

煤矸石组分与表土质地对充填重构土壤导气率的影响

陈孝杨, 张凌霄, 陈敏, 黄河, 胡智勇

(安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 研究煤矸石组分及表土质地对煤矸石重构土壤导气率的影响, 探讨重构土壤这种差异显著的非均质土壤导气内在机理, 为进一步研究复杂的非均质土壤导气特性提供理论基础。通过在煤矸石中掺杂不同粒径碎石来改变其组分, 并利用 3 种不同质地的土壤在土柱内进行土壤剖面重构, 采用一维瞬态法测量其导气率。结果表明: (1) 不同碎石粒径和质量分数对混合基质饱和含水量影响不同, 掺杂 2~5 mm 粒径碎石, 随着质量分数的增加, 饱和含水量逐渐增加, 从 7.29% 增加到 12.9%; 掺杂 5~10 mm 粒径碎石, 饱和含水量随着质量分数的增加先增加后减少, 分别为 7.28%, 8.5%, 6.9%。(2) 煤矸石的导气率远大于土壤, 并且煤矸石的导气率对水分的敏感度随质量含水量的增加而增加, 而土壤的导气率对水分变化的敏感度均随质量含水量的增加而降低。(3) 碎石的存在为大孔隙的产生创造条件的同时也会减少了土壤通气断面, 阻隔空气传输的通道。(4) 重构土壤导气率受表土质地和底部填充介质的共同影响, 覆土土壤导气率决定了重构土壤的导气率大小, 而充填基质导气率决定了充填介质对重构土壤导气率影响的系数(S_{km})。 S_{km} 与充填介质导气率呈显著相关, 可以通过指数函数进行拟合($R^2=0.93$)。通过充填介质及覆土土壤的导气率可以对重构土壤导气率进行估算, 简化了重构土壤导气率的测定过程。

关键词: 重构土壤; 导气率; 煤矸石; 表土质地

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0091-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.05.015

The Effects of Coal Gangue Composition and Surface Soil Texture on the Air Permeability in Reconstruction Soil Filled with Coal Gangue

CHEN Xiaoyang, ZHANG Lingxiao, CHEN Min, HUANG He, HU Zhiyong

(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001)

Abstract: In order to investigate the mechanism of non-homogeneous soil air permeability in reconstruction soil and provide a theoretical basis for further studies of the characteristics of complex heterogeneous soil, the effects of coal gangue composition and topsoil texture on air permeability of reconstruction soil were studied. The coal gangue was mixed with different particle size gravel to change its composition, the soils were reconstructed by using three different soils in the soil column, and the air permeability was measured by one-dimensional transient method. The results showed that the influence of particle size and mass fraction of different gravel on saturated mass water content of mixed matrix was different. The saturated mass water content was increased gradually from 7.29% to 12.9% with 2~5 mm particle size gravel increasing. The saturated mass water content was increased first and then decreased with the mass fraction increasing of 5~10 mm particle size gravel, which were 7.28%, 8.5% and 6.9% respectively. The air permeability of coal gangue was much larger than that of soil, and the sensitivity of coal gangue to mass water content was increased with the mass water content increasing, while the sensitivity of soil was decreased with the mass water content increasing. The presence of gravel created an advantage for the formation of large pores and reduced the soil ventilation section to block the air transmission channel. The air permeability of reconstruction soil was influenced by topsoil texture and bottom filling matrix. The air permeability of reconstruction soil depended on topsoil permeability, and the air permeability of bottom filling matrix determined the influence coefficient of filling matrix on the air permeability of reconstructed soil (S_{km}). S_{km} had a significant correlation with the filling matrix permeability, which could be fitted by an exponential function ($R^2=0.93$). The air

permeability of reconstructed soil could be estimated by topsoil and filling matrix air permeability, which simplified the air permeability determination process of reconstruction soil.

Keywords: reconstruction soil; air permeability; coal gangue; topsoil texture

为了改善矿区生态环境,矿山生态建设是迫切需要的。因此,国内专家学者^[1-5]对矿区生态建设做了大量研究,提出土壤重构、景观重建、矿山生态重建、矿山生态恢复等概念。土壤重构是通过适当的采矿和重构技术工艺,应用工程措施及物理、化学、生物、生态措施,重新构造一个适宜的土壤剖面 and 土壤肥力条件以及稳定的地貌景观,在较短的时间内恢复和提高重构土壤的生产力,并改善重构土壤的环境质量,来恢复或重建破坏土地的土壤^[6]。经过长期的理论与实践,利用煤矸石充填重构土壤是经济可行的^[4]。因此,煤矿区用矸石作为垫底基质进行土壤剖面重构,恢复生态环境和土地复垦的立地条件工程大量存在。但是煤矸石理化性质与土壤存在明显差异^[7-8],会直接影响重构土壤剖面水分分布^[9]。采用煤矸石作为土柱底层充填基质时,底部矸石层的含水量要远低于表层土壤^[10],并且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^[11]。含水量是影响土壤导气率的决定性因素之一^[12-13],因此,煤矸石对重构土壤水分运动特性和有效性的影响必然会对重构土壤导气率产生显著影响。

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,许多专家学者对土壤导气率做了研究。Li 等^[14]利用样品密封端压力与时间的动态变化关系推导出瞬压法沥青导气率计算公式;李陆生等^[15]通过理论推到与试验分析简化了 Li 等^[14]的导气率瞬态模型;Chen 等^[16]发现压实会影响土壤的孔隙弯曲度和连通性,导致表层土壤(0—12 cm)导气率的下降;罗松等^[17]在对不同开垦年限黑土耕地土壤导气率的研究中发现,黑土耕地土壤导气率易受开垦的影响,并随着开垦年限的增加而显著减少;王卫华等^[18]研究表明,玉米地和果树地表层土壤导气率与气温存在显著线性关系并建立了导气率与地温的预测关系式。但他们

对土壤导气率的研究主要集中在自然土壤,而对重构土壤这种差异显著的非均质土壤导气内在机理研究还十分欠缺。因此,开展对重构土壤导气率的相关研究对深化土壤导气特征机制认识具有重要意义,不仅可以为煤矸石利用提供依据,并且可以了解这种复杂的非均质土壤导气率和气体运动过程。

1 材料与方法

1.1 供试材料

煤矸石样品采自安徽省淮南市潘集矿区某矸石山。潘集矿区属暖温带季风气候,年平均气温 14.3~16.0℃,年均降水量 937 mm,是典型的煤炭开采区。淮南矿区煤矸石成分相似,主要由泥岩、页岩、粉砂岩、砾岩和石灰岩等组成。采样后将样品带回实验室进行机械组成分析及含水量测定(表 1)。供试土壤样品分别采自淮南市大通湿地公园(A)、东辰生态园(B)、淮河岸边(C),煤矸石和土壤样品的采集时间为 2016 年 10 月。采样时,先去除表层 0—5 cm 土壤,用环刀和铝盒分别取样带回实验室进行容重与含水量测定,然后采集 5—20 cm 深度土样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初始含水量;用比重计法测定土壤的颗粒密度(ρ_s),结合土壤容重(ρ_b)计算孔隙度(n),近似作为土壤饱和含水量的结果数据,计算公式为: $\theta_s = n = (1 - \rho_s / \rho_b) \times 100\%$;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分级。试验土壤样品的机械组成与物理性质见表 2。

表 1 煤矸石样品的机械组成与含水量

机械组成/%				初始	饱和
<2 mm	2~5 mm	5~10 mm	≥10 mm	含水量/%	含水量/%
19.25	17.50	25.58	37.67	1.91	8.48

表 2 土壤样品的机械组成与物理性质

采样点	机械组成/%			初始容重/ (g·cm ⁻³)	初始 含水量/%	饱和 含水量/%	表土 质地
	≤0.002 mm	0.002~0.02 mm	>0.02~2 mm				
A	15.84	76.85	7.31	1.89	20.50	33.06	粉壤土
B	21.67	66.61	11.72	1.81	19.82	31.29	粉黏壤土
C	9.66	42.62	47.72	1.82	16.99	29.11	壤土

取煤矸石样品 6 袋称重,依次加入总质量 15%,30%,45%粒径为 2~5,5~10 mm 的碎石均匀混合,碎石是由煤矸石样品过 2,5,10 mm 筛获得。将煤矸石和混合样品依次标号为 0,1,2,3,4,5,6。分别取 0~6 号样品 600 g,填充进大环刀(内径 10 cm,高 6

cm),压实到 5 cm,置于水中浸泡 24 h,测量其饱和含水量^[19];分别再称取 0~6 号样品 1 200 g,设置不同的初始含水量,填充进土柱中,均匀压实到 10 cm,测定不同组分煤矸石的导气率。将 1 200 g 3 种土样(A、B、C)按不同初始含水量边填充边均匀的压实进

土柱管内,压实到 10 cm,测定不同质地土壤的导气率。分别称取 0~6 号样品 600 g,按 5% 初始含水量依次填充进土柱,压实到 5 cm,保持底部充填基质含水量不变,再取 600 g 3 种不同质地的土样,按不同初始含水量均匀分层填充进土柱中压实到 10 cm,根据充填方式将重构土壤依次编号为 A0~A6、B0~B6 和 C0~C6,测定不同充填方式下重构土壤的导气率。通过控制样品压实后的厚度来控制样品的容重,其容重均约为 1.53 g/cm³。样品分析和试验时间为 2016 年 12 月至 2017 年 10 月。

1.2 测定方法

本试验采用一维瞬态法测量煤矸石及土壤导气率^[14],其装置示意图见图 1。试验开始前,先在土柱管内壁均匀地涂抹凡士林,防止气体从土柱管内壁漏出,再将样品按试验方案设计填充进土柱管,按图示连接测试装置,确保系统密闭后,开始用打气筒向储气筒供气,经过储气筒的缓冲,空气通过导气软管进入土柱管,通过 U 型气压计来测定土样密封气体的气压变化。当气压计指示气压稍高于预定值时,停止打气,待气压降到预定值,用录像机记录气压计读数的变化过程。本试验的气压预定值为 20 cm 水柱,通过录像机记录的视频读取气读计读数随时间的变化关系,所有数值取 3 个重复土柱的算术平均值作为该处理的值^[20]。导气率($k_a, 10^{-12} \text{ m}^2$)计算公式为:

$$k_a = -\frac{VL\mu S}{AP_{atm}} \tag{1}$$

式中:V 为储气瓶与土柱管未填充部分体积之和(m³);L 为土柱管内土样高度(m);μ 为空气黏滞系数(1.86×10⁻⁵ (Pa·s));S 为时间单位 s 的倒数(s⁻¹);A 为土柱管管口横截面积 (m²);P_{atm} 为 1 个标准大气压(101.3 kPa)。

S 的计算公式为:

$$S = \ln \left[\frac{(P(0) + P_{atm})(P(t) - P_{atm})}{(P(0) - P_{atm})(P(t) + P_{atm})} \right] / t \tag{2}$$

式中:P(0)为初始气压差(kPa);P(t)为时间 t 对应气压计内的气压差(kPa)。

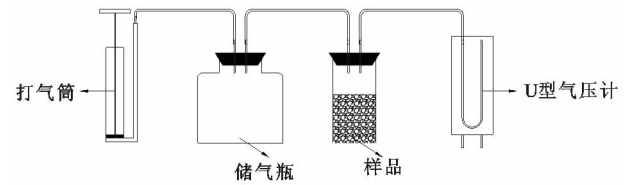


图 1 导气率测定装置示意

2 结果与分析

2.1 煤矸石组分对其饱和含水量的影响

由表 3 可知,相同粒径下,混合介质的饱和含水量随着碎石质量分数的增加其变化趋势有所不同。掺杂 2~5 mm 粒径碎石,随着质量分数的增加,饱和含水量逐渐增加,从 7.29% 增加到 12.90%;掺杂

5~10 mm 粒径矸石,饱和含水量随着质量分数的增加先增加后减少,依次为 7.28%,8.50%,6.90%。与煤矸石相比,掺杂 2~5 mm 粒径碎石时,仅在 15% 时饱和含水量有所下降,降低了 1.19%,其余含水量均有所增加;掺杂 5~10 mm 粒径碎石时,总体上饱和含水量有下降趋势,仅在 30% 时无明显变化。多孔介质的孔隙度对介质的饱和含水量影响最大^[21],这说明掺杂碎石时,会改变介质的孔隙结构状况,并且受碎石粒径和质量分数影响。同时也说明了掺杂少量小粒径碎石时不利于介质孔隙的发育,但随着小碎石质量分数的增加,将逐渐改善混合介质的孔隙结构,其持水能力更强;掺杂 15%~45% 质量分数大粒径碎石时均不利于介质孔隙的发育,这可能是由于大粒径碎石密度大,自身孔隙分布少,导致在相同质量,随着大碎石质量分数的增加,介质的总孔隙度下降。另外,煤矸石样品的饱和含水量远低于土壤样品,这主要是由于煤矸石的密度远高于土壤,在相同体积情况,煤矸石的质量相对较大,其质量含水量就会偏低。

表 3 不同碎石粒径和质量分数下混合介质饱和含水量

碎石粒径/mm	碎石质量分数/%	饱和含水量/%
2~5	15	7.29
	30	10.93
	45	12.90
5~10	15	7.28
	30	8.50
	45	6.90

2.2 质地对介质导气率的影响

煤矸石与土壤在质地和水力学性质等方面存在明显差异^[7],这将直接影响土壤导气率^[20]。为研究煤矸石及表土质地对煤矸石充填重构土壤导气率的影响,必须对不同质地土壤及煤矸石的导气率要有所了解。

由图 2 可知,4 种不同质地介质的导气率均随含水量的增加而减小;相同含水量下,煤矸石的导气率远大于土壤。多孔介质的导气率主要取决于介质的总孔隙度及孔隙连通性^[22],尤其是通气孔隙的大小。煤矸石颗粒组成粒径远大于土壤,有利于大孔隙的发育和孔隙之间的连通性,其通气孔隙含量较大,因此煤矸石的导气率远大于土壤。多孔介质由水、固和气 3 相组成,水和空气占据介质的孔隙,介质水分的增加必然会占据通气孔隙导致通气孔隙的减少,从而影响通气状况,导致导气率的下降。在土壤中,壤土的导气率最大,粉黏壤土的导气率居中,粉壤土的导气率最小,其中壤土的导气率要明显高于另两类土壤,粉黏壤土和粉壤土的导气率相近。这可能主要是受土壤质地的影响,在壤土中砂粒含量占 47.72%,远高于粉黏壤土和粉壤土,一般砂性土具有更佳的通透性^[20]。另

外,煤矸石与土壤的导气率对水分的敏感度随含水量的变化也不同:土壤的导气率对水分的敏感度均随含水量的增加而降低,而煤矸石对水分的敏感度却随含水量的增加而增加。当含水量在 2.5%~7.5% 时,粉壤土、粉黏壤土和壤土导气率随含水量变化的斜率分别为 -0.827 , -0.735 , -1.103 ; 当含水量在 7.5%~15% 时,斜率分别为 -0.279 , -0.368 , -0.509 ; 而煤矸石含水量在 2.5%~5% 时的斜率为 -0.551 , 含水量在 5%~6.5% 时为 -2.405 。可以发现在含水量较低时,煤矸石导气率对水分的敏感度小于土壤,而随着含水量的增加,煤矸石导气率对水分的敏感度明显增加且远高于土壤。这可能是因为煤矸石中大孔隙分布相对较多,小孔隙分布较少,而在土壤中孔隙的分布却相反。在多孔介质中,空气总是优先占据较大的孔隙,水则优先占据较小的孔隙,由于煤矸石中大孔隙分布较广,因此含水量的增加一开始对煤矸石的导气率影响相对较小,随后逐渐增加,而在土壤中却恰恰相反。

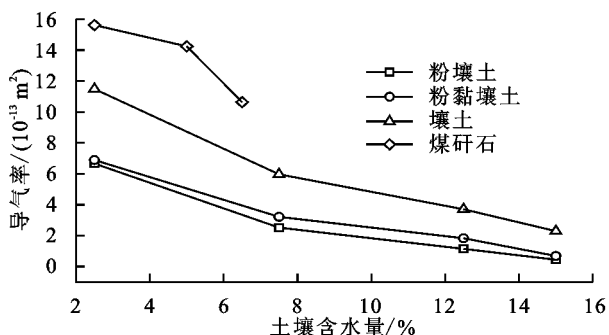
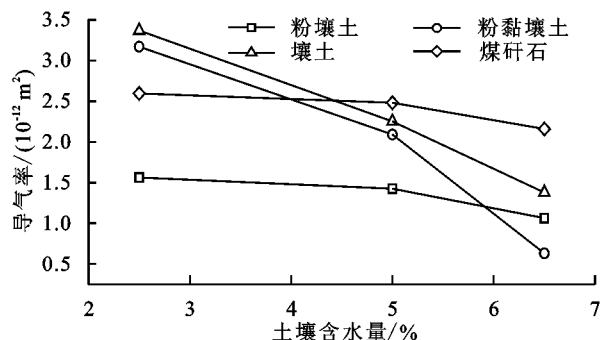


图 2 不同质地介质导气率随含水量的变化



2.3 煤矸石组分对其导气率的影响

在煤矸石中掺杂碎石基本上能提高煤矸石的导气性能,仅在含水量相对较高时掺杂 15% 小粒径碎石时导气率下降(图 3),说明碎石的存在为煤矸石大孔隙的发育提供了条件。但随着煤矸石中碎石质量分数的增加,煤矸石导气率的变化有所不同。掺杂小粒径(2~5 mm)碎石,在含水量较低时,质量分数为 30% 的导气率最大,45% 的导气率最小,导气率随着质量分数先增加后减少;而在含水量较高时,导气率随质量分数的变化表现出不同规律,随着质量分数的增加而增加;质量分数为 45% 时,导气率受含水量变化的影响不明显,含水量增加 5% 而导气率仅降低了 $0.436 \times 10^{-12} \text{ m}^2$,其导气率对水分的敏感度远低于质量分数为 15% 和 30% 时。这可能是因为掺杂 15%~45% 质量分数小碎石时,随着质量分数的增加,煤矸石大孔隙发育更明显,小孔隙分布较少,尤其在 45% 时,并且此时碎石的存在可能会阻碍气体的传输。这是因为碎石的存在会阻断煤矸石孔隙断面,也会阻碍水分的入渗^[23]。掺杂大粒径(5~10 mm)碎石,导气率随着质量分数的增加先增加后减小,质量分数为 30% 时导气率最高;当质量分数在 45% 时,其导气率与煤矸石导气率相近,远低于质量分数为 15% 和 30%,并且此时导气率对水分的敏感度相对较低。这说明碎石的质量分数在 45% 时,为大孔隙的产生创造条件同时也会阻碍气体的传输^[24],尤其是大碎石的存在。

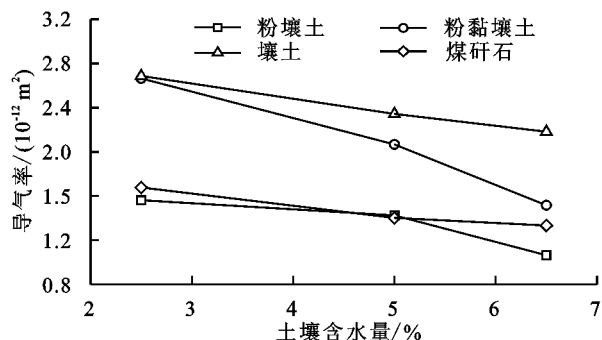


图 3 不同碎石质量分数下煤矸石混合介质导气率随含水量的变化

同时,碎石粒径也会对混合介质导气率产生影响。相同质量分数下,掺杂小碎石介质的导气能力总体上要大于掺杂大碎石的,仅在碎石质量分数为 30% 含水量较高时掺杂大碎石的导气率相对较高(图 4)。综上,可以说明小碎石更有利于介质的导气能力,而大碎石会阻碍气体传输。因此,在煤矸石中适当地掺杂小碎石可以有效地提升煤矸石的导气能力。

2.4 表土质地对重构土壤导气率的影响

在底部填充基质导气率不变的情况下,重构土壤

导气率均随着表土导气率的变化而变化,其变化趋势基本与表土导气率的变化保持一致,但两者导气率却有明显差异。重构土壤导气率显著高于表土导气率(图 5),而又低于底部充填基质的导气率,介于表土导气率与底部充填基质导气率之间。这可能是由于底部充填基质导气率明显大于表土,缩短了气体在充填基质层通过的时间,但当气体通过充填基质继续向上运动时,由于表土导气率相对较低,会受到了表土层的阻碍^[9],使得导气率相对底部充填基质有所下

降。这与非均匀土壤剖面的入渗规律不同,对于非均匀土壤,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^[25]。在相同含水量时,壤土重构土壤导气率>粉黏重构土壤导气率>粉壤土重构土壤导气率,这与表土导气率大小相一致。另外,在含水量较低时,重构土壤导气率增幅相对较大,而在含水量较高时,增幅相对较小。这可能是由于含水量较低时,表土导气率相对较高,底部充填基质对导气率的影响就越大,而当含水量较高时,表土导气率相对较低,底部充填基质对导气率的影响就越小。这说明底部填充基质对重构土壤导气率的影响会受表土导气率的影响,而这需要进一步探究。综上,表土质地不仅会限制重构土壤的导气率,并且会影响底部充填基质对导气率的影响。

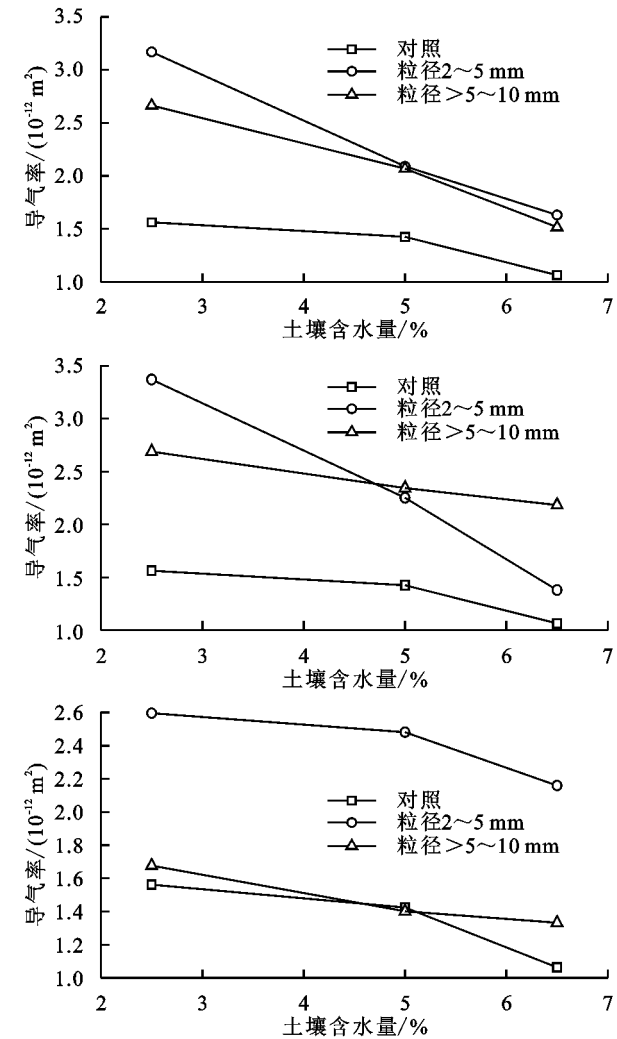


图 4 不同碎石粒径混合煤矸石导气率随含水量的变化

2.5 充填基质对重构土壤导气率的影响

不同充填基质对重构土壤导气率的影响程度明显存在差异,充填基质对重构土壤导气率的影响程度依次为样品 3>5>2>1>4>6>0,其中 1~5 号样品对重构土壤导气率的影响相近,0 号和 6 号样品相

近(图 6)。另外,在含水量较低时,底部充填基质对重构土壤导气率影响较大,而含水量较高时,影响相对较小。这可能是受底部充填基质通气孔隙的影响,为了进一步分析底部充填基质在不同情况下对重构土壤导气率的影响,定义充填基质对重构土壤导气率影响的系数为 S_{ba} 。计算公式为:

$$S_{ba} = K_{ar} / K_a \tag{3}$$

式中: K_{ar} 为重构土壤导气率(10^{-12} m^2); K_a 为表土导气率(10^{-12} m^2)。

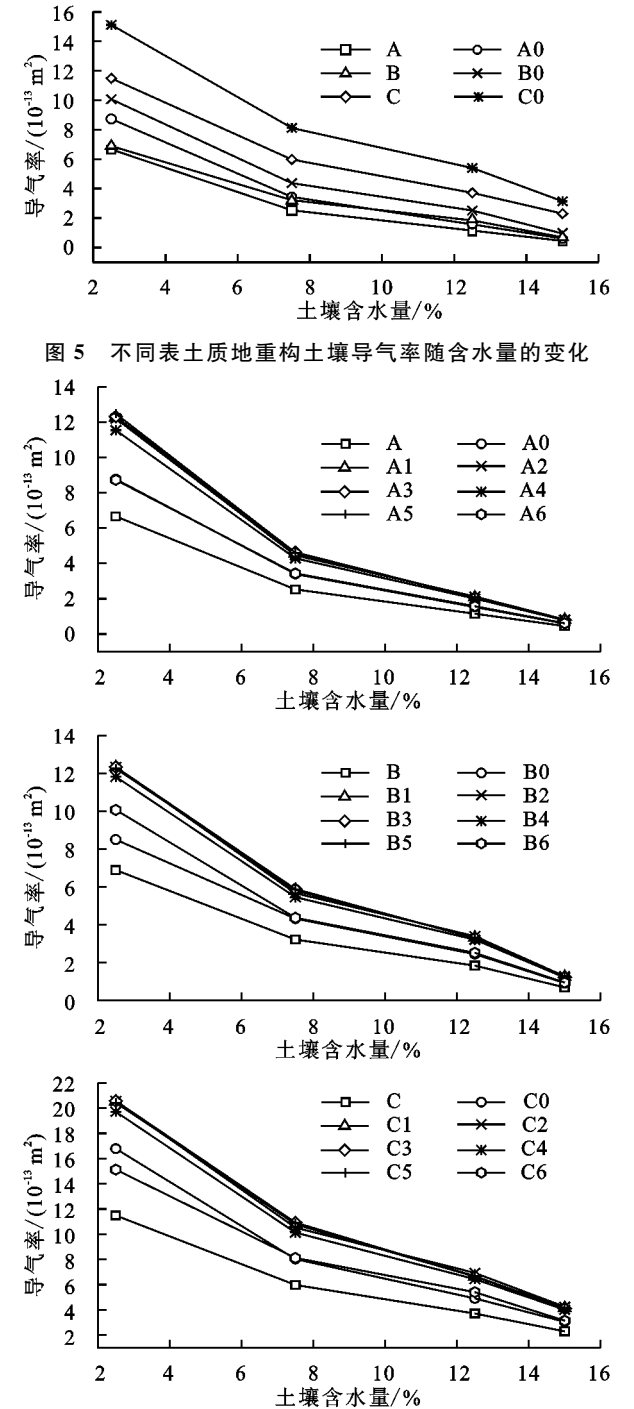


图 6 不同充填基质重构土壤导气率随含水量的变化趋势

由表 4 可知,不同基质对重构土壤导气率的影响系数不同,但相同基质在不同含水量及表土质地的情

况下对重构土壤导气率的影响系数相近。这可以说明,底部充填基质对导气率的影响并不受表土质地和表土含水量的影响,而是与充填基质密切相关,并且同一种基质其影响系数相近。这也解释了为什么在含水量较低时,底部充填基质对重构土壤导气率影响较大,而含水量较高时,其影响相对较小。这主要是因为表土含水量较低时,其导气率相对较高,而含

水量较高时,其导气率相对较低。另外, S_{ka} 大小依次为 $3>5>2>1>4>6>0$,与底部充填基质导气率大小排序相同,这说明 S_{ka} 可能受底部充填基质导气率影响,因为底部充填基质导气率越大,越有利于气体的通过。为进一步探讨不同填充基质间 S_{ka} 差异的原因,对 S_{ka} 与充填基质导气率进行了相关性分析及曲线拟合,其拟合曲线见图 7。

表 4 底部充填基质对重构土壤导气率的影响系数

表土质地	土壤 含水量/%	导气率/(10^{-12} m^2)						
		0	1	2	3	4	5	6
粉壤土	2.5	1.32	1.83	1.84	1.85	1.73	1.89	1.31
	7.5	1.30	1.80	1.83	1.83	1.70	1.87	1.36
	12.5	1.27	1.79	1.80	1.76	1.76	1.85	1.41
	15.0	1.29	1.78	1.81	1.89	1.74	1.81	1.44
粉黏壤土	2.5	1.37	1.79	1.79	1.79	1.75	1.78	1.46
	7.5	1.34	1.77	1.76	1.83	1.72	1.86	1.32
	12.5	1.38	1.81	1.86	1.77	1.74	1.83	1.35
	15.0	1.33	1.78	1.85	1.76	1.71	1.82	1.37
壤土	2.5	1.46	1.79	1.80	1.79	1.73	1.82	1.40
	7.5	1.45	1.81	1.82	1.81	1.75	1.84	1.36
	12.5	1.39	1.77	1.87	1.79	1.71	1.79	1.45
	15.0	1.35	1.88	1.85	1.81	1.75	1.78	1.32

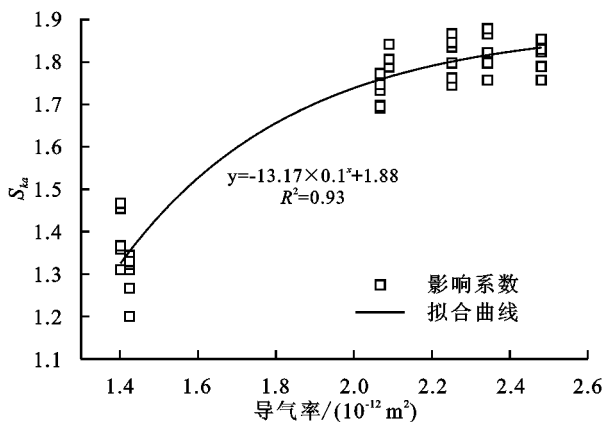


图 7 底部充填基质导气率对 S_{ka} 的影响

S_{ka} 与底部充填基质导气率呈显著相关 ($P < 0.05$), 并且可以通过指数函数进行拟合 ($R^2 = 0.93$)。因此, 可以应用该方程对底部填充基质对重构土壤导气率影响系数进行估算, 进而推算出重构土壤的导气率。计算公式为:

$$K_{ar} = S_{ka} \times K_a \quad (4)$$

$$S_{ka} = 13.17 \times 0.1^{K_{af}} + 1.88, K_{af} \geq 1.40 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \quad (5)$$

式中: K_{af} 为拟合经验常数, 无量纲。

这样只需获得底部充填基质及表土的导气率就能对重构土壤导气率进行估算, 简化了重构土壤导气率的计算过程。但是本文在研究过程未考虑表土覆

土厚度及底部充填基质的厚度对重构土壤导气率的影响, 在设置土柱时表土厚度及填充厚度均设置为 5 cm, 因此该计算方程还存在许多不足之处, 需要进一步研究完善。

3 结论

(1) 不同碎石粒径和质量分数对混合基质饱和含水量影响不同, 混合 2~5 mm 粒径研石, 随着质量分数的增加, 饱和含水量逐渐增加, 混合 5~10 mm 粒径研石, 饱和含水量随着质量分数的增加先增加后减少。

(2) 煤研石的导气率远大于土壤, 由于孔隙结构的差异, 土壤的导气率对水分变化的敏感度均随含水量的增加而降低, 而煤研石的导气率对水分的敏感度却随含水量的增加而增加。

(3) 碎石的存在, 为大孔隙的产生创造了条件, 为空气通过土壤断面创造便利条件的同时也会减少土壤通气断面, 阻隔空气传输的通道。

(4) 重构土壤导气率不仅受覆土类型影响, 而且受底部填充基质的影响, 但重构土壤的导气率由覆土土壤导气率所决定, 充填基质决定重构土壤导气率受影响系数。 S_{ka} 与充填介质呈显著相关性, 可以通过指数函数进行拟合 ($R^2 = 0.93$)。因此, 只要获得充填介质及覆土土壤导气率就能对重构土壤导气率进行估算, 简化重构土壤导气率的测定过程。

参考文献:

- [1] 白中科,付梅臣,赵中秋.论矿区土壤环境问题[J].生态环境,2006,15(5):232-235.
- [2] 卞正富.矿区开采沉陷农用地质量空间变化研究[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):89-94.
- [3] 白中科,郭青霞,王改玲,等.矿区土地复垦与生态重建效益演变与配置研究[J].自然资源学报,2001,16(6):525-530.
- [4] 胡振琪.煤矿山复垦土壤剖面重构的基本原理与方法[J].煤炭学报,1997,22(6):59-64.
- [5] 卞正富,许家林,雷少刚.论矿山生态建设[J].煤炭学报,2007,32(1):13-19.
- [6] 胡振琪,魏忠义,秦萍.矿山复垦土壤重构的概念与方法[J].土壤,2005,37(1):8-12.
- [7] 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):161-167,182.
- [8] 严家平,陈孝杨,蔡毅,等.不同风化年限的淮南矿区煤矸石理化性质变化规律[J].农业工程学报,2017,33(3):176-182.
- [9] 王顺,陈敏,陈孝杨,等.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[J].水土保持学报,2017,31(4):93-98,126.
- [10] 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.
- [11] 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):145-150,156.
- [12] 王卫华,王全九,樊军.原状土与扰动土导气率、导水率与含水率的关系[J].农业工程学报,2008,24(8):25-29.
- [13] 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.
- [14] Li H L, Jiao J J, Luk M. A falling-pressure method for measuring air permeability of asphalt in laboratory [J]. Journal of Hydrology, 2004, 286(1): 69-77.
- [15] 李陆生,张振华,潘英华,等.土壤导气率瞬态模型关键参数 s 简化求解[J].土壤,2012,44(6):170-175.
- [16] 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.
- [17] 罗松,韩少杰,王恩姮,等.不同开垦年限黑土耕地土壤导气率及其影响因素[J].东北林业大学学报,2017,45(6):47-50.
- [18] 王卫华,王全九.土壤导气率日变化特征分析[J].灌溉排水学报,2011,30(6):25-30.
- [19] 陈敏,陈孝杨,王芳,等.容重对煤矸石水力特性的影响[J].煤炭技术,2017,36(3):52-54.
- [20] 朱敏,张振华,潘英华,等.土壤质地及容重和含水率对其导气率影响的实验研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):116-121.
- [21] 刘效东,乔玉娜,周国逸.土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J].植物生态学报,2011,35(12):1209-1218.
- [22] Kuncoro P H, Koga K, Satta N, et al. A Study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity [J]. Soil & Tillage Research, 2014, 143(12): 172-179.
- [23] Zhou B B, Shao M A, Wen M X, et al. Effects of coal gangue content on water movement and solute transport in a china loess plateau soil [J]. Clean-Soil, Air, Water, 2015, 38(11): 1031-1038.
- [24] 王卫华,王全九,王铄.土石混合介质导气率变化特征试验[J].农业工程学报,2012,28(4):82-88.
- [25] 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.