



# 华南陆块液体钾、锂资源的区域成矿背景与成矿作用初探\*

刘成林<sup>1</sup>, 余小灿<sup>2</sup>, 赵艳军<sup>1</sup>, 王九一<sup>1</sup>, 王立成<sup>1</sup>, 徐海明<sup>1</sup>, 李坚<sup>3</sup>, 王春连<sup>1</sup>

(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, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 3 江西省地质矿产勘查开发局 902 地质大队, 江西 新余 338000)

**摘要** 中国华南陆块江汉盆地的江陵凹陷和潜江凹陷以及江西吉泰盆地等裂谷盆地, 在白垩纪—古近纪时期, 发育了大量的蒸发岩, 并形成了富含钾、锂、铷、铯、溴、碘、硼元素的卤水, 这些高价值元素的含量多达到工业利用品位或综合利用品位, 资源潜力巨大。这些资源的富集区域分布于华南陆块与新华夏裂谷构造的交汇处, 同时也是华南花岗岩省与新华夏裂谷玄武岩的分布区。通过对该区域大地构造、火成岩、古气候、古地理特征与全球海侵事件等综合分析, 同时结合盆地卤水化学成分的研究, 作者提出华南陆块(地区)的中生代—新生代盆地(群)可能是液体钾、锂、铷、铯、溴、碘、硼资源的成矿区, 成矿物质受到白垩纪—古近纪火山活动带来的深部物质及海侵事件带来的海水等多源补给, 前者主要带来锂、钾、铷、铯等, 后者带来钾及溴、碘等。华南盆地卤水中钾、锂等元素的富集是内生与外生地质动力作用的结果, 即构造-火成岩-海侵-干旱气候耦合作用的结果, 成矿作用过程可以归结为裂谷沉积成矿, 主要形成富钾、锂卤水, 埋藏阶段这些卤水通常转移到孔隙发育的碎屑岩、玄武岩及断裂带内保存, 形成盆地深层卤水矿床。

**关键词** 地球化学; 华南陆块; 中生代—新生代; 新华夏裂谷; 蒸发岩; 卤水; 钾锂成矿

中图分类号: P618.71; P619.21<sup>+1</sup>

文献标志码: A

## A tentative discussion on regional metallogenic background and mineralization mechanism of subterranean brines rich in potassium and lithium in South China Block

LIU ChengLin<sup>1</sup>, YU XiaoCan<sup>2</sup>, ZHAO YanJun<sup>1</sup>, WANG JiuYi<sup>1</sup>, WANG LiCheng<sup>1</sup>,  
XU HaiMing<sup>1</sup>, LI Jian<sup>3</sup> and WANG ChunLian<sup>1</sup>

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3 No.902 Geological Team, Geology and Mineral Exploration and Development Bureau, Xinyu 338000, Jiangxi, China)

### Abstract

Large amounts of Cretaceous-Paleogene evaporites and subterranean brines rich in potassium, lithium, rubidium, cesium, bromine, iodide and boron were formed in such rift basins in South China Block as the Jiangling

\* 本文得到国家重点基础研究发展计划“973”项目(编号:2011CB403007)和中国地质科学院基本科研业务费项目(编号:YYWF201607)资助

第一作者简介 刘成林,男,1963年生,研究员,主要从事沉积矿床研究工作。Email:liuchenglin@263.net

收稿日期 2016-08-16; 改回日期 2016-09-16。苏杭编辑。

depression, Qianjiang Depression in the Jiangnan basin of Hubei and the Jitai basin in Jiangxi. Most of concentrations of the highly valuable elements in subterranean brines have reached industrial grade or comprehensive utilization grade, indicating great resource potential. Most of these basins are not only situated in the conjunction of the South China Block and the Neocathaysian rift system but also located in the South China granite province and Neocathaysian rift belt. In this study, the authors conducted detailed and comprehensive investigation of regional tectonic features, igneous rock geochemistry, paleoclimate record, paleogeographic characteristics in the South China Block and global transgressive history, and carried out the study of the brine chemical analysis. On such a basis, the authors propose that the Mesozoic-Cenozoic basins in the South China Block are the metallogenic province of brine resources rich in potassium, lithium, rubidium, cesium, bromine, iodide and boron, for example, the brines in Jiangling Depression are rich in potassium (9.91 g/L), lithium (80 mg/L), rubidium (60 mg/L), cesium (25 mg/L), bromine (200.23 mg/L), iodide (73 mg/L) and boron (900 mg/L). It is inferred that deep materials brought by intense volcanic activities and pulsed transgressive seawater during the Cretaceous-Paleogene acted as the major provenance for these subterranean brines in the South China Block. The enrichment of potassium, lithium and other elements in these brines was promoted through endogenous and exogenous geological processes, i. e., the coupling of rifting tectonics, igneous activities, transgressive, and arid climate. The model will play a positive guiding role for the potash and lithium resources exploration in South China region.

**Key words:** geochemistry, South China Block, Mesozoic-Cenozoic, Neocathaysian rift, evaporite, brine, mineralization of potassium and lithium

钾盐是中国紧缺的战略性资源,目前对外依存度50%(邢万里等,2013),国内钾盐资源主要分布在西部青海柴达木、新疆罗布泊等盐湖卤水中。锂是制造新能源汽车电池的重要原料,未来对锂的需求将有爆发性增长。目前,盐湖生产的锂盐产品已占锂产品总量的85%以上(杨荣金等,2014),例如,智利阿塔卡玛盐湖、美国西尔斯湖与银峰湖的地下卤水以及阿根廷 Hombe Muerto 盐湖都有较强的锂生产能力(来自美国地质调查局(USGS)网站,2015)。目前,中国锂资源主要分布于柴达木盆地盐湖和西藏盐湖,由于镁/锂比值太大或外部开发条件差等,尚未得到大规模、高效开发。铷和铯具有优异的光电性能,在自动化、电子技术、军工等高科技领域发挥了独特和不可替代的作用。然而,目前铷、铯的工业生产以铯榴石、锂云母等固态矿为主,提取过程复杂、成本高,卤水中铷、铯以离子形式存在,提取方便,是铷、铯工业技术发展趋势(闫明等,2006;刘元会等,2006)。此外,硼、溴、碘也是重要的战略性资源,在国防工业、卫生医疗、防火材料及精细化工等有广泛用途。

华南地区,例如从湖北省到湖南,再到江西省,分布有一系列的中生代—新生代盆地,如江汉盆地、洞庭盆地、清江与吉泰盆地等,可以称之为“裂谷盆地群”(图1)。这些湖盆在白垩纪—古近纪时期,大

多已演化为盐湖,并沉积了巨量石盐等盐类矿产(储澄,1983;刘庆民等,1982;刘群等,1987;姚秋昌等,2008;汪春连等,2012;李皓楠等,2015;刘锦磊等,2015;冯黎春等,2015;Yu et al.,2015)。其中,在江汉盆地的江陵凹陷、潜江凹陷,发现深层卤水,富含钾、锂、硼、铷、铯、溴、碘等高价值、新兴战略型矿产资源,它们的品位已达到工业利用或综合利用水平,这种多元素达品位的矿床可以称之为复合矿床。分析认为,湖南和江西的一些中生代盐盆也可以形成这种复合卤水矿床,对江西吉泰盆地地层卤水初步化学分析,卤水氯化钾含量接近1%工业品位,锂含量很高,属于“液态型富锂矿”。从构造上看华南地区,一方面,处于北东向裂谷系(新华夏裂谷系)与中扬子陆块交汇处;另一方面,位于北东向玄武岩分布带与华南大花岗岩省的交集地区,其成矿作用可能受到深部物质来源的影响。

基于成矿特征及大地构造背景资料综合分析,作者提出华南地区,尤其从湖北到江西等省的中生代—新生代盐盆地群中可能蕴藏有丰富的钾、锂、硼、铷、铯、溴、碘等战略性资源,该区域可以称之为“钾、锂、硼、铷、铯、溴、碘”成矿区。此成矿区可能类似于中国西南地区的低温热液成矿区(李朝阳,1999;宋昊等,2011)及华南钨锡成矿区(石玉泉等,1988;裴荣富等,2008)等,它们均形成于特定的地质

构造背景。为此,作者基于大量相关文献,从构造、岩浆作用、气候、海侵与沉积等方面分析探讨这种复合矿床的形成条件与形成机理。

## 1 华南陆块大地构造特征

华南陆块位于欧亚大陆东南端,东临西太平洋,西以攀西构造带为邻,北以秦岭-大别造山带为界,南部则与海南相接。华南陆块由扬子块体和华夏块体构成,NE—NEE 走向的绍兴-江山-萍乡断裂是扬子和华夏陆块的新元古代拼和带(图 1)(舒良树,2012)。

华南陆壳生长具有多期幕式特点,以侧向增生(碰撞拼合)为主,垂向生长(岩浆上涌和底侵)为辅(舒良树,2012)。到晚中生代,中国东部和东亚太平洋地区的地质构造格局发生了巨大的变革,形成了一系列 NE—NNE 向的构造隆起带和沉降带,控制着该区中生代以来的沉积建造、岩浆活动、成矿作

用以及第四纪以来的地势轮廓(谭忠福等,1983)。李四光(1973)把这种独特的构造现象称为新华夏构造体系。中国东部裂谷系是在太平洋板块向欧亚板块俯冲、印度板块同欧亚板块聚合和碰撞的背景下,自侏罗纪以来,两种作用交替活动,在中国东部形成强大的应力释放带,裂解形成了巨型裂谷系(童崇光,1980)。

白垩纪—古新世时期,中国东部中生代构造动力体系的转换经历了从 EW 走向,向 NE—NNE 走向的变化,以及以挤压为主的构造-岩浆造山系统向以拉伸为主的伸展盆岭系统的转换(任纪舜等,1990;1998),不仅导致华北地区大规模的岩石圈伸展、火山活动、裂陷盆地形成、大规模成矿等(Gilder et al.,1991;Lin et al.,2006;Ren et al.,2002;Zhai et al.,2007),而且在华中-华南地区也出现大规模的断陷盆地、火山活动及金属、非金属和油气的成矿成藏作用(田在艺,1986;华仁民等,1999;Li,2000;毛景文等,2004b,2005;舒良树,2012;刘成林,2013)。

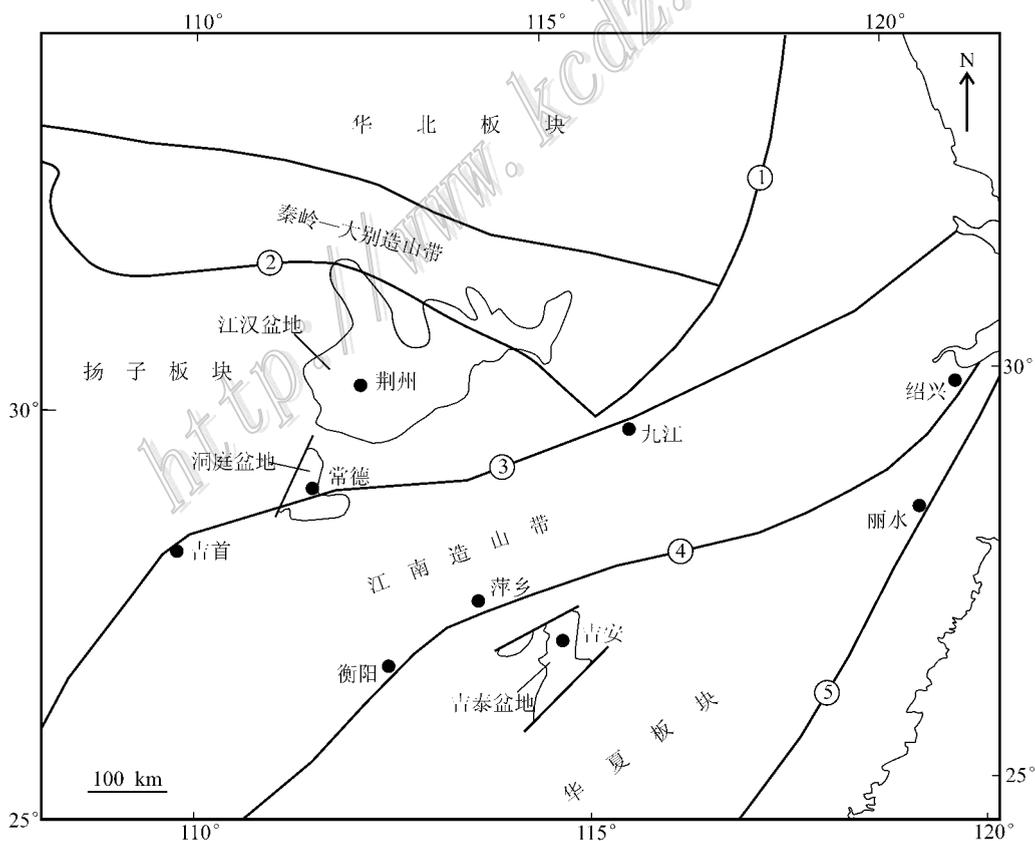


图 1 华南大地构造特征及盆地分布图(据马永生等,2009 改编)

①—郯庐断裂;②—房城-襄广断裂带;③—江南中生代北界隐伏断裂;④—绍兴-江山-萍乡断裂带;⑤—丽水-海丰断裂带

Fig. 4 Tectonic features and basin distribution in South China (after Ma et al., 2009)

①—Tanlu fault; ②—Fangcheng-Xiangguang fault zone; ③—Jiangnan Mesozoic northern buried fault; ④—Shaoxing-Jiangshan-Pingxiang fault zone; ⑤—Lishui-Haifeng fault zone

早白垩世开始的构造反转在中国中东部形成了一系列裂陷盆地(张岳桥等,2004),但是,东南部中、新生代盆地规模小,而且成因机制复杂,并与花岗岩构成了复杂的盆岭镶嵌体系——华南盆岭构造,属于典型的箕状断陷盆地(舒良树等,2006)。关于早白垩世裂陷盆地形成的深部动力学机制,前人认为岩石圈减薄过程在地壳浅部直接影响东亚地区广泛分布的裂谷盆地系统(张岳桥等,2008),也有人认为是太平洋板块向大陆俯冲引起的(Gilder et al., 1991; 张岳桥等,2004)或弧后拉张(余心起等,2003),通常这些深部过程伴随着大规模的成矿作用(陈毓川等,2007)。晚白垩世以来,发育大规模陆相断陷盆地,普遍含有玄武岩夹层,在赣杭带玄武岩年龄多集中在110~95 Ma左右,盆地的形成为陆内构造-沉积-岩浆作用的产物(舒良树等,2002;舒良树,2012)。

## 2 华南火成岩特征与物质来源

### 2.1 新华夏裂谷带中生代—新生代火山岩

新华夏系中生代火山岩在空间上的分布有明显的规律性,中国东部地区中生代火山岩,明显地分为NNE向延伸的4个岩带(关德范,1977)。新生代火山岩主要沿中国东部大陆边缘一系列NE向、NNE向的裂谷和断陷盆地及其边缘分布(刘若新,1992)。据徐义刚等(2015),古近纪的火山活动主要分布在松辽平原、华北平原、江汉平原之下,据钻孔揭示,玄武岩的厚度可逾千米,以拉斑玄武质岩浆喷发活动为主,古近纪火山岩在地表零星出露。江陵凹陷火山岩非常发育,火山岩分布面积达3527 km<sup>2</sup>,厚度大,分布层位多,从沙市组-潜江组均有火山岩分布(徐论勋等,1995;彭头平等,2006)。凹陷北部的火山岩最发育,厚度最大达588.6 m,往南火山岩的厚度逐渐变薄,减薄为小于50 m(据江汉油田研究院,2010)。目前,通常认为火山岩其构造背景与太平洋板块俯冲无关,而是形成于裂谷环境,与软流圈上涌导致的岩石圈—软流圈相互作用有关(徐夕生等,2005)。对于玄武岩的成因,大多数学者都认为,虽然地壳物质的混染对岩浆的成分有一定的影响,但不是主要的,岩浆成分主要受源区的成分控制,而且软流圈—岩石圈的相互作用导致了源区的不均一性,并且一般认为碱性玄武岩起源于深部软流圈地幔的低程度熔融,而拉斑玄武岩则是岩石圈地幔或

有部分软流圈地幔的加入在浅部相对高程度熔融的结果(Xu et al., 2005; Chen et al., 2007)。

### 2.2 华南大花岗岩省

中国最大的岩浆岩产区——华南大花岗岩省最具构造-岩浆和岩浆-构造发生—发展的代表性(裴荣富等,2008)。在华南,从太古宙—元古宙和古生代—中生代—新生代各时代均广泛出露以同熔-重熔为主的各类型花岗岩体。华南花岗岩的形成具有幕式多期次侵入的特点,主要形成于新元古代、早古生代、早中生代、晚中生代4个地质时期(孙涛,2006)(图2)。

据孙涛(2006),早中生代(印支期)花岗岩主要分布于桂东南大容山—六万大山—旧州、台马一带,以含堇青石为特点,同时更大范围地分布在赣南、粤北、闽西等地,以含白云母、不含堇青石为特点,它们以强过铝质为主,占印支期花岗岩的72.7%,晚中生代花岗岩在华南花岗岩中出露面积最大,燕山早期以粤、闽、湘、赣为主要分布区域,主体呈NE向分布,在南岭地区呈EW向分布;与印支期花岗岩相比,燕山早期花岗岩准铝和弱过铝质钙碱性岩性的比例增加,面积上强过铝花岗岩已不再占有优势,燕山晚期花岗岩的出露面积超过50 300 km<sup>2</sup>,此时岩浆活动主要以准铝质和弱过铝质钙碱性为主。

强烈的燕山期构造岩浆活动是在华南板块转入板内机制的背景上发生的。据Chen等(2002)研究,呈EW向展布的燕山早期花岗岩(即南岭花岗岩)属于典型的后造山花岗岩组合(钾长花岗岩、二长花岗岩组合),且伴有双峰式火山岩与A型花岗岩,属于与伸展构造有关的火成岩组合。这种EW向构造岩浆组合,属于与印支运动有联系的后造山花岗岩。燕山晚期花岗岩(年龄低于140 Ma)广泛分布于东南沿海地区,且经常伴有同时代、同物质来源的火山岩,构成所谓的花岗质火山侵入杂岩带(Li, 2000)。这种花岗岩与火山岩相伴生的现象,一直可以追索到江西赣江一线(周新民等,2000)。燕山晚期花岗岩和火山岩的形成,与太平洋板块向欧亚板块的俯冲有直接关系(王德滋,2004)。

### 2.3 华南中生代—新生代盆地内及周缘火成岩地球化学特征

作者搜集了华南地区湖北江汉盆地江陵凹陷和江西吉泰盆地内及周缘的火成岩的地球化学组成,见表1。从表中可以看出,湖北江陵凹陷内古近纪玄武岩 $w(K_2O)$ 为0.15%~1.0%,平均值为0.76%;

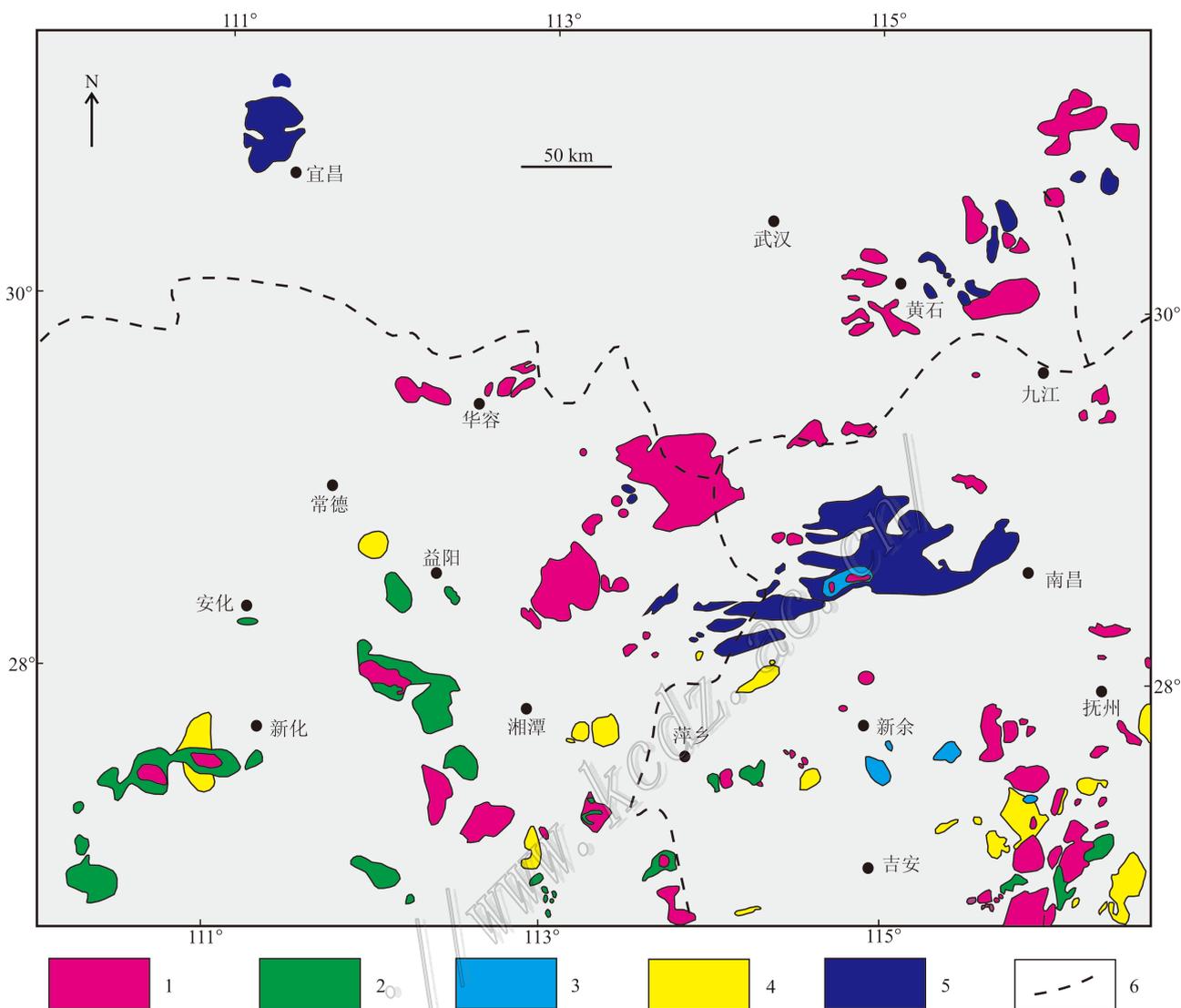


图 2 华南地区花岗岩分布图(据孙涛,2006)

1—燕山期花岗岩; 2—印支期花岗岩; 3—海西期花岗岩; 4—加里东期花岗岩; 5—前寒武纪花岗岩; 6—省界

Fig. 2 The distribution of granites in South China (after Sun, 2006)

1—Yanshanian granite; 2—Indosinian granite; 3—Hercynian granite; 4—Caledonian granite; 5—Precambrian granite; 6—Provincial boundary

表 1 华南地区中生代—新生代盆地内及周缘玄武岩及花岗岩化学组成

Table 1 Chemical composition of basalt and granite in Mesozoic-Cenozoic basin and the periphery in South China

	$w(B)/\%$		$w(B)/10^{-6}$			数据来源
	$K_2O$	Li	Rb	Cs	Sr	
江陵凹陷古近纪玄武岩	0.15~1.20(0.76)	9.76~27.3(17.26)	0.95~32.50(15.79)	0.10~0.95(0.37)	330.00~595.00(456.2)	彭头平等,2006, $n=9$ ; 刘成林,2013, $n=7$
华容地区燕山期花岗岩	3.57~5.73(4.59)	—	117.80~290.70(223.1)	—	105.80~448.50(206)	王连训等,2008, $n=7$
吉泰盆地早白垩世玄武岩	0.63~1.27(1.06)	—	11.08~38.99(29.63)	—	352.00~404.25(384.59)	余心起等,2005, $n=3$
江西南村地区燕山期花岗岩	4.43~5.75(5.03)	28.07~330.90(112.88)	5.82~61.90(27.07)	—	399.00~896.70(590.37)	石连成,2015, $n=25$

注:“—”表示元素含量未分析;括号内为平均值;  $n$  为样品数。

$\alpha(\text{Li})$ 为  $9.76 \times 10^{-6} \sim 27.30 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $17.26 \times 10^{-6}$ ;  $\alpha(\text{Rb})$ 为  $0.95 \times 10^{-6} \sim 32.50 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $17.26 \times 10^{-6}$ ;  $\alpha(\text{Cs})$ 为  $0.10 \times 10^{-6} \sim 0.95 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $0.37 \times 10^{-6}$ ;  $\alpha(\text{Sr})$ 为  $330.00 \times 10^{-6} \sim 595.00 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $456.20 \times 10^{-6}$ 。江陵凹陷南缘华容地区燕山期花岗岩  $\alpha(\text{K}_2\text{O})$ 为  $3.57\% \sim 5.73\%$ , 平均值为  $4.59\%$ ;  $\alpha(\text{Rb})$ 为  $117.80 \times 10^{-6} \sim 290.70 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $223.10 \times 10^{-6}$ ;  $\alpha(\text{Sr})$ 为  $105.80 \times 10^{-6} \sim 448.50 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $206.00 \times 10^{-6}$ 。江西吉泰盆地内早白垩世玄武岩  $\alpha(\text{K}_2\text{O})$ 为  $0.63\% \sim 1.27\%$ , 平均值为  $1.06\%$ ;  $\alpha(\text{Rb})$ 为  $11.08 \times 10^{-6} \sim 38.99 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $29.63 \times 10^{-6}$ ;  $\alpha(\text{Sr})$ 为  $352.00 \times 10^{-6} \sim 404.25 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $384.59 \times 10^{-6}$ 。江西吉泰盆地周缘南村地区燕山期花岗岩  $\alpha(\text{K}_2\text{O})$ 为  $4.43\% \sim 5.75\%$ , 平均值为  $5.03\%$ ;  $\alpha(\text{Li})$ 为  $28.07 \times 10^{-6} \sim 330.90 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $112.88 \times 10^{-6}$ ;  $\alpha(\text{Rb})$ 为  $5.82 \times 10^{-6} \sim 61.90 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $27.07 \times 10^{-6}$ ;  $\alpha(\text{Sr})$ 为  $399.00 \times 10^{-6} \sim 896.70 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $590.37 \times 10^{-6}$ 。由此可见, 华南地区花岗岩和玄武岩含有丰富的钾、锂等元素, 应是卤水钾、锂成矿的重要物源。

### 3 古气候与古地理环境

#### 3.1 古气候

从晚侏罗世到早古近纪, 北半球欧亚大陆中部地区中亚、蒙古、中国逐渐形成一个近东西向、狭长的干旱气候带(Zachos et al., 2001; Keller, 2008)。白垩纪—古近纪时期, 中扬子地区, 特别是江汉盆地的江陵凹陷和潜江凹陷处于这一气候干旱带的东段, 干旱的气候客观上为本区蒸发盐矿和富钾卤水的聚集提供了极佳的环境条件。其中, 在江汉盆地的多个次级凹陷, 如江陵凹陷、潜江凹陷均发现有富钾、锂、硼等有益元素的卤水, 在干旱区东段的江西吉泰盆地, 沉积有数千米的白垩系红层, 上白垩统周田组更是沉积了大套的厚层石膏岩, 并赋存富钾卤水(卢秋芽, 1991; 胡为正等, 2006)。清江盆地、新干盆地及会昌盆地等有厚层石盐沉积(刘庆民等, 1982; 刘贤林, 1999)。江汉盆地的古孢粉学研究表明, 白垩纪—古近纪区域植物群中代表干旱气候特征的植物非常繁盛, 以榆粉属、克拉梭粉属、希指蕨孢属、麻黄粉属为代表(王大宁等, 1980)。根据孢粉组合揭示

的古植物群落特征(王大宁等, 1980; 童国榜等, 2002), 本区在晚白垩世属于热带—亚热带干旱气候, 古新世早期为半干旱的亚热带气候, 古新世中期变干, 恢复到亚热带干旱气候(王大宁等, 1980); 始新世中期为中-南亚热带湿润半湿润气候, 晚期为北-中亚热带气候(童国榜等, 2002)。从晚白垩世—古近纪的整体气候格局(图3)看, 中白垩世赛若曼期—坎潘期出现温室与极热气候, 之后温度有所降低, 晚白垩世马斯特里赫特期气候波动大, 古新世—始新世出现PETM极热事件, 早始新世温度达到峰值, 之后温度开始降低, 始新世晚期温度达到最低。晚白垩世—古近纪整体为干旱气候, 无疑对中扬子地区富钾卤水的形成、汇聚具有重要的作用(王春连等, 2012; 2013a; 2013b; 刘成林等, 2013; 余小灿等, 2014; Meng et al., 2014)。

#### 3.2 海侵与古地理环境

白垩纪全球平均海平面处于较高水平, 其比现今海洋平均海平面高约  $75 \sim 250 \text{ m}$ (Haq, 2014)。同时, 整个白垩纪时期全球海平面处于快速波动状态(Haq et al., 1987; 1988; Miller et al., 2004; 2008), 并可能在土仑期达到最大, 当时海平面可能比现今地球高  $240 \sim 250 \text{ m}$ 。晚白垩世海侵被认为是自奥陶纪以来最大规模的海侵事件(Hancock et al., 1979)。这次海侵事件波及范围巨大, 当时约  $23\%$  的大陆都受到了这次海侵的影响, 而剩下的陆表面积仅仅占地球表面积的  $18\%$ (现今陆表面积占地球表面积的  $28\%$ )(Matsumoto, 1977)。这一时期, 整个北美约有  $35\% \sim 38\%$  的陆地被海水淹没, 而在欧亚大陆被海水淹没的面积达到了  $41\% \sim 42\%$ (Hallam, 1977)。

马永生等(2009)编制了中国东部晚白垩世—古近纪岩相古地理图(图4), 显示扬子地区在该时期曾发生过海侵, 但古环境的重建问题目前仍存在一定争论, 争论的焦点集中在这一时期中国东部是否发生过海侵。自20世纪70年代在江汉盆地、三水盆地、渤海湾盆地等古近系陆续发现有孔虫(林景星, 1979), 从而提出中国东部晚白垩世—古近纪发生过海侵的观点或推论。目前, 中国东部晚白垩世—古近纪海侵事件的研究多集中于松辽盆地及其相邻盆地(侯读杰等, 1999; 黄永建等, 2015; Sha et al., 2008), 渤海湾盆地(袁文芳等, 2005), 而对以江汉盆地、洞庭盆地以及吉泰盆地等组成的裂谷盆地群的研究仍涉及较少。地层中是否存在生活于海相环境中的生物化石是判别海侵的一个重要标志(侯佑堂等, 1982)。

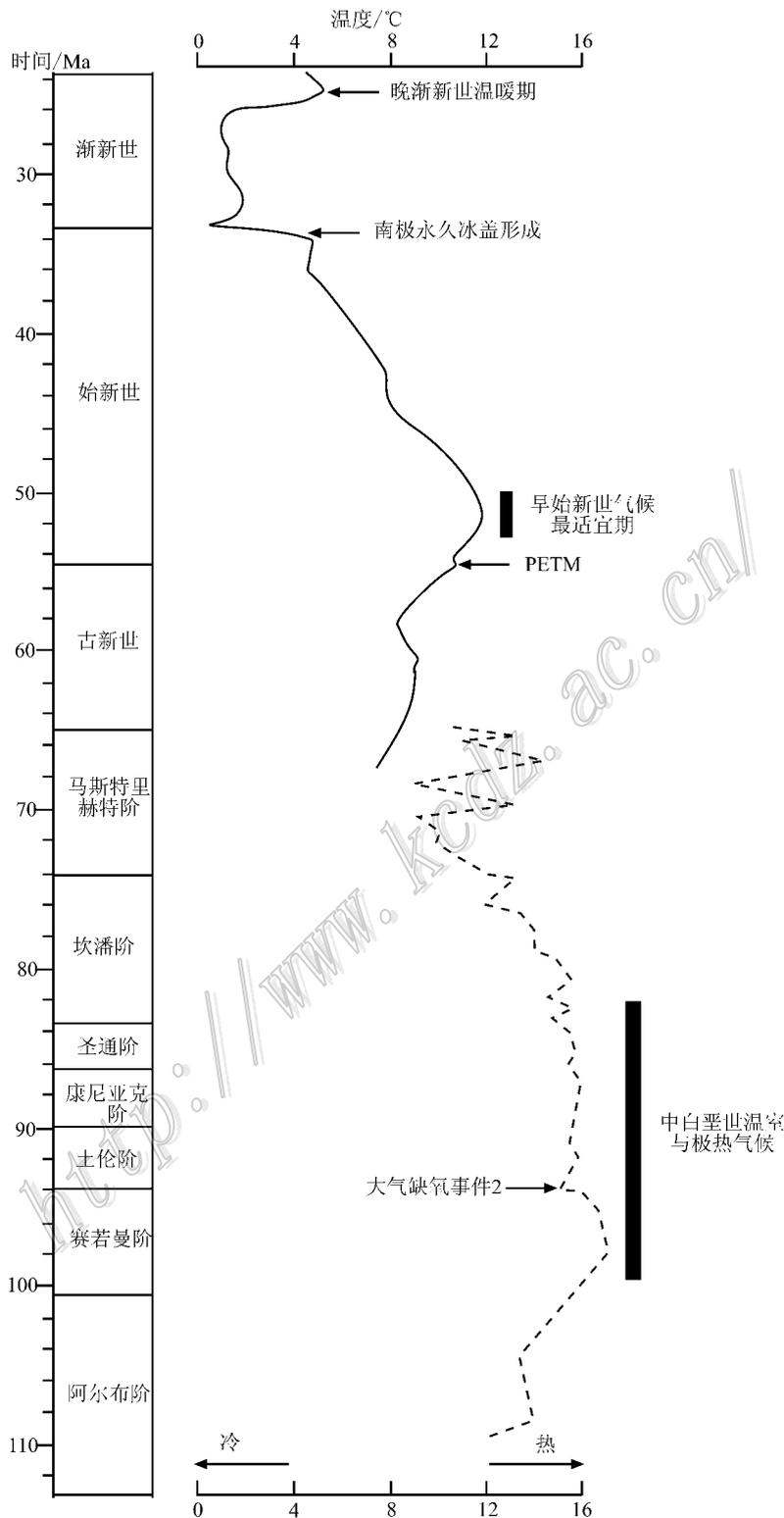


图 3 白垩纪—古近纪气候变化记录( 实线引自 Zachos et al. 2001 ;虚线引自 Keller 2008 )

Fig. 3 Climate change record in Cretaceous-Paleogene( solid line sources after Zachos et al. 2001 ;dotted line sources after Keller 2008 )

如袁文芳等( 2005 )在对渤海湾盆地古近纪海侵的研究进展的分析中指出,持“海侵论”的研究者认为在

该区发现了有孔虫、钙质超微化石、多毛类栖管等海相起源的化石组合, 鲱形目鱼类、管状藻类、沟鞭藻、

疑源藻等与海相环境有关的生物组合,以及渤海藻、渤海螺等地方性化石组合和海百合茎、海胆刺、硅藻等,这些都可以作为支持海侵的证据。傅强等(2007)在苏北盆地白垩系泰州组二段、古近系阜宁组二、四段发现有孔虫、多毛纲虫管、沟鞭藻、颗石藻和腹足类等多种海相生物化石,且集中出现、层位稳定、分布有序,进而认为苏北盆地在晚白垩世、古新世曾遭受海侵影响。Feng等(2009)在松辽盆地青山口组一段的油页岩中发现了丰富的反映淡水-半咸水环境的多刺甲藻 *Sentusidinium* 等和反映海相或者半咸水环境的口堪斯藻 *Kiokansium* 等,表明陆相湖泊油页岩形成过程中受到了海侵的影响。实际上,在德国三叠系陆相地层中也曾有类似的研究报道,如王璞等(2002)在两类海侵层序中均发现有含海生或者混生化石,如双壳类 *Myophoria vulgaris* 和 *Costatoria costata*,在德国南部地区的海泛地层中,含有菊石 *Beneckeia bichi* 和腕足类 *Dielasmaeckii* 等典型海相化石。然而,尽管在这些地层中发现了相关的海相、海陆过渡相或者海洋起源的化石,但类似的化石种类在一些陆相咸水环境仍可见到。汪品先(1992)及刘传联等(2002)通过与现生“海源陆生生物”的比较,认为原先认为是“海相”标志的有孔虫、钙质超微化石、沟鞭藻和疑源类、多毛类和鱼类实际上可能是“海源陆生化石”,它们生活在以  $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+$  为主的咸水湖泊环境。茅绍智等(1995)指出,20世纪70年代中期,西方的沟鞭藻专家公认沟鞭藻化石为海相的标志化石。尽管曾注意到黄骅坳陷的沟鞭藻化石组合面貌明显不同于同时代海相沟鞭藻组合,但还是用“海侵”或“海侵影响”来解释这些化石。另一方面,因为白垩纪或古近纪海侵时,当时属于全球性干旱,中国东部大部也处于干旱气候条件,蒸发强度大,水体盐度很高,海源生物很难在陆相环境中生长,故可能导致含盐系地层中很难见到代表性的海相化石。

古遗迹标志方面,李应暹等(1997)在下辽河坳陷沙河街组三段发现了海相遗迹化石 *Teichichnus* sp. 吴贤涛等(1997)系统研究了东濮凹陷沙河街组各段的生物痕迹相,识别出属于边缘海相的潮道、滨岸和临滨3类生物痕迹相,产有 *Arenicolites*, *Ophiomorpha*, *Thalassinoides* sp. 等海相生物痕迹,从而支持了研究区古近纪存在海侵的观点。

同时,袁文芳等(2005)报道了东营凹陷沙河街组四段发现的管状藻礁灰岩,其中产有与海相密切

相关的各类海相生物化石,为盆地这一时期的海侵事件提供了有利的证据。牟晓慧等(2007)认为岐口凹陷沙河街组一段广泛发育的“纹层状钙质泥岩”和“油页岩”中有相当部分是由泥岩和颗石灰岩互层构成,而颗石灰岩是由外海进入渤海湾盆地的颗石藻勃发堆积形成,反映了海侵作用的存在。此外,何镜宇等(1982)、葛瑞全(2003,2004)、傅强等(2007)、吴贤涛等(2004)通过对中国东部盆地白垩系—古近系中海绿石、方沸石以及磷灰石的发现,认为这些盆地在晚白垩世—古近纪遭受了不同程度海侵的影响。Feng等(2009)在松辽盆地上白垩统的油页岩研究中,发现其分子化石表现出  $\text{Pr}/\text{Ph}$  比值低( $<0.9$ )、伽马蜡烷含量高且变化较大、4-甲基甾烷丰富、甾烷中  $\text{C}_{27}/\text{C}_{29}$  和  $\text{C}_{28}/\text{C}_{29}$  的比值大于泥岩、正烷烃碳同位素轻、高碳数烷烃中  $\text{C}_{43}$ 、 $\text{C}_{45}$  和  $\text{C}_{47}$  异常丰富等特征,进而推断油页岩形成于还原环境,藻类丰富多样,可能与海侵作用有关。

### 3.3 地球化学特征

地球化学指标方面,溴元素是重要的指标之一。典型陆相盐湖富钾卤水中的溴碘含量一般较低,如罗布泊卤水  $\omega(\text{Br})$  为  $8.38 \times 10^{-6} \sim 20.8 \times 10^{-6}$ , 平均  $15.3 \times 10^{-6}$ ;  $\omega(\text{I})$  为  $0.07 \times 10^{-6} \sim 0.57 \times 10^{-6}$ , 平均  $0.22 \times 10^{-6}$  (王弼力等,2001)。然而,研究区卤水  $\omega(\text{Br})$  平均  $202 \times 10^{-6}$ ,  $\omega(\text{I})$  平均  $70.8 \times 10^{-6}$  (表2),比陆相盐湖卤水高十多倍,相当于海水蒸发浓缩至石膏析出时残留海水溴含量(陈郁华,1983)。作者对江西吉泰盆地白垩系钻井(T7X孔)岩芯石盐进行化学分析,石盐中  $\omega(\text{Br})$  为  $71 \times 10^{-6} \sim 107 \times 10^{-6}$ , 平均  $90.25 \times 10^{-6}$  ( $N=19$ ),与江陵凹陷沙钾3井石盐溴含量相近,其  $\omega(\text{Br})$  为  $38.8 \times 10^{-6} \sim 222 \times 10^{-6}$ , 平均  $91.65 \times 10^{-6}$  ( $N=39$ )。此两盆地石盐溴含量与海水蒸发析出的石盐中  $\omega(\text{Br})$  为  $110 \times 10^{-6} \sim 330 \times 10^{-6}$  接近(陈郁华,1983),而一般陆相盆地石盐中的溴含量则很低。因此,可以推断这些盆地的溴来源具有海水起源特征。因此,推测白垩纪大海侵可能曾影响到华南中部地区。

## 4 华南主要盆地的深层卤水矿床特征

### 4.1 江陵凹陷

江陵凹陷位于中国东部裂谷盆地系中南部,是江汉盆地西部的一个次级凹陷,面积  $6500 \text{ km}^2$ 。盆地内白垩系—新近系最大沉积厚度近万米,蒸发岩

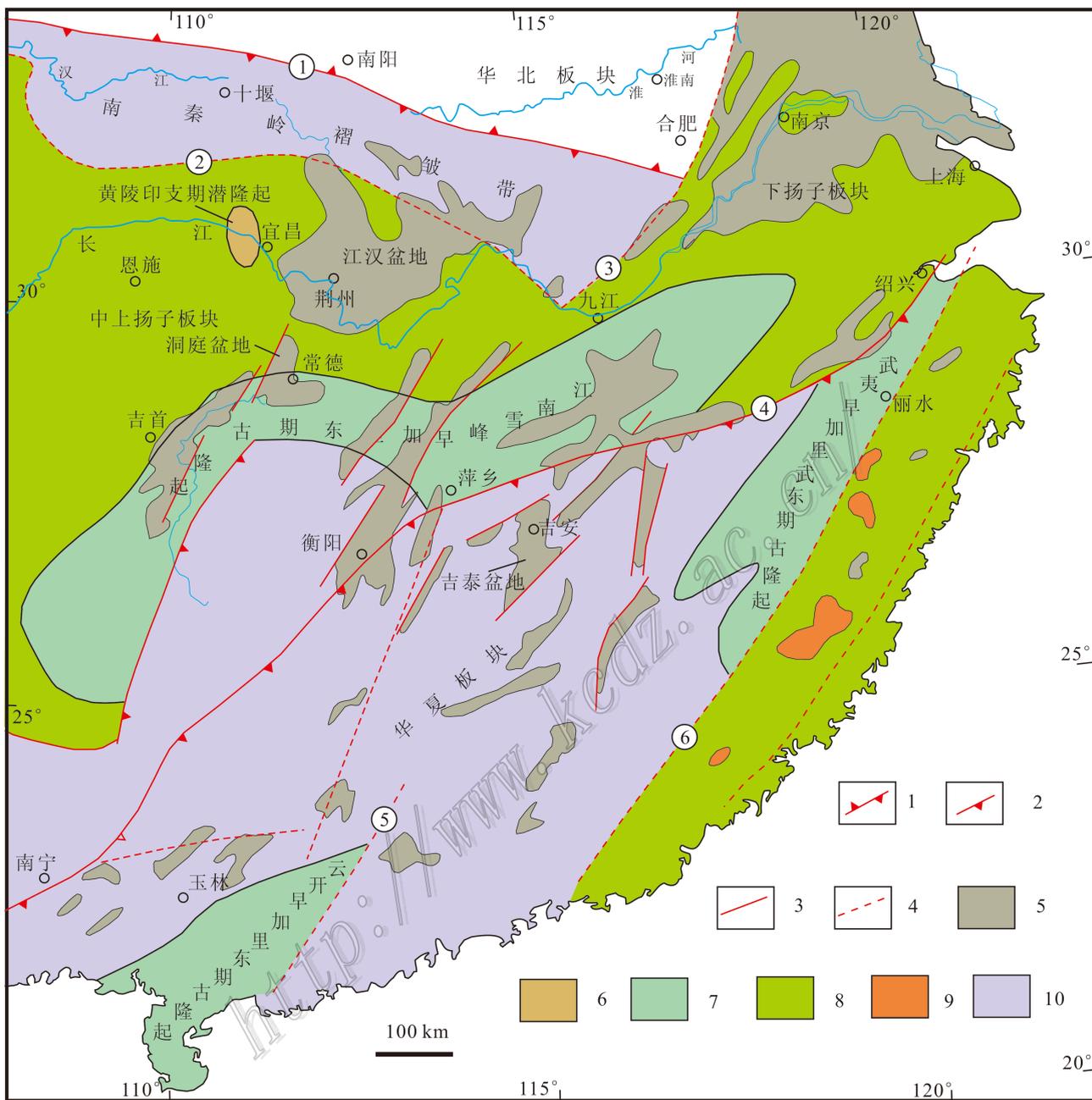


图 4 中国东部晚白垩世—古近纪岩相古地理图(据马永生等,2009)

Fig. 4 Late Cretaceous-Paleogene lithofacies paleogeographic map in eastern China (after Ma et al., 2009)

- ①—高丹加里东期板块结合带；②—郟庐断裂；③—房城-襄广断裂带；④—绍兴-江山-萍乡加里东期-晋宁期板块结合带；
- ⑤—四会-吴川断裂带；⑥—丽水-海丰断裂带

- 1—一级单元界线；2—二级单元界线；3—三级单元界线；4—大断裂带；5—裂陷盆地；6—潜隆起区；7—古隆起区；8—陆缘浅海；
- 9—火山沉积盆地；10—褶皱带

- ①—Shang dan Caledonian plate junction；②—Tanlu fault；③—Fangcheng-xiangguang fault zone；④—Shaoxing-Jiangshan-Pingxiang Caledonian-Jinningian plate junction；⑤—Sihui-Wuchuan fault zone；⑥—Lishui-Haifeng fault zone

- 1—Primary unit boundary；2—Secondary unit boundary；3—Three-level unit boundary；4—Large fault zone；5—Rift basin；
- 6—Latent uplift zone；7—Ancient uplift zone；8—Epicontinental seas；9—Volcanic-sedimentary basin；10—Fold belt

主要发育于古新统沙市组和始新统新沟嘴组。

**卤水分布层位** 富钾卤水主要赋存于沙市组和新沟嘴组内,含盐层系按照岩性组合,可划分为盐下碳酸盐岩段,含盐段和盐上硫酸盐段。盐下碳酸盐岩段主要岩性为紫红色、灰色泥质白云岩,局部夹薄层硬石膏岩、膏泥岩及粉砂岩。含盐段主要为白色、灰白色含硬石膏盐岩、含钙芒硝盐岩与灰色、棕色泥岩及粉砂岩。盐上硫酸盐段主要为深灰色泥岩、泥膏岩、钙芒硝岩及膏质粉砂岩,粉细砂岩薄层,夹棕红色泥岩。

**储集层特征** 江陵凹陷储卤层主要有3种类型,分别为砂岩孔隙型、泥岩裂隙型和玄武岩孔洞型。砂岩主要为石英砂岩,长石英砂岩和岩屑石英砂岩,砂岩一般为细-中砂状结构,碎屑颗粒平均含量为78%,充填物平均含量22%。孔隙度11.4%,渗透率 $4.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属低孔低渗类型。泥岩裂隙主要是断裂带中的细小断裂及节理,储集性和连通性好,但发育规模不好控制。玄武岩中气孔含量与储层物性呈正比。火山岩气孔一般呈断续线状分布,气孔椭圆形居多,长轴3~13 mm,短轴0.2~7.0 mm,气孔面积含量不均,密集处20%~30%不等,气孔一般不连通。

**卤水化学组成** 江陵凹陷岗钾1井古新统卤水化学组成见表2,卤水皆为过饱和状态,矿化度达到了334 g/L。 $\text{Cl}^-$ 及 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 及 $\text{Na}^+$ 含量占据绝大多数, $\text{SO}_4^{2-}$ 含量极低。 $\omega(\text{KCl})$ 为1.58%,达到了工业品位的要求。

卤水微量元素种类多且含量高,主要为锂、锶、铷、溴、碘和硼等元素。沙市组卤水中 $\omega(\text{Br}^-)$ 为 $200.23 \times 10^{-6} \sim 230 \times 10^{-6}$ ,高于上覆新沟嘴组地层水 $\omega(\text{Br}^-)$ 平均值( $94 \times 10^{-6}$ )的2.1~2.4倍;江陵凹陷各地层的地层水普遍含碘,潜江组、新沟嘴组和沙市组地层平均 $\omega(\text{I}^-)$ 不均一,分别为几乎为零、 $21 \times 10^{-6}$ 和 $58 \times 10^{-6}$ 。岗钾1井卤水锂 $\omega(\text{Li}^+)$ 为 $80 \times 10^{-6}$ ;  $\omega(\text{Sr}^{2+})$ 为 $230 \times 10^{-6}$ ,  $\omega(\text{Rb}^+)$ 为 $60 \times 10^{-6}$ ,  $\omega(\text{Cs}^+)$ 为 $25 \times 10^{-6}$ ,  $\omega(\text{Br}^-)$ 为 $200.23 \times 10^{-6}$ ,  $\omega(\text{I}^-)$ 为 $73 \times 10^{-6}$ ,  $\omega(\text{B})$ 为 $900 \times 10^{-6}$ 。

由表2可见,与四川三叠系海相地层深层卤水相比,江陵凹陷古新统卤水与其有相同的地方,埋藏深、温度较高、含盐度也高,并且卤水中的钾及多种微量元素都达到了工业品位,它们的成因可能有相似性。

岗钾1井卤水特征系数见表3,由该表可见,江

表2 江陵凹陷与四川盆地富钾卤水化学特征  
Table 2 Chemical composition of potassium-rich brines in Jiangling depression and Qaidam Basin

组分	四川盆地西部&四川盆地东北部& (三叠系海相) (三叠系海相)		
	岗钾1井	$\rho(B)(\text{g/L})$	
矿化度	334.49	377.27	352.69
$\text{K}^+$	9.91	53.27	25.96
$\text{Na}^+$	119.35	98.79	100.52
$\text{Ca}^{2+}$	4.14	3.63	10.88
$\text{Mg}^{2+}$	0.17	3.17	1.26
$\text{Cl}^-$	200.09	210.08	201.97
$\text{SO}_4^{2-}$	0.83	1.39	0.37
$\text{HCO}_3^-$	—	1.13	0.37
	$\rho(B) \times 10^{-6}$		
$\text{Sr}^{2+}$	230	166	597
$\text{Li}^+$	80	89.8	323
$\text{Rb}^+$	60	37.5	32.2
$\text{Cs}^+$	25	2.55	3.89
$\text{Br}^-$	200.23	2533	1675
$\text{I}^-$	73	28.38	38
B	900	4994	1694

注: & 据林耀庭等, 2002; — 表示元素含量未分析。

陵凹陷古新统卤水主要特征系数与黄海海水浓缩到石盐阶段的特征系数相似,表明其已浓缩到了石盐阶段,但B、Li、Ru和Cs更丰富。卤水的变质程度可有 $\text{SO}_4 \times 10^2 / \text{Cl}$ 值来判定,江陵凹陷古新统卤水的 $\text{SO}_4 \times 10^2 / \text{Cl}$ 值为0.12~0.51,其值非常低,反映了卤水经历了强烈变质,即去硫酸根作用。然而一些微量元素和重金属的富集,表明其有深部来源的补给(潘源敦等, 2011; 刘成林, 2013)。

#### 4.2 潜江凹陷

潜江凹陷位于江汉盆地中部,是中国典型的中、新生代断陷盆地,面积2500 km<sup>2</sup>。自晚始新世—早渐新世,成为整个盆地的沉降、汇水和浓缩中心,在封闭、强蒸发环境下,形成了独特的具有沉积充填特征的陆相蒸发岩沉积盆地,盐系地层厚达3500 m以上,其中盐类沉积累计厚度达1800 m(刘群等, 1987)。古近系潜江组水化学类型主要为硫酸钠亚型和氯化物型,卤水含矿面积达2500 km<sup>2</sup>(渠洁瑜等, 1984; 于什松, 1994; 马黎春等, 2015)。

潜江组主要以碎屑岩、碳酸盐岩、蒸发岩及其过渡类的沉积建造为主。砂岩由于其渗流能力好,是深层卤水最主要和有利利用价值的赋存体。潜江组的砂岩可划分为中砂岩、细砂岩、粉砂岩等几种岩性,从粉砂岩-细砂岩-中砂岩储层物性由低到高。

表 3 江陵凹陷古新世富钾卤水特征参数

Table 3 Characteristic parameters of Paleocene potassium-rich brines in Jiangling Depression

特征系数	岗钾 1 井	黄海海水 (析出石盐时期)
$n\text{Na}/n\text{Cl}$	0.60	0.82
$\text{Br} \times 10^3/\text{Cl}$	1.00	3.55
$\text{K} \times 10^3/\text{Cl}$	49.53	47.90
$\text{SO}_4 \times 10^2/\text{Cl}$	0.41	10.78
$\text{K}/\text{Br}$	49.49	12.02
$n\text{Na}/n\text{K}$	12.04	18.82
$\text{Sr} \times 10^3/\text{Cl}$	1.15	0.32
$\text{B} \times 10^3/\text{Cl}$	4.50	0.27
$\text{Rb} \times 10^3/\text{Cl}$	0.30	0.01
$\text{Cs} \times 10^3/\text{Cl}$	0.13	—
$\text{Li} \times 10^3/\text{Cl}$	0.4	0.01
$\text{Ca}/\text{Cl}$	0.02	0.00

注：黄海海水数据来自陈郁华，1983；“—”表示元素含量未分析。

潜江凹陷潜江组卤水的平均矿化度为 280.9 g/L, 常量元素平均含量占 99.4%, 微量元素平均含量为 0.57% (黄华等, 2015)。潜江组部分层位含有氯化钙型水、硫酸镁亚型和碳酸盐型卤水(表 4)。卤水垂直分带明显, 矿化度随卤水层埋深增加而增高, 可以划分为 3 个层段: ① 卤水层埋深 500~1280 m, 在 1280 m 时矿化度达到 270 g/L; ② 卤水层埋深 1280~2190 m, 卤水矿化度向饱和状态过渡, 矿化度在 270~300 g/L; ③ 卤水层埋深 2190 m 以下, 矿化度一般都超过 300 g/L。据黄华等(2015)可知, 卤水中的锂、溴元素达到开采工业品位, 钾硼碘元素达到综合利用工业品位, 钾、硼、碘元素达到综合利用工业

品位。

潜江凹陷潜江组蒸发岩盐类矿物组合特征: 钙芒硝、无水芒硝、无水钠镁矾、盐镁芒硝、钾芒硝、石盐、钾石膏、杂卤石等(吴必豪等, 1980), 可以推断, 原始湖水应为硫酸钠亚型卤水, 这与目前地层中占据主导的水化学类型较为吻合。碳酸盐型卤水阴离子中  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  占据主导, 其当量浓度超过  $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$  之和, 为典型的大气水的特征。深部氯化钙型卤水具有富  $\text{Ca}$ 、贫  $\text{SO}_4$ 、高矿化度及富含多种微量元素的特征, 这一特殊的水化学类型与深埋藏变质作用有关。

### 4.3 吉泰盆地

吉泰盆地位于江西省中部, 大地构造位于华南褶皱系赣西南凹陷北部吉安凹陷中, 为白垩纪形成的陆相箕状湖盆, 面积约 4550  $\text{km}^2$  (卢秋芽, 1991), 与清江盆地、抚州盆地、赣州盆地等一起构成江西中北部晚燕山期—喜马拉雅期盆地群。

在吉泰盆地开展钾盐普查过程中发现有卤水矿点。据已实施的 6 个钻孔发现, 盆内卤水矿床走向北东, 倾向南西, 目前控制卤水延伸约 2000 m。卤水赋存于白垩系周田组第三段的构造破碎带中, 卤水具承压性, 最大水头高于孔口标高 3 m; 多孔抽水试验显示, 涌水量稳定, 在孔深 200~300 m 段单井涌水量在 220  $\text{m}^3/\text{d}$  以上, 卤水中  $\text{LiCl}$  的含量为工业品位 2 倍, 为富锂卤水矿, 同时还含有一定的钾、溴、碘、硼等有益组分。在吉泰盆地四周发育有黄坳、吉水、遂川-德兴三条深大断裂及数十条规模稍小的断裂, 这些具有较好的与深部及浅部沟通能力, 深层卤

表 4 潜江凹陷潜江组典型卤水化学成分特征(据马黎春等, 2015)

Table 4 Chemical composition of typical brines in Qianjiang Formation of Qianjiang depression (after Ma et al., 2015)

组分	广 14 井	浩 192 井	钟斜 6-17 井	代 7-7 井
	$\rho(\text{B})(\text{g/L})$			
$\text{K}^+$	5.93	3.59	1.48	0.212
$\text{Ca}^{2+}$	4.09	0.00053	0.9	0.117
$\text{Na}^+$	120.43	126.33	83.6	39.7
$\text{Cl}^-$	198	193	168	78
$\text{SO}_4^{2-}$	0.79	7.24	2.254	8.15
	$\rho(\text{B})10^{-6}$			
$\text{Mg}^{2+}$	450	0.1	336	57.4
$\text{CO}_3^{2-}$	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15
$\text{HCO}_3^-$	360	750	272	2200
$\text{Li}^+$	113.5	87.7	15.3	8.59
B	405.2	195	240	35.5
Br	506.4	455.4	10	31.4
水型	氯化钙型	硫酸钠亚型	硫酸镁亚型	碳酸盐型

水受地层压力沿深大断裂向上运移,赋存于裂隙、孔隙发育的断层带中。与江汉盆地卤水赋存特征类比,推测目前发现富锂卤水矿为次级储卤区,主要储卤区可能在深部。

## 5 深层卤水的起源与成因

### 5.1 卤水成因

世界上多个蒸发岩盆地都报道有盐湖(地下)卤水资源(如美国伊利诺伊盆地、法国巴黎盆地、西加拿大盆地、中国江汉盆地等)(Craig, 1969; Davis et al., 1986; Vengosh et al., 1995; Lowenstein et al., 2003, 2009; Nishio et al., 2010; 刘成林, 2013),并通常富含钾、硼、锂、溴、碘、铷、铯、稀有气体及重金属元素等(Thompson et al., 1988; 刘成林, 2013)。

死海盆地位于约旦-以色列裂谷,裂谷南北长达1100 km,宽5~20 km,是一个典型的剪张性裂谷,上新世至今的死海群,沉积了一套巨厚的碎屑岩-蒸发岩系。区内东北部有较大面积新近纪玄武岩等基性火山岩出露,裂谷盆地自北向南都广泛分布有盐泉(钱自强等, 1994)。死海海水就是富钾卤水,死海卤水化学具有高钙、高溴特征,金含量是海水的1000倍。死海盐类物质1/3来自约旦河,2/3来自高盐度泉水,3个泉水 $\rho(K^+)$ 平均达15.99 g/L;计算氯化钾资源量40亿吨,调查资源量20亿吨(Bentor, 1961; Zak et al., 1968)。

20世纪60年代,在美国加利福尼亚州索尔顿海湖东南的科学钻探中,钻遇高温(270~370℃)热卤,富含钾硼锂铷铯及重金属铁铅锌铜等元素(Thompson et al., 1988)(表5)。而索尔顿卤水中主要重金属铜、锌、铁等则要高出一般盐湖卤水的数十甚至数百倍,索尔顿热卤水属于典型裂谷深部起源卤水。Helgeson(1968)认为,卤水是起源于科罗拉多河水的沉积物同生水;而Craig(1969)根据氢、氧同位素研究,认为索尔顿海卤水起源于大气降水,通过沉积物循环形成。

中国柴达木和四川盆地也产有富钾、锂、硼、铷、铯的卤水资源。柴达木盆地西部古近系和新近系碎屑岩中赋存有大量富钾卤水(油田水),采样测试其化学组成特征(表5),与柴达木盆地现代盐湖卤水具有较大区别,其溴、碘、硼、锂和铯等微量元素要比盐湖卤水高数倍至十倍以上,显然,地层深部卤水的

表5 索尔顿海与柴达木盆地深层卤水化学组成  
( $\rho(B) \times 10^{-6}$ )

Table 5 The chemical composition of deep brines in Salton Sea and Qaidam Basin ( $\rho(B) \times 10^{-6}$ )

元素成分	索尔顿海热卤 <sup>1</sup>	柴达木盆地西部深层卤水 <sup>2</sup>
Mn	1940	—
Ca	40260	—
Mg	49	—
Sr	559	—
Ba	219	—
Na	62380	—
K	20700	7783
Li	266	223
Rb	149	—
Cs	45	54
Br	—	80
I	—	35
Zn	606	—
B	465	2414
Cl	185780	166890
TDS(g/L)	313.6	283.88

注:1—Thompson et al., 1988; 2—刘成林等采样分析; —表示元素含量未分析。

起源与第四纪盐湖没有直接关系。李廷伟等(2006)、樊启顺等(2007)、谭红兵等(2007)对该深部卤水开展研究,认为这些油田水成矿物质来源于蒸发岩地下溶解、火山岩的水-岩相互作用和火山地热水等。四川盆地,主要见于川西的邛崃构造,川东宣达,含卤地层为下三叠统,卤水矿化度平均值为250 g/L以上,最高达377 g/L,  $\rho(K^+)$ 异常高,达50.00~25.96 g/L,同时富含碘、硼、锂、铷和铯等多种微量元素,含量都已达到工业品位(林耀庭, 2001; 2002),可能属于沉积变质水和固体钾盐溶滤水复合成因(林耀庭等, 2004)。

盆地封存的卤水属于地层水(柯林斯, 1974; Hanor, 1994),区别于储存在盆地基底结晶岩系中的卤水,如著名的加拿大地盾卤水(Frape et al., 1987)。大陆地区地下卤水中盐分的主要来源包括:①海侵的海水;②海相沉积物风化释放的盐分;③大陆地表岩石的风化产物;④火山喷发物质和热水盐分(Mcarthur et al., 1989)。而水的主要来源包括外源的大气降水和内源的盆地封存水体及地壳流体或幔源(Thompson, 1992; Plank, 1996; 毛景文等, 2001, 2004a)。由此可知,沉积盆地中卤水的物质来源和演化包含了一系列复杂作用(Cai et al., 2001)。

关于沉积盆地中卤水成因,国内外学者曾做了

大量的研究:① 沉积盆地结晶基底中的卤水(如 Bottomley et al., 1994; 1999; 2003; Leybourne et al., 2007; Greene et al., 2008; Katz et al., 2011);② 地层水或盆地卤水(Sonnenfeld, 1984; Matray et al., 1990; Fontes et al., 1993; 黄思静等, 1997; 林耀庭等, 1997; Cai et al., 1997; 2001; Kloppmann et al., 2001; Birkle et al., 2009; 刘成林, 2013);③ 表层水、现代盐湖、浅层地下水等水体(肖应凯等, 1994; 刘成林等, 1999; 王弼力等, 1997; 2001; 韩凤清, 2001; Xiao et al., 2000; Winckler et al., 2001; Klein-BenDavid et al., 2004; 樊启顺等, 2007; 谭红兵等, 2007; 2009)。沉积盆地中卤水的来源通常认为主要有 2 种机制:其一,是表层水的蒸发作用产生的埋藏卤水或蒸发卤水(原生卤水);其二,是盐类矿物的地下溶解和原生卤水的稀释(次生卤水)(Matray et al., 1990; Hardie, 1991; Hanor, 1994; Kloppman et al., 2001; Birkle et al., 2009; 刘成林等, 2009; 2013);另外,深源卤水补给也是来源之一(曲懿华, 1982; 刘成林, 2013)。

水-岩反应与深层卤水成因有密切联系。例如,加拿大地盾卤水,赋存于古老结晶岩的裂隙内,有观点认为卤水是发生长期水-岩反应形成的(Fritz et al., 1982; 1987; Frapé et al., 1984),也有认为卤水是形成于蒸发浓缩的海水,向下渗透与岩石反应形成的(Bottomley et al., 1999; 2003)。在瑞典的 Stripa 地区,卤水赋存于花岗岩体的孔隙内,溶质来源于地下水与围岩发生的水-岩反应(Nordstrom et al., 1989a; 1989b)。在芬兰卤水位于海岸地带,并且大约 7000 年以前就一直被海水所淹没,海水与其所赋存的结晶岩发生了水-岩反应(Lahermo et al., 1987)。在英格兰康沃尔地区,卤水赋存于花岗岩体内,溶质来源于地下水与长石和黑云母发生的水-岩反应(Edmunds et al., 1984; 1985)。在澳大利亚的 Yilgarn 板块,含盐的地下水来源于海水,演化成多来源的成因,其中水-岩反应贡献了溶质来源(Mcarthur et al., 1989)。在欧洲西南部比利牛斯山逆冲带的东北,深部地下水与沉积地层发生的高温水-岩反应导致了泉水的矿化(Khaska et al., 2015)。在东欧地台,卤水赋存与火成岩基底内,溶质来源于地下水与结晶岩的水-岩反应(Vovk, 1987)。总之,这些高盐度流体的成因一方面被解释为海相成因。另一方面,地下水向下渗透或一些深部高温流体在上升冷却过程中均会发生水岩反应而形成卤水,这

些都已被流体的化学成分和同位素组成所证实。

## 5.2 华南富钾、锂卤水成因初探

白垩纪时期,在华南陆块形成了一系列的中生代—新生代裂陷盆地,现已在湖北江汉盆地的潜江凹陷和江陵凹陷发现了深部卤水,富含钾、锂、硼、铷、铯、溴、碘等元素,以及江西的吉泰盆地发现了地层卤水,氯化钾含量接近工业品位,富含锂元素。这些卤水的成因可能由以下因素造成。

从构造角度分析,华南中生代—新生代盆地是由于构造格局的转折(挤压转变为拉张)导致岩石圈发生大规模的减薄而形成的。在拉张的动力学背景下,壳幔相互作用及大规模的岩浆活动,在裂谷盆地中发育大量的火成岩。例如美国的索尔顿盐湖、中东的死海盆地以及中国西藏和青海的第四纪盐湖等,并在卤水中富集锂、硼、铷、铯等元素,而这些元素的来源与盆地内的火山活动有密切的关系。可见,华南中生代—新生代盆地卤水锂、硼、铷、铯元素的富集与本地区玄武岩喷发和花岗岩侵入活动有关。

从古地理、古气候方面分析,白垩纪—古近纪时期,北半球欧亚大陆中部地区中亚、蒙古、中国逐渐形成一个近东西向、狭长的干旱气候带。湖北江汉盆地及江西的吉泰盆地处于这一干旱带内,在盆地内沉积了大套的蒸发岩并赋存富钾卤水。同时,古孢粉学及沉积学研究表明,晚白垩世—古近纪时期,研究区整体处于干旱气候格局。白垩纪全球平均海平面处于较高水平,整个白垩纪时期全球海平面处于快速波动状态,晚白垩世海侵被认为是自奥陶纪以来最大规模的海侵事件。而中国东部晚白垩世—古近纪是否发生过海侵,一直是长期存在的争论。前人在生物化石、古遗迹、矿物岩石学、生物标志化合物和地球化学指标方面均找到了海侵的证据。江西吉泰盆地 T7X 钻孔岩芯石盐溴含量与江陵凹陷沙钾 3 井石盐溴含量相近(平均  $91 \times 10^{-6}$ ),与海水蒸发析出石盐溴含量( $110 \times 10^{-6} \sim 330 \times 10^{-6}$ )相当,可以推断这些盆地的溴来源具有海水起源特征。

根据上述构造、物源与干旱气候特征,再现华南地区裂谷盆地的液态型钾锂资源富集成矿过程(图 5、图 6)。其成矿过程可分解为“2 个阶段”以及“3 个成钾作用过程”。“2 个阶段”包括:第一阶段,地表盐湖—太阳能作用阶段;第二阶段,埋藏-岩浆热能作用。“3 个成钾作用过程”包括:第一是蒸发沉积;第二是沉积淋滤;第三是变质-改造。

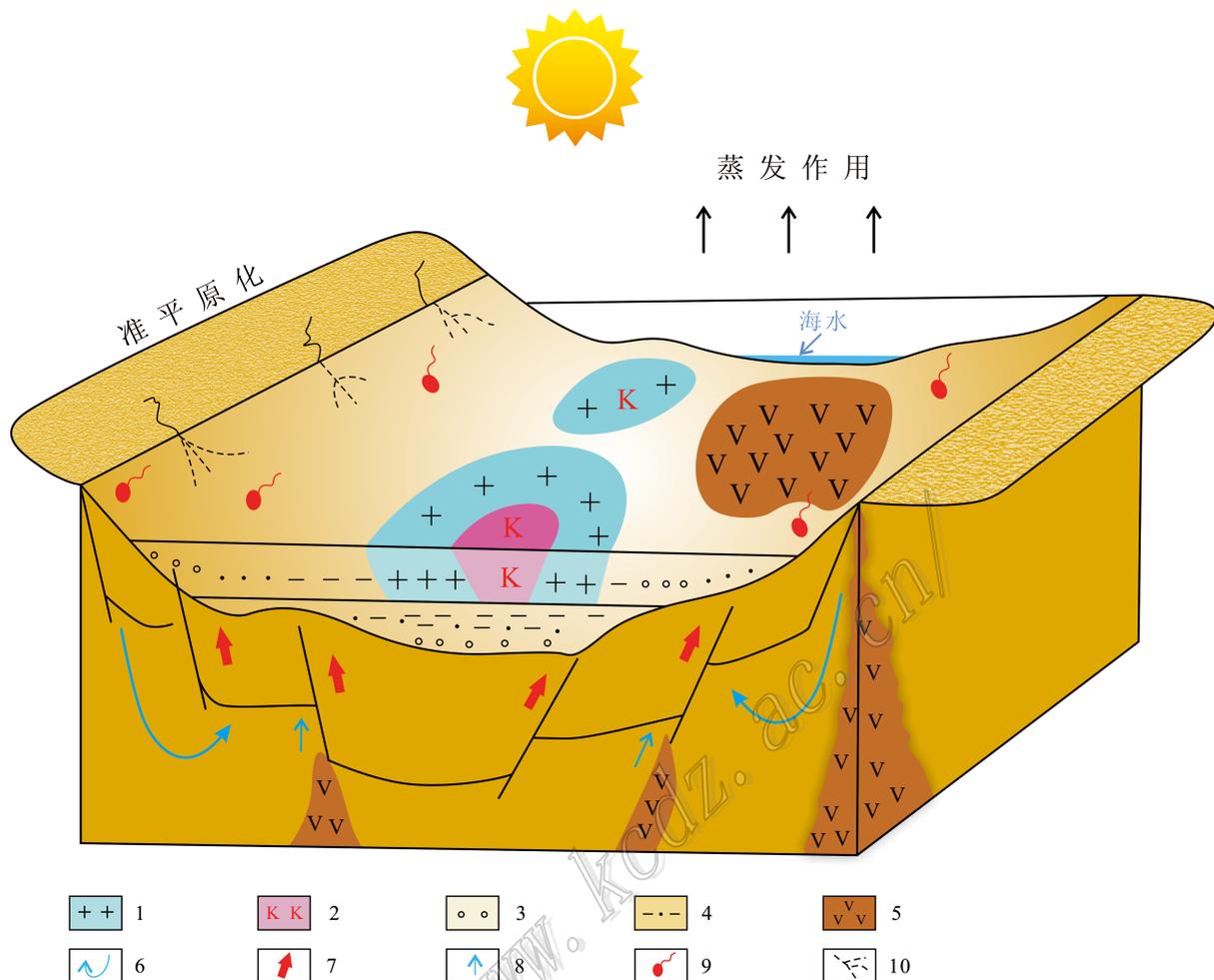


图5 裂谷盆地成钾模式图(刘成林,2013)

1—石盐; 2—钾盐; 3—砂砾岩; 4—粉砂; 5—玄武岩; 6—深循环卤水(起源于卤水—矿物反应); 7—地层建造水被驱动上涌;  
8—岩浆分异热液流体; 9—地表盐泉(来自深循环水、建造水的上升排泄); 10—冲积物

Fig. 5 Schematic diagram shows that how potash salts formed in rift basin (after Liu, 2013)

1—Halite; 2—Potash salt; 3—Sandy conglomerates; 4—Siltstones; 5—Basalts; 6—Deep cycle brine (originating from brine-minerals reaction); 7—Upwelling formation water derived by magma; 8—Magmatic differentiation hydrothermal fluids;  
9—Surface salt springs (derived from discharge of the deep cycle water and formation water); 10—Alluvial deposits

在构造-物源-气候耦合作用下,裂谷盆地古盐湖卤水持续浓缩,先出现大量石盐沉积,在石盐沉积区内进一步浓缩出现光卤石及溢晶石等;在盐湖沉积后期或成岩期,受到海侵或大气降水影响,已沉积的光卤石被淋滤,氯化镁被带走,氯化钾残留下来形成钾石盐矿层。

对于尚未蒸发浓缩演化至钾盐矿物析出的盐湖富钾卤水,在沉积晚期及埋藏时期,沉积环境从地表太阳能驱动转为岩浆热能驱动。盐湖卤水转入同沉积期或更深部地层的盐类晶间及碎屑孔隙-裂隙中;随着埋藏加深,物理化学条件变为还原条件。岩浆

流体侵入,继续带来成矿物质,岩浆热能加速卤水-矿物反应,卤水中硫酸根绝大部分被还原,同时镁离子进入方解石或文石形成白云石,卤水化学类型转变为氯化钙型。随着地层压力增加,富钾卤水转移至孔隙及裂隙发育的岩层中储藏(图6);如果断裂切穿储卤层,一部分热卤又可以盐泉的形式补给盐湖,开始新的地球化学循环。裂谷发展后期,古盐湖开始淡化,出现巨厚的石膏和碳酸盐岩及碎屑岩沉积,形成卤水盖层。

总之,华南陆块(地区)富、钾、锂、硼、铷、铯、溴、碘卤水是多源补给、内生与外生地质作用耦合的

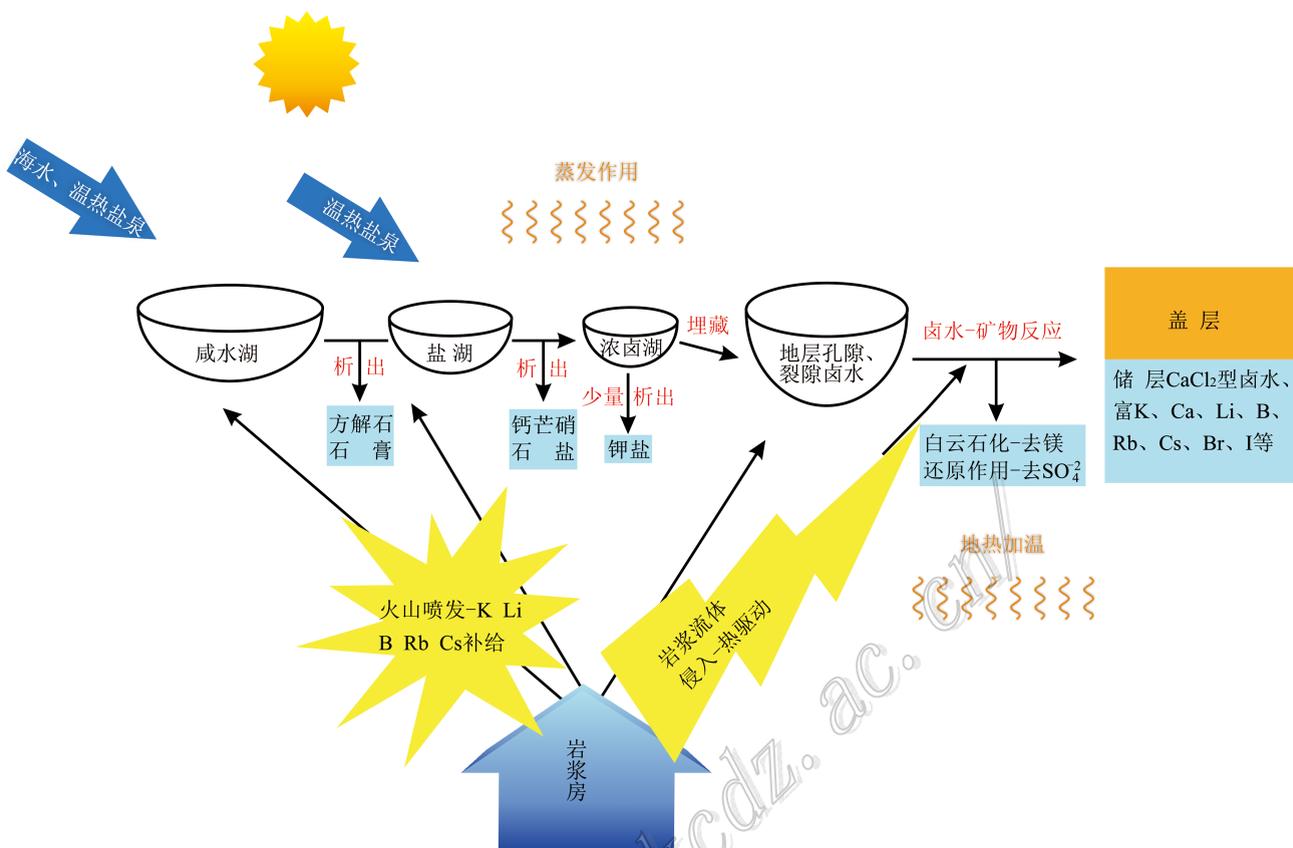


图 6 裂谷盆地富钾卤水形成过程示意图(刘成林, 2013)

Fig. 6 Schematic diagram showing the formation process of potassium-rich brines in the rift basin (after Liu, 2013)

结果;此成矿作用亦可称为“复合成矿”,其物质来源的多源性以及成矿机理的复杂性,尚需要进一步深入研究;进一步推论,华南地区盆地大多具有一定的钾、锂、硼、铷、铯、溴、碘复合成矿条件,可能构成华南液体钾、锂(及硼、铷、铯、溴、碘)成矿区。

## 6 结 论

中生代时期华南陆块处于拉张应力的动力学背景之下,形成典型的裂谷箕状断陷盆地,为盐类蒸发沉积和富钾卤水提供了构造空间。

由于岩石圈发生大规模的减薄导致壳幔相互作用及大规模的岩浆活动,在裂谷盆地中发育大量的火成岩。华南陆块分布大量玄武岩和花岗岩,为钾锂等有益元素的富集提供了物质补给。中国东部晚白垩世—古近纪的海侵,可为盆地带来丰富的钾、溴、碘等物质。

在白垩纪—古近纪干旱的气候环境下,华南中

生代—新生代盆地广泛出现蒸发作用,形成大量蒸发岩。同时,对于古盐湖中尚未蒸发浓缩演化至钾盐矿物析出的盐湖富钾卤水,在沉积晚期及埋藏时期,转入同沉积期或更深处地层的碎屑孔隙-裂隙中,同时,在岩浆热能的驱动与流体补给下,钾、锂、硼、铷、铯可能还继续得到补充富集。

华南陆块的液体钾锂矿床可能是内生与外生地质共同作用,或构造-火成岩-海侵-干旱气候耦合成矿的结果。由此,推测华南地区中生代-新生代盆地可能具有钾、锂、硼、铷、铯、溴、碘复合成矿的条件,并构成华南卤水型液体钾锂(及硼、铷、铯、溴、碘)成矿区。

**志 谢** 参加此项工作还有中国地质科学院矿产资源研究所张华博士,沈立建博士,胡宇飞硕士,陈永志研究员,野外采样得到锦辉集团公司和江西省地矿局 902 大队领导干部的大力支持,在此一并志谢!

## References

- Bentor Y K. 1961. Some geochemical aspects of the dead sea and the question of its age [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 25 ( 4 ) : 239-260.
- Birkle P , García B M and Padrón C M M. 2009. Origin and evolution of formation water at the Jujo-Tecominoacán oil reservoir , Gulf of Mexico. Part 1 : Chemical evolution and water-rock interaction [ J ]. *Applied Geochemistry* , 24 : 543-554.
- Bottonley D J , Chan L H , Katz A , Starinsky A and Clark I D. 2003. Lithium isotope geochemistry and origin of Canadian Shield brines [ J ]. *Groundwater* , 41 : 847-856.
- Bottonley D J , Gregoire D C and Raven K. 1994. Saline groundwaters and brines in the Canadian Shield : Geochemical and isotopic evidence for a residual evaporate brine component [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 58 ( 5 ) : 1483-1498.
- Bottonley D J , Katz A , Chan L H , Starinsky A , Douglas M , Clark I D and Raven K G. 1999. The origin and evolution of Canadian Shield brines : Evaporation or freezing of seawater ? New lithium isotope and geochemical evidence from the Slave crator [ J ]. *Chemical Geology* , 155 : 295-320.
- Cai C , Mei B , Li W and Zeng F. 1997. Water-rock interaction in the Tarim basin : Constraints from oilfield water geochemistry [ J ]. *Chinese Journal of Geochemistry* , 16 : 289-303.
- Cai C , Franks S G and Aagaard P. 2001. Origin and migration of brines form Paleozoic strata in Central Tarim , China : Constraints from  $^{87}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$  ,  $\delta\text{D}$  ,  $\delta^{18}\text{O}$  and water chemistry [ J ]. *Applied Geochemistry* , 16 : 1269-1284.
- Carpenter A B. 1978. Origin and chemical evolution of brines in sedimentary basins [ A ]. In : Jonson K S and Russell J A , eds. Thirteenth annual forum on the geology of industrial minerals [ C ]. Oklahoma Geological Survey Circular , 79 : 60-77.
- Chen P R , Hua R M , Zhang B T , Lu J J and Fan C F. 2002. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region-petrological constraints and geodynamic setting [ J ]. *Science in China Series D : Earth Sciences* , 45 ( 8 ) : 755-768.
- Chen Y , Zhang Y X , Graham D , Su S G and Deng J F. 2007. Geochemistry of Cenozoic basalts and mantle xenoliths in northeast China [ J ]. *Lithos* , 96 : 108-126.
- Chen Y H. 1983. Sequence of salt separation and regularity of some trace elements distribution during isothermal evaporation ( 25°C ) of the Huanghai sea water [ J ]. *Acta Geological Sinica* , ( 4 ) : 379-390 ( in Chinese with English abstract ).
- Chu C. 1983. A discussion on genesis of gypsum salt minerals [ J ]. *Hunan Geology* , 2 ( 2 ) : 44-52 ( in Chinese ).
- Clutter T J. 2000. Mining economic benefits from geothermal brine [ J ]. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin* , 21 ( 2 ) : 1-3.
- Craig H. 1969. Source fluids for the Salton Sea geothermal system [ J ]. *American Journal of Science* , 267 : 249-255.
- Davis J R , Friedman I and Gleason J D. 1986. Origin of the lithium-rich brine , Clayton Valley , Nevada. U. S. [ J ]. *Geological Survey Bulletin* , 1622 : 131-138.
- Edmunds W M , Andrews J N , Burgess W G , Kay R L F and Lee D J. 1984. The evolution of saline and thermal groundwaters in the Cammenellis granite [ J ]. *Mineralogical Magazine* , 48 : 407-424.
- Edmunds W M , Kay R L F and McCartney R A. 1985. Origin of saline groundwaters in the Cammenellis granite : Natural processes and reaction during Hot Dry Rock reservoir circulation [ J ]. *Chemical Geology* , 49 : 287-301.
- Fan Q S , Ma H Z , Tan H B , Xu J X and Li T W. 2007. Characteristics and origin of brines in western Qaidam Basin [ J ]. *Geochimica* , 36 ( 6 ) : 601-611 ( in Chinese with English abstract ).
- Feng Z H , Fang W , Wang Z , Huang C Y , Huo Q L , Zhang J H , Huang J H and Zhang L. 2009. Microfossils and molecular records in oil shales of the Songliao Basin and implications for paleo-depositional environment [ J ]. *Science in China Series D : Earth Sciences* , 52 ( 10 ) : 1559-1571.
- Fontes J C and Matray J M. 1993. Geochemistry and origin of formation brines form the Paris Basin , France. 1. Brines associated with Triassic salt [ J ]. *Chemical Geology* , 109 : 149-175.
- Frape S K , Fritz P and McNurr R H. 1984. The role of water-rock interaction in the chemical evolution of groundwaters from the Canadian Shield [ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 48 : 1617-1627.
- Frape S K and Fritz P. 1987. Geochemical trends for ground waters from the Canadian Shield [ A ]. In : Fritz P and Frape S K , eds. Saline water and gases in crystalline rocks [ C ]. Geological Association of Canadian Special Papers , 33 : 19-38.
- Fritz P and Frape S K. 1982. Saline groundwaters in the Canadian Shield. A first overview [ J ]. *Chemical Geology* , 36 : 179-190.
- Fritz P and Frape S K. 1987. Saline water and gases in crystalline rocks [ M ]. Geological Association of Canada Special Paper No. 33. Ottawa , Canada.
- Fu Q , Li Y , Zhang G D and Liu Y R. 2007. Evidence of transgression

- lake of Subei Basin during Late Cretaceous and Paleocene Epoch and its geological significance[ J ]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25( 3 ): 380-385( in Chinese with English abstract ).
- Gan D F. 1997. The geological conditions of the formation of oil and gas in the second subsidence zone of Neocathaysian rift[ J ]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2 : 7-22( in Chinese with English abstract ).
- Ge R Q, Song C C, Zhang C P, Wang R L, Zhang W D and Xu H Z. 2003. Restudy on the Shahejie Formation transgression of the Paleocene in Zhan-che Sag (Jiyang Depression)[ J ]. *Geological Journal of China Universities*, 9( 3 ): 450-457( in Chinese with English abstract ).
- Ge R Q. 2004. Occurrence and Geological significance of glauconite in Cenozoic Group of Jiyang Dpression[ J ]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22( 2 ): 276-280( in Chinese with English abstract ).
- Gilder S A, Keller G R, Luo M and Goodell P C. 1991. Timing and spatial distribution of rifting in China[ J ]. *Tectonophysics*, 197 : 225-243.
- Goldsmith M. 1976. Geothermal Development and the salton sea[ J ]. *Energy*, 1( 4 ): 367-373.
- Greene S, Battve N, Clark I, Kotzer T and Bottomley D. 2008. Canadian Shield brine from the Con Mine, Yellowknife, NT, Canada: Noble gas evidence for an evaporated Palaeozoic seawater origin mixed with glacial meltwater and Holocene recharge[ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 : 4008-4019.
- Hallam. A. 1977. Secular changes in marine inundation of USSR and North America through the Phanerozoic[ J ]. *Nature*, 269 : 769-772.
- Han F Q. 2001. The geochemistry of lithium in salt lake on Qinghai-Tibean Plateau[ J ]. *Journal of Salt Lake Research*, 9( 1 ): 55-61( in Chinese with English abstract ).
- Hancock J M and Kauffman E G. 1979. The great transgressions of the Late Cretaceous[ J ]. *Journal of the Geological Society*, 136 : 175-186.
- Hanor J S. 1994. Origin of saline fluids in sedimentary basin[ J ]. *Geological Society London Special Publications*, 78 : 151-174.
- Haq B U, Hardenbol J and Vail P R. 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassi[ J ]. *Science*, 235 : 1156-1167.
- Haq B U, Hardenbol J and Vail P R. 1988. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level chang[ J ]. *The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, 42 : 71-108.
- Haq B U. 2014. Cretaceous eustasy revisited[ J ]. *Global and Planetary Change*, 113 : 44-58.
- Hardie L A. 1991. On the significance of evaporites[ J ]. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 19 : 131-168.
- He J Y and Yu S Y. Occurrence of glauconite in Lower Tertiary of northern Huanghua Depression[ J ]. *Earth Science*, 7( 1 ): 129-142 ( in Chinese with English abstract ).
- Hou D J, Huang Q H, Kong Q Y, Feng Z H and Huang F T. 1999. Transgression and generation of Low-matural hydrocarbon in Songliao Basin[ J ]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 21( 1 ): 26-28( in Chinese with English abstract ).
- Hou Y T, Chen D Q, Yang H R, He J D, Zhou Q C and Tian M J. 1982. Cretaceous-Quaternary ostracoda fauna in Jiangsu Province[ J ]. Beijing: Geological Publishing House. 1-39( in Chinese ).
- Hu W Z, Li J L and Feng H. 2006. An analysis on ore-controlling factors and ore-searching prospect of Nankeng gypsum deposit in the Jitai Basin[ J ]. *Journal of East China Institute of Technology* ( z1 ): 182-186( in Chinese with English abstract ).
- Hua R M and Mao J W. 1999. A preliminary discussion on the Mesozoic Metallogenic explosion in East Chin[ J ]. *Mineral Deposits*, 18( 4 ): 300-308( in Chinese with English abstract ).
- Huang H, Zhang S Y and Zhang L Y. 2015. Mineral characteristics and resources assessment of the deep brine in Qianjiang Formation, Jiangnan Depression[ J ]. *Journal of Salt Lake Research*, 23( 2 ): 34-43( in Chinese with English abstract ).
- Huang S J and Zeng Y F. 1997. Geochemical characteristics of deep formation brine, Leikoupo Formation of Middle Triassic Sichuan Province[ J ]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15( 3 ): 67-71( in Chinese with English abstract ).
- Huang Y J and Wang C S. 2015. Progress of reactive iron burial in the marine and terrestrial sediments with its implications to the genesis of source rock in Songliao Basin[ J ]. *Chinese Journal of Nature*, 37 ( 2 ): 79-85( in Chinese with English abstract ).
- Jiangnan oilfield research institute. 2010. Investigation and evaluation of Paleogene potassium-rich brines in Jiangling depression[ R ].
- Katz A, Starinsky A and Marion G M. 2011. Saline waters in basement rocks of the Kaapvaal Craton, South Afric[ J ]. *Chemical Geology*, 289 : 163-170.
- Ke L S. 1974. Geochemistry of oil field water[ M ]. Beijing: Petroleum Industry Press. 1-102( in Chinese ).
- Keller G. 2008. Cretaceous climate, volcanism, impacts, and biotic effects[ J ]. *Cretaceous Research*, 29 : 754-771.

- Khaska M, Salle C L G L, Videau G, Flinois JS, Frappe S, Team A and Verdoux P. 2015. Deep water circulation at the northern Pyrenean thrust: Implication of high temperature water-rock interaction processes on the mineralization of major spring water in an overthrust area [ J ]. *Chemical Geology*, 419: 114-131.
- Klein-BenDavid O, Sass E and Katz A. 2004. The evolution of marine evaporitic brines in inland basins: The Jordan-Dead Rift valley [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68( 8 ): 1763-1775.
- Kloppmann W, Négrel P, Casanova J, Klinge H, Schelkes K and Guerrot C. 2001. Halite dissolution derived brines in the vicinity of a Permian salt dome (N German Basin). Evidence from boron, strontium, oxygen, and hydrogen isotopes [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65( 22 ): 4087-4101.
- Lahermo P W and Lampen P H. 1987. Brackish and saline groundwaters in Finland [ A ]. In: Fritz P and Frappe S K eds. In Saline Water and Gases in Crystalline Rocks [ C ]. Geological Association of Canada-Special Paper 33: 103-110.
- Leybourne M I and Goodfellow W D. 2007. Br/Cl ratios and O, H, C, and B isotopic constrains on the origin of saline waters from eastern Canada [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 2209-2223.
- Li H N, Wang C L, Liu C L, Yang S G, Xu H M, Yu X C and Liu J L. 2015. Paleotemperatures of Early Eocene in the Jiangling depression: Evidence from fluid inclusions in thenardite [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 89( 11 ): 2019-2027 ( in Chinese with English abstract ).
- Li S G. 1973. Introduction to geomechanics [ M ]. Beijing: Science Press ( in Chinese ).
- Li T W, Tan H B and Fan Q S. 2006. Hydrochemical characteristics and genesis of oilfield brines in western Qaidam Basin [ M ]. Beijing: Geological Publishing Press. 488-491 ( in Chinese ).
- Li X H. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in southeast China [ J ]. *Journal of Asian Earth Science*, 18: 293-305.
- Li Y X, Lu Z S and Wang D. 1997. Study on continental trace fossils and sedimentary environment in Liaohe Basin [ M ]. Beijing: Petroleum Industry Press. 1-46 ( in Chinese ).
- Li Z Y. 1999. Some geological characteristics of concentrated distribution area of epithermal deposits in China [ J ]. *Earth Science Frontiers*, 6( 1 ): 163-170 ( in Chinese with English abstract ).
- Lin J X. 1979. Paleocene foraminiferal fauna of Jinghezhen Formation in the Jiangnan Basin, central China, and its palaeogeographical significance [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 24: 1132-1135.
- Lin W and Wang Q C. 2006. Late Mesozoic extensional tectonics in the North China Block: a crustal response to subcontinental mantle remova [ J ]? *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 117( 6 ): 287-297.
- Lin Y T, Tang Q, Xiong S J and Song H B. 1997. Geochemical characteristics and genetic classification of hydrogen-oxygen isotopes in brines in Sichuan Basin [ J ]. *Geology Geochemistry*, 3( 4 ): 20-26 ( in Chinese with English abstract ).
- Lin Y T. 2001. Conditions for Sichuan basin to trap Triassic brine [ J ]. *Geology of Chemical Minerals*, ( 1 ): 22-23 ( in Chinese with English abstract ).
- Lin Y T, He J Q and Ye M C. 2002. Distribution types of characters of potassium-bearing brine resources in Sichuan Basin [ J ]. *Geology of Chemical Minerals*, 24( 4 ): 215-247 ( in Chinese with English abstract ).
- Lin Y T, Yao Y C, Kang Z H and Wang N J. 2004. Study on the geochemical characteristics and resource significance of the highly mineralized potassium-rich brine in the Sichuan Xuanda salt Basin [ J ]. *Journal of Salt Lake Research*, 12( 1 ): 8-17 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu C L, Wang M L and Jiao P C. 1999. Hydrogen, oxygen, strontium and sulfur isotopic geochemistry and potash-forming material sources of Lop Nur Salt Lake, Xinjiang [ J ]. *Mineral Deposits*, 18( 3 ): 268-275 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu C L, Zhao Q H and Wang P X. 2002. Water chemistry of the Paleogene Dongying lake: Evidence from fossil assemblages and shell isotopes [ J ]. *Acta Geoscientica Sinica*, 23( 3 ): 230-242 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu C L, Wang M L, Jiao P C and Chen Y Z. 2009. The probing of regularity and controlling factors of potash deposits distribution in Lop Nur Salt Lake, Xinjiang [ J ]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30( 6 ): 796-802 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu C L. 2013. Characteristics and formation of potash deposits in continental rift Basin: A review [ J ]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34( 5 ): 515-527 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu C L, Wang C L, Xu H M, Liu B K, Shen L J, Wang L C and Zhao Y J. 2013. Research progress on potash mineralogy in evaporates in Jiangling Depression [ J ]. *Mineral Deposits*, 32( 1 ): 221-222 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu J L, Wang C L, Liu C L, Chen B, Xu H M, Yu X C and Li H N. 2015. Geochemical characteristics of the Shashi Formation in Sha 3 well of the Jiangling Depression and its indication for potash formation [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 89( 11 ): 2196-2202 ( in Chinese with English abstract ).

- Liu Q, Chen Y H, Li Y C, Lan Q C, Yuan H R and Yan D L. 1987. Mesozoic-Cenozoic terrigenous clastic-chemical rock salt deposits in China [M]. Beijing: Science and Technology Press (in Chinese).
- Liu Q M and He L Z. 1982. Sedimentary characteristics and forming conditions of rock salt deposits in Qingjiang basin [J]. China Well and Rock Salt, (1): 11-15 (in Chinese).
- Liu R X. 1992. Geochronology and geochemistry of the Cenozoic volcanic rocks in China [M]. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- Liu Y H and Deng T L. 2006. Progress on the process and technique of lithium recovery from salt lake brines around the world [J]. World Science Technology Research and Development, 28(5): 69-75 (in Chinese with English abstract).
- Lowenstein T K, Hardie L A, Timofeeff M N and Demico R V. 2003. Secular variation in seawater chemistry and the origin of calcium chloride basinal brines [J]. Geology, 31(10): 857-860.
- 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: 71-94.
- Lu Q Y. 1991. Characteristics of Cretaceous sedimentation in Taihe Depression, Jitai Basin, Jiangxi Province [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 15(5): 395-398 (in Chinese).
- Ma L C, Huang H, Zhang L Y, Liu C L, Sun M G and Niu L. 2015. Characteristics of Paleogene deep potassium-rich brines in the Qianjiang Depression, Hubei Province [J]. Acta Geologica Sinica, 89(11): 2114-2121 (in Chinese with English abstract).
- Ma Y S, Chen H D and Wang G L. 2009. Atlas of tectono-sequence lithofacies Paleogeography [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Mao J W and Li Y Q. 2001. Fluid inclusions of the Dongping gold telluride deposit in Hebei Province, China: Involvement of mantle fluid in Metallogenesis [J]. Mineral Deposits, 20(1): 23-36 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W and Li X F. 2004a. Mantle-derived fluids in relation to ore-forming and oil-forming process [J]. Mineral Deposits, 23(4): 520-532 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Li X X, Zhang C Q and Mei Y X. 2004b. Mesozoic large-scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China [J]. Earth Science Frontiers, 11(2): 45-56 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Li X X, Zhang Z H, Wang Y T, Wang Z L, Zhao C S, Yang F Q and Li H M. 2005. Geodynamic process and metallogeny: History and present research trend, with a special discussion on continental accretion and related metallogeny throughout geological history in South China [J]. Mineral Deposits, 24(3): 193-205 (in Chinese with English abstract).
- Mao S Z, Tong L F and Wang C F. 1995. Paleogene terrestrial dinoflagellate and other planktonic algae and oil and gas exploration in Henan [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese).
- Matraj J M and Fontes J C. 1990. Origin of the oil-field brines in the Paris basin [J]. Geology, 18: 501-504 (in Chinese with English abstract).
- Matsumoto T. 1977. On the so-called Cretaceous transgressions [J]. Palaeontological Society of Japan-Special Paper, 21: 75-84.
- Mcarthur J M, Turner J, Lyons W B and Thirlwall M F. 1989. Salt sources and water-rock interaction on the Yilgarn Block, Australia: Isotopic and major element tracers [J]. Applied Geochemistry, 4: 79-92.
- Meng F W, Galamay A R, Yang C H, Li Y P and Zhuo Q G. 2014. The major composition of a middle-late Eocene salt lake in the Yunyung depression of Jiangnan Basin of Middle China based on analyses of fluid inclusions in Halite [J]. Journal of Asian Earth Science, 85: 97-105.
- Miller K G, Sugarman P J, Browning J V, Kominz M A, Olsson R K, Feigenson M D and Hernández J C. 2004. Upper Cretaceous sequences and sea-level history, New Jersey coastal plain [J]. Geological Society of America Bulletin, 116: 368-393.
- Miller K G, Wright J D, Katz M E, Browning J V, Cramer B, Wade B S and Mizintseva S F. 2008. A view of Antarctic ice-sheet evolution from sea-level and deep-sea isotope changes during the Late Cretaceous-Cenozoic [A]. In: Cooper A K and Barrett P J eds. Antarctica: A keystone in a changing world: Proceedings of the 10th International Symposium on Antarctic Earth Sciences [C]. Washington, DC: The National Academies Press. 55-70.
- Mou X H, Dong Z X, Zhang J, Li H S and Li H J. 2007. The finding of coccolith limestone and its environment significance in Qikou Depression in Shahejie 1 Member [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 29(5): 45-56 (in Chinese with English abstract).
- Nishio Y, Okamura K, Tanimizu M, Ishikawa T and Sano Y. 2010. Lithium and strontium isotopic systematics of waters around Ontake volcano, Japan: Implications for deep-seated fluids and earthquake swarms [J]. Earth and Planetary Science Letters, 297: 567-576.
- Nordstrom D K, Ball J W, Donahoe R J and Whittemore D. 1989a. Groundwater chemistry and water-rock interactions at Stripa [J].

- Geochimica et Cosmochimica Acta, 53 : 1727- 1740.
- Nordstrom D K, Lindblom S, Donahoe R J and Barton C C. 1989b. Fluid inclusions in the Stripa granite and their possible influence on the groundwater chemistry[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 53 : 1741-1755.
- Pan D Y, Liu C L and Xu H M. 2011. Characteristics and formation of potassium-bearing brine in the deeper strata in depression in Hubei Jiangling Province[J]. Geology of Chemical Minerals, 33(3) : 65-71 (in Chinese with English abstract).
- Pei R F, Wang Y L, Li L and Wang H L. 2008. South China great granite province and its metallogenic series of Tungsten-Tin polymetallics[J]. China Tungsten Industry, 23(1) : 10-13.
- Peng T P, Wang Y J, Fan W M, Yu X B, Peng B X and Xu Z Y. 2006. <sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar geochronology and geochemistry of the early Tertiary basaltic rocks in the Jiangnan basin, China and its petrogenesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(6) : 1617-1626 (in Chinese with English abstract).
- Plank T. 1996. The brine of the earth[J]. Nature, 380 : 202-203.
- Qian Z Q, Qu Y H and Liu Q. 1994. Potash deposits[M]. Beijing : Geological Publishing Press (in Chinese).
- Qu J Y, Wu B H and Li J M. 1984. Statistical analysis of genesis of underground brine-Taking Qianjiang Depression as an example[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, (1) : 61-70 (in Chinese with English abstract).
- Qu Y H. 1982. Deep brines : A new origin of potash deposits[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1 : 7-14 (in Chinese with English abstract).
- Ren J S, Chen T Y and Niu B G. 1990. Tectonic evolution and mineralization of the continental lithosphere in eastern China and adjacent area[M]. Beijing : Science Press. 1-205 (in Chinese).
- Ren J Y and Yang W R. 1998. Lithospheric structure and tectonic magmatic evolution in eastern China[M]. Beijing : Atomic Energy Press. 1-12 (in Chinese).
- Ren J Y, Tamaki K, Li S T and Zheng J X. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent area[J]. Tectonophysics, 344 : 175-205.
- Sha J G, Hirano H, Yao X G and Pan Y H. 2008. Late Mesozoic transgressions of eastern Heilongjiang and their significance in tectonics, and coal and oil accumulation in northeast China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, palaeoecology, 263(3-4) : 119-130.
- Shi L C. 2015. Geological and geochemical characteristics of Yanshanian granitic plutons in the area of Nancun, Jiangxi province and its geological significance (Master 's thesis)[D]. Supervisor : Xie C F. Nanchang : East China Institute of Technology. 28-41 (in Chinese with English abstract).
- Shi Y Q and Chen D S. 1988. Characteristics of ore-controlling structure of tungsten and tin deposits in South China[J]. Mineral Resources and Geology, 2(1) : 70-75 (in Chinese with English abstract).
- Shu L S and Zhou X M. 2002. Late Mesozoic tectonism of southeast China[J]. Geological Review, 48(3) : 249-260 (in Chinese with English abstract).
- Shu L S and Wang D Z. 2006. A comparison study of basin and range tectonics in the western North America and southeastern China[J]. Geological Journal of China Universities, 12(1) : 1-13 (in Chinese with English abstract).
- Shu L S. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. Geological Bulletin of China, 31(7) : 1035-1053 (in Chinese with English abstract).
- Sonnenfeld P. 1984. Brines and evaporates[M]. Orlando : Academic Press.
- Sun T. 2006. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes[J]. Geological Bulletin of China, 25(3) : 331-335 (in Chinese with English abstract).
- Tan H B, Cao C D, Li T W and Fan Q S. 2007. Hydrochemistry characteristics and Chemical evolution of oilfield brines of the Paleogene and Neogene in western Qaidam Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 9(3) : 313-320 (in Chinese with English abstract).
- Tan H B, Ma H Z, Zhang X Y, Xu J X and Xiao Y K. 2009. Fractionation of chlorine isotope in salt mineral sequences and application : Research on sedimentary stage of ancient salt rock deposit in Tarim Basin and western Qaidam Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(4) : 955-962 (in Chinese with English abstract).
- Tan Z F and Zhang Q F. 1983. A preliminary study on the evolution and genetic mechanism of the Neocathaysian tectonic system in eastern China[J]. Acta Geologica Sinica, 1 : 43-51 (in Chinese with English abstract).
- Thompson A B. 1992. Water in the earth 's upper mantle[J]. Nature, 358 : 295-302.
- Thompson J M and Fournier R O. 1988. Chemistry and Geothermometry of Brine Produced From the Salton Sea Scientific Drill Hole, Imperial Valley, California[J]. Journal of Geophysical Research, 93(13) : 165-173.
- Tian Z Y. 1986. Tectonic evolution and promising areas for searching oil and gas in Middle Yangtze region[J]. Geotectonica et Metallogenia,

- 9(3):205-218( in Chinese with English abstract ).
- Tong C G. 1980. Some characteristics of petroleum geology of the rift system in eastern China[ J ]. *Acta Petrolei Sinica* , 1(4): 19-26( in Chinese with English abstract ).
- Tong G P , Jia X M , Zheng M P , Yuan H R , Liu J Y and Wang W M. 2002. Palynological evidence of Middle-Late Eocene climatic cycles in Jiangnan Basin[ J ]. *Acta Geoscientica Sinica* , 23(2): 159-164( in Chinese with English abstract ).
- United State Geological Survey. 2015. Mineral commodity summaries. [http //minerals. usgs. gov/minerals/pubs/mcs/](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/).
- Vengosh A , Chivas A R , Starinsky A , Kolodny Y , Zhang B Z and Zhang P X. 1995. Chemical and boron isotope compositions of non-marine brines from the Qaidam Basin , Qinghai , China[ J ]. *Chemical Geology* , 120 : 135-154.
- Vovk I F. 1987. Radiolytic salt enrichment and brines in the crystalline basement of the East European platform[ A ]. In : Fritz P and Frapet S K , eds. In *Saline Water and Gases in Crystalline rocks*[ C ]. Geological Association of Canada-Special Paper 33 : 197-210.
- Wang C L , Liu C L , Hu H B , Mao J S , Shen L J and Zhao H T. 2012. Sedimentary characteristics and its environmental significance of salt-bearing strata of the Member 4 of Paleocene Shashi Formation in southern margin of Jiangling Depression , Jiangnan Basin[ J ]. *Journal of Palaeogeography* , 14(2) : 165-175( in Chinese with English abstract ).
- Wang C L , Liu C L , Xu H M , Wang L C and Zhang L B. 2013a. Carbon and oxygen isotopes characteristics of Palaeocene saline lake facies carbonates in Jiangling Depression and their environmental significance[ J ]. *Acta Geoscientica Sinica* , 34(5) : 567-576( in Chinese with English abstract ).
- Wang C L , Liu C L , Xu H M , Wang L C and Zhang L B. 2013b. Homogenization temperature study of salt inclusions from the upper section of Shashi Formation in Jiangling Depression[ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 32(3) : 383-392( in Chinese with English abstract ).
- Wang D N and Zhao Y N. 1980. Late Cretaceous-Early Paleogene sporopollen assemblages of the Jiangnan basin and their stratigraphical significance[ J ]. *Proceeding of Stratigraphic Paleontology* , 2 : 121-171( in Chinese with English abstract ).
- Wang D Z. 2004. The study of granitic rocks in South China : Looking back and forward[ J ]. *Geological Journal of China Universities* , 10(3) : 305-314( in Chinese with English abstract ).
- Wang L X , Ma C Q , Zhang J Y , Chen L and Zhang C. 2008. Petrological and geochemical characteristics and petrogenesis of the Early Cretaceous Taohuashan-Xiaomoshan granites in northeastern Hunan province[ J ]. *Geological Journal of China Universities* , 14(3) : 334-349( in Chinese with English abstract ).
- Wang M L , Yang Z S and Liu C L. 1997. Potassium deposit of salt lake in northern Qaidam basin and its development prospect[ M ]. Beijing : Geological Publishing House. 33-51( in Chinese ).
- Wang M L , Liu C L , Jiao P C , Han W T , Song S S , Chen Y Z , Yang Z S , Fan W D , Li C H , Fen J X , Chen J Z , Wang X M , Yu Z H and Li Y W. 2001. Potash resources in Lop Nur salt lake[ M ]. Beijing : Geological Publishing House. 1-159( in Chinese ).
- Wang P J , Schneider W , Mattern Frank and Bian W H. 2002. The characteristics of transgressive sequence of terrigenous basin : Correlation between the Triassic in centroleuropen basin and the Cretaceous in Songliao basin of China[ J ]. *Journal of Mineralogy and Petrology* , 22(2) : 47-53( in Chinese with English abstract ).
- Wang P X. 1992. The use and misuse of microfossils in marine transgression studies[ J ]. *Quaternary Sciences* , 4 : 321-329( in Chinese with English abstract ).
- Winckler G , Aeschbach-Hertig W , Kipfer R , Botz R , Rübél A P , Bayer R and Stoffers P. 2001. Constraints on origin and evolution of Red Sea brines from helium and argon isotopes[ J ]. *Earth and Planetary Science Letters* , 184 : 671-683.
- Wu B H , Qi Z M , Wang M L and Qu J Y. 1980. Geochemistry of salt-bearing deposits in basin Q , Hubei province[ J ]. *Acta Geologica Sinica* , 4 : 324-333( in Chinese with English abstract ).
- Wu H , Xu Z Q , Ni S J and Zhang C J. 2011. A preliminary study on the relationship between large-scale low temperature metallogenesis and Uranium mineralization in southwestern China[ J ]. *Acta Mineralogica Sinica* , (S1) : 289-290( in Chinese with English abstract ).
- Wu X T , Lin Y L and Pan J N. 1997. Significance of ichnofaces and its corresponding well log patterns of Shahejie Formation in Dongpu depression[ J ]. *Journal of Palaeogeography* , 1(3) : 50-64( in Chinese with English abstract ).
- Wu X T and Ren Y L. 2004. The tertiary seawater and new reservoir probe in Dongpu depression as well as its surrounded basin[ J ]. *Acta Palaeontologica Sinica* , 43(1) : 147-154( in Chinese with English abstract ).
- Xiao Y K , Qi H P , Wang Y H and Jin L. 1994. Lithium isotopic compositions of brine , sediments and source water in Da Qaidam lake , Qinghai , China[ J ]. *Geochimica* , 23(4) : 329-338( in Chinese with English abstract ).

- English abstract ).
- Xiao Y K , Liu W G , Zhang Y M , Wang Y H and Shirodkar P V . 2000. Variations in isotopic compositions of chlorine in evaporation-controlled salt lake brines of Qaidam Basin , China[ J ]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology , 18( 2 ): 169-177.
- Xing W L and Chen Q S . 2013. Analysis of potash resources security in China[ J ]. China Mining Magazine , 22( 12 ): 11-14( in Chinese with English abstract ).
- Xu L X , Yan C D , Yu H L and Wang B Q . 1995. Chronology of Paleogene volcanic rocks in Jiangnan Basin[ J ]. Oil & Gas Geology , 16( 2 ): 132-137( in Chinese with English abstract ).
- Xu X S and Xie X . 2005. Late Mesozoic-Cenozoic basaltic rocks and crust-mantle interaction SE China[ J ]. Geological Journal of China Universities , 11( 3 ): 318-334( in Chinese with English abstract ).
- Xu Y G , Ma J L , Frey F A , Feigenson M D and Liu J F . 2005. Role of lithosphere interaction in the genesis of Quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong , western North China Crator[ J ]. Chemical Geology , 224 : 247-271.
- Xu Y G and Fan Q C . 2015. Cenozoic volcanism in eastern China : Review and perspectives[ J ]. Bulletin of Mineralogy , Petrology and Geochemistry , 34( 4 ): 682-689( in Chinese with English abstract ).
- Yan M , Zhong H and Zhang Y . 2006. Progress of the separation of Rb and Cs from Brin[ J ]. Journal of Salt Lake Research , 14( 3 ): 67-71 ( in Chinese with English abstract ).
- Yang R J , Li Y W and Tian H Y . 2014. Analysis and countermeasure study on environmental impact of lithium resources development in Qinghai saline lake[ J ]. Environment and Sustainable Development , ( 2 ): 91-91( in Chinese with English abstract ).
- Yao Q C and Lou J S . 2008. An analysis of hydrocarbon pooling conditions in Yuanjiang sag , the Dongting Basin[ J ]. Natural Gas Industry , 28( 9 ): 37-40( in Chinese with English abstract ).
- Yu S S . 1994. The hydrochemical characteristics of the deep brines in Basin Q , Hubei province[ J ]. Journal of Salt Lake Research , 2( 1 ): 6-17( in Chinese with English abstract ).
- Yu X C , Wang C L , Liu C L , Zhang Z C , Xu H M , Huang H , Xie T X , Li H N and Liu J L . 2015. Sedimentary characteristics and depositional model of a Paleocene-Eocene salt lake in the Jiangling Depression , China[ J ]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology , 33( 6 ): 1426-1435.
- Yu X Q , Shu L S , Deng P , Wang B and Zu F P . 2003. The sedimentary features of the Jurassic-Tertiary terrestrial strata in southeast China[ J ]. Journal of Stratigraphy , 27( 3 ): 254-263( in Chinese with English abstract ).
- Yu X Q , Shu L S , Deng G H , Wang B and Zu F P . 2005. Geochemical features and tectonic significance of the alkali-basalts from Ji 'an-Taihe Basin , Jiangxi province[ J ]. Geoscience , 19( 1 ): 133-140( in Chinese with English abstract ).
- Yu X X , Wang C L , Liu C L , Zhang Z C , Xu H M and Xie T X . 2014. REE geochemical characteristics of sedimentary rocks in Jiangling depression and their geological significance[ J ]. Mineral Deposits , 33( 5 ): 1057-1068( in Chinese with English abstract ).
- Yuan W F , Chen S Y and Zeng C M . 2005. Research development and prospects on Paleogene sea transgression in Bohai bay Basin[ J ]. Acta Sedimentologica Sinica , 23( 4 ): 604-611( in Chinese with English abstract ).
- Zachos J , Pagani M , Sloan L , Thomas E and Billups K . 2001. Trends , Rhythms , and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present[ J ]. Science , 292 : 689-693.
- Zak I and Bentor Y K . 1968. Some new data on the salt deposits of the Dead Sea area , Israel , Symposium on Geology of Saline Deposits , Hanover[ J ]. Unesco : Earth Sciences , 7 : 137-146.
- Zhai M , Fan Q , Zhang H , Sui J and Shao J A . 2007. Lower crustal processes leading to Mesozoic lithospheric thinning beneath eastern North China : Underplating , replacement and delamination[ J ]. Lithos , 96( 1 ): 36-54.
- Zhang Y Q , Zhao Y , Dong S W and Yang N . 2004. Tectonic evolution stages of the Early Cretaceous rift basins in eastern China and adjacent areas and their geodynamic background[ J ]. Earth Science Frontiers , 11( 3 ): 123-132( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Y Q , Li J L , Zhang T , Dong S W and Yuan J Y . 2008. Cretaceous to Paleocene tectono-sedimentary evolution of the Jiaolai Basin and the contiguous area of the Shandong peninsula ( North China ) and its geodynamic implications[ J ]. Acta Geologica Sinica , 82( 9 ): 1229-1257( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Y S , Wang G L , Yang Y Q and Qi Z X . 2005. Rhythms of saline lake sediments of the Paleogene and their paleoclimatic significance in Qianjiang sag , Jiangnan Basin[ J ]. Journal of Palaeogeography , 7( 4 ): 461-470( in Chinese with English abstract ).
- Zhou X M and Li X W . 2000. The model of lithospheric reduction and basalt underplating and petrogenesis of Late Mesozoic igneous rocks[ J ]. Progress in Natural Science , 10( 3 ): 240-237( in Chinese ).

#### 附中文参考文献

陈郁华 . 1983. 黄海水 25℃ 恒温蒸发时的盐析序列及某些微量元素

- 的分布规律[J]. 地质学报, (4): 379-390.
- 储澄. 1983. 湘澧盐矿的膏盐类矿物成因探讨[J]. 湖南地质, 2(2): 44-52.
- 樊启顺, 马海州, 谭红兵, 许建新, 李廷伟. 2007. 柴达木盆地西部卤水特征及成因探讨[J]. 地球化学, 36(6): 601-611.
- 傅强, 李益, 张国栋, 刘玉瑞. 2007. 苏北盆地晚白垩世—古新世海侵湖泊的证据及其地质意义[J]. 沉积学报, 25(3): 380-385.
- 关德范. 1977. 新华夏系第二沉降带油、气形成的地质条件[J]. 大庆石油学院学报, 2: 7-22.
- 葛瑞全, 宋传春, 张淳萍, 王如良, 张文多, 徐洪泽. 2003. 济阳沾车凹陷古近系沙河街组海侵的再认识[J]. 高校地质学报, 9(3): 450-457.
- 葛瑞全. 2004. 济阳凹陷新生界海绿石的存在及其地质意义[J]. 沉积学报, 22(2): 276-280.
- 韩凤清. 2001. 青藏高原盐湖 Li 地球化学[J]. 盐湖研究, 9(1): 55-61.
- 何镜宇, 余素玉. 1982. 黄骅坳陷下第三系的海绿石[J]. 地球科学, 7(1): 129-142.
- 侯读杰, 黄清华, 孔庆云, 冯子辉, 黄福棠. 1999. 松辽盆地白垩纪海侵事件与油气的早期生成[J]. 江汉石油学报, 21(1): 26-28.
- 侯佑棠, 陈德琼, 杨恒仁, 何俊德, 周全春, 田慕劬. 1982. 江苏地区白垩纪—第四纪介形类动物群[M]. 北京: 地质出版社. 1-39.
- 胡为正, 李均良, 冯晔. 2006. 吉泰盆地南坑石膏矿床控矿因素分析及找矿前景[J]. 东华理工学院学报(21): 182-186.
- 华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发[J]. 矿床地质, 18(4): 300-308.
- 黄华, 张士元, 张连元. 2015. 潜江凹陷潜江组深层卤水矿产特征与资源评价[J]. 盐湖研究, 23(2): 34-43.
- 黄思静, 曾允孚. 1997. 四川成都某深层富钾卤水的地球化学特征及成因[J]. 沉积学报, 15(3): 67-71.
- 黄永建, 王成善. 2015. 海陆相活性铁埋藏研究进展及其对松辽盆地烃源岩成因的启示[J]. 自然杂志, 37(2): 79-85.
- 江汉油田研究院. 2010. 江陵古近纪盐盆地富钾卤水调查评价[R].
- 柯林斯. 1974. 油田水地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社. 1-102.
- 李朝阳. 1999. 中国低温热液矿床集中分布区的一些地质特点[J]. 地学前缘, (1): 163-170.
- 李皓楠, 王春连, 刘成林, 杨申谷, 徐海明, 余小灿, 刘锦磊. 2015. 江陵凹陷始新世早期古气温: 来自无水芒硝流体包裹体的证据[J]. 地质学报, 89(11): 2019-2027.
- 李四光. 1973. 地质力学概论[M]. 北京: 科学出版社.
- 李廷伟, 谭红兵, 樊启顺. 2006. 柴达木盆地西部油田水卤水水化学特征及成因分析[M]. 北京: 地质出版社. 488-491.
- 李应暹, 卢宗盛, 王丹. 1997. 辽河盆地陆相遗迹化石与沉积环境研究[M]. 北京: 石油工业出版社. 1-46.
- 林景星. 1979. 江汉盆地第三系荆河镇组有孔虫动物群及其古地理意义[J]. 科学通报, 24: 1132-1135.
- 林耀庭, 唐庆, 熊淑君, 宋鹤彬. 1997. 四川盆地卤水的氢、氧、同位素地球化学特征及其成因分类研究[J]. 地质地球化学, 3(4): 20-26.
- 林耀庭. 2001. 四川盆地三叠纪卤水成藏条件[J]. 化工矿地质, (1): 22-23.
- 林耀庭, 何金权, 叶茂才. 2002. 四川盆地卤水钾资源分布类型及其品质的研究[J]. 化工矿地质, 24(4): 215-247.
- 林耀庭, 姚有成, 康正华, 王宁军. 2004. 四川宣达盐盆富钾富矿卤水地球化学特征及资源意义研究[J]. 盐湖研究, 12(1): 8-17.
- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程. 1999. 新疆罗布泊盐湖氧氢锶硫同位素地球化学及钾矿成矿物质来源[J]. 矿床地质, 18(3): 268-275.
- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程, 陈永志. 2009. 罗布泊盐湖钾盐矿床分布规律及控制因素分析[J]. 地球学报, 30(6): 796-802.
- 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, 王春连, 徐海明, 刘宝坤, 沈立建, 王立成, 赵艳军. 2013. 江陵凹陷古近系蒸发岩中钾盐矿物研究进展[J]. 矿床地质, 32(1): 221-222.
- 刘传联, 赵泉鸿, 汪品先. 2002. 从化石群及壳体同位素看古近纪东营湖湖水化学[J]. 地球学报, 23(3): 230-242.
- 刘锦磊, 王春连, 刘成林, 陈波, 徐海明, 余小灿, 李皓楠. 2015. 江陵凹陷沙坪3井古近系沙市组地球化学特征及成钾指示[J]. 地质学报, 89(11): 2196-2202.
- 刘庆民, 何烈珍. 1982. 清江盆地岩盐矿床沉积特征与形成条件[J]. 中国井矿盐, (1): 11-15.
- 刘群, 陈郁华, 李银彩, 蓝庆春, 袁鹤然, 闫东兰. 1987. 中国中、新生代陆源碎屑—化学岩型盐类沉积[M]. 北京: 科学技术出版社.
- 刘若新. 1992. 中国新生代火山岩年代学与地球化学[M]. 北京: 地震出版社.
- 刘元会, 邓天龙. 2006. 国内外从盐湖卤水中提锂工艺技术研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 28(5): 69-75.
- 卢秋芽. 1991. 江西吉泰盆地泰和坳陷白垩纪沉积特征[J]. 物探与化探, 15(5): 395-398.
- 马黎春, 黄华, 张连元, 刘成林, 孙明光, 牛磊. 2015. 湖北潜江凹陷古近系深层富钾卤水矿床特征及成因[J]. 地质学报, 89(11): 2114-2121.

- 马永生,陈洪德,王国力. 2009. 中国南方构造—层序岩相古地理图集[M]. 北京: 科学出版社.
- 毛景文,李荫清. 2001. 河北省东坪碛化物金矿床流体包裹体研究: 地幔流体与成矿关系[J]. 矿床地质, 20(1): 23-36.
- 毛景文,李晓峰. 2004a. 深部流体及其与成藏成矿关系研究现状[J]. 矿床地质, 23(4): 520-532.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,张长青,梅燕雄. 2004b. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. 地学前缘, 11(2): 45-56.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,张作衡,王义天,王志良,赵财胜,杨富全,李厚民. 2005. 大陆动力学演化与成矿研究: 历史与现状—兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成矿作用[J]. 矿床地质, 24(3): 193-205.
- 茅绍智,董林芬,王从凤. 1995. 河南早第三纪陆相沟鞭藻及其他浮游藻类与油气勘探[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 美国地质调查局. 2015. 矿产商品概要. 网址: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>.
- 牟晓慧,董兆雄,张建,李会慎,李宏军. 2007. 岐口凹陷沙一段砾石灰岩的发现及其环境意义[J]. 西南石油大学学报, 29(5): 45-56.
- 潘源敦,刘成林,徐海明. 2011. 湖北江陵凹陷深层高温富钾卤水特征及其成因探讨[J]. 化工矿产地质, 33(3): 65-71.
- 裴荣富,王永磊,李莉,王浩琳. 2008. 华南大花岗岩省及其与钨锡多金属区域成矿系列[J]. 中国钨业, 23(1): 10-13.
- 彭头平,王岳军,范蔚茗,喻晓冰,彭冰霞,徐征语. 2006. 江汉盆地早第三纪玄武岩质岩石<sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar年代学和地球化学特征及其成因意义[J]. 岩石学报, 22(6): 1617-1626.
- 钱自强,曲懿华,刘群. 1994. 钾盐矿床[M]. 北京: 地质出版社.
- 渠洁瑜,吴必豪,李黎明. 1984. 地下卤水成因类型的统计分析——以潜江凹陷为例[J]. 工程勘察, (1): 61-70.
- 曲懿华. 1982. 钾盐矿床母液来源的新途径—深卤补给[J]. 矿物岩石, 1: 7-14.
- 任纪舜,陈廷愚,牛宝贵. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社. 1-205.
- 任纪舜,杨巍然. 1998. 中国东部岩石圈结构与构造岩浆演化[M]. 北京: 原子能出版社. 1-12.
- 宋昊,徐争启,倪师军,张成江. 2011. 中国西南大面积低温成矿作用与铀矿成矿关系初探[J]. 矿物学报, (S1): 289-290.
- 舒良树,王德滋. 2006. 北美西部与中国东南部盆岭构造对比研究[J]. 高校地质学报, 12(1): 1-13.
- 舒良树,周新民. 2002. 中国东南部晚中生代构造格架[J]. 地质论评, 48(3): 249-260.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1035-1053.
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. 地质通报, 25(3): 331-335.
- 石连成. 2015. 江西南村地区燕山期花岗岩体地质地球化学特征及其地质意义(硕士学位论文[D]. 导师: 谢财富. 南昌: 东华理工大学. 28-41.
- 石玉泉,陈德松. 1988. 华南钨锡矿床的构造控矿特征[J]. 矿产与地质, 2(S1): 70-75.
- 谭红兵,曹成东,李廷伟,樊启顺. 2007. 柴达木盆地西部古近系和新近系油田卤水资源水化学特征及化学演化[J]. 古地理学报, 9(3): 313-320.
- 谭红兵,马海州,张西营,许建新,肖应凯. 2009. 蒸发岩序列中氯化物盐的氯同位素分馏效应及应用——兼论塔里木盆地、柴达木盆地古代岩盐的沉积阶段[J]. 岩石学报, 25(4): 955-962.
- 谭忠福,张启富. 1983. 中国东部新华夏系的演化规律及其成因机制的初步探讨[J]. 地质学报, 1: 43-51.
- 田在艺. 1986. 中扬子区构造演化规律与今后油气勘探新领域[J]. 大地构造与成矿学, 9(3): 205-218.
- 童崇光. 1980. 中国东部裂谷系盆地的石油地质特征[J]. 石油学报, 1(4): 19-26.
- 童国榜,贾秀梅,郑绵平,袁鹤然,刘俊英,王伟铭. 2002. 江汉盆地始新世中晚期气候变化周期性的孢粉学证据[J]. 地球学报, 23(2): 159-164.
- 王春连,刘成林,胡海兵,毛劲松,沈立建,赵海彤. 2012. 江汉盆地江陵凹陷南缘古新统沙市组四段含盐岩系沉积特征及其沉积环境意义[J]. 古地理学报, 14(2): 165-175.
- 王春连,刘成林,徐海明,王立成,张林兵. 2013a. 江陵凹陷古新世盐湖沉积碳酸盐碳同位素组成及其环境意义[J]. 地球学报, 34(5): 567-576.
- 王春连,刘成林,徐海明,王立成,张林兵. 2013b. 江陵凹陷沙市组上段石盐包裹体测温学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 32(3): 383-392.
- 王大宁,赵英娘. 1980. 江汉盆地晚白垩世—早第三纪早期孢粉组合特征及其地层意义[J]. 地层古生物论文集, 2: 121-171.
- 王德滋. 2004. 华南花岗岩研究的回顾与展望[J]. 高校地质学报, 10(3): 305-314.
- 王弼力,刘成林,焦鹏程,韩蔚田,宋松山,陈永志,杨智琛,樊卫东,李廷祺,李长华,冯金星,陈建忠,王新民,于志鸿,李亚文. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源[M]. 北京: 地质出版社. 1-159.
- 王弼力,杨智琛,刘成林. 1997. 柴达木盆地北部盐湖钾矿床及其开发前景[M]. 北京: 地质出版社. 33-51.

- 王连训,马昌前,张金阳,陈玲,张超. 2008. 湘东北早白垩世桃花山-小磨山花岗岩体岩石地球化学特征及成因[J]. 高校地质学报, 14(3):334-349.
- 汪品先. 1992. 微体化石在海侵研究中的应用与错用[J]. 第四纪研究, 4:321-329.
- 王璞, Schneider W, Mattern F, 边伟华. 2002. 陆相盆地中的海侵层序特征: 中欧盆地三叠系与松辽盆地白垩系对比研究[J]. 矿物岩石, 22(2):47-53.
- 吴必豪, 祁佐明, 王弼力, 渠洁瑜. 1980. 湖北Q盆地含盐系地球化学的研究[J]. 地质学报, 4:324-333.
- 吴贤涛, 林又玲, 潘结南. 1997. 东濮凹陷沙河街组痕迹相及其对应的测井图型[J]. 古地理学报, 1(3):50-64.
- 吴贤涛, 仁义来. 2004. 渤海湾盆地古近纪海水通道与储层探析[J]. 古生物学报, 43(1):147-154.
- 肖应凯, 祁海平, 王蕴慧, 金琳. 1994. 青海大柴达木湖卤水、沉积物和水源水中的锂同位素组成[J]. 地球化学, 23(4):329-338.
- 邢万里, 陈其慎. 2013. 中国钾资源安全分析[J]. 中国矿业, 22(12):11-14.
- 徐论勋, 阎春德, 俞惠隆, 王宝清. 1995. 江汉盆地地下第三系火山岩[J]. 石油与天然气地质, 16(2):132-137.
- 徐夕生, 谢昕. 2005. 中国东南部晚中生代—新生代玄武岩与壳幔作用[J]. 高校地质学报, 11(3):318-334.
- 徐义刚, 樊祺诚. 2015. 中国东部新生代火山岩研究回顾与展望[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(4):682-689.
- 杨荣金, 李彦武, 田海燕. 2014. 青海盐湖锂资源开发的环境影响分析及对策研究[J]. 环境与可持续发展, (2):91-91.
- 闫明, 钟辉, 张艳. 2006. 卤水中分离提取铷、铯的研究进展[J]. 盐湖研究, 14(3):67-71.
- 姚秋昌, 楼基胜. 2008. 洞庭盆地沅江凹陷油气成藏条件分析[J]. 天然气工业, 28(9):37-40.
- 于升松. 1994. 湖北江汉盆地潜江凹陷深层地下卤水水文地球化学研究[J]. 盐湖研究, 2(1):6-17.
- 余小灿, 王春连, 刘成林, 张招崇, 徐海明, 谢腾骁. 2014. 江陵凹陷古新统沉积岩稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 33(5):1057-1068.
- 余心起, 舒良树, 邓平, 王彬, 祖辅平. 2003. 中国东南部侏罗纪-第三纪陆相地层沉积特征[J]. 地层学杂志, 27(3):254-263.
- 余心起, 舒良树, 邓国辉, 王彬, 祖辅平. 2005. 江西吉泰盆地碱性玄武岩的地球化学特征及构造意义[J]. 现代地质, 19(1):133-140.
- 袁文芳, 陈世悦, 曾昌民. 2005. 渤海湾盆地古近纪海侵问题研究进展及展望[J]. 沉积学报, 23(4):604-611.
- 张永生, 王国力, 杨玉卿, 漆智先. 2005. 江汉盆地潜江凹陷古近系盐湖沉积盐韵律及其古气候意义[J]. 古地理学报, 7(4):461-470.
- 张岳桥, 李金良, 张田, 董树文, 袁嘉音. 2008. 胶莱盆地及其邻区白垩纪—古近世沉积构造演化历史及其区域动力学意义[J]. 地质学报, 82(9):1229-1257.
- 张岳桥, 赵越, 董树文, 杨农. 2004. 中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化阶段[J]. 地学前缘, 11(3):123-132.
- 周新民, 李显武. 2000. 中国东南部晚中生代火成岩成因、岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式[J]. 自然科学进展, 10(3):240-237.