湘东北官庄金矿田韧性剪切带运动学涡度与矿体空间分布的关系

刘守林[1,2],张雄[1,2,3*],文亭[1,2],严长华[1,2*],吕星球[1,2],魏金驹[1,2]

1.湖南省地质院,湖南 长沙 410100;
2.湖南省水文地质环境地质调查监测所,湖南 长沙 410100;
3.中南大学地球科学与信息物理学院,有色金属成矿预测教育部重点实验室,湖南 长沙 410083

摘 要:湘东北官庄金矿田韧性剪切带构造发育,为了进一步深化对该区构造发育机制的认识,探讨该区地质构造机理与矿脉发育之间的关系,开展了研究工作。通过野外调查洪源矿区韧性剪切带构造特征,分析岩石学显微结构构造;运用极摩尔圆法计算含矿构造运动学涡度参数,其运动学涡度值W_k分别为0.707和0.758,同时,计算官庄金矿田纯剪切应变速率和简单剪切应变速率之比ε/γ值为0.842~0.449。结果表明,洪源矿区金宏矿段纯剪切和简单剪切近似相等,且官庄金矿田ε/γ值自西向东逐渐减小,说明简单剪切速率自西向东加快,具有逆冲推覆构造运动特征。建立了运动学涡度参数与矿体变化系数之间的关系,4个矿区(矿段)矿体厚度变化系数V_m与运动学涡度W_k值呈正相关性,拟合函数为W_k=0.3146V_m+0.3978。而剪切应变速率之比ε/γ值与金矿化存在负相关性,拟合函数为ε/γ=−0.5834V_c+1.4107。韧性剪切构造运动使得金矿体在空间分布上呈现出任意方向矿体,但是以NWW和NNE向为主的2组金矿脉,为该区域今后找矿提供了主攻方向。

关键词:矿体空间分布;运动学涡度;韧性剪切带;官庄金矿田;湘东北

中图分类号:P618.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2518(2026)04-0783-14 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.04.114

引用格式:刘守林,张雄,文亭,等.湘东北官庄金矿田韧性剪切带运动学涡度与矿体空间分布的关系[J].黄金科学技术,2026,34(4):783-796.LIU Shoulin,ZHANG Xiong,WEN Ting,et al.Relationship between Kinematic Vorticity of Ductile Shear Zones and Spatial Distribution of Orebodies in the Guanzhuang Gold Field, Northeastern Hunan[J].Gold Science and Technology,2026,34(4):783-796.

作为关键金属,金矿床是全国乃至全球地质学家和地质工作者的重要研究课题。湘东北平江—浏阳—醴陵成矿带是钦杭成矿带的重要组成部分,区域内新宁—灰汤断裂带、长沙—平江断裂带和浏阳—醴陵—衡东断裂带控制着区内金矿床的分布边界。其中,醴陵地区官庄金矿田位于平江—浏阳—醴陵成矿带南段,出露的赋矿地质单元为一套新元古界变质岩系。该区金矿床的成因类型可划分为2种类型,分别是构造变质热液型和岩浆热液型。其中构造变质热液型观点有:该区主成矿期成

收稿日期:2025-03-19;**修订日期:**2026-04-28

基金项目:湖南省自然科学基金项目"黄铁矿和毒砂对金矿床成因及找矿勘探的指示意义——以湘东北洪源矿区为例"(编号:2024JJ8356)、湖南省地质院青年项目"湘东北洪源矿区金矿床成矿流体的来源及演化过程"(编号:HNGSTP202327)、湖南省地质勘查基金项目"湖南省醴陵市洪源矿区金宏金矿边深部详查"(编号:20180308)和湖南省地质院科研基金项目"江南造山带湖南中东段金成矿时空演化规律与靶区优选"(编号:HNGSTP202625)联合资助

作者简介:刘守林(1989—),男,湖南长沙人,高级工程师,从事矿产调查、矿产预测和矿床地球化学等工作。E-mail:850076291@qq.com

***通信作者:**张雄(1986—),男,湖北荆州人,博士,正高级工程师,从事矿产调查、矿产预测和地质学研究等工作。E-mail:275201655@qq.com
严长华(1985—),男,安徽马鞍山人,高级工程师,从事构造地质和矿产资源勘查工作。E-mail:307970029@qq.com

© Editorial Department of *Gold Science and Technology* (CC BY-NC-ND)

矿流体为韧性剪切作用形成的动力变质热液(柳德荣等,1993),区域内3条近EW向韧性剪切带控制着整个金矿田,其成矿构造主要与剪切相关的各级断裂有关(刘亮明等,1997)。此外,研究区内矿床空间分布特征具有分带性,受构造控矿明显(符巩固等,2002)。洪源矿区金明金矿的地质和地球化学证据表明,金矿床归类为造山型矿床,与加里东期大陆内造山运动相关(Zhang et al,2024;Chen et al,2025)。岩浆热液型观点有:燕山期湘东北地区存在陆内碰撞造山运动,且伴随着岩浆热液作用和动力变质作用,对区内金多金属成矿具有重要的影响(贺转利等,2004);该区金矿成矿期主要集中于440~400 Ma、160~110 Ma和~70 Ma这3个时期,且区域金矿床具有与造山作用有关的浅成型金矿特点(董国军等,2008),也有学者认为该区成矿集中于加里东期和印支期(韩凤彬等,2010);对区域发育的岩体(板杉铺岩体和宏夏桥岩体)进行测年研究,证实其与成矿存在一定的时空关系(张菲菲等,2010;李建华等,2015)。通过研究肖家山金成矿物质来源,认为岩浆成分提供了成矿物质(Hou et al,2023)。因此,该区内金矿床的成因类型存在较大争议,其区域构造控矿规律仍不清楚,深边部地质找矿工作面临巨大的挑战。

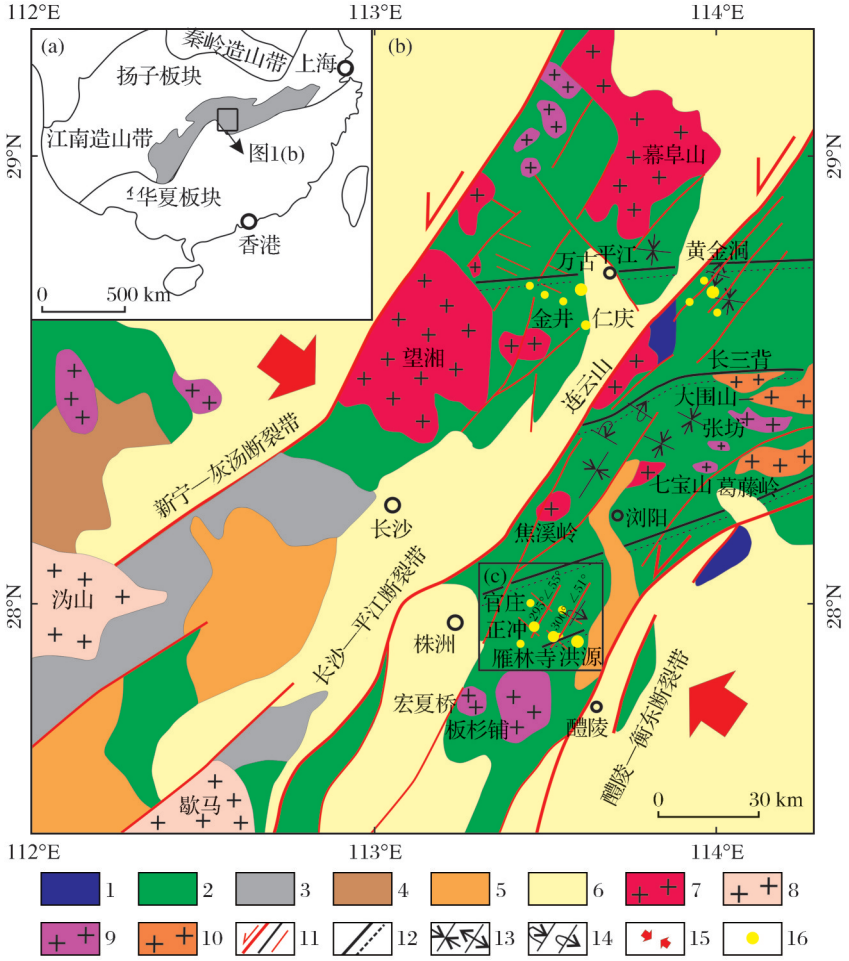
韧性剪切构造由于其特殊的构造运动机理,是金、铀成矿的重要研究对象。剪切运动是Au元素活化迁移的重要过程,能够促使含金变质热液的形成,因此,剪切带型金矿是一种重要的金矿床类型(陈柏林等,1999);区域剪切带的应力应变越强、时间越长且规模越大,则其成矿元素迁移越容易被激活,成矿作用也越强,存在一定的关联性(何绍勋等,1992;刘继顺,1996),遗憾的是,成矿与剪切构造运动关系是如何变化的目前并未解决;湘东—赣西存在NNE向大型区域走滑构造,内部脆—韧性构造发育,变形过程中伴随着显著的流体运动,是铀矿床形成的重要区域(李建威等,1999;李先福等,2001),也未解决变形与铀矿体的关系。近年来,有学者对桂北地区三门韧性剪切带进行了厘定并讨论了其构造意义,认为该构造是华南加里东期华夏陆块由SE向NW逆冲到扬子陆块受阻后反冲作用的产物(秦亚等,2021);对广东河台金矿田剪切带糜棱岩的研究结果表明,脆—韧性变形使得最小主应力轴方向更有利于热液的运移和最终成矿,取得了较好的研究成果(Jiao et al,2017;李康等,2024)。胡瑞忠等(2026)最新研究表明,华南加里东期陆内成矿作用集中在440~395 Ma,与华南地区加里东期花岗岩活动和前泥盆系区域变质作用的时代相吻合,是一整套关系密切的统一成矿系统。因此,针对以往学者对韧性剪切带构造的研究,对本区金矿床成因的重新厘定具有重要的启发意义。同时发现,多数学者从定性的角度研究区内构造,讨论其与金成矿之间的关系,尚未找到有效的研究方法和手段,也未建立构造—成矿之间的任何定量关联性。通过大量野外地质调查发现,湘东北官庄金矿田发育强烈韧性剪切带构造。该区陆内构造运动与金成矿有关的导矿和容矿空间厘定尚不清楚,亟待研究。

因此,本次研究试图精细刻画含金韧性剪切带构造和矿体形态特征,定量分析其运动学涡度参数与矿体变化参数,试图建立二者之间的某种函数关系,具有较强的矿床学成矿理论意义。同时,计算该区韧性剪切带的运动学涡度值,明确构造的性质,建立构造—岩浆—成矿模式,把握该区构造控矿规律和矿脉(体)分布特征,具有指导找矿的现实意义。

1 区域地质背景

湘东北区域处于扬子板块与华夏板块之间的江南古陆内[图1(a)]。区域内出露地层岩性为新元古—古元古界连云山组和苍溪组片岩、千枚岩、片麻岩、角闪岩和混合岩;新元古界冷家溪群板岩;新元古界板溪群砾岩、砂岩、凝灰岩和板岩;志留—震旦系砂页岩、砾岩和板岩;三叠—泥盆系灰岩、白云岩、泥岩和粉砂岩;第四系—白垩系砂岩、泥岩。区内构造发育有新宁—灰汤断裂带、长沙—平江断裂带和醴陵—衡东断裂带,以及七宝山—官庄NE向复式背斜,整个构造形迹以NNE向为主,其次为次级构造[图1(b)、1(c)]。

区域内发育的岩浆岩体主要有新元古代花岗岩,如长三背岩体和大围山岩体;晚志留世花岗岩,如板杉铺岩体和宏夏桥岩体(张菲菲等,2010;李建华等,2015);三叠纪花岗岩,如沩山岩体和歇马岩体。早中生代之后,该区岩浆活跃,发育大量白垩



1.新元古—古元古界连云山组和苍溪组片岩、千枚岩、片麻岩、角山岩和混合岩;2.新元古界冷家溪群板岩、白云岩、砂岩、泥岩和粉砂岩;3.新元古界板溪群砾岩、砂岩、凝灰岩和板岩;4.志留—震旦系砂页岩、砾岩和板岩;5.三叠—泥盆系灰岩、白云岩、砂岩、泥岩和粉砂岩;6.第四系—白垩系砂岩、泥岩;7.白垩纪—晚侏罗世花岗岩;8.三叠纪花岗岩;9.晚志留世花岗岩;10.新元古代花岗岩;11.左行断裂/次级断裂;12.韧性剪切带;13.向斜/背斜;14.倒转向斜/背斜;15.推覆构造方向;16.金矿床(点)

图1　湘东北区域地质及洪源矿区地质图(修改自Xu et al,2017)

Fig. 1　Regional geology of northeast Hunan and geological map of the Hongyuan mining area (modified after Xu et al,2017)

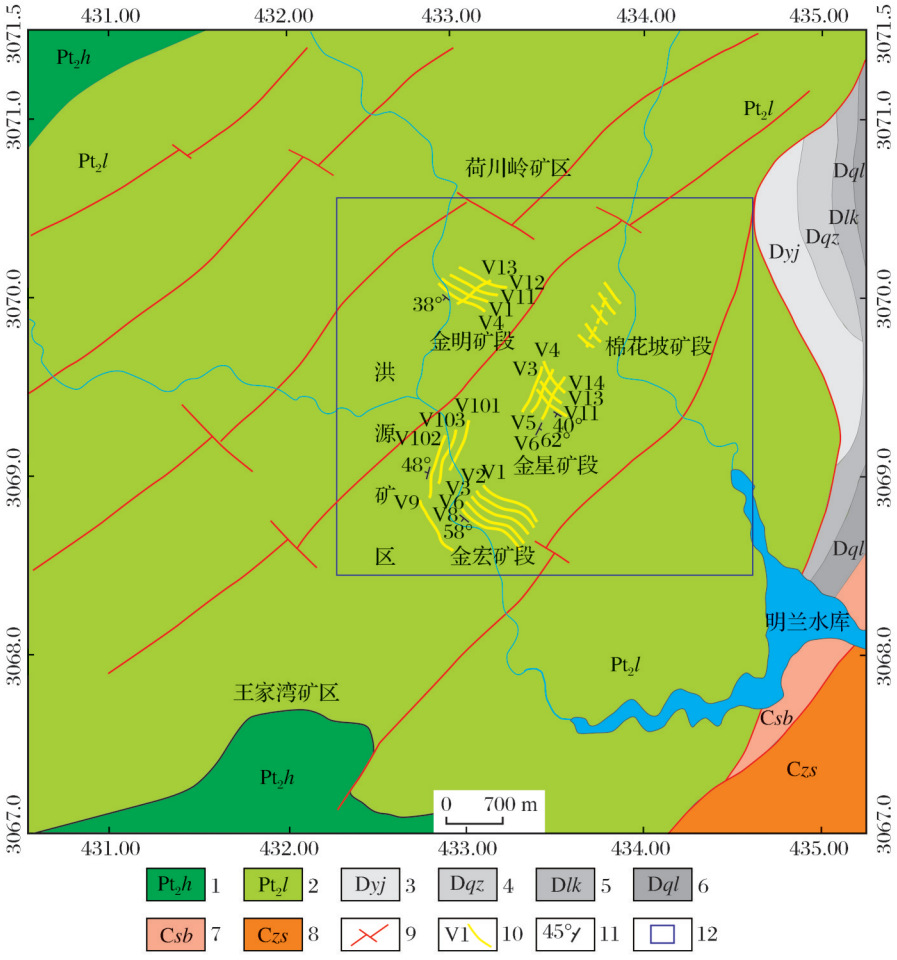
纪—晚侏罗世花岗岩体,如幕阜山岩体、望湘岩体、蕉溪岭岩体、金井岩体和七宝山岩体等(贾大成等,2002;贺转利等,2004)[图1(b)]。

2　矿体和矿石特征

2.1　剪切带中矿体特征

湘东北醴陵地区官庄金矿田内金矿类型为韧性剪切带含金蚀变岩型和含金石英脉型2种(王淑军,2015;刘鹤群,2017)。区内剪切带构造延伸20~30 km,控制着金矿床的分布,自西向东分布着正冲、肖家山和洪源金矿等[图1(c)]。金矿体发育在韧性剪切带的内外接触带中或复式背斜次级构造的结合部位。其中,洪源矿区位于官庄金矿田区域剪切带的东缘。

洪源矿区包括金宏、金明和金星3个矿段。区内发育多条剪切带含金石英脉型矿体,主矿体走向可划分为NNE和NWW向2组(图2)。矿体受NNE向压扭性构造控制。金宏矿段发育有V101、V102和V103等矿体。其中,V101号矿体走向为NNE向,长度为50~500 m,倾角为40°~75°,厚度为0.39~2.90 m,品位为0.70×10^{-6}~23.72×10^{-6}。V2号矿体走



1.中元古界冷家溪群黄浒洞组;2.中元古界冷家溪群雷神庙组;3.泥盆系易家湾组;4.泥盆系棋梓桥组;5.泥盆系龙口组;6.泥盆系七里江组;7.石炭系尚保冲组;8.石炭系樟树湾组;9.断层;10.矿体(脉);11.矿体(脉)产状;12.研究区范围

图2 洪源矿区矿脉分布地质图(据湖南省地质院,2020)

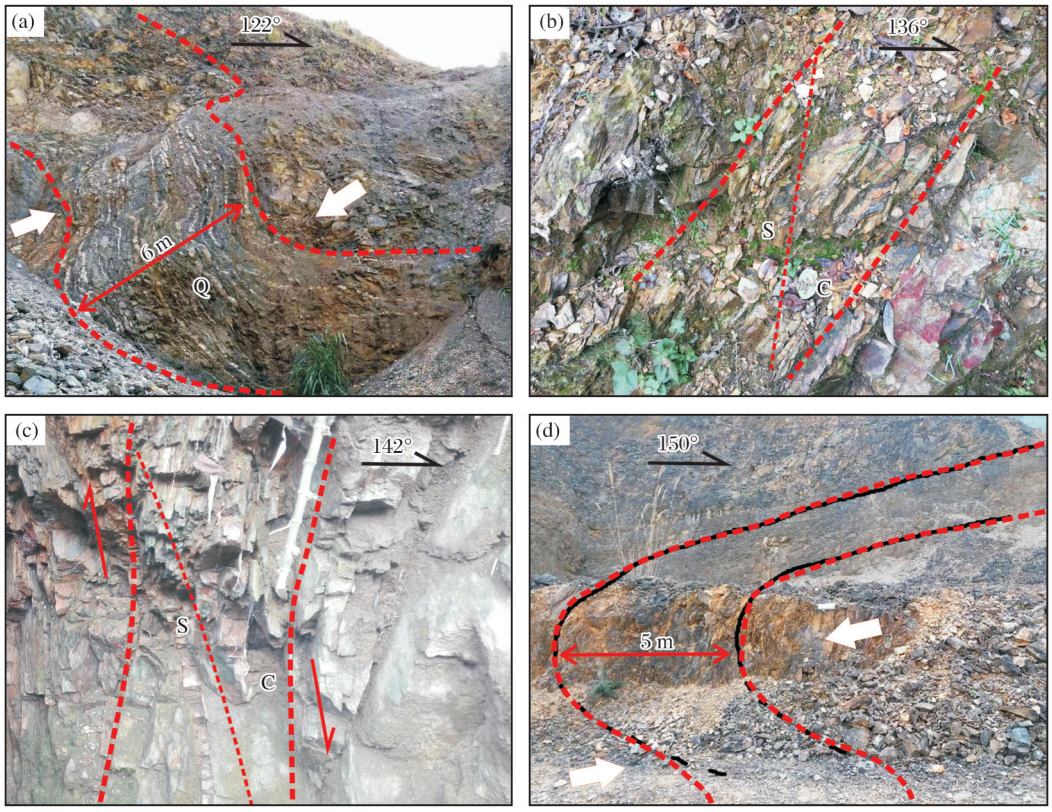
Fig. 2 Geological map of ore vein distribution in the Hongyuan mining area (according to Hunan Provincial Geological Institute, 2020)

向为NNE向,长度为40~600 m,倾角为35°~70°,厚度为0.22~2.88 m,品位为0.53×10^{-6}~48.98×10^{-6}。V3号矿体走向为NNE向,长度为30~300 m,倾角为35°~75°,厚度为0.40~4.19 m,品位为0.76×10^{-6}~25.82×10^{-6}。

2.2 韧性剪切带及S-C组构特征

洪源矿区内发育剪切劈理、褶皱和糜棱岩化等构造。糜棱岩化具有条带状和纹层状,形成条带状的石英细脉与绿泥石化板岩镶嵌[图3(a)]。糜棱岩化中见硅化、黄铁矿化,以及绿泥石、绢云母等矿物[图3(b)、3(c)]。褶皱为次级背斜构造,见平卧褶皱和轴面近水平褶皱[图3(d)],岩性为板岩,挤压破碎明显,见强烈的硅化和黄铁矿化。千枚岩和板岩受构造运动强烈挤压发生劈理化,片麻岩薄层厚度为0.1~5.0 cm,接触面见蚀变矿物发育绿泥石和绢云母,夹石英细脉厚度为0.1~3.0 cm[图3(b)、3(c)]。

矿区内F_1、F_2和F_3断裂为区域上断裂带的一部分,在断裂带内分布着一系列韧性剪切带,延伸数米至数公里,呈狭长条带状,宽度数厘米至数米。糜棱面理发育(图3),走向为10°~70°,倾向295°~330°,倾角为35°~85°。硅质糜棱岩中,硅化石英残斑的长轴方向与糜棱面理呈小角度相交构成S-C组构。S-C组构的运动学指向显示韧性剪切带既



(a)(b)洪源矿区金宏矿段;(c)(d)洪源矿区金星矿段

图3　洪源矿区韧性剪切带构造地质特征

Fig. 3　Tectonic geological characteristics of ductile shear zone in the Hongyuan mining area

有逆冲剪切的性质。糜棱线理产状,走向为10°~70°,倾向25°~65°,倾角为15°~75°。在不同动力作用下,形成大、中、细3种不同类型石英脉。在矿脉中局部可见定向排列的硫化物,如长条状或扁状的黄铁矿,其形成可能与剪切构造运动有关。

2.3　岩石显微构造特征

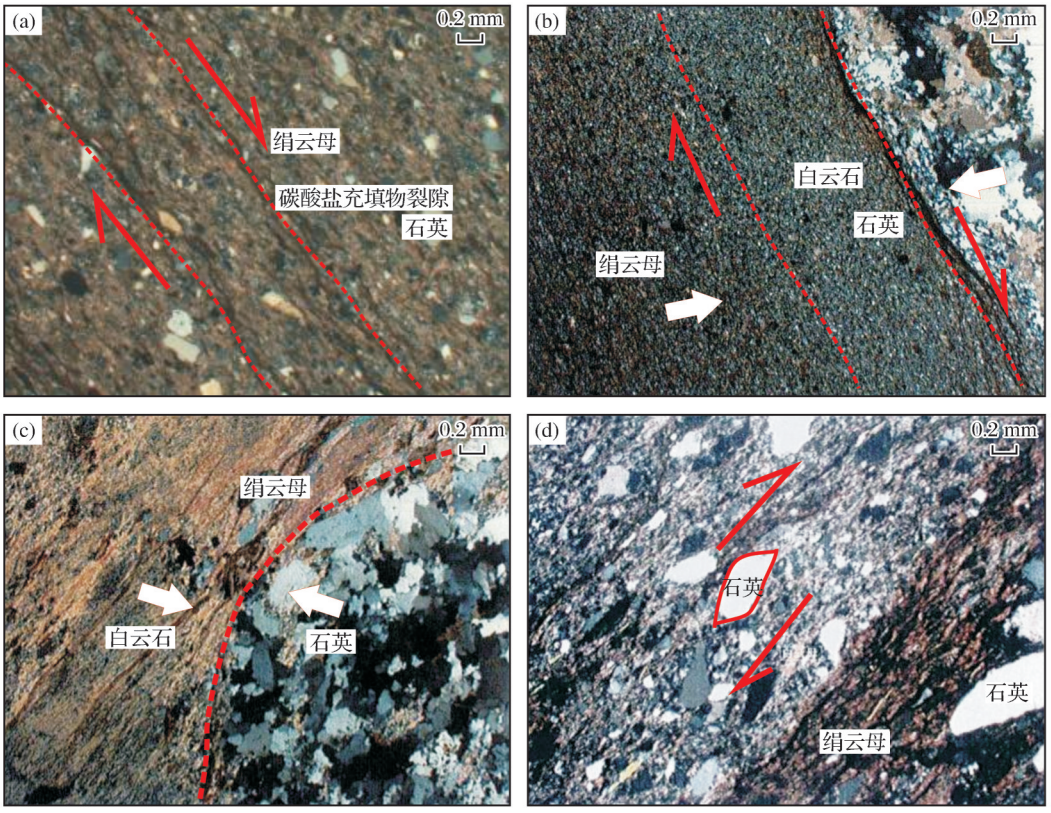
矿区含金石英脉的围岩为板岩或片麻岩,岩石中蚀变有硅化、绿泥石化、绢云母化和碳酸盐化等(图4)。岩石具有变余结构,矿物粒度大小不等,呈半自形和他形,变晶结构,为半自形隐晶质结构[图4(a)、4(b)、4(d)、4(e)]。石英动态重结晶,石英等矿物呈定向剪切排列明显[图4(a)、4(c)、4(d)]。显微S-C组构发育,石英脉或团块被剪切拉伸,呈不对称的眼球体,不对称眼球体与糜棱面理相交构成S-C组构,石英的剪切拉伸方向与定向排列的绢云母、绿泥石基质构成S-C组构[图4(a)、4(d)]。糜棱岩中发育各种典型的韧性剪切变形特征,例如S-C组构[图4(a)、4(b)、4(d)]、亚颗粒旋转重结晶的细石英颗粒[图4(a)、4(d)],这些韧性剪切带中产出不同的金矿床,也反映出金矿床中剪切动力作用痕迹。

3　构造运动学涡度研究

3.1　数据选取和统计

运用极摩尔圆法计算运动学涡度参数,来定量描述韧性剪切带构造运动的特征。张进江等(1995,1997)提出,由$W_k=\cos\upsilon$求得运动学涡度值。当$W_k=0$时,只有纯剪切变形;当$W_k=1$时,只有简单剪切。同时纯剪切组分和简单剪切组分则构成一般剪切,因此,一般剪切的W_k值为0~1。然而,当纯剪切组分和简单剪切组分相等时,W_k并非等于0.5,而是接近于0.71。由纯剪切应变速率和简单剪切应变速率之比$\varepsilon/\gamma=(\mathrm{tg}\upsilon)/2$,来确定剪切构造变形性质(张进江等,1995,1997;何国建等,2014)。

本次选取试验样品共7个,其中官庄金矿田洪



(a)洪源矿区金宏矿段KZ206B2;(b)洪源矿区金宏矿段40Y3B4;(c)洪源矿区金宏矿段ZK804B1;(d)洪源金星A-AB8

图4 洪源矿区含金石英脉围岩显微构造地质特征

Fig. 4 Microstructural geological characteristics of surrounding rock of gold-bearing quartz veins in the Hongyuan mining area

源矿区金宏矿段样品3个,洪源矿区金星矿段样品4个。通过采样制取的光片,在镜下对发育的S-C组构进行夹角测量,获得S-C夹角α为15°~22°(表1)。

室内利用Straindesk软件,计算了显微构造的石英颗粒有限变量$R(a/b)$和有限应变椭圆方位角Azimuth值,最终利用极摩尔圆法制图,确定并计算W_k值和ε/γ值,计算结果见图5和表1。

3.2 分析结果

官庄金矿田洪源矿区金宏和金星矿段的运动学涡度值Wk分别为0.707和0.758,结果显示该区韧性剪切带构造为一般剪切;统计整个醴陵官庄金矿田正冲矿区、肖家山矿区、洪源矿区金宏矿段和洪源矿区金星矿段的W_k值,由西向东分别为0.5235、0.560、0.707和0.758(图6),其中洪源矿区金宏矿段W_k值为0.707,表明洪源矿区金宏矿段纯剪切和简单剪切近似相等。

洪源矿区金宏矿段和金星矿段ε/γ值分别为0.509和0.449,统计官庄金矿田正冲矿区、肖家山矿区、洪源矿区金宏矿段和洪源矿区金星矿段的纯剪切应变速率和简单剪切应变速率之比ε/γ值,自西向东分别为0.842、0.751、0.509和0.449,表明官庄金矿田的纯剪切应变速率与简单剪切应变速率之比均小于1,说明构造运动过程中,官庄金矿田构造运动强烈,简单剪切速率比纯剪切速率快。同时,该区由西向东ε/γ数值逐渐减小,说明简单剪切速率由西向东加快。

4 剪切构造与矿体空间分布关系

4.1 运动学参数变化与矿体容矿空间的关系

简单剪切和纯剪切是地质体2种最基本的运动变形方式,核心区别在于是否伴随物质旋转以及主应变轴的方向是否变化。纯剪切地质体没有旋

表1　官庄金矿田含矿构造运动学涡度值

Table 1　Kinematic vorticity value of ore-bearing structure in the Guanzhuang gold field

矿区名称	标本编号	有限变量 $R(a/b)$	有限应变椭圆方位角	S-C夹角α	υ	$W_k=\cos\upsilon$	$\varepsilon/\gamma=(\mathrm{tg}\upsilon)/2$	文献来源
正冲矿区	410-B1	1.177	122.5°	10°	49°	0.656	0.575	文亭(2017)
	410-B2	1.25	115.3°	13°	61°	0.485	0.902	
	330-B10	1.136	127.3°	14°	58°	0.530	0.800	
	330-B15	1.263	152.3°	11°	65°	0.423	1.072	
	平均值					0.5235	0.842	
肖家山矿区(雁林寺)	DB2668-1	1.249	10.5°	12°	60°	0.50	0.866	何国建等(2014)
	DB2668-3	1.141	152.2°	18°	51°	0.63	0.617	
	DB2924-8	1.362	9.2°	14°	57°	0.54	0.77	
	平均值					0.56	0.751	
洪源矿区金宏矿段	40Y3B4	1.726	112.5°	21°	35.3°	0.82	0.354	本次统计
	KZ206B2	1.484	126.8°	16°	50.7°	0.63	0.611	
	ZK804B1	1.856	53.7°	15°	48.3°	0.67	0.561	
	平均值					0.707	0.509	
洪源矿区金星矿段	AAB1	1.662	39.0°	15°	50.6°	0.63	0.609	本次统计
	AAB8	2.018	50.9°	22°	28.9°	0.87	0.276	
	BT1B1	1.671	48.9°	18°	43.3°	0.78	0.471	
	D601B1	1.787	55.9°	17°	41.2°	0.75	0.438	
	平均值					0.758	0.449	

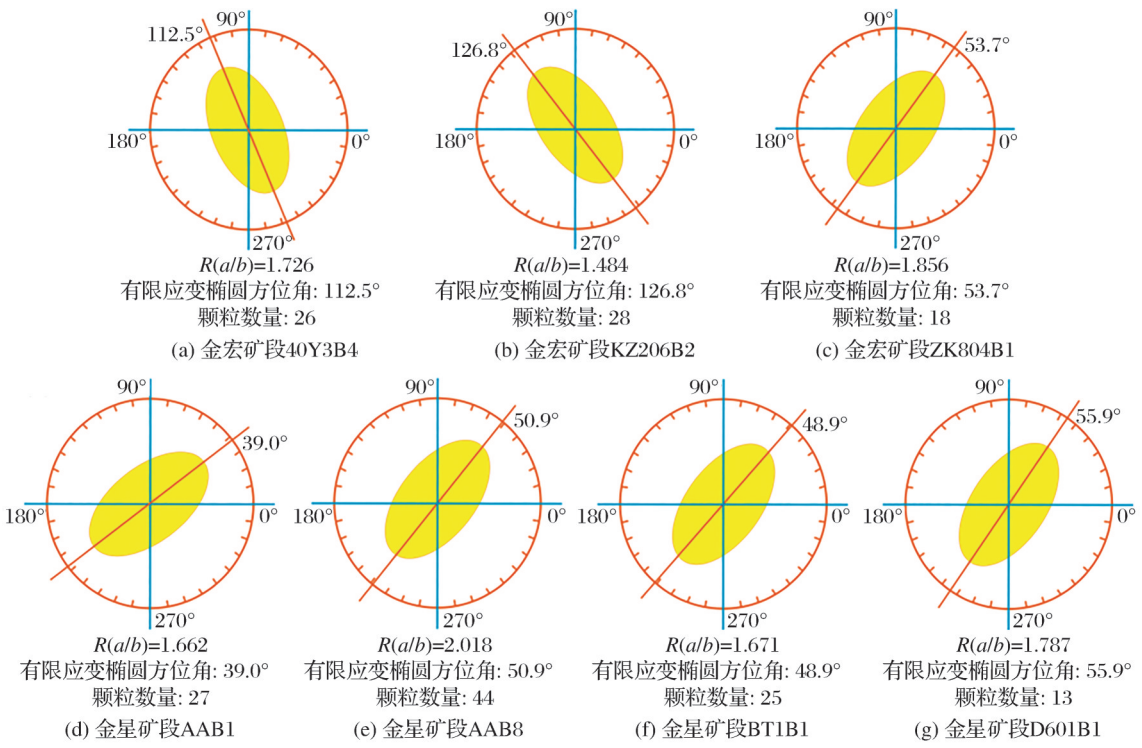
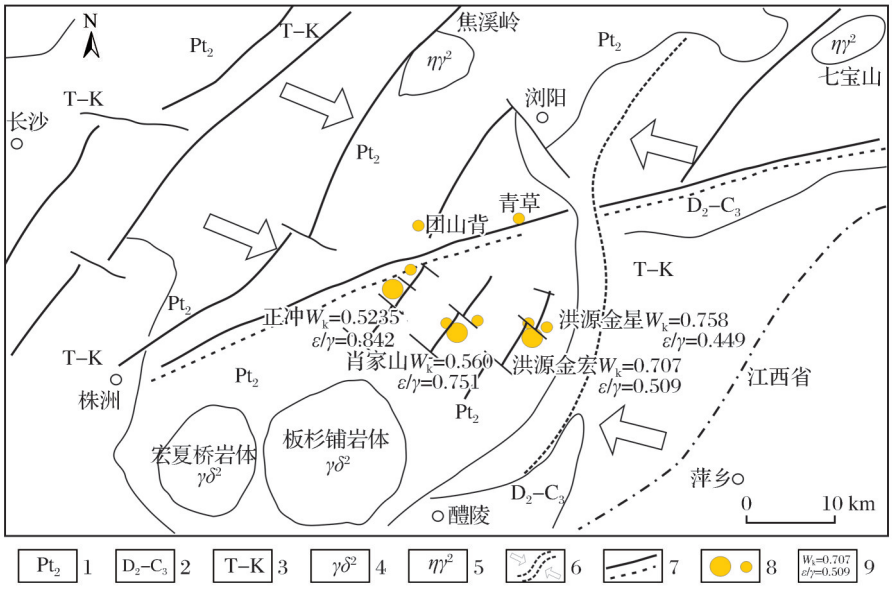


图5　洪源矿区有限应变*Rs*值

Fig. 5　*Rs* value of finite strain in the Hongyuan mining area

转,主应变轴(λ_1,λ_2,λ_3)方向固定不变;简单剪切的主应变轴会发生旋转,最大主应力(λ_1)方向与剪切面(λ_3)呈斜角,并随应变量增大而沿次应力(λ_2)转向旋转(图7)。实际上,在自然界中地质体变形往往是这2种机制的叠加,很难出现一种剪切运动。

醴陵官庄金矿田正冲矿区、肖家山矿区、洪源



1.新元古界冷家溪群;2.中泥盆—下石炭统;3.三叠—白垩系;4.志留纪花岗岩;5.晚侏罗世花岗岩;
6.断裂构造带;7.韧性剪切带;8.金矿床;9.金矿床涡度值W_k和ε/γ

图6 官庄金矿田运动涡度值分布地质简图

Fig. 6 Geological map of kinematic vorticity value distribution in the Guanzhuang gold field

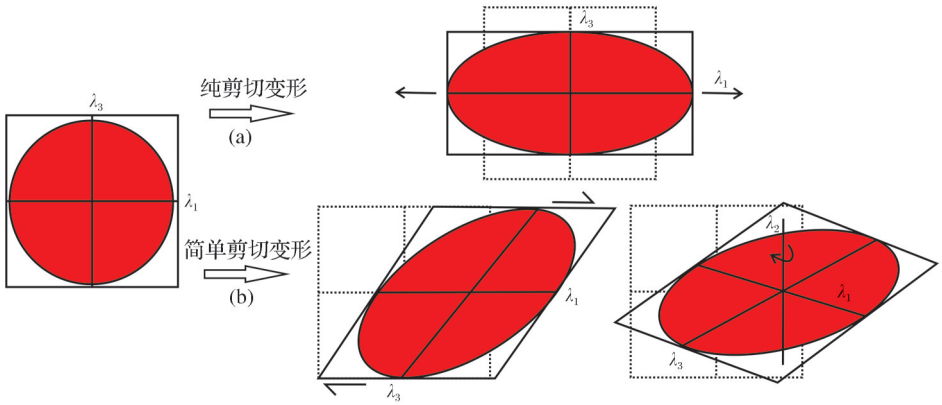


图7 纯剪切变形和简单剪切变形特征

Fig. 7 Characteristics of pure shear deformation and simple shear deformation

矿区金宏矿段和洪源矿区金星矿段的W_k值自西向东分别为0.5235、0.560、0.707和0.758,正冲矿区和肖家山矿区W_k值小于0.71,其围岩地质体纯剪切成分略大于简单剪切。该区围岩地层纯剪切长轴垂直于变形方向,区域内围岩地层挤压趋于地壳增厚或垂直载荷运动加强,另外证据显示正冲矿区深部有侵入岩发育,增强了围岩地层的垂直运动。洪源矿区金宏和金星矿段W_k值大于0.71,因此,洪源矿区围岩地质体简单剪切成分略大于纯剪切,说明围岩地层主应变轴会发生旋转,最大主应力方向与剪切面呈斜角,并发生转向剪切方向。

运动学涡度W_k值的大小或变化如何影响扩容空间的发育,正冲矿区和肖家山矿区W_k值小于0.71,矿体呈脉状和透镜状,侧伏角小。而洪源矿区金宏和金星矿段W_k值趋于或大于0.71,矿体呈脉状和透镜状,地质体旋转角较大,矿体侧伏角较大(图8)。

本次统计官庄金矿田正冲矿区、肖家山矿区以及洪源矿区金宏和金星矿段的矿体厚度变化系数和品位变化系数,可以看出运动学涡度W_k值的大小与

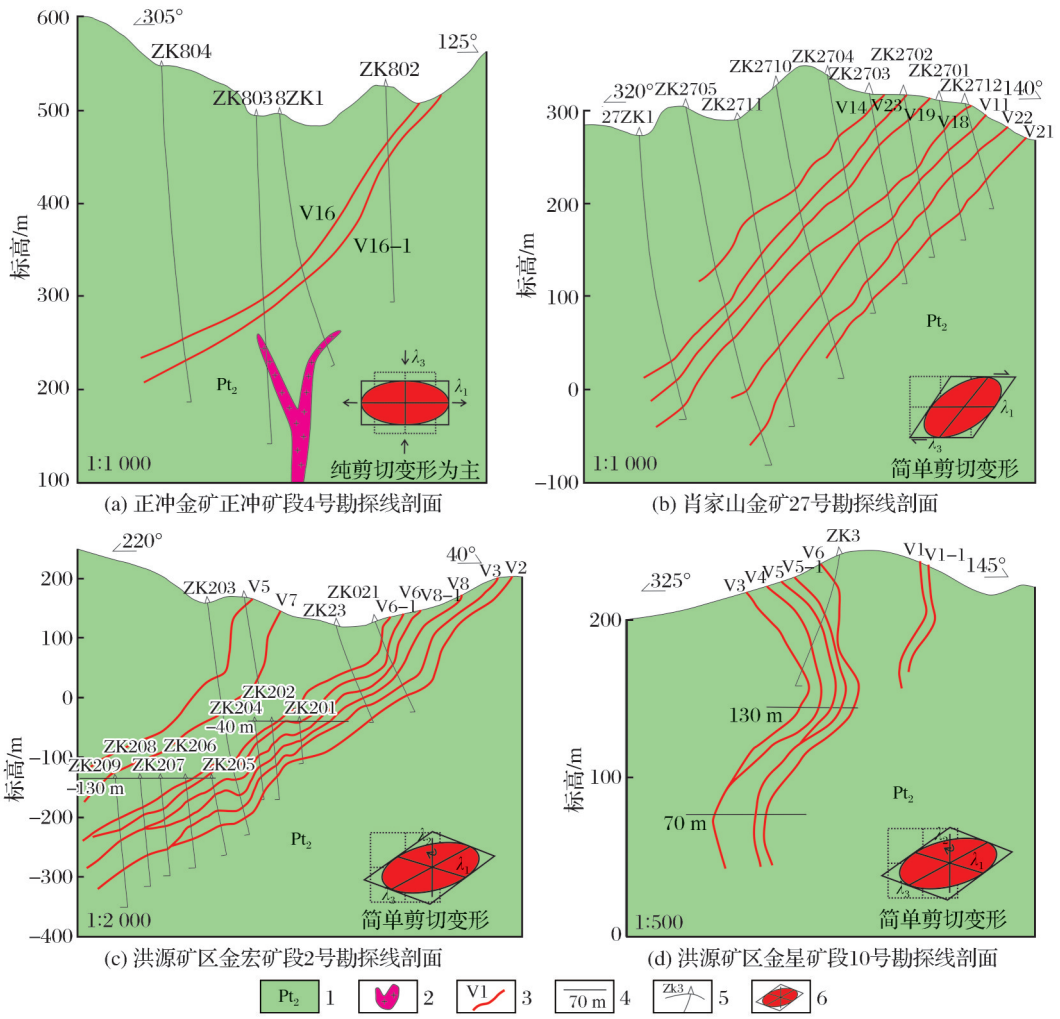


图8　官庄金矿田矿脉形态分布地质特征

Fig. 8　Geological characteristics of vein morphology distribution in the Guanzhuang gold field

矿体厚度变化系数V_m存在一定关系,二者呈正相关性,趋势拟合函数为W_k=0.3146V_m+0.3978(图9,表2)。而剪切应变速率之比ε/γ值与金矿化存在负相关性,趋势拟合函数为ε/γ=−0.5834V_c+1.4107(图9)。

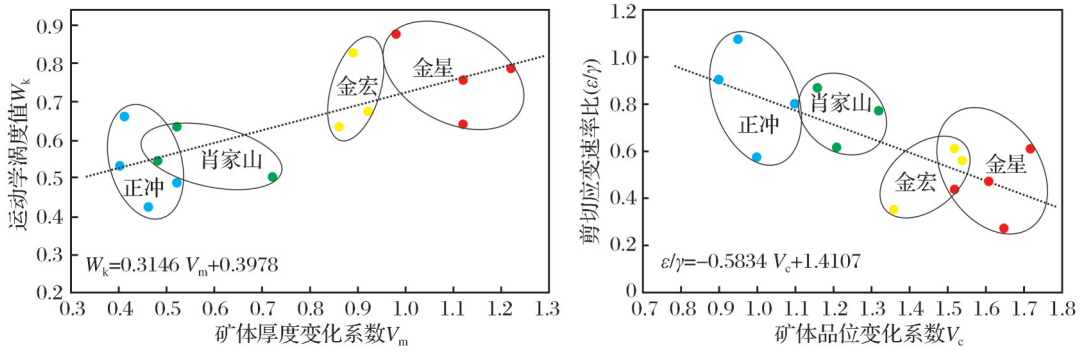


图9　矿体变化系数与运动学涡度参数的关系

Fig. 9　Relationship between orebody variation coefficient and kinematic vorticity parameter

表 2　官庄金矿田矿体变化系数统计

Table 2　Statistics of orebody variation coefficient in the Guanzhuang gold field

矿区名称	厚度变化系数 V_m	W_k	品位变化系数 V_c	ε/γ
正冲矿区	0.41	0.656	1	0.575
	0.52	0.485	0.9	0.902
	0.4	0.53	1.1	0.8
	0.46	0.423	0.95	1.072
肖家山矿区	0.72	0.5	1.16	0.866
	0.52	0.63	1.21	0.617
	0.48	0.54	1.32	0.77
洪源矿区金宏矿段	0.89	0.82	1.36	0.354
	0.86	0.63	1.52	0.611
	0.92	0.67	1.54	0.561
洪源矿区金星矿段	1.12	0.63	1.72	0.609
	0.98	0.87	1.65	0.276
	1.23	0.78	1.61	0.471
	1.12	0.75	1.52	0.438

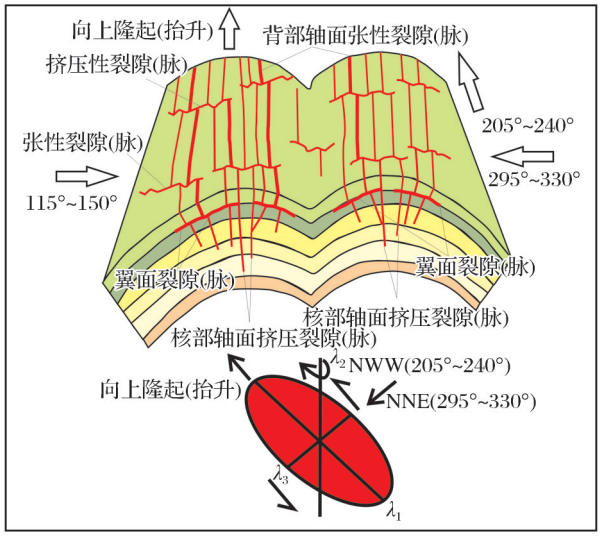


图 10　构造应力与矿脉分布模式简图

Fig. 10　Simplified diagram of tectonic stress and vein distribution pattern

4.2　矿脉空间发育与勘探方向

华南地区推覆构造与金矿化存在密切关系，特别是褶皱式逆冲推覆构造为金成矿提供了活化动力和封闭空间（彭少梅等，1992a，1992b）。湘东北处于加里东—印支—燕山期陆内岩石圈挤压—拉张的大地构造运动旋回之中，特别是在加里东期（约 490~390 Ma）经历了较强烈的地质构造运动演化。

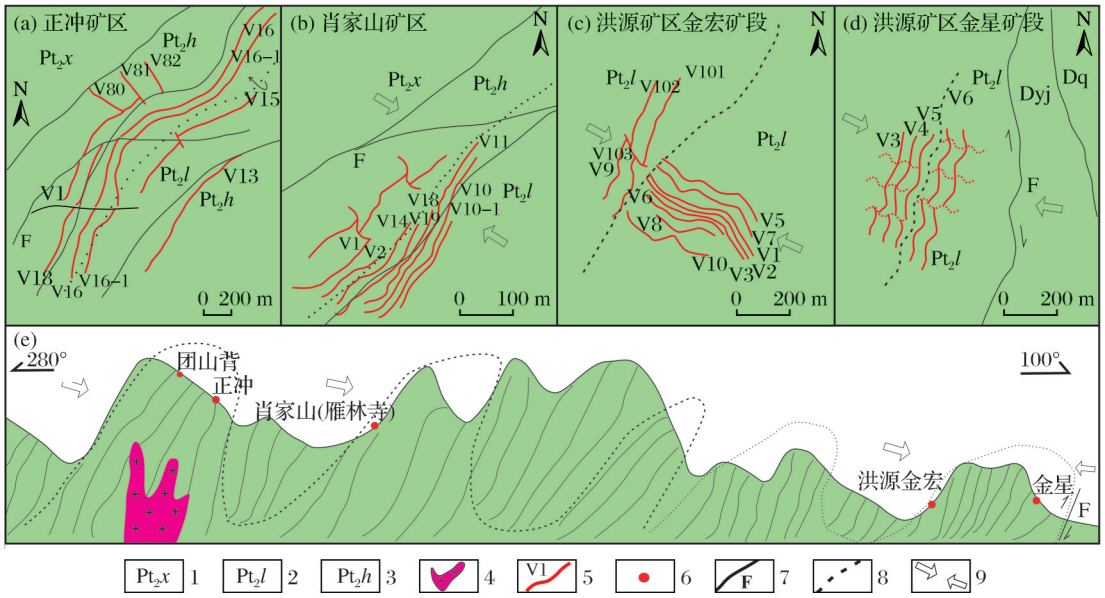
加里东期扬子板块与华夏板块在江南造山带内发生陆内俯冲造山运动，此时湘东—赣西发育推覆逆冲，形成 NNE 向纵向构造行迹，且伴随地块隆起或抬升（图 10），醴陵官庄金矿田在剪切挤压作用下产生雁列式 NNE 或 NWW 向次级褶皱构造系。加里东期矿区南部发育宏夏桥和板杉铺岩体（张菲菲等，2010；李建华等，2015），为金成矿提供了能量和物质来源，构造运动驱使热液快速进入到韧性剪切构造、层间破碎构造和断层破碎构造中，与围岩发生水（液）岩作用，从矿源层萃取出 Au 元素，成矿热液在容矿构造系中充填或交代蚀变围岩并继续沉淀富集，特别是在背斜核部和不同岩性翼面产生层间破碎带，发育 NWW 和 NNE 向断裂系形成金矿脉（图 10）。

通过分析构造应力与矿脉分布模式，研究区 NNE 向为石英脉或挤压破碎型矿脉，NNW 向为石英细脉带型矿脉。由于 NNE 向推覆构造运动同期形成的导矿运矿空间，属于构造开放空间，因此其矿脉走向和倾向延伸较长，发育压性石英中细脉型矿脉。而 NNW 向矿脉属于次级构造形成的封闭空间，一般其矿脉品位矿化程度较高，但是矿脉沿走向和倾向较短，不连续，呈雁列式或近平行式矿脉产出。另外，由于韧性剪切构造运动的发生，在岩层之间发育的翼面错动裂隙，在深部出现近水平矿脉，或出现其他任意方向的层间矿脉（图 10）。

官庄金矿田自西向东分布有正冲、肖家山（雁林寺）和洪源金矿区，在区域上规模矿脉主要为 NNE 和 NWW 向（图 11）。矿脉分布规律：自西向东由简单变复杂，矿脉膨大缩小，尖灭再现，矿体深部厚度变化和品位变化较大，且 NEE 向矿脉更加发育。因此，研究区矿产调查和勘探工作须以 NWW 和 NNE 向矿脉为主攻方向。

5　结论

（1）湘东北醴陵官庄金矿田正冲矿区、肖家山矿区、洪源矿区金宏矿段和洪源矿区金星矿段的 W_k 值由西向东分别为 0.5235、0.560、0.707 和 0.758，表明洪源矿区金宏矿段纯剪切和简单剪切近似相等。其次，纯剪切应变速率和简单剪切应变速率之比 ε/γ 值自西向东分别为 0.842、0.751、0.509 和 0.449，



1.中元古界冷家溪群小木坪组;2.中元古界冷家溪群雷神庙组;3.中元古界冷家溪群黄浒洞组;4.花岗闪长岩;5.金矿体(脉);6.矿床(区);7.断层及编号;8.次级褶皱核部;9.构造运动方向

图11　官庄金矿田矿脉分布(a~d)与构造剖面(e)简图

Fig. 11　Simplified diagrams of ore veins distribution(a~d) and structural profile(e) in the Guanzhuang gold field

该区自西向东ε/γ数值逐渐减小,说明简单剪切速率自西向东加快,具有推覆逆冲构造运动特征。

(2)官庄金矿田正冲矿区、肖家山矿区、洪源矿区金宏矿段和金星矿段的矿体厚度变化系数V_m与运动学涡度W_k值的大小存在一定的关系,二者呈正相关性,拟合函数为W_k=0.3146V_m+0.3978。而剪切应变速率比值ε/γ值与金矿化存在负相关性,拟合函数为ε/γ=−0.5834V_c+1.4107。

(3)金矿体分布在空间上,韧性剪切构造为金矿床提供了搬运通道和容矿空间,形成任意走向方向的矿脉(化),而以NWW和NNE向为主的2组金矿脉(化),为今后找矿提供了勘探方向。

参考文献(References):

Chen Z H, Shao Y J, Liu Q Q, et al, 2025. Metallogeny of the Jinming gold deposit in northeast Hunan, Jiangnan Orogen: constraints from in situ sericite Rb-Sr dating, pyrite trace elements and S isotope geochemistry [J]. Ore Geology Reviews, 178: 106499.

Hou D Z, Lin S, Liu L, et al, 2023. Metal source and fluid evolution in Xiaojiashan gold deposit in northeastern Hunan, China: implications of rare earth elements, fluid inclusions, and pyrite S isotopic compositions [J]. Minerals, 13 (1): 121.

Jiao Q Q, Deng T, Wang L X, et al, 2017. Geochronological and mineralogical constraints on mineralization of the Hetai goldfield in Guangdong Province, South China [J]. Ore Geology Reviews, 88: 655-673.

Xu D R, Deng T, Chi G X, et al, 2017. Gold mineralization in the Jiangnan Orogenic Belt of South China: geological, geochemical and geochronological characteristics, ore deposit-type and geodynamic setting [J]. Ore Geology Reviews, 88: 565-618.

Zhang Y C, Shao Y J, Liu Q Q, et al, 2024. Constraints on the genesis of the Wangjiawan gold deposit, northeast Hunan district, Jiangnan Orogen: evidence from fluid inclusions and H-O-S-Pb isotopes [J]. Ore Geology Reviews, 167: 106018.

陈柏林,董法先,李中坚,1999. 韧性剪切带型金矿成矿模式[J]. 地质论评,(2):186-192. Chen Bailin, Dong Faxian, Li Zhongjian, 1999. Metallogenic model of ductile shear zone type gold deposit [J]. Geological Review, (2): 186-192.

董国军,许德如,王力,等,2008. 湘东地区金矿床矿化年龄

的测定及含矿流体来源的示踪：兼论矿床成因类型[J]. 大地构造与成矿学，32(4)：482-491. Dong Guojun, Xu Deru, Wang Li, et al, 2008. Determination of mineralizing ages on gold ore deposits in the eastern Hunan Province, South China and isotopic tracking on ore-forming fluids: re-discussing gold ore deposit type [J]. Geotectonica et Metallogenia, 32(4): 482-491.

符巩固，许德如，陈广浩，等，2002. 湘东北地区金成矿地质特征及找矿新进展[J]. 大地构造与成矿学，26(4)：416-422. Fu Gonggu, Xu Deru, Chen Guanghao, et al, 2002. New recognitions on geological characteristics of gold ore deposits in northeastern Hunan Province, China and new prospecting advances[J]. Geotectonica et Metallogenia, 26(4): 416-422.

韩凤彬，常亮，蔡明海，等，2010. 湘东北地区金矿成矿时代研究[J]. 矿床地质，29(3)：563-571. Han Fengbin, Chang Liang, Cai Minghai, et al, 2010. Ore-forming epoch of gold deposits in northeastern Hunan [J]. Mineral Deposits, 29(3): 563-571.

何国建，金巍，胡为正，等，2014. 运动学涡度及其在湘东雁林寺韧性剪切带中的应用[J]. 地质调查与研究，37(2)：136-143. He Guojian, Jin Wei, Hu Weizheng, et al, 2014. Kinematic vorticity and its application to the Yanlinsi ductile shear zone in eastern Hunan Province [J]. Geological Survey and Research, 37(2): 136-143.

何绍勋，段嘉瑞，周崇智，等，1992. 一种新的金矿类型：剪切带型金矿[J]. 中国有色金属学报，2(2)：1-6. He Shaoxun, Duan Jiarui, Zhou Chongzhi, et al, 1992. A new type of gold deposit-shear zone type gold deposit[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2(2): 1-6.

贺转利，许德如，陈广浩，等，2004. 湘东北燕山期陆内碰撞造山带金多金属成矿地球化学[J]. 矿床地质，23(1)：39-51. He Zhuanli, Xu Deru, Chen Guanghao, et al, 2004. Gold-polymetallic ore-forming geochemistry of Yanshanian intracontinental collis ion orogen, northeastern Hunan Province[J]. Mineral Deposits, 23(1): 39-51.

胡瑞忠，黄明亮，彭建堂，等. 2026. 华南加里东期陆内成矿作用[J]. 中国科学：地球科学，56(9)：3227-3242 .Hu Rui, Huang Mingliang, Peng Jiantang, et al, 2026. Caledonian intracontinental metallogeny in South China [J]. Science China Earth Sciences, 69(9): 3181-3196.

贾大成，胡瑞忠，卢焱，等，2002. 湘东北蕉溪岭富钠煌斑岩地球化学特征[J]. 岩石学报，18(4)：459-467. Jia Dacheng, Hu Ruizhong, Lu Yan, et al, 2002. Petrological and geochemical characteristics of sodium-rich lamprophyres from Jiaoxiling in northeast Hunan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 18(4): 459-467.

李建华，张岳桥，董树文，等，2015. 湘东宏夏桥和板杉铺岩体LA-MC-ICPMS锆石U-Pb年龄及地质意义[J]. 地球学报，36(2)：187-196. Li Jianhua, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, et al, 2015. LA-MC-ICPMS zircon U-Pb geochronology of the Hongxiaqiao and Banshanpu granitoids in eastern Hunan Province and its geological implications[J]. Acta Geoscientia Sinica, 36(2): 187-196.

李建威，李先福，李紫金，等，1999. 走滑变形过程中的流体包裹体研究：以湘东地区为例[J]. 大地构造与成矿学，23(3)：240-247. Li Jianwei, Li Xianfu, Li Zijin, et al, 1999. Fluid inclusions study in the process of strike slip faulting: a case study in eastern Hunan Province [J]. Geotectonica et Metallogenia, 23(3): 240-247.

李康，焦骞骞，许德如，等，2024. 广东河台金矿田糜棱岩磁组构对剪切带变形与成矿的约束[J]. 地质学报，98(6)：1757-1775. Li Kang, Jiao Qianqian, Xu Deru, et al, 2024. Characteristics of mylonite magnetic fabrics and constraint on the relationship between the shear zone deformation and mineralization [J]. Acta Geologica Sinica, 98(6): 1757-1775.

李先福，傅昭仁，李建威，等，2001. 湘东—赣西NNE向走滑构造[J]. 大地构造与成矿学，25(2)：136-140. Li Xianfu, Fu Zhaoren, Li Jianwei, et al, 2001. Strike-slip tectonics trending NNE in the area of eastern Hunan and western Jiangxi, China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 25(2): 136-140.

刘鹤群，2017. 湘东北醴陵地区石英脉型金矿床成矿预测探讨[J]. 国土资源导刊，14(2)：74-78. Liu Hequn, 2017. Investigation for quartz-vein type gold ore mineralization forecast in northeast Hunan Liling [J]. Land & Resources Herald, 14(2): 74-78.

刘继顺，1996. 韧性剪切带中金成矿研究的若干问题[J]. 地质论评，42(2)：123-128. Liu Jishun, 1996. Some problems in the study of gold mineralization in ductile shear zones[J]. Geological Review, 42(2): 123-128.

刘亮明，彭省临，吴延之，1997. 湘东北地区脉型金矿床成矿构造特征及构造成矿机制[J]. 大地构造与成矿学，21(3)：197-204. Liu Liangming, Peng Shenglin, Wu Yanzhi, 1997. Features of metallogenic-tectonics and mechanism of tectonic-metallization for vein-type gold deposits in the north-eastetern Hunan, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 21(3): 197-204.

柳德荣，吴延之，1993. 醴陵市雁林寺金矿床成因探讨[J]. 湖

南地质,(4):247-251.Liu Derong, Wu Yanzhi, 1993.On the genesis of yanlingshi gold deposit in Liling[J].Hunan Geology,(4):247-251.

彭少梅,1992a.一个新的金矿成矿系列——论粤北新洲褶皱式逆冲推覆构造与金矿化的关系[J].黄金,(2):7-10. Peng Shaomei, 1992a.A new kind of minerogenetic series of gold deposits in Xinzhou area, northern Guangdong Province[J].Gold,(2):7-10.

彭少梅,何绍勋,1992b.粤北新洲推覆构造外来系统中的石英脉及其与金矿化的关系[J].地质找矿论丛,7(3):35-47. Peng Shaomei, He Shaoxun, 1992b. The quartz veins and their relationship with gold mineralization in the Xinzhou nappe structure, northern Guangdong[J].Contributions to Geology and Mineral Resources Research,7(3):35-47.

秦亚,冯佐海,黄靖哲,等,2021.桂北地区三门韧性剪切带的厘定及其构造意义[J].地球科学,46(11):4017-4032. Qin Ya, Feng Zuohai, Huang Jingzhe, et al, 2021. Discovery of Sanmen ductile shear zone in north Guangxi and its tectonic significances[J].Earth Science, 46(11): 4017-4032.

王淑军,2015.湖南省醴陵市金宏金矿成矿规律及找矿[J].国土资源导刊,12(2):30-33,38.Wang Shujun, 2015. Metallogenic regularity and ore-finding of Jinhong gold deposit in Liling, Hunan[J].Land & Resources Herald, 12(2):30-33,38.

文亭,2017.湖南省醴陵市正冲金矿床成矿构造特征与找矿预测[D].长沙:中南大学.Wen Ting,2017.Metallogenic structural characteristics and prospecting prediction of Zhengchong gold deposit in Liling City, Hunan Province[D].Changsha:Central South University.

张菲菲,王岳军,范蔚茗,等,2010.湘东—赣西地区早古生代晚期花岗岩体的LA-ICPMS锆石U-Pb定年研究[J].地球化学,39(5):414-426.Zhang Feifei, Wang Yuejun, Fan Weiming, et al, 2010. LA-ICPMS zircon U-Pb geochronology of late Early Paleozoic granites in eastern Hunan and western Jiangxi Provinces, South China[J].Geochimica,39(5):414-426.

张进江,郑亚东,1995.运动学涡度、极摩尔圆及其在一般剪切带定量分析中的应用[J].地质力学学报,1(3):55-64.Zhang Jinjiang, Zheng Yadong, 1995.Kinematic vorticity, polar Mohr circle and thier application in quantitative analysis of general shear zones[J].Journal of Geomechanics,1(3):55-64.

张进江,郑亚东,1997.运动学涡度和极摩尔圆的基本原理与应用[J].地质科技情报,(3):33-39.Zhang Jinjiang, Zheng Yadong, 1997. Basic principles and applications of kinema tic vorticity and polar Mohr diagram[J].Geological Science and Technology Information,(3):33-39.

Relationship between Kinematic Vorticity of Ductile Shear Zones and Spatial Distribution of Orebodies in the Guanzhuang Gold Field, Northeastern Hunan

LIU Shoulin[1,2], ZHANG Xiong[1,2,3], WEN Ting[1,2], YAN Changhua[1,2], LV Xingqiu[1,2], WEI Jinju[1,2]

1.*Geological Bureau of Hunan Province, Changsha* 410100, *Hunan, China*;

2.*Hydrogeological Environment Geological Investigation and Monitoring of Hunan Province, Changsha* 410100, *Hunan, China*;

3. *School of Geosciences and Info-physics & Key Laboratory of Non-ferrous Metals Metallogenic Prediction of Ministry of Education, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*

Abstract: The Guanzhuang gold ore field, located in northeastern Hunan Province, is distinguished by its extensively developed ductile shear zones. This study aims to elucidate the structural development mechanisms within this region by employing kinematic vorticity parameters of the ductile shear zones to investigate the characteristics of regional metallogenic structures and to examine the relationship between structural mechanisms and vein development. Field investigations were conducted to assess the structural features of ductile shear zones within the Jinhong and Jinxing ore sections of the Hongyuan mining area, complemented by a detailed petrological microstructural analysis. The kinematic vorticity parameters were calculated using the Mohr's circle method, resulting in W_k values of 0.707 and 0.758 for the Jinhong and Jinxing ore sections,

respectively. These findings suggest that pure shear and simple shear are nearly equivalent in the Jinhong ore section. Furthermore, the ratios (ε/γ) of pure shear strain rate to simple shear strain rate were determined to be 0.509 and 0.449 for the Jinhong and Jinxing ore sections, respectively. The ε/γ ratios for the Zhengchong, Xiaojiashan, Jinhong, and Jinxing ore sections within the Guanzhuang gold ore field, arranged from west to east, are 0.842, 0.751, 0.509, and 0.449, respectively. All ε/γ ratios in the area are less than 1, indicating significant lateral tectonic movement within the Guanzhuang gold ore field. Furthermore, the ε/γ values exhibit a gradual decrease from west to east, suggesting an acceleration of simple shear rates in the same direction, which is indicative of nappe thrust tectonic movement. For the first time, a quantitative relationship has been established between kinematic vorticity parameters and vein variation coefficients. The variation coefficients (V_m) of orebody thickness for the four deposits demonstrate a positive correlation with the kinematic vorticity (W_k) values, with a fitted function expressed as $W_k = 0.3146V_m + 0.3978$. Conversely, the shear strain rate ratio (ε/γ) exhibits a negative correlation with gold mineralization, with a fitted function given by $\varepsilon/\gamma=-0.5834V_c+1.4107$. In conclusion, it is posited that this region corresponds to a hydrothermal deposit model typified by tectonic-magmatic-mineralization processes. The area experienced Caledonian hydrothermal activity, which facilitated the formation of gold deposits. The ductile shear tectonic movements have influenced the spatial distribution of gold ore bodies, it reveals ore bodies in any directions, but there are two sets of gold veins oriented in NWW and NNE directions. These orientations offer a principal framework for guiding prospecting activities.

Key words: spatial distribution of orebody; kinematic vorticity; ductile shear zone; Guanzhuang gold field; Northeastern Hunan