



前陆盆地钾盐矿床成因及模式

——以西班牙北部埃布罗盆地为例*

王立成¹, 刘成林¹, 王延路²

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要 前陆盆地蕴藏有巨量的钾盐资源,而对于其内的钾盐矿床成因和模式还欠缺系统的总结。西班牙埃布罗盆地是由于伊比利亚和欧亚块体碰撞而形成的前陆盆地。始新世晚期(约36 Ma)海水完全从盆地退出后,在极端干旱气候作用下,由于碰撞造山导致盆地的封闭作用,在南比利牛斯前陆盆地系统的前渊带(即埃布罗盆地北部)形成了典型的厚层含钾石盐-光卤石的正常海相蒸发岩序列。后期受到构造挤压作用,钾盐地层以盐底劈的形式出露在背斜核部。埃布罗盆地钾盐成因是构造、气候和物源三者耦合作用的结果,与中国库车前陆盆地有很大的相似性。据此,作者建议可重点关注盆地南北盐丘地带苏维依组蒸发岩以及卤水的迁移方向。

关键词 地质学,前陆盆地,钾盐矿床,钾盐矿床模式,埃布罗盆地

中图分类号: P619.211

文献标志码: A

Genesis and formation model of potash deposits in foreland basins: A case study of Ebro Basin, northern Spain

WANG LiCheng¹, LIU ChengLin¹ and WANG YanLu²

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

The foreland basin hosts huge reserves of potash salts, although there is no systematic summary of the genesis and formation model of potash salts deposits. The Ebro Basin is a typical foreland basin produced by the collision between Euro-Asia and Iberia plates. Nearly isochronous sea retreat that occurred at the late Eocene (36 Ma) led to the transition from marine to continent. Basin closure caused by orogeny and continentalization combined with arid climate led to precipitation of relatively thick typical marine evaporite sequences containing sylvite and carnallite in the fore-deep area of South Pyrenean foreland systems. Potash salts were exposed in the core of the anticlines as salt diapirs after successive tectonic compression. Potash salts in the Ebro Basin are the coupling mechanism of tectonism, climate, and source, similar to features of the Kuqa foreland basin. It is thus held that further work should focus on the evaporites in the Suweiyi Formation in salt domes and transportation of the brines.

Key Words: geology, foreland basin, potash deposit of metallogenic, model of potash deposit, Ebro Basin

据美国地质调查局统计,2015年世界钾盐资源量为 2500×10^8 (按 K_2O 折算) 这些巨量钾盐资源按其分布地域来讲,主要集中在北美、欧洲和中亚等地;主要分布时代从第四纪—泥盆纪(刘成林等,2006)并且在各种大地构造背景下皆有产出;刘成林等(2015)将其分为离散型、汇聚型和稳定型3大类,而对于前陆盆地的钾盐矿床特征和成矿模式还缺乏系统的梳理、总结。通常,前陆盆地的形成是由于大型逆冲席的侵位结果,一般具有不对称的形态(Jordan et al., 1988)而其沉积充填的演化,如沉积环境、厚度、垂向序列等,也与挤压构造活动息息相关(Muñoz-Jiménez et al., 1997)通常由于弹性挠曲先充填海相沉积物(Jordan, 1981)而后由于持续汇聚结束海相历史,再沉积陆相碎屑岩(Allen et al., 1986)。这种海陆转变通常为蒸发岩的形成提供了良好的构造空间和物质来源,若适逢干旱/极端干旱的古气候,则钾盐容易在盆地内形成。显生宙以来,沉积于前陆盆地的钾盐矿床包括摩洛哥三叠纪钾盐矿、中亚晚侏罗世钾盐矿、西班牙埃布罗始新世—渐新世钾盐矿和意大利西西里中新世钾盐矿等(钱自强等,1994;Warren, 2010),特别是西班牙埃布罗钾盐盆地面积小,储量却达到2.7亿吨(K_2O 当量)(刘成林等,2015),是典型的前陆盆地超大型钾盐矿。据此,本文以西班牙埃布罗钾盐盆地为例,结合前人资料和2014年实地考察,试图总结该前陆盆地钾盐矿床的特征、成因及其成钾模式,以期为中国海相找钾提供思路和借鉴。

1 埃布罗盆地演化与充填序列

在伊比利亚块体内,古近纪的前陆盆地与阿尔卑斯山链相接,盆地北部是比利牛斯山,南部是贝蒂克山链。由于伊比利亚和欧洲块体从晚白垩世—中新世早期(85~21 Ma)的持续汇聚,南比利牛斯前陆盆地得以形成(Caja et al., 2010)。一般而言,埃布罗盆地是南比利牛斯前陆盆地的最新演化阶段,而其早期阶段的前陆盆地目前已作为外来逆冲推覆体顶部的猪背盆地(Orí et al., 1984)。盆地总体呈NW-SE走向的三角形形状,其北西向边缘与海相连,北部与比利牛斯山相接,东南和西南部分别与加泰兰海岸山脉和伊比利亚山脉相邻(Sáez et al.,

2007;Costa et al., 2010)(图1)。盆地南缘由一系列NW-SE向到近EW向的南倾逆冲断裂组成,这些断裂水平位移从几百米到几十公里(Muñoz-Jiménez et al., 1997)。

从岩石圈尺度来看,比利牛斯山有2个显著特征:其一是在欧洲板块之下伊比利亚块体的下地壳俯冲;其二是在上地壳形成了拆离的造山棱柱体(Teixell, 1998)。盆地的基岩包括:①海西期花岗岩基底和低级变质岩;②中生代前造山期海相碳酸盐岩;③同造山期晚三叠期—早中新世碳酸盐岩和碎屑岩;④后造山期沉积序列(Caja et al., 2010)。在早白垩世(约125 Ma),伊比利亚块体开始逆时针旋转并向北与欧洲块体开始汇聚(图2, Sibuet et al., 2004),主比利牛斯造山作用一直持续到约20 Ma(Sinclair et al., 2005)。在新近纪—第四纪(~23 Ma)以来,埃布罗盆地东南缘和东比利牛斯山由于瓦伦西亚海槽打开相关的裂谷作用而开始隆升(Lewis et al., 2000),大约13~8.5 Ma,盆地通过古埃布罗河与地中海连通(Rushlow et al., 2013)。

南比利牛斯盆地的演化与比利牛斯山的逆冲侵位和隆升密切相关(Cendón et al., 2003)。埃布罗盆地在剖面上呈不对称状,古近纪沉积物最厚处在北端的近比利牛斯山前,向南沉积物厚度逐渐减薄(Costa et al., 2010)。南比利牛斯前陆盆地的充填序列包括晚白垩世—中中新世海相和陆相沉积物,盆地可能通过海水通道与边缘洋盆相连通,在东部是特提斯洋,西部是大西洋,环比利牛斯地区的古地理重建表明,东部海水通道在始新世中—晚期经历了早期持续的闭合作用(Meulenkamp et al., 2003)。盆地西部与大洋的联系一直维持到始新世晚期,自始新世中期开始的西比利牛斯山的持续构造隆升导致了盆地与大西洋的最终分隔(Muñoz-Jiménez et al., 1986;Puigdefàbregas et al., 1992)。最近的古地磁结果表明(Costa et al., 2010),在埃布罗盆地东部和西部最终海相向陆相的转变都对应于约36 Ma(Priabonia期),不存在盆地东西部的穿时性,反映了总体快速的海退。封闭的海相条件导致了蒸发岩沉积在西部的纳瓦拉和东部的加泰兰盆地,但现今被中南比利牛斯逆冲席的侵位所分隔(Rosell et al., 1997)。海相盆地关闭后是连续的晚始新世—中中新世的厚层河流—湖泊相序列(Arenas et al., 1999)。

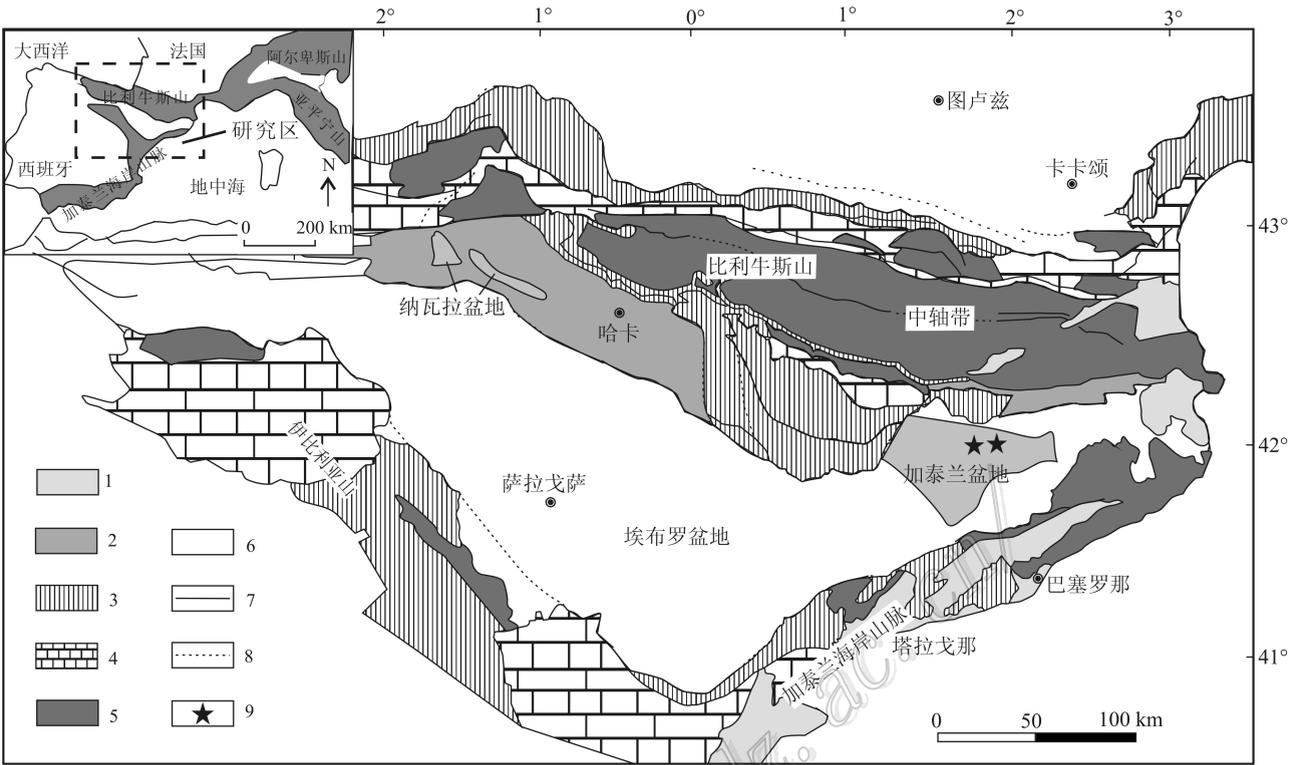


图 1 埃布罗盆地地质图 (修改自 Rushlow et al., 2013)

1—新近系; 2—始新统一渐新统; 3—晚白垩统一古新统; 4—早白垩统; 5—基底; 6—前陆盆地部分; 7—逆冲断裂; 8—隐伏逆冲断裂;
9—加泰兰盆地两个钾盐矿产地: Cardona 和 Súrria 地区

Fig. 1 Geological map of the Ebro Basin (modified after Rushlow et al., 2013)

1—Neogene; 2—Eocene-Oligocene; 3—Upper Cretaceous-Paleocene; 4—Lower Cretaceous; 5—Basement; 6—Foreland basin; 7—Thrust;
8—Blind thrust; 9—Two potash mines in Catalan Basin, Cardona and Súrria

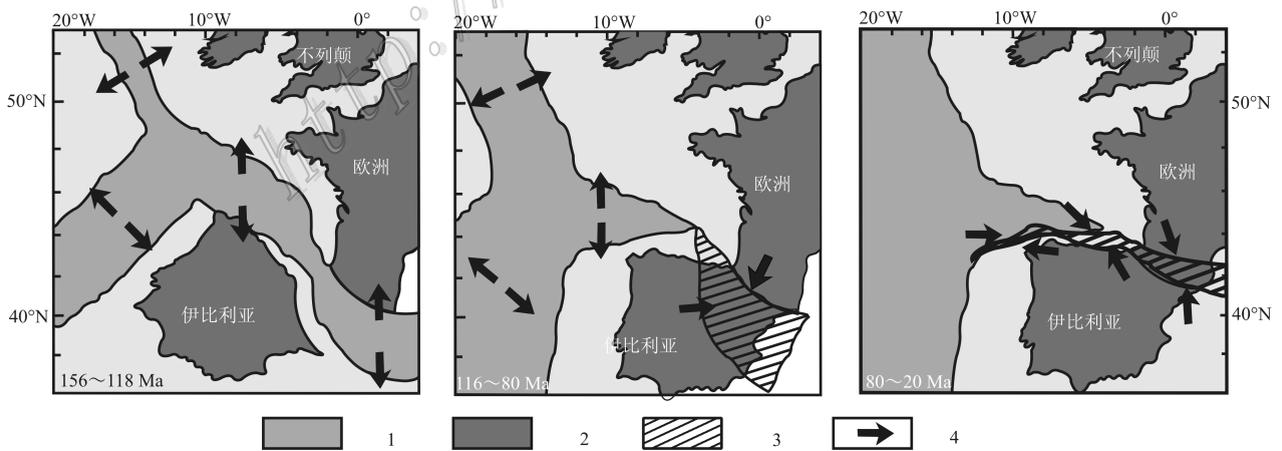


图 2 根据古地磁数据恢复的欧亚和伊比利亚块体动力学运动(据 Sibuet et al., 2004 修改)

1—大洋; 2—板块; 3—挤压区域; 4—板块相对运动方向

Fig. 2 Dynamically restored plate motions based on paleomagnetic data with Europe fixed (simplified after Sibuet et al., 2004)

1—Ocean; 2—Plate; 3—Compression area; 4—Relative plate motion directions

从晚始新世—中新世,埃布罗盆地是一个内陆的汇水盆地,盆地内发育盆地边缘的冲积体系和中部的浅湖和泥坪环境;在盆地中部存在几个大型湖泊扩张-收缩的旋回,每个旋回持续约 2 Ma (Sáez et al., 2007)。

2 蒸发岩盆地的形成与含蒸发岩地层

始新世时期南比利牛斯盆地记录了广泛的海相蒸发沉积作用 (Busson et al., 1997), 包括 2 个阶段: 第一个阶段在早-中始新世, 蒸发岩沉积在盆地的东部, 也叫东南比利牛斯盆地; 第二个阶段在晚始新世, 发育在南部, 并延伸到整个前陆盆地, 称之为钾盐盆地 (Rosell et al., 1997)。在晚白垩世—始新世晚期/渐新世界线, 东南比利牛斯盆地沉积厚度最大, 可达 6000 m (Carrillo et al., 2014)。在伊比利亚与欧亚块体碰撞的早期阶段, 东南比利牛斯盆地主要是非海相的 Garumn 相; 在早-晚始新世之间, 由于西部与大西洋的沟通, 整个盆地皆为海相沉积。该盆地最重要的地层单元包括下始新统和中始新统, 沉积含蒸发岩地层单元厚度 2500 m, 最大的蒸发岩单元包括 Serrat 蒸发岩和 Beuda 石膏组 (Carrillo et al., 2014)。

晚始新世的蒸发岩代表了盆地与广海隔绝前的最高海相层位沉积。晚始新世埃布罗盆地的古气候以中纬度的温暖气候 (热带到副热带) 为特征, 到始新世末期, 转变为存在干季的气候, 到早渐新世气候变得更加干旱 (Cabrera et al., 1987; Cavagnetto et al., 1996)。最高海相层 Liedena 砂岩的厚度和沉积相分布证明, 在始新世晚期盆地的构造隆升是由于南比利牛斯底部逆冲带顶部的 Jaca-Pamplona 盆地的向南平移导致的 (Payros et al., 2000; Larrasoña et al., 2003)。这期构造隆升可能与中纬度的海平面下降事件 (最高峰在 36.2 Ma) 同时发生, 并最终导致了盆地彻底隔绝了与广海的联系 (Costa et al., 2010), 海相含石盐-钾盐蒸发岩开始形成, 称之为 Cardona 组, 或区域上可对比的 La Noguera, Artés 和 òdena 蒸发岩单元 (Cendón et al., 2003; Sáez et al., 2007; Costa et al., 2011)。综合最高海相层的钙质超微化石和磁性地层学数据, 认为该套地层时代为 Priabonian 期 (Cascella et al., 2009)。

晚始新世南比利牛斯蒸发岩盆地可分为 2 个次级盆地, 西部的纳瓦拉和东部的加泰兰盆地。从构造背景, 岩相古地理和地球化学对比来看, 2 个次级盆地属于一个统一的蒸发岩盆地 (Ayora et al., 1995)。并且, 在 2 个次级盆地中, 蒸发岩都同时出现在三角洲沉积之上, 河湖相沉积之下 (Cendón et al., 2003)。在 2 个沉积中心, 蒸发岩序列都显示了典型的贫硫酸镁型的完整沉积旋回。这个旋回可以分为 4 个单元, 从底部到顶部依次是: ① 底部硬石膏段 (BAU); ② 下部石盐段 (LHU); ③ 钾盐段 (PU), 该段底部是钾石盐和石盐组合, 顶部是光卤石和石盐组合; ④ 上部石盐段 (UHU, 图 3)。不管是从盆地边缘到盆地中心, 还是从盆地演化早期到末期, 盆地皆由三角洲砂岩、泥灰岩、台地礁、叠层石灰岩以及石膏带和氯化物中心带组成。由于在 UHU 段碎屑夹层的比例逐步增加, 蒸发岩层序逐步被含硬石膏结核的泥岩所替代, 这被解释为撒布哈相 (Rosell et al., 1997; Cendón et al., 2003)。蒸发岩序列的总厚度是不一定的, 加泰兰次级盆地更厚, 达 300 m; 而纳瓦拉次级盆地稍薄, 最厚处仅 150 m。钻孔揭露, 在加泰兰沉积中心, PU 在中心位置呈透镜状, 横向延伸要小于下部石盐段; 在钾盐段内部, 光卤石层比钾石盐层占更大的面积 (Cendón et al., 2003)。

3 蒸发岩特征

3.1 蒸发岩沉积特征

石膏段 该段露头在东部加泰兰盆地延伸 60 km, 达 30 m 厚, 主要由硬石膏转化来的次生石膏组成 (Taberner et al., 2000)。石膏段主要由透石膏假晶相和纹层石膏相组成, 前者显示了再沉积的特点, 再沉积的石膏夹层在部分地区由垮塌的显示有内部纹层的石膏层, 以及中-粗粒石膏砂岩组成。

底部石膏段 (BAU) 底部硬石膏段在纳瓦拉次级盆地厚 1~5 m, 而在加泰兰次级盆地达 13 m 厚, 这个段直接发育在海相泥灰岩之上。

下石盐段 (LHU) 下石盐段在 BAU 段之上主要由条带状石盐组成, 在加泰兰地区达 130 m 厚, 而在纳瓦拉地区仅 12 m, 显示了由灰白色石盐和半透明灰色石盐交替导致颜色变化的条带结构。该段最上部 1~2 m 由条带状泥岩和红棕色石盐组成。

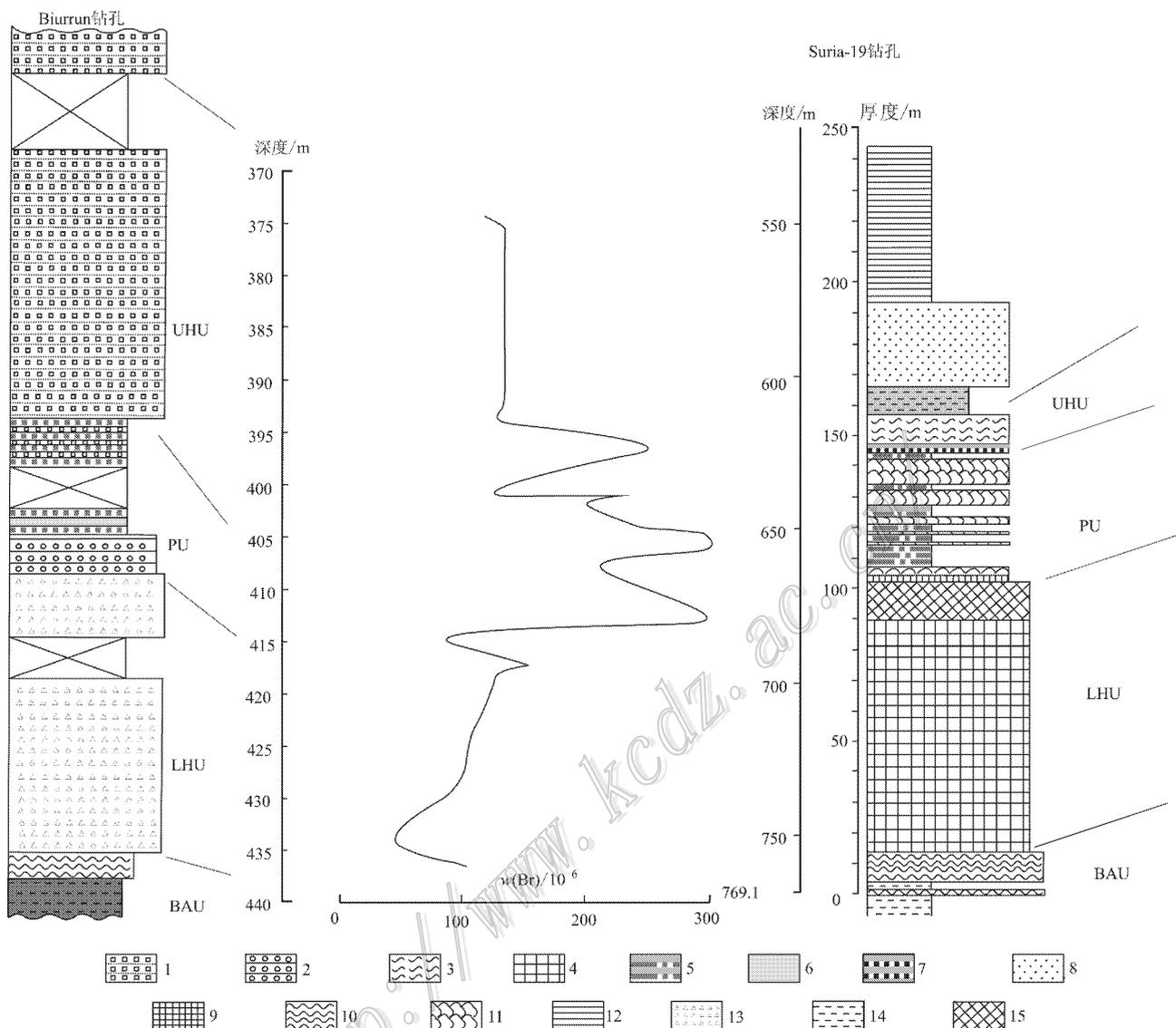


图 3 典型的蒸发岩序列(Biurrun 钻孔来自纳瓦拉盆地, Taberner et al., 2000; Suria-19 钻孔来自加泰兰盆地, Cendón et al., 2003)

- 1—石盐+硬石膏+黏土; 2—钾石盐+硬石膏+石盐; 3—硬石膏+石盐; 4—下石盐段; 5—光卤石; 6—硬石膏+黏土+石盐;
 7—上石盐段; 8—砂岩; 9—钾石盐; 10—硬石膏; 11—石盐夹钾石盐和光卤石; 12—红色泥岩; 13—石盐; 14—泥灰岩;
 15—下石盐段上部

Fig. 3 Typical evaporite sequences (borehole Biurrun is drilled in the Navarra Basin modified after Taberner et al., 2000; while borehole Suria-19 was drilled in the Catalan Basin modified after Cendón et al., 2003)

- 1—Halite + anhydrite + clay; 2—Sylvite + anhydrite + halite; 3—Anhydrite + halite; 4—Lower halite unit; 5—Carnallite; 6—Anhydrite + clay + halite; 7—Upper halite unit; 8—Sandstone; 9—Sylvite; 10—Anhydrite; 11—Halite intercalated with sylvite and carnallite; 12—Red mudstone; 13—Halite; 14—Marl; 15—Upper part of lower halite unit

钾盐段(PU) 在 2 个沉积中心都有发现,并由盆地中心向边缘减薄。从矿物组成来看,可分为 2 个序列:① 钾石盐夹层,在 LHU 上部,由互层的条带状微晶雾状红色石盐(1 mm 厚)和微晶钾石盐(2~6 mm 厚)旋回组成;钾石盐夹层的厚度在加泰兰

为 5~20 m,在纳瓦拉至多 2 m 厚。在该层存在一个完整的沉积旋回,即由不溶物-石盐-钾石盐-石盐-不溶物组成(Rosell et al., 1997)(图 4a、b);② 光卤石夹层,在加泰兰为 6 m,在纳瓦拉至多 12 m 厚,发育在沉积中心钾石盐夹层的顶部。由 2 种岩相组

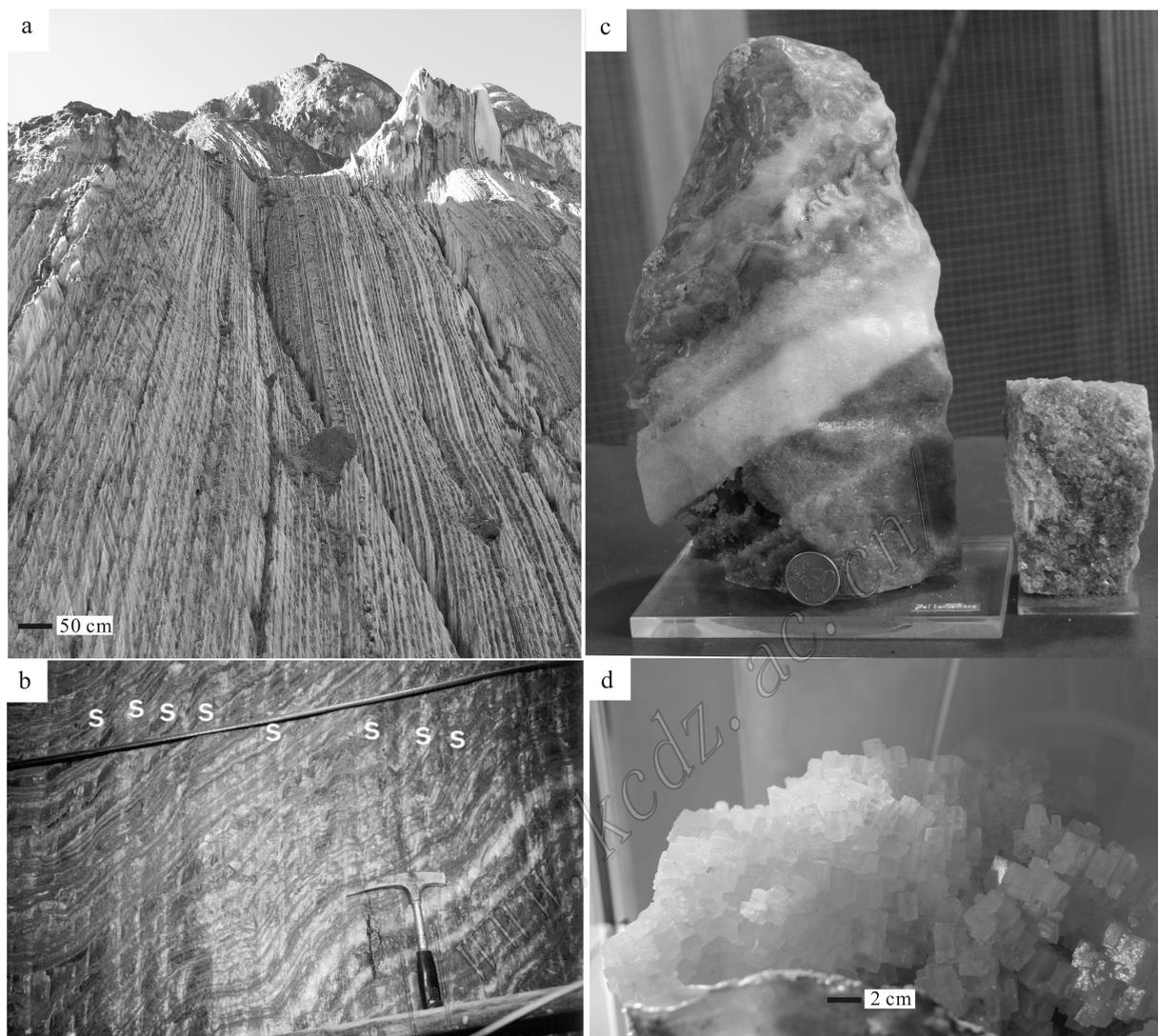


图4 埃布罗盆地典型钾盐

a. 因盐底劈形成的盐谷, Cardona 地区; b. 光卤石-石盐序列; c. 条带状钾石盐(s)-石盐互层, 纳瓦拉盆地(据 Taberner et al., 2000); d. 立方体石盐晶体

Fig. 4 Typical potash salts in the Ebro Basin

a. Salt valley formed by salt diapirs, Cardona area; b. Sequence of carnallite-halite; c. Alternations of banded sylvite (s) and halite, Navarra Basin(after Taberner et al., 2000); d. Cubic halite crystal

成:一种是角砾相,由钾石盐胶结的光卤石角砾碎屑(最大达2 cm)组成;另一种是条带状光卤石,由光卤石和石盐,黏土层和微量钾石盐韵律互层组成(图4c)。

上石盐段(UHU)在纳瓦拉最厚可达75 m,分布面积大于钾盐段;但在加泰兰次级盆地仅局部发育(约1~35 m厚)。主要由石盐、黏土和层状硬石膏的韵律互层组成。石盐夹层由漏斗晶组成(图4d)。

这些不同蒸发岩段组成的序列是蒸发沉积作用的大旋回,其中,钾盐段代表了盆地最大的浓缩程

度。Rosell等(1981)认为上石盐段代表了海水的再次侵入导致的,但Ayora等(1995)认为上石盐段是在完全陆相的背景下形成的。后者是最合理的解释,因为如前所述,在36 Ma整个盆地完全隔绝了与广海的联系。在纳瓦拉和加泰兰2个次级盆地中心都显示了完整的蒸发岩沉积旋回,但是都不存在中间的硫酸镁岩层。

3.2 蒸发岩地球化学特征

3.2.1 Br含量

在LHU底部, $w(\text{Br})$ 为 $50 \times 10^{-6} \sim 58 \times 10^{-6}$,

在顶部达 150×10^{-6} , 呈现出朝着钾盐段溴含量逐渐增加的趋势(图 3, Taberner et al., 2000), 这也在横向上有体现, 溴含量朝着蒸发沉积中心逐渐增加。

在钾盐段, 石盐的 $\alpha(\text{Br})$ 高达 250×10^{-6} , 而在钾石盐和光卤石则分别可达 2000×10^{-6} 和 3000×10^{-6} 。Br 值在剖面上的逐渐增加, 表明了海相卤水的逐渐浓缩趋势(Taberner et al., 2000)。但在 UHU 段下部, $\alpha(\text{Br})$ 为 $132 \times 10^{-6} \sim 260 \times 10^{-6}$, 而在上部则在 $135 \times 10^{-6} \sim 145 \times 10^{-6}$ 之间。

3.2.2 卤水的化学组成

原生包裹体分析得到的卤水化学组成表明, Na 离子含量在 LHU 段向上减少, 而 Cl 离子含量向上则持续富集, 表明了卤水的持续浓缩(Taberner et al., 2000)。Mg 离子含量在整个蒸发岩序列上也是增加; 在 LHU 段 K 离子含量也是持续增加, 而在 UHU 段则很低(Taberner et al., 2000), 这主要是 K 离子在钾盐段由于钾盐矿物析出后的消耗。

与海相环境的蒸发岩相比, 盆地石盐包裹体硫酸根离子的含量相对较低, 这可能是由于白云岩化和 CaCl_2 卤水的流入导致的(Ayora et al., 1994)。UHU 段异常高的 Mg 离子含量和 Br 值由于盆地与广海的隔绝, 不太可能是海水的再次流入, 而有可能是之前沉淀的光卤石的再旋回(Ayora et al., 1994; Taberner et al., 2000)。

3.2.3 同位素组成

透石膏相样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $20.8\% \sim 21.9\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $11.4\% \sim 12.9\%$, 与典型的古近纪海相硫酸盐相一致(Taberner et al., 2000)。这表明与广海隔绝前盆地内残留的海水是钾盐的物质来源。

5 埃布罗盆地的钾盐形成

盆地封闭和干旱气候是蒸发岩沉积的 2 个必要条件。对于南比利牛斯钾盐盆地而言, 盆地的封闭是由比利牛斯山隆起相关的构造事件导致的, 而且始新世末期发生的海平面变化也利于盆地封闭(Rosell et al., 1997)。另外, 区域地形地貌的演化以及随着海平面下降导致的陆地曝漏面积的增加, 都使得盆地的大陆性增加。一般而言, 大陆性的增高会引起相对湿度变得极低而导致钾盐矿物的沉淀析出(Kinsman, 1976)。尽管在 36 Ma 左右隔绝了与广海的联系, 但是 Rosell 等(1997)认为不大可能与广海完全隔绝, 因为在纳瓦拉盆地蒸发岩旋回的顶

部发现了海相微体浮游生物。在蒸发岩沉积之前, 盆地沉积了一套缺氧条件下的海相泥灰岩, 这些缺氧的泥灰岩阻碍了礁体的生长和繁殖。在硫酸钙沉积阶段产生的硫酸钙沉积局限在盆地边缘, 而盆地中心仅有薄层硬石膏, 可能与盆地中心水体底部的缺氧条件更利于硫酸盐细菌还原作用有关(Rosell et al., 1997)。在氯化物沉积阶段, 沉积作用一直持续无间断, 石盐也显示了两种结构类型, 干净透明的和雾状的。雾状石盐有 3 种不同形式, 大型漏斗状晶体, 立方晶体和板状的拉伸状晶体。在盆地内, 干净和雾状的石盐呈现出纹层状和条带状的良好旋回性, 可能与干湿季节交替有关(Rosell et al., 1981)。成盐后期的演化在加泰兰和纳瓦拉盆地又不相同, 在加泰罗尼亚缺乏发育完好的上盐组, 而在蒸发岩大旋回的末期纳瓦拉沉积了一层泥灰岩。

因此, 可以把埃布罗盆地钾盐形成及后期演化总结为以下过程(图 5)。在北侧造山带隆升的早期(晚白垩世—古近纪, 约 58 Ma), 北侧造山带的隆起引起的构造负载, 使得盆地北部地区形成前渊, 为钾盐沉积提供了空间。在始新世晚期, 覆盖了埃布罗盆地东北缘的分支大洋被隔绝了与大西洋的联系, 这些残留海水在埃布罗盆地经历了持续的蒸发浓缩作用。在蒸发作用的早期阶段, 盆地边缘形成了以硫酸盐为主的蒸发岩沉积; 在盆地中心沉积了钾石盐和光卤石(图 5a), 显示了“牛眼式”的特点。在海退后, 海相蒸发岩序列之上覆盖了晚渐新世几百米厚的河湖相沉积物, 这些沉积物来自造山隆起的加泰兰海岸山脉(图 5b); 图 5c 表明在渐新世晚期, 伊比利亚块体的挤压作用开始影响盆地北缘 Cardona 地区蒸发岩的形成, 使得盐发生塑性流动, 比如从 Cardona 到 Súria 地区, 这些盐重新在背斜核部聚集, 可达 1000 多米厚, 同时挤压形成的盐底劈作用使得盐岩从底部到达地表(图 5d、图 6)。不同地层经历的侵蚀作用形成了如今看到的景观, 在 Cardona, 盐底劈导致了 1 个山谷的形成, 称之为盐谷(图 4a)。对 Cardona 和 Súria 两个盐背斜的研究表明, 岩层经历了 3 期变形, 首先是剪切作用形成了几米至十米级的向南倒转的褶皱, 其次是大尺度的褶皱作用, 使得朝向背斜方向的盐层变厚, 最后是逆冲和背冲作用(Sans, 2003), 这 3 期变形使得钾盐的原生沉积(图 7a)发生了 3 次成盐期后的作用: 首先是中等程度的褶皱短缩作用(12% 的短缩量), 形成了宽缓的对称褶皱(图 7b); 其次是剥蚀作用导致盐层负载的

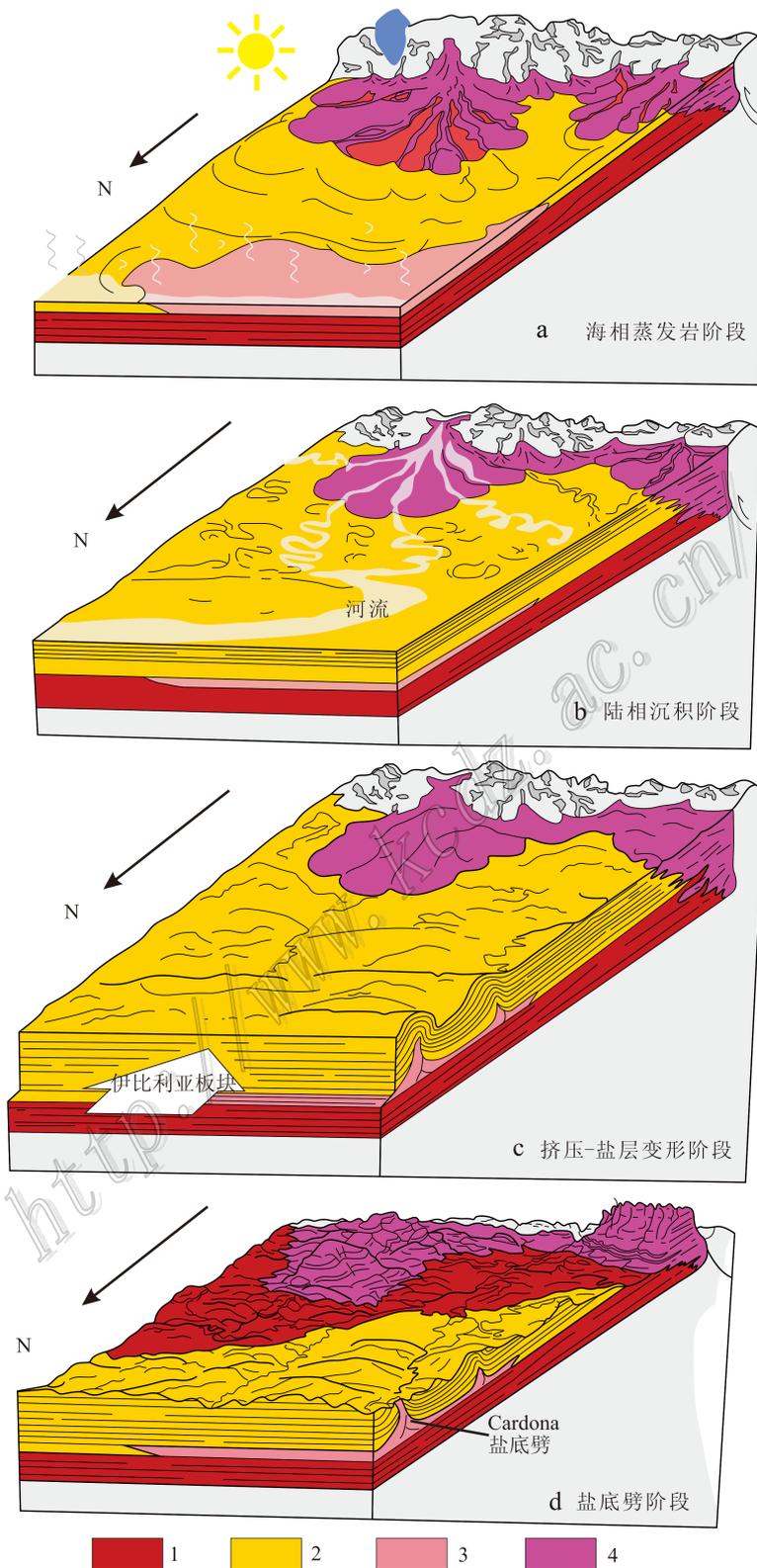


图5 埃布罗盆地钾盐成因模式图(据 Cardona 盐历史博物馆)

1—海相沉积; 2—河湖相沉积; 3—岩盐沉积; 4—冲-洪积物

Fig. 5 Formation model of potash salts in Ebro Basin (modified after Cardona Salt History Museum)

1—Marine sediments; 2—Fluvial-lacustrine sediments; 3—Rock salts; 4—Alluvial-deluvial sediments

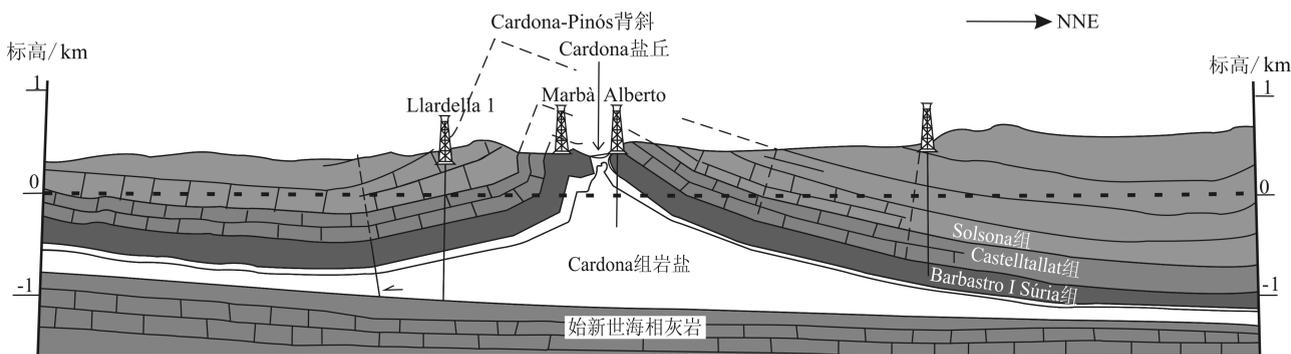


图 6 Cardona 地区盐底劈剖面示意图(据 Miralles et al., 2000)

Fig. 6 Sketch map showing the geological cross-section across Cardona salt diapir (modified after Miralles et al., 2000)

减小(去顶作用)(图 7c);在盐底劈发展过程中,背斜变得非对称,所有的盐底劈都平行于褶皱的轴向,并在枢纽部位刺穿(图 7d),在这过程中盐层作为滑脱层,而所有的这些后期作用则至少在渐新世之后发生,而盐底劈的形成可能仅仅是 2 Ma 左右(Sans, 2003)。

6 成钾模式及其与库车前陆盆地的对比

周缘前陆盆地的演化通常包括:早期阶段由于沉降速率超过沉积物的供给使得盆地可容纳空间的快速加深;随后随着板块间的持续汇聚,使得造山楔不断变宽变厚,地表风化侵蚀作用也随之加强,并搬运到前陆盆地中;晚期阶段,通常从欠充填到平衡充填或过充填阶段转化,这是由于沉积物的供应速率超过了前渊带的可容纳空间(Costa et al., 2010)。这种转化的参考框架就是海平面的变化,即是沉积环境从海相到陆相的转换通常对应于过充填状态(Sinclair, 1997)。海陆转化通常是穿时的,但是如果大陆碰撞最终造成了大陆封闭的古地理格局,那么这种从开放到封闭的汇水盆地的转化可能导致盆地范围等时的大陆化(Costa et al., 2010)。纵观埃布罗前陆盆地钾盐的形成无一例外地受控于前陆盆地构造演化-干旱气候-海水物源三者的耦合作用。埃布罗前陆盆地靠近比利牛斯造山带一侧形成的前渊成为钾盐的沉积空间,同时,隆起的造山带和隆后拗陷共同形成天然的屏障,构成了沉积空间的封闭,物源来自残余海水,兼备干旱气候的持续蒸发作用,这 3 个要素的相互作用使得钾盐形成(图 8)。值得

注意的是,由于海水在整个盆地的退出是等时的,因此,在海退方向上的纳瓦拉和加泰兰 2 个沉积中心皆沉积有钾盐。

因此,这个模式具有以下特点:① 从沉积序列上,盆地下部为海相沉积,包括蒸发岩和碳酸盐岩,上部为三角洲相、河流相和湖泊相沉积;② 海水是成钾物质的来源,且物源方向与盆地形成的主应力方向垂直;③ 挤压导致造山带的隆起和前渊带的持续沉降是钾盐沉积空间形成和封闭蒸发的必要条件;④ 在构造上,成钾的原型盆地都经历了不同程度的短缩,钾盐-石盐层等可能成为了滑脱层,并易于形成各种挤压型的盐构造;⑤ 从找矿特点来看,盐底劈构造在地貌上表现为盐丘,要注重对盐丘的勘查。

中国塔里木盆地库车盆地为印度-欧亚大陆碰撞背景下形成的再生前陆盆地(贾承造, 1997),古新世—始新世时期多次的海侵-海退沉积了多旋回的蒸发岩序列,至渐新世末期海水完全退出塔里木地区(曹养同等, 2010; 刘成林等, 2013; 张华等, 2013),在这时期发育的海相蒸发岩中发现了光卤石、钾石盐等钾盐矿物,显示了良好的找钾前景(刘成林等, 2013)。通过与埃布罗盆地的对比发现,两者在构造-沉积特征以及成盐机制等方面具有高度的相似性,这可能对库车盆地的找钾工作提供有益的启示。首先, 2 个盆地都是在造山带前缘的前陆盆地,且处于前陆盆地系统的前渊地带,因此,库车盆地的拜城拗陷是钾盐富集的可能部位(图 9)。其次, 2 个盆地的蒸发岩均形成于残留海水的持续蒸发,库车盆地来自于新特提斯海退后的残留海水,埃布罗盆地来自于大西洋的残留海水。值得注意的是, 2 个盆

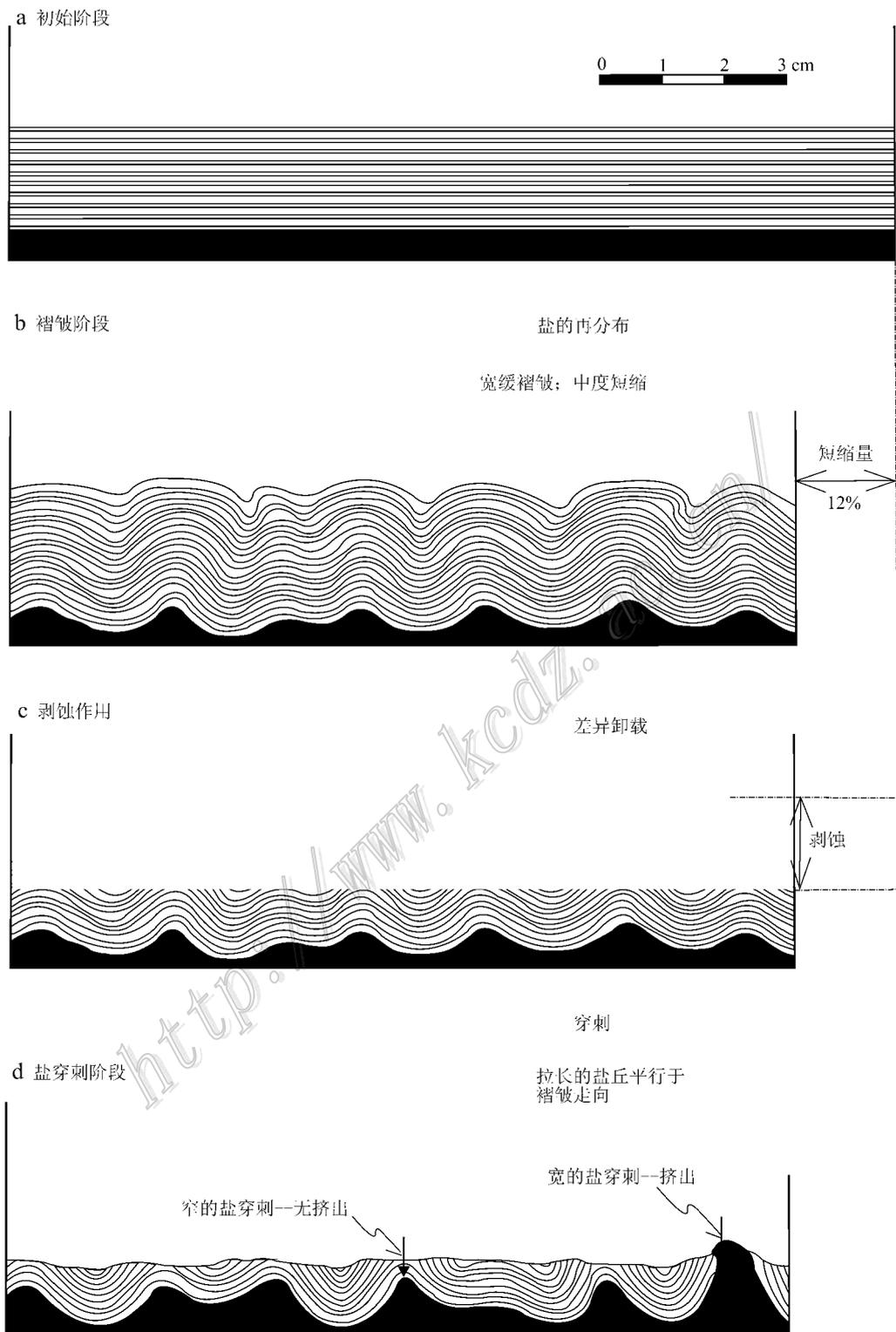


图7 Cardona地区成钾期后盐穿刺构造的形成过程示意图(据Sans, 2003)

- a. 原始钾盐沉积阶段; b. 宽缓褶皱阶段, 12%的短缩量; c. 剥蚀作用阶段, 岩盐上部地层被剥蚀; d. 盐穿刺阶段, 石盐-钾盐在较宽缓的褶皱轴部挤出

Fig. 7 Sketch map showing the development of salt diapir in Cardona area (after Sans, 2003)

- a. Initial stage of primary potash salts deposition; b. Open folds stage, 12% shortening; c. Erosion stage, the uploads were eroded; d. Salt diapir stage, halite-potash salts were extruded from the axes of open fold

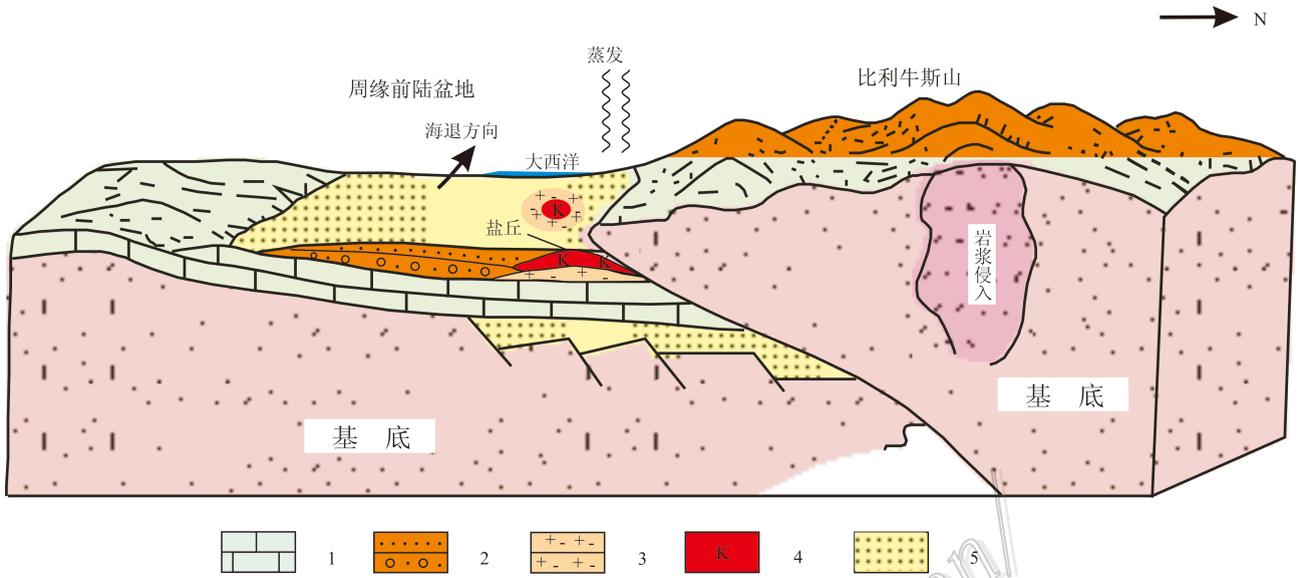


图 8 埃布罗前陆盆地钾盐沉积模式

1—海相灰岩；2—河流相碎屑岩；3—石盐沉积；4—钾盐沉积；5—湖泊沉积

Fig. 8 Depositional model of potash salts in Ebro foreland Basin

1—Marine limestone; 2—Alluvial detrital rocks; 3—Halite; 4—Potash; 5—Lacustrine rocks

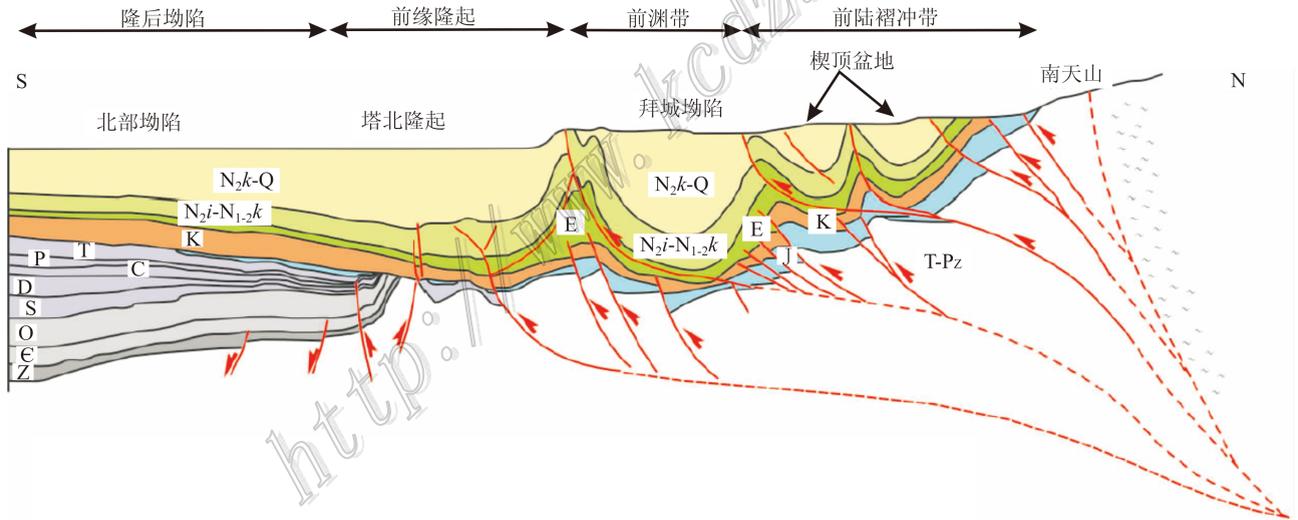


图 9 库车前陆盆地逆冲推覆构造剖面示意图(据何登发等, 2013)

Q—第四系； N_{2k} —新近系库车组； N_{1-2k} —新近系康村组； N_{1j} —中新统吉迪克组；E—古新统；K—白垩系；J—侏罗系；T—三叠系；P—二叠系；C—石炭系；D—泥盆系；S—志留系；O—奥陶系；∈—寒武系；Z—震旦系；Pz—古生界

Fig. 9 Sketch map showing the cross-section of the thrusting-napping tectonic wedges in the Kuqa foreland Basin (modified after He et al., 2013)

Q—Quaternary; N_{2k} —Kuqa Formation; N_{1-2k} —Kangcun Formation; N_{1j} —Miocene Jidike Formation; E—Paleocene; K—Cretaceous; J—Jurassic; T—Triassic; P—Permian; C—Carboniferous; D—Devonian; S—Silurian; O—Ordovician; ∈—Cambrian; Z—Edicaran; Pz—Paleozoic

地海水最终退却的时间几乎同时，都在始新世末期（埃布罗盆地 36 Ma, Costa et al., 2010; 库车盆地 37 Ma, Bosboom et al., 2011），这可能与中纬度全球海平面下降有关(Haq et al., 1987; Miller et al.,

2005)。2 个盆地海水皆由东而西退却，都与盆地展布方向相垂直，反映出在拗陷的次级构造单元内卤水自东向西迁移，然而由于海退的等时性，埃布罗盆地东部加泰兰和西部纳瓦拉 2 个沉积中心均发育钾

盐沉积。再次,从沉积旋回来看,埃布罗盆地显示了典型的蒸发岩沉积大旋回,从泥灰岩-底部石膏-下石盐带-钾盐带-上石盐带,在钾盐带,由黏土层-石盐-钾石盐或光卤石-石盐-黏土层组成(图4a);在库车盆地蒸发岩序列中,从库姆格列木组到苏维依组发育多个蒸发岩沉积旋回(曹养同等,2010),并且蒸发岩沉积总是和碎屑岩(主要是泥岩、粉砂岩)交互沉积,反映了盐湖在咸化(盐化)过程中有淡水间接地不断注入,这与埃布罗盆地很相似,表明短时间的淡化还并不足以影响成盐卤水析钾的进程。另外,中新世吉迪克组为典型的陆相环境下的蒸发岩,埃布罗盆地也发育中新世的蒸发岩,但未有钾盐沉积(Ortí et al., 2000),钾盐主要赋存在始新世晚期 Cardona 组中,那么库车盆地是否也应重点关注始新世晚期苏维依组沉积的蒸发岩?另外,埃布罗盆地的钾盐赋存在东、西部2个沉积中心,但如张华等(2013)所言,库车盆地海退具有不等时性,那么卤水迁移的方向则是要重点考虑的问题(刘成林等,2013)。

目前在库车盆地中发现2个重要的盐丘构造带,北部的克拉苏-依奇克里克背斜构造带核部和南部的秋里塔克背斜构造带核部(刘成林等,2013),从前人研究来看,这些盐丘都是典型的盐底劈构造(李世琴,2010);这与埃布罗盆地很相似,Cardona 地区位于盆地北部,该区发现的钾盐矿即是一个典型的背斜核部盐底劈构造。由于库车盆地新生代地层厚度大,受制于勘探成本,是否可以考虑在盆地南北两侧的盐底劈构造地区开展进一步的工作,或许有发现钾盐的可能。

志谢 感谢西班牙钾盐矿考察期间中国科学院青藏高原研究所方小敏研究员和兰州大学宋春晖教授的帮助和有益的讨论,张小梅同志清绘了部分图件,编辑部同志也为本文的顺利出版付出了辛劳,审稿专家提供了有益和建设性的意见,在此一并致谢!

References

- Allen P A, Homewood P and Williams G D. 1986. Foreland basins: An introduction [A]. In: Allen P A and Homewood P, eds. Foreland Basins [C]. Special Publication of International Association of Sedimentologists, 8: 3-12.
- Arenas C and Pardo G. 1999. Latest Oligocene-Late Miocene lacustrine systems of the north-central part of the Ebro Basin (Spain): Sedimentary facies model and palaeogeographic synthesis [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 151(1): 127-148.
- Ayora C, García-Veigas J and Pueyo J J. 1994. The chemical and hydrological evolution of an ancient potash-forming evaporite basin as constrained by mineral sequence, fluid inclusion composition and numerical simulation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 3379-3394.
- Ayora C, Taberner C, Pierre C and Pueyo J J. 1995. Modeling the sulfur and oxygen isotopic composition of sulfates through a halite-potash sequence: Implications for the hydrological evolution of the Upper Eocene Southpyrenean Basin [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(9): 1799-1808.
- Bosboom R E, Dupont-Nivet G, Mandic O, Stoica M, Zchariasse W J, Guo Z J, Li C X and Krüggman W. 2011. Late Eocene sea retreat from the Tarim Basin (West China) and concomitant Asian paleoenvironmental change [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 299: 385-398.
- Busson G and Schreiber B C. 1997. Sedimentary deposition in rift and foreland basins in France and Spain (Paleogene and Lower Neogene) [M]. New York: Columbia University Press. 479.
- Cabrera L and Sáez A. 1987. Coal deposition in carbonate rich shallow Lacustrine systems: The Calaf and Mequinenza sequences (Oligocene, Eastern Ebro Basin, NE Spain) [J]. *Journal of Geological Society, London*, 144: 451-461.
- Caja M A, Marfil R, Garcia D, Remacha E, Morad S, Mansurbeg H, Martínez-Calvo C and Lahoz-Beltrá R. 2010. Provenance of siliciclastic and hybrid turbiditic arenites of the Eocene Hecho Group, Spanish Pyrenees: Implications for the tectonic evolution of a foreland basin [J]. *Basin Research*, 22(2): 157-180.
- Cao Y T, Yang H J, Liu C L, Gu Q Y, Jiao P C and Lu Y H. 2010. Response on sediment of evaporite in Kuqa Basin from Paleogene to Neogene period and Himalayan tectonic phase [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(6): 1054-1065 (in Chinese with English abstract).
- Carrillo E, Rosell L and Ortí F. 2014. Multi-episodic evaporite sedimentation as an indicator of palaeogeographical evolution in foreland basins (South-eastern Pyrenean basin, Early-Middle Eocene) [J]. *Sedimentology*, 61: 2086-2112.
- Cascella A and Dinarès-Turell J. 2009. Integrated calcareous nannofossil biostratigraphy and magnetostratigraphy from the uppermost marine Eocene deposits of the southeastern Pyrenean foreland basin:

- Evidences for marine Priabonian depositior[J]. *Geologica Acta*, 7: 281-296.
- Cavagnetto C and Anadón P. 1996. Preliminary palynological investigations on floristic and climatic change in the Middle Eocene-Lower Oligocene of the eastern Ebro Basin, north-east Spain[J]. *Review of Palaeobot. Palynol.*, 92: 281-305.
- Cendón D I, Ayora C, Pueyo J J and Taberner C. 2003. The geochemical evolution of the Catalan potash subsbasin, South Pyrenean foreland basin (Spain) [J]. *Chemical Geology*, 200(3): 339-357.
- Costa E, Garcés M, López-Blanco M, Beamud E, Gómez-Paccard M and Larrasoña J C. 2010. Closing and continentalization of the South Pyrenean foreland basin (NE Spain): Magnetostratigraphical constraints[J]. *Basin Research*, 22(6): 904-917.
- Costa E, Garcés M, Sáez A, Cabrera L and López-Blanco M. 2011. The age of the "Grande Coupure" mammal turnover: New constraints from the Eocene-Oligocene record of the eastern Ebro Basin (NE Spain) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 301: 97-107.
- Haq B U, Hardenbol J and Vail P R. 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. *Science*, 235: 1156-1167.
- He D F, Li D S, He J Y and Wu X Z. 2013. Comparison in petroleum geology between Kuqa depression and Southwest depression in Tarim Basin and its exploration significance[J]. *Acta Petroli Sinica*, 34(2): 201-218 (in Chinese with English abstract).
- Jia C Z. 1997. Tectonic characteristics and petroleum Tarim Basin, China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. 1-389 (in Chinese).
- Jordan T E. 1981. Thrust loads and foreland basin evolution, Cretaceous, western United States[J]. *AAPG Bulletin*, 65: 2506-2520.
- Jordan T E, Flemings P B and Beer J A. 1988. Dating thrust-fault activity by use of foreland-basin strata [A]. In: Kleinspehn K L and Paola C, eds. *New Perspectives in Basin Analysis*[C]. New York: Springer-Verlag. 307-330.
- Kinsman. 1976. Evaporites: Relative humidity control of primary mineral facies[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 46: 273-279.
- Larrasoña J C, Parés J M, Millán H, Del Valle J and Pueyo E L. 2003. Paleomagnetic, structural and stratigraphic constraints on transverse fault kinematics during basin inversion: The Pamplona Fault (Pyrenees, N Spain)[J]. *Tectonics*, 22: 1071.
- Lewis C J, Vergés J and Marzo M. 2000. High mountains in a zone of extended crust: Insights into the Neogene-Quaternary topographic development of northeastern Iberia[J]. *Tectonics*, 19(1): 86-102.
- Li S Q. 2010. Compression salt tectonics and synkinematic strata record in the middle to western Kuqa foreland basin, southern Tianshan (Ph. D Dissertation) [D]. Hangzhou: Zhejiang University. 1-100 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Wang M L, Jiao P C and Chen Y Z. 2006. The exploration experiences of potash deposits in the world and probing of countermeasures of China's future potash-deposits investigation[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 28(1): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Cao Y T, Yang H J, Jiao P C and Gu Q Y. 2013. Discussion on Paleogene-Neogene environmental change of salt lakes in Kuqa foreland basin and its potash-forming effect[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 34(5): 547-558 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Zhao Y J, Fang X M, Lü F L, Wang L C, Yan M D, Zhang H and Ding T. 2015. Plate tectonics control on the distribution and formation of the marine potash deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 1893-1907 (in Chinese with English abstract).
- Meulenkamp J E and Sissingh W. 2003. Tertiary palaeogeography and tectonostratigraphic evolution of the Northern and Southern Peri-Tethys platforms and the intermediate domains of the African-Eurasian convergent plate boundary zone [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 196(1): 209-228.
- Miller K G, Komins M A, Browning J V, Wright J D, Mountain G S, Katz M E, Sugarman P J, Cramer B S, Christie-Blick N and Pekar S F. 2005. The Phanerozoic record of global sea-level change[J]. *Science*, 310: 1293-1298.
- Miralles L, Sans M, Pueyo J J and Santanach P. 2000. Recrystallization salt fabric in a shear zone (Cardona diapir, southern Pyrenees, Spain) [A]. In: Vendeville B, Mart Y and Vigneresse J L, eds. *Salt, shale and igneous diapirs in and around Europe*[C]. London: Geological Society Special Publications, 174: 149-167.
- Muñoz-Jiménez A and Casas-Sainz A M. 1997. The Rioja Trough (N Spain): Tectosedimentary evolution of a symmetric foreland basin[J]. *Basin Research*, 9(1): 65-85.
- Muñoz-Jiménez A, Martínez A and Vergés J. 1986. Thrust sequences in the eastern Spanish Pyrenees[J]. *Journal of Structural Geology*, 8(3): 399-405.
- Ori G G and Friend P F. 1984. Sedimentary basins formed and carried piggyback on active thrust sheets[J]. *Geology*, 12(8): 475-478.
- Ortí F and Rosell L. 2000. Evaporative systems and diagenetic patterns in the Calatayud Basin (Miocene, Central Spain) [J]. *Sedimen-*

- tology, 47: 665-685.
- Payros A, Astibia H, Cearrea A, Pereda-Suberbiola X, Muelaga X and Badiola A. 2000. The Upper Eocene South Pyrenean coastal deposits (Liedena Sandstone, Naverre): Sedimentary facies, benthic foraminifera and avian ichnology[J]. *Facies*, 42: 19-23.
- Puigdefàbregas C, Muñoz J A and Vergés J. 1992. Thrusting and foreland basin evolution in the southern Pyrenees[A]. In: McClay K R, ed. Thrust tectonics[C]. Netherlands Springer. 247-254.
- Qian Z Q, Qu Y H and Liu Q. 1994. The potash deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-273 (in Chinese).
- Rosell L and Pueyo J J. 1997. Second marine evaporitic phase in the south Pyrenean Foredeep: The Priabonian potash basin (Late Eocene; autochthonous-allochthonous Zone X) [A]. In: Busson G and Schreiber B C, eds. Sedimentary deposition in rift and foreland Basins in France and Spain (Paleogene and Lower Neogene) [C]. New York: Columbia University Press. 358-387.
- Rosell L and Orti F. 1981. The saline (potash) formation of the Navarra Basin (Upper Eocene, Spain) [J]. *Petrology Review of Institute Investigation Geology*, 35: 71-121.
- Rushlow C R, Barnes J B, Ehlers T A and Vergés J. 2013. Exhumation of the southern Pyrenean fold-thrust belt (Spain) from orogenic growth to decay[J]. *Tectonics*, 32: 843-860.
- Sáez A, Anadón P, Herrero M J and Moscariello A. 2007. Variable style of transition between Palaeogene fluvial fan and lacustrine systems, southern Pyrenean foreland, NE Spain[J]. *Sedimentology*, 54(2): 367-390.
- Sans M. 2003. From thrust tectonics to diapirism: The role of evaporates in the kinematic evolution of the eastern South Pyrenean front[J]. *Geologica Acta*, 11(3): 239-259.
- Sibuet J C, Srivastava S P and Spakman W. 2004. Pyrenean orogeny and plate kinematics[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B08104), doi:10.1029/2003JB002514.
- Sinclair H D, Gibson M, Naylor M and Morris R G. 2005. Asymmetric growth of the Pyrenees revealed through measurement and modeling of orogenic fluxes[J]. *American Journal of Science*, 305(5): 369-406.
- Taberner C, Cendón D I, Pueyo J J and Ayora C. 2000. The use of environmental markers to distinguish marine vs. continental deposition and to quantify the significance of recycling in evaporite basins[J]. *Sedimentary Geology*, 137: 213-240.
- Teixell A. 1998. Crustal structure and orogenic material budget in the west central Pyrenees[J]. *Tectonics*, 17: 395-406.
- Warren J K. 2010. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits[J]. *Earth-Science Reviews*, 98(3): 217-268.
- Zhang H, Liu C L, Cao Y T, Sun H W and Wang L C. 2013. A tentative discussion on the time and the way of marine regression from Tarim Bay during the Cenozoic[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(5): 577-584 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹养同, 杨海军, 刘成林, 顾乔元, 焦鹏程, 卢玉红. 2010. 库车盆
地古—新近纪蒸发岩沉积对喜马拉雅构造运动期次的响应[J].
沉积学报, 28(6): 1054-1065.
- 何登发, 李德生, 何金有, 吴晓智. 2013. 塔里木盆地库车坳陷和西
南坳陷油气地质特征类比及勘探启示[J]. *石油学报*, 34(2):
201-218.
- 贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工
业出版社. 1-389.
- 李世琴. 2010. 南天山库车中-西段挤压盐构造及同构造沉积地层研
究(博士论文)[D]. 杭州: 浙江大学. 1-80.
- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程, 陈永志. 2006. 世界主要古代钾盐找矿实
践与中国找钾对策[J]. *化工矿产地质*, 28(1): 1-8.
- 刘成林, 曹养同, 杨海军, 焦鹏程, 顾乔元. 2013. 库车前陆盆地古
近纪—新近纪盐湖环境变迁及其成钾效应探讨[J]. *地球学报*,
34(5): 547-558.
- 刘成林, 赵艳军, 方小敏, 吕凤琳, 王立成, 颜茂都, 张华, 丁婷.
2015. 板块构造对海相钾盐矿床分布与成矿模式的控制[J]. *地
质学报*, 89(11): 1893-1907.
- 钱自强, 曲懿华, 刘群. 1994. 钾盐矿床[M]. 北京: 地质出版社. 1-
273.
- 张华, 刘成林, 曹养同, 孙宏伟, 王立成. 2013. 塔里木古海湾新生
代海退时限及方式的初步探讨[J]. *地球学报*, 34(5): 577-584.