

不同压实水平下铁尾矿砂和土壤的水力学特征比较

吕春娟, 王煜, 毕如田, 梁建财, 朱洪芬, 陈丹

(山西农业大学资源环境学院, 山西农业大学农业资源与环境国家级实验教学示范中心, 山西 太谷 030801)

摘要: 由于尾矿砂的不良结构和严重压实, 水土流失严重, 水分已成为其生态恢复的重要限制因素。因此以水分运移为主线, 通过室内土柱模拟, 研究铁尾矿砂和土壤在自然状态到最大压实状态间5个压实水平(铁尾矿砂 $1.50\sim 1.70\text{ g/cm}^3$, 土壤 $1.30\sim 1.50\text{ g/cm}^3$)的水力学特征差异, 为尾矿砂的合理改良提供依据。结果表明: 铁尾矿砂自然容重 1.50 g/cm^3 的水分入渗能力低于土壤自然容重 1.30 g/cm^3 的水分入渗能力。随容重的增大, 尾矿砂和土壤的水分运移特征均呈幂函数减小的趋势, 但分别在 $1.60, 1.40\text{ g/cm}^3$ 处入渗能力明显降低。从水分参数入渗率、湿润锋距离、累计入渗量、饱和导水率、剖面水分分布整体来看, 在较低容重范围内, 土壤水分运移能力高于铁尾矿砂, 但由于容重对土壤水分运移的影响大于铁尾矿砂, 在较高容重范围内, 土壤的水分运移能力则不如铁尾矿砂。铁尾矿砂和土壤的水分特征曲线形状也完全不同, 铁尾矿砂呈现“上凸”形, 表现为高吸力段缓低吸力段陡, 土壤水分特征曲线均为“下凹”形, 表现为高吸力段陡低吸力段缓。因此, 尾矿砂中可以添加土壤或者类似土壤结构的基质来增强其不良的持水性和导水性, 促进生态恢复。

关键词: 铁尾矿砂; 土壤; 容重; 水力学参数; 水分特征曲线

中图分类号: S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)01-0108-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.016

Comparison of Hydraulic Characteristics of Iron Tailings Sand and Soil Under Different Compaction Levels

LÜ Chunjuan, WANG Yu, BI Rutian, LIANG Jiancai, ZHU Hongfen, CHEN Dan

(College of Resources and Environment, National Experimental Teaching

Demonstration Center, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: Due to the poor structure and severe compaction of tailings, surface runoff is easily generated. Water has become an important limiting factor for its ecological restoration. In order to further understand the difference of hydraulic characteristics between tailings and soil, and to provide a scientific improvement for iron tailings sand, the water transport characteristics of iron tailings and soil under five compaction levels from natural bulk density to maximum compaction density (iron tailings from 1.50 g/cm^3 to 1.70 g/cm^3 , soil from 1.30 g/cm^3 to 1.50 g/cm^3) were compared by indoor soil column simulation. The water infiltration capacity of natural bulk density of 1.50 g/cm^3 iron tailings sand was lower than that of soil with 1.30 g/cm^3 under natural bulk density. With the increase of the bulk densities, the water infiltration parameters of both tailings sand and soil decreased in the form of power function. But the infiltration capacity of iron tailings and soil presented respectively significant reduction at the level of 1.60 g/cm^3 and 1.40 g/cm^3 . Based on the overall water parameters including water infiltration rate, wetting front distance, cumulative infiltration volume, saturated hydraulic conductivity, and water distribution in profile, the water transport capacity of soil was higher than that of iron tailings in the lower bulk density levels; however, due to the effect of bulk density on soil water transport was greater than that on iron tailings, the water transport capacity of soil was not as good as iron tailings under the higher bulk density levels. The shape of the water characteristic curve of the iron tailings sand was completely different from soil; the iron tailings sand was “convex”, which was charac-

收稿日期: 2019-07-04

资助项目: 国家自然科学基金项目(41401619); 山西农业大学引进人才科研启动项目(2014ZZ07)

第一作者: 吕春娟(1978-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀与土地整治研究。E-mail: lcjcwj@126.com

通信作者: 毕如田(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土地利用信息技术、土地复垦研究。E-mail: brt@sxau.edu.cn

terized by gentle change in the high suction and steep change in the low suction section, while that of soil was “concave”, which was characterized by steep change in the high suction section and gentle change in the low suction section. Therefore, soil or other matrix similar to soil structure can be added to tailings to tailings sand could be added by soil or other matrix similar to soil structure to enhance its poor water holding and hydraulic conductivity, and promote ecological restoration.

Keywords: iron tailings sand; soil; bulk density; hydraulic parameters; water characteristic curve

采矿产生的废弃物通常使用大型机械分层输送到排弃点,极大地扰动土壤结构,打破了原始土壤剖面的水文平衡。排弃的岩土废弃物颗粒重新排列孔隙空间减少,颗粒接触紧密,容重增加,导致大孔隙数量下降和微孔隙数量增加,根系穿透阻力增加,水分入渗能力降低,通气性减弱^[1-2],产生坡面径流和侵蚀等不可避免的环境问题^[3],同时由于水分垂直运移路径受阻,入渗水分降低土体抵抗强度,也常常引发岩土体的安全稳定问题^[4]。这些不利的基质属性在生态恢复过程中也会影响植物的出苗、根系的形态建成和生理特征^[5]。因此在矿区土地复垦过程中通过覆土、秸秆残留、牧草残渣增加土壤有机质含量或者适当的土壤耕作降低土壤容重^[6],了解基质压实水平与水分入渗、运移的变化是必不可少的一部分^[7]。

土壤压实问题一直是国内外的研究焦点。Daddow等^[8]创造了生长限制体积密度(GLBD),每个特定的土壤质地存在一个阈值,如果土壤密度超过这个界限,根系将会因为高的机械抗拒而不再穿透;Goldsmith等^[5]将Daddow等^[8]的生长限制体积密度GLBD转化为相对密度,发现在82%~91%变化;Bonnaud等^[9]研究发现,林地土壤压实后,经中长期演变(7~8年),由于上层滞水面的持续时间变长,表层土壤有向水成土演变的趋势。国内对于农田土壤的压实问题有很多关注,曾健等^[10]研究了红壤地区种植土容重对水分入渗及再分布的影响;吴军虎等^[11]研究发现,有机质含量高的农田土壤入渗性能对容重反映敏感。

土壤质地也是影响土壤入渗能力的一个重要参数,不同质地土壤受容重影响入渗能力减少的程度不同^[12]。范严伟等^[13]研究了土壤质地、容重、初始含水率和灌溉水深对不同容重土壤的水分入参与分布,表明容重和质地对土壤含水率和累计入渗率影响较大;甄庆等^[14]发现,晋陕蒙能源区风沙土、黄土、砒砂岩及不同土体构型的入渗能力差异明显。目前的研究大多集中于农田土壤或者林地压实后的水分入渗变化,对于矿区的压实也有很多研究^[2,15-19],主要关注煤矿区较多,不同采矿废弃物的组成有很大差异,王晓彤等^[15]研究了采煤沉陷地充填复垦的黄河泥沙不同容重的水分特征及其孔隙变化。但是从水分运移的角度,

尤其对于铁尾矿砂的关注很少,而中国的铁矿石储量居世界第4位,较全球平均品位低10.45%^[20],产生了大量的铁尾矿库,颗粒细小紧实,缺乏有机质,野外调查中发现铁尾矿砂压实严重,极易产生水土流失,尾矿砂的结构亟待改良,改善水分运移,控制水土流失。本研究以水分运移为主线,在铁尾矿砂野外调查的基础上,设置不同压实水平,并与其周围农田土壤不同压实水平进行比较,观测铁尾矿砂和土壤的水分运移规律及差异,以便更深入地理解铁尾矿砂的水力学参数,为铁尾矿砂的生态修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2016年4月,在山西省运城市垣曲县干排铁尾矿库定位生态恢复试验基地采集铁尾矿砂,同时在铁尾矿库周边农田采集土壤,采集样品带回实验室,风干、碾碎、去除杂物过2 mm土壤筛备用。根据国际粒级制标准:砂粒(0.02~2 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)、黏粒(<0.002 mm),铁尾矿砂的颗粒组成为砂粒46.42%,粉粒38.95%,黏粒14.43%;土壤颗粒组成为砂粒45.05%,粉粒30.76%,黏粒24.19%。铁尾矿砂和土壤有机质含量分别为2.95,5.89 g/kg。

1.2 试验设计与试验方法

野外调查中发现干排铁尾矿砂自然容重为1.50 g/cm³,长期沉降机械压实后表层容重在1.65~1.70 g/cm³;而农田土壤自然状态下容重仅为1.30 g/cm³,与尾矿砂自然状态下有很大的差异。因此该试验在铁尾矿砂和土壤的自然容重和最大容重间均以0.5 g/cm³间隔设置5个容重梯度,铁尾矿砂容重为1.50,1.55,1.60,1.65,1.70 g/cm³;土壤容重为1.30,1.35,1.40,1.45,1.50 g/cm³,来分析同样的压实水平对尾矿砂和土壤水分运移产生的影响是否相同,尾矿砂与农田土壤的水分运移参数的差距有多大。

试验于2017年5月至2018年9月,在山西农业大学资源环境学院试验站进行。根据非饱和流的达西定律单位土壤断面的水流量 $q=K(\theta)\nabla\Psi$ 。式中: $K(\theta)$ 为导水率(cm/s); $\nabla\Psi$ 为水势梯度(kPa)。土壤水在水势梯度的驱动下,从高土水势点流向低的土水势点^[21]。

入渗试验采用非饱和土体的垂直一维积水入渗试验,积水深度恒定为 5 cm,土壤和尾矿砂的初始含水率均为风干含水率,分别为 2.5% 和 4.5%。试验装置由有机玻璃入渗土柱和马氏瓶自动供水系统组成^[22]。马氏瓶和入渗土柱外侧均有刻度尺记录不同时间湿润锋距离、入渗量,土柱剖面每隔 10 cm 留有 2 个内径为 5 mm 的圆孔,可利用 TZS 土壤水分速测仪测定土柱剖面不同深度的水分变化。

铁尾矿砂和土壤的水分特征曲线采用张力计法^[22]测定。饱和导水率采用室内定水头法^[15]测定,水头为 5 cm。试验中每个容重水平重复 3 次,文中所列数据均为 3 次重复的均值。

2 结果与分析

2.1 铁尾矿砂和土壤水分入渗过程比较

2.1.1 铁尾矿砂和土壤水分入渗能力比较 本试验是在地表 5 cm 积水条件下进行的非饱和水分入渗,供水强度充足恒定,水分迁移主要推动力为基质势、重力势和压力水头,整个入渗过程真实地反映土壤和

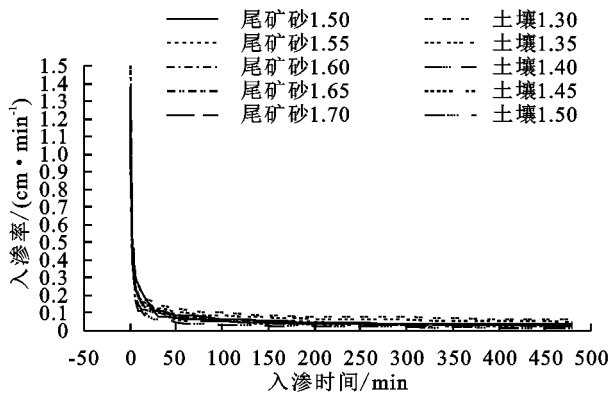


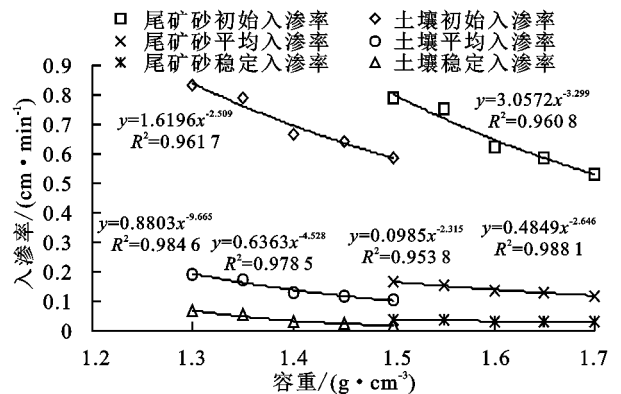
图 1 铁尾矿和土壤水分入渗过程参数比较

尾矿砂 5 个容重下入渗率的变化范围为 0.028~1.383 cm/min,变幅为 1.355 cm/min;土壤 5 个容重下入渗率的变化范围为 0.017~1.500 cm/min,变幅为 1.483 cm/min;而且整个入渗过程中尾矿砂 5 个容重入渗率的变幅都小于土壤 5 个容重入渗率的变幅,都是随着入渗时间延长减少,最后趋于稳定(图 1)。据入渗变化可以用初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率来定量表征水分入渗变化过程,可以看出尾矿砂和土壤的这 3 个人渗参数均随着容重的增大而减小,土壤的人渗参数整体上大于尾矿砂,说明相同压实状态下,尾矿砂的入渗性能整体上不如土壤;方差分析表明,容重对土壤和尾矿砂入渗率的影响均不显著($P>0.05$),但容重对土壤入渗参数的影响大于对尾矿砂入渗参数的影响。

2.1.2 铁尾矿砂和土壤湿润锋前进距离和累计入渗量关系 试验材料铁尾矿砂和土壤初始水分条件均

尾矿砂自身的入渗性能差异(图 1)。铁尾矿砂和土壤的入渗过程表现为入渗率随着入渗时间变化呈幂函数减小的趋势($y=ax^{-b}$ 。式中: y 为入渗率(cm/min); x 为入渗时间(min); a 、 b 均为拟合参数, $0<a$ 、 $b<1$),相关系数均大于 0.90,且在 $\alpha=0.01$ 水平上通过显著性检验,故不在一一列出各拟合函数。

整个入渗过程根据入渗率的变化可以分为 3 个阶段:在入渗开始时,由于地表积水,表层薄土层很快被湿润接近饱和,而下面的土壤很干燥,因此基质势梯度很大,表现在前 3 min,入渗率最快,为快速入渗阶段,这个阶段的入渗主要受控于基质梯度;当水分继续入渗,剖面上的水分含量不断减小,湿润锋与干土间的梯度减小,入渗率减低,表现为 6~360 min 时间段,为缓慢入渗阶段;随着入渗持续,湿润锋前端基质梯度非常小,甚至可以忽略,这时的人渗速率主要由重力势和压力水头决定,表现为 360~480 min 时间段,入渗速率稳定不变,反映了土壤的稳定入渗能力;另外入渗过程中孔隙中发现不断有气泡溢出,孔隙中未溢出的空气,也会阻碍入渗率降低。



为风干状态,湿润锋前进距离反映了水分入渗过程中湿润前沿与干土之间交界面的运移情况。

从图 2 可以看出,铁尾矿砂和土壤的湿润锋前进距离随入渗时间均呈现幂函数增大的趋势。容重越小,湿润锋前进距离越大,铁尾矿砂容重 1.50, 1.55, 1.60, 1.65, 1.70 g/cm^3 的湿润锋前进距离范围为 50.90~42.93 cm,容重间湿润锋变幅 7.97 cm;土壤容重 1.30, 1.35, 1.40, 1.45, 1.50 g/cm^3 的湿润锋前进距离范围为 65.93~27.60 cm,变幅为 38.33 cm。相同容重变幅范围内,土壤湿润锋变幅是铁尾矿砂的 4.81 倍,容重对土壤和铁尾矿砂湿润锋运移距离的影响不同,尾矿砂不同容重间湿润锋前进距离差异不显著;但土壤不同容重间湿润锋前进距离差异显著($P<0.05$)。进一步多重比较表明,容重 1.4 g/cm^3 是土壤湿润锋距离明显降低的一个转折点,土壤容重 1.30 g/cm^3 与 1.40, 1.45, 1.50 g/cm^3 之间差异显著,

1.35 g/cm³ 与 1.45, 1.50 g/cm³ 之间差异显著, 其余土壤容重间差异均不显著。

累计入渗量随时间变化趋势与湿润锋前进距离相同, 均随着入渗透时间增大而增大, 均表现为开始增加速度快, 随入渗透时间延长, 增加速度越来越慢, 而且不同容重间增大的速度不同(图 3)。相同入渗时间 480 min, 随着铁尾矿砂容重由 1.50 g/cm³ 增大到 1.70 g/cm³, 累计入渗量则由 29.73 cm 减少到 23.07 cm; 土壤容重由 1.30 g/cm³ 增大到 1.50 g/cm³, 累计入渗量由 44.43 cm 降低到 15.43 cm; 两者累计入渗量均随着容重的增大而减小, 但容重对土壤累计入渗量的影响大于对铁尾矿砂入渗量的影响。

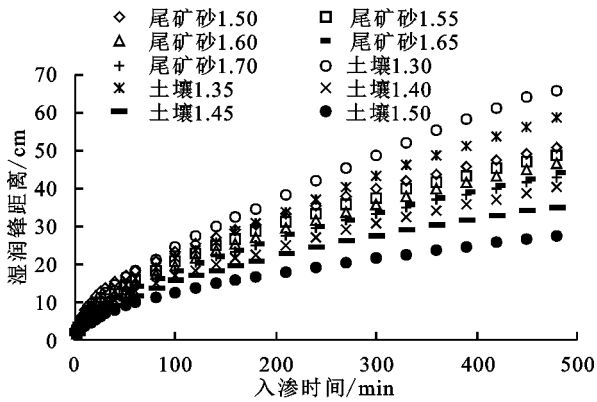


图 2 铁尾矿砂和土壤的湿润锋距离比较

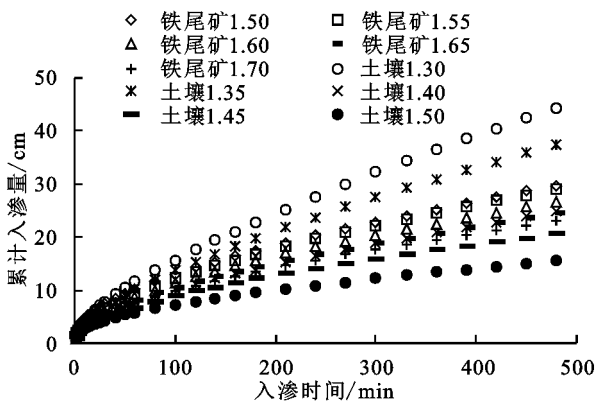


图 3 铁尾矿砂和土壤的累计入渗量比较

经 SPSS 直线拟合和 Pearson 相关性分析表明, 其决定系数 R^2 和相关系数 r 均大于 0.99, 不同容重下的铁尾矿砂和土壤的累计入渗量和湿润锋关系均表现出较强的直线相关关系。从图 2 和图 3 中还可以看出, 如果把土壤和铁尾矿砂放到一起比较, 湿润锋前进距离和累计入渗量从大到小依次为土 1.30 g/cm³ > 土 1.35 g/cm³ > 砂 1.50 g/cm³ > 砂 1.55 g/cm³ > 砂 1.60 g/cm³ > 土 1.40 g/cm³ > 砂 1.65 g/cm³ > 砂 1.70 g/cm³ > 土 1.45 g/cm³ > 土 1.50 g/cm³。

2.2 铁尾矿砂和土壤剖面水分分布比较

由于铁尾矿砂和土壤水分垂向运移速率的差异(图 1), 在相同的 480 min 入渗时间内, 水分垂直剖面湿润锋

运移距离不同, 水分变化也有很大的差异(图 4)。

根据不同土层含水率变化, 可以看出铁尾矿砂和土壤剖面都存在水分分层现象, 整体表现随着土层深度增加, 水分含量降低, 分层现象弱化。尾矿砂的湿润锋前进距离均大于 40 cm, 剖面的分层现象更明显, 根据不同深度水分梯度, 可将尾矿砂剖面从上到下分为 4 个区: 饱和区、过渡区、传导区和湿润区^[23]。容重 1.50, 1.55, 1.60, 1.65, 1.70 g/cm³ 铁尾矿砂 10 cm 以上水分充分饱和, 含水率分别为 31.0%, 29.8%, 28.4%, 25.9%, 25.9%, 为水分饱和区; 与 10 cm 以上相比, 10—20 cm 的含水率降幅较大, 平均下降了 23.33%, 为水分过渡区; 20—30, 30—40 cm 含水率平均降幅分别为 9.58% 和 6.56%, 降幅较小, 为水分传导区; 大于 40 cm 含水率快速降低接近尾矿砂的初始含水率, 为湿润区。5 个容重下尾矿砂湿润锋变异系数 0.07, 土壤 1.30, 1.35, 1.40, 1.45, 1.50 g/cm³ 5 个容重土柱湿润锋距离变异系数 0.36, 说明高容重下, 水分在土壤中向深层的传导性受到限制大于尾矿砂。但是可以发现土壤 10 cm 以上饱和区的土层的水分含量均大于铁尾矿砂, 分别为 44.8%, 45.0%, 36.3%, 34.6%, 34.0%; 而且 10—20 cm 的含水率降幅也小于相同土层的铁尾矿砂, 分别为 8.26%, 20.22%, 16.25%, 18.21%, 21.18%。说明土壤即使在压实的情况下, 孔隙度也大于铁尾矿的孔隙度, 具有较强的储水的能力。

土壤和铁尾矿砂相同土层的含水率都随着容重的增大而减小; 但是每一土层深度在入渗过程中土壤含水率均表现为快速升高、缓慢增加、稳定不变 3 个阶段, 与非饱和重塑土渗透过程中不同深度的基质势由高到低逐渐变缓的趋势相一致^[24], 主要是由基质势的变化所致。

2.3 铁尾矿砂和土壤饱和导水率比较

当地表有积水时, 表层土壤将很快饱和, 土壤的饱和导水率反映了重力下渗水在土壤中运动的最大能力, 将直接制约地表径流量的发生和发展。尾矿砂、土壤在接近自然容重的状态下, 即土壤容重为 1.3 g/cm³、尾矿砂容重为 1.50 g/cm³ 的饱和导水率分别为 0.094 7, 0.029 4 cm/s, 自然状态下土壤的饱和导水率是自然状态下尾矿砂饱和导水率的 3.22 倍(图 5)。随容重增大, 尾矿砂和土壤的饱和导水率均以幂函数趋势降低, 但是二者降低的速度不同, 容重越大, 大孔隙数量越少, 水分流通路径的连通性降低, 导水性能越低。尾矿砂在相同容重变幅下, 饱和导水率降低的速度远小于土壤, 与自然容重 1.50 g/cm³ 相比,

铁尾矿砂 1.55, 1.60, 1.65, 1.70 g/cm³ 分别降低了 21.90%, 31.08%, 45.65%, 61.88%。与自然容重 1.30

g/cm³ 相比, 土壤 1.35, 1.40, 1.45, 1.50 g/cm³ 分别降低了 41.18%, 67.76%, 78.83%, 91.43%。

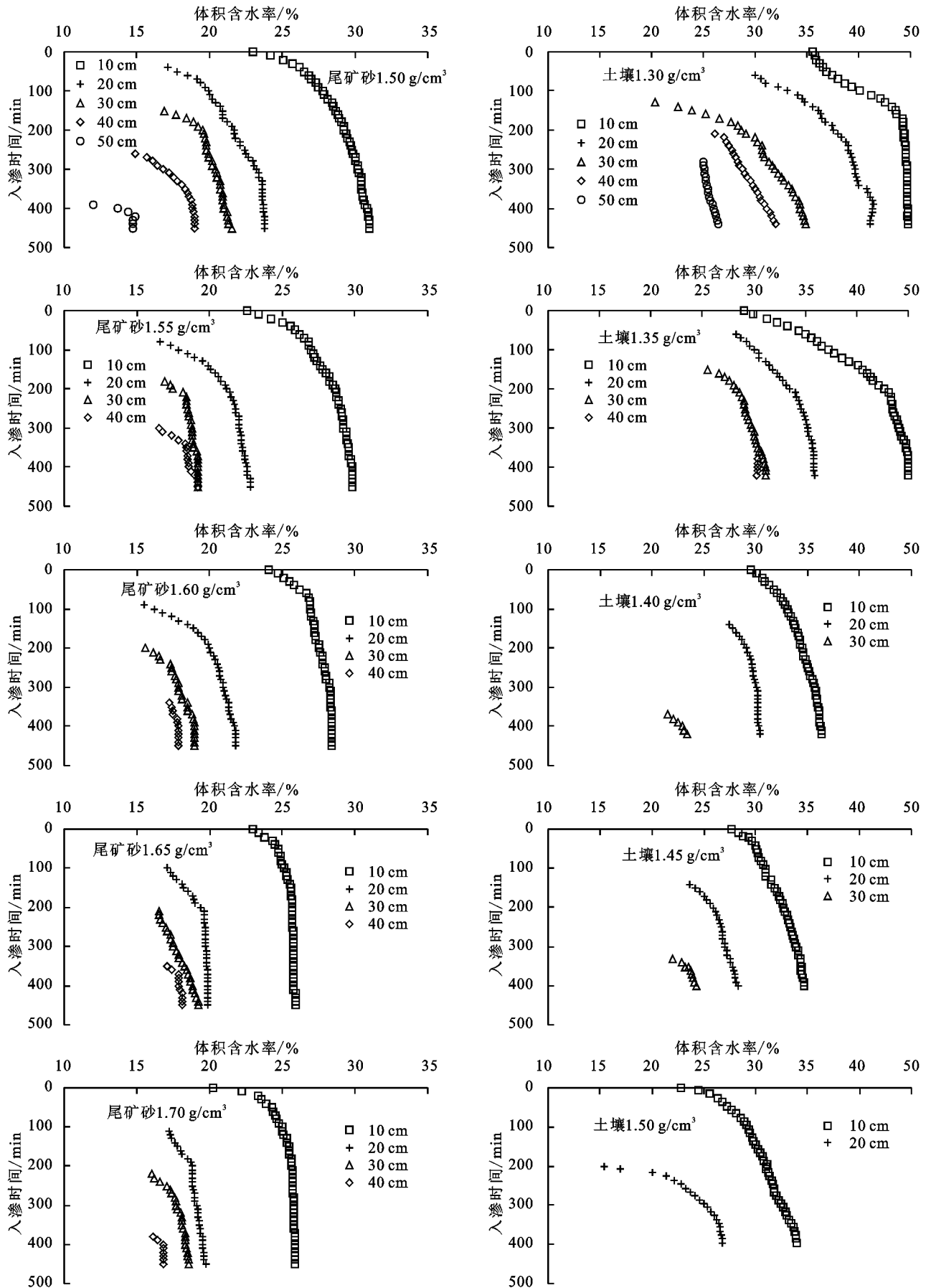


图 4 铁尾矿和土壤入渗剖面含水率比较

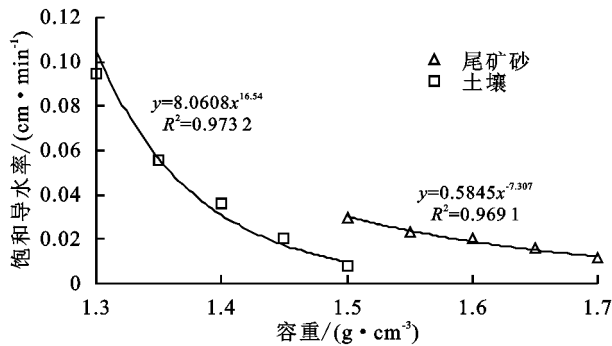
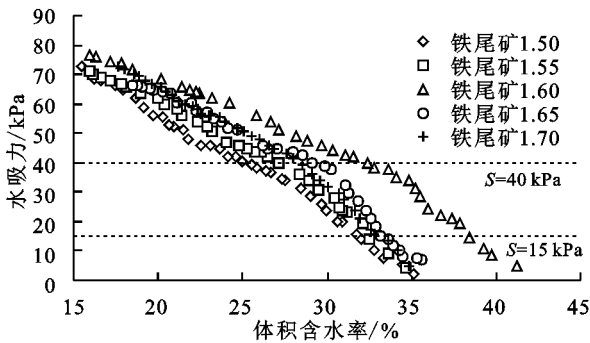


图 5 铁尾矿砂和土壤饱和和导水率比较

2.4 铁尾矿砂和土壤水分特征曲线比较

水分特征曲线表示土壤水的能量状态和土壤水的数量之间的关系,反映了土壤保持水分和释放水分的基本特性^[21]。从图 6 可以看出,铁尾矿砂和土壤随着水分含量的减少,水吸力增大,但二者水分特征曲线变化的形状完全不同,但是相同材料下变化形状却是相似的。1.50,1.55,1.60,1.65,1.70 g/cm³ 铁尾矿砂的水分特征曲线均为“上凸”形,表现为高吸力段



缓低吸力段陡,其拐点为 40 kPa;当尾矿砂水吸力大于 40 kPa 时,单位基质势力变化引起的尾矿砂水分变化分别为 0.30%,0.37%,0.45%,0.42%,0.33%,尾矿砂释放水分速度变快,曲线较缓,保水性差;当尾矿砂水吸力小于 40 kPa 时,水分逐渐接近饱和水分,单位基质势力变化引起的尾矿砂水分变化分别 0.26%,0.21%,0.25%,0.20%,0.18%,尾矿砂释放水分速度慢,曲线变陡,不利于重力水的深层运移。而容重 1.30,1.35,1.40,1.45,1.50 g/cm³ 土壤水分特征曲线均为“下凹”形,表现为高吸力段陡低吸力段缓,拐点为 30 kPa,当土壤水吸力大于 30 kPa 时,单位基质势力变化引起的土壤水分变化分别 0.17%,0.17%,0.17%,0.19%,0.21%,土壤释放水分速度慢,曲线变陡,保水性强;当土壤水吸力小于 30 kPa 时,单位基质势力变化引起的土壤水分变化分别 0.34%,0.48%,0.61%,0.52%,0.35%,土壤释放水分速度快,曲线平缓,利于水分在较大孔隙中向深层运移,减少地面积水、径流侵蚀。

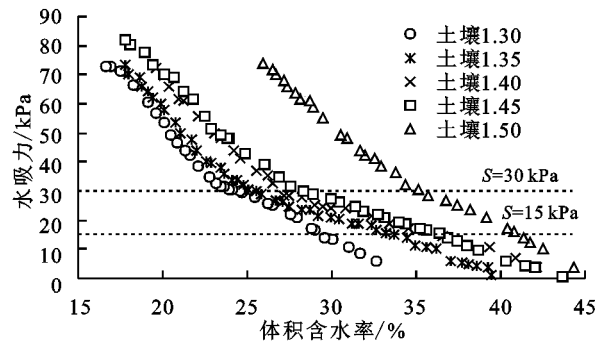


图 6 铁尾矿砂和土壤水分特征曲线比较

土壤水对植物的有效性,不在于土壤水量的多少,而在于其能量的高低,根据姚贤良等^[25]研究表明,通常将 100/3~1 500 kPa 的土壤水看做是植物根系可以吸收的有效水。结合上述分析,从图 6 还可以看出,以植物利用来看主要集中在土壤水分特征曲线的较陡段和和尾矿砂水分特征曲线的较缓段;如果从水土保持角度分析,主要关注土壤水吸力较低曲线段的持水量变化,从图 6 还可以看出,除过 1.60 g/cm³ 尾矿砂的持水能力较强,1.30 g/cm³ 土壤持水能力较弱之外,其余容重水平下土壤的持水能力均比尾矿砂强。

通常,土壤水分特征曲线对容重的变化较为敏感^[26-27],随容重的增大,土壤的大孔隙减少,小孔隙增加,颗粒表面能增大,吸持较多的水分,土壤的持水量增大^[21],土壤的孔隙结构和颗粒大小也会受到显著影响^[26,28]。但是在图 6 中发现,容重对土壤和铁尾矿砂的水分特征曲线的影响不同。在同一水吸力下,随容重的增大,在相同吸力下,土壤的持水量持续增大,特别当土壤容重从 1.45 g/cm³ 增大到 1.50 g/cm³

时,土壤的持水量急速增大;但是在同一水吸力下,随容重的增大,尾矿砂的持水量依次表现为 1.50 g/cm³ < 1.55 g/cm³ < 1.70 g/cm³ < 1.65 g/cm³ < 1.60 g/cm³,并没有遵循随容重持续增大的趋势。

为了进一步定量比较土壤和铁尾矿砂的水分特征曲线,通过常用模型 Van Genuchten、Brooks-Corey、Gardener、Fredlund-Xing 拟合比较及 R²、RMSE 精度检验,最终采用适合本研究的 Van Genuchten 模型拟合结果来比较。

从表 1 可以看出,尾矿砂不同容重水平下的饱和含水率 θ_s 和残余含水率 θ_r 均小于土壤,进一步说明尾矿结构容水能力差,也是水土流失严重的原因之一;拟合参数 α 为进气吸力值的倒数,进气值是指在含水率饱和的土壤中施加土壤水吸力,当土壤水吸力不断提高至某一临界值时,该水分饱和土壤孔隙中的水分恰好开始流失时的土壤水吸力值,可以看到尾矿砂相同压实水平下的参数 α 比土壤大,也就是其进气值比土壤小,说明尾矿砂由饱和状态开始排水需要的水吸力比土壤小;拟合参数 n 是形状系数,表示水分

特征曲线的陡度, n 越大, 表示土壤含水率随水吸力增大降低的越快, 尾矿砂 n 值变幅为 0.138, 土壤 n 值变幅为 0.059, 二者在自然压实状态下的 n 值相差不多, 但是

随着容重的增大, 尾矿砂的 n 值变化比土壤大, 说明尾矿的压实更易影响其持水能力; 整体看来, 尾矿砂的容水和持水能力均小于土壤。

表 1 土壤和尾矿砂的水分特征曲线拟合参数

基质类型	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Van Genuchten 模型					
		残余含水率 θ_r	饱和含水率 θ_s	拟合参数 α	拟合参数 n	R^2	RMSE
尾矿砂	1.50	0.048	0.368	0.013	1.470	0.993	0.055
	1.55	0.047	0.357	0.015	1.442	0.991	0.056
	1.60	0.045	0.347	0.016	1.409	0.992	0.075
	1.65	0.043	0.336	0.019	1.372	0.988	0.055
	1.70	0.041	0.325	0.021	1.332	0.993	0.051
	1.30	0.071	0.445	0.012	1.479	0.989	0.053
	1.35	0.070	0.432	0.013	1.471	0.996	0.066
土壤	1.40	0.069	0.420	0.013	1.459	0.993	0.065
	1.45	0.067	0.408	0.014	1.442	0.995	0.075
	1.50	0.066	0.396	0.014	1.420	0.995	0.055

3 讨论

对比铁尾矿砂和土壤的水分参数, 发现二者的水分入渗率、湿润锋距离、累计入渗量、饱和导水率均受到容重的影响, 表现为随容重的增大而减小的负相关关系, 这个结果与大多数研究^[10-12]结果相同, 但因土壤类型或质地的差异, 最佳拟合函数类型不同; 土壤在相同容重增幅下, 这些水分参数受到的影响程度要大于铁尾矿砂(图 1~图 5), 在图 1~图 3 中更能直观地看到, 铁尾矿砂的水分参数曲线较集中地分布在土壤 5 个容重水分参数曲线之间。土壤压实最重要的体现就是土壤孔隙结构重构, 包括土壤孔隙的形态大小数量搭配及其空间分布状况, 孔隙越大, 能容纳的水分含量越高。孔隙越长, 连通性越好, 越有利于水分运动^[29]。结合图 6 水分特征曲线发现在接近饱和段, 土壤的含水率基本上都大于尾矿砂的含水率, 说明土壤的总孔隙度大于尾矿砂的总孔隙度。进一步根据茹林公式 $D = 3/S$ 。式中: D 为当量孔径 (mm); S 为土壤水吸力 (Pa 或者 $\text{cm H}_2\text{O}$)。当量孔径 $D > 0.02 \text{ mm}$, $S < 15 \text{ kPa}$ 时, 为通气孔径^[30]。图 6 中在水吸力 S 小于 15 kPa 到接近 0 的曲线段, 土壤的水分释放量大于尾矿砂的水分释放量, 进一步证实土壤的通气孔隙含量大于铁尾矿砂; 而且有机质含量高的土壤, 团粒结构多, 大孔隙多, 水流通道好, 水分参数受容重影响显著^[11]。供试土壤为农田土壤, 有机质含量为 5.89 g/kg, 大于铁尾矿砂有机质含量 2.95 g/kg; 铁尾矿砂为矿石球磨后的产物, 缺乏有机质和土壤结构, 孔隙主要以中小孔隙为主。因此低容重下土壤的饱和导水率和入渗率较铁尾矿砂大, 但是由于土壤的通气孔隙比铁尾矿砂多, 大孔隙的数量和

孔径更易受压实的影响, 而中小孔隙为主的铁尾矿砂对压实的变化相对不太明显, 因此随着压实水平增大, 土壤的水分运移更易受到影响。

铁尾矿砂的水分特征曲线也表现出与土壤完全相反的趋势, 5 个容重铁尾矿砂水分特征曲线均表现为“上凸”形, 土壤 5 个容重下水分特征曲线均表现为“下凹”形。而且相同水吸力下, 铁尾矿砂和土壤水分含量随容重的变化也不同, 大多数的研究^[15, 25]结果表明, 在相似或者相同含水量下, 孔隙水吸力随着压实作用的增加而增加。本研究中的土壤完全表现出相同的趋势, 但是铁尾矿砂却并非如此, 在相同水吸力下, 容重 1.60 g/cm^3 表现出最强的持水能力, 这种不同变化趋势或者突变现象, 可能与不同压实状态下的孔隙大小分布有关系。类似的现象在不同容重的黄河泥沙中也被发现, 1.35~1.60 g/cm^3 黄河泥沙的 3 种孔隙随容重的增加减小程度不同, 呈现非线性减小^[15]关系。针对土壤和铁尾矿砂随容重变化在入渗参数和水分特征值曲线上表现的差异性, 还需要进一步从不同容重下孔隙的微观结构和连通性差异去验证, 也是下一步的研究重点。

如果将不同容重的尾矿砂和土壤水分特征曲线放在一起比较的话(图 6), 可以发现, 同一水吸力下的持水量关系和同一水分含量下的水吸力大小, 在不同水吸力阶段或者不同的水分含量阶段, 尾矿砂和土壤的相互关系是不断变化的。进一步说明水分含量—水吸力关系与所研究的材料也有很大的关系, 因此要改善尾矿砂的水分状况, 不仅是调控尾矿砂本身的紧实度问题, 更多要改善尾矿砂的组成, 适当加入水分容量较大的土壤或者其他有机材料, 增强尾矿砂的水分调控能力。

4 结论

(1)铁尾矿砂和土壤的湿润锋和累计入渗量呈现明显的线性关系,但是二者的水分运移参数初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率、饱和导水率等随容重的增大以幂函数趋势降低,存在入渗能力明显降低的容重转折点。

(2)自然容重状态下的铁尾矿砂的水分入渗能力显著低于自然容重状态下的土壤;高容重水平下铁尾矿砂的水分入渗性能反而比土壤高,因此容重对土壤的水分入渗参数的影响大于对铁尾矿砂的影响。

(3)对比铁尾矿砂和土壤剖面水分分布,在入渗过程中,每一土层深度土壤含水率均表现为快速升高、缓慢增加、稳定不变 3 个阶段;根据不同土层深度水分含量变化,铁尾矿砂和土壤剖面都存在水分分层现象,且随着土层深度增加,分层现象弱化。二者不同的是相同压实水平下,相同土层土壤的含水率均大于铁尾矿砂,但是在高容重水平下,土壤水分的运移距离严重受限,远低于尾矿砂。

(4)铁尾矿砂和土壤随着水分含量的减少,水吸力增大,但二者水分特征曲线变化的形状完全不同,铁尾矿砂为“上凸”形,表现为高吸力段缓低吸力段陡,土壤水分特征曲线均为“下凹”形,表现为高吸力段陡低吸力段缓。在植物可利用的水吸力范围内($S > 100/3$ kPa),尾矿砂的持水能力比土壤强,但释放速度快,保水性差;在重力水低吸力范围内($S < 30$ kPa),土壤的持水性比尾矿砂强,水分释放速度快,利于土壤水分深层运移,减少地表积水。因此可将土壤或其他材料与尾矿砂混合改善尾矿砂的水分调控能力。

参考文献:

- [1] Chen G, Weil R R, Hill R L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability [J]. *Soil Tillage Research*, 2014, 136: 61-69.
- [2] 刘涛,王金满,秦倩,等.矿区机械压实对土壤孔隙特性影响的研究进展[J].*土壤通报*, 2016, 47(1): 233-238.
- [3] Zhang L, Wang J M, Bai Z K, et al. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area [J]. *Catena*, 2015, 128: 44-53.
- [4] 侯龙.非饱和土孔隙水作用机理及其在边坡稳定分析中的应用研究[D].重庆:重庆大学, 2012.
- [5] Goldsmith W, Silva M, Fischenich C. Determining optimum degree of soil compaction for balancing mechanical stability and plant growth capacity[Z]. ERDC, TN-EM-RRP-SR-26, 2001.
- [6] Hamza M A, Anderson W K. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions [J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 82: 121-145.
- [7] Arvidsson J, Sjöberg E, van Denakker J J H. Subsoil compaction by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden III. Risk assessment using a soil water model [J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 73: 77-87.
- [8] Daddow R L, Warrington G E. Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture[M]. Colorado: Watershed Systems Development Group, 1983.
- [9] Bonnaud P, Santenoise P, Tisserand D, et al. Impact of compaction on two sensitive forest soils in Lorraine (France) assessed by the changes occurring in the perched watertable [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 437: 380-395.
- [10] 曾健,费良军,裴青宝.土壤容重对红壤水分垂直入渗特性的影响[J].*排灌机械工程学报*, 2017, 35(12): 1081-1087.
- [11] 吴军虎,张铁钢,赵伟,等.容重对不同有机质含量土壤水分入渗特性的影响[J].*水土保持学报*, 2013, 27(3): 63-67, 268.
- [12] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J].*农业工程学报*, 2009, 25(6): 40-45.
- [13] 范严伟,赵文举,冀宏.垂直一维入渗土壤水分分布与入渗特性数值模拟[J].*兰州理工大学学报*, 2012, 38(2): 51-55.
- [14] 甄庆,摄晓燕,张应龙,等.晋陕蒙能源区不同构型土体水分入渗特性模拟[J].*农业机械学报*, 2015, 46(8): 90-96.
- [15] 王晓彤,胡振琪,梁宇生,等.基于水分特性的采煤沉陷地充填复垦黄河泥沙容重优选[J].*农业工程学报*, 2018, 34(16): 258-264.
- [16] Chong S K, Cowsert P T. Infiltration in reclaimed mined land ameliorated with deep tillage treatments [J]. *Soil & Tillage Research*, 1997, 44: 255-264.
- [17] Haigh, Martin J, Sansom B. Soil compaction, runoff and erosion on reclaimed coal-lands (UK) [J]. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 1999, 134: 135-146.
- [18] Saffih-Hdadi K, Défossez P, Richard G, et al. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density [J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 105: 96-103.
- [19] 刘宁,李新举,郭斌,等.机械压实过程中复垦土壤紧实度影响因素的模拟分析[J].*农业工程学报*, 2014, 30(1): 183-190.
- [20] 何青,赵玲玲.山西铁矿资源的概况与展望[J].*山西冶金*, 2004(4): 5-7.
- [21] 华孟,王坚.土壤物理学[M].北京:北京农业大学出版社, 1993.
- [22] 陈丹,吕春娟,郭星星,等.容重对铁尾矿水分运移特征的影响[J].*水土保持通报*, 2019, 39(1): 78-84.

在不同入渗时间下进行统计分析, 秸秆施入深度越深, 累积入渗量和湿润锋运移距离在不同处理下差异明显。秸秆施入深度对湿润锋运移影响较明显。

(2) 不同秸秆施入深度下, 秸秆层的上部土壤含水量比不施入秸秆大, 而秸秆层下部土壤的含水量比不施入秸秆小; 相同入渗深度下, 含有秸秆土层的含水量比不含有秸秆土层的含水量明显增加。

(3) 秸秆施入深度影响土壤水吸力在不同土层深度中的大小。入渗相同深度, 秸秆施入深度越深, 土壤水吸力峰值越大, 达到峰值所需时间越长。秸秆能够改变土层孔隙状况, 使 T5 微型传感器周围的土壤环境发生改变, 导致在不同土层深度下土壤水吸力峰值出现差异。不同土层深度下, 土壤水吸力随着水分入渗 T5 微型传感器周围, 土壤水吸力在峰值处骤降。从峰值时刻开始到下降趋于平稳, 这段时间内土壤水吸力随时间变化用幂函数拟合程度较好。

参考文献:

[1] 安丰华, 王志春, 杨帆, 等. 秸秆还田研究进展[J]. 土壤与作物, 2015, 4(2): 57-63.

[2] 赵宏波, 何进, 李洪文, 等. 秸秆还田方式对种床土壤物理性质和小麦生长的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊 1): 60-67.

[3] 李荣, 侯贤清, 吴鹏年, 等. 秸秆还田配施氮肥对土壤性状与水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 289-298.

[4] 刘继龙, 李佳文, 周延, 等. 秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 333-339.

[5] 隋鹏祥, 张文可, 梅楠, 等. 不同秸秆还田方式对春玉米产量、水分利用和根系生长的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 255-261.

(上接第 115 页)

[23] Bodman G B, Colman E A. Moisture and energy conduction during down-ward entry of water into soil [J]. Soil Science of America Journal, 1944, (8)2: 166-182.

[24] 贾书岭. 非饱和重塑土渗透特性试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.

[25] 姚贤良, 程云生. 土壤物理学[M]. 北京: 农业出版社, 1986.

[26] Miller C J, Yesiller N, Yaldo K, et al. Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(9): 722-742.

[6] 郑欣荣, 王利书, 齐鸣, 等. 秸秆还田下灌水量对土壤水分运移特性研究[J]. 节水灌溉, 2018(11): 20-23, 28.

[7] 闪佳黛. 秸秆还田下微咸水入渗特征及土壤水盐运移分布影响[D]. 河北 邯郸: 河北工程大学, 2017.

[8] 郑健, 王燕, 蔡焕杰, 等. 秸秆颗粒形态对沟灌入渗特征影响的试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(1): 66-72, 80.

[9] 王珍, 冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能力的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 75-80.

[10] 张金珠, 王振华, 虎胆·吐马尔白. 具有秸秆夹层层状土壤一维垂直入渗水盐分布特征[J]. 土壤, 2014, 46(5): 954-960.

[11] 王曼华, 陈为峰, 宋希亮, 等. 秸秆双层覆盖对盐碱地水盐运动影响初步研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1395-1403.

[12] 王珍, 冯浩, 吴淑芳. 秸秆不同还田方式对土壤低吸力段持水能力及蒸发特性的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 533-539.

[13] 王苓, 张民, 刘之广, 等. 土壤水吸力对控释尿素养分释放特征的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 434-443.

[14] 信秀丽, 张佳宝, 朱安宁. 土壤水吸力空间分布规律的时间稳定性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 15-19.

[15] 邹焱, 陈洪松, 苏以荣, 等. 红壤积水入渗及土壤水分再分布规律室内模拟试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 174-177.

[16] Azmi M, Ramli M H, Hezmi M A, et al. Estimation of soil water characteristic curves (SWCC) of mining sand using soil suction modeling [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 527(1): 6987-6997.

[17] Li X, Zhang L M, Wu L Z. A Framework for unifying soil fabric, suction, void ratio, and water content during the dehydration Process [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(2): 387-399.

[27] Yang S, Lu T H. Study of soil-water characteristic curve using microscopic spherical particle model [J]. Pedosphere, 2012, 22(1): 103-111.

[28] Indrawan I G B, Rahardjo, H, Leong E C. Effects of coarse-grained materials on properties of residual soil [J]. Engineering Geology, 2006, 82(3): 154-164.

[29] Hu X, Li Z C, Li X Y, et al. Influence of shrub encroachment on CT-measured soil macropore characteristics in the Inner Mongolia grassland of northern China [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 150: 1-9.

[30] 关连珠. 普通土壤学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.