



滇东北会泽地区南华系沉积相与古气候特征 ——来自元素地球化学的证据

王浩宇, 张 亚, 徐 杰, 向经纬

中国地质调查局 昆明自然资源综合调查中心, 云南 昆明 650000

摘 要: 通过资料收集、剖面测制、岩矿鉴定、主微量元素分析、特征指数参数对比、沉积相综合建模等一系列工作, 对滇东北会泽地区南华系沉积环境和古气候进行了探讨。该区南华系自下而上出露澄江组和南沱组, 二者均为陆源碎屑岩系, 呈平行不整合接触。澄江组主要包括粉砂质泥岩、粉砂岩、细砂岩、细粒石英杂砂岩和岩屑砂岩等。南沱组主要为一套灰黄色中层状复成分冰碛砾岩。澄江组中沉积旋回发育, 可见小型槽状交错层理、斜层理、平行层理、水平层理等沉积构造。对澄江组细碎屑岩样品的主微量元素特征指数 SD、CV、CIA、CIW、PIA、ICV、Na/K、Al/Ca、Ru/Sr、V/Cr、U/Th、Ni/Co 等进行分析, 其结果均指示氧化、弱氧化的沉积环境。研究认为澄江组为湖泊相, 包括滨湖亚相和浅湖亚相, 为温暖湿润气候类型; 南沱组为冰川相, 包括冰碛亚相和冰湖亚相, 为寒冷干燥气候类型。

关键词: 南华系; 澄江组; 南沱组; 沉积相; 古气候; 云南省

SEDIMENTARY FACIES AND PALEOCLIMATE OF NANHUA SYSTEM IN HUIZE AREA, NORTHEASTERN YUNNAN PROVINCE: Evidence from Element Geochemistry

WANG hao-yu, ZHANG Ya, XU jie, XIANG Jing-wei

Kunming Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Kunming 650000, China

Abstract: The sedimentary environment and paleoclimate of Chengjiang Formation and Nantuo Formation of Nanhua System in Huize area of northeast Yunnan Province are studied through data collection, section survey, rock-mineral identification, major and trace elements analysis, correlation of characteristic index parameters and comprehensive modeling of sedimentary facies. The Chengjiang Formation and Nantuo Formation, occurred from bottom to top, both belong to terrigenous clastic rock series, showing a parallel unconformity contact. The Chengjiang Formation consists of mainly silty mudstone, siltstone, fine sandstone, fine-grained quartz gritstone and lithic sandstone. The Nantuo Formation is mainly a set of grayish yellow medium-thick polymictic moraine conglomerate. Sedimentary cycles are developed in Chengjiang Formation, with sedimentary structures such as small trough cross-bedding, oblique bedding, parallel bedding and horizontal bedding. The analysis results of major and trace element characteristic indexes including SD, CV, CIA, CIW, PIA, ICV, Na/K, Al/Ca, Ru/Sr, V/Cr, U/Th and Ni/Co of fine clastic rocks from Chengjiang

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-09-13. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局基础地质调查项目“滇中楚雄地区土地质量地球化学调查”(ZD20220210).

作者简介: 王浩宇(1995—), 男, 从事基础地质、生态地质研究, 通信地址 云南省昆明市西山区春雨路 1566 号, E-mail/m18813097066@163.com

通信作者: 张亚(1987—), 男, 工程师, 从事基础地质、矿床地质、生态地质研究, 通信地址 云南省昆明市西山区春雨路 1566 号, E-mail/176500023@qq.com

Formation all indicate the sedimentary environment of oxidation or weak oxidation. It is considered that Chengjiang Formation is of lake facies, including shore-lake and shallow-lake subfacies, with a warm and humid climate; while Nantuo Formation is glacial facies, including moraine and glacial lake subfacies, with a cold and dry climate.

Key words: Nanhua System; Chengjiang Formation; Nantuo Formation; sedimentary facies; paleoclimate; Yunnan Province

0 前言

新元古代有很多重大的全球性地质事件发生,如罗迪尼亚(Rodinia)超大陆聚散以及雪球地球事件等^[1]。该时期的冰川一直延伸到赤道附近,在全球范围内都具有等时性。扬子陆块隶属华南板块,是Rodinia超大陆的重要组成部分^[2],扬子陆块中的南华系相当于国际成冰系^[3],出现南沱和长安(或古城)两个冰期^[4-5],分别对应国际上的 Marinoan 冰期和 Sturtian 冰期。南华系即为南沱冰期以寒冷事件为特征的一段地史记录^[6]。南华系分为上、下统,下统自下而上包括莲沱组、古城组、大塘坡组;上统为南沱组。雪球地球中的冰期海洋也是目前国内外的研究热点之一^[7]。但由于学科侧重点不同、研究完整度不一和成果多元化等因素的影响,南华系的建系工作仍在进行,目前尚处于讨论和探索阶段。本研究旨在运用地层学、地球化学、沉积学、古生物学等工作方法,通过 CIA、CIW、PIA、Rb/Sr 值等指标反映的古气候演化过程,建立研究区南华系地层及古气候演化格架。

1 区域地质背景

研究区位于滇东北会泽县待补镇,地处扬子板块西南部,为攀西裂谷带与黔中隆起交汇处^[8]。区内出露地层从老到新依次为:下震旦统澄江组、南沱组,上震旦统灯影组,下寒武统渔户村组、筇竹寺组、沧浪铺组,中泥盆统海口组,上泥盆统宰格组,下石炭统岩关组、大塘组、摆佐组,下、中二叠统梁山组、栖霞组、茅口组,上二叠统,下三叠统飞仙关组、永宁镇组(图1)。主要岩性包括紫红色砂岩、冰碛砾岩及页岩、白云岩、硅质岩、碳酸盐岩、粉砂岩夹泥灰岩、灰岩等^[9]。新元古界昆阳群发育待补断层,与小江断裂东支相交,为研究区最大的断层之一,断层线总体延伸方向为41°左右,延伸长度约49.8 km,呈舒缓波状。同时还发育不同规模的断裂和一系列北北东、北东向褶皱。南华系仅出露澄江组(Nh_{1c})(相当于大塘坡组)和南沱组(Nh_{2n}),

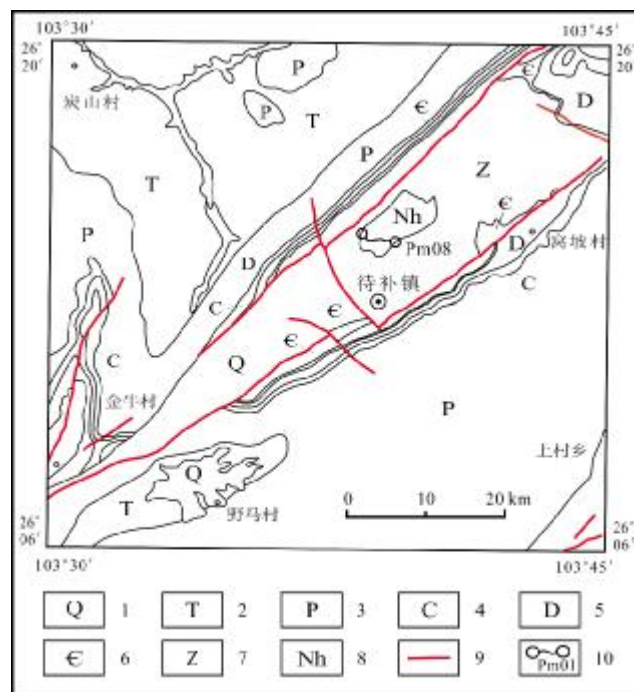


图1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the study area

1—第四系(Quaternary); 2—三叠系(Triassic); 3—二叠系(Permian); 4—石炭系(Carboniferous); 5—泥盆系(Devonian); 6—寒武系(Cambrian); 7—震旦系(Sinian System); 8—南华系(Nanhua System); 9—断层(fault); 10—剖面位置及编号(section and number)

面积约4.39 km²。

2 地层及岩石学特征

2.1 地层剖面及样品采集

研究区澄江组—南沱组剖面(Pm08)位于待补镇东北约1.5 km处,起点坐标:东经103°27'08",北纬26°14'16",终点坐标:东经103°26'36",北纬26°14'46"。区域上澄江组与下伏鹅头厂组(Pt_{2e})为角度不整合接触,与上覆南沱组呈平行不整合接触,南沱组与上覆灯影组(Z€d)呈平行不整合接触。在澄江组中共采集7件细碎屑岩样品,其编号分别为:Pm08-02-1(Pm08剖面第2层第1个样品)、Pm08-05-1、Pm08-06-1、

11. 浅灰绿色薄—中层状细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩互层,三者层厚之比为2:2:1. 53.8 m
10. 灰绿色中层状泥质岩,风化面为灰绿色,新鲜面为绿色,泥质粉砂状结构,中层状构造,层厚12~41 cm. 7.8 m
9. 灰紫色中层状硅质胶结含粉砂质细粒岩屑砂岩、粉砂岩与灰绿色泥质岩构成韵律层,岩石局部硅化较高,硬度较高.岩屑砂岩、粉砂岩、泥质岩三者层厚之比1:1:1. 73.1 m
8. 灰色中层状硅质胶结含粉砂质细粒岩屑石英砂岩夹薄层状粉砂岩,两者比例3:1. 10.0 m
7. 灰黄色薄—中层状泥质粉砂岩和细砂岩互层,两者岩层厚度比例2:1.泥质粉砂岩风化面为浅黄色,新鲜色为灰黄色,泥质结构,薄—中层状构造,层厚8~23 cm,岩石中平行层理发育;细砂岩风化面为浅黄色,新鲜面为灰黄色,细砂状结构,薄—中层状构造,层厚7~17 cm,岩石中水平层理发育. 44.9 m
6. 灰黄—灰绿色泥质粉砂岩与粉砂质泥岩互层,偶夹中—薄层状细砂岩. 41.3 m
5. 粉砂质泥岩.岩石风化面为土黄色,新鲜面为青灰色,泥质结构,中层状构造,岩层厚度13~25 cm. 11.6 m
4. 灰绿色薄—中层状含粉砂质细粒岩屑砂岩.岩屑砂岩单层厚度7~23 cm,可见水平层理发育. 132.4 m
3. 灰黄—灰紫色中层状岩屑砂岩与粉砂质泥岩互层,两者层厚相当,单层厚约15~20 cm. 100.9 m
2. 青灰色中层状粉砂质泥岩,单层厚度13~25 cm. 47.1 m
1. 青灰色粉砂质泥岩,偶夹薄层状泥岩. 54.0 m
(未见底)

2.2 岩性特征

研究区整个南华系岩性均为陆源碎屑岩.澄江组下部主要为青灰色薄层状粉砂质泥岩、粉砂岩,灰黄色薄至中层状泥质粉砂岩、细砂岩等;中部为杂色中至厚层状含粉砂质泥质岩,紫红色薄至中层状细砂岩、粉砂岩等;顶部为一套浅灰、深灰色中层状含粉砂质细粒石英杂砂岩夹浅灰色中层状含粉砂质细粒岩屑砂岩.南沱组主要为一套灰黄色中层状复成分砾岩,砾石分选性差、磨圆适中,部分砾石表面可观察到明显擦痕,综合判断为冰碛砾岩.

(1) 细碎屑岩类

包括青灰色、灰黄色薄至中层状粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩等,成分主要为粉砂质和泥质的陆源碎屑,长石约占10%,石英约25%.按粉砂质所占比例的不同来进行分类:粉砂质>75%,为含泥质粉砂岩;50%<粉砂质<75%,为泥质粉砂岩;25%<粉砂质<50%,为粉砂质泥岩;粉砂质<25%,为含粉砂质泥岩;粉砂质<5%,为泥岩.

(2) 中碎屑岩类

南华系澄江组主要包含灰黄色中层状细砂岩,灰色中层状含粉砂质细粒岩屑石英砂岩,浅灰、深灰色中层状含粉砂质细粒石英杂砂岩等.细砂岩主要成分为陆源碎屑约70%,石英约25%,其余为少量长石和胶结物;石英砂岩中石英含量约95%,其余为岩屑和硅质胶结物;石英杂砂岩中石英砂约占90%,泥质约占10%.

(3) 粗碎屑岩类

主要为一套分布于南华系南沱组的复成分砾岩,岩石由砾石、砂质成分和填隙物组成.砾石:2~20 mm,主要呈次棱角状,少量为尖棱角状,个别为次圆状,成分为砂岩和泥质岩,占全部的20%.砂质成分:0.004~2 mm,主要呈次棱角状,少量为尖棱角状,个别为次圆状,成分为砂岩、泥质岩和石英,占全部的40%.填隙物:颗粒细小,主要为泥质,含较多的氧化铁质,占全部的30%.

2.3 沉积构造特征

澄江组在研究区内出露面积较小,厚度不大,自下而上识别出2类基本层序(图3):A类型由青灰、灰黄、灰绿色中—厚层状细粒岩屑砂岩(a)或粉砂质岩屑砂岩、长石岩屑砂岩夹薄层状灰绿色—黄绿色薄层状泥

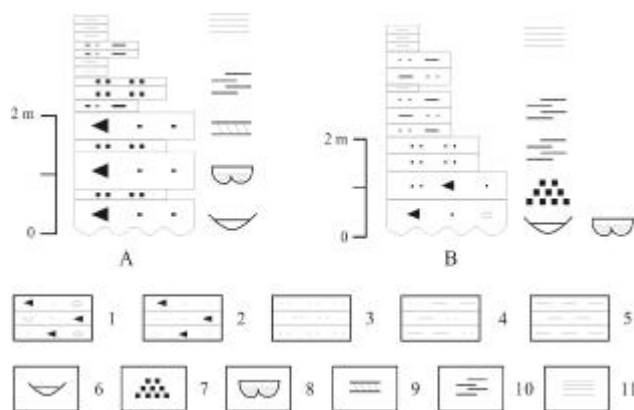


图3 澄江组基本层序特征

Fig. 3 Basic sequence characteristics of Chengjiang Formation
1—含砾岩屑砂岩 (pebbly lithic sandstone); 2—岩屑砂岩 (lithic sandstone); 3—粉砂岩 (siltstone); 4—粉砂质泥岩 (silty mudstone); 5—泥岩 (mudstone); 6—冲刷面 (erosion surface); 7—递变层理 (graded bedding); 8—槽状交错层理 (trough cross-bedding); 9—板状交错层理 (tabular cross-bedding); 10—平行层理 (parallel bedding); 11—水平层理 (horizontal bedding)

岩、粉砂质泥岩、粉砂岩(b)组成 ab 式的基本层序, $a:b=2:1\sim3:1$, a 中底面可见小型槽状交错层理、斜层理, b 中可见平行层理、水平层理, 向上岩屑砂岩厚度有减薄趋势, 比例减少, 粉砂岩、粉砂质泥岩含量增大, 由砂-粉砂组合向粉砂-泥组合转变, 体现出物源迁远、沉积速率减缓的趋势; B 类型由浅灰、灰黄色中—厚层状含砾岩屑砂岩(图 4a)、细粒岩屑砂岩(a)夹中薄层状深灰、灰绿色粉砂岩、泥质粉砂岩(b)组成 ab 式基本层序, 向上由砂-粉砂组合向粉砂-泥组合转变, a 中发育递变层理、砂纹层理(图 4c), b 中可见平行层理、水平层理。

3 分析测试

3.1 测试方法

按粒级可将碎屑岩大致分为 3 类: 砾岩、角砾岩为粗碎屑岩; 砂岩、细砂岩为中碎屑岩; 粉砂岩、泥岩为细

碎屑岩。普遍认为粗粒度碎屑岩其成分主要为风化产物, 细碎屑岩在后期成岩过程中, 其微量元素相对稳定, 能更准确地反映物源和古环境特征。故本研究采集分析的样品均为粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩。样品分析在自然资源部昆明矿产资源监督检测中心进行。

主量元素分析利用日本理学公司 PrimusII X 射线荧光光谱仪完成。处理方法如下: 取一小块样品并清除表面杂质, 粉碎并研磨至 200 目以下; 将处理好的样品放至烘箱, 105 °C 恒温烘干 12 h; 在恒重陶瓷坩埚中放置约 1 g 烘干后样品, 置于马弗炉中以 1 000 °C 恒温灼烧 2 h, 取出冷却样品计算烧失量; 在铂金坩埚上放入 6 g 助熔剂($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{LiBO}_2:\text{LiF}=9:2:1$)、0.3 g 氧化剂(NH_4NO_3)和 0.6 g 样品, 置于熔样炉中以 1 150 °C 加热 14 min; 冷却后进行主量元素分析。

微量元素分析利用 Agilent7700e ICP-MS 分析完成。处理方法如下: 将 200 目样品置于烘箱中以 105 °C



图 4 澄江组、南沱组野外特征照片

Fig. 4 Field photographs showing the characteristics of Chengjiang Formation and Nantuo Formation

a—澄江组中层状细砂岩、岩屑砂岩、石英杂砂岩(medium-thick fine sandstone, lithic sandstone and quartz greywacke of Chengjiang fm.); b—澄江组和南沱组角度不整合特征(angular unconformity between Chengjiang and Nantuo fms.); c—石英砂岩中的平行层理(parallel bedding in quartz sandstone); d—南沱组紫红色厚层状复成分冰碛砾岩(purplish red thick polymictic moraine conglomerate of Nantuo fm.)

烘干 12 h,在溶样弹中加入 50 mg 样品,先后各加入 1 mL 高浓度硝酸和氢氟酸;将溶样弹放入钢套并置于烘箱,以 190 ℃恒温加热 24 h;冷却后将样品放置于电热板上以 120 ℃恒温蒸干;加入 1 mL 浓硝酸再次蒸干;分别放入 1 mL 浓硝酸、超纯水和内标试剂(浓度为 1×10^{-6});最后次溶样弹以 190 ℃加热 12 h,最后将样品放入烧杯中用 2%浓度有硝酸稀释至 100 g 备用.

3.2 分析结果

研究区南沱组为一套灰黄色中层状复成分砾岩,矿物粒度越大,则相对风化程度越低.后期起到环境示踪作用的微量元素沉积分布也不均匀,故此次 X 射线荧光光谱(XRF)分析测试并没有使用南沱组岩石样品^[3].但通过对砾岩中砾石成分、沉积构造、空间分布形态等方面的研究,再结合澄江组主量元素分析成果,能更好地梳理出南华系的古环境和古气候特征.澄江组 7 件细碎屑岩样品主量、微量元素分析结果如表 1、2.

从分析结果可以看出,澄江组细碎屑岩主量元素单组数值均保持在一定的区间范围内,不同元素之间无明显相关性;易流失元素 Na、K 含量偏低,K/Na 介于 50~100 之间;微量元素中 Ni、Rb 的变化范围较大,其他元素均保持在一定的区间范围.原因可能以下几点:1)样品岩性相近,均为细碎屑岩;2)物源供给和水动力情况相对稳定;3)载体为持续性流水且搬运距离较远;4)成岩时期钾交代程度高.

4 讨论

4.1 SD、CV 值对古气候的指示意义

同一主量元素含量所形成的数组,其标准偏差(SD)和变异系数(CV)可以反映出样品的均一性、差异程度等.非线性的气候特征对元素的差异化分布具有一定影响,所以从单元素各数组的标准偏差和分异系数大小来研究古气候的波动程度.通过计算得到研究区澄江组主量元素 SD 和 CV 值(表 3).从表 3 可以看出,除 SiO₂ CV=9.92%之外,其余元素 CV 值均介于 29.73%~76.39%之间.虽然目前元素差异和气候变化之间尚无明确的量化关系,但不难发现在该地史时期气候波动明显.

4.2 CIA、CIA* 值对古气候的指示意义

CIA 指数由 Nesbitt 等^[10]提出用以反映化学风化程度.其计算公式为 $CIA=[Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO+K_2O+Na_2O)]\times 100$,计算数值均采用氧化物分子摩尔数.但考虑到 CaO 在风化和后期成岩过程中均易受到影响,故用 McLennan^[11]提出的方法进行校正: $CaO-P_2O_5\times (10/3)=D$,若 $D<Na_2O$,则 $CaO^*=D$,反之,则 $CaO^*=Na_2O$,CIA* 值由原来的 CIA 中使用校正后的 CaO* 计算得到. CIA*<55 代表岩石未经化学风化,CIA*=100 代表岩石完全化学风化,60~70 之间代表寒冷干燥的气候类型,70~80 之间代表温暖湿润的气候类型,80~100 之间代表炎热潮湿的气候类型.此次样品的 CIA* 值除 Pm08-02-1 为 67.44, Pm08-07-2 为 61.22 之外,其余 5 件样品的 CIA* 值介于 72.04~76.19 之间(表 4,图 5).

表 1 待补地区 Pm08 剖面岩屑砂岩样品主量元素分析结果
Table 1 Contents of major elements in lithic sandstone samples from Pm08 section in Daibu area

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
Pm08-02-1	85.69	0.32	5.9	0.46	1.89	0.012	0.66	0.61	0.058	2.18	0.036	1.6
Pm08-05-1	79.03	0.46	8.36	5.03	1.77	0.014	0.5	0.28	0.054	2.91	0.052	1.47
Pm08-06-1	70.74	0.6	14.97	2.42	0.68	0.029	1.08	0.43	0.51	4.22	0.039	3.81
Pm08-07-1	80.99	0.39	9.26	1.63	0.78	<0.010	0.72	0.26	0.32	2.62	0.035	2.27
Pm08-07-2	62.97	0.64	4.7	4.36	0.82	0.026	0.17	0.45	0.43	2.11	0.14	3.52
Pm08-12-1	72.61	0.79	12.32	2.01	0.61	0.021	0.36	0.55	0.29	3.01	0.021	1.61
Pm08-15-1	77.33	0.62	10.51	4.88	0.67	0.018	0.83	0.44	0.42	2.77	0.042	2.66

含量单位:%.

表 2 待补地区 Pm08 岩屑砂岩剖面样品微量元素分析结果

Table 2 Contents of trace elements in lithic sandstone samples from Pm08 section in Daibu area

样品号	Ni	Co	Cr	V	Rb	Sr	Th	U
Pm08-02-1	32.8	33.6	4.17	12.5	83.4	15.7	8.17	1.71
Pm08-05-1	56.6	36.9	6.05	15.5	134	13.0	10.1	1.83
Pm08-06-1	72.1	43.7	5.88	15.2	139	16.9	6.85	1.60
Pm08-07-1	45.7	21.9	3.06	10.2	104	18.3	5.87	1.31
Pm08-07-2	62.97	36.1	2.82	11.8	113	14.1	7.11	1.54
Pm08-12-1	72.61	40.2	4.55	10.6	92	18.2	9.25	1.66
Pm08-15-1	77.33	28.7	5.13	12.2	125	15.4	6.54	1.27

含量单位:10⁻⁶.

因为 CIA^{*} 值受成岩作用、沉积分异和交代作用等的影响,所以推测整体为温暖湿润的气候类型,偶尔波动成寒冷干燥气候.

4.3 CIW、PIA 值对古气候的指示意义

钾的交代作用会使地层中的 K 元素比物源区母岩中更为富集,在 CIA 的基础之上不用 K₂O 参与计算,就得到了化学风化作用指数(CIW), $CIW=[Al_2O_3/$

$(Al_2O_3+CaO^+Na_2O)]\times 100$,用各摩尔数进行计算. CIW 值与母岩风化程度成正比,用皮尔森相关系数法计算 CIW 和 CIA^{*} 之间的相关系数 r ,得到 r 为 0.76,呈正相关态势. 二者数值相差越大,说明钾的交代作用越强,也能进一步推测物源碎屑中 K 已经大量流失. 澄江组 CIW 值从 98.06 过渡到 92.60,均值为 94.03,但此计算方法也未充分考虑钾长石中的 Al 元素,样品钾长石中 Al 含量越高,对应得到的 CIW 值也会越大.

斜长石蚀变指数(PIA),是在 CIW 的计算公式中 Al₂O₃ 含量换成 Al₂O₃-K₂O 的值进行计算,减小钾长石中 Al 元素含量的影响,从而进一步提高计算结果的可靠程度. $PIA=[(Al_2O_3-K_2O)/(Al_2O_3+CaO-K_2O+Na_2O)]\times 100$. 结果显示,样品除 Pm08-07-2 的 PIA 值为 75.66 外,其余均大于 90(表 4).

4.4 ICV 值对古气候的指示意义

成分变异指数(ICV)是用来反映黏土矿物含量多少的特征指数, $ICV=(Fe_2O_3+K_2O+Na_2O+CaO^+MgO+MnO+TiO_2)/Al_2O_3$,黏土矿物与岩石风化程度成正比. ICV>1 时,表示黏土矿物含量较少的首次沉积; ICV<1 时,表示强风化环境首次沉积或者再沉积的产物. 本研究样品中除 Pm08-07-02 为 1.72, Pm08-05-1 为 1.08

表 3 样品主量元素标准偏差和变异系数计算结果表

Table 3 Standard deviation and variation coefficient calculation results of major elements in samples

元素	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
SD	7.50	0.16	3.56	1.79	0.55	0.01	0.30	0.13	0.18	0.70	0.04
CV/%	9.92	29.88	37.79	60.14	53.43	33.32	49.14	29.73	60.60	24.80	76.39

表 4 样品主量元素特征指数计算结果表

Table 4 Characteristic index calculation results of major elements in samples

样品号	CIA	CIA [*]	CIW	PIA	ICV	Na/K	Al/Ca	Rb/Sr	V/Cr	U/Th	Ni/Co
Pm08-02-1	67.44	71.99	98.07	96.98	0.64	0.03	9.67	5.31	3.00	0.21	0.98
Pm08-05-1	72.04	73.48	98.72	98.06	1.08	0.02	29.86	10.31	2.56	0.18	1.53
Pm08-06-1	74.37	74.41	94.17	92.06	0.62	0.12	34.81	8.22	2.59	0.23	1.65
Pm08-07-1	74.32	74.39	94.22	92.12	0.64	0.12	35.62	5.68	3.33	0.22	2.09
Pm08-07-2	61.12	61.49	84.94	75.66	1.73	0.20	10.44	8.01	4.18	0.22	1.74
Pm08-12-1	76.19	77.44	95.50	94.14	0.55	0.10	22.40	5.05	2.33	0.18	1.81
Pm08-15-1	74.33	74.43	92.60	90.21	0.95	0.15	23.89	8.12	2.38	0.19	2.69

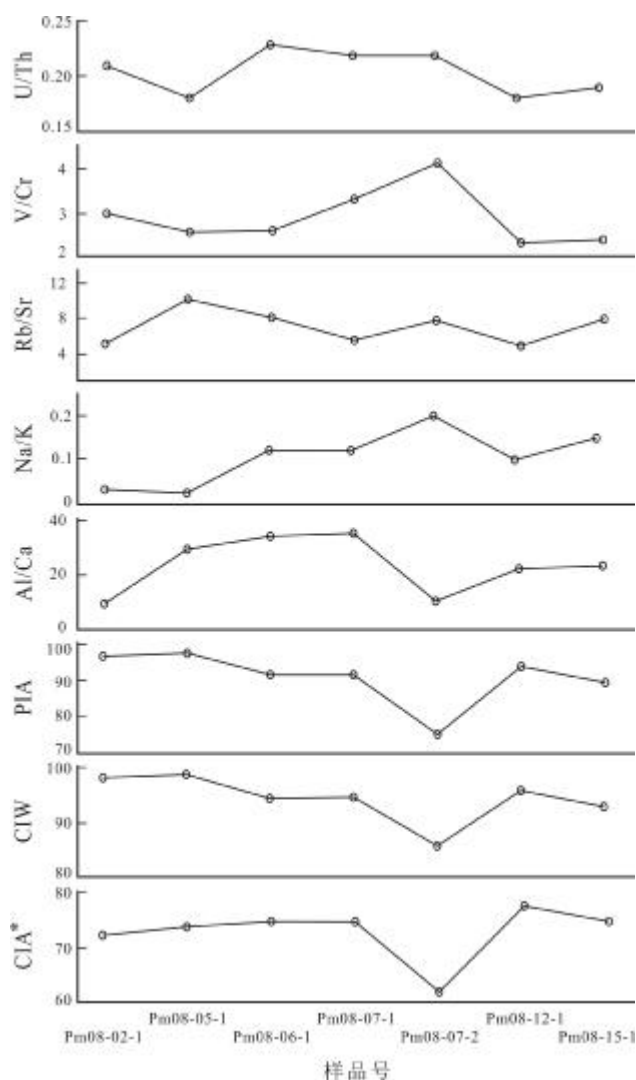


图5 特征指数变化规律图

Fig. 5 Variations of characteristic indexes

之外,其余样品ICV值均小于1(表4),总体反映物源为强风化环境产物,这与CIA*、CIW、IPV值所反映的温暖湿润气候类型相一致。

4.5 Na/K、Al/Ca、Ru/Sr 值与古气候演化特征

表征斜长石的风化指标并不单一。斜长石中Na含量较高,钾长石、伊利石和云母等矿物中K含量较高,而斜长石较易风化,往往母岩风化程度与Na/K比值呈反比。本研究样品中Na/K比值介于0.02~0.2,属于较小值范围(表4)。

Al在黏土矿物中含量较高,为典型陆源元素。Ca元素主要以方解石或白云石矿物的形式出现,多被视为水成元素或化学成因元素。因此,Al/Ca值也被用以表征岩石中陆源碎屑所占比例。陆源碎屑含量越高,

表示沉积区越靠近地表风化区。本研究样品Al/Ca值介于9.67~35.62之间(表4),表明陆源碎屑供给充足且稳定。从元素差异化角度区别海相和陆相沉积环境,有助于构建更为精确的沉积演化模式。

Ru的离子半径较大,对黏土矿物的吸附性较强而容易被保留。Sr离子半径较小,对黏土矿物吸附性较弱而容易被带走,故用Ru/Sr值来反映原岩的淋溶度。Ru/Sr值与古环境演化呈正相关性,比值越高表示降雨量越充沛。澄江组样品Ru/Sr值在5.05~10.31之间(表4),一般认为Ru/Sr>3则指示温暖湿润的气候类型。

4.6 V/Cr、U/Th、Ni/Co 值与古气候演化特征

古氧相鉴别方法(V/Cr)由Jones等^[12]提出。古氧相是反映沉积水体深浅的重要指标,氧化环境V/Cr<2,弱氧化环境V/Cr值介于2~4.25之间,缺氧环境V/Cr>4.25。澄江组样品V/Cr值最小为2.33,最大值为4.18,平均值为2.91(表4),指示弱氧化环境。一般认为弱氧化环境的沉积水体具有一定的水动力条件和深度,溶氧适度又不会轻易露出水体而产生强氧化。

U/Th值与环境氧化度呈负相关,一般情况下,V/Cr值越高,则U/Th值越低,二者对环境氧化度起到相互佐证的作用。本研究样品U/Th值在0.18~0.23之间(表4),一般认为陆源碎屑岩的U/Th值为0.26±0.13^[12],实验结果与此相符。V/Cr、U/Th与环境氧化度的对应关系如图6所示。

Ni/Co值也是研究环境氧化度的重要参数之一^[13],其比值与环境氧化度对应关系如下:Ni/Co<5,为氧化环境;5<Ni/Co<7,为弱氧化环境;Ni/Co>7,为还原环境。本研究样品Ni/Co值介于0.98~2.69之间,平均值为1.78(表4)。

V/Cr、U/Th、Ni/Co值按照其参数值域所指示的环境类型,均指示氧化、弱氧化的沉积环境,数据之间吻合度高,同时与李明龙等^[14]所提出的鄂西走马地区大塘坡组(对应澄江组)早期为弱氧化环境、晚期氧化作用增强的研究成果相符合。

5 沉积相类型探讨

沉积相是沉积环境的物质表现,是一个沉积环境中所有的原生沉积特征的总和,包括岩石、古生物和岩石地球化学等特征^[15-19]。经前人不断研究总结,冯增

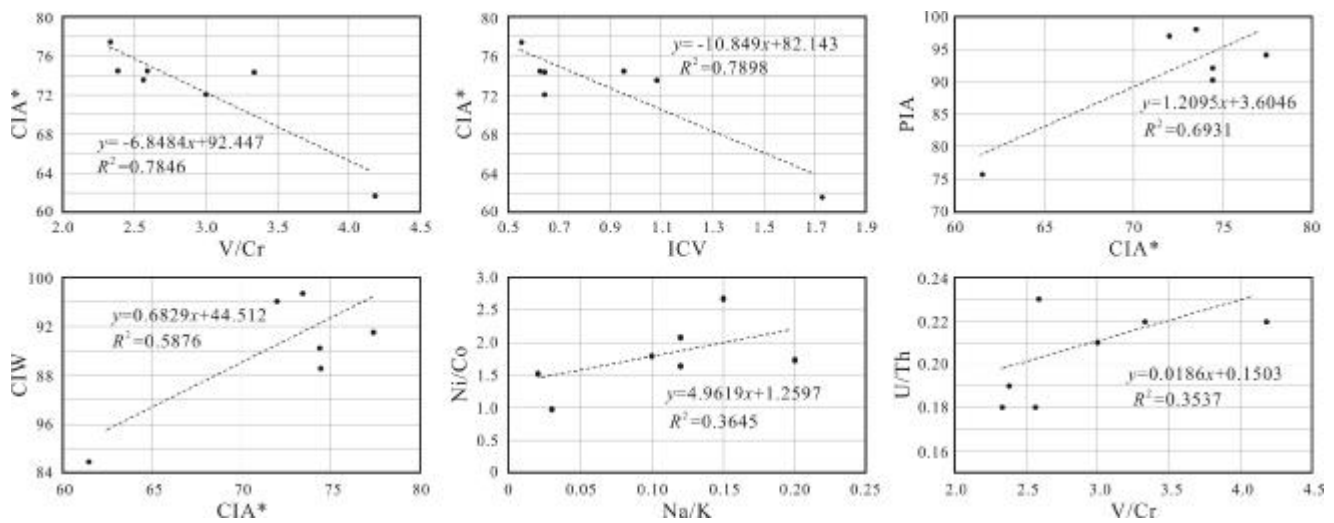


图 6 不同特征指数相关系数图

Fig. 6 Diagrams showing the correlations between the characteristic indexes of samples

昭^[20]提出岩相+沉积环境=沉积相的观点,笔者认同。故此次运用岩性组合、沉积构造和主微量元素指数分析的二元建模法来进行研究,最终认为滇东北待补镇南华系澄江组为湖相沉积类型,包括滨湖、浅湖两个亚相;南沱组为冰川相,包括冰碛亚相和冰湖亚相(图 7)。

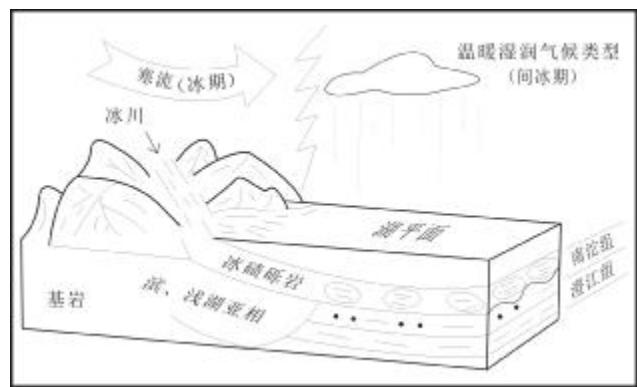


图 7 南华系澄江组、南沱组沉积相三维模式图

Fig. 7 3D model of sedimentary facies of Chengjiang and Nantuo formations of Nanhua System

5.1 滨湖和浅湖亚相

滨湖亚相主要分布在澄江组中的灰紫色中层状硅质胶结含粉砂质细粒岩屑砂岩、粉砂岩与灰绿色泥质岩,灰色中层状硅质胶结含粉砂质细粒岩屑石英砂岩夹薄层状粉砂岩等层位,发育平行层理、小型交错层理、递变层理等。石英砂岩常见于滨海亚相和滨湖亚

相中,但相临层位中均无海相沉积岩类和构造发育。浅湖亚相主要分布在灰黄—灰紫色中层状岩屑砂岩与粉砂质泥岩、杂色中—厚层状青灰色含粉砂质泥质岩等层位中,发育小型波状层理、水平层理等。样品主微量元素分析均指示温暖湿润的气候类型和氧化、弱氧化的沉积环境,此测试结果与浅湖亚相多为弱氧化环境和还原环境的推论相符。

5.2 冰碛和冰湖亚相

冰碛亚相和冰湖亚相都分布于南沱组的复成分砾岩中。冰碛亚相中砾石分选性不好,磨圆度差,并且砾石表面有明显的擦痕。冰湖亚相砾石磨圆较好,呈次圆—圆状,胶结物为泥砂质胶结的部分层位。一般认为卷入冰川内部的砾石难以发生分选和磨圆,且泥质胶结物均匀分布也需要流动水体的作用。

6 结论

(1)通过对澄江组 7 件细碎屑岩样品的主、微量元素进行测试,对比分析了 CIA、CIW、IPV、ICV、Na/K、Al/Ca、Ru/Sr、V/Cr、U/Th、Ni/Co 等有关参数,判断该地史时期气候温暖湿润,雨量充沛,为氧化、弱氧化沉积环境。

(2)滇东北会泽地区南华系包括澄江组和南沱组,均为陆源碎屑岩。澄江组沉积相为湖相,自下而上分为浅湖亚相和滨湖亚相;南沱组为一套复成分砾岩,判断为扇三角洲沉积,属扇三角洲平原亚相,泥石流

微相。

(3)研究区南华系的沉积构造特征(宏观)与元素特征(微相)相吻合,宏观+微观的二元研究模式,在区域上(与鄂西走马地区南华系)进行综合对比时确实能够使成果更为量化和精确。

参考文献(References):

- [1]宋芳,牛志军,何钰砚,等.湘中地区南华系沉积序列、物源特征及区域对比[J].地球科学,2019,44(9):3074-3087.
Song F, Niu Z J, He Y Y, et al. Sedimentary sequence, provenance and stratigraphic correlation of Nanhua System in middle Hunan Province[J]. Earth Science, 2019, 44(9): 3074-3087.
- [2]刘兵,李静,邓仁宏,等.扬子陆块西缘安益南华纪火山岩的厘定及其地质意义[J].地质通报,2018,37(11):1980-1990.
Liu B, Li J, Deng R H, et al. Determination of the Nanhua System volcanic rocks in Anyi on the western margin of the Yangtze Block[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(11): 1980-1990.
- [3]蔡雄飞,叶琴,肖明元.对南华系下统莲沱组 CIA 值寒冷气候认识的几点商榷——以鄂西神农架、湘西北南华系莲沱组为例[J].岩石矿物学杂志,2018,37(4):621-636.
Cai X F, Ye Q, Xiao M Y. Some opinions concerning the understanding of CIA cold climate of the Liantuo Formation of Nanhua System: Exemplified by the Nanhua System from Shennongjia in western Hubei and western Hunan[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2018, 37(4): 621-636.
- [4]黄晶,储雪蕾,张启锐,等.新元古代冰期及其年代[J].地学前缘,2007,14(2):249-256.
Huang J, Chu X L, Zhang Q R, et al. Constraints on the age of Neoproterozoic global glaciations[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(2): 249-256.
- [5]沈洪娟,顾尚义,赵思凡,等.华南南华纪南沱冰期海洋环境的沉积地球化学记录——来自黔东南南华系南沱组白云岩碳氧同位素和微量元素的证据[J].地质论评,2020,66(1):214-228.
Shen H J, Gu S Y, Zhao S F, et al. The sedimentary geochemical records of ocean environment during the Nantuo (Marinoan) glaciation in South China: Carbon and oxygen isotopes and trace element compositions of dolostone in Nantuo Formation, Nanhua System, in eastern Guizhou[J]. Geological Review, 2020, 66(1): 214-228.
- [6]卢定彪,张德明,吴开彬,等.华南新元古代南华大冰期气候岩石地层对比[J].中国科技论文,2018,13(9):1060-1067.
Lu D B, Zhang D M, Wu K B, et al. Stratigraphic correlation on climate and rock during the Nanhua Great Ice Age of the Neoproterozoic in South China[J]. China Sciencepaper, 2018, 13(9): 1060-1067.
- [7]王泽传,赵茂春,赵思传,等.云南新元古代地史研究的新认识[J].地层学杂志,2019,43(1):74-80.
Wang Z C, Zhao M C, Zhao S C, et al. Study on the Neoproterozoic geohistory of Yunnan Province[J]. Journal of Stratigraphy, 2019, 43(1): 74-80.
- [8]韩阳光,颜丹平,穆丹,等.滇东北驾车穹隆结构及其 Pb、Zn、Ag、As、Sb 元素异常特征[J].地学前缘,2018,25(1):65-79.
Han Y G, Yan D P, Mu D, et al. Structural and background anomaly characteristics of Pb, Zn, Ag, As, Sb of the Jiache dome, Northeast Yunnan Province[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(1): 65-79.
- [9]云南省地质矿产局.云南省区域地质志[M].北京:地质出版社,1990:611-631.
Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Yunnan Province [M]. Beijing: Geological publishing House, 1990: 611-631. (in Chinese)
- [10]Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885):715-717.
- [11]McLennan S M. Weathering and global denudation[J]. The Journal of Geology, 1993, 101(2):295-303.
- [12]Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 1994, 111(1/4):111-129.
- [13]Wei H Y, Chen D Z, Yu H, et al. End-Guadalupian mass extinction and negative carbon isotope excursion at Xiaojiaba, Guangyuan, Sichuan[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(9):1480-1488.
- [14]李明龙,陈林,田景春,等.鄂西走马地区南华纪古城期—南沱早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[J].地质学报,2019,93(9):2158-2170.
Li M L, Chen L, Tian J C, et al. Paleoclimate and paleo-oxygen evolution during the Gucheng Period-early Nantuo Period of Nanhua System in the Zouma area, West Hubei: Evidence from elemental geochemistry of fine clastic rocks[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(9): 2158-2170.
- [15]黄宗理,张良弼.地球科学大辞典:基础学科卷[M].北京:地质出版社,2006:1-1173.
Huang Z L, Zhang L B. A dictionary of earth sciences: Basic disciplines [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1-1173. (in Chinese)
- [16]鲁欣.沉积岩石学原理(中册)[M].北京:地质出版社,1955:1-174.
Lu X. Principles of sedimentary petrology, Volume 2 [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1955: 1-174. (in Chinese)

- 324.
- [13]王海鹏. 辽宁省岩石地层太原组地质年代的确定[J]. 地质与资源, 2015, 24(4): 287-294.
- Wang H P. Determination of the geological age of lithostratigraphic Taiyuan Formation in Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2015, 24(4): 287-294.
- [14]彭玉鲸, 陈跃军, 刘跃文. 本溪组——岩石地层和年代地层与穿时性[J]. 世界地质, 2003, 22(2): 111-118.
- Peng Y J, Chen Y J, Liu Y W. Benxi Formation: Lithohorizon and chronohorizon with diachronism[J]. Global Geology, 2003, 22(2): 111-118.
- [15]李明娟, 张洪年, 胡宗全. 济阳拗陷上古生界层序划分与等时格架建立[J]. 石油物探, 2006, 45(1): 83-87.
- Li M J, Zhang H N, Hu Z Q. Division of Upper Paleozoic stratigraphic sequence and establishment of isochronal stratigraphic frame in Jiyang depression[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(1): 83-87.
- [16]于鹏. 广覆式生烃理念在辽河东部凸起油气成藏中的应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2014, 29(4): 24-30.
- Yu P. Application of widely-covered hydrocarbon generation concept to hydrocarbon accumulation in Eastern Uplift, Liaohe Depression[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2014, 29(4): 24-30.
- [17]葛明娜, 张金川, 毛俊莉, 等. 辽河拗陷东部凸起上古生界页岩气资源潜力评价[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 28-32, 128.
- Ge M N, Zhang J C, Mao J L, et al. Evaluation on Neopaleozoic shale gas resource potential in the Eastern Salient of the Liaohe Depression[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(9): 28-32, 128.
- [18]李春华, 于鹏, 毛俊莉, 等. 辽河拗陷东部凸起上古生界致密砂岩气成藏特征[J]. 特种油气藏, 2013, 20(1): 19-22.
- Li C H, Yu P, Mao J L, et al. Diagenetic characteristics of tight sandstone of Upper Paleozoic of East Uplift in Liaohe Depression[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2013, 20(1): 19-22, 155-156.
- [19]陈洪德, 覃建雄, 田景春, 等. 中国南方古生界层序格架中的生储盖组合类型及特征[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 62-69.
- Chen H D, Tan J X, Qin J C, et al. Types and features of source-reservoir-cap rock combinations in Paleozoic sequence in southern China[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 62-69.
- [20]陈洪德, 倪新锋, 田景春, 等. 华南海相下组合层序地层格架与油气勘探[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 370-377.
- Chen H D, Ni X F, Tian J C, et al. Sequence stratigraphic framework of marine lower assemblage in South China and petroleum exploration [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 370-377.

(上接第 635 页/Continued from Page 635)

- [17]北京石油学院矿物岩石教研室. 沉积岩石学[M]. 北京: 中国工业出版社, 1961: 1-263.
- Mineralogy and Petrology Section of Beijing Institute of Petroleum. Sedimentary petrology [M]. Beijing: China Industrial Press, 1961: 1-263. (in Chinese)
- [18]华东石油学院岩矿教研室. 沉积岩石学(下册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1982: 1-256.
- Mineralogy and Petrology Section of East China Petroleum Institute. Sedimentary petrology, volume 2 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982: 1-256. (in Chinese)
- [19]冯增昭. 沉积岩石学[M]. 2 版. 北京: 石油工业出版社, 1994: 1-326.
- Feng Z Z. Sedimentary petrology [M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 1-326. (in Chinese)
- [20]冯增昭. 沉积相的一些术语定义的评论[J]. 古地理学报, 2020, 22(2): 207-220.
- Feng Z Z. A review on the definitions of terms of sedimentary facies [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2020, 22(2): 207-220.