

文章编号: 1000-0550(2017)01-0024-11

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.01.003

贵州紫云晚二叠世一早三叠世初火山作用与生物礁的沉积演化

范广慧¹, 王永标², 孟峥³, 李国山²

1. 广州海洋地质调查局, 广州 510760

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

3. 湖北省地质调查院, 武汉 430034

摘要 晚二叠世长期期是华南地区重要的成礁期,也是火山事件频发的一个时期。生物礁是一种对海洋环境十分敏感的生态系统,晚二叠世的火山作用势必影响到当时生物礁的生长和沉积相的演化。然而,前人有关晚二叠世火山事件的研究主要集中在二叠系与三叠系界线附近,而对整个长期期生物礁的演化与火山事件关系的研究则较少。选择贵州紫云的台地边缘礁为研究对象,通过大量磁化率的测试,分析整个晚二叠世生物礁的沉积演化与火山作用的关系。分析结果显示,长兴早期和末期岩石的磁化率值明显偏高,反映较强的火山活动。在这两个时期,造架生物相对不发育。长兴中期,岩石的磁化率值相较于长兴早期和长兴晚期总体偏低,表明火山活动相对较弱,导致生物礁的快速生长。但长兴中期生物礁灰岩中夹有几层生物碎屑灰岩,其磁化率值有小幅度的升高,说明短时期小规模火山作用虽然导致了生物礁生长的暂时中断,但礁相动荡的环境使得火山灰中细小的铁磁性物质难以沉积下来。研究发现,尽管早三叠世早期泥岩具有高的磁化率值,但泥质岩中多层火山黏土具有异常高的磁化率值,火山灰物质对磁化率大小的影响远远超过陆源物质的贡献。

关键词 长期期;生物礁;磁化率;沉积演化;火山作用

第一作者简介 范广慧,女,1989年出生,硕士,助理工程师,古生物学与地层学,E-mail:janice0301@126.com

中图分类号 P534 P317 **文献标识码** A

0 引言

二叠纪末的全球海洋生物大灭绝被解释为是一种或多种地质事件共同作用的结果^[1-6]。在华南地区,由于二叠系—三叠系界线附近广泛存在火山黏土^[7],因此二叠纪末的全球生物灭绝事件常常与火山联系在一起^[8]。尽管前人对华南晚二叠世生物礁中的造礁生物和沉积相作了许多研究^[9-13],但这些研究主要集中在二叠纪—三叠纪界线附近^[14-17],而对整个长期期生物礁群落的演化与地质事件的关系仍不十分清楚。

古代火山作用的直接证据是火山碎屑岩或由火山灰物质演化来的火山黏土。在中国南方二叠纪地层中,火山黏土十分常见,但这些火山黏土多保存在深水盆地中。在浅水碳酸盐台地,由于较强的水动力作用,大部分细小的火山灰物质很难沉积下来,因此浅水台地环境中古代火山事件很难在野外识别。然而,由于火山灰物质中含有丰富的铁磁性矿物,一定

量的火山灰物质的带入就会使原先较纯的台地灰岩的磁化率值产生明显的变化。研究利用磁化率数据系统研究了贵州紫云石头寨剖面整个晚二叠世生物群落和沉积演化与火山作用的关系。

1 紫云晚二叠世生物礁概况

中国南方晚二叠世长期期生物礁主要分布在扬子地台的北缘和南缘。扬子地台南缘生物礁主要分布在广西隆林、贵州册亨、贞丰、紫云、望谟、罗甸一带,构成一弧形碳酸盐台地边缘相带(图1),因此该礁带被认为属于碳酸盐台地边缘礁。该礁带以南为台前斜坡和深水盆地相沉积(南盘江盆地)。南盘江盆地中发育许多孤立的小型碳酸盐台地,在这些孤立台地上也发现有少量生物礁。

在扬子地台南缘生物礁带中,位于黔南地区的紫云石头寨生物礁出露最好。石头寨剖面礁相地层序列十分清晰(图2)。长期期生物礁是在吴家坪期碎屑岩的基础上发展起来的。长期期早期以硅质团块

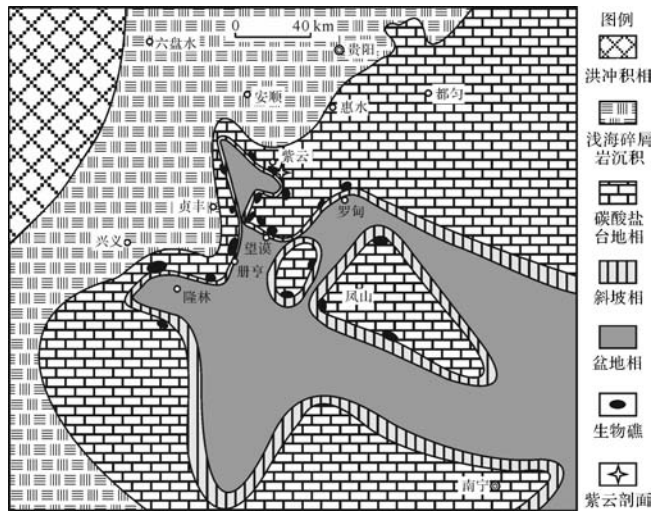


图 1 扬子台地南缘晚二叠世生物礁分布古地理图
(据桑惕等,1986 和冯增昭等,1997,有修改)

Fig.1 Paleogeographic map of Late Permian reef in the southern margin of Yangtze platform (modified from Sang *et al.*, 1986; Feng *et al.*, 1997)

灰岩为特征,缺乏造礁生物,仅有有孔虫和钙藻化石,其中有大量的 *Palaeofusulina* 化石。硅质团块灰岩之上出现棘屑灰岩,在此棘屑滩的基础上开始出现钙质海绵形成的厚达 8 m 的障积岩。障积岩之上主体为厚达 90 m 的骨架岩或部分障积岩,但其中夹多层藻—有孔虫颗粒灰岩。在生物礁演化的最后阶段,出现了厚约 16 m 的黏结岩。黏结岩之上为厚约 1 m 的微晶白云岩,标志着曾经盛极一时的华南长期期礁生态系的终结。受二叠纪末海平面下降事件^[20]影响,生物礁顶部遭受不同程度的剥蚀,与三叠纪地层之间形成高低不平的不整合面。不整合面之上为早三叠世的灰褐色泥岩夹火山黏土,向上逐渐过渡为薄层状泥质灰岩。

2 研究方法

自然界中的物质都是具有一定磁性的,这些磁性是由一些磁性矿物产生。磁性矿物分为顺磁性、抗磁

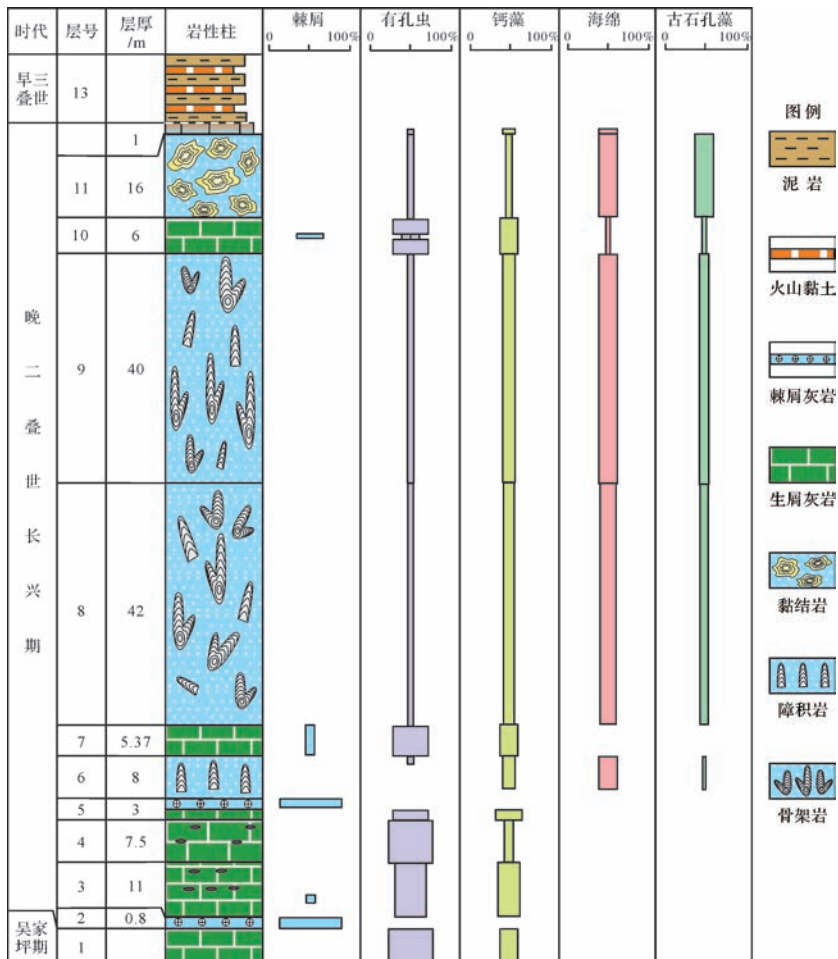


图 2 紫云石头寨长兴期地层序列及主要生物含量变化

Fig.2 Changhsingian stratigraphic sequence and variation of fossil contents in the Shitouzhai section at Ziyun area

性、亚铁磁性(如磁铁矿、磁赤铁矿、磁黄铁矿)和不完整反铁磁性(如赤铁矿、针铁矿)等类型。其中亚铁磁性矿物和不完整反铁磁性矿物是环境磁学中重要的研究对象^[21]。天然物质的磁学性质需要通过一些磁学参数来反映,例如,体积磁化率、质量磁化率、天然剩磁、饱和等温剩磁、磁化率频率系数等。其中最常用到的就是磁化率。磁化率表示外磁场作用下物质磁化的能力,磁化率的大小与样品中磁性矿物的种类和含量密切相关,所以经常用磁化率来粗略估计磁性矿物的含量。

海洋是个复杂的环境系统,海洋沉积物中的磁性矿物来源于海洋自身沉积作用、生物作用(深海海泥中的磁细菌)和还原成岩作用(贫氧或缺氧的环境)^[22]。由于生物礁发育在浅海、富氧的区域,所以生物作用和还原成岩作用的影响可以忽略不计。因此,进入生物礁沉积物的磁性矿物主要以水和大气为载体。火山喷发物、土壤和岩石风化产物可以通过河流、冰川将磁性矿物带入海底。而大气层外的陨石或显微熔融石、宇宙小球粒及一部分火山灰物质则可通过大气传播并沉淀进入海洋沉积物中。

磁化率的高低反映顺磁性物质的多少,而海洋中的磁性矿物主要通过陆源物质的河流输入或火山带入。当海平面下降或火山活动加剧时,陆源物质增多,磁性矿物增多,因此磁化率升高。反之,当环境趋于稳定,陆源磁性矿物输入就会减少,形成较纯净的生物礁灰岩,其磁化率值就降低。

紫云石头寨剖面磁化率的采样贯穿整个长兴期地层和早三叠世底部的泥质岩。其中,二叠纪末生物大灭绝界线以下主体为晚二叠世长兴期的生物礁灰岩夹生物碎屑灰岩,灭绝界线以上为早三叠世的灰褐色泥岩。在该剖面共采集岩石磁化率样品 91 个,平均采样间距为 1 m 左右。

磁化率测试工作在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室岩石磁学分室完成,采用 MFK1—FA 型磁化率仪。具体操作过程如下:

(1) 测得空盒质量 m_0 (单位:g)以及空盒磁化率 κ_0 (单位: 10^{-6}SI);

(2) 选取新鲜样品,经过常温干燥后再用非铁质工具手工碎样,碎至直径不超过 0.5 cm 的颗粒,装入体积为 10 cm^3 的圆柱形聚乙烯盒内并压实。测得样品与盒子的质量 m_1 (单位:g)以及样品与盒子的磁化率 κ_1 (单位: 10^{-6}SI)。

计算过程:样品质量磁化率 = $(\kappa_1 - \kappa_0) \times 10 / (m_1 -$

$m_0)$ (单位: $10^{-9}\text{ m}^3/\text{kg}$)

3 结果

通过对石头寨剖面 91 个样品的磁化率测试和分析,发现长兴早期和末期磁化率值偏高,而中期生物礁发育时段磁化率总体偏低(表 1、图 3)。各层段具体数值变化如下:

表 1 石头寨剖面岩石样品磁化率
Table 1 Magnetic susceptibility of rock samples in Shitouzhai section

样品号	层位	样品质量磁化率 / $10^{-9}\text{ m}^3/\text{kg}$	样品号	层位	样品质量磁化率 / $10^{-9}\text{ m}^3/\text{kg}$
ZY-26	13	35.58	ZY-68	9	-3.68
ZY-25	13	606.58	ZY-69	9	-2.40
ZY-24	13	40.26	ZY-70	9	-3.58
ZY-23	13	716.48	ZY-71	9	-3.94
ZY-22	13	31.74	ZY-72	9	-2.24
ZY-21	13	668.26	ZY-73	8	-3.32
ZY-20	13	43.72	ZY-74	8	-3.55
ZY-19	13	26.09	ZY-75	8	-4.31
ZY-18	13	25.61	ZY-76	8	-3.63
ZY-17	13	33.44	ZY-77	8	-3.91
ZY-16	13	34.78	ZY-78	8	-2.62
ZY-34	12	21.17	ZY-79	8	-2.82
ZY-27	11	10.14	ZY-80	8	-3.31
ZY-28	11	-2.04	ZY-81	8	-2.65
ZY-30	11	-0.29	ZY-83	8	-3.91
ZY-31	11	3.44	ZY-84	8	-2.80
ZY-32	11	18.43	ZY-85	8	-4.13
ZY-33	11	5.09	ZY-86	8	-3.04
ZY-39	11	8.28	ZY-87	8	-3.23
ZY-40	11	2.55	ZY-88	8	3.07
ZY-41	11	3.56	ZY-89	8	0.31
ZY-42	11	2.57	ZY-90	8	4.55
ZY-43	11	3.42	ZY-91	8	0.86
ZY-44	11	6.07	ZY-92	8	-3.05
ZY-45	11	6.07	ZY-93	8	-1.62
ZY-46	11	3.68	ZY-94	7	-1.92
ZY-47	10	-0.31	ZY-95	7	0.79
ZY-48	10	2.24	ZY-96	7	-2.58
ZY-49	10	0.61	ZY-97	7	-1.07
ZY-50	10	-0.66	ZY-98	6	-1.15
ZY-51	10	0.67	ZY-99	6	-2.42
ZY-52	10	5.39	ZY-100	6	-2.52
ZY-53	9	0.07	ZY-101	6	-0.14
ZY-54	9	-0.52	ZY-102	5	0.34
ZY-55	9	-3.40	ZY-103	5	9.32
ZY-56	9	1.50	ZY-104	5	7.85
ZY-57	9	1.24	ZY-105	4	10.46
ZY-58	9	1.32	ZY-106	4	3.90
ZY-59	9	-1.11	ZY-107	4	10.61
ZY-60	9	-3.79	ZY-109	3	10.70
ZY-61	9	-2.60	ZY-110	3	8.36
ZY-62	9	1.57	ZY-111	3	2.95
ZY-63	9	-2.56	ZY-112	3	4.14
ZY-64	9	1.39	ZY-113	3	11.10
ZY-65	9	-2.23	ZY-114	3	-1.39
ZY-66	9	-1.96	ZY-115	2	-0.43
ZY-67	9	-4.30	ZY-116	1	7.20

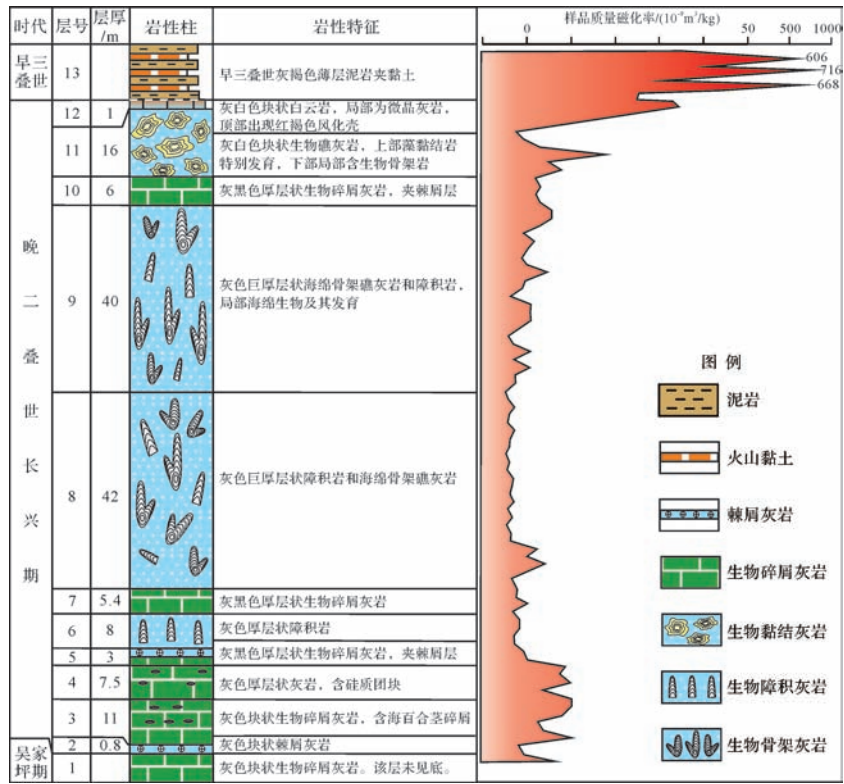


图 3 贵州紫云石头寨剖面晚二叠世生物礁沉积相演化与磁化率变化关系

Fig.3 The relationship between facies evolution of Late Permian reef and changes of magnetic susceptibility in the Shitouzhai section at Ziyun area

(1) 长兴期底部的生物碎屑灰岩磁化率偏高, 数值大致为 $(2.57 \sim 11.10) \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

(2) 生物礁灰岩中磁化率值总体偏低, 一般在 0 左右, 且大部分为较小的负值。

(3) 在生物礁核相中, 海绵骨架岩和障积岩对应的磁化率较低, 约为 $-1.86 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$, 而生物碎屑灰岩对应的磁化率较高, 约为 $1.99 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

(4) 生物礁顶部的藻黏结岩磁化率较海绵骨架岩和障积岩偏高, 大约为 $5.70 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

(5) 磁化率值在二叠纪—三叠纪界线附近异常升高, 高达 $25.61 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

(6) 早三叠世初期的泥岩磁化率值升高至 $(25.60 \sim 43.72) \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$, 泥岩中夹有数层火山黏土, 其磁化率值为 $(606.58 \sim 716.48) \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

以上数据表明: 长兴期生物礁的基底为含硅质团块生物碎屑灰岩。前人通过地球化学分析认为这一时期的硅质是火山成因的^[23-24]。因此在生物礁生长前本区同样受到了火山物质的影响, 从而导致磁化率值偏高。随后长兴期生物礁繁盛, 礁灰岩的磁化率值较低, 几乎不含磁性矿物。需要说明的是, 在生物礁

发育时段, 仍出现几层藻—有孔虫生物碎屑灰岩。前期研究发现藻—有孔虫灰岩中存在大量与火山活动有关的石英颗粒以及火山玻璃, 并认为这些藻—有孔虫灰岩是火山活动导致造礁生物暂时消失在礁坪形成的产物^[25]。但这几层生物碎屑灰岩的磁化率值并没有太明显的升高, 这可能与礁相动荡的水体环境有关。动荡的礁相浅水环境使得火山灰中一部分细小的富铁矿物或颗粒难以沉积下来, 因此其磁化率值也没有明显的升高。

然而, 礁顶部的黏结岩中磁化率值却明显较高, 说明在生物礁生长最末期火山活动再次加剧。尽管黏结岩也形成于浅水环境, 但黏结生物可能有效地捕获了一部分火山灰物质, 从而导致磁化率值的明显升高。二叠纪末生物大灭绝界线上的泥质岩中, 磁化率异常升高。这可能与生物大灭绝后陆源物质的大量输入^[26]及期间频繁的火山活动有关^[27]。特别需要指出的是, 二叠纪末生物大灭绝界线以上的泥岩中夹有数层火山黏土。这些火山黏土的磁化率值是泥岩磁化率值的 20 倍左右(图 4), 说明火山灰物质对磁化率大小的影响远远超过陆源物质的贡献。

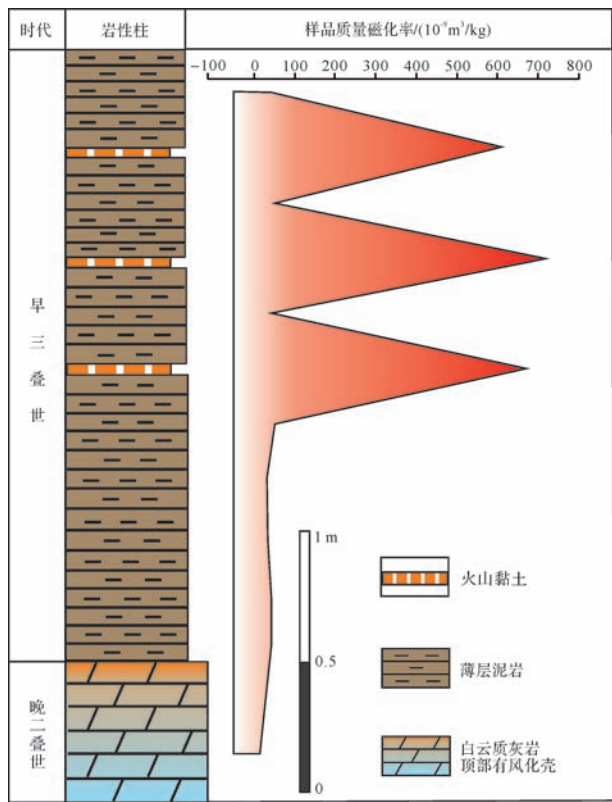


图4 石头寨剖面早三叠世泥质岩中具有异常高磁化率值的火山黏土

Fig.4 Volcanic clay with extremely high magnetic susceptibility in the Early Triassic mudstone interval of the Shitouzhai section

源输入明显减少,为中国南方生物礁的广泛发育创造了条件^[40-41]。尽管如此,Shen *et al.*^[42]报道在紫云地区的吴家坪组和长兴组之间存在2.6 m厚的凝灰岩,说明长兴组早期沉积中仍受零星的火山或陆源输入的影响,从而出现硅质团块灰岩沉积(图5)。由于火山灰物质或陆源物质的影响,长兴早期硅质团块灰岩的磁化率值明显偏高。

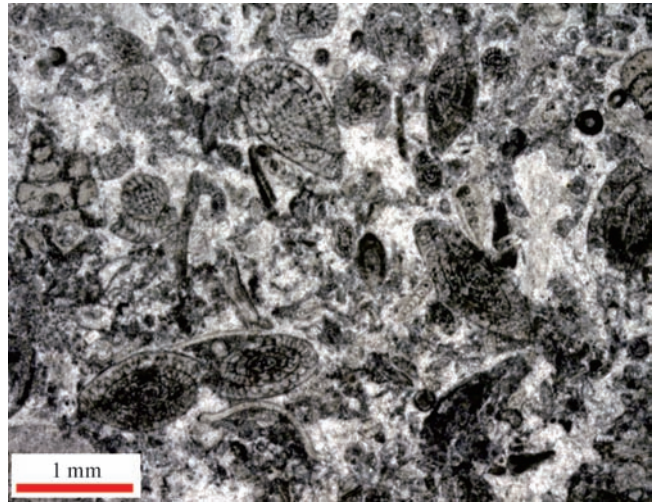


图5 贵州紫云石头寨剖面长兴早期硅质团块灰岩中丰富的 Palaeofusulina 化石,岩石薄片照片

Fig.5 Thin section showing abundant Palaeofusulina in the Early Changhsingian bioclastic limestone with chert clots in the Shitouzhai section at Ziyun

4 火山作用与沉积相演化关系

石头寨剖面磁化率值的变化特征很好地反映了长兴期生物礁生态系与火山活动的变化规律。根据磁化率值和沉积相的周期性变化,本文将紫云石头寨晚二叠世长兴期沉积演化分为长兴早期、长兴中期、长兴末期和早三叠世初期四个时期。

4.1 长兴早期沉积及火山物质的影响

在中二叠世—晚二叠世之交,华南地区火山活动十分强烈^[27-32]。尤其是中国西南地区的峨眉山玄武岩喷发,形成覆盖四川、贵州和云南三省面积达 $3.3 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、平均厚度705 m、局部厚度5 km的火山熔岩^[16],是世界公认的大火成岩省^[33]。峨眉山玄武岩喷发的时间恰好与瓜达鲁普统一乐平统之交的生物绝灭事件时间相吻合^[34-39]。这一期火山活动破坏了陆地植被,在华南广泛形成以龙潭组为代表的含煤碎屑岩沉积。但在远离火山活动的地区,则是与龙潭组同期异相的吴家坪组沉积。

但从晚二叠世晚期的长兴期开始,火山活动和陆

4.2 长兴中期生物礁的发育及间歇性火山作用的影响

长兴中期火山活动明显减弱,海水变得清澈。在浅海地区首先形成的是海百合茎碎屑滩沉积,在此基础上造礁海绵才开始迅速拓殖。造礁生物包括大型的串管海绵、纤维海绵和水螅等。在生物礁建造的早期,以海绵障积岩为主,逐渐演变成以海绵骨架岩为主。在整个长兴中期,以海绵为代表的造礁生物最终形成了厚达近百米的生物礁灰岩。

尽管这一时期海洋环境总体稳定,以生物礁灰岩建造为主要特征。但调查发现,在生物礁灰岩中仍夹有数层生物碎屑灰岩(图6)。早期研究认为,这些生物碎屑灰岩为礁后潟湖环境的藻和有孔虫颗粒灰岩或泥粒灰岩沉积^[11]。然而,最近的研究发现这些生物碎屑灰岩中存在大量与火山活动有关的石英颗粒及火山玻璃,并认为这些生物碎屑灰岩是火山活动导致造礁生物暂时消失后在礁坪形成的产物^[25]。

虽然陆源剥蚀产生的石英等碎屑也可被带入近

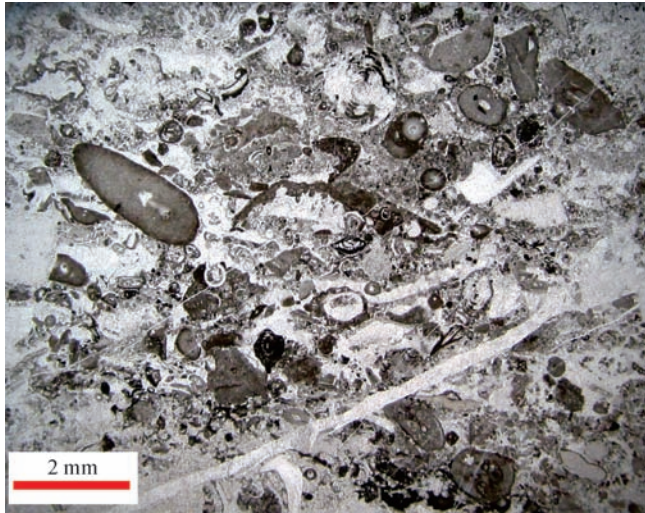


图6 贵州紫云石头寨剖面长兴中期生物碎屑灰岩,产较丰富的管壳石,室内薄片照片

Fig.6 Abundant Tubiphytes produced in the middle Changhsingian bioclastic limestone in the Shitouzhai section at Ziyun area, thin section photo

岸浅海环境,同时使生物礁生态系的生长受到暂时的抑制,但根据研究区晚二叠世的古地理图分析,来自康滇古陆的陆源物质大部分沉积在川滇黔碎屑岩台地上,很少有陆源物质会进入碳酸盐台地(图1)。此外,由于紫云生物礁分布在碳酸盐台地边缘,因此礁与古陆之间存在水体相对安静的礁后潟湖。由于潟湖中水动力较弱,因此来自陆地的碎屑物质很容易被沉积在潟湖环境。所以静水潟湖是捕获陆源碎屑物的有效陷井,从而使碎屑物难以超越潟湖到达台地边缘礁中。然而,火山灰物质则可以通过空气循环被搬运至远离海岸的台地边缘环境中(图7)。因此,我们认为,石头寨剖面长兴中期生物礁中所夹的生物碎屑灰岩不是因为陆源物质输入造成的,而是晚二叠世长兴期间歇性的火山灰物质带入造成的。此外,从区域上看,尽管峨眉山玄武岩喷发主要发生在中二叠世与晚二叠世之交^[36],但朱江等^[43]认为中二叠世的峨眉山玄武岩喷发持续到晚二叠世末期。前人在华南地区二叠纪—三叠纪界线以下数十厘米内发现多层黏土,其中贵州惠水断杉的上二叠统有多达十余层的凝灰岩^[27]。因此,可以认为长兴中期的海洋环境仍受到间歇性火山活动的影响。

火山物质带入导致生物礁生长暂时停止的现象在印度尼西亚新近纪与礁有关的碳酸盐地层中也有记录。Wilson *et al.*(图6)^[44]通过对该地区地层序列的分析,发现凝灰质生物碎屑泥粒灰岩中常常产丰富

的底栖有孔虫,而造礁珊瑚则明显减少。一些研究表明,有孔虫之所以可以适应较多火山碎屑物质的带入,是因为一些有孔虫在被埋在厚达1 cm的沉积物中时,仍可以从中爬出来^[45]。与此同时,间歇性火山活动及火山灰物质的带入在使生物礁建造转变为藻和有孔虫碎屑灰岩沉积的同时,也势必引起藻有孔虫灰岩中磁化率的升高。然而测试结果显示,生物礁中所夹的几层生物碎屑灰岩的磁化率值并没有非常明显的波动。这可能与生物礁中浅水动荡的沉积环境有关。一方面,浅水氧化环境使火山灰物质的中含铁的暗色矿物容易分解而溶解到海水中,另一方面礁相动荡的水动力条件使得一部分细小的火山灰物质难以沉积下来,因此磁化率值并没有显著的升高。

4.3 长兴末期火山活动的加剧

在长兴末期生物礁顶部出现厚约16 m的黏结岩(图1)。这些黏结岩主要由古石孔藻(*Archaeolithoporella*)包覆 *Tabulozoa*、水螅或海绵而成,黏结纹层厚可达5 mm左右(图8)。通过酸蚀处理,我们在这套黏结岩中也发现大量与火山活动相关的石英颗粒,反映当时周边地区有火山喷发^[25]。测试发现,黏结岩的磁化率比生物礁灰岩的磁化率明显较高,进一步证实了长兴末期火山活动的加剧。

黏结岩中最常见的黏结生物 *Archaeolithoporella* 可能属于红藻^[46],但从形态特征上看更可能属于蓝藻或蓝细菌^[47]。黏结生物的生态功能一直被认为是在礁中起加固礁体骨架的作用,但 *Archaeolithoporella* 大量出现的原因却很少引起人们的关注。与火山有关的石英的存在及磁化率值的升高表明,黏结岩的形成与二叠纪末火山活动的加强具有等时性。前文提到长兴中晚期间歇性火山导致生物礁暂时停止而形成生物碎屑灰岩,但长兴末期的火山活动并没有导致生物碎屑灰岩的形成,而是形成黏结岩,这可能是由于黏结生物 *Archaeolithoporella* 作为一种低等的藻类具有很强的环境适应能力。然而,尽管黏结岩在形成时间与火山活动相对应,但导致黏结岩形成可能还另有原因。调查发现,黏结岩中除了古石孔藻外,还存在大量早期海底胶结物。这些胶结物的出现可能与深部海水的上涌有关,也可能与高温导致的蒸发和海水浓缩有关^[25]。

有意思的是,除了古石孔藻外,管壳石的丰度在黏结岩中也明显增高(图8C),这与长兴中晚期生物礁发育时期所夹的生物碎屑灰岩中富管壳石的情况非常类似。与其他大部分浅海底栖生物一样,二叠纪

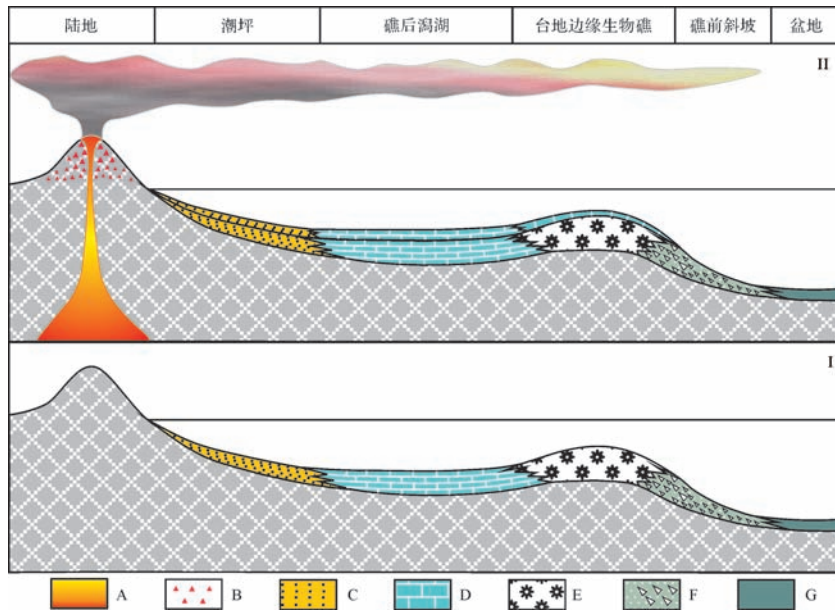


图7 贵州紫云晚二叠世生物礁沉积示意图

I. 正常浅海环境下生物礁群落生长状态 II. 火山活动期间, 生物礁群落暂时破坏, 并被藻—有孔虫生物群所代替。
A. 岩浆; B. 火山角砾; C. 潮坪碎屑岩沉积; D. 礁后潟湖灰岩沉积; E. 礁灰岩; F. 礁前斜坡沉积; G. 盆地相泥质岩沉积

Fig.7 Sedimentary schematic of Late Permian reefs at Ziyun area, Guizhou



图8 贵州紫云石头寨剖面长兴晚期古石孔藻和管壳石黏结岩

A, B. 古石孔藻黏结岩, 室内薄片照片; C. 管壳石黏结岩, 单偏光显微镜; D. 古石孔藻黏结岩, 野外照片

Fig.8 Late Changhsingian encrusted framestone by *Archaeolithoporella* and *Tubiphytes* in the Shitouzhai section at Ziyun area

末大灭绝后, 管壳石曾一度消失, 但在早三叠世生物复苏过程中, 管壳石却是较先复苏的种类^[48], 并于中三叠世在华南形成以管壳石为主的生物礁, 暗示管壳

石是一种对环境事件具有较强适应能力的种类。因此, 我们认为紫云晚二叠世生物礁中这种具有较强适应能力的管壳石的局部繁盛可能暗示着礁相生态环

境的暂时恶化。而导致环境恶化的原因之一则可能是长兴末期火山活动的喷发。

4.4 早三叠世初期陆源输入和火山活动的影响

从区域地层序列上看,二叠纪末生物大灭绝之后,早三叠世底部普遍出现一套泥质岩或泥质灰岩沉积,指示陆源物质输入的加强和沉积速率的加大^[49]。陆源输入加强还得到牙形石中锇同位素的支持^[26]。在紫云石头寨剖面,早三叠世底部主体为一套灰褐色薄层泥岩,期间夹多层灰黄色火山黏土(图9)。由于陆源物质中含有丰富的磁性矿物,因此泥岩的磁化率值显著增加,高达 $(25.60 \sim 43.72) \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。然而,火山黏土的磁化率值却显得更高,可达 $(606.58 \sim 716.48) \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$,表明早三叠世初期频繁的火山作用^[50-51]及其对岩石磁化率的影响。



图9 贵州紫云石头寨剖面早三叠世泥质岩中的火山黏土,黄色虚线指示火山黏土层

Fig.9 Early Triassic grey-brown marl with several layers of volcanic clay in the Shitouzhai section at Ziyun, Guizhou.

Yellow dotted lines indicate layers of volcanic clay

5 结论

贵州紫云石头寨剖面磁化率测试分析显示,岩石磁化率的高低与火山物质和陆源输入存在正相关关系。而火山活动和陆源输入又进一步影响生物礁群落的生长,从而导致沉积相上的变化。石头寨剖面晚二叠世长兴期至早三叠世初的沉积演化可分为四个阶段,即长兴早期、长兴中期、长兴末期和早三叠世初期。

(1) 受火山灰物质或陆源物质中富铁磁性矿物的影响,长兴早期硅质团块灰岩的磁化率值明显偏高。火山灰物质或陆源输入的影响也抑制了生物礁的生长,从而出现硅质团块灰岩沉积。

(2) 长兴中期总体环境稳定,因此生物礁十分发

育。但存在间歇性的火山活动,并导致生物礁生长的短暂停止,而出现藻—有孔虫生物碎屑灰岩。由于礁相环境水体动荡,因此细小的铁磁性物质难以沉积下来,生物碎屑灰岩的磁化率值并没有明显升高。

(3) 长兴末期火山活动的加剧,生物礁顶部的黏结岩磁化率明显较高。但黏结岩的形成不但受火山活动的影响,更主要受高温环境的控制。

(4) 早三叠世初期大量陆源物质的输入及火山灰物质的加入导致泥质岩中磁性矿物含量和磁化率值的显著增加。其中火山物质对磁化率值的影响明显大于一般的陆源输入。

参考文献 (References)

- [1] Knoll A H, Bambach R K, Canfield D E, et al. Comparative earth history and Late Permian mass extinction[J]. *Science*, 1996, 273 (5274): 452-457.
- [2] Wignall P B, Twitchett R J. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction[J]. *Science*, 1996, 272(5265): 1155-1158.
- [3] Meyer K M, Kump L R, Ridgwell A. Biogeochemical controls on photic-zone euxinia during the end-Permian mass extinction[J]. *Geology*, 2008, 36(9): 747-750.
- [4] Meyer K M, Kump L R. Oceanic euxinia in Earth history: causes and consequences[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2008, 36(1): 251-288.
- [5] Heydari E, Hassanzadeh J. Deev Jahi Model of the Permian-Triassic boundary mass extinction: a case for gas hydrates as the main cause of biological crisis on Earth[J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 163 (1/2): 147-163.
- [6] Algeo T J, Chen Z Q, Fraiser M L, et al. Terrestrial-marine teleconnections in the collapse and rebuilding of Early Triassic marine ecosystems[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 308(1/2): 1-11.
- [7] 杨遵仪,吴顺宝,殷鸿福,等. 华南二叠—三叠纪过渡期地质事件[M]. 北京:地质出版社,1991. [Yang Zunyi, Wu Shunbao, Yin Hongfu, et al. Permo-Triassic Events of South China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.]
- [8] Yin H F, Huang S J, Zhang K X, et al. The effects of volcanism on the Permo-Triassic mass extinction in South China[M]//Sweet W C, Yang Z Y, Dickins J M, et al. Permo-Triassic Events in the Eastern Tethys. Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 169-174.
- [9] 范嘉松,张维,马行,等. 鄂西二叠系生物礁的基本特征及其发育规律[J]. *地质科学*, 1982(3): 274-282. [Fan Jiasong, Zhang Wei, Ma Xing, et al. The Upper Permian reefs in Lichuan area, west Hubei[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1982(3): 274-282.]
- [10] 李书舜,刘大成,谷顺华. 四川开县红花生物礁的基本特征及找气意义[J]. *天然气工业*, 1985, 5(2): 24-28. [Li Shushun, Liu Dacheng, Gu Shunhua. Characteristics of the Honghua reef in Kai county of Sichuan and its significance in finding the new type

- hydrocarbon reservoir[J]. *Natural Gas Industry*, 1985, 5(2): 24-28.]
- [11] 林启祥. 贵州紫云晚二叠世生物礁及其演化[J]. *地球科学*, 1992, 17(3): 301-307. [Lin Qixiang. Nature and evolution of Late Permian reef in Ziyun, Guizhou province[J]. *Earth Science*, 1992, 17(3): 301-307.]
- [12] 李学杰, 陈林洲, 罗新民. 湘南上二叠统长兴组生物礁基本特征[J]. *地质科学*, 1993, 28(4): 317-326. [Li Xuejie, Chen Linzhou, Luo Xinmin. The reefs of Changxing Formation in the southern Hunan province[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1993, 28(4): 317-326.]
- [13] 王生海, 范嘉松, Rigby J K. 贵州紫云二叠纪生物礁的基本特征及其发育规律[J]. *沉积学报*, 1996, 14(2): 66-74. [Wang Shenghai, Fan Jiasong, Rigby J K. The characteristics and development of the Permian reefs in Ziyun county, South Guizhou, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(2): 66-74.]
- [14] Stanley S M. Climatic cooling and mass extinction of paleozoic reef communities[J]. *Palaios*, 1988, 3(2): 228-232.
- [15] Flügel E, Reinhardt J. Uppermost Permian reefs in Skyros (Greece) and Sichuan (China): implications for the Late Permian extinction event[J]. *Palaios*, 1989, 4(6): 502-518.
- [16] Wignall P B. Large igneous provinces and mass extinctions[J]. *Earth-Science Reviews*, 2001, 53(1/2): 1-33.
- [17] 吴亚生, 范嘉松, 姜红霞, 等. 二叠纪末生物礁生态系绝灭的方式[J]. *科学通报*, 2007, 52(2): 207-214. [Wu Yasheng, Fan Jiasong, Jiang Hongxia, et al. Extinction pattern of reef ecosystems in Latest Permian[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(2): 207-214.]
- [18] 桑恂, 王立亭, 叶念曾. 贵州晚二叠世岩相古地理特征[J]. *贵州地质*, 1986, 3(2): 105-125, 152. [Sang Ti, Wang Liting, Ye Nianzeng. The characteristics of lithofacies and palaeogeography in Late Permian, Guizhou[J]. *Geology of Guizhou*, 1986, 3(2): 105-125, 152.]
- [19] 冯增昭, 杨玉卿, 金振奎, 等. 中国南方二叠纪岩相古地理[M]. 东营: 石油大学出版社, 1997. [Feng Zengzhao, Yang Yuqing, Jin Zhenkui, et al. *Lithofacies Paleogeography of Permian in South China*[M]. Dongying: Petroleum University Press, 1997.]
- [20] 吴亚生, 范嘉松, 金玉环. 晚二叠世末的生物礁出露及其意义[J]. *地质学报*, 2003, 77(3): 289-296. [Wu Yasheng, Fan Jiasong, Jin Yugan. Emergence of the Late Permian Changhsingian reefs at the end of the Permian[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(3): 289-296.]
- [21] 周元涛, 张玉芬. 环境磁学及其在古气候环境研究中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2007, 4(6): 533-539. [Zhou Yuantao, Zhang Yufen. Environmental magnetism and its application in paleoclimatic and paleoenvironmental study[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2007, 4(6): 533-539.]
- [22] 孟庆勇, 李安春. 海洋沉积物的环境磁学研究简述[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(1): 86-90. [Meng Qingyong, Li Anchun. Brief reviews on environmental magnetism in marine sediment[J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(1): 86-90.]
- [23] 杨瑞东. 贵州晚二叠世硅质类型及其沉积地球化学环境[J]. *贵州地质*, 1990, 7(2): 171-176. [Yang Ruidong. Types of siliceous rocks and their sedimentary geochemical environment of Late Permian in Guizhou[J]. *Geology of Guizhou*, 1990, 7(2): 171-176.]
- [24] 李蔚洋, 刘杰, 何幼斌. 四川地区上二叠统吴家坪组条带状硅质岩成因分析[J]. *海相油气地质*, 2011, 16(2): 61-65. [Li Weiyang, Liu Jie, He Youbin. Origin of Upper Permian Wujiaping banding siliceous rock in Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2011, 16(2): 61-65.]
- [25] Fan Guanghui, Wang Yongbiao, Kershaw S, et al. Recurrent breakdown of Late Permian reef communities in response to episodic volcanic activities: evidence from southern Guizhou in South China[J]. *Facies*, 2014, 60(2): 603-613.
- [26] Song Haijun, Wignall P B, Tong Jinnan, et al. Integrated Sr isotope variations and global environmental changes through the Late Permian to early Late Triassic[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 424: 140-147.
- [27] 殷鸿福, 黄思骥, 张克信, 等. 华南二叠纪—三叠纪之交的火山活动及其对生物绝灭的影响[J]. *地质学报*, 1989(2): 169-180. [Yin Hongfu, Huang Siji, Zhang Kexin, et al. Volcanism at the Permian-Triassic boundary in South China and its effects on mass extinction[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1989(2): 169-180.]
- [28] Chung S L, Jahn B M. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary[J]. *Geology*, 1995, 23(10): 889-892.
- [29] Lo C H, Chung S L, Lee T Y, et al. Age of the Emeishan flood magmatism and relations to Permian-Triassic boundary events[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 198(3/4): 449-458.
- [30] 宋谢炎, 侯增谦, 汪云亮, 等. 峨眉山玄武岩的地幔热柱成因[J]. *矿物岩石*, 2002, 22(4): 27-32. [Song Xieyan, Hou Zengqian, Wang Yunliang, et al. The mantle plume features of Emeishan basalts[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2002, 22(4): 27-32.]
- [31] 何斌, 徐义刚, 肖龙, 等. 峨眉山地幔柱上升的沉积响应及其地质意义[J]. *地质论评*, 2006, 52(1): 30-37. [He Bin, Xu Yigang, Xiao Long, et al. Sedimentary responses to uplift of Emeishan mantle plume and its implications[J]. *Geological Review*, 2006, 52(1): 30-37.]
- [32] He Bin, Xu Yigang, Huang Xiaolong, et al. Age and duration of the Emeishan flood volcanism, SW China: geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb dating of silicic ignimbrites, post-volcanic Xuanwei Formation and clay tuff at the Chaotian section[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 255(3/4): 306-323.
- [33] Ali J R, Thompson G M, Zhou Meifu, et al. Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Lithos*, 2005, 79(3/4): 475-489.
- [34] 杨振宇, 沈渭州, 郑连弟. 广西来宾蓬莱滩二叠纪瓜德鲁普统一乐平统界线剖面元素和同位素地球化学研究及地质意义[J]. *地质学报*, 2009, 83(1): 1-15. [Yang Zhenyu, Shen Weizhou, Zheng Liandi. Elements and isotopic geochemistry of Guadalupian-Lopingian boundary profile at the Penglaitan section

- of Laibin, Guangxi province, and its geological implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(1): 1-15.]
- [35] Wignall P. The Link between large igneous province eruptions and mass extinctions[J]. *Elements*, 2005, 1(5): 293-297.
- [36] Wignall P B, Sun Yadong, Bond D P G, et al. Volcanism, mass extinction, and carbon isotope fluctuations in the Middle Permian of China[J]. *Science*, 2009, 324(5931): 1179-1182.
- [37] Lai Xulong, Wang Wei, Wignall P B, et al. Palaeoenvironmental change during the end-Guadalupian (Permian) mass extinction in Sichuan, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 269(1/2): 78-93.
- [38] 赖旭龙,孙亚东,江海. 峨眉山大火成岩省火山活动与中、晚二叠世之交生物大灭绝[J]. *中国科学基金*, 2009(6): 353-356. [Lai Xulong, Sun Yadong, Jiang Haishui. The relationship between volcanism of Emeishan large igneous province and mass extinction during Middle-Late Permian transition[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2009(6): 353-356.]
- [39] Bond D P G, Wignall P B, Wang W, et al. The mid-Capitanian (Middle Permian) mass extinction and carbon isotope record of South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 292(1/2): 282-294.
- [40] 徐桂荣,罗新民,王永标. 长江中游晚二叠世生物礁的生成模型[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1997. [Xu Guirong, Luo Xinmin, Wang Yongbiao. On a Building Model of Late Permian Reefs in Central Yangtze River Area[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997.]
- [41] 范嘉松,吴亚生. 世界二叠纪生物礁的基本特征及其古地理分布[J]. *古地学报*, 2005, 7(3): 287-304. [Fan Jiasong, Wu Yasheng. Main features of the Permian reefs of world and their palaeogeographic distribution [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(3): 287-304.]
- [42] Shen Jianwei, Xu Huilong. Microbial carbonates as contributors to Upper Permian (Guadalupian - Lopingian) biostromes and reefs in carbonate platform margin setting, Ziyun County, South China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 218(3/4): 217-238.
- [43] 朱江,张招崇,侯通,等. 贵州盘县峨眉山玄武岩系顶部凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄;对峨眉山大火成岩省与生物大规模灭绝关系的约束[J]. *岩石学报*, 2011, 27(9): 2743-2751. [Zhu Jiang, Zhang Zhaochong, Hou Tong, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the tuffs on the uppermost of the Emeishan basalt succession in Panxian county, Guizhou province: Constraints on genetic link between Emeishan large igneous province and the mass extinction [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(9): 2743-2751.]
- [44] Wilson M E J, Lokier S W. Siliciclastic and volcanoclastic influences on equatorial carbonates: insights from the Neogene of Indonesia[J]. *Sedimentology*, 2002, 49(3): 583-601.
- [45] Myers E H. Life activities of foraminifera in relation to marine ecology[J]. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 1943, 86(3): 439-458.
- [46] Endo R. Stratigraphical and paleontological studies of the Later Paleozoic calcareous algae in Japan, VI[J]. *Science Reports of the Saitama University (Series B)*, 1953, 1(2): 97-104.
- [47] Dunham R J. Capitan Reef, New Mexico and Texas: Facts and Questions to Aid Interpretation and Group Discussion [M]. Midland, TX: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1972: 297.
- [48] Song Haijun, Wignall P B, Chen Zhongqiang, et al. Recovery tempo and pattern of marine ecosystems after the end-Permian mass extinction[J]. *Geology*, 2011, 39(8): 739-742.
- [49] Algeo T J, Twitchett R J. Anomalous Early Triassic sediment fluxes due to elevated weathering rates and their biological consequences [J]. *Geology*, 2010, 38(11): 1023-1026.
- [50] 何锦文,芮琳,柴之芳,等. 浙江长兴煤山地区晚二叠世末、早三叠世初的火山活动[J]. *地层学杂志*, 1987, 11(3): 194-199, 245. [He Jinwen, Rui Lin, Chai Zhifang, et al. The Latest Permian and Earliest Triassic volcanic activities in the Meishan area of Changxing, Zhejiang[J]. *Journal of Stratigraphy*, 1987, 11(3): 194-199, 245.]
- [51] 余聪,姚华舟,赵小明,等. 鄂西利川地区二叠—三叠系界线附近地层的碳酸盐微相类型和早三叠世火山活动的证据[J]. *华南地质与矿产*, 2015, 31(2): 115-124. [Yu Cong, Yao Huazhou, Zhao Xiaoming, et al. Carbonate microfacies in strata near the Permian-Triassic boundary and the volcanic activity evidence in the Early Triassic in Lichuan area, western Hubei province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2015, 31(2): 115-124.]

The Relationship between Volcanism and Reef Sedimentary Evolution from Late Permian to the Beginning of Early Triassic in Ziyun Area, Guizhou Province

FAN GuangHui¹, WANG YongBiao², MENG Zheng³, LI GuoShan²

1. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Hubei Institute of Geological Survey, Wuhan 430034, China

Abstract: Late Permian Changhsingian is an important period of reef buildup as well as a period of frequent volcanic activities in South China. Because reefs are peculiar ecosystems extremely sensitive to environment change, late Permian volcanism would surely have affected the reef growth and evolution of facies. However, most of the researches concerning the late Permian volcanism are concentrated near the Permo-Triassic boundary. Studies appear to be relatively lack on the relations between the evolution of reefs and volcanism throughout the whole late Permian Changhsingian. This paper documented the relationship between late Permian volcanism and the marginal platform reef evolution in Ziyun area of Guizhou province based on the analysis of magnetic susceptibility. The magnetic susceptibility data reflect two pulses of high magnetic susceptibility values respectively in the early Changhsingian and late Changhsingian, indicating two periods of intense volcanic activities. During both periods, reef-building organisms were clearly stressed and reef-building process was interrupted. The magnetic susceptibility values in the middle Changhsingian are generally lower, indicating weak volcanism activities that favored the rapid growth of reef-building organisms. However, the magnetic susceptibility values from the bioclastic limestone interbedded in reef limestone do not increase significantly, implying that turbulent water conditions prevented tiny volcano ash rich in ferromagnetic minerals from depositing in shallow reef environment although periodic volcanic eruption may have resulted in temporary breakdown of reef growth. This study shows that several beds of volcanic clay interbedded in the early Triassic mudstone possess abnormally high magnetic susceptibility values compared with the mudstone itself, indicating that much greater contributions of volcanic ash to the magnetic susceptibility values than the terrigenous material.

Key words: Changhsingian; reef; magnetic susceptibility; sedimentary evolution; volcanism