

晚中生代滦平盆地古气候环境演化

——基于化学风化强度重建

殷艺天,张来明,顾雪,余晨旻,吴培衍

(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083)

摘要:气候变化是影响生物群演化的关键驱动因素,因此研究陆地生态系统所处的古气候环境背景具有十分重要的意义。滦平盆地作为典型的晚中生代陆相沉积盆地,出露燕辽生物群和热河生物群的代表性化石,是开展古气候演化与生物群更替关系研究的理想场所。然而,前人研究主要聚焦于热河生物群演化中晚期阶段,这限制了对热河生物群早期演化的理解。本研究对滦平盆地晚中生代地层开展沉积学和元素地球化学研究,重建化学风化强度、古温度和古降水等多个古气候环境记录。研究结果表明,滦平盆地在侏罗纪和白垩纪之交为相对干旱的气候,可能驱动了该地区燕辽生物群与热河生物群的交替。基于火山灰层位与热河生物群生物多样性联系,研究发现白垩纪火山活动的增强与古气候逐渐转向暖湿导致湖泊古生产力显著提高,推测热河生物群的早期演化可能受到火山活动与气候演化的双重驱动。

关键词:滦平盆地;晚侏罗世—早白垩世;热河生物群;化学风化;古气候重建

中图分类号:P532

文献标志码:A

Paleoclimate and paleoenvironment evolution during Late Mesozoic in Luanping Basin: Evidence from chemical weathering reconstruction

YIN Yitian, ZHANG Laiming, GU Xue, YU Chenmin, WU Peiyan

(School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: It is of significance to study the paleoclimate and paleoenvironment of the terrestrial ecosystem since climate change is a major driving force in biota evolution. As a typical Late Mesozoic continental sedimentary basin, the Luanping Basin contains representative Yanliao and Jehol biota fossils, which makes it an ideal place to study the relationship between paleoclimate/paleoenvironment and biota evolutions. However, the previous studies mainly focus on the middle and late evolutionary stages of Jehol Biota, which limits our understanding of the early evolution of Jehol Biota. In this study, we conducted sedimentological and geochemical analyses of the Late Mesozoic strata in the Luanping Basin and reconstructed the paleoclimatic and paleoenvironmental records such as chemical weathering, paleotemperature, and paleoprecipitation. The results indicate that the relatively arid climate in the Luanping Basin at the turn from the Jurassic to Cretaceous may have affected the alternation of the Yanliao and Jehol Biotas in the region. Based on the relationships between the volcanic ash horizons and the biodiversity of the Jehol Biota, we suggest that the relatively warm and humid climate and the volcanic activities during the Cretaceous led to a significant increase in the lake paleoproductivity. Therefore, we speculate that both volcanic activity and climatic change have affected the early evolution of the Jehol Biota.

收稿日期:2022-01-22

基金项目:中央高校基本科研业务费(265202103);国家重点研发计划项目(2018YFE0204204)

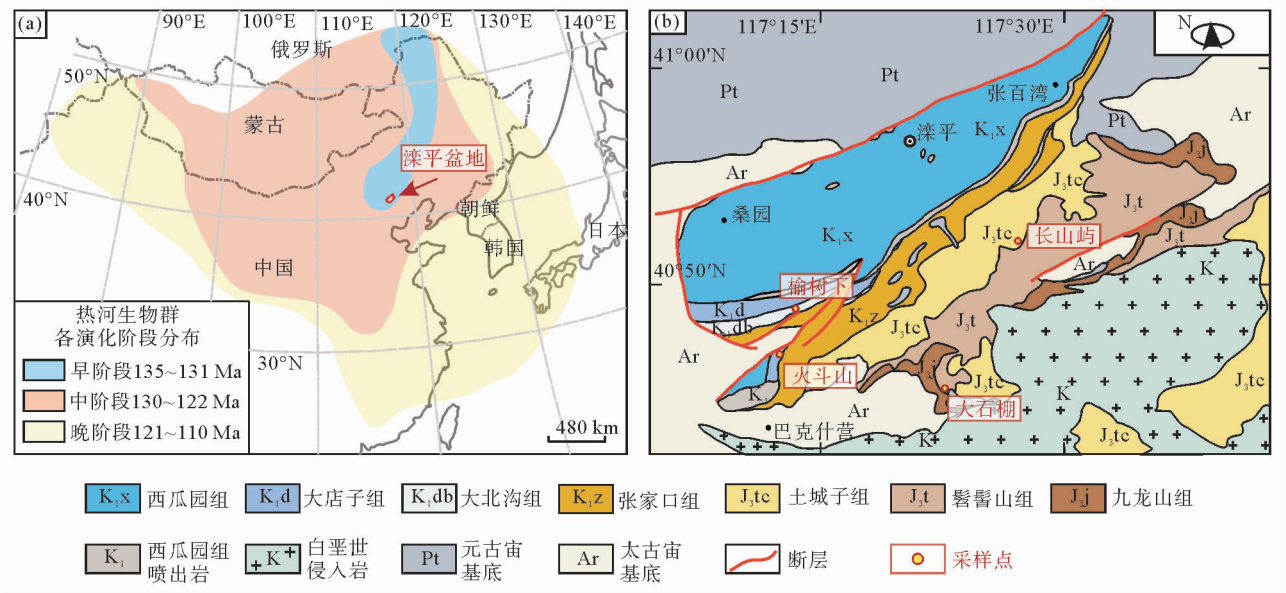
作者简介:殷艺天(1998—),男,安徽池州人,硕士研究生,主要从事晚中生代燕山地区古气候重建研究。

张来明(1987—),男,河南新乡人,副教授,博士生导师,主要从事沉积地球化学、古气候学研究,本文通信作者。
E-mail: lzhang@cugb.edu.cn

Key words: Luanping Basin; Late Jurassic-Early Cretaceous; Jehol Biota; chemical weathering; paleoclimatic reconstruction

热河生物群是早白垩世东亚地区重要的陆地生物群^[1],前人发现大量保存完好的化石,包括腹足类、双壳类、甲壳类、昆虫类和蛛形类等无脊椎动物,无颌类、软骨鱼类、硬骨鱼类、两栖类(无尾和有尾两栖类)、爬行类、鸟类和哺乳动物等脊椎动物,以及藻类、苔藓、蕨类、裸子植物、被子植物等主要植物门类,其中辽西地区发现的带羽毛恐龙化石是著名的早期鸟类记录,被子植物化石则是开花植物进化的最古老记录之一^[2]。研究热河生物群对于了解现代地球生态系统中一些主要生物类群(如真兽类和后兽类哺乳动物、鸟类、昆虫若干亚类群以及被子植物等)的起源和早期演化具有重要意义,是观察完整的早白垩世陆地生态系统组成和演化的最佳选择^[2]。构造活动和古气候变化是影响热河生物群演化的关键驱动因素^[1],华北克拉通破坏造成的构造活动导致了广泛发育的断陷盆地,形成了众多淡水湖泊;频繁的火山活动为淡水湖泊提供了大量营养物质,也造就了多变的气候环境,对生物群产生了强大的选择性压力^[1]。因此,研究热河生物群的古气候环境背景对理解早白垩世东亚陆地生态系统具有十分重要的意义^[2]。

前人将热河生物群分为三个演化阶段:第一阶段仅局限于河北北部等较小的地理范围,第二阶段扩展到华北以及蒙古板块的较大区域,第三阶段地理分布最大^[1](图 1(a))。值得注意的是,受限于地理环境等因素,第一阶段的生物多样性相对较低,与第二、三阶段的整体繁盛形成鲜明对比。前人对热河生物群开展的古气候环境研究主要集中在第二、三阶段,关于第一阶段的研究较少^[2],这限制了对热河生物群早期演化的理解。本研究整合并梳理了前人关于滦平盆地年代学与沉积学工作,采用元素地球化学等方法,重建了滦平盆地晚侏罗世到早白垩世古气候环境演化,并进一步探究了古气候变化和火山活动对生物多样性的影响。



陆相碎屑沉积,以红色和杂色碎屑岩及中性和酸性火山岩共生为特征(图 1(b))。基于前人年代学研究,重新梳理了滦平盆地的年代学格架(图 2),除九龙山组底部 163.4 Ma 年龄来自相邻的承德盆地^[8],其余年龄均来自滦平盆地内^[9]。

盆地中、晚中生代九龙山组发育在起伏不平的变质岩基底之上,底部以辫状河沉积为主,随着沉积过程水体逐渐加深,局部沉积了湖相细碎屑岩。髫髻山组以安山岩为主,夹少量泥岩、砂岩,代表盆地火山活动的增强,是火山喷溢充填阶段。然后,盆地接受了一套厚达 1 400 m 的土城子组沉积,属于扇三角洲向滨浅湖过渡的沉积环境。之后,构造活动再次增强,大规模酸性火山岩喷发形成了张家口组火山岩。大北沟组整合于张家口组之上,为一套扇三角洲-湖相沉积体,总厚度约 220 m,正常沉积岩层出现并取代凝灰岩成为主要岩层是大北沟与张家口组界线的标志。大店子组整体发育湖相连续沉积序列,“蜂窝梁砾岩”或与之相当的粗碎屑岩层为大北沟组与大店子组的界限^[10]。上覆西瓜园组与大店子组呈角度不整合接触,整体是火山-湖泊相沉积,总厚度约 1 300 m。

2 材料与方法

本研究在滦平盆地共采集样品 68 件,其中九龙山组 15 件样品采自盆地南侧的大石棚剖面,土城子组 18 件样品采自盆地中部的长山岭剖面,大北沟组 23 件与大店子 12 件样品采自盆地西侧的榆树下与火斗山剖面(图 1~2)。为了排除火山灰层对测试分析结果的影响,仅样品中的黑色泥岩被用于测试分析,其中 36 件样品用于主量元素测试,大北沟组的 6 件样品被用于微量元素测试。元素含量测试结果可用于计算化学蚀变指数等气候环境指标,由此反映研究区的气候环境演化^[11]。

实验在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,全岩主量元素分析使用日本理学(Rigaku)生产的 ZSX Primus II 型波长色散 X 射线荧光光谱仪(X-ray fluorescence spectrometer, XRF),4.0 kW 端窗铑靶 X 射线光管,测试条件为电压 50 kV,电流 60 mA,主量元素分析谱线均为 $K\alpha$,标准曲线利用国家标准物质岩石系列 GBW07101-14、土壤系列 GSS07401-08、水系沉积物系列 GBW07302-12 建立。数据校正采用理论 α 系数法,测试相对标准偏差(relative standard deviation, RSD) < 2%。

全岩微量元素含量利用 Agilent 7700e 电感耦合等离子质谱仪(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)分析完成。用于 ICP-MS 分析的样品处理流程如下:①将 200 目样品置于 105 °C 烘箱中烘干 12 h;②准确称取粉末样品 50 mg 置于 Teflon 溶样弹中;③依次缓慢加入 1 mL 高纯 HNO_3 和 1 mL 高纯 HF;④将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190 °C 烘箱中加热 24 h 以上;⑤待溶样弹冷却,开盖后置于 140 °C 电热板上蒸干,然后加入 1 mL HNO_3 并再次蒸干;⑥加入 1 mL 高纯 HNO_3 、1 mL MQ 水和 1 mL 内标 In(浓度 1 ppm),再次将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190 °C 烘箱中加热 12 h 以上;⑦将

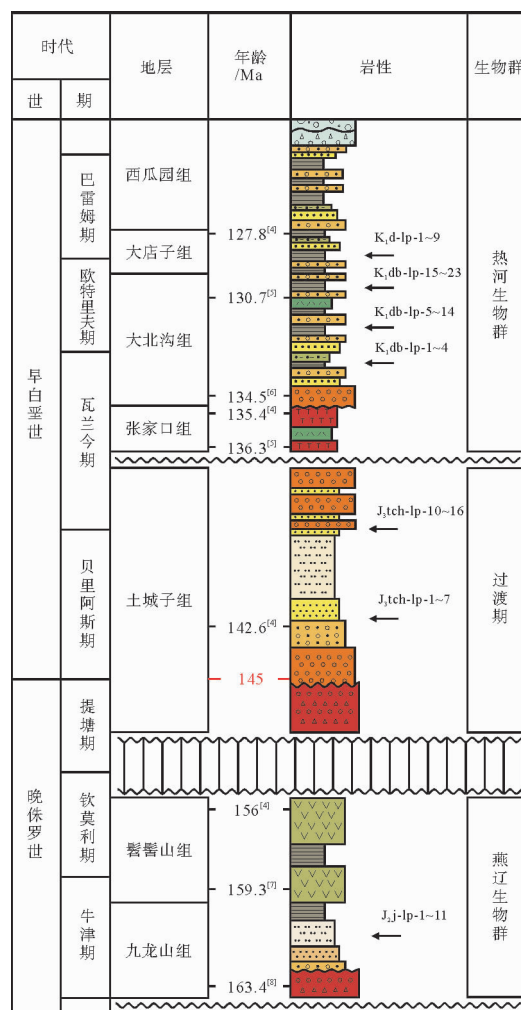


图 2 滦平盆地年代地层格架图

Fig. 2 Chronological framework of the Luanping Basin

溶液转入聚乙烯料瓶中,并用 2% HNO_3 稀释至 100 g 以备 ICP-MS 测试。

2.1 化学蚀变指数(CIA)

化学蚀变指数(chemical index of alteration, CIA)指示土壤和沉积物化学风化程度,能够用于古气候重建^[12]。在化学风化过程中,随着气候变得温暖湿润,自由阳离子的反应减少会产生更高的 CIA 值。公式如下:

$$\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100. \quad (1)$$

其中,所有氧化物均以摩尔单位表示, CaO^* 代表硅酸盐组分中的 CaO 。对 CaO^* 的校正步骤遵循 McLennan^[13]的方法:①使用 P_2O_5 数据对磷灰石中的 CaO 进行校正($\text{CaO}' = \text{CaO} - 10/3 \times \text{P}_2\text{O}_5$);②如果 CaO' 大于 Na_2O ,则 CaO^* 等于 Na_2O ,如果 CaO' 小于 Na_2O ,则 CaO^* 等于 CaO' 。未经风化原岩的特点是 CIA 值低(45~55),随着逐渐风化和流动元素的损失,数值接近 100。

岩石 K_2O 含量会受到钾元素交代作用的影响,这种次生沉积过程会导致钾离子在严重蚀变岩石中被埋藏流体所吸收^[12],可以使用 Panahi 等^[14]的方法对 CIA 值进行校正。

$$\text{K}_2\text{O}_{\text{corr}} = [m \text{Al}_2\text{O}_3 + m(\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O})] / (1 - m). \quad (2)$$

$$m = \text{K}_2\text{O} / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}). \quad (3)$$

将式(1)中的 K_2O 替换为 $\text{K}_2\text{O}_{\text{corr}}$,计算校正后 CIA(CIA_{corr}),当 $\text{CIA}_{\text{corr}} < \text{CIA}$ 时, CIA 能更准确地反映风化强度,否则 CIA_{corr} 可信度更高。

根据 Yang 等^[15]的公式可计算陆地地表温度(land surface temperature, LST):

$$\text{LST} = 0.56 \times \text{CIA} - 25.7. \quad (4)$$

其中: LST 单位 $^{\circ}\text{C}$, $r^2 = 0.50$, $SE = \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。当 CIA 为 50~90 时,该公式是可靠的(对应 3~25 $^{\circ}\text{C}$)。利用三点移动平均值对 LST 记录进行平滑处理,以反映每个点位的时间平均条件,同时考虑采样分辨率的可变性。

2.2 化学风化指数(CIW)

由于过量的 K_2O 在沉积岩单元中出现的频率很高^[12],使 CIA 值受到钾元素交代作用影响较大, Harnois^[16]提出一种替代指数,即化学风化指数(chemical weathering index, CIW),该指数与 CIA 原理相同,只是删除了 K_2O 。公式为:

$$\text{CIW} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O})] \times 100. \quad (5)$$

Sheldon 等^[17]提出 CIW 和年平均降水量(mean annual precipitation, MAP)的关系为:

$$\text{MAP}(\text{mm/yr}) = 221.12e^{0.0197(\text{CIW})} (r^2 = 0.72, SE = \pm 182 \text{ mm}). \quad (6)$$

2.3 元素指标

Al/K 比值:在河湖相沉积环境中, K 元素通常存在于伊利石中,而 Al 元素则存在于高岭石中。伊利石是相对干旱气候条件下机械风化的一种常见产物,高岭石则主要是潮湿时期的化学风化产物。因此,沉积岩中较高的 Al/K 比值反映了化学风化作用较强,指示较高的汇水区降水^[18]。

Sr/Rb 比值:矿物在化学风化过程中所释放的 Rb 元素容易被富钾黏土重新吸收,因此大部分 Rb 元素被保留在原岩中,只有少量会随地表径流淋滤迁移。与 Rb 元素不同的是, Sr 元素在化学风化过程中会以自由离子的形式随地表径流迁移,并通过物理吸附或化学沉淀作用沉积在湖底。因此, Sr/Rb 比值可以作为湖泊流域化学风化强度的指标, Sr/Rb 比值越高则表明化学风化强度越强^[19]。

K+Ti+Rb 值:湖相沉积物中的 K、Ti 和 Rb 元素的含量被证实与细粒或粉粒级的沉积物有正相关关系,基于 K、Ti、Rb 元素的一致性和线性相关性,可以将 K、Ti、Rb 含量相加,用和值表示细粒组分的变化。随着区域降水的增加,可能会导致分选较差的碎屑物质进入湖泊,导致湖泊沉积物中细粒矿物的比例降低,因此 K+Ti+Rb 值越低则湖泊流域的降水强度越高,指示化学风化强度越强^[20]。

P/Al 比值: P 是一种重要的营养元素,主要以有机结合态的形式进入到沉积物中,由于 P 会在缺氧条件下溶解,因此对于富氧到亚氧条件下的沉积物, P 元素作为古生产力指标尤为重要。为了消除陆源碎屑岩对 P 元素含量的影响,将 P 元素对 Al 元素进行比值^[21],结果越高则沉积物的古生产力越高。

3 结果与讨论

3.1 晚侏罗世—早白垩世滦平盆地气候环境的变化

如图3所示,滦平盆地在整个演化阶段风化强度在50~75之间浮动,反映了相对较低的化学风化强度。其中九龙山组平均值65.8,土城子组平均值50.7,大北沟组与大店子组连续沉积的平均值为64.2,表明晚侏罗世—早白垩世盆地整体处于温暖湿润的气候环境(表1)。

需要注意的是,侏罗纪—白垩纪之交土城子组的风化强度出现了一个较为明显的低值阶段,最小值小于50,指示该时期沉积岩几乎没有发生化学风化。前人在土城子组进行的孢粉学研究表明,该时期的优势孢粉组合为 *Classopollis*-*Cooksonites*-*Ephedripites*,其中 *Classopollis* 作为优势属反映了相对干旱的气候^[23],表明盆地可能处于相对干旱凉爽的气候环境。以上认识与全球古温度记录一致,例如 Scotese 等^[22]认为晚侏罗世—早白垩世全球进入冷期,平均温度降至18℃。

前人在古地磁学与古风向学的研究中认为,华北板块在侏罗纪、白垩纪之交发生了真极移事件^[24-25],这次真极移事件导致华北板块在10 Ma时间向南移动至30°N,从北方温暖湿润带进入了水汽来源稀缺的副热带高压带,这一独特的气候转变时期被称为“侏罗纪东亚大干旱事件”,对比前人的古地磁记录与古风向变化的时间,滦平盆地土城子组的极低化学风化强度可能受到此次真极移事件产生的极端干旱气候影响。

前人古生物学研究表明,土城子组沉积时期的化石记录并不丰富,动物化石以叶肢介与介形类为代表,其中叶肢介明显不同于下部燕辽生物群的柴达木叶肢介类群。土城子组下段 *Pseudograptia* 十分丰富,与热河生物群早期代表类型 *Nestoria* 具有密切的亲缘关系。而介形类下部组合以 *Darwinula* 为主,具有明显的中侏罗世—晚侏罗世早期化石特征;上部组合则为晚侏罗世—早白垩世化石特征。化石记录显示土城子组沉积时期燕辽生物群急剧减少,而热河生物群先驱类型已经萌发,这使得土城子组成为燕山地区两大重要中生代生物群——燕辽生物群和热河生物群的间隔期^[9]。前人综合多学科研究认为,燕山地区晚侏罗世—早白垩世早期的生物群更替具有一定的继承性,其中土城子组沉积时期所发生的古气候环境变化可能触发了生物群落的“避难所”机制^[26],本研究中土城子组沉积时期风化程度剧烈降低指示的湿度与温度的突变很好地支持了前人的结论(图3)。

3.2 早白垩世火山活动等对滦平盆地生物多样性的影响

Qin 等^[2,27]对大北沟组地层开展了地层学与古生物学研究,将大北沟组划分为三段,对其中部分黑色泥岩样品进行了主微量元素测试。在此基础上,本研究开展了测试分析工作,并对结果进行校正以消除K元素交代作用所产生的影响,最终获得具有较高分辨率的综合风化与气候环境指标演化曲线(图4)。

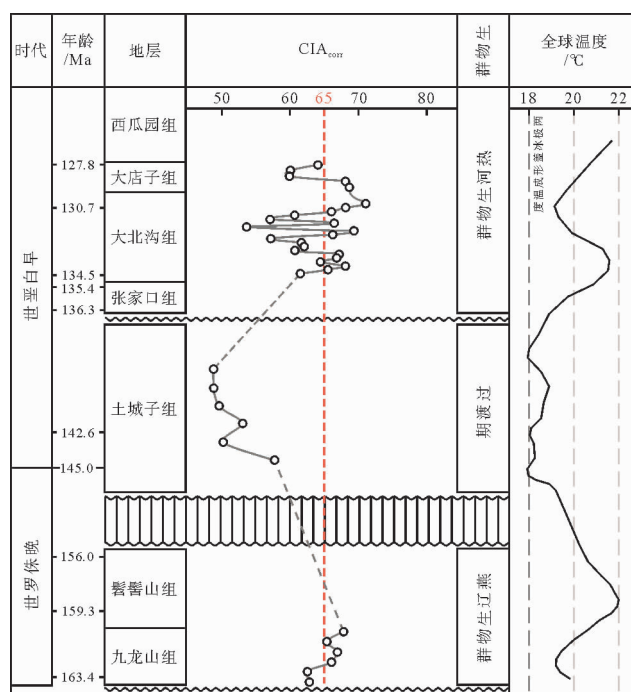


图3 滦平盆地化学风化指数演化图(全球温度数据来源于文献[22])

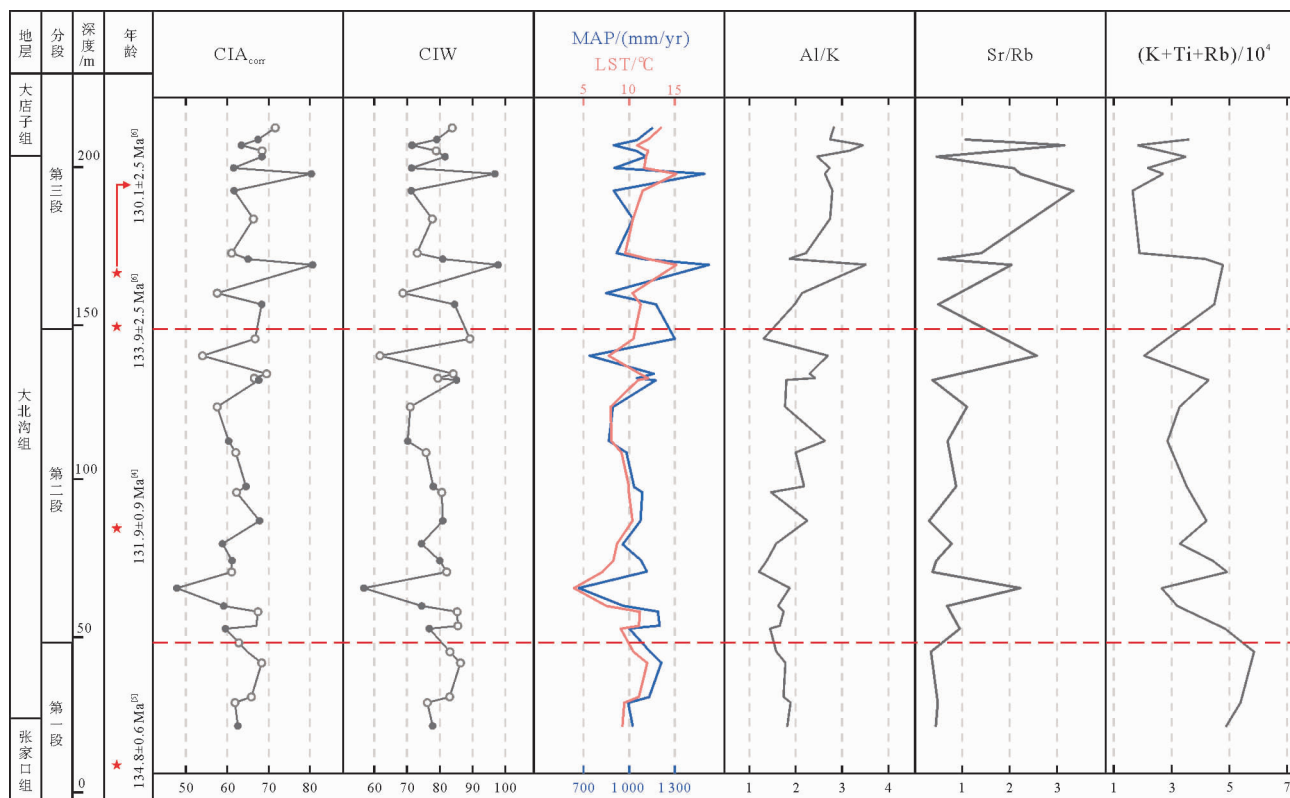
Fig. 3 Chemical weathering index of the Luanping Basin
(the global temperature data from literature [22])

表 1 滦平盆地泥岩主量元素含量、CIA 校正计算及温度降水值

Tab. 1 Major element concentrations of mudstones from the Luanping Basin and related calculations

组名	样品	SiO ₂ /%	TiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	TFe ₂ O ₃ /%	MnO /%	MgO /%	CaO /%	Na ₂ O /%	K ₂ O /%	P ₂ O ₅ /%	LOI /%	SUM /%	CIA	CIA _{corr}	CIW	LST ^a /℃	MAP ^b / (mm/yr)
九龙山	1	66.321	0.709	13.778	5.719	0.069	3.307	1.645	1.718	2.561	0.171	3.703	99.701	62.7	63.4	71.8	9.8	909
	3	68.021	0.675	13.276	4.924	0.058	2.706	2.054	1.604	2.545	0.139	3.981	99.983	62.3	63.0	71.6	10.0	905
	5	68.185	0.760	14.306	5.503	0.051	2.238	1.283	1.483	2.913	0.171	3.519	100.412	65.5	66.6	76.6	11.3	1 000
	7	64.973	0.837	15.409	5.757	0.054	2.559	1.288	1.339	3.470	0.153	3.969	99.808	66.0	67.3	78.7	11.8	1 041
	9	66.141	0.760	14.729	5.818	0.054	2.301	1.206	1.757	2.902	0.138	3.557	99.363	65.1	66.0	75.6	11.7	980
土城子	11	64.989	0.806	15.256	5.683	0.049	2.216	1.157	1.318	3.308	0.147	4.580	99.509	67.0	68.4	79.5	11.0	1 059
	1	55.133	1.197	18.648	7.857	0.025	1.894	4.492	3.806	1.510	0.564	4.224	99.350	56.8	56.9	59.8	6.6	718
	4	58.556	0.912	16.237	6.548	0.065	2.799	4.880	4.225	2.522	0.385	2.897	100.026	49.4	49.6	53.9	3.2	639
	7	58.560	0.929	16.670	7.284	0.064	2.099	3.044	4.451	3.190	0.403	2.144	98.838	52.0	52.4	58.3	2.9	698
	10	57.350	0.806	14.449	5.891	0.064	1.020	6.237	3.730	2.686	0.398	6.706	99.337	48.8	49.0	54.1	2.0	641
大北沟	13	53.256	2.585	15.081	10.807	0.144	3.349	6.235	4.133	2.560	0.962	0.855	99.967	47.9	48.1	52.6	1.4	623
	16	53.095	2.588	15.172	10.249	0.130	3.202	6.272	4.112	2.654	0.960	1.740	100.174	48.0	48.3	52.9	2.8	626
	1	63.810	0.825	17.449	4.690	0.033	0.578	0.504	3.094	5.889	0.230	2.784	99.886	59.6	61.8	76.2	7.8	991
	2	64.991	0.668	17.462	3.748	0.054	0.668	0.343	1.943	6.390	0.099	3.021	99.387	62.4	65.8	83.0	11.0	1 133
	3	73.655	0.272	13.200	3.228	0.099	0.600	0.263	1.037	4.734	0.037	2.463	99.588	64.6	68.3	86.3	11.9	1 210
大北沟	4	69.448	0.293	15.607	2.641	0.055	0.585	0.444	1.493	6.314	0.041	2.617	99.538	60.9	64.8	83.1	11.2	1 137
	5	73.033	0.364	14.169	1.822	0.015	0.583	0.255	1.233	5.434	0.040	2.798	99.746	63.1	67.0	85.5	11.6	1 192
	6	73.444	0.337	13.841	1.612	0.011	0.547	0.229	1.270	5.065	0.047	3.011	99.414	63.7	67.4	85.3	11.3	1 185
	7	77.534	0.285	10.897	1.316	0.019	0.387	0.225	1.255	5.726	0.041	1.819	99.504	55.9	61.0	82.1	9.3	1 114
	9	76.208	0.442	10.696	1.690	0.031	0.651	0.304	1.327	4.645	0.070	3.398	99.462	58.4	62.2	80.6	9.0	1 082
	10	75.890	0.385	10.366	3.041	0.118	1.166	0.575	1.559	3.311	0.123	3.032	99.566	60.0	62.0	75.8	8.6	983
	12	67.645	0.361	10.225	2.362	0.037	2.226	4.744	1.270	3.677	0.086	6.776	99.409	55.6	57.5	71.0	8.0	895
	13	70.657	0.430	12.561	3.913	0.016	2.326	0.770	1.355	3.313	0.157	3.900	99.398	64.7	66.5	79.4	10.9	1 056
	14	72.811	0.308	10.884	3.962	0.021	2.616	1.059	0.625	3.018	0.086	4.116	99.506	67.1	69.5	84.1	11.1	1 159
	15	51.192	0.347	9.343	3.478	0.189	1.170	14.620	1.760	2.215	0.218	14.776	99.308	53.3	53.9	61.7	7.7	746
	16	74.290	0.134	13.241	1.090	0.006	0.807	0.448	0.531	6.445	0.036	2.766	99.794	60.6	66.7	89.2	9.2	1 281
	18	71.950	0.435	9.448	2.949	0.033	1.464	3.333	1.307	2.819	0.218	5.925	99.881	56.2	57.5	68.7	7.9	856
	19	68.379	0.477	10.848	3.221	0.046	1.705	3.747	1.221	3.123	0.178	6.249	99.194	59.4	61.0	73.0	8.7	931
大店子	20	65.333	0.653	14.563	4.623	0.031	1.984	0.920	1.885	3.386	0.249	5.778	99.405	65.0	66.3	77.7	11.1	1 021
	20	65.333	0.653	14.563	4.623	0.031	1.984	0.920	1.885	3.386	0.249	5.778	99.405	65.0	66.3	77.7	11.1	1 021
	22	60.820	0.427	11.472	5.234	0.085	2.005	6.613	0.934	2.318	0.296	9.024	99.228	67.2	68.4	78.9	12.7	1 045
	23	74.271	0.385	12.22	3.244	0.011	1.776	0.419	1.045	2.760	0.052	3.539	99.722	69.5	71.3	83.8	13.6	1 152
	1	61.631	0.696	16.689	5.848	0.067	2.665	1.245	1.010	4.654	0.106	5.375	99.986	66.6	68.9	83.4	13.1	1 143
大店子	3	73.765	0.511	11.288	4.946	0.038	1.847	0.500	1.480	2.161	0.087	3.487	100.110	67.3	68.4	78.3	11.7	1 032
	5	62.059	0.896	17.095	5.558	0.089	1.849	1.177	4.596	2.321	0.338	3.511	99.489	60.0	60.3	65.8	9.0	807
	7	37.095	0.348	8.104	3.266	0.796	1.246	23.931	1.100	1.742	0.170	21.476	99.274	59.5	60.3	69.1	8.5	863
	9	58.379	0.684	15.777	6.008	0.069	2.175	3.959	1.649	3.416	0.189	7.171	99.476	63.3	64.4	74.4	9.8	957

LST^a—land surface temperature(地表温度); MAP^b—mean annual precipitation(年平均降水量)



沉积年龄数据来自文献[4-6]; CIA_{corr} 与 CIW 中, 灰色圆点的原始数据来自文献[2]; Al/K、Sr/Rb、K+Ti+Rb 中部分数据来自文献[2]

图4 滦平盆地大北沟组风化指标与气候环境指标图

Fig. 4 Weathering index and climatic/environmental index of the Dabeigou Formation in the Luanping Basin

大北沟组第一段 CIA 的平均值为 65 左右, 进入第二段后 CIA 小幅下降, 最低值降到 55, 之后显著上升并恢复到 65~70, 最高值达 80。CIW 也显示了相似的趋势, 即第二段开始出现短暂降低, 之后缓慢回升。此外, Al/K、Rb/Sr 和 K+Ti+Rb 比值所反映的化学风化程度也与 CIA 和 CIW 具有相同趋势。

古温度重建结果显示, 大北沟组第一段沉积初期的地表平均温度为 10~15 °C, 但在第二段沉积初期下降到 5 °C 以下, 最后在第二段末期到第三段逐渐回升到 10~15 °C。年平均降水量 (MAP) 整体趋势与温度类似, 反映了逐渐湿润的趋势, 最低值小于 800 mm/yr, 峰值则超过了 1 400 mm/yr。且均在第三段沉积时期温度和降水量波动明显。

根据前人岩性描述^[27-28], 以剖面厚度 10 m 为单位统计火山灰层数, 共识别出四个火山灰富集层 (图 5), 因此将大北沟组沉积时期的火山活动划分为四期。其中第 I 期火山活动较弱, 第 II、III、IV 期的火山活动更活跃, 可能对生态环境产生更大的影响。

古生产力指标 P/Al 总体呈逐渐增高的趋势, 下部 P/Al 较低且波动较弱, 指示了较低的湖泊古生产力; 伴随着大北沟组沉积时期火山活动的增强, 上部 P/Al 明显升高, 反映了古生产力的提升。推测频繁的火山活动所产生的火山灰将丰富的营养物质引入湖中, 导致湖泊富营养化和初级生产力水平持续提高^[29], 而稳定的初级生产力对食物链产生了巨大贡献。此外, 大北沟组沉积时期由寒冷干旱向温暖湿润逐渐过渡的气候条件也与逐渐增强的火山活动具有一定的相关性。

古生物证据显示大北沟组 *Ostracod* 与 *Spinicaudatan* 的生物多样性发生了显著增加^[2], 其中 *Spinicaudatan* 的多样性受到第 II 期火山喷发的影响出现短期的峰值, 但可能受到当时恶劣气候环境的限制, 生物多样性又迅速回落, 在第 III 期火山活动之后, 火山活动所提供的养分逐渐增多, 同时盆地气候逐渐变得温暖湿润, *Ostracod* 与 *Spinicaudatan* 的生物多样性均出现迅速增长, 并达到更大的峰值。

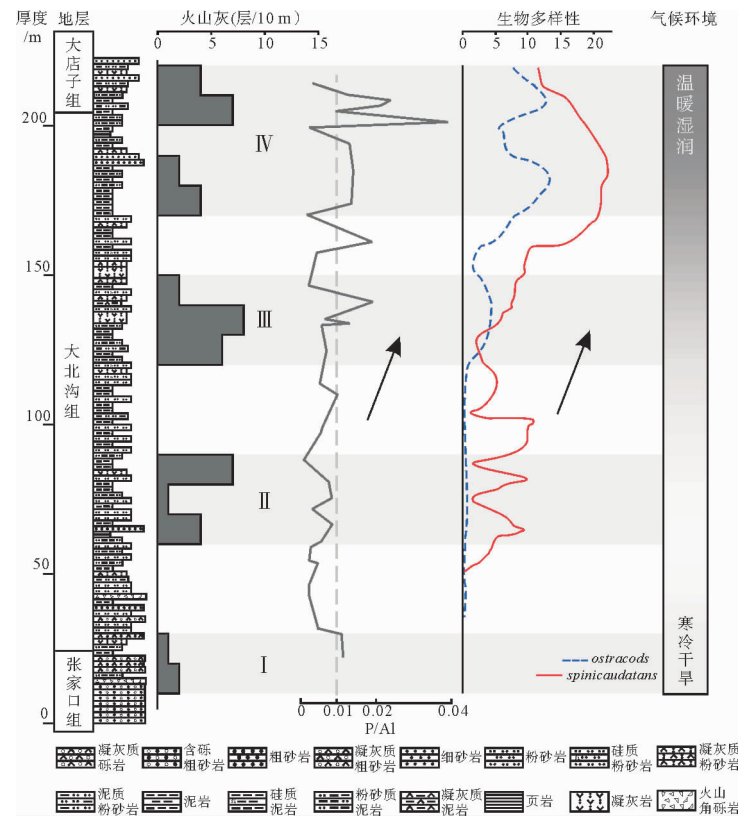


图5 大北沟组火山活动、气候演化和生物多样性综合评价图(生物多样性数据来源于文献[2])

Fig. 5 Comprehensive evaluation of volcanism, climate evolution, and biodiversity in the Dabeigou Formation (biodiversity data from literature [2])

4 结论

基于前人研究结果,本研究对滦平盆地晚中生代陆相地层进行了全岩主微量分析,重建了滦平盆地晚中生代风化强度与气候演化,得到以下结论:

1) 化学风化强度记录表明,滦平盆地在侏罗纪—白垩纪之交经历了温暖湿润—干旱—温暖湿润的气候条件转变,真极移导致的华北板块气候变化可能是造成这一转变的原因,而这种气候转变影响了生物群的绝灭或迁徙事件。

2) 大北沟组的主微量元素记录和火山灰分布情况表明盆地气候在这一阶段逐渐转向温暖湿润,此时火山分期次喷发,提供了充足的初级营养成分,使得湖泊古生产力逐渐提高。因此,气候演化与构造活动共同促进了山间盆地的生物多样性发展,推动了热河生物群的早期演化。

参考文献:

[1]ZHOU Z H,BARRETT P M,HILTON J.An exceptionally preserved Lower Cretaceous ecosystem[J].Nature,2003,421 (6925):807-814.

[2]QIN Z H,XI D P,WAGREICH M,et al.Living environment of the early Jehol Biota:A case study from the Lower Cretaceous Dabeigou Formation,Luanping Basin (North China)[J/OL].Cretaceous Research,2021,124.DOI:10.1016/j.cretres. 2021.104833.

[3]ZHOU Z H,WANG Y.Vertebrate assemblages of the Jurassic Yanliao Biota and the Early Cretaceous Jehol Biota:Comparisons and implications[J].Palaeoworld,2017,26(2):241-252.

[4]WEI H H,MENG Q R,WU G L,et al.Multiple controls on rift basin sedimentation in volcanic settings:Insights from the anatomy of a small Early Cretaceous basin in the Yanshan belt,northern North China[J].Geological Society of America Bulletin,2012,124(3/4):380-399.

- [5] YU Z Q, WANG M, LI Y J, et al. New geochronological constraints for the Lower Cretaceous Jiufotang Formation in Jianchang Basin, NE China, and their implications for the late Jehol Biota [J/OL]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 583. DOI:10.1016/j.palaeo.2021.110657.
- [6] ZHANG L J, ZHENG D, CHANG S C, et al. New age constraints on the early Jehol Biota of Luanping, northeastern China [J/OL]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 585. DOI:10.1016/j.palaeo.2021.1100748.
- [7] 周鹏洁, 滦平盆地中生代早白垩世沉积体系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
ZHOU Pengjie. Research on Mesozoic Early Cretaceous sedimentary system in Luanping basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [8] 陈海燕, 张运强, 张计东, 等. 冀北承德盆地侏罗系九龙山组凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. *地质通报*, 2014, 33(7): 966-973.
CHEN Haiyan, ZHANG Yunqiang, ZHANG Jidong, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of tuff of Jiulongshan Formation from Chengde basin, northern Hebei [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(7): 966-973.
- [9] 黄迪颖. 燕辽生物群和燕山运动[J]. *古生物学报*, 2015, 54(4): 501-546.
HUANG Diying. Yanliao biota and Yanshan movement [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2015, 54(4): 501-546.
- [10] 李佩贤, 柳永清, 田树刚. 冀北滦平盆地侏罗系—白垩系岩石地层研究新进展[J]. *地质通报*, 2004, 23(8): 757-765.
LI Peixian, LIU Yongqing, TIAN Shugang. Advances in the study of the Jurassic-Cretaceous lithostratigraphy in the Luanping basin, northern Hebei [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(8): 757-765.
- [11] 胡芸冰, 刘燕, 郭英海, 等. 鄂尔多斯盆地南缘上石炭统本溪组泥岩元素地球化学特征及沉积环境启示[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(1): 13-23.
HU Yunbing, LIU Yan, GUO Yinghai, et al. Elemental geochemical characteristics of mudstones in Upper Carboniferous Benxi Formation in southern Ordos Basin and their enlightenment to sedimentary environment [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2022, 41(1): 13-23.
- [12] WANG P, DU Y S, YU W C, et al. The chemical index of alteration (CIA) as a proxy for climate change during glacial-interglacial transitions in Earth history [J/OL]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 201. DOI:10.1016/j.earscirev.2019.103032.
- [13] MCLENNAN S M. Weathering and global denudation [J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.
- [14] PANAH I A, YOUNG G M, RAINBIRD R H. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Quebec, Canada [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(13): 2199-2220.
- [15] YANG J H, CAWOOD P A, DU Y S, et al. Global continental weathering trends across the Early Permian glacial to post-glacial transition: Correlating high- and low-paleolatitude sedimentary records [J]. *Geology*, 2014, 42(10): 835-838.
- [16] HARNOIS L. The CIW index: A new chemical index of weathering [J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55(3/4): 319-322.
- [17] SHELDON N D, RETALLACK G, TANAKA S. Geochemical climofunctions from North American soils and application to paleosols across the Eocene-Oligocene boundary in Oregon [J]. *The Journal of Geology*, 2002, 110(6): 687-696.
- [18] BURNETT A P, SOREGHAN M J, SCHOLZ C A, et al. Tropical East African climate change and its relation to global climate: A record from lake Tanganyika, tropical East Africa, over the past 90+ kyr [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 303: 155-167.
- [19] YANG H F, HUANG Y J, MA C, et al. Recognition of Milankovitch cycles in XRF core-scanning records of the Late Cretaceous Nenjiang Formation from the Songliao Basin (northeastern China) and their paleoclimate implications [J/OL]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 194. DOI:10.1016/j.jseaes.2019.104183.
- [20] ALGEO T J, KUWAHARA K, SANO H, et al. Spatial variation in sediment fluxes, redox conditions, and productivity in the Permian-Triassic Panthalassic Ocean [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 308: 65-83.
- [21] ARTHUR M A, DEAN W E, SCHOLLE P. Comparative geochemical and mineralogical studies of two cyclic transgressive pelagic limestone units, Cretaceous Western Interior basin, U.S. [C]// *Fine-Grained Deposits and Biofacies of the Cretaceous Western Interior Seaway: Evidence of Cyclic Sedimentary Processes (FG4)*. The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM), 1985.
- [22] SCOTTESE C R, SONG H J, MILLS B J W, et al. Phanerozoic paleotemperatures: The earth's changing climate during the last 540 million years [J/OL]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 215. DOI:10.1016/j.earscirev.2021.103503. (下转第 29 页)

111326.

- [10] ISHIHARA T, SUGAI T. Eustatic and regional tectonic controls on late Pleistocene paleovalley morphology in the central Kanto Plain, Japan[J]. *Quaternary International*, 2017, 456: 69-84.
- [11] MORISHITA Y. Nationwide urban ground deformation monitoring in Japan using Sentinel-1 LiCSAR products and LiCS-BAS[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2021, 8(1): 1-23.
- [12] 朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1717-1733.
ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1717-1733.
- [13] FARR T G, ROSEN P A, CARO E, et al. The shuttle radar topography mission[J/OL]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45. DOI: 10.1029/2005RG000183.
- [14] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [15] GELARO R, MCCARTY W, SUÁREZ M J, et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2)[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(14): 5419-5454.
- [16] DOIN M P, LASSERRE C, PELTZER G, et al. Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 69(1): 35-50.
- [17] HOOPER A, BEKAERT D, SPAANS K, et al. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation[J]. *Tectonophysics*, 2011, 514-517: 1-13.
- [18] BEKAERT D P S, WALTERS R J, WRIGHT T J, et al. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 170: 40-47.

(责任编辑:高丽华)

(上接第 18 页)

- [23] 林妙琴, 李建国. 冀北滦平盆地三岔子剖面晚侏罗世-早白垩世孢粉组合及其意义[C]//中国古生物学会孢粉学分会十届一次学术年会论文摘要集, 2017: 16. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2017.008839.
- [24] QIAO D W, PENG N, KUANG H W, et al. Changes in prevailing surface-paleowinds reveal the atmospheric circulation transition during Early Cretaceous in North China[J/OL]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 586. DOI: 10.1016/j.palaeo.2021.110784.
- [25] GAO Y J, ZHANG S H, ZHAO H Q, et al. North China block underwent simultaneous true polar wander and tectonic convergence in late Jurassic: New paleomagnetic constraints[J/OL]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 567. DOI: 10.1016/j.epsl.2021.117012.
- [26] 王大宁, 王旭日, 季强. 冀北—辽西地区侏罗—白垩纪之交的孢粉植物群演替与古气候变化[J]. *地球学报*, 2016, 37(4): 449-459.
WANG Daning, WANG Xuri, JI Qiang. The palynoflora alternation and the paleoclimate change at the turning time between Late Jurassic and Early Cretaceous in Northern Hebei and Western Liaoning [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2016, 37(4): 449-459.
- [27] 覃祚煥, 席党鹏, 徐延康, 等. 冀北滦平盆地榆树下剖面大北沟组岩石地层, 生物地层及其地质年代探讨[J]. *地学前缘*, 2017, 24(1): 78-105.
QIN Zuohuan, XI Dangpeng, XU Yankang, et al. Lithostratigraphy, biostratigraphy and geological time of Dabeigou Formation from the Yushuxia Section in the Luanping Basin, Northern Hebei[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(1): 78-105.
- [28] 孟庆强. 地质体中天然氢气成因识别方法初探[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(3): 552-558.
MENG Qingqiang. Identification method for the origin of natural hydrogen gas in geological bodies[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(3): 552-558.
- [29] DUGGEN S, CROOT P, SCHACHT U, et al. Subduction zone volcanic ash can fertilize the surface ocean and stimulate phytoplankton growth: Evidence from biogeochemical experiments and satellite data[J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34. DOI: 10.1029/2006GL027522.

(责任编辑:高丽华)