

西藏改则盆地渐新世-中中新世沉积物中 矿物组合特征及其对气候的指示意义

陈江军¹, 洪汉烈^{1,2}, 刘 钊¹, 宋鄂平^{2,3,4}, 王朝文^{1,2}, 姜高磊^{1,3}, 殷 科^{1,2},
张克信^{1,2,3}

(1. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学 生物地质与环境地质国家重点实验室,
湖北 武汉 430074; 3. 中国地质大学 地质调查研究院, 湖北 武汉 430074; 4. 湖北民族学院 生物科学与技术学院,
湖北 恩施 445000)

摘 要: 为了揭示西藏改则地区渐新世-中中新世古气候环境演化, 结合改则盆地的沉积环境和沉积相, 并利用 X 射线粉晶衍射对改则盆地的样品进行了全岩分析。结果表明, 沉积物中主要矿物组成为石英、长石、方解石和少量白云石等, 通过沉积物中矿物含量变化和石英/长石的比值显示青藏高原改则盆地康托组在气候总体为干冷的大背景下经历了 4 个阶段: I (早渐新世): 石英含量最高, 碳酸盐矿物次之, 长石含量最少, 白云石在该阶段出现频繁, 且含量变化明显, 指示气候以季节性干旱为主; II (晚渐新世): 石英含量最高, 但相比上一阶段有所下降, 碳酸盐矿物和长石含量增加, 指示气候进一步趋向干冷化; III (早中新世): 石英含量最高, 但相比之前两个阶段进一步减少, 长石含量进一步增加, 碳酸盐总体呈现增加趋势, 特别是白云石, 相比之前两个阶段含量增加明显以及下降的石英/长石比值, 指示气候变得更为干冷; IV (中中新世): 石英含量相对上一阶段有所增加, 长石和碳酸盐矿物含量降低, 石英/长石比值也有所增长, 但相比 I 和 II 阶段仍然较小, 指示该阶段气候虽有所回升, 但依旧处于干冷环境下。对比青藏高原隆升和全球气候变化, 可知改则盆地气候阶段性变化可能是高原隆升和全球气候变化共同影响的结果。

关键词: 青藏高原; 改则盆地; 康托组; 常见矿物; 古气候

中图分类号: P532

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)03-0393-12

Mineral assemblage characteristics of the Oligocene-Miocene sediments in the Gerze Basin, Tibet, and their paleoclimatic significance

CHEN Jiang-jun¹, HONG Han-lie^{1,2}, LIU Zhao¹, SONG E-ping^{2,3,4}, WANG Chao-wen^{1,2},
JIANG Gao-lei^{1,3}, YIN Ke^{1,2} and ZHANG Ke-xin^{1,2,3}

(1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. Biological Scientific and Technical College, Hubei University for Nationalities, Enshi 445000, China)

Abstract: In order to reveal the paleoclimate evolution of the Oligocene-Miocene sediments in the Gerze Basin, Tibet, the authors used X-Ray diffraction (XRD) to analyze the Mineral assemblage characteristics in combination with the sedimentary environments and sedimentary facies of Gerze Basin. The results show that the main minerals in the sediments are quartz, feldspar and calcite, with small amounts of dolomite, and their relative

收稿日期: 2014-11-02; 修订日期: 2015-04-02

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011121261); 国家自然科学基金项目(40921062); 大学生自主创新资助计划(1410491A04); 生物地质与环境地质国家重点实验室自主研究课题(GBL11307)

作者简介: 陈江军(1990-), 在读硕士; 通讯作者: 洪汉烈(1964-), 教授, 博士生导师, 主要从事粘土矿物学研究, E-mail: honghl8311@yahoo.com.cn

content varies along the section. Variations of relative values and ratios of quartz/feldspar suggest that the Gerze Basin has experienced four-stage paleoclimatic evolution: Stage I (early Oligocene), characterized by high quartz and carbonate mineral content and low feldspar content; dolomite occurred frequently at this stage, and the content changed significantly, indicative of a dominant seasonal arid climate; Stage II (late Oligocene), characterized by high quartz content, which, however somewhat decreased, indicating a colder and drier climate; Stage III (early Miocene), characterized by high quartz content; nevertheless, compared with features of the previous two stages, the quartz content further decreased, the content of feldspar further increased, and carbonate tended to become an overall increase. Compared with the previous two stages, dolomite increased significantly whereas quartz/feldspar ratios decreased, indicating that the climate became colder and drier; Stage IV (mid-Miocene), during which quartz content relatively increased, feldspar and carbonate minerals content decreased, quartz/feldspar ratios also increased; nevertheless, compared with Stage I and II, the quartz/feldspar ratios remained small, indicating that the climate was somewhat recovered, but still in a cold and dry environment. Compared with the uplift of the Tibetan Plateau and the global climate change, the authors hold that that climatic periodic changes during Oligocene-Miocene in the Gerze Basin might have been caused by plateau uplift and the global climate change.

Key words: Tibetan Plateau; Gerze Basin; Kangtuo Formation; mineral assemblage; paleoclimate

新生代以来亚洲内陆干旱化与青藏高原的隆升或者全球气候变冷密切相关,研究青藏高原的隆升及其环境效应对指示未来气候能提供一定的科学依据(潘保田等, 1996; 王先彦等, 2006)。青藏高原新生代的沉积盆地是对造山带隆升过程的响应,盆地中沉积物可以很好的反映盆地沉积过程中的气候和环境变化的信息以及揭示其周围造山带的构造演化过程(Metivier and Gaudemer, 1997; Dupont-Nivet *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2013a, 2013b)。因此,利用盆地沉积物组合特征重建古气候、反演青藏高原的隆升事件已经成为当前研究的热点,比如对西藏南部的吉隆盆地(Wang *et al.*, 1996; Hong *et al.*, 2010)、札达盆地(Hong *et al.*, 2012)、东北缘的临夏盆地(Hong *et al.*, 2007; 方小敏等, 2007; 徐先海等, 2008)、柴达木盆地(Song *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2013a)等的研究,并取得了丰硕的成果。这些盆地位于青藏高原的南部及东北缘,而对于青藏高原的中部地区沉积盆地的研究较为匮乏(Liu *et al.*, 2001)。中部盆地多为直接受青藏高原隆升影响而形成的压陷或拉分盆地,与青藏高原隆升密切相关,蕴含着青藏高原新生代隆升与古气候环境演化的重要信息(DeCelles *et al.*, 2007)。

盆地沉积物主要由物源碎屑矿物组成,碎屑矿物是源区母岩遭受剥蚀、风化而来的产物,它们含量的变化能直接反应气候对岩石风化作用的影响,因而对气候变化十分敏感(Yang *et al.*, 2006; 王中波

等, 2006; Roy *et al.*, 2008)。石英、长石为改则盆地康托组沉积物中碎屑矿物的主要组成部分,其含量远高于盆地沉积物中的其他碎屑矿物,采用它们作为反映气候的指标,更加直观明显(Wang *et al.*, 2011)。此外,由于青藏高原中部新生代以来普遍处于比较干旱的气候环境下,盆地沉积物中经常出现大量的碳酸盐矿物,它们主要为化学沉积的产物(Wang *et al.*, 2013b),这些碳酸盐矿物对气候环境的响应十分敏感。碎屑矿物中石英的耐风化能力较强,长石的耐风化能力相对较弱,石英和长石的相对含量以及石英与长石比值的变化,能很好的反映当时环境的化学风化强弱变化(Garzanti *et al.*, 2014; Perri *et al.*, 2014)。沉积盆地中碳酸盐矿物主要由方解石和白云石组成,它们在地层纵向上的含量变化能有效揭示气候干冷湿热的变化(贺永忠等, 2008; 叶明阳等, 2009; Warrier *et al.*, 2014)。因此,本文选取沉积物中的碳酸盐矿物以及主要的碎屑矿物相结合进行分析,并结合盆地沉积相演化分析资料,探究改则盆地康托组沉积物记录的气候环境演化信息。

1 研究区地质概况

西藏改则盆地位于西藏羌塘地块、阿里地区的东部,是特提斯洋闭合后受印度-欧亚板块碰撞影响,在班公湖-怒江缝合带南侧形成的山间断陷盆地

(张克信等, 2010a, 2010b; 姜高磊等, 2013)(图1)。沉积盆地地层出露连续, 主要为古近系的纳丁措组(E_n)、美苏组(E_m)和新近系的康托组(EN_k)以及第四系沉积物。纳丁措组为一套中基性火山熔岩夹火山碎屑岩组合, 美苏组为一套基性-酸性火山熔岩为主夹火山碎屑岩组合, 康托组主要岩性为紫红色砾岩夹紫红、浅灰、灰黑色砂岩、含砾砂岩、粉砂岩、

粉砂质泥岩(姜高磊等, 2013)(图1)。盆地的两侧存在着大片蛇绿岩, 是班公湖-怒江缝合带在侏罗世洋壳俯冲而形成的。由于地处班公湖-怒江缝合带部位, 以及新生代以来青藏高原隆升的影响, 羌塘地区构造活动以及岩性岩相复杂, 因此, 改则盆地康托组先后地层顺序有待进一步探讨和研究。张克信等(2007)通过对青藏高原新近纪残留盆地的研究, 表

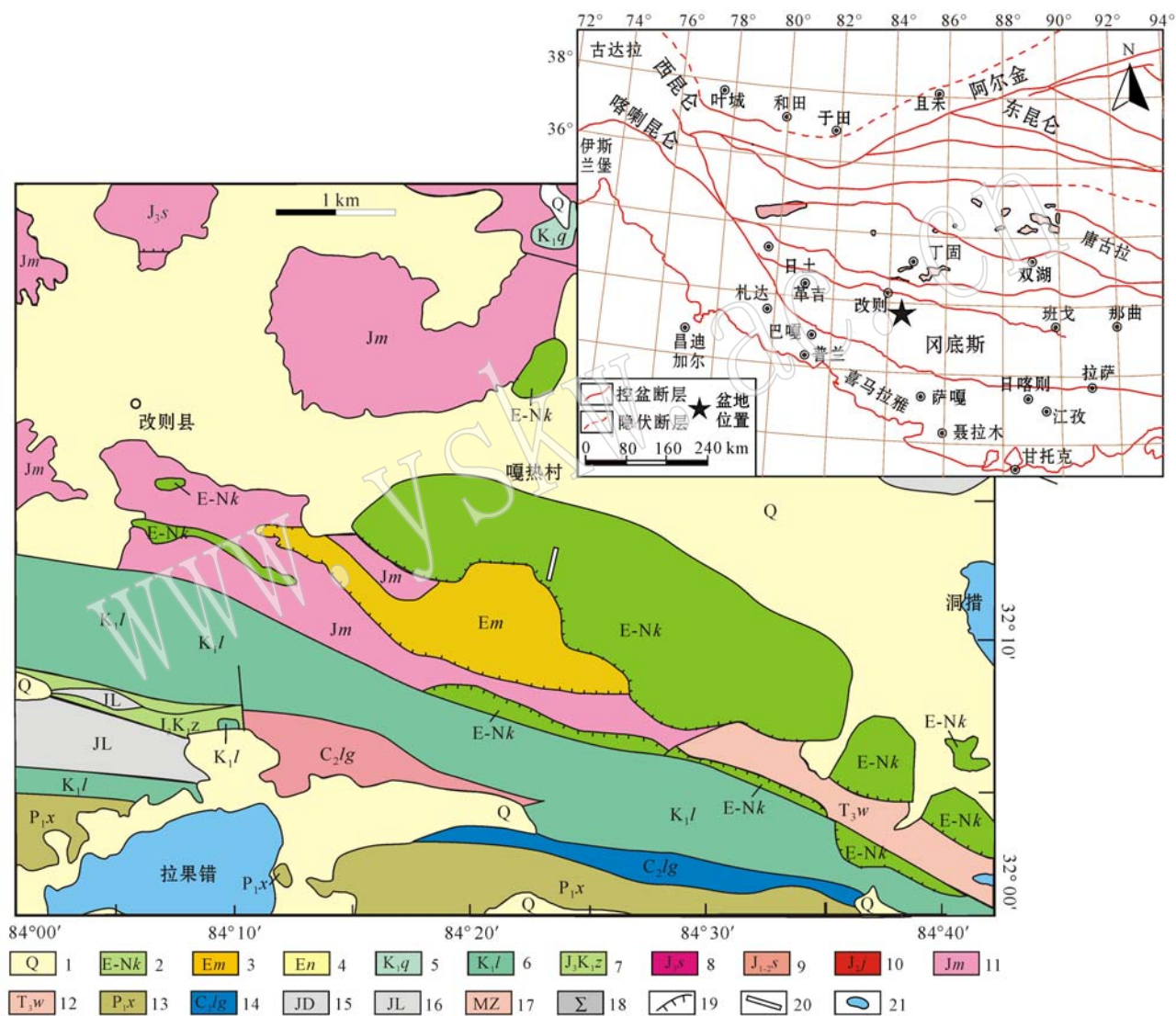


图1 改则盆地构造位置及地质简图(修改自姜高磊等, 2013)

Fig. 1 Tectonic location of Gerze Basin and geological sketch map of the study area (modified after Jiang *et al.*, 2013)

1—第四系; 2—康托组; 3—美苏组; 4—纳丁措组; 5—去申拉组; 6—郎山组; 7—则弄组; 8—沙木罗组; 9—色哇组; 10—捷不曲组; 11—木嘎岗日岩组; 12—巫嘎组; 13—下拉组; 14—拉嘎组; 15—洞措蛇绿岩; 16—拉果措蛇绿岩; 17—仲岗洋岛岩片; 18—未分超基性岩; 19—角度不整合; 20—研究剖面; 21—湖泊

1—Quaternary; 2—Kangtuo Formation; 3—Meicuo Formation; 4—Nading Co Formation; 5—Qushenla Formation; 6—Langshan Formation; 7—Zenong Formation; 8—Shamuluo Formation; 9—Sewa Formation; 10—Jiebuqu Formation; 11—Mugagangri Rock Formation; 12—Wuga Formation; 13—Xiala Formation; 14—Laga Formation; 15—Dongco ophiolite; 16—Lhaguo Co ophiolite; 17—Zhonggang oceanic islands rock slices; 18—ultrabasic rocks; 19—angular unconformity; 20—studied section; 21—lake

明康托组直接不整合于牛堡组之上(张克信等, 2007)。羌塘腹地丁固-加措地区, 康托组与上覆地层鱼鳞山组呈不整合接触关系, 但鱼鳞山组仅能对比于班公湖-怒江缝合带以北的地区(岳龙等, 2006)。前人对羌塘地块沉积地层序列的研究发现, 康托组不整合于火山岩地层纳丁措组和美苏组之上(张克信等, 2010a)。在改则日玛、纳丁措地区石坪顶组与康托组呈不整合接触, 且覆于康托组之上(蔚远江等, 2002)。姜高磊等(2013)认为改则盆地康托组为新近系地层, 其下覆地层为古近系纳丁措组和美苏组(姜高磊等, 2013)。因此, 通过对该地区的研究进行总结, 本文将改则盆地新生代地层分为古近系纳丁措组以及美苏组, 新近系康托组和石坪顶组。

由于改则地区构造活动复杂以及缺少有效的年代学研究手段, 改则盆地康托组年代存在较大争议。王波明等(2009)通过对这一区域的孢粉组合及鱼化石进行研究, 得出牛堡组时代为始新世。谢国刚等(2003)对尼玛地区美苏组的火山岩开展同位素研究得出, 美苏组地质时代可能为 56~45 Ma, 属于古新世到始新世。对班公湖-怒江缝合带以南改则地区康托组下覆地层纳丁措组的火山岩研究表明, 纳丁措组的火山岩同位素测年为 32.60 Ma(张克信等, 2010a), 表明康托组的形成时代至少应晚于 32.80 Ma。李才等(2006)对康托组底部火山岩分别用 ^{40}Ar - ^{39}Ar 和 K-Ar 测年获得了 30.5 ± 0.6 Ma 和 28.4~29.3 Ma 的年代数据(李才等, 2006), 这和西藏自治区地质调查院获得的 29.6 Ma 的 K-Ar 年龄具有很好的一致性, 表明康托组的形成时代应不晚于早渐新世。35~26 Ma 是冈底斯地区重要的火山喷发和岩浆侵入时期(王国灿等, 2010), 研究剖面底部的三层(4、6、9 层)安山岩夹层, 是对冈底斯火山喷发时期(35~26 Ma)的响应。前人对康托组上覆地层石坪顶组火山岩测年为 10.6 Ma(刘荣等, 2006)。张克信等(2010a)对青藏高原古近纪-新近纪地层分区与序列的研究时也认为康托组形成于早渐新统-中中新统。综合考虑前人的研究成果, 厘定改则盆地康托组的沉积响应始于早渐新世, 结束于中新世中期, 康托组底部渐新世的沉积年龄为 30 Ma 左右, 顶部中新世中期沉积年龄为 10 Ma 左右。

通过对改则盆地康托组沉积环境沉积相研究表明, 剖面主要为陆内湖泊沉积, 从水下扇相紫红-砖红色厚层状中-细砾岩、红褐色薄层状岩屑砂岩以及泥

岩与岩屑砂岩互层向上转变为湖泊三角洲相泥岩与石英岩屑砂岩互层为特征和湖泊相多个泥沙逆序旋回以及厚层状泥岩。剖面中遗迹化石丰富, 种类多样, 主要为鸟类脚印、潜穴、痕迹等(姜高磊等, 2013)。

2 材料及方法

样品选取首先按照研究区所有样品的岩性分开, 如砂岩、粉砂岩、泥岩等。而每种岩性又可以细分, 如按泥岩里含粉砂质、钙质成分的多少分开, 细砂岩和粉砂岩也一样。这样就更全面的把握研究区岩石岩性类型。取样品时把所有的样品取全, 让其更具有代表性。

根据改则盆地康托组沉积物岩性特征、碎屑组成、粒度特征以及颜色, 选取了 150 个代表性样品, 样品间距 3~12 m, 样品岩性主要为砂岩、粉砂岩以及泥岩。对每个代表性样品选取大约 20 g 在 70 °C 烘箱中加热 24 h。利用玛瑙研钵把样品磨至小于 0.074 mm。然后将磨制好的粉末样品放入带有凹槽的载玻片中压实, 制成全岩薄片。

全岩样品的 X 射线衍射在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室 Panalytical X'Pert PRO DY2198 衍射仪上进行, 为铜靶辐射, 工作电压和电流分别为 40 kV 和 40 mA, 相对湿度 40%。扫描过程采用连续扫描方式, 扫描范围(2θ)为 3°~65°, 4°/min。

沉积物中矿物的鉴定主要根据其在 XRD 图谱中不同的特征峰值来判别(如图 2)。全岩样品中矿物相对含量的半定量计算方法采用 Hillier 在 2000 年提出的一种利用特征峰值的峰面积与衍射强度相结合的计算方法(Hillier, 2000)。方解石、石英、长石和白云石在 X 粉晶衍射中分别采用的特征峰值为 3.03 Å、4.26 Å、3.18 Å 和 2.88 Å。半定量计算方法是以前玉矿物为标准来计算其他矿物的相对含量, 方解石、石英、长石和白云石对于刚玉 012 峰值 3.48 Å 的相对强度分别为 3.58、1.14、2.25、3.58 (Hong *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011)。

3 结果及讨论

3.1 改则盆地康托组物源的讨论

一般说来, 沉积物中碎屑矿物主要来源于母岩, 碎屑矿物的物源的稳定性以及搬运距离会对研究结

果造成很大影响。改则盆地康托组时期的古流向总体显示为 N、NNE 和 NNW, 说明改则盆地康托组在沉积过程阶段古流向变化不大, 沉积物源相对稳定, 主要来自盆地南侧的较陡区域或者南部的冈底斯隆起区(姜高磊等, 2013)。

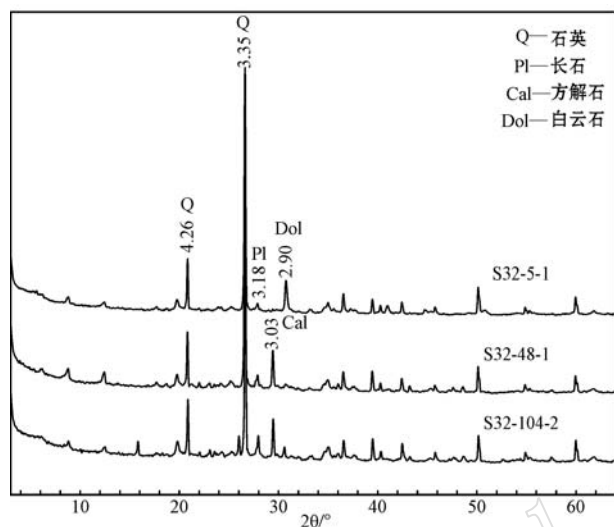


图2 改则盆地康托组代表性样品的 X 射线衍射图

Fig. 2 X-Ray diffraction patterns of the representative samples in the Kangtuo Formation sediments in Gerze basin

改则剖面中常见重矿物组合为锆石、磷灰石、电气石、金红石以及角闪石矿物, 这些重矿物组合特征指示物源以火山岩为主。而改则盆地南缘广泛分布的侏罗系复理石建造、混杂岩、海相砾岩, 白垩系火山岩和蛇绿岩等近物源可能为改则盆地提供丰富的物质来源(Kapp *et al.*, 2005)。

改则盆地中粘土矿物的组合及其含量变化主要受气候因素控制影响, 后期成岩作用对其控制并不明显(Eping *et al.*, 2014)。新生代以来, 改则盆地普遍处于干冷气候条件, 地下水系并不发育, 地下水对岩石中的碎屑矿物的含量变化虽有影响, 但作用并不明显。

3.2 碳酸盐矿物成因讨论

通过对改则盆地沉积物的全岩进行 XRD 射线分析得出, 碳酸盐矿物连续存在于整个剖面, 且为沉积物的重要组成部分。但沉积物中碳酸盐矿物的自生成因还是碎屑成因, 它们的气候指示意义不同, 会对改则盆地气候分析造成很大影响(佟宏鹏等, 2012)。因此, 很有必要对沉积物中碳酸盐矿物的成因进行探讨。

挑选了改则盆地沉积物中典型的样品进行扫描

电镜(SEM)观察, 碳酸盐矿物可能由于风化作用, 很难观察到完整的形貌, 此次观察结合能谱进行分析。在扫描镜下观察发现, 碳酸盐矿物形态复杂, 显晶质碳酸盐和隐晶质碳酸盐均有出现。显晶质碳酸盐矿物由于风化作用影响, 表面侵蚀严重, 单晶碳酸盐矿物也多为不完整菱面体。扫描电镜下可以看出碳酸盐颗粒表面大多较为平滑, 未见有搬运颗粒碰撞产生的碰撞痕迹。隐晶质碳酸盐矿物多以充填空隙物或胶结物形式存在于沉积物中。通过镜下碳酸盐矿物的特征显示改则盆地碳酸盐矿物为自生成因(杨作升等, 2009; 董林森等, 2011)。进一步对改则盆地地质研究发现, 改则盆地周缘以冈底斯隆升期新生代的火山岩地层为主, 并未见有灰岩地层出露(Kapp *et al.*, 2005)。综合上述讨论, 改则盆地沉积物中的碳酸盐矿物为自生成因。

3.3 改则盆地沉积物矿物特征以及古气候变化

X 射线粉晶衍射分析表明, 改则盆地康托组主要矿物种类为石英、长石、方解石和少量白云石, 在整个研究剖面中, 石英和长石连续存在。石英相对含量最高, 在 28%~88% 之间变化, 平均含量约为 71%; 长石的相对含量为 4%~28%, 平均含量为 12%; 方解石虽不是连续存在整个剖面, 但在剖面中出现频繁, 仅在少数层位中缺失, 方解石相对含量 0~40%, 平均含量约为 14%; 白云石呈间歇性出现, 但最高相对含量可达 61%, 平均含量仅为 3%。因此, 沉积物中主要矿物以石英长石为主, 碳酸盐矿物次之。石英和长石是由母岩剥蚀搬运而重新沉积的碎屑矿物, 石英的耐风化能力比较强, 长石相对较弱, 石英和长石相对含量的多少, 能在一定程度上反映当时环境的风化强度, 即指示古气候的变化(Garzanti *et al.*, 2014; Perri *et al.*, 2014)。在研究剖面中碳酸盐矿物频繁出现, 且相对含量的变化较大, 可以有效反映当时古气候的变化。降水量越大, 即气候越湿润, 碳酸盐矿物溶解量越大, 在沉积物中相对含量会减少; 温度越高, 水中溶解 CO_2 含量越低, 也会导致沉积物中碳酸盐矿物含量会降低(叶明阳等, 2009; Warrier *et al.*, 2014)。碳酸盐矿物的保存也与化学风化程度有关, 风化作用越强, 碳酸盐矿物越不容易保存, 反之, 则利于保存(杨作升等, 2009)。所以沉积物中碳酸盐矿物的相对含量多少也能反映该时段气候的干冷湿热的变化。

为了更好地代表改则盆地康托组沉积物中主要矿物含量以及石英/长石比值变化的总体趋势, 将所

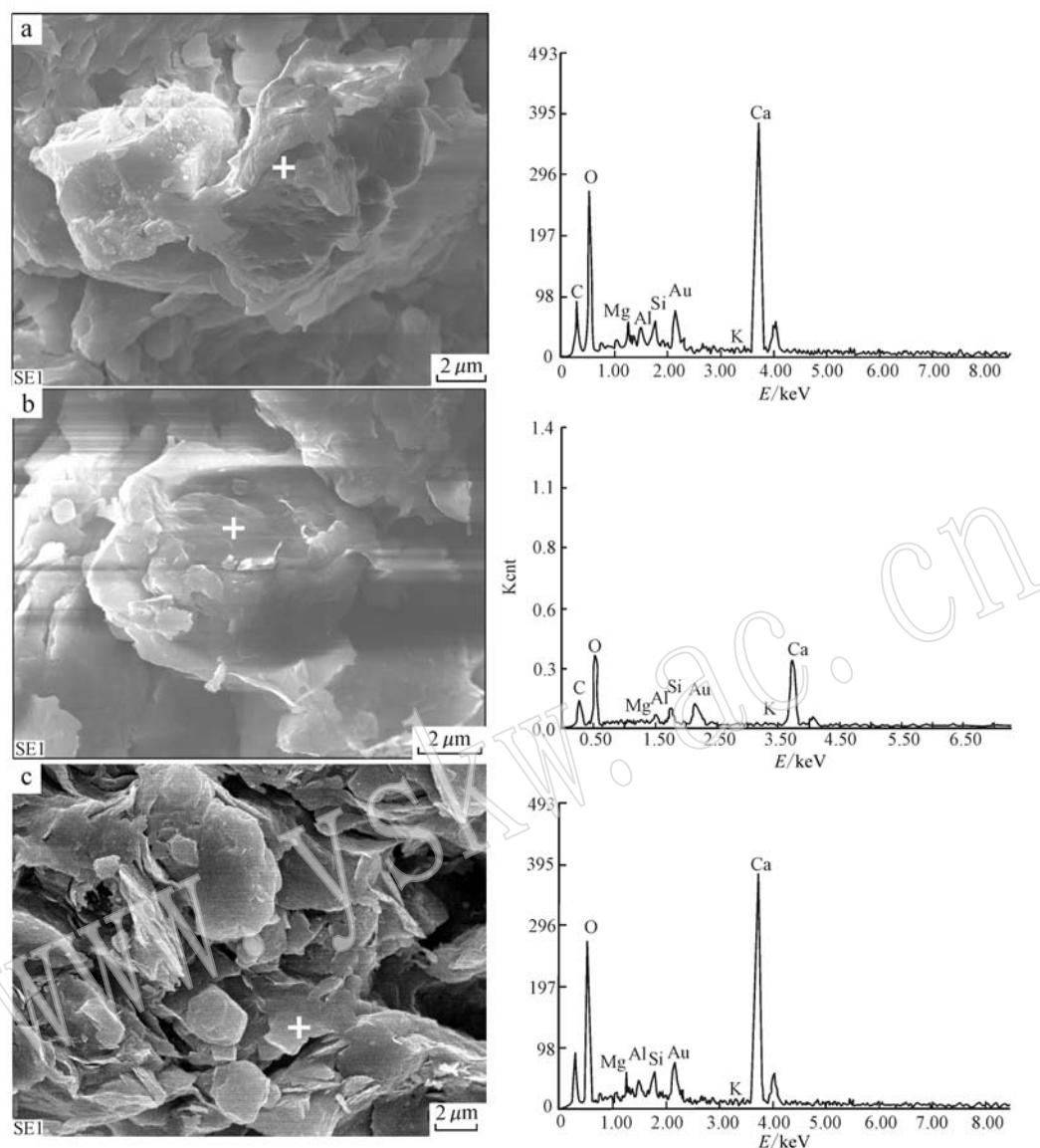


图 3 改则盆地沉积物中碳酸盐矿物扫描电子分析典型形貌及其能谱图

Fig. 3 Scanning electron analysis and energy spectrum diagram of carbonate minerals in the Kangtuo Formation sediments in Gerze Basin

得的数据采用九点平均法和标准方差法进行处理(图 3)。改则盆地沉积物虽然主要含石英、长石、方解石和少量白云石,但沉积物中主要矿物组合和含量随深度变化存在明显的变化。根据沉积物矿物含量和石英/长石比值变化,将改则盆地康托组气候变化划分为 4 个阶段(图 4)。

(1) 下部(0~271.24 m): 该段主要为早渐新世,属于剖面的 1~25 层,该阶段石英含量在 48%~87%之间变化,平均含量约 77%;长石含量在 4%~18%之间,平均含量仅为 8%。该段石英/长石比值变化较大且较为频繁,总体在 5~15 之间变化,表明

该阶段化学风化作用较为明显且气候波动较大,呈现季节性变化。该段地层沉积物的碳酸盐矿物含量在 5%~30%之间变化,平均含量约为 15%。此阶段白云石出现较为频繁,但含量变化较为明显,显示该阶段气候以季节性干旱为主。因此,该段沉积物中矿物的特征揭示改则盆地该段时间的气候以干旱为主,但总体呈现季节性变化。

(2) 中部(271.24~691.78 m): 该段主要为晚渐新世,属于剖面的 26~85 层,该阶段石英的含量在 28%~84%,平均含量约 71%;长石含量在 7%~28%,平均含量约 12%;该段石英/长石比值总体在

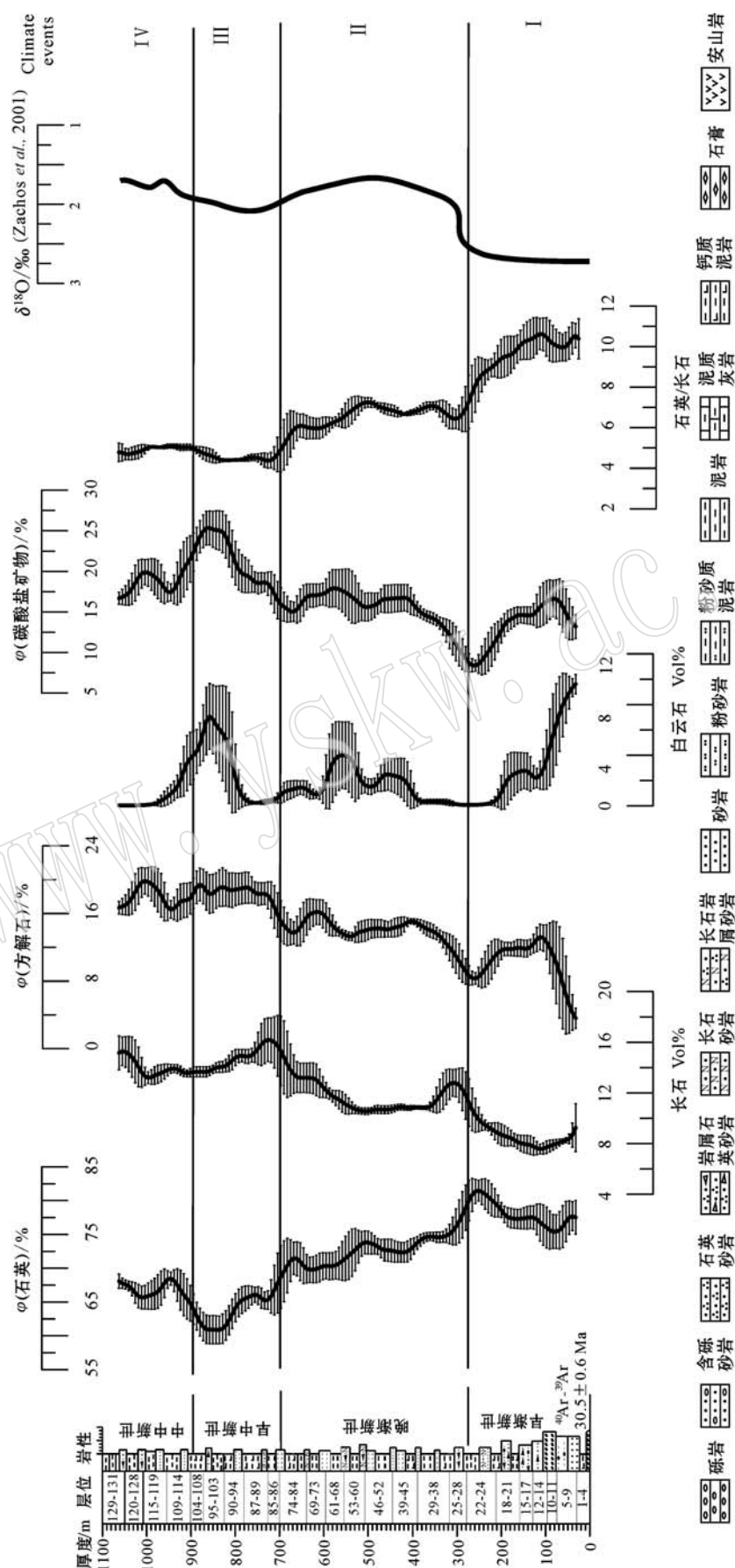


图 4 改则盆地康托组沉积物非粘土矿物相对含量和石英/长石比值以及深海沉积物中氧同位素数据图(^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄来自李才等, 2006)

Fig. 4 The relative content of non-clay minerals and the quartz/plagioclase ratio in the Kangtuo Formation sediments in Gerze Basin and oxygen isotope data of marine sediments (the age of $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ after Li Cai *et al.*, 2006)

3~10 之间变化,但整体相对较为平稳,显示该阶段气候变化较为稳定。这段时间石英相对含量稍有下降,长石的相对含量增加,石英/长石比值与下部相比减少,显示该阶段化学风化作用相对减弱。该阶段沉积物中碳酸盐矿物含量在 5%~58% 之间变化,平均含量约为 17%,整体上呈现平稳上升的趋势。虽然白云石仅在少数几个层位出现,但总碳酸盐矿物含量相比下部有所增加,这反映了该阶段气候变得更为干旱。因此,该段沉积物中矿物的特征揭示改则盆地在晚渐新世的气候逐渐趋向于干冷化。

(3) 上部(691.78~896.15 m): 该段主要为早中新世,位于剖面的 86~110 层,该阶段石英含量在 30%~88% 之间,平均含量约为 64%,石英含量显著下降,且波动较为明显;长石含量在 8%~22% 之间,平均含量约为 15%,长石含量整体上虽有所下降,但下降趋势并不明显。该段石英与长石的比值总体在 2~7 之间变化,整体变化较为平缓。但相比上一阶段,石英长石比值进一步下降,显示化学风化作用进一步减弱。该阶段沉积物中碳酸盐矿物含量在 3%~61% 变化,碳酸盐的平均含量高达 21%,相比上一阶段含量增加明显。此外,该阶段白云石显著增加,显示气候变得更为干冷。因此,该段沉积物中矿物特征反映了该阶段改则盆地气候相比之前变得更加干冷。

(4) 顶部(896.15~1090.48 m): 该段主要为中中新世,位于剖面的 111~131 层,该阶段石英含量在 41%~81% 之间,平均含量约 67%;长石含量在 9%~28% 之间,平均含量约 14%。该段石英/长石比值总体在 2~10 之间变化,变化趋势相对较为稳定。该阶段石英含量相比上部稍有增加,但依旧少于中下部;长石的含量相比上部略为减少,但含量高于中下部长石含量;石英/长石比值比上部有所增加,但仍然小于中下部的石英/长石比值,反映该阶段化学风化作用有所增强,但仍比中下部弱。该阶段沉积物中碳酸盐矿物含量在 0~51% 之间,平均含量约为 19%,含量比上部来说有所减少,反映了气候开始趋于回暖,但总体仍然较为干冷。因此,沉积物中矿物特征反映了该阶段改则盆地气候虽然有所回暖,但依旧处于相对干冷的环境。

3.4 改则盆地对高原隆升和全球气候变化的沉积响应

约 40 Ma 以来,印度与欧亚板块全面完成碰撞之后,青藏高原中部地区出现大面积的沉积缺失和

发育不整合面,说明青藏高原中部地区普遍发生了抬升和剥蚀(张克信等,2010b)。渐新世地层的底部,区域上广泛分布的角度不整合面,以及整个高原的周缘普遍出现快速剥蚀的冲积扇和山区河流相砾岩堆积,都是 34 Ma 左右高原快速隆升的耦合效应(王国灿等,2010)。姜高磊对改则盆地沉积相研究可知,早渐新世期间改则盆地处于初始断陷阶段,盆地的物源碎屑来源丰富(姜高磊等,2013)。对盆地该阶段的石英和长石含量进行分析可知,石英和长石变化趋势虽不一致,但整体上含量都有所增加,指示盆地沉积物受物源控制较明显。高原的快速隆升,特别是冈底斯山脉的崛起,为改则盆地提供了丰富的物源(徐亚东等,2013)。高原周缘山系的崛起导致了高原腹地季风增强,干旱炎热气候盛行。此外,晚始新世期间,新特提斯海的消亡进一步减少了青藏高原地区的水分的供给,使得青藏高原气候变得更为干旱(Bosboom *et al.*, 2011)。与此同时,始新世晚期到渐新世早期我国植被组成由热带亚热带常绿阔叶树为主的阔叶林转变为落叶树为主的针阔混交林(吴珍汉等,2007),说明早渐新世期间气候开始变干变冷。另外,早渐新世期间全球的 $\delta^{18}\text{O}$ 急剧增加和南极冰川大规模增长,预示着全球气候在早渐新世急剧变冷(Zachos *et al.*, 2001)。因此在高原隆升和全球变冷的双重作用下,改则盆地早渐新世气候在总体干旱的背景下呈现季节性变化。

进入晚渐新世之后,全球气候整体趋于稳定(Zachos *et al.*, 2001)。对印度地区的金丝桃科叶化石研究表明,晚渐新世期间(28~23 Ma)该地区气候温暖湿润,并未呈现季节性变化(Srivastava and Mehrotra, 2013)。深海有孔虫壳体稳定同位素研究也可知,晚渐新世全球处于大暖期(Pekar *et al.*, 2006)。然而晚渐新世期间,青藏高原中部地区经历强烈的陆陆碰撞,强烈的南北挤压作用导致羌塘地块中生界地层强烈变形,褶皱、断裂发育(Horton *et al.*, 2002; Kapp *et al.*, 2005)。高原北缘岩石圈尺度破裂形成,陆内俯冲开始,印度岩石圈发生拆沉作用,印度-雅鲁藏布江缝合带和印度陆棚变形,喜马拉雅沿主中央冲断带开始大规模隆升(张克信等,2010b; Pan *et al.*, 2012)。虽然青藏高原快速隆升剥蚀能为改则盆地提供丰富的物源,但在晚渐新世阶段,改则盆地沉积物中矿物都呈现缓慢变化趋势。可能是由于改则盆地进入稳定沉积阶段,物源对盆地沉积物的矿物含量变化虽然有一定影响,但作用

并不明显。沉积物中矿物含量变化主要受气候作用影响。晚始新世期间,石英长石比值有所减少,碳酸盐矿物含量总体呈现上升趋势,可能是由于青藏高原的隆升阻挡了印度洋水分和热流的进入,导致晚渐新世改则盆地气候趋于干冷化。

中新世早期,青藏高原隆升进一步加强,青藏高原总体的地理格局开始发生改变(王国灿等, 2011)。羌塘-可可西里地区的植硅体化石,反映渐新世晚期-中新世早期之间一次快速降温事件,对应于青藏高原的抬升和向北扩展(王国灿等, 2010)。沉积学研究显示冈底斯南部在该时间段广泛发育大竹卡组砾岩,丁固-加措地区古近系与新近系地层也呈不整合接触,这些都表明高原中部出现了明显的剥蚀和快速堆积。高强度、大范围的隆升是青藏高原晚渐新世一早中新世气候变的更加干冷的决定性因素之一(潘保田等, 1996)。对改则盆地的粘土矿物研究显示,该阶段绿泥石含量增加明显,高岭石矿物消失,指示物源发生了一定变化。沉积盆地矿物中石英总体含量下降明显,白云石含量突然升高,也都指示物源对沉积盆地的矿物控制作用明显。晚渐新世一早中新世,青海循化盆地粘土记录表明气候条件发生了由相对温暖潮湿到相对冷干的转变,揭示晚渐新世一早中新世间出现了一次极端的降温事件(约 21.3 Ma)(殷科等, 2010)。Zachos 等(2001)对海洋中 C、O 同位素研究表明,早中新世期间全球处于寒冷的冰川时期。由于受到青藏高原进一步隆升和全球气候变冷的影响,改则盆地早中新世期间气候变得更为干冷。

中新世之后,全球各大洲都处于温暖潮湿的气候(Zachos *et al.*, 2001)。循化-化隆盆地中新世的石膏层以及落叶阔叶林的孢粉特征都显示了当时温暖湿润的气候(季军良等, 2013)。柴达木盆地沉积物的矿物学研究显示柴达木盆地在中中新世气候较为温暖湿润(Wang *et al.*, 2013a)。尼泊尔 Sunray Khola 剖面的孢粉组合在中中新世期间也显示为亚热带-温带阔叶林和热带森林环境(Sanyal *et al.*, 2005)。在美洲和欧洲,植物化石记录也反映出在中中新世呈现温暖气候条件(White *et al.*, 1997)。在此期间,改则盆地碳酸盐矿物含量整体上也有所增加,石英含量也相对升高,显示改则盆地气候有所回暖。与此同时,在青藏高原腹地的羌塘-可可西里地区,盆地发生区域性抬升,海拔达到相当大的高度(王国灿等, 2010)。高原中部尼玛盆地碳酸

盐的氧同位素研究表明,喜马拉雅和冈底斯中新世之前已达到 4.5~5 km 的高度(DeCelles *et al.*, 2007)。中新世早中期热带亚热带阔叶林几乎同步消亡、暗针叶林同步进入繁盛阶段甚至跃居主导地位,指示青藏高原在渐新世中晚期发生过整体快速隆升,至中新世早中期青藏高原的古海拔高度已经达到 4 000~4 500 m(吴珍汉等, 2007)。改则盆地中新世气候虽有所回升,但相比渐新世早中期来说,仍然较为干冷,可能主要因为该时期青藏高原隆升已经达到一定高度,全球气候的回暖对改则盆地的气候虽有影响,但影响并不明显。

4 结论

(1) 对改则盆地康托组的沉积物进行 X 粉晶衍射的全岩分析,其结果显示沉积物中主要的矿物为石英、长石、方解石以及少量白云石。通过矿物的含量及特征将改则盆地气候变化划分为 4 个阶段: I (0~271.24 m)早渐新世,改则盆地气候显示为季节性干冷; II (271.24~691.78 m)晚渐新世,改则盆地气候逐渐趋向于干旱化; III (691.78~896.15 m)晚渐新世-早中新世,改则盆地的气候变得更为干冷; IV (896.15~1 090.48 m)早中新世-中新世,改则盆地的气候虽有所回升,但依旧处于干冷的环境。

(2) 改则盆地渐新世-中新世气候以干冷为背景的大环境下发生了几次大的交替变化,不仅跟青藏高原的隆升阻隔了印度洋水分和热流的进入有关,也受到全球气候变化大背景的影响,说明改则盆地的渐新世-中新世气候变化是青藏高原隆升和全球气候变化的共同结果。

致谢 感谢基金项目(GBL11307)组老师在实验方法和数据处理上的指导,也感谢学校校团委龙眉老师和朱丹的帮助。

References

- Bosboom R E, Dupont-Nivet G, Houben A, *et al.* 2011. Late Eocene sea retreat from the Tarim Basin (west China) and concomitant Asian paleoenvironmental change[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 299 (3~4): 385~398.
- DeCelles P G, Quade J, Kapp P, *et al.* 2007. High and dry in central Tibet during the Late Oligocene[J]. *Earth and Planetary Science*

- Letters, 253(3~4): 389~401.
- Dong Linsen, Liu Li, Zhu Defeng, *et al.* 2011. Distribution and impact on reservoir properties of authigenic carbonate minerals in pyroclastic Rocks of Beier Depression, Hailaer Basin[J]. Journal of Science and Environment, 33(3): 253~260(in Chinese with English abstract).
- Dupont-Nivet G, W Krijgsman, Langereis C G, *et al.* 2007. Tibetan plateau aridification linked to global cooling at the Eocene-Oligocene transition[J]. Nature, 445(7 128): 635~638.
- Eping S, Z Kexin, Jiangjun C, *et al.* 2014. Clay mineralogy and its Paleoclimatic significance of the Oligocene Miocene sediments in the Gerze Basin, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 88(5): 1 579~1 591.
- Fang Xiaomin, Xu Xianhai, Song Chunhui, *et al.* 2007. High resolution rock magnetic records of Cenozoic sediments: in the Linxia Basin and their implications on drying of Asian inland[J]. Quaternary Sciences, 27(6): 989~1 000(in Chinese with English abstract).
- Garzanti E, Padoan M, Setti M, *et al.* 2014. Provenance versus weathering control on the composition of tropical river mud (southern Africa)[J]. Chemical Geology, 366: 61~74.
- He Yongzhong, Li Xiangkun, Liu Jianqing, *et al.* 2008. Sedimentary environment of dolomite and its significance of Buqu Formation Middle Jura Series in Zharen Region, North Tibet[J]. Guizhou Geology, 25(1): 41~58(in Chinese with English abstract).
- Hillier S. 2000. Accurate quantitative analysis of clay and other minerals in sandstones by XRD: comparison of a Rietveld and a reference intensity ratio (RIR) method and the importance of sample preparation[J]. Clay Minerals, 35(1): 291~302.
- Hong H L, K X Zhang, Li Z H, *et al.* 2010. Climatic and tectonic uplift evolution since similar to 7 Ma in Gyirong basin, southwestern Tibet plateau: clay mineral evidence[J]. International Journal of Earth Sciences, 99(6): 1 305~1 315.
- Hong H L, Wang C W, Zeng K F, *et al.* 2012. Clay mineralogy of the Zhada sediments: Evidence for Climatic and Tectonic Evolution Since similar to 9 ma in Zhada, Southwestern Tibet[J]. Clays and Clay Minerals, 60(3): 240~253.
- Hong H L, Li Z H, Xue H J, *et al.* 2007. Oligocene clay mineralogy of the Linxia Basin: Evidence of Paleoclimatic evolution subsequent to the initial-stage uplift of the Tibetan Plateau[J]. Clays and Clay Minerals, 55(5): 491~503.
- Horton B K, Yin A, Spurlin M S, *et al.* 2002. Paleocene-Eocene syn-contractual sedimentation in narrow, lacustrine-dominated basins of east-central Tibet[J]. Geological Society of America Bulletin, 114(7): 771~786.
- Ji Junliang, Hong Hanlie, Xiao Guoqiao, *et al.* 2013. Evolutionary sequences of the Neogene major climatic events in the Tibetan Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 32(1): 120~129(in Chinese with English abstract).
- Jiang Gaolei, Han Fang, Song Bowen, *et al.* 2013. Sedimentary facies analysis of the Oligocene-Miocene Kangtuo Formation in Gerze Basin, Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 32(1): 165~174(in Chinese with English abstract).
- Kapp P, Yin A, Harrison T M, *et al.* 2005. Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet[J]. Geological Society of America Bulletin, 117(7~8): 865~878.
- Li Cai, Huang Xiaopeng, Mou Shiyong, *et al.* 2006. Age dating of the zougouchacuo volcanic rocks and age determination of the Kangtog Formation in southern Qiangtang, northern Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 25(1): 226~228(in Chinese with English abstract).
- Liu Rong, Lü Jingang, Wu Xinzong, *et al.* 2006. Time and environment of formation and geochemical characteristics of the Chenyuhu to Xiangyanghu Shipingding group volcanic rocks in Northern Tibet[J]. Xinjiang Geology, 24(2): 109~114(in Chinese with English abstract).
- Liu Z F, Wang C S, Yi H S, *et al.* 2001. Evolution and mass accumulation of the Cenozoic Hoh Xil basin, northern Tibet[J]. Journal of Sedimentary Research, 71(6B): 971~984.
- Metivier F and Gaudemer Y. 1997. Mass transfer between eastern Tien Shan and adjacent basins (central Asia): Constraints on regional tectonics and topography[J]. Geophysical Journal International, 128(1): 1~15.
- Pan Baotian and Li Jijun. 1996. Qinghai-Tibetan plateau: a driver and amplifier of the global climatic change III—The effects of the uplift of Qinghai-Tibetan Plateau on climatic changes[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 32(1): 108~115(in Chinese with English abstract).
- Pan G T, Wang L Q, Li R S, *et al.* 2012. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 53(SI): 3~14.
- Pekar S F, DeConto R M and Harwood D M. 2006. Resolving a late Oligocene conundrum: Deep-sea warming and Antarctic glaciation[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 231(1~2): 29~40.
- Perri F, L Borrelli, Gulla G, *et al.* 2014. Chemical and mineralogical features of Plio-Pleistocene fine-grained sediments in Calabria, southern Italy[J]. Italian Journal of Geosciences, 133(1): 101~115.
- Roy P D, Caballero M, Lozano R, *et al.* 2008. Geochemistry of late quaternary sediments from Tecocomulco lake, central Mexico: Implication to chemical weathering and provenance[J]. Chemie Der Erde-Geochemistry, 68(4): 383~393.
- Sanyal P, Bhattacharya S K and Prasad M. 2005. Chemical diagenesis of Si-

- walik sandstone: Isotopic and mineralogical proxies from Surai Khola section, Nepal[J]. *Sedimentary Geology*, 180 (1~2): 57~74.
- Song B W, K X Zhang, Chen R M, *et al.* 2013. The sedimentary record in Northern Qaidam Basin and its response to the uplift of the South Qilian Mountain at around 30 Ma[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 87 (2): 528~539.
- Srivastava G and Mehrotra R C. 2013. Endemism due to climate change: Evidence from Poeciloneuron Bedd. (Clusiaceae) leaf fossil from Assam, India[J]. *Journal of Earth System Science*, 122(2): 283~288.
- Tong Hongpeng and Chen Duofu. 2012. First discovery and characterizations of late Cretaceous seep carbonates from Xigaze in Tibet[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 36(57): 3 500~3 510(in Chinese with English abstract).
- Wang Boming, Zhou Jiasheng, Wen Tao, *et al.* 2009. Timing of terrestrial strata in Tibetan Nyima Basin and its significance[J]. *Natural Gas Technology*, 3(4): 21~24(in Chinese with English abstract).
- Wang C W, Hong H L, Li Z H, *et al.* 2013a. Climatic and tectonic evolution in the North Qaidam since the Cenozoic: Evidence from sedimentology and mineralogy[J]. *Journal of Earth Science*, 24 (3): 314~327.
- Wang C W, Hong H L, Li Z H, *et al.* 2013b. The Eocene-Oligocene climate transition in the Tarim Basin, Northwest China: Evidence from clay mineralogy[J]. *Applied Clay Science*, 74 (S1): 10~19.
- Wang C W, Hong H L, Song B W, *et al.* 2011. The early-Eocene climate optimum (EECO) event in the Qaidam basin, northwest China: clay evidence[J]. *Clay Minerals*, 46 (4): 649~661.
- Wang F B, Li S F, Shen X H, *et al.* 1996. Formation, evolution and environmental changes of the Gyirong basin and uplift of the Himalaya[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 39(4): 401~409.
- Wang Guocan, Cao Kai, Zhang Kexin, *et al.* 2011. Spatio-temporal framework of tectonic uplift stages of the Tibetan Plateau in Cenozoic[J]. *Sci. China Earth Sci.*, 41(3): 332~349(in Chinese with English abstract).
- Wang Guocan, Zhang Kexin, Cao Kai, *et al.* 2010. Expanding-processes of the Qinghai-Tibet Plateau during Cenozoic: an insight from Spatio-Temporal difference of uplift[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 713~727(in Chinese with English abstract).
- Wang Xianyan, Lu Huayu, Ji Junfeng, *et al.* 2006. Causes of the Miocene sequence of red earthy accumulation in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau Margin and its indication of the Aridification of Asian Inland[J]. *Sci. China Earth Sci.*, 36(3): 261~272(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhongbo, Yang Shouye, Li Ping, *et al.* 2006. Detrital mineral compositions of the Changjiang River sediments and their tracing implications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(4): 570~578(in Chinese with English abstract).
- Warrier A K, Shankar R and Sandeep K. 2014. Sedimentological and carbonate data evidence for lake level variations during the past 3 700 years from a southern Indian lake[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 397 (S1): 52~60.
- Wei Yuanjiang, Yang Xiaoping, Lei Zhenyu, *et al.* 2002. A preliminary study of the Mesozoic-Cenozoic Palaeoclimate evolution in Changlala areas, Qiangtang Basin, Northern Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23 (1): 55~62(in Chinese with English abstract).
- White J M, Ager T A, Adam D P, *et al.* 1997. An 18 million year record of vegetation and climate change in northwestern Canada and Alaska: Tectonic and global climatic correlates[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 130 (1~4): 293~306.
- Wu Zhenhan, Wu Zhonghai, Hu Daogong, *et al.* 2007. Geological evidences for the Tibetan Plateau uplifted in Late Oligocene[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(5): 577~587(in Chinese with English abstract).
- Xie Guogang, Liao Siping, Luo Xiaochuan, *et al.* 2003. Establishment of the Paleogene Meisu Formation in the Nyima area, Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(5): 341~345(in Chinese with English abstract).
- Xu Xianhai, Fang Xiaomin, Song Chunhui, *et al.* 2008. Grain-size record of Cenozoic Lacustrine sediments from Linxia Basin and the aridification of Asian Inland[J]. *Journal of Lake Sciences*, 20(1): 65~75(in Chinese with English abstract).
- Xu Yadong, Zhang Kexin, Chen Ruiming, *et al.* 2013. Oligocene tectonic lithofacies paleogeography of the Tibetan Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(1): 44~55(in Chinese with English abstract).
- Yang S Y, Li C X and Cai J G. 2006. Geochemical compositions of core sediments in eastern China: Implication for Late Cenozoic palaeoenvironmental changes [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 229(4): 287~302.
- Yang Zuosheng, Wang Haicheng, Qiao Shuqing, *et al.* 2009. Carbonate minerals in Estuary sediments of the Changjiang and Huanghe: the content, morphology, and influential factors[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 40(6): 674~681(in Chinese with English abstract).
- Ye Mingyang, Li Tingyong, Wang Jianli, *et al.* 2009. Study on variations of speleothem and the relationship between pedogenic carbonates and precipitation in Furong cave[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(4): 684~690(in Chinese with English abstract).

- Yin Ke, Hong Hanlie, Li Rongbiao, *et al.* 2010. Clay mineralogy and its Palaeoclimatic indicator of the Late Oligocene and Early Miocene in Xunhua Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 29(3): 41~48(in Chinese with English abstract).
- Yue Long, Mou Shiyong, Zeng Changxing, *et al.* 2006. Age of the Kangtuo Formation in the Dinggo-Gyaco area, Qiangtang, northern Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 25(1): 229~232 (in Chinese with English abstract).
- Zachos J M, Pagani, Sloan L, *et al.* 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present[J]. Science, 292(517): 686~693.
- Zhang Kexin, Wang Guocan, Chen Fenning, *et al.* 2007. Coupling between the uplift of Qinghai-Tibet Plateau and distribution of Basins of Paleogene-Neogene[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 32(5): 583~597(in Chinese with English abstract).
- Zhang Kexin, Wang Guocan, Ji Junliang, *et al.* 2010a. Paleogene-Neogene stratigraphic realm and sedimentary sequence of the Qinghai-Tibet Plateau and their response to uplift of the plateau[J]. Sci. China Earth Sci., 40(12): 1 632~1 654(in Chinese with English abstract).
- Zhang Kexin, Wang Guocan, Luo Mansheng, *et al.* 2010b. Evolution of tectonic lithofacies paleogeography of Cenozoic of Qinghai-Tibet Plateau and its response to uplift of the plateau[J]. Earth Science - Journal of China University of Geosciences, 35(5): 697~712(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 董林森, 刘立, 朱德丰, 等. 2011. 海拉尔盆地贝尔凹陷火山碎屑岩自生碳酸盐矿物分布及对储层物性的影响[J]. 地球科学与环境学报, 33(3): 253~260.
- 方小敏, 徐先海, 宋春晖, 等. 2007. 临夏盆地新生代沉积物高分辨率岩石磁学记录与亚洲内陆干旱化过程及原因[J]. 第四纪研究, 27(6): 989~1 000.
- 贺永忠, 李祥坤, 刘建清, 等. 2008. 藏北扎仁地区中侏罗统布曲组白云岩的沉积环境及意义[J]. 贵州地质, 25(1): 41~58.
- 季军良, 洪汉烈, 肖国桥, 等. 2013. 青藏高原新近纪重大气候事件演化序列[J]. 地质通报, 32(1): 120~129.
- 姜高磊, 韩芳, 宋博文, 等. 2013. 西藏改则盆地渐新统一中新统康托组沉积相特征[J]. 地质通报, 32(1): 165~174.
- 李才, 黄小鹏, 牟世勇, 等. 2006. 藏北羌塘南部走构由茶错地区火山岩定年与康托组时代的厘定[J]. 地质通报, 25(1): 226~228.
- 刘荣, 吕金刚, 吴新忠, 等. 2006. 藏北沉鱼湖-向阳湖一带石坪顶组火山岩特征、形成时代及环境[J]. 新疆地质, 24(2): 109~114.
- 潘保田, 李吉均. 1996. 青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器——Ⅲ. 青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. 兰州大学学报, 32(1): 108~115.
- 佟宏鹏, 陈多福. 2012. 西藏日喀则晚白垩世冷泉碳酸盐岩的发现及其特征[J]. 科学通报, 36(57): 3 500~3 510.
- 王波明, 周家声, 闻涛, 等. 2009. 西藏尼玛盆地陆相地层归属及其油气意义[J]. 天然气技术, 3(4): 21~24.
- 王国灿, 曹凯, 张克信, 等. 2011. 青藏高原新生代构造隆升阶段的时空格局[J]. 中国科学: 地球科学, 41(3): 332~349.
- 王国灿, 张克信, 曹凯, 等. 2010. 从青藏高原新生代构造隆升的时空差异性看青藏高原的扩展与高原形成过程[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 35(5): 713~727.
- 王先彦, 鹿化煜, 季峻峰, 等. 2006. 青藏高原东北缘中新世红色土状堆积序列的成因及其对亚洲干旱过程的指示[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 36(3): 261~272.
- 王中波, 杨守业, 李萍, 等. 2006. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义[J]. 沉积学报, 24(4): 570~578.
- 蔚远江, 杨晓萍, 雷振宇, 等. 2002. 羌塘盆地查郎拉地区中新世古气候演化初探[J]. 地球学报, 23(1): 55~62.
- 吴珍汉, 吴中海, 胡道功, 等. 2007. 青藏高原渐新世晚期隆升的地质证据[J]. 地质学报, 81(5): 577~587.
- 谢国刚, 廖思平, 罗小川, 等. 2003. 西藏尼玛地区古近纪美苏组的建立[J]. 地质通报, 22(5): 341~345.
- 徐先海, 方小敏, 宋春晖, 等. 2008. 临夏盆地新生代沉积物粒度记录与亚洲内陆干旱化[J]. 湖泊科学, 20(1): 65~75.
- 徐亚东, 张克信, 陈锐明, 等. 2013. 青藏高原渐新世构造岩相古地理[J]. 地质通报, 32(1): 44~55.
- 杨作升, 王海成, 乔淑卿, 等. 2009. 黄河与长江入海沉积物中碳酸盐含量和矿物颗粒形态特征及影响因素[J]. 海洋与湖沼, 40(6): 674~681.
- 叶明阳, 李廷勇, 王建力, 等. 2009. 芙蓉洞次生碳酸盐沉积特征及与降水的关系研究[J]. 沉积学报, 27(4): 684~690.
- 殷科, 洪汉烈, 李荣彪, 等. 2010. 循化盆地晚渐新世一早中新世沉积物中黏土矿物特征及其古气候指示意义[J]. 地质科技情报, 29(3): 41~48.
- 岳龙, 牟世勇, 曾昌兴, 等. 2006. 藏北羌塘丁固-加措地区康托组的时代[J]. 地质通报, 25(1): 229~232.
- 张克信, 王国灿, 陈奋宁, 等. 2007. 青藏高原古近纪-新近纪隆升与沉积盆地分布耦合[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 32(5): 583~597.
- 张克信, 王国灿, 季军良, 等. 2010a. 青藏高原古近纪-新近纪地层分区与序列及其对隆升的响应[J]. 中国科学: 地球科学, 40(12): 1 632~1 654.
- 张克信, 王国灿, 骆满生, 等. 2010b. 青藏高原新生代构造岩相古地理演化及其对构造隆升的响应[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 35(5): 697~712.