

# 土体渗透性影响因素 ——以普定陈旗堡为例

陈明珠<sup>1</sup>, 阎长虹<sup>1</sup>, 王玉英<sup>1</sup>, 詹启伟<sup>1</sup>, 郭军辉<sup>1</sup>, 郑军<sup>1</sup>, 陈喜<sup>2</sup>

(1. 南京大学地球科学系, 南京 210093;

2. 河海大学水文水资源及水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

**摘要:** 贵州是我国西南典型岩溶发育地区, 平坦地形及谷地等地段第四系分布广泛, 但其厚度不大且变化甚剧。该地区土壤瘠薄、土体流失严重, 生态环境脆弱, 导致这一地区快速石漠化。本文以贵州普定县陈旗堡这一小型水文地质单元为例, 选取典型试验点, 取样并进行现场及室内试验, 研究岩溶地区土体物质成分、物理力学性质及土壤渗透特性。文中最后分析了土体成因、矿物成分对渗透性的影响, 得出该地区粉质粘土渗透系数与孔隙比的数学关系, 以为水土保持、生态环境治理提供理论支持。

**关键词:** 普定县陈旗堡; 石漠化; 物质成分; 渗透系数

**中图分类号:** P642.11<sup>+</sup>6; TU411.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3665(2008)04-0066-05

## 1 概述

贵州是中国岩溶地貌最发育的省份之一, 第四系虽然分布广泛, 但厚度不均<sup>[1]</sup>。经过长期的耕作开发, 土层被翻松, 经雨水淋滤, 土体不断流失, 造成了严重的水土流失现象, 裸露出大面积的灰岩, 加剧了石漠化进程。为了减少石漠化现象的大面积发生, 选取普定县作为国家还林还草示范区进行研究, 以复原生态环境。本文选择普定县陈旗堡作为研究区域。

陈旗堡位于贵州省普定县南部。区内地势起伏大, 海拔 1 250 ~ 1 400m, 相对高差 150m 左右, 年降水量 1 300mm, 年蒸发量 920mm。区域内碳酸盐岩广为分布, 主要出露地层为三叠系中统关岭组二组段, 岩性为灰岩、白云岩、泥质灰岩及白云质灰岩<sup>[2]</sup>。该地区山盆期夷平面形成时的地貌几乎破坏殆尽, 地势向北、东、南三面逐渐降低(图 1)。

陈旗堡三面环山, 成葫芦型, 从西侧葫芦嘴排水, 基本形态构成一个典型的水文地质单元。本文选取典型位置, 进行原位渗透试验, 并取土样研究相应土层的物理力学指标, 进行室内渗透试验, 分析土体性质与渗透性的关系, 以期能为水土保持提供理论数据支持, 为

后期西南喀斯特山区石漠化的生态恢复和保持提供建议。

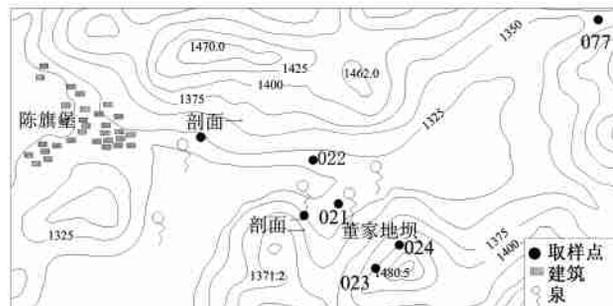


图 1 陈旗堡周围地形示意图

Fig. 1 The landform around Chenqibao village

## 2 土体性质测定

以自然地物地貌将陈旗堡地区划分为一个水文地质单元, 在研究区域内开挖 2 个剖面 1 和 2, 剖面 1 划分为 3 层, 剖面 2 划分为 2 层。在其典型地段选取 5 个地点进行原位渗透试验, 共涉及 7 个土层(021-1、021-2、022、023-1、023-2、024-2、077), 分布在研究区域东侧、北侧、南侧的谷底、山坡、垭口以及山腰。分别取样进行室内渗透试验, 试验点及剖面点见图 1。

### 2.1 土的基本物理性质指标

室内试验得出土体基本物理指标如表 1 所示。从表 1 可以看出, 除个别样外, 陈旗堡地区土的天然含水率大部分接近塑限, 孔隙比都很大, 最大达到 1.5, 属于大孔隙比土; 液限最低也接近 40%, 最高达 71.9%,

收稿日期: 2007-11-19; 修订日期: 2007-12-25

基金项目: 国家重大基础研究(973)项目(2006CB403204)

作者简介: 陈明珠(1985-), 男, 硕士研究生, 专业方向为岩土体物理力学研究。

E-mail: bright7684@sina.com

塑性指数基本在 15 以上,在塑性图上都在 A 线  $I_p = 0.73(W_L - 20)$  附近。根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001)<sup>[3]</sup>,由塑性指数可判定研究区域的土为粘土及粉质粘土。

表 1 土体基本物理性质

Table 1 The basic physical properties of the soil

土样编号	含水率 (%)	重度 (kN/m <sup>3</sup> )	比重	塑限 (%)	液限 (%)	孔隙比	饱和度 (%)
1-1	29.16	17.52	2.72	30.57	48.68	0.965	82.2
1-2	30.66	16.52	2.73	36.23	49.44	1.115	75.0
剖面点 1-3	32.95	17.14	2.72	33.99	54.50	1.068	83.9
2-1	36.57	15.34	2.74	39.53	71.90	1.391	72.1
2-2	38.96	17.85	2.75	41.01	69.19	1.098	97.5
077	47.55	15.96	2.75	39.15	62.48	1.492	87.6
021-1	26.60	18.08	2.71	24.48	38.73	0.860	83.8
021-2	26.08	18.52	2.71	22.92	37.93	0.808	87.4
试验点 022	34.12	17.19	2.73	35.34	57.97	1.087	85.7
023-1	43.10	15.34	2.75	36.22	54.74	1.514	78.3
023-2	38.34	16.32	2.75	40.78	52.72	1.243	84.8
024-2	39.37	16.95	2.75	38.09	59.03	1.216	89.0

2.2 土的矿物组成

原样经风干后,先用双氧水除去有机质,经碾磨粉碎后用于粘土矿物分析。通过 X 射线衍射分析确定土的矿物组成。由衍射图谱可以看出,陈旗堡小流域的土样,无论是取自洼地(021)、山坡(022)、垭口(077),还是山腰(023、024),乃至剖面 1、2, X 射线的衍射谱都十分相似,表明它们的矿物组成基本一致,不同的仅是每种组分有所差异而已。根据 X 衍射谱线特征,土中非粘土矿物主要是石英(4.27Å, 3.36Å)、长石(3.2Å),这些矿物均是抗风化能力很强的矿物组分。粘土矿物应以伊利石(10Å)、蒙脱石(12.5Å)为主,还有少量的蛭石(14Å),其他还有少量的碳酸盐矿物,包括方解石和白云石(表 2)。

表 2 土体的矿物成分

Table 2 Mineral compositions of the soil

采样点	原生矿物含量 (%)		次生矿物含量 (%)			
	石英	长石	蒙脱石	伊利石	蛭石	碳酸盐
1-1	30.2	15.9	17.8	23.0	3.8	9.3
1-2	36.2	15.4	17.3	22.7	4.1	4.3
1-3	33.8	15.2	13.7	26.5	5.8	5.0
2-1	27.6	13.0	14.5	37.0	3.4	4.4
2-2	20.7	15.2	17.1	31.0	9.6	6.3
021-1	59.7	8.9	9.0	14.1	5.3	2.9
021-2	36.7	12.6	12.6	27.9	6.7	3.5
022	42.9	16.7	18.8	12.1	3.6	6.0
023-1	29.4	16.0	17.9	26.8	4.7	5.2
023-2	35.5	18.8	10.8	25.3	4.0	5.6
024-1	34.7	17.9	8.3	27.1	7.8	4.2
024-2	31.2	13.7	15.3	22.9	10.8	6.1
077	43.9	13.2	14.8	21.3	3.9	2.9

2.3 颗粒分析

以颗粒分析级配曲线为基础,计算其粒度分布函数。以粒度直径(mm)的对数做其频率曲线,可得到基本成正态分布的图形(图 2、图 3)<sup>[4]</sup>,即粒度的分布符合正态分布,正态函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{(x-\bar{\phi})^2}{2^2}} \quad (1)$$

$$D = 1g\bar{\phi}$$

式中: ———标准方差;

$\bar{\phi}$ ——样本粒径平均值(mm)。

综合资料分析后取:

$$\bar{\phi} = (\phi_5 + \phi_{15} + \phi_{25} + \phi_{35} + \phi_{45} + \phi_{55} + \phi_{65} + \phi_{75} + \phi_{85} + \phi_{95})/10$$

$\bar{\phi}$ 与正态分布矩平均值  $x_{\phi}$  的接近程度达到 97%<sup>[4]</sup>。

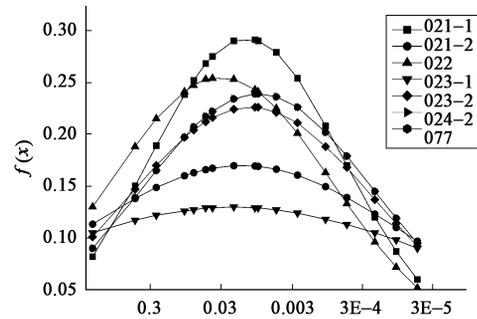


图 2 试验点土体颗粒正态分布图

Fig. 2 Normal distribution of soil particle on test points

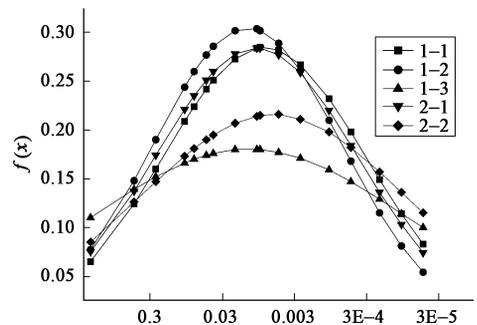


图 3 剖面 1、剖面 2 土体颗粒正态分布图

Fig. 3 Normal distribution of soil particle on section 1 and 2

结合颗粒分析试验,得出陈旗堡土的颗粒组成及平均粒径列于表 3。可以看出,陈旗堡土以  $< 5\mu\text{m}$  的粘粒和  $50 \sim 5\mu\text{m}$  的粉粒为主,两者含量相当。这与矿物组成基本一致。而  $< 0.002\text{mm}$  的胶粒成分上差异很大,从只有 10.8% 的 077 点到达到 53.1% 的 2-1 点。粒度参数  $K_G$  和  $S_k$  反应的是粒径的集中程度和偏离

程度。结合《贵州省区域地质志》,可反映当时沉积环境以河流相为主。

表 3 颗粒分析及粒度参数

Table 3 Result of particle size analysis and grain-size parameters

土样编号	颗粒组成 (%)				粒度参数			
	> 0.05mm	< 0.005mm	< 0.002mm	< 0.001mm	平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )	标准差	峰度 $K_G$	偏度 $S_k$
021-1	19.3	49.2	23.4	3.7	13.3	1.36	2.05	1.38
021-2	8.8	43.4	21.2	9.5	15.4	2.35	1.83	1.38
022	13.3	46.9	27.9	16.6	30.4	1.56	4.30	1.20
023-1	12.7	39.9	19.0	7.0	20.5	3.08	1.87	1.27
023-2	6.5	58.2	34.7	14.1	11.6	1.76	2.52	1.30
024-2	4.9	63.9	43.0	24.8	9.3	1.67	1.40	1.56
077	9.1	29.2	10.8	< 5	17.7	1.86	2.57	1.32
1-1	8.8	49.4	15.6	< 5	7.88	1.40	0.33	2.06
1-2	6.2	51.4	22.5	< 5	13.41	1.31	2.64	1.42
1-3	6.9	54.3	15.4	< 5	12.87	2.21	2.62	1.42
2-1	4.9	68.7	43.7	15.7	10.10	1.40	5.15	1.35
2-2	1.8	73.1	53.1	34.0	5.96	1.85	2.97	1.37

\* 粒度参数参考 Folk & Ward (1957) 粒度参数定义<sup>[5]</sup>。

## 2.4 渗透试验

在水文地质单元内 5 个典型试验点处,用双套管法进行原位渗透试验,并于周边相同土层取原状土样,进行室内渗透试验。同时在 2 个典型开挖剖面上用 4cm 环刀取样,进行室内试验。

双套管法测定原位土体渗透系数的基本原理是通过在内外环建立等深的薄水层,在土壤中形成一维垂直自由入渗水流,监测入渗速率随时间的变化,认为入渗达到稳定时的入渗速率为土壤的饱和渗透系数<sup>[6-7]</sup>。

室内渗透试验采用 4cm 环刀取样,土样经饱和后,用南 R55 型渗透仪进行测定,具体试验操作及计算依照土工试验规范<sup>[8]</sup>。渗透系数计算结果如表 4 所示。可见,陈旗堡土的渗透系数大部分量级为  $10^{-5} \sim 10^{-4}$  cm/s,少数可大至  $10^{-3}$  cm/s。

表 4 渗透系数计算结果

Table 4 Calculation results of permeability coefficient

土样编号 (试验点)	渗透系数 ( $\times 10^{-6}$ cm/s)			土样编号 (剖面点)	渗透系数 ( $\times 10^{-6}$ cm/s) 室内变水头
	室内 变水头	原位 常水头	原位 变水头		
077	50.2	30.4	43.6	1-1	142.4
021-1	850.1	488	487	1-2	243.4
021-2	383.3	253	187	1-3	0.6
022	456.1	2 250	1 930	2-1	1 707.7
023-1	1 116.7	368	430	2-2	160.1
023-2	—	666	633		
024-2	1.8	75.4	63.8		

## 3 渗透系数影响因素分析

土壤入渗性能作为土壤因子的重要研究内容之

一,是降雨-径流循环中的关键一环,它通过改变降雨-径流的关系而对土壤侵蚀产生影响<sup>[9]</sup>。因此,研究土壤的入渗性能,有着极其重要的意义。渗透系数是渗流分析中最基本的计算参数,目前国内外对渗透系数的选用主要是通过试验获取。

实验数据显示研究区域土体主要为粘性土,粘性土的渗透性不完全与孔隙比成正比,在很大程度上取决于它的成因、粘土矿物成分、交换阳离子的成分和含量、孔隙液体含水量及成分等物理化学因素<sup>[10]</sup>。

### 3.1 土体成因、结构及形成环境对渗透系数的影响

从点 22、24 和剖面 2 来看,其土质类型均为粘性土,但其渗透性相差很大。022 点,其原位渗透系数达到  $10^{-3}$  cm/s,在现场可以发现泥砾的存在,这对其渗透性起到决定性作用。024-2 点的粘粒含量很高,< 0.002mm 的粘粒达到了 63.9%,其渗透系数  $10^{-5}$  cm/s,比较小。在剖面 2 开挖的土体中,2-1 土的渗透系数达到  $10^{-3}$  cm/s,室内颗粒分析显示其粘粒含量高,而现场可见以垂直方向为主裂隙,显然受土体中裂隙控制。从上述分析来看,粘性土的渗透性受土体的成因和结构控制。

### 3.2 土体矿物成分与渗透系数的关系

粘性土的矿物组成对其渗透性也是很有影响的。从表 1 可以看出在稠度方面,整体表现为液限高,而塑性指数靠近 A 线。粘性土本应具有较低的渗透系数,但实际测得的渗透系数都在  $10^{-4}$  cm/s 这个量级。这与土体中的粘土矿物有着极大关系。

根据对土样进行的 X 射线衍射分析,陈旗堡土体

中的粘土矿物主要是蒙脱石和伊利石,还有少量的蛭石。蒙脱石含量高时,粘性土在纯净的水中,细颗粒之间的内聚力大部分甚至全部消失,而分散成原级颗粒,因此未饱和即被冲蚀,导致渗透系数增大。结合表1和表4可以看出,077和024-1试验点的土体蒙脱石含量较低,渗透系数就相对低一些。

### 3.3 孔隙比与渗透系数的关系

孔隙比是土的重要物理性质之一,它与土的结构及松密程度密切相关,主要取决于土的粒度成分和排列情况。实践证明,对于无粘性土,孔隙比与渗透系数成线性相关,而对于粘性土,即使密度和孔隙比相同的同一粘性土,由于结构不同,可以具有极不相同的性质。

根据表3和表4,绘制2个剖面点和5个渗透试验点土层的孔隙比 $e$ 与渗透系数 $k$ 的半对数关系曲线,如图4所示。可以发现,与无粘性土相比,孔隙比与渗透系数的对数并不成线性关系,而是非常离散。由此可见,粘性土的渗透性要比无粘性土复杂得多,它的影响因素不再单纯是孔隙比与原级颗粒的组成。

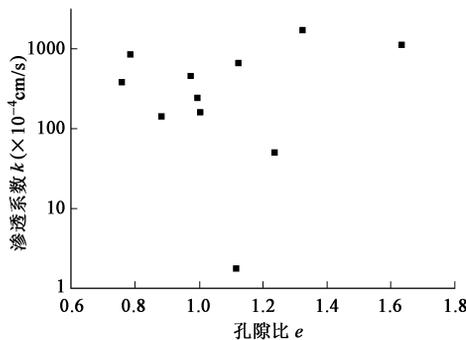


图4 孔隙比与渗透系数关系

Fig. 4 Relationship between void ratio and permeability coefficient

剖面点1-1、1-2、2-1、2-2,试验点077、023-2都是粉质粘土,根据欧孝夺等研究<sup>[11]</sup>,知可用指数关系拟合粉质粘土渗透系数合孔隙比。因研究区域土体渗透系数主要在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$  cm/s,因此选此数量级渗透系数的粉质粘土包括剖面点1-1、1-2、2-1、2-2,试验点023-2作图(图5)。拟合公式为 $\lg k = 2.111 \lg e + 7.31$ ,  $R^2 = 0.9088$ ,显示出高度相关。

### 3.4 不均匀系数对粉质粘土渗透性的影响

不均匀系数和曲率系数是土体级配良好与否的两个指标,经常用于粗颗粒土的级配判定和渗透性的估算<sup>[12]</sup>。因陈旗堡土体渗透系数在 $10^{-4}$  cm/s左右,介于中渗透性到弱渗透性之间。本文对处于这个量级的粉

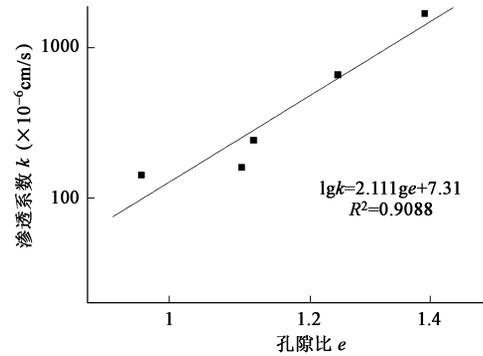


图5 粉质粘土孔隙比与渗透系数的关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between void ratio and permeability coefficient on silty clay

质粘土的渗透系数与不均匀系数做双对数曲线图(图6)。可见,随着不均匀系数的增大,粉质粘土的渗透系数呈下降趋势,但没有高度相关的指数关系。这是由于不均匀系数越大,说明土粒越不均匀,小颗粒就可以填充在大颗粒之中,从而使渗透系数下降。对于粘土,其性质受成因、粘土矿物成分、交换阳离子的成分和含量、孔隙液体含水量及成分的影响,不均匀系数对其渗透性的影响不是很明显,具体规律还有待更加深入的研究。

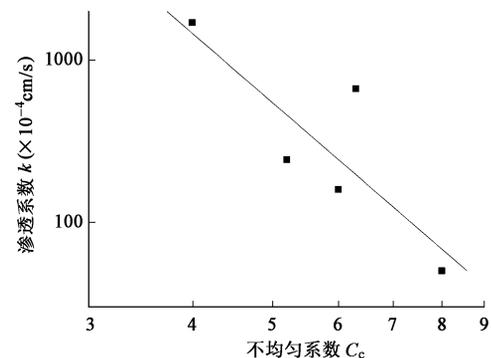


图6 粉质粘土不均匀系数与渗透系数的关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between nonuniform coefficient and permeability coefficient on silty clay

## 4 结论与问题

(1) 本区土体渗透系数主要在 $10^{-4}$  cm/s量级上,局部可达 $10^{-3}$  cm/s,介于中渗透性与弱渗透性之间。

(2) 土体的渗透性与其成因有着密切的关系,特别受土体结构如裂隙面的影响。

(3) 土体的渗透性与其矿物成分有着重要关系。蒙脱石含量高时,细颗粒之间的内聚力大部分甚至全部消失,导致渗透系数增大。

(4) 本区粘性土孔隙比与渗透系数不再存在对应关系,表明粘性土的渗透性影响因素更加复杂,与土体的组构具有不可分割的联系。粉质粘土的渗透性与其孔隙比成指数关系,试验显示其高度相关。

(5) 随着不均匀系数的增大,粉质粘土的渗透性减小。

贵州是以碳酸盐岩为主的地区,石漠化相当严重。分布广泛却又零星的第四纪土体是人类生产活动的重点。土体中的伊利石、蒙脱石很容易被淋滤掉,造成土体孔隙增大,加速水土流失,因此更加需要加大植树、植草力度,以植物根茎保持土壤,防治水土流失。

**参考文献:**

[ 1 ] 贵州省地质矿产局. 贵州省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1987.  
 [ 2 ] 王腊春,许有鹏,张立峰,等. 贵州普定后寨地下河流域岩溶水特征研究[J]. 地理科学,2000,20(6):557-562.  
 [ 3 ] 中华人民共和国建设部. GB 50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

[ 4 ] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及应用[M]. 北京:地质出版社,1976.  
 [ 5 ] 张宏,柳艳华,杜东菊. 渤海湾西岸沉积物粒度参数特征及其工程性质分析[J]. 天津城市建设学院学报,2007,13(2):104-110.  
 [ 6 ] 张增圻,沈荣开. 农田水利学习题试验集[M]. 北京:水力电力出版社,1994.  
 [ 7 ] 冶运涛,伍靖伟,王兴奎. 双套管法测定土壤渗透系数数值模拟分析[J]. 灌溉排水学报,2007,26(3):14-18.  
 [ 8 ] 南京水利科学研究院. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,1999.  
 [ 9 ] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京:水利电力出版社,1992.  
 [10] 熊毅. 土壤胶体(第二册)[M]. 北京:科学出版社,1985.  
 [11] 欧孝夺,易念平,陆增建,等. 尾矿砂土渗透系数与其埋深之间的关系分析[J]. 广西大学学报,2001,26(3):1-5.  
 [12] 朱崇辉,刘俊民,王增红. 无粘性粗粒土的渗透试验研究[J]. 人民长江,2005,36(11):53-55.

## The influence factors of soil permeability in Chenqibao village of Puding County

CHEN Ming-zhu<sup>1</sup>, YAN Chang-hong<sup>1</sup>, WANG Yu-ying<sup>1</sup>, ZHAN Qi-wei<sup>1</sup>, GUO Jun-hui<sup>1</sup>, ZHENG Jun<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>2</sup>

(1. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Key State Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering Science, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Guizhou Province is one of the provinces with typical karst. The Quaternary is widely distributed in the surface of the flat terrain and valley while the thickness variates strongly. The soil is infertile and the soil erosion is serious, which leads to the rapid rock desertification and fragile ecological environment in this region. Takes the small hydrogeological unit in Chenqibao village of Puding Country as an example, there are sampled soil on typical test points, and then, did field and indoor tests. The authers studied the material composition, the basic physico-mechanical properties and permeability of the soil. In the end, we got the permeability coefficient, and also analyzed the origin and the minerals of soil, the permeability coefficient. Meanwhile, we gains the relationship between the permeability coefficient and void ratio of the soil in this region. This work provides theoretical data supporting soil and water conservation and the ecological environment treatment.

**Key words:** Chenqibao village of Puding Country; rock desertification; material composition; permeability coefficient

责任编辑:张明霞