

文章编号: 1000-7598 (2013) 10-2928-11

岩体结构均质区划分法的适用性研究

郭亮^{1,2}, 李晓昭^{1,2}, 王益壮^{1,2}, 陈为平^{1,2}, 程梦林^{1,2}, 周扬一^{1,2}

(1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210093; 2. 南京大学 华东有色地勘局地下空间与地质环境研究所, 南京 210093)

摘要: 岩体结构均质区划分是结构面统计与建模的基础。实践中以主控要素作指标、以最优划法为依据, 更易获客观真实划分结果。针对国内核废料处置库北山预选区岩体结构面, 开展了测窗范围截取、取样偏差及块网变异修正前处理, 编程实现了多种方法下的均质区划分, 初步探究各法在北山的判别力、适用性、局限性。结果表明: 针对北山预选区而言, 关联系数法和 Mahtab 法适用性较弱, Miller 法最强; 而 Miller 法中又以“34 格大面积块”的划分效果最佳。将此最优划法应用至北山茆茆槽块段, 希望能给结构面网络建模及后续渗流计算提供有益参考。

关键词: 岩体结构; 均质区划分法; 判别力; 甘肃北山

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Applicability research on structural homogeneity delineation of rock masses

GUO Liang^{1,2}, LI Xiao-zhao^{1,2}, WANG Yi-zhuang^{1,2}, CHEN Wei-ping^{1,2},
CHENG Meng-lin^{1,2}, ZHOU Yang-yi^{1,2}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. NJU-ECE Institute for Underground space and Geoenvironment, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Delineation of structural homogeneity of rock masses is the basis of statistics and modeling of discontinuities. In practice, an objective partition result is easier to obtain with key factors as indicators and optimal delineation as the final judgment criterion. In order to better characterize the discontinuities in Chinese high-level nuclear waste disposal preselected region in Gansu Beishan, the measure window truncation, sampling bias and grid variability correction are carried out to deal with the discontinuities of rock masses. Such programming realizes structural homogeneity delineation by using a variety of methods and has a preliminary probe into the distinguish capability, applicability and limitation in Beishan. The results show that, as far as the Beishan preselected area be concerned, different delineation schemes are obtained in which the applicability of the correlation coefficient method and the Mahtab's method are weak in applicability while the Miller's method is the best and the Miller's method is increasing sequentially. It is worth mentioning specially that in the Miller's methods, the 34-block scheme receives the most satisfactory result. At last, the optimal method is applied to Jijicao area; and the delineation result provides a useful direction for the structural network modeling and the following seepage flow path calculations.

Key words: rock mass structure; structural homogeneity delineation; distinguish capability; Beishan of Gansu province

1 引言

地质结构面在岩体中的存在导致其力学性能不连续、非均匀、各向异性。为确定相似结构岩体边界, 需将岩体划分为若干独立区域, 各区域内岩体具有相似的结构特征及地质力学性质^[1-3]。此种岩体结构均质区划分是开展结构面特征参数统计的前提, 亦处在地质结构面网络建模的基础一环, 因此,

在岩体结构研究中占据特殊地位。然而, 当岩体地质结构面分布存在较大随机性时, 表观判断往往难得正确的区分效果; 而当地质结构面成簇的分布在岩体中, 即便肉眼判定相似性较高的区域仍可能隐含较大统计学差异或观测误差^[4]; 另外, 表观判断对两个露头间的结构相似性判别暂且胜任, 但在多个露头相互比较时往往显得“眼花缭乱、难分难辨”。因此, 探索更为客观、量化的统计学方法对岩体结

收稿日期: 2013-04-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(No. 2013CB036001); 国防科技重点项目(科工二司[2012]491 号); 江苏省普通高校研究生科研创新计划(省助)资助(No. CXZZ13-0057)。

第一作者简介: 郭亮, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事岩土结构与渗流方面的研究工作。E-mail: guoliang688@126.com

构均质区的准确划分显得尤为重要^[5]。

1983 年美国怀俄明大学的 Miller^[6]采用概率论中的关联表和施密特等面积投影网结合的办法 (以下简称 Miller 法), 成功地用地质结构面产状为指标进行了岩体结构均质区划分; 后来 Kulatilake 等^[7-8]对此法进行了改进, 并成功运用于三峡永久船闸附近隧洞的均质区划分中; 瑞典的 SKB 公司在进行核废料处置库场址评价时也采用了改进的 Miller 法^[4]; 1984 年美国哥伦比亚大学的 Mahtab 等^[9]提出了适用于地质结构面产状变化复杂的显著性簇产状相似法; Martin^[10]在划分某钻石矿场均质区时提出了相关系数法; 另外, Kulatilake 等^[8]及陈剑平等^[11]近年来逐步将分形维数引入均质区划分中, 成功计算了施密特投影图的分形维数。上述各法所用的划分指标不尽相同, 有的以结构面产状、密度、迹长等单参数作为划分依据 (如 Miller、Mahtab 法); 有些则考虑多参数的综合效应 (如 Kulatilake 的分形维数法)。可见即便同一区域, 划分法的选取不同, 划分结果亦或不同。因此, 针对研究区地质结构面分布特征开展均质区划分法的适宜性研究, 有助于区分各法的判别力, 进而评价划分结果的可信度, 提升所建结构面网络模型的可靠度。对场址评价和区域稳定性分析具有重要意义。

本文针对我国核废料处置库北山预选区结构面数据, 编程实现多种均质区划分法, 分析各法的判别力及局限性, 进而综合评判其北山适宜性。基于最优划分结果开展的结构面网络模拟更真实客观展现结构面系统特征, 有助获取正确的渗流计算结果。

2 岩体结构均质区划分方法

岩体结构的均质性, 在排除岩性条件差异后主要取决于岩体中结构面的不同特征^[12-15], 因此, 岩体结构均质区划分目前仍主要以结构面要素为依据而进行。

2.1 岩体结构面类型

岩体结构面的分类原则和方法不是惟一, 通常按地质成因分为: 原生结构面、构造结构面和次生结构面; 按破裂面的力学成因分为: 剪性结构面、张性结构面; 按发育规模分为: 贯通性软弱面 (A 类)、显现结构面 (B 类)、隐微结构面 (C 类); 按工程性状及规模可划分 I ~ V 级结构面^[16-17]。

上述岩体结构面类别的划分仍只是定性的描述, 为了更准确开展岩体结构面研究, 1978 年国际岩石力学学会制定了描述结构面特征的 10 项定量指标: 产状、连续性、密度 (间距)、张开度、粗糙

度、充填胶结特征、面壁抗压强度、渗流、组数和块体大小^[18]。

2.2 均质区划分法原理及其特点

(1) Miller 法

该法应用列联表分析施密特投影网, 每个结构域由一个施密特投影网代表。施密特网上给定划分网格的环带数和各环带网格数, 网格即下半球施密特投影在半球上具有等表面积的小块, 每一块为列联表的一个单元, 单元值对应块中结构面极点数量。

表 1 为分析施密特块网的一个列联表, 为检验相邻结构域统计意义均质性的零假设, 采用下列 χ^2 检验进行计算:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(f_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}} \quad (1)$$

$$e_{ij} = \frac{(R_i C_j)}{N} \quad (2)$$

式中: e_{ij} 为第 ij 单元中结构面极点的期望频率; f_{ij} 为第 ij 单元中结构面极点的观测频率; R_i 为第 i 行中结构面极点总的观测数量; C_j 为第 j 列中结构面极点总的观测数量; N 为结构面极点总的观测数量。

表 1 施密特块网形成的列联表
Table 1 Contingency table for Schmidt plots

行数	列数				行总和
	块 1	块 2	...	块 c	
施密特投影图 1	f_{11}	f_{12}		f_{1c}	R_1
施密特投影图 2	f_{21}	f_{22}		f_{2c}	R_2
...					
施密特投影图 r	f_{r1}	f_{r2}		f_{rc}	R_r
列总和	C_1	C_2		C_c	N

零假设为真则该统计是具有 $(r-1)(c-1)$ 个自由度的 χ^2 分布, 且其值不会超过一定置信水平 α 上的 χ^2 查表值。

比较施密特投影网时, 通常从地质学或工程观点用 χ^2 值计算其一定置信水平 α 上的值, 即 α 值作为衡量从列联表计算出 χ^2 值的测度; 更大的 α 值指示更小的 χ^2 值, 因此, 更易接受取样结构整体相似。

(2) Mahtab 法

该法假设任意两个被比较结构面产状样本, 包含非随机分布的数据。同样将上半球划成一定数量 (100 格) 等面积四边形块网, 随机检验给出该块网对应的阈值 (k), 当块中极点数超过此阈值时, 则称此块为非随机块。相邻的非随机块形成簇, 对

每个簇在假设其服从半球正态分布条件下, 计算其平均产状以及在给定概率水平上的均值置信锥 (ψ) 和离散程度 (K)。

进一步假设簇中的极点分布形式对均质性测试无关, 规定一个截取值, 超过该截取值的簇称为显著性簇。Mahtab 法对两簇均值夹角 (β) 与均值置信锥 (ψ) 展开比较, 当 β 小于两簇中任一均值置信锥 ψ 时, 两簇就被认为相似。两样本只要有一对相似簇, 即被认为在统计意义上是相似的。

以下对各参数予以简要说明: 假若区域中极点随机分布, 则该区域块上极点数量符合泊桑分布, 可进行泊桑分布假设检验。此时随机密度 D 的发生概率可由下式计算:

$$p(D > k) = 1 - \sum_{j=1}^k \frac{e^{-m} m^j}{j!} \quad (3)$$

$$p(D > k) = \alpha \quad (4)$$

$$1 - \sum_{j=1}^k \frac{e^{-m} m^j}{j!} \leq \alpha \quad (5)$$

式中: p 为随机密度 D 发生的概率; k 为最小的整数; D 为随机密度; m 为样本中一个块的平均极点数, $m = qc$; q 为样本极点总数; c 为一个块关于上半球面积的分数面积。

α 给定一个较低的概率, 获得一个 k 值满足上式, 则此 k 值就认为是随机与非随机的界限值, 即阈值。截取值略显主观, 需人为选取, 其最小值等于阈值 k 。通常选取样本观测值总数的 1/10, 大约 3~5 倍的阈值。

(3) 关联系数法

该法同样将施密特图划分块网 (见表 1), 得到 2 行/C 列的表格。与 Miller 法不同的是该法将皮尔逊关联系数作衡量均质性的指标, 计算式为

$$\gamma = \frac{\sum X_i Y_i / n - \left(\sum X_i / n \right) \left(\sum Y_i / n \right)}{\sqrt{\left[\sum X_i X_i / n - \left(\sum X_i / n \right)^2 \right] \left[\sum Y_i Y_i / n - \left(\sum Y_i / n \right)^2 \right]}} \quad (6)$$

式中: $X_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 为第 1 个施密特块网观测频率; $Y_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 为第 2 个施密特块网观测频率; n 为删除观测频率均为 0 的块后对应列数。

皮尔逊关联系数 γ 在 $[-1, 1]$ 内取值, 反映两变量间线性关系。1 表示两变量完全正相关; 0 表示两变量不相关; -1 表示两变量完全负相关。即 γ 反映线性相关性的强度, 对均质性分区而言, 相关性强弱标准应结合具体实例确定。

3 结构面特征参数获取与前处理

3.1 研究区概况

1990~1999 年间核工业北京地质研究院在我国高放废物地质处置库北山预选区共筛选出旧井、新场-向阳山、野马泉等 8 个有利块段。本文主要针对旧井地段和茈茈槽块段两重点预选区域展开结构面调查, 研究区位于甘肃北山南带中段, 大地构造位置处于塔里木板块东端, 属二级构造单元塔里木地台和北山古生代褶皱带的连接部位。上述两重点调查区域地表岩石出露良好, 面积分别为 12 km² 和 462 km², 主体岩石为黑云母二长花岗岩, 约 9.3 km², 占 77.5%; 此外还有变质岩残留体和第四纪沉积物。区内地层分属天山-兴安地层区 (I 级)、北山地层分区 (II 级), 由老至新有元古界、寒武系、奥陶系、志留系、石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系、第三系和第四系。区内构造形变以脆性断裂和裂隙为主, 其次为韧性剪切变形。华力西晚期发育由两条区域断裂带组成的东西向逆冲断裂构造: 南侧由账房山-华窑山断裂、半滩南-华窑山北断裂、半滩南山北断裂等 7 条东西向断裂组成; 北侧由两个黑包北-十月井北断裂、两个黑包北断裂、蛇跃区断裂等 6 条东西向断裂组成 (见图 1(a))。印支-燕山期以来, 构造应力场以左行扭动为主导, 由此产生的低角度断裂持续发育成不同尺度的断层与拉分盆地, 进而错断东西向边界断裂; 高角度裂隙目前仍处发育阶段, 以长大裂隙和裂隙密集带为主。其中茈茈槽块段经核工业北京地质研究院卫片解译和野外实地调查后分辨出 7 条断裂构造: 一级断裂 (>1 km) 为 F1~F6; 二级断裂 (<1 km) 为 F7, 如图 1(b) 所示。空间关系上茈茈槽块段 (见图 1(b)) 位于旧井地段 (见图 1(a)) 的东南方。

3.2 地质结构面特征参数测量

笔者研究组在 BS03 钻孔周边 1 000 m 范围 (如图 2 所示) 布设 11 个测窗和 7 条测线, 运用测窗 (线) 法编录了约 800 条地质结构面信息; 另在茈茈槽块段采用 RTK-GPS 精确定位了 9 个测区 (A~I 区) 近 7 000 条地质结构面, 获取了相对真实的迹线分布特征信息, 如图 3 所示。

3.3 均质区划分前处理

(1) 测窗范围截取

笔者运用 Miller 法 (施密特图关联表法) 进行露头均质性比较时发现: 同样两露头, 测窗截取面积不同, 所得结果亦不一。即均质性统计结果会随测窗范围的改变而改变。为此选取两适宜样本 (参数见表 2) 模拟探求对比露头测窗截取范围的影响。

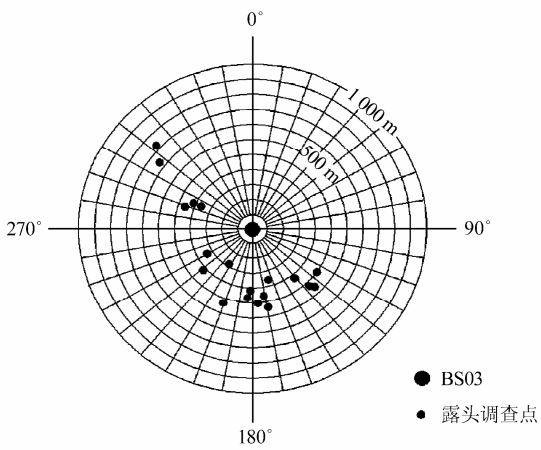
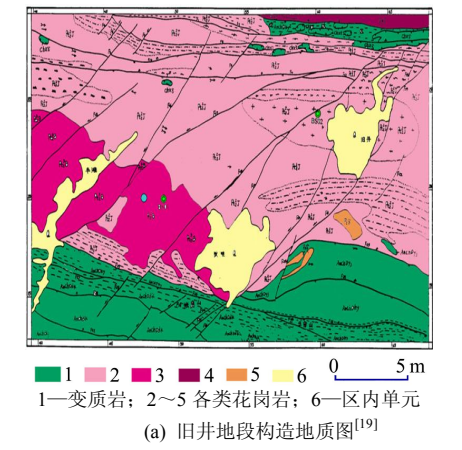


图 2 旧井地段测点露头位置示意
Fig.2 Sketch of discontinuities measuring location in Jiujiing

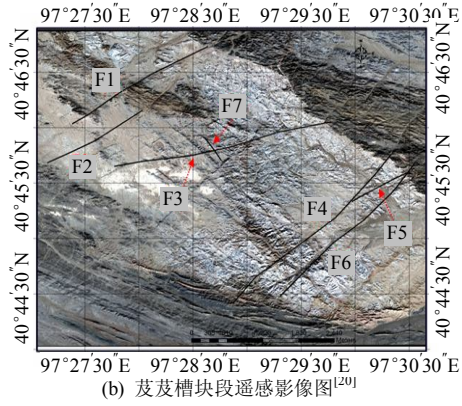


图 1 研究区概貌
Fig.1 The overview of study area

表 3 为模拟两样本不同测窗截取面积下的卡方可信度 α 值（均质性衡量指标）。由表易知：当对比样本的测窗截取面积相当时， α 稳定在其真值附近（此例为 0.5，见对角线示）；而当样本测窗面积差异时所得结果离散性较大。故为使分析结果真实可信，应在对比露头截取面积大体相等的前提下开展统计计算。下文分析数据皆经此前处理而获取。

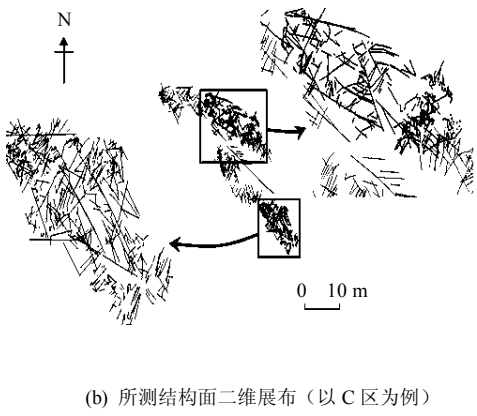
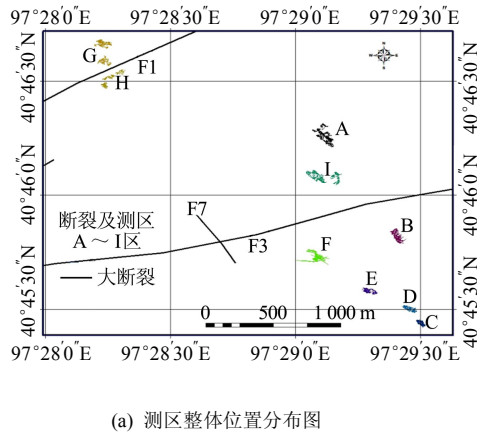


图 3 芡芡槽块段量测结构面
Fig.3 Diagram of discontinuities measuring location in Jijicao

表 2 模拟样本参数
Table 2 Simulation parameters of samples

样本号	第 1 组			第 2 组			第 3 组		
	数量	平均产状	平均迹长	数量	平均产状	平均迹长	数量	平均产状	平均迹长
	/条	/ (°)/(°)	/ m	/条	/ (°)/(°)	/ m	/条	/ (°)/(°)	/ m
1	600	45/45	1.5	400	150/75	2.0	500	270/30	2.5
2	600	45/45	2.0	500	180/75	2.5	500	270/60	2.5

注：平均产状：45/45 为倾向/倾角。

表3 不同测窗面积对应的 α 值
Table 3 α values of sampling windows in different sizes

结构面密度 m_i /(条/ m^2)	测窗截取面积 S_i / m^2					
	10×10	9×7	8×7	7×9	6×6	5×6
14	0.537	0.736	0.657	0.601	0.739	0.680
22	0.467	0.560	0.723	0.623	0.701	0.652
25	0.482	0.356	0.548	0.479	0.670	0.659
22	0.312	0.530	0.421	0.555	0.672	0.601
39	0.343	0.561	0.422	0.379	0.521	0.622
47	0.199	0.423	0.652	0.421	0.456	0.537

注: 表中 m_i , S_i 中, $i=1, 2$ 。

(2) 取样偏差修正

野外量测所得结构面信息通常仅代表其一维或二维属性, 取样偏差在所难免^[21]: 结构面相对露头的空间位置变异, 交切频率随之变动, 致使产状观测频率往往有别于其真实频率, 谓之产状取样偏差; 迹长取样亦存在截长(短)偏差和尺寸偏差(大尺度结构面相比小尺度有更高被取样的概率)。故在均质区划分前应对露头数据开展取样偏差修正。

表4归纳了常用产状修正法所需的考量指标及其实现难易程度。

表4 常用产状修正法对比
Table 4 Comparison of orientation correction methods

名称	考察因素	实现难易度
夹角修正法	测线(窗)产状, 结构面产状	易
铅直窗口修正法	测窗尺寸, 结构面产状、尺寸、形态	难, 需分组及 各组平均迹长
矢量修正法	测窗产状、尺寸, 结构面产状、尺寸、形态	难, 需分组及 各组平均迹长

均质区划分通常处在网络建模的初始阶段, 此时结构面分组结果及各组平均迹长较难获取, 因而铅直窗口与矢量修正法较难实现。为此笔者选取夹角修正法进行产状修正。

$$TCF_{\text{线}} = \frac{1}{\cos \delta} \quad (7)$$

$$TCF_{\text{窗}} = \frac{1}{\sin \delta} \quad (8)$$

$$\cos \delta = |\cos(\alpha_n - \alpha_s) \cos \beta_n \cos \beta_s + \sin \beta_n \sin \beta_s| \quad (9)$$

式中: $TCF_{\text{线}}$ 和 $TCF_{\text{窗}}$ 分别对应测线法和测窗法下的产状修正系数; δ 为测线(窗)极点与结构面极点的交角; α_n 、 β_n 为结构面极点的倾向和倾角; α_s 、 β_s 为测线的倾向和倾角。

以旧井地段测量数据为例, 按式(7)~(9)编程计算结构面产状修正系数, 所得部分结果见表5。

表5 结构面夹角修正法计算结果(部分数据)
Table 5 Calculation results of discontinuities angle correction method (part of data)

倾向 α_n /(°)	倾角 β_n /(°)	夹角 δ /(°)	$TCF_{\text{线}}$
101	80	76	1.0
245	45	46	1.3
245	42	43	1.4
135	65	60	1.1
80	63	60	1.1
245	42	43	1.4

因迹长偏差修正需知各组结构面的概率分布函数, 而均质区划分阶段无法预知, 故暂不进行迹长修正。

(3) 块网变异修正

Miller 法运用关联表分析施密特投影图, 将结构区域划分为若干等面积块网, 利用结构面极点投影至各块网内形成的关联表展开均质性判断。然而结构面的客观非均匀分布, 造成块网旋转角度差异时, 即便同组露头落在各块网中的结构面极点数亦有差别(见图4), 由此引起的关联表变动导致相似性可信度 α 值离散性很大, 影响均质性的正确判断。

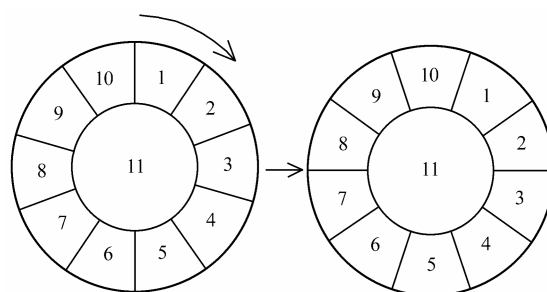


图4 施密特投影图块网角度旋转示意
Fig.4 Sketch of Schmidt grid rotation

图5为Miller法计算所得某组对比露头在块网旋转不同角度时的相似性可信度 α 波动情况。

由图5(a)可知: 即便同组露头, 块网旋转后相似性可信度 α 的计算结果亦会随之大幅变动(由0~0.242波动); 由图5(b)进一步知, 以 1° 为增量旋转 360° , α 值分布频率显著集中于其均值0.011 6附近(方差 7.6×10^{-4}), 超过0.03(约均值3倍)的 α 值个数仅占总数的9%左右。因此, 为减少块网产状主观随意性带来的误差, 应取块网各旋转角度下计算所得 α 均值作为最终衡量指标。

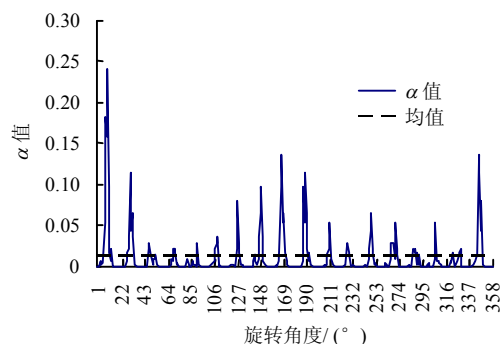
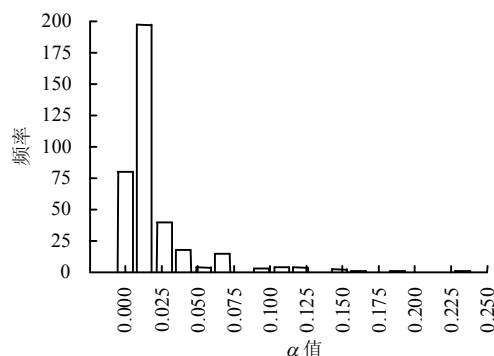
(a) 各旋转角度下的 α 值 (直线表示均值)(b) α 值频率分布直方图

图 5 块网旋转时某组露头对比结果

Fig.5 Comparison results of an outcrop with Schmidt grid rotation

4 北山岩体结构均质区划分实例

以旧井地段 BS03 孔周边所测结构面为例，取

图 6 所示 6 个满足样本数据要求的露头应用上述各法进行均质区划分对比。

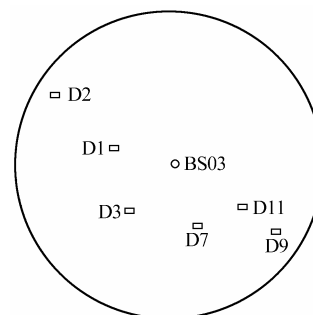


图 6 均质性待划分露头

Fig.6 Sketch of delineation outcrops

4.1 Miller 法的实现

针对 Miller 法实现难度较大的问题，编程时对于不满足 Lancaster 准则的情况，采取 3 种改进技术手段加以处理：①扣除未使用的块后保证最低 30 个自由度，采用近似正态分布计算 α 值（简称近似正态法）；②合并块网中的临近块以满足 Lancaster 准则（简称合并法）；③为使块的面积足够大以满足 Lancaster 准则，而减少块网中块的数量（简称大面积块法）。各法计算所得相似性可信度 α 的均值见表 6。

表 6 Miller 法计算所得 α 均值
Table 6 Mean values of α of Miller method

对比露头	1-2	1-3	1-7	1-9	1-11	2-3	2-7	2-9	2-11	3-7	3-9	3-11	7-9	7-11	9-11
近似正态法(100 块)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.2×10^{-2}
合并法(100 块)	0	0	1.4×10^{-5}	0	0	0	0	0	0	8.6×10^{-5}	0	0	0	9.8×10^{-6}	6.2×10^{-2}
大面积块(7 块)	0	0	0.031	0	0	0	0.214	0	0	0	0	0	8.2×10^{-5}	6.1×10^{-5}	0.022
大面积块(11 块)	0	0	8×10^{-5}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.5×10^{-3}
大面积块(34 块)	0	0	7×10^{-3}	0	0	0	1.4×10^{-3}	0	0	5.2×10^{-5}	0	0	1.3×10^{-6}	4.4×10^{-6}	5.3×10^{-2}

注：表中“1-2”即表示 D1 与 D2 露头间对比计算，其他类同。

由上表知，近似正态法算得露头 D9 与 D11 的均质性最大，其 α 均值 (0.012) 大于其余各组计算值 (0)，然而此法的整体辨别力不强 (其余各组均 0 值，均质性强、弱难以区分)；合并法对不同露头虽有一定程度区分，但除“D9~D11”组对比露头外其余各组计算值均远小于 0.05 (统计上满足零假设的下限)，故此法代表性不强，需进一步的数据予以支持；不同块数大面积块法的计算结果显示，基于 34 格施密特块网的 Miller 法对北山岩体均质性具有更强的整体判别力，能显著区分各露头岩体结构

均质性强弱 (均质性“D9~D11” > “D1~D7” > “D2~D7” > “D3~D7” > “D7~D11” > “D7~D9”)。

另从 7 格大面积块法所得“D2~D7”组露头 α 值频率分布直方图 (见图 7) 看： α 多集中于两端而非其均值附近，此异常分布表明 7 格的计算结果存在偏差，均值已不能反映 α 的客观实际。大面积块法从 34 格到 11 格时判别力渐弱乃至 7 格时出现偏差 (7 格结果显示露头均质性“D2~D7” > “D1~D7” > “D9~D11” > “D7~D9” > “D7~D11”)，

说明此法块网格数存在下限, 过少的格数会导致结果出错, 实际划分时应加以注意。

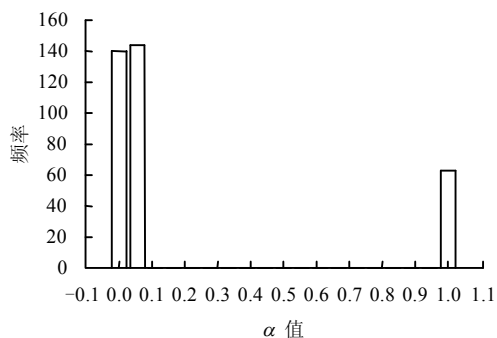


图7 D2与D7露头的 α 值频率分布直方图
(7格大面积块)

Fig.7 Frequency of α distribution histogram of
"D2-D7" outcrops (7 patches large area)

4.2 Mahtab 法的实现

此法针对极点所成簇展开, 不涉及 Lancaster 准则和空白区扣除, 故施密特图块网的旋转对其结果影响可忽略, 编程时取消块网旋转步骤。Mahtab 法均质性判别力受 3 因素影响: ① $P(D > k)$ 的取值; ②均值置信锥的概率水平; ③截取值, 然而目前研究阶段尚难用 3 因素的定量组合来准确划分均质和非均质结构区域^[7], 但综合各参数定量影响后将结构区关于均质性强弱排序, 亦可达均质区划分之目的。

(1) 概率 P 的影响

通过固定其他两因素后改变 P 值大小来研究各区域均质性强弱。

由表 7 知, 随计算阈值时概率 P 减小, 有些样本的相似性结果改变, 如 D2 与 D11 露头由相似变为不相似; 有些样本则相似程度减弱, 如 D7 与 D11 露头由两组相似性簇变为一组。

(2) 概率水平的影响

概率水平通过影响均值置信锥的大小而间接影响样本均质性判断结果。表 8 显示: 随概率水平的减小, 均值置信锥角度减小余弦值增大, 在两簇夹角不变的情况下均质性判别力增强。表 9 亦验证此结论: 当概率水平为 0.9 时, 第 1 次迭代便将所有露头划归同一均质区; 当概率水平减小至 0.7 时, 则需两次迭代 (第 1 次迭代将露头 D3、D7、D9、D11 划归同一均质区, D1、D2 各为单独区域; 第 2 次才将全部露头划归同一均质区); 而概率水平为 0.5 的第 1 次迭代结果将 D3、D7、D11 划归一起, 第 2 次才将全部露头合并起来。

因此, 概率水平显著影响北山区域露头均质性计算结果, 并据此知露头 D3、D7、D11 的均质性较强, 宜归同一均质区。

表 7 不同 P 值下各露头均质性对比
Table 7 Homogeneity comparisons in different P values

样本 露头号 编号	概率 P					
	0.20		0.05		0.01	
	簇号	夹角余弦	簇号	夹角余弦	簇号	夹角余弦
D1、D2	0、1	0.946	0、1	0.940	0、1	0.939
D1、D3						
D1、D7	0、0	0.928	0、0	0.930	0、0	0.932
D1、D9						
D1、D11	0、1	0.972	0、1	0.970	0、0	0.975
D2、D3	1、0	0.964	1、0	0.960	1、0	0.966
D2、D7						
D2、D9						
D2、D11	0、0	0.619				
D3、D7	2、0	0.984	2、0	0.980	2、0	0.984
D3、D9						
D3、D11	1、0	0.970	1、0	0.980	1、1	0.961
D7、D9	1、0	0.953	1、0	0.950	1、0	0.946
D7、D11	0、1	0.989	0、1	0.990	0、0	0.989
	1、0	0.757				
D9、D11	0、0	0.906	0、0	0.890	0、1	0.921

表 8 不同概率水平(level)对应的均值置信锥
Table 8 Mean confidence cones corresponding
to various probability levels

露头	概率水平				比较的簇号
	0.5	0.7	0.8	0.9	
D1	0.993	0.989	0.985	0.978	0
	0.997	0.995	0.994	0.991	1
	1.000	1.000	0.999	0.999	
D2	0.987	0.977	0.970	0.957	0
	0.981	0.967	0.956	0.937	1
D3	0.993	0.989	0.985	0.978	0
	0.999	0.998	0.998	0.996	1
	0.998	0.996	0.995	0.993	
	0.996	0.993	0.991	0.987	2
D7	0.975	0.957	0.943	0.918	0
	0.998	0.996	0.995	0.993	
	0.999	0.999	0.998	0.997	1
	0.999	0.999	0.999	0.998	
	1.000	1.000	1.000	1.000	
D9	0.951	0.915	0.886	0.837	0
	1.000	1.000	1.000	1.000	
D11	0.939	0.894	0.858	0.797	0
	0.989	0.981	0.974	0.963	1
	0.999	0.999	0.999	0.998	

表 9 不同概率水平(level)下露头均质性对比
Table 9 Homogeneity comparison in different probability levels

露头号	概率水平				夹角 余弦
	0.5 下的簇号	0.7 下的簇号	0.8 下的簇号	0.9 下的簇号	
D1、D2			0、1		0.942
D1、D3					
D1、D7			0、0		0.928
D1、D9					
D1、D11		0、1	0、1		0.972
D2、D3		1、0	1、0		0.964
D2、D7					
D2、D9					
D2、D11					
D3、D7	2、0	2、0	2、0	2、0	0.984
D3、D9					
D3、D11	1、0	1、0	1、0	1、0	0.977
D7、D9		1、0	1、0	1、0	0.946
D7、D11	0、1	0、1	0、1	0、1	0.989
D9、D11			0、0	0、0	0.890

(3) 截取值大小的影响

截取值对均质区划分的影响通过显著性簇的确立而实现。表 10 显示随截取值增大，簇的显著性转变，相似簇对的形成愈发困难，使得样本相似度降低，均质性判别力增强。当截取值为 5%时相似簇对几乎包含了所有簇，截取值为 10%则删除那些极点数为 3~8 的簇，截取值为 20%删除那些极点数为 10~20 的簇，因样本相似主要受均质置信锥较大簇（含极点数目较多簇）的控制，故由截取值为 5%至截取值为 10%而失去的簇（显著性簇变成非显著性簇）基本对样本相似无影响——相似性簇对只有“D3~D7”组从 2 变成 1；但由截取值为 10%至

表 10 不同截取值(cut-off)下露头均质性对比
Table 10 Homogeneity comparison in different cut-offs

露头编号	相似簇对数		
	截取值=5%	截取值=10%	截取值=20%
D1、D2	1	1	1
D1、D3			
D1、D7	1	1	1
D1、D9	1		
D1、D11	1	1	
D2、D3	1	1	1
D2、D7			
D2、D9			
D2、D11			
D3、D7	2	1	
D3、D9			
D3、D11	1	1	
D7、D9	1	1	
D7、D11	1	1	
D9、D11	1	1	1

截取值为 20%失去的簇所含极点数目较多，均值置信锥较大，因而对样本相似性影响较大（约一半样本由相似变为不相似）。

由上表知，增大截取值均质性较强的露头是 D1、D2、D3、D7 组合及 D9、D11 组合。

4.3 关联系数法的实现

与 Miller 法类似，皮尔逊关联系数 γ 值亦受下列因素影响：（1）块网的块数；（2）块网相对正北方位置。为此将施密特图划分 3 种（100 格、34 格、11 格）块网，每种块网均以 1° 增量旋转 360° 取其均值对比研究，结果见表 11。

表 11 关联系数法不同块网计算结果对比
Table 11 Comparison of calculation results under different grids with correlation coefficient method

露头号	11 格		34 格		100 格	
	γ 均值	数值排序	γ 均值	数值排序	γ 均值	数值排序
D1~D2	0.184	4	0.073	6	-0.138	8
D1~D3	0.141	5	-0.020	9	-0.150	9
D1~D7	0.525	2	0.395	2	0.240	2
D1~D9	-0.124	11	-0.151	12	-0.252	14
D1~D11	-0.093	10	0.043	8	-0.056	4
D2~D3	-0.284	15	-0.354	15	-0.265	15
D2~D7	0.292	3	0.050	7	-0.066	5
D2~D9	0.105	6	0.121	3	-0.069	6
D2~D11	-0.189	13	-0.219	13	-0.222	13
D3~D7	0.043	7	-0.064	10	-0.118	7
D3~D9	-0.268	14	-0.250	14	-0.221	12
D3~D11	-0.151	12	-0.106	11	-0.176	10
D7~D9	0.034	8	0.083	5	-0.192	11
D7~D11	0.007	9	0.113	4	-0.027	3
D9~D11	0.619	1	0.496	1	0.312	1

由表 11 可知，施密特块网块数的变动对皮尔逊关联系数 γ 值影响较大，即关联系数随划分块数的减少而增大（100 格时 γ 均值为三者最小的频率占 80%，11 格时 γ 均值为三者最大的频率占 53%），表 12 所列“D9~D11”组露头相关计算结果亦印证上述趋势。

表 12 “D9~D11”组露头 3 种施密特块网下的 γ 极值
Table 12 Extreme values of γ of “D9-D11” outcrops under various Schmidt grids

施密特块网	皮尔逊关联系数 γ	
	最小值	最大值
11 格	0.433	0.770
34 格	0.411	0.574
100 格	0.168	0.461

从图 8 显示的“D9~D11”组露头 34 格块网 γ 值频率分布直方图可知， γ 值大体呈正态分布，多集中其均值（0.496）附近，可认为 γ 均值能反映其

真实值。因而将表 11 的 γ 均值排序结合显著性检验后综合评价: D9 与 D11 组露头均质性最强, 适宜归入同一均质区; D1 与 D7 组露头均质程度次之, 划归另一均质区(与 Miller 及 Mahtab 法结果较符); 剩余组均质性排序不一, 尚难统一划分。

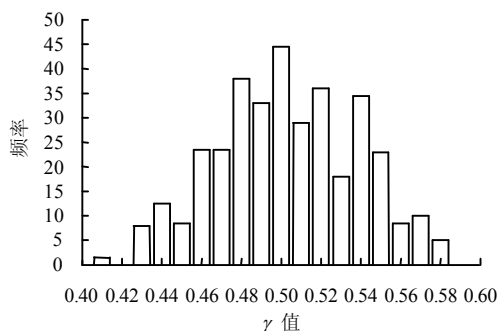


图 8 34 格块网下“D9~D11”组露头 γ 值频率分布直方图

Fig.8 Frequency of γ distribution histogram of “D9-D11” outcrops under 34 patches Schmidt grids

4.4 各划分法应用效果总结

针对我国核废料处置库北山预选区岩体结构面施密特投影图空白区略大, 极点较集中成簇分布的特点, 分别运用上述 3 种方法展开岩体结构均质区划分, 就各法的实现过程及其判别结果总结以下几点认识:

(1) 皮尔逊关联系数法的实现不涉及 Lancaster 之类准则及块网合并问题, 过程相对简单, 但相比 Miller 法中意义更加明确的 χ^2 技术(判明待考察各属性间有无关联, 即是否独立), 关联系数统计意义上仅反映两变量线性相关性, 判别力较弱; 就划分结果而言, 该法并未给出衡量均质性强弱的定量指标, γ 值需结合显著性检验方能作出相应均质区划分。

(2) Mahtab 法的簇簇对比类似平滑处理, 有效减少测量偏差及不稳定因素的影响, 地质意义较清晰。然而此法“一对显著性簇相似两样本便相似”判据的判别力较其他各法明显略弱; 另从结果看, 所受影响因素过多, 不同因素影响下的均质性排列结果亦不一, 可见各因素的波动显著影响结果的稳定性, 致使所得结论偶然性偏大可信度偏低。

(3) Miller 法基于 χ^2 统计量的列联表分析为总体相似度测量提供明确、标准的尺度, 是一种应用成熟广泛的均质性定量评价法。然而因样本大小、块网选择、空白带消除、Lancaster 准则满足等方面的限制, 该法在编程实现方面存在一定难度, 由此促使了本文改进技术的运用以求突破。从改进手段

的应用效果看, 近似正态法判别力最弱; 而合并法因待并块的数量及位置往往不一, 常造成结果误差较大、代表性不强、可信度不够; 相比之下大面积块法无论在判别力强度还是结果可信度方面均较它法颇为优越, 但存有划分块格数量下限的缺点, 据上文结果知, 34 格块网的大面积块 Miller 法更适宜北山岩体结构均质区划分。

(4) 上述各法的实现过程及判断结果揭示: 判别力强弱并非划分法适宜性评价的惟一标准, 还应结合工程实际、地质经验及肉眼比选判断等多因素综合考量, 方能获得最适合的岩体结构均质区划分法。

4.5 北山优划法的茛茞槽应用

通过运用旧井地段 BS03 孔周边结构面数据开展的均质区划分法北山适用性研究, 初步得 34 格大面积块 Miller 法较之其他各法更适宜北山岩体均质区划分选用。为此尝试将该优划法应用于重点预选区域茛茞槽块段, 以期获取该块段均质性划分结果。

针对上文所述茛茞槽块段 9 测区(A~I 区)近 7 000 条地质结构面数据(前处理时发现 A、B 区数据异常, 此处暂剔除), 采用 34 格大面积块 Miller 法计算结果见表 13。

表 13 Miller 法计算所得 α 均值(34 格大面积块)
Table 13 Mean values of α of Miller method
(34-patch large area)

测区	C	D	E	F	G	H	I
C		0.074	0.033	8.4×10^{-6}	2.1×10^{-7}	0	0
D	0.074		0.091	0	0	6.5×10^{-7}	0
E	0.033	0.091		5.2×10^{-6}	1.4×10^{-7}	0	0
F	8.4×10^{-6}	0	5.2×10^{-6}		4.2×10^{-3}	2.0×10^{-4}	1.7×10^{-3}
G	2.1×10^{-7}	0	1.4×10^{-7}	4.2×10^{-3}		0.024	2.6×10^{-3}
H	0	6.5×10^{-7}	0	2.0×10^{-4}	0.024		1.2×10^{-3}
I	0	0	0	1.7×10^{-3}	2.6×10^{-3}	1.2×10^{-3}	

计算结果显示: CD、CE、DE 各区之间均质性均较强(α 均值分别为 0.074、0.033、0.091), 故 CDE 应划归同一均质区(命名为 I 均质区); GH 测区均质性稍弱(α 均值为 0.024), 亦可归入另一均质区(命名为 II 均质区); F、I 则难以归入上述任一均质区(两区与其余各区比较所得 α 值数量级均小于 10^{-3})。两均质区结构面分组情况见图 9。

如 3.1 节所述, 茛茞槽块段主要为黑云母二长花岗岩, 岩体在最后一期岩浆侵入活动后遭受 2 次构造运动, 岩块主要受北东向断裂控制, 块内主要发育 7 条公里级断裂构造(见图 1(b)), 北东向断裂以张性、张扭性为主, 组合配套有东西向压性、压扭性断裂, 它们在成生时代上大体相当(海西晚期)。

在此类断裂构造特征基础上结合区域地质构造演化史, 初步判定该块段岩体结构整体均质程度较高, 但受断裂构造影响局部区域均质性较差, 如长度最大的 F3 左行断裂对块段整体均质性产生最大影响, 其边界附近岩体结构难以均一。上述有限的理论划分结果亦很好印证了整体定性判断 (CDE 归属均质性最强的 I 区; GH 归属均质性稍弱的 II 区; F、I 受 F3 断裂的较大影响, 差异度很大)。此应用结果一方面验证了该优化法的可行性, 另一方面亦扩展了该块段均质性定性评价结果。

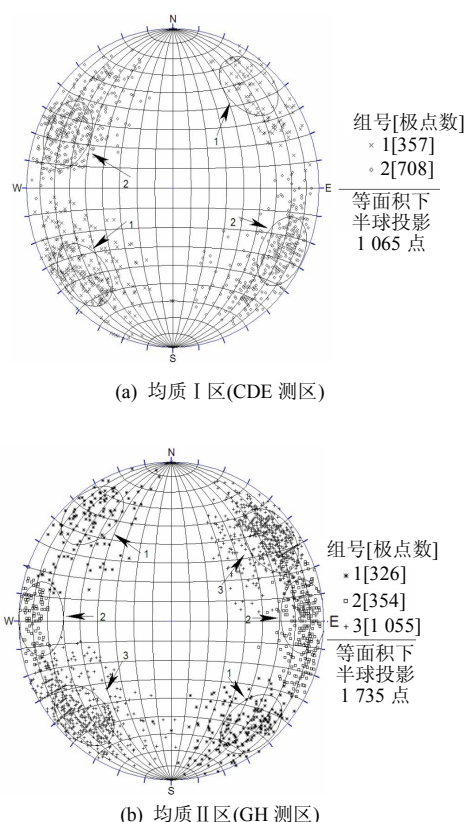


图 9 茆茆槽块段两均质区结构面分组
Fig.9 Discontinuities clustering results of two homogeneous regions in Jijicao block

5 结 论

(1) 尽管利用结构面多因素综合指标划分均质区可更全面反映岩体力学特征, 但具体方法实现上的困难致使单因素指标仍是目前岩体结构分区的主要方法。

(2) 以产状单因素作为划分指标的 Miller 法、Mahtab 法及关联系数法实际应用时各有所限, 效果不一, 就北山应用效果而言, 关联系数法地质意义较模糊, 判别力偏弱, 均质性区分力度略显不足; Mahtab 法地质意义清晰, 但其受制因素过多, 判断结果偶然性较大; Miller 法理论成熟、应用广泛,

但实现难度略大, 经针对性算法改进后应用效果良好, 并以 34 格大面积块的划分效果最佳。

(3) 统筹本文各划分法在 BS03 孔周边岩体应用结果得 D9 与 D11 露头均质性最强, 适宜归入同一均质区。

(4) 将比选所得适宜北山岩体的均质区划分法进一步应用到茆茆槽区域, 合理地将该地区划分成两个均质区 (CDE 测区和 GH 测区)。

(5) 均质区的实例划分充分验证: 目前所常用各法, 即便采取复杂的处理方式, 仍存有不可忽视的内在局限及误差; 判别力强弱并非适宜性评价的惟一标准, 科学统计结合工程实际、地质经验及肉眼比选判断等因素后综合考量, 方能获最适合的划分法及划分结果。

参 考 文 献

- [1] 金曲生, 范建平, 王思敬. 结构面密度算法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 273—278.
JING Qu-sheng, FAN Jian-ping, WANG Si-jing. A new method to calculate density of discontinuity and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(3): 273—278.
- [2] 周创兵, 叶自桐, 何炬林, 等. 岩石节理张开度的概率模型与随机模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 267—272.
ZHOU Chuang-bing, YE Zi-tong, HE Ju-lin, et al. Probabilistic model and stochastic simulation for aperture of rock joints[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(3): 267—272.
- [3] 贾洪彪, 马淑芝, 唐辉明, 等. 岩体结构面网络三维模拟的工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 976—979.
JIA Hong-biao, MA Shu-zhi, TANG Hui-ming, et al. Study on engineering application of 3-D modeling of rock discontinuity network[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(7): 976—979.
- [4] MUNIER R. Statistical analysis of fracture data adapted for modelling discrete fracture networks-version 2[R]. [S. l.]: Svensk Kärnbränslehantering AB, 2004: 20—23.
- [5] 陈剑平, 王清, 肖树芳, 等. 岩体结构统计均质区的划分[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(1): 19—24.
CHEN Jian-ping, WANG Qing, XIAO Shu-fang, et al. Evaluation of statistical homogeneity of rock mass structure[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 1996, 7(1): 19—24.