容重对铁尾矿水分运移特征的影响

陈 丹[1]，吕春娟[1,2]，郭星星[1]，王 煜[1]，郭岩松[1]，梁建才[1]

（1.山西农业大学 资源环境学院，山西 太谷 030801；
2.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：[目的] 探究紧实度对铁尾矿水分运移特性的影响，为铁矿区水土保持及植被恢复提供科学依据。[方法] 采用室内一维土柱试验和张力计法，分别测定 1.50，1.55，1.60，1.65，1.70 g/cm³ 这 5 个容重水平下的入渗过程及水分特征曲线。[结果] ①随着容重增加，铁尾矿入渗能力降低，容重与稳渗率、湿润峰距离、累积入渗量呈显著线性负相关关系（$p<0.05$）；②铁尾矿剖面水分含量随土层深度的增加而下降，1.50～1.60 g/cm³ 含水量在不同深度上分层明显，1.65 和 1.70 g/cm³ 尾矿砂剖面含水量分异性较小；③Green-Ampt 模型拟合铁尾饱和导水率与实测值相关系数为 0.886，计算精度较高，Kostiakov 模型拟合不同容重铁尾矿入渗过程效果最佳（$R^2=0.989$）；④铁尾矿在脱湿过程中，高容重下持水能力明显下降，1.60 g/cm³ 持水保水性最好，van Genuchten 模型拟合水分特征曲线表明，饱和含水率（θ_s）、残余含水率（θ_r）、进气值（α）、形状系数（n）等参数随容重增大而减小。[结论] 高度压实严重抑制铁尾矿水分入渗和持水能力，因此复垦修复中应以疏松尾矿基质改善结构特性为主。

关键词：铁尾矿；容重；水分入渗过程；水分入渗模型；水分特征曲线

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)01-0078-07 **中图分类号**：S152.7+2

文献参数：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. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.013；Chen Dan，Lü Chunjuan，Guo Xingxing，et al. Effect of bulk density on water transport characteristics of iron tailings[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(1)：78-84.

Effect of Bulk Density on Water Transport Characteristics of Iron Tailings

Chen Dan[1]，Lü Chunjuan[1,2]，Guo Xingxing[1]，Wang Yu[1]，Guo Yansong[1]，Liang Jiancai[1]

（1. *College of Resources and Environment，Shanxi Agricaltural University，Taigu，Shanxi* 030801，*China*；2. *National Expermental Teaching Demonstration Center for Agricaltural Resources and Environment，Shanxi Agricaltural University，Taigu，Shanxi* 030801，*China*）

Abstract：[Objective] To investigate the influence of compactness on water transport characteristics of iron tailings sand，in order to provide scientific support for soil and water conservation and vegetation restoration in iron mining area. [Methods] The infiltration process and water characteristic curves were measured by means of one-dimensional soil column test and tensometer method at five bulk weight levels of 1.50，1.55，1.60，1.65 g/cm³ and 1.70 g/cm³. [Results] ① As the bulk density increased，the infiltration capacity of iron tailings decreased，and the bulk density had a significant linear negative correlation with the stability of the iron tailings，the cumulative infiltration and the wetting peak distance（$p<0.05$）. ② The water content of the tailings of 1.50～1.60 g/cm³ was obviously stratified with depths，and the water content of the tailings sands of 1.65 g/cm³ and 1.70 g/cm³ was less. ③ The correlation coefficient between the saturated hydraulic conductivity of the iron tailings and the measured value of the Green-Ampt model was 0.886，and the calculation accuracy was high. The Kostiakov model was the best for fitting the different weight-bearing iron tailings infiltration process（$R^2=0.989$）. ④ During the dehumidification process，the water holding capacity drop significantly at levels of high bulk density made. The water holding and water retention performance was the

收稿日期：2018-09-16 **修回日期**：2018-09-28

资助项目：国家自然科学基金青年项目“铁矿干排尾矿坡面生态恢复侵蚀调控机理研究”（41401619）；山西农业大学引进人才科研启动项目（2014ZZ07）；山西省研究联合培养基地人才培养项目（2016JD21）

第一作者：陈丹（1993—），女（汉族），河北省唐山市人，硕士研究生，研究方向为矿区土壤侵蚀。E-mail：1354520704@.qq.com。

通讯作者：吕春娟（1978—），女（汉族），山西省运城市人，博士，副教授，主要从事土壤侵蚀与土地整治工作。E-mail：lcjcwg@126.com。

best at levels of 1.60 g/cm^3. The water characteristic curve fitted with van Genuchten model showed that the saturated water content, residual moisture content, air intake value and shape coefficient decreased with the increase of bulk density. [Conclusion] High compactness seriously inhibited water infiltration and water holding capacity of iron tailings. Loosing tailings matrix should be used to improve the structural properties in the reclamation.

Keywords: iron tailings; bulk density; water infiltration process; water infiltration model; moisture characteristic curve

近年来,由于采矿引起的土地污染和环境破坏以及由此产生的人地矛盾问题日益严重。采矿和复垦过程中由于机械设备反复碾压导致复垦土体紧实度显著增加,严重影响土壤理化性状且降低植被恢复效果,制约着复垦质量[1]。复垦区土壤机械压实已成为国内外土壤物理特性中的研究焦点,研究发现复垦土壤通常在物理特性上有异于一般农田或植被土壤,其土壤容重大且穿透阻力大、入渗慢[2-3]。容重是反映土壤压实程度的重要衡量指标,不同压实状态下水分在土壤中的运移特征影响着入渗及地下径流等水循环过程,对矿区水土侵蚀和植被生态建设至关重要。

铁尾矿是矿区开采矿石产生的大量固体废弃物。据统计,全球拥有超过 2.30×10^{11} t 铁矿石[4],中国作为全球第二大铁矿石生产国,由于选矿技术限制铁尾矿排弃量大,综合利用率不到 10%,远落后于西方发达国家的 60%。山西是中国重要的"铁矿之都",铁尾矿排弃量大,约占原矿的 60%以上。由于尾矿砂昼夜温差大,颗粒凝聚力弱,持水力差[5],长期大量堆存的尾矿在机械化作业下容重高达 1.90 g/cm^3,经降雨和地表径流冲刷过后易板结紧实,表层致密少孔,易引发土壤侵蚀问题。目前容重对入渗影响研究主要以各类土壤及各种工矿区废弃地如煤矸石、粉煤灰等废弃地为主[6-7],容重对水分入渗的影响本质上是通过水流通道——土壤孔隙来实现。李卓等[8]研究发现随容重逐渐增大,大孔隙含量与土壤入渗能力均呈下降趋势。孙增慧等[9]研究了有机重构土体中土壤容重对水分入渗的影响,发现表层覆土容重从 1.2 g/cm^3 到 1.6 g/cm^3,土壤水分入渗深度依次降低,且表层覆土容重 1.5 g/cm^3 和 1.6 g/cm^3 下的土体水分分布无明显差异。胡振华等[10]模拟风化煤矸石入渗研究表明,容重过大会影响煤矸石的稳渗状态,1.20 g/cm^3 煤矸石稳渗率是 1.50 g/cm^3 煤矸石的 103 倍,容重与稳渗率之间符合幂函数递减关系。赵新宇等[11]对红壤水平入渗研究表明,在相同入渗距离,容重越大,土层含水量越小。上述相关研究为非饱和土壤水分运移规律提供了科学依据,然而研究大多集中于煤矿区、红壤和黄土等区域,针对铁尾矿复垦区土壤入渗性能方面的研究较为鲜见,本文拟利用一维土柱水分垂直入渗试验和水分特征曲线,分析压实与铁尾矿入渗能力和持水性能之间的定量关系,以期为铁矿区水土流失治理和植被恢复提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试样品为铁尾矿砂,采集于山西省垣曲县国泰矿业集团泉子沟干排铁尾矿复垦区,地理位置 34°57′—35°27′N, 111°35′—112°20′E,位于黄河北岸,中条山北部,运城市东北隅。属半湿润大陆性季风气候,年平均气温 13.5 ℃,全年平均风速为 2.8 m/s,年均降水量 631 mm。平均海拔 489 m,地形为山间盆地,沟谷纵横、地形破碎。铁矿分布多而散、矿石品位不高,多年露天开采已形成大面积尾矿废弃地,易发生风蚀和水蚀。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,铁尾矿初始含水率为0.63%,颗粒组成采用 MS2000 型激光粒度仪测定,砂粒(0.02～2 mm)、粉粒(0.02～0.002 mm)、黏粒(＜0.002mm)含量分别为 46.62%,38.95%,14.43%。

1.2　试验设计

垂直一维水分入渗试验于 2018 年 4 至 5 月在山西农业大学资源环境学院试验站进行,室内试验温度为 19～23 ℃。试验土柱为内径 10 cm,高 100 cm 的有机玻璃圆筒,底部为均匀排列直径 1 mm 细孔的法兰式透气底板,土柱侧壁每隔 10 cm 开 2 个内径为 5 mm 的圆孔,便于 TZS 土壤水分速测仪测定入渗过程中剖面含水率的动态变化,水分数据采集时间间隔为 10 min。为保证装土均匀,每 5 cm 一层根据所需要控制的容重压实,层间打毛使其形成匀质土体,尾矿砂装填高度为 70 cm。土柱上层盖一层滤纸,并覆盖 1 cm 厚的石英砂以防止供水初始对尾矿表面产生冲击。为探究紧实度对尾矿砂水分入渗的影响,设定 1.50,1.55,1.60,1.65,1.70 g/cm^3 这 5 个容重水平,模拟矿区不同压实状态下的铁尾矿水分入渗过程,入渗过程中,利用马氏瓶供水保证积水深度恒定为 5 cm,按照由密到疏的原则分别以 1,3,5,10,20,30 min 时间间隔记录相应入渗时间下的马氏瓶读数、湿润锋前进距离。

水分特征曲线采用张力计法测定,试验土柱为高 20 cm,内径 10 cm 的有机玻璃土柱,底部均匀的排列有直径约 1 mm 的孔径,将过 2 mm 筛的铁尾矿每3 cm

一层按设计容重压实，土柱设计高度为 15 cm。待土柱内铁尾矿砂样品中水分充分饱和后插入张力计负压管，待读数稳定后开始读数，持续记录水吸力变化，称重法测定尾矿砂含水量，直至基质势不再升高趋于稳定试验结束。以上每个容重水平试验重复 3 次。

1.3 水分入渗模型

水分入渗模型是在大量入渗资料基础上提出的描述土壤入渗过程的物理概念表达，其中入渗参数从水动力学角度上可反映不同容重的水分入渗特征。本文选用 Green-Ampt 模型、Philip 模型和 Kostiakov 模型用以模拟铁尾矿水分垂直运动，探讨容重对入渗模型参数的影响，并比较各模型对铁尾矿水分入渗的适宜性。3 种入渗模型表达式如下：

Green-Ampt 模型

$$i_{Zf}=K_s(1+S_f/Z_f) \tag{1}$$

式中：i_{Zf}——入渗速率(cm/min)；K_s——饱和导水率(cm/min)；Z_f——概化的湿润锋深度(cm)；S_f——湿润锋处平均基质吸力(cm)。下同。

Philip 模型

$$i_t=0.5St^{-0.5}+A \tag{2}$$

式中：i_t——入渗速率(cm/min)；S——吸湿率(cm/min$^{1/2}$)；A——稳定入渗速率(cm/min$^{1/2}$)；t——入渗时间(min)。下同。

Kostiakov 模型

$$i_t=kt^{-\alpha} \tag{3}$$

式中：k——入渗系数，第一单位时间末的土壤入渗率(cm/min)；a——入渗指数。下同。

水分特征曲线拟合采用 van Genuchten 模型。van Genuchten 模型有连续斜率，可得到的光滑曲线，对绝大多数土壤在相当宽的水势范围内具有普遍适用性，其公式表示为：

$$\theta_h=\theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{(1+|\alpha h|^n)^m} \tag{4}$$

式中：θ_h——土壤的体积含水率(cm^3/cm^3)；h——压力水头(cm)；θ_r——残余含水率(cm^3/cm^3)；θ_s——饱和体积含水率(cm^3/cm^3)；α，n，m——经验拟合参数，其中，参数 α 为进气值倒数，参数 n 为曲线形状系数，参数 m 本身并没有实际含义，但参数 m 与 n 存在 $m=1-1/n$ 的数学关系。

采用 Excel 处理数据和作图，SPSS21.0 进行数据统计分析和模型拟合。

2 结果与分析

2.1 容重对铁尾矿入渗过程的影响

2.1.1 容重对入渗速率的影响 图 1 为铁尾矿不同时间点上入渗率与容重间的变化特征，铁尾矿在不同入渗时刻容重对入渗率的影响不同。入渗前期的入渗率随容重增加递减明显，容重由 1.50 递增至 1.70 g/cm^3，5 min 和 20 min 铁尾矿入渗率降幅为 21.5% 和 15.6%，随入渗时间延长，不同容重间的入渗率在 100，210 和 450 min 这 3 个时间点上变化较小，铁尾矿 3 条入渗率变化线近乎成平行直线，方差分析显示不同容重间的入渗率无显著差异($p>0.05$)。容重对铁尾矿初始入渗率影响较大，随着入渗时间的延长，容重对入渗率的影响逐渐减小。

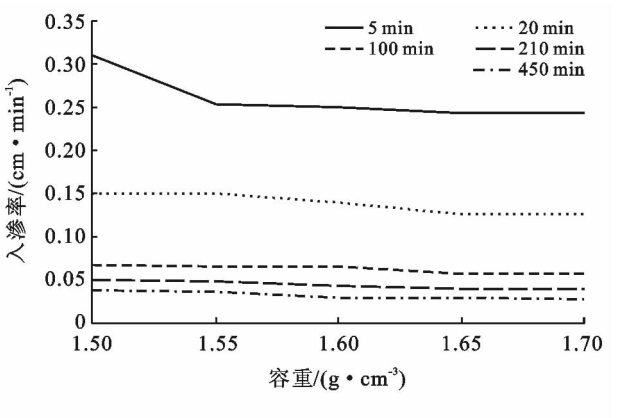


图 1 不同容重不同入渗时段的铁尾矿入渗率

稳渗率是水分入渗速率相对稳定的入渗特征参数，常用其描述土壤渗水强弱程度。图 2 为铁尾矿稳渗率与容重的关系图，铁尾矿稳渗率随容重递增而降低，容重与稳渗率呈显著负相关($p<0.05$)。容重 1.50 g/cm^3 水分传导能力均大于其他几个容重的铁尾矿，不同容重稳渗率介于 0.03～0.04 cm/min 之间，变异系数仅为 13%，这与粉壤土[12]随容重增加稳定入渗率变化幅度较小的研究结果类似。

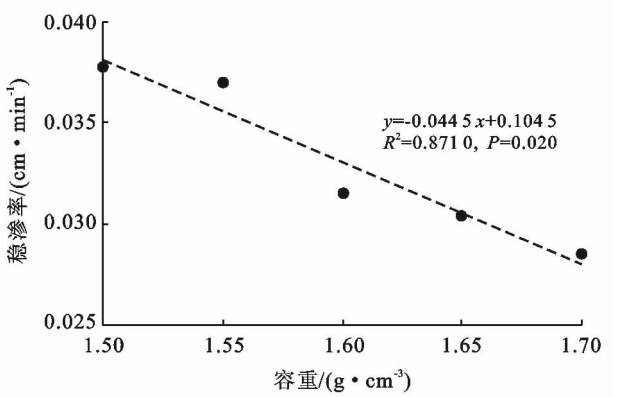


图 2 铁尾矿砂稳渗率与容重关系

2.1.2 容重对湿润峰运移距离和累积入渗量的影响 累积入渗量是在一定时间内，单位面积土壤入渗的

水分总量,可以表征特定土壤的入渗能力。铁尾矿水分累积量随时间的变化如图 3。入渗开始时,累积量增加较快,不同容重累积量曲线在 30 min 内几乎重叠,随入渗时间延长,累积量曲线斜率降低,不同容重间曲线差异逐渐增大。容重与累积入渗量的线性拟合结果表明二者存在极显著负相关关系,其拟合方程为:$y=-35.667x+83.613$,($R^2=0.98$,$p=0.001$),其中 y 为累积入渗量(cm),x 为容重(g/cm^3)。

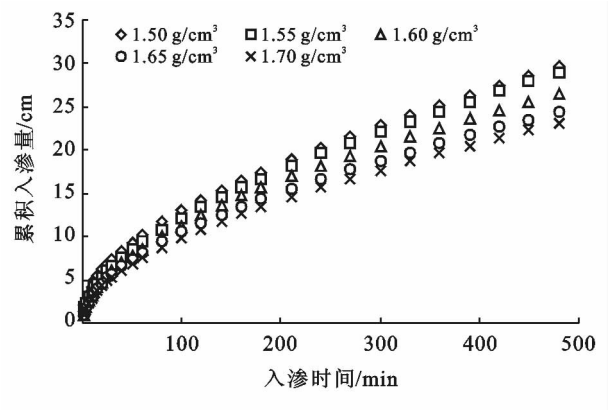


图 3　不同容重铁尾矿累积入渗量随入渗时间变化特征

湿润峰为入渗水与干土交界的平面,指示水分入渗的最大深度。由图 4 可知,湿润峰距离随时间的变化趋势与累积量变化一致,入渗深度均随入渗时间延长而增加。容重增大减弱铁尾矿通透性,相同入渗时间内湿润峰前进距离缩短。为定量表达容重与湿润峰深度之间的关系,对二者进行了回归分析,经检验,二者为显著线性负相关关系,铁尾矿湿润峰深度随容重变化的相关方程为:$y=-41.4x+112.96$($R^2=0.989\,8$,$p=0.000$),其中 y 为湿润峰前进距离(cm),x 为容重(g/cm^3),容重显著影响铁尾矿湿润峰前进距离。

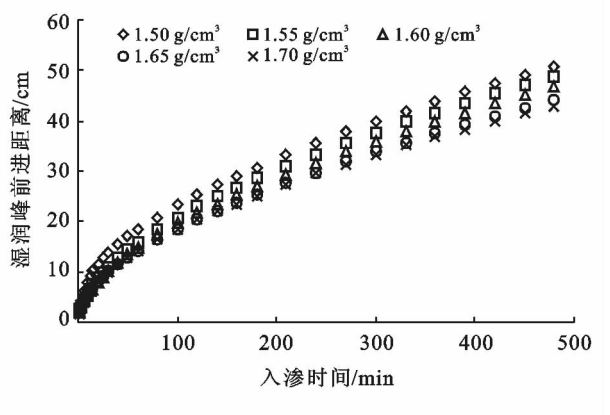


图 4　不同容重铁尾矿湿润峰前进距离与时间变化特征

2.2　容重对入渗模型参数的影响

通过试验数据推求的模型参数如表 1 所示,Philip 模型中的 A 表示稳渗率,但在长时间入渗条件下 A 趋近于于饱和导水率[10]。将 Green-Ampt 模型和 Philip 模型拟合的铁尾矿饱和导水率对比后发现,Philip 模型的稳渗率 A 均小于 Green-Ampt 模型的拟合参数 K_s,这与曾健等[13]模拟的容重对红壤水分垂直特性影响结果一致,这可能是铁尾矿土体中空气的闭塞作用使得尾矿孔隙不可能完全饱和导致的稳渗率小于饱和导水率。将 Green-Ampt 模型和 Philip 模型拟合的饱和导水率分别与实测值对比,Green-Ampt 模型与实测值的相关系数 r(0.886)高于 Philip 模型(0.453),并同时高于 0.05 显著性水平下的临界值 $r_{0.05}=0.632$,因此,Green-Ampt 模型用于模拟不同容重下铁尾矿水分垂直运动效果较好。

表 1　不同容重下铁尾矿的入渗模型参数比较

容重/	K_s 实测值/	Green-Ampt 模型			Philip 模型			Kostiakov 模型		
(g·cm^{-3})	(cm·min^{-1})	K_s	S_f	R^2	S	A	R^2	K	n	R^2
1.50	0.038	0.058	21.902	0.935	1.159	0.013	0.983	0.574	0.445	0.990
1.55	0.037	0.053	7.317	0.953	1.084	0.013	0.994	0.548	0.462	0.993
1.60	0.031	0.052	6.150	0.930	0.961	0.016	0.993	0.484	0.440	0.994
1.65	0.030	0.046	6.356	0.916	0.918	0.013	0.986	0.459	0.444	0.990
1.70	0.030	0.046	6.058	0.880	0.826	0.015	0.978	0.412	0.425	0.988

注:表中 K_s 为饱和导水率;S_f 为湿润锋处平均基质吸力;R^2 为决定系数;S 为吸湿率;A 为稳渗率;K 为入渗系数;n 为样本数。下同。

从 3 个入渗模型模拟铁尾矿水分垂直入渗的拟合精度上来看,Kostiakov 模型拟合效果最佳,决定系数 R^2 均值最高,为 0.989,其次为 Philip 模型,R^2 均值为 0.981,Green-Ampt 模型的决定系数 R^2 最小,均值为 0.942,拟合效果较差。Kostiakov 模型中,入渗系数 K 表征第一单位时间末的入渗速率,铁尾矿 K 值在 0.574～0.412 之间,且均表现为随容重增大,K 值依次减小的趋势,能够解释试验初始入渗率的变化。

2.3　容重对铁尾矿剖面水分分布的影响

由图 5 可以看出,容重对土壤剖面含水率有明显

影响，且相同容重下含水率随土层深度增加而下降。铁尾矿容重从 1.50 g/cm³ 递增至 1.70 g/cm³，剖面水分分层现象越来越弱化，5 个容重在 0—40 cm 深度上，含水率绝对变化值分别为 12%，10.6%，10.5%，7.8%和 9%，说明压实使不同深度间含水率差异变小，主要体现在除表层以下 10—40 cm 土层范围内。5 个容重水平各层含水率在 400 min 左右均能够达到饱和状态，并随容重增加而降低，且表层 0—10 cm 土层含水率始终处于最大值，为水分饱和区，明显高于 10—40 cm 土层，这与薛文强等[14]研究纳米碳对土壤水分分布影响结果一致。这主要是因为表层土随入渗持续的进行，与水分接触面积大，时间长，容易达到过饱和状态；10—20 cm 较表层含水率有大幅下降，容重 1.50，1.55，1.60，1.65，1.70 g/cm³ 分别下降了 23.23%，23.49%，23.24%，23.17%，23.55%，为含水率水分过渡区；20—30 cm 土层含水率较 10—20 cm 变化差异不大，降低了 3.52%～15.79%，为水分传导区域；大于 30 cm 土层接近湿润峰最前缘，为湿润区。

相同土层含水率有随容重增加而减小的变化趋势，容重从 1.50 到 1.70 g/cm³，0—10 cm 表层含水率变化范围为 25.9%～31% ，降幅为 20%，10—20 cm，20—30 cm，30—40 cm 降幅分别为 16.8%，13.4%和 11.6%。相同土层容重越大湿润峰水分到达同一深度所需时间越长，曲线越短。1.65 g/cm³ 和 1.70 g/cm³ 水平水分垂直分布差异小，20—40 cm 土层饱和含水率变异系数分为 28.5%和 22.1%，压实使铁尾矿水分含量大幅减少，有明显的阻水作用，因此从水分含量的角度出发，大于 1.65 g/cm³ 的铁尾矿将不利于尾矿体水分下渗，加大尾矿区产生坡面径流和水土流失的风险。

2.4 容重对铁尾矿水分特征曲线及模型参数的影响

土壤水分特征曲线反映土壤水在非饱和状态下土壤水能态和数量间的关系。由图 6 可知，铁尾矿水分曲线在脱湿初始(<30 kPa)以重力排水为主，水分主要在大孔隙(d>0.01 mm)中运动，含水量较高(18.0%～26.2%)，不同容重间持水量差异明显，之后随吸力上升主要以蒸发释水为主，吸附作用影响越来越大，较低的含水量条件下不同容重间持水量差异不明显。除 1.60 g/cm³ 外，相同吸力下铁尾矿持水量随容重增加而减少，其中 1.60 g/cm³ 在各吸力段持水量显著高于其他处理，1.55 和 1.65 g/cm³ 持水量差异较小，铁尾矿在高度压实 1.70 g/cm³ 下，持水量显著降低，尤其体现在高基质势(<30 kPa)阶段。

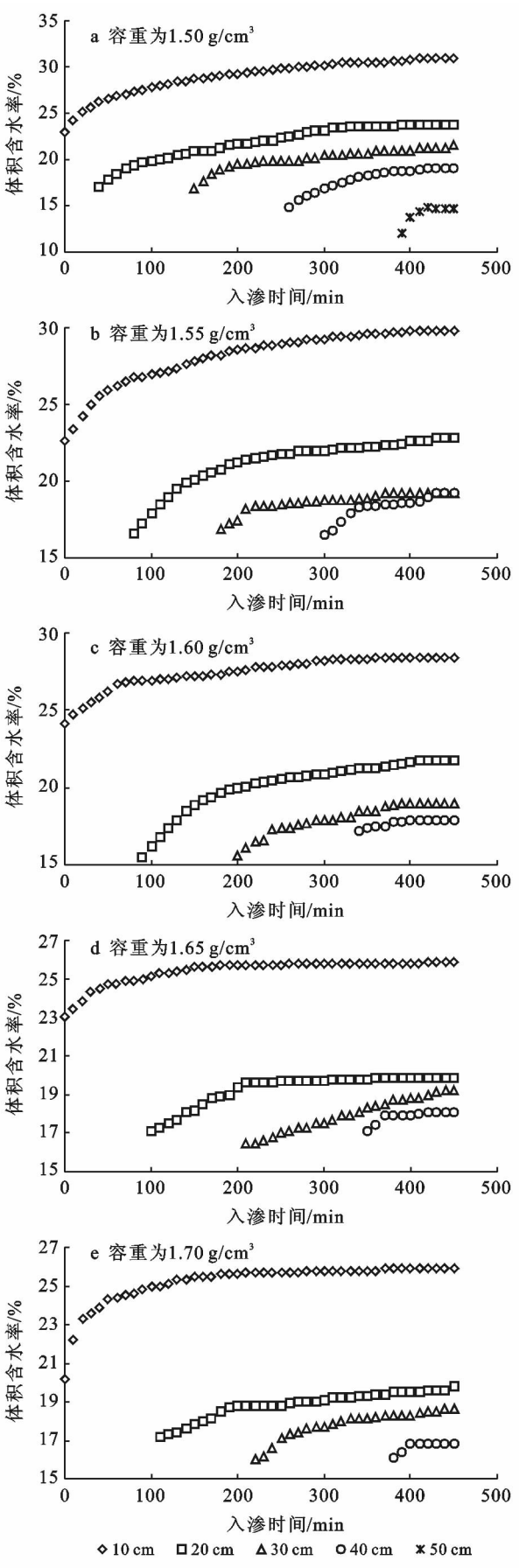


图 5 不同容重铁尾矿剖面水分变化

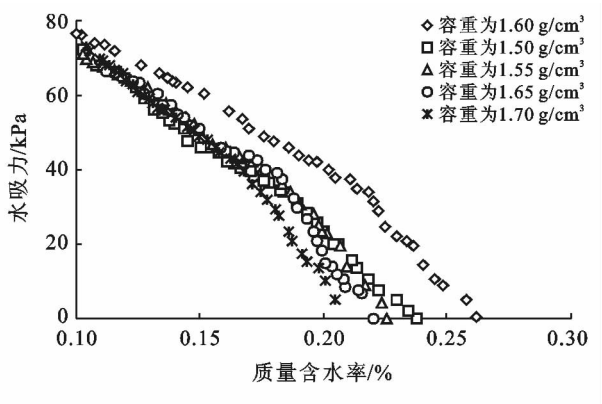


图 6　不同容重铁尾矿水分特征

利用 van Genuchten 模型拟合实测不同容重铁尾矿水分特征曲线(表 2)。由表 2 可知,拟合决定系数 R^2 均大于 0.989 9,残差平方和 SSE 均小于 0.001 9,均方差 RMSE 均小于 0.071 3,精度较高。饱和含水率和残余含水率均表现出随容重增加而减小的趋势,容重从 1.50 到 1.70 g/cm³,饱和含水率和残余含水率分别降低了 11.8%和 14.7%。说明压实不仅使大孔隙数量减少,饱和含水率降低,同时也使铁尾矿在较低水势下保持的水分显著减少,原因在于压实减少了土体中的细小孔隙,减弱了高吸力下孔隙对水分的吸持和保蓄能力,降低残余含水量。进气值为土壤水由饱和转为非饱和状态的负压值,参数 α 值随容重由 1.50 递增至 1.70 g/cm³,铁尾矿进气值分别为 7.5,6.8,6.1,5.3,4.1 kPa。形状系数 n 随容重增大而变大。

表 2　不同容重 van Genuchten 模型拟合参数

容重/(g·cm^{-3})	θ_r/(cm³·cm³)	θ_s/(cm³·cm³)	α	n	m	R^2	SSE	RMSE
1.50	0.047 9	0.367 6	0.013 4	1.468 6	0.319 1	0.993 3	0.000 8	0.057 0
1.55	0.046 4	0.357 2	0.014 7	1.441 0	0.306 0	0.993 6	0.000 7	0.057 4
1.60	0.044 7	0.346 6	0.016 5	1.408 0	0.289 8	0.989 9	0.001 9	0.071 3
1.65	0.042 8	0.335 7	0.018 7	1.370 5	0.270 3	0.990 6	0.001 1	0.057 0
1.70	0.040 9	0.324 4	0.021 4	1.331 0	0.248 7	0.995 2	0.000 5	0.050 4

注:θ_r 为残余含水率;θ_s 为饱和体积含水率;α,n,m 为经验拟合参数;R^2 为拟合决定系数;SSE 为残差平方和;RMSE 为均方差。

容重变化会引起土壤孔隙分配和水分状态的改变,进而影响植物吸收效率。田间持水量和凋萎持水量是农业生产中对植物生长至关重要的水分常数,一般把吸力为 30 kPa 和 1500 kPa 所对应的含水量分别认为是田间持水量和凋萎持水量[15],二者差值即为土壤有效含水量。利用 van Genuchten 模型计算的水分特征常数如表 3。随压实程度的增加,铁尾矿田间持水量减小,凋萎含水量呈现先减少后增加的趋势,但由于在高吸力范围,干容重对水分曲线影响小,故不同容重间凋萎含水量波动较小。铁尾矿最大有效含水量随压实程度增加呈现减少的规律,因此,压实会减弱铁尾矿中水分对植物的有效补给能力,不利于植物生长。

表 3　不同容重铁尾矿水分特征常数

持水量/%	容重/(g·cm^{-3})				
	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70
田间持水量	13.87	13.07	12.34	11.74	11.24
凋萎含水量	4.97	4.85	4.78	4.79	4.87
有效含水量	8.91	8.22	7.55	6.95	6.36

3　讨 论

容重对入渗率的影响因含水率不同而存在一定差异,试验结果证明,容重从 1.50 增至 1.70 g/cm³,铁尾矿剖面相同深度含水率依次减小,且相同时间垂直入渗率降低。这与余冬立等[16]研究容重对海涂土壤水分运动参数的影响类似,即土壤水平扩散率随着土壤含水率增加而增大。研究表明[15],在土壤水分入渗过程中,首先满足土壤颗粒表面所吸附的膜状水,其次为毛细管力吸持的毛管水,最后成为自由水。在低含水率即高容重下,铁尾矿中吸渗的水分仅满足前 2 类水分的吸持,因而入渗率较低;容重小则大孔隙数量多,含水率越大,充斥于孔隙中的自由水也较多,水分下渗空间较大,其水分入渗率加快。

压实度是影响铁尾矿水分入渗性能的重要因素,试验结果表明容重增加会明显削弱铁尾矿入渗性能,这主要因为不同容重改变了铁尾矿孔隙状况,大孔隙和传导孔隙是水分渗透的主要通道,容重小土体相对疏松多孔,过度压实使大孔隙数量减少,水分渗透性减弱。同时容重对初始入渗率影响较为明显,随时间延长,100 min 后不同容重入渗率无显著差异。入渗初期土壤表层与湿润峰前缘位差小而水势梯度大,入渗快,而结构孔隙直接影响水势大小,故容重对水分入渗影响明显;随入渗时间增加,土壤体积膨胀,且土壤空气的包被作用进一步降低入渗率[17],土水势不断

减小直至基质势作用逐渐消失，不同容重水分主要受重力作用缓慢入渗，结构对入渗的影响相对弱化。不同容重铁尾矿稳渗率在 0.03～0.04 cm/min 之间，与城市砂土的 0.67 cm/min，南方红壤的 0.13～0.68 cm/min，粉砂土的 0.35～0.09 cm/min，壤土的 0.05 cm/min 等[13,18-19]均质土壤稳渗率相比，其渗透性较差，表明在面对强降雨时较容易产生地表径流及泥沙侵蚀，因此，对裸砂地基质进行复垦改良，降低压实程度，改善尾矿通透性，提高水分下渗率是很重要的。

压实度对铁尾矿持水性能也有重要的影响，持水性整体上随容重增加而减弱。这与吕殿青等[20]和付晓莉等[21]研究压实对土壤持水性的影响结果一致，吕殿青认为，随着土壤压实程度的增加，黏粒含量高的塿土田间持水量和凋萎含水量随之减小，而黏粒含量较低的黑垆土则呈现逐渐增加的趋势，但是土壤最大有效含水量始终是减小的，压实会降低土壤水分储存能力，不利于植物生长。土壤孔隙是土壤水分运动的空间，孔隙度的大小直接影响着土壤的导水特性，其中大孔隙虽仅占土壤体积的 0.1%～5%，却在很大程度上影响着水分运移[22]。试验发现铁尾矿容重在 1.50～1.70 g/cm^3 内，1.60 g/cm^3 持水性在整个吸力范围内最高，原因可能为铁尾矿结构不良，黏粒含量低，干容重低，则铁尾矿结构过于分散，大孔隙数量多且储水性能差。当容重增加到一定程度时，内部大孔隙就会被挤压成易于持水的中小孔隙，出现持水性能随容重增加而增加的现象[23]，过度压实则使土壤中非毛管孔隙、毛细管孔隙等各类孔隙大量减少，持蓄水分能力降低。因此，对本研究区而言，在复垦实践中，对于结构松散的铁尾矿，容重设置不应过小，否则易造成持水能力的下降，容重 1.60 g/cm^3 最利于水分的保持和植物吸收利用。

4 结 论

(1) 容重与铁尾矿入渗性能为负相关关系，容重越大，入渗速率越小，湿润峰前进距离及累积入渗量依次减少，容重与稳渗率、累积入渗量、湿润峰距离呈显著的线性负相关关系($P<0.05$)。

(2) Kostiakov 模型对模拟矿区铁尾矿水分入渗过程具有较高适宜性，决定系数在 0.985 以上；Green-Ampt 模型较 Philip 模型对铁尾矿饱和导水率有更高的拟合精度($r=0.886$)；van Genuchten 模型可以很好地拟合不同容重水平下铁尾矿水分特征曲线。

(3) 铁尾矿土层含水率随深度增加而减少，铁尾矿土柱容重越高。0—10 cm 表层含水率最易达到饱和状态，相对其他土层其含水率最大；10—40 cm 土层含水率差异变化较小，1.65 g/cm^3 和 1.70 g/cm^3 的铁尾矿剖面含水率明显减小，其与水土侵蚀的内在机理有待进一步研究。

(4) 铁尾矿持水性能在 1.60 g/cm^3 容重下最高，整体上随容重增大而降低，持水性能在<30 kPa 的低吸力范围差异明显。

[参 考 文 献]

[1] 王煜琴，李新举，胡振琪，等. 煤矿区复垦土壤压实时空变异特征[J]. 农业工程学报，2009，25(5)：223-227.

[2] 闵祥宇，李新举，李奇超. 机械压实对复垦土壤粒径分布多重分形特征的影响[J]. 农业工程学报，2017，33(20)：274-283.

[3] Stoessel F, Sonderegger T, Bayer P, et al. Assessing the environmental impacts of soil compaction in life cycle assessment[J]. Science of the Total Environment, 2018, 630(15): 913-921.

[4] Bedi A, Singh B R, Deshmukh S K, et al. An Aspergillus aculateus strain was capable of producing agriculturally useful nanoparticles via bioremediation of iron ore tailings [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 215(1): 100-107.

[5] 吕春娟，毕如田，陈卫国，等. 土壤结构调理剂 PAM 对复垦铁尾矿砂物理性状的影响[J]. 农业工程学报，2017，33(6)：240-245.

[6] 康金林，杨洁，刘窑军，等. 初始含水率及容重影响下红壤水分入渗规律[J]. 水土保持学报，2016，30(1)：122-126.

[7] 裴青宝，赵新宇，张建丰，等. 容重对红壤水平入渗特性的影响[J]. 水土保持学报，2014，28(6)：111-114.

[8] 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.

[9] 孙增慧，张扬，王欢元. 基于 HYDRUS-1D 模型的土壤容重对水分入渗影响的研究[J]. 西部大开发(土地开发工程研究)，2017，2(7)：20-17.

[10] 胡振华，王电龙，呼起跃，等. 风化煤矸石入渗规律模拟[J]. 中国水土保持科学，2008，6(2)：55-59.

[11] 赵新宇，高金龙，古鹏飞. 容重对红壤水平入渗及氯离子运移特性影响[J]. 排灌机械工程学报，2016，34(4)：346-350.

[12] 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.

[13] 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.

(下转第 90 页)

[4] 陈桂坤,张蕾娜,程锋,等.数量质量并重管理的耕地保护政策研究[J].中国土地科学,2009,23(12):39-43.
[5] 王盼盼,宋戈,王越.农用地分等定级及土地开发整理成果在耕地占补平衡中的应用[J].农业工程学报,2016,32(11):258-264.
[6] 顾万帆,蒋玉根,邵赛男,等.富阳市补充耕地的地力现状与提升建议[J].浙江农业科学,2014,55(4):569-572.
[7] 王忠,沈倩莹,沈建国,等.余杭区新垦耕地土壤理化性状调查及培肥改良对策[J].浙江农业科学,2017,58(8):1467-1470,1476.
[8] 杨志臣,吕贻忠,张凤荣,等.秸秆还田和腐熟有机肥对水稻土培肥效果对比分析[J].农业工程学报,2008,24(3):214-218.
[9] 卫婷,韩丽娜,韩清芳,等.有机培肥对旱地土壤养分有效性和酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(3):611-620.
[10] 周江明.不同有机肥对水稻产量和土壤肥力的影响[J].浙江农业科学,2014,55(2):156-162.
[11] 沈建国.余杭耕地质量与管理[M].北京:中国农业科学技术出版社,2014.
[12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京,中国农业出版社,2007.
[13] 黄昌勇.土壤学[M].北京,中国农业出版社,1999.
[14] 赵建阳.蔬菜标准化生产技术[M].杭州,浙江科学技术出版社,2008.
[15] 荣勤雷,梁国庆,周卫,等.不同有机肥对黄泥田土壤培肥效果及土壤酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,50(5):168-1177.
[16] 郭治兴,王静,柴敏,等.近 30 年来广东省土壤 pH 值的时空变化[J].应用生态学报,2011,22(2):425-430.
[17] 曾招兵,曾思坚,刘一锋,等.1984 年以来广东水稻土 pH 变化趋势及影响因素[J].土壤,2014,46(4):732-736.
[18] 邵学新,黄标,顾志权,等.长三角经济高速发展地区土壤 pH 时空变化及其影响因素[J].矿物岩石地球化学通报,2006,25(2):143-149.
[19] 张永春,汪吉东,沈明星,等.长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响[J].土壤学报,2010,47(3):465-472.
[20] 周晓阳,徐明岗,周世伟,等.长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1615-1621.
[21] 孟红旗,刘景,徐明岗,等.长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J].土壤学报,2013,50(6):1109-1116.
[22] 高利华,屈忠义,丁艳宏,等.秸秆不同还田方式对土壤理化性质及玉米产量的影响研究[J].中国水利水电,2016(9):28-34.
[23] 刘义国,刘永红,刘洪军,等.秸秆还田量对土壤理化性状及小麦产量的影响[J].中国农学通报,2013,29(3):131-135.
[24] 袁金华,徐仁扣.生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J].生态环境学报,2011,20(4):779-785.
[25] 勾芒芒,屈忠义.生物炭对改善土壤理化性质及作物产量影响的研究进展[J].中国土壤与肥料,2013(5):1-5.
[26] 马永清,毛仁钊,刘孟雨,等.小麦秸秆的生化他感效应[J].生态学杂志,1993,12(5):36-38.
[27] 杨思存,霍琳,王建成.秸秆还田的生化他感效应研究初报[J].西北农林学报,2005,14(1):52-56.
[28] 吴崇海,顾士领.小麦高留茬的经济效益与配套技术[J].土壤肥料,1996(2):11-14.
[29] 沈裕琥,黄相国,王海庆.秸秆覆盖的农田效应[J].干旱地区农业研究,1998,16(1):45-50.

(上接第 84 页)

[14] 薛文强,周蓓蓓,毛通,等.纳米碳混合层对土壤水分入渗特性及水分分布影响[J].水土保持学报,2018,32(3):152-159.
[15] 雷志栋,杨诗秀.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988:5-216.
[16] 佘冬立,刘营营,刘冬冬,等.土壤容重对海涂垦区粉砂土水分垂直入渗特征的影响研究[J].农业现代化研究,2012,33(6):749-761.
[17] 张晓凤,张旭,蒋晶,等.北京奥林匹克森林公园典型下垫面入渗特性[J].清华大学学报:自然科学版,2012(2):223-228.
[18] 赵云鹏,白一茹,王幼奇,等.城市绿地覆盖砂石后土壤水分入渗过程及模型分析[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2017,45(7):66-72.
[19] 佘冬立,郑加兴,刘营营,等.围垦年限和土壤容重对海涂土壤水分运动参数的影响[J].农业机械学报,2015,46(2):120-125.
[20] 吕殿青,邵明安,潘云.容重变化与土壤水分特征的依赖关系研究[J].水土保持学报,2009,23(3):209-212.
[21] 付晓莉,邵明安.SWCC 测定过程产生的容重变化对 SWCC 参数的影响[J].水土保持学报,2007,21(3):178-182.
[22] 冯杰,尚嫚廷,刘佩贵.大孔隙土壤与均质土壤水分特征曲线比较研究[J].土壤通报,2009,40(5):1006-1009.
[23] 舒凯民,樊贵盛.砂壤黄土比水容量对土壤容重变异敏感性分析[J].土壤通报,2016,47(4):814-819.