不同土壤质地区域多点采样的方法来完成。采用这样的方法可以定性阐明土壤质地对入渗能力的影响, 但由于土壤性质空间变异性较大以及影响入渗性能参数较多和研究方法没有突破等问题, 土壤质地对入渗性能的量化研究受到很多限制。本文采用自然土壤中添加沙粒及人工粘土的方法改变土壤粘粒含量, 形成不同粘粒含量

系列的土壤。研究土壤粘粒含量对水分入渗能力的定量影响和规律, 为土壤改良和促进农田降水转化提供理论依据。采用这样的方法可以控制其他参数不变, 有效排除其他因素对试验结果的影响, 克服了田间试验不可控制因素较多, 试验随机误差较大等缺点, 可以较好地得出土壤粘粒含量对水分入渗能力影响的量化结果。

1 材料与方法

1.1 试验土壤制备

试验所用自然土壤采自陕西杨凌二道塬农田地表 40 cm 以下, 以减小耕层高有机质的影响。将所采集土壤烘干、研磨, 过 0.45 mm 筛, 测定各级颗粒组成。所用沙子采自渭河沙滩, 过 0.45 mm 筛, 测定各级颗粒组成。粘土用自然土壤依据司笃克斯沉降原理采用沉降的方法制备, 即土粒沉降的速度依其粒径的大小而不同, 粒径越大, 沉降速度越快; 粒径越小, 沉降速度越慢。具体制备方法是: 在内径 50 cm, 高 70 cm 大桶中放入经研磨、过 0.45 mm 筛的土壤 10 kg 左右, 加水 100 kg 以上, 快速搅拌 10 min, 均匀至桶底无沉淀且使土粒尽量分散, 静置 30~50 h, 澄清后将水用虹吸的方法吸出, 取泥层上部 1/4, 烘

收稿日期: 2008-04-20

基金项目: 国家 863 计划课题“降水资源转化利用技术”(2006AA100204); 新世纪优秀人才支持计划资助(01140602); 高等学校学科创新引智计划资助; 国家自然科学基金“黄土高原小流域降雨径流调控利用潜力动态分析与优化配制研究”(40701092)

作者简介: 李卓(1979—), 男, 山西吕梁人, 在读博士生, 研究方向为水土资源高效利用。E-mail: lizhuo_2000@sina.com。

*通讯作者: 吴普特(1963—), 男, 陕西武功人, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持与节水农业等方面的研究工作。E-mail: Gzvp@vip.sina.com。

干,研磨,过 0.45 mm 筛。所需粘土经几次制备够用后,将所有制好的粘土放在一起搅拌均匀,测定各级颗粒组成。土壤颗粒分析用 MS2000 激光粒度仪。所

用自然壤土、沙子、人工粘土等试验材料颗粒组成见表 1。将制备好的沙子及人工粘土按试验所需比例加入自然土壤中搅拌均匀即成试验土壤。

表 1 原料各级颗粒含量

Table 1 Particle size distribution of raw material

粒径 Particle diameter (mm)	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001
自然土壤 Natural soil (%)	0.8	8.5	30.0	11.6	18.7	30.4
沙子 Sand (%)	11.6	81.7	3.7	1.6	1.2	0.2
人工粘土 Artificial clay (%)	0.4	2.6	6.1	8.4	32.2	50.3

1.2 试验方案

试验用自然土壤中添加沙粒及人工粘土的方法改变土壤粘粒含量。设计加沙 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80% 8 个处理,加粘土 10%、20%、30%、40%、50% 5 个处理及无添加物 1 个处理,共 14 个处理,这样就可以形成粘粒含量由少到多的一个系列。

加沙土壤中由于所加沙粒密度较自然土壤大,所以随着沙粒的增加,土壤在同一容重水平上紧密程度逐渐降低。这样必然会使土壤气相固相比例大幅改变,不符合试验初衷。为了使试验土壤符合单一差异原则,必须使其紧密程度基本一致,即概念化的容重水平一致。而达到这样的目的只能以改变现实容重来实现。经前期试填装土柱的紧密程度测量,各加沙量水平土壤容重需按表 2 所列值方可使

其概念化的容重达到一致。人工粘土与自然土壤密度相近,所以加粘土壤与无添加物土壤保持同一容重水平。这样就使所有试验土样概念化容重水平保持一致。

将配制好的土壤充分混合均匀,按设计容重填充到直径 10 cm,高 35 cm 的 PVC 管中。装土前管底用纱网封住,管内涂凡士林,网内放滤纸,管内壁每 5 cm 做标记,再把每管用土均分为 6 份,每装一份压实至管内壁预定刻度处,装土至 30 cm。入渗用马氏瓶定水头供水,0~1 min 每 15 s 记录一次入渗数据,1~5 min 每 1 min 记录一次,7 min 记录一次,10 min 记录一次,10~20 min 每 5 min 记录一次,20~200 min 每 10 min 记录一次,200~400 min 每 30 min 记录一次,以后每 1 h 记录一次。试验重复 3 次。

表 2 试验土壤粘粒含量及容重

Table 2 Clay particle content and bulk density of experimental soils

编号 Treatment number	添加物 Additives		粘粒含量 (%) (<0.001 mm) Clay content	物理性粘粒含量 (%) (<0.01 mm) physical clay content	容重 (g/cm ³) Bulk density
	加沙量 (%) Addition of sand	加粘土量 (%) Addition of clay			
N ₁	80		6.0	14.5	1.70
N ₂	70		9.1	20.3	1.65
N ₃	60		12.2	26.1	1.60
N ₄	50		15.2	31.9	1.55
N ₅	40		18.2	37.6	1.50
N ₆	30		21.3	43.4	1.45
N ₇	20		24.3	49.2	1.40
N ₈	10		27.4	54.9	1.35
N ₉	0	0	30.4	60.7	1.30
N ₁₀		10	32.4	63.7	1.30
N ₁₁		20	34.4	66.7	1.30
N ₁₂		30	36.4	69.6	1.30
N ₁₃		40	38.4	72.8	1.30
N ₁₄		50	40.4	75.8	1.30

2 结果与分析

2.1 粘粒含量对土壤入渗能力的影响

通过对十几组不同粘粒含量土壤的试验及试验数据的分析,发现土壤粘粒含量对于表征土壤入渗能力的稳定入渗速率、累积入渗量均有明显影响。

2.1.1 稳定入渗速率 十几组试验结果表明,入渗速率可以在 120 min 左右达到相对稳定,但由于本试验涉及土样较多,且控制条件差异较大,故不一概而论,以 120 min 后最先连续 5 个时刻记录点的入渗速率达到基本相同时的平均速率作为稳定入渗速率。

图 1 所示为加沙土壤稳定入渗速率与粘粒含量之间的关系,由图可以看出,随着土壤粘粒含量增多,其稳定入渗速率持续减小,土壤粘粒含量从 6% 增加到 30.4%,稳定入渗速率从 0.0169 cm/min 减小到 0.0088 cm/min,二者呈极显著幂函数负相关,相关方程为 $y = 0.0313x^{-0.3791}$ ($\alpha = 0.05$, $r^2 = 0.9651$)。图 2 所示为加粘土后土壤稳定入渗速率与粘粒含量之间的关系,由图可以看出,随着粘粒含量增多,其稳定入渗速率持续减小,土壤粘粒含量从 30.4% 增加到 40.4%,稳定入渗速率从 0.0088 cm/min 减小到 0.0068 cm/min,二者呈极显著幂函数负相关,相关方程为 $y = 0.171x^{-0.8674}$ ($\alpha = 0.05$, $r^2 = 0.991$)。由上述结果可以看出,无论是在土壤中添加沙粒还是粘土,其稳定入渗速率均随粘粒含量增加而减小,而且合成土壤的稳定入渗速率均与粘粒含量呈幂函数负相关。而将试验土壤作为一个系列来分析,粘粒含量由 6% 增加到 40.4%,稳定入渗速率则从 0.0169 cm/min 减小到 0.0068 cm/min,二者也呈极显著幂函数负相关,相关方程为 $y = 0.0341x^{-0.4136}$ ($\alpha = 0.05$, $r^2 = 0.9692$),关系曲线如图 3 所示。由以上结果可以看出,尽管试验土壤采取不同的方法改变土壤粘粒含量(加沙使其降低,加粘使其升高),但不论是分段(加沙、加粘)分析还是全系列分析,稳定入渗速率均与土壤粘粒含量呈幂函数相关关系,而且相关性都非常显著。这就说明土壤水分入渗的稳定入渗速率在容重等其他条件一致的情况下主要受粘粒含量的影响。

2.1.2 90 min 累积入渗量 一定时段的累积入渗量也是反映土壤入渗能力的重要指标。本试验取 90 min 累积入渗量 (I_{90}) 作为衡量指标,结果表明, I_{90} 与土壤粘粒含量有关。图 4 为试验土壤入渗累积过程曲线,由图可以看出,试验土壤在 90 min 入渗累积过程中,5 min 以后任一时刻点的累积入渗量

均随土壤粘粒含量增加递减,累积过程曲线随粘粒含量增加逐渐趋近 x 轴。

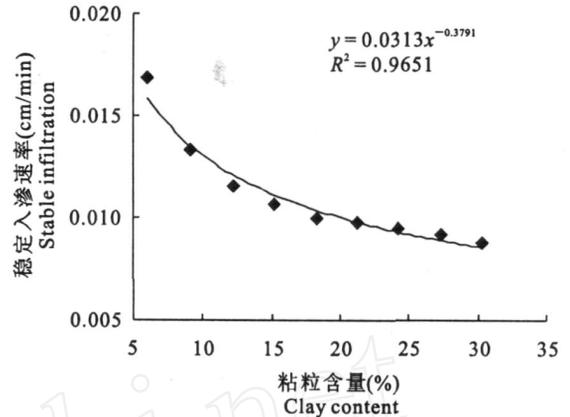


图 1 加沙土样 ($N_1 \sim N_9$) 粘粒含量与稳定入渗速率关系
Fig. 1 Relationship between stable infiltration rate and clay content of soil added sand ($N_1 \sim N_9$)

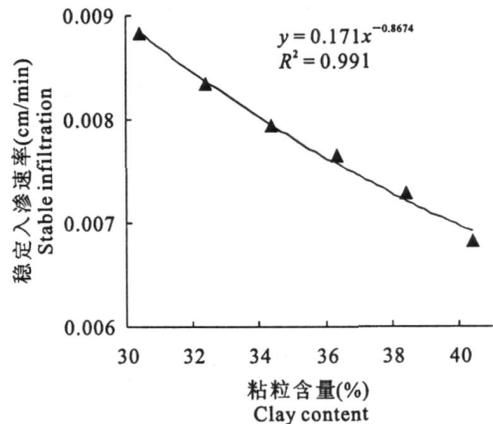


图 2 加粘土样 ($N_9 \sim N_{14}$) 粘粒含量与稳定入渗速率关系
Fig. 2 Relationship between stable infiltration rate and clay content of soil added clay ($N_9 \sim N_{14}$)

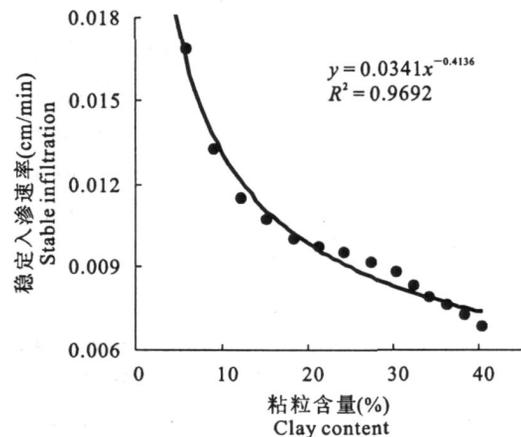


图 3 试验土壤(全系列)粘粒含量与稳定入渗速率关系
Fig. 3 Relationship between stable infiltration rate and clay content of experimental soils

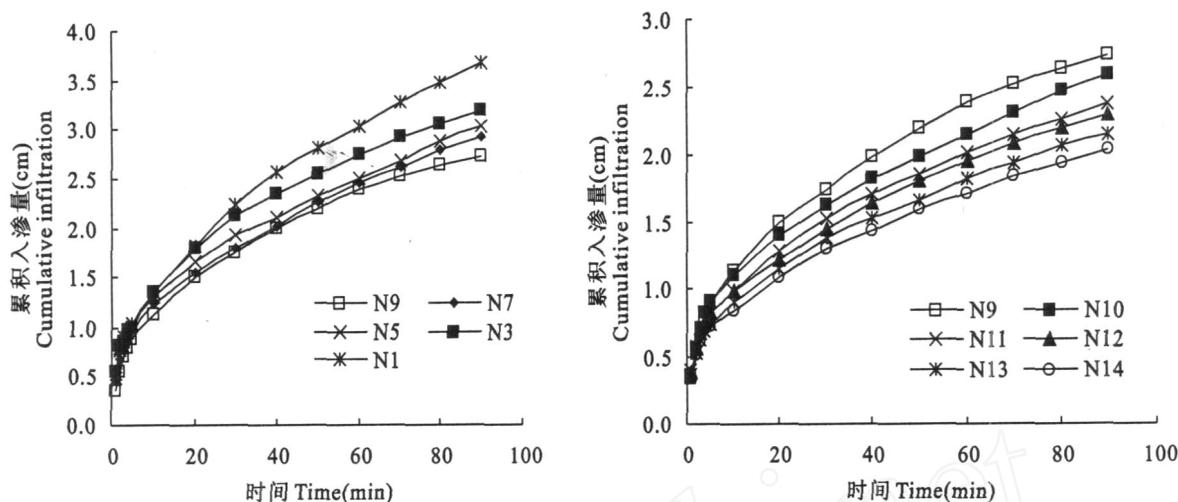


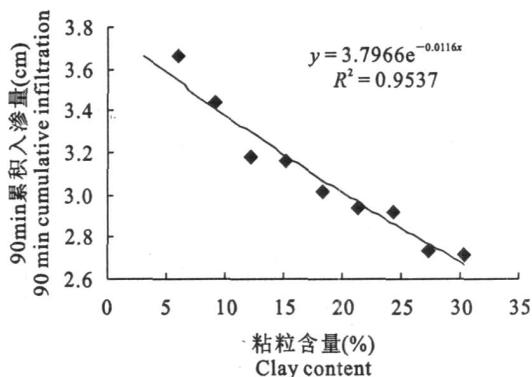
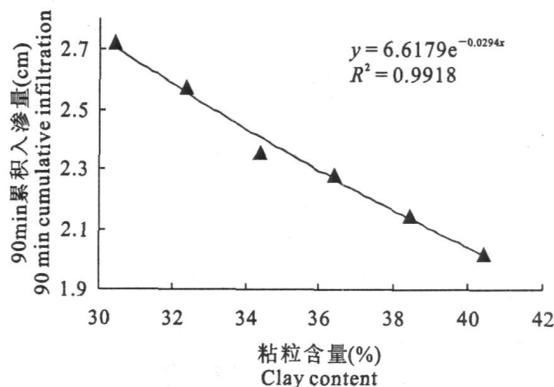
图 4 试验土壤(部分)90 min 入渗累积过程

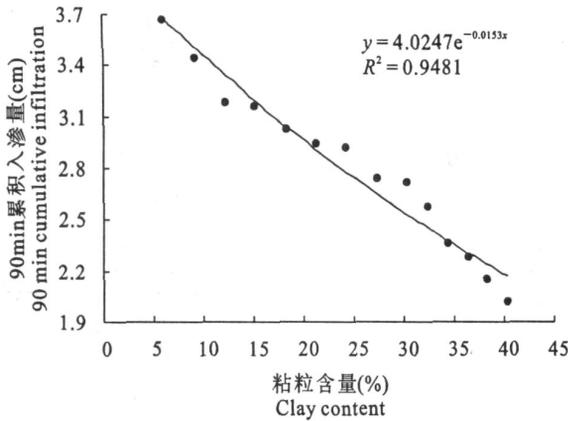
Fig. 4 The 90-minute cumulative infiltration process of soil tested (part)

图 5 所示为加沙土壤 I_{90} 与粘粒含量之间的关系。由图可以看出,随着土壤粘粒含量增多, I_{90} 持续减小,土壤粘粒含量从 6% 增加到 30.4%, I_{90} 从 3.66 cm 减小到 2.72 cm,二者呈极显著指数负相关,相关方程为 $y = 3.7966e^{-0.0116x}$ ($\alpha = 0.05$, $r^2 = 0.9537$)。图 6 所示为加粘土壤 I_{90} 与粘粒含量之间的关系,可以看出,随着粘粒含量增多, I_{90} 持续减小,土壤粘粒含量从 30.4% 增加到 40.4%, I_{90} 从 2.72 cm 减小到 2.02 cm,二者呈极显著指数负相关,相关方程为 $y = 6.6179e^{-0.0294x}$ ($\alpha = 0.05$, $r^2 = 0.9918$)。由上述结果可以看出,无论是在土壤中添加沙粒还是粘土, I_{90} 均随粘粒含量增加而减小,而且合成土壤的 I_{90} 均与粘粒含量呈指数负相关。而将试验土壤作为一个系列来分析,粘粒含量由 6% 增加到 40.4%, I_{90} 则从 3.66 cm 减小到 2.02 cm,二者也呈极显著指数负相关,相关方程为 $y = 4.0247e^{-0.0153x}$ ($\alpha = 0.05$, $r^2 = 0.9481$),关系曲线如图 7 所示。由以上结果及前述稳定入渗速率与粘粒含量关系的结果可以看出,表征土壤入渗能力的两大指标都与土壤粘粒含量密切相关,这也说明土壤水分全时段入渗能力在容重等其他条件一致的情况下主要受粘粒含量的影响。

土壤水分入渗过程是水分通过土表进入土体形成土壤水的过程。水分进入土体后土壤水的流动就发生在土壤粒子的孔隙间,土壤孔隙就是水分在土壤中运动的通道,水分的移动能力、运动状态受土壤孔隙状况的直接影响。通常认为孔隙量越多,入渗越快,而孔隙量相当的土壤其孔隙结构、孔径分布及连通状况的差异也会影响土壤中水流,也即影响土壤的入渗能力。本试验中紧实度基本一致的砂土与

容重一致的粘土,其各粘粒含量水平上的总孔隙度相差不太大,由于质地的差异各粘粒含量水平上的土壤大孔隙、毛管孔隙含量不同,随着粘粒含量的增多,毛管孔隙增多,大孔隙减少,毛管力对垂直一维入渗的水分驱动力——重力的抵消作用逐渐增强,

图 5 加沙土壤($N_1 \sim N_9$)粘粒含量与 I_{90} 关系Fig. 5 Relationship between I_{90} and clay content of soil added sand ($N_1 \sim N_9$)图 6 加粘土壤($N_9 \sim N_{14}$)粘粒含量与 I_{90} 关系Fig. 6 Relationship between I_{90} and clay content of soil added clay ($N_9 \sim N_{10}$)

图7 试验土壤(全系列)粘粒含量与 I_{90} 关系Fig. 7 Relationship between I_{90} and clay content of all experimental soils

从而减小了土壤的水力传导度,其结果就是随着粘粒含量的增多,土壤入渗能力递减。另一方面,土壤细粘粒质量分数越高,其整体的比表面积越大,表面能越高,吸附能力越强,土壤的导水能力就越弱,入渗能力也就越差,所以试验土壤随细粘粒的增多入渗能力递减。

2.1.3 不同粒径粘粒含量对入渗能力影响比较
土壤质地通过对土粒的表面能、土壤孔隙尺度和分布的影响,来影响土壤水分运动的驱动力和水力传导度的大小,进而影响土壤水分入渗能力^[11],所以具有巨大表面能的粘粒影响作用很大。但到底多大粒径范围的粘粒是最主要因素,会因试验土壤的不同而有所差异。本文以卡钦斯基土壤粒级分级标准比较粘粒 (<0.001 mm) 与物理性粘粒 (<0.01 mm) 含量跟入渗能力的关系。前面已论述了入渗能力与粘粒含量关系,由于篇幅所限,入渗能力与物理性粘粒含量关系不再图示。试验结果表明,无论是加沙土壤还是加粘土壤,表征入渗能力的稳定入渗速率及 90 min 累积入渗量 (I_{90}) 与物理性粘粒含量的关系跟与粘粒含量的关系一样分别是幂函数负相关与指数负相关关系,但拟合方程相关系数要小于与粘粒含量的,这说明土壤入渗能力与其粘粒含量相关更显著。粘粒跟物理性粘粒对土壤入渗能力均有影响,但粘粒的影响要更大,而粘粒包含于物理性粘粒中,所以物理性粘粒对土壤入渗能力的影响可能主要是通过粘粒实现,真正影响土壤入渗能力的是 <0.001 mm 的粘粒。

2.2 不同粘粒含量土壤入渗模型应用分析

Green 和 Ampt 根据简单的土壤物理模型,推导出二维入渗方程 Green-Ampt 入渗模型^[12]。该模型适用于土质均匀,土壤初始干燥的薄层积水条件下

的入渗。Green-Ampt 模型具体表示为:

$$i = k_s \frac{(h_0 + h_f + z_f)}{z_f} \quad (1)$$

式中, i 为入渗率 (cm/min); k_s 为土壤表征饱和导水率 (cm/min), 有时称为饱和导水率, 主要取决于土壤封闭空气对入渗的影响程度; h_0 为土壤表面积水深度 (cm); h_f 为湿润锋面吸力 (cm); z_f 为概化的湿润锋深度 (cm)。此处 z_f 可用下式计算。

$$z_f = \frac{I}{s - i} \quad (2)$$

式中, I 为累积入渗量 (cm); s 为土壤饱和含水率 (cm^3/cm^3); i 为初始土壤含水率 (cm^3/cm^3)。

Philip 在对 Richards 方程进行系统研究的基础上, 得出 Philip 入渗模型^[13]。该模型也是描述一维垂直入渗较为理想的模型。Philip 模型具体表示为:

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

式中, i 为入渗率 (cm/min); S 为土壤吸湿率 ($\text{cm}/\text{min}^{0.5}$); t 为入渗时间 (min); A 为常数 (cm/min)。

Kostiakov 于 1932 年提出了一个经典的经验入渗模型^[14], 虽然其参数没有明确的物理意义, 但由于其形式简单, 计算方便, 而且没有太多的条件要求, 所以应用比较广泛, 降雨入渗、积水入渗都有使用。Kostiakov 入渗模型具体表示为:

$$i(t) = t^{-b} \quad (4)$$

利用本试验数据对以上 3 个入渗模型分别拟合, 得到各个模型的回归参数 (见表 3)。

由表 3 可知, Green-Ampt 模型参数 k_s 值变化在 0.031 ~ 0.004 之间, 随土壤粘粒含量增加而递减, 说明土壤饱和导水率随粘粒含量增加而递减。 h_f 值变化在 8.6 ~ 38.7 之间, 随土壤粘粒含量增加递增, 说明湿润锋面处的吸力随粘粒含量增加递增。Philip 模型参数 A 值随土壤粘粒含量增加递减, S 值无明显规律。Kostiakov 模型 a 、 b 值也无明显规律, 但是加粘土壤 ($N_{10} \sim N_{14}$) 中 a 值有随质地变重逐渐减小的趋势。

从表 3 也可以看出, 试验土壤在 $\alpha = 0.01$ 水平上 Green-Ampt 模型参数拟合相关系数 R^2 较小, 除 N_9 外, 都小于 0.9, 最小的是 0.756; Philip 模型参数拟合相关系数较好, 变化在 0.854 ~ 0.952 之间; Kostiakov 模型参数拟合相关系数最大, 变化在 0.911 ~ 0.962 之间, 达到极显著水平。这说明 Green-Ampt 模型模拟本试验过程效果一般, Philip 模型较好, Kostiakov 模型最好。

为了进一步分析 3 个模型的精度,采用 400 min 计算的累积入渗量与实测的累积入渗量进行比较。以实测值为 x 轴,计算值为 y 轴,将 0 ~ 400 min 各

计时时刻的累积入渗量绘于坐标中,用线性回归的方法得出计算值与实测值的关系方程(见表 4)。

表 3 试验土壤 3 个模型参数及精度检验 ($\alpha = 0.01$)

Table 3 Model parameters of experimental soils

粘粒含量 Clay content (%)	Green-Ampt 模型 Green-Ampt Model			Philip 模型 Philip Model			Kostiakov 模型 Kostiakov Model		
	k_s	h_f	R^2	A	S	R^2	a	b	R^2
N ₁	0.031	8.6	0.791	0.015	0.46	0.897	0.2079	0.49	0.916
N ₂	0.025	9.6	0.874	0.014	0.595	0.95	0.2812	0.62	0.936
N ₃	0.025	11.2	0.868	0.013	0.557	0.849	0.2710	0.641	0.943
N ₄	0.024	12.2	0.833	0.013	0.575	0.921	0.2979	0.679	0.950
N ₅	0.023	13.1	0.817	0.013	0.591	0.854	0.2748	0.666	0.911
N ₆	0.023	13.3	0.883	0.012	0.528	0.952	0.3027	0.683	0.961
N ₇	0.019	13.3	0.851	0.012	0.460	0.904	0.2582	0.651	0.924
N ₈	0.018	14.4	0.776	0.011	0.542	0.907	0.2518	0.642	0.924
N ₉	0.016	15.2	0.954	0.009	0.568	0.939	0.2427	0.615	0.937
N ₁₀	0.013	16.7	0.823	0.009	0.444	0.918	0.2618	0.720	0.928
N ₁₁	0.010	24.1	0.756	0.008	0.377	0.906	0.1919	0.640	0.946
N ₁₂	0.009	26.4	0.862	0.008	0.390	0.909	0.1936	0.632	0.949
N ₁₃	0.006	28.5	0.896	0.004	0.269	0.949	0.1854	0.655	0.962
N ₁₄	0.004	38.7	0.780	0.003	0.324	0.884	0.1596	0.616	0.933

表 4 试验土壤 3 个模型计算 400 min 累积入渗量与实测值关系回归方程 ($\alpha = 0.01$)

Table 4 The relationship between calculated and measured 400-min cumulative infiltration

粘粒含量 Clay content (%)	Green-Ampt 模型 Green-Ampt model		Philip 模型 Philip model		Kostiakov 模型 Kostiakov model	
	关系方程 Relation equation	R^2	关系方程 Relation equation	R^2	关系方程 Relation equation	R^2
N ₁	$I_G = 1.0999I$	0.9847	$I_P = 0.9556I$	0.9959	$I_K = 1.0234I$	0.9988
N ₂	$I_G = 1.1582I$	0.9829	$I_P = 1.0819I$	0.9891	$I_K = 1.0392I$	0.9991
N ₃	$I_G = 1.0396I$	0.9878	$I_P = 0.9701I$	0.9871	$I_K = 0.9853I$	0.9998
N ₄	$I_G = 1.22I$	0.9893	$I_P = 1.0364I$	0.986	$I_K = 1.009I$	0.9996
N ₅	$I_G = 1.1747I$	0.988	$I_P = 1.0975I$	0.9831	$I_K = 1.0041I$	0.9992
N ₆	$I_G = 1.1005I$	0.9904	$I_P = 0.9935I$	0.9913	$I_K = 0.9948I$	0.9998
N ₇	$I_G = 1.0753I$	0.9854	$I_P = 0.9836I$	0.9946	$I_K = 0.9783I$	0.9997
N ₈	$I_G = 1.0208I$	0.9923	$I_P = 1.0265I$	0.9819	$I_K = 1.0158I$	0.9992
N ₉	$I_G = 1.0695I$	0.981	$I_P = 1.0308I$	0.9856	$I_K = 0.9995I$	0.9998
N ₁₀	$I_G = 0.9454I$	0.9982	$I_P = 1.0632I$	0.9932	$I_K = 0.9717I$	0.999
N ₁₁	$I_G = 0.9578I$	0.9974	$I_P = 0.9545I$	0.9863	$I_K = 0.9799I$	0.9997
N ₁₂	$I_G = 0.8832I$	0.9876	$I_P = 0.9289I$	0.9809	$I_K = 0.9992I$	0.9996
N ₁₃	$I_G = 1.008I$	0.9961	$I_P = 0.9214I$	0.9994	$I_K = 0.9789I$	0.9998
N ₁₄	$I_G = 0.9378I$	0.9893	$I_P = 0.8724I$	0.9972	$I_K = 0.9959I$	0.9997

表中, I_G 、 I_P 、 I_K 分别代表用 Green-Ampt 模型、Philip 模型、Kostiakov 模型计算的 400 min 累积入渗量; R^2 代表相关系数。由拟合结果可知,各处理 Green-Ampt 模型计算值的相对误差较大,平均为 8.9%,最大达到 22%; Philip 模型的相对误差较前者小,平均为 5.4%,最大值为 12.8%; Kostiakov 模型

的最小,平均值只有 1.5%,最大值为 3.9%。这进一步证实了前述结论,即对于本试验 Kostiakov 模型最好,Philip 模型次之,Green-Ampt 模型不太理想。

3 结 论

1) 土壤粘粒含量对土壤入渗能力有较大影响,

随粘粒含量增多,入渗能力递减。稳定入渗速率、90 min 累积入渗量与土壤粘粒(<0.001 mm)及物理性粘粒(<0.01 mm)含量分别呈幂函数负相关、指数负相关关系,但与粘粒含量的相关性更为显著。

2) 根据对 Green-Ampt 模型、Philip 模型、Kostiakov 模型 3 个模型的参数拟合及累积入渗量计算,发现在本试验中 Kostiakov 模型拟合精度最好,Philip 模型次之,Green-Ampt 模型较差,说明 Kostiakov 模型对于本试验的均质土体确实是个比较实用的模型。

参考文献:

- [1] Bouwer H. Intake rate: Cylinder infiltrometer[C]// Klute A. Methods of Soil Analysis. Monograph No. 9 Am Soc Agron Madison, WI, 1986: 825—843.
- [2] Hillel D. Environmental Soil Physics[M]. New York: Academic Press, 1998: 385—426.
- [3] 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: 77—131, 321—376.
- [4] 李雪转,樊贵盛.土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J].农业工程学报,2006,22(3): 188—190.
- [5] 陈瑶,张科利,罗利芳,等.黄土坡耕地弃耕后土壤入渗变化规律及影响因素[J].泥沙研究,2005,(5): 45—50.
- [6] 袁建平,张素丽,张春燕,等.黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异[J].土壤学报,2001,38(4): 579—583.
- [7] 田积莹.黄土地区土壤的物理性质与黄土成因的关系[J].中国科学院西北水保所集刊,1987,(5): 1210—1212.
- [8] 樊贵盛,邢述彦,赵生义.土壤质地对间歇入渗减渗效果的影响[J].农业工程学报,1998,14(2): 250—252.
- [9] 张振华,杨润亚,蔡焕杰,等.土壤质地、密度及供水方式对点源入渗特性的影响[J].农业系统科学与综合研究,2004,20(2): 81—84.
- [10] 解文艳,樊贵盛.土壤质地对土壤入渗能力的影响[J].太原理工大学学报,2004,35(5): 537—540.
- [11] 李雪转,樊贵盛.土壤有机质含量对土壤入渗能力影响的试验研究[J].太原理工大学学报,2006,37(1): 59—62.
- [12] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics, flow of air and water through soils[J]. J Agr Sci, 1911,76(4): 1—24.
- [13] Philip J R. The theory of infiltration about sorptivity and algebraic infiltration equations[J]. Soil Sci, 1957,84(4): 257—264.
- [14] Kostiakov A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration[J]. Soil Sci, 1932,97(1): 17—21.

Effects of soil clay particle content on soil infiltration capacity by simulated experiments

LI Zhuo¹, WU Pu-te², FENG Hao², ZHAO Xi-ning², HUANG Jun³

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwestern A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to investigate the influence of soil clay particle content on soil infiltration capacity, the researchers compounded some kinds of soils by adding sand and clay to natural soil, and then simulated the influence of artificial soil clay particle content on soil infiltration capacity by water accumulated column infiltration. The results showed that: (1) clay particle content has a great effect on soil infiltration capacity, the more clay contained, the weaker infiltration capacity. The stable infiltration rate decreased from 0.0169 cm/min to 0.0068 cm/min and 90-min cumulative infiltration decreased from 3.66 cm to 2.02 cm as clay particle (<0.001 mm) content increased from 6% to 40.4%. (2) The stable infiltration rate and 90-min cumulative infiltration have negative power and exponential function relationship with clay particle content and so physical clay particle (<0.01 mm) content. But the correlation with clay particle content was better. (3) Through fitting parameters of Green-Ampt model, Philip model, Kostiakov model and using these models to calculate the cumulative infiltration, the researchers found that Kostiakov model has highest fitting accuracy, Philip model took second place and Green-Ampt model was worst in this experiment. It illustrated that Kostiakov model is more practical.

Keywords: soil water infiltration; soil clay particle content; infiltration model