

doi: 10.12029/gc20210317

洪勃, 李喜安, 王力, 孙建强, 简涛, 孟杰. 2021. 延安晚更新世黄土颗粒微观各向异性特征及其成因分析[J]. 中国地质, 48(3): 900–910.  
Hong Bo, Li Xi'an, Wang Li, Sun Jianqiang, Jian Tao, Meng Jie. 2021. Microscopic anisotropy and genesis of Late Pleistocene loess particles in Yan'an[J]. Geology in China, 48(3): 900–910(in Chinese with English abstract).

## 延安晚更新世黄土颗粒微观各向异性特征 及其成因分析

洪勃<sup>1,2</sup>, 李喜安<sup>1</sup>, 王力<sup>1</sup>, 孙建强<sup>1</sup>, 简涛<sup>3</sup>, 孟杰<sup>4</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 4. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 土颗粒的形状及其空间方位的择优取向是导致宏观土体各向异性的重要原因之一。以具有明显各向异性的晚更新世马兰黄土为研究对象, 借助 Quanta FEG 型电子显微镜扫描照片所包含的相关信息, 揭示其微结构在水平向和垂直向上的差异, 并对该微观结构的各向异性成因进行了分析。发现: (1) 水平向和垂直向切片中颗粒的圆弧度  $R_c$  具有正态分布特征, 无论垂直向还是水平向土壤颗粒均以次圆形、圆形和非常圆颗粒为主。(2) 水平方向切片中颗粒的方位角具有一定的 WN-ES 的优势方向, 而垂直向切片中土颗粒的长轴有与地面平行的优势取向, 且埋深越深这种趋势越明显。(3) 水平切片中土颗粒的各向同性性质更为显著, 而垂直向切片中颗粒的各向异性性质更为突出, 且随埋深的增加, 各向异性增强。(4) 水平向和垂直向切片中颗粒总的概率分布基本表现为随机分布, 粉粒在数量上占绝对优势是导致这种无序分布的重要原因, 相对于粉粒而言细砂则可在一定程度上体现其排列具有方向性。分析表明, 颗粒的方位角和各向异性率对黄土微观各向异性具有较好的指示作用。同时, 颗粒的方向性对黄土高原的古气候也具有重要研究意义。

**关键词:** 黄土; 微观各向异性; 圆度; 方位角; 各向异性率; 概率熵; 岩土工程; 延安; 陕西

**中图分类号:** P642.13<sup>+</sup>1; P534.63<sup>+</sup>1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2021)03-0900-11

## Microscopic anisotropy and genesis of Late Pleistocene loess particles in Yan'an

HONG Bo<sup>1,2</sup>, LI Xi'an<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, SUN Jianqiang<sup>1</sup>, JIAN Tao<sup>3</sup>, MENG Jie<sup>4</sup>

(1. College of geological engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430071, Hubei, China; 4. Faculty of Engineering, China University of Geoscience (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China)

**Abstract:** The shape and dominant spatial orientation of soil particles are the important cause of macroscopic soil anisotropy. Based

收稿日期: 2018-9-14; 改回日期: 2019-09-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41572264, 41877225)、中央高校基本科研业务费专项资金—长安大学优秀博士学位论文培育资助项目(300102268717)联合资助。

作者简介: 洪勃, 男, 1987年生, 博士, 工程师, 主要从事地质灾害调查及防灾减灾研究; E-mail: hongbo@chd.edu.cn / 382492004@qq.com。

通讯作者: 李喜安, 男, 1968年生, 博士, 教授, 主要从事黄土工程地质方面的研究和教学; E-mail: dclixa@chd.edu.cn。

on Quanta FEG scanning electron micrograph, the late Pleistocene Malan loess with obvious anisotropy was studied to reveal the difference of the microstructure in the horizontal and vertical directions and the anisotropic cause of the microstructure. The results show that the roundness  $R_0$  of the particles in the horizontal and vertical slices has normal distribution characteristics. Subcircular, circular and very circular particles are the main types of soil particles in both vertical and horizontal directions. The azimuth of the particles in the horizontal slice has a certain dominant direction of WN-ES, while the long axis of the soil particles in the vertical slice has the dominant orientation parallel to the ground, and the deeper the buried depth is, the more obvious the trend is. The isotropic nature of the soil particles in the horizontal section is more significant, while the anisotropic properties of the particles in the vertical section are more prominent, and the anisotropy increases with the buried depth. The total probability distribution of particles in horizontal and vertical slices is basically disordered. The quantitative advantage of the particles is a major reason for this disordered distribution. Compared with the fine particles, fine sand, to some extent, has the preference of a certain orientation in alignment. The analysis shows that the azimuth and anisotropy of the particles have a good indication to microscopic anisotropy of the loess. At the same time, the direction of particles also is of significance for the study of paleoclimate of the Loess Plateau.

**Key words:** loess; microscopic anisotropy; roundness; azimuth distribution; anisotropy index; probability entropy; geotechnical engineering; Yanan; Shaanxi Province

**About the first author:** HONG Bo, male, born in 1987, Ph.D, engaged in geo-hazards investigation and disaster prevention and mitigation research; E-mail:hongbo@chd.edu.cn / 382492004@qq.com.

**About the corresponding author:** LI Xi'an, male, born in 1968, Ph.D, professor, engaged in the research and teaching of loess engineering geology; E-mail:dclixa@chd.edu.cn.

**Fund support:** Funded by the National Natural Science Foundation of China (No.41572264, 41877225) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, CHD (No. 300102268717).

## 1 引言

黏土颗粒团聚体及其微观结构的择优取向是导致土体宏观物理性质表现出各向异性的重要原因。因此,从微观来研究土颗粒团聚体的择优取向也是了解土的宏观各向异性性质的一个重要的视角。尽管诸多研究人员尝试定量描述颗粒团聚体的择优取向问题,但直到 Tovey (1980, 1989)给出了一个定量评估土颗粒团聚体取向的指标—各向异性指数( $I_a$ ),土颗粒团聚体的微观各向异性才有了一个具体的量化指标。Shi et al. (1995)引入 Shannon 熵并提出了用于评价黏土微观组构单元体的有序性指标:概率熵/排列熵( $H_m$ )。至此,土的微观组构各向异性评价体系基本成形(我们且称之为 Tovey-Shi 评价系统)。Shi et al. (1998)也应用该评价系统对压实土微观组构的方向性及其在微观力学模型中的应用进行了评价。Wang et al. (2008)采用各向异性指数用于研究污染物阻隔材料以及路基压实黏土中的颗粒取向问题。Tang et al. (2012)对上海淤泥质黏土冻结前后微观孔隙的定向性进行了定量分析。Zhang et al. (2017)运用概率熵评价了西宁地区原状黄土强度各向异性与土颗粒定向排列的

微观机制。显然,土壤微观各向异性的 Tovey-Shi 评价系统是有助于进一步认识土壤宏观各向异性行为的。

然而中国黄土作为干旱—半干旱气候条件下形成的一种特殊黏土,在古气候的多次冷暖交替作用下,使得完整的黄土地层剖面具有鲜明的各向异性特征。其天然土层在沉积和固结过程中,土颗粒的取向和所形成的微观结构在空间上常呈现定向排列,这也是导致黄土的物理性质具有各向异性的重要原因。

尽管国内外众多研究学者对黄土的磁化率各向异性(孙继敏等, 1995; 王建力等, 1995; Zhang et al., 2010)、强度—变形各向异性(Yoshimine et al., 2005; 邵生俊等, 2014; 徐善常等, 2015)、渗透各向异性(洪勃等, 2019; Hong et al., 2019)开展了相关工作,也指出黄土宏观—细观尺度上的各向异性究其原因还是微观结构的异质性所导致的,但是多数关于宏观—细观尺度上各向异性的微观机理的认识却只停留在主观臆想的水平上,很少有依据微观尺度的定量数据等信息来论证或揭示该微观机理。为此,本文旨在通过黄土的 SEM 照片所包含的颗粒的圆形度、方位角、各向异性率和概率熵等定量数据

信息来描述黄土各向异性的微观特征,揭示黄土宏观—细观尺度上各向异性的微观本质,同时对黄土微观结构各向异性的成因进行探讨。

## 2 实验材料与方法

### 2.1 黄土基本性质

延安地处黄土高原中部(图1),黄土覆盖厚度大,地层连续。对于顶层的晚更新世马兰黄土,形成于距今5~100 ka,粒度成分以粉粒为主,土层厚度10~30 m。相比于更深层的午城、离石黄土,表层的风积马兰黄土仍处于欠固结状态,受固结扰动较少,土颗粒更多地继承了初始堆积时的形态。因此,笔者选取新近堆积的晚更新世马兰黄土来研究黄土微观各向异性特征及其成因。

试验所用黄土为Q<sub>3</sub>马兰黄土,取自延安新区I期工程挖山填沟挖方工程新鲜剖面,自地表以下2 m、4 m、6 m、8 m、10 m深度处人工切取土样,剖面所处的地貌单元类型为黄土残垣—梁。取样时,将土块削成圆柱形,用铁皮桶套上,并用罗盘标定方位,刻划在土样顶面并记录于试样标签之上。使用激光粒度分析仪测得土样的颗粒大小分布(图2),并按粒径进行分类(黏粒, <5 μm; 粉粒, 5~75 μm; 细砂, 75~250 μm; 中砂, 250~500 μm; 粗砂, >500 μm)。实验室测得土样的基本指标见表1。

### 2.2 微观试样制备与图像后处理

采用Li et al. (2020)的制备方法与流程制备准备微观试样,使用Quanta FEG扫描电子显微镜采集图像以备分析。使用ArcGIS的空间分析功能描绘

出SEM照片中的土颗粒,剔除照片边沿的不完整颗粒,统计出颗粒的数量、面积、周长、长轴长度、短轴长度以及方向角等参数(图3)。由于黏粒及胶粒数量受外界影响显著,其方向性已不具初始沉积状态,故不统计粒径5 μm以下的颗粒,所研究土样中没有达到粗砂粒径的颗粒。

## 3 结果与分析

### 3.1 圆度

圆度 $R_0$ 是一个形状因子,它是一种广泛使用的二维形状测量方法,也是表征颗粒形状的一个重要指标。颗粒的圆度是所有沉积物的一种物理性质,取决于棱角的尖锐程度,它与颗粒形状无关。圆度还可以使我们能够了解颗粒在沉积之前所经过的距离,并且还可以指示构造扰动,因此,在确定沉积环境时(在无化石的情况下)颗粒的圆度是很有用的(Powers, 1953)。最早Cox(1927)根据三维物体球度的概念类推出了一个易于量测的二维圆度的定义,即圆度就是一个圆的面积与周长之比接近相同的程度,其计算式如下:

$$R_0 = \frac{4\pi A}{L^2} \quad (1)$$

式中 $A$ 为颗粒面积( $\mu\text{m}^2$ ); $L$ 为颗粒周长( $\mu\text{m}$ )。对于圆形,其圆度具有最大值 $R_0=1$ ;对于面积( $A$ )与周长( $L$ )比率较低的形状,如狭长状或薄片状或具有粗糙边缘形状,其圆度值均小于1(Arasan et al., 2011)。尽管采用圆度来描述颗粒形状已被广泛接受,但由于方法尚未标准化,因此也形成了许多圆

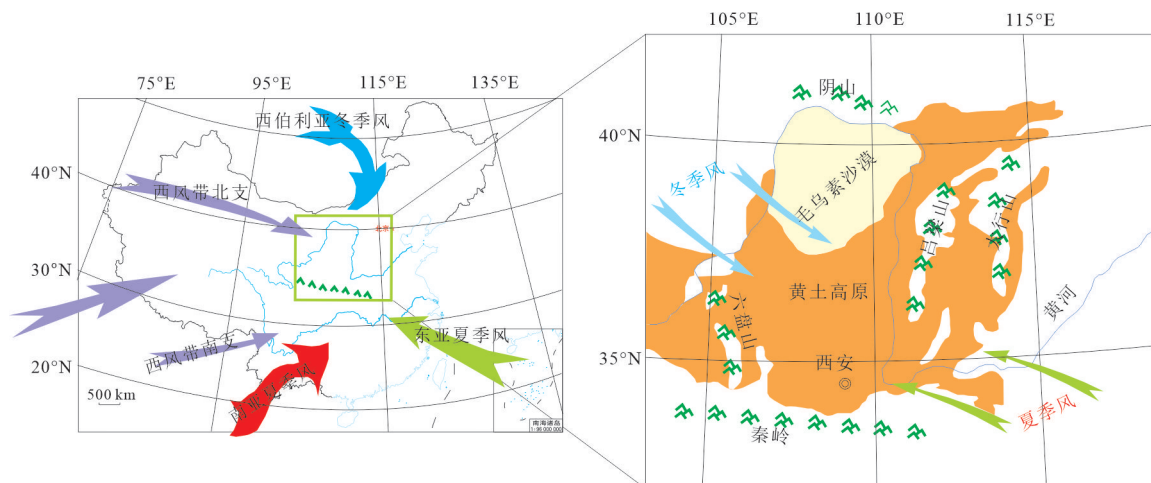


图1 黄土高原盛行风向及研究区域位置(据Zhang et al., 2010修改)

Fig.1 Prevailing wind direction of the Loess Plateau and location of the study area (modified from Zhang et al., 2010)

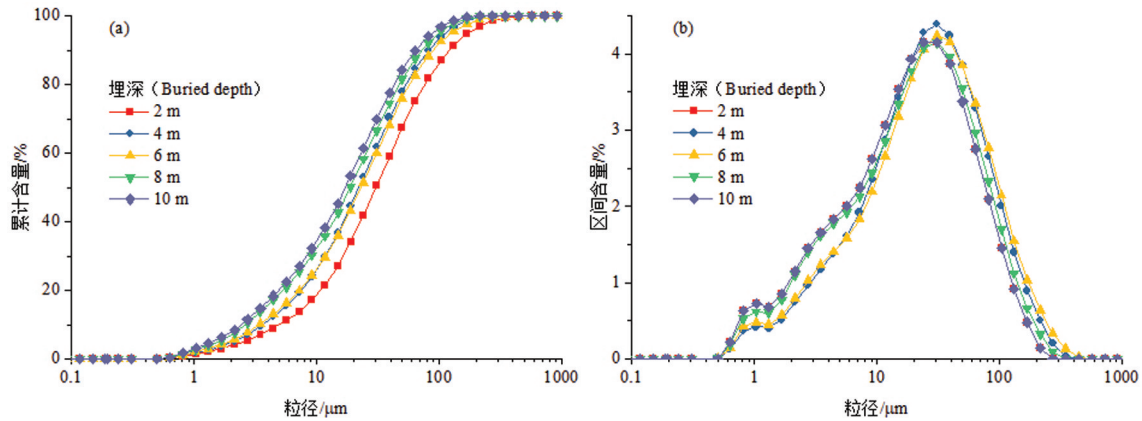


图2 颗分曲线  
Fig.2 Particle size distribution

度分类(表2)。Powers (1953)定义的六类颗粒圆度将被引入用于描述黄土的微观颗粒形状。

从图4可以看出,无论垂直向还是水平向土壤颗粒以次圆、圆形和极圆颗粒为主。水平方向上,随埋深的增加极棱角、棱角、次棱角颗粒含量变化不大,分别在2.5%、5%、10%左右,而次圆、圆形颗粒含量随埋深略微减少,极圆颗粒随埋深稍微增多。Zhang et al. (2017)研究也表明原状黄土颗粒的形态在平行于天然沉积面的方向上主要为圆形或椭圆形。在垂直方向上,随埋深的增加棱角和次棱角颗粒含量变化与水平向相似,含量也在5%和10%左右,极棱角和极圆颗粒含量逐渐降低,而次圆形和圆形颗粒随埋深逐渐增多。

### 3.2 方位角分布

在微观结构的定量信息中,反映微观单元体定向性的指标无论对于黄土的工程性质还是其生成原因都有着重要意义。由于单元体的定向方位在0~360°范围内为镜像对称,因此只要统计分析出单元体在0~180°中的方位就可以了。将0~180°以

10°为单位分为18个方位区,以某一方位内颗粒的频数来表示,可以分析出微观单元体在每个分区中定向程度,从而可以得到整个图像中单元体的定向分布,绘制出定向角分布玫瑰花图(图5)。

由所有深度上的垂直向的切片中颗粒的方向角玫瑰花图可以看出(图5),水平向颗粒的优选方向基本在130°~150°(N40°W~N60°W),而且这个范围内的概率也全部大于50%,虽然最大概率只达到56.82%,但这种在所有深度上均统一大于50%的现象,也十分可能是颗粒在沉积过程中遵循某种规律的表现。而垂直向显微照片的玫瑰花图很容易看出颗粒择优取向基本介于地平±45°范围内,且随着埋深的增加,压实作用的增强,这种取向性更加显著。

### 3.3 各向异性率 $I_a$

从图5定向角分布玫瑰花图来看,在0~360°上的定向角分布是镜像对称的,并呈椭圆形分布。为了反映土体微观结构整体定向性,Tovey (1980)提出了各向异性指数用于反映土壤组构的各向异性程度,并将各向异性指数定义为土壤组构定向分布玫瑰花图的最佳拟合椭圆的主轴、次轴的比值来反映土壤组构各向异性的程度( $D_{max}/D_{min}$ )。尽管该表示方法很简单方便,但是这个比值是开放区间,其范围为[1, +∞)。Tovey (1989)又将上述式子改进为(1- $D_{min}/D_{max}$ ),其范围为[0, 1]。而Shi et al. (1995, 1998)又将这个改进的式子表示成百分数的形式并用于研究黏土微观组构(颗粒或孔隙)的定向性分布。因此,各向异性率指标的定义如下:

$$I_a = \frac{R-r}{R} \times 100\% \quad (2)$$

表1 试验土样的基本情况  
Table 1 Basic properties of the soil samples

埋深 /m	天然含水率 W/%	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	相对密度 Gs	孔隙比 e	垂直切片	水平切片
2	12.92	1.667	2.71	0.836	5	5
4	14.83	1.81	2.71	0.719	5	5
6	15.67	1.826	2.71	0.717	5	5
8	16.13	1.872	2.71	0.681	5	5
10	15.87	1.904	2.71	0.649	5	5

注:\*引自文献 Powers (1953)。

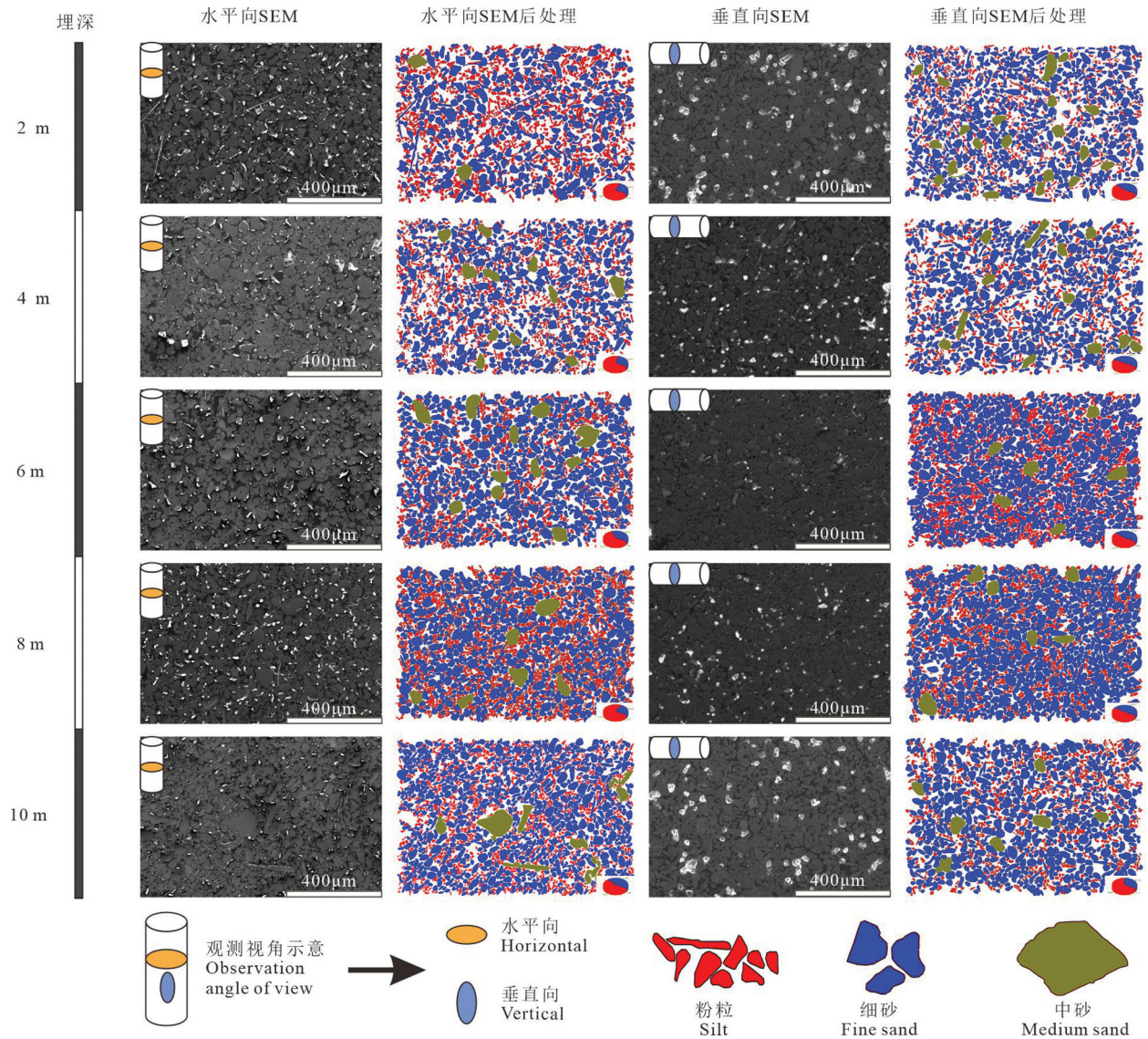


图3 SEM后处理图片

Fig.3 SEM photos and image post-processing

表2 颗粒圆度分类

Table 2 Classification chart for particle shapes

圆度等级 (Roundness Grade)	次生颗粒 (Unnatural Particles)	极棱角 (Very angular)	棱角 (Angular)	次棱角 (Subangular)	次圆形 (Subrounded)	圆形 (Rounded)	极圆 (Well rounded)
Cox (1927)	<0.50	0.50~0.65	0.65~0.70	0.70~0.75	0.75~0.77	0.77~0.80	0.80~1.00
Russell & Taylor (1937)	/	/	0~0.15	0.15~0.30	0.30~0.50	0.50~0.70	0.70~1.00
Krumbein (1941)	<0.10	0.10~0.20	0.20~0.30	0.30~0.50	0.50~0.60	0.60~0.80	0.80~1.00
Pettijohn (1949)*	/	/	0~0.15	0.15~0.25	0.25~0.40	0.40~0.60	0.60~1.00
Powers (1953)	0~0.12	0.12~0.17	0.17~0.25	0.25~0.35	0.35~0.49	0.49~0.70	0.70~1.00
Al-Rousan et al. (2007)	>2.00	1.54~2.00	1.43~4.54	1.3~1.43	1.29~1.33	1.25~1.29	1.00~1.25
Alshibli & Alsaleh (2004)	/	>1.50	1.40~1.50	1.30~1.40	1.20~1.30	1.10~1.20	1.00~1.10
Arasan et al. (2011)	1.70~2.00	1.55~1.70	1.40~1.55	1.30~1.40	1.25~1.30	1.15~1.25	1.00~1.215

注：\*引自文献 Powers(1953)。

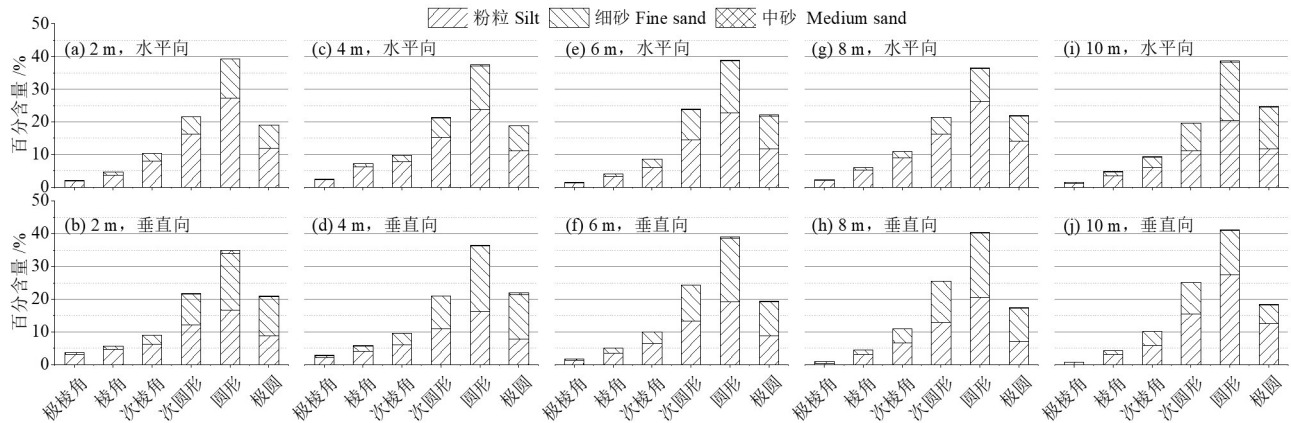


图4 不同埋深水平方向、垂直方向颗粒圆形度统计图

Fig.4 Statistics of the roundness in the horizontal and vertical slices in the different buried depths

式中,  $I_a$  为各向异性率;  $R$  为玫瑰花图外接椭圆形的长轴长度( $\mu\text{m}$ );  $r$  为玫瑰花图外接椭圆形的短轴长度( $\mu\text{m}$ )。  $I_a$  值的变化范围可以从 0 ~ 100%, 当  $I_a=0$  时, 表明土壤微观组构整体呈随机分布, 各向同性; 而当  $I_a=100\%$  时, 表明土壤微观组构整体呈同一方位分布, 各向异性。

从图6可以看出, 随着埋深的增加, 水平向粉粒和细砂的各向异性率均大于零, 除4 m深度最小外, 其他深度的粉粒、细砂各向异性率均大于10%, 其中以细砂的各向异性率较为显著, 最大达到20.54%。这与细砂粒径相对较大而能更好地指示其方向性有关。而土颗粒总的各向异性率却有逐渐增大的趋势, 最大值达15.49%。在垂直向粉粒、细砂和土颗粒总的各向异性率基本上都随着土层埋深的增加而增大。

### 3.4 概率熵 $H_m$

尽管各向异性率一定程度上能够反映黏性土微观结构单元整体分布情况, 但不能很好地反映结构单元体的有序性。Shi (1995) 将香农熵引入来反映黏土微观结构单元体排列的有序性, 称为概率熵或排列熵。Zhang et al. (2017) 也采用了该指标量化评价黏土材料微观孔隙的有序程度。概率熵或排列熵表达式如下:

$$H_m = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{M} \cdot \frac{\ln(m_i/M)}{\ln n} = - \sum_{i=1}^n P_i \cdot \log_n P_i$$

(3)

式中,  $H_m$  为黏性土结构单元体排列的概率熵, 其中  $m_i$  为第  $i$  方位区内颗粒数量;  $M$  为总颗粒数量;  $n$  为在单元体排列方向  $[0 \sim 180^\circ]$  中等分的方位区数, 这里单元体的排列方向为  $0^\circ \sim 180^\circ$ , 以  $10^\circ$  为单

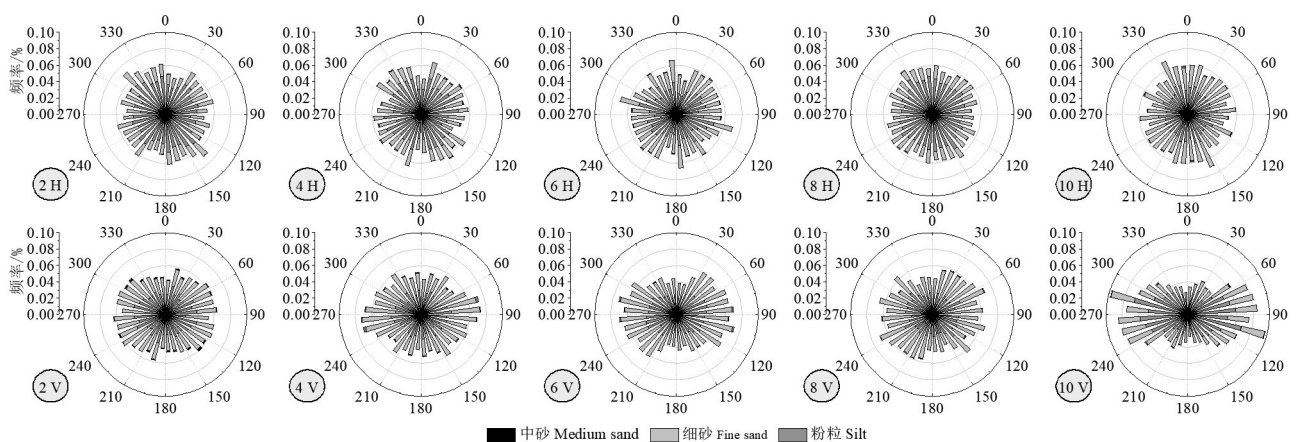


图5 不同埋深水平方向、垂直方向土颗粒定向角玫瑰花图

Fig.5 Azimuth rose diagrams of the soil particles at different depths in the horizontal and vertical slices

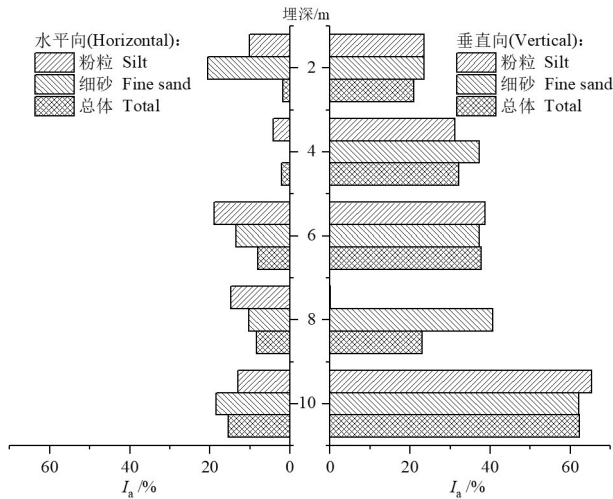


图6 各向异性率

Fig.6 Vertical and horizontal  $I_a$  values with depths

位等分,  $n=18$ ;  $P_i$ 为结构单元体在某一方位区中呈现的概率。显而易见,  $H_m$ 的取值在 $[0, 1]$ 区间, 表明土壤微观单元体(颗粒或孔隙)呈某一方位优势分布, 显示出单元体定向排列, 有序度最高; 当 $H_m=1$ 时, 表明土壤微观单元体(颗粒或孔隙)完全随机分布, 在每一方位区中, 结构单元出现的概率相同。也就是说 $H_m$ 越大, 结构单元越趋于各向同性;  $H_m$ 越小, 越趋于各向异性。

从图7可以看出, 不同埋深垂直向总概率熵值均小于水平向, 垂直向颗粒排列的有序性较水平向要好。就粉粒和细砂而言, 无论水平向还是垂直向, 粉粒的概率熵值 $H_m > 0.5$ , 介于 $0.608\sim 0.812$ 。对于细砂来说, 细砂的概率熵值均小于粉粒, 最小 $H_m$ 值为 $0.382$ , 说明细砂更多地趋于各向异性分布, 细砂具有很好地指示各向异性的作用(Matalucci et al., 1969)。

## 4 马兰黄土颗粒微观各向异性的讨论

### 4.1 颗粒方向性、粒度与晚第四纪古季风的相关性分析

#### 4.1.1 颗粒方向性与晚第四纪古季风的指示作用

诸多黄土第四纪的研究表明, 中国黄土是第四纪历次冰期东亚冬季风粉尘堆积的产物(景才瑞, 1980; 李虎侯, 1986; 庞奖励, 1999; 张小曳, 2001), 其主要物源为蒙古国南部及与之相邻的戈壁、沙漠地区(谢远云等, 2002; 孙继敏, 2004), 且主要由近地面

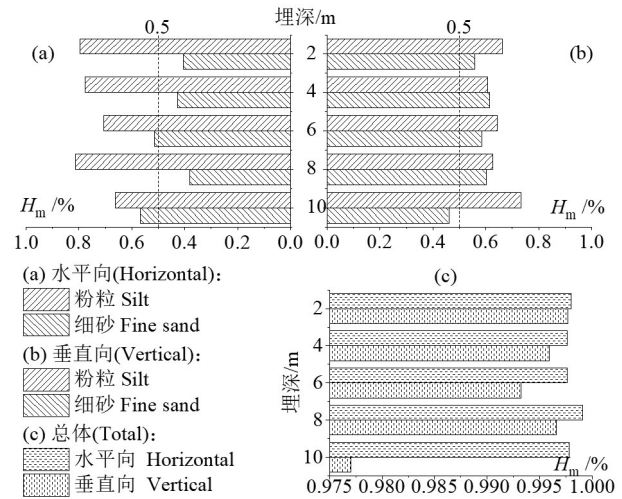


图7 概率熵

Fig.7 Vertical and horizontal  $H_m$  values with depths

风(基本在3000 m以下)从上述地区搬运而来(张小曳, 2001; 孙继敏, 2004)。尤其是晚更新世黄土强烈地反映了与第四纪东亚冬季风气候有着密切关系(丁仲礼等, 1995; 孙继敏等, 1995; 鹿化煜等, 1998; 庞奖励, 1999; Zhang et al., 2010)。这主要是由于第四纪冰期气候寒冷, 海陆热力性质差异, 东亚的冬季风比夏季风更强(田旭等, 2020)。当时蒙古—西伯利亚地区冬季气温低, 气压高, 与周围地区相比, 气压梯度更大, 风力更强劲, 冬季风对中国北方气候的控制时间长达8~9个月(丁仲礼等, 1995), 冬季风的锋面可到达长江流域(庞奖励, 1999), 能够搬运大量的粉尘物质沉积于黄土高原(景才瑞, 1980)。而东亚的夏季风来自海洋, 当时东亚地区普遍高温, 温差小, 气压梯度力小, 东亚夏季风环流十分弱, 它的活动范围只限于黄土高原南缘以南的中国南方(孙东怀等, 1996), 且夏季风对东亚地区的作用时间也很短(丁仲礼等, 1995)。正是由于晚第四纪冰期气候干冷、少雨, 所以干沉降是粉尘在黄土区沉降的主要过程(张小曳, 2001), 即粉尘堆积物经东亚冬季风搬运而来, 仅经受了相对较弱的夏季风雨水所导致的固结作用和成壤作用的改造, 这样才能使大量堆积下来的黄土得以保存, 持续加厚(景才瑞, 1980; 孙东怀等, 1996), 并在一定程度上保存了颗粒的定向排列(孙继敏等, 1995), 即粉尘物质堆积时的颗粒长轴方向与主导风向平行(孙继敏等, 1995; 王建力等, 1995)。而所有深度上水平向切片

中颗粒的方向性分布这一现象正好与冬季风风向相契合。尽管是弱契合,但这一结果并未能完全掩盖水平向颗粒的优先取向在一定程度上可以作为古风向指示的事实。如Matalucci et al. (1969)对美国密西西比维克斯堡黄土和前维克斯堡黄土显微照片的研究表明,粉粒级颗粒的择优取向相当好地保存了当地的古风向。Lagroix & Banerjee (2002)也证实了阿拉斯加黄土组构也很好地记录了该地区的古风向变化。而这种弱契合现象(或颗粒择优取向的双峰分布)可能正是由于地形、大气紊流或其他气象因素引起的沉积风向的局部变化所致(Matalucci et al., 1969; 王建力等, 1995)。很显然,对于气候不利于成壤作用发育的黄土高原的风成黄土而言,该地区黄土颗粒团聚体的择优取向也应该具有良好的古风向指示作用。如果这一规律能够得到黄土高原不同地区黄土剖面的验证,则无论对于黄土的成因,还是古气候的研究均具有重要的意义。

#### 4.1.2 粒度随埋深变化的古季风风力强度指示

对于风成黄土而言,在其沉降过程中,既受风力作用,也受重力的影响,但主要作用是风力(袁方等, 2018)。因此,丁仲礼等(1995)将 $<2\ \mu\text{m}$ 的细颗粒与 $>10\ \mu\text{m}$ 的粗颗粒百分含量之比用来反映古季风风力的强度变化。就同一剖面来说,粒度粗细的变化直接指示了第四纪时期冬季风风力强度变化(丁仲礼等, 1995; 鹿化煜等, 1998)。也就是说东亚冬季风风力越强,堆积于黄土高原的较粗和粗颗粒组分含量越多,较细和细颗粒组分含量相对较少(鹿化煜等, 1998; 李建刚等, 2020),沉积速率也较快;反之,较细和细颗粒组分含量相对增加,则沉积速率也相对缓慢。从图8a可知,剖面中 $<2\ \mu\text{m}$ 的细颗粒含量在4%~13%, $>10\ \mu\text{m}$ 的粗颗粒含量在87%~96%。随埋深的增加细颗粒含量逐渐增多,粗颗粒含量逐渐减少。这个规律大体可以指示出延安马兰黄土沉积时期(埋深10~2 m)冬季风风力强度是逐渐增强的,亦即在10 m左右黄土颗粒沉积速率较缓慢,随时间的推移和风力强度的增强,黄土颗粒的沉积速率也相对增强。这与李虎侯(1986)对洛川马兰黄土埋深2.36~10.36 m沉积速率的研究结果基本一致(图8b)。差别可能在于风化成壤作用使较细和细颗粒组分相对含量的变化,这与风化成壤作用强度相关(鹿化煜等, 1998; 张玉芬等, 2013)。

#### 4.2 颗粒圆度对各向异性的影响

尽管圆度不能直接反映土体各向异性特征,但是圆度对土壤各向异性行为的影响主要受控于土颗粒自身物理性质(形状、大小等)以及由土颗粒构成的微结构/组构的择优取向和接触模式。许多研究表明土颗粒团聚体的形状和大小不仅反映了土壤的沉积历史,同时对土体的物理性质也具有控制作用(Nouguier-Lehon et al., 2003)。就颗粒形状的力学性质而言,圆形颗粒与其他形状相比具有更大的剪切刚度(Manne & Devarakonda, 2016)以及较低的应力状态敏感性(Cho et al., 2006)。Nouguier-Lehon et al. (2003)研究也表明,颗粒形状严重影响土的沉积过程中在重力作用下产生各向异性的方式,其中细长颗粒(这里称为异形颗粒)比角形颗粒或圆形颗粒更具显著的各向异性,同时颗粒形状也严重地控制着土体强度与变形的各向异性行为。

#### 4.3 沉积后的应力诱导作用

虽然粉尘颗粒是由冬季风携带而来,但土颗粒仍可能在地表随地面风向、夏季风向和雨水以及固结、成壤作用从而形成更稳定的状态(孙东怀等, 1996; Zhang et al., 2010),即颗粒的最大轴平面总是趋向于垂直于最大主应力方向的调整或旋转(Nouguier-Lehon et al., 2003)。尽管在沉积过程中颗粒形状就已经严重地影响着土颗粒在风力和重力作用下产生各向异性的方式,但对晚第四纪冰期

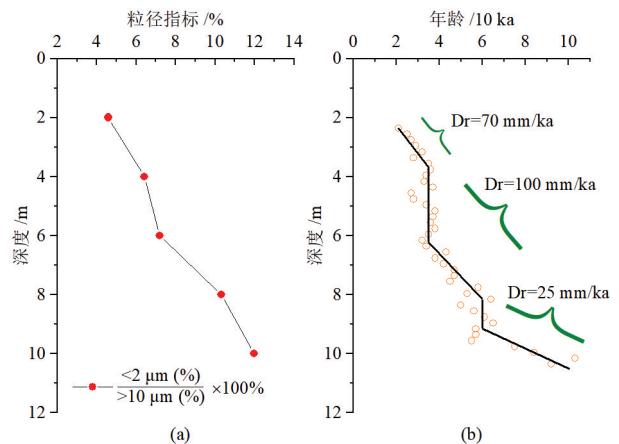


图8 剖面粒径指标(a), 马兰黄土的埋深、绝对年龄以及沉积速率(b)(李虎侯, 1986)

Fig. 8 Section grain-size index(a), Burial depth and absolute geological age of Luochuan Malan loess (b) (Dr is the deposition rate, and data from Li Huhou(1986))



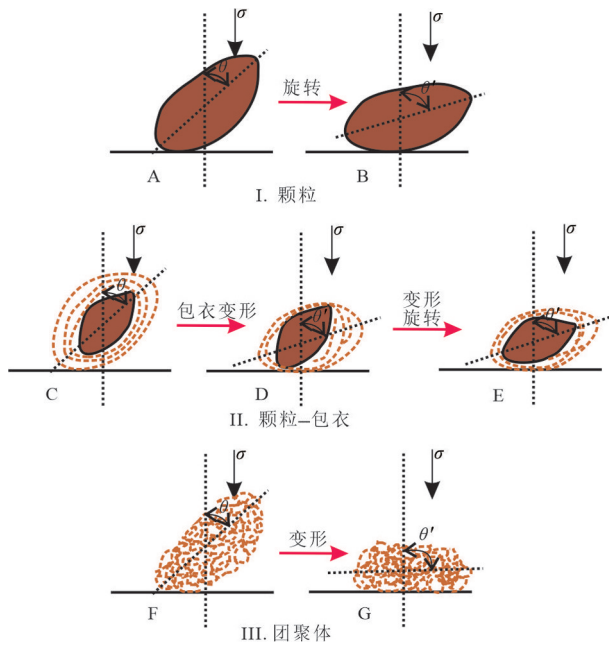


图9 土颗粒转动、变形类型概念模型

I—土颗粒转动;II—土颗粒和包衣的转动、变形;III—团聚体的变形

Fig. 9 Conceptual model of the soil particle rotation and deformation

I—Particle rotation; II—Particle and coating rotation and deformation;  
III—Aggregate deformation

干冷、少雨的气候来说,沉积之后土颗粒的择优取向还会受到呈正相关的上覆土压力的影响(Meade, 1965)。图5、图6反映了固结作用的影响,即随埋深垂直方向上土颗粒具有定向排列,各向异性显著。这说明随着上覆土自重压力的增加,土颗粒发生转动或者变形使土颗粒的长轴方向逐渐与地表平行,从亚稳态趋于稳态。

固结作用对土颗粒择优取向的作用可以分为3种:(1)光滑颗粒(如石英、方解石、长石等)的转动(图9-I);沉积过程颗粒处于亚稳定状态(即颗粒长轴方向未与地表平行),在固结作用下颗粒发生转动、位移使得颗粒长轴方向调整,趋于定向排列。(2)被包衣包裹的土颗粒的转动和变形(图9-II);由于包衣多为微小黏粒松散地黏附于较大颗粒的外层,受固结作用包衣首先发生变形已平衡外力作用,而包衣内的土颗粒还未发生转动,当外力超过某个临界值,包衣的变形已经不能平衡外力作用时,核部颗粒才进行位置调整,直至稳定状态;(3)团聚体的变形(图9-III);团聚体本就是沉积过程中形成的黏粒集合体,其结构松散,最易受外力作用的影响,固结作用会使其变形而

趋于固结作用的优选方向。

当然,固结过程是具有时间依赖性的,在外力作用下,如果某个颗粒处于不平衡状态,则它会通过位移或变形并改变周围颗粒的平衡。就单个土颗粒而言,其转动或变形可能是颗粒级时间尺度的短暂过程,而地层则是宏观尺度上大量土颗粒一起参与的过程(Santamarina, 2003)。

## 5 结 论

(1)通过对晚更新世马兰黄土中粉粒、细砂、中砂的圆度统计表明:无论垂直向还是水平向土壤颗粒团聚体以次圆形、圆形和非常圆颗粒为主。

(2)原状黄土的各向异性特征是由其颗粒的方向性所控制的。延安马兰黄土垂直向颗粒的方向性基本平行于沉积方向,且埋深越深越显著;而水平向颗粒的方位角范围在 $130^{\circ}\sim 150^{\circ}$ ( $N40^{\circ}W\sim N60^{\circ}W$ ),可能具有一定的古风向指示意义。

(3)水平向和垂直向切片微观各向异性率和概率熵对比分析表明:细砂具有很好地指示各向异性的作用。

(4)延安马兰黄土颗粒微观各向异性的成因:部分是沉积过程中的风力作用;部分是沉积后的应力诱导作用,并提出了固结过程中的应力诱导作用的概念模型。

(5)上述规律只反映一个代表性地区上的剖面特征,在其他地区很可能也存在这些规律,这些规律的普适性尚需不同典型地区剖面试样的分析结果佐证。笔者将对此做进一步的研究。

## References

- Al-Rousan T, Masad E, Tutumluer E, Pan T. 2007. Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics[J]. *Construction and Building Materials*, 21(5):978-990.
- Alshibli K A, Alsaleh M I. 2004. Characterizing surface roughness and shape of sands using digital microscopy[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(1):36-45.
- Arasan S, Akbulut S, Hasiloglu A S. 2011. The relationship between the fractal dimension and shape properties of particles[J]. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 15(7):1219.
- Cho G C, Dodds J, Santamarina J C. 2006. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*

- Engineering, 132(5): 591–602.
- Cox E P. 1927. A method of assigning numerical and percentage values to the degree of roundness of sand grains[J]. *Journal of Paleontology*, 1(3): 179–183.
- Ding Zhongli, Yu Zhiwei. 1995. Forcing mechanisms of paleomonsoons over East Asia[J]. *Quaternary Sciences*, (1): 63–74 (in Chinese with English abstract).
- Hong Bo, Li Xi'an, Wang Li, Li Lincui. 2019. Permeability anisotropy and microstructure of Yan'an Q3 loess[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 49(5): 1389–1397(in Chinese with English abstract).
- Hong B, Li X A, Wang L, Li L C. 2019. Temporal variation in the permeability anisotropy behavior of the Malan loess in northern Shaanxi Province, China: An experimental study[J]. *Environmental Earth Sciences*, 78(15): 447.
- Jing Cairui. 1980. Climatic conditions, times and genesis of Chinese Loess Formation[J]. *Acta Geographica Sinica*, (1): 83–86(in Chinese with English abstract).
- Krumbein W C. 1941. Measurement and geologic significance of shape and roundness of sedimentary particles[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 11: 64–72.
- Lagroix F, Banerjee S K. 2002. Paleowind directions from the magnetic fabric of loess profiles in central Alaska[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 195(1):99–112.
- Li Huhou. 1986. The age of Malan loess—II. TL dating of Luochuan section[J]. *Chinese Science Bulletin*, (5): 372–375.
- Li Jiangang, Liu Xiaoyan, Yuan Sihua, Chen Shizhe, Li Ying, Zhao Zhenhong, Jiang Jiyi. 2020. Grain-size characteristics and paleoclimate response of terrace sediments in Sandaohu River of Yili Basin[J]. *Northwestern Geology*, 53(4): 11–19(in Chinese with English abstract).
- Li X, Hong B, Wang L, Li L, Sun J. 2020. Microanisotropy and preferred orientation of grains and aggregates (POGA) of the Malan loess in Yan'an, China: A profile study[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79: 1893–1907.
- Lu Huayu, An Zhisheng. 1998. Paleoclimatic significance of grain size of loess-palaeosol deposit in Chinese Loess Plateau[J]. *Science in China (Series D)*, 28(3): 278–283(in Chinese).
- Manne A, Devarakonda N S. 2016. Influence of particle shape and size on the dynamic soil properties[J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(24): 897–902.
- Matalucci R V, Shelton J W, Abdel-Hady M. 1969. Grain orientation in Vicksburg Loess[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 39(3): 969–979.
- Meade R M. 1965. Mechanics of aquifer system. Removal of water and rearrangement of particles during the compaction of clayey sediments—review: Meade Robert M[J]. 1964. U S Geol. Surv. Prof. Paper 497-B: 1–22. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 12(6): 1060.
- Nouguier-Lehon C, Cambou B, Vincens E. 2003. Influence of particle shape and angularity on the behaviour of granular materials: A numerical analysis[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27(14): 1207–1226.
- Pang Jiangli. 1999. Palaeo-monsoon evolution in time and space on the loess plateau since the Late Pleistocene[J]. *Journal of Desert Research*, 19(1):73–77.
- Powers M C. 1953. A new roundness scale for sedimentary particles[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 23(2): 117–119.
- Russell R D, Taylor R E. 1937. Roundness and shape of Mississippi River sands[J]. *The Journal of Geology*, 45(3): 25–267.
- Santamarina J C. 2003. Soil behavior at the microscale: Particle forces[J]. *Geotechnical Special Publication*, 1–32.
- Shao Shengjun, Xu Ping, Wang Qiang, Dai Yafeng. 2014. True triaxial tests on anisotropic strength characteristics of loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 36(9): 1614–1623(in Chinese with English abstract).
- Shi B, Li S, Tolkachev M. 1995. Quantitative approach on SEM images of microstructure of clay soils[J]. *Science in China(Ser. B)*, 38(6): 41–748.
- Shi B, Murakami Y, Wu Z. 1998. Orientation of aggregates of fine-grained soil: Quantification and application[J]. *Engineering Geology*, 50(1): 9–70.
- Sun Donghuai, An Zhisheng, Liu Tungsheng, Wu Xihao. 1996. Evolution of Summer Monsoon at the Loess Plateau during the 150 ka[J]. *Science in China (Series D)*, 26(5): 417–422(in Chinese).
- Sun Jimin. 2004. Provenance, forming mechanism and transport of loess in China[J]. *Quaternary Sciences*, (2): 175–183(in Chinese with English abstract).
- Sun Jimin, Ding Zhongli, Liu Tungsheng, Yuan Baoyin, Guo Zhengtang. 1995. A study of loess and paleosol magnetic fabrics on the preliminary application of Reconstruction of the Winter Wind Direction[J]. *Chinese Science Bulletin*, 40(21): 1976–1978 (in Chinese).
- Tang Y Q, Zhou J, Hong J, Yang P, Wang J X. 2012. Quantitative analysis of the microstructure of Shanghai muddy clay before and after freezing[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(2): 9–316.
- Tovey N K. 1980. A digital computer technique for orientation analysis of micrographs of soil fabric[J]. *Journal of Microscopy*, 120(3): 303–315.
- Tian Xu, Hu Bangqi, Wang Feifei, Huang Wei, Ding Xue, Song Weiyu, Xu Fangjian. 2020. Clay mineral provenance and its response to paleoclimate in the central Okinawa Trough since the last Deglaciation (19 ka) [J]. *Geology in China*, 47(5): 1501–1511(in Chinese with English abstract).
- Tovey N K. 1989. Image Analysis for Quantitative Assessments of the Fabric of Soils and Sediments[R]. *Science and Engineering*

- Research Council: Civil Engineering Reports,5.
- Wang B, Shi B, Inyang H I. 2008. GIS-based quantitative analysis of orientation anisotropy of contaminant barrier particles using standard deviational ellipse[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 17(4): 437-447.
- Wang Jianli, Fang Xiaomin, Zhang Yutian, Cao Jixiu. 1995. The anisotropy of loess magnetic susceptibility in the northeastern fringe of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau as an indicator of palaeowind direction[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 31(4): 155-159(in Chinese with English abstract).
- Xie Yuanyun, Zhang Xuqiang, He Kui, Li Chang'an. 2002. Grain-size distribution and material source analysis of loess on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geology in China*, 29(3): 317-321(in Chinese with English abstract).
- Xu Shanchang, Liang Qingguo, Li Shuaishuai, Zhang Tangjie, Zhang Rong. 2015. Experimental study on Anisotropic characteristics of undisturbed Q<sub>3</sub> Loess from Dingxi, Gansu[J]. *Journal of Geomechanics*, 21(3): 378-385(in Chinese with English abstract).
- Yoshimine M, Yu B, Iwatate T, Liu F, Che A. 2005. Mechanical anisotropy of undisturbed loess soil[C]//*New Developments of Geotechnical Engineering in Soft Ground—Proceedings of Sino-Japanese Symposium on Geotechnical Engineering*, Shanghai, China, 150-157.
- Yuan Fang, Xie Yuanyun, Chi Yunping. 2018. Material characteristics of dust fallouts during the duststorm weather in Harbin: Constraint on the provenance[J]. *Geology in China*, 45(6): 1177-1187(in Chinese with English abstract).
- Zhang H, Chen Q, Chen J, Wang J. 2017. Application of a modified structural clay model considering anisotropy to embankment behavior[J]. *Geomechanics and Engineering*, 13(1): 79-97.
- Zhang R, Kravchinsky V A, Zhu R, Yue L. 2010. Paleomonsoon route reconstruction along a W-E transect in the Chinese Loess Plateau using the anisotropy of magnetic susceptibility: Summer monsoon model[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 299(3/4): 436-446.
- Zhang Xiaoye. 2001. Source distributions, emission, transport, deposition of Asian dust and loess accumulation[J]. *Quaternary Sciences*, 21(1): 29-40(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yufen, Li Chang'an, Xiong Deqiang, Zhou Yao, Sun Xilin. 2013. Oxide geochemical characteristics and paleoclimate records of "Wushan loess"[J]. *Geology in China*, 40(1): 352-360(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献:**
- 丁仲礼, 余志伟. 1995. 第四纪时期东亚季风变化的动力机制[J]. *第四纪研究*, (1): 63-74.
- 洪勃, 李喜安, 王力, 李林翠. 2019. 延安Q<sub>3</sub>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)*, 49(5): 1389-1397.
- 景才瑞. 1980. 中国黄土形成的气候条件、时代与成因[J]. *地理学报*, (1): 83-86.
- 李虎侯. 1986. 马兰黄土的形成年龄Ⅱ. 洛川剖面的热释光研究[J]. *科学通报*, (5): 372-375.
- 李建刚, 刘晓燕, 袁四化, 陈诗哲, 李瑛, 赵振宏, 姜纪沂. 2020. 伊犁盆地三道河河流阶地沉积物粒度特征及其古气候响应[J]. *西北地质*, 53(4): 11-19.
- 庞化煜, 安芷生. 1998. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 28(3): 278-283.
- 庞奖励. 1999. 晚更新世以来黄土高原地区古季风的时空演化[J]. *中国沙漠*, (1): 73-77.
- 邵生俊, 许萍, 王强, 代亚锋. 2014. 黄土各向异性强度特性的真三轴试验研究[J]. *岩土工程学报*, 36(9): 1614-1623.
- 孙东怀, 安芷生, 刘东生, 吴锡浩. 1996. 最近150ka黄土高原夏季气候格局的演化[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, (5): 417-422.
- 孙继敏. 2004. 中国黄土的物质来源及其粉尘的产生机制与搬运过程[J]. *第四纪研究*, (2): 175-183.
- 孙继敏, 丁仲礼, 刘东生, 袁宝印, 郭正堂. 1995. 黄土与古土壤磁组构测定在重建冬季风向上的初步应用[J]. *科学通报*, 40(21): 1976-1978.
- 田旭, 胡邦琦, 王飞飞, 黄威, 丁雪, 宋维宇, 徐方建. 2020. 末次冰消期(1.9万年)以来冲绳海槽中部黏土矿物来源及其环境响应[J]. *中国地质*, 47(5): 1501-1511.
- 王健力, 方小敏, 张宇田, 曹继秀. 1995. 青藏高原东北边缘黄土磁化率各向异性揭示古风向的初步研究[J]. *兰州大学学报*, (4): 155-159.
- 谢远云, 张序强, 何葵, 李长安. 2002. 青藏高原东北缘黄土粒度组成及物质来源分析[J]. *中国地质*, 29(3): 317-321.
- 徐善常, 梁庆国, 李帅帅, 张堂杰, 张荣. 2015. 甘肃定西原状Q<sub>3</sub>黄土各向异性试验研究[J]. *地质力学学报*, 21(3): 378-385.
- 袁方, 谢远云, 迟云平. 2018. 哈尔滨尘暴天气沉降物的物质组成及其对物源的限制[J]. *中国地质*, 45(6): 1177-1187.
- 张小曳. 2001. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积[J]. *第四纪研究*, 21(1): 29-40.
- 张玉芬, 李长安, 熊德强, 周耀, 孙习林. 2013. "巫山黄土"氧化物地球化学特征与古气候记录[J]. *中国地质*, 40(1): 352-360.