

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

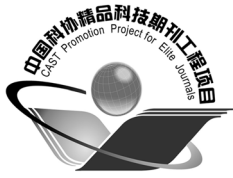


中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

第52卷 第6期

Vol.52 No.6



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 6 期 2015 年 11 月

目 次

综述与评论

- 耕地地力评价指标体系构建中的问题与分析逻辑…………… 赵彦锋 程道全 陈 杰等 (1197)
 蚯蚓对土壤温室气体排放的影响及机制研究进展…………… 卢明珠 吕宪国 管 强等 (1209)

研究论文

- 高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素… 杨 帆 黄来明 李德成等 (1226)
 中国中、东部典型县域土壤与地表水体多样性的粒度效应及关联性…………… 任圆圆 张学雷 (1237)
 渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征…………… 于 洋 赵业婷 常庆瑞 (1251)
 黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演…………… 李 萍 赵庚星 高明秀等 (1262)
 干湿交替对黄土崩解速度的影响…………… 王 健 马 璠 张鹏辉等 (1273)
 晋陕蒙接壤区露天矿层状土壤水分入渗特征与模拟…………… 吴奇凡 樊 军 杨晓莉等 (1280)
 旱作褐土中氧化铁的厌氧还原与光合型亚铁氧化特征…………… 孙丽蓉 王旭刚 徐晓峰等 (1291)
 流动电位法研究高岭石胶体对包铝石英砂zeta电位的影响 …………… 李忠意 徐仁扣 (1301)
 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析 …………… 于 飞 施卫明 (1311)
 太行山山麓平原30年间土壤养分与供肥能力变化 …………… 刘建玲 贾 可 廖文华等 (1325)
 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性…………… 杨 文 周脚根 王美慧等 (1336)
 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征…………… 李红林 贡 璐 朱美玲等 (1345)
 东北平原土壤硒分布特征及影响因素…………… 戴慧敏 宫传东 董 北等 (1356)
 浙江南部亚热带森林土壤植硅体碳的研究…………… 林维雷 应雨骐 姜培坤等 (1365)
 土壤非多次叠加污染对蚯蚓的毒性效应…………… 马静静 钱新春 张 伟等 (1374)
 有机肥对黄瓜枯萎病的防治效果及防病机理研究…………… 赵丽娅 李文庆 唐龙翔等 (1383)
 滴灌枸杞对龟裂碱土几种酶活性的改良效应…………… 张体彬 康跃虎 万书勤等 (1392)
 石羊河流域中下游浅层地温变化及其对气温变化的响应…………… 杨晓玲 丁文魁 马中华等 (1401)
 高放废物处置库预选场址包气带土壤渗透性研究…………… 李杰彪 苏 锐 周志超等 (1412)

研究简报

- 基于TM数据的黑土有机质含量空间格局反演研究 …………… 宋金红 吴景贵 赵欣宇等 (1422)
 陕西省玉米土壤肥力与施肥效应评估…………… 单 燕 李水利 李 茹等 (1430)
 宇宙射线土壤水分观测方法在黄土高原草地植被的应用…………… 赵 纯 袁国富 刘 晓等 (1438)

信息

- 《土壤学报》入选“2015期刊数字影响力100强”…………… (1437)

封面图片：滴灌枸杞改良龟裂碱土重度盐碱荒地（由张体彬提供）

DOI: 10.11766/trxb201412010605

晋陕蒙接壤区露天矿层状土壤水分入渗特征与模拟*

吴奇凡¹ 樊军^{2†} 杨晓莉¹ 潘雅文¹ 王亚飞³ 乔艳琴¹ 王胜³

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 西北农林科技大学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)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 分析4种不同结构层状土水分入渗规律, 为晋陕蒙接壤区露天矿排土场建设筛选合适的层状土体。设置沙土、砒砂岩、黄绵土和红黏土4种均质土柱以及黄-沙-红、黄-红-沙、沙-黄-砒、黄-砒-沙4种层状土, 借助室内土柱自动观测系统测定矿区土壤的入渗过程, 通过入渗速率、累积入渗量、湿润锋运移、剖面含水量变化分析不同结构层状土入渗特征, 结合晋陕蒙接壤区自然条件, 评价适合排土场建设的层状土体。结果表明: 黄-沙-红、沙-黄-砒型层状土在短时间内能储存大量水分, 且第三层土体阻水作用强, 黄-沙-红型层状土下层红黏土阻水效果尤其显著, 这两种层状土体是矿区排土场较理想的新土体结构。但是, 黄-红-沙型层状土入渗速率慢, 在强降雨条件下不能使水分迅速入渗。黄-砒-沙型层状土湿润锋到达第三层土体后运移速率仍很快, 阻水效果差, 水分容易渗漏到深层土壤, 这两种层状土结构不宜应用到晋陕蒙矿区排土场建设中。最后探讨了HYDRUS-1D对入渗过程的模拟, 利用均质土剖面含水量反演土壤水力参数模拟4种层状土的入渗过程, 得到较好的模拟效果。本文对4种层状土入渗特征的测定与模拟, 对于指导露天矿区排土场新土体构筑有一定的理论和现实意义。

关键词 层状土; 入渗; HYDRUS-1D; 矿区复垦

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A

晋陕蒙接壤地区矿产资源十分丰富, 但在煤炭的开采过程中, 土地遭到严重破坏, 生态环境可能恶化。按土地法规定, 排土场大部分区段的最终利用方向是农耕地, 然而目前排土场土壤随意堆砌, 很难达到土地开发整理的预期效果。层状土广泛用于垃圾填埋、矿区复垦, 不需要铺设造价高昂的斥水层, 就能够有效减少水分渗漏到下层土壤, 防止污染地下水, 并起到保水的作用^[1-2]。Aubertin等^[3]介绍了利用数值模拟设置最佳层状土的方法, 并模拟了具有毛管障碍的层状土阻止水分向矿区排土场的深层渗漏。任利东等^[4]与任利东和黄明斌^[5]对砂型层状土柱排水及蒸发过程的实测和模拟表明层状土能提高土体的持水能力, 并能显著降低土壤蒸发。

国内外许多学者对层状土水分入渗和溶质迁移过程进行了研究^[6-7], 毛晓敏和尚松浩^[8]提出饱和和层最小通量法计算多层土壤稳定入渗率, 王春颖等^[9]建立了针对夹砂层状土入渗的S-Green-Ampt模型, 准确模拟了层状土的入渗过程。模拟层状土的入渗过程需要了解土壤的水力性质, 实验室获取土壤水力特性参数费时费力, 且不能很好地适用田间情况^[10], 因此根据水分运动过程, 反演土壤水力参数得到广泛应用。Jhorar等^[11]研究表明在半干旱地区可以利用植物和土壤蒸散量反演土壤的水力特性参数。Šimůnek和van Genuchten^[12]根据入渗过程土壤含水量和压力水头随时间的变化反推土壤水力参数, 并且利用蒸发过程水分变化反推土壤水力参数, 两种方法相互对比结果相近, 表明根据

* 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB3-13)、国家自然科学基金项目 (51239009, 41271239) 资助

† 通讯作者, E-mail: fanjun@ms.iswe.ac.cn

作者简介: 吴奇凡 (1989—), 男, 河南宝丰人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤物理。E-mail: wqfuan@163.com

收稿日期: 2014-12-01; 收到修改稿日期: 2015-03-12

水份在土壤中运动反演土壤水力参数方法可行。

本文通过设置均质土和不同类型的层状土土柱，实测入渗过程水分运动特征，利用HYDRUS-1D结合均质土入渗过程水分变化反演土壤水力特性参数，然后模拟层状土入渗水分变化过程，并与实测值对比，分析不同类型层状土水分运动特征，对晋陕蒙露天矿合理构筑排土场新土体有一定理论和现实意义。

1 材料与方法

1.1 实验设计

供试土样采自内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗境内，4种土壤分别是沙土、砒砂岩、黄绵土和红黏土，基本物理性质如表1，通过毛管公式计算出土壤孔隙的分布状况，求得毛管孔隙度。

土柱高87 cm，共设8个处理，4个均质土，4

表1 供试土壤物理性质

Table 1 Physical properties of the experimental soils							
土壤类型 Soil type	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	黏粒 Clay (%)	容重 Bulk density (g cm^{-3})	饱和含水量 θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	毛管孔隙度 Capillary porosity (0.01 ~ 0.000 2 mm) (%)	非毛管孔隙度 Noncapillary porosity (> 0.01 mm) (%)
沙土 Sandy soil	84.3	6.4	9.3	1.61	0.34	6.0	79.1
砒砂岩 Pi-sha sandstone	58.9	20.9	20.2	1.46	0.44	6.5	50.0
黄绵土 Loessal soil	52.5	35.8	11.7	1.48	0.41	51.8	34.1
红黏土 Red clay	42.2	36.6	21.2	1.46	0.46	71.4	4.3

个层状土，每个处理3个重复，各层状土处理如图1所示。实验采用高100 cm的透明有机玻璃圆柱，有机玻璃土柱从下至上每隔10 cm安装时域反射仪探头（TDR，三针式15 cm长），每个土柱安装8个探头。时域反射连接数据采集器CR1000（Campbell Scientific Inc, Logan, UT, 美国），在数据采集器的控制下自动测量土壤含水量。有机玻璃土柱下方设有多孔板，用以排气和排水。

实验步骤：（1）沙土、砒砂岩、黄绵土、红

黏土分别按照容重1.61、1.46、1.48、1.46 g cm^{-3} 分层填装，层间打毛，土柱底层铺有滤网，以防土粒从多孔板中漏出，同时利于底部排气，尽可能减小禁锢空气对入渗的影响。（2）记录马氏瓶水位变化及湿润锋运移过程，设定数据采集器自动测量步长为2 min，自动记录土壤剖面含水量随时间的变化过程。（3）当湿润锋运移到土柱底部时，停止马氏瓶供水，入渗实验结束。所有数值取3个重复土柱的算术平均值作为该处理的值。

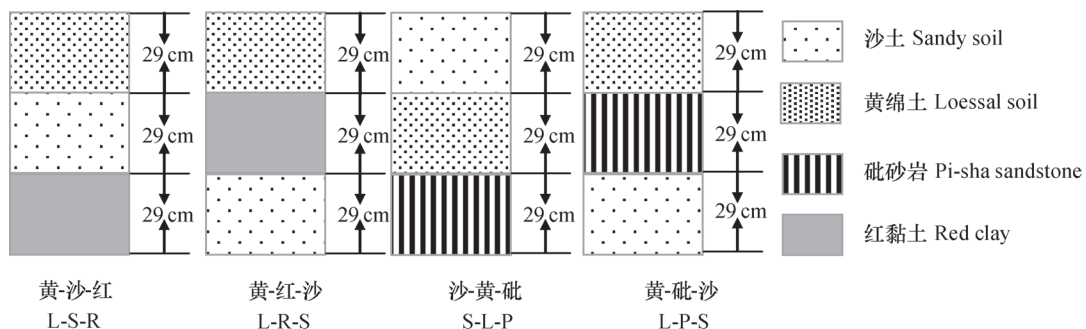


图1 各层状土处理土壤分层示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil layers in each column

1.2 水流控制方程

非饱和土壤中的水流可以用白金汉-达西定律描述, 将白金汉-达西定律代入连续方程得到Richards方程。选用一维的Richards方程作为该土壤剖面水流运动的控制方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

式中: $\theta(h)$ 为土壤含水率, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; t 为时间, min (入渗阶段); z 为空间坐标系 (向上为正), cm; K 为土壤导水率, cm min^{-1} ; h 为土壤水势, cm。

1.3 土壤水力参数

非饱和土壤水力性质 $\theta(h)$ 、 $K(h)$ 是关于 h 的高度非线性化的函数, 本文采用van Genuchten方程表示土壤水力性质, 表达式如下:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^n]^2 \quad (3)$$

其中

$$m = 1 - \frac{1}{n}, n > 1 \quad (4)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (5)$$

式中, $K(h)$ 为非饱和导水率, cm min^{-1} ; θ_r 为滞留含水量, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; θ_s 为饱和含水量, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; α 为进气吸力的倒数; n 为孔隙体积大小分布的指数, l 通常取值为0.5, 反映了土壤孔隙的连通性; K_s 为饱和导水率, cm min^{-1} ; S_e 为无量纲的有效水分含量。

1.4 初始和边界条件

初始和边界条件如下:

$$h(z, t) = \begin{cases} 3 & , t = 0, z = L \\ -10000 & , t = 0, 0 < z < L \end{cases}$$

$$h(z, t) = 3 \quad t > 0, z = L \quad (6)$$

$$q(z, t) = 0 \quad t > 0, z = 0$$

2 结果与讨论

2.1 层状入渗速率随时间的变化特征

水流在黄-沙-红、黄-红-沙、黄-砒-沙型层

状土第一层土体入渗时与沙-黄-砒型层状土入渗特征差异显著 (表2), 水流在第一层土体的运动过程与均质土的运动过程相同^[13]。水流进入第二层土体后, 无论第二层土的质地比第一层粗还是细, 入渗速度均明显减小 (图2), 其中黄-沙-红、黄-砒-沙型层状土入渗速率迅速减小, 达到稳渗, 而黄-红-沙、沙-黄-砒型层状土入渗速率缓慢减小, 逐渐达到稳渗。水流进入第三层土体后, 除黄-红-沙、黄-砒-沙型层状土入渗速率变化不明显, 其他两种结构层状土入渗速率都进一步减小, 其中沙-黄-砒型层状土入渗速率迅速减小, 达到稳渗, 黄-沙-红型层状土入渗速率缓慢减小, 逐渐稳渗 (表2, 图2)。Miyazaki^[14]研究表明只有在水流入渗速度较高时, 下层土阻碍入渗效果才比较明显, 水流在黄-红-沙型层状土第二层土的稳渗速率仅为 $0.016 \text{ cm min}^{-1}$, 这可能是造成该层状土体第三层土稳渗速率变化不明显的主要原因。毛管障碍的影响程度随着土层间孔隙差异增加而增大^[15], 而沙土和砒砂岩的毛管孔隙度分别为6%和6.5%, 差异很小, 可能是水流通过砒-沙交界面时, 入渗速率变化不明显的原因。

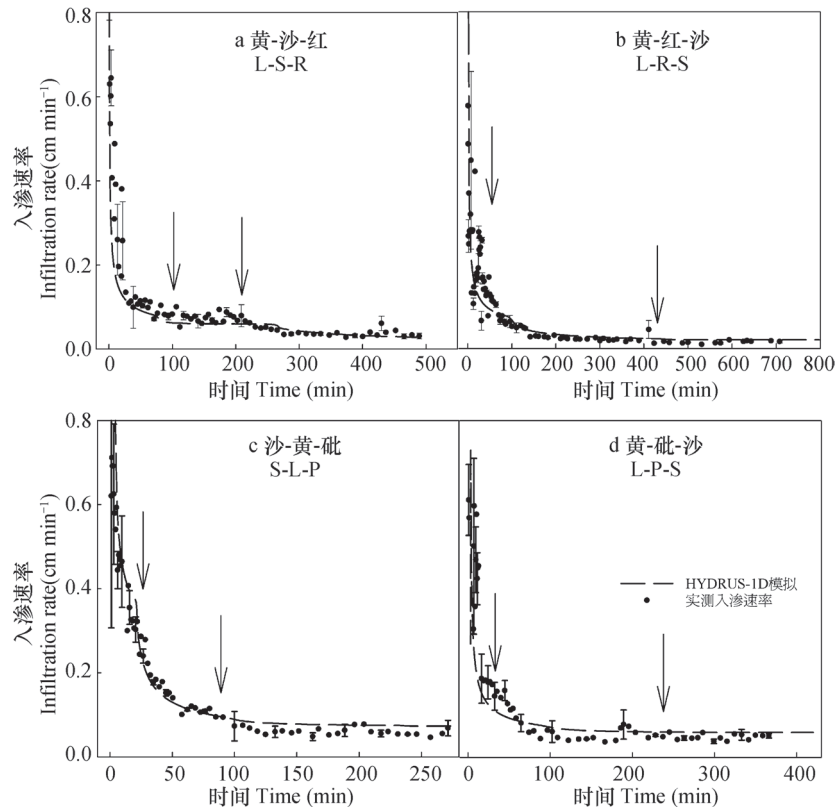
无论粗质土覆盖细质土还是细质土覆盖粗质土均有减渗现象, 但两种结构减渗机理不同^[16]。粗质土覆盖细质土是因为存在导水障碍, 细质土覆盖粗质土是因为存在毛管障碍, 两者统称为水流障碍^[17]。由达西定律可知, 入渗速率与水势梯度、饱和导水率成正比。水势梯度由水头压力、重力, 基质吸附力和毛管力造成。粗质土覆盖细质土如黄-沙-红中沙土覆盖红黏土, 黄-红-沙中的黄绵土覆盖红黏土, 沙-黄-砒中沙土覆盖黄绵土, 下层土的导水率小于上层土 (表2), 存在导水障碍。当湿润锋到达两种土壤交界面时, 毛管吸力增大但导水率减小, 后者的减小效应大于前者的增大效应, 故入渗速率减小, 这与水分由大孔隙流向小孔隙时, 运动阻力变大导致水分运动速度减慢的研究一致^[18]。此时的导水率及水势梯度均由下层细质土决定, 故入渗速率主要由细质土控制。细质土覆盖粗质土如黄-沙-红中黄绵土覆盖沙土, 黄-红-沙中红黏土覆盖沙土, 沙-黄-砒中黄绵土覆盖砒砂岩, 黄-砒-沙中黄绵土覆盖砒砂岩, 黄-砒-沙中的黄绵土覆盖砒砂岩, 砒砂岩覆盖沙土, 下层土的毛管孔隙度小于上层土 (表1), 存在毛管障碍。上界面负压水头达到下界面粗质土进 waters

表2 层状土入渗特征统计分析

Table 2 Statistical analysis of infiltration characteristics of the layered soils

层状土类型 Layered soil style	各层入渗历时 Infiltration time of each layer (min)			各层末段入渗速率 Infiltration rate of the bottom section of each soil layer (cm min ⁻¹)			稳渗耗时 Time for infiltration to get steady (min)	
	第一层 First layer	第二层 Second layer	第三层 Third layer	第一层 First layer	第二层 Second layer	第三层 Third layer	第二层 Second layer	第三层 Third layer
	黄-沙-红 L-S-R	56.4a	112.6c	321.5g	0.115a	0.078c	0.033d	12.4a
黄-红-沙 L-R-S	52.8a	408.2d	278.1h	0.129a	0.016d	0.017d	88.6b	0
沙-黄-砒 S-L-P	17.6b	71.0e	174.1i	0.329b	0.100e	0.053f	57.3c	11.3e
黄-砒-沙 L-P-S	53.5a	175.6f	145.1j	0.125a	0.047f	0.053f	16.7a	0

注：同列或同行不同字母表示差异显著，相同字母表示差异不显著 ($p < 0.05$) Note: Values in the same column or row affixed with the same letter are not significantly different at the 5% probability level, and those with different are significantly different



注：实线箭头表示湿润锋到达层状土界面，下同

Note: Arrow means the wetting front reaches the interface between two layers, (the same below)

图2 实测与模拟入渗速率

Fig. 2 Measured and simulated infiltration rate

头时,水分才会穿过交界面进入下层土,下层土地越均一旦越粗,毛管障碍作用越强烈^[19]。当湿润锋穿过土壤交界面后,上层细质土的水流量无法满足下层粗质土入渗量的需求,所以入渗速率减小,此时的导水率仍由细质土决定。水流进入黄-沙-红、黄-红-沙、沙-黄-砒、黄-砒-沙型层状土第二层土体后,入渗速率持续减小,达到稳渗分别耗时12.4、88.6、57.3、16.7 min;水流进入第三层土体后,只有黄-沙-红、沙-黄-砒型层状土入渗速率进一步减小,达到稳渗分别耗时164.1、11.3 min(表2)。水流穿过黄-沙、黄-砒交界面后,入渗速率迅速减缓;穿过黄-红、沙-黄、沙-红交界面时入渗速率缓慢减小。前者为细质土覆盖粗质土,存在毛管障碍;后者为粗质土覆盖细质土,存在导水障碍,两种水流障碍减缓过程不同。总之,层状土壤的构筑,可以显著降低降水的入渗速率,避免水分快速渗漏。

2.2 层状土累积入渗量随时间的变化特征

湿润锋未到层状土交界面前,水势梯度大,下渗速度快,累积入渗量随时间变化特征与均质土一致,呈非线性。湿润锋穿过第一层与第二层的交界面后,累积入渗量随时间变化呈线性,斜率变小。湿润锋穿过第二层与第三层的交界面后,累积入渗量随时间变化仍呈线性,斜率进一步变小(图3)。累积入渗量的大小与土壤在土柱中所处的位置有很大关系,相同入渗历时内,沙-黄-砒型层状土的累积入渗量最大,黄-沙-红型层状土的累积入渗量较黄-红-沙型层状土大,黄-砒-

沙型层状土介于黄-沙-红和黄-红-沙型层状土之间(图3),所以粗质土层越靠上,相同入渗历时内累积入渗量越大。当湿润锋到达第二层土与第三层土交界面时,黄-沙-红、黄-红-沙、沙-黄-砒、黄-砒-沙4种层状土累积入渗量分别为19.3、21.3、17.8、19.6 cm,耗时分别为169.0、461.1、88.6、229.1 min。黄-沙-红与沙-黄-砒型层状土累积入渗量差异达到极显著水平($p < 0.05$),这两个土体上面两层均为沙土和黄绵土,但黄-沙-红型土体较沙-黄-砒型土体累积入渗量大1.5 cm,主要因为黄-沙-红型土体的水流障碍较沙-黄-砒型土体的水流障碍强烈,导致水分在第一层和第二层累积。这与Tallon等^[20]关于不同质地土壤交界面的差异导致水分在交界面以上土层累积的研究相似。黄-红-沙型层状土入渗耗时是黄沙红型层状土的2.7倍,入渗速率很慢,晋陕蒙接壤区雨季集中,短时强降雨天气多,黄-红-沙型层状土入渗缓慢,易形成地表径流或者积水蒸发,这种新土体结构不适合该矿区排土场建设中应用。

2.3 层状土湿润锋随时间变化规律

水分在第一层土运动时,其湿润锋推进深度与均质土湿润锋推进深度随时间变化曲线相同,都呈连续递增,并逐渐趋于平缓。但湿润锋穿过第一与第二层交界面时,由于土壤交界面处毛细管的不连续,引起能量的骤然变化,使湿润锋的运移出现突变,速度与均质土相比明显减缓(图4)。用线性关系 $Z_f=at+b$ 拟合湿润锋在第二层、第三层土体随时间运移过程(表3), a 为在某一土层运移的平均

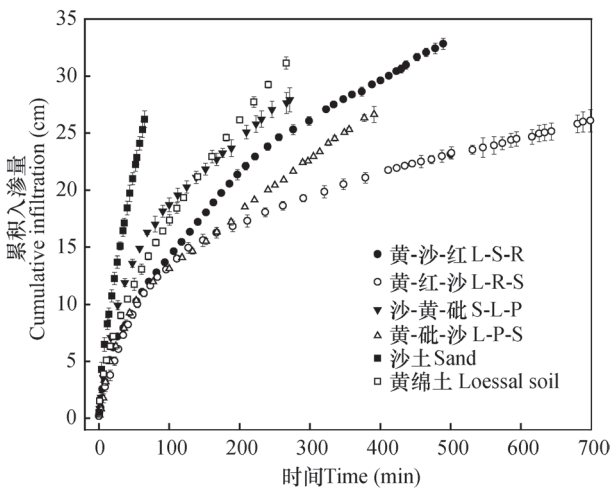


图3 实测层状土累积入渗量

Fig. 3 Measured cumulative infiltration in columns of layered soil

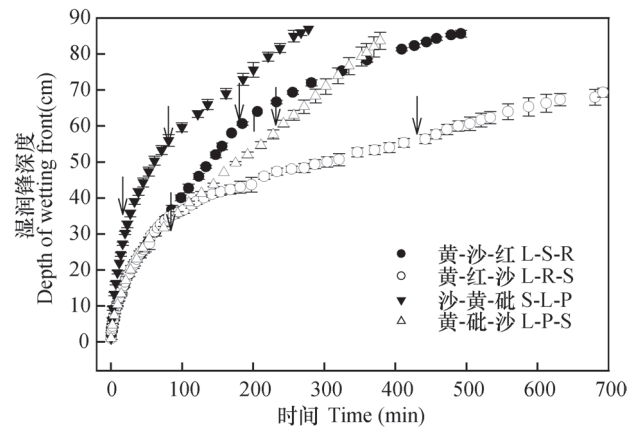


图4 湿润锋推进距离随时间变化

Fig. 4 Temporal variation of the advance of wetting front

速率, c 为湿润锋在第二层与第三层运移平均速率的比值。当湿润锋穿过第二层与第三层交界面时, 湿润锋推进随时间变化仍呈线性, 除了黄-沙-砒型层状土湿润锋推进速率略微变大, 其他三种层状土湿润锋推进速率再次减小(表3)。湿润锋到达交界面后, 粗质土覆盖细质土没有细质土覆盖粗质土的湿润锋运移速率变化剧烈(图4)。

黄-红-沙和沙-黄-砒型层状土第二层土的饱和导水率较第一层土小, 湿润锋穿过两者交界面后, 水流入渗较慢, 饱和区与非饱和区的含水量差异明显, 随着第二层土下界面附近的饱和区不断向下扩展, 湿润锋锋面含水率差异逐渐缩小并趋向恒定, 湿润锋随时间的运移逐渐减缓趋向稳定。黄-砒-沙和黄-沙-红型层状土第二层土的饱和导水率

大于第一层, 湿润锋穿过交界面后, 水流迅速下渗, 饱和区和非饱和区的含水量差异小, 湿润锋向下推进速率迅速稳定(图4)。湿润锋经过黄-沙-红、黄-红-沙、沙-黄-砒、黄-砒-沙型层状土第三层与第二层运移速率的比值分别为0.34、0.78、0.34、1.07(表3), 黄-沙-红与沙-黄-砒型层状土第三层土的阻水效果明显, 黄-红-沙型层状土的阻水效果稍差, 黄-砒-沙型层状土第三层湿润锋运移速率有少许增加, 阻水效果最差, 水分容易下渗到更深层土壤。水分入渗到深层土壤或进入地下水, 植物将无法利用, 而且矿区水分的深层渗漏有可能造成地下水污染^[21]。因此, 晋陕蒙矿区排土场建设也不宜采取黄-砒-沙型层状土体。

表3 湿润锋随时间运移的线性关系参数

Table 3 Linear regression parameters of the movement of wetting front with time

层状土类型 Layered soil style	土层 Soil layer	a	b	R^2	c
黄-沙-红 L-S-R	第二层 Second layer	0.254	15	0.999	0.34
	第三层 Third layer	0.086	46.9	0.975	
黄-红-沙 L-R-S	第二层 Second layer	0.066	30.1	0.952	0.78
	第三层 Third layer	0.052	37.4	0.99	
沙-黄-砒 S-L-P	第二层 Second layer	0.439	24.8	0.976	0.34
	第三层 Third layer	0.149	46.1	0.998	
黄-砒-沙 L-P-S	第二层 Second layer	0.176	18.8	0.998	1.07
	第三层 Third layer	0.189	16.5	0.998	

2.4 层状土入渗剖面含水量随时间变化规律

随着湿润锋向下推进, 各土层含水率均骤升并逐渐平稳, 含水量骤升的时刻即是湿润锋到达的时刻, 与均质土相比, 层状土入渗过程更加复杂, 其含水率在层状土剖面上具有不连续性(图5), 这与李毅和任鑫^[13]的研究一致。本研究利用自动化测量系统, 连续、密集监测剖面含水量时空变化, 获取有效数据点多, 精度高, 可以捕捉到因层状土水流障碍引起的含水量变化。在黄-沙-红型层状土中, 沙土层最下方的探头测得的含水量明显高于沙土层另外两个探头测得的含水量, 而其他土体相同土层不同位置探头测得的含水量没有出现这种现象, 主要因为沙土和红黏土交界面存在比较强烈的导水障碍, 阻水作用较强, 这与Aubertin等^[3]的研究相似。他们的研究表明在干旱区, 粗质土夹

在两种细质土间的层状土可以有效增加水流障碍。黄-沙-红型层状土使水分在红黏土层以上显著累积, 这种使水分在表层累积的能力对植物蒸腾作用意义重大^[20]。

2.5 入渗模拟

通过两种方法获取土壤水力参数: (1) 利用HYDRUS-1D结合均质土体入渗过程剖面含水量反演土壤水力参数, (2) 利用高速离心机($10^{-4} \sim 1$ MPa)和WP4露点水势仪(大于1 MPa)实测土壤水分特征曲线, 拟合土壤水力参数, 饱和导水率由定水头法测得, 4种土壤的水力特性参数(表4)。

利用均质土体反演的土壤水力参数直接模拟层状土体的入渗过程效果不理想(相对误差在15%~27%之间), 可能是填装层状土时, 不同土壤孔隙大小不一, 沙土大于0.01 mm的孔隙远多于

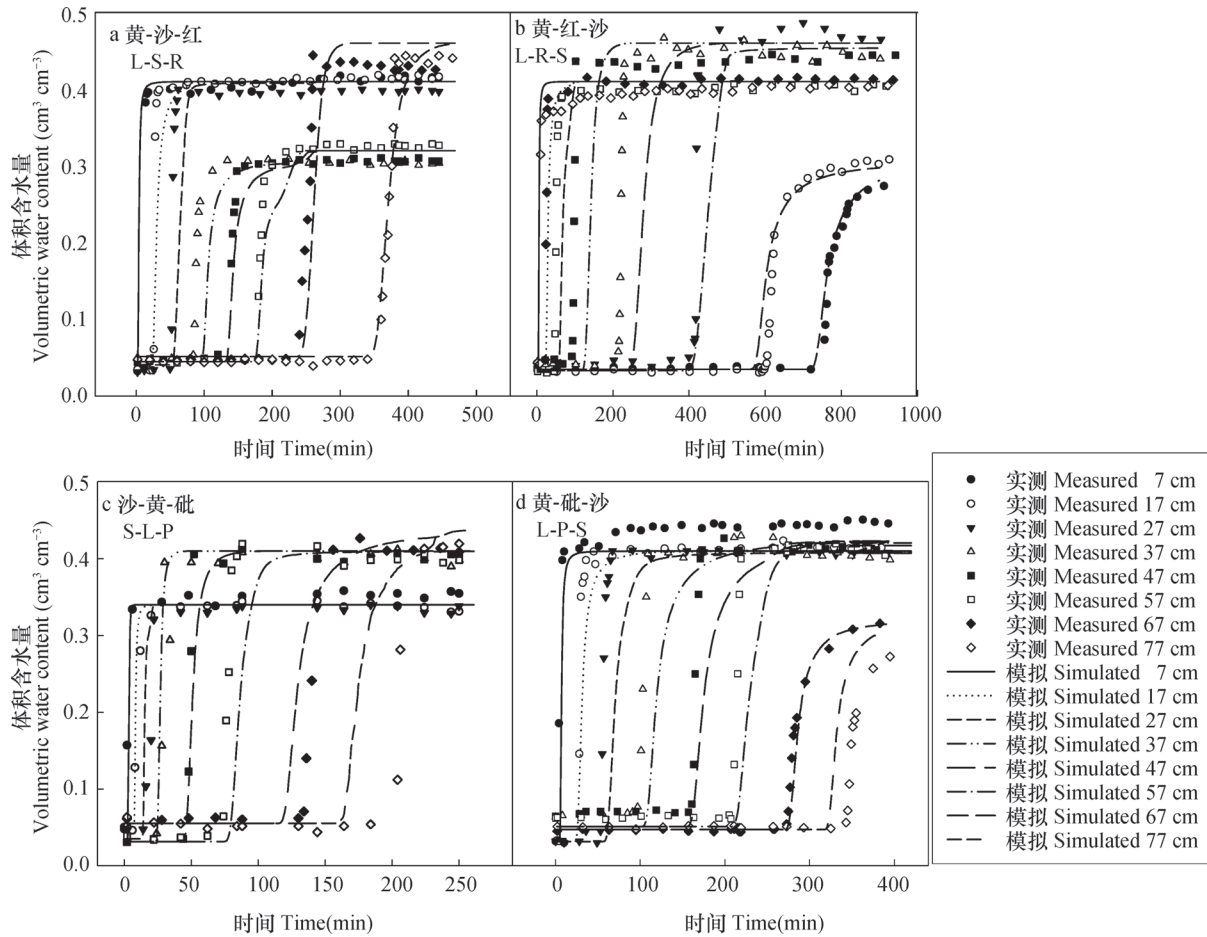


图5 实测与模拟入渗过程剖面含水量

Fig.5 Measured and simulated profile water content during infiltration process

表4 4种土壤水力参数反演结果

Table 4 Inversion of hydraulic parameters of the four types of layered soil columns

	残留含水率	饱和含水	经验参数		经验参数 n		饱和导水率	
	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})				$(K_s \text{ cm min}^{-1})$	
	实测	实测	实测	反演	实测	反演	实测	反演
	Measured	Measured	Measured	Inversed	Measured	Inversed	Measured	Inversed
沙土 Sandy soil	0.047	0.34	0.048	0.055	1.8	3.1	0.0340	0.260
砒砂岩 Pi-sha sand stone	0.051	0.44	0.024	0.033	1.3	2.0	0.0260	0.140
黄绵土 Loessal soil	0.031	0.41	0.018	0.021	2.0	2.6	0.0031	0.047
红黏土 Red clay	0.032	0.46	0.034	0.019	1.2	1.8	0.0025	0.009

其他土壤（表1），容重最易发生变化。饱和导水率随着容重的增加呈幂函数形式减小^[22]，装土过程中沙土容重不易控制，导致层状土体不同层位沙土的饱和导水率与均质土体反演的饱和导水率存在较大的差异。Huang等^[23]在模拟非均质土壤水分入渗时，假定 K_s 为最大的误差源，不确定性远大于 θ_r 、 θ_s 、 α 、 n ，将 K_s 作为校验变量，取得较好的模拟结果。利用HYDRUS-1D对位于上、中、下三个层位沙土的饱和导水率进行优化，优化后分别为 0.28 cm min^{-1} 、 0.09 cm min^{-1} 、 0.04 cm min^{-1} 。饱和导水率优化后模拟效果显著提高，相对误差降低至6%以下。用实测的水力参数模拟入渗过程效果不理想（相对误差在20%至37%之间），Schaap和Leij^[24]认为因测量误差和土壤结构复杂，有些实测的水力参数不能应用到实际中，实测饱和导水率和反演饱和导水率差异较大（表4），实测的水力参数模拟效果差可能是因为饱和导水率测定存在较大误差。用反演的饱和导水率代替实测的饱和导水率，模拟效果有所改善，相对误差在10%以下。

利用平均误差（MEP）、标准偏差（SDP）和决定系数（ R^2 ）具体评价模拟的精度。MEP表示高估（正）或低估（负）实测值，SDP表示模拟的精度^[25]。反演的参数模拟入渗速率、剖面含水量随时间变化分别如图2和图5，模拟结果的 R^2 在0.86至0.97之间，MEP分别在-0.000 4和-0.009 7，-0.022 2和0.005 7之间，SDP在0.025和0.039，0.034和0.092之间。实测参数模拟入渗速率和剖面含水量的 R^2 在0.79至0.95之间，MEP分别在0.018和0.048，0.01和0.033之间，SDP在0.065和0.09，0.094和0.101之间。实测参数模拟效果较差，可能因为通过离心机（脱湿过程）测得的土壤水力参数模拟入渗过程（吸湿过程），未考虑滞后效应，Si和Kachanoski^[26]基于入渗过程反演的土壤水力参数，在不考虑滞后效应的情况下直接模拟排水过程储水量，模拟效果差。总体而言，利用自动测量系统连续监测土壤剖面含水率变化，获得大量有效的土壤含水率数据点，反演土壤水力参数能改善层状土入渗过程模拟的效果。

3 结 论

通过室内均质土柱和不同结构的层状土柱定水头入渗实验，4种层状土的累积入渗量、入渗速

率、湿润锋行进进行的实测及模拟研究表明：

层状土入渗过程水分运动规律与土层的排列顺序有很大关系，粗质沙土越向上，相同入渗历时内，累积入渗量越大，入渗速率和湿润锋运移速率越大。黄-红-沙型层状土入渗速率慢，在强降雨条件下，不能使水分迅速入渗。黄-砒-沙型层状土湿润锋到达第三层土体后，运移速率仍很快，阻水效果差，水分易渗漏到深层土壤，这两种层状土结构不宜应用到晋陕蒙矿区排土场建设中；黄-沙-红、沙-黄-砒型层状土在短时间内能储存大量水分，且第三层土壤阻水作用强，黄-沙-红型层状土下层红黏土阻水效果尤其明显，这两种层状土是矿区排土场构造新土体较理想的结构。通过HYDRUS-1D结合土柱剖面含水量变化反演的土壤水力参数，模拟层状土剖面含水量及入渗速率的变化，入渗速率和剖面含水量的 R^2 在0.86至0.97之间，入渗速率的MEP和SDP分别在-0.000 4和-0.009 7，0.025和0.039之间，剖面含水量的MEP和SDP分别在-0.022 2和0.005 7，0.034和0.092之间。统计结果表明利用HYDRUS-1D结合均质土入渗过程反演土壤水力参数，能较好地模拟层状土的入渗过程。

参 考 文 献

- [1] Nicholson R V, Gillham R W, Cherry J A, et al. Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26 (1) : 1—8
- [2] Scanlon B R, Reedy R C, Keese K E, et al. Evaluation of evapotranspirative covers for waste containment in arid and semiarid regions in the southwestern USA. Vadose Zone Journal, 2005, 4 (1) : 55—71
- [3] Aubertin M, Cifuentes E, Apithy S A, et al. Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46 (10) : 1146—1164
- [4] 任利东, 黄明斌, 樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究. 农业工程学报, 2013, 29 (19) : 105—111. Ren L D, Huang M B, Fan J. Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (19) : 105—111
- [5] 任利东, 黄明斌. 砂性层状土柱蒸发过程实验与数值模拟. 土壤学报, 2014, 51 (6) : 1282—1289. Ren L D, Huang M B. Experiment and numerical simulation of soil evaporation from layered sandy soil columns (In

- Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (6): 1282—1289
- [6] 张建丰, 王文焰. 砂层在黄土中发生指流条件的试验研究. *农业工程学报*, 2008, 24 (3): 82—86. Zhang J F, Wang W Y. Experiment study of finger flow occurrence in loess soil (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24 (3): 82—86
- [7] Si B C, Miles D, Gary P, Flow and transport in layered soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91 (2): 127—132
- [8] 毛晓敏, 尚松浩. 计算层状土稳定入渗率的饱和层最小通量法. *水利学报*, 2010, 41 (7): 810—817. MAO X M, Shang S H. Method of minimum flux in saturation layer for calculating stable water infiltration through layered soil (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41 (7): 810—817
- [9] 王春颖, 毛晓敏, 赵兵. 层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟. *农业工程学报*, 2010 26 (11): 61—67. Wang C Y, Mao X M, Zhao B. Experiments and simulation on infiltration into layered soil column with sand interlayer under ponding condition (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (11): 61—67
- [10] Yang H, Rahardjo H, Leong E C, et al. Factors affecting drying and wetting soil-water characteristic curves of sandy soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41 (5): 908—920
- [11] Jhorar R K, Bastiaanssen W G M, Feddes R A, et al. Inversely estimating soil hydraulic functions using evapotranspiration fluxes. *Journal of Hydrology*, 2002, 258 (1): 198—213
- [12] Šimůnek J, Genuchten M T. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. *Water Resources Research*, 1996, 32 (9): 2683—2696
- [13] 李毅, 任鑫, Horton R. 不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响. *排灌机械工程学报*, 2012, 30 (4): 485—490. Li Y, Ren X, Robert H. Influence of various soil textures and layer positions on infiltration characteristics of layered soils (In Chinese). *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30 (4): 485—490
- [14] Miyazaki T. Water flow in unsaturated soil in layered slopes. *Journal of Hydrology*, 1988, 102 (1): 201—214
- [15] 史文娟. 蒸发条件下夹砂层土壤水盐运移实验研究. 西安理工大学水利水电学院, 2005. Shi W J. Laboratory studies of evaporation from the sand-layered soil column in the presence of shallow water table (In Chinese). Institute of water Resources and hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, 2005
- [16] 张建丰. 黄土区层状土入渗特性及其指流的实验研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学资源环境学院, 2004. Zhang J F. Experimental study on infiltration characteristics and finger flow in layer soils of the loess area (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, College of Natural Resources and Environment, 2004
- [17] Zettl J, Lee Barbour S, Huang M, et al. Influence of textural layering on field capacity of coarse soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91 (2): 133—147
- [18] Hillel D, Talpaz H. Simulation of soil water dynamics in layered soils. *Soil Science*, 1977, 123 (1): 54—62
- [19] Stormont J C, Anderson C E. Capillary barrier effect from underlying coarser soil layer. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125 (8): 641—648
- [20] Tallon L K, O' Kane M A, Chapman D E, et al. Unsaturated sloping layered soil cover system: Field investigation. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91 (2): 161—168
- [21] Huang M, Elshorbagy A, Lee Barbour S, et al. System dynamics modeling of infiltration and drainage in layered coarse soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91 (2): 185—197
- [22] 吕殿青, 邵明安, 刘春平. 容重对土壤饱和和水分运动参数的影响. *水土保持学报*, 2006, 20 (3): 154—157. Lu D Q, Shao M A, Liu C P. Effect of bulk density on soil saturated water movement parameters (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (3): 154—157
- [23] Huang M, Barbour S L, Elshorbagy A, et al. Infiltration and drainage processes in multi-layered coarse soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91 (2): 169—183
- [24] Schaap M G, Leij F J. Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47 (1): 37—42
- [25] Al Majou H, Bruand A, Duval O, et al. Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon. *Soil Use and Management*, 2008, 24 (4): 383—391
- [26] Si B C, Kachanoski R G. Unified solution for infiltration and drainage with Hysteresis Theory and field test. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64 (1): 30—36

EXPERIMENT AND SIMULATION OF INFILTRATION FROM LAYERED SOILS IN OPEN PIT MINE IN JIN-SHAAN-MENG ADJACENT REGION

Wu Qi fan¹ Fan Jun^{2†} Yang Xiaoli¹ Pan Yawen¹ Wang Yafei³ Qiao Yanqin¹ Wang Sheng³

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

(2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to search for an optimal soil layer structure for constructing an earth dumping site for the open-pit mine at the Jin-Shaan-Meng bordering region, an experiment on soil water percolation through 4 soil columns different in soil layer structure, was carried out. The four soil columns were homogeneously packed with Sandy soil, Pi-sha Sandstone, Loessal soil or Red clay, but different in order, that is, Loessal soil-Sandy Soil-Red clay (L-S-R), Loessal soil-Red clay-Sandy Soil (L-R-S), Sandy Soil-Loessal soil-Pi-sha Sandstone (S-L-P), and Loessal soil-Pi-sha Sandstone-Sandy Soil (L-P-S). With the aid of an automatic observation system (AOS) attached to the columns to monitor variation of soil water content with time, and at the same time, change in water level in the markov bottles and wetting front movement was recorded. Based on infiltration rate, cumulative infiltration, wetting front movement and change in profile water content, water percolation through the soil columns different in soil layer structure was characterized. Taking into consideration the natural conditions of the region, evaluation of the columns was done for one that was optimal for construction of the earth dumping site. Results show that after water flowing into the second layer of the columns, percolation rate continuously decreased. After water flowing into the third soil layer in Columns L-S-R and S-L-P, percolation rate further decreased. When the wetting front got to the interface between the second and the third soil layers in Columns L-S-R, L-R-S, S-L-P and L-P-S within 169.0, 461.1, 88.6 and 229.1 min, respectively, accumulated percolation reached 19.3, 21.3, 17.8 and 19.6 cm, respectively, in the four columns. In the soil columns the wetting front moved through the 3rd layer of soil at a rate, being 0.34, 0.78, 0.34 and 1.07% of the rate at which it went down through the 2nd layer in Columns L-S-R, L-R-S, S-L-P and L-P-S, respectively. In Column L-S-R, the water content monitored by the probe at the bottom of the sand soil layer was apparently higher than that measured by the other two probes in the layer, while no such phenomenon was observed in the same soil layer in the other columns. Columns L-S-R and S-L-P could hold a large amount of water for a short period of time, and the third layers of soil tended to prevent water from percolating downwards, especially in Column L-S-R, where the effect of the third layer of red clay was very significant. Obviously, these two types of layered soil structure are the ideal ones for construction of earth dumping sites for open pit mines. In Column L-R-S water infiltrated and percolated down the column very slowly. In case of heavy rain storm, rain water could not infiltrate into the soil readily. In Column L-P-S, after wetting front reached the third layer of soil, it kept moving through the layer rapidly. Obviously the soil column could not hold water and instead let the water go further down into deep soil layers. So, these two types of layered soil structure are not fit for use in construction of earth dumping sites. Changes in water content in soil profiles were monitored continuously with the aid of TDR. Soil hydraulic parameters inversed by combining HYDRUS-1D with water content in infiltration profile of homogeneous soil, after being

collated and optimized, were used to simulate variation of the water content and infiltration rate in infiltration profile of layered soil structure. Statistical analysis shows that R^2 of measured and simulated infiltration rate and profile water content varied between 0.86 and 0.97, and *MEP* and *SDP* of the infiltration rate did between -0.000 4 and -0.009 7, 0.025 and 0.039, respectively, and *MEP* and *SDP* of the profile water content did between -0.022 2 and 0.005 7, 0.034 and 0.092, respectively. Statistics also shows that the inversed parameters can be used to better simulate water infiltration processes through the layer-structured soil. The findings in earth this experiment may have some theoretical and practical significance in guiding construction of earth dumping sites for open pit mines.

Key words Layered soils; Infiltration; HYDRUS-1D; Reclamation of mining areas

(责任编辑: 汪枫生)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Problems and analytical logic in building cultivated land productivity evaluation index system..... Zhao Yanfeng, Cheng Daoquan, Chen Jie, et al. (1207)
 Advancement in study on effect of earthworm on greenhouse gas emission in soil and its mechanism Lu Mingzhu, Lü Xianguo, Guan Qiang, et al. (1224)

Research Articles

- Vertical distributions of soil organic and inorganic carbon and their controls along toposequences in an alpine region Yang Fan, Huang Laiming, Li Decheng, et al. (1235)
 Effect of grain size on and correlation analysis of pedodiversity and surface water body diversity in counties typical of Central and East China Ren Yuanyuan, Zhang Xuelei (1249)
 Spatial-temporal variability of soil readily available nutrients in cultivated land of Weibei Tableland Area Yu Yang, Zhao Yeting, Chang Qingrui (1260)
 Hyperspectral estimation and remote sensing retrieval of soil water regime in the Yellow River Delta Li Ping, Zhao Gengxing, Gao Mingxiu, et al. (1271)
 Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate Wang Jian, Ma Fan, Zhang Penghui, et al. (1278)
 Experiment and simulation of infiltration from layered soils in open pit mine in Jin-Shaan-Meng adjacent region Wu Qifan, Fan Jun, Yang Xiaoli, et al. (1289)
 Anaerobic redox of iron oxides and photosynthetic oxidation of ferrous iron in upland cinnamon soils Sun Lirong, Wang Xugang, Xu Xiaofeng, et al. (1299)
 Study on effect of kaolinite colloids on zeta potential of Al oxide coated quartz with streaming potential method Li Zhongyi, Xu Renkou (1309)
 Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years Yu Fei, Shi Weiming (1324)
 Changes of soil nutrients and supply capacities in the piedmont plain of Taihang Mountain during the period of 1978–2008 Liu Jianling, Jia Ke, Liao Wenhua, et al. (1334)
 Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small hilly watershed in subtropics of China Yang Wen, Zhou Jiaogen, Wang Meihui, et al. (1343)
 Stoichiometric characteristics of soil in an oasis on northern edge of Tarim Basin, China Li Honglin, Gong Lu, Zhu Meiling, et al. (1354)
 Distribution of soil selenium in the Northeast China Plain and its influencing factors Dai Huimin, Gong Chuandong, Dong Bei, et al. (1364)
 Study on phytolith-occluded organic carbon in soil of subtropical forest of southern Zhejiang Lin Weilei, Ying Yuqi, Jiang Peikun, et al. (1372)
 Toxic effect of multiple-time overlying pollution of Phe in soil on *Eisenia fetida* Ma Jingjing, Qian Xinchun, Zhang Wei, et al. (1381)
 Effect of organic manure on cucumber Fusarium wilt control and its mechanism Zhao Liya, Li Wenqing, Tang Longxiang, et al. (1390)
 Ameliorative effect of cropping *Lycium barbarum* L. with drip irrigation on soil enzymes activities in takyric solonetz Zhang Tibin, Kang Yaohu, Wan Shuqin, et al. (1399)
 Change in shallow soil temperature and its response to change in air temperature in middle and lower reaches of Shiyang River Basin Yang Xiaoling, Ding Wenkui, Ma Zhonghua, et al. (1410)
 Soil permeability of aeration zone in Xinchang-Xiangyangshan - a preselected site for high level radioactive waste disposal Li Jiebiao, Su Rui, Zhou Zhichao, et al. (1420)

Research Notes

- Inversion of spatial pattern of organic matter contents in black soil based on TM data Song Jinhong, Wu Jinggui, Zhao Xinyu, et al. (1429)
 Analysis of soil fertility and fertilizer efficiency of maize field in Shaanxi Shan Yan, Li Shuili, Li Ru, et al. (1437)
 Application of cosmic-ray method to soil moisture measurement of grassland in the Loess Plateau Zhao Chun, Yuan Guofu, Liu Xiao, et al. (1444)

Cover Picture: Reclamation of a highly saline-sodic wasteland of takyric solonetz while cropping *Lycium barbarum* L. with drip irrigation (by Zhang Tibin)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 6 期 2015 年 11 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 6 Nov., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

