

康定大渡河矿田北缘孔玉金矿区控矿构造特征 与成矿动力学环境*

杨钻云, 王元君**, 宋钰婷, 张译文, 赵幼琳

(西华师范大学环境科学与工程学院, 四川南充 637009)

摘要 孔玉金矿区地处川滇构造带北缘, 是大渡河金矿田的组成部分之一; 矿体主要赋存于盖层泥盆系黑色岩系中, 已有的年龄数据分别有 13.2 Ma、9.55 Ma, 代表喜马拉雅期成矿。川滇构造带历经中、新元古代和显生宙 2 个巨型构造旋回, 矿床的形成叠加了被动大陆边缘、活动大陆边缘交替历史条件下岩石圈的伸展、裂隙和收缩、碰撞造山作用, 发育大量韧性-脆韧性剪切带构造, 成矿地球动力学环境极其复杂。矿床的动力变形样式与构造活动阶段并非同步发育, 矿化就位时代滞后于赋矿围岩的剪切变形时代; 构造运动控制了元素在地壳中的分布和分配, 在含矿岩系中氧化物含量除 SiO_2 、 Fe_2O_3 显著偏高外, 其他氧化物含量如 K_2O 、 CaO 、 Al_2O_3 、 MgO 、 FeO 等均明显偏低, 构造地球化学特征表现为富 Si、Fe, 贫 Na、K; 依据元素在不同构造类型和单元中分配的规律性, 区内成矿有用组分的分散和富集过程可分为矿源层、变质热液初步富集和成矿作用 3 个阶段。

关键词 地质学; 动力学环境; 成矿控矿; 构造变形; 演化规律; 孔玉金矿区

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Ore-controlling structure characteristics and metallogenic dynamics environment of Kongyu gold deposit on northern margin of Dadu River orefield in Kangding

YANG ZuanYun, WANG YuanJun, SONG YuTing, ZHANG YiWen and ZHAO YouLin

(College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, Sichuan, China)

Abstract

Located on the northern margin of the Sichuan-Yunnan structural belt, the Kongyu gold mining area is one of the components of the Dadu River gold orefield, and the orebodies mainly occur in the black rock series of the Devonian caprock. The ages of the existing data are 13.2 Ma and 9.55 Ma respectively, which represent the Himalayan mineralization. The Sichuan-Yunnan tectonic belt has experienced two giant tectonic cycles of Mesoproterozoic-Neoproterozoic and Phanerozoic. The formation of the deposit experienced superimposition of extension, rifting, contraction and collision orogeny of the lithosphere under the alternating historical conditions of passive continental margin and active continental margin. A large number of ductile-brittle ductile shear zone structures are developed, and the metallogenic geodynamic environment is extremely complex. The dynamic deformation pattern and tectonic activity stage of the deposit were not developed synchronously, and the mineralization age lags behind the shear deformation age of the host rock. Tectonic movement controls the distribution and allo-

* 本文得到西华师范大学博士启动基金项目(编号:412665)资助

第一作者简介 杨钻云,男,1981年生,博士,高级工程师,主要从事成矿规律与成矿预测、区域资源调查与环境研究。Email:yang-zuanyun@126.com

** 通讯作者 王元君,男,1964年生,博士,教授,主要从事地球探测与信息技术研究。Email:171182714@qq.com

收稿日期 2019-06-25;改回日期 2020-04-25。张绮玲编辑。

cation of elements in the earth's crust, except for SiO_2 and Fe_2O_3 which are obviously high; the values of oxides in the ore-bearing rock series, such as K_2O , Al_2O_3 , MgO , CaO and FeO , are obviously low; there exist rich Si and Fe but poor Na, K and some other elements. According to the distribution of elements in different tectonic types and units, the dispersion and enrichment of useful ore-forming components can be divided into three stages: source bed, preliminary enrichment of metamorphic hydrothermal solution and mineralization.

Key words: geology, dynamic environment, metallogenic control, tectonic deformation, evolution law, Kongyu gold mining area

研究区地处川滇经向构造体系北缘丹巴弧形构造岩片之上,位于鲜水河韧性平移断裂和龙门山造山带的复合交汇处,在华北、扬子和松潘-甘孜褶皱带之间因板块俯冲、碰撞及陆内汇聚作用而呈倒三角形(熊发挥等,2010)(图1a、b)。其中,沿大渡河流域两岸自北向南,从孔玉至姑咱,金矿点星罗棋布,是川西地区重要的贵金属成矿区之一(陈智梁等,1997;邓军等,1998;陈毓川等,2006)。根据大渡河金矿田矿床的产出位置和赋矿围岩的不同,分为姑咱金矿区和孔玉金矿区。前者以黄金坪、大窝凼、一柱香等矿产地为代表,矿体多数赋存于基底康定杂岩中,少数赋存于震旦系中(偏岩子金矿);后者以燕子沟、二里沟、新台子、无角沟等矿产地为典型,矿体主要赋存于盖层泥盆系黑色岩系中,对其研究相对比较薄弱。20世纪初至1949年前,Legendre P L、谭锡畴、李春昱等国内外学者在大渡河矿田区先后开展过零星的地质调查工作,1949年后数十年至1970年代后期,以四川省地矿局所属的地质队为主,在区内陆续开展了较多的矿产和区调工作,并相继发现了黄金坪、白金台子等一大批金矿床(点),取得了重大找矿突破。矿床的形成通常记录了地质作用的过程,其成因类型对区域构造背景和成矿环境具有明显的选择性(陈衍景,2006),罗鸿书等(1982)将大渡河金矿田矿床类型确定为断裂构造带蚀变破碎岩型;川滇构造带历经中、新元古代和显生宙2个构造旋回,本质上是被动大陆边缘、活动大陆边缘交替历史条件下岩石圈的伸展、裂隙和收缩、碰撞造山作用在时间和空间上叠加发育的历史,其矿床类型具有造山型金矿的一般特征(刘肇昌等,1996; Groves et al., 1998; Goldfarb et al., 1998; 张欣等,2011)。构造运动控制了元素在地壳中的分布和分配,使其在不同构造类型和单元中的分配有一定的规律性,构造运动、动力学条件和岩浆活动等差异性,致使元素在分配、共生组合等方面各不相同(杨国清,1990)。区内所属的造山型金矿在构造地球化学、成矿元素的

富集、构造变形机制、构造控矿特征等方面与成矿动力学环境之间在认识上仍缺乏关联性、系统性,本文以“康定大渡河矿田北缘孔玉金矿区控矿构造特征及成矿动力学环境”研究为纲,通过对成矿地层岩石组合、岩石氧化物、成矿火成岩、构造解析、岩石变质变形机制等开展系列的研究工作,逐步揭示矿区成金物源及氧化物的地球化学行为、地质构造控制条件及成矿演化规律等,建立造山型金矿床综合找矿信息模型,其成果不仅在理论上充实和丰富了造山型金矿成矿理论,而且在实践上对引领大渡河流域金的找矿突破具有重要的指导意义。

1 区域地质背景

在北部劳亚大陆、东部扬子陆块和西部羌塘-昌都微大陆之间俯冲、碰撞及陆内聚敛过程中,南北向与东西向挤压作用在各阶段交替发育,形成大量的韧性剪切构造。不同序次的构造活动在空间上相互叠加,形成南北向、弧形构造形迹和东西向张性断裂。宏观上,孔玉金矿区受到川滇南北向构造、金汤弧形构造及大渡河韧性剪切构造的影响,形成南北向构造、弧形构造和东西向张裂构造,由构造应力作用产生的巨大能量使裂(晶)隙金、包体金、吸附金、晶格金等摆脱晶键的束缚而活化迁移,在韧性剪切带中以含金石英脉分布并成群成带出现。区域地层由结晶基底和盖层两部分组成,二者呈角度不整合接触。基底地层归属龙门山前陆逆冲楔,而盖层则归属于丹巴弧形构造岩片。结晶基底由康定群组成,盖层主要分布于基底的周边,主要有震旦系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、古近系、新近系和第四系。

地层岩石伴随大量的张裂、剪裂和微裂隙、裂纹、劈理等,金矿体赋存于盖层泥盆系黑色岩系中,岩层向西倾斜,近南北向展布。地层岩石变形与构造活动同步发育,包括各类层间劈理、板理、片理等,

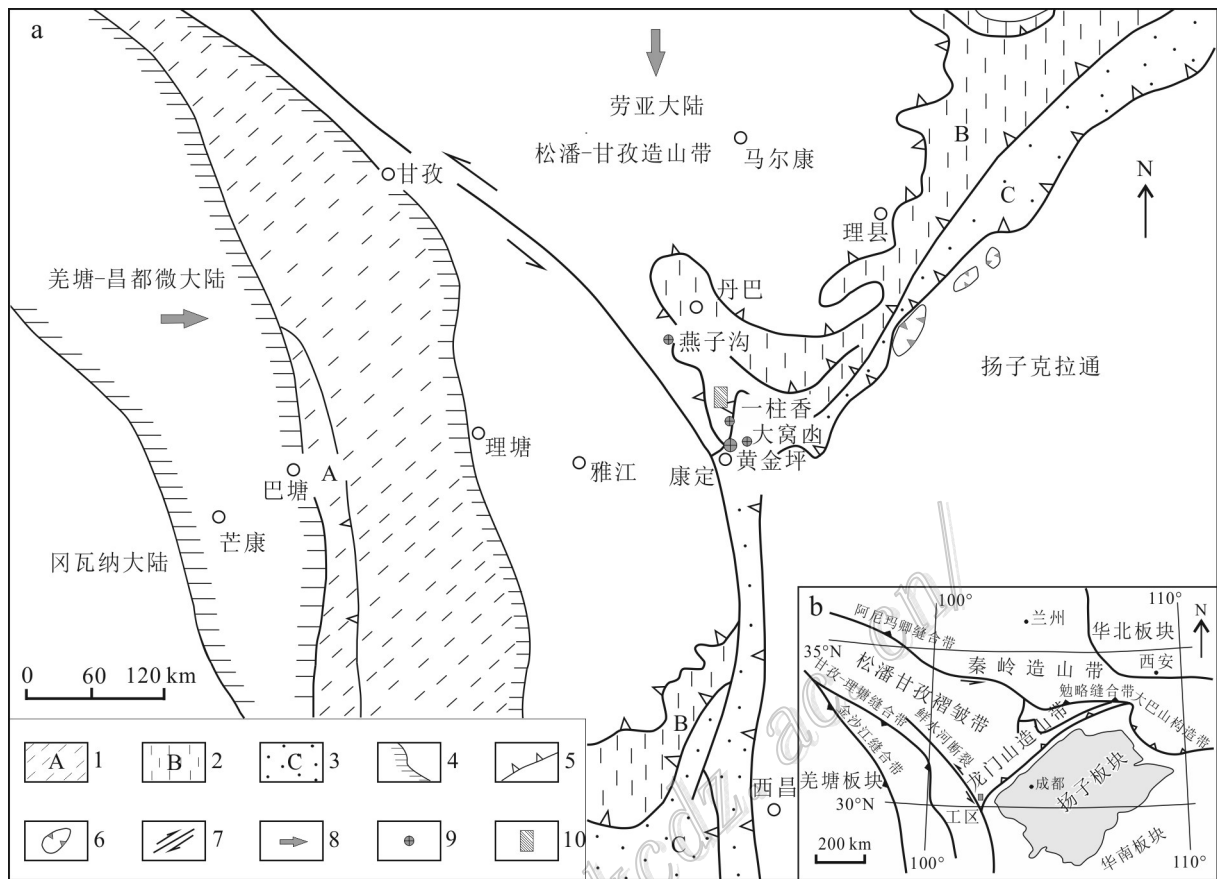


图1 大渡河矿田区构造体系(a)及构造背景略图(b)(据许志琴等,1999;刘树根等,2009修绘)

1—西部结合带;2—造山带主体;3—前陆逆冲楔;4—蛇绿混杂带;5—滑脱逆冲带;6—飞来峰;7—平移断层;8—剪切滑移矢量;9—金矿点;10—孔玉金矿区

Fig. 1 Simplified map of the Dadu River orefield in Kangding tectonic system (a) and tectonic background of the study area (b) (modified after Xu et al., 1999; Liu et al., 2009)

1—Combined belt in the west; 2—Main orogenic belt; 3—Wedge of thrust in the foreland; 4—Ophiolitic mélangé zone; 5—Thrusts-decollement system; 6—Klippe; 7—Strike-slip fault; 8—Sliding vector of shear; 9—Gold ore spot; 10—Kongyu gold mining area

石英脉常沿千枚岩、板岩层间裂隙或基性岩脉的节理灌入,后经过含矿热液的充填和交代作用,形成石英脉型和破碎带蚀变岩型2种矿石建造(图2a~c)。区域岩浆活动以晋宁-澄江期和海西期与成矿关系最为密切,为壳源岩浆活动及变质热液提供了通道和热源,其次为印支期和燕山期。

2 矿床地质概况

矿区内主要出露震旦系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系。岩层自东向西呈单斜构造分布,近南北向展布,向西倾斜,倾角70°左右,地层中偶见有小的挠曲,轴向亦为南北向。矿区构造主要受控于南北向构造,次为北西向弧形构造,且相互叠

加。在构造挤压、压扭应力作用下,岩石的物理性能不同,其表现形式各异。如碳质板岩、绢云千枚岩等岩石通常发生塑性形变,普遍发育劈(片)理化、无根褶皱等;矿区西部砂、硅质板岩“X”型张剪节理发育。矿体的富集随着构造表征的差异而相应地不同,一种与滑脱剪切有关,矿体产状与地层产状一致,呈层状、似层状产出,围岩劈理化、塑性变形强烈,因受逆冲挤压应力作用,呈叠瓦状展布,包括石英脉型和破碎带蚀变岩型2种类型,前者以含矿热液沿断裂面或裂隙充填形成石英脉,后者以构造岩渗透交代形成构造蚀变岩,常伴有揉皱现象;另一种受“X”型剪节理控制,多见于西部砂岩、硅质板岩等脆性岩石中,以石英脉型金矿体居多,矿体产状与节理产状一致,主要由脆性断裂控制。矿体与围岩界

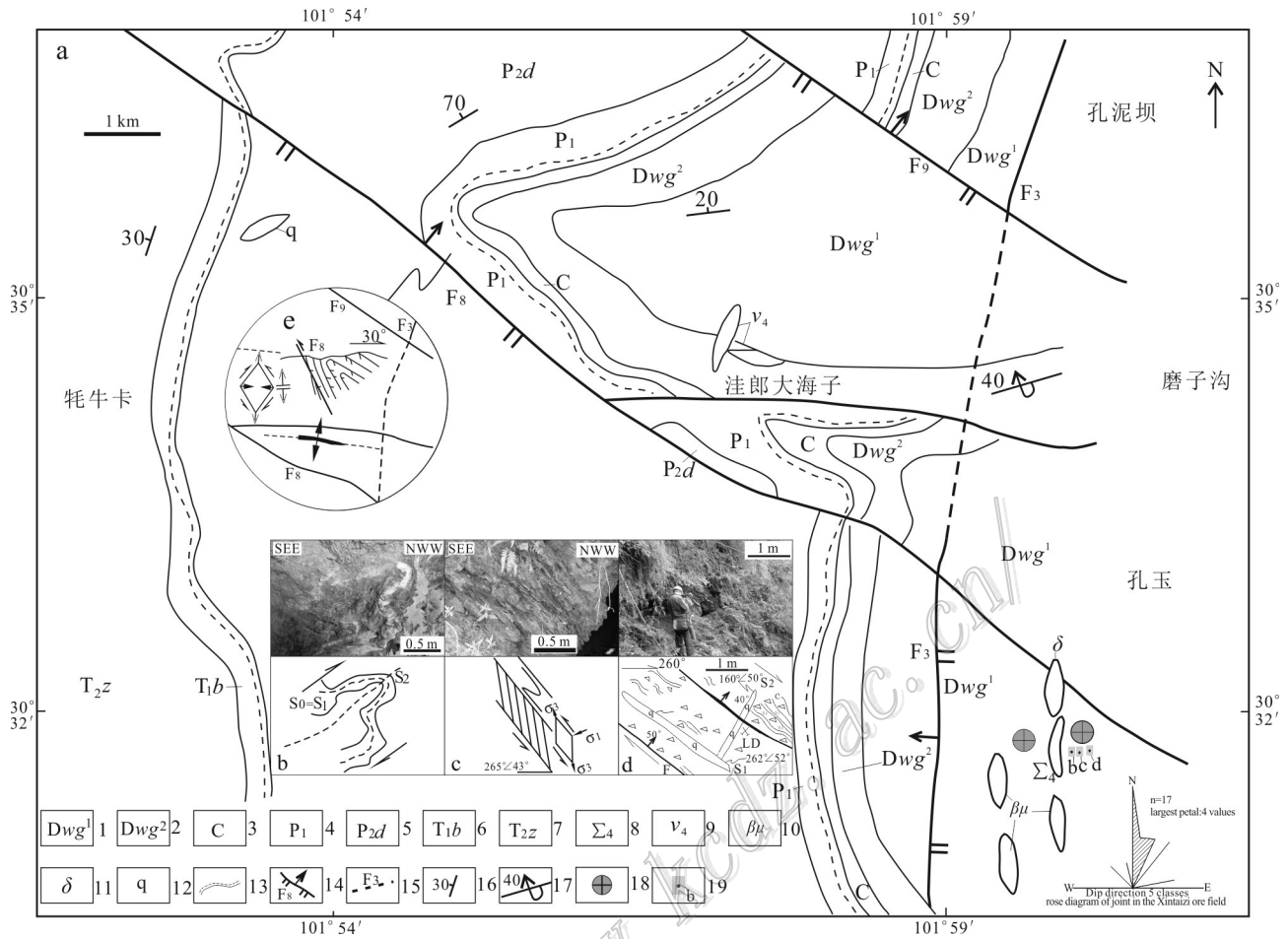


图2 区域构造体系的复合关系及构造动力学特征(a~d)及F₈断裂剖面特征(e)

b. 二里沟南无根褶皱及示意性素描图; c. 新台子矿区PD01 硐口劈理化及示意性素描图; d. 断层蚀变岩、石英脉及示意性素描图
 1—泥盆系危关群第一岩组板岩、千枚岩; 2—泥盆系危关群第二岩组灰岩、砂岩; 3—石炭系泥砂质灰岩; 4—二叠系下统生物碎屑灰岩;
 5—二叠系上统大石包组组变玄武岩; 6—三叠系下统茨茨沟组碎屑岩夹碳酸盐岩; 7—三叠系中统杂古脑组碎屑岩; 8—超基性岩;
 9—辉长岩; 10—辉绿岩脉; 11—闪长岩脉; 12—石英脉; 13—假整合界线; 14—逆断层及编号; 15—推断断层及编号;
 16—岩层产状; 17—倒转岩层产状; 18—金矿点; 19—照片位置及编号

Fig.2 Compound relationship and tectonic dynamic characteristics of regional tectonic system (a~d) and the fault profile characteristics of F₈ (e)

b. Sketches of rootless folding in south side of Erligou; c. Sketches of folding tectonics in the Xintaizi ore field, PD01; d. the sketch of map(lower) and the photo of Quartz vein, alteration rock about fault (upper)

1—Slate and phyllite of devonian weiguan group first rock formation; 2—Limestone and sandstone of devonian weiguan group second rock formation; 3—Limestone in mud and sandy of carboniferous; 4—Bioclastic limestone of permian lower series; 5—Altered basalt of permian upper dashibao formation; 6—Clastic rock and carbonate of Triassic lower paozigou formation; 7—Clastic rock of triassic middle zagunao formation; 8—Ultrabasic rocks; 9—Gabbro; 10—Diabase veins; 11—Diorite dikes; 12—Quartz veins; 13—Unconformity boundary; 14—Reverse faults and numbers; 15—Inferred faults and its number; 16—Attitude of stratum; 17—Inverted strata occurrence; 18—Gold ore spot; 19—Photo location and its number

线一般比较清晰,由矿体向围岩,矿石品位逐渐降低。近矿围岩(夹石)较完整,破碎程度低, $w(\text{Au})$ 约 $5 \times 10^{-9} \sim 500 \times 10^{-9}$, 硅化、黄铁、黄铜矿化或褐铁矿化蚀变较弱。围岩蚀变是热液成矿作用的标志性现象,是寻找矿体的重要标志。

孔玉金矿区属于绿泥石-绢云母化带千枚岩变质亚带,变质温度介于 $200 \sim 800^\circ\text{C}$ 之间,伴随的矿化及蚀变主要有硅化、黄铁矿化、褐铁矿化、黄铜矿化、绿泥石化、绢云母化及碳酸盐化。矿石金属成分包括 Au、Ag、Cu、Pb、Fe、C、As 等。矿石矿物主要为黄

铁矿、黄铜矿、自然金,伴有极少量的褐铁矿、方铅矿等;脉石矿物以石英为主,次为绢云母、碳质、方解石等,矿石类型为含硫化物金矿石,硫化物以黄铁矿物为主。矿石具他形、自形粒状、压碎、交代残余结构等,矿石以细脉状构造为主,次为网脉状、浸染状、斑点状、交错网脉状构造。

3 成矿地层岩石建造

3.1 含矿地质体建造类型

矿体赋存于盖层泥盆系危关群第一岩组(Dug¹),岩性为碳质板岩夹千枚岩、钙质砂质板岩、变质砂岩、石英砂岩等。岩层自西向东、由上至下划分为上、中、下3部分,上部灰色变质砂岩与深灰色碳(硅)质板岩互层,钙(砂)质板岩与结晶灰岩互层,岩石蚀变程度较弱,主要为硅化、绢云母化、黄铁矿化;中部灰色-灰绿色钙(砂)质板岩夹深灰色、麻灰色碳(硅)、砂质板岩夹绢云千枚岩,在低洼薄弱地段有少量的辉绿岩脉侵入,脉体周围有多条石英细脉穿插其中,部分脉体亦含金;下部岩性为灰黑色碳(硅)质板岩夹千枚岩,在首采区及其附近,石英脉和破碎蚀变岩普遍发育,且常伴有辉绿岩脉侵入,蚀变强烈,发育硅化、绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化、黄铜矿化等,是新台子矿区主要含金层段,从矿区地表路线地质调查和坑道采样情况来看,岩石自东向西含碳量逐渐减少,构造变形性状由塑性过渡为脆性,含矿性也随之变差。

成矿热液白云母K-Ar测定年龄为9.55 Ma、(20.8±0.6)Ma(罗鸿书等,1982;陈智梁等,1997);电子自旋共振法(石英ESR)测得年龄为13.2 Ma(吴二红,2015),表明喜马拉雅期成矿。赋矿围岩的时代与成矿时代具有较大时差,表明构造热能来自于大规模构造推覆挤压和燕山-喜马拉雅山多次复合叠加作用,使金矿化就位时代滞后于赋矿围岩的剪切变形时代,反映了矿液中的金元素是以络合物形式在后期构造-岩浆作用下发生运移并沉淀成矿的特点,符合中国金矿的普遍性规律(涂光炽,1989)。在成矿过程中,随着热对流速率的加快,围岩中的Si、Ca、K、Al、Pb、Zn、Au、Hg、As、Sb等进入含矿溶液中,在不同的物理化学条件下分别形成Pb-Zn-Au、Hg、Al-Au、Fe-Cu等不同矿产类型。地质体在演化发展过程中若能够形成金矿床,其地层岩石建造必须具备有利于成矿元素活化迁出的矿源层和使成矿物质沉淀、屏蔽作用的赋矿层。区内各主要地层含金

丰度的统计结果表明,前震旦系地层金元素平均丰度值(质量分数,下同)为 13.5×10^{-9} ,标准离差 σ 为25.3,变异系数为187(冶金部西南地勘局606队,1987);东南部康定杂岩之花岗岩中金的丰度值为 260×10^{-9} ,康定杂岩是震旦系沉积物的直接物源,震旦系观音崖组黑色碎屑沉积物中金的丰度值最高达 310×10^{-9} ,有部分金矿(偏岩子)直接赋存于震旦系灯影组中,表明前震旦系基底和震旦系是区内金矿床的主要矿源层(王全伟等,2003a)。另外,区内泥盆系危关群为一套高硫、高碳、高砷的黑色岩系,有机碳含量为0.05%~0.87%;在二里沟富康选厂矿石颗粒堆积物之下的土壤中测得 $w(\text{As})$ 为 60.4×10^{-6} , $w(\text{Cu})$ 为 50.2×10^{-6} 。碳质、石墨和非晶碳是金的有利沉淀剂,有机碳具有吸附性,可以驱使含金流体向浅部运移,同时底部千枚岩层可以阻挡表生含金流体向深部传递,成矿流体中的络合物金在还原条件下形成单质金,或呈原子、吸附离子赋存于黄铁矿、黄铜矿裂隙中。

3.2 岩石氧化物含量与金的关系

区内含矿围岩主要为千枚岩、碳(硅)质板岩等,通过对新台子矿区5件千枚岩、板岩样品进行氧化物含量测试和薄片鉴定工作,结果表明 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等多数氧化物的含量变化幅度大,是由于原岩的化学属性和浅变质作用下蚀变程度的差异,加剧了氧化物含量的变化幅度;在偏光显微镜下,长石矿物普遍发育绢云母化;在综合矿化因素下,含矿围岩与未矿化的千枚岩、板岩之间,某些氧化物含量仍具有明显的变化趋势(表1)。含矿岩系中氧化物含量除 SiO_2 、 Fe_2O_3 显著偏高外,其他氧化物如 K_2O 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 FeO 等含量均明显偏低(图3),这与野外和显微镜下观察到的矿化岩石均不发育钾化,而普遍发育硅化、黄铁矿化、绢云母化、褐铁矿化等特征相一致(图4a、b); K_2O 含量明显偏低,与康定杂岩为一套低钾的灰色英云闪长质混合片麻岩一致,有所不同的是杂岩体后期普遍发育钾交代,由花岗闪长质向花岗质岩石转化(陈智梁等,1997)。含矿岩系中具有较高的 Fe_2O_3 和较低的 FeO ,说明成矿过程的氧化还原作用,使部分 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} ,而 Au^{1+} 、 Au^{3+} 则被还原为 Au^0 并沉淀。

4 成矿火成岩条件

区内岩浆岩以辉绿岩脉为主,在二里沟、新台子、无角沟矿区内均有出露,与区域南北向构造带

表1 矿区浅变质板岩、千枚岩氧化物含量结果表

Table 1 Results of oxide analyses of shallowly metamorphosed slate and phyllite in the mining area

含矿性	w(B)/%										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
不含矿	48.86	18.23	0.75	6.61	3.79	3.00	0.34	5.27	0.34	0.094	0.101
	21.05	8.79	12.34	6.79	5.62	13.19	0.27	2.32	0.41	0.31	0.170
平均	34.96	13.51	6.55	6.70	4.71	8.10	0.31	3.80	0.375	0.202	0.136
含矿	97.38	0.42	0.48	0.97	0.18	0.25	0.028	0.11	0.013	0.033	0.0011
	20.92	9.71	34.88	3.85	1.00	1.77	0.20	2.77	0.29	0.061	0.062
	72.20	2.54	1.35	3.40	2.62	6.88	0.058	0.72	0.10	0.12	0.061
平均	63.50	4.22	12.24	2.74	1.27	2.97	0.095	1.20	0.134	0.071	0.041

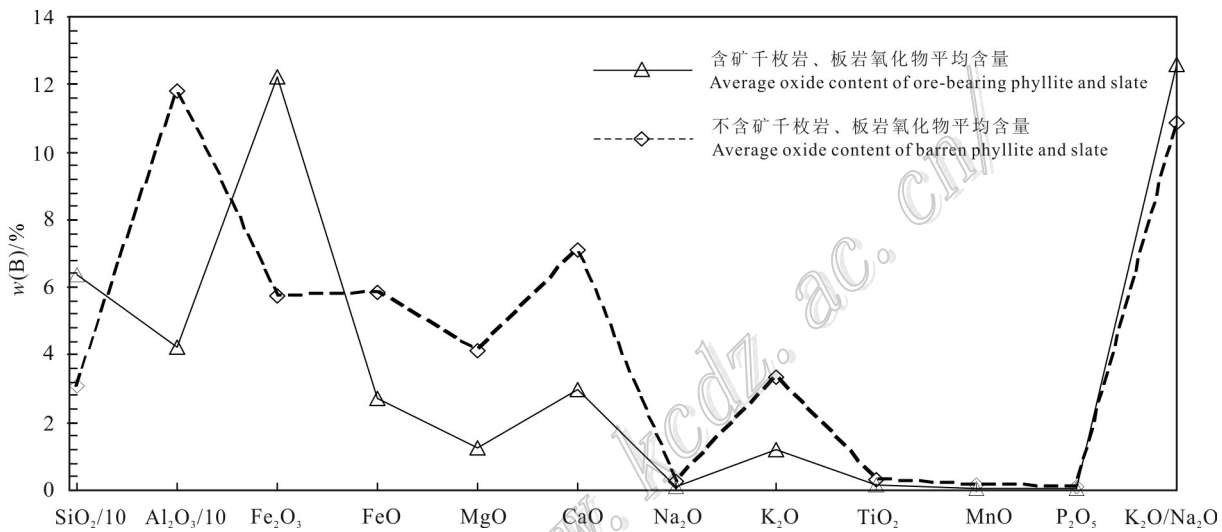


图3 矿区板岩、千枚岩的氧化物含量与金的矿化关系

Fig. 3 Relationship between oxide content of slate and phyllite and gold mineralization in the mining area

展布方向一致。区内金矿体的分布、数量及富集程度与辉绿岩脉在空间上联系紧密,如新台子矿区内,在岩体集中分布的首采区附近,金矿体数量、规模、品位等均好于矿区内的其他地段。辉绿岩脉的化学组成为: $w(\text{Si}_2\text{O})$ 48.27%~48.41%, $w(\text{Ti}_2\text{O})$ 1.68%~2.72%, $w(\text{MgO})$ 4.84%~7.98%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 平均 0.904%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 平均 1.78%, 全碱含量较低, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 13.39%~13.68%, $\sigma=0.47\sim 2.65$, 平均 1.56, 属钙碱性岩; 岩浆结晶锆石 U-Pb 法测得辉绿岩体的侵位年龄至少有 2 期, 分别为 $(425.5\pm 2.7)\text{Ma}$ 、 $(221\pm 1.6)\text{Ma}$, 从 $w(\text{K}_2\text{O})$ 和 $w(\text{SiO}_2)$ 关系特征上亦表明区内辉绿岩脉侵入活动至少有 2 期, 早期为低钾(拉斑)系列, 晚期为钾玄岩系列(吴二红, 2015)。

早期辉绿岩较新鲜, 金属矿化较弱, 在新台子矿区测得早期辉绿岩体的 $w(\text{Au})$ 为 0.02 g/t, 岩体内常包裹有团块状细粒-粗粒黄铁矿, 黄铁矿外部常发育

褐铁矿化、硅化; 晚期辉绿岩脉沿着已有的裂隙面上升, 侵位于泥盆系危关群第一岩组, 岩体与围岩接触界线清晰, 之后含矿热液追随故道进行交代, 并沿岩体与脉体之间的空隙侵入并初步富集, 这一时期的辉绿岩脉中常含有浸染状的黄铁矿, 黄铁矿呈粉末状, 均匀分布(图 5a~d)。显然, 晚期辉绿岩脉不仅为后期成矿提供了矿源, 富 S^{2-} 环境为载金黄铁矿等矿物的形成提供了条件。总之, 区内辉绿岩体与金矿床的空间位置关系, 可归纳为 2 种: 其一, 含金热液通过深大断裂面或裂隙面上升, 沿着基性岩脉的节理裂隙灌入形成石英脉, 挤压条件下的断裂作用伴有大量的韧性剪切变形带, 含矿元素沿脉体周围剪切变形低压带被活化运移完成初步富集, 部分地段与构造岩发生渗透交代形成蚀变岩型金矿体; 其二, 辉绿岩脉侵位于深大断裂形成的裂隙中, 之后石英脉贯入, 含矿元素沿着岩体与脉体之间的空隙侵入

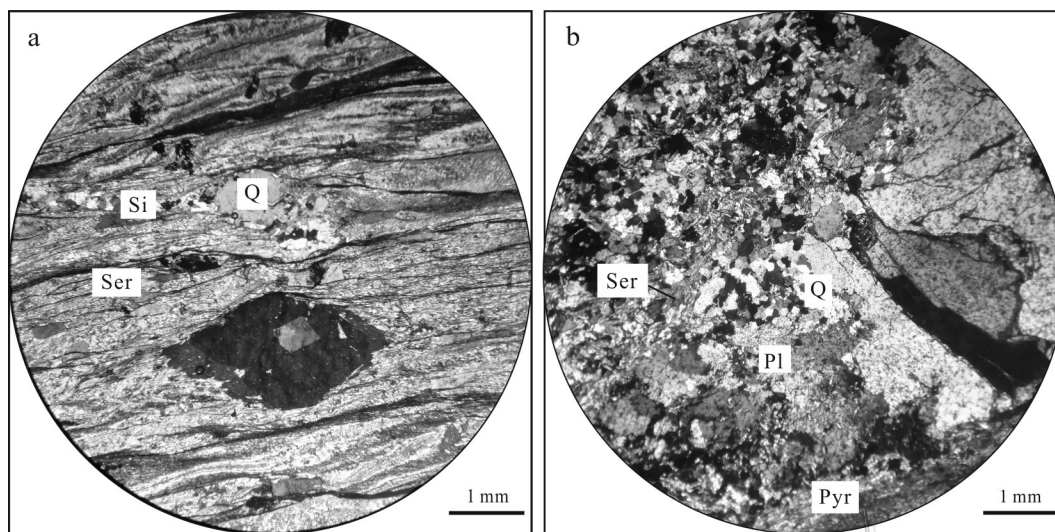


图 4 千枚岩、硅质板岩显微变形、矿化特征

a. 千枚岩中矿物矿化及显微变形; b. 硅质板岩中矿物矿化及显微变形

Q—石英; Pl—斜长石; Si—硅化; Ser—绢云母化; Pyr—黄铁矿化

Fig. 4 Microscopic deformation and mineralization characteristics of phyllite and siliceous slate

a. Mineral mineralization and microscopic deformation in phyllite; b. Mineral mineralization and microscopic deformation of siliceous slate

Q—Quartz; Pl—Plagioclase; Si—Silicification; Ser—Sericitization; Pyr—Pyritization

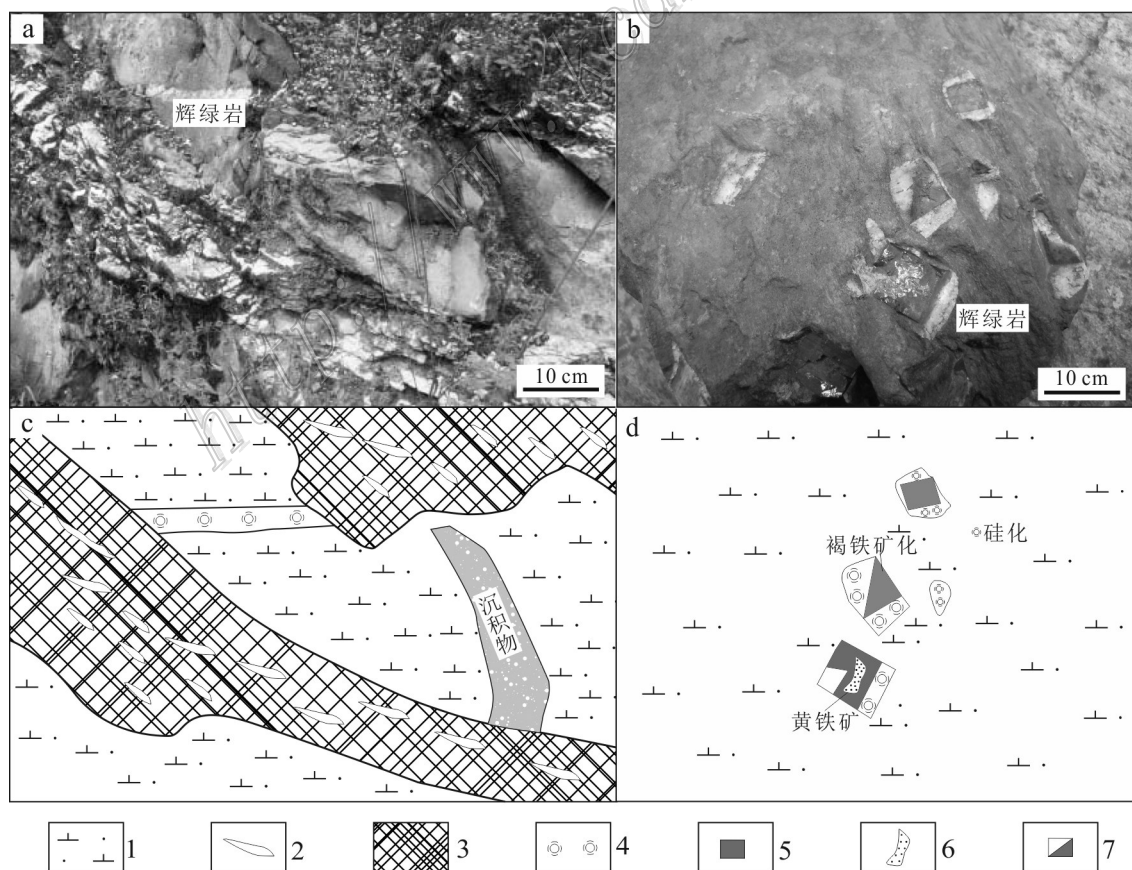


图 5 矿区基性辉绿岩脉侵入期次剖析图

- a. 第二期辉绿岩脉, 内有黄铁矿呈浸染状, 均匀分布, 后期矿体、石英脉灌入(吴二红, 2015); b. 第一期辉绿岩脉, 黄铁矿呈团块状(杨钻云等, 2013); c. 第二期辉绿岩脉侵入(图a)素描图; d. 第一期辉绿岩脉侵入(图b)素描图
1—辉绿岩; 2—石英脉; 3—金矿(化)体; 4—硅化; 5—团块状黄铁矿化; 6—细粒黄铁矿化; 7—褐铁矿化

Fig. 5 Analyses of intrusive stages of basic diabase dikes in the mining area

- a. The second stage diabase vein, in which pyrite is disseminated and evenly distributed, and the later orebody and quartz vein are infused (after Wu, 2015); b. The first stage diabase vein, pyrite is massive (after Yang et al., 2011); c. Sketch of the second stage diabase vein (Fig. a); d. Sketch of the first stage diabase vein (Fig. b)

1—Diabase; 2—Quartz vein; 3—Gold (mineralization) mine; 4—Silicide; 5—Crumb pyritization; 6—Fine grained pyritization; 7—Ferritization

而发生初步的富集(杨钻云等, 2013)。

5 成矿构造动力学条件

5.1 构造体系的复合关系

在川滇南北向、金汤弧形及大渡河韧性剪切构造的控制下, 区内构造活动在空间上互相叠加, 岩石变质变形作用强烈, 形成南北向构造形迹、弧形构造形迹和东西向张性断裂。其中, 南北向构造形迹集中分布在康定至孔泥坝一带, 由一系列压性结构面组成, 应为川滇南北向构造的北延部分, 在区内主要出露江达沟复单斜和江达沟断裂(F_3), 沿断裂带有基性、中酸性岩脉侵入, 赋围岩泥盆系危关群沿断裂两盘均有出露, 岩层劈理发育, 断裂往北被北西向永西沟断裂(F_8)、孔泥坝断裂(F_9)切错, 断裂性质为压性。

在南北向构造作用下, 区内岩层、断裂、岩(矿)体等总体呈南北向展布, 地层中偶发育有小的挠曲, 轴向亦为南北向。弧形构造形迹由走向北西、向西南凸的弧形褶皱和断裂组成, 包括洼朗大海子背斜和永西沟断裂(F_8)、孔泥坝断裂(F_9)。洼朗大海子倒转背斜位于康定孔泥坝以南, 西段轴线走向 300° , 东段近东西向, 构成略向西南凸的弧形。背斜被永西沟断裂和孔泥坝断裂挟持, 南翼被永西沟断裂破坏, 并倒转, 为轴面北倾, 向西北倾伏的倒转鼻状背斜。永西沟断裂(F_8)位于丹巴永西沟至康定洼朗大海子一线, 总体走向 $300^\circ\sim 320^\circ$, 呈略向西南凸的弧形, 断裂切割泥盆系至三叠系中统地层, 断面倾向北东, 倾角 $50^\circ\pm$, 沿断裂带可见糜棱岩、压扁矿物及基性岩脉; 孔泥坝断裂(F_9)位于康定孔泥坝至丹巴杨柳坪一带, 走向 $305^\circ\sim 310^\circ$, 区内延长15 km, 断裂切割泥盆系至二叠系, 断裂面倾向北东, 倾角 $40^\circ\sim 45^\circ$, 断裂两侧岩石破碎, 岩层产状紊乱, 节理发育。在康定孔玉区内, 川滇南北向构造和金汤弧形构造往往呈近 90° 交接, 应为反接复合

关系(图2)。

5.2 构造与成矿的关系

新元古代和显生宙发展各阶段, 被动大陆边缘、活动大陆边缘交替发育, 驱使岩石圈板块发生伸展、裂隙和收缩、碰撞造山作用, 发育大量的韧性-脆韧性剪切带构造, 包括各类层间劈理、板理、片理等, 石英脉常沿千枚岩、板岩层间裂隙或基性岩脉的节理灌入, 后经过含矿热液的充填和交代作用, 形成石英脉型和破碎带蚀变岩型2种矿石建造。构造对矿床的形成和空间分布起着极其重要的控制作用, 区内各主要构造体系的演化过程和构造变动形式均不相同, 当这些年代、动力作用方式和方向均不同, 且具有一定形态组合规律的构造体系出现在同一研究区内时, 必然会相互干扰, 并为区内多种矿产的形成和有规律的分布奠定了一定的基础。其中, 川滇南北向构造是澄江期东西向水平挤压应力作用下形成的, 应为区内形成较早的构造体系, 而金汤弧形构造可能为印支造山运动的产物。在川滇经向构造和印支期金汤弧形构造的复合作用下, 基底地层受到挤压, 发生破碎、层间滑动、褶皱变形, 期间又叠加了大量的韧性剪切构造, 形成至今看到的基本成矿构造空间。南北向构造形迹是壳源岩浆活动的主要通道, 后期在北西向弧形构造、韧性剪切构造的复合作用下, 形成了有利的导矿、容矿空间(杨钻云等, 2013)。在相同构造背景条件下, 不同的岩石类型, 其结构、成岩强度、静力学参数、成岩矿物属性等均不相同, 在相同的定向压力作用下会有不同的变形结果。

通过野外详细的构造观测和中-小尺度构造解析, 区内矿石、脉石矿物在定向压力下的表现方式可定性为塑性矿物的流动、穿刺和硬脆性矿物的碎裂作用。其中塑性矿物包括黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、方解石、绢云母、黑云母等, 黄铁矿在高温高压下可转化为塑性矿物, 这些塑性矿物在构造均向和定向压力作用下发生缓慢的塑性流动, 而石英等脆性矿物漂浮在塑性矿物中与其一道发生流动。在

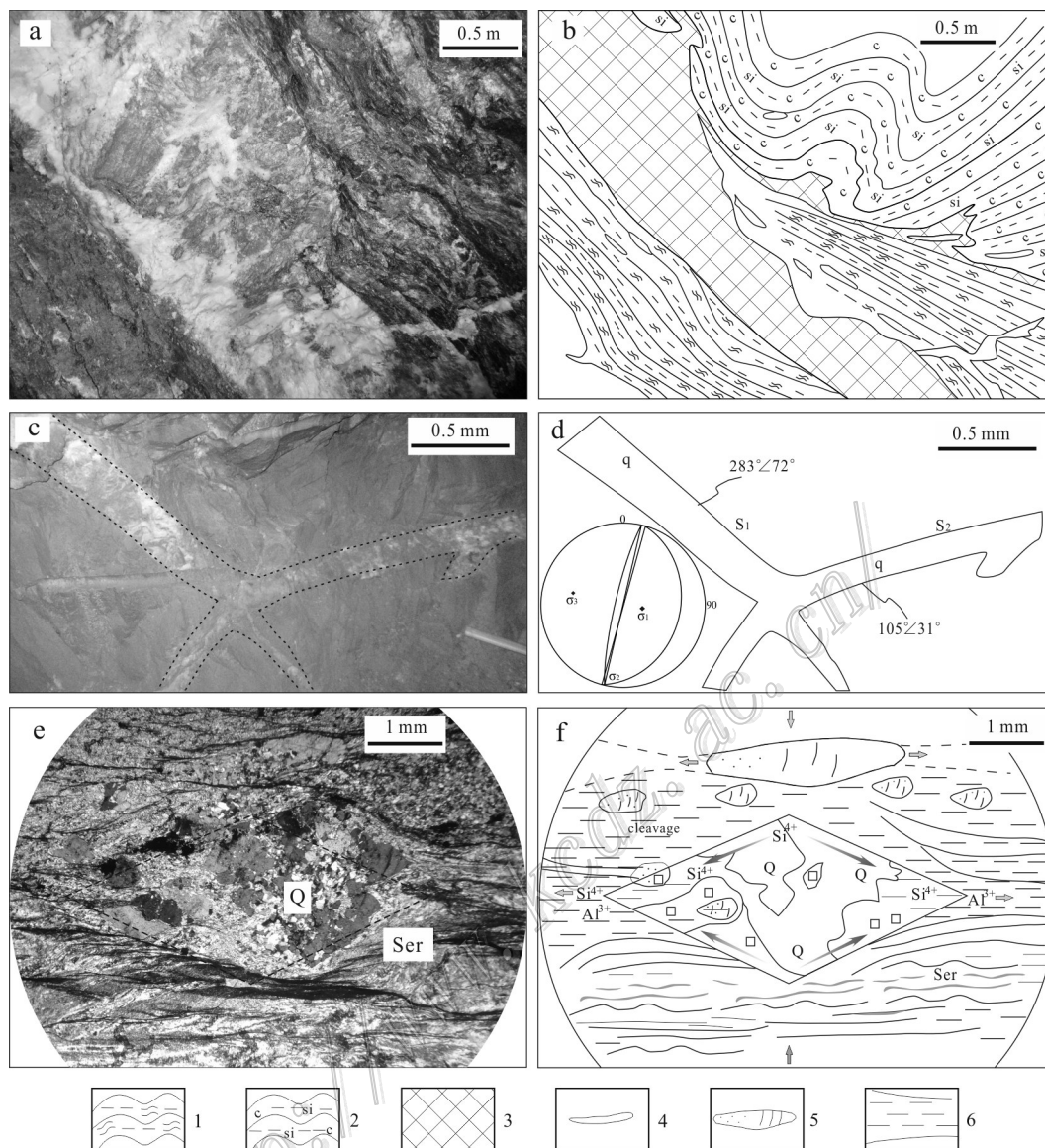


图 6 塑性、硬脆性矿物定向压力下的形变特征

a. 塑性矿物的流动、刺穿作用; b. 图 a 的素描图; c. 硅质板岩 X 型张剪节理; d. 图 c 的素描图; e. 显微镜下矿物晶格内扩散、蠕变流动; f. 图 e 的素描图

1—绢云千枚岩; 2—碳硅质板岩; 3—金矿体; 4—石英脉; 5—变形透镜体; 6—劈理

Q—石英; Ser—绢云母; Si—硅化; q—石英脉; S₁/S₂—“X”型张剪节理;

Si⁴⁺—四价硅离子; Al³⁺—三价铝离子; □—空位

Fig. 6 Deformation characteristics of plastic, hard and brittle minerals under directional pressure

a. The flow and puncture of plastic minerals; b. Fig. a sketch; c. The state of "X" tensile shear joints of siliceous slate; d. Fig. c sketch; e. Lattice (internal) diffusion and creep flow under the microscope; f. Fig. e sketch

1—Sericite phyllite; 2—Siliceous carbon slate; 3—Gold orebody; 4—Quartz vein; 5—Deformation of the lens; 6—Cleavage;

Q—Quartz; Ser—Sericite; Si—Silicification; q—Quartz vein; S₁/S₂—“X” tensile shear joints;

Si⁴⁺—Tetravalent silicon ions; Al³⁺—Trivalent aluminium ions; □—Vacancy

塑性矿物的流动作用下,岩石往往发生塑性变形,劈理、片理发育,矿层发生膨胀和狭缩、鞍部增厚、塑性脉灌入等,以产出构造蚀变岩型金矿为主。矿物塑性流动往往发生在第一褶皱作用阶段,并带动硫化物

矿层、碳硅质板岩、片岩等形成塑流层,随着褶皱回返,均向和定向压力减弱,其塑性流动作用也逐渐被削减,并转变为相对刚性,在之后复合构造作用下,特别是有构造断裂发生时,较刚性的硫化物断块便

刺入塑性围岩中。砂岩、硅质板岩等硬脆性岩石中,极脆性、脆性矿物通常在中低温-中低压的构造动力变质层中被压碎,发生脆性破裂。微观下,矿物的破裂可能与晶体内位错及其运动有关(王全伟等,2003b),在构造应力驱使下,发生晶格(内)扩散,原子、离子和空位蠕变流动,质点从压缩面流向拉伸面,空位由拉伸面流向压缩面,进行质点扩散,微观上常呈菱形形状变形,塑性矿物在拉伸方向具有细颈化破裂,断口呈凹凸状。如石英、长石、方解石、黄铁矿等硬脆性矿物受挤压而发生不同程度的破裂,显微镜下,多呈不规则粒状,颗粒有压扁并呈凹凸接触,且裂纹发育;硅质板岩等硬脆性岩石以“X”型张剪节理、脆性断裂发育为主,形成石英脉型金矿体(图6a~f)。

6 成矿地球动力学环境分析

矿床的形成通常记录了地质作用的过程,建立某一类矿床区域矿产成矿模型等权威性成果对于区域构造背景和区域成矿评价的研究具有重要意义(陈毓川等,2006),应用矿床模型,可以解决找什么类型的矿(卿敏等,2019);而成矿地球动力学环

境分析是从岩石圈及相邻圈层物质和能量迁移交换的角度探讨成矿地质构造环境的时、空演化规律,从而可以解决在什么年代的地质体中寻找形成于什么构造环境的何种类型的矿床(卿敏等,2001)。

在漫长的地质演化过程中,研究区历经中、新元古代和显生宙两大巨型构造旋回,地层岩石伴有大量的张裂、剪裂和微裂隙、裂纹、劈理等,岩石空隙度、渗透率和过渡效应增大;另一方面,构造运动控制了元素在地壳中的分布和分配,使地壳物质发生方向性地球化学改变和变化规律。矿床的形成叠加了被动大陆边缘、活动大陆边缘交替历史条件下岩石圈的伸展、裂陷和收缩、碰撞造山作用,发育大量韧性-脆韧性剪切带构造,成矿地球动力学环境极其复杂;矿床的动力变形样式与构造活动阶段并非同步发育,矿化就位时代滞后于赋矿围岩的剪切变形时代;孔玉金矿区成矿作用仅仅发生在特定的物理化学和地球动力学条件下,依据元素在不同构造类型和单元中分配的规律性,区内有用成矿组分的分散和富集过程可分为矿源层、变质热液初步富集和成矿作用3个阶段(图7a、b)。

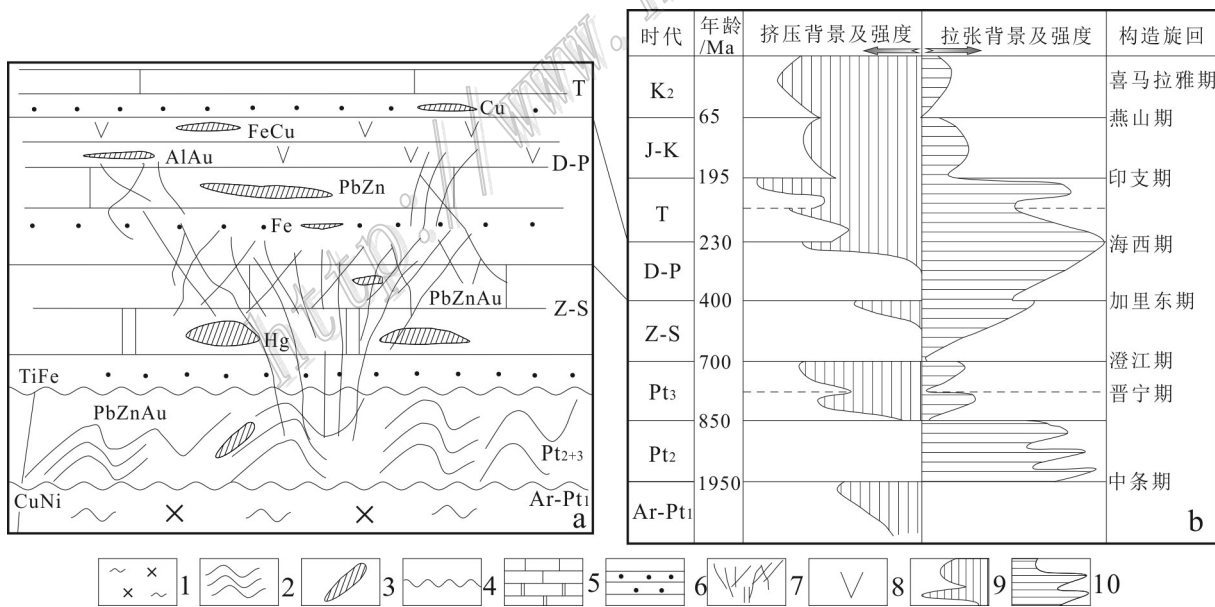


图7 孔玉金矿区综合找矿信息模型(a)与成矿地球动力学环境(b)

- 1—结晶基底;2—褶皱基底;3—元素富集区;4—不整合接触;5—层控海相碳酸盐沉积;6—层控碎屑岩沉积;7—运移通道;8—玄武岩;
- 9—挤压背景及强度;10—拉张背景及强度

Fig.7 Comprehensive prospecting information model (a) and metallogenic geodynamic environment (b) of the Kongyu gold deposit
 1—Crystalline basement; 2—Fold basement; 3—Element-rich area; 4—Unconformity; 5—Stratabound marine carbonate deposits; 6—Stratabound clastic deposits; 7—Migration channel; 8—Basalt; 9—Background and intensity of extrusion; 10—The background and intensity of stretching

矿源层阶段:前震旦系基底岩系作为上覆震旦系沉积物的直接物源,其含金丰度是所有沉积盖层的几倍-数倍;晋宁-澄江期岩石圈收缩、碰撞挤压环境下发展的川滇经向构造体系是壳源岩浆活动主要通道,在一定程度上控制了后期岩层的变形样式和特征,也控制了后期矿床的形态和分布;受东西向水平挤压作用,基底地层发生剪切、破碎、层间滑动、褶皱变形等,含金热液从基底岩系中首次发生运移并在震旦系初步汇集,使震旦系黑色碎屑沉积物中金的含量增高,有些地段直接富集成矿,表明前震旦系基底岩系、震旦系是区内金矿床的主要矿源层。

变质热液初步富集阶段:海西期处于显生宙巨型构造旋回的初始阶段,构造活动为川滇被动大陆边缘裂谷发育期,岩石圈伸展、裂隙拉张,基性-超基性岩浆沿深大断裂向上侵位于泥盆系危关群,炽热岩浆将矿源层中金活化、迁移,并与接触带围岩发生交代形成变质热液,之后沿着深大断裂或裂隙上升,沿千枚岩层间裂隙或基性岩脉的节理裂隙灌入而初步富集。

成矿作用阶段:喜马拉雅期为显生宙巨型构造旋回的晚期阶段,是区内造山型金矿床的重要形成期。由于印度板块和欧亚板块的碰撞,区内再次受到近东西向构造挤压,张性和挤压剪切作用相互叠加,改变了含矿流体的物理化学条件,金的络合物开始分解,围岩发生绢云母化、黄铁矿化、硅化等,载金聚金条件不断成熟,成矿控矿条件不断优化,在金的沉淀和硅质充填作用下,形成石英脉型和破碎带蚀变岩型金矿床。

7 结 论

(1) 区内赋存于沉积盖层泥盆系危关群黑色岩系中的金矿床,是在经历了多期次的运移、富集和演化,并在特定的物理化学条件下形成的,包括石英脉型和破碎带蚀变岩型2种矿石建造。

(2) 矿床的形成叠加了被动大陆边缘、活动大陆边缘交替历史条件下岩石圈的伸展、裂隙和收缩、碰撞造山作用,发育大量的韧性-脆韧性剪切构造;在区域定向压力下矿物的表现方式定性为塑性矿物的流动、穿刺和硬脆性矿物的碎裂作用;成矿有用组分的分散和富集规律包括矿源层、变质热液初步富集和成矿作用3个阶段。

(3) 前震旦系基底、震旦系为区内金矿床的主要矿源层;泥盆系危关群为一套高硫、高碳、高钾的黑色岩系,在挤压条件下,或以离子态进入含矿流体中,共同构成赋矿地层的有机地球化学障;碳质岩层具有还原能力和总体不透水性,使成矿流体中的络合物形式的金还原成单质金,或呈原子、吸附离子赋存于黄铁矿、黄铜矿裂隙中沉淀。

(4) 含矿岩系中氧化物含量除 SiO_2 、 Fe_2O_3 显著偏高外,其他氧化物如 K_2O 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 FeO 等含量均明显偏低;较高的 Fe_2O_3 和较低的 FeO ,表明成矿过程的氧化还原作用,部分 Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+} , Au^+ 、 Au^{3+} 则被还原为 Au^0 并沉淀。

致 谢 野外工作期间,得到了孔玉乡折多村书记陈多刚,村民陈多强、郑应忠等的大力支持;样品的测试工作由西南冶金地质测试所完成;刘肇昌教授在本文修改过程中提出了许多宝贵的意见;评审员审阅了全文并提出了建设性的修改意见,作者借此向他们表示衷心的感谢!

References

- Chen Y J. 2006. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential[J]. *Geology in China*, 33(6): 1181-1193 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y C, Zhu Y S, Xiao K Y, Zhang X H, Mei Y X, Yan S H, Liu Y L, Song G Y, Li C J, Wang Y Y, Dong J H and Li H M. 2006. Division of mineralization province and belts in China[J]. *Mineral Deposits*, 25(Supp.):1-6(in Chinese with English abstract).
- Chen Z L and Liu Y P. 1997. Structure research of the gold ore field on the both sides of the Dadu river in Kangding[M]. Beijing: Geological Publishing House. 5-35(in Chinese).
- Deng J, Zhai Y S and Yang L Q. 1998. On ore-forming system of shear zone tectonics[J]. *Journal of Graduate School, China University of Geoscience*, 12(4): 493-500(in Chinese with English abstract).
- Goldfarb R J, Phillips G N and Nokleberg W J. 1998. Tectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific rim[J]. *Ore Geology Reviews*, 13: 185-218
- Groves D L, Goldfarb R J, Gebre-miriam M, et al. 1998. Orogenic gold deposits: Proposed classification in the context their crustal distribution and relationship to the other gold deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 13:7-27.
- Liu S G, Li Z W, Cao J X, Liu S, Deng B, Wang G Z and Deng B. 2009. 4-D textural and structural characteristics of Longmen intra-continental composite orogenic belt, southwest China[J]. *Chinese Journal of Geology(Scientia Geologica Sinica)*, 44(4): 1151-1179.

- Liu Z C, Li F Y, Zhong K H, Li W and Wen S X. 1996. Tectonic evolution and metallogenesis on the western margin of the Yangtze platform[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press. 206-220(in Chinese).
- Luo H S and Wang S Y. 1982. The geological characteristics of strata-bound gold deposits and prospecting direction in Kangding sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, (2): 1-2(in Chinese).
- No. 606 Team, Southwest Geological Survey Bureau, Ministry of Metallurgy. 1987. Gold abundance statistics of the pre-Sinian strata in the Kangding Group[R]. 12-20(in Chinese).
- Qing M, Lei S B and Mu T. 2001. Analysis of metallogenic geodynamics environment and regional ore-forming prediction[A]. The western region of China gold geological symposium proceedings[C]. 35-43 (in Chinese).
- Qing M, Wang W C, Li W B, Zhang L J, Zhang D and Han X J. 2019. Exploration of porphyry Cu±Mo±Au deposits in island arc and continental margin arc environment: Application of geological indexes[J]. Mineral Deposits, 38(6): 1223-1244(in Chinese with English abstract).
- Tu G C. 1989. Gold several characteristics of China[A]. The international gold geology and exploration of academic conference proceedings[C](in Chinese).
- Wang Q W, Yao S Z and Luo Y N. 2003a. the ore-forming tectonic system and tectonic dynamics of the Micro-dissiminated gold deposits in northwest Sichuan[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press. 23-76(in Chinese).
- Wang Q W, Yao S Z and Liang B. 2003b. Discussion of ore-forming tectonic dynamics of gold deposits in northwest Sichuan Province[J]. Geological Science And Technology Information, 22(4): 80-84(in Chinese with English abstract).
- Wu E H. 2015. Discussion on geological characteristics and metallogenic genesis of Erligou gold deposit in Kangding[D]. Chengdu University of Technology. 10-25(in Chinese with English abstract).
- Xiong F H, Xiao Y F, Sun Y, Huang Y Z, Feng W and Niu G. 2010. Analysis on metallogenic geological conditions and prospecting for Mozigou gold mine in Danba of Sichuan[J]. Metal Mine, 401(1): 103-107(in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Yang J S, Jiang M and Li H B. 1999. Continental subduction and uplifting of the orogenic belts at the margin of the Qinghai-Tibet plateau[J]. Earth Science Frontiers(China University of Geosciences, Beijing), 6(3):139-151(in Chinese with English abstract).
- Yang G Q. 1990. Tectonogeochemistry[M]. Guilin: Guangxi Normal University Press. 10-35(in Chinese).
- Yang Z Y, Zheng H, Li J, Han Y H and Luo F C. 2013. Geological features and prospecting direction of the Xintaizi gold ore field in the northern margin of the Xikang-Yunnan axis[J]. Geology and Exploration, 49(5): 846-854(in Chinese with English abstract).
- Zhang X, Wang X W, Zhao Y and Hou L. 2011. Analysis on ore-controlling structure and metallogenic mechanism of Yanzigou gold deposit in Danba[J]. Nonferrous Metals, 63(3): 19-24(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈衍景. 2006. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. 中国地质, 33(6): 1181-1193.
- 陈毓川, 朱裕生, 肖克炎, 张晓华, 梅燕雄, 闫升好, 刘亚玲, 宋国耀, 李纯杰, 王勇毅, 董建华, 李厚民. 2006. 中国区成矿区(带)划分[J]. 矿床地质, 25(增刊): 1-6.
- 邓智梁, 刘宇平. 1997. 康定大渡河两岸主要金矿区矿田构造研究[M]. 北京: 地质出版社. 5-35.
- 邓军, 翟裕生, 杨立强. 1998. 论剪切带构造成矿系统[J]. 现代地质, 12(4): 493-500.
- 刘树根, 李智武, 曹俊兴, 刘顺, 邓宾, 王国芝, 邓斌. 2009. 龙门山陆内复合造山带的四维结构构造特征[J]. 地质科学, 44(4): 1151-1179.
- 刘肇昌, 李凡友, 钟康惠, 李伟, 文绍先. 1996. 扬子地台西缘构造演化与成矿[M]. 成都: 电子科技大学出版社. 206-220.
- 罗鸿书, 王树印. 1982. 四川康定层控型金矿地质特征及找矿方向[J]. 四川地质学报, (2): 1-2.
- 卿敏, 雷时斌, 慕涛. 2001. 成矿地球动力学环境分析与金矿区域成矿预测[A]. 中国西部地区金矿地质学术讨论会论文集[C]. 35-43.
- 卿敏, 王文成, 李文博, 张乐骏, 张岱, 韩先菊. 2019. 岛弧-陆缘弧环境斑岩 Cu±Mo±Au 矿床勘查: 地质标志应用[J]. 矿床地质, 38(6): 1223-1244.
- 涂光炽. 1989. 中国金矿若干特征[A]. 国际金矿地质与勘探学术会议论文集[C].
- 王全伟, 姚书振, 骆耀南. 2003a. 川西北微细浸染型金矿成矿构造系统及其动力学分析[M]. 成都: 电子科技大学出版社. 23-76.
- 王全伟, 姚书振, 梁斌. 2003b. 川西北地区金矿成矿构造动力学探讨[J]. 地质科技情报, 22(4): 80-84.
- 吴二红. 2015. 康定二里沟金矿床地质特征及成因探讨[D]. 成都理工大学. 10-25.
- 熊发挥, 肖渊甫, 孙燕, 黄耀宗, 冯伟, 牛刚. 2010. 四川丹巴磨子沟金矿成矿条件及找矿前景分析[J]. 金属矿山, 401(1): 103-107.
- 许志琴, 杨经绥, 姜枚, 李海兵. 1999. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起[J]. 地学前缘, 6(3): 139-151.
- 杨国清. 1990. 构造地球化学[M]. 桂林: 广西师范大学出版社. 10-35.
- 杨钻云, 郑辉, 李见, 韩运华, 罗富春. 2013. 康滇地轴北缘新台子金矿区矿床地质特征及找矿方向浅析[J]. 地质与勘探, 49(5): 846-854.
- 冶金部西南地勘局 606 队. 1987. 康定群前震旦系地层含金丰度统计[R]. 12-20.
- 张欣, 汪雄武, 赵岩, 侯林. 2011. 丹巴燕子沟金矿构造控矿特征分析及成矿机制初探[J]. 有色金属, 63(3): 19-24.