

西刚果造山带东缘 Inkisi 组砂岩岩石学、 年代学特征及地质意义



张金龙^{1, 2)}, 张洪瑞³⁾, 潘志龙^{1, 2)}, 罗迪柯³⁾, 邢伟伟^{1, 2)}, 刘思林¹⁾,
于龙¹⁾, 贾鹏飞³⁾, 杨宁¹⁾, 李强¹⁾

1) 河北省区域地质调查院, 河北廊坊, 065000; 2) 河北省区域地质调查院实验室, 河北廊坊, 065000;
3) 中信建设有限责任公司, 北京, 100027

内容提要:西刚果 (West Congo) 造山带是泛非 (Pan-Africa) 期圣弗朗西斯科 (São Francisco) 克拉通与刚果 (Congo) 克拉通汇聚—碰撞造山的非洲部分, 其构造演化备受国内外学者关注, 开展该时期地层的研究工作对探讨造山带的构造演化具有重大意义。笔者等研究选取造山带东缘前陆盆地内安哥拉西北部的 Inkisi 组砂岩为研究对象, 开展了年代学及岩石学等方面的研究。结果表明: Inkisi 组砂岩中最小碎屑锆石年龄为 588.0 ± 3.0 Ma, 判别图解指示砂岩形成于碰撞背景下的沉积盆地。Inkisi 组砂岩的化学蚀变指数 (CIA 、 CIW 、 PIA) 分别为 63.34~73.17、70.82~92.29、65.19~89.56, 表明源区为温暖潮湿的古气候条件, 并且源岩经历了低中等风化作用。砂岩中发育大量流水沉积构造, Sr/Ba 值为 $0.07 \sim 0.24 < 0.5$, 粒度分析结果显示河流沉积的特征, 这些共同指示该套砂岩形成于河流沉积环境。结合岩石地球化学、年代学及碎屑组分分析结果, 笔者等认为研究区内的 Inkisi 组砂岩形成于活动大陆边缘背景下与碰撞环境有关的盆地, 是泛非期西刚果造山运动的响应, 同时也暗示在埃迪卡拉纪—早寒武世时期西刚果碰撞造山运动仍在继续。

关键词:西刚果造山带; 安哥拉; Inkisi 组; 前陆盆地; 构造背景

西刚果 (West Congo) 造山带位于刚果 (Congo) 克拉通的西缘, 沿 NW—SE 向与大西洋沿岸平行分布, 形成于泛非 (Pan-Africa) 期圣弗朗西斯科 (São Francisco) 克拉通与刚果 (Congo) 克拉通的汇聚—碰撞造山过程, 是冈瓦纳 (Gondwana) 大陆拼合过程中的重要组成部分 (Trompette et al., 1988; Monié et al., 2012; Affaton et al., 2016; Delpomdor et al., 2016)。自新元古代埃迪卡拉纪 (震旦纪) 以来, 造山带经历了 Macaúbas 洋壳的俯冲、碰撞和垮塌等演化过程 (Mossakovsky et al., 1993; Dobretsov et al., 1995)。在此期间, 造山带的东缘形成了一个沿 NW—SE 向展布的巨大带状向斜构造, 其在构造划分上属于前陆盆地, 部分学者 (Trompette et al., 1988; Delpomdor et al., 2016) 将其称为新元古代西刚果 (West Congo) 盆地。

盆地中的碎屑物质是在区域构造作用下, 侵蚀区和沉积盆地间有机结合的产物, 保留了大量关于

造山带的地质证据, 可以用来示踪源区的信息 (Dickinson, 1979; Dickinson et al., 1985; Patchett et al., 1999; Oszypko et al., 2005; Parsons et al., 2005), 可以通过对碎屑锆石的研究来确定源区物质组成、时代和构造环境等 (Bruguier et al., 1997; 万渝生等, 2003; Thomas et al., 2005)。因此, 开展前陆盆地内地层的研究工作, 不仅关系到盆地地质演化的重建, 而且对非洲西部泛非期西刚果造山运动的活动时限探讨也具有重要意义。

Inkisi 组作为前陆盆地沉积体系中最晚的沉积地层 (Cosson, 1955; Dadet, 1969; Boudzoumou, 1986), 一直备受众多学者的关注。Cahen (1954) 在刚果民主共和国北部刚果河的支流中首次命名了 Inkisi 组, Stanton 等 (1963) 随后在安哥拉进行地层研究时沿用了该名称。Schermerhorn (1961) 根据对安哥拉 Mbanza Congo 地区 Inkisi 组岩石组合特征和剖面特征的分析, 认为 Inkisi 组形成于陆相浅水沉

注: 本文为安哥拉国家地质调查计划 (编号: PLANAGEO) 项目的成果。

收稿日期: 2025-01-10; 改回日期: 2025-05-09; 网络首发: 2025-07-20; 责任编辑: 李明。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.07.037

作者简介: 张金龙, 男, 1989 年生, 高级工程师, 长期从事区域地质矿产调查与研究; Email: 562278395@qq.com。通讯作者: 张洪瑞, 男, 1982 年生, 研究员, 长期从事非洲地质调查及矿产勘查工作; Email: zhanghr@citic.com。

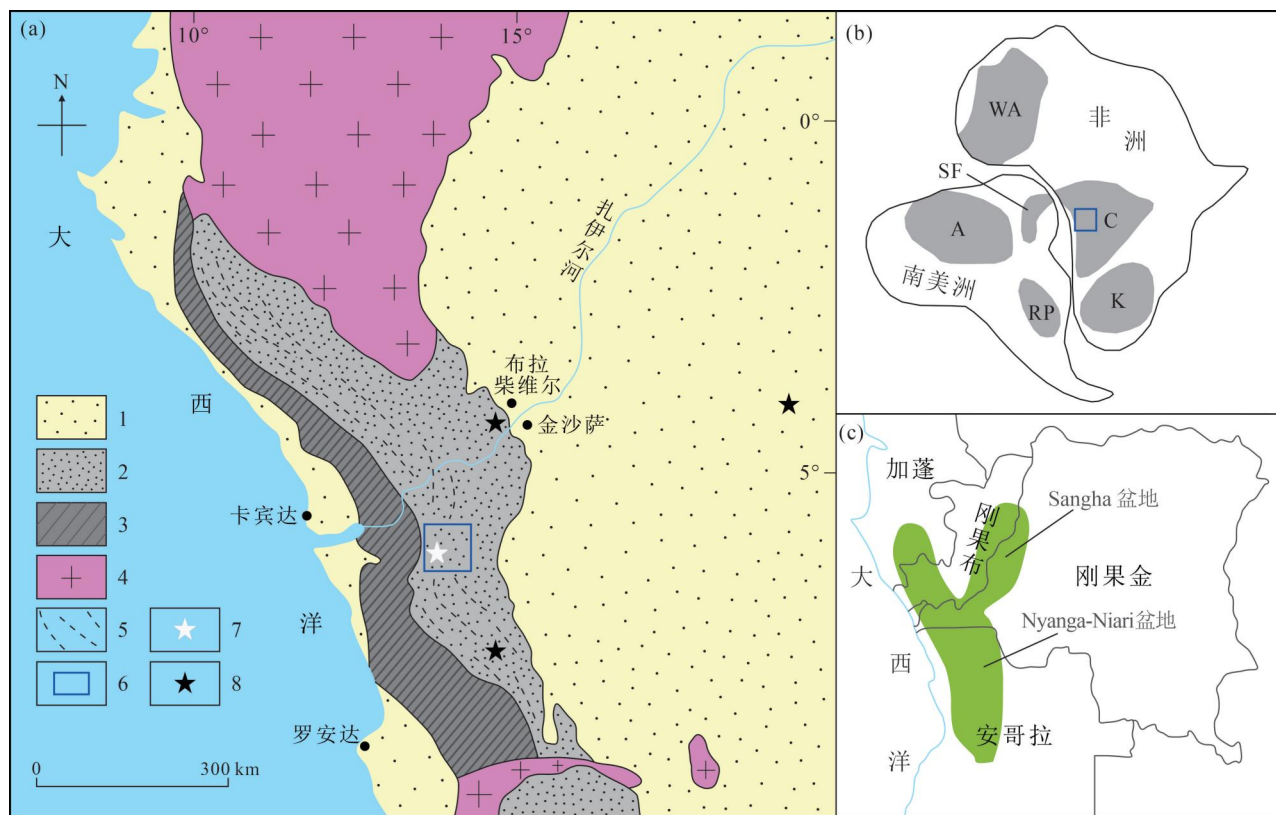


图1 安哥拉西北部区域地质简图(a) (据 Cahen, 1984); 泛非期非洲—南美洲板块克拉通分布简图(b) (据 Affaton et al., 2016); 及泛非期前陆盆地分布范围简图(c) (据 Delpomdor et al., 2016)

Fig. 1 Regional geological map of northwest Angola (a) (after Cahen, 1984); distribution map of cratons on the African—South American plate during the Pan-African period (b) (after Affaton et al., 2016); and map of the distribution range of Pan-African foreland basins (c) (after Delpomdor et al., 2016)

1—中生代盖层; 2—以西刚果超群为主的前陆盆地和西刚果造山带外部构造单元; 3—西刚果造山带内部构造单元, 以马永贝超群和再造基底为主; 4—太古宙和元古代基底; 5—西刚果超群褶皱区; 6—研究区; 7—本文样品点; 8—前人样品点; WA—西非克拉通; C—刚果克拉通; K—卡拉哈里克拉通; SF—圣弗朗西斯科克拉通; A—亚马逊克拉通; PR—拉普拉塔河克拉通

1—Meso—Cenozoic cover; 2—west Congo Basin and external structural units of the west Congo Belt, Western Congo Supergroup; 3—internal structural units of the west Congo Belt: Mayombian Supergroup and reactivated basement; 4—basement of Archean and Lower Proterozoic; 5—folded part of the west Congo Supergroup; 6—studied area; 7—sample point for this work; 8—sample points for previous work; WA—West African Craton; C—Congo Craton; K—Kalahari Craton; SF—São Francisco Craton; A—Amazonian Craton; PR—Rio de la Plata Craton

积盆地, 并且具有近源快速沉积的特征; Boudzoumou (1986) 在经过调查研究后认为 Inkisi 组为河流成因, 并进行了明确的细分; Alvarez 等 (1995) 将下扎伊尔地区的 Inkisi 组自下而上划分为 3 个亚组, 分别对应河流相、三角洲前缘和三角洲平原沉积环境; Perevalov 等 (1992) 在综合了前人研究的基础上将 Inkisi 组划入了新元古代 Xisto—Gresoso 群; Frimmel (2006) 和 Straathof (2011) 先后在 Inkisi 组获得了 558 ± 29 Ma 和 581 ± 29 Ma 的最小碎屑锆石年龄, 并将其沉积时代划入了前寒武纪; Affaton 等 (2016) 在刚果 (金) Brazzville 一带的 Inkisi 组获得了一组 500~800 Ma 的碎屑锆石 U-Pb 同位素年龄, 并据此

认为该组的沉积时代晚于 600 Ma; 李春稼 (2024) 在安哥拉东北部地区 Inkisi 组获得了最小碎屑锆石年龄为 531 ± 9 Ma, 并据此认为其沉积时代为早寒武世, 随后据该组的岩石组合特征及岩石地球化学指标, 对 Inkisi 组的沉积环境、物质来源和物源区构造背景进行了初步探讨。上述研究主要集中在 Inkisi 组的沉积学和年代学方面, 关于该组沉积时代的顶界、物源和沉积环境等认识仍不统一, 并且缺少对前陆盆地的构造属性和西刚果造山运动的时限等关键性问题的探讨研究。

为探明上述疑问, 笔者等选取西刚果造山带南部安哥拉西北部地区进行了野外地质调查工作, 以

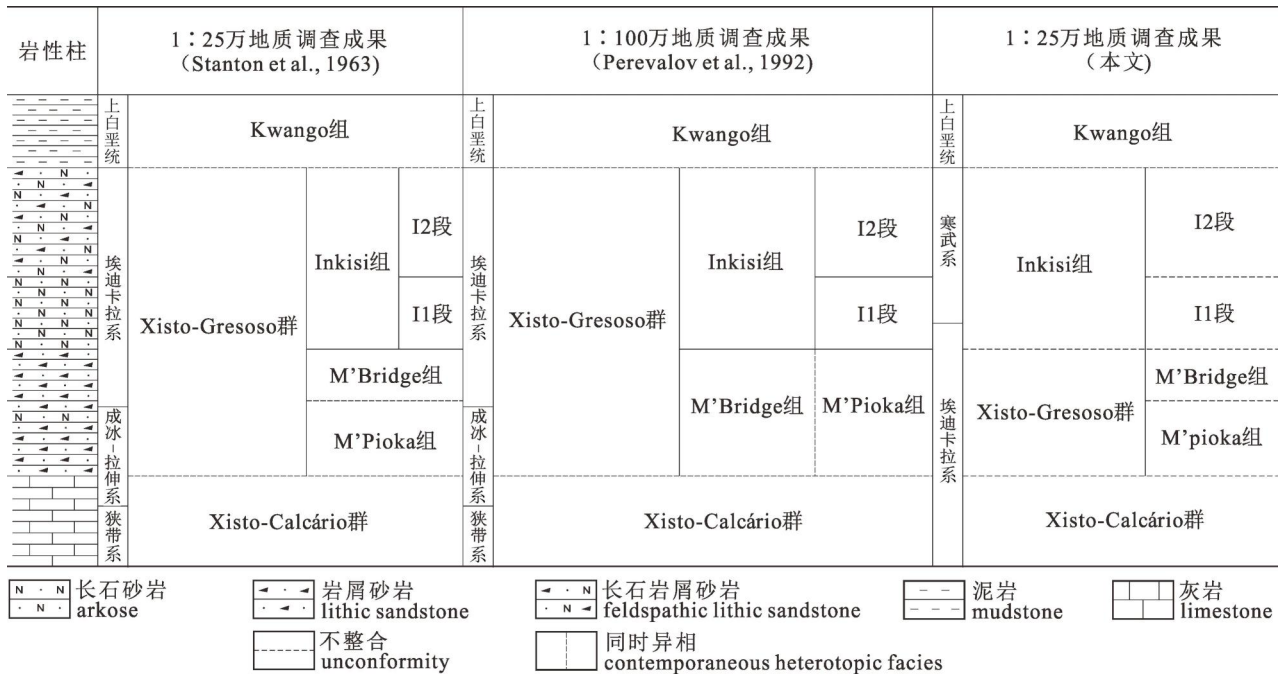


图 2 安哥拉西北部地层沿革简表

Fig. 2 A brief history of the stratigraphy in northwestern Angola

Inkisi 组为研究对象,通过岩石学和年代学等方面的研究,探讨其沉积时代上限、物质来源及源区构造背景等问题,进而丰富该区域地层方面的研究,并为探讨前陆盆地的构造属性和西刚果造山带的活动时限提供科学依据。

1 区域地质概况与岩相学特征

研究区位于安哥拉西北部,前陆盆地的西南缘,泛非期西刚果造山带的东侧。研究区的西侧为造山带的强烈褶皱隆升区,向北东方向延至前陆盆地的腹地,盆地内主要由西刚果超群沉积地层组成 (Affaton et al., 2016),后期常被晚古生代以来的地层覆盖 (Linol et al., 2014) (图 1a、b)。已有资料表明 (Godivier et al., 1986; Gioan et al., 1989; Alvarez, 1991; Deffontaines, 1991; Fernandez-Alonso et al., 2012),在新元古代早期,原刚果克拉通的西部边缘受到幕式 NW—SE 和 NE—SW 伸展的影响,形成了几个相互连接的盆地,它们共同组成前陆盆地 (图 1c),即:①沿 NW—SE 走向分布的 Nyanga—Niari 盆地 (Schroeder, 1981; Alvarez, 1991; Sounga et al., 2012; Delpomdor et al., 2014),并且盆地向南部和东部逐渐加深;②沿 NE—SW 走向分布的 Sangha 盆地 (Poidevin, 1985; Vicat et al., 1989)。

区内 Inkisi 组为一套杂色陆相碎屑沉积地层,

自下至上划分为 I1 和 I2 两个段,在研究区西部和东部分别不整合在埃迪卡拉纪 Xisto—Gresoso 群陆相碎屑岩和 Xisto—Calcário 群海相碳酸盐岩之上,东北部被中生代湖相沉积地层不整合覆盖 (Stanton et al., 1963; Perevalov et al., 1992),区内地层沿革简表见图 2。笔者等工作以 Inkisi 组 I2 段的砂岩为研究对象,其岩性以灰色厚层—块层状变质中细粒岩屑砂岩、细粒长石岩屑砂岩为主,发育大型平行层理和交错层理 (图 3a、b),局部夹透镜状砾岩、粉砂质板岩,偶见小型流水波痕 (图 3c)。

变质细粒长石岩屑砂岩,呈变余砂状结构,块状构造,由陆源碎屑和填隙物组成,其中陆源碎屑成分为石英(40%±)、长石(25%±)、岩屑(35%±)及少量白云母(图 3d)。碎屑颗粒主显棱角状—次圆状,以 0.125~0.25 mm 的细砂为主,较少量 0.25~0.35 mm 的中砂,具方向性排列。石英碎屑具波状、带状消光,具次生加大边;长石包括钾长石、斜长石,具高岭土化、绢云母化特征;岩屑主要为板岩、燧石、流纹岩等,部分岩屑受轻微变质变形作用影响被轻微拉长变形;白云母零散分布;填隙物包括胶结物和黏土杂基,胶结物为硅质和铁质,硅质胶结物已重结晶为石英碎屑的次生加大边,铁质胶结物呈深褐色尘点状,围绕砂粒分布,黏土杂基已变质重结晶为显微鳞片状绢云母,直径<0.05 mm,定向明显。

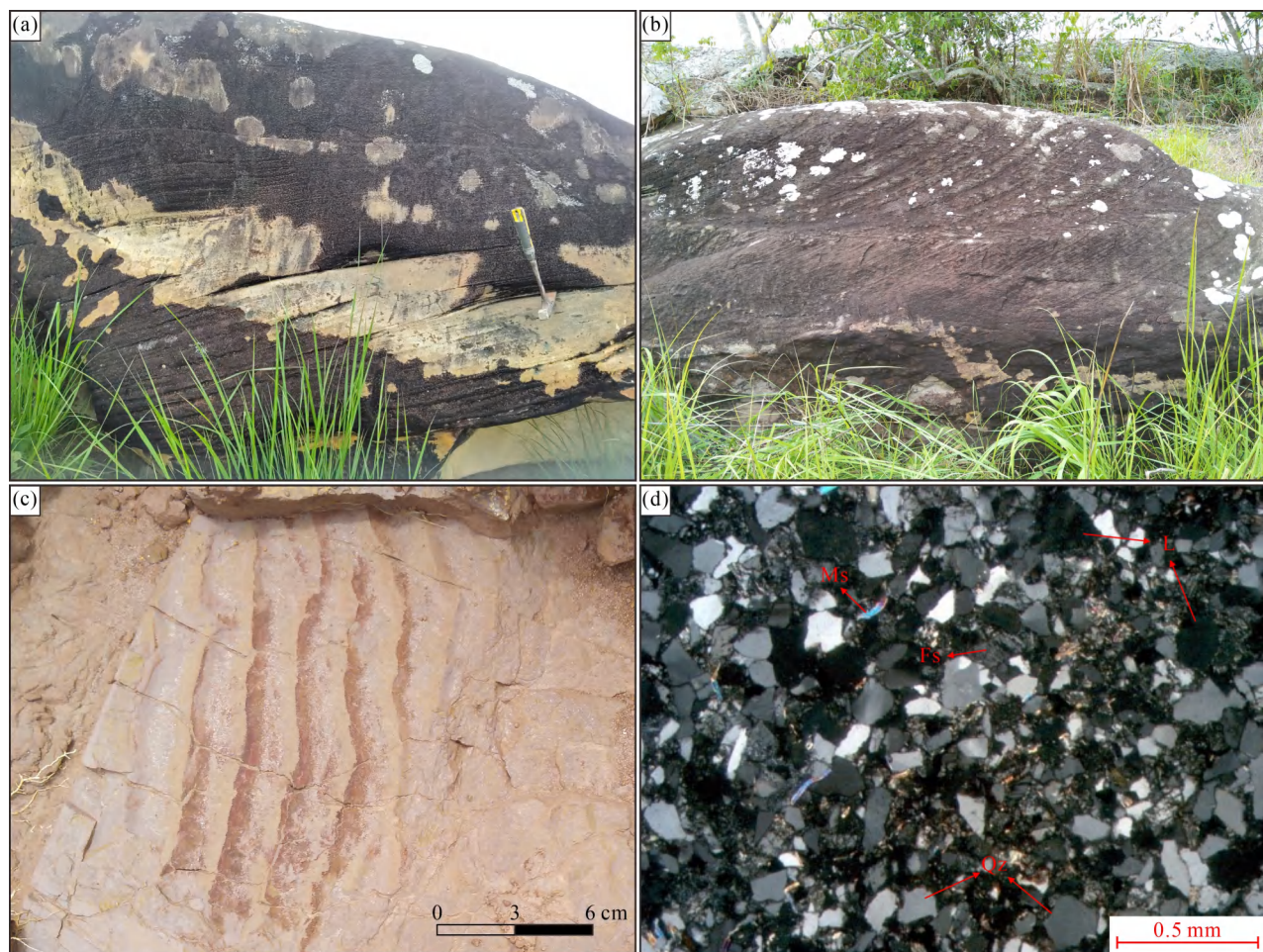


图3 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩特征: (a) 砂岩野外特征; (b) 交错层理; (c) 小型流水波痕; (d) 显微特征

Fig. 3 Characteristics of the Inkisi Formation sandstone in northwestern Angola: (a) field view;

(b) cross beddings; (c) small flowing ripple marks; (d) microscopic

Qz—石英; Fs—长石; L—岩屑; Ms—白云母

Qz—quartz; Fs—feldspar; L—detritus; Ms—muscovite

2 样品采集与测试方法

笔者等用于年代学分析的碎屑锆石 U-Pb 测年样品(8-TW1)、岩石地球化学样品(8-YQ1~YQ5)、碎屑组分统计样品(8-ZF1~ZF4)和粒度分析样品(8-LD1~LD3),均采集于 Inkisi 组 I2 段的变质细粒长石岩屑砂岩。在取样过程中,尽量选择新鲜无风化蚀变、无脉体穿插的样品,以降低对实验测试的影响。

锆石的分选由中国廊坊市诚信地质服务有限公司完成,锆石制靶、CL 照相及锆石 U-Pb 同位素测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。碎屑锆石样品破碎到 250~380 μm ,经水中淘洗、磁选和重磁选后,在双目镜下挑选透明干净、裂缝和包裹体较少的锆石颗粒制成环氧树脂样品靶。经打磨、抛光后对锆石进行反射光、透射光和阴极发光显

微照相,并对锆石外观特征进行研究,选取具有明显震荡环带结构且无裂隙和包裹体的锆石进行测试。锆石 U-Pb 同位素分析采用 LA-ICP-MS 分析技术完成,激光束斑直径为 24 μm 或 32 μm ,频率为 6 Hz,能量密度为 7 J/cm^2 。采用 ^{208}Pb 校正法对普通 Pb 进行校正,利用 NIST610 玻璃标样作为外标,计算锆石样品中的 Pb、U、Th 含量。采用标准锆石 91500 (Wiedenbeck et al., 1995, 2004) 作为定年外标,采用标准锆石 Plesovice 作为监控样品。数据处理采用中国地质大学刘勇胜博士研发的 ICP-MSData Cal 程序,年龄计算和谐和图的绘制采用 Isoplot 3.0 完成 (Ludwig, 2003)。

岩石地球化学分析、碎屑组分统计和粒度分析等测试工作,均在河北省区域地质调查院实验室完成。其中,样品的主量元素采用荷兰帕纳科公司研

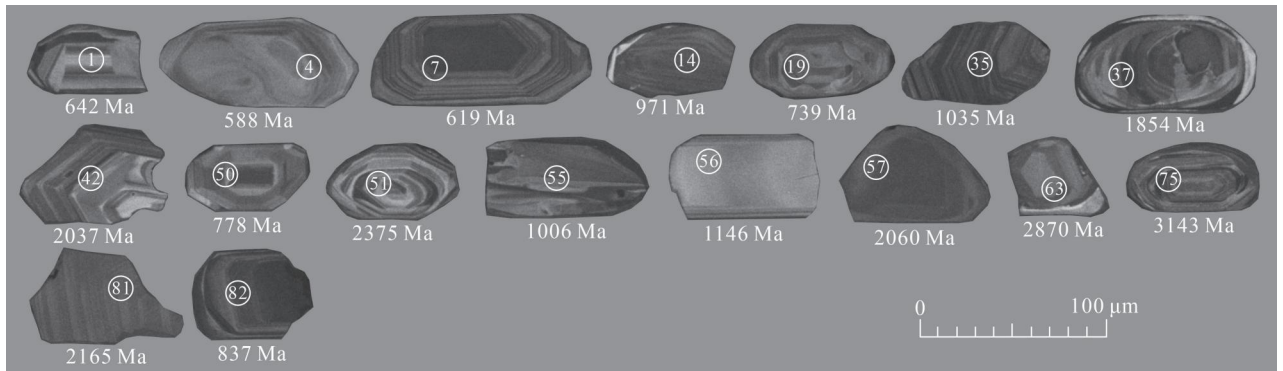


图 4 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩代表性碎屑锆石 CL 图像及测点位置

Fig. 4 CL images and measurement point locations of representative detrital zircon from the Inkisi Formation sandstone in northwestern Angola

制的 Axios X 射线荧光光谱仪测定, FeO 利用氢氟酸—硫酸溶样、重铬酸钾滴定的容量法测试, 分析精度优于 2%。稀土和微量元素采用 X Series II 型等离子体光谱仪 (ICP-MS) 测定, 分析精度优于 1%~5%; 碎屑成分统计的样品均为致密块状, 需将其磨制成薄片, 然后在奥林巴斯 BX53 偏光显微镜下进行粒度分析, 每件样品统计和分析颗粒数量均大于 350 颗, 且成分颗粒大于 0.03 mm。

3 分析结果

3.1 碎屑锆石 U-Pb 年代学

3.1.1 碎屑锆石特征

Inkisi 组砂岩中碎屑锆石主要为柱状、椭圆状或不规则状 (图 4), 粒径一般在 50~150 μm 之间, 长宽比介于 1:1~1:3.5, 部分锆石表面较粗糙, 少数可见裂纹, 反映锆石在形成后受到过地质活动改造。部分锆石呈次棱角—次圆状, 表明它们经历了较长距离搬运。锆石的 Th 含量介于 2.69×10^{-6} ~ 837×10^{-6} 之间, U 的含量为 8.66×10^{-6} ~ 682×10^{-6} , Th/U 值为 0.03~1.39, 其中大多数的锆石 Th/U 值大于 0.4, 它们内部环带清晰, 具有环带结构, 表现为岩浆锆石成因。部分锆石的 Th/U 值介于 0.1~0.4 之

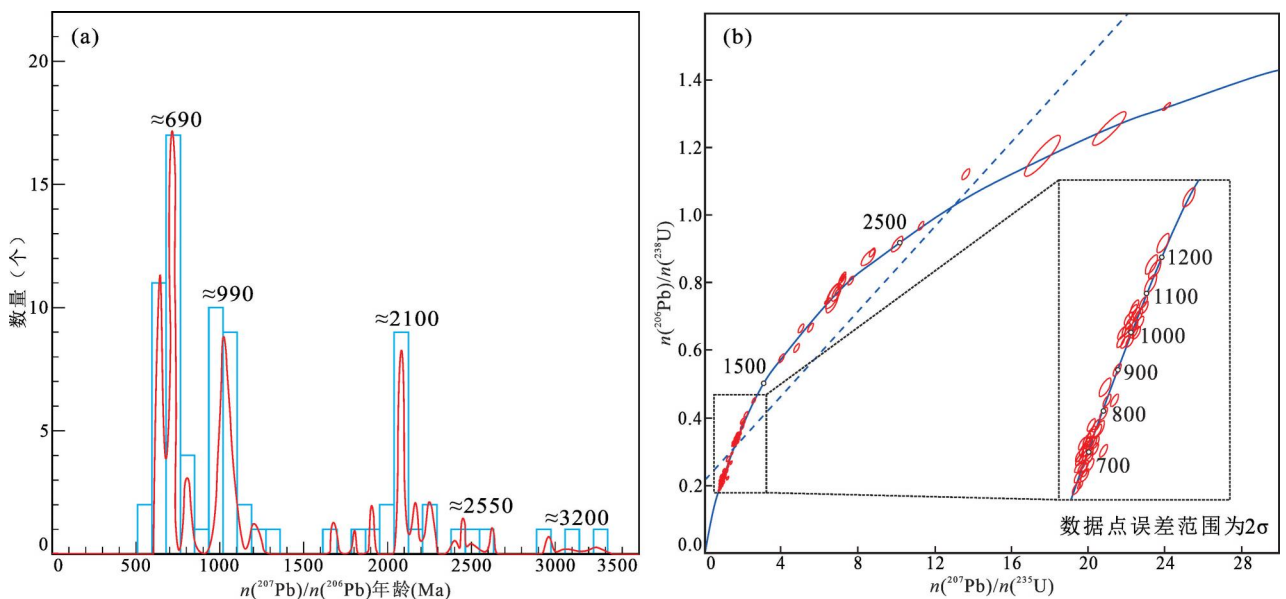


图 5 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩碎屑锆石 U-Pb 同位素年龄频率直方图 (a) 和谐和图 (b)

Fig. 5 U-Pb isotope ages requery histogram (a) and harmonic plot (b) of debris zircon from the Inkisi Formation sandstone in northwestern Angola

表 1 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩碎屑锆石测年数据表

Table 1 Detrital zircon dating data of the Inkisi Formation sandstone in northwestern Angola

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度(%)
	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		
				测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	
001	153	167	0.92	0.06175	0.0002	0.8915	0.0043	0.1047	0.0004	665	5	647	2	642	2	99
002	263	280	0.94	0.2645	0.0005	24.11	0.0795	0.6608	0.0018	3274	2	3273	3	3270	7	100
003	238	344	0.69	0.1003	0.0003	3.992	0.0316	0.2884	0.0016	1629	7	1633	6	1634	8	100
004	30	235	0.13	0.05986	0.0004	0.7890	0.0077	0.09548	0.0005	598	11	591	4	588	3	100
005	133	111	1.20	0.06059	0.0002	0.8417	0.0045	0.1007	0.0004	625	6	620	2	618	2	100
006	61	73	0.84	0.07208	0.0003	1.607	0.0088	0.1617	0.0007	988	5	973	3	966	4	99
007	458	488	0.94	0.06427	0.0005	0.8939	0.0076	0.1008	0.0003	751	13	648	4	619	2	95
008	34	46	0.74	0.1688	0.0004	11.27	0.0517	0.4842	0.0020	2546	3	2546	4	2545	9	99
009	418	422	0.99	0.07133	0.0002	1.640	0.0076	0.1667	0.0006	967	4	986	3	994	4	99
010	215	248	0.87	0.06114	0.0002	0.8827	0.0043	0.1047	0.0005	644	5	642	2	642	3	99
011	64	61	1.04	0.07876	0.0012	1.206	0.0178	0.1111	0.0005	1166	22	803	8	679	3	83
012	361	427	0.85	0.06245	0.0003	0.9680	0.0070	0.1126	0.0009	689	8	687	4	688	5	100
013	337	334	1.01	0.06093	0.0002	0.8710	0.0054	0.1036	0.0004	637	7	636	3	635	2	100
014	43	313	0.14	0.07046	0.0002	1.579	0.0066	0.1625	0.0006	942	4	962	3	971	3	99
015	116	155	0.75	0.07189	0.0002	1.631	0.0073	0.1645	0.0006	983	4	982	3	982	3	99
016	132	206	0.64	0.05990	0.0002	0.7932	0.0036	0.09598	0.0003	600	5	593	2	591	2	100
017	106	304	0.35	0.1098	0.0002	5.028	0.0278	0.3321	0.0018	1796	5	1824	5	1849	9	99
018	176	350	0.50	0.07313	0.0003	1.731	0.0083	0.1716	0.0006	1017	5	1020	3	1021	3	100
019	69	139	0.50	0.06398	0.0003	1.072	0.0076	0.1215	0.0006	741	7	740	4	739	4	100
020	139	332	0.42	0.08292	0.0002	2.587	0.0138	0.2261	0.0009	1267	5	1297	4	1314	5	99
021	152	245	0.62	0.06168	0.0002	0.8815	0.0034	0.1036	0.0003	663	4	642	2	636	2	99
022	837	682	1.23	0.06149	0.0002	0.8743	0.0029	0.1031	0.0003	657	3	638	2	633	2	99
023	132	458	0.29	0.06159	0.0002	0.9576	0.0041	0.1127	0.0004	660	4	682	2	688	2	99
024	338	291	1.16	0.06635	0.0009	1.046	0.0139	0.1144	0.0005	817	20	727	7	698	3	96
025	20	682	0.03	0.1147	0.0012	4.801	0.0384	0.3037	0.0021	1875	19	1785	7	1709	10	96
026	403	409	0.99	0.06580	0.0003	1.107	0.0077	0.1220	0.0008	800	7	757	4	742	5	98
027	88	163	0.54	0.07269	0.0004	1.757	0.0237	0.1746	0.0013	1005	16	1030	9	1037	7	99
028	132	426	0.31	0.06346	0.0003	1.041	0.0049	0.1190	0.0004	724	5	724	2	725	2	100
029	462	368	1.26	0.06210	0.0002	0.9444	0.0048	0.1103	0.0005	677	5	675	3	674	3	100
030	50	149	0.34	0.07427	0.0004	1.772	0.0091	0.1731	0.0006	1049	5	1035	3	1029	3	99
031	136	233	0.58	0.07184	0.0003	1.626	0.0108	0.1640	0.0006	981	8	980	4	979	3	100
032	104	195	0.53	0.1262	0.0004	6.503	0.0301	0.3736	0.0015	2046	4	2046	4	2046	7	99
033	193	314	0.61	0.06266	0.0003	0.9594	0.0038	0.1111	0.0003	697	4	683	2	679	2	99

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值				同位素年龄(Ma)				谐和度(%)				
	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$						
				测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ					
034	77	103	0.75	0.07329	0.0002	1.694	0.0117	0.1675	0.0009	1022	7	1006	4	998	5	99
035	435	431	1.01	0.07216	0.0002	1.734	0.0115	0.1741	0.0008	991	7	1021	4	1035	4	99
036	156	143	1.09	0.06605	0.0003	1.039	0.0070	0.1139	0.0004	808	9	723	4	696	2	96
037	48	302	0.16	0.1200	0.0014	5.514	0.0483	0.3332	0.0025	1956	21	1903	8	1854	12	97
038	95	277	0.34	0.07324	0.0004	1.781	0.0155	0.1761	0.0007	1020	11	1038	6	1045	4	99
039	248	504	0.49	0.06408	0.0003	0.9899	0.0042	0.1121	0.0004	744	4	699	2	685	2	98
040	177	358	0.49	0.06167	0.0002	0.9368	0.0051	0.1101	0.0003	663	7	671	3	674	2	100
041	19	250	0.08	0.07171	0.0002	1.642	0.0091	0.1660	0.0006	978	6	986	3	990	3	100
042	119	336	0.35	0.1245	0.0002	6.383	0.0216	0.3717	0.0010	2022	3	2030	3	2037	5	100
043	98	187	0.52	0.06356	0.0003	0.9902	0.0068	0.1129	0.0004	727	9	699	3	690	2	99
044	60	85	0.71	0.06238	0.0003	0.9294	0.0044	0.1081	0.0003	687	5	667	2	661	2	99
045	14	24	0.58	0.1373	0.0009	7.656	0.0597	0.4048	0.0027	2193	6	2191	7	2191	13	99
046	21	69	0.30	0.06892	0.0003	1.400	0.0089	0.1473	0.0007	896	6	889	4	886	4	100
047	166	198	0.84	0.1280	0.0002	7.198	0.0211	0.4077	0.0010	2071	2	2136	3	2204	4	97
048	186	221	0.84	0.06344	0.0005	0.9897	0.0049	0.1134	0.0006	723	5	699	3	692	3	99
049	31	70	0.44	0.06253	0.0004	0.9597	0.0061	0.1113	0.0004	692	8	683	3	680	2	100
050	56	75	0.75	0.07021	0.0003	1.241	0.0129	0.1283	0.0013	934	10	819	6	778	8	95
051	26	52	0.50	0.1420	0.0007	8.724	0.0538	0.4456	0.0018	2251	5	2310	6	2375	8	97
052	41	33	1.24	0.1407	0.0010	8.467	0.1426	0.4345	0.0040	2235	17	2282	15	2326	18	98
053	185	152	1.22	0.06228	0.0004	0.9842	0.0081	0.1145	0.0004	684	11	696	4	699	3	100
054	208	217	0.96	0.08005	0.0071	0.9733	0.0821	0.08818	0.0023	1198	180	690	42	545	13	77
055	9	44	0.20	0.07217	0.0003	1.680	0.0132	0.1688	0.0012	991	7	1001	5	1006	7	100
056	3	12	0.25	0.07766	0.0006	2.083	0.0323	0.1945	0.0026	1138	14	1143	11	1146	14	100
057	47	35	1.34	0.1288	0.0005	6.673	0.1323	0.3765	0.0078	2082	16	2069	18	2060	36	100
058	120	144	0.83	0.06305	0.0006	1.037	0.0129	0.1192	0.0008	710	16	722	6	726	4	99
059	3	9	0.33	0.2175	0.0009	17.62	0.3760	0.5878	0.0126	2962	16	2969	21	2980	51	100
060	95	110	0.86	0.06382	0.0006	1.050	0.0109	0.1193	0.0006	736	14	729	5	727	3	100
061	25	38	0.66	0.1295	0.0004	6.904	0.0409	0.3864	0.0020	2092	5	2099	5	2106	9	100
062	159	73	2.19	0.07031	0.0005	0.9017	0.0068	0.09308	0.0005	937	8	653	4	574	3	87
063	26	106	0.25	0.1760	0.0003	13.61	0.0883	0.5608	0.0036	2615	5	2723	6	2870	15	95
064	244	387	0.63	0.07423	0.0005	1.848	0.0254	0.1798	0.0012	1048	17	1063	9	1066	6	100
065	240	173	1.39	0.07530	0.0006	1.929	0.0245	0.1853	0.0010	1077	17	1091	9	1096	6	100
066	19	105	0.18	0.1275	0.0003	7.224	0.0279	0.4107	0.0014	2064	3	2139	3	2218	6	96
067	210	424	0.50	0.06258	0.0004	0.990	0.0073	0.1147	0.0004	694	10	699	4	700	2	100
068	230	364	0.63	0.1595	0.0003	10.05	0.1116	0.4568	0.0051	2450	9	2439	10	2425	23	99

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值				同位素年龄(Ma)				谐和度(%)				
	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$			$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			
				测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ		测值	1 σ	测值	1 σ
069	138	174	0.79	0.07580	0.0010	2.090	0.0544	0.1980	0.0020	1090	36	1145	18	1165	11	98
070	22	20	1.10	0.1290	0.0005	6.875	0.0941	0.3864	0.0052	2085	11	2095	12	2106	24	100
071	18	35	0.51	0.07492	0.0007	1.780	0.0344	0.1725	0.0030	1066	17	1038	13	1026	16	99
072	41	69	0.59	0.06322	0.0007	1.005	0.0141	0.1151	0.0006	716	20	706	7	702	4	99
073	38	154	0.25	0.07143	0.0010	1.634	0.0292	0.1656	0.0011	970	26	983	11	988	6	100
074	35	39	0.90	0.1288	0.0004	6.746	0.1352	0.3797	0.0076	2082	16	2079	18	2075	35	100
075	11	26	0.42	0.2435	0.0006	21.10	0.3369	0.6283	0.0099	3143	12	3143	15	3143	39	99
076	75	129	0.58	0.07556	0.0006	2.136	0.0300	0.2046	0.0016	1083	16	1161	10	1200	8	97
077	49	87	0.56	0.06863	0.0005	1.271	0.0117	0.1348	0.0014	888	9	833	5	815	8	98
078	193	221	0.87	0.06247	0.0006	0.9748	0.0130	0.1130	0.0007	690	18	691	7	690	4	100
079	50	80	0.63	0.07159	0.0003	1.348	0.0174	0.1366	0.0017	974	12	867	8	825	10	95
080	53	79	0.67	0.07233	0.0003	1.687	0.0121	0.1691	0.0009	995	7	1004	5	1007	5	100
081	41	74	0.55	0.1289	0.0004	7.108	0.0673	0.3992	0.0028	2084	8	2125	8	2165	13	98
082	48	314	0.15	0.06521	0.0008	1.269	0.0426	0.1387	0.0021	781	45	832	19	837	12	99
083	34	62	0.55	0.07398	0.0005	1.811	0.0247	0.1770	0.0011	1041	18	1050	9	1050	6	99
084	42	142	0.30	0.1279	0.0003	7.175	0.0399	0.4068	0.0020	2069	4	2133	5	2200	9	97

间,它们内部环带模糊,具不分带、弱分带的增生结构,推测它们来自古老的结晶基底,并发生了不同程度的重结晶作用。仅有两颗锆石的 Th/U 值小于 0.1,锆石呈灰黑色,分带不发育,为变质锆石。

3.1.2 碎屑锆石年龄

笔者等对砂岩样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试,并获得了 81 组有效碎屑锆石年龄数据,其中最小碎屑锆石年龄为 588.0 ± 3.0 Ma (表 1)。按照锆石年龄频率直方图特征可划分为 3 组年龄(图 5a),第一组年龄介于 588~778 Ma,共 31 个测点,占总数的 38.3%;第二组年龄为 815~1165 Ma,共 25 个测点,占总数 30.9%;第三组年龄为 1849~2375 Ma,共 15 个测点,占总数的 18.5%;另外还有 4 颗太古宙锆石。碎屑锆石年龄频率图(图 5b)显示,碎屑锆石年龄大部分分布在谐和曲线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $588 \pm 3 \sim 3270 \pm 7$ Ma 之间,年龄跨度大,表明原岩物源区复杂。

3.2 岩石地球化学特征

笔者等研究样品的地球化学分析结果如表 2 所示。其中 SiO_2 含量在 70.59%~72.34% 之间,平均含量为 71.62%,表明样品富含石英或二氧化硅矿物。 Al_2O_3 含量为 12.71%~13.32%,平均含量为 12.96%,表明样品受到了较强烈的蚀变。 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值介于 5.30~5.69 之间,平均值为 5.53,表明砂岩样品的成分成熟度较低。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 值介于 0.176~0.189 之间,平均值为 0.18,表明研究区构造背景与大陆边缘弧有关(0.15~0.22)。 K_2O 含量为 2.91%~3.71%,平均含量为 3.43%。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值为 0.23~0.29<0.4,表明样品的母岩中只含有少量的碱性长石。 Na_2O 含量为 1.10%~4.07%,平均含量为 2.33%。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值介于 0.72~3.38 之间,平均值为 2.05。 CaO 含量为 0.06%~1.67%,平均含量为 0.62%。 MgO 含量为 1.14%~1.42%,平均含量为 1.31%。 TiO_2 含量为 0.48%~0.77%,平均含量为 0.64%。 CaO 含量为 0.06%~1.67%,平均含量为 0.62%。 $\text{TFe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ 的含量为 4.56%~5.76%,平均含量为 5.28%。 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$ 值介于 2.22~11.31 之间,平均值为 6.73。

样品的稀土元素总量变化较大, ΣREE 值介于 $146.34 \times 10^{-6} \sim 269.55 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 185.38×10^{-6} 。 LREE 值介于 $131.00 \times 10^{-6} \sim 247.63 \times 10^{-6}$, HREE 值介于 $11.53 \times 10^{-6} \sim 21.92 \times$

表 2 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩主量元素 (%) 和微量元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果Table 2 Analysis results of major (%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) of the Inkisi Formation sandstone in northwestern Angola

类别	样品编号	8-YQ1	8-YQ2	8-YQ3	8-YQ4	8-YQ5	类别	样品编号	8-YQ1	8-YQ2	8-YQ3	8-YQ4	8-YQ5
主量元素	SiO ₂	70.88	72.34	72.05	72.24	70.59	微量元素	Sr	138	57.8	59.2	63	151
	Al ₂ O ₃	12.77	12.71	13.11	12.89	13.32		Ba	588	713	798	758	741
	TiO ₂	0.48	0.77	0.70	0.68	0.59		Li	24.6	29.0	31.8	30.2	23.8
	Fe ₂ O ₃	2.21	2.87	2.79	2.69	2.02		Be	2.78	2.56	2.86	2.76	1.86
	FeO	1.09	1.33	1.30	1.34	1.51		Sc	5.68	6.46	8.86	8.03	8.37
	CaO	1.67	0.08	0.06	0.09	1.18		V	52.7	70.5	76.3	72.3	60.5
	MgO	1.14	1.41	1.41	1.42	1.16		Cr	38.2	60.4	62.3	39.3	45.2
	K ₂ O	2.91	3.62	3.71	3.68	3.24		Co	6.45	6.87	7.65	7.31	7.58
	Na ₂ O	4.07	1.27	1.10	1.51	3.71		Ni	19.0	21.4	24.3	22.5	21.7
	MnO	0.052	0.024	0.023	0.024	0.056		Cu	8.57	5.62	6.64	5.59	7.80
	P ₂ O ₅	0.146	0.125	0.105	0.119	0.138		Zn	42.0	51.5	58.9	53.9	51.5
	烧失	2.34	3.15	3.34	3.03	2.05		Ga	15.6	17.0	19.3	18.1	17.2
	总和	99.76	99.71	99.71	99.71	99.56		Zr	157	207	216	199	160
	TFe ₂ O ₃	3.42	4.36	4.24	4.18	3.68		Nb	12.5	17.1	16.8	16.0	12.2
	TFe+MgO	4.56	5.76	5.65	5.60	4.84		Mo	0.24	0.21	0.26	0.20	0.63
	Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.180	0.176	0.182	0.178	0.189		Cd	0.14	0.024	0.026	0.028	0.187
	K ₂ O/Na ₂ O	0.72	2.84	3.38	2.43	0.87		In	0.041	0.048	0.050	0.052	0.034
	Al ₂ O ₃ /(CaO+Na ₂ O)	2.22	9.36	11.31	8.04	2.72		Cs	4.39	5.20	5.84	5.46	4.45
CIA	60.96	72.20	73.17	71.30	63.34	Hf	4.49	6.02	6.13	5.51	5.18		
CIW	70.82	90.90	92.29	89.52	74.87	Ta	1.04	1.35	1.43	1.30	0.88		
PIA	65.19	87.72	89.56	85.92	69.28	W	1.46	1.82	1.70	1.60	1.60		
微量元素	Y	28.5	14.4	13.8	16.8	25.4	Tl	0.64	0.71	0.78	0.74	0.66	
	La	100	40.5	43.4	43.2	34.2	Pb	13.0	24.0	26.4	23.1	12.8	
	Ce	54.1	69.4	71.1	77.0	56.4	Bi	0.75	0.43	0.41	0.36	0.69	
	Pr	17.3	8.04	7.84	8.77	6.94	Th	12.3	17.3	17.7	16.2	10.7	
	Nd	64.1	28.4	26.8	31.1	26.8	U	1.76	2.76	2.75	2.57	2.17	
	Sm	10.1	4.87	4.54	5.44	5.45	Th/U	6.99	6.27	6.44	6.30	4.93	
	Eu	2.03	1.10	1.04	1.19	1.21	Rb/Sr	0.65	2.27	2.47	2.21	0.77	
	Gd	7.63	3.88	3.58	4.28	4.51	Ba/Sr	4.26	12.34	13.48	12.03	4.91	
	Tb	1.09	0.57	0.51	0.62	0.75	Th/Sc	2.17	2.68	2.00	2.02	1.28	
	Dy	5.62	3.02	2.69	3.19	3.79	ΣREE	269.55	164.79	166.25	179.97	146.34	
	Ho	1.01	0.56	0.50	0.59	0.86	LREE	247.63	152.31	154.72	166.70	131.00	
	Er	2.95	1.85	1.69	1.86	2.26	HREE	21.92	12.48	11.53	13.27	15.34	
	Tm	0.45	0.31	0.28	0.32	0.41	LREE/HREE	11.30	12.20	13.42	12.56	8.54	
	Yb	2.75	1.95	1.95	2.06	2.44	δCe	0.29	0.89	0.87	0.92	0.85	
	Lu	0.42	0.34	0.33	0.35	0.32	δEu	0.68	0.75	0.76	0.73	0.72	
	Rb	90.0	131	146	139	117							

注: $CIA = \frac{100 \cdot n(Al_2O_3)}{n(Al_2O_3) + n(CaO^*) + n(K_2O) + n(Na_2O)}$; $CIW = \frac{n(Al_2O_3)}{n(CaO^*) + n(Na_2O) + n(Al_2O_3)} \times 100\%$; $PIA = \frac{n(Al_2O_3) - n(K_2O)}{n(CaO^*) + n(Na_2O) + n(Al_2O_3) - n(K_2O)} \times 100$; 其中 $n(CaO^*)$ 是指仅计硅酸盐矿物中的 Ca, $n(CaO^*)$ 校正方法为, 令 $n(CaO_{\text{剩余}}) = n(CaO) - n(P_2O_5) \cdot \frac{10}{3}$, 若 $n(CaO_{\text{剩余}}) < n(Na_2O)$, 则取 $n(CaO^*) = n(CaO_{\text{剩余}})$; 若 $n(CaO_{\text{剩余}}) > n(Na_2O)$, 则取 $n(CaO^*) = n(Na_2O)$ 。 $\delta Ce = 2Ce_N / (La_N + Pr_N)$, $\delta Eu = 2Eu_N / (Sm_N + Gd_N)$ (据 McLennan, 1993)。

10^{-6} , LREE/HREE 值介于 8.54 ~ 13.42 之间, 平均值 11.60, 表明 LREE 相对富集, HREE 相对亏损。 La_N/Yb_N 值介于 10.05 ~ 26.08 之间, 平均值 16.41。除样品 8-YQ1 的 Ce 异常显著外, 其余样品的 δCe 值为 0.85 ~ 0.92, 平均值 0.88。Eu 负异常不明显,

δEu 值为 0.68 ~ 0.76, 平均值 0.73, 在北美页岩 (PAAS) 标准化稀土配分曲线中显示缓倾特征 (图 6), 说明样品的原始物源主要来自上地壳。

3.3 碎屑组分分析

沉积岩中的碎屑组分能够反映物源区的性质,

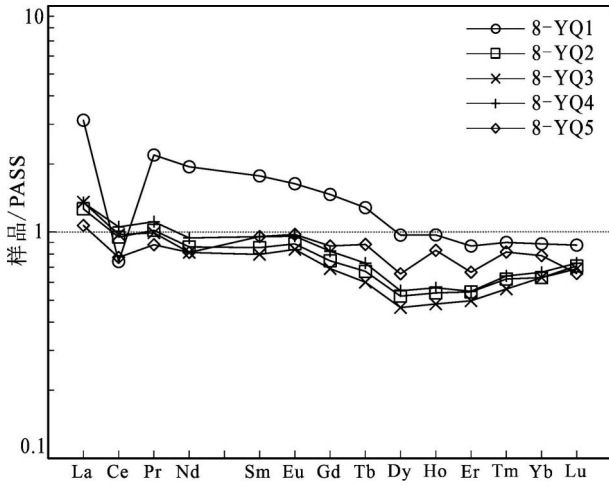


图6 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩 PASS 标准化稀土元素配分图

Fig. 6 PASS normalized REE patterns of the Inkisi Formation sandstone in northwestern Angola

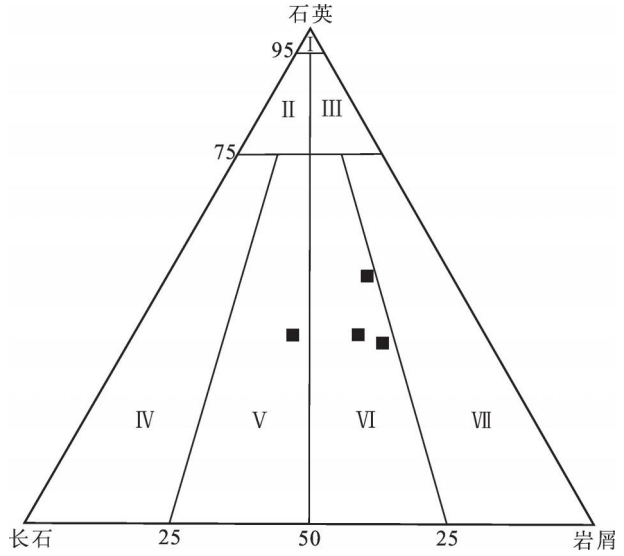


图7 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩分类图解

Fig. 7 Classification diagram of the Inkisi Formation sandstone in northwestern Angola

I—石英砂岩; II—长石石英砂岩; III—岩屑石英砂岩; IV—长石砂岩; V—岩屑长石砂岩; VI—长石岩屑砂岩; VII—岩屑砂岩
 I—Quartz sandstone; II—feldspathic quartz sandstone; III—lithic quartz sandstone; IV—arkose; V—lithic arkose; VI—feldspathic lithic sandstone; VII—lithic sandstone

并判别物源区的构造背景(方爱民等, 2003), 并且已广泛应用于沉积岩的构造背景分析中(和政军, 1989; 李忠等, 2004; 马圣杰等, 2024)。笔者等根据碎屑—物源区—板块构造三位一体的分类方案(Dickinson et al., 1979; Dickinson et al., 1983), 来分析 Inkisi 组砂岩的源区属性。

笔者等用于碎屑组分分析的样品, 每件统计碎屑颗粒数量均大于 350 颗。结果(表 3)显示, 样品中石英含量 36.28%~49.61%, 长石含量 14.57%~33.33%, 岩屑含量 27.70%~44.15%。石英碎屑以单晶石英(33.89%~43.73%)为主, 除样品 8-ZF3 的斜长石含量较低外, 其余样品斜长石(11.76%~20.42%)均高于钾长石(2.81%~12.91%)含量。岩屑以沉积岩(23.24%~42.48%)为主, 成分主要为陆屑沉积岩岩屑, 次为硅质岩、硅酸盐碎屑, 说明接受了沉积岩蚀源区物质的供应。根据统计结果表

3 以及砂岩的三端元图解进行投图, 结果显示(图 7)测试样品主要为长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩, 与野外调查和岩矿鉴定结果一致。

3.4 粒度特征

笔者等采用薄片图像法, 对 Inkisi 组的 3 件砂岩样品进行了粒度统计分析, 每件样品统计的碎屑颗粒数量均大于 600 颗, 先在镜下测出碎屑颗粒的最大粒径, 然后换算成 ϕ 值, 并以 0.25ϕ 为间隔进行分组, 分别统计了每组碎屑颗粒的频数和累计频数(表 4)。

4 讨论

4.1 Inkisi 组沉积时限讨论

在过去的数十年中, 由于安哥拉的安全问题, 前人对 Inkisi 组的研究程度较低, 关于其形成时限问题, 一直都是众多学者关注的焦点(Cosson, 1955; Dadet, 1969; Boudzoumou, 1986; Perevalov, 1992; Frimmel et al., 2006; Tack et al., 2008; Straathof et al., 2011; Linol et al., 2015)。已有资料显示, 安哥拉地区的 Inkisi 组中尚未发现标准化石, 因此采用碎屑锆石测年的

表 3 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩碎屑组分分析结果 (%) 统计表

Table 3 Statistical table of analysis results (%) of clasts in sandstone of the Inkisi Formation in northwestern Angola

编号	Qm	Qp	Qt	P	K	Ft	Lv	Ls	L	Lt
8-ZF1	36.63	1.17	37.80	20.42	12.91	33.33	4.46	23.24	27.70	28.87
8-ZF2	43.73	5.88	49.61	11.76	2.81	14.57	2.56	32.23	34.79	40.67
8-ZF3	33.89	2.39	36.28	5.01	13.60	18.61	1.67	42.48	44.15	46.54
8-ZF4	34.42	3.26	37.68	15.12	6.74	21.86	4.19	34.65	38.84	42.10

注: Qm—单晶石英; Qp—多晶石英; Qt—石英总量(Qm+Qp); P—斜长石; K—钾长石; Ft—长石总量(P+K); Lv—火山岩屑; Ls—沉积岩和变质沉积岩岩屑; L—不稳定岩屑(Lv+Ls); Lt—多晶质岩屑(L+Qp)。

表 4 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩粒度分析统计表

Table 4 Statistical table of grain size analysis of the Inkisi Formation sandstone in northwestern Angola

样品编号		8-LD1			8-LD2			8-LD3		
岩性		细粒岩屑长石砂岩			细粒长石岩屑砂岩			细粒长石岩屑砂岩		
粒径 (mm)	粒径 (φ)	频数	频率 (%)	累计频率 (%)	频数	频率 (%)	累计频率 (%)	频数	频率 (%)	累计频率 (%)
0.5000~0.4204	1.00~1.25				0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
0.4204~0.3536	1.25~1.50				2	0.33	0.33	1	0.17	0.17
0.3536~0.2973	1.50~1.75				6	0.99	1.31	6	1.00	1.17
0.2973~0.2500	1.75~2.00				9	1.48	2.79	30	5.00	6.17
0.2500~0.2102	2.00~2.25	0	0.00	0.00	43	7.06	9.85	82	13.67	19.83
0.2102~0.1768	2.25~2.50	1	0.17	0.17	109	17.90	27.75	129	21.50	41.33
0.1768~0.1487	2.50~2.75	11	1.83	2.00	132	21.67	49.43	148	24.67	66.00
0.1487~0.1250	2.75~3.00	33	5.50	7.50	114	18.72	68.14	97	16.17	82.17
0.1250~0.1051	3.00~3.25	95	15.83	23.33	96	15.76	83.91	58	9.67	91.83
0.1051~0.0884	3.25~3.50	126	21.00	44.33	50	8.21	92.12	36	6.00	97.83
0.0884~0.0743	3.50~3.75	148	24.67	69.00	29	4.76	96.88	6	1.00	98.83
0.0743~0.0625	3.75~4.00	88	14.67	83.67	13	2.13	99.01	2	0.33	99.17
0.0625~0.0526	4.00~4.25	54	9.00	92.67	3	0.49	99.51	2	0.33	99.50
0.0526~0.0442	4.25~4.50	28	4.67	97.33	3	0.49	100.00	3	0.50	100.00
0.0442~0.0372	4.50~4.75	11	1.83	99.17	0	0.00	100.00	0	0.00	100.00
0.0372~0.0313	4.75~5.00	3	0.50	99.67						
0.0313~0.0156	5.00~6.00	2	0.33	100.00						
合计		600	100		609	100		600	100	
平均粒度 (M_z)		3.60			2.81			2.63		
标准偏差 (σ_i)		0.4908			0.4949			0.4562		
偏度 (SK_1)		0.1387			0.1417			0.1151		
峰态 (K_G)		1.1297			1.0334			1.041		

注: 粒径(d)的单位 φ 与 mm 的换算关系为: $d/\varphi = -\log_2(d/\text{mm})$ 。

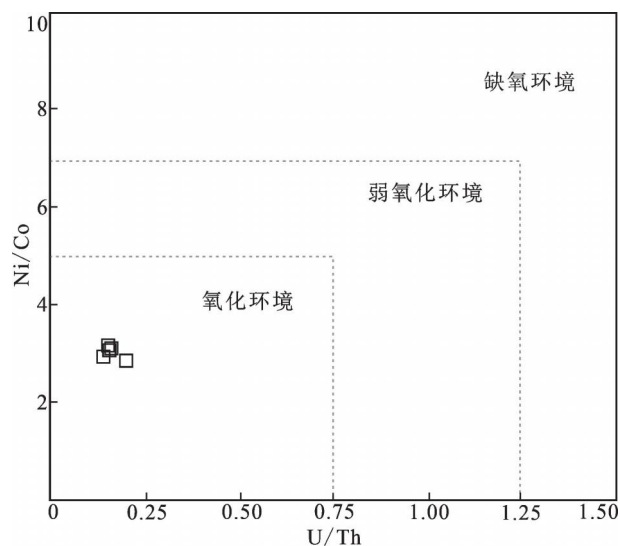


图 8 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩 U/Th—Ni/Co 图解

(据 Jones, 1994)

Fig. 8 U/Th—Ni/Co diagram of the Inkisi Formation sandstone in northwestern Angola (after Jones, 1994)

新等, 2021; 陈伟雄等, 2023)。Inkisi 组在前陆盆地中广泛分布 (Sounga et al., 2012), 考虑到该组在盆地不同部位的形成时代可能会存在差异, 因此笔者等将结合盆地中已有的调查成果, 对前陆盆地西南缘的 Inkisi 组的沉积时限进行探讨。Schermerhorn (1951) 将 Inkisi 组划归于 Congo Occidental 体系的顶部层位, 形成时代为前寒武纪晚期; Perevalov (1992) 将 Inkisi 组划入了 Xisto—Gresoso 群, 沉积时代归属于新元古代; Alvarez (1995) 认为研究区东北部刚果民主共和国 Kinshasa 地区的 Inkisi 组形成于泛非期后的古生代; Frimmel (2006) 和 Straathof (2011) 根据在 Inkisi 组中获得的碎屑锆石年龄 (558 ± 29 Ma, 581 ± 29 Ma), 将其沉积时代划入了前寒武纪; Sounga (2012) 将 Kinshasa 一带的 Inkisi 组划为西刚果体系的顶部沉积地层, 沉积时代归属于新元古代末期; Linol 等 (2016) 根据研究区东北部刚果盆地钻孔中 Inkisi 组的碎屑锆石年龄, 将其沉积时代划归于新元古代末期—早寒武纪; Affaton 等 (2016) 根据 Inkisi 组碎屑锆石年龄, 认为其沉积时代晚于 600 Ma; 李春稼 (2024) 在安哥拉东

方法来限定地层沉积时代, 无疑是最直接有效的方法 (Williams, 2001; 李亚萍等, 2007; 段明

北部地区 Inkisi 组砂岩中获得了最小碎屑锆石年龄为 531 ± 9 Ma, 并据此认为其沉积时代为早寒武世。

笔者等工作在前陆盆地西南缘安哥拉西北部的 Inkisi 组 I2 段砂岩中, 获得的最小碎屑锆石年龄为 588.0 ± 3.0 Ma, 说明该套砂岩的沉积时代晚于 588.0 ± 3.0 Ma。考虑到地层在沉积过程中需要一定的沉积时间跨度, 而同一地层单元在不同区域或不同层位之间仍会存在少量差异, 再结合已获得的年代学结果及区域地质背景, 笔者等认为将安哥拉西北部 Inkisi 组的沉积时限置于埃迪卡拉纪—早寒武世较为合理。

4.2 沉积环境讨论

关于 Inkisi 组的形成环境仍存在很多争议, 部分学者 (Cahen, 1954; Cosson, 1955; Dadet, 1969; Boudzoumou, 1986) 在刚果共和国首都 Brazzaville 一带进行调查时, 认为 Inkisi 组是在河道中沉积形成的; 最新研究表明 (Alvarez et al., 1995; Sounga et al., 2012; Timothée, 2024), Brazzaville—Kinshasa 一带存在一个 NE—SW 向展布的盆地, 盆地内的 Inkisi 组是河控三角洲为主的沉积产物, 并且在沉积过程中受到了海洋的影响; 李春稼 (2024) 根据 Inkisi 组砂岩的岩石地球化学分析结果认为, 该组形成于陆相淡水沉积环境。

笔者等野外调查发现, Inkisi 组下部岩性以中粗粒长石砂岩为主, 夹透镜状砾岩和粉砂质泥岩, 粉砂质泥岩中发育小型流水波痕 (图 3c), 波脊呈波曲型, 波长 1.5~2 cm, 波高 0.3~0.5 cm, 波痕指数为 3~6.7, 对称指数为 2~3, 具浪成波痕的特征。上部岩性以厚层—块层状岩屑砂岩、长石岩屑砂岩为主, 夹透镜状砾岩和粉砂质泥岩, 发育大型流水成因的平行层理和板状交错层理。

研究表明, Sr 和 Ba 元素的含量与盐度有关, 常被用来区分海相和陆相沉积环境 (毛光周等, 2011)。另外, 当 Ni/Co 值大于 7.0 时为缺氧环境, 介于 7.0~5.0 之间时为弱氧化环境, 小于 5.0 时为氧化环境, 而 U/Th 值也会随着沉积环境还原性的增强而升高 (Jones et al., 1994; Wei Hengye, 2012; Zhang Qian et al., 2018; 李明龙等, 2019)。笔者等测试的砂岩样品 Sr/Ba 值为 $0.07 \sim 0.24 < 0.5$, 指示陆相沉积环境, 与李春稼 (2024) 结论一致。U/Th—Ni/Co 图解 (图 8) 显示, Inkisi 组所有样品点均落入氧化环境区域。上述地球化学参数表明, 本文 Inkisi 组的取样层位为具有氧化特征的陆相沉积环境。

为更准确地反映 Inkisi 组的沉积环境特征, 笔者等对 Inkisi 组的砂岩进行了粒度分析。结果显示 (表 4), 测试样品的平均粒度 (Mz) 为 $2.63 \sim 3.6 \phi$, 属中细砂级, 反映水动力一般; 标准偏差 (σ_1) 为 $0.4562 \sim 0.4949 \phi$, 说明分选好; 偏度 (Sk_1) 为 $0.1151 \sim 0.1417$, 为不对称正偏态曲线, 说明沉积物以粗组分为主; 峰态 (KG) 为 $1.0334 \sim 1.1297$, 属中等峰态。频率曲线呈不明显的双峰形态, 粒度分布范围较宽 (图 9a), 累计曲线较陡直, 分选好 (图 9b), 概率累计曲线呈两段式 (图 9c), 牵引总体不发育, 以跳跃总体为主, 悬浮总体次之, S 截点为 $2.7 \sim 3.6 \phi$, 跳跃总体的斜率较高 ($60^\circ \sim 62^\circ$), 具有曲流河沉积砂体的粒度特征 (朱筱敏, 2008; 陈建强等, 2015)。偏度与标准偏差结构参数散点图解 (Friedman, 1967) 显示, 砂岩样品均落入右侧的河流区域 (图 9d)。

综上所述, 虽然笔者等研究缺乏 Inkisi 组垂向上的系统调查, 但是通过该组的岩石组合及沉积构造, 以及笔者等获得的 Inkisi 组砂岩地球化学和粒

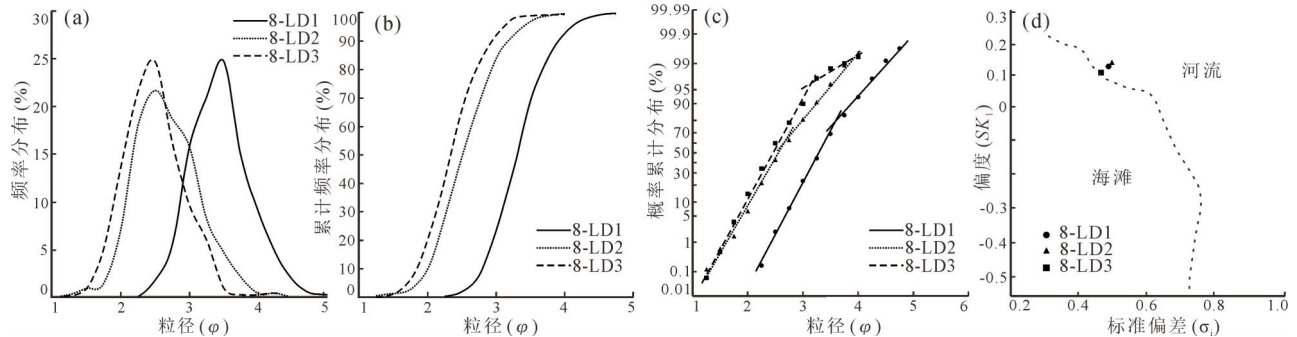


图9 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩粒度曲线及 C—M 图解: (a) 频率曲线; (b) 累计曲线; (c) 概率累计曲线; (d) 偏度与标准偏差结构参数散点图

Fig. 9 Grain size diagrams and C—M diagram of the Inkisi Formation sandstone in northwestern Angola: (a) frequency curve; (b) accumulation curve; (c) probability accumulation curve; (d) standard deviation skewness dispersion diagram

度分析结果,笔者认为研究区内 Inkisi 组下部在沉积过程中存在湖泊的干扰,而上部则是以氧化环境下的河流沉积为主。

4.3 风化程度及古气候

碎屑岩在形成过程中,不稳定元素的氧化物含量,受风化、搬运、成岩和蚀变作用等影响显著(张金龙等, 2017; 陈梦雅等, 2023)。为了定量分析碎屑岩源区岩石的风化程度, Nesbitt (1982)、Harnois (1988) 和 Fedo (1995) 等人先后提出 *CIA*、*CIW* 和 *PIA* 等化学蚀变指数,并被广泛应用于碎屑岩源区岩石风化程度和古气候的分析判断中(冯连君等, 2006; 毛光周等, 2011; 李明龙等, 2019; 陈伟雄等, 2023; 马圣杰等, 2024)。研究区 Inkisi 组砂岩的 *CIA* 值为 63.34~73.17, 平均为 68.19, 属低中等风化, 表明源区为温暖湿润的气候条件; *CIW* 值为 70.82~92.29, 平均为 83.68, 属中等风化, 反映源区为温暖湿润的气候条件; *PIA* 值为 65.19~89.56, 平均为 79.53, 属低中等风化, 指示源区为温暖湿润的气候条件。*CIA* 值、*CIW* 值和 *PIA* 值的特征基本一致, 均反映研究区 Inkisi 组砂岩的源区岩石风化强度中等, 具温暖潮湿的古气候特征。由于上地壳中的斜长石和钾长石都是易风化的不稳定矿物, Nesbitt (1982) 提出了 A—CN—K 三角模型图解, 来分析陆壳物质的风化趋势。图解显示 Inkisi 组砂岩落在弱—中等风化之间, 风化趋势线平行于 A—CN 线(图 10), 尚处于大陆风化的早期阶段, 该阶段正

在进行脱 Na、Ca 的过程, 表明斜长石正在风化消失(陈俊等, 2001; 姜大伟, 2018), 这与上述蚀变指数和变异指数基本一致, 均指示了源区岩石风化程度中等。

此外, 源区的风化作用以及沉积物的再旋回过程均可导致 U 的氧化淋失和 Th/U 值的升高。通常, Th/U>4.0 被认为与风化作用有关, Th/U>5.0 则表明源区岩石经历了明显的风化作用(Taylor, 1985; McLennan, 1991)。Inkisi 组砂岩的 Th/U 值介于 4.93~6.99 之间, 平均值为 6.19>5.0, 且明显高于上地壳的平均值(图 10), 指示源区岩石经历了较强的风化作用, 再次表明源区古气候为温暖湿润气候。

综上所述, Inkisi 组砂岩的源区岩石整体属低—中等风化强度, 古气候为温暖湿润。

4.4 物源区分析

沉积物的物源分析现今已然成为盆地分析的重要组成部分, 是建立源区和沉积区域关系, 重现盆地演化的重要依据(Morton, 1994; Gray, 1997; Xu Yajun, 2007)。众多学者通过对 Inkisi 组砂岩碎屑锆石的研究发现, 前陆盆地的物源在泛非期冈瓦纳大陆拼合过程中尚存在一些差异(图 11)。Affaton 等(2016)根据 Brazzaville 附近 Inkisi 组砂岩的碎屑锆石年龄(图 1), 认为 500~800 Ma 的锆石群(I)来自西部泛非期 Aracuai—西刚果造山带的花岗岩类(Rosa et al., 2007; Pedrosa-Soares et al., 2011;

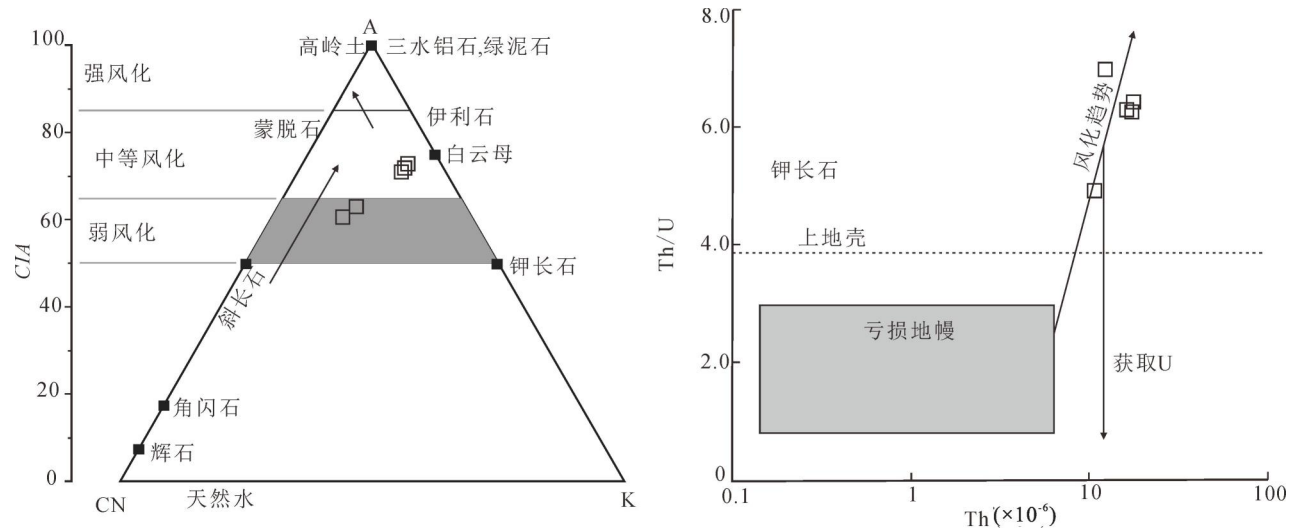


图 10 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩 A—CN—K 图解(据 Nesbitt, 1982) 与 Th/U—Th 图解(据顾雪祥等, 2003)
Fig. 10 A—CN—K diagram (after Nesbitt, 1982) and Th/U—Th diagram (after Gu Xue Xiang et al., 2003&) of the Inkisi Formation sandstone in northwestern Angola

A—Al₂O₃; CN—CaO + Na₂O; K—K₂O

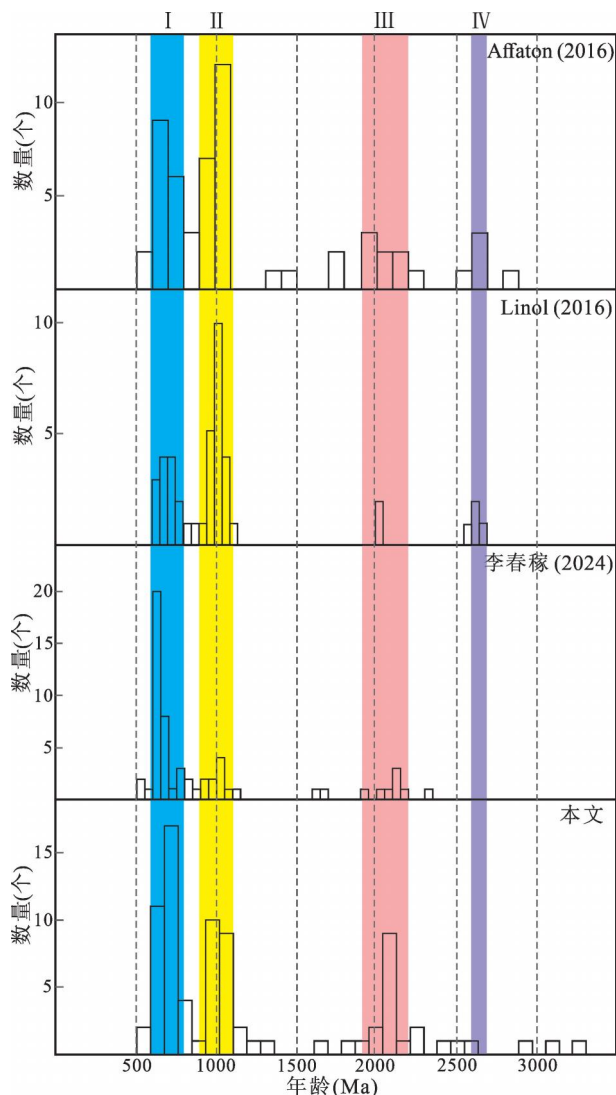


图 11 安哥拉西北部前陆盆地不同区域 Inkisi 组砂岩碎屑锆石年龄分布直方对比图

Fig. 11 Histogram comparison of zircon age distribution of the Inkisi Formation sandstone fragments in different regions of the foreland basin, northwestern Angola

Tupinambá et al., 2012); 900~1200 Ma 的锆石群 (II) 来自 Mayombe 褶皱带内的变质火山岩和花岗岩类; 1800~2300 Ma 的锆石群 (III) 可能来自被改造的 Mayombe 基底或克拉通内部; 2500~3100 Ma 的锆石群 (IV) 可能来自刚果和圣弗朗西斯科拉通的花岗质岩石。Linol 等 (2016) 在 Dekese 钻孔 (Cahen et al., 1959, 1960) 中获得了 Inkisi 组砂岩的四组碎屑锆石年龄, 认为其为一套起源于北非和 Chaillu 地块的冲洪积扇沉积地层 (Alvarez et al., 1995; Timothée et al., 2024)。李春稼 (2024) 获得了 Inkisi 组砂岩的三组碎屑锆石年龄, 并据此认为

西部的西刚果造山带是其物源区, 而南部的 Angola 地盾和东部的 Lufilian 构造带也可能为该组提供了物源。

笔者等在 Inkisi 组砂岩中获得了 3 组碎屑锆石年龄, 显示了多物源的沉积特征, 与区域构造地质事件吻合度较好。砂岩的碎屑锆石年龄亦可分为 4 组, 其中 588~837 Ma 的主峰年龄区间与泛非期西刚果造山运动时限一致, 表明在造山期间, 伴随着俯冲—碰撞作用形成了大规模的岩浆事件, 这些岩浆物质随着构造隆升, 最终被风化剥蚀、搬运到前陆盆地中, 成为了 Inkisi 组砂岩最主要的沉积物源; 笔者在研究区西部的 Canbinda—Lufico 绿岩带 (Perevalov et al., 1992) 流纹岩和碱性侵入岩中获得了一批 900~1000 Ma 的锆石 U-Pb 年龄, 与 Inkisi 组砂岩中 966~1150 Ma 的锆石年龄区间 (峰值 990 Ma±) 一致, 表明 Canbinda—Lufico 绿岩带中的流纹岩和碱性侵入岩是 Inkisi 组砂岩的重要物源区; 1850~2425 Ma 的锆石年龄区间 (峰值约 2106 Ma±), 与研究区西侧 Mayombe 地盾中的 TTG 岩系同位素年龄近一致, 说明研究区西侧古元古代的 TTG 岩系是 Inkisi 组砂岩的次要物源区。与前人不同的是, 笔者等研究还获得了 2 颗大于 3000 Ma 的碎屑锆石, 呈灰黑色次圆—圆状, 内部结构浑浊不清, 具多期变质、长期搬运的特征, 推测来自于研究区周围古老的 Mayombe 地盾和 Angola 地盾的结晶基底

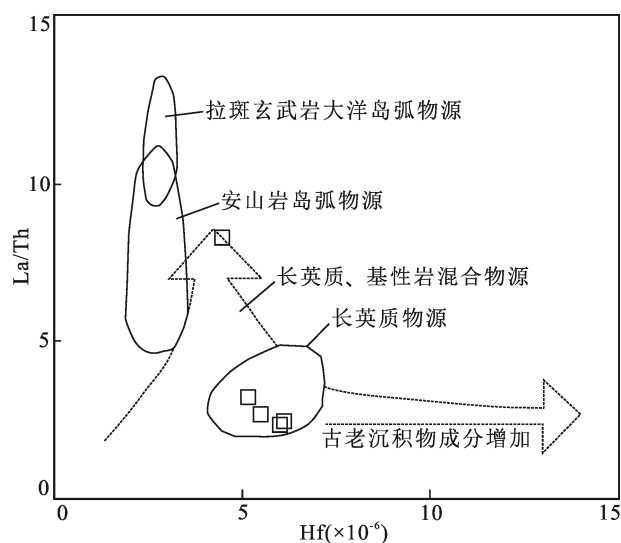


图 12 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩 La/Th—Hf 判别图解 (据 Floyd et al., 1987)

Fig. 12 La/Th—Hf discrimination diagram of the Inkisi Formation sandstones in northwestern Angola (after Floyd et al., 1987)

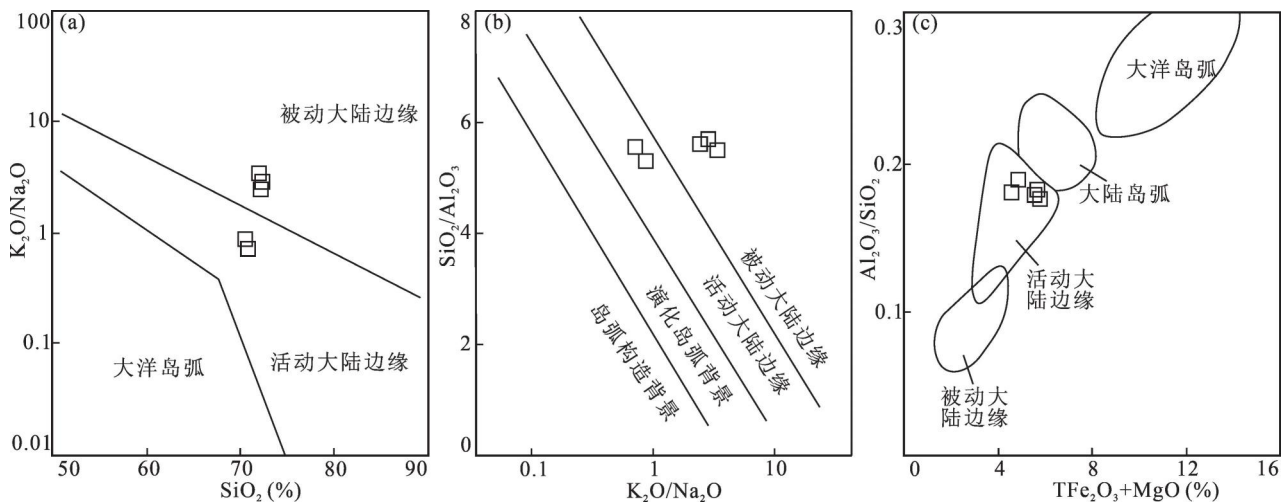


图 13 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩主量元素构造背景判别图解(据毛光周等, 2011)

Fig. 13 Diagram for discriminating the structural background of major elements in the Inkisi Formation sandstone in northwestern Angola(after Mao Guangzhou et al. , 2011&)

(Paula, 2015)之中。

为了进一步揭露物源岩属性,笔者等利用 La/Th—Hf 原岩属性判别图解对 Inkisi 组砂岩的物质来源进行了剖析,图解(图 12)显示,除 1 件样品落在长英质—基性岩混合物源区域外,其余样品均落在上地壳长英质物源区域,与上述结论基本一致。

综上所述,Inkisi 组砂岩的源岩以上地壳源区的长英质(花岗岩类或各类沉积岩)岩石为主。其中,西刚果造山带是 Inkisi 组砂岩最主要的沉积物源,Canbinda—Lufico 绿岩带中的流纹岩和碱性侵入岩是 Inkisi 组砂岩的重要物源区,古元古代 Mayombe

地盾中的 TTG 岩系是 Inkisi 组砂岩的次要物源区,还有少量物源来自西部的 Mayombe 地盾和南部的 Angola 地盾。

4.5 源区构造背景分析

碎屑岩的地球化学特征可以用来反映原岩的物质组成和源区的构造背景,而不同构造背景下的碎屑岩,其主量元素的差异明显,从大洋岛弧到被动大陆边缘背景中 TFe_2O_3+MgO 、 TiO_2 、 Al_2O_3 和 SiO_2 的比值减小,而 K_2O/Na_2O 与 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ 的值逐渐变大(McLennan et al. , 1993)。笔者等通过与不同构造背景下的砂岩地球化学特征对比,可以发现 Inkisi 组砂岩的主量元素以及微量元素的各项参数与活动

表 5 不同构造环境砂岩地球化学参数对比表

Table 5 Geochemical parameter comparison of the sandstone from various tectonic setting

参数 ($\times 10^{-6}$)	大洋岛弧	大陆岛弧	活动大陆边缘	被动大陆边缘	上地壳	Inkisi 组
SiO_2	58.83	70.69	73.86	81.95	66	71.62
Al_2O_3	17.11	14.04	12.89	8.41	15.2	12.96
TiO_2	1.06	0.64	0.46	0.49	0.5	0.64
Al_2O_3/SiO_2	0.29	0.2	0.18	0.1	7.15	0.18
TFe_2O_3+MgO	11.73	6.79	4.63	2.89	6.7	5.28
K_2O/Na_2O	0.39	0.61	0.99	1.6	0.23	2.05
$Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$	1.72	2.42	2.56	4.15	0.87	6.73
δEu	1.04	0.8	0.6	0.55	0.65	0.73
Th/U	2.1	4.6	4.8	5.6	3.8	6.18
La/Sc	0.55	1.82	4.55	6.25	2.73	7.64
Th/Sc	0.15	0.85	2.59	3.06	0.97	2.03
Rb/Sr	0.05	0.65	0.89	1.19	0.32	1.67
Ba/Sr	0.95	3.55	3.8	4.7	1.57	9.4

注: 构造环境参数数据 Bhatia, 1983 和 Bhatia et al. , 1986; 上地壳参数数据 Taylor, 1985。

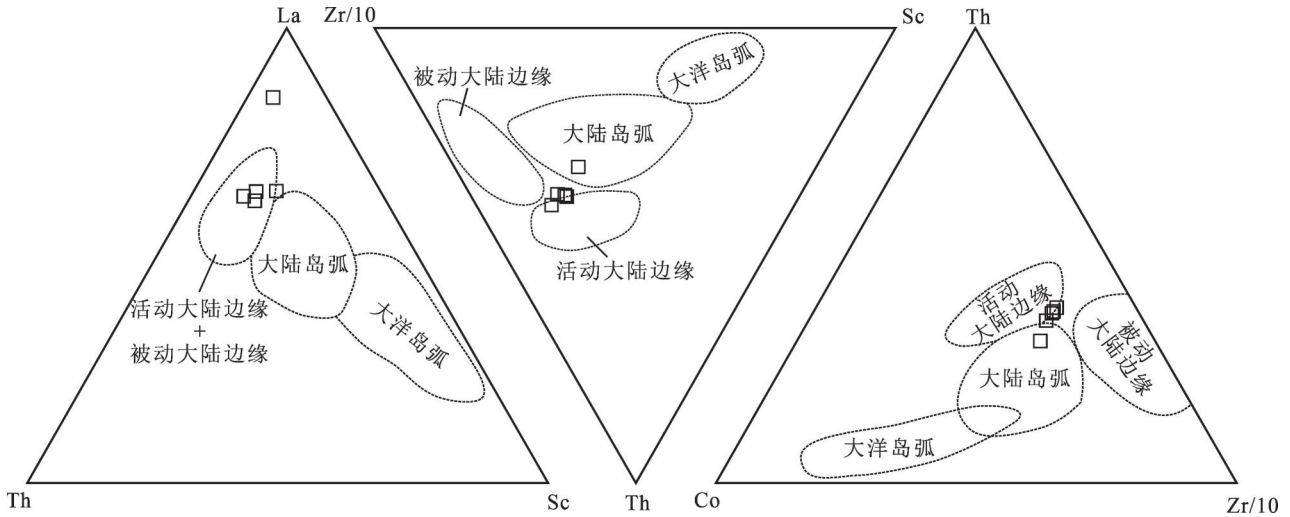


图 14 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩 La—Th—Sc、Th—Sc—Zr/10 和 Th—Co—Zr/10 构造背景判别图解 (据 Bhatia 等, 1986)

Fig. 14 La—Th—Sc, Th—Sc—Zr/10 and Th—Co—Zr/10 diagrams for discriminating the tectonic background of the Inkisi Formation sandstones in northwestern Angola (after Bhatia et al., 1986)

大陆边缘和大陆岛弧的砂岩特征相似(表 5)。

沉积岩中化学元素的迁移、溶解和交代作用对其化学成分影响较小,能够很好地反映出物源区的特征,对研究物源区和判别构造背景等具有重要指示作用(Bhatia, 1986; Rollonson, 1993; Roser et al., 1996)。在 SiO_2-K_2O/Na_2O 和 $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ 图解(图 13a、b)中,样品点均落入活动大陆边缘和被动大陆边缘的区域中;在 $(TFe_2O_3 + MgO)-Al_2O_3/SiO_2$ 图解(图 13c)中,所有砂岩样品点均落在活动大陆边缘区域内。上述图解表明 Inkisi 组砂岩的物源以活动大陆边缘为主,被动大陆边缘次之,该结论与李春稼(2024)认识基本一致。

Taylor 等(1985)认为稀土元素和微量元素在水中比较稳定,一般很难溶解,在搬运和沉积过程中具

有非迁移性,能够很好地反映源区的地球化学特征和大地构造背景。Bhatia 等(1986)根据砂岩的稀土和微量元素提出了可以判别源区大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘的构造背景图解。据构造背景判别图解(图 14)显示,Inkisi 组砂岩的大部分样品落在活动大陆边缘区域内,少量落在大陆岛弧区域,进一步表明该套砂岩具有多物源的特点,也暗示了大陆岛弧也为 Inkisi 组砂岩提供了物质来源。

为了更明确地反映 Inkisi 组砂岩源区的构造背景,笔者等将砂岩的碎屑组合及其特征参数与 Valloni(1984)总结的不同物源区砂的参数进行了对比,由表 6 可以看出,Inkisi 组砂岩的物源区参数与褶皱冲断前陆非常相近。

表 6 基本物源区碎屑组合及特征参数(据 Valloni, 1984)

Table 6 The characteristics of detrital modes from sandstones of different tectonic settings (after Valloni, 1984)

物源区类型	基本碎屑组合	特征参数			特征颗粒
		C/Q	P/F	Lv/L	
大陆基底	Q—F	0.05	0.25		以石英为主的碎屑
增生基底	Q—F	0.10	0.35	0.15	具石英质、沉积变质、沉积岩屑,有碳酸盐颗粒
褶皱冲断前陆	Q—L	0.15	0.40	0.05	沉积岩屑占优势
板块缝合高地	F—L	0.20	0.60	0.45	
大陆—岛弧	Lv	0.25	0.80	0.85	火山—变质火山岩屑占优势,伴有沉积—变质陈及岩屑
大洋—岛弧	Lv	0.30	0.85	0.85	火山岩屑、沉积岩屑发育
群岛	贫 Q 富 L		0.90	0.95	常见火山玻璃,含拉斑玄武岩和碱性玄武岩残余颗粒
安哥拉西北部地区(本文)	Q—L—F	0.17	0.59	0.09	石英碎屑和沉积岩屑占优势

注: C/Q—(多晶石英+燧石)/石英总量;P/F—斜长石/长石总量;Lv/L—火山岩屑/岩屑总量。

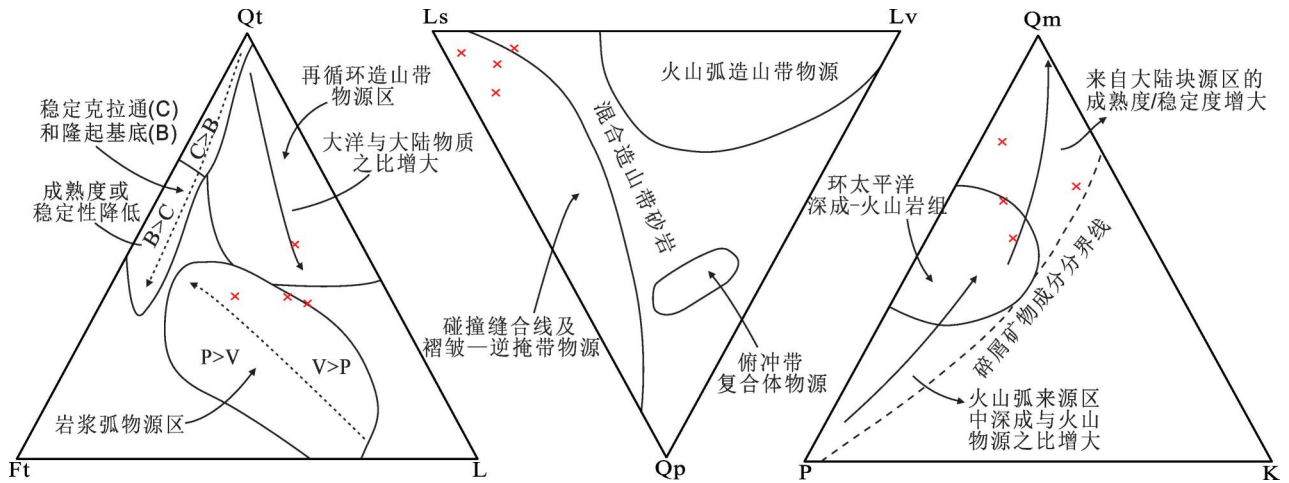


图 15 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩 Qt—Ft—L、Qp—Lv—Ls 和 Qm—P—K 构造环境判别图解 (据 Dickinson, 1983)

Fig. 15 Qt—Ft—L, Qp—Lv—Ls and Qm—P—K diagrams identifying the tectonic settings of the Inkisi Formation sandstones in northwestern Angola (after Dickinson, 1983)

此外,笔者等在碎屑组分统计的基础上,分别绘制了 Qt—Ft—L、Qp—Lv—Ls 以及 Qm—P—K 构造环境判别图解(图 15)。在 Qt—Ft—L 图解中大部分砂岩样品落在了岩浆弧物源区,另有 1 件样品落入了再循环造山带物源区;在 Qp—Lv—Ls 图解中样品全部落入了碰撞缝合线及褶皱—逆掩带物源区域及其周围;在 Qm—P—K 图解中,样品分别落在了环太平洋深成—火山岩和大陆块物源区中。

众多学者 (Pedrosa-Soares, 2000; Seer et al., 2001; Valeriano et al., 2004; Alkmim, 2006) 认为,在成冰纪末期(约 625 Ma),受泛非期造山运动的影响,刚果克拉通西缘的马卡乌巴斯盆地开始闭合,盆地内的洋壳部分开始向刚果克拉通俯冲,形成了与弧有关的花岗岩序列,该过程至少持续到了 585 Ma 左右;进入碰撞造山阶段,随着地壳的持续缩短,构造变质作用达到高峰,在造山带西侧形成了一套埃迪卡拉纪后期的同构造花岗岩套 (Pedrosa-Soares, 2000; Pedrosa-Soares et al., 2001; Silva et al., 2005),受碰撞造山的褶皱隆升作用影响,在西刚果造山带的东侧形成了前陆盆地。笔者等研究区位于前陆盆地的西南缘,Inkisi 组作为前陆盆地的最后沉积盖层,它的碎屑物源相对传输距离较短,碎屑物质经受风化和搬运作用的影响较小,能够更准确、可靠地反映它们形成的构造背景。笔者根据本文工作获得的地球化学特征和碎屑组分分析结果,并结合区域构造背景认为,Inkisi 组砂岩物源区的大地构造背景主要以活动大陆边缘背景下的陆缘弧为主,被动

大陆边缘次之。

4.6 Inkisi 组砂岩形成的构造属性及地质意义

Alvarez 等 (1995) 认为 Inkisi 组形成于泛非期后 NE—SW 向的伸展盆地构造背景, Affaton 等 (2016) 则认为其形成于泛非期碰撞背景下的前陆盆地。研究区内的 Inkisi 组受造山运动的影响,与下伏西刚果体系的其余地层和上覆晚古生代地层均为不整合接触 (Jean-Didier Sounga et al., 2012), 所以从空间分布上讲,沉积盆地是以 Inkisi 组地层为顶。区内的 Inkisi 组地层走向为 NW—SE 向,与泛非期西刚果造山带的走向一致,地层产状近水平,为一套冲洪积扇成因的“红层”,底部以粗砂岩、砾岩为主,上部以厚层状砂岩为主,夹透镜状泥岩 (Cahen et al., 1959; Cahen et al., 1960; Philippe Alvarez et al., 1995; Alkmim et al., 2006; Tack et al., 2008; Linol et al., 2015; Affaton et al., 2016; Delvaux et al., 2021), 代表了近源快速沉积的过程,因此,其碎屑锆石的年龄分布特征更能够反映沉积盆地的构造属性。笔者根据碎屑锆石年龄与地层沉积年龄差值的累计百分比判别图解 (Cawood et al., 2012) 可知 (图 16), Inkisi 组砂岩形成于碰撞环境的沉积盆地,进而说明埃迪卡拉纪—早寒武世时期的前陆盆地仍处于冈瓦纳大陆碰撞—拼合的挤压构造背景,也暗示了该时期安哥拉西北地区的西刚果碰撞造山运动仍在继续。

5 结论

(1) 笔者等在安哥拉西北部西刚果造山带东缘

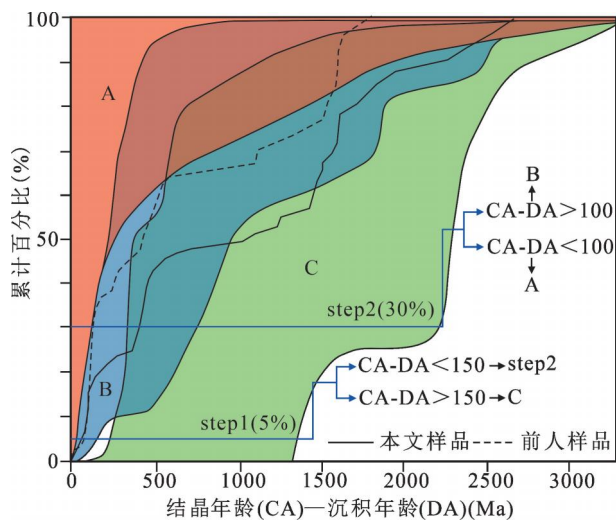


图 16 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩碎屑锆石的盆地构造属性判别图解(据 Cawood et al., 2012)

Fig. 16 Diagram of basin tectonic attribute discrimination for sandstone detrital zircons in the Inkisi Formation, northwestern Angola (after Cawood et al., 2012)

A—汇聚环境; B—碰撞环境; C—伸展环境
A—convergent setting; B—collisional setting;
C—extensional setting

Inkisi 组砂岩中获得最小碎屑锆石年龄为 588.0 ± 3.0 Ma, 表明在新元古代末期前陆盆地仍在接受沉积。考虑到前人已获得最小碎屑锆石年龄为 531 ± 9 Ma, 笔者等认为将安哥拉西北部 Inkisi 组的沉积时限置于埃迪卡拉纪—早寒武世较为合理。

(2) 安哥拉西北部 Inkisi 组砂岩形成于河流沉积环境, 其源岩经历了低中等强度的风化, 古气候为温暖潮湿的条件。

(3) 年代学和岩石地球化学特征表明, 西刚果造山带是 Inkisi 组砂岩最主要的物源为 Canbinda—Lufico 绿岩带中的流纹岩和碱性侵入岩, 次要物源区为 Mayombe 地盾中的 TTG 岩系。

(4) 西刚果造山带东缘 Inkisi 组砂岩形成于碰撞环境的沉积盆地, 暗示在埃迪卡拉纪—早寒武世时期西刚果碰撞造山运动仍在继续。

致谢: 感谢审稿专家们宝贵的修改意见! 实验测试工作得到了河北省区域地质调查院实验室、核工业北京地质研究院分析测试研究中心的大力支持, 在此一并表示感谢!

参 考 文 献 / References

(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)

- 陈建强, 周洪瑞, 王训练. 2015. 沉积学及古地理学教程. 第二版. 北京: 地质出版社: 74~82.
- 陈骏, 安芷生, 刘连文, 季峻峰, 杨杰东, 陈旸. 2001. 最近 2.5Ma 以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化. 中国科学(D 辑), 31(2): 136~145.
- 陈梦雅, 聂逢君. 2023. 开鲁盆地宝龙山地区姚家组物源及铀源分析: 来自地球化学特征及碎屑锆石 U-Pb 年代学证据. 矿物岩石, 43(4): 33~48.
- 陈伟雄, 徐琼, 童喜润, 顾涛, 散飞雪, 邱啸飞. 2023. 华夏陆块早寒武世沉积地层年代学与地球化学组成: 对源区和构造背景的指示. 地质学报, 97(7): 2157~2175.
- 段明新, 周传芳, 杨华本, 蔡艳龙, 魏小勇, 徐建鑫, 赵佳琪. 2021. 漠河盆地西部二十二站组碎屑锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其物源意义. 地质学报, 95(11): 3317~3334.
- 方爱民, 李继亮, 侯泉林, 刘小汉, 肖文交, 俞良军, 周辉. 2003. 新疆西昆仑库车地复理石源区性质及构造背景分析. 岩石学报, 19(1): 153~166.
- 冯连君, 储雪蕾, 张同钢, 黄晶. 2006. 莲沱砂岩—南华大冰期前气候转冷的沉积记录. 岩石学报, 22(9): 2387~2393.
- 顾雪祥, 刘建明, Oskar Schulz, Franz Vavtar, 唐菊兴, 王乾. 2003. 扬子地块南缘元古代浊积岩源区风化特征和源岩性质的沉积地球化学记录. 成都理工大学学报(自然科学版), 30(3): 221~235.
- 和政军. 1989. 辽宁锦西地区中元古代—中生代砂岩构造背景的探讨. 沉积学报, 7(2): 21~28.
- 姜大伟. 2018. 龙门山南段及其前陆区晚第四纪构造变形的河流地貌研究. 国际地震动态, 5: 41~43.
- 李春稼, 张洪瑞, 罗迪柯, 靳立杰, 高继雷, 王子圣, 梁云汉, 贾鹏飞, 刘伟, 张攀. 2024. 安哥拉东北部地区 Inkisi 组碎屑锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义. 地质论评, 3(70): 1031~1046.
- 李明龙, 陈林, 田景春, 郑德顺, 许克元, 方喜林, 曹文胜, 赵军, 冉中夏. 2019. 鄂西走马地区南华纪古城期—南沱期古气候和古氧相演化: 来自细碎屑岩元素地球化学的证据. 地质学报, 93(9): 2158~2170.
- 李亚萍, 李锦轶, 孙桂华, 朱志新, 杨之青. 2007. 准噶尔盆地基底的探讨: 来自原泥盆纪卡拉麦里组砂岩碎屑锆石的证据. 岩石学报, 23(7): 1577~1590.
- 李忠, 王道轩, 林伟, 王清晨. 2004. 库车坳陷中—新生界碎屑组分对物源类型及其构造属性的指示. 岩石学报, 20(3): 655~666.
- 马圣杰, 裴先治, 裴磊, 刘成军, 李佐臣, 李瑞保, 赵杰, 王潇, 王茂, 林浩. 2024. 陕南镇巴小洋坝地区南华系物源分析: 来自碎屑锆石 U-Pb 年龄、碎屑成分分析及地球化学的证据. 矿产勘查, 15(2): 165~189.
- 毛光周, 刘池洋. 2011. 地球化学在物源及沉积背景分析中的应用. 地球科学与环境学报, 33(4): 337~348.
- 万渝生, 张巧大, 宋天锐. 2003. 北京十三陵长城系常沟组碎屑锆石 SHRIMP 年龄: 华北克拉通盖层物源区及最大沉积年龄的限定. 科学通报, 48(18): 1970~1975.
- 张金龙, 陈超, 潘志龙, 张桂凤, 张欢, 李庆喆. 2017. 北内蒙古北山西林陶勒二断井组的厘定与沉积环境分析. 地质调查与研究, 40(4): 274~280.
- 朱筱敏. 2008. 沉积岩石学(第四版). 北京: 石油工业出版社: 64~79.
- Affaton P, Kalsbeek F, Boudzoumou F. 2016. The Pan-African West Congo belt in the Republic of Congo (Congo Brazzaville): Stratigraphy of the Mayombe and West Congo Supergroups studied by

- detrital zircon geochronology. *Precambrian Research*, 272: 185~202.
- Alkmim F F, Marshak S, Pedrosa-Soares A C. 2006. Kinematic evolution of the Aracuai—West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research*, 149(1~2): 43~64.
- Allègre C J, Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 1~25.
- Alvarez P, Maurin J C. 1991. Evolution sédimentaire et tectonique du bassin protérozoïque supérieur de Comba (Congo). *Stratigraphie séquentielle du Supergroupe Ouest-Congolien et modèle d'amortissement sur décrochement dans le contexte de la tectogenèse panafricaine*. *Precambrian Research*, 78(1~2): 1~30.
- Alvarez P, Maurin J C, Vicat J P. 1995. La formation de l'inkisi (Supergroupe ouest-congolien) en Afrique centrale (Congo et Bas-Zaïre): un delta d'âge Paléozoïque comblant un bassin en extension. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série II*, 321(11): 1053~1060.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of greywacks and tectonic setting discrimination of sedimentary basin. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181~193.
- Boudzoumou F. 1986. La chaîne ouest-congolienne et son avant-pays au Congo; relations avec le Mayombien; sédimentologie des séquences d'âge protérozoïque supérieur. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 160(5): 827~839.
- Bruguier O, Lancelot JR, Malavieille J. 1997. U-Pb dating on single detrital zircon grains from the Triassic Songpan—Ganze flysch (Central China): provenance and tectonic correlations. *Earth and Planetary Science Letters*, 152: 217~231.
- Cahen L. 1954. *Géologie du Congo Belge*. Liège: Impr. H. Vaillant—Carmanne; 1~577.
- Cahen L, Ferrand J J, Haarsma M J F, Lepersonne J, Verbeek T H. 1959. Description du sondage de Samba. *Sciences Géologiques*, 29(8).
- Cahen L, Ferrand J J, Haarsma M J F, Lepersonne J, Verbeek T H. 1960. Description du sondage de Dekese. *Annales du Musée Royal du Congo Belge, Tervuren (Belgique)*, 34: 1~115.
- Cahen L, Snelling N J, Delhal J, Vail J R. 1984. The geochronology and evolution of Africa. Oxford: Clarendon Press; 1~512.
- Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. 2012. Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology*, 40(10): 875~878.
- Chen Jianqiang, Zhou Hongrui, Wang Xunlian. 2015#. *Textbook of Sedimentology and Paleogeography (2nd ed.)*. Beijing: Geological Publishing House; 74~82.
- Chen Jun, An Zhisheng, Liu, Lianwen, Ji Junfeng, Yang Jiedong, Chen Yang. 2001#. Changes in the chemical composition of eolian dust from the Loess Plateau and chemical weathering in the Asian inland over the last 2.5 Ma. *Science in China (Series D)*, 31(2): 136~145.
- Chen Mengya, Nie Fengjun. 2023#. Provenance and uranium source analysis of the Yaojia Formation in the Baolongshan area, Kailu Basin; Evidence from geochemical characteristics and detrital zircon U-Pb geochronology. *Mineralogy and Petrology*, 43(4): 33~48.
- Chen Weixiong, Xu Qiong, Tong Xirun, Gu Tao, San Feixue, Qiu Xiaofei. 2023#. Chronology and geochemical composition of Early Cambrian sedimentary strata in the Cathaysia Block; Implications for provenance and tectonic setting. *Acta Geologica Sinica*, 97(7): 2157~2175.
- Cosson J. 1955. Notice explicative sur les feuilles Pointe—Noire et Brazzaville. Brazzaville; Bull. Dir. Min. Géol., A. E. F.: 1~56.
- Dadet P. 1969. Notice explicative de la carte géologique du Congo Brazzaville au 1: 500 000. In: G. de Bussac, Clermont-Ferrand eds. *Mémoire BRGM*: 1~103.
- Deffontaines B, Chorowicz J. 1991. Principles of drainage basin analysis from multisource data: application to the structural analysis of the Zaïre Basin. *Tectonophysics*, 194: 237~263.
- Delpomdor F, Eyles N, Tack L, Préat A. 2016. Pre- and post-Marinoan carbonate facies of the Democratic Republic of the Congo; Glacially- or tectonically-influenced deep-water sediments? . *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 457: 144~157.
- Delpomdor F, Kant F, Préat A. 2014. Neoproterozoic uppermost Haut—Shiloango Subgroup (West Congolian Supergroup, Democratic Republic of Congo): misinterpreted stromatolites and implications for sea-level fluctuations before the onset of the Marinoan glaciation. *Journal of African Earth Sciences*, 90: 49~63.
- Delvaux D, Maddaloni F, Tesauro M, Braitenberg C. 2021. The Congo Basin; stratigraphy and subsurface structure defined by regional seismic reflection, refraction and well data. *Global and Planetary Change*, 198(2): 103~407.
- Dickinson W R. 1985. Interpreting Provenance relations from detrital modes of sandstones. Netherlands: Dordrecht Reidel Publishing: 333~361.
- Dickinson W R, Beard L S, Brakenridge G R. 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geological Society of America Bulletin*, 94(2): 222~235.
- Dickinson W R, Suzeck C. 1979. Plate tectonics and sandstone compositions. *AAPG Bulletin*, 63(12): 2164~2182.
- Dobretsov N L, Berzin N A, Buslov M M. 1995. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean. *International Geology Review*, 37(4): 335~360.
- Duan Mingxin, Zhou Chuanfang, Yang Huaben, Cai Yanlong, Wei Xiaoyong, Xu Jianxin, Zhao Jiaqi. 2021#. Detrital zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Ershierzhan Formation in the western Mohe Basin; Implications for provenance. *Acta Geologica Sinica*, 95(11): 3317~3334.
- Fang Aimin, Li Jiliang, Hou Quanlin, Liu Xiaohan, Xiao Wenjiao, Yu Liangjun, Zhou Hui. 2003#. Tectonic setting and provenance of the Kudi flysch in west Kunlun mountains, Xinjiang province. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 153~166.
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleo weathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10): 921~924.
- Feng Lianjun, Chu Xuelei, Zhang Tonggang, Huang Jing. 2006#. Sedimentary records of climate cooling before the Nanhua Ice Age in Liantuo Sandstone. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2387~2393.
- Fernandez-Alonso M, Cutten H, De Waele B, Tack L, Tahon A, Baudet D, Barritt S. 2012. The Mesoproterozoic Karagwe—Ankole Belt (formerly the NE Kibara Belt): the result of prolonged extensional intracratonic basin development punctuated by two short-lived far-field compressional events. *Precambrian Research*, 223~224: 185~198.
- Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall; framework modeand geochemical evidence from turbidities and stones. *Journal of the Geological Society of London*, 144(4): 531~542.
- Friedman G M. 1967. Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands. *Journal of Sedimentary Petrology*, 37(2): 327~354.

- Frimmel H E, Tack L, Basei M S, Nutman A P, Boven A. 2006. Provenance and chemostratigraphy of the Neoproterozoic West Congolian Group in the Democratic Republic of Congo. *Journal of African Earth Sciences*, 46(3): 221~239.
- Gioan P, Vicat J P, Maurin J C. 1989. Evolution géodynamique du bassin sud-congolais (Niari) au cours du Protérozoïque supérieur. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série II*, 305(16): 1273~1278.
- Godivier R, Legeley A, Albouy Y. 1986. Levés gravimétriques de reconnaissance, Congo—Gabon. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 8(6): 1~11.
- Gray M B, Peter K Z. 1997. Comparison of clastic wedge provenance in the Appalachian foreland using U-Pb ages of detrital zircons. *Tectonic*, 16(1): 151~160.
- Gu Xuexiang, Liu Jianming, Oskar Schulz, Franz Vavtar, Tang Juxing, Wang Qian. 2003&. Sedimentary geochemical records for the source area weathering and nature of source rocks of the proterozoic turbidites from the southern margin of the Yangtze Block. *Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition)*, 30(3): 221~235.
- Harnois L. 1988. The CIW index: A new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology*, 55(3~4): 319~322.
- He Zhengjun. 1989&. Approach of tectonic background for mid Proterozoic Mesozoic sandstones in Jinxi, Liaoning. *Acta Sedimentologica Sinica*, 7(2): 21~28.
- Jiang Dawei. 2018&. Study on River Landforms of Late Quaternary Structural Deformation in the Southern Section of Longmen Mountain and Its Foreland Region. *Recent Developments in World Seismology*, 5: 41~43.
- Jones B, Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 111(1~4): 111~129.
- Linol B, De Wit M J, Barton E, De Wit M M J C, Guillocheau F. 2016. U-Pb detrital zircon dates and source provenance analysis of Phanerozoic sequences of the Congo Basin, central Gondwana. *Gondwana Research*, 29(1): 208~219.
- Linol B, De Wit, M J, Barton E, Guillocheau F, De Wit M C J, Colin J P. 2015. Paleogeography and tectono—stratigraphy of Carboniferous—Permian and triassic 'karoo-like' sequences of the Congo basin, *Geology and Resource Potential of the Congo Basin*. Springer, Berlin, Heidelberg, 111~134.
- Li Chunjia, Zhang Hongrui, Luo Dike, Jin Lijie, Gao Jilei, Wang Zisheng, Liang Yunhan, Jia Pengfei, Liu Wei, Zhang Pan. 2024&. U-Pb dating of detrital zircons and geochemical characteristics of Inkisi Formation in the northeastern Angola area. *Geological Review*, 70(3): 1031~1046.
- Li Minglong, Chen Lin, Tian Jingchun, Zheng Deshun, Xu Keyuan, Fang Xilin, Cao Wensheng, Zhao Jun, Ran Zhongxia. 2019&. Paleoclimate and paleo-oxygenation evolution from the Nanhuan Gucheng to Nantuo stages in the Zouma area, western Hubei: Evidence from elemental geochemistry of fine-grained clastic rocks. *Acta Geologica Sinica*, 93(9): 2158~2170.
- Li Yaping, Li Jinyi, Sun Guihua, Zhu Zhixin, Yang Zhiqing. 2007&. Basement of Junggar basin: evidence from detrital zircons in sandstone of previous Devonian Kalamaili formation. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1577~1590.
- Li Zhong, Wang Daoxuan, Lin Wei, Wang Qingchen. 2004&. Provenance types and tectonic attributes indicated by detrital components in the Mesozoic—Cenozoic strata of the Kuqa Depression. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 655~666.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3.00; A Geochronological Tool kit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, California.
- Ma Shengjie, Pei Xianzhi, Pei Lei, Liu Chengjun, Li Zuochen, Li Ruibao, Zhao Jie, Wang Xiao, Lin Hao. 2024&. Source analysis of Nanhua Formation in Xiaoyangba area, Zhenba, southern Shaanxi: Evidence from detrital zircon U-Pb age, detrital composition analysis, and geochemistry. *Mineral Exploration*, 15(2): 165~189.
- Mao Guangzhou, Liu Chiyang. 2011&. Application of geochemistry in provenance and depositional setting analysis. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(4): 337~348.
- McLennan S M, Taylor S R. 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends. *Journal of Geology*, 99: 1~21.
- McLennan S M. 1993. Weathering and Global Denudation. *Journal of Geology*, 101(2): 295~303.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel M J. 1993. Geochemical Approaches to Sedimentation, Provenance and Tectonics, *Jonhanson M J. Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*, Boulder. Geological Society of America, 21~40.
- Monié P, Bosch D, Bruguier O, Vauchez A, Rolland Y, Nsungani P, Neto A B. 2012. The Late Neoproterozoic—Early Palaeozoic evolution of the West Congo Belt of NW Angola: geochronological (U-Pb and Ar-Ar) and petrostructural constraints. *Terra Nova*, 24(3): 238~247.
- Morton A C, Hallsworth C R. 1994. Identifying provenance specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 90(3): 241~256.
- Mossakovsky AA, Ruzhentsev SV, Samygin SG, Kheraskova TN. 1993. Central Asian fold belt: Geodynamic evolution and formation history. *Geotectonics*, 27(6): 445~474.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715~717.
- Oszycko N, Salata D. 2005. Provenance analyses of the Late Cretaceous—Paleocene deposits of the Magura Basin (Polish Western Carpathians)—Evidence from a study of the heavy minerals. *Acta Geologica Polonica*, 55: 237~267.
- Parsons I, Thomposn P, Lee MR, Cayzer N. 2005. Alkali feldspar microtextures as provenance indicators in silici clastic rocks and their role in feldspar dissolution during transport and diagenesis. *Journal of Sedimentary Research*, 75: 921~942.
- Patchelt P J, Roth M A, Canale B S, de Freitas T A, Harrison J C, Embr A F, Ross G M. 1999. Nd isotopes, geochemistry, and constraints on sources of sediments in the Franklinian mobile belt, Arctic Canada. *Geological Society of America Bulletin*, 111: 578~589.
- Paula R T, Rocha G C. 2015. Geologia e evolucao tectônica de Angola, Africa. *Revista de Geografia-PPGEO-UFJF*, 5(2).
- Pedrosa-Soares A C, Wiedemann-Leonardos C M. 2000. Evolution of the Araçuaí belt and its connection to the Ribeira Belt, Eastern Brazil. In: Cordani U G, Milani E J, Thomaz Filho A, Campos D A, eds. *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro: International Geological Congress, 265~285.
- Pedrosa-Soares A C, Noce C M, Wiedemann C M, Pinto C P. 2001. The Aracuaí—West Congo orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly. *Precambrian Research*, 110(1~4): 307~323.
- Pedrosa-Soares A C, De Campos C P, Noce C, Silva L C, Novo T,

- Roncato J, Medeiros S, Castañeda C, Queiroga G, Dantas E, Dussin I, Alkmim F. 2011. Late Neoproterozoic—Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí orogen (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources. In: Sial A N, Bettencourt J S, De Campos C P, Ferreira V P eds. *Granite-Related Ore deposits*. London: Geological Society, Special Publication, 25~51.
- Perevalov O V, Voinovsky A S, Tselikovskiy A F, Agueev Y L, Polskoi F R, Khódirev V L, Kondrátiev A L. 1992. Geology of Angola explanatory news of geological chart scale 1 : 1,000,000.
- Poidevin J L. 1985. Le Protérozoïque supérieur de la République centrafricaine. *Annales du Musée Royal de l'Afrique Centrale, Sciences Géologiques*, 87:75.
- Rollinson H R. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. London: Longman Scientific and Technical Press.
- Roser B P, Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone—mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *The Journal of Geology*, 94(5): 635~650.
- Roser B P, Cooper R A, Nathan S, Tulloch A J. 1996. Reconnaissance sandstone geochemistry, provenance, and tectonic setting of the Lower Paleozoic terranes of the West Coast and Nelson, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 39(1): 1~16.
- Rosa M L S, Conceição H, Macambira M J, Galarza M A, Cunha M P, Menezes R C L, Marinho M M, Cruz-Filho B E, Rios D C. 2007. Neoproterozoic orogenic magmatism in the Southern Bahia Alkaline Province of NE Brazil: U-Pb and Pb-Pb ages of the blue sodalite syenites. *Lithos*, 97(1~2): 88~97.
- Schroeder J W. 1981. Oil search in the heart of Africa: a working hypothesis. *Bulletin Vereinigung von Petroleum—Geologen und-Ingenieuren*, 47: 31~37.
- Schermerhorn L J G. 1961. Sedimentary cycles in the West Congo, Geosyncline of Northeast Angola. *Boletim Serviços geologia minas Angola*, 3: 47~62.
- Seer H J, Brod J A, Fuck R A, Pimentel M M, Boaventura G R, Dardenne M A. 2001. Grupo Araxú em sua área tipo: Um fragmento de crosta oceânica neoproterozóica na Faixa de Dobramento Brasília. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(4): 396~924.
- Silva L C, McNaughton N J, Armstrong R, Hartmann L A, Fletcher I R. 2005. The Neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections: A zircon-based U-Pb geochronologic subdivision for the Brasiliano/Pan-African system of orogens. *Precambrian Research*, 136: 203~240.
- Sounga J D, Affaton P, Noack Y, Mialoundama F. 2012. Albitization in the Inkisi sandstones, Republic of Congo: Characterization and interpretation. *Global Journal of Geological Sciences*, 10(2): 175~186.
- Straathof G B. 2011. *Neoproterozoic Low Latitude Claciations: An African Perspective*. Edinburgh: Ph. D. Thesis University of Edinburgh, 1~285.
- Stanton W I, Schermerhorn L J G, Korpershoek H R. 1963. The West Congo System. *Bol. Serv. Géol. Min., Angola*, 8: 69~78.
- Tack L, Delvaux D, Kadima E, Delpomdor F, Tahon A, Dumont P, Hanon M, Fernandez-Alonso M, Baudet D, Dewaele S, 2008. The 1.000m thick Redbeds sequence of the Congo River Basin (CRB): a generally overlooked testimony in Central Africa of post-Gondwana amalgamation (550 Ma) and pre-Karoo break-up (320 Ma). In: 22nd Colloquium African Geology (CAG22): 86~88.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell Press, 1~312.
- Thomas P B, William A T, Scott D S, George E G. 2005. Detrital zircon evidence of Laurentian crustal dominance in the lower Pennsylvanian deposits of the Alleghanian clastic wedge in eastern North America. *Sedimentary Geology*, 182: 59~86.
- Timothée M, Florent B, Dieu-Veill N H M, Damien D. 2024. The Cambro—Ordovician Gondwana alluvial megafan in Central Africa: Insights from the Paleozoic sandstones of the Inkisi group, Congo Republic and Democratic Republic of the Congo. *Journal of African Earth Sciences*, 209: 105~109.
- Trompette R, Boudzoumou F. 1988. Palaeogeographic significance of stromatolitic buildups on late Proterozoic platforms: the example of the west congo basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 66(1~2): 101~122.
- Tupinambá M, Heilbron M, Valeriano C M, Porto Jr R, Dios F B, Machado N, Almeida J C H. 2012. Juvenile contribution to the Rio Negro Magmatic Arc (Ribeira Belt, Brazil): implications for Western Gondwana amalgamation. *Gondwana Research*, 21(2~3): 422~438.
- Valeriano C M, Machado N, Simonetti A, Valladares C S, Seer H J, Simões L S A. 2004. U-Pb geochronology of the southern Brasília belt (SE-Brazil): sedimentary provenance. Neoproterozoic orogeny and assembly of West-Gondwana. *Precambrian Research*, 130(1~4): 27~55.
- Valloni R, Mezzadri G. 1984. Compositional suites of terrigenous deep-sea sands of the present continental margins. *Sedimentology*, 31(3): 353~364.
- Vicat J P, Gioan P, Albouy Y, Cornacchia M, Giorgi L, Blondin P. 1989. Mise en évidence, sur la bordure ouest du craton du Congo, de fossés d'effondrement d'âge protérozoïque supérieur, masqués par les formations phanérozoïques de la cuvette du Zaïre. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série IIa—Sciences de la Terre et des Planètes*, 309: 1207~1213.
- Wan Yusheng, Zhang Qiaoda, Song tianrui. 2003. SHRIMP ages of detrital zircons from the Changgou Formation of the Great Wall System in the Thirteen Tombs of Beijing: limitations on the source area and maximum sedimentary age of the North China Craton cap rocks. *Science Bulletin*, 48(18): 1970~1975.
- Wei Hengye. 2012. Productivity and redox proxies of palaeo-oceans: An Overview of elementary geochemistry. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(02): 76~88.
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, Griffin W L, Oberli M M F O, Quadt A V, Roddick J C, Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U—Th—Pb, Lu—Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*. 19(1): 1~23.
- Wiedenbeck M, Hanchar J M, Peck W H, Sylvester P, John V, Whitehouse M, Kronz A, Morishita Y, Nasdala L, Fiebig J, Franchi I, Girard J P, Greenwood R C, Hinton R, Kita N, Mason P R D, Norman M, Ogasawara M, Piccoli P M, Rhede D, Satoh H, Schulz-Dobrick B, Skaro, Spicuzza M J, Terada K, Tindle A, Togashi S, Vennemann T, Xie Q, Zheng Y F. 2004. Further characterisation of the 91500 zircon crystal. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 9~39.
- Williams I S. 2001. Response of detrital zircon and monazite and their U-Pb isotopic systems to regional metamorphism and host rock partial melting, Cooma Complex, southeastern Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 557~80.
- Xu Yajun, Du Yuansheng, Yang Jianghai. 2007. Prospects of sediment provenance analysis. *Geological science and technology information*,

26(3): 26.

Zhang Jinlong, Chen Chao, Pan Zhilong, Zhang Guifeng, Zhang Huan, Li Qingzhe. 2017. Affirm of the Erduanjing formation and analysis of its depositional environment in Xilintaole area, Inner Mongolia. Geological Survey and Research, 40(4): 274~280.

Zhang Qian, Wang Jian, Yu Qian, Xiao Yuanfu, Zhang Bin, Wang

Xiaofei, Zhao Ankun. 2018. The Silicon Source and Sedimentary Environment of the Lower Silurian Longmaxi Formation in Yanyuan Basin, Western Edge of the Yangtze Platform, Geological Review, 64(3): 610~622.

Zhu Xiaomin. 2008. Sedimentary Petrology (4th ed). Beijing: Petroleum Industry Press: 64~79.

Petrographic and chronological characteristics and geological significance of Inkisi Formation sandstones from eastern margin of the west Congo Orogenic Belt

ZHANG Jinlong^{1,2)}, ZHANG Hongrui³⁾, PAN Zhilong^{1,2)}, LUO Dike³⁾, XING Weiwei^{1,2)}, LIU Silin¹⁾, YU Long¹⁾, JIA Pengfei³⁾, YANG Ning¹⁾, LI Qiang¹⁾

1) Regional Geological Survey Institute of Hebei Province, Langfang, Hebei, 065000;

2) Laboratory of Regional Geological Survey Institute of Hebei Province, Langfang, Hebei, 065000;

3) Citic Construction Co., Ltd., Beijing, 100027

Objectives: The West Congo Orogenic Belt is a part of Africa where the San Francisco Craton and Congo Craton converged and collided during the Pan African period. Its tectonic evolution has attracted the attention of scholars both domestically and internationally. Conducting research on the stratigraphy during this period is of great significance for exploring the tectonic evolution of the orogenic belt.

Methods: This study selected the Inkisi Formation sandstone in the northwest of Angola in the foreland basin on the eastern edge of the orogenic belt as the research object, and conducted studies on chronology and petrology.

Results: The minimum detrital zircon age in the Inkisi Formation sandstone is 588.0 ± 3.0 Ma, and the discrimination diagram indicates that the sandstone was formed in a sedimentary basin under a collision background. The chemical alteration indices (*CIA*, *CIW*, *PIA*) of the Inkisi sandstone are 63.34~73.17, 70.82~92.29, and 65.19~89.56, the Sr/Ba values ranging from 0.07 to 0.24 < 0.5.

Conclusions: The petrological and chronological characteristics of the Inkisi sandstone indicate that it was formed in a basin related to collision environments in the context of active continental margins, and is a product of river sedimentary environments. Its source area was warm and humid ancient climate conditions, and the source rocks underwent low to moderate weathering. It is a response to the Pan African West Congo orogeny, and also suggests that the West Congo collisional orogeny continued during the Ediacaran—Early Cambrian period.

Keywords: West Congo Orogenic Belt; Angola; Inkisi Formation; foreland basin; tectonic setting

Acknowledgements: This paper is supported by the Angolan National Geological Survey Program (No. PLANAGEO) Project. In addition, I sincerely thank the reviewers for their valuable revision suggestions! Thank you for the strong support from the Laboratory of Regional Geological Survey Institute of Hebei Province and the Analysis and Testing Research Center of Beijing Geological Research Institute of Nuclear Industry!

First author: ZHANG Jinlong, male, born in 1989, senior engineer, is mainly engaged in regional geological survey and mineral resources; Email: 562278395@qq.com

Corresponding author: ZHANG Hongrui, male, born in 1982, prof., is mainly engaged in geological survey and mineral exploration in Africa; Email: zhanghr@citic.com

Manuscript received on: 2025-01-10; Accepted on: 2025-05-09; Network published on: 2025-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.07.037

Edited by: LI Ming