滇东北中元古界下昆阳群鹅头厂组变质岩地球 化学特征及其形成环境

缪 宇¹,韦少港²,吕晓春¹,宋文婷³,万理文¹ MIAO Yu¹, WEI Shaogang², LÜ Xiaochun¹, SONG Wenting³, WAN Liwen¹

1.中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心,云南 昆明 650001;

2.中国地震局地壳应力研究所,北京 100085;

3.云南工商学院,云南 昆明 650001

1. Kunming Natural Resources Comprehensive Investigation Center, China Geological Survey, Kunming 650001, Yunnan, China;

2. Institute of Crustal Stress, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China;

3. Technology and Business University, Kunming 650001, Yunnan, China

摘要:昆阳群浅变质岩系作为扬子陆块西缘变质褶皱基底的重要组成部分,其形成及演化机制一直备受关注。以昆阳群代表 性地层鹅头厂组变质岩为例,从岩石共生组合、岩相学标志、岩石地球化学等方面对该套变质岩原岩类型、物源、沉积及构造 环境背景进行约束。变质岩微古生物及同位素年龄显示,该套变质岩成岩时代属中元古代晚期,沉积相及岩相学表现为正常 海相沉积原岩特征。岩石地球化学分析显示,变质岩原岩为杂砂岩及亚杂砂岩类,兼有部分泥岩成分,形成于浅海-滨海相的 氧化沉积环境。岩石整体经历过中等程度的风化淋滤作用,成熟度较低。沉积物质主要来源于上地壳构造活动区,具有活动 构造带单次循环沉积产物的特征,并经历过一定程度的壳内地化分异作用。沉积物源以大陆岛弧型低铝 TTG 系列火山岩为 主,兼有部分上地壳陆源物质的介入。岩石地球化学特征还指示,该套变质岩原岩主要沉积于被动大陆边缘的构造环境,很 可能形成于昆阳海洋裂谷盆地闭合阶段后期的残留海盆。

关键词:昆阳群鹅头厂组;岩石地球化学;变质原岩恢复;中元古界;滇东北

中图分类号:P534.3;P588.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)10-1538-11

Miao Y, Wei S G, Lü X C, Song W T, Wan L W. Geochemical characteristics and formation environment of metamorphic rocks in Etouchang Formation of Middle Proterozoic Lower Kunyang Group in northeastern Yunnan. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(10):1538–1548

Abstract: As an important part of the metamorphic fold basement on the western margin of the Yangtze block, the light metamorphic rock series of Kunyang Group has attracted much attention from experts for its formation and evolution mechanism. Taking the metamorphic rocks of Etouchang Formation, the representative stratum of Kunyang Group, as an example, this paper constrains the protolith type, provenance, sedimentation and tectonic environment background of the metamorphic rocks in the aspects of rock symbiotic association, petrographic markers and petrogeochemical. The micropaleontology and isotopic age of the metamorphic rocks indicate that the diagenetic age of the metamorphic rocks belongs to Late Mesoproterozoic, and the sedimentary facies and petrographic shows the characteristics of normal marine sedimentary. Comprehensive petrogeochemical analysis shows that the original rocks of metamorphic rocks were composed of graywacke and subgraywacke with some mudstone components, which were formed in the oxidative sedimentary environment of the shallow–littoral facies. The rocks experienced moderate weathering and leaching with lower

作者简介:缪宇(1988-),男,硕士,工程师,从事资源勘查及区域地质调查研究。E-mail:361583884@qq.com

收稿日期:2019-04-07;修订日期:2020-04-03

资助项目:中国地质调查局项目《云南待补(G48E011006)、务德(G48E011007)、李子沟(G48E012006)、得德卡(G48E012007)幅1:5万 区域地质矿产调查》(编号:12120115041601)

rock maturity and leaching with lower rock maturity. The sediments mainly came from the tectonic active area of the upper crust, with the characteristics of single cycle sedimentary products in the active structural belt and experienced a certain degree of intracrustal geochemical differentiation. The main source of the sediments was the continental island arc type low aluminum TTG series volcanic rocks, with the intervention of part of the upper crust terrigenous materials. Furthermore, petrogeochemical characteristics also show that the metamorphic protolith mainly deposited in the passive continental margin tectonic environment. The authors hold that the metamorphic protoliths were probably formed in the residual basin in the late closure stage of Kunyang marine rift basin.

Key words: Etouchang Formation of Kunyang Group; petrogeochemistry; metamorphic protolith recovery; Mesoproterozoic; northeastern Yunnan

扬子陆块作为与华北陆块相对应的中国南方 前寒武纪克拉通,其构造演化一直备受关注。前人 研究显示,扬子陆块在古元古代晚期—中元古代的 构造演化与哥伦比亚超大陆会聚(约 1.84 Ga)^[1]和 裂解事件(约1.6Ga)^[2-3]同时发生,扬子陆块在此期 间经历了广泛的岩浆作用、变质事件及沉积盆地发 育[1,4-5]。中—新元古代晋宁运动使扬子陆块克拉 通化,并最终形成固结基底60。扬子陆块具典型的 基底和盖层双层结构⁶⁶。基底岩系包括古一中元古 代地层,古元古界为哀牢山群、大红山群、瑶山群、 苴林群,主要分布于陆块西缘和元谋地区,中元古 界为分布于滇中地区的昆阳群。吕梁旋回使古元 古代地层发生中压区域动力热液变质作用,形成了 云南最老的结晶基底,扬子旋回之晋宁造山运动使 中元古代昆阳群及古元古代结晶基底经褶皱回返 形成了最终固结的扬子陆块褶皱基底。晋宁运动 后,扬子陆块进入板内海陆交互沉积阶段,并经加 里东-阿尔卑斯旋回最终形成扬子陆块盖层^①。昆 阳群可分为上、下2个亚群,其中鹅头厂组属昆阳群 下亚群,属扬子陆块褶皱基底发展阶段末期[6-7]。 中元古代,滇中地区处于昆阳裂谷形成的海洋裂谷 盆地沉积环境,该裂谷盆地于1.4~1.0 Ga 接受海水 沉积直至裂谷闭合,并最终形成滇中昆阳群雏形^[8]。 鹅头厂组即形成于裂谷盆地闭合阶段的浅海-滨海 环境¹⁹,成岩过程以正常沉积为主,主要接受花岗岩 类和 TTG 岩系碎屑沉积, 沉积过程中先后发生多 次地震沉积事件,局部形成一系列浊积岩沉 积[10-12]。晋宁运动早期昆阳群接受侵入的基性岩 浆热液改造最终富集成矿,形成鹅头厂铁矿床[12]。 虽然前人对扬子陆块西缘昆阳群进行了大量的研 究,取得了重要的成果。然而,下昆阳群鹅头厂组 变质岩系变质原岩恢复、沉积特征、沉积物源、沉积 构造环境等方面在很大程度上仍缺乏系统的研究. 本文以下昆阳群鹅头厂组变质岩为例展开研究,为

扬子陆块褶皱基底的演化发展提供重要依据。

1 地质背景及岩相学特征

鹅头厂组变质岩位于扬子地层区曲靖地层小区^①,构造上属扬子陆块南缘之曲靖-水城褶冲带(图1)。对 PM25 剖面的研究(图2,仅重点研究鹅头厂组剖面部分)表明,该变质岩系主要岩石类型为浅变质泥质粉砂岩、岩屑杂砂岩、粉砂质泥岩及 绢云粘土板岩,平行层理发育(图3-a),多呈互层状 产出,沉积分异作用明显,具有较完整的沉积旋回 及沉积韵律,其砂岩-泥岩-板岩的岩性组合具有海 进和海退的环境特征,初步推测其形成环境为浅 海-滨海相,为典型的正常海相沉积原岩,具体证据 在下文论述。

对剖面地层进行采样(图2)并进行镜下岩相学 分析。浅变质泥质粉砂岩(图 3-b)颗粒细小,呈显 微鳞片状、鳞片集合体状,泥质岩屑及石英颗粒呈 定向分布特征,为典型的变余层理结构;绢云粘土 板岩(图 3-c)少量细微石英颗粒、黄褐色雏晶状云母 矿物及少量浅绿色,细片状绿泥石沿微劈理面定向线 性分布,为典型的变余层面结构。岩相学特征分析为 典型的正常沉积原岩,进一步推测其原岩为沉积岩 类[13]。西南地科所于鹅头厂组岩石标本中获得了中 元古代非丝状藻体 Asperatopsophosphaera incrassa、 Taeniatum crassum Sin et Liu 及丝状藻体 Archaeotrchion J.W.Sohorf 等微古生物样本^①;早期研究中,曹仁关 等[14] 及孙克详等[15] 对昆阳群鹅头厂组的基性变质 岩样品进行 K-Ar 法定年,得到年龄值分别为 1020 Ma 及 1028~1059 Ma^[14-15]:潘泽伟等^[12]对研究区变 质岩 Sm-Nd 同位素研究表明,鹅头厂组变质岩系 成岩年代为1031±17 Ma,与早期年代学研究成果基 本一致。综合微古生物及同位素年龄显示,研究区 鹅头厂组原岩沉积时代属中元古代晚期。



Fig. 1 Geological and structural sketch map of the study area
1-第四系;2-三叠系;3-二叠系;4-石炭系;5-泥盆系;6-寒武系;7-震旦系;8-南华系;9-中元古界鹅头厂组;
10-剖面及编号;11-地层界线;12-角度不整合接触;13-平行不整合接触;14-实测断层





2 样品采集及分析结果

样品采集于鹅头厂组变质岩剖面(图 2), 剖面 整体风化较严重,因此采集到的无风化新鲜样品较 少,共采集代表性露头浅变质岩屑杂砂岩、绢云母 粘土板岩、浅变质粉砂质泥岩、浅变质泥质粉砂岩 新鲜样品各1件(共4件),基本控制了鹅头厂组中 的岩屑砂岩、板岩、泥岩、粉砂岩等主要岩性组合, 代表性较强。

样品测试在云南省核工业二〇九地质大队检



图 3 研究区鹅头厂组变质岩野外露头(a)及显微照片(b、c)

Fig. 3 Field outcrop(a) and microphotographs(b,c) for metamorphic rocks of Etouchang Formation in the study area a—岩屑杂砂岩平行层理;b—浅变质泥质粉砂岩;c—绢云粘土板岩;ARF—泥质岩屑;CM—粘土矿物;

Q一石英;Mc一云母类; Ch-绿泥石

测中心完成,岩石主量、微量和稀土元素分别使用 ICPA6300型等离子体发射光谱仪(ICP-OES)、 PE300X型等离子体发射质谱仪(ICP-MS)和 Axios 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)进行测试,测试精确度 和准确度优于 5%,具体测试结果见表 1。

3 岩石地球化学特征

3.1 主量元素

岩石地球化学数据显示(表1),研究区变质岩 SiO, 整体含量较高,在62.46%~75.40%之间; Al, O, 含量为 8.79% ~ 14.35%, 岩石 al >alk + c, t > 0, 表明 4 个样品均属铝过饱和系列;K,O含量为2.42%~ 4.07%, Na2O含量较小(0.046%~0.52%), CaO含 量较小(0.16%~0.78%),岩石富钾贫钠钙;Fe₂O₃ (FeO)含量为 4.1%~6.82% (1.08%~2.96%), MgO 含量为 0.63% ~ 1.44%, MnO 含量为 0.053% ~ 0.13%,表现为明显的富镁铁、贫锰的地球化学特 征,具有氧化环境下的沉积特征。岩石风化系数 (CIA)为75.5~77.8(平均76.7),风化系数高于上 地壳平均值(CIA=48),与平均页岩风化系数接 近^[16](CIA=70~75),表现为炎热潮湿的风化条 件^[17-18];K,O/Na,O=6.46~54.83,Na 淋滤丢失严 重,岩石成熟度低,表明该区变质岩经历过一定程 度的风化淋滤作用,表现为中等风化淋滤的地球化 学特征。岩石 SiO₂/Al₂O₃=3.8~8.6(平均 5.81), 岩石成分变异系数(ICV)整体接近或大于1(0.78~ 1.02),说明岩石成熟度较低,原岩含少量粘土成分, 构造活动对原岩源区具有一定程度的影响,原岩源 区物质来源于构造活动区[18-19],具有活动构造带单 次循环沉积产物的特征[20-21]。

3.2 稀土和微量元素

稀土元素配分模式图显示,研究区变质岩轻稀 土元素相对富集,重稀土元素相对亏损, Σ LREE/ HREE=6.47~9.49(平均8.27),La_N/Yb_N=7.66~ 10.35(平均8.93),说明轻、重稀土元素分馏作用较 强(表1);Eu表现为明显负异常, δ Eu=0.63~0.66 (平均0.64),与PAAS(后太古宙澳大利亚页岩)及 UCC(上地壳)成分基本一致,沉积物中长英质成分 占据主导^[22-24]。各变质岩样品总体配分模式相近,呈 典型的右倾模式(图4~a),说明沉积物源均来自于上 地壳;其中轻、重稀土元素的强分馏性和负Eu异常表 明物源一定程度上亏损酸性物质,说明原岩源区发生 过一定程度的壳内地球化学分异作用^[25-27]。

微量元素蛛网图显示,研究区变质岩微量元素 成分除 Sr、Y 元素外与 PAAS 成分基本一致 (图 4-b)。其中 Sr 表现为亏损的地球化学特征,Y 则表现为相对富集。综合该组地层的高岩石风化 系数,推测 Sr 的亏损应为斜长石风化蚀变作用造成 了一定程度的 Sr 亏损。而 Y 在超基性岩-酸性岩 中的含量具有递增趋势,在酸性岩中 Y 含量最 高^[29]。鹅头厂组变质岩中 Y 相对富集的特征指示 沉积物源可能与酸性岩类有关,但具体物源性质见 下文论述。

4 讨 论

4.1 原岩恢复

鹅头厂组主要为砂岩-泥岩-板岩互层旋回的 岩性组合特征,岩相学分析表明,该地层变质岩多 呈变余层理结构及变余层面结构,具有典型的正常 沉积原岩特征。 表1 鹅头厂组变质岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 1 Result of major, trace and rare earth elements analysis for metamorphic rocks in the Etouchang Formation

岩性	浅变质岩	绢云母粘	浅变质粉	浅变质泥	出版	浅变质岩	绢云母粘	浅变质粉	浅变质泥
	屑杂砂岩	土板岩	砂质泥岩	质粉砂岩	石性	屑杂砂岩	土板岩	砂质泥岩	质粉砂岩
样品	PM-Qy1	PM-Qy2	PM-Qy3	PM-Qy4	样品	PM-Qy1	PM-Qy2	PM-Qy3	PM-Qy4
SiO ₂	73.38	62.46	67.07	75.4	al	46.8	45.52	43.42	36.38
${\rm TiO}_2$	0.62	0.7	0.81	0.66	fm	38.08	39.31	38.7	49.91
Al_2O_3	11.85	16.37	14.35	8.79	с	1.15	1.77	4.29	2.56
Fe_2O_3	4.8	6.82	4.17	4.76	alk	13.97	13.4	13.59	11.15
FeO	1.08	1.25	2.64	2.96	c∕ fm	0.03	0.05	0.11	0.05
MnO	0.057	0.13	0.053	0.13	si	491.8	294.76	344.36	529.53
MgO	0.75	1.37	1.44	0.63	ti	3.13	2.49	3.13	3.49
CaO	0.16	0.35	0.78	0.34	h	0	0	0	0
Na_2O	0.058	0.25	0.52	0.046	р	0.37	0.28	0.3	0.36
K_2O	3.18	4.07	3.36	2.42	k	0.97	0.91	0.81	0.97
P_2O_5	0.13	0.14	0.14	0.12	mg	0.2	0.25	0.28	0.13
F-	0.068	0.092	0.071	0.052	о	0.64	0.62	0.42	0.5
SO3	0.027	0.03	0.012	0.032	t	31.68	30.36	25.53	22.67
烧失量	3.64	5.52	4.02	3.1	qz	320.07	126	177.22	373.58
总计	99.8	99.55	99.44	99.44					
V	108	123	114	95	La	43.4	42.8	48.6	42.1
Cr	65.4	69	63.6	57.1	Ce	82.8	83.7	86.3	72.9
Co	9.68	13.4	15.6	8.39	Pr	9.36	9.37	11.3	8.58
Ni	39	49.6	41.2	37.1	Nd	33.7	33.8	43	30.2
Cu	18.2	69.7	16.5	30.4	Sm	5.85	6.55	9.64	5.67
Zn	101	163	125	78.1	Eu	1.09	1.25	2.01	1.11
Rb	126	138	119	94.4	Gd	4.44	5.21	8.57	4.66
Zr	249	191	232	353	Tb	0.76	0.89	1.38	0.76
Nb	14.5	15	17	11.7	Dy	5.11	6	8.66	4.86
Hf	6.4	5.3	6.1	7.1	Но	1	1.16	1.62	0.94
Pb	7	8.54	9.31	16	Er	2.86	3.37	4.44	2.65
U	2.68	2.73	2.7	2.56	Tm	0.51	0.59	0.75	0.47
W	5.03	3.61	5.64	3.22	Yb	3.26	3.77	4.55	2.92
Ge	1.94	2.34	1.91	1.74	Lu	0.54	0.62	0.75	0.48
Pd	< 0.10	< 0.10	< 0.10	<0.10	Y	127.6	132	148.3	126
Pt	<0.10	<0.10	< 0.10	<0.10	Σree	194.21	198.48	230.78	177.83
Cs	5.76	10.4	6.71	3.94	LREE	175.18	176.23	198.8	159.46
Be	3.42	3.55	3.19	2.75	HREE	18.48	21.62	30.72	17.74
Th	12.3	12.5	12.4	11.3	LREE/	9.48	8.15	6.47	8.99
Li	19.8	24.4	43	11.7	HREE				
Sr	30.7	24.6	39	19	La _N /	9.55	8.15	7.66	10.35
Tl	0.63	0.87	0.65	0.48	Yb _N				
Та	1.13	1.34	1.63	1.1	δEu	0.63	0.63	0.66	0.64
Au	1.44	2.23	2.25	1.27	δCe	0.96	0.98	0.87	0.89

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为10-6



of metamorphic rocks in the study area

利用岩石地球化学对变质岩原岩进行恢复能 从另一方面提供有力证据。在地球化学原岩恢复 图解(图 5-a)中,鹅头厂组变质岩均位于沉积岩区; 在 Si-(al+fm)+(c+alk)图解(图 5-b)中,均投于砂 岩区,说明该组变质岩为副变质岩,原岩以砂岩为 主。为进一步确认原岩成分,对常用的几种恢复变



图 5 研究区变质岩原岩恢复图解

质岩原岩的地球方法进行了比较,选取3种误差小、 准确性高的方法^[24]:其中ΣREE-La/Yb图解(图5c)中,样品均投入砂质岩、杂砂岩区及页岩和粘土 岩区;在A-C-FM图解(图5-d)中,样品均投入于 粘土岩及亚杂砂岩区;在米什金图解(图6)中,除 Fe/(Ca+Mg)-SiO₂图解因铁含量偏高而有误差 外,其余样品均投入杂砂岩及亚杂砂岩系列。综合 样品岩性矿物组合,说明原岩应为杂砂岩及亚杂砂 岩类,混有少量泥岩成分。

4.2 沉积环境

判断古沉积环境,首先要对其沉积过程中的氧

化还原环境进行判别,岩石地球化学富镁铁贫锰的 地球化学特征,表明沉积界面具有一定氧化环境。 为了进一步对该地层的沉积环境进行约束,利用对 氧化还原示踪性强的元素进行岩石地球化学分析。 研究区变质岩 δU=2U(U+Th/3):δU 值为 0.79~ 0.81(平均 0.80,<1),表现为正常海水下的沉积^[36]。 微量元素 V/Cr 值为 1.65~1.79(平均 1.72,<2), U/Th值为0.21~0.23(平均 0.22,<0.75),Ni/Co值 为 2.64~4.42(平均 3.70,<5),表现为含氧量较高的 氧化沉积环境^[37]。在微量元素氧化还原环境判别图 (图 7)中,样品均位于氧化环境区域,基本确定鹅头



厂组变质岩沉积环境属于氧化环境。其中地球化 学数据中 Rb/K 值为 2.07×10⁻⁶~2.42×10⁻⁶(平均 2.23×10⁻⁶, <0.006), Th/U 值为 4.41~4.59(平均 4.54, <7),表现为典型的海相沉积特征^[39-41]。结合 变质岩剖面中砂岩-泥岩-板岩沉积韵律及沉积旋 回,具有海进和海退的沉积地质特征,岩屑砂岩中 可见砂纹层理、平行层理,由原岩的岩石组合及地 球化学特征看,鹅头厂组变质岩地层形成于浅海-滨海相的氧化沉积环境。

4.3 沉积物源

通过鹅头厂组变质岩地层野外地质调查发现, 区内变质岩地层局部常夹数层英安斑岩等酸性火 山岩,说明本组沉积时期,局部有酸性岩浆喷溢活 动存在:结合 Y 正异常特征,推测该地层沉积物源 在一定程度上与酸性岩浆岩有关。为进一步对该 推测结果进行论证,笔者引入性质稳定且不易受地 质作用影响的 La、Th、Hf 和 Co 元素对沉积物源进 行约束^[42],在Hf-La/Th图解(图8)中,研究区样品 大部分落入酸性岛弧源区,结合该地层中酸性火山 岩夹层的地质特征,可以确定该区沉积物源主要为 酸性岛弧火山岩,与地球化学分析中 K,O>Na,O、 轻、重稀土元素的强分馏性质及 Y 的相对富集结果 相互印证。标准化稀土元素配分曲线呈典型的右 倾模式,说明沉积物源均来自上地壳,TiO,含量高 于上地幔, MnO / TiO, 值为 0.09~0.19(平均0.14), 表明物源除酸性岛弧火山岩外还有部分上地壳陆



图 8 研究区变质岩沉积物源 Hf-La/Th 图解^[43] Fig.8 Hf-La/Th diagram of the sediment provenance for metamorphic rocks in the study area

源物质的介入[44]。

在 Th-Hf-Co 图解(图9)中,研究区样品均落 于 TTG 岩石附近,根据 SiO₂ = 70%,Al₂O₃小于 15%,将研究区物源 TTG 岩系划分为低铝 TTG 系 列,稀土及微量元素表现为明显的负 Eu 异常及 Sr 亏损特征,与低铝 TTG 系列负 Eu 异常、Sr 相对亏 损的特征一致,可以确定该区变质岩沉积物源为低 铝 TTG 岩系^[45],与前人研究结果基本一致。

综上所述,该区沉积物源主要为岛弧型低铝 TTG系列,由于低铝 TTG 岩系主要形成于低压源 区,结合前文源区酸性岛弧火山岩的沉积物源特 征,笔者认为研究区沉积物源主要形成于低压环境 下板块俯冲的岛弧环境,但具体构造环境还需进一 步约束。

4.4 构造环境

碎屑沉积岩岩石地球化学物质组成与其物源 及大地构造背景息息相关,因此利用碎屑沉积岩岩 石地球化学物质组成对其沉积构造背景进行约束, 是目前行之有效且较可靠的方法。根据前文得出 的相关结论,研究区变质岩岩石成熟度较低,具有 活动构造带单次循环沉积产物的特征;沉积环境为 浅海-滨海相的氧化沉积环境;沉积物源主要为酸 性岛弧火山岩,兼有部分上地壳陆源物质的介入。 因此初步推断,该区变质岩源区构造环境应为大陆 边缘-大陆岛弧。

岩石地球化学特征显示,沉积岩构造环境由大陆



Fig. 9 Th-Hf-Co diagram of the sediment provenance for metamorphic rocks in the study area



a—SiO₂-K₂O/Na₂O图解^[47]; b—K₂O/Na₂O-SiO₂/Al₂O₃图解^[48];

c--(TFe2O3+MgO)-TiO2图解[40];d-Th-Co-Zr/10图解[49-50]

边缘向洋中脊过渡过程中,Al₂O₃/(Al₂O₃+Fe₂O₃)值 具有由高变低的趋势,越靠近大陆边缘比值越大且 越接近于1^[46]。研究区 Al₂O₃/(Al₂O₃+Fe₂O₃)值为 0.65~0.77(平均0.71),位于0.60~0.90之间,反映 了该区变质岩原岩大陆边缘的沉积构造环境[49]。 Roser 和 Maynard 指出,某些沉积岩中主量和微量 元素对沉积构造环境具有一定的指示作用[47-48]。 SiO₂-K₂O/Na₂O(图 10-a)和 K₂O/Na₂O-SiO₂/ Al,O₃(图 10-b)构造环境判别图解显示,研究区样 品均落于被动大陆边缘区。Bhatia 指出,由大洋岛弧 向被动大陆边缘的构造环境过渡, TFe₂O₃+MgO、 TiO,及Al,O,/SiO,值逐渐降低^[49]。利用 Bhatia 的 TFe₂O₃+MgO 与 TiO₂ 关系判别图(图 10-c) 对沉积

物源区构造环境进行判别,判别结果显示,研究区样 品主要落入大陆岛弧杂砂岩区或界线附近。为了进 一步验证该结果,笔者引入了 Th-Co-Zr/10 图解 (图 10-d)进行验证,结果显示,研究区样品也基本 落入大陆岛弧杂砂岩区,部分落入大陆岛弧杂砂岩 区及被动大陆边缘界线附近,与上述结论基本一 致。因此笔者认为,研究区变质岩原岩主要形成于 被动大陆边缘的构造环境,且物源区存在大量大陆 岛弧性质的物源物质,与物源分析中沉积物源主要 为岛弧型低铝 TTG 系列火山岩的结论一致。

昆阳裂谷形成的海洋裂谷盆地于中元古代中 前期(约1.4 Ga)接受沉积,并于中元古代晚期(约 1.0 Ga)闭合,闭合年代与鹅头厂组变质岩形成时代 (1031±17 Ma)基本一致,说明鹅头厂组变质岩形成 于昆阳裂谷闭合阶段晚期。沉积海盆闭合阶段后 期盆地两端地块逐渐接近,于板块聚合阶段初期形 成未完全闭合的继承性沉积海盆,并因板块汇聚形 成一系列大陆岛弧,导致此时期岩浆活动活跃,为 鹅头厂组变质岩提供了足够的沉积物源,并于继承 性海盆继续沉积。在板块挤压过程中,上地壳陆源 物质因挤压破碎混入沉积物源,与岩浆物质共同沉 积,直至海洋裂谷盆地完全闭合并隆升结束沉积。

综上所述,该套变质岩原岩主要沉积于被动大陆 边缘的构造环境,且沉积源区存在大量大陆岛弧性质 的物源物质,兼有部分上地壳陆源物质的介入,形成 于昆阳海洋裂谷盆地闭合阶段后期的残留海盆。

5 结 论

(1)滇东北中元古界下昆阳群鹅头厂组沉积相 及岩相学分析显示,该组变质岩具典型的正常海相 沉积原岩特征,沉积旋回及沉积韵律完整,变余结 构构造发育。

(2) 鹅头厂组变质岩具有高钾、贫钠钙, 富镁 铁、贫锰;轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对亏 损, 负 Eu 异常的特征; 微量元素成分与 PAAS 及上 地壳成分基本一致(除 Sr 元素表现为亏损, Y 元素 表现为富集)。岩石整体经历过中等程度的风化淋 滤作用, 成熟度较低, 构造活动对原岩源区具有一 定程度的影响; 沉积物源主要来源于上地壳构造活 动区的酸性岩类, 具有活动构造带单次循环沉积产 物的特征, 原岩源区曾发生过一定程度的壳内地化 分异作用。

(3)鹅头厂组变质岩原岩以杂砂岩及亚杂砂岩 类为主,并混有少量泥岩成分,原岩主要形成于浅 海-滨海相的氧化沉积环境;沉积物源以大陆岛弧 型低铝 TTG 系列火山岩为主,兼有部分上地壳陆 源物质的介入。

(4) 鹅头厂组变质岩原岩主要沉积于被动大陆 边缘的构造环境,很可能形成于昆阳海洋裂谷盆地 闭合阶段后期的残留海盆。

致谢:野外工作期间得到中国地质调查区昆明 自然资源综合调查中心同事的大力支持和帮助,室 内研究得到中国地质大学(北京)王建平教授的帮 助,评审专家对论文初稿提出了宝贵的修改意见, 谨致谢忱。

参考文献

- [1] Liu W, Yang X Y, Shu S Y, et al. Precambrian basement and Late Paleoproterozoic to Mesoproterozoic tectonic evolution of the SW Yangtze Block, South China: Constraints from zircon U-Pb dating and Hf isotopes[J].Minerals, 2018, 8(8), 333: 1-21.
- [2] Wang W, Zhou M F. Provenance and tectonic setting of the Paleo-to Mesoproterozoic Dongchuan Group in the southwestern Yangtze Block, South China: Implication for the breakup of the supercontinent Columbia[J]. Tectonophys, 2014, 610: 110–127.
- [3] Wang W, Zhou M F, Zhao X F, et al. Late Paleoproterozoic to Mesoproterozoic rift successions in SW China: Implication for the Yangtze Block – North Australia – Northwest Laurentia connection in the Columbia supercontinent [J]. Sedimentary Geology, 2014, 309 (jul15): 33–47.
- [4]张恒,高林志,张传恒,等.扬子板块西南部古元古代岩浆及变质事件——兼论扬子板块对 Nuna 超大陆事件的响应[J].地质通报, 2019,38(11):1777-1789.
- [5] Zhao X F, Zhou M F, Li J W, et al. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: Implications for tectonic evolution of the Yangtze Block [J]. Precambrian Research, 2010, 182(1/2): 57–69.
- [6] 翟明国.克拉通化与华北陆块的形成[J].中国科学(D 辑),2011,41 (8):1037-1046.
- [7] 刘昊岗,张恒,张传恒,等.滇中北部昆阳群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb年龄及其地层学意义[J].地质通报,2019,38(7):1183-1190.
- [8]高林志,张恒,张传恒,等.滇东昆阳群地层序列的厘定及其在中国 地层表的位置[J].地质论评,2018,64(2):477-493.
- [9] 杜远生,孙克祥,李志伟.云南元江地区中元古代昆阳群下亚群的 沉积地质及控矿作用[J].地球科学-中国地质大学学报,1988,23 (1):27-31.
- [10] 杜远生,张传恒,韩欣,等.滇中中元古代昆阳群的地震事件沉积 及其地质意义[J].中国科学,2001,31(4): 283-289.
- [11] 张永北, 王豪, 徐成彦, 等. 滇中昆阳群火成碳酸岩的发现及其意义[J]. 地质科技情报, 1996, 15(3): 14-18.
- [12] 潘泽伟,赵波,余海军,等.滇中鹅头厂铁矿床含矿岩系及成矿作 用年代学[J].矿产勘查,2017,8(4):626-630.
- [13] 杜涛, 侯明才, 陈琳, 等. 西昆仑造山带中提热艾力组沉积环境及 物源区构造背景[J]. 地质通报, 2013, 32(5): 751-759.
- [14] 曹仁关.云南东川上前寒武系的划分与对比[J].中国区域地质, 1987,6(2):113-120.
- [15] 孙克祥, 沈远仁, 刘国庆, 等. 滇中元古宙贴铜矿床[M]. 武汉: 中国 地质大学出版社, 1991: 14-16.
- [16] Nesbitt H W, Young C M. Proterozoic climates and platemotion inferred from major element chemistry of lutites [J]. Nature, 1982, 199: 715–717.
- [17] 龙晓平,袁超,孙敏,等.北疆阿尔泰南缘泥盆系浅变质碎屑沉积 岩地球化学特征及其形成环境[J].岩石学报,2005,24(4):718-732.
- [18] 裴国栋,弓小平,马华东,等.阿尔泰造山带喀纳斯群变质岩地球 化学特征及形成环境[J].中国地质,2018,45(1):141-155.
- [19] 戴亚权,罗静兰,王孟,等.东秦岭丹凤蛇绿混杂岩带泥质粉砂岩

的地球化学特征及物源分析[J].地质通报,2009,28(10):1465-1471.

- [20] Van de Kamp P C V D, Leake B E.Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the Northeastern Pacific Margin[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 1985,76(4): 411–449.
- [21] 龙晓平.新疆阿尔泰古生代碎屑沉积岩的沉积时代、物质来源及 其构造背景[D].中国科学院研究生院(广州地球化学研究所)博 士学位论文,2007.
- [22] 马明,陈国俊,吕成福,等.珠江口盆地白云凹陷始新统-下渐新统 沉积环境与泥岩物源[J].岩石学报,2016,37(5):610-621.
- [23] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[M].London Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 1–38.
- [24] Taylor S R, Mclennan S M. The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks[M]. Phi. Trans. R. soc. London, 1981, A301: 381–399.
- [25] 江小燕,刘永江,周冰,等.大兴安岭南段兴-蒙草原区二叠纪砂岩 物源分析[J].地质通报,2011,30(7):1085-1098.
- [26]时国,郭福生,谢财富,等.赣中相山铀矿田基地变质岩原岩恢复 及其形成环境[J].中国地质,2015,42(2):457-468.
- [27] 王照元,郑常青,徐久磊,等.内蒙古莫尔道嘎佳疙瘩组变质岩地 球化学特征及构造意义[J].地球科学,2018,43(1):176-198.
- [28] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
- [29] 赵琦.稀土元素 Y,Ce,La 在区域化探扫面工作中的初步应用[J]. 物探与化探,1989,13(3):161.
- [30] Winchester J A, Park R G, Holland J G. The geochemistry of lewisian semipelitic schists from the Gairloch district, Wester Ross[J]. Scottish Journal of Geology, 1980, 16(2/3): 165–179.
- [31] Simonen A J P.Stratigraphy and sedmentation of the Sovecofennidie, Early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland [J]. Bulletin de la Commission Geologique de Finlande, 1953, 160: 1–64.
- [32] Gromet L P, Haskin L A, Korotev R L, et al. The "North American shale composite": Its compilation, major and trace element characteristics[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, 48 (12): 2469–2482.
- [33] 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京: 地 质出版社, 1987: 12-14.
- [34] 周世泰.对 17 种恢复变质岩原岩的岩石化学方法的检验结果[J].地 质论评,1984,1(30):81-84.
- [35]张海祥,张伯友.赣北星子群变质岩的原岩恢复及其形成构造环

境判别[J].中国地质,2003,30(3):254-260.

- [36] Wignall P B.Black shales [M]. Oxford: Clarendon Press, 1994: 46.
- [37] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 1994, 111(1/4): 111–129.
- [38] 王淑芳,董大忠,王玉满,等.四川盆地南部志留系龙马溪组富有 机质页岩沉积环境的元素地球化学判别指标[J].海相油气地质, 2014,19(3):27-34.
- [39]任云伟,王惠初,初航,等.辽吉古元古代活动带中变质富铝沉积 岩系地球化学特征及其对物源的制约[J].地质通报,2019, 38(2/3):371-387.
- [40] Bhatia M R. Platc tectonics and geochemical composition of sand stones[J]. The Journal of Geology, 1983, 91(6): 611–627.
- [41] 史冀忠,陈高潮,李玉宏,等.内蒙古西部额济纳旗雅干地区二叠 系埋汗哈达组的岩石学特征及沉积环境[J].地质通报,2011,30 (6):972.
- [42] 黄喜峰,钱壮志,逯东霞,等.贺兰山中南段奥陶系米钵山组的沉积环境与构造背景分析[J].地球学报,2009,30(1):65-71.
- [43] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from Turbiditic sandstones [J]. Journal of the Geological Society, 1987, 144(4): 531–542.
- [44] 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 等. 扬子地台西缘新元古代 TTG 的厘定 及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25(4): 273-281.
- [45] 张华峰,王浩睁,豆敬兆,等.华北克拉通怀安陆块新太古代低铝和高铝 TTG 片麻岩的地球化学特征与成因[J].岩石学报,2015, 31(6):1518-1534.
- [46]许威.滇西允沟岩组地球化学特征与原岩恢复[D].成都理工大 学硕士学位论文, 2014.
- [47] Roser B P, Korsch R J.Determination of tectomic setting of sandstonemudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J].Journal of Geology, 1986, 94(5): 635–650.
- [48] Maynard J B, Valloni R, Yu H S. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins[J]. Geological Society, London, Spcial Publication, 1982, 10(1): 551–561.
- [49] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonics setting discrimination of sedimentary basins[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1986, 92: 181–193.
- [50] 毛寅,赖健清,王熊军,等.青海赛什塘矿区变质岩特征及其形成 构造环境[J].中国有色金属学报,2025,22(3):642-651.
- ①云南省地质调查局八分队.东川幅1:200000区域地质调查报告.云南省地质局.