

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.01.008

东北非地层区划及其地层格架与对比

王成刚, 向文帅, 李福林*, 王建雄, 吴发富, 李勇

WANG Chenggang, XIANG Wenshuai, LI Fulin*, WANG Jianxiong, WU Fafu, LI Yong

中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205

Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China

摘要:东非造山带作为全球出露较完整的前寒武系造山带之一,蕴藏了丰富的矿产资源。在查阅苏丹、厄立特里亚、埃塞俄比亚基础地质资料的基础上,将研究区划分为撒哈拉、东非和东冈瓦纳 3 个地层大区,进一步划分出 Nukheila、Zalingei、Bayuda、Muglad-Kosti、努比亚、莫桑比克、East Ogaden 和 West Ogaden 8 个地层区。其中,努比亚地层区和莫桑比克地层区划分出 Cabgaba 地体、Gebeit 地体、Haya 地体、Barka 地体、Hagar 地体、Adobha Abiy 地体、Nacfa 地体、White Nile 裂陷盆地、Butana 基底、Ingessana-Gambela 基底、Dodola-Moyale 基底、Bule Nile-Atbara 裂陷盆地和 Main Ethiopia 裂陷盆地 13 个地层分区。在此基础上,对各地层区或分区中岩石地层单元进行了梳理,结合前人同位素年代地层学和生物地层学的研究成果进行对比分析,重新厘定上述各地层区划内岩石地层格架。通过对各地层区划内物质组成、构造特征及沉积环境的对比分析,总结了沉积地层对地质事件的响应、探讨了研究区中生代古地貌特征,并分析了研究区的找矿潜力区。

关键词:东北非;地层区划;地层格架;地层对比;地质调查工程

中图分类号:P534 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)01-0099-20

Wang C G, Xiang W S, Li F L, Wang J X, Wu F F, Li Y. Stratigraphic divisions and their stratigraphic framework and correlation in Northeast Africa. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(1): 99-118

Abstract: The East African orogenic belt, one of the most well-exposed Precambrian orogenic belts in the world, is rich of mineral resources. Based on study of a large number of literature about Sudan, Eritrea and Ethiopia, the study area is divided into Sahara Stratigraphic Superregion, East Africa Stratigraphic Superregion and East Gonwana Stratigraphic Superregion, which include Nukheila stratigraphic region, Zalingei stratigraphic region, Bayuda stratigraphic region, Muglad-Kosti stratigraphic region, Nubian stratigraphic region, Mozambique stratigraphic region. Two of the eight stratigraphic regions are furtherly classified into thirteen stratigraphic divisions, such as Cabgaba terrane, Gebeit terrane, Haya terrane, Barka terrane, Hagar terrane, Adobha Abiy terrane, Nacfa terrane, White Nile rift basin, Butana base, Ingessana-Gambela base, Dodola-Moyale base, Bule Nile-Atbara rift basin and Main Ethiopia rift basin. Then, the lithostratigraphic units in each stratigraphic region or stratigraphic division were sorted out, and stratigraphic framework was established with the predecessors' results about isotopic chronostratigraphy and biostratigraphy. Based on comparison and analysis of the material composition, structural characteristics and sedimentary environment of the stratigraphic divisions, we summarize the sediment responsibility to geological events, discuss about the paleo-geomorphic in study area during the Mesozoic, and analyze the areas with prospecting potential.

Key words: Northeast Africa; stratigraphic division; stratigraphic framework; stratigraphic correlation; geological survey engineering

收稿日期:2021-02-01;修订日期:2021-10-25

资助项目:中国地质调查局项目《北部非洲大型铜金资源基地评价》(编号:DD20190443)和中国商务部对外援助项目《援摩洛哥十幅地球化学填图项目》(编号:[2021]28)

作者简介:王成刚(1988-),男,硕士,高级工程师,从事区域地质、基础地质调查研究。E-mail:511540818@qq.com

*通信作者:李福林(1987-),男,硕士,高级工程师,从事区域地质、基础地质调查研究。E-mail:fulinxiangsong@163.com

东北非及其邻区因特殊的地质条件,蕴藏了较多的矿产资源,其中多种矿产资源可与中国互补,如铜、金、石油等。在中国鼓励矿业活动走出国门的战略背景下,要参与该地区相关矿产的勘探开发活动,离不开对该地区地质矿物的深入研究。而对东北非地区开展地层区划及相关研究是开展基础地质调查研究的重要任务。众所周知,东北非及邻区各国(埃塞俄比亚、厄立特里亚、苏丹、埃及沙特阿拉伯,因资料收集原因本文研究地区只包含了前三个国家)因经济发展缓慢及其他原因,地质工作进展滞后,地质资料少,且工作程度不同。前人从不同角度对东北非基底进行了总结^[1-11],对上覆盖层的研究则主要集中于产油盆地^[12-20]。随着地质科学的发展,现今地层区划还包括构造环境等方面的依据^[21-22]。前人研究主要集中在造山带基底和油气盆地成藏方面,缺乏针对全区全时段的研究。本文在前人研究的基础上,按照岩性组合差异、构造、时代、沉积环境、生物组合等特征对东北非地区开展地层区划,建立各地层区划内的地层格架并进行对比分析,为东北非及邻区进一步开展找矿工作提供参考。

此外,未收集到生物年代或同位素年代学资料的地质单元,主要依据苏丹1:100万地质图及其说明书、埃塞俄比亚1:200万地质图解析。

1 地质背景

东北非地区基底由东非造山带及其两侧的古老地壳组成。东非造山带由莫桑比克洋闭合而成,形成于新元古代,物质组成为中元古代晚期—新元古代弧盆系、洋壳,变质程度较低,两侧古老陆壳形成时代可追溯至哥伦比亚时期,物质由碎屑岩和火成岩组成,且发生了强烈的变质变形作用^[1,3,23-25]。对该地区上覆盖层的研究基于油气资源的需求而展开,主要集中在西南油盆和南部等地区^[12-20]。上覆盖层有古生界、中生界和新生界。其中古生界发育不全,零星分布,为碎屑岩沉积。中生代,北部和南部地区发育不同时期的海相地层,中西部则为陆相碎屑岩地层。新生界以苏丹南部陆相碎屑岩、埃塞俄比亚中部中酸性火山岩夹碎屑岩和东南部海相—陆相沉积为主^[17,26-30]。

2 东北非主要构造单元及地层分区

泛非运动使莫桑比克洋中的部分岛弧或微地

块拼合,并最终导致莫桑比克洋关闭,且使撒哈拉克拉通与东冈瓦纳陆块拼合在一起,东北非地区基底就此形成。依据已识别的缝合带、不同岩石类型组合及其变质程度将东北非地区划分为撒哈拉地层大区(SSSR)、东非地层大区(EASSR)、东冈瓦纳地层大区(EGSSR)。依据内部构造和沉积特征^[17,31-35],将SSSR划分为Nukheila地层区(NSR)、Zalingei地层区(ZSR)、Bayuda地层区(BSR)和Muglad-Kosti地层区(MKSR);将EASSR划分为努比亚地层区(NbSR)和莫桑比克地层区(MSR)。依据前人研究识别的缝合带和大型剪切带^[1,25,35-37],将NSR进一步划分为Cabgaba地体(CT)、Gebeit地体(GT)、Haya地体(HT)、Barka地体(BT)、Hagar地体(HaT)、Adobha Abiy地体(AAT)、Nacfa地体(NT)7个地层分区;将MSR进一步划分为White Nile裂陷盆地(WNRB)、Butana基底(BB)、Ingessana-Gambela基底(IGB)、Dodola-Moyale基底(DMB)、Bule Nile-Atbara裂陷盆地(BARB)、Main Ethiopia裂陷盆地(MERB)6个地层分区;将EGSSR划分为East Ogaden地层区和West Ogaden地层区^[7,17,24,35,38](图1)。

2.1 撒哈拉地层大区(SSSR)

SSSR位于苏丹中部和西北部、东非地层大区以西,以Keraf缝合带(KeS)为界,该界线往南延伸至Khartoum以北,在区内南段出露于Nuba山南部地区。该地层大区具中元古代以前的基底^[23-25],除西北有少量古生代沉积外,其余地区则未见。中生代地层在区内广泛发育,除北部夹少量海相地层外,其余为陆相地层沉积。新生代地层在区内未见。

Nukheila地层区(NSR):位于苏丹西北部,其主要以古生代被动陆缘和陆内裂陷盆地沉积为特征,东南以Zalingei褶皱带形成的断层为边界,野外出露少,大部分被沙漠覆盖。划分界线由基底露头和古生代地层露头推测。

Zalingei地层区(ZSR):西北侧边界因覆盖强烈多为推测,东南界线则为中非剪切带在苏丹境内的延伸部分。该地层区内发育强烈的北—北北东—北东至北东东向线性构造和褶皱构造^[31-32]。

Bayuda地层区(BSR):位于苏丹北部地区,北部边界与主体位于埃及的Halfa地体相邻,以Delgo或Delgo-Atmur缝合带(DS)为界,发育蛇绿岩套和北东—近东向褶皱构造,褶皱轴面多呈水平方向。

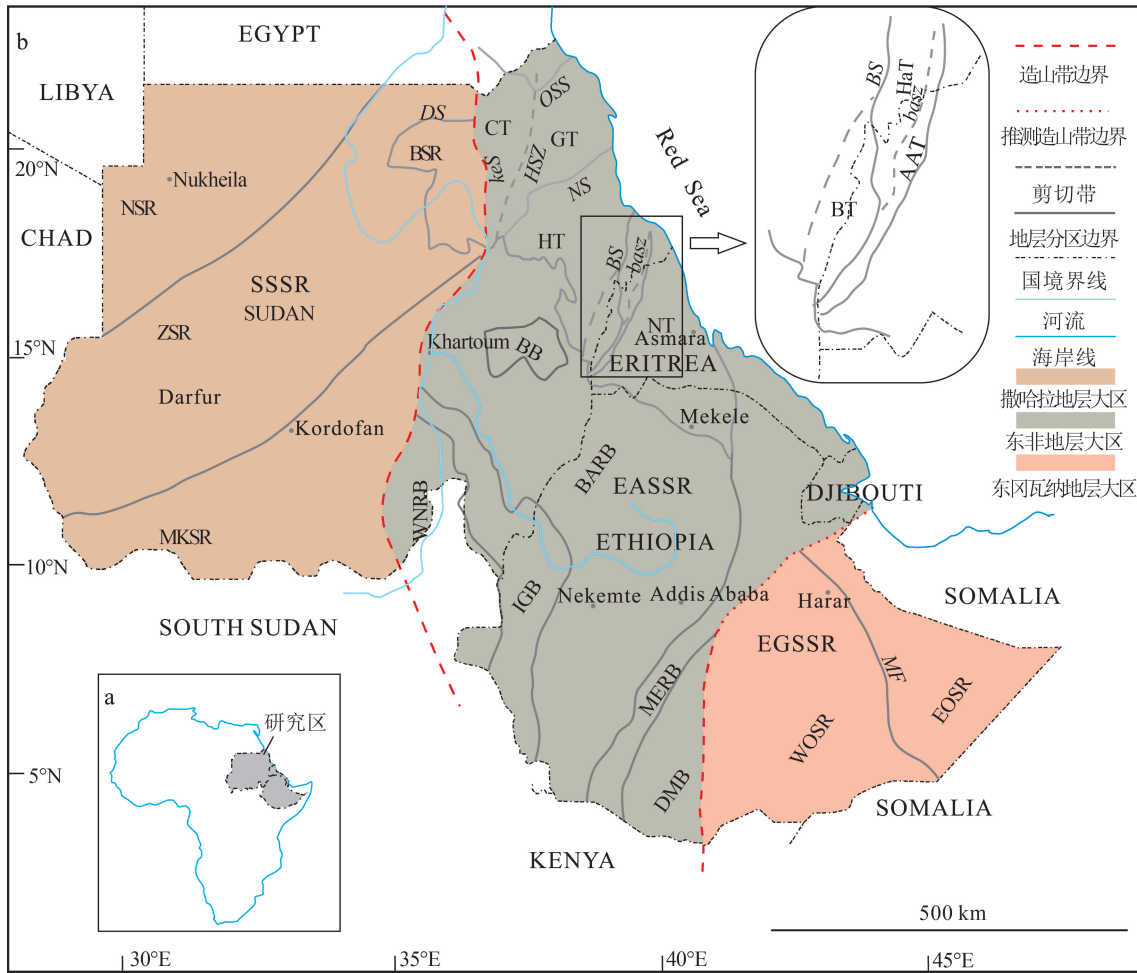


图 1 东北非地层分区图(据参考文献[1,34]修改)

Fig. 1 Stratigraphic division in Northeastern Africa

SSSR—撒哈拉地层大区;EASSR—东非地层大区;EGSSR—东冈瓦纳地层大区;NSR—Nukheila 地层区;ZSR—Zalingei 地层区;BSR—Bayuda 地层区;MKSR, Muglad-Kosti 地层区;CT—Cabgaba 地体地层分区;GT—Gebeit 地体地层分区;HT—Haya 地体地层分区;BT—Barka 地体地层分区;HaT—Hagar 地体地层分区;AAT—Adobha Abiy 地体地层分区;NT—Nacfa 地体地层分区;WNRB—White Nile 裂陷盆地地层分区;BB—Butana 基底地层分区;IGB—Ingessana-Gambela 基底地层分区;DMB—Dodola-Moyale 基底地层分区;BARB—Bule Nile-Atbara 裂陷盆地地层分区;MERB—Main Ethiopia 裂陷盆地地层分区;EOSR—East Ogaden 地层区;WOSR—West Ogaden 地层区;DS—Delgo-Atmur 缝合带;KeS—Keraf 缝合带;OSS—Onib-Sol Hamed 缝合带;HSZ—Hamisana 剪切带;NS—Nakasib 缝合带;BS—Barka 缝合带;basz—Baden 剪切带

Bayura 地体是否属于撒哈拉克拉通的一部分还存在争议^[25, 36, 39]。该地体中碎屑锆石年龄和侵入岩年龄均接近中元古代末期或属于新元古代,因此笔者认为,大量的中元古代碎屑锆石年龄表明,其与西部的陆块具有相同的构造属性,应为撒哈拉克拉通陆缘沉积的一部分,东部与 Gabgaba 地体相邻,界线为 KeS。

Muglad-Kosti 裂陷盆地(MKSR):北侧边界为中非剪切带,东南边界为 Kabus 缝合带,仅在 Nuba 山脉出露,往北延伸与 KeS 连接。受北西—南东向

和北东东—南西西向拉伸应力作用影响形成较多大小不一的裂陷盆地,其内以大量中—新生代裂陷盆地沉积为特征。

2.2 东非(EASSR)地层大区

EASSR 位于 SSSR 东部,东南与 EGSSR 的界线为 Moyale-Wadera 变形带^[11, 10, 40-42]。其包括 2 个地层区,东部零星沉积有晚古生代陆相地层,中生代地层除在厄立特里亚和苏丹红海省缺失外,在其他地区均发育,且具有西北部为陆相、东南部为陆相—海相的沉积特征。

2.2.1 努比亚地层区(NbSR)

NbSR 是阿拉伯—努比亚地盾位于非洲大陆的一部分,主要由新元古代形成的陆缘沉积物、岛弧或微陆块、洋壳等经泛非运动拼合造山而成。在后碰撞期,经历了挤压、抬升、韧性剪切等构造作用,在东南缘零星发育古生代沉积。中生代,受冈瓦纳裂解影响,部分地区形成裂陷盆地,接受陆相沉积。新生代以来,受红海扩张影响,发育火山岩和零星沉积地层。本文依据前人识别的缝合带或大型构造界线将其细分为以下地层分区。

Cabgaba 地体(CT):与东部 Bayura 地体以 KeS 为界。在 Keraf 缝合带北部以北向直立褶皱构造为主,而在该带内以北—北北西向左行走滑断层为主^[39]。

Gebeit 地体(GT):与东部 Gabgaba 地体以 Hamisana 剪切带(HSZ)为界。HSZ 带内构造应力为剪切应力^[10, 43],且发育其中的基性—超基性岩的形成时间晚于其围岩,并非同一时期形成。HSZ 内发育的构造主要为碎裂变形构造,褶皱构造以南北向为主,也有北东—南西向、北西—南东向和东—西向;断层以走滑断层为主。此外,还发育北西—南东向拉伸裂隙、北东—南西向卸荷裂隙及南—北向和北东东向剪切裂隙^[44]。GT 南部与 Haya 地体毗邻。

Haya 地体(HT):与西北部 Gebeit 地体以 Nakasib 缝合带(NS)为界,该界线呈北东向,为一褶皱俯冲带,该带内发育等斜褶皱。受后期走滑剪切作用改造,区内岩层形成陡立的褶皱轴和片内褶皱^[45]。东南部与 Barka 地体毗邻。

Barka 地体(BT):位于 HT 东南部,其构造方向主要呈南—北向,向北逐渐转为东—西向。前人依据整体构造样式及变质程度将其与 HT 进行区分^[3, 5],因其北部构造样式与 HT 有相似性,使本区北部与 HT 边界模糊不清。东部以 Barka 缝合带(BS)与 Hagar 地体为界。

Hagar 地体(HaT):位于 BT 东部,其内岩石变质程度低,岩石组合及构造样式与 BT 不同。东部与 Adobha Abiy 地体以 Baden 剪切带(*basz*)为界。因区域转换挤压作用,区内发育大量走滑剪切带。

Adobha Abiy 地体(AAT):位于 HaT 东部,空间上呈北北东向展布、狭长条带状,东部以 Elababu 剪切带(*ESZ*)与 Nacfa 地体分界,西南、西北分别与

HaT、AAT 毗邻,其界线为 *basz*, *ESZ* 与 *basz* 在最北端合并在一起^[5]。

Nacfa 地体(NT):与 AAT 以 *ESZ* 为界,东部为红海。区内发育多条长且狭窄的剪切带,呈南—南西走向,这些剪切带将 NT 划分为多个具有不同变形样式的地块,如 NT 西南地块、阿斯马拉北部的地块都缺少大型褶皱构造。Drury 等^[5]将 NT 从西到东划分为 Hal Hal 地块、Sheraro 地块、Adi Hageray 地块、Adi Nebrid 地块、中部陡立带、Asmara 向斜、Chila 地块和 Adwa 地块。

2.2.2 莫桑比克地层区(MSR)

MSR 位于东非造山带东南,由刚果克拉通、阿扎尼亚克拉通和印度克拉通在泛非运动时期俯冲碰撞形成,基底主体由古—中元古代地壳重组而成,在东南侧边界则混有新元古代形成的洋壳或弧后盆地沉积地层,其前寒武系相较于努比亚地盾具更高的变质相(麻粒岩相—角闪岩相)。在泛非期发育的南—北向、北北东—南南西向断裂,于中生代和新生代再次发生裂陷活动,形成北东—南西向、北西—南东向断裂及一系列裂陷盆地。区内中生界在西北部地区为陆相沉积,在东南部则为海相沉积,新生界区内转为陆相沉积并发育火山岩。依据岩层和构造发育情况细分为以下地层分区。

White Nile 裂陷盆地(WNRB)地层分区:由北西向和北—北西走向断层系构成的裂陷盆地,其北段延伸到 MKSR 中,北部边界为东西向和北东向断层,南部延伸至南苏丹,称为 Melut 盆地^[17]。

Ingessana—Gambela 基底(IGB)地层分区:曾被称为西埃塞俄比亚地盾^[46],位于 Bule Nile 裂谷系和 White Nile 裂谷系中间,在 2 个裂谷扩张期,其中间的 Ingessana Hills 地区因挤压应力作用而隆起,该隆起带向东南方向延伸至埃塞俄比亚的 Metu 地区。该地层分区以断陷盆地边界为界。在 Tulu dimtu 地区发现蛇绿岩,其近南北向延伸,向北被 Bule Nile 裂谷盆地的沉积物覆盖,并延伸至努比亚地盾地层区,可能与 Barka 缝合带相连^[1]。

Butana 基底(BB)地层分区:位于苏丹东部,其东北部为 Atbara 断层带形成的裂陷盆地,西南以 Bule Nile 裂陷盆地东北部的断裂带为界,向东南, Bule Nile 断裂带延伸至埃塞俄比亚境内,被 Main Ethiopia 裂谷截断;西北和东南界线以北东东向断裂为界。

Bule Nile-Atbara 裂陷盆地 (BARB) 地层分区: 由 Bule Nile 裂谷盆地与较小的 Atbara 裂谷盆地组成, 以发育中—新生代裂陷盆地沉积为特征, 东北部边界为侏罗纪—白垩纪断裂构造, 因资料匮乏, 本文以第四系界线作为本地层分区与努比亚地盾的界线; 西南界线为隆起基底 IGB 的东北边界, 该边界为一系列近平行于 Bule Nile 的断层带; 2 个裂陷盆地向东南延伸至埃塞俄比亚境内, 且在埃塞俄比亚境内盆地更宽、沉降更深; 其西北边界为克拉通与造山带的边界; 东南部界线为埃塞裂陷盆地的边界。

Main Ethiopia 裂陷盆地 (MERB) 地层分区: Main Ethiopia 裂谷位于东非大裂谷系的东北段, 呈北东—南西向贯穿埃塞俄比亚境内, 以发育大量新生代陆内裂陷沉积为特征。

Dodola-Moyale 基底 (DMB) 地层分区: 西部以埃塞大裂谷的东部大断裂为界, 东部以 Moyale-Wadera 变形带与东冈瓦纳克拉通分界, 该变形带往南延伸进入肯尼亚北部, 往北被埃塞俄比亚中部新生代地层掩盖, 推测过红海可能与阿拉伯半岛的 Nabtah 带相连^[40-42]。

2.3 东冈瓦纳地层大区 (EGSSR)

EGSSR 基底主要形成于泛非运动之前, 西南部以 Moyale-Wadera 变形带与莫桑比克变质带为界, 该界线向北延伸, 在埃塞俄比亚中部被埃塞大裂谷形成的新生代火山岩和碎屑岩覆盖, 因此本文采用埃塞大裂谷南缘大断裂带作为 MSR 与 EGSSR 的界线。本地层大区内沉积零星下古生界, 上古生界—中生界发育, 且中生界以海相地层为主, 新生界在东部地区为海相, 西部为陆相夹火山岩沉积。本地层大区可进一步划分为: East Ogaden 地层区, 位于 EGSSR 东部, 以广泛发育的新生代海相地层为特征, 西部边界为 Marda 断层带; West Ogaden 地层区, 位于 EGSSR 西部, 以中生代海相沉积和新生代广泛发育的火山岩为特征。本地层分区西部以 Moyale-Wadera 变形带分界与 DMB 相邻、北部以埃塞大裂谷南缘断裂与 MERB 毗邻, 东部以形成于新元古代且遭受后期构造活动活化的 Marda 断层带为界, 与 East Ogaden 分界^[30, 47-50]。

3 各地层分区地层格架

3.1 撒哈拉地层大区 (SSSR)

NSR 以发育古生界为特征, 地层格架见图 2。

在西北部的 Jebel Uweinat 地区出露以片麻岩和石英岩为主的 Karkur Murr 岩系。其形成时代早于 2500 Ma^[51]。

本地层区的古生界主要出露在 Jebel Uweinat 及周边地区, 下古生界为陆相碎屑岩, 底部为不整合于基底之上的砾岩, 向上为砂岩、泥岩, 其内发育 3 个不整合界面, 其中 Karkur Talh 组发育海相碎屑岩沉积。上古生界则相对完整, 主要为砂岩、粉砂岩等碎屑岩沉积, 夹灰岩、泥灰岩等。在下泥盆统中发现疑为鸚鵡螺的生物化石, 因此认为早泥盆世海侵曾到达本区, 使本区接受海相沉积; 邻近的乍得和利比亚都在该层位发现了植物化石群, 整个泥盆系与乍得的 Tadrart 组层位相当, 因此本文称为 Tadrart 组。石炭系产丰富的植物化石, 整体为湖相沉积夹海相近滨沉积。在 Uweinat 山脉二叠系—侏罗系发育, 其中二叠系—侏罗系下部称为 Lakia 组 (含高岭石中—粗粒砂岩、粉砂岩夹砾岩)^[52-53]。在 Ennedi 地区, 也发育下古生界, 长期以来对这套地层的细分工作并未取得进展, 因此本文在 Ennedi 地区沿用 Whiteman^[51] 的划分方案, 将其统称为下古生界。

区内中生界为砂岩、粉砂岩、粘土岩夹砾岩, 产侏罗纪和白垩纪植物化石群。侏罗纪和白垩纪, 本区主要为陆相沉积, 在顶部的 Kababish 组中发现海相遗迹化石, 表明地层中夹海相沉积^[54]。新生界只发育古近系, 岩性为粉砂岩、细砂岩、泥灰岩、泥晶灰岩夹硅质岩、石膏, 其余大面积为推测, 未见露头^[34, 54]。

ZSR 地层格架 (图 2) 在西南的 Jebel Marra 附近出露的片麻岩被称为“片麻岩群”, 认为其是 SSSR 的基底^[51]。往上为“石英岩群”和“石英片岩群”, 可进一步划分为 4 个岩组 (图 2), 部分岩组中见侵入的辉绿岩, 变质后为角闪片岩和片麻岩^[31-32]。前人在侵入其中的 Kutum 花岗岩中获得中元古代同位素年龄^[31, 34], 因此认为, 该套岩石组合的形成时间早于中元古代。区内古生界的岩性为粗粒砂岩夹泥质条带, 与上、下地层均呈不整合接触, 其与乍得东部的奥陶纪 Massalit 砂岩岩性相似, 本文认为两者层位相当并称为 Massalit 组。区内出露大量中生代“努比亚砂岩系”, 底部为砾岩, 往上为中—粗粒砂岩、细砂岩、粉砂岩、泥岩, 发育板状层理、槽状交错层理、生物扰动构造等, 顶部的 Kababish 组产晚白垩世化石^[14-15]。新生界岩性

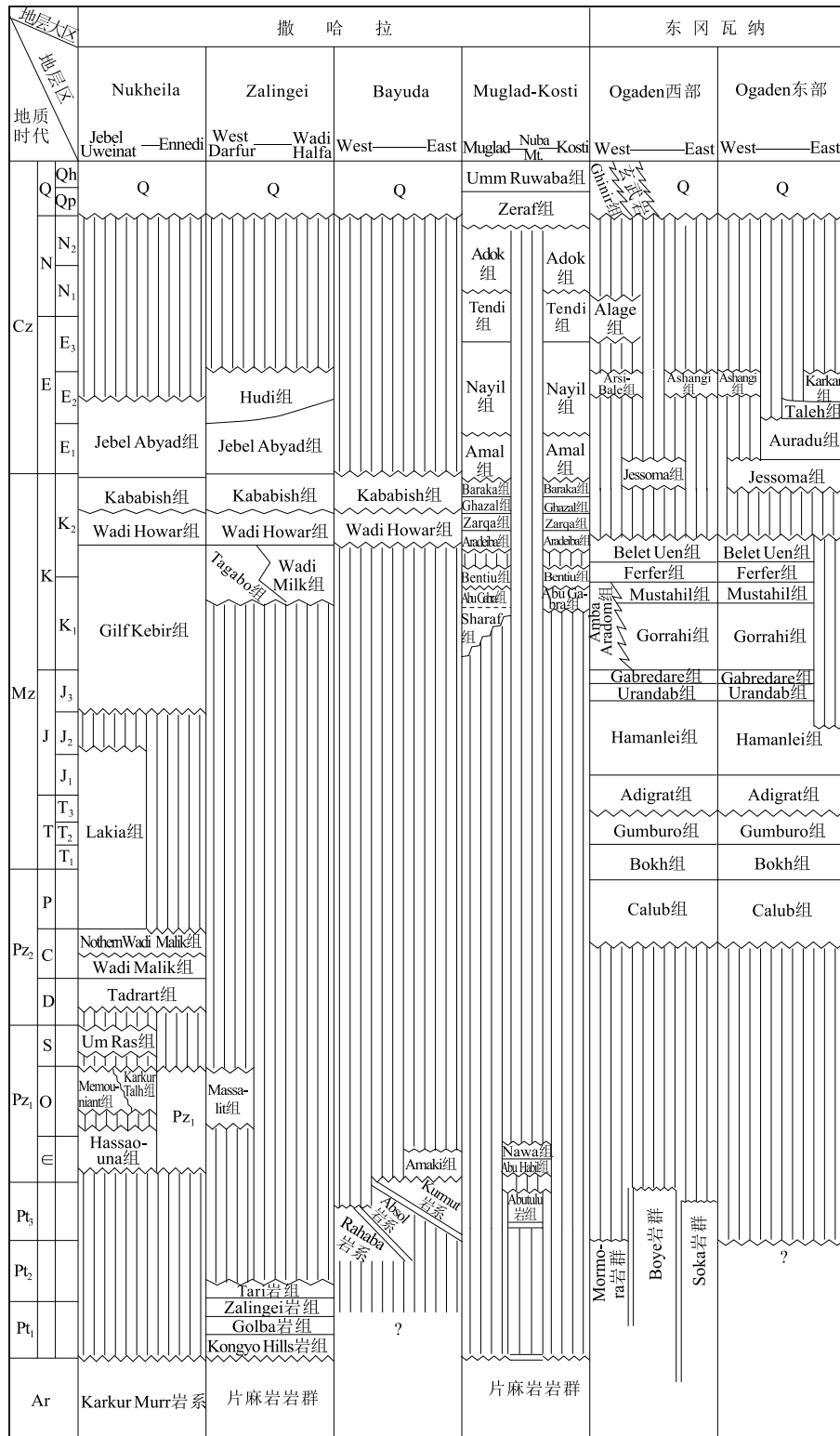


图2 撒哈拉与东冈瓦纳地层大区地层格架

Fig. 2 Stratigraphic framework of Sahara and East Gonwana stratigraphic superregion

Ar—太古宙; Pt₁—古元古代; Pt₂—中元古代; Pt₃—新元古代; e—寒武纪; O—奥陶纪; S—志留纪; D—泥盆纪; C—石炭纪; P—二叠纪; T₁—早三叠世; T₂—中三叠世; T₃—晚三叠世; J₁—早侏罗世; J₂—中侏罗世; J₃—晚侏罗世; K₁—早白垩世; K₂—晚白垩世; E₁—古新世; E₂—始新世; E₃—渐新世; N₁—中新世; N₂—上新世; Qp—更新世; Qh—全新世

为砂岩、泥灰岩、粘土岩和灰黑色页岩夹灰岩结核、硅质灰岩,顶部为燧石层,见双壳和腹足类化石。

BSR 地层(图 2)的基底为一套高级变质岩,岩性主要为片麻岩、石英片岩、石英岩、钙质硅质岩和大理岩,称为 Bayura 组,可进一步划分为 Kurmut、Absol、Rahaba 3 个岩系。前人获得的同位素年龄数据表明,Rahaba 岩系形成时代最早,其沉积始于中元古代末期^[55]。由于三者呈构造接触关系,因此本文舍去 Bayura 组,采用“岩系”这种非正式地层单位。下古生界发育于本区东部,称为 Amaki 系,本文称为 Amaki 组,岩性为红色长石砂岩、砾岩、杂砂岩、粉砂岩、钙质砂岩夹少量灰岩。区内白垩系与紧邻 Dongola 地区的白垩系岩性相似,采用 Wadi Howar 组和 Kababish 组命名。此外,区内还出露白垩纪玄武岩。

MKSr 以发育大量中—新生代裂陷盆地沉积为特征,分布于东部和西部,地层格架如图 2 所示。区内中部 Nuba 山地区出露前寒武系片麻岩群及不整合于其上的片岩群,后者被称为 Abutul 岩组,在 Nuba 山南部和 Abu Habil 发育下古生界,岩性为紫红色—红色砂岩、长石砂岩、砾岩、杂砂岩、泥岩夹灰岩等。下古生界变质程度低,原岩特征明显,岩性组合反映出其快速堆积沉积的特征,可能为造山作用后期形成于前陆盆地的磨拉石建造。区内广泛发育的中—新生代裂陷盆地沉积,以粗—细砂岩、粉砂岩、粘土岩、页岩等沉积为主,其中发育 7 个不整合界面。此外,还见有白垩纪玄武岩、粗面岩和辉绿岩。

3.2 东非地层大区(EASSR)

东非地层大区由努比亚地层区和莫桑比克地层区组成,其内各地层分区地层格架如图 3、图 4 所示,现分述如下。

3.2.1 努比亚地层区(NbSR)

NbSR 被划分为 Cabgaba 地体(CT)、Gebeit 地体(GT)、Haya 地体(HT)、Barka 地体(BT)、Hagar 地体(HaT)、Adobha Abiy 地体(AAT)、Nacfa 地体(NT)7 个地层分区。各地层分区地层格架见图 3。

CT 由形成于新元古代的岛弧和弧后盆地拼合而成,后经过造山后期区域变质作用,形成一套以绿片岩相—角闪岩相为主的变质岩。岩性主要为一套含大量大理岩、石英岩和角闪岩的岩石组合。此

外,还有与早期岛弧相关的变火山岩。区内见较多第四系砂席和沙丘(Qs)。

GT 基底出露零星,为一套变火山岩和沉积岩组合,变质程度以绿片岩相为主,局部地区达角闪岩相,原岩为弱—钙碱性岩类、拉斑玄武岩、玄武质安山岩、安山岩、英安岩、流纹岩、砂—泥质岩、硬砂岩夹灰岩、大理岩^[56]。可进一步划分为 2 个岩系,两者呈构造接触关系。局部发育中生界砂岩,前人在白垩纪正长岩中发现该砂岩碎块捕虏体,并将其与东南部的 Gedaref 组对比^[51],认为与此层位相当,因此本文称为 Gedaref 组。此外,区内见第四系砾石、砂、粉砂、粘土,其上为沙丘和砂席(Qs),在红海沿岸发育珊瑚礁(Qr)和河流相沉积(Umm Ruwaba 组)。

HT 在西北边界 NS 中发育蛇绿岩,带内发育形成于岛弧环境的沉积—火山岩组合,其中火山岩为拉斑玄武岩、钙碱性火山岩,顶部为一套变沉积岩夹大理岩,缝合带内发育同构造期的辉长岩—闪长岩—英云闪长岩及花岗闪长岩—奥长花岗岩组合^[45,57]。依据不同的岩石组合特征,该缝合带可划分出 5 个构造地层单元,依次为 Arbaat 岩群(与裂解活动有关的基性岩、酸性火山岩,夹碎屑岩、灰岩)、Salatib 群(碎屑岩、碳酸盐岩、流纹岩和长英质凝灰岩互层)、Meritri 群(红色砾岩、杂砂岩、灰岩、砂岩和中酸性火山凝灰岩)、Nakasib 蛇绿岩及 Shalhout 群(长英质火山岩、杂砂岩)^[57-58]。区内东南部为绿片岩相—角闪岩相变火山—沉积岩组合,统称为 Nafiredeib 岩系。至第四纪,在红海沿岸发育沙丘和砂席(Qs)珊瑚礁(Qr)。

BT 由高角闪岩相—麻粒岩相正片麻岩、角闪岩、大理岩、富铁泥质片岩和少量石英岩组成,有晚期长英质岩墙侵入。本地层区发育中生代砂岩,可与邻近苏丹 Gedaref 组进行对比,本文称为 Gedaref 组;还发育新生代粗面质火山岩和玄武质火山岩。这 2 套火山岩的形成时代不详。此外,沉积大量的第四系砂席、沙丘。

依据内部次级剪切带和断层,将 HaT 划分为 7 个构造单元,分别为 H1、H2、H3、H4、H5、S1 和 S2^[5]。这 7 个构造单元向南逐渐尖灭。其西北部的 S1 和 S2 岩性为变枕状玄武岩、变辉长岩、绿泥石千枚岩、绿泥石片岩夹铁锰硅质岩、大理岩、浊积岩、含硫硅质岩等,可能为蛇绿岩组合。另 5 个单元整

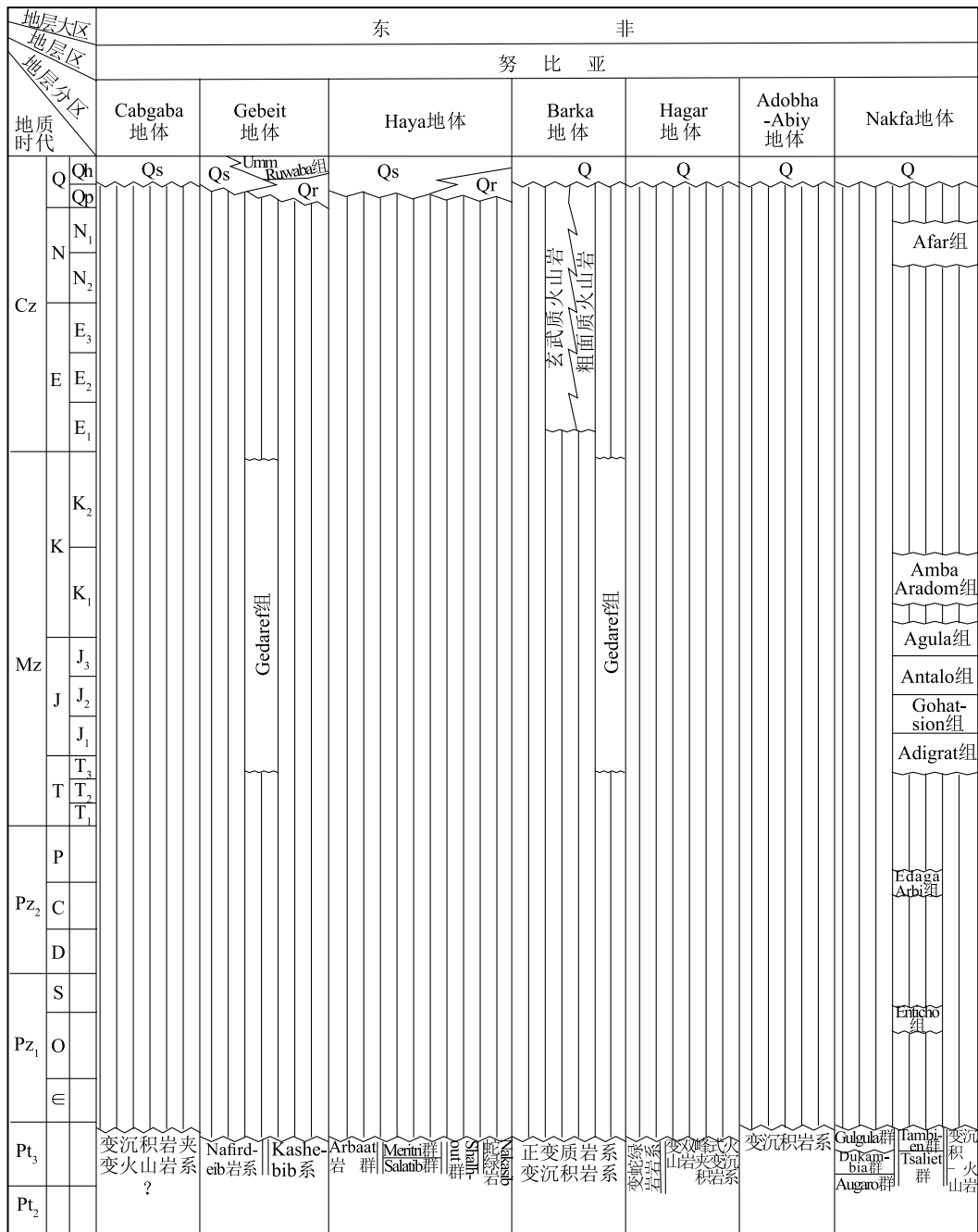


图 3 努比亚地层区地层格架(地质时代各代号注释同图 2)

Fig. 3 Stratigraphic framework of Nubian stratigraphic region

体以双峰式火山岩为特征,夹浊积岩、滑塌沉积岩、铁锰硅质岩和大理岩。区内发育第四系坡积物和残积物。

AAT 被划分为 3 个单元,分别为 A1、A2、A3^[5],岩性分别为变泥质岩夹不纯的碳酸盐岩、粉红色碳酸盐岩、变形砂岩和复成分砾岩。本地层分区原岩岩性为沉积岩,属于低绿片岩相。3 个单元无序,呈

构造接触关系。

NT 基底可进一步分为:①Hal Hal 地块,为变中—酸性侵入岩,同时见基性侵入体,在高海拔地区为未变形且低变质中酸性火山岩,南部见强烈褶皱的大理岩和变泥质岩;②西部为 Mongareb 变基性—超基性岩;③Sheraro 地块,为强烈变形的变杂砂岩、长石砂岩、石英砂岩、泥岩、粉砂岩、砾岩、厚

层碳酸盐岩和泥岩夹少量火山岩, Teklay^[59] 建有 Augaro 群、Dukambia 群、Gulgula 群; ④ Adi Hageray 地块, 为变质程度较低的沉积岩, 见孤立的火山岩和超基性岩; ⑤ Adi Nebriid 地块, 为酸性火山岩、变泥质沉积岩; ⑥ Zagher 带, 包含基性—超基性火山岩和侵入岩, 发育糜棱岩; 中部地区为片麻岩、角闪岩、石榴子石—蓝晶石副片岩; ⑦ Asmara 地块, 以火山岩和火山碎屑岩为主; ⑧ Chila 地块, 为浅变质沉积岩, 变中—酸性火山岩、绢云母炭质千枚岩、片岩, 碳酸盐岩、砂岩、砾岩、石英岩等, 从下至上建立 Tsaliyet 群、Tambien 群; ⑨ Adwa 地块为浊积岩, 中—酸性火山岩; ⑩ Daro Tekli 带, 以构造混合的基性—超基性岩为主^[5]。

本地层分区内古生界主要发育在南部 Mekele 盆地及周边地区, 前人以冰川沉积为依据建立了 Enticho 冰川沉积、Edaga Arbi 冰川沉积 2 个非正式地层单位^[60-63], 本文将这些单元称为 Enticho 组和 Edaga Arbi 组。

厄立特里亚境内 Mendefera 往南至 Mekele 地区、厄立特里亚境内沿海地区发育中生代—新生代沉积岩和基性火山岩, 岩性为砂岩、泥岩、灰岩、泥灰岩等, 其中早—中侏罗世 Gohatsion 组泥岩代表了该区域中生代第一海侵作用的到来。随后 Agula 组顶部角度不整合界面代表了海相沉积退出该地区; 中新统一上新统为碱性玄武岩、酸性熔岩和熔结凝灰岩。苏丹境内与该套地层对应的层位未细分, 统称为晚白垩世砂岩, 夹少量砾岩。依据孢粉化石推测为晚白垩世, 局部可能至古近纪。

3.2.2 莫桑比克地层区 (MSR)

MSR 由 White Nile 裂陷盆地 (WNRB)、Ingessana—Gambela 基底 (IGB)、Butana 基底 (BB)、Bule Nile—Atbara 裂陷盆地 (BARB)、Main Ethiopia 裂陷盆地 (MERB)、Dodola—Moyale 基底 (DMB) 6 个地层分区构成。各地层分区地层格架如图 4 所示。

WNRB 中西部见新元古代基底, 为 Tin 岩群, 岩性为角闪岩、副片麻岩、泥质钙质硅质岩。往上为晚白垩世 Melut 组厚层砂岩夹泥岩沉积。新生代则发育裂陷盆地沉积的碎屑岩, 岩性主要为厚—薄层中粗粒砂岩、粘土岩, 其间发育 2 个不整合界面和第四纪 Agor 组 (疏松砂、粘土)^[64]。

IGB 在苏丹境内 Ingessana 地区的前寒武系称

为 Tin 群, 岩性同 WNRB 内的 Tin 群。在埃塞俄比亚境内 Gambela 及周边地区可见 Alghe 岩群 (黑云母和角闪石片麻岩、麻粒岩及与少量副片麻岩组成的混杂岩)、Aleltu 岩群 (变火山岩、变沉积岩)、Bila 岩群 (Daleti 岩组方解石大理岩, Guliso 岩组砾岩、砂岩、石墨片岩、石英岩、石英白云母片岩等)、Dengi 岩组 (由变砾岩和砂岩组成)、Baro 岩群 (黑云母片麻岩、角闪石—黑云母片麻岩、石榴子石—角闪石片麻岩、硅酸钙质片麻岩、白云母片麻岩)、Birbir 群 (变质玄武岩、安山岩、流纹岩、千枚岩、含炭质片岩、大理岩、石英岩、变砾岩、绿片岩、变砂岩、燧石和角闪岩)、Tulu Dimtu 群 (变玄武岩、超基性岩、绿片岩、千枚岩、变砾岩、石英岩和大理岩)。虽然 Alghe 岩群与 Baro 岩群、Birbir 群与 Tulu Dimtu 群岩性相似, 但是原岩岩性和叠置顺序有较大差异, 本文仍予以保留。

古生代—中生代, Gimbi—Nejo 地区发育 Luma 组 (底部砾岩, 往上为砂岩、粉砂岩和页岩, 具体时代不详), 局部地区发现侏罗系, 称为 Adigrat 组 (砂岩)。

本分区西南部见大量新生代溢流玄武岩, 称为 Makonnen 组, 区内发育的第四系未细分。

BB 基底多被第四系覆盖, 依据苏丹 1:100 万地质图划分出 2 个地质单元。分别为古—中元古代变火山岩和沉积岩, 新元古代变沉积岩、变火山岩、变蛇纹质和花岗质岩类, 两者呈构造接触关系。因该地区受造山活动影响, 古老的陆壳和较年轻的洋壳混杂。在西北部和东北部发育白垩纪形成的河流相砂岩、粉砂岩及少量砾岩, 因岩性和层位与邻区 Gedaref 地区的 Gedaref 组相当, 故本文称其为 Gedaref 组, 发育第四系 Umm Ruwaba 组 (砾石、砂泥和粘土)。

BARB 的古元古界零星出露于苏丹境内的裂陷盆地中, 在 Bule Nile 地区为 Tin 群, 在埃塞俄比亚境内的 Didesa、Anger 及 Abay 河谷中出露 Alghe 岩群, 在南部的 Kibish 地区出露 Awata 岩群。古生界发育在埃塞 Abay 河、Mekelle 盆地边缘及 Adigrat 地区, 岩石地层单位及原生叠置关系如图 4 所示, 其中古生界发育 2 次冰川沉积作用, 岩性主要为砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩, 与上、下地层均呈不整合接触。在苏丹境内 Gedaref 地区则沉积 Gedaref 组砂岩、砂质泥岩和泥岩^[61, 63, 65-67]。中生代早期只在埃塞俄比亚境内沉积了 Adigrat 组的砂岩, 随后海侵到来, 但

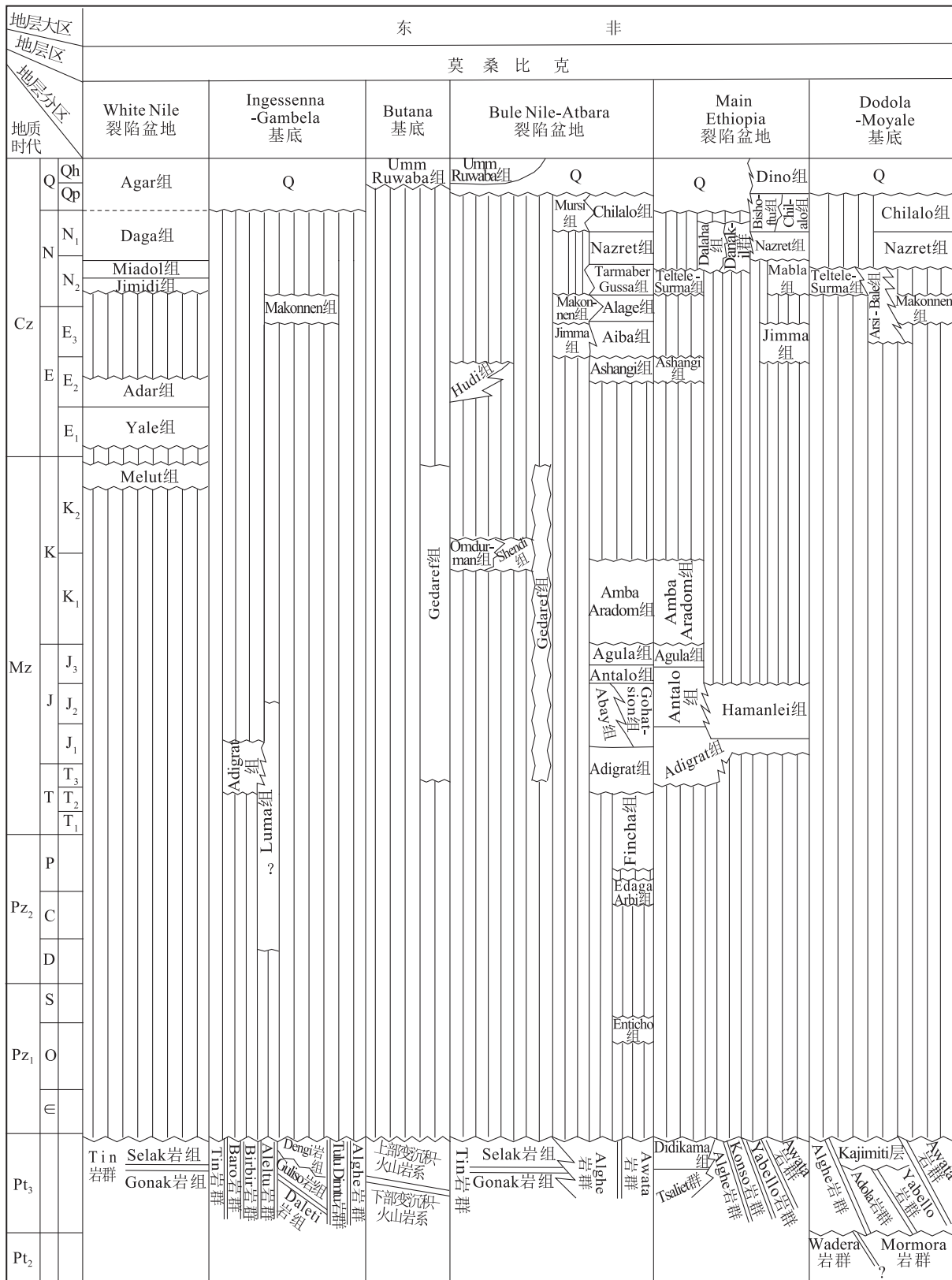


图4 莫桑比克地层区地层格架图(地质时代各代号注释同图2)

Fig.4 Stratigraphic Framework of Mozambique stratigraphic region

是没有越过埃塞俄比亚—苏丹边境,只在埃塞俄比亚境内 Didesa 河北东至北部地区沉积海相地层,岩性为砂岩、泥岩、碳酸盐岩、膏泥岩等,苏丹境内只有 Gedaref 地区沉积了陆相砂岩、粉砂岩,白垩纪早期发生海退,海相沉积退出本区,沉积了陆相砾岩、中—粗高岭石质砂岩、石英砂岩、含铁砂岩等。苏丹境内有新生界 Hudi 组(燧石岩)和新生代未细分的玄武质火山岩(通过与埃塞俄比亚边境地质图对比,可能与 Ashangi 组层位相当)、第四纪 Umm Ruwaba 组(砾石、砂、粉砂和粘土),第四系主要为沙漠化沉积,多为风成的席状砂、沙丘等。本地层分区在埃塞俄比亚境内发育大量基性—酸性火山岩及火山碎屑岩,叠置层序如图 4 所示。

MERB 内的元古宇主要分布在西南部 Usmo 河至 Chamo 湖之间,主要为新元古代 Konso 岩群(角闪石片麻岩、辉石片麻岩、石榴子石辉石片麻岩、麻粒岩和角闪岩夹少量副片麻岩)、Alghe 岩群、Awata 岩群、Yavello 岩群。此外,区内北部 Afirera 湖地区发育新元古代 Tsaliet 群和 Didikama 组(板岩、白云岩)。中生界主要分布在 Ziway 湖北东地区,或因后期裂隙接受沉积遭覆盖,露头较少,主要为侏罗系下部陆相砂岩沉积,中—上部海相砂岩、泥岩、碳酸盐岩和膏泥岩沉积,以及白垩系下部砂岩、粉砂岩沉积。新生界在本区广泛分布。岩性以基性—酸性火山岩及其碎屑岩为主,具双峰式火山岩特征,同时拉伸作用形成的裂隙盆地接受了碎屑岩沉积,如 Danakil 群(砾岩、砂岩、粉砂岩夹基性火山岩沉积)。第四纪,区内火山活动和湖相沉积作用仍在持续,相应的基性—酸性火山岩及河流、湖泊相砾石、砂、泥沉积仍在堆积,在东部 Afar 地区则可能发育海相沉积。

Yibas 等^[42]运用构造单元名和变质程度结合的方式命名 DMB 区内的岩层,该命名类似于非正式地层单位,因此本文不予采用。需要指出的是, Kazmin 等^[48]认为区内有太古宙地层,即 Bruji 片麻岩、Alghe 片麻岩、Awata 片麻岩、Yavello 片麻岩或底部杂岩体,但结合区内已有的同位素年龄数据^[42, 68],笔者认为埃塞俄比亚南部地区不发育太古宙地层。总结前人资料认为,本分区局部出露中元古界,以片麻岩为主,主要为中元古代晚期的 Wadera 岩群、Mormora 岩群,岩性为变沉积岩、变火山—沉积岩;新元古界建有 Adola 岩群(角闪岩)、

Alghe 岩群、Awata 岩群、Yavello 岩群、Baro 岩群等,岩性为以火成岩为原岩形成的高级变质岩,如黑云母、角闪石片麻岩、砂线石片麻岩、麻粒岩夹副片麻岩;Kajimiti 层(变砾岩、变砂岩)。

区内缺失古生界—中生界,新生界以玄武岩、流纹质熔岩、粗面岩、粗面质玄武岩、碱性玄武岩、黑曜岩、松脂岩等火山岩为主,此外还有陆相碎屑岩沉积。前人以岩性或地名命名为非正式地层单位,本文沿用其名和原始定义并将其命名为组,原生叠置关系见图 4。

3.3 东冈瓦纳地层大区(EGSSR)

EGSSR 由 East Ogaden 地层区(EOSR)和 West Ogaden 地层区(WOSR)组成。

EOSR 主要出露新生界,前寒武系基底被完全覆盖。中生界虽在区内发育较完整,但因新生界覆盖及 Marda 断裂带活动影响,仅出露在该断裂带周边。古生界:来自钻孔资料,见 Calub 组,岩性为红棕色粗粒长石砂岩,夹棱角状砾岩和少量粉砂岩,局部夹基性凝灰岩^[19, 28, 69-70]。中生界:三叠系 Bokh 组、Gumburo 组、Adigrat 组,岩性为深灰色页岩夹粉砂岩、砂岩,上部为浅灰绿色、灰色砂岩夹泥岩、砾岩^[19, 28, 69-70]。侏罗纪之前,区内主要接受陆相沉积,之后直至白垩纪主要为海相沉积,岩性为灰岩、生物碎屑灰岩、鲕粒灰岩、白云岩、泥岩、页岩、砂岩夹膏岩层,地层单元的原生叠置层序如图 2 所示。Sokm 地区缺失 Urandab 组—Mustahil 组和 Belet Uen 组^[30]。新生界:底部的 Jessoma 组砂岩为陆相沉积,表明海陆界线退至该地区以东,之后的 Auradu 组、Taleh 组、Karkar 组灰岩、白云岩、膏泥岩沉积代表了一次快速的海侵—海退旋回过程。区内发育 Ashangi 组的玄武岩夹凝灰岩。第四系为河流相砂、粉砂沉积。

WOSR 的元古宇主要出露在南部与 DMB 相邻的地区,建有古—中元古界 Mormora 岩群、新元古界 Adola 岩群、Alghe 岩群、Awata 岩群,另在 Hirma—Harar 地区为石英黑云片岩、石榴子石片岩、千枚岩、绿泥片岩等变沉积—火山岩组合,前人划分的变质杂岩被证实形成于新元古代^[68]。两地新元古界的出现是碰撞过程中混入较新岛弧或洋壳物质的结果。

中生代地层单元和岩性特征与 EOSR 相同,但局部地区因海侵作用未到达,于早白垩世还沉积了

代表陆相环境的 Amba Aradom 组(砂岩、砾岩、页岩夹少量灰岩)。

本区新生代不发育海相地层,底部为陆相 Jessoma 组砂岩,往上多零星分布基性火山岩。

4 地层对比

4.1 前寒武系

受泛非运动、冈瓦纳裂解、红海扩张等构造运动叠加影响,研究区前寒武系遭受了强烈的变质变形作用,使地质体原生空间移位、地层无序,严重影响前寒武系的古地理、地层层序重建。本文主要通过收集分析前人同位素数据来开展各地层间前寒武系的对比。

(1) 太古宇—中元古界

地质记录主要分布在 SSSR 和 EGSSR。在 NSR 内 Uweinat 地区基底中获得 Sm-Nd 模式年龄和全岩 Rb-Sr 年龄分别为 3000~3200 Ma,约 2617 Ma^[23],说明该地区基底片麻岩原岩形成于中新太古代。在 ZSR 中的 Wadi Howar、努比亚沙漠、Sabaloka 及 El Obeid 地区分别有片麻岩 Sm-Nd T_{DM} 模式年龄 1.2~2.4 Ga、2.2 Ga、2.6 Ga、>2 Ga^[23-25],反映了 ZSR 新太古代—中元古代古老地壳的存在。此外,BSR 北部 Halfa 地区变质岩中有 Nd 模式年龄 2.82~1.26 Ga、Ⅲ型 Pb 比值和强的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 负异常及年轻的 Rb-Sr 年龄^[3],说明 Halfa 地体不仅具有与撒哈拉相同的古老基底,而且发生了重组。

在 WOSR 内 Hirna—Harar 地区及毗邻的 EASSR 与 EGSSR 界线处,建有 Mormora 岩群、Boye 岩群和 Soka 岩群,其中,Boye 岩群中锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为 649~781 Ma,并有大量 2300~2489 Ma 继承锆石年龄,且全岩 Sm-Nd 模式年龄 T_{DM} 为 2.08~2.34 Ga,Soka 群中锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为 781~843 Ma,并有大量 1997~2900 Ma 继承锆石年龄,且全岩 Sm-Nd 模式年龄 T_{DM} 为 1.6~2.88 Ga^[68]。这说明,Boye 岩群形成始于古元古代,而 Soka 岩群的形成始于新太古代,两者都经历古—新元古代的弧盆扩张、弧陆碰撞增生,混入了中—新元古代地壳而形成。在 DMB 以副变质岩为主的 Wadera 岩群和 Mormora 岩群则形成于中元古代^[41-42,68],东部未变形的花岗岩中发现大量约 2.5 Ga 的锆石^[71],可能是古老地壳混染熔融的结果。

(2) 新元古界

主要分布于 EASSR,其中 NbSR 为新元古代海洋沉积、弧盆系沉积,MSR 则是除新元古代弧盆系和海洋沉积外,还大量混入了中元古代或更古老的地壳物质。

GT 基底的原岩大多与俯冲作用相关,部分岩石 Ti/V 值(>20)较高^[3,56],反映俯冲过程中有洋内岛弧或弧后盆地物质混入。前人研究获得 GT 基底中变火山岩同位素年龄为 720~830 Ma,并结合主、微量特征认为其具有洋内岛弧大地构造背景^[3,45,56]。HT 则形成于 900~850 Ma^[57-58,72-74],在 HT 边缘有 790 Ma 的双峰式火山岩组合,代表 HT 边缘初始有裂解活动。NS 代表的洋盆或弧盆最终在 750 Ma 左右闭合,使 GT 和 HT 拼合在一起。

前人在 BT 的片麻岩中获得原岩锆石 Pb-Pb 年龄约为 700 Ma^[68],且另有资料表明,BT 中不同变质程度的岩石形成于同一时代,因此笔者认为 BT 形成于约 700 Ma;HaT 的蛇绿岩与 AAT 中的大洋沉积物共同组成了 BT 与 NT 的缝合带,而 HaT 中的双峰式火山岩可能是俯冲增生过程中混入早期边缘裂谷产物的结果,前人曾在 HaT 中获得了 840~855 Ma 的火山岩年龄^[74]。在 NT 西南 Sheraro 地块,侵入 Augaro 群和 Dukamia 群的花岗岩的同位素年龄为 850 Ma,反映其形成于新元古代早中期,NT 区内火山岩年龄和前泛非期侵入岩年龄为 790~850 Ma^[75-79],说明 NT 形成于新元古代。其中,对顶部 Tambien 群中碳同位素变化曲线分析认为 Tambien 群形成于 Cryogenian^[80],在其下的 Tsaliyet 群中获得了 740~775 Ma 年龄数据,Augaro 群的形成时代早于 Tsaliyet 群,因为侵入其中的岩浆岩锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄约为 850 Ma^[75]。Gulgula 群与 Tambien 群中的砾岩可能都代表了新元古代成冰纪冰川作用沉积,两者可进行对比。BS 往南延伸可能与 IGB 内 Tulu Dimtu 缝合带(以下称“TDS”)连接对应,BS 所在段弧盆闭合于 800~850 Ma^[60],南部 TDS 所在段闭合时间为 794~728 Ma^{[46]①},说明北部 BS 代表的弧盆闭合早于南部。

Nuba 山脉西部的 Abutulu 岩组中火山岩的 Sm-Nd 年龄为 778±90 Ma,形成于弧后盆地环境^[81],其时代为新元古代。可能是在碰撞造山过程中,因挤压推覆混入到陆壳一侧的结果。

在 IGB,前人获得的年龄数据有:Alge 岩群片

麻岩原岩年龄为 845~856 Ma, 基性岩和碎屑岩模式年龄为 1.2~0.7 Ga^[82-83]①, 说明该变质岩原岩形成时间不早于 1.2 Ga, 结合周边同位素年龄数据认为, Alge 岩群、Alelu 岩群、Baro 岩群、Birbir 岩群、Tulu Dimtu 岩群主要形成于新元古代中期, 且可能混有中元古代晚期陆壳成分。以此类比 Ingessana 地区的 Tin 群, 认为其形成于新元古代。这些地层单元的形成时代与 DMB 中以正变质岩为主的 Adola 岩群、Yabello 岩群、Awata 岩群、Alge 岩群相近, DMB 中的岩群形成于 900~700 Ma, 为新元古代^[41-42, 68]。依据前人研究, Guliso 岩组可能和 TDS 带中的变砾岩、砂岩等层位相当。Dengi 岩组复成分砾岩具有杂基、砂岩具红棕色和灰白色、含岩屑等特征, 说明了堆积快速、水动力强的沉积特征, 可能为碰撞造山后期前陆盆地沉积, 同时 Kajimiti 层(变质程度很低, 且内部只发育泛非运动最晚期的构造特征^[42, 84])也反映了造山运动后期的前陆盆地环境, 因此两者层位可对比, 都形成于新元古代末期。

本文的对比研究认为, MSR(前人称莫桑比克变质带)较 NbSR 虽有更高变质程度的基底, 但是具有与 NbSR 呈过渡渐变的物质组成特征, 边界的洋壳或弧盆沉积物都是该地区为东非造山带一部分的证据。此外, 高级变质相部分为东冈瓦纳古老基底部分, 这是莫桑比克洋壳与东冈瓦纳陆壳受造山运动影响混杂的结果。因此, 本文将 MSR 划归为 EASSR。MSR 与 NbSR 具有相似的构造和物质组成特征, NbSR 内已发现较多大型铜、金等多金属矿床, 而 MSR 内发现的金属矿产较少, 因此可考虑在 MSR 中部署更多的矿产调查工作。

4.2 古生界

泛非运动后, 东北非地区基底形成并趋于稳定, 虽有古生代各时期的侵入岩发育(主要发育在苏丹境内), 但与造山运动无关。区内古生代沉积岩或火山岩分布少, 主要分布在 NSR、ZSR、NT、BARB 内。其中 Hassaouna 组、Amaki 组、Abu Habil 组、Nawa 组缺少生物化石。依前人将其与相邻的埃及、利比亚地区地层对比结果^[51], 本文将 Hassaouna 组划为寒武系; Amaki 组中有寒武纪时期的侵入岩, 因此将其划归寒武系; 而 Abu Habil 组与 Nawa 组整体可与 Amaki 组对比, 对比结果揭示, 此三者为造山运动后期凹陷盆地中形成的磨拉石沉

积。NSR 地层区内的 Memouniant 组, 与下伏的 Hassaouna 组呈角度不整合接触关系, Whiteman^[51]将其划归为奥陶系。Massalit 组中未发现化石, 通过类比乍得境内相似的岩性单元, 将其暂归为奥陶系; Karkur Talh 组产遗迹化石, 而在 NT、BARB 内的 Mekele、Bule Nile 盆地中 Enticho 组产管状水母 *Discophyllum cf. peltatum*, 时代为奥陶纪^[85], 其内部发育冰川沉积。在埃及境内, Um Ras 组产遗迹化石组合, 指示其时代为志留纪, 因此苏丹境内的 Um Ras 被划归为志留系, 并依据上、下关系将 Karkur Talh 组划归为奥陶系; Tadrart 组缺乏化石, 被前人置于泥盆系, 也有将其归为下石炭统的建议^[34], 具体时代有待进一步的研究。NSR 内寒武系、泥盆系、石炭系及二叠系为陆相沉积, 奥陶系则以海相沉积为主夹少量陆相沉积, 志留系则为陆相和海相交互沉积, 进入晚古生代, 冈瓦纳陆内裂陷盆地发育, 此时段研究区广泛发育裂陷盆地沉积, 其中石炭系顶部见冰川沉积。Wadi Malik 组产杜内期—维宪期植物化石组合 *Archaeosigillaria*, *Lepidodendron*, *Lepidodendropsis*, *Precyclostigma*, *Prelepidodendron* 等; Nothern-Wadi Malik 组所产植物化石指示其时代为晚石炭世纳缪尔期—斯蒂芬期^[86], 且其中也发育冰碛沉积。Lakia 组所产植物化石组合表明其从二叠纪开始接受沉积直至中侏罗世。Edaga Arbi 组产出孢粉化石 *Dentatispora*, *Granulatisporites*, *Kraeuselisporites*, *Punctatisporites*, *Cycadopites*, *Plicatipollenites*, *Potonieisporites*^[61], 这个组合在南非地区分布于上石炭统—下二叠统。而 BARB 内 Fincha 组建立的 6 个孢粉化石组合带^[67]指示其沉积时代始于早二叠世, 至晚三叠世结束。WOSR、EOSR 内的 Calub 组无生物化石记录, 但其中的砾岩被 Hunegnaw 等^[28]认为是冰川作用成因, Worku 等^[70]则认为是河流冲积作用形成, 并将其划归为二叠系。结合与上覆的 Bokh 组呈整合接触关系, 本文采用 Hunegnaw 的划分方案, 认为该砾岩可与 Edaga Arbi 组冰川沉积对比, 形成时代为晚石炭世—晚二叠世。Bokh 组产出的孢粉化石可与上述 Finchia 组中部的孢粉组合进行对比, 这些化石反映其形成时代为早三叠世; Gumburo 组中发现不具年代指示意义的木化石残片, 经过总结对比前人划分方案^[20, 28, 70], 本文将其划归为中—上三叠统。

4.3 中生界

研究区中生界主要为侏罗系和白垩系, 在

SSSR、EASSR 西部以白垩系为主。19 世纪初期, SSSR 内的白垩系被统称为“Nubian 砂岩”, 时代归为古生代—中生代, 随着系统地质调查工作的开展及研究的深入, 该套碎屑岩被细分为 Wadi Milk 组、Wadi Howar 组、Kababish 组、Omdurman 组及 Shendi 组; 在 MKSR 内则有 Abu Gabra 组、Bentiu 组、Dafur 群。苏丹境内中生界底部为 BARB 内的 Gedaref 组, 有研究认为, Gedaref 组向东南方向延伸, 与埃塞俄比亚境内的 Adigrat 组呈相变接触关系^[51], 而后者伏于 Antalo 组灰岩之下, Adigrat 组形成时代为中三叠世—早侏罗世^[19, 87]。因此认为, Gedaref 组沉积始于中侏罗世。在 Gedaref 组顶部见 Maastrichtian 期的花粉化石 *Cristaeturities cristatus*^[88], 因此 Gedaref 组形成时代为晚三叠世—白垩纪末期。

Tagabo 组与 Wadi Milk 组产丰富植物化石和孢粉化石^[15], 两者植物化石组合相似, 因此认为二者的形成时代相近, 同归于早白垩世阿尔布期—塞诺曼期, 然而, 在 Wadi Milk 组近底部的碎屑锆石年龄为 $79.2 \pm 2.4 \text{ Ma}$ ^[89], 认为其始于晚白垩世坎潘期, 本文现采用前一方案, 具体时代有待更进一步研究。整合于 Wadi Milk 组之下的 Wadi Howar 组产孢粉化石 *Foveotricolpites*, *Tricolpites* 等, 时代划归为土伦期—圣通期^[13], 结合下伏地层时代, 本文认为与 Wadi Milk 组和 Tagabo 组均为早白垩世阿尔布期—塞诺曼期。有研究认为, Shendi 组中的鲕状针铁矿可能与 Wadi Milk 组中的高岭石层沉积受同一海平面变化事件影响^[15], 因此本文认为, Shendi 组也形成于阿尔布期—塞诺曼期。前人报道的 Omdurman 组孢粉化石^[90] 显示沉积时间为阿尔布期—塞诺曼期。Kababish 组产植物化石、双壳、有孔虫、腹足类等, 反映此时为海陆交互的沉积特征, 依据 NSR 和 ZSR 与邻区最大海侵作用发生时期及整合于其上的 Jebel Abyad 组形成于古近纪, 将 Kababish 组归于坎潘阶—马斯特里赫特阶。

MKSR 内沉积了巨厚的碎屑岩, 且产丰富的孢粉化石, 白垩系在 Muglad 盆地发育最全, 结合前人获得的孢粉化石, 可总结出 8 个孢粉化石组合带, 其特征属如图 5 中的 I ~ VIII 所示。Abu Gabra 组产化石组合 I 和 II, 时代属贝里阿斯期—阿普特期早期; Bentiu 组产带 III 和 IV 化石, 时代属阿普特晚期—赛诺曼期; Aradeiba 组产 V 带化石, 时代为土伦期—圣通期; Zarga 组产带 VI 化石, 时代为坎潘期; Ghazal

组产 VII 带化石, 时代属坎潘期晚期—马斯特里赫特期早期; Baraka 组产带 VIII 化石, 时代为马斯特里赫特期^[91-94]。

EASSR 南部、东南部及 EGSSR 内中生界多以海相沉积为主, 但底部 Adigrat 组除外。Ogaden 地区 Adigrat 组曾被认为是 Gumburo 组上部^[95], 所产孢粉化石具有晚三叠世孢粉化石的组合特征。Bule Nile 盆地、Mekele 盆地、Ogaden 盆地的对比结果^[19] 显示, Adigrat 组沉积厚度在 Bule Nile 盆地中最大, 而 Ogaden 地区最薄, 这并非说明 Bule Nile 盆地的 Adigrat 组初始沉积最早, 而是代表快速的海侵作用最先到达 Ogaden 盆地, 并先开始了 Gohatsion 组、Abay 组、Hamanlei 组钙质砂岩、灰岩等海相沉积。此外, 在 Mekele 盆地 Antalo 组中发现的化石, 可建立中侏罗世 *Somalirhynchia - Amydroptychus - Cymatorhynchia* 腕足化石组合带, 产出的菊石和有孔虫表明, 其可延续至牛津期或钦莫利期^[96-98], 在 BARB 盆地中 Antalo 组归为牛津阶—钦莫利阶。Gohatsion 组中化石表明其沉积于早侏罗世—中侏罗世巴通期^[99]。笔者认为, Gohatsion 组代表了早三叠世快速海侵过程的开始, 在 BARB 盆地中 Gohatsion 组应包括 Wolela^[19] 提出的该盆地第一“过渡段”, 但只相当于 NT 盆地中的第一“过渡段”, 且 Gohatsion 组底界在 BARB 盆地低于 NT 南部 Mekele 盆地。在 BARB 内 Agula 组底部的鞭毛藻和上部的脊椎动物齿板化石, 指示其沉积时代为晚侏罗世—白垩纪早期^[100]。Hamanlei 组和 Urandab 组产孔虫化石^[95], 分别可建 *Kurnubia palastiniensis - Nautiloculina - Miliammina jurassica* 组合带、*Epistomina - Citharinella nikitini* 组合带, 时代分属早—晚侏罗世及晚侏罗世。Gabredarre 组中未发现具时代指示意义的化石, Brassier 等认为其与周边钦莫利阶—提塘阶灰岩层位相当^[95]。从岩性组合和上覆、下伏地层推断, Abay 组与 Gohatsion 组层位相当。

Amba Aradom 组形成时代具有早白垩世^[19, 50] 和晚白垩世^[60] 两种划分意见, 在 BARB 地区与下伏的 Antalo 组呈整合接触, 而后者为晚侏罗世沉积, 此外在 WOSR 北部 Amba Aradom 组灰岩夹层中发现阿普特期有孔虫 *Orbitolina* spp. 和双壳类^[101], 因此笔者认为其沉积于早白垩世, 时代与 EGSSR 区的 Urandab 组—Mustahil 组相当。Gorrahil 组为一套蒸发相沉积, 也被称为“主要石膏层”, 暂未收集到相

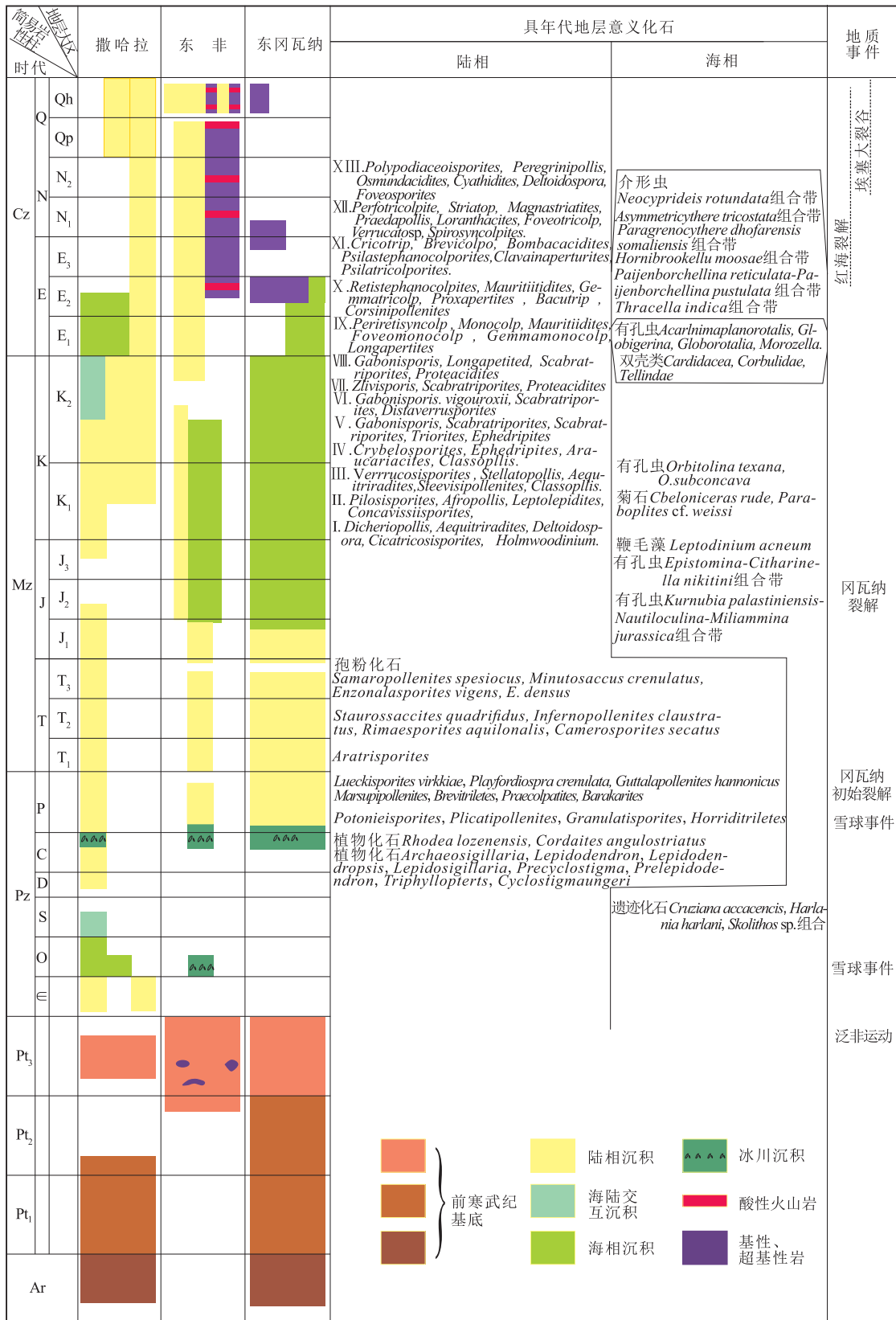


图 5 研究区岩石地层、生物地层和地质事件对比(地质时代各代号注释同图 2)

Fig. 5 Correlation of biostratigraphic, lithostratigraphy and geological events in the study area

关年代学资料,依据与上、下地层关系,将 Gorrahi 组置于下白垩统下一中部。在埃塞俄比亚与索马里交界的 Mudugh 盆地中, Mustahil 组的有孔虫、菊石化石指示其时代为早白垩世阿普特—阿尔布期^[102]。Ferfer 组和 Belet Uen 组暂时未收集到相关年代学资料,沿用前人方案归为晚白垩世赛诺曼—土伦期^[19, 103-104]。前人对 Jessoma 组形成时代有多种划分方案^[19, 28, 50, 70],结合索马里 Palmae 省产晚白垩世孢粉化石^[105],本文采用上白垩统一古新统划分方案,且与下伏的 Belet Uen 组呈不整合接触。

冈瓦纳大陆裂解活动在中生代非常强烈,强烈的拉伸作用使基底中的线性构造再次活化并裂解,形成北西—南东向、东—西向、北东—南西向的裂陷盆地,其中以第一种方向最明显,且多期次的构造活动,形成盆地内多个不整合界面。最终,裂解作用致使海侵的到来,在南部的 WOSR、EOSR、BARB 地区,早侏罗世中晚期开始接受海相沉积,NSR、ZSR 直至晚白垩世才受到来自埃及方向海侵作用的影响,夹海相沉积地层,而 EASSR 北部、MKSR 未受海侵影响,依旧沉积陆相地层(图 5)。由此说明,冈瓦纳裂解对区内沉积环境造成了广泛影响,且中生代时期,研究区内为北—中部高、南部低的古地貌特征。

4.4 新生代

新生代,海侵未到达的 MKSR、WNRB 地区继续接受陆相沉积,前人在 WNRB 内 Melut 盆地中建立了 5 个孢粉化石组合带^[94],每个组合带中特征属如图 5 中 IX~XIII,其分布为 Yale 组下一中部产 IX 化石带,时代为古近纪;Yale 组上部和 Adar 组产 X 带,时代为始新世;Jimidi 组至 Miadol 组下部产 XI 带,时代为渐新世—早中新世;Miadol 组上部至 Daga 组下部产 XII 带组合,时代为早中新世,Daga 组上部产 XIII 带,时代为晚中新世—上新世。

新生代伊始,海退作用持续,研究区南部海平面退至 Marda 断裂附近,北部 NSR、ZSR 内 Jebel Abyad 组中产双壳、有孔虫、棘皮类等生物化石,时代归为古近纪,这些化石组合反映其为海相沉积。Hudi 组中的腹足无时代指示意义,依据上下接触关系,本文将其归为始新统。WOSR、EOSR 内 Auradu 组代表了区内最后一次海侵作用,Auradu 组产大量古新世—始新世早期有孔虫化石^[104],索马里北部地区 Karkar 组建有 6 个介形虫化石带(图

5)^[106],表明其为中始新世沉积。

从始新世开始,Ashangi 组、Aiba 组、Alage 组、Makonnen 组等大量玄武岩夹中酸性火山岩溢流或喷出,其与红海、亚丁湾的裂解相关,其中最古老的为 Ashangi 组,同位素年龄数据显示,Ashangi 组形成于 54~34 Ma^[60],属古新世;Makonnen 组 K-Ar 同位素年龄为 28.8~34.8 Ma^[107]。中新世,受形成 Afar 裂陷及 Main Ethiopia 大裂谷的拉张应力影响,再次形成大量火山岩,如 Tarmaber Gussa 组、Alage 组、Nazret 组等,而此时海平面持续下降并退出研究区,同时大部分地区接受早先或正在形成的裂陷、断陷盆地沉积,如 Danakil 群、Dalaha 组等。至第四纪,发育河流和湖泊沉积,在红海沿岸发育海相沉积物。

从地层格架图、综合对比图(图 2~图 5)看出,区内太古宇—中元古界分布于撒哈拉和东冈瓦纳陆块内,发育于两陆块间的中元古代晚期—新元古代岛弧、洋壳等在泛非运动中隆升造山形成东非造山带,同时撒哈拉和东冈瓦纳拼合。NbSR 由大量洋壳、岛弧等火山物质组成,为后期的成矿作用提供了物质基础。NbSR 内已发现较多中—超大型金属矿床,尤其是位于 NbSR 内各地层分区的边界位置,这些地层分区的边界位置是有利的金属矿产找矿前景区。早古生代,区内遭受风化剥蚀,仅在西北部的 NbSR 地区有古生代沉积,晚古生代—中生代,MSR 和 EGSSR 受冈瓦纳裂解影响,形成裂陷盆地并接受沉积,在侏罗纪—白垩纪冈瓦纳裂解活动进入强烈期,从南向北的海侵到达 EASSR 东南和 EGSSR,使这 2 个地区发育海相地层,SSSR 北部则直到白垩纪末期才受到来自埃及方向海侵作用的影响,沉积海相地层,而 EASSR 大部分地区则未受南、北 2 个方向不同时期海侵作用的影响。SSSR 和 EASSR 南部的晚白垩世—始新世裂陷盆地内有很好的油气资源,而这 2 个地层大区北部的 Wadi Howar、Atbara—Bule Nile 地区同样发育同一时期的裂陷盆地沉积,具有相似的成藏条件,这些地区同样具有较好的油气资源地质条件。WOSR 内二叠系—三叠系 Karroo 群发现大量烃源岩,侏罗系—白垩系连续浅海盆地沉积同样具有较好的烃源岩潜力,是油气资源的潜力区。中生代末期—新生代早期,红海裂解扩展,受此影响,NbSR 东北部、MSR 东南部及 EGSSR 出现大量新生代火山岩,且 EGSSR 区内自西向东发生海退作用,使 EOSR 发育

新生代海相地层, 而 WOSR 则为新生代火山岩和陆相地层。在 MERB 东北部 Danakil 凹陷内发育盐矿, 区内较多活火山也为硫成矿提供了有利的地质条件。

5 结 论

(1) 首次对东非苏丹、厄立特里亚、埃塞俄比亚开展综合地层区划研究, 共划分出撒哈拉地层大区、东非地层大区和东冈瓦纳地层大区; 进一步划分出 Nukheila 地层区、Zalingei 地层区、Bayuda 地层区和 Muglad-Kosti 地层区, 努比亚地层区、莫桑比克地层区, East Ogaden 地层区和 West Ogaden 地层区; 其中努比亚地层区内细分为 Cabgaba 地体、Gebeit 地体、Haya 地体、Barka 地体、Hagar 地体、Adobha Abiy 地体、Nacfa 地体 7 个地层分区, 莫桑比克地层区划分为 Butana 基底、Ingessana-Gambela 基底、Dodola-Moyale 基底、Bule Nile-Atbara 裂陷盆地、Main Ethiopia 裂陷盆地 5 个地层分区。地层区划有助于更好地识别地层特征和属性, 也有利于矿产调查地质工作。

(2) 通过对研究区的地层对比分析, 中生代, 研究区南部发生海侵作用早于北部, 且中生代大部分时期, 北部—中部为陆相沉积, 南部为海相沉积, 说明研究区中生代具有北—中部高、南部低的古地理地貌特征。

(3) 通过地层对比分析认为, EASSR 内地层分区的边界是较好的金属矿床潜力区; 苏丹 Wadi Howar 地区和 Atbara-Bule Nile 地区白垩系、埃塞俄比亚 Ogaden 盆地的侏罗系—白垩系浅海盆地有一定油气资源潜力。

致谢: 感谢在论文编写期间中国地质调查局武汉地质调查中心刘江涛博士、张海坤高级工程师给予文章结构提出的建设性意见, 也一并感谢提供实地工作资料和信息的小伙伴们。

参考文献

- [1] Stern R J. ARC Assembly and Continental Collision in the Neoproterozoic East African Orogen: Implications for the Consolidation of Gondwanaland[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1994, 22(1): 319-351.
- [2] Stern R J. Crustal evolution in the East African Orogen: a neodymium isotopic perspective[J]. Journal of African Earth Sciences, 2002, 34(3): 109-117.
- [3] Johnson P R, Woldehaimanot B. Development of the Arabian-Nubian Shield: perspectives on accretion and deformation in the northern East African Orogen and the assembly of Gondwana [C]// Proterozoic East Gondwana: Supercontinent Assembly and Breakup. The Geological Society of London, 2003: 289-325.
- [4] Avigad D, Gvirtzman Z. Late Neoproterozoic rise and fall of the northern Arabian-Nubian shield: The role of lithospheric mantle delamination and subsequent thermal subsidence[J]. Tectonophysics, 2009, 477(3/4): 217-228.
- [5] Drury S A, De Souza Filho C R. Neoproterozoic terrane assemblages in Eritrea: review and prospects[J]. Journal of African Earth Sciences, 1998, 27(3): 331-348.
- [6] Fritz H, Abdelsalam M, Ali K A, et al. Orogen styles in the East African Orogen: A review of the Neoproterozoic to Cambrian tectonic evolution[J]. Journal of African Earth Sciences, 2013, 86: 65-106.
- [7] Vail J R. Outline of the Geochronology and Tectonic Units of the Basement Complex of Northeast Africa [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1976, 350(1660): 127-141.
- [8] Vail J R. Pan-African (late Precambrian) tectonic terrains and the reconstruction of the Arabian-Nubian Shield [J]. Geology, 1985, 13(12): 839.
- [9] Vail J R. Pan-African crustal accretion in north-east Africa [J]. Journal of African Earth Sciences, 1983, 1(3): 285-294.
- [10] Abdelsalam M G, Stern R J. Sutures and shear zones in the Arabian-Nubian Shield [J]. Journal of African Earth Sciences, 1996, 23(3): 289-310.
- [11] Joseph G, Meert R V D V. The assembly of Gondwana 800-550 Ma [J]. Geodynamics, 1997, 23(3/4): 223-235.
- [12] Schlüter T. Chapter 4 Review of countries and territories [C]// Geological Atlas of Africa. Berlin: Springer Verlag, 2008.
- [13] Schrank E. Biostratigraphic importance of microfloras from the Late Cretaceous clastic series of Northwestern Sudan [J]. Cretaceous Research, 1987, 8(1): 29-42.
- [14] Schrank E. Nonmarine Cretaceous correlations in Egypt and northern Sudan: palynological and palaeobotanical evidence [J]. Cretaceous Research, 1992, 13(4): 351-368.
- [15] Wycisk P. Stratigraphic update of the nonmarine Cretaceous from SW Egypt and NW Sudan [J]. Cretaceous Research, 1991, 12(2): 185-200.
- [16] Mateer N J, Wycisk P, Jacobs L L, et al. Correlation of nonmarine Cretaceous strata of Africa and the Middle East [J]. Cretaceous Research, 1992, 13(3): 273-318.
- [17] Salama R B. Rift Basins of the Sudan [C]// Selley R C. Sedimentary basins of Africa. 1997: 105-149.
- [18] 张可宝, 史卜庆, 窦立荣, 等. 苏丹 Melut 盆地的形成和演化 [J]. 内蒙古石油化工, 2007, (12): 137-140.
- [19] Wolela A. Sedimentation of the Triassic-Jurassic Adigrat Sandstone Formation, Bule Nile (Abay) Basin, Ethiopia [J]. Journal of African Earth Sciences, 2008, (52): 30-42.
- [20] Wolela A. Sedimentation and depositional environments of the Barremian-Cenomanian Debre Libanose Sandstone, Bule Nile (Abay) Basin, Ethiopia [J]. Cretaceous Research, 2009, 30: 1133-1145.
- [21] 张克信, 何卫红, 徐亚东, 等. 论断代构造-地层区划的原则与方

- 法:以中国寒武纪构造-地层区划为例[J].地球科学,2020,45(12):4267-4290.
- [22] 张克信,潘桂棠,何卫红,等.中国构造-地层大区划分新方案[J].地球科学——中国地质大学学报,2015,40(2):206-233.
- [23] Stern R J, Kr Ner A, Bender R, et al. Precambrian basement around Wadi Halfa, Sudan: a new perspective on the evolution of the East Saharan Craton[J]. *Geologische Rundschau*, 1994, 83(3): 564-577.
- [24] Harris N B W, Hawkesworth C J, Ries A C. Crustal evolution in north-east and east Africa from model Nd ages[J]. *Nature*, 1984, 309(5971): 773-776.
- [25] Kröner A, Stern R J, Dawoud A S, et al. The Pan-African continental margin in northeastern Africa: evidence from a geochronological study of granulites at Sabaloka, Sudan[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, (85): 91-104.
- [26] Fantozzi P L, M A K. Geological mapping in northeastern Somalia (Midjiurtinia region): Field evidence of the structural and paleogeographic evolution of the northern margin of the Somali plate[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2002, 34(1): 21-55.
- [27] Mège D, Le Deit L, Rango T, et al. Gravity tectonics of topographic ridges: Halokinesis and gravitational spreading in the western Ogaden, Ethiopia[J]. *Geomorphology*, 2013, 193: 1-13.
- [28] Hunegnaw A, Sage L, Gonnard R. Hydrocarbon potential of the intracratonic Ogaden basin, SE Ethiopia [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1998, 21(4): 401-425.
- [29] Rooney T O. The Cenozoic magmatism of East-Africa: Part I—Flood basalts and pulsed magmatism[J]. *Lithos*, 2017, 286/287: 264-301.
- [30] Boccaletti M, Getaneh A, Bonavia F F. The marda fault: a Remnant of an incipient aborted rift in the Paleo-African Arabian Plate[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1991, 14(1): 79-91.
- [31] Gindy A R. General geology and petrography of the precambrian basement around Zalingei town, Darfur Province, Sudan [J]. *Precambrian Research*, 1984, 24(3): 217-236.
- [32] Schandelmeyer H, Richter A, Harms U. Proterozoic deformation of the East Saharan Craton in Southeast Libya, South Egypt and North Sudan[J]. *Tectonophysics*, 1987, 140(2): 233-246.
- [33] Eldawi M G F A G. Gravity Investigation in Area East of River Nile (Khartoum State) [J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2003, 14(2): 175-181.
- [34] Staff of the Geological Research Authority of the Sudan R R I L. Accompanying Geological Notes to the 1 : 1000000 Scale Geology Atlas of the Republic of the Sudan[M]. Khartoum(Sudan): Khartoum University Press, 1995.
- [35] Villiams F M. Understanding Ethiopia [M]. Cham Heidelberg New York Dordrecht London: Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- [36] Lissan N H, Bakheit A K. Geochemistry and Geotectonic Setting of Neoproterozoic Granitoids from Artoli Area, Berber Province, Northern Sudan[J]. *Journal of Applied Science*, 2011, 11(5): 752-767.
- [37] Nils Lenhardt S B B S, Montasir A. Ibinoof S A S. The monogenetic Bayuda Volcanic Field, Sudan: New insights into geology and volcanic morphology [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2018, 356: 211-224.
- [38] Almond D C. New Ideas on the geological history of the basement complex of North-east Sudan[J]. *Sudan Notes and Records*, 1978, 59: 106-136.
- [39] Küster D, Liégeois J. Sr, Nd isotopes and geochemistry of the Bayuda Desert high-grade metamorphic basement (Sudan): an early Pan-African oceanic convergent margin, not the edge of the East Saharan ghost craton? [J]. *Precambrian Research*, 2001, 109(1): 1-23.
- [40] Yibas B, Armstrong R, Reimold W U, et al. Deformational belts and suture zones in the East African Orogen: a revisit in light of recent data from the precambrian of southern Ethiopia [C]//Annual Meeting of the Geological society of South Africa, School of Geological Sciences, University of Kwazulu-Natal, 2005.
- [41] Yibas B, Reimold W U, Anhaeusser C R, et al. Geochemistry of the mafic rocks of the ophiolitic fold and thrust belts of southern Ethiopia: constraints on the tectonic regime during the Neoproterozoic (900-700 Ma) [J]. *Precambrian Research*, 2003, 121(3): 157-183.
- [42] Yibas B, Reimold W U, Armstrong R, et al. The tectonostratigraphy, granitoid geochronology and geological evolution of the Precambrian of southern Ethiopia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2002, 34(1): 57-84.
- [43] Evuk D, Franz G, Frei D, et al. The Neoproterozoic evolution of the central-eastern Bayuda Desert (Sudan) [J]. *Precambrian Research*, 2014, 240: 108-125.
- [44] Abdalla E. M. Elsheikh K A E Z. The Structural Evolution of the Hamisana Geodynamic Zone, Red Sea Region, NE Sudan [J]. *American Journal of Earth Sciences*, 2015, 2(3): 52-60.
- [45] Wipfler E L. Transpressive structures in the Neoproterozoic Ariab-Nakasib Belt, northeast Sudan: evidence for suturing by oblique collision[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1996, 23(3): 347-362.
- [46] Bowden S, Gani N D, Alemu T, et al. Evolution of the Western Ethiopian Shield revealed through U - Pb geochronology, petrogenesis, and geochemistry of syn- and post-tectonic intrusive rocks[J]. *Precambrian Research*, 2020, 338: 105588.
- [47] Xue L, Alemu T, Gani N D, et al. Spatial and temporal variation of tectonic uplift in the southeastern Ethiopian Plateau from morphotectonic analysis[J]. *Geomorphology*, 2018, 309: 98-111.
- [48] Kazmin V, Shifferaw A, Balcha T. The Ethiopian basement: Stratigraphy and possible manner of evolution [J]. *Geologische Rundschau*, 1978, 67(2): 531-546.
- [49] Mège D, Purcell P, Pochat S, et al. The Landscape and Landforms of the Ogaden, Southeast Ethiopia[M]//Billi P. Landscapes and Landforms of Ethiopia. 2015: 323-348.
- [50] Purcell P G. The Marda Fault Zone, Ethiopia [J]. *Nature*, 1976, 261(5561): 569-571.
- [51] Whiteman A J. The geology of the Sudan Republic [M]. Ely House, London: Oxford University Press, 1971.
- [52] Nafi M, Dawi M E, Amein A E, et al. New Evidence of Upper Carboniferous - Permian Strata in Northern Sudan [C]//Sudanese Association of Petroleum Geoscientists conference, Khartoum, 2011.
- [53] Nafi M, Salih K, Amein A E, et al. Significance of newly discovered Late

- Carboniferous and Permo-Triassic Strata, North and Northwestern Sudan[C]//CPC-2014 Field Meeting on Carboniferous and Permian Nonmarine-Marine correlation, Freiberg, 2014.
- [54] Elsheikh A, Abdelsalam M G, Mickus K. Geology and geophysics of the West Nubian Paleolake and the Northern Darfur Megalake (WNPL-NDML): Implication for groundwater resources in Darfur, northwestern Sudan[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2011, 61 (1): 82-93.
- [55] Küster D, Liégeois J, Matukov D, et al. Zircon geochronology and Sr, Nd, Pb isotope geochemistry of granitoids from Bayuda Desert and Sabaloka (Sudan): Evidence for a Bayudian event (920-900Ma) preceding the Pan-African orogenic cycle (860-590Ma) at the eastern boundary of the Saharan Metacraton [J]. *Precambrian Research*, 2008, 164(1/2): 16-39.
- [56] Reischmann T, Kröner A. Late Proterozoic island arc volcanics from Gebeit, Red Sea Hills, north-east Sudan[J]. *Geol Rundsch*, 1994, 83: 547-563.
- [57] Abdelsalam M G, Stern R J. Tectonic evolution of the Nakasib suture, Red Sea Hills, Sudan: evidence for a Late Precambrian Wilson Cycle[J]. *Journal of the Geological Society*, 1993, 150(2): 393-404.
- [58] Abdelsalam M G, Stern R J. Structure of the late Proterozoic Nakasib suture, Sudan[J]. *Journal of the Geological Society*, 1993, 150 (6): 1065-1074.
- [59] Teklay M. Neoproterozoic arc-back-arc system analog to modern arc-back-arc systems: evidence from tholeiite-boninite association, serpentinite mudflows and across-arc geochemical trends in Eritrea, southern Arabian-Nubian shield[J]. *Precambrian Research*, 2006, 145 (1/2): 81-92.
- [60] Deschamps S T J M. Geology and mineral potential of Ethiopia: a note on geology and mineral map of Ethiopia [J]. *African Earth Sciences*, 2003, 36: 273-313.
- [61] Bussert R, Schrank E. Palynological evidence for a latest Carboniferous-Early Permian glaciation in Northern Ethiopia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2007, 49(4): 201-210.
- [62] Lewin A, Meinhold G, Hinderer M, et al. Heavy minerals as provenance indicator in glaciogenic successions: An example from the Palaeozoic of Ethiopia [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2020, 165: 1-14.
- [63] Lewin A, Meinhold G, Hinderer M, et al. Provenance of sandstones in Ethiopia during Late Ordovician and Carboniferous-Permian Gondwana glaciations: Petrography and geochemistry of the Enticho Sandstone and the Edaga Arbi Glacials [J]. *Sedimentary Geology*, 2018, 375: 188-202.
- [64] Dou L, Xiao K, Cheng D, et al. Petroleum geology of the Melut Basin and the Great Palogue Field, Sudan [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(3): 129-144.
- [65] Bussert R. Depositional environments during the Late Palaeozoic ice age (LPIA) in northern Ethiopia, NE Africa [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2014, 99: 386-407.
- [66] Kumpulainen R A, Uchman A, Woldehaimanot B, et al. Trace fossil evidence from the Adigrat Sandstone for an Ordovician glaciation in Eritrea, NE Africa [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2006, 45(4): 408-420.
- [67] Dawit E L. Permian and Triassic microfloral assemblages from the Blue Nile Basin, central Ethiopia [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2014, 99: 408-426.
- [68] Teklay M, Kröner A, Mezger K, et al. Geochemistry, Pb-Pb single zircon ages and Nd-Sr isotope composition of Precambrian rocks from southern and eastern Ethiopia: implications for crustal evolution in East Africa [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1998, 26 (2): 207-227.
- [69] Dawidson A, Mcgregor D C. Palynomorphs indicating Permian rocks in Ethiopia [J]. *Nature*, 1976, 262(5567): 371-373.
- [70] Worku T, Astin T R. The Karoo sediments (Late Palaeozoic to Early Jurassic) of the Ogaden Basin, Ethiopia [J]. *Sedimentary Geology*, 1992, (76): 7-21.
- [71] Stern R J, Ali K A, Abdelsalam M G, et al. U-Pb zircon geochronology of the eastern part of the Southern Ethiopian Shield [J]. *Precambrian Research*, 2012, 206/207: 159-167.
- [72] Stern R J, Abdelsalam M G. Formation of juvenile continental crust in the Arabian-Nubian shield: evidence from granitic rocks of the Nakasib suture, NE Sudan [J]. *Geologische Rundschau*, 1988, 87: 150-160.
- [73] Reischmann T, Bachtadse V, Kröner A, et al. Geochronology and palaeomagnetism of a late Proterozoic island arc terrane from the Red Sea Hills, northeast Sudan [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 114(1): 1-15.
- [74] Kröner A, Linnebacher P, Stern R J, et al. Evolution of Pan-African island arc assemblages in the southern Red Sea Hills, Sudan, and in southwestern Arabia as exemplified by geochemistry and geochronology [J]. *Precambrian Research*, 1991, (53): 99-118.
- [75] Teklay M, Haile T, Kröner A, et al. A Back-arc Palaeotectonic Setting for the Augaro Neoproterozoic Magmatic Rocks of Western Eritrea [J]. *Gondwana Research*, 2003, 6(4): 629-640.
- [76] Teklay M, Berhe K, Reimold W U, et al. Geochemistry and Geochronology of a Neoproterozoic Low-K Tholeiite-Boninite Association in Central Eritrea [J]. *Gondwana Research*, 2002, 5 (3): 597-611.
- [77] Beyth M, Stern R J, Matthews A. Significance of high-grade metasediments from the Neoproterozoic basement of Eritrea [J]. *Precambrian Research*, 1997, 86(1): 45-58.
- [78] Teklay M, Kroner A, Mezger K. Enrichment from plume interaction in the generation of Neoproterozoic arc rocks in northern Eritrea: implications for crustal accretion in the southern Arabian-Nubian Shield [J]. *Chemical Geology*, 2002, 184: 167-184.
- [79] Andersson U B, Ghebreab W, Teklay M. Crustal evolution and metamorphism in east-central Eritrea, south-east Arabian-Nubian Shield [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2006, 44(1): 45-65.
- [80] Miller N R, Stern R J, Avigad D, et al. Cryogenian slate-carbonate sequences of the Tambien Group, northern Ethiopia (I): pre-"Sturtian" chemostratigraphy and regional correlations [J]. *Precambrian Research*, 2009(170): 129-156.
- [81] Ibinooof M A, Bumby A J, Grantham G H, et al. Geology, geochemistry and Sr-Nd constraints of selected metavolcanic rocks from the

- eastern boundary of the Saharan Metacraton, southern Sudan: A possible revision of the eastern boundary[J]. *Precambrian Research*, 2016, 281: 566–584.
- [82] Woldemichael B W, Woldemichael B W, Kimura J, et al. SHRIMP U–Pb zircon geochronology and Sr–Nd isotopic systematic of the Neoproterozoic Ghimbi–Nedjo mafic to intermediate intrusions of Western Ethiopia: a record of passive margin magmatism at 855 Ma? [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2010, 99(8): 1773–1790.
- [83] Padoan M, Garzanti E, Harlavan Y, et al. Tracing Nile sediment sources by Sr and Nd isotope signatures (Uganda, Ethiopia, Sudan) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(12): 3627–3644.
- [84] Worku H, Yifa K. The tectonic evolution of the Precambrian metamorphic rocks of the Adola Belt (Southern Ethiopia) [J]. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 1992, 14(1): 37–55.
- [85] Saxena G N, Assefa G. New evidence on the age of the glacial rocks of northern Ethiopia [J]. *Geological Magazine*, 1983, 120(6): 549–554.
- [86] Klitzsch E. Fossil Plants from the Nubian Sandstone of Eastern Darfur [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1990, 10(1/2): 199–213.
- [87] Wolela A. Diagenetic evolution of the Anisian–Pliensbachian Adigrat Sandstone, Bule Nile Basin, Ethiopia [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2010, (56): 29–42.
- [88] Eisawi A, Schrank E. Terrestrial palynology and age assessment of the Gedaref Formation (eastern Sudan) [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2009, 54(1): 22–30.
- [89] Owusu Agyemang P C, Roberts E M, Bussert R, et al. U–Pb detrital zircon constraints on the depositional age and provenance of the dinosaur-bearing Upper Cretaceous Wadi Milk formation of Sudan [J]. *Cretaceous Research*, 2019, 97: 52–72.
- [90] Schrank E, Awad M. Palynological evidence for the age and depositional environment of the Cretaceous Omdurman Formation in the Khartoum area, Sudan [J]. *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen*, 1990, Reihe A 120: 169–182.
- [91] Cole J M, Abdelrahim O B, Hunter A W, et al. Late Cretaceous spore–pollen zonation of the Central African Rift System (CARS), Kaikang Trough, Muglad Basin, South Sudan: angiosperm spread and links to the Elaterates Province [J]. *Palynology*, 2017, 41(4): 547–578.
- [92] Eisawi A A M, Ibrahim A B, Omer B A R, et al. Palynozonation of the Cretaceous to Lower Paleogene Strata of the Muglad Basin, Sudan [J]. *Palynology*, 2012, 36(2): 191–207.
- [93] Kaska H V. A spore and pollen zonation of early cretaceous tertiary nonmarine sediments [J]. *Palynology*, 1989, 13(1): 79–90.
- [94] Eisawi A, Schrank E. Upper Cretaceous to Neogene Palynology of the Melut Basin, Southeast Sudan [J]. *Palynology*, 2008, 32: 101–129.
- [95] Brassier M, Geleta S. A planktonic marker and Callovian–Oxfordian fragmentation of Gondwana: Data from Ogaden basin, Ethiopia [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1993, 104 (1): 177–184.
- [96] Kiessling W, Pandey D K, Schemm–Gregory M, et al. Marine benthic invertebrates from the Upper Jurassic of northern Ethiopia and their biogeographic affinities [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2011, 59: 195–214.
- [97] Martire L, Clari P, Pavia G. Discontinuities and sequence stratigraphy of the Antalo limestone (Upper Jurassic, North Ethiopia) [C]// *Geoscience and Technology Forum*, Torino, 2000.
- [98] Martire L, Clari P, Pavia G. Stratigraphic analysis of the Upper Jurassic (Oxfordian–Kimmeridgian) Antalo limestone in the Mekele Outlier (Tigray, northern Ethiopia) [C]// *Crasquin–Soleau S, Barrier E. Peri–Tethys Memoir 4: Epicratonic basins of Peri–Tethyan platforms. Memoires du Museum National d’ Histoire Naturelle*, 1998: 131–144.
- [99] Getaneh A. Gohatsion Formation. A new Lias–Malm lithostratigraphic unit from the Abay River basin, Ethiopia [J]. *Geosciences Journal*, 1981, 2: 63–68.
- [100] Goodwin M B, Clemens W A, Hhtchison J H, et al. Mesozoic Continental Vertebrates with associated Palynostratigraphic dates from the northwestern Ethiopia [J]. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 1999, 19(4): 728–741.
- [101] Bosellini A, Russo A, Assefa G. The Mesozoic succession of Dire Dawa, Harar Province, Ethiopia [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2001, 32(3): 403–417.
- [102] Russo A, Bosellini F, Mohamed C, et al. Paleoenvironmental analysis and cyclicity of the Mustahil Formation (Cretaceous of central Somalia) [J]. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 1991, 96 (4): 487–500.
- [103] Barbieri F, Mohamed C M, Di Geronimo I, et al. II Cretaceo Nella regione di Hiiraan in Somalia (valle dello Webi Shabelle) [J]. *Mem. Sci. Geol.*, 1979, 32: 1–23.
- [104] Bosellini A. The Continental Margins of Somalia: Structural evolution and sequence stratigraphy [J]. *Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 1992, *Memoir* 53: 185–205.
- [105] Schrank E. Palynology of the Yesomma Formation in northern Somalia: a study of pollen, spores and associated phytoplankton from the Late Cretaceous Palmae Province [J]. *Palaeontographica Abteilung B: Paläophytologie*, 1994, 231: 63–112.
- [106] Elewa A M T, Luger P, Bassiouni M A. Middle Eocene Ostracoda from Northern Somalia: (Paleoenvironmental Appraisal) [J]. *Revue DE Micropaleontologie*, 2001, 4(44): 279–289.
- [107] Davidson A. The Omo River project: Reconnaissance geology and geochemistry of parts of Illubabor, Kefa, Gemu Gofa, and Sidamo [J]. *Ethiopian Institute Geological Surveys Bulletin*, 1983.
- ①姚华舟, 陈开旭, 徐景银, 等. 埃塞俄比亚 Gimbi–Nejo 地区区域地球化学调查报告. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 2010.