

# 煤矸石充填重构土壤水分再分布与剖面气热变化试验研究

王顺<sup>1</sup>, 陈敏<sup>1</sup>, 陈孝杨<sup>1,2</sup>, 陈清华<sup>3</sup>, 刘本乐<sup>1</sup>, 胡智勇<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽省煤炭勘探工程技术研究中心, 安徽 宿州 234000; 3. 安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 为研究煤矿区用矸石作为垫底基质进行土壤剖面重构土壤水分再分布过程和剖面热扩散与气体浓度变化特征, 以指导工程设计和重构土壤熟化技术应用, 在实验室设计了一种煤矿区重构土壤水气热运移模拟装置, 通过布设在土柱系统不同深度的温湿度传感器和 CO<sub>2</sub> 浓度检测仪, 连续监测重构土壤剖面含水量、温度和 CO<sub>2</sub> 浓度。结果表明: 煤矸石层具有良好的阻水性, 阻碍水分的入渗, 增加上层土壤的持水能力。但是, 煤矸石的持水性差, 煤矸石层的含水量低于土壤层 10% 左右; 煤矸石具有更佳的热扩散性, 在加热过程中煤矸石层的温度远大于土壤层, 在重构土壤中容易形成稳定的温度梯度, 尤其在煤矸石层与土壤层之间存在明显的温度差。土壤层的温度受底部加热的影响较小, 短期内主要受室温影响, 其变化曲线与室温日变化曲线基本一致, 最大波动幅度在 2.89 °C; 底部通 CO<sub>2</sub> 对土壤层 CO<sub>2</sub> 浓度的影响非常小, 气体在煤矸石层向土壤层扩散时容易受到土壤层的阻隔, 导致气体在土壤层下界面累积; 煤矸石层会对邻近土壤层产生较大影响, 影响微生物的生存环境, 导致微生物的活性下降。当覆土厚度为 60 cm 时, 煤矸石层对土壤层的影响较小, 随着覆土厚度的增加, 煤矸石的影响会逐渐削弱。

**关键词:** 重构土壤; 煤矸石; 温度梯度; CO<sub>2</sub> 扩散; 土壤水分入渗

**中图分类号:** S152; TD88

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2017)04-0093-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.016

## Water Redistribution and Gas-Heat Diffusion of Reconstruction Soil Filled with Gangue

WANG Shun<sup>1</sup>, CHEN Min<sup>1</sup>, CHEN Xiaoyang<sup>1,2</sup>, CHEN Qinghua<sup>3</sup>, LIU Benle<sup>1</sup>, HU Zhiyong<sup>1</sup>

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001;

2. Engineering and Technology Research Center on Coal Exploration of Anhui, Suzhou, Anhui 234000;

3. College of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001)

**Abstract:** In order to characterize water redistribution and gas-heat diffusion of reconstruction soil filled with gangue in coal mining areas, guide engineering design and rebuild soil ripening technology, a simulator was designed in laboratory. Soil water content, temperature and soil CO<sub>2</sub> concentration could be constantly measured by laid sensors and detectors in different depth of soil column. The results showed that soil water infiltration process was slowed down and the water-holding capacity of the upper soil was increased because of good water resistance from coal gangue layer. However, the water content of coal gangue layer was significantly lower, approximately 10%, than that of topsoil due to the poor water-holding capacity of gangue. Coal gangue had higher thermal diffusivity, higher temperature than that of topsoil with heating, could form sustainable temperature gradient and temperature difference with topsoil layer in reconstruction soil. The effects of heated from below on topsoil was small, which it was mainly influenced from indoor temperature in the short run. In addition, the temperature changing curve of topsoil is similar with the temperature of laboratory and its biggest fluctuation range was for 2.89 °C. The effects of aerating CO<sub>2</sub> from column bottom on CO<sub>2</sub> concentration of topsoil soil was also very small, because gas transport from coal gangue layers to soil ones would easily be cut off as so to gas accumulated in the soil layer below. The coal gangue could have a negative impact on microbial living environment to adjacent topsoil layers and declined microorganism activities. The effects of coal gangue on topsoil layer were brought down when the cover soil

收稿日期: 2017-03-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(41572333, 51274013, 41402309)

第一作者: 王顺(1976—), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要从事矿山生态环境修复研究。E-mail: 6627528@qq.com

通信作者: 陈孝杨(1976—), 男, 安徽肥西人, 教授, 博士, 主要从事矿山环境修复与土地复垦研究。E-mail: chenxy@aust.edu.cn

thickness was 60 cm. The influences gradually would be weakened with the thickness increased.

**Keywords:** reconstruction soil; coal gangue; temperature gradient; gas diffusion; soil infiltration

煤矸石的理化性质与土壤存在较大差异<sup>[1]</sup>,特殊下垫面基质的存在会造成自表层土壤至地下潜水位间复杂的气体、水分与温度梯度。土壤水、气、热因子是影响植物生长的重要因素。土壤温度会影响植物生长发育<sup>[2]</sup>、土壤水分运移<sup>[3]</sup>、土壤微生物的活性以及土壤呼吸。土壤水分也会影响农作物的生长,特别在干旱季节采取适当的保水措施或灌溉措施,将会增加作物的生物量,并且土壤水分对土壤温度的变化起着重要作用<sup>[4]</sup>。土壤导气率是土壤水力特性研究和农业生产应用中的重要参数,直接影响土壤气体交换能力,进而影响土壤水分和养分的有效性<sup>[5]</sup>。因此,对土壤水、气、热因子的研究是目前热点问题,但是煤矿区重构土壤水气热耦合运移及其参数确定方面的研究还少见于文献报道。

宋杨睿等、Wang 等<sup>[6-7]</sup>研究发现采用煤矸石作为土柱底层充填基质时,重构土壤整体含水率均比自然土壤含水率低,并且由于煤矸石吸水持水能力极弱,无法实现地下水对表层土壤的有效补给;陈孝杨等<sup>[8]</sup>发现在煤矸石充填重构土壤中,当覆土厚度较薄时,表层土壤温度的昼夜变化幅度相对较大;郑永红等<sup>[9]</sup>在对潘一矿煤矸石充填重构土壤呼吸的研究中发现土壤的  $Q_{10}$  值低于暖温带  $Q_{10}$  平均值,低于中国土壤呼吸  $Q_{10}$  平均值和农田生态系统的  $Q_{10}$  平均值。目前,专家学者们虽然通过煤矸石充填重构土壤的现场调查研究发现,煤矸石基质会对上覆土壤的水分、温度和土壤呼吸产生影响,但是对其影响的机理不清楚。因此,本文设计了一种煤矿区重构土壤水气热运移模拟装置,通过对煤矸石充填重构土壤剖面含水量、温度和  $CO_2$  浓度监测,研究土壤水分入参与剖面气热梯度变化特征,为类似工程设计和表层土壤熟化技术应用提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验用煤矸石样品采自安徽省淮南市潘集矿区某煤矿矸石山,潘集矿区属暖温带季风气候,年平均气温  $14.3\sim 16.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年平均降雨量 937 mm,是典型的煤炭开采区。该矸石山煤矸石主要成分与淮南矿区煤矸石相同,主要由泥岩、页岩、粉砂岩、砾岩和石灰岩等组成,能够代表整个矿区的元素组成,现已停止对新矸石的输入,呈“锥形”,表层有风化迹象。采样时,分别从煤矸石山的山底、山腰和山顶处采集等质量风化样品充分混合后带回实验室进行处理。先将粒径大于 5 cm 的煤矸石挑选出来,再分别用孔径

为 2 mm 和 10 mm 的分子筛将煤矸石进行筛分。测得煤矸石样品的机械组成为: $>50\text{ mm}$  粒径的煤矸石质量占 2.04%, $10\sim 50\text{ mm}$  的占 15.12%, $2\sim 10\text{ mm}$  的占 47.49%, $\leq 2\text{ mm}$  的占 35.34%,饱和含水量为 16.40%。供试土壤来自淮南市大通湿地公园。取样时,先去掉表层 5 cm 土壤,用环刀和铝盒分别取样带回实验室测定其容重与含水量;然后采集深度 5—20 cm 土壤带回实验室用于土柱填充。在实验室内用烘干法测定土壤样品的初始容重和含水量。从带回的土壤样品中随机取样 3 次,风干后过 2 mm 筛,用 Rise-2006 激光粒度分析仪测定土壤颗粒组成,并依据国际分级标准对土壤质地进行命名。试验土壤样品为粉壤土,其黏粒、粉粒和砂粒的占比分别为 7.31%,76.85%,15.84%。土壤初始容重为  $1.89\text{ g/cm}^3$ ,初始含水量为 20.50%,饱和含水量为 33.06%。

### 1.2 研究方法

1.2.1 饱和导水率 使用定水头法测定饱和导水率。将试验样品按初试容重填充进渗透系数测定仪,将渗透系数测定仪放置水中浸泡 24 h 后拿出,用马氏瓶为试验供水,使水头保持在 5 cm。供水开始后从漏斗滴下第一滴水时开始计时,每隔 2 min 测量漏斗下烧杯里的出渗水量  $Q$ ,同时保持水层的高度不变,则饱和导水率计算公式如下:

$$V=(10Q_n)/(T_nS) \quad (1)$$

$$K=V[L/(h+L)] \quad (2)$$

式中: $V$  为渗透速度( $\text{mm/min}$ ); $T_n$  为每次渗透间隔时间( $\text{min}$ ); $Q_n$  为间隔时间内渗透水量( $\text{mm}$ ); $S$  为渗透面的横断面积( $\text{cm}^2$ ); $K$  为饱和导水率( $\text{cm/min}$ ); $L$  为土层厚度( $\text{cm}$ ); $h$  为水层高度( $\text{cm}$ )。

1.2.2 试验装置 为研究重构土壤水分和气热运移规律,设计了一种煤矿区重构土壤水气热运移模拟装置(RS-I 型)。该装置由土柱、支撑架、进气装置组成,内置加热板、温度传感器以及湿度传感器,数据通过计算机读取并实现对温度和湿度的连续监测。土柱长 60 cm,宽 60 cm,高 120 cm,柱体两侧留有孔位,用于连接传感器以及  $CO_2$  检测仪。

1.2.3 土柱填充 在土柱内周围放置 2 cm 厚的隔热棉,减少外界气温对重构土壤剖面温度的影响。将煤矸石均匀填充在底部并压实,然后按初始容重将土样分层均匀的填入土柱内。装置底部用密封胶泥密封保证装置的密封性,减少空气对试验的影响。土柱底部为煤矸石样品,上层为试验土壤,即 0—60 cm 为土壤层,60—100 cm 为煤矸石基质(图 1)。每 20 cm

设有一个监测点,埋有温度传感器和湿度传感器,其位置见图 1 所示(H1、H2、H3、H4 和 H5)。

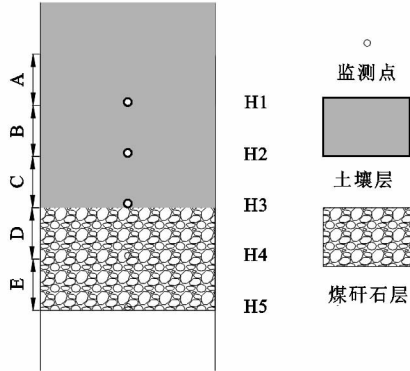


图 1 RS-I 型重构土壤传热传质试验装置的土柱剖面示意

1.2.4 试验方法 2016 年 11 月到翌年 1 月在室内进行试验,整个试验分 3 个阶段进行。第一阶段,在填充好的土柱上方进行灌溉,灌溉量为 60 mm。同时,通过湿度传感器测定剖面含水量在 5~20 h 内的变化情况;第二阶段,当土柱内土壤剖面水分再分布过程结束后,通过温度传感器记录室内土壤剖面温度日变化情况。然后通过土柱底部的加热板对土柱进行加热,设置温度分别为 30,40,50 ℃。当土柱剖面温度趋于稳定后停止加热,通过温度传感器记录重构土壤剖面温度的热传递过程;第三阶段,停止加热后,当重构土壤剖面温度梯度趋于稳定,使用泵吸式 CO<sub>2</sub> 检测仪每隔 2 h 测定一次不同断面的土壤 CO<sub>2</sub> 浓度,探究 CO<sub>2</sub> 浓度日变化情况。测定完 CO<sub>2</sub> 浓度日变化后,通过 CO<sub>2</sub> 瓶以 3 L/h 的速率分别通气 0.5,1,1.5 h,来改变底部初始 CO<sub>2</sub> 浓度,以研究重构土壤中的气体扩散规律。

1.3 数据处理

采用 Excel 2010 和 Origin Pro 2016 软件统计分析数据及作图,并用 SPSS 19.0 软件对试验数据进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 重构土壤水分入渗过程

试验前,测得煤矸石层的饱和导水率为 0.68 cm/s,上覆土壤的饱和导水率为 0.005 7 cm/s。由于没有连续灌溉,未能测得重构土壤的稳定入渗率。但由 Al-Maktoumi 等<sup>[10]</sup>研究可知,无论粗颗粒覆盖细颗粒,还是细颗粒覆盖粗颗粒,层状土壤的稳定入渗率均变小。因此,重构土壤的稳定入渗率将小于 0.005 7 cm/s,但试验中实际测得的初始入渗率却很大,达 1.17 cm/s。当湿润锋到达 H2 层前,随着土壤水分的入渗,20—40 cm 处土壤含水量不断增加,H1 层含水量最高为 33.72%,基本达到饱和(图 2)。因没有水分继续补给,且表层土壤存在水分的自然蒸发,在 15 h 时观测,H2 层以上的含水量开始减少。

在整个监测时间段内,H2 层以下的土壤水分没有明显变化。这可能是由于表层土壤水分蒸发导致表层土壤含水量降低,使得其基质势与 H2 层相比相对偏低,土壤水分开始向上迁移,H2 层含水量开始降低。在水分入渗和再分布过程中,矸石层的含水量明显低于土壤层,达 10%左右。

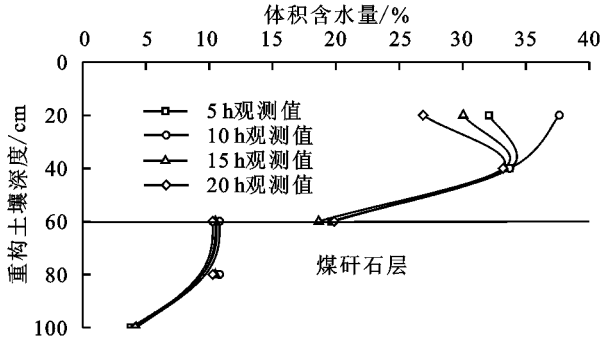


图 2 重构土壤入渗过程不同历时的含水量分布

2.2 重构土壤剖面温度日变化

由于实验室内没有恒温装置,室温易受到室外太阳辐射的影响。上午太阳辐射较强,室温开始上升,下午太阳辐射削弱,室温也随之下降。重构土壤温度随室温的变化而变化,呈“单峰”曲线,土壤温度先上升后下降(图 3)。表层土壤日最高温度出现在 14:30 左右,日变幅为 2.20 ℃;20—100 cm 深度的土壤温度最高值出现的时间点与此基本一致,在 15:00 左右,日变化相对平缓。室内重构土壤温度变化主要受室温的影响,并随着土壤深度的增加,土壤温度受室温的影响逐渐减小,温度变幅逐渐平缓<sup>[11]</sup>。20—100 cm 深度的土壤最低温度与表层土壤温度相比,表现出了明显的滞后性,H1 和 H5 层滞后了 2 h,H2、H3 和 H4 层滞后了 3 h。这主要是因为土壤的热容较大以及热量由表层向深层传递需要时间,导致土壤温度最高值和最低值出现滞后现象<sup>[12]</sup>,但是最高温度没有表现出明显的滞后性,这可能是由于冬季室温偏低,且表层土壤最高温度低于下层土壤温度,导致其对深层土壤升温过程的影响较小。

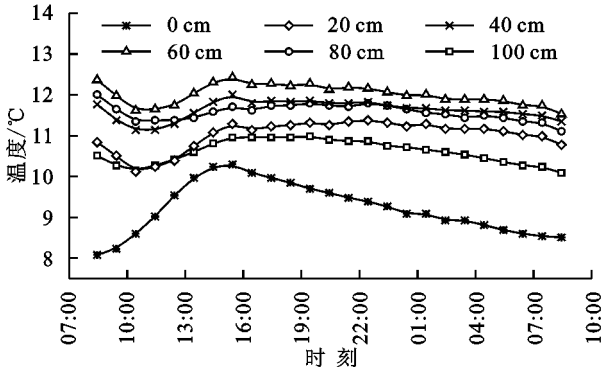


图 3 重构土壤不同深度土壤温度日变化

2.3 加热对重构土壤剖面温度变化的影响

对煤矸石底部加热时(30,40,50 ℃),H4 层和

H5 层温度迅速上升,越靠近加热板温度变化幅度越大,且随着时间推移其升温趋势逐渐平缓。当停止加热时,H4 和 H5 层温度迅速下降,随着时间推移其降温趋势逐渐平缓。表土、H1 和 H2 层温度在 14 h 内并没有受底部加热影响,其变化曲线与室温日变化一致,最大波动幅度在 2.89 °C,说明 0—40 cm 土壤层温度短时间内主要受室温影响(图 4)。而 H3 层温度先受室温的影响,随室温的变化而变化,后受底部矸石层温度的影响,有小幅度的升高。H3 层受底部加热的影响,表现出了一定的滞后性,其温度变化幅度明显小于 H4 和 H5 层,这主要是由煤矸石本身热性质以及含水量所引起。煤矸石导热性强,热容小,且煤矸石层含水量明显低于土壤层,水的热容大,所以煤矸石层的热扩散性明显高于土壤层。因此,在煤矸石充填重构土壤中,煤矸石层与土壤层极易形成温度梯度。

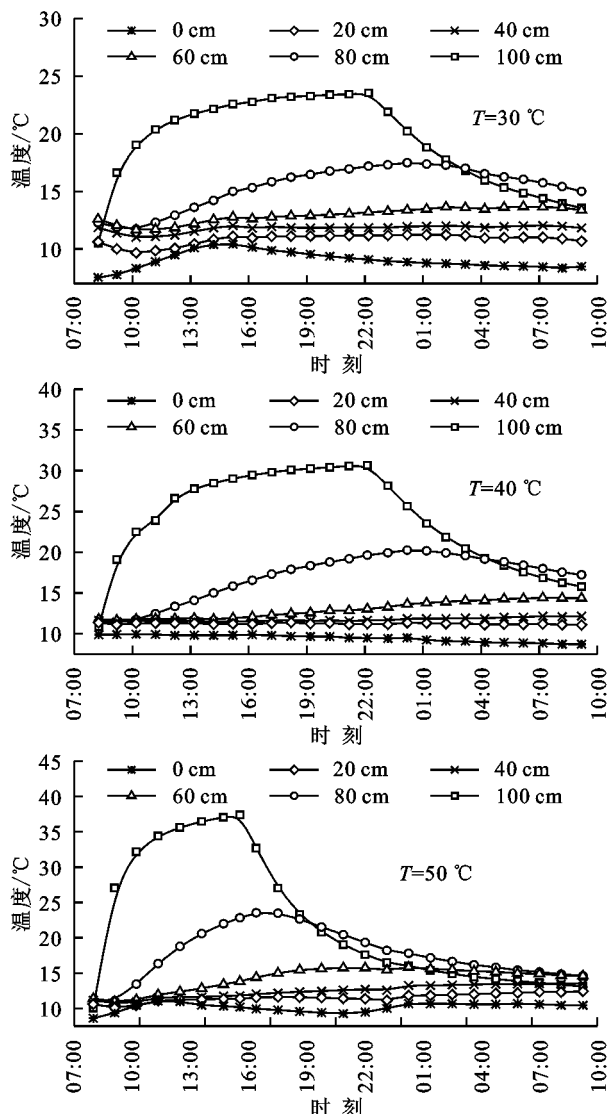


图 4 不同加热温度过程重构土壤温度随时间的变化

## 2.4 重构土壤剖面 CO<sub>2</sub> 浓度日变化特征

重构土壤不同深度 CO<sub>2</sub> 浓度变化规律基本一致,都呈先升高后降低的趋势(图 5)。在 10:00—13:00 点呈上升趋势,下午 14:00—22:00 呈下降趋势,

CO<sub>2</sub> 浓度最高值出现在下午 1:00—2:00 之间,变化规律与土壤温度日变化曲线相似。H1 和 H2 层 CO<sub>2</sub> 浓度明显高于 H3、H4 和 H5 层 CO<sub>2</sub> 浓度,并且其波动幅度也明显大于 H3、H4 和 H5 层。H1 和 H2 层 CO<sub>2</sub> 浓度日变幅分别为 0.098% 和 0.079%,H3、H4 和 H5 层 CO<sub>2</sub> 浓度变化范围在 0.022%~0.044% 之间。这是因为煤矸石层的有机质含量偏低且其环境不利于微生物的生长,微生物含量较低,因此其 CO<sub>2</sub> 浓度波动较小。一般非扰动土壤 CO<sub>2</sub> 浓度会随着土壤深度的增加而增大,因为随着深度的增加土壤气体交换会受到阻碍;扰动的重构土壤由于土壤结构重建,有效孔隙增大,促进土壤与大气之间的气体交换,从而不同深度土壤之间 CO<sub>2</sub> 浓度变化幅度基本不会有明显的差异。但是重构土壤中 H3 层的 CO<sub>2</sub> 浓度明显低于 H1 和 H2 层,这说明煤矸石层会对邻近土壤层产生影响,不利于微生物生物量碳的累积<sup>[13]</sup>,将抑制土壤层微生物的活性。

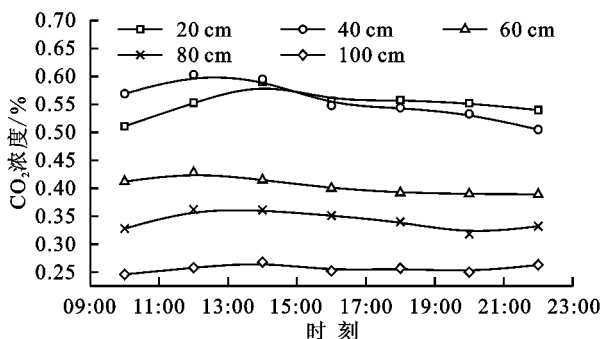


图 5 重构土壤不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 浓度日变化

由于表层土壤(0—20 cm)结构疏松,孔隙相对较多,有利于表层土壤与空气 CO<sub>2</sub> 的交换。而随着深度的增加,下层土壤受到上层土壤的压实作用,容重相对较高,孔隙相对较少,不利于土壤气体的交换。因此,土壤微生物呼吸产生的 CO<sub>2</sub> 会在 H2 层逐渐累积,而 H1 层会与空气进行气体交换,导致在 10:00—16:00, H2 层 CO<sub>2</sub> 浓度要高于 H1 层。然后随着土壤温度的降低,土壤微生物活性降低, H2 层 CO<sub>2</sub> 浓度开始降低,而 H1 层会与空气进行气体交换,其 CO<sub>2</sub> 逐渐高于 H2 层。而在矸石层中,随着深度的增加,CO<sub>2</sub> 浓度逐渐降低。土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度主要受微生物活性的影响,而微生物的活性又会受到土壤水分影响。土壤水分不仅会影响微生物的活动,而且会占据土壤透气孔隙,使得土壤中的 CO<sub>2</sub> 浓度升高,而 H5 层含水量远低于 H4 层,从而 H5 层的 CO<sub>2</sub> 浓度会低于 H4 层。

## 2.5 煤矸石充填重构土壤气体扩散特征

不同通气时长下,H3、H4 和 H5 层 CO<sub>2</sub> 浓度随时间变化趋势基本一致,H5 层 CO<sub>2</sub> 浓度呈快速下降趋势,H4 层 CO<sub>2</sub> 浓度先上升后下降,H3 层 CO<sub>2</sub> 浓

度呈缓慢上升趋势,而通气对 H1 和 H2 层  $\text{CO}_2$  浓度的影响不明显(图 6)。

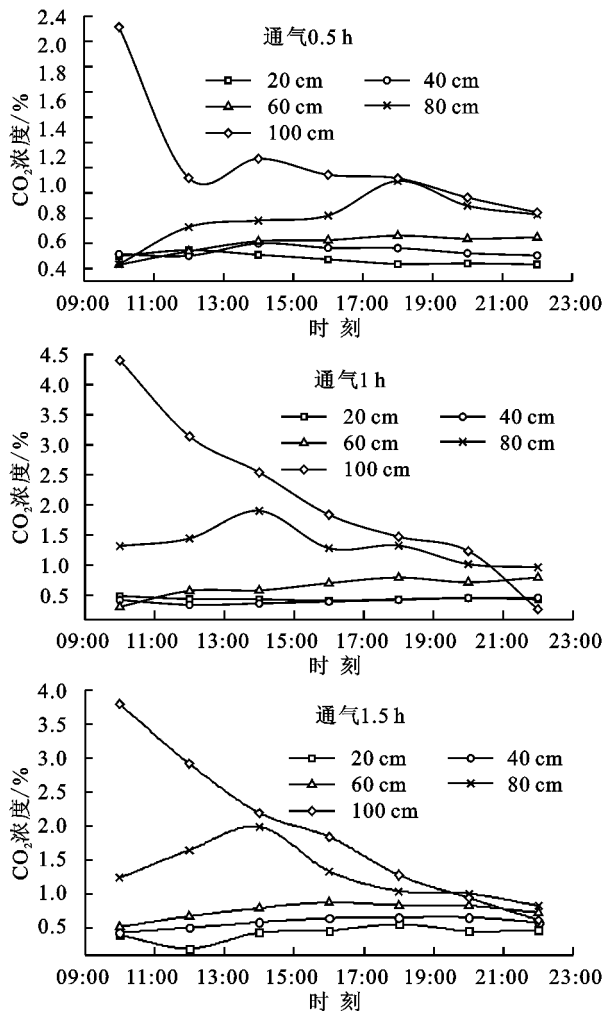


图 6 不同初始  $\text{CO}_2$  浓度下重构土壤剖面  $\text{CO}_2$  浓度随时间的变化

在通气 0.5 h 和 1 h 时, H1 和 H2 层的  $\text{CO}_2$  浓度在短期内(12 h)不受底部通气的影响,其变化趋势与不通气时  $\text{CO}_2$  日变化基本一致;当通气 1.5 h 时, H2 层的  $\text{CO}_2$  浓度有轻微上升。不同深度  $\text{CO}_2$  浓度存在浓度差时,气体会由高浓度向低浓度扩散,其扩散速率会受浓度差影响。当通气刚完成时,底部气体浓度较大, H5 层与 H4 层之间存在较大浓度差,所以 H5 层的  $\text{CO}_2$  会快速向 H4 层扩散, H4 层  $\text{CO}_2$  浓度有明显上升趋势。当 H4 层  $\text{CO}_2$  浓度达到峰值时, H5 层与 H4 层间的气体浓度差较小,此时 H5 层  $\text{CO}_2$  浓度向 H4 层的气体扩散速率比 H4 层向上层的扩散速率小, H4 层的  $\text{CO}_2$  浓度出现下降趋势,而 H3 层的  $\text{CO}_2$  浓度却没有呈明显上升趋势。这是因为土壤中的气体扩散不仅受气体浓度差的影响,也与通气孔隙含量、孔隙弯曲度、孔隙连通性<sup>[14]</sup>和含水量有关<sup>[15]</sup>。而煤矸石粒径大,存在较多的大孔隙,与土壤相比,煤矸石具有更好的导气性,并且煤矸石层的含水量远小于土壤层,当水分占据土壤孔隙时,气体

的扩散会受到阻碍。因此,气体容易在煤矸石层中扩散,当气体扩散至土壤层下界面时,扩散受到限制  $\text{CO}_2$  并在土壤层下界面累积。

### 3 讨论

#### 3.1 重构土壤水分运移及气热扩散特征

在煤矸石充填重构土壤中,矸石层的含水量远低于土壤层,这一方面是因为煤矸石的颗粒密度远远大于土壤;另一方面,秦倩等<sup>[16]</sup>通过对煤矸石水分特征曲线的研究发现,煤矸石的持水性差,在低吸力段时大部分水分就会被排空,继续随着吸力的增加,含水量不再明显发生变化;在同一吸力下,煤矸石的含水量会明显低于正常土壤。所以,当土壤层与煤矸石层的水势达到动态平衡时,两者的含水量会存在差异。在非饱和土壤水运动过程中,基质势是主要驱动力<sup>[7]</sup>。土壤水总是从基质势大向基质势小的方向运动,然后达到能量平衡。由于煤矸石在低含水量时就能达到较大基质势,这就会导致土壤层水分不易向煤矸石层运动,水分就会在土壤层中累积,同时入渗过程也会受阻。因此在灌溉和降雨的情况下,矸石层的存在有利于土壤水分的保持,阻碍水分的下渗流失,但是煤矸石层的含水量低,当表层土壤含水量因水分蒸发降低时,煤矸石层却不能及时对土壤层进行水分的补给。所以在煤矸石重构土壤中,在灌溉或降雨后的短时间内土壤层的含水量会明显增加,但是随着表层土壤水分的蒸发,土壤层的含水量反而偏低。同时矸石层的水分竖直上移迁移也会受到煤矸石性质的显著影响<sup>[17]</sup>;当有地下水对煤矸石层水分补给时,由于煤矸石颗粒组分较大,毛细管作用小,会限制水分向上运动。因此,在煤矸石充填复垦地,特别是覆土厚度较薄的区域,应通过少量多次灌溉来保障重构土壤的水分。

当气体扩散至土壤层下界面时,由于矸石层大孔隙特征明显,气体扩散会受到土壤层阻碍,导致气体在土壤层下界面缓慢累积,形成气体浓度梯度,影响土壤层的气体交换。有的煤矸石含硫量高,且主要以黄铁矿形式赋存,煤矸石层的大孔隙结构有利于黄铁矿与空气和水接触,在微生物的催化作用下,会释放热量并生成硫酸、硫酸亚铁和硫酸铁<sup>[18]</sup>。土壤微生物活性易受土壤温度的影响,随着温度的升高,土壤微生物活动会加强,增强自身的呼吸作用以及对土壤有机质的分解<sup>[19-20]</sup>,使得土壤  $\text{CO}_2$  浓度升高。并且煤矸石与土壤相比具有更好的热扩散性,导致重构土壤内形成温度梯度。当温度梯度存在时,土壤内部会形成能量梯度,改变土壤内部水分、水汽和气体运动状态。煤矸石层在高温的环境下,土壤水分容易蒸发形成水汽,和气体一同向上扩散。当水汽遇到温度较低的土壤层时,水汽容易凝结,所以在

煤矸石层中,底部的含水量会相对较低。当黄铁矿氧化释放的热量在煤矸石层中累积达到煤矸石中可燃物的燃烧临界点时,会引发自然,释放多种酸性气体,致使煤矸石层局部酸化<sup>[21]</sup>。在温度梯度的影响下,一旦酸性气体向上扩散并与煤矸石层的水分结合,将降低煤矸石层的 pH 值,进而影响土壤层,特别是煤矸石与土壤的界面层环境。

### 3.2 土壤剖面重构时覆土厚度的选择

土壤空气中 CO<sub>2</sub> 浓度主要决定于植物根系呼吸、土壤微生物活性、土壤温度和含水量等<sup>[8-9]</sup>。在没有植物根系呼吸和其他条件影响下,H3 层土壤微生物的活性明显比 H1 和 H2 层弱。煤矸石会改变相邻土壤层的环境,影响土壤微生物的活性。但研究结果显示,煤矸石层对 H1 和 H2 层微生物活性的影响较小,说明煤矸石层仅容易对煤矸石界面以上 20 cm 深度内的土壤层产生影响。H1 层土壤的含水量在灌溉后 10~20 h 内,受表土水分蒸发的影响,其波动较大,含水量明显降低。H2 层的土壤含水量没有明显变化,而 20—40 cm 土壤层的含水量随着 H1 层含水量的降低对 H1 层进行水分的补给而降低。利用煤矸石进行充填复垦时,若覆土厚度为 40 cm,当 20—40 cm 土壤层对表土进行水分补给,其含水量开始降低时,由于煤矸石层含水量和基质势较低,无法对 20—40 cm 土壤层进行水分后续补给,将导致整个土壤层的含水量会偏低,不利于植被生长。综合考虑煤矸石对土壤层的多种影响,当覆土厚度为 60 cm 时,煤矸石对土壤层的影响较小,并随着覆土厚度的增加,煤矸石的影响会逐渐削弱。陈孝杨等<sup>[8]</sup>通过对覆土厚度不同的 4 类试验小区的土壤昼夜呼吸变化研究也发现,60—100 cm 是最有利于土壤生物活动的覆土厚度。

## 4 结论

(1)煤矸石充填重构土壤中,煤矸石层对土壤层具有良好的阻水性,使下渗水流在一定限度内滞留于土壤层中,增加了上层土壤的持水能力;但是,煤矸石的持水性差,含水量低,在表层土壤水分蒸发的情况下不利于对土壤水分的补给。

(2)煤矸石层具有良好的热扩散性,在重构土壤中容易形成稳定的温度梯度,特别在煤矸石层与土壤层之间存在明显的温度差。底部温度的变化对土壤层的影响较小,土壤层温度变化主要受环境温度影响。

(3)煤矸石层具有良好的导气性,气体容易在煤矸石层中扩散,当气体扩散至土壤层下界面时,气体扩散容易受到阻隔,导致气体在煤矸石下界面累积。

(4)在煤矸石充填重构土壤中,煤矸石层会对邻近土壤层产生较大影响,影响微生物生存的环境,导

致微生物的活性下降。在利用煤矸石进行土地复垦时,应当设计覆土厚度在 60 cm 以上。

### 参考文献:

- [1] 蔡毅,严家平,陈孝杨,等. 表生作用下煤矸石风化特征研究:以淮南矿区为例[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(5):937-943.
- [2] Dedrick D D, Robert H, Joshua L H, et al. An experimental study of coupled heat and water transfer in wettable and artificially hydrophobized soils[J]. Soil Science Society of America Journal,2014,78(1):125-132.
- [3] 辛继红,高红贝,邵明安. 土壤温度对土壤水分入渗的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(3):217-220.
- [4] 陈丽娟,张新民,王小军,等. 不同土壤水分处理对膜上灌春小麦土壤温度的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(4):9-13.
- [5] 邵明安. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [6] 宋杨睿,王金满,李新风,等. 高潜水位采煤塌陷区重构土壤水分运移规律模拟研究[J]. 水土保持学报,2016,30(2):143-148.
- [7] Wang J M, Li X F, Bai Z K, 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.
- [8] 陈孝杨,王芳,严家平,等. 覆土厚度对矿区复垦土壤呼吸昼夜变化的影响[J]. 中国矿业大学学报,2016,45(1):163-169.
- [9] 郑永红,张治国,胡友彪,等. 煤矿复垦重构土壤呼吸季节变化特征及其环境影响因子[J]. 煤炭学报,2014,39(11):2300-2306.
- [10] Al-Maktoumi A, Kacimov A, Al-Ismaily S, et al. Infiltration into two-layered soil: The green-ampt and averyanov models revisited [J]. Transport in Porous Media,2015,109(1):169-193.
- [11] 贾红,徐为根,彭明艳,等. 日光温室土壤温度变化特征和预报模型研究[J]. 安徽农业科学,2011,39(11):6471-6473.
- [12] 陈继康,李素娟,张宇,等. 不同耕作方式麦田土壤温度及其对气温的响应特征:土壤温度日变化及其对气温的响应[J]. 中国农业科学,2009,42(7):2592-2600.
- [13] 陈孝杨,周育智,严家平,等. 覆土厚度对煤矸石充填重构土壤活性有机碳分布的影响[J]. 煤炭学报,2016,41(5):1236-1243.
- [14] Kuncoro P H, Koga K, Satta N, et al. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices[J]. Soil and Tillage Research,2014,143(12):180-187.
- [15] 王卫华,王全九,李淑芹. 长武地区土壤导气率及其与导水率的关系[J]. 农业工程学报,2009,25(11):120-127.