

文章编号: 1674-9669(2015)06-0125-07  
DOI: 10.13264/j.cnki.ysjx.2015.06.023

## 离子型稀土一维垂直入渗规律 及最大粒径的影响试验研究

金解放, 陶伟, 邱灿, 郭钟群

(江西理工大学建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

**摘 要:**为了研究不同最大粒径离子型稀土土样对入渗规律的影响,利用自制的试验装置进行离子型稀土垂直入渗试验.水头高度恒定为 6 cm,土样最大粒径分别为 2.36 mm、1.18 mm、0.6 mm 和 0.3 mm.在试验结果的基础上,利用改进的 Green-Ampt 模型分析离子型稀土入渗的饱和导水率和基质吸力.结果表明,随着入渗时间的递增,累积入渗深度和湿润锋运移速率分别呈“快速增加-缓慢发展”和“快速减小-缓慢发展”的趋势.湿润锋运移速率与入渗时间之间满足幂函数关系,土样最大粒径对幂函数参数有较大影响.入渗率与湿润锋倒数之间具有良好的线性相关性.随着土样最大粒径的增加,饱和导水率和基质吸力也逐渐增加,二者与最大粒径之间呈指数函数关系.

**关键词:**离子型稀土;入渗;最大粒径;饱和导水率;基质吸力

**中图分类号:**TD865;TU411.1 **文献标志码:**A

## Experimental research on the one dimensional vertical infiltration rule of ionic rare earth and the effects of maximum particle size

JIN Jiefang, TAO Wei, QIU Can, GUO Zhongqun

(School of Architectural and Surveying and Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:**In order to study the infiltration laws of ionic type rare earth and the influences of maximum particle size on infiltration laws, vertical infiltration tests on ionic rare earth were carried out by self-made testing equipment with constant water head height being 6cm, and the maximum grain sizes of samples being 0.3mm, 0.6 mm, 1.18 mm and 2.36 mm respectively. Based on the experimental results, the ionic type rare earth's saturated hydraulic conductivity and matric suction of infiltration were analyzed by the modified Green-Ampt model. The results show that the infiltration cumulative depth indicates a trend of “rapidly increasing, then slowly developing”, and changing rate of wetting front, however, has a trend of “sharply decreasing, then slowly developing” with the increasing infiltration time. The relationship between wetting front changing rate and infiltration time is applied to power function, and maximum particle size of soil samples exerts a considerable influence on the parameters of power function. The infiltration rate and the reciprocal of the wetting front have a good linear correlation. Saturated hydraulic conductivity and matric suction increase with the increasing of soil sample particle size, and the relationship between both of them and the maximum particle sizes is exponential.

**Keywords:**ionic rare earth; infiltration; maximum particle size; saturated hydraulic conductivity; matric suction

收稿日期:2015-06-11

基金项目:江西省自然科学基金资助项目(20151BAB206025)

作者简介:金解放(1977-),男,博士,副教授,主要从事岩土工程分析方面的教学和科研工作,E-mail:jif\_chang@126.com.

南方离子型稀土属于离子吸附型矿床,是关系国家安全和发展的最重要战略资源之一,属于国家保护性开采矿产资源.其开采工艺先后有池浸、堆浸和原地浸,目前大力推广原地浸开采工艺<sup>[1-3]</sup>.

与其他矿种溶浸技术研究相比<sup>[4-7]</sup>,离子型稀土原地浸开采工艺的理论研究落后于工程实际应用.在实际开采过程中,多凭经验确定注液井网参数和注液速度,造成资源浸取回收率不确定性非常大,有的可达 90%,有的甚至不足 10%<sup>[8]</sup>,急需开展原地浸出的基础理论研究工作.基于此,罗嗣海等<sup>[9-10]</sup>研究了浸矿过程中矿土渗透性和强度的变化规律,取得了许多有益结果.然而,对离子型稀土非饱和入渗规律,特别是不同最大粒径对入渗的影响特性研究较少.研究离子型稀土的入渗规律,不仅有利于完善离子型稀土原地浸开采工艺的理论体系,也有利于南方离子型稀土原地浸标准化开采的实施.

入渗是指水进入土壤(体)的过程,许多工程问题与入渗有关,农田灌溉、降雨地表径流、农药、污染物在土体中的迁移、边坡稳定及南方离子型稀土矿山的开采,都涉及到土壤的入渗.土壤入渗规律研究方法以试验研究为主,在试验的基础上提出假说或归纳试验规律,建立或改进土壤入渗模型.经典的入渗模型主要有 Green-Ampt 模型<sup>[11]</sup>、Horton 模型<sup>[12]</sup>和 Philip 模型<sup>[13]</sup>,Kostiakov 模型<sup>[14]</sup>.Green-Ampt 模型最初应用于垂直入渗的分析,基于试验装置进行室内相似模拟,对于研究水分位移以及湿润锋的移动范围有推动作用.郭向红等<sup>[15]</sup>研究了不同入渗水头对水分入渗特性的变化规律,将入渗水头对入渗的影响归结为对概化饱和区导水率的影响,从而改进了 Green-Ampt 模型,利用改进的模型计算得到的入渗率和实测值吻合较好.

自制一套离子型稀土入渗试验装置,对 4 组不同最大粒径稀土土样进行入渗试验,分析累积入渗深度和湿润锋运移速率随时间的变化规律,得到湿润锋运移速率随时间变化的经验模型.借助改进后的 Green-Ampt 模型,分析入渗率与湿润锋倒数之间的关系,重点研究最大粒径对离子型稀土入渗基质吸力的影响.研究结果有助于完善离子型稀土原地浸开采的理论体系.

## 1 入渗模型

根据 Green-Ampt 入渗模型中土壤含水率分布的基本假定,将土柱垂直入渗过程简化为理想模型.假定土壤入渗时存在明显的湿润锋面且水平,湿润锋

面将土壤分为饱和区和干土区.湿润锋后面为饱和区,土壤含水率为饱和含水率  $\theta_s$ ,导水率为饱和导水率  $k_s$ ,湿润锋前面为干土区,土壤含水率为初始含水率  $\theta_i$ .利用水量平衡原理得到试验中  $\Delta t$  时间内入渗进入到土柱的水量和湿润锋之间的关系

$$\Delta I = (\theta_s - \theta_i) \times z_f \quad (1)$$

式(1)中: $\Delta I$  为时段内累计入渗量,mm; $\theta_s$  为稀土饱和含水率; $\theta_i$  为稀土初始含水率; $z_f$  为湿润锋深度,cm.

累计入渗量和入渗率之间具有如下关系

$$i = \frac{dI}{dt} \quad (2)$$

式(2)中: $I$  为累计入渗量,cm; $i$  为入渗率,cm/min; $t$  为时间,min.

将式(1)代入式(2)中得到入渗率和湿润锋推进之间的关系为:

$$i = (\theta_s - \theta_i) \times \frac{dz_f}{dt} \quad (3)$$

通过达西定律可以表示为

$$i = k_s \frac{z_f + s_f + h}{z_f} \quad (4)$$

式(4)中: $k_s$  为土壤饱和导水率,cm/min; $s_f$  为湿润锋平均基质吸力,cm; $h$  为土柱表面积水深度,cm.

通过郭向红<sup>[15]</sup>将原 Green-Ampt 模型中  $k_s$  使用  $k_s(h)$  代替得到下列入渗公式

$$i = k_s(h) + k_s(h) \frac{s_f + h}{z_f} \quad (5)$$

$$i = a + bx \quad (6)$$

$$a = k_s(h) \quad (7)$$

$$s_f = \frac{b}{k_s(h)} - h \quad (8)$$

式(5)、式(6)、式(7)、式(8)中: $a$ 、 $b$  为拟合参数; $x = 1/z_f$ , $k_s$  为土壤饱和导水率,cm/min; $s_f$  为湿润锋平均基质吸力,cm.

## 2 试验装置、土样制备和试验方法

### 2.1 试验装置

入渗试验装置如图 1 所示,该装置由土柱、测压管、马氏瓶供水器和称量设备组成.其中主管为外径 50 mm,长度 2 000 mm 的有机玻璃管,测压管由水平管和垂直管通过弯头连接而成,测压管外径 20 mm.水平管之间的间距 300 mm,水平管和主管连接部分用纱布堵住,防止土样进入水平管中.从上往下第一根水平管距离主管上表面 100 mm,最下面一根水平管距离主管下表面 100 mm,其间每间隔 300 mm 分布一个测压管.溢水管分别距离上下表面为 50 mm

和 50 mm,而且垂直管面上都贴有刻度尺,其最小刻度为 1 mm.试验土柱的直径为 40 mm,高 1 890 mm,恒定水头高均为 60 mm.距离上土表面一定距离设有排水管收集径流,装置末端也设有溢水管,可以准确测出累积流出量.

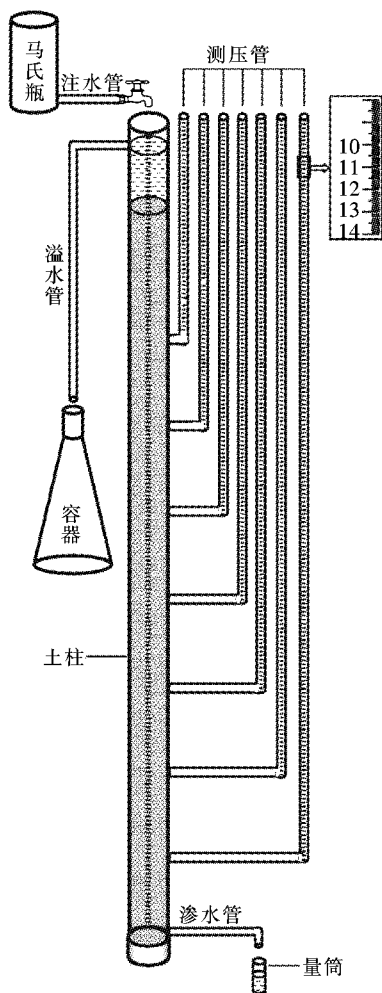


图 1 入渗试验装置

Fig.1 Device of infiltration experiment

## 2.2 土样制备

试验所需稀土均来自赣南寻乌县稀土矿山,在室内放置若干天,风化完成.分别用不同孔径(2.36 mm、1.18 mm、0.6 mm、0.3 mm)标准筛筛取,统一测定试样含水率,按土样粒径 0~2.36 mm、0~1.18 mm、0~

0.6 mm、0~0.3 mm(下文统称最大粒径 2.36 mm、最大粒径 1.18 mm、最大粒径 0.6 mm 和最大粒径 0.3 mm 土样)分组备用.

土样以 5 cm 为一层装填,每装一层后进行压实,再装填下一层,以保证上下土层接触良好,试验土柱的物理特性见表 1.

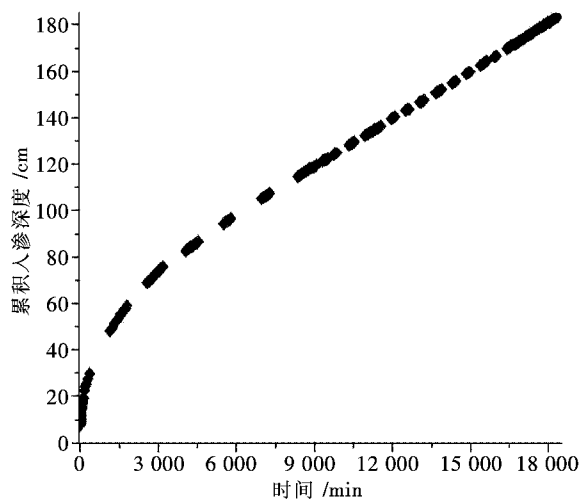
## 2.3 试验方法

积水高度由溢水管至上土表面的距离控制,从而保证恒定的水头压力,通过调节溢水管至上土表面的距离可以固定不同的水头高度,试验过程中始终保持水头高度为 6 cm.从开始注入水后,观测对象为刻度尺的读数、马氏瓶读数以及量杯中水的重量.由于前期土柱干燥,入渗速度较快记录数据的时间间隔为 1 min,以保证前期数据的精度,随着入渗时间增加记录数据的时间间隔增加到 1 h.

## 3 结果及分析

### 3.1 不同最大粒径下累积入渗深度随时间的变化规律

4 组试验均在水头高度为 6 cm 的情况下进行的.每隔一段时间观察土柱的湿润锋位置,观察不同时间下的土柱湿润锋位置,如图 2 所示.

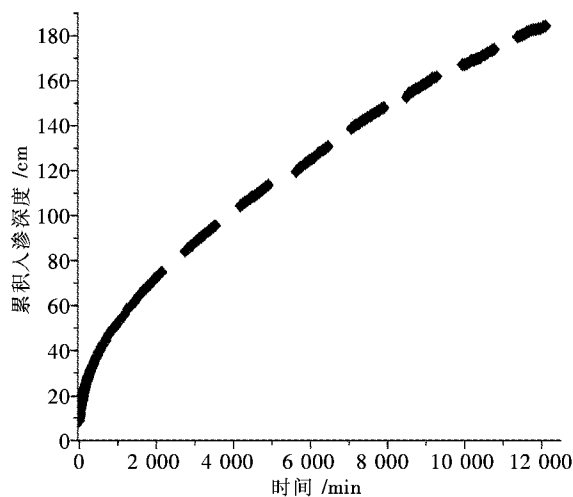


(a) 粒径 0.3 mm

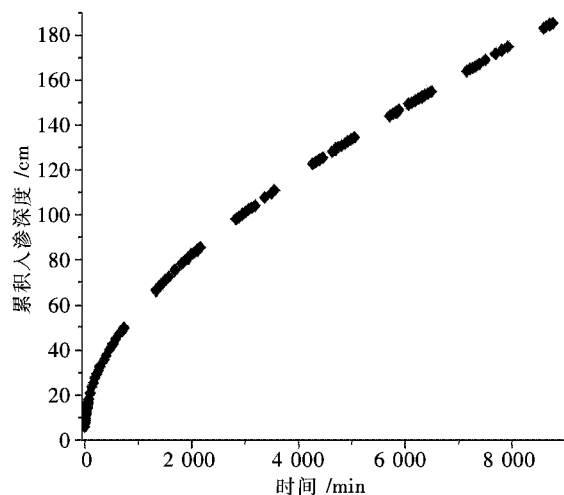
表 1 实验基本参数

Table 1 Basic parameters of experiment

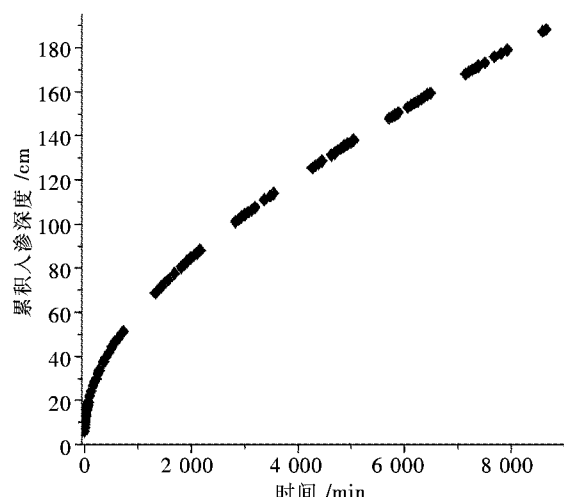
| 试验土样粒径       | 不同粒径组所占比例 /% |          |         |          |            | 饱和含水率 $\theta_s$ /% | 初始含水率 $\theta_i$ /% |
|--------------|--------------|----------|---------|----------|------------|---------------------|---------------------|
|              | 2.36~1.18    | 1.18~0.6 | 0.6~0.3 | 0.3~0.15 | 0.15~0.075 |                     |                     |
| 最大粒径 0.3 mm  | 0            | 0        | 0       | 52.78    | 47.22      | 33.23               | 6.43                |
| 最大粒径 0.6 mm  | 0            | 0        | 52.84   | 28.47    | 18.69      | 35.32               | 6.43                |
| 最大粒径 1.18 mm | 0            | 31.25    | 18.76   | 26.39    | 23.60      | 38.57               | 6.43                |
| 最大粒径 2.36 mm | 29.80        | 22.30    | 15.10   | 8.63     | 24.12      | 40.23               | 6.43                |



(b) 粒径 0.6 mm



(c) 粒径 1.18 mm



(d) 粒径 2.36 mm

图2 累积入渗深度与时间的关系

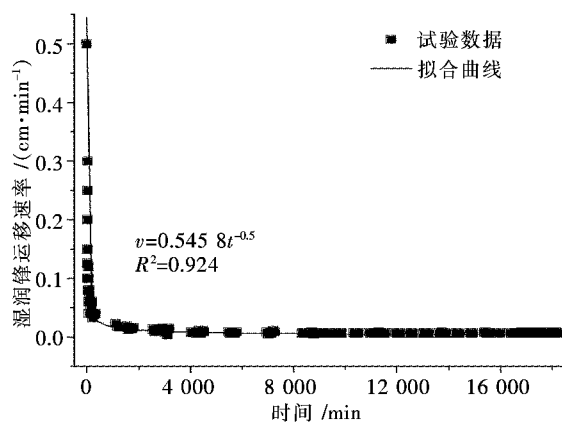
Fig.2 Relationship between cumulative infiltration depth and time

从图2中可以看出,在一维垂直入渗过程中,4种土样的湿润锋入渗深度随时间的变化趋势大致相同.随着入渗时间的增加,湿润锋累积距离也增加,且

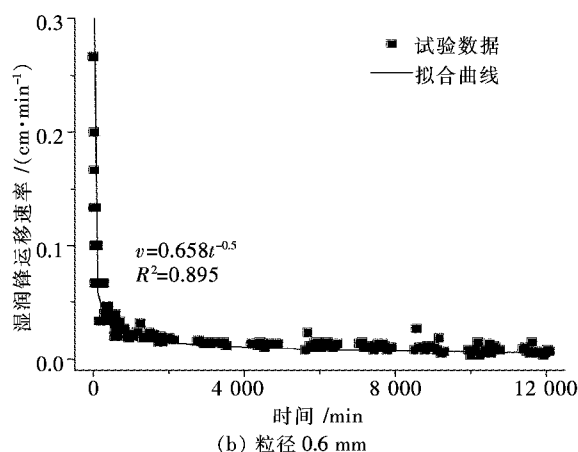
入渗初期湿润锋运移速率较快,后期逐渐减慢.

### 3.2 不同最大粒径下湿润锋运移速率随时间的变化规律

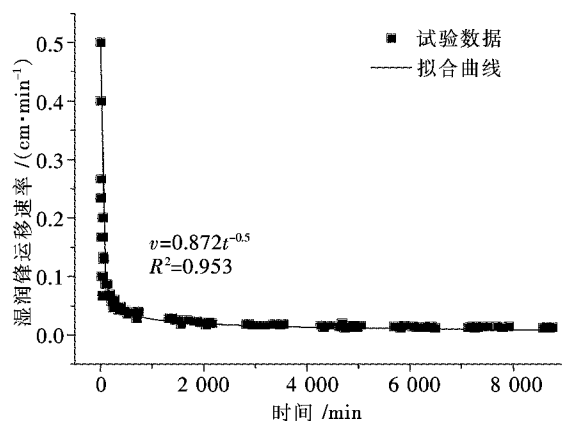
4种土样的湿润锋运移速率随时间变化如图3所示.从图3可以看出,不同最大粒径下的湿润锋运移速率随时间的变化趋势相同,先是快速减小,后是缓慢发展,最后趋于一稳定值.其变化规律基本符合幂函数关系  $v = \lambda \times t^{-0.5}$ ,其中  $v$  为湿润锋运移速率,单位为  $\text{cm}/\text{min}$ ;  $t$  为入渗时间,单位为  $\text{min}$ ;  $\lambda$  为待定参数,单位为  $\text{cm} \cdot \text{min}^{0.5}$ .利用该函数拟合湿润锋运移速率随时间变化的试验数据,拟合结果如表2所示.



(a) 粒径 0.3 mm



(b) 粒径 0.6 mm



(c) 粒径 1.18 mm

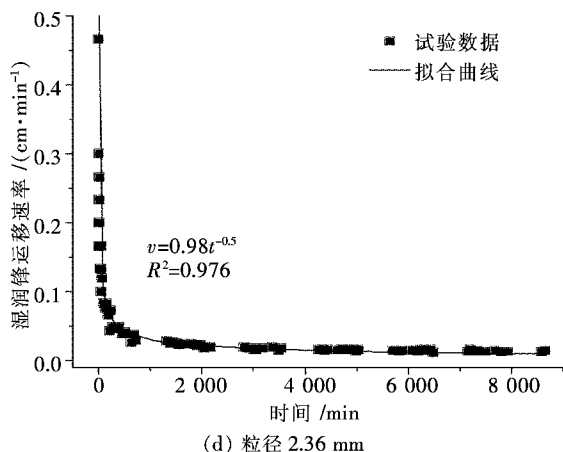


图3 湿润锋运移速率与时间的关系

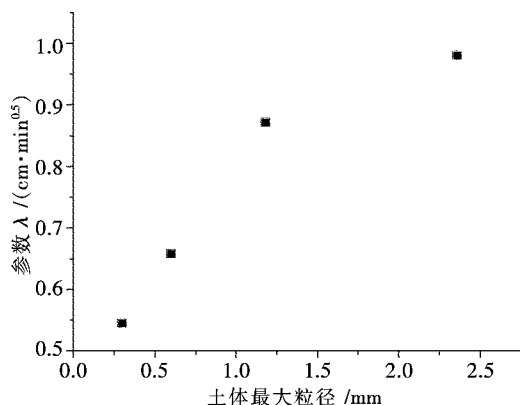
Fig.3 Relationship between wetting front migration rate and time

表2 湿润锋运移速率与时间关系的拟合参数

Table 2 Fitting parameters of wetting front migration rate and time

| 最大粒径 /mm | 系数 $\lambda$ /(cm·min <sup>0.5</sup> ) | 拟合相关系数 $R^2$ |
|----------|----------------------------------------|--------------|
| 0.3      | 0.545 8                                | 0.924        |
| 0.6      | 0.658 0                                | 0.895        |
| 1.18     | 0.872 0                                | 0.953        |
| 2.36     | 0.980 0                                | 0.976        |

由表2的拟合结果可以看出,最大粒径不同的稀土土样,湿润锋运移速率随时间变化的模型参数 $\lambda$ 也不同,参数 $\lambda$ 随最大粒径的变化趋势如图4所示。从图4可以看出,随最大粒径的增加,参数 $\lambda$ 先是快速增大,而后缓慢增大。表明,土样最大粒径对其入渗速率有较大的影响。

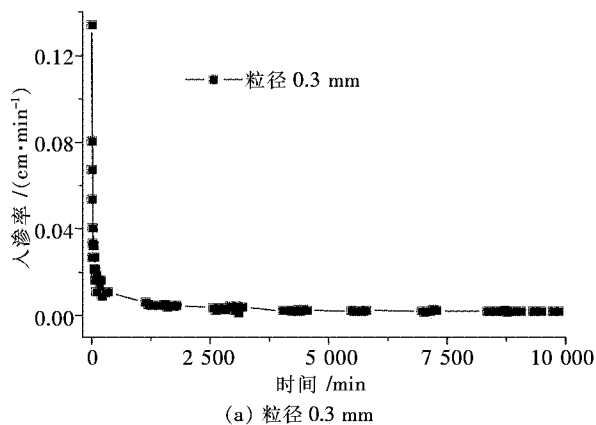
图4 参数 $\lambda$ 随土体最大粒径的变化趋势Fig.4 Parameter  $\lambda$  trends with maximum particle size of soil

分析认为,造成上述现象的原因有3个方面:一是入渗的初始阶段,由于土样具有初始水头压力(本文的水头压力为6 cm)和一定的基质吸力,二者共同影响着土体的入渗速率,导致清水快速入渗。二是随

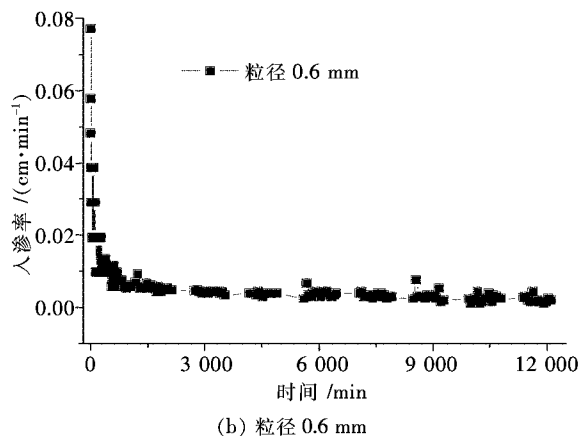
着入渗深度的增加,土样对水分迁移具有一定的阻碍作用,即相对初始阶段的恒定水头压力,土样具有一定的渗透系数;入渗深度越大,土样对水分迁移的累积阻碍作用越大,导致其入渗湿润锋运移速率呈整体减小趋势,而水头压力的影响逐渐减弱;具有不同最大粒径的土样具有不同的渗透系数,进而导致具有不同的湿润锋运移速率。三是在初始水头压力和基质吸力共同作用下的入渗过程中,不可避免地造成土样中微小颗粒发生迁移,以及造成土样被“压实”的现象,进而导致其湿润锋运移速率降低。

### 3.3 不同最大粒径下入渗率随时间的变化规律

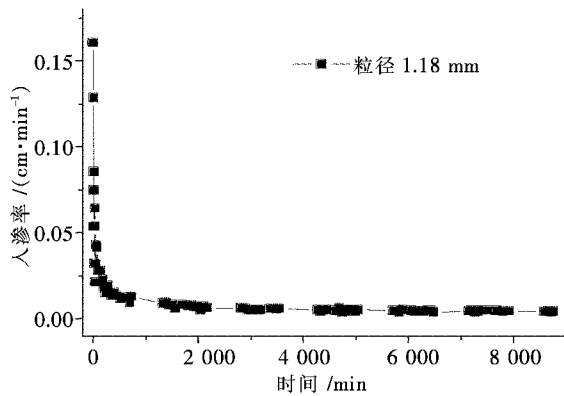
根据 Green-Ampt 模型,利用不同时刻的湿润锋距离,根据式(3)求得不同粒径下稀土入渗率随时间变化的关系,如图5所示。从图5中可以看出,不同粒径下的入渗率随时间的变化趋势相同,在入渗过程的最初阶段,稀土具有很高的入渗率,随着时间的推移,稀土的入渗性能迅速下降,最大粒径不同的土样,其入渗速率不同。例如在入渗的初始60 min内,入渗率快速下降;入渗时间到2000 min左右时,每种土样的入渗率基本保持稳定,最大粒径为0.3 mm、0.6 mm、1.18 mm和2.36 mm的土样的入渗率分别约为0.002 cm/min、0.002 2 cm/min、0.004 4 cm/min、0.004 8 cm/min。原因与影响湿润锋运移速率的相同,在此不再赘述。



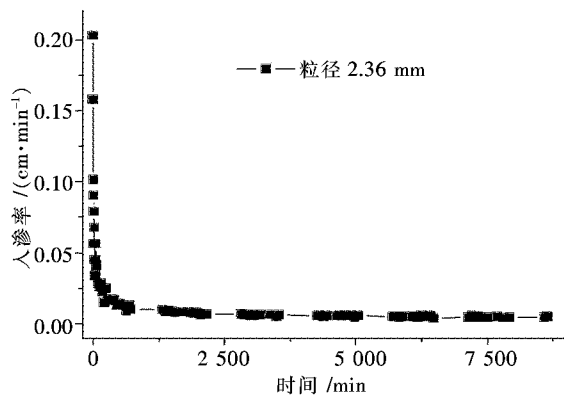
(a) 粒径 0.3 mm



(b) 粒径 0.6 mm



(c) 粒径 1.18 mm



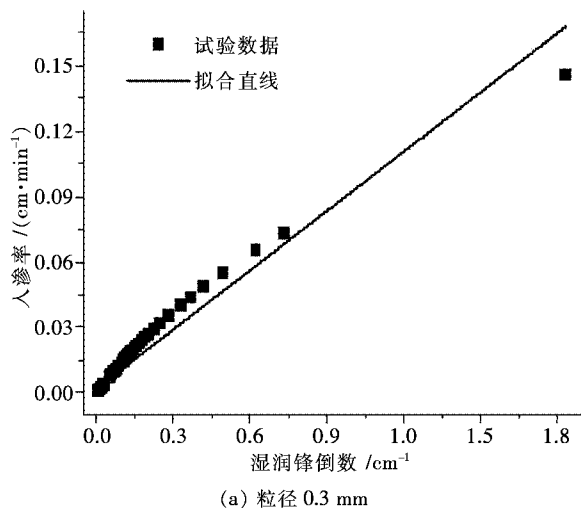
(d) 粒径 2.36 mm

图 5 入渗率随时间的变化关系

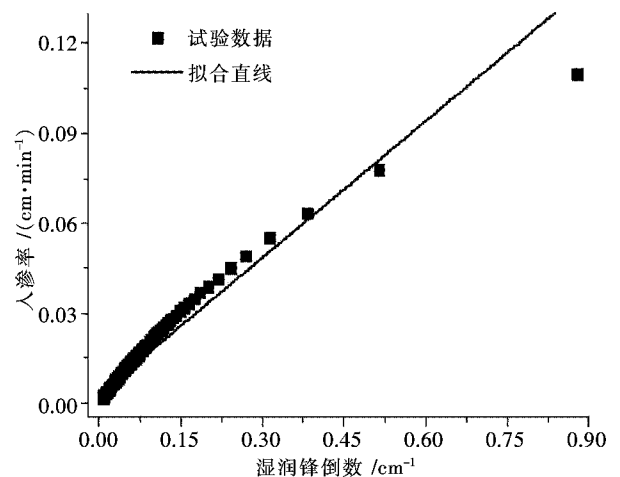
Fig.5 Relationship of infiltration rate with time

### 3.4 不同最大粒径下湿润锋倒数与入渗率的关系

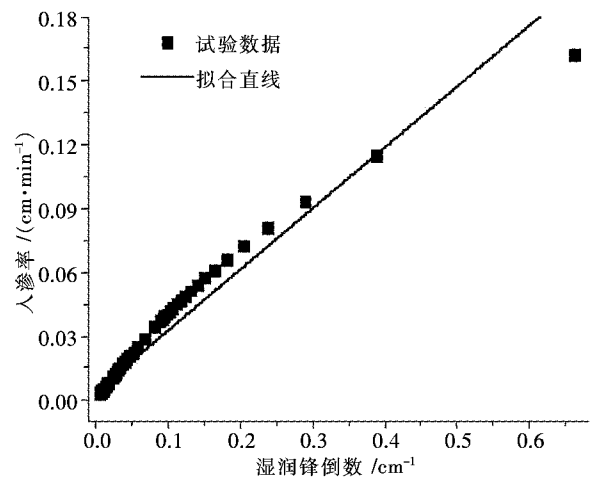
根据试验结果,不同土样的入渗率与湿润锋倒数的关系如图 6 所示,并按式(6)进行拟合,按式(7)和式(8)求出不同粒径下所对应的饱和导水率值以及基质吸力,结果如表 3 所示.由表 3 可以看出,在相同的水头压力条件下,土样最大粒径改变时,其饱和导水率也发生变化,随着最大粒径的增大,其饱和导水率和基质吸力均逐渐增加.



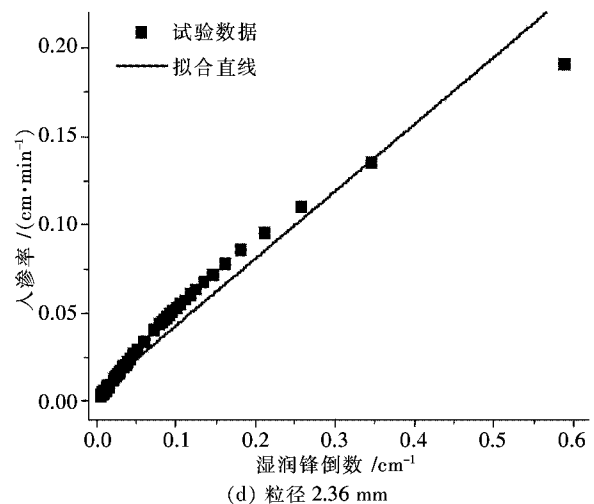
(a) 粒径 0.3 mm



(b) 粒径 0.6 mm



(c) 粒径 1.18 mm



(d) 粒径 2.36 mm

图 6 入渗率与湿润锋倒数之间的关系

Fig.6 Relationship between infiltration rate and wetting front

根据表 3 得到的不同土样最大粒径对应的饱和导水率和基质吸力的关系,用指数函数分别拟合饱和导水率和基质吸力与最大粒径的关系,结果如图 7 所示.由图 7 可以看出,二者与土样最大粒径的关系都

表3 入渗率和湿润锋倒数的拟合结果  
Table 3 Fitting results of infiltration rate and wetting front reciprocal

| 最大粒径<br>/mm | 系数 $b$<br>/( $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ ) | 饱和导水率 $k_s$<br>/( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) | 基质吸力 $s_f$<br>/cm | 相关系数<br>$R^2$ |
|-------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------|---------------|
| 2.36 mm     | 0.38                                               | 0.005                                                 | 70.0              | 0.96          |
| 1.18 mm     | 0.286                                              | 0.004                                                 | 65.5              | 0.96          |
| 0.6 mm      | 0.152                                              | 0.002 85                                              | 47.3              | 0.95          |
| 0.3 mm      | 0.09                                               | 0.001 7                                               | 46.9              | 0.96          |

可以用指数函数拟合,其中饱和导水率的拟合效果较好,而基质吸力的拟合效果相对较差.根据此经验公式可以推测不同最大粒径稀土的饱和导水率和基质吸力.

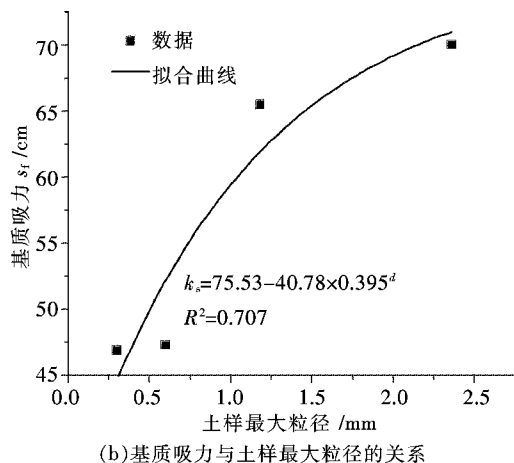
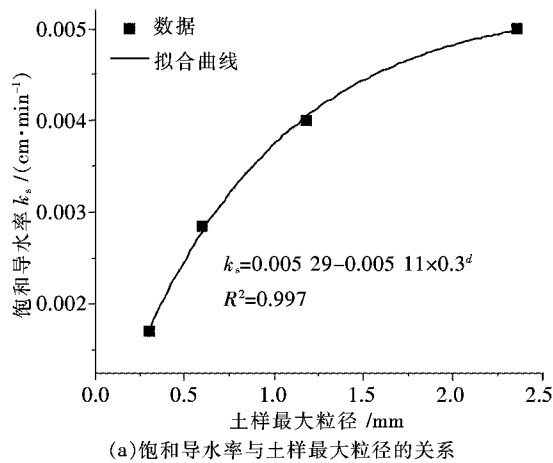


图7 饱和导水率和基质吸力分别与最大粒径的关系

Fig.7 Relationship between saturated hydraulic conductivity and matrix suction and maximum particle size

## 4 结论

在恒定水头高度为6 cm的条件下,对4组不同最大粒径下的稀土矿进行了室内一维垂直入渗试验,研究了不同最大粒径下的入渗规律,结果表明:

1)4种最大粒径土样的湿润锋入渗深度随着时间的变化趋势大致相同.随着入渗时间的增加,湿润锋累积入渗深度呈现先快速增加,后缓慢发展的趋势;即湿润锋运移速率值呈先是快速减小,后是缓慢发展的趋势.

2)湿润锋运移速率与时间之间的关系符合幂函数关系  $v = \lambda \times t^{-0.5}$ ,不同最大粒径的土样,其参数  $\lambda$  不同,随着最大粒径的增大,参数  $\lambda$  的值也逐渐增加,表明土样最大粒径影响土样入渗运移速率.

3)入渗率与湿润锋倒数之间具有良好的线性相关性;根据线性拟合结果可以求得土样入渗时的饱和导水率和基质吸力;随着土样最大粒径的增加,饱和导水率和基质吸力值都逐渐增大,二者与最大粒径之间满足指数函数关系.表明土样最大粒径对入渗过程中的饱和含水率和基质吸力都有影响.

## 参考文献:

- [1] 汤涌忠,李茂楠.离子吸附型稀土矿原地浸采矿法[J].矿业研究与开发,1997,17(2):1-4.
- [2] 吴爱祥,尹升华,李建峰.离子型稀土矿原地溶浸溶液渗流规律的影响因素[J].中南大学学报(自然科学版),2005,36(3):506-510.
- [3] 池汝安,田君,罗仙平,等.风化壳淋积型稀土矿的基础研究[J].有色金属科学与工程,2012,3(4):1-13.
- [4] 安莲英,殷辉安,唐明林.溶浸开采深埋藏杂卤石可行性及溶浸动力学模拟[J].地质学报,2010,84(11):1690-1696.
- [5] 梁卫国,赵阳升,徐素国,等.原位溶浸采矿理论研究[J].太原理工大学学报,2012,43(3):382-387.
- [6] 叶勇军,丁德馨,李广悦,等.堆浸铀矿堆液体饱和渗流规律的研究[J].岩土力学,2013,34(8):2243-2248.
- [7] 李青松,吴爱祥,姜立春.堆中布液浸出高泥矿堆的机理研究[J].矿冶工程,2003,23(2):23-26.
- [8] 李永绣,周新木,刘艳珠,等.离子吸附型稀土高效提取和分离技术进展[J].中国稀土学报,2012,30(3):257-264.
- [9] 罗嗣海,袁磊,王观石,等.浸矿对离子型稀土矿强度影响的试验研究[J].有色金属科学与工程,2013,4(3):58-61.
- [10] 罗嗣海,黄群群,王观石,等.离子型稀土浸矿过程中渗透性变化规律的试验研究[J].有色金属科学与工程,2014,5(2):95-99.
- [11] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics, part I: Flow of air and water through soils[J]. Journal of Agricultural Sciences, 1911, 4(1):1-24.
- [12] Horton R. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity[J]. Soil Science Society America Proceedings, 1940 (3): 399-417.
- [13] Philip J R. The theory of infiltration[J]. Soil Science, 1957, 83(5): 345-357.
- [14] Kostiakov A. 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 purpose of melioration[C]//Moscow: Transaction Communication International Society Soil Science 6th, 1932: 17-21.
- [15] 郭向红,孙西欢,马娟娟,等.不同入渗水头条件下的 Green-Ampt 模型[J].农业工程学报,2010,26(3):64-68.