

北山沙枣园花岗岩岩体不同尺度结构面 几何特征研究

霍亮^{1,2}, 王贵宾², 杨春和^{2,3}, 魏翔⁴, 唐明豪³

(1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 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; 3. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 4. 重庆工商大学, 重庆 400067)

摘要: 花岗岩是我国高放废物处置库的候选围岩, 其中发育的多尺度结构面对处置库的密闭性有关键影响。以北山沙枣园岩体为研究区域, 选择 II, III, IV~V 级结构面为研究对象, 在调研的基础上, 采用野外测量的方法, 获取多尺度结构面的迹长和产状参数。运用数理统计方法分析多尺度结构面迹长分布, 相较于指数分布, 幂律分布更符合多尺度结构面的迹长分布, 呈现尺度无关的标度统一性, 标度为 2.236。采用基于粒子群算法的 K-means 聚类算法, 分析多尺度结构面的优势产状, II 级结构面的优势走向在 NW320° 附近, 倾角为 56°~76°, III 级结构面的优势走向为 NW304°~314° 和 NE43.5°, 倾角分别为 71.3°~72.9° 和 82.3°, IV~V 级结构面最优结构面走向为 NE38.8°~41.5°, 优势倾角为 70.0°~70.9°, 呈现尺度相关的差异性。基于结构面“梯子”形态产生机制, 结合大尺度结构面走滑应变生成次级结构面的模型, 提出“梯子-剪切”模式, 解释不同尺度结构面组合形态原因, 建立沙枣园岩体多尺度结构面的成生联系。

关键词: 岩石力学; 沙枣园; 结构面; 迹长; 产状; 组合形态

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2019)09-1848-12

Geometric characteristics of multi-scale discontinuities of Shazaoyuan granite masses in Beishan

HUO Liang^{1,2}, WANG Guibin², YANG Chunhe^{2,3}, WEI Xiang⁴, TANG Minghao³

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 4. Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: Granite is a candidate wall rock for high-level radioactive waste repository in China. The development of multi-scale discontinuities has a key impact on the closure of the repository. Taking grades II, III, IV-V discontinuities of Shazaoyuan granite masses in Beishan as the research objects, the trace length and occurrence

收稿日期: 2019-01-08; **修回日期:** 2019-05-23

基金项目: 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室开放基金项目(NRE1606); 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开放基金项目(Z017010)

Supported by Open Research Fund of State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology(Grant No. NRE606) and Open Research Fund of State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences(Grant No. Z017010)

作者简介: 霍亮(1988-), 男, 2010年毕业于重庆大学采矿工程专业, 现任讲师, 主要从事岩体工程方面的教学与研究工作。E-mail: huoliang@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0015

parameters of multi-scale discontinuities were obtained based on the literature investigation and field measurement. The trace length distribution of multi-scale discontinuities was analyzed by mathematical statistics. Compared with the exponential distribution, the power law distribution is more applicable to the trace length of multi-scale discontinuities, showing scale-independent scaling uniformity with a scale of 2.236. Adopting the K-means algorithm based on particle swarm optimization, the dominant attitude of multi-scale discontinuities was identified. The dominant trend and dip angle of grades II, III and IV-V discontinuities are, respectively, NW320° and 56° - 76°, NW304° - 314° or NE43.5° and 71.3° - 72.9° or 82.3°, and NE38.8° - 41.5° and 70.0° - 70.9°, showing a scale-dependent difference. Based on the “ladder” formation mechanism of discontinuities and the model of secondary discontinuities generated by strike-slip strain, a “ladder-shear” model was proposed to explain the combination morphological reasons of multi-scale discontinuities and to establish the genetic relationship of multi-scale discontinuities in Shazaoyuan granite.

Key words: rock mechanics; Shazaoyuan; discontinuity; trace length; occurrence; combination form

1 引 言

岩体作为高放废物地质处置库的天然隔离体系,是“多重屏障系统”中的最后一道屏障。我国高放射性废物的候选围岩为花岗岩岩体,其中广泛分布的多尺度结构面是地下水渗流和核素迁移的主要通道,对处置库长期安全性起着关键作用。

结构面的迹长和产状是决定其空间展布的关键几何特征,国内外学者对此进行了很多研究,取得很多重要进展。潘别桐和徐光黎^[1]总结了迹长的概率分布形式,有指数分布、均匀分布、对数分布、对数正态分布和双曲线分布等。对于小尺度的露头节理, G. M. Laslett^[2]假设其迹长服从负指数分布,基于极大似然原理,采用窗口法,推导露头节理的平均迹长; S. D. Priest 和 J. A. Hudson^[3]采用测线法估计结构面的平均迹长; M. Mauldon^[4]认为相较测线法,统计窗法包含有更大的统计面,有效地减少采样误差,统计结果更接近真实情况。对于多尺度结构面迹长, N. E. Odling^[5]运用热气球和直升机采集挪威西部某地七级尺度结构面的迹线长度,并运用幂律分布对迹长-频数曲线进行拟合,多尺度结构面的幂律指数相同,呈现尺度无关性; E. Bonnet 等^[6]调研了结构面迹线长度满足的分布类型,认为多尺度结构面满足幂律分布; L. Bertrand 等^[7]对西班牙 Tamariu 花岗岩发育的四级尺度结构面迹长-累积频次进行幂律分布拟合,运用最小二乘法估计参数,并采用 R^2 评价拟合效果,多尺度结构面的幂律指数一致,呈现尺度无关性。

迹长是结构面一维空间的度量,产状则确定了结构面在二维空间的方位。对于结构面的产状分

析, R. J. Shanley 和 M. A. Mahtab^[8]首次应用聚类算法对结构面产状数据进行聚类分析; 经过优化改进, J. P. Harrison^[9]提出采用模糊 C 均值方法对结构面进行聚类分析, 该方法是基于模糊集的 K-means 算法; W. Zhou 和 N. H. Maerz^[10]采用最近邻聚类、K 均值聚类、模糊逻辑聚类和矢量量化 4 种方法, 对结构面数据进行聚类分析。相较于其他聚类算法, K-means 算法不易受到异常值的影响, 具有明确分类, 适合结构面的聚类分析, 但其聚类结果受到初始中心的影响, 容易陷入局部最优。为克服 K-means 聚类算法在结构面聚类分析中的缺点, Y. Li 等^[11]构建基于粒子群算法(particle swarm optimization, 简称 PSO)的 K-means 算法(K-means algorithm based on particle swarm optimization, 简称 KPSO)应用于结构面聚类分析, 利用粒子对自身及群体的记忆学习, 增强 K-means 的全局搜索能力, 避免陷入局部极值。

甘肃北山地区是我国高放废物地质处置库场址首选预选区, 其中关于新场岩体的多尺度结构面开展了大量工作。王 峰等^[12-13]通过对甘肃北山新场地区 ETM 影像、热释光测年和断裂剖面特征分析, 构建新场岩体内大尺度断层的成生模式。王贵宾等^[14-16]采用综合测线法, 对北山新场露头节理的几何特征进行测量, 对露头节理的平均迹长、中点面密度等参数开展研究。霍 亮等^[17]统计分析 III, IV~V 级结构面的几何特征, 构建新场岩体内多尺度结构面的分布模型。

上述研究工作, 以多尺度结构面的单一几何特征作为研究对象, 比较不同拟合方法、聚类方法、结构面测量方法的优劣, 甚少将多尺度结构面的迹长和产状进行综合分析, 进而推演多尺度结构面的几何特征的成生规律。

沙枣园地区是甘肃北山预选区的重点预选地段之一^[18]。当前,沙枣园岩体中大尺度断层的识别工作基本完成,本文选取沙枣园花岗岩岩体为研究区域,依据谷德振和黄鼎成^[19]的结构面分级方法,以区域内发育的 II, III, IV~V 级结构面为研究对象,采用调研及野外勘测的方法,获取多尺度结构面几何特征,分析不同尺度结构面的迹长、产状特征,解释多尺度结构面空间展布形态规律,为推荐场址后续地下实验室的修建、运营提供参考依据。

2 研究区域

沙枣园岩体位于甘肃省西北部,嘉峪关市以西北约 80 km 处,见图 1(a),海拔高度 1 200~1 500 m,岩性以花岗闪长岩为主,地势北高南低,相对高差几十米,见图 1(b),岩体地貌为浑圆状山丘,坡度较小,山谷低平,戈壁砾石较普遍,见图 1(c)。沙枣园岩体内岩石类型较全,从基性到酸性均有,由老至新岩性依次为闪长岩或石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩,共同构成由基性至酸性的岩浆侵入旋回序列,岩体地表的主体岩性是花岗闪长岩,其主要分布在枯井单元内,地表出露面积 327 km²,其次是二长花岗岩,地表出露面积 23.7 km²^[20-21]。

陈伟明等^[21]对沙枣园岩体内发育的 II 级尺度

结构面已经做了详尽调查,几何特征见表 1。

沙枣园岩体内 II 级结构面的调研范围及空间展布,如图 2 阴影区域所示,岩体内共识别出 12 条 II 级结构面,走向分为北西向和北东向,北西向结构面发育规模明显大于北东向结构面。

由于沙枣园南部区域更准确反映了岩体被北西向和北东向 II 级结构面切割的特征,为充分体现 III 级、IV~V 级结构面调查区域的代表性,其测量范围以沙枣园候选场址南部某钻孔为中心开展。该钻孔位于北西向和北东向 II 级结构面相夹区域。如图 2 所示,半径约 5 km 的花岗岩岩体范围内($r < 5$ km),调查 III 级结构面(迹线长度 100 m 以上),调查精度按 1:10 000 比例尺要求,测量面积 60 km²。半径约 1 km 的范围内($r < 1$ km),调查 IV 级和 V 级结构面,调查精度按 1:2 000 比例尺要求,测量面积 3.14 km²,如图 3 所示。

以图 3 “十”字阴影区域内分布的 II 级结构面为界,按照整体性、层次性原则,将岩体划分为若干 III 级结构面测量区域。首先对测量区域进行遥感初步解译,提取地表结构面特征,运用亚米级精度 GPS 对 III 级结构面进行追踪测量,比对现场结构面与遥感影像差异,寻找特征测点,测量 III 级结构面的倾向、倾角,记录结构面位置、充填状况,最终布置 56 个测点,测得 24 条有效 III 级结构面。

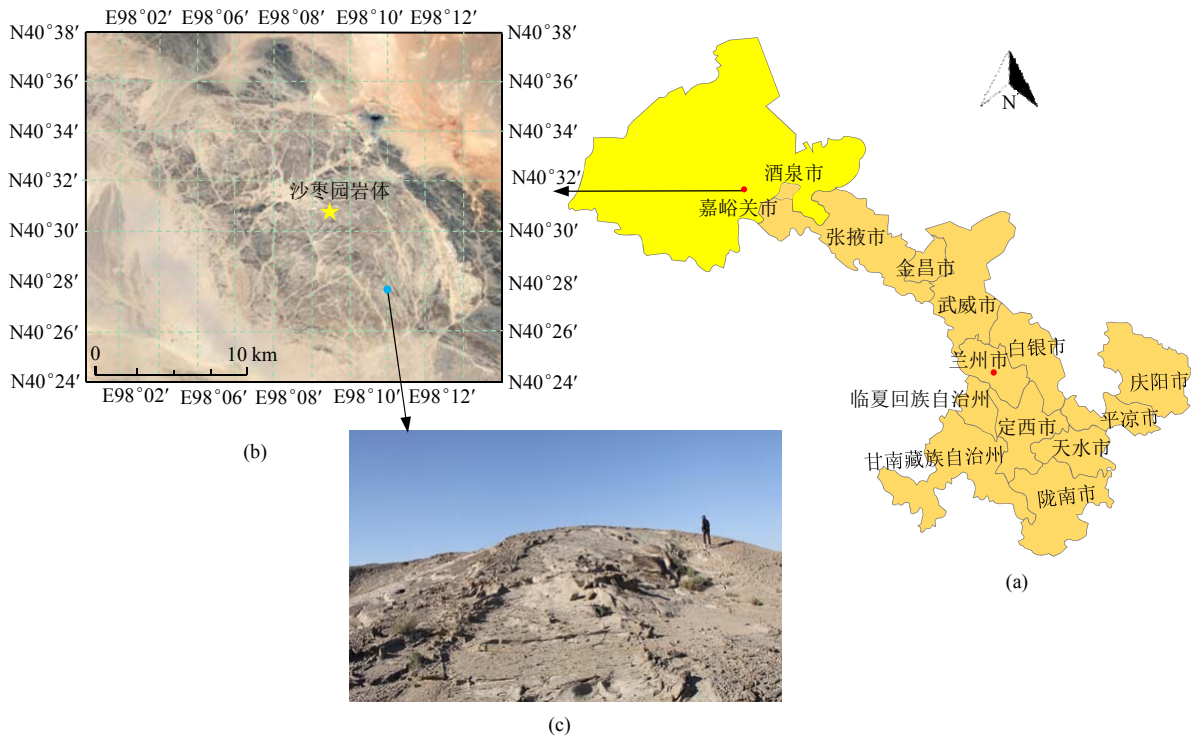


图 1 北山沙枣园岩体区位及地形特征

Fig.1 Location and topography characteristics of the Shazaoyuan area in Beishan

表 1 沙枣园岩体 II 级结构面几何特征

Table 1 Geometric characteristic of grade II discontinuities of Shazaoyuan rock block

编号	长度/km	走向/倾向	倾角/(°)
F1	20.5	北西/北东	54~67
F2	12.0	北西/北东	44
F3	6.2	北西/南西	59~69
F4	12.2	北西/南西	62
F5	7.5	北西/南西	75~76
F6	8.5	北东/北西	57~70
F7	1.5	北东/北西	65
F8	1.5	北东/不明	72
F9	7.8	北东/北西	65
F10	6.8	北西/南西	76
F11	2.5	北东/北西	65
F12	3.7	北西/北东	65

较好的露头面。采用 50 m 皮尺布设测线，测线布设方位应尽可能与露头发育的主要结构面相交，布设位置尽可能减少删截长度，现场如图 4 所示。记录结构面与测线相交位置，采用激光测距仪测量 IV 级和 V 级结构面迹长，采用罗盘测量结构面的倾向、倾角，并记录结构面填充情况，共布置 62 个露头点，测得 1 368 条 IV 级和 V 级结构面。

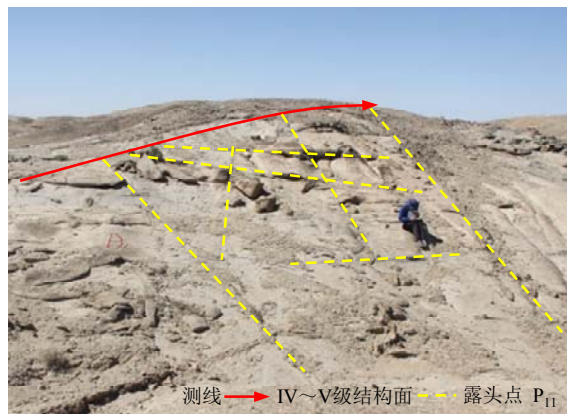


图 4 沙枣园岩体 IV~V 级结构面现场测量

Fig.4 Field measurement of grade IV-V discontinuities of Shazaoyuan rock block

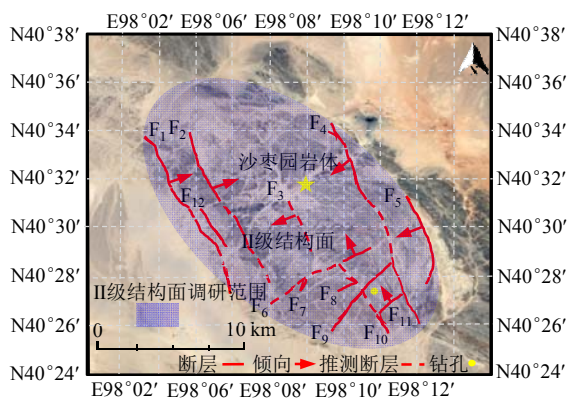


图 2 沙枣园岩体 II 级结构面调研范围(据陈伟明等^[21]修改)

Fig.2 Investigation scope of grade II discontinuities of Shazaoyuan rock block(revised according to CHEN Wenming et al^[21])

3 几何特征数据分析

结构面几何特征通常包括：结构面大小、空间方位、连续性、密度、张开度、形态等，其中结构面大小很难获取，通常以其迹长描述其发育规模。结构面的迹长和产状确定结构面在空间线性展布。

3.1 迹长特征分析

结构面迹线长度是描述结构面发育规模的重要参数。确定各级尺度结构面调查区域后，因结构面在调查区域内随机分布，通过对某级尺度结构面进行抽样测量，并采用指数分布和幂律分布，对不同尺度结构面的迹线长度与其累积频数进行统计分析，确定岩体结构面总体特征参数，推测分布模型，如图 5 所示。

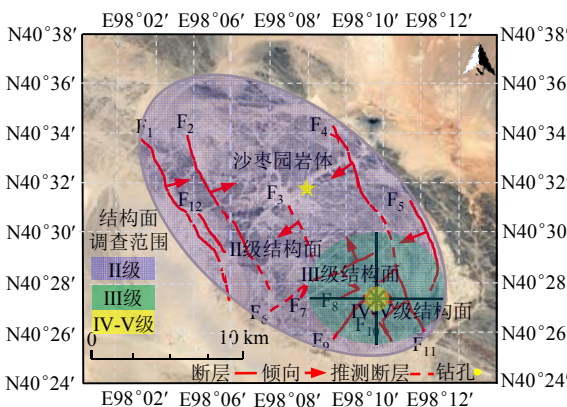
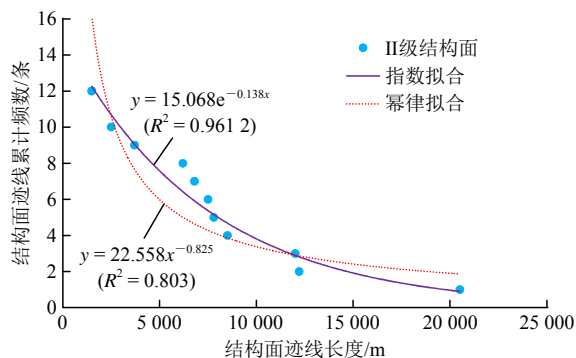


图 3 沙枣园岩体 III, IV~V 级结构面调查范围

Fig.3 Investigation scope of grade III, IV-V discontinuities of Shazaoyuan rock block

采用综合测线法^[14]对图 3 “米”字阴影区域内分布 IV~V 级结构面开展测量，寻找岩体出露情况



(a) II 级结构面

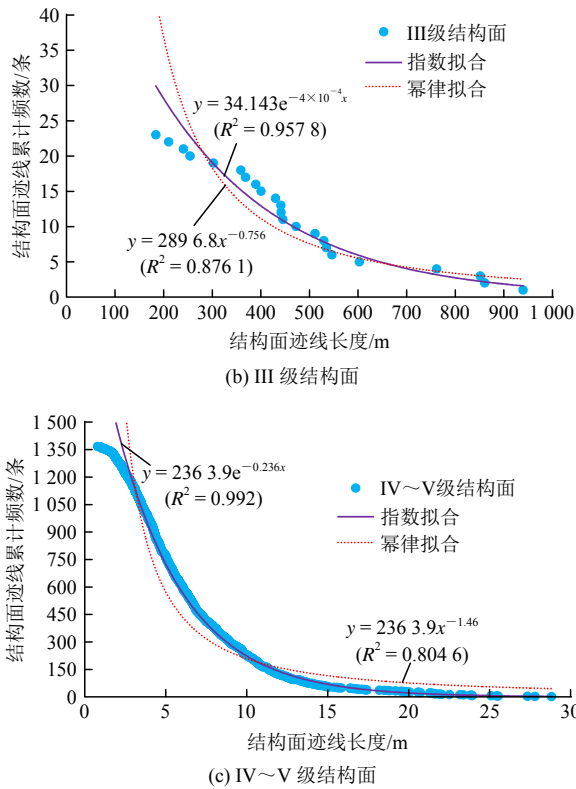


图5 不同尺度结构面迹长 - 累积频次拟合分布

Fig.5 Fitting distribution of trace length-cumulative frequency for different scale discontinuities

观察不同尺度结构面迹长 - 累积频次曲线形态, 同级结构面中, 累积频次随结构面迹线长度的增长而减少, 这一现象随结构面尺度的减小而越发显著。图 5(c)中 IV~V 级结构面的迹长 - 累积频次曲线呈现“重头 - 长尾”的分布形态, 10 m 以下结构面占据 IV~V 级结构面总数的 83.4%。采用拟合优度 R^2 作为评价指标, 分析不同尺度结构面迹长 - 累积频次曲线的拟合效果, 拟合参数整理如表 2 所示。

比较表 2 中幂律分布和指数分布对多尺度结构面迹长数据的拟合, 指数分布全部优于幂律分布, 尤其是对 IV~V 级结构面迹长数据的拟合, 两者相差 15% 以上。表 2 中的拟合结果是通过人为选定测量区域, 针对指定尺度结构面的迹长, 采用相应测量技术获取迹长数据, 并进行统计分析的结果, 据此

并不能判定沙枣园岩体多尺度结构面迹长分布满足指数分布。

对北山沙枣园岩体而言, 该区域内所有因构造作用形成的各级尺度结构面的迹长数据共同构成客观存在的统计总体。因岩石风化、测量误差及测量技术的限制, 只有通过结构面的样本数据来推断结构面统计总体的迹长特征。但是单一尺度结构面的样本数据对统计总体并不具有充分的代表性, 因而表 2 中拟合结果并不足以认定总体结构面迹线长度满足指数分布。

为得到更符合结构面总体分布的拟合结果, 通过扩大样本容量, 包括 II, III, IV~V 级结构面数据, 增强样本代表性。将不同测量区域、不同尺度结构面迹长数据进行面积归一化处理, 使不同尺度结构面的累积频次特征统一归纳至单位 km^2 范围内, 绘制结构面迹线长度与单位 km^2 结构面累积频次散点图, 并采用指数分布和幂律分布进行拟合, 如图 6 所示。由于结构面发育规模越大, 对岩体力学性质、渗透性质影响越大, 为突出大尺度结构面分布特征, 图 6 采用笛卡尔双对数坐标轴绘制。

图 6 中各级尺度结构面的迹长 - 归一化累积频次曲线形态均呈现两边弯折的“凸”字型, IV~V 级结构面的这一特征尤为明显。采用指数、幂律分布拟合曲线, 归一化后的拟合规律与单一尺度结构面的拟合规律截然不同, 幂律分布的拟合优度明显优于指数分布, 相差 61.79%。

单一尺度结构面迹长与归一化结构面迹长数据产生统计偏差的原因在于: 一方面, 选定测量区域范围后, 将贯穿区域的大尺度结构面进行删减, 导致大尺度结构面不能被完全测量, 因此双对数坐标曲线尾部向下弯曲; 另一方面, 在测量过程中, 由于测量技术分辨率的局限, 只能舍弃处于测量尺度下限边缘的结构面, 导致曲线头部向下弯曲。以曲线形态弯折最严重的 IV~V 级尺度结构面测量为例, 采用测线法测量, 测线方位的布置必须考虑优

表 2 沙枣园岩体多尺度结构面拟合分布参数

Table 2 Fitting distribution parameters of multi-scale discontinuities in Shazaoyuan rock block

拟合方法	II 级结构面迹长		III 级结构面迹长		IV~V 级结构面迹长	
	表达式	R^2	表达式	R^2	表达式	R^2
幂律分布	$22.558x^{-0.825}$	0.803	$2.896.8x^{-0.756}$	0.756	$6.025.3x^{-1.46}$	0.805
指数分布	$15.068e^{-0.138x}$	0.961	$34.143e^{-0.0004x}$	0.958	$2.363.9e^{-0.236x}$	0.992

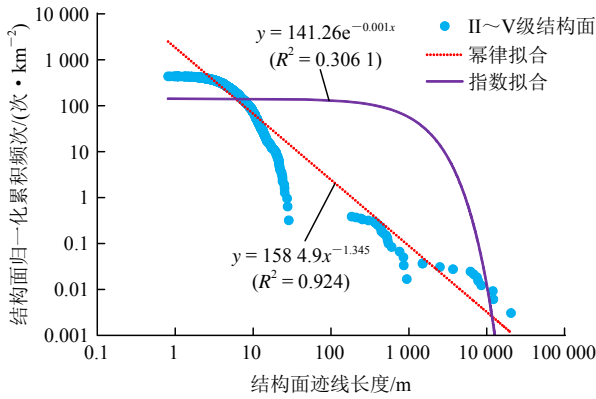


图 6 多尺度结构面迹长 - 归一化累积频次拟合分布

Fig.6 Fitting distribution of trace length-normalized cumulative frequency of multi-scale discontinuities

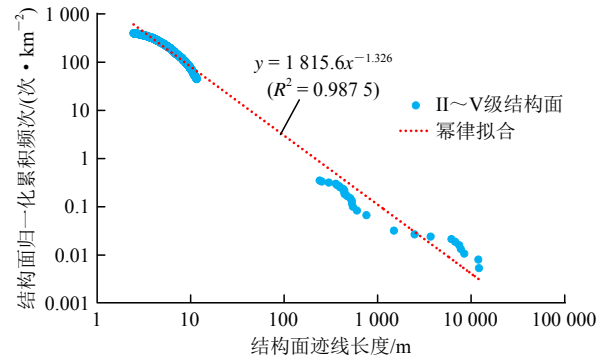


图 8 多尺度结构面删截 10%迹长 - 归一化拟合分布

Fig.8 Fitting distribution of delete 10% trace of multi-scale discontinuities-normalized cumulative frequency

势结构面，过短的结构面没有被充分采集，测线方位一旦确定，节理迹线相对于测线有 3 种关系^[12]，如图 7 所示，对于类型 I，结构面在测线另一边的迹长被删减。

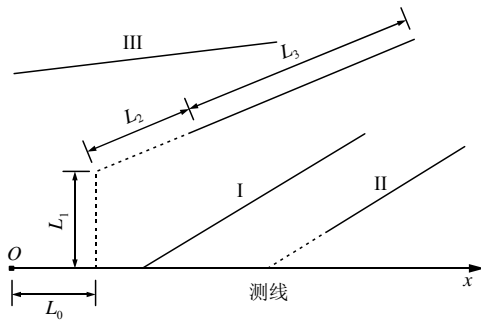


图 7 节理迹线端点类型(据杨春和等^[15]修改)

Fig.7 Types of the endpoint of joint traces(revised according to YANG Chunhe et al^[15])

由于各级尺度结构面迹线不完全测量，幂律分布会呈现其他分布形式。因此单一尺度结构面迹线长度 - 累计频次在双对数坐标系中呈现两头“弯折”的形态，分布规律更符合指数分布。为校正测量误差对拟合结果的影响，得到更准确的幂律分布拟合参数，对归一化后多尺度结构面的迹长数据，删截其测量尺度上、下限 10%的数据，采用幂律分布进行拟合，如图 8 所示。

删截后的多尺度结构面的归一化数据具有更好的幂律分布拟合效果，如表 3 所示。相较于未删截数据的拟合参数，拟合优度 R^2 提高了 6.3%，进一步证实了沙枣园岩体多尺度结构面迹长 - 累计频次满足幂律分布特征。

由于北山沙枣园岩体多尺度结构面迹长 - 累计频次分布符合幂律分布，因此由图 8 可得，多尺度结构面迹长 x 与其累计频次满足幂律分布，其互补累计分布函数 $F(x)$ 如下式：

表 3 沙枣园岩体多尺度结构面迹长幂律分布参数

Table 3 Parameters of power law distribution of multi-scale discontinuities in Shazaoyuan rock block

拟合对象	表达式	R^2
归一化结构面数据	$1\ 284.9x^{-1.345}$	0.924
删截 10%归一化结构面	$1\ 815.6x^{-1.326}$	0.987

$$F(x) = p(X > x) = 1\ 815.6x^{-1.326} \quad (1)$$

根据互补累计分布函数与概率密度函数的相互关系，将多尺度结构面迹长 x 的概率密度函数 $f(x)$ 描述为

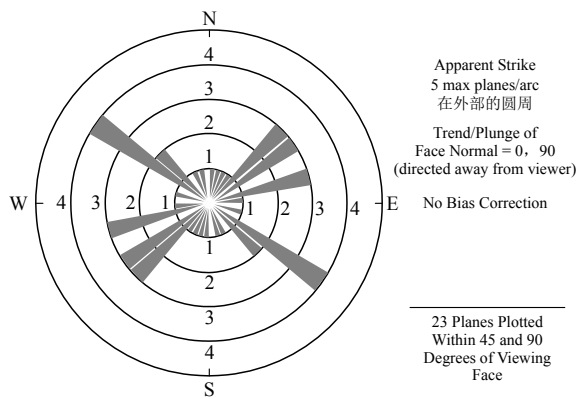
$$f(x) = p(x \leq X \leq x + dx) = 2\ 407.5x^{-2.326} \quad (2)$$

式(2)得到多尺度结构面迹长 - 频次满足幂律分布，其标度为 2.326。对于沙枣园岩体内发育的不同尺度结构面的迹长，均满足该幂律分布，因而具有标度不变性的特征，图 8 中多尺度结构面迹长 - 归一化累积频次散点图近似共线也反映了这一特征。多尺度结构面迹长分布的标度不变性，致使不能从结构面迹长的统计参数上区分结构面尺度大小，因而沙枣园岩体的多尺度结构面的迹长分布呈现尺度相似性。

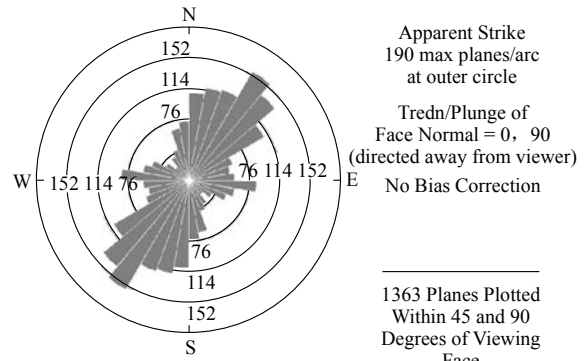
3.2 产状特征分析

岩体结构面是具有一定方向、延展较大、厚度较小的二维地质界面。结构面迹线长度仅反映空间一维特征，结构面的产状确定其走向及延展方位。结构面产状纷繁复杂，多尺度结构面产状数据分析的关键是确定不同尺度结构面的优势分组。

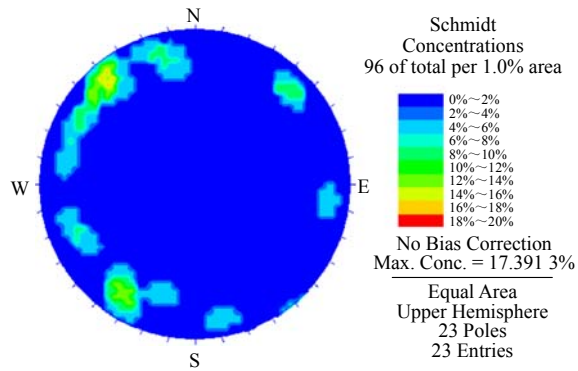
首先，运用 Dips 软件绘制岩体内不同尺度结构面的走向玫瑰花瓣图，如图 9(a)，10(a)所示。III 级结构面中优势走向为北西向和北东向 2 组，这一点与图 2 中 II 级结构面呈现相似性。对 IV~V 级结构



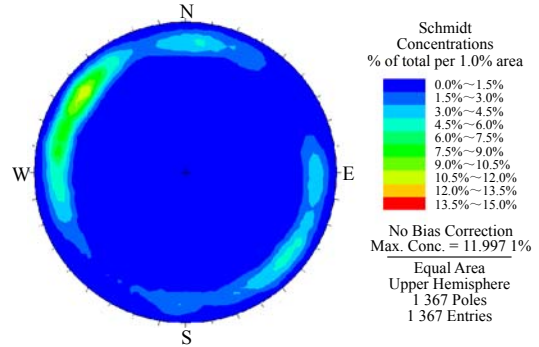
(a) 走向玫瑰花瓣图



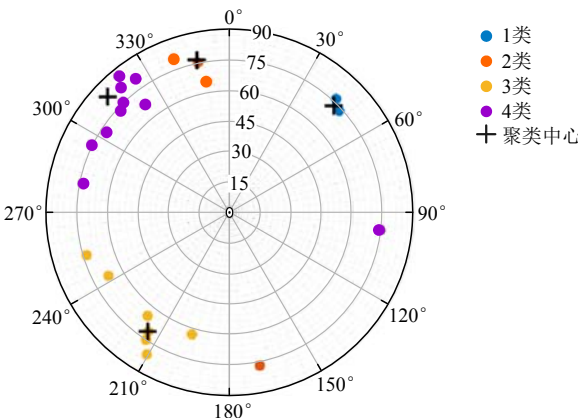
(a) 走向玫瑰花瓣图



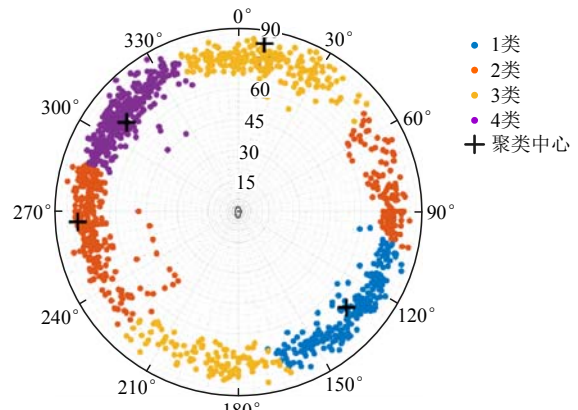
(b) 极点等密度图



(b) 极点等密度图



(c) KPSO 聚类分析图



(c) KPSO 聚类分析图

图 10 沙枣园岩体 IV~V 级结构面产状分析

Fig.10 Occurrence analysis of grade IV~V discontinuities of Shazaoyuan rock block

图 9 沙枣园岩体 III 级结构面产状分析

Fig.9 Occurrence analysis of grade III discontinuities of Shazaoyuan rock block

面而言，主要发育北东向结构面，北西向结构面发育较少，既体现了与 III 级结构面的相似之处，又体现了差异性。

其次，采用等面积上半球赤平投影法对 III 级、IV~V 级尺度优势结构面进行初步分析，如图 9(b)，10(b)所示。极点多汇集在球体边缘，III 级、IV~V 级结构面的倾角多集中在 65°~85° 范围，呈现倾角的相似性。图 9(b)中，III 级结构面极点汇集区域主要集中在 4 个区域，其中北西优势走向均划分为基

本对称的 2 个优势倾向组，北东向优势走向形成 2 个相邻的优势倾向组。图 10(b)中，IV~V 级结构面因北东向优势组散乱，极点覆盖区域呈条带状分布，其优势结构面投影点汇集区与 III 级尺度结构面极点密度最大处相似。

在极点等密度图上，人为点取结构面优势组倾向、倾角是传统划分结构面优势组采用的方法。该方法主观性太强，因此，选择基于粒子群算法的 K-means 方法^[11]对沙枣园岩体中 III 级、IV~V 级结构面的产状进行聚类分析，结果如图 9(c)，10(c)所示。聚类中心位置与图 9(b)，10(b)极点汇集区域中心

位置基本吻合, III 级、IV~V 级结构面优势组的平均迹长、倾向、倾角及数据占比如表 4 所示。

表 4 沙枣园岩体 III 级、IV~V 级结构面优势产状分组
Table 4 Dominant sets of grade III, IV-V discontinuities of Shazaoyuan rock block

测量对象	优势组	平均迹长/m	优势产状		数据百分比/%
			倾向/(°)	倾角/(°)	
III 级 结构面	1	529.1	44.0	72.9	8.7
	2	640.9	348.0	76.4	17.4
	3	448.3	214.1	71.3	30.4
	4	431.9	313.5	82.3	43.5
IV~V 级 结构面	1	6.4	131.5	70.9	17.6
	2	5.6	8.7	83.3	23.7
	3	6.4	308.8	70.0	28.6
	4	7.7	266.3	79.1	30.1

表 4 中, III 级结构面中发育北东向 $313.5^\circ \angle 82.3^\circ$, 数据占比最大, 达到 43.5%, 平均迹长最小。其次发育北西向 $44.0^\circ \angle 72.9^\circ$ 与 $214.1^\circ \angle 71.3^\circ$, 两者平均迹长相差 80.8 m, 倾角相差 1.6° , 倾向相差 170.1° , 可视为同组优势结构面, 占比 39.1%, 并与最优结构面 $313.5^\circ \angle 82.3^\circ$ 倾向分别相差 269.5° , 99.4° , 组合形态近似垂直。数据占比最小的北东东向优势结构面 $348.0^\circ \angle 76.4^\circ$ 发育规模最大, 平均迹长比北东向优势组大 209 m。

IV~V 级结构面主要发育北东向 $308.8^\circ \angle 70.0^\circ$ 和 $131.5^\circ \angle 70.9^\circ$, 两者倾角相差 0.9° , 倾向相差 177.3° , 平均迹长相等, 可视为倾向相反的同组优势结构面, 在 IV~V 级结构面数据中占比 46.2%。其次发育的优势结构面为北北西向 $266.3^\circ \angle 79.1^\circ$, 迹长最长, 以及北西西向 $8.7^\circ \angle 83.3^\circ$ 优势结构面, 其中北北西向结构面、北西西向结构面与北东向结构面分别相差 42.5° , 59.9° 。

综合图 2 和表 2 中 II 级结构面几何特征, 可得北西向结构面有 7 条, 走向在 $NW320^\circ$ 附近, 平均长度 9.84 km; 北东向结构面有 5 条, 走向在 $NE40^\circ$ 附近, 平均长度 4.36 km, 北西向结构面发育规模约北东向结构面 2 倍。从 II 级结构面的发育数量和发育规模角度分析, 北西向均优于北东向, 北东向结构面多终止于北西向结构面。

综合分析沙枣园岩体中 II, III, IV~V 级结构面优势组的迹长、产状分布特征, 北西向结构面是 II 级结构面中发育最显著的优势组; 而 III 级结构面中北西向优势组数据占比稍小于北东向, 但平均迹长大于北东向, 因此两者发育程度相差不大; 然而

IV~V 级结构面中北东向结构面中发育最显著, 并伴随发育北北西向和北西西向结构面。

综上, 与多尺度结构面迹长分布规律呈现尺度相似性不同, 多尺度结构面产状特征中尺度差异性和相似性并存。差异性体现在, 随结构面发育尺度减小, 岩体中发育的最优结构面由北西向过渡为北东向。同时, 不能忽略的是, II, III, IV~V 级结构面均发育的北东向优势结构面, 且其走向均在 $NE40^\circ$ 附近, 即倾向为 $NW310^\circ$ 或 $SE130^\circ$ 附近, 呈现一定程度的尺度相似性。

4 组合形态分析

当前沙枣园岩体最大水平主应力方向与岩体内北西向 II 级结构面走向相符^[22]。结构面是岩体在特定地质环境和构造应力场作用下的产物。产状呈现差异性的同级尺度结构面, 空间上呈现一定的组合形态, 而小尺度结构面的生成受大尺度结构面的控制。结合沙枣园中多尺度结构面优势组的迹长和产状特征, 分别得到如图 11 所示的各个尺度结构面的组合形态图。

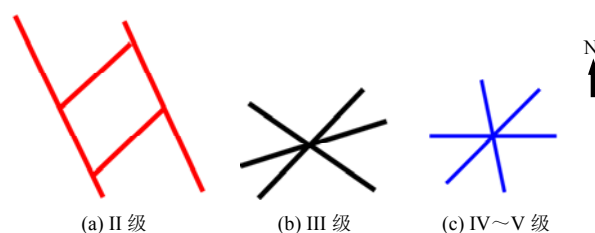


图 11 沙枣园岩体多尺度结构面组合形态

Fig. 11 Combination form of multi-scale discontinuities of Shazaoyuan rock block

图 11 中不同尺度结构面组合形态不同, 源于产状特征的差异性, 而产状差异性由形成结构面的构造应力及其边界条件决定。II 级结构面中后期形成的规模较小的北东向结构面, 以近垂直形式相交于前期形成的北西向结构面, 并以其为界, 构成“梯子”型, 见图 11(a)。而 III 级和 IV~V 级结构面的组合形态根据优势组产状, 组合构成“米”字型, 如图 11(b), (c)所示。

D. C. P. Peacock^[23]认为结构面呈现“梯子”形态的原因在于, 局部区域产生剪切变形, 扰动水平最大主应力轨迹线, 导致与最小主应力发生转换, 从而产生发育规模较小近垂直结构面。T. Bai 等^[24]认为局部区域应力转换的原因在于, 前期生成的北西向结构面的间距/层厚大于 1, 因而结构面间的应

力性质发生转换，导致垂直结构面产生。这一机制在鄂尔多斯盆地东南部的节理发育特征中得到验证^[25]。综合两者，J. P. Grider 和 D. C. P. Peacock^[26]提出“梯子”型结构面组合形态的发育模式，如图 12 所示。

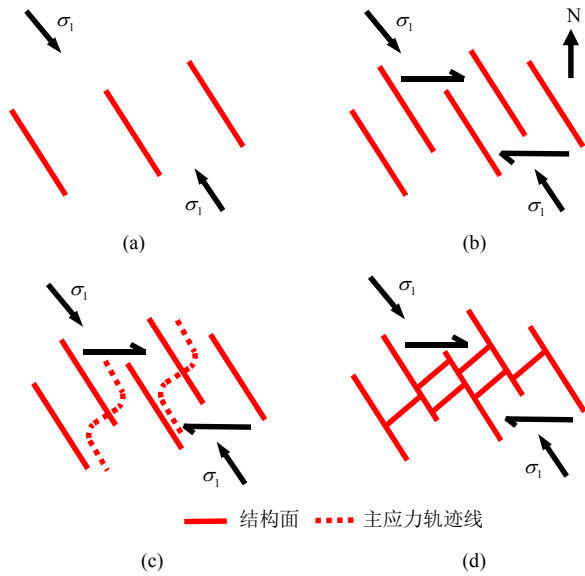
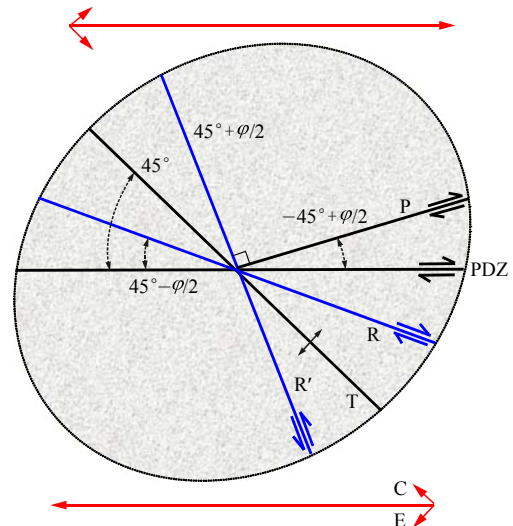


图 12 “梯子”组合形态发育模式(据 J. P. Crider 和 D. C. P. Peacock^[26]修改)
Fig.12 Morphological development model of “ladder” combination (revised according to J. P. Crider and D. C. P. Peacock^[26])

图 12(a), (b)中，在北西向水平压应力作用下，岩体发育规模较大的北西向结构面，在应力持续作用下，北西向结构面数量增加，间距减小，局部区域产生一对右行力偶。图 12(c), (d)中，局部剪切变形增加，北西向应力轨迹线偏转，产生规模较小北东向结构面，两者构成“梯子”型组合形态。假设图 12(d)中“梯子”形态的结构面尺度为 II 级，则北东向 II 级结构面和北西向 II 级结构面分别构成剪切带，而剪切带中发育的 III 级、IV~V 级结构面产状可采用走滑应变椭圆解释，如图 13 所示。

岩体在走滑断层附近有一对右行力偶，产生旋转剪切，分别有挤压分量 C 和拉张分量 E 。椭圆的长轴和短轴在递进变形过程中相对于剪切方向发生旋转，其中， φ 为岩石内摩擦角。以主位移带(PDZ, principal displacement zone)为横轴，顺时针为正，可能发生多个方向的次级破裂：小角度相交的里德尔剪切破裂 $R(45^\circ - \varphi/2)$ 及共轭里德尔剪切破裂 $R'(45^\circ + \varphi/2)$ ；呈 45° 相交的张性破裂 T ；同向小角度相交的剪切破裂 $P(\varphi/2 - 45^\circ)$ ，该破裂与 R' 破裂相互垂直。上述多组破裂可构成 III, IV~V 级结构面的“米”字型组合形态，以沙枣园岩体为例，



C—来自扭动的挤压矢量；E—来自扭动的伸展矢量；
R—里德尔剪切破裂；R'—共轭里德尔剪切破裂；
PDZ—主位移带；P—同向剪切破裂；T—张拉破裂
图 13 右行力偶产生走滑应变椭圆(据 Y. Katz 等^[27-28]修改)
Fig.13 Strain ellipse by the couple right strike slip(revised according to Y. Katz et al^[27-28])

选取图 3 中 III 级结构面调查范围内的 II 级结构面走向 NW330° 和 NE40° 为剪切带方向，沙枣园岩石的内摩擦角为 54° 左右，预测该测量范围内次级结构面的优势倾向，如表 5 所示。

表 5 沙枣园岩体 III, IV~V 级结构面优势倾向预测
Table 5 Prediction of dominant sets of grade III, IV-V discontinuities of Shazaoyuan rock block

II 级结构面剪切带走向	次级结构面预测优势倾向/(°)			
	R	R'	T	P
NE40°	148/328	22/202	175/355	112/292
NW330°	78/258	132/312	105/285	42/222

对比表 4 中野外测量获取的结构面优势倾向数据与表 5 中预测的次级结构面倾向数据可知，III 级结构面中的 4 组优势倾向，均可在表 5 中找到相近倾向，最大角度差小于 8° ，其中 3 组在 NW330° 剪切带内，第 2 组优势结构面倾向在 NE40° 剪切带内，数据占比最小。同样，IV~V 级结构面优势倾向在 NW330° 剪切带内可找到 3 组相近倾向，第 2 组优势结构面在 NE40° 剪切带内，该组预测数据与实测聚类数据角度差达到 13.3° ，为最大角度差，数据占比最小。上述预测结果说明，北西向与北东向 II 级结构面构成的剪切带共同控制产生 III 级与 IV~V 级结构面构成的“米”字型组合形态，并且由于北西向 II 级结构面发育规模更大，对次级结构面组合形态的控制作用更强。结合图 11, 12 提出符合沙

枣园岩体多尺度结构面组合形态形成过程的“梯子-剪切”模式，如图 14 所示。

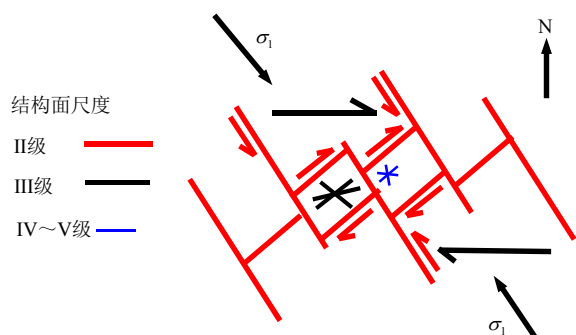


图 14 沙枣园岩体多尺度结构面“梯子-剪切”模式
Fig.14 “Ladder-shear” model of multi-scale discontinuities of Shazaoyuan rock block

为清晰展示多尺度结构面组合形态的相互关系，缩小了不同尺度结构面的尺度比例，如图 14 所示。假设区域构造应力方向不变，持续作用于沙枣园岩体，岩体产生北西向结构面；随时间推移，应变累积，前期结构面持续滑动扩展，发育为 II 级结构面，控制中期结构面的方位生成，并限制其发育规模，从而形成北东向 II 级结构面。两者构成“梯子”形态，并共同控制后期 III, IV~V 级结构面的发育产状，致使其结构面组合形态为“米”字型。

5 讨 论

本文对不同尺度结构面设置典型测量区域，结合不同尺度结构面的展布特征，采用相应方法开展勘察测量，针对结构面的迹长和产状特征进行分析。其中，迹长特征呈现尺度无关性，标度为 2.326，优势组产状中尺度相似性与差异性并存。E. Bonnet 等^[6]对 45 组世界各地不同尺度结构面及其频次的幂律分布标度进行整理，其中 28 组的标度在 2.0~3.0，18 组在 2.0~2.4。L. Bertrand 等^[7]对西班牙某地花岗岩多尺度结构面的产状进行统计分析，发现虽然不同尺度结构面中均发育相同方向的优势组结构面，但相同优势组结构面在不同尺度中占比并不相同。基于此，本文结合不同尺度结构面优势产状的空间组合形态，提出“梯子-剪切”模式，揭示沙枣园岩体中大尺度结构面控制小尺度结构面的生成过程，解释多尺度结构面优势产状具有尺度依赖性的原因。

由于板块运动、碰撞，我国西北地区构造地应力的整体环境为纵向压缩，由 NNE 向至 NEE 向顺时针旋转^[29-30]。区域复杂构造应力是形成北山地区

地质构造的成因。北山属于天山海西褶皱带的东延部分，主要构造线为近 EW 向，而北山区域中的新场岩体、芨芨槽岩体和旧井岩体中，显著发育 NE 向 II 级结构面，沙枣园岩体虽位于北山地区，但其中 NW 向 II 级结构面发育规模明显大于 NE 向^[30-32]，呈现区域复杂性。本文研究结果适用于沙枣园岩体构造、岩性及结构面组合形态相似的硬脆性岩体，对于差异较大的岩体，本文通过多尺度结构面组合形态反演区域多尺度结构面生成过程的研究思路具有一定的参考意义。由于北山沙枣园岩体面积 375 km²，深度至少 600 m，采用综合测线法对岩体典型区域的 IV~V 级结构面进行人工测量，并对 III 级结构面进行追踪测量，不能满足测量需求，应借鉴国内外更先进的测量方法。M. Sturzenegger^[33]以边坡工程岩体研究对象，采用激光扫描和近景摄影测量技术，对岩体结构面开展精细测量；张培兴等^[34]采用无人机对新场岩体内不同尺度岩体结构面进行摄影测量，探索多尺度结构面的非接触式测量方法，尽可能扩大沙枣园岩体的测量范围，并与钻孔中裂隙编录相结合，深入分析结构面的三维空间展布，为我国高放废物北山预选区的渗流特性和核素迁移规律研究探路。

6 结 论

高放废物地质处置工程中，多尺度结构面的空间展布对放射性核素的迁移分布具有关键影响，然而，区域岩体多尺度结构面在识别测量、数据分析和生成机制中面临多学科的交叉研究，是一个难点，处于理论拼图的阶段。本文按照结构面的发育规模，将北山沙枣园地下实验室建造区域划分为不同的调查范围，从调查统计入手，分析多尺度结构面的迹长、产状、组合形态，并构建沙枣园岩体多尺度结构面的生成模式。根据当前沙枣园岩体多尺度结构面的调查范围，得到以下几点结论：

(1) 经过面积归一化处理后，北山沙枣园岩体多尺度结构面迹长分布规律满足幂律分布，其标度为 2.326，因此多尺度结构面迹长呈现尺度无关的自相似性。

(2) 北山沙枣园岩体多尺度结构面的优势产状特征中，尺度差异性和相似性并存，其中尺度差异性体现为：随结构面尺度减小，结构面优势走向由北西北东转变。II 级结构面中发育最显著的优势组走向在 NW320° 附近，优势倾角为 56°~76°；III

级尺度结构面中北西向与北东向发育程度相近, 优势倾角为 $71.3^{\circ} \sim 82.3^{\circ}$; IV~V 级结构面中发育最显著的优势组走向为 $NE38.8^{\circ} \sim 41.5^{\circ}$, 优势倾角 $70.0^{\circ} \sim 70.9^{\circ}$ 。同时, II, III, IV~V 级结构面中均发育走向为 $NE40^{\circ}$ 的优势结构面, 呈现尺度相似性。

(3) 结合大尺度结构面走滑应变生成次级结构面的力学机制, 将 II 级结构面的组合形态与 III 级、IV~V 级结构面的组合形态相结合, 提出符合沙枣园多尺度结构面组合形态的“梯子-剪切”模式, 该模式揭示了当前结构面调查范围内, 沙枣园岩体地表多尺度结构面的成生联系。

致谢 感谢核工业北京地质研究院环境工程研究所的李亚伟老师、刘健老师和赵宏刚老师在北山沙枣园岩体多尺度结构面调查中给予的无私帮助和指导!

参考文献(References):

- [1] 潘别桐, 徐光黎. 岩体节理几何特征的研究现状及趋向[J]. 工程勘察, 1989, (5): 23 - 26.(PAN Bietong, XU Guangli. The state-of-art and trend in the study of rock joint geometry[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1989, (5): 23 - 26.(in Chinese))
- [2] LASLETT G M. Censoring and edge effects in areal and line transect sampling of rock joint traces[J]. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 1982, 14(2): 125 - 140.
- [3] PRIEST S D, HUDSON J A. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(3): 183 - 197.
- [4] MAULDON M. Estimating mean fracture trace length and density from observations in convex windows[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1998, 31(4): 201 - 216.
- [5] ODLING N E. Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western Norway[J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19(10): 1257 - 1271.
- [6] BONNET E, BOUR O, ODLING N E, et al. Scaling of fracture systems in geological media[J]. Reviews of Geophysics, 2001, 39(3): 347 - 383.
- [7] BERTRAND L, GERAUD Y, GARZIC E L, et al. A multiscale analysis of a fracture pattern in granite: A case study of the Tamariu granite, Catalunya, Spain[J]. Journal of Structural Geology, 2015, 78(4): 52 - 66.
- [8] SHANELY R J, MAHTAB M A. Delineation and analysis of clusters in orientation data[J]. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 1976, 8(1): 9 - 23.
- [9] HARRISON J P. Fuzzy objective functions applied to the analysis of discontinuity orientation data[C]// HUDSON J A, ed. Proceedings of the international Society of Rock Mechanics Symposium. London: British Geotechnical Society, 1992: 25 - 30.
- [10] ZHOU W, MAERZ N H. Implementation of multivariate clustering methods for characterizing discontinuities data from scanlines and oriented boreholes[J]. Computers and Geosciences, 2002, 28(7): 827 - 839.
- [11] LI Y, WANG Q, CHEN J P, et al. K -means algorithm based on particle swarm optimization for the identification of rock discontinuity sets[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(1): 375 - 385.
- [12] 王峰, 苏刚, 晋佩东. 甘肃北山地区晚第四纪构造变形特征及演化趋势[J]. 地震研究, 2004, 27(2): 173 - 178.(WANG Feng, SU Gang, JIN Peidong. Tectonic deformation and evolution trend of Beishan region, Gansu province since late quaternary[J]. Journal of Seismological Research, 2004, 27(4): 173 - 178.(in Chinese))
- [13] 王峰, 王驹, 范洪海, 等. 甘肃北山旧井地区晚第四纪活动断裂分布及其构造意义[J]. 地质论评, 2005, 51(3): 250 - 256.(WANG Feng, WANG Ju, FAN Honghai, et al. Distribution of late quaternary active faults and its tectonic significance in the Beishan region, Gansu Province China[J]. Geological Review, 2005, 51(3): 250 - 256.(in Chinese))
- [14] 王贵宾, 杨春和, 包宏涛, 等. 岩体节理平均迹长估计[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2589 - 2592.(WANG Guibin, YANG Chunhe, BAO Hongtao, et al. Mean trace length estimation of rock mass joint[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2589 - 2592.(in Chinese))
- [15] 杨春和, 包宏涛, 王贵宾, 等. 岩体节理平均迹长和迹线中点面密度估计[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2475 - 2480.(YANG Chunhe, BAO Hongtao, WANG Guibin, et al. Estimation of mean trace length and trace midpoint density of rock mass joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2475 - 2480.(in Chinese))
- [16] 杨春和, 梅涛, 王贵宾, 等. 甘肃北山芨芨采石场岩体节理特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 3849 - 3854.(YANG Chunhe, MEI Tao, WANG Guibin, et al. Study on rockmass joint characteristics of Jiji Quarry in Beishan, Gansu Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.2): 3849 - 3854.(in Chinese))
- [17] 霍亮, 王贵宾, 杨春和, 等. 北山某地段岩体多尺度结构面成生联系研究[C]// 王驹编. 第七届废物地下处置学术研讨会论文集. 北京: 原子能出版社, 2018: 93 - 99.(HUO Liang, WANG Guibin, YANG Chunhe, et al. Study on genetic relation of multi-scale

- structural plane of rock mass in Beishan area[C]// WANG Ju ed. Seventh Symposium on Underground Waste Disposal. Beijing: Atomic Energy Press, 2018: 93 - 99.(in Chinese))
- [18] 李杰彪, 苏 锐, 周志超, 等. 甘肃北山沙枣园地区土壤表层盐分特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(9): 115 - 120.(LI Jiebiao, SU Sui, ZHOU Zhichao, et al. Analysis on characteristics of soil salinity in Shazaoyuan site of Gansu Beishan region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(9): 115 - 120.(in Chinese))
- [19] 谷德振, 黄鼎成. 岩体结构的分类及其质量系数的确定[J]. 水文地质工程地质, 1979, 6(2): 8 - 13.(GU Dezhen, HUANG Dingcheng. Classification of rock mass structure and confirmation of rock mass quality coefficient[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1979, 6(2): 8 - 13.(in Chinese))
- [20] 董万平. 甘肃省金塔县沙枣园子金矿地质特征与找矿标志[J]. 甘肃科技, 2017, 33(21): 32 - 34.(DONG Wanping. Geological characteristics and prospecting criteria of Shazaoyuanzi gold deposit in Jinta County, Gansu Province[J]. Gansu Science and Technology, 2017, 33(21): 32 - 34.(in Chinese))
- [21] 陈伟明, 金远新, 罗 辉, 等. 高放废物处置库北山预选区沙枣园岩体地质特征[C]// 王 驹编. 第 7 届废物地下处置学术研讨会. 北京: 原子能出版社, 2018: 41 - 45.(CHEN Weinming, JIN Yuanxin, LUO Hui, et al. Geology of Shazaoyuan intrusion in Beishan region pre-selected for disposal of high-level radioactive waste[C]// WANG Ju ed. The Seventh Symposium on Underground Waste Disposal. Beijing: Atomic Energy Press, 2018: 41 - 45.(in Chinese))
- [22] 陈群策, 秦向辉. 北山预选区沙枣园和算井子岩体 BS20, BS21, BS22, BS23 钻孔地应力测量[R]. 北京: 中国地质科学院地质力学研究所, 2016.(CHEN Qunce, QIN Xianghui. In-situ stress measurements at boreholes BS20, BS21, BS22 and BS23 in the Shazaoyuan and Suanjingzi rock blocks in the Beishan preselected area[R]. Beijing: Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, 2016.(in Chinese))
- [23] PEACOCK D C P. The temporal relationship between joints and faults[J]. Journal of Structural Geology, 2001, 23(2): 329 - 341.
- [24] BAI T, MAERTEN L, GROSS M R, et al. Orthogonal cross joints: do they imply a regional stress rotation[J]. Journal of Structural Geology, 2002, 24(1): 77 - 88.
- [25] 姜 琳, 王清晨, 王香增, 等. 鄂尔多斯盆地东南部中生界地层节理发育特征与古应力场[J]. 岩石学报, 2013, 29(5): 1 774 - 1 790.(JIANG Lin, WANG Qingchen, WANG Xiangzeng, et al. Joint development and paleo stress field in Mesozoic strata of the southeastern Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(5): 1 774 - 1 790.(in Chinese))
- [26] CRIDER J G, PEACOCK D C P. Initiation of brittle faults in the upper crust: a review of field observations[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(4): 691 - 707.
- [27] KATZ Y, WEIBERGER R, AYDIN A. Geometry and kinematic evolution of Riedel shear structures, Capitol Reef National Park, Utah[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(3): 491 - 501.
- [28] DAVIS G H, BUMP A P, GARCIA P E, et al. Conjugate Riedel deformation band shear zones[J]. Journal of Structural Geology, 2000, 22(2): 169 - 190.
- [29] ZHAO X G, WANG J, QIN X H, et al. In-situ stress measurements and regional stress field assessment in the Xinjiang candidate area for China's HLW disposal[J]. Engineering Geology, 2015, 197: 42 - 56.
- [30] ZHAO X G, WANG J, CAI M, et al. In-situ stress measurements and regional stress field assessment of the Beishan area, China[J]. Engineering Geology, 2013, 163: 26 - 40.
- [31] 方茂龙. 甘肃北山小西弓—红旗山地区中新代变形构造及其形成机制[J]. 铀矿地质, 1995, 11(5): 291 - 296.(FANG Maolong. Meso-Cenozoic deformational structures and their formation mechanism in Xiaoxigong—Hongqishan area, Beishan, Gansu province[J]. Uranium Geology, 1995, 11(5): 291 - 296.(in Chinese))
- [32] ZHANG C, CHEN Q, QIN X, et al. In-situ stress and fracture characterization of a candidate repository for spent nuclear fuel in Gansu, northwestern China[J]. Engineering Geology, 2017, 231: 218 - 229.
- [33] STURZENEGGER M. Multi-scale characterization of rock mass discontinuities and rock slope geometry using terrestrial remote sensing techniques[Ph. D. Thesis][D]. Canada: Simon Fraser University, 2010.
- [34] 张培兴, 李晓昭, 宋金龙. 无人机在高放废物处置预选区不同尺度结构面调查中的应用[J]. 工程勘察, 2017, (12): 44 - 48.(ZHANG Peixing, LI Xiaozhao, SONG Jinlong. Application of UAV in investigation of discontinuities at different scales in the preselected area for high-level radioactive waste disposal[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2017, (12): 44 - 48.(in Chinese))