

引用格式: 樊如意, 杨萌萌, 周均朋, 等, 2023. 运城盆地 ZK301 钻孔中新世保德组孢粉组合及地质意义 [J]. 地质力学学报, 29 (4): 543–554. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023053](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023053)

Citation: FAN R Y, YANG M M, ZHOU J P, et al., 2023. The spore-pollen assemblages of the Miocene Baode Formation from Borehole ZK301 in the Yuncheng Basin and its geological significance[J]. Journal of Geomechanics, 29 (4): 543–554. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023053](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023053)

运城盆地 ZK301 钻孔中新世保德组孢粉组合及地质意义

樊如意, 杨萌萌, 周均朋, 赵建新

FAN Ruyi, YANG Mengmeng, ZHOU Junpeng, ZHAO Jianxin

山西省地质勘查局二一四地质队有限公司 山西 运城 044000

The 214 Geological department Co., Ltd., Shanxi Provincial Geological Exploration Bureau, Yuncheng 044000, Shanxi, China

The spore-pollen assemblages of the Miocene Baode Formation from Borehole ZK301 in the Yuncheng Basin and its geological significance

Abstract: The deposition period of the Baode Formation in the Miocene was crucial when the uplift and expansion of the Tibetan Plateau in the NE direction affected the Cenozoic basins around the Ordos Plateau. Previous research has mainly focused on tectonic and sedimentary aspects, with relatively few results on climate and environmental responses. We conducted a systematic sporopollen study on the Borehole ZK301 from the late Miocene Baode Formation in the E'mei tableland, Yuncheng Basin, characterized the deposited and redeposited spore-pollen and discussed the paleoclimate and paleotectonic background of the Baode Formation during its deposition. From bottom to top, the Miocene Baode Formation in the Yuncheng Basin can be divided into two spore-pollen assemblages, which are Ephedraceae–Chenopodiaceae–Gramineae zone and *Artemisia*–Chenopodiaceae–*Humulus* zone, indicating that the desert steppe dominated by Chenopodiaceae, Gramineae, and Ephedraceae developed into the desert steppe dominated by *Artemisia* and Chenopodiaceae in the late Miocene. Accordingly, the climate transitioned from relatively cold and dry to cold and dry, which was related to the influence of the remote effect of the uplift and expansion of the Tibetan Plateau on the climate in the late Miocene. The redeposited spore-pollen assemblages are mainly concentrated in the lower part of the Baode Formation, with the highest content of Ephedraceae, followed by *Pinus*, *Picea*, Cupressaceae, Chenopodiaceae, Juglandaceae and Pteridophyte, and a small amount of *Classopollis* and Elaeagnaceae, reflecting a warm and humid climate. The redeposited spore-pollens were mainly from the Paleogene strata on the northern margin of the Zhongtiaoshan Mountains, which indicates that there was a rapid uplift and denudation of the Zhongtiaoshan Mountains in the early stage of the Baode Formation deposition. The Baode Formation underwent the Paleogene strata's denudation, transportation, and redeposited process. The research results can provide evidence for the late Miocene paleoclimate in the Yuncheng Basin and new evidence for the uplift of the Zhongtiaoshan Mountains in this period.

Keywords: Baode Formation; palynological records; paleoclimate; tectonic implications; Yuncheng Basin; Cenozoic

摘要: 中新世保德组沉积时期是青藏高原向北东方向隆升扩展影响到鄂尔多斯周缘新生代盆地的关键时期。文章对运城盆地峨嵋台地 ZK301 钻孔中新世晚期保德组岩芯进行了孢粉学研究, 系统鉴定了沉积孢粉和再沉积孢粉的特征, 探讨了保德组沉积时期的古气候与古构造背景。运城盆地中新世保德组沉积孢粉自下而上可以划分为麻黄科-藜科-禾本科和蒿属-藜科-葎草属 2 个孢粉组合带, 说明运城盆地中新

基金项目: 山西省自然资源厅地质勘查项目 (2020-00160 G151-C51/9)

This research is financially supported by the Geological Exploration Project of the Shanxi Provincial Department of Natural Resources (Grant 2020-00160 G151-C51/9).

第一作者: 樊如意 (1988—), 男, 工程师, 从事沉积地质及矿产地质方面工作。E-mail: 386179141@qq.com

通讯作者: 杨萌萌 (1985—), 男, 高级工程师, 从事沉积地质及矿产地质方面工作。E-mail: 358182595@qq.com

收稿日期: 2023-04-17; 修回日期: 2023-06-29; 责任编辑: 吴芳

世晚期是从以麻黄科-藜科-禾本科为主的荒漠草原发展为以蒿属-藜科为主的荒漠草原,气候由相对寒冷干燥过渡为偏冷偏干,这种变化过程与中新世晚期青藏高原隆升扩展远程效应对气候的影响有关。再沉积孢粉组合主要集中在保德组下部,以麻黄科含量最高,其次是松属、云杉属、柏科、藜科、胡桃科和蕨类植物孢子,还有少量的克拉梭粉属和胡颓子科等,反映了温暖湿润的气候环境。再沉积孢粉主要来自中条山北缘山前的古近纪地层,说明在保德组沉积初期,中条山存在一期快速的隆升剥蚀,保德组经历了古近纪地层的剥蚀-搬运-再沉积过程。

关键词: 保德组;孢粉记录;古气候;构造意义;运城盆地;新生代

中图分类号: P534.631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 04-0543-12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023053

0 引言

Zdansky(1923)将山西省保德县冀家沟一套产三趾马化石的红土命名为“三趾马红土”,又称“保德红土”。全国地层委员会(1963)首次将“三趾马红土”称为保德阶。山西省区调队(1978)将“三趾马红土”之下的底砾层和“三趾马红土”下部重新厘定为保德组(邓涛等,2004)。保德组主要分布于山西地堑系的运城盆地、临汾盆地、太原盆地以及大同盆地,岩性主要由粗碎屑岩和黏土组成,不整合于前新生代地层之上(山西省地质矿产局,1989)。古地磁测年和哺乳动物化石研究表明,保德组的沉积时代为中新世晚期(张云翔等,1997;邓涛等,2004,2008):陕西省府谷县老高川剖面保德组古地磁年龄为7.4~5.3 Ma(张云翔等,1997),保德县冀家沟保德组古地磁年龄为10.0~5.3 Ma(邓涛等,2004),三门峡盆地“三趾马红土”保德组古地磁年龄为12.0~5.3 Ma(邓涛等,2008)。汾渭地堑系保德组含有丰富的哺乳动物化石(童永生等,1995;张云翔等,1997;邓涛等,2004),也表明其沉积时代为中新世晚期(童永生等,1995)。

区域地质资料研究表明,中新世保德组沉积时期是青藏高原向北东方向隆升扩展影响到鄂尔多斯周缘新生代盆地的关键时期,该期构造事件对河西走廊及鄂尔多斯周缘的古气候环境都产生了明显的影响(Li et al., 2011; 索艳慧等, 2017; 李三忠等, 2019; Shi et al., 2020)。保德组红黏土广泛分布于鄂尔多斯及周缘地区,黏土形成演化与青藏高原10~8 Ma的强烈隆升密切相关(邓涛等, 2004; Molnar, 2005)。河西走廊循化盆地与保德组沉积时代相当的地层中,孢粉组合以麻黄粉属-白刺粉属-藜粉属为主,古植被表现为灌丛草原,气候持续变冷变干,

表明青藏高原向北东方向的隆升扩展已经影响到了该区域古气候环境的变化(徐增连, 2015)。汾渭地堑系三门峡盆地保德组的孢粉组合中,以桑科-藜科-蒿属-禾本科孢粉为主,孢粉浓度低,植物种类单调,气候相对寒冷干旱(陈兴强, 2017)。山西地堑系保德县芦子沟剖面保德组的孢粉组合中,乔木植物花粉含量已经较高,并且种类丰富,亚热带植物如芸香科、漆树科等较常见,仍含有一定量的耐旱的蒿属、藜科和禾本科等,表明气候环境与循化盆地、三门峡盆地相比要温暖湿润的多(Li et al., 2011)。

青藏高原中新世晚期向北东方向的隆升扩展引起了鄂尔多斯盆地的逆时针旋转,山西地堑系的运城盆地、临汾盆地、太原盆地、忻州盆地、大同盆地自南向北依次形成(Shi et al., 2020)。文章以山西地堑系最南段的运城盆地中的ZK301钻孔为研究对象,针对中新世保德组开展系统的孢粉分析,建立沉积孢粉和再沉积孢粉的演化序列,研究成果将为运城盆地中新世晚期的古气候和古构造背景研究提供新的依据。

1 区域地质概况

运城盆地是山西地堑系南部的新生代断陷盆地,其南部为中条山,北部有孤峰山、稷王山,西部为渭河盆地。盆地南北界山地均以一系列阶梯状的活动断裂与盆地相连,主要包括中条山北缘断裂、鸣条岗南缘断裂、鸣条岗北缘断裂、峨眉台地南缘断裂和峨眉台地北缘断裂(图1)。这些阶梯状的断裂将运城盆地划分为涑水平原和峨眉台地两大主要构造单元。盆地南部中条山出露太古界涑水杂岩、古元古界中条群,均为变质岩系,其上为中元古界长城系石英岩、黑色页岩、含硅质条带白云

岩、震旦系冰碛岩以及寒武系、奥陶系碳酸盐岩(李振宏等, 2020; 仇度伟等, 2021)。盆地北部峨眉台地以孤峰山为中心, 出露早白垩世花岗岩, 两侧主要出露寒武系碳酸盐岩(齐玥等, 2011, 2016)。峨眉台地的其它地区主要出露中更新世离石黄土和上更新世马兰黄土, 钻孔揭示其下主要为中新世—上新世的河湖相地层, 以粉砂和黏土为主。夹持于中条山与峨眉台地之间的涑水平原为一套新生代河湖体系沉积, 沉积厚度达 3000 m, 古近纪和新

近纪地层在露头尺度上呈现明显的角度不整合接触关系。运城盆地古近纪的演化主要受控于东部的滨太平洋构造域, 沉积中心仅仅局限于中条山北缘的盐湖一带, 中新世时期受控于青藏高原向东北方向隆升扩展所引起的鄂尔多斯盆地逆时针旋转的远程效应, 沉积中心在现今的峨眉台地一带(Shi et al., 2020)。早更新世时期, 黄河贯通三门峡东流入海, 峨眉台地形成(李振宏等, 2020)。

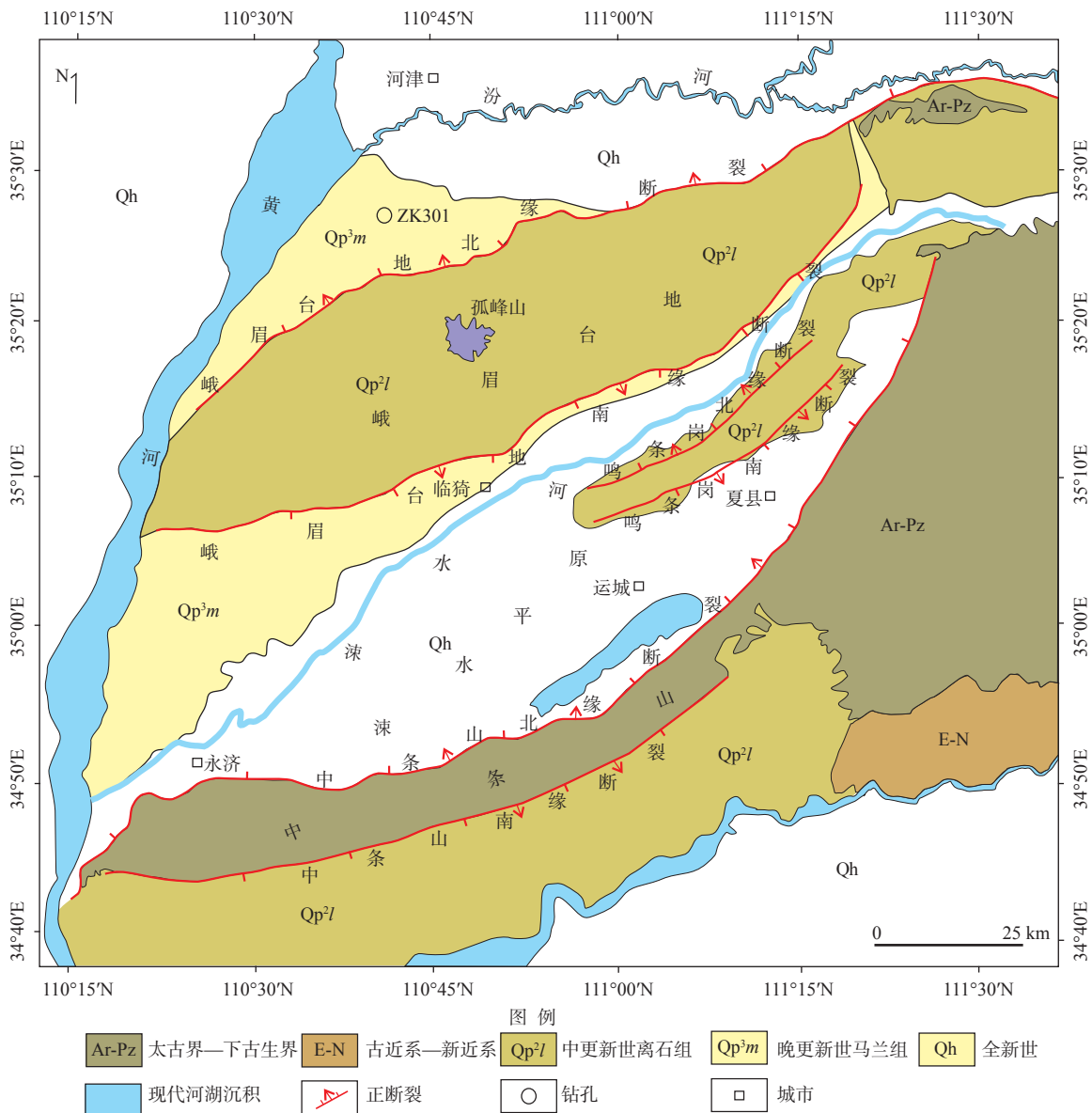


图 1 运城盆地区域地质简图

Fig. 1 Regional geologic map of the Yuncheng Basin

ZK301 钻孔位于峨眉台地北缘断裂的下降盘, 地表出露晚更新世马兰黄土, 完钻井深 1327.00 m(图 2)。自上而下钻遇的层位包括晚更新世马兰黄土、丁村

组, 中更新世涇河组, 早更新世三门组, 上新世静乐组, 中新世保德组以及二叠纪石盒子组。晚更新世马兰黄土(0~8.20 m)主要为一套棕色黏土质粉砂

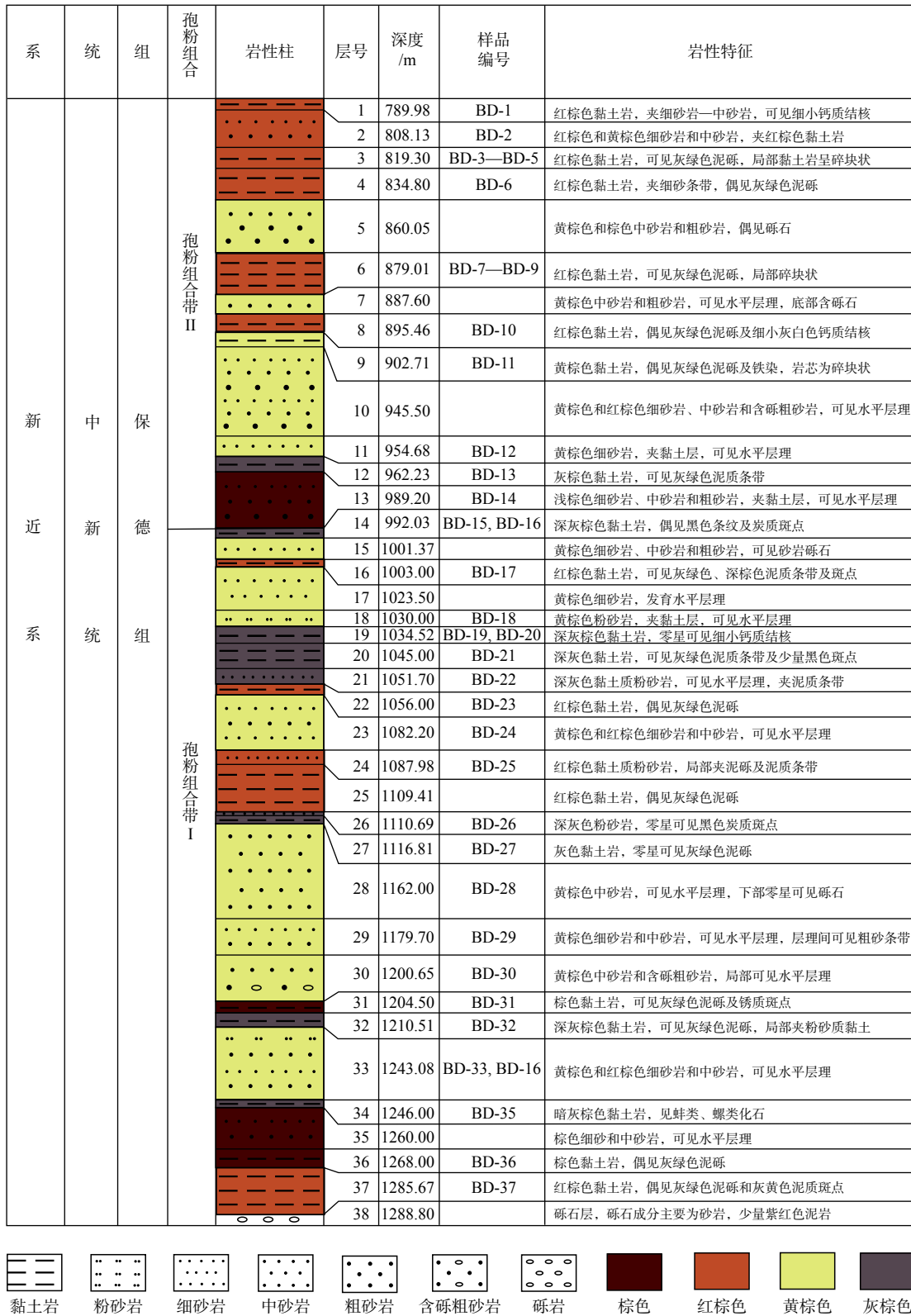


图 2 ZK301 钻孔中新世晚期保德组剖面柱状图

Fig. 2 Histogram of the late Miocene Baode Formation from the Borehole ZK301

岩、粉砂质黏土岩, 上部偶见炭质团块, 下部发育钙质结核。晚更新世丁村组 (8.20~134.53 m), 主要为一套河流相的粗砂岩、细砂岩、粉砂岩沉积, 纵向

上存在多个向上变细的旋回。中更新世匡河组 (134.53~283.32 m), 主要为一套河流相的浅棕黄色粗中砂岩、粗砂岩, 中砂岩中可见泥砾和砂质团块,

粗砂岩中偶见砾石,局部可见砂纹层理,层理中可见铁锰质条纹。早更新世三门组(283.32~744.48 m),底部为一套杂色砾岩,砾石多呈次圆状,少量呈现棱角状,成分主要为砂岩和灰岩,向上逐步过渡为含砾粗砂岩、粗砂岩;中部为一套棕红色黏土岩、粉砂质黏土岩,水平层理发育;上部为一套厚层状棕黄色砂岩,可见小型交错层理,偶见铁锰质条纹和钙质结核。上新世静乐组(744.48~794.00 m),主要为一套红棕色黏土、黏土质细砂岩,含大量的钙质结核。中新世保德组(794.00~1288.80 m),上部为红棕色黏土岩,底部为一套厚层状砾石层,砾石成分主要为砂岩,少量紫红色泥岩,向上逐步过渡为含砾粗砂岩、黏土质细砂岩,局部可见水平层理,与下覆的二叠世石盒子组棕黄色、黄绿色泥岩角度不整合接触。ZK301 钻孔未打穿二叠纪石盒子组。

2 材料与方 法

研究目的层位为运城盆地 ZK301 钻孔中新世保德组,钻孔深度为 794.00~1288.80 m,共采集孢粉样品 37 个(图 2)。孢粉样品前处理、鉴定和分析均在中国地质科学院地质力学研究所孢粉实验室完成。为了保证获取足够的孢粉数量,每个样品称 100 g 烘干,之后加入 1 片石松子孢子片(10300 粒/片)。然后在样品中加入 20% 的盐酸去除碳酸盐。样品洗至中性后,再加入 40% 的氢氟酸去除硅酸盐。再洗至中性后,在超声波清洗器中先后过 200 μm 和 7 μm 筛布富集孢粉。最后,转移到 1 ml 的指形管中,加入甘油保存,在孢粉鉴定室进行制片并在显微镜下进行鉴定。

孢粉样品的鉴定在德国产 Leica DM 2500 生物显微镜和日本产 Olympus BX-51 型光学显微镜下进行,照相采用 Olympus DP25 成像系统。鉴定过程中参考了《花粉分析》(坡克罗夫斯卡娅等,1956)、《中国植物花粉形态》(中国科学院植物研究所形态室孢粉组,1960)、《中国蕨类植物孢子形态》(中国科学院北京植物研究所古植物研究室孢粉组,1976)、《中国孢粉化石(第一卷):晚白垩世和第三纪孢粉》(宋之琛等,1999)等。最后,使用 Tilia 软件进行孢粉百分比计算和画图。再沉积孢粉是保存在老地层中的孢粉化石经过一系列的风化、剥蚀,搬运到新地层中继续保存下来的孢粉,常常与新形成的孢粉掺杂在一起。新生代沉积地层中再沉积孢粉和

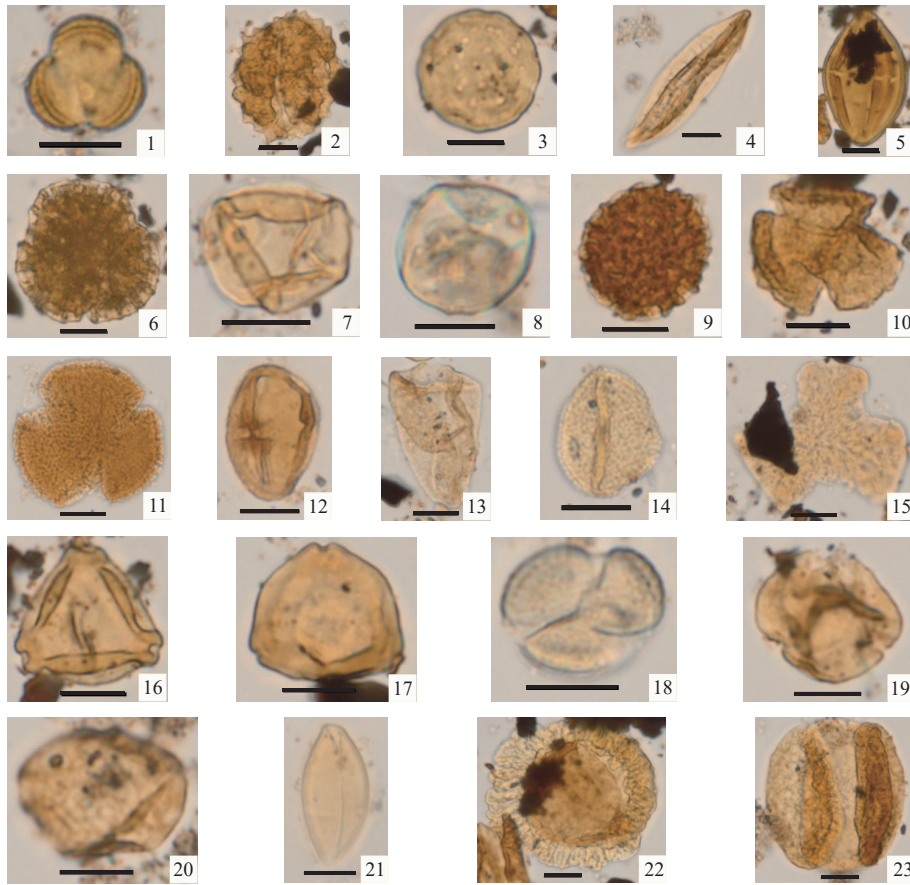
地层中新形成的孢粉以自身荧光进行区分。再沉积孢粉的镜下特点是深褐色至棕黑色,被压扁呈扁平或片状,外壁残破,保存不全或外壁纹饰不清,弱或无荧光。地层中新形成的孢粉一般是浅色的,自身荧光颜色为从黄色到橙色,通常在透射光下呈黄色—浅黄褐色。

3 结 果

37 块孢粉样品中,23 块样品的孢粉含量达到 100 粒以上,其余 14 块样品少于 100 粒。孢粉数量达到 100 粒以上的样品参加孢粉百分含量的计算。样品中的孢粉由地层沉积时新形成的孢粉化石和再沉积孢粉化石两部分组成,地层中新形成的孢粉类型分属 24 科 28 属,主要孢粉类型见图 3;再沉积孢粉类型分属 13 科 15 属,主要孢粉类型见图 4。根据孢粉统计结果,建立了主要和具有代表性的孢粉百分比含量图谱(图 5)。孢粉百分比含量反映的是某种植物在当时当地植被中的相对丰富程度,孢粉浓度是指单位体积或单位质量的沉积物中所含的孢粉粒数。依据主要孢粉类型、百分比关系、木本植物、草本及灌木植物类型、再沉积孢粉及孢粉浓度特征等,自下而上将 ZK301 钻孔中保德组孢粉组合划分为 2 个组合带。

3.1 1 带:深度 990.20~1288.80 m,麻黄科-藜科-禾本科组合带

该孢粉组合带共分析样品 23 块,其中 14 块样品达到统计孢粉含量要求,总体孢粉浓度较高,最高达 19980 粒/克。该组合带的孢粉包括地层沉积时新形成的孢粉化石和再沉积孢粉化石,其中再沉积孢粉的数量比地层中新形成的孢粉多。该孢粉组合带草本和灌木花粉占绝对优势,约 53.9%~92.4%,主要由麻黄科(11.4%~60.0%)、藜科(5.6%~59.8%)和禾本科(0~17.3%)组成,麻黄科再沉积花粉所占比例较大,藜科和禾本科再沉积花粉所占比例较小。地层沉积时新形成的草本和灌木植物孢粉化石以麻黄科、藜科和禾本科占优势,还含有一定量的蒿属(0.3%~19.1%)、白花丹科(0~5.9%)、白刺属(0~5.3%)和少量的紫苑属、蓝刺头属、唇形科、蓼科、毛茛科、蔷薇科、牻牛儿苗科、伞形科、莎草科、眼子菜科。木本植物花粉(6.4%~43.1%)包括云杉属(0~18.6%)、松属(0~14.8%)、柏科(0~10.6%)、桦木科(0~5.9%)、胡桃科(0~4.9%)和少量的铁杉属、南洋杉科、克拉梭粉属、苏铁科、槭树



1—蒿属；2—蓝刺头属；3—藜科；4—麻黄科；5—白刺属；6—白花丹科；7—禾本科；8—葎草属；9—蓼科；10—毛茛科；11—牻牛儿苗科；12—伞形科；13—莎草科；14—眼子菜科；15—槭树科；16—桦木科；17—胡桃科；18—柳属；19—椴树科；20—榆科；21—苏铁科；22—铁杉属；23—松属

图3 ZK301钻孔中新世晚期保德组主要孢粉类型（比例尺均为10 μm）

Fig. 3 Photomicrographs of selected spore-pollen types from the late Miocene Baode Formation from Borehole ZK301 (The scale is 10 μm)

(1) *Artemisia*; (2) *Echinops*; (3) Chenopodiaceae; (4) Ephedraceae; (5) *Nitraria*; (6) Plumbaginaceae; (7) Gramineae; (8) *Humulus*; (9) Polygonaceae; (10) Ranunculaceae; (11) Geraniaceae; (12) Apiaceae; (13) Cyperaceae; (14) Potamogetonaceae; (15) Aceraceae; (16) Betulaceae; (17) Juglandaceae; (18) *Salix*; (19) Tiliaceae; (20) Ulmaceae; (21) Cycadaceae; (22) *Tsuga*; (23) *Pinus*

科、柳属、椴树科、榆科等。蕨类植物孢子(0~12.0%)包括卷柏科(0~4.2%)、凤尾蕨科(0~4.2%)、里白科(0~3.5%)、紫萁科和水蕨科。再沉积花粉包括大量的麻黄科,还有藜科、胡桃科、胡颓子科、松属、云杉属、铁杉属、南洋杉科、柏科、克拉梭粉属、卷柏科、里白科、紫萁科、水蕨科和凤尾蕨科等。

3.2 II带:深度794.00~990.20 m, 蒿属-藜科-葎草属组合带

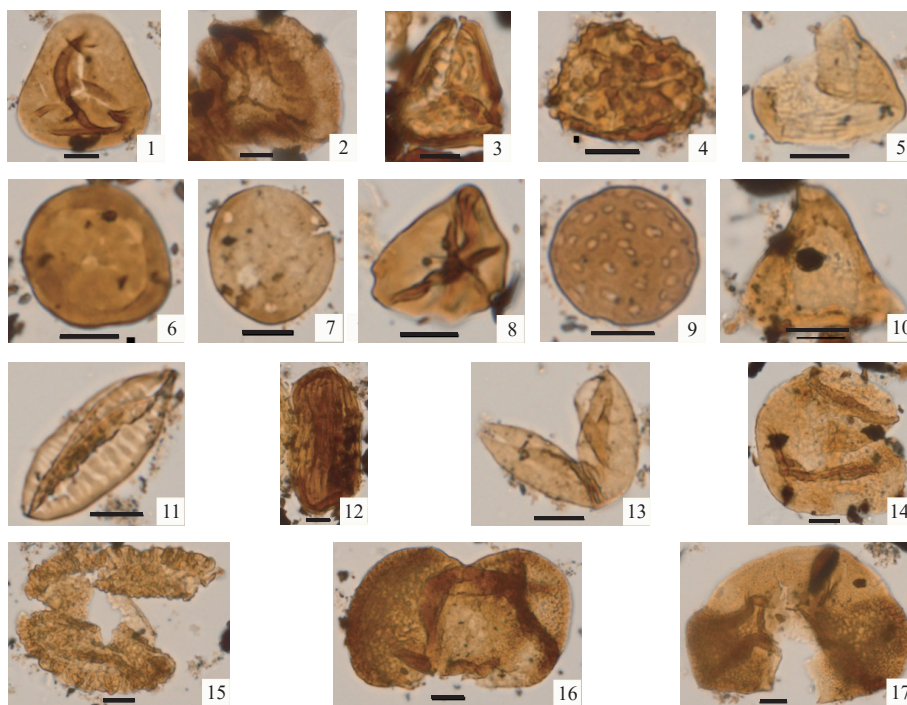
该孢粉组合带共分析样品14块,其中9块达到统计的孢粉含量要求,但总体孢粉浓度较低,未见再沉积孢粉。该组合带仍是草本和灌木花粉占绝对优势,约93.8%~98.7%,木本植物花粉含量少,仅占1.3%~5.5%,未见蕨类植物孢子。草本和灌木花

粉以蒿属(75.9%~93.7%)和藜科(1.9%~19.8%)为主,出现葎草属(0~3.4%)花粉,还发现少量的禾本科(0~2.1%)、毛茛科(0~1.4%)、唇形科(0~0.9%)、菊科(0~0.9%)、白花丹科(0~0.8%)。与孢粉组合I带相比,蒿属花粉含量明显升高,藜科花粉含量显著降低。木本植物花粉(1.3%~5.5%)包括松属(0~2.1%)、胡桃科(0~2.1%)、桦木科(0~1.4%)、榆科(0~0.9%)和柳属(0~0.6%)等。

4 讨论

4.1 古气候背景

ZK301钻孔的孢粉包括再沉积孢粉和新形成孢粉两部分。再沉积孢粉是由盆地周围及造山带



1—里白科; 2—凤尾蕨科; 3—卷柏科; 4—紫萁科; 5—水蕨科; 6—克拉梭粉属; 7—胡桃科: 山核桃属; 8—胡桃科: 黄杞属; 9—藜科; 10—胡桃子科; 11—麻黄科: 棱形麻黄粉; 12—麻黄科: 多肋麻黄粉; 13—柏科; 14—南洋杉科; 15—铁杉属; 16—松属; 17—云杉属

图 4 ZK301 钻孔中新世晚期保德组主要再沉积孢粉类型 (比例尺均为 10 μm)

Fig. 4 Photomicrographs of selected redeposited spore-pollen types of the late Miocene Baode Formation from Borehole ZK301 (The scale is 10 μm)

(1) Gleicheniaceae; (2) Pteridaceae; (3) Selaginellaceae; (4) Osmundaceae; (5) Parkeriaceae; (6) *Classopollis*; (7) Juglandaceae: *Carya*; (8) Juglandaceae: *Engelhardtia*; (9) Chenopodiaceae; (10) Elaeagnaceae; (11) Ephedraceae: *Ephedripites fusiformis*; (12) Ephedraceae: *Ephedripites multicotatus*; (13) Cupressaceae; (14) Araucariaceae; (15) *Tsuga*; (16) *Pinus*; (17) *Picea*

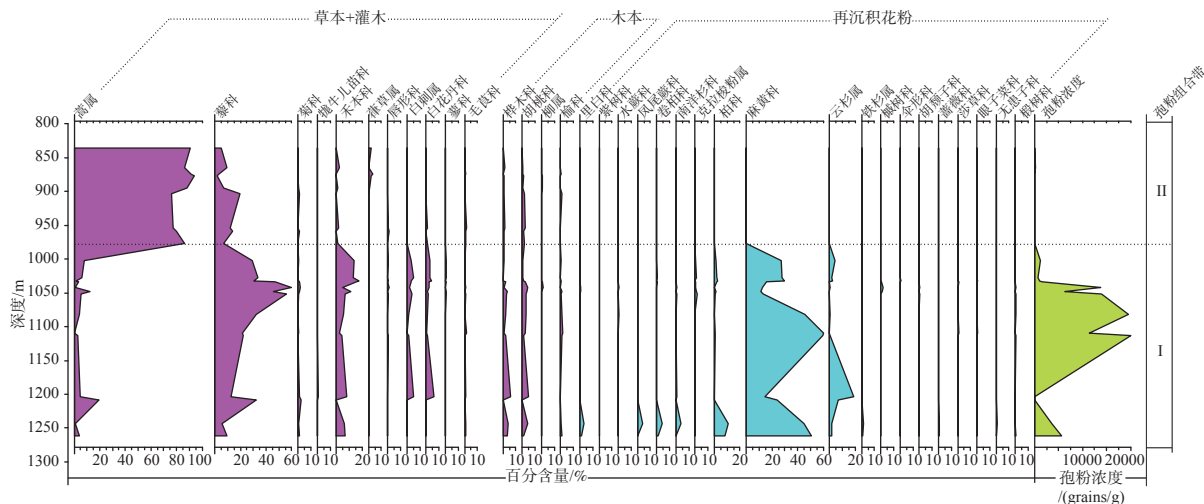


图 5 ZK301 钻孔中新世晚期保德组孢粉百分比图谱

Fig. 5 Spore-pollen percentage diagram of the late Miocene Baode Formation from Borehole ZK301

老地层经过剥蚀、搬运和再沉积到新地层中富集的, 并不能反映新地层本身的古植被和古环境。根据新形成孢粉组合带的特征, ZK301 钻孔保德组孢粉组合大致可以分为以下 2 类植被与环境。

孢粉组合带 I(990.20~1288.80 m), 以草本植物占优势、木本植物次之、蕨类植物最少。该组合带孢粉浓度较高, 但再沉积孢粉比地层沉积时新形成的孢粉含量高, 地层沉积时新形成的孢粉浓度并不

高。地层沉积时新形成的孢粉组合特征以麻黄科、藜科和禾本科花粉占优势。麻黄科的生长环境条件极差,是一种极度耐旱的荒漠植物,生长在年降水量不足 100 mm 的干旱、荒漠地区,是草原或半荒漠植物的典型代表,常用来指示干旱环境(中国植被编辑委员会,1980)。藜科为旱生和超旱生草本植物,一般来讲,藜科与蒿属相比,生长条件更为干旱,生长在开阔的陆地环境,现代藜科花粉在荒漠环境中占优势(许清海等,2005)。高含量的藜科花粉分布在年均温 $-2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,年降水量 300 mm 以下地区(李文漪,1998)。禾本科为相对喜湿的中生草本植物,具有代表性,不少种类是草地、草甸和草原的建群种或优势种,在草原及荒漠草原地区指示低温高湿环境(罗传秀等,2006),以年均温 $-2\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为宜,年降水量 300~600 mm 之间为宜(Schäbitz,1994)。菊科蒿属的生境条件比藜科好,多分布在水分条件较好的低山和冲洪积扇上(Minckley and Whitlock,2000)。白刺属和白花丹科生长在干旱环境下的盐碱土壤(Grubov,2001)中。草本植物还零星发现耐寒的紫苑属、蓝刺头属和中生的唇形科、毛茛科、蔷薇科、伞形科等,以及水生的莎草科和眼子菜科。眼子菜科是生长在水下的植物,莎草科通常生长在湿润或沼泽地区,反应湿冷的生态环境(Xu et al.,2007)。综上所述,该时期的古植被是以麻黄科-藜科-禾本科为主的荒漠草原,反映寒冷干燥的气候环境。

孢粉组合带 II(794.00~990.20 m),与孢粉组合带 I 相比,孢粉浓度骤降,且未见再沉积孢粉。该孢粉组合带仍是草本和灌木花粉占绝对优势,木本植物花粉含量少,未见蕨类植物孢子。草本和灌木花粉以蒿属占绝对优势,其次是藜科花粉。蒿属和藜科植物属耐盐碱植物,也多生长在湖泊周围的河滩湿地,其往往与隐域性生境条件密切相关(Li et al.,2019)。干旱条件下藜科含量高,而半干旱条件下蒿含量高(闫顺,1991)。当蒿属和藜科植物成为绝对优势种群,则表现为荒漠景观,物种组成单调。组合带中出现荻草属花粉,荻草属常生长在沟边、荒地、废墟、林缘边。另外,还含有一些中生的草本植物禾本科、毛茛科和唇形科等,以及喜温湿的落叶阔叶植物花粉胡桃科、桦木科和榆科等。总体而言,该时期的古植被是以蒿属-藜科为主的荒漠草原,反映偏冷偏干的气候环境。

上述分析表明,运城盆地峨嵋台地 ZK301 钻孔中新世保德组的孢粉组合特征能够比较客观地反

映当地及周围的古植被和古气候演化过程。中新世晚期以藜科-禾本科-麻黄科为主的荒漠草原发展为以蒿属-藜科为主的荒漠草原,对应的古气候背景由寒冷干燥逐渐过渡为偏冷偏干,寒冷程度自中新世保德组沉积初期至晚期寒冷程度有所减弱,气候逐渐变的温和。这种古气候环境的变化过程可能与青藏高原隆升扩展影响到了运城盆地引起区域古气候的变迁有关。在中新世保德组沉积初期,由于青藏高原的强烈隆升扩展的远程效应,中条山及相邻的运城盆地气候突然变得寒冷干燥,随着强烈隆升作用的逐步减弱,气候也随之变得偏冷偏干。中新世保德组沉积时期古气候背景由寒冷干燥转变为偏冷偏干的过程,较好地响应了区域隆升扩展远程效应由强变弱的过程,反应了构造与气候之间的相互耦合关系。

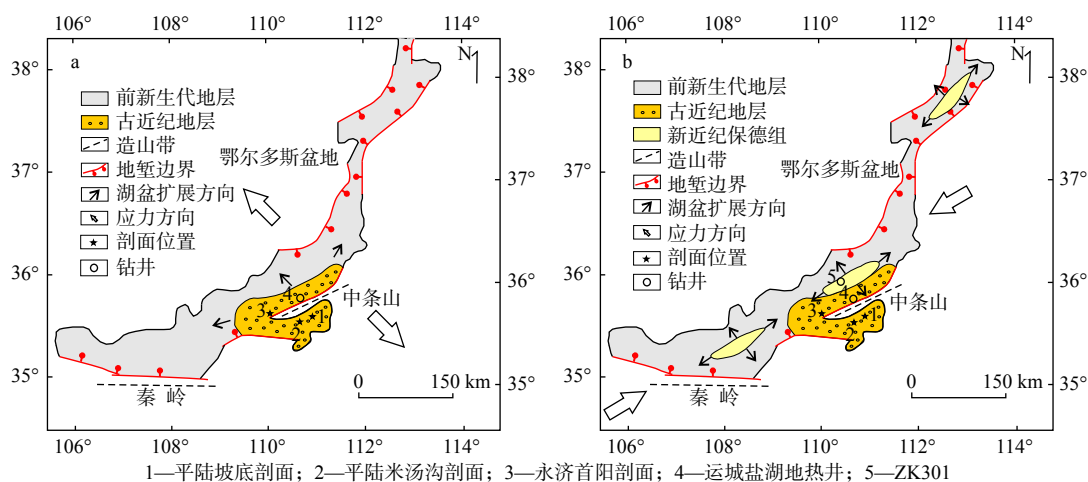
4.2 构造意义

山西峨眉台地 ZK301 钻孔保德组下部孢粉 I 带(990.20~1288.80 m)含有大量的再沉积孢粉,而保德组上部孢粉 II 带(794.00~990.20 m)未发现再沉积孢粉。保德组钻孔序列中再沉积孢粉含量自下而上的变化,使得该区域孢粉分布的控制因素变得更为复杂。

孢粉组合 I 带再沉积孢粉中,麻黄科含量最高,其次是松属、云杉属、柏科、藜科、胡桃科和蕨类植物孢子,还有少量的克拉梭粉属和胡颓子科等。克拉梭粉属开始出现于晚三叠世,繁盛于晚侏罗世一早白垩世,一直延续到古近纪(刘兆生,2000)。区域地质资料表明,运城盆地及中条山邻区均未发现晚三叠世、侏罗纪和白垩纪沉积,因此保德组中的再沉积克拉梭粉属应该来自于古近纪地层。受到区域隆升剥蚀以及盆地沉降的影响,中条山及邻区古近纪地层主要出露于中条山南缘平陆坡底、米汤沟一带,中条山北缘永济首阳一带也有局部分布。运城盐湖黑泥浴地热钻井中也钻遇到了该套地层,岩性组合与平陆坡底、米汤沟以及永济首阳一带的岩性组合特征基本一致,以紫红色泥岩、灰白色砂岩夹薄层石膏为典型特征(图 1)。运城盆地 ZK301 钻孔保德组孢粉 I 带再沉积孢粉组合特征可与中条山南缘平陆坡底渐新世门里组和始新世高庙组相对比,古新世门里组孢粉的主要种属有:松属(23.2%)、麻黄科(12.0%)、罗汉松科(11.3%)、南洋杉科、雪松属、柏科、杉科、云杉属,以及被子植物胡桃科(6.2%)、栎属(6.2%)、柳属(1.9%)、漆树属和蕨类植物孢子;始新世高庙组的孢粉主要种属

有: 松属(22.1%)、麻黄科(20.4%)、柏科(5.5%)、杉科(4.6%), 被子植物栎属(5.2%)、柳属(3.7%)、豆科、胡颓子科、桦木科、胡桃科、棕榈科、木兰科和一些蕨类植物孢子(山西省地质局二一四地质队, 1982; 陈兴强, 2017)。在中条山北缘永济首阳一带出露始新统至渐新统部分地层, 岩性为灰白色砂岩、紫红色泥岩局部夹薄层石膏层, 与上覆保德组底部砾岩呈角度不整合接触。中条山北缘运城盐湖地热钻孔资料显示, 保德组底部岩性组合特征与 ZK301 钻孔以及露头资料完全可以对比, 均为一套厚层砾岩, 砾石成分有来自于中条山的混合花岗岩以及与古近纪沉积特征较为一致的紫红色泥岩、灰白色砂岩。区域上保德组底部砾岩的砾石成分表明, 保德组沉积初期, 中条山处于快速隆升期, 运城盆地随之沉降, 早期古近纪位于中条山山前的沉积中心迁移至现今的峨眉台地一带, 在二叠系石盒子组基底之上开始接受晚新生代沉积。随着中条山北缘隆起范围的不断扩大, 早期沉积的古近纪地层开始遭受剥蚀, 向位于盆地沉积中心的峨眉台地一带提供物源。结合区域露头及钻孔资料综合分析, ZK301 钻孔保德组中下部含有大量的再沉积孢粉, 应该来自于中条山北缘古近纪地层的剥蚀再沉积。随着区域隆升剥蚀的逐步减弱, 物源区由早期的快速抬升逐步趋于稳定, 再沉积孢粉由于沉积速率的下降而淋滤消失, 因而在保德组上部地层中基本上不再含有剥蚀再沉积的孢粉, 而是以代表盆地气候背景的新生沉积孢粉为主。

青藏高原自新生代以来经过多阶段快速隆升, 向北东方向不断扩展, 并在 10~8 Ma 期间影响到了青藏高原东北缘(方小敏, 2017; Shi et al., 2020; 寇琳琳等, 2021), 造成中新世以来鄂尔多斯盆地的逆时针旋转, 进而使山西地堑系运城盆地峨眉台地、临汾盆地、太原盆地、大同盆地等一系列晚新生代盆地开始接受沉积(韩晓明等, 2015; 林向东等, 2017; Shi et al., 2020; Chen et al., 2021; 秦帮策等, 2021; 仲启蒙等, 2022)。运城盆地峨眉台地上郭 1 井与 ZK301 钻孔保德组沉积序列完全可以对比, 上郭 1 井保德组与下覆寒武系张夏组不整合接触, 古地磁年龄限定保德组的底部沉积时代为 9.1 Ma(闫纪元, 2021)。通过与上郭 1 井沉积序列对比分析, ZK301 钻孔的保德组底部年龄应该为 9.1 Ma, 也就是说运城盆地峨眉台地在该时期受到青藏高原隆升扩展的远程效应影响, 开始接受沉积。中条山断裂自渐新世开始活动, 晚中新世后构造活动显著增强, 上盘强烈下沉和下盘相对隆升, 造成中条山的隆升, 也响应了该期构造运动(Su et al., 2021)。青藏高原在 10~8 Ma 期间隆升扩展的远程效应, 在运城盆地沉积-气候方面都有较好的响应。中新世保德组沉积时期, 运城盆地南缘中条山快速隆升, 造成了中条山山麓河流加速下切, 先期沉积在中条山北缘相对较高部位的古近纪地层被侵蚀、搬运、再沉积到了现今的峨眉台地地区, 形成了中新世晚期的沉积中心, 随着沉积中心不断扩展, 汾渭地堑系最终形成(李振宏等, 2020; 仇度伟等, 2021; 图 6)。



a—保德组沉积前; b—保德组沉积初期

图 6 运城盆地新近系保德组沉积前后古地理格局

Fig. 6 Paleogeographic pattern before and after the deposition of Neogene Baode Formation in the Yuncheng Basin

(a) Before the deposition of the Baode Formation; (b) The early deposition stage of the Baode Formation

运城盆地峨眉台地 ZK301 钻孔保德组与下覆二叠系石盒子组不整合接触,再沉积孢粉含量的变化正好响应了该期的隆升剥蚀、搬运到再沉积的过程。在古气候方面,运城盆地古近纪始新世至渐新世沉积时期总体上为温暖湿润的气候环境,但在中新世保德组沉积时期,气候变得寒冷干燥,正好响应了青藏高原隆升远程效应对气候变化的影响。随着隆升扩展程度的减弱,气候也逐渐变得相对温和,保德组上部偏冷偏干的气候背景也响应了该期构造活动逐渐减弱的过程。

5 结论

(1) 运城盆地 ZK301 钻孔中新世保德组孢粉具有新形成孢粉和再沉积孢粉两部分,二者分别反映了该沉积时期的古气候与古构造背景。

(2) ZK301 钻孔保德组新形成孢粉组合特征表明,运城盆地中新世晚期从以麻黄科-藜科-禾本科为主的荒漠草原发展为以蒿属-藜科为主的荒漠草原,对应的古气候背景由寒冷干燥逐步变化为偏冷偏干,这种变化与青藏高原隆升扩展由强变弱的趋势之间具有很好的响应关系。

(3) ZK301 钻孔保德组下部含较多的再沉积孢粉,上部几乎不含再沉积孢粉,这种变化响应了中条山及邻区中新世晚期的隆升由强逐渐减弱的过程,再沉积孢粉主要来自于古地形较高部位古近纪地层的剥蚀-搬运-再沉积,随着隆升强度的减弱,再沉积孢粉经过长期淋滤而消失。

References

- CHEN X Q, 2017. Sedimentary and tectonic evolution of the Cenozoic Weihe-Shanxi Graben and the mechanism [D]. Doctor's thesis. Beijing: Peking University. (in Chinese with English abstract)
- CHEN X Q, DONG S W, SHI W, et al., 2021. Magnetostratigraphic ages of the Cenozoic Weihe and Shanxi Grabens in North China and their tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 813: 228914.
- China Vegetation Editing Committee, 1980. China vegetation[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- DENG T, WANG W M, YUE L P, et al., 2004. New advances in the establishment of the Neogene Baode stage[J]. *Journal of Stratigraphy*, 28(1): 41-47. (in Chinese with English abstract)
- DENG T, WANG W M, YUE L P, 2008. A comprehensive study report on the Shanwang and Baode stages of the Neogene in China[M]. In: Third National Stratigraphic Commission, ed. Research Report on the Stratigraphic Formation of Major Faults in China (2001~2005). Beijing: Geology Press, 13-31. (in Chinese)
- FANG X M, 2017. Phased uplift of the Tibetan Plateau[J]. *Science & Technology Review*, 35(6): 42-50. (in Chinese with English abstract)
- GRUBOV V I, 2001. Key to the vascular plants of Mongolia (with an Atlas)[M]. Science Publishers.
- HAN X M, LIU F, ZHANG W T, et al., 2015. Analyzing the variation characteristics of stress field in Hetao seismic belt using focal mechanism data[J]. *Seismology and Geology*, 37(4): 1030-1042. (in Chinese with English abstract)
- KOU L L, LI Z H, DONG X P, et al., 2021. The age sequence of the detrital zircons from the Guanyindian section in Longde, the northeastern margin of the Tibetan Plateau, and its geological significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(6): 1051-1064. (in Chinese with English abstract)
- LI S Z, CAO X Z, WANG G Z, et al., 2019. Meso-Cenozoic tectonic evolution and plate reconstruction of the Pacific Plate[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 642-677. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, 1998. Quaternary vegetation and environment of China[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- LI X R, FANG X M, WU F L, et al., 2011. Pollen evidence from Baode of the northern Loess Plateau of China and strong East Asian summer monsoons during the Early Pliocene[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(1): 64-69.
- LI Y W, XU Q H, ZHANG S R, et al., 2019. Significance of pollen assemblages for the vegetation composition of alpine shrub meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 64(20): 2141-2150. (in Chinese with English abstract)
- LI Z H, JIANG B Y, DONG X P, et al., 2020. Collapses of loess at the front of the Emei tableland in the Yuncheng basin and their major geological controlling factors[J]. *Coal Geology & Exploration*, 48(2): 171-178. (in Chinese with English abstract)
- LIN X D, YUAN H Y, XU P, et al., 2017. Zonational characteristics of earthquake focal mechanism solutions in North China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(12): 4589-4622. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z S, 2000. Early cretaceous sporopollen assemblage from the Hanxia of Yumen in Gansu, NW China[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 17(3): 73-84. (in Chinese with English abstract)
- LUO C X, PAN A D, ZHENG Z, 2006. Progresses about the studies on the relationship between topsoil spore-pollen and vegetation in arid areas of northwest China[J]. *Arid Zone Research*, 23(2): 314-319. (in Chinese with English abstract)
- MINCKLEY T, WHITLOCK C, 2000. Spatial variation of modern pollen in Oregon and southern Washington, USA[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 112(1-3): 97-123.
- MOLNAR P, 2005. Mio-Pliocene growth of the Tibetan Plateau and evolution of East Asian climate[J]. *Palaeontologia Electronica*, 8(1): 1-23.
- National Stratigraphic Committee, 1963. Cenozoic erathem of China[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Palynological Section, Morphological Department, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, 1960. Pollen morphology of Chinese plants[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- POKROVSKAYA, GESHIDEKOVA, GRICHUK, et al., 1956. Pollen analysis[M]. WANG F X, ZHANG J T, MA Y Q, et al, trans. Beijing: Science Press.

- ence Press. (in Chinese)
- QI Y, XU H B, ZHANG J X, et al., 2011. Geochemistry, geochronology and geological significance of Gufengshan granodiorite in Linfen Grabben Basin[J]. *Geological Review*, 57(4): 565-573. (in Chinese with English abstract)
- QI Y, LUO J H, WU J D, et al., 2016. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic composition of the Canfang and Gufengshan granodiorite plutons in central-southern North China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(7): 2015-2028. (in Chinese with English abstract)
- QIN B C, FANG W X, ZHANG J G, et al., 2021. Quaternary sedimentary sequence and sedimentary environment restoration in the Jinzhong Basin, Fenhe Rift Valley[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(6): 1035-1050. (in Chinese with English abstract)
- QIU D W, GONG W B, YAN J Y, et al., 2021. Geological environment changes during the late Pleistocene-Holocene on the E'mei tableland in the northern Yuncheng basin, Shanxi Province: implications for the distribution of human settlements[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(2): 326-338. (in Chinese with English abstract)
- SCHÄBITZ F, 1994. Holocene climatic variations in northern Patagonia, Argentina[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 109(2-4): 287-294.
- Shanxi Provincial Geological Bureau 214 Geological Team, 1982. Instructions for 1: 100000 Geological Map of Yuncheng District, Shanxi Province[M]. Yuncheng: Water Resources Bureau of Yuncheng District Administration. (in Chinese)
- Shanxi Provincial Geological Prospecting Bureau, 1989. Regional geology of Shanxi province[M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- SHI W, DONG S W, HU J M, 2020. Neotectonics around the Ordos Block, North China: a review and new insights[J]. *Earth-Science Reviews*, 200: 102969.
- SONG Z C, 1999. Fossil spores and pollen of China (Vol. 1)[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Sporopollen Group, Paleobotany Research Office, Beijing Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, 1976. Spore morphology of ferns in China[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- SU P, HE H L, TAN X B, et al., 2021. Initiation and evolution of the Shanxi rift system in North China: evidence from low-temperature thermochronology in a plate reconstruction framework[J]. *Tectonics*, 40(3): e2020TC006298.
- SUO Y H, LI S Z, CAO X Z, et al., 2017. Mesozoic-Cenozoic inversion tectonics of East China and its implications for the subduction process of the oceanic plate[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(4): 249-267. (in Chinese with English abstract)
- TONG Y S, ZHENG S H, QIU Z D, 1995. Cenozoic mammals ages of China[J]. *Vertebrata Palasiatica*, 33(4): 290-314. (in Chinese with English abstract)
- XU Q H, LI Y C, YANG X L, et al., 2005. A study of some typical pollen types taphonomy and relationships with vegetation in the northeast of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 20(1): 89-98. (in Chinese with English abstract)
- XU Q H, LI Y C, YANG X L, et al., 2007. Quantitative relationship between pollen and vegetation in northern China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(4): 582-599.
- XU Z L, 2015. Oligocene-Miocene pollen records in Xunhua Basin, northeastern Tibetan Plateau and its implications for evolution of the East Asian monsoon[D]. Wuhan: China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)
- YAN J Y, 2021. Late Cenozoic tectonic-sedimentary, uplifting and denudational process of the Yuncheng Basin and northern Gushan Mountain[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract)
- YAN S, 1991. The characteristics of Quaternary sporo-pollen assemblage and the vegetation succession in Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 14(2): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- ZDANSKY O, 1923. Fundorte der Hipparion-Fauna um Pao-Te-Hsien in NW-Shansi[J]. *Bulletin of the Geological Survey, China*, 5: 69-81.
- ZHANG Y X, YUE L P, CHEN D L, et al., 1997. Petrographic marks for stratigraphic division of the Neogene Red Clay in North China and their significance[J]. *Journal of Stratigraphy*, 21(1): 63-67. (in Chinese with English abstract)
- ZHONG Q M, SHAO B, HOU G T, 2022. Numerical simulation and analysis of lithospheric stress field in Fenwei graben[J]. *Progress in Geophysics*, 37(1): 152-163. (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈兴强, 2017. 汾渭地堑系新生代沉积-构造演化及其形成机制[D]. 博士学位论文. 北京: 北京大学.
- 邓涛, 王伟铭, 岳乐平, 等, 2004. 新近系保德阶建阶研究新进展[J]. *地层学杂志*, 28(1): 41-47.
- 邓涛, 王伟铭, 岳乐平, 2008. 中国陆相新近系山旺阶和保德阶综合研究报告[M]. 见: 第三届全国地层委员会编. 中国主要断代地层建阶研究报告(2001~2005). 北京: 地质出版社, 13-31.
- 方小敏, 2017. 青藏高原隆升阶段性[J]. *科技导报*, 35(6): 42-50.
- 韩晓明, 刘芳, 张文韬, 等, 2015. 基于震源机制资料分析河套地震带的应力场变化特征[J]. *地震地质*, 37(4): 1030-1042.
- 寇琳琳, 李振宏, 董晓朋, 等, 2021. 青藏高原东北缘隆德观音店剖面碎屑锆石年龄序列及地质意义[J]. *地质力学学报*, 27(6): 1051-1064.
- 李三忠, 曹现志, 王光增, 等, 2019. 太平洋板块中-新生代构造演化及板块重建[J]. *地质力学学报*, 25(5): 642-677.
- 李文漪, 1998. 中国第四纪植被与环境[M]. 北京: 科学出版社.
- 李怡雯, 徐海清, 张生瑞, 等, 2019. 青藏高原高寒灌丛草甸花粉组合的植被指示性[J]. *科学通报*, 64: 2141-2150.
- 李振宏, 姜博宇, 董晓朋, 等, 2020. 运城盆地峨眉台地前缘黄土塌陷现状及地质主控因素[J]. *煤田地质与勘探*, 48(2): 171-178.
- 林向东, 袁怀玉, 徐平, 等, 2017. 华北地区地震震源机制分区特征[J]. *地球物理学报*, 60(12): 4589-4622.
- 刘兆生, 2000. 甘肃玉门早峡早白垩世孢粉组合[J]. *微体古生物学报*, 17(3): 73-84.
- 罗传秀, 潘安定, 郑卓, 2006. 西北干旱地区表土孢粉与植被关系研究进展[J]. *干旱区研究*, 23(2): 314-319.
- 坡克罗夫斯卡娅, 格刺德科娃, 格里丘克, 等, 1956. 花粉分析[M]. 王伏雄, 张金谈, 马毓泉, 等译. 北京: 科学出版社.
- 齐玥, 徐鸿博, 张竞雄, 等, 2011. 临汾断陷盆地孤峰山花岗岩的地球化学和年代学及其地质意义[J]. *地质论评*, 57(4): 565-573.

- 齐玥, 罗金海, 巫嘉德, 等, 2016. 华北中南部蚕坊和孤峰山花岗岩长岩体的地球化学特征和 Sr-Nd-Pb 同位素组成 [J]. 岩石学报, 32(7): 2015-2028.
- 秦帮策, 方维萱, 张建国, 等, 2021. 汾河裂谷晋中盆地内第四纪沉积序列与沉积环境恢复 [J]. 地质力学学报, 27(6): 1035-1050.
- 仇度伟, 公王斌, 闫纪元, 等, 2021. 山西运城盆地北部峨嵋台地晚更新世: 全新世地质环境变化及其对人类聚落分布的影响 [J]. 地质力学学报, 27(2): 326-338.
- 全国地层委员会, 1963. 全国地层会议学术报告汇编: 中国的新生界 [M]. 北京: 科学出版社.
- 山西省地质局二一四地质队, 1982. 山西省运城地区地质图系说明书 [M]. 运城: 运城地区行署水利局.
- 山西省地质矿产局, 1989. 山西省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社.
- 宋之琛, 1999. 中国孢粉化石(第一卷): 晚白垩世和第三纪孢粉 [M]. 北京: 科学出版社.
- 索艳慧, 李三忠, 曹现志, 等, 2017. 中国东部中生代反转构造及其记录的大洋板块俯冲过程 [J]. 地学前缘, 24(4): 249-267.
- 童永生, 郑绍华, 邱铸鼎, 1995. 中国新生代哺乳动物分期 [J]. 古脊椎动物学报, 33(4): 290-314.
- 许清海, 李月丛, 阳小兰, 等, 2005. 青藏高原东北部典型花粉类型埋藏特征及其与植被关系的研究 [J]. 地球科学进展, 20(1): 89-98.
- 徐增连, 2015. 青藏高原东北缘循化盆地渐新世-中新世孢粉记录与东亚季风演化 [D]. 武汉: 中国地质大学.
- 闫纪元, 2021. 运城盆地及北侧孤山晚新生代构造-沉积与隆升-剥蚀过程研究 [D]. 北京: 中国地质科学院.
- 闫顺, 1991. 新疆第四纪孢粉组合特征及植被演替 [J]. 干旱区地理, 14(2): 1-9.
- 张云翔, 岳乐平, 陈丹玲, 等, 1997. 中国北部新第三纪红层划分的岩石学标志及其意义 [J]. 地层学杂志, 21(1): 63-67.
- 中国科学院北京植物研究所古植物研究室孢粉组, 1976. 中国蕨类植物孢子形态 [M]. 北京: 科学出版社.
- 中国科学院植物研究所形态室孢粉组, 1960. 中国植物花粉形态 [M]. 北京: 科学出版社.
- 中国植被编辑委员会, 1980. 中国植被 [M]. 北京: 科学出版社.
- 仲启蒙, 邵博, 侯贵廷, 2022. 汾渭地堑岩石圈的应力场数值模拟与分析 [J]. 地球物理学进展, 37(1): 152-163.