华南板块西南缘中三叠统底部火山灰来源

——以右江盆地者堡敢南一带凝灰岩为例

向坤鹏,安亚运,贺永忠,赵磊,易成兴,刘奎勇,张厚松,黄勇,盘应娟,邓小杰 贵州省地质调查院,贵阳,550081

内容提要:华南板块西南缘中三叠统底部普遍发育凝灰岩夹层,但对火山灰的来源存在不同认识。位于华南板 块西南缘的右江盆地在早一中三叠世为连续海相沉积,较为完整的火山沉积记录为探讨火山灰的来源提供了基础。 本文以右江盆地者堡敢南一带早、中三叠世之交凝灰岩为研究对象,在剖面测制基础上,对含凝灰岩层段灰岩进行 生物地层分析,划分为4个牙形石带,分别为 Neospathodus pakistanensis 间隔带;Neospathodus waageni—N. abruptus 组 合带;Neospathodus homeri—N. triangularis 组合带以及 Chiosella timorensis 间隔带,由此确定第 17 层凝灰岩为中三叠 统底界凝灰岩。凝灰岩岩石学、地球化学分析结果显示为流纹质玻屑凝灰岩,属于亚碱性系列。稀土配分曲线显示 为右倾轻稀土富集,明显的负 Eu 异常。大离子亲石元素(LILE)(Rb、U、Th 和 Ba等)富集和高场强元素(HFSE) (Nb、Ta、P和 Ti等)亏损,整体表现出与弧相关的地球化学特征。在生物地层、同位素年代学对凝灰岩形成时代进行 精确限定的基础上,通过华南板块西南缘中三叠统底界凝灰岩的区域分布、矿物组成、地球化学特征,结合右江盆地 中—下三叠统火山岩层序特征进行详细对比分析,结果显示广西凭祥—十万大山一带火山岩是其主要来源。

关键词:凝灰岩;牙形石;中三叠统;地球化学特征;来源;敢南地区

华南板块西南缘三叠纪地层中,除浅水高能的 礁、滩相带以外,相对深水低能的台地与盆地相区广 泛分布着多层凝灰岩(或火山成因黏土岩)。其沉 积厚度和层数受沉积水动力环境、火山作用强度等 条件限制,显示明显的地域差异。这些凝灰岩在成 岩后经水解蚀变和表生风化,颜色呈灰绿色,常含富 SiO₂的豆粒,俗称为"绿豆岩"。在中三叠统底部,分 布着一层厚度明显较大的凝灰岩,也称主凝灰岩或 界线凝灰岩,因其在露头尺度易于识别且层位分布 极其稳定,区域地质填图中常作为划分中三叠统底 界的直观岩性标志(贵州省区域地质志,1987),据 此进行区域地层划分与对比。

针对中三叠统底部的这套凝灰岩,前人开展了 较多研究,归集起来主要有以下三个方面:①地层学 研究方面。鉴于该套凝灰岩在层位上与早、中三叠 世界线接近,随着锆石 U-Pb 定年技术的长足发展, 选取凝灰岩中的锆石配合牙形石生物地层进行高精 度同位素定年(王彦斌等,2004;Lehrmann et al., 2006;郑连弟等,2010),是国际上早、中三叠世界线 研究的重要补充;②岩石学、矿物学方面。由于中三 叠统底界凝灰岩厚度较大,在潮坪、部分台地相区经 过成岩后水解蚀变形成厚度较大的黏土岩,是制作 陶瓷的重要原料,局部地区厚度和品位参数达到工 业开采的要求。因此,部分研究者对这套火山成因 黏土岩进行了详细的岩石学、矿物学分析(关建哲 等,1990;陈忠等,1999;朱立军等,1994);③与生物 灭绝事件关系研究。早、中三叠世是继二叠纪末全 球生物大灭绝以后生物复苏、生态重建的重要时期。 在华南地区,早、中三叠世凝灰岩在层序上常与一些 特异埋藏化石群伴生,二者在时空上的高度吻合导 致很难摆脱其作为生物死亡主控或诱导因素的嫌 疑,部分研究者据此讨论火山喷发与化石群生存和 埋藏的关系(万大学,2002;唐斌等,2007a,b;汪啸风 等,2009;马会珍等,2018)。

就中三叠统底界火山灰的来源而言,前人主要 在早、中三叠世凝灰岩岩相学分析和地球化学特征 对比基础上,结合凝灰岩的区域分布特征,认为早、 中三叠世凝灰岩可能具有大致相同的产出背景 (Newkirk et al.,2002),对中三叠世凝灰岩的来源研 究缺乏足够证据,严重制约了对中三叠统界线凝灰

注:本文为中国地质调查局项目(编号:DD20160020)与贵州省地质矿产勘查开发局科研项目(编号:QDKKH[2017]28)的成果。

收稿日期:2018-10-27;改回日期:2019-01-14;责任编辑:刘志强。Doi:10.16509/j.georeview.2019.02.005

作者简介:向坤鹏,男,1988年生,博士,高级工程师,主要从事区域地质研究,Email:xiangkp1988@163.com。



图 1 华南板块西南缘右江盆地构造格架简图(a,底图据杜远生等,2009)和敢南一带区域地质简图(b) Fig. 1 Tectonic framework of Youjiang Basin,Southwest margin of south China plate(a,modified from Du Yuansheng et al., 2009&) and the geological map of Gannan region,Zhebao,Guangxi(b)

岩产出大地构造背景的进一步认识。右江盆地在 早一中三叠世为连续海相沉积,较为完整的记录了 区域上的同期火山事件信息。本文以右江盆地敢南 一带早三叠世罗楼组—中三叠世新苑组凝灰岩作为 研究对象,通过牙形石生物地层和前人发表的同位 素年代学数据限定其形成时代,根据中三叠统底界 凝灰岩的区域分布、岩石矿物学、地球化学等特征, 结合早—中三叠统凝灰岩层序特征和相变关系对 比,对其来源做出限定。

1 区域地质背景

中元古代晚期—新元古代早期,扬子板块和华 夏板块沿江绍缝合带碰撞形成了统一的华南板块 (Ye Meifang et al.,2007;Li Xianhua et al.,2009;徐 亚军等,2018),之后于泥盆纪至二叠纪初期经历了 不同程度的伸展裂陷作用(秦建华等,1996)。在大 地构造位置上位于华南板块西南缘的右江盆地就是 基于这一阶段的裂陷作用,于加里东造山带夷平基 础上发育起来的再生盆地(杜远生等,2009,2013)。 受古特提斯和滨太平洋构造域的复合作用,盆地受 多条断裂控制(图 1a),整体轮廓呈"菱形":西北部 以弥勒—师宗—盘县断裂带为界接扬子板块,西南 部以那坡—龙州断裂带为界与越北地块分开,东北 部以南丹—河池断裂带为界与终防海槽相隔(吴根 耀等,2001)。盆地在泥盆纪—早二叠世期间发育 众多规模不等、大小悬殊的孤立碳酸盐岩台地,整体 形成孤立台地与深水海槽相间的棋盘状古地理格 局,碳酸盐岩台地边缘常发育同沉积断层及沉积碳 酸盐岩脉(彭阳等,2004,2015)。在经历了晚二叠 世末期的生物大灭绝后,盆地早一中三叠世整体表现为水体逐渐加深的过程,沉积了巨厚的复理石沉积(吕洪波等,2003)。同期区域上爆发了广泛且强烈的火山事件,相对于扬子地台广泛发育的碳酸盐岩台地,水体较深且水动力较弱的右江盆地对火山沉积的记录更为完整。

研究区敢南一带位于右江盆地西北缘,安然背 斜的南东翼(图 1b)。区内断裂构造方向以东西向 和北东向为主,时代上东西向断层发育略早。出露 的最老地层为晚石炭世黄龙组,主体岩性为浅灰色 厚层—块状颗粒灰岩,含有少量蛇、珊瑚化石,整体 为滩相沉积的产物:其上整合沉积了晚石炭世—中 二叠世地层,包括马平组、平川组、栖霞组和茅口组, 以中二叠统为主,整体为一套厚层--块状生物屑灰 岩,含有大量腹足、蜒、苔藓虫、珊瑚化石等,代表了 生屑滩—礁相连续沉积(陆刚等,2006)。受峨眉山 地幔柱活动影响,该区经历了不均匀地壳隆升,形成 中、上二叠统之间的假整合,并导致晚二叠世沉积在 安然一带发生东西分异,具体表现为古风化壳之上, 东西两侧分别沉积了含燧石灰岩为主的台地相沉积 以及以海绵灰岩代表的礁相沉积。晚二叠世末期, 于安然北部发生裂陷,形成现今台盆分异的雏形。 三叠系主要见于安然背斜边缘,与上二叠统假整合 接触,局部被断层改造。中、下三叠统为连续沉积, 主体由碳酸盐岩和细碎屑岩组成,含大量菊石、双壳 化石,局部发现含海生爬行类化石(内部资料)。岩 石组合中含多层薄层凝灰岩,尤其以中三叠统底部 凝灰岩厚度较大,区域分布稳定。这些凝灰岩夹层 是早一中三叠世火山事件的直接记录,不仅可以为 地层对比提供依据,还携带大量区域构造信息,为解 析同期大地构造背景提供良好的物质基础。

2 样品采集与分析方法

2.1 样品采集

敢南一带三叠系位于安然背斜南翼,地层整体 南倾(图2a)。露头尺度,中、下三叠统界线附近层 段可见含多层凝灰岩夹层,用于地球化学分析的凝 灰岩样品采自第12层和第17层中。其中第12层 凝灰岩厚94 cm,可以分为两个小层序,并显示相似 的纵向变化特征。层序I厚44 cm,与下伏灰岩突变 接触,其上见厚度2 cm的硅质岩;2~8 cm发育顺层 劈理,岩石较为破碎;8~42 cm凝灰岩特征较为稳 定,可见大量浅灰色"麻点"顺层分布,岩石较为完 整,向上减少变细;顶部为粒度极其细小的浅灰白色 斑脱岩,厚度 2 cm。层序 II 厚度 50 cm,显示与层序 I 基本一致的变化特征,但缺失底部极薄层硅质岩,与上覆灰岩突变接触。剖面第 17 层凝灰岩厚 90 cm,也可以分为两个小层序(图 2b)。层序 I 厚度 50 cm,底部 0~10 cm 发育顺层劈理,岩石较为破碎,呈黄褐色色调;10~40 cm 见有明显的顺层状白 色麻点,岩石相对完整,块度较好且特征稳定(图 2c);40~50 cm 见明显的硅化,碎屑粒度变细;层序 II 厚度 39 cm,呈黄褐色色调,发育明显的顺层劈 理,岩石多呈碎片状。为保证样品新鲜具有代表性,样品采集时避开顶、底部的硅化带,于中下部岩石相 对完整处采样。除此之外,为约束凝灰岩的形成时 代,于第 10 层~第 18 层的浅灰色薄层状泥晶灰岩/含泥质泥晶灰岩中采集了 13 件牙形石样品(采样 位置见图 2a)。

用于地球化学分析的样品岩性为流纹质晶屑凝 灰岩,发育明显的凝灰结构。岩石主要由细粒火山 灰、晶屑、玻屑和少量黏土矿物组成。其中火山灰占 比 65%~80%,大部分细火山灰呈团块状产出。具 不均匀硅化和弱黏土化现象。样品中"麻点"即由 火山灰团不均匀硅化形成;晶屑占比 10%~15%,以 长石晶屑(4%~10%)和石英晶屑(3%~7%)为主 (图 2d),含有少量磁铁矿晶屑。晶屑形态各异,有 弓形、眉状、鸡骨状及镰刀状等(图 2e),局部边缘具 溶蚀现象;玻屑占比 2%~3%;黏土矿物以伊利石为 主,占比 5%~10%,呈显微鳞片状,结晶粒度<0.004 mm,分布较为均匀,整体显示轻微硅化和褐铁矿化。

2.2 分析方法

凝灰岩样品经过粗碎至 2~4 cm 后,采用 3%~ 5%的稀盐酸经超声波多次清洗以清除表面杂质。 样品晾干后细碎,研磨至 200 目用于分析测试。化 学分析由西安瑞石地质科技有限公司测试完成,其 中主量元素采用波长色散 X 射线荧光光谱(XRF) 方法分析, XRF 溶片法执行国家标准 GB/T14506. 28-2010,氧化亚铁含量测定执行国家标准 GB/ T14506.28-2010,分析相对偏差小于 5%。稀土元 素、微量元素采用 X series 2/SN01831C 电感耦合等 离子体质谱仪测定,分别执行国家标准 GB/T 14506.29-2010和 GB/T 14506.30-2010。

3 牙形石生物地层

根据牙形石鉴定结果综合分析,自下而上在剖 面第 10 层至第 18 层共识别出 4 个牙形石带(图 3),整体与贵州望谟甘河桥剖面可对比(姚建新等,



图 2 广西者堡敢南一带三叠系剖面(a)及凝灰岩露头(b,c)、显微特征(d,e) Fig.2 The Triassic section (a), the outcrop (b,c) and microscopic characteristics (b,c) of the tuff in Gannan region, Zhebao, Guangxi

 $2004)_{\,\circ}$

3.1 Neospathodus pakistanensis 间隔带

主要位于第 10 层中上部,以 Neospathodus

pakistanensis Sweet 的出现为底界,以 *Neospathodus waageni* 和 *N. abruptus* 的出现为顶界,共生的主要分子包括 *Neohindeodella nevadensis* Müller; *N. suevica*



图 3 广西者堡敢南一带早—中三叠世地层牙形石分布柱状图

Fig.3 Early-Middle Triassic conodonts distribution histogram of Gannan region, Zhebao, Guangxi

(Tatge); N. kobayashii (Igo et Koike); Cypridodella conflexa Mosher; Hibbardella triassica (Müller); Neospathodus biangularis Z. H.Wang et Cao; N. dieneri Swee 等,时代为早三叠世印度晚期至奥伦尼克早期。

3.2 Neospathodus waageni—N. abruptus 组合带

位于第 11 层至 15 层段,以 Neospathodus waageni 和 N. abruptus 的出现为底界,以 Neospathodus homeri 和 N. triangularis 的出现为顶 界,共生的主要分子包括 Neospathodus crassatus (Koike); N. pusillus (Hatleberg et Clark); N. cf. excelsus Wang et Wang; Hindeodella suevica (Tatge); Cypridodella conflexa Mosher; Neohindeodella nevadensis Müller; N. triassica (Müller); Diplododella magnidentata (Tatge); Cratognathodus robustus Wang et Wang; Hibbardella triassica (Müller); Lonchodina muller Tatge; Prioniodella ctenoides Tatge 等,时代为早 三叠世奧伦尼克期。

3.3 Neospathodus homeri—N. triangularis 组合带 位于第 16 层, 以 Neospathodus homeri 和 N. triangularis 的出现为底界,以 Chiosella timorensis 的 出现为顶界,共生的主要分子包括 Neospathodus elongatus Wang et Wang; N. excelsus Wang et Wang; N. homeri(Bender); N. brochus(Sweet); Cypridodella conflexa Mosher; Hindeodella suevica(Tatge);

Neohindeodella triassica (Müller); N. nevadensis Müller; Lonchodina muller Tatge; Diplododella coalescens Wang et Wang; Prioniodina excavata Mosher 等,该组合带广泛分布于华南地区的下三叠统上部 (姚建新等, 2004),时代为早三叠世奥伦尼克晚期。

3.4 Chiosella timorensis 间隔带

主要位于第18层,以 Chiosella timorensis 的出现 为底界,其上未见顶,大致相当于甘河桥剖面、青岩 剖面中 Chiosella timorensis 间隔带的下部。共生的 主要分子包括 Neospathodus curtatus (Gedik); N. symmetricus (Perry et Wang); N. brochus (Sweet); N. cf. branson(Müller); Cypridodella conflexa Mosher; Neohindeodella triassica (Müller); N. nevadensis Müller; Prioniodina excavata Mosher; Enantiognathus ziegler (Diebel); Hindeodella suevica (Tatge); Ozarkodina cf. tortilis Tatge; Lonchodina muller Tatge; Prioniodella ctenoides Tatge 等,时代为中三叠世安尼 早期。

在国际生物地层研究中,常以 Chiosella timorensis 的首现作为中三叠世安尼期的开始(殷鸿 福等,2000,2002)。考虑到本次研究中牙形石采样 对生物地层的控制精度可能不够,在剖面第16 层顶 部30 cm、第18 层底部15 cm 内未密集采样,缺乏样 品控制。因此只能确定在第18 层中上部已经有该 牙形石分子的出现,而不能确定其首现位置。结合 邻区罗甸关刀剖面中,该牙形石化石分子出现在凝 灰岩之下 0.5 m(姚建新等,2004),本次研究将界线 置于凝灰岩之下。尽管存在误差,但根据牙形石分 带结果和凝灰岩在地层柱上的相对位置,认为剖面 第17 层凝灰岩即为中三叠世底部的界线凝灰岩。

4 凝灰岩地球化学特征及产出的 构造背景

表1 广西者堡敢南地区流纹质玻屑凝灰岩主量元素(%)、微量元素(×10⁻⁶)含量及有关参数

Table 1 The major (%) and trace element ($\times 10^{-6}$) concentrations of the rhyolitic vitric tuff in Gannan region,

样品号	W12-1	W12-2	W12-3	W17-1	W17-2	样品号	W12-1	W12-2	W12-3	W17-1	W17-2
SiO ₂	75.29	75.17	73.11	68.94	69.54	La	25.41	26.80	27.87	36.50	32.99
TiO_2	0.21	0.35	0.30	0.30	0.27	Ce	51.91	54.50	57.02	74.17	66.45
Al_2O_3	13.36	12.54	14.13	16.55	16.59	Pr	6.42	6.78	7.03	9.17	8.61
Fe_2O_3	0.72	0.63	0.66	1.06	0.86	Nd	23.40	25.55	26.00	33.19	30.11
FeO	1.23	2.01	1.61	1.32	1.31	Sm	5.38	6.02	6.03	7.34	6.84
MnO	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	Eu	0.35	0.43	0.43	0.53	0.50
MgO	1.97	2.59	2.62	2.64	2.65	Gd	4.57	5.98	5.30	6.20	5.74
CaO	0.18	0.17	0.21	0.33	0.28	Tb	0.82	1.31	0.98	1.06	0.99
Na ₂ O	3.80	3.01	2.82	1.73	2.49	Dy	4.72	8.72	5.72	5.92	5.48
K_2O	1.12	1.10	1.94	3.58	2.80	Ho	0.88	1.75	1.09	1.11	1.02
P_2O_5	0.11	0.13	0.10	0.15	0.12	Er	2.49	4.82	3.10	3.22	3.00
烧失	1.81	2.01	2.26	3.17	2.87	Tm	0.38	0.70	0.48	0.51	0.47
Na_2O/K_2O	3.39	2.73	1.45	0.48	0.89	Yb	2.40	3.97	2.94	3.31	3.04
A/CNK	2.62	2.93	2.85	2.93	2.98	Lu	0.36	0.55	0.43	0.49	0.45
Sc	2.25	3.36	3.50	3.82	3.67	Y	24.20	54.79	30.68	30.39	27.63
Rb	40.70	41.79	67.76	132.90	112.20	δEu	0.21	0.22	0.22	0.23	0.24
Sr	62.31	66.03	54.55	51.35	60.26	Σ REE	129.48	147.86	144.41	182.71	165.69
Zr	127.60	141.60	147.30	173.10	163.50	Σ LREE/ Σ HREE	6.79	4.32	6.21	7.37	7.21
Nb	9.19	10.21	10.35	12.94	12.09	Nb/Ta	9.79	10.12	10.20	10.10	10.15
Ba	137.30	162.10	195.60	340.70	301.70	La/Nb	2.77	2.62	2.69	2.82	2.73
Hf	3.97	4.19	4.41	5.27	5.05	(La/Yb) _N	7.19	4.59	6.45	7.50	7.37
Ta	0.94	1.01	1.02	1.28	1.19	(Ce/Yb) _N	5.68	3.61	5.10	5.89	5.74
Pb	48.84	85.83	36.09	45.38	35.81	(La/Sm) _N	2.95	2.78	2.89	3.11	3.01
Th	19.74	19.34	21.14	29.23	26.32	(Gd/Yb) _N	1.54	1.22	1.46	1.52	1.53
U	5.54	4.44	5.41	6.79	6.46	(Dy/Yb) _N	1.29	1.44	1.27	1.17	1.18

Zhebao, Guangxi

4.1 主量元素分析

分析数据结果见表 1。从表中数据可以看出,5 件样品烧失量为 1.81%~3.17%,主要氧化物与烧失量之和为 99.73%~99.83%,数据在误差允许范围之内,满足研究要求。样品 SiO₂含量较高,为 68.94%~75.29%,指示为酸性凝灰岩。Al₂O₃含量 12.54%~16.59%,平均为 14.63%;铝饱和指数(A/CNK)为 2.62~2.98,平均值为 2.86,具有壳源岩石过铝质的特点。全碱含量(Na₂O+K₂O)为 4.11%~5.31%,平均为 4.88%。其中第 12 层的 3 件样品显示富钠贫钾特点(Na₂O/K₂O>2),第 17 层的 2 件样品相对富钾(Na₂O/K₂O>2),第 17 层的 2 件样品相对富钾(Na₂O/K₂O>2),第 17 层的 2 件样品相对富钾(Na₂O/K₂O<1)。可能受后期成岩过程改造,导致样品 K₂O 含量整体较低。但凝灰岩 K₂O 含量的上显示含量升高趋势。所有样品的 TiO₂、CaO 和 P₂O₅明显较低,含量分别为 0.21%~0.35%、0.17%~0.33%和 0.10%~0.15%。

在火成岩 TAS(SiO₂—Na₂O+K₂O)分类图上,样 品均投点在英安岩—流纹岩区内(图 4a),显示为亚 碱性的酸性凝灰岩。通过对比前人大致同层位火山 岩地球化学数据发现,岩石全碱含量与次生蚀变关 系密切,流纹岩、碎斑熔岩全碱含量最高,凝灰岩次 之,台地—潮坪相凝灰岩—黏土岩含量最低。在岩 石薄片中见含少量黏土矿物,尽管未对黏土矿物的 成因做深入研究,但火山灰在远距离空降沉积时,不 可避免的混入少量细粒陆源碎屑物质。在陆源碎屑 物质的搬运和沉积过程中,陆源碎屑整体显示向高 成分成熟度演化的趋势,细粒的陆源细碎屑成分整 体以长英质为主,加上样品有轻微的硅化蚀变,可能 会导致样品中 SiO₂含量的升高,进而影响到岩性分 类判别。因此进一步采用抗蚀变元素 Nb/Y—Zr/ TiO₂×0.0001进行岩类判别,全部落入流纹英安岩/ 英安岩区域(图4b),与熔岩基本一致。台地—潮坪 相凝灰岩、黏土岩投点到安山岩/玄武岩区域,这可 能与台地—潮坪环境下低成熟度陆源碎屑物质的加 入有关。结合薄片鉴定综合分析确定样品岩性为流 纹质凝灰岩,属于亚碱性系列。

4.2 稀土、微量元素分析

5件样品稀土元素总含量(ΣREE)为129.48× 10⁻⁶~182.71×10⁻⁶,平均为154.03×10⁻⁶;轻稀土总 量(ΣLREE)为120.08×10⁻⁶~160.89×10⁻⁶,平均为 132.74×10⁻⁶;重稀土总量(ΣHREE)为16.62×10⁻⁶ ~27.78×10⁻⁶,平均为21.29×10⁻⁶;轻、重稀土比 (ΣLREE/ΣHREE)为4.32~7.37,显示轻、重稀土分 异明显。其中第17层凝灰岩样品稀土总量相对第 12层略高,轻稀土含量富集更为明显。(La/Yb)_N 为4.59~7.50,平均值6.62;(Ce/Yb)_N值>1(3.61~ 5.89),在球粒陨石标准化稀土配分曲线(图5a)上 表现为轻稀土相对富集的右倾分布型式。(La/



图 4 TAS(a,据 Le Bas et al., 1986) 与 Nb/Y—Zr/TiO₂×0.0001 图(b,据 Winchester et al., 1977)

1—Rhyolite of Banba Formation(data from Wang Shaonian,1991&);2—Rhyolite of Banba Formation(data from Qin Xiaofeng et al.,2011&);3— Rhyolite and porphyroclastic lava of Banba Formation(data from Yang Lizhen et al.,1997#);4—Tuff of Xuman Formation[®];5—Tuff of Badong Formation[®];6—Tuff of Luolou Formation and Xinyuan Formation, Gannan region, this study



图 5 凝灰岩球粒陨石标准化稀土配分曲线(a)及原始地幔标准化多元素蛛网图(b)(球粒陨石与原始地幔标准化数据 据 Sun and Mc Donough, 1989),图例与图 4 一致

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized multiple trace element diagrams (b) of the tuff (chondrite and primitive mantle normalizing values after Sun and Mc Donough, 1989), Legends in accordance with figure 4





 $\label{eq:Fig.6} Fig.6\ The\ Rb/30\\ -Hf-Ta\times3(\,a\,,after\ Harris\ et\ al.\,,1986)\,, Rb/Zr-SiO_2(\,b\,,after\ Harris\ et\ al.\,,1986)\,and$

Rb—Yb+Ta(c,after Pearce et al.,1984) diagram of the tuff

Sm)_N值>1(2.78~3.11)反映轻稀土元素之间分馏 较好;(Gd/Yb)_N为1.22~1.54,(Dy/Yb)_N为1.17~ 1.44,曲线整体向右下倾斜,重稀土元素之间分馏程 度较轻稀土减弱。样品显示明显的负 Eu 异常,δEu 为0.21~0.24,指示岩浆喷发之前经历了明显的斜 长石分离结晶作用。5件凝灰岩样品的稀土配分曲 线极其相似,结合凝灰岩在露头尺度上较为一致的 地质特征,认为二者可能为同源不同期火山活动的 产物。对比发现,敢南一带凝灰岩与十万大山南麓 板八组流纹岩、碎斑熔岩具有极其相似的稀土配分 曲线,只是整体含量更低,与巴东组、许满组底界凝 灰岩含量大致相当。

原始地幔标准化多元素蛛网图显示(图 5b),凝

灰岩样品均表现为富集大离子亲石元素(LILE) Rb、 U、Th和Ba等,其中Rb含量为40.70×10⁻⁶~133.00 ×10⁻⁶;U含量4.44×10⁻⁶~6.79×10⁻⁶,平均值5.73× 10⁻⁶;Th含量19.30×10⁻⁶~29.20×10⁻⁶,平均值 23.15×10⁻⁶;Ba含量137.30×10⁻⁶~340.70×10⁻⁶,平 均值227.48×10⁻⁶;而明显亏损高场强元素(HFSE) Nb、Ta、P和Ti等,其中Nb含量9.19×10⁻⁶~12.94× 10⁻⁶,平均值10.96×10⁻⁶;Ta含量0.94×10⁻⁶~1.23× 10⁻⁶,平均值1.09×10⁻⁶。5件样品在多元素蛛网图 上表现出一致的变化特征,指示凝灰岩具有相同的 岩浆源区。与巴东组、板八组、许满组火山岩/火山 碎屑岩数据对比结果显示,尽管部分数据不完全 (缺项),但除大离子亲石元素受成岩后期改造显示 不同程度的富集特征外,多数数据显示相似的变化 特征。整体反映岩浆源区有较多岛弧火山岩或壳源 物质加入的特征。

4.3 产出构造背景分析

岩石学和地球化学特征显示敢南地区流纹质凝 灰岩属于亚碱性系列,REE 配分模式为右倾型,相 对富集轻稀土元素(LREE)和大离子亲石元素 (LILE),亏损高场强元素(HFSE),具有明显的 Eu 负异常和 Pb 正异常,表现出与俯冲消减作用有关 岛弧/陆缘弧火山岩相似的地球化学特征。

考虑到凝灰岩在成岩后期轻微的蚀变可能导致 部分活动性较强元素含量的变化,因此构造环境的 判别主要依据含量变化小的常量元素(主要是 SiO₂)、活动性较小的不相容元素(Nb、Ta、Zr、Hf、Rb 等)及其比值对。凝灰岩 La/Nb 比值为 2.62~ 2.83,平均值为 2.73,远高于原始地幔的 La/Nb 值 (La/Nb=0.94),略高于大陆地壳的La/Nb 值(La/ Nb=2.2)(Saunders et al., 1988); Nb/Ta 值为 9.79~ 10.20,平均值为10.07,明显低于球粒陨石、原始地 幔(Nb/Ta=17.4±0.5)和亏损地幔(Nb/Ta=15.5± 1.0) (Jochum et al., 1997) 的比值, 而与大陆地壳的 Nb/Ta 值(Nb/Ta = 11~12)(Taylor et al., 1985)接 近。在 Rb/30—Hf—Ta×3 三角图解上, 落入到火山 弧花岗岩和板内花岗岩区域:在 Rb/Zr-SiO,图解 上,样品落入后碰撞/火山弧花岗岩区域;在 Rb--Yb+Ta 图解上,全部落入到火山弧花岗岩区域。多 种元素比值显示原始岩浆有陆壳物质的加入,多种 构造环境判别图解显示岩浆成因可能与俯冲作用相 关。

5 界线凝灰岩火山质成分来源分析

华南板块西南缘,特别是右江盆地三叠系含多 层薄层凝灰岩,其中二叠系—三叠系界线(PTB)及 邻近层位的凝灰岩因与全球晚二叠世生物灭绝事件 在时代上接近而备受关注,对火山灰的物源进行了 详细对比和研究。Newkirk 等(2002)对右江盆地 PTB 附近及下三叠统凝灰岩岩相学及地球化学研究 表明,它们具有相似的岩浆来源,是火山岛弧与扬子 板块南缘微陆块碰撞的产物;王曼等(2018)通过对 广西来宾蓬莱滩剖面大隆组顶部凝灰质砂岩的研 究,结合华南地区 PTB 火山质成分时空分布特征, 认为华南 PTB 火山灰来源于华南板块西南缘古特 提斯二叠纪大陆岩浆弧,火山活动规模较小,不是导 致生物大灭绝的主导因素。黄虎等(2012)研究认 为,中三叠统底界火山灰与 PTB 附近及下三叠统凝 灰岩具有相似的来源。

综合上述研究结论,可以进一步推断中、下三叠 统凝灰岩与 PTB 火山灰来源一致,包括中三叠统底 界凝灰岩,均来自华南板块西南缘古特提斯二叠纪 大陆岩浆弧。根据上述推断产生了疑问:作为二叠 纪的大陆岩浆弧,如何能为中三叠统凝灰岩提供物 源? 该岩浆弧在中三叠世是否有强烈的酸性火山活 动?考虑到华南板块西南缘在中三叠世整体以潮 坪-台地相沉积为主,而右江盆地同期为相对深水 的盆地相沉积。结合凝灰岩在潮坪—台地相区中三 叠统底部只有一层,而在盆地相区以中三叠统底部 凝灰岩沉积厚度最大的的地质事实和火山事件的等 时性综合分析,认为潮坪、台地、盆地相区中三叠统 底部的这套凝灰岩属于同期同源火山作用的产物。 为此,本文根据凝灰岩的物质组成及区域分布特征, 在古生物资料和高精度年代学研究对其时代限定的 基础上,结合区域大地构造背景下中酸性火山岩的 分布特征进行对比研究,为中三叠统底部凝灰岩中 火山灰的物源提供约束。

5.1 区域分布及矿物组成

5.1.1 凝灰岩厚度及分布

中三叠统底部的这套凝灰岩分布极其广泛,在 华南板块西南缘最为明显。其中在四川盆地内,中 三叠统底部的岩石地层单元为雷口坡组,凝灰岩位 于该组底部,厚度1m左右。分布特征整体显示为 川东北厚度较大,但变化较大;川西南厚度薄,但分 布较为稳定的特点(关建哲等,1990)。在川东和黔 北地区,潮坪相区中三叠世岩石地层单元主要为巴 东组。在遵义虾子场一带可见玻屑凝灰岩厚度为 0.55 m;在印江县大尧寨一带玻屑凝灰岩厚度为 0.6 m。

台地相区主要为中三叠世关岭组,主要见于华 南板块西南缘。在息烽县梨树坡一带玻屑凝灰岩厚 度为1.6 m;在开阳县顶卡、望牛冲剖面中玻屑凝灰 岩厚度分别为0.9 m 和0.7 m;在乌当区下坝一带 厚度仅2 cm;在毕节后川地区该套凝灰岩厚度达3 m,在大方县坝子厚度1.7 m;在兴义北部糯泥—革 上梁子一带,凝灰岩厚度30 cm。在贞丰县龙场、关 岭县永宁镇一带玻屑凝灰岩厚度分别为0.3 m 和3 m;在清镇高铺一带,玻屑凝灰岩厚度大于3 m。整 体而言,在六枝中寨、普定、清镇高铺一线相对较厚, 往南东、北西方向玻屑凝灰岩厚度逐渐减薄。

斜坡--盆地相区为中三叠世新苑组和许满组,

主要分布于右江盆地北部及邻区。在贞丰县呢罗一带岩性为晶屑凝灰岩,厚度为4m;在望谟乐旺一带,凝灰岩厚度为10.69m;在隆林敢南一带晶屑凝 灰岩厚0.9m。在隆林过兴一带,作为中三叠世新苑组底界的凝灰岩厚度约60cm;在罗甸县大田一带许满组含有5层以上凝灰岩,其中界线凝灰岩厚度为18.30m。

以上分布特征显示,中三叠统底部的这套凝灰 岩分布极其广泛。尽管该套凝灰岩的厚度显示出明 显的地域差异,但整体显示向南西厚度增大、层数增 多的趋势。一方面得益于盆地相区较为安静的水动 力条件,另一方面可能与邻近火山喷发中心,火山灰 供给充足有关。中一下三叠统含多层凝灰岩的剖面 主要位于在黔西南及以南的右江盆地,同一剖面上 其厚度相对于早、中三叠世其他层位凝灰岩明显较 大,通常达10倍以上。如:望谟城北剖面中早一中 三叠统含2层凝灰岩,其中界线凝灰岩厚度4.2m, 而早三叠世晚期凝灰岩厚度仅 10 cm (周长勇等, 2017);在敢南一带,界线凝灰岩之下,早三叠世罗 楼组中发现3层晶屑凝灰岩,除第12层与界线凝灰 岩厚度相当外,其余厚度较小,厚度1~4 cm;在隆林 过兴一带,罗楼组碎屑岩底部含有3层以上薄层凝 灰岩,厚度1~10 cm;界线凝灰岩之上新苑组还有8 层以上薄层凝灰岩,厚度1~8 cm。指示这一期火山 活动的喷发强度和规模较大,可能代表华南地区三 叠纪规模最大的一次酸性火山喷发事件。

不同相区岩性略有区别,在潮坪和台地相区整体以玻屑凝灰岩/火山蚀变黏土岩为主,粒度较细; 斜坡和盆地相区主要为晶屑凝灰岩,火山碎屑整体较粗。尽管岩性略有变化,但整体显示与下伏地层 界线截然,与上覆地层岩性渐变过渡的特征。

5.1.2 矿物组成特征

前人对该套界线凝灰岩做过详细的矿物组分分 析。其中峨眉山中三叠世雷口坡组底部凝灰岩矿物 成分分析结果显示(关建哲等,1990),含有火山玻 璃和方英石晶屑的残留。并认为是火山灰在碱性富 镁条件下转变为黏土,在富钾地下水作用下继续转 变为富钾的伊利石黏土岩的结果;在重庆北碚地区, 该套凝灰岩经成岩后期环境改变为水云母黏土岩 (陈忠等,1999)。朱立军等(1994)研究显示,贵州 "绿豆岩"是由酸性火山灰在沉积盆地中发生沉积 水解,经成岩作用形成的酸性火—沉黏土岩。因水 环境的差异,形成在贵阳、盘县、兴仁、贞丰等地不同 的黏土矿物组合。在罗捆一带凝灰岩中除了长石、 石英晶屑外,还见有少量磁铁矿晶屑。本次研究岩 石薄片观察结果显示,晶屑凝灰岩中的晶屑主要以 长石和石英为主,石英晶屑边缘具熔蚀现象。值得 注意的是,薄片中见有少量磁铁矿晶屑,这与罗捆一 带凝灰岩一致。对比发现,在广西凭祥—十万大山 一带同期火山岩中普遍见有大量磁铁矿斑晶(广西 壮族自治区区域地质志,1985),指示二者有同源的 可能。

5.2 凝灰岩的形成时代

5.2.1 古生物化石

前人研究显示,在罗平张口洞剖面上,在凝灰岩 之上采集到中三叠世安尼期双壳类标准化石 Myophoria (Costatoria) goldfussi mansuyi Hsü,在凝 灰岩之下采集到下三叠统奥伦阶顶部牙形石标准分 子 Neospathodus triangularis (Bander)(张启跃等, 2009)。玻屑凝灰岩之上具中三叠世的双壳类 Costatoria goldfussi mansuyi—Leptochondria 组合和菊 石 Leirolites—Hollandites 组合;之下又具有早三叠世 的双壳类 Entolium discites microtis—Pteria murchisoni 组合和菊石 Tirolites—Procarnites 组合(贵州省区域 地质志,1987)。林文球等(1982)在凝灰岩之下嘉 陵江组采获代表早三叠世奥伦尼克期的 Ptcria cf murchisoni—Tirolites spinosus 化石组合,在雷口坡组 凝灰岩之上采获 Myophoria goldfassi—Eumorphotis illyrica 化石组合, 佐证凝灰岩时代为中三叠世安尼 期。

在三叠纪生物地层研究中,目前国际上大部分研究者认可以 Chiosella timorensis 化石的首现作为中三叠世安尼期的开始(殷鸿福等,2000;2002)。 区域上,王志浩等对滇黔桂地区该套界线凝灰岩之下采获代表中三叠世开始的牙形石 Chiosella timorensis(王志浩等,1990),并在黔中、黔西南地区 也获得相同的发现(杨守仁等,1992;秦典夕等, 1993)。在罗甸关刀剖面上,厚度较大的主凝灰岩 位于牙形石 Chiosella timorensis 之上 0.5 m 处(姚建 新等,2004)。本次研究于敢南剖面第 18 层采集到 牙形石 Chiosella timorensis,考虑到样品的采集精度 问题,参考关刀剖面将界线置于凝灰岩之下。牙形 石资料整体指示凝灰岩时代为安尼早期。

5.2.2 同位素年龄

对于这套凝灰岩的绝对时代,前人做过较多高 精度年代学研究。王彦斌等(2004)应用二次离子 探针质谱对望谟甘河桥玻屑凝灰岩进行锆石 U-Pb 年代学分析,获得其结果为 239.0±2.9 Ma。之后, 郑连弟等(2010)再次对甘河桥剖面凝灰岩进行 SHRIMP年龄测定,获得结果为247.6±1.7 Ma。 Lehrmann等(2006)应用TIMS获得关刀地区中三叠 世新苑组底部凝灰岩锆石U-Pb年龄为247.13± 0.12 Ma,时代属于中三叠世。黄虎等(2012)获得 田林利周中三叠世百逢组底部凝灰岩LAICP-MS 锆石U-Pb年龄为247.2±1.5 Ma。谢韬等(2013)获 得罗平板桥一带关岭组底部凝灰岩锆石LAICP-MS U-Pb年龄为246.6±1.4 Ma。

根据前人报道的数据结果看,大部分数据在误 差范围内一致,代表界线凝灰岩所对应酸性岩浆活 动的时间。上述研究表明,不管是古生物化石资料, 还是凝灰岩同位素年代学研究结果,均支持华南地 区中三叠统底界凝灰岩时代为安尼早期。

5.3 界线凝灰岩与区域火山岩的同源性分析

5.3.1 扬子台地西南缘三叠纪主要火山岩带

分布及特征

前述研究结果显示,凝灰岩分布广泛,为酸性火 山活动的产物。凝灰岩层数、厚度向南西呈增加趋 势,指示火山质成分来自扬子地台的西南一侧。在 层序上,中、下三叠统在右江盆地保存多层凝灰岩夹 层,显示多期喷发后沉积的特征,而位于中三叠统底 界的凝灰岩相对厚度最大,古生物和同位素年代学 指示其形成时代为中三叠世安尼早期。区域地质资 料显示,扬子台地西南缘三叠纪主要火山岩带有:① 三江造山带火山岩;②义敦岛弧带火山岩;③凭祥— 十万大山一带火山岩。其中三江地区火山岩时代为 早三叠世到晚三叠世,岩性为流纹岩、流纹质次火山 岩、英安岩和流纹岩。从岩性、时代上与华南地区三 叠纪火山灰一致,但该区整体以次火山岩为主,占比 50%以上(莫宣学等,2001),火山活动的强度和规模 较小,不太可能为华南中三叠统底界凝灰岩提供主 要的物质来源。而义敦岛弧带的西、中亚带分别以 玄武岩、玄武岩—安山岩—流纹岩组合(四川省区 域地质志,1991),时代以晚三叠世为主;东亚带虽 然以酸性火山岩为主,但只在局部出露,范围局限。 从岩性组合、时代、出露范围等方面均显示与华南中 三叠统底界凝灰岩有明显的区别,不可能为其提供 物质来源。凭祥—十万大山地区中生代火山活动不 仅是广西,甚至是华南地区范围最大、强度最强的地 区。除在凭祥西北那坡一带见有少量基性火山岩外 (胡丽莎等,2012),其余地区均为中一酸性岩,且以 酸性火山岩为主(广西壮族自治区区域地质志, 1985)。在岩性、时代、层序上与右江盆地三叠纪火

山灰可对比,火山活动强度和规模也支持其中一期 可能作为右江盆地中三叠统底界凝灰岩的物源区。

5.3.2 界线凝灰岩与凭祥—十万大山火山岩带

特征对比

根据杨丽贞等(2011)研究资料显示,凭祥地区 中三叠世火山岩为一套酸性、中酸性熔岩、凝灰岩和 火山角砾岩,最厚处达2030 m:沿凭祥-东门断裂的 宁明—扶绥一带的厚度中心位于崇左那关山地区, 火山岩厚 690 m,属火山溢流相;十万大山南麓防城 县扶隆—板八—峒中一带,厚236~620m;在富宁— 那坡一带中三叠统上部夹 4—5 层凝灰岩,反映了该 区中三叠世晚期曾有微弱的火山活动。对比该区 早一中三叠世流纹岩,有两个细微区别:一是中三叠 世流纹岩含有部分磁铁矿斑晶(杨丽贞等,1997), 这与罗捆、敢南一带凝灰岩具有相似性:二是中三叠 世火山岩相对更富 K₂O,这与敢南剖面中 17 层相对 12 层更富集 K₂O 的特征一致。火山岩纵向层序特 征指示每一期火山活动均以爆发开始而以溢流结 束,各期间隙极为短暂,基本是连续喷发,厚度自南 西向北东变薄,这与右江盆地三叠纪同期凝灰岩整 体向北东层数减少,厚度减薄的变化趋势一致。

地球化学分析显示,凭祥—十万大山一带中三 叠世火山岩在硅—碱图上全部属亚碱性系列;在 AFM 图解上基本上全部属于钙碱性系列;稀土元素 的配分型式与岛弧型钙碱性岩石系列的配分型式— 致;具有岛弧或活动大陆边缘的地球化学特征。 Newkirk 等(2002)研究认为,右江盆地 PTB 附近及 下三叠统凝灰岩具有相似的岩浆来源,是火山岛弧 与扬子地台南缘微陆块碰撞的产物;这与敢南一带 凝灰岩—致,地球化学特征指示与岛弧或活动大陆 边缘相关的大地构造背景。

以上特征表明,广西地区三叠纪火山岩整体层 序与右江盆地凝灰岩分布具有良好的对应关系,凭 祥一十万大山中三叠世火山岩在时代、地球化学特 征等方面指示与华南地区中三叠世界线凝灰岩的一 致性,岩性显示岩相差异,佐证了二者的同源性,代 表右江盆地中三叠统底部凝灰质成分的物质来源。 区域对比发现,与台马碎斑熔岩同源的火山岩代表 了凭祥—十万大山一带中三叠世早期剧烈岩浆活动 的产物,在灵山县太平坳一带,台马碎斑熔岩覆盖于 下三叠统凝灰岩之上,代表了侵出相的产物,形成中 三叠世十万大山中心裂隙式火山构造的穹状岩脊 (杨丽贞等,2011)。在防城港市那良镇、邕宁县古 同、板八高瓦地区均可见该套碎斑熔岩被中三叠世 板八组流纹岩覆盖,岩性呈渐变过渡关系。这不仅 限定火山活动的时间为中三叠世,还佐证该期酸性 岩浆活动爆发剧烈且规模较大,足以产生巨量的火 山灰,空降沉积后形成的凝灰岩广泛分布于右江盆 地以及华南板块西南缘。

6 构造指示及意义

右江盆地位于华南板块西南缘,盆地平面形态 整体呈菱形。盆地构造与沉积格局的形成和演化在 三叠纪同时受控于两大构造域并处于二者的交界部 位,西南、东南边界分别呈北西、北东走向,分别与古 特提斯和滨太平洋构造域的主构造线方向一致。前 人研究[●]指出,右江盆地的性质在早—中三叠世大 致以镇宁—册亨断裂带和里达断裂带为界发生了 东、西分异,两侧分别显示弧后裂陷盆地和大陆裂谷 盆地的特点。处于盆地西北缘的敢南一带,下三叠 统上部整体以灰岩为主,夹少量细碎屑岩;整合于其 上的中三叠统整体以细碎屑岩为主,灰岩夹层只在 底部出现。自下而上整体反映了沉积环境水体逐渐 变深、盆域范围逐渐增大的过程,这为确定盆地处于 伸展构造背景提供了佐证。而盆地内部的东、西分 异,可能是滨太平洋和古特提斯两大构造域分别作 为主应力场作用的结果。

前述分析指出,右江盆地中三叠统底部火山灰 的物源区为凭祥—十万大山火山岩带。同源火山质 成分具有相同的大地构造指示,即火山岩带与空降 沉积形成的凝灰岩具有相同的构造意义。区域构造 上,右江盆地西南一侧的越北地块属于古特提斯构 造域,位于滇桂交界带的古特提斯洋盆在早--中三 叠世总体上均处于消减阶段(吴根耀等,2000;胡丽 莎等,2012);盆地东南一侧为钦州缝合带,尽管扬 子板块和华夏板块在早古生代末已经拼合为一体, 但其西南端并没有完全拼合,位于钦防一带的残余 洋盆俯冲消减作用一直延续至中三叠世(覃小峰 等,2011;殷鸿福等,1999)。上述资料指示两大构造 域在早—中三叠世整体处于消减汇聚阶段。但从火 山岩带分布特征看,凭祥--十万大山三叠纪火山岩 带整体受断裂控制明显,分别与古特提构造域、滨太 平洋构造域主构造线方向一致。岩石组合方面,中 三叠世整体以酸性火山岩为主,表现出高铝钙碱性 的地球化学特征。这与以中性岩为主,酸性岩次之 的典型岛弧岩石组合有明显区别。

根据上述研究,作者等认为,随着古特提斯洋的 逐渐闭合,两大构造域在交汇部位发生应力集中,相 互作用表现的愈发明显。伴随块体的旋转引起局部 应力场的改变,导致在两大构造域交汇部位地壳伸 展。受古特提斯构造域控制的俯冲板片发生板片断 离,引起地壳岩石部分熔融产生大规模酸性岩浆,沿 北西向、北东向断裂带等构造薄弱带上涌形成岩浆 带。大量壳源物质的加入,形成以酸性岩为主的岩 石.且表现出高铝钙碱性特征。而由于发生部分熔 融的岩浆源区在早期已经受滨太平洋和古特提斯洋 俯冲板片及流体交代作用的强烈影响,产生的岩浆 显示与岛弧或者大陆边缘弧相似的地球化学特征。 综合前述,认为右江盆地中三叠统底部凝灰岩以及 为其提供火山灰来源的火山岩所代表的火山活动产 生于局部伸展构造背景,是古特提斯构造域与古太 平洋构造域相互作用的结果,详细记录了两大构造 域交汇部位中生代地壳的生长过程,可能对扬子地 台与华夏地块起到最终焊接的作用。

7 结论

(1)敢南一带早、中三叠世之交地层中含有多 套流纹质凝灰岩夹层,属于亚碱性系列。岩石稀土 配分曲线显示为右倾轻稀土富集型,明显的负 Eu 异常。大离子亲石元素(LILE)(Rb、U、Th 和 Ba 等)富集和高场强元素(HFSE)(Nb、Ta、P 和 Ti 等) 亏损,整体显示与弧相关的地球化学特征。

(2) 对早一中三叠世界线附近含凝灰岩层段 (剖面第 10~18 层) 灰岩进行生物地层分析, 自下而 上划分为4个牙形石带, 分别为 Neospathodus pakistanensis 间隔带; Neospathodus waageni—N. abruptus 组合带; Neospathodus homeri—N. triangularis 组合带以及 Chiosella timorensis 间隔带。并由此确 定第 17 层凝灰岩为界线凝灰岩, 时代为中三叠世安 尼早期。

(3)在生物地层、同位素年代学对其形成时代 进行精确限定的基础上,通过华南板块西南缘中三 叠统底界凝灰岩的区域分布、矿物组成、地球化学特 征,结合右江盆地中—下三叠统火山岩层序特征进 行详细对比。结果显示广西凭祥—十万大山一带中 三叠世火山岩是其主要来源。

致谢:牙形石样品处理和鉴定得到云南地质调 查院古生物研究所董致中、王伟的大力帮助,两位审 稿专家对文章初稿存在的问题提出了许多建设性意 见,使笔者等在论文修改中思考更多、收获更多,在 此一并表示由衷的感谢!

注释 / Notes

- ●贵州省地质调查院. 2015. 桑朗、罗悃、八茂、圭里四幅1:5万区域地质调查报告.
- ❷贵州省地质调查院. 2004. 遵义市幅1:25 万区域地质调查报告.
- ③中国地质大学(北京). 2004. 南盘江坳陷"三史"研究及油气勘探 目标优选(中册:构造史部分).

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)

- 陈忠, 唐洪明, 沈明道, 赵敬松. 1999. "绿豆岩" 组分新析. 西南石 油学院学报, 21(1): 39~42.
- 杜远生,黄虎,杨江海,黄宏伟,陶平,黄志强,胡丽莎,谢春霞. 2013.晚古生代—中三叠世右江盆地的格局和转换.地质论评, 59(1):1~11.
- 杜远生,黄宏伟,黄志强,徐亚军,杨江海,黄虎.2009.右江盆地晚 古生代—三叠纪盆地转换及其构造意义.地质科技情报,28 (6):10~15.
- 关建哲,戴克琳,杜其良.1990. 峨眉山绿豆岩的应用及其成因探索. 成都地质学院学报,17(2):37~43.
- 广西壮族自治区地质矿产局. 1985. 广西壮族自治区区域地质志. 北 京:地质出版社: 1~853.
- 贵州省地质矿产局. 1987. 贵州省区域地质志. 北京:地质出版社: 1 ~698.
- 黄虎,杨江海,杜远生,黄宏伟,黄志强,谢春霞,胡丽沙.2012.右 江盆地上二叠统—中三叠统凝灰岩年龄及其地质意义.地球科 学—中国地质大学学报,37(1):125~138.
- 胡丽莎, 杜远生, 杨江海, 黄虎, 黄宏伟, 黄志强. 2012. 广西那龙地 区中三叠世火山岩地球化学特征及构造意义. 地质论评, 58 (3):481~494.
- 林文球,王洪峯,宋华彬.1982.四川峨眉龙门洞晚二迭世—早中三 迭世地层及其沉积环境.矿物岩石,1(3):50~55.
- 陆刚,胡贵昂,张能,张耿,潘艺文,彭阳.2006. 右江盆地二叠纪生物礁时空分布和沉积构造演化新知.地质论评,52(2):190~197.
- 吕洪波,章雨旭,夏邦栋,方中,周伟明,彭阳,吴智平,李伟.2003.南 盘江盆地中三叠统复理石中的同沉积挤压构造———类新的沉 积构造的归类、命名和构造意义探讨.地质论评,49(5):449~ 456.
- 马会珍, 谭靖. 2018. 贵州盘县新民地区中三叠世关岭组盘县生物群 埋藏环境分析. 贵州地质, 35(2): 138~144.
- 莫宣学,邓晋福,董方浏,喻学惠,王勇,周肃,杨伟光.2001.西南 三江造山带火山岩—构造组合及其意义.高校地质学报,7 (2):121~138.
- 彭阳,胡贵昂,陆刚,章雨旭,乔秀夫.2004.桂西北晚古生代地层中的 沉积灰岩墙研究进展.地质论评,50(6):613~619.
- 彭阳,陆刚.2015.广西乐业泥盆系—石炭系沉积碳酸盐岩脉及地震 事件沉积的新发现.地质论评,61(2):281~287.
- 秦典夕,颜承锡,熊剑飞.1993.黔中三叠纪牙形类生物地层研究的 新进展.贵州地质,10(2):120~130.
- 秦建华,吴应林,颜仰基,朱忠发.1996.南盘江盆地海西—印支期 沉积构造演化.地质学报,70(2):99~107.
- 覃小锋,王宗起,张英利,潘罗忠,胡贵昂,周府生.2011.桂西南早 中生代酸性火山岩年代学和地球化学:对钦一杭结合带西南段 构造演化的约束.岩石学报,27(3):794~808.

四川省地质矿产局. 1991. 四川省区域地质志. 北京: 地质出版社: 1 ~730.

- 唐宾,郝维城,孙作玉.2007a.贵州中三叠世盘县动物群产出地层 剖面样品元素地球化学数据因子分析及其环境演化意义.古地 理学报,9(6):651~659.
- 唐宾,刘楚雄,郝维城.2007b.贵州中三叠世盘县动物群产出地层 的稀土元素特征及其地质意义.北京大学学报(自然科学版), 43(2):190~197.
- 万大学. 2002. 贵州盘县羊槛地区安尼锡克中期凝灰岩的发现及其 意义. 贵州地质, 19(2): 77~81.
- 王曼, 钟玉婷, 侯莹玲, 沈树忠, 徐义刚, 何斌. 2018. 华南地区二叠 纪一三叠纪界线酸性火山灰的源区与规模. 岩石学报, 34(1): 36~48.
- 汪绍年. 1991. 广西大容山—十万大山岩带中花岗岩类特征及成因. 岩石学报,7(2):73~80.
- 汪啸风,陈孝红,程龙,王传尚,Bachmann G H, Sander M, Hagdorn
 H. 2009. 关岭及相关生物群沉积与生态环境的探讨.古生物学报,48(3):509~526.
- 王彦斌,刘敦一,姚建新,纪占胜,王立亭,武桂春.2004. 黔西南 下一中三叠统界线年龄.地质学报,78(5):586~590.
- 王志浩, 钟端. 1990. 滇东、黔西和桂北不同相区的三叠纪牙形刺生物地层. 地层学杂志, 14(1):15~35.
- 吴根耀,马力,钟大赉,吴浩若,季建清,邝国敦,徐克定.2001. 滇 桂交界区印支期增生弧型造山带:兼论与造山作用耦合的盆地 演化.石油实验地质,23(1):8~18.
- 吴根耀,吴浩若,钟大赉,邝国敦,季建清.2000. 滇桂交界处古特 提斯的洋岛和岛弧火山岩.现代地质,14(4):393~400.
- 谢韬,周长勇,张启跃,胡世学,黄金元,文芠,丛峰.2013.罗平生物群下部凝灰岩锆石年龄及其地质意义.地质论评,59(1): 159~164.
- 徐亚军, 杜远生. 2018. 从板缘碰撞到陆内造山: 华南东南缘早古生 代造山作用演化. 地球科学, 43(2): 333~353.
- 杨丽贞, 陈兆福, 白艳萍. 1997. 广西南部中生代火山岩. 武汉: 中国 地质大学出版社: 1~47.
- 杨丽贞,刘融涛,白艳萍.2011. 广西南部钦州地区早—中三叠世火 山事件—台马碎斑熔岩. 地质通报,30(1):95~100.
- 杨守仁,初庆春.1992.黔西南三叠系永宁镇组牙形石研究—兼论 下、中三叠统界线.北京大学学报(自然科学版),28(6):722~ 732.
- 姚建新,纪占胜,王立亭,王彦斌,武桂春.2004.贵州南部地区中 三叠统青岩阶底界附近牙形石生物地层学研究.地质学报,78 (5):577~585.
- 殷鸿福, 童金南. 2002. 关于中国的海相三叠系建阶及下三叠统分阶 界线. 地球科学一中国地质大学学报, 27(5): 490~497.
- 殷鸿福,吴顺宝,杜远生,彭元桥.1999.华南是特提斯多岛洋体系 的一部分.地球科学一中国地质大学学报,24(1):109~113.
- 殷鸿福,杨遵仪,童金南.2000.国际三叠系研究现状.地层学杂志, 24(2):109~113.
- 张启跃,周长勇,吕涛,谢韬,楼雄英,刘伟,孙媛媛,黄金元,赵 来时.2009.云南中三叠世罗平生物群地层时代的厘定:来自牙 形石的证据.中国科学(D辑:地球科学),39(3):300~305.
- 郑连弟,姚建新, 全亚博, 宋彪, 王立亭, 杨振宇. 2010. 贵州南部地 区安尼阶底界锆石 SHRIMP 年龄结果. 地质学报, 84(8): 1112 ~1117.
- 周长勇,张启跃,黄金元,胡世学,文芝,谢韬.2017.南盘江盆地首 次发现早三叠世海生爬行动物化石.地质通报,36(1):168~ 171.
- 朱立军. 1994. 贵州早、中三叠世间绿豆岩粘土矿物学研究. 贵州工

学院学报,23(5):19~24.

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region. 1985&. Regional Geology of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House: 1~853.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province. 1987&. Regional Geology of Guizhou Province. Beijing: Geological Publishing House: 1~698.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. 1991&. Regional Geology of Sichuan Province. Beijing: Geological Publishing House: 1~730.
- Chen Zhong, Tang Hongming, Shen Mingdao, Zhao Jingsong. 1999&. New analysis on the composition of "mung bean rock". Journal of Southwest Petroleum Institute, 21(1): 39~42.
- Du Yuansheng, Huang Hu, Yang Jianghai, Huang Hongwei, Tao Ping, Huang Zhiqiang, Hu Lisha, Xie Chunxia. 2013&. The basin translation from Late Paleozoic to Triassic of the Youjiang Basin and its tectonic signification. Geological Review, 59(1): 1~11.
- Du Yuansheng, Huang Hongwei, Huang Zhiqiang, Xu Yajun, Yang Jianghai, Huang Hu. 2009&. Basin translation from late Palaeozoic to Triassic of Youjiang basin and its tectonic significance. Geological Science and Technology Information, 28(6): 10~15.
- Guan Jianzhe, Dai Kelin, Du Qiliang. 1990&. Use and Genesis of greenbean rocks and its genesis in Emeishan area, Sichuan Province. Journal of Chengdu College of Geology, 17(2): 37~43.
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward MP and Ries, AC (eds). Collision Tectonics. Geological Society of London. Special Publication, 19: 67~81.
- Huang Hu, Yang Jianghai, Du Yuansheng, Huang Hongwei, Huang Zhiqiang, Xie Chunxia, Hu Lisha. 2012 &. LA-ICP MS U-Pb dating of zircons from tuffs of the Upper Permian—Middle Triassic in Youjiang basin, Guangxi province and its geological significance. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 37(1): 125~138.
- Hu Lisha, Du Yuansheng, Yang Jianghai, Huang Hu, Huang Hongwei, Huang Zhiqiang. 2012&. Geochemistry and tectonic significance of middle Triassic volcanic rocks in Nalong, Guangxi Area. Geological Review, 58(3): 481~494.
- Jochum K P, Pfander J, Snow J E, Hofmann A W. 1997. Nb/Ta in mantle and crust.EOS, 78: 804.
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica diagram. Journal of Petrology, 27(3): 745~750.
- Lehrmann D J, Ramezani J, Bowring S A, Martin M W, Montgomery P, Enos P, Payne J L, Orchard M J, Wang Hongmei, Wei Jiayong. 2006. Timing of recovery from the end-Permian extinction: geochronologic and biostratigraphic constraints from south China. Geology, 34(12): 1053~1056.
- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang, Lo Chinghua, Wang Jian, Ye Meifang, Yang Yueheng. 2009. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia blocks in south China: constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd—Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks. Precambrian Research, 174 (1~2): 117~128.
- Lin Wenqiu, Wang Hongfeng, Song Huabin. 1982&. Upper Permian to Lower—Middle Triassic strata and sedimentary environments in Longmendong, Emei, Sichuan. Jmineral Petrol, 1(3): 50~55.
- Lu Gang, Hu Guiang, Zhang Neng, Zhang Geng, Pan Yiwen, Peng

Yang. 2006&. Recent approach to space—time distribution and sedimentary structural evolution of Permian reef in Youjiang Basin. Geological Review, 52(2): 190~197.

- Lü Hongbo, Zhang Yuxu, Xia Bangdong, Fang Zhong, Zhou Weiming, Peng Yang, Wu Zhiping, Li Wei. 2003&. Syn – sedimentary compression structures in the Middle Triassic flysch of the Nanpanjiang Basin, SW China. Geological Review, 49 (5): 449 ~ 456.
- Ma Huizhen, Tan Jing. 2018&. Analysis on buried environment of Panxian biota in Guanling formation of middle Triassic in Xinmin area of Panxian, Guizhou. Guizhou Geology, 35(2): 138~144.
- Mo Xuanxue, Deng Jinfu, Dong Fangliu, Yu Xuehui, Wang Yong, Zhou Su, Yang Weiguang. 2001&. Volcanic petrotectonic assemblages in Sanjiang orogenic belt, SW China and implication for tectonics. Geological Journal of China Universities, 7(2): 121~138.
- Newkirk T T, Lehrmann D, Dudak G. 2002. Tephrastratigraphy and analysis of tectonic setting of Triassic intermediate volcanic strata: Nanpanjiang basin, South China. AGU Fall Meeting Abstracts.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25: 956~983.
- Peng Yang, Lu Gang. 2015&. Neptunian dikes and earthquake events in Leye, Guangxi. Geological Review, 61(2):281~287.
- Peng Yang, Hu Guiang, Lu Gang, Zhang Yuxu, Qiao Xiufu. 2004&. Progress in studying on limestone dikes in Late Paleozoic strata in northwestern Guangxi. Geological Review, 50(6):613~619.
- Qin Dianxi, Yan Chengxi, Xiong Jianfei. 1993&. New advance in the biostratigraphy of Triassic conodonts in central Guizhou. Guizhou Geology, 10(2): 120~130.
- Qin Jianhua, Wu Yinglin, Yan Yangji, Zhu Zhongfa. 1996**&**. Hercynian—Indosinian sedimentary—tectonic evolution of the Nanpanjiang basin. Acta Geologica Sinica, 70(2): 99~107.
- Qin Xiaofeng, Wang Zongqi, Zhang Yingli, Pan Luozhong, Hu Guiang, Zhou Fusheng. 2011&. Geochronology and geochemistry of Early Mesozoic acid volcanic rocks from Southwest Guangxi: Constraints on tectonic evolution of the southwestern segment of Qinzhou— Hangzhou joint belt. Acta Petrologica Sinica, 27(3): 794~808.
- Saunders A D, Norry M J, Tarney J. 1988. Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs: trace element constraints. Journal of Petrology (Special Lithosphere Issue), 415~445.
- Sun S S, Mc Donough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society of London: Special Publication, 42: 313~345.
- Tang Bin, Hao Weicheng, Sun Zuoyu. 2007a&. Factor analyses and environmental evolution implications of element geochemistry data for the section bearing the Middle Triassic Panxian fauna in Guizhou Province. Journal of Palaeogeography, 9(6): 651~659.
- Tang Bin, Liu Chuxiong, Hao Weicheng. 2007b&. REE characteristics and their geological implications of the strata bearing Panxian fauna of the middle Triassic of Guizhou province. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 43(2): 190~197.
- Taylor S R, McLennan S M.1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell: 1~312.
- Wan Daxue. 2002 & Discovery on the tuff of the middle Anisian stage in the Yangkan area, Panxian, Guizhou and its significance. Guizhou Geology, 19(2): 77~81.
- Wang Man, Zhong Yuting, Hou Yingling, Shen Shuhong, Xu Yigang,

He Bin. 2018 &. Source and extent of the felsic volcanic ashes at the Permian Triassic boundary in South China. Acta Petrologica Sinica, 34(1): $36{\sim}48$.

- Wang Shaonian. 1991&. Characteristics and genesis of granitoids in the Darongshan and Shiwandashan area of Guangxi province, China. Acta Petrologica Sinica, 7(2): 73~80.
- Wang Xiaofeng, Chen Xiaohong, Cheng Long, Wang Chuanshang, Bachmann G H, Sander M, Hagdorn H. 2009&. Sedimentary and palaeoecological environment of the Guanling and related biotas. Acta Palaeontologica Sinica, 48(3): 509~526.
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Yao Jianxin, Ji Zhansheng, Wang Liting, Wu Guichun. 2004&. Age derermination of the lower—middle Triassic boundary at Ganheqiao, Wangmo, Guizhou province. Acta Geologica Sinica, 78(5): 586~590.
- Wang Zhihao, Zhong Duan. 1990#. Different facies formation of Triassic conodonts in Eastern Yunnan, Western Guizhou and Northern Guangxi. Journal of Stratigraphy, 14(1): 15~35.
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20: 325~343.
- Wu Genyao, Ma Li, Zhong Dalai, Wu Haoruo, Ji Jianqing, Kuang Guodun, Xu Keding. 2001&. Indosinian turkic-type orogen bordering Yunnan and Guangxi: with reference to coupled basin evolution. Petroleum Geology and Experiment, 23(1): 8~18.
- Wu Genyao, Wu Haoruo, Zhong Dalai, Kuang Guodun, Ji Jianqing. 2000&. Volcanic rocks of Paleotethyan ocean island and island-arc bordering Yunnan and Guangxi, China. Geoscience, 14(4): 393~ 400.
- Xie Tao, Zhou Changyong, Zhang Qiyue, Hu Shixue, Huang Jinyuan, Wen Wen, Cong Feng. 2013&. Zircon U-Pb age for the tuff before the Luoping biota and its geological implication. Geological Review, 59(1): 159~164.
- Xu Yajun, Du Yuansheng. 2018&. From periphery collision to intraplate orogeny: early Paleozoic orogenesis in southeastern part of south China. Earth Science, 43(2): 333~353.
- Yang Lizhen, Chen Zhaofu, Bai Yanping. 1997#. The Mesozoic Volcanic Rocks in South Guangxi. Wuhan: China University of Geoscience Press; 1~47.
- Yang Lizhen, Liu Rongtao, Bai Yanping. 2011&. The Early—Middle Triassic volcanic event—the Taima porphyroclastic lava in the

Qinzhou area, southern Guangxi, China. Geological Bulletin of China, $30(1): 95 \sim 100$.

- Yang Shouren, Chu Qingchun. 1992&. Study on conodonts from Triassic Yongningzhen formation, southwestern Guizhou province—with a discussion on lower/middle Triassic boundary. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 28(6): 722~732.
- Yao Jianxin, Ji Zhansheng, Wang Liting, Wang Yanbin, Wu Guichun. 2004&. Research on conodont biostratigraphy near the bottom boundary of the middle Triassic Qingyan stage in the southern Guizhou province. Acta Geologica Sinica, 78(5): 577~585.
- Ye Meifang, Li Xianhua, Li Wuxian, Liu Ying, Li Zhengxiang. 2007. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole rock geochemical evidence for an early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block. Gondwana Research, 12 (1~2): 144~156.
- Yin Hongfu, Tong Jinnan. 2002&. Chinese marine Triassic stages and boundaries of lower Triassic stages. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 27(5): 490~497.
- Yin Hongfu, Wu Shunbao, Du Yuansheng, Peng Yuanqiao. 1999&. South China defined as part of tethyan archipelagic ocean system. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 24(1): 109~113.
- Yin Hongfu, Yang Zunyi, Tong Jinnan. 2000&. On status of the international Triassic research. Journal of Stratigraphy, 24(2): 109 ~113.
- Zhang Qiyue, Zhou Changyong, Xie Tao, Lou Xiongying, Liu Wei, Sun Yuanyuan, Huang Jinyuan, Zhao Laishi. 2009#. Redefinition of the middle Triassic Luoping biota of Yunnan: evidence from conodont. Science China(Part D: Earth Sciences), 39(3): 300~305.
- Zheng Liandi, Yao Jianxin, Tong Yabo, Song Biao, Wang Liting, Yang Zhenyu. 2010&. Zircon U-Pb dating for the boundary of Olenekian—Anisian at Wangmo, Guizhou province. Acta Geologica Sinica, 84(8): 1112~1117.
- Zhou Changyong, Zhang Qiyue, Huang Jinyuan, Hu Shixue, Wen Wen, Xie Tao. 2017&. The first discovery of marine reptile fossils from the early Triassic of the Nanpanjiang basin. Geological Bulletin of China, 36(1): 168~171.
- Zhu Lijun. 1994&. A study of the clay mineralogy of green-bean rock between the early and middle Triassic in Guizhou. Journal of Guizhou Institute of Technology, 23(5): 19~24.

Provenance of the volcanic ash in the bottom of Middle Triassic, southwest margin of the South China plate: a case study of the tuff in Gannan region, Zhebao, Youjiang basin

XIANG Kunpeng, AN Yayun, HE Yongzhong, ZHAO Lei, YI Chengxing, LIU Kuiyong, ZHANG Housong, HUANG Yong, PAN Yingjuan, DENG Xiaojie Guizhou Geological Survey, Guiyang, 550081

Objectives: The tuff interlayer is widespread in the bottom of Middle Triassic, southwestern margin of the South China plate, and there exist different viewpoints about the provenance of the volcanic ash. The Youjiang basin is located in the southwest margin of the South China plate, deposited a suit of marine sedimentation during Early—Middle Triassic stage, which provides basis material for exploring the provenance of the volcanic ash.

Methods: This article focused on the Early Triassic and Middle Triassic tuff in Gannan region, Zhebao,

Youjiang basin, based on the section measurement, biostratigraphic analysis results divided the limestone into 4 conodont zones, the *Neospathodus pakistanensis* zone, the *Neospathodus waageni—N. abruptus* zone, the *Neospathodus homeri—N. triangularis* and the *Chiosella timorensis* zone, respectively, which determined the 17th bed tuff as the bottom of Middle Triassic.

Results: The petrology analysis result shows that the tuff is subdivided into rhyolitic vitric tuff, belong to the alkali series, all samples are characterized by relative enrichment in light rare earth elements (LREE), obvious negative Eu anomaly, and displayed LILE (Rb, U, Th and Ba) enrichment and HFSE depletion (Nb, Ta, Ti and P), analogues to those of typical subduction-related geochemical. Based on the age of the tuff determined by the biostratigraphic and the isotope chronology, detailed comparative analysis through the regional distribution, the mineral composition and the geochemical characteristics of Middle Triassic boundary tuff in southwestern margin of the Yangtze plate, and the Lower—Middle Triassic volcanic rocks sequence features in Youjiang basin.

Conclusions: Based on the age determine of the tuff by the biostratigraphic and the isotope chronology, combining with the regional distribution, the mineral composition and the geochemical characteristics of the Middle Triassic boundary tuff in southwestern margin of the South China plate, and the Early—Middle Triassic volcanic rock sequence features in Youjiang basin, detailed comparative analysis between the Middle Triassic tuff and the volcanic rocks in southwestern margin of the Yangtze plate and its adjacent region, and result show the Middle Triassic Pingxiang—Shiwandashan volcanic belt is the provenance of the lower Middle Triassic volcanic ash, Youjiang basin.

Keywords: tuff; conodont; middle Triassic; geochemical characteristics; provenance; Gannan region

Acknowlegements: This research is supported by China Geological Survey Project(No. DD20160020) and the Geological Scientific Research Project: Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province (No. QDKKH [2017] 28). Thank the anonymous reviewers for their constructive comments on this research.

First author: XIANG Kunpeng, male, born in 1988, senior engineer, engaged in basic geology survey and research work. Email: xiangkp1988@163.com

Manuscript received on: 2018-10-27; Accepted on: 2019-01-14; Edited by: LIU Zhiqiang **Doi**: 10.16509/j.georeview.2019.02.005