

doi: 10.12029/gc20180410

付建刚, 李光明, 王根厚, 黄勇, 张林奎, 董随亮, 梁维. 2018. 北喜马拉雅双穹隆构造的建立: 来自藏南错那洞穹隆的厘定[J]. 中国地质, 45(4): 783–802.

Fu Jiangan, Li Guangming, Wang Genhou, Huang Yong, Zhang Linkui, Dong Suiliang, Liang Wei. 2018. Establishment of the North Himalayan double gneiss domes: evidence from field identification of the Cuonadong dome, south Tibet[J]. Geology in China, 45(4): 783–802(in Chinese with English abstract).

北喜马拉雅双穹隆构造的建立： 来自藏南错那洞穹隆的厘定

付建刚^{1,2} 李光明¹ 王根厚² 黄勇¹ 张林奎¹ 董随亮¹ 梁维¹

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 矿产资源室, 四川 成都 610081;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:错那洞穹隆属于北喜马拉雅片麻岩穹隆带(NHGD)的东南部重要组成部分,是本次研究首次发现并确立的穹隆构造。穹隆位于藏南扎西康矿集区南部,由外向内被两条环形断裂划分为三个岩石-构造单元:特提斯喜马拉雅沉积岩系上部单元、中部单元以及核部,其中内侧断裂为下拆离断层,外侧为上拆离断层。上部单元主要由侏罗系日当组的泥质粉砂质板岩和片岩组成,由外向穹隆中心靠近,根据变质矿物组合特征,其岩性呈较明显的渐变过程,即含或者不含变质矿物的泥质粉砂质板岩、含堇青石粉砂质板岩、含石榴石堇青石粉砂质板岩和含石榴石黑云母粉砂质板岩;中部单元从上至下岩石变质程度逐渐加深,构造变形依次增强,岩性依次为日当组低-高变质的片岩(包括含石榴石黑云母石英片岩、含蓝晶石-十字石二云母石英片岩、含矽线石二云母二长片麻岩)、含电气石(化)花岗质黑云母片麻岩、石榴石云母片麻岩和糜棱状石英二云母片麻岩,其典型变质矿物有石榴石、十字石、矽线石和蓝晶石;核部主要由糜棱状花岗质片麻岩夹少量的副片麻岩和错那洞淡色花岗岩组成。错那洞穹隆主要发育四期线理构造:近N-S向逆冲、N-S向伸展线理、近E-W向线理和围绕核部向四周外侧倾伏线理,分别对应了穹隆构造经历的四期主要变形:初期向南逆冲、早期近N-S向伸展、主期近E-W向伸展和晚期滑塌构造运动,其中主期近E-W向伸展对应于错那洞穹隆的形成,其动力学背景可能是印度板块斜向俯冲及由俯冲引起的中地壳向东流动双重作用。错那洞穹隆的发现和确立丰富了NHGD近E-W向伸展构造,进一步将NHGD划分为由近N-S向伸展所形成的穹隆带(简称NS-NHGD)和近E-W向伸展所形成的穹隆带(EW-NHGD)。

关键词:穹隆;E-W向伸展;错那洞;扎西康;北喜马拉雅片麻岩穹隆带(NHGD)

中图分类号:P542 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2018)04-0783-20

Establishment of the North Himalayan double gneiss domes: evidence from field identification of the Cuonadong dome, south Tibet

FU Jiangan^{1,2}, LI Guangming¹, WANG Genhou², HUANG Yong¹, ZHANG Linkui¹,
DONG Suiliang¹, LIANG Wei¹

收稿日期:2016-05-22;改回日期:2017-08-26

基金资助:国家自然科学基金项目(41602214)、中国地质调查局项目(DD20160015)和国家科学技术部“青藏高原典型矿集区透明化与矿体定位预测”(2016YFC060308)联合资助。

作者简介:付建刚,男,1987年生,博士,主要从事于构造地质与成矿理论研究;Email:fujiangangcd@163.com。

通讯作者:李光明,男,1965年生,研究员,主要从事于矿产资源勘查与评价、区域成矿规律与成矿预测;E-mail:13982257109@163.com。

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The Cuonadong dome, which is firstly reported in this study, is exposed as an east-southern important part of the North Himalayan gneiss domes (NHGD). The Cuonadong dome is located in the southern part of the Zhaxikang ore concentration area, which is divided into three tectono-lithostratigraphic units by two circle faults around the dome, which is geometrically from upper to lower (or from outer to inner) in order of cap rocks, decollement system and core, with the outer fault being upper detachment fault and the inner fault being lower detachment fault. The Cuonadong dome is a magmatic orthogneiss and leucogranite mantled by orthogneiss and metasedimentary rocks, which in turn are overlain by Jurassic metasedimentary and sedimentary rocks. The grades of metamorphism and structural deformation increase towards the core, which is consistent with the low to high degree metamorphic schist, tourmaline granitic biotite gneiss, garnet mica gneiss, and mylonitic quartz mica gneiss of the Ridang Formation. Their typical metamorphic minerals include garnet, staurolite, sillimanite and kyanite. The Cuonadong dome has preserved evidence for four major deformational events: southward thrust, early approximately N-S extensional deformation, main approximately E-W extensional deformation, and late collapse structural deformation around the core of the Cuonadong dome, which are consistent with four groups of lineation, respectively. The form of the Cuonadong dome resulted from the main E-W extension which resulted from eastward flow of middle or lower crust from beneath Tibet accommodated by northward oblique underthrusting of Indian crust beneath Tibet. The establishment of the Cuonadong dome has enhanced and enriched the significance of the E-W extension of the NHGD, which is further divided into two structural dome zones according to the different extensional directions: approximately N-S extensional North Himalayan gneiss domes (NS-NHGD) and E-W extensional North Himalayan gneiss domes (EW-NHGD).

Key words: dome; E-W extension; Cuonadong; Zhaxikang; North Himalayan gneiss domes (NHGD)

About the first author: FU Jiangang, male, born in 1987, Ph.D, majors in structural geology and metallogenic theory; E-mail: fujiangangcd@163.com.

About the corresponding author: LI Guangming, male, born in 1965, professor, engages in mineral resource exploration and metallogenic prediction; E-mail: 13982257109@163.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41602214), Ministry of Science and Technology Program (No. 2016YFC060308), and China Geological Survey Program (No. DD20160015).

1 引 言

喜马拉雅造山带作为全球新生代特提斯—喜马拉雅巨型造山带的重要组成部分,地质构造复杂,岩浆活动频繁,成矿条件优越,是全球地质学家关注的热点(Le Fort et al., 1987; Harrison et al., 1997; Edwards et al., 1999; Zhang et al., 2002; Lee et al., 2004; Yin, 2006; 侯增谦等, 2006a; 侯增谦等, 2006b; Zeng et al., 2011; Mitsuishi et al., 2012; 许志琴等, 2012; 许志琴等, 2013; 郑有业等, 2014)。喜马拉雅造山带由北向南主要由四个构造地层单元组成:特提斯喜马拉雅(TH)、高喜马拉雅(GHS)、低喜马拉雅(LHS)和喜马拉雅前陆盆地(HFB),其构造边界依次为雅鲁藏布江缝合带(ITSZ)、藏南拆离系(STDS)、主中央逆冲断裂(MCT)、主边界逆冲断裂(MBT)和主前锋逆冲断裂(MFT)(Burg and Chen,

1984; Thiede et al., 2006)。自新生代以来,造山带南北两侧分别经历了以挤压和伸展为主的构造变形作用,二者彼此重叠,相互交错。南侧主体是南喜马拉雅逆冲推覆系,包括主中央逆冲断裂(MCT)、主边界逆冲断裂(MBT)和主前锋逆冲断裂(MFT);北侧(即北喜马拉雅带)以发育各种形式伸展构造为特征,如南北向裂(NSTR)、藏南拆离系(STDS)和北喜马拉雅片麻岩穹隆带(NHGD)等,其中NHGD是北喜马拉雅带伸展构造体系中的典型代表(Chen et al., 1990; Lee et al., 2000; Lee et al., 2004)。

NHGD又称北喜马拉雅穹隆带或拉轨岗日变质核杂岩带,呈东西向带状分布于78°E~92°E之间。带内典型的穹隆体自西向东依次为拉轨岗日、马山、定日、麻布迦、康马、然巴和也拉香波等,前人对NHGD的形成机制、构造演化以及典型穹隆体的几何学、运动学等方面已做了大量研究(Chen et al.,

1990; Lee et al., 2000; Lee et al., 2004; Quigley et al., 2006; 张波等, 2006; Kawakami et al., 2007; 张进江等, 2007, 2011; 郭磊等, 2008; Langille et al., 2010; Wagner et al., 2010; Zeng et al., 2011)。尽管这些穹隆具有相似的构造特征,但是它们的形成与演化很明显不是单一构造事件或过程的结果,而是整个造山带发展演化过程中多个不同阶段的综合反映。一方面,NHGD发育有两期不同构造背景的穹隆构造:早期穹隆构造背景为近南北向伸展,如马拉山、麻布迦、康马、也拉香波等;而晚期为近东西向伸展机制。目前NHGD的研究主要集中在近NS向伸展机制下形成的穹隆,在此简称NS-NHGD;而近EW向伸展构造下形成的穹隆(简称EW-NHGD)研究相当薄弱,已报道的仅有Leo Pargil (Thiede et al., 2006; Lederer et al., 2013)、Gurla Mandhata (Murphy et al., 2002; Murphy, 2007; McCallister et al., 2014)、定日(Dewane et al., 2006; Mahéo et al., 2007; Lee et al., 2011; Mitsuishi et al., 2012)和然巴穹隆(张波等, 2006; 郭磊等, 2008)。另一方面,就NHGD的形成机制而言,目前也是存在着如channel flow、底辟、逆冲和拆离断层-变质核杂岩等多种模式的激烈争议(Burg et al., 1984; Le Fort et al., 1987; Chen et al., 1990; Lee et al., 2004; Wagner et al., 2010)。

因此,本文通过详细的野外调查和综合研究,在NHGD的东南部首次发现并确立了错那洞穹隆构造,该穹隆位于扎西康整装勘查区的中南部,距北部也拉香波穹隆约40 km。本文详细报道了错那洞穹隆的岩石-构造单元特征、分析了穹隆构造的几何学和运动学特征,探讨了错那洞穹隆的形成机制。该穹隆构造的确立,为深入理解北喜马拉雅的构造格架、重新认识NHGD的形成机制提供了新的证据和全新的视角。

2 地质背景

北喜马拉雅片麻岩穹隆带(NHGD)属于特提斯喜马拉雅带一部分,整体上位于北边雅鲁藏布江缝合带(ITSZ)和南边藏南拆离系(STDS)中间,自西向东由一系列断续出露的穹隆构造体组成,如拉轨岗日、定日、马拉山、康马、然巴和也拉香波等(图1a)。NHGD内穹隆构造的主体是由大量的花岗岩体和片麻岩以及覆盖其上的浅变质沉积岩组成,其

中花岗岩体的年龄变化范围较大,在43~14 Ma (高利娥等, 2013; Liu et al., 2016a; Liu et al., 2016b; 王晓先等, 2016)。带内发育主要地层为特提斯喜马拉雅岩系(西藏沉积岩系),属于寒武纪至始新世印度大陆被动陆缘海相沉积。NHGD自白垩纪到晚新生代经历了多期构造活动,依次为晚白垩世—古新世与俯冲相关的向南逆冲推覆,始新世—中新世低角度向南逆冲推覆和高角度反向逆冲,形成特提斯喜马拉雅逆冲叠瓦构造和藏南拆离系,中新世晚期南北走向的伸展构造,形成如亚东—谷露等近南北向的裂谷(Armijo et al., 1986; Mercier et al., 1987; Ratschbacher et al., 1994; Quidelleur et al., 1997; Godin et al., 1999; Searle, 1999; Mahéo et al., 2007)。

北喜马拉雅片麻岩穹隆带由变沉积岩、片麻岩和花岗岩组成的核部及低级变质或未变质的沉积岩上部单元构成(Burg et al., 1984; Chen et al., 1990; Lee et al., 2000; Lee et al., 2004; Aoya et al., 2005)。穹隆带内较好的保存了南北向挤压变形及随后垂向减薄和水平拉伸变形、中等温压变质作用和淡色花岗岩侵入的构造痕迹。NHGD沿着走向延伸方向呈现出北喜马拉雅背斜构造,带内的穹隆体均位于北倾的吉隆—康马逆冲断裂(GKT)上盘(图1a)。NHGD主要发育两期构造变形: D_1 和 D_2 ,其中 D_1 以N-S向挤压而引起褶皱和增厚为特征; D_2 变形主要是高应变的垂向减薄和N-S向水平拉伸为特征(Burg et al., 1984; Chen et al., 1990; Lee et al., 2000; Lee et al., 2004)。位于NHGD中东部的康马、然巴和也拉香波穹隆具有相似的岩石-构造组合,均由两条围绕穹隆核部的环形断裂将穹隆划分为上构造层(低级变质的特提斯喜马拉雅沉积岩系)、中构造层(中级变质片岩系)、下构造层(糜棱状片麻岩和核部花岗岩)(Chen et al., 1990; 王根厚等, 1997; Lee et al., 2000; 张进江等, 2007; 郭磊等, 2008; 王晓先等, 2015)3个构造层(图2),其中外侧为上拆离断层,内侧是下拆离断层。

错那洞穹隆位于NHGD的东南边缘,扎西康矿集区南部,距也拉香波穹隆正南约40 km,前人俗称错那洞岩体(图1b)。其地理上位于 92°E 和 28°N 交界附近,靠近错那县吉松镇,出露面积约为 600 km^2 ,平面上呈近圆形。

在较大局域的范围上,错那洞穹隆位于近东西

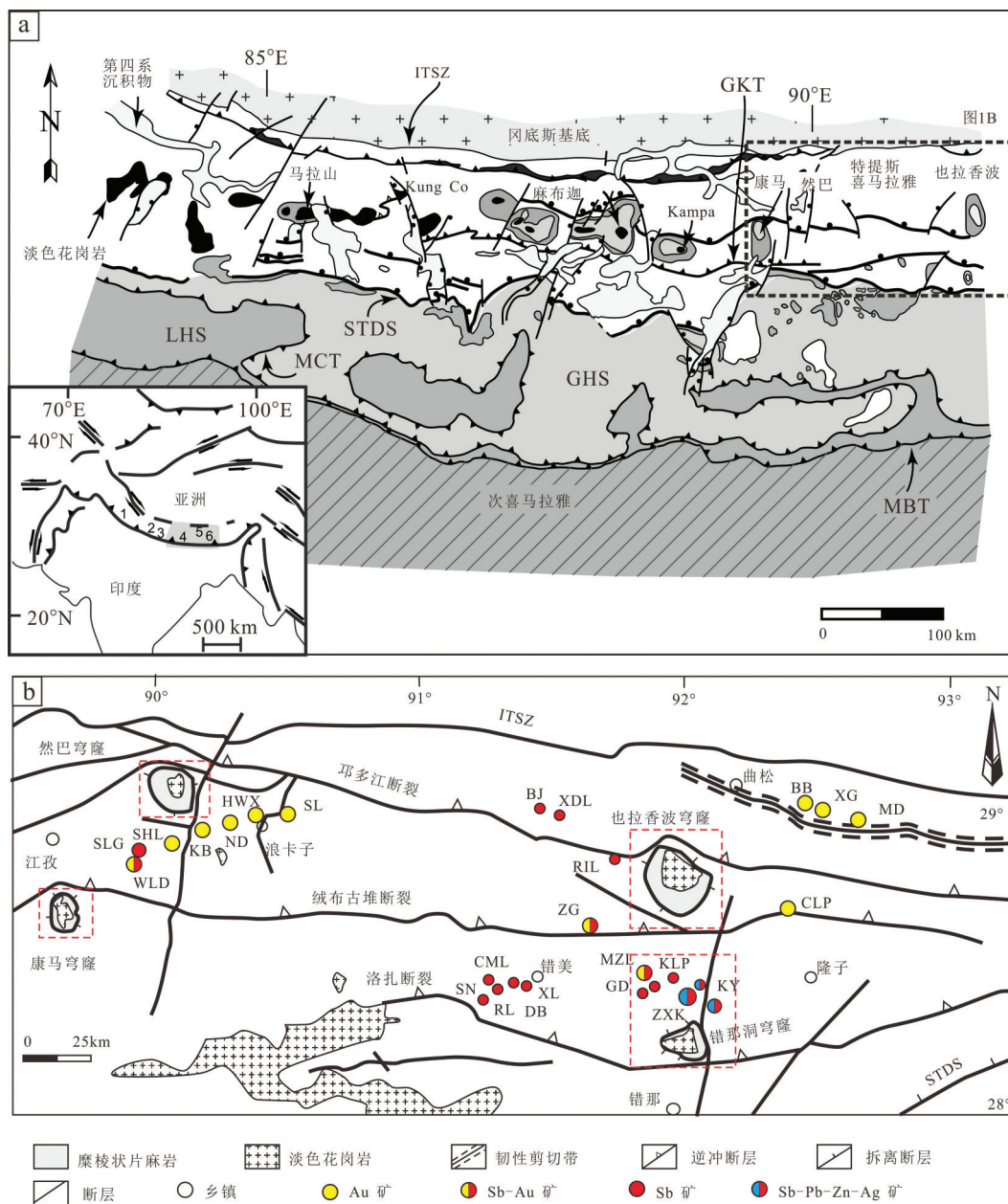


图1 北喜马拉雅构造格架及其矿产分布图

a—喜马拉雅造山带中南部局域构造简图及北喜马拉雅片麻岩穹隆带(NHGD)分布(据Lee et al.,2004修改): GHS—高喜马拉雅, LHS—低喜马拉雅, MBT—主边界逆冲断裂, MCT—主中央逆冲断裂, STDS—藏南拆离系, GKT—吉隆—康马逆冲断裂; b—北喜马拉雅东段构造格架及矿产分布图(据Sun et al., 2016修改), 显示了研究区南部错那洞穹隆位置和离错那洞穹隆较近的相似穹隆构造位置

Fig.1 Tectonic framework and deposits in northern Himalaya

a— Regional tectonic map of the central southern Himalayan orogen including the North Himalayan gneiss domes (NHGD) in southern Tibet, modified after Lee et al. (2004). MBT, Main Boundary Thrust; MCT, Main Central Thrust; STDS, South Tibetan Detachment System; GKT, Gyirong - Kangmar Thrust; NHA, North Himalayan Antiform; ITSZ, Indus - Tsangpo Suture Zone; LHS, Lesser Himalayan Sequence; HHC, Higher Himalayan crystalline series; THS, Tethyan Himalayan sedimentary sequence. Location of Fig. 1b map shown by rectangle in the east. Inset map shows location of regional map, modified after Larson et al. (2010) and King et al. (2011). b—Tectonic map of the eastern North Himalayan gneiss domes and polymetallic metallogenic belt, modified after Sun et al. (2016). Locations of Fig. 2, well-studied domes and typical deposits shown

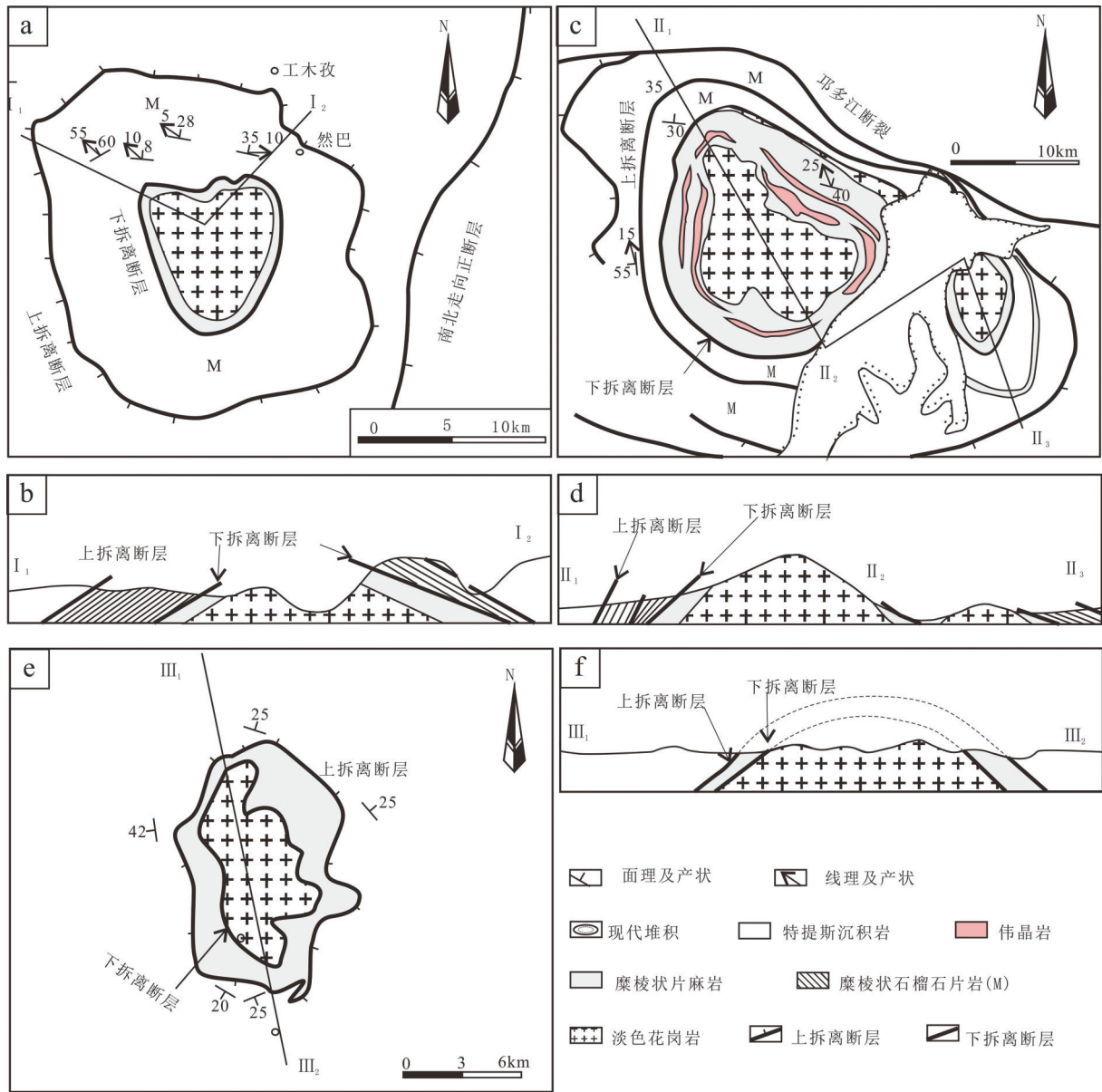


图2 北喜马拉雅中东部穹隆构造地质图(a、c、e)和构造剖面图(b、d、f)

a—然巴穹隆构造地质图;b—然巴穹隆构造剖面图(位置见图2a中I₁和I₂)(张波等, 2006; 郭磊等, 2008);c—也拉香波穹隆构造地质图;d—也拉香波穹隆构造剖面图(位置见图2c中II₁、II₂和II₃)(张进江等, 2007);e—康马穹隆构造地质图;f—康马穹隆构造剖面图(位置见图2e中III₁和III₂)(王根厚等, 1997)

Fig.2 Regional tectonic map of the dome in the mid-eastern Himalaya

a—Geological map of the Ranba dome; b—Structural section crossing the Ranba dome; c—Geological map of the Yelaxiangbo dome; d—Structural section crossing the Yelaxiangbo dome; e—Geological map of the Kangmar dome; f—Structural section crossing the Kangmar dome

走向的绒布—古堆逆冲断裂和洛扎逆冲断裂之间, 其中洛扎逆冲断裂是吉隆—康马逆冲断裂(GKT)向东延伸的一部分;同时该穹隆正好落在近南北向密集分布的洞嘎断裂带上(图1b),该断裂带以发育近南北向的地堑(如串珠状的拿日雍措湖)、大量呈南北向、北东向展布的高角度正断层以及受其控制

的多个矿床为特征,而扎西康矿集区就是其中典型的代表(图3a)。扎西康矿集区出露主要地层为日当组砂页岩、路热组泥晶灰岩、遮拉组泥岩和泥质砂页岩及维美组变质粉砂岩。矿体均产于两组张性构造:即近南北向和北东向断裂构造,并严格受构造控制。近SN向主要控矿断裂分布在区内北

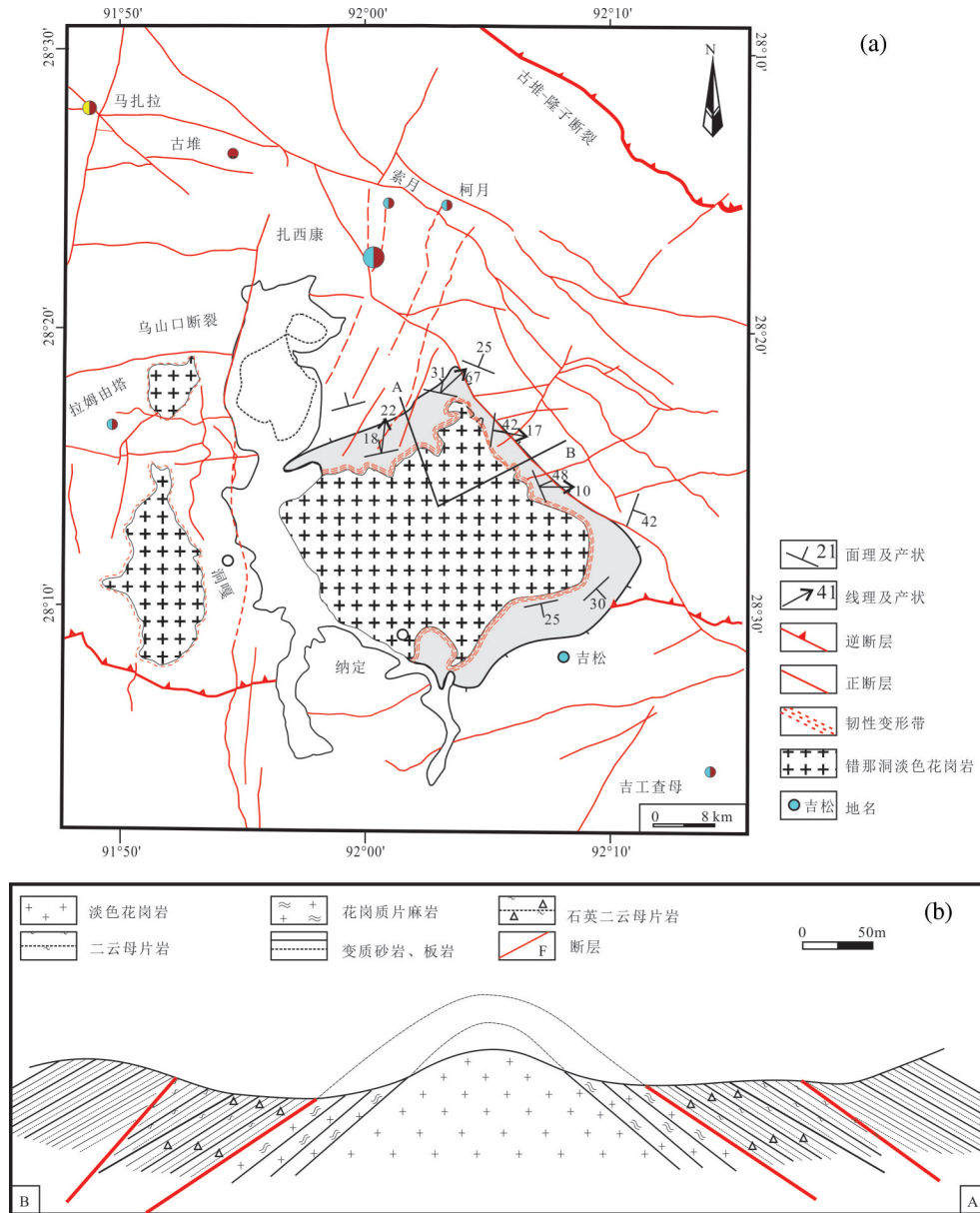


图3 扎西康矿集区南部错那洞穹窿构造地质图(a)和构造剖面图(b)
Fig.3 Geological map of the Cuonadong dome and structural section crossing the Cuonadong dome

部,代表性的有F2、F6和F7,延伸长度分别为1400 m、400 m和600 m左右,断层整体高角度向西倾。近NE向控矿断裂主要分布在矿区南部,以F13和F14为代表,断层高角度倾向NW。

3 错那洞穹窿的岩石-构造组成

错那洞穹窿位于扎西康矿集区南部约10 km,吉松NNW方向约8 km。经本次野外调查和构造剖面测制,错那洞穹窿被两条呈环状围绕穹窿分布的

拆离断层分为三部分,包括上部单元侏罗纪日当组、中部单元、核部错那洞岩体,其中外侧为上拆离断层,内侧为下拆离断层(图3a)。该穹窿岩石-构造单元与NHGD中也拉香波、康马以及然巴穹窿相似(图2)。上部单元地层主要由侏罗纪日当组组成,岩性主要为粉砂质泥岩夹粉砂岩和片岩。构成中部单元的地层为一套浅变质的日当组片岩组合和花岗质片麻岩及少量大理岩化灰岩等;变质程度较浅,原岩为泥质岩、碎屑岩夹碳酸岩的副变质

岩。岩石劈理化发育,变形面以 S_1 为主,产状围绕核部岩体向四周发散;构造置换较为强烈,板岩多见揉皱变形;中部单元内夹有较多花岗岩透镜体。

3.1 上部单元

错那洞穹隆上部单元主要由侏罗纪日当组组成,与下覆中部单元界限为上拆离断层,岩性主要为含十字石石榴石黑云母片岩、含石榴石堇青石粉砂质板岩、含堇青石硬绿泥石粉砂质板岩和泥质粉砂质板岩,特征性变质矿物主要为堇青石、石榴石和十字石,经低级变质作用形成变质砂岩或板岩(图4a),总体为一套半深海斜坡相复理石建造。岩层受区域变质作用,普遍发生浅变质,褶皱变形较为强烈,形成大量倒转褶皱和次级褶皱。该岩石单元岩层产状基本沿着穹隆形态向外低角度缓倾,北侧整体倾向北或北北西或北北东,倾角为 $12^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 。

3.2 上拆离断层

上拆离断层主要发育于穹隆的北侧和东侧以及东南侧,西侧和南西侧被南北向和北西向断裂改造。在穹隆的北侧,断层将上盘的板岩、千枚岩和下盘中部单元中的黑云斜斜片麻岩和含石榴石电气石花岗质黑云母片麻岩分开,上盘砂板岩地层产状整体低角度北倾, $10^{\circ}\angle 38^{\circ}$ 靠近断层位置,发育一系列小型直立褶皱、斜卧褶皱和破劈理;下盘面理产状为 $18^{\circ}\angle 32^{\circ}$,发育一系列强烈变形的不对称褶皱。断层延伸规模长约3 km,宽约10 m,产状为 $22^{\circ}\angle 38^{\circ}$,主要是由砂板岩和云母片岩及石英脉组成的破碎带,野外判断为正断层。穹隆北西侧,断层倾向北西(324°),倾角为 56° ,根据上下盘褶皱变形以及标志层(如石英脉)特征判断为正断层,以发育大量的孔雀石化破碎带为特征,破碎带宽5 m左右。

3.3 中部单元

错那洞穹隆中部单元地层主要由含十字石石榴石云母石英片岩、含蓝晶石云母石英片岩、含矽线石云母石英片岩、含电气石花岗质黑云母片麻岩、石榴石云母片麻岩和糜棱状石英二云母片麻岩组成(图4b、c)。中部单元与上覆上部单元以上拆离断层为分界,与穹隆核部以下拆离断层分界。中部单元内从上至下岩石变质程度逐渐加深,构造变形依次增强,岩性依次为日当组含十字石石榴石云母石英片岩、含蓝晶石云母石英片岩、含矽线石云母石英片岩、含电气石石榴石花岗质黑云母片麻岩

和糜棱状石英二云母片麻岩,局部可见面理置换现象。残余的面理和变余矿物组合特征显示该岩石单元主要由砂岩、粉砂岩和泥岩变质而成,与上覆上部单元可能同属特提斯喜马拉雅沉积岩系。该单元中岩石主要矿物组合为石英+长石+黑云母+白云母,特征变质矿物主要有十字石石榴子石、蓝晶石和矽线石等,其中石榴子石晶形较好,呈旋转斑晶发育;蓝晶石呈扁平的板条状、浅蓝色或者淡蓝白色、局部可见放射状集合体;矽线石单个晶体呈针状或柱状、浅绿色、集合体呈放射状;电气石呈长柱状,局部与石英穿插交错,呈现X型节理的棋盘状特征。该构造层中下部随变形程度的加强而呈现典型糜棱岩构造特征。在穹隆体的北北西侧,石榴石云母片麻岩中发育顺层的花岗质糜棱岩,推测可能是花岗质岩脉顺层侵入之后受强烈韧性变形的结果。此外,靠近下拆离断层的中构造层中发育大量顺层的淡色花岗质岩脉。

中部单元内面状构造和线理构造十分发育,主要见于糜棱状石英二云母片岩和糜棱状浅色花岗岩中。面理主要由暗色矿物或矿物集合体连续定向排列构成,分布较为均匀,透入性较好(图5a)。在强变形的糜棱状石英二云母片岩中,暗色矿物和浅色矿物分异显著,呈明显的面状分布特征,形成条带状糜棱岩。线理主要表现为矿物拉伸线理,由矿物颗粒强烈塑性拉长、定向排列构成(图5a、b、c)。在手标本尺度上,可见同时发育的S和C面理,S面理主要由拉长的透镜状长石和长石集合体以及长石残斑长轴优选方位所显示的斜列面理,C面理由暗色片状矿物集合体定向排列构成。变形较弱的岩石中可见C与S面理斜交形成的“S-C”组构,而在强变形糜棱岩中S面趋于与C面平行(图5c)。

3.4 下拆离断层

下拆离断层是该研究区内变形最为强烈的地质界线,将上部中部单元中糜棱状片岩与核部糜棱状片麻岩分开,主要发育在错那洞穹隆的北侧、东侧以及东南侧。在穹隆北东侧,该断层宽约3 m,主要由糜棱状浅色花岗质片麻岩组成,其矿物组成有长石、石英、白云母、石榴石、少量黑云母和电气石等。该岩石遭受强烈韧性剪切变形形成典型的糜棱状组构,长石、石英斑晶旋转或定向排列或者发生强烈拉伸,石榴石发生明显旋转,白云母和黑云

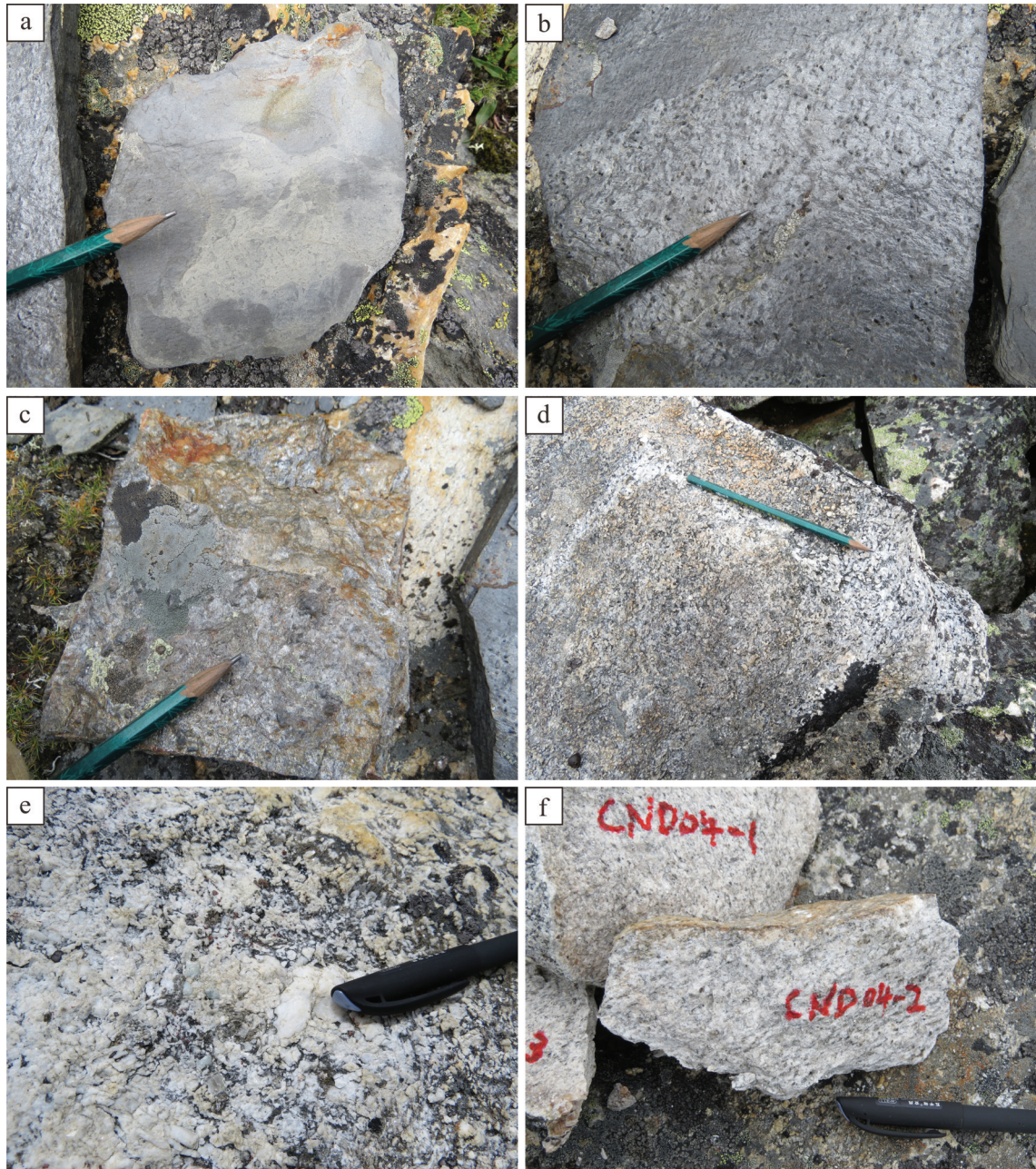


图4 错那洞穹隆构造的野外岩石学特征

a—粉砂质板岩;b—含堇青石石榴石黑云母片岩;c—含电气石石榴石黑云母片岩;d—含电气石花岗质片麻;e—含石榴子石绿柱石伟晶岩;f—淡色花岗岩

Fig.4 Macroscopic petrology ranging from the outermost to the core of the dome (a-f) in the Cuonadong dome

a—Jurassic slate of the Ridang Formation in the upper unit; b—Cordierite-garnet-biotite schist in the middle unit; c—Tourmaline-garnet-biotite schist in the middle unit; d—Tourmaline granitic gneiss; e— Garnet-aquamarine muscovite granite, garnet with red arrow and aquamarine with black arrow; f—Garnet muscovite granite

母严格按照面理排列,与长石或石英或石榴石一起形成典型的S-C组构,断层性质为正断层,其产状为57°∠32°。在穹隆东侧,该断层将上盘含石榴石二云母二长片麻岩和下盘眼球状白云母花岗质片麻岩分开,其

上盘面理产状为98°∠12°,该断层附近发育大量的不对称褶皱、眼球状构造以及δ型旋转斑晶(图7a-d)。

3.5 核部

错那洞穹隆核部主要由糜棱状花岗质片麻岩、

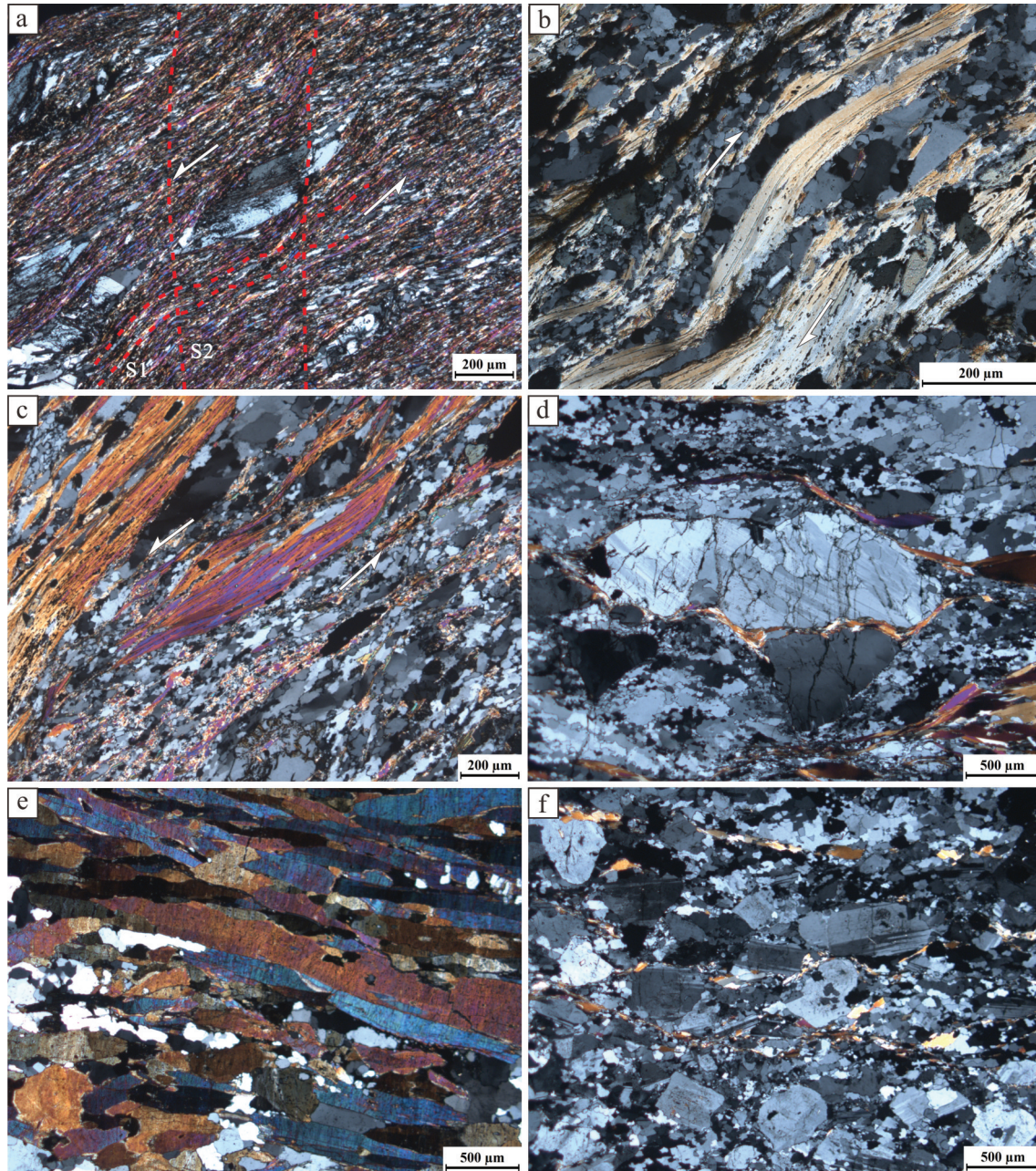


图5 错那洞穹隆构造的微观岩石学特征(正交偏光)

a—含堇青石榴石黑云母片岩,斜长石呈透镜状定向分布,并发生了脆性变形,云母类矿物定向排列,受后期构造变形影响呈褶皱纹理特征,其中S1明显地被S2置换;b—含电气石石榴石云母片岩,云母弯曲,发生韧性变形;c—含电气石石榴石云母片岩,云母鱼构造;d—白云母花岗岩,斜长石呈眼球状构造,并发生了脆性变形,其中围绕长石斑晶的云母和石英均发生韧性变形;e—电气石石英岩,电气石呈长柱状定向分布,其横切面呈较为典型的六面体;f—淡色花岗岩,长石石英准定向排列,表明变形较弱

Fig.5 Microscopic petrology in the Cuonadong dome

a—Cordierite–garnet–biotite schist in the middle unit containing plagioclase porphyroblasts, and S₁ and S₂; b—Tourmaline–garnet–biotite schist in the middle unit containing ductile deformed mica; c—Tourmaline–garnet–biotite schist containing mica–fish structure; d—Muscovite granite containing plagioclase augen and surrounding fine–grained micas and quartzs with ductile deformation; e—Tourmaline granite; f—Weakly deformed muscovite granite in the core

错那洞淡色花岗岩、大量穿插其中的伟晶岩夹少量的副片麻岩和混合岩组成,与上覆中部单元以下拆离断层接触。靠近下拆离断层主体岩性为糜棱状花岗质片麻岩,变形强烈,呈典型糜棱状特征,糜棱面理与下拆离断层产状基本一致。片麻岩与核部的淡色花岗岩体为侵入接触关系。糜棱状花岗质片麻岩主要矿物组合为斜长石、石英、白云母和黑云母等。副片麻岩主要为石榴石二云母片麻岩,矿物组合为斜长石、石英、黑云母、白云母和石榴子石等,呈现出云母富集条带和拉伸石英定向排列形成的条带状构造。穹隆构造的北西或北东侧,片麻岩中发育有顺层侵位的伟晶岩脉(图4e),矿物组合为长石、石英、白云母、绿柱石和石榴石,其中绿柱石晶形保持完好,呈典型的六方柱形态,粒径变化较大,整体上伟晶岩脉属于淡色花岗岩系,变形较弱。

错那洞岩体岩性为淡色花岗岩,即含电气石榴石中粗粒白云母花岗岩和含电气石二云母花岗岩,具中一粗粒结构,块状构造,主要矿物为斜长石、钾长石、白云母和少量黑云母、电气石和石榴子石,副矿物为锆石、独居石、钛铁矿、磁铁矿、磷灰石等,岩相分带不明显,构造变形较弱(图4f,图5f)。岩体内部见大量的伟晶岩,由于整体露头较为破碎,初步判断伟晶岩脉宽度为5~15 m,均切穿片麻岩和中细粒花岗岩,其白云母粒径较大,可达4~5 cm。岩体边界发育由石英长石拉伸及云母的定向排列所形成的透入性面理、线理,其产状整体与围岩一致,但透入性向核部中心方向逐渐减弱,中心部位仅可见矿物微弱定向,靠近岩体边部方向花岗岩变形程度逐渐增强。

4 穹隆构造的运动学特征

4.1 线理构造

根据错那洞穹隆不同构造单元内线理发育的不同方向及其相互关系,初步划分为四期线理构造,其中第一期主要是由北向南逆冲性质的近南北向拉伸线理,第二期以残留的南北向伸展特征的近南北向拉伸线理为主,第三期为近东西向倾伏,是该穹隆的主体透入性线理,第四期则是以穹隆为中心,向四周倾伏的擦痕构造。

第一期向南逆冲特征的近南北向拉伸线理主要发育错那洞穹隆上部单元中的片岩和千枚岩,中部单元中局部出现,主要是浅色矿物如石英和暗色

矿物黑云母等拉伸,同时云母类矿物定向排列而成,并呈现透镜体状、拔丝构造或黏滞性石香肠的特征。这些线理的穹隆北翼向北北东倾伏,倾伏向在 $355\sim 20^\circ$ 之间,倾伏角较缓,在 $15\sim 40^\circ$ 之间变化,不对称褶皱等运动学特征指示该其线理记录了由北向南逆冲运动。

第二期向北伸展特征的近南北向拉伸线理在穹隆上部单元和中部单元中均保存较好,主要表现为石英的拉伸和变质矿物的定向排列(图6a),该组线理整体上呈近南北向倾伏。穹隆北西部该组线理倾伏向 $311\sim 338^\circ$,北侧倾伏向为 5° 。该线理与第一期线理紧密相连,并对第一期线理进行改造,在上部单元砂板岩的手标本上,可见两组线理同时存在,第二期线理明显晚育第一期线理,其运动学特征表明由南向北伸展。

第三期为错那洞穹隆岩石-构造单元的透入性主期线理,代表了穹隆的主期变形。该组线理在穹隆上部单元中除了表现变质矿物的定向排列以及石英的拉伸等特征之外,还发育有褶皱线理。在中部单元中表现为电气石部分变质为黑云母,同时保留了电气石的假晶,并定向排列,石英拉伸、不对称长石碎斑系尾部及压力影构造线理等。核部线理主要发育于正、副片麻岩中,其中副片麻岩主要表现为石英条带、云母定向排列以及长石的强烈拉伸等,呈现典型的条带状片麻岩特征;花岗质片麻岩中表现为石英的旋转拉伸并定向排列,形成了一系列的S-C组构,部分云母随着石英长石斑晶的旋转而发生了扭转或者拉伸,形成了云母鱼或粘滞型香肠构造,石榴石则部分成压力影构造(图6b)。核部淡色花岗岩边部线理比面理更为发育,形成典型的L型构造岩。该组线理整体为近东西向倾伏,在穹隆的北西侧倾伏向为 290° ,北东侧倾伏向为 $50\sim 70^\circ$,倾伏角较缓,在 $10\sim 30^\circ$ 之间变化。

第四期主要是穹隆体四周向外倾伏的擦痕构造及矿物生长纤维(图6c、d),该组线理主要发育于中部单元片岩和核部片麻岩中透入性较差的脆韧性面理之上,这些线理顺着面理倾向倾伏,与穹隆四周外侧倾伏一致(图6e、f),该期线理对上面三期线理均进行了不同程度的改造。

4.2 运动学特征

本次研究针对错那洞穹隆岩石-构造单元特征

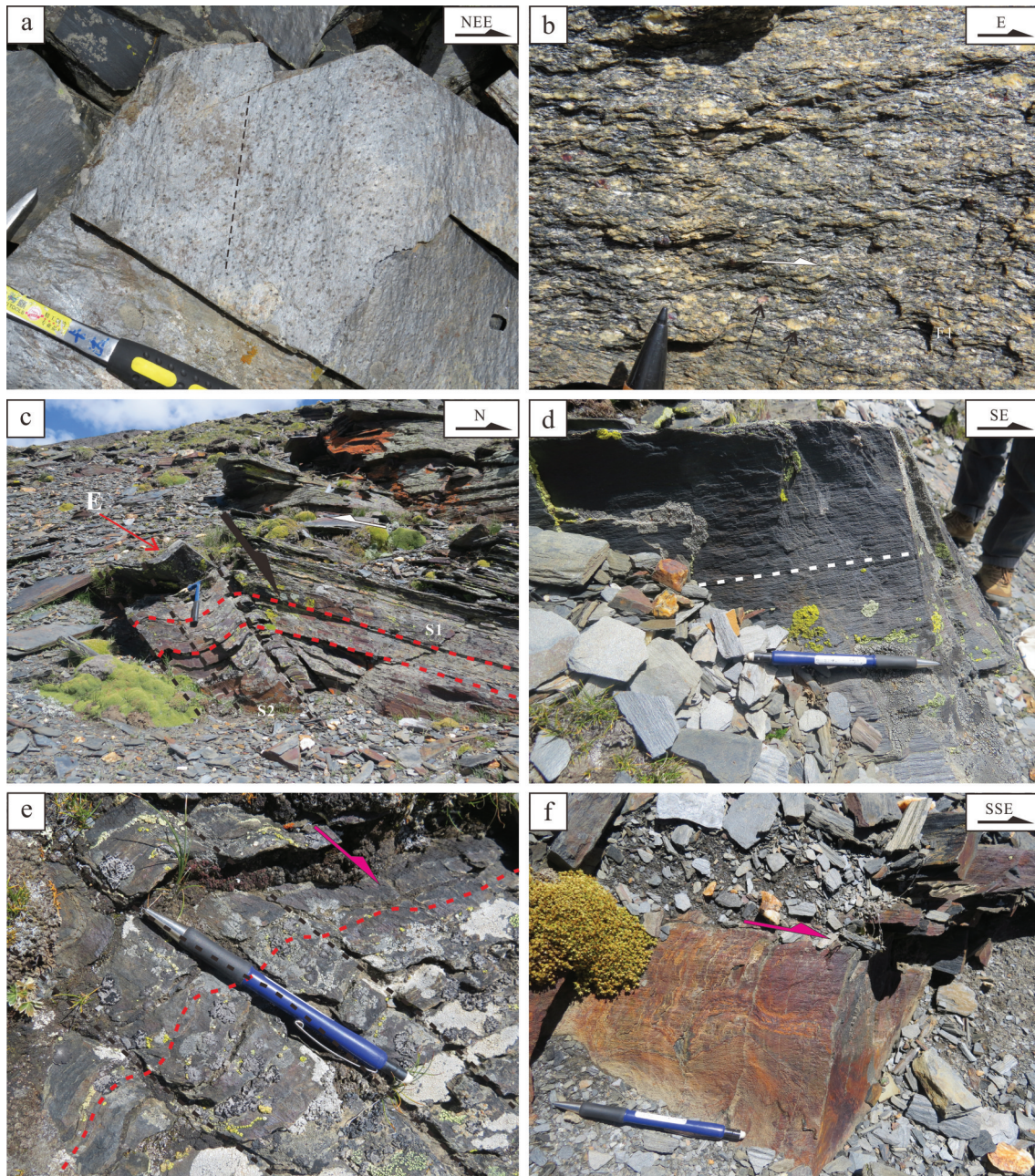


图6 错那洞穹隆中发育的线理特征

a—含堇青石石榴石云母粉砂质板岩中发育的近南北向线理构造,线理由堇青石和云母等矿物定向排列构成;b—含石榴石黑云母花岗岩质片麻岩中发育的近东西向线理构造,线理表现为石英条带、云母定向排列、强烈拉伸的长石以及较长的石榴石压力影(黑色箭头);c—由北向南逆冲形成的S₁面理,该构造被向北伸展所形成的S₂改造;d—错那洞穹隆南部围绕穹隆四周发育的线理L₄;e—错那洞穹隆南部错那洞穹隆南部围绕穹隆四周发育的线理L₄;f—错那洞南部晚期成穹阶段过程中(D₄)擦痕面上发育的阶步

Fig.6 Typical lineations in the different parts of the Cuonadong dome

a—Nearly S-N trending lineation defined by the preferred orientation of mica and cordierite; b—Nearly E-W trending lineation defined by preferred orientation of mica, striped quartz, strongly stretched feldspar and pressure shadows of garnet; c—S₁ and F₁ defined by top-to-S shear deformation, cut by S₂ defined by the top-to-N deformation (D₂); d—L₄ defined by the steps on slickenside on the southern part of the dome, location in Fig. 6c with red arrow; e—S₁ defined by top-to-S shear deformation, which is cut by S₂ defined by the top-to-N (D₂) deformation; f—The steps on slickenside showing D₄ southward sliding on the southern part of the dome

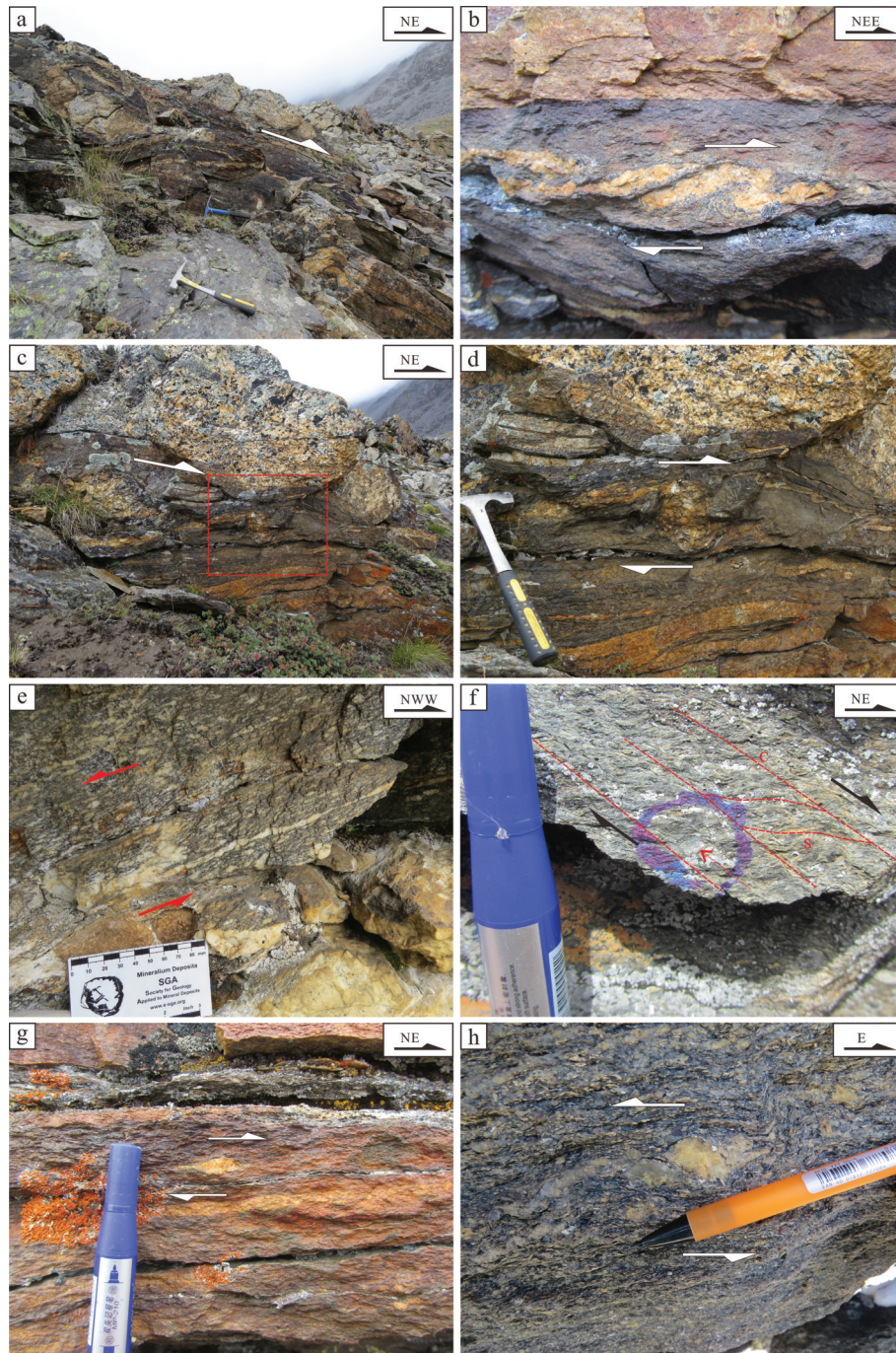


图7 错那洞穹隆中部单元的野外运动学特征

a—错那洞穹隆北东侧中部单元中的滑脱褶皱；b—石英的塑性流变，典型的韧性变形特征，指示右行；c—中部单元中白云母花岗岩呈眼球状构造和 δ 型旋转构造发育于片麻岩中，指示右行；d—c中的放大，白云母花岗岩的 δ 型旋转构造和揉褶皱，指示右行；e—糜棱状花岗质片麻岩中石英呈眼球状构造发育，并定向排列，与暗色矿物一起构成S-C组构，指示左行；f—含石榴子石片岩中发育S-C组构，指示右行；g—花岗质片麻岩中石英呈透镜体发育，指示右行；h—黑云母石英片麻岩中发育的S-C组构，指示左行

Fig.7 Field kinematics in the Cuonadong dome

a—Decollement fold in the middle unit of the Cuonadong dome; b—Plastic flow of quartz; c—Granitic gneiss containing augen structure and δ structure; d—Enlarged Fig. 6c, with δ structure and minor folds; e—Mylonitic granitic gneiss containing augen structure and S-C structure defined by dark-colored mineral zones and feldspar/quartz phenocryst; f—Garnet schist containing S-C structure; g—Granitic gneiss containing lenticular quartz; h—Biotite gneisses containing S-C structure

及线理的分析研究,初步确定该穹隆主要经历了四期变形,与上述四期线理分别对应。

第一期构造变形(初期变形)对应于错那洞穹隆第一期向南逆冲的近南北向拉伸线理,在穹隆南北两侧均有发育,结合北翼第一期线理产状特征,不对称褶皱、石英透镜体以及S-C组构特征综合显示早期向南逆冲的性质。

第二期构造变形(早期变形)对应于穹隆上部单元和中部单元中第二期近南北向倾伏的拉伸线理,以石英透镜体和眼球状构造以及斜卧紧闭褶皱为特征,在穹隆北侧或北西侧,均指示穹隆上部单元和中部单元的上部均经历了整体向北的伸展运动。

第三期是错那洞穹隆的主期变形,对应于近东西向倾伏线理,该线理代表的是统一的上盘向NEE的运动,即穹隆北东侧为正断下滑性质。在穹隆北东侧,不同的岩石-构造单元发育多种不同的运动学标志,其中上部单元中主要表现为不对称褶皱、Z形褶皱、透镜体等。在中部单元中表现出片麻岩中白云母花岗岩的不对称紧闭褶皱(图7a、d),石英的“Z”形揉褶皱(图7b)、眼球状构造(图7c,图8a、f)、旋转碎斑(图7c、d)、含电气石石榴石石英云母片麻岩中S-C面理(图7f,图8e)、石英的透镜体构造(图7g、h)、黑云斜长片麻岩中单斜对称压力影构造(图8b)等,均指示呈右旋的伸展构造特征。核部靠近下拆离断层的糜棱状花岗质片麻岩中发育S-C组构(图7g)、不对称碎斑系(图7g)、动态重结晶(图8h)、云母鱼构造、布丁构造(图8g)、透镜体等,同时也显示出统一的右旋伸展特征。同时糜棱状花岗岩中石英的棋盘状显微亚颗粒构造(图8h)表明花岗岩经历了高温变形作用(500~700°C)。

第四期(即晚期)变形对应于穹隆内后期脆韧性面理上顺面理发育向穹隆外侧四周倾伏的后期线理,主要表现为擦痕和矿物生长纤维,断层面擦痕表现出的阶步以及矿物生长方向表明穹隆外侧垮塌下滑。

5 讨论

5.1 错那洞穹隆的形成机制探讨

前人对北喜马拉雅片麻岩穹隆带(NHGD)的形成机制提出了多种模式,如拆离断层-变质核杂岩模式、底辟、逆冲(断坡)、双冲构造和Channel Flow

等(Burg and Chen, 1984; Burg et al., 1984; Le Fort et al., 1987; Chen et al., 1990; Lee et al., 2000; Lee et al., 2004; Lee et al., 2006; Lee and Whitehouse, 2007; Wagner et al., 2010; Ding et al., 2016)。错那洞穹隆位于NHGD的东南端,是本次研究在NHGD中新发现的穹隆构造。明显地,单一的成因模型无法解释该穹隆发育的多期构造运动特征。

错那洞穹隆发育两期近南北向的线理构造在上部单元和中部单元中均有保留,指示了错那洞地区分别经历初期向南的挤压逆冲作用和早期向北的伸展运动特征,其中早期伸展特征可能是藏南拆离系(STDS)在特提斯喜马拉雅沉积岩系向北拆离作用的一种表现,类似的现象在NHGD其他穹隆中均有相似的运动学特征报道,如康马穹隆(Lee et al., 2000)、麻布迦穹隆(Lee et al., 2006; Langille et al., 2010)和也拉香波穹隆(张进江等, 2007)等。

错那洞穹隆近东西向线理构造对应主期变形运动,该运动特征与NHGD中其他穹隆如也拉香波穹隆、康马穹隆、麻布迦穹隆、哈金桑惹和马拉山穹隆明显不同,这些穹隆的主期变形为近南北向的构造运动,与STDS的南北向伸展密切相关;而与NHGD中的然巴穹隆(郭磊等, 2008)、定日穹隆(Lee et al., 2011)以及西部的Leo Pargil(Thiede et al., 2006)和Gurla Mandhata穹隆(Murphy et al., 2002)基本一致,这些穹隆均发育于近南北向的地堑和密集的断裂带上,对应于北喜马拉雅带南北向裂谷系的近东西向伸展作用。张进江等(2007, 2011)对也拉香波穹隆和马拉山穹隆进行了详细的构造分析,提出NHGD的形成与STDS的伸展减薄相关。STDS的南北向伸展减薄引发广泛的部分重熔,导致大规模的花岗岩侵位,其底辟作用形成NHGD;马拉山穹隆作用和最后底辟作用的时间为17~15 Ma,随后,约13 Ma,北喜马拉雅构造体制由南北向伸展开始转换为近东西向伸展(张进江等, 2011)。Kawakami等(2007)获得马拉山穹隆的侵位时间为18.5~15.3 Ma,冷却年龄为15.9 Ma,其中花岗岩岩体侵位时间与主期变形即D₂伸展(N-S向伸展)时间基本一致,其深度约在15.2 km,该穹隆构造是STDS北侧的一个组成部分(Kawakami et al., 2007)。麻布迦穹隆的形成在某种程度上受绝热加压环境下混合岩上涌的底辟作用和同时期南北向

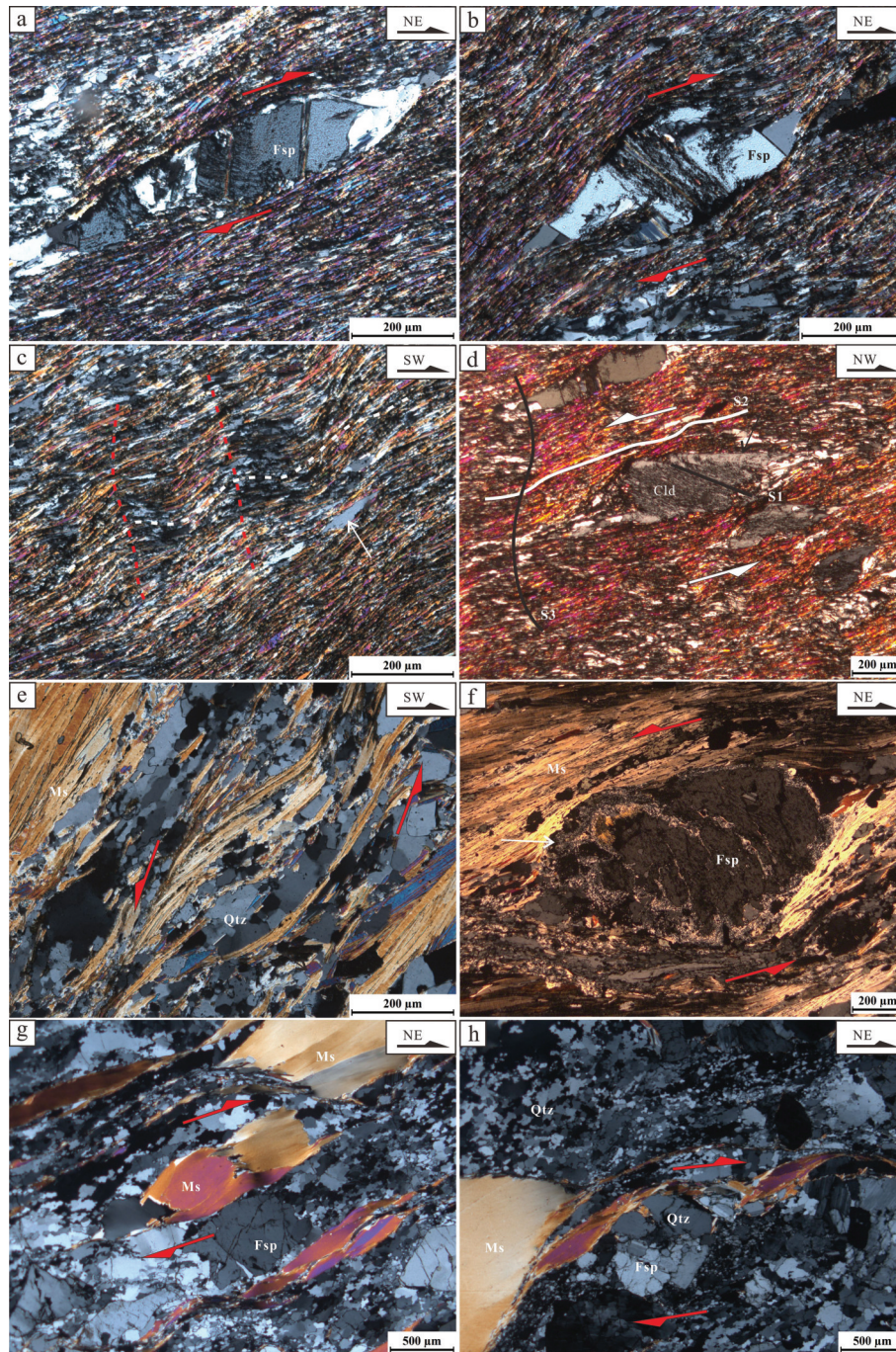


图8 错那洞穹隆中部单元的微观运动学特征

a—含石榴石黑云母石英片岩中眼球状构造,长石发生了脆性断裂,其裂隙被云母充填,指示右行;b—含石榴石黑云母石英片岩中单斜对称压力影构造,指示右行;c—含石榴石黑云母石英片岩中的褶皱线理;d—含石榴石黑云母石英片岩中的眼球状构造和石英包体的残留,指示左行;e—含电气石花岗质黑云母片麻岩中S-C组构,指示左行;f—含电气石花岗质黑云母片麻岩中的眼球状构造和反应边构造,指示左行;g—糜棱状白云母花岗岩中白云母被韧性拉长,呈拔丝特征,指示右行;h—糜棱状白云母花岗岩中动态重结晶和石英的棋盘状亚颗粒构造,指示右行;Fsp—长石;Cld—硬绿泥石;Ms—白云母;Qtz—石英

Fig.8 Microscopic kinematics in the Cuonadong dome

a—Garnet-biotite schist containing augen structure, and feldspar with brittle fracture locally filled by mica; b—Garnet-biotite schist containing asymmetric strain shadows; c—Relationship between S_2 and S_3 ; d—Garnet-biotite schist containing augen structure and exsolution of quartz in the core; e—Granitic gneiss containing S-C structure; f—Granitic gneiss augen structure and reaction rim; g—Mylonitic granitic gneiss containing ductile deformation in mica with boudin structure; h—Mylonitic granite containing dynamic crystallization and chessboard subgrain microstructures in quartz; Fsp—feldspar; Cld—chloritoid; Ms—muscovite; Qtz—quartz

韧性伸展垮塌共同影响,同时在深部的花岗质岩体为其提供热驱动力(Lee et al., 2004)。康马穹隆在构造、变质和冷却历史记录上与麻布迦穹隆相似,其形成机制略有不同,主要体现在侵入历史方面,其成穹过程是加热的中地壳向上沿着吉隆—康马逆冲断层(GKT)逆冲在向北倾的断坡之上的结果(Chen et al., 1990; Lee et al., 2000)。整体上,这些与南北向伸展构造密切相关的穹隆,如康马、麻布迦、Kampa和马拉山,呈现出以下一些相同的特征:(1)围绕穹隆核部的变沉积岩(上部单元和中部单元)中发育两组透入性的变形构造样式 D_1 和 D_2 ,其中越靠近核部, D_2 变形越强;(2)在片麻质或者花岗质核部的最外部发育强烈的 D_2 组面理;(3)近N-S向拉伸线理与 D_2 组面理一致;(4) D_1 构造变形以发育由N-S向挤压收缩和垂直加厚而导致的中高角度S1面理为特征;(5)穹隆中垂向减薄—水平拉伸作用、变质作用、混合岩的出现以及淡色花岗岩的侵位等事件与高喜马拉雅(GHS)一致;(6)不同穹隆中 D_2 伸展变形的动力学特征和构造深度各不相同,表明藏南中地壳韧性伸展变形的深度沿着NHGD走向而变化(Aoya et al., 2005; Lee et al., 2006; Quigley et al., 2006; Quigley et al., 2008; Langille et al., 2010)。因此,这些穹隆构造与STDS南北向伸展密切相关,其形式时间也相对较早(18~11.3 Ma),这些穹隆自西向东组成的穹隆带简称为NS-NHGD,是北喜马拉雅近南北向伸展体制的重要组成部分。

错那洞穹隆发育早期近南北向伸展线理构造表明该穹隆早期(即成穹隆阶段之前)也经历了NHGD中近N-S向伸展构造运动。然而错那洞穹隆没有在NHGD中整体为N-S向伸展体制下成穹,可能的原因是控制成穹隆构造的 D_2 伸展变形的动力学机制和构造深度随着平行于NHGD走向的中地壳N-S向韧性伸展变形的深度而变化(Wagner et al., 2010)。如马拉山穹隆,花岗岩侵位到STDS之上的特提斯喜马拉雅中上构造水平中而引起的主体向北剪切伸展,其构造深度约为10 km(Kawakami et al., 2007);Kampa穹隆,顺着STDS滑动而引起地壳伸展导致整体向北伸展,其构造深度约为>16 km(Quigley et al., 2006; Quigley et al., 2008);而麻布迦穹隆, D_2 伸展变形的深度在20~25 km(Lee et al., 2004)。在区域构造上,造山带NS向

挤压与EW向伸展的转换机制是由于区域构造应力场的重组,即 σ_1 变为竖直、 σ_3 呈水平的东西向(Thiede et al., 2006)。在该构造背景下,以主导性NS挤压机制下的局部NS向伸展作用形成了早期穹隆带,即NS-NHGD(Burg et al., 1984; Lee et al., 2000);而相对年轻的穹隆带(EW-NHGD)则由EW向伸展的新构造所引起。

NHGD中与近东西向伸展构造运动相关的穹隆(EW-NHGD)目前已经报道的有定日和然巴穹隆。郭磊等(2007)认为然巴穹隆的形成与青藏高原广泛发育的近南北向裂谷有关,是东西向伸展和底辟作用共同作用的结果,其时间约为6 Ma。Mitsuishi等(2012)报道了近N-S向Kung Co断裂局部表现为一高应变韧性变形,是东西向伸展的结果,其变形时间与定日花岗岩侵入时间一致(约19 Ma),是目前藏南所报道近东西向伸展活动开始的最早时间,并指出在19 Ma喜马拉雅造山带近南北向伸展和近东西向伸展同时进行。

喜马拉雅造山带近东西向地壳伸展作用的驱动机制存在众多争议,根据应力情况主要分为两大类:即应力恒定和应力变化。应力恒定的机制又可分为两种:1)印度板块沿着轻微滑动的弧形板块边界斜向俯冲于西藏地块而引起的基底剪切作用(McCaffrey and Nabelek, 1998; Liu and Yang, 2003);2)岩石圈的下挠和弧形弯曲(Klootwijk et al., 1985)。应力变化以及随后重力扩散而引起的机制包括以下几种:(1)岩石圈地幔的消除(England and Houseman, 1989; Molnar et al., 1993; Jiménez-Munt and Platt, 2006);(2)上地壳和地幔中热的结构和密度分布的变化(Blisniuk et al., 2001);(3)下地壳内低黏度物质的流动(Shen et al., 2001; Copley and McKenzie, 2007; Cook and Royden, 2008);(4)印度岩石圈向下俯冲至西藏的南部(DeCelles et al., 2002);(5)正在上涌的地幔终止以及沿着亚洲板块东部边缘的弧后扩展(Yin, 2010);(6)中地壳或下地壳向东流动(速度为 $2V_0$)以及印度板块向北俯冲(向北迁移速度为 V_0)(Lee et al., 2011);(7)西藏地壳呈放射状向南流动从而导致中地壳的N-S向伸展和上地壳W-E向伸展同时进行(Mitsuishi et al., 2012);(8)斜向汇聚(Oblique Convergence)(Styron et al., 2011)。北喜马拉雅近东西向伸展作用在

NHGD中的定日穹隆和然巴穹隆表现更为具体。定日穹隆的构造位置处于定日区域性N-S向断裂的东边,然巴穹隆则属于亚东—谷露裂谷系,其东部边界被一近南北向正断层切割,该断层可能是亚东—谷露裂谷系的组成部分,该穹隆主变形时间(6 Ma)与该区域发育的南北向裂谷系活动时间相近。错那洞穹隆在构造变形、构造位置与定日、然巴穹隆相似,主期变形都经历了近东西向的伸展构造运动,构造位置处于近南北走向的洞嘎正断层带,穹隆西侧边界与一南北走向的乌山口正断层相切,该断层同样属于洞嘎正断层带的一部分。此外,定日穹隆、然巴穹隆以及错那洞穹隆均位于吉隆—康马逆冲断裂(GKT)的北侧,该逆冲断裂的活动时间约为11 Ma,其变化范围为15~5.5 Ma(Lee et al., 2011),结合NS-NHGD活动时间(18~11.3 Ma),GKT与NS-NHGD密切相关,因此推测GKT时间约为15 Ma较为合理。在Kung Co、然巴和错那洞穹隆区,GKT分别被Kung Co、亚东裂谷系和乌山口近南北向正断层切割,其中Kung Co正断层开始活动的时间在13~12 Ma(Lee et al., 2011),亚东—谷露裂谷系活动时间约为8 Ma(Harrison et al., 1995),错那洞穹隆北部NS向控矿断裂活动时间约为12 Ma(梁维等, 2015),表明与东西向伸展机制相关的近南北走向正断层活动晚于GKT的活动时间。

综上所述,错那洞穹隆作为NHGD的重要组成部分,与Kung Co和然巴穹隆相似,均属于近东西向伸展构造运动的结果,其动力学机制可能是印度板块斜向俯冲及由俯冲引起的中地壳向东流动。

5.2 错那洞穹隆的确立对北喜马拉雅构造认识的意义

已有研究表明,北喜马拉雅片麻岩穹隆带(NHGD)作为一个独立的构造带,其形成过程一直以来被认为是某个单一的成因模型或者动力学机制或者构造事件作用的结果,具有统一的构造背景(Lee et al., 2000; Lee et al., 2004; Aoya et al., 2005; 张进江 et al., 2007; 张进江 et al., 2011)。发育于其中的淡色花岗岩和高喜马拉雅淡色花岗岩在形成时间、地质背景和构造成因等方面均具有高度相似性(Lee and Whitehouse, 2007),二者均是与伸展构造相关,白云母脱水熔融作用的结果(张宏飞 et al., 2005; Kawakami et al., 2007),因此在某种程度上,

NHGD中的淡色花岗岩是高喜马拉雅淡色花岗岩向北的延续。近年来,越来越多的研究表明,NHGD中不仅仅发育与南北向伸展构造运动相关的穹隆,代表性的有也拉香波、康马、麻布迦以及马拉山等穹隆,同样也发育在近东西向伸展体制下的穹隆构造,如定日和然巴穹隆,整体上,东西向伸展构造的活动时间明显晚于南北向伸展构造。

错那洞穹隆作为NHGD中一个新发现的穹隆构造,主期变形呈现近东西向伸展构造运动特征,从而为EW-NHGD提供一个重要支撑点。目前,东西向伸展构造机制下所形成的穹隆研究相对较少,其中以定日穹隆研究最为成熟。Lee et al.(2011)提出定日穹隆的形成机制是印度板块向北俯冲以及伴随着俯冲所引起的中地壳或下地壳向东流动二者共同作用的结果,其中向东流动的速度是印度板块向北迁移速度的2倍;Mitsuishi et al.(2012)认为西藏地壳呈放射状向南流动导致了中地壳以N-S向伸展的韧性变形、上地壳以W-E向伸展的脆性变形以及定日穹隆同时出现。结合上述关于近东西向伸展机制中的斜向汇聚模式,三者共同的特征是有向东的运动分量。故不论何种模型,在北喜马拉雅构造演化中,地壳向东运动分量是形成NHGD中近东西向伸展穹隆构造不可或缺的要害。另一方面,印度板块的斜向俯冲已是不争的事实。因此,印度板块向北斜向俯冲以及由其所引起的西藏地壳向东流动是形成错那洞穹隆的机制。自此,由本文所研究的错那洞穹隆和然巴、定日穹隆以及西部的Leo Pargil和Gurla Mandhata穹隆共同组成了NHGD中近东西向伸展体制的穹隆带,即EW-NHGD,该穹隆带明显不同于自东向西依次由也拉香波、康马、麻布迦和马拉山等穹隆组成的近南北向伸展所形成的穹隆带,即NS-NHGD。

6 结 论

(1)错那洞穹隆位于NHGD的东南部,是本次研究首次发现并确立的穹隆构造。

(2)错那洞穹隆由上部单元、中部单元和核部三部分组成,分别以上拆离断层和下拆离断层为界。

(3)错那洞穹隆发育四期主要的线理构造:近N-S向挤压和近N-S向伸展、E-W向和四周向外倾伏的线理,分别对应四期构造运动:早期N-S向挤压、

N-S向伸展、主期E-W向伸展和晚期垮塌构造。

(4)北喜马拉雅片麻岩穹隆带(NHGD)由NS-NHGD和EW-NHGD组成,其中EW-NHGD明显晚于NS-NHGD。

致谢:野外地质调查得到了中国地质调查局成都地质调查中心的周邦国、吴建阳、张志、卿成实和西藏华钰矿业股份有限公司的专家和同行的热心帮助,室内显微镜微观观察得到了中国地质调查局成都地质调查中心廖光宇老师的鼎力帮助;同时审稿专家在本文修改过程中提出了建设性意见,在此一并表示衷心的感谢。

References

- Aoya M, Wallis S R, Terada K, Lee J, Kawakami T, Wang Y, Heizler M. 2005. North-south extension in the Tibetan crust triggered by granite emplacement[J]. *Geology*, 33(11): 853-856.
- Armijo R., Tapponnier P, Mercier J L, Han T-L. 1986. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B14): 13803-13872.
- Blisniuk P M, Hacker B R, Glodny J, Ratschbacher L, Bi S, Wu Z, McWilliams M O, Calvert A. 2001. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago[J]. *Nature*, 412(6847): 628-632.
- Burg J P, and Chen G M. 1984. Tectonics and structural zonation of southern Tibet, China[J]. *Nature*, 311(5983): 219-223.
- Burg J P, Guiraud M, Chen G M, Li G C. 1984. Himalayan metamorphism and deformations in the North Himalayan Belt (southern Tibet, China) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 69(2): 391-400.
- Chen Z, Liu Y, Hodges K V, Burchfiel B C, Royden L H, Deng C. 1990. The Kangmar Dome: A Metamorphic Core Complex in Southern Xizang (Tibet) [J]. *Science*, 250(4987): 1552-1556.
- Cook K L, Royden L H. 2008. The role of crustal strength variations in shaping orogenic plateaus, with application to Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B8): 1-18.
- Copley A, McKenzie D. 2007. Models of crustal flow in the India-Asia collision zone[J]. *Geophysical Journal International*, 169(2): 683-698.
- DeCelles P G, Robinson D M, Zandt G. 2002. Implications of shortening in the Himalayan fold-thrust belt for uplift of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 21(6): 1-12.
- Dewane T J, Stockli D F, Hager C, Taylor M, Ding L, Lee J, Wallis S. 2006. Timing of Cenozoic E-W Extension in the Tangra Yum Co-Kung Co Rift, south-central Tibet. *Agu Fall Meeting Abstracts*, 87: 1-2.
- Ding H, Zhang Z, Dong X, Tian Z, Xiang H, Mu H, Gou Z, Shui X, Li W, Mao L. 2016. Early Eocene (ca. 50 Ma) collision of the Indian and Asian continents: Constraints from the North Himalayan metamorphic rocks, southeastern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 435: 64-73.
- Edwards M, WSF K, Li J, Roden-Tice M, Copeland P. 1999. The Karo-La Décollement, southern Tibet: A Himalayan extensional structure domed by emplacement of the Late Miocene Karo-La Granite[J]. *Geophys. Res.*, 99: 40-45.
- England P, Houseman G. 1989. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B12): 17561-17579.
- Gao Lie, Zeng Lingsen, Wang Li, Hou Kejun, Guo Chunli, Tang Suohan. 2013. Age and formation mechanism of the Malashan high-Ca two-mica granite within the Northern Himalayan Gneiss Domes, southern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1995-2012(in Chinese with English abstract).
- Godin L, Brown R L, Hanmer S, Parrish R. 1999. Back folds in the core of the Himalayan orogen: An alternative interpretation[J]. *Geology*, 27(2): 151-154.
- Guo Lei, Zhang Jinjiang, Zhang Bo. 2008. Structures, kinematics, thermochronology and tectonic evolution of the Ranba gneiss dome in the northern Himalaya[J]. *Progress in Natural Science*, 18(06): 640-650(in Chinese).
- Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, Lovera O M. 1995. Activation of the Nyainqentanghla Shear Zone: Implications for uplift of the southern Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 14(3): 658-676.
- Harrison T M, Lovera O M, Grove M. 1997. New insights into the origin of two contrasting Himalayan granite belts[J]. *Geology*, 25(10): 899-902.
- Hou Zengqian, Pan Guitang, Wang Anjian, Mo Xuanxue, Tian Shihong, Sun Xiaoming, Ding Lin, Wang Erqi, Gao Yongfeng, Xie Yuling, Zeng Pusheng, Qin Kezhang, Xu Jifeng, Qu Xiaoming, Yang Zhiming, Yang Zhusen, Fei Hongcai, Meng Xiangjin, Li Zhenqing. 2006a. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(05): 521-543(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Yang Zhusen, Meng Xiangjin, Li Zhenqing, Yang Zhiming, Zheng Mianping, Zheng Youye, Nie Fengjun, Gao Yongfeng, Jiang Sihong, Li Guangming. 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: 2. Mineralization in post collisional extension setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(06): 629-651 (in Chinese with English abstract).
- Jiménez-Munt I, Platt J P. 2006. Influence of mantle dynamics on the topographic evolution of the Tibetan Plateau: Results from numerical modeling[J]. *Tectonics*, 25(6): 1-17.
- Kawakami T, Aoya M, Wallis S, Lee J, Terada K, Wang Y, Heizler M. 2007. Contact metamorphism in the Malashan dome, North Himalayan gneiss domes, southern Tibet: an example of shallow extensional tectonics in the Tethys Himalaya[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(8): 831-853.
- King J, Harris N, Argles T, Parrish R, Zhang H. 2011. Contribution of crustal anatexis to the tectonic evolution of Indian crust beneath

- southern Tibet[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 123(1/2): 218–239.
- Klootwijk C T, Conaghan P J, Powell C M. 1985. The Himalayan Arc: large-scale continental subduction, oroclinal bending and back-arc spreading[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 75(2/3): 167–183.
- Langille J, Lee J, Hacker B, Seward G. 2010. Middle crustal ductile deformation patterns in southern Tibet: Insights from vorticity studies in Mabja Dome[J]. *Journal of Structural Geology*, 32(1): 70–85.
- Larson K P, Godin L, Davis W J, Davis D W. 2010. Out-of-sequence deformation and expansion of the Himalayan orogenic wedge: Insight from the Changgo culmination, south central Tibet[J]. *Tectonics*, 29(4): 1–30.
- Le Fort P, Cuney M, Deniel C, France-Lanord C, Sheppard S, Upreti B, Vidal P. 1987. Crustal generation of the Himalayan leucogranites[J]. *Tectonophysics*, 134(1): 39–57.
- Lederer G, Cottle J, Jessup M, Langille J, Ahmad T. 2013. Timescales of partial melting in the Himalayan middle crust: insight from the Leo Pargil dome, northwest India[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166(5): 1415–1441.
- Lee J, Hacker B, Wang Y. 2004. Evolution of North Himalayan gneiss domes: structural and metamorphic studies in Mabja Dome, southern Tibet[J]. *Journal of Structural Geology*, 26(12): 2297–2316.
- Lee J, Hacker B R, Dinklage W S, Wang Y, Gans P, Calvert A, Wan J, Chen W, Blythe A E, McClelland W. 2000. Evolution of the Kangmar Dome, southern Tibet: Structural, petrologic, and thermochronologic constraints[J]. *Tectonics*, 19(5): 872–895.
- Lee J, Hager C, Wallis S R, Stockli D F, Whitehouse M J, Aoya M, Wang Y. 2011. Middle to late Miocene extremely rapid exhumation and thermal reequilibration in the Kung Co rift, southern Tibet[J]. *Tectonics*, 30(2): 1–26.
- Lee J, McClelland W, Wang Y, Blythe A, McWilliams M. 2006. Oligocene–Miocene middle crustal flow in southern Tibet: geochronology of Mabja Dome. *Geological Society, London, Special Publications*, 268(1): 445–469.
- Lee J, Whitehouse M J. 2007. Onset of mid-crustal extensional flow in southern Tibet: Evidence from U/Pb zircon ages[J]. *Geology*, 35(1): 45–48.
- Liang Wei, Yang Zhusen, Zheng Yuanchuan. 2015. The Zhaxikang Pb–Zn deposit: Ar–Ar age of sericite and its metallogenic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(3): 560–568 (in Chinese with English abstract).
- Liu M, Yang Y. 2003. Extensional collapse of the Tibetan Plateau: Results of three-dimensional finite element modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8): 1–15.
- Liu X C, Wu F Y, Yu L J, Liu Z C, Ji W Q, Wang J G. 2016a. Emplacement age of leucogranite in the Kampa Dome, southern Tibet[J]. *Tectonophysics*, 667: 163–175.
- Liu Z C, Wu F Y, Ding L, Liu X C, Wang J G, Ji W Q. 2016b. Highly fractionated Late Eocene (~35 Ma) leucogranite in the Xiaru Dome, Tethyan Himalaya, South Tibet[J]. *Lithos*, 240–243: 337–354.
- Mahéo G, Leloup P H, Valli F, Lacassin R, Arnaud N, Paquette J L, Fernandez A, Haibing L, Farley K A, Tapponnier P. 2007. Post 4 Ma initiation of normal faulting in southern Tibet. Constraints from the Kung Co half graben[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(1/2): 233–243.
- McCaffrey R, Nabelek J. 1998. Role of oblique convergence in the active deformation of the Himalayas and southern Tibet plateau[J]. *Geology*, 26(8): 691–694.
- McCallister A T, Taylor M H, Murphy M, Styron R H, Stockli D F. 2014. Thermochronologic constraints on the late Cenozoic exhumation history of the Gurla Mandhata metamorphic core complex, Southwestern Tibet[J]. *Tectonics*, 33(2): 27–52.
- Mercier J L, Armijo R, Tapponnier P, Carey-Gailhardis E, Lin H T. 1987. Change from Late Tertiary compression to Quaternary extension in southern Tibet during the India–Asia Collision[J]. *Tectonics*, 6(3): 275–304.
- Mitsui M, Wallis S R, Aoya M, Lee J, Wang Y. 2012. E–W extension at 19 Ma in the Kung Co area, S. Tibet: Evidence for contemporaneous E–W and N–S extension in the Himalayan orogen[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 325–326(0): 10–20.
- Molnar P, England P, Martinod J. 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian Monsoon[J]. *Reviews of Geophysics*, 31(4): 357–396.
- Murphy M, Yin A, Kapp P, Harrison T, Manning C, Ryerson F, Lin D, Jinghui G. 2002. Structural evolution of the Gurla Mandhata detachment system, southwest Tibet: Implications for the eastward extent of the Karakoram fault system[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 114(4): 428–447.
- Murphy M A. 2007. Isotopic characteristics of the Gurla Mandhata metamorphic core complex: Implications for the architecture of the Himalayan orogen[J]. *Geology*, 35(11): 983–986.
- Quidelleur X, Grove M, Lovera O M, Harrison T M, Yin A, Ryerson F J. 1997. Thermal evolution and slip history of the Renbu Zedong Thrust, southeastern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B2): 2659–2679.
- Quigley M, Liangjun Y, Xiaohan L, Wilson C J L, Sandiford M, Phillips D. 2006. ⁴⁰Ar/³⁹Ar thermochronology of the Kampa Dome, southern Tibet: Implications for tectonic evolution of the North Himalayan gneiss domes[J]. *Tectonophysics*, 421(3/4): 269–297.
- Quigley M C, Liangjun Y, Gregory C, Corvino A, Sandiford M, Wilson C J L, Xiaohan L. 2008. U–Pb SHRIMP zircon geochronology and *T–t–d* history of the Kampa Dome, southern Tibet[J]. *Tectonophysics*, 446(1/4): 97–113.
- Ratschbacher L, Frisch W, Liu G, Chen C. 1994. Distributed deformation in southern and western Tibet during and after the India–Asia collision[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B10): 19917–19945.

- Searle M P. 1999. Emplacement of Himalayan leucogranites by magma injection along giant sill complexes: examples from the Cho Oyu, Gyachung Kang and Everest leucogranites (Nepal Himalaya) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17(5/6): 773–783.
- Shen F, Royden L H, Burchfiel B C. 2001. Large-scale crustal deformation of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B4): 6793–6816.
- Styron R H, Taylor M H, Murphy M A. 2011. Oblique convergence, arc-parallel extension, and the role of strike-slip faulting in the High Himalaya[J]. *Geosphere*, 7(2): 582–596.
- Sun X, Zheng Y, Wang C, Zhao Z, Geng X. 2016. Identifying geochemical anomalies associated with Sb–Au–Pb–Zn–Ag mineralization in North Himalaya, southern Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 73: 1–12.
- Thiede R C, Arrowsmith J R, Bookhagen B, McWilliams M, Sobel E R, Strecker M R. 2006. Dome formation and extension in the Tethyan Himalaya, Leo Pargil, northwest India[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 118(5/6): 635–650.
- Wagner T, Lee J, Hacker B R, Seward G. 2010. Kinematics and vorticity in Kangmar Dome, southern Tibet: Testing midcrustal channel flow models for the Himalaya[J]. *Tectonics*, 29(6): 1–26.
- Wang Genhou, Zhou Xiang, Zeng Qinggao, Pubu Ciren. 1997. Structure of the Kangmar therm-extensional metamorphic core complex, Xizang(Tibet) [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 24(2): 66–71(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxian, Zhang Jinjiang, Yan Shuyu, Liu Jiang. 2015. Structural characteristics and active time of the Kangmar detachment, Southern Tibet[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(2): 250–259(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxian, Zhang Jinjiang, Yan Shuyu, Liu Jiang. 2016. Age and geochemistry of the Cuona leucogranite in southern Tibet and its geological implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(1): 91–103 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jinsui, Li Wenchang, Zeng Lingsen, Xu Cuiping. 2012. Tectonic background of important metallogenic belts in the southern and southeastern Tibetan Plateau and ore prospecting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(12): 1857–1868 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Wang Qin, Zeng Lingsen, Liang Fenghua, Li Huaqi, Qi Xuexiang, Cai Zhihui, Li Zhonghai, Cao Hui. 2013. Three-dimensional extrusion model of the Great Himalaya slice[J]. *Geology in China*, 40(3): 671–680(in Chinese with English abstract).
- Yin A. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis[J]. *Tectonophysics*, 488(1/4): 293–325.
- Yin A. 2006. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation[J]. *Earth-Science Reviews*, 76(1/2): 1–131.
- Zeng L, Gao L, Xie K, Liu Z. 2011. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes: Melting thickened lower continental crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 303(3–4): 251–266.
- Zhang Bo, Zhang Jinjiang, Guo Lei. 2006. Fractal analysis of dynamically recrystallized quartz grains and estimation of mainly rheological parameters of the Ranba ductile shear zone[J]. *Chinese Journal of Geology*, 41(1): 158–169(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfei, Harris N, Parrish R, Zhang Li, Zhao Zhidan, Li Dewei. 2005. Geochemistry of north Himalayan leucogranites: regional comparison, petrogenesis and tectonic implications[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(3): 275–288(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinjiang, Guo Lei, Zhang Bo. 2007. Structure and kinematics of the Yalashangbo dome in the northern Himalayan Dome belt, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 42(1): 16–30(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinjiang, Yang Xiongying, Qi Guowei, Wang Dechao. 2011. Geochronology of the Malashan dome and its application in formation of the Southern Tibet detachment system(STDS) and Northern Himalayan gneiss domes(NHGD) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3535–3544(in Chinese with English abstract).
- Zhang J, Ji J, Zhong D, Sang H, He S. 2002. Structural and Chronological Evidence for the India–Eurasia Collision of the Early Paleocene in the Eastern Himalayan Syntaxis, Namjagarbarwa[J]. *Acta Geologica Sinica – English Edition*, 76(4): 446–454.
- Zheng Youye, Sun Xiang, Tian Liming, Zheng Haitao, Yu Miao, Yang Wantao, Zhou Tiancheng, Geng Xuebin. 2014. Mineralization, deposit type and metallogenic age of the gold antimony polymetallic belt in the eastern part of North Himalayan[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(1): 108–118(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 高利娥, 曾令森, 王莉, 侯可军, 郭春丽, 唐索寒. 2013. 藏南马山高钙二云母花岗岩的年代学特征及其形成机制[J]. *岩石学报*, 29(6): 1995–2012.
- 郭磊, 张进江, 张波. 2008. 北喜马拉雅然巴穹隆的构造、运动学特征、年代学及演化[J]. *自然科学进展*, 18(6): 640–650.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲, 曾普胜, 秦克章, 许继峰, 曲晓明, 杨志明, 杨竹森, 费红彩, 孟祥金, 李振清. 2006a. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. *矿床地质*, 25(5): 521–543.
- 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 孟祥金, 李振清, 杨志明, 郑绵平, 郑有业, 聂凤军, 高永丰, 江思宏, 李光明. 2006b. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用[J]. *矿床地质*, 25(6): 629–651.
- 梁维, 杨竹森, 郑远川. 2015. 藏南扎西康铅锌多金属矿绢云母 Ar–Ar 年龄及其成矿意义[J]. *地质学报*, 89(3): 560–568.
- 王根厚, 周祥, 曾庆高, 普布次仁. 1997. 西藏康马热伸展变质核杂岩构造研究[J]. *成都理工学院学报*, 24(2): 66–71.
- 王晓先, 张进江, 闫淑玉, 刘江. 2016. 藏南错那淡色花岗岩 LA–

- MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及其地质意义[J]. 地质通报, 35(1): 91-103.
- 王晓先, 张进江, 闫淑玉, 刘江. 2015. 藏南康马拆离断层的构造特征及其活动时代[J]. 大地构造与成矿学, 39(2): 250-259.
- 许志琴, 王勤, 曾令森, 梁凤华, 李化启, 戚学祥, 蔡志慧, 李忠海, 曹汇. 2013. 高喜马拉雅的三维挤出模式[J]. 中国地质, 40(3): 671-680.
- 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 曾令森, 许翠萍. 2012. 青藏高原南部与东南部重要成矿带的大地构造定格与找矿前景[J]. 地质学报, 86(12): 1857-1868.
- 张波, 张进江, 郭磊. 2006. 北喜马拉雅穹隆带然巴韧性剪切带石英动态重结晶颗粒的分维几何分析与主要流变参数的估算[J]. 地质科学, 41(1): 158-169.
- 张宏飞, Harris N, Parrish R, 张利, 赵志丹, 李德威. 2005. 北喜马拉雅淡色花岗岩地球化学: 区域对比、岩石成因及其构造意义[J]. 地球科学, 30(3): 275-288.
- 张进江, 郭磊, 张波. 2007. 北喜马拉雅穹隆带雅拉香波穹隆的构造组成和运动学特征[J]. 地质科学, 42(1): 16-30.
- 张进江, 杨雄英, 戚国伟, 王德朝. 2011. 马拉山穹隆的活动时限及其在藏南拆离系——北喜马拉雅片麻岩穹隆形成机制的应用[J]. 岩石学报, 27(12): 3535-3544.
- 郑有业, 孙祥, 田立明, 郑海涛, 于森, 杨万涛, 周天成, 耿学斌. 2014. 北喜马拉雅东段金锑多金属成矿作用、矿床类型与成矿时代[J]. 大地构造与成矿学, 38(1): 108-118.

有鳞动物最古老“祖先”认定

The confirmation of the oldest ‘ancestors’ of animals with scales

有鳞类动物是陆地脊椎动物种类最多的类群之一, 包括现今蛇和蜥蜴在内的动物类群。然而, 到目前为止有鳞类动物的内部系统关系一直存在争议, 已知最古老的化石记录与人们估计的起源时间存在 70 Ma 的空白; 在爬行动物系谱图的研究中代表性的有鳞类动物数量不足; 解剖学和 DNA 研究提供的最新演化历史也存在冲突。

根据英国《自然》杂志近日发表的一篇古生物学论文, 科学家确定了所有有鳞动物的最古老“祖先”, 其生活在三叠纪, 大约 2.4 Ga 前, 在爬行动物历史中处重要地位。同时, 该研究认为, 有鳞动物的起源和双孔亚纲爬行动物的分化, 可追溯到二叠纪/三叠纪大灭绝之前, 即约 2.52 Ga 前。

此次, 加拿大阿尔伯塔大学研究人员提阿戈·

西摩伊斯及其同事重新检查了之前在意大利阿尔卑斯山发现的名为“*Megachirella wachtleri*”的化石, 并将其重新分到包含有鳞类动物的更大范围分类, 即鳞龙超目。他们使用高分辨率 CAT 扫描仪, 揭示出了化石骨架中以前未被注意到的特征, 包括一个只见于有鳞动物的小型下颌骨。除此之外, 研究团队还组建了有史以来最大的化石与现存爬行动物数据集, 以评估这块化石在有鳞动物历史中的位置。研究结果表明, 该化石是已知最古老的有鳞类动物谱系成员, 比侏罗纪时期已知最早的真实有鳞动物早 72 Ma 左右。这一发现有助于填补我们对于有鳞动物和其他爬行动物起源的认知空白, 表明它们在二叠纪/三叠纪大灭绝前后就开始分化。这一事件可能为爬行动物谱系内的分化创造新的机会。



有鳞类动物最古老“祖先”的化石标本
图片、资料来源:《自然》