

文章编号: 1000-0550(2003)01-0031-07

冈底斯弧弧后早白垩世裂谷作用的沉积学证据^①

张开均^{1,2} 夏 斌¹ 夏邦栋² 王冠民³ 张孟群⁴ 李永铁⁵ 叶和飞⁵

1(中国科学院广州地球化学研究所 广州 510640) 2(南京大学地球科学系 南京 210093) 3(石油大学资源科学系 山东东营 257062)
4(南京大学现代分析中心 南京 210093) 5(中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘 要 冈底斯弧弧后地区早白垩世地层的一个显著特点是,由下而上普遍从陆相—海陆交互碎屑岩变化为海相碳酸盐岩。该地区在早白垩世中期开始了广泛的海侵,沉积范围由早期仅局限于班公湖—怒江缝合带附近而扩展至羌塘地体南缘和拉萨地体,沉积了巨厚的台地相灰岩;与塔里木南部和思茅地区同期海平面变化非常不同,那里在晚白垩世才出现海侵。砂岩组分研究显示,早白垩世早期碎屑物源主要来自北侧的造山带,向上则逐步受到南侧火山弧的控制。在海侵层系的下部,发现了丰富的双峰型火山岩和双峰式火山岩碎屑。因而推断该区在早白垩世发生了强烈的裂谷沉降作用。与此同时的在印度和巴基斯坦境内的 Ladakh-Kohistan 弧后裂谷作用还形成了具有洋壳基底的 Shyok 边缘海。因此,在早中白垩世,欧亚大陆南缘为西太平洋型的活动大陆边缘,因强烈的弧后裂谷作用产生了一系列边缘海盆地;在包括青藏高原南部在内的欧亚大陆南缘,既没有构造动力,也没有古地理和古地形证据支持在早白垩世末(99 Ma±)即出现强烈的抬升。

关键词 冈底斯岩浆弧 早白垩世 裂谷作用 欧亚大陆南缘 构造重建

第一作者简介 张开均 男 1963 年出生 博士 教授 沉积—大地构造

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

1 引言

火山弧的弧后地区,是地球上构造活动最为活跃的地区之一。紧邻雅鲁藏布江缝合带北侧的冈底斯弧,从我国西藏一直向西延伸到印度(Ladakh 岩浆弧)和巴基斯坦(Kohistan 岩浆弧)境内,绵延三千余公里,是青藏高原上和欧亚大陆南缘最为醒目的构造单元之一。在印度和巴基斯坦境内,该火山弧的弧后地区,已被确认发生了多期次的伸展和压缩变形,尤以中白垩世(大约 120~90 Ma)的裂谷作用最为强烈和显著,具有洋壳基底的 Shyok 边缘海盆(缝合带)即被认为由这种弧后裂谷作用而形成的^[1,2]。然而,对于我国境内冈底斯弧弧后地区的构造—古地理演变,尽管中外科学家特别是我国学者通过大量研究已取得不少重要进展,但对一些重大问题仍存在一些相当矛盾的认识。例如,根据多年艰苦的研究,我国绝大多数科学家相信,冈底斯弧及其弧后地区的地形是相当和缓的,一直到新生代初的印藏碰撞才逐渐抬升^[3~10];然而,也有一些学者相信,该区在白垩纪即已强烈隆升^[11~13],如 Murphy 等(1997)通过对冈底斯弧的构造变形的研究,认为雅鲁藏布江缝合带以北,包括冈底斯弧在内的

青藏(高原)南部地区,在早白垩世一直受到强烈的压缩作用,在 99 Ma 时即隆升到 3 km 以上并一直维持到印藏碰撞^[13]。因而,对冈底斯弧弧后地区的构造—古地理的研究,对阐明特提斯的演化和青藏高原的形成时限和成因,都具有极为重要的意义。我们近 7 年来,通过在艰苦的野外工作的基础上,发现冈底斯弧弧后在早白垩世发生了强烈的裂谷作用,这将有力地制约欧亚大陆南缘的构造—古地理再造。本文仅讨论冈底斯弧弧后中部地区(83°~90°E±)早白垩世裂谷作用的沉积学证据。

2 冈底斯弧弧后早白垩世地层的岩性特点

狭义的冈底斯弧弧后地区指西藏中部地区,由北而南包括羌塘地体的南缘、班公湖—怒江缝合带和拉萨地体的北部,其岩性总结如图 1。在羌塘地体南缘的土门地区,早白垩世阿布山组角度不整合在侏罗系浅海相地层之上,其底部为厚近 50 m 的粗到细粒碎屑岩,向上则渐变为海相灰岩,含丰富的有孔虫和双壳类化石,大体相当于拉萨地体北部的朗山组。在班公湖—怒江缝合带上,早白垩世主要由下部的沙木罗组和上

① 国家自然科学基金项目(批准号 40072075)资助
收稿日期: 2002-12-26 收修稿日期: 2003-01-10

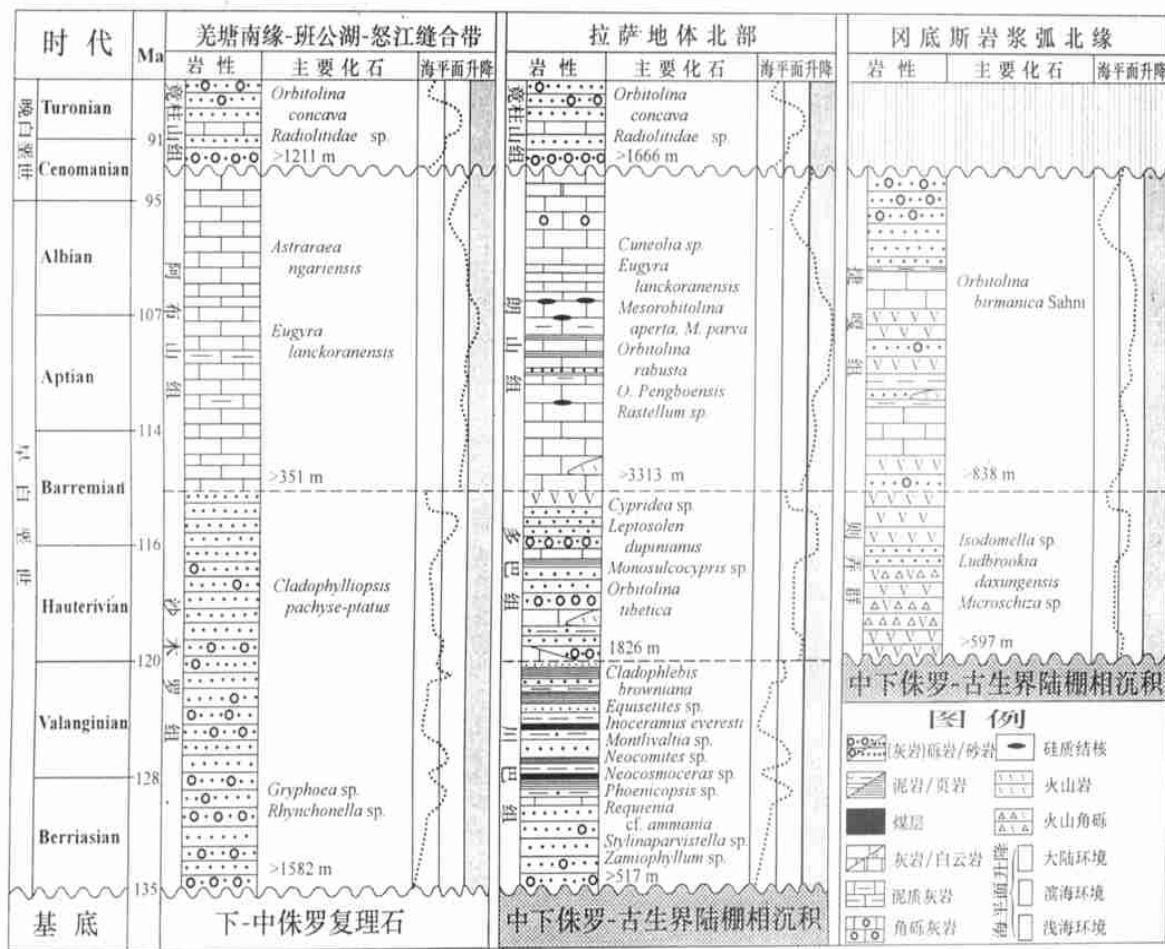


图 1 冈底斯弧弧后早白垩世地层柱状示意图

Fig. 1 Early Cretaceous stratigraphy of the back-arc area of the Gangdese magmatic arc, central Tibet

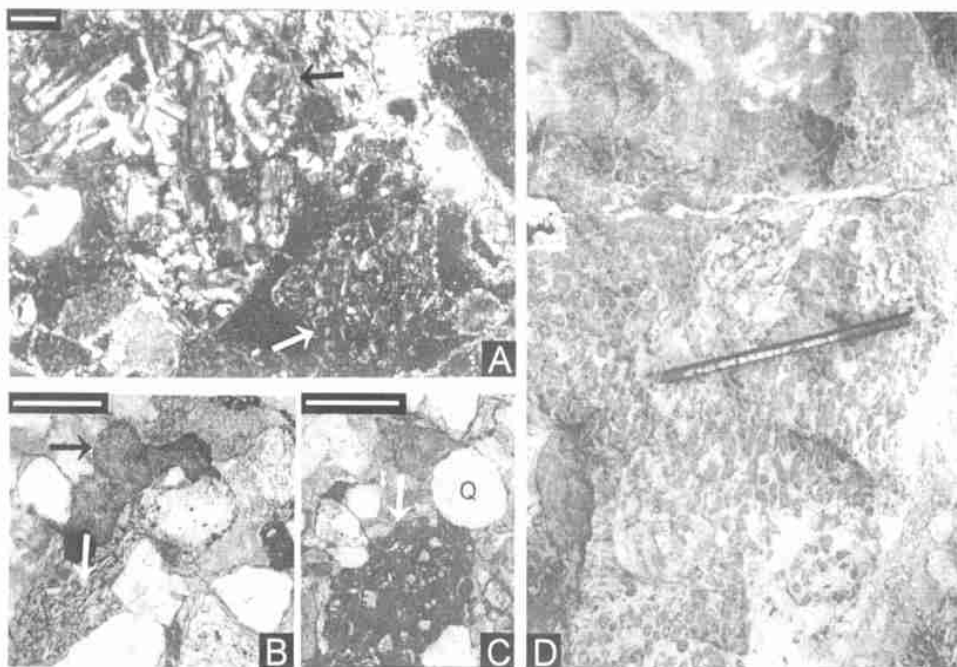
部的阿布山组组成;沙木罗组可能下延至晚侏罗世,不整合在早-中侏罗世木嘎岗日组复理石之上,主要为一套向上变细的碎屑岩,但厚度仅约 1500 多 m;阿布山组为一套厚度不详的海相碳酸盐岩。拉萨地体北部的早白垩世地层从上到下由川巴组、多巴组和朗山组组成,川巴组主要为一套局部含煤的碎屑岩;多巴组则为碎屑岩与碳酸盐岩互层,其中多有火山岩夹层和火山岩碎屑(图 2B, C);朗山组为厚达 3~4 km 的碳酸盐岩^[8, 14-16]。在冈底斯岩浆弧北缘地区,早白垩世地层从下到上包括则弄群和捷嘎组。则弄群主要由火山熔岩和火山碎屑岩组成,间夹少量砂岩,化石稀少,本次研究仅据少量化石以及其火山作用与多巴组的同时性,认为它是早白垩世中期的产物。捷嘎组为一套灰岩-碎屑岩-火山岩的复杂组合,厚度 > 838 m,灰岩及碎屑岩含化石丰富,与朗山组时代相当。综合起来看,冈底斯弧弧后地区早白垩世地层的岩性的一个显著特点是,由下而上普遍从碎屑岩变化为海相碳酸盐岩(图 1)。

3 冈底斯弧弧后早白垩世沉积相演变

早白垩世早期 (Berriasian-V alanginian) 的碎屑岩仅局限于班怒带附近 (沙木罗组下部) 和拉萨地体北侧 (川巴组),其中含丰富的植物化石及碎片,并混生有海相化石,属广义的三角洲相沉积。碎屑搬运方向主要为由北而南,显示物源区在北方(图 3A)。

早白垩世中期 (Hauterivian-Early Barremian) 的沉积物 (沙木罗组上部、多巴组、则弄群) 的覆盖范围较早期沉积物明显加大,可能主要形成在高能的潮坪环境,不少层位具有丰富的鱼骨状交错层理、透镜状层理和波状交错层理等,灰岩中含丰富的海相化石,如固着蛤、有孔虫等。经常能够观察到近百米的角砾状灰岩,这些角砾状灰岩在近冈底斯弧一侧呈近带状分布,与火山岩夹层几乎在同一带内,表明它们可能都受到同生长正断层的控制(图 3B)。但其南部也局部分布有三角洲相沉积(图 3B)。

早白垩世晚期 (Late Barremian-Early Cenomani-



A. 砂岩中的辉长岩(黑箭头)和玄武岩(白箭头)小砾石(取自图 3 班公湖-怒江缝合带之最东侧沙木罗组);
 B. 砂岩中的玄武岩颗粒(白箭头)和玻屑(黑箭头); C. 砂岩中的流纹质岩(白箭头)和磨圆的石英颗粒(Q),
 B和 C均取自同一薄片,其中存在双峰式火山岩屑和远源沉积物(取自图 3 磁石北东约 80km 处多巴组);
 D. 珊瑚礁(图 3 东错以西朗山组) 比例尺长度为 1 mm

图 2 冈底斯弧后早白垩世沉积岩中一些代表性的特征

Fig. 2 Diagnostic signatures for Early Cretaceous sedimentary rocks in central Tibet

an)碳酸盐岩(朗山组、阿布山组)与早白垩世早期沉积物(沙木罗组、川巴组)在拉萨地体北侧和班怒带附近极为有限的分布不同,其沉积已扩展至羌塘地体南缘^[16,19]。如在西部阿里地区多玛附近^[15,20,21]、在土门地区^[16,19]都发现有含丰富海相化石、数百米厚的朗山组台地相灰岩。除了前人业已在青藏公路以西的拉萨地体上发现的广泛分布的朗山组海相沉积外^[8,14-19,22],在青藏公路以东也发现了与西部相同的沉积,如在拉萨市北东约 180 km 的桑巴附近,朗山组台地相灰岩厚达 3 100 m^[16,19]。灰岩含生物(碎屑)丰富,如固着蛤、有孔虫、珊瑚等,部分层位出现较深水生物如海绵等,不少地段出现固着蛤和珊瑚的生物礁(图 2D);岩性单一,但中部普遍含丰富的硅质结核条带,局部地区顶部出现鸟眼状灰岩和白云岩。因而该时期的岩石可能主要形成在台地相环境下,局部形成在局限台地相环境(图 3C)。

因此,自早白垩世中期开始的海侵是显而易见的,并在早白垩世晚期得到进一步发展(图 1, 3)。

4 冈底斯弧后早白垩世砂岩碎屑成分的变化

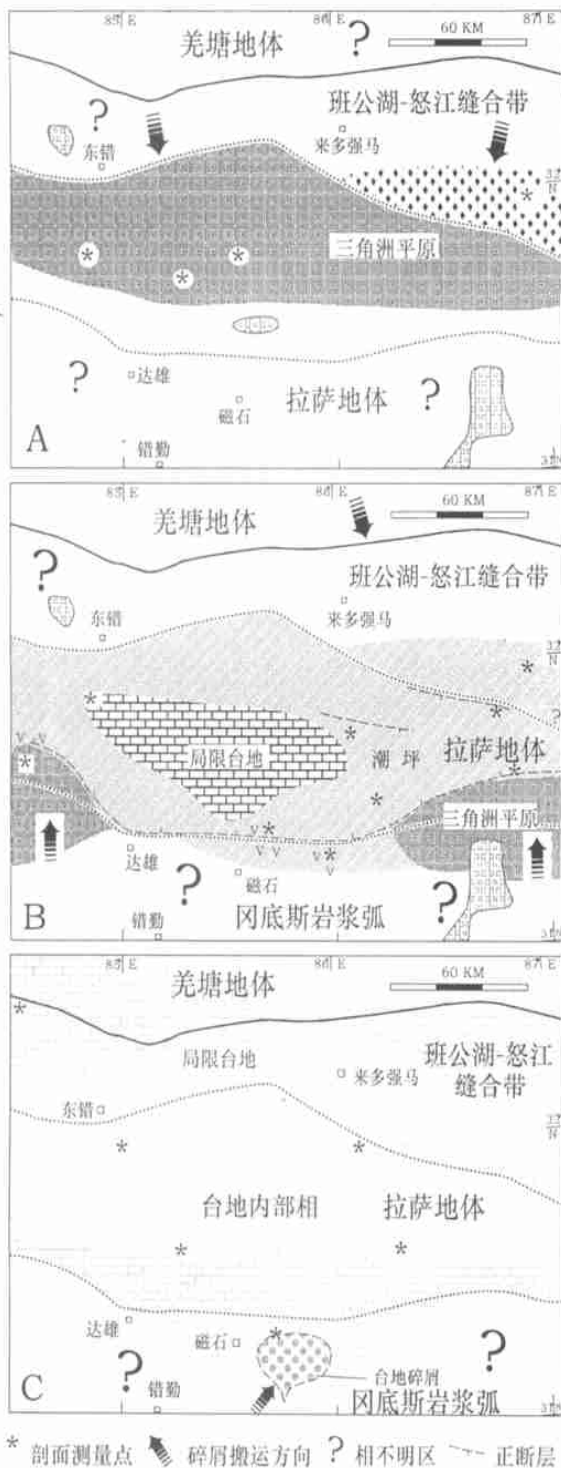
通过对 100 多个基质含量 < 25% 的砂岩薄片组分

的统计发现,早白垩世砂岩碎屑成分呈非常有意义的规律性变化,早白垩世早期碎屑物源主要来自北侧的造山带,向上则逐步受到南侧火山弧的控制(图 4A- D)。

在早白垩世早期(沙木罗组、川巴组)的砂岩碎屑成分中,长石和岩屑平均各占 11%,石英平均占 78%,其中不时能够观察到超基性岩和基性岩碎屑颗粒(图 2A),局部见放射虫颗粒,清楚地表明其物源主要来自造山带(图 4A, D)。

早白垩世中期砂岩中,以石英颗粒(图 2C)含量最为丰富,平均为 54%,次之岩屑,平均含量 26%,长石含量最少,为 20%;但各种碎屑含量的变化幅度很大,石英从 4% 到 89%,岩屑从 1% 到 67%,长石从 1% 到 73%。砂岩碎屑由造山带和岩浆弧两个物源区(图 4B),偶尔还有(克拉通内部?)远源沉积物(图 2C)。样品位置越偏南,越向上,则源自岩浆弧的数目越多,表明岩浆弧在研究区的南部,岩浆活动随时代变新而变强。有意思的是,部分含丰富的火山岩碎屑的砂岩中,观察到双峰式火山岩碎屑,即玄武岩岩屑与流纹岩岩屑共存于同一薄片(图 2B, C)。

早白垩世晚期砂岩以岩屑为主,平均占 42%,其中 65% 的来自火山岩,次之石英,平均占 34%,长石平



A. 早白垩世早期; B. 早白垩世中期; C. 早白垩世晚期
 在图 B 的正断层附近的剖面测量点均发现灰岩砾岩或火山岩
 图 3 冈底斯弧弧后早白垩世岩相-古地理示意图
 Fig. 3 Sketch map of Early Cretaceous facies distribution and paleogeography in the back-arc area of the Gangdese magmatic arc, central Tibet

5 讨论

大量的研究证明,拉萨地体和羌塘地体自晚侏罗世起即沿班公湖-怒江缝合带开始发生碰撞^[4-10,14-18]。本次研究表明,拉萨地体北侧和班怒带附近堆积的晚侏罗世-早白垩世初的沙木罗组和早白垩世初期的川巴组,其总体岩性特征(图 1)和砂岩组分特点(图 2A, 4A, D)显示其为的一套陆源碎屑磨拉石岩系,这表明拉萨地体和羌塘地体的碰撞可能延续到早白垩世 Valanginian 期。然而,早白垩世中期(以多巴组为代表)的岩性已变化为海相碎屑岩和灰岩的互层沉积,并夹有数层双峰型火山岩层(它文另述);随后沉积的早白垩世晚期沉积物(以朗山组为代表)则完全变化为厚度巨大、几乎单一的台地相碳酸盐沉积(图 1)^[14-16,18,19]。自早白垩世中期多巴组开始的海侵,在早白垩世晚期(以朗山组为代表)达到高峰,并可能延伸到晚白垩世 Cenomanian 早期^[17],在其晚期又转化为陆相碎屑沉积(图 1)^[15]。这种海侵既朝北向羌塘地区发展,又朝南向冈底斯弧地区发展(图 3)^[19],显然不能考虑是因羌塘和拉萨地体碰撞挠曲的产物,这是因为这种挠曲产生的沉降总是向前陆方向单方向传播的^[24],而不是象研究区那样,沉降朝前、后(陆)方向双向发展(图 3)^[16,19]。朗山组台地相灰岩也显示,当时周边地区的地形非常和缓,因为从较高的地形上剥蚀而来的陆源碎屑必然会造成碳酸盐造岩生物的窒息^[25],而不会产生沉积物如此巨厚、岩性如此单一、沉积范围如此之广的灰岩。也就是说,当时不太可能有挤压造山作用和因此产生的造山带。十分有趣的是,在相隔不远的塔里木南部^[26]和思茅地区^[27],早白垩世主要为陆相沉积或未接受沉积,在晚白垩世才开始出现海侵,与冈底斯弧的弧后地区海平面变化非常不同。因此,冈底斯弧后地区早白垩世中期开始的大范围的海侵(图 3),显然不是全球或区域性海侵的结果,应是局部性裂谷作用导致的构造沉降的产物。多巴组中双峰型火山岩当是冈底斯弧弧后地区的裂谷环境下的产物;多巴组沉积岩层中双峰式火山岩碎屑(图 2B, C)的发现,更进一步证实了这种裂谷作用的存在^[23]。已有的火山岩夹层的 K-Ar 年龄约为 115 Ma。因此,冈底斯弧弧后裂谷作用可能发生于早白垩世 Hauterivian 期到晚白垩世初 Cenomanian 早期,约从 120 Ma 到 95 Ma,持续约 25 Ma。

前人在青藏公路附近的拉萨地体上,也曾发现了

均含量为 24%。砂岩的物源区主要为岩浆弧,个别来自造山带(图 4C)。

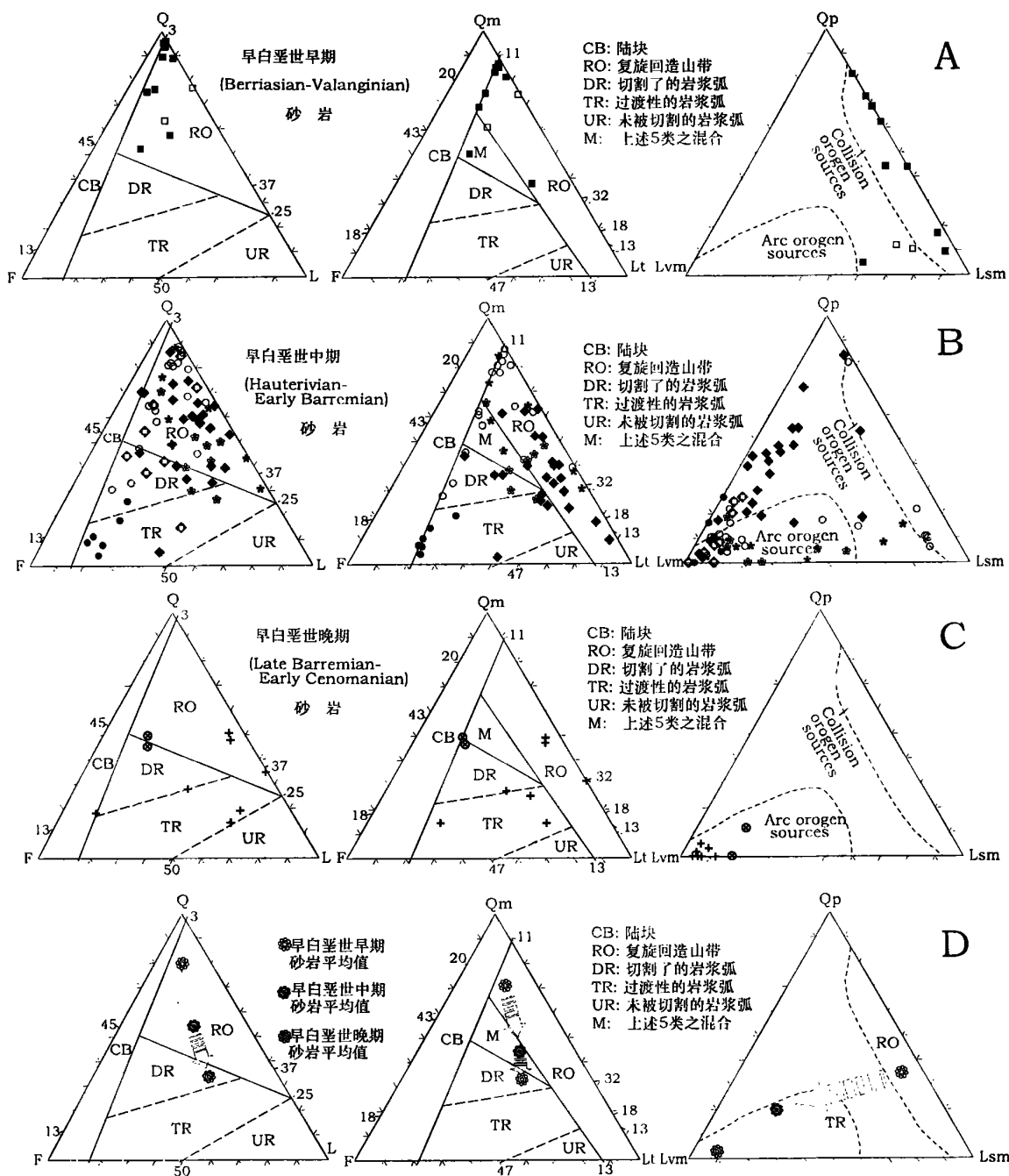


图 4 冈底斯弧后早白垩世砂岩颗粒组分的三角投影

Fig. 4 Ternary plots of modal sandstone grain compositions in the back-arc area of the Gangdese magmatic arc, central Tibet

大致同时代的火山岩, 尽管对它们是形成于后造山构造坍塌^[28]还是弧后盆地^[29]的背景, 争议颇大, 但毫无疑问都支持当时的伸展(裂谷)构造环境。由于这种裂谷作用不仅发生在冈底斯弧的弧后地区, 同时还发生在印度和巴基斯坦境内 Ladakh-Kohistan 岩浆弧的弧后地区, 并且还与冈底斯弧的前弧盆地的形成时代相耦合^[1,2], 因而, 这种大范围的同期裂谷作用, 被认为是由于雅鲁藏布新特提斯洋俯冲所引发的岩浆-热活

动, 在仰冲板块上产生广泛的松弛和拉张应变的结果

6 对欧亚大陆南缘重建的意义

西藏中部地区的裂谷盆地为我们展示了一个发育在陆壳基底上还没有出现洋壳的弧后盆地的典型实例。而在更东侧的班戈湖区, 那儿广泛发育的蛇绿岩岩片, 也有人认为是早白垩世边缘海原地封闭的产物^[10,30,31]。在我国境内最西侧的狮泉河一带, 也存在相

近或相同时期的边缘海型蛇绿岩套^[20]和复理石沉积^[21],该地区的边缘海盆地也极有可能是由弧后裂谷作用产生的^[20]。向西,与冈底斯弧弧后裂谷作用的发生时限大致相同的印度境内 Ladakh 岩浆弧和巴基斯坦境内 Kohistan 岩浆弧的弧后地区^[1,2],因裂谷作用形成了具有洋壳基底的 Shyok 边缘海盆地^[1,2]。因此,在早中白垩世,欧亚大陆南缘显然是西太平洋型的活动大陆边缘,发育强烈的弧后裂谷作用,并因此产生了一系列边缘海盆地(图 5)。这表明,在包括青藏高原南部在内的欧亚大陆南缘,既没有构造动力,也没有古地理和古地形证据支持在早白垩世末(99 Ma±)即出现强烈的抬升^[16,19]。

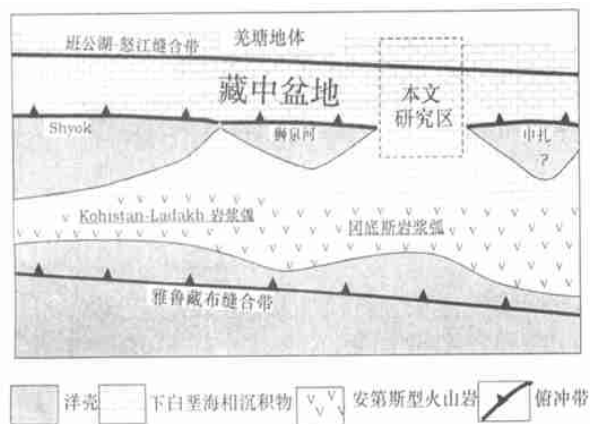


图 5 欧亚大陆南缘早白垩世 (Hauterivian-Early Cenomanian) 构造重建

Fig. 5 Tectonic reconstruction of southern Eurasian margin in Early Cretaceous time (Hauterivian-Early Cenomanian)

致谢 本研究得到国家自然科学基金(40072075)和中国石油天然气总公司的资助,孔庆友、赵明等协助进行了砂岩的研究,黄志诚教授给予了热情的指教,一并致以衷心的感谢。

参考文献 (References)

- 1 Rolland Y, Pecher A, Picard C. Middle Cretaceous back-arc formation and arc evolution along the Asian margin: the Shyok Suture zone in northern Ladakh (NW Himalaya) [J]. *Tectonophysics*, 2000, 325: 145~173
- 2 Treloar P J, Petterson M G, Jan M Q, *et al.* A re-evaluation of the stratigraphy and evolution of the Kohistan Arc sequence, Pakistan Himalaya: implications for magmatic and tectonic arc-building processes [J]. *Journal of the Geological Society, London*, 1996, 153: 681~693
- 3 徐仁. 青藏高原植被的变化和高原的隆升 [J]. *青藏高原生态和地质研究*, 1981, 1: 139~144 [Xu R. Vegetational changes in the past and uplift of the Qinghai-Xizang plateau [J]. *Geological and Eco-*

- logical Studies on the Qinghai-Xizang Plateau, 1981, 1: 139~144]
- 4 Allegre C J, Courtillot V, Tapponnier P, *et al.* Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt [J]. *Nature*, 1984, 307: 17~22
- 5 Chang C F, Chen N, Coward M P, *et al.* Preliminary conclusions of the Royal Society/Academia Sinica 1985 Geotraverse of Tibet [J]. *Nature*, 1986, 323: 501~507
- 6 Dewey J F, Shackleton R M, Chang C F, *et al.* The tectonic development of the Tibetan plateau [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London A*, 1988, 327: 379~413
- 7 萧序常,李廷栋,李光岑等. 喜马拉雅岩石圈构造演化 [M]. 北京: 地质出版社, 1988. 1~188 [Xiao X C, Li T D, Li G C, *et al.* Tectonic evolution of the Himalayan lithosphere [M]. Beijing Geological Publishing House, 1988. 1~188]
- 8 余光明,王成善. 西藏特提斯沉积地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1990. 1~185 [Yu G M, Wang C S. Sedimentary Geology of the Xizang (Tibet) Tethys [M]. Beijing Geological Publishing House, 1990. 1~185]
- 9 钟大赉,丁林. 青藏高原的构造发展 [J]. *中国科学 (D)*, 1996, 26: 289~295 [Zhong D L, Ding L. Tectonic development of the Tibetan plateau [J]. *Science in China (D)*, 1996, 26: 289~295]
- 10 潘桂棠,陈智梁,李兴振等. 东特提斯地质构造形成演化 [M]. 北京: 地质出版社, 1997. 1~218 [Pan G T, Chen Z L, Li X Z, *et al.* Geologic and tectonic formation and evolution of the eastern Tethys [M]. Beijing Geological Publishing House, 1997. 1~218]
- 11 England P, Searle M. The Cretaceous-Tertiary deformation of the Lhasa terrain and its implications for crustal thickening in Tibet [J]. *Tectonics*, 1986, 5: 1~14
- 12 Mattauer M. Intracontinental subduction, crust-mantle decollement and crustal-stacking wedge in the Himalayas and other collision belts [J]. *Geological Society Special Publications*, 1986, 19: 37~50
- 13 Murphy M A, Yin A, Harrison T M, *et al.* Did the Indo-Asian collision alone create the Tibetan plateau? [J]. *Geology*, 1997, 25: 719~722
- 14 刘训,傅德荣,姚培毅等. 青藏高原不同地体的地层、生物区系及沉积构造演化史 [M]. 北京: 地质出版社, 1992. 1~168 [Liu X, Fu D R, Yao P Y, *et al.* Stratigraphy, paleogeography, and sedimentary-tectonic development of Qinghai-Xizang plateau [M]. Beijing Geological Publishing House, 1992. 1~168]
- 15 西藏地质矿产局. 西藏自治区地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1993. 1~707 [Xizang Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Xizang Autonomous Region, China [M]. Beijing Geological Publishing House, 1993. 1~707]
- 16 Zhang K J, Xia B D, Liang X W. Mesozoic and Paleogene sedimentary facies and paleogeography of Tibet: tectonic implications [J]. *Geological Journal*, 2002, 37: 217~246
- 17 Yin J, Xu J, Liu C, *et al.* The Tibetan plateau: Regional stratigraphic context and previous work [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London A*, 1988, 327: 5~52
- 18 林宝玉,王乃文,王思恩等. 西藏地层 [M]. 北京: 地质出版社, 1989. 1~168 [Lin B Y, Wang N W, Wang S, *et al.* Stratigraphy of Xizang Province, China [M]. Beijing Geological Publishing

- House, 1989. 1-168]
- 19 Zhang K J. Cretaceous paleogeography of Tibet and adjacent areas (China): tectonic implications [J]. *Cretaceous Research*, 2000, 21: 23-33
- 20 郭铁鹰, 梁定益, 张宜智等. 阿里地质 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991. 1-464 [Guo T Y, Liang D Y, Zhang Y Z, *et al.* *Geology of Ngari, Tibet (Xizang), China* [M]. Wuhan: The China University of Geosciences Press, 1991. 1-464]
- 21 杨式溥, 宋志敏, 梁定益. 西藏阿里 (狮泉河-多玛) 地区中侏罗世-早白垩世复理石相遗迹化石 [J]. *地质学报*, 1982, 56: 302-313 [Yang S P, Song Z M, Liang D Y. Middle Jurassic to Early Cretaceous flysch trace fossils from Ngari region, Tibet (China) [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1982, 56: 302-313]
- 22 Zhang K J, Zhang Y J, Xia B D. Did the Indo-Asian collision alone create the Tibetan plateau? - Comment [J]. *Geology*, 1998, 26: 1098-1099
- 23 Garzanti E, Vezzoli G, Ando S, *et al.* Petrology of rifted-margin sand (Red Sea and Gulf of Aden, Yemen) [J]. *The Journal of Geology*, 2001, 109: 277-297
- 24 Ori G G, Friend P F. Sedimentary basins formed and carried piggyback on active thrust sheets [J]. *Geology*, 1984, 12: 475-478
- 25 Wilson J L. Carbonate facies in geologic history [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1975. 1-471
- 26 唐天福, 薛耀松, 俞从流. 新疆塔里木盆地西部晚白垩世至早第三纪海相沉积特征及沉积环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1992. 1-138 [Tang T F, Xue Y S, Yu C L. Characteristics and sedimentary environments of the Late Cretaceous to early Tertiary marine strata in the western Tarim basin, China [M]. Beijing: Science Press, 1992. 1-138]
- 27 成都地质矿产研究所, 四川区调队. 怒江、澜沧江、金沙江区域地层 [M]. 北京: 地质出版社, 1992. 1-469 [Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Sichuan Geological Survey. Stratigraphy in the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992. 1-469]
- 28 Xu R H, Scharer U, Allegre C J. Magmatism and metamorphism in the Lhasa block (Tibet): a geochronological study [J]. *Journal of Geology*, 1985, 93: 4-57
- 29 Debon F, Le Fort P, Sheppard S M F, *et al.* The four plutonic belts of the Transhimalaya-Himalaya: A chemical, mineralogical, isotopic and chronological synthesis along a Tibet-Nepal section [J]. *Journal of Petrology*, 1986, 27: 219-250
- 30 王希斌, 鲍佩声, 邓万明等. 西藏蛇绿岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1987. 1-336 [Wang X B, Bao P S, Deng W M, *et al.* *Ophiolites of Xizang* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987. 1-336]
- 31 Hsu K J, Pan G T, Seng Φ r A M C. Tectonic evolution of the Tibetan Plateau: A working hypothesis based on the archipelago model of orogenesis [J]. *International Geology Review*, 1995, 37: 473-508

Sedimentologic Evidence for Early Cretaceous Back-arc Rifting of the Gangdese Magmatic Arc, Tibet, Western China

ZHANG Kai-jun^{1,2} XIA Bin¹ XIA Bang-dong² WANG Guan-min³
ZHANG Meng-qun⁴ LI Yong-tie⁵ YE He-fei⁵

1(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640)

2(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

3(Department of Resources, Petroleum University, Dongying, Shandong 257062)

4(Material Analysis Center, Nanjing University, Nanjing 210093)

5(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Company Limited, Beijing 100083)

Abstract Early Cretaceous sedimentary system in the back-arc area of the Gangdese magmatic arc, central Tibet, western China, is characterized by a distinct change from clastics to carbonates in an ascending order. An intensive marine transgression occurred in this area during middle Cretaceous time, which led to accumulation of a massive succession of platform limestone in the southern margin of the Qiangtang terrain and the Lhasa terrain. The trend of eustasy in this area is quite different from that in the Tarim and Simao basins, where a coeval marine regression was in progress. Sandstones (Q78F11L11) in early Early Cretaceous were mainly derived from northern orogen but, upwards, they were gradually dominated by a (southern) magmatic arc provenance. Both bimodal volcanic rocks and bimodal volcanic debris were sometimes found within the middle Cretaceous sedimentary sequences in the southern margin of the back-arc area. An early Cretaceous back-arc rifting event is thus proposed regarding the Gangdese magmatic arc. This back-arc rifting gave rise to the Shyok marginal sea that was floored by oceanic basement, in the back-arc area of the Ladakh-Kohistan arcs. We believe that, during (early-) middle Cretaceous time, the entire

(Continued on page 65)

- Sedimentary Petrology, 1992, 62 35~ 40
- 13 Gao S, Collins M. Net transport direction of sands in a tidal inlet, using foraminiferal tests as natural tracers[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, 40 681~ 697
- 14 White T E. Status of measurement techniques for coastal sediment transport[J]. Coastal Engineering, 1998, 35 17~ 45
- 15 Gao S. A theoretical framework of tracer methods for marine sediment dynamics [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45 1434~ 1440

Tracer Methods in Marine Sediment Dynamics

GAO Sh u

(Ministry of Education Key Laboratory for Coast and Island Development, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract The present contribution is concerned with the application of tracer methods to marine sediment dynamics, in terms of material source identification, sediment transport rate calculations and the problem of a universal theoretical framework. For the tracing of material sources, mixing models that are originally established for river basin systems should be modified to fit marine environments; in particular, changes in the fingerprinting particles during transport must be considered. In the research field of sediment transport rate determination, artificial tracers have been used, on the basis of the spatial integration method (SIM), the time integration method (TIM), or the continuous injection method (CIM), with the SIM being the most popular. In the application of these methods it is crucial to define the centroid movement and the depth of disturbance. In the case of natural tracers, these methods are no longer applicable because the centroid movement cannot be defined. Nevertheless, in some circumstances, natural tracers can provide information on transport, on the basis of a mathematical model. Further investigations are required in the future to establish a universal theoretical framework for both artificial and natural tracers for sediment transport studies, in which solutions must be found to the problems associated with the differential dynamic behaviors of the tracer and the bulk sediment, deposition rates and the depth of disturbance as functions of the temporal scale, and sediment dispersive processes.

Key words marine sediment transport, source tracing, artificial tracer experiments, natural tracer method, universal theoretical framework

(Continued from page 37)

southern Eurasian margin could have been active, leading to a series of back-arc rift basins. Some basins may have ultimately been floored by oceanic crust while others remained underlain by continental or transitional basement, much like the present western Pacific margin. There is no mechanism and no paleogeographic and topographic evidence to support the view that the Tibetan plateau had intensely been elevated by the end of Early Cretaceous time.

Key words Gangdese magmatic arc, Early Cretaceous, back-arc rifting, southern margin of the Eurasian continent, tectonic reconstruction