

黏土夹层位置对黄河泥沙充填复垦土壤水分入渗的影响

王晓彤¹, 胡振琪^{2*}, 赖小君¹, 梁宇生¹

(1. 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 北京 100083; 2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221000)

摘要: 在中国东部地区, 土地复垦的一项重要任务是将采煤沉陷地复垦为耕地, 复垦后的耕地生产力水平应接近损毁前的水平。然而, 采用传统的黄河泥沙一次性充填后覆盖一定厚度土壤层的复垦方式, 复垦后土壤持水性差, 生产力水平低。夹层式充填复垦能够有效改善传统充填复垦土壤的水分特性, 该文研究夹层位置对黄河泥沙充填复垦土壤水分入渗过程的影响, 共设计当地普通农田土壤剖面(CK1), 传统“上土下沙”土壤剖面构型(CK2)及 5 个夹层式土壤剖面构型处理 T1~T5: 在 60 cm 厚的黄河泥沙充填层中的不同位置夹 20 cm 厚土层(黏土层), 夹层距离表土距离分别为 50 cm (T1), 55 cm (T2), 60 cm (T3), 65 cm (T4) 及 70 cm (T5)。通过室内入渗试验, 分析不同位置设置夹层后土壤水分入渗特性及含水率分布情况, 优选适应于该地区的夹层式土壤剖面构型。结果表明: 入渗率随着夹层深度的增加呈先增加后减小的趋势, 即夹层位置距离土表 55 cm 为一临界深度, 此时重构土壤的入渗率最低、湿润锋的运移速度最慢、阻水效果最强, 但考虑到研究区强降雨天气, 易形成地表径流。当心土夹层位置距离土表 60 cm 时, 更接近普通农田土壤水分入渗特性, 是黄河泥沙夹层式充填复垦的理想选择。该研究对深入探讨黄河泥沙夹层式充填复垦内部作用机理和指导滨黄河地区采煤沉陷地的土地复垦具有重要意义。

关键词: 泥沙; 入渗; 复垦; 黄河; 土壤重构; 黏土夹层

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.011

中图分类号: TD88

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-18-0086-08

王晓彤, 胡振琪, 赖小君, 梁宇生. 黏土夹层位置对黄河泥沙充填复垦土壤水分入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 86—93. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.011 <http://www.tcsae.org>

Wang Xiaotong, Hu Zhenqi, Lai Xiaojun, Liang Yusheng. Influence of clay interlayer position on infiltration of reclaimed soil filled with Yellow River sediment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(18): 86 — 93. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.011 <http://www.tcsae.org>

0 引言

井工煤矿开采往往导致地表下沉, 造成大量沉陷地, 对生态环境产生严重破坏。中国井工煤矿占 75%以上^[1-2], 预计到 2020 年采煤沉陷地面积将累积达 184 万 hm²^[3]。在中国东部的煤粮复合区, 大面积的耕地正在和将要被破坏, 使得矿区耕地资源严重不足。耕地是人类赖以生存的基本资源, 进入 21 世纪后人地矛盾逐渐加剧, 因此采煤沉陷地复垦成为中国亟待解决的问题。

自 20 世纪 80 年代以来, 徐州、淮南、济宁、德州等地采用充填技术复垦了大量土地。该项技术通常利用待复垦区域易获取的固体废弃物, 例如粉煤灰、煤矸石、淤泥及泥沙等, 先将其一次性充填设计标高, 然后将一定厚度的土壤覆盖于表层。这样既处理了废弃物, 又复垦了沉陷区被破坏的土地, 经济与环境效益十分突出^[4]。但存在煤矸石、粉煤灰充填物料不足及污染的风险^[5-6], 使得这种技术的推广受到限制。相对而言, 黄河泥沙中各项重金

属含量均不超出国家二级质量标准, 可视作一种绿色安全的充填材料^[7]。黄河是世界上含沙量最大的河, 大量的泥沙在黄河的中下游淤积, 政府每年都需要投入大量的资金进行黄河中下游的清淤工作。采用黄河泥沙充填复垦采煤沉陷地实现了一举两全, 既完成了黄河清淤工作, 又能够解决充填材料不足的问题。但是黄河泥沙质地属壤砂类, 砂粒质量分数将近 80%, 持水性差^[8], 在覆盖土壤层厚度不足 40 cm 的情况下, 农作物在生长期所需灌溉频率是正常农田的 2 倍以上, 即使如此, 土壤剖面各层含水率仍显著低于正常农田, 小麦产量仅为正常农田的 56%左右^[7]。黄河泥沙充填层的存在使得充填复垦后的土壤剖面结构, 较未损毁的农田土存在较大的差异, 尤其是土壤的物理特性^[9]。为了改善黄河泥沙一次性充填复垦所形成的“上土下沙”土壤剖面漏水漏肥的不足, 胡振琪等提出黄河泥沙夹层式充填复垦技术, 即在黄河泥沙充填层中夹黏土层的方式^[10]。然后, Hu 等^[11]又通过室内种植试验从土壤理化性质、生物量等角度研究了黄河泥沙夹层式充填技术的优势及不足。同时, 其团队^[10]为解决黄河泥沙夹层式充填复垦技术排水固结周期长的难题, 在充填复垦工艺上进行了相应的完善, 通过多层多次交替式充填复垦工艺, 实现了夹黏土层式多层土壤剖面的野外构建, 并在山东省德州市邱集煤矿西侧采煤沉陷地进行了黄河泥沙夹层式充填复垦的实践验证, 验

收稿日期: 2019-04-29 修订日期: 2019-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41771542)

作者简介: 王晓彤, 博士生, 主要从事土地复垦与生态修复研究。

Email: xiaotong0532@126.com

*通信作者: 胡振琪, 教授, 博士生导师, 主要从事土地复垦与生态修复研究。Email: huzq1963@163.com

证结果表明, 夹层式土壤剖面构型的小麦产量当年可以当年达到甚至高于对照农田。然而, 对夹层式土壤剖面结构内部的作用机理并未展开详细的探讨。

土壤水分入渗是水文循环的重要组成部分，它在灌溉、产流、水土流失、养分和污染物输送等诸多现象中起着重要作用^[12-13]。土壤结构由简单到复杂的改变，使得土壤的入渗过程变得更为复杂^[14]。Wang 等^[15]研究发现，煤矸石重构土壤剖面结构的改变对复垦后土壤水力特性及含水率分布情况均产生不同程度的影响。王春颖等^[16-17]通过室内土柱一维入渗试验，研究表明土壤结构中夹层的存在能够起到阻水作用，同时证明层状土壤夹层质地的不同能够明显改变水分的入渗特性。夹层结构会改变土壤水分的入渗性能，同时影响了水的分布状况^[18]，入渗结束后对土壤水分重新分配的研究也取得了丰富的成果^[19-20]，由于粗层限制了细层孔隙压力的增加，土壤含水率与基质势之间存在明显的延滞效应^[21]，夹砂层的含水率较低，但其随着深度的增加而呈现增加趋势^[22]。尽管对于层状土壤水分入渗规律的研究，在土壤物理学领域起步较早，并取得了相对成熟的理论。但是关于夹层位置对黄河泥沙充填复垦土壤水分运动的研究还未曾涉及。

黄河泥沙充填复垦采煤沉陷地, 是对土壤剖面的重构, 重构后的土壤属于人造土壤, 可纳入到人为土的范畴^[23]。本文针对黄河泥沙夹层式充填复垦土壤, 研究水分在这种人为构造的夹层式土壤内入渗、扩散等的作用机理。通过垂直一维入渗试验, 分析不同夹层位置对重构土壤入渗规律的影响, 并对照普通农田土壤的水分入渗特性, 优选出适宜的夹层位置, 为黄河泥沙夹层式充填复垦在滨黄河地区采煤沉陷地的推广应用提供依据。

1 材料与方法

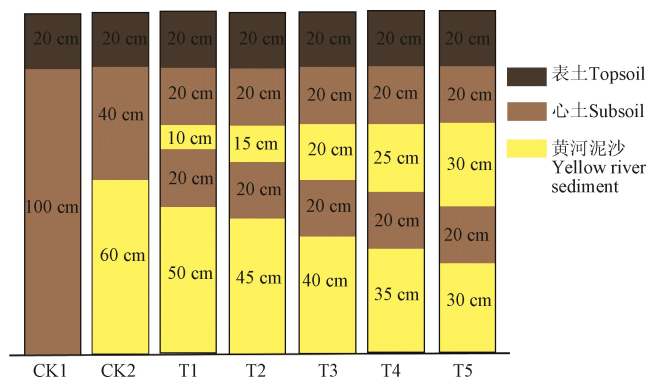
1.1 供试土壤

为模拟黄河泥沙夹层式充填复垦土壤,在中国矿业大学(北京)土地复垦与生态恢复重点实验室进行土柱入渗试验。填充土柱所需材料包括表土(0~20 cm)、心土(>20~60 cm)和黄河泥沙。表土和心土均采自于山东省德州市齐河县邱集煤矿的采煤沉陷地(36°28'52"N, 116°28'03"E),该地已有10 a未种植农作物。黄河泥沙采自于山东省德州市齐河县邱集靳庄引黄干渠(36°29'40"N, 116°28'54"E),距离采煤沉陷地1.89 km。采集运回的3种充填材料风干后,经过碾压、磨碎、过2 mm筛,分别混合均匀后备用。采用时域反射仪(time domain reflectometry, TDR)测定表土、心土和黄河泥沙的初始体积含水率,分别为0.067、0.083、0.024 cm³/cm³。采用环刀法测定表土、心土和黄河泥沙的容重分别为1.35、1.43、1.5 g/cm³。通过吸管法测定供试土壤的颗粒组成,依据美国农业部制,粒径在≤0.002, >0.002~0.05, >0.05~2 mm的范围,其中表土所占的体积分数分别为20.43%、70.16%、9.42%,其质地类型为粉黏壤;心土所占的体积分数分别为62.54%、33.16%、4.3%,其质地类型为黏土;黄河泥沙所占的体积分数分别为3.8%、

18.28%、77.92%，其质地类型为壤砂土。按照毛管孔隙指 0.0002~0.01 mm 的孔隙，而非毛管孔隙指 >0.01 mm 的孔隙^[24]，计算得到表土、心土及黄河泥沙的毛管孔隙度分别为 30.25%、24.82%及 13.61%，非毛管孔隙度分别为 17.52%、12.57%及 31%。

1.2 试验设计

试验土柱高为 120 cm, 共设计 7 个处理, 每个处理设置 3 个重复。7 个处理如图 1 所示, 包括: 普通农田土壤 (CK1)、“上土下沙”的传统土壤剖面构型 (CK2) 及含 20 cm 黏土夹层的夹层式黄河泥沙充填复垦土壤 (T1~T5)。传统黄河泥沙充填复垦土壤将黄河泥沙填充在土表以下 60 cm, 夹层式黄河泥沙充填复垦土壤在保留底层填充黄河泥沙的基础上, 考虑了研究区种植作物 (小麦-玉米) 根系的分布特征^[25], 选取距离土柱上端 50 (T1)、55 (T2)、60 (T3)、65 (T4)、70 (T5) cm 处, 将原本覆盖在黄河泥沙层上的部分 (20 cm 厚) 心土层, 分别夹在黄河泥沙充填层中。



注：表土为粉黏壤，心土为黏土。
Note: Topsoil is silt clay loam and subsoil is clay.

图 1 不同处理土壤剖面示意图

Fig.1 Schematic of soil profile for different treatments

1.3 试验过程

室内一维薄积水入渗试验在内直径 19 cm, 高为 130 cm 的有机玻璃管中进行(填装土柱高度为 120 cm), 如图 2 所示。

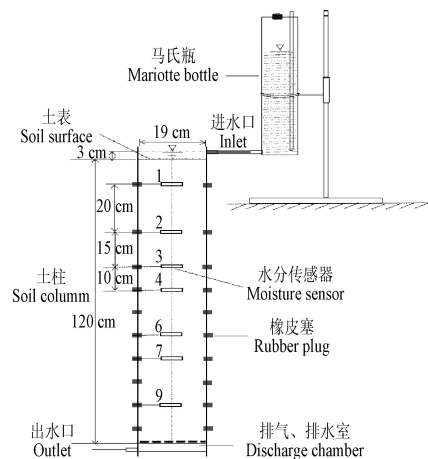


图2 入渗试验装置

Fig.2 Experimental setup of infiltration

有机玻璃管顶端 5 cm 用于供水,接下来 120 cm 用于填装土柱,填装土柱的土壤剖面设计如图 1 所示,总共 7 个处理,每个处理重复 3 次。有机玻璃管壁最底部设有 5 cm 高的排气、排水室,以减少空气禁锢对入渗的影响。马氏瓶内径 10 cm,高为 50 cm,在整个入渗试验过程中用于恒定供水水头,另外通过读取瓶内水分在一定时间内的下降刻度,并进行累积入渗量的计算,同时对对应求出不同时刻的入渗率(取值为读取累积入渗量的值和对对应入渗时间的比)。土壤水分传感器(ECH₂O),连接数据采集器(EM50)用于记录土壤剖面含水率随时间的变化状况。

由于研究区内地下水埋深较大,可看作自由排水,下边界直接连通排气排水室,不做地下水位的模拟处理。装土前在土柱底层垫滤网,上覆滤纸,防止黄河泥沙颗粒,从底部挡板的小孔漏出。表土、心土、黄河泥沙分别按照约 1.3、1.4 及 1.5 g/cm³ 的容重,称取 5 cm 厚度的质量后分层填装,层间打毛,并分别在距离土表 10、30、45、55、75、85、105 cm 处安插传感器,土柱填装完成后放置 48 h,开始入渗试验。上边界条件为定水头 3 cm 薄积水入渗。计算好设定水头 3 cm 厚度所需水量,用量筒量出,瞬时灌入土柱,同时打开马氏瓶出水口阀门,按下秒表,调整马氏瓶的高度,保持恒定水头 3 cm,开始入渗试验。试验按照由密到疏的原则(每隔 2、10、30、60、120 min),记录湿润锋的位置及通过马氏瓶读取累积入渗量,同时设定数据采集器步长为 5 min 自动记录土壤水分传感器探头处土壤含水率随时间的变化。直至湿润锋到达土柱最底部,停止马氏瓶供水,入渗试验完成。

1.4 入渗模型及评价指标

Kostiakov 模型是一种常见的入渗模型^[26]。本研究选择 Kostiakov 模型,采用最小二乘法对各处理试验数据进行拟合,分析模型模拟普通农田土壤(CK1)及 2 种黄河泥沙充填复垦方式下所形成的“上土下沙”土壤剖面(CK2)及“夹层式”土壤剖面(T1~T5)土壤水分入渗过程的适用性。

Kostiakov 入渗模型为

$$I(t)=kt^n \quad (k>0, 0<a<1) \tag{1}$$

式中 $I(t)$ 为累积入渗量, cm; t 为入渗时间, min; k 和 n 为模型经验参数。

采用决定系数(R^2)及相对均方根误差(relative root mean square error, RRMSE)作为评价 Kostiakov 模型和 Horton 模型模拟土壤水分入渗效果的指标参数,其中 R^2 的值越接近于 1, RRMSE 值越小,说明所选用的入渗模型拟合效果越好。

2 结果与分析

2.1 夹层位置对入渗率的影响

入渗率的大小是多种因素综合作用的体现,这些因素主要包括土壤初始含水率、质地、土壤构造、供水等^[27]。本研究在控制其他因素不变的情况下,研究土壤构造的改变(黄河泥沙层中心土夹层的不同位置)对入渗率的影响。为了更好地说明不同夹层位置对重构土壤入渗率

的影响,分 3 种情况计算入渗率:1)各土柱整体的稳定入渗速率;2)夹层式土柱湿润锋从到达到穿透心土夹层上方的黄河泥沙层的平均入渗率;3)夹层式土柱心土夹层的平均入渗率。

对于土柱整体的入渗率而言,不同处理随时间的变化趋势相同,均快速减小而后趋于稳定(图 3)。主要原因是由于在入渗初期,表层土壤的初始含水率很低,具有较高的土壤水吸力,入渗率很大。随时间的推进,土壤含水率不断增加,土壤水吸力不断减小,在 1 000 min 左右,不同处理的入渗率逐渐趋于稳定,如表 1 所示。将各处理 1 000 min 后的稳定入渗率进行单位转化后分别统计,能够更清晰地对比不同处理稳定入渗率(为入渗稳定后累积入渗量和入渗时间的比)的差异。CK2 的稳定入渗率最高,是 CK1 (0.288 cm/h) 的 1.18 倍。T2、布设夹层后较 CK2 的稳定入渗率均有了改善,降低了 29.47% ($P<0.05$)。T2 均显著性低于 CK1、CK2、T1、T3、T4、T5,而 T1 与 T3、T4、T5 之间,CK1 与 T3 之间不存在显著性差异($P>0.05$)。说明 T2 的减渗效果最强,而 T3 的稳定入渗率较 CK1 更为接近。

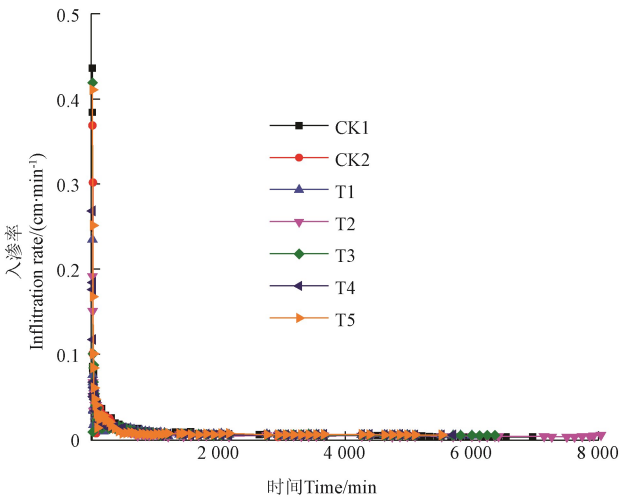


图 3 不同处理入渗率随时间的变化

Fig.3 Infiltration rate against time in different treatments

表 1 不同处理的入渗特性统计

Table 1 Statistics of infiltration characteristic of different treatments

处理 Treatment	心土夹层距土 表距离 Distance of clay interlayer from soil surface/cm	稳定入渗率 Stable infiltration rate/(cm·h ⁻¹)	心土夹层上方泥沙 层的平均入渗率 Mean infiltration rate of sediment layer above clay interlayer/ (cm·h ⁻¹)	心土夹层的 平均入渗率 Mean infiltration rate of clay interlayer/ (cm·h ⁻¹)
CK1	无	0.288b	—	—
CK2	40	0.342a	—	—
T1	50	0.314ab	0.327c	0.312c
T2	55	0.241c	0.280d	0.258e
T3	60	0.306b	0.328c	0.305d
T4	65	0.327ab	0.353b	0.323b
T5	70	0.337ab	0.361a	0.340a

注: 同列字母不同则存在显著差异 ($P<0.05$)。
Note: Different letter in same column indicates significant difference ($P<0.05$).

对夹层式土柱 T1~T5, 湿润锋从到达穿透心土夹层上方的黄河泥沙层的平均入渗率及心土夹层的平均入渗率如表 1 所示。不同处理黄河泥沙层的平均入渗率: $T5 > T4 > T3$ (或 $T1$) $> T2$ ($P < 0.05$)。湿润锋进入心土夹层后由于导水障碍, 入渗率将进一步减小, 不同处理心土夹层的平均入渗率: $T5 > T4 > T1 > T3 > T2$ ($P < 0.05$)。T2 在心土夹层和其上的黄河泥沙层中平均入渗率均为最低, 分别为 0.280 和 0.258 cm/h。

综上, 不同心土夹层位置的减渗效果不同, 随着夹层位置 (心土夹层上方泥沙层厚度) 的增加, 减渗效果呈先增加再减小的趋势, 当黄河泥沙中心土夹层离土表为 55 cm (T2) 时, 减渗效果最强。其中, 黄河泥沙中心土夹层离土表为 60 cm (T3) 时的稳定入渗率更接近煤炭开采前普通农田土壤水平。当入渗水分从泥沙层进入到质地黏重的心土夹层时, 入渗率受控于心土夹层。另外, 由于黄河泥沙中心土夹层的饱和导水率和其上黄河泥沙层的饱和导水率相差较大, 心土夹层相对于其上方的黄河泥沙层而言形成了隔水层, 可能在界面处形成临时水位。试验数据说明当黄河泥沙中心土夹层离土表为 55 cm (T2) 时, 减渗效果最强, 而随着夹层深度的增加, 在界面处形成水压将不断增强, 心土夹层的减渗效果将随之减弱。

2.2 夹层位置对累积入渗量的影响

累积入渗量是一定时间段内, 渗入单位土壤的总水量^[27]。在入渗初期, 水势梯度大, 累积入渗量增加较快, T1~T5 累积入渗量随时间的变化特征与 CK1 一致, 均呈非线性变化, 穿过交界面后, 累积入渗量随时间变化呈线性关系, 斜率变小, 如图 4 所示。当入渗锋面穿过“沙-土”的分界面以后, 累积入渗量曲线的斜率将再一次减小, 但其变小的程度较上一次转折有所减弱。入渗锋面到达黄河泥沙中的心土夹层 (T1~T5) 的累积入渗量分别为 17.12、19.24、20.58、20.88 及 22.22 cm, 可以看出夹层位置越靠上, 入渗锋面到达土夹层时的累积入渗量越小。由于入渗试验在湿润锋到达土柱底端时结束, 也就是说这个时刻的累积入渗量为入渗过程结束土柱的持水量。CK2 累积入渗量仅为 37.02 cm, 比 CK1 (48.01 cm) 低 22.89%。从入渗开始至入渗结束 CK2 的总历时为 5 100 min, 比 CK1 (6 960 min) 低。说明当 CK2 灌溉量大于 37.02 cm 时, 将出现水分的渗漏, 不利于土壤水分的保持。在黄河泥沙层中夹心土层后, 试验处理组 (T1~T5) 均在不同程度上改善了 CK2 水分渗漏现象。入渗试验结束时, T1~T5 总的累积入渗量分别为 39.57、41.85、42.69、41.16、40.96 cm, 较 CK2 分别提高了 6.89%、15.32%、11.18%、13.04%、10.64%, 其中 T3 对 CK2 持水量的改善程度最大。

综上, 黄河泥沙中夹心土层后, 能够有效提高传统黄河泥沙复垦方式形成的“上土下沙”土壤剖面构型的持水量, 其中 T3 的改善效果最显著。重构后的层状土壤结构较均质土壤而言, 存在不同程度的减渗效果, 但砂夹黏和黏夹砂的作用机理有所不同, 砂土中夹黏土, 是

在砂土中设置阻水障碍, 而黏土中夹砂土, 是在黏土中设置导水障碍^[28]。由达西定律可得知, 入渗量与土壤的非饱和导水率密切相关^[29-30]。黄河泥沙的砂粒质量分数约 80%, 用于充填复垦后改变了重构土壤剖面的孔隙分布状况、过水断面大小及土壤水分运动通道等, 会改变水流通道的弯曲程度, 从而在一定程度上限制了水分的入渗, 同时由于泥沙中大孔隙的存在而加快了水分的流失^[10]。在黄河泥沙层中布设心土夹层后, 土沙双层结构变为多层土壤复合结构, 其入渗过程变得更为复杂, 在水流障碍的作用下, 有效的改善了水分的渗漏现象。

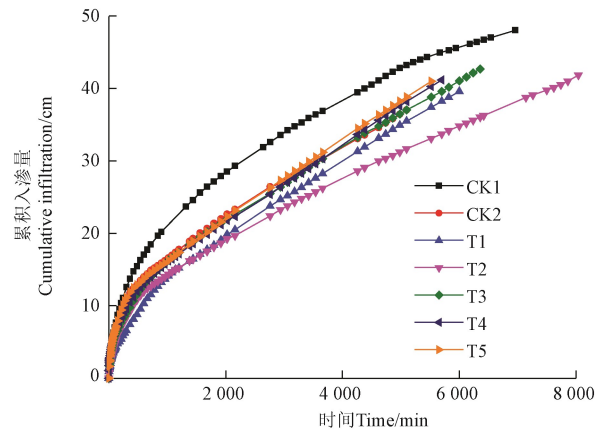


图 4 不同处理累积入渗量随时间的变化

Fig.4 Cumulative infiltration against time in different treatments

2.3 夹层位置对湿润锋运移的影响

不同处理湿润锋推进距离随时间的变化关系, 如图 5 所示。CK1 在入渗过程中湿润锋随时间的延长而逐渐推进, 可视为 1 条平滑的曲线。然而, CK2 入渗的湿润锋推进距离随时间的变化关系显然不再符合此特征, 受黄河泥沙质地及下边界条件不同的影响, 湿润锋在 840 min 穿越“土-沙”界面后, 运移速度迅速增加, 从入渗开始至入渗结束总历时为 5 100 min, 仅为 CK1 总历时的 72.27%, 在相同灌溉条件下, 由于黄河泥沙充填层的存在, 土壤水分由饱和入渗变为非饱和入渗, 水分会优先从大孔隙中流出, 即土壤水分在穿越“土-沙”界面后会出现“指流”或者说是“漏斗流”的现象, 采用传统“上土下沙”土壤剖面构型不利于土壤水分的保持, 若覆土厚度不足, 农作物的长势欠佳。

从图 5 中可以看出, 在黄河泥沙层中设置心土夹层后, T1~T5 的湿润锋随时间的运移过程中均出现多次转折, 使得重构土壤的湿润锋运移特性较 CK2 均得到不同程度的改善。在入渗初期 T1~T5 的入渗规律基本相同, 主要是由于 0~40 cm 土壤质地、厚度及土层排列一致。他们之间的差异主要出现在 1 020 min 以后, T1~T5 的湿润锋先后穿过“土-沙”界面, 进入黄河泥沙层后, 湿润锋的运移速率均有所提高, 其中 T3、T4、T5 的运移速率高于 T1、T2, 此时 T3~T5 之间不存在显著性差异, T1 和 T2 之间不存在显著性差异。由于夹层的位置不同, 湿润锋穿过“沙-土”界面进入心土夹层的时间亦不相同, 进入心土夹层后, T1~T5 湿润锋的运移速率均有所降低,

且 T2 的湿润锋速率最低。综上, 心土夹层的存在可以改善漏水现象, 当湿润锋运移到“土-沙”分界面时, 会出现暂时的停滞, 然而湿润锋进入黄河泥沙层后湿润锋的运移速率变快, 而进入心土夹层后湿润锋的运移速率变慢, 这与王春颖等的研究结论相一致^[16]。由于黄河泥沙层中心土夹层的位置不同, 湿润锋在交界面处的转折程度不同, 湿润锋的推进速度也不同, 其中, T2 湿润锋的推进速度最慢, 湿润锋运移到土柱底端, 整个入渗过程的总历时为 8 040 min 是 CK1 的 1.16 倍, 随着心土夹层深度的增加, 湿润锋的运移速度逐渐增大。

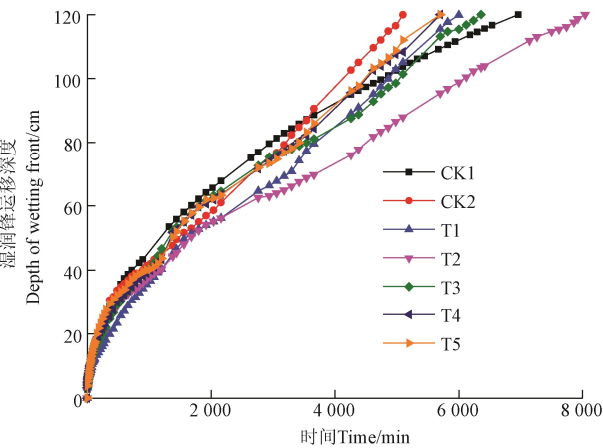


图 5 不同处理湿润锋随时间的变化
Fig.5 Wetting front against time in different treatments

综上, 可以推测黄河泥沙层中所夹心土层的位置存在 1 个临界值, 当深度为该临界值时, 心土夹层的阻水作用最强。德州市位于山东西部, 降水主要集中在夏季, 据统计汛期(6—9 月)降水量占全年降水量的 75%以上。当夹层位置达到这一临界值时, 阻水效果最强, 湿润锋的推进速度低于对照普通农田土壤剖面构型, 在强降雨天气条件下, 入渗缓慢, 易形成地表径流, 因此, 结合研究区状况, 当黄河泥沙层中心土夹层距离土表 60 cm (T3), 湿润锋的推进速度更接近与普通农田土壤剖面构型(CK1), 该剖面构型适合在当地推广应用。

2.4 夹层位置对累积入渗量与湿润锋之间关系的影响

对不同处理入渗过程中, 累积入渗量 I 与湿润锋推进距离 Z_f 之间的关系进行分析, 得出两者之间存在线性关系 ($R^2>0.995$)。两者关系可通过 $I=aZ_f+b$ 进行表达^[31], 相关参数统计于表 2。系数 a 即为直线斜率, 可作为湿润锋推进单位距离所需要的水量, 亦可反映不同处理土壤剖面的持水能力。对比表 3 中的 a 值可以发现, CK1 推进单位距离所需的水量最大, 而 CK2 所需的水量最小, 说明 CK1 具有较大的持水能力, 而 CK2 的持水能力较差。通过在黄河泥沙层中设置心土夹层后, 增加了上层土体的持水能力, 在下渗水量没有达到它最大持水能力以前, 心土夹层起到了阻止水流继续向下渗流的作用。T1~T5 的 a 值较 CK2 分别提高了 9.22%、11.73%、12.65%、8.68%、9.98%, 从不同程度上改善了 CK2 的持水效果, 其中 T3 a

值提高幅度最大, 说明 T3 湿润锋推进单位距离所需水量水量较 CK1 更为接近。因此, 在实际的充填复垦过程中可以将黄河泥沙充填层中心土夹层的位置控制在距离土表 60 cm, 能够有效提高“上土下沙”剖面构型在入渗过程中土壤剖面的持水性。

表 2 不同处理累积入渗量 (I) 和湿润锋推进距离 (Z_f) 的线性回归参数

处理 Treatments	线性拟合 Linear fitting $I=aZ_f+b$		
	a	b	R^2
CK1	0.401 9	0.114 8	0.985 2
CK2	0.314 6	1.989 8	0.999 6
T1	0.343 6	0.454 6	0.995 4
T2	0.351 5	0.349 9	0.997 5
T3	0.354 4	0.715 0	0.996 9
T4	0.341 9	1.129 7	0.996 8
T5	0.346 0	1.205 9	0.996 5

2.5 夹层位置对剖面含水率的影响

数据采集器 EM50 连接水分传感器 EC-5 自动采集 CK1, CK2 及 T1~T5 每层土壤剖面含水率随时间的变化情况, 如图 6 所示。对比烘干法测得同一时刻剖面含水率, 某些探针测得的剖面含水率略高, 但不影响监测整个入渗过程土壤水分的变化趋势。随着湿润锋向下推进, CK1 在整个入渗过程中 6 根探针所测得的土壤剖面含水率的变化规律比较一致, 各层的土壤含水率都存在急剧上升并趋于稳定的过程。然而 CK2 土壤剖面含水率出现明显的分层, 60 cm 以下黄河泥沙层的平均剖面含水率为 $0.32\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 仅为 60 cm 以上土壤层的 0.63 倍。

通过对比 T1~T5 与 CK1, CK2 剖面含水率随时间的变化情况可以发现, 黄河泥沙充填层中夹心土层后, 所形成的多层土壤复合结构的水分入渗过程更加复杂, 其含水率在不同土质土层土壤剖面上具有不连续的特点, 从图 6 中可以看出, T1~T5 的蓝色曲线(45 cm 处探针实测心土夹层上方的黄河泥沙层的含水率)均得到了不同程度的抬高, 明显改善了 CK2 上土下沙土壤剖面含水率的分布情况。含水率由非饱和状态逐渐达到饱和, 主要由于心土夹层的存在, 对水分在黄河泥沙层中的运移造成了强烈的导水障碍, 进而提高了黄河泥沙层的剖面含水率, 这与 Aubertin 等的研究结论相一致^[32]。探针实测 T1~T5 土壤剖面含水率发生突变的时间基本一致, 均发生在 1 000 min 左右, 这主要是由于 45 cm 以上土层排列一致。但随着心土夹层深度的增加, 45 cm 深的黄河泥沙层含水量从骤升到逐渐趋于平稳的时间呈现逐渐增加的趋势分别为 1 170、2 050、2 130、2 980、3 770 min, 说明, 湿润锋通过心土夹层上方黄河泥沙层时, 保持非饱和状态, 且非饱和状态持续的时间随心土夹层位置的下移, 而逐渐延长。另外, 通过对比各处理体积含水率的数据, 发现在不同夹层位置 T1~T5 的 45 cm 处探针测

得含水量随时间的变化均表现为两次增加, 其中第 2 次增加极有可能是由于湿润锋到达心土夹层上方由于存在

导水障碍水分开始在夹层上方蓄积, 向上湿润黄河泥沙层引起。

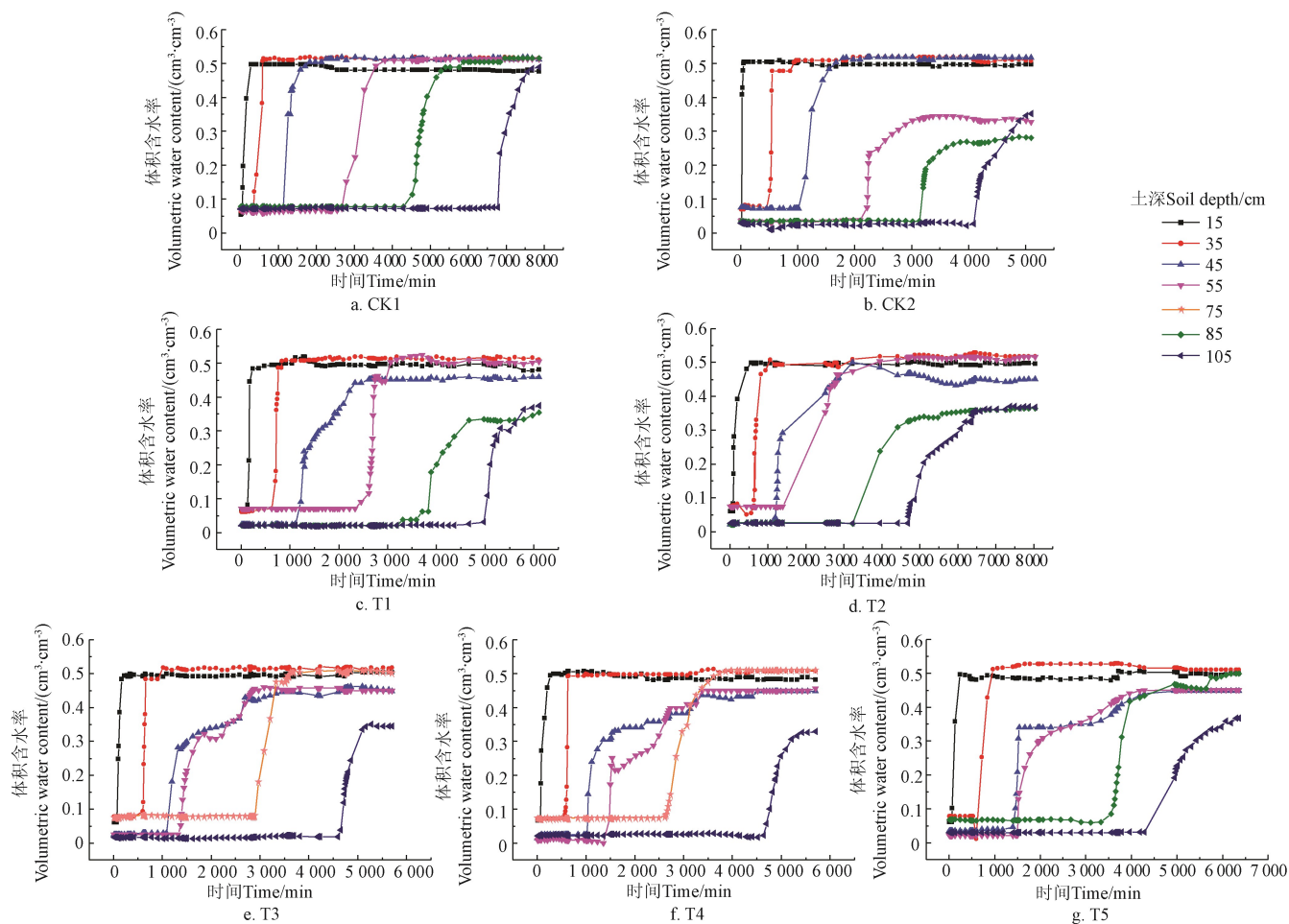


图 6 不同处理土壤剖面含水率随时间的变化

Fig.6 Soil profile water content against time in different treatments

2.6 模型分析

利用 Kostiakov 模型分别对不同处理重构土壤的入渗试验实测入渗量 I (cm) 和入渗时间 t (min) 之间关系进行拟合, 模型拟合结果如表 3 所示。Kostiakov 模型对各处理拟合的 R^2 均约 0.99, RRMSE 均不大于 0.07, 说明 Kostiakov 模型能够较好地模拟黄河泥沙充填复垦不同剖面构型土壤水分的入渗特性。

表 3 Kostiakov 模型模拟不同处理入渗过程

Table 3 Infiltration simulation by Kostiakov model of different treatments

处理 Treatment	Kostiakov 模型 $I(t)=kt^n$ Model of Kostiakov		R^2	RRMSE
	k	n		
CK1	1.232 8	0.414 2	0.99 4	0.053
CK2	0.728 0	0.455 4	0.99 7	0.038
T1	0.248 8	0.579 0	0.99 8	0.036
T2	0.440 7	0.501 8	0.99 8	0.037
T3	0.491 0	0.505 0	0.99 7	0.042
T4	0.541 9	0.492 7	0.99 4	0.058
T5	0.693 0	0.464 0	0.99 0	0.070

3 结 论

黄河泥沙充填层中夹黏土层后, 重构土壤由双层结

构转变为多层复合结构, 使得土壤水分入渗过程变得更加复杂, 在毛管障碍及导水障碍的用下, 有效避免了水分的快速渗漏, 改善了土壤剖面含水率分布状况, 提高了入渗过程中重构土壤剖面的持水性。研究发现在黄河泥沙层中夹黏土层位置的变化, 对重构土壤入渗特性有明显影响。具体结论如下:

1) 入渗率随着夹层深度的增加, 呈现先增加而后减小的趋势, 即在黄河泥沙充填层中布设 20 cm 心土夹层位置距离土表 55 cm (T2) 时为一临界深度, 此时重构土壤的入渗率最低、湿润锋的运移速度最慢、阻水效果最强, 比对照为普通农田土壤 (CK1) 稳定入渗率还低 19.5%。考虑到研究区强降雨天气, 重构土壤的入渗率过低, 易形成地表径流。

2) 湿润锋推进单位距离的需水量可反映土壤剖面的持水能力, 夹层在不同程度上改善了“上土下沙”土壤剖面 (CK2) 的持水能力, 其中心土夹层位置为距离土表 60 cm (T3) 改善程度最大, 土壤剖面水分分布情况也得到了改善, 因此在距离土表 60 cm (T3) 设置夹层, 土壤水分入渗特性及入渗过程的土壤持水性更接近对照为普通农田土壤 (CK1), 是黄河泥沙夹层式充填复垦采煤沉陷地重构土壤剖面构型的理想选择。

3) 通过 Kostikov 模型对入渗量和入渗时间之间关系进行拟合, R^2 均约为 0.99, RRMSE 均不大于 0.07, 拟合效果良好, 研究表明 Kostikov 模型能够较好地模拟黄河泥沙夹层式充填重构土壤水分入渗特性。

[参 考 文 献]

- [1] Darmody R G, Bauer R, Barkley D, et al. Agricultural impacts of longwall mine subsidence: The experience in Illinois, USA and Queensland, Australia[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(2): 207—212.
- [2] Wang Jinman, Zhang Meng, Bai Zhongke, et al. Multi-fractal characteristics of reconstructed soil particle in opencast coal mine dump in loess area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(4): 230—238.
- [3] Xiao Wu, Hu Zhenqi, Chugh Y P, et al. Y. Dynamic subsidence simulation and topsoil removal strategy in high groundwater table and underground coal mining area: A case study in Shandong Province[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2014, 28(4): 250—263.
- [4] 胡振琪. 土地复垦与生态重建[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [5] 魏忠义, 胡振琪, 司继涛, 等. 采煤沉陷地粉煤灰充填复垦土壤元素淋溶特性实验研究[J]. 农业环境保护, 2002, 21(1): 13—15, 18.
Wei Zhongyi, Hu Zhenqi, Si Jitao, et al. Leaching characteristics of several elements on subsided land filled in with flying ash[J]. Agro-environmental Protection, 2002, 21(1): 13—15, 18. (in Chinese with English abstract)
- [6] Tang Quan, Li Liyuan, Zhang Song, et al. Characterization of heavy metals in coal gangue-reclaimed soils from a coal mining area[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, 186: 1—11.
- [7] 胡振琪, 王培俊, 邵芳. 引黄河泥沙充填复垦采煤沉陷地技术的试验研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 288—295.
Hu Zhenqi, Wang Peijun, Shao Fang. Technique for filling reclamation of mining subsidence land with Yellow River sediment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(3): 288—295. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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.
Wang Xiaotong, Hu Zhenqi, Liang Yusheng, et al. Optimal bulk density infilling reclamation of mining subsidence land with Yellow River sediment based on water characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(16): 258—264. (in Chinese with English abstract)
- [9] 党宏宇, 邵明安, 陈洪松, 等. 不同煤矸石厚度及位置对土壤水分入渗过程的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 62—66.
Dang Hongyu, Shao Mangan, Chen Hongsong, et al. Effect of thickness and location of coal gangue on the process of water infiltration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(3): 62—66. (in Chinese with English abstract)
- [10] 胡振琪, 多玲花, 王晓彤. 采煤沉陷地夹层式充填复垦原理与方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 198—206.
Hu Zhenqi, Duo Linghua, Wang Xiaotong. Principle and method of reclaiming subsidence land with inter-layers of filling materials[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 198—206. (in Chinese with English abstract)
- [11] Hu Z Q, Shao F, Kevin M S. Reclaiming subsided land with Yellow River sediments: Evaluation of soil sediment columns[J]. Geoderma, 2017, 307: 210—219.
- [12] Ma Y, Feng S, Zhan H, et al. Water infiltration in layered soils with air entrapment: Modified green-ampt model and experimental validation[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2010, 16(8): 628—638.
- [13] Huang M B, Barbour S L, Elshorbagy A, et al. Infiltration and drainage processes in multi-layered coarse soils[J]. Revue Canadienne De La Science Du Sol, 2015, 91(2): 185—197.
- [14] Jury W A, Horton R. Soil Physics[M]. 6th ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2004.
- [15] Wang J, Li X, Bai Z, et al. The effects of coal gangue and fly ash on the hydraulic properties and water content distribution in reconstructed soil profiles of coal - mined land with a high groundwater table[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(3): 687—697.
- [16] 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[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 61—67.
Wang Chunying, Mao Xiaomin, Zhao Bing. Experiments and simulation on infiltration into layered soil column with sand interlayer under ponding condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 61—67. (in Chinese with English abstract)
- [17] Wang Chunying, Mao Xiaomin, Hatano R. Modeling ponded infiltration in fine textured soils with coarse interlayer[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78: 745—753.
- [18] Hill D E, Parlange J Y. Wetting front instability in layered soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, 36(5): 697—702.
- [19] Romano N, Brunone B, Santini A. Numerical analysis of one dimensional unsaturated flow in layered soils[J]. Water Resour, 1998, 21: 315—324.
- [20] Alfnes E, Kinzelbach W, Aagaard P. Investigation of hydrogeologic processes in a dipping layer structure: 1. The flow barrier effect[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, 69(3/4): 157—172.
- [21] Yang H, Rahardjo H, Leong E C. Behavior of unsaturated layered soil columns during infiltration[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2006, 11(4): 329—337.
- [22] Bruch P G. Laboratory Study of Evaporative Fluxes in Homogeneous and Layered Soils[D]. Saskatchewan, Canada: University of Saskatchewan Saskatoon, 1993.
- [23] IUSS Working Group WRB. Word Reference Base for Soil Resources 2006[M]. Rome:FAO, 2006.
- [24] 张航, 徐明岗, 张富仓, 等. 陕西农业土壤持水性能及其与土壤性质的关系[J]. 干旱地区农业研究, 1994(2): 32—37.
Zhang Hang, Xu Minggang, Zhang Fucang, et al. Relationship between agricultural soil water holding capacity

- and soil properties in Shaanxi Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1994(2): 32—37.
- [25] Ehdaie B, Merhaunt D J, Ahmadlan S. Root system size influences water-nutrient uptake and nitrate leaching potential in wheat[J]. *Agronomy & Crop Science*, 2010, 196(6): 455—466.
- [26] 邵芳, 王培俊, 胡振琪, 等. 引黄河泥沙充填复垦农田土壤的垂向入渗特征[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(5): 54—67. Shao Fang, Wang Peijun, Hu Zhenqi, et al. Vertical infiltration characteristics of reclamation farmland soil filled with the yellow river sediment[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(5): 54—67. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王全九, 邵明安, 郑继勇. 土壤中水分运动与溶质迁移[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [28] 孟华, 王坚. 土壤物理学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1993.
- [29] Zettl J, Barbour S L, Huang M, et al. Influence of textural layering on field capacity of coarse soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91(2): 133—147.
- [30] 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.
- [31] 李毅, 任鑫, Robert H. 不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2012, 30(4): 485—490. Li Yi, Ren Xin, Horton Robert. Influence of various soil textures and layer positions on infiltration characteristics of layered soils[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(4): 485—490. (in Chinese with English abstract)
- [32] Aubertin M, Cifuentes E, Apithy S A, et al. Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(10): 1146—1164.

Influence of clay interlayer position on infiltration of reclaimed soil filled with Yellow River sediment

Wang Xiaotong¹, Hu Zhenqi^{2*}, Lai Xiaojun¹, Liang Yusheng¹

(1. *Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;*

2. *School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221000, China)*

Abstract: Coal is the primary energy source in china, large-scale coal mining causes serious ecological and environmental problems in China. For restoring farmland in such areas, reclaiming subsided land with Yellow River sediment is an effective reclamation technology. In this study, we investigated the influence of interlayer positions on soil water infiltration process of reclaimed soil filled with Yellow River sediment. The laboratory experiments of infiltration were conducted in the soil columns of 120 cm with 2 control treatments (CK1, CK2) and 5 interlayer treatments (T1-T5). CK1 consisted of 20-cm topsoil overlying subsoil, representing native undisturbed farmland. CK2 represented conventional reconstructed soil profile consisted of 20-cm topsoil and 40-cm subsoil overlying sediment and 60 cm Yellow River sediment on the bottom. Treatments T1-T5 represented reconstruct multi-layered soil profiles consisted of 20-cm topsoil, 20-cm subsoil and different combinations of sediment and 20-cm thick subsoil interlayer located at different position between the Yellow River sediment layer. In treatments of T1-T5, subsoil interlayer was filled into the column at the 50, 55, 60, 65, 70 cm away from the soil surface, respectively. The soil texture of subsoil was clay. Thus, the subsoil interlayer was also the clay interlayer. By the laboratory infiltration experiments, the influence of interlayer position on water infiltration was analyzed, and the subsoil interlayer position of the reclaimed soil filled with Yellow River sediment was optimized. Calculated index included infiltration rate, cumulative infiltration, depth to the wetting front, and water content volume distribution of the reclaimed soils. Finally, the filtration was fitted by Kostiakov model. The results showed that subsoil clay interlayer was more effective in inhibiting water leakage and improving the water-holding capacity of conventional reconstructed soil profile. The infiltration rate increased and then decreased with the increasing depth of subsoil interlayers with the same thickness. The position of the subsoil interlayer at 55 cm below the soil surface was a threshold where the infiltration rate was the lowest, the migration speed of the wetting front was the slowest, and the water resistance effect was the strongest. However, considering the heavy rainfall in the study area, surface runoff was easy to form. When the position of interlayer was 60 cm below the soil surface, the water infiltration characteristic was closer to that of undamaged farmland, and it was the optimal position of interlayer for land reclamation with Yellow River sediments. Moreover, the Kostiakov model could fit the infiltration process well for the reclaimed soil with clay interlayer in the Yellow River sediment layer (R^2 was higher than 0.99 and relative root mean square error was not higher than 0.07). This study has important practical significance for extension of interlayer soil profile reclamations with Yellow River sediment.

Keywords: sediments; infiltration; reclamation; Yellow River; soil reconstruction; clay interlayer