

基于坡度坡向原理的黏性土扫描电镜图像 颗粒定向性研究

王宝军, 张明瑞, 施 斌
(南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 利用扫描电镜图像中边缘像素的坡向与颗粒的长轴定向方向正交的原理, 采用 GIS 空间分析技术对扫描电镜图像进行边缘提取和定向分析, 并分别利用定向玫瑰图、主定向方向和各向异性率等指标对颗粒的定向特征进行描述, 通过实例分析验证该方法的有效性。试验结果表明: 由于噪声及算法误差的影响, 低坡度区间内的定向玫瑰图及各向异性率不能反映土样的定向特征, 玫瑰图在坐标轴及对角线方向上将出现异常突起, 各向异性率也明显偏低; 随着坡度的升高, 噪声及算法误差的影响逐渐变小, 并可以很好地反映土样的整体定向特征。

关键词: 土力学; 定向分布; 定量分析; 微观结构

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增 1 - 2951 - 07

QUANTITATIVE ANALYSIS OF ORIENTATION DISTRIBUTION OF SOIL GRAINS BASED ON SLOPE-ASPECT THEORY

WANG Baojun, ZHANG Mingrui, SHI Bin

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: A new technique for quantitative analysis of the orientation distribution of soil grains from SEM images, slope-aspect technique, was described in this paper. The pixels at the edge of the particles of SEM were abstracted by the method of slope analysis. Because the aspect values of the pixels at the edge of the particles are orthogonal to the orientation of the particles, the orientation characteristics of a SEM image of soil samples can be obtained by quantitatively analyzing the aspect of the pixels at the edge of the particles in SEM. Some quantitative analysis techniques, including rosette diagrams, index of anisotropy and main orientation angle were also used. Through some examples, the slope-aspect technique is proved to be an efficient technique in examining orientation patterns of clay or sand soil microstructure, and it can provide more reasonable rosette histogram, index of anisotropy and main orientation angle. It also shows that the results in low slope classes can not present the orientation characteristics of whole sample because of noise and algorithmic error. But aspect values of pixels with higher slope class on the boundaries of particles can well present the orientation pattern of soil samples.

Key words: soil mechanics; orientation distribution; quantitative analysis; soil microstructure

1 引 言

微观结构对土体宏观物理力学性质的影响已经

被人们广泛接受, 也成为研究土体工程性质的重要内容之一, 越来越多的研究者开始对土体微观结构特征展开研究, 也取得了许多有价值的成果^[1~4]。

自从扫描电子显微镜(SEM)、透射电镜(TEM)等高端

收稿日期: 2009 - 03 - 20; **修回日期:** 2009 - 05 - 27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40572154); 国家自然科学基金重点项目(40730739)

作者简介: 王宝军(1973 -), 男, 博士, 1995年毕业于南京大学水文地质工程地质专业, 现任教授, 主要从事岩土工程试验及信息技术应用方面的教学与研究工作。E-mail: baojun@nju.edu.cn

实验设备问世以来,人们对微观世界的探索和研究便进入了一个崭新的阶段。20世纪60年代许多专家和学者借助于扫描电子显微镜对土颗粒微观结构进行研究,从而提出了许多新的土体微结构概念和模型。20世纪70年代后期,随着计算机科学技术的迅猛发展,人们利用计算机图像处理技术对扫描电镜照片进行处理,从而在土体微观结构的定量化研究方面取得了一系列丰硕的成果,同时,由于技术条件的提高,人们也研制了一些新型的仪器用于定量地研究土体的微观结构特征。例如:J. B. Osipov 和 B. A. Sokolov^[5]应用全自动 X 光衍射分析仪对黏土微观结构的定向性进行了分析;N. K. Tovey 等^[6~8]提出了对土的 SEM 照片进行计算机处理的方法,吴义祥^[9]对黏性土的光片图像进行计算机处理;施斌等^[10]利用 DIPIX 图像处理系统并开发了相关的土结构图像处理软件来评价土的微结构的定向性,并系统地提出了各向异性率、概率熵、黏土矿物定向频率分布函数和黏性土团粒定向频率分布函数这 4 种评价黏性土定向性的定量表示方法;王宝军等^[11]利用计算机图像处理技术并结合地理信息系统(GIS)软件提出了计算土体中颗粒形态分形维数和颗粒定向性定量分析的方法。

本文在 B. M. Unitt 和 C. A. Smith^[12]提出的灰度图像强度梯度技术及 N. K. Tovey 等^[13, 14]的改进强度梯度法基础上,提出了应用 GIS 空间分析技术 - 坡度坡向法,实现 SEM 图像中颗粒定向性的定量分析,并利用定向玫瑰图及定向椭圆计算黏性土 SEM 图像的各向异性率。

2 基本原理

B. M. Unitt 和 C. A. Smith^[12]提出了土颗粒定向性定量分析的强度梯度技术,根据这一原理,得到一种比 X 射线衍射法更简单的对土颗粒定向性定量研究的方法。N. K. Tovey 等^[13, 14]对强度梯度技术进行了改进,然后利用这一原理通过对 SEM 照片进行计算机图像处理研究土颗粒的微观结构定向性。

土颗粒的 SEM 照片是一幅灰度图像,像素点的灰度值为 0~255(对 8 bit 图像而言),灰度值与样品表面起伏状态具有较好的相关性。根据图像中某一像素点周围 8 个像素点灰度值的大小按照下式定义了该点的强度梯度矢量方向和大小:

$$\tan \theta = \frac{\Delta I / \Delta Y}{\Delta I / \Delta X} \quad (1)$$

$$V = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{\Delta X}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{\Delta Y}\right)^2} \quad (2)$$

式中: $\Delta I / \Delta Y$ 为该点周围像素点灰度值沿 Y 方向的强度变化; $\Delta I / \Delta X$ 为灰度值强度沿 X 方向的变化; θ 为强度变化的方向; V 为强度变化矢量,用于衡量强度变化的大小。

根据强度变化矢量将 SEM 图像的所有像素点进行分级,然后分别统计各个级别中的强度变化方向,而强度变化方向的正交方向即为该强度矢量级别下的颗粒的定向方向。

N. K. Tovey 和 D. H. Krinsley^[13]利用自编的程序成功应用该理论对多幅 SEM 照片进行了定向性分析,但是该方法也存在一些问题,主要是强度梯度方向及强度矢量的物理意义不明确。导致在分析中,强度矢量的取值比较随意。由于不同强度矢量级别的颗粒定向特征可能完全不同,如何确定特征强度矢量级别,进而获得可以代表图像颗粒定向性就变得比较困难。

式(1), (2)很容易使人们联想到地理信息系统(GIS)中常用的空间分析方法 - 坡度和坡向分析。坡度是表示某点倾斜程度的一个矢量,其模等于地表曲面函数在该点的切平面与水平面夹角的正切,其方向等于在该切平面上沿最大倾斜方向的某一矢量在水平面上的投影方向,也就是坡向。坡度和坡向都是重要的地形因子,在地学分析领域有着广泛的应用。

土颗粒表面形貌变化在 SEM 图像中表现为不同的灰度值,因此可以将 SEM 图像看作以灰度值描述高程的微观地表数字高程模型(DEM)。对土颗粒而言,在颗粒内部以及颗粒边缘的像素点上都会对应唯一的坡度和坡向值,其中颗粒边缘的坡向由于边界处灰度值的突变,将与边缘垂直。如果某一个土颗粒表现为狭长形特征(见图 1(a)),则像素点的坡向在垂直颗粒长轴方向上的统计数目将明显大于其他方向;反之,如果土颗粒表现为近似圆形特征(见图 1(b)),则颗粒的坡向数据会表现为各个方向的近似均匀分布。因此,通过对土颗粒表面坡向数据的统计可以得到颗粒的主定向方向,根据这一原理对 SEM 照片中的所有颗粒边界像素的坡向数据进行统计就可得出土样的定向性特征。

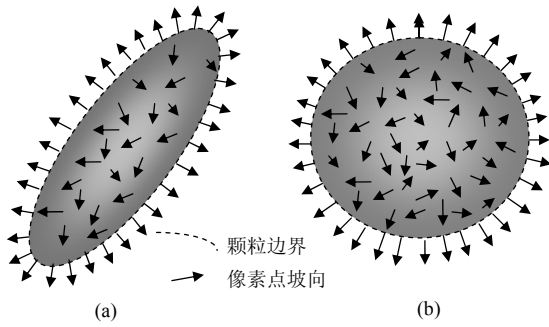


图 1 SEM 图像中颗粒边界及内部像素坡向分布图

Fig.1 Aspect distribution of the particles in SEM

影响该方法的关键问题在于 SEM 图像中灰度值与颗粒高程之间的对应关系。从扫描电镜的工作原理来讲, 灰度值的大小取决于入射电子与表面物质接触后激发的二次电子产额, 它与土样表面的形态具有良好的对应关系, 但是影响二次电子产额的因素也有很多, 比如入射电子能量、颗粒均匀性以及颗粒尖角等。因此严格来讲, SEM 图像的灰度值可以从总体上表达颗粒的起伏形貌, 但灰度值与土样表面高度并不严格线性相关。但是, 由于本方法采用的是计算周边邻近像素点灰度值计算坡度和坡向的, 因此灰度值与高程之间的非严格线性相关对本方法的影响甚小。

另外, 图 1 中给出的是理想化的土颗粒, 对于真实颗粒要复杂得多。一般认为颗粒内部像素的坡向更趋向于随机分布, 而是否完全符合随机分布则取决于整个土样的成因机制和受力历史。为了排除颗粒内部随机定向的像素数目对统计结果的影响, 可以采用坡度对图像中的像素进行分级。该方法类似于的强度矢量分级方法^[13], 但坡度分级的物理意义更加明确。

从图 2(a)给出的黏性土 SEM 图像中可以看出, 颗粒的边界轮廓线较颗粒内部的起伏轮廓线要明晰很多, 这主要是因为颗粒边界处两侧的灰度值变化

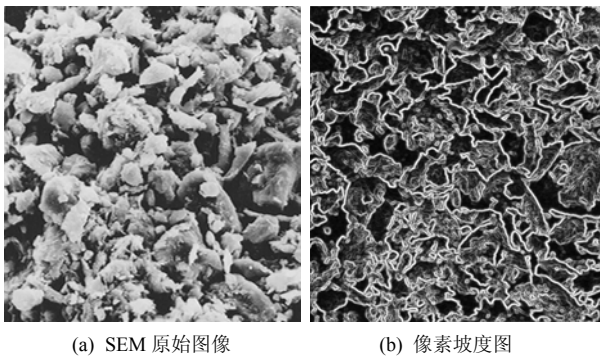


图 2 黏性土颗粒的坡度分布图

Fig.2 Slope distribution of a certain clayey soil

较大, 类似于实际地形中的“悬崖”。因此颗粒边界处坡度会明显高于内部的坡度值, 图 2(b)中高亮显示的坡度值代表了大多数的颗粒边界。在进行定向分析时, 只需要提取边界处的像素进行统计分析即可, 这就大大降低了颗粒内部随机定向像素的影响。

3 分析方法及步骤

以上介绍的方法大部分操作都可以利用 GIS 中的空间分析模块完成, 也可以根据相关算法开发程序实现, 本文主要介绍利用 GIS 软件平台 ArcGIS 的 Spatial Analyst 模块实现颗粒定向分析。图 3 给出了坡度 - 坡向分析法的工作流程图。

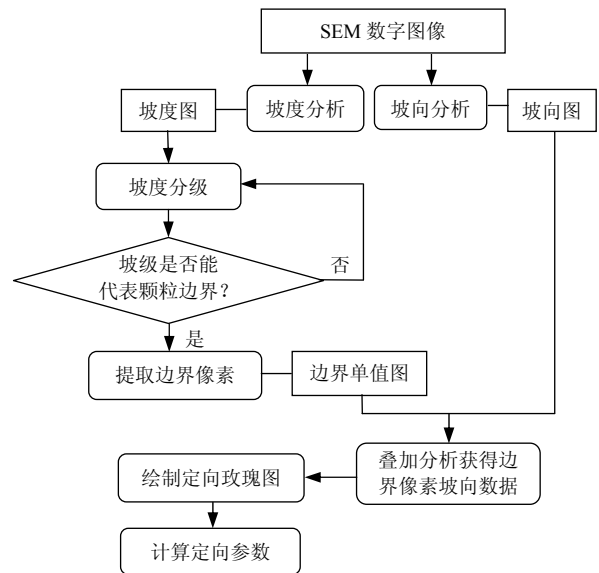


图 3 坡度 - 坡向分析法的工作流程图

Fig.3 Flow chart of slope-aspect orientation analysis

SEM 原始图像一般有 2 种格式, 即数字格式和冲洗照片。如果是数字格式则可以直接使用, 如果是冲洗的照片则需要通过扫描成为数字格式。依据图 3 所示的流程图依次执行如下步骤:

(1) 创建坡度坡向图

将 SEM 数字图像导入 ArcGIS 的 Spatial Analyst 空间分析模块中进行坡度坡向分析, 并得到坡度和坡向栅格图。由于系统自动将图像的像素灰度值视为高程值, 即 0~255 个地图单位, 而图像的平面尺寸是由图像的分辨率得到的, 如 1 024×768 个地图单位。由于“高程值”与“平面尺寸”之间差别较小, 很有可能导致整个“地形”异常高耸, 进而导致坡度值过分集中在高坡度区域, 而影响坡度分级,

因此创建坡度图时应利用 ArcGIS 提供的 Z-factor 参数调整高程因子, 使坡度分布趋近正态分布。

(2) 坡度分级与边界单值图

ArcGIS 的地图渲染功能可以根据坡度值的大小对坡度进行分级并用不同颜色显示坡度分级图, 这非常有利于观察坡度分级结果是否代表大多数的颗粒边界。如果多数通过肉眼观察到的边界不在高坡度分级中, 则需要调整分级, 直到满足要求。由于本文介绍的方法是基于统计分析的, 因此该过程需要考虑的另一个因素是坡度分级中像素的相对数量, 如果像素数量过少则会影响统计结果的客观性。图 2(b)所示即为经过坡度分级后确定的图 2(a)的颗粒边界。

利用 Spatial Analyst 提供的“重新赋值”功能为高坡度级别的像素重新赋值为 1, 而其他坡度级别的像素则赋值为空值, 从而获得边界单值图。空值的作用为下面进行的图像的叠加分析做准备, 空值在进行任何栅格运算时均为空值, 实际上就是使空值对应的像素不参与坡向统计分析。

(3) 边界像素的坡向数据提取

将边界单值图与步骤(1)中得到的坡向图进行叠加分析, 即可获得边界像素的定向图。所谓叠加分析是 GIS 中最基本的空间分析功能, 对方法而言, 就是将两幅栅格图像行列编号相同的单元进行乘法运算, 由于边界单值图中边界上的像素点值为 1, 两幅图像相乘后, 边界上的像素点的坡向仍然保留原值, 而边界以外的点, 由于边界单值图中边界以外的像素点值为空值, 其相乘后结果为空值。这样就可以获得仅包含边界像素坡向值的边界像素坡向图。

(4) 基于统计方法的定向性分析

定向分析最常用的方法是定向玫瑰图, 将定向角按照一定间隔分割成连续区间, 然后分别统计边界像素坡向分布图中在各个坡向区间中的像素数目, 最后绘制成玫瑰图。当然, 需要注意的是, 颗粒的定向方向与边界坡向方向是正交关系, 因此最后绘制的定向玫瑰图是坡向玫瑰图旋转 90°后的成果^[13]。

从定向玫瑰图中可以直观获得颗粒的定向特征, 但不能够给出定向性定量指标, 如主定向角和各向异性率。因此还需要对玫瑰图进行椭圆拟合, 并根据椭圆的长轴指向确定主定向角, 根据椭圆长轴和短轴关系确定各向异性率^[15]。

4 应用实例

4.1 样品置备

本次研究的样品分别是 2 个取自 310 国道一路基的石灰改良土(见图 4(a), (b))、1 个广西南宁的膨胀土(见图 4(c))和 N. K. Tovey 和 D. H. Krinsley^[13]中引用的一橄欖岩(见图 4(d))。其中 4(a)和 4(b)为同一风干法制样土样不同成像放大倍数下的 SEM 图像, 4(c)为冷冻干燥法制样的膨胀土 SEM 图像。

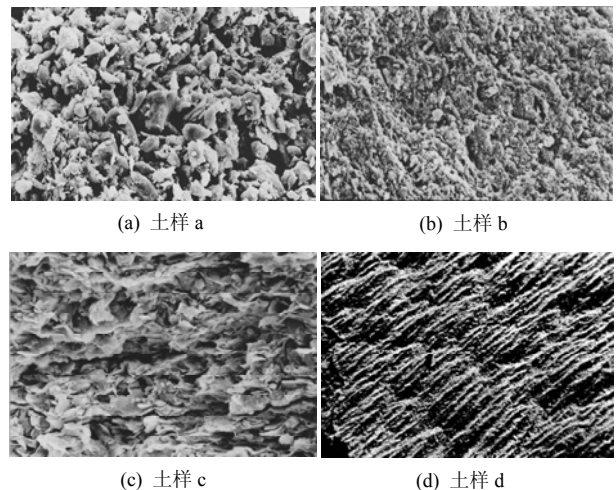


图 4 研究土样的 SEM 原始图像

Fig.4 Original SEM images of soil samples used in this research

图 4 土样 a, b, c 的 SEM 图像为照片, 经扫描后保存为数字图像, 土样 d 从电子文档中提取得到数字图像, 土样的相关参数见表 1。

表 1 土样的相关参数

Table 1 List of some basic properties of the soil samples				
土样编号	取样地点	土样类型	放大倍数/倍	图像分辨率/像素
a	310 国道	石灰+黏土	1 000	714×460
b	310 国道	石灰+黏土	500	708×433
c	广西南宁	膨胀土	2 000	4 461×3 144
d	未知	橄欖岩	94	1 390×937

4.2 定向分析结果

按照前述方法, 在 ArcGIS 中获得不同坡度级别下像素的坡向图, 并进行统计分析, 将统计分析结果保留为文本, 利用自主开发的玫瑰图绘制程序绘制各样品 SEM 的颗粒定向玫瑰图, 结合不同坡级与颗粒边界关系以及玫瑰图形态确定最佳坡级和玫瑰图。各土样最佳坡级对应的颗粒定向玫瑰图, 见图 5(图中比例尺为像素)。

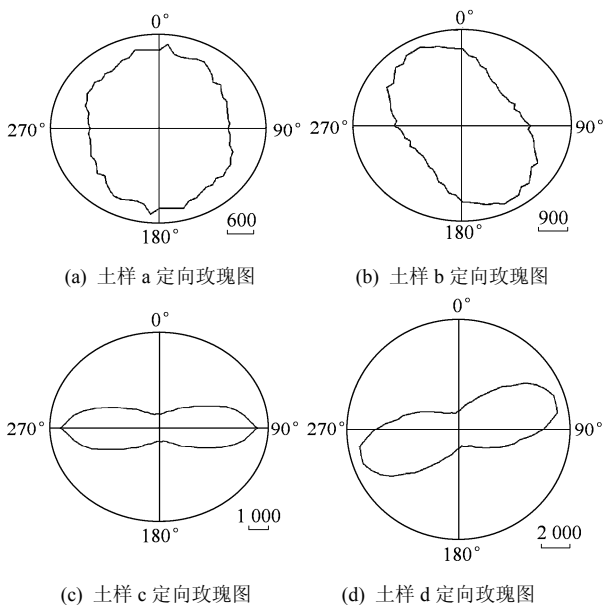


图 5 各土样最佳坡级对应的颗粒定向玫瑰图

Fig.5 Rosette histograms of various soil samples under the optimum slope class

根据最佳玫瑰图形态, 利用标准差椭圆原理得到最佳拟合椭圆的长轴和短轴并计算主定向角及各向异性率(见表 2)。

表 2 各试土样品定向参数

Table 2 Orientation parameter of various soil samples

土样编号	椭圆长轴 /像素	椭圆短轴 /像素	主定向角 /($^{\circ}$)	各向异性率 /%
a	1 964	1 733	175.81	11.74
b	2 038	2 718	149.09	25.00
c	3 501	1 482	88.86	57.66
d	5 038	2 212	73.80	56.09

5 分析与讨论

本文所述的方法的关键技术在于如何确定统计所需要的位于颗粒边界的像素点, 通过不同颜色进行渲染的坡度图可以在一定程度上帮助获得边界的像素点, 但人为判断缺少可观性。试验结果表明, 不同坡级下的统计结果对定向参数的影响不同。

5.1 计算误差分析

对每个土样分别按照不同坡级绘制坡向玫瑰图, 可以发现一个共同的特性, 即在低坡级范围内的定向玫瑰图在第一象限的 0° , 45° 和 90° 三个特征角度上存在明显的尖峰现象, 其他象限的对应位置也是如此, 图 6 中小于 60° 坡级的玫瑰图都是如此(见图 6(a), (b), (c)), 图中比例尺为像素数。这一

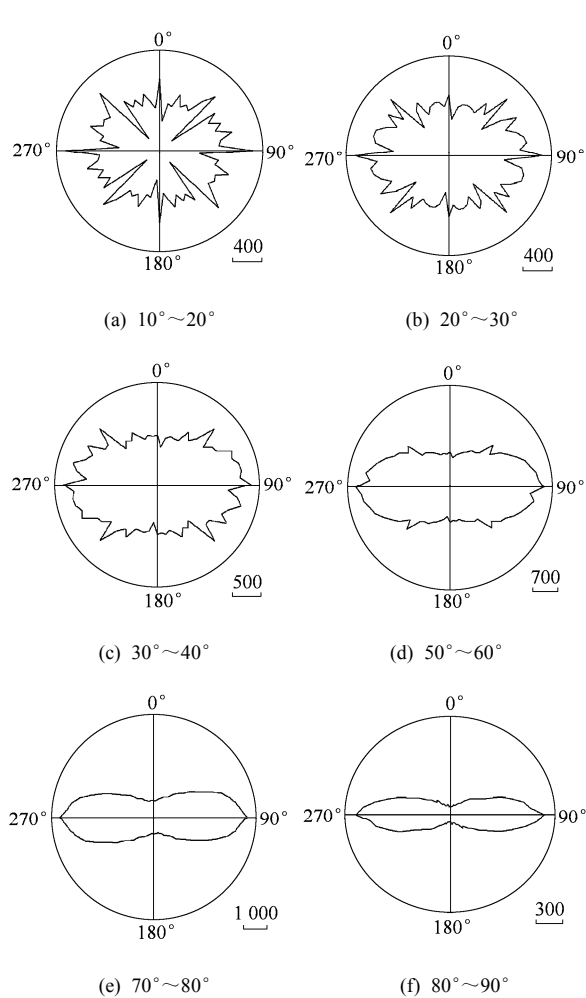
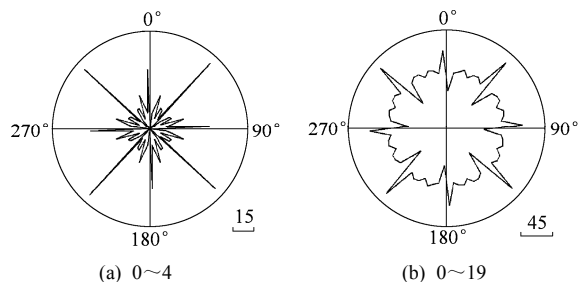


图 6 土样 c 各区间定向玫瑰图

Fig.6 Rosette histograms of sample c under different slopes

现象强度梯度法中也普遍存在^[13]。随着坡级提高, 尖角逐渐消失(见图 6(e), (f))。

这一现象产生的机制首先是来自于坡向的计算方法^[16]。以一幅灰度值随机分布的图像为例, 当所要计算的单元的周围像素灰度值的变化范围较小时, 坡向值为 0° , 45° 和 90° 的概率将明显高于其他坡向值。当分别用不同灰度值变化范围的随机图像进行模拟(见图 7, 图中比例尺为像素数)后可以发现, 当图像灰度变化范围较小时, 其特征角度处的尖峰非常明显, 随灰度值范围的增加, 尖角消失。



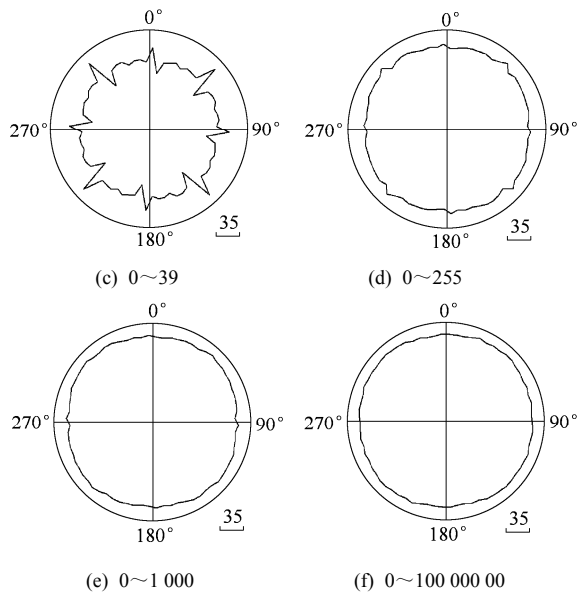


图7 不同灰度范围随机图像模拟的定向玫瑰图
Fig.7 Rosette histograms of random images with different gray intensities

而对于正常土样的 SEM 图像，低坡度级别下的像素的灰度值变化范围很小，且这些像素点位于颗粒的内部(或者由于扫描原因产生的随机噪波)，其灰度值的分布符合或接近随机分布，因此出现尖峰。而边界处的像素，由于其坡向(灰度值变化方向)基本垂直于边界，因此不符合随机分布，且灰度变化范围加大(最大值为 255)，这样尖峰自然消失。

由此可见，通过细分坡度级别，寻找尖峰消失的临界坡度值可以剔除计算误差对定向玫瑰图的影响。在剔除低坡度区间后，其他级别上的优势定向方向可以客观的描述该级别上像素的定向特征。

5.2 坡度级别对各向异性率及主定向角的影响分析

根据图 6 得到的不同坡级下的玫瑰图拟合椭圆获得椭圆的长轴和短轴后计算得到的土样的各向异性率(见图 8)，可以看出，随着坡级的不断增高，土样的各向异性率不断增大，当坡级增加到一定量之后，参与统计的像素值变小，各向异性率会发生不规律变化。

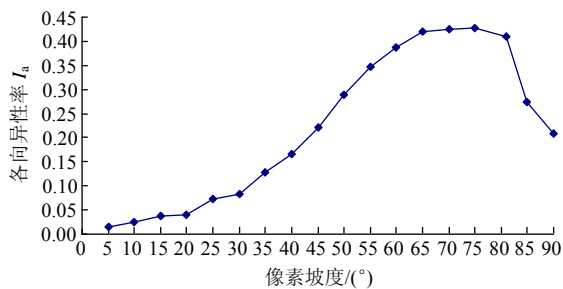


图8 土样 c 在不同坡级下各向异性率变化曲线图
Fig.8 Index of anisotropy of different slope classes of sample c

对于土样 c 来说，在坡级超过 80°后发生骤降，但在试验中，某些土样在各向异性率达到稳定后也有可能出现骤升，由此可见，坡级对各向异性率的影响较大。因此，要获得比较合理的各向异性率，在坡级确定中，除了考虑算法误差外，还需要根据其各向异性率的变化，尽量选择各向异性率出现骤升或骤降之前的坡度作为分析土样各向异性率的最佳坡级。

土样 c 在不同坡度下的主定向角的变化见表 3，从表中可以看出，坡级对主定向角的影响较小。这主要是因为低坡级下的尖峰是中心和轴对称的，它仅对拟合椭圆的扁率产生影响，而对轴向的影响较小。

表 3 土样 c 在不同坡度下的主定向角变化

坡度	主定向角	坡度	主定向角
0~10	95.34	50~60	83.45
10~20	92.45	60~70	85.34
20~30	91.15	70~80	86.35
30~40	87.86	80~90	88.76
40~50	85.54	0~90	87.56

5.3 最佳坡度区间的确定

所谓最佳坡度区间主要是颗粒边缘定向特征而言。如前所述，颗粒的边界处像素灰度与颗粒形貌之间的对应关系最好，最能够表达颗粒表面的高度变化。而颗粒内部的像素灰度除受颗粒表面高度变化影响外，还与颗粒密度、成分等相关。如在某一个处于较低位置处的微小突起，其灰度值都会表现为明亮的像素。这些高亮的像素主要分布在颗粒内部，而较少分布于颗粒边缘，因此颗粒边缘像素可以很好的描述颗粒的定向特征。因此确定颗粒边缘显得至关重要。

通过 ArcGIS 的可视化显示功能，可以帮助判断边缘像素对应的坡度级别，但不够客观，人为判断结合各向异性率变化曲线分析，可以获得较好结果。即在人为判断获得的坡度(如 60°)基础上，确定分析区间(如 55°~最大坡度)。通过计算各坡度级别下的各向异性率，各向异性率原则上应当逐渐上升并趋于平稳，最后在坡度较高的级别上将出现不稳定变化，即骤升或骤降，此时认为该坡度级别已经不能代表颗粒边界，将该坡度级别之前的坡度作为最佳坡度，并取最佳坡度以上的所有像素作为统计对象作为最终各向异性率参数。如果在各向异性

率曲线上出现明显的平稳段, 也可以取平稳段的各向异性率作为最终的各向异性率参数, 但在实际工作中, 明显的稳定各向异性率很难确定。

但是需要注意的是, 由于颗粒内部的异常突起多数表现为高坡度像素, 这些像素的坡向比较趋向于随机定向, 因此该方法确定的最终各向异性率仍会偏低。消除内部颗粒异常突起的有效方法是先对图像进行去噪处理, 由于篇幅的关系本文不作赘述。

6 结 论

利用土样扫描电镜照片中灰度值差异可以反应颗粒表面形态特征的特点, 利用 GIS 中的坡度坡向分析原理, 提出了一种利用颗粒边界的坡向统计方法获得土样颗粒定向性定量参数方法。通过实例研究, 得到如下结论:

(1) 本方法利用坡度对像素进行分级、利用坡向表征像素定向, 较强度梯度法中利用强度变化矢量和强度梯度具有更加明晰的物理意义。而利用 ArcGIS 空间分析方法使分析过程更简单, 且可以在可视化环境下辅助判断颗粒边缘。

(2) 本方法利用像素统计方法计算土样的总体定向特征, 克服了 SEM 图像分割颗粒的困难, 也避免了灰度阈值设置而带来的误差, 尤其对于难以区分颗粒与孔隙明确边界的膨胀土样的颗粒定向, 具有非常好的效果。

(3) 由于图像中随机微小突起的影响, 其对各坡级下的各向异性率会偏小, 因此运用本方法得到的各向异性率最终值总是小于真实值, 但对主定向角的影响相对较小。

参考文献(References):

- [1] 李生林, 秦素娟, 薄遵昭, 等. 中国膨胀土工程地质研究[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.(LI Shenglin, QIN Sujuan, BO Zunzhao, et al. Studies of the engineering geology of expansive soils in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1992.(in Chinese))
- [2] 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 appraisal on microstructure of compacted clayey soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(4): 57 - 62.(in Chinese))
- [3] 施 斌. 黏性土微观结构定向性的定量研究[J]. 地质学报, 1997, 71(1): 36 - 43.(SHI Bin. Quantitative orientation studies on microstructure of clayey soil[J]. Acta Geologica Sinica, 1997, 71(1): 36 - 43.(in Chinese))
- [4] 梁双华, 孙如华, 李文平. 基于 Mapinfo 和 Photoshop 的黏性土扫描电镜图像处理[J]. 河南科技大学学报, 2005, 26(1): 55 - 58.(LIANG Shuanghua, SUN Ruhua, LI Wenping. Using Mapinfo and Photoshop to study sem images of clay[J]. Journal of Henan University of Science and Technology, 2005, 26(1): 55 - 58.(in Chinese))
- [5] OSIPOV J B, SOKOLOV B A. Quantitative characteristics of clay fabrics using the method of magnetic anisotropy[C]// Bulletin of the International Association of Engineering Geology. [S.l.]: [s.n.], 1972: 23 - 38.
- [6] TOVEY N K. A digital computer technique for orientation analysis of micrographs of soil fabric[J]. Journal of Microscopy, 1980, 120(2): 303 - 315.
- [7] TOVEY N K, SOKOLOV V N. Quantitative SEM methods for soil fabric analysis[C]// Scanning Electron Microscopy. [S.l.]: SEM Inc., 1981: 536 - 554.
- [8] TOVEY N K, SMART P. Intensity gradient techniques for orientation analysis of electron micrographs[J]. Scanning, 1986, 8(2): 75 - 90.
- [9] 吴义祥. 工程黏性土微观结构的定量评价[J]. 中国地质科学院院报, 1991, 23(2): 143 - 151.(WU Yixiang. Quantitative appraisal on microstructure of engineering clayey soil[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1991, 23(2): 143 - 151.(in Chinese))
- [10] 施 斌, 李 立, 姜洪涛, 等. DIPIX 图像处理系统在土体微结构定量研究中的应用[J]. 南京大学学报, 1996, 32(2): 275 - 280.(SHI Bin, LI Li, JIANG Hongtao, et al. Application of DIPIX image processing system into quantitative analysis of soil microstructure[J]. Journal of Nanjing University, 1996, 32(2): 275 - 280.(in Chinese))
- [11] 王宝军, 施 斌, 刘志彬, 等. 基于 GIS 的黏性土微观结构的分形研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 244 - 247.(WANG Baojun, SHI Bin, LIU Zhibin, et al. Fractal study of microstructure of clayey soil by GIS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 244 - 247.(in Chinese))
- [12] UNITT B M, SMITH K C A. The application of the minicomputer in scanning electron microscopy[C]// BRANDON D G ed. Proceedings of the 6th European Congress on Electron Microscopy. Jerusalem: TAL International Publishing Company, 1976: 162 - 167.
- [13] TOVEY N K, KRINSLEY D H. A technique for quantitatively assessing orientation patterns in sand grain microtextures[J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1990, 41(1): 117 - 127.
- [14] TOVEY N K, KRINSLEY D H. Mapping of the orientation of fine-grained minerals in soils and sediments[J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1992, 46(1): 93 - 101.
- [15] WANG B J, SHI B, HILARY I. GIS-based quantitative analysis of orientation anisotropy of contaminant barrier particles using standard deviational ellipse[J]. Soil and Sediment Contamination, 2008, 17(4): 437 - 447.
- [16] 张渭军, 王文科, 孔金玲, 等. 基于 Geomap 的坡度坡向分析[J]. 测绘学报, 2006, 31(4): 142 - 144.(ZHANG Weijun, WANG Wenke, KONG Jinling, et al. Slope and aspect analysis based on Geomap[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 31(4): 142 - 144.(in Chinese))