

DOI: 10.11779/CJGE20220159

基于微结构量化的含渐变带天然黄土渗透各向异性研究——以延安新区 Q₁ 黄土为例

包 含¹, 尹晓晴¹, 兰恒星^{2,3,4}, 晏长根¹, 马扬帆¹, 张科科¹, 彭建兵^{2,4}

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 4. 自然资源部生态地质与灾害防控重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要: 为研究含渐变带天然黄土的渗透各向异性特征, 以含黄土层(L19)、古土壤层(S18)以及两者之间渐变带(S18z)的早更新世(Q₁)黄土为例, 获取了各土层在 0°, 45°, 90° 方向的饱和渗透系数, 并计算了相应的孔隙度 n_m 、形状系数 F 、形态分维数 D 、概率熵 H_m 等微观结构参数, 分析了微观结构参数对渗透系数的影响。结果表明: ①除概率熵外, 孔隙和颗粒的微观结构参数均具有各向异性特征, 渐变带土层的微观结构特征与相邻土层存在显著差异; ②各土层沿沉积方向渗透系数均最大、渗透能力随渗流时间衰减最快, 沿垂直沉积方向渗透系数均最小、渗透能力衰减最慢; ③微观结构参数对各土层渗透系数的影响程度均表现为 $n_m > F(\text{孔隙}) > F(\text{颗粒}) > D(\text{孔隙}) > D(\text{颗粒}) > H_m(\text{孔隙}) \approx H_m(\text{颗粒})$, 其中孔隙度对渗透性能的贡献约可达到 30%; ④渐变带土层的渗透性能最差, 水分易在渐变带发生累积, 导致含水率提高, 弱化土体力学性质, 需要重点关注。

关键词: Q₁ 黄土; 渐变带; 渗透系数; 各向异性; 微观结构

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)04-0730-09

作者简介: 包 含(1988—), 男, 工学博士, 教授, 主要从事岩土力学研究工作。E-mail: baohangeo@163.com。

Permeability anisotropy of natural loess with gradation zone: case study of Q₁ loess in Yan'an New District

BAO Han¹, YIN Xiaoqing¹, LAN Hengxing^{2, 3, 4}, YAN Changgen¹, MA Yangfan¹, ZHANG Keke¹, PENG Jianbing^{2, 4}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Key Laboratory of Ecological Geology and Disaster Prevention of Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to study the permeability anisotropy of the natural loess with gradation zone, the early Pleistocene (Q₁) loess containing the loess layer (L19), paleosol layer (S18) and the gradation zone (S18z) between them is taken as an example to obtain the permeability coefficients of saturation of various soil layers in 0°, 45° and 90° directions. The microstructural parameters such as porosity n_m , shape coefficient F , morphological fractional dimension D and probability entropy H_m are calculated, and then the influences of the microstructural parameters on the permeability coefficient are analyzed. The results show that: (1) Except the probability entropy, the microstructural parameters of both the pores and the particles are anisotropic, and the microstructural characteristics of the soil layer in the gradation zone are significantly different from those of the adjacent soil layers. (2) Each soil layer has the largest permeability coefficient and the fastest attenuation of permeability during seepage along the deposition direction, and the smallest permeability coefficient and the slowest decay of permeability along the vertical deposition direction. (3) The influence degree of the microstructural parameters on the permeability coefficient of each soil layer is $n_m > F(\text{pore}) > F(\text{particle}) > D(\text{pore}) > D(\text{particle}) > H_m(\text{pore}) \approx H_m(\text{particle})$, in which the contribution of porosity to the permeability can reach 30%. (4) The permeability of the gradation zone soil is the worst, and water tends to accumulate in the gradation zone, leading to an increase of the water content and weakening the mechanical properties of the soil, which needs to be focused on.

Key words: Q₁ loess; gradation zone; permeability coefficient; anisotropy; microstructure

基金项目: 国家自然科学基金项目(41790443, 42041006, 41927806); 中央高校基本科研业务费项目(300102212213); 陕西省科学技术协会青年人才托举计划项目(20220707)

收稿日期: 2022-02-13

0 引 言

中国黄土覆盖面积广阔, 厚度大, 居世界第一^[1], 具有欠压实、水敏性、垂直节理发育、富含可溶性盐等一系列特点^[2]。受气候变化影响, 黄土地区降雨量近年呈增多趋势, 地质灾害频发, 产生了严重的社会影响, 其中与渗流有关的灾害尤为突出^[3-6]。黄土地层沉积韵律显著, 表现出层状特征, 而且不同土层之间往往以渐变过渡带的形式体现^[7], 这些层间过渡带常成为水作用最为强烈的部位, 如石碑塬因饱和黄土层沿隔水的古土壤界面发生振动液化而发生了大规模灾变^[8]。因此, 黄土界面的渗流问题越来越受到重视, 而渗透各向异性是其中一个重要研究方向^[9]。

目前, 对土的渗透各向异性已经有了比较丰富的研究基础^[10-11]。在以往的研究中, 常以沿不同方向的渗透系数之比表征试样的渗透各向异性^[12]。大量试验结果表明, 黄土渗透各向异性表现较为复杂, 并且具有较强的空间变异性^[8,13]。王铁行等^[14]采用 GDS 三轴渗透仪测得原状黄土水平向渗透系数大于垂直向渗透系数, 但也有学者发现黄土垂直向渗透系数大于水平向渗透系数的现象^[15]。洪勃等^[9]通过室内变水头试验, 从原生、次生孔隙结构入手, 分析了渗透性能各向异性的原因。但目前对黄土渗透特性的研究多集中在单一土层上, 对含渐变带天然黄土的关注度不够。事实上, 黄土层间渐变带对水最为敏感, 在水的作用下往往充当了灾害发生的边界条件^[16], 尤其是古土壤与黄土层之间的渐变带, 但这方面的研究成果非常缺乏。

黄土的微结构状态影响其宏观性质, 在水力特性、力学特性等方面均有着显著的体现^[17]。因此, 从微结构出发探究宏观物理特性, 成为揭示黄土宏观行为的有效方法。早在 20 世纪 60 时代, 张宗祜^[18]就对黄土结构进行了初步研究并对其做了分类, 80 年代之后, 众多学者^[19-20]利用压汞技术对黄土微观结构做了较为深入的研究。近年来, 研究土体微结构的手段不断完善, 既可以采用 CT、光学显微镜、扫描电镜等获

取微结构图像, 也可以通过 image-pro plus、section image、CVIP tools 等图像分析软件实现对微结构的数字化提取^[21-22]。形状系数^[23]、形态分维数、孔隙度、概率熵、定向角分布^[24]等定量指标的应用, 为黄土微观结构的量化分析提供了便利, 也为黄土渗透性能与微观结构关系的建立奠定了基础。

土体渗流实际上是水通过土体中不规则孔隙的流动, 因此要揭示黄土渗透各向异性的本质, 需要从微观层面展开研究。事实上, 微观结构对渗透各向异性产生的影响与宏观层面所产生的作用同样重要。微观层面和颗粒平整度也是导致渗透各向异性的重要原因^[25]。在微结构影响下, 黄土各向异性显著, 其在垂直方向上的渗透系数不同于水平方向, 且二者的差异会随着土层与深度的不同而变化^[26]。Li 等^[27]曾分析了微结构对渗透性能的影响, 探讨了水或污染物在黄土中的迁移特征, 并肯定了微结构在降低水或污染物随深度迁移速率方面的作用。在许多研究中, 学者们引入了微观参数来探讨黄土渗透各向异性的微观机制^[9,26]。反映黄土微观结构的量化指标较多, 但对于各指标对渗透行为的影响程度尚缺乏相关的评价。

黄土层间渐变带作为一个具有重要工程特性的特殊土层, 其水稳定性影响工程土体的稳定状态, 因此探究其渗透特性与常规土层的异同具有重要的意义。本文以延安新区含渐变带 Q₁ 天然黄土为研究对象, 通过电镜扫描试验 (SEM) 得到不同层黄土的微观结构图像, 提取其各向异性微观结构参数, 并结合饱和渗透试验, 量化分析各向异性微观结构参数对渗透系数的影响。本研究有利于明晰多层黄土的渗透特性, 也有助于揭示渗透致黄土沿层间界面滑移的机制。

1 试验材料

1.1 样品采集与基本性质

试验用黄土样品采集于延安新城北区, 位置如图 1 所示。

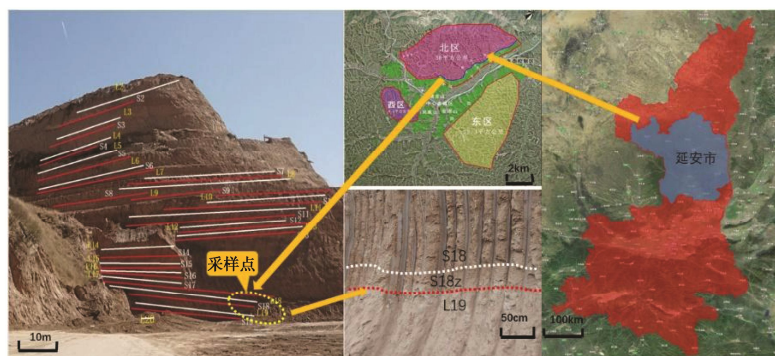


图 1 取样点位置与土层信息

Fig. 1 Sampling site and information of soil layers

表 1 不同土层的基本物性参数
Table 1 Basic physical parameters of different soil layers

土层	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	不均匀系 数 C _u 值	土粒相对 质量密度	干密度/ (g·cm ⁻³)	塑限含 水率/%	液限含 水率/%	塑性指数	天然含水 率/%
S18	0.236	12.2	2.67	1.57	15.1	27.0	11.9	10.3
S18 _z	0.199	11.0	2.69	1.58	16.0	26.8	10.8	10.3
L19	0.200	12.5	2.70	1.61	16.1	28.0	11.9	10.4

取样点所在剖面高度为 102 m, 含黄土或古土壤 37 层。本研究所取样品为 Q₁ 时代相邻的 S18 土层和 L19 土层, 两土层间存在明显的渐变带, 称作 S18_z 土层, 采样位置及土层关系见图 1。其中 S18、S18_z 及 L19 土层的厚度依次为 1.81, 0.28, 1.63 m, S18 土层的埋藏深度约为 84 m, 3 层土的取土深度共 128 cm, 即包含 S18_z 土层在内的上下各 50 cm。取样方法为人工挖掘, 土样切割后用气泡袋和保鲜膜进行包裹, 防止运输中土样发生损坏和水分流失等。依据《土工试验方法标准: GB/T 50123—1999》, 利用粒度分析仪等分别测得各土层的主要物性参数, 结果见图 2 和表 1。其中土样粒组主要以粉粒为主, S18 土层约为 83.3%, S18_z 土层约为 81.56%, L19 土层约为 81.56%, 黏粒含量分别为 13.44%, 14.70%, 13.85%, 砂粒含量分别为 4.74%, 3.74%, 4.13%。

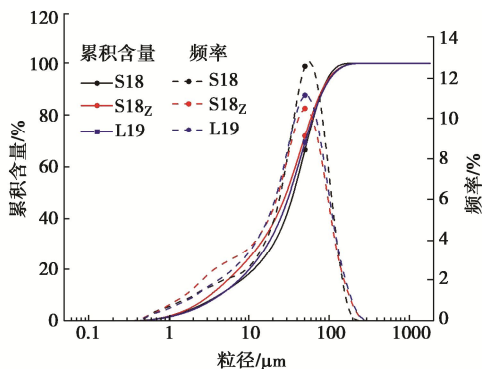


图 2 不同土层粒度分布曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of different soil layers

1.2 试样制备

用于进行渗透试验的样品采用定向取样的方式制作, 根据图 3 所示方向, 对 3 个土层分别获取与沉积方向呈 0°, 45° 和 90° 夹角的原状土试样。试验采用的渗透环刀规格为 φ 61.8 mm×H40 mm, 为确保环刀内壁与试样形成密封, 要在环刀内壁上涂抹一层薄的凡士林, 以免其成为主要的渗流通道。为避免破坏黄土原生结构, 在样品制作过程中尽量施力轻且均匀, 并保证样品两侧切剖面平整。

2 含渐变带天然黄土渗透特性

采用室内变水头渗透试验, 利用 TST-55 型变水

头渗透仪测定 3 个土层的饱和和渗透系数。试样的各向异性渗透方向如图 3 所示, 渗透环刀规格 φ 61.8 mm×40 mm, 试验用水为煮沸脱气的蒸馏水。试验时, 先在一定水头作用下静置一段时间, 待出水口有水溢出且无气泡排出时, 开始记录试验数据。渗透试验持续 5 h, 每小时进行 5 次测量并计算 1 个渗透系数值。渗透系数 k 可依据达西定律计算得到, 如下式所示:

$$k = \frac{al}{Ft} \ln \frac{h_1}{h_2} = \frac{2.3al}{Ft} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

式中: a 为储水管的截面积 (cm²); l 为渗流路径的长度 (cm); F 为试样的截面积 (cm²); h_1, h_2 为起始和终止水头高度 (cm); t 为试验计算时长 (s); 2.3 为 \ln 与 \lg 的换算系数。本研究中: 储水管的截面积为 0.785 cm², 渗流路径的长度为 4 cm, 试样的截面积为 30 cm², 试验计算时长为 1 h。

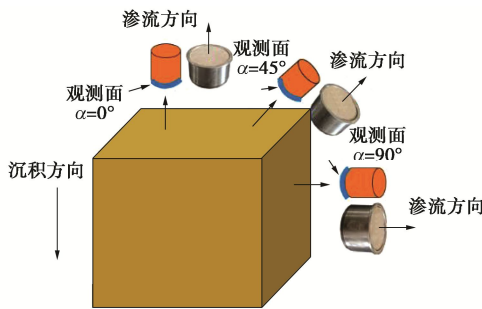


图 3 渗流方向与观测面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of seepage direction and observation plan

根据沉积方向与渗流方向的关系, 可以把土层的饱和和渗透系数分别定义为 k_0, k_{45}, k_{90} , 各土层不同方向渗透系数随渗透时间的变化如图 4 所示。

图 4 中可见, 在相同试验条件下, 所得各土层的渗透系数大小关系为 S18>L19>S18_z。渗透系数的各向异性在渗流初期表现最为明显, 3 个土层均表现为 $k_0 > k_{45} > k_{90}$ 。随渗流时间的增长, 各土层渗透系数表现出不断衰减的规律, 衰减速率 S18>L19>S18_z。各土层渗透系数的衰减速率具有各向异性, 表现为方向角越大, 衰减速率越慢。由此可知, 渗透系数沿沉积方向最大, 沿垂直沉积方向最小; 渗透性能弱化速率同样沿沉积方向最大, 沿垂直沉积方向最小。在 3 个土层中, 渐变带 S18_z 土层的渗透系数最小, 由此易在 S18 与 S18_z 土层的接触带形成一个相对阻水层, 水分

在此处累积, 导致含水率提高, 土层产生弱化, 稳定性降低。因此需要加强对土层渐变带的关注, 预防沿渐变带产生滑坡灾害。

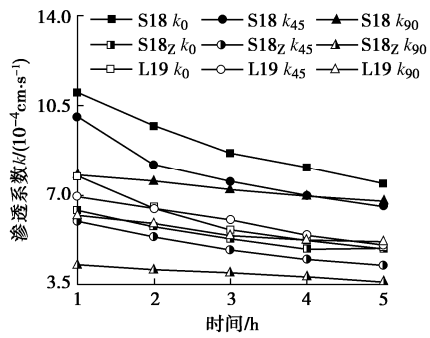


图 4 饱和渗透系数随时间变化图

Fig. 4 Variation of permeability coefficient of saturation with time

在本研究中, 黄土垂直向渗透系数大于水平向, 可能与黄土中存在的连通的垂直微结构有关, 这些结构会形成优势的渗流通道^[28-29]。在渗流初期, 黄土结构较完整, 孔隙和颗粒分布均匀, 且存在的孔隙多为大孔隙, 渗透系数较大, 随着渗透的持续进行, 黄土中的可溶盐和可溶性胶结物发生溶解或溃散, 加之渗透力的作用, 让本来附着在土骨架上的细小颗粒发生转移、流失, 堵塞了主要渗流通道的关键节点, 导致渗流通道更加迂回曲折, 且堆积起来的细小颗粒增强了对水流的黏滞作用, 使饱和渗透系数不断衰减^[30], 而且垂直向的衰减速率显著高于水平向, 使得垂直与水平方向渗透系数的差距逐渐减弱, 在长期渗流作用下水平向渗透系数可能会达到或反超垂直向。由于土中细小颗粒随渗流的持续进行会发生渗透压密, 渗透系数随时间的变化幅度趋缓(图 4), 其中渗透压密所产生的机制学者已经做出了解释^[31]。对于古土壤层(S18)的渗透系数大于黄土层(L19)的现象, 也有合理解释, 主要体现在两个方面。首先, 黄土层(L19)形成于古土壤层(S18)之前, 经历了更长时间的压实作用, 由此可导致黄土层的渗透系数小于上覆临近古土壤层的渗透系数; 再者, Q₁时代的黄土致密, 与 Q₂ 和 Q₃ 时期疏松多孔的黄土不同, 一般不具有湿陷性, 渗透性也与其它时代的土层有着显著差异。

各土层渗透各向异性特征不可忽略, 为了确定各土层渗透系数的各向异性变化规律, 定义 $r_{\alpha} = k_{\alpha} / k_0$ 为

渗透各向异性率^[12], 其中 α 为渗流方向与沉积方向的夹角, k_{α} 为某一夹角下的渗透系数。因此, r_{α} 即表示为 α 角度下渗透系数与 0° 时渗透系数的比值。各土层 r_{α} 随时间的变化如图 5 所示。

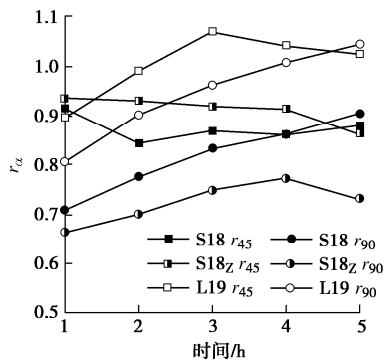


图 5 各土层渗透系数的各向异性率

Fig. 5 Anisotropic rates of permeability coefficient of soil layers

由图 5 可以看出, 整体上, 各土层的渗透各向异性率随时间增长表现为逐渐趋近, 表明渗透各向异性程度逐渐减弱, 而且各土层渗透各向异性的弱化过程均非单调变化, 而是具有较为复杂的表现。由此可说明, 黄土的渗透性在各方向上的衰减过程存在差异, 体现了黄土内部复杂的渗流路径和物质变化。而且 S18_Z 土层的各向异性率随渗流的持续进行又表现出逐渐趋远的现象, 这表明渐变带土层处水分不易流出, 容易产生失稳。

3 含渐变带天然黄土微观结构特征

3.1 微观结构定性分析

为了解各土层在不同渗流方向上的微观结构表现, 分别在 0°, 45°, 90° 渗流方向上对土体微观结构进行电镜显微观测, 各观测面选择如图 3 所示。微观结构测试样品大小为 8 mm×8 mm×8 mm, 采用 FEI Quanta 450 型环境扫描电子显微镜(ESEM)对试样进行观察, 分别获取放大 500, 800, 1000 倍的微观图像各 3 张。本研究中, 选取放大 500 倍的 3 张图片进行微观结构定量分析。采用 PCAS 软件, 对获取的 SEM 图像进行二值化处理, 调整原始图像的亮度和对比度, 选择合适的灰度值, 自动提取孔隙和颗粒, 处理过程见图 6, 结果见表 2。

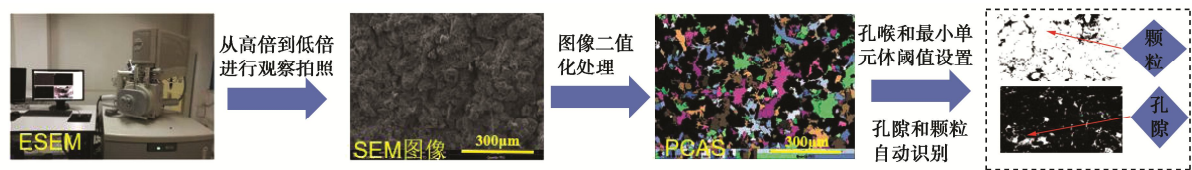


图6 微观图像处理流程图

Fig. 6 Flow chart of microscopic image processing

表 2 不同角度下部分微观图像的二值化处理

Table 2 Binarization processing diagrams of partial microscopic images under different observation angles

土层	孔隙			颗粒		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°
S18						
S18z						
L19						

3.2 微观结构参数定量分析

微观结构参数是定量评价黄土各向异性微观特征的重要指标，是建立黄土微观结构与渗透性能关系的纽带。本研究中涉及的微观结构参数同时包括了颗粒和孔隙的特征参数，相关参数的定义和算法如下：

(1) 形状系数 F

形状系数定义为等价圆周长与实际周长的比值，可以定量描述颗粒和孔隙的形态，是描述单元体形状圆润程度的定量参数^[23]。计算方法如下：

$$F_i = C_c / S_a \quad , \quad (2)$$

$$F = \sum_{i=1}^x \frac{F_i}{x} \quad . \quad (3)$$

式中： F_i 为单元体的形状系数； F 为平均形状系数； C_c 为单元体等面积圆周长； x 为孔隙或颗粒单元体的个数； S_a 为孔隙或颗粒的实际周长。 F 值为0~1，且 F 值越接近于1，单元体越倾向于圆形。

(2) 形态分维数 D

为了量化单元体微观形态的分布，Moore 等^[32]提出了基于等效周长和等效面积计算形态分维数，可以用来反映微观结构粗糙复杂程度，将其定义为

$$\lg P = \frac{D}{2} \lg A + C \quad . \quad (4)$$

式中： P 为单元体的等效周长； A 为单元体的等效面积； C 为拟合常数。 D 越大，土体结构越复杂，土体的团粒化程度越低。

(3) 概率熵 H_m

为了反映单元体的有序性，从现代信息系统中引进一个指标——概率熵，是根据结构单位体在某一方位区上出现的概率进行计算^[24]，具体定义如下：

$$H_m = - \sum_{i=1}^m P_i \lg_m P_i \quad . \quad (5)$$

式中： m 即为在单元体排列方向[0~N]上等分的方位区数， P_i 为结构单元体在某一方位区中呈现的概率。

H_m 取值在0~1，值越接近于0，其有序性越高。

(4) 孔隙度 n_m

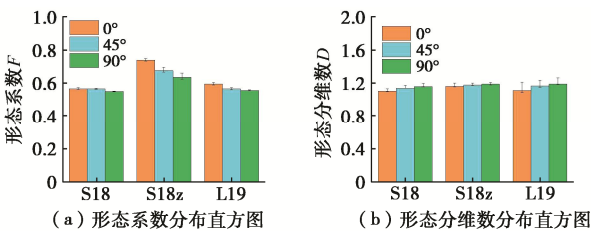
定义为视域内有效孔隙面积与土颗粒面积的比值，可以说明单元体的密实程度，计算公式如下：

$$n_m = \frac{G_n}{G_T} \quad . \quad (6)$$

式中： G_n 为有效孔隙面积； G_T 为视域内的颗粒面积。

根据上述微观结构参数计算方法，计算各土层不同观测方向下的微观结构参数。由于本研究是针对不同观测条件下3张500倍的平行图像进行分析，因此得到的是微观结构参数的范围值，结果如图7,8所示，数据范围以误差柱的形式表示。

由图7可知，除概率熵外，孔隙的其他3种结构参数均表现出各向异性特征，且孔隙度的各向异性特征最为显著。随着观测角的增大，各土层孔隙的圆度减弱，粗糙起伏程度减小，孔隙度显著降低，而孔隙在空间上的排列一直处于混乱、无序的状态。根据各土层孔隙结构参数的大小关系，可以发现S18z土层的孔隙度明显低于S18和L19，孔隙的形状系数 F 略大于S18和L19，而形态分维数 D 和概率熵 H_m 与S18和L19无显著差别。由此可以说明，渐变带土的孔隙度大大降低，且孔隙形态更加趋近于圆形。图8中，颗粒的结构参数中除概率熵外同样具有各向异性特征，随观测角度的增大， F 呈逐渐减小趋势， D 呈逐渐增大趋势，而 H_m 则保持基本不变。由此说明，随观测角度的增大，各土层颗粒形态的圆度减弱，粗糙起伏程度增大，颗粒排列呈现无序性。



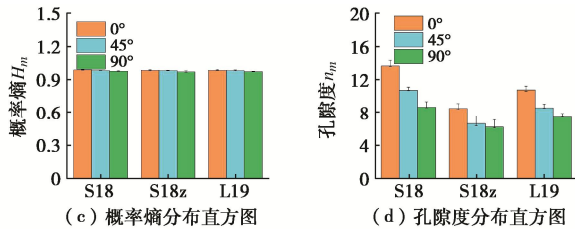


图7 孔隙微观参数分布直方图

Fig. 7 Histogram of distribution of microscopic parameters of pores

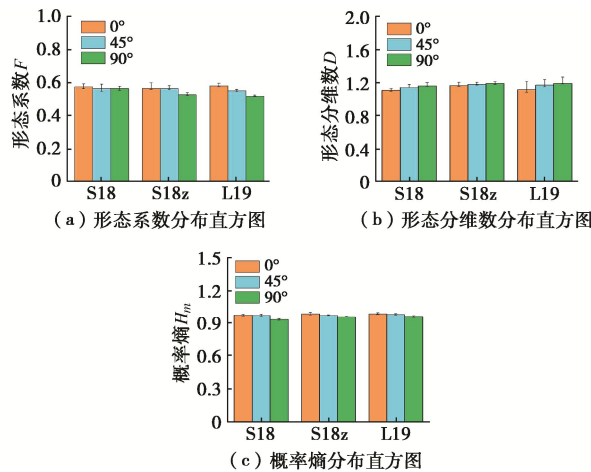


图8 颗粒微观参数分布直方图

Fig. 8 Histogram of microscopic parameter distribution of particles

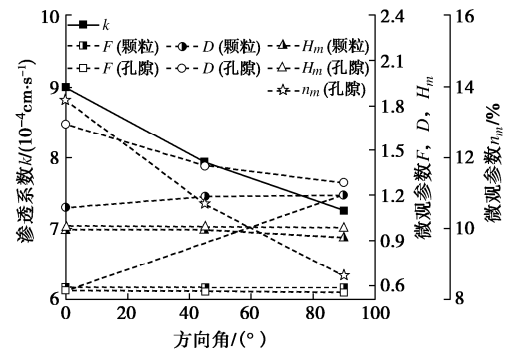
4 微观结构对渗透性能的影响

微观结构影响土的渗透特性, 可用于揭示渗透各向异性现象产生的原因。结合各土层孔隙和颗粒的微观结构参数与渗透系数, 分析微观结构对含渐变带天然黄土渗透各向异性的影响, 其中渗透系数采用 5 个小时的平均值, 结果如图 9 所示。

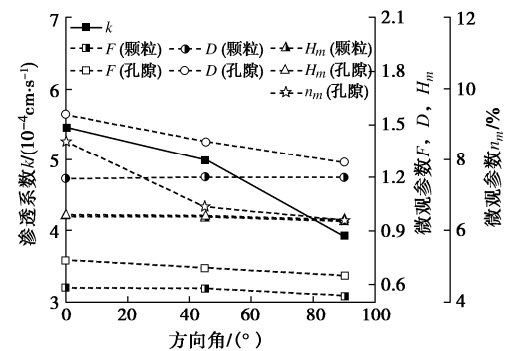
由图 9 可知, 各土层渗透系数与微观结构参数之间整体上表现出较为紧密的关联性。3 土层的渗透系数与相对应的孔隙度 n_m 、孔隙的形状系数 F 、形态分维数 D 、概率熵 H_m 以及颗粒的 F 、 H_m 均呈正相关关系, 而与颗粒的形态分维数 D 呈负相关关系。

孔隙作为水、气渗流的主要通道, 控制着多孔材料的渗透过程, 是影响其渗透性能最为关键的因素, 并且表现出典型的正相关关系。对于孔隙的形态分维数 D , D 值越大, 土中孔隙边界形态越复杂, 对水的黏滞度越大, 越不利于水的渗流, 因此与渗透系数呈负相关关系。由于孔隙度对渗透系数的影响远超形态分维数, 因此在图 9 中, 形态分维数与渗透系数的负相关关系并没有表现出来。对于孔隙和颗粒的 F 与渗透系数所呈现的正相关关系, 主要是孔隙的狭长形态

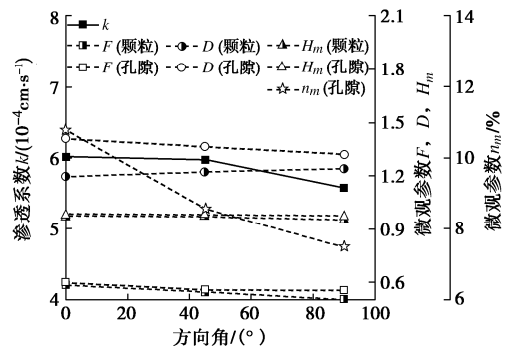
会引起渗流不通畅^[23], 因此孔隙形态越趋近于圆, 渗透系数表现越大。



(a) S18 土层渗透系数与微观参数的关系



(b) S18z 土层渗透系数与微观参数的关系



(c) L19 土层渗透系数与微观参数的关系

图9 微观结构参数与渗透系数关系

Fig. 9 Relationship between microstructure parameters and permeability coefficients

为进一步定量评价各微观结构参数对渗透各向异性的影响程度, 运用主成分分析法分析各微观参数对渗透系数的影响^[33], 其处理过程如图 10, 得到各微观参数的影响权重如表 3。

由主成分分析法结果可见, 各土层微观结构参数对渗透系数的影响具有差异性, 整体上, 孔隙微观结构参数对渗透系数的影响性要大于颗粒微观结构参数。各微观结构参数对 3 个土层渗透系数的影响程度大小关系基本表现为 $n_m > F(\text{孔隙}) > F(\text{颗粒}) > D(\text{孔隙}) > D(\text{颗粒}) > H_m(\text{孔隙}) \approx H_m(\text{颗粒})$ 。在微观结构参数中, 孔隙度是决定渗透性能最关键的

因素，其对渗透性能的贡献度大约可达到 30%，远大于其它参数，同时也进一步证明了概率熵不是渗透各向异性的主因。

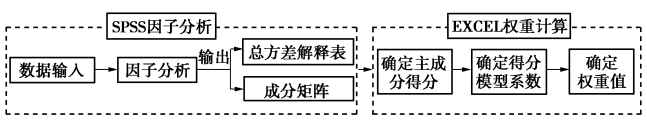


图 10 主成分分析法流程图

Fig. 10 Flow chart of principal component analysis

表 3 微观参数影响性权重

Table 3 Influencing weights of microscopic parameters

评价因子	孔隙				颗粒			
	<i>F</i>	<i>D</i>	<i>H_m</i>	<i>n_m</i>	<i>F</i>	<i>D</i>	<i>H_m</i>	
权重	S18	20%	14%	7%	27%	18%	11%	6%
	S18z	18%	13%	8%	28%	16%	9%	8%
	L19	20%	13%	7%	26%	19%	7%	6%

5 讨 论

5.1 饱和渗透系数演化机理

黄土作为一种特殊土，其饱和渗透系数随渗流时间发生快速减小具有普遍性。但也有学者发现由于渗透初期较小的渗流力会促进形成较强的渗流通道，渗透系数会发生短暂增大的现象^[34]。总结以往研究成果，渗透系数普遍减小现象的产生主要有以下 3 方面的原因^[9, 26, 29]。①渗流过程中黄土粒度组分的变化：受崩解作用影响，渗流过程中细颗粒增多、粗颗粒减少，增加的细颗粒物质填充颗粒间孔隙使黄土结构变得密实；黏土颗粒易吸水膨胀，且膨胀的土粒在周围受到刚性限制的条件下只能向粒间孔隙发展。②渗流过程中颗粒的迁移：附着在骨架上的细小颗粒在渗透力的作用下运移、流失，堵住了优势渗流通道的孔喉，增长了水流路径，加大了土与水的接触面积，增强了对水流的黏滞作用。③渗流过程中可溶物的流失：可溶盐的流失导致颗粒边缘胶结物质约束消失，颗粒间发生相对移动，使颗粒结构变得紧密，渗透各向异性减弱。本研究中所针对的 Q₁ 黄土湿陷性基本丧失，相比中更新世和晚更新世黄土，其渗透系数降低的幅度较小。本研究中 Q₁ 黄土 5 h 内渗透系数降低约 13%~36%，而 Q₂ 和 Q₃ 黄土在 5 h 内的减小量较大，甚至可以达到 70% 以上^[9, 35]。

渐变带土层渗透系数明显较小，一方面是渐变带土层的孔隙度大大降低，孔隙连通性较弱；另一方面，渐变带土层黏土矿物的含量与古土壤层、黄土层相比相对较多，黏土矿物阻碍了土体垂直孔隙的连通性。王力等^[36]指出渗透系数与黏粒含量呈显著的指数函数负相关关系，且相关系数都在 0.9 以上。而渐变带土层黏粒含量最多，容易形成黏土薄膜，减小孔隙的有效半径，造成孔隙吼道的堵塞，使渗透系数降低。

5.2 微观结构对渗透特性的控制机理

孔隙度是影响渗透的主导因素，尤其是大孔隙，因为水流优先通过孔隙率高、连通性好的超大孔隙^[26, 37]。结合微观图像可以发现，垂直向的孔隙度发育均大于水平向，这也是垂直渗透系数大于水平渗透系数的直接原因。

颗粒和孔隙的形状系数具有密切的关联，颗粒形状的不规则可导致孔隙结构的不规则。郑颖人^[38]指出，颗粒形状会影响颗粒之间的接触关系和填充关系，进而影响孔隙的形状和大小，改变其中水流运动。形状系数越小，单元体的形状越狭长，大孔隙数量越少，渗流通道越小，不利于水流通过。尤其是经历渗透作用后，附着的碎屑逐渐脱离颗粒，使得颗粒形态由球状向不规则状转变，土体的孔隙由更加偏向圆滑状转变为更加偏向狭长状，表现出大孔结构逐渐消失。

形态分维数的大小表征土体微观孔隙或颗粒的复杂程度。孔隙形态分维数和颗粒形态分维数具有一定的关联性，孔隙分维数越大，土颗粒的团粒化程度越低。研究表明，随着孔隙分形维数的增大，微观孔隙越不规则，表面越粗糙，渗流阻力增大，渗透率减小；颗粒形态分维数越大，颗粒表面起伏程度越大^[32]，使得孔隙结构不规则、分布不均匀，过水通道变得狭窄，同样降低渗透系数。

本研究中各土层孔隙和颗粒的概率熵值均较大且相差不大，说明所研究对象的微观结构排列不规则，定向性差，并且不是渗透差异性的主要诱因。

6 结 论

本文针对含渐变带黄土渗透各向异性，结合土体微观结构定量化，分析了不同土层渗透各向异性与孔隙度 *n_m*、形状系数 *F*、形态分维数 *D*、概率熵 *H_m* 等土体微观参数的关系，得到以下 4 点结论。

(1) 除概率熵外，含渐变带黄土微观结构参数表现出各向异性特征，相对于相邻土层，渐变带土的孔隙度显著降低，孔隙形态更加趋近于圆形。

(2) 各土层渗透系数大小关系为 S18>L19>S18z，渗透系数沿沉积方向最大，沿垂直沉积方向最小。各土层渗透性能随渗流时间增长逐渐弱化，弱化速率沿沉积方向最大，沿垂直沉积方向最小。

(3) 各微观结构参数对 3 个土层渗透系数的影响程度大小表现为 *n_m*>*F*（孔隙）>*F*（颗粒）>*D*（孔隙）>*D*（颗粒）>*H_m*（孔隙）≈*H_m*（颗粒），孔隙度是决定渗透性能最关键的因素，其对渗透性能的贡献度大约可达 30%。

(4) 各土层渗透性具有明显差异，渐变带土层渗

透系数最小, 水分易在此处发生积累, 导致含水率提高, 形成弱化带, 降低土体稳定性, 因此需特别关注。

参考文献:

- [1] HOU K, QIAN H, ZHANG Y T, et al. Seepage mechanisms and permeability differences between loess and paleosols in the critical zone of the Loess Plateau[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021, **46**(10): 2044-2059.
- [2] LU J, WANG T H, CHENG W C, et al. Permeability anisotropy of loess under influence of dry density and freeze-thaw cycles[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, **19**(9): 04019103.
- [3] LAN H X, PENG J B, ZHU Y B, et al. Research on geological and surfacial processes and major disaster effects in the Yellow River Basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, **65**(2): 234-256.
- [4] LAN H X, TIAN N M, LI L P, et al. Poverty control policy may affect the transition of geological disaster risk in China[J]. *Humanities and Social Sciences Communications*, 2022, **9**(1): 1-7.
- [5] LAN H X, ZHAO X X, MACCIOTTA R, et al. The cyclic expansion and contraction characteristics of a loess slope and implications for slope stability[J]. *Scientific Reports*, 2021, **11**(1): 2250.
- [6] BAO H, LIU C Q, LAN H X, et al. Time-dependency deterioration of polypropylene fiber reinforced soil and guar gum mixed soil in loess cut-slope protecting[J]. *Engineering Geology*, 2022, **311**: 106895.
- [7] 包 含, 马扬帆, 兰恒星, 等. 基于微结构量化的含渐变带黄土各向异性特征研究[J]. *中国公路学报*, 2022, **35**(10): 88-99. (BAO Han, MA Yangfan, LAN Hengxing, et al. Anisotropic characteristics of loess with gradation zone based on microstructure quantification[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, **35**(10): 88-99. (in Chinese))
- [8] WANG W, WANG Y, SUN Q M, et al. Spatial variation of saturated hydraulic conductivity of a loess slope in the South Jingyang Plateau, China[J]. *Engineering Geology*, 2018, **236**: 70-78.
- [9] 洪 勃, 李喜安, 王 力, 等. 延安 Q₃ 原状黄土渗透各向异性及微结构分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019, **49**(5): 1389-1397. (HONG Bo, LI Xian, WANG Li, et al. Permeability anisotropy and microstructure of Yan'an Q₃ loess[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, **49**(5): 1389-1397. (in Chinese))
- [10] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. (LIU Zudian. *Loess Mechanics and Engineering*[M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [11] 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和原状和重塑 Q₃ 黄土渗水特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(6): 1020-1027. (YAO Zhihua, CHEN Zhenghan, HUANG Xuefeng, et al. Hydraulic conductivity of unsaturated undisturbed and remolded Q₃ loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(6): 1020-1027. (in Chinese))
- [12] CHAN H T, KENNEY T C. Laboratory investigation of permeability ratio of new Liskeard varved soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1973, **10**(3): 453-472.
- [13] HONG B, LI X, WANG L, et al. Temporal variation in the permeability anisotropy behavior of the Malan loess in northern Shaanxi Province, China: an experimental study[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, **78**(15): 1-12.
- [14] 王铁行, 杨 涛, 鲁 洁. 干密度及冻融循环对黄土渗透性的各向异性影响[J]. *岩土力学*, 2016, **37**(增刊 1): 72-78. (WANG Tiehang, YANG Tao, LU Jie. Influence of dry density and freezing-thawing cycles on anisotropic permeability of loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(S1): 72-78. (in Chinese))
- [15] 张 昭, 刘奉银, 齐吉琳, 等. 基于孔隙连通-迂曲参数表征土的非饱和渗透各向异性[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(增刊 1): 147-152. (ZHANG Zhao, LIU Fengyin, QI Jilin, et al. Representation of anisotropy in unsaturated permeabilities for soils based on pore connectivity-tortuosity parameter[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(S1): 147-152. (in Chinese))
- [16] 兰恒星, 周成虎, 伍法权, 等. GIS 支持下的降雨型滑坡危险性空间分析预测[J]. *科学通报*, 2003, **48**(5): 507-512. (LAN Hengxing, ZHOU Chenghu, WU Faquan, et al. Spatial analysis and prediction of rainfall landslide risk supported by GIS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(5): 507-512. (in Chinese))
- [17] LI X, LI L C, SONG Y X, et al. Characterization of the mechanisms underlying loess collapsibility for land-creation project in Shaanxi Province, China—a study from a micro perspective[J]. *Engineering Geology*, 2019, **249**: 77-88.
- [18] 张宗祜. 我国黄土类土显微结构的研究[J]. *地质学报*, 1964, **38**(3): 357-369, 375. (ZHANG Zonghu. Study on microstructure of loess soil in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1964, **38**(3): 357-369, 375. (in Chinese))
- [19] 高国瑞. 中国黄土的微结构[J]. *科学通报*, 1980, **25**(20): 945-948. (GAO Guorui. Microstructure of loess in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1980, **25**(20): 945-948. (in Chinese))
- [20] 雷祥义. 西安黄土显微结构类型[J]. *西北大学学报(自然*

- 科学版), 1983, **13**(4): 56-65, 127. (LEI Xiangyi. Type of the loess microtextures in Xian district[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 1983, **13**(4): 56-65, 127. (in Chinese))
- [21] LAN H X, CHEN J H, MACCIOTTA R. Universal confined tensile strength of intact rock[J]. Scientific Reports, 2019, **9**(1): 6170.
- [22] BAO H, QI Q, LAN H X, et al. Sliding mechanical properties of fault gouge studied from ring shear test-based microscopic morphology characterization[J]. Engineering Geology, 2020, **279**: 105879.
- [23] 高 英, 马艳霞, 张吾渝, 等. 西宁地区不同湿陷程度黄土的微观结构分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, **17**(1): 65-73. (GAO Ying, MA Yanxia, ZHANG Wuyu, et al. Microstructure analysis of loess with different collapsibility in Xining area[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, **17**(1): 65-73. (in Chinese))
- [24] 施 斌. 黏性土击实过程中微观结构的定量评价[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(4): 57-62. (SHI Bin. Quantitative assessment of changes of microstructure for clayey soil in the process of compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(4): 57-62. (in Chinese))
- [25] WITT K J, BRAUNS J. Permeability-anisotropy due to particle shape[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, **109**(9): 1181-1187.
- [26] XU P P, ZHANG Q Y, QIAN H, et al. Investigation into microscopic mechanisms of anisotropic saturated permeability of undisturbed Q₂ loess[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, **79**(18): 1-13.
- [27] LI X A, LI L C. Quantification of the pore structures of Malan loess and the effects on loess permeability and environmental significance, Shaanxi Province, China: an experimental study[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, **76**(15): 1-14.
- [28] XU P P, ZHANG Q Y, QIAN H, et al. Microstructure and permeability evolution of remolded loess with different dry densities under saturated seepage[J]. Engineering Geology, 2021, **282**: 105875.
- [29] BAO H, TANG M, LAN H X, et al. Soil erosion and its causes in high-filling body: a case study of a valley area on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 2023, **20**(1): 182-196.
- [30] 李喜安, 洪 勃, 李林翠, 等. 黄土湿陷对渗透系数影响的试验研究[J]. 中国公路学报, 2017, **30**(6): 198-208, 222. (LI Xian, HONG Bo, LI Lincui, et al. Experimental research on permeability coefficient under influence of loess collapsibility[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, **30**(6): 198-208, 222. (in Chinese))
- [31] 李喜安, 黄润秋, 彭建兵, 等. 关于物理潜蚀作用及其概念模型的讨论[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(6): 880-886. (LI Xi'an, HUANG Runqiu, PENG Jianbing, et al. Establishment of conceptual models of physical sub-ground erosion[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(6): 880-886. (in Chinese))
- [32] MOORE C A, DONALDSON C F. Quantifying soil microstructure using fractals[J]. Géotechnique, 1995, **45**(1): 105-116.
- [33] 王玉涛, 刘小平, 曹晓毅. 基于主成分分析法的Q₂黄土湿陷特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, **47**(4): 141-148. (WANG Yutao, LIU Xiaoping, CAO Xiaoyi. A study of the collapsibility of Q₂ loess based on principal component analysis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, **47**(4): 141-148. (in Chinese))
- [34] 刘 颖. 黄土的渗透性[M]// 黄土基本性质的研究, 北京: 科学出版社, 1961. (LIU Ying. Permeability of loess[M]// Study on Basic Properties of Loess, Beijing: Science Press, 1961. (in Chinese))
- [35] WANG L, LI X, ZHENG Z Y, et al. Analysis of the slope failure mechanism a under tunnel erosion environment in the south-eastern Loess Plateau in China[J]. Catena, 2022, **212**: 106039.
- [36] 王 力, 李喜安, 何 军, 等. 不同黏粒含量对黄土渗透系数影响的试验研究[J]. 水土保持通报, 2018, **38**(2): 95-101. (WANG Li, LI Xian, HE Jun, et al. Experimental study on permeability coefficient of loess with different clay content[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, **38**(2): 95-101. (in Chinese))
- [37] JU X N, JIA Y H, LI T C, et al. Morphology and multifractal characteristics of soil pores and their functional implication[J]. Catena, 2021, **196**: 104822.
- [38] 郑颖人. 岩土塑性力学的新进展: 广义塑性力学[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(1): 1-10. (ZHENG Yingren. New development of geotechnical plastic mechanics: generalized plastic mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(1): 1-10. (in Chinese))