

# 污泥掺混改良沙土的水分入渗及再分布规律

黄殿男, 焦美怡, 李琳, 傅金祥, 张贺凯, 常沙

(沈阳建筑大学 辽河流域水污染防治研究院, 沈阳 110168)

**摘 要:**为探究城市生活污水处理厂脱水污泥作为土壤改良剂对风蚀沙土的改良效果,确定合适的污泥沙土掺混比例,试验以污水厂离心脱水污泥与沙漠表层土壤按污泥掺混量为 10%,15%,20%,30%,50%充分掺混,以水分入渗能力、土壤饱和含水率和土壤保水能力为指标,研究了不同掺混比例“泥—沙”复合土壤中水分入渗规律和土壤保水性能,用以确定最佳污泥掺混比例和最佳保水层。结果表明:污泥与沙土的掺混比例对水分入渗湿润锋影响较大。掺混比为 10%的“泥—沙”复合土壤入渗时间最短,速率最大,30%,50%的入渗时间长,速率较慢;不同污泥与沙土掺混比例,土壤水分累积入渗量的大小依次为:10%(54.15 cm)>15%(47.12 cm)>20%(40.80 cm)>沙土(34.97 cm)>30%(23.10 cm)>50%(12.68 cm),累积入渗量与时间关系符合 Kostiakov 土壤水分入渗模型;在污泥与沙土不同掺混比对各土层含水率及水分再分布试验中,污泥与沙土掺混比为 20%的复合土壤为最佳选择,保水性最好的土层是 40—60 cm。

**关键词:**脱水污泥;沙土;水分入渗;土壤改良

**中图分类号:**S152.7<sup>+1</sup>

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2020)01-0189-08

## Water Infiltration and Redistribution of Improved Sand by Sludge Mixing

HUANG Diannan, JIAO Meiyi, LI Lin, FU Jinxiang, ZHANG Hekai, CHANG Sha

(Liaoh River Basin Water Pollution Prevention and Control Institute, Shenyang Architectural University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** To explore the effect of dewatered sludge from urban domestic sewage plants as soil amendments on wind erosion of sandy soil, determine an appropriate mixing proportion of sludge and sandy soil, the test was carried out by mixing centrifugal dewatered sludge with desert surface soil in proportions of 10%, 15%, 20%, 30%, and 50%. Water infiltration capacity, soil moisture content and soil water retention capacity were selected as indicators, the law of water infiltration and soil water retention in different ‘sludge-sand’ composite soils with different mixing ratios were studied to determine the optimum sludge blending ratio and the best water retaining layer. The results showed that the mixing ratio of sludge and sand had a great influence on the moisture infiltration wetting front; the ‘sludge-sand’ composite soil with a mixing ratio of 10% had the shortest infiltration time and the highest rate, while the composite soil with 30% and 50% mixing ratio had longer infiltration time and shorter rate; soil moisture cumulative infiltration under the different ratios of sludge and sand mixing decreased in the order: 10%(54.15 cm)>15%(47.12 cm)>20%(40.80 cm)>sand(34.97 cm)>30%(23.10 cm)>50%(12.68 cm). The relationship between cumulative infiltration and time followed Kostiakov soil water infiltration model. In the test of soil moisture content and redistribution of water in soil with different ratios of sludge and sand, the mixed sandy soil with 20% sludge is the best choice, and soil layer with the best water holding is 40—60 cm layer.

**Keywords:** dewatered sludge; sandy soil; water infiltration; soil improvement

随着城市人口的快速增长,污水处理行业不断发展,污泥产量大幅增加,污泥科学处置是事关生态系

统和人类健康安全的大事<sup>[1]</sup>。目前我国沙化土地面积占国土面积的 1/6 以上,土壤沙化成为我国最为严

收稿日期:2018-12-12

修回日期:2019-03-14

资助项目:辽宁省高等学校基本科研项目(LJZZ2017011),辽宁省教育厅项目(jytcy201820);辽宁省科技厅重点研发计划(2017207002);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07202012)

第一作者:黄殿男(1983—),女,辽宁沈阳人,博士(后),副教授,主要从事污泥处理处置研究。E-mail:7nan@163.com

重的生态问题之一<sup>[2]</sup>。沙化土壤保水能力差,不利于植物生长,是制约沙化土地生态修复的瓶颈问题。污水厂污泥含水率高,且其中水分较难去除,是目前污泥处理处置的难题。本研究旨在通过利用城市污泥治理沙化土地,实现污泥减量化处理,并解决后续环境消纳问题,有效改善沙化土壤保水能力差的缺点<sup>[3]</sup>,实现“废荒同治”。

污泥改良沙化土壤需要科学确定污泥施用量和最佳保水土层,保障补给水分能在沙土中有效蓄存并被植物利用,是该工作的关键。水分在“泥—沙”复合土壤中的入渗规律、各土层的水分再分布及保贮水能力等均是研究重点<sup>[4]</sup>。土壤水分入渗特性不仅影响植物根系分布状况,也是合理调控土壤水分、预防干旱的关键和基础<sup>[5]</sup>。水分再分布是入渗的后续过程,决定着不同土层深度的保水性,直接影响着土壤水分的有效性及植物的生长<sup>[5-6]</sup>,对植物种类的选择也有一定的参考价值。

许多学者对土壤水分入渗进行了研究。邹焱等<sup>[7]</sup>通过室内土柱模拟研究了红壤土水分入渗及水分再分布,发现湿润锋运行距离、累积入渗量与时间的平方根呈线性关系,湿润锋速率与时间呈幂函数关系。王永东等<sup>[8]</sup>对塔克拉玛干风沙土水分入渗规律进行了研究,发现风沙土水分入渗初期速率较大,后逐渐减小,最终达到稳定入渗。肖茜等<sup>[9]</sup>对施用生物炭黄土的水分入渗进行了研究,发现生物炭添加量影响湿润锋进程与累积入渗量。李帅霖等<sup>[10]</sup>室内模拟了降雨淋洗土柱试验,发现土壤水分入渗湿润锋入渗深度与时间呈幂函数关系,累积入渗量与时间符合 Kostakov 水分入渗模型。包含等<sup>[4]</sup>水分入渗及再分布试验研究发现,大兴沙壤土保水最佳土层在 20—35 cm。上述研究均研究水分在单一介质中的输运规律,对于“污泥—沙土”复合介质中水分输运规律研究鲜有报道。

我国利用污泥治理沙化土壤的研究起步较晚,目前相关研究多集中于:污泥掺混改良沙化土壤的含水率、氮磷钾和有机质含量等土壤理化性质指标的变化<sup>[11-14]</sup>,植物生长情况<sup>[15-17]</sup>和污泥应用沙土后环境风险分析<sup>[18-19]</sup>等方面,但对污泥改良沙土水分运移转化规律研究较少。本文采用模拟降雨淋洗的方式,研究沙化土壤表层上覆盖污泥与沙土掺混土的水分入渗及再分布规律,构建水分入渗模型。该研究可为污泥掺混改良沙土技术评估提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验沙土于 2017 年 10 月取自辽宁省阜新市彰武

县风蚀沙化土壤 0—60 cm 土层,按土层深度将沙土编号:1<sup>#</sup> (10—20 cm),2<sup>#</sup> (20—30 cm),3<sup>#</sup> (30—40 cm),4<sup>#</sup> (40—50 cm)、和 5<sup>#</sup> (50—60 cm),分别装袋运回实验室。试验污泥于 2017 年 10 月取自辽宁省沈阳市北部污水处理厂离心脱水车间;样品取回后存放于 4℃ 低温实验室内,当日测样品含水率、pH 值和有机质含量。污泥的含水率、pH 值和有机质含量分别是 81.3%,6.71,66.4%。沙土的含水率、pH 值和有机质含量分别是 4.77%,6.64,0.43%,容重、比重、孔隙度分别是 1.51 g/cm<sup>3</sup>,2.662 g/cm<sup>3</sup>,0.433。污泥机械组成为:砂粒 (50~2 000 μm) 占 98.08%,粉粒 (2~50 μm) 占 1.9%,黏粒 (0.01~2 μm) 占 0.01%;沙土机械组成为:砂粒 (50~2 000 μm) 占 96.55%,粉粒 (2~50 μm) 占 3.43%,黏粒 (0.01~2 μm) 占 0.01%。

### 1.2 试验装置及方法

试验装置为直径 20 cm、高 60 cm 的有机玻璃桶,壁厚 1 cm。在桶上纵向设置 5 个内径 5.5 cm 的圆孔(各圆孔圆心相距 10 cm),用以布设 5 组土壤墒情监测仪探头。桶底面有数个直径 2 cm 的孔(能保证水分自由下渗)。为承受上层沙土,装置底部设置多孔有机玻璃板,板厚 2 cm。桶上方设置直径为 20 cm 的圆形模拟降雨盘,降雨盘通过聚氯乙烯管与水箱、流量控制器、水泵等设备连接,形成模拟淋洗系统。装置示意图如图 1 所示。

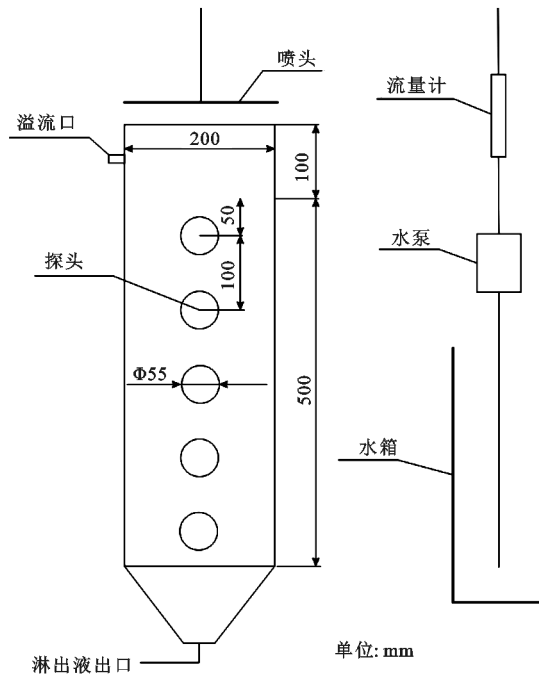


图 1 试验装置示意图

在室内封闭条件下进行模拟试验,室内温度恒定(8℃)。试验土壤与空气接触面积较小,忽略蒸发作用,只单一考虑土壤水分入渗。污泥与沙土按照 10%,15%,20%,30%,50%等掺比(污泥与沙土质量

比为 1:9,1:5.7,1:4,1:2.3,1:1)均匀混合。将分层采集的 5<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 沙土分层填充入 5 个相同模拟土柱装置中,每层厚度 10 cm,为与污泥治沙实际工程相符,将上述 5 组不同处理的复合介质作为 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 的浅层土壤依次装填各土柱内,填充厚度 20 cm。设置沙土水分入渗对照。用去离子水模拟降雨,采取饱和淋洗方式。通过前期课题组对沙土层的饱和淋洗试验结果<sup>[18]</sup>,将模拟降雨参数设置为:降雨强度约为 48 mm/h,降雨总量为 2 L。通过装置侧面所插的土壤墒情监测仪探头进行土壤含水率的监测与记录,从模拟降雨开始计时,前 30 min 每 1 min 记录一次数据,模拟降雨结束后每 60 min 记录一次数据,将各土层含水率变化数据上传至电脑,分析水分在入渗过程中各土层含水率的变化以及模拟降雨结束后各土层水分的再分布情况。2017 年 11 月 2 日进行初次淋洗试验。文中所有数据均为 3 组平行重复测定的平均值。

### 1.3 主要仪器与分析方法

污泥和沙土中有机物含量的测定采用灼烧称重法,称重使用分析天平(精度 0.001);污泥与沙土初始

含水率采用烘干法,使用 YX—HF 马弗炉(上海娥江仪器)烘干;试验过程中土层含水率用土壤墒情监测法,选用 TRM—ZS1 型土壤墒情监测仪(锦州阳光气象科技有限公司)进行测定;污泥与沙土 pH 测试采用电极法,使用 Seveneasy S20 型精密 pH 计(瑞士 TOLEDO 公司)进行测定;污泥及沙土粒径分布采用激光粒度分析仪分析法,使用 MASTERSIZER 2000 型激光粒度分析仪(英国马尔文公司)测定;沙土容重采用环刀法,比重采用比重瓶法,沙土孔隙度=(1-容重/比重)×100%。

### 1.4 数据统计与分析

本试验利用 Excel 2010 进行数据计算、整理及统计,利用 Excel 2010,Origin 9.0 进行图形绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 泥沙掺混对沙土物理性质的影响

从试验污泥与试验沙土机械组成上看,二者较为接近。试验中污泥颗粒组成与沙土颗粒组成较为相似。污泥与沙土掺混比 0,10%,15%,20%,30%,50%的复合土壤各指标及性质如图 2 所示。

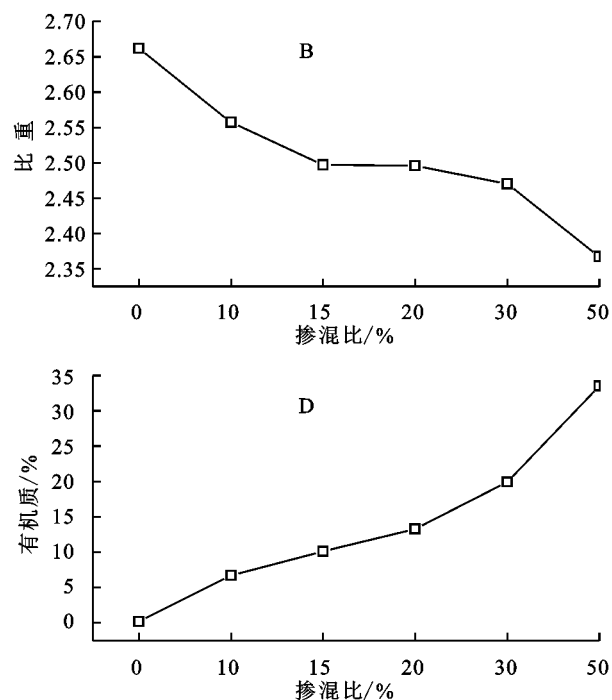
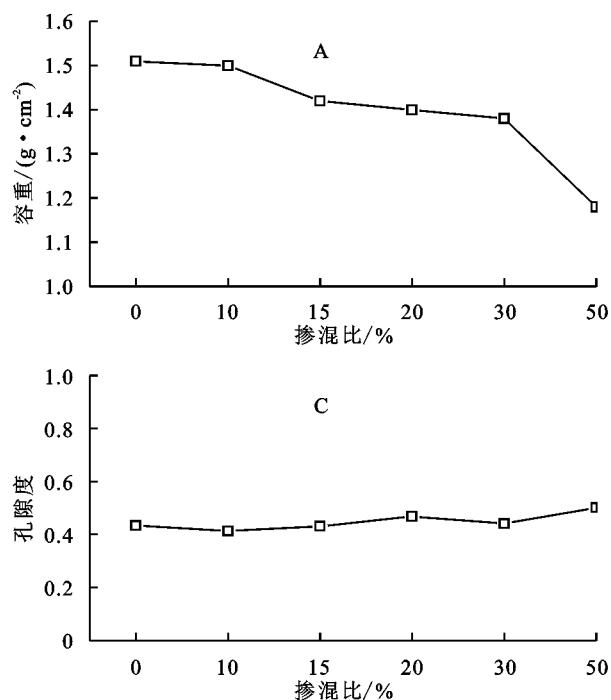


图 2 “泥—沙”不同掺混比例复合土壤性质变化

土壤容重是反映土壤紧实度的一个指标,从图 2A 可以看出,复合土壤的容重随污泥掺混比增加呈现下降趋势,相比沙土而言,50%掺混比土壤容重下降 21.85%,说明随着掺混比的不断增加,土壤紧实度下降。土壤比重主要取决于土壤固相组成物质的种类和相对含量,从图 2B 可以看出,随着泥沙掺混比的不断增加,复合土壤的比重呈现下降趋势,相比沙土而言,

50%掺混比土壤比重下降了 11%,说明随着污泥含量的增加,比重下降。土壤孔隙度反映了土壤蓄水保墒能力,从图 2C 可以看出,随着泥沙掺混比的增加,复合土壤的孔隙度呈现上升趋势,相比沙土而言,50%掺混比土壤孔隙度上升了 15.7%,说明随着泥沙掺混比的不断增加,土壤蓄水能力增强。从图 2D 可以得出,随着污泥掺混比例的增加,复合土壤的有机质含量上升。从复

合土壤的容重、孔隙度、比重、有机质含量指标看出, 掺混比越大, 土壤性质得到明显改善。

### 2.2 污泥沙土掺混比对水分入渗的影响

在土壤水分下渗过程中, 湿润区前端与干土层形成的明显交界面称作湿润锋<sup>[20]</sup>。湿润锋可以直观表示在土壤基质势和重力势共同作用下水分入渗特征。试验中记录湿润锋位置和时间, 并绘制入渗曲线, 分析污泥沙土掺混比对土壤水分入渗的影响, 为确定污泥治沙合适掺混比提供理论参考。

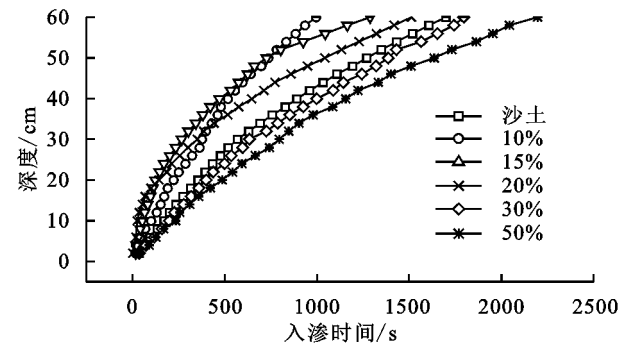


图 3 水分湿润锋随时间变化

#### 2.2.1 泥沙掺混比对沙土水分湿润锋的影响

如图 3 所示, 沙土与 5 种不同掺混比土壤湿润锋入渗深度均随时间而发生变化。不同污泥沙土掺混比例设置的全程水分入渗总时间排序为: 10% (996 s) < 15% (1 289 s) < 20% (1 513 s) < 沙土 (1 699 s) < 30% (1 796 s) < 50% (2 196 s), 表明污泥沙土掺混比例对水分湿润锋入渗深度有明显的影响。在试验过程中, 掺混比 10%, 15% 和 20% 的表层复合土壤以及沙土表面在整个试验过程中都没有产生径流, 而掺混比 30% 和 50% 的表层复合土壤表面产生径流, 水分不易下渗。这是因为污泥与沙土掺混后, 使得沙土中有机质和黏粒含量增加, 改善了土壤状况, 使得土壤颗粒胶结, 形成较大的团聚体, 进而使沙土孔隙度增大<sup>[20]</sup>, 因此当掺混比小于 20% 时, 随掺混比例的增加沙土孔隙度也就越大, 故掺混比为 10%, 15%, 20% 的复合土壤水分入渗速率也比较大。但掺混比 30% 和 50% 的复合土壤入渗速率却小于沙土, 这可能由于污泥保水性好, 加之掺混比例大, 使复合土壤的基质势能升高, 从而导致入渗速率减小, 甚至几乎不下渗<sup>[21]</sup>。

对试验中水分湿润锋下渗距离  $S$  (cm) 与入渗时间  $t$  (s) 进行曲线拟合 (表 1), 发现其符合幂函数  $S = at^b$  ( $a$  表示第一个单位时间内水分湿润锋下移的距离;  $b$  表示曲线的衰减程度), 拟合曲线相关系数  $R^2$  均大于 0.99。污泥掺混比从 0 到 20%,  $a$  值依次增大, 从 30% 到 50% 呈现下降趋势, 体现了污泥添加程度导致的水分入渗特征变化, 0 到 20% 水分入渗速率增大, 30% 到 50% 速率下降。

2.2.2 泥沙掺混比对水分入渗速率的影响 如图 4 所示, 水分入渗速率随时间呈现降低的趋势, 整个曲线可以分成 3 个阶段: 第一阶段为水分入渗速率迅速下降阶段, 此阶段时间较为短暂; 第二阶段为入渗速率缓慢降低阶段, 此阶段较第一阶段时间长; 第三阶段为入渗速率稳定阶段, 此阶段时间最长。第一阶段各污泥沙土掺混比的入渗速率较为接近, 而第二阶段各污泥沙土掺混比的水分入渗速率开始出现明显的变化, 其中掺混比 10% 的水分入渗速率持续变化时间较长, 而稳定入渗速率维持时间较短; 掺混比 15% 和 20% 的水分入渗速率较为接近; 掺混比 30% 和 50% 的复合土壤水分稳定入渗速率维持时间最长。这与水分入渗速率与模拟降雨强度 (雨水与土壤接触时的初速度) 有关。浅层土壤与淋洗雨水直接接触, 入渗速度较大, 而随着深度增加, 土壤层对水分入渗产生阻力, 水分入渗速率减小<sup>[4]</sup>。随着试验进行, 装置内各个土层含水率逐渐升高, 土壤基质势能升高, 对水分的接受能力下降, 入渗速率达到稳定 (稳定入渗速率)。试验结果表明, 污泥沙土掺混比 10% 的土壤入渗能力最强, 50% 的复合土壤入渗能力最弱。

表 1 湿润锋深度与入渗时间拟合

污泥 施用量/%	$a$	$b$	$R^2$
0	0.31235	0.7105	0.99485
10	0.35819	0.74882	0.99598
15	1.69073	0.50798	0.99404
20	2.09598	0.45891	0.99811
30	0.23559	0.74079	0.99575
50	0.22056	0.7331	0.99555

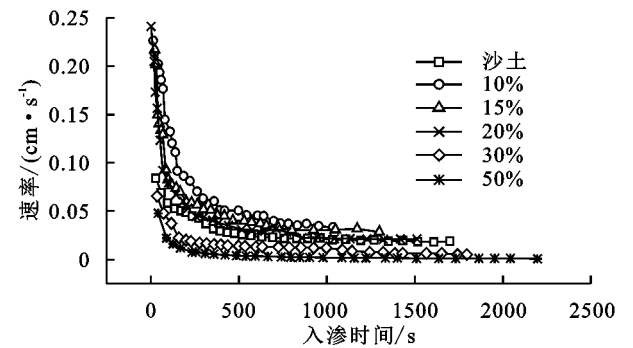


图 4 水分入渗速率随时间变化

### 2.3 泥沙掺混比对水分累积入渗量及土壤水分入渗参数的影响

2.3.1 泥沙掺混比对水分累积入渗量的影响 累积入渗量是指入渗开始后一定时间内通过地表单位面积入渗到土壤中的总水量。水分入渗达到稳定之前, 通常用累积入渗量来表示土壤水分入渗能力<sup>[9]</sup>。

由图 5 可见, 泥沙掺混比对水分累积入渗量影响较为明显, 各泥沙掺混比的复合土壤的累积入渗量均



随时间逐渐增大,复合土壤累积入渗量大小排序为:10%(54.15 cm)>15%(47.12 cm)>20%(40.80 cm)>沙土(34.97 cm)>30%(23.10 cm)>50%(12.68 cm)。与沙土相比,掺混比 10%,15%,20%的复合土壤水分累积入渗量都较大,土壤入渗能力较强,有利于水分入渗,而掺混比 30%和 50%的复合土壤水分则不易下渗,不是污泥改良沙土的适宜比例。

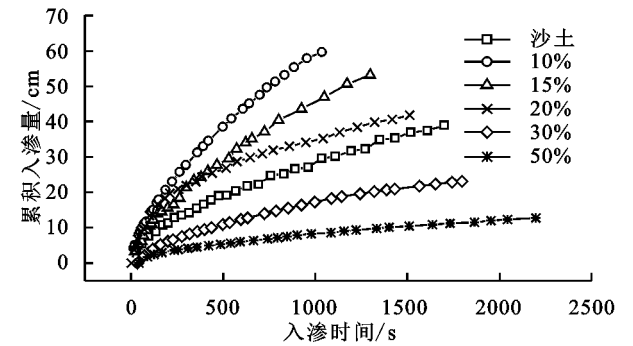


图 5 累积入渗量随时间的变化

2.3.2 泥沙掺混比对沙土水分入渗参数的影响 采用 Philip, Kostiakov 入渗经验公式<sup>[22-24]</sup>对实测结果进行拟合, Philip 入渗经验公式表达式为:

$$I(t)=St^{0.5}+At$$

式中: $I(t)$ 为累积入渗量(cm); $t$ 为水分入渗随时间(s); $S$ 为吸渗率( $\text{cm/s}^{0.5}$ ); $A$ 为稳渗率( $\text{cm/s}$ )。土壤吸渗率( $S$ )是指土壤依靠毛管力吸收或释放液体的能力,是反映土壤前期入渗能力的一个重要指标,对土壤初期入渗率的大小起决定性作用;稳渗率( $A$ )为土壤的稳定下渗强度和稳定入渗率,是衡量土壤入渗性能的指标,随着入渗时间的增加,参数  $A$  对土壤入渗率的大小起决定性作用。

各泥沙掺混比的土壤水分下渗曲线与 Philip 入渗经验公式拟合结果见表 2。可见各掺混比土壤的水分下渗曲线与 Philip 入渗经验公式拟合效果较好。掺混比小于 20%时,土壤吸渗率呈现升高趋势,掺混比大于 30%时,土壤吸渗率呈现下降趋势,掺混比为 50%的吸渗率最低。这是因为泥沙掺混增加了沙土的有机质含量,有机质含量高的土壤,土壤团粒结构多且稳定性好,土壤孔隙分布比较均匀,且毛管孔隙较多,可以贮存大量水分<sup>[25]</sup>,从而提高了土壤的吸水性能,因此在泥沙掺混比小于 20%时,随掺混比的增加,土壤的毛管力对土壤水分吸收的能力增强。而当泥沙掺混比大于 30%时,污泥含量过高水分不易下渗,复合介质吸渗率也随之减小。稳渗率大小排序为:10%>15%>20%>沙土>30%>50%。泥沙掺混比 20%的复合土壤初期水分入渗能力较强,后期稳定入渗能力较弱,说明该比例土壤前期入渗和后期

保水能力较强,有利于植物对水分的吸收。  
Kostiakov 入渗经验公式表达式为:  
$$I(t)=Ktn$$
  
式中: $I(t)$ 为累积入渗量(cm); $t$ 为水分入渗随时间(s); $K$ 和 $n$ 为经验常数。

表 2 Philip 入渗经验公式参数

掺混比例/%	S	A	R <sup>2</sup>
0	0.71945	0.00564	0.99841
10	1.19287	0.02249	0.99851
15	0.88516	0.01768	0.99673
20	1.43446	0.01584	0.99757
30	0.40838	0.01375	0.99513
50	0.00352	0.00906	0.99829

污泥与沙土各个掺混比例的水分入渗曲线与 Kostiakov 公式拟合度均较高,且拟合度高于 Philip 入渗经验公式(表 3)。泥沙掺混比对式中的  $K$  和  $n$  参数的影响较大,其中掺混比例为 20%的  $K$  值最大,表明水分从一开始入渗量较大,此掺混比的复合土壤有助于降雨初期水分迅速下渗,利于植物浅层根系更快的接触以及吸收水分;而其  $n$  值最小,表明随着时间的推移,水分入渗量衰减程度最低,表明在整个水分入渗过程中累积入渗量都呈较高的水平。

表 3 Kostiakov 入渗参数

掺混比例/%	K	n	R <sup>2</sup>
0	0.50265	0.58474	0.99844
10	0.74077	0.63516	0.99969
15	0.51250	0.64979	0.99846
20	2.14825	0.40529	0.99872
30	0.25962	0.60345	0.99697
50	0.0045	0.57775	0.99916

2.4 泥沙掺混比对各土层含水率及水分再分布的影响  
2.4.1 在 0—30 min 内泥沙掺混比对各土层含水率的影响 图 6 列出了泥沙掺混比 10%,15%,20%复合土壤 0—30 min 各土层含水率变化曲线图。如图 6A 所示,沙土的初始含水率接近于 10%,随着试验的进行,第一层、第二层、第三层、第四层、第五层含水率依次迅速升高,当到达 18 min 时,含水率基本保持稳定。图 6B 可以看出,10%掺混比复合土壤表层(1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>)土壤初始含水率接近 20%,而以下三层沙土含水率接近 10%。掺混比 10%的饱和含水率接近 45%,因此当 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 土壤含水率接近饱和含水率时变平缓,而时间维持大概 15 min 又呈现下降趋势,下降到含水率 30%左右。下层沙土从含水率接近 10%处上升至 30%左右,保持平缓。图 6C 可

以看出,15%掺混比的表层(1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>)土壤初始含水率接近 30%,而以下三层沙土含水率接近 10%。掺混比 15%的饱和含水率接近 60%,因此 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 土壤含水率接近饱和含水率后趋于平缓,而时间维持大概 20 min 又呈现下降趋势,下降到含水率 35%左右。下层沙土从含水率接近 10%处上升至 35%左右,保持平缓。图 6D 可以看出,掺混比 20%与掺混比 15%的水分入渗规律较为相似,1<sup>#</sup> 土壤初始含水率为

20%左右,2<sup>#</sup> 初始含水率为 35%左右,以下三层沙土含水率依然接近 10%。掺混比 20%的饱和含水率接近 65%,因此当 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 土壤含水率接近饱和含水率后趋于平缓,时间维持大概 20 min 又呈现下降趋势,但下降到接近 50%又继续保持平稳状态。下层沙土从含水率接近 10%上升到含水率 35%左右保持平稳。可见 20%掺混比例要比 15%的饱和含水率高,保水周期长,蓄水能力较强。

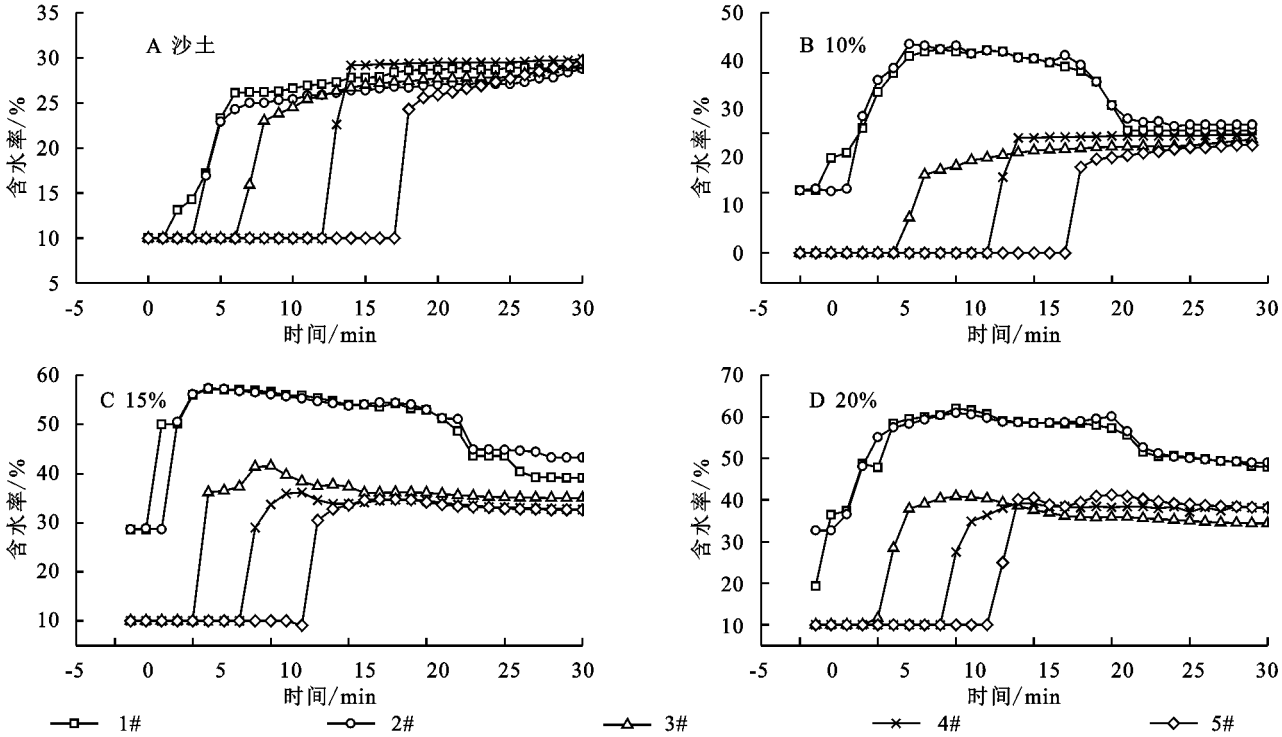


图 6 0—30 min 各泥沙掺混比复合土壤各土层含水率变化

2.4.2 在 60 min 后泥沙掺混比对各土层水分再分布的影响  
不同泥沙掺混比复合土壤中水分在模拟降雨结束后运动并没有停止。在水分重力势和土壤基质势共同作用下,水分由势能高的位置向势能低的位置迁移。图中显示各土层沙土含水率随时间都呈现下降趋势。不同泥沙掺混比对各土层保水性以及保水周期有不同的影响。如图 7A 所示,各土层水分含量大小排序为:5<sup>#</sup>>4<sup>#</sup>>3<sup>#</sup>>2<sup>#</sup>>1<sup>#</sup>,其中,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 沙土含水率下降最快,在 60—4 000 min 内下降幅度为 84.3%,其次为 2<sup>#</sup>,下降幅度为 70.9%。这可能由于浅层(1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>)土壤水土势梯度较高,且随着下层水分继续下渗,下层土壤含水率降低,基质势降低,达到饱和含水率后水分又迅速向下层迁移。这与邹焱等<sup>[7]</sup>研究结果一致。4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 沙土含水率下降幅度最慢,基本保持稳定。在 2 800 min 以后 4<sup>#</sup> 与 5<sup>#</sup> 含水率相同,甚至 4<sup>#</sup> 超过 5<sup>#</sup>,这是由于 4<sup>#</sup> 水分在前期向下迁移,随着含水率的不断降低,基质势降低,5<sup>#</sup> 含水率在稳定的情况下会通过毛管作用补充上层水分,同时 5<sup>#</sup> 水

分继续缓慢向下迁移,所以含水率逐渐与 4<sup>#</sup> 一致甚至小于 4<sup>#</sup>。这与吴奇凡等<sup>[26]</sup>研究结果一致。图 7B 所示各土层水分含量大小排序为:5<sup>#</sup>>4<sup>#</sup>>2<sup>#</sup>>1<sup>#</sup>>3<sup>#</sup>。泥沙掺混比例为 10%的土壤填装在 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>,使得 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 土壤含水率下降幅度减小,4 000 min 处含水率分别为 17.8%和 29.2%,保水性能比沙土有所提高。但依然不如 4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 的保水效果好。图 7C 所示各土层水分含量大小排序为:2<sup>#</sup>>1<sup>#</sup>>5<sup>#</sup>≈4<sup>#</sup>>3<sup>#</sup>。掺混比为 15%的土壤保水性能有明显提高,4 000 min 处含水率分别为 33%和 35.3%,比 4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 的保水效果好。图 7D 所示各土层水分含量大小排序为:2<sup>#</sup>>1<sup>#</sup>>5<sup>#</sup>>4<sup>#</sup>>3<sup>#</sup>。掺混比为 15%和掺混比为 20%的土壤水分再分布曲线较为相似。掺混比 20%的土壤 4 000 min 处含水率分别为 36.5%和 40.4%,保水性较掺混比 15%的复合土壤好。综上所述,泥沙掺混比 20%的复合土壤保水性较好,4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> (40—60 cm) 是最佳的保水深度。

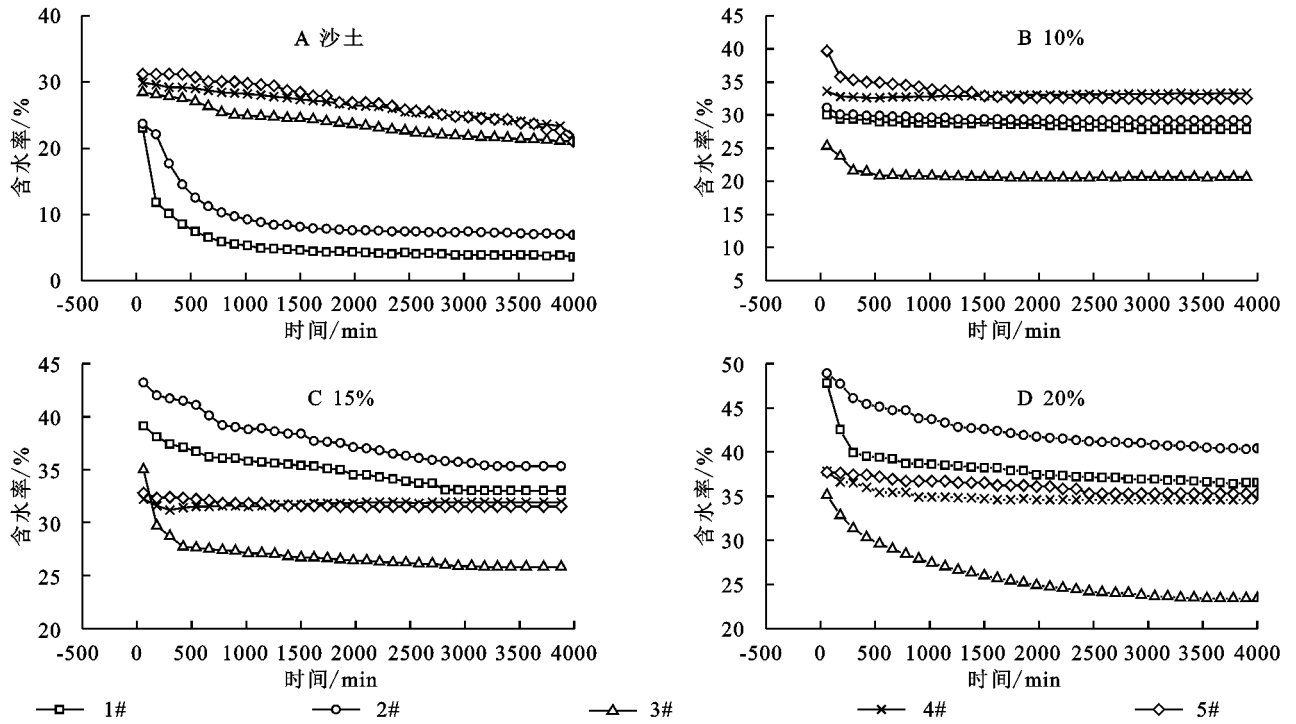


图 7 污泥与沙土不同掺混比 60 min 后水分再分布

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

从泥沙掺混对沙土物理性质的影响来看,泥沙掺混确实可以改良沙土的各项理化指标,且呈现向好转变的趋势。这与黄殿男等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。在整个污泥沙土掺混水分入渗试验后,归纳总结发现,水分入渗基本可以分为 3 个阶段:含水率迅速上升阶段、含水率缓慢上升阶段、含水率稳定持平阶段。水分入渗由水的重力势能和基质势能决定的。当水分入渗之初,沙土含水率接近于零,基质势小,在重力与吸力的共同作用下,土壤含水率迅速升高。随着试验的进行,沙土含水率逐渐升高,沙土基质势能升高,沙土对水分的吸收减弱,因此含水率上升缓慢。当沙土达到饱和时,沙土基质势能接近于零,因此含水率基本保持不变,即达到含水率稳定阶段。这与彭柳军等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。本试验结果表明,10%,15%,20%的复合土壤水分入渗速率及累积入渗量都相对较大,其中泥沙掺混比 20%的复合土壤初期水分入渗能力较强,后期稳定入渗能力较弱,且该掺混比的土壤饱和含水率蓄存周期较长。综上所述,污泥与沙土掺混比为 20%的土壤前期入渗和后期保水能力较强,有利于植物对水分的吸收。因此,泥沙掺混比为 20%的复合土壤为最优选择。

#### 3.2 结论

(1) 污泥掺混可以减小沙土的紧实度,增加沙土的

孔隙度及有机质含量,确实可以起到改良沙土的作用。

(2) 泥沙掺混比对沙土水分入渗深润锋影响较大,掺混比为 10%的泥沙复合土壤入渗时间最短,速率最大,30%,50%的入渗时间长,速率较慢,前期基本不入渗;各个掺混比的水分湿润锋随时间变化曲线遵循幂函数  $S=at^b$ ,相关  $R^2$  均大于 0.99。

(3) 不同泥沙掺混比土壤水分累积入渗量的大小依次为:10%(54.15 cm)>15%(47.12 cm)>20%(40.80 cm)>沙土(34.97 cm)>30%(23.10 cm)>50%(12.68 cm),符合 Kostikov 入渗经验公式。

(4) 从饱和含水率和土壤保水性能来看,污泥与沙土掺混比 20%的复合土壤最佳,而保水性最好的土层为 4# 和 5# (深度在 40—60 cm),可为后续选择种植植物种类提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 王东琴.污泥处理处置技术进展[J].山西化工,2016,36(3):17-19.
- [2] 屠志方,李梦先,孙涛.第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析[J].林业资源管理,2016(1):1-5.
- [3] 李霞,李法云,荣湘民,等.城市污泥改良沙地土壤过程中氮磷的淋溶特征与风险分析[J].水土保持学报,2013,27(4):93-97.
- [4] 包含,侯立柱,刘江涛,等.室内模拟降雨条件下土壤水分入渗及再分布试验[J].农业工程学报,2011,27(7):70-75.
- [5] 吕喜玺,史学正,于东升.用人工模拟降雨研究南方低丘土壤的渗透[J].水土保持学报,1995,9(3):1-8.

- [6] 陈洪松,邵明安.黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J].水科学进展,2003,14(4):513-520.
- [7] 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.
- [8] 王永东,张宏武,徐新文,等.风沙土水分入渗与再分布过程中湿润锋运移试验研究[J].干旱区资源与环境,2009,23(8):190-194.
- [9] 肖茜,张洪培,沈玉芳,等.生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J].农业工程学报,2015,31(16):128-134.
- [10] 李帅霖,王霞,王朔,等.生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):135-144.
- [11] Sui Y, Thompson M L, Mize C W. Redistribution of biosolids-derived total phosphorus applied to a mollisol [J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(4): 1068-1074.
- [12] Casado-Vela J, Sellés S, Navarro J, et al. Evaluation of composted sewage sludge as nutritional source for horticultural soils [J]. Waste Management, 2006, 26(9):946-952.
- [13] Wu L, Cheng M, Li Z, et al. Major nutrients, heavy metals and PBDEs in soils after long-term sewage sludge application[J]. Journal of Soils and Sediments, 2012,12(4):531-541.
- [14] 赖发英,王国锋,孙永明,等.城市污泥对矿区土壤性状的影响[J].核农学报,2010,24(2):349-354.
- [15] 李东洁.污泥及赤泥农用对油菜生长、品质及土壤环境的影响[D].河北保定:河北农业大学,2013.
- [16] 王洋洋.污泥用量对土壤重金属积累及空心菜品质的影响[D].郑州:河南农业大学,2008.
- [17] Singh R P, Agrawal M. Variations in heavy metal accumulation, growth and yield of rice plants grown at different sewage sludge amendment rates[J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2010,73(4):632-641.
- [18] 黄殿男,谭杰,傅金祥,等.城市污水厂污泥改良水蚀沙土对地下水风险模拟[J].生态学杂志,2017,36(10):2926-2932.
- [19] 王新,周启星.污泥堆肥土地利用对树木生长和土壤环境的影响[J].农业环境科学学报,2005,24(1):174-177.
- [20] 张启昌,孟庆繁,兰晓龙.黄土低山丘陵区湿润锋运动的试验研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(4):84-88.
- [21] 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.
- [22] 原林虎. PHILIP 入渗模型参数预报模型研究与应用 [D].太原:太原理工大学,2013.
- [23] 王家智. Kostiakov 模型在辽西低山丘陵区土壤水分中的应用[J].水科学与工程学报,2015(6):35-37.
- [24] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [25] 黄殿男,谭杰,傅金祥,等.城市污水处理厂污泥对沙漠化土壤的改良效果[J].水土保持学报,2017,31(1):326-330.
- [26] 吴奇凡.层状土壤水分运动特征及植物生长适宜性 [D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [27] 彭柳君.水在原状黄土中的入渗过程研究[D].北京:北京工业大学,2016.

(上接第 188 页)

- [9] 杜昭阳,辛磊,李超,等.基于质量评价的耕地建设分区研究:以河北省望都县为例[J].农业现代化研究,2013,34(6):733-737.
- [10] 张孟容,毕如田,赵建民,等.基于分区决策树的省级耕地地力评价:以山西省为例[J].土壤通报,2016,47(3):580-587.
- [11] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit Region[J]. Economic Geography, 1970,46(2):234-240.
- [12] 李武艳,朱从谋,王华,等.浙江省耕地质量多尺度空间自相关分析[J].农业工程学报,2016,32(23):239-245,315.
- [13] 王守坤.空间计量模型中权重矩阵的类型与选择[J].经济数学,2013,30(3):57-63.
- [14] 赵映慧,修春亮,姜博,等.1990 年代以来空间极化研究综述[J].经济地理,2010,30(3):383-387.
- [15] 兰安军,张百平,熊康宁,等.黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析[J].地理研究,2003,22(6):733-741,811.
- [16] 王治国,王春红.对我国水土保持区划与规划中若干问题的认识[J].中国水土保持科学,2007,5(1):105-109.
- [17] 郭梁,Andreas Wilkes,于海英,等.中国主要农作物产量波动影响因素分析[J].植物分类与资源学报,2013,35(4):513-521.