

文章编号: 1000-0550(2012)05-0817-08

贵州安顺新民二叠系—三叠系界线剖面磁化率变化 及古气候环境意义^①

徐国真 冯凡斌 雷勇 沈俊 冯庆来

(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)

摘要 贵州安顺新民二叠系—三叠系界线剖面磁化率测试结果表明,该剖面二叠系磁化率整体偏低(平均 $6.4 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$),界线之上磁化率快速增加并相对稳定在 $1.3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ 附近,与华南其他二叠系—三叠系剖面磁化率变化趋势相同;与陆源孢粉丰度、 TiO_2 曲线的同步变化趋势表明,新民剖面磁化率主要来自陆源物质。结合磁化率、地球化学指标的变化特征,将源区 P—T 之交古气候划分为 3 个阶段:阶段 I (1-2 层中部) 为化学风化作用较强的温暖潮湿的气候条件;阶段 II (2 层上部-P—T 界线) 整体处于较强化学风化作用条件下温热潮湿的气候环境,变化较为频繁,表现为温润/湿热交替;阶段 III (P—T 界线之上) 物理风化加强,化学风化明显减弱,经短暂“过渡段”,气候总体转变为干热的条件。

关键词 磁化率 地球化学 孢粉 古气候 二叠纪—三叠纪之交 华南

第一作者简介 徐国真 女 1990 年出生 硕士 地层学和古气候学 E-mail: xuguozen1990@163.com

通讯作者 冯庆来 E-mail: qinglaifeng@cug.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

海相地层磁化率可以反映源区风化作用的强度。一般磁化率越高,反映风化作用越强、陆源磁性矿物的输入量越大,反之亦然,而风化作用的强弱直接与气候变化有关。大量研究表明,结合沉积学研究,海相沉积物磁化率变化可用于反映物源区的气候变化,其结果与许多其他气候代用指标,如氧同位素、孢粉和地球化学元素比值等,得出的结果相一致^[1-7]。

二叠纪—三叠纪之交是地质历史上的重大转折期,这一时期不仅爆发了显生宙以来规模最大的生物灭绝事件^[8],还伴随着许多其他重大的地质事件,古气候变化正是其中之一。探究该时期气候演变不仅为探究当时生物灭绝原因提供一些线索,同时也有助于认识当今气候现状以及预测未来气候变化,因此一直以来是地质学界关注的热点。贵州新民二叠系—三叠系界线剖面是华南碳酸盐台地边缘相的海相地层,其沉积序列完整且后期成岩作用较弱,是研究二叠纪—三叠纪之交古气候特征和演化的良好对象。本文旨在尝试通过该剖面磁化率变化的研究,并结合陆源孢粉丰度和地球化学指标来探讨剖面磁化率的

物质来源并对源区 P—T 之交古气候环境的演变进行初步探究。

1 区域地质背景及地层

东吴运动之后,华南板块上二叠统岩相强烈分异,东西两缘为陆相沉积区,紧邻古陆地区为滨海碎屑岩相,中部为浅海碳酸盐岩相和深水硅质泥岩相。新民二叠系—三叠系界线剖面位于贵州省安顺市北约 20 km 的轿子山附近,为台地内部断陷盆地背景的较深水硅—泥质沉积地层(图 1)。该剖面位于新开的采石场内,由上二叠统大隆组和下三叠统罗楼组组成,地层连续,P—T 界线出露完整,岩石新鲜,生物化石丰富,保存较好,已经建立可与国际层型剖面对比的牙形石化石带。

该剖面总厚度为 13 m,可划分为 9 层。其中,第 1 层到第 5 层为上二叠统长兴阶大隆组(P_3d),地层以黑色和灰黑色硅质泥岩、钙质泥岩、含泥硅质岩为主;第 6 层到第 9 层为下三叠统罗楼组(T_1l),地层主要是灰绿色、黄绿色泥岩,与下伏的大隆组整合接触(图 2)。

新民剖面牙形石自下而上为: *Clarkina zhangii*

^① 国家自然科学基金项目(批准号:40839903 A0921062 A0972002)和国家理科基地资金共同资助。
收稿日期:2011-08-23;收修稿日期:2012-01-12

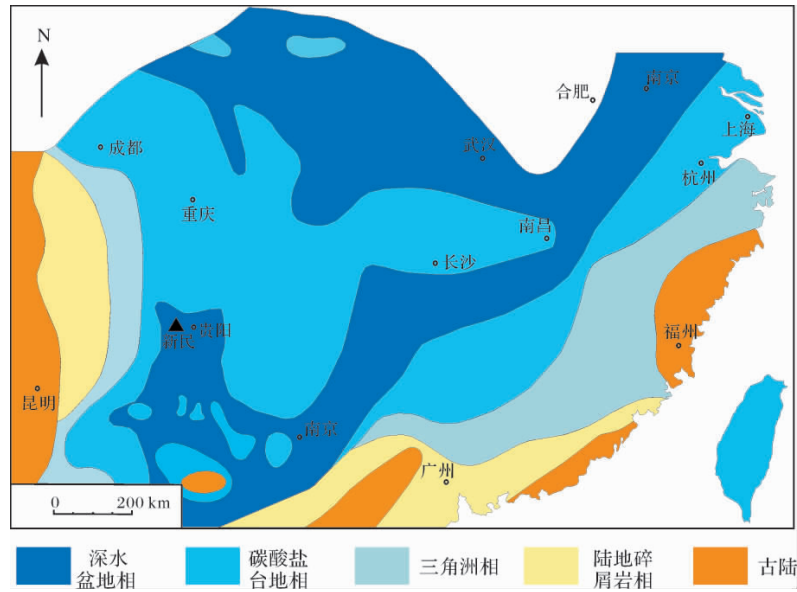


图1 中国华南长兴期岩相古地理图(据文献[9]修改,▲为新民剖面地理位置)

Fig.1 Changhsingian lithofacies-paleogeography in South China(revised after reference 9 ,▲ represents the location of Xinmin section)

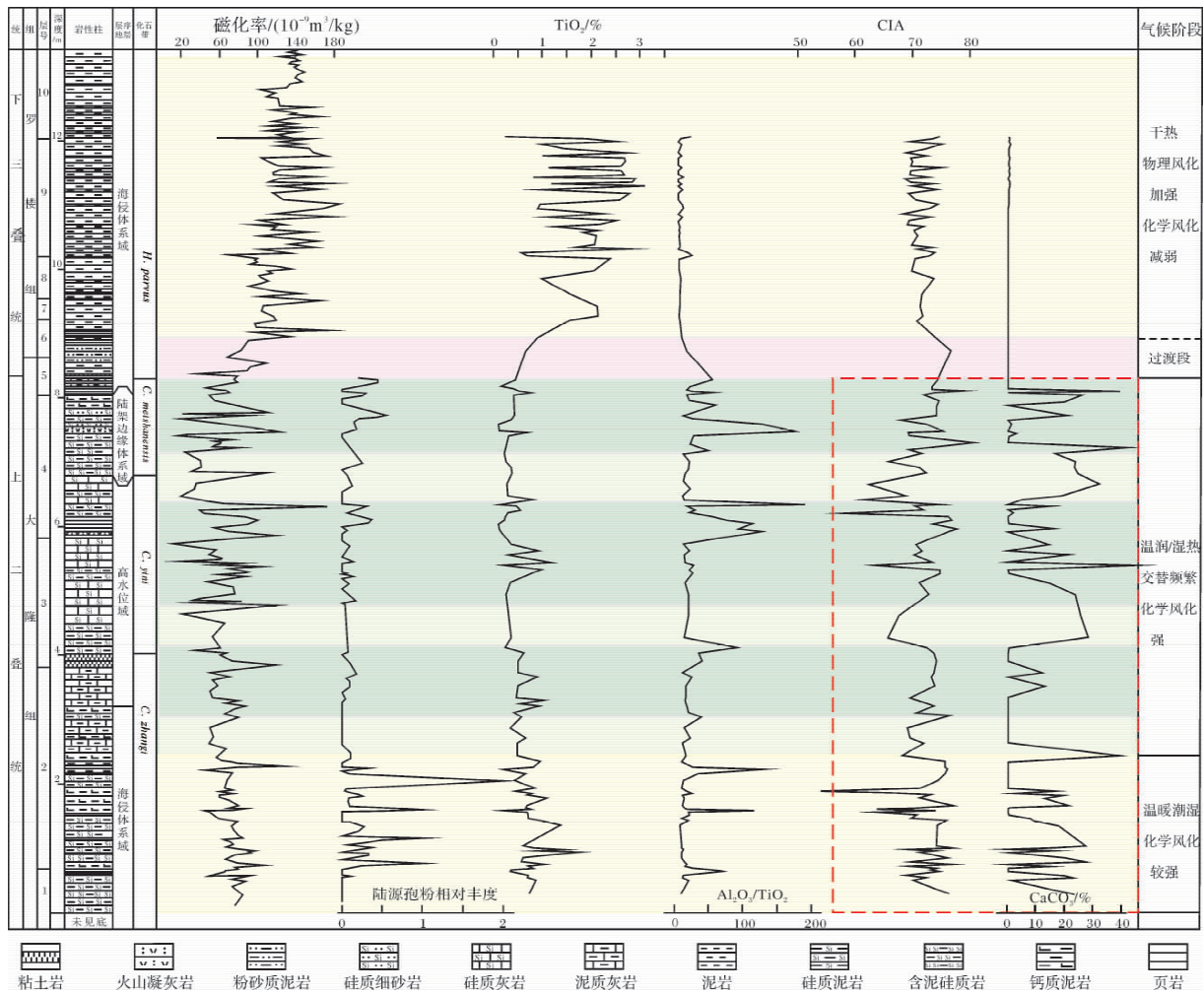


图2 新民剖面气候综合柱状图

Fig.2 Multi-climatic column of Xinmin section

带、*Clarkina yini* 带、*Clarkina meishanensis* 带和 *Hindeodus parvus* 带。*Clarkina meishanensis* 带见于 5~3 层的下部, *Hindeodus parvus* 带见于 5~3 层的上部。因此, 我们把二叠纪—三叠纪的界线定在 5~3 层内部(图 2)。

该剖面层序地层特征清晰, 第 1 层到第 2 层中部主要为黑色泥岩、硅质泥岩夹少量薄层页岩, 属海进体系域。第 2 层中部至第 4 层下部, 主要由泥灰岩和硅质灰岩组成, 代表高水位域沉积。第 4 层上部, 主要由黑色泥灰岩、粉砂岩和泥岩组成, 代表陆架边缘体系域沉积。第 5 层至第 10 层, 主要由泥岩和粉砂质泥岩组成, 代表海侵体系域沉积。

由于罗楼组上部遭受风化作用明显, 本文仅对大隆组上部泥质岩(约 5.7 m)进行了研究。

2 测试方法

对上述 14 m 地层采集磁化率样品 267 块(采样间距约 5 cm), 地球化学分析样品 136 块(主要控制岩性变化), 孢粉分析样品 142 块。

本文采用质量磁化率, 单位为 m^3/kg , 因其相对传统的体积磁化率, 样品处理简单, 同时精度又较体积磁化率高, 故越来越受学者们的青睐^[10]。测试在中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院岩石磁学实验室用捷克产 KLY-3 卡帕桥磁学测试仪完成, 其精度为 10^{-6} SI。样品处理步骤为: 取新鲜样品碎成小块状装入小塑料盒中, 每个样品按不同的方向测试 3 次, 换算成质量磁化率(样品质量已用分析天平精确测得), 最后取其平均值即为分析数据。

全岩主量元素氧化物分析测试由中国地质大学(武汉)生物地质和环境地质国家重点实验室完成, 测试前, 对样品进行了清洗、粉碎并用碳化钨振动钵研磨至 200 目。分析仪器为日本理学 3080 E1 型波长色散 X 射线荧光光谱仪, 主要元素的分析精度优于 6%。化学风化指数(CIA)计算公式为 $\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}^* + \text{K}_2\text{O}) \times 100$, 式中主成分均以摩尔分数表示, CaO^* 指硅酸盐中的 CaO, 即全岩 CaO 扣除化学沉积(新民剖面主要为碳酸钙和磷酸钙)中 CaO 的摩尔分数。本文 CaO^* 校正公式为 $\text{CaO}^* = \text{CaO} - 10/3 \times \text{P}_2\text{O}_5 - \text{CaCO}_3$, 式中主成分以摩尔分数表示^[10]。 CaCO_3 含量计算公式 $\text{CaCO}_3(\text{wt}\%) = \text{TIC} \times 100/12.0$, 即 $(\text{TC} - \text{TOC}) \times 100/12.0$, 其中 TC 为样品总碳, TOC 为总有机碳, 二者之差即为总无机碳(TIC)。TC 和 TOC 的测试在辛辛那提大学完

成, 仪器为 C-S2000 分析仪, 测试步骤如下: 称取部分样品测试样品全碳, 然后将 100 mg 样品用 7% 的 HCl 在 40℃ 下处理 24 小时, 去除无机碳(TIC), 最后测试有机碳(TOC)。结果用标样 DBS-1 和 Sold 校正, 误差小于 5%。

微古植物室内分析处理在中国地质大学(武汉)湖北省表层系统开放实验室微体古生物分室进行, 采用常规酸处理及重液浮选法富集。选择新鲜样品, 粉碎至 100~150 目粉末, 然后称取 50 g 粉末进行常规酸处理, 并加入一片石松孢子片(内含石松孢子 27 637 粒)。统计时, 将孢粉、菌孢、疑源类和藻类、石松孢子分别计数。微古植物丰度用各类微古植物化石数量与石松孢子数量的比值来表示。

3 实验结果

3.1 磁化率特征

同华南其他二叠系—三叠系界线剖面磁化率变化总体趋势相似, 新民剖面二叠系大隆组上部磁化率相对较低(平均 $\sim 6.4 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$), 三叠系罗楼组下部磁化率较高(平均 $\sim 1.2 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$), 界线层位于磁化率显著增加的转折处^[12]。以下分阶段对该剖面磁化率变化进行描述(图 2)。

阶段 I (1-2 层中部): 该段岩性主要为黑色泥岩、硅质泥岩夹少量薄层页岩, 含少量火山凝灰岩层。磁化率相对较高($6.5 \times 10^{-8} \sim 8.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$), 呈现一定的旋回性, 且从下而上逐渐减小, 层序地层学研究表明该段为缓慢的海侵过程, 磁化率这种减小趋势与前人研究海侵过程磁化率向上减小的变化规律一致^[13]。

阶段 II (2 层上部 P—T 界线): 该段主要岩性为硅质灰岩、泥灰岩夹薄层硅质、钙质泥岩和少量火山凝灰岩, 富含生物碎屑, 向上泥岩成分加大, 逐渐过渡为以硅质泥岩、钙质泥岩为主, 夹少量火山凝灰岩、泥灰岩的沉积。磁化率总体比上一阶段低, 根据其剧烈快速波动变化可划分出 3 个小旋回(图 2, 浅灰段磁化率低, 暗灰段磁化率高, 一灰一暗为一个旋回): 第 1 旋回磁化率从上一阶段降低, 经短暂低值段($4.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)快速小幅回升并持续至 3 层底部(平均 $7.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$); 第 2 旋回低值段平均 $5.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 高值段平均 $7.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 自 3 层中部持续到 4 层底部页岩之上; 第 3 旋回低值段始于高水位域顶部, 平均值 $3.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 高值段自低水位域下部始至 P—T 界线, 该段磁化率处于逐渐上升的状

态,平均 $6.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。总之,阶段2磁化率波动剧烈,单层磁化率变化亦十分显著,但整体磁化率不高。

阶段Ⅲ(P—T界线之上):岩性主要为薄层泥岩夹页岩及少量火山黏土岩。该段对应另一个海侵体系,但磁化率却快速显著增加,至9层达最高,平均 $1.35 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,随后保持小幅稳定波动。该段磁化率亦显示明显的旋回性,与肉眼观察到的岩性旋回可对比。

以上结果表明,新民剖面磁化率阶段性变化显著,且在不同阶段受各种因素的影响强度也有所不同:阶段Ⅰ在整体相对较高的水平下,磁化率在海侵体系中遵循向上逐渐减小的规律,说明该阶段海水进退对磁化率的影响较为明显;阶段Ⅱ磁化率与CaO呈明显的此消彼长关系,表明碳酸盐的稀释作用显著;阶段Ⅲ磁化率快速增加,则可能与二叠纪末生物大灭绝之后,陆地植被遭到破坏、风化作用加剧等背景有关^[14,15]。因此,新民剖面磁化率的影响因素较多,尽管如此仍能提取可信的古气候变化信息,讨论见后。

3.2 地球化学数据变化特征

图2给出了 TiO_2 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、CIA与CaO的变化曲线(10层以上无数据),结果显示 TiO_2 含量较少,质量分数仅0~3.5%,但与磁化率具有很好的同步变化趋势,因而可作与磁化率相同的阶段划分。阶段Ⅰ, TiO_2 较高,平均0.9%;阶段Ⅱ TiO_2 整体值不高(平均0.5%),但波动较大,亦可划分3个旋回,与磁化率变化相应;阶段Ⅲ, TiO_2 迅速增加至第9层并最终稳定在1%~3%之间,平均1.9%。

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 也可划分出与磁化率相同的阶段性,但变化特征不同,最显著区别在于阶段Ⅰ和阶段Ⅱ的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 明显比阶段Ⅲ高。阶段Ⅰ, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 主要分布在10~30之间,平均~25;阶段Ⅱ为 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 在剖面中的最高值段,主要介于20~60之间,平均39,整体较阶段Ⅰ升高,且自下向上有逐渐增加的趋势。需要说明的是4层底和中上部黏土岩和凝灰岩及其附近出现几个高值(>100),可能与火山活动有关,不代表正常沉积,但剔除后不改变整体变化趋势。根据 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 变化特征,本段亦可划分与磁化率、 TiO_2 一致的3个旋回;阶段Ⅲ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 快速下降并维持在10左右直至9层顶。

研究表明碳酸盐成分较高时,CIA计算不准确,其结果往往比真实值偏低^[16,17]。图2显示新民剖面

二叠系部分 CaCO_3 含量较高,一半以上的样品质量分数大于10%,有的高达50%,换算成CaO并与全岩CaO对比,发现二叠系CaO几乎全部赋存于碳酸盐中,来自硅酸盐的含量极少,因此对CIA校正计算影响较大,同时二叠系CIA(红色虚线方框内)随 CaCO_3 含量变化波动较大,且呈明显此消彼长关系,也证实了高碳酸盐含量对CIA影响较大;三叠系部分 CaCO_3 含量几乎为0,说明CaO主要来自硅酸盐(磷酸钙含量极少),CIA校正计算较准确,因此笔者认为该剖面三叠系部分CIA计算可信程度更高。由图2可以看出,进入三叠系后,CIA明显减小并稳定于68~75之间,与同阶段 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 变化特征相似。

3.3 孢粉含量变化

孢粉是陆地植物的一部分,海相地层中的孢粉丰度常用来反映陆源物质的输入量,可辅助探讨源区风化强度。新民剖面没有分离出三叠纪孢粉,图2仅给出了二叠系部分孢粉相对丰度变化曲线,总体上与磁化率表现出同步变化趋势,可依磁化率划分阶段描述。

阶段Ⅰ:该阶段孢粉丰度为剖面二叠系部分最高值段,平均约0.25,具有明显的旋回性特征。

阶段Ⅱ:该阶段孢粉丰度明显比阶段Ⅰ低,多数层位为0,大致也可划分3个与磁化率对应的旋回(浅灰段为低值,暗灰段为高值):第1旋回低值段仅底部一个样品含有孢粉,高值段上部出现孢粉,但丰度仍较低,平均不足0.1;第2旋回低值段孢粉丰度接近0,高值阶段比第1旋回稍高,平均0.1,该旋回顶部(第4层底部页岩)孢粉相对丰度达0.3以上;第3旋回低值段仅顶部样品中含有孢粉,丰度为0.13,高值段孢粉丰度0.17,为3个旋回中最高值,可见在阶段Ⅱ,陆源孢粉数量也是逐渐增加的,表明陆源物质输入有所增加。

4 讨论

4.1 磁化率作为古气候指标在新民剖面应用的可行性

陆源碎屑物质是海洋沉积物磁化率的主要贡献者,研究表明,即使在有成岩作用的影响下,大多数海洋沉积物磁化率变化仍可作为识别引起陆源物质流入海洋的物理过程的代用指标,这些物理过程包括物源的稳定性、构造运动、火山活动、海平面变化和气候条件等等,在缺乏构造作用影响的前提下,海平面变化和气候因素是最主要的控制因素^[18],近年来磁化

率被广泛用于海相地层对比和高分辨率旋回地层学的研究就是基于海平面升降或气候变化可引起磁化率的相应变化而兴起的^[19~21]。

尽管影响磁化率变化的因素很多,许多学者认为在其他影响因素不大的情况下,磁化率仍以用来进行气候变化的估测,尤其在各种稳定海相沉积中常为研究气候旋回的代用指标,这是因为气候变化(尤其是温湿、干冷变化)引起源区旋回性风化剥蚀,它们的产物随之流入沉积盆地并以陆源碎屑组分的形式保存下来,并最终成为影响地层磁化率高低变化的主要贡献者^[7 22 23]。Ellwood等^[24]认为即使在沉积环境变化显著的海相地层中,磁化率也可以作为很好的气候变化指标,但前提是研究剖面构造简单,物源稳定,后期成岩作用影响小,地层表现出明显的旋回性或韵律性变化。

P—T之交黔桂地区构造活动简单,物源稳定,沉积连续,但火山活动较为发育,尤其是晚二叠世长长期,研究剖面发育十几层稳定连续的薄层火山凝灰岩和黏土岩层,磁化率测试表明同东攀剖面一样,这些火山层磁化率值不高,与正常沉积磁化率值相差不大,不影响整体磁化率的变化趋势^[25]。同时新民剖面磁化率与岩性明显的对应关系,即泥岩、页岩磁化率值高,而灰岩、泥灰岩磁化率偏低,也显示出高频率气候旋回信息,因此笔者认为通过磁化率变化特征并结合其他气候指标重建源区P—T之交古气候环境的演变是可行的。

4.2 地球化学指标的古气候环境意义

海相地层中主量元素可用来探讨源区化学风化程度,因为 TiO_2 、 Al_2O_3 等组分主要来自陆源,而海相沉积物(地层)中陆源物质来自陆地风化产物,所以源区化学风化作用的强弱会保存在沉积记录中,因而以上化学因子含量及其比值有助于研究源区的化学风化强度,进而进行古气候变化的探讨。前已述及,作为一种化学行为保守元素,Ti被认为是海洋沉积物中陆源物质的最佳指示因子,其与其他元素的比值可以作为元素在化学风化中行为的示踪因子。在化学风化过程中,Al对淋滤有抵制作用,进而在侵蚀产物中富集,因此在来自较强化学风化源区的海洋沉积物中有较高的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值。陆地上的化学风化强弱很大程度上受控于湿度和温度,湿热的气候可以增强化学风化,化学风化的加强可以导致风化产物中Al含量增加,因此 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 的高值可体现较强的化学风化以及更为湿热的气候,低值体现弱的化学风

化和相对干冷的气候环境。研究表明用元素比值作古气候环境变化的指示因子,相对于直接用元素含量变化作指示因子来说,克服了其他元素稀释造成的影响,具有更高的准确性^[26 27]。

然而不同剖面 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值不同,有时甚至相差几个数量级,因此 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 只能定性分析剖面纵向化学风化程度的变化趋势而不能定量,因此笔者引入CIA(化学风化指数)(计算公式见前文),该指数起初是定量反映源区化学风化程度的化学指标^[28],随后被大量用于定量反映古气候环境变化,且其时代应用范围也不断扩展,Goldberg & Humayun^[17]和Sheldon^[29]分别将其应用中晚二叠世和P—T之交地层中,认为CIA可以较好的反映当时古化学风化程度。研究表明,CIA介于50~65之间反映寒冷干燥气候条件下的低等化学风化程度;65~85之间代表温暖湿润条件下的中等化学风化程度;85~100之间反映炎热潮湿的热带亚热带强烈化学风化程度^[30 31]。如前所述,因应用限制,本文仅对三叠系CIA进行描述讨论。

4.3 新民剖面源区P—T之交古气候环境演变

根据前文划分阶段对源区P—T之交古气候演变进行探讨。

阶段I:磁化率、陆源孢粉丰度和 TiO_2 均处于剖面较高值域,陆源物质输入丰富, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值也在整个剖面处于较高水平,代表了化学风化较强,温暖潮湿的气候条件。该阶段对应牙形石*Clarkina zhangi*带下部及其之下,为长长期早期。

阶段II:磁化率、陆源孢粉丰度、 TiO_2 以及 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 均处于快速剧烈波动期。前三者整体上比阶段I有所下降,表明陆源输入相对减少,可能主要与海平面升高、与陆地距离较远有关。高碳酸盐沉积对陆源物质有稀释作用^[31],本阶段碳酸盐含量为剖面最高,且其高值域恰都对应磁化率、陆源孢粉丰度和 TiO_2 的低谷(图2),说明该阶段碳酸盐对陆源物质的稀释作用较为明显,因此磁化率相对阶段I降低不一定代表气候转向干冷,地球化学指标可能更能反映当时的气候变化。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 整体较阶段I有所上升,说明化学风化程度稍有增强,气候相对温热潮湿。根据各指标波动特征,气候环境也进一步划分为3个旋回亚阶段,表现为温润/湿热频繁交替,且有向上逐渐湿热的变化趋势(陆源孢粉丰度、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 总体向上增加)。该阶段对应包括*Clarkina zhangi*带上部、*Clarkina yini*带和*Clarkina meishanensis*带在内的长兴

期大部。

阶段Ⅲ:磁化率、 TiO_2 快速大幅增加,说明短期内大量陆源物质注入沉积盆地,前人研究表明这是一个全球范围内P—T界线剖面所共有的现象,即P—T之交沉积盆地的陆源物质供给显著增加^[11,14]。其中土壤有机物、碳屑和以陆源黏土为主的磁化率的增加使越来越多的学者确信二叠纪末生物大灭绝的同时,全球气候快速变暖并干旱化,造成大规模森林野火频发,使得森林快速消亡,继而地表物理风化加剧,陆地生态系统崩溃,大量陆源物质注入沉积盆地并进一步威胁海洋生态系统^[14,15,33,34]。因此,新民剖面P—T之交磁化率的快速增加很可能就是陆地地表物理风化的结果。另一方面,与磁化率和 TiO_2 相反, Al_2O_3/TiO_2 快速下降,甚至低于阶段I,随后保持低值稳定,表示化学风化程度较界线之下明显减弱。CIA则在经历小幅下降后,稳定波动于68~75之间,代表了中—低等化学风化程度的较为干旱的气候条件,这不仅验证了早三叠世化学风化作用的减弱,也从另一方面说明晚二叠世应为更湿热的气候环境。同时,我们还注意到在阶段Ⅲ底部,磁化率、 TiO_2 、 Al_2O_3/TiO_2 和CIA似乎并不是十分急剧转变的,而是有一个“过渡段”(图2)。Yu^[35]对黔西滇东地区陆相和海陆交互剖面进行的古植物研究表明,二叠纪末研究区植物群以代表湿热气候的大羽羊齿植物群为特征,三叠纪最初期则为*Annalepis*(脊囊属)–*gigantopterids* Permian relicts(大羽羊齿类残余分子),表明该地区陆地植物的灭绝是一个稍显滞后的灭绝过程,使三叠纪最初期仍然为较为温和湿润的气候条件;其后很快转为红层沉积并缺乏植物化石,表明古气候迅速转为干热环境。植物群演变与笔者结论相一致,新民剖面的“过渡段”很可能是黔西滇东地区受海洋潮湿气候影响的结果,说明新民地区三叠纪最初期的气候具有温热湿润向干热过渡的性质,但该过渡期较为短暂。总之,综合物理风化和化学风化两方面的证据,认为新民剖面第Ⅲ阶段气候总体转变为相对干热的条件,该阶段为三叠系底部,对应*Hindeodus parvus*带及其之上地层。

5 结论

对新民二叠系—三叠系界线剖面进行了磁化率测试并将其与陆源孢粉、地球化学指标进行综合分析,得出以下结论:

(1) 二叠系磁化率整体偏低(平均 6.4×10^{-8}

m^3/kg),三叠系磁化率快速增加并稳定在 $1.3 \times 10^{-7} m^3/kg$ 左右,与华南其他二叠系—三叠系剖面磁化率变化趋势一致。

(2) 磁化率、陆源孢粉丰度和 TiO_2 表现出很好的同步变化趋势,表明陆源物质是新民剖面磁化率的主要贡献者。

(3) 根据磁化率、地球化学指标的变化特征将源区P—T之交气候划分为3个阶段:阶段I(1—2层中部)为化学风化作用较强的温暖潮湿的气候条件;阶段II(2层上部—P—T界线)整体处于较强化学风化条件下温热潮湿的气候环境,且温润/湿热交替频繁;阶段III(P—T界线之上)物理风化加强,化学风化作用明显减弱,经过短暂的温湿向干热转变的“过渡段”,气候总体转为干旱炎热。

致谢 李永涛副教授提供磁化率测试方面的帮助;本课题组夏文臣教授和张宁教授提供牙形石生物地层资料和层序地层划分资料,胡庆、向宇和陈桂凡在研究过程中提供帮助;审稿专家和编辑对本文提出宝贵修改意见,在此一并致谢。

参考文献(References)

- 1 Kent D V. Apparent correlation of paleomagnetic intensity and climatic records in deep-sea sediments[J]. *Nature*, 1982, 299: 538-539
- 2 Arai K, Sakai H, Konishi K. High-resolution rock-magnetic variability in shallow marine sediment: a sensitive paleoclimatic metronome[J]. *Sedimentary Geology*, 1997, 110: 7-23
- 3 Lean C M B, McCave I N. Glacial to interglacial mineral magnetic and palaeoceanographic changes at Catham Rise, SW Pacific Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 163: 247-260
- 4 杨小强,李华梅,周永章. 南海南部NS93-5孔沉积物磁化率特征及其对全球气候变化的记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(1): 31-36 [Yang Xiaoqiang, Li Huamei, Zhou Yongzhang. Magnetic susceptibility oscillation and unstable climate events of core NS93-5 from South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(1): 31-36]
- 5 Wu Huaichun, Zhang Shihong, Jiang Ganqing, et al. Magnetic susceptibility variations of the Ediacaran cap carbonates in the Yangtze platform and their implications for paleoclimate [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2005, 23(3): 291-298
- 6 舒强,卫艳,李吉均,等. 苏北盆地兴化1#钻孔沉积物磁化率特征及其古气候环境意义[J]. *地质科技情报*, 2005, 24(4): 31-36 [Shu Qiang, Wei Yan, Li Jijun, et al. Characteristics and paleoclimatic and paleoenvironmental implication of sedimentary susceptibility of Xinghua Well 1 in North Jiangsu basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2005, 24(4): 31-36]
- 7 张振,宋春晖,张平,等. 青藏高原昆仑山垭口盆地晚上新世以来沉积物磁化率与气候变化[J]. *资源调查与环境*, 2007, 28(3):

- 205-212 [Zhang Zhen, Song Chunhui, Zhang Ping, *et al.* Magnetic susceptibility of lacustrine sediments and climatic change in Kunlun Mountains pass basin since the late Pliocene [J]. *Resources Survey & Environment*, 2007, 28(3): 205-212]
- 8 杨遵仪, 殷鸿福, 吴顺宝, 等. 华南二叠系—三叠系界线地层及动物群 [M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1-420 [Yang Zunyi, Yin Hongfu, Wu Shunbao, *et al.* Permian-Triassic Boundary Stratigraphy and Faunas of South China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 1-420]
- 9 冯增昭, 金振奎, 杨玉卿, 等. 滇黔桂地区二叠纪岩相古地理 [M]. 地质出版社, 1994: 1-146 [Feng Zengzhao, Jin Zhenkui, Yang Yuqing, *et al.* Lithofacies Paleogeography of Permian of Yunnan-Guizhou-Guanxi Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 1-146]
- 10 Ellwood B B, Hrouda F, Wagner J J. Symposia on magnetic fabrics; introductory comments [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1988, 51: 249-252
- 11 彭元桥, 董金南, Hansen H J, 等. 华南二叠—三叠系界线处的磁化率特征及其对比意义 [J]. *华南地质与矿产*, 2000, 2: 22-28 [Peng Yuanqiao, Tong Jinnan, Hansen H J, *et al.* Susceptibility and its significance across the Permian-Triassic boundary in South China [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2000, 2: 22-28]
- 12 Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance [J]. *Geology*, 1995, 23(10): 921-924
- 13 Ellwood B B, Brett C E, MacDonald W D. Magnetostratigraphy susceptibility of the Upper Ordovician Kope Formation, northern Kentucky [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 243: 42-54
- 14 Algeo T J, Ellwood B B, Thi Kim Thoa Nguyen, *et al.* The Permian-Triassic boundary at Nhi Tao, Vietnam: Evidence for recurrent influx of sulfidic water masses to a shallow-marine carbonate platform [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 252: 304-327
- 15 Shen Shuzhong, Crowley J L, Wang Yue, *et al.* Calibrating the End-Permian Mass Extinction [J]. *Scienceexpress*, 2011: 1-13
- 16 McLennan S M. Weathering and global denudation [J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303
- 17 Goldberg K, Humayun M. The applicability of the chemical index of alteration as a paleoclimatic indicator: An example from the Permian of the Paran Basin, Brazil [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 293: 175-183
- 18 Ellwood B B, Crick R E, Hassani A E, *et al.* Magnetosusceptibility event and cyclostratigraphy method applied to marine rocks: Detrital input versus carbonate productivity [J]. *Geology*, 2000, 28(12): 1135-1138
- 19 Mead G A, Tauxe L, Labrecque J L. Oligocene paleoceanography of the South Atlantic: Paleoclimatic implications of sediment accumulation rates and magnetic susceptibility measurements [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1986, 1: 273-284
- 20 张世红, 王训练, 朱鸿. 碳酸盐岩磁化率与相对海平面变化的关系——黔南泥盆—石炭系例析 [J]. *中国科学: D 辑*, 1999, 29: 558-566 [Zhang Shihong, Wang Xunlian, Zhu Hong. The relations between relative sea-level change and magnetic susceptibility in carbonate: An example from Devonian-Carboniferous System in south Guizhou province [J]. *Science in China: Series D*, 1999, 29: 558-566]
- 21 Crick R E, Ellwood B B, Feist R, *et al.* Magnetostratigraphy susceptibility of the Frasnian/Famennian boundary [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 181: 67-90
- 22 宋华颖, 伊海生, 马雪, 等. 柴达木盆地西部典型剖面磁化率特征及其意义 [J]. *勘探地球物理进展*, 2009, 32(4): 275-279 [Song Huaying, Yin Haisheng, Ma Xue, *et al.* Characteristics of magnetic susceptibility on typical sections and its significance in western Qaidam Basin [J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2009, 32(4): 275-279]
- 23 戴霜, 黄永波, 赵杰, 等. 六盘山群沉积物磁化率记录的早白垩世气候变化 [J]. *地学前缘*, 2010, 17(3): 242-249 [Dai shuang, Huang Yongbo, Zhao Jie, *et al.* The climate change during 128.11 ~ 119.05 Ma recorded by the susceptibility of the sediments of Liupanshan Group [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(3): 242-249]
- 24 Ellwood B B, Tomkin J H, Febo L A, *et al.* Time series analysis of magnetic susceptibility variations in deep marine sedimentary rocks: A test using the upper Danian-Lower Selandian proposed GSSP, Spain [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 261: 270-279
- 25 陈建业, 冯庆来, 陈晶, 等. 广西东攀二叠系—三叠系界线剖面基于岩石磁参数的米兰科维奇旋回特征和地层对比 [J]. *地层学杂志*, 2007, 31(4): 309-315 [Chen Jianye, Feng Qinglai, Chen Jing, *et al.* Cyclostratigraphy and stratigraphic correlation based on rock-magnetic parameters on the Permian-Triassic boundary in the Dongpan section in Guangxi [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2007, 31(4): 309-315]
- 26 乔培军. 南海西南晚更新世以来沉积地球化学特征及其古环境意义 [D]. 上海: 同济大学海洋与地球科学学院, 2005 [Qiao Peijun. Sedimentary Geochemical Characteristics of the Sediments since Pleistocene in Southwest South China Sea and Their Paleoenvironmental Implications [D]. Shanghai: School of Ocean and Earth Sciences, Tongji University, 2005]
- 27 王成, 龚庆杰, 李刚, 等. 从南海沉积物中的主量元素比值变化看沉积物源区化学侵蚀变化 [J]. *海洋地质动态*, 2007, 23(1): 1-5 [Wang Cheng, Gong Qingjie, Li Gang, *et al.* Chemical weathering change indicated by major elements ratios of the sediments in South China Sea [J]. *Marine Geology Letters*, 2007, 23(1): 1-5]
- 28 Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299: 715-717
- 29 Sheldon N D. Abrupt chemical weathering increase across the P-T boundary [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 231: 315-321

- 30 Nesbitt H W , Young G M. Formation and diagenesis of weathering profiles [J]. *The Journal of Geology* , 1989 , 97(2) : 129-147
- 31 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 化学蚀变指数(CIA) 及其在新元古代碎屑岩中的应用 [J]. *地学前缘* , 2003 , 10(4) : 539-543 [Feng Lianjun , Chu Xuelei , Zhang Qirui , *et al.* CIA(Chemical Index of Alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks [J]. *Earth Science Frontiers* , 2003 , 10(4) : 539-543]
- 32 Silva A C D , Potma K , Weissenberger J A W , *et al.* Magnetic susceptibility evolution and sedimentary environments on carbonate platform sediments and atolls , comparison of the Frasnian from Belgium and Alberta , Canada [J]. *Sedimentary Geology* , 2009 , 214: 3-18
- 33 Sephton M A , Looy C , Brinkhuis H , *et al.* Catastrophic soil erosion during the end-Permian biotic crisis [J]. *Geology* , 2005 , 33: 941-944
- 34 Xie Shucheng , Pancost R D , Huang Junhua , *et al.* Changes in the global carbon cycle occurred as two episodes during the Permian-Triassic crisis [J]. *Geology* , 2007 , 35(12) : 1083-1086
- 35 Yu Jianxin. Floras and the evolutionary dynamics across the Permian-Triassic boundary nearby the border of Guizhou and Yunnan , South China [D]. Wuhan: China University of Geosciences , 2008

Variations of the Magnetic Susceptibility across the P-T Boundary at Xinmin Section in Anshun , Guizhou and Their Paleoclimatic Implications

XU Guo-zhen FENG Fan-bin LEI Yong SHEN Jun FENG Qing-lai

(Key Laboratory of Biological and Environment Geology , China University of Geosciences , Wuhan 430074)

Abstract: Magnetic susceptibility results from Xinmin section in An-shun , Guizhou indicate that the Permian Dalong Formation is with low values ($6.4 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ in average) and that their values increase significantly across the P-T boundary and are high , about $1.3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$, in the Triassic Luolou Formation , which shows the same variation trend with that across other P-T boundary sections in South China. A good positive correlation with both terrestrial sporopollen abundance and TiO_2 variations proves that terrestrial influx attributes most of the magnetic susceptibility at Xinmin section. 3 paleoclimatic stages in the source area were figured out based on the variations of magnetic susceptibility and geochemical climatic proxies: Stage I (bed 1 to the middle of bed 2) is characterized by a warm/humid climate with strong chemical weathering; while a hot/humid climate with stronger chemical weathering dominates stage II (top of bed 2 to the P-T boundary) , the climate condition change rapidly between much milder climate and humid climate; after a short transitional period , the climate in stage III (above the P-T boundary) turns into a relatively hot/dry climate with obvious much stronger physical weathering and weaker chemical weathering.

Key words: magnetic susceptibility; geochemistry; palynology; paleoclimate; Permian-Triassic boundary; South China