



移动阅读

陈云, 伊海生, 陈璐洁, 等, 2023. 青藏高原古近系牛堡组三段天文周期旋回分析及古湖平面演化研究: 以尼玛盆地尼1井为例[J]. 沉积与特提斯地质, 43(3): 555-564. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.09003

CHEN Y, YI H S, CHEN L J, et al., 2023. Astronomical cycles analysis and paleolake level evolution characteristics of Paleogene upper Niubao Formation: A case study of the Ni-1 well in Tibetan Plateau[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(3): 555-564. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.09003

青藏高原古近系牛堡组三段天文周期旋回分析及古湖平面演化研究: 以尼玛盆地尼1井为例

陈云¹, 伊海生², 陈璐洁³, 伍新和⁴, 唐闻强², 汪锐⁴, 杨芸³, 张承志³

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059;
3. 中国石油青海油田分公司, 甘肃 敦煌 736202; 4. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 海淀 100083)

摘要: 青藏高原中部尼玛盆地是一个形成于班公湖-怒江缝合带之上的新生代陆相裂谷盆地。交通不便和勘探程度较低等因素导致其高精度沉积旋回特征和地层学一直鲜有研究。尼1井是盆地内第一口地质探井, 通过对该井古近系牛堡组三段的自然伽马测井曲线进行频谱分析, 证实了天文轨道周期对盆地内湖相地层的沉积具有显著影响。滤波分析显示牛堡组三段保存了41个短偏心率(~100 kyr)周期, 76个斜率(~54 kyr)周期和178个岁差(~23 kyr)周期, 平均沉积速率为92.03 m/Ma, 沉积时限~4.1 Myr。此外, 结合Fischer图解与总有机碳含量的变化趋势, 确定牛堡组三段湖平面经历了1次长周期的升降变化过程。综合分析, 认为尼玛盆地优质烃源岩的形成主要受天文旋回周期影响下的湖平面变化所控制。

关键词: 尼玛盆地; 米兰科维奇旋回; 频谱分析; 湖平面演化; 烃源层分布

中图分类号: P532

文献标识码: A

Astronomical cycles analysis and paleolake level evolution characteristics of Paleogene upper Niubao Formation: A case study of the Ni-1 well in Tibetan Plateau

CHEN Yun¹, YI Haisheng², CHEN Lujie³, WU Xinhe⁴, TANG Wenqiang², WANG Rui⁴, YANG Yun³, ZHANG Cheng-zhi³

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Qinghai oilfield Company, Petro China, Dunhuang 736202, China; 4. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China)

Abstract: The Nyima Basin in the central Tibetan Plateau is a Cenozoic terrestrial rift basin located over the Bangong-Nujiang suture zone. The Ni-1 well is the first geological exploration well in the Nyima Basin. Based on the spectrum analysis data of the natural gamma logging curves of the Paleogene upper Niubao Formation from the Ni-1 well, it is confirmed that the significant influence of astronomical orbital periods on the deposition of lacustrine strata in the Nyima Basin. Filter analysis shows that the upper Niubao Formation has preserved 41 short eccentricity (~100 kyr) cycles, 76 obliquity (~54 kyr) cycles and 178 precession (~23 kyr) cycles, with an average sedimentation rate of 92.03 m/Ma and a sedimentation time limit of ~4.1 Myr. In addition, combined the

收稿日期: 2021-07-28; 改回日期: 2021-09-27; 责任编辑: 郭秀梅

作者简介: 陈云(1991—), 博士, 主要从事沉积学及古环境方面的研究。E-mail: chenyun4619@163.com

资助项目: 国家自然科学基金项目(4157020610)

change trends of Fischer diagram and total organic carbon contents, it is suggested that the lake levels of the upper Niubao Formation experienced once ascending-descending fluctuations. It is concluded that the formation of high-quality hydrocarbon source rocks in the Nyima Basin is mainly controlled by changes of lake levels induced by astronomical cycles.

Key words: Nyima Basin; milankovitch cycles; spectrum analysis; lake level evolution; source rock layers distribution

0 引言

尼玛盆地位于青藏高原腹地,自然环境恶劣,交通条件极差,长期以来研究程度较低(王成善等, 2001, 2006; 薛光琦等, 2005; 张大伟, 2011)。近年来在尼玛盆地湖相地层中发现了多处沥青显示及油页岩带,显示出良好的油气勘探前景。详细的沉积旋回研究是含油气盆地研究中的重要组成部分(程日辉等, 2008; 付文钊等, 2013),对预测含油气盆地的生储盖组合具有重要的指示作用,但与海相盆地相比,湖相盆地旋回变化的沉降中心和海域迁移更加快速导致其研究更加困难(Plyusnina et al., 2016),也阻碍了对古湖泊演化和陆相盆地油气勘探的理解。

米兰科维奇理论指出地球轨道的周期性变化会引起太阳平均辐照率的周期性变化,进而引起地球气候的周期性变化,且这些气候变化信息被沉积物所记录保存(Milankovitch, 1941; Idnurm and Cook, 1980; Berber et al., 1989),常被用来反演地质历史时期的古气候演化(Laskar et al., 2004; 吴怀春等, 2008; Huang et al., 2010),在湖相地层的旋回识别及湖平面变化的研究中也得到了广泛应用(Shi et al., 2018; Zhang et al., 2019; Huang et al., 2021)。本文以西藏中部尼玛盆地古近系牛堡组为研究对象,基于自然伽马(GR)测井曲线,对牛三段的湖相地层进行研究,并探讨沉积湖盆的湖平面变化与总有机碳含量(TOC)的变化趋势,初步建立牛三段天文年代标尺及旋回地层层序和古湖平面演化特征,为尼玛盆地的油气勘探研究提供新的资料。

1 区域地质概况

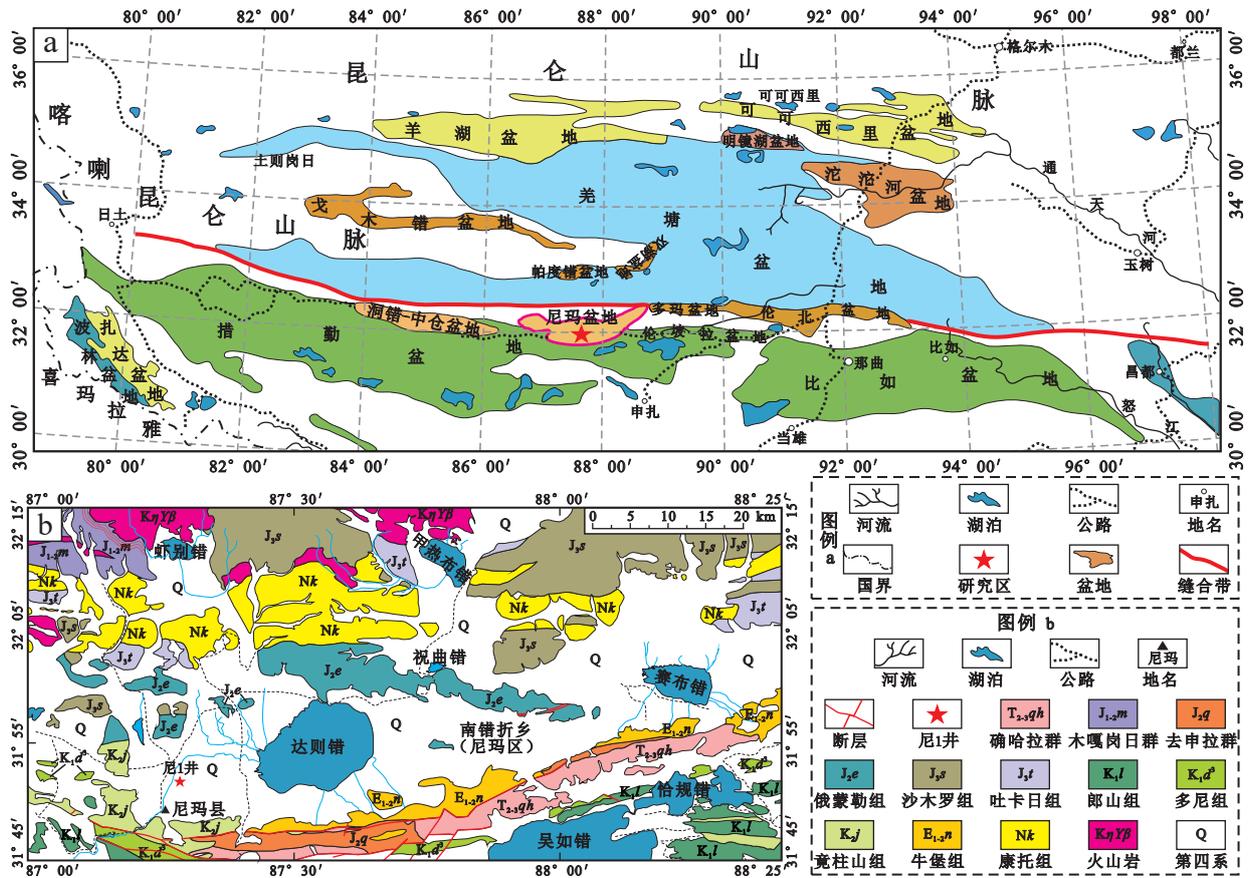
尼玛盆地位于青藏高原中部北纬 $31^{\circ}40'$ ~ $32^{\circ}20'$,东经 $87^{\circ}00'$ ~ $88^{\circ}30'$ 之间,是一个形成于班公-怒江缝合带之上的新生代陆相裂谷盆地,东连伦坡拉盆地,西接洞错-中仓盆地(图1a),盆地内构造复杂,总体上具有两坳一隆的构造格架,即北部坳陷、南部坳陷和中央隆起(卢书炜等, 2003; Kapp et al., 2007; Decelles and Kapp, 2007; Wang et al.,

2011),新生代地层发育,沉积了古近系牛堡组(E_{1-2n})、新近系康托组(N_{1k})及第四系(Q)地层,下伏上白垩统竞柱山组(K_j)、下白垩统多尼组(K_d)、上侏罗统沙木罗组(J_{3s})、中—下侏罗统木嘎岗日群(J_{1-2mg})、上三叠统确哈拉群(T_{3qh})等地层(河南省地质调查院, 2002; 陈云, 2018)(图1b)。

尼玛盆地牛堡组地层主要为一套浅湖相杂色泥岩、页岩、碳酸盐岩及砂岩组合,地层可分为三段,自下而上依次为牛堡组一段、二段和三段,牛堡组一段为一套紫红色砂岩,局部夹灰绿、紫红色泥岩,与中生界下伏地层呈不整合接触,地震资料显示其最大厚度达1300 m;牛二段为一套灰黑色泥岩夹页岩沉积,局部见油页岩及粉细砂岩,沉积厚度达1000 m;牛三段为灰色、灰绿色泥岩夹泥灰岩及粉砂岩,厚度大于1000 m,岩性变化明显,是本次研究的主要层位(马立祥等, 1996; 孙涛等, 2012; 胡济民, 1995)。钻井资料和露头显示,第三系的沉积相类型主要为滨浅湖相、半深湖至深湖相及冲积扇相和洪积扇相沉积,牛堡组下段为偏干旱气候环境下的湖相沉积,上段为偏潮湿气候环境的湖相沉积;其中,牛三段为高水位体系域,沉积相类型有滨浅湖相、半深湖相和扇三角洲相气候环境向偏干旱环境转化,湖平面相对下降,沉积物略偏粗红(王开发等, 1975; 马立祥等, 1996; 赵帅等, 2019)。产孢粉化石、轮藻化石及介形虫化石(王开发等, 1975; 西藏自治区地质矿产局, 1993; 夏代祥等, 1997; 王波明等, 2009)。地震资料显示尼1井地区沉积地层产状平整,褶皱不发育,未发生大规模构造运动,且古近系牛堡组地层发育完整未见缺失,岩性变化明显,是理想的研究对象。

2 数据采集与分析测试

地层中只要符合采集密度的地球化学数据或地球物理数据,均可用于米兰科维奇旋回地层学的研究(Abels et al., 2010; 尹青等, 2015),并且米氏旋回广泛分布于河流、湖泊和深海沉积物的地质记录中,而自然伽马曲线由于其具等间距、连续、高



(a) 青藏高原盆地分布简图及研究盆地位置; (b) 尼玛盆地地层分布示意图。

图 1 青藏高原盆地分布位置及研究区地层

Fig. 1 Cenozoic basins in Tibet Plateau and the location of Nyima Basin (a) and stratigraphic distribution of Nyima Basin (b)

分辨率等特点,因此可作为良好的米兰科维奇旋回检测资料(李凤杰等,2007;李堃宇等,2018;唐闻强等,2020)。

本文选取盆地内尼 1 井自然伽马测井曲线和岩屑样品 TOC 数据作为分析样本。尼 1 井自然伽马曲线采样间隔 0.125 m,由西藏自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队完成,首先连接并调试自然伽马测井仪(ZGJ-SL 自然伽马测井仪),然后将探测器(闪烁计数管)放入井中,地层中的伽马射线穿过泥浆进入探测器,探测器将伽马射线转化为电脉冲信号,经放大器、电缆传输至地面仪器,最终形成自然伽马测井曲线,原始自然伽马曲线因噪声及环境的影响,需要通过 Past 软件进行预处理,以排除异常点。总有机碳(TOC)测定由四川省煤田地质局实验中心完成,首先将块样烘干粉碎至 0.2 mm 以下,用稀盐酸浸泡(8 h)除去样品中的无机碳,然后在燃烧管内用高温氧气流(99.999%)充分燃烧,使总有机碳全部转化为二氧化碳,最后将

载有 CO_2 的气流通过红外检测器/热导检测器检测出 CO_2 的含量,最终计算总有机碳的含量。

相关地震资料及钻井过程中的实际情况,显示该井地层连续未见断层。钻遇地层自上而下分别为第四系表土沉积、新近系及古近系地层。其中牛三段介于 136.5~513 m,岩性组合以砂岩、砂质泥岩、泥质砂岩和泥岩为主,旋回变化良好(图 2),是本次研究的重点层位。该段自然伽马值介于 26.37~335.35API 之间,平均值 63.79 API,自然伽马低值与砂岩、含泥砂岩对应,高值与泥岩及含砂泥岩相对应,TOC 含量介于 0.17%~0.75% 之间,平均值为 0.37%,且下部 TOC 含量相较于上部相对较高。(图 2)。测井数据经过西藏地质六队的测井专业人员处理与校对,准确无误。值得说明的是,380 m 附近的 GR 极大值并非数据异常点,这种类似的 GR 异常高值在柴达木盆地的上干柴沟组中普遍存在,并作为勘探开发中的重要分层标志。

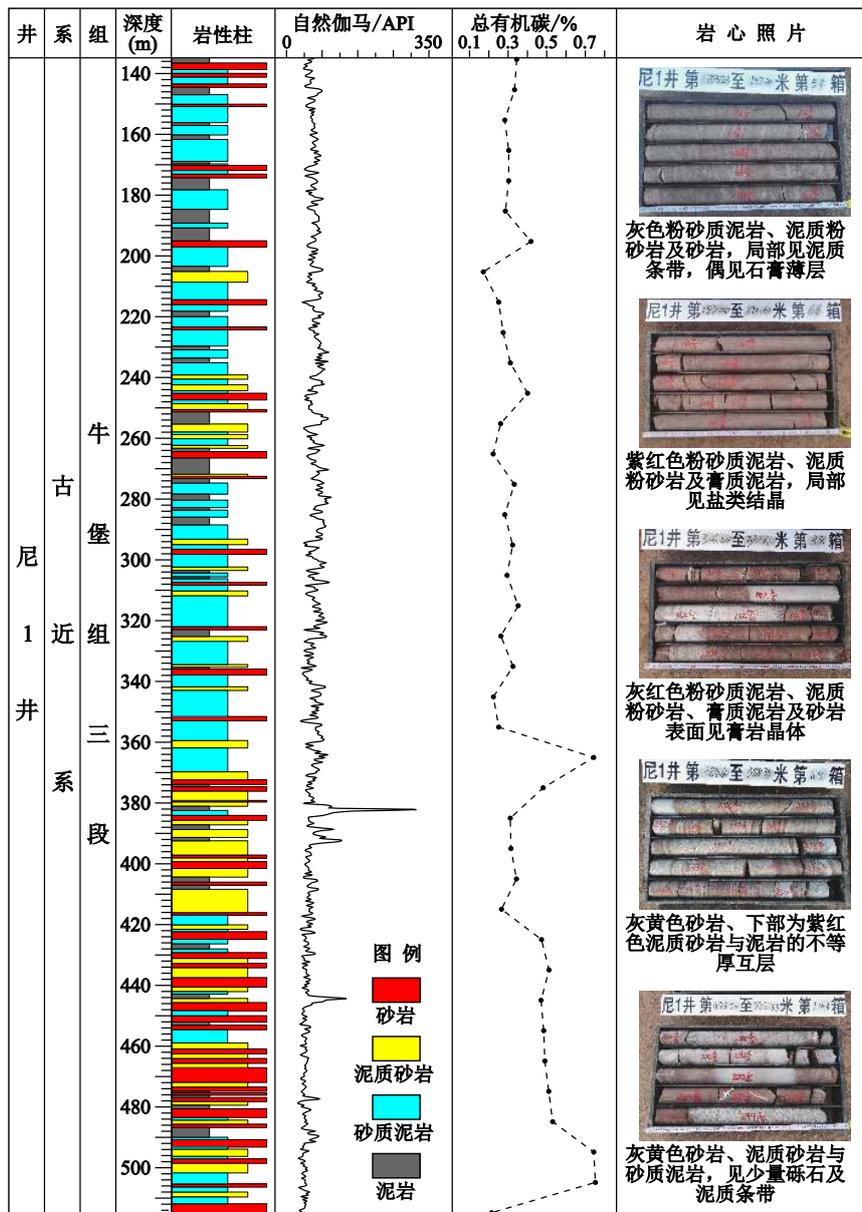


图2 尼玛盆地西部地区尼1井牛堡组三段综合柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of the upper Niubao Formation in well Ni-1, Western Nyima Basin

3 牛三段旋回地层及地球化学分析特征

3.1 自然伽马曲线频谱分析

随着超算解析技术的不断进步，傅里叶变换、数字滤波及小波分析被引入米兰科维奇旋回分析中，极大地提高了米氏旋回分析的准确性，使得地层记录的气候变化信息被逐步揭示(Hays et al., 1976; Abels et al., 2010; Meyers, 2019)。首先运用 Past 软件导入自然伽马曲线数据(等间距 0.125 m)，选取 REDFIT spectral 模块进行计算，得出频率、相对强度及置信度数据，然后将数据导入 Excel 表格，

导出频率和相对强度曲线并以 0.1(置信度 90%)的显著性水平为参考依据进行分析。最后以 Matlab 软件对天文周期轨道旋回进行带通滤波处理，得到相应的旋回曲线(带通滤波采用 Matlab 软件进行自主编程)。由图 3 可知，牛三段的自然伽马数据所对应的主要频率点(置信度 90%)的频率值依次为 0.108 75、0.193 63、0.278 51、0.466 84、0.578 25。波长为频率的倒数，因此对应波长为 9.195 4、5.164 5、3.590 5、2.142 1、1.729 4，旋回波长的实质为沉积地层中沉积物的沉积厚度，由此可知古近系牛三段各旋回的沉积厚度分别为 9.195 4 m、5.164 5

m、3.590 5 m、2.142 1 m 和 1.729 4 m。

3.2 旋回厚度及沉积速率分析

古近系的天文轨道周期,包括偏心率短周期(100 kyr)、斜率长周期(54 kyr)和短周期(41 kyr)、岁差长周期(23 kyr)和短周期(19 kyr),各周期理论比值为 1:0.54:0.41:0.23:0.19。而在尼 1 井牛三段中识别出的各级旋回周期比值为 1:0.56:0.39:0.23:0.19,该比值与古近系天文轨道周期理论比值非常接近,误差率依次为 4.01%、4.76%、1.28% 和 1.02%,误差均未超过 5%(表 1),因此可知,尼玛盆地西部地区牛三段的各级旋回沉积厚度与天文轨道周期是相互对应的。根据各天文轨道周期的频率,可得出偏心率短周期,斜率长、短周期和岁差长、短周期的平均沉积厚度分别为:91.95 m/Ma、91.96 m/Ma、92.06 m/Ma、93.14 m/Ma 和 91.02

m/Ma,总平均沉积速率为 92.03 m/Ma。由于尼玛盆地的相关研究较少,缺乏精确的年龄约束,而相邻的轮坡拉盆地研究较为完善,对古近系牛堡组地层研究程度相对较高且对该套地层做了大量有关天文旋回的研究,因此以相邻的伦坡拉盆地作为参考(马立祥等,1996;秦建中,2006;尹青等,2015)。相关研究显示伦坡拉盆地牛堡组的平均沉积速率为 101.2 m/Ma(马鹏飞等,2013),与本次的研究结果相近,因此认为尼玛盆地牛堡组上段的沉积速率结果是可信的。

此外,研究中利用 Matlab 软件对自然伽马曲线进行带通滤波处理,分别得到了 100 kyr、54 kyr 和 23 kyr 周期对应的理论旋回分布图(图 4),可知偏心率控制的旋回个数为 41 个,斜率控制的旋回个数为 76 个,岁差控制的旋回个数为 178 个。不

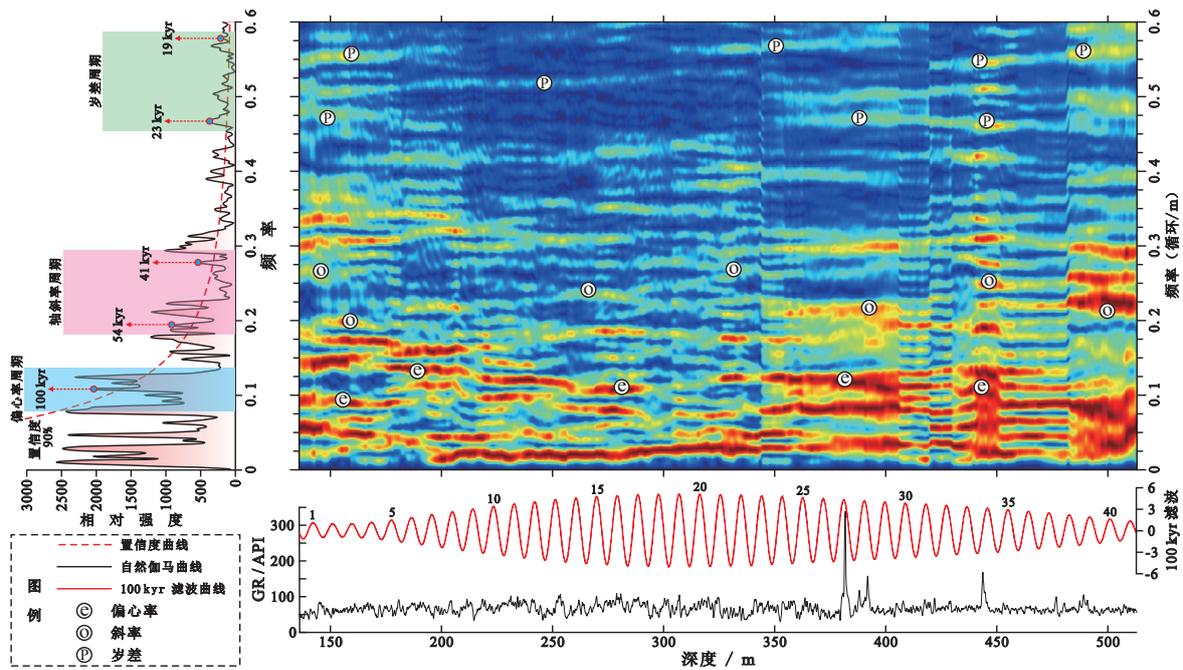


图 3 尼玛盆地西部地区牛堡组三段自然伽马曲线频谱分析

Fig. 3 Spectrum analysis of natural gamma curve of the upper Niubao Formation in western Nyima Basin

表 1 尼玛盆地牛堡组三段自然伽马测井曲线频谱分析结果及比例关系

Table 1 Spectrum analysis results and proportional relations of natural gamma curve of upper Niubao Formation in Nyima Basin

井号	频率	厚度/m	厚度比值	理论比值	误差率	轨道周期/kyr
尼1井	0.108 75	9.195	1	1	/	偏心率短周期100
	0.193 63	5.164	0.56	0.54	4.01%	斜率长周期54
	0.278 51	3.591	0.39	0.41	4.76%	斜率短周期41
	0.466 84	2.142	0.23	0.23	1.28%	岁差长周期23
	0.578 25	1.729	0.19	0.19	1.02%	岁差短周期19

同轨道周期的沉积时间控制着相应的沉积旋回,即不同轨道周期的单个旋回周期代表了其单次的沉积时间,由此可知牛堡组三段的偏心率沉积时间为 4.1 Ma、斜率沉积时间为 4.104 Ma、岁差沉积时间为 4.094 Ma,平均沉积时间为 4.099 Ma,即牛堡组三段总沉积时间为 4.1 Ma。

3.3 总有机碳含量分析

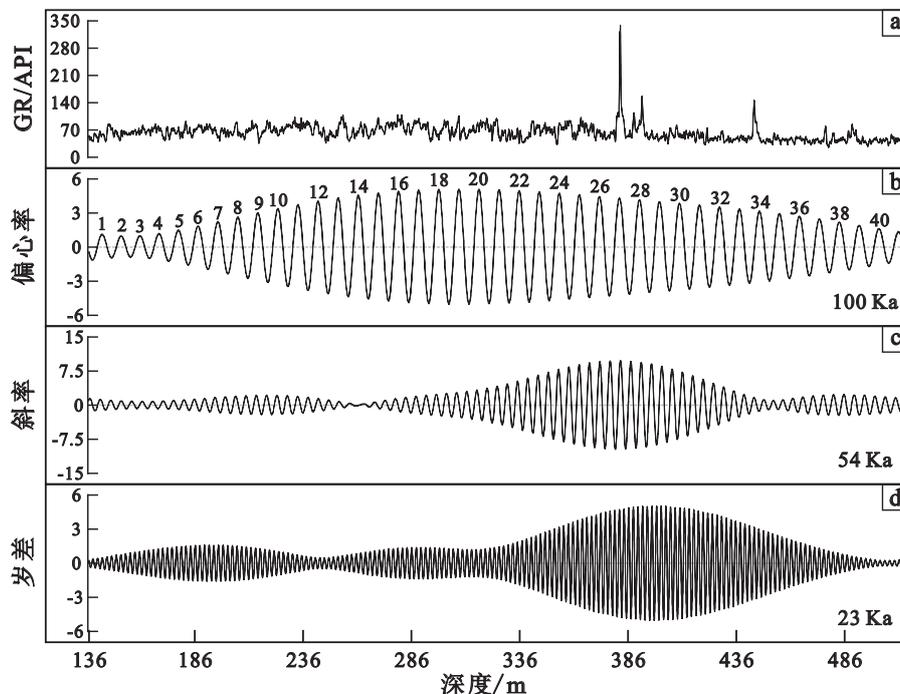
有机质丰度是判别烃源岩能否生烃的基础指标(Cluff and Barrows, 1982;陈义才等, 2007),目前比较常用的烃源岩有机质丰度评价指标有总有机碳含量(TOC)、氯仿沥青“A”、生烃潜量(S_1+S_2)等,TOC作为有机质丰度的最基础指标其含量的高低直接影响油气资源的前景评价和勘探规模。牛堡组作为青藏高原中部新生代陆相盆地的主要生烃层位,在已经发现的油气及地表沥青显示中基本是牛堡组油源(伦坡拉盆地以油气显示及工业油流为主,尼玛盆地以地表沥青显示为主),其特征为烃源岩层厚度大,泥质含量高,有效烃源岩主要发育在洼陷区。尼1井牛三段 TOC 分析采用等间距采样法,采样间隔 10 m/件,共采集样品 39 件,岩性以泥岩、砂质泥岩为主,样品颜色均呈灰黑色。对 39 件样品进行有机地化分析,结果显示尼1井样

品总有机碳含量(TOC)的分布范围为 0.17%~0.75%,平均值为 0.35%。自上而下 TOC 含量呈现明显的两段式分布特征,第一段 TOC 含量较高,为 0.21%~0.75%,平均值为 0.43%,深度为 365~515 m;第二段 TOC 含量较低,为 0.17%~0.42%,平均值为 0.29%,深度为 135~355 m。显示牛三段下部优质烃源岩更为发育。

4 讨论

4.1 湖平面演化特征

湖平面的升降变化直接影响湖盆的可容纳空间,因此可以利用 Fischer 图解对湖盆可容纳空间的大小进行分析,进而反演湖平面的变化特征。Fischer 图解以井深为横坐标,以每个旋回的平均厚度累计偏差为纵坐标(龚大兴等, 2011;尹青等, 2015),最后得出旋回厚度累计偏差曲线,其平均旋回厚度为 0.659 m,主旋回厚度是 30.78 m。按照先前计算的沉积速率,30.78 m 代表了~334 kyr 的旋回周期。而这一周期对于 405 kyr 的长偏心率周期似乎误差较大,这个~334 kyr 极有可能是~95 kyr 和~131 kyr 的调幅周期(图 5)。因此,可以确定的是偏心率的变化控制了湖平面的变化。然而



(a) 原始自然伽马曲线, GR/API; (b) 牛堡组三段偏心率(100 kyr)带通滤波曲线及旋回个数; (c) 牛堡组三段斜率(54 kyr)带通滤波曲线及旋回个数; (d) 牛堡组三段岁差(23 kyr)带通滤波曲线及旋回个数。

图4 尼玛盆地西部牛堡组三段高分辨率天文年代标尺

Fig. 4 High-resolution astronomical timescale of the upper Niubao Formation in western area, Nyima Basin

偏心率本身并不对气候产生调控作用,其主要是调节岁差变化幅度来影响气候(Huang et al, 2010; 石巨业等, 2019),因此,选取了岁差(23 kyr)滤波曲线变化趋势与之进行对比。

通过对尼玛盆地西部牛堡组三段进行 Fischer 图解分析,结合米兰科维奇旋回特征,可以得到具有天文年代标尺的湖平面变化趋势图(图 5),对比发现,自然伽马残差及累计残差曲线与总有机碳(TOC)趋势曲线具有高度一致性。结果显示,牛堡组三段湖平面经历了一次相对长周期的上升与下降过程,其中湖平面上升过程经历了 1.4 Myr,下降过程经历了 2.7 Myr;经历了五次短周期的上升与下降过程,湖平面上升,TOC 含量升高,湖平面下降,TOC 含量降低,二者变化趋势完全一致。引起这种变化的原因可能是当湖平面处于上升阶段时,湖盆的可容空间变大,沉积物退积,沉积速率降低,并且河流补给加强,营养盐大量输入,水体营养盐的富集和相对良好的保存条件(氧化还原界面上升),最终形成优质烃源岩层;而当湖平面下降时,湖盆的可容空间变小,沉积物进积,沉积速率增加,河流补给减弱,水体的营养盐输入减弱且氧化还原界面下降,形成了差或非烃源岩层。

4.2 烃源岩发育的控制因素

有机质富集层存在“烃源岩保存条件”与“有机质生产力”两方面的主控因素(Demaison

and Moore, 1980; Calvert, 1987; Tyson and Pearson, 1991),二者共同控制着优质烃源岩层的发育。尼 1 井牛三段 GR 带通滤波、Fischer 图解与 TOC 含量变化趋势显示天文周期旋回对湖平面和优质烃源岩层的发育起着控制作用。GR、氧同位素等的带通滤波曲线作为气候演化的指示标志之一,其振幅的大小与温度之间存在正相关关系(Zachos, 2001),一些证据也显示在地质历史中冰期普遍发育于偏心率极小的低振幅时期(Huang, 2010)。

研究区湖平面的变化主要受偏心率的控制,当地球轨道偏心率较大时(趋于椭圆),岁差起伏较大(带通滤波高振幅),四季变化明显,北半球冬季变短,夏季变长,导致海陆温差增大,陆地迅速升温形成低压区,而海洋缓慢升温形成高压区,海风作用加强并携带大量水汽输入陆地,使陆地降雨量增加,大量的降雨一方面加强了陆源营养盐输入湖盆,提高了湖盆初级生产力,另一方面又使湖平面升高(氧化还原界面上升),最终促进了优质烃源岩的形成(图 6A);反之,地球轨道偏心率较小时(趋于正圆),岁差起伏较小(带通滤波低振幅),四季变化不明显,海陆温差减小,海风作用减弱,导致陆地降水减弱,营养盐输入和湖平面也随之下降,不利于有机质的保存,最终在偏心率较小时形成了差或非烃源岩层(图 6b)。综上所述,当偏心率增大,北半球冬、夏季太阳辐射的变化增大了海陆热力性质

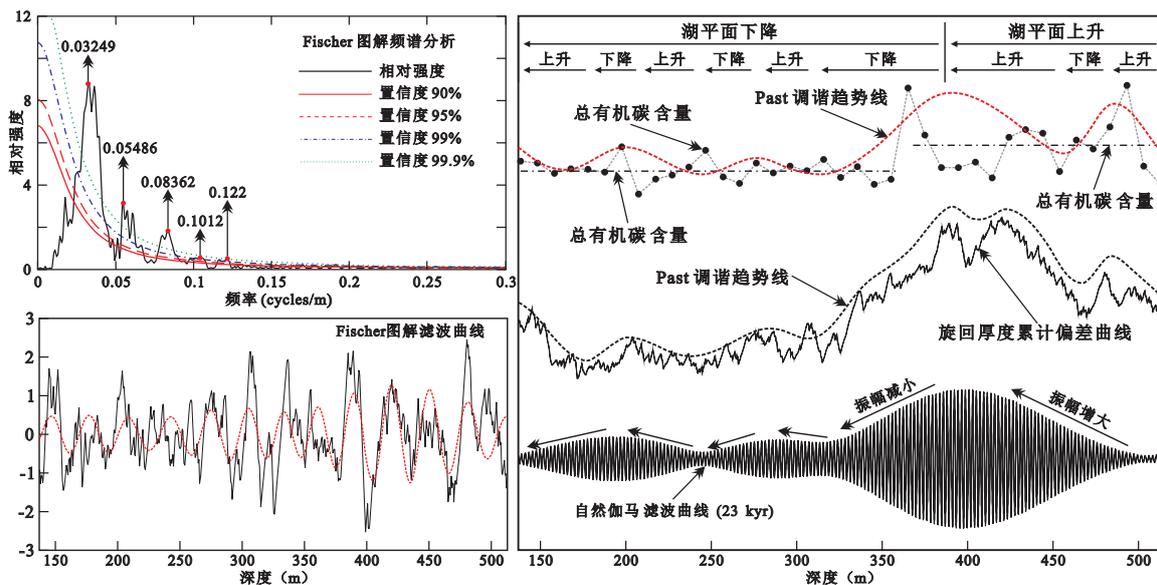
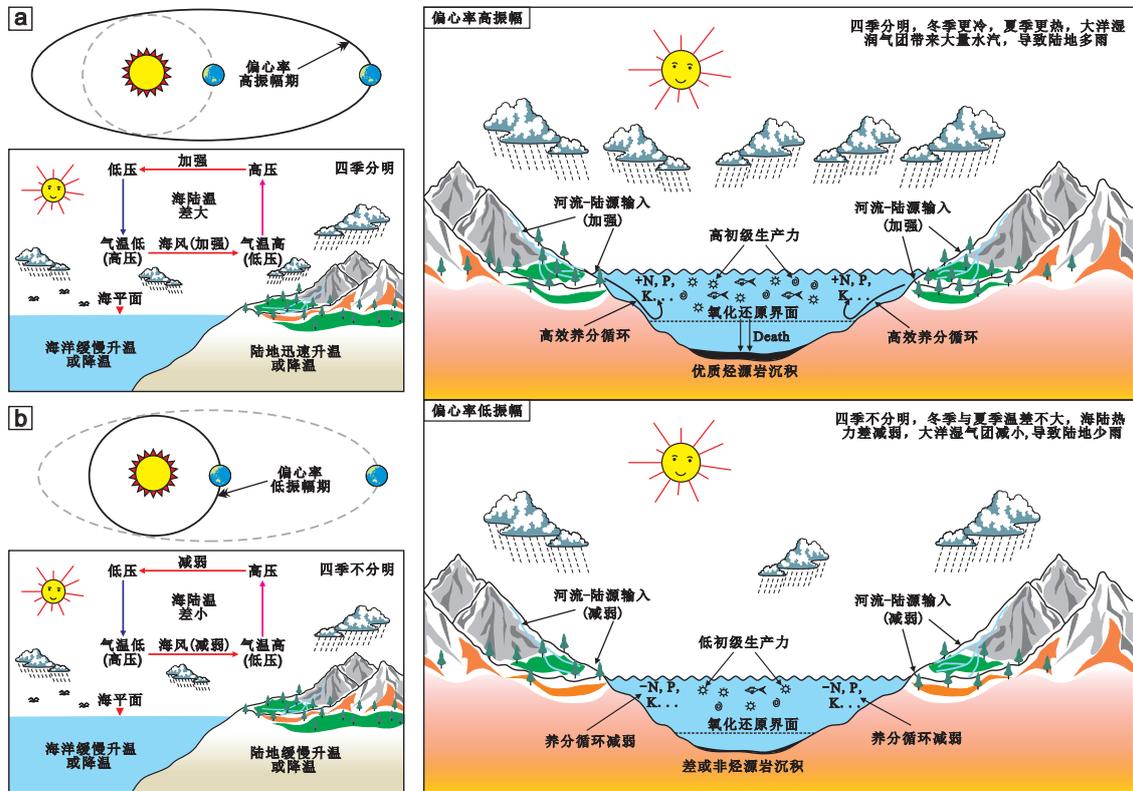


图 5 尼玛盆地西部地区牛堡组三段 Fischer 图解频谱分析(左)及湖平面变化趋势图(右)

Fig. 5 The Fischer plots spectrum analysis (left) and the changing trend of lake level of the upper Niubao Formation in the western Nyima Basin (right)

差异,从而增强了季风的势力,为其带来丰沛的降雨使内陆湖盆扩张,湖平面上升,有机质得以更好

地保存;反之,当偏心率减小,这种气候效应也会相应减弱。



(a) 偏心率高振幅期湖盆沉积模式图; (b) 偏心率低振幅期湖盆沉积模式图。

图 6 尼玛盆地西部地区牛堡组三段优质烃源岩发育模式图

Fig. 6 Development pattern of high quality source rocks in the upper of Niubao formation in the upper of Niubao formation in Western area, Nyima Basin

5 结论

(1) 通过对尼 1 井自然伽马曲线进行频谱分析,在牛堡组三段地层中识别出米兰科维奇旋回,表明天文轨道周期旋回对尼玛盆地古近系牛堡组湖相沉积物的沉积过程具有明显影响。

(2) 利用频谱分析方法,在古近系牛堡组三段地层中共识别出高频沉积旋回 41 个,旋回厚度介于 9.102~9.314 m 之间,平均旋回厚度为 9.203 m,平均沉积速率为 92.03 m/Ma,沉积时限为 4.1 Myr。

(3) 根据 Fischer 图解,结合天文年代标尺及有机碳含量变化趋势,表明尼玛盆地古近系牛堡组三段经历了一次明显的长周期的湖平面上升 (1.4 Myr) 和下降 (2.7 Myr),且三者之间就有很好的相关性。综合分析,认为牛三段 TOC 含量的变化是受天文旋回周期影响下的湖平面变化所控制的。

致谢: 两位匿名审稿专家对论文修改提出了建设性的意见,在此表示衷心感谢。

References

- Abels H A, Aziz H A, Krijgsman W, et al., 2010. Long-period eccentricity control on sedimentary sequences in the continental Madrid Basin (middle Miocene, Spain) [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 289 (1-2): 220-231.
- Berber A, Loutre M F, Dehant V, 1989. Pre-Quaternary Milankovitch frequencies [J]. *Nature*, 342 (9): 133.
- Calvert S E, 1987. Oceanographic controls on the accumulation of organic matter in marine sediments [C]// Brook J, Fleet A J, Marine petroleum source rock. London: Blackwell Scientific, 137-151.
- Chen Y C, Shen Z M, Luo X P, 2007. *Petroleum & Gas Organic Geochemistry* [M]. Beijing: Science Press.
- Chen Y, 2018. Sedimentary Characteristics and Evaluation of Hydrocarbon Potential of Upper Jurassic Shamuluo Formation in the Nima Area, Tibet [D]. Chengdu University of Technology.
- Cheng R H, Wang G D, Wang P J. 2008. Sedimentary Cycles of the Cretaceous Quantou—Nenjiang Formations and Milankovitch

- Cycles of the South Hole of the SLCORE- I in the Songliao Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82 (1) : 55-64.
- Cluff R M, Barrows M H, 1982. Hydrocarbon generation and source rock evaluation (origin of petroleum III) [M]. Tulsa Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists.
- Decelles P G, Kapp P, 2007. Late Cretaceous to Mid-Tertiary Basin Evolution in the Central Tibetan Plateau: Changing Environments in Response to Tectonic Partitioning, Aridification, and Regional Elevation Gain[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 119 (5-6) : 654 – 680 .
- Demaison G J, Moore G T, 1980. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. *AAPG Bulletin*, 64: 1179 – 1209 .
- Fu W Z, Yu J F, Yang F J, et al., 2013. Feature extraction of Milankovitch cycle in well logs and its sedimentological significance: a case study of Jiyang depression zone[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 42 (6) : 1025 – 1032 (in Chinese with English abstract).
- Gong D X, Yi H S, Wu C H, et al., 2011. High-frequency carbonate depositional cycles and its response to the gamma ray well logging data and sea-level change in Permian Nanpanjiang Basin[J]. *Progress in Geophysics*, 26 (1) : 287 – 293 (in Chinese with English abstract).
- Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J, 1976. Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages[J]. *Science*, 194: 1121 – 1132 .
- Henan Geological Survey Institute, 2002. Regional geological survey report of the people's Republic of China (1: 250000 Nyima area) [R]. Special report on geological survey of China Geological Survey (Part A, No: H45C001003) .
- Hu J M, 1995. New insights from the study of the Lunpola Group in the Lunpola Basin, Xizang area[J]. *Zhongyong Oil & Gas Exploration*, (1) : 15 – 23 (in Chinese with English abstract).
- Huang C J, Hinnov L, Fischer A G, et al., 2010. Astronomical tuning of the Aptian Stage from Italian reference sections[J]. *Geology*, 38 (10) : 899 – 902 .
- Huang H, Gao Y, Ma C, et al., 2021. Organic carbon burial is paced by a ~173-ka obliquity cycle in the middle to high latitudes[J]. *Science Advances*, 7 (28) : 9489 – 9498 .
- Idnurm M, Cook P J, 1980. Palaeomagnetism of beach ridges in South Australia and the Milankovitch theory of ice ages[J]. *Nature*, 286: 699 – 702 .
- Kapp P, Decelles P G, Gehrels G E, et al., 2007. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nyima area of central Tibet[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 119 (7-8) : 917 – 932 .
- Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al., 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 428 (1) : 261 – 285 .
- Li F J, Zheng R C, Luo Q L, et al., 2007. Analysis of Milankovitch Cycles of the Changxing Formation in Northeastern Sichuan Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 36 (6) : 805 – 810 (in Chinese with English abstract).
- Li K Y, Yi H S, Xia G Q, 2018. Characteristics of Milankovitch Cycles of Shangyoushashan and Xiayoushashan Formations in Qigequan Area, Western Qaidam Basin Based on the Spectral Analysis of the Logging Curve[J]. *Geological Science and Technology Information*, 37 (3) : 87 – 91 (in Chinese with English abstract).
- Lu S W, Ren J D, Du F J, et al., 2003. Tectonic evolution of the Mesozoic Tethyan Ocean: An example from the Nyima region in Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 23 (3) : 35 – 39 (in Chinese with English abstract).
- Ma L X, Zhang E H, Ju J C, et al., 1996. Basic characteristics of Paleogene deposition systems tract in Lunpola Basin, XiZang (Tibet) [J]. *Journal of Earth Science*, 2: 174 – 178 (in Chinese with English abstract).
- Ma P F, Wang L C, Ran B, 2013. Subsidence analysis of the Cenozoic Lunpola basin, central Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (3) : 990 – 1002 (in Chinese with English abstract).
- Meyers S R, 2019. Cyclostratigraphy and the problem of astrochronologic testing[J]. *Earth Science Reviews*, 190 (1) : 190 – 223 .
- Milankovitch M, 1941. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem[M]. Akademie: Royale Serbe, 133: 1-633.
- Plyusnina E E, Ruban D A, Conrad C P, et al., 2016. Long-term eustatic cyclicity in the Paleogene: a critical assessment[J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 127: 425 – 434 .
- Qin J Z, 2006. Study on the petroleum resource potential in the Qiangtang Basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 28 (6) : 566 – 573 (in Chinese with English abstract).
- Shi J Y, Jin Z J, Liu Q Y, et al., 2018. Terrestrial sedimentary responses to astronomically forced climate changes during the early Paleogene in the Bohai Bay Basin, eastern China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 502, 1–12.
- Shi J Y, Jin Z J, Liu Q Y, et al., 2019. Quantitative classification of high-frequency sequences in fine-grained lacustrine sedimentary rocks based on Milankovitch theory[J]. *Oil & Gas Geology*, 6: 1205-1214.
- Sun T, Wang C S, Li Y L, et al., 2012. Characteristics and significance of sedimentary organic matter in the Paleogene of Lunpola basin, central Tibet[J]. *Geochimica*, 041 (6) : 530 – 537 (in Chinese with English abstract).
- Tang W Q, Yi H S, Yi F, et al., 2020. Characteristics of Milankovitch Cycles of Xia Ganchaigou Formations in Zhahaquan Area, Southwest Qaidam Basin, Based on the Spectral Analysis of the Logging Curve [C]//Proceedings of SPG/SEG Nanjing 2020 International Geophysical Conference, 1042-1045.
- Tyson R V, Pearson T H, 1991. Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia [C]. Oxford: Geological Society Special Publication, 58: 1–24.
- Wang B M, Zhou J S, Wen T, et al., 2009. Timing of Terrestrial Strata in Tibetan Nyima Basin and Its Significance[J]. *Natural Gas Technology*, 3 (4) : 21 – 24 (in Chinese with English abstract).
- Wang C S, Li Y L, Li Y T, 2006. Discussion on evaluation of oil and gas resources in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Petroli Sinica*, 27 (4) : 1 – 7 (in Chinese with English abstract).
- Wang C S, Yi H S, Li Y, et al., 2001. The Geological evolution and prospective oil and gas assessment of the Qiangtang Basin in Northern Tibetan Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Wang K F, Yang J W, Li Z, et al., 1975. On the tertiary spore-pollen assemblages from Lunpola Basin of XiZang, china and their

- paleogeographic significance[J]. *Chinese Journal of Geology*, 10 (4) : 366–374 (in Chinese with English abstract).
- Wang L C, Wang C C, Li Y L, et al., 2011. Organic Geochemistry of Potential Source Rocks in the Tertiary Dingqinghu Formation, Nima Basin, Central Tibet[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 34 (1) : 67–85.
- Wu H C, Zhang S H, Huang Q H, 2008. Establishment of floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation in the Songliao basin of Northeast China[J]. *Earth Science Frontiers*, 15 (4) : 159–169 (in Chinese with English abstract).
- Tibet autonomous region geological and mineral exploration and Development Bureau, 1993. Regional geology of Xizang (Tibet) Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Xia D X, Liu S K, Teng Y, et al., 1997. Stratigraphy lithostratigraphy of Xizang (Tibet) Autonomous Region [M]. Beijing: China University of Geosciences Press.
- Xue G Q, Qian H, Jiang M, 2005. Tectonic Characteristic of Mantle on the West Edge of Qinghai-Xizang Plateau-Receiver Function Inversion through West Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geological Review*, 51 (6) : 708–712 (in Chinese with English abstract).
- Yin Q, Yi H S, Xia G Q, et al., 2015. Accommodation space and Milankovitch orbit cycle sequence of the Paleogene stratigraphic frames in Lunpola basin based on the spectrum analysis of the logging curve[J]. *Progress in Geophysics*, 30 (3) : 1288–1297 (in Chinese with English abstract).
- Zachos J C, 2001. Climate Response to Orbital Forcing Across the Oligocene-Miocene Boundary[J]. *Science*, 292 (5515) : 274–278.
- Zhang R, Jin Z, Liu Q, et al., 2019. Astronomical constraints on deposition of the Middle Triassic Chang 7 lacustrine shales in the Ordos Basin, Central China[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 528: 87–98.
- Zhang D W, 2011. Potential of hydrocarbon resources and strategic research in Tibet area[J]. *China Mining Magazine*, 20 (3) : 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Zhao S, Xie X N, Liu Z R, et al., 2019. Control of Tectonic-Paleogeomorphology on Deposition System of Faulting-Subsiding Basin: A Case from the Eocene Niubao Formation in Lunpola Basin, Central Tibet[J]. *Geological Science and Technology Information*, 38 (2) : 59–70 (in Chinese with English abstract).
- 旋回的测井响应及海平面变化趋势[J]. *地球物理学进展*, 26 (1) : 287–293.
- 河南省地质调查院, 2002.1 : 25 万尼玛区幅区域地质调查报告[R]. 中国地质调查局地质调查专报 A 第 (H45C001003) 号.
- 胡济民, 1995. 西藏伦坡拉盆地伦坡拉群研究的新认识[J]. *中扬油气勘查*, (1) : 15–23.
- 李凤杰, 郑荣才, 罗清林, 等, 2007. 四川盆地东北地区长兴组米兰科维奇周期分析[J]. *中国矿业大学学报*, 36 (6) : 805–810.
- 李堃宇, 伊海生, 夏国清, 2018. 基于测井曲线频谱分析柴达木盆地西部七个泉地区上、下油砂山组米兰科维奇旋回特征[J]. *地质科技情报*, 37 (3) : 87–91.
- 卢书炜, 任建德, 杜凤军, 等, 2003. 从尼玛地区地质新资料看中特提斯洋的构造演化[J]. *沉积与特提斯地质*, 23 (3) : 35–39.
- 马立祥, 张二华, 鞠俊成, 等, 1996. 西藏伦坡拉盆地第三系沉积体系域基本特征[J]. *地球科学*, 2: 174–178.
- 马鹏飞, 王立成, 冉波, 2013. 青藏高原中部新生代伦坡拉盆地沉降史分析[J]. *岩石学报*, 29 (3) : 990–1002.
- 秦建中, 2006. 青藏高原羌塘盆地油气资源潜力分析[J]. *石油实验地质*, 28 (6) : 566–573.
- 石巨业, 金之钧, 刘全有, 等, 2019. 基于米兰科维奇理论的湖相细粒沉积岩高频层序定量划分[J]. *石油与天然气地质*, 6: 1205–1214.
- 孙涛, 王成善, 李亚林, 等, 2012. 西藏中部伦坡拉盆地古近系沉积有机质特征及意义[J]. *地球化学*, 041 (6) : 530–537.
- 唐闻强, 伊海生, 伊帆, 等, 2020. 基于测井曲线频谱分析柴西南扎哈泉地区下干柴沟组米兰科维奇旋回特征[C]//SPG/SEG 南京 2020 年国际地球物理会议, 1042-1045.
- 王波明, 周家声, 闻涛, 等, 2009. 西藏尼玛盆地陆相地层归属及其油气意义[J]. *天然气技术*, 3 (4) : 21–24.
- 王成善, 李亚林, 李永铁, 2006. 青藏高原油气资源远景评价问题[J]. *石油学报*, 27 (4) : 1–7.
- 王成善, 伊海生, 李勇, 等, 2001. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 王开发, 杨蕉文, 李哲, 等, 1975. 根据孢粉组合推论西藏伦坡拉盆地第三纪地层时代及其古地理[J]. *地质科学*, 10 (4) : 366–374.
- 吴怀春, 张世红, 黄清华, 2008. 中国东北松辽盆地晚白垩世青山口组浮动天文年代标尺的建立[J]. *地学前缘*, 15 (4) : 159–169.
- 西藏自治区地质矿产局, 1993. 西藏自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 夏代祥, 刘世坤, 滕云, 等, 1997. 西藏自治区岩石地层[M]. 北京: 中国地质大学出版社.
- 薛光琦, 钱辉, 姜枚, 2005. 青藏高原西缘上地幔构造特征-穿越西昆仑造山带的接收函数反演[J]. *地质论评*, 51 (6) : 708–712.
- 尹青, 伊海生, 夏国清, 等, 2015. 基于测井曲线频谱分析在伦坡拉盆地古近系米氏旋回层序及可容空间变化趋势中的研究[J]. *地球物理学进展*, 30 (3) : 1288–1297.
- 张大伟, 2011. 西藏地区油气资源潜力与战略选区[J]. *中国矿业*, 20 (3) : 1–5.
- 赵帅, 解习农, 刘中戎, 等, 2019. 古地貌对断陷盆地沉积体系的控制作用: 以青藏高原伦坡拉盆地始新统牛堡组为例[J]. *地质科技情报*, 38 (2) : 59–70.

附中文参考文献

- 陈义才, 沈忠民, 罗小平, 2007. 石油与天然气有机地球化学 [M]. 北京: 科学出版社.
- 陈云, 2018. 西藏尼玛地区上侏罗统沙木罗组沉积特征及生烃潜力评价[D]. 成都理工大学.
- 程日辉, 王国栋, 王璞珂, 2008. 松辽盆地白垩系泉段—三嫩二段沉积旋回与米兰科维奇周期[J]. *地质学报*, 82 (1) : 55-64.
- 付文钊, 余继峰, 杨锋杰, 等, 2013. 测井记录中米氏旋回信息提取及其沉积学意义—以济阳拗陷区为例[J]. *中国矿业大学学报*, 42 (6) : 1025–1032.
- 龚大兴, 伊海生, 吴驰华, 等, 2011. 南盘江盆地二叠系高频沉积