



移动阅读

汪素风, 陈云, 伊海生, 等, 2023. 西藏尼玛盆地古近纪湖相油页岩正构烷烃特征及其古环境与古气候意义[J]. 沉积与特提斯地质, 43(3): 542–554. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.10001

Wang S F, Chen Y, Yi H S, et al., 2023. The characteristics of n-alkanes from the Palaeogene lacustrine oil shale in the Kanggale area, Nyima Basin, and their paleoenvironment and Paleoclimate significance[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(3): 542–554. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.10001

西藏尼玛盆地古近纪湖相油页岩正构烷烃特征及其古环境与古气候意义

汪素风¹, 陈云¹, 伊海生^{1*}, 唐闻强^{1,2}, 周羽漩^{1,3}, 崔荣龙⁴, 伍新和⁵,
白蓉², 杨芸⁴

(1. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 中国石油西南油气田分公司, 四川 成都 610051;
3. 川渝共建古生物与古环境协同演化重庆市重点实验室, 重庆 400700; 4. 中国石油青海油田分公司, 甘肃 敦煌
736202; 5. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 海淀 100083)

摘要: 尼玛盆地地处青藏高原中部特殊区域, 自新生代以来沉积了大套连续的湖相暗色油页岩, 其富含生物分子化石, 对重建青藏高原古气候和古环境具有重要意义。本文通过对尼玛盆地古近系牛堡组康嘎勒剖面正构烷烃及相关参数分布特征进行研究, 结果显示, 剖面油页岩正构烷烃分布从底到顶由单峰前峰型向单峰后峰型过渡, 具2个旋回周期; 碳优势指数相对稳定, 但 TAR、ACL、 P_{aq} 及 $nC_{\leq 21}/nC_{\geq 25}$ 变化较大, 表明湖泊沉积有机质由内源为主的低等藻类向高等水生植物和外来陆生高等植物转变, 且区域气候环境由温凉湿润向炎热干旱逐步演化。综合分析认为, 尼玛盆地在始新世的气候变化在很大程度上是受西风环流和季风系统的共同影响。且西风环流和季风的强度变化与全球气候存在一定的关系。即全球变暖时, 西风环流势力减弱, 西风环流和残余洋水汽为高原中部提供的有效降水减少, 气候相对干旱; 而在全球降温时, 西风环流和印度季风增强, 残余洋水汽的叠加又为高原中部提供了充足的有效降水, 气候湿润。

关键词: 正构烷烃; 油页岩; 西风环流; 印度季风; 尼玛盆地

中图分类号: P532

文献标识码: A

The characteristics of n-alkanes from the Palaeogene lacustrine oil shale in the Kanggale area, Nyima Basin, and their paleoenvironment and Paleoclimate significance

WANG Sufeng¹, CHEN Yun¹, YI Haisheng^{1*}, TANG Wenqiang^{1,2}, ZHOU Yuxuan^{1,3}, CUI Ronglong⁴, WU Xinhe⁵, BAI Rong², YANG Yun⁴

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Petrochina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu 610051, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Paleontology and Paleoenvironment Co-evolution (Sichuan-Chongqing Joint Construction), Chongqing 400700, China; 4. Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang 736202, China; 5. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China)

收稿日期: 2022-08-04; 改回日期: 2022-08-04; 责任编辑: 郭秀梅; 科学编辑: 崔晓庄

作者简介: 汪素风 (1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为古气候与古环境。E-mail: wsf19113272354@163.com

通讯作者: 伊海生 (1959—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为沉积学。E-mail: yhs@cdu.edu.cn

资助项目: 尼玛盆地南部拗陷沉积构造调查 (DD2016160-YQ17W01)

Abstract: Continuous lacustrine dark oil shale with numerous biomolecular fossils were deposited in the Nyima Basin on the central Qinghai-Tibet Plateau since Cenozoic. It is of great significance to reconstruct the paleoclimate and paleoenvironment of the Qinghai-Tibet Plateau. By analyzing the distribution characteristics of *n*-alkanes and related parameters of the Palaeocene Niubao Formation in the Kanggale section, the results show that the distribution of *n*-alkanes in the oil shale varies from bottom to top from a single peak type to a single behind peak type with two cycles; The CPI is relatively stable, but the TAR, ACL, P_{aq} and $nC_{\leq 21}/nC_{\geq 25}$ are more variable, indicating a shift in the sedimentary organic matter of the lake from endogenous-dominated lower algae to higher aquatic and exogenous terrestrial higher plants, and a gradual evolution of the regional climatic environment from cool and humid to hot and arid. To sum up, we believe that the climate change in the Nyima Basin during the Eocene was mainly influenced by westerly circulation and monsoon systems, which is related to the global climate. During periods of global warming, there is less effective precipitation from the central plateau (provided by westerly circulation and moisture from the residual ocean) and the climate dries up as westerly circulation weakens. Instead, the intensification of westerly circulation and Indian monsoons enriched the central of the plateau with repeated effective precipitation, resulting in a wetter climate.

Key words: *n*-alkanes; oil shale; westerlies; The Indian monsoon; Nyima Basin

0 引言

正构烷烃作为一种十分常见的生物标志物,自发现以来已成为重建古气候和环境变化的重要工具,尤其是在缺失花粉及生物化石保存的地层中应用广泛(Volkman et al., 1998; Castañeda and Schouten, 2011; Ouyang et al., 2015)。正构烷烃在湖泊、陆地和近岸海洋沉积物和岩石中保存稳定且含量相对丰富(Ratnayake et al., 2006; Ishiwatari et al., 2005; Boot et al., 2006),不同生物体来源的正构烷烃在碳数范围、主峰碳及分布特征方面有明显不同。一般来说,长链正构烷烃($nC_{27} \sim nC_{33}$)主要来自陆源高等植物,中链正构烷烃($nC_{23} \sim nC_{25}$)主要来自沉水植物和浮水植物,短链正构烷烃($< nC_{21}$)主要来自低等水生藻类及细菌(Eglinton et al., 1967; Yadav et al., 2017; Filho et al., 2013)。因此,湖泊和海洋沉积物中不同链长的正构烷烃常被用来区分不同的输入源,特别是长链正构烷烃作为陆源生物源的特殊性生物标记已取得众多成果,且作为气候环境参数在重建古气候、古环境与古植被分布中发挥了重要的作用。

青藏高原对全球气候环境的变化影响显著,其地形屏障的形成及环境转型是目前国际上研究的热点与难点问题(Li et al., 1991; Song et al., 2013; Sun, 2015)。其中,青藏高原中部地区是研究高原隆升和气候变化的重要场(Wang et al., 2008)。地处青藏高原中部的尼玛盆地,沉积了大套暗色泥岩及油页岩(李亚林等, 2010; 孙涛等, 2013),是湖泊演化和古气候研究的重要对象。分子化石作为古

湖泊环境研究的替代性指标,被广泛用于古环境变迁研究中(郑艳红等, 2007; Brocks and Grice, 2011)。目前有关湖泊分子化石的研究主要集中在现代湖泊,对古湖泊分子化石的研究较少,关于尼玛盆地分子化石特征指示始新世—渐新世古环境变迁的研究更是极少报道。而在始新世—渐新世全球出现了几次显著的气候事件,包括 PETM(55Ma)、Oi-1(33.5Ma)、Mi-1(23Ma)(Zachos, 2001; Thomas et al., 2002; Deconto and Pollard, 2003)。研究地层正好处于 PETM 到 Oi-1 的气候转型期,湖泊分子化石又能很好地指示气候波动。因此,本文对尼玛盆地康嘎勒剖面的正构烷烃分布特征进行研究,重建该地区环境气候变迁过程,为研究青藏高原中部始新世的气候变迁提供基础资料。

1 地质背景

1.1 区域地质概况

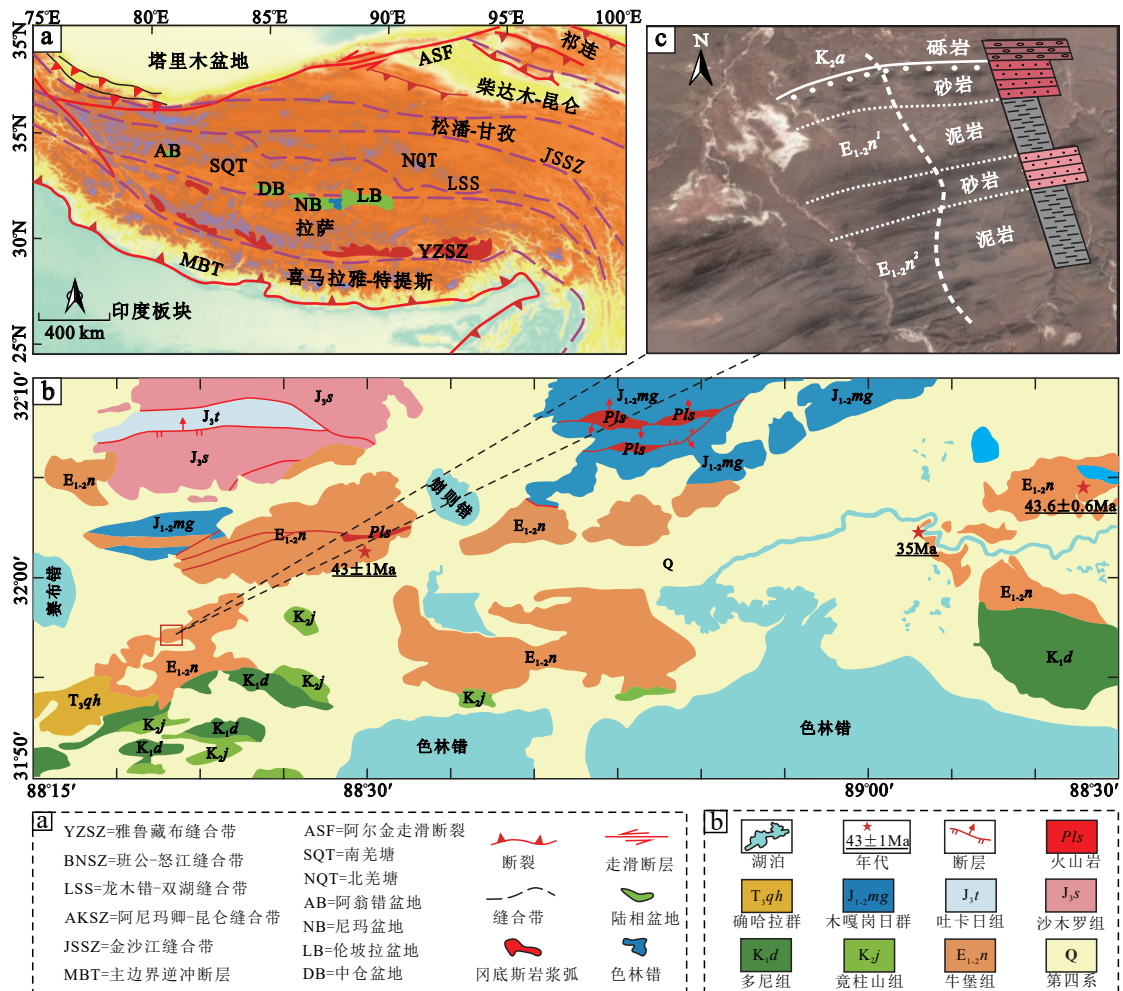
尼玛盆地位于青藏高原中部,位于北纬 $31^{\circ}40' \sim 32^{\circ}20'$,东经 $87^{\circ}00' \sim 88^{\circ}30'$ 之间,是一个形成于班公湖—怒江缝合带之上的新生代陆相盆地,东连伦坡拉盆地,西接洞错—中仓盆地。盆地内构造复杂,总体上具有“两坳一隆”的构造格架,即北部坳陷、南部坳陷和中央隆起。盆地内新生代沉积发育较为完全,主要为古近系牛堡组(E_{1-2n})、新近系康托组(N_k)和第四系(Q);基底地层主要由上三叠统确哈拉群(T_3qh)、中—下侏罗统木嘎岗日群(J_{1-2mg})、上侏罗统沙木罗组(J_3s)、下白垩统多尼组(K_1d)、上白垩统竞柱山组(K_j)等组成(图 1)。其中牛堡组沉积以红色陆源碎屑沉积物为特征,自下而上分

为三段。下部牛一段以紫红色砾岩、砂砾岩为主，局部夹灰绿、紫红色泥岩，与下伏中生界呈不整合接触；中上部牛二段和牛三段是细粒陆源碎屑沉积，以灰色、灰绿色泥岩、页岩为主，在尼玛盆地牛堡组发现油气流(夏位国等, 1986; 赵帅等, 2019)。沉积相主要发育扇三角洲和湖相沉积。扇三角洲相可进一步划分为扇三角洲平原、扇三角洲前缘和前扇三角洲；湖相进一步分为滨湖、浅湖与深—半深湖 3 个沉积亚相(赵帅等, 2019)。在牛堡组主要产孢粉和轮藻化石 *Obtusochara*、*Sphaerochara*、*Tectochara* 及 *Cypris-Limnocythere-Eucypris* 介形化石组合(王开发等, 1975; 王波明等, 2009)。随着研究的深入，在牛堡组发现了大量植物化石(Palms,

Golden rain tree, *Ficus stephensoni*; *Juglandites* sp.; *Dryophyllum* sp.)和鱼化石 (*Eoanabas thibetana* gen. et sp. nov.)(Su et al., 2019; 廖铸敏和白培荣, 2019; Wu et al., 2017)。

1.2 研究剖面地层划分与对比

尼玛盆地始新统牛堡组地层主要出露于盆地西北部虾别错及东部赛布错地区，为一套典型的湖相沉积，沉积有大套的暗色泥岩及油页岩。底部与上白垩统阿布山组呈不整合接触；顶部与丁青湖组呈平行不整合接触，最厚可达 3 000 m 以上。研究剖面位于赛布错湖东部 10 km 处(剖面代号: NKP)，底部为白垩系阿布山组安山质砾岩，向上牛堡组岩性主要为紫红色砂岩、砾岩及灰黑色泥岩、泥灰岩



a. 青藏高原盆地分布及构造简图; b. 尼玛盆地东部地区地层分布图; c. 研究剖面岩性示意图。

图 1 尼玛盆地地理位置及研究区地层分布图 (据西藏自治区地质局第四地质大队伦坡拉地区地质图修改, 1981)

Fig. 1 The tectonic map of Qinghai-Tibet Plateau and schematic geological sketch map of Niyma Basin (Modified from the geological map of the Lunpola area of the fourth geological brigade of the Tibet Autonomous Region Geological Bureau, 1981)

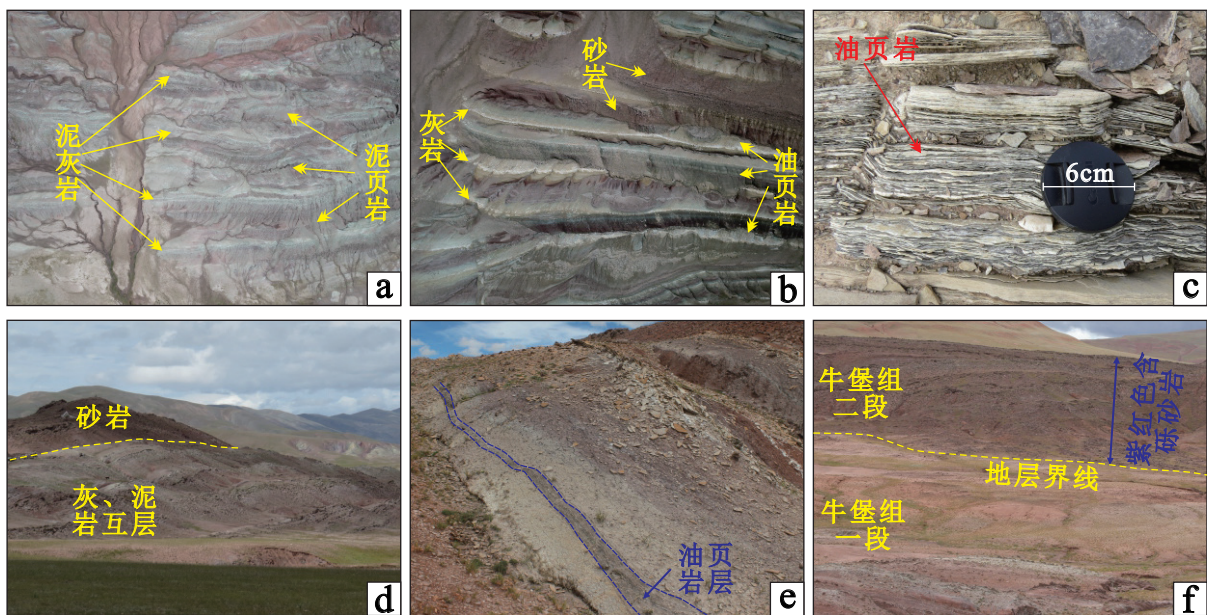
及层状油页岩, 共见 2 套砂泥沉积旋回。泥岩、油页岩侧向延伸稳定, 多呈深黑色、黄褐色, 薄—中层状产出, 层厚几十厘米到几米不等, 其中油页岩层共计 16 层, 累计厚度约 28 m, 可点燃, 常与黄灰色、灰绿色泥灰岩、钙质泥岩互层产出, 部分灰岩中可见干沥青(图 2)。

地层的划分与对比主要依据岩性组合特征及古生物等特征确定。前人在班公湖—怒江缝合带尼玛—伦坡拉地区进行了大量的剖面测量及地震解释, 认为牛堡组的 3 个岩性段分别对应断陷盆地发育过程中湖盆从生长到消亡的 3 个过程(形成、扩张、萎缩), 牛一段与牛二段以一套巨厚层砂砾岩为界, 界线年龄为 42 Ma(马鹏飞等, 2013; 赵帅等, 2019)。根据孢粉、介形虫、轮藻化石、植物化石将牛堡组沉积时代划分为古新世—始新世(廖铸敏和白培荣, 2019; 白培荣等, 2017); 通过对那曲地区 Pm043-1 剖面的锆石 U-Pb 测年认为牛堡组二段的年龄为 43.6 ± 0.6 Ma(陶江龙, 2018); Xiong et al. (2022) 通过对伦坡拉盆地车布里、达玉、伦坡里剖面的 U-Pb 测年以及地震解译认为牛一段的沉积时代为 ca. 50~40 Ma, 牛二段年龄限制在 40~38 Ma。陈云等(2021)利用自然伽马频谱分析对尼玛 1 井牛堡组的沉积速率进行了恢复, 得出了牛一段

平均沉积速率为 44.03 m/Ma(陈云等, 2021), 根据沉积速率获得牛一段的底部年龄约为 47 Ma。结合上述研究成果及地层岩性组合连井分析, 我们大致确定了研究剖面的地层界线及年代(图 3)。

2 样品采集与实验方法

实验样品采自赛布错东部 10 km 康嘎勒(NKP)剖面, 地层出露良好, 层系清晰, 但未见顶。样品以地层出露的油页岩为对象, 采集油页岩样品共计 16 件(表 1、图 3)。样品在粉碎前, 先进行预处理, 即先除去表面污染物, 然后以有机溶剂淋洗岩样表面, 再用水洗净残余溶剂。将样品磨碎至 100 目, 用三氯甲烷索氏抽提 72 h, 萃取可溶有机组分, 然后进行分离。一般来说, 对可溶有机质族组分加入正己烷, 摇匀, 静置过夜, 使沥青质沉淀。然后用正己烷冲洗饱和烃, 用苯冲洗芳烃, 用苯-无水乙醇(体积比为 1:1)冲洗非烃。饱和烃气相色谱用 HP6890 气相色谱仪完成。进样温度 290°C, 检测器(FID)温度 300°C, HP-5 石英弹性毛细管色谱柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm), 载气为氦气。初温 60°C 恒温 5 min, 升温速度为 3°C/min, 终温 290°C 恒温 20 min。饱和烃色谱-质谱(GC-MS)由 Agilent5975MSD 色谱-质谱联用仪分析。实验条



a. 康嘎勒剖面野外露头航拍照片; b. 野外露头岩性组合航拍照片; c. 油页岩野外露头照片; d. 砂岩宏观露头照片; e. 泥页岩中的油页岩夹层; f. 牛堡组一段与二段野外宏观界线。

图 2 康嘎勒剖面野外露头照片

Fig. 2 The field outcrop photos in the Kanggale Section

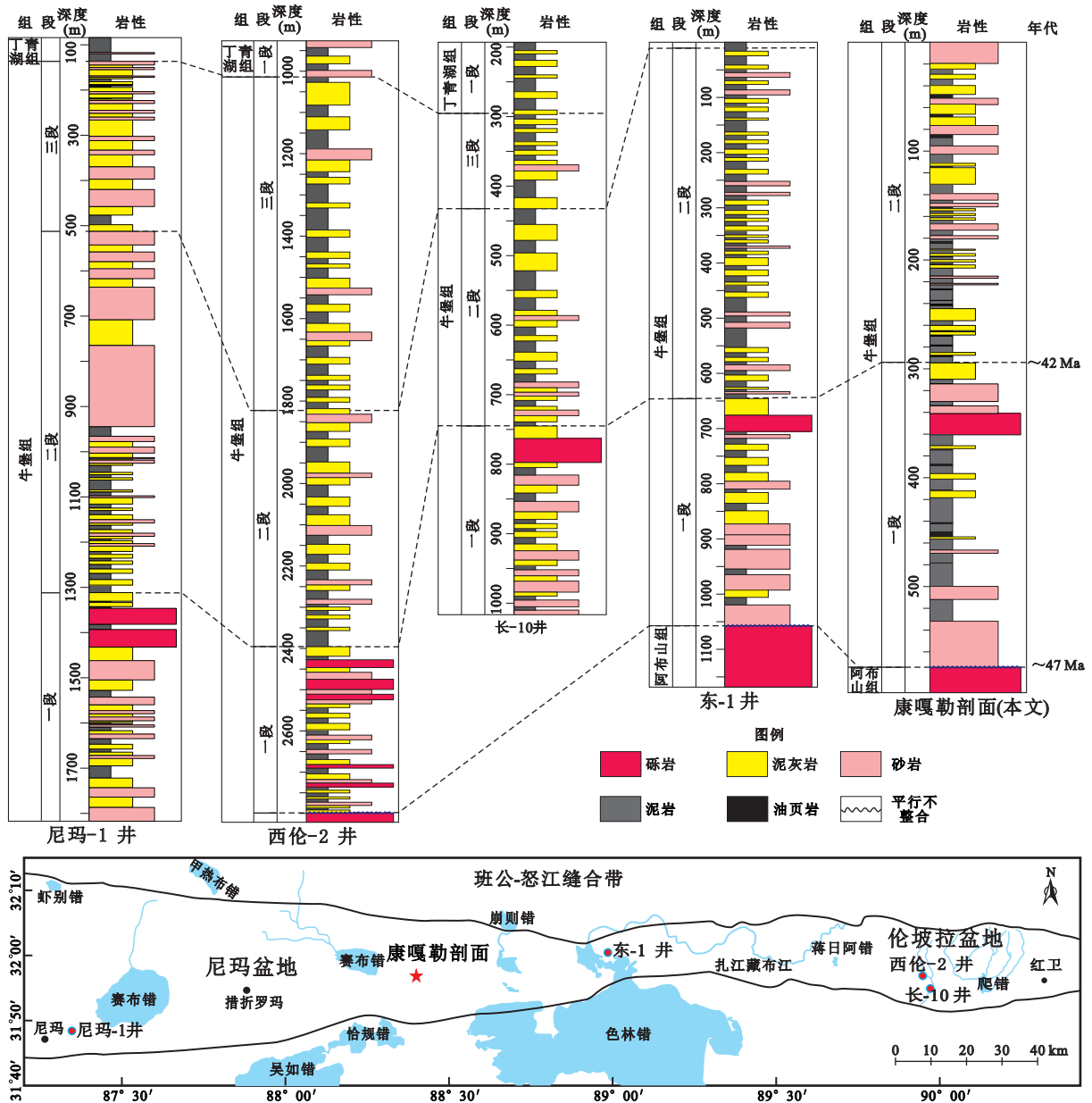


图3 青藏高原中部班公湖-怒江缝合带牛堡组地层对比

Fig. 3 Stratigraphic correlation of the Niubao Formation in Bangong-Nujiang suture zone in central Tibetan Plateau

件: 电子轰击能量 70 eV, 离子源温度 230~250℃, 传输线温度 250℃, 光电倍增管电压 350 V, 扫描方式为多离子检测。所有样品分析均在中国石油华北油田勘探开发研究院生油实验室完成。

3 结果

3.1 正构烷烃分布特征

GC-MS 饱和烃谱图分析表明, 所有样品的正构烷烃分布范围在 $nC_{14} \sim nC_{35}$ 之间(大部分样品的 nC_{34} 和 nC_{35} 含量极低, 故忽略不计), 整体上以低

碳数正构烷烃为主要分布特征, 主峰碳数为 $nC_{16} \sim nC_{18}$, 占总样品数的 75%, 部分样品具高碳数正构烷烃分布特征, 主峰碳数为 $nC_{25} \sim nC_{27}$ 。短链正构烷烃和长链正构烷烃均无明显的奇偶优势, 部分样品存在一些低碳数与高碳数并存的双峰型(图 4)。从底到顶正构烷烃主峰碳由前峰型向后峰型逐渐过渡, 其中可见双峰型的过渡型分布, 并呈现出两个旋回周期, 其分布特征可归纳为 4 种模式(表 1): ①前峰型: 呈单峰分布型态, L/H 值大于 1, 属于这一分布模式的有 NKP-01S₂; ②双峰前峰型: 呈双峰

表 1 尼玛盆地康嘎勒剖面的正构烷烃参数
Table 1 N-alkane parameters of the Kangale Section, Nyima Basin.

样品编号	岩性	L/H	CPI	P_{aq}	TAR	ACL	nC_{27}/nC_{31}	短链	中链	长链
NKP-01S ₁	油页岩	0.96	1.22	0.64	0.65	26.26	1.57	41.76	36.20	22.04
NKP-01S ₂	油页岩	4.41	1.32	0.63	0.11	26.32	1.47	78.25	14.19	7.56
NKP-03S ₁	油页岩	1.30	1.23	0.55	0.49	26.73	1.33	49.28	26.89	23.83
NKP-10S ₁	油页岩	1.02	1.31	0.57	0.64	26.61	1.64	44.66	31.01	24.33
NKP-10S ₂	油页岩	1.40	1.22	0.68	0.37	26.07	2.53	53.80	29.78	16.42
NKP-14S ₁	油页岩	0.83	1.24	0.66	0.71	26.15	2.53	39.68	38.30	22.02
NKP-14S ₂	油页岩	0.86	1.18	0.67	0.64	26.44	2.80	42.79	35.03	22.18
NKP-14S ₃	油页岩	0.47	1.23	0.61	1.61	26.43	2.16	25.17	42.93	31.90
NKP-18S ₁	油页岩	0.49	1.06	0.56	1.42	26.68	1.50	25.18	35.73	39.10
NKP-23S ₁	油页岩	1.82	1.11	0.68	0.26	26.18	1.57	58.77	25.93	15.30
NKP-23S ₂	油页岩	1.86	1.28	0.62	0.29	26.39	1.77	59.89	24.03	16.08
NKP-24S ₁	油页岩	1.02	1.30	0.67	0.60	26.09	1.97	42.16	39.47	18.37
NKP-25S ₁	油页岩	1.01	1.28	0.61	0.64	26.41	1.86	43.22	35.41	21.37
NKP-26S ₁	油页岩	1.21	1.17	0.63	0.51	26.33	1.82	48.36	32.41	19.23
NKP-26S ₂	油页岩	0.25	1.22	0.53	3.93	26.83	1.93	16.16	41.67	42.17
NKP-27S ₁	油页岩	0.48	1.11	0.66	1.43	26.20	2.07	24.96	44.77	30.27

注: $CPI = [\sum(C_{25} - C_{33})_{odd} / \sum(C_{24} - C_{32})_{even} + \sum(C_{25} - C_{33})_{odd} / \sum(C_{26} - C_{34})_{even}] / 2$; $P_{aq} = (C_{23} + C_{25}) / (C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31})$; $TAR = (C_{27} + C_{29} + C_{31}) / (C_{15} + C_{17} + C_{19})$; $ACL = (23 \times C_{23} + 25 \times C_{25} + 27 \times C_{27} + 29 \times C_{29} + 31 \times C_{31}) / (C_{23} + C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31})$; 短链(%) = $[\sum(C_{14} - C_{20}) / \sum(C_{14} - C_{40})] \times 100$; 中链(%) = $[\sum(C_{21} - C_{26}) / \sum(C_{14} - C_{40})] \times 100$; 长链(%) = $[\sum(C_{27} - C_{40}) / \sum(C_{14} - C_{40})] \times 100$; $L/H = \sum C_{21} - (\leq 21) / \sum C_{22} + (\geq 22)$ 。

型分布形态, L/H 值大于 1, 属于这一分布模式的有 NKP-03S₁, NKP-10S₁, NKP-10S₂, NKP-23S₁, NKP-23S₂, NKP-24S₁, NKP-25S₁, NKP-26S₁; ③双峰后峰型: 呈双峰型分布形态, L/H 值小于 1, 该分布模式包括 NKP-01S₁, NKP-14S₁, NKP-14S₂; ④后峰型: 呈单峰型分布形态, L/H 小于 0.5, 该分布模式包括 NKP-14S₃, NKP-18S₁, NKP-26S₂, NKP-27S₁。

3.2 正构烷烃相关参数特征

目前对湖泊沉积物中不同碳链长的正构烷烃分布特征进行定量描述的常用方法包括: 碳优势指数(CPI)、长链正构烷烃平均链长变化(ACL)、 P_{aq} 指数(沉水/漂浮植物与陆生植物之间的相对含量)、 nC_{27}/nC_{31} (木本植物和草本植物相对含量的变化)和低碳数与高碳数链长比值(L/H)等(Ficken et al., 2000; Dodd and Poveda, 2003; Eglinton and Eglinton, 2008; Zhang et al., 2017)。

康嘎勒剖面湖相油页岩中碳优势指数 CPI 值在 1.06~1.32 之间, 平均值为 1.22, 较稳定; P_{aq} 指数在 0.53~0.68 之间, 平均值为 0.62, 处于较高的值域。研究区 TAR 比值在 0.11~3.93 之间, 平均值为 0.89; 不同层位样品的 TAR 值变化较大, 前峰型 TAR 值为 0.11; 双峰前峰型为 0.26~0.64, 平

均值为 0.47; 双峰后峰型为 0.64~0.71, 平均值为 0.67; 后峰型 TAR 值为 1.42~3.93, 平均值为 2.1; 研究剖面长链正构烷烃碳优势指数 CPI 在 1.06~1.32 之间, 平均 CPI 值为 1.22; 长链正构烷烃平均链长 ACL 值在 26.07~26.83 之间, 平均值为 26.38; 木本植物和草本植物的相对含量 nC_{27}/nC_{31} 值在 1.33~2.80 之间, 平均值为 1.91; 短链的变化范围介于 16.15~78.24 之间, 平均值为 43.38; 中链的变化范围为 14.19~44.77, 平均值为 33.36; 长链的变化范围为 7.56~42.17, 平均值为 23.26; ACL 值与 P_{aq} 指数呈显著的负相关($n=16, R^2=0.852$) (图 5)。

4 讨论

4.1 正构烷烃关键指标及其气候指示意义

在湖泊有机质中, 正构烷烃不仅反映有机质的不同来源, 在一定程度上也能够反映区域内的古气候变化(Cranwell et al., 1987; Meyers, 2003; Pearson et al., 2007; Blyth et al., 2008)。研究区沉积的有机质从底至顶显示为前峰型向双峰型再向后峰型的演化过程, 共出现 2 次演化周期, 表明湖泊由营养盐富集的浊水型湖泊向水生高等植物发育的清水

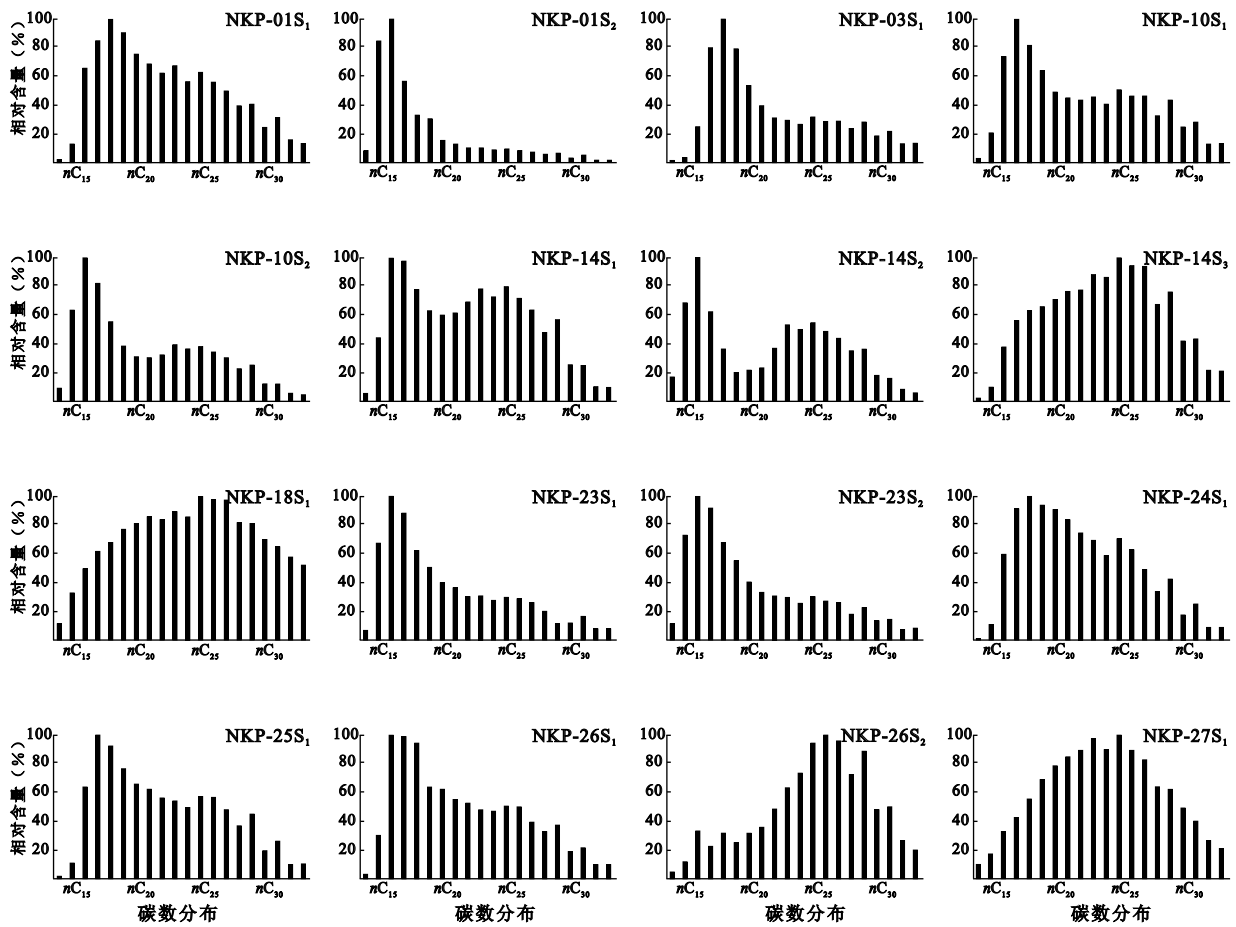


图 4 尼玛盆地康嘎勒剖面的正构烷烃分布特征

Fig. 4 The n-alkane distribution in the samples collected from the Kanggale section, Nyima Basin.

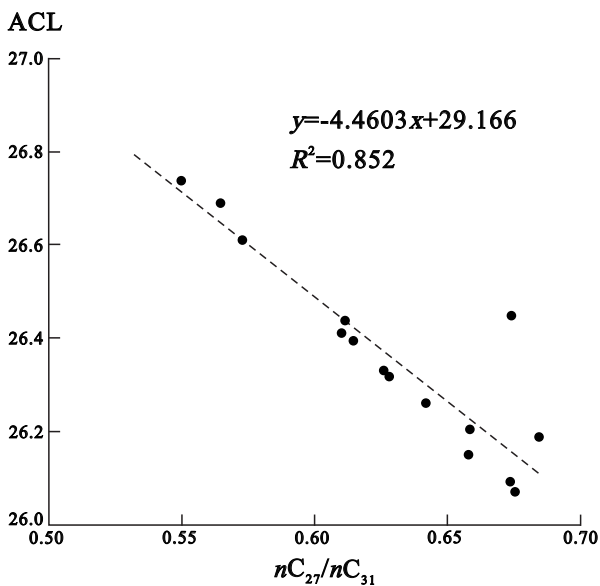


图 5 尼玛盆地康嘎勒剖面正构烷烃 ACL 与 nC_{27}/nC_{31} 的关系图

Fig. 5 ACL vs. nC_{27}/nC_{31} diagram of the n-alkanes in the Kanggale KGL section, Nyima Basin

型湖泊演化; 营养盐浓度随藻类数量的增加而增加, 使湖泊呈浊态; 而水生植物通过降低营养盐浓度, 使湖泊保持清水稳态 (Scheffer, 1999; 高海龙, 2017; 李英杰等, 2009; 宋英伟等, 2006)。碳优势指数 CPI 反映沉积有机质的来源, 陆源高等植物奇偶优势明显, CPI 通常大于 5; 而多数水生藻类与浮游细菌 CPI 值较低, 且无明显奇偶优势; CPI 在一定程度上也能反映气候的变化, 在相对干旱的条件下 CPI 值较大, 在湿润的气候条件下较小 (Zhang et al., 2006; 杨桂芳等, 2015)。研究区 CPI 值较低且相对稳定, 表明当时的有机质来源以水生藻类和浮游细菌为主, 气候相对湿润; ACL 在长时间尺度上反映植被种类的变化, 当 ACL 值较高时指示区域内高等植物为正构烷烃主要来源, 反之指示藻菌类生物为正构烷烃主要来源。其次, ACL 的气候指示意义也有较多探讨, 其中湖相沉积物中的 ACL 主要反映的是该区域降雨量或有效湿度的变化, ACL 值较小表明区域降水多蒸发弱, 有效湿度较

大,气候相对湿润;ACL值较高指示区域降水较弱蒸发强,有效湿度较小,气候相对干旱(Zhang et al., 2006; 蒲阳等, 2010; 杨桂芳等, 2015)。NKP剖面ACL变化趋势为升—降—升—降—降,在岩性地层上油页岩也可形成于蒸发强具盐度分层的还原环境中(Wang et al., 2021),而砂岩一般形成于地表径流(淡水)输入增加的环境中,ACL为低值时油页岩大量沉积,而ACL为高值时出现砂岩沉积,二者相吻合,表明当时的气候经历了干旱—湿润—干旱—湿润—湿润的变化过程(图6)。

P_{aq} 指数是Ficken et al.(2000)基于现代植被研究结果所定义,用于衡量大型水生植物来源的正构烷烃相对含量的一个参数。一般认为 P_{aq} 较高表明大型水生植物比例较高,区域气候相对湿润;反之大型水生植物比例越低,湖泊水位较低且区域气候相对干旱(Ficken et al., 2000; Zhang et al., 2004; 刘嘉丽等, 2017; 赵佳玉等, 2021)。ACL值与 P_{aq} 的相

关性参数能有效反映区域的气候变化(Gagosian et al., 1986; Schefuß et al., 2003; Ficken et al., 2000),NKP剖面 P_{aq} 与ACL的变化表明经历了类似的气候变化;正构烷烃 nC_{27}/nC_{31} 比值通常用来反映木本和草本植物相对含量的变化,当 nC_{27}/nC_{31} 的比值较低时,表明湖泊陆源有机物中草本植物输入增加;当 nC_{27}/nC_{31} 比值较高时,表明湖泊沉积物中木本植物输入增加,草本植物一般代表干旱环境,木本植物则代表湿润环境(谢树成和 Evershed, 2001; Meyers, 2003; Bush and Mcinerney, 2013)。NKP剖面 nC_{27}/nC_{31} 比值的变化趋势与 P_{aq} 、ACL指示的气候变化一致。综上所述,通过短链、中链、长链正构烷烃、ACL、 P_{aq} 、 nC_{27}/nC_{31} 指标的讨论,表明尼玛盆地在始新世经历了干旱—湿润—干旱—湿润—湿润的气候变化。

4.2 古环境变迁特征

通过选取康嘎勒剖面湖相油页岩正构烷烃的

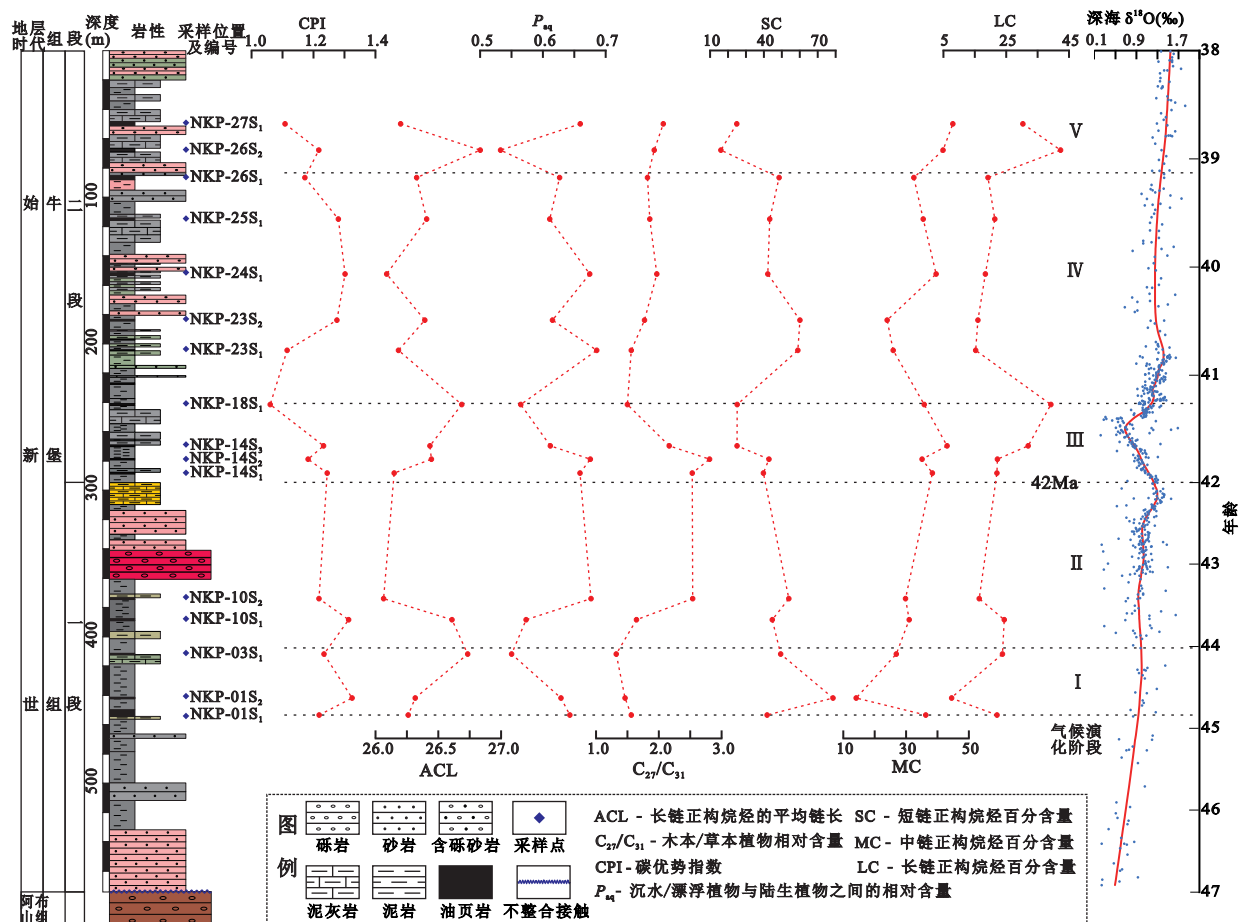


图6 尼玛盆地康嘎勒剖面正构烷烃相关参数、气候变化趋势与深海氧同位素曲线 (Zachos, 2001)

Fig. 6 Related parameters of *n*-alkanes and climate change trend and global deep-sea oxygen isotope variation curve in kangale section, Nyima Basin (Zachos, 2001)

CPI、ACL、 P_{aq} 指数、 nC_{27}/nC_{31} 及不同链长正构烷烃的相对含量等参数,结合 GC-MS 饱和烃谱图和剖面岩性特征,将康嘎勒地区始新世的气候环境划分为 5 个阶段(图 6)。

第 I 阶段:该阶段对应的岩石地层单元为始新统牛堡组一段,厚度约 40 m。主要由紫红色砂砾岩、灰黑色、黑色泥岩、灰黑色泥页岩和黑色油页岩组成,砂砾岩自下而上呈逐渐变细的正粒序结构。全球氧同位素较低,气候较暖;CPI 和 ACL 呈上升趋势,表明沉水、漂浮植物的含量增加;此外中长链正构烷烃含量较小,而短链正构烷烃占绝对优势,反映了陆源高等植物输入极少,水生植物为有机质的主要来源,与 P_{aq} 和 nC_{27}/nC_{31} 变化趋势相一致。同时,典型的前峰型正构烷烃的分布特征也表明该阶段藻类或低等水生生物为湖泊有机质的主要来源。

第 II 阶段:该阶段对应的岩石地层单元为始新统牛堡组一段上部,厚度约 118.5 m。该段主要由灰色泥岩、灰黑色泥灰岩、油页岩、紫红色砂砾岩及灰黄色泥灰岩组成,处于陆源输入逐渐增加的阶段。全球氧同位素存在较小幅度的增大,有降温的趋势;CPI 值虽然有波动,但较前一阶段低;ACL 呈下降趋势,而 P_{aq} 值在 0.55~0.68 之间,平均值为 0.63,整体呈上升趋势;中、长链正构烷烃、 nC_{27}/nC_{31} 的含量较上一阶段较高,表明陆生高等植物的输入量在逐步增加。

第 III 阶段:该阶段对应的岩石地层单元为始新统牛堡组二段下部,厚度约 56 m。岩性主要为灰黑色泥岩、泥灰岩及黑色油页岩。油页岩呈极薄层产出,侧向延伸稳定。全球氧同位素降低,气候变暖;CPI 值较为波动,ACL 值呈上升趋势,与之对应的 P_{aq} 值及 nC_{27}/nC_{31} 值下降,表明陆源物质的输入量快速降低,取而代之的是水生藻类或水生植物的爆发;中链、长链正构烷烃的含量增加,短链正构烷烃的含量下降,指示了水生植物为有机质的主要来源,这与正构烷烃分布呈 nC_{25} - nC_{27} 的后峰型分布具有很好的一致性。总体而言,该阶段气候相对温暖,水体相对清澈,适合水生植物的生长。

第 IV 阶段:该阶段对应的岩石地层单元为始新统牛堡组二段中上部,厚度约 157 m。该段沉积物主要为灰黑色泥岩、泥页岩,间夹多套黑色薄层状油页岩,质软可弯折。氧同位素上升,气候变冷;CPI 值呈明显的上升趋势且在高值稳定持续,表明该时期气温相对温凉,此段 ACL 值较波动,表明当

时的降水变化幅度较大; P_{aq} 值也较为波动,但 nC_{27}/nC_{31} 值相对平稳,表明该时期陆源物质与水生生物共同参与了有机质的形成,短链正构烷烃呈上升—下降—稳定的变化过程,中链正构烷烃则与之相反,长链正构烷烃相对平稳,表明该阶段经历了藻类繁盛向水生植物繁盛的变化过程,指示了湖泊水体由藻类繁盛的浊水型湖泊向水生植物繁盛的清水型湖泊的转变过程。

第 V 阶段:该阶段对应的岩石地层单元为始新统牛堡组二段上部,厚度约 33m。该段岩性主要为泥岩及黑色油页岩。氧同位素持续上升,气候持续变冷;CPI 和 ACL 呈下降趋势,反映了该时期气候相对湿润; P_{aq} 值呈上升趋势, nC_{27}/nC_{31} 值相对平稳,中、长链正构烷烃呈上升趋势,短链正构烷烃呈下降趋势,表明水生植物和陆源高等植物为湖泊有机质的主要来源,也反映出当时的气候环境相对湿润。

正构烷烃参数指标表明尼玛盆地湖泊有机质来源在不同阶段变化不同,反映了当时的气候经历了温凉与热干之间的交替变化。当气候干旱时,陆源高等植物的输入减少,反之,陆源高等植物输入增加。当陆源高等植物增加,营养盐浓度降低,湖泊向清水型湖泊转变。通过与全球氧同位素对比,发现气温和降水呈反相关,即当全球降温时,尼玛盆地的气候逐渐湿润;升温时,气候相对干旱。

4.3 尼玛盆地古气候演化控制因素

沉积物中正构烷烃含量及分布特征与源区环境密切相关,可反演古海拔、古温度和气候的干湿变化(Gagosian and Peltzer, 1986; Schefuß et al., 2003; Lu and Guo, 2014)。研究区正构烷烃相关参数与温度变化呈负相关,即温度高时,气候干旱;反之气候湿润。自白垩纪末期以来,冈瓦纳大陆裂解加剧,印度板块脱离南极洲板块向北漂移与欧亚板块汇聚挤压,致使西藏中部地区向北移动,在 40 Ma 左右西藏中部地区大致处于北纬 20°~25°之间(Fang et al., 2021; Bosboom et al., 2011)。Fang et al.(2020)利用古地磁对西藏中部的化石、孢粉、氧同位素等获得的海拔进行纠正,认为西藏中部在晚始新世处于低海拔热带或亚热带地区。在距今约 60~50 Ma,印度板块与欧亚板块发生碰撞,冈底斯山脉隆起。虽然冈底斯山脉对研究区起到了季风水汽输入的屏障作用,但在冈底斯山脉 ca. 41 Ma 快速北移的过程中将允许当时季风水汽向北扩张(Fang et al.,2021)。唐古拉山脉在约 43~40 Ma 时

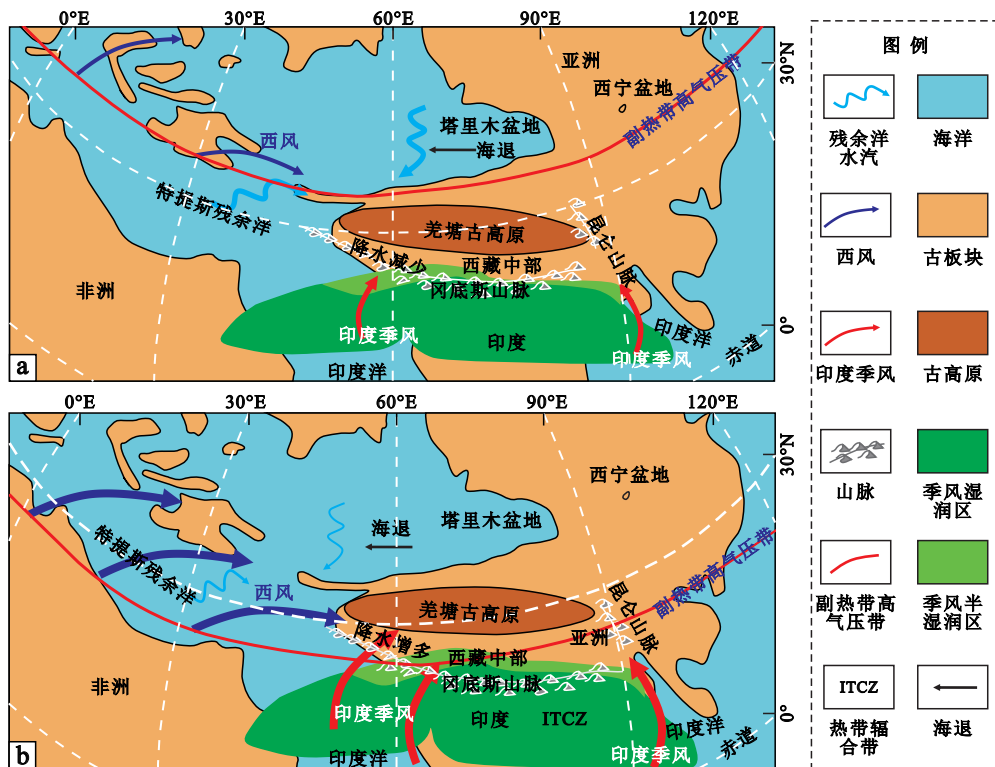
出现了快速变形和抬升,唐古拉山脉允许热带印度季风携带的水汽进入西藏中部地区(Fang et al., 2021)。而亚洲季风在晚始新世就存在类似于现今的大气环流格局(Licht et al., 2014, 2016),郭正堂(2017)认为 Licht et al. (2014) 报道的季风是受热带辐合带(ITCZ)摆动影响的热带季风,并不是现代季风,而是热带辐合带(ITCZ)季风系统。当热带辐合带向北移动,较冷的印度洋(高气压)向较温暖的大陆(低气压)移动,印度夏季风增强,反之热带辐合带向南移动(Beasley et al., 2021),印度夏季风减弱。在约 41 Ma 印度季风增强,向北扩展至热带地区(Fang et al., 2021)。

青藏高原北部,始新世晚期塔里木盆地大规模海退,在约 40 Ma 海水从塔里木盆地退出(Bosboom et al., 2014; Carrapa et al., 2015; Sun, 2016)。在帕米尔以西仍然存在着广阔的大洋,西风可以将水汽带入青藏高原中部及中亚地区,如青藏高原中部以及更东边的蒙古国南部地区,在晚始新世仍为湖泊-河流相沉积环境(马鹏飞等, 2013; Sun and Windley, 2015)。而尼玛盆地与全球气候变化存在一定关系。

当全球变暖时,副热带高压向北移动,西风环流的势力减弱(寿绍文, 2008; 伍光和等, 2007)。西风环流和特提斯残余洋携带的水汽不足以越过高原北部的高地形进入尼玛盆地,高原南部冈底斯山脉虽然允许印度季风通过,但还是阻挡了部分水汽,使进入尼玛盆地有效降水降低;由于研究区气温升高,蒸发增强,进一步加剧了尼玛盆地的干旱程度(图 7a)。当全球降温时,副热带高压向南移动,西风环流的势力增强(寿绍文, 2008; 伍光和等, 2007),叠加特提斯残余洋携带的水汽可能越过高原北部为尼玛盆地带来降水;在全球降温时有可能推动热带辐合带(ITCZ)向北移动,从而增强印度季风环流,在尼玛盆地温度较低时产生的湿度最高(Fang et al., 2021; Su et al., 2020),致使尼玛盆地当时的气候温凉湿润(图 7b)。因此,青藏高原中部特殊的气候变化可能与西风环流和季风的强度变化有关。

5 结论

(1) 尼玛盆地沉积有机质正构烷烃分布由前峰型向后峰型逐渐过渡,并经历了 2 次周期变化。表



a. 始新世相对暖期气候变化模式图; b. 始新世相对冷期气候变化模式图。

图 7 青藏高原中部始新世古气候演化模式图(根据 Bosboom et al., 2011; Fang et al., 2021; 寿绍文, 2009 修订)

Fig. 7 Eocene paleoclimate evolutionary model of the central Tibetan Plateau (Modified according to Bosboom et al., 2011; Fang et al., 2021; Shou, 2009)

明湖泊沉积有机质由水生藻类为主的浊水型湖泊向水生高等植物和陆源高等植物输入为主的清水型湖泊逐渐过渡,湖泊性质发生重大转变。

(2)正构烷烃相关参数特征显示,青藏高原中部尼玛盆地区域气候由早期的干燥炎热向温凉湿润逐步变化,它与 Zechos 利用深海底栖有孔虫氧同位素恢复的全球同期气候变化存在差异,表明青藏高原中部气候变化是由区域特殊古地理格局所导致。

(3)康嘎勒地区古近纪的气候经历了干旱—湿润—干旱—湿润—湿润五个变化阶段,且气温降低时气候湿润,温度升高时气候干旱。这主要是由于在全球相对暖期,副热带高压北移,西风环流的势力减弱,使得尼玛盆地的有效降水减少,气候干旱;而全球降温时,西风环流和印度季风势力增强,为其提供了一定的有效降水,气候湿润。因此青藏高原中部尼玛盆地特殊的气候变化可能与西风环流和季风的强度变化有关。

致谢: 感谢李高杰、夏国清、田康志、李鑫、杨嘉宝、杜春阳、李堃宇等师兄在野外采样付出的辛勤汗水。感谢石宇翔博士和白鑫硕士在论文撰写过程中的帮助。

References

- Bai P R, Zeng Y R, Li Y S, et al., 2017. Discovery and Its Significance of the Eocene Plant Fossils in the Kongnongla Area from the Southeast Margin Bangor Basin in Northern Tibet[J]. *Guizhou Geology*, 34 (4) : 301–305 (in Chinese with English abstract).
- Beasley C, Kender S, Giosan L, et al., 2021. Evidence of a South Asian Proto-Monsoon During the Oligocene-Miocene Transition[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 36 (9) : e2021PA004278.
- Blyth A J, Baker A, Collins M J, et al., 2008. Molecular organic matter in speleothems and its potential as an environmental proxy[J]. *Quaternary Science Reviews*, 27 (9–10) : 905–921.
- Boot C S, Ettwein V J, Maslin M A, et al., 2006. A 35, 000 year record of terrigenous and marine lipids in Amazon Fan sediments[J]. *Organic Geochemistry*, 37 (2) : 208–219.
- Bosboom R E, Dupont-Nivet G, Houben A, et al., 2011. Late Eocene sea retreat from the Tarim Basin (west China) and concomitant Asian paleoenvironmental change[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 299 (3–4) : 385–398.
- Bosboom R, Dupont-Nivet G, Grothe A, et al., 2014. Linking Tarim Basin sea retreat (West China) and Asian aridification in the late Eocene[J]. *Basin Research*, 26 (5) : 621–640.
- Brocks J J, Grice K, 2011. Biomarkers (Molecular Fossils) [M]. Springer Netherlands, 147–167.
- Bush R T, Mcinerney F A, 2013. Leaf wax n-alkane distributions in and across modern plants: Implications for paleoecology and chemotaxonomy[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 117: 161–179.
- Carrapa B, DeCelles P G, Wang X, et al., 2015. Tectono-climatic implications of Eocene Paratethys regression in the Tajik basin of central Asia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 424: 168–178.
- Castañeda I S, Schouten S. 2011. A review of molecular organic proxies for examining modern and ancient lacustrine environments[J]. *Quaternary Science Reviews*, 30 (21–22) : 2851–2891.
- Cranwell P A, Eglinton G, Robinson N, 1987. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments—II [J]. *Organic Geochemistry*, 11 (6) : 513–527.
- Deconto R M, Pollard D, 2003. Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO₂ [J]. *nature*, 421: 245–249.
- Dodd R S, Poveda M M, 2003. Environmental gradients and population divergence contribute to variation in cuticular wax composition in *Juniperus communis* [J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 31 (11) : 1257–1270.
- Eglinton G, Hamilton R J, 1967. Leaf epicuticular waxes [J]. *Science*, 156: 1322–1335.
- Eglinton T I, Eglinton G, 2008. Molecular Proxies for Paleoclimatology [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 275 (1–2) : 1–16.
- Fang X, Dupont-Nivet G, Wang C, et al., 2020. Revised chronology of central Tibet uplift (Lunpola Basin) [J]. *Science Advances*, 6 (50) : eaba7298.
- Fang X, Yan M, Zhang W, et al., 2021. Paleogeography control of Indian monsoon intensification and expansion at 41 Ma [J]. *Science Bulletin*, 66 (22) : 2320–2328.
- Ficken K J, Li B, Swain D L, et al., 2000. An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes [J]. *Organic Geochemistry*, 31 (7–8) : 745–749.
- Filho P J S, Luz L P, Betemps G R, et al., 2013. Studies of n-alkanes in the sediments of colony Z3 (Pelotas-RS-Brazil) [J]. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 17 (1) : 27–33.
- Gagosian R B, Peltzer E T, 1986. The importance of atmospheric input of terrestrial organic material to deep sea sediments [J]. *Organic Geochemistry*, 10 (4–6) : 661–669.
- Ishiwatari R, Yamamoto S, Uemura H, 2005. Lipid and lignin/cutin compounds in Lake Baikal sediments over the last 3 kyr: Implications for glacial-interglacial palaeoenvironmental change [J]. *Organic Geochemistry*, 36 (3) : 327–347.
- Li J, 1991. The environmental effects of the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 10 (6) : 479–483.
- Licht A, Van Cappelle M, Abels H A, et al., 2014. Asian monsoons in a late Eocene greenhouse world [J]. *Nature*, 513 (7519) : 501–506.
- Licht A., Dupont-Nivet G, Pullen A, et al., 2016. Resilience of the Asian atmospheric circulation shown by Paleogene dust provenance [J]. *Nature Communication*, 7 (1) : 1–6.
- Lu H, Guo Z, 2014. Evolution of the monsoon and dry climate in East Asia during late Cenozoic: A review [J]. *Science China Earth Sciences*, 57 (1) : 70–79.

- Meyers P A, 2003. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes[J]. *Organic Geochemistry*, 34 (2) : 261 – 289 .
- Ouyang X, Guo F, Bu H, 2015. Lipid biomarkers and pertinent indices from aquatic environment record paleoclimate and paleoenvironment changes[J]. *Quaternary Science Reviews*, 123: 180 – 192 .
- Pearson E J, Farrimond P, Juggins S, 2007. Lipid geochemistry of lake sediments from semi-arid Spain: Relationships with source inputs and environmental factors[J]. *Organic Geochemistry*, 38 (7) : 1169 – 1195 .
- Ratnayake N P, Suzuki N, Okada M, et al., 2006. The variations of stable carbon isotope ratio of land plant-derived-alkanes in deep sea sediments from the bering Sea and north Pacific Ocean during the last 250, 000 years[J]. *Chemical Geology*, 228 (4) : 197 – 208 .
- Scheffer M. 1999. The effect of aquatic vegetation on turbidity; how important are the filter feeders? [J]. *Hydrobiologia*, 408–409: 307–316.
- Schefeuf E, Ratmeyer V, Stuut J B, et al., 2003. Carbon isotope analyses of n-alkanes in dust from the lower atmosphere over the central eastern Atlantic[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67 (10) : 1757 – 1767 .
- Song E P, Zhang K X, Yi S, et al., 2013. Cenozoic uplift of the Tibetan Plateau on the Global Response to Climate Change[J]. *Advanced Materials Research*, 864–867: 2719–2724.
- Su T, Farnsworth A, Spicer R A, et al., 2019. No high Tibetan Plateau until the Neogene[J]. *Science Advances*, 5 (3) : eaav2189 .
- Su T, Spicer R A, Wu F X, et al., 2020. A Middle Eocene lowland humid subtropical “Shangri-La” ecosystem in central Tibet[J]. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 117 (52) : 32989 – 32995 .
- Sun J, Windley B F, 2015. Onset of aridification by 34 Ma across the Eocene-Oligocene transition in Central Asia[J]. *Geology*, 43 (11) : 1015 – 1018 .
- Sun J, Windley B F, Zhang Z, et al., 2016. Diachronous seawater retreat from the southwestern margin of the Tarim Basin in the late Eocene[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 116: 222 – 231 .
- Sun Y, 2015. Miocene climate change on the Chinese Loess Plateau : Possible links to the growth of the northern Tibetan Plateau and global cooling[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 7 (16) : 2097 – 2108 .
- Thomas D J, Zachos J C, Bralower T J, et al., 2002. Warming the fuel for the fire: Evidence for the thermal dissociation of methane hydrate during the Paleocene-Eocene thermal maximum[J]. *Geology*, 30 (12) : 1067 – 1070 .
- Volkman J K, Barrett S M, Blackburn S I, et al., 1998. Microalgal biomarkers: A review of recent research developments[J]. *Organic Geochemistry*, 29 (5–7) : 1163–1179.
- Wang C S, Zhao X X, Liu Z F, et al., 2008. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105 (13) : 4987 – 92 .
- Wang Y, Xu S, Hao F, et al. 2021. Arid climate disturbance and the development of salinized lacustrine oil shale in the Middle Jurassic Dameigou Formation, Qaidam Basin, northwestern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 577: 110533.
- Wu F, Miao D, Chang M, et al., 2017. Fossil climbing perch and associated plant megafossils indicate a warm and wet central Tibet during the late Oligocene[J]. *Scientific Reports*, 7 (1) : 878 .
- Xiong Z, Liu X, Ding L, et al. 2022. The rise and demise of the Paleogene Central Tibetan Valley[J]. *Science advances*, 8 (6) : eabj0944.
- Yadav A, Praveen K M, Prem K, et al., 2017. Molecular distribution and carbon isotope of n-alkanes from Ashtamudi Estuary, South India: Assessment of organic matter sources and paleoclimatic implications[J]. *Marine Chemistry*, 196: 62 – 70 .
- Zachos J, 2001. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present[J]. *Science*, 292 (5517) : 686 – 693 .
- Zhang H, Wang R, Xiao W, 2017. Paleoenvironmental implications of Holocene long-chain n-alkanes on the northern Bering Sea Slope[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 36 (8) : 137 – 145 .
- Zhang Z, Zhao M, Eglinton G, et al., 2006. Leaf wax lipids as paleovegetational and paleoenvironmental proxies for the Chinese Loess Plateau over the last 170 kyr[J]. *Quaternary Science Reviews*, 25 (5–6) : 575–594.
- Zhang Z, Zhao M, Yang X, et al., 2004. A hydrocarbon biomarker record for the last 40 Kyr of plant input to Lake Heqing, Southwestern China[J]. *Organic Geochemistry*, 35 (5) : 595 – 613 .
- Chen Y, Tang W Q, Zhang C Z, et al., 2021. Study on Paleoclimate and Identification of High Frequency Cycle Based on Natural Gamma Ray Logging Data[J]. *Well Logging Technology*, 45 (4) : 8 (in Chinese with English abstract).
- Gao H L, 2017. Research on the Recovery of the Submerged Macrophyte in Eutrophicated Shallow Lakes[D]. Nanjing University.
- Guo Z T, 2017. Loess Plateau attests to the onsets of monsoon and deserts[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 47 (4) : 421 – 437 (in Chinese with English abstract).
- Li Y L, Wang C S, Zhu L D, et al., 2010. Discovery of oil shale in the Nima basin, Tibet, China and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 29 (12) : 1872 – 1874 (in Chinese with English abstract).
- Li Y J, Hu X Z, Hu S R, et al., 2009. Microcosmic experimental comparison of ecological and physicochemical characters between macrophytic and algal lakes[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 8 (05) : 1649 – 1654 (in Chinese with English abstract).
- Liao Z M, Bai P R, 2019. The Discovery and significance of flora macrofossil in Niubao formation of Bangongcuo -Nujiang river suture[J]. *Yunnan Geology*, 38 (1) : 10 – 14 (in Chinese with English abstract).
- Liu J L, Liu Q, Wu J, et al., 2017. N-alkanes distributions and compound-specific carbon isotope records and their paleoenvironmental significance of sediments from Lake Sifangshan in the Great Khingan Mountain, Northeastern China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 29 (2) : 498 – 511 (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).

- Pu Y, Zhang H C, Lei G L, et al., Climate variability recorded by n-alkanes of paleolake sediment in Qaidam Basin on the northeast Tibetan Plateau in late MIS3[J]. *Scientia Sinica (Terrae)* 40 (5): 624–631.
- Shou S W, 2009. *Synoptic Meteorology*[M]. Beijing: China Meteorological Press.
- Song Y W, Li Y J, Sun Y N, et al., 2006. Regime Shift Theory and Ecological Restoration Discussion in Eutrophic Shallow Lakes[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1: 67 – 70 (in Chinese with English abstract).
- Sun T, Wang C S, Li Y L, et al., 2013. Geological characteristics and resource potential of shale gas in Nima Basins, central Tibet[J]. *China Mining Magazine*, 22 (1): 72 – 75 (in Chinese with English abstract).
- Tao J L, 2018. Sedimentary Environment Analysis of Niubao Formation–Ding Qinghu Formation in Duoma Area, Shuanghu, Northern Tibet[J]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- 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 K F, Yang J W, Li Z, et al., 1975. On the tertiary sporopollen assemblages from Lunpola basin of Xizang, China and their palaeogeographic significance[J]. *Chinese Journal of Geology*, 4: 366–374 (in Chinese with English abstract).
- Wu G H, Wang N A, Hu S X, et al., 2008. *Physical geography (the 4th Edition)* [M]. Beijing: Higher education press.
- Xia W G, 1986. Some charophyte from Lunpola Basin, baingoin County, Xizang (Tibet) [C]//*Bulletin of the Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, The Chinese Academy of Geological Sciences* (7) [C].
- Xie S C, Evershed R P, 2001. A record of climate change and biological succession of molecular fossils in Peat Deposits[J]. *Chinese Science Bulletin*, 46 (10): 863–866 (in Chinese with English abstract).
- Yang G F, Wu F D, Chen Z H, et al., 2015. n-Alkane Distribution and Their Palaeoenvironmental Implications in Fluvial-Lacustrine Sediments in Dengkou, Inner Mongolia[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 40 (2): 327 – 333 (in Chinese with English abstract).
- Zhao J Y, Wang S X, Andrey Darin, et al., 2021. N-alkanes Distribution and their paleoenvironmental implications during Holocene in lacustrine Sediments in lake Shuang, Xinjiang[J]. *Quaternary Sciences*, 41 (04): 965–975 (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).
- Zheng Y H, Zhou W J, Xie S C, 2007. Fossil records of Lipid molecules from Holocene peat on ZoiGè Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 1: 108–113 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白培荣, 曾禹人, 李月森, 等, 2017. 藏北班戈盆地东南缘恐弄拉地区始新世植物化石的发现及其意义[J]. *贵州地质*, 34 (4): 301–305.
- 陈云, 唐闻强, 张承志, 等, 2021. 基于自然伽马测井曲线的旋回识别及古气候判断[J]. *测井技术*, 45 (4): 8.
- 高海龙, 2017. 富营养化浅水湖泊沉积物植物恢复研究[D]. 南京大学.
- 郭正堂, 2017. 黄土高原见证季风和荒漠的由来[J]. *中国科学: 地球科学*, 47 (4): 421–437.
- 李亚林, 王成善, 朱利东, 等, 2010. 西藏尼玛盆地油页岩的发现及其地质意义[J]. *地质通报*, 29 (12): 1872–1874.
- 李英杰, 胡小贞, 胡社荣, 等, 2009. 草、藻型湖泊水体生态及理化特性的实验对比[J]. *生态环境学报*, 8 (05): 1649–1654.
- 廖铸敏, 白培荣, 2019. 班公错-怒江缝合带牛堡组中植物大化石的发现及其意义[J]. *云南地质*, 38 (1): 10–14.
- 刘嘉丽, 刘强, 伍婧, 等, 2017. 大兴安岭四方山天池全新世以来沉积物正构烷烃分布, 单体碳同位素特征及古环境意义[J]. *湖泊科学*, 29 (2): 498–511.
- 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.
- 蒲阳, 张虎才, 雷国良, 等, 2010. 青藏高原东北部柴达木盆地古湖泊沉积物正构烷烃记录 MIS3 晚期气候变化[J]. *中国科学: 地球科学*, 40 (5): 624–631.
- 寿绍文, 2009. *天气学*[M]. 北京: 气象出版社.
- 宋英伟, 李英杰, 孙艳妮, 等, 2006. 富营养化浅水湖泊稳态转换理论与生态恢复探讨[J]. *环境科学研究*, 1: 67–70.
- 孙涛, 王成善, 李亚林, 等, 2013. 西藏中部尼玛盆地页岩气地质特征及资源潜力[J]. *中国矿业*, 22 (1): 72–75.
- 陶江龙, 2018. 西藏双湖县多玛地区牛堡组—丁青湖组沉积环境分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 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*, 4: 366–374.
- 伍光和, 王乃昂, 胡双熙, 等, 2008. *自然地理学(第四版)* [M]. 北京: 高等教育出版社.
- 夏位国, 1986. 西藏班戈县伦坡拉盆地伦坡拉群的轮藻化石[C]//*中国地质科学院成都地质矿产研究所文集* (7) [C]. 64–71.
- 谢树成, Evershed R P, 2001. 泥炭分子化石记录气候变迁和生物演替的信息[J]. *科学通报*, 46 (10): 863–866.
- 杨桂芳, 武法东, 陈正洪, 等, 2015. 内蒙古磴口河湖相沉积物正构烷烃分布特征及其环境意义[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 40 (2): 327–333.
- 赵佳玉, 王淑贤, Andrey Darin, 等, 2021. 新疆阿尔泰全新世双湖沉积物正构烷烃分布及其环境意义[J]. *第四纪研究*, 41 (04): 965–975.
- 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.
- 郑艳红, 周卫健, 谢树成, 2007. 若尔盖高原全新世气候序列的类脂分子化石记录[J]. *第四纪研究*, 1: 108–113.