

基于标准差椭圆法 SEM 图像颗粒定向研究原理与方法

王宝军

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 土体的结构特性研究是土力学和土质学研究的前沿课题, 而关于土颗粒定向特性的定量研究方法相对较少, 某些方法由于需要过多的人为判断而缺乏客观性。引入 ArcGIS 中用于点集分布特征的分析方法——标准差椭圆法, 通过微观结构图像的转换和处理, 利用标准差椭圆给出图像中所有颗粒的定向角分布, 进而计算土样的主定向角和各向异性率。该方法为颗粒定向的定量研究提供了一个科学、客观和可靠的手段。

关键词: 标准差椭圆; 颗粒定向; 微观结构; SEM

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)07-1082-06

作者简介: 王宝军(1973-), 男, 吉林长春人, 博士, 主要从事 GIS 在岩土工程中的应用研究工作。E-mail: baojun@nju.edu.cn。

Theories and methods for soil grain orientation distribution in SEM by standard deviational ellipse

WANG Bao-jun

(School of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Studies on soil microstructure are the front edge of the subject on soil mechanics and soil properties. However, the quantitative studies on the orientation characteristics of soil grains in the soil microstructural images (SEM) are an intractable subject in the past decades. An analytical method called the standard deviational ellipse method, which is often used for point set distribution analysis in geographical information system (GIS), is introduced for quantitative analysis of soil grains. Through the conversion and processing of soil microstructural images, the orientation angles of soil grains' can be fast determined by using the standard deviational ellipse method, and the correlative data can be statistically analyzed, and then the characteristic of the soil grain orientation distribution can be obtained. The results show that the method is more scientific, objective and reliable for the quantitative studies on soil grain orientation distribution.

Key words: standard deviational ellipse; grain orientation distribution; soil microstructure; SEM

0 引言

土体在宏观上表现出来的复杂工程地质特征, 许多与土体微观结构的不均匀性有关, 尤其是在长期的地质历史过程中, 土体在构造应力、自重应力、地下水以及工程活动等的作用下, 土颗粒的排列方式必将作相应的调整以达到新的平衡, 因此, 颗粒的定向性反映了土体的应力过程, 对于土体工程性质也将产生较大的影响。因此研究土颗粒的定向性具有重要的理论价值和工程意义。

扫描电镜 (SEM) 是目前研究土微观结构的主要手段之一, 这方面的研究成果也比较多^[1-6]。施斌利用莫斯科大学研制的 Videolab 图像分析系统对粘性土 SEM 图像中的孔隙进行了定向性分析, 给出了主定向角、各向异性率以及角度分布玫瑰图^[5], 但由于该系统在国内并不普及, 软件的工作原理也没有相关详尽

报道, 影响了该方法的推广; 在文献[6]中, 施斌提出了一种简易的定量分析方法 (SQM 法), 该方法通过透明纸手工描图, 并人为绘制颗粒 (或孔隙) 的长短轴的方式得到颗粒 (或孔隙) 的定向指标; 王清等也采用简化微观结构图像中颗粒形态的方法进行颗粒定向性的研究^[4], 该方法虽然利用计算机自动统计计算颗粒的方向角等参数, 但仍然采用人工方式对颗粒进行简化, 给出颗粒的长短轴以及方向。以上方法由于过多的人工干预, 尤其是颗粒方向的人为给定, 增加了统计误差, 也增加了统计的工作量, 使得这些方法不适合大量样品的统计分析。

Lefever 早在 1926 年就提出了利用标准差椭圆方

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40572154)

收稿日期: 2008-05-06

法分析离散数据集的分布特征,通过椭圆的长轴方向表征离散数据集的主要分布方向,椭圆的面积表征离散点集分布的分散(紧凑)程度。虽然该方法提出的时间比较早,但在相当长的时间内没有在实践中得到有效应用^[7-8],在1967年 Bashur 等利用该方法对社区人群种族^[9]以及医疗设施分布^[10]等进行分析时使用了该方法,并取得成功。目前该方法已经被嵌入某些大型商业软件如 ArcGIS9.0 中作为分散点集的分布特征分析方法,并且在污染扩散、人口分布、种群分布、犯罪分析等相关领域得到了广泛应用^[11]。

在土的微观结构扫描电镜照片中,如果将颗粒(或孔隙)进行提取,并利用图像处理技术对颗粒进行分割,使之成为独立的颗粒,再以一定的采样频率将颗粒多边形转化为离散点集,就可以利用标准差椭圆的工作原理绘制每个颗粒的定向分布椭圆,然后对整个图像中的所有颗粒的定向角进行统计分析,从而定量分析土样的定向特征,该过程全部采用计算机自动计算完成,减少了人工干预的误差和工作量。本文在简要介绍标准差椭圆方法工作原理的基础上,重点介绍利用该原理统计颗粒定向分布特征的方法和步骤。

1 标准差椭圆基本原理

在离散点集的原始坐标系(XOY)下,假设存在某一方向,所有离散点到该方向的标准差距离最小,那么,该方向与原坐标轴的 X 方向的夹角 θ 就是点集的定向方向。将坐标轴进行旋转形成新的坐标系($X' O' Y'$),新的坐标系的坐标原点为点集中所有点的平均值中点 (μ, ν) ,见图1。

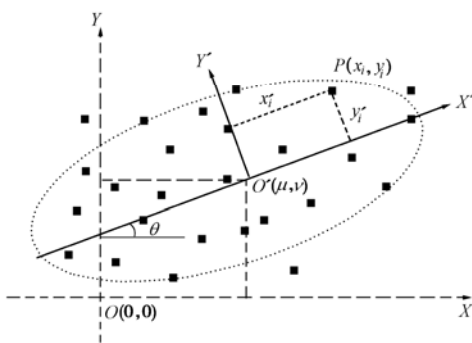


图1 标准差椭圆示意图

Fig. 1 Standard deviational ellipse

μ 和 ν 的取值则分别为点集中所有点的 x 坐标值和 y 坐标值的平均值,

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad \nu = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (1)$$

所有点到新坐标系下的 X 轴的标准差距离 $\sigma_{y'}$ 可以表示为^[8]

$$\sigma_{y'} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y'_i)^2}{n}} \quad (2)$$

式中, $y'_i = (y_i - \nu) \cos \theta - (x_i - \mu) \sin \theta$, 令 $\bar{y}_i = y_i - \nu$, $\bar{x}_i = x_i - \mu$, 并将其代入式(2)得:

$$\sigma_{y'} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \bar{y}_i^2 \cos^2 \theta - 2 \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \bar{y}_i \cos \theta \sin \theta + \sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 \sin^2 \theta}{n}} \quad (3)$$

当在假定的新坐标系下标准差距离最小时,则假定的坐标系的旋转角度 θ 就是离散点集的定向方向。对式(2)求一阶导数可以获得最大(最小)的标准差距离,

$$\frac{d\sigma_{y'}}{d\theta} = \frac{1}{n\sigma_{y'}} \left[\sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 \cos \theta \sin \theta - \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \bar{y}_i (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) - \sum_{i=1}^n \bar{y}_i^2 \cos \theta \sin \theta \right] \quad (4)$$

则

$$\tan \theta = \frac{(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \bar{y}_i^2) \pm \sqrt{(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \bar{y}_i^2)^2 + 4(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i \bar{y}_i)^2}}{2 \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \bar{y}_i} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)中可以获得两个标准差距离,其中最大标准差距离 $\sigma_{x'}$ 为椭圆的长轴长度,最小的距离 $\sigma_{y'}$ 即为椭圆的短轴长度, θ 即为坐标系的旋转方向角,也就是点集的定向方向,见图1。

2 颗粒定向性的统计原理与方法

2.1 基本原理

在扫描电镜照片中,颗粒和孔隙是通过不同的灰度来表现的,一般浅色部分为颗粒,深色部分为孔隙。由于颗粒表面的起伏,使得图像上的颗粒和孔隙并没有严格意义上的分界线。但在某一个切面上颗粒和孔隙是有界限的,该切面在图像处理中表现为阈值,当灰度值高于该阈值时赋值1,低于该阈值赋值0,这就是图像处理中常用的图像二值化^[3]。

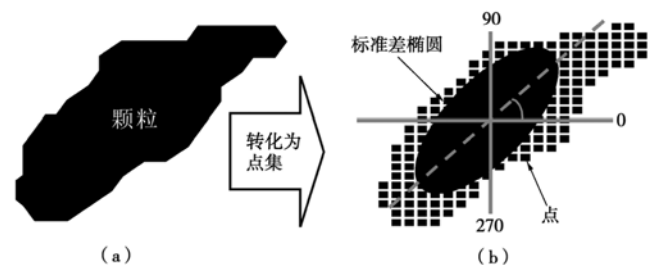


图2 颗粒多边形转化为点集

Fig. 2 Transformation polygon of grains to point set

图像二值化后,颗粒表现为复杂形状的图斑,图2(a)中的黑色多边形为经过二值化后的某颗粒的示意图。在实际工作中,一张SEM照片中会存在几十甚至上百个这样的颗粒。现以单个颗粒进行阐述如何应用标准差椭圆方法实现颗粒的定向。对于图2(a)中的颗粒,如果仅通过肉眼很难准确判断颗粒的定向方向,不同人会给出不同的方向,无法科学的确定定向角。如果将图2(a)中的颗粒多边形以一定的采样频率转化为离散点集(图2(b)),就可以按照标准差椭圆的原理,分别计算出分散点集的中心 (μ, v) ,以及椭圆的旋转角度 θ ,椭圆长轴 σ_x 和短轴 σ_y ,其中椭圆的旋转角度 θ 就是我们要统计的颗粒定向方向。

2.2 颗粒定向统计方法

以上介绍的原理是针对每一个独立颗粒计算其定向角。然而,要描述整个土样的定向性还必须对所有颗粒的定向角进行统计分析。定向性的统计方法目前主要包括定向分布玫瑰图、主定向角、各向异性率^[5-6]、平均定向方向、定向分布函数以及定向分布直方图等^[4]。本文主要采用定向玫瑰图、主定向角以及各向异性率来描述土样的定向特征。

定向玫瑰图是将所有参与统计的颗粒的定向角按照一定的角度间隔(一般采用 5° 或 10°)分级,然后统计每一个角度间隔内颗粒的个数,最后绘制成玫瑰图,图3为某土样的颗粒定向玫瑰图。由于定向方向的对称性,只需要绘制 $0^\circ \sim 180^\circ$ 区间内的玫瑰图,然后通过镜像获得 $0^\circ \sim 360^\circ$ 区间的定向玫瑰图。因此,在统计过程中,需要将大于 180° 的颗粒的定向角减去 180° 进行统计。

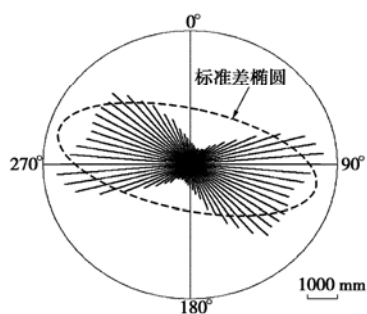


图3 某土样颗粒的定向玫瑰图及拟合椭圆

Fig. 3 Rosette histogram and best fitting ellipse of a soil sample

利用玫瑰图可以直观了解土样中颗粒的定向分布特征,但这种描述仅仅是半定量的。要对土样进行完全的定量描述,还需要确定土样中颗粒的主定向角和各向异性率。要确定主定向角和各向异性率,首先需要用椭圆去拟合玫瑰图中的各个数据点,这个椭圆称为最佳拟合椭圆。该椭圆的旋转角度即为土样的颗粒主定向角,各向异性率则表示为^[6]

$$I_a = \frac{R-r}{R} \times 100\% \quad (6)$$

式中, I_a 为各向异性率, R 为定向椭圆的长轴长度, r 为短轴长度。

在计算机技术广泛应用以前,人们往往根据玫瑰图进行肉眼判断,然后手工绘制椭圆,缺少客观性和科学性。本文仍然采用ArcGIS中提供的标准差椭圆的方法,可以同时获得主定向角和各向异性率。

2.3 实现方法与步骤

以上介绍了利用标准差椭圆实现SEM图像中颗粒定向的基本原理,我们可以通过编程实现上述过程。但是由于整个过程中涉及到图像处理、颗粒提取与编码、标准差椭圆分析以及绘图等多个部分,编程过程相对复杂。利用已有软件实现上述过程更能保证研究成果具有可比性,且易于推广。如前所述,ArcGIS9.0将标准差椭圆的方法引入到了点集定向性分布的工具集中,配合ArcGIS9.0提供的其他工具使整个分析过程更加方便,图4给出了整个分析过程的流程图,全部过程均可以在ArcGIS9.0中完成,图像二值化过程也可以在其它图像处理软件中完成,如Photoshop等。

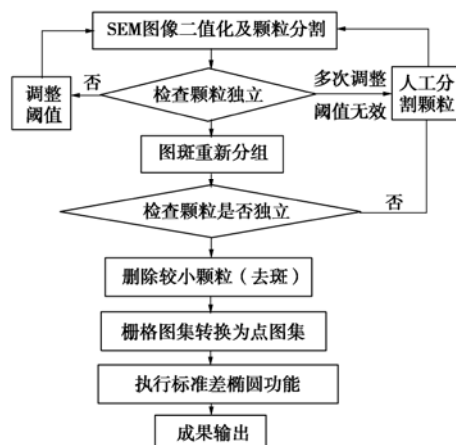


图4 基于ArcGIS实现颗粒定向统计流程图

Fig. 4 Flow chart of grain orientation distribution by ArcGIS

(1) 图像二值化与颗粒分割

该过程是将灰度(0~255)图像转化为0和1表达的黑白图像,对于SEM图像而言,不是颗粒就是孔隙,不存在中间状态,缺省情况下白色(0)表示颗粒,黑色(1)表示孔隙。阈值的选取对灰度图像二值化的结果影响很大,阈值越大,图像中颗粒的面积越小,反之颗粒的面积越大,并且颗粒之间将会发生彼此较链现象,如图5所示。但是如果阈值过大,虽然颗粒之间彼此独立开来,但形成的黑色图斑却不能真实反映颗粒的形态。因此,阈值调整需要反复多次。在调整阈值的过程中,注意与原始图像进行对比,使得大多数的黑色图斑能够反映原始颗粒的形态,同时

满足颗粒彼此独立。

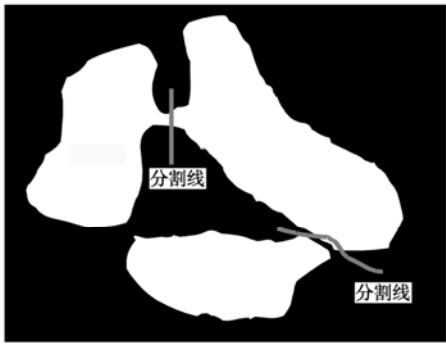


图 5 添加分割线辅助提取颗粒示意图
Fig. 5 Grain extraction by adding split lines

但是，一般来说同时满足以上两个条件是很难达到的，尤其是对于结构连接比较紧密的土颗粒。因此在图像处理过程中，通过阈值调整无法将视觉上可以识别的彼此明显独立的颗粒分割开时，需要用人工干预的方式将两个或多个颗粒分割开。具体方法是在彼此铰链的颗粒连接最“薄弱”的颈缩部分用黑色线条分割断，见图 5。处理过程中，只要能够保证颗粒像素级别上分开即可，即两个颗粒之间只要有一个像素宽度的分割线存在，在后面的计算机处理中就可以实现颗粒的独立。

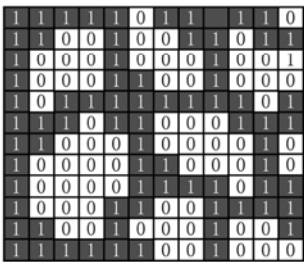
(2) 颗粒分组

上面提到的图像中的颗粒和孔隙是分别用 0 和 1 表达的栅格图像，经过颗粒分割后的颗粒虽然在视觉上彼此独立，但在数学上仍处于一个数据集当中（图 6（a））。ArcGIS 中提供的“区域分组”工具是根据栅格图像中栅格点的空间位置以及相互连接状态而进行分类的一种方法。分组后在空间上独立的颗粒将被重新赋值，不同组的栅格单元有不同编号，见图 6（b）。

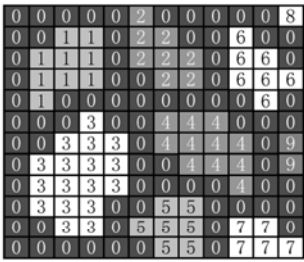
(3) 去斑

所谓“斑”指的是 SEM 图像经过二值化处理后产生的彼此独立的面积很小的图块，如图 6（b）中编号为 8 和 9 的组。一般来说，这些图块只有几个或十几个像素组成（取决于扫描图像的分辨率），它们并不代表实际意义上的颗粒形态，因此在统计分析中应当排除这部分图块。

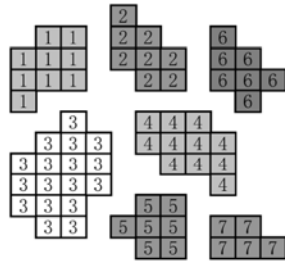
在许多图像处理软件如 Photoshop 中也提供“去斑”的功能，但在 ArcGIS 中提供的 Set Null 或 Classify 功能对于去除小图斑更加方便。另外，由于我们需要分析的是颗粒的定向性，还应当利用该方法去除图像中的孔隙部分。关于如何利用 Set Null 或 Classify 功能实现去除斑点及孔隙，请参阅 ArcGIS 相关手册或文献^[12]，去斑后的结果如图 6（c）所示。



(a) 分组前的二值栅格图



(b) 分组后的栅格图



(c) 去斑后的栅格图

图 6 栅格图像分组示意图

Fig. 6 Processing of region groups

(4) 图像重采样与数据集转换

数据集转换是 GIS 的基本功能之一，本次研究中涉及到的数据集转换是由栅格数据向矢量点集数据的转换。扫描图片或经图像处理得到的二值图都是以像素点为存储单元的栅格数据，在 ArcGIS 中以图片的像素数描述栅格图单元尺寸。由于研究的颗粒或孔隙大小仅仅是相对于整个图片而言，因此单元尺寸的绝对值和单位不会影响最终的结果，因此在分析过程中，可以不必考虑长度单位，而图片的分辨率则更加重要。

在 ArcGIS 提供的“重采样”方法调整栅格图像的精度，即表达每一个独立颗粒所用的点的个数，重采样使用的像素个数越多，转换为点集后图斑包含的点数量越少；反之，转换为点集后图斑包含的点数量越多。图像重采样完成后，应用 ArcGIS 的“栅格转点集”工具实现由栅格图像向点集的转换，前面进行的分组结果中的属性值则保存在转换后的点集的属性表中，该值被自动存储在名为 GRID_CODE 的属性字段中，该值对后面的统计分析是至关重要的。

(5) 定向性统计与输出

完成以上准备工作后，在 ArcGIS 中实现颗粒定向分析是非常简单的。图 7 是 ArcGIS 的“标准差椭圆

圆定向分析”对话框。在 Input Feature Class 项目中选择转换为点集的图层数据,在 Output Ellipse Feature Class 输入存储标准差椭圆的图集文件目录和文件名。在 Ellipse Size 中选择显示标准差椭圆大小,该设置不会影响最终的统计结果。Case Field 用于设置点集统计的范围,由于本次研究的目的是得到不同组的独立的定向信息,即每个颗粒的定向角数据,因此我们需要对每个颗粒图斑分别获得标准差椭圆,而颗粒标识为离散点的 GRID_CODE 属性项,因此在 Case Field 项中应当选择 GRID_CODE 项。



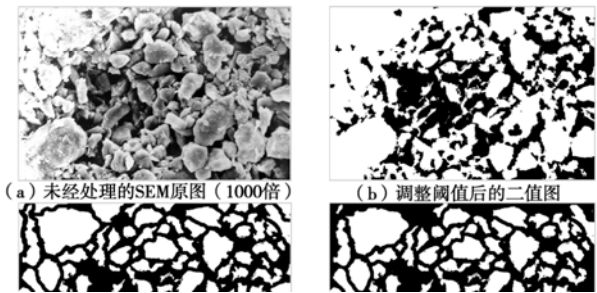
图 7 标准差椭圆工具对话框

Fig. 7 Dialogue form of standard deviational ellipse

执行标准差椭圆定向后,系统将为每个颗粒绘制一个独立的标准差椭圆,并以图层的方式在窗口中显示,每个颗粒的定向信息存储在该图层的属性表中,该表的属性字段及含义见表 1



化(图 8 (b)),添加分割线以提取独立的颗粒图斑(8 (c))。在添加分割线过程中,在图像处理软件(PhotoShop)中将二值图和未经处理的灰度原图叠加,将二值图设置为半透明,这样就可以同时根据灰度原图和二值图进行比较,确定合理的分割线位置。从图 8c 中可以看出,在图像的边界上有一些缺损的颗粒,这些颗粒中有些颗粒根本无法判断其定向性,在对整个土样进行颗粒的定向分析中,这些颗粒会对统计结果产生影响,因此需要进行清除,见图 8 (d)。图 8 (e) 给出的是颗粒分组并去除小颗粒(斑)后的渲染图,不同的分组由不同的颜色显示。小颗粒(斑)的确定主要根据分组后的属性数据表中每组中栅格单元个数来确定,由于本次试验所用样品在单元个数为 11 处有明显的突变,大多数颗粒的单元个数大于 11,因此选择该阈值去除小颗粒(斑)。图 8 (f) 是将图 8 (e) 的分组后的栅格图转换为矢量点图层,图层中最小颗粒的点数为 11 个,最大颗粒的点数为 4150 个。



片见图 8 (a),图片的原始分辨率为 800×522 像素。

3.2 数据处理

按照前面介绍的流程,分别对图 8 (a) 进行二值

土样的主定向角为 13.445°,各向异性率为 11.4%。由此可以看出,该土样各项异性率较小,也就是说该土样不具有明显的定向性。

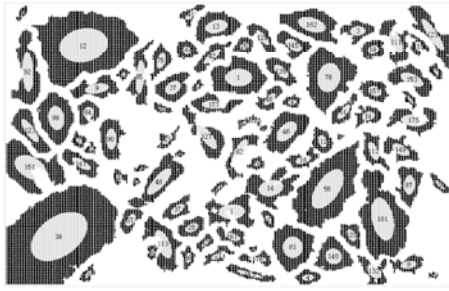


图9 独立颗粒定向角结果图

Fig. 9 Result of orientation distribution analysis using SDE

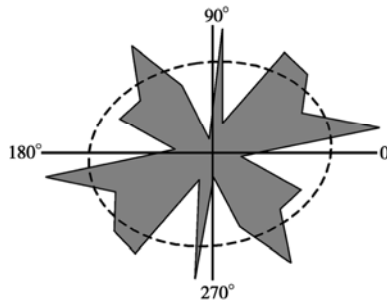


图10 土样颗粒定向玫瑰图

Fig. 10 Rosette histogram of soil samples

4 结 语

本文系统介绍了利用标准差椭圆统计 SEM 图像中土颗粒定向特征的原理、方法和步骤。该方法解决了依靠人工统计颗粒定向性带来的主观性、工作量大和精确性差等不足。提供了一种通过计算机自动处理和统计分析颗粒定向性的定量方法。利用解决宏观问题的 GIS 软件处理微观问题是本次研究的一个重要特点, ArcGIS 中提供的定向性分析模块可以很好的解决从颗粒提取、颗粒定向到显示输出的所有问题, 减少了独立开发软件的工作量, 同时也提高了分析流程的标准化。

参考文献:

- [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: 171 - 185. (LI Sheng-lin, QIN Su-juan, BO Zun-zhao, et al. Studies on the engineering geology of expansive soils in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1992: 171 - 185. (in Chinese))
- [2] 李 兰, 王兰民, 王 峻. 黄土微观结构特征定量研究及其在工程地震中的应用[J]. 甘肃科学学报, 2006, 18(1): 120 - 124. (LI Lan, WANG Lan-min, WANG Jun. A quantitative study on the characteristics of microstructure of loess and its application to engineering seismic[J]. Journal of Gansu Sciences, 2006, 18(1): 120 - 124. (in Chinese))
- [3] 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 Bao-jun, SHI Bin, LIU Zhi-bin, et al. Fractal study on microstructure of clayey soil by GIS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 244 - 247. (in Chinese))
- [4] 王 清, 王凤艳, 肖树芳. 土微观结构特征的定量研究及其在工程中的应用[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(2): 148 - 153. (WANG Qing, WANG Feng-yan, XIAO Shu-fang. A quantitative study of the microstructure characteristics of soil and its application to engineering[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(2): 148 - 153. (in Chinese))
- [5] 施 斌, 姜洪涛. 粘性土的微观结构分析技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 864 - 870. (SHI Bin, JIANG Hong-tao. Research on the analysis techniques for clayey soil microstructure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 864 - 870. (in Chinese))
- [6] 施 斌. 粘性土微观结构简易定量分析法[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(1): 7 - 10. (SHI Bin. A simplified quantitative analysis method for soil microstructure[J]. 1997, 24(1): 7 - 10. (in Chinese))
- [7] WELTY Lefever D. Measuring geographic concentration by means of the stand deviational ellipse[J]. The American Journal of Sociology, 1926(1): 88 - 94.
- [8] YUILL Robert S. The standard deviational ellipse; an updated tool for spatial description[J]. Geografiska Annaler (Series B). Human Geography, 1971, 53(1): 28 - 39.
- [9] BASHUR Rashid L, SHANON Gary W, FLORY Stanley E, et al. Community interaction and racial integration in the Detroit area: an ecological analysis[R]. US Office of Education, 1967.
- [10] BASHUR Rashid L, SHANNON Gary W, METZNER Charles A. The Application of three-dimensional analogue models to the distribution of medical care facilities[C]// Paper Presented to the 97th Annual Meeting of the American Public Health Association, Philadelphia, 1969.
- [11] 姜云鹏. 在 ArcGIS 9 中进行空间统计[J]. 中国通讯, 2006, 19: 1 - 9. (JIANG Yun-peng. Spatial statistic in ArcGIS9.0[J]. Chinese Communication, 2006, 19: 1 - 9. (in Chinese))