

羌塘盆地中侏罗统黑色岩系碳氧同位素特征 及其地质意义*

夏 芳 陈 兰 达雪娟 朱章雄 徐桂文

重庆科技大学地球科学系, 重庆 401331

摘 要 羌塘盆地中侏罗统黑色岩系因富含有机质而成为重要烃源岩之一。选择毕洛错剖面为研究对象, 以古生物地层学为基础, 依据 TOC 含量和碳氧同位素变化, 深入分析该剖面中侏罗统巴通阶—卡洛夫阶 (Bathonian-Callovian) 黑色岩系的碳氧同位素时空分布规律, 探讨该时期的古环境、古气候等特征。结果显示: 研究区中侏罗统黑色岩系的 TOC 含量为 0~1.5%, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值为 $-24\text{‰} \sim -26\text{‰}$ (PDB), $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值为 $-4.819\text{‰} \sim -2.323\text{‰}$ (PDB) (平均值为 -0.659‰), $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-13.96\text{‰} \sim -0.66\text{‰}$ (PDB) (平均值 -7.37‰)。通过全球碳同位素地层对比, 认为巴通期底部 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 负偏与早—中侏罗世海退事件驱动的陆源输入增强相关; 中—晚巴通期至早卡洛夫期 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 正向偏移对应海洋初级生产力激增事件; 卡洛夫期至早牛津期, 沙特阿拉伯、巴黎盆地、波兰喀尔巴阡山脉以及羌塘盆地 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 普遍发生了正偏移现象, 且与高 TOC 页岩层段相对应, 表明富有机质黑色岩系的发育与大规模海侵有关, 并受控于全球海平面上升背景下有机质埋藏通量的增加。另外, 古生物学、岩石学以及氧化还原指标 ($V/(V+Ni)$ 、 V/Cr 、 Ni/Co 等) 显示, 该套黑色岩系形成于较还原的沉积环境中。上述成果揭示了羌塘盆地中侏罗统黑色岩系碳氧同位素时空分布具有全球性, 而且受控于还原条件、海平面上升等多种因素的控制。

关键词 碳氧同位素 全球对比 海平面变化 黑色岩系 中侏罗统 羌塘盆地

第一作者简介 夏芳, 女, 1998 年生, 重庆科技大学硕士研究生, 地质工程专业。E-mail: 2635410100@qq.com。

通讯作者简介 陈兰, 女, 1975 年生, 博士, 教授, 主要从事黑色页岩与大洋缺氧事件研究。E-mail: elle-10@163.com。

中图分类号: P597 文献标志码: A

Carbon and oxygen isotopes of the Middle Jurassic black rock series in Qiangtang Basin and their geological significances

XIA Fang CHEN Lan DA Xuejuan ZHU Zhangxiong XU Guiwen

Department of Earth Sciences, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China

Abstract The Middle Jurassic black rock series in the Qiangtang Basin serve as significant

* 国家自然科学基金 (编号: 42241203, 42272125, 41572095, U24A20597), 深地国家科技重大专项 (编号: 2024ZD1001005), 中国科学院地球化学研究所关键矿产成矿与预测全国重点实验室开放基金 (编号: 202512, 202409), 西藏自治区科技计划项目 (编号: XZ202401YD0006, XZ202403ZY0040) 共同资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42241203, 42272125, 41572095, U24A20597), Deep Earth Probe and Mineral Resources Exploration-National Science and Technology Major Project (No. 2024ZD1001005), Opening Foundations of the State Key Laboratories of Critical Mineral Research and Exploration, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (Nos. 202512, 202409) and Major Project of Science, Technology Department of Tibet Autonomous Region (Nos. XZ202401YD0006, XZ202403ZY0040)]

收稿日期: 2025-02-16 改回日期: 2025-05-26

hydrocarbon source rocks due to their high organic matter contents. The Biluo Co section was chosen as the research target. Based on paleontological stratigraphy and by analyzing the total organic carbon (TOC) contents as well as variations in carbon and oxygen isotopes, this study discussed the spatio-temporal distribution patterns of carbon and oxygen isotopes from the black rock series of the Bathonian-Callovian stages (Middle Jurassic), and the characteristics of the paleoenvironment and paleoclimate during this period. Results show that the TOC contents range from 0 to 1.5%, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values vary between -24‰ and -26‰ , -4.819‰ and 2.323‰ (mean values of -0.659‰), -13.96‰ and 0.66‰ (mean values of -7.37‰), respectively. According to the global carbon isotope correlations, the negative inorganic carbon excursions in the early Bathonian is associated with the enhanced terrigenous input triggered by the Early-Middle Jurassic regression event. The positive shifts of $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ from the Middle-Late Bathonian to the Early Callovian correspond to the event of a substantial surge in marine primary productivity. During the Callovian-Early Oxfordian, a widespread positive carbon isotopes anomalies and high TOC contents of shales occurred in regions such as the Qiangtang Basin, Saudi Arabia, Paris Basin, and Polish Carpathians, which shows that the organic-rich black rock series are closely related to large-scale marine transgressions and primarily driven by the increase in the burial flux of organic matters under the backdrop of global sea-level rise. Moreover, paleontological and petrological characteristics, and redox-sensitive proxies (e.g., $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$, V/Cr , Ni/Co ratios) suggest that the black rock series deposited in a relatively reducing sedimentary environments. This study highlights that the carbon and oxygen isotopes of Middle Jurassic black rock series have the global distribution patterns influenced by multiple factors, including redox conditions, sea-level fluctuations, burial dynamics of organic matters, and so on.

Key words carbon and oxygen isotope, global correlation, sea-level changes, black rock series, Middle Jurassic, Qiangtang Basin

About the first author XIA Fang, born in 1998, master degree candidate, majors in geological engineering. E-mail: 2635410100@qq.com.

About the corresponding author CHEN Lan, born in 1975, professor, is engaged in research on black shales and oceanic anoxic events. E-mail: ellc-10@163.com.

0 引言

西藏羌塘盆地拥有世界上面积最大的海相侏罗纪地层,因自然条件恶劣,研究程度较低。然而,该时期地层在整个东特提斯域占有十分重要的地位,尤其是双湖—安多地区侏罗系含颗石藻的黑色岩系(陈兰等, 2003; Chen *et al.*, 2019, 2023),既是研究区油气勘探的重点(王成善和张哨楠, 1996; 和钟铎等, 2000; 李勇等, 2001; 吴珍汉等, 2014; 王剑等, 2020; 杨易卓等, 2022),也是该期古海洋学研究最理想的地层。毕洛错地区因发育中侏罗统优质烃源岩而备受关注(王成善等, 2004; 王剑, 2009; 季长军, 2015; 吴珍汉等, 2016; 杨易卓等, 2022),但地层时代一直存有争议,从晚三叠世、早侏罗世和中侏罗世均有报道(吴瑞忠等, 1986; 赵政璋和李永铁, 2000; 伊海

生等, 2003; Xia *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2016; Fu *et al.*, 2016; Yin, 2022; 王剑等, 2024),而根据颗石藻化石以及方解石 U-Pb 定年,认为毕洛错黑色岩系地层时代归属于中侏罗世 Bathonian-Callovian (Chen *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024)。近年来,也有学者主要利用沉积学、元素地球化学等讨论其沉积环境、古海洋学意义(Chen *et al.*, 2013; Fu *et al.*, 2010, 2014; Jenkyns *et al.*, 2013),但很少有学者进行碳氧同位素特征分析,尤其是依据碳同位素偏移讨论极端事件的古海洋、古气候以及开展地层对比。

已有研究表明,该套油页岩 TOC 含量较高,且热演化程度达到成熟至高成熟阶段,表明其具备良好的生烃潜力(季长军, 2015)。在此基础上,伊帆等(2016)进一步发现油页岩层段 TOC 含量

与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值具有显著的负—正旋回变化特征, 与早侏罗世 Toarcian 期全球大洋缺氧事件 (T-OAE) 相关。值得一提的是, 尽管上述研究揭示了烃源岩丰度和对 T-OAE 的响应, 但针对其氧化还原特征、海平面变化、古生产力以及古气候条件等研究仍不够深入。近年来, Chen 等 (2023) 在巴通阶识别出 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 负偏移事件, 偏移幅度约为 -4‰ , 并结合氧化还原敏感元素 (如 Mo、U 等) 及生产力指标 (如 Ba), 认为研究区碳同位素负偏移可能受控于古生产力与局部缺氧环境的协同作用, 这为古环境重建提供了有力证据。然而, 已识别出的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 负偏移是否具有全球性, 与其他盆地在时空分布上的变化规律是否相似, 尚不清楚。因此, 本研究选择双湖毕洛错黑色岩系为研究对象, 在已有研究基础之上, 将 TOC 含量与同位素地球化学 ($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$) 相结合, 总结碳氧同位素分布范围与变化趋势, 并与侏罗纪经典剖面对比, 分析碳氧同位素波动是否与有机碳埋藏或初级生产力等因素有关, 以进一步揭示这个时期的古海洋、古气候特征和生物演化, 为侏罗纪地层全球对比提供依据。

1 区域地质背景

羌塘盆地位于特提斯构造域东段, 南北边界分别为班公湖—怒江缝合带和可可西里—金沙江缝合

带 (图 1), 总体上具有两坳一隆的构造格局, 即北羌塘坳陷、中央隆起带和南羌塘坳陷 (胡承祖等, 1986; 夏代祥, 1986; 黄继钧, 2000; Liu *et al.*, 2016; 王剑和付修根, 2018)。

毕洛错剖面位于南羌塘坳陷 (图 2-A) (王成善等, 2001; Pan *et al.*, 2012)。研究区侏罗系地层从下至上依次为曲色组 (J_1q)、色哇组 (J_2s)、布曲组 (J_2b)、夏里组 (J_2x) 和索瓦组 (J_3s) (图 2-B) (王永胜和郑春子, 2008; 尹青等, 2015; 夏国清等, 2015; 薛伟伟等, 2020)。曲色组主要发育薄层状黑色泥页岩, 并夹有油页岩层、石膏层以及玄武岩等。色哇组以深灰色、灰色泥页岩、粉砂质泥岩/页岩、粉砂岩为主, 夹灰岩。布曲组主要发育薄层至厚层的灰色至灰黑色生屑灰岩、结晶灰岩, 并发育含油砂糖状白云岩。夏里组以碎屑岩为主, 含有少量碳酸盐岩及石膏层。索瓦组则以碳酸盐岩为主, 主要为生屑灰岩、结晶灰岩等 (王成善等, 2004; 伊海生等, 2014; 万友利等, 2017; 王忠伟等, 2017; 夏国清等, 2017; 薛伟伟等, 2020) (图 2-C)。毕洛错剖面主要包括中侏罗统布曲组和夏里组 (图 2-B), 岩性以灰黑色泥岩/页岩和深灰色泥晶灰岩为主。

由于毕洛错剖面可供研究的菊石化石证据相对较少, 同时对菊石化石的鉴定也存在误差, 导致对

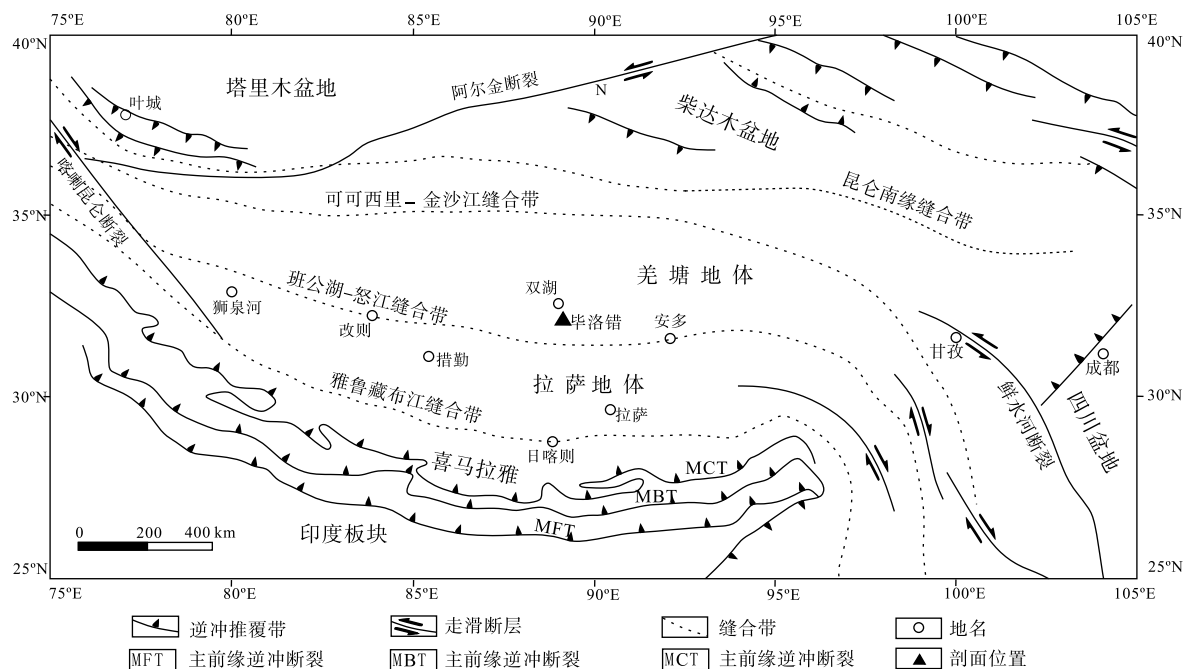


图 1 青藏高原大地构造简图 (修改于 Liu *et al.*, 2016)

Fig. 1 Simplified structural map of the Tibetan Plateau (modified from Liu *et al.*, 2016)

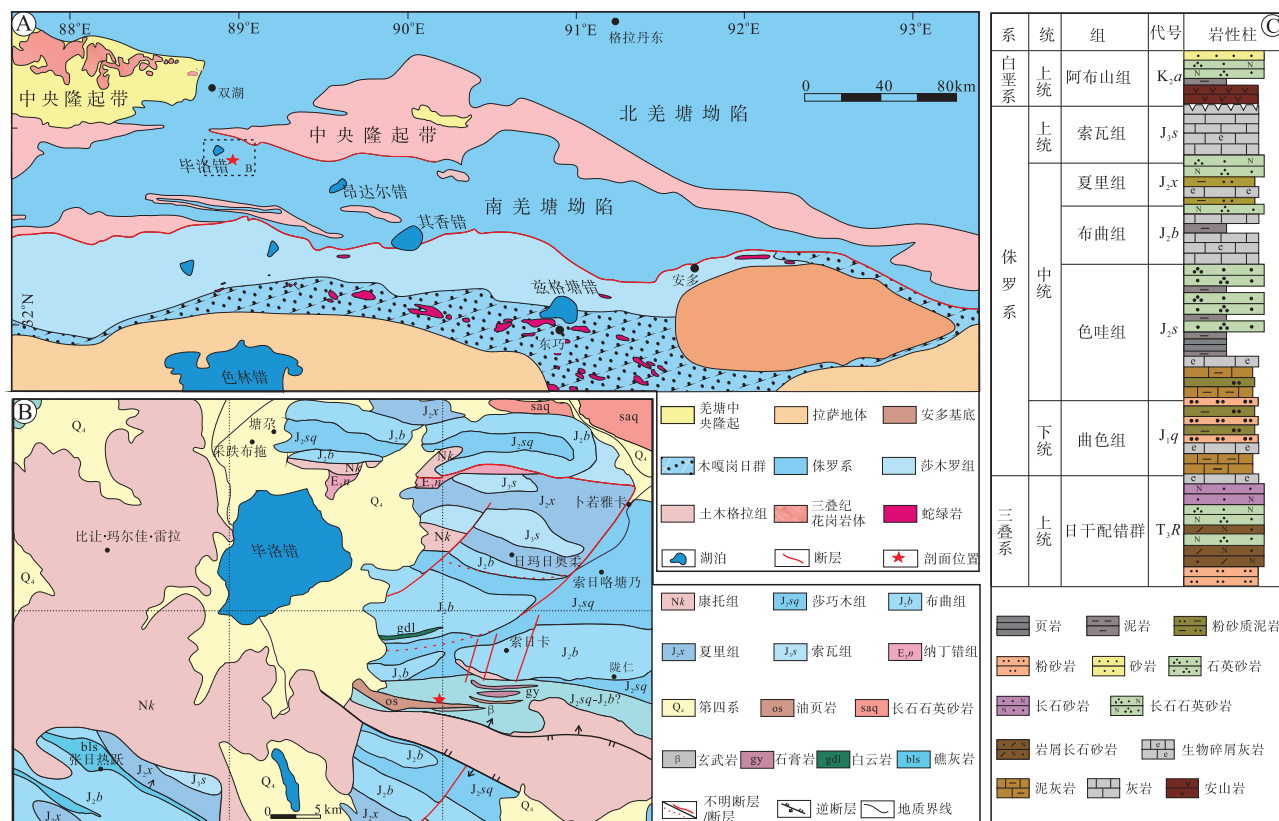


图 2 西藏羌塘盆地构造单元划分 (A)、毕洛错地区地层分布 (B) 及侏罗系地层综合柱状图 (C)

(据王永胜, 2006^①; Ma *et al.*, 2017; 薛伟伟等, 2020; 有修改)Fig. 2 Tectonic division of Qiangtang Basin in Tibet (A), strata distribution (B) and comprehensive stratigraphic column of the Jurassic in Biluo Co area (C) (modified from Wang, 2006; Ma *et al.*, 2017; Xue *et al.*, 2020)

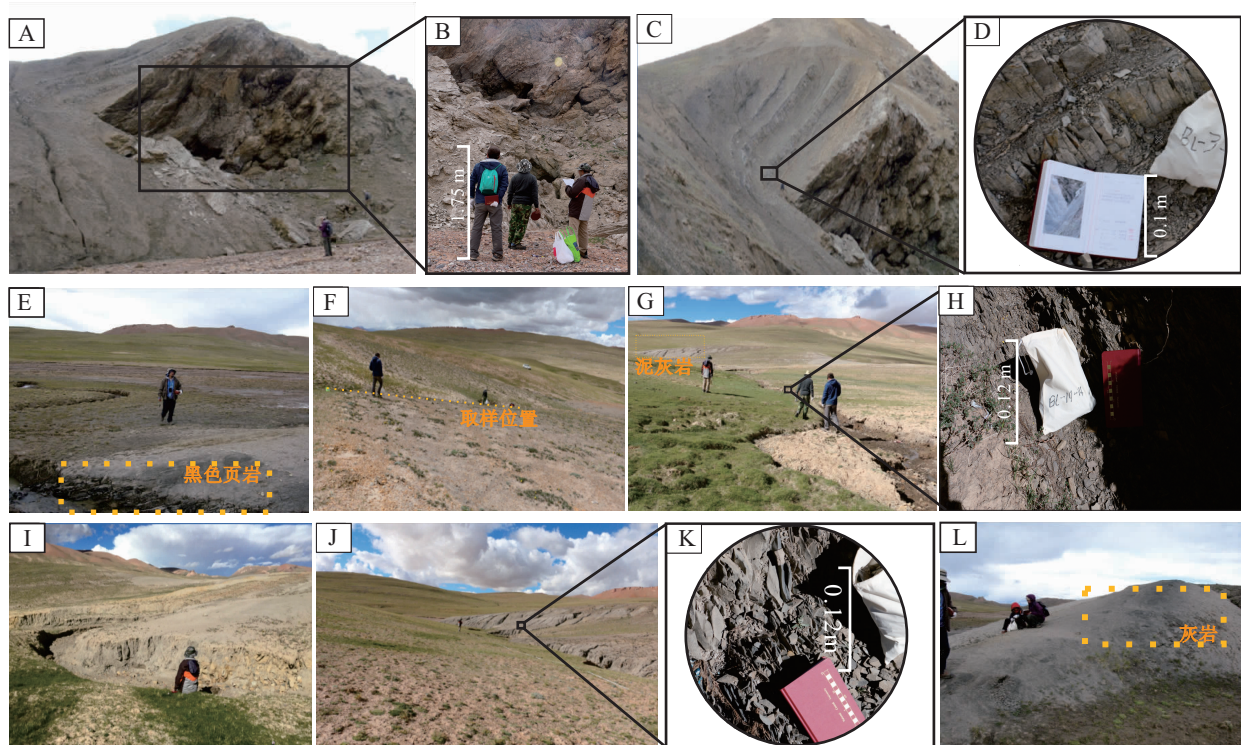
藏北地区侏罗纪地层的理解错误, 因此, 在生物地层研究及对比方面尚有不同的意见。比如: 毕洛错剖面的 22 块菊石标本, 经鉴定为 *Cleviceras cf. elegans*, 对应着欧洲 Toarcian 期 *Harpoceras falciferum* 菊石带 (伊海生等, 2003; Chen *et al.*, 2005; 阴家润等, 2006), 而剖面底部油页岩、灰岩中还发现了 *Dactylioceras sp.*, *Dactylioceras cf. directum* 菊石和丰富的双壳类 *Bositra buchii* (Roemer), *Cuspidaria sp.*, *Protocardia sp.* (阴家润等, 2006; 王永胜等, 2008)。但是, Yin (2022) 认为以上菊石化石鉴定有误, 重新鉴定后认为该剖面上部时代为中侏罗世 Callovian 期。然而, 颗石藻化石指示该剖面中上部为 Bathonian-Callovian 期, 可能延至早 Oxfordian 期 (Chen *et al.*, 2019, 2023), 底部 (0~50 m) 的孢粉组合指示其时代为早 Toarcian 期 (Xia *et al.*, 2021)。除此之外, 剖面底部油页岩

石定年为 184.4 ± 0.61 Ma (Fu *et al.*, 2016), 而方解石 U-Pb 定年为 165.6 ± 3.7 Ma (Wang *et al.*, 2024)。因此, 综合古生物和放射性同位素定年结果, 认为毕洛错剖面中上部为中侏罗世 Bathonian-Callovian 期, 顶部可能为 Oxfordian 期。

2 样品采集和实验方法

毕洛错剖面位于双湖地区毕洛错湖东侧, 可划分为 30 层, 真厚度约为 455.42 m。在剖面的下部 (0~130 m), 岩性以油页岩、泥灰岩、灰岩为主, 偶夹硅质和钙质泥岩, 底部为石膏; 中部 (130~240 m) 出露富含有机质的油页岩和石灰岩互层; 上部 (240~455.42 m) 则主要发育泥灰岩和灰岩互层, 夹有富含有机质的油页岩层 (图 3; 图 4)。本次挑选了 51 个新鲜样品, 进行了总有机碳

①王永胜. 2006. 1:250000 昂达尔错幅区调报告. 长春: 吉林省地质调查院.



A, B—剖面底部, 硬石膏层; C, D—BL-3-1, 剖面下部, 黑色页岩夹灰黑色钙质泥岩; E—剖面中下部, 黑色油页岩; F—13~18 层, 黑色页岩及泥岩 (风化显著); G, H—BL-19-14, 剖面中部, 黄色泥灰岩和灰黑色页岩互层, 含菊石及双壳类化石; I—剖面中上部, 23~24 层, 以灰绿色泥灰岩和灰黑色薄层页岩为主, 发育菊石化石; J, K—BL-28-1, 27~30 层, 灰色泥岩、泥灰岩; L—剖面顶部, 灰岩

图 3 羌塘盆地毕洛错剖面中侏罗统野外照片

Fig. 3 Field photographs of the Middle Jurassic at Biluo Co section in Qiangtang Basin

(TOC)、碳氧同位素以及元素地球化学分析。

测定总有机碳 (TOC) 和有机碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) 时, 首先取 2 g 样品粉末, 加入浓度 5% 的稀盐酸去除碳酸盐等无机矿物。处理后的样品需过滤和洗涤, 以确保所有氯化钙和碳酸盐残留被彻底清除。TOC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的实验分别在国家地质分析研究中心 (北京) 石油实验室 Vario Macrocube 和 MAT-253 质谱仪进行。对于无机碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$) 和氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$) 的实验, 先将研磨后的样品与 100% 磷酸 (H_3PO_4) 反应, 提取样品中的无机碳组分, 然后在同济大学的海洋地质国家重点实验室 Finnigan MAT-253 质谱仪进行测试。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 测试精度均为 0.01‰。

主量元素的测定通过 X 射线荧光 (XRF) 法完成, 分析误差控制在 1% 以内。微量元素的测试则是通过 Perkin-Elmer Sciex Elan 6000 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 进行, 其分析精度可以达到 5% 以上。元素地球化学实验在中国科学院地球化学研究所 (IGCAS) 关键矿产成矿与预测全国

重点实验室完成。

3 实验结果

3.1 有效性分析

碳同位素值的有效性和可靠性主要受到风化、成岩、热液作用及样品处理污染等因素影响, 其中风化和成岩作用是最主要的因素 (胡庆, 2011)。一般来说, 沉积后期, 在成岩作用或淡水淋滤作用下, Mn 元素可能会置换 Sr 元素, 导致 Mn 含量增加而 Sr 含量减少 (黄思静, 2010)。这种变化可以通过 Mn/Sr 值来指示, 而且该比值在一定程度上可以反映成岩作用的影响, 特别是当岩石中的 Mn/Sr 值远小于 10 时, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值更有可能是原始沉积碳同位素组成的可靠记录 (王大锐等, 2001)。

此外, 碳酸盐岩的原始氧同位素组成受到水体温度和盐度的影响, 可能在沉积后的成岩或埋藏过程中与热水发生同位素交换, 导致 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低。通常情况下, $\delta^{18}\text{O} < -5\text{‰}$ 时, 表明其可能经历了强

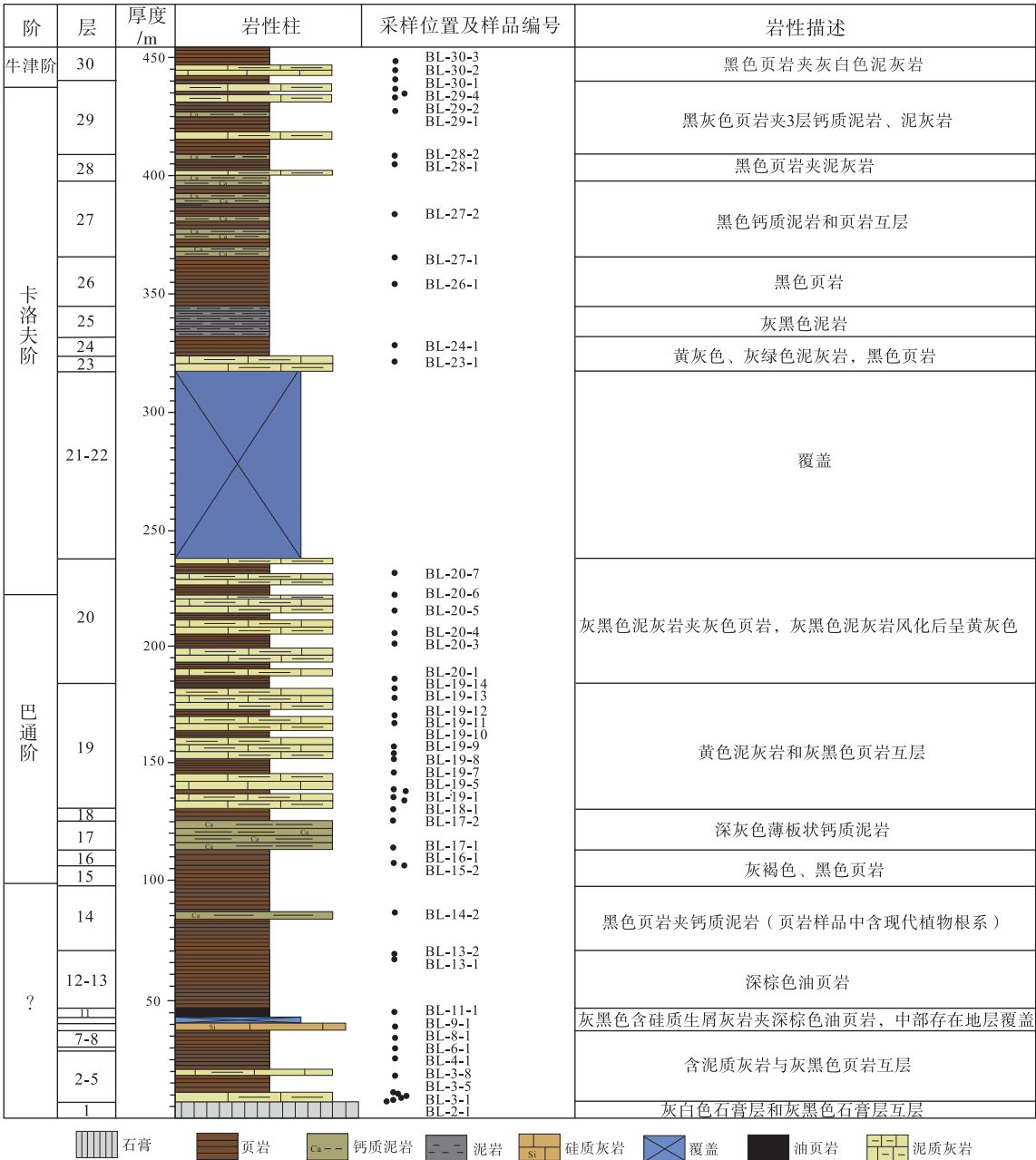


图 4 羌塘盆地毕洛错剖面中侏罗统综合柱状图（修改于 Chen *et al.*, 2023）

Fig. 4 Comprehensive stratigraphic column of the Middle Jurassic at Biluo Co section in Qiangtang Basin
(modified from Chen *et al.*, 2023)

烈的成岩蚀变，原始海水信号已显著改变，而 $\delta^{18}\text{O} > -10\text{‰}$ 则通常被认为是其碳同位素记录受后期改造影响较小，相对可靠（胡庆，2011）。除此之外， $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的相关性也是评估岩石同位素组成变化的有效性手段之一。成岩作用可能导致 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同时向较轻的方向变化，因此，经历成岩作用的岩石往往表现出 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的正相关性（胡庆，2011）。

毕洛错剖面所有样品的 Mn/Sr 值范围在 0.02 ~ 4.63 之间，且绝大多数比值低于 2（表 1）。同时，Mn/Sr 值与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 相关系数分别为 0.2316 和 0.0816，表明无明显的相关性（图 5）。 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 之间的相关系数为 0.0317（图 5），其 $\delta^{18}\text{O}$ 值域主要分布在 $-13.96\text{‰} \sim 0.66\text{‰}$ （PDB）之间，且多数样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值超过 -10‰ （表 1）。由此可见，绝大多数样品均保留了原始碳同位素组成。此

表 1 羌塘盆地毕洛错剖面中侏罗统黑色岩系地球化学特征

Table 1 Geochemical data of the Middle Jurassic black rock series at Biluo Co section in Qiangtang Basin

阶	样品编号	岩性	TOC /%	$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ /‰, PDB	$\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ /‰, PDB	$\delta^{18}\text{O}$ /‰, PDB	Mn / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Sr / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Mn/Sr	Ce / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Sr/Ba	Rb/K	P/Ti	Ba _{bio} / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
牛津阶	BL-30-3	黑色页岩	1.55	-26.193	0.350	-5.54	387.23	524.68	0.74	0.38	6.13	0.008	0.273	856
	BL-30-2	灰白色泥灰岩	0.90	-27.102	0.570	-6.53	387.23	591.82	0.65	0.38	6.30	0.009	0.437	939
	BL-30-1	黑色页岩	2.88	-26.156	0.732	-5.18	232.34	427.06	0.54	0.53	3.35	0.011	0.234	1274
卡洛夫阶	BL-29-4	泥灰岩	1.38	-26.074	0.196	-6.76	309.78	397.69	0.78	0.66	2.55	0.010	0.109	1557
	BL-29-3	黑色页岩	1.02	-24.489	0.774	-6.27	232.34	421.70	0.55	0.39	3.95	0.004	0.046	1068
	BL-29-2	泥灰岩	1.01	-26.533	0.008	-5.85	464.67	433.43	1.07	0.58	2.93	0.011	0.208	1477
	BL-29-1	黑色页岩	1.43	-26.135	0.509	-7.10	309.78	368.69	0.84	0.42	3.58	0.006	0.052	1029
	BL-28-2	钙质泥岩	0.79	-25.637	-0.719	-4.80	619.57	413.92	1.50	0.61	2.65	0.013	0.364	1563
	BL-28-1	黑色页岩	1.30	-25.889	0.241	-7.18	309.78	378.30	0.82	0.69	2.31	0.007	0.076	1639
	BL-27-2	页岩	1.90	-25.963	0.176	-5.70	309.78	348.64	0.89	0.80	0.89	0.008	0.294	3914
	BL-27-1	钙质泥岩	1.42	-26.796	0.784	-7.24	309.78	299.67	1.03	0.85	1.65	0.007	0.108	1814
	BL-26-1	黑色页岩	2.14	-26.458	-0.588	-7.20	387.23	300.43	1.29	0.28	4.16	0.002	0.256	723
	BL-24-1	黑色页岩	2.74	-25.605	0.109	-7.82	309.78	283.36	1.09	0.28	3.82	0.003	0.084	741
	BL-23-1	灰色泥灰岩	0.45	-27.286	0.950	-1.76	851.90	348.40	2.45	0.28	4.68	0.006	0.364	745
	BL-20-7	灰色页岩	0.16	-25.726	2.323	-0.60	851.90	294.37	2.89	0.72	1.69	0.027	0.364	1738
	BL-20-6	灰色页岩	2.51	-26.088	0.375	-9.25	309.78	292.94	1.06	0.34	3.28	0.002	0.069	892
巴通阶	BL-20-5	灰黑色泥灰岩	0.17	-25.213	-0.009	-1.84	929.35	337.71	2.75	0.20	4.86	0.006	0.232	695
	BL-20-4	灰黑色泥灰岩	0.46	-26.552	-1.107	-0.12	464.67	397.86	1.17	0.20	1.78	0.007	0.416	2237
	BL-20-3	灰色页岩	0.34	-25.886	1.273	-1.60	542.12	264.14	2.05	0.82	1.10	0.034	0.388	2395
	BL-20-1	灰色页岩	0.57	-24.980	0.715	-0.70	542.12	319.27	1.70	0.70	1.77	0.032	0.388	1804
	BL-19-14	黑色页岩	2.63	-26.017	0.079	-6.98	232.34	468.98	0.50	0.22	3.54	0.002	0.111	1325
	BL-19-13	黄色泥灰岩	0.41	-25.826	1.379	0.66	387.23	292.43	1.32	0.67	1.32	0.025	0.364	2213
	BL-19-12	灰色页岩	0.03	—	-2.764	-8.04	542.12	432.23	1.25	0.23	1.30	0.002	0.129	3336
	BL-19-11	黄色泥灰岩	0.80	-26.208	-3.147	-1.48	619.57	342.47	1.81	0.63	1.59	0.026	0.340	2153
	BL-19-9	黄色泥灰岩	—	—	0.109	-1.75	851.90	403.50	2.11	0.60	2.45	0.016	0.175	1646
	BL-19-8	黑色页岩	2.53	-26.880	0.508	-6.26	232.34	300.07	0.77	0.62	1.94	0.003	0.099	1543
	BL-19-7	黑色页岩	0.36	-25.511	-1.852	-11.43	774.46	344.94	2.25	0.63	2.03	0.014	0.208	1696
	BL-19-5	黄色泥灰岩	3.12	-26.587	0.202	-9.56	309.78	246.11	1.26	0.52	1.83	0.004	0.100	1348
	BL-19-4	黑色页岩	1.53	-26.312	-4.319	-7.01	851.90	184.16	4.63	0.97	0.77	0.013	0.159	2390
	BL-19-2	黄色泥灰岩	0.35	-27.797	-4.040	-8.93	1084.24	295.62	3.67	0.54	2.28	0.006	0.193	1297
	BL-19-1	黄色含泥质灰岩	0.41	-24.880	-3.843	-8.91	1084.24	306.36	3.54	0.79	1.12	0.015	0.171	2729
	BL-18-1	黑色页岩	0.00	—	-0.603	-9.67	309.78	252.90	1.22	0.40	2.43	0.002	0.088	1042
	BL-17-2	深灰色钙质泥岩	0.55	—	-4.814	-5.24	851.90	249.73	3.41	0.40	2.19	0.006	0.189	1139
	BL-17-1	深灰色钙质泥岩	0.54	-25.343	-4.819	-4.68	851.90	451.26	1.89	0.66	0.83	0.014	0.168	5451
	BL-16-1	黑色页岩	1.70	-26.276	-2.259	-7.91	697.01	271.97	2.56	0.96	1.17	0.035	0.668	2324
	BL-15-2	灰褐色页岩	4.10	-26.788	-0.268	-11.85	232.34	258.56	0.90	0.46	2.49	0.003	0.101	1040
	BL-14-2	钙质泥岩	0.49	—	-0.464	-8.77	851.90	344.95	2.47	0.41	2.54	0.062	1.942	1356
	BL-13-2	黑色页岩	1.21	-25.668	-0.298	-10.11	309.78	445.69	0.70	0.47	4.02	0.007	0.364	1109
	BL-13-1	黑色页岩	0.70	-24.319	-1.196	-9.10	309.78	438.88	0.71	0.47	3.85	0.007	0.188	1139
	BL-11-1	油页岩	0.00	—	-1.146	-8.86	77.45	161.56	0.48	0.46	0.87	0.008	0.448	1864
	BL-9-1	灰黑色含生屑灰岩	0.30	-24.668	-0.650	-7.37	309.78	1571.3	0.20	0.10	—	—	0.485	—
	BL-8-1	灰黑色页岩	0.82	-24.232	0.338	-9.87	232.34	545.16	0.43	0.35	8.62	0.007	0.291	632

续表 1

阶	样品编号	岩性	TOC	$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$	$\delta^{18}\text{O}$	Mn	Sr	Mn/Sr	Ce	Sr/Ba	Rb/K	P/Ti	Ba _{bio}
			/%	/‰, PDB	/‰, PDB	/‰, PDB	/μg·g ⁻¹	/μg·g ⁻¹		/μg·g ⁻¹				/μg·g ⁻¹
	BL-6-1	深褐色页岩	0.60	-25.057	0.192	-10.09	309.78	519.36	0.60	0.19	4.15	0.007	0.265	1252
	BL-4-1	灰黑色页岩	0.40	-25.361	-1.904	-10.70	309.78	442.98	0.70	0.17	2.71	0.007	0.218	1636
	BL-3-8	黑色页岩	1.24	-25.274	-1.351	-11.71	309.78	305.46	1.01	0.32	3.53	0.007	0.300	864
	BL-3-5	灰色泥质灰岩	0.47	-25.979	-0.450	-10.32	309.78	245.18	1.26	0.25	5.65	0.007	0.132	434
?	BL-3-4	黑色页岩	3.41	-25.165	-0.483	-10.24	154.89	241.41	0.64	0.77	1.08	0.007	0.121	2236
	BL-3-3	浅灰色含泥质灰岩	0.21	-26.248	0.239	-11.75	232.34	294.14	0.79	0.13	5.81	0.007	1.768	506
	BL-3-2	褐灰色页岩	0.30	-24.830	0.156	-12.11	232.34	231.68	1.00	0.47	2.00	0.007	0.146	1157
	BL-3-1	浅灰色含泥质灰岩	0.44	-25.917	0.586	-10.49	232.34	319.76	0.73	0.18	5.90	0.007	0.324	542
	BL-2-1	泥灰岩	0.38	-25.113	-0.791	-13.96	309.78	174.44	1.78	0.27	2.35	0.007	0.260	741

注：“-” 无数据。

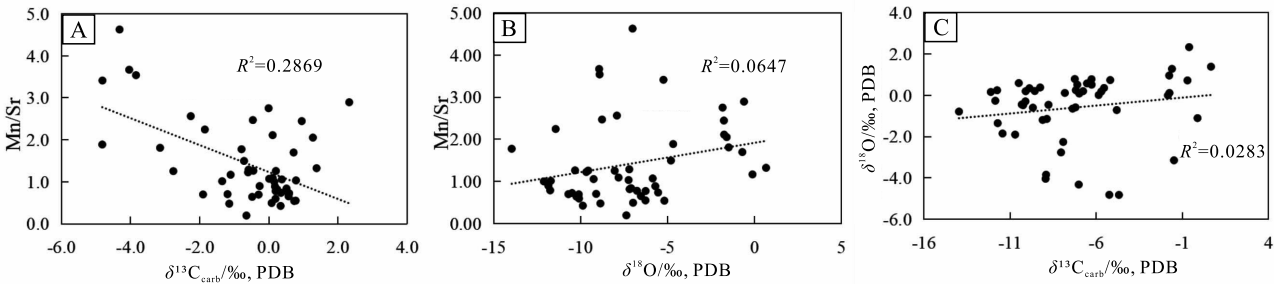


图 5 羌塘盆地毕洛错剖面中侏罗统黑色岩系 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 与 Mn/Sr (A)、 $\delta^{18}\text{O}$ 与 Mn/Sr (B) 以及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ (C) 相关性

Fig. 5 Correlation diagrams of $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ vs. Mn/Sr (A), $\delta^{18}\text{O}$ vs. Mn/Sr (B), and $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ (C) in black rock series at Biluo Co section in Qiangtang Basin

外，研究区该套黑色岩系生物标志化合物结果揭示该套地层有机质保存良好，生物降解程度低。这表明微生物分馏对有机碳同位素值的影响较小，因此其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值能够较好地保存原始生物来源与沉积环境的信息（季长军，2015）。故认为，毕洛错剖面样品的碳氧同位素组成未受成岩作用的影响，可以有效地反映原始地质信息。

3.2 结果

3.2.1 微量元素

氧化还原敏感元素 U、V、Cr、Co、Ni 以及 Th 特征可以重建沉积时期的古氧化还原环境（韦恒叶，2012；陈平等，2020）。毕洛错剖面黑色岩系 U 含量介于 0.32 ~ 1.10 μg/g 之间，平均 1.96 μg/g；V 为 15.22 ~ 170.44 μg/g，平均 71.56 μg/g；Cr、Co 和 Ni 的含量分别为 11.91 ~ 86.48 μg/g、6.34 ~ 21.554 μg/g、70.79 ~ 150.611 μg/g；Th 含量为 1.03 ~ 11.282 μg/g，平均 5.41 μg/g。

其中，Th 和 Cr 的含量比较低，平均值分别为 5.42 μg/g 和 0.48 μg/g（表 2）。

3.2.2 碳氧同位素

表 1 和图 6 显示，毕洛错剖面的总有机碳（TOC）含量分布在 0 ~ 1.5% 之间，平均值为 1.1%。有机碳同位素比值（ $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ）在 -24‰ ~ -26‰（PDB）之间变化，平均 -25.8‰（PDB）。无机碳同位素比值（ $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ ）的波动范围为 -4.819‰ ~ 2.323‰（PDB），平均 -0.659‰（PDB）。氧同位素比值（ $\delta^{18}\text{O}$ ）的变化范围为 -13.96‰ ~ 0.66‰（PDB），平均 -7.37‰（PDB）。

在剖面底部（0 ~ 100 m），TOC 含量普遍低于 1%， $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值从 -26‰ 下降至 -27‰，而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值主要在 -1‰ 左右波动， $\delta^{18}\text{O}$ 值在近 10‰ 处相对稳定。在剖面顶部 222 ~ 437 m（卡洛夫阶）和 437 ~ 455.3 m（牛津阶），TOC 含量普遍超过 1%， $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值主要分布在 -26‰ ~ -27‰ 之间， $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值在 0 附近波动，而 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -6‰ 附近波动明显。

表 2 羌塘盆地毕洛错剖面中侏罗统黑色岩系元素地球化学数据

Table 2 Elemental geochemical data of the Middle Jurassic black rock series at Biluo Co section in Qiangtang Basin

阶	样品编号	岩性	含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$						
			U	V	Cr	Co	Ni	Th	δU
牛津阶	BL-30-3	黑色页岩	1.11	42.53	33.92	8.38	96.98	4.15	0.89
	BL-30-2	灰白色泥灰岩	1.39	44.11	39.13	8.61	101.89	4.60	0.95
	BL-30-1	黑色页岩	1.56	63.20	50.02	10.49	93.40	6.74	0.82
卡洛夫阶	BL-29-4	泥灰岩	1.77	80.01	56.45	11.65	87.67	8.87	0.75
	BL-29-3	黑色页岩	1.20	48.91	38.68	9.47	90.57	4.78	0.86
	BL-29-2	泥灰岩	1.79	71.50	54.18	10.76	92.26	7.30	0.85
	BL-29-1	黑色页岩	1.09	49.93	42.36	9.30	91.36	4.74	0.82
	BL-28-2	钙质泥岩	1.72	80.35	59.05	11.75	92.53	7.32	0.83
	BL-28-1	黑色页岩	1.79	78.12	60.00	11.88	91.65	7.78	0.82
	BL-27-2	页岩	2.12	88.86	68.19	12.48	87.31	8.98	0.83
	BL-27-1	钙质泥岩	1.97	96.46	66.43	12.59	92.32	8.51	0.82
	BL-26-1	黑色页岩	0.65	41.36	28.91	7.10	74.84	3.22	0.75
	BL-24-1	黑色页岩	0.67	39.59	29.24	7.04	95.64	3.20	0.78
	BL-23-1	灰色泥灰岩	0.60	40.55	24.61	7.73	80.64	3.06	0.74
	BL-20-7	灰色页岩	2.13	100.04	68.13	12.78	95.96	8.54	0.86
	BL-20-6	灰色页岩	0.73	57.77	36.42	8.83	80.88	4.08	0.70
	BL-20-5	灰黑色泥灰岩	0.57	31.58	25.49	6.44	77.97	2.43	0.83
	BL-20-4	灰黑色泥灰岩	0.50	42.69	24.09	6.84	77.39	2.53	0.74
巴通阶	BL-20-3	灰色页岩	1.99	101.65	74.01	14.42	81.51	10.17	0.74
	BL-20-1	灰色页岩	1.95	86.70	64.29	10.37	92.34	8.30	0.83
	BL-19-14	黑色页岩	0.50	46.08	24.73	6.34	70.79	2.62	0.73
	BL-19-13	黄色泥灰岩	1.70	91.45	63.06	11.70	79.42	7.82	0.79
	BL-19-12	灰色页岩	0.67	62.19	31.01	6.49	74.67	2.66	0.86
	BL-19-11	黄色泥灰岩	2.27	98.08	69.01	12.25	96.55	7.45	0.95
	BL-19-9	黄色泥灰岩	1.84	89.74	59.74	9.66	88.34	7.00	0.88
	BL-19-8	黑色页岩	1.41	60.28	44.62	12.59	99.91	5.89	0.84
	BL-19-7	黑色页岩	2.99	112.98	63.62	11.53	109.58	7.41	1.10
	BL-19-5	黄色泥灰岩	1.33	73.06	47.38	12.74	73.24	5.73	0.82
	BL-19-4	黑色页岩	3.33	156.45	86.48	16.54	109.23	10.75	0.96
	BL-19-2	黄色泥灰岩	1.20	71.54	44.10	11.30	78.71	5.56	0.79
	BL-19-1	黄色含泥质灰岩	2.10	105.27	73.07	11.78	75.10	9.44	0.80
	BL-18-1	黑色页岩	0.88	63.11	45.26	10.05	76.81	4.44	0.74
	BL-17-2	深灰色钙质泥岩	0.87	58.62	43.85	9.71	75.84	4.46	0.74
	BL-17-1	深灰色钙质泥岩	3.73	145.40	62.45	16.84	115.65	6.98	1.23
	BL-16-1	黑色页岩	3.09	137.53	76.99	10.83	70.84	11.28	0.90
	BL-15-2	灰褐色页岩	7.27	170.44	46.28	15.42	144.49	5.07	1.62
?	BL-14-2	钙质泥岩	0.32	37.73	12.40	21.55	33.97	4.28	1.56
	BL-13-2	黑色页岩	1.52	59.71	52.39	10.15	99.96	4.61	0.99
	BL-13-1	黑色页岩	1.49	59.67	51.26	9.47	102.45	4.76	0.97
	BL-11-1	油页岩	5.97	128.28	60.46	14.96	82.68	5.06	1.56
	BL-9-1	含生屑灰岩	0.57	18.19	21.08	6.50	115.92	1.03	1.25
	BL-8-1	灰黑色页岩	1.57	45.55	36.30	9.34	107.69	3.60	1.13

续表 2

阶	样品编号	岩性	含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$						
			U	V	Cr	Co	Ni	Th	δU
	BL-6-1	深褐色页岩	1.02	22.82	24.42	7.60	113.95	1.95	1.22
	BL-4-1	灰黑色页岩	0.87	23.24	18.44	7.11	107.94	1.76	1.19
	BL-3-8	黑色页岩	2.45	49.29	26.37	9.89	104.29	2.73	1.46
	BL-3-5	灰色泥质灰岩	0.84	20.51	53.55	7.17	83.65	1.91	1.14
?	BL-3-4	黑色页岩	2.27	90.18	22.17	14.07	113.37	8.68	0.88
	BL-3-3	含泥质灰岩	0.56	15.22	74.66	7.24	86.99	1.16	1.18
	BL-3-2	褐灰色页岩	1.50	60.61	11.91	12.15	113.91	5.09	0.94
	BL-3-1	含泥质灰岩	0.72	21.65	14.56	6.78	104.08	1.65	1.13
	BL-2-1	泥灰岩	1.10	27.42	21.55	7.76	99.62	2.52	1.13

注：“-” 无数据； $\delta\text{U}=2\times\text{U}(\text{U}+\text{Th}/3)$ （张晓，2021）。

在剖面中下部 100 ~ 169 m（巴通阶早期），TOC 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 波动明显，出现明显的负偏移。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值在 4.10‰ ~ 0.35‰ 之间变化， $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值在 -0.268‰ ~ -4.04‰ 之间变化。169 m 之上，TOC 值正偏移至 2.53%（BL-19-2 至 BL-19-11），最终稳定在 0.17%（BL-20-5）； $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值上升至 -1.517‰（BL-19-2 至 BL-19-11），并在 -0.009‰（BL-20-5）趋于稳定； $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值介于 -27.797‰ ~ -26.788‰ 之间，而 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -11.85‰ ~ -8.93‰ 之间波动（BL-15-2 至 BL-19-2），最终在 217 m 处趋于稳定（图 6）。

4 讨论

4.1 古沉积环境

4.1.1 氧化还原环境

古氧相是指古环境中的氧化还原条件，通常根据底水的氧气浓度将氧化还原状态划分为氧化、贫氧、缺氧和硫化（Werne *et al.*, 2003）。氧化还原敏感性元素（如 U、V、Mo、Cr、Co 和 Ni 等）含量及其特征比值被广泛应用于判别沉积水体的氧化还原状态（Jones and Manning, 1994; Tribouillard *et al.*, 2006; 韦恒叶, 2012）。 $\text{V}/\text{Cr}<2$ 指示氧化环境，2~4.25 指示贫氧环境， >4.25 指示缺氧环境（Jones and Manning, 1994）（表 3）。此外， $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})>0.84$ 通常指示缺氧环境，0.60 ~ 0.84 指示贫氧环境， <0.46 则指示富氧环境。

研究区黑色岩系样品中， V/Cr 值为 0.86 ~ 3.68，平均值为 1.5，其中剖面底部（巴通阶）4

个样品的 V/Cr 值均大于 2。 Ni/Co 值范围为 5.52 ~ 17.83，平均值为 9.63。 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值为 0.11 ~ 0.66，平均值为 0.4。 U/Th 值为 0.18 ~ 1.43，平均值为 0.38（图 7）。其中，有 4 个样品的 U/Th 值大于 0.75。同时， δU 值的分布范围为 0.7 ~ 1.62，平均值为 0.9，其中 13 个样品的 δU 值大于 1。以上特征比值表明，该套黑色岩系沉积于贫氧—弱还原条件下。另外，该套黑色岩系以平行层理为主的黑色页岩、泥灰岩为主（图 3），通过生物标志化合物参数（ $\text{Pr}/\text{Ph}<2$ ，重排甾烷 $\text{C}_{27}/\text{规则甾烷}$ $\text{C}_{27}<1$ ）证实了毕洛错剖面黑色岩系形成于还原环境中（张晓，2021）。Chen 等（2023）发现巴通期—卡洛夫期 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 显著正偏移与颗石藻富集的协同演化特征，揭示古海洋生产力勃发与缺氧事件的耦合机制。图 9 中 δCe 普遍大于 0，指示缺氧环境（樊秋爽等，2022）。因此，微量元素特征比值结合岩性、生物标志化合物及同位素记录等显示，研究区该套黑色岩系形成于较还原的沉积环境。

4.1.2 古生产力

海洋生产力作为海洋生态系统的核心驱动力，其波动直接记录于沉积物中，成为解析地质灾变事件中生物集群灭绝—生态系统复苏过程的关键研究内容（伊帆，2018）。研究表明，特定微量元素（如 P、Ba）通过生物吸收—埋藏过程在沉积物中发生富集，可有效作为古海洋生产力的重要替代指标（Algeo *et al.*, 2007）。然而，P 含量指标易受陆源碎屑输入的干扰，难以独立示踪原始生产力。鉴于此，研究者提出采用 P/Ti 元素比值法，通过 Ti 对陆源碎屑贡献量的标准化处理，有效剔除成岩过

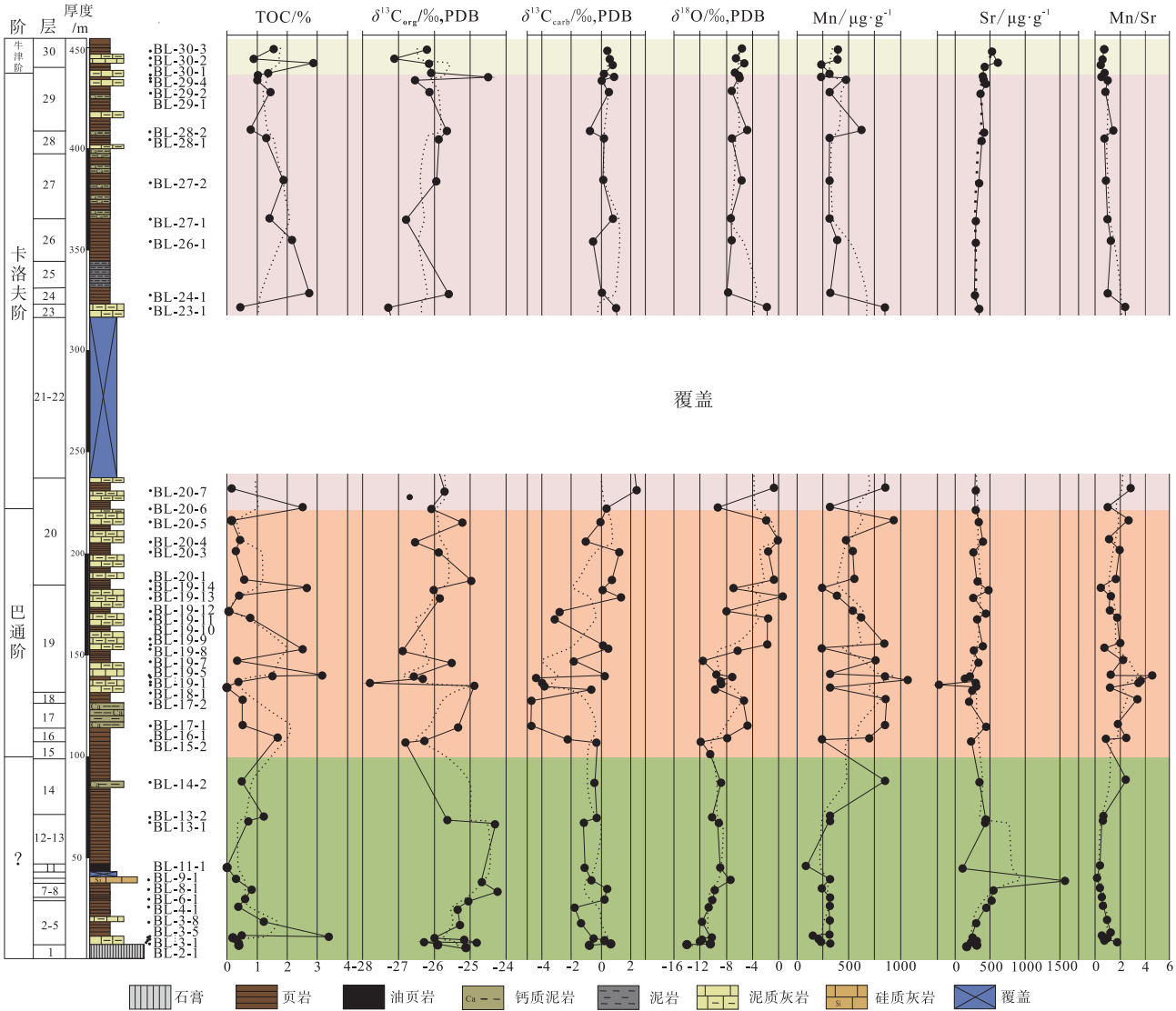


图 6 羌塘盆地毕洛错剖面中侏罗统黑色岩系碳氧同位素组成及变化曲线
(虚线为 3 点移动平均曲线, 实线为实际变化曲线)

Fig.6 Carbon and oxygen isotope compositions and variations of the Middle Jurassic black rock series at Biluo Co section in Qiangtang Basin (The dashed line represents the three-point moving average curves, and the solid line represents the actual change curves)

表 3 氧化还原敏感元素指标 (据 Jones and Manning, 1994)

Table 3 Trace-metal redox proxies (after Jones and Manning, 1994)

古氧化还原环境	V/Cr	Ni/Co	V/(V+Ni)	U/Th	δU
缺氧、还原环境	> 4.25	> 7.0	> 0.84	> 1.25	> 1
贫氧	2.0~4.25	5.0~7.0	0.60~0.84	0.75~1.25	
富氧、氧化环境	< 2.0	< 5.0	< 0.6	< 0.75	< 1

程中陆源输入的影响, 显著提升古生产力评估精度 (Zhao *et al.*, 2021)。

此外, 生物成因 Ba_{bio} 含量也被广泛用作古生产力的指标。 Ba_{bio} 是指沉积物中 Ba 元素总含量减

去陆源碎屑中 Ba 的含量, 其计算公式如下 (Francois *et al.*, 1995):

$$Ba_{bio} = Ba_{tot} - [Al \times (Ba/Al)_{detrital}] \quad (1)$$

其中, Ba_{bio} 表示生物成因 Ba 含量; Al 和 Ba_{tot}

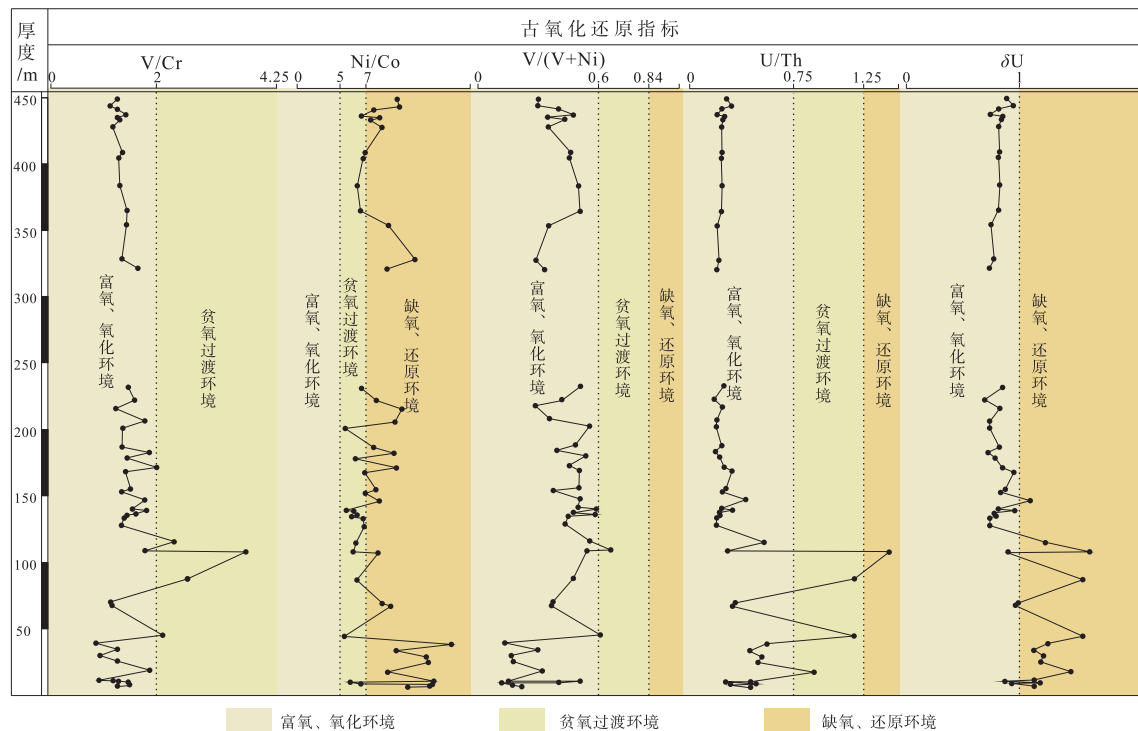


图 7 羌塘盆地毕洛错剖面中侏罗统黑色岩系古氧化还原环境垂向分布

Fig. 7 Vertical distribution profile of palaeosalinity and palaeoredox parameters of the Middle Jurassic black rock series at Biluo Co section in Qiangtang Basin

分别为测试样品中 Al 和 Ba 元素的总含量； $(Ba/Al)_{\text{detrital}}$ 是平均地壳岩石中 Ba/Al 值，其范围介于 0.0032 ~ 0.0046 之间，平均值为 0.0039 (Shen *et al.*, 2015)。本次研究中，选用 0.0039 作为 $(Ba/Al)_{\text{detrital}}$ 的计算值。根据 Ba_{bio} 含量的大小，可将古生产力水平划分为低等 ($< 200 \mu\text{g/g}$)、中等 ($200 \sim 1000 \mu\text{g/g}$) 和高等 ($> 1000 \mu\text{g/g}$) 3 个等级。图 8 显示了研究区 Sr/Ba、P/Ti、 Ba_{bio} 变化规律。

如图 8 所示，巴通阶黑色岩系的 P/Ti 平均值为 0.23， Ba_{bio} 含量平均值为 $1990.15 \mu\text{g/g}$ 。数据显示，该层位多数样品 Ba_{bio} 含量超过 $2000 \mu\text{g/g}$ ，部分样品 Ba_{bio} 值可达 $5000 \mu\text{g/g}$ 以上，反映中高生产力水平特征，表明巴通阶古生产力存在显著波动。相比之下，卡洛夫阶黑色岩系的 P/Ti 值为 $0.046 \sim 0.36$ (均值 0.184)， Ba_{bio} 含量介于 $722.5 \sim 3914.2 \mu\text{g/g}$ 之间 (均值 $1453.8 \mu\text{g/g}$)，整体呈现相对稳定的中等生产力水平，仅在卡洛夫阶上部出现突发性增长，但非峰值期数值均低于 $2000 \mu\text{g/g}$ 。

综上所述，毕洛错剖面古生产力总体以中等为主，其中从剖面底部至巴通阶沉积期，古生产力呈

现显著波动特征，以中—高水平为主导，而卡洛夫—牛津阶则以稳定中等生产力为主，仅个别样品显示高生产力特征。

4.1.3 古海平面变化

Ce 异常为研究相对海平面波动提供了一种方法 (Wright *et al.*, 1987; Wang *et al.*, 2016)。该指标不仅可有效示踪氧化还原界面垂向迁移过程，更应用于海平面升降旋回的定量反演。其理论基础源于 Elderfield 和 Greaves (1982) 提出的铈元素分馏机制： Ce^{3+} 与 Ce^{4+} 价态转化过程导致其在水体—沉积物系统中的差异性富集行为，这种地球化学行为可通过 δCe 来反映，计算如下：

$$\delta\text{Ce} = \log[3\text{Ce}_N / (2\text{La}_N + \text{Nd}_N)] \quad (2)$$

式中： La_N 、 Ce_N 、 Nd_N 为北美页岩标准化值 (NASC, Gromet *et al.*, 1984)，分别为 $32 \mu\text{g/g}$ 、 $64 \mu\text{g/g}$ 、 $32 \mu\text{g/g}$ 。研究显示，Ce 正异常通常对应氧化环境增强或海平面降低的过程，而负异常则反映还原条件或海平面上升的沉积背景 (Wilde *et al.*, 1996)。值得注意的是，寒武系黑色页岩和燧石—磷灰石在气候变暖和海侵引起的缺氧条件下形成，并具有明显的 Ce 异常 (Guo *et al.*, 2007)，这一现

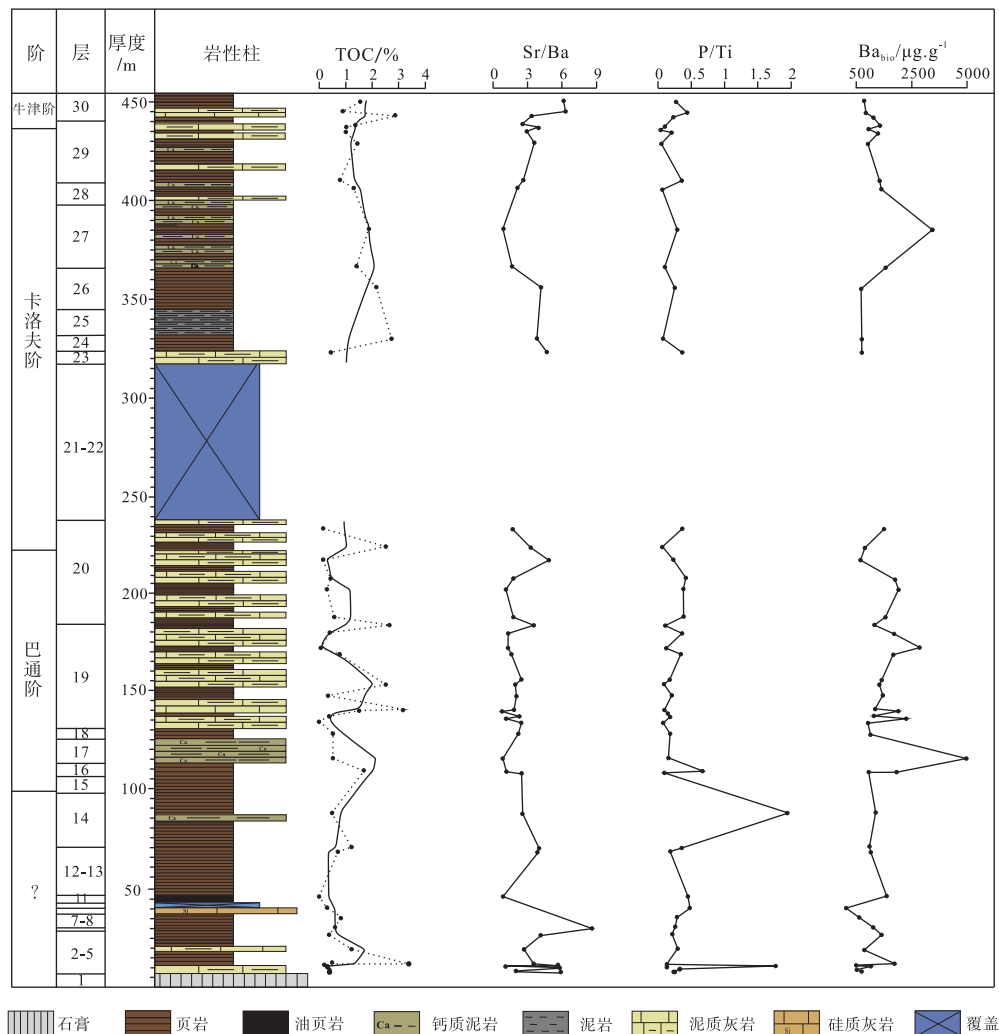


图 8 羌塘盆地毕洛错剖面中侏罗统黑色岩系 TOC 含量以及古生产力指标垂向变化

Fig. 8 Stratigraphic variations of TOC contents and paleoproductivity proxies of the Middle Jurassic black rock series at Biluo Co section in Qiangtang Basin

象证实全岩 Ce 指标不仅具有与海相碳酸盐生物壳体（如牙形石、鱼鳞化石）相似的环境指示功能，更能有效排除沉积作用差异或成岩改造等因素的干扰，为古海水氧化还原状态和海平面波动提供可靠的证据（Yang *et al.*, 1999）。

毕洛错剖面黑色岩系 δCe 介于 $-0.03 \sim 0.06$ 之间, 平均值为 -0.03 (图 9), 指示其为整体稳定的水体环境。基于剖面的 Ce 异常变化曲线, 可以识别出 (至少) 2 次海平面相对升降的周期变化。一般来说: $\delta\text{Ce} \approx 0$, 表示没有明显的 Ce 异常, Ce 的行为与其他稀土元素一致; $\delta\text{Ce} > 0$, 表示正 Ce 异常, Ce 相对富集, 通常与氧化环境相关 (Ce^{3+} 被氧化为 Ce^{4+} 并沉淀); $\delta\text{Ce} < 0$, 表示负 Ce 异常, Ce 相对亏损, 通常与还原环境相关 (Ce^{4+} 被还原为

Ce^{3+} ，并保持溶解状态)。图 9 显示，根据 Ce 异常值研究区可明显划分出 2 个海泛面，在巴通阶之下，海平面为明显的下降期（即剖面第 1~20 层），而卡洛夫阶—牛津阶海平面逐渐上升。

4.2 中侏罗统全球 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 对比

毕洛错剖面的黑色岩系中侏罗统碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$) 变化特征与全球同期变化高度一致 (Brigaud *et al.*, 2009; Arabas *et al.*, 2016; Al-Mojel *et al.*, 2018), 特别是巴通阶—卡洛夫阶界线具有较好的全球可对比性(图 10), 为剖面中上部地层时代提供更有利的证据。

在下巴通阶, 羌塘盆地毕洛错剖面的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 在 110~128 m 处记录了 1 个显著的负偏移, 其值从

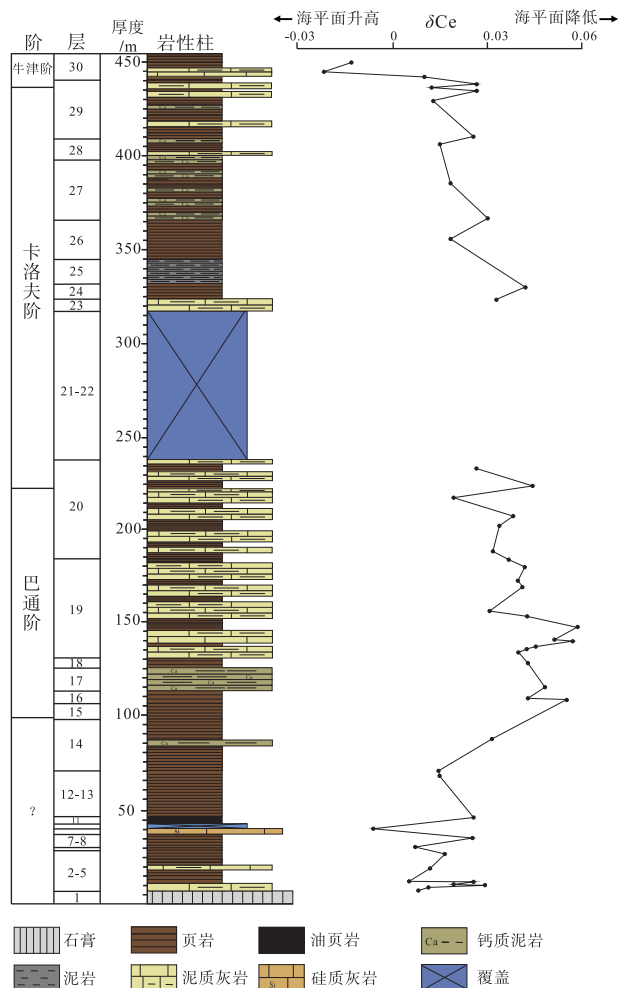


图 9 羌塘盆地毕洛错剖面中侏罗世海平面变化
Fig. 9 The Middle Jurassic sea-level changes at Biluo
Co section in Qiangtang Basin

-0.25‰降至-4.85‰, 偏移量为 4.6‰ (图 10-A), 这一显著 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 异常在阿拉伯板块 (沙特阿拉伯) 以及欧亚板块 (巴黎盆地、喀尔巴阡山脉) 以及等地均有出现。沙特阿拉伯的 Khashm adh Dhibi 剖面 (230~275 m 处, 图 10-B) 以及 Wadi Birk 剖面 (240~315 m 处, 图 10-C) 均可发现明显的负偏移现象, 偏移量约为 2‰ (Al-Mojel *et al.*, 2018)。而欧亚板块的巴黎盆地 (图 10-D) 以及波兰喀尔巴阡山脉 Arda 剖面 (图 10-E) 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值同样出现了显著的负偏移, 偏移量可达 4‰ (Brigaud *et al.*, 2009; Arabas *et al.*, 2016)。

在巴通阶至卡洛夫阶, 羌塘盆地毕洛错剖面的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 在 135~230 m 处急速上升, 其值从 -4‰ 上升至 1‰, 偏移量为 5‰, 并且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值波动明显。

这一现象在沙特阿拉伯的 Khashm adh Dhibi 剖面、Wadi Birk 剖面以及欧亚板块的巴黎盆地以及波兰喀尔巴阡山脉 Arda 剖面均有相同变化, 偏移量在 2‰~4‰ 之间。中一晚卡洛夫阶, 研究区与阿拉伯板块以及欧亚板块 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 均为正异常, 除毕洛错剖面变化幅度较小外, 其余剖面均有显著变化, 其变化幅度为 2‰~4‰ (图 10)。

4.3 碳偏移机制探讨

碳同位素组成变化受到沉积环境、海平面波动及有机碳循环等因素影响。在近岸环境中, 陆源有机碳输入及其氧化作用可造成溶解态 ^{12}C 的富集, 进而导致碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低 (Coimbra *et al.*, 2014)。与开阔海域相比, 内陆架水体的同位素值往往因生物泵效应难以完全平衡, 导致近岸碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低。当发生海退时, 河流输送的 ^{12}C 有机碳通量显著增加, 大陆架底层有机沉积物发生再活化, 从而导致 $\delta^{13}\text{C}$ 值出现显著负偏 (Arthur *et al.*, 1987)。而相对海平面上升阶段, 增强的陆架—开阔海连通性促使 ^{12}C 贫乏, 海洋水体持续输入, 碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高。

毕洛错剖面中侏罗统碳同位素演化特征与全球相似, 记录了 3 次显著的偏移事件, 分别为晚巴通阶、中一晚巴通阶至晚卡洛夫阶和中一晚卡洛夫阶。在欧洲陆表海与特提斯洋大陆边缘同期地层中亦出现碳同位素偏移。其中, Bartolini 等 (1999) 对意大利中部 Umbria-Marche 盆地中侏罗世中一晚期的碳同位素偏移机制进行了深入研究, 发现放射虫群落多样性演变与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 曲线及燧石含量变化存在显著耦合关系, 其中晚巴通阶—早卡洛夫阶 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 正偏移与燧石含量激增及放射虫群落演替同时发生。此次研究提出了该时期碳同位素正偏移可能与海洋初级生产力升高有关, 有机碳埋藏效率的提升导致海水 ^{13}C 相对富集。Arabas 等 (2016) 对波兰克拉科夫—西里西亚地区 (Pieniny Klippen Belt) 中一晚侏罗世碳酸盐岩的碳氧同位素研究为此提供了佐证, 认为晚卡洛夫阶—中牛津阶 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 正偏移与全球性海平面上升有关。海侵过程扩展了陆架生产力区域、促进了有机质埋藏, 最终驱动海水 ^{13}C 值升高。Al-Mojel 等 (2018) 对沙特阿拉伯 Khashm Adh Dhibi 和 Wadi Birk 剖面 1340 件样品进行了系统研究, 表明巴柔阶—巴通阶过渡期 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$

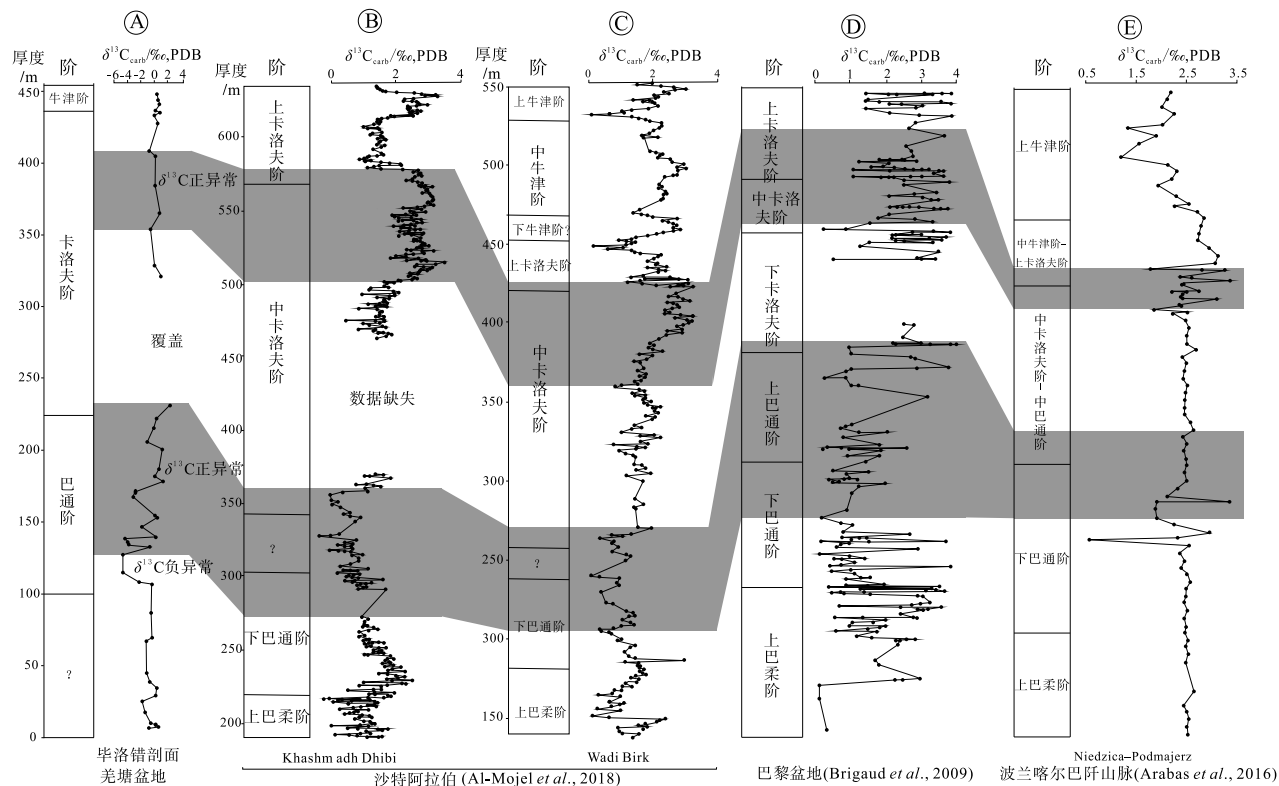


图 10 全球中侏罗统碳同位素对比

Fig. 10 Global carbon isotopes stratigraphic correlation during the Middle Jurassic

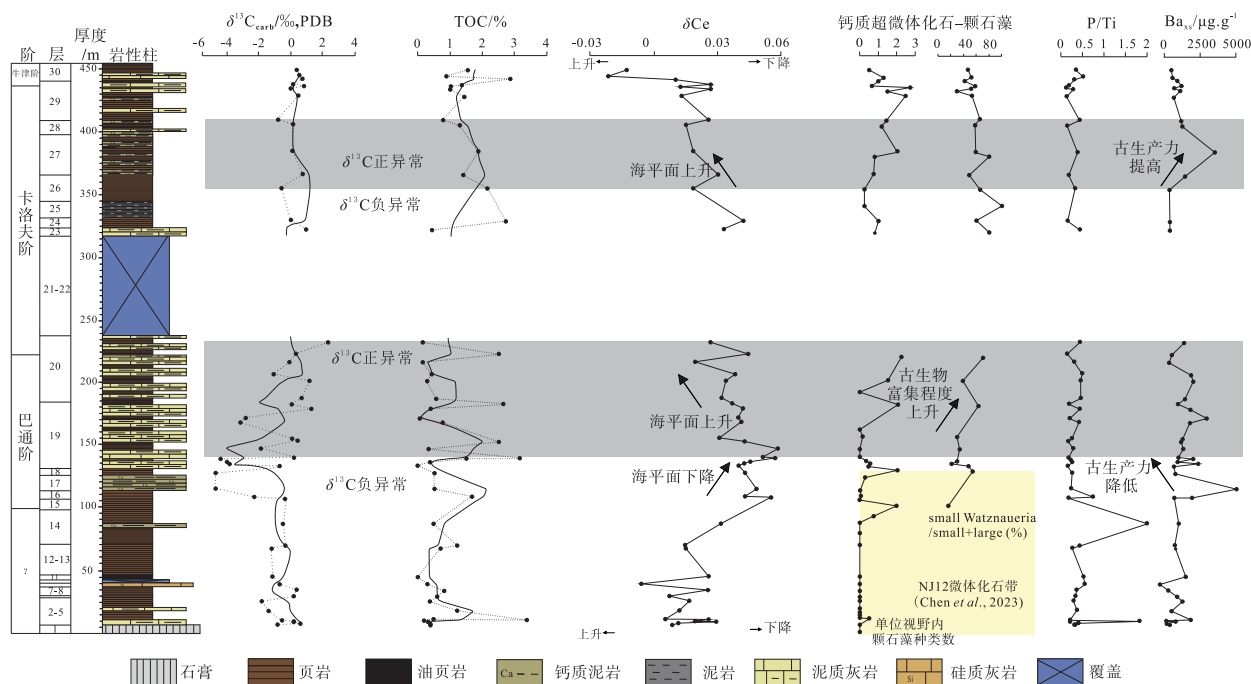


图 11 羌塘盆地毕洛错剖面中侏罗统黑色岩系碳同位素曲线与有机碳埋藏、古生产力和海平面变化综合对比

Fig. 11 Comprehensive correlation of carbon isotope curves with organic carbon burial, paleoproductivity, and sea-level changes of the Middle Jurassic black rock series at Biluo Co section in Qiangtang Basin

负偏移与陆源 ^{12}C 有机质输入增加相关,随后,在卡洛夫阶—牛津阶,全球性的海侵事件导致海平面上升、生产力升高以及有机碳埋藏增加,这一协同作用共同驱动了 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 的显著正偏移。

毕洛错剖面碳同位素在早巴通阶初始阶段, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 负异常主要受控于早—中侏罗世全球性海退(图11),导致有机碳再矿化通量增加;中—晚巴通期至早卡洛夫期的显著正偏移则与古特提斯域生产力提高有关,表现为钙质超微化石丰度异常增高与黑色页岩沉积序列的广泛发育;而中—晚卡洛夫期持续的正异常响应则揭示了全球性海侵背景下缺氧盆地扩张与陆源营养盐通量增加的协同作用,该过程通过生物泵效率提升与有机碳埋藏增强导致碳循环达到平衡。

5 结论

1) 羌塘盆地中侏罗统黑色页岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 在巴通阶沉积时期发生显著波动,卡洛夫阶—牛津阶发生小幅度波动,与全球中侏罗统的同位素分布规律具有相似性。

2) 结合岩性、生物标志化合物、氧化还原敏感元素及同位素等特征,认为羌塘盆地中侏罗统黑色页岩形成于较还原的沉积环境。 Ce 异常垂向演化揭示巴通阶时期毕洛错剖面海平面呈持续性下降趋势,而卡洛夫阶则表现为海侵。

3) 羌塘盆地的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 变化规律具有全球性,巴通阶底部的负偏移主要与早—中侏罗世的海退有关;在巴通阶至早卡洛夫阶, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 出现正偏移,这与海洋初级生产力的显著提高密切相关;而中—上卡洛夫阶的正偏移,则主要受到全球海平面上升及有机质埋藏增加的影响。

致谢 非常感谢重庆科技大学王茂成老师在野外工作中给予了大量帮助和支持。同时也感谢评审人的宝贵意见与建议,提高了本文的质量。

参考文献 (References)

陈兰,伊海生,胡瑞忠. 2003. 藏北羌塘地区侏罗纪颗石藻化石的发现及其意义. 地学前缘, 10(4): 613–618. [Chen L, Yi H S, Hu R Z. 2003. The discovery of Jurassic coccolithophore in Qiangtang area of northern Tibetan Plateau and its significance. Earth Science Frontiers, 10(4): 613–618]

陈平,林卫兵,龚大建,尚飞,刘晓彤. 2020. 贵州岑巩区块下寒武统变马冲组黑色页岩沉积地球化学特征及其沉积环境意义. 地质科学, 55(4): 1025–1043. [Chen P, Lin W B, Gong D J, Shang F, Liu X T. 2020. Sedimentary geochemical characteristics and its sedimentary environment significance of the black shale of the Lower Cambrian Bianmachong Formation in the Cen'gong block, Guizhou Province. Chinese Journal of Geology, 55(4): 1025–1043]

樊秋爽,夏国清,李高杰,伊海生. 2022. 古海洋氧化还原条件分析方法与研究进展. 沉积学报, 40(5): 1151–1171. [Fan Q S, Xia G Q, Li G J, Yi H S. 2022. Analytical methods and research progress of redox conditions in the paleo-ocean. Acta Sedimentologica Sinica, 40(5): 1151–1171]

和钟铎,陈光权. 2000. 西藏羌塘盆地的构造沉积物征及演化. 长春科技大学学报, 30(4): 347–352. [He Z H, Chen G Q. 2000. Characteristics and evolution of structural sediments in Qiangtang basin, Xizang. Journal of Changchun University of Science and Technology, 30(4): 347–352]

胡承祖,吴瑞忠,张懋功,王成善. 1986. 藏北双湖地区地质构造特征. 青藏高原地质文集: 41–56. [Hu C Z, Wu R Z, Zhang M G, Wang C S. 1986. Geological structural characteristics of the Shuanghu area in northern Tibet. Geological Collection of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau: 41–56]

胡庆. 2011. 贵州安顺新民剖面晚二叠世碳同位素研究. 中国地质大学硕士学位论文. [Hu Q. 2011. Research of carbon isotope excursion in the Late Permian at Xinmin section, Guizhou, South China. Masteral dissertation of China University of Geosciences]

黄继钧. 2000. 羌塘盆地性质及构造演化. 地质力学学报, 6(4): 58–66. [Huang J J. 2000. Nature of the Qiangtang Basin and its tectonic evolution. Journal of Geomechanics, 6(4): 58–66]

黄思静. 2010. 碳酸盐岩的成岩作用. 北京: 地质出版社, 1–288. [Huang S J. 2010. Carbonate diagenesis. Beijing: Geological Publishing House, 1–288]

季长军. 2015. 南羌塘坳陷油藏带生物标志化合物特征及油源对比研究. 成都理工大学博士学位论文. [Ji C J. 2015. Biomarker characteristics and oil-source correlation research of the reservoirs in southern Qiangtang depression. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology]

李勇,王成善,伊海生,石和,林金辉,朱利东,李祥辉. 2001. 青藏高原中侏罗世—早白垩世羌塘复合型前陆盆地充填模式. 沉积学报, 19(1): 20–27. [Li Y, Wang C S, Yi H S, Shi H, Lin J H, Zhu L D, Li X H. 2001. Fill models of in the Qiangtang composite foreland basin in Qinghai: Xizang plateau, China. Acta Sedimentologica Sinica, 19(1): 20–27]

万友利,王剑,谭富文,付修根,王忠伟. 2017. 羌塘盆地隆鄂尼—昂达尔错地区布曲组白云岩储层成因及孔隙演化特征. 东北石油大学学报, 41(3): 21–33. [Wan Y L, Wang J, Tan F W, Fu X G, Wang Z W. 2017. Dolomite reservoir formation mechanism and pore evolution feature of the Buqu Formation in the Long'en-Angdaerco area, Qiangtang Basin. Journal of Northeast Petroleum University, 41(3): 21–33]

王成善,张哨楠. 1996. 青藏高原含油气盆地分析及油气资源预测.

- 地球科学, 21(2): 120–129. [Wang C S, Zhang S N. 1996. Preliminary analysis of petroliferous basins and oil-gas prospects in Qinghai-Xizang(Tibet) plateau. *Earth Science*, 21(2): 120–129]
- 王成善, 伊海生, 李勇, 邓斌. 2001. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价. 北京: 地质出版社, 1–249. [Wang C S, Yi H S, Li Y, Deng B. 2001. *Geological Evolution and Oil and Gas Prospects of the Qiangtang Basin*. Beijing: Geological Publishing House, 1–249]
- 王成善, 伊海生, 刘池洋, 李亚林, 邹艳荣, 伍新和, 邓斌, 杨兴科. 2004. 西藏羌塘盆地古油藏发现及其意义. 石油与天然气地质, 25(2): 139–143. [Wang C S, Yi H S, Liu C Y, Li Y L, Zou Y R, Wu X H, Deng B, Yang X K. 2004. Discovery of paleo-oil-reservoir in Qiangtang Basin in Tibet and its geological significance. *Oil & Gas Geology*, 25(2): 139–143]
- 王大锐, 王新平, 孙晓婷. 2001. 广西西北部二叠系—三叠系界线碳、氧同位素组成异常及其意义. 地质论评, 47(3): 225–228. [Wang D R, Wang X P, Sun X T. 2001. The anomaly of carbon and oxygen isotopic compositions across the Permian: Triassic boundary in northwest Guangxi, South China, and its significance. *Geological Review*, 47(3): 225–228]
- 王剑. 2009. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价. 北京: 地质出版社. [Wang J. 2009. *Strategic Survey and Evaluation of Oil and Gas Resources in the Tibetan Plateau*. Beijing: Geological Publishing House]
- 王剑, 付修根. 2018. 论羌塘盆地沉积演化. 中国地质, 45(2): 237–259. [Wang J, Fu X G. 2018. Sedimentary evolution of the Qiangtang Basin. *Geology in China*, 45(2): 237–259]
- 王剑, 付修根, 沈利军, 谭富文, 宋春彦, 陈文彬. 2020. 论羌塘盆地油气勘探前景. 地质论评, 66(5): 1091–1113. [Wang J, Fu X G, Shen L J, Tan F W, Song C Y, Chen W B. 2020. Prospect of the potential of oil and gas resources in Qiangtang Basin, Xizang(Tibet). *Geological Review*, 66(5): 1091–1113]
- 王剑, 张豪薇, 张健, 沈利军, 张建勇, 付修根. 2024. 论羌塘含油气盆地关键地层划分对比问题. 海相油气地质, 29(1): 17–29. [Wang J, Zhang H W, Zhang J, Shen L J, Zhang J Y, Fu X G. 2024. Advances in division and correlation of stratigraphy in the oil-bearing Qiangtang Basin, North Tibet. *Marine Origin Petroleum Geology*, 29(1): 17–29]
- 王永胜, 张树歧, 郑春子, 李庆武, 冯德臣, 李学彬, 于喜文. 2008. 藏北南羌塘盆地曲瑞恰乃地区中侏罗世色哇组、莎巧木组、布曲组的生物地层特征. 地质通报, 27(1): 92–100. [Wang Y S, Zhang S Q, Zheng C Z, Li Q W, Feng D C, Li X B, Yu X W. 2008. Biostratigraphic of the Middle Jurassic Sêwa, Shaqiaomu and Bi Qu formations in the Quruqianai area, south Qiangtang Basin, northern Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 27(1): 92–100]
- 王永胜, 郑春子. 2008. 藏北南羌塘盆地毕洛错地区下侏罗统曲色组石膏岩层. 地层学杂志, 32(3): 321–326. [Wang Y S, Zheng C Z. 2008. Gypsum beds of the Early Jurassic Quse Formation in the Biloucuo area of the southern Qiangtang Basin, northern Xizang. *Journal of Stratigraphy*, 32(3): 321–326]
- 王忠伟, 王剑, 付修根, 陈文彬, 卫红伟, 宋春彦. 2017. 藏北羌塘盆地井下布曲组含油白云岩地球化学特征及其意义. 地质通报, 36(4): 591–600. [Wang Z W, Wang J, Fu X G, Chen W B, Wei H W, Song C Y. 2017. Geochemical features of oil-bearing samples from the well in Buqu Formation in the Qiangtang Basin, northern Tibet, and their implications. *Geological Bulletin of China*, 36(4): 591–600]
- 韦恒叶. 2012. 古海洋生产力与氧化还原指标: 元素地球化学综述. 沉积与特提斯地质, 32(2): 76–88. [Wei H Y. 2012. Productivity and redox proxies of palaeo-oceans: an overview of elementary geochemistry. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(2): 76–88]
- 吴瑞忠, 胡承祖, 王成善, 张懋功, 高德荣, 兰伯龙, 张哨楠, 陈德全, 王全海. 1986. 藏北羌塘地区地层系统. 青藏高原地质文集: 1–32. [Wu R Z, Hu C Z, Wang C S, Zhang M G, Gao D R, Lan B L, Zhang S N, Chen D Q, Wang Q H. 1986. Stratigraphy of the Qiangtang area in northern Tibet. *Geological Collection of the Tibetan Plateau*: 1–32]
- 吴珍汉, 高锐, 卢占武, 叶培盛, 陆露, 殷裁云. 2014. 羌塘盆地结构构造与油气勘探方向. 地质学报, 88(6): 1130–1144. [Wu Z H, Gao R, Lu Z W, Ye P S, Lu L, Yin C Y. 2014. Structures of the Qiangtang Basin and its significance to oil-gas exploration. *Acta Geologica Sinica*, 88(6): 1130–1144]
- 吴珍汉, 刘志伟, 赵珍, 季长军, 叶培盛. 2016. 羌塘盆地隆鄂尼—昂达尔错古油藏逆冲推覆构造隆升. 地质学报, 90(4): 615–627. [Wu Z H, Liu Z W, Zhao Z, Ji C J, Ye P S. 2016. Thrust and uplift of the lung'erni-angdarco paleo-oil reservoirs in the Qiangtang Basin. *Acta Geologica Sinica*, 90(4): 615–627]
- 夏代祥. 1986. 班公湖—怒江、雅鲁藏布江缝合带中段演化历程的剖析. 青藏高原地质文集: 123–138. [Xia D X. 1986. Analysis of the evolutionary history of the middle section of the Bangong Lake-Nujiang and Yarlung Zangbo Suture Zones. *Geological Collection of the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau*: 123–138]
- 夏国清, 伊海生. 2015. 羌塘盆地双湖地区曲色组冷泉碳酸盐岩及其地质意义. 沉积与特提斯地质, 35(1): 68–75. [Xia G Q, Yi H S. 2015. Characteristics and significance of the cold-vent carbonate rocks from the Quse Formation in the Shuanghu area, Qiangtang Basin, northern Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 35(1): 68–75]
- 夏国清, 伊海生, 李高杰, 金峰, 季长军, 李启来. 2017. 南羌塘坳陷布曲组油藏带特征及空间演化规律. 岩性油气藏, 29(1): 90–96. [Xia G Q, Yi H S, Li G J, Jin F, Ji C J, Li Q L. 2017. Characteristics and evolution of oil reservoir zones of Buqu Formation in the southern Qiangtang Depression. *Lithologic Reservoirs*, 29(1): 90–96]
- 薛伟伟, 马安林, 胡修棉. 2020. 羌塘盆地侏罗系—白垩系岩石地层格架厘定. 地质论评, 66(5): 1114–1129. [Xue W W, Ma A L, Hu X M. 2020. The redefinition of the Jurassic: Cretaceous lithostratigraphic framework in the Qiangtang Basin, Xizang Plateau. *Geological Review*, 66(5): 1114–1129]
- 杨易卓, 黄志龙, 赵珍, 唐友军. 2022. 羌塘盆地毕洛错地区古油藏地球化学特征与油源对比. 地球科学, 47(5): 1834–1848. [Yang Y Z, Huang Z L, Zhao Z, Tang Y J. 2022. Geochemical characteris-

- tics and oil source correlation of paleo-reservoirs in Biluocuo area, Qiangtang Basin. *Earth Science*, 47(5): 1834–1848]
- 伊帆. 2018. 西藏羌塘地区三叠-侏罗过渡时期的碳同位素记录及其古环境意义. 成都理工大学博士学位论文. [Yi F. 2018. Carbon isotopic records and its paleoenvironmental significance during the Triassic-Jurassic transition. in Qiangtang area, Tibet. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 伊帆, 朱利东, 刘显凡, 伊海生. 2016. 藏北羌塘盆地双湖地区下侏罗统油页岩的有机碳同位素异常和正构烷烃分布特征及大洋缺氧事件研究. *矿物学报*, 36(3): 413–422. [Yi F, Zhu L D, Liu X F, Yi H S. 2016. The distribution of N-alkanes and anomalies of organic carbon isotopes and the Toarcian oceanic anoxic events of the Lower Jurassic oil shales in Qiangtang Basin, north Tibet, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 36(3): 413–422]
- 伊海生, 林金辉, 赵兵, 李勇, 石和, 朱利东. 2003. 藏北羌塘地区地层新资料. *地质论评*, 49(1): 59–65. [Yi H S, Lin J H, Zhao B, Li Y, Shi H, Zhu L D. 2003. New biostratigraphic data of the Qiangtang area in the northern Tibetan Plateau. *Geological Review*, 49(1): 59–65]
- 伊海生, 陈志勇, 季长军, 杨晓萍, 夏国清, 吴驰华. 2014. 羌塘盆地南部地区布曲组砂糖状白云岩埋藏成因的新证据. *岩石学报*, 30(3): 737–746. [Yi H S, Chen Z Y, Ji C J, Yang X P, Xia G Q, Wu C H. 2014. New evidence for deep burial origin of sucrosic Dolomites from Middle Jurassic Buqu Formation in southern Qiangtang Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 737–746]
- 阴家润, 高金汉, 王永胜, 张树岐, 郑春子, 徐德彪, 白志达, 孙立新, 苏新. 2006. 西藏北部色哇-安多地区侏罗纪菊石类与缺氧黑色页岩相. *古生物学报*, 45(3): 311–331. [Yin J R, Gao J H, Wang Y S, Zhang S Q, Zheng C Z, Xu D B, Bai Z D, Sun L X, Su X. 2006. Jurassic *Ammonites* in anoxic black shales from sewa and amdo, northern Tibet. *Acta Palaeontologica Sinica*, 45(3): 311–331]
- 尹青, 伊海生, 夏国清. 2015. 羌塘盆地双湖地区侏罗系岩石物性特征. *地球物理学进展*, 30(1): 285–292. [Yin Q, Yi H S, Xia G Q. 2015. Characteristics of the petrophysical parameters of the rocks in Shuanghu region, Qiangtang Basin. *Progress in Geophysics*, 30(1): 285–292]
- 张晓. 2021. 西藏羌塘盆地含颗石藻黑色岩系的地球化学特征及生烃潜力评价. 重庆科技学院硕士学位论文. [Zhang X. 2021. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential evaluation of coccolith-bearing black rock shale series in the Qiangtang Basin, Tibet. Masteral dissertation of Chongqing University of Science & Technology]
- 赵政璋, 李永铁. 2000. 青藏高原羌塘盆地石油地质条件. 第31届国际地质大会中国代表团学术论文文集. 北京: 中国地质学会, 4. [Zhao Z Z, Li Y T. 2000. Petroleum geological conditions of the Qiangtang Basin on the Tibetan Plateau. Proceedings of the 31st International Geological Congress, Chinese Delegation Academic Paper Collection. Beijing: Geological Society of China, 4]
- Algeo T J, Ingall E. 2007. Sedimentary C_{org} : P ratios, paleocean ventilation, and Phanerozoic atmospheric pO_2 . *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 256(3): 130–155.
- Al-Mojel A, Dera G, Razin P, Le Nindre Y M. 2018. Carbon and oxygen isotope stratigraphy of Jurassic platform carbonates from Saudi Arabia: implications for diagenesis, correlations and global paleoenvironmental changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 511: 388–402.
- Arabas A. 2016. Middle–Upper Jurassic stable isotope records and seawater temperature variations: new palaeoclimate data from marine carbonate and belemnite rostra (Pieniny Klippen Belt, Carpathians). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 446: 284–294.
- Arthur M A, Schlanger S O, Jenkyns H C. 1987. The Cenomanian-Turonian Oceanic Anoxic Event, II. Palaeoceanographic controls on organic-matter production and preservation. Geological Society, London, Special Publications, 26: 401–420.
- Bartolini A, Baumgartner P O, Guex J. 1999. Middle and Late Jurassic radiolarian palaeoecology versus carbon-isotope stratigraphy. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 145(1): 43–60.
- Brigaud B, Durllet C, Deconinck J F, Vincent B, Pucéat E, Thierry J, Trouiller A. 2009. Facies and climate/ environmental changes recorded on a carbonate ramp: a sedimentological and geochemical approach on Middle Jurassic carbonates (Paris Basin, France). *Sedimentary Geology*, 222: 181–206.
- Chen L, Yi H S, Hu R Z, Zhong H, Zou Y R. 2005. Organic geochemistry of the Early Jurassic oil shale from the Shuanghu area in northern Tibet and the early Toarcian oceanic anoxic event. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 79: 392–397.
- Chen L, Yi H S, Tsai L L-Y, Xu G W, Da X J, Lin A T-S. 2013. Jurassic black shales facies from Qiangtang Basin (northern Tibet): rare earth and trace elements for paleoceanographic implications. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 87(2): 540–554.
- Chen L, Jenkyns H C, Xu G W, Mattioli E, Da X J, Yi H S, Xia M Q, Zhu Z X, Huang Z H. 2016. Preliminary nannofossil and geochemical data from Jurassic black shales from the Qiangtang Basin, northern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115: 257–267.
- Chen L, Mattioli E, Da X J, Jenkyns H C, Zhu Z X, Xu G W, Yi H S. 2019. Calcareous nannofossils from the Jurassic black shales in the Qiangtang Basin, Northern Tibet (China): new records of stratigraphic ages and palaeoceanography. *Newsletters on Stratigraphy*, 52(1): 55–72.
- Chen L, Mattioli E, Da X J, Xu G W, Zhu Z X, Zhang X, Yi H S, Jiang S J, Wang Y S, Jenkyns H C, Tang J, Huang S. 2023. Integrated carbon-isotope and calcareous nannofossil stratigraphy in the Middle Jurassic of Qinghai-Xizang (China). *Newsletters on Stratigraphy*, 56(4): 405–421.
- Coimbra R, Immenhauser A, Olóriz F. 2014. Spatial geochemistry of Upper Jurassic marine carbonates (Iberian subplate). *Earth-Science Reviews*, 139: 1–32.
- Elderfield H, Greaves M J. 1982. The rare earth elements in seawater. *Nature*, 296: 214–219.
- Francois R, Honjo S, Manganini S J, Ravizza G E. 1995. Biogenic barium fluxes to the deep sea: implications for paleoproductivity reconstruction.

- tion. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(2): 289–303.
- Fu X G, Wang J, Zeng Y H, Tan F W, Chen W B, Feng X L. 2010. Geochemistry of rare earth elements in marine oil shale: a case study from the Bilong Co area, Northern Tibet, China. *Oil Shale*, 27(3): 194–208.
- Fu X G, Tan F W, Feng X L, Wang D, Chen W B, Song C Y, Zeng S Q. 2014. Early Jurassic anoxic conditions and organic accumulation in the eastern Tethys. *International Geology Review*, 56(12): 1450–1465.
- Fu X G, Wang J, Feng X L, Wang D, Chen W B, Song C Y, Zeng S Q. 2016. Early Jurassic carbon-isotope excursion in the Qiangtang Basin (Tibet), the eastern Tethys: implications for the Toarcian Oceanic anoxic event. *Chemical Geology*, 442: 62–72.
- Gromet L P, Haskin L A, Korotev R L, Dymek R F. 1984. The “North American shale composite”: its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(12): 2469–2482.
- Guo Q J, Shields G A, Liu C Q, Strauss H, Zhu M Y, Pi D H, Goldberg T, Yang X L. 2007. Trace element chemostratigraphy of two Ediacaran-Cambrian successions in South China: implications for organosedimentary metal enrichment and silicification in the Early Cambrian. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(1): 194–216.
- Jenkyns H C, Yi H S, Chen L, Da X J, Xia M Q, Xu G W, Ji C J. 2013. The Early Jurassic oil shales in the Qiangtang Basin, northern Tibet: biomarkers and Toarcian oceanic anoxic events. *Oil Shale*, 30: 441–455.
- Jones B, Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 111(1–4): 111–129.
- Liu X H, Xu Q, Ding L. 2016. Differential surface uplift: Cenozoic paleoelevation history of the Tibetan Plateau. *Science China Earth Sciences*, 59(11): 2105–2120.
- Ma A L, Hu X M, Garzanti E, Han Z, Lai W. 2017. Sedimentary and tectonic evolution of the southern Qiangtang basin: implications for the Lhasa-Qiangtang collision timing. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(7): 4790–4813.
- Pan G T, Wang L Q, Li R S, Yuan S H, Ji W H, Yin F G, Zhang W P, Wang B D. 2012. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3–14.
- Shen J, Schoepfer S D, Feng Q L, Zhou L, Yu J X, Song H Y, Wei H Y, Algeo T J. 2015. Marine productivity changes during the end-Permian crisis and Early Triassic recovery. *Earth-Science Reviews*, 149: 136–162.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical Geology*, 232(1): 12–32.
- Wang L C, Garzanti E, Peng H, Li Y L, Shen L J, He S L, Yue Y H, Khan W, Ding L. 2024. Discovery of the Callovian Oceanic Anoxic Event in the Qiangtang Basin, eastern Tethys: insights from in situ calcite U-Pb dating. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 656(1–3): 112572.
- Wang S F, Dong D Z, Wang Y M, Li X J, Huang J L, Guan Q Z. 2016. Sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of organic-rich shale: a case study of the Lower Silurian Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin, China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 28: 691–699.
- Werne J P, Lyons T W, Hollander D J, Formolo M J, Sinninghe Damsté J S. 2003. Reduced sulfur in euxinic sediments of the Cariaco Basin: sulfur isotope constraints on organic sulfur formation. *Chemical Geology*, 195(1): 159–179.
- Wilde P, Quinby-Hunt M S, Erdtmann B D. 1996. The whole-rock cerium anomaly: a potential indicator of eustatic sea-level changes in shales of the anoxic facies. *Sedimentary Geology*, 101(1): 43–53.
- Wright J, Schrader H, Holser W T. 1987. Paleoredox variations in ancient oceans recorded by rare earth elements in fossil apatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(3): 631–644.
- Xia G Q, Mansour A, Gentzis T, Li G J, Carvajal-Ortiz H, Ocubalidet S, Yi F, Yun C, Yi H S. 2021. Depositional paleoenvironment and source rock characterization across the Toarcian Oceanic Anoxic Event from the eastern Tethys, Tibet, SW China. *International Journal of Coal Geology*, 243: 103780.
- Yang J D, Sun W G, Wang Z Z, Xue Y S, Tao X C. 1999. Variations in Sr and C isotopes and Ce anomalies in successions from China: evidence for the oxygenation of Neoproterozoic seawater? *Precambrian Research*, 93(2): 215–233.
- Yin J R. 2022. A revision and new data on the Jurassic *Ammonites* from the Biluoco area, southern Qiangtang block (North Tibet). *Newsletters on Stratigraphy*, 55: 1–19.
- Zhao B S, Li R X, Qin X L, Wang N, Zhou W, Khaled A, Zhao D, Zhang Y N, Wu X L, Liu Q. 2021. Geochemical characteristics and mechanism of organic matter accumulation of marine-continental transitional shale of the Lower Permian Shanxi Formation, southeastern Ordos Basin, North China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205: 108815.

(责任编辑 张西娟)