

莱阳盆地 Albian 阶林家庄—辛格庄组古环境演变 沉积地球化学记录

陶有兵¹⁾, 任天龙^{1)*}, 黄永波¹⁾, 王丽娟¹⁾, 姚金娇²⁾, 张成君²⁾

1) 山东省地质调查院, 山东济南 250013;

2) 兰州大学地质科学与矿产资源学院(西部矿产资源重点实验室), 甘肃兰州 730000

摘 要: 胶莱盆地是一白垩系发育较为完整的陆相含火山地层沉积盆地。白垩系中发现有大量恐龙骨骼、恐龙蛋, 以及其它动植物化石, 是研究陆相白垩纪古环境演变的重要地区。本文通过对胶莱盆地莱阳洼陷 Albian 阶林家庄组—辛格庄组地层沉积特征、碳酸盐碳氧同位素组成($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$)、色度(L^* , a^* , b^*)、碳酸盐含量、TOC 含量, 以及风化指数(CIA)、古气候指数(C)等古环境指标的综合分析, 反映出 Albian 阶古气候从早期偏冷干逐渐过渡到半干旱-半湿润状态。古气候总体上温暖湿润, 但也存在多次气候波动特征。偏重的碳同位素组成与 OAEs 事件有较好的对应关系, 表明胶莱盆地在白垩纪时期陆相地层与海相地层之间存在一定的对比关系。碳酸盐碳、氧同位素组成特征表明, 高浓度大气 CO_2 可能是这两者之间联系的纽带。林家庄组—辛格庄组地层碳同位素组成显示, 陆相地层中 OAE1c 至少由 3 次次级旋回组成, 代表了气候的不稳定性和复杂性。

关键词: 胶莱盆地; 白垩纪; Albian 阶; 林家庄组—辛格庄组; 古环境

中图分类号: P595; P532 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.100801

Sediment and Geochemical Records of Paleoenvironmental Change during Linjiazhuang and Xingezhuang Formations at Albian Stage in the Laiyang Depression

TAO You-bing¹⁾, REN Tian-long^{1)*}, HUNAG Yong-bo¹⁾, WANG Li-juan¹⁾,
YAO Jin-jiao²⁾, ZHANG Cheng-jun²⁾

1) Shandong Institute of Geological Survey, Jinan, Shandong 250013;

2) School of Earth Sciences & Key Laboratory of Mineral Resources in Western China (Gansu Province),
Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000

Abstract: Jiaolai Basin is a Cretaceous terrestrial sediment basin with complete strata from the early to late period and includes magmatites among the sediment layers. Lots of dinosaur bone fossils and egg fossils, and even other animal bone and plant fossils were buried in the Cretaceous sediment layers. It is a key region to research the terrestrial paleoenvironmental change during the Cretaceous period. In this study, we surveyed the PM301 section of Linjiazhuang and Xingezhuang Formations in the Laiyang depression, which belongs to the Jiaolai Basin at Albian Stage in the field. Carbon and oxygen isotopes of carbonates ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$), chromaticness (L^* , a^* , b^*), carbonate content, TOC, and chemical index of alteration (CIA), paleoclimate index (C) had been done for the sediment samples collected from these two Formations. Based on these geochemical proxies, paleoclimate was reconstructed from the cold and dry early Albian Stage to semi-dry and semi-wet gradually, but on the whole, paleoclimate at Albian Stage was warm and wet with several climate oscillation. From the PM301

本文由山东省地勘项目“胶莱盆地中部白垩纪古生物化石调查研究及保护”(编号: 鲁勘字(2019)54 号)资助。

收稿日期: 2021-08-09; 改回日期: 2021-09-22; 网络首发日期: 2021-10-14。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 陶有兵, 男, 1980 年生。硕士, 正高级工程师。主要从事区域地质矿产调查工作。通讯地址: 250013, 山东省济南市历下区荆山路 17 号。E-mail: 446452272@qq.com。

*通讯作者: 任天龙, 男, 1980 年生。本科, 正高级工程师。主要从事地层古生物研究工作。通讯地址: 250013, 山东省济南市历下区荆山路 17 号。E-mail: J_were121@126.com。

section, we can find that the heavier carbon isotope at Albian stage had a high correlation with ocean OAEs events, indicating a similarity between the terrestrial and ocean sediment environments. High atmospheric CO₂ from volcano emissions may be a linkage between the terrestrial and ocean teleconnection. Based on the heavier carbon isotope excursion, OAE 1c can be divided into at least three sub-cycle stages, and it is inferred that the paleoclimate at Albian stage was unstable and complex.

Key words: Jiaolai Basin; Cretaceous; Albian stage; Linjiazhuang–Xingezhuang Formations; paleoenvironment

白垩纪作为距今最近的极端“温室气候”时代(Berner, 1994; Crowley and Kim, 1995; Tarduno and Sagger, 1995; Herman and Spicer, 1996; Barrera and Savin, 1999), 期间发生了许多重大的地质事件, 如大洋缺氧事件(Ocean Anoxic Event, OAE)、晚白垩世大洋红层(Upper Cretaceous Oceanic Red Beds, CORB)与富氧作用、全球海平面变化、全球分布的富有机质黑色页岩、碳酸盐台地沉没、全球性大规模火山活动、生物群重大辐射和更替、超静磁带出现、白垩纪末生物集群绝灭事件等(Wanlliser, 1996; Barrera and Savin, 1999; Jones and Jenkyns, 2001; Cronin et al., 2001; 马宗晋等, 2001; 史瑞萍和朱日祥, 2002; Leckie et al., 2002; Hu et al., 2004; Wang et al., 2005; Zhao, 2005), 因此, 成为国际地球科学界认识地球发展的典范, 并称之为“白垩纪世界”(Skelton, 2003)。白垩纪时期全球平均气温比工业革命以前高 3~10℃(Tarduno and Sagger, 1995; Huber et al., 1995, 2002; Clarke and Jenkyns, 1999; Barrera and Savin, 1999; Wilson and Norris, 2001), 且大陆内部年温差极小, 从赤道到极地无明显的气候分带, 当时两极无冰覆盖, 海平面比现代高约 60 m 以上(Berner, 1994; Norris et al., 2002), 这些地质现象的成因成为目前研究的热点, 其研究成果对未来地球发展的趋势有重要的参考价值。

尽管对白垩纪时期各种地质事件进行了大量的研究工作, 但目前对其成因仍不明确, 尤其是 CO₂ 等温室气体的总含量和温度比现在高, 总体上为高温气候特征。然而, Keller(2008)对白垩纪现有资料进行总结, 发现白垩纪气候也具有冷暖变化的周期性。另外, 大量的地质现象发现于海相环境, 对白垩纪的地质记录主要建立在海相地层 12 个阶的基础之上, 而该时期陆相地层结构、古环境等研究则相对薄弱。中国白垩纪时期主要以陆相地层发育为主, 分布于各中生代大型内陆盆地内, 以河湖相沉积和火山堆积为特征(陈丕基等, 1998; 万晓樵等, 2013)。同时, 中西部与东部地区构造活动的差异, 导致了在东部以细碎屑岩夹火山岩、火山碎屑岩及煤系地层为特色的沉积建造, 如松辽盆地、嘉荫盆地、冀北—辽西盆地群、胶莱盆地、苏北盆地、天台盆地、信江盆地等; 中西部地区则以红色碎屑沉积为主, 如准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地、江汉盆地、四川盆地和楚雄盆地(席党鹏等, 2019)。中国东

部地区松辽盆地白垩系发育较好, 目前通过对生物地层、古地磁、锆石 U-Pb 定年等分析, 建立了与海相地层对应的白垩纪陆相年代地层(席党鹏等, 2019)。并且对上白垩统青山口组—嫩江组时期海侵造成生物集群灭绝事件(王东坡和刘立, 1994), 以及热河动物群(Jehol Biota)(顾知微, 1962; 季强, 2002)、鸟类(Ji et al., 2004)和有胎盘类哺乳动物的起源(季强, 2002)等研究为我国白垩纪气候和生物演化奠定了基础。

山东胶莱盆地白垩系发育完整, 为研究白垩纪古环境演变提供了良好的载体。莱阳洼陷中下白垩统上部的林家庄组和辛格庄组与 Albian 阶相当(席党鹏等, 2019), 该阶段是全球 OAE 1b–1d 黑色页岩沉积(Bralower et al., 1997, 1999)、海平面开始上升(Weissert et al., 1998), 也是白垩纪时期真正意义上的温室气候时期, 直到 Cenomanian–Turonian 阶达到白垩纪极端温室气候(Larson, 1991)。事实上, 白垩纪大多地质事件开始于 Aptian–Albian 时期。因此, 对胶莱盆地莱阳洼陷林家庄组和辛格庄组地层的古环境研究, 可以深入认识白垩纪陆相地层记录的古环境演变过程, 以及与全球环境之间的响应。

1 地质背景及样品采集

中国东部白垩纪大地构造处于相对活跃期, 燕山运动、喜马拉雅运动等导致了我国东部一系列北北东向、北东向或近东西向展布的断陷盆地形成。华北地区白垩纪沉积盆地主要有胶莱盆地、苏北盆地和合肥盆地等, 以胶莱盆地白垩系发育最为典型, 研究程度较高(图 1)。胶莱盆地地处胶东半岛, 北部除平度断层外均超覆于胶北隆起之上; 南部与苏鲁造山带相邻; 西部与郯庐断裂带相接; 东部延伸至黄海, 主要为白垩纪时期的陆相沉积盆地(霍腾飞等, 2015)。发育着完整的白垩纪陆相地层和沉积记录, 由下至上发育早白垩世莱阳群、青山群和晚白垩世王氏群。东缘早白垩世早期莱阳群沉积体现了湖盆由开始形成—鼎盛—萎缩消亡的全过程, 发育由冲洪积相—湖相—三角洲相—河流相沉积的完整序列, 且由东至西, 由湖相到河流相逐渐过渡(任天龙, 2019)。

自 1951 年杨钟健、刘东生发现第一具完整恐龙骨架——棘鼻青岛龙(*Tsintaosaurus spinorhinus*

Young)以来, 胶莱盆地内从下白垩统到上白垩统中不断发现恐龙骨骼或遗迹化石。早白垩世中晚期莱阳群和青山群或大盛群中以发育恐龙足迹化石为特征, 晚白垩世王氏群中则以保存恐龙骨骼类化石, 以及足迹与蛋化石为主。盆地中发现与华北北部热河生物群相似的早白垩世陆地生物群和以鸭嘴龙为代表的晚白垩世生物群(柳永清等, 2011; 张嘉良等, 2017)。

本文研究剖面 PM301 位于山东省莱阳市北臧家疃村, 莱阳洼陷北缘, 坡度较陡。剖面起点 X: 288911.24 (120.63°E), Y: 4100918.74 (37.02°N) (图 1)。剖面主体为覆盖于早白垩世火山岩(石前庄组)之上的山前冲积扇-河流相沉积(林家庄组 K_{1lj}), 该山前冲积扇-河流相沉积与火山岩无大的沉积间断。剖面中部见多处恐龙骨骼化石, 前人在该组内

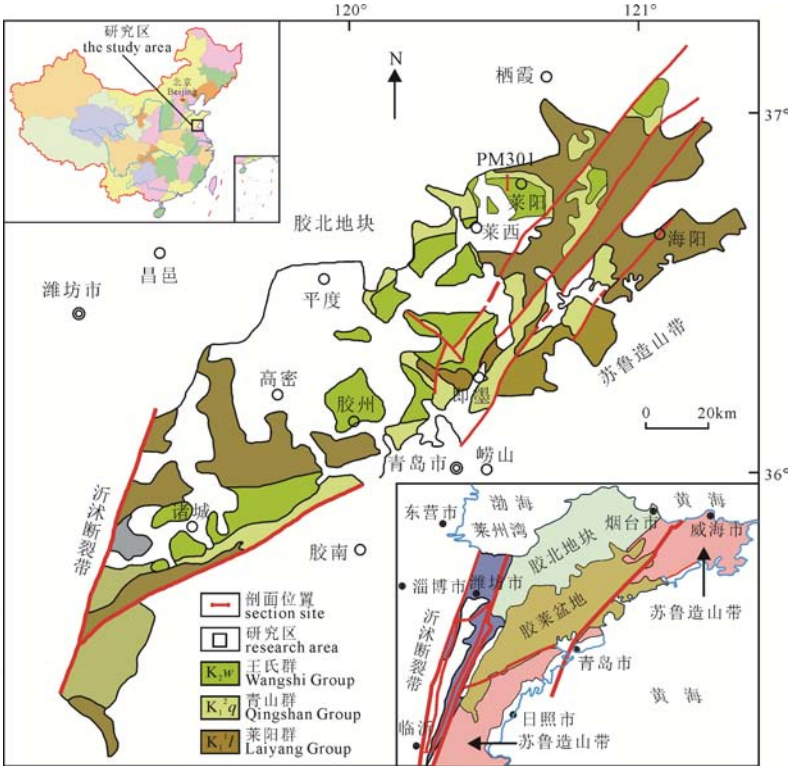


图 1 胶莱盆地及盆地白垩系地层分布
Fig. 1 The location of Jiaolai Basin and the distribution of Cretaceous stratigraphies



图 2 胶莱盆地 PM301 林家庄组地层恐龙骨骼化石
Fig. 2 The dinosaur bone fossils in the Linjiazhuang Formation of the PM301 section in the Jiaolai Basin

发现鸢嘴龙(*Spittacosaurus*)化石。林家庄组(K_{1ij})大约 140 m 厚, 辛格庄组大约 30 m 厚(未到顶)。席党鹏等(2019)将胶莱盆地白垩系地层林家庄组(K_{1ij})和辛格庄组(K_{1ix})划归到下白垩统上部, 与 Albian 阶相当。

PM301 剖面中林家庄组主要由灰绿色粗砾岩、砂砾岩, 灰紫色、灰绿色中厚层钙质细砂岩, 灰紫红色含岩屑粉细砂岩, 灰紫红色含砾岩屑细粉砂岩, 灰紫红色泥质粉砂岩等组成。灰紫红色泥质粉砂岩发育在林家庄组上部地层中。砾石主要为安山质, 大小不一, 砾石大者粒径达 15 cm, 次棱角状到次圆状。在砾岩、细砂岩底部发育冲刷构造。钙质细砂岩中钙质呈疙瘩状, 发育有虫迹构造, 为牧食迹。灰紫红色块状岩屑细砂岩、灰紫色含砾岩屑细粉砂岩中见有肱骨、头骨、椎骨(图 2a)、牙(图 2b, c)、肋骨(图 2d)等恐龙骨骼碎片化石, 化石呈分散堆积, 局部相对富集。辛格庄组(未见顶)主要由砖红色粉砂岩-灰红色含细砾钙质粉细砂岩组成, 钙质含量较高, 通常表面形成泥灰岩, 风化后呈龟裂状。

2 样品分析及结果

本文从 PM301 剖面 66 层沉积层中共采集新鲜样品 44 个。野外对岩石样品进行详细的结构构造描述, 室内对采集样品进行薄片鉴定, 以及地球化学指标 TOC、碳酸盐含量、色度、稳定碳氧同位素组成、元素等分析。

有机质含量(TOC)测定——重铬酸钾法。准确称取磨碎至 80 目以上样品 0.1~0.5 g(精确到 0.0001 g), 放入干的硬质试管中, 用吸管加入 0.8000 N 重铬酸钾标准溶液 5 mL, 再用注射器注入 5 mL 浓硫酸, 小心摇匀。在 170~180℃油浴锅中加热, 使溶液保持沸腾 5 min, 用一定量的标准重铬酸钾-硫酸溶液, 氧化土壤有机碳, 多余的重铬酸钾用硫酸亚铁溶液滴定, 由消耗的重铬酸钾量计算出有机碳量, 再乘以常数 1.724, 即为土壤有机质量。平均误差<±1%。

沉积岩样品中碳酸盐含量采用稀盐酸法。将新鲜样品粉碎至 80~100 目, 称取一定量的样品与 5 mL 10% HCl 充分反应, 获得反应前后压力差值, 利用气体平衡状态方程计算碳酸盐含量。平均误差<±3%。

碳酸盐碳、氧同位素组成分析($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$)采用磷酸法。将新鲜样品磨碎至 80 目以上, 分出大约 10 g 左右磨好的样品, 在 300℃左右的真空中焙烧 30 min 左右备用。将准备好的样品放入 GAS-Bench-MAT 253 自动进样、分析系统进行分析。实验室工作标准为 SB-1, $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 值为-2.6‰,

$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ 为-15.3‰。平均误差<±0.3‰。

样品色度测量采用日本美能达公司的 SPAD-503 土色仪进行。样品研磨到大约 80 目, 均匀后取 2~3 g 放于白色参照色板上, 压实和压平后, 随机取 3 个区域进行色度测量。采用门赛尔 CIEL*a*b*(1976)表色系统, 测定值平均后求得土壤颜色的 L^* 、 a^* 、 b^* 各参数值。测量前在白色参板上进行比色仪校正。仪器可测定的 L^* 值在 0~100 之间, a^* 和 b^* 值为±60 之间。 a^* 值(正值偏向红色, 负值偏向绿色)和 b^* 值(正值偏向黄色, 负值偏向蓝色)。

元素含量采用 X-射线荧光光谱法分析。称取 4 g 左右样品(过 200 目筛)加入磨具中心, 外层用硼酸包裹, 用半自动压样机在 30 t 压力下静压 15 s, 制成直径 4 cm, 厚度 7~9 mm 的圆饼状, 待测样品均匀平整。制备好的样品按顺序放入仪器待测样区, 机械手自动将样品放入测试点进行测试。测试仪器为 PW2403(荷兰)。

PM301 剖面沉积地层 TOC、碳酸盐含量、碳酸盐碳氧同位素组成、色度指标分析结果如图 3 所示。TOC 含量在 0.01%~0.44% 范围, 平均为 0.15%。在林家庄组早期、中期和后期 TOC 含量相对较高。碳酸盐含量为 3.25%~60.38%, 平均值为 19.67%。在林家庄组中呈多旋回特征。碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)为 -9.21‰~6.75‰, 平均 0.68‰左右, 呈多次正偏现象, 正偏移差>8‰。氧同位素组成($\delta^{18}\text{O}$)为 -18.43‰~-11.87‰, 平均-14.75‰左右, 与 $\delta^{13}\text{C}$ 呈中等程度反相关关系($r^2=0.32\sim0.51$)。色度指标 L^* (亮度值)为 54.50~74.90, 平均 64.98; a^* (红度值)为 5.60~15.50, 平均为 10.09, 指示沉积物颜色偏红; b^* (黄度值)在 14.00~23.93 范围, 平均为 18.20, 表明沉积物颜色整体上偏红黄。

3 讨论

在古环境演变分析中, 大量研究表明沉积学、古生物学、地球化学、地球物理等指标能很好地记录古环境信息, 可以用来进行古环境重建。

PM301 剖面色度指标中, 亮度值(L^*)与碳酸盐含量有中等程度($r^2=0.26$)正相关性, 而与 TOC 含量几乎没有相关性, 但 TOC 含量对亮度也有一定程度的影响(图 4A, D)。红度(a^*)与全铁含量(Fe_2O_3)呈弱正相关性($r^2=0.07$), 黄度(b^*)与全铁含量(Fe_2O_3)无相关性(图 4B, C)。Nagao and Nakashima(1992)对大西洋深海沉积物研究, 认为碳酸钙决定亮度值(L^*)的白度, 有机质决定 L^* 的黑度, 氧化还原条件对 L^* 值有较大的影响; 红绿度值(a^*)与远洋沉积物(粒度因素)、碳酸锰(MnCO_3)、以及钙质浊积岩中铁

的氧化物、氢氧化物、含二价铁的显色矿物有关;黄蓝色值(b^*)受控于钙质浊积岩中铁的氢氧化物。可以看出 PM301 剖面中色度参数的影响因素不是单一因素,而是多个因素的综合作用。因此,亮度(L^*)与碳酸盐含量的相关性较大,碳酸盐含量是影响亮度值的主要因素。亮度值越高,指示了温暖湿润的古气候环境;相反,较低的亮度值代表了较为干冷的气候条件。红度(a^*)与全铁(Fe_2O_3)之间有一定的相关性,说明红度值受铁的氧化物(Fe_2O_3)的影响。研究表明,湖相沉积物中,色度 a^* 值和 b^* 值与 Mg 元素和 Fe 元素具有较好的正相关性(陈宗颜等, 2011)。黄度 b^* 值可以用于反映湖水深度变化,映有效湿度的变化, b^* 值高,湖水浅,氧化作用增强(吴艳宏和李世杰, 2004)。而黄土地层中,王千锁等(2015)发现朝那黄土剖面中黄度 b^* 与针铁矿的相关性较好,而李杨等(2018)对新疆昭苏黄土剖面研究时发现黄度 b^* 值与针铁矿相关性较差,其原因是 b^* 值受碳酸钙和有机质等多方面的影响。较高的红度值指示了氧化性的地表流动水体环境,黄度值越高代表了水体较浅环境,如半深湖、漫滩湖泊等环境。总体上,

PM301 白垩系地层指示了胶莱盆地莱阳洼陷在 Albian 阶林家庄组—辛格庄组期间气候较为温暖,蒸发较强而有利于碳酸盐的形成,沉积环境以氧化环境为主,但氧化环境不利于有机质的保存。

沉积物中自生碳酸盐碳、氧同位素组成($\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$)对古水文状况有较好的判识作用。PM301 剖面中沉积物碳酸盐碳、氧同位素组成($\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$)表现出中等程度的相关性($r^2=0.32$)(图 4E)。但是,从图中也明显反映出有 2 种不同的作用方式,图 4E 中 b 区的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 表现出正相关性, a 区地层沉积中碳酸盐 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 之间的相关性较好($r^2=0.51$)(图 4F)。沉积物碳酸盐碳、氧同位素组成之间的正相关性主要是由于水体滞留、蒸发所致(Zhang et al., 2013)。莱阳洼陷在 Albian 阶可能存在漫滩、漫滩湖泊等浅水滞留环境,蒸发作用较强。从 PM301 地层中同步偏轻的碳、氧同位素组成正相关地层沉积物主要为泥质粉砂为主(图 3),表明水动力为相对较弱的滞留水体环境,主要受蒸发作用的影响。相对较轻的碳、氧同位素组成表明水体主要来源于大气降水,该时期温度相对较低导致同位素组成偏轻。

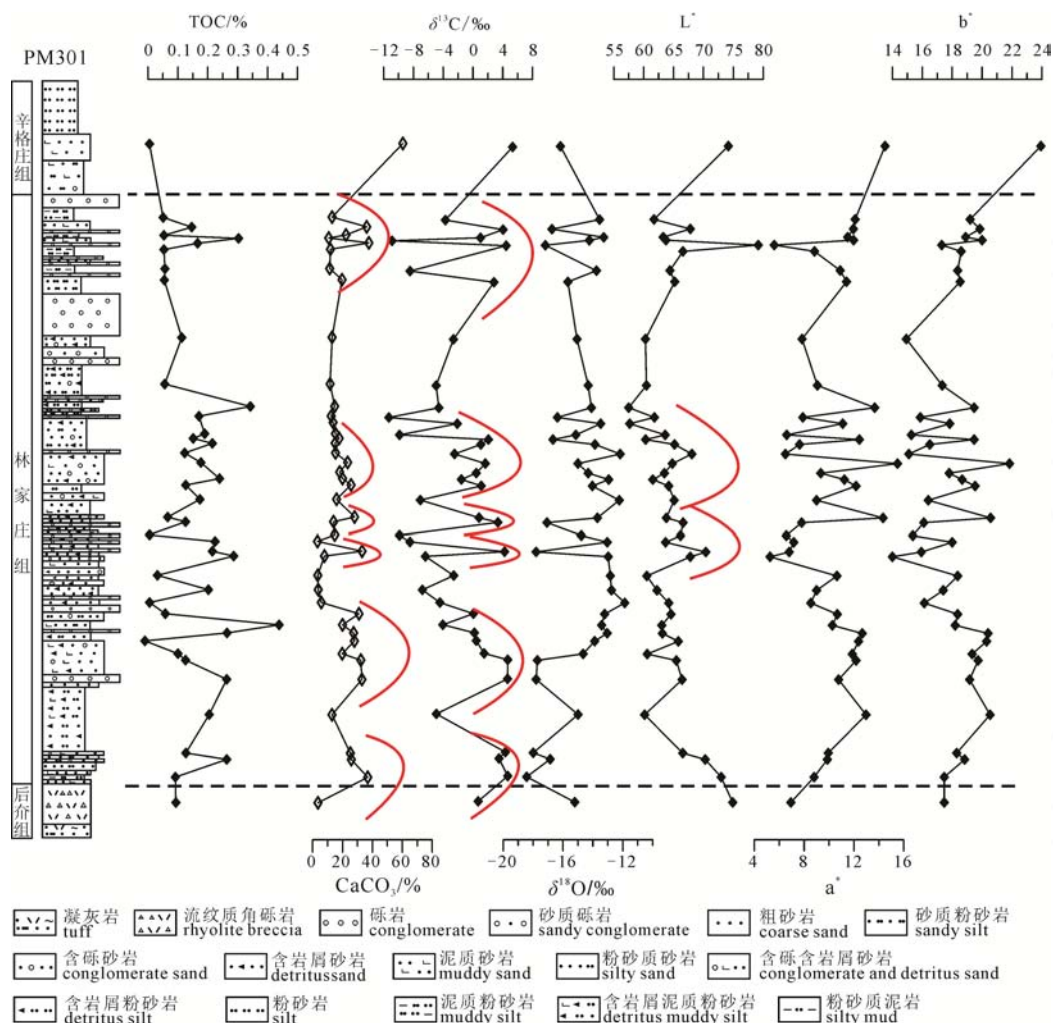


图 3 莱阳洼陷 PM301 剖面林家庄组—辛格庄组地球化学指标

Fig. 3 Geochemical proxies in the PM301 section of Linjiazhuang–Xingezhuang Formations in the Laiyang depression

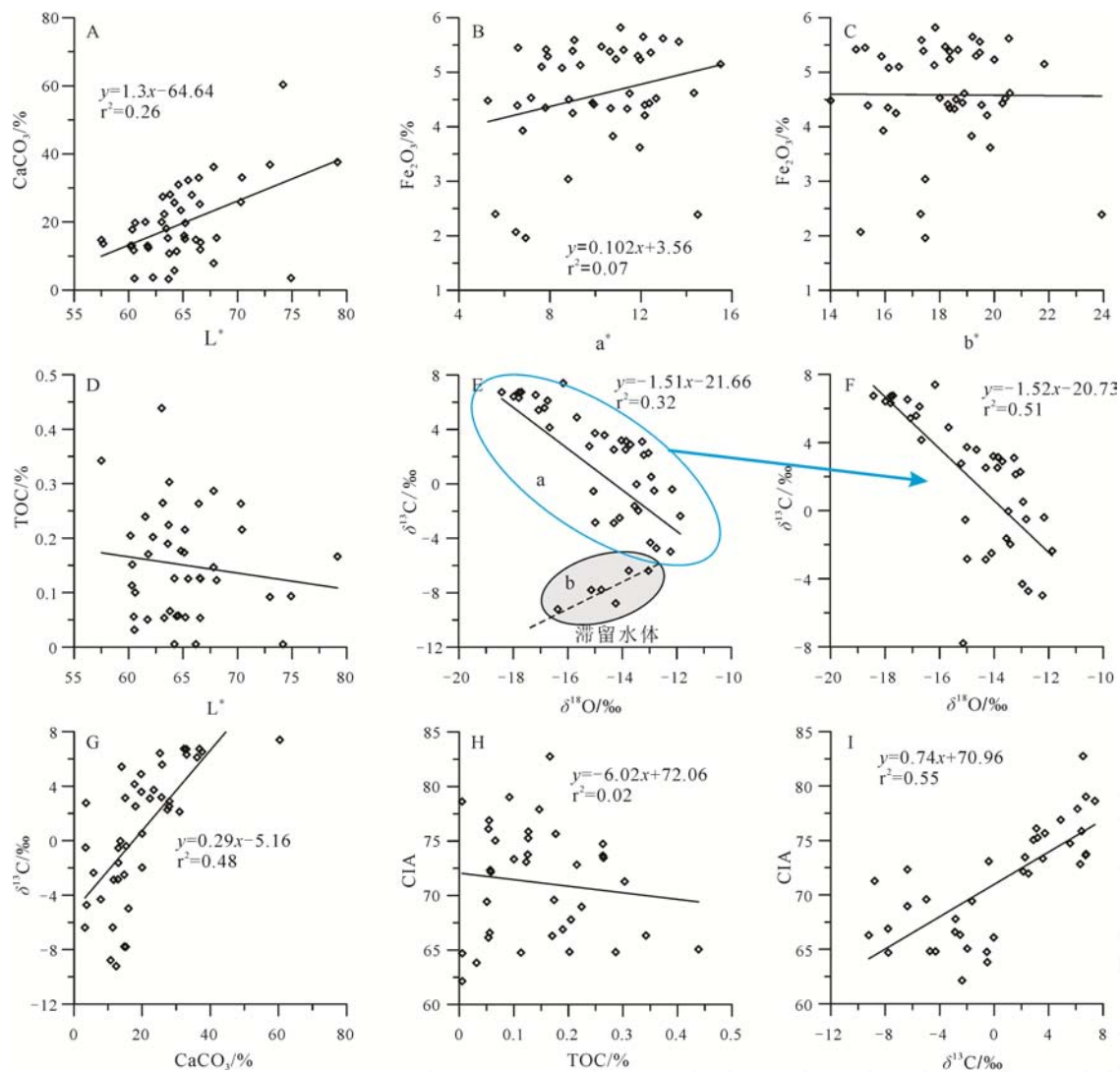


图4 莱阳洼陷 PM301 剖面环境参数之间的相关性

Fig. 4 The relationship among the environmental proxies in the PM301 section of the Laiyang depression

由于 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 主要受流域水体、碳酸盐岩、大气 CO_2 与湖泊水体中碳的交换、湖水的硬度、湖泊生产力等因素的影响,通常大气降雨有较轻的氧同位素组成。PM301 中偏轻的 $\delta^{18}\text{O}$ 表明了 Albian 阶有较高的降雨,指示了有较高的温度。而偏重的 $\delta^{13}\text{C}$ 明显与大气 CO_2 有关,较多自生碳酸盐形成与偏重的 $\delta^{13}\text{C}$ 有较高的相关性($r^2=0.48$) (图 4G),表明大量的 CO_2 溶于水体内。胶莱盆地为一个基性-酸性火山岩盆地,白垩系物质也来源于基性-酸性火山岩,流域没有碳酸盐岩母源输入。因此,该时期偏重的大气 CO_2 是影响沉积物自生碳酸盐中碳同位素组成的主要因素。

大气 CO_2 普遍认为是显生宙气候变化的主要驱动力(Royer et al., 2004),也是联系大陆与海洋的纽带。白垩纪有较高含量的大气 CO_2 浓度(Royer, 2006; Fletcher et al., 2008; Wang et al., 2014),研究认为高含量的大气 CO_2 与白垩纪 Aptian-Albian (早白垩世) 有大规模的火山活动(Larson, 1991; Kaiho and Saito,

1994; Keller, 2008)有关。研究表明,白垩纪火山喷发的规模是现代的 10 倍,释放出的 CO_2 使当时大气中 CO_2 浓度是现在的 4 倍以上,平均达到 $1120\sim 1680 \text{ mL/m}^3$ (Otto-Bliesner et al., 2002)。 CO_2 等温室气体的总含量远远高于目前大气中温室气体的总含量,是工业革命以前的 4~10 倍(Berner, 1994; Crowley and Kim, 1995; Herman and Spicer, 1996; Barrera and Savin, 1999; Berner and Kothavala, 2001)。Sun et al.(2016)根据银杏角质层计算出白垩纪 Aptian—早 Albian 时期,大气 CO_2 浓度为的 $(970\sim 1305)\times 10^{-6} \text{ v}$,并且早 Albian (OAE 1b) CO_2 浓度比 Aptian 早期(Selli, OAE 1a)和 Aptian 中期(Fallot OAEs)要高。大规模火山活动引起大气中 CO_2 浓度升高(Weissert et al., 1998),造成大洋沉积物碳酸盐碳同位素正偏现象(约 $1\text{‰}\sim 2\text{‰}$, Weissert et al., 1998; Stoll and Schrag, 2000; Wilson and Norris, 2001)。PM301 胶莱盆地陆相地层也有几乎与海相地层相似的 $\delta^{13}\text{C}$ 表现形式,进一步说明大气 CO_2 是联系大

陆与海洋的纽带。火山活动喷发出的大量 CO_2 进入大气环境(Adams et al., 2010; Barclay et al., 2010; Jenkyns, 2010)导致温室环境,以至于海平面上升(Haq et al., 1987)、全球变暖(Lloyd, 1982; Weedon and Jenkyns, 2003; Wagner et al., 2008)、水汽活动和大陆风化作用增强(Erba and Tremolada, 2004)。全球变化暖有利于植物的生长,提高海洋系统中的初级生产力(Sepkoski, 1981; Meyers, 2005; Millan et al., 2009)。海洋中的高生产力有利于有机质的埋藏而产生全球的 OAEs 事件,形成富有机质黑色纹层泥岩。

沉积物中有机质含量(TOC)与流域、湖泊、海洋中植被发育和水生生物生长状况,以及有机质在沉积环境中的保存状况有关。通常,温暖湿润气候条件下有利于陆生植被的发育,从而有较多的有机质进入沉积物中,沉积物中较高含量指示了润湿气候;而干旱环境下则不利于植被的生长,导致流域沉积物中有机质含量降低,较低的 TOC 含量指示了干旱环境。氧化环境不利于有机质的保存,而在湖泊、海洋等水体长期滞留的还原环境则有利于有机质的保存。另外,大气 CO_2 作为植物光合作用反应物对植物的生长有重要意义,沉积物中的 TOC 含量也可以间接指示大气 CO_2 的浓度。因此,沉积物中有机质含量可指示气候和沉积环境特征。在 PM301 剖面中,高 TOC 含量代表了暖湿气候环境。图 5 中反映出 TOC 与碳同位素组成之间有正相关趋势,高 TOC 含量与偏重碳酸盐碳同位素组成对应。这也进一步证明,海洋沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的增高是由于海洋浮游生物从海水中优先吸收其 ^{12}C , 有机碳广泛埋藏,同时造成全球大气 $^{13}\text{CO}_2$ 的增加。这样也可造成碳同位素组成偏重的陆相沉积物碳酸盐形成。

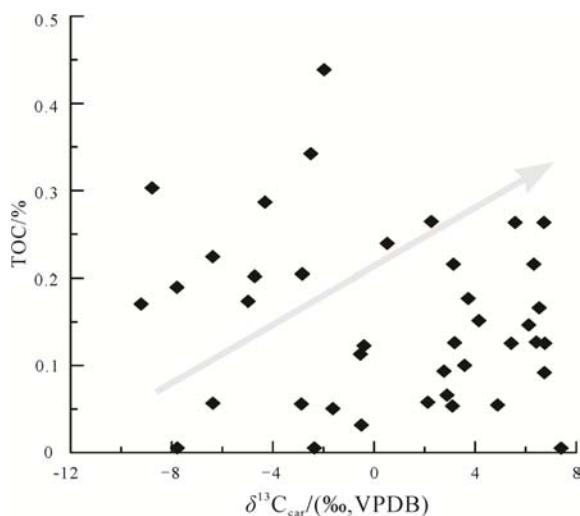


图5 莱阳洼陷 Albian 阶林家莊组—辛格庄组 TOC 与碳同位素组成相关性

Fig. 5 The correlation between TOC and $\delta^{13}\text{C}$ at Linjiazhuang-Xingezhuang Formations at Albian stage in the Laiyang depress

通常,岩石风化作用强度与气候环境有直接关系,在暖湿气候下风化作用相对较强;而干冷气候风化作用较弱。Nesbitt and Yong(1982)提出了化学风化指标 CIA,其表达式为:

$$\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$$

CIA 值与长石风化成黏土矿物的程度成正比。

CIA 值越大,风化强度越大。通常, CIA 值介于 50 ~ 65, 属于低等风化程度,反映寒冷干燥的气候环境;介于 65 ~ 85, 属于中等风化程度,反映温暖湿润的气候环境;介于 85 ~ 100, 属于强烈的风化程度,反映炎热潮湿的气候环境(周家兴等, 2019)。PM301 地层中 CIA 在 65~85 之间(图 4H-I、图 6),表明莱阳洼陷 Albian 阶气候以温暖湿润为主。然而,图 4H 中 CIA 与 TOC 之间呈极弱的负相关关系(图 4H),表明越湿润条件有机质含量越低。这一方面说明白垩纪时期总体上温度较高、蒸发作用较强,相对湿度较低而不利于植物的生长;或者该时期的演化环境不利于有机质的保存。图 4I 则表明 CIA 与碳同位素组成有较好的相关性,即越湿润的气候条件,形成的碳酸盐碳同位素组成越重。这进一步证明火山活动释放出的高浓度 CO_2 气体导致气候变为湿润,有利于植物生长。但由于氧化环境导致陆相沉积物中有机质含量降低,而海相地层中有机质含量增加,形成富有机质黑色纹层泥。

通过对胶莱盆地莱阳洼陷 Albian 阶林家莊组—辛格庄组地层稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)、风化指数 CIA、指示碳酸盐含量的亮度值(L^*),以及反映气候干湿的古气候指数 C(关有志, 1992)进行综合对比,偏重的 $\delta^{13}\text{C}$ 与风化作用强、碳酸盐含量高相对应(图 6),说明了 Albian 阶林家莊组—辛格庄组时期气候温暖湿润,但也有多次冷-暖旋回。冷期的触发机制是否与火山作用有关还值得深入研究。但林家莊组—辛格庄组偏重的碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)与海相地层中记录到的 OAE 1a、OAE 1b、OAE 1c 和 OAE 1d 有较好的对应关系。古气候指数 C 也反映出,胶莱盆地 Albian 阶早期偏冷干逐渐过渡到半干旱-半湿润,总体上有湿度逐渐增加趋势。

白垩纪古海洋中在 Aptian-Albian 期间的大洋缺氧事件(Oceanic Anoxic Events, OAEs)称为 OAE 1, OAE 1 比较显著的黑色页岩沉积又可以划分为 OAE 1a, 1b, 1c 和 1d 四期,其中 OAE 1a(Selli 层)可能具有全球的规模(Jenkyns, 1980)。这段时期的主要气候特点是 Aptian 末期气候变冷和海平面下降,随后是 Albian 早期海平面的上升(Weissert et al., 1998)。白垩纪大洋缺氧事件一般对应海相碳酸盐岩的碳同位素正偏、海洋生物的快速更替和富有机质黑色页岩的大规模分布,指示了大范围的古环境、

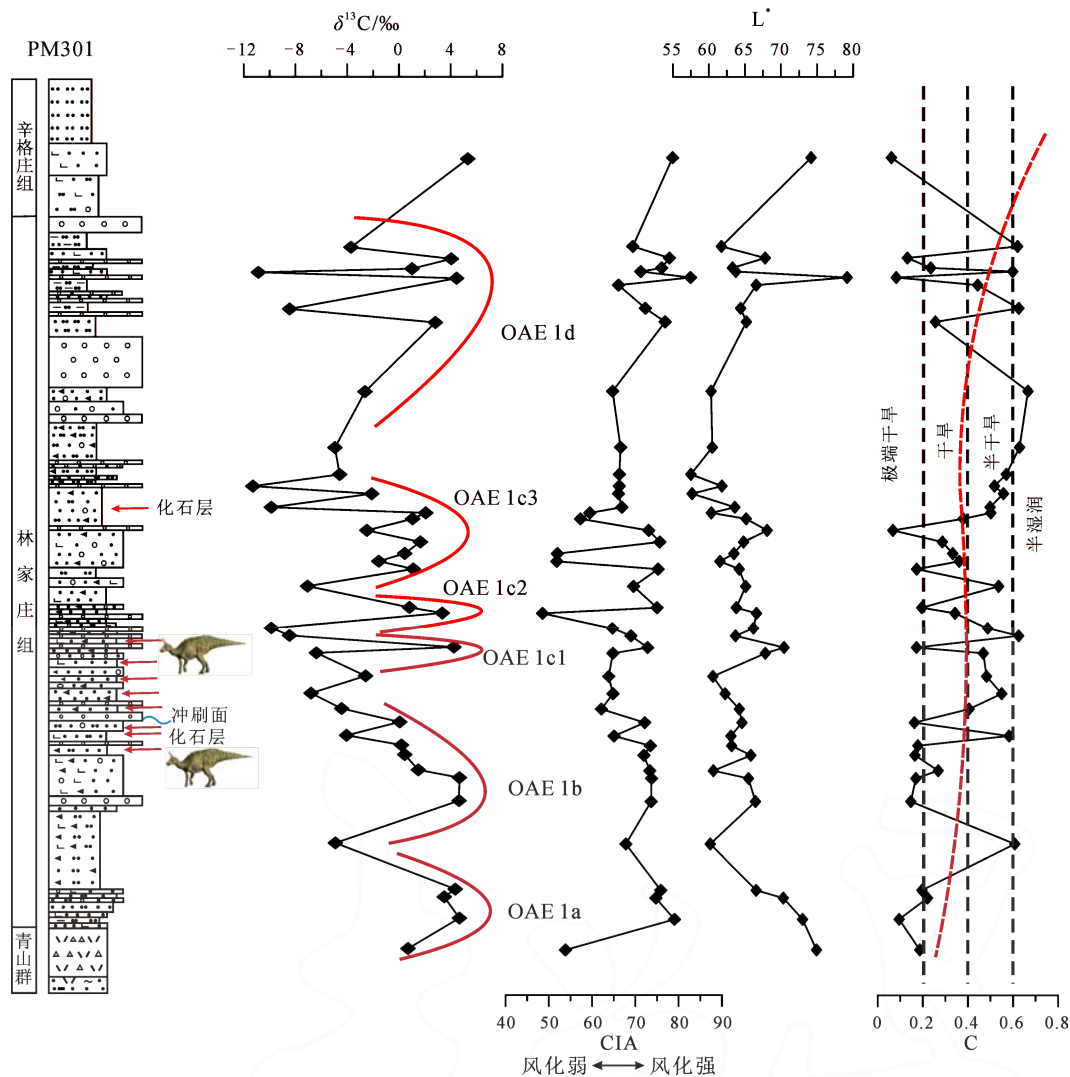


图 6 莱阳洼陷 Albian 阶林家庄组—辛格庄组古环境演变特征

Fig. 6 Paleoenvironmental change during Linjiazhuang-Xingezhuang Formations at Albian stage in the Laiyang depress

古气候变化(黄永建等, 2008)。根据对全球各个不同地点的黑色页岩的研究, 证实 OAE 1a 很可能是一次古海洋生产力事件, 并且标志着白垩纪温室气候的开始, 但是其发生、发展过程表现出极为复杂的性质(Larson, 1991)。在 PM301 中也可以明显反映出, OAE 1c 至少由 3 次次级旋回组成, 代表了在白垩纪整体温度上升过程中, 也有多次气候波动特征。

在 PM301 剖面中, 林家庄组中一下部地层含有大量恐龙骨骼化石, 并且在砾石层底部发现有较明显的冲刷面构造特征。而恐龙骨骼化石层主要形成于 OAE 1b—OAE 1c 时期, 表明在 OAEs 事件中, 湿度、降雨量增加造成莱阳洼陷水动力环境发生快速的变化, 河道—漫滩随着地表径流增加及快速变化, 生活在三角洲平原、河漫滩等环境的恐龙也可能受到环境快速变化的影响而死亡埋藏。另外, OAEs 期间大量的火山活动释放出高浓度的 CO_2 是否也是造成大量动物死亡的原因也值得深入研究。

4 结论

本文通过对胶莱盆地莱阳洼陷 Albian 阶林家庄组—辛格庄组地层沉积特征、碳酸盐碳氧同位素组成、色度、碳酸盐含量、TOC 含量, 以及元素组成等综合分析, 偏重的碳同位素组成与 OAEs 事件有较好的对应关系, 表明在白垩纪时期海相地层与陆相地层之间有很好的对应关系。大气 CO_2 可能是这两者之间的联系的纽带。在 Aptian-Albian 期间大量的火山活动释放出的 CO_2 是造成莱阳洼陷林家庄组—辛格庄组沉积地层中碳酸盐碳同位素组成偏重、风化作用增强、碳酸盐含量升高的主要原因。古气候总体上从 Albian 阶早期偏冷干逐渐过渡到半干旱-半湿润, 从 Albian 阶早期湿度逐渐增加。在 PM301 中也可以明显反映出, OAE 1c 至少由 3 次次级旋回组成, 代表了在白垩纪整体温度上升过程中, 也有多次气候波动特征。由于在 Albian 时期湿度、降雨量增加, 造成莱阳洼陷水动力环境发生快速的

变化,导致恐龙受快速变化的环境影响而大量死亡埋藏。另外,OAEs期间大量的火山活动释放出高浓度的CO₂也可能是大量动物死亡的原因之一。

Acknowledgements:

This study was supported by Shandong Geological Society (No. LKZ(2019)54).

参考文献:

- 陈丕基,施泽龙,叶宁,叶得泉. 1998. 松花江生物群与东北白垩系地层序列[J]. 古生物学报, 37(3): 380-385.
- 陈宗颜,陈克龙,罗正霞. 2011. 察尔汗地区 130 ka B.P.以来湖相沉积物颜色记录的气候变化探讨[J]. 盐湖研究, 19(4): 1-7.
- 顾知微. 1962. 记滇中几个晚白垩世淡水瓣鳃类化石并略回顾云南陆相白垩系的研究[J]. 古生物学报, 10(3): 287-311.
- 关有志. 1992. 科尔沁沙地的元素、粘土矿物与沉积环境[J]. 中国沙漠, 12(1): 9-15.
- 黄永建,王成善,顾健. 2008. 白垩纪大洋缺氧事件: 研究进展与未来展望[J]. 地质学报, 82(1): 21-30.
- 霍腾飞,杨德彬,许文良,王枫,刘海彬,师江朋. 2015. 胶莱盆地早白垩世瓦屋砬组砂岩中碎屑锆石 U-Pb-Hf 同位素组成及其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 39(2): 355-368.
- 季强. 2002. 论热河生物群[J]. 地质论评, 48(3): 290-296.
- 李杨,方晶,潘隆,王福. 2018. 沉积物色度在古环境重建中的应用[J]. 气象科技进展, 8(6): 22-27.
- 柳永清,旷红伟,彭楠,许欢,刘燕学. 2011. 山东胶莱盆地白垩纪恐龙足迹与骨骼化石埋藏沉积相与古地理环境[J]. 地学前缘, 18(4): 9-24.
- 马宗晋,杜品仁,卢苗安. 2001. 地球的多圈层相互作用[J]. 地学前缘, 8(1): 3-8.
- 任天龙. 2019. 胶莱盆地东缘早白垩世莱阳群沉积序列及岩相古地理[J]. 山东国土资源, 35(7): 38-45.
- 史瑞萍,朱日祥. 2002. 白垩纪地球物理场异常与地球深部动力学[J]. 地球物理学进展, 17(2): 295-300.
- 万晓樵,李罡,黄清华,席党鹏,陈丕基. 2013. 中国白垩纪陆相阶的划分与对比[J]. 地层学杂志, 37(4): 457-471.
- 王东坡,刘立. 1994. 大陆裂谷盆地层序地层学的研究[J]. 岩相古地理, 14(3): 1-9.
- 王千锁,宋友桂,李吉均,赵志军,荣培. 2015. 末次冰期-间冰期旋回朝那黄土颜色特征及古气候意义[J]. 地理科学, 35(11): 1489-1494.
- 吴艳宏,李世杰. 2004. 湖泊沉积物色度在短尺度古气候研究中的应用[J]. 地球科学进展, 19(5): 789-792.
- 席党鹏,万晓樵,李国彪,李罡. 2019. 中国白垩纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学: 地球科学, 49(1): 257-288.
- 张嘉良,王强,蒋顺兴,程心,李宁,裘锐,张鑫俊,汪筱林. 2017. 山东莱阳晚白垩世恐龙与恐龙蛋研究历史和新进展[J]. 古脊椎动物学报, 55(2): 187-200.
- 周家兴,吴利杰,于娟,杨丽君. 2019. 铜川地区 11.4 ~ 1.5 ka B.P.期间黄土地球化学风化特征及其古气候意义[J]. 地球与环境, 47(1): 64-73.

References:

- ADAMS D D, HURTGEN M T, SAGEMAN B B. 2010. Volcanic triggering of a biogeochemical cascade during Oceanic Anoxic Event 2[J]. Nature Geoscience, 3(3): 201-204.
- BARCLAY R S, McELWAIN J C, SAGEMAN B B. 2010. Carbon sequestration activated by a volcanic CO₂ pulse during Oceanic Anoxic Event 2[J]. Nature Geoscience, 3(3): 205-208.
- BARRERA E, SAVIN, S. 1999. Evolution of late Campanian-Maastrichtian marine climates and oceans[J]. Special Paper of the Geological Society of America, 332: 245-282.
- BERNER R A, KOTHAVALA Z. 2001. GeocarbIII: A revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time[J]. American Journal of Science, 301(2): 182-204.
- BERNER R A. 1994. GEOCARB II: A revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time[J]. American Journal of Science, 294: 56-91.
- BRALOWER T J, CoBABE E, CLEMENT B, SLITER W V, OSBURN C L, LONGORIA J. 1999. The record of global change in mid-Cretaceous (Barremian-Albian) sections from the Sierra Madre, northeastern Mexico[J]. Journal of Foraminiferal Research, 29(4): 418-437.
- BRALOWER T J, FULLAGAR P D, PAULL C K, DWYER G S, LECKIE R M. 1997. Mid-Cretaceous strontium-isotope stratigraphy of deep-sea sections[J]. Geological Society of America Bulletin, 109(11): 1421-1442.
- CHEN Pei-ji, SHI Zhai-long, YE Ning, YE De-quan. 1998. Sungari biota and Cretaceous stratigraphic sequence of NE China[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 37(3): 380-385(in Chinese with English abstract).
- CHEN Zong-yan, CHEN Ke-long, LUO Zheng-xia. 2011. Climatic change recorded by the chroma of lacustrine sediments from 130 ka B. P. in Qarhan Area[J]. Journal of Salt Lake Research, 19(4): 1-7(in Chinese with English abstract).
- CLARKE L J, JENKYN H C. 1999. New oxygen isotope evidence for long-term Cretaceous climatic change in the Southern Hemisphere[J]. Geology, 27(8): 699-702.
- CRONIN M, TAUXE L, CONSTABLE C, SELKIN P, PICK T. 2001. Noise in the quiet zone[J]. Earth and Planetary Science Letters, 190(1-2): 13-30.
- CROWLEY T J, KIM K-Y. 1995. Comparison of longterm greenhouse projections with the geologic record[J]. Geophysical Research Letters, 22(8): 933-936.
- ERBA E, TREMOLADA F. 2004. Nannofossil carbonate fluxes during the Early Cretaceous: Phytoplankton response to nutrition episodes, atmospheric CO₂, and anoxia[J]. Paleoceanography and Paleoclimatology, 19(1): PA1008.
- FLETCHER B J, BRENTNALL S J, ANDERSON C W, BERNER R A, BEERLING D J. 2008. Atmospheric carbon dioxide linked with Mesozoic and early Cenozoic climate change[J]. Nature Geoscience, 1(2): 43-48.
- GU Zhi-wei. 1962. Note on the occurrence of some late Cretaceous fresh-water lamellibranchs in the chusiung district of central

- Yunnan with a brief review on the continental Cretaceous of Yunnan[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 10(3): 287-311(in Chinese with English abstract).
- GUAN You-zhi. 1992. The elements, clay mineral and depositional environment in Horqin sand land[J]. *Journal of Desert Research*, 12(1): 9-15(in Chinese with English abstract).
- HAQ B U, HARDENBOL J, VAIL P R. 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. *Science*, 235(4793): 1156-1167.
- HERMAN A B, SPICER R A. 1996. Palaeobotanical evidence for a warm Cretaceous Arctic Ocean[J]. *Nature*, 380: 330-333.
- HU Xiu-mian, JANSÁ L, WANG Cheng-shan, SARTI M, BAK K, WAGREICH M, MICHALIK J, SOTÁK J. 2004. Upper Cretaceous oceanic red beds (CORBs) in the Tethys: occurrences, lithofacies, age and environments[J]. *Cretaceous Research*, 26(1): 3-20.
- HUANG Yong-jian, WANG Cheng-shan, GU Jian. 2008. Cretaceous ocean anoxic events: Research progress and forthcoming prospects[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(1): 21-30(in Chinese with English abstract).
- HUBER B T, HODELL D A, HAMILTON C P. 1995. Middle-Late Cretaceous climate of the southern high latitudes: Stable isotopic evidence for minimal equator-to-pole thermal gradients[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 107(10): 1164-1191.
- HUBER B T, NORRIS R D, MACLEOD K G. 2002. Deep-sea paleotemperature record of extreme warmth during the Cretaceous[J]. *Geology*, 30(2): 123-126.
- HUO Teng-fei, YANG De-bing, XU Wen-liang, WANG Feng, LIU Hai-bing, SHI Jiang-peng. 2015. U-Pb ages and Hf isotope compositions of detrital zircons from the sandstone in the early Cretaceous Wawukuang formation in the Jiaolai Basin, Shandong Province and its tectonic implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(2): 355-368(in Chinese with English abstract).
- JENKINS H C. 1980. Cretaceous anoxic events: from continents to oceans[J]. *Journal of the Geological Society*, 137(2): 171-188.
- JENKINS H C. 2010. Geochemistry of oceanic anoxic events[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(3): Q03004.
- JI Qiang, LI Hong-qi, MICHELLE B L, LIU Yu-sheng, WINSHIP T D. 2004. Early Cretaceous *Archaeofructus eoflora* sp. nov. with bisexual flowers from Beipiao, western Liaoning, China[J]. *Acta Geologica Sinica(English edition)*, 78(4): 883-896.
- JI Qiang. 2002. On the Mesozoic Jehol biota of China[J]. *Geological Review*, 48(3): 290-296(in Chinese with English abstract).
- JONES C E, JENKINS H J. 2001. Seawater strontium isotopes, oceanic anoxic events, and seafloor hydrothermal activity in the Jurassic and Cretaceous[J]. *American Journal of Science*, 301(2): 112-149.
- KAIHO K, SAITO S. 1994. Oceanic crust production and climate during the last 100 Myr[J]. *Terra Nova*, 6(4): 376-384.
- KELLER G. 2008. Cretaceous climate, volcanism, impacts, and biotic effects[J]. *Cretaceous Research*, 29(5-6): 754-771.
- LARSON R L. 1991. Latest pulse of earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume[J]. *Geology*, 19(6): 547-550.
- LECKIE R M, BRALOWER T J, CASHMAN R. 2002. Oceanic anoxic events and plankton evolution: Biotic response to tectonic forcing during the mid-Cretaceous[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 17(3): 13-13-29.
- LI Yang, FANG Jing, PAN Long, WANG Fu. 2018. Application of sediment chromaticity in paleo-environment reconstruction[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 8(6): 22-27(in Chinese with English abstract).
- LIU Yong-qing, KUANG Hongwei, PENG Nan, XU Huan, LIU Yan-xue. 2011. Sedimentary facies of dinosaur trackways and bonebeds in the Cretaceous Jiaolai Basin, eastern Shandong, China, and their paleogeographical implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(4): 9-24(in Chinese with English abstract).
- LLOYD C R. 1982. The mid-Cretaceous earth: Paleogeography; ocean circulation and temperature; atmospheric circulation[J]. *The Journal of Geology*, 90(4): 393-413.
- MA Zong-jing, DU Pin-ren, LU Miao-an. 2001. Multi-layered interaction of the earth[J]. *Earth Science Frontiers*, 8(1): 3-8(in Chinese with English abstract).
- MEYERS P A. 2005. Paleooceanographic and paleoclimatic similarities between Mediterranean sapropels and Cretaceous black shales[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 235(1): 305-320.
- MILLÁN M I, WEISSERT H J, FERNÁNDEZ-MENDIOLA P A, GARCÍA-MONDÉJAR J. 2009. Impact of Early Aptian carbon cycle perturbations on evolution of a marine shelf system in the Basque-Cantabrian Basin (Aralar, N Spain)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 28(3): 392-401.
- NAGAO S, NAKASHIMA S. 1992. The factors controlling vertical color variations of North Atlantic Maderia Abyssal Plain sediments[J]. *Marine Geology*, 109(1-2): 83-94.
- NESBITT H W, YONG G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lites[J]. *Nature*, 299: 715-717.
- NORRIS R D, BICE K L, MAGNO E A, WILSON P A. 2002. Jiggling the tropical thermostat in the Cretaceous hothouse[J]. *Geology*, 30(4): 299-302.
- OTTO-BLIESNER B L, BRADY E C, SHIELDS C. 2002. Late Cretaceous ocean: Coupled simulations with the national center for atmospheric research climate system model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 107(D2): 11-11-14.
- REN Tian-long. 2019. Analysis on sedimentary sequence and lithofacies paleogeography of early Cretaceous Laiyang Group in eastern Jiaolai Basin[J]. *Shandong Land and Resources*, 35(7): 38-45(in Chinese with English abstract).

- ROYER D L, BERNER R A, MONTANEZ I P, TABOR N J, BEERLING D J. 2004. CO₂ as a primary driver of Phanerozoic climate[J]. *GSA Today*, 14(3): 3-7.
- ROYER D L. 2006. CO₂-forced climate thresholds during the Phanerozoic[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(23): 5665-5675.
- SEPKOSKI J J. 1981. A factor analytic description of the Phanerozoic marine fossil record[J]. *Paleobiology*, 7(1): 36-53.
- SHI Rui-ping, ZHU Ri-xiang. 2002. Possible links between abnormal geological events and geodynamics during Cretaceous[J]. *Progress in Geophysics*, 17(2): 295-300(in Chinese with English abstract).
- SKELTON P W. 2003. *The Cretaceous World*[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 1-350.
- STOLL H M, SCHRAG D P. 2000. High-resolution stable isotope records from the Upper Cretaceous rocks of Italy and Spain: Glacial episodes in a greenhouse planet?[J]. *GSA Bulletin*, 112(2): 308-319.
- SUN Yue-wu, LI Xiang, ZHAO Guo-wei, LIU Huan, ZHANG Yan-long. 2016. Aptian and Albian atmospheric CO₂ changes during oceanic anoxic events: Evidence from fossil *Ginkgo* cuticles in Jilin Province, Northeast China[J]. *Cretaceous Research*, 62: 130-141.
- TARDUNO J A, SAGGER W W. 1995. Polar standstill of the mid-Cretaceous Pacific Plate and its geodynamic implications[J]. *Science*, 269(5226): 956-959.
- WAGNER T, HERRLE J O, SINNINGHE DAMSTÉ J S, SCHOUTEN S, STÜSSER I, HOFMANN P. 2008. Rapid warming and salinity changes of Cretaceous surface waters in the subtropical North Atlantic[J]. *Geology*, 36(3): 203-206.
- WAN Xiao-jiao, LI Gang, HUANG Qing-hua, XI Dang-peng, CHEN Pei-ji. 2013. Division and correlation of terrestrial Cretaceous stages in China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 37(4): 457-471(in Chinese with English abstract).
- WANG Cheng-shan, HU Xiu-mian, SARTI M, SCOTT R W, LI Xiang-hui. 2005. Upper Cretaceous oceanic red beds in southern Tibet: a major change from anoxic to oxic, deep-sea environments[J]. *Cretaceous Research*, 26(1): 21-32.
- WANG Dong-po, LIU Li. 1994. Sequence stratigraphy in continental rift basins[J]. *Sedimentary and Palaeogeography*, 14(3): 1-9(in Chinese with English abstract).
- WANG Qian-suo, SONG You-gui, LI Ji-jun, ZHAO Zhi-jun, RONG Pei. 2015. Characteristics of color in Chaona section and its paleoclimatic significance during the Last Glacial-interglacial cycle[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 35(11): 1489-1494(in Chinese with English abstract).
- WANG Yong-dong, HUANG Cheng-min, SUN Bai-nian, QUAN Cheng, WU Jing-yu, LIN Zhi-cheng. 2014. Paleo-CO₂ variation trends and the Cretaceous greenhouse climate[J]. *Earth-Science Reviews*, 129: 136-147.
- WANLLISER O H. 1996. Global events and events stratigraphy in the Phanerozoic[M]. Heidelberg: Springer-verlag: 242-252.
- WEEDON G, JENKYN H C. 2003. Evidence for rapid climate change in the Mesozoic-Palaeogene greenhouse world[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 361(1810): 1885-1916.
- WEISSERT H, LINI A, FÖLLMI K B, KUHN O. 1998. Correlation of Early Cretaceous carbon isotope stratigraphy and platform drowning events: a possible link?[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 137(3): 189-203.
- WILSON P A, NORRIS R D. 2001. Warm tropical ocean surface and global anoxia during the mid-Cretaceous period[J]. *Nature*, 412(6845): 425-429.
- WU Yan-hong, LI Shi-jie. 2004. Significance of lake sediment color for short time scale climate variation[J]. *Advance in Earth Science*, 19(5): 789-792(in Chinese with English abstract).
- XI Dang-peng, WAN Xiao-jiao, LI Guo-biao, LI Gang. 2019. Cretaceous integrative stratigraphy and timescale of China[J]. *Science Sinica(Terrae)*, 49(1): 257-288(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jia-liang, WANG Qiang, JIANG Shun-xing, CHENG Xin, LI Ning, QIU Rui, ZHANG Xin-jun, WANG Xiao-lin. 2017. Review of historical and current research on the Late Cretaceous dinosaurs and dinosaur eggs from Laiyang, Shandong[J]. *Vertebrata Palasiatica*, 55(2): 187-200(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Cheng-jun, FAN Rong, LI Jun, MISCHKE S, DEMBELE I, HU Xiao-lan. 2013. Carbon and oxygen isotopic compositions: How lacustrine environmental factors respond in northwestern and northeastern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(5): 1344-1354.
- ZHAO Xi-xi. 2005. The Earth's magnetic field and global geologic phenomena in Mid-Cretaceous[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 199-216.
- ZHOU Jia-xing, WU Li-jie, YU Juan, YANG Li-jun. 2019. Characteristics of geochemical weathering of loess in the Tongchuan area during 11.4-1.5 ka B.P. and its paleoclimatic implications[J]. *Earth and Environment*, 47(1): 64-73(in Chinese with English abstract).