

# 土石混合介质导气率变化特征试验

王卫华<sup>1</sup>, 王全九<sup>1,2\*</sup>, 王 铄<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点试验室, 杨凌 712100)

**摘要:** 土壤中碎石的存在改变了土壤结构和孔隙分布, 进而影响土壤通气性能。该文通过对碎石单粒径土石混合介质导气率变化特征研究, 旨在探讨单粒径土石混合介质导气内在机理, 为进一步研究复杂的野外土石混合介质的导气特性提供基础。为了研究土石混合介质中碎石对导气率的影响, 该文通过试验研究, 分析土壤颗粒小于 2 mm 的样本(砂土、砂壤土、黏壤土)、碎石质量分数(10%、20%、30%、40%、50%)和碎石粒径(2~3、>3~5 mm)对土石混合介质导气率的影响。结果表明: 在土壤颗粒小于 2 mm 的样本条件下, 土壤导气率呈砂土>砂壤土>黏壤土; 在相同碎石质量分数的土石混合介质中导气率呈砂壤土>砂土>黏壤土; 碎石的存在改善黏壤土的导气性能, 使黏壤土碎石混合介质的导气率大于黏壤土的导气率; 降低了砂壤土和砂土的导气性能, 且砂土的降低幅度远大于砂壤土; 在砂壤土中碎石粒径 2~3 mm 的导气率大于>3~5 mm 的导气率; 在砂土中碎石质量分数 30%之内, 碎石粒径>3~5 mm 的导气率稍大于 2~3 mm 的导气率, 在 40%则相反, 但两种粒径下混合介质导气率差异不是很明显。

**关键词:** 土壤, 孔隙大小, 物理特性, 土石混合介质, 碎石质量分数, 碎石粒径, 导气率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.04.0013

中图分类号: S152.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-04-0082-07

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.

Wang Weihua, Wang Quanjiu, Wang Shuo. Experimental Research on change characteristics of soil air permeability in stony soil medium[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 82-88. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

由于自然成土过程和人类活动的影响, 一些土壤中含有一定量的碎石(2 mm<颗粒粒径<76 mm)<sup>[1]</sup>, 尤其在山区和隔壁滩周围的绿洲农田大面积存在着土石混合介质。碎石存在直接影响土壤结构和孔隙分布状况, 进而影响土壤导气透水特征。近年来, 国内外学者对土石混合介质的水分运动特性进行了研究, 结果显示镶嵌在地表和土壤剖面中的碎石能够改变土壤持水特性, 影响土壤水分入渗以及水分含量和植物生长, 有助于提高干旱和半干旱地区的土壤生产力<sup>[2-4]</sup>。由于碎石存在影响水分运动特性和有效性, 必然对土壤导气特征产生显著影响, 但对于碎石影响介质导气特征内在机制与影响程度缺乏深入研究。目前国内外学者对土壤导气率的研究主要集中在均质或非均质土壤, 并取得了显著进展。Moldrup 等学者研究表明非扰动土壤的导气率受土壤孔隙结构的影响<sup>[5-8]</sup>。Atac Tuli 和 Poulse 对比分析了含水量对扰动土和原状土导气率和导水率的影响, 结果显示扰动土样和原状土导气率和导水率存在显著差异, 而这种

差异主要由扰动土缺少大孔隙而引起的<sup>[9-10]</sup>。王卫华和王全九研究扰动土和非扰动土的土壤导气率的影响因素, 结果表明土壤导气率与土壤质地、土壤结构、孔隙大小分布有密切的关系<sup>[11-13]</sup>。一些学者认为, 由于土壤孔隙结构很难定量描述, 利用数学公式准确预测不同质地土壤的导气率是非常困难的<sup>[14]</sup>。因此, 开展相关研究对深化土壤导气特征机制认识具有重要意义。本论文通过分析碎石质量分数和碎石粒径对土石混合介质导气率特性的影响, 进一步揭示土石混合介质导气率的内在机制, 为深入系统研究土石混合介质导气特征提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验在中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行。土样取自陕西杨凌、内蒙古东胜、陕西神木三地, 土样风干过 2 mm 土筛后, 用马尔文激光法测定土壤颗粒组成, 并根据国际分级标准对土壤质地进行命名。3 种土壤质地分别为, 杨凌土为黏壤土, 东胜土为砂壤土, 神木土为砂土, 具体颗粒分析及土壤类型列在表 1 中。

碎石采自杨凌渭河河滩, 利用标准土筛对碎石进行粒径分级, 以当量粒径为分类依据进行分组, 分别为粒径 2~3 mm 组和>3~5 mm 组。用排水法测定两组碎石的密度, 并设定土样体积质量为 1.45 g/cm<sup>3</sup>, 碎石体积质量为 2.63 g/cm<sup>3</sup> 计。用烘干法测定土样和碎石相应体积质量下的初始含水率和饱和含水率, 结

收稿日期: 2011-03-21 修订日期: 2011-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179150)。

作者简介: 王卫华(1982-), 女, 陕西西安人, 博士生。主要从事土壤物理方面的研究。西安 西安理工大学水利水电学院, 710048。

Email: wangweihua1220@163.com

\*通信作者: 王全九(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 中国农业工程学会会员(E041200065S), 主要从事农业水土工程方面研究工作。西安 西安理工大学水利水电学院, 710048。Email: wquanjiu@163.com

果列在表 2 中。

表 1 试验土壤质地

Table 1 Soil texture of the tested soil samples

取样地点	机械组成/%			土壤类型
	<0.002 mm	0.002~0.02 mm	>0.02~2 mm	
陕西杨凌	30.57	42.76	26.67	黏壤土
内蒙东胜	12.20	24.86	62.94	砂壤土
陕西神木	0.99	1.35	97.66	砂土

表 2 土样和碎石的体积质量与含水率

Table 2 Bulk density and water content of the test soil and stone samples

试验材料	基本物理参数			
	粒径/mm	初始含水率 $\theta_i$ /%	饱和含水率 $\theta_s$ /%	体积质量 $\rho$ /(g·cm <sup>-3</sup> )
碎石	2~3	0.005	0.009	2.63
	>3~5	0.005	0.009	2.63
黏壤土(杨凌)		1.80	33.85	1.45
砂壤土(东胜)	<2	0.98	31.21	1.45
砂土(神木)		0.33	20.60	1.45

### 1.2 导气率测定设备

本试验采用 PL-300 型土壤导气率测定仪(德国 Umwelt-Geräte-Technik GmbH 公司)测定混合介质的导气率<sup>[15]</sup>。该系统由主机和样本容器两部分组成。试验系统由图 1 所示,主机包括气泵、测量喉管、压力传感器及数据采集器。样本容器环刀高为 6.1 cm,内径为 7.2 cm,容积为 248 cm<sup>3</sup>。在试验过程中将装有供试土样的环刀与环刀适配器连接。在测量过程中,空气自动由环刀流入仪器,并测量环刀内部与外部空气间的压力差,同时直接输出试样导气率数值。

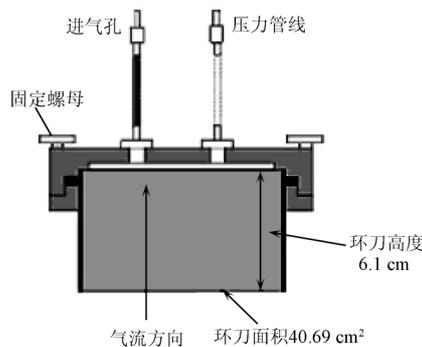


图 1 导气率测定样本容器示意图

Fig.1 Schematic description of air permeability specimen containers

### 1.3 试验方案

本论文主要研究碎石粒径和质量分数对土石混合介质导气率的影响,试验选取 2 种碎石粒径(2~3、>3~5 mm),5 种碎石质量分数(10%、20%、30%、40%、50%)作为研究对象,并以土壤颗粒小于 2 mm 的样本作为对照。

为了研究方便性,利用设定土壤体积质量和碎石体积质量确定土石混合介质的体积质量。Russo<sup>[16]</sup>和 Sharma<sup>[17]</sup>提出了土石混合介质的体积质量的计算公式,

具体表达为

$$\rho_r = \frac{\rho_{rf} \rho_{fe}}{(1 - R_m) \rho_{rf} + R_m \rho_{fe}} \quad (1)$$

式中,  $\rho_r$  表示土石混合介质的体积质量, g/cm<sup>3</sup>;  $\rho_{rf}$  表示碎石体积质量, g/cm<sup>3</sup>;  $\rho_{fe}$  表示土样体积质量, g/cm<sup>3</sup>;  $R_m$  表示碎石的质量分数, %。

对土石混合介质制备,先按照设定土样与碎石质量分数,分别确定土样和碎石质量,并将其均匀混合,然后通过加水,配置设定含水率的土石混合介质,并人工搅拌均匀。将制备好的土石混合介质装入环刀,保鲜膜封口防止水分散失,静置 24 h,作为供试试样。然后,利用土壤导气率测定仪测定试样的导气率。

## 2 结果与分析

### 2.1 碎石质量分数对混合介质基本物理特性的影响

土石混合介质的基本物理特性因碎石质量分数的不同而变化<sup>[18]</sup>,不同碎石质量分数情况下混合介质的体积质量见表 3。由表中数据可看,相同粒径下,随着碎石质量分数的增加,土石混合介质体积质量均呈增加趋势,而混合介质的饱和含水率呈减小趋势。这是由于碎石质量分数越高,单位体积内混合介质的质量也越大,从而体积质量增加,混合介质孔隙度减少所致。

表 3 不同碎石粒径和质量分数下混合介质体积质量及饱和含水率  
Table 3 Bulk density and saturated water content of stony-soil medium of different rock fragment contents and rock fragment particle sizes

碎石粒径/mm	碎石质量分数/%	土石混合介质体积质量/(g·cm <sup>-3</sup> )	饱和含水率/%		
			砂土	砂壤土	黏壤土
2~3	10	1.57	18.54	28.09	30.47
	20	1.69	16.48	24.97	27.08
	30	1.8	14.42	21.85	23.70
	40	1.92	12.36	18.73	20.31
>3~5	10	1.57	17.61	26.69	28.94
	20	1.69	15.49	23.47	25.46
	30	1.81	13.41	20.32	22.04
	40	1.93	11.37	17.23	18.69

### 2.2 土壤质地对混合介质导气率的影响

为了分析土壤质地对土石混合介质导气率的影响,在相同的碎石粒径(以 2~3 mm 粒径为例)、碎石质量分数(20%)下,分析杨凌黏壤土、东胜砂壤土、神木砂土所形成土石混合介质导气率的变化特征,同时为了对比分析,同时测定未掺合碎石情况下 3 种质地土壤的导气率,结果如图 2 所示。

由图 2 可见,3 种质地土壤导气率均随土壤含水率的增加而减小;相同的含水率下,砂土的导气率最大,黏壤土的导气率最小,砂壤土的导气率居中。这是由于砂土、砂壤土、黏壤土的黏粒质量分数依次逐渐增加,土壤孔径逐渐减小,孔隙的连通性越来越差,土壤导气能力亦越来越小。3 种土壤导气率随土壤含水率的增加

下降的平均速率依次为 0.179、0.146、0.021 cm/s。砂粒含量越高,随含水率的增加土壤导气率下降的速度越快。3种质地土壤所形成的混合介质的导气率同样随含水率的增加均降低,下降平均速率分别为 0.0448、0.1018 和 0.0201 cm/s。在相同含水率下,砂壤土混合

介质导气率最大、砂土混合介质次之、黏壤土混合介质最小。对比未掺合碎石的土样的导气率,不同质地土壤所形成土石混合介质的导气率大小顺序表现出不同变化特征,说明碎石掺合会改变混合介质孔隙分布特征和孔隙导气能力。

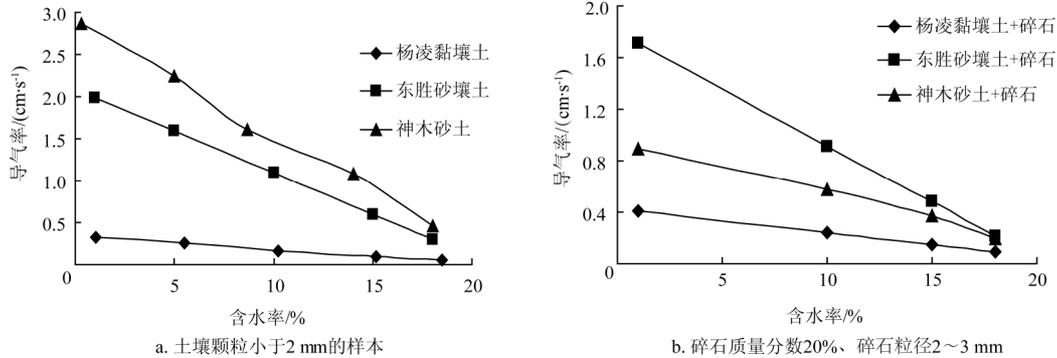


图2 土壤和相同碎石质量分数下3种混合介质导气率

Fig.2 Air permeability of three stony-soil mediums under same rock fragment content

### 2.3 碎石质量分数对混合介质导气率的影响

碎石的存在,一方面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;另一方面减少了土壤通气断面,阻隔空气传输的通道。两者对比作用,决定碎石的质量分数影响混合介质的导气性能变化特征。为分析碎石质量分数对混合介质导气率影响,测定了相同碎石粒径(2~3 mm)不同碎石质量分数下,3种土壤质地土壤所形成混合介质导气率随含水率的变化过程,结果如图3所示。

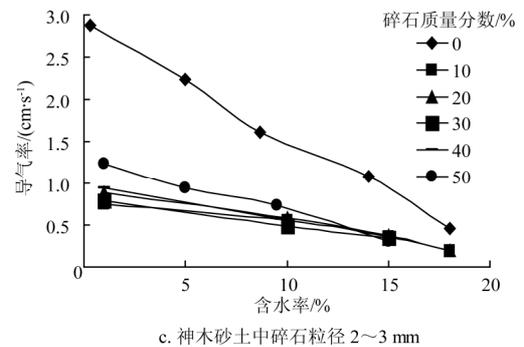


图3 不同碎石质量分数下混合介质导气率

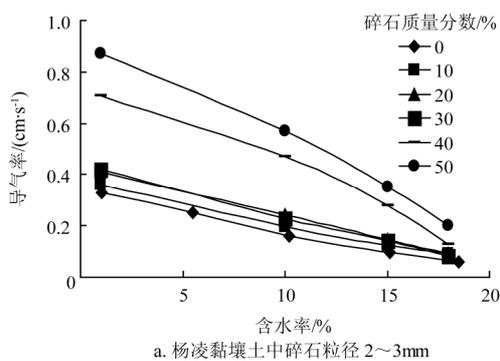
Fig.3 Air permeability of stony-soil mediums for different rock fragment contents

由图3可见,在黏壤土土质中碎石的存在增加混合介质的导气性能,在碎石质量分数为50%时导气性能最大;在砂壤土土质中碎石质量分数小于40%时,混合介质的导气率随着碎石质量分数的增加而减小;在砂土土质中碎石的存在降低了混合介质的导气性能,在碎石质量分数为40%时导气性能最小。以土壤样本导气率为基础,分析了不同碎石质量分数下混合介质导气率的相对增加量(以2~3 mm粒径为例),其分析结果见表4。

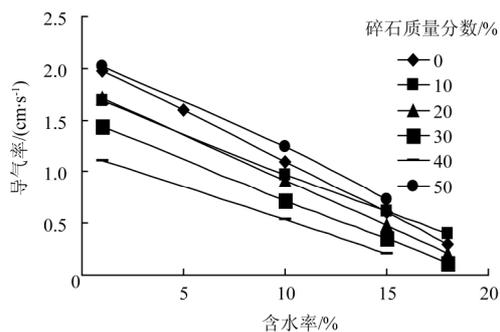
表4 不同碎石质量分数下混合介质导气率相对土壤导气率的变化量

Table 4 Relative variation of air permeability of three stony-soil mediums with varied rock fragment contents

土壤质地	含水率/%	碎石质量分数/%				
		10	20	30	40	50
黏壤土	1	0.03	0.17	0.20	1.03	1.49
	10	0.20	0.33	0.39	1.85	2.45
	15	0.29	0.50	0.55	1.90	2.62
	18	0.66	0.80	1.00	2.20	—
砂壤土	1	-0.13	-0.14	-0.28	-0.44	0.02



a. 杨凌黏壤土中碎石粒径2~3mm



b. 东胜砂壤土中碎石粒径2~3 mm

续表

土壤 质地	含水 率/%	碎石质量分数/%				
		10	20	30	40	50
黏壤土	10	-0.12	-0.17	-0.35	-0.51	0.13
	15	0.03	-0.20	-0.42	-0.65	0.22
	18	0.33	-0.30	-0.63	—	—
	1	-0.73	-0.68	-0.70	-0.66	-0.56
	10	-0.62	-0.61	-0.60	-0.58	-0.50
	15	-0.61	-0.60	-0.57	—	—
砂土	18	-0.57	-0.52	—	—	—

注：碎石粒径 2~3 mm。

由表 4 可以看出，对于相同土壤质地，随碎石含量增加，混合介质的导气率相对变化量呈现不同变化程度。在黏壤土中掺合碎石，其导气率相对黏壤土的导气率是增大的，并随着碎石质量分数的增加，其相对增量亦随之增大，这是由于碎石的存在为混合介质大孔隙的发育提供了条件，碎石质量分数越大，大孔隙分布越多，因此在相同的碎石质量分数下，混合介质的导气率大于黏壤土的导气率，其导气率的相对变化量随含水率的增加而增加，这也说明，在黏壤土中碎石的存在提高了混合介质的导气性能。

在砂壤土中碎石的存在，土石混合介质导气率相对砂壤土有增有减。在碎石质量分数小于 40% 情况时，碎石的存在基本上降低砂壤土的导气性能，只在碎石质量分数 10% 时，高含水率时土石混合介质导气率大于砂壤土导气率。在砂壤土中掺合碎石，在相同的含水率下，土石混合介质导气率的相对砂壤土的降低量随碎石质量分数的增加越来越大。在碎石质量分数 50% 时，土石混合介质的导气率大于砂壤土。由此可见，在砂壤土中掺合碎石，其土石混合介质导气率变化较为复杂，在碎石

质量分数较小时，基本表现为碎石的存在减小了单位面积上的通气断面。

在砂土中碎石的存在，土石混合介质导气率明显的低于砂土导气率。在相同的含水率下，土石混合介质导气率的相对降低量随碎石质量分数的增加而降低，其相对增量随含水率的增加亦降低。这是由于砂土本身大颗粒质量分数较大，大孔隙较为发育，导气性能较其他两种土质要好。砂土中碎石的存在，降低了混合介质单位面积中过气断面面积。

### 2.4 碎石粒径对混合介质导气率的影响

碎石的粒径大小决定着碎石的比表面积，碎石粒径越大，在土壤单位面积的通气断面越小，就会影响混合介质的导气能力。但是按照土力学特征，合理介质颗粒级配比例，又影响土壤密实程度，这就与混合介质质量分数密切相关，因此碎石粒径对土壤导气率的影响不仅会因土壤质地不同而不同，而且与碎石质量分数密切相关，是相互作用的复杂系统。

图 4 显示了黏壤土掺合不同碎石粒径混合介质导气率变化特征。由图 4 可见，不同碎石粒径条件下混合介质导气率均大于黏壤土的导气率。在碎石质量分数 10%~30% 之间时，碎石粒径 >3~5 mm 的混合介质导气能力大于碎石粒径 2~3 mm，在碎石质量分数为 40% 时，碎石粒径 2~3 mm 的混合介质导气能力大于粒径 >3~5 mm 的混合介质导气率。这说明碎石粒径的大小影响着混合介质的导气能力，在碎石质量分数较小时，大粒径碎石对导气能力的影响大于小粒径碎石，在碎石质量分数 40% 时，出现相反结果。由此也可看出，混合介质的导气率受碎石质量分数和碎石粒径双重影响。

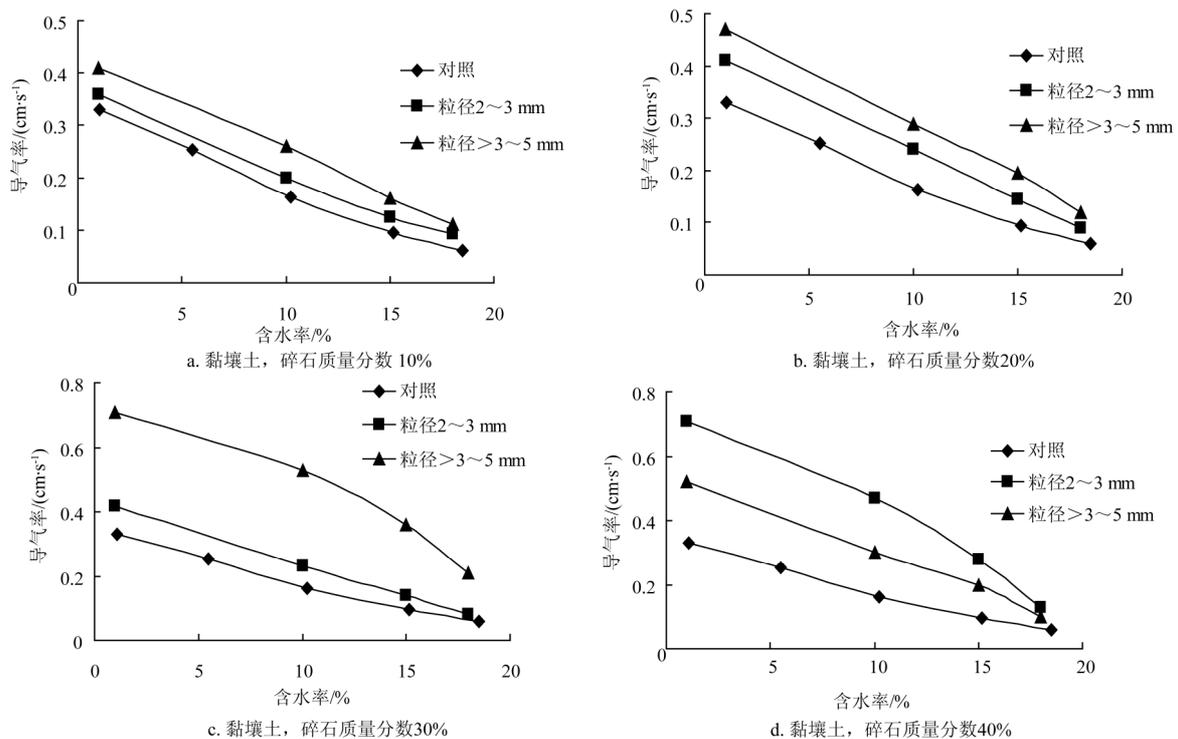


图 4 黏壤土不同碎石粒径混合介质导气率随含水率的变化趋势

Fig.4 Air permeability of stony-soil mediums of clay loam soil with different rock fragment particle size

图 5 显示东胜砂壤土掺合不同碎石粒径的混合介质导气率的变化趋势。由图 5 可见, 砂壤土的导气率均大于混合介质的导气率。在砂壤土中碎石的存在减小了单位面积上的有效通气断面, 降低了混合介质的导气能力。在碎石各个质量分数下, 碎石粒径为 2~3 mm 的混合介质导气率均大于 >3~5 mm 混合介质的导气率。

图 6 显示砂土中掺合不同碎石粒径的土石混合介质导气

率变化趋势。由图 6 可见, 不同碎石粒径条件下, 土石混合介质导气率明显的小于砂土导气率。而在相同的碎石质量分数下, 碎石粒径为 2~3 mm 和碎石粒径 >3~5 mm 的混合介质导气率差异较小, 在碎石质量分数小于 30% 时, 粒径 >3~5 mm 的混合介质导气率稍大于粒径为 2~3 mm 的混合介质导气率; 在碎石质量分数 40% 时, 粒径为 2~3 mm 的混合介质导气率稍大于粒径 >3~5 mm 的混合介质导气率。

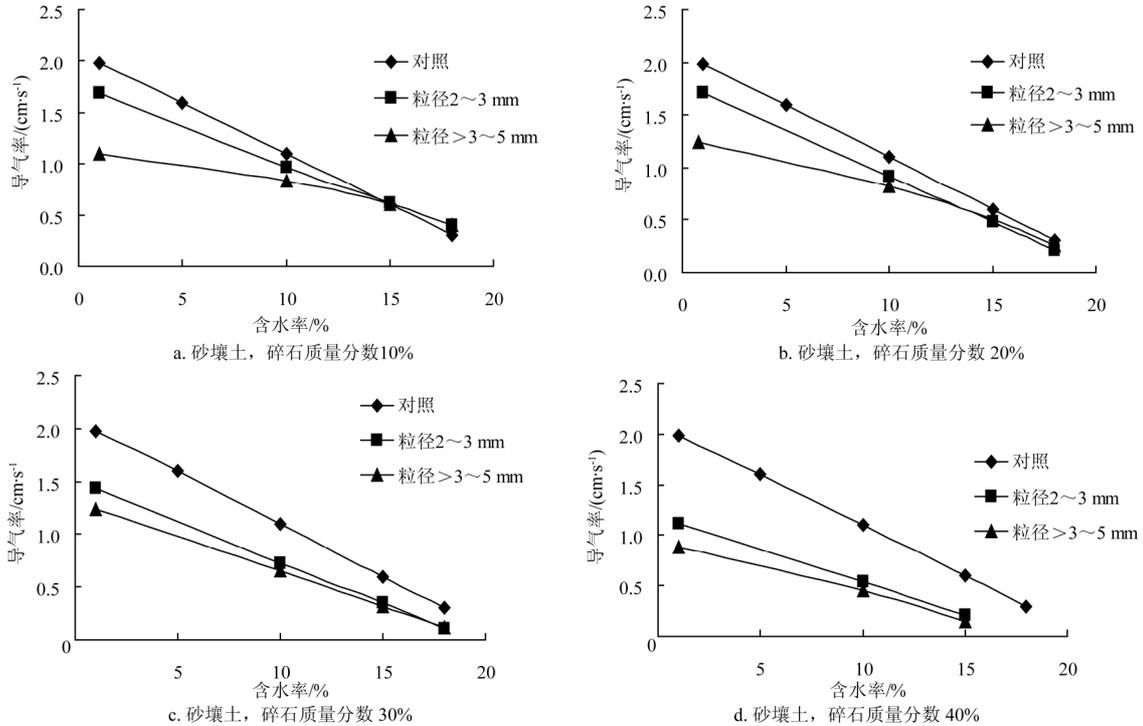


图 5 砂壤土不同粒径碎石混合介质导气率随含水率的变化趋势

Fig.5 Air permeability of stony-soil mediums of sandy loam soil with different rock fragment particle size

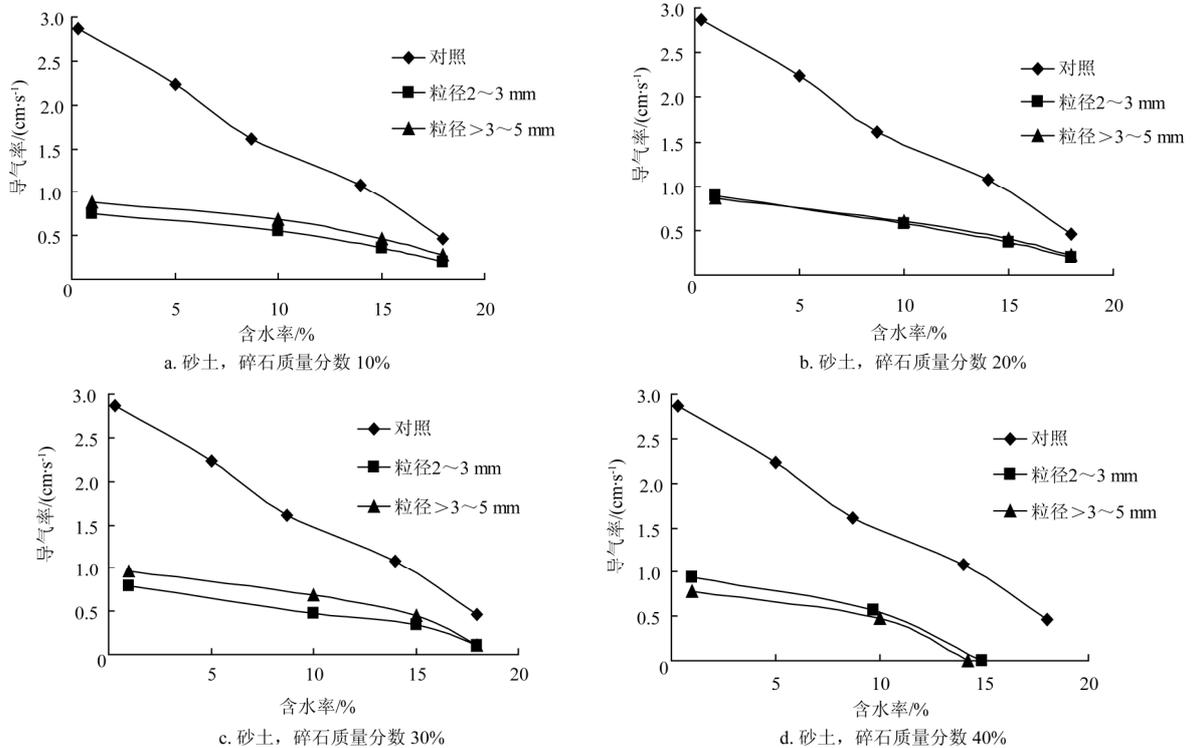


图 6 砂土不同碎石粒径混合介质导气率随含水率的变化趋势

Fig.6 Air permeability of stony-soil mediums of sand soil with different rock fragment particle size

对3种质地土壤中掺合不同粒径的碎石的混合介质导气率对比分析可以看出, 碎石粒径对混合介质导气率的影响, 不仅与土壤质地有关, 而且与碎石粒径的大小有关。为了进

一步分析碎石粒径对混合介质导气率的影响, 分别以不同土壤质地的导气率为基础, 分析不同碎石质量分数下, 碎石粒径对混合介质导气率的影响程度, 结果如表5所示。

表5 不同碎石粒径下混合介质导气率相对土壤导气率的降低程度  
Table 5 Difference in air permeability between the fine soil and the rock fragment soil

土壤质地	含水率/%	碎石质量分数 10%		碎石质量分数 20%		碎石质量分数 30%		碎石质量分数 40%	
		粒径	粒径	粒径	粒径	粒径	粒径	粒径	粒径
		2~3 mm	>3~5 mm						
黏壤土	1	0.03	0.17	0.17	0.34	0.20	1.03	1.03	0.49
	10	0.20	0.57	0.33	0.76	0.39	2.21	1.85	0.82
	15	0.29	0.66	0.50	1.02	0.55	2.73	1.90	1.07
	18	0.66	1.20	0.80	1.40	1.00	3.20	2.20	—
砂壤土	1	-0.13	-0.44	-0.14	-0.37	-0.28	-0.37	-0.44	-0.56
	10	-0.12	-0.45	-0.17	-0.44	-0.35	-0.41	-0.51	-0.59
	15	0.03	-0.49	-0.20	-0.48	-0.42	-0.47	-0.65	-0.75
	18	0.33	-0.50	-0.30	-0.50	-0.63	-0.60	—	—
砂土	1	-0.73	-0.68	-0.68	-0.69	-0.70	-0.65	-0.66	-0.72
	10	-0.62	-0.53	-0.61	-0.59	-0.68	-0.53	-0.58	-0.68
	15	-0.61	-0.50	-0.60	-0.57	-0.72	-0.51	—	—
	18	-0.57	-0.39	-0.52	-0.52	—	—	—	—

由表5可见, 黏壤土掺合碎石提高了土石混合介质的导气能力, 并因碎石粒径的不同, 导气率也发生较大变化。在碎石质量分数10%~30%之间时, 碎石粒径为2~3 mm的土石混合介质导气率大于碎石粒径>3~5 mm的导气率, 在相同的碎石质量分数条件下, 其相对黏壤土的导气率, 随含水率的增加增幅越来越大, 土石混合介质导气率的增幅在3%~320%; 在碎石质量分数40%时, 碎石粒径2~3 mm的混合介质导气率大于碎石粒径>3~5 mm的混合介质的导气率, 其相对黏壤土的导气率, 随含水率的增加增幅越大, 增幅范围在49%~210%。因此在黏壤土中适当添加碎石可显著改善土壤结构, 提高混合介质的导气性能。

砂壤土中掺合碎石降低了土石混合介质的导气能力, 并因不同的碎石粒径而呈现不同导气性能。仅在碎石质量分数10%, 高含水率时混合介质的导气率高于砂壤土的导气率, 其它情况土石混合介质的导气率均小于砂壤土的导气率。碎石粒径2~3 mm的土石混合介质的导气率大于碎石粒径>3~5 mm的导气率, 其相对砂壤土导气率, 随着含水率的增加, 其降幅越来越大。

砂土掺合碎石将明显的降低土壤的导气性能。在碎石质量分数30%之内, 碎石粒径>3~5 mm的降低程度稍大于粒径为2~3 mm的混合介质导气率, 其降低程度不大, 在10%之内。在碎石含量40%时, 2~3 mm碎石粒径混合介质导气率稍大于>3~5 mm, 变幅亦在10%之内, 因此在砂土中碎石粒径对混合介质导气率的影响不明显。

### 3 结论

本文通过土石混合介质导气率的室内试验研究, 分析了碎石质量分数和碎石粒径对土壤导气率的影响。

1) 在土壤中碎石的存在影响了原土壤的物理特性,

在相同的碎石粒径下, 混合介质的体积质量随碎石质量分数的增加而增加, 而饱和含水率逐渐减小。

2) 黏壤土中碎石的存在改善了土壤结构, 提高了土壤的通气性能, 其导气率随碎石质量分数的增加而增大。在砂壤土和砂土中碎石的存在降低土壤导气性能, 且砂土的降低程度大于砂壤土。在相同的含水率下, 土石混合介质导气率的相对砂壤土的降低量随碎石质量分数的增加越来越大。在相同的含水率下, 土石混合介质导气率相对砂土的导气率降低量随碎石质量分数的增加而降低。

3) 碎石粒径的大小同样影响着混合介质的导气性能。黏壤土中掺合碎石, 在碎石质量分数30%之内, 粒径>3~5 mm的导气率大于2~3 mm的导气率, 在40%的碎石质量分数时结果相反。在砂壤土掺合碎石, 粒径2~3 mm的土石混合介质的导气率大于>3~5 mm。在砂土中掺合碎石, 土石混合介质导气率明显的小于砂土的导气率, 碎石粒径2~3 mm和>3~5 mm的土石混合介质的导气率相差不大。

综上所述, 对于偏黏性的土壤, 碎石的存在可以改善土壤结构性, 提高土壤的导气能力; 偏砂性的土壤, 碎石的存在降低混合介质的导气能力。因此在农田当中, 偏黏性的土壤当中, 掺合大粒径的碎石, 改良土壤结构, 提高土壤通气透水性, 为农作物的生长提供有利条件; 偏砂性的土壤当中尽量减少大粒径的碎石存在, 避免使本身较好的土壤结构遭到破坏。

### [参考文献]

- [1] 朱元骏, 邵明安. 不同碎石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 64-66.  
Zhu Yuanjun, Shao Ming'an. Processes of rainfall infiltration and sediment yield in soils containing different rock fragment contents[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(2): 64-66. (in Chinese with English abstract)

- [2] Brakensiek D L, Rawls WJ. Soil containing rock fragments: effect s on infiltration[J]. CATENA, 1994, 23(1/2): 99—110.
- [3] Poesen J E, De Luna A, Franca J, et al. Govers. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content[J]. CATENA, 1999, 36(4): 315—329.
- [4] Jean W P, Basvan W, Kristin B, et al. Variation of rock fragment cover and size along semiarid hill slopes: a case – study from southeast Spain[J]. Geomorphology, 1998, 23(2): 323—335.
- [5] Brooks R H, Corey A T. Properties of porous media affecting fluid flow[J]. Journal of Irrigation and Drainage Division 1966, 92: 61—89.
- [6] Ball, B C. Modeling of soil pores as tubes using gas permeabilities, gas diffusivities and water release[J]. Journal of Soil Science 1981, 32(4): 465—481.
- [7] McCarthy, K P, Brown, K W. Soil gas permeability as influenced by soil gas-filled porosity[J]. Soil Science Society of American Journal, 1992, 56(4): 997—1003.
- [8] Moldrup P, Yoshikawa S, Olesen T, et al. Air permeability in undisturbed volcanic ash soils: Predictive model test and soil structure fingerprint [J]. Soil Sci Soc Am J, 2003, 67: 32—40.
- [9] Atac Tuli, Hopmans J W, Rolston D E, et al. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils[J]. Soil Sci, 2005, 69: 1361—1371.
- [10] Poulsen T G, Blendstrup H. Predicting air permeability in porous media with variable structure, bulk density and water content[J]. Vadose Zone J. 2008, 7(4), 1269—1275.
- [11] 王卫华, 王全九, 樊军. 原状土与扰动土土壤导气率、导水率与含水率间关系分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 25—29. Wang Weihua, Wang Quanjiu, Fan Jun. Relationship between air permeability, water conductivity and water content for undisturbed and disturbed soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(8): 25—29. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王卫华, 王全九, 李淑琴. 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. Wang Weihua, Wang Quanjiu, Li Shuqin. Character of soil air permeability and its relationship with water conductivity in Changwu, loess region of China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 120—127. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王卫华. 土壤导气率变化特征试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008. Wang Weihua. Experimental Studies on Soil Air Permeability[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [14] Seyfried M S, Murdock M D. Use of air permeability to estimate infiltrability of frozen soil[J]. Journal of Hydrology. 1997, 202(1): 95—107.
- [15] 德国 Umwelt-Geräte-Technik GmbH 公司. PL-300 土壤导气率测量仪使用说明书[Z]. 2007.
- [16] Russo D. Leaching characteristics of a stony desert soil [J]. Soil Science of America Journal, 1983, 47: 431—438.
- [17] Sharma P P, Carter F S, Halvorson G A. Water retention by soils containing coal[J]. Soil Science of America Journal, 1993, 57(2): 311—316.
- [18] 杨艳芬, 王全九, 曾辰, 等. 土石混合介质水分入渗特性试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 87—90. Yang Yanfen, Wang Quanjiu, Zeng Chen. Experimental research on water infiltration characteristics of stony-soil medium[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 87—90. (in Chinese with English abstract)

## Experimental research on change characteristics of soil air permeability in stony soil medium

Wang Weihua<sup>1</sup>, Wang Quanjiu<sup>1,2\*</sup>, Wang Shuo<sup>1</sup>

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, the Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Soil structure and pore distribution will be changed by rock fragment, which affects the air permeability and water conductivity. The inherent mechanism of soil air permeability by single rock fragment particle size in stony-soil medium was discussed, which was the basis for investigating the soil air permeability in complex stony-soil medium. Influences of soil air permeability in stony soil medium in different samples which soil particle size less than 2mm (sand, sandy loam soil, clay loam soil), different rock fragment contents (10%, 20%, 30%, 40%) and different rock fragment particle sizes (2-3, >3-5 mm) were analyzed. Results showed that the values of samples with particle size less than 2mm were in the order of sand > sand loam soil > clay loam soil. For the stony soil medium with the same rock fragment content, the values of soil air permeability were in the order of sand loam soil > sand > clay loam soil. The presence of rock fragment improved soil structure and the performance of soil air permeability, made the permeability of stony-soil Medium better than that of clay loam, decreased the air permeability of sand loam soil and sand. And depression amplitude of sandy soil was far larger than that of sandy loam. Soil air permeability of rock fragment particle of >3-5 mm was greater than that of 2-3 mm when the rock fragment content in sand loam soil was less than 30%, and the situation was opposite when the rock fragment content in sand loam soil was 40%; air permeability of stony soil medium was little difference under the two rock fragment particle sizes condition.

**Key words:** soils, pore size, physical properties, stony soil medium, rock fragment content, rock fragment particle size, soil air permeability