

青藏高原晚新生代湖泊地质环境与成盐成藏作用

郑绵平¹⁾, 张雪飞¹⁾, 侯献华¹⁾, 王海雷¹⁾, 李洪普²⁾, 施林峰¹⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037;

2) 青海省柴达木综合地质矿产勘察院, 青海格尔木 816000

摘 要: 青藏高原湖泊演化是地质构造和气候环境变化共同作用的产物。湖泊沉积既是地质环境记录器, 又是盐类和油气战略资源。但是, 以往在高原内部还缺乏连续完整的高分辨率的长达 1~2 km 的湖芯。本项目在柴达木东、西部获取 1~2 km 5 支系统的岩芯, 取得丰富的高原沉积盆地新纪录。将本轮工作的年代学结果与最新的国际标准相对比, 建立了柴达木盆地较精确的磁性地层年代框架。通过柴达木钻孔剖面冷、暖相盐类矿物环境指标研究, 从 2 Ma BP 开始断续出现冷相矿物至今, 柴达木盆地西部共出现 31 个冷系列, 这与国外冰期研究结果相近。通过对钻孔沉积速率和粒度的研究, 尝试对青藏高原隆升的几个阶段进行划分。对盆地盐沉积的综合研究, 首次发现在盆地中部存在古大气环流的明显界限和成盐突变带。在该线以北, 反映冷湿期盐沉积的西风优势区, 在该区西侧 2 Ma 出现冷相盐沉积, 向东侧渐变至 0.72 Ma 出现冷相盐沉积; 而在该分界线以南, 0.048 Ma 才突然出现盐沉积。提出在高山深盆背景下多级盐盆迁聚成钾观点, 进一步完善陆相成钾理论。本轮工作还在柴达木盆地西部发现富钾卤水的新型矿层。

关键词: 冷事件; 寒旱中心; 青藏高原隆升; 资源响应

中图分类号: K928.43; P588.247; P532 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2013.02.01

Geological Environments of the Late Cenozoic Lakes and Salt-forming and Oil-gas Pool-forming Actions in the Tibetan Plateau

ZHENG Mian-ping¹⁾, ZHANG Xue-fei¹⁾, HOU Xian-hua¹⁾, WANG Hai-lei¹⁾, LI Hong-pu²⁾,
SHI Lin-feng¹⁾

1) MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Golmud, Qinghai 816000

Abstract: The evolution of the lakes in the Tibetan plateau is dominated by the change of both the geological structure and the climate. Thus the lacustrine sediments can serve as a good recorder for both the past geological events and the climate change. Besides, the lacustrine sediments are strategic resources for salts, oils and gas. However, there had been no high resolution successive drilling core from the lacustrine sediments in the QT plateau that could reach a length of 1~2 km before this work. Since the beginning of this century, the authors have systematically collected 5 drilling cores with lengths of 1~2 km from the east and west Qaidam basin, and have obtained unprecedented rich information concerning the geological and climatic history of the Tibetan Plateau from these sedimentary cores. Through comparing the chronologic results with the latest international standard, a more precise model of magnetostratigraphy was established. Based on studying the cold, warm and eurythermal saline minerals in Qaidam basin, the authors found 31 series of cold events since 2 Ma BP. From that time Qaidam

本文由中国地质调查局重大地质基础项目(编号: 1212010818057)、国家自然科学基金重点项目(编号: 40531002)和中国地质调查局国土资源大调查项目“中国柴达木盆地西部上新统以来富钾硼锂深循环卤水矿产普查钻探岩芯综合研究”(编号: 1212011018004)联合资助。获中国地质科学院 2012 年度十大科技进展第三名。

收稿日期: 2013-02-21; 改回日期: 2013-03-04。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 郑绵平, 男, 1934 年生。研究员, 中国工程院院士。主要从事盐湖学与盐类矿床地质学研究。

E-mail: zhengmp2010@126.com。

basin began to intermittently appear cold events. The time of cold events is close to the chronologic data of Cenozoic Global Glaciation. The uplift of the Tibetan Plateau was tentatively divided into several stages according to the study of the deposition rate and the particle size. At the first time, the authors found that there was a demarcation line in the middle of Qaidam basin, which was not only the boundary of paleo-atmospheric circulations but also the boundary of salt formation. The westerly wind inclined area located to the north of the investigated line reflects salt deposits in the cold-wet climate period. To the west of the study area, the cold saline sediments occurred after 2 Ma, whereas they gradually crystallized into cold saline deposits at 0.72 Ma; in contrast, the saline sedimentary period started at 0.048 Ma in the south part of the boundary. The point of view is put forward in this paper that potassium was concentrated by the transportation of the multi-stage salt basin lying in the high mountain-deep basin environment, and this viewpoint can further improve the theory of potassium formation in continental facies. A new potash-rich brine horizon was found by the authors in the western Qaidam basin.

Key words: cold event; cold and arid center; the uplift of the Tibetan Plateau; resource response

青藏高原—湖泊—沙漠—黄土是一个成因上相关的耦合系统,以刘东生为代表的中国学者已在黄土研究上做出了世界性的贡献,揭示了黄土与季风的关系。湖泊(盐湖)沉积是中国人有望做出应有贡献的一个新领域。特别随着晚近地质时期(N-Q)强烈的高原隆升,引起亚洲季风系统稳定建立的同时,在多圈层作用下,还引起一系列矿产资源效应,国家急需的油气和钾盐以及硼、锂、铷、铯、碘、溴等的大规模聚集。表生-深部效应结合,既有表生(大气圈、水圈、生物圈)作用,还有深部岩石圈作用;晚近的成矿作用是古、中生代成矿作用的继承和发展,前期青藏高原矿产研究虽然取得长足进步,但是同晚近资源和环境及其相关耦合的研究较少,该项目研究可望成为成矿与环境融合协同研究的前沿课题。

青藏高原各类湖泊众多,尤其是第四纪湖相沉积分布广泛,且来自人类污染甚少,是研究古气候变化的理想场所。位于青藏高原北部的柴达木盆地是青藏高原最大的内陆盆地,其盐湖-湖泊沉积,对于研究晚新生代依赖青藏高原隆升过程中环境变化具有重大意义。其中三湖区(即察尔汗盐湖区)是柴达木晚新生代(N₂-Q)厚度最大的连续沉积中心(一般4300~5300 m),也是青藏高原内部面积和厚度最大的新生代沉积湖盆。

柴达木西部以大浪滩地区为中心(称之为“西大湖”),既是柴达木盆地古近纪—新近纪上新世早期的连续沉积中心,又是古新世—上新世早期(E₁+N₂¹)柴达木古湖主要分布区,其沉积厚度(E₁+N₂¹)达7000~4600 m。该区也是柴达木盆地主要的第三系石油和第三系—晚更新世盐类分布区。

柴达木盆地是我国最大钾盐基地,其中察尔汗湖区钾盐形成时代最新(晚更新世晚期—全新世),

保有KCl储量4.3亿吨;在该区取得长记录岩芯,可以从环境演化过程,深入阐明陆相钾盐湖成矿理论。除此之外,三湖区还储藏有世界最大的第四纪生物气田,尚待查明其地质成因机制。

1 年代学模式

不管是高原隆升和长尺度气候变化的科学研究,还是矿产资源的调查评价,一个精确的年代框架是必不可少的。测年方法有许多种,而对于柴达木盆地巨厚的连续湖相沉积来说,选择必要的同位素和古地磁手段无疑是较为合适的测年方法。在过去的几十年中,柴达木盆地各个地区进行了多次钻探工作,主要用于油气资源勘探以及找钾的研究,陆续发表了柴达木盆地各个区域的磁性地层结果(E.德比希尔等,1985;刘泽纯等,1990;沈振枢等,1992)。沈振枢等人(1993)综合分析柴达木盆地尕斯库勒湖ZK2605、大浪滩ZK402和ZK336、察汗斯图拉ZK4613、马海ZK4012、昆依特ZK3208、一里坪ZK701和801、察尔汗水6孔的古地磁数据,沈振枢等(1993)首次建立了4 Ma以来柴达木盆地钻孔剖面连续沉积的磁性地层。同时结合同位素年代学以及生物地层对比等综合资料,论证确定了本区第四系底界及内部各统界限的原则和依据,划分了第四系底界及内部各统,建立了4个井下第四纪地层单位(沈振枢等,1992,1993)。随后的十几年中,柴达木盆地并没有新的全取芯长尺度钻孔的磁性地层数据报道,仅仅是一些浅钻孔或者深钻孔目标层位的古地磁数据,如刘泽纯等(2000)综合了达布逊1号孔、涩中6井、涩深1井、台南1井、盐心1井、驼中2井以及鸭湖剖面的磁性地层结果,建立了柴达木盆地东部的一个第四纪磁极性序列。因此,在这十几年中柴达木盆地的大部分第四纪研究工作采用的年

代框架还是参考沈振枢等(1993)的磁性地层结果。

然而，沈振枢等(1993)所采用的古地磁数据多为 20 世纪 80 年代所测，其取样间隔相对较大，测试仪器设备相对落后，其结果已不能满足现代科学研究所要求的高分辨率和高精度的年代框架。另外，沈振枢等人(1993)所采用的国际标准极性柱在一些极性亚时的时代上已经做出了调整，如 B/M 界限的时代从 0.73 Ma 校正为 0.78 Ma(Gradstein et al, 2004)。因此，本次工作将展示柴达木盆地大浪滩地区梁 ZK02、梁 ZK05 及梁 ZK06 三个钻孔最新的磁性地层结果，并结合梁 ZK02 同位素年代，与沈振枢等人(1993)的磁极性序列和最新的国际标准极性序列对比，厘定出一个较为精确的柴达木盆地磁性地层年代框架，为柴达木盆地的环境气候研究以及找钾找油提供了较为精确的年代框架。

2 冷期系列的厘定与其环境意义

笔者通过国内第四纪盐湖沉积的长期实地考察和盐湖长期科学观察站的实验研究，结合国内外大量盐沉积实验研究资料，包括介稳相图的 3 种水化学类型(碳酸盐型、硫酸钠亚型、硫酸镁亚型和氯化物型)4~5 元卤水体系数据，以比较盐湖学的理论和方法，将盐类沉积划分为冷相、暖相和广温相(郑绵平等, 1998)，提出一套有根据的古气候“温度-湿度计”(刘东生, 1998)，并经尔后得到有关学科的应用和其他方法的较一致的验证(王乃昂等, 2000; Wei et al., 2002; 魏乐军等, 2002; 刘成林等, 2008)。

柴达木盆地西部自第三系—第四系和东部现代盐沉积区盐类矿物种类较多，已发现盐类矿物初步统计达 51 个(表 1)，其中典型的冷相盐矿物有：芒

表 1 柴达木冷、暖相与广温相盐类矿物简表
Table 1 Cold, warm and eurythermal saline minerals in Qaidam Basin

化合物类型	冷相盐类矿物	暖相盐类矿物	广温相盐类矿物
碳酸盐	泡碱(Na ₂ CO ₃ •10H ₂ O)	白云石(CaCO ₃ •MgCO ₃)	天然碱 (Na ₂ CO ₃ •NaHCO ₃ •2H ₂ O)
		镁方解石(CaCO ₃ , MgCO ₃ >4%)	
		菱镁矿(MgCO ₃)	
		文石(CaCO ₃)	
		碳钙镁石(CaCO ₃ •3MgCO ₃)	
硫酸盐	泻利盐(MgSO ₄ •7H ₂ O) 六水泻利盐(MgSO ₄ •6H ₂ O) 芒硝(Na ₂ SO ₄ •10H ₂ O) 水钙芒硝(5Na ₂ SO ₄ •3CaSO ₄ •6H ₂ O) 羟钠镁矾(NaOH•MgSO ₄ •2H ₂ O) 软钾镁矾(K ₂ SO ₄ •MgSO ₄ •6H ₂ O)	半水石膏(CaSO ₄ •1/2H ₂ O)	石膏(CaSO ₄ •2H ₂ O) 杂卤石 (K ₂ SO ₄ •2CaSO ₄ •MgSO ₄ •2H ₂ O) 钾芒硝(Na ₂ SO ₄ •3K ₂ SO ₄)
		硬石膏(CaSO ₄)	
		钙芒硝(Na ₂ SO ₄ •CaSO ₄)	
		无水芒硝(Na ₂ SO ₄)	
		白钠镁矾(Na ₂ SO ₄ •MgSO ₄ •4H ₂ O, 偏暖相)	
		钠镁矾(6Na ₂ SO ₄ •7MgSO ₄ •15H ₂ O)	
		四水泻利盐(MgSO ₄ •4H ₂ O)	
		天青石(SrSO ₄)	
		无水钾镁矾(K ₂ SO ₄ •2Mg ₂ SO ₄)	
		钾盐镁矾(KCl•MgSO ₄ •3H ₂ O)	
		盐镁芒硝(3NaCl•9Na ₂ SO ₄ •MgSO ₄)	
		重晶石(BaSO ₄)	
卤化物	光卤石(KCl•MgCl ₂ •6H ₂ O)	氯氧镁铝石(Na ₄ Mg ₉ Al ₄ Cl ₁₂ (OH) ₂₂)	石盐(NaCl)
	水石盐(NaCl•2H ₂ O)		
	南极石(CaCl ₂ •6H ₂ O)		
	水氯镁石(MgCl ₂ •6H ₂ O)		
	钾石盐(KCl)		
硼酸盐和硼酸	多水硼钠石(Na(H ₂ O) ₃ [BB ₄ O ₆ (OH) ₄])	三方硼砂(Na ₂ [B ₄ O ₅ (OH) ₄]•3H ₂ O) 硼硅钙镁石 板硼石(Ca[B ₃ O ₃ (OH) ₅]•4H ₂ O)	钠硼解石(NaCaB ₅ O ₉ •8H ₂ O)
	柱硼镁石(MgB ₂ O ₄ •3H ₂ O)		
	硼砂(Na ₂ B ₄ O ₇ •10H ₂ O)		
	水方硼石(CaO•MgO ₃ •3B ₂ O ₃ •6H ₂ O)		
	章氏硼镁石(MgB ₄ O ₇ •9H ₂ O)		
	水碳硼石 (MgCa ₂ [CO ₃ B ₂ O ₃ (OH) ₄]•8H ₂ O)		
	祁连山石(NaHCO ₃ •H ₃ BO ₃ •2H ₂ O)		
	库水硼镁石(Mg ₂ B ₆ O ₁₁ •15H ₂ O)		
	多水硼镁石(Mg ₂ B ₆ O ₁₁ •15H ₂ O)		
	三方硼镁石(MgO•3B ₂ O ₃ •7.5H ₂ O)		
	诺硼钙石(Ca[B ₆ O ₉ (OH) ₂]•3H ₂ O)		

硝、泻利盐、软钾镁矾和一些富含结晶水的硼酸盐以及偏冷相的钾石盐、光卤石、水氯镁石；暖相盐矿物有无水芒硝、钾镁矾、无水钾镁矾、四水泻利盐、柱硼镁石和偏暖相的白钠镁矾；广温相盐矿物有石盐、石膏、杂卤石、钠硼解石等。

据上述西部含盐岩系冷相矿物的系统对比，首次确定出柴达木西部冷期出现的 31 个时间系列。最早出现冷相矿物约为 2010—1980 ka，持续 31 次，从约 2010 ka 开始，冷期累计时间达 687 ka。据国外冰期研究(Ehlers et al., 2007)，第四纪全球冰期时间最早发生在 2.5 Ma 前后，约 2.1 Ma 至现代，该冰川期间共有 13 次，次冰川事件 9 次。其多数事件与柴达木西部发现的冷期比较接近。

3 青藏高原季风演替与高原隆升

李吉均等(1998)最早划分了青藏高原上新世晚期—第四纪几个隆升阶段，通过本次柴达木 14 个钻孔岩芯研究尝试对青藏高原和昆黄运动及尔后的隆升运动进一步划分：在原来划分的青藏高原隆升运动 A、B、C 幕基础上，建议增加 B₁ 幕，为节约篇幅，试将其列如表 2。

关于青藏高原昆黄运动：除前人已厘定昆黄运动序幕、主幕和续幕外，本文还识别出 0.47—0.42 Ma 昆黄运动 IV 幕。

共和运动及尔后运动：原称共和运动肇始 150 ka(李吉均等，1998)，据新钻孔剖面进一步厘定

为 169—143 ka，并在 100—82 ka 还有一次明显上升运动(命名为共和运动 II 幕)，在尔后 48 ka 以来，还有一次间歇性强烈的抬升，据周边阶地期上升幅度很大，由于沿柴中断裂发生一次由西往东迁聚成盐突变，而建议命名为柴中运动。

根据 14 个钻孔已有的年龄数据和沉积速率表明：3.60—3.33 Ma、3.21—3.12 Ma、3.0—2.59 Ma、2.19—2.15 Ma、1.70—1.65 Ma、1.07—0.99 Ma 和 0.13 Ma 以来有七次强烈隆升。结合新钻孔数据，在 2.19 Ma 隆升运动后还有 7 次隆升并还可与柴达木西部发现的冷期芒硝层等相呼应。

4 寒旱中心与古大气环流的演替

根据上述柴达木东、西部上新世以来古环境分析，在上新世和更新世大部分时间柴达木东部和东南部还以温湿和凉湿为主环境，而西藏高原仍为南温带偏温湿气候，说明印度季风和东南夏季风还能到该区；而西风带和冬季风主要还活跃在塔里木东部和柴达木西部和祁连山以北，从而构成中国西部塔东—柴西寒旱中心，并导致柴西形成“古盐盆地”，而柴达木东部和西南部长期为淡水湖-微咸水湖间或沼泽环境。

在柴达木之南的西藏高原上有广泛分布砂泥质淡水湖相沉积，藏东—滇西和川西长期有煤层(N₂)或褐煤与泥炭(Q)发育，表明西藏高原上新世气候仍为凉湿/温湿气候。

表 2 青藏运动 A、B、C 阶段与其特征
Table 2 The stages and characteristics of Qinghai-Tibet movement

青藏高原边缘山麓与盆地划分(施雅风等, 1999)		柴达木盆地(本文)	
年代(Ma BP)及方法	构造与沉积特征	年代(Ma BP)及方法	构造与沉积特征
3.4(青藏运动 A 幕) 古地磁年龄测定	青藏高原外围山麓与盆地：高原夷平面 P ₂ 解体，喜马拉雅南麓 MBT 向南逆冲，中下西瓦里克群强烈褶皱，高原北缘西昆仑、阿尔金、祁连山前 Q ₁ 唐拉斯山前砾岩、临夏盆地红土风化壳、昆仑山垭口扇砾岩等开始大发展	3.60—3.33、 3.21—3.12 钻孔湖芯用古地磁 辅以铀系法、ESR、 ¹⁴ C 测定	柴达木西昆仑(其漫塔格)山前尔斯库勒湖和南祁连山前海湖湖在此时段有厚大砾岩沉积，后者在 3.60—3.33 Ma 沉积速率突然上升到 0.28 mm/a，尔斯库勒湖、大浪滩、察汗斯拉图和一里坪在 3.2—3.1 Ma 沉积速率一致锐增，平均沉积速率达 0.26 mm/a
2.6(青藏运动 B 幕) 古地磁年龄测定	柴达木周缘盆地：祁连山北麓的地壳缩短 14 km，祁连山隆起	2.59 古地磁年代测定	对 5 口钻孔钻穿 2.588 Ma 的岩芯分析表明：在 ≥2.6 Ma，沉积速率均较高，平均 0.28 mm/a
1.65(青藏运动 C 幕) 古地磁年龄测定	青藏高原东边临夏东北古湖被切穿，形成井沟头组砾岩层；黄河 T ₇ 阶地形成	1.69—1.50 (大浪滩新施工 3 钻孔均有显示)	大浪滩梁 ZK06、梁 ZK02、梁 ZK05 沉积速率均一致增高，其平均沉积速率 0.4 mm/a，尤其是与柴达木西部岩芯冷相芒硝层显示冷期 1690—1517 ka 相呼应
		2.15—2.13 (据柴达木西部 6 个 钻孔资料确定；青藏 高原运动 B ₁ 幕)	据 5 个盐湖 6 个钻孔资料取得平均沉积速率达 0.57 mm/a

上新世大量的煤炭和褐煤的发育表明, 印度季风在上新世沿三江地区以及喜马拉雅垭口还是可以达到柴达木东部的; 此时西风仍沿青藏高原北缘流行, 冬季风盛行在祁连山以北, 而从早更新世晚期(约 50 ka BP)西风带向东至青藏高原呈南北分流运行, 但沿三江通道东南季风暖流湿气仍可达柴达木东南部。直至 50 ka BP 以后, 柴达木东部骤变为干旱成盐环境; 塔东—柴西“寒旱中心”则南迁至阿里西部。

5 盐类矿产资源的响应

柴达木是我国著名的盐沉积聚宝盆, 尤以东部三湖地区最负盛名, 但是最早和最强烈的成盐中心是在西部。在柴达木盆地西部和东部存在两个不同成盐次盆地群, 西部为“古盐盆地”群, 以始新世—第四纪, 尤以上新世—晚更新世成盐强度最大; 东部为“新生盐盆地”群, 成盐时代为晚更新世晚期—全新世(48000 a—现代)。西部古盐盆地群以大浪滩和狮子沟地区为中心, 是柴达木西部断续长约 50 Ma 的成盐中心, 尤以大浪滩新近纪以来成盐持续时间长、成盐强度最大。西部古盐盆地可划分为地下和浅表两类含盐沉积区。地下含盐沉积区构成低丘构造带, 由上而下, 由早中更新世—始新世含盐岩系构成; 浅表含盐岩系广布于低丘构造带之间的洼地 and 现代盐湖, 围绕大浪滩干盐湖, 往东依次有察汗斯拉图干盐湖、昆特依干盐湖、马海半干盐湖, 东南有一里坪干盐湖, 西南为尔斯库勒湖。

东部新生盐盆地群主要以东南部洼地为主, 由北西往南东依次分布: 西台吉乃尔湖、东台吉乃尔湖、涩聂湖—达布逊湖—察尔汗湖区(含南、北霍布逊湖等); 南祁连山山前还分布有大、小柴旦湖等盐湖。

5.1 柴中断裂与其成盐突变带

上述西部“古盐盆地群”和东部“新生盐盆地群”, 两者接触带呈东西延伸, 宽仅 10~20 km, 但在本带南北, 无论在成盐时代还是沉积速率上有着巨大差别, 故本文称之为“柴中成盐突变带”。在此带南侧西台吉乃尔湖往东依次为东台和小柴旦湖, 进入东部祁连山有东西走向的塔塔棱河与雅沙图凹地。在古、新盐盆地群, 两者之间在地表上均是一片湖积平原, 并无山川相隔, 由于厚层第四纪沉积覆盖, 也见不到断层显示。该区早期的地质构造图上, 在柴达木中部并未见划分界线。随着近期我国地质和石油地球物理调查的进展, 已揭示在柴达木

中部东西的确是深藏着一条区域性深大断裂, 回头再观地图和遥感影像(图 1), 可见该断裂东连南祁连山塔塔棱河, 西接祁曼塔格山垭口, 长达 500 km 以上。雅沙图有古钙华型硼酸盐沉积, 塔塔棱河和遥相对应的西部拉陵格勒河水都有含硼异常, 后者以昆仑山楚拉克阿拉干河谷地火山沉积和热泉中携带硼锂组分, 而分别构成柴达木盆地现代特种盐湖的主要来源。

在布格重力异常图上, 柴中成盐突变带以北, 重力异常成 NW—NNW 向, 以南主体重力异常无明显方向性(徐凤银等, 2009)。在航磁异常图上, 柴中成盐突变带以北磁力异常呈 NW—NNW 向, 以南磁力异常呈东西向。沿成盐突变带为一条航磁异常带(图 2)。

笔者多次指出(Zheng et al., 2011; 郑绵平等, 2012), 大型盐盆地和钾盐矿床形成和保存与陆块稳定性密切相关, 在中国构造背景较为活动情况下, 尤其要求有较稳定基底。柴达木南北次盐盆地群聚集和后期变化特征, 是上述观点一个佐证: 柴中成盐突变带南为太古代一套麻粒岩相的深变质岩(徐凤银等, 2009), 是柴达木地块的古陆核部分。而柴中带之北, 为元古代达肯大坂群, 为一套代表活动性的火山-泥砂质岩系, 是柴南古陆核基向北向增生的地质体。可见柴达木南北结晶基底不同, 而柴中断裂带是形成于元古代, 是南北两地块的缝合带。在加里东期, 柴达木地块从柴—祁地块分离独立后, 经历海西期和燕山—喜山期两次成盐阶段。海西期形成海相弧后裂陷盆地, 柴中断裂带控制了该裂陷的展布; 燕山—喜山形成陆相盆地。柴中断裂带以走滑作用为主, 对东西盆地沉积中心的迁移有重要控制作用, 不但是控制柴达木油气成藏与分布的一个关键构造(徐凤银等, 2009), 而且对新生代成盐沉

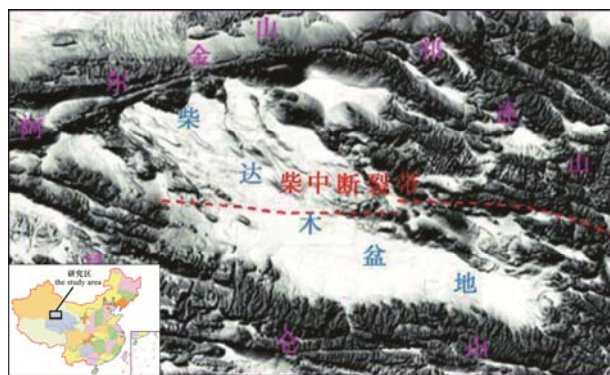


图 1 柴达木盆地影像(徐凤银等, 2009)

Fig. 1 Geomorphologic image of Qaidam Basin (after XU et al., 2009)

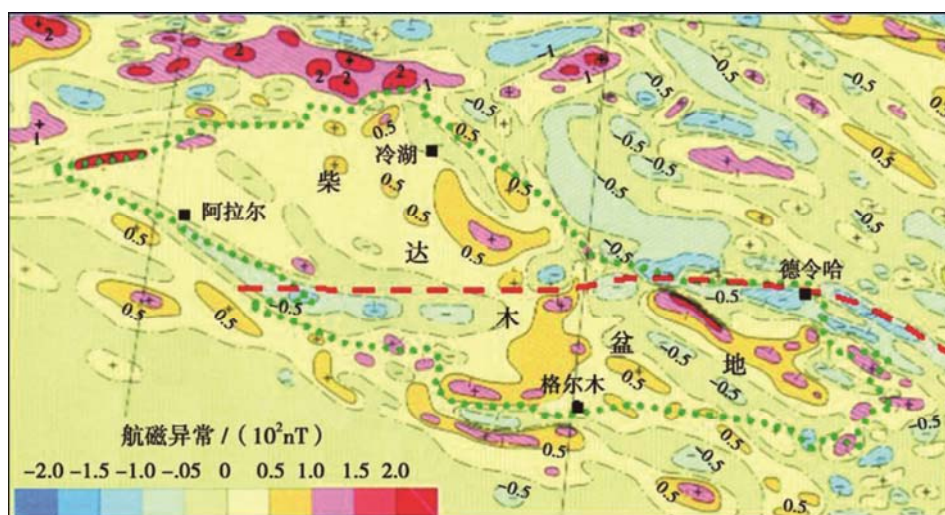


图2 柴达木航磁异常平面分布(徐凤银等, 2009)

Fig. 2 Plane distribution of aeromagnetic anomalies in Qaidam Basin (after XU et al., 2009)

积中心的迁聚有重大控制作用;柴中断裂带与盆地周边构造共同形成翘翘板,导致柴达木盆地北降南升,先在柴西狮子沟—大浪滩形成盐沉积中心,嗣后逐步东迁,至新近纪,察汗斯拉图—一里坪成为沉积中心;第四纪始,发生重大构造转折,柴中成盐突变带为界,柴达木地块南降北升,沉积中心迁至“三湖”拗陷。

5.2 陆相钾盐成矿机制概述

1)区域地质调查和地球化学研究表明,柴达木从侏罗纪前已成陆相环境,缺乏海水补给,柴达木陆相盐类物质,特别是钾盐主要还是由风化盐类从广大面积泛湖和长期分异积聚过来的,深部热水含钾量较少,对盐湖贡献主要是锂和硼。柴西从古新

纪开始见有石膏沉积,始新统—上新统均有岩盐沉积,岩盐由薄到厚,但含钾低,缺乏钾盐沉积,断续长达5000余年,主要钾盐沉积直到晚更新统才出现。但是其作为捕集盐分的蒸发成盐面积较大,仅计柴西古盐盆面积约6万 km^2 。古昆仑湖群总面积约几千 km^2 ,由于其成盐历史很短,虽亦补给部分盐分,而不支持认为察尔汗钾分主要来自古昆仑湖的观点(朱允铸等, 1994),但据实地调查,古拉陵格勒河地热区却是东、西台盐湖锂、硼的重要补给来源(图3)。

2)基于高山深盆地地貌背景,盐类物质在多级盐盆地系统中,在重力场和化学分异作用下逐渐富集钾盐。柴达木最早成盐于始新世,位于柴达木西南

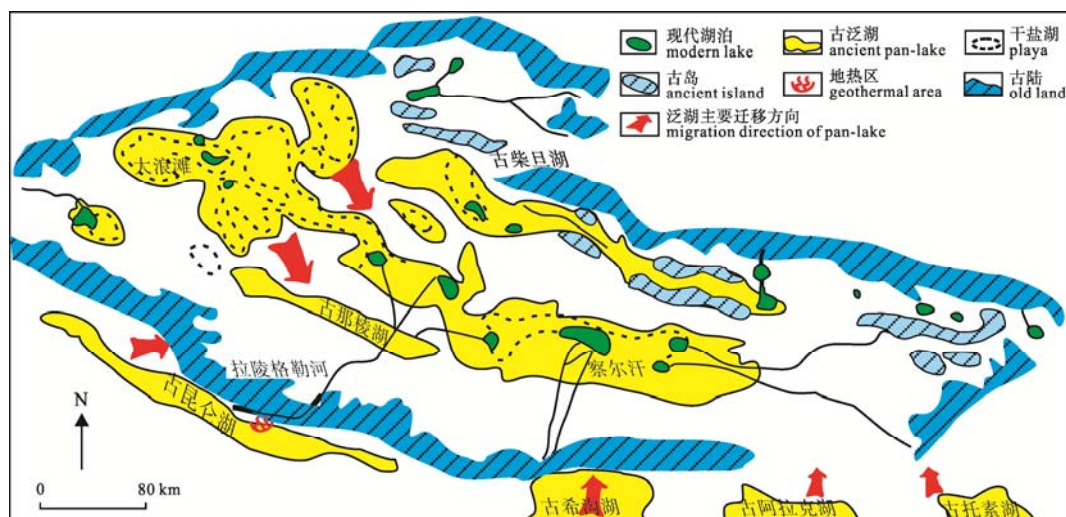


图3 柴达木和北昆仑晚更新世泛湖迁移方向

Fig. 3 Migration direction of Late Cenozoic Qaidam basin-North Kunlun pan-lake

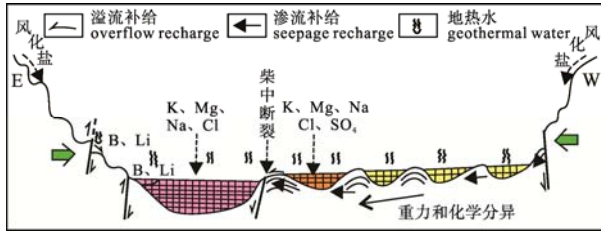


图 4 柴达木东部多级盐盆迁聚成盐模式

Fig. 4 A model of salt formation of multistage salt basin in eastern Qaidam Basin

部狮子沟一带，至渐新世向东偏北迁至大浪滩；至中新世迁至察汗斯拉图；上新世迁至一里坪；第四

纪早期迁至马海，但在西部次级盐盆地东迁过程中，大浪滩地区持续拗陷成盐时间较长，故成西部聚钾中心；最后在晚更新世，柴达木古翘翘板向东倾斜，柴中断裂发挥枢纽作用，促使富钾卤水汇聚三湖区，而形成规模较大钾矿床(图 4)。

3)钾盐最后聚集于最为稳定的太古代基底，有利于钾盐稳定沉积和后期保存。

4)与干寒/暖偏干气候相耦合，大部分钾盐在盐湖干化阶段富集于晶间卤水和盐层中，不至于被近期周期性降水所淡化，而有利于保存可溶性钾盐矿层。

5)察尔汗湖区在已揭露第三纪以来的深部层位，

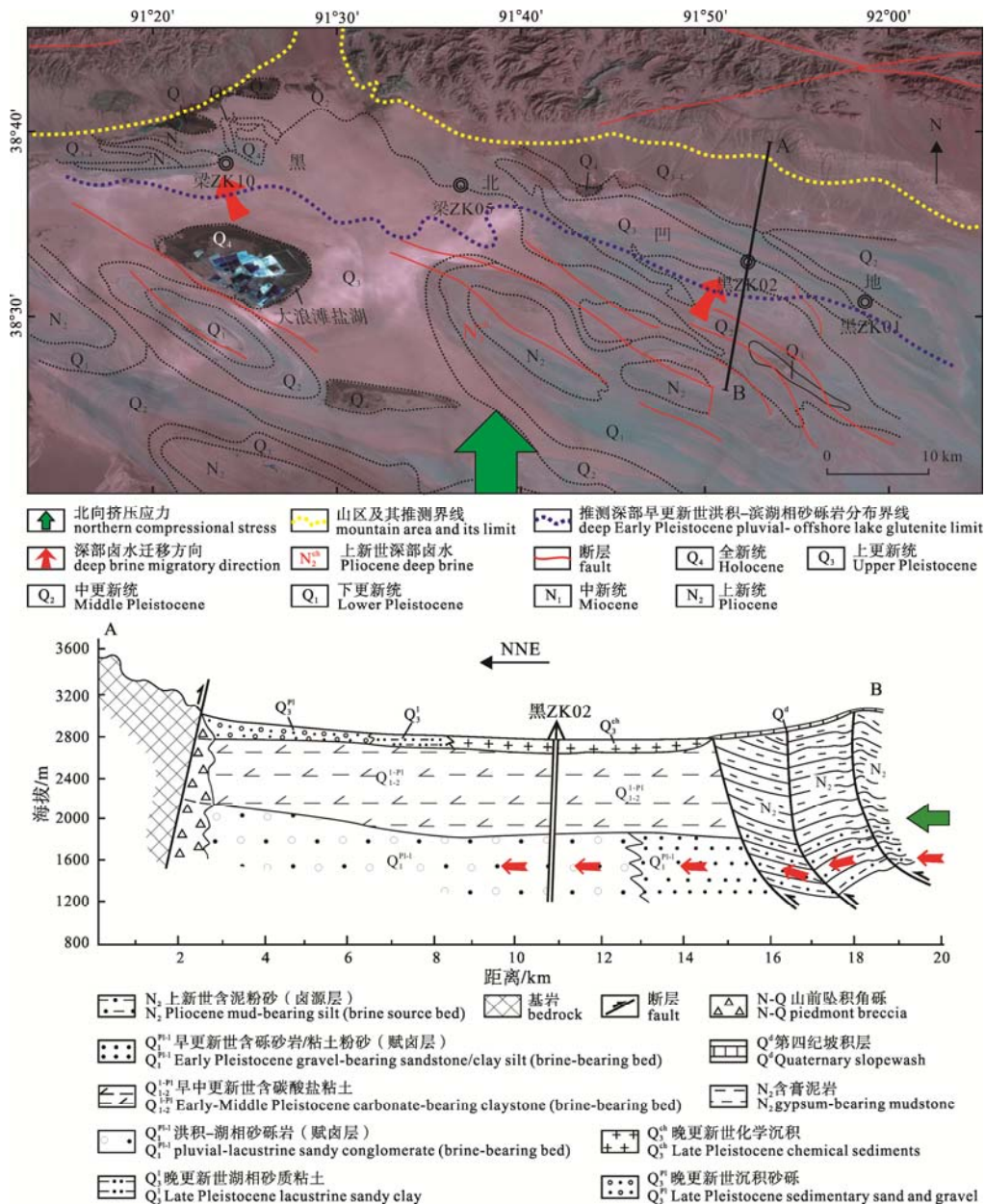


Fig. 5 Schematic diagram of the deep brine migration in Heibei depression (after New Potash Drilling Achievement; WANG et al., 2011; WEI et al., 1993 and earthquake explanation information by YU Chang-qing)

不存在其他含盐层位,也无大规模深部地下卤水,而柴达木盆地 CaCl_2 卤水主要见于西部古盐盆地第三系地层中,因此不能支持察尔汗钾盐是由东部 CaCl_2 泉水和河水混合形成的观点(Lowenstein et al., 1989)。

以上说明钾矿床形成必须经过一个长期演化分异富集过程,陆相钾盐尤其如此,而且形成的钾盐与石盐之比(KCl/NaCl)仅达千分之一到万分之几,与海相钾盐矿床高 KCl/NaCl 相比,相差悬殊。

6 西部柴达木地下富钾卤水的新发现与初步评价*

本轮工作在柴达木西部大浪滩地区黑北凹地实施 4 个钻孔:2011 年施工梁 ZK05、黑 ZK01,2012 年以来施工梁 ZK10 和黑 ZK02(图 5)。其中梁 ZK05 上部 170 余 m 为含粉砂粘土石盐和含盐/含膏粉砂粘土;170 余 m 至 325 m 为含膏粉砂和粘土粉砂层;中下部自 325 m 至 1025 m 终孔为洪积相砂砾层。终孔后砂砾层中有少量卤水渗出。黑 ZK01 孔(1251 m),从 0—800 m 为盐类沉积为主,属湖相化学沉积相,为晶间卤水含水层;800—1251 m 为巨厚的松散层,属滨湖相沉积,为孔隙卤水含水层。对该孔晶间卤水层进行抽水试验, KCl 品位 1.0%;对孔隙卤水层经抽水试验,卤水 KCl 品位 0.36%。通过该孔的施工工作,将大浪滩一带的孔隙卤水和晶间卤水向东拓展了 20 km。黑 ZK02 孔(设计井深 1200 m),从 381.05—808.46 m 段已揭露出了厚达 427.41 m 的滨湖-洪积相砂卵砾石层(含卤水层);808.46—1200 m 为粘土层。在黑北凹地西部实施梁 ZK10(设计井深 1550 m),揭露出石盐层总厚度 115.23 m,施工至 897.65 m 时,揭露砂卵砾石层(含卤水层),截至目前,含卤水(碎屑)层厚度达 653 m,仍未揭穿,还需向下钻进。

通过 2012 年黑 ZK02 和梁 ZK10 孔,进一步揭示砂砾石层赋存含钾卤水,确证了在柴达木西北部还存在一种新型含钾卤水层位。它在欧亚陆陆碰撞构造背景下,第四纪以来向北挤压应力的远程效应,遂使深部从原来的上新世 CaCl_2 型赋卤层向北迁聚到早更新世滨湖-洪积相砂砾层中,构成“砂砾岩型富钾卤水(可称转型卤水资源)”,其迁聚机制简要图解如图 5。根据三个钻孔的资料,黑北凹地的深层卤水就有 KCl 远景资源量 1 亿吨。进一步证明,柴西存在新近纪和早第四纪多种类型的富钾卤水资源,

有望成为青海钾盐后备基地。

7 盐湖生物气

柴达木盆地三湖区的生物气田是目前世界最大的第四纪生物气田(孙平等, 2011)。其中 Q_{1+2} 和 N_2^3 为生物气源岩。三湖凹陷 Q_{1+2} 最大生气强度 $140 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, N_2^3 最大生气强度 $90 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。本轮工作对盆地东部达布逊湖钻孔灌顶气分析显示甲烷气在 60~1200 m 地层中广泛存在。根据本区地质条件和天然气分析的结果,判断天然气为典型的生物成因,为生物降解原始有机质生成。可溶有机质类型为 II 型,岩石抽提物、生物标志物分析结果指示,第四系岩芯原始有机质沉积环境为还原环境,在水质由淡变咸阶段有利成气,生物气源岩处于未成熟阶段。三湖地区有机质来源是低等的水生生物和藻类,反映为浅水-沼泽相环境,由于沉积速度快,有机质快速埋藏,在还原-微咸水-淡水条件下,有利于甲烷气的形成(详见另文发表)。

致谢:本项目的启动和研究过程中承中国地质调查局汪民等领导同志,袁道先、陈运泰、戴金星、滕吉文、赵文津等院士,中国地质科学院董树文、中国地质科学院矿产资源研究所王瑞江、王宗起等院所领导以及中国地质科学院地质力学研究所杨振宇、中国地质科学院地质研究所杨经绥、中国石油勘探开发研究院邹才能、中国石油勘探开发研究院廊坊分院李景明、青海盐湖集团王兴富、中国科学院青海盐湖研究所宋彭生、中国地质科学院矿产资源研究所贾沁贤等专家给予支持与帮助,在此一并致谢。

说明:本项目的主要参与人员还有中国地质科学院地质研究所刘俊英,中国石油勘探开发研究院廊坊分院张英,中国地质科学院矿产资源研究所张成君、马妮娜、陈文西、李金锁、刘建华、孔凡晶,中国科学院地质与地球物理研究所马志邦,中国科学院南京古生物地质研究所舒军武等,相关总结及其相关研究成果将分别另行发表。

参考文献:

- E.德比希尔, J.绍, 王靖泰. 1985. 柴达木盆地达布逊湖 1 号孔古地磁年代[J]. 冰川冻土, 7(3): 227-232.
李吉均, 方小敏. 1998. 青藏高原隆起与环境变化研究[J]. 科学通报, 43(15): 1569-1574.

*据我国新近颁布 DZ/T0212-2002 标准: 卤水含 $\text{KCl} \geq 0.5\% \sim 1\%$ 为工业品位; 本文据我国钾盐实际情况, 将地下卤水含 $\text{KCl} \geq 0.5\%$ 称为富钾卤水。

- 刘东生. 1998. 后记[J]. 第四纪研究, 18(4): 378.
- 刘成林, 焦鹏程, 陈永志, 王弼力. 2008. 罗布泊盐湖晚更新世末期芒硝岩沉积及其古气候意义[J]. 地球学报, 19(4): 397-404.
- 刘泽纯, 陈晔. 2000. 柴达木盆地深钻孔岩芯分析 300 万年来环境变化过程[M]. 南京: 南京师范大学出版社.
- 刘泽纯, 孙世英, 杨藩, 周翁虹. 1990. 柴达木盆地三湖地区第四纪地层学及其年代学分析[J]. 中国科学(B 辑), (11): 1202-1212.
- 孙平, 郭泽清, 张林, 张绍胜, 田继先, 孔骅. 2011. 柴达木盆地三湖北斜坡岩性气藏勘探与发现[J]. 石油地质, (1): 25-32.
- 沈振枢, 程果, 葛同明. 1992. 柴达木盆地第四纪磁性地层特征及其意义[J]. 青海地质, (2): 19-29.
- 沈振枢, 程果, 乐昌硕, 刘淑琴. 1993. 柴达木盆地第四纪含盐地层划分及沉积环境[M]. 北京: 地质出版社.
- 施雅风, 刘晓东, 李炳元, 姚檀栋. 1999. 距今 40~30 ka 青藏高原特强夏季风事件及其与岁差周期关系[J]. 科学通报, 44(14): 1475-1480.
- 王乃昂, 王涛, 高顺尉, 史正涛, 胡刚. 2000. 河西走廊末次冰期芒硝和砂楔与古气候重建[J]. 地学前缘, 7(z1): 59-66.
- 王亚东, 张涛, 李仕远, 郑建京, 郭建明, 孙国强. 2011. 地震剖面记录的柴达木盆地西部地区新生代构造变形特征[J]. 世界地质, 30(2): 213-223.
- 魏新俊, 邵长铎, 王弼力, 赵德钧, 蔡克勤, 姜继学, 何国权, 胡文瑄. 1993. 柴达木盆地西部富钾盐湖物质成分、沉积特征及形成条件研究[M]. 北京: 地质出版社.
- 魏乐军, 郑绵平, 刘喜方, 蔡克勤, 乜贞. 2002. 西藏洞错硼砂芒硝层的发现及其古气候意义[J]. 地质学报, 76(2): 261-271.
- 徐凤银, 施俊, 张少云, 真允庆. 2009. 柴达木盆地柴中断裂带演化及其对成盐作用的控制[J]. 石油学报, 30(6): 803-808.
- 郑绵平, 张震, 张永生, 刘喜方, 尹宏伟. 2012. 我国钾盐找矿规律新认识和进展[J]. 地球学报, 33(3): 280-294.
- 郑绵平, 赵元艺, 刘俊英. 1998. 第四纪盐湖沉积与古气候[J]. 第四纪研究, 18(4): 297-307.
- 朱允铸, 朱坚华, 李文生. 1994. 柴达木盆地新构造运动及盐湖发展演化[M]. 北京: 地质出版社.
- LI Ji-jun, FANG Xiao-min. 1998. Research on the uplift of the Qinghai-Tibet plateau and environmental changes[J]. Chinese Science Bulletin, 43(15): 1569-1574(in Chinese).
- LIU Dong-sheng. 1998. Postscript[J]. Quaternary Sciences, 18(4): 378(in Chinese).
- LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng, CHEN Yong-zhi, WANG Mi-li. 2008. Late Pleistocene Mirabilite Deposition in the Lop Nur Saline Lake, Xinjiang, and Its Paleoclimate Implications[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(4): 397-404(in Chinese with English abstract).
- LIU Ze-chun, CHEN Ye. 2000. The environment changes of core profiles since 3 Ma B.P. in the Qaidam basin[M]. Nanjing: Nanjing Normal University Press(in Chinese).
- LIU Ze-chun, SUN Shi-ying, YANG Fan, ZHOU Weng-hong. 1990. Quaternary stratigraphy and its geological age in Sanhu area, Qaidam basin[J]. Science in China(Series B), 20(11): 1202-1212(in Chinese).
- SUN Ping, GUO Ze-qing, ZHANG Lin, ZHANG Shao-sheng, TIAN Ji-xian, KONG Hua. 2011. Lithologic Gas Reservoir Exploration and Discovery in Northern Sanhu Slope, Qaidam Basin[J]. Petroleum Geology, (1): 25-31(in Chinese with English abstract).
- SHEN Zhen-shu, CHENG Guo, GE Tong-ming. 1992. Magnetostratigraphic characteristics of Quaternary system in Qaidam basin and its significance[J]. Qinghai Geology, (2): 19-29(in Chinese with English abstract).
- SHEN Zhen-shu, CHENG Guo, LE Chang-shuo, LIU Shu-qin. 1993. The division and sedimentary environment of Quaternary salt-bearing strata in Qaidam basin[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- SHI Ya-feng, LIU Xiao-dong, LI Bing-yuan, YAO Tan-dong. 1999. The very strong summer monsoon events since 40-30 ka B.P. and its relationship with the precession period[J]. Chinese Science Bulletin, 44(14): 1475-1480(in Chinese).
- LOWENSTEIN T K, SPENCER R J, ZHANG Peng-xi. 1989. Origin of ancient potash evaporates: Clue from the modern non-marine Qaidam Basin of Western China[J]. Science, 245: 1090-1092.
- WANG Nai-ang, WANG Tao, GAO Shun-wei, SHI Zheng-tao, HU Gang. 2000. The sand wedge and mirabilite of the last ice age and paleoclimate reconstruction in HEXI corridor, Gansu, west China[J]. Earth Science Frontiers, 7(Suppl): 59-66(in Chinese with English abstract).
- WANG Ya-dong, ZHANG Tao, LI Shi-yuan, ZHENG Jian-jing, GUO Jian-ming, SUN Guo-qiang. 2011. Cenozoic tectonic deformation characteristics of western Qaidam basin inferred by seismic profile[J]. Global Geology, 30(2): 213-223(in Chinese with English abstract).

References:

- WEI Le-jun, ZHENG Mian-ping, LIU Xi-fang, CAI Ke-qin, NIE Zhen. 2002. Discovery of Borax-bearing Mirabilite Beds in Dong Co, Northern Tibet, and Its Palaeoclimatic Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*(English Edition), 76(3): 271-283.
- WEI Le-jun, ZHENG Mian-ping, LIU Xi-fang, CAI Ke-qin, NIE Zhen. 2002. Discovery of Borax-bearing Mirabilite Beds in Tontso Lake, the Northern Tibet and Its Palaeoclimatic Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 261-271(in Chinese with English abstract).
- WEI Xin-jun, SHAO Chang-duo, WANG Mi-li, ZHAO De-jun, CAI Ke-qin, JIANG Ji-xue, HE Guo-quan, HU Wen-xuan. 1993. Material constituents depositional features and formation conditions of potassium-rich salt lakes in western Qaisam basin[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- XU Feng-yin, SHI Jun, ZHANG Shao-yun, ZHEN Yun-qing. 2009. Evolution of Qaidam Fault and its effects on the basin formation in Qaidam Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 30(6): 803-808(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, ZHANG Yong-sheng, YUAN He-ran, LIU Xi-fang, CHEN Wen-xi, LI Jin-suo. 2011. Regional Distribution and Prospects of Potash in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(1): 17-50.
- ZHENG Mian-ping, ZHANG Zhen, ZHANG Yong-sheng, LIU Xi-fang, YIN Hong-wei. 2012. Potash Exploration Characteristics in China: New Understanding and Research Progress[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(3): 280-294(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping, ZHAO Yuan-yi, LIU Jun-ying. 1998. Quaternary saline lake deposition and paleoclimate[J]. *Quaternary Sciences*, 18(4): 297-307(in Chinese with English abstract).
- ZHU Yun-zhu, ZHU Jian-hua, LI Wen-sheng. 1994. The neotectonic movement and the evolution of saline lakes of Qaidam basin in Northwestern China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).

波兰《哥白尼索引》评估值公布 中国期刊中《地球学报》名列前茅

波兰《哥白尼索引》最近公布了 2011 年度评估值, 被其收录的 579 种中国期刊中(大陆 543 种, 台湾 11 种, 香港 24 种, 澳门 1 种), 处于活动状态(active)的有 494 种, 非活动状态(not active)的有 85 种。

《哥白尼索引》根据期刊“科学质量”、“编辑质量”、“国际影响力”、“按时发行”和“印刷质量”等评价标准, 每年对其收录的期刊进行多参数的质量评价。“哥白尼索引评估值(ICV)”采用了国际上公认的评估标准, 包括详细的参数分析、负分分析, 专家同行评议。

评估值(ICV) ≥ 10 的中国期刊有 9 种。ICV 为 9 的期刊有 44 种, 其中地学类期刊只有《地球学报》, 见下表:

排名	期刊中文名	期刊外文名	出版地	评估值
1	中国药理学报(英文版)	Acta Pharmacologica Sinica	大陆	25.34
2	遗传学报(英文版)	Journal of Genetics and Genomics	大陆	20.26
3	国际口腔科学杂志(英文版)	International Journal of Oral Science	大陆	15.76
4	力学学报(英文版)	Acta Mechanica Sinica	大陆	13.19
5	应用数学和力学(英文版)	Applied Mathematics and Mechanics	大陆	11.89
6	地球科学(英文版)	Journal of Earth Science	大陆	10.60
7	中国神经再生研究(英文版)	Neural Regeneration Research	大陆	10.47
8	亚太热带医药杂志(英文版)	Asian Pacific Journal of Tropical Medicine	大陆	10.36
9	香港急症医学期刊(英文版)	Hong Kong Journal of Emergency Medicine	香港	10.31
10	地球学报	Acta Geoscientica Sinica	大陆	9.00

信息链接: http://www.cessp.org.cn/ch/reader/view_news.aspx?id=20121009140738001。