

黄土渗透性 与空隙性关系的研究

地质出版社

黄土渗透性与空隙性关系的研究

李 云 峰 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

(京) 新登字085号

内 容 提 要

本书是一本研究黄土地下水的专著。著者从黄土空隙的微观定量测量入手,研究了黄土渗透性与空隙性之间的内在联系。书中对粘性土微空隙测量方法及测量结果进行了较详细地介绍与分析研究,附有多个计算机程序。本书可供从事水文地质工程地质工作的科研、生产人员和大专院校有关专业的本科生、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄土渗透性与空隙性关系的研究/李云峰著.-北京:地质出版社,1994.10

ISBN 7-116-01681-3

I.黄… II.李… III.①黄土性土壤-渗透性-研究②黄土性土壤-孔隙性-研究
IV.S152

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第05616号

地 质 出 版 发 行

(北京和平里七区十楼)

责任编辑:戴鸿麟

*

北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092¹/₁₆ 印张:5.75 铜版图:8页 字数:1290000

1994年10月北京第一版·1994年10月北京第一次印刷

印数:1—600册 定价:6.40元

ISBN 7-116-01681-3

P·1359

序 言

本书是作者近年来的研究成果。编写本书的目的是将该项研究工作的指导思想、研究方法和研究结果介绍给读者。

空隙是地下水储存、运移的空间和通道。黄土这种特殊的第四纪松散堆积物，虽从颗粒级配上讲属粘性土范畴，但却发育有三种类型的空隙，即孔隙、裂隙和孔洞。裂隙和孔洞，因其个体大、连通性好，其作用以导水为主。那么，黄土层的导水性是否以裂隙和孔洞为主，而孔隙则处于无足轻重的地位呢？大小不同的空隙对黄土导水性能的贡献是不一样的。被结合水全部占据的空隙，在通常情况下是不导水的。那么多大的空隙方是有效的导水空隙？导水空隙的形状、数目、总容积及黄土总空隙度等，哪些是影响黄土渗透能力的因素？如果影响的话，其间是一种什么样的关系？这些问题，一些研究者在认识上并不统一；而有些问题，以往的研究尚未涉及。

回答上述问题，必须具备两方面的测量数据，一是渗透系数值；二是与之对应的各类空隙的定量数据，包括空隙的大小（直径、面积或体积）、数目及形状等。其中，属微观尺度的空隙不仅个体小，无法用常规方法测量，而且数量极多，定量研究的系列数据将是十分庞大的。因此，它构成了问题的关键。

本书作者针对上述问题开展了大量研究工作，利用微机图象测孔法和水银测孔法取得了洛川塬黄土地层空隙的系统测量资料，仅21个层位134块土样的室内测试数据就有数百万个。用图象测孔法系统地研究黄土空隙的诸要素，在作者之前，国内尚未见有研究成果发表。

书中在讨论了空隙性各单项因素所反映出的规律之后，用模糊聚类分析及系统聚类分析对空隙性诸因素的综合影响所反映出的规律性进行了讨论。在此基础上提出了划分黄土层为空隙性发育好、中、差三类的分类标准。

本书通过对测试资料的分析对比，证明了黄土层的导水性以孔隙为主。用曲线图分析法及逐步回归分析法分析了透水空隙的大小，并筛选出了对渗透系数影响显著的空隙要素，同时获得了描述渗透系数、透水空隙空容及渗透系数与空隙性各要素关系的随机数学模型。

本书的写作特点是，注重研究方法的介绍，立足于庞大而翔实的基础数据；在此前提下，通过综合分析、研究，得出相应的结论，阐明作者的观点。

目 录

第一章 绪言	(1)
第一节 黄土地下水研究的意义	(1)
第二节 黄土地下水研究的历史及现状	(1)
第三节 黄土地下水的一般特征与规律	(3)
第二章 洛川塬自然概况	(4)
第三章 黄土层的空隙性研究	(7)
第一节 大空隙发育规律	(7)
第二节 微空隙发育规律	(10)
第四章 黄土的空隙性分类研究	(32)
第一节 系统聚类分析	(32)
第二节 模糊聚类分析	(41)
第五章 黄土渗透性与空隙性关系的研究	(52)
第一节 渗透系数测试方法及结果	(53)
第二节 黄土透水的微小空容分析	(54)
第三节 黄土渗透性与空隙性的内在联系	(70)
第六章 主要结论	(80)
参考文献	(82)
图版说明及图版	(85)

第一章 绪 言

第一节 黄土地下水研究的意义

黄土 (Loess) 是第四纪以来特有的一种大陆疏松堆积物。我国黄土层厚度居世界之最, 黄土分布面积之广、层序之全也属世界罕见。我国黄土分布面积达44万km², 占陆地面积的4.4%; 黄土分布区居住着两亿多人口^[4], 他们的衣食住行无不与黄土息息相关。我国大片黄土分布在北纬33°—47°之间的黄河中游地区, 即陕、甘、宁、晋、豫等省(区)。具体范围是北起长城, 南抵秦岭, 东界太行山, 西止乌鞘岭。

黄土分布区以气候干旱、雨量稀少、水资源贫乏为特征。黄土区的人民早就知道在黄土层中挖井取水, 解决人畜饮用问题。然而, 因为黄土厚度大、水位埋藏深、成井难, 而水量又无保证, 所以历史上在广大的黄土区极少有民井。许多地方靠吃“窖水”或取数百米深沟底的地表水解决人畜用水问题。数千年来, 黄土区人民深受缺水之苦, 工农业生产的发展也受到严重地阻碍。因此, 黄土地下水的研究对国民经济的发展和人民生活水平的提高有着极其重要的现实意义。

黄土地下水研究属黄土水文地质的范畴。黄土水文地质是水文地质学的一个新辟领域, 与水文地质学其它领域相比, 它十分年轻。黄土水文地质问题是比较难于解决的问题。黄土水文地质的发展必将推动水文地质学的发展。因此, 黄土地下水的研究具有重要的理论意义。

第二节 黄土地下水研究的历史及现状

在世界范围内, 黄土在很多国家都有分布。黄土覆盖面积占全球的4%, 占陆地面积的9.3%。然而, 把黄土地下水作为一种水资源提到水文地质研究的议事日程上来, 仅有20 a的历史。70年代初, 我国为解决黄土塬区人民的饮水问题, 开展了黄土水文地质普查勘探, 在黄土层中开采出了较为丰富的地下水; 随之, 一批黄土水文地质研究成果脱颖而出。率先使用“黄土层地下水”这一术语, 并认为开发利用黄土层地下水是一个很重要的值得深入研究的问题, 是《黄河中游地区黄土水文地质问题》一文^[20]。进入80年代以来, 水文地质教科书上才开始在有关章节中纳入了黄土地下水的内容^[1, 31]。近几年来, 一些水文地质文献中有关黄土水文地质研究的内容越来越多, 研究得越来越深入^[20-43], 取得了突破性的进展: 提出了黄土层是双重介质的新观点, 把黄土层地下水作为一种新类型的地下水——第四系裂隙、孔隙双重介质水进行研究。

我国的黄土水文地质研究具有得天独厚的条件, 近20 a来发展迅速, 硕果累累, 在基础理论研究和开发利用方面都处于世界先进行列。然而, 还有不少问题有待更深入的研究, 以求从理论上、实践上推动黄土水文地质研究的发展。

一般认为,黄土潜水含水层的裂隙、孔洞以导水为主,孔隙以储水为主。那么,是否可以认为,黄土层的导水也以裂隙、孔洞为主?换言之,黄土层的渗透性是否主要决定于裂隙、孔洞的发育程度,而孔隙则处于无足轻重的地位呢?再者,黄土层的裂隙发育有一定的主导方向,且多为垂直裂隙,孔洞也以垂向居多,而黄土层的垂直渗透系数一般均大于水平渗透系数。那么,渗透性的这种垂直与水平方向的差异,是否完全是由裂隙、孔洞造成的,而与孔隙无关?对这些问题,以往的研究在认识上并不统一。

空隙是地下水储存、运移的空间和通道。广而言之,所有的粘性土,其渗透性制约于空隙性,它们有着密切的关系。这一点早已引起水文地质工程地质学家们的重视,并且试图用经验公式或理论公式来表达这种关系。

美国著名的土力学家太沙基(Terzaghi)提出,用下面的经验公式来表达渗透系数 K 同孔隙比 e 的关系:

$$K = f(e - 0.15)^3(1 + e) \quad (1)$$

式中, f 为8—10的常数。

尼希达(Nishida)和纳卡格瓦(Nakagawa)根据对粘土试样的试验结果建立了下列方程式:

$$\lg K = e / (0.01 I_p + 0.05) - 10 \quad (2)$$

式中, I_p 为塑性指数。

萨克尔杰(Suklje)提出的 K 与 e 的关系式则是:

$$K = \exp(0.6020 e - 7.9633) \quad (3)$$

上述所描述的关系^[77],均反映了 K 与 e 是正相关关系,随着孔隙比 e 的增大,渗透系数 K 相应变大。这对于表达同一种粘性土紧密度不同时的 $K-e$ 关系,或许是合理的。但是用它们表达不同粘性土的渗透系数随空隙比的变化,经实践验证,不是普遍适用的。

王大纯教授1964年在教科书中就有了如下的阐述:“对岩石透水性起决定作用的是空隙的大小,其次才是空隙的多少”。“粘土的孔隙度有时虽然可达50%以上,但是,由于它的极其微细的孔隙……,一般被认作是不透水的岩层。砂砾的孔隙度一般为30%左右,但由于孔隙大,所以透水性很良好”。^[50]

1982年,M.Vlahovic'在上述三式的基础上引入“能被自由水充满的极限孔隙度 n_{fw} 和极限孔隙比 e_{fw} ”的概念,确立了以下的关系式^[77]:

$$K = \exp(1.6 e_{fw} + 2.1) - 10 \quad (4)$$

式中的 e_{fw} 是根据孔隙度 n 和塑限 W_p 用下式求出的:

$$e_{fw} = (n - W_p) / [1 - (n - W_p)] \quad (5)$$

式(4)实际上已经反映了 K 值的变化不是与 n 呈正相关关系,而是与 e_{fw} 呈正相关关系。被非自由水占据着的空隙即使再多,对渗透系数值的波动也是无影响的。式(4)还表明,在渗透系数与空隙性的关系式中,应当排除非自由水占据的空间。如何排除,这是个难以解决的问题。式(5)是用塑限 W_p 近似地代替弱结合水的含量,而作了这一排除。

描述粘性土的渗透性与空隙性的关系,式(4)无疑是在(1)、(2)、(3)式的基础上前进了。(1)、(2)、(3)式描述这种关系时,所考虑的空隙性主要是空隙多少这一因素。(4)式虽然考虑了空隙的大小问题,但并未从根本上解决大、小界限问题。而空隙性所包含的因素,远非如此简单,除了总空隙度之外,不同等级空隙的“区间空隙度”、空

隙数目、空隙形状等等，也属空隙性应包括的内容。那么，用什么样的手段可以取得这些项目的数据？粘性土的渗透性，除上述各式所表达的与空容有关之外，到底还与空隙性的哪些因素有关？就空容而言，渗透性与哪个级别的空容有关？与多大空隙的空容无关？用什么样的数学式可以表达这种关系？本书将就上述问题展开讨论。

第三节 黄土地下水的一般特征与规律

一、黄土的地质特征

黄土地层典型的地质特征是具有多层性、非均质性、各向异性。一般而言，各地的黄土地层均发育有多层黄土与多层古土壤，层序较全者可达数十层之多。这众多的层次在岩性上并非是均一的，而是各有差异的。这种差异性不仅表现在同一剖面的不同层位上，而且就同一层而言，不同地点也是有差异的。这种水平方向的差异随着两地相距越远而越加明显。从颗粒级配上讲，黄土以粉粒成分为主，并且以 $10-50\mu\text{m}$ 的粗粉砂粒占绝对优势， $<5\mu\text{m}$ 的粘粒含量占 $15-27\%$ ，属粘性土范畴（ $>2\text{mm}$ 的砾粒不超过 50% ， $<0.005\text{mm}$ 的粘粒超过 6% ）^[48]。一般而言，在黄土剖面上颗粒自上而下变细（表1）。

表1 洛川黄土塬不同时代的黄土和古土壤(埋藏风化层)粒度组成

时 代	土 类	层 位	粒 级 重 量 (%)						中位数 M_d (ϕ)	分选系数 S_o
			>0.1	$\begin{array}{c} 0.1 \\ \\ 0.05 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.05 \\ \\ 0.01 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.01 \\ \\ 0.005 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.005 \\ \\ 0.001 \end{array}$	<0.001		
Q_1-Q_3	黄 土	马 兰	1.9	4.9	53.3	12.5	12.9	14.5	6.00	2.882
		离石上部	1.0	9.0	52.7	11.0	13.4	12.9	5.92	2.681
		离石下部	0.8	4.5	50.3	12.3	17.0	14.2	6.34	2.967
		午 城	1.6	4.2	44.1	12.2	19.5	18.2	7.40	3.311
Q_1-Q_2	古土壤	离石上部	0.7	6.4	45.7	12.7	17.9	14.1	6.31	3.459
	埋藏风化层	离石下部	0.4	4.4	45.7	12.6	19.1	18.7	6.56	3.551
		午 城	0.6	1.9	42.0	12.6	21.5	21.4	7.30	3.600

注：粒组单位为毫米。

(引自刘东生等《黄土与环境》)

黄土地层虽属第四纪松散堆积物，发育有孔隙，但又发育了通常只有坚硬岩石才有的裂隙和孔洞。黄土剖面，自上而下有结构变密实，孔隙变小，孔洞、裂隙变少的趋势。

二、黄土地层的水文地质特征

黄土地层的上述特征，决定了它特有的水文地质特征。它的多层性、非均质性，决定了黄土含水层中赋水的不均匀性；其结构上的各向异性，制约着其渗透性能上的各向异性；黄土层的颗粒级配，导致了黄土含水层的水资源不可能很丰富。

通常认为，黄土层是一种裂隙、孔洞-孔隙双重介质，其裂隙、孔洞以导水为主，孔隙以储水为主^[25,26]。

黄土分布区具有独特的地貌景观，如黄土塬(高塬、台塬)、黄土梁峁及黄土掌地、杖地、台地^[17,43]等。这种独特的地貌条件控制着黄土地下水的形成与分布。大气降水入渗是黄土层地下水的主要补给来源^[24,27]。黄土层地下水的分布虽然具有普遍性，但由于沟谷切割，使之分布又不连续；高塬上水位埋藏深，沟谷地带、台地上埋藏浅，含水层厚度差别也很大。

第二章 洛川塬自然概况

洛川塬是我国最著名的黄土塬之一,深受黄土研究专家及黄土水文地质工作者的重视。这里,黄土地层发育全,厚度大,有代表性;黄土地质及黄土水文地质研究程度高;交通方便,有利于样品的采集、运输。

洛川塬位于延安地区偏南部,南距西安二百余公里。西延公路贯穿其腹部。本区属半干旱大陆性气候。据洛川县气象站1955—1988年资料,年平均降水量为621.7mm,最大达911.9mm(1964年),最小为396.8mm(1986年)。年平均蒸发量为1623.9mm。洛河自北而南穿过洛川塬中部,谷深数百米,支沟发育,呈树枝状,将塬体切割得支离破碎。

洛川塬塬面开阔平坦,塬区黄土地层齐全,厚度大(图版1,照片7),是高原型黄土塬的典型。洛川塬以中生界为基底。中生界是一套砂岩、泥岩、页岩不等厚相间成层的碎屑岩系。黄土地层覆盖在上新统(N_2)三趾马红色粘土(厚度10—20m)之上。塬体主要由更新统黄土构成,表面有极薄的全新统黄土。黄土总厚度在140m左右,塬中心最厚(图1)。

洛川塬位于鄂尔多斯地台的东南缘,前第三纪地层虽经构造变形,但岩层形变不显,为向北西或北北西缓倾的单斜地层,倾角 $<5^\circ$,普遍发育近东西向与近南北向的两组“X”型共轭扭裂隙,多垂直于岩层面。

洛川塬区特定的地质结构决定了塬区主要存在两种类型地下水:赋存于黄土层中的潜水和赋存于中生界砂页岩中的承压水。 N_2 红色粘土夹于其间,构成相对隔水层。潜水位埋深介于30—60m之间。潜水含水层厚度达80m左右。其中,有几层较重要者,例如L15、L9。这两层黄土不仅在地层年代划分上有着重要的意义(L15底面即 Q_2 底界,距今约120万a;L9底面即 Q_2^{1-1} 与 Q_2^{1-2} 的分界,距今约80万a),而且有着特殊的水文地质意义。位于中更新统底部的第L15层黄土,常被称作下砂黄土、下粉砂层等,不仅颗粒粗,而且层厚大,达7—8m,是重要的含水层位。在沟谷中,凡是切割出L15的地方,一般均呈现出潮湿的条带,许多地方还形成泥流(图版1,照片3)。位于潜水位附近的第L9层黄土,常被称作中砂黄土、中粉砂层等,厚度为7—8m。该层在塬中心处位于潜水位之下;而在塬边则多处于水位之上,远看呈厚度较大的一个白色条带。从整个黄土剖面上看,其粒度组成是下更新统黄土较中更新统黄土细(表1)。比较而言,中更新统的富水性远强于下更新统。因此,本次研究的重点放在中更新统。

潜水含水层的补给只有唯一的来源,即垂直入渗补给,主要是大气降水入渗补给,偶有灌溉入渗补给。其补给方式,笔者认为,通过极少的大通道集中快速补给与通过一般空隙分散缓慢补给兼有。关于大通道补给,笔者在这两年的野外研究工作中,发现了一处极有说服力的落水洞。在洛川县城西侧西沟与北沟中夹的塬块上,有一直径为1m左右的落水洞,位于老乡的耕地中间,无法填死;1988年因建筑需要,此处用推土机削低数十米至S5(第五层古土壤),离潜水位已不远,但此洞仍深不见底。沿塬边追索,无出口洞,显然是直通地下水位了。

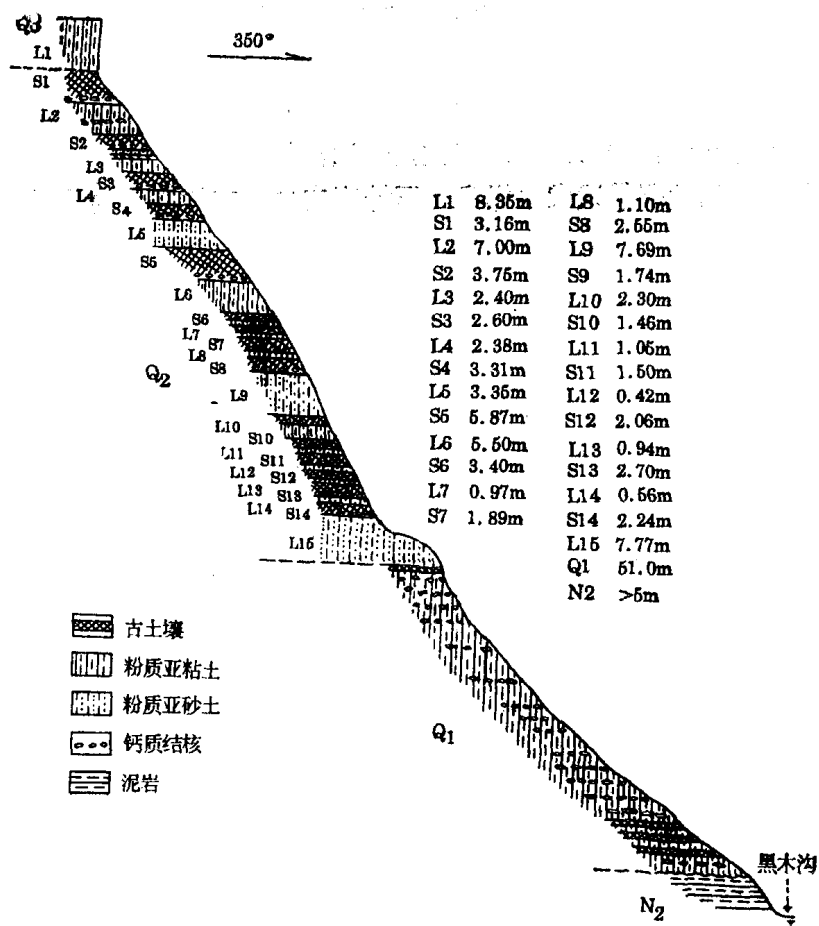


图 1 洛川黑木沟黄土地层实测剖面图
(据陕西二水, 有修改)

洛川塬发育有大量塬面洼地、无出口的浅沟(图版 2, 照片 1), 村村有蓄水的涝池。这些都是汇集大气降水, 入渗补给潜水的有利因素。在大面积范围内, 入渗补给是分散而缓慢的。

洛川塬上深切至潜水位之下的沟谷是潜水天然的排泄通道。潜水以泉(图版 1, 照片 5) 或分散渗出的形式(图版 1, 照片 3) 排向沟谷, 构成非降水期沟谷水流唯一的来源。

潜水位高出下伏承压水头约 50m 以上, 可越过上新统相变带及裂隙向基岩裂隙水排泄。这也是其排泄方式之一。

自 70 年代以来, 为解决生活用水及少量灌溉用水, 在塬区大量开采中、下更新统中的潜水, 这更是目前重要的排泄方式之一。由于补给缓慢, 数量有限, 地下水资源不能满足开采需求, 致使开采中心地下水位下降强烈, 形成降落漏斗。在 1979—1988 年的 9 a 里, 洛川县城开采中心地段的潜水位下降了 20m 以上。

本次研究集中在洛川塬中心, 涉及洛川县城周围约 40 km² 的范围, 北起好音村, 南到坡头, 西自马家庄, 东止胡村。取样地点选在黑木沟上游, 在秦家寨—石家庄剖面采集了 L4、S4、L6、S6、L7、S7、L9、S9、L10、S12、L13、S13、L15 共 13 个层位的样品。在县城边施工开挖的新鲜断面上采集了 L1、S1、L3、S3、L5、S5 共 6 个层

位的样品。对下更新统,只在中部各取一层黄土、一层古土壤,作为 Q_1 的代表进行测试,其取样地点在县城西沟。

为了便于对比,每个层位均在相同地点、同一时间采集顺层、垂层原状样各数盒和保持天然水分的扰动样数盒,密封后,运回室内供试验用。

凡损坏、备用及调试仪器试做的样品,不计算在内。有效样品共用原状样105个、扰动样29个,合计134个。

第三章 黄土层的空隙性研究

第一节 大空隙发育规律

所谓大空隙，是指肉眼可见的黄土中的空隙，包括裂隙、孔洞、大孔隙。

一、裂隙

含有裂隙是黄土的重要特性之一。其发育方向以垂向居多，也有倾斜及顺层者。究其成因，有成岩作用、风化作用，也不排除构造作用的影响。黄土裂隙的发育规律是：

① 剖面上：上部较下部发育，自上而下裂隙发育有减弱趋势，以L1层位最发育（图版1，照片8），最大面裂隙率可达5‰。

② 平面上：塬边较塬体内发育。塬边因受重力及风化作用，裂隙开启性好。塬体内多较隐蔽或被充填。

③ 从裂隙个体上看：因受其岩性影响，黄土层中的裂隙个体较大而数量少，古土壤粘土层中的裂隙个体较小而数量多。个体大的裂隙连通性、开启性往往好，平面上可延伸若千米，剖面上可贯穿多层黄土层与古土壤层，是造成黄土塬高陡边坡的主要原因。

④ 裂隙的发育有几个主导方向：据10个地点的测量统计资料，统计面积为85m²，裂隙236条，裂隙面积共计0.22862m²，面裂隙率为0.269‰（表2）。裂隙走向玫瑰图，见图2。从图2和表2可以看出，北北东向的裂隙虽然条数不多，可是宽度较大，因而面裂隙率最高。就裂隙长度而言，北西向条数最多、总长度最大。

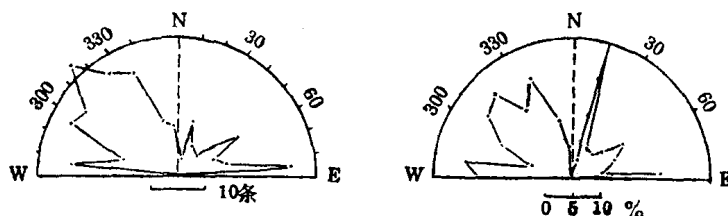


图2 L1裂隙玫瑰图
(左图以长度计；右图以面积计)

二、孔洞

孔洞发育，是黄土又一特性之一。孔洞形体较大，但数量较孔隙要少得多。其形状大部分为长管状，多沿垂向发育，横截面呈圆形或椭圆形，直径小者不足1mm，大者可达数厘米（图版1，照片6）。长度是直径的几个数量级。究其成因，生物作用明显，潜蚀作用参与，也有部分较小孔洞是成岩作用的产物。

秦家寨村东的群20孔岩心孔洞统计资料列于表3，各层面孔洞率曲线示于图3。群20孔各层的岩心均有多个点的孔洞统计资料，此处用的是每层中数值最大者。

图3的左框线示岩层埋深，右框线示岩层代号，上下框线示面孔洞率（‰）。图3反映出洛川黄土孔洞发育具有以下规律：

表 2 L1裂隙统计一览表

走向区间	裂隙条数	平均走向	总长度 (m)	总面积 (mm ²)
1—10°	3	10°00'00"	2.50	3500
11—20°	10	15°54'00"	7.90	25350
21—30°	6	28°00'00"	3.45	5950
31—40°	5	37°12'00"	3.60	5725
41—50°	6	46°10'00"	4.06	6470
51—60°	13	56°51'00"	10.30	11600
61—70°	7	67°08'00"	5.85	8225
71—80°	8	76°52'30"	5.95	5975
81—90°	20	86°30'00"	15.15	15900
271—280°	19	278°19'00"	14.85	19175
281—290°	10	287°12'00"	6.70	7200
291—300°	21	295°14'00"	15.45	13525
301—310°	20	306°55'30"	16.95	18925
311—320°	27	317°04'00"	21.85	20025
321—330°	22	327°30'00"	17.05	14700
331—340°	20	336°45'00"	15.65	19400
341—350°	10	346°54'00"	9.50	10950
351—360°	9	357°53'20"	7.05	6025

统计面积: 85m²裂隙面积: 228620mm²

裂隙条数: 236条

面裂隙率: 0.269%

表 3 群20孔岩心孔洞统计一览表

层 位	孔 深 (m)	统计面积 (cm ²)	孔洞个数	孔洞面积 (mm ²)	面孔洞率 (‰)
L1	7.10	63	85	15.04	23.9
S1	9.70	80	126	23.44	29.3
L3	21.50	80	83	10.43	13.0
S3	22.60	80	164	21.93	27.4
L4	26.00	64	48	6.69	10.5
S4	29.70	72	181	72.88	101.0
L5	32.80	60	82	12.28	20.5
S5	39.70	72	237	32.8	45.6
L6	40.50	77	104	13.73	17.8
S6	48.00	86	179	12.23	25.5
L7	48.80	49	18	2.26	4.6
S7	49.30	56	132	16.58	29.6
L9	58.50	64	23	2.89	4.5
S9	63.90	56	114	37.01	66.1
L10	65.80	64	83	22.87	35.7
S12	69.00	49	51	23.31	47.6
L13	71.00	56	42	5.82	9.4
S13	73.90	63	22	2.76	4.4
L15	77.00	56	12	1.51	13.6
Q1L		42	14	1.76	4.2
Q1S		56	17	2.13	3.8

- ① 剖面上，面孔洞率自上而下有变小的趋势。
- ② 古土壤层的面孔洞率较黄土层大。
- ③ 面孔洞率不大，一般均 $<5\%$ ，个别点可达 1% 。

三、大孔隙

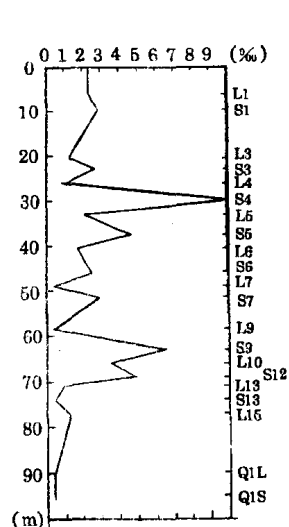


图 3 群20孔岩心孔洞率曲线

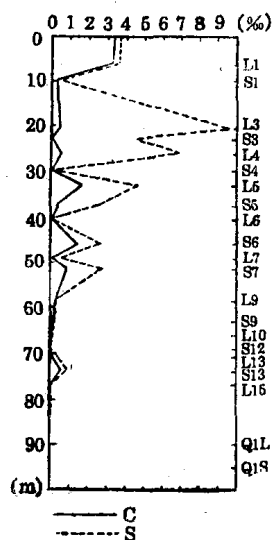


图 4 大孔隙率曲线

C—据垂层统计资料；S—据水平统计资料

表 4 大孔隙统计一览表

层 位	大孔隙个数	大孔隙总面积 (mm ²)	面孔隙率 (‰)	层 位	大孔隙个数	大孔隙总面积 (mm ²)	面孔隙率 (‰)
L1C	26	10.00	33.3	L1S	29	11.00	36.7
S1C	5	1.25	4.2	S1S	6	1.50	5.0
L3C	8	1.50	5.0	L3S	48	28.75	95.8
S33C	0	0	0	S3S	10	13.50	45.0
L4C	6	1.50	5.0	L4S	15	21.00	70.0
S4C	1	0.25	0.8	S4S	2	0.50	1.7
L5C	6	5.25	17.5	L5S	23	14.00	46.7
S5C	2	1.25	4.2	S5S	12	7.50	25.0
L6C	1	0.25	0.8	L6S	0	0	0
S8C	3	4.50	15.0	S6S	16	8.00	26.7
L7C	1	0.25	0.8	L7S	7	1.75	5.8
S7C	3	2.75	9.2	S7S	7	8.25	27.5
L9C	1	1.00	3.3	L9S	3	0.75	2.5
S9C	2	0.50	1.7	S9S	3	0.75	2.5
L10C	1	0.25	0.8	L10S	1	0.50	1.7
S12C	0	0	0	S12S	0	0	0
L13C	1	0.25	0.8	L13S	2	1.25	4.2
S13C	4	1.75	5.8	S13S	3	2.75	9.2
L15C	0	0	0	L15S	1	0.25	0.8
Q1LC	0	0	0	Q1LS	0	0	0
Q15C	1	0.25	0.8	Q15S	0	0	0

指孔径 $\geq 0.5\text{mm}$ 的孔隙,基本上为等轴状。其特点是孔径远远大于骨架颗粒的直径。其成因主要是成岩作用。

将本次研究中实际统计的21个层位的大孔隙面积率绘于图4中,数据列于表4中。

图4及表4中的资料均是用环刀取样统计出的,统计面积为 30cm^2 。其中C代表垂层统计的资料,S代表水平统计的资料。图4的框边意义同图3。

图4及表4反映出如下的规律:

- ① 剖面上,大孔隙率自上而下有变小的趋势。
- ② 在大孔隙率曲线上,一般黄土层为峰值,古土壤为谷值。
- ③ 大孔隙率最大不足1%,余者均 $<0.5\%$ 。
- ④ 顺层与垂层统计出的同一层位的大孔隙率,一般都很接近(个别层位相差悬殊,如L3)。

第二节 微空隙发育规律

一、微空隙观测手段简介

研究黄土微空隙发育规律,首先要解决的是微空隙测试手段问题。

土结构的研究与土的其它特性的研究相比,起步较晚,是个薄弱环节,其研究方法远不及土的化学、矿物学等研究方法成熟。进入60年代后期,扫描电子显微镜(SEM)的成功应用,促使土结构的研究有了较迅速的发展。但是,土结构的定量分析,目前还不成熟,国内外均处于探索阶段。属于土结构研究内容之一的空隙研究,更是薄弱中的薄弱环节。

目前,可用于细粒土微空隙研究的方法有^[64]:

- ① 薄片试样的光学显微镜观察。
- ② 小块试样扫描电镜观察。
- ③ 小块试样表面复型薄膜或超薄切片的透射电镜观察。
- ④ 水银测孔仪测量空隙大小分布。
- ⑤ 气体等温吸附法(BET法)测量孔径 $<1000\text{\AA}$ 的空隙分布。
- ⑥ 真空毛管法测定饱和试样的空隙大小分布。
- ⑦ 比电导率测定块状试样的空隙率。

其中的⑤、⑥、⑦种方法应用不普遍,如BET法,只能测量 $<1000\text{\AA}$ 的空隙分布,而一般粘性土中的空隙绝大多数都 $>1000\text{\AA}$ 。①、②、③种方法则是对空隙的形状、分布进行定性描述,难以取得系列的定量资料。

水银测孔仪测量空隙大小分布,过去多被石油专业用于坚硬岩石。我国于1984年首次移植到黄土空隙大小分布的测试上^[39]。该方法可以取得粘性土不同等级的空容数值,是该项目定量分析的成功方法^[10、23、29、38、39]。

作者本次研究所使用的主要方法是借助微型计算机进行的图象测量法(Photogrammetric method),辅之以水银测孔试验,互为补充。

二、测试方法及结果

1. 计算机图象测量法测量黄土的微空隙

图象测孔法是使用微型电子计算机图象分析系统对光学显微图象或电子显微图象进行

定量化的信息提取,实现对空隙或颗粒几何形态要素的测量。

将该方法用于土结构研究,国际上已有先例(Morgenster, 1967; Tovey, 1973, 1974, 1981^[46]; Сергеев, 1984^[47]; 等),国内应用极少。吴义祥(1988)首次将它用于定量研究工程粘性土的微观结构。他的研究是从颗粒形态的测量入手的,填补了国内的这项空白^①。而将它用于粘性土空隙性诸要素的定量分析,在作者之前,未见有研究成果发表。

作者使用了地质科学院水文地质工程地质研究所的计算机图象测量系统,使用的程序有40余个。该套程序是由合肥工业大学计算机系专门编制的^[8]。

(1) 方法的基本原理

该方法是把黄土微观信息通过电视摄像机以每秒钟30幅的速率摄取视频信号,通过视频信号/数字信号转换装置(A/D转换装置)把摄取的视频信号转换成数字信号,存贮在帧存贮器中;同时,图象板中的显示逻辑单元把帧存贮器中的图象数字信号作D/A转换,并显示在监视器上。对存贮的图象通过微机进行一系列处理,最后把该图幅上所有空隙的边缘轮廓提取出来,再用数点法统计计算各个空隙的周长、面积、最长弦长度及方位、形状系数等要素;同时记录每个空隙边缘轮廓上所有单元点的坐标值。全部过程均在图象显示器上迭次显示(图版1,照片2)。

(2) 硬件与软件

硬件:该系统由六大部件组成(图版2,照片2):

① 摄像机(RCA-2000)。

② 主机Super PC-XT(双软盘驱动器,20M硬盘,640K内存,配有 $512 \times 512 \times 8\text{bit}$ 的PFG-83图象板)。

③ 一个终端,彩色CRT。

④ 彩色图象监视器(Thomson 4156)。

⑤ 打印机(FX-100)。

⑥ 绘图仪(SEKONIC SPL-400)。

软件:为粘性土微结构处理专门编制的程序有40余个,各有其功能。下面只举部分最主要的:

① 置图象板于摄像机连续摄取信息状态,并冻结摄入的图象程序。

② 从 516×516 图象中割取 256×256 图象程序。

③ 图象存盘程序。

④ 调出图象程序。

⑤ 正负片转换程序。

⑥ 加伪彩色程序。

⑦ 二值化程序。

⑧ 手工切割程序。

⑨ 边缘轮廓提取程序。

⑩ 图象检测程序。

⑪ 打印输出程序。

① 吴义祥,博士论文,《工程粘性土微观结构的定量研究》,1988年。

⑫ 绘图输出程序。

(3) 输入及输出信息

摄像机摄入的信息可以是实物,也可以是象片。微空隙研究不可能按实际的尺度摄入,必须先经放大,制成放大象片。放大手段可以用光学显微镜,也可以用电子显微镜,视放大倍数的要求而定。放大倍数的选取,须根据观测要素的尺度确定。放大倍数与视域又是

表 5 微机图象测孔法测量黄土空隙结果一览表

图片号: S3C1 空隙总面积: 0.111161 总空隙数: 273 空隙度: 0.3063616 空隙比: 0.4416734 放大倍数: 100 比例尺: 2:37164E-03		
形状系数范围值: 0.0—0.1 孔径范围值: 0—5 孔径范围值: 5—10 孔径范围值: 10—100 孔径范围值: 100—1000 孔径范围值: 1000—5000 孔径范围值: ≥ 5000	空隙数: 58 空隙数: 0 空隙数: 0 空隙数: 43 空隙数: 13 空隙数: 1 空隙数: 1	面积值(mm ²): 0.1058058 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 9.921928E-03 面积值(mm ²): 1.407294E-02 面积值(mm ²): 1.587346E-02 面积值(mm ²): 6.593245E-02
形状系数范围值: 0.1—0.3 孔径范围值: 0—5 孔径范围值: 5—10 孔径范围值: 10—100 孔径范围值: 100—1000 孔径范围值: 1000—5000 孔径范围值: ≥ 5000	空隙数: 82 空隙数: 12 空隙数: 37 空隙数: 33 空隙数: 0 空隙数: 0 空隙数: 0	面积值(mm ²): 4.25788 E-03 面积值(mm ²): 2.699845 E-04 面积值(mm ²): 1.372421 E-03 面积值(mm ²): 2.615474 E-03 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 0
形状系数范围值: 0.3—0.5 孔径范围值: 0—5 孔径范围值: 5—10 孔径范围值: 10—100 孔径范围值: 100—1000 孔径范围值: 1000—5000 孔径范围值: ≥ 5000	空隙数: 13 空隙数: 13 空隙数: 0 空隙数: 0 空隙数: 0 空隙数: 0 空隙数: 0	面积值(mm ²): 2.306117 E-04 面积值(mm ²): 2.306117 E-04 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 0
形状系数范围值: 0.5—0.7 孔径范围值: 0—5 孔径范围值: 5—10 孔径范围值: 10—100 孔径范围值: 100—1000 孔径范围值: 1000—5000 孔径范围值: ≥ 5000	空隙数: 33 空隙数: 33 空隙数: 0 空隙数: 0 空隙数: 0 空隙数: 0 空隙数: 0	面积值(mm ²): 3.712286 E-04 面积值(mm ²): 3.712286 E-04 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 0
形状系数范围值: ≥ 0.7 孔径范围值: 0—5 孔径范围值: 5—10 孔径范围值: 10—100 孔径范围值: 100—1000 孔径范围值: 1000—5000 孔径范围值: ≥ 5000	空隙数: 87 空隙数: 87 空隙数: 0 空隙数: 0 空隙数: 0 空隙数: 0 空隙数: 0	面积值(mm ²): 5.005962 E-04 面积值(mm ²): 5.005962 E-04 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 0 面积值(mm ²): 0