

doi:10.3799/dqkx.2014.037

黔东震旦—寒武系转换期碎屑锆石年龄及其地质意义

杨恩林^{1,2}, 吕新彪^{1*}, 石平², 吴波², 刘文³, 狄永宁⁴

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
2. 贵州省地质矿产勘察开发局 117 地质大队, 贵州贵阳 550018
3. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430074
4. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州贵阳 550001

摘要: 通过对注溪地层剖面岩性、含矿性及接触关系进行详细考察, 并对其黑色岩系中长石岩屑砂岩进行碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年, 获得 84 组有效年龄, 其中 864~742 Ma 年龄最集中, 表明新元古代黔东地区存在大规模的岩浆活动。江南造山带为黔东早寒武世黑色岩系的主要沉积物源区, 而钒等成矿元素源于基性—超基性侵入岩体。雪峰运动导致这些含矿岩体剥顶, 大量金属元素注入海洋, 海侵海底缺氧, 富含这些成矿元素藻类死亡, 钒等金属元素随同有机质进入沉积物中, 在利于其沉淀富集的留茶坡和九门冲组地层成矿。536 Ma 为留茶坡组最后接受沉积时限和九门冲组最大沉积年龄, 震旦与寒武系界线位于留茶坡组中上部硅质岩中, 清水江组地层岩性的变形、变质和角度不整合于上覆、下伏地层的现象为雪峰运动地质效应。

关键词: 地层学; 碎屑锆石; 沉积; 地质年代学; 注溪剖面。

中图分类号: P597 **文章编号:** 1000—2383(2014)04—0387—12 **收稿日期:** 2013—07—19

Detrital Zircon Age of Stratigraphic Sinian-Cambrian in East Guizhou and Its Geological Significance

Yang Enlin^{1,2}, Lü Xinbiao^{1*}, Shi Ping², Wu Bo², Liu Wen³, Di Yongning⁴

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. 117 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Guiyang 550018, China
3. Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
4. School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

Abstract: Lithology, ore-bearing potential and contact relation in Zhuxi stratigraphic section are studied in detail. 84 groups of effective ages concentrated in 864—742 Ma are obtained from U-Pb dating of detrital zircon by LA-ICP-MS in feldspar lithic sandstone in the black shales, which indicates the presence of large-scale magmatic activity of the East Guizhou at the Neoproterozoic. All zircon U-Pb ages indicate that sediments within Lower Cambrian black shales in East Guizhou are mainly from the Jiangnan orogen. Metal elements such as vanadium are derived from the basic-ultrabasic rocks. The Xuefeng movement peeled the top of ore-bearing rock off the basic-ultrabasic rocks, pouring a great amount of metal into the ocean. The anoxic submarine caused the death of algae whose bodies were rich of metallogenic elements, which introduced vanadium into the sediments along with the organic matter. The mineralization occurred in the Liuchapo and Jiumenchong formations that were favorable to sedimentation of metals. 536 Ma is the final depositional time of the Jiumenchong Formation, and maximum depositional age of the Liuchapo Formation. The boundary between Sinian and Cambrian is located in the upper siliceous rocks of the Liuchapo Formation. Lithology deformation, metamorphism, and unconformity with other strata of the Qingshuijiang Formation are the geological responses of the Xuefeng movement.

Key words: stratigraphy; detrital zircon; sedimentology; geochronology; Zhuxi section.

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目 05 子课题 (No. 2011BAB06B04-05); 贵州地矿局地质科研项目 (No. 200901)。

作者简介: 杨恩林 (1978—), 男, 工程师, 博士生, 主要从事沉积学研究。E-mail: 155060162@qq.com

*** 通讯作者:** 吕新彪, E-mail: lvxb_01@163.com

0 引言

碎屑锆石年代学在示踪沉积物源、限定地层的最大沉积时代、恢复区域古地理格局、反演盆地演化与构造事件和揭示早期大陆演化等方面得到广泛应用(余振兵,2007)。黔东南地区地史演化过程中大量地质信息被粉砂(泥质)级沉积物保存下来,搬运到华南盆地最早开启的地方——黔东南裂谷盆地(汪正江,2008)沉淀沉积。震旦—寒武系地层完整出露的注溪剖面就位于黔东南裂谷盆地沉积区中心,注溪剖面为研究黔东南地区新元古代地层及其构造演化提供了理想的场所。前人曾对黔东南新元古代的地层格架(孟晓庆,2007)、沉积环境(刘宝珺等,1993;陈兰,2006;周琦等,2007)、构造演化(杨森楠,1989)等方面进行较为广泛的研究,同时也研究了该时期火成岩的年代学(李献华,1999;周明忠等,2008;Zhang *et al.*, 2008;周金城等,2009;卓皆文等,2009;高林志等,2010;Wang *et al.*, 2010;王敏,2012;李献华等,2002,2012)。汪正江(2008)通过对黔东南地区新元古代各地层岩性、矿物组合以及湘黔桂火山—岩浆事件的研究认为,黔东南裂谷盆地沉积为华南新元古代裂谷盆地演化起了奠基作用。Wang *et al.*(2010)

对黔东南地区梵净山群回香坪、洼溪、独岩塘组和下江群鸟叶、张家坝、清水江、南沱组地层的碎屑锆石年代学研究表明,该区新元古代碎屑沉积物主要来自扬子地台。Gaskiers 冰期(580~590 Ma)(Calver *et al.*, 2004)之后,全球气候变暖,海平面上升导致震旦—寒武系期间的大面积沉积。黔东南地区震旦—寒武系转换期沉积了一套富含有机质和多金属元素的黑色岩系,其沉积物源缺乏系统分析,且赋存于此黑色岩系中的长石岩屑砂岩碎屑锆石年代学研究成果未见报道。本文对江南造山带西段震旦—寒武系转换界面上,赋存于黑色岩系的长石岩屑砂岩碎屑锆石利用 LA-ICP-MS 方法进行 U-Pb 年龄测定,分析年龄谱特征对应的构造热事件,探讨构造热事件与地层界线、沉积物源区的补给情况和雪峰运动的地质效应等问题。

1 地质背景及剖面

吕梁运动使扬子、华北和塔里木等克拉通联结,成为克拉通的一部分(戴传固等,2005)。到中元古代早期扬子克拉通发生裂解,分裂出扬子板块和华夏古陆,其间为南华狭窄洋盆(刘宝珺,1993),经过多

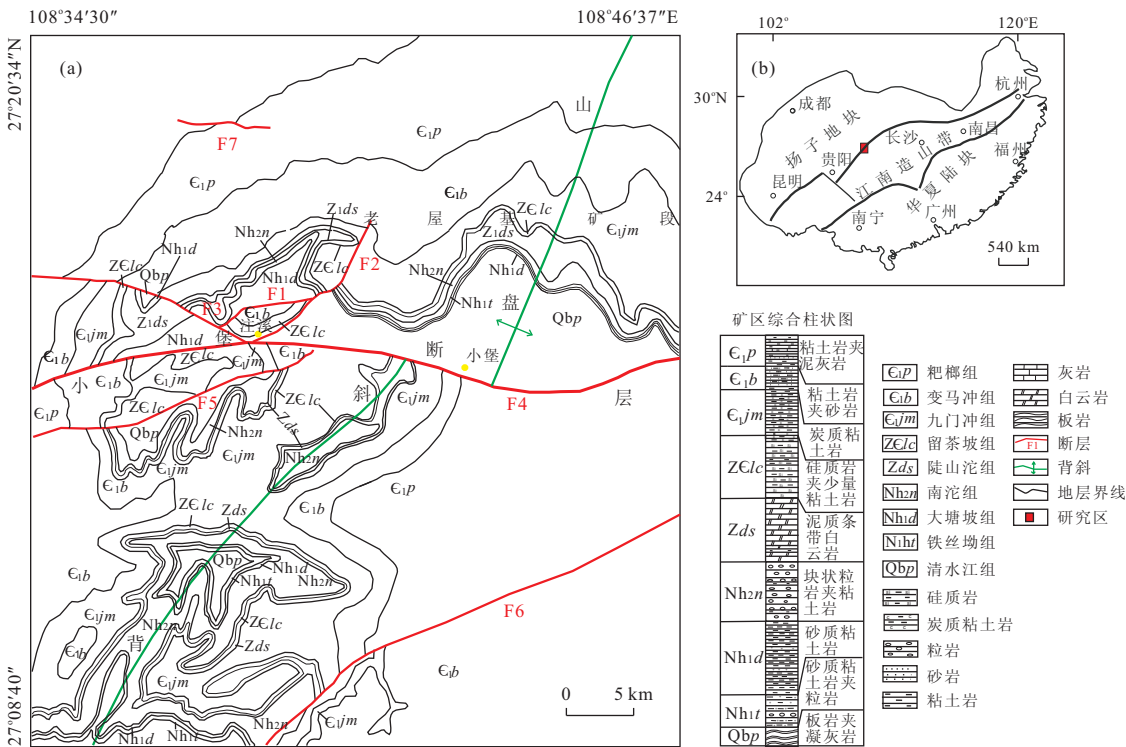


图 1 注溪钒矿床地质略图(a)和研究区大地构造单元(b)(图 a 据贵州地矿局 117 地质队资料,2011 修改)

Fig.1 The simplified geological map of the Zhuxi vanadium deposit (a), and the tectonic location and tectonic units division of the studied area (b)

次造山和裂解运动,呈现出现在的地理格局——江南造山带为扬子板块和华夏古陆的拼接带(图 1b)。黔东裂谷盆地为华南狭窄洋的一部分,注溪钒矿床就位于此裂谷盆地之中。黔东地区区域上属于江南造山带西南段,注溪钒矿床位于盘山背斜北端(图 1a),震旦系留茶坡组和寒武系九门冲组地层完整出露于桐子园背斜翼部,核部为新元古界下江群清水江组板岩。剖面自下而上依次为震旦系陡山沱组泥质条带白云岩—留茶坡组热水隐晶质(灰)黑色硅质岩夹炭质粉砂岩—灰色长石岩屑砂岩(厚度 0.2~5.0 m)—九门冲组含黄铁矿粘土质粉砂岩(多金属层)—黑色炭质粉砂岩(底部为钒矿层)。留茶坡组岩性组合(自下而上):薄层状黑色硅质岩—薄至中层灰色硅质岩—薄层硅质岩夹少量炭质粉砂岩。邻区铜仁和遵义留茶坡组顶部硅质岩都发育有一层 10~30 cm 的凝灰岩,锆石 U-Pb 年龄 556~518 Ma(周明忠等,2008;卓皆文等,2009)。九门冲组岩性组合(自下而上):一段以长石岩屑砂岩、含黄铁矿粘土质粉砂岩(多金属层)和炭质粉砂岩组成,二段为薄至中层深灰色灰岩。震旦—寒武转换期黑色岩系的产生为海平面频繁升降事件的结果,该事件使下伏震旦系陡山沱组白云岩为代表的碳酸盐台地被淹没而消亡;海侵海水快速加深,之后海退海平面下降;整个过程持续到九门冲组顶部台地相灰岩结束。总之,注溪剖面黑色岩系上覆、下伏地层都为碳酸盐岩,即表明当时的沉积环境为低能—高能—低能环境。

2 样品

贵州注溪钒矿床位于盘山背斜北段轴部及近北东倾伏端的桐子园—哨坪背斜,区内层位稳定。本次样品采集为留茶坡组与九门冲组分界标志岩性——灰色长石岩屑砂岩,采样地点(坐标:108°40′10″E, 27°15′30″N)在注溪钒矿床主矿体下部,具体位置见(图 1)。剖面九门冲组从下往上依次为长石岩屑砂岩、含铁粉砂岩(多金属层)、炭质粉砂岩(钒矿层)和炭质粉砂岩(围岩)(图 2)。长石岩屑砂岩野外露头呈深灰色,表面风化呈浅色(图 3a),厚约 2 m,陆源沉积特征斜层理和波痕等构造发育。显微镜下观察(图 3b),长石岩屑砂岩的组分主要由陆源碎屑、内碎屑和填隙物等组成,石英矿物屑(53%)、长石矿物屑(15%),碎屑颗粒粒径 0.15~0.20 mm,极少数可达到 0.30 mm,呈次椭圆状—次圆状,磨圆度和分选性一般,岩石成分成熟度中等。一种可能是物源来自于

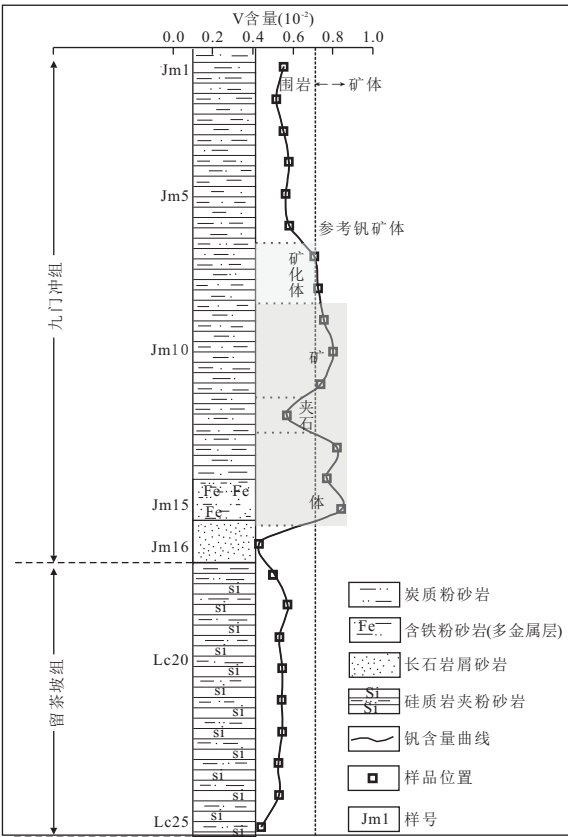


图 2 注溪钒矿床老屋基地层柱状剖面
Fig.2 Stratigraphic in Laowuji of the Zhuxi vanadium deposit

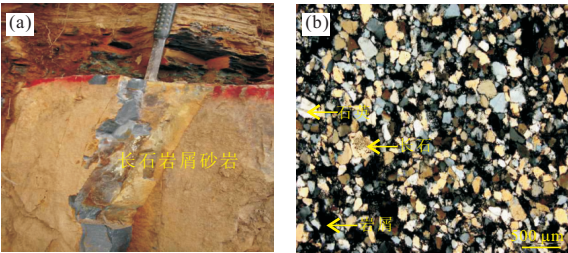


图 3 长石岩屑砂岩露头(a)和显微镜下照片(b)
Fig.3 Photos of the feldspar lithic sandstone in outcrop and under microscope

富含石英和岩屑再旋回的沉积岩区,即碎屑物来自于早期的碎屑沉积岩的再剥蚀和沉积;另外一种可能是碎屑物质经过了长距离搬运,这两种因素也可能同时存在。

3 分析方法和数据处理

锆石按常规重力和磁选方法分选,由河北省区域地质矿产调查研究所完成。分选后的锆石在双目

镜下主要挑选完整、透明度高、无裂隙、体型较大且具有代表性的锆石,将其整齐地置于环氧树脂中,磨至大部分锆石一半处截面.制靶后先进行反射光、透射光显微照相,选择其中无裂隙、无包裹体的锆石再进行阴极发光(CL)显微照相.阴极发光显微照相在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR) JEOL-JXA-8100 电子探针上完成.锆石 U-Pb 同位素测年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用激光剥蚀等离子质谱(LA-ICP-MS)仪分析完成.具体分析为 MicroLas 公司的 Geolas2005 准分子激光剥蚀系统和美国 Agilent 公司的 Agilent7700 型 ICP-MS 仪器.剥蚀过程以氦气为载气,束斑直径 $32\text{ }\mu\text{m}$,激光脉冲为 6 Hz,能量为 50 mJ,以国际标准锆石 91500 作为外标标样,元素含量用 NIST610 为外标,²⁹Si 为内标元素.样品每隔 5 个点做两个点标准锆石 91500 测定,以降低每次测定条件之间的偏差.实验原始数据采用 ICPMSDataCa 软件进行处理(Liu *et al.*,2010),U-Pb 年龄谐和图和年龄加权平均值计算采用 Isoplot3.0 完成(Ludwig,2008),详细操作流程及数据处理方法见(Liu *et al.*,2010).

4 分析结果

长石岩屑砂岩石中多数碎屑锆石在双目镜下透明度较高,总体呈淡黄色、淡褐色,晶型为四方柱、四方双锥和短柱状.大多数振荡环带明显,个别内部为均质或弱环带结构,长度 80~250 μm ,宽度 40~150 μm .宽缓不一的生长环带可能为锆石结晶温度以及寄主岩石成分的不同所致.少量碎屑锆石具有一定的磨圆度,可能是长距离搬运或沉积再旋回的结果.据锆石的 CL 图像可分为 3 类(图 4);(1)核部与边缘都发育有振荡环带或弱震荡环带,为岩浆成因锆石(图 4,测点 3、5、6、7、9 等);(2)核部具有继承锆石的残留核,但边部具有明显能代表岩浆结晶年龄的振荡环带(图 4,测点 49);(3)极少量锆石 CL 图像显示出面状分带结构或均质无分带结构(图 4,测点 42),其可能是锆石经历了重结晶的变质成因,U-Pb 年龄可能记录的是变质热事件年龄.测点都分布于具有明显的振荡环带部位.Th 和 U 等微量元素含量不同,CL 图像强弱不等,少量颜色较暗;几乎所有年龄谐和锆石的 Th/U 比值都大于 0.4,显示锆石大都为岩浆成因,仅测点 83、84 寄存的碎屑锆石 Th/U 值为 0.26 和 0.31.据碎屑锆石年龄范

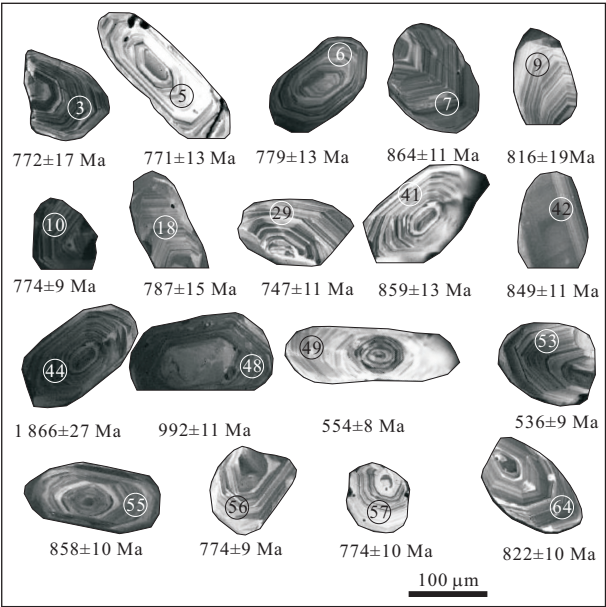


图 4 长石岩屑砂岩代表性锆石 CL 图像(图中圆为锆石 U-Pb 测年位置,其编号与表 1 中一致)
Fig.4 CL images of selected zircons from Jiumenchong Formation

围,对 $>1\ 200\text{ Ma}$ 的样品,因含大量放射性成因 Pb,采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄; $<1\ 200\text{ Ma}$ 的样品,由于可用于测量的放射性成因 Pb 含量低和普通 Pb 校正的不确定性,采用更为可靠的²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄(Sireombe, 1999; Cawood and Nemchin, 2000).样品 U-Pb 年龄共测试了 90 个点,以谐和度 $\geq 80\%$ 为标准遴选 U-Pb 年龄数据,选出 84 组为有效数据.测试结果见表 1,谐和年龄频谱见图 4, U-Pb 年龄值图谱分布较广,为 $536\pm 9\sim 1\ 881\pm 20\text{ Ma}$,可分为 $1\ 743\sim 1\ 859\text{ Ma}$ 、 $1\ 061\sim 914\text{ Ma}$ 、 $864\sim 742\text{ Ma}$ 、 $663\sim 623\text{ Ma}$ 和 $556\sim 536\text{ Ma}$ 5 个年龄区间,说明其物源区应具有多种不同时代的岩石作为剥蚀源.由表 1 和图 5 得知,536~556 Ma 区间共有 4 个有效测点,占总有效数据的 4.8%,加权平均值 555 Ma.623~663 Ma 区间有 6 个碎屑锆石年龄点,占总有效数据的 7.1%,加权平均值 663 Ma.864~742 Ma 区间共有 66 个测点年龄,占总有效数据的 78.57%,加权平均值分别为 824 Ma(主峰值)、777 Ma(次峰值)和 856 Ma(第三值),其锆石振荡环带明显或弱振荡环带,且 Th/U 比值大都大于 0.4.总之,结合 Th/U 比值和 CL 图像,说明绝大多数锆石应为岩浆成因(Hermann *et al.*,2001).

表 1 九门冲组碎屑锆石 U-Pb 年龄测试结果

Table 1 U-Pb isotopic data for detrital zircons from Jiumenchong Formation

测点号	含量(10^{-6})			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}(\text{Ma})$			谐和度(%)						
	Pb	Th	U	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ		年龄	1σ				
1	132	412	408	0.062 86	0.002 90	1.061 73	0.047 04	0.122 44	0.001 90	702	94	735	23	745	11	98
2	145	288	426	0.069 98	0.003 16	1.488 85	0.066 18	0.153 29	0.002 13	928	93	926	27	919	12	99
3	35	72	117	0.079 01	0.005 47	1.373 37	0.094 38	0.127 16	0.003 06	1 172	138	878	40	772	17	87
4	177	455	562	0.066 20	0.003 13	1.189 95	0.052 61	0.129 64	0.001 77	813	100	796	24	786	10	98
5	115	353	256	0.067 91	0.004 48	1.188 03	0.074 88	0.127 13	0.002 30	865	137	795	35	771	13	96
6	67	179	217	0.066 49	0.003 95	1.175 87	0.065 50	0.128 51	0.002 30	822	124	789	31	779	13	98
7	184	427	600	0.066 64	0.002 88	1.324 83	0.052 80	0.143 45	0.001 94	828	85	857	23	864	11	99
8	52	147	140	0.075 08	0.005 54	1.376 59	0.097 03	0.135 07	0.002 92	1 072	149	879	41	817	17	92
9	35	73	143	0.072 93	0.005 31	1.330 88	0.088 63	0.134 93	0.003 33	1 013	148	859	39	816	19	94
10	326	824	1 204	0.065 53	0.002 42	1.169 33	0.043 75	0.127 56	0.001 58	791	78	786	20	774	9	98
11	148	317	623	0.066 00	0.002 74	1.254 27	0.049 92	0.136 89	0.001 74	806	92	825	22	827	10	99
12	250	909	352	0.063 47	0.003 04	1.132 99	0.054 15	0.128 23	0.002 01	724	106	769	26	778	11	98
13	265	735	420	0.068 99	0.003 14	1.462 46	0.065 46	0.152 33	0.002 46	898	-105	915	27	914	14	99
14	107	270	369	0.061 50	0.003 28	1.042 38	0.052 77	0.123 09	0.002 28	657	115	725	26	748	13	96
15	295	772	848	0.060 11	0.002 23	1.144 73	0.045 60	0.137 19	0.002 30	609	81	775	22	829	13	93
16	252	504	421	0.088 03	0.004 62	1.707 72	0.100 44	0.137 36	0.002 83	1 383	100	1 011	38	830	16	80
17	227	608	780	0.063 62	0.002 58	1.086 82	0.041 96	0.122 89	0.001 72	728	86	747	20	747	10	99
18	64	160	190	0.067 15	0.004 31	1.199 49	0.070 61	0.129 84	0.002 66	843	135	800	33	787	15	98
19	83	223	235	0.058 71	0.003 91	1.168 81	0.067 02	0.142 32	0.003 02	567	114	786	31	858	17	91
20	172	356	634	0.062 80	0.003 34	1.280 24	0.051 90	0.140 48	0.001 83	702	114	837	23	847	10	98
21	43	124	162	0.077 10	0.007 37	1.088 86	0.084 02	0.108 23	0.004 00	1 124	192	748	41	662	23	87
22	174	408	686	0.065 99	0.002 80	1.215 79	0.045 50	0.130 79	0.001 86	806	90	808	21	792	11	98
23	159	387	472	0.064 81	0.003 14	1.282 27	0.056 92	0.143 06	0.002 26	769	108	838	25	862	13	97
24	114	334	242	0.070 46	0.004 03	1.263 83	0.074 68	0.129 71	0.002 56	943	117	830	34	786	15	94
25	61	141	215	0.067 77	0.004 06	1.179 98	0.070 49	0.127 24	0.002 55	861	125	791	33	772	15	97
26	64	127	235	0.068 33	0.003 56	1.334 47	0.068 95	0.142 12	0.002 63	880	107	861	30	857	15	99
27	247	630	902	0.070 81	0.004 66	1.243 21	0.079 16	0.126 80	0.001 49	954	135	820	36	770	9	93
28	93	299	221	0.071 33	0.004 89	1.167 84	0.072 31	0.122 06	0.002 56	969	141	786	34	742	15	94
29	157	498	431	0.067 40	0.003 05	1.141 34	0.050 68	0.122 89	0.001 93	850	94	773	24	747	11	96
30	135	345	473	0.063 34	0.002 76	1.080 20	0.047 26	0.122 95	0.001 64	720	88	744	23	748	9	99
31	144	557	621	0.060 17	0.002 96	0.740 59	0.035 21	0.089 49	0.001 26	609	112	563	21	553	7	98
32	110	223	425	0.070 59	0.003 27	1.321 23	0.060 71	0.134 82	0.001 87	946	96	855	27	815	11	95
33	280	656	728	0.062 96	0.002 60	1.244 23	0.050 16	0.142 28	0.001 91	706	88	821	23	858	11	95
34	231	593	654	0.066 33	0.002 64	1.296 01	0.050 30	0.140 70	0.001 88	817	83	844	22	849	11	99
35	226	699	907	0.059 73	0.002 29	0.900 70	0.035 21	0.108 34	0.001 49	594	83	652	19	663	9	98
36	66	168	195	0.062 13	0.003 77	1.169 11	0.070 19	0.136 30	0.002 33	680	130	786	33	824	13	95
37	131	301	596	0.070 27	0.003 28	1.039 65	0.047 68	0.107 62	0.001 51	936	95	724	24	659	9	90
38	117	354	322	0.063 76	0.003 20	1.123 19	0.058 88	0.127 92	0.002 36	744	102	765	28	776	13	98
39	70	185	191	0.066 92	0.005 10	1.219 83	0.085 00	0.134 78	0.003 03	835	127	810	39	815	17	99
40	69	176	196	0.065 35	0.004 28	1.246 62	0.073 01	0.142 17	0.003 17	787	137	822	33	857	18	95

续表 1

测点号	含量(10^{-6})			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$				$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}(\text{Ma})$				谐和度(%)	
	Pb	Th	U	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
41	113	257	388	0.064 00	0.003 08	1.273 94	0.061 61	0.142 58	0.002 28	743	102	834	28
42	135	367	343	0.067 76	0.003 19	1.327 40	0.060 81	0.140 80	0.001 98	861	103	858	27
43	99	244	296	0.072 26	0.004 29	1.275 24	0.073 10	0.127 57	0.001 98	994	116	835	33
44	261	235	388	0.106 64	0.003 96	4.995 41	0.179 71	0.335 70	0.005 58	1 743	68	1 819	30
45	87	231	271	0.071 28	0.004 33	1.338 01	0.077 69	0.136 16	0.002 37	965	125	862	34
46	95	248	331	0.064 28	0.003 35	1.128 41	0.057 16	0.127 28	0.002 06	750	111	767	27
47	102	275	269	0.071 74	0.003 97	1.378 09	0.071 66	0.142 35	0.004 23	989	113	880	31
48	269	501	843	0.073 38	0.003 06	1.567 88	0.062 60	0.153 73	0.001 95	1 033	84	958	25
49	79	188	478	0.068 84	0.003 82	0.856 33	0.046 47	0.089 74	0.001 41	894	115	628	25
50	216	375	726	0.084 66	0.003 64	1.615 59	0.070 29	0.136 69	0.001 72	1 309	84	976	27
51	235	456	648	0.063 83	0.002 23	1.260 08	0.043 27	0.142 46	0.001 90	744	74	828	19
52	112	283	299	0.061 84	0.003 38	1.138 09	0.060 12	0.134 36	0.002 26	733	119	772	29
53	109	298	726	0.053 70	0.002 63	0.643 82	0.033 02	0.086 68	0.001 50	367	111	505	20
54	92	214	285	0.072 16	0.003 72	1.333 64	0.065 26	0.136 09	0.002 11	991	104	860	28
55	100	158	413	0.065 29	0.003 04	1.285 42	0.058 35	0.142 41	0.001 73	783	98	839	26
56	162	373	605	0.062 59	0.002 39	1.110 58	0.043 24	0.127 52	0.001 52	694	81	758	21
57	157	310	745	0.061 14	0.002 57	1.075 71	0.043 54	0.127 64	0.001 83	643	91	742	21
58	46	98	152	0.062 99	0.003 95	1.159 08	0.075 03	0.133 88	0.003 09	709	133	782	35
59	28	45	106	0.091 43	0.006 51	1.923 96	0.135 16	0.156 92	0.004 09	1 455	137	1 089	47
60	54	98	210	0.060 50	0.003 24	1.321 99	0.070 52	0.156 99	0.002 72	620	116	855	31
61	103	141	478	0.061 67	0.003 46	1.207 62	0.063 14	0.142 26	0.002 48	663	125	804	29
62	127	321	463	0.067 81	0.003 27	1.009 87	0.049 38	0.107 53	0.001 71	863	100	709	25
63	222	410	850	0.067 25	0.002 56	1.337 00	0.052 23	0.141 85	0.002 02	856	80	862	23
64	210	529	511	0.068 35	0.003 08	1.301 88	0.058 38	0.136 03	0.001 75	880	93	847	26
65	87	201	319	0.065 99	0.003 74	1.158 59	0.066 08	0.126 88	0.002 12	806	119	781	31
66	271	665	783	0.063 53	0.002 64	1.200 41	0.049 04	0.135 73	0.001 65	728	89	801	23
67	99	229	297	0.082 58	0.004 26	1.378 71	0.066 20	0.122 22	0.002 02	1 261	106	880	28
68	334	30	905	0.113 69	0.003 47	5.346 99	0.167 63	0.338 92	0.004 10	1 859	55	1 876	27
69	65	196	345	0.058 67	0.004 22	0.715 93	0.049 66	0.090 01	0.001 71	554	157	548	29
70	146	345	335	0.085 84	0.004 35	1.559 60	0.069 77	0.134 30	0.002 43	1 400	97	954	28
71	135	426	446	0.071 40	0.004 15	0.991 78	0.056 91	0.101 51	0.001 51	969	114	700	29
72	325	880	646	0.076 44	0.003 29	1.480 49	0.061 51	0.140 42	0.002 12	1 106	86	922	25
73	119	306	266	0.070 26	0.003 97	1.276 65	0.065 39	0.133 83	0.002 38	1 000	116	835	29
74	188	429	513	0.070 67	0.003 39	1.334 17	0.068 09	0.135 68	0.002 29	948	94	861	30
75	192	402	521	0.075 49	0.003 34	1.423 50	0.063 76	0.136 01	0.002 01	1 083	89	899	27
76	114	281	318	0.068 42	0.003 62	1.334 90	0.071 48	0.142 10	0.002 62	881	109	861	31
77	970	2 885	2 544	0.068 13	0.002 03	1.166 93	0.035 57	0.123 24	0.001 60	872	62	785	17
78	39	89	99	0.079 58	0.006 51	1.398 63	0.106 96	0.133 71	0.003 78	1 187	162	888	45
79	303	478	913	0.069 60	0.002 40	1.731 65	0.060 89	0.178 93	0.002 44	917	71	1 020	23
80	104	244	393	0.062 54	0.003 58	1.097 78	0.060 98	0.127 58	0.002 17	692	122	752	30
81	331	778	1 029	0.067 59	0.002 89	1.280 92	0.052 46	0.136 60	0.001 75	857	89	837	23
82	213	334	1 285	0.072 16	0.002 72	1.084 47	0.039 86	0.108 33	0.001 53	991	71	746	19
83	173	497	457	0.065 50	0.003 19	1.199 77	0.062 41	0.130 13	0.002 17	791	108	800	29
84	103	146	470	0.063 54	0.002 95	1.254 28	0.059 43	0.142 29	0.002 31	728	94	825	27

5 讨论

5.1 沉积时限划分以及地质界线

赋存于留茶坡组顶部斑脱岩(U-Pb 年龄 518~556 Ma)和九门冲组底部多金属层(Re-Os 同位素年龄 537~542 Ma)之间的长石岩屑砂岩,其碎屑锆石 U-Pb 年龄最小值为 536 ± 9 Ma,表明 536 ± 9 Ma 为研究区留茶坡组最后接受沉积年龄和九门冲组接受的最大沉积年龄。从地层沉积的先后顺序来考虑,上覆多金属层(显示出界线上、下岩相,生物群落,元素,同位素,矿物组合突变(李胜荣和高振敏,1995))的沉积时代小于 536 Ma,但该层位 Re-Os 同位素年龄(537~542 Ma)大于 536 Ma。周明忠等(2008)指出华南多金属层 Re-Os 同位素定年代表的是岩浆房喷发出岩浆的物质年龄,而非沉积地层年龄。即前寒武时期,黔东地区存在火山活动。

软躯体动物演化到有骨骼动物在生物进化中具有划时代的意义,国际上震旦—寒武系界线的层型界线点应位于最古老的带壳动物化石组合地层的底部(尹恭正,1996)。国际上通过精确的锆石 U-Pb 定年,把寒武—前寒武纪界线确定为 542 ± 1 Ma(Amthor *et al.*, 2003),而朱日祥等(2009)测试云南中谊村段凝灰岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 535 ± 2 Ma,该年龄接近前寒武纪—寒武纪界线。黔东地区呈现出平行整合接触关系的留茶坡组(硅质岩)与九门冲组(碎屑岩)界线上的长石岩屑砂岩碎屑锆石最小 U-Pb 年龄为 536 ± 9 Ma,证明区内约 536 Ma 有一期火山活动,这成果与周明忠等(2008)和朱日祥等(2009)的研究结论相吻合,即华南存在 536 Ma 左右的火山活动,该期火山活动在地史中可能具有重要意义——致使软躯体动物演化到有骨骼动物。杨瑞东和钱逸(2005)在留茶坡组一段白云岩获得较多的原始锥石类微体动物化石,表明留茶坡组底部仍可能属于震旦系,而王砚耕等(1984)在留茶坡组二段硅质岩夹粉砂岩中发现小壳动物化石,暗示留茶坡组顶部地层的沉积时间跨越到寒武系,即留茶坡组为跨越震旦系和寒武系地层。古生物和同位素年龄表明:震旦与寒武系地质界线的划分应该在留茶坡组顶部。

5.2 雪峰运动地质效应

黔东地区新元古代地层(由老到新)岩性组合表现为火山活动渐弱的特点,如四堡群(淘金河、余家沟、肖家河、回香坪、铜厂、洼溪及独岩塘组)的火山岩—火山沉积岩—砾岩—(粉)砂岩—泥岩组合,下

江群(甲路、乌叶、张家坝、清水江、平略和隆里组)的(粉)砂岩—泥岩夹火山碎屑岩组合和震旦系(江口、大唐坡、南沱、陡山沱、留茶坡和九门冲组)由冰碛岩—粉砂岩(板岩)—硅质岩—碳酸盐岩—粘土岩组合夹极少量火山碎屑岩组成。淘金河—回香坪组主要由变质火山岩和陆源碎屑岩组成,铜厂—张家坝组的火山岩浆活动明显减少,但清水江组地层产状、岩性、矿物组合以及岩石组构都反映出较为强烈火山、构造活动特征,而平略—九门冲组的岩性组合表现为相对安静的沉积环境。

雪峰运动是扬子准地台的一次奠基性运动,造成南沱冰渍层与下江群浅变质岩之间不整合接触的运动(贵州省地质矿产局,1987)。黔东天柱地区发育有紧闭褶皱、逆冲断层的清水江组灰色砂质板岩与震旦系铁丝垌组冰渍砾岩呈高角度不整合接触关系,是 760 Ma 左右雪峰运动构造事件的结果(张元志,1995)。桂北三门街地区侵入时代约 760 Ma 的基性侵入岩(辉绿岩)事件是雪峰运动的地质效应(汪正江,2008)。刘文凯和彭国林(1994)指出,开阳地区的低角度南沱组(缺失平略、隆里、铁丝垌和大塘坡组地层)冰渍砾岩直接覆盖于高角度清水江组板岩之上,为雪峰运动的表现形式。研究区清水江组地层严重变形(近直立紧闭褶皱和逆冲断层发育)、产状较陡,而上覆地层(铁丝垌组)产状较为平缓,二者多为高角度不整合接触关系。清水江组岩性组合主要由(变余)沉凝灰岩、凝灰质(粉)砂岩和凝灰质板岩,粉砂质板岩和少量绢云母板岩组成,如黔东地区顺层产于清水江组中部的斑脱岩 U-Pb 年龄 774 ± 8 Ma(高林志等,2010)。桂北三门街 760 Ma 左右的辉绿岩侵入事件与顺层产于清水江组 774 Ma 的斑脱岩,二者与本文碎屑锆石 U-Pb 年龄次峰值 777 Ma 所记录的岩浆事件具有相似同位素年龄,即江南造山带西南端 760~777 Ma 的火山岩浆事件可能是雪峰运动的地质效应。总之,清水江组地层严重变形,岩性和岩石组构组合不同于下江群其他地层,以及不整合接触于上覆、下伏地层,区内局部地层缺失、断裂变形等地质现象,可能源于雪峰运动地质效应。

5.3 沉积岩源区以及钼元素沉淀成矿

新元古代以 Rodinia 超大陆裂解为标志性事件诱发了华南大规模火山活动。李献华等(2012)统计华南前寒武纪沉积岩中大量碎屑锆石年龄谱图表明:扬子块体沉积岩中新元古代锆石的比例占绝大多数。本文碎屑锆石所记录的构造热事件中,具有明

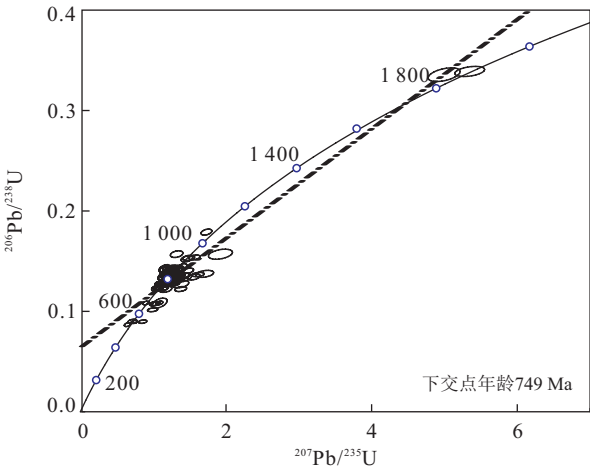


图 5 九门冲组碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.5 U-Pb concordia plots of detrital zircon from Jiumenchong Formation

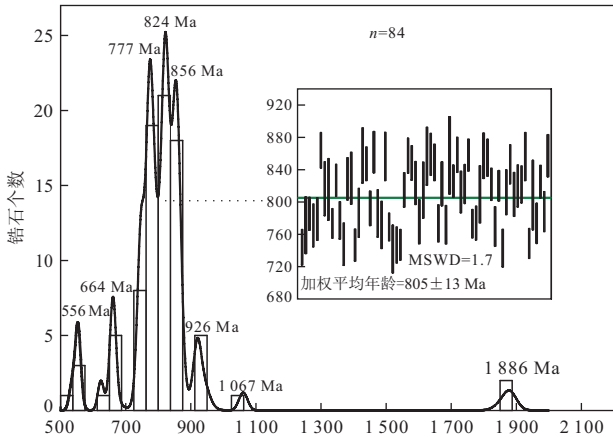


图 6 九门冲组碎屑锆石 U-Pb 年龄图谱

Fig.6 U-Pb histograms and relative probability plots of detrital zircon from Jiumenchong Formation

显年龄优势段 742~864 Ma(79.07%)(表 1,图 5、6),也表明新元古代岩浆岩为黔东黑色岩系的主要沉积物源区.由图 7、8 得知,研究区东南缘江南造山带新元古代火山—岩浆事件大量活动,区内 U-Pb 年龄集中在 755~850 Ma,主峰值(加权平均)825 Ma 的火山—岩浆岩,表现为连续产出.图 8b、8c 得知,江南造山带新元古代的中酸性岩与基性—超基性岩产出时间段略有不同.中酸性岩主要位于 780~840 Ma(图 8b),主峰值(加权平均)为 825 Ma,与本文碎屑锆石 U-Pb 年龄的主峰值 824 Ma(图 6)相吻合.如北西端梵净山地区侵入四堡群白岗岩 U-Pb 年龄 821~840 Ma(薛怀民等,2012);拉张裂谷环境桂北三防岩体 U-Pb 年龄 804~826 Ma(李献华,1999;葛文春等,2001;王敏,2012);中段湘东—

赣西地区碰撞作用后伸展垮塌环境 818~820 Ma 的九岭岩体(张菲菲等,2011);东段皖南地区 U-Pb 年龄约 823 Ma 的许村岩体可能是华南地幔柱活动导致地壳重熔的产物,而非“造山运动”作用的结果(李献华等,2002).这些岩体成矿元素地球化学特征表现为以亲硫和稀土元素丰度低为特征,钒元素特别明显.如上述桂北、赣西北—湘东北、皖南和梵净山地区花岗岩体钒均值分别为 63.56×10^{-6} (葛文春等,2001)、 79.43×10^{-6} (李鹏春等,2007)、 74.11×10^{-6} (薛怀民等,2010)和小于 10.00×10^{-6} (贵州省地质矿产局,1987).新元古代江南造山带东—中—西段分布的产出环境与地幔有关的基性—超基性岩体,其侵入时间分为 763 Ma 和 830 Ma 两段(图 8c),前者与本文碎屑锆石次峰值 777 Ma(图 6)具有相似同位素年龄,而这些基性—超基性岩体成矿元素地球化学特征与中酸性岩相反,以亲硫和稀土元素丰度高为特征,钒含量明显高于大陆地壳平均值 128×10^{-6} .如皖南—赣东北、桂北和黔东的基性—超基性岩体钒元素含量(均值)分别为 197.62×10^{-6} (赵建新等,1995)、 200.18×10^{-6} (周继彬,2006)和 278.00×10^{-6} (薛怀民等,2012).区内喷出岩(变质细碧—角斑岩、枕状熔岩、拉斑玄武岩和少量凝灰岩)较发育.如黔东甲路组斑脱岩 814 Ma(高林志等,2010),黔东北铜厂组和余家沟组沉凝灰岩分别为 832 Ma 和 851 Ma(王敏,2012),回香坪组凝灰岩 814 Ma(Zhou *et al.*,2009)等.总之,研究区东南缘江南造山带大规模火山—岩浆岩为黔东早寒武世黑色岩系的沉积物源区.Jiang *et al.*(2006)和易发成等(2004)研究认为华南黑色岩系多金属来源于深部地幔或地壳,所以推测 742~864 Ma 的火山—岩浆岩既为黔东地区下寒武黑色岩系地层提供了碎屑物,又提供了钒等多金属成矿元素,特别是基性—超基性岩.

新元古代自下而上可能存在有 4 期冰期,分别为约 750 Ma 的 Kaigas 冰期(Frimmel *et al.*,1996)、约 720~660 Ma 的 Sturtian 冰期(Brasier *et al.*,2000)、约 650~635 Ma 的 Marinoan 冰期(Zhang *et al.*,2008)和约 580~590 Ma 的 Gaskiers 冰期(Calver *et al.*,2004).清水江组和留茶坡组夹层凝灰岩 U-Pb 年龄分别为 774 Ma 和 518~556 Ma,表明平略—陡山沱组相当于冰期,这期间普遍发育浅变质的碎屑沉积岩和碳酸盐岩,且地层产状平缓,几乎没有构造—岩浆事件的记录.雪峰运动导致 825 Ma 和 760 Ma 左右侵入前寒武地层的基

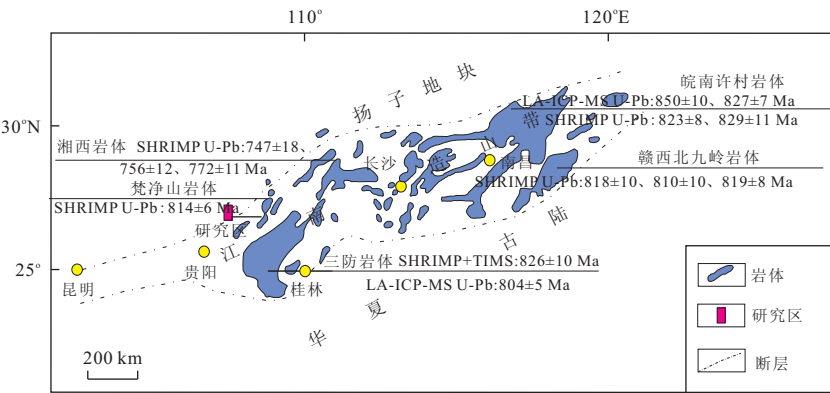


图 7 江南造山带新元古代部分岩体分布(据王敏,2012 修改)

Fig.7 The distribution of partly igneous rocks in Neroproterozoic from the Jiangnan orogen

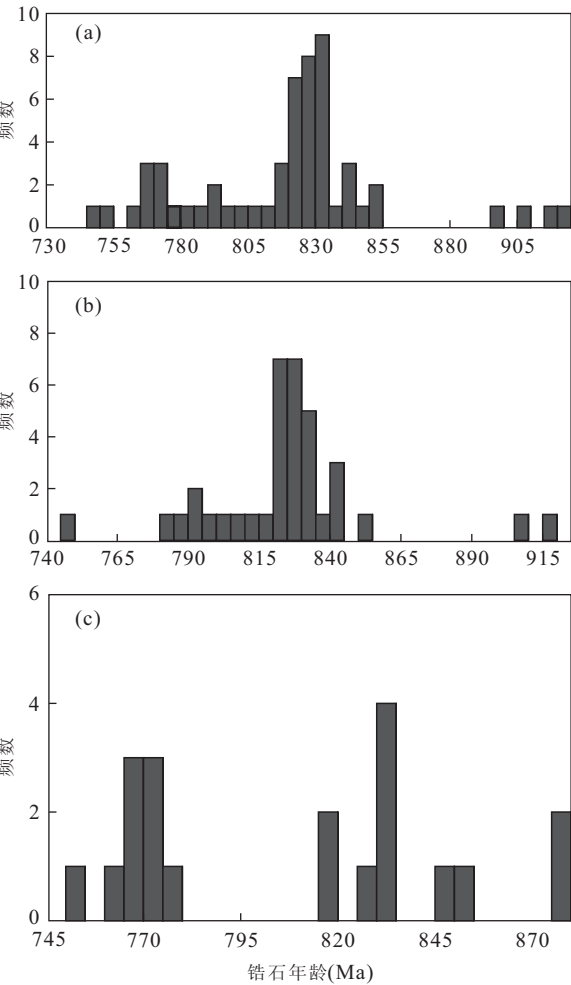


图 8 江南造山带新元古代岩体年龄统计直方图(数据来源李献华等,1999,2002;葛文春等,2001;王敏,2012)

Fig.8 Age histograms of igneous rocks in Neroproterozoic from the Jiangnan orogen

a.所统计岩体年龄;b.中酸性岩体年龄;c.基性—超基性岩体年龄

盖,海水藻类生物很少,钒元素难以沉积沉淀,所以平略—南沱组地层钒含量很少.直到陡山沱组(冰期)之后,全球气候变暖条件下形成的跨时代地层(留茶坡组热水沉积硅质岩),藻类繁盛,这些低等生物从海水中富集钒等元素,在海进海底缺氧的环境下,含钒的藻类死亡沉入水底,在富含 H_2S 环境中,有机质又被细菌分解而迅速消耗;而随有机质进入沉积物的钒等金属元素因在强还原环境中活动性急剧下降,而被粘土、铁锰氧化物、氢氧化物吸附,或被成岩早期形成的黄铁矿表面配合,钒元素就此沉积沉淀,所以直到留茶坡和九门冲组才有钒富集成矿.此外,海平面上升还将导致深水区沉积速度降低,经过漫长的沉积周期,形成了既富金属元素又富有机质的黑色页岩.

6 结论

黔东震旦—寒武系转换期黑色岩系赋存的长石岩屑砂岩碎屑锆石年代学研究表明:富含多金属元素黑色岩系沉积碎屑物源区主要为江南造山带新元古代的火山—岩浆岩,而基性—超基性岩贡献大量钒等成矿元素.震旦与寒武系分界线划分在留茶坡组顶部硅质岩中,非长石岩屑砂岩为标志的岩相转变(留茶坡组与九门冲组地层界线)界面上,536 Ma 为留茶坡组地层最后沉积时限和九门冲组最大沉积年龄.清水江组地层岩性的变形、变质和角度不整合于上覆、下伏地层的现象为雪峰运动地质效应.

致谢:成文过程中匿名审稿专家对文稿提出宝贵的修改建议和意见;野外工作期间贵州地矿局注溪钒矿床详查项目组提供便利,贵州地矿局 117 地质队吴波、陈德荣和鲍一明先生在采样中热心帮助,

性—超基性岩体剥顶,剥蚀进入海水中,海洋中有大量的钒元素存在;只是清水江组之后,全球被冰川覆

在此一并致以衷心的感谢!

References

- Amthor, J. E., Grotzinger, J. P., Schroder, S., et al., 2003. Extinction of Cloudina and Namacalathus at the Precambrian-Cambrian Boundary in Oman. *Geology*, 31(5): 431–434. doi: 10.1130/0091-7613(2003)031<0431:EOCANA>2.0.CO;2
- Brasier, M., McCarron, G., Tucker, R., et al., 2000. New U-Pb Zircon Dates for the Neoproterozoic Gubrah Glaciation and for the Top of the Huqf Supergroup, Oman. *Geology*, 28(2): 175–178. doi: 10.1130/0091-7613(2000)28<175:NUZDFT>2.0.CO;2
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province, 1987. Regional Geology of Guizhou Province. Geological Publishing House, Beijing, 608–617 (in Chinese).
- Calver, C. R., Black, L. P., Everard, J. L., et al., 2004. U-Pb Zircon Age Constraints on Late Neoproterozoic Glaciation in Tasmania. *Geology*, 32(10): 893–896. doi: 10.1130/G20713.1
- Cawood, P. A., Nemehin, A. A., 2000. Provenance Record of a Rift Basin: U/Pb Ages of Detrital Zircons from the Perth Basin, Western Australia. *Sedimentary Geology*, 134(3–4): 209–234. doi: 10.1016/S0037-0738(00)00044-0
- Chen, L., 2006. Sedimentology and Geochemistry of the Early Cambrian Black Rock Series in Hunan-Guizhou, China (Dissertation). Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang (in Chinese with English abstract).
- Dai, C. G., Li, S., Zhang, H., 2005. Initiative Discussion on Tectonic Evolution of Southwest Segment of Jiangnan Orogenic Belt: Taking an Example from East Guizhou and the Adjacent Areas. *Guizhou Geology*, 22(2): 98–102 (in Chinese with English abstract).
- Frimmel, H. W., Klotzi, U. S., Siegfried, P. R., 1996. New Pb-Pb Single Zircon Age Constraints on the Timing of Neoproterozoic Glaciation and Continental Break-Up in Namibia. *The Journal of Geology*, 104(4): 459–469.
- Gao, L. Z., Dai, C. G., Liu, Y. X., et al., 2010. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of the Tuffaceous Bed of Xiajiang Group in Guizhou Province and Its Stratigraphic Implication. *Geology in China*, 37(4): 1071–1080 (in Chinese with English abstract).
- Ge, W. C., Li, X. H., Li, Z. X., et al., 2001. Mafic Intrusions in Longsheng Area: Age and Its Geological Implications. *Chinese Journal of Geology*, 36(1): 112–118 (in Chinese with English abstract).
- Hermann, J., Rubatto, D., Korsakov, A., 2001. Multiple Zircon Growth during Fast Exhumation of Diamondiferous, Deeply Subducted Continental Crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(1): 66–82. doi: 10.1007/s004100000218
- Jiang, S. Y., Chen, Y. Q., Ling, H. F., et al., 2006. Trace- and Rare-Earth Element Geochemistry and Pb-Pb Dating of Black Shales and Intercalated Ni-Mo-PGE-Au Sulfide Ores in Lower Cambrian Strata, Yangtze Platform, South China. *Mineralium Deposita*, 41(5): 453–467. doi: 10.1007/s00126-006-0066-6
- Li, P. C., Chen, G. H., Xu, D. R., et al., 2007. Petrological and Geochemical Characteristics and Petrogenesis of Neoproterozoic Peraluminous Granites in Northeastern Hunan Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1): 126–136 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. R., Gao, Z. M., 1995. REE Characteristics of Black Rock Series of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Hunan-Guizhou Provinces, China, with a Discussion on the REE Patterns in Marine Hydrothermal Sediments. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(2): 225–229 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., 1999. U-Pb Zircon Ages of Granites from Northern Guangxi and Their Tectonic Significance. *Geochimica*, 28(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Li, W. X., He, B., 2012. Building of the South China Block and Its Relevance to Assembly and Breakup of Rodinia Supercontinent: Observations Interpretations and Tests. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 3(6): 543–559 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Li, Z. X., Zhou, H. W., et al., 2002. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronological, Geochemical and Nd Isotopic Study of the Neoproterozoic Granitoids in Southern Anhui. *Geological Review*, 48(Suppl.): 8–16 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. J., Xu, X. S., Pan, X. N., et al., 1993. Ancient Continental Sedimentary Crustal Evolution and Mineralization of South China. Science Press, Beijing, 77–180 (in Chinese).
- Liu, W. K., Peng, G. L., 1994. Appearance of Xuefeng Orogeny in Baiyan Anticline in Weng'an County. *Guizhou Geology*, 11(1): 44–50 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571. doi: 10.1093/petrology/egp082

- Ludwig, K. R., 2008. ISOPLOT 3. 70: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel, Berkeley Geochronology Center, Special Publication No.4.
- Meng, X. Q., 2007. Sequence-Stratigraphic Framework and Its Palaeogeographical Evolution of the Lower Cambrian Series in Guizhou and Its Adjacent Areas (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- She, Z. B., 2007. Detrital Zircon Geochronology of the Upper Proterozoic-Mesozoic Clastic Rocks in the Mid-Upper Yangtze Region (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 2—5 (in Chinese with English abstract).
- Sireombe, K. N., 1999. Tracing Provenance through the Isotope Ages of Littoral and Sedimentary Detrital Zircon, Eastern Australia. *Sedimentary Geology*, 124 (1—4): 47—67. doi:10.1016/S0037—0738(98)00120—1
- Wang, L. J., Griffin, W. L., Yu, J. H., et al., 2010. Precambrian Crustal Evolution of the Yangtze Block Tracked by Detrital Zircons from Neoproterozoic Sedimentary Rocks. *Precambrian Research*, 177 (1—2): 131—144. doi:10.1016/j.precamres.2009.11.008
- Wang, M., 2012. The Neoproterozoic Magmatism and Tectonic Implications, the Fanjingshan Mt., Northeast Guizhou Province (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 4—7 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. G., Yin, G. Z., Zheng, S. F., et al., 1984. The Upper Precambrian and Sinian-Cambrian Boundary in Guizhou. Guizhou People's Publishing House, Guiyang, 153—170 (in Chinese).
- Wang, Z. J., 2008. Neoproterozoic Rift Basin Evolution and Its Stratigraphic Division and Correlation in Eastern Guizhou (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 32—62 (in Chinese with English abstract).
- Xue, H. M., Ma, F., Song, Y. Q., 2012. Mafic-Ultramafic Rocks from the Fanjingshan Region, Southwestern Margin of the Jiangnan Orogenic Belt: Ages, Geochemical Characteristics and Tectonic Setting. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 3015—3030 (in Chinese with English abstract).
- Xue, H. M., Ma, F., Song, Y. Q., et al., 2010. Geochronology and Geochemistry of the Neoproterozoic Granitoid Association from Eastern Segment of the Jiangnan Orogen, China: Constraints on the Timing and Process of Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3215—3244 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R. D., Qian, Y., 2005. Microfossils from the Dengying Formation of Wuhe Section, Taijiang County, Guizhou Province, China. *Chinese Journal of Geology*, 40 (1): 40—46 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. N., 1989. The Formation Features and Tectonic Evolution of the South China Taphrogenic System. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 14(1): 29—36 (in Chinese with English abstract).
- Yi, F. C., Yang, J., Hou, L. J., et al., 2004. Origin and Geochemistry of Platinum Group Elements of Lower Cambrian Black Shale Series in Northern Guizhou. *Chinese Journal of Geology*, 39(3): 367—374 (in Chinese with English abstract).
- Yin, G. Z., 1996. Division and Correlation of Cambrian in Guizhou. *Guizhou Geology*, 13(2): 115—128 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. F., Wang, Y. J., Fan, W. M., et al., 2011. Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes of the Neoproterozoic Granites in the Central of Jiangnan Uplift. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(1): 73—84 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. H., Jiang, G., Han, Y., 2008. The Age of the Nantuo Formation and Nantuo Glaciation in South China. *Terra Nova*, 20 (4): 289—294. doi:10.1111/j.1365—3121.2008.00819.x
- Zhang, Y. Z., 1995. Effect of Xuefeng Orogeny on Tianzhu Region, Southeast Guizhou. *Guizhou Geology*, 13 (1): 30—36 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. X., Li, X. H., McCulloch, M. T., et al., 1995. Petrogenesis of Ophiolites from South Anhui and Northeast Jiangxi, and Their Tectonic Implications: Chemical and Sm-Nd Isotopic Constraints. *Geochimica*, 24 (4): 312—326 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. B., 2006. Age and Origin of Proterozoic Mafic-Magmatism in Northern Guangxi-Western Hunan: In Response to the Breakup Rodina (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 30—31 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. C., Wang, X. L., Qiu, J. S., 2009. Some Neoproterozoic Geological Events Involved in the Development of the Jiangnan Orogen. *Geological Journal of China Universities*, 15 (4): 453—459 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, M. Z., Luo, T. Y., Li, Z. X., et al., 2008. SHRIMP Zircon U-Pb Age of Tuffs on the Bottom of Sinian Niutitang Formation at Zunyi Area, and Its Geological Implications. *Chinese Science Bulletin*, 53(1): 104—110 (in Chinese).
- Zhou, Q., Du, Y. S., Wang, J. S., et al., 2007. Characteristics

- and Significance of the Cold Seep Carbonates from the Datangpo Formation of the Nanhua Series in the North-east Guizhou. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(3): 339—346 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Li, X. H., Hou, X. G., et al., 2009. SIMS U-Pb Zircon Age of a Tuff Layer in the Meishucun Section, Yunnan, Southwest China: Constraint on the Age of the Precambrian-Cambrian Boundary. *Science in China (Series D)*, 39(8): 1105—1111 (in Chinese). doi: 10.1007/s11430-009-0152-6
- Zhuo, J. W., Wang, Z. J., Wang, J., et al., 2009. SHRIMP Zircon U-Pb Age of Crystal Tuffs on the Top of Sinian Laobao Formation at Bahuang, Tongren Area, and Its Geological Implications. *Geological Review*, 55(5): 639—646 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 贵州省地质矿产局, 1987. 贵州省区域地质志. 北京: 地质出版社, 608—617.
- 陈兰, 2006. 湘黔地区早寒武世黑色岩系沉积学及地球化学研究(博士学位论文). 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 戴传固, 李硕, 张慧, 2005. 试论江南造山带西南段构造演化——以黔东南及邻区为例. *贵州地质*, 22(2): 98—102.
- 高林志, 戴传固, 刘燕学, 等, 2010. 黔东南地区下江群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层意义. *中国地质*, 37(4): 1071—1080.
- 葛文春, 李献华, 李正祥, 等, 2001. 龙胜地区镁铁质侵入体: 年龄及其地质意义. *地质科学*, 36(1): 112—118.
- 李鹏春, 陈广浩, 许德如, 等, 2007. 湘东北新元古代过铝质花岗岩的岩石地球化学特征及其成因讨论. *大地构造与成矿学*, 31(1): 126—136.
- 李胜荣, 高振敏, 1995. 湘黔地区牛蹄塘组黑色岩系稀土特征——兼论海相热水沉积岩稀土模式. *矿物学报*, 15(2): 225—229.
- 李献华, 1999. 广西北部新元古代花岗岩锆石 U-Pb 年代学及其构造意义. *地球化学*, 28(1): 1—9.
- 李献华, 李武显, 何斌, 2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合—裂解——观察、解释与检验. *矿物岩石地球化学通报*, 3(6): 543—559.
- 李献华, 李正祥, 周汉文, 等, 2002. 皖南新元古代花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学和 Nd 同位素研究. *地质论评*, 48(增刊): 8—16.
- 刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 等, 1993. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿. 北京: 科学出版社, 77—180.
- 刘文凯, 彭国林, 1994. 雪峰运动在瓮安白岩背斜的表现形式. *贵州地质*, 11(1): 44—50.
- 孟晓庆, 2007. 贵州及邻区下寒武统层序地层格架及其古地理演化(硕士论文). 北京: 中国地质大学.
- 余振兵, 2007. 中上扬子上元古界—中生界碎屑锆石年代学研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学, 2—5.
- 王敏, 2012. 黔东南梵净山地区晚元古代岩浆活动及其大地构造意义(博士学位论文). 北京: 中国地质大学, 4—7.
- 王砚耕, 尹恭正, 郑淑芳, 等, 1984. 贵州上前寒武系及震旦系—寒武系界线. 贵阳: 贵州人民出版社, 153—170.
- 汪正江, 2008. 黔东南地区新元古代裂谷盆地演化及其地层对比研究(博士学位论文). 北京: 中国地质科学院, 32—62.
- 薛怀民, 马芳, 宋永勤, 2012. 江南造山带西南段梵净山地区镁铁质—超镁铁质岩: 形成时代、地球化学特征与构造环境. *岩石学报*, 28(9): 3015—3030.
- 薛怀民, 马芳, 宋永勤, 等, 2010. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学: 对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束. *岩石学报*, 26(11): 3215—3244.
- 杨瑞东, 钱逸, 2005. 贵州台江五河剖面灯影组顶部微体动物化石. *地质科学*, 40(1): 40—46.
- 杨森楠, 1989. 华南裂陷系的建造特征和构造演化. *地球科学——中国地质大学学报*, 14(1): 29—36.
- 易发成, 杨剑, 候兰杰, 等, 2004. 黔北黑色岩系的铂族元素地球化学特征及成因探讨. *地质科学*, 39(3): 367—374.
- 尹恭正, 1996. 贵州寒武纪地层的划分和对比. *贵州地质*, 13(2): 115—128.
- 张菲菲, 王岳军, 范蔚茗, 等, 2011. 江南隆起带中段新元古代花岗岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成研究. *大地构造与成矿学*, 35(1): 73—84.
- 张元志, 1995. 雪峰运动在贵州天柱的表现形式. *贵州地质*, 13(1): 30—36.
- 赵建新, 李献华, McCulloch, M. T., 等, 1995. 皖南和赣东北蛇绿岩成因及其构造意义: 元素和 Sm-Nd 同位素制约. *地球化学*, 24(4): 211—326.
- 周继彬, 2006. 桂北—湘西新元古代铁镁质岩的形成时代和成因——对 Rodinia 超大陆裂解的响应(博士学位论文). 北京: 中国科学院, 30—31.
- 周金城, 王孝磊, 邱检生, 2009. 江南造山带形成过程中若干新元古代地质事件. *高校地质学报*, 15(4): 453—459.
- 周明忠, 罗泰义, 李正祥, 等, 2008. 遵义牛蹄塘组底部凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. *科学通报*, 53(1): 104—110.
- 周琦, 杜远生, 王家生, 等, 2007. 黔东南地区南华系大塘坡组冷泉碳酸盐岩及其意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(3): 339—346.
- 朱日祥, 李献华, 侯先光, 等, 2009. 梅树村剖面离子探针锆石 U-Pb 年代学: 对前寒武纪—寒武纪界线的年代制约. *中国科学 (D 辑)*, 39(8): 1105—1111.
- 卓皆文, 汪正江, 王剑, 等, 2009. 铜仁坝黄震旦系老堡组顶部晶屑凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地质论评*, 55(5): 639—646.