



典型小陆块海相成钾机理*

——以西西里微陆块钾盐矿床为例

王九一, 刘成林, 沈立建

(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)

摘要 中国大陆是由多个小陆块经多期次离散碰撞拼合而成,而“小陆块是否能成大钾”一直是国内钾盐研究领域关注的科学问题。文章剖析了意大利西西里微陆块的典型海相钾盐矿床形成条件与机理,为中国小陆块成钾研究提供借鉴。在晚中新世墨西拿盐度危机(Messinian Salinity Crisis)最盛期(5.60~5.55 Ma),西西里岛的卡尔塔尼塞塔盆地聚集了高达2亿t的钾盐镁矾矿。通过对卡尔塔尼塞塔盆地钾盐矿的赋存地层格架、矿体特征、成矿模式和机理进行梳理和总结,指出该矿床呈层状赋存于地中海“再沉积下石膏组”的原生石盐岩中,形成于深水、分层的常年性盐湖环境。晚中新世地中海碰撞挤压的构造活动导致卡尔塔尼塞塔盆地强烈挠曲下凹,形成多个次级成矿凹陷;次级凹陷接受海水的周期性补给;在墨西拿盐度危机最盛期,由于气候变冷变干、直布罗陀海峡关闭、海平面急剧下降,远离补给源的次级凹陷变得更加封闭,从而在5万年的极短时间内经强烈蒸发,聚集为大规模钾盐矿。西西里微陆块尽管陆块小、盆地小,但在满足封闭构造-干旱气候-充足物源三要素耦合的特定时期内,同样形成了大型钾盐矿床。因此,西西里微陆块的钾盐成矿实例证明海相小陆块同样具有形成大型钾矿床的潜力,这对中国海相小陆块汇聚区的找钾工作具有重要的借鉴意义。

关键词 地质学;西西里微陆块;晚中新世;墨西拿盐度危机;钾盐成矿机理

中图分类号: P619.21⁺1

文献标志码: A

Mineralization mechanism of potash salt in typical marine microplate: An example from the Sicily microplate potash salt deposit

WANG JiuYi, LIU ChengLin and SHEN LiJian

(MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

Potash salt is one of the most required mineral resources in China; nevertheless, China's mainland is mainly composed of several microplates or small blocks which drifted, collided and coalesced together in different periods. Under this tectonic scheme, many scientists in China have doubted that whether large potash salt deposits could be formed in these microplates. During Messinian Salinity Crisis Acme (5.60~5.55 Ma), up to 2×10^8 t kainite, an available potash salt, was accumulated in the Caltanissetta Basin, the major foreland basin in Sicily, which was a typical marine microplate. In this study, based on exploring stratigraphic framework, orebody characteristics, mineralization pattern and mechanism of kainite in the Caltanissetta Basin, the authors have reached two conclusions. First, kainite was preserved in the primary halite, which was the chief evaporite of

* 本文为国家自然科学基金项目(编号:41302133)和国家重点基础研究发展计划“973”项目(编号:2011CB403007)资助成果

第一作者简介 王九一,男,1983年生,助理研究员,从事蒸发盐沉积与古气候研究。Email:wjyhx@163.com

收稿日期 2016-08-30;改回日期 2016-10-27。张绮玲编辑。

'Resedimentary Lower Gypsum' in the Caltanissetta Basin; kainite crystallized in deep, stratified, perennial saline marine setting, a rather saline pan environment. Second, late Miocene tectonic collision between African and Eurasia plates built flexural Caltanissetta Basin, and many sub-depressions were separated by intra-basinal anticlines, which provided pivotal reservoirs for late potash accumulation. During Messinian Salinity Crisis Acme (5.60~5.55 Ma), global climate became cold, leading to closure of Gibraltar gateway. Consequently, serious sealevel dropdown occurred in the middle Mediterranean Sea as well as in sub-depressions of the Caltanissetta Basin. Due to pulsed transgression and retreat of seawater in these sub-depressions, large quantities of kainite formed only in 50 ka (5.60~5.55 Ma). The potash-forming pattern and mechanism in Sicily suggest that even in small basins in microplate, large potash deposits could form if these basins meet the requirement of restricted setting, arid climate, and sufficient potassium input. The observation and research conducted by the authors shed a great deal of light on exploration and prospecting of potash salt in China.

Key words: geology, Sicily microplate, Late Miocene, Messinian Salinity Crisis, mineralization mechanism of potash salt

全球钾盐矿产资源主要分布在巨型、稳定的海相克拉通盆地(刘成林等,2015),而中国大地构造是由多个小陆块经多期次拼合而成的(任纪舜,1994;万天丰等,2007;颜茂都等,2014)。这种多个小陆块拼接的构造背景使得中国古代海相蒸发岩的沉积类型多、分布区域分散,导致找钾难度大。基于中国构造格局的客观背景,深入开展中国海相小陆块找钾工作是缓解中国钾盐紧缺形势的必然选择。而小陆块能否形成大钾矿,是矿床学界关注的问题。

地中海地区在晚中新世墨西拿期聚集了巨量的海相石盐、石膏等蒸发盐岩,是地球历史上著名的地质事件,被称为“墨西拿盐度危机”。墨西拿盐度危机从提出至今,数十年来一直是地球科学领域的研究热点(Selli,1954;Decima et al.,1973;Schreiber et al.,1976;Hsü, et al.,1977;Butler et al.,1995;Clauzon et al.,1996;Lugli et al.,1999;Hardie et al.,2004;Rouchy et al.,2006;CIESM,2008;Garcia-Castellanos et al.,2011;Manzi et al.,2012;Roveri et al.,2014;Lugli et al.,2015)。尽管在墨西拿盐度危机时,地中海周缘及深海盆地广泛沉积石膏和石盐岩,但唯有地中海中部的西西里岛富集以钾盐镁矾为主要含钾矿物的海相钾盐矿,矿床 K_2O 总储量约2亿t(Garrett,1996)。该矿床于20世纪20年代被发现,但直到60年代才开始建矿生产,大部分矿产于90年代中期停产封存。多数矿山包含约6层不等厚度的钾矿层,含钾矿物主要为钾盐镁矾,其次为极少量的钾石盐、光卤石和杂卤石。矿石品位大约在10%~16%(以 K_2O 计),不可溶物含量为0.4%~2.0%(Garrett,1996)。矿带主要矿

山包括Pasquasia, Realmonte, Racalmuto等。

西西里岛面积只有25 711 km²,在构造上属于典型的海相小陆块(Serpelloni et al.,2007;Devoti et al.,2008)。虽然西西里岛在晚中新世墨西拿盐度危机期间聚集了如此巨量的钾盐矿,但长期以来,西西里岛钾盐矿的成矿模式和成矿机理等基本科学问题未受关注,阻碍我们深入认识海相小陆块的成钾机制,不利于中国海相小陆块的找钾工作。为此,本文对前人在地中海地区开展的关于墨西拿盐度危机的研究成果进行梳理和总结,在厘清西西里岛钾盐矿的赋存地层格架、矿床特征的基础上,建立西西里岛钾盐矿的成矿模式,并从构造-气候-物源耦合的角度探讨其成矿机理,以期对中国海相小陆块找钾提供有益的启示和借鉴。

1 构造背景

西西里岛位于地中海地区非洲板块和欧亚板块的碰撞汇聚带(图1)构造上属于非洲板块北端的小陆块(Serpelloni et al.,2007;Devoti et al.,2008)。晚白垩世(95~85 Ma),非洲板块与欧亚板块发生碰撞,整个地中海地区受到NW向快速挤压,亚平宁半岛和非洲板块北部褶皱隆起(Grasso et al.,1982;Faccenna et al.,2001)。渐新世晚期(~30 Ma)随着爱奥尼亚洋壳深俯冲至撒丁岛-科西嘉岛,第勒尼安弧后扩张盆地开始形成(Dewey et al.,1989),并在西西里岛东界形成了著名的马耳他断崖系(Grasso et al.,1982)。晚中新世—早上新世,非洲板块岩石圈板片的北向俯冲导致西西里岛南部形



图 1 中地中海地区构造纲要图(据 Faccenna et al., 2001; Serpelloni et al., 2007; Devoti et al., 2008 修改)

Fig. 1 Tectonic structures in middle Mediterranean Sea (modified after Faccenna et al., 2001; Serpelloni et al., 2007; Devoti et al., 2008)

成 NW 向的西西里岛裂谷(图 1), 从而使西西里岛逐渐与非洲板块分离, 形成独立的小陆块(Serpelloni et al., 2007)。

地中海地区因受非洲板块的北向俯冲, 形成复杂的卡拉布里亚-西西里-亚平宁前陆逆冲体系(Butler et al., 1995; Faccenna et al., 2001)。在这种构造背景下, 西西里岛抬升并在内部形成一系列 NE-SW 向的前陆盆地。其中, 位于西西里岛东南部的卡尔塔尼塞塔盆地(图 2)在晚中新世聚集了巨量的钾盐矿(Decima et al., 1973)。该盆地西北部为从非洲北部延伸至亚平宁半岛的近东西向马格里布-西西里-亚平宁造山带; NE 向的杰拉逆冲断裂的东北向段将其与东南部的 Hyblean 高原分割开来; 东北部为著名的埃特纳活火山。

卡尔塔尼塞塔盆地的钾盐矿床自东北部埃特纳火山向西南延伸到地中海沿岸, 矿带长 115 km, 宽 5~10 km, 呈 NE 向分布于狭长的前陆盆地内(Decima et al., 1973), 矿体呈孤立状分布于盆地内的多个次级凹陷中(图 2)。

2 矿床特征

2.1 含矿地层格架

地中海周缘边缘海盆赋存有大量的石膏岩, 早期的研究发现这些石膏岩的沉积时代相近, 据此提出“墨西拿盐度危机”的概念(Selli, 1954; Ogniben, 1957)。此后, 地中海西部深海盆的地震剖面揭示出同时期形成的“石盐-石膏-石盐”韵律旋回(Decima et al., 1973)。随着地中海西部海盆深海钻探计划(DSDP)的实施, 许清华对 DSDP Leg 13 获取的钻孔进行蒸发岩岩相学分析, 认为整个地中海在大约 6 Ma 时完全干涸, 并提出了影响深远的“干化深盆”成盐模式(Hsü, 1972; Hsü et al., 1973)。最新的研究结果表明, 在发生盐度危机时, 地中海并不是完全干涸的, 很可能是深盆深水的成盐环境(Hardie et al., 2004; Lugli et al., 2015)。近年来, 研究者对地中海地区蒸发盐岩系统地开展了地层年代学、沉积学等研究(Krijgsman et al., 1999; Butler et al., 1999;

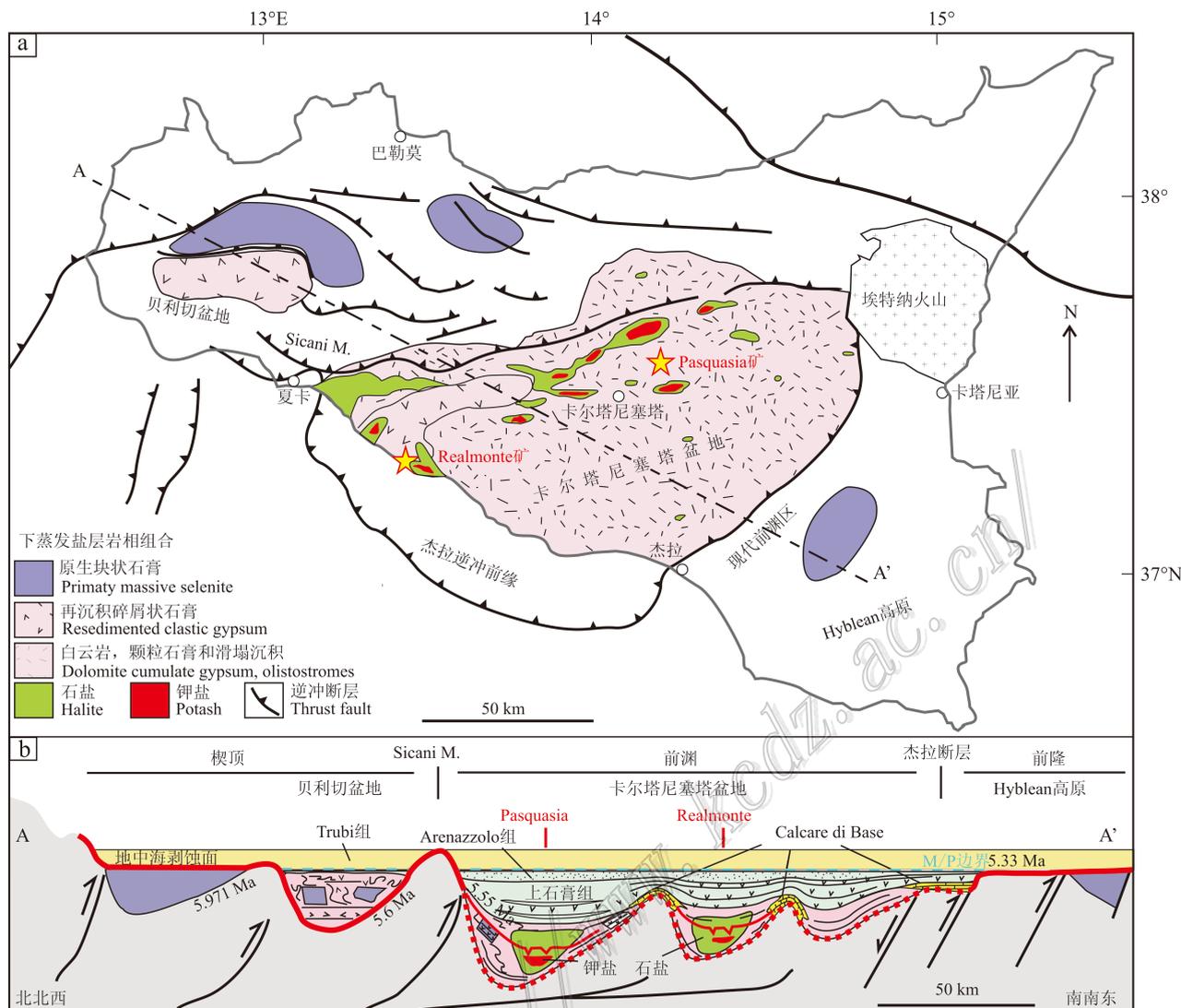


图2 西西里岛卡尔塔尼塞塔盆地地质构造图(a)及A—A'剖面图(b)(改编自Decima et al., 1973; Manzi et al., 2012)

Fig. 2 Schematic geological map (a) and cross section A—A' (b) of the Caltanissetta Basin, Sicily (modified after Decima et al., 1973; Manzi et al., 2012)

Rouchy et al., 2006; CIESM, 2008; Manzi et al., 2013; Roveri et al., 2008; 2014), 发现盐度危机形成的石膏-碎屑层韵律具有高度的一致性, 并基本查明盐度危机发生的期次和地层序列(图3)。墨西拿盐度危机共经历了3个演化阶段, 每个阶段在地中海边缘、深海盆地均表现出不同的沉积特征(Butler et al., 1999; Rouchy et al., 2006; CIESM, 2008; Roveri et al., 2014)。

(1) 阶段一(5.971~5.60 Ma) 墨西拿盐度危机开始。边缘海盆(<200 m)沉积原生下石膏组(PLG); 在深水海盆, 水体盐度没有达到石膏沉积期, 仅形成白云石和页岩等初级的蒸发岩。

(2) 阶段二(5.60~5.55 Ma) 是墨西拿盐度

危机最大化时期。海平面急剧下降, 使得早先的边缘海盆暴露地表经受剥蚀, 环地中海形成显著的地中海剥蚀面(Mediterranean Erosion Surface)(图3)。在早先的深水海盆, 海水变浅浓缩, 堆积广布于地中海海底的碎屑石膏岩、原生石盐岩和钾盐镁矾(再沉积下石膏组, RLG)。

(3) 阶段三(5.55~5.33 Ma) 海平面上升, 在深水海盆形成上石膏组(UG)和页岩, 浅水海盆则堆积泥沙碎屑岩(图3)。

卡尔塔尼塞塔盆地的钾盐镁矾矿床赋存于墨西拿盐度危机第二阶段(5.60~5.55 Ma)的再沉积下石膏组(RLG)。大多数矿体位于石盐沉积的中心地带(图2), 指示钾盐镁矾是在石盐结晶后析出, 具有

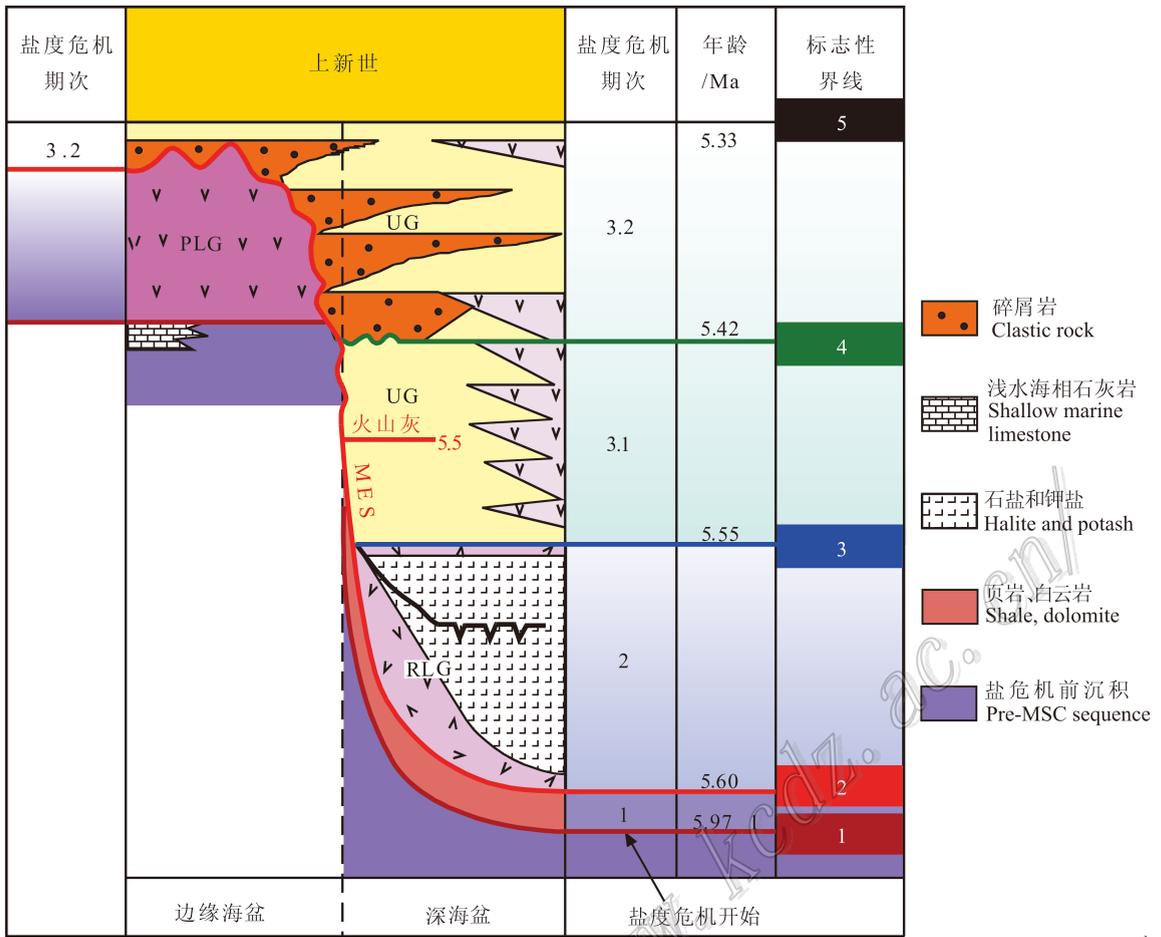


图 3 墨西拿盐度危机地层沉积序列(改编自 Roveri et al., 2008; Manzi et al., 2013)

蒸发盐组: PLG—边缘海盆原生石膏沉积; RLG—再沉积下石膏组; UG—上石膏组;

标志性界线: 1—墨西拿盐度危机开始; 2—地中海剥蚀面; 3—上石膏组底界/石盐钾盐顶界; 4—上石膏组粗碎屑岩与细碎屑岩分界; 5—上新统赞可尔阶底界

Fig. 3 Messinian salinity crisis stratigraphic framework (modified after Roveri et al., 2008; Manzi et al., 2013)

Evaporite units: PLG-Primary Lower Gypsum; RLG-Resedimented Lower Gypsum; UG-Upper Gypsum

Key surfaces: 1—Mediterranean Salinity Crisis onset; 2—Mediterranean Erosion Surface; 3—Base of the Upper Gypsum/top of the halite; 4—Base of the p-ev2 unit; 5—Base of the Zanclean

原生成因特征。

2.2 矿体特征

西西里岛卡尔塔尼塞塔盆地的钾盐矿床虽然分布于不同的孤立次级凹陷内,但成矿序列具有区域一致性,并可进行对比(Decima et al., 1973; Lugli et al., 1999)。在盆地东北部的 Pasquasia 矿山和西南部的 Realmonte 矿山(图 2),再沉积下石膏组(RLG)主要表现为厚层石盐岩,其上部被上石膏组覆盖,其下为墨西拿盐度危机阶段一沉积的基底泥灰岩(图 4)。再沉积下石膏组的厚层石盐岩自下而上可划分

为 A、B、C、D 4 段,钾盐镁矾呈层状分布于石盐岩的 B 段内。

在卡尔塔尼塞塔盆地, Pasquasia 矿床规模最大,面积达 24 km²,矿体埋深 300~800 m。该矿底部的再沉积下石膏组石盐岩中赋存 5 层钾盐镁矾矿层,均因盐岩塑性流动而受到强烈的褶曲变形,分布于高度扭曲的向斜和背斜构造中。其中,第二层钾盐镁矾是最厚的一层,平均厚度达 30 m,品位为 10.5%~13.5%(以 K₂O 计)。该矿山自 1952 年开始开采,1992 年停产关闭。

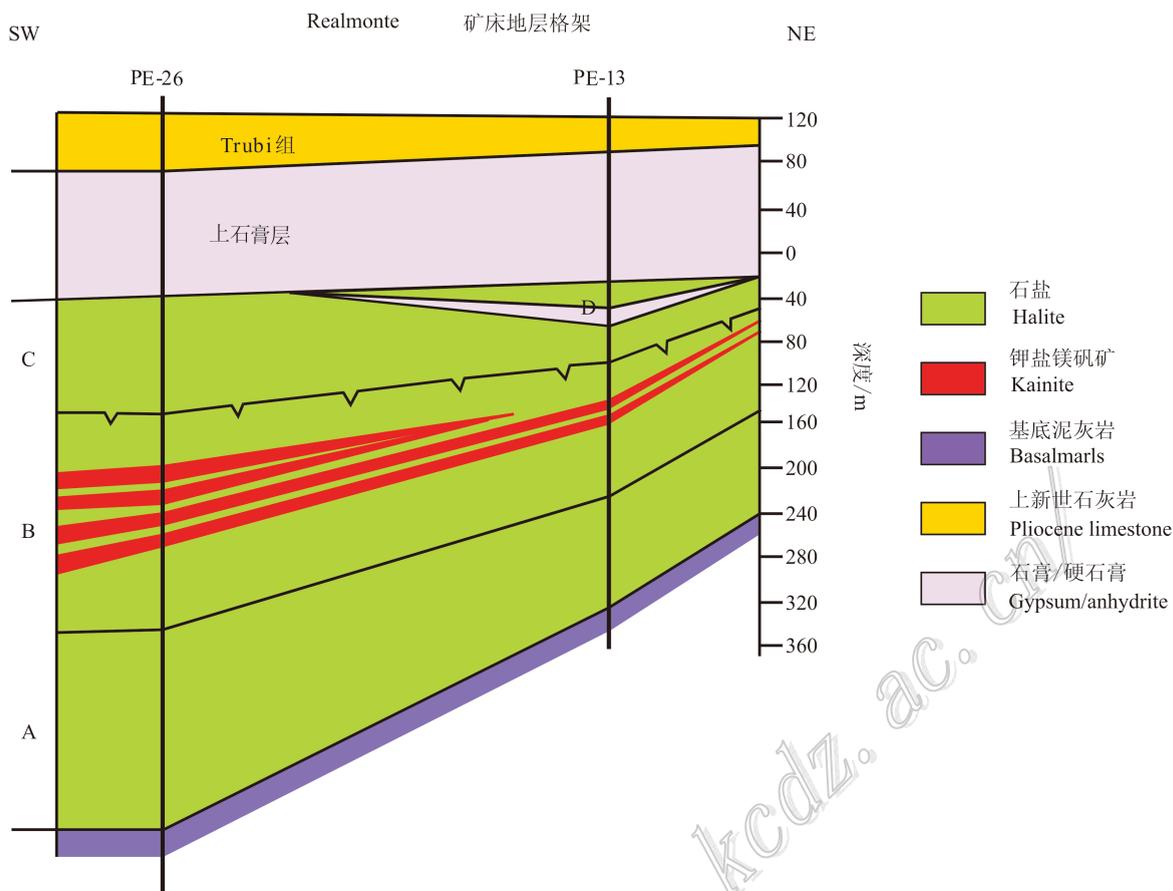


图4 卡尔塔尼塞塔盆地 Realmonte 矿区地层序列(改自 Lugli et al., 1999)

Fig. 4 Stratigraphic column of the Realmonte salt mine, Caltanissetta Basin (modified after Lugli et al., 1999)

对盆地西南部的 Realmonte 矿床来说,墨西哥盐度危机形成的石盐、石膏和钾盐厚度高达 400~600 m,再沉积下石膏组的厚层石盐岩中至少赋存 6 层钾盐镁矾矿层(Lugli et al., 1999)。矿体厚层石盐岩 A、B、C、D 段的岩性特征(图 4)如下:

A 段(50 m): 水平层理的灰色石盐岩夹白色硬石膏结核或纹层,向上变为灰色块状石盐岩;

B 段(100 m): 灰色块状石盐岩与灰色钾盐镁矾薄层,中夹毫米—厘米级的杂卤石球晶或纹层,顶部硬石膏纹层频繁出现。上部含有 6 层浅灰色钾盐镁矾矿,总厚度约为 12 m。矿区南部的钾盐镁矾矿层多被溶蚀,代之以石盐-硬石膏-泥砾岩;

C 段(70~80 m): 白色石盐岩,中间夹薄层灰黑色泥岩纹层和浅灰色杂卤石、硬石膏纹层;

D 段(60 m): 灰色硬石膏质泥岩,向上渐变为硬石膏纹层和毫米—厘米级的石盐互层。

3 沉积特征与环境

根据 Lugli 等(1999)对 Realmonte 矿床的岩相学研究结果,下石膏组石盐岩 A 段和 B 段由大小均一的颗粒状石盐晶体组成,几乎不含底部生长的人字形晶体,表明该石盐层形成于深水、分层的常年性盐湖环境(Lowenstein et al., 1985)。B 段的钾盐镁矾矿层多为纹层状,层厚数毫米至 2 m,晶体为大小均一的颗粒状,晶体之间表现为镶嵌态,表明其成因与原生钾石盐相似(Lowenstein et al., 1990),均由海水蒸发而结晶析出。石盐岩 B 段顶部出现较多连接状的晶筏、人字形石盐晶体、充填黏土的溶蚀空洞等,在 B 段和 C 段石盐层界线,可以看到大量垂直状裂隙切开 B 段顶部石盐,这些裂隙中充填次生石盐胶结物和碎屑,表明石盐岩 B/C 界线为干盐湖

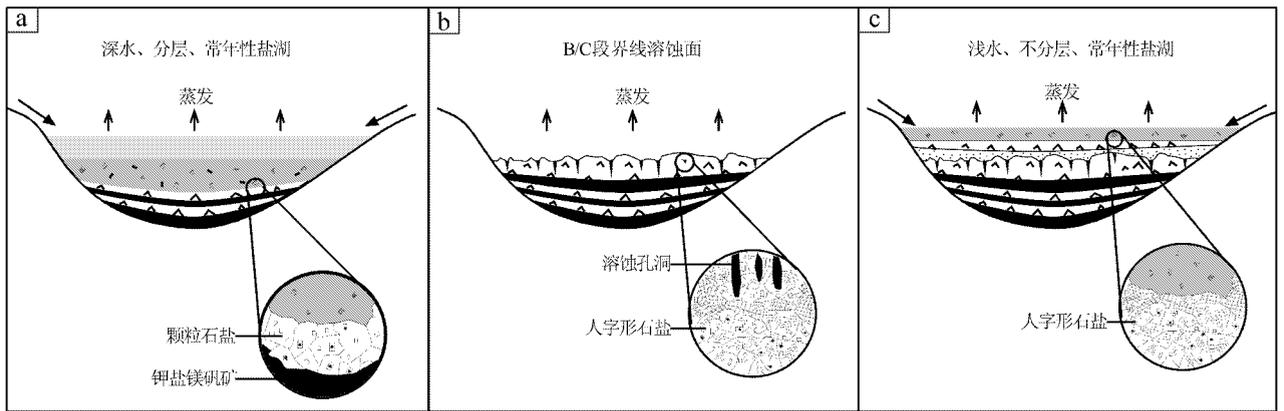


图 5 卡尔塔尼塞塔盆地钾盐镁矾矿成矿模式

- a. 石盐岩 A-B 段沉积于深水、分层的常年性盐湖环境; b. 石盐岩 B/C 段界线, 干盐湖沉积; c. 石盐岩 C 段沉积于浅水、不分层的常年性盐湖环境

Fig. 5 Mineralization model of kainite potash deposit in the Caltanissetta Basin

- a. Halite unit A and B, deep, stratified, and perennial saline lake; b. transition between halite unit B and C, desiccated saline pan deposit; c. Halite unit C, shallow, non-stratified, perennial saline lake

环境。C 段石盐多是由人字形晶体胶结而成, 说明该段石盐形成于浅水、不分层的常年性盐湖 (Lowenstein et al., 1985)。

基于 Realmonte 矿区含矿盐系地层的岩相特征, 笔者总结出卡尔塔尼塞塔盆地钾盐镁矾矿床的成矿过程 (图 5)。由石盐岩 A 段至 C 段, 盆地内次级凹陷的成矿卤水由于气候干旱、海平面降低而持续蒸发浓缩, 先后析出原生石盐和钾盐镁矾矿 (A-B 段) (图 5a), 然后在墨西拿盐度危机最盛时 (B/C 界线) 完全干涸。干涸的盐湖地表在强烈毛细蒸发作用下, 形成如现今柴达木盆地和罗布泊凹陷地表景观的“帐篷状”干盐壳和“泥裂”构造 (图 5b)。之后, 陆地洪水或较淡的海水重新进入盆地, 溶蚀地表干盐壳, 在早先形成的“泥裂”中充填次生石盐胶结晶体和碎屑 (B/C 界线的溶蚀面)。最后, 随着蒸发作用的持续进行, 盐湖再次回到 C 段的石盐-碎屑层沉积旋回 (图 5c)。

4 成矿机理

全球绝大部分钾盐矿均形成于满足封闭构造、干旱气候、充足物源条件的地区。封闭的地质构造为成盐成矿提供容纳空间和有利的蒸发浓缩环境; 干旱的气候意味着蒸发量大于降雨量, 是盐类矿物结晶析出的必备要素, 无论是海水还是陆地淡水, 均需要源源不断地将成盐物质运送至封闭成盐构造

中。因此, 钾盐成矿的构造、气候、物源三要素缺一不可。西西里岛卡尔塔尼塞塔盆地的钾盐镁矾矿同样是在以上三要素的耦合下富集成矿的。

4.1 封闭构造凹陷

西西里岛是在非洲板块和欧亚板块自晚白垩世发生碰撞的挤压环境中形成的 (Grasso et al., 1982; Faccenna et al., 2001) 碰撞挤压环境导致在西西里岛内部沿 NE 向形成前陆盆地系统, 成为亚平宁-马格里布前陆冲断体系的一部分 (Grasso et al., 1982; Butler et al., 1995)。西西里岛的前陆盆地系统包括楔顶带、前渊 (卡尔塔尼塞塔盆地) 以及前隆的 Hyblean 高原 (图 2a)。

晚中新世托尔顿期 (~7.25 Ma), 卡尔塔尼塞塔盆地开始挠曲下凹并抬升为浅海台地, 沉积局限海盆的藻灰岩建造, 楔顶带和前隆区则形成猪背盆地, 堆积页岩、泥灰岩 (Grasso et al., 1982)。随着 5.97 Ma 墨西拿盐度危机的开始, 原生石膏沉积首先堆积在位于浅海环境的楔顶带和前隆区猪背盆地, 组成原生下石膏组 (图 3), 而卡尔塔尼塞塔盆地仍处于较深水环境, 沉积类型仍以白云岩、泥灰岩为主 (CIEM, 2008; Roveri et al., 2014)。在 ~5.60 Ma, 地中海地区构造运动十分活跃, 卡尔塔尼塞塔盆地由于受到盆内逆冲断裂活动影响, 内部差异隆升形成一系列低缓背斜, 盆地分割成多个封闭的次级凹陷 (Pedley et al., 1993), 为成盐成矿创造了有利的封闭空间。

4.2 干旱气候

现有证据表明,5.60~5.55 Ma 是墨西哥盐度危机最强盛时期,气候极端干燥。环地中海的边缘海盆,如法国东南部利翁湾(Lofi et al., 2011)、埃及尼罗河海底扇(Loncke et al., 2006)、意大利波河谷地(Ghielmi et al., 2013)、以色列西海岸黎凡特海盆(Bertoni et al., 2007)等都发现了显著的地中海剥蚀面(Mediterranean Erosion Surface),这一剥蚀面在地震剖面上表现为高差数百米至上千米的深下切边缘谷地,指示“深盆浅水”的地质条件。

在西西里岛卡尔塔尼塞塔盆地,由于5.6 Ma 海平面急剧下降,早先在楔顶带和前隆区形成的猪背盆地出露海平面并接受剥蚀(CIESM, 2008; Roveri et al., 2008)。这些猪背盆地在盐度危机阶段一沉积的原生下石膏组也被剥蚀搬运到前渊的次级凹陷中(图2b),成为再次沉积的碎屑石膏。同时,在各个次级凹陷中,原生颗粒石膏、原生石盐、原生钾盐镁矾开始快速结晶,这些原生蒸发盐矿物与剥蚀搬运来的再沉积碎屑石膏共同组成了再沉积下石膏组(CIESM, 2008; Roveri et al., 2008)。

现有观点认为墨西哥盐度危机极盛期的干旱气候是由全球变冷引起的(CIESM, 2008; Roveri et al., 2008; Manzi et al., 2012; 2013; 2016)。深海氧同位素曲线(Shackleton et al., 1995)指示全球气候在5.60~5.55 Ma(TG12-TG14)变冷,温度下降使得海平面降低,切断地中海与大西洋的水体交换,导致地中海地区气候急剧变干。在干冷的气候格局下,卡尔塔尼塞塔盆地聚集了丰富的石盐和钾镁盐(CIESM, 2008; Roveri et al., 2008)。采用最新测温方法的原生石盐流体包裹体测温数据表明,墨西哥盐度危机最大化时期,地中海表层海水温度平均为17~18℃(Speranza et al., 2013),也指示了相对干冷的气候状况。另一个强有力的证据来自西西里岛卡尔塔尼塞塔盆地、西班牙索班斯盆地、塞浦路斯岛的旋回地层学研究(Manzi et al., 2012; 2013; 2016),天体谐波分析指出这些地区的石膏-碎屑层韵律严格受地球轨道参数岁差周期的控制,沉积旋回在整个地中海地区具有高度一致性,表明环地中海地区的蒸发岩沉积严格受控于当时的干冷气候。

基于以上证据,笔者认为中地中海地区的构造运动为卡尔塔尼塞塔盆地钾盐矿床提供了成矿空间和构造背景,但全球气候在5.60~5.55 Ma 的快速

变冷变干,触发了大规模钾盐镁矾矿的聚集。

4.3 充足物源

钾盐矿的富集需要充足的物源持续不断地补给封闭凹陷,其物质来源包括海水、陆地淡水以及构造活跃带深部卤水补给的成矿元素(Hardie, 1990; Horita et al., 2002; Lowenstein et al., 2009)。

有关西西里岛卡尔塔尼塞塔盆地的钾盐镁矾矿的物源研究较少,一般认为,西西里岛的原生钾盐镁矾矿成矿物质来自于海水(Decima et al., 1973; Garrett, 1996; Warren, 2010)。在钾盐镁矾矿层结晶的石盐岩B段(图4), $\omega(\text{Br})$ 可达 $130 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$,指示其成矿卤水为海水(Lugli et al., 1999)。卡尔塔尼塞塔盆地的原生石盐流体包裹体成分分析(Cendón, 1998; Zimmermann, 2000)、下石膏组的原生石膏样品S和Sr同位素研究(Garcia-veigas et al., 1995)均揭示出原生石盐和石膏的海相成因特征。Speranza等(2013)在卡尔塔尼塞塔盆地 Realmonte 矿再沉积下石膏组的石盐岩C段采集了原生石盐样品,对原生石盐流体包裹体中的子晶进行扫描电镜-能谱仪(SEM-EDS)观察和激光拉曼光谱鉴定,发现这些子晶主要是方解石、白云石、石膏、硬石膏、钾石盐、杂卤石以及其他Ca、K、Mg的硫酸盐矿物,表明该段石盐岩成矿物质来自于Mg-SO₄型卤水,这与新生代全球“文石海”海水组成(Lowenstein et al., 2001)是一致的。

唯一的特例来自于Rigaudier等(2011)的研究,他们采集了20件位于 Realmonte 矿石盐岩B段顶部的原生石盐样品,并分析了原生石盐流体包裹体的氢、氧同位素组成,计算结果显示,氢、氧同位素数值分别为 $-70\% \pm 10\%$ 和 $-11.5\% \pm 1.5\%$,表明结晶卤水混杂有大量陆源淡水。但是,他们采样的位置位于 Realmonte 矿石盐岩B段的顶部,接近B/C溶蚀面(Lugli et al., 1999),此时 Realmonte 地区的已演化为内陆浅水-干盐湖的沉积环境(图5c),因此,成盐卤水容易受到陆源淡水的扰动,从而表现出陆源淡水和海水混合的特征。

另外一个需要关注的关键问题是,火山和断裂活动是否为钾盐镁矾矿的富集提供含钾物质来源。诸多研究表明,在构造活跃区,断裂和火山活动与深部富钾卤水密切相关,能够为成矿盆地提供丰富的K、Mg、B、Li、Rb、Cs等有用元素(Lowenstein et al., 2009; 刘成林等, 2013)。西西里岛位于马格里布-西西里-亚平宁逆冲碰撞造山带(图1),岛上断裂系统

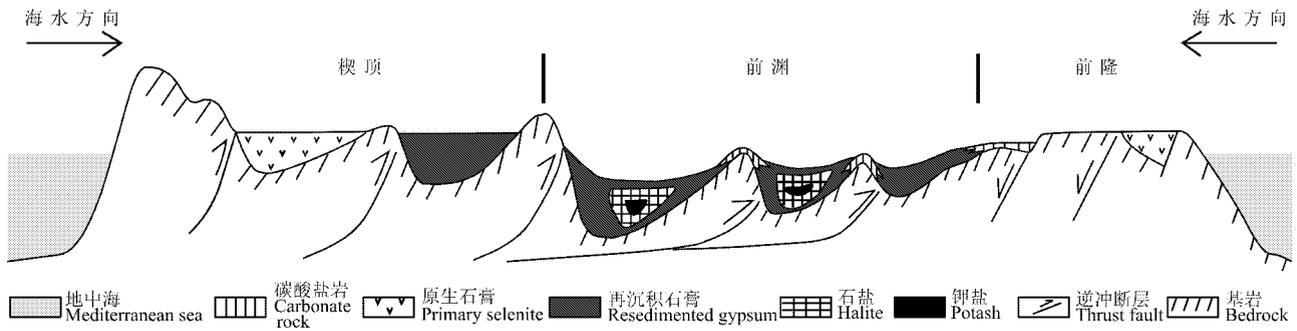


图 6 典型海相小陆块——西西里微陆块钾盐成矿模式示意图

Fig. 6 Schematic model for potash accumulation in Sicily marine microplate

密布,并且分布有众多火山(如埃特纳活火山)。然而,目前的研究并没有发现深部卤水参与了卡尔塔尼塞塔盆地钾盐镁矾的成矿过程。

西西里岛卡尔塔尼塞塔盆地的构造、古气候特征及其钾盐矿物质来源分析表明,非洲板块和欧亚板块的碰撞俯冲导致卡尔塔尼塞塔强烈挠曲下凹,并分割成多个成矿次级凹陷。此后,在墨西拿盐度危机最盛期(5.60~5.55 Ma),由于气候变冷变干,卡尔塔尼塞塔盆地的次级凹陷经海水的周期性补给,于5万年的时间内聚集数百米的厚层石盐岩和近2亿(以 K_2O 计)的原生钾盐镁矾矿(图6)。

5 结 论

本文对意大利西西里微陆块卡尔塔尼塞塔盆地晚中新世钾盐镁矾矿的赋存地层格架、沉积环境进行梳理和总结,研究钾盐镁矾矿的成矿模式,得到如下认识:

(1)意大利西西里岛钾盐镁矾矿呈层状赋存于地中海地区再沉积下石膏组的原生石盐岩B段,是原生海相钾盐。该矿于5.60~5.55 Ma晚中新世墨西拿盐度危机最盛期,在深水、分层、常年性盐湖环境中富集成矿。

(2)晚中新世地中海碰撞挤压的构造运动导致西西里岛卡尔塔尼塞塔盆地强烈挠曲下凹,形成多个次级成矿凹陷,在墨西拿盐度危机最盛期,全球变冷变干、直布罗陀海峡关闭、海平面急剧下降,次级凹陷变得更加封闭,受海水的周期性补给,成矿次级凹陷在5万年的极短时间内聚集近2亿(以 K_2O 计)的钾盐镁矾矿。

中国大陆是由小陆块经过多期次离散拼合而

成;“小陆块是否能成大钾”一直是中国钾盐研究和勘查的重点科学问题。意大利西西里岛作为典型的小陆块,面积仅有25 711 km^2 ,但西西里岛的卡尔塔尼塞塔盆地,却在墨西拿盐度危机最盛期的仅仅5万年(5.60~5.55 Ma)时间内,沉积多达2亿t的原生海相钾盐镁矾矿。这说明,当满足封闭构造-干旱气候-充足物源三要素时,即使是小陆块也具有形成大型钾矿的巨大潜力,这对中国海相小陆块汇聚区的找钾工作具有十分重要的借鉴意义。

References

- Bertoni C and Cartwright J. 2007. Major erosion at the end of the Messinian Salinity Crisis: Evidence from the Levant Basin, eastern Mediterranean[J]. *Basin Research*, 19(1): 1-18.
- Butler R W H, Lickorish W H, Grasso M, Pedley H M and Ramberti L. 1995. Tectonics and sequence stratigraphy in Messinian basins, Sicily: Constraints on the initiation and termination of the Mediterranean salinity crisis[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 107(4): 425-439.
- Butler R W H, McClelland E and Jones R E. 1999. Calibrating the duration and timing of the Messinian salinity crisis in the Mediterranean: Linked tectonoclimatic signals in thrust-top basins of Sicily[J]. *Journal of the Geological Society*, 156(4): 827-835.
- Cendón D I, Ayora C and Pueyo J J. 1998. The origin of barren bodies in the Subiza potash deposit, Navarra, Spain: Implications for sylvite formation[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 68(1): 43-52.
- CIESM. 2008. The Messinian salinity crisis from mega-deposits to mi-

- crobiology[R]. In : Briand F, ed. A consensus report, in 33ème CIESM Workshop Monographs. Monaco : CIESM, Bd De Suisse, Mc-98000. 168.
- Clauzon G, Suc J P, Gautier F, Berger A and Loutre M F. 1996. Alternate interpretation of the Messinian salinity crisis : Controversy resolved[J]. *Geology*, 24(4): 363-366.
- Decima A and Wezel F. 1973. Late Miocene evaporites of the central Sicilian basin, Italy[A]. In : Ryan W B F, Hsü K J, Cita M B, et al., ed. Initial reports of the deep sea drilling project[M]. 1234-1241.
- Devoti R, Riguzzi F, Cuffaro M and Doglioni C. 2008. New GPS constraints on the kinematics of the Apennines subduction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1): 163-174.
- Dewey J, Helman M, Knott S, Turco E and Hutton D. 1989. Kinematics of the western Mediterranean[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 45(1): 265-283.
- Duggen S, Hoernle K, Van Den Bogaard P, Rüpke L and Morgan J P. 2003. Deep roots of the Messinian salinity crisis[J]. *Nature*, 422(6932): 602-606.
- Faccenna C, Becker T W, Lucente F P, Jolivet L and Rossetti F. 2001. History of subduction and back arc extension in the Central Mediterranean[J]. *Geophysical Journal International*, 145(3): 809-820.
- Garcia-Castellanos D and Villaseñor A. 2011. Messinian salinity crisis regulated by competing tectonics and erosion at the Gibraltar arc[J]. *Nature*, 480(7377): 359-363.
- Garcia-Veigas J, Orti F, Rosell L, Ayora C, Rouchy J M and Lugli S. 1995. The Messinian salt of the Mediterranean : Geochemical study of the salt from the Central Sicily Basin and comparison with the Lorca Basin (Spain) [J]. *Bull. Soc. Géol. France*, 166 : 699-710.
- Garrett D E. 1996. Potash : deposits, processing, properties and uses[M]. London : Chapman & Hall. 734.
- Ghielmi M, Minervini M, Nini C, Rogledi S and Rossi M. 2013. Late Miocene-Middle Pleistocene sequences in the Po Plain-Northern Adriatic Sea (Italy): The stratigraphic record of modification phases affecting a complex foreland basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 42 : 50-81.
- Grasso M T and Lentini F. 1982. Sedimentary and tectonic evolution of the eastern Hyblean Plateau (southeastern Sicily) during late Cretaceous to Quaternary time[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 39(3): 261-280.
- Hardie L A. 1990. The roles of rifting and hydrothermal CaCl₂ brines in the origin of potash evaporites ; an hypothesis[J]. *American Journal of Science*, 290(1): 43-106.
- Horita J, Zimmermann H and Holland H D. 2002. Chemical evolution of seawater during the Phanerozoic : Implications from the record of marine evaporites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(21): 3733-3756.
- Hardie L A and Lowenstein T K. 2004. Did the Mediterranean Sea dry out during the Miocene ? A reassessment of the evaporite evidence from DSDP Legs 13 and 42A cores[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 74(4): 453-461.
- Hsü K J, Montadert L, Bernoulli D, Cita M B, Erickson A, Garrison R E, Kidd R B, Mèlières F, Müller C and Wright R. 1977. History of the Mediterranean salinity crisis[J]. *Nature*, 267(5610): 399-403.
- Hsü K J, Ryan W B F and Cita M B. 1973. Late Miocene desiccation of the Mediterranean[J]. *Nature*, 242(5395): 240-244.
- Hsü K J. 1972. Origin of saline giants : A critical review after the discovery of the Mediterranean evaporite[J]. *Earth-Science Reviews*, 8(4): 371-396.
- Krijgsman W, Hilgen F, Raffi I, Sierro F and Wilson D. 1999. Chronology, causes and progression of the Messinian salinity crisis[J]. *Nature*, 400(6745): 652-655.
- Liu C. 2013. Characteristics and Formation of Potash Deposits in Continental Rift Basins : A Review[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 34(5): 515-527 (in Chinese with English abstract).
- Liu C, Zhao Y, Fang X, Lü F, Wang L, Yan M, 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).
- Lofi J, Sage F, Déverchère J, Loncke L, Maillard A, Gaullier V, Thignon I, Gillet H, Guennoc P and Gorini C. 2011. Refining our knowledge of the Messinian salinity crisis records in the offshore domain through multi-site seismic analysis[J]. *Bulletin de la Société*

- géologique de France , 182 (2) : 163-180.
- Loncke L , Gaullier V , Mascle J , Vendeville B and Camera L. 2006. The Nile deep-sea fan : an example of interacting sedimentation , salt tectonics , and inherited subsalt paleotopographic features [J]. *Marine and Petroleum Geology* , 23 (3) : 297-315.
- Lowenstein T K and Hardie L A. 1985. Criteria for the recognition of salt-pan evaporites [J]. *Sedimentology* , 32 (5) : 627-644.
- Lowenstein T K and Spencer R J. 1990. Syndepositional origin of potash evaporites : petrographic and fluid inclusion evidence [J]. *American Journal of Science* , 290 (1) : 1-42.
- Lowenstein T K , Timofeeff M N , Brennan S T , Hardie L A and Demicco R V. 2001. Oscillations in Phanerozoic seawater chemistry : Evidence from fluid inclusions [J]. *Science* , 294 (5544) : 1086-1088.
- Lowenstein T K and Risacher F. 2009. Closed basin brine evolution and the influence of Ca-Cl inflow waters : Death valley and Bristol Dry Lake California , Qaidam Basin , China , and Salar de Atacama , Chile [J]. *Aquatic Geochemistry* , 15 (1) : 71-94.
- Lugli S , Manzi V , Roveri M and Schreiber B C. 2015. The deep record of the Messinian salinity crisis : Evidence of a non-desiccated Mediterranean Sea [J]. *Palaeogeography , Palaeoclimatology , Palaeoecology* , 433 : 201-218.
- Lugli S , Schreiber B C and Triberti B. 1999. Giant polygons in the Realmonte mine (Agrigento , Sicily) : Evidence for the desiccation of a Messinian halite basin [J]. *Journal of Sedimentary Research* , 69 (3) : 764-771.
- Manzi V , Gennari R , Lugli S , Roveri M , Scafetta N and Schreiber B C. 2012. High-frequency cyclicity in the Mediterranean Messinian evaporites : Evidence for solar-lunar climate forcing [J]. *Journal of Sedimentary Research* , 82 (12) : 991-1005.
- Manzi V , Gennari R , Hilgen F , Krijgsman W , Lugli S , Roveri M and Sierro F J. 2013. Age refinement of the Messinian salinity crisis onset in the Mediterranean [J]. *Terra Nova* , 25 (4) : 315-322.
- Manzi V , Lugli S , Roveri M , Dela Pierre F , Gennari R , Lozar F , Natalicchio M , Schreiber B C , Taviani M and Turco E. 2016. The Messinian salinity crisis in Cyprus : A further step towards a new stratigraphic framework for Eastern Mediterranean [J]. *Basin Research* , 28 (2) : 159-297.
- Ogniben L. 1957. Petrografia della Serie Solifera Siciliana e considerazioni geologiche relative [M]. Servizio geologico d 'Italia , 275.
- Pedley H M and Grasso M. 1993. Controls on faunal and sediment cyclicity within the Tripoli and Calcare di Base basins (Late Miocene) of central Sicily [J]. *Palaeogeography , Palaeoclimatology , Palaeoecology* , 105 (3-4) : 337-360.
- Ren J. 1994. The continental tectonic of China [J]. 3-4 : 5-13 (in Chinese with English abstract).
- Rigaudier T , Lécuyer C , Gardien V , Sue J-P and Martineau F. 2011. The record of temperature , wind velocity and air humidity in the δD and $\delta^{18}O$ of water inclusions in synthetic and Messinian halites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 75 (16) : 4637-4652.
- Rouchy J M and Caruso A. 2006. The Messinian salinity crisis in the Mediterranean basin : A reassessment of the data and an integrated scenario [J]. *Sedimentary Geology* , 188 : 35-67.
- Roveri M , Lugli S , Manzi V and Schreiber B C. 2008. The Messinian Sicilian stratigraphy revisited : new insights for the Messinian salinity crisis [J]. *Terra Nova* , 20 (6) : 483-488.
- Roveri M , Flecker R , Krijgsman W , Lofi J , Lugli S , Manzi V , Sierro F J , Bertini A , Camerlenghi A and De Lange G. 2014. The Messinian Salinity Crisis : past and future of a great challenge for marine sciences [J]. *Marine geology* , 352 (50th Anniversary Special Issue) : 25-58.
- Schreiber B C , Friedman G M , Decima A and Schreiber E. 1976. Depositional environments of Upper Miocene (Messinian) evaporite deposits of the Sicilian Basin [J]. *Sedimentology* , 23 (6) : 729-760.
- Selli R. 1954. Il Bacino del Metauro : Descrizione geologica , risorse minerarie , idrogeologia [M]. Museo geologico Giovanni Cappellini , 234.
- Serpelloni E , Vannucci G , Pondrelli S , Argnani A , Casula G , Anzidei M , Baldi P and Gasperini P. 2007. Kinematics of the Western Africa-Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data [J]. *Geophysical Journal International* , 169 (3) : 1180-1200.
- Shackleton N J , Hall M A and Pate D. 1995. Pliocene stable isotope stratigraphy of Site 846 [J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program , Scientific Results* , 138 : 337-355.

- Speranza G, Cosentino D, Tecce F and Faccenna C. 2013. Paleoclimate reconstruction during the Messinian evaporative drawdown of the Mediterranean Basin: Insights from microthermometry on halite fluid inclusions[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(12): 5054-5077.
- Wan T. and Zhu H. 2007. Positions and kinematics of Chinese continental blocks in reconstruction of global paleo-continent for Paleozoic and Triassic[J]. *Geoscience*, 21(1): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- Warren J K. 2010. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits[J]. *Earth-Science Reviews*, 98(3-4): 217-268.
- Yan M and Zhang D. 2014. Drifting history of the China main blocks during specific periods and their tectonic constraints on Marine Potash Formation[J]. *Mineral Deposits*, 33(5): 945-963 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F, Xiao W J and Zhao G. 2013. Introduction to tectonics of China[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1189-1206.
- Zimmermann H. 2000. Tertiary seawater chemistry; implications from primary fluid inclusions in marine halite[J]. *American Journal of Science*, 300(10): 723-767.

附中文参考文献

- 刘成林. 2013. 大陆裂谷盆地钾盐矿床特征与成矿作用[J]. *地球学报*, 34(5): 515-527.
- 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.
- 任纪舜. 1994. 中国大陆的组成、结构、演化和动力学[J]. *地球学报*, 3-4: 5-13.
- 万天丰, 朱鸿. 2007. 古生代与三叠纪中国各陆块在全球古大陆再造中的位置与运动学特征[J]. *现代地质*, 21(1): 1-13.
- 颜茂都, 张大文. 2014. 中国主要陆块特定时段的漂移演化历史及其对海相钾盐成矿作用的制约[J]. *矿床地质*, 33(5): 945-963.

<http://www.kcdz.ac.cn/>