# 西藏尼玛盆地古新统—始新统牛堡组 化学地层格架分析

Pre-pub. on line: www. geojournals.cn/georev

尹世滔<sup>1)</sup>,张治锋<sup>1)</sup>,黄永建<sup>1)</sup>,祝有海<sup>2)</sup>,张帅<sup>2)</sup>,韩中鹏<sup>1)</sup>, 李亚林<sup>1)</sup>,李祥<sup>1)</sup>,赵永辉<sup>1)</sup>,刘建伟<sup>1)</sup>

1) 中国地质大学(北京), 地球科学与资源学院, 北京, 100083;

2)中国地质调查局油气资源调查中心,北京,100083

内容提要:已有勘探资料表明,西藏尼玛盆地古新统一始新统牛堡组地层具有良好的油气资源显示,然而目前 有关于该套地层的地层格架划分仍然薄弱。化学地层学方法在北美页岩气勘探开发中取得了巨大成功,鉴于此,本 文以尼玛盆地东部的协德乡南牛堡组剖面作为研究对象,通过对露头样品的主微量元素测试结果进行沉积地球化 学、主成分分析、完备总体经验模态分解、以及自相关函数分析,从化学自一异旋回角度以及元素耦合行为出发,探 讨地球化学基准面对化学地层格架的控制作用,从而为牛堡组地层提供化学地层划分方案。主成分分析结果表明, 牛堡组地层沉积主要受控于细粒碎屑输入、碳酸盐岩、粗粒碎屑输入、氧化还原一生产力、以及盐度这五个因素;经 验模态分解和自相关函数分析结果表明,牛堡组地层受到了明显的异旋回驱动,显示出多尺度基准面震荡特点。通 过对异旋回信号分量(本征模函数,IMFs)进行重构,并且结合元素相互耦合特性,建立了牛堡组化学地层格架,该结 果与岩石地层单元以及沉积相单元一致,证明了本文所提出的化学地层划分方案的可靠性和实用性。

关键词:古新统一始新统牛堡组;主成分分析;完备总体经验模态分解;自相关函数;自异旋回

尼玛盆地属于班公湖—怒江带内的新生代陆相 沉积盆地,紧邻伦坡拉盆地西侧,其整体呈东西向展 布(Decelles et al., 2007a; Kapp et al., 2007)。盆 地基底为侏罗系—白垩系海相地层,新生代盖层为 古新统一始新统牛堡组(E<sub>1-</sub>,n)、渐新世丁青湖组 (E,d)及第四系(Q)堆积物(李启来,2017)。蒋忠 惕等(2006)和李亚林等(2010)先后在尼玛盆地发 现沥青脉和油页岩,表明尼玛盆地是一个含油气盆 地。周小琳(2011)和卢志友等(2018)通过对牛堡 组和丁青湖组地层的烃源岩和有机地化特征进行分 析,进一步证实尼玛盆地牛堡组烃源岩具有较好的 生烃潜力(孙涛等,2013a,b)。但截止目前,尼玛盆 地牛堡组还没有建立详尽的地层系统,已有的地层 划分方案也主要是基于岩石学等特征(如武景龙 等,2011)。由于岩石地层单元的穿时性,难以进行 区域对比,从而急需引入新的地层学方法(Bellanca et al., 1996; Pearce et al., 1999; Ramkumar, 2015)

由于沉积源区、沉积背景、古气候和成岩作用的 影响,沉积岩中的元素成分处于高度变化之中,因而 可以利用地层主微量元素含量、组合及其比值变化 特征,建立勘探区的高分辨率的化学地层框架,解决 勘探区的地层划分和对比问题(Dypvik and Harris, 2001; Martínez-Santana et al., 2013; Craigie, 2015)。化学地层学以普遍获取的露头和钻井岩屑 作为样品,且用量少、对岩性无特殊要求,对甜点层 的识别和刻画尤为准确(Craigie, 2015)。目前在油 气勘探,尤其是在非常规油气勘探领域特别是北美 的页岩油气中得到大规模的推广与应用,如 Sano 等 (2013)和 Turner 等(2015)用化学地层学方法分别 建立了美国晚侏罗世 Haynesville 和 Woodford 页岩 的地层框架。

在传统的化学地层学工作中,研究人员往往只利用单一的地球化学指标进行地层划分,并且地层划分过程较为主观,因此有必要对化学地层学方法进一步发展,使其更能够解决实际问题(Dypvik and

注:本文为中国地质调查局项目(编号:DD20190102)的成果。

收稿日期:2020-09-01;改回日期:2021-01-22;网终首发:2021-02-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.03.00 \* 作者简介: 尹世滔,男,1996年生,硕士研究生,地质工程专业;Email:yinst@cugb.edu.cn。通讯作者:黄永建,男,1974年生,副教授,主要 从事白垩纪古气候,沉积地球化学等研究;Email:huangyj@cugb.edu.cn。

Harris, 2001; Martínez-Santana et al., 2013; Craigie, 2015)。从层序地层学的观点来看,地层划 分和对比的关键更在于沉积基准面的识别(吴向 峰,2010;尹海生,2011)。本文以尼玛盆地东部边缘 相协德乡南剖面上的牛堡组地层为研究对象,从化 学地层学的角度出发,结合层序地层学方法,以主微 量元素测试结果为基础,进行沉积地化、主成分、完 备经验模态分解和重构、自相关函数等分析,从多指 标角度探讨化学地层基准面的自异旋回过程 (Holbrook and Miall, 2020),从而建立牛堡组地层 的化学地层格架,为尼玛盆地牛堡组地层的划分和 对比打下基础,以进一步促进该地区油气资源评价 工作的开展。

### 1 地质背景

尼玛盆地为古近系陆相盆地,从大地构造位置 上看,其位于班公湖—怒江缝合带上的南部边缘一 带(DeCelles et al., 2007b),其南部为拉萨地体,北 部为羌塘地体,东部与伦坡拉盆地相连,总体呈东西 向展布(图 1a)。尼玛盆地的现今构造格局主要受 控于白垩纪末---始新世时期的构造碰撞运动(罗照 华等,2006),导致盆地总体上呈现为南北为坳陷 区,中部为隆起的古地理格局(卢志友等,2018; Decelles et al., 2007a; Kapp et al., 2007)。赵斌 (2013)通过对尼玛盆地南部和北部多条实测剖面 进行地层对比,也将尼玛盆地划分为三个一级构造 单元,即中部逆冲推覆体、甲若错坳陷(北部坳陷)、 达则错坳陷(南部坳陷)。Kapp 等(2007)通过对尼 玛盆地大面积分布的红层进行黑云母同位素 40Ar/39Ar测年,提出盆地地层的年代为渐新世—中 新世。王波明等(2009)在盆地内发现的孢粉组合 以及古生物鱼化石等证据,也表明尼玛盆地陆相地 层时代为始新世—渐新世。赵珍等(2020)基于牛 堡组地层内的斑脱岩和火山岩夹层,利用 U-Pb 定 年手段,将牛堡组中上段时代定为45.41~43.82 Ma,从而确定了牛堡组地层为古新世—始新世沉积 产物。

古近系牛堡组(E<sub>1-2</sub>n)地层在尼玛盆地内广泛 发育,在地表主要出露于盆地南部达则错坳陷带以 及盆地北部甲若错坳陷带(李启来,2017),如查昂 巴(武景龙等,2011)、虾别错(李亚林等,2010)地 区,其不整合于竞柱山组之上。由于受盆地中部的 隆起/逆冲推覆体阻隔,尼玛盆地南北坳陷具有完全 不同的沉积物源特征(Decelles et al., 2007a;Kapp et al., 2007)。其中盆地南部坳陷牛堡组地层广泛 发育辫状河、辫状河三角洲、冲积扇、扇三角洲、湖泊 相沉积(Decelles et al., 2007a;武景龙等,2011; 卢 志友等,2018)。根据沉积相和沉积岩心等特征, 一 般将牛堡组地层由上到下划分为三个岩性段, 对应 沉积序列表现为粗—细—粗的旋回特点(黄辉等, 2012)。

本文所研究协德乡南剖面(section in the southern Xiede village, XDXS)位于尼玛盆地南部坳 陷的东部(图1),剖面厚度超过2km,几乎出露全 部的牛堡组地层。剖面底部为牛堡组一段序列,整 体为一套砾岩、粗砂岩沉积,大型槽状交错层理发 育,地层呈透镜状产出,指示为辫状河心滩沉积,由 于未见不整合接触界线,整条剖面未现下伏竞柱山 组地层,因此牛堡组底部地层未完全出露:到剖面中 上部,整体显示为砂质沉积、夹泥岩,并且发育边滩 相中的二元结构,整体解释为曲流河环境下的沉积 产物,为牛堡组二段沉积序列;而到剖面顶部,泥岩 和页岩比例较多,发育水平层理,显示为三角洲平原 亚相沉积产物,由于区域上牛堡组顶部地层与丁青 湖组地层呈现(平行不)整合接触关系,但是在牛堡 组剖面顶部,地层序列连续发育,未见明显不整合 面,因此认为协德乡南剖面仍未出露丁青湖组沉积。 整条剖面沉积相划分见图 5。

### 2 材料与方法

### 2.1 X射线荧光分析

按照每一单层至少有一件样品控制的原则,在 协德乡南牛堡组剖面,共采取到 415 件地化样品。 对所采样品进行了 X-射线荧光分析(XRF),以得到 主微量测试结果。首先,分析样品被研磨至 200 目, 然后送至北京北达智汇微构分析测试中心,其中主 量元素以金属氧化物百分比(%)形式表示,微量元 素以 μg/g(×10<sup>-6</sup>)的形式表示,并用中国地质科学 院发布的 25 个岩石标样((GBW07101-07125))进 行校正。

#### 2.2 主成分分析

已有沉积地化工作表明,沉积地层主要受控于物源变化、沉积环境、沉积过程(Ramkumar, 2015) 以及后期的保存条件。具体而言其包括陆源碎屑输 入情况、沉积过程中的生产力水平、沉积水体氧化还 原条件、以及古气候条件等因素(Bellanca et al., 1996; Pearce et al., 1999; Montero-Serrano et al., 2010)。这些因素导致地层中主微量元素含量及其



图 1 青藏高原构造单元简图(a,据 Decelles et al., 2007b 修改)及西藏尼玛盆地协德乡区域地质图及协德乡南 剖面位置(b,据 1:25 万尼玛幅地质图<sup>●</sup>修改)

Fig. 1 Simplified tectonic map of Xizang(Tibet) Plateau (a, modified from Decelles et al., 2007b), Regional geological map of study area, and the position of the section in southern Xiede village (XDXS) (b, modified from  $1 \div 250000$  Regional Geological Map of Nyima Region $\bullet$ )

IYSZ—雅鲁藏布江缝合带;BNSZ—班公湖—怒江缝合带;JSZ—西金乌兰湖—金沙江缝合带;SKSZ—昆仑南缘缝合带 IYSZ—Indus—Yarlung River suture zone; BNSZ—Bangong Lake—Nujiang River suture zone; JSZ—Jinsha River suture zone; SKSZ—Southern Kunlun suture zone

分布、同位素组成以及有机质含量等都是处于高度 变化的(Asiedu et al., 2000; Yan Yi et al., 2006), 因此可以通过沉积物/岩石中的各种化学指纹对这 些因素进行反演。化学地层学工作就是依靠这些保存在沉积记录中的各种地化指纹的变异性来实现的(Ramkumar, 2015),这就要求我们获取大量的岩石

地球化学数据。如何从众多的地化数据中快速寻找 到能够刻画地层特征的地球化学参数或组合,同时 又尽可能地代表整个岩石记录,这就变得至关重要。

主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA)是在保证数据信息丢失最少的原则下,将原来 众多且具有一定相关性的指标重新组合成一组新的 相互无关的综合指标的统计方法(Jolliffe, 1986), 是一种典型且常用的降维手段。从岩石中所测定出 来的各种元素变量,其彼此之间具有某种内在联系, 因为元素在岩石中的物质表现是通过矿物实现的, 而特定的元素组合构成了矿物。因此,可以利用主 成分分析手段建立元素组合。本文将利用主成分分 析确定单元素组合,并根据因子得分,重新构建多个 能够反映地层物源信息、沉积环境、和保存等条件的 综合变量(主成分)。

### 2.3 完备集合经验模态分解

化学地层划分的关键在于化学基准面的识别. 化学地层基准面提取与其他旋回分析并无本质上的 区别。但是,考虑到地球化学数据的非线性和非平 稳性,由Yeh等(2010)提出的完备经验模态分解 方法(complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)是一种很好的数据自适应 信号提取方法,其将原始时间序列分解成若干本征 模函数(IMFs)和一个残差变量(RES),这些 IMFs 按照自身特征频率由高到低的顺序排列,并且每个 IMF 都具有特定的物理含义, 而 RES 变量被认为是 代表了数据本身的长趋势,一般不予考虑。利用 CEEMD 进行化学地层基准面分析的基本思想,是基 于化学地层资料是地层信息的集合体,化学地层信 号的奇异性一般反映了地层边界信息这一重要事 实。通过提取复杂信号在每一个时刻局部的振荡模 式,将复杂信号分解为有限个本征模态函数之和,每 一个 IMF 的信息反映了不同级别层序的界面特征, 进而可被用于进行化学地层基准面分析和层序划分 及对比研究。本文利用 Matlab 平台实现 CEEMD 分 析过程。

### 2.4 自相关函数(ACF)

自相关函数(Autocorrelation Function, ACF),用 于计算同一时间序列中,不同时间点观测值之间的 相关性(Davis, 1986),常被用于识别隐含在时间序 列中的周期信号。本文用该函数识别时间序列中的 异旋回信号分量,并进而恢复对应的化学沉积基准 面,从而建立化学地层格架。其原理在于,异成因过 程主要受控于气候(Sobel and Strecker, 2003)、构造 (Whipple and Tucker, 1999)以及海平面变化,表现 出明显的周期性特征;而自成因过程是沉积和地层 系统强烈自组织特性的表现,在时间序列上表现为 分形特性以及不规则振荡(Holbrook and Miall, 2020),无周期特征,其对应功率谱符合 P~1/f<sup>β</sup> 特 征,即功率值与频率的  $\beta$  次方成反比(Holbrook and Miall, 2020)。对一个时间序列的自相关函数作傅 里叶变换就得到对应的功率谱密度,准周期时间序 列功率谱呈现多个谱峰,其与白噪音或者分形时间 序列的功率谱存在明显区别(李春峰,2005)。因 此,通过对时间序列作自相关分析,如果目标时间序 列具有自相关性,即存在周期性,那么在某一延迟时 间节点(t)处,其自相关函数出现极大值;反之,如果 目标时间序列为纯粹的白噪音/无周期性(自成 因),那么其自相关函数,在任一延迟时间节点(t) 处,都无极大值出现。由于白噪音在地层划分和对 比中没有作用,本文只需要识别出时间序列中的异 旋回信号即可,而无需进一步鉴别白噪音和自旋回 信号。

### 3 结果

### 3.1 X射线荧光分析结果

本次 XRF 测试,共获取到 10 种主量元素的氧 化物含量,即 Na<sub>2</sub>O, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, TiO<sub>2</sub>, MnO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(wt%), 以及 14 种包括 Zn, Cu, As, Sr, Zr, Nb, Sn, Ag, Cd, Ba, Cl, V, Cr, S(ppm) 在内的微量元素。其中 Zn, Cu, As, Sr, Zr, Sn, Ba, Cl 中存在少量异常值(<5%), 后续分析中用序列均值 替代这些异常值; 而 Ag 和 Cd 的数据中存在大量异 常值(>10%), 在后续分析中不再使用。本文后续 分析中, 主微量元素都用百分含量表示, 以避免分析 偏差产生。

### 3.2 主成分分析结果

对协德乡南牛堡组剖面样品主微量测试结果进 行主成分分析,如表1所示,可以抽取到5个主成分 (用PCA表示)。其中PCA1由Zn,Cu,Sr,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O,TiO<sub>2</sub>,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>组成;PCA2由As,SiO<sub>2</sub>,CaO,MnO<sub>2</sub> 和MgO组成;PCA3由Zr,Nb,Sn和Ba组成;PCA4 由V,Cr,S和P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>组成;PCA5由Cl和Na<sub>2</sub>O组成。 Cr元素在PCA1和PCA4中均具有较高的载荷绝对 值,说明Cr既有陆源带入,同时也具有沉积底层水 体氧化还原状态密切相关,但是考虑到Cr与V两 者之间的密切关系,如在页岩地层研究中,常用V/ Cr值来判断沉积水体氧化还原情况(Tribovillard et al., 2006; Jenkyns, 2010),因此将其划分到 PCA4 中。CaO 变量在 PCA1 和 PCA2 中均具有较高的载 荷绝对值,说明在协德乡南(XDXS)剖面上,CaO 具 有双重来源,即陆相输入来源和沉积水体自生沉积 来源,考虑到 Ca 与 Mn 和 Mg 之间的矿物亲缘性,故 将 CaO 划分到 PCA2 中。P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 在 PCA2 和 PCA4 中 也均具有较高的载荷绝对值,说明在协德乡南 (XDXS)剖面上,生产力营养元素 P 与陆相输入相 关,考虑到 P 与 S,V,Cr 之间存在密切的生物地球 化学耦合过程(如 Huang Yongjian et al., 2007),因 此将其划分到 PCA4 当中。

所抽取出来的 5 个主成分累计方差贡献为 76.75%,其中: PCA1 占到 27.92%, PCA2 占到 13.59%, PCA3 占到 13.31%, PCA4 占到 11.93%, PCA5 占到 10.00%。因此,所抽取出来的着 5 个主 成分可以代表原始元素变量中的绝大部分信息。

### 3.3 完备经验模态分解结果

首先,按照主成分分析结果,以及各主成分对应的因子得分系数,构建出具有特定地质含义的综合变量,如PCA1=0.54×Zn+0.85×Cu-0.92×Sr+0.91×Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+0.91×K<sub>2</sub>O+0.73×TiO<sub>2</sub>+0.92×Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,按照同样的思路可以得到其余4个综合变量,即PCA2,PCA3,PCA4,PCA5,构建结果见图5(黑色曲线)。然后,按照CEEMD分解方法,将5个主成分进行分解,得到对应的本征模函数(IMFs)以及残差(RES)。以PCA1为例,其可以被分解成8个IMFs以及1个RES分量(图2)。同样的,PCA2和PCA4都可以被分解成IMF1~8加上一个RES分量,PCA3和PCA5可以被分解成IMF1~9以及一个RES分

量。

### 3.4 自相关性分析结果

为了进一步构建出能够反映地层化学基准面的 曲线,需要对主成分(PCA)综合变量中的异旋回分 量进行识别。本文对 5 个主成分,通过 CEEMD 分 解所得到的所有本征模函数(IMFs)以及残差 (RES)分量进行自相关函数分析。其中主成分 1 的 各个 IMFs 和 RES 分量自相关函数如图 3 所示,可 以看到 IMF1~3 在任一延迟时间点都不出现极值, 表现为自旋回或者白噪音的特点;而 IMF4—RES 都 呈现出明显的周期性,具有异旋回特点。对其余 4 个主成分的本征模函数(IMFs)以及残差(RES)分 量也进行同样的处理,其结果表明:主成分 2、4、5 的 本征模函数 IMF1~3 均为自旋回或者白噪音分量, IMF4—RES 均为异旋回分量;主成分 3 的本征模函 数 IMF1~4 为自旋回或者白噪音分量,IMF5—RES 为异旋回分量。

### 4 讨论

### 4.1 沉积地球化学特征

Fe 属于氧化还原敏感性元素,沉积地层中的 Fe 一部分来源于陆源碎屑输入,同时还有相当一部分 Fe 来源于还原条件下自生富集成因以及成岩作用 期间热液带入;而 Al 和 Ti 元素属于对氧化还原不 敏感的元素,是陆源碎屑输入的良好指标。由于沉 积地层为湖相沉积,可以排除热液输入的影响,因此 可以用 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 值将陆源背景扣除掉,从而反映 成岩作用强度,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 突然增大代表大量成岩 作用 Fe 输入(Richer et al., 2006; Thomson et al.,

表 1 西藏尼玛盆地协德乡南剖面古新统一始新统牛堡组样品主成分分析的旋转因子载荷 Table 1 The factor loadings after rotating of PCA analysis results of the Paleocene—Eocene Niubao

Formation on the section in southern Xiede village, the Nyima Basin, Xizang											
元素/	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	PCA5	元素/	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	PCA5
氧化物	27.92%	13.59%	13.31%	11.93%	10.00%	氧化物	27.92%	13.59%	13.31%	11.93%	10.00%
Zn	0.54	-0.02	0.26	0.47	-0.02	S	0.19	0.16	0.11	0.55	0.15
Cu	0.85	-0.05	0.22	0.19	0.03	Na <sub>2</sub> O	0.09	0.01	0.06	0.08	0.98
As	-0.1	0.86	-0.18	0.08	-0.09	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.91	-0.03	-0.03	0.04	-0.02
$\mathbf{Sr}$	-0.92	0.04	-0.03	0.08	-0.12	SiO <sub>2</sub>	0.3	-0.51	0.64	-0.11	-0.15
Zr	0.06	-0.12	0.75	-0.09	0.03	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0.14	-0.56	0.13	0.43	-0.38
Nb	-0.11	0.27	-0.55	-0.05	-0.07	K <sub>2</sub> O	0.91	0.06	-0.08	0.01	0.03
Sn	0.38	-0.21	0.61	-0.29	0.05	CaO	-0.62	0.36	-0.45	0.41	-0.19
Ba	-0.24	-0.01	0.71	0.13	0.02	TiO <sub>2</sub>	0.73	-0.21	0.16	0.55	0.06
Cl	0.06	-0.02	0.03	0.1	0.98	MnO <sub>2</sub>	-0.12	0.77	-0.44	0.26	0.07
V	-0.1	0.08	-0.33	0.88	0.08	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.92	0	0.01	-0.15	0.09
Cr	-0.65	-0.15	-0.26	0.62	-0.03	MgO	0.08	0.85	-0.1	-0.01	-0.02

![](_page_5_Figure_2.jpeg)

![](_page_5_Figure_3.jpeg)

2006)。S元素含量变化也可以指示氧化还原界面, 大量S元素峰值的出现可能代表了还原环境下大量 黄铁矿或者其他铁硫化物形成(Richer et al., 2006)。

如图 4 所示, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 具有很好的相关 性,说明地层中Fe元素主要来源于陆源碎屑输入,S 元素含量以及 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 值整体波动范围较小,仅 在局部层位其数值突然增大(500~550 m;1180~ 1250 m;1900~2185 m),这在一定程度上指示成岩 作用对剖面地层沉积影响较小。V/Cr 比值是反映 水体氧化还原条件的重要指标之一,一般在氧化水 体条件下 V/Cr<2,在贫氧水体条件下 V/Cr 值在 2 ~4.25 之间,当 V/Cr>4.25 则指示次氧化--缺氧的 水体条件(Tribovillard et al., 2006; Jenkyns, 2010)。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与S元素的哈克图解(图4)表明,Fe 元素在地层中主要以氧化物形式存在,结合 V/Cr 曲线(V/Cr < 2),表明地层沉积环境整体以氧化条 件为主,这与宏观上,协德乡南剖面整体为盆地边缘 相沉积一致。V/Cr与Fe,O,/TiO,具有较高的正相 关性(R<sup>2</sup>=0.53),这说明沉积地层中扣除陆源背景

输入的那部分 Fe 可以代表沉积时在相对缺氧沉积 环境下自生富集的输入量,而不是后期成岩作用改 造贡献。因此可以认为本次 XRF 测试结果可以代 表沉积地层原始沉积组分。

### 4.2 元素组合的地球化学含义

主成分 1 中,  $Al_2O_3$  和  $K_2O$  一般被认为与黏土 和长石矿物相关(Pearce and Jarvis, 1992; Tribovillard et al., 2006); TiO<sub>2</sub> 被认为是代表相对 稳定的陆源碎屑物质, 受成岩作用影响很小 (MacLean et al., 1997); Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Ti 元素一样, 被广 泛用作陆源沉积输入变化的指标, 但是在某些还原 环境中, 也可被用作反演水体氧化还原程度的指标 (如 Sluijs et al., 2009)。Sr 一般被认为与碳酸盐岩 矿物相关, 但是主成分分析结果表明(表 1), Sr 与  $Al_2O_3$  和  $K_2O$  等陆源元素具有很好的相关性, 说明 Sr 很可能也主要是陆相带入; Zn 和 Cu 属于微量元 素, 容易被由  $Al_2O_3$  和  $K_2O$  组成的黏土矿物吸附。 因此, 可以将主成分 1 理解为细粒陆源元素组合。 主成分 2 中, CaO, MnO<sub>2</sub> 和 MgO 三者与碳酸盐岩密 切相关(如 Montero-Serrano et al., 2010), 而 SiO<sub>2</sub> 对

![](_page_6_Figure_2.jpeg)

![](_page_6_Figure_3.jpeg)

图 3 西藏尼玛盆地协德乡南剖面古新统一始新统牛堡组主成分 1 的各本征模函数(IMFs)及残差(RES)分量的 自相关分析(据 Davis, 1986))

Fig. 3 The autocorrelation analysis for intrinsic mode functions (IMFs) and residual (RES) of PCA1 variable of the Paleocene—Eocene Niubao Formation on the section

in southern Xiede village, the Nyima Basin, Xizang(after Davis, 1986)

图中黑色虚线为95%置信水平线,黑色实线为任一延迟时间 t 处的自相关值,位于置信水平区间内的部分表示为随机、独立点

The dotted black lines denote the 95% CL lines, the solid black lines are autocorrelation coefficients along lag time (t),

and the intervals falling below 95% CL lines mean random and independent points

碳酸盐岩具有稀释作用,其负的因子得分系数(表 1)就是最好的证明,因此可以将主成分2解释为碳 酸盐岩元素组合。主成分3中,Zr与锆石具有很好 的矿物亲缘性,代表了粗碎屑输入(Tribovillard et al.,2006),Nb与锐钛矿,Sn与锡石,Ba与重晶石 分别具有很好的矿物亲缘性,这些都是典型的重矿 物,其化学性质非常稳定,受物理/化学风化作用的 影响很小,其相对含量反映了物质沉积搬运过程中 的水动力分选过程,因此可以将 PCA3 解释为粗粒 陆源元素组合。主成分4中,V和Cr具有多价态 (Wanty and Goldhaber, 1992; Calvert and Pedersen, 1993),可以作为氧化还原指标,如 V/Cr 常用来反 演沉积水体的氧化还原程度(Tribovillard et al., 2006; Jenkyns, 2010);S元素也是变价元素,一般在 还原水体中 S 以 H<sub>2</sub>S 形式存在;P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量可以反映 沉积水体生产力水平(Tyrrell, 1999),并且与总有 机碳含量(TOC)之间存在密切联系,如在白垩纪时 期的古海洋演化过程中,活性磷与总磷的堆积速率 的最大值与大洋缺氧事件近乎相对应(Föllmik, 1996),而能够被生物利用的 P 在还原条件时更容 易释放出来,P 元素与水体氧化还原之间存在密切 的耦合关系(Huang Yongjian et al., 2007),因此,可

![](_page_7_Figure_1.jpeg)

![](_page_7_Figure_2.jpeg)

以将 PCA4 解释为氧化还原与生产力元素组合。主成分 5 由 Cl 和 Na<sub>2</sub>O 组成, Cl 和 Na 都是卤族元素,因此可以将其解释为盐度元素组合。各元素组合地球化学含义总结为表 2。

### 4.3 自异旋回过程

Beerbower(1964)首先区分了沉积系统中旋回 驱动的内外动力来源,分别命名为自旋回和异旋回 (目前更倾向于用自成因和异成因过程两个术语, 因为这些过程不一定是严格的旋回性质的, Hajek and Straub, 2017)。盆地充填序列的发育被认为广 泛受到自成因过程(盆地内)和异成因过程(盆地 外)的双重控制。最近的实验和理论研究都表明, 自成因过程(Hajek et al., 2010; Straub et al., 2015)和异成因过程(Holbrook and Miall, 2020)都 能产生地层,这就造成同一时间序列里面既包含异 成因分量,还含有自成因分量。

表 2 西藏尼玛盆地协德乡南剖面古新统—始新统牛堡组元素组合的地球化学含意 Table 2 The implications of geochemical associations of the Paleocene—Eocene

Niubao Formation	on	the	section	ın	southern	xiede	village,	

the Hynna Dashi, Alzang									
主成分	方差贡献	元素组成	地球化学含义						
PCA1	27.92%	$\operatorname{Zn},\operatorname{Cu},\operatorname{Sr},\operatorname{Al}_2\operatorname{O}_3,\operatorname{K}_2\operatorname{O},\operatorname{TiO}_2,\operatorname{Fe}_2\operatorname{O}_3$	细粒陆源碎屑						
PCA2	13.59%	$As, SiO_2, CaO, MnO_2, MgO$	碳酸盐岩相关						
PCA3	13.31%	Zr, Nb, Sn, Ba	粗粒陆源碎屑						
PCA4	11.93%	V, Cr, S, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	沉积水体氧化还原与生产力水平						
PCA5	10.00%	Cl, Na <sub>2</sub> O	沉积水体盐度						

自成因过程是持续进行的沉积机制,产生元地层、地层束和地层构型要素,包括离散的海底扇叶的生长和剥落、单一地层单元的沉积或离散的潮汐通道的迁移和放弃等常见过程,属于沉积学家熟知的传统的相序和相模式的研究范畴(Hajek and Straub, 2017; Paola, 2018)。自过程负责将沉积物分散到盆地内,在此

过程中产生和组织而形成地层。自成因过程没有单一的特征长度或时间尺度,而是占据了一个广泛的 尺度范围,是沉积和地层系统的强烈的自组织特性 的表现,在时间序列上表现为自相似性或者分形特 性以及不规则振荡(Holbrook and Miall, 2020),即 时间序列对应的功率谱符合 1/f<sup>θ</sup> 特征,即功率值与 频率的 β 次方成反比(李春峰, 2005; Holbrook and Miall, 2020)。自成因过程甚至会破坏异成因信号 在地层记录中保存(JeroImack and Paola, 2010)。

异成因过程主导并控制了沉积系统的物质和能量的变化,其本身并不产生地层,而是通过对自过程的改变而体现出来。因此不存在绝对意义上的异成因沉积,而只是被异过程驱动的自过程的变化而产生的沉积(Holbrook and Miall, 2020)。与自过程相反,异成因过程主要受控于气候(Sobel and Strecker, 2003)、构造(Whipple and Tucker, 1999)以及海平面变化,在地层记录中倾向于周期性或者准周期性,因而是可预测和可识别的。对于异成因过程产生的简单周期性或随机时间序列而言,它们的功率谱都不具有 1/f<sup>8</sup> 特征,而是呈现出明显的可以代表该时间序列中主周期的谱峰(Holbrook and Miall, 2020)。

因此,澄清自异成因过程的含义、机制和保存临 界点,成为地层学研究中最为根本的问题之一 (Holbrook and Miall, 2020)。对于地层划分和对比 而言,即基准面的识别过程,关键在于对自异旋回信 号的识别和区分。前面通过自相关函数分析,已经 将5个主成分中的异旋回信号进行了识别,基于异 成因信号分量,重构曲线见图5。

### 4.4 化学地层框架

元素之间的矿物亲缘性分析表明,主成分1 (PCA1)主要代表了地层中细粒陆源碎屑物质输入 量的变化,并且主成分分析表明,主成分1(PCA1) 的方差贡献最大,这说明该剖面沉积基准面主要受 控于细粒陆源碎屑输入量的变化。因此本文以基于 主成分1(PCA1)分解得到的本征模函数(IMFs),来 详细阐明化学地层格架的划分过程及其内涵。由图 3可知,主成分1(PCA1)对应 IMF4~8 分量均显示 出异旋回特征,可以认为他们代表了不同尺度的异 成因过程,即不同时间尺度的化学基准面变化。原 则上利用 IMF4~8 中的任意一个分量都可以划分出 对应时间尺度的化学地层框架,但是考虑到基于不 同 IMF 所恢复出来的不同时间尺度地化基准面对 最终的地层沉积样式都具有一定程度的方差贡献. 即意味着每个尺度的地化基准面只能反映一部分的 地层沉积信息。因此为了得到稳健的地层划分方 案,可以将每个主成份中具有异旋回特征的 IMF 分 量进行合并,重构得到具有特定地球化学含义的基 准面,如利用 PCA1 中的 IMF4~8 分量可以重构得 到代表细粒陆源元素输入量的基准面曲线,以下简 称为细粒基准面。基于同样过程,还可以得到碳酸 盐岩基准面曲线、粗粒基准面、氧化还原与生产力基 准面、以及盐度基准面曲线,其结果如图 5 所示(黑 色曲线)。那么所重构出来的基准面曲线上相邻两 个峰值/谷值区间即代表了一次地球化学沉积基准 面旋回。基于此可以得到具有对应地球化学含义的 地层划分方案(图 5,黑色水平虚线)。

将重构出来五条地球化学基准面曲线(图 5,黑 色曲线)与对应的主成分综合变量曲线(图 5,灰色 曲线)进行对比,可以发现,前者波动更加明显,能 够揭示更多的地球化学突变点,这点是传统化学地 层学无法实现的。

在传统层序地层学中,海侵体系域(TSTs)由退 积序列定义(Catuneanu et al., 2011),表现为可容 纳空间持续增加,对应的陆源碎屑指标含量以及沉 积盆地局限程度逐渐降低(如 Turner et al., 2016); 低水位体系域(LSTs)由进积序列定义(Catuneanu et al., 2011),盆地局限水平逐渐升高(Turner et al., 2016);高水位体系域(HSTs)同样由进积序列定义, 表现为可容纳空间持续减少(Catuneanu et al., 2011),对应的陆源碎屑指标含量逐渐升高,然而沉 积盆地局限程度却是最低的(如 Turner et al., 2016)。基于以上观点,可以认为基准面变化的具 体表现形式就是可容纳空间发生变化,而直接的物 质表现就是,陆源输入量、水体局限程度(氧还还 原)等替代性指标的升高与降低。

回归到本文,可以认为细粒基准面曲线上,其对 应数值由高到低,代表细粒物质输入量逐渐减少,即 意味着沉积水体逐渐变浅,可容纳空间减少,沉积基 准面不断升高的过程;由于氧化还原—生产力指标 常常与细粒指标之间存在同相的耦合关系,因此氧 化还原—生产力基准面曲线上,对应数值表现为逐 渐降低,也代表了沉积基准面不断升高的过程;碳酸 盐岩含量、粗粒物质含量、以及盐度三者都与细粒物 质含量存在反相的理论耦合关系,因此,其对应基准 面曲线数值由高到低,则表示积基准面不断降低的 过程。利用这种元素指标之间的耦合关系,可以建 立最终的化学地层格架。具体流程如下:①细粒基

![](_page_9_Figure_1.jpeg)

Fig. 5 The chemo-stratigraphic scheme for the Paleocene—Eocene Niubao Formation on the section in southern Xiede village, the Nyima Basin, Xizang

准面对地层沉积样式具有最高的方差贡献(PCA1 方差最大),因此首先以细粒基准面曲线上的峰值 点作为对应地层划分界限;②结合各元素组合之间 的耦合关系,同样可以将氧化还原—生产力基准面 曲线上的峰值点作为对应地层划分界限;并将碳酸 盐岩、粗粒、以及盐度基准面曲线上的谷值点作为对 应地层划分界限。基于这5种基准面分别得到的地 层划分方案如图5所示(黑色水平虚线)。

基于不同的地球化学元素组合(主成分)所得 到的地层划分方案不同,是因为其侧重点不同。如 基于细粒基准面得到的地层划分方案,强调地层中 细粒碎屑物质输入量在异成因驱动下的表现形式; 而基于主成分3得到的地层划分方案,则强调沉积 水体氧化还原程度以及生产力水平。那么如何对不 同的划分方案进行统一呢?异成因过程主要受控于 气候(Sobel and Strecker, 2003)、构造(Whipple and Tucker, 1999)以及海平面变化,因此从地球化学角 度出发,代表地层的各种属性之间应该存在耦合关 系,即只有那些具有共同界线,并且地层属性能够相 互耦合起来的界线,可能才代表了真正的基准面。 本文按照至少有3条不同类型地层界线能够满足地 球化学耦合关系,则将该界线视为真正影响到地层 沉积的异旋回基准面界线原则,从而得到协德乡南 剖面牛堡组地层的最终化学地层格架,其结果如图 5(化学地层格架)所示,共得到十二个化学地层单 元。

将化学地层学格架与岩石地层单元进行对比。 如图 5 所示,化学地层界线整体上与岩石地层界线 一致,并且都是出现在岩性粒度变化的位置,如⑩/ ①和①/①之间的界线对应泥岩/粗砂岩界线,⑧/ ⑨之间的界线对应粉砂/含砾粗砂岩界线,由于协德 乡牛堡组地层是湖相沉积,这说明控制地层沉积的 主要因素为物源输入,这与化学地层学分析过程中 的主成分分析结果一致,即反映地层粒度信息的主 成分1和3累计提供了41.23%的方差贡献。与此 同时,在岩石地层单元上,还有许多界线在化学地层 学格架上并没有体现出来,那是因为在原始地层沉 积过程中,除了异旋回因素如源区信号能够影响到 沉积序列,另外自旋回过程同样可以作用于地层沉 积样式,但是与前者不同的是,后者产生的地层无法 实现区域甚至全球对比。由于本文采用完备经验模 态分解方法,首先将自旋回信号滤掉,只保留了异旋 回信号,所以相较于传统的岩石地层学划分方案,本 文的化学地层学格架相当于一个"滤波器",已经将 自旋回因素产生的岩石界线排除在外,这样提高了 地层的区域可对比性。除此之外,相较于岩石地层 单元,本文给出的化学地层学框架还识别出前者无 法识别到的界线,如化学地层单元(9)/(10)之间的界线 出现在岩石地层单元上没有响应。

化学地层界线其本质上是对沉积环境改变做出 的响应,因此化学地层界线能与沉积相界线很好对 应,如最底部的界线与辫状河沉积相/曲流河沉积相 之间的界线一致,并且前者具有更高的分辨率,那是 因为在这些沉积相中,还存在许多微环境的变化,如 亚相、微相等。

#### 4.5 区域地层对比

协德乡南牛堡组地层位于尼玛盆地南部坳陷的 东边,属于盆地边缘相沉积。尽管位于尼玛盆地北 部坳陷的牛堡组地层也整体可以划分为三段,即沉 积序列表现为从下到上粗—细—粗的沉积旋回特征 (黄辉等,2012),但是物源和古流向数据分析表明, 尼玛盆地北部和南部坳陷分别接收来自不同物源区 的沉积(Kapp et al., 2007), 尼玛盆地南北坳陷内 牛堡组地层的沉积环境也完全不同,因此在区域上, 协德乡南剖面的牛堡组地层只能与尼玛盆地南部对 应地层进行对比。对于尼玛盆地南部坳陷,在晚白 垩纪—第三纪时期,其主要为辫状河、冲积扇、湖相 沉积等沉积类型(DeCelles et al., 2007a),本文所研 究的协德乡南牛堡组沉积环境与其一致(图5)。具 体来看,无论是位于南部坳陷西部(尼玛县城附近) 的康玛儿勒、新秃那若、俄久乡下布果剖面(卢志友 等,2018),还是位于南部坳陷南部的杳昂巴剖面 (武景龙等,2011;李启来,2017),其牛堡组地层都 表现为顶底为相对较粗的浅水相沉积,而中间为相 对深水相沉积,这与协德乡南剖面情况一致。因此 可以认为本文针对协德乡南牛堡组地层所划分的十 二个化学地层单元可以应用于尼玛盆地南部坳陷其 他地区的牛堡组地层。但是值得注意的是,协德乡 牛堡组属于盆地边缘相沉积,在具体地层对比时还 应该考虑到沉积相迁移所引起的沉积环境改变的问 题。

### 5 结论

(1)本文利用化学地层学方法,首次建立了西藏尼玛盆地古新统一始新统牛堡组地层的化学地层 学格架,有利于促进该地区油气资源评价工作的开展。将协德乡南牛堡组地层划分成了12个化学地 层单元,该地层划分结果与岩石地层单元以及沉积 相单元一致,证实了化学地层划分方案的可靠性和 实用性,并且认为该划分结果可以应用于尼玛盆地 南部坳陷中沉积的牛堡组地层,具备区域可对比性。

(2)此外,本文在牛堡组地层化学地层格架建 立过程中,对化学地层学方法进行了探索。本文结 合了沉积地球化学、主成分分析、完备总体经验模态 分解、以及自相关函数分析等方法,从化学自一异旋 回角度以及元素耦合行为出发,探讨了地球化学基 准面对化学地层框架的控制作用。这一过程有别于 传统的化学地层学方法,其更加强调异旋回对地层 的控制作用,并且取得的结果更加客观。 **致谢:**在野外样品采集过程中,得到了博士研究 生李帅、郝敏刚、韩凯博的帮助;稿件中部分图件得 到博士研究生毕文军以及硕士研究生包宏扬的协 助;审稿过程中得到了评审专家和编辑提出的宝贵 意见,在此一并表示谢意!

#### 注释 / Note

❶ 河南省地质调查院. 2002. 1:25 万尼玛区幅区域地质调查报告.

#### 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)

- 黄辉,朱利东,杨文光,杨林,武景龙,董煜,周小琳. 2012. 西藏 尼玛北部新生代盆地沉积记录及控盆机理. 地质通报,31(6): 936~942.
- 蒋忠惕,张家强,王德杰. 2006. 西藏尼玛地区油气显示的发现及 其意义. 地质通报,25(9~10):1189~1193.
- 李春峰. 2005. 分形介质与分形地层. 地层学杂志, 29(4): 348~ 354.
- 李启来. 2017. 西藏尼玛地区古近系牛堡组古湖平面变化的沉积地 球化学记录. 导师:伊海生. 成都:成都理工大学博士学位论 文:1~115.
- 李亚林, 王成善, 朱利东, 王立成, 杨光文. 2010. 西藏尼玛盆地油 页岩的发现及其地质意义. 地质通报, 29(12): 1872~1874.
- 卢志友,杨文光,朱利东,刘和,陶刚,欧阳慧子.2018. 西藏尼玛 盆地古近系牛堡组烃源岩地球化学特征. 地质与勘探,54(5): 1060~1068.
- 罗照华,莫宣学,侯增谦,邓万明,王江海,赵志丹,喻学惠,李建 平. 2006. 青藏高原新生代形成演化的整合模型——来自火成 岩的约束. 地学前缘,13(4):196~211.
- 孙涛,王成善,李亚林,魏玉帅. 2013a. 西藏中部尼玛盆地页岩气 地质特征及资源潜力. 中国矿业, 22(1):72~75.
- 孙涛,王成善,李亚林,魏玉帅. 2013b. 西藏尼玛盆地古近系牛堡 组烃源岩生烃潜力及分子地球化学特征. 矿物岩石地球化学通 报,32(2):243~251.
- 王波明,周家声,闻涛,何志文. 2009. 西藏尼玛盆地陆相地层归属 及其油气意义. 天然气技术,3(4):21~24.
- 武景龙,朱利东,杨文光,黄辉. 2011. 尼玛盆地南部古近系牛堡组 沉积特征及其地质意义. 华南地质与矿产,27(1):59~63.
- 武向峰. 2010. 柴达木盆地西部上、下干柴沟组湖平面变化程式及 控制因素. 导师:伊海生. 成都:成都理工大学硕士学位论文: 1~84.
- 伊海生. 2011. 测井曲线旋回分析在碳酸盐岩层序地层研究中的应用. 古地理学报, 13(4): 456~466.
- 赵斌. 2013. 西藏尼玛盆地结构构造特征及其油气意义. 导师: 莫 宣学, 王成善. 北京:中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1~ 59.
- 赵珍,吴珍汉,杨易卓,季长军.2020. 羌塘中部陆相红层时代的 U-Pb 年龄约束.地质论评,66(5):1155~1170.
- 周小林. 2011. 西藏尼玛盆地烃源岩地球化学特征研究. 导师:朱 利东. 成都:成都理工大学硕士学位论文:1~79.
- Asiedu D K, Suzuki S, Nogami K, Shibata T. 2000. Geochemistry of Lower Cretaceous sediments, inner zone of southwest Japan: constraints on provenance and tectonic environment. Geochemical

Journal, 34: 155~173.

- Beerbower J R. 1964. Cyclothems and cyclic depositional mechanisms in alluvial plain sedimentation. Geological Survey of Kansas Bulletin, 169(1): 31~42.
- Bellanca A, Claps M, Erba E, Masetti D, Neri R, Premoli I, Venezia F. 1996. Orbitally induced limestone/marlstone rhythms in the Albian—Cenomanian Cismon section (Venetian region, northern Italy): sedimentology, calcareous and siliceous plankton distribution, elemental and isotope geochemistry. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 126(3~4); 227~260.
- Calvert S E, Pedersen T F. 1993. Geochemistry of recent oxic and anoxic sediments: implications for the geological record. Marine Geology, 113(1~2): 67~88.
- Catuneanu O, Galloway W E, Kendall C G S C, Miall A D, Posamentier H W, Strasser A, Tucker M E. 2011. Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature. Newsletters on Stratigraphy, 44 (3): 173~245.
- Craigie N W. 2015. Applications of chemostratigraphy in Cretaceous sediments encountered in the North Central Rub'al - Khali Basin, Saudi Arabia. Journal of African Earth Sciences, 104: 27~42.
- Davis J C. 1986. Statistics and Data Analysis in Geology. New York: John Wiley & Sons: 243~248.
- Decelles P G, Kapp P. 2007a. Late Cretaceous to Mid Tertiary basin evolution in the central Tibetan Plateau: Changing environments in response to tectonic partitioning, aridification, and regional elevation gain. Geological Society of America Bulletin, 119(5~6): 654~ 680.
- Decelles P G, Quade J, Kapp P, Fan M J, Dettman D L, Ding L. 2007b. High and dry in central Tibet during the Late Oligocene. Earth and Planetary Science Letters, 253: 389~401.
- Dypvik H, Harris N B. 2001. Geochemical facies analysis of fine-grained siliciclasics using Th/U, Zr/Rb and (Zr+Rb)/Sr ratios. Chemical Geology, 181: 131~146.
- Föllmi K B. 1996. The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits. Earth Science Reviews, 40(1~2): 55~ 124.
- Hajek E A, Heller P L, Sheets B A. 2010. Significance of channel-belt clustering in alluvial basins. Geology, 38(6): 535~538.
- Hajek E A, Straub K M. 2017. Autogenic sedimentation in clastic stratigraphy. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 45: 681~709.
- Holbrook J M, Miall A D. 2020. Time in the rock: A field guide to interpreting past events and processes from siliciclastic stratigraphy. Earth-Science Reviews, 203: 103121.
- Huang Hui, Zhu Lidong, Yang Wenguang, Yang Lin, Wu Jinglong, Dong Yu, Zhou Xiaolin. 2012&. Cenozoic basin sedimentary record and basin——controlling mechanism of northern Nyima, Tibet. Geological Bulletin of China, 31(6): 936~942.
- Huang Yongjian, Wang Chengshan, Chen Xi. 2007. Response of reactive Phosphorus burial to the sedimentary transition from Cretaceous black shales to oceanic red beds in Southern Tibet. Acta Geological Sinica, 81(6): 1012~1018.
- Jenkyns H C. 2010. Geochemistry of oceanic anoxic events. Geochemistry Geophysics Geosystems, 11(3): 1525~2027.
- Jerolmack D J, Paola C. 2010. Shredding of environmental signals by sediment transport. Geophysical Research Letters, 37.
- Jiang Zhongti, Zhang Jiaqiang, Wang Dejie. 2006&. Discovery of oil gas shows in the Nyima area, Tibet, China and its significance.

Geological Bulletin of China, 25(9~10): 1189~1193.

- Jolliffe I T. 1986. Pincipal Component Analysis. New York: Springer-Verlag: 246.
- Kapp P, Decelles P G, Gehrels G E, Heizler M, Ding Lin. 2007. Geological records of the Lhasa—Qiangtang and Indo—Asian collisions in the Nima area of central Tibet. Geological Society of America Bulletin, 119(7~8): 917~932.
- Li Chunfeng. 2005&. Fractal media and fractal stratigraphy. Journal of Stratigraphy, 29(4): 348~354.
- Li Qilai. 2017&. Sedimentary geochemistry and lake-level changes from the Paleogene Niubao Formation of Nima area, Tibet. Chengdu: Dissertation submitted to Chengdu University of Technology for doctoral degree, 1~115.
- Li Yalin, Wang Chengshan, Zhu Lidong, Wang Licheng, Yang Wenguang. 2010#. Discovery of oil shale in the Nima basin, Tibet, China and its significance. Geological Bulletin of China, 29(12): 1872~1874.
- Lu Zhiyou, Yang Wenguang, Zhu Lidong, Liu He, Tao Gang, Ouyang HuiZi. 2018&. Geochemical characteristics of the Paleogene Niubao formation source rocks in the Nima Basin, Tibet. Geology and Exploration, 54(5): 1060~1068.
- Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, Deng Wanming, Wang Jianghai, Zhao Zhidan, Yu Xuehui, Li Jianping. 2006&. An integrated model for the Cenozoic evolution of the Tibetan plateau: constraints from igneous rocks. Earth Science Frontiers, 13(4): 196~211.
- MacLean W H, Bonavia F F, Sanna G. 1997. Argillite debris converted to bauxite during karst weathering: Evidence from immobile element geochemistry at the Olmedo Deposit, Sardinia. Mineralium Deposita, 32(6): 607~616.
- Martínez-Santana M, Márquez G, Escobar M, Esteves I H. 2013. Geochemistry and chemostratigraphy of the Colon - Mito Juan units ( Campanian—Maastrichtian ), Venezuela: Implications for provenance, depositional conditions, and stratigraphic subdivision. Geochemical Journal, 47: 537~546.
- Montero-Serrrano J C, Palarea-Albaladejo J, Martín-Fernúndez J A, Martínez-Santana M, Gutiérrez-Martín J V. 2010. Sedimentary chemofacies characterization by means of multivariate analysis. Sedimentary Geology, 228: 218~228.
- Paola C, Ganti V, Mohrig D, Runkel A C, Straub K M. 2018. Time not our time: physical controls on the preservation and measurement of geologic time. Annual Review of Earth Planetary Science, 46(1): 409~438.
- Pearce T J, Besly B M, Wray D S, Wright D K. 1999. Chemostratigraphy: a method to improve interwell correlation in barren sequences—a case study using onshore Duckmantian/ Stephanian sequences (West Midlands, U. K.). Sedimentary Geology, 124(1~4): 197~220.
- Pearce T J, Jarvis I. 1992. Applications of geochemical data to modeling sediment dispersal patterns in distal turbidites: Late Quaternary of the Madeira Abyssal Plain. Journal of Sedimentary Petrology, 62 (6): 112~1129.
- Ramkumar M. 2015. Chemostratigraphy: Concepts, Techniques, and Applications. New York: Elsevier: 1~21.
- Richter T O, Van der Gaast S, Koster B, Vaars A, Gieles R, de Stigter H C, de Haas H, van Weering T C E. 2006. The Avaatech XRF Core Scanner: technical description and applications to NE Atlantic sediments. In: Rothwell R G (ed). New techniques in sediment

core analysis. London: Geological Society of London: 39~50.

- Sano J L, Ratcliffe K T, Spain D R. 2013. Chemostratigraphy of the Haynesville shale. AAPG Memoir, 105: 137~154.
- Sluijs A, Bijl P K, Schouten S, Röhl U, Reichert G J, Brinkhuis H. 2011. Southern Ocean warming, sea level and hydrological change during the Paleocene—Eocene thermal maximum. Climate of the Past, 7(1): 47~61.
- Sobel E R, Strecker M R. 2003. Uplift, exhumation and precipitation: tectonic and climatic control of Late Cenozoic landscape evolution in the northern Sierras Pampeanas, Argentina. Basin Research, 15 (4): 431~451.
- Straub K M, Li Qi, Benson W M. 2015. Influence of sediment cohesion on deltaic shoreline dynamics and bulk sediment retention: A laboratory study. Geophysical Research Letters, 42(22): 9808 ~ 9815.
- Sun Tao, Wang Chengshan, Li Yalin, Wei Yushuai. 2013a&. Geological characteristics and resource potential of shale gas in Nima Basins, central Tibet. China Mining Magazine, 22(1): 72~75.
- Sun Tao, Wang Chengshan, Li Yalin, Wei Yushuai. 2013b&. Hydrocarbon potential and molecular organic geochemistry of Niubao formation in Nima Basin, central Tibet. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 32(2): 243~251.
- Thomson J, Croudace I W, Rothwell R G. 2006. A geochemical application of the ITRAX scanner to a sediment core containing eastern Mediterranean sapropel units. In: Rothwell R G (ed). New techniques in sediment core analysis. London: Geological Society of London: 65~77.
- Tribovillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. Chemical Geology, 232(1~2): 12~32.
- Turner B W, Molinares Blanco C E, Slatt R M. 2015. Chemostratigraphic, palynostratigraphic, and sequence stratigraphic analysis of the Woodford Shale, Wyche Farm Quarry, Pontotoc County, Oklahoma. Interpretation, 3: SH1~SH9.
- Turner B W, Tréanton J A, Slatt R M. 2016. The use of chemostratigraphy to refine ambiguous sequence stratigraphic correlations in marine mudrocks. An example from the Woodford Shale, Oklahoma, USA. Journal of the Geological Society, 173: 854~868.
- Tyrrell T. 1999. The relative influence of nitrogen and phosphorus on oceanic primary production. Nature, 400(6744): 525~529.
- Wang Boming, Zhou Jiasheng, Wen Tao, He Zhiwen. 2009&. Timing of terrestrial strata in Tibetan Nyima Basin and its significance. Natural Gas Technology, 3(4): 21~24.
- Wanty R B, Goldhaber M B. 1992. Thermodynamics and kinetics of reactions involving vanadium in natural systems: Accumulation of vanadium in sedimentary rock. Geochimica et Cosmochimica Acta, 56: 171~183.
- Whipple K X, Tucker G E. 1999. Dynamics of the stream power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 104(B8): 17661~17674.
- Wu Jinglong, Zhu Lidong, Yang Wenguang, Huang Hui. 2011&. Sedimentary characteristics and geological significance of Paleogene Niubao Formation, Southern Nyima Basin. Geology and Mineral Resources of South China, 27(1): 59~63.
- Wu Xiangfeng. 2010&. Lake level fluctuation pattern and controlling factors of Shangganchaigou Formation and Xiaganchaigou Formation,

Western Qaidam Basin. Chengdu: Dissertation submitted to Chengdu University of Technology for master degree, 1~84.

- Yan Yi, Xia Bin, Lin Ge, Cui Xuejun, Hu Xiaoqiong, Yan Pin, Zhang Faqiang. 2006. Geochemistry of the sedimentary rocks from the Nanxiong Basin, South China and implications for provenance, paleoenvironment and paleoclimate at the K/T boundary. Sedimentary Geology, 197: 127~140.
- Yeh J R, Shieh J S, Huang N E. 2010. Complementary ensemble empirical mode decomposition: a novel noise enhanced data analysis method. Advances in Adaptive Data Analysis, 2(2): 135~156.
- Yi Haisheng. 2011&. Application of well log cycle analysis in studies of sequence stratigraphy of carbonate rocks. Journal of

Paleoceanography, 13(4): 456~466.

- Zhao Bin. 2013&. Structure characteristics and its petroleum significance of the Nima Basin, central Tibet. Beijing: Dissertation submitted to China University of Geosciences for master degree, 1~ 59.
- Zhao Zhen, Wu Zhenhan, Yang Yizhuo, Ji Changjun. 2020&. Establishing the chronostratigraphic framework of the continental red beds in Central Qiangtang Basin: Constrained by zircon U-Pb ages. Geological Review, 66(5): 1155~1170.
- Zhou Xiaolin. 2011&. Geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in Nima Basin, Tibet. Chengdu: Dissertation submitted to Chengdu University of Technology for master degree, 1~79.

## The chemo-stratigraphic analysis for the Paleocene—Eocene Niubao Formation on the section in southern Xiede village, the Nyima Basin, Xizang (Tibet)

 $\label{eq:2.1} {\rm YIN~Shitao}^{\rm 1)} \mbox{, ZHANG~Zhifeng}^{\rm 1)} \mbox{, HUANG~Yongjian}^{\rm 1)} \mbox{, ZHU~Youhai}^{\rm 2)} \mbox{, ZHANG~Shuai}^{\rm 2)} \mbox{,}$ 

HAN Zhongpeng<sup>11</sup>, LI Yalin<sup>11</sup>, LI Xiang<sup>11</sup>, ZHAO Yonghui<sup>11</sup>, LIU Jianwei<sup>11</sup>

1) School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083;

2) Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing, 100083

**Objective**: The Paleocene—Eocene Niubao Formation in the Nyima Basin of Xizang (Tibet) was recently proved to be a set of petroliferous succession. However, a systematic stratigraphic division scheme still lacks. Thus, we try to use elemental proxies to do a chemo-stratigraphic analysis on the Niubao Formation from the perspectives of geochemistry and autogenic/allogenic processes. With the expectations of not only establishing a stratigraphic scheme for the Niubao Formation, but also exploring a reliable and practical stratigraphic division method.

**Methods**: Based on the early field work, and the later whole-rock X-ray fluorescence (XRF) measurements, sedimentary geochemistry, principal component analysis (PCA), complementary ensemble empirical mode decomposition (CEEMD), and autocorrelation function (ACF), the base level curves of deposition with specific geochemical meanings were reconstructed.

**Results**: XRF analysis detected 10 kinds of major elements (expressed in metallic oxides %) and 12 kinds of trace elements (in  $\mu$ g/g) with good quality, based on which principal component analysis unveiled that the Niubao Formation was mainly controlled by factors of fine terrigenous inputs, carbonate contents, redox—productivity level, and coarse terrigenous inputs. Complementary ensemble empirical mode decomposition (CEEMD) analysis on PCA results, and the further autocorrelation function (ACF) analysis on intrinsic mode functions (IMFs) revealed that the strata were characterized by prominent and multi-scale allogenic forcing, which enables the reconstruction of geochemical base level of deposition, thus the chemo-stratigraphic scheme of the Niubao Formation can be established.

**Conclusions**: The chemo-stratigraphic scheme of the Niubao Formation based on aforementioned methods and processes can be correlated with traditional lithostratigraphic schemes and sedimentary facies, but with more explicit geological meanings, which at the same time can be utilized to regional stratigraphic correlation, testifying the reliability of our chemo-stratigraphic scheme.

**Keywords**: Paleocene—Eocene Niubao Formation; principal component analysis; complementary ensemble empirical mode decomposition; autocorrelation function; autocyclicity/ allocyclicity; the Nyima Basin of Xizang (Tibet) Acknowledgements: This study was supported by the China Geological Survey Program (No. DD20190102) First author: YIN Shitao, male, born in 1996, master student; Email: 2101180046@ cugb. edu. cn

**Corresponding author**: HUANG Yongjian, male, born in 1974, associate professor, mainly work on Chemostratigraphy, Sedimentary Geochemistry, and Cretaceous Paleoclimatology of the Songliao Basin; Email: huangyj@ cugb. edu. cn

Manuscript received on: 2020-09-01; Accepted on: 2021-01-22; Network Published on: 2021-02-20 Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 03. 00 \* Edited by: LIU Zhiqiang