

苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组一段元素地球化学特征及其地质意义

张妮¹⁾, 林春明¹⁾, 周健²⁾, 陈顺勇¹⁾, 张猛¹⁾, 刘玉瑞³⁾, 董桂玉³⁾

1) 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京, 210093;

2) 中国石化胜利油田分公司西部新区研究中心, 山东东营, 257000;

3) 中石化江苏油田分公司地质科学研究院, 江苏扬州, 225009

内容提要:苏北盆地高邮凹陷所经历的风化作用以物理风化为主, 化学风化程度很弱。其中南部陡坡带的大部分地区所经历化学风化程度相对北部缓坡带较强, 说明古气候条件更为温暖潮湿; 北部缓坡带及黄珏、邵伯地区所经历的物理风化作用相对较强且差异较大, 说明曾经历较强的构造运动。研究区源岩主要为长英质物质和再旋回沉积物质, 受中基性物质的影响较小。高邮凹陷边缘及吴堡低凸起附近地区戴一段下部地层具有下伏阜宁组地层的海相地化特征, 因此研究区物源中可能有较多部分来自基底母岩被剥蚀和再旋回沉积的产物。地化数据反映研究区构造背景为安第斯型活动大陆边缘, 由于地史及动力学机制的差异, 其构造背景有别于东太平洋典型的安第斯型活动大陆边缘, 可反映我国东部大陆边缘特殊的地体构造特征。

关键词:苏北盆地; 高邮凹陷; 地球化学; 物源; 风化作用; 构造背景

苏北盆地属苏北-南黄海盆地西部的陆上部分, 其内中生界沉积厚度大且分布广, 高邮凹陷是苏北盆地油气最富集的一个凹陷, 前人对苏北盆地高邮凹陷戴南组的研究主要集中在古生物、层序地层、油气藏、沉积相等方面, 随着戴南组勘探和研究程度的提高, 展示了该区戴南组具备较好的构造-岩性油气藏的勘探前景, 但整个苏北盆地在地球化学领域的研究程度很低。研究区所在的下扬子盆地是中国南方海相油气勘探领域除四川盆地外唯一获得工业性规模储量的区域, 因具有特殊的构造位置和演化历史而受到石油地质界的广泛关注, 因此下扬子地区的地质构造演化一直以来是研究的热点, 但对其新生代以来构造演化的研究相对缺乏。

本文在元素地球化学分析的基础上, 对苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组时期的母岩类型及其对物源的指示作用进行探讨; 恢复其古湖泊环境 (包括风化作用类型、风化程度和古气候条件等在该区的空间差异以及是否发生海侵等), 并结合中国东部特

殊的地体构造特征对该区包括整个苏北盆地和下扬子地区在古近纪时期的构造环境进行探讨, 判断其构造发展历史。可进一步丰富源岩沉积学的信息, 初步建立盆地沉积岩和源岩之间的对应关系, 为苏北盆地勘探开发提供理论意义, 也为下扬子地区新生代的构造演化过程提供地化方面的证据, 拓展东部含油气盆地的研究领域。

1 区域地质概况

苏北盆地西接鲁苏隆起, 南邻通扬隆起, 向东伸入黄海, 属于苏北-南黄海盆地的陆上部分。苏北盆地内部可划分 4 个近东西向展布的二级构造单元, 由南向北分别为东台拗陷、建湖隆起、盐阜拗陷和滨海隆起 (图 1a)。高邮凹陷位于东台拗陷中部, 戴南组 (E_2d) 地层位于古近系阜宁组 (E_1f) 之上, 三垛组 (E_2s) 之下, 并细分为戴南组二段 (E_2d_2) 和一段 (E_2d_1)。其中戴南组一段 (以下简称戴一段) 与下伏阜宁组四段不整合-假整合接触, 戴一段地层自

注: 本文为“内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室”自主研究基金项目 (编号 2009-II-11) 和教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目 (编号 20090091110023) 共同资助成果。

收稿日期: 2011-02-23; 改回日期: 2011-06-23; 责任编辑: 周健。

作者简介: 张妮, 女, 1978 年生。博士研究生, 沉积学与石油地质学。Email: znia@sina.com。通讯作者: 林春明, 男, 1964 年生。教授, 博士生导师, 从事沉积学研究。通讯地址: 210093, 江苏省南京市汉口路 22 号; Email: cmlin@nju.edu.cn。

DOI: CNKI: 11-1951/P. 20120113. 0857. 011 网络出版时间: 2012-1-13 8:57

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20120113.0857.011.html>

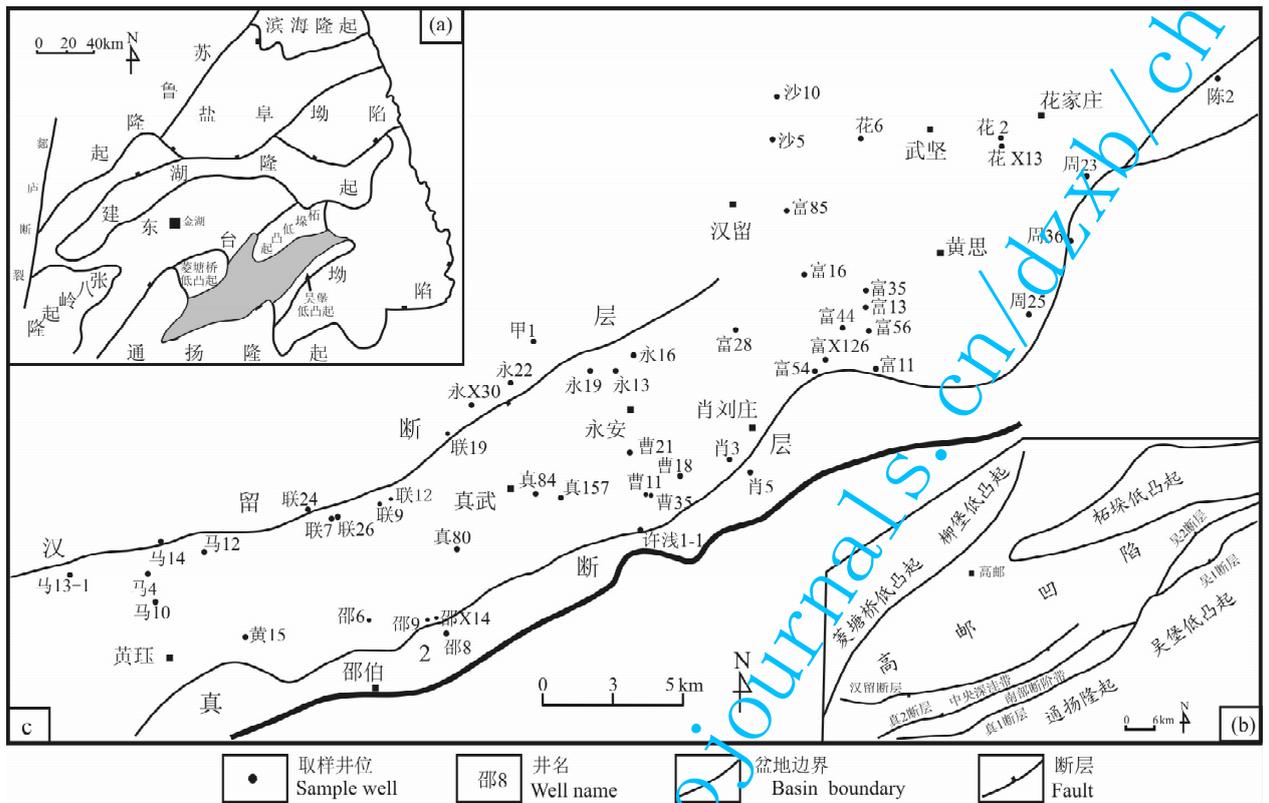


图 1 高邮凹陷古近系戴一段构造 (a, b) 及地球化学样品位置图 (c)

Fig. 1 Analytical map of the 1st Member of Palaeogene Dainan Formation in Gaoyou depression showing the tectonic setting (a, b) and location of geochemical samples (c)

老至新又可分为戴一段三亚段 ($E_2 d_3^1$)、二亚段 ($E_2 d_2^1$) 和亚段 ($E_2 d_1^1$)。

戴一段沉积时期,苏北盆地受挤压抬升,使盆地边界和盆内燕山早中期处于隐伏状态的逆断层复活,形成一些列 NE 向张性剪切断裂带,将前期阜宁组时期统一的坳陷盆地分割为若干个 NE 向小型断陷,这些断陷包括高邮凹陷均呈南断北超、南陡北缓的不对称型,断陷强烈,上下盘升降明显(断距多超过 1 km),断裂的发育常具有同生性质。阜宁组沉积末期,苏北盆地发生至少两次构造回返过程,导致金湖凹陷至高邮凹陷北坡成为挤压缓冲地带,大型断裂少,而高邮凹陷南部断裂带可能在背斜纵向垮塌基础上形成,并可能有古老基岩逆断层回滑参与作用。因此,南部深凹带以不对称向斜为形成基础,并由于长期处于坳陷沉积中心,同沉积下滑作用相对明显。根据区域地质应力的影响,可将高邮凹陷沿 NNE 向的构造应力方向切割成三部分,自南向北依次为南部陡坡带、中央深凹带和北部斜坡带(邱旭明等,2006;赵俊峰等,2008;陈安定,2010;图 1b)。

在高邮凹陷戴一段三个亚段中未遭受明显变质作用的泥岩段采集 60 个样品用于微量元素分析,在

砂岩段采集 60 个样品用于主量元素分析,样品分散于周庄、花庄、富民、永安、肖刘庄、曹庄、真武、邵伯、联盟庄、马家嘴地区(图 1c)。测试在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,所用仪器为高分辨率电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS),型号为 Element 2。重复样与标样分析结果表明微量元素和主量元素的相对误差均小于 5%,分析结果可靠。

2 微量元素赋存特征分析

2.1 微量元素特征

微量元素由于地球化学学习性上的差异,使其在地质演化过程中表现出不同的性质,在基性、超基性岩中铁镁矿物大量富集,使得相容元素(如亲铁性元素 Co、Ni、Cr 等)有较高的含量,优先进入结晶矿物相或残留相,即岩石发生部分熔融时,趋向保留于源岩中。高场强元素(Nb、Ta、Hf 等)和大离子亲石元素(Sr、Rb、Ba 等)则属不相容元素,在岩浆分异结晶过程中均优先进入熔体相。其中高场强元素在表生作用中化学性质稳定,可追踪沉积物源区的物质组成。大离子亲石元素化学性质相对活泼,易受风化作用影响,

常通过选择性离子交换作用和粘土矿物的吸附作用固定于风化剖面中(Nesbitt et al., 1980)。

高邮凹陷戴一段沉积岩的微量元素整体上表现为 Co、Ni 和 Cr 等亲铁性元素相对大陆上地壳较为富集且分馏明显, 说明研究区物源可能受到岩浆-变质地体的影响, Nb、Zr、Hf 等高场强元素的含量与大陆上地壳较为相近, 说明研究区的源岩为古老大陆上地壳。大离子亲石元素中除了 Rb 与大陆上地壳较为相近外, Sr、Ba 均表现为明显亏损, 显示研究区的风化作用较为强烈。镜下观察, 研究区碎屑岩中长石以酸性斜长石和钾长石为主而缺乏中基性斜长石, 因此源区的风化作用可能以中基性斜长石的分解为优势。由于 Sr 含量及 Sr/Ba 值可指示风化程度及古湖泊环境, Sr、Ba 含量尤其是 Sr 含量在各地区差异显著, 说明研究区的风化程度或古湖泊水体存在地区间的差异。永安地区的 Nb、Ta、Zr 等高场强元素相对大陆上地壳出现明显异常, 由于 Nb、Ta、Zr 主要富集于副矿物中, 在大洋板块发生俯冲消减至一定深度时, 随同板块一同俯冲的沉积物和板块表层蚀变的玄武岩中的流体发生脱水作用, 伴随强活动性元素一同流出, 而存在于副矿物中的高场强元素不随流体发生迁移, 释放出的流体向上迁移至上伏的地幔楔, 发生交代作用, 导致部分熔融作用形成的熔体中 Nb、Ta、Zr 相对亏损 (Pearce, 1983), 因此永安地区的微量元素异常说明该地区受到来自幔源的大陆岛弧火山岩的影响 (图 2)。

2.2 母岩类型分析

在 Co/Th-La/Sc 图解中, 研究区戴一段沉积岩具有较高且较为稳定的 Co/Th 值, 平均为 6.5, La/Sc 值较高, 主要介于 4~9 之间, 样品主要分布在玄

武质、安山质岩石和花岗岩之间, 说明研究区源岩主要为花岗岩和中基性火成岩, 其中永安地区受玄武质火成岩的影响较大 (图 3a)。La/Tu-Hf 判别图可进一步揭示源岩的属性, 研究区大部分样品主要落在长英质/基性物岩混合物源区以及长英质物源区, 说明研究区物源主要来自火山弧物质和大陆上地壳的长英质物质。研究区的老沉积物组分含量很低, 反映了活动边缘物源的特征。其中高邮凹陷北部斜坡带的周庄、沙埝、富民地区样品完全落入长英质源区范围内, 老沉积物组分相对较高, 说明这些地区源岩主要受大陆上地壳的长英质物质控制 (图 3b)。

Lacassie (2004) 将砂岩的物源分为 4 种不同的组合: 基性物质、中性物质、长英质物质和再旋回沉积物质。相对大陆上地壳而言, 基性物源具有 Sc、V、Cr 的明显富集和 Nb、Rb、Zr、Ce 的明显亏损 (Lacassie, 2004); 中性物源的元素富集与亏损情况与基性物源较为相似, 但富集和亏损程度均低于基性物源; 长英质物质具有中等程度的 Nb 亏损; 再旋回沉积物质中则除了具有与长英质物质程度相似的 Nb 亏损外, 还具有中等程度的 Cr 富集和明显的 Sr 亏损。高邮凹陷戴一段样品均具有中等程度的 Nb 亏损和 Cr 富集, 其中大部分样品具有再旋回沉积所特有的明显的 Sr 谷, 还有一部分样品没有 Sr 谷, 虽然研究区部分样品具有小规模的中基性物源所特有的 Zr、Nb 亏损和 Cr 富集, 但所有样品均缺少 Sc 峰、V 峰, 说明研究区源区岩石主要为长英质物质和再旋回沉积物质, 受中基性物质的影响, 但影响较小, 其中永安地区源岩受中基性物质的影响较大, 这与研究区的物源属性判别结果一致 (图 2)。

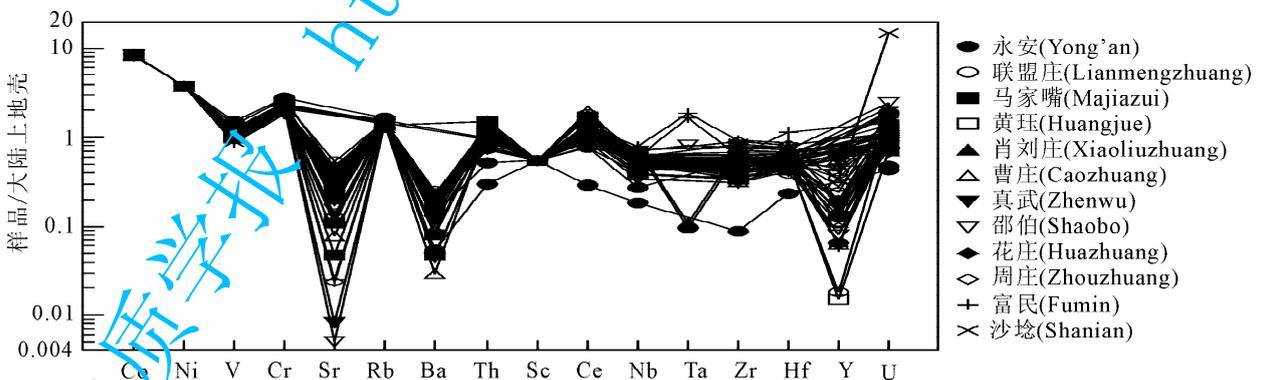


图 2 高邮凹陷古近系戴一段微量元素大陆上地壳标准化图 (标准化数据引自 Taylor 等, 1985)

Fig. 2 Trace elements diagram normalized by upper crust of the 1st Member of Palaeogene

Dainan Formation in Gaoyou depression (upper crust data from Taylor et al., 1985)

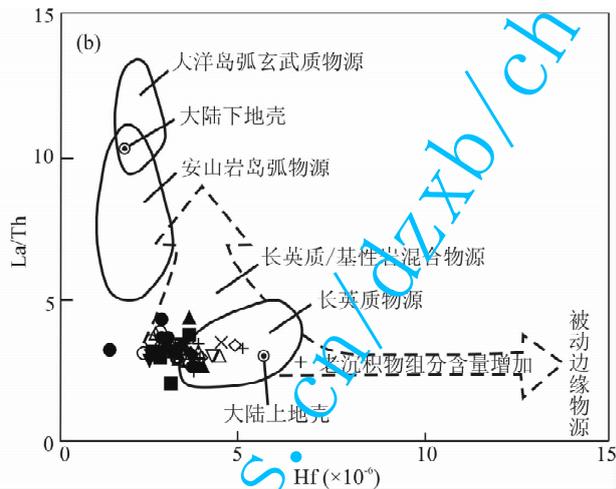
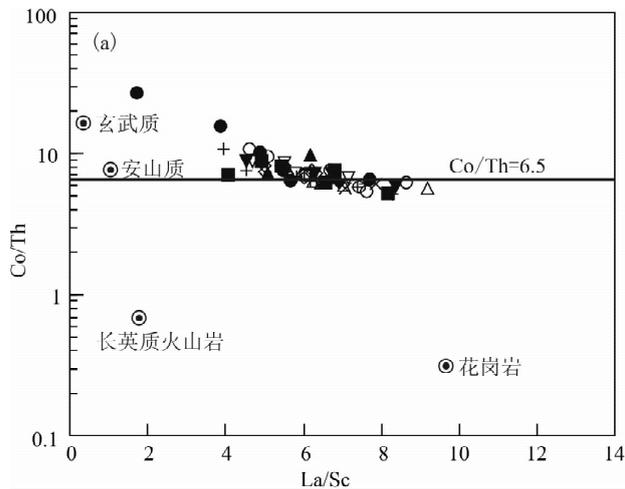


图3 高邮凹陷古近系戴一段微量元素判别图

Fig. 3 Trace elements ratios of the 1st Member of Palaeogene Dainan Formation in Gaoyou depression

(a)—Co/Th-La/Sc图解(据 Floyd等, 1987); (b)—Hf-La/Th图解(据 Gu et al., 2002);图例同图2

(a)—Diagram of Co/Th-La/Sc ratios (from Floyd et al., 1987); (b)—diagram of Hf-La/Th ratios

(from Gu et al., 2002); Legend same as in Fig. 2

3 主量元素赋存特征分析

3.1 主量元素特征

高邮凹陷戴一段砂岩的 SiO_2 含量普遍较高, 介于 62.91%~86.61% 之间, 平均 77.00%, 说明砂岩中石英或富含 SiO_2 的矿物(如长石)含量较高, 矿物成分成熟度较高。各地区 SiO_2 的平均含量差异较大, 南部陡坡带的邵伯、黄珏地区 SiO_2 平均含量普遍偏低, 其中邵伯地区 SiO_2 平均含量仅为 69.85%, 而北部缓坡带的富民、周庄、联盟庄等地区的 SiO_2 平均含量相对较高, 其中富民地区的 SiO_2 平均含量可达到 79.75%(图 4)。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{TiO}_2$ (图 5a) 和 $(\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)-\text{TiO}_2$ (图 5b) 显示研究区南部陡坡带的邵伯、曹庄、肖刘庄地区以及北部缓坡带的永安和富民北部地区的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值和 $\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量普遍偏高, 其中邵伯、曹庄地区部分样品的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值和 $\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量最高可分别达到 2.2 和 10%, 而靠近永安的富 85 井的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值和 $\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量可分别达到 1.4 和 8%, 说明高邮凹陷南部陡坡带以及北部缓坡带的永安附近地区相对其他地区更富集含钾矿物而亏损斜长石, 且受到基性岩的影响相对较强(图 5a, b)。成岩及其后生作用常造成主量元素出现异常, 如热液作用造成 SiO_2 含量的突然升高, 或在地表风化过程中, Na 相对于 K 优先被淋滤带出风化壳, 导致 Na 的显著亏损和高比值的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 异常等。高邮凹陷戴一段样品中 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值分布较集中, 主要介于

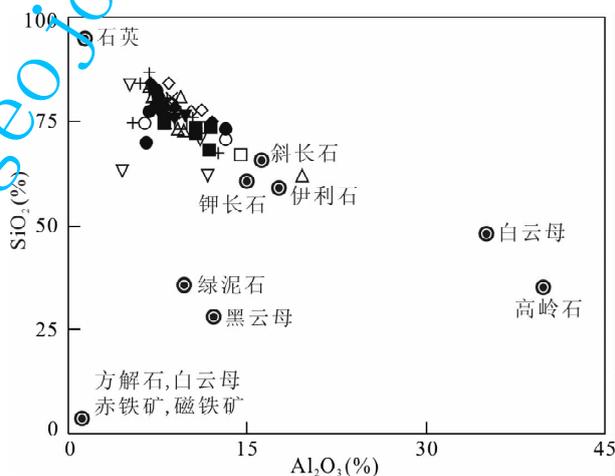


图4 高邮凹陷古近系戴一段砂岩 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 判别图(图例同图2)

Fig. 4 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ discriminant diagram of the 1st Member of Palaeogene Dainan Formation in Gaoyou depression (Legend same as in Fig. 2)

0.1~1.5 之间, 平均值仅为 0.68, 低于澳大利亚后太古宙页岩(3.08)和大陆上地壳(0.68)的平均值, 并未出现 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值异常高现象, 表明成岩及其后生作用并没有显著影响样品成分。

3.2 物源区的风化特征

陆源的风化程度主要受气候和构造隆升速率的影响, 在化学风化过程中, 稳定的阳离子被保存在风化产物中(如 Al^{3+} 、 Ti^{4+} 、 Zr^{4+} 等), 而不稳定的阳离子往往流失(如 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 等), 元素的丢失程度取

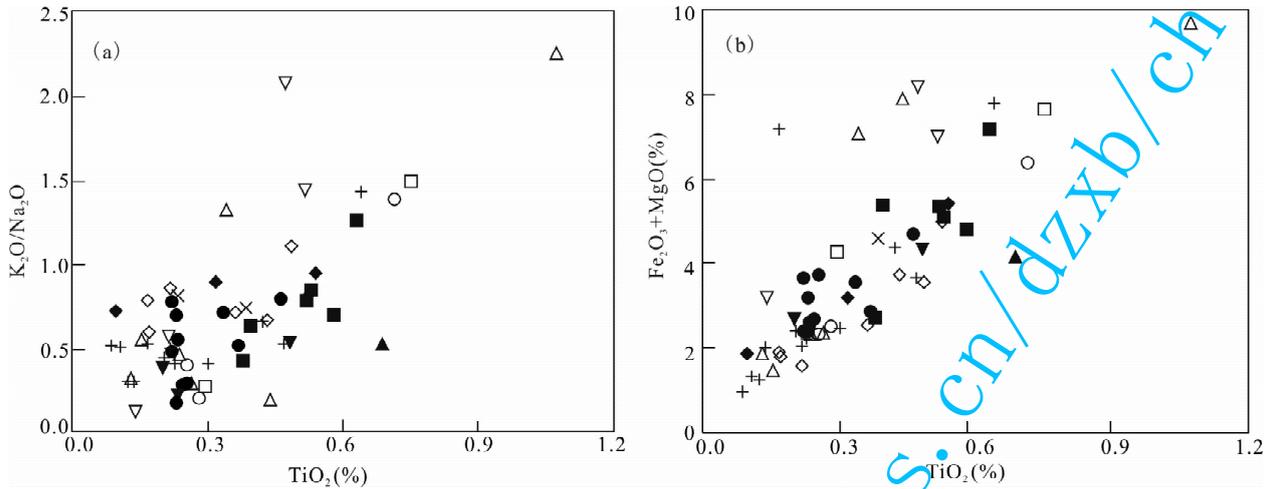


图 5 高邮凹陷古近系戴一段主要元素相关性图解(图例同图 2)

Fig. 5 Correlation diagram of major elements of the 1st Member of Palaeogene Dainan Formation in Gaoyou depression (Legend same as in Fig. 2)

决于化学风化强度。由于 Sr 通常富集于斜长石中,因此斜长石的风化解导致母岩中 Sr 的淋失以及 K 因离子交换作用而进入黏土矿物,由于高邮凹陷戴一段沉积岩中 Sr 强烈亏损,但 K_2O/Na_2O 平均值仅为 0.68, 低于上地壳的平均值 0.9, 说明源区斜长石的风化解低于钾长石。砂岩中 Al_2O_3 含量变化较大, 在 4.47%~14.43% 之间, 平均 8.90%, Al_2O_3 含量与砂岩中斜长石、云母和黏土矿物等富铝矿物有关, 可通过 $SiO_2-Al_2O_3$ 判别图了解研究区矿物成分的差异 (Cullers, 2000)。研究区砂岩的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量呈明显的负相关关系, 砂岩中硅铝矿物成分主要在石英、钾长石、斜长石、伊利石、绿泥石等矿物之间变化 (图 4), 反映源区所经历的化学风化作用较弱。其中邵伯、黄珏地区的投点最为分散, 其次是联盟庄、永安、富民地区, 说明这些地区的矿物含量差异较大, 可能是离物源很近或受到不同物源的影响。曹庄地区出现伊利石富集现象, 由于伊利石多为白云母或钾长石风化蚀变形成, 说明该地区相对其他地区所经历的化学风化作用较弱。

化学蚀变指数 (CIA) 可定量评价化学风化强度, $CIA = 100 \times [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$, 值越大风化作用越强。式中各元素采用摩尔百分含量, CaO^* 仅代表样品硅酸盐中的 CaO (Nesbitt et al., 1982)。A-CN-K 图 (图 6a) 可判别风化作用的趋势、源岩成分及钾交代作用的特征, 图中的 A-CN 边为风化作用的起始阶段, 随着化学风化作用的进行, K_2O 显著丢失, 成分点移向 Al_2O_3 端点。沉积物的预测风化趋势线 (图中虚线 a) 与斜

长石-钾长石 (Pl-Ksp) 连线的交点可推断化学风化作用发生以前的 Pl/Ksp 值。高岭石的伊利石化以及斜长石的钾交代作用可造成预测风化趋势线发生右倾, 但仍可通过与 Pl-Ksp 线的交点估计化学风化作用发生之前的 Pl/Ksp 值 (Fedo et al., 1995)。镜下观察高邮凹陷戴一段沉积岩中碳酸盐含量较高, 且主要以方解石胶结物形式存在, 因此在 CIA 值计算之前去除了碳酸盐中的 CaO 含量, 且研究区碎屑岩中矿物长石含量较高, 仅次于石英, 因此 CIA 值可通过样品距离 CN-K 边界的高度来确定 (Taylor et al., 1985)。

CIA 值计算与 A-CN-K 判别图得到的高邮凹陷戴一段砂岩的结果基本一致, CIA 值总体在 48~69 之间, 平均为 55, 反映源区所经历化学风化较弱, 也可能经历了较强烈的构造运动。图 6a 中样品的化学成分趋势线 (图中虚线 b) 与 Pl-Ksp 线的交点反映研究区的源岩成分与花岗闪长岩相近, 且趋势线较好的指向黏土矿物, 说明源区的化学风化主要是花岗闪长岩源岩中的斜长石向黏土矿物转化, 钾交代作用较强烈。其中高邮凹陷中央深凹带南部陡坡带如邵伯、黄珏和曹庄等地区的 CIA 平均值相对较高, 介于 56~58 之间, 化学风化作用相对较强, 北部缓坡带的联盟庄、永安和富民等地区的 CIA 平均值相对较低, 介于 52~54 之间, 化学风化作用相对较弱。说明相对高邮凹陷北部缓坡带而言, 南部陡坡带所经历的化学风化程度较强, 古气候条件更为温暖和潮湿。

源区的风化作用和沉积物的再旋回过程均可导

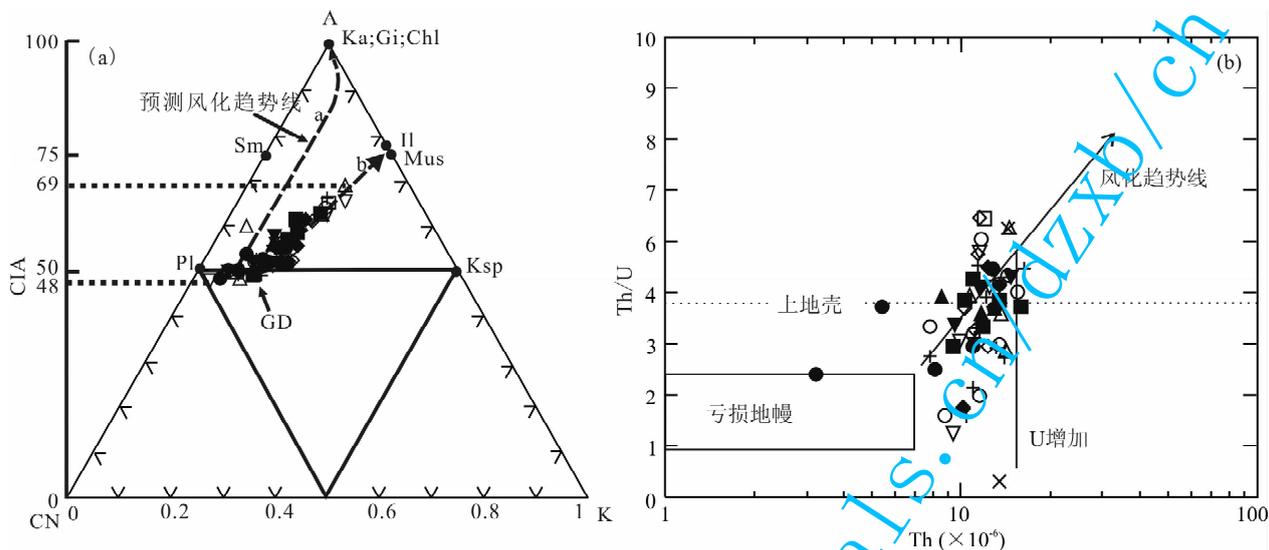


图6 高邮凹陷古近系戴一段砂岩 A-CN-K(a)和 Th/U-Th 判别图(b)

Fig. 6 A-CN-K (a) and Th/U-Th diagram of the 1st Member of Palaeogene Dainan Formation in Gaoyou depression

A— Al_2O_3 ; CN— $\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}$; K— K_2O ; Ka—高岭石; Gi—水铝矿; Chl—绿泥石; Sm—蒙脱石; Il—伊利石; Mus—白云母;

Pl—斜长石; Ksp—钾长石; GD—花岗闪长岩; 其他图例同图2

A— Al_2O_3 ; CN— $\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}$; K— K_2O ; Ka—kaolinite; Gi—gibbsite; Chl—chlorite; Sm—smectite; Il—illite;

Mus—muscovite; Pl—plagioclase; Ksp—K-feldspar; Legend same as in Fig. 2

致难溶的 U^{4+} 在风化作用过程中氧化为易溶的 U^{6+} , 导致 U 元素流失, 因此沉积岩的 Th/U 与风化作用强度呈正相关。具火山物质背景的沉积岩 Th/U 值 < 3.0 ; 当 Th/U 值 > 4.0 时, 沉积岩的形成与母岩的风化作用有关, 而当 Th/U 值 > 5.0 时, 表明母岩经历了明显的风化作用过程 (McLennan et al., 1993)。高邮凹陷戴一段砂岩的 Th/U 值差异较大, 说明所经历风化作用差异较大, Th/U 值主要集中在 $2.5 \sim 6.0$ 之间。Th-Th/U 图解 (图 6b) 显示, 高邮凹陷南部陡坡带的马家嘴、真武、曹庄、肖刘庄地区的 Th/U 值较为稳定, 大部分接近上地壳平均值 3.8, 反映这些地区源岩的风化程度一般且较为稳定。高邮凹陷北部缓坡带的富民、沙埕、永安、联盟庄、周庄、花庄地区以及南部的邵伯和黄珏地区 Th/U 值差异较大, 源岩所受风化作用差异较大, 其中部分样品 Th/U 值 > 4.0 , 甚至 > 6.0 , 说明源岩受到较强的风化作用, 部分样品 Th/U 值 < 3.0 , 甚至接近亏损地幔, 受风化作用影响非常小, 说明源岩经历了强烈的构造运动后抬升地面并接受了快速剥蚀和沉积或是气候条件向着更适合于物理风化的方向演化。

综上所述, 高邮凹陷戴一段砂岩所经历的风化作用以物理风化为主, 化学风化作用较弱, 其中南部陡坡带的大部分地区 (黄珏、邵伯除外) 所经历风化

作用一般, 且风化作用较为稳定, 虽然这些地区均位于高邮凹陷真 2 断层附近, 但其沉积物主要由较远处源岩的风化搬运而来, 受构造运动的影响较小。高邮凹陷北部缓坡带以及黄珏、邵伯地区所经历的风化作用差异较大, 说明这些地区沉积物存在两种沉积方式, 一种是来自远处的源岩在经历了较强的风化作用或较远距离的搬运后沉积, 另一种是来自近处的源岩由于强烈的构造运动抬升剥蚀后的迅速再沉积。

3.3 古湖泊的环境恢复

微量元素尤其是 B、Sr、Ga 等是指示湖水变化的最为灵敏的元素, 与古湖泊水体及盐度的变化具有内在的联系。Sr 元素活动性强, 易溶解流失, Ba 的地球化学性质稳定, 离子半径较大, 易被黏土矿物交替和有机质吸附, 且具有较小的溶度积, 易与海水中的 SO_4^{2-} 结合, 生成 BaSO_4 沉淀。因此沉积作用中, 从介质中迁入沉积物中的游离态 Sr/Ba 值是判断海陆沉积相的有效指标。在高邮凹陷戴一段沉积岩中, 从 $\text{E}_2d_3^3$ 至 $\text{E}_2d_1^1$ 亚段的不同沉积时期, Sr 的平均含量分别为 77.85×10^{-6} 、 78.23×10^{-6} 和 103.76×10^{-6} , 呈有规律的递增趋势, 这与研究区戴一段时期存在湖盆扩张有关。在高邮凹陷以箕状断陷湖盆存在初期, 戴一段沉积早期地层逐层超复, 断陷湖盆由小变大, 戴南事件后断陷湖盆进入后期, 并达到最

大湖侵(邱旭明等, 2006), 且高邮凹陷滨浅湖中的生物扰动组合也反映了戴一段时期的湖平面整体稳定条件下的小幅度快速上升后稳定的水体变化(张喜林等, 2006), 由此可见, 随着水域扩大, Sr 含量较好的指示了古湖泊的水体深浅变化。

高邮凹陷戴一段沉积岩中 Sr/Ba 比值变化显示, 高邮凹陷北部缓坡带的沙埝、花庄、周庄、富民北部、永安、联盟庄地区的 Sr/Ba 值较低, 介于 0.8~0.9 之间, 指示沉积受海相因素影响较大; 南部陡坡带的马家嘴、富民南部、肖刘庄地区的 Sr/Ba 值较高, 介于 1.15~1.35 之间, 指示陆相因素在沉积中占据主导位置; 南部陡坡带最南端的曹庄、邵伯、真武和黄珏地区的 Sr/Ba 值最低, 介于 0.6~1.0 之间, 除了真武地区, 其他地区的 Sr/Ba 值均低于 0.8, 说明这些地区的沉积作用受海相因素影响最大。在戴一段不同亚段的沉积时期, Sr/Ba 平均值存在差异, 由 $E_2d_3^1$ 至 $E_2d_1^1$ 沉积时期, Sr/Ba 值分别为 2.62、0.81 和 1.01, 说明在 $E_2d_3^1$ 时期后, 古湖泊的盐度突然减少(图 7)。

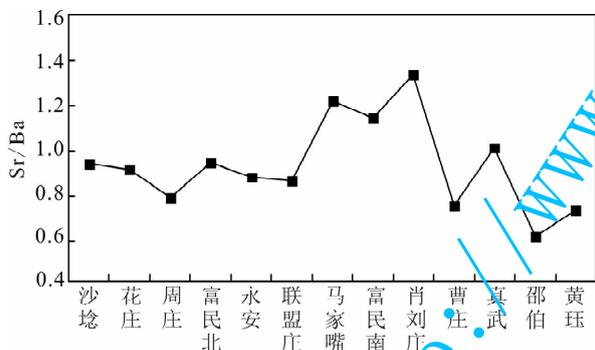


图 7 高邮凹陷古近系戴一段 Sr/Ba 值分布曲线

Fig. 7 Sr/Ba values of the 1st Member of Palaeogene Dainan Formation in Gaoyou depression

高邮凹陷泰州组(K_2t)和阜宁组(E_1f)均含有指示海相或与海有关的多门类生物化石。古生物、岩矿等资料表明苏北盆地在晚白垩世(K_2t_2)、古新世(E_1f_2 、 E_1f_1)曾与海相通, 并遭受海侵影响。海侵的原因可能是晚白垩世晚期起, 中国东部的地应力条件以张力占优势, 并在华北—渤海湾、苏北—南黄海和东海陆架区, 发育了一系列在变质岩基底上被古近纪沉积物所充填的半地堑箕状盆地, 这一区域的拉张状态直至渐新世因受太平洋板块俯冲的影响而被阻止(朱夏等, 1990)。海水由东海向黄海海侵, 造成陆架上箕状盆地在短时期内与海水相通(傅

强等, 2007)。通过 Sr/Ba 值可确定在阜宁组沉积时期, 南黄海入侵苏北盆地的海侵范围已越过苏北盆地东部的盐城凹陷和海安凹陷, 以指状海湾入侵甚至泛滥至高邮凹陷。戴南组有丰富的实体化石如介形类、腹足类和轮藻, 戴一段生物以浅水类型为主(张喜林等, 2006), 戴南组底部粉砂岩或灰质粉砂岩中不断发现阜四段的海相化石遗迹, 如 *Neomonocerotina bullata* (膨胀新单角介), *Sinocypris funingensis* (阜宁中华金星介), *Ilyocypris hexatuberosa* (六结土星介)等, 这些化石壳面往往被磨损、溶蚀或被钙质所包裹, 且多沿凹陷边缘以及吴堡低凸起两侧分布, 戴南组内介形类种属和个体数自下而上减少(蔡小李, 1988)。镜下观察, 在研究区的永安和马家嘴地区均发现含量相对较高的来自阜宁组的碳酸盐鲕粒。

本文认为, 戴一段沉积岩中的 Sr/Ba 值所反映出的海相特征主要是受下伏 E_1f_4 地层的影响, E_2d_1 的海相化石为 E_1f_4 地层被剥蚀后再沉积而成, 且 $E_2d_3^1$ 至 $E_2d_1^1$ 时期, Sr/Ba 值大幅降低, 海相化石遗迹逐渐减少, 说明对 E_1f_4 的剥蚀主要发生在 $E_2d_1^1$ 时期。同时 Sr/Ba 值显示海相环境特征明显的富民南部、肖刘庄以及马家嘴地区与指示海相环境的介形虫发育位置一致, 均位于吴堡低凸起附近及高邮凹陷南缘。说明在苏北盆地发育的断陷阶段, 在整个苏北盆地以张剪性断裂活动为主的地质背景下, 高邮凹陷在 E_2d_1 沉积初期, 受到吴堡运动的影响, 该运动以戴南组低角度不整合覆盖于阜宁组之上为标志, 且以差异升降运动为主, 表现为戴南组的局部缺失和阜宁组的局部剥蚀。下伏不整合 E_1f_4 地层在吴堡断裂带附近以及凹陷边缘受挤压抬升后被剥蚀, 并与戴一段初期地层发生了同沉积, 马家嘴地区对阜宁组的剥蚀则主要由于汉留断层的发育。因此至始新世戴南组沉积时期, 苏北盆地已演变为内陆湖泊环境, 但 E_1f_4 海侵之后的海相特征仍残留在不整合于其上的 E_2d_1 的沉积岩中。

4 构造背景讨论

4.1 构造背景判别

活动大陆边缘与汇聚板块边界有关, 是大洋板块向毗邻大陆俯冲消减的地带, 代表威尔逊旋回的后历史。以火山弧(岛弧)、海沟和贝尼奥夫带(B式俯冲带)三者共生为特征。常将活动大陆边缘分为岛弧型(或称沟-弧-盆体系型或西太平洋型)大陆边缘和陆源弧(或称沟-弧体系型或安第斯型、东太

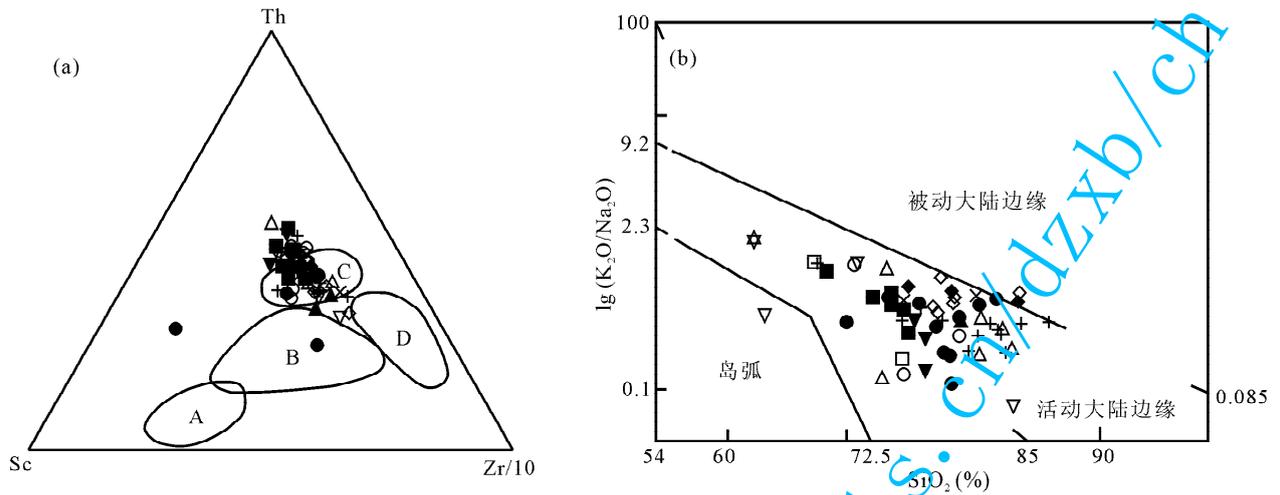


图 8 高邮凹陷古近系戴一段碎屑岩构造背景判别图

Fig. 8 Tectonic setting discrimination of the 1st Member of Palaeogene Damar Formation in Gaoyou depression

(a)—Th-Sc-Zr/10 图解(底图据 Bhatia et al., 1986); A—大洋岛弧; B—大陆岛弧; C—活动大陆边缘;

D—被动大陆边缘; (b)— $\lg(K_2O/Na_2O)$ - SiO_2 图解(底图据 Gu, 1994); 其他图例同图 2

(a)—Th-Sc-Zr/10 diagram (from Bhatia et al., 1986); A—oceanic island arc; B—continental island arc;

C—active continental margin; D—passive margins; (b)— $\lg(K_2O/Na_2O)$ - SiO_2 diagram (from Gu, 1994); Legend same as in Fig. 2

平洋型)大陆边缘(Dickinson et al., 1979; Bhatia et al., 1985)。

Th-Sc-Zr/10 判别图(图 8a)内可区分出大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘(安第斯型大陆边缘)和被动大陆边缘这四种构造环境(Bhatia et al., 1986)。显然,高邮凹陷戴一段的大部分碎屑岩样品均集中于活动大陆边缘构造背景中,仅汉留断层附近的永安地区投点分散,其中一个样品落在大陆岛弧构造背景中。因此高邮凹陷戴一段原始母岩的构造背景以活动大陆边缘为主,且在汉留断层附近有大陆岛弧物质掺入,可能受局部后期构造热事件及动力变质作用等热事件的影响; $\lg(K_2O/Na_2O)$ - SiO_2 判别图(图 8b),是按照 Roser 等(1986)对于砂岩-泥岩套构造环境的判别的原则操作,可区分出被动大陆边缘、活动大陆边缘和岛弧这三类构造环境。图中看出,高邮凹陷戴一段砂岩样品基本集中于活动大陆边缘构造背景范围内,仅有邵伯一个点落入岛弧区内。两种方法所得结果的一致性,说明高邮凹陷戴南组构造环境主要为安第斯型活动大陆边缘,与微量元素的分析结果基本一致。

4.2 构造背景讨论

以上地化分析较为客观的反映了戴一段沉积时期,苏北盆地高邮凹陷的安第斯型活动大陆边缘构造背景。但是应当进一步关注的是,研究区在古近系戴南组时期位于西太平洋的沟-弧-盆体系展布地带,但其沉积物中几乎未见岛弧组分,且被纳入到东

太平洋典型的安第斯型活动大陆边缘,这种差异可反映研究区地体群漂移拼贴的特殊构造环境。

地体概念最早被应用于北美西部科迪勒拉山系,是指拼贴于大陆边缘在构造运动中其位置有过几百千米到几千千米移动的岛弧、海山、洋底高原和大陆裂解碎块(Howell et al., 1986)。郭令智等(1984, 2000)最先将地体理论引入我国并认为中国地体都分布在古克拉通板块的边缘,可分为华北、西北、西南和中央等 4 个地体带,一系列地体群和数 10 个地体。中国东部正是地史上散布增生于大陆板块边缘的一系列移置地体拼接而成,以下论述中所提到的“地块”就是一些已与其他地体拼接的大型地体(郭令智等,1984, 2000)。

高邮凹陷所处的下扬子地块在古纬度、火山岩和花岗岩时空发育、区域成矿专属性、沉积建造和构造变形等方面具独特性,是一个不同于扬子地块的晚古生代—早中生代的独立地块。受燕山期苏鲁板间造山作用的影响,下扬子地块直至燕山中期才“楔入”在印支期已拼合的扬子与华北地块。在白垩世时期,相继发生了下扬子地块中的燕山碰撞造山事件和燕山造山带的坍塌以及岩石圈的拆沉,因此在晚白垩世末,燕山期高原不复存在,东亚地区大陆边缘由新特提斯构造域转换为太平洋构造域,随着西太平洋部分弧后盆地形成,导致大陆地壳处于张弛拉张应力环境(叶舟等, 2006),研究区所在的苏北盆地正是叠加在燕山造山带坍塌裂谷之上的一系列

沉积范围广、水体连通的大型板内大陆相盆地之一。

下扬子地块其实就是一个与其北邻和南邻的华北、华夏两个地块一起,先后从冈瓦那古陆离裂出来,漂浮于古特提斯洋中缓慢北移的较大陆块。在古特提斯洋内一起北移的,还有印度地块等更大更多的陆块。由于相邻地体漂移速度的差异,两者在同趋势北移中发生相互碰撞、拼贴、错位,而两者间也可拉开距离,加大其间的洋域。两地块之间距离的时宽时窄会在地块的地史记录中表现为多旋回的构造运动。具体到下扬子地区,板块之上各时代的沉积盆地,也随着这一多旋回演化趋势而不断改变其自身的沉积建造和构造格局。陈沪生等(1999)根据华北地块(参照点为石家庄)同下扬子地块(参照点为南京)在各地质年代时的古纬度值的差额为两者距离的标志,分析两个相邻时代之间的纬度差值伸长或缩短的变化,并将这种变化同苏北盆地所经历的地壳运动、岩浆活动以及主要地质事件相互对照认为(表 1):地史过程中海相盆地的发育期与两地块拉开时期(古纬度差值变大)相对应,此时发生盆地拉伸张裂运动,如晚白垩世时导致东北向的压性结构面转变为张性结构面的“黄桥转换事件”,岩浆活动的类型也随着纬距差的变化而改变;当两地块相对移近时(古纬度差值变小),地块内部对应于地壳褶皱运动,如晋宁运动、加里东运动、印支和燕山运动均与地块移近期对应,因此中生代时期的

苏北盆地演化可划分为 3 个阶段:早期收缩阶段(235~150 Ma)、中期变革阶段(150~90 Ma)和晚期伸展阶段(90~0 Ma)。

高邮凹陷在戴南组沉积时期正处于苏北盆地晚期伸展的演化阶段,太平洋板块的俯冲带和岩浆活动区之间的苏北—南黄海地区处在软流圈浮力相对增大的状态,拉伸断陷形成并伴随不同期的幔源玄武岩溢流,并由于地壳的弹塑力和应力积累的周期,使苏北盆地在演化过程中出现断陷与拗陷交替发育的特征。因此,苏北盆地在戴南组沉积之前岩浆活动频繁,火成岩基底类型较为丰富,以晚古生代的深部花岗岩化作用以及中生代的花岗岩与中—酸性喷发岩为主,基性岩喷发为辅且主要发生在二叠世(P)和古近世(E)(表 1),这与微量元素分析得出研究区源区岩石主要为长英质物质和再旋回沉积物质,受中基性物质的影响但影响程度较小的结论是吻合的,说明高邮凹陷戴一段物源中可能有较多部分是来自基底母岩被剥蚀和再旋回沉积的产物。地化结果所显示的研究区中吴堡低凸起附近以及凹陷南缘马家嘴地区出现戴一段对下伏阜宁组较强烈的剥蚀,以及在北部斜坡带永安地区附近显示受中基性幔源物质的影响较大,较好的反映了高邮凹陷在沉积旋回上断陷充填、火山喷发和拗陷超覆反复交替的沉积特征,而这也是整个苏北盆地在中、新生代时期的沉积特征。

表 1 下扬子区板块漂移聚散过程与苏北盆地演化序列对照表(据陈沪生等, 1999 修改)

Table 1 Contrast of the drift process of Lower Yangtze area plate and the evolution sequence of the North Jiangsu basin (modified from Chen Husheng et al., 1999)

示意标尺 100 Ma	6	5.5	5	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1	0.5
时代	Z ₂	C	O	S	D	C	P	T	J	K	R	
华北古纬度	0±	N1.8°	N6.7°				N14.5°	N24.6°		N43.1°	N43°	
下扬子古纬度			S29.4°				S1.5°	N4.6°		N38.7°	S34.7°	
两地纬差	35°±	24.3°±	36.1°				16°	20°		4.4°	8.3°	
两地相对位移	移 近		移 开			移 近		移 开		移 近		移 开
地壳运动	晋宁运动					加里东运动				印支燕山运动		
主要地质事件	陆核增生	统一下扬子板块形成			下扬子与华夏板块碰撞		下扬子-华夏联合板块形成		联合板块与华北板块碰撞	板块再破碎	黄桥转换事件,全区张裂	开始分裂新的板块
岩浆作用	情况不明			深部花岗岩化作用		基性岩		花岗岩与中-酸性喷发岩			基性岩	

研究区所处的下扬子地块在地史过程中与相邻地块经历多次直接或间接的碰撞拼贴、相对错移,使

地块边缘发生多次混合岩化、花岗岩化或中酸性浅层火山活动。而多次的地壳减薄拉张或伸展运动,

则诱发地幔上隆,进而导致被动裂谷的诞生,使盆地从裂陷向拗陷逐步演化。由于中国东部大陆边缘地体众多且地体面积甚小,每个地体或地块就如同一个小板块,即使是中心部位仍离边界很近,因而具有板块边缘的构造背景和沉积建造特征。虽然苏北盆地的构造背景与太平洋板块构造运动关系密切,但在白垩世时期,下扬子地块已与华北、扬子地块拼贴,其间还曾经历应力拉张状态,无论下扬子地块与相邻地块呈拉张或挤压状态,只要未发生强烈的板块俯冲,均会具有类似于安第斯型活动大陆边缘的构造背景。因此由于地史及动力学机制的差异,位于下扬子地块西南缘的苏北盆地在戴一段时期所具有的安第斯型活动大陆边缘构造背景可反映我国东部地区由较多地体拼贴的特殊构造特征,有别于东太平洋典型的安第斯型活动大陆边缘。

致谢:本文得到江苏油田地质科学研究所有关人员帮助,南京大学地球科学与工程学院王博副教授给予悉心指导,谨致谢意。

参 考 文 献

- 蔡小李. 1988. 苏北盆地介形类的演化与构造运动. 石油勘探与开发, 6: 41~45.
- 陈安定. 2010. 苏北盆地构造特征及箕状断陷形成机理. 石油与天然气地质, 31(2): 140~150.
- 陈沪生, 张永鸿, 徐师文. 1999. 下扬子及邻区岩石圈结构构造特征与油气资源评价. 北京: 地质出版社, 192~195.
- 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. 沉积学报, 25(3): 380~385.
- 郭令智, 施央申, 马瑞士. 1984. 论地体构造—板块构造理论研究的最新问题. 中国地质科学院院报, (10): 27~34.
- 郭令智, 舒良树, 卢华复, 施央申, 马瑞士, 张庆龙, 王良书, 贾东. 2000. 中国地体构造研究进展综述. 南京大学学报(自然科学), 36(1): 1~17.
- 邱旭明, 刘玉瑞, 傅强. 2006. 苏北盆地白垩统——第三系层序地层与沉积演化. 北京: 地质出版社, 1~154.
- 叶舟, 马力, 梁兴, 吴根耀, 徐克定, 张廷山. 2006. 下扬子独立地块与中生代改造型残留盆地. 地质科学, 41(1): 81~101.
- 张喜林, 朱筱敏, 郭长敏, 杨俊生, 王秀秀. 2006. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组滨浅湖沉积中的遗迹化石. 沉积学报, 24(1): 81~89.
- 赵俊峰, 刘池洋, 喻林, 王晓梅. 2008. 鄂尔多斯盆地中生代沉积和堆积中心迁移及其地质意义. 地质学报, 82(4): 540~552.
- 朱夏, 徐旺. 1990. 中国中生代沉积盆地. 北京: 石油工业出版社.
- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: province and tectonic control. *Sedimentary Geology*, 45: 97~113.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181~193.
- Cullers R L. 2000. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian—Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos*, 51: 181~203.
- Dickinson W R, Suzek C A. 1973. Plate tectonics and sandstone compositions. *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 63(12): 2164~2182.
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23: 921~924.
- Gu X X. 1994. Geochemical characteristics of the Tethys-turbidites in northwestern Sichuan, China: implications for provenance and interpretation of the tectonic setting. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58 (21): 4615~4631.
- Gu X X, Liu J M, Zheng M H. 2002. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: geochemical evidence. *Journal of Sedimentary Research*, 72 (3): 393~407.
- Howell D G, Jones D L, Scherbner E R. 1986. Tectonostratigraphic terrane of the Circum Pacific region. Houston: Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, 3~30.
- Lacassie J P, Roser B, Ruiz Del Solar J, et al. 2004. Discovering geochemical patterns using self-organizing neural networks: a new perspective for sedimentary provenance analysis. *Sedimentary Geology*, 165: 175~191.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper*, 284: 21~40.
- Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. 1980. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44: 1659~1666.
- Nesbitt H W M, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715~717.
- Pearce J A. 1983. The role of sub-continental lithosphere in magmagenesis at destructive plate margins. In: Hawkesworth et al., eds. *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Nantich Shiva, 230~249.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 1~312.

Geochemical Characteristics of the 1st Member of Paleogene Dainan Formation in Gaoyou Depression of the North Jiangsu Basin, and Its Geological Significance

ZHANG Ni¹⁾, LIN Chunming¹⁾, ZHOU Jian²⁾, CHEN Shunyong¹⁾,
ZHANG Meng¹⁾, LIU Yurui³⁾, DONG Guiyu³⁾

1) *State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210093;*

2) *Institute of Western New District, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong, 257000;*

3) *Institute of Geological Sciences, Jiangsu Oilfield Branch Company, SINOPEC, Yangzhou, Jiangsu, 225009*

Abstract

The type of weathering experienced in Gaoyou depression of North Jiangsu basin was mainly physical weathering. In the depression, the degree of chemical weathering suffered in the majority of the southern step-fault zone was more intensive and the paleoclimate was relatively warmer and damper than those in the northern counterpart. On the contrast, in the northern slope zone, including Huangjue and Shaobo area, the provenance underwent strong weathering or severe tectonic movement for having caused rapid denudation and fast sedimentation in the depression. Mother rocks in Gaoyou depression are mainly felsic rocks and recycling sedimentary deposits, containing little intermediate-basic magmatic source rocks. In strata of the 1st Member of Dainan Formation, the margin of Gaoyou depression and its neighbouring Wubao salient contained marine features that are similar to the underlying Funing Formation. Hence, we deduce that the majority of source rocks in studied area come from denuded original basement and recycling sedimentary deposits. Geochemical data display that the tectonic setting of studied area is included in the Andean-type continental margin. We deem that this tectonic setting of North Jiangsu basin reflects a special tectonics of East China and is differed to the typical Andean active continental margin of the eastern Pacific Ocean, for the big divergence between these two regions no matter in geologic history or in dynamic mechanism.

Key words: the North Jiangsu basin; the Gaoyou depression; geochemical; provenance; weathering; tectonic setting