

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.03.009

内蒙古维拉斯托锡多金属矿石英脉形态分带定量分析

李柱,张德会*

(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083)

摘要:为探讨维拉斯托锡多金属矿床含锡石英脉形态分带的成矿动力学机制,通过利用分形和混合分布工具对断层脉带和上、下节理脉带进行定量分析。上、下节理脉带在脉厚、钨锡品位分形维数和混合筛分分布方面均具有相似性,暗示了两者可能具有相似的成矿机制。与上、下节理脉带相比,断层脉带的脉厚和钨锡品位分形维数均较小,断层脉带内的聚焦化流动、较低的脉体成核率、脉体叠加生长和矿化叠加富集可能是导致断层脉带的厚脉和富矿比例均高于上、下节理脉带的重要原因。

关键词:锡多金属矿;缓倾石英脉;分形;混合分布;内蒙古

中图分类号:P618.44

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2021)03-0121-10

Quantitative Analysis of Morphological Zonations of Quartz Veins in Weilasituo Sn – polymetallic Deposit, Inner Mongolia

LI Zhu, ZHANG Dehui*

(School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to discuss the dynamic mineralization mechanism of Sn – bearing quartz vein morphology zoning in the Weilasituo Sn – polymetallic deposit, three zonations including the upper joint vein zonation, the fault vein zonation and the lower joint vein zonation are analyzed quantitatively by means of vein thickness fractal, tin grades fractal, tungsten grades fractal and mixed distributions. It is found that the similarities of the thickness, Sn – W fractal dimensions and the mixed distributions of ore grades components in the upper and lower joint – vein zonations indicate that the two may have similar metallogenic mechanism. Compared with the upper and lower joint vein zonations, the thickness and the Sn and W grades of fractal dimensions in the fault vein are both small. The focused flow, lower nucleation rate, superimposed growth of veins and the superposition of mineralization may be the reasons for the higher proportions of thick vein and high – grade ores in the fault vein than that in the two joint vein zonations.

Keywords: Sn – polymetallic deposit; gently inclined quartz vein; fractal; mixed distribution; Inner Mongolia

收稿日期:2020-05-13;修回日期:2021-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目“石英脉型黑钨矿床‘五层楼’垂直形态分带形成的动力学机制”(41373048)。

作者简介:李柱(1987 –),男,博士研究生,高级工程师,主要从事成矿动力学研究工作。E – mail:867113514@qq.com。

* 通讯作者:张德会(1955 –),男,教授,主要从事成矿作用地球化学教学和研究工作。E – mail:1978011191@cugb.edu.cn。

大兴安岭南段是中国北方重要的锡铜银多金属成矿带,分布着至少 23 个锡矿产地,尤其是近些年白音查干(约 22 万 t 锡)和维拉斯托(约 9 万 t 锡)2 个大型锡多金属矿床相继被发现,显示出该地区锡矿找矿具有巨大潜力,越来越多学者开始关注该地区锡矿床成因研究。前人对维拉斯托锡多金属矿床进行了详细的研究,包括与成矿有关的花岗岩成因、成岩和成矿年龄、流体包裹体、同位素地球化学等方面(江思宏等,2010;OUYANG et al., 2014; LIU et al., 2016; WANG et al., 2017; 祝新友等, 2016; 翟德高等, 2016; 刘瑞麟等, 2018a, 2018b; 周振华等, 2019),但目前鲜有对含锡钨石英脉形态方面的研究。通过钻孔揭露的资料和对井下巷道内矿化石英脉形态的观察,发现该矿床石英脉总体上呈缓倾斜产出,在剖面中部发育缓倾的厚脉,而厚脉的上、下两侧是倾角更缓甚至近水平的薄脉体,其分带类型既不同于岭南地区钨矿的“五层楼”分带模式(LIU et al., 2014; 刘向冲等, 2017),也不同于葡萄牙潘纳斯卡拉钨锡矿床的整体近水平的叶脉模式(FOX-

FORD et al., 2000)。维拉斯托缓倾石英脉的形态分带现象在该地区并非个例,而是具有一定普遍性(LIU et al., 2016; 周振华等, 2019),但是关于其成矿动力学机制的科学问题尚未被关注和研究。该问题制约着维拉斯托矿床和该地区类似矿床的外围和深部找矿方向和效率。笔者以维拉斯托锡多金属矿床中的含矿石英脉为研究对象,利用分形和混合筛分工具定量分析脉体形态分带和成矿元素在不同分带中的分布规律,探讨石英脉形态分带和成矿动力学关系。

1 矿床地质背景

维拉斯托矿床大地构造上处于中亚造山带大兴安岭南段晚古生代宝力道弧增生带内(图 1a),该区域从古生代末期开始到中生代期间,经历了碰撞造山、碰撞后伸展作用和受古太平洋板块俯冲影响的构造转换阶段,构造-岩浆活动强烈(刘瑞麟等, 2018a; 周振华等, 2019)。

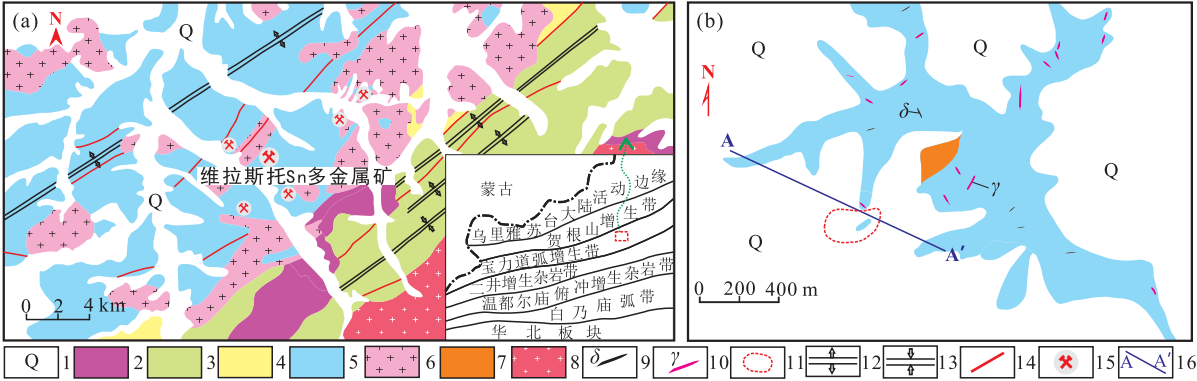


图 1 维拉斯托锡多金属矿地质简图

Fig. 1 Geological sketch of Weilasituo Sn - polymetallic ore deposit

区域出露的地层主要有:下元古界黑云斜长片麻岩和斜长角闪岩,上石炭统碎屑岩,中、下二叠统的火山碎屑岩和碎屑岩,中、上侏罗统含煤岩系和第四系(郭秉程等, 2017)。矿区内地层出露简单,以下元古界黑云斜长片麻岩和第四系为主(图 1b)。区域内的构造运动具有多旋回的特征,华力西期以褶皱构造运动为主,其中维拉斯托矿床发育在米生庙复背斜内,该褶皱为一枢纽北东向,轴面近直立,两

翼倾角 65°左右的复背斜。印支—燕山期构造运动则以断裂为主,形成近东西向、北东向和北北东压扭性断裂带,控制着燕山期岩浆岩和矿体分布特征,矿区内主要以北北东向逆断层为主,控制着主要石英大脉和深部的石英斑岩的发育(付旭等, 2015)。在岩浆岩方面,区域出露华力西期石英闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩(308~320 Ma)(王新宇等, 2013),燕山期花岗岩(140~142 Ma)出露在区域内西南方

向的北大山地区(LIU et al., 2016; 管育春等, 2017);而矿区内岩浆岩则以华力西期石英闪长岩为主,局部出露花岗岩脉和闪长岩脉,与锡钨成矿密切相关的燕山期石英斑岩(135~140 Ma)隐伏在距地表400 m以下,呈岩钟状产出(祝新友等, 2016)。此外,该区域内围绕维拉斯托锡多金属矿还发育着一系列铅锌多金属矿床(图1a)。

维拉斯托矿区南北长1.8 km,东西宽2.5 km,矿化面积约4.5 km²。石英脉型矿体主要赋存在片麻岩和石英闪长岩内,隐伏于地下,偶在地表上见到石英细脉,其脉厚(或称脉幅)集中在0.1~1 cm。石英大脉是脉型锡钨资源/储量最重要的贡献者,属于缓倾脉状矿体(图2),受控于北北东向逆断层(付旭等, 2015)。如Sn0号石英脉体是矿区内最大的矿体,未出露地表,构成本次研究的断层脉带的主体,总体走向为13°~45°,倾向为103°~135°,倾角为20°~40°左右,呈缓波状产出,具有分支复合和膨大缩小现象。此外,还有大量在节理内充填的石英薄脉体呈更缓产状,甚至近水平产出,倾角多在10°~15°左右。石英脉型矿体的矿石矿物主要有锡石、黑钨矿、黝锡矿、闪锌矿、铁锂云母等,脉石矿物则为石英、绢云母、黄玉、萤石、方解石等。根据矿物共生组合、围岩蚀变及穿插关系,矿床成矿期次可以分为:岩浆-热液期、热液期和表生期;成矿阶段可划分为:斑岩型锡矿化阶段、云英岩型锂矿化阶段、石英脉型锡钨矿化阶段、石英脉型硫化物矿化阶段、萤石-碳酸盐阶段和表生风化阶段(郭桂娟, 2016)。

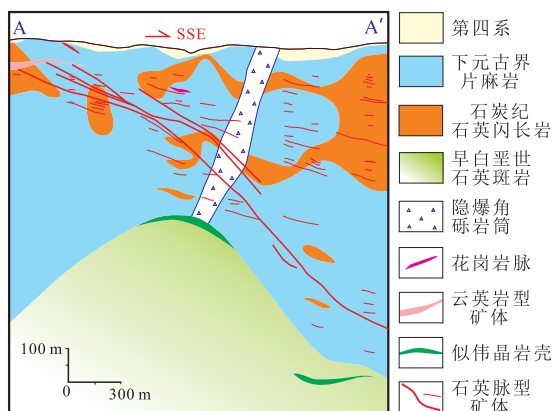


图2 维拉斯托锡多金属矿地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of the Weilasituo

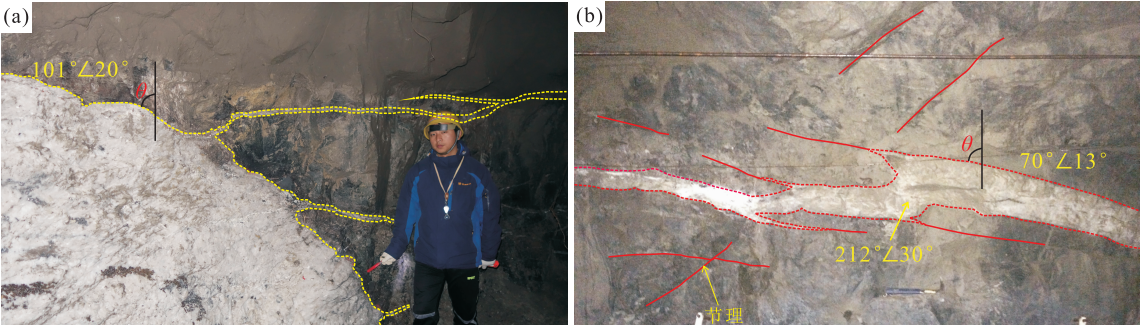
Sn-polymetallic ore deposit

2 石英脉形态分带

尽管矿床范围内的石英脉在地表出露有限,但随着井下巷道的开拓,石英脉的产状和形态也逐渐被揭露(图2)。观察发现石英脉具有以下3个主要特征:①充填结构特征。②脉体缓倾斜产出。③受不同构造控制的脉厚/厚差异较大。在含矿石英脉中可以观察到铁锂云母沿着两侧脉壁垂直生长,脉体中心有锡石、黑钨矿及硫化物发育,局部发育石英晶簇,具有充填结构特征(FOXFORD et al., 2000)。脉体的倾角集中在10°~30°,不同于南岭地区“五层楼”陡倾石英脉(LIU et al., 2014; 刘向冲等, 2017),也与葡萄岩潘纳斯卡拉钨锡矿床中基本近水平石英脉不完全相同(FOXFORD et al., 2000),可能属于上述两者之间的过渡类型。含矿石英脉的脉厚在剖面上变化大,主要表现为:剖面中部是受走向北北东的缓倾逆断层构造控制的石英大脉,脉厚度较大,集中在0.40~3.00 m(图3a);而大脉的上侧或下侧脉体以薄脉体为主,脉厚范围集中分布在1~30 cm,其形成可能主要受节理控制(图3b);在剖面累计脉厚统计中(图4),可以发现累计厚度曲线在中部较陡,而在上部和下部则较缓。根据上述特征,笔者将维拉斯托矿床中含矿石英脉在剖面上分为中部的断层脉带、上节理脉带和下节理脉带;断层脉带包括主干和分支断层内发育的石英脉以及之间节理内充填的石英脉体,其断层呈北北东走向,统计的倾角总体上小于45°,剖面呈缓波状,是在晚侏罗—早白垩世北西—南东向区域应力挤压的环境下形成的逆断层(付旭等, 2015);上、下节理脉带分别指在断层脉带上侧和下侧范围内发育的石英脉体,这些脉体的形成可能主要受节理构造控制。

3 数据与方法

目前,维拉斯托矿床中脉厚大于20 cm的含矿石英脉有100条以上,分布在不同开采水平段内。对于缓倾和近水平的脉体来说,利用钻孔能够有效揭露比较完整的脉体厚度和数量数据。为了探讨不同脉带中脉体的生长机制和在成矿过程中的定量关系,笔者对矿区内17条勘探线上的124个钻孔(直



a. 南斜井 2 中 3 线处发育在断层内的厚大石英脉;b. 南斜井 2 中与主运交汇处充填在节理内的石英脉

图 3 维拉斯托矿床巷道中脉体形态及产状

Fig. 3 Morphology and occurrence of quartz veins in the underworkings of the Weilasituo ore deposit

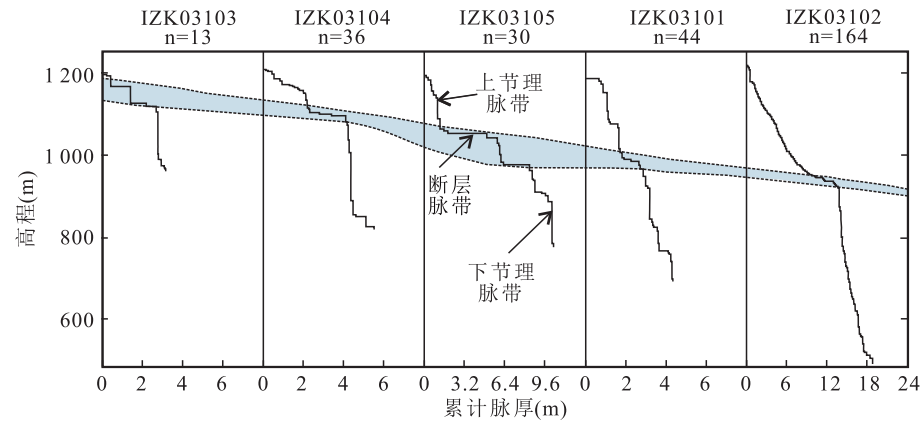


图 4 维拉斯托矿床 31 勘探线钻孔内石英脉累计厚度剖面

Fig. 4 Cumulative thickness profile of quartz veins in boreholes of No. 31 line of the Weilasituo ore deposit

孔)中的脉体数据进行统计分析,统计内容包括: T -脉伪厚, Sn 品位(%), WO_3 品位(%).其中,脉厚 t 需要利用轴夹角和脉伪厚进行计算求得,脉厚 t 计算公式如下(GILLESPIE et al.,1999)。

$t = T \times \sin \theta$;其中 θ 为轴夹角。

脉厚是脉体系统中的重要参数,而脉厚分形可作了解释脉体生长机制的重要工具,能够揭示脉体的连通性和生长规律(GILLESPIE et al.,1999;ROBERTS et al.,1998;ROBERTS et al.,1999),目前已被应用于各类脉型矿床的分析(ROBERTS et al.,1998;FOX-FORD et al.,2000;MONECKE et al.,2001;LIU et al.,2014;刘向冲等,2017)。脉厚分形原理是基于脉厚不小于 t 的脉体数量 $N(t)$ 与脉厚 t 之间通常服从幂律分或负指数分布的关系,幂律分布公式如下(Liu et al.,2014;GILLESPIE et al.,1999)。

$N(t) \propto t^{-D_i}$;上式中 D_i 是脉厚的分形维数。

负指数分布公式如下(GILLESPIE et al.,

1999;SANDERSON et al.,2008)。

$N(t) \propto e^{-D_i t}$

概率统计是地球化学研究经典和重要的课题,在追踪深部地质过程和分离背景与异常方面有着重要作用(CHENG et al.,1994)。在对地球化学元素进行分析过程中,常利用分形分布工具主要有以下 4 种:分形、多重分形、正态分布和多模式分布(AL-LEGRE et al.,1995)。在成矿过程中,成矿元素品位也常服从幂律分布(申维,2002;刘向冲等,2017)。在分组适当和样品数量足够的情况下,多模式分布中的双峰或多峰曲线常代表多成因的总体混合分布(赵鹏大等,1994;LIU et al.,2020)。维拉斯托锡多金属矿床经历了多期、多阶段的成矿作用(OUY-ANG et al.,2014;LIU et al.,2016;WANG et al.,2017),锡钨成矿元素品位可能服从多模式(混合)分布。因此,笔者综合利用分形和多模式分布手段对维拉斯托锡多金属矿床 3 个脉带的石英脉型 WO_3

和 Sn 品位进行统计分析工作,其中多模式分布是利用 MML – EM 算法对锡钨品位分别进行混合分布筛分分析(算法见 FIGUEIREDO et al. ,2002;刘向冲等,2011,2017;LIU et al. ,2020)。

4 分析结果

4.1 脉厚分形特征

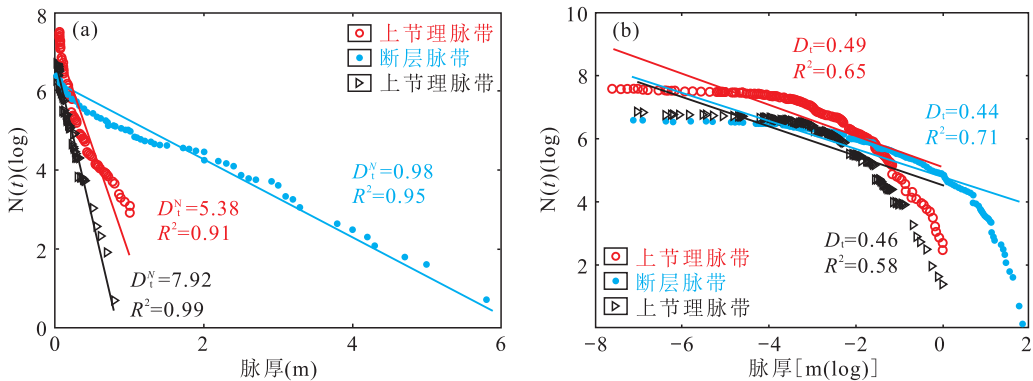
维拉斯托含矿石英英脉脉厚整体上呈现:上、下节理脉带平均脉厚相似,值均较小,而中部的断层脉带的较大(表 1)。3 个脉带的脉厚数据的负指数分布和幂律分布的分形分布拟合结果如图 5 和表 1 所示。从负指数分形分布结果(图 5a)中可以看出 3 个脉带拟合优度均较高,接近 1;而幂律分形分布拟合结果(图 5b)中 3 个脉带的拟合优度均较低,仅在 0.6~0.7 左右,双对数曲线呈开口向下的弧形,曲线斜率变化较大。因此判断维拉斯托含矿石英英脉脉厚分形服从负指数分布,断层脉带分形维数小于 1,

上、下节理脉带分形维数均大于 1,上节理脉带分形维数略小于下节理脉带。

4.2 钨锡品位统计分布特征

4.2.1 钨锡品位分形特征

本次对 3 个脉带中统计的原始钨锡品位数据和截断数据分别进行了分形分布拟合,其中 2 个元素的截断数据的阈值均设为 0.03%。整体上钨锡截断数据分形拟合优度略高于高于原始数据的,而钨品位分形拟合优度高于锡品位。不论钨品位还是锡品位,上、下脉带的拟合优度都要大于断层脉带的。原始数据和截断数据分形结果(表 1,图 6a、图 6b)中 3 个脉带的锡分形维数均小于 1,并且断层脉带分形维数均小于上、下节理脉带,上、下节理脉带的分形维数接近;钨品位的分形结果(表 1,图 6c、图 6d)也显示 3 个脉带分形维数都小于 1,断层脉带的钨品位分形维数也小于上、下节理脉带,上节理脉带钨品位分形维数略大于下节理脉带。



a. 负指数分布拟合;b. 幂律分布拟合

图 5 脉厚数据分形分布拟合图

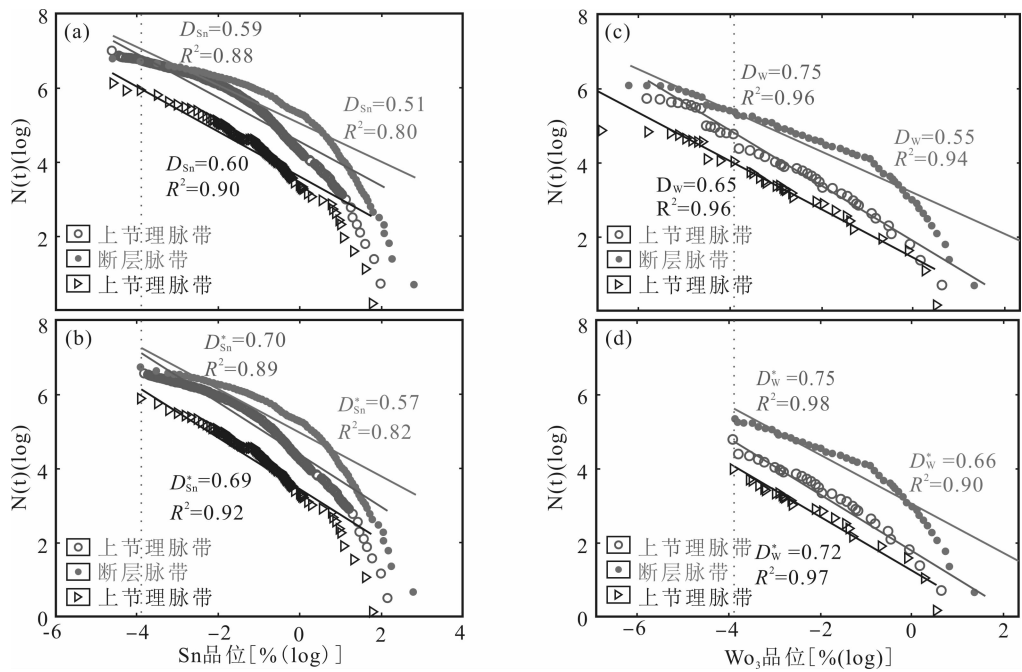
Fig. 5 The fitting diagrams of fractal distribution of vein thickness data

表 1 不同脉带脉厚和钨锡品位的分形分布统计结果表

Tab. 1 The fitting results of fractal distribution of vein thickness, Sn and WO₃ grades in different zonations

分带	平均脉厚 (m)	D_i	R^2	D_i^N	R^2	WO ₃ 平均 品位(%)	D_w	D_w^*	Sn 平均 品位(%)	D_{Sn}	D_{Sn}^*
上节理脉带	0.12	0.49	0.67	5.38	0.91	0.12	0.75	0.75	0.33	0.59	0.70
断层脉带	0.55	0.44	0.70	0.98	0.95	0.21	0.55	0.66	0.83	0.51	0.57
下节理脉带	0.11	0.46	0.56	7.92	0.99	0.11	0.65	0.72	0.31	0.60	0.69

注: D_i 和 D_i^N 分别是脉厚数据幂律分布和负指数分布的分形维数; R^2 是拟合优度; D_w 和 D_w^* 分别是原始钨品位数据和截断分形数据的分形维数; D_{Sn} 和 D_{Sn}^* 分别是原始锡品位数据和截断分形数据的分形维数。



a、b. 原始 Sn 品位和截断数据拟合;c、d. 原始 WO₃品位和截断数据拟合

图 6 钨锡品位数据的分形拟合图

Fig. 6 The fitting diagrams of fractal distribution of Sn and WO₃ grades data

4.2.2 钨锡品位混合筛分特征

本次的钨锡品位混合筛分结果显示 3 个脉带的钨锡品位数据都服从混合对数数据分布,筛分结果如表 2 和图 7 所示。3 个脉带的锡和钨品位都由 2 个对数正态分布组成。断层脉带锡品位和钨品位 2 个子分部的均值分别都高于上、下节理脉带的,而上、下节理脉带子分部均值都相同或相近。

表 2 锡和钨品位混合分布筛分结果

Tab. 2 Separation results of mixed distribution of Sn and WO₃ grades data

分带	参数	锡品位		钨品位	
		子分部		子分部	
		1	2	1	2
上节理脉带	权重	0.35	0.65	0.68	0.32
	均值(%)	0.02	0.21	0.01	0.06
	方差	1.8×10 ⁻⁴	0.26	5.3×10 ⁻⁵	0.06
断层脉带	权重	0.53	0.47	0.54	0.46
	均值(%)	0.07	0.93	0.01	0.13
	方差	0.02	2.74	4.0×10 ⁻⁵	0.19
下节理脉带	权重	0.46	0.54	0.59	0.41
	均值(%)	0.02	0.23	0.01	0.06
	方差	4.3×10 ⁻⁴	0.31	4.1×10 ⁻⁵	0.06

5 讨论

5.1 脉厚分形分布意义

脉体通常是在围岩变形和流体因素共同耦合作用下生长的,目前用来解释其动力学过程的物理模型主要有渗流模型和随机生长模型(MONECKE et al., 2002; SANDERSON et al., 2008; 刘向冲等, 2017)。在渗流模型中,脉体的生长受渗透阈值的控制,在高于渗透阈值的骨干裂隙内会形成聚焦化流动,可以提供阻止早期水岩反应的必要流体渠道,同时伴随脉厚分形维数会减小(SANDERSON et al., 2008)。随机生长模型则强调脉体的生长受脉体成核率 r_n (单位时间单位体积内新生脉体数量)和脉体生长率 r_g (单位时间脉厚生在量)约束,脉厚分形维数 D_t 满足以下公式(MONECKE et al., 2002; 刘向冲等, 2017)。

$$D_t \propto \frac{r_n}{r_g}$$

通常脉厚分形维数值越小意味着整个脉体系统中的厚/大脉所占比例越大,脉体的连通性则越高(GILLESPIE et al., 1999)。Foxford 等(2000)认

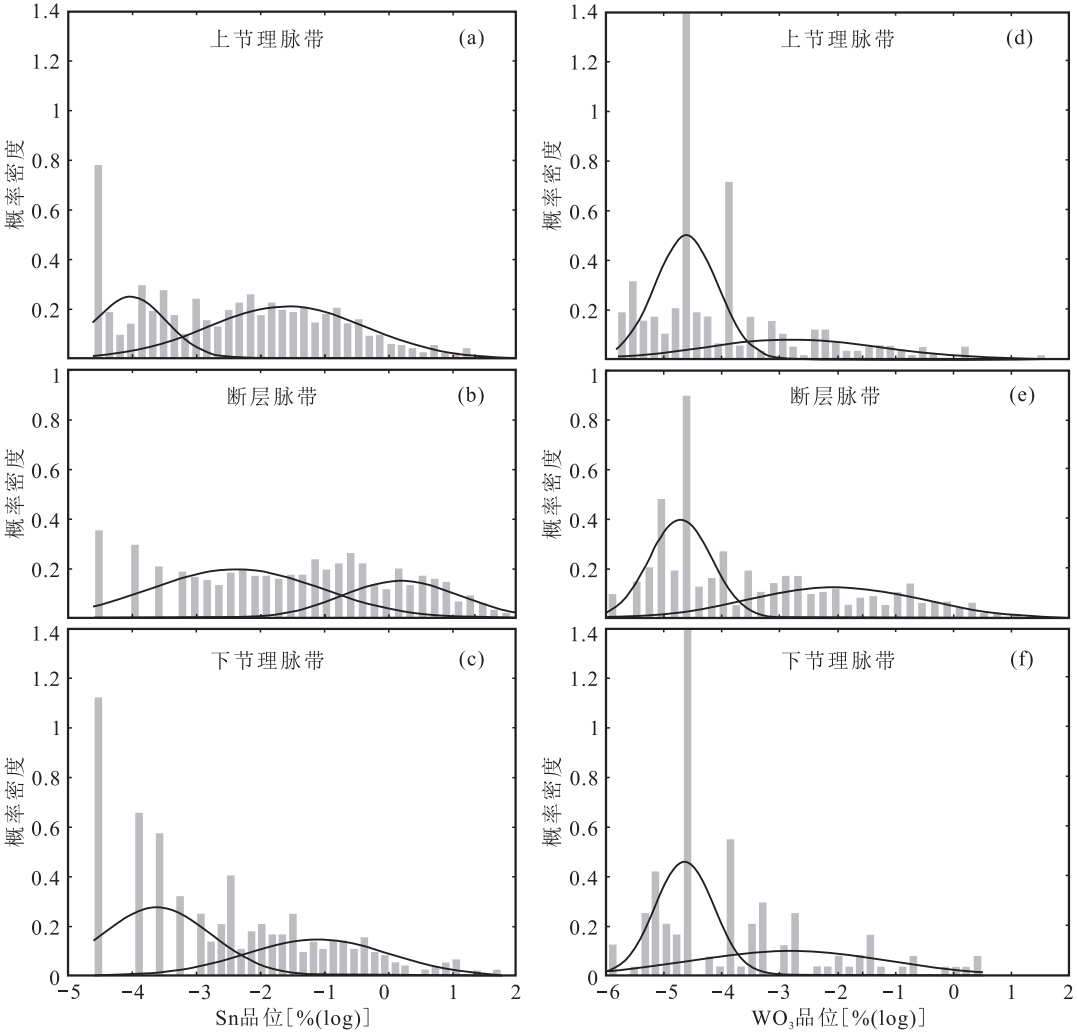


图 7 钨锡品位混合筛分分布拟合图

Fig. 7 The fitting diagrams of mixed distributions of WO_3 and Sn grades data

为成矿流体从骨干脉体向其他部位供给,脉厚从矿体中心向外逐渐变小,脉厚分形维数会变大;反之,脉厚分形维数减小的方向通常指向成矿流体来源方向。本矿床中石英脉的脉厚分形维数中断层脉带的脉厚分形维数值 $D_f^N (<1)$ 均小于上、下节理脉带值 (>1) 的,这表明中部断层脉带的厚脉比例要高于上、下节理脉带。断层脉带的脉厚分形维数小于 1,说明其渗透能力已超过临界值 (ROBERTS et al., 1998),该脉带的断层内成矿流体形成了聚焦化流动,其连通性显著高于上、下节理脉带的,构成了连通深部成矿流体来源的渠道 (ROBERTS et al., 1999)。此外该脉带内的流体对流作用阻止了早期流体与围岩的反应,为成矿元素富集提供了必要条件。与上、下节理脉带相比,断层脉带内具有较大的

平均脉厚和较小的脉密度,反映了该带脉体具有较高的生长率和较低的成核率,使得其分形维数较小。上、下节理脉带的脉厚分形维数值均大于 1,且数值相近,可能反映 2 个节理脉带的具有相似的脉体生长特征,这也与地质上观察的实事是吻合的 (图 4)。

在地质特征方面,维拉斯托锡多金属矿与具有“五层楼”分带的南岭大吉山钨矿和葡萄牙 Panasqueira 钨矿床的含石英脉均发育在隐伏花岗岩的顶上带内,围岩蚀变都比较弱;大吉山钨矿石英脉是陡倾脉,Panasqueira 钨矿近水平产出的,维拉斯托矿床石英脉则是在北西—南东向挤压应力作用下形成的缓波状逆断层控制下呈缓倾状,其倾角介于上述两者之间;这种脉体产状的差异可能是由于应力条件的不同 (刘向冲, 2014; Foxford et al.,

2000)。在脉厚(幅)方面,大吉山钨矿具有“五层楼”模式垂直形态分带,Panasqueira 钨矿的脉厚(幅)则从矿体中心向外减小,维拉斯托矿床的石英脉脉厚也是从中间的断层脉带向上下节理脉带变小;三者脉厚的变化规律相近,具有共同的特征即脉厚增大的方向指向成矿热液的来源(ROBERTS et al., 1999)。

5.2 钨锡品位统计分布意义

在钨锡品位分形方面,3 个脉带的分形维数均小于 1,表明钨锡元素均发生了富集(刘向冲等, 2017)。断层脉带的钨、锡品位分形维数值均高于上、下节理脉带,反映断层脉带内的钨锡元素富集程度或者富矿石比例要高于上、下节理脉带;而上、下节理脉带钨、锡品位均具有相似的分形维数则可以暗示两者富集程度相当。钨锡品位混合筛分结果反映出锡和钨元素在 3 个脉带脉体可能均经历了至少 2 次以上成矿作用,而不是一次充填或矿化作用下形成的,并且不同脉带可能具有相似的脉体充填次数。锡和钨品位的统计特征明显不同:总体上锡的平均品位高于钨平均品位(表 1);3 个脉带的锡的分形维数均小于钨分形维数(图 6);与钨品位相比,锡品位子分部均值整体上比较大(表 2),如断层脉带锡品位子分布 2 均值(0.93%)是该脉带钨品位的子分布 2 均值(0.13%)的 7 倍;这些都表明该矿床锡的成矿强度要高于钨。这与南岭地区钨矿中钨锡元素统计特征区别很大(刘向冲等, 2017)。

笔者所述成矿元素品位的分形结果并不是完美地服从分形分布,尤其是断层脉带,这些对数曲线都是不同程度呈现左侧平缓和右侧陡倾。这种现象在地学数据中普遍存在(CHENG et al., 1994; XIE et al., 2009),其背后更深层次成因机制仍需进一步研究。

5.3 成矿动力学意义

笔者认为造成断层脉带和上、下节理脉带脉体形态分带的形成机制可能包括以下两类模式:第一,断层脉带的脉体生长次数多于上、下节理脉带;第二,在相近的脉体充填次数的情况下,断层脉带脉体具有较低成核率,多次叠加生长和矿化,而上、下节理脉带则是在高成核率和低脉体生长率的条件下生长。对于第一种假设,混合筛分给出的结果显示断层脉带和上、下节理脉带的钨和锡品位子分布数均相同,暗示它们可能具有相似的脉体生长次数,似乎

并不支持该假设,不过要验证该假设仍需要对矿物学、矿床学和同位素地球化学等方面系统研究。笔者的定量分析支持第二种假设,断层脉带具有较低的成核率,在重复的破裂-充填-愈合-破裂-扩展的过程中,脉体不断生长和矿化叠加富集,使得脉厚分形维数 $D_f^N < 1$ 和钨锡品位较高;而上、下节理具有相似的生长机制,在高成核率的背景下,在成矿流体充填过程中大部分脉体生长并不是在原有脉体基础上继续发育,而是选择新的节理内重新开始成核生长,造成了脉厚分形维数 $D_f^N > 1$ 和钨锡品位较低。根据脉厚分形维数定量分析,推测在成矿过程中断层脉带内骨干裂隙中的成矿流体可能会形成聚焦化流动,而流体发生对流作用可以阻止早期成矿元素与围岩发生反应而沉淀,这种作用也为维拉斯托断层脉带的钨锡矿元素富集提供了保障(ROBERTS et al., 1999; LIU et al., 2014)。因此,推测断层脉带的高连通性的骨干裂隙在成矿时,可以为上、下节理脉带提供了成矿流体的运输渠道。

6 结论

(1)断层脉带的厚脉和富矿比例均高于上、下节理脉带,并且其脉体系统连通性也显著高于后两者。

(2)3 个脉带的钨锡品位都服从混合正态分布,都由 2 个子分部组成,暗示 3 个脉带脉体的形成均存在至少 2 次以上的充填成矿作用。

(3)上、下节理脉带在脉厚、钨锡品位分形维数和混合筛分特征方面均具有相似性,反映两者具有相似的成矿机制。

(4)与上、下节理脉带相比,断层脉带内的聚焦化流动、较低的脉体成核率、脉体叠加生长和矿化叠加富集可能造成其厚脉和富矿比例均高于上、下节理脉带的重要原因。

致谢:在野外踏勘、岩心编录和资料收集过程中得到内蒙古维拉斯托矿业公司的王可详总经理的大力支持,论文得到审查稿专家的有益建议,在此一并感谢。

参考文献(References):

付旭,胡格吉乐吐,罗少飞,等. 内蒙古自治区克什克腾旗维拉斯托矿区锡多金属矿勘探报告[R]. 呼和浩特:内蒙

- 古地质勘查有限责任公司,2015.
- 管育春,杨宗锋,祝新友,等. 内蒙古北大山杂岩体成因及其地质意义[J]. 矿产勘查,2017,8(6):1054-1068.
- GUAN Yuchun, YANG Zongfeng, ZHU Xinyou, et al. Petrogenesis and geological significance of the Beidashan complex rockmass, Inner Mongolia[J]. Mineral Exploration, 2017, 8(6):1054-1068.
- 郭秉程,苏美霞,杜映东,等. 大兴安岭构造层与赋矿地层的多元化特征探讨[J]. 西北地质,2017,50(1):78-89.
- GUO Bingcheng, SU Meixia, DU Yingdong, et al. Discussion of the diversified characteristics of structural layer and ore-bearing strata in Great Xing'an Ranges[J]. Northwestern Geology, 2017,50(1):78-89.
- 郭贵娟. 内蒙古维拉斯托锡多金属矿床地质特征及成因探讨[D]. 北京:中国地质大学(北京),2016.
- GUO Guijuan. Discussion on geological characteristics and metallogenic origin of Weilasituo Sn polymetal deposit in Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- 江思宏,聂凤军,刘翼飞,等. 内蒙古拜仁达坝及维拉斯托银多金属矿床的硫和铅同位素研究[J]. 矿床地质,2010,29(1):101-112.
- JIANG Sihong, NIE Fengjun, LIU Yifei, et al. Sulfur and lead isotopic compositions of Bairendaba and Weilasituo silver-polymetallic deposits, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(1):101-112.
- 刘瑞麟,武广,李铁刚,等. 大兴安岭南段维拉斯托锡多金属矿床 LA-ICP-MS 锡石和锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地学前缘,2018a,25(5):189-207.
- LIU Ruilin, WU Guang, LI Tiegang, et al. LA-ICP-MS cassiterite and zircon U-Pb ages of the Weilasituo tin-polymetallic deposit in the southern Great Xing'an Range and their geological significance[J]. Earth Science Frontiers, 2018a, 25(5):183-201.
- 刘瑞麟,武广,陈公正,等. 大兴安岭南段维拉斯托锡多金属矿床流体包裹体和同位素特征[J]. 矿床地质,2018b,37(2):199-224.
- LIU Ruilin, WU Guang, CHEN Gongzheng, et al. Characteristics of fluid inclusions and H-O-C-S-Pb isotopes of Weilasituo Sn-polymetallic deposit in southern Da Hinggan Mountains[J]. Mineral Deposits, 2018b, 37(2):199-224.
- 刘向冲,侯翠霞,申维,等. MML-EM 方法及其在化探数据混合分布中的应用[J]. 地球科学(中国地质大学学报),2011,36(02):180-184.
- LIU Xiangchong, HOU Cui xia, SHEN Wei, et al. MML-EM algorithm and its application on mixed distributions of geochemical data[J]. Earth Science-Journal of China University of Geoscience, 2011, 36(02):180-184.
- 刘向冲,张德会,赵波,等. 漂塘钨矿床“五层楼”垂直形态分带定量分析[J]. 高校地质学报,2017,23(3):408-416.
- LIU Xiangchong, ZHANG Dehui, ZHAO Bo, et al. Quantitative analysis of the “Five-floor” vertical morphological zonation in the Piaotang tungsten deposits, South China [J]. Geological Journal of China Universities, 2017, 23(3):408-416.
- 申维. 分形混沌与矿产预测[M]. 北京:地质出版社,2002.
- SHEN Wei. Fractal chaos and mineral prediction[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- 王新宇,侯青叶,王瑾,等. 内蒙古维拉斯托矿床花岗岩类 SHRIMP 年代学及 Hf 同位素研究[J]. 现代地质,2013,27(1):67-78.
- WANG Xinyu, HOU Qingye, WANG Jin, et al. SHRIMP geochronology and Hf isotope of zircons from granitoids of the Weilasituo deposit in Inner Mongolia[J]. Geoscience, 2013, 27(1):67-78.
- 翟德高,刘家军,李俊明,等. 内蒙古维拉斯托斑岩型锡矿床成岩、成矿时代及其地质意义[J]. 矿床地质,2016,35(5):1011-1022.
- ZHAI Degao, LIU Jiajun, LI Junming, et al. Geochronological study of Weilasituo porphyry type Sn deposit in Inner Mongolia and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2016, 35(5):1011-1022.
- 赵鹏大,胡旺亮,李紫金,等. 矿床统计预测[M]. 北京:地质出版社,1994.
- ZHAO Pengda, HU Wangliang, LI Zijin, et al. Statistical prediction of ore deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- 周振华,高旭,欧阳荷根,等. 锡钨锂矿化与外围脉状铅锌银铜矿化的内在成因关系和形成机制—以内蒙古维拉斯托锡钨锂多金属矿床为例[J]. 矿床地质,2019,38(5):1004-1022.
- ZHOU Zhenhua, GAO Xu, OUYANG Hegen, et al. Formation mechanism intrinsic genetic relationship between tin-tungsten-lithium mineralization and peripheral lead-zinc-silver-copper mineralization: Exemplified by Weilasituo tin-tungsten-lithium polymetallic deposit, Inner Mongolia [J]. Mineral Deposits, 2019, 38(5):1004-1022.
- 祝新友,张志辉,付旭,等. 内蒙古赤峰维拉斯托大型锡多金属矿的地质地球化学特征[J]. 中国地质,2016,43(1):188-208.

- ZHU Xinyou, ZHANG Zhihui, FU Xu, et al. Geological and geochemical characteristics of the Weilasituo Sn-Zn deposit, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 2016, 43(1):188-208.
- Allegre C J, Lewin E. Scaling laws and geochemical distributions [J]. *Earth Planet Science Letters*, 1995, 132 (1-4): 1-13.
- Cheng Qiuming, Agterberg F, Ballantyne S. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1994, 51(2): 109 -130.
- Figueiredo M A T, Jain A K. Unsupervised learning of finite mixture models. *Pattern Analysis and Machine Intelligence* [J]. *IEEE Transactions on*, 2002, 24(3): 381 -396.
- Foxford K A, Nicholson R A, Polya D A, et al. Extensional failure and hydraulic valving at Minas da Panasqueira, Portugal [J]. *Journal of Structural Geology*, 2000, 22: 1065-1086.
- Gillespie P A, Johnston J D, Loriga M A, et al. Influence of layering on vein systematics in line samples [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1999, 155 (1): 35 -56.
- Liu Yifei, Jiang Sihong, Bagas L. The genesis of metal zonation in the Weilasituo and Bairendaba Ag-Zn-Pb-Cu-(Sn-W) deposits in the shallow part of a porphyry Sn-W-Rb system, Inner Mongolia, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 75:153-73.
- Liu Xiangchong, Xing Huilin, Zhang Dehui. Fluid focusing and its link to vertical morphological zonation at the Dajishan vein-type tungsten deposit, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 62:245-258.
- Liu Xiangchong, Wang Wenlei, Pei Yingru, et al. A knowledge-driven way to interpret the isometric log-ratio transformation and mixture distributions of geochemical data [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, 210:1-9.
- Monecke T, Gemmell J B, Monecke J. Fractal distributions of veins in drill core from the Hellyer VHMS deposit, Australia: constraints on the origin and evolution of the mineralising system[J]. *Mineralium Deposita*, 2001, 36 (5): 406-415.
- Ouyang Hegen, Mao Jingwen, Santosh M, et al. The Early Cretaceous Weilasituo Zn-Cu-Ag vein deposit in the southern Great Xing'an Range, northeast China: Fluid inclusions, H, O, S, Pb isotope geochemistry and genetic implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 56: 503-515.
- Roberts S, Sanderson D J, Gumiel P. Analysis of Sn-W mineralization from Central Iberia: Insight into of fracture connectivity in the formation of an ore deposit [J]. *Economic Geology*, 1998, 93: 360-365.
- Roberts S, Sanderson D J, Gumiel P. Fractal analysis and percolation properties of veins [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1999, 155(1):7-16.
- Sanderson D J, Roerberts S, Gumiel P, et al. Quantitative analysis of tin-and tungsten-bearing sheeted vein Systems [J]. *Economic Geology*, 2008, 103: 1043 -1056.
- Wang Fengxiang, Jiang Sihong, Liu Yifei. Geological, geochemical, and geochronological characteristics of Weilasituo Sn-polymetal deposit, Inner Mongolia, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 80:1206-1229.
- Xie Shuyun, Yang Yongguo, Bao Zhengyu, et al. Mineral resource analysis by parabolic fractals [J]. *Mining Science and Technology*, 2009, 19(1): 91-96.