

表 1

孔隙度		超微孔隙	微孔隙①	微孔隙②	小孔隙	中孔隙	大孔隙
主要孔隙结构型式		超微聚集体内孔隙 (基本单元)	微聚集体内孔隙 (结合水为主)	微聚集体内孔隙 (自由水为主)	微聚集体 间孔隙	粒间孔隙	孤立孔隙
界线孔径 (μm)	分形法	0.05	0.5	1.0	3.5		
	传统法	0.0625	0.1~0.15	1	4	16	

到的孔隙分形特征是有区别的，分别具有不同的实际意义。

四、实用意义

通过大量统计和分析表明，土孔隙具有分形分布的特征，其特征量为孔隙度指数。那么，它具有何种实用价值呢？现举几个实例讨论如下：

(一) 一般土的孔隙度指数

不同类型的土具有不同的孔隙结构，Sergeyev等按微结构特征将土划分出五种基本类型。即层流状结构、基质状结构、蜂窝状结构、紊流状结构、骨架状结构。图2是其中三种典型结构类型土的孔隙分形分布型式。表2列出了这五种结构类型土的孔隙度指数。从表2可知，具层流结构的土其孔隙度指数 D_{p1} 、 D_{p2} 、 D_{p3} 均比较小，表明这种土孔隙不发育；一般来说，细颗粒多，则 D_{p1} 大而 D_{p3} 小表明微聚集体内的孔隙（以结合水为主）发育而微聚集体间的孔隙不甚发育；粗颗粒多，则 D_{p1} 小而 D_{p3} 大，表明微集内孔隙不发育而微聚集体间孔隙发育。

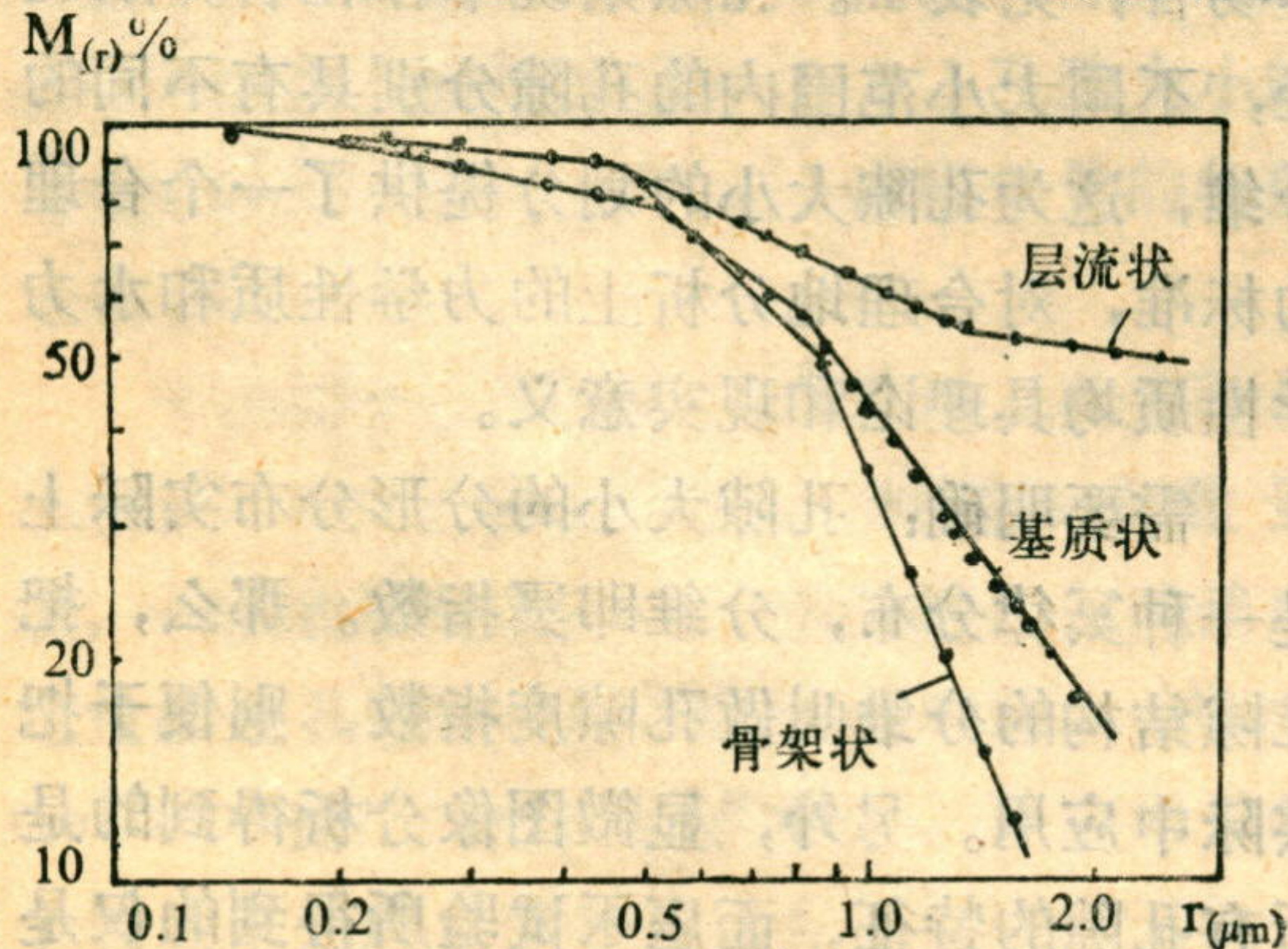


图 2 一般土孔隙分形分布型式

表 2

微结构类型	孔隙度指数		
	D_{p1}	D_{p2}	D_{p3}
层流状	0.14	0.47	0.13
基质状	0.27	0.68	1.37
蜂窝状	0.13	0.75	1.38
紊流状	0.17	0.88	2.11
骨架状	0.11	0.97	2.23

(二) 黄土的孔隙度指数

黄土最大特征是孔隙结构发育。雷祥义用压汞试验研究了我国西北黄土的孔隙结构。图3是三种不同类型黄土孔隙的分形分布型式。表3列出代表这三种类型黄土的孔隙度指数。从表3可知，细粒含量较多的粘质黄土， D_{p1} 较大而 D_{p4} 较小，表明其微聚集体内的孔隙发育，而中、大孔隙不发育。粗粒含量多的砂质黄土则相反， D_{p1} 小而 D_{p4} 大，表明其微聚集体内的孔隙不发育，而中、大孔隙很发育。这种现象具有普遍意义。研究表明，黄土的湿陷性决定于大、中孔隙（主要是支架孔隙），而与微孔隙无

表 3

黄土类型	土样编号	孔隙度指数		
		D_{p1}	$D_{p2,3}$	D_{p4}
砂质黄土	靖 1	0.01	0.12	1.34
	榆 1	0.05	0.17	2.20
黄土	西 1	0.08	0.14	1.15
粘质黄土	刘 6	0.12	0.17	0.72
	水 5	0.11	0.22	0.61

关。那么，应用 $D_{p,4}$ 的大小来预测黄土的湿陷性可能具有有现实意义。

(三) 蠕变过程中孔隙度指数的变化

土受力后体积的变形基本上就是孔隙变化的结果。土受力性质不同，孔隙的变化也是不同的。在短时间压实下，土体积变形的的主要部分是较大孔隙减少的结果，而微小孔隙基本不变化。在长期力的作用下，不同大小的孔隙都将发生变化。肖树芳等研究了泥化夹层的微结构在蠕变不同阶段的变化，泥化夹层孔隙的分形分布型式同本节(一)。表4列出在剪应力作用下，蠕变不同阶段泥化夹层的孔隙度指数。在剪应力长期作用下，随蠕变的发展，微团聚体逐渐靠拢，并定向排列，微团聚体趋向扁平，并部分贯通，而微团聚体本身则逐渐分解，颗粒重新排列。前者反映在 $D_{p,3}$ 减小，表明微团聚体间孔隙减少，后者反映在 $D_{p,1}$ 增大，表明微团聚体因破坏而其内部微孔隙增加。图4是孔隙度指数在蠕变过程中随时间的变化曲线。特别地，当蠕变进入加速阶段， $D_{p,3}$ 急剧减小，这表明粒间孔隙相互贯通成较大的孔隙甚至微裂隙，试件即将破坏。这种现象为蠕变发展的预报提供了一个新的途径。

表 4

蠕变阶段 \ 孔隙度指数	$D_{p,1}$	$D_{p,2}$	$D_{p,3}$
初始阶段 I	0.06	0.40	1.96
等速阶段 II	0.10	0.38	1.87
加速阶段 III	0.14	0.36	1.13

五、结论

根据本文研究有如下初步结论：

1. 土孔隙分布遵从分形分布型式。分形把不同大小的孔隙联系起来，分维就是这性

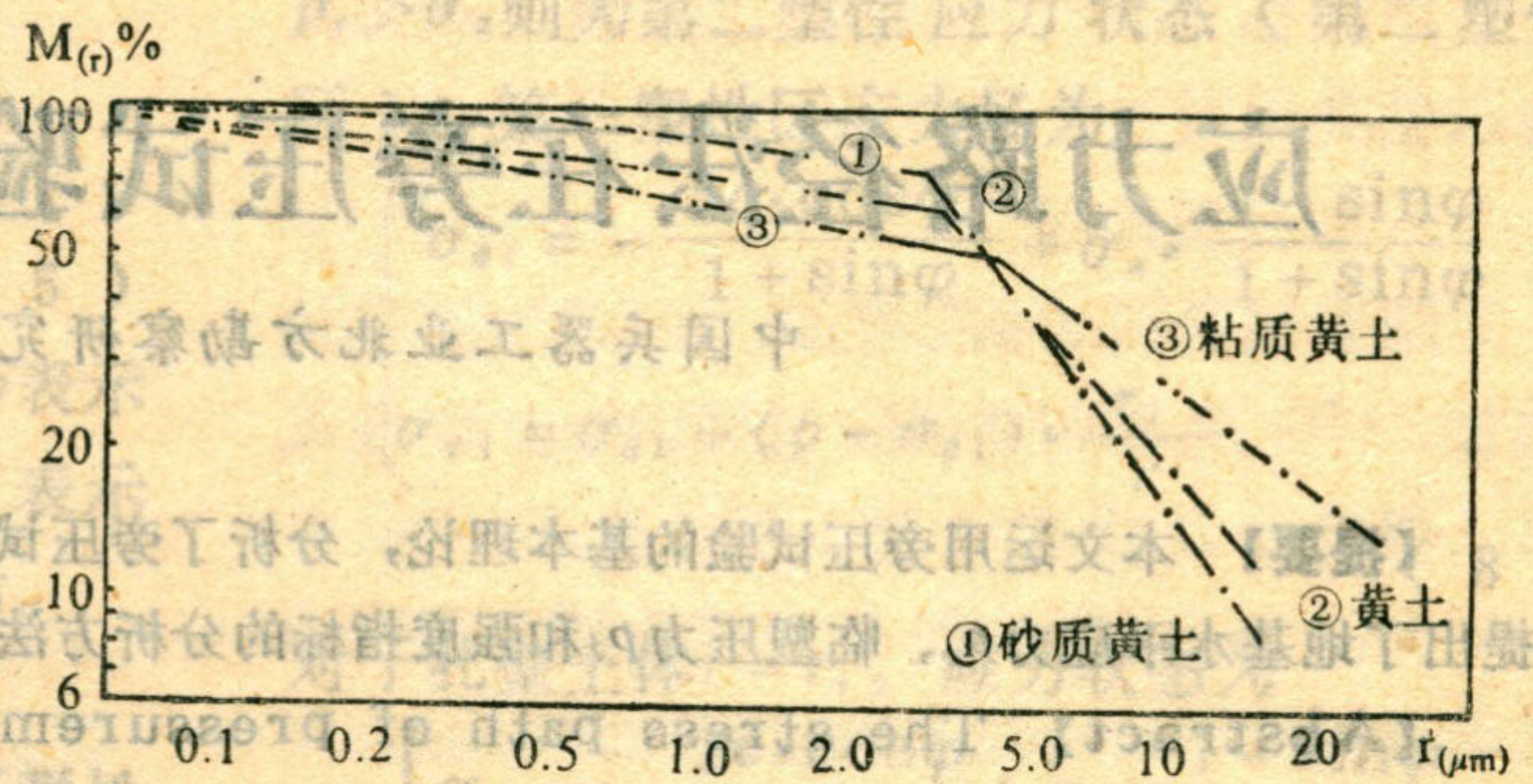


图 3 黄土孔隙分形分布型式

无统一特征尺度的孔隙系统的特征参量，分形使这种复杂的问题变得简单明了。

2. 孔隙系统存在多个无标度区，不同层次的孔隙分别具有不同的分维，并且界限孔隙直径对不同土均存在确定其大小的问题，它决定于孔隙结构的类型。

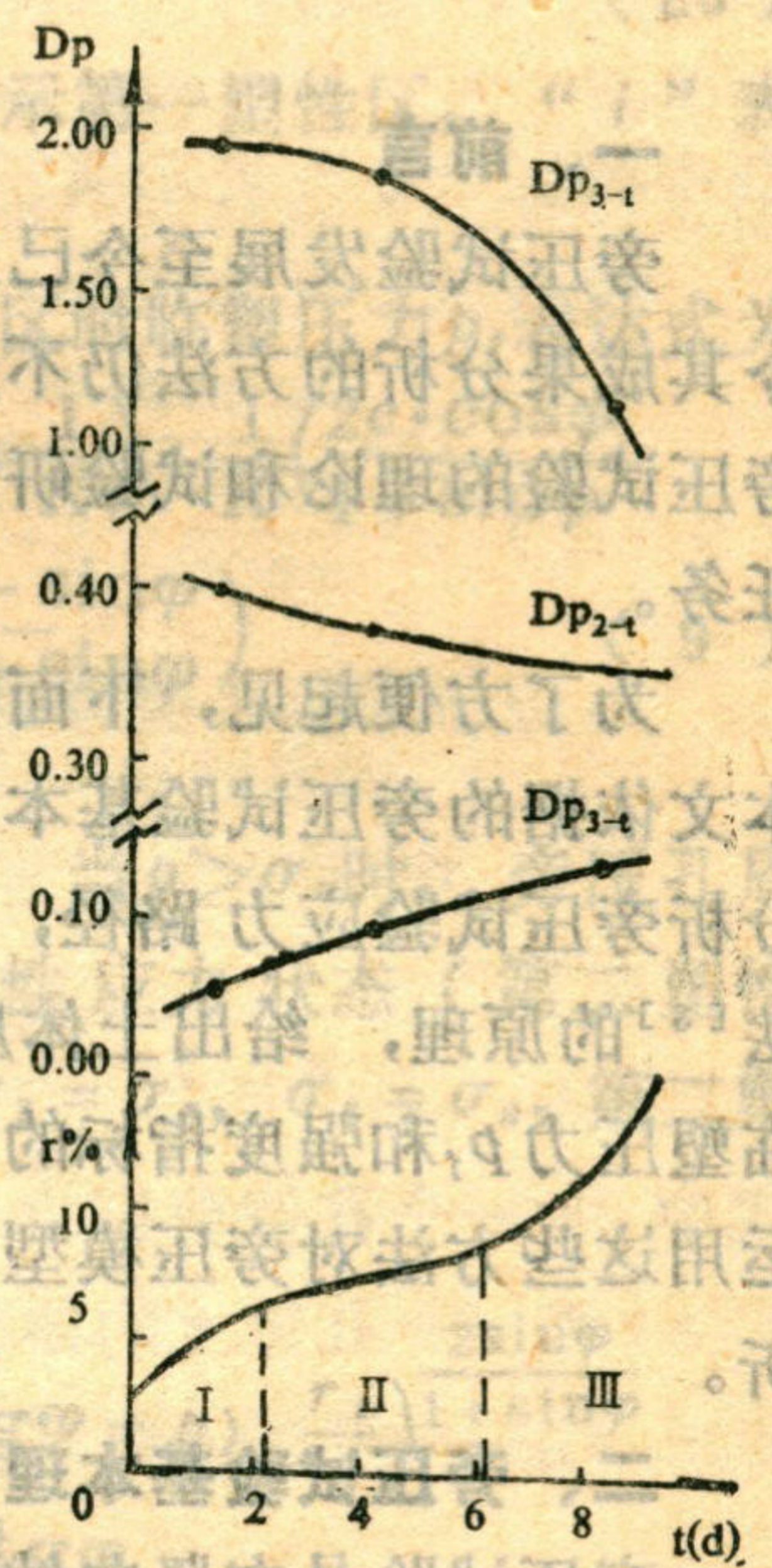


图 4 蠕变过程中孔隙度指数的变化

这种现象对进一步研究土的力学性质和渗透性均具有重要的应用前景。

3. 本文提出的孔隙度分维概念反映了孔隙大小及不同大小孔隙之间的关系，因此把它称为孔隙度指数，更便于应用。

4. 通过几个实例，初步反映出不同类型的土其孔隙度指数具有明显差别，反映这种差别是孔隙比或孔隙率等概念所无能为力的。在力的作用下，孔隙度指数将发生相应的变化，并且随力的性质不同而不同。泥化夹层在蠕变过程中孔隙度指数的变化可以帮

(下转第34页)