

赞比亚东北部姆波洛科索盆地沉积地层特征

孙宏伟,王杰,任军平,左立波,古阿雷

中国地质调查局天津地质调查中心,天津,300170

内容提要:赞比亚东北部姆波洛科索盆地古元古代姆波洛科索群是研究早前寒武纪河流相、浅海相沉积序列和基底组分的重要地层单元。本文通过对该地区岩石地层组成、沉积时代与沉积环境方面进行研究及系统总结,并结合对该地区姆巴拉组实测剖面及其碎屑岩岩石学和地球化学分析数据,获得以下认识:姆波洛科索群可能形成于 1860 Ma 之后,其上覆卡萨马群可能形成于 1434 Ma 之后;姆波洛科索盆地沉积环境主要包括:辫状河、冲积扇、湖泊以及浅海等;姆波洛科索群底部姆巴拉组碎屑岩以班委乌卢地块基底花岗岩为主要物源,形成于被动大陆边缘构造背景之下;姆波洛科索盆地可能属于被动大陆边缘型盆地;化探分析数据显示盆地东部与北部地区分别具有金、铀找矿潜力。

关键词:赞比亚;姆波洛科索盆地;沉积特征;地球化学;资源潜力

非洲中南部地区主要分布有中—古元古代姆瓦超群(Muva Supergroup)、新元古代加丹加(Katanga)超群以及中—新生代卡鲁(Karoo)超群 3 套沉积地层,其中后两者由于赋存大量矿产资源而备受关注(Cairncross, 2001; Kampunzu et al., 2009; Fernandes et al., 2015; Phiri et al., 2016; Mambwe et al., 2017),但中—古元古代姆瓦超群则研究程度较低(Unrug, 1984; Andrews-Speed, 1989)。姆瓦超群不整合覆盖在班委乌卢(Bangweulu)结晶基底之上,主要分布在赞比亚东北部的姆波洛科索(Mporokoso)盆地及其周围,沉积地层厚度超过 5000 m,分布面积达 50000 km²(Unrug, 1984),其底部的姆波洛科索群是研究早前寒武纪河流相、浅海相沉积序列和基底组分的重要层位,且具有一定的金、铀成矿潜力(Guernsey, 1952; Andrews-Speed and Unrug, 1984; Andrews-Speed, 1986, 1989; 任军平等, 2016)。因此,理清姆波洛科索群沉积特征及姆波洛科索盆地沉积演化规律具有重要研究意义,同时也为我国地勘单位在该地区开展矿产勘查提供基础地质资料与技术支持,服务于我国矿产资源“走出去”及“一带一路”倡议。

长期以来,由于缺少可靠的地球化学数据,人们对姆波洛科索盆地与姆波洛科索群的形成构造背景

及其沉积物源未进行过系统的讨论(Unrug, 1984; Andrews-Speed, 1989; Debruyne et al., 2014)。本文通过援外地质调查期间进行实测剖面,对获得的姆波洛科索群底部姆巴拉组(Mbala)碎屑岩进行岩石学和地球化学分析,取得了地球化学数据,并通过各种岩石化学图解推断了其形成时的构造背景,与近年来通过碎屑锆石研究(Waele et al., 2006a)和早期沉积相分析(Unrug, 1984)得出的结论基本一致,进一步指出了姆波洛科索盆地可能为被动大陆边缘盆地。

1 构造背景

赞比亚东北部姆波洛科索盆地位于班委乌卢地块中部,该地块以“班委乌卢湖”命名(Drysdall et al., 1972),也有学者称其为“赞比亚克拉通”(Clifford, 1970)、“赞比亚核”(Robinson, 1982)等。班委乌卢地块面积约 150000 km²,毗邻刚果克拉通和坦桑尼亚克拉通(Andersen and Unrug, 1984),其四周被不同时期的活动带包围,东北部为古元古代乌本迪(Ubendian)构造带,西部为中元古代基巴拉(Kibara)构造带和新元古代卢菲里安(Lufilian)构造带(Waele et al., 2008),东南部为中元古代的伊鲁米德(Irumide)构造带(Waele et al., 2006b)(图

注:本文为商务部技术援外项目(编号:[2015]352)和中国地质调查局项目(编号:121201006000150014)的成果。

收稿日期:2018-07-17;改回日期:2018-12-01;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.01.016

作者简介:孙宏伟,男,1986年生,工程师,矿物学、岩石学、矿床学专业,Email:shwucub@163.com。通讯作者:王杰,男,1964年生,教授级高级工程师,主要从事地质矿产调查与研究,Email:wangjie513046@163.com。

1)。

2 岩石组成

2.1 变质结晶基底

班委乌卢地块内现存结晶基底主要包括东西向的片岩带、侵入其内的花岗岩类和上覆的变质火山岩 (Andersen and Unrug, 1984; Debryne et al.,

2014)。片岩主要出露在班委乌卢地块的东部和北东部,呈东西向带状分布,长 75~100 km,宽 10 km,岩性主要为白云母化或绿泥石化石英—长石片岩,其原岩为酸性火山岩和泥质—砂质沉积岩 (Debryne et al., 2014)。局部地区也可见少量的石英岩和变质砂岩 (Andersen and Unrug, 1984)。

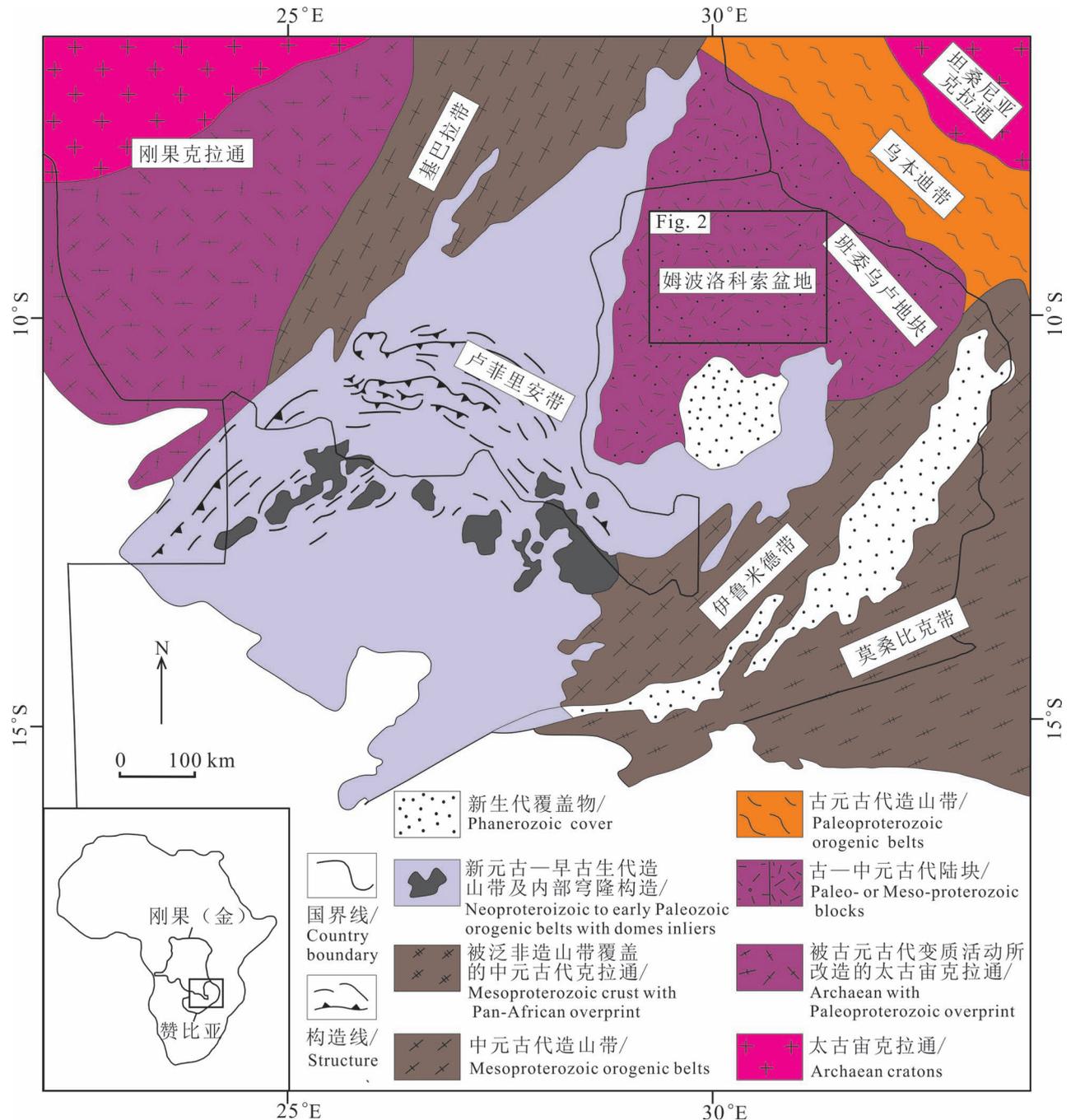


图 1 赞比亚东北部姆波洛科索盆地构造背景图(据 Waele et al., 2008 修改)

Fig. 1 Tectonic setting of the Mporokoso Basin, north-eastern Zambia, showing relationship to surrounding orogenic belts (modified after Waele et al., 2008)

2.2 沉积盖层

“姆瓦超群”一词最早由 Daly 和 Unrug (1982) 提出,为 2000 Ma 以后在班委乌卢地块内沉积的盖层,不整合覆盖在基底之上,主要由早期的姆波洛科索群和晚期的卡萨马群组成,姆波洛科索群主要分布在赞比亚境内的姆波洛科索盆地内,少量延伸至坦桑尼亚境内,总厚度超过 5000 m,自下而上又分为:姆巴拉组、萨马 (Nsama) 组、卡布韦卢马 (Kabweluma) 组和基波特 (Chibote) 组 (Unrug, 1984);卡萨马群则主要分布在姆波洛科索盆地东南部外缘的卡萨马市周围(图 2)。

2.2.1 姆巴拉组

姆巴拉组以姆巴拉地区命名,在盆地北部最厚

可达 2700 m,而盆地西南部厚度则明显变薄,仅为 300 m 左右。该组主要包括砾岩、成熟石英砂岩(紫色、粉红和白色)以及少量燧石。根据岩石组分、颜色、结构和构造等关系,又可细分为基皮利 (Chipili) 岩段、苏姆布 (Sumbu) 岩段、姆瓦韦 (Mpawwe) 岩段、姆南什 (Mununshi) 岩段、姆普隆古 (Mpulungu) 岩段、伦佐 (Lunzua) 岩段和卡拉耶 (Kalaye) 岩段等 7 个非正式地层单位 (Unrug, 1984)。该组典型的剖面位于盆地的东北部,下部位于姆巴拉东的卡温贝 (Kawimbe) 地区,上部位于伦佐 (Lunzua) 断崖和姆普隆古—伦佐 (Mpulungu—Lunzua) 河峡谷地区 (Unrug, 1984)。

基皮利岩段:不整合覆盖在基底杂岩之上,岩性

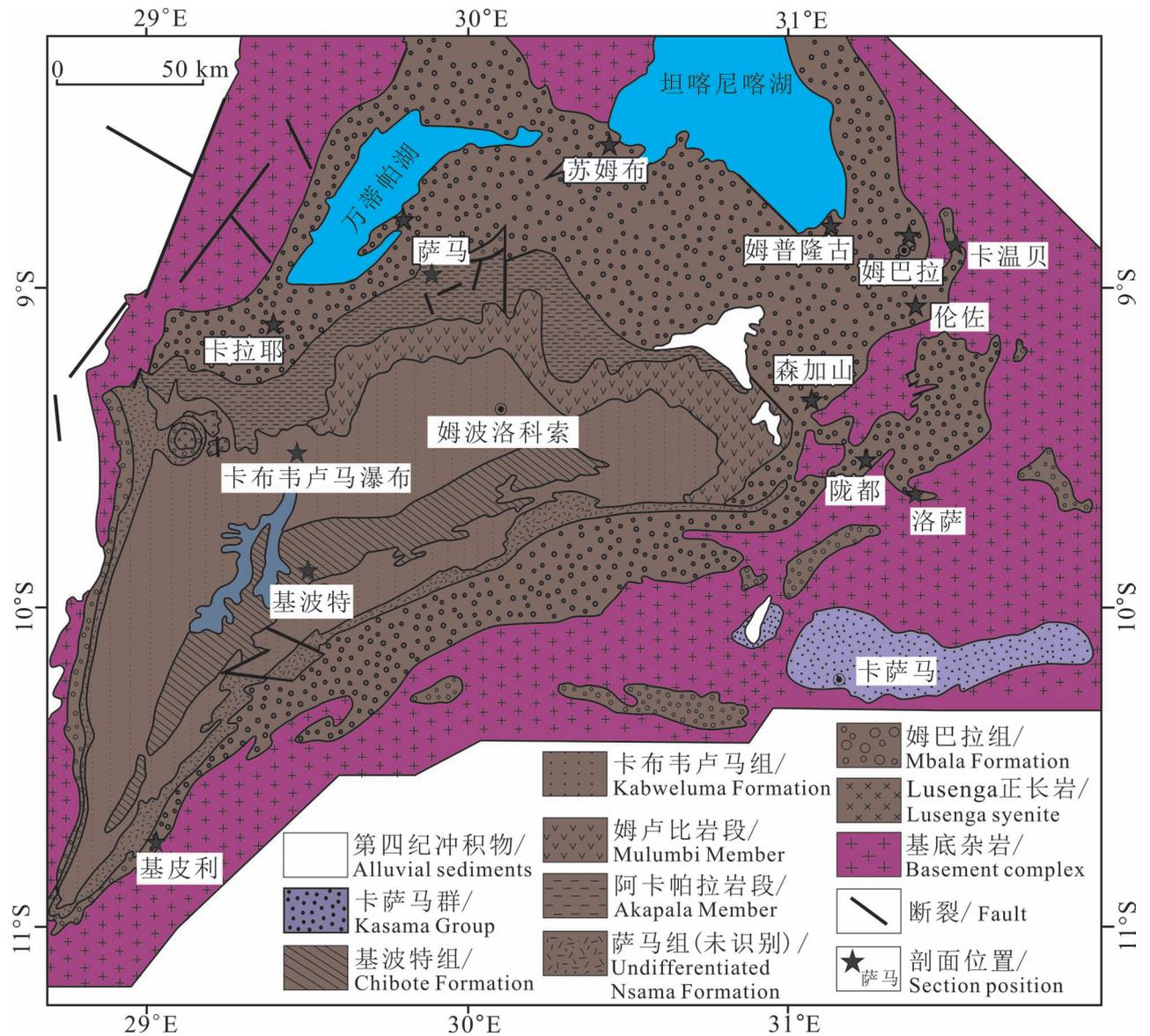


图 2 赞比亚东北部姆波洛科索盆地地质图(据 Unrug, 1984 修改)

Fig. 2 Geological map of the Mporokoso Basin, north-eastern Zambia (modified after Unrug, 1984)

主要为一套白色厚层状石英砂岩,底部为灰白色、灰红色砾岩,砾石成分与姆巴拉组岩性一致。典型剖面位于卢福布河(Lufubu)北侧的高地。

苏姆布岩段:以坦喀尼喀湖附近的苏姆布镇命名,主要岩性为深灰色厚层状石英砂岩,赤铁矿化十分发育,厚度约为 700 m,典型剖面位于基萨拉(Chisala)河谷。

姆瓦韦岩段:主要岩性为灰褐色砾岩,见有石英砂岩夹层以及条带状含铁建造,该岩段沉积厚度可达 200 m,砾石成分为硅化长英质火山岩、石英斑岩、变沉积岩等。该岩段赤铁矿化亦较为发育,局部铀矿化发育,并见有少量电气石、锡石、自然金等重矿物(Andrews-Speed and Unrug, 1982)。岩层厚度以及砾石粒径自南向北均呈减小趋势,与古水流方向一致。典型剖面位于森加(Senga)镇附近的姆瓦韦山附近。

姆南什岩段:该岩段分布范围较局限,主要在盆地西部出现,厚度 50~100 m,主要为灰色砾岩含有少量的紫色石英砂岩,与姆瓦韦岩段岩性相比,主要差别在于砾石成分不同,姆南什岩段砾石成分以高

比例的火山岩及缺乏条带状含铁建造为特征。

姆普隆古岩段:该岩段以坦喀尼喀湖附近的姆普隆古镇命名,厚度 20 m 以上,主要由灰白色、浅黄色中—厚层状泥质岩、砂岩、蓝灰色燧石、凝灰岩等组成。

伦佐岩段:该岩段以伦佐河命名,主要分布在盆地东南部地区,最厚可达 900 m,典型剖面位于伦佐河峡谷,主要岩性为灰白色、粉红色厚层状中—细粒石英砂岩,楔形层理及板状交错层理十分发育。

卡拉耶岩段:该岩段以盆地西北部的卡拉耶悬崖处命名,岩性主要为灰白色、粉红色厚层状中—粗粒石英砂岩,上部夹有红色薄层状细粒石英砂岩及云母泥岩,交错层理十分发育。区内未见完整典型剖面,上半部在卡拉耶悬崖处较典型,下半部则在苏姆布镇西侧出露较好。

在我们援外地质调查期间,在盆地东缘陇都(Nondo)地区共发现姆波洛科索群姆巴拉组 3 个岩段(图 3),其下段岩性主要为含砾石英砂岩、中细粒石英砂岩,底部为一套砾岩,砾石成分以石英为主,砾石含量 10%~35%(图 4 a, b);中段主要岩性为细

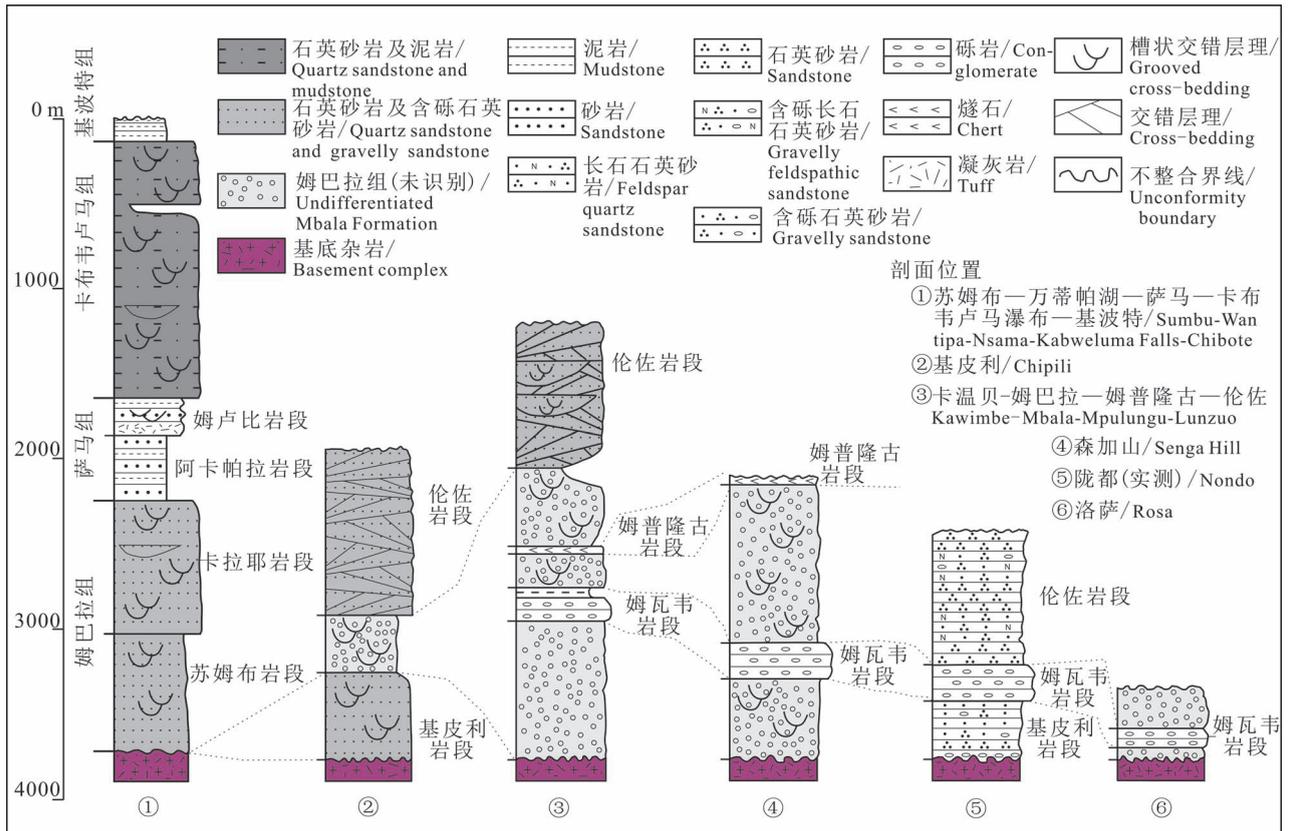


图 3 赞比亚东北部姆波洛科索群地层柱状对比图(据 Unrug, 1984 修改)

Fig. 3 Schematic stratigraphic section of Paleoproterozoic sequences in eastern margin of the Mporokoso Basin, north-eastern Zambia (modified after Unrug, 1984)

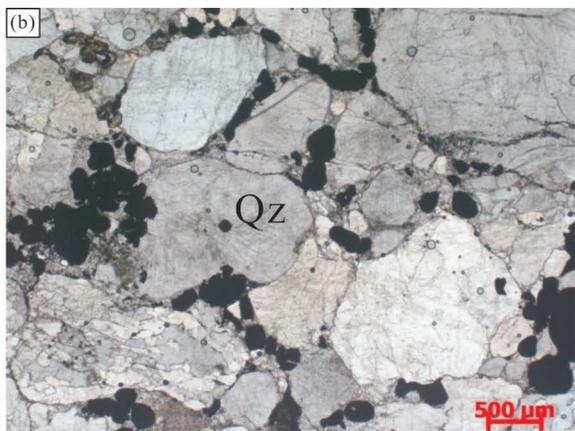
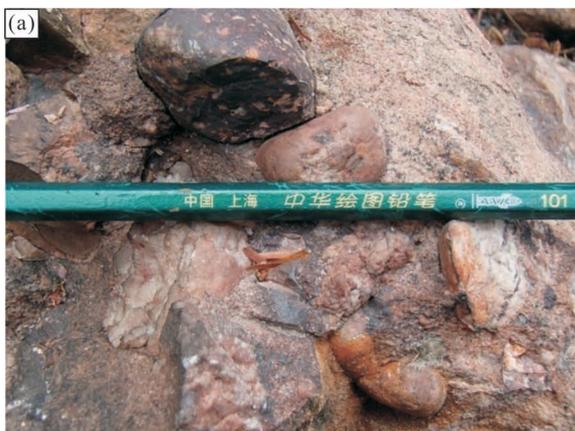


图 4 赞比亚东北部姆波洛科索盆地陇都地区姆巴拉组沉积岩岩石特征

Fig. 4 Rock features of Mbala Formation in the Mporokoso Basin, north-eastern Zambia

Qz—石英; Qz—quartz

砾岩、中砾岩、石英细砾岩,砾石含量一般为 15%~35%,部分可达 60%。砾石成分以石英为主,少量粉砂岩砾石、泥岩砾石。石英砾石粒径一般为 3~20 mm,部分可达 45~150 mm,其它砾石砾径多为 15~25 mm,部分可达 50~100 mm。局部粒序层理、交错层理发育(图 4 c,d);其上段岩性主要为肉红色、灰白色石英砂岩、含砾石英砂岩以及石英细砾岩(图 4 e,f)。砾石含量一般为 5%~20%,部分可达 40%。砾石成分主要为石英,砾石粒径 2~5 mm,部分达 10~20 mm。交错层理与斜层理较为发育(图 4 g,h)。与 Unrug(1984)所测地层柱状图(图 3)对比,下段应与基皮利岩段对应,中段与姆瓦韦岩段对应,上段则主要与伦佐岩段相对应。

2.2.2 萨马组

萨马组以萨马村地区命名,该组整合覆盖在姆巴拉组之上,沉积厚度在盆地北部达到最大,约为 600 m,西南部较薄,约为 20 m(Thieme, 1971; Thieme and Johnson, 1981)。该组岩石主要由火山碎屑沉积岩组成,包括熔结凝灰岩、晶屑凝灰岩、玻璃质凝灰岩、凝灰岩硅化形成的燧石和具有明显玻

璃质和结晶质凝灰物质的砂岩和泥岩,受沉积环境影响,该组岩石颜色变化较大,包括红色、紫色、绿色、浅灰、黑色以及白色等多种颜色。该组典型剖面沿着萨马—姆波洛科索公路(Unrug, 1984),下段称之为阿卡帕拉(Akapala)岩段,上段称之为姆卢比(Mulumbi)岩段,但在盆地南部及西部因其厚度有限且分布不均,因此未进行区分。

阿卡帕拉岩段:以阿卡帕拉河命名,厚度 300~400 m,岩性主要为灰黑色中—厚层状中粗粒含云母砂岩与灰黑色含云母粉砂岩以及灰绿色砂质泥岩互层,平行层理及低角度交错层理发育。

姆卢比岩段:以姆卢比山命名,厚度可达 200 m,岩性主要为红色、紫红色砂岩、泥岩夹有灰白色薄层状长英质熔结凝灰岩。

2.2.3 卡布韦卢马组

该组以卡伦韦什(Kalungweishi)河地区的卡布韦卢马瀑布命名,主要分布在姆波洛科索盆地的核心地区,厚度可达 1500 m,岩石类型以白色和粉红色粗—中粒厚层—巨厚层状石英砂岩以及红色或浅灰色泥岩为主,夹有少量石英质砾岩透镜体

表 1 赞比亚东北部姆波洛科索盆地沉积相划分(据 Unrug, 1984; Andrews-Speed, 1986 修改)

Table 1 Division for facies association of the Mporokoso Basin, north-eastern Zambia (modified after Unrug, 1984; Andrews-Speed, 1986)

相组合	特征描述	沉积环境	沉积相
D	紫色、浅灰红色、绿色硅质泥岩,少量泥质粉砂岩,平行层理发育	湖心沉积	湖泊相
C	灰白色中层状中—细粒石英砂岩,槽状交错层理十分发育,石英颗粒分选一般,多为次棱角状到次圆状	辫状河或低弯曲河道内水下移动沙丘沉积	河流相
	紫色、红色或浅灰色泥岩,呈小透镜体状或薄层席状,具粉砂岩夹层,夹层发育波痕	泥岩透镜体为辫状河不活跃河道物沉积;薄层状泥岩为辫状河或低弯曲河泛滥平原沉积	
B	灰白色、粉红色细粒泥岩和粉砂岩,粉砂岩内含少量泥岩碎屑	季节性湖泊泥滩沉积	湖泊相
	灰黑色、灰绿色薄层状凝灰岩和熔结凝灰岩,具流动构造,一些凝灰岩发生硅化形成燧石	湖泊沉积	
	紫色、粉红色中层状中细粒凝灰质砂岩,泥岩碎屑较发育	流经干旱泥滩的含水火山灰流沉积	
A	灰白色中粒砂岩,槽状交错层理发育,并见有波痕	河流沉积	河流相
	杂岩透镜体,包括角砾岩及其槽状交错层理的粗粒砂岩夹层	冲积扇内泥石流沉积	冲积扇
	紫红色、红色中层状泥岩、泥质粉砂岩,交错层理十分发育,波痕亦较发育	冲积平原下游洪积物	
	含砾中粗粒砂岩,砾石为次棱角状到圆状;角砾岩,沟渠化特征明显	辫状河系统内河道和纵向沙坝沉积	河流相
	具斜层理以及板状交错层理的杂砂岩和砂岩,赤铁矿化十分发育	横向沙坝沉积	
	泥岩、凝灰岩、硅质岩以及少量砂质泥岩、钙质泥岩	湖泊沉积	湖泊相
成熟度非常高的白色、粉色、淡紫色石英细砂岩,交错层理、水平层理发育	浅海沉积	浅海相	

(Thieme, 1971; Thieme and Johnson, 1981)。但该组地层覆盖较为严重,目前未发现较典型剖面。

2.2.4 基波特组

该组以基波特教堂命名,位于姆波洛科索群序列的最上部,沉积厚度超过 1000 m,由于受到后期风化剥蚀,未见顶,岩性组成以紫色、浅灰红色和绿色硅质泥岩以及粘土岩为主(Thieme and Johnson, 1981)。该组岩石在盆地内分布较少且多被覆盖,主要位于平坦地区,该组未发现典型剖面。

2.2.5 卡萨马群

卡萨马群以卡萨马地区命名,主要分布在姆波洛科索盆地东南部的卡萨马地区,呈带状东西向展布,但风化剥蚀严重,沉积厚度 80~300 m,岩石组成一系列高成熟度的石英砂岩、赤铁矿化砂岩和红色、紫红色泥岩、页岩,水平纹层理、包卷层理、楔状交错层理发育(Andersen and Unrug, 1984)。典型剖面位于卡萨马城东 12 km 的玛布拉(Mabula)河谷处,厚度 120 m,可分为 4 个岩段(Daly and Unrug, 1982)。

玛布拉(Mabula)岩段:位于卡萨马群地层的底部,红色泥质粉砂岩与紫红色薄层状泥岩交互出现,底部见少量的灰白色粉砂岩透镜体。

昌萨米纳(Chansamina)岩段:主要岩性为红色

中层状中粒石英砂岩,发育少量交错层理。在昌萨米纳河谷处出露较好。

马库姆巴(Makumba)岩段:主要岩性为白色、粉红色厚层状中粒石英砂岩,包含褐红色含铁砂岩透镜体,大规模的槽状交错层理十分发育。在玛布拉镇马库姆巴山谷处出露。

米撒姆弗(Misamfu)岩段:大量的红色、紫红色泥岩透镜体嵌入到马库姆巴砂岩段内,称之为米撒姆弗泥岩段,在卡萨马城东部的坦赞铁路边出露较好。

3 沉积环境及沉积相

Unrug(1984)和 Andrews-Speed(1986)通过对姆波洛科索盆地岩石结构、构造的研究,将姆波洛科索群划分出 A、B、C、D 共 4 个沉积相组合(表 1),沉积环境主要包括浅海、辫状河、曲流河、冲积扇和湖泊等。

姆波洛科索群以陆相沉积环境为主,仅在姆巴拉组内部存在少量浅海相沉积。姆巴拉组以 A 沉积相组合为主,其中盆地东部以辫状河、湖泊沉积为主,南部为泥石流和河道砾岩沉积,北部为辫状河、曲流河沉积,东南部见有少量浅海相沉积,东北部出现冲积扇环境的泥岩沉积(Miall, 1977),盆地内自

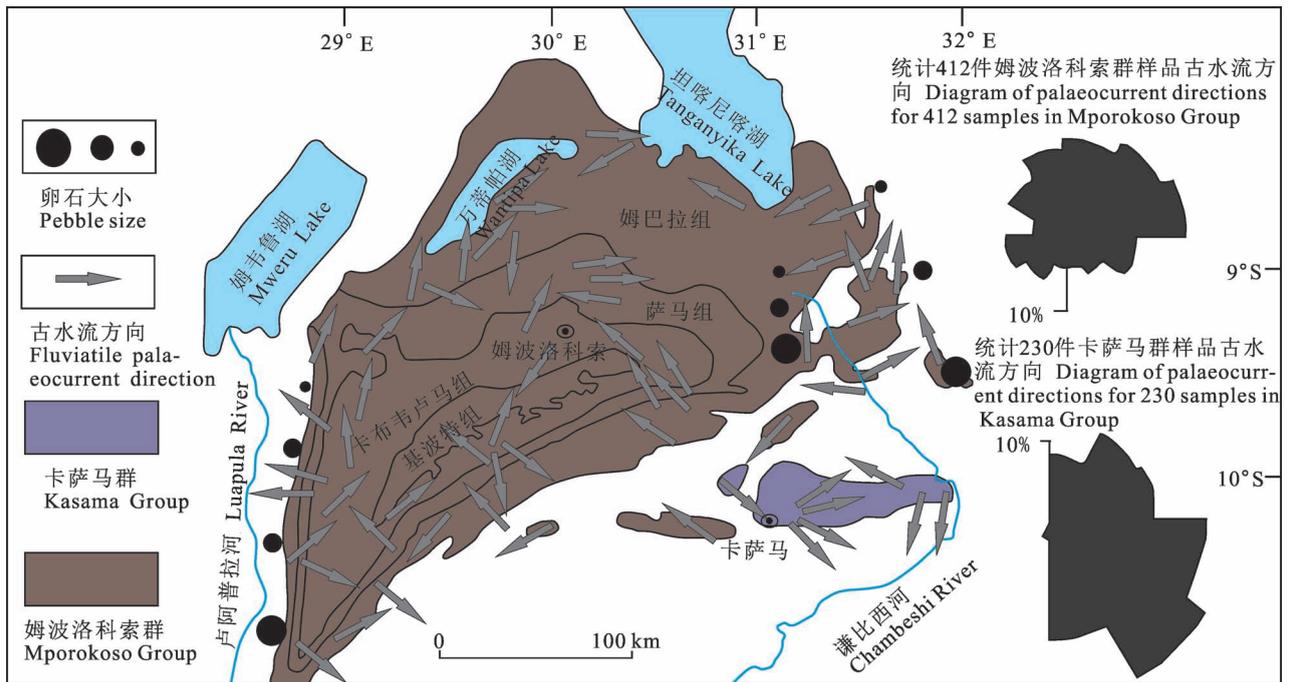


图 5 赞比亚东北部姆波洛科索盆地穆瓦超群沉积岩古水流方向(据 Andersen and Unrug, 1984 修改)

Fig. 5 Palaeotransport systems map for Muva Supergroup sedimentary rocks in the Mporokoso Basin, northeast Zambia (modified after Andersen and Unrug, 1984)

南向北碎屑沉积物粒度呈减小的趋势。其他组分布范围较小,相组合也较为简单,其中:萨马组以 B 沉积相组合为特征,以湖泊沉积环境为主,少量的河流相沉积;卡布韦卢马组以 C 沉积相组合为特征,为典型的辫状河、曲流河环境沉积,以及一定的泛滥平原沉积;基波特组位于沉积盆地核心区,以 D 沉积相为特征,为一套湖泊相沉积。

Andersen 等(1984)对姆波洛科索盆地及其周边地区古水流方向进行了统计分析,盆地内部砾石粒径变化及交错层理指示的古水流方向均为自南向北,由此推测姆波洛科索群碎屑沉积物主要来源于盆地南部古老基底(图 5),与通过沉积相分析获得的盆地碎屑沉积物粒度变化趋势一致,进一步反映了盆地南部古老基底抬升剥蚀作用,与该时期近南北向碰撞导致的快速隆升地质背景相吻合(De Waele et al., 2006b)。

4 岩石地球化学特征

4.1 稀土元素特征

碎屑岩的稀土含量主要受控于其物源区岩石成分(Fleet, 1984; McLennan, 1989),与风化、搬运以及成岩作用关系较小,其配分模式从源岩到沉积物没有明显变化,常被用作判别源区岩石的主要标志(Condie, 1991)。另外,通过研究区和疑似物源区稀土元素配分曲线位置的高低、倾斜程度、铈异常以及曲线总体形态的相互对比来分析研究区的物源(宋凯等,2002;王昌勇等,2008),也是目前物源分析中应用最广和最有效的手段之一。

姆巴拉组 5 件砂岩样品稀土元素分析结果(表 2)采用 Leed 球粒陨石标准化后,其配分模式曲线图(图 6)特征主要表现为:轻稀土元素富集、重稀土元素亏损;存在明显 Eu 负异常,Ce 基本正常;La—Eu 段轻稀土配分曲线较陡、斜率较大,表现为明显的“右倾”,说明轻稀土元素之间的分馏程度较高;Gd—Lu 段重稀土配分曲线较为平坦、斜率较小,重

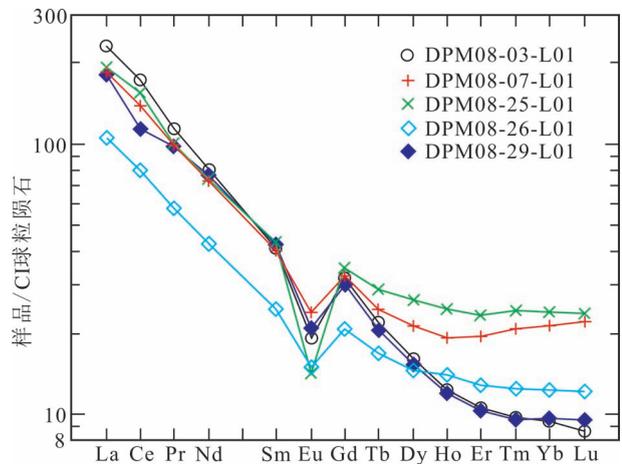


图 6 赞比亚东北部陇都地区姆巴拉组砂岩稀土元素配分模式(标准化值据 Boynton, 1984)

Fig. 6 Distribution patterns of rare earth elements of sandstone in Mbala Formation from Nondo area, north-eastern Zambia (normalization values after Boynton, 1984)

稀土元素之间分馏程度较低。

Bhatia 等(1981, 1985)通过对澳大利亚东部不同大地构造背景的沉积盆地中砂岩和泥岩的研究,总结出稀土元素在不同大地构造背景沉积盆地杂砂岩的分布特征(表 3)。该表系统地揭示了稀土元素分布特征所反映的沉积盆地的大地构造背景和物源区类型。本次测试的数据与参考数据对比显示:姆巴拉组砂岩的物源区与被动大陆边缘相近(表 3)。根据 Bhatia 等(1981, 1985)提出的 La/Yb— Σ REE 图解,研究区的姆巴拉组投点主要分布在花岗岩区,沉积岩区较少(图 7),说明基底花岗岩为姆巴拉组的主要物源区,与盆地古水流分析结果一致。

4.2 微量元素特征

陆源碎屑岩中的微量元素具有较大的稳定性,其含量变化与源区构造背景之间存在着必然联系。细粒沉积物中的微量元素已被广泛应用于沉积源区的确定和构造背景分析等研究中(Bhatia and Crook,

表 2 赞比亚东北部陇都地区姆巴拉组砂岩稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 2 Rare earth element ($\times 10^{-6}$) analyses of sandstone in Mbala Formation from Nondo area, north-eastern Zambia

地层	样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
姆巴拉组	DPM08-03-L01	54.4	105	10.7	37.1	6.41	1.11	6.51	0.81	4.05	0.7	1.75	0.25	1.62	0.22
	DPM08-07-L01	43.5	84.7	9.58	34.5	6.22	1.39	6.6	0.92	5.39	1.09	3.2	0.53	3.6	0.56
	DPM08-25-L01	45.2	94.8	9.6	34.8	6.62	0.82	7.16	1.08	6.74	1.39	3.87	0.62	4.06	0.6
	DPM08-26-L01	24.7	49.1	5.45	20	3.76	0.87	4.26	0.63	3.77	0.79	2.13	0.32	2.09	0.31
	DPM08-29-L01	43.8	69.7	9.48	35.7	6.45	1.2	6.17	0.76	3.87	0.68	1.71	0.25	1.64	0.24

注:稀土元素数据为原始数据,由中国地质调查局天津地质调查中心实验室测定完成。

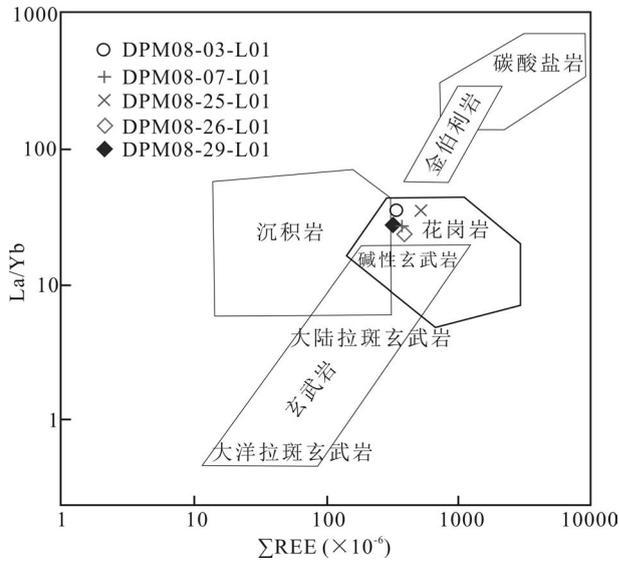


图 7 赞比亚东北部陇都地区姆巴拉组沉积物源图解(标准化值据 Bhatia, 1986)

Fig. 7 Discrimination diagrams of sediment source based on rare earth elements for Mbala Formation in Nondo area, north-eastern Zambia (normalization values after Bhatia, 1986)

1986; Taylor, 1995; Spalletti et al., 2012)。将姆巴拉组 5 件砂岩样品微量元素分析结果(表 4)分别投到 Zr—Th 图解(图 8 a)、La—Th—Sc 图解(图 8 b)、Th—Co—Zr/10 图解(图 8c)中显示,姆巴拉组物源区为被动大陆边缘构造背景,与稀土元素分析结果基本一致,因此推断姆波洛科索盆地属于被动大陆边缘盆地。

5 沉积作用年龄

由于姆瓦超群沉积盖层缺乏具体的层位年龄数据,目前主要通过基底年龄与沉积盖层内碎屑锆石年龄制约沉积盖层的最大成岩年龄,而沉积盖层内

岩脉则用于获得该层位的最小年龄数据。

目前已获得的班委乌卢地块内姆波洛科索群底部结晶基底的年龄主要集中在在 1.86 ~ 1.82 Ga。Brewer 等(1979)获得的基底花岗岩全岩 Rb—Sr 等时线年龄为 1832 ± 32 Ma; Waele 等(2006b)获得的基底花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 1860 ± 13 Ma 和 1862 ± 8 Ma, 凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 1862 ± 19 Ma 和 1868 ± 7 Ma, 因此推测沉积盖层形成于 1860 Ma 之后。而切穿姆波洛科索群的卢森加(Lusenga)正长岩侵入体获得的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 1145 ± 20 Ma (Brewer et al., 1979), 制约了沉积盖层的最小年龄。

沉积盖层内碎屑锆石年龄的最小值也是确定盖层沉积年龄下限的一种方式。通过对班委乌卢地块内碎屑锆石年龄数据统计作图(图 9)发现(Waele et al., 2006b): 曼萨地区姆波洛科索群的卡布韦卢马组底部石英砂岩碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄区间为 $(2710 \pm 13) \sim (1824 \pm 19)$ Ma (集中于 2050 ~ 1950 Ma), 该最小年龄(1824 ± 19 Ma)可能代表了卡布韦卢马组的最大沉积年龄。卡萨马市东部姆韦拉(Mwela)地区卡萨马群中石英砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄区间(1434 ± 14) ~ (2593 ± 5) Ma (集中于 2050 ~ 1900 Ma), 该最小年龄(1434 ± 14 Ma)可能代表了卡萨马群的最大沉积年龄, 也说明该地层与姆波洛科索群相比沉积时代较晚, 为一个相对年轻的沉积序列, 其碎屑锆石年龄分布样式与姆波洛科索群相似, 说明其物源与姆波洛科索群相似, 亦或是姆波洛科索群再沉积的产物, 而古水流方向显示卡萨马群物源自北向南(图 5), 因此推测其为姆波洛科索群再沉积的产物。

综上所述, 本文推测姆波洛科索群形成于 1860 Ma 之后, 卡萨马群则可能主要形成于 1434 Ma 之后, 可能为姆波洛科索地区隆升之后剥蚀再沉积

表 3 不同大地构造背景沉积盆地砂岩的稀土元素特征(据 Bhatia et al., 1981, 1985 修改)

Table 3 The characteristics of rare earth elements in sandstone of sedimentary basins in different geotectonic backgrounds (modified after Bhatia et al., 1981, 1985)

大地构造背景	物源区类型	La	Ce	ΣREE	$\frac{La_N}{Yb_N}$	$\frac{Ce}{Yb}$	$\frac{LREE}{HREE}$	δEu
		(×10 ⁻⁶)						
大洋岛弧	未切割的岩浆弧	8±1.7	19±3.7	58±10	4.2±1.3	2.8±0.9	3.8±0.9	1.04±0.11
大陆岛弧	切割的岩浆弧	27±4.5	59±8.8	146±20	11±3.6	7.5±2.5	7.7±1.7	0.79±0.13
活动型大陆边缘	抬升基底	37	78	186	12.6	8.5	9.1	0.6
被动边缘	克拉通内部构造高地	39	85	210	15.9	10.8	8.5	0.56
姆巴拉组(平均值)		42.32	80.66	189.92	14.3	31	8.1	0.67

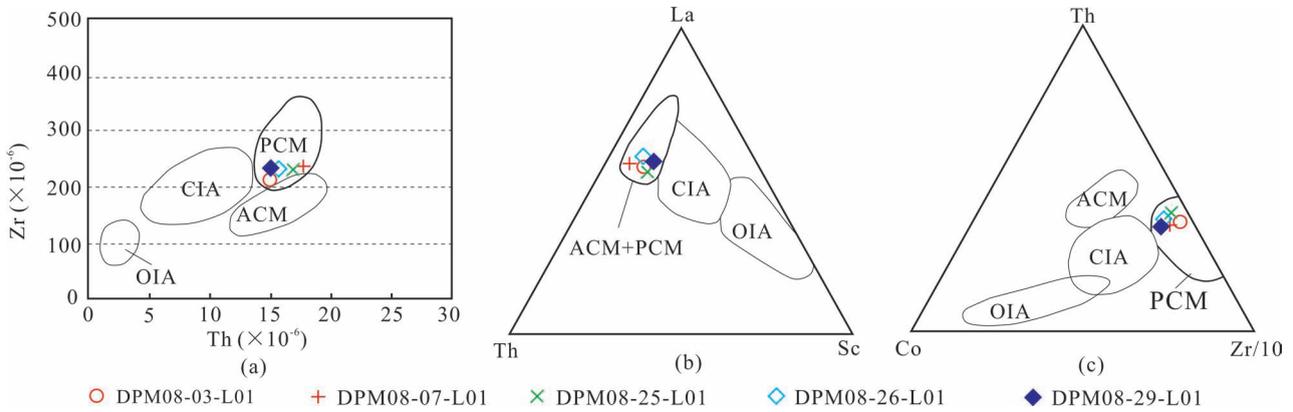


图 8 砂岩微量元素构造环境判别图解 (标准化值据 Bhatia and Crook, 1986)

Fig. 8 Discrimination diagrams of tectonic setting based on trace elements (normalization values after Bhatia and Crook, 1986)

ACM—活动大陆边缘;PCM—被动大陆边缘;CIA—大陆岛弧;OIA—大洋岛弧

ACM—active continental margin;PCM—passive continental margin;CIA—continental island arc;OIA—oceanic island arc

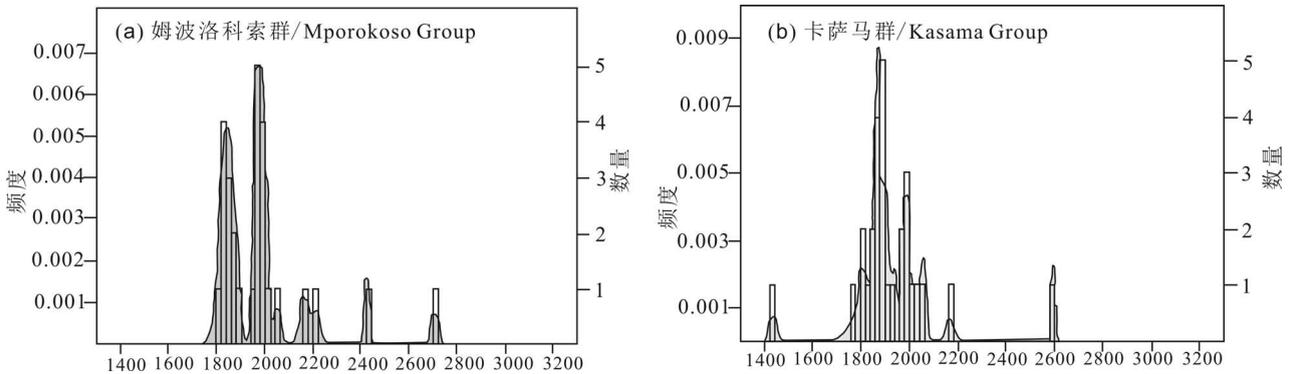


图 9 班委乌卢地块沉积碎屑锆石年龄 (据 Waele et al., 2006b)

Fig. 9 Ages of the detrital zircons from the Bangweulu Block (after Waele et al., 2006b)

的产物,但对于姆波洛科索群及卡萨马群的上限年龄仍需进一步研究。

6 资源潜力分析

Guernsey (1952) 最早发现姆巴拉组部分砂岩及

砾岩富含金, Andrews-Speed 等 (1987) 在森加山附近通过连续采集 2350 个含砾砂岩样品分析发现, 该地区金的富集与沉积作用密切相关, 金主要富集在不同岩性交界处的厚层状砾岩及含砾砂岩中 (图 10), 最高含金量可达 1.3×10^{-6} , 其中 4.4% 样品金含量

表 4 赞比亚东北部陇都地区姆巴拉组砂岩微量元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果

Table 4 Trace element analyses ($\times 10^{-6}$) of sandstone in Mbala Formation from Nondo area, north-eastern Zambia

地层	样品	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Co	Sr	Ba	V	Sc	Zr	Ga	U	Th
姆巴拉组	DPM08-03-L01	15.5	18.2	14.1	59.3	9.52	6.01	102	386	209	5.08	134	5.70	2.91	31.4
	DPM08-07-L01	5.66	12.6	45.6	43.0	15.4	5.85	39.0	834	43.7	18.3	199	22.7	4.57	17.4
	DPM08-25-L01	12.5	17.7	25.8	206	19.1	8.72	34.2	203	283	9.35	228	11.0	5.20	23.0
	DPM08-26-L01	9.02	8.76	27.6	42.2	12.5	7.91	6.01	636	57.0	11.7	90.0	10.5	1.22	10.1
	DPM08-29-L01	19.2	17.1	32.3	37.2	7.92	6.45	12.4	564	73.6	9.88	139	10.5	1.41	10.3

注: 微量元素数据为原始数据, 由中国地质调查局天津地质调查中心实验室测定完成。

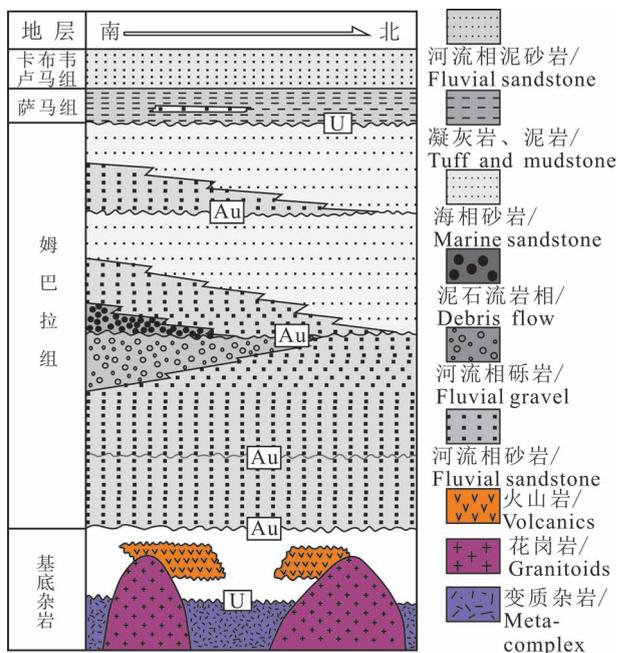


图 10 赞比亚东北部姆波洛科索群主要的层序地层及矿产分布概况(据 Andrews-Speed, 1989 修改)

Fig. 10 Summary of the sequence stratigraphy and prospectivity of the Mporokoso Group, north-eastern Zambia (modified after Andrews-Speed, 1989)

大于 0.2×10^{-6} 。任军平等(2016)认为班委乌卢地块中的砾岩型金矿点,虽然开采规模小,但成矿条件较好,有较大的找矿潜力。王杰等^①(2015)在执行“援赞比亚北部省卡萨马地区区域地质与地球化学调查(2012~2015)”项目期间,通过 1:10 万区域地质与地球化学调查工作,对样品进行地球化学分析显示金的品位最大值为 86.5×10^{-9} 。但赞比亚东北部地区至今并未发现较大规模的金矿,已有矿点也主要为小规模的金矿,且基底金元素含量并不高,因此对于该地区砾岩型金及砂金的物源仍存在一定争议,距离姆波洛科索盆地最近的大型金矿为位于其东部 200 km 的卢帕(Lupa)金矿集区(图 11),该金矿形成于乌本迪造山活动(2290~1700 Ma)时期(Lawley et al., 2013, 2014)。尽管古水流方向显示盆地主要的沉积物源来自南部,但盆地东部也有部分来自东部的物源显示,而且已有的金矿点也主要集中在盆地东部,由此推测盆地内砂金主要源自其东部的卢帕金矿集区,盆地内金矿的找矿方向应主要集中在盆地东部。

Saviaro 等(1980)最早发现部分姆波洛科索群沉积地层内铀元素富集,Andrews-Speed 等(1987)采

集 126 个样品分析显示,超过 20% 的样品铀含量 $> 10 \times 10^{-6}$,最高可达 60×10^{-6} ,含铀较高样品主要集中在姆巴拉组与萨马组地层的不整合界面处以及部分基岩出露区(图 10)。Andrews-Speed(1989)认为其成因可能是早期由岩浆活动将上地幔或地壳中的铀元素带至地表,后经风化剥蚀再沉积形成富铀的碎屑沉积岩。距离该盆地较近,但形成时代更晚的卢菲里安弧形构造带内的铀矿可以为姆波洛科索盆地铀矿勘查提供一定的借鉴,卢菲里安地区的铀矿成因主要为富铀碎屑岩被后期热液改造再富集成矿(Cosi et al., 1992; Cailteux et al., 2005; Kampunzu et al., 2009; Haest et al., 2010),可见后期构造活动对该地区铀矿的富集成矿至关重要,因此盆地铀矿找矿方向应集中在盆地北部构造较为发育(图 2)的区域。

7 结论

(1) 研究区古元古代—中元古代沉积环境主要包括辫状河、冲积扇、湖泊、浅海、泻湖和潮坪等。

(2) 研究区姆巴拉组岩石地球化学分析结果显示,该组物源区具有被动大陆边缘构造背景,基底花岗岩为其主要物源,由此推测姆波洛科索盆地为被动大陆边缘型盆地。

(3) 研究区姆波洛科索群可能形成于 1860 Ma

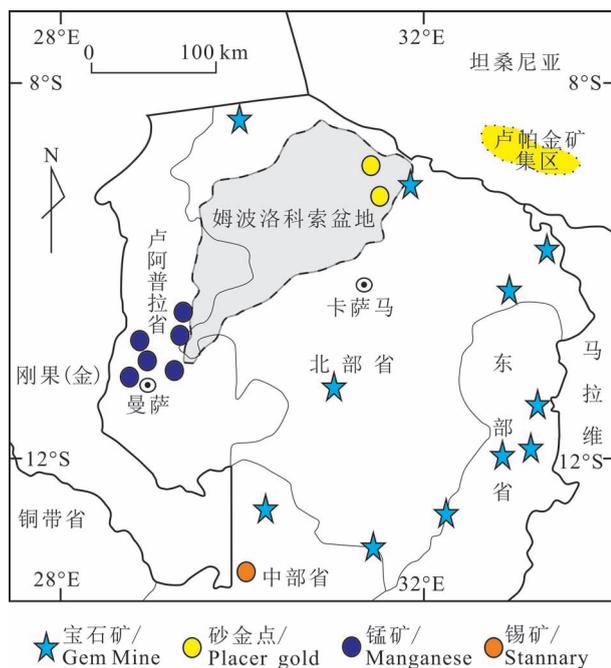


图 11 赞比亚东北部地区主要矿产分布略图

Fig. 11 Sketch map of the ore deposits, north-eastern Zambia

之后,卡萨马群则可能形成于 1434 Ma 之后,可能为姆波洛科索群再沉积的产物。

(4) 姆波洛科索盆地东部与北部地区分别具有金、铀找矿潜力。

致谢:感谢中国地质调查局天津地质调查中心李怀坤研究员在成文过程中提供的指导与帮助,同时也衷心感谢江思宏研究员、章雨旭研究员给予的宝贵意见!

注 释 / Notes

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

① 王杰,任军平, Dokowe A P, 程绪江,左立波,曹淑萍,李 硕, Chikambwe E M, Chishimba C, 许康康, Malunga D,胡志明,张亚娜. 2015. 卡萨马和陇都地区区域地球化学调查报告.天津:中国地质调查局天津地质调查中心: 49~79.

① Wang Jie, Ren Junping, Dokowe A P, Cheng Xujiang, Zuo Libo, Cao Shuping, Li Shuo, Chikambwe E M, Chishimba C, Xu Kangkang, Malunga D, Hu Zhiming, Zhang Yana. 2015 #. The Geochemistry of the Kasama and Nondo areas. Tianjin: Tianjin Center of China Geological Survey: 47~49.

参 考 文 献 / References

任军平,左立波,许康康,王杰,刘晓阳,何胜飞,刘宇,贺福清. 2016. 赞比亚北部班韦乌卢地块演化及矿产资源研究现状.地质论评, 62(4): 979~996.

宋凯,吕剑文,杜金良,王宏科. 2002. 鄂尔多斯盆地中部上三叠统延长组物源方向分析与三角洲沉积体系.古地理学报, 4(3): 59~66.

王昌勇,郑荣才,王海红,韩永林,王成玉,牛小兵. 2008. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 6 油层组物源区分析.沉积学报, 26(6): 933~938.

Andersen L S and Unrug R.1984. Geodynamic evolution of the Bangweulu Block, northern Zambia. Precambrian Research, 25(1~3): 187~212.

Andrews-Speed C P and Mulumba B P. 1987. Empirical guides to gold enrichment in Proterozoic quartz-pebble conglomerates in northern Zambia. Journal of African Earth Sciences, 6(4): 595~601.

Andrews-Speed C P. 1986. Gold-bearing fluvial and associated tidal marine sediments of Proterozoic age in the Mporokoso basin, northern Zambia. Sedimentary Geology, 48(3~4): 193~222.

Andrews-Speed C P. 1989. The Mid-Proterozoic Mporokoso basin, northern Zambia: sequence stratigraphy, tectonic setting and potential for gold and uranium mineralisation. Precambrian Research, 44(1): 1~17.

Bhatia M R and Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. Contributions to Mineralogy and Petrology, 92(2): 181~193.

Bhatia M R and Taylor S R. 1981. Trace-element geochemistry and sedimentary provinces: A study from the Tasman Geosyncline, Australia. Chemical Geology, 33(2): 115~125.

Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian

Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control. Sedimentary Geology, 45(2): 97~113.

Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. Developments in Geochemistry, 2: 63~114.

Brewer M S, Haslam H W, Darbyshire P F P, Davis, A E. 1979. Rb-Sr age determinations in the Bangweulu Block, Luapula Province, Zambia. Geology Science, 79(5): 11.

Cailteux J L H, Kampunzu A B H, Batumike M J. 2005. Lithostratigraphic position and petrographic characteristics of R. A. T. (“Roches Argilo—Talqueuses”) Subgroup, Neoproterozoic Katangan Belt (Congo). Journal of African Earth Sciences, 42(1): 82~94.

Cairncross B. 2001. An overview of the Permian (Karoo) coal deposits of southern Africa. Journal of African Earth Sciences, 33(4): 529~562.

Clifford T N. 1970. The structural framework of Africa. African magmatism and tectonics, Oliver and Boyd Edinburgh, 1~26.

Condie K C. 1991. Another look at rare earth elements in shales. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55(9): 2527~2531.

Cosi M, De Bonis A, Gosso G, et al. 1992. Late Proterozoic thrust tectonics, high-pressure metamorphism and uranium mineralization in the Domes Area, Lufilian Arc, Northwestern Zambia. Precambrian Research, 58: 215~240.

Daly M C, Unrug R. 1982. The Muva Supergroup of northern Zambia: a craton to mobile belt sedimentary sequence. South African Journal of Geology, 85(3): 155~165.

Debruyne D, Van Wilderode J, Balcaen L, Vanhaecke F, Muechez P. 2014. Geochemistry and isotopic evolution of the central African Domes, Bangweulu and Irumide regions: Evidence for cryptic Archean sources and a Paleoproterozoic continental arc. Journal of African Earth Sciences, 100: 145~163.

Drysdall A R, Johnson R L, Moore T A and Thieme J G. 1972. Outline of the geology of Zambia. Geology Mijnbouw, 51: 265~276.

Fernandes P, Cogne N, Chew D M, Rodrigues B, Jorge R, Marques J, Jamal D, Vasconcelos L. 2015. The thermal history of the Karoo Moatize—Minjova Basin, Tete Province, Mozambique: An integrated vitrinite reflectance and apatite fission track thermochronology study. Journal of African Earth Sciences, 112: 55~72.

Fleet A J. 1984. Aqueous and sedimentary geochemistry of the rare earth elements. Developments in Geochemistry, 2: 343~373.

Guernsey T D. 1952. A Prospector's Guide to Mineral Occurrences in Northern Rhodesia. British South Africa Company, Salisbury: 1~87.

Haest M, Schneider J, Cloquet C, Latruwe K, Vanhaecke F, Muechez P. 2010. Pb isotopic constraints on the formation of the Dikulushi Cu—Pb—Zn—Ag mineralization, Kundelungu Plateau (Democratic Republic of Congo). Mineralium Deposita, 45(4): 393~410.

Kampunzu A B, Cailteux J L H, Kamona A F, Intiomale M M, Melcher F. 2009. Sediment-hosted Zn—Pb—Cu deposits in the Central African Copperbelt. Ore Geology Reviews, 35(3): 263~297.

Lawley C J M, Selby D, Condon D J, Horstwood M, Millar I, Crowley Q, Imber J. 2013. Litho-geochemistry, geochronology and geodynamic setting of the Lupa terrane, Tanzania: Implications for the extent of the Archean Tanzanian craton. Precambrian Research, 231: 174~193.

Lawley C J M, Selby D, Condon D, Imber J. 2014. Palaeoproterozoic orogenic gold style mineralization at the Southwestern Archean Tanzanian cratonic margin, Lupa Goldfield, SW Tanzania:

- Implications from U-Pb titanite geochronology. *Gondwana Research*, 26(4) : 1141~1158.
- Mambwe P, Kipata L, Chabu M, Muchez P, Lubala T, Jebrak M, Delvaux D. 2017. Sedimentology of the Shangoluwe breccias and timing of the Cu mineralisation (Katanga Supergroup, D. R. of Congo). *Journal of African Earth Sciences*, 132: 1~15
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21(1) : 169~200.
- Miall A D. 1977. A review of the braided river depositional environment. *Earth-Sciences Review*, 13 (1) : 1~62.
- Phiri C, Wang Pujun, Nyambe I A. 2016. Geology and potential hydrocarbon play system of Lower Karoo Group in the Maamba Coalfield Basin, southern Zambia. *Journal of African Earth Sciences*, 118: 245~262.
- Ren Junping, Zuo Libo, Xu Kangkang, Wang Jie, Liu Xiaoyang, He Shengfei, Liu Yu, He Fuqing. 2016. Geodynamic evolution and mineral resources present research in Bangweulu Block, Northern Zambia. *Geological Review*, 62(4) : 979~996.
- Robinson D. 1982. Precambrian of the southern hemisphere. *Earth Science Reviews*, 18(2) : 186.
- Saviaro K and Agar R. 1980. Uranium channel anomalies from the 1973~76 airborne geophysical survey of Zambia. *Geological Survey of Zambia*, Lusaka, 89: 33.
- Song Kai, LV Jianwen, Du Jinliang, Wang Hongke. 2002. Source direction analysis and delta depositional systems of Yanchang Formation of the Upper Triassic in the central Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography*, 4(3) : 59~66.
- Spalletti L A, Limarino C O, Piñol F C. 2012. Petrology and geochemistry of Carboniferous siliciclastics from the Argentine Frontal Cordillera: A test of methods for interpreting provenance and tectonic setting. *Journal of South American Earth Sciences*, 36: 32~54.
- Taylor S R and McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2) : 241~265.
- Thieme J G and Johnson R L. 1981. Geological Map of the Republic of Zambia 1 : 1000000. Geological Survey of Zambia, Lusaka.
- Thieme J G. 1971. The Geology of the Musonda Falls Area: Explanation of Degree Sheet 1028, SE. Quarter. Republic of Zambia, Ministry of Mines and Mining Development, Lusaka.
- Unrug R. 1984. The mid-Proterozoic Mporokoso Group of northern Zambia: stratigraphy, sedimentation and regional position. *Precambrian Research*, 24(2) : 99~121.
- Waele B D, Johnson S P, Pisarevsky S A. 2008. Palaeoproterozoic to Neoproterozoic growth and evolution of the eastern Congo Craton: its role in the Rodinia puzzle. *Precambrian Research*, 160(1) : 127~141.
- Waele B D, Kampunzu A B, Mapani B S E, Tembo F. 2006b. The Mesoproterozoic Irumide belt of Zambia. *Journal of African Earth Sciences*, 46(1) : 36~70.
- Waele B D, Liégeois J P, Nemchin A A, Tembo F. 2006a. Isotopic and geochemical evidence of Proterozoic episodic crustal reworking within the Irumide Belt of south—central Africa, the southern metacratonic boundary of an Archaean Bangweulu Craton. *Precambrian Research*, 148(3) : 225~256.
- Wang Changyong, Zheng Rongcai, Wang Haihong, Han Yonglin, Wang Chengyu, Niu Xiaobing. 2008. Provenance analysis of Chang-6 oil reservoir set in Jiyuan region in Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(6) : 933~938.

Sedimentary Stratigraphic Characteristics of The Mporokoso Basin in The North-eastern Zambia

SUN Hongwei, WANG Jie, REN Junping, ZUO Libo, GU Alei

Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin, 300170

Abstract: The Paleoproterozoic Mporokoso Group in the Mporokoso Basin of north-eastern Zambia is an important stratum for the study of fluvial to shallow-marine sedimentary succession and basal components of the early Precambrian. In this paper, based on the study and systematic summary of lithostratigraphic composition, sedimentary age and environment, combined with the measured section of Mbala Formation and its clastic petrological and geochemical analysis data in the region, the following knowledge is obtained: The Mporokoso Group is supposed to be formed later than 1860 Ma, and the overlying Kasama Group is supposed to be formed later than 1434 Ma; The sedimentary environment of the Mporokoso Basin mainly includes: braided rivers, alluvial fans, lakes and shallow seas; The clastic rocks of Mbala Formation at the bottom of Mporokoso Group are mainly derived from basement granite of the Bangweulu Block and formed under the passive continental marginal tectonic setting; The Mporokoso Basin may belong to the passive continental marginal basin; Geochemical analysis data have shown potentials for gold and uranium prospecting in the eastern and northern parts of the basin, respectively.

Keywords: Zambia; Mporokoso Basin; Sedimentary characteristics; Geochemistry; Resource potential

Acknowledgements: This study is Supported by China-Aid Airborne Geophysical Survey and Geochemical and Geological Mapping Technical Cooperation Project in the north-eastern Zambia (No. [2015]352) and Chinese

Geological Survey (No. 121201006000150014). Thanks to Prof. LI Huaikun, JIANG Sihong and ZHANG Yuxu for their valuable comments and suggestions.

First author: SUN Hongwei, male, born in 1986. Master, degree, major in Mineralogy, Petrology, Mineral Deposit Geology. Email: shwcub@163.com.

Corresponding author: WANG Jie, male, born in 1964. professor, mainly engages in geological survey and research. Email: wangjie513046@163.com.

Manuscript received on: 2018-07-17; Accepted on: 2018-12-01; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.01.016

《地质论评》第 40 届编辑委员会

The 40th Editorial Committee of *Geological Review*

姓名	职称	专业	主要研究方向	服务单位
主 编				
杨文采	院士	地球物理学	地球物理	浙江大学
副主编(8 人, 按姓名汉语拼音字母为序):				
陈衍景	教授	矿床学	矿床地质地球化学、造山带成矿规律、流体成矿作用、大氧化事件与成矿大爆发	北京大学地球与空间科学学院
董云鹏	教授	构造地质学	大陆构造与动力学、造山带构造演化	西北大学、大陆动力学国际重点实验室
谢树成	教授	地质学(古生物学、地球生物学)	地质微生物与全球变化	中国地质大学(武汉)
阎长虹	教授	水文地质工程地质	水文地质工程地质及环境地质	南京大学地球科学与工程学院
张拴宏	研究员	构造地质学	区域地质、大地构造及前寒武纪地质学	中国地质科学院地质力学研究所
章雨旭(常务)	研究员	矿床学/沉积学	区域地质与成矿	中国地质学会
朱祥坤	研究员	地球化学	同位素地球化学与地质年代学	中国地质科学院地质研究所
朱筱敏	教授	沉积地质学和石油地质学	碎屑岩沉积, 层序地层学、地震沉积学、储层地质学	中国石油大学(北京)
编委(共 52 位, 各学科按姓名汉语拼音字母为序):				
古生物学和地层学				
沈树忠	院士	古生物学和地层学	二叠纪地层学、腕足动物和牙形类古生物学	南京大学地球科学与工程学院
陈孝红	研究员	地层古生物	地层古生物、页岩气调查	中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心)
李怀坤	研究员	地层学和古生物学	中新元古代地层、地质年代学, 前寒武纪地质学	中国地质调查局天津地质调查中心
唐烽	研究员	地层古生物学	前寒武纪至古生代地层及早期生命演化研究	中国地质科学院地质研究所
汪筱林	研究员	古脊椎动物学	翼龙、恐龙、恐龙蛋等中生代爬行动物)及地层学、沉积学、埋藏学、古环境及中生代生物群综合研究	中国科学院古脊椎动物与古人类研究所 / 中国科学院大学地球与行星学院 / 南京大学生物演化与环境科教融合中心
构造地质学和沉积学				
陈汉林	教授	构造地质学	造山带与盆地构造	浙江大学地球科学学院