

北喜马拉雅然巴穹隆的构造、运动学特征、年代学及演化^{*}

郭磊 张进江^{**} 张波

北京大学地球与空间科学学院, 教育部造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871

摘要 然巴穹隆构造位于北喜马拉雅片麻岩穹隆带, 由上、下两个拆离断层及3个构造层组成。低变质特提斯喜马拉雅沉积岩系形成上构造层, 底部为脆性上拆离断层; 糜棱状片麻岩及核部浅色花岗岩体组成下构造层, 顶部是韧性下拆离断层; 中级变质糜棱状石榴石、十字石、红柱石片岩构成两拆离断层间的中构造层, 可能是上构造层底部经拆离作用形成。穹隆构造主要经历3期变形: 第1期上盘向北北西运动, 可能与藏南拆离系活动有关; 第2期为主期变形, 与东西向伸展相关, 各单元统一地上盘向东运动, 形成然巴穹隆的主要构造特征; 第3期为穹隆向外的垮塌下滑。然巴穹隆构造可能是东西向伸展和岩浆底辟作用的结果, 下拆离断层可能是将上盘沉积岩系与结晶基底分开的主拆离断层, 为主变形期东西向伸展形成, 后期岩体的底辟作用形成穹隆的形态。穹隆核部主变形晚期侵位的浅色花岗岩冷却年龄为6Ma左右, 说明穹隆主期伸展与该区东西向伸展作用活动时代一致, 然巴穹隆构造的形成与青藏高原南北走向裂谷系的東西向伸展相关。

关键词 然巴片麻岩穹隆 北喜马拉雅片麻岩穹隆带 东西向伸展

北喜马拉雅片麻岩穹隆带^[1-7]、藏南拆离系(STDS)^[8-11]以及南北走向裂谷系^[12-21]为中新世以来青藏高原伸展构造的重要组成部分^[22]。片麻岩穹隆在北喜马拉雅穹隆带中广泛发育, 其典型组成为: 核部为浅色花岗岩或二云母花岗岩, 岩体外围为变形片麻岩, 片麻岩上覆低变质的古生代-新生代特提斯喜马拉雅沉积岩系, 其间可能发育有中级变质岩, 如千枚岩和石榴石片岩等。穹隆出露的岩浆岩和地壳深部岩石(如糜棱状片麻岩等), 提供了研究该区构造变形历史的窗口, 成为学者们关注的焦点^[1-7, 23-27]。

目前, 学者们对穹隆的成因机制解释大致可分为以下几类模式: 深部流动变形、地壳收缩和地壳伸展。流动变形模式包括底辟、地幔上涌及 channel

flow 模式。底辟(包括热隆模式)认为穹隆由主中央断裂(MCT)之上深熔岩浆^[28]或是伸展减压重融岩浆浮力上升形成^[9, 23, 29, 30]; 地幔上涌模式认为穹隆为横向挤压导致的软流物质上涌^[16]; channel flow 模式^[31, 32]则认为塑性流动物质为下地壳熔融层。地壳收缩模式认为穹隆发育于逆冲断层断坡或双重构造^[1, 3-4, 33, 34]; Lee 等认为穹隆是地壳收缩与伸展共同作用产物^[6]。

康马、麻布加、雅拉香波、哈金桑惹(Kampa)、马拉山、Leo Pargil、Gurla Mandhata 等是北喜马拉雅穹隆带中较大的穹隆(位置见图1), 前人对其进行了深入研究。如 Burg 等通过研究康马穹隆, 认为穹隆发育于深部逆冲断层断坡或双重构造^[1]; 但 Chen 等则认为康马穹隆类似于美国西部

2007-11-01 收稿; 2008-01-08 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40572115)

^{**} 通信作者, E-mail: zhij@pku.edu.cn

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

变质核杂岩, 是青藏高原重力垮塌伸展作用结果^[2]; Lee 等详细研究了康马穹隆和麻布加穹隆, 认为中地壳的伸展作用和南向逆冲形成了高应变透入性构造和穹隆作用, 而伸展作用与 STDS 相关^[5-7]; 张进江等认为雅拉香波穹隆下拆离断层为 STDS 在北喜马拉雅的出露^[24], 构造减薄、均衡反弹及岩浆底劈作用形成现今穹隆构造形态^[23, 25]; Thiede 等详细报道了 Leo Pargil 穹隆西翼的构造和年代学特征, 认为 16—14 Ma 开始的東西向伸展对穹隆的形成起主导作用^[26]; Murphy 同样认为晚中新世南北走向的 Gurla Mandhata 拆离断层系向西剪切出露了高喜马拉雅高级变质岩, 并形成了 Gurla Mandhata 穹隆^[27].

然巴穹隆是北喜马拉雅穹隆带中的一个典型构造, 本文将报道该穹隆的构造样式、构造组成、运动学特征及其形成年代, 并初步分析其成因机制.

1 区域地质概况

北喜马拉雅片麻岩穹隆带位于特提斯喜马拉雅内^[8-11, 35], 由一系列片麻岩穹隆构造组成(图 1). 带内上覆寒武纪至始新世印度大陆被动陆缘海相沉积^[35, 36]. 特提斯喜马拉雅构造复杂, 出露白垩纪至第四纪逆冲构造、褶皱^[9, 16, 37-41]和伸展构造(如 STDS、南北走向伸展构造)^[22], 其中最年轻构造是中新世晚期开始发育的南北走向伸展构造^[12-21], 如亚东-谷露裂谷和申扎-定结裂谷等^[18, 20].

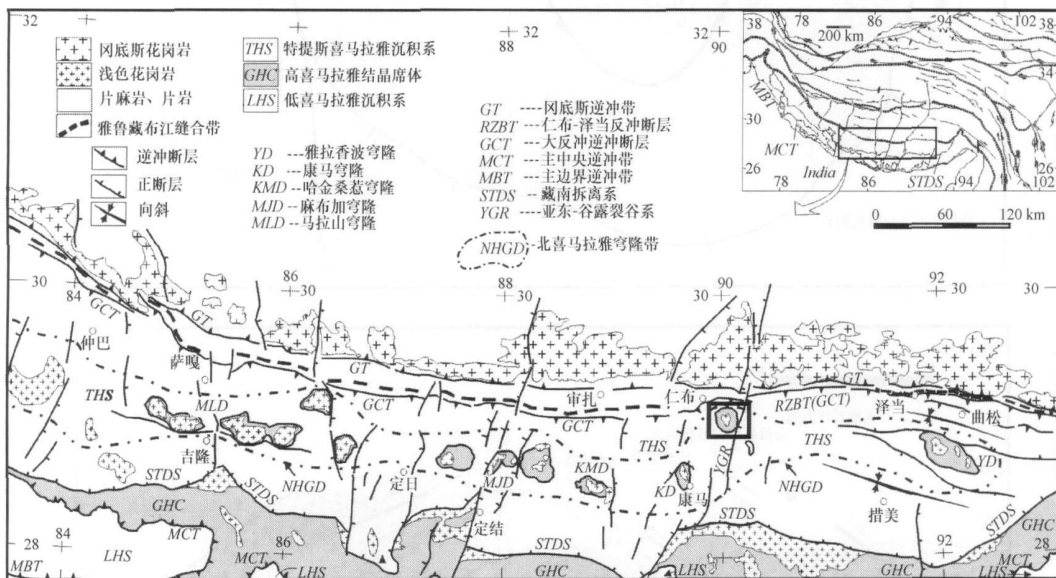


图 1 北喜马拉雅片麻岩穹隆带区域地质图
方框为本文研究区(据文献 [5, 22, 42] 修改)

然巴穹隆位于北喜马拉雅片麻岩穹隆带的中北部, 是北喜马拉雅穹隆带中较小的一个, 面积约为 400 km², 平面近心形. 地理位置为 89°55'E—90°15'E 和 29°00'N—29°12'N, 构造位置属南北向亚东-谷露裂谷系.

2 然巴穹隆岩石——构造单元

然巴穹隆核部为面理线理化浅色花岗岩, 围绕穹隆发育两条拆离断层, 将穹隆分为 3 个构造层(图 2(a)), 外侧为上拆离断层, 内侧为下拆离断层, 被其分割的 3 个岩石单元由外向内分别是: 上

构造层——低级变质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, 与核部花岗岩为侵入接触. 穹隆东侧被一南北走向正断层所切割.

2.1 上构造层——低级变质特提斯喜马拉雅沉积岩系

然巴穹隆的最外侧为板岩、千枚岩, 属低级变质的特提斯喜马拉雅沉积岩系, 为晚三叠世海相碎屑沉积, 原岩主要为泥岩、砂岩、石英岩等, 经低级变质形成板岩或千枚岩. 该岩石单元岩层面理产

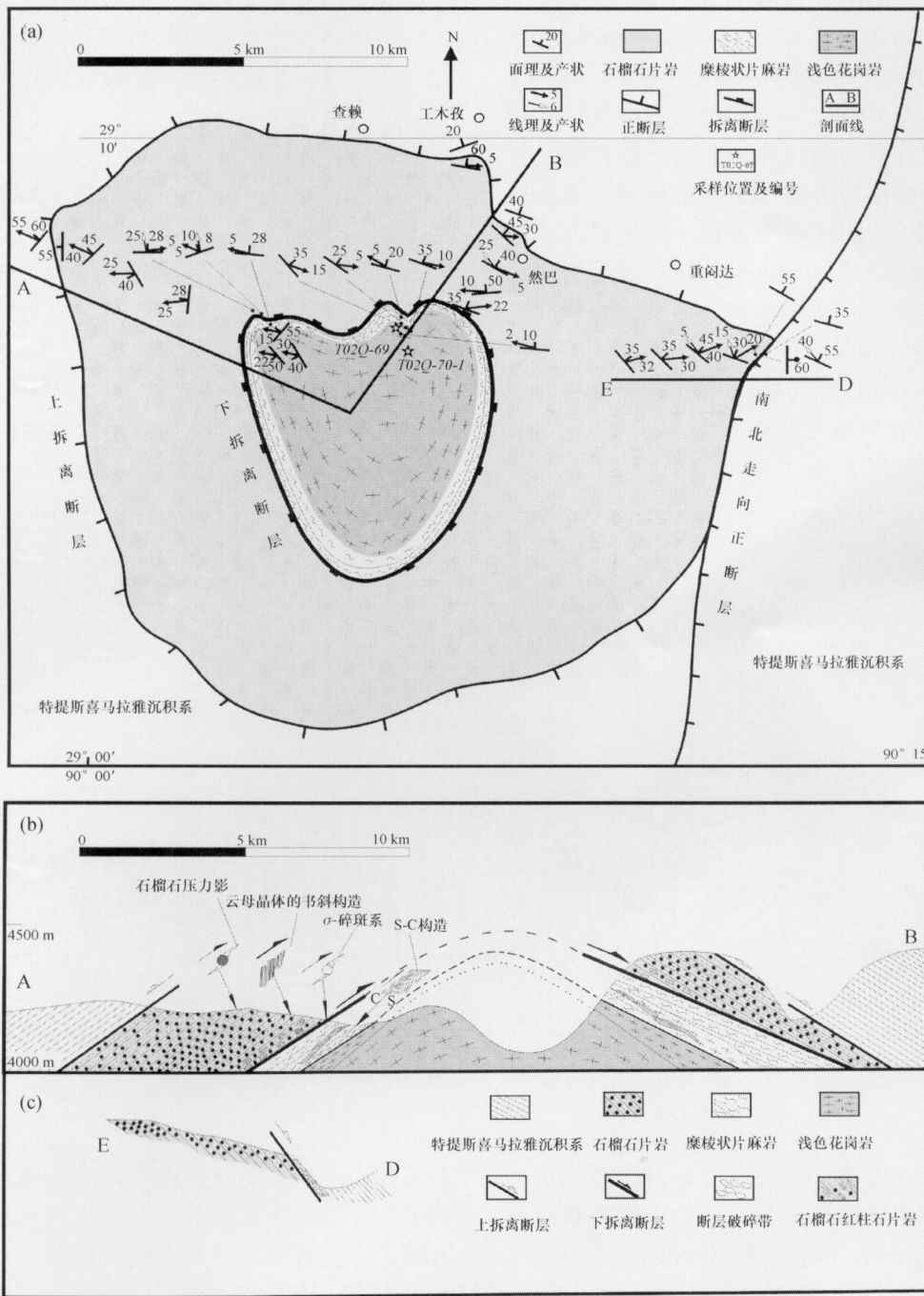


图2 然巴穹隆构造地质图(a)及剖面图(b), (c)
(剖面位置见图2(a))

状基本沿穹隆形态向外倾伏, 北侧基本倾向为北, 倾角为 20°—40°, 西北侧岩层倾向为北西西向, 倾角为 50°—60°, 东侧岩层倾向为北东向, 倾角为 55°(图 2)。该单元与下伏中构造层的界限为上拆离断层。

2.2 上拆离断层

围绕然巴穹隆, 呈环形发育, 该断层将上盘板岩、千枚岩和下盘中构造层的石榴石片岩分开

(图2). 穹隆西侧, 上盘板劈理产状为 $20^{\circ} \angle 60^{\circ}$, 下盘面理产状为 $270^{\circ} \angle 55^{\circ}$, 断层面与下盘片岩面理平行. 穹隆东北侧, 断层倾向北东, 倾角 20° , 发育顺层侵入的辉石岩岩脉, 辉石含量高, 且粒度较大, 脉体边部发生强烈变形.

穹隆东侧上拆离断层被一南北走向的脆性正断层所叠加(图3(a)), 断层带内发育断层角砾岩, 断层面上可观察到倾向擦痕, 正阶步指示向东下滑. 断层处发育顺层侵入的花岗岩和辉长岩(辉石颗粒较大), 边部均发育强烈变形, 并出露少量热接触变质大理岩. 该断层南北向延伸, 断层东倾, 倾角 60° . 从区域上, 断层应属亚东—谷露裂谷系, 为其内系列南北走向正断层之一(图1, 并见文献^[43]).

2.3 中构造层——石榴石、十字石、红柱石云母片岩

该岩石单元位于上拆离断层与下拆离断层之间(图2), 顶部至底部变质程度逐渐加深, 岩性依次是含钛铁矿十字石片岩, 石榴石十字石二云母片岩, 石榴石红柱石云母片岩. 局部可以见到面理置换现象(图3(e)), 残余层理和变余矿物组合表明该岩石单元由砂岩、粉砂岩及泥岩变质而成, 可能与上构造层同属于特提斯喜马拉雅沉积岩系. 岩石主要矿物组合为石英+长石+黑云母+白云母, 特征变质矿物包括石榴石、十字石、红柱石、电气石、钛铁矿等, 其中石榴石晶形较好, 发育环带构造, 该构造层中下部片岩因为强烈变形而呈现典型糜棱岩特征.

中构造层内夹少量顺层侵入的辉绿辉长岩脉, 其变形程度与围岩一致. 穹隆东北侧石榴石片岩中还发育顺层的花岗质糜棱岩, 可能为顺层侵入的花岗岩脉发生强烈韧性变形形成. 靠近下拆离断层的中构造层发育大量顺层浅色花岗岩脉、辉石岩脉, 穿插于片岩中.

2.4 下拆离断层

该断层为中构造层糜棱状片岩与下构造层糜棱状片麻岩的界限(图2). 穹隆东北侧, 该断层带上出现石英脉碎块与石榴石片岩、片麻岩混杂现象(图3(b)), 断层倾向北北东, 倾角 15° . 穹隆西北侧, 断层附近发育不对称褶皱以及布丁构造, 沿断层侵入辉石岩岩脉, 岩脉由内向外变形程度逐渐增

强, 内部中心相为粗粒流动构造, 次边界相为细粒定向构造, 边界相强变形, 辉石、长石等矿物强烈拉伸形成线理, 面理平行于断层面. 这一变形程度的分带性说明辉石岩脉为同构造侵位.

2.5 下构造层——糜棱状片麻岩

与核部花岗岩体一起形成下拆离断层之下的穹隆核部, 主体岩性为斜长角闪片麻岩夹负片麻岩, 强烈变形为糜棱状岩石, 糜棱面理产状与下拆离断层相同, 片麻岩与核部浅色花岗岩为侵入接触关系(图3(c)). 负片麻岩主要为石榴石、红柱石二云母片麻岩, 矿物组合为黑云母+白云母+石英+斜长石+石榴石+红柱石, 呈现由云母富集带和拉伸石英形成的条带状构造; 斜长角闪片麻岩主要矿物组合为斜长石+角闪石+黑云母等. 穹隆西北侧片麻岩中穿插有顺层侵位的伟晶岩脉, 矿物组合为石英+长石+白云母+石榴石, 属浅色花岗岩系, 发生微弱变形.

2.6 核部花岗岩体

穹隆核部为心形出露的浅色花岗岩体(图2), 主矿物组合为石英+斜长石+正长石+白云母+(少量)黑云母, 并富含石榴石和电气石. 岩体边部与片麻岩接触带发育一套石榴石二云母花岗岩岩体, 斜长石含量略多于核部花岗岩, 两者为连续过渡关系, 是一期岩浆侵入的产物. 岩体边界发育由石英长石拉伸及云母定向排列形成透入性面、线理, 产状与围岩相同, 但透入性向核心方向减弱, 中心部位仅见矿物微弱定向. 在围岩接触带可见明显的热接触变质现象—围岩中含大量长约10—15 m的红柱石(图3(d)), 红柱石斜切面理, 但也基本呈现定向排列, 所以核部岩体可能是构造晚期侵位.

3 构造及运动学

3.1 线理构造

然巴穹隆内共发育3期线理构造(图4), 第1期为残留的近南北向拉伸线理, 第2期为主期线理, 近东西向倾伏, 第3期为向穹隆四周倾伏的擦痕构造.

(1) 第1期近南北向的线理在上、中构造层中均可观察到, 表现为变质矿物的定向排列, 石英的

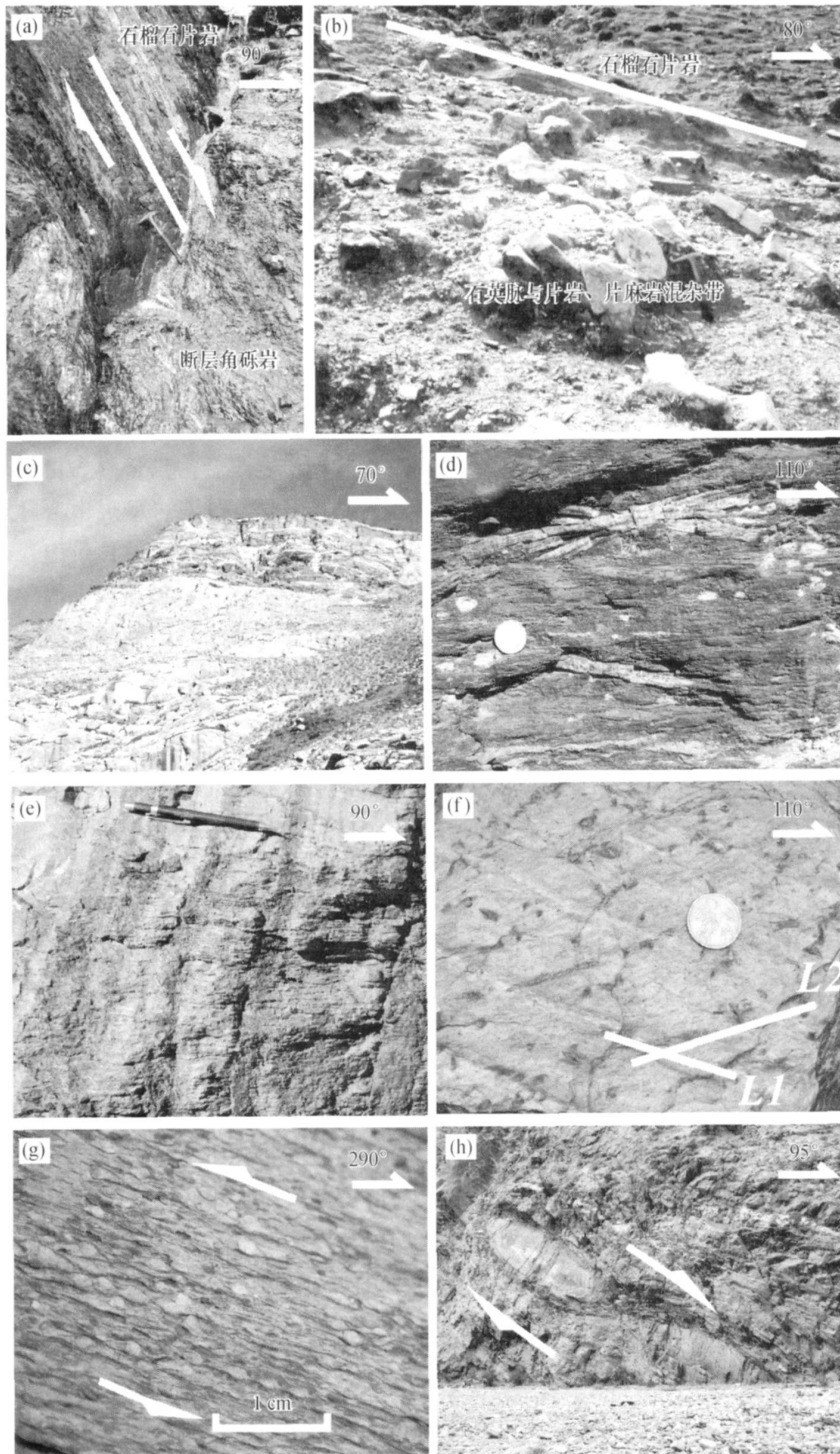


图3 然巴穹隆各单元典型特征及典型构造

(a) 东侧南北走向正断层, 断层面倾向东; (b) 下拆离断层构造混杂带; (c) 核部花岗岩与上覆片麻岩接触关系, 上为片麻岩, 下为浅色花岗岩; (d) 中构造层底部石榴石红柱石片岩, 红柱石斜切面理, 但也基本定向排列, 为变形后期热接触变质作用产物; (e) 中构造层面理置换现象; (f) 西北侧中构造层发育的两组线理, L1为早期北北向倾伏线理, L2为主变形期北西西向倾伏线理; (g) 西北侧中构造层不对称构造;

指示上盘向东运动; (h) 东侧中构造层基性脉发育大型布丁构造, 指示上盘向东运动

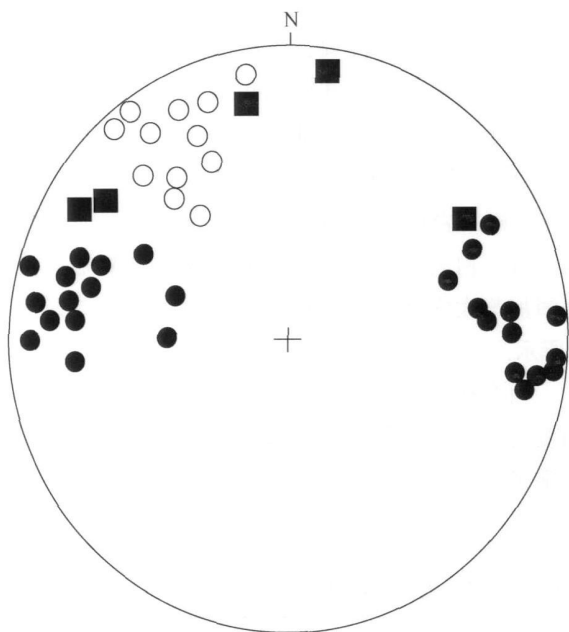


图 4 然巴穹隆各构造层及核部花岗岩体线理的下半球投影

● 为各构造单元主导线理 ○ 为各构造单元早期线理;
■ 为后期倾向擦痕

拉伸等。线理总体为近南北向倾伏，穹隆东侧和东北侧该组线理倾伏向为 $315^{\circ}-340^{\circ}$ ，西北侧倾伏向为 $320^{\circ}-350^{\circ}$ 。

(2) 第 2 期为穹隆各岩石—构造单元透入性主期线理，代表穹隆的主期变形。该组线理在上构造层除表现为变质矿物的定向排列，石英的拉伸等外，还发育褶皱线理；中构造层表现为云母排列、石英拉伸及不对称长石碎斑系尾部及石榴石压力影等；下构造层负片麻岩中表现为石英条带、强烈拉伸的长石和云母的定向排列等，形成典型的条带状片麻岩，在斜长角闪片麻岩中表现为角闪石的定向排列；核部浅色花岗岩边部该组线理比面理更发育，形成典型的 L 型构造岩。这期线理总体为近东西向倾伏，在穹隆西北侧倾伏向为 $265^{\circ}-285^{\circ}$ ，东侧和东北侧倾伏向为 $80^{\circ}-100^{\circ}$ 。

(3) 第 3 期为向穹隆四周倾伏的擦痕构造，仅发育在上构造层岩石密集发育的劈理面上，表现为热擦痕和矿物生长纤维，产状沿面理向穹隆外侧倾伏。

第 1 期和第 2 期线理在上、中构造层中同时存在(图 3(f))，但第 2 期近东西向倾伏的主导线理明

显覆盖了第 1 期近南北向倾伏的线理。在中构造层，由浅部向深部(即向变形更强的穹隆内部)，第 2 期逐渐变为占绝对主导地位的优势线理，第 1 期线理则仅为部分残存。下构造层片麻岩和核部花岗岩只发育第 2 期线理。第 3 期的倾向擦痕构造只发育于上构造层脆性面理上。这些证据表明了这 3 组线理发育的先后关系：穹隆早期形成的近南北向线理被主变形期发育的线理所叠加，第 3 期的擦痕构造则代表后期穹隆的垮塌下滑。

3.2 运动学特征

通过对然巴穹隆岩石—构造特征及线理的观察和分析，我们认为该穹隆主要发育三期变形，分别对应三组线理：

最早期变形对应的为一组近南北向倾伏的拉伸线理，在 XZ 面上可观察到 S—C 组构，穹隆西北侧发育向北北西倒伏的紧闭褶皱，指示为一期向北的运动。

第 2 期为穹隆的主期变形，对应统一的近东西倾伏向线理。穹隆西北部，上、中构造层岩石沿倾伏向为 $265^{\circ}-285^{\circ}$ 的线理方向发育众多运动学标志，如有 S—C 面理和变质矿物的不对称构造(图 3(g))、A 型褶皱、“Z”形褶皱、石英脉错断及布丁构造、石榴石压力影及雪球构造、云母晶体书斜构造、长石的不对称碎斑系等；下构造层糜棱状片麻岩中也发育 S—C 组构、长石的不对称碎斑系。穹隆西北侧的板劈理、千枚理及片理产状均为 NW—NNW 倾向，而所有上述运动学标志均指示上盘向东运动，说明穹隆西北侧具有向东的逆冲运动。在穹隆北部(工木孜南，图 2(a))，中构造层面理产状北倾，所夹糜棱状花岗岩中较大的长石颗粒形成 σ 型碎斑系，长石长轴形成 S 面理，而其尾部与石英条带及云母等一起形成 C 面理，S 与 C 关系指示为向东逆冲。穹隆东北部沿倾伏向为 $80^{\circ}-100^{\circ}$ 的线理同样发育指示上盘向东的运动学特征，并形成大型布丁构造(图 3(h))，该侧各单元面理产状为东倾，所以表现为向东下滑的正断性质。核部浅色花岗岩岩体边部发育相同的运动学特征，也指示向东的运动，但变形向中心逐渐减弱，岩体与围岩发生热接触变质作用产生的红柱石切割中、下构造层面理，但也有基本定向(图 3(e))，说明核部浅色花岗岩可

能是该期变形晚期侵入。以上运动学证据表明, 然巴穹隆构造各单元在第二期变形时具有一期统一的上盘向东运动的特征。

第3期变形为穹隆向外垮塌, 对应的线理构造为上构造层及上拆离断层中发育的、透入性较差的顺倾向热擦痕, 为后期穹隆向外侧垮塌下滑所致。

4 浅色花岗岩构造热年代学

核部发育浅色花岗岩是北喜马拉雅片麻岩穹隆带各个穹隆最显著的特征之一, 然巴穹隆浅色花岗岩岩体主要侵位于穹隆核部, 其变形、运动学特征与穹隆主期变形相同, 但变形程度向岩体中心逐渐

变弱, 围岩热接触变质作用产生的红柱石切割面理, 但也大致定向排列, 表明浅色花岗岩可能侵位于穹隆主变形后期, 其冷却年龄可能会给出主变形的时间上限。我们在核部浅色花岗岩中选取新鲜岩石样品(采样位置见图2(a)), 进行 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素测年。样品岩性为石榴石二云母花岗岩, 分别挑选黑云母、白云母作为测试矿物。样品选好后, 寄往美国加州大学洛杉矶分校进行测试, 测试结果如表1所示。

两个样品的阶段升温测年分析数据列于表2, 相应的年龄谱和等时线见图5。所有样品的年龄谱非常平坦, 表明核部浅色花岗岩为一期热事件形成。

表1 然巴穹隆核部浅色花岗岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素测年结果

样品编号	采样位置	岩性	测试矿物	坪年龄 ($\pm 1\sigma$)/Ma	等时线年龄		
					年龄($\pm 1\sigma$)/Ma	MSWD	初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
T02Q-69	穹隆核部边缘	浅色花岗岩	黑云母	6.04 \pm 0.13	5.99 \pm 0.14	1.562021	300.1664 \pm 5.907128
T02Q-70-1	穹隆核部主体	浅色花岗岩	白云母	6.19 \pm 0.11	6.15 \pm 0.12	0.3029752	297.7110 \pm 2.609215

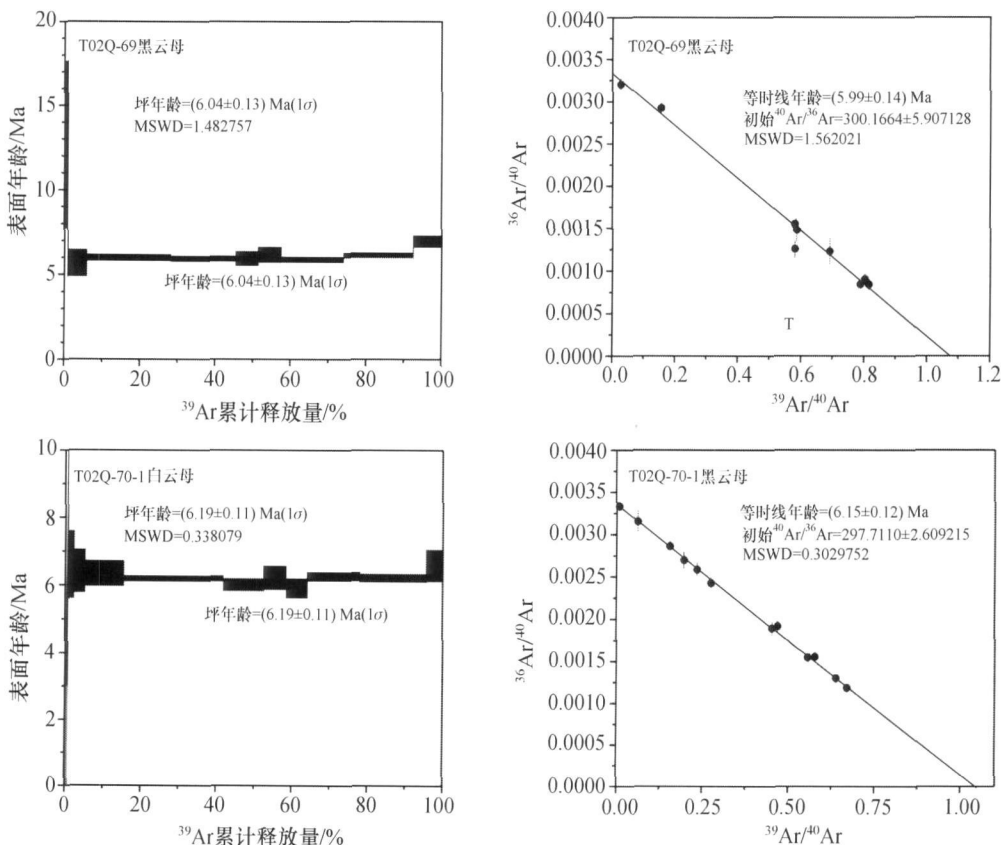


图5 然巴穹隆核部浅色花岗岩样品 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄谱图和等时线图

从表 1 中可以看出, 然巴穹隆核部浅色花岗岩的冷却年龄在 6 Ma 左右, 说明然巴穹隆主期变形在此时已处于活动的晚期. 而然巴穹隆所处的亚东-谷露裂谷可能开始活动于 11 Ma^[43], 并于 8 Ma 左右达到高峰^[44], 所以裂谷活动与然巴穹隆的主期变形在构造关系、活动时间上具有统一性, 因此有理由

认为然巴穹隆的主期变形(上盘向东的运动)与该区南北走向裂谷的东西向伸展作用相关, 即穹隆的主期变形是北喜马拉雅地区普遍发育的东西向伸展的结果, 变形晚期核部浅色花岗岩侵入, 形成穹隆现今的形态.

表 2 然巴穹隆核部浅色花岗岩样品黑云母、白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素阶段升温分析数据^{a)}

T/ °C	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _m	³⁹ Ar/mol	(⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K) _m ± 1σ	坪年龄 ± 1σ/Ma
T02Q-69 黑云母 W= 6.8 mg J= 0.003571783							
500	36.6872	0.117444	0.28181	0.0657	3.09E-15	1.9733 ± 0.775	12.67 ± 4.96
600	6.5172	0.018993	0.12353	0.0299	1.65E-14	0.8821 ± 0.121	5.67 ± 0.78
700	1.7530	0.002674	0.01766	0.0280	7.50E-14	0.9314 ± 0.029	5.99 ± 0.18
770	1.2598	0.001040	0.02043	0.0275	5.82E-14	0.9214 ± 0.025	5.93 ± 0.16
840	1.4815	0.001798	0.06312	0.0270	1.99E-14	0.9227 ± 0.064	5.94 ± 0.41
900	1.7409	0.002556	0.06872	0.0278	2.04E-14	0.9586 ± 0.071	6.17 ± 0.45
960	1.2791	0.001135	0.03164	0.0280	5.59E-14	0.9136 ± 0.024	5.88 ± 0.15
1050	1.3011	0.001083	0.04826	0.0274	6.21E-14	0.9523 ± 0.021	6.13 ± 0.14
1150	1.7550	0.002245	0.28435	0.0266	2.55E-14	1.0822 ± 0.052	6.96 ± 0.33
T02Q-70-1 白云母 W= 6.9 mg J= 0.003568018							
500	137.4573	0.458471	0.04489	0.1599	1.87E-15	1.9500 ± 2.156	12.51 ± 13.78
600	16.2275	0.051085	0.04155	0.0289	2.94E-15	1.1026 ± 0.634	7.08 ± 4.06
700	5.1078	0.013699	0.01124	0.0155	9.18E-15	1.0280 ± 0.154	6.61 ± 0.99
770	4.2801	0.010995	0.00378	0.0149	1.75E-14	0.9985 ± 0.099	6.42 ± 0.63
840	6.4428	0.018351	0.00102	0.0160	6.23E-14	0.9875 ± 0.058	6.35 ± 0.38
880	1.5977	0.002038	0.00028	0.0128	1.60E-13	0.9626 ± 0.013	6.19 ± 0.08
920	1.7637	0.002694	0.00055	0.0129	6.50E-14	0.9347 ± 0.028	6.01 ± 0.18
960	2.2327	0.004170	(0.00087)	0.0131	3.66E-14	0.9675 ± 0.054	6.22 ± 0.35
1000	2.1571	0.004081	0.00041	0.0132	3.39E-14	0.9184 ± 0.045	5.90 ± 0.29
1070	1.8293	0.002784	0.00017	0.0129	8.46E-14	0.9738 ± 0.020	6.26 ± 0.13
1150	1.5220	0.001766	0.00023	0.0127	1.07E-13	0.9673 ± 0.018	6.22 ± 0.12
1350	3.6520	0.008785	(0.00014)	0.0143	2.67E-14	1.0232 ± 0.074	6.57 ± 0.47

a) m 表示质谱测量同位素比值。⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素测年在美国加州大学洛杉矶分校进行, 详细的实验流程请参考文献[45]。样品在美国 Michigan 大学 Ford 反应堆接受中子照射, 照射时间为 45h, 标样为 Fish Canyon Tuff 透长石(27.8 Ma)^[46]。样品在置于真空炉内的钽坩埚中进行阶段升温, 使用气源自动质谱仪分析释放的同位素组分, 用 AGE CAL EXE 计算坪年龄和等时线, 年龄误差以 1σ 给出, 不包括 J 值和衰变常数误差

5 然巴穹隆构造形成机制的讨论

北喜马拉雅穹隆构造形成机制已有很多模式, 如底劈、逆冲(断坡)、Channel Flow 和拆离断层-变质核杂岩模式等^[1, 3-4, 6, 9, 16, 23, 28-34], 但然巴穹隆发育的三期构造运动无法用单一模式来解释.

然巴穹隆早期向北的构造运动在除下构造层、

核部岩体外各构造层均有保留, 这可能是藏南拆离系(STDS)向北的拆离作用在特提斯喜马拉雅沉积岩系中的表现, 前人在对北喜马拉雅穹隆带中其他穹隆的研究中也报导过类似的运动学特征^[6, 7, 24].

然巴穹隆各单元主期构造运动特征是上盘向东的运动, 明显不同于康马、雅拉香波、马拉山、哈金桑惹(Kampa)等穹隆的近南北向构造运动(与

STDS等南北向伸展作用相关)。因此,推测该穹隆成因类似于北喜马拉雅穹隆带西部的 Leo Pargil 和 Gurla Mandhata 穹隆^[26, 27], 可能为青藏高原南北向裂谷系的東西向伸展作用所形成, 理由如下。

(1) 然巴穹隆构造由高级变质岩和年轻岩体组成并被低级变质岩构造叠置: 上拆离断层之上沉积岩系的板岩、变质砂岩形成上盘; 下拆离断层之下的斜长角闪片麻岩、负片麻岩及花岗岩体形成下盘, 两者界限为强变形剪切带, 即上、下拆离断层围限的中构造层, 该层可能是上盘沉积岩系经强烈韧性变形而形成的糜棱状岩石^[24]。所以, 下拆离断层为分割结晶基底和盖层沉积的底部或主断层, 其主期变形为上盘向东的运动, 属东西向伸展构造作用, 表明该穹隆可能类似于拆离断层—变质核杂岩成因模式, 东西向的伸展拆离造成了中、下构造层和下拆离断层带的强烈韧性变形。

(2) 然巴穹隆现今的形态与主期变形晚期核部浅色花岗岩岩体的侵入有关, 可能是主变形后期构造减薄、均衡反弹及岩浆的底辟热隆作用形成, 并导致第3期穹隆向外的垮塌作用。

(3) 然巴穹隆的构造位置属于亚东—谷露裂谷系, 穹隆东侧边界与一南北走向正断层相切(图2), 该南北走向正断层可能是亚东—谷露裂谷的一部分。核部主变形晚期侵入的浅色花岗岩构造热年代学(⁴⁰Ar-³⁹Ar冷却年龄约为6Ma)也表明, 然巴穹隆的主期变形时间与该区广泛发育的南北走向裂谷系的活动年代相近。

因此, 我们认为然巴穹隆经历了早期北北西向运动(可能与STDS相关)、主变形期上盘向东的运动(可能与青藏高原南北走向裂谷系的東西向伸展作用相关)、主变形期后期核部浅色花岗岩侵入和最后向外的垮塌, 穹隆的形成演化主要受到东西向伸展和底辟作用控制。

6 结论

然巴穹隆位于北喜马拉雅穹隆带北部, 是由糜棱状片麻岩及花岗岩体组成的、并被中—低级变质沉积岩构造叠置的穹隆构造, 可能为拆离断层—变质核杂岩和底辟共同作用的结果。该穹隆被上、下

两个拆离断层分割成3个岩石单元, 下拆离断层为主或底部拆离断层, 并将由特提斯喜马拉雅沉积岩系组成的上盘与由糜棱状片麻岩组成的下盘分割开来, 上、下拆离断层间的中构造层为上盘底部强烈韧性变形形成。穹隆各单元发育有3组线理, 运动学特征指示穹隆主要经历3期变形: 早期为向北北西的运动, 可能与STDS的活动有关; 第2期为穹隆的主期变形, 各单元具有统一的上盘向东的运动性质; 第3期为穹隆向外的垮塌下滑。穹隆核部浅色花岗岩为穹隆主变形期晚期侵入, 其⁴⁰Ar-³⁹Ar冷却年龄约为6Ma。综合穹隆构造和热年代学, 我们认为该穹隆的形成可能与青藏高原广泛发育的南北走向裂谷有关, 为东西向伸展和底辟共同作用的结果。

参 考 文 献

- Burg JP, Guiraud M, Chen GM, et al. Himalayan metamorphism and deformation in the North Himalayan belt, southern Tibet, China. *Earth Planet Sci Letts*, 1984, 69: 391-400
- Chen Z, Liu Y, Hodges KV, et al. Structural evolution of the Kangmar dome: A metamorphic core complex in southern Xizang (Tibet). *Science*, 1990, 250: 1552-1556
- Wu C, Nelson KD, Wortman G, et al. Yadong cross structure and South Tibetan Detachment in the east central Himalaya (89°-90°E). *Tectonics*, 1998, 17: 28-45
- Hauck ML, Nelson KD, Brown LD, et al. Crustal structure of the Himalayan orogen at approximately 90 east longitude from Project INDEPTH deep reflection profile. *Tectonics*, 1998, 17: 481-500
- Lee J, Hacker BR, Dinklage WS, et al. Evolution of the Kangmar dome, southern Tibet: Structural, Petrologic and thermochronologic constraints. *Tectonics*, 2000, 19: 872-895
- Lee J, Wang Y, McWilliams, et al. Contraction, extension, and diapirism in Mabja Dome: Implications for tectonics of southern Tibet. *Geological Society of America Abstracts*, 2002, 34: 332
- Lee J, Bradley Hacker, Yu Wang. Evolution of North Himalayan gneiss domes: Structural and metamorphic studies in Mabja Dome, southern Tibet. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26: 2297-2316
- Burg JP, Brunel M, Gapais D, et al. Deformation of the crystalline main central sheet in south Tibet (China). *Journal of Structural Geology*, 1984, 6: 535-542
- Burg JP, Chen JM. Tectonics and structural zonation of southern Tibet, China. *Nature*, 1984, 311: 219-223
- Burchfiel BC, Chen Z, Hodges KV, et al. The south Tibetan

- detachment system, Himalayan orogen, extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt. *Geol Soc Am Special Paper* 269, 1992, 1—41
- 11 Hodges KV, Parrish R, Housh T, et al. Simultaneous Miocene extension and shortening in the Himalayan orogen. *Science* 1992, 258: 1466—1470
 - 12 Coleman M, Hodges K. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr age from a new minimum age for east-west extension. *Nature* 1995, 374: 49—52
 - 13 Harrison TM, Copeland P, Kidd WSF, et al. Activation of the Nyainqentanghla Shear Zone: Implication uplift of the southern Tibetan Plateau. *Tectonics* 1995, 14: 658—676
 - 14 Searle MP. The rise and fall of Tibet. *Nature* 1995, 347: 17—18
 - 15 Seeber L, Reicher A. Strain partitioning along the Himalayan arc and the Nanga Parbat antiform. *Geology*, 1998, 26: 791—794
 - 16 Yin A, Kapp PA, Murphy MA, et al. Significant late Neogene east-west extension in northern Tibet. *Geology*, 1999, 27: 787—790
 - 17 Yin A. Mode of Cenozoic east-west extension in Tibet suggesting a common origin of rifts in Asia during the Indo-Asian collision. *J Geophys Res*, 2000, 105 (B9): 21745—21759
 - 18 Zhang JJ, Guo L. Structure and geochronology of the southern Xainza-Dinggye rift and its relationship to the south Tibetan detachment system. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29: 722—736
 - 19 张进江, 丁林, 钟大赉, 等. 喜马拉雅平行于造山带伸展——是垮塌的标志还是挤压隆升过程的产物? *科学通报*, 1999, 44: 2031—2036
 - 20 张进江, 郭磊, 丁林. 申扎-定结正断层体系中、南段构造特征及其与藏南拆离系的关系. *科学通报*, 2002, 47: 38—43
 - 21 张进江, 丁林. 青藏高原东西向伸展及其地质意义. *地质科学*, 2003, 38: 179—189
 - 22 Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2000, 28: 211—280
 - 23 李德威, 刘德民, 廖群安, 等. 藏南萨迦拉轨岗日变质核杂岩的厘定及其成因. *地质通报*, 2003, 22: 7—11
 - 24 张进江, 郭磊, 张波. 北喜马拉雅雅拉香波穹隆的构造组成和运动学特征. *地质科学*, 2007, 42(1): 16—30
 - 25 张金阳, 廖群安, 李德威, 等. 藏南萨迦拉轨岗日淡色花岗岩特征及与变质核杂岩的关系. *地球科学*, 2003, 28: 695—701
 - 26 Rasmus C, Thiede J, Ramon Arrowsmith Bodo, Bookhagen, et al. Dome formation and extension in the Tethyan Himalaya Leo Pargil, northwest India. *Geological Society of America Bulletin*, 2006, 118(5—6): 635—650
 - 27 Murphy MA, Yin A, Kapp P, et al. Structural evolution of the Gurla Mandhata detachment system, southwest Tibet: Implications for the eastward extent of the Karakoram fault system. *Geological Society of America Bulletin*, 2002, 114: 428—447
 - 28 Harrison TM, Lovera OM, Grove M. New insights into the origin of two contrasting Himalayan granite belts. *Geology*, 1997, 25: 899—902
 - 29 Le Fort P. Metamorphism and magmatism during the Himalayan collision. In: Coward M P, Ries A C. Eds. *Collision Tectonics*. Geol Soc London Spec Publication 1986, 19: 159—172
 - 30 Le Fort P, Cuney M, Deniel C, et al. Crustal generation of Himalayan leucogranites. *Tectonophysics*, 1987, 134: 39—57
 - 31 Beaumont C, Jamieson RA, Nguyen MH, et al. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. *Nature*, 2001, 414: 738—742
 - 32 Beaumont C, Jamieson RA, Nguyen MH, et al. Crustal channel flows: 1. Numerical models with applications to the tectonics of the Himalayan-Tibetan orogen. *J Geophys Res*, 2004, 109 (B6): Art. No. B06406
 - 33 Makovsky Y, Klempner S L, Ratschbacher L, et al. Midcrustal reflector on INDEPTH wide-angle profiles: An ophiolite slab beneath the India-Asia suture in southern Tibet? *Tectonics* 1999, 18: 793—808
 - 34 Yin A. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation. *Earth-Science Reviews*, 2006, 76: 1—131
 - 35 Hodges KV. Tectonics of the Himalaya and southern Tibet from two perspectives. *Geol Soc Am Bull*, 2000, 112: 324—350
 - 36 Gansser A. *The Geology of the Himalayas*. New York: Wiley Interscience, 1964, 1—289
 - 37 Le Fort P. Himalayas: The collision range. Present knowledge of the continental arc. *Am J Sci*, 1975, 275: 1—44
 - 38 Searle MP. Stratigraphy, structure and evolution of the Tibetan-Tethys zone in Zaskar and the Indus suture zone in the Ladakh Himalaya. *Trans. R Soc Edinburgh Earth Sci*, 1983, 73: 205—219
 - 39 Ratschbacher L, Frisch W, Liu G, et al. Distributed deformation in southern and western Tibet during and after the India-Asia collision. *J Geophys Res*, 1994, 99: 19917—19945
 - 40 Quidelleur X, Grove M, Lovera OM, et al. The thermal evolution and slip history of the Renbu Zedong Thrust, southeastern Tibet. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 2659—2679
 - 41 Yin A, Harrison TM, Ryerson FJ, et al. Tertiary structural evolution of the Gandese thrust system, southeastern Tibet. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 18175—18201
 - 42 中国地质调查局成都地质矿产研究所. 青藏高原及邻区地质图(1:100万). 成都: 成都地图出版社, 2004
 - 43 Pan Y, Kidd WSF. Nyainqentanghla shear zone: A late Miocene

- extensional detachment in the southern Tibetan. *Geology*, 1993, 20: 775-778
- 44 Harrison T M, Mckeegan K D, Le Fort P. Detection of inherited Monazite in the Manaslu leucogranite by $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ ion microprobe dating, crystallization age and tectonic implication. *Earth Planet Sci Letts*, 1995, 133: 271-282
- 45 McDougall I, Harrison T M. *Geochronology and Thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Method*, 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1999
- 46 Cebula G T, Kunk M J, Mehnert H H, et al. The fish canyon tuff: A potential standard for the $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ and fission-track dating methods. *Terra Cognita*, 1986, 6: 139-140

关于召开中国土壤学会第十一届全国会员代表大会暨第七届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会的通知

土壤资源是人类的生存平台和粮食生产基地, 其重要性不言而喻。我国人均耕地、林地、牧草地数量均远远低于世界人均数量, 并且整体质量偏低、退化沙化现象较为严重, 加之近年城市化的扩张, 非农占用耕地大量增加, 土壤资源与社会发展之间的矛盾日益突出。为加强我国土壤资源领域的交流, 推动对土壤科学与社会可持续发展的学术研究, 由中国土壤学会主办, 中国农业大学资源与环境学院等9单位承办, 于2008年9月24-27日在北京召开“中国土壤学会第十一届全国会员代表大会暨第七届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会”。

大会主题: 土壤科学与社会可持续发展

主要议题:

1. 围绕土壤科学与农业可持续发展、土壤科学与资源可持续利用和土壤科学与生态安全和环境健康等内容, 开展分专题的学术研讨和交流。
 - 土壤资源现状、问题与展望
 - 土壤性质与演变过程
 - 生态环境协调与粮食安全保障
 - 工业化和城市化及肥料高投入对土壤质量与生态环境的影响
 - 土壤在社会、环境和农业可持续发展中的作用
 - 土壤资源合理利用和提高土壤质量的政策与建议
 - 土地资源利用—生态环境友好—粮食安全保障和谐的政策、措施与建议
2. 总结中国土壤学会第十届理事会工作; 修改和制定有关条例; 选举第十一届中国土壤学会理事、常务理事、理事长, 确定各专业委员会主任; 讨论和确定第十一届理事会的主要任务。

3. 颁奖表彰。

组委会联系方式:

通讯地址: 北京市海淀区圆明园西路2号 中国农业大学资源与环境学院

邮编: 100193

联系人: 王雪娟 张福锁

联系电话: 010-62732232

传真: 62731016

手机: 13811893123

E-mail: fertrdc@cau.edu.cn