

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.01.20

基于CT影像的砂岩文物结构特征分析

王莹莹¹, 徐金明^{1,2}, 黄继忠²

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 上海大学文化遗产保护基础科学研究院, 上海 200444)

摘要: 对于砂岩文物, 成分不同、结构不同, 表面变化过程和变化结果也不同。以中国三处(石门山、云冈石窟、乐山大佛)砂岩文物为例, 联合使用肉眼鉴定与灰度阈值法得到了砂岩文物CT图像中不同矿物成分的实际分布, 分析了不同位置切片图像的成分特点与结构特点, 研究了砂岩内部结构数字图像特征参数的变化规律, 探讨了三处砂岩文物数字图像特征参数的区别及其与岩样外观表现的关系。结果表明, 三处砂岩文物样品主要成分均为石英和长石, 石英含量大小顺序是石门山砂岩 > 云冈石窟砂岩 > 乐山大佛砂岩; 乐山大佛砂岩形状变化最小, 云冈石窟砂岩次之, 石门山砂岩形状最不规则; 石门山砂岩纹理最复杂, 乐山大佛砂岩最为简单; 乐山大佛砂岩表面风化严重、但随深度增加变化不明显, 云冈石窟砂岩距表面越深、风化越弱, 石门山砂岩风化变化比较复杂。研究结果对石质文物保护具有重要的参考价值。

关键词: CT; 砂岩; 文物; 数字图像特征参数

中图分类号: P341

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)01-0127-08

Analysis on structural features of sandstones relics using digital image technology based on CT images

WANG Yingying¹, XU Jinming^{1,2}, HUANG Jizhong²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Basic Scientific Research Institute of Cultural Heritage Protection, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: For sandstone cultural relics, the composition and structure are different, resulting in the changes in the process and result of the relics' surfaces. In this study, taking three sandstone cultural relics (or Shimenshan grotto, Yungang grotto and Leshan buddha) in China as the examples, the actual distributions of different mineral compositions in CT images of sandstone cultural relics were obtained by using the visual identification and gray threshold method. The composition types and textural features of the slice images on various locations were explored. The variations in the digital features of internal structures of the sandstones were then investigated. The relations between the digital features and the appearance of the sandstones were thereafter obtained. The results show that, the main compositions in sandstone cultural relics of the three locations are quartz and feldspar with the great-small order of the quartz contents in Shimenshan grotto > Yungang grotto > Leshan Buddha; the shapes of the sandstone in Leshan buddha change least, followed by those in Yungang grotto and then by Shimenshan grotto; the sandstone textures of the Shimenshan is the most complex, while those in Leshan buddha is the most simple; the sandstone weathering is serious on the surface and not obvious with the depth increase for the Leshan buddha, while the sandstone weathering decreases with

收稿日期: 2019-05-08; 修订日期: 2019-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(41472254); 山西省重点研发计划项目(201803D31080)

第一作者: 王莹莹(1992-), 女, 河南周口人, 岩土工程专业, 硕士, 主要从事岩土工程的科研工作。E-mail: YingYingW2017@163.com

通讯作者: 徐金明(1963-), 男, 江苏南通人, 岩土工程专业, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质与岩土工程的教学与科研工作。E-mail: xjming@163.com

the depth increase for Yungang grotto and exhibits a much complexity for Shimenshan grotto. The results may be referable in the protection of sandstone relics.

Keywords: CT; sandstone; relics; digital image feature parameters

0 引言

石窟文物大多有数百甚至上千年的历史,在水和环境污染等各种营力作用下,普遍存在风化问题、裂隙问题、水岩相互作用等问题^[1]。由于文物表面变化过程取决于表面的成分和结构,使用 CT (Computerized Tomography, 计算机层析摄影) 扫描试验和数字图像处理技术可以确定表面附近的成分、结构及其变化特点^[2]。

CT 技术具有无扰动、可多层面分析、机制明确等优点,近年来受到岩土工程研究者的关注。方建银等^[3]将岩石 CT 扫描断面分为完整区、损伤区和孔洞裂纹区,分析了三轴压缩试验过程中粉砂岩孔隙率、损伤率和完整率的变化特征;尹小涛等^[4]通过提取 CT 图像中的裂纹,分析了加载过程中裂纹分维数的变化特征;薛华庆等^[5]使用 CT 扫描结果来表征油砂、致密砂岩和页岩样品的微观结构,分析了常规测试方法与 CT 扫描表征结果的差异性;HAN 等^[6]基于 CT 扫描图,建立了合成岩石和贝雷砂岩的数值模型,利用试验结果验证了数值模型的合理性;闻磊等^[7]建立了利用 CT 数和 X 射线吸收系数表示的岩石冻融衰变函数模型,分析了岩石冻融过程中的完整性损失。

一些学者结合数字图像处理技术与 CT 图像研究岩石的结构特征。朱健伟等^[8]结合数字图像处理技术和扩展有限元方法研究了变形破坏过程中岩石试样中的应力场、位移场、不同组分损伤情况及其与裂缝萌生扩展过程的关系。刘向君等^[9]以常规砂岩为研究对象,使用微 CT 扫描结果与图像处理技术建立了反映真实孔隙结构的三维数字岩芯模型;于庆磊等^[10]利用数字图像处理技术和 CT 图像表征混凝土材料的结构,提出了环状分区与分割阈值自动识别相结合的 CT 图像分割算法;杨振琦等^[11]利用数字图像处理技术和 CT 图像表征花岗岩试件的结构,建立了花岗岩试件的三维数值模型,研究了对单轴压缩条件下花岗岩试件的破裂过程。

现有研究中,砂岩中不同组分实际类型和真实分布的重视还不够,也没有将 CT 技术与砂岩表面附近风化特征很好结合起来。本文拟在使用 CT 技术获取

三处砂岩文物(石门山、云冈石窟、乐山大佛)表面附近切片图像基础上,分析不同深度切片图像的成分、结构与数字特征参数,研究图像特征参数、砂岩所处环境、表面附近风化程度变化的关系,这对合理分析石质文物特点、有效制订石质文物保护措施都有一定的参考价值。

1 CT 试验原理

CT 扫描试验所用仪器由 X 射线源、样品转台、探测器、重构系统组成。X 射线穿透物质后,X 射线强度衰减程度与物体密度、物体厚度成正比;CT 扫描图片的灰度值直接表现了 X 射线的衰减程度:物质的密度越大,X 射线衰减程度就越高,扫描图片灰度值就越大。对于岩石孔隙和裂隙,由于主要成分为密度很小的空气,X 射线衰减程度低,相应 CT 图像为黑色、灰度值较小。

试验仪器主要性能指标为:X 射线源电压为 140 kV;电流为 100 μ A;扫描厚度为 41.5 μ m;放大倍数为 4.81;空间分辨率为 1~2 μ m;密度对比分辨率为 20%;可识别最小体积为 10 μ m 左右。主要操作参数为:扫描模式为连续扫描;扫描过程中,X 射线源和探测器位置保持不变,样品匀速从 180° 旋转至 180°、每旋转 n 度拍摄 1 张图片。

2 砂岩文物中不同组分类型和分布的确定

砂岩文物的风化,主要取决于岩石结构。岩石结构主要包括岩石中不同组分的颗粒形态、大小和连接方式。下面将根据所得 CT 图像、使用数字图像处理技术研究不同组分的类型和分布,它们是岩石结构的核心要素。

2.1 砂岩文物的来源

试验样品分别来源于云冈石窟、乐山大佛和石门山石窟的砂岩,它们的外观情况见图 1。

2.2 砂岩文物的 CT 图像

对三种不同砂岩文物试样进行了 CT 扫描试验,某一切片位置的 CT 扫描图像如图 2 所示,为后续处理方便,将图像都转化为灰度图像。灰度图像中,灰度级是 0~255 中的整数。图 2 中,云冈石窟砂岩切片位置距表面 14.822 mm,像素高度最大为 477,像素宽度

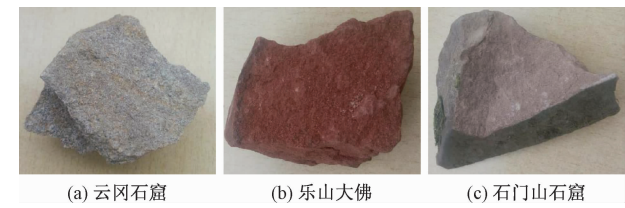


图 1 不同样本的外观情况

Fig. 1 Appearances of specimens at various locations

最大为 585; 乐山大佛砂岩切片位置距表面 16.102 mm, 像素高度最大为 477, 像素宽度最大为 618; 石门山砂岩切片位置距表面 14.822 mm 处, 像素高度最大为 411, 像素宽度最大为 963。

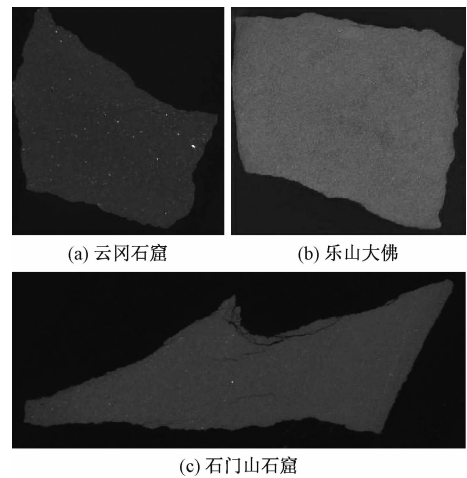


图 2 不同地区砂岩文物样本的 CT 图像

Fig. 2 CT images of sandstone relics specimens in various regions

2.3 CT 图像中组分类型和分布的确定

本次研究采用灰度分界阈值法、通过编制 MATLAB 代码来获得砂岩文物 CT 图像中不同组分的类型和位置。

(1) 不同组分灰度分界阈值的确定

图 2 中砂岩文物的主要组分类型是石英和长石。这两种组分的灰度分界阈值, 使用点选法确定: 首先采用肉眼鉴定确定不同位置点对应的成分类型, 然后提取该点的位置坐标 x 、 y 和相应的灰度值; 然后获得所选点灰度值的统计结果; 最后将所得统计结果应用于整幅图像^[12]。

对于图 2(a), 不同组分的点选位置与灰度值见表 1, 相应的统计结果见表 2。为了将点选灰度值统计结果更好地应用于整幅图像, 使用灰度值统计结果(灰度均值和方差)来确定两种组分的灰度分界阈值 T 。

假设两种组分灰度为相邻分布, 灰度较高组分的

灰度均值和方差分别是 H_1 和 σ_1 , 灰度较低组分的灰度均值和方差分别是 H_2 和 σ_2 , 将两种组分的灰度分界阈值 T 定义为:

表 1 图 2(a) 中不同组分的位置与灰度值

Table 1 Location and gray value of various compositions in Fig. 2(a)

点选 序号	长石			石英		
	像素点位置		灰度 值	像素点位置		灰度 值
	<i>x</i> 坐标	<i>y</i> 坐标		<i>x</i> 坐标	<i>y</i> 坐标	
1	262	394	25	299	398	33
2	464	440	22	169	360	35
3	147	97	23	273	466	35
4	158	430	25	197	107	33
5	286	271	19	223	314	39
.....						
21	170	428	25	331	473	31
22	118	420	23	276	463	34
23	452	400	20	370	478	32
24	349	255	22	368	303	36
25	149	88	21	155	212	33

表 2 表 1 中不同组分的统计结果

Table 2 Statistics of various compositions from table 1

统计量	组分类型	
	长石	石英
点选点数	25	25
灰度均值	22.84	34.76
灰度方差	3.06	6.44

$$T = \text{int}\left[\frac{1}{2}(H_1 - 2\sigma_1) + \frac{1}{2}(H_2 + 2\sigma_2)\right] \quad (1)$$

式中: int——取整计算。
 H_1 ——长石点选点数;
 H_2 ——石英点选点数;
 σ_1 ——长石灰度均值;
 σ_2 ——石英灰度均值, 取整是因为灰度值必须为一整数。

使用这一方法, 使阈值分割结果与肉眼观察所得不同组分总体百分比尽量一致, 得到图 2(a) (云冈石窟砂岩) 长石和石英之间的灰度分界阈值为 25。使用相同方法得到图 2(b) (乐山大佛砂岩) 长石和石英的灰度分界阈值为 45, 图 2(c) (石门山砂岩) 长石和石英的灰度分界阈值为 27。

(2) 不同组分的分布

使用前述所得灰度分界阈值分别对图 2(a)、图 2(b)、图 2(c) 进行分割, 就可得到砂岩文物中不同组分分布的二值图像(分别见图 3、图 4 和图 5)。

由图 3 ~ 图 5 可知, 云冈石窟砂岩(图 3)中长石与石英含量相差不大, 乐山大佛砂岩(图 4)中长石含量

远多于石英含量,而石门山砂岩(图 5)中石英含量远多于长石含量。

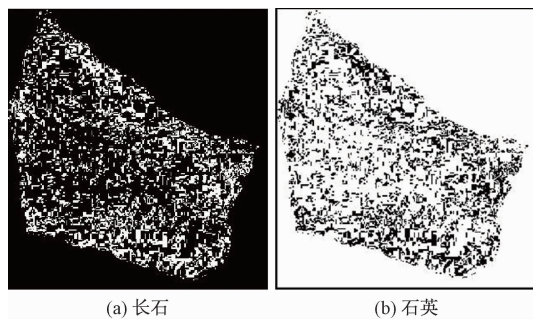


图 3 由图 2(a)得到的不同组分分布

Fig. 3 Composition distributions from CT image Fig. 2(a)

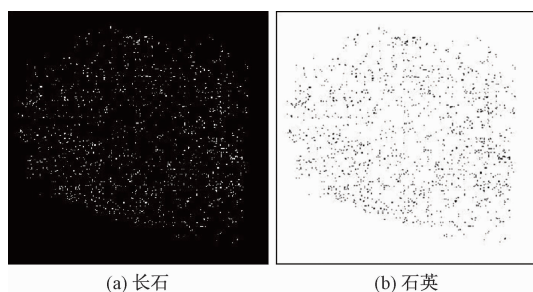


图 4 由图 2(b)得到的不同组分分布

Fig. 4 Composition distributions from CT image Fig. 2(b)

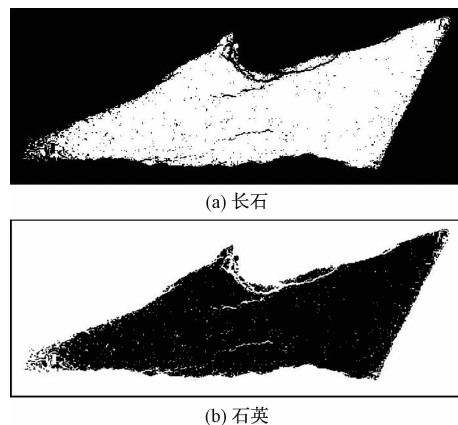


图 5 由图 2(c)得到的不同组分分布

Fig. 5 Composition distributions from CT image Fig. 2(c)

3 不同砂岩文物结构特征的比较

3.1 不同地区砂岩文物的环境特征风化作用是砂岩文物的主要病害之一,取决于岩石中不同组分类型和环境因素^[13]。不同地区砂岩文物的主要环境特点如表 3 所示。由表 3 可以看出,不同地区砂岩的环境特点差异很大。

3.2 砂岩组分的几何特征参数

砂岩组分的几何特征参数可使用圆形度 R_0 、矩形

表 3 不同地区砂岩的环境特点

Table 3 Environmental features of sandstone relics in various regions

位置	地理位置	开凿年代	是否临水	砂岩种类	地质条件	气候条件
云冈石窟	山西省 大同市	公元 460 年	是	杂砂岩	河流阶地 沟谷地貌	半干旱地区, 年降雨量 800 mm
乐山大佛	四川省 乐山市	公元 713 年	是	红砂岩	河流阶地 沟谷地貌	亚热带湿润地区,高温高湿, 年降雨量 1 000 mm
石门山石窟	重庆市	公元 1094 年	否	含泥质砂岩	构造剥蚀 低山丘陵地貌	亚热带湿润地区,高温高湿, 年降雨量 1 000 mm

度 R 、内切圆半径 r (mm)、形状离散指标 e 及偏心率 E 来表征^[14],分别表示组分区域接近圆的程度、对外接矩形的充满程度、内切圆的半径、形状的复杂性及对象区域的紧凑性,计算公式分别为:

$$R_0 = 4\pi S/L^2 \quad (2)$$

$$R = S/S_M \quad (3)$$

$$r = 2S/L \quad (4)$$

$$e = L^2/S \quad (5)$$

$$E = A/B \quad (6)$$

式中: S ——组分区域的面积/ mm^2 ;

L ——组分区域的周长/ mm ;

S_M ——组分区域最小外接矩形的面积/ mm^2 ;

A/B ——分别表示组分区域的长轴长度与短轴长度/ mm 。

使用这些计算公式,得到不同地区砂岩文物中不同组分几何特征参数的计算结果(表 4)。

由表 4 可以看出,就颗粒面积和周长来说,都是石门山砂岩最大,乐山大佛砂岩次之,云冈石窟砂岩最小;对于颗粒圆形度,所有三处文物长石圆形度都远小于石英圆形度;对于矩形度,乐山大佛砂岩较大,石门山砂岩较小,云冈石窟砂岩比较离散;对于内切圆半径来说,石英都远大于长石;就离散指标来说,石英都远小于长石;对于偏心率来说,乐山大佛砂岩中长石远大于石英,且云冈石窟砂岩的偏心率小于石门山砂岩的

偏心率。

这些几何特征参数变化与砂岩文物环境密切相关。云冈石窟与乐山大佛都临水而建,乐山大佛更是濒临大渡河、青衣江和岷江三江汇流处,因此,乐山大佛砂岩受水的影响最大、颗粒形状变化最小,云冈石窟砂岩次之,石门山颗粒形状最不规则。

表 4 不同地区砂岩文物中不同组分的几何特征参数

Table 4 Geometrical parameters of compositions in sandstone relics at various regions

位置	矿物成分	面积 S/mm^2	周长 L/mm	圆形度 R_0	矩形度 R	内切圆半径 r/mm	形状离散指标 e	偏心率 E
云冈石窟砂岩	长石	1.95×10^4	140.49	18.60	0.27	11.75	0.68	1.67
	石英	1.95×10^4	140.49	2.04×10^3	0.84	1.97×10^3	6.2×10^{-3}	1.07
乐山大佛砂岩	长石	2.06×10^4	144.86	2.16×10^3	1.00	181.50	5.8×10^{-3}	171.50
	石英	2.06×10^4	144.86	3.53×10^5	0.98	2.96×10^4	3.56×10^{-5}	1.03
石门山砂岩	长石	2.77×10^4	181.77	3.02	0.60	0.64	4.17	2.50
	石英	2.77×10^4	181.77	1.56×10^5	0.61	1.97×10^4	8.08×10^{-5}	2.58

3.3 基于灰度直方图的数字图像特征参数

基于灰度直方图的纹理特征参数,也可用于描述颗粒组分区域的形状特征。这些参数包括均值 μ 、方差 σ^2 、偏度 S 、峰值 K 、能量 E 和熵 H , 计算公式分别为:

$$\mu = \sum_{i=0}^{L-1} r_i p(r_i); \sigma^2 = \sum_{i=0}^{L-1} (r_i - \mu)^2 p(r_i)$$
$$S = \frac{1}{\sigma^3} \sum_{i=0}^{L-1} (r_i - \mu)^3 p(r_i)$$
$$K = \frac{1}{\sigma^4} \sum_{i=0}^{L-1} (r_i - \mu)^4 p(r_i)$$
$$E = \sum_{i=0}^{L-1} p^2(r_i); H = - \sum_{i=0}^{L-1} p(r_i) \log_2(p(r_i))$$
$$p(r_i) = \frac{n(r_i)}{N}$$

(7)

式中: $p(r_i)$ ——灰度值 r_i 出现的概率;
 $n(r_i)$ ——图像中灰度值为 r_i 的像素点总数;
 N ——图像的总像素点数。

均值表示一幅图像或区域的平均亮度;方差反映了纹理的粗糙程度;偏度是对灰度分布偏离对称情况的度量;峰值描述了灰度分布的倾向;能量是图像所具有的信息量的度量;熵反映了图像中纹理的非均匀程度或复杂程度。

不同样本的灰度直方图(横坐标是灰度级,纵坐标是灰度级出现的概率)见图 6。

三处砂岩文物基于图 6(灰度直方图)的图像纹理特征参数计算结果如表 5 所示。

由表 5 可以看出,均值是云冈石窟砂岩最大、石门山砂岩次之、乐山大佛砂岩最小,表明云冈石窟砂岩在灰度直方图上平均亮度最大;方差是云冈石窟砂岩最大、石门山砂岩次之、乐山大佛砂岩最小,表明云冈石窟砂岩的纹理最为粗糙;偏度是乐山大佛砂岩最大、石

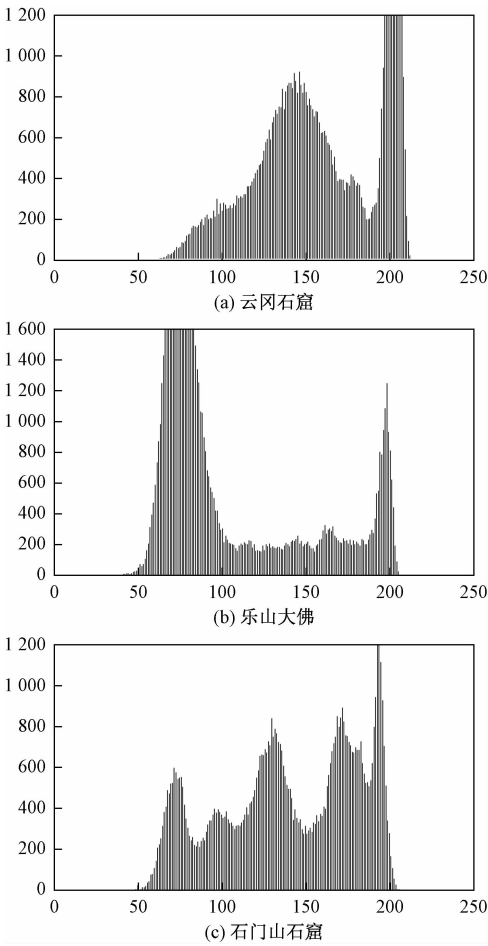


图 6 不同地区样本的灰度直方图

Fig. 6 Gray histogram of specimens in different regions

门山砂岩次之、云冈石窟砂岩最小,表明云冈石窟对灰度分布偏离对称情况最小;峰值是乐山大佛砂岩大于石门山砂岩、云冈石窟砂岩,表明乐山大佛砂岩灰度分布散布于尾端;能量是乐山大佛砂岩最大、云冈石窟砂岩次之、石门山砂岩最小;熵是石门山砂岩最大、云冈石窟砂岩次之、乐山大佛砂岩最小,表明石门山砂岩纹

理最复杂、乐山大佛砂岩最为简单。

表 5 不同地区砂岩 CT 图像基于灰度直方图的图像纹理特征参数

Table 5 Textural parameters based on gray histogram of sandstone CT images in different regions

参数	云冈石窟砂岩	乐山大佛砂岩	石门山砂岩
均值	52.57	35.14	46.69
方差	4.11×10^3	2.35×10^3	3.46×10^3
偏度	1.97	2.61	2.06
峰值	4.07	7.58	4.467
能量	1.20×10^{-3}	1.59×10^{-3}	9.20×10^{-4}
熵	2.80	2.73	2.88

基于灰度直方图的这些 CT 图像纹理特征参数也与砂岩文物环境密切相关。云冈石窟的砂岩为杂砂岩,分选性差、磨圆较差、结构成熟度低,一般富含石英、含量可达 50%;乐山大佛两侧岩石是红砂岩,质地疏松、易于风化;石门山石窟多雕刻于含泥质砂岩,砂岩孔隙大、吸水性强。因此,云冈石窟砂岩在灰度直方图上平均亮度最大、纹理最粗糙、灰度分布偏离对称情况最小;乐山大佛砂岩灰度分布散布于尾端;石门山砂岩纹理最为复杂,乐山大佛砂岩最简单均匀。

3.4 基于灰度共生矩阵的数字图像特征参数

灰度直方图不能完整反映图像像素的相对位置,

可以根据灰度共生矩阵、通过计算对比度 f_1 、相关度 f_2 、角二阶矩 f_3 、逆差矩 f_5 和熵 f_4 等纹理参数来描述图像灰度值的空间位置关系,图像对比度反映了图像的清晰程度和纹理的深浅程度;相关度反映了图像纹理的精致程度;角二阶矩反映了灰度分布均匀程度和纹理粗细程度;逆差矩反映了图像纹理局部变化的大小。

计算公式分别为

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \sum_{i=1}^N (i-j)^2 \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p^2(i,j) \right] \\ f_2 &= \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N ij p(i,j) - \mu_1 \mu_2 \right] / [\sigma_1^2 \sigma_2^2] \\ f_3 &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p^2(i,j) \\ f_5 &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p(i,j) / 1 + (i-j)^2, i \neq j \\ f_4 &= - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p(i,j) \log \{ p(i,j) \} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: i, j ——分别为两个像素的灰度;

$p(i, j)$ ——共生矩阵归一化后的元素。

不同地区砂岩文物 CT 图像中不同组分基于灰度共生矩阵图像纹理特征参数的计算结果见表 6。

表 6 不同地区砂岩 CT 图像基于灰度共生矩阵的图像纹理特征参数

Table 6 Textural parameters based on grayscale co-occurrence matrix of sandstone CT images in various regions

位置	矿物成分	对比度	相关度	角二阶矩	逆差矩	熵	均值	标准差
云冈石窟砂岩	长石	2.025 9	0.903 8	0.530 1	0.963 7	0.696 2	175.686 5	117.207 8
	石英	2.163 4	0.890 0	0.556 0	0.961 2	0.696 2	183.892 4	113.443 6
乐山大佛砂岩	长石	0.627 8	0.972 9	0.514 0	0.988 5	0.543 6	157.880 5	123.210 2
	石英	0.758 0	0.954 8	0.641 2	0.986 2	0.543 6	198.563 6	105.102 1
石门山砂岩	长石	0.544 5	0.972 9	0.579 3	0.990 1	0.662 0	181.695 1	114.948 4
	石英	0.625 0	0.972 6	0.521 2	0.988 7	0.662 0	160.992 1	122.552 2

由表 6 可以看出,三个地区砂岩文物中,长石的对比度都小于石英,说明石英图像的纹理和沟纹特征都大于长石;云冈石窟砂岩的对比度 > 乐山大佛砂岩的对比度 > 石门山砂岩的对比度,说明云冈石窟砂岩的纹理和沟纹特征最大,乐山大佛砂岩居中,石门山砂岩最小;砂岩中长石和石英的相关度都相差不大,说明砂岩图像纹理的精致程度相似;砂岩的角二阶矩都为 0.514 0~0.641 2,说明砂岩中不同组分的纹理一般、不够细致均匀;砂岩中长石的熵都等于石英的熵,云冈石窟砂岩的熵 > 石门山砂岩的熵 > 乐山大佛砂岩的熵;砂岩中长石和石英的逆差矩,都是石门山砂岩 > 乐山大佛砂岩 > 云冈石窟砂岩,说明石门山砂岩不同组分变化规律性最强,乐山大佛砂岩居中,云冈石窟砂岩

最杂乱。

基于灰度共生矩阵的这些 CT 图像纹理特征参数与砂岩文物环境密切相关。云冈石窟建造年代最为久远,经受了较多的人为与生物破坏;石门山建造年代距今最近;乐山大佛和石门山石窟气候湿润,风力较小,常年处于高湿状态,水岩作用显著。因此,云冈石窟砂岩的纹理和沟纹特征参数最大,乐山大佛砂岩居中,石门山砂岩最小;三个地区砂岩图像纹理的精致程度相似,不同组分的纹理不够均匀;石门山砂岩图像区域的变化规律最强,乐山大佛砂岩居中,云冈石窟砂岩最差。

3.5 砂岩文物纹理参数随深度的变化情况

随着 CT 图像扫描深度的变化,不同地区岩样纹

理特征也会发生变化^[15]。对所有 CT 图像,每隔一定距离(乐山大佛、云冈石窟、石门山砂岩分别为 415、382、382 μm)取一幅 CT 图像计算基于灰度直方图的 CT 图像纹理特征参数,得到纹理参数随深度的变化情况(图 7)。图中,UZ1 和 UZ2 分别为均值和一致性指标。

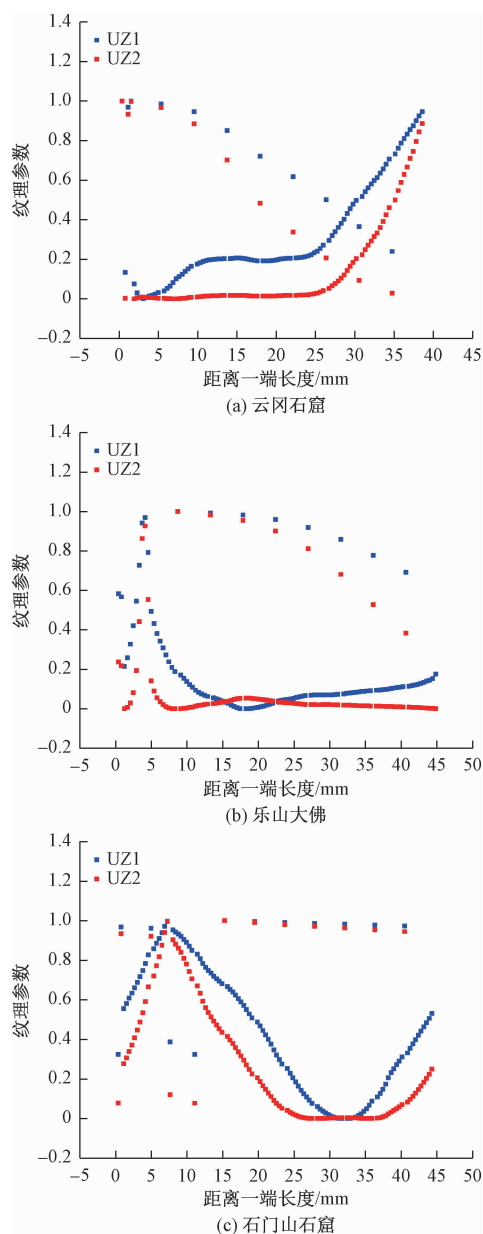


图 7 不同地区砂岩文物基于灰度直方图纹理参数随深度的变化

Fig. 7 Textural parameters of specimen CT images from gray histogram at various depths in three regions

由图 7 可知,对于云冈石窟砂岩,距表面 25 mm 内参数变化比较平稳,但 25 mm 后纹理参数大小明显增加;对于乐山大佛砂岩来说,距表面 7.5 mm 内变化

比较明显,但 7.5 mm 后趋于稳定;对于石门山砂岩来说,距表面 7.5 mm 内纹理参数急剧增加,7.5 mm 到 30 mm 纹理参数急剧下降,30 mm 后纹理参数又急剧上升,变化比较明显。

因此,随着距表面距离大小的增加,乐山大佛砂岩纹理变化最小,云冈石窟砂岩次之,石门山砂岩形状最不规则,三处砂岩纹理复杂大小的顺序是石门山石窟 > 云冈石窟 > 乐山大佛。这说明,乐山大佛砂岩表面风化严重,随深度增加风化程度变化不明显;云冈石窟砂岩是随着深度的增加,风化起初不明显,但深度达到 25 mm 后,风化程度骤增;石门山砂岩由于各种营力作用与岩性的复杂性,随深度增加、风化程度变化比较复杂。

4 结论与展望

本文在获取石门山石窟、云冈石窟、乐山大佛砂岩表面附近 CT 图像基础上,分析了图像中不同组分的分布特征、数字特征参数、所处环境及其与表面附近风化程度变化的关系,得到如下结论:

(1) 云冈石窟砂岩中,长石与石英含量相差不大;乐山大佛砂岩中,长石含量远多于石英含量;石门山砂岩中,石英含量远多于长石含量。

(2) 乐山大佛砂岩颗粒形状变化最小,云冈石窟砂岩次之,石门山砂岩形状最不规则;石门山砂岩纹理最复杂,乐山大佛砂岩最为简单均匀;石门山砂岩图像区域的变化规律最强,乐山大佛砂岩居中,云冈石窟砂岩最为杂乱。

(3) 乐山大佛砂岩表面风化严重,但随深度增加、风化变化不明显;云冈石窟砂岩风化起初不明显,但深度达到 25 mm 后,风化程度骤增;石门山砂岩随深度增加、风化程度变化比较复杂。

确定两种或多种组分(包括出现基质和胶结物)时的分界灰度值,是本项研究的基础问题,目前还没有很好的解决方法;使用深度学习解决这一问题,联合使用灰度分布特征、不同组分的形态特征、深度学习的泛化能力,可能是一种比较好的解决方法。

参考文献:

- [1] 王金华,陈嘉琦. 我国石窟寺保护现状及发展探析[J]. 东南文化,2018(1):6-14. [WANG J H, CHEN J Q. Current status and future development of cave temples protection in China [J]. Southeast Culture,2018(1):6-14. (in Chinese)]

- [2] GEIGER J, HUNYADFALVI Z, BOGNER P. Analysis of small-scale heterogeneity in clastic rocks by using computerized X-ray tomography (CT) [J]. Engineering Geology, 2009, 103(3/4): 112 – 118.
- [3] 方建银, 党发宁, 肖耀庭, 等. 粉砂岩三轴压缩 CT 试验过程的分区定量研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 1976 – 1984. [FANG J Y, DANG F N, XIAO Y T, et al. Quantitative study on the ct test process of siltstone under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 1976 – 1984. (in Chinese)]
- [4] 尹小涛, 王水林, 党发宁, 等. CT 实验条件下砂岩破裂分形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 2721 – 2726. [YIN X T, WANG S L, DANG F N, et al. Study on fractal characteristics of sandstone damage-fracture under ct test condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (Suppl): 2721 – 2726. (in Chinese)]
- [5] 薛华庆, 胥蕊娜, 姜培学, 等. 岩石微观结构 CT 扫描表征技术研究[J]. 力学学报, 2015, 47(6): 1073 – 1078. [XUE H Q, XU R N, JIANG P X, et al. Characterization of rock microstructure using 3d X-ray computed tomography [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(6): 1073 – 1078. (in Chinese)]
- [6] HAN Y H, HU D D, MATZAR L. Numerical computation of elastic properties for porous rocks based on CT-scanned images using direct mapping method [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 122: 346 – 353.
- [7] 闻磊, 李夕兵, 王伟, 等. 石英砂岩冻融完整性损失研究[J]. 固体力学学报, 2016, 37(4): 368 – 378. [WEN L, LI X B, WANG W, et al. Research on the integrity loss of quartz sandstone under freeze-thaw cycles [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2016, 37(4): 368 – 378. (in Chinese)]
- [8] 朱健伟, 叶伟英, 徐金明, 等. 基于视频图像和扩展有限元法的花岗岩裂缝扩展过程[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(3): 122 – 126. [ZHU J W, YE W Y, XU J M, et al. Simulation of propagation of cracks in granite based on digital image processing and extended finite element method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 2013, 24(3): 122 – 126. (in Chinese)]
- [9] 刘向君, 朱洪林, 梁利喜. 基于微 CT 技术的砂岩数字岩石物理实验[J]. 地球物理学报, 2014, 57(4): 1133 – 1140. [LIU X J, ZHU H L, LIANG L X. Digital rock physics of sandstone based on micro-CT technology [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(4): 1133 – 1140. (in Chinese)]
- [10] 于庆磊, 杨天鸿, 唐世斌, 等. 基于 CT 的准脆性材料三维结构重建及应用研究[J]. 工程力学, 2015, 32(11): 51 – 61. [YU Q L, YANG T H, TANG S B, et al. The 3D reconstruction method for quasi-brittle material structure and application [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(11): 51 – 61. (in Chinese)]
- [11] 杨振琦, 王述红, 孟嫣然, 等. 基于 CT 扫描的花岗岩三维数值试件重构模型及应用[J]. 固体力学学报, 2017, 38(6): 591 – 598. [YANG Z Q, WANG S H, MENG Y R, et al. The 3D Numerical Specimen of Granite Based on CT Technology and Application [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2017, 38(6): 591 – 598. (in Chinese)]
- [12] 刘芳, 徐金明. 基于试验视频图像的花岗岩细观组分运动过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1602 – 1608. [LIU F, XU J M. An investigation on movements of meso-compositions of granite specimen using video image processing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1602 – 1608. (in Chinese)]
- [13] 孟田华, 杨成全, 卢玉和, 等. SEM 和 X-Ray 对云冈石窟石雕风化物的分析[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2014, 30(4): 17 – 21. [MENG T H, YANG C Q, LU Y H, et al. Analysis of the Yungang grottoes weathered stone with SEM and X-ray approaches [J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition), 2014, 30(4): 17 – 21. (in Chinese)]
- [14] 安晨昊, 徐金明, 孙皓, 等. 单轴压缩条件下花岗岩中不同矿物的形状变化[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 471 – 475. [AN C H, XU J M, SUN H, et al. Shape changes of various minerals on granite surface during uniaxial compression test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Suppl): 471 – 475. (in Chinese)]
- [15] 严绍军, 陈嘉琦, 窦彦, 等. 云冈石窟砂岩特性与岩石风化试验[J]. 现代地质, 2015, 29(2): 442 – 447. [YAN S J, CHEN J Q, DOU Y, et al. Characteristics of Yungang grottoes sandstone and weathering simulation tests [J]. Geoscience, 2015, 29(2): 442 – 447. (in Chinese)]