

# 鄂尔多斯盆地西缘羊虎沟组孢粉组合特征与古气候意义

王冰雪<sup>1,2</sup>, 许高峰<sup>3</sup>, 郭怀军<sup>3</sup>, 郝志磊<sup>4</sup>, 何文祥<sup>1,2\*</sup>, 胡勇<sup>1,2</sup>, 侯云东<sup>5</sup>, 孙继峰<sup>5</sup>

1. 长江大学资源与环境学院, 油气地球化学与环境湖北省重点实验室, 武汉 430100
2. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100
3. 中国石油长庆油田工程监督处, 庆阳 710018
4. 中国石油长庆油田公司勘探事业部, 西安 710000
5. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710000

**摘要** 鄂尔多斯盆地西缘羊虎沟组页岩气勘探潜力巨大, 但对其孢粉化石的研究较少, 此外还存在地层时代厘定不清、古气候古环境特征认识不明等问题。本研究通过对盆地西缘乌达剖面羊虎沟组的孢粉化石展开研究, 根据孢粉化石种属及其含量变化, 建立了2个孢粉组合带: 第I孢粉组合 (*Lycospora noctuina*-*Stenozonotriletes lycosporoides* 组合) 和第II孢粉组合 (*Dictyotriletes bireticulatus*-*Ahrensiporites guerickei* 组合), 分别产自羊虎沟组下段、上段。通过与内蒙古白彦套海地区羊虎沟组、宁夏中宁一中卫地区石炭纪—早二叠世孢子带等进行对比, 确定了2个孢粉组合的时代, 分别为维斯发A—B期和维斯发C—D期, 属于巴什基尔晚期和莫斯科期。研究发现羊虎沟组下段较上段的蕨类植物孢子化石含量稍有增加, 裸子植物花粉化石含量稍有减少, 但总体变化不大, 表明羊虎沟组沉积时期气候较为稳定。对孢粉化石与古植物类型的亲缘关系进行推测, 羊虎沟组沉积时期生长的古植物多为热带—亚热带型; 运用地球化学元素进行验证, 研究区应为温暖潮湿的热带—亚热带型气候。

**关键词** 羊虎沟组; 孢粉组合; 鄂尔多斯盆地西缘; 乌达地区; 古气候

鄂尔多斯盆地是中国中西部中—新生代的大型多期叠合盆地, 为中国内陆第二大沉积盆地。近年来, 随着对全盆油气勘探力度的增加, 在鄂尔多

斯盆地西缘晚古生代石炭纪羊虎沟组发现具有较好勘探潜力的页岩气藏<sup>[1]</sup>。羊虎沟组富含暗色页岩和粉砂质泥岩, 且单层厚度与累计厚度大、发育高

收稿日期: 2022-06-17; 修回日期: 2022-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41872144); 国家科技重大专项(2016ZX05046-002, 2016ZX05047-005)

作者简介: 王冰雪, 硕士研究生, 研究方向为古生物地层学及油藏地质学, 电子信箱: 2534578371@qq.com; 何文祥(通信作者), 教授, 研究方向为油藏描述及油藏地球化学、油气田勘探与开发, 电子信箱: hwx@yangtzeu.edu.cn

引用格式: 王冰雪, 许高峰, 郭怀军, 等. 鄂尔多斯盆地西缘羊虎沟组孢粉组合特征与古气候意义[J]. 科技导报, 2023, 41(5): 113-124; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.05.012

有机质丰度、热成熟度适中,有机质类型为以 $\text{II}_1$ — $\text{II}_2$ 型为主的泥页岩层段<sup>[2-3]</sup>,呼鲁斯太南部、石炭井和乌达地区是羊虎沟组中最有利的页岩气集聚区<sup>[4]</sup>。

孢粉在古生物地层学中的应用已有很长的历史,前人对于晚古生代的孢粉化石的研究主要集中在孢粉化石的分类与特征性孢粉序列研究<sup>[5-7]</sup>、利用孢粉组合确定地层年代研究<sup>[8-10]</sup>、通过孢粉组合特征与分布规律对古环境、古气候进行推测<sup>[11-12]</sup>以及对分散孢粉化石指向植物类群的研究<sup>[13-14]</sup>。如Perez<sup>[5]</sup>鉴定出阿根廷西北部Paganzo盆地石炭纪马兰赞组59个孢粉化石物种,划分出6个孢粉组合;Lopes等<sup>[6]</sup>根据孢粉资料提出了挪威近海芬马克地台的2个新的生物带和3个亚带的新生物分带方案;高联达<sup>[7]</sup>对宁夏石炭纪和二叠纪孢粉地层进行研究,将羊虎沟组划分为*Radiizonates aligerens-Triquitrites sinani*(AS)带和*Dictyotriletes bireticulatus-Torispora seczris*(BS)带2个孢粉带。高存山<sup>[8]</sup>对鄂尔多斯宜川地区二叠纪孢粉化石特征分析并邻区对比,讨论了孢粉组合的时代意义;Juncal等<sup>[9]</sup>通过对西欧比利牛斯中部和东部上石炭纪和二叠纪的孢粉组合分析与锆石定年,将南比利牛斯地区的孢粉组合与绝对年龄相关联,为南欧二叠纪—石炭纪过渡时期的年代地层学研究提供了重要信息;Lopes等<sup>[10]</sup>对挪威斯瓦尔巴群岛熊岛东海岸晚泥盆世10个露头的孢粉化石进行分析,确定其为法门阶。Jin等<sup>[11]</sup>通过对鄂尔多斯盆地延长组长7段孢粉和有机碳研究,探寻鄂尔多斯盆地中三叠世湖泊深化与全球海平面的关系;王永栋<sup>[12]</sup>根据宁夏中卫下河沿地区羊虎沟组孢粉化石特征建立了*Laevigatosporites medius-Cyclogranisporites aureus*(MA)带和*Torispora securis-Punctatisporites hians*(SH)带,并结合孢粉植物群特征与古地磁特征确定中卫维斯发期的气候以温暖潮湿为主。何汝昌<sup>[13]</sup>通过对内蒙古准格尔旗罐子区沟孢粉资料分析,指出混生生物群在划分地层界限中的意义;江德昕等<sup>[14]</sup>对内蒙古东胜地区延安组孢子花粉进行研究,确定分散孢子花粉的亲缘关系,为建立孢粉植物群提供了理论。从上述研究来看国外学者对鄂尔多斯盆地

孢粉化石研究较少,国内学者对鄂尔多斯盆地晚古生代的研究主要集中在内蒙古东胜、陇东、宜川等东部地区和西南部地区,且主要为二叠纪、三叠纪、侏罗纪等时期的孢粉组合划分与古气候研究,仅高联达、王永栋等人对宁夏地区石炭纪羊虎沟组孢粉组合进行了研究,二人的研究结果也有所不同。

本研究通过野外实地踏勘乌达露头,基于孢粉化石资料,结合前人的研究成果及剖面资料,对鄂尔多斯盆地西缘石炭纪羊虎沟组孢粉化石特征进行分析,建立了2个孢粉化石组合带,并与同时期其他地区地层对比,对羊虎沟组进行厘定,确定其地层时代;通过推测孢粉化石与植物类型的亲缘关系确定气候类型,得出沉积时期的古气候特征,并通过邻区的地球化学元素与古气候的关系进一步对羊虎沟组沉积时期的古气候进行探讨。

## 1 区域概况

鄂尔多斯盆地西缘主要包括东经 $107^\circ$ 以西,宁夏同心以东,北起内蒙古桌子山,南达甘肃陇县,面积约 $5\text{万 km}^2$ ,属于华北地层区。盆地西缘构造特征单一,周缘断裂发育,内部平缓稳定<sup>[15-16]</sup>,上古生界地层总体呈中部薄、东西侧厚且由南向北逐渐减薄<sup>[17]</sup>。乌达地区位于贺兰山北段,华北板块的西北缘,在构造上属鄂尔多斯盆地西缘冲断构造带,是中国北方重要的产煤基地,同时也是华夏植物群的重要产地之一<sup>[18]</sup>。乌达地区羊虎沟组出露良好,为露头垂向层序和沉积体系分析提供了得天独厚的条件。

乌达剖面位于盆地西缘北段区域,地处内蒙古自治区乌海市乌达区乌斯太镇西部约 $10\text{ km}$ 处(图1),石炭纪—二叠纪地层发育完全。

石炭纪羊虎沟组总厚度约为 $900\text{ m}$ ,羊虎沟组上段厚度约为 $477\text{ m}$ ,主要为褐灰色、深灰或灰黑色泥岩、黑色页岩、黄褐色灰岩、薄煤层;羊虎沟组下段厚度约为 $423\text{ m}$ ,主要为黑色页岩、灰黄色含砾粗砂岩、黄褐色砂屑灰岩(图2<sup>[9]</sup>)。沉积物所处水上或水下以及水体深度的不同,泥岩呈现的颜色也有所不同<sup>[20]</sup>,羊虎沟组新鲜剖面岩石的颜色呈现

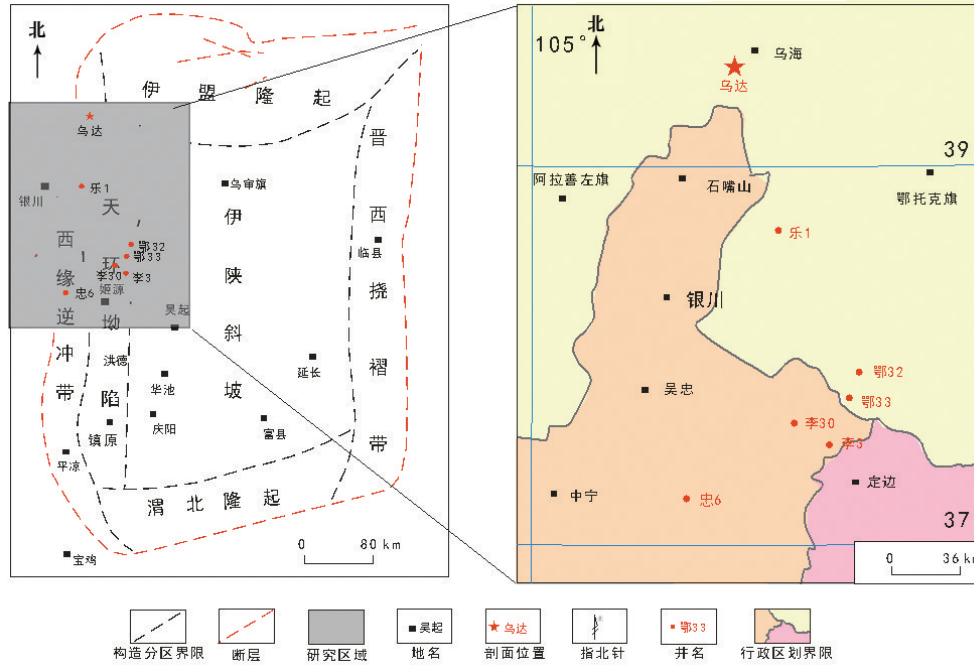


图1 研究区域与乌达剖面位置

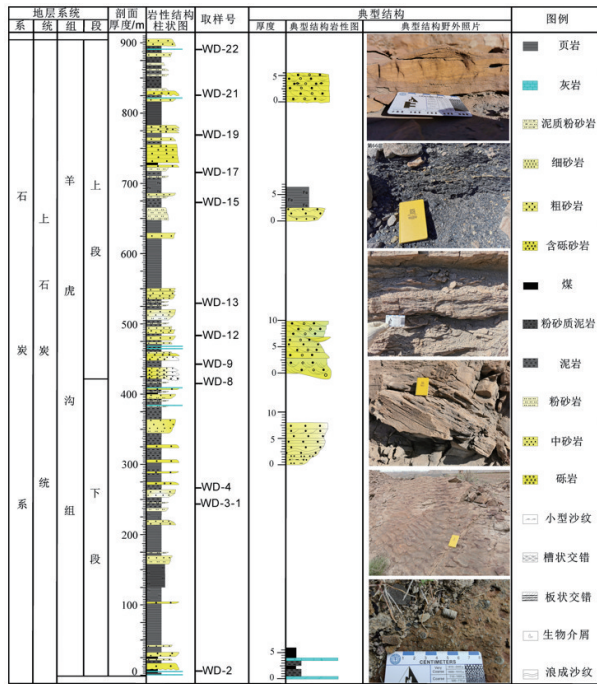
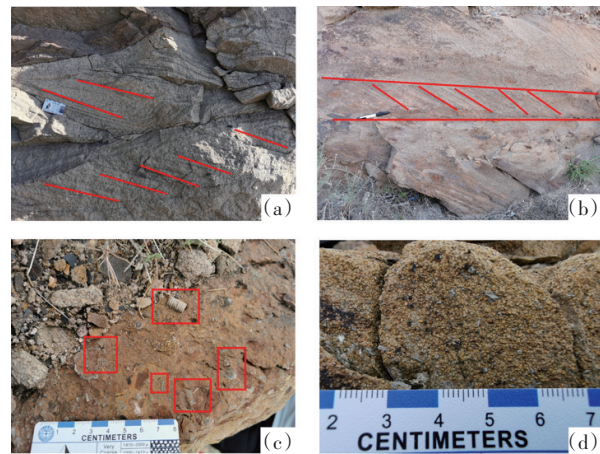


图2 乌达剖面综合柱状图及取样点 (图片来自文献[19],有修改)

出褐色、灰黑色、黑色、黄褐色、灰黄色等,表明石炭系羊虎沟组水面存在波动。羊虎沟组沉积时期,沉积物在水流的搬运和沉积下形成板状、槽状交错层理(图3(a)、(b))。海百合是海生棘皮动物一纲,

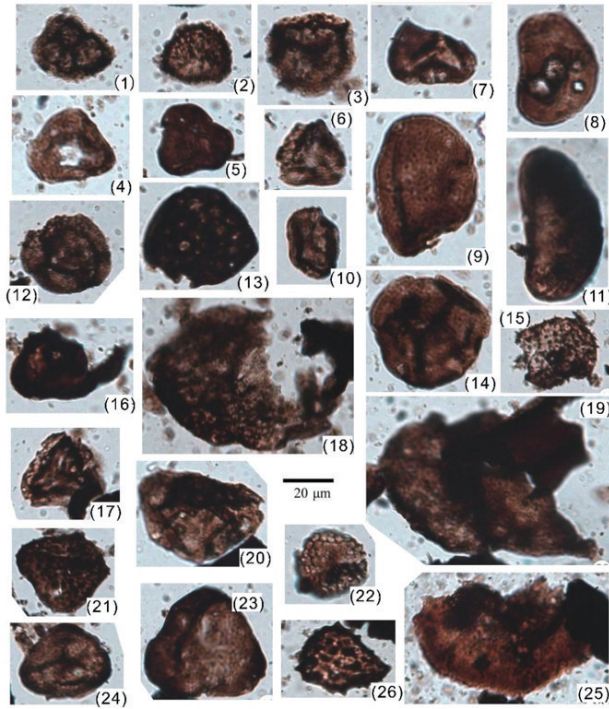
深海浅海均有,大多固着海底生活<sup>[21]</sup>,在野外探勘中发现羊虎沟组有大量海百合化石出露(图3(c))。此外还见有鲕粒灰岩(图3(d)),典型物理化学机理认为鲕粒形成于动荡温暖的浅水中<sup>[22]</sup>,进一步推测羊虎沟组为温暖的气候类型。除鲕粒、海百合之外还见有丰富的孢粉化石与植物碎片。



(a)、(b)为板状及槽状交错层理; (c)为海百合化石与生物碎屑;(d)为鲕粒灰岩 图3 鄂尔多斯盆地乌达剖面羊虎沟组典型岩石学特征与沉积构造

## 2 孢粉化石组合特征及其时代

孢粉样品均来自鄂尔多斯盆地西缘乌达剖面,剖面位置见图1。系统采集了羊虎沟组底部到顶部孢粉化石样品12件,其中羊虎沟组下段4件,上段8件,取样位置见图2,主要孢粉化石见图4。



(1) *Lycospora* sp.; (2) *Lycospora rotunda* Bharadwaj, 1957; (3) *Lycospora noctuina* Butterworth and Williams, 1958; (4) *Leiotriletes* sp.; (5) *Leiotriletes adnatus* (Kosanke) Potonié and Kremp, 1955; (6) *Leiotriletes minor* Jiang, 1982; (7) *Leiotriletes levis* (Kosanke) Potonié and Kremp, 1955; (8) *Laevigatosporites medius* Kosanke, 1950; (9) *Laevigatosporites desmoinesensis* (Wilson and Coe) Schopf, Wilson and Bentall, 1944; (10) *Laevigatosporites minimus* (Wilson and Coe) Schopf, Wilson and Bentall, 1944; (11) *Laevigatosporites vulgaris* Ibrahim, 1933; (12) *Cyclogranisporites* sp.; (13) *Dictyotriletes* sp.; (14) *Punctatisporites* sp.; (15) *Apiculatisporis* sp.; (16) *Densosporites anulatus* (Loose) Smith and Butterworth, 1967; (17) *Simozonotriletes labellatus* Wang, 1984; (18) *Florinites* spp.; (19) *Pityosporites* spp.; (20) *Calamospora saariana* Bharadwaj, 1957; (21) *Lophotriletes gibbosus* (Ibrahim) Potonié and Kremp, 1955; (22) *Microreticulatisporites* sp.; (23) *Triquirites* sp.; (24) *Stenozonotriletes lycosporoides* (Butterworth and Williams) Smith and Butterworth, 1967; (25) *Crassispora orientalis* Ouyang and Li, 1980; (26) *Spinozonotriletes* sp.

图4 乌达剖面羊虎沟组代表化石属种图谱

对采集的12件样品进行分析。其中2件样品化石稀少,仅发现零星的侧生光面三缝孢(*Leiotriletes adnatus*),该分子延续时代很长,广泛分布于世界各地晚古生代—中生代地层中,无法区分具体地质时代;1件样品未见任何化石,无法提供地层时代等具体信息;剩余9件样品中均获得了丰富的孢粉化石。

本研究根据孢粉化石的组合特征及其纵向分布规律,将孢粉化石分为2个组合带,即第I孢粉组合:*Lycospora noctuina*—*Stenozonotriletes lycosporoides*组合;第II孢粉组合:*Dictyotriletes bireticulatus*—*Ahrensia sporites guerickei*组合(图5)。

### 2.1 孢粉组合特征

#### 2.1.1 羊虎沟组下段孢粉 *Lycospora noctuina*—*Stenozonotriletes lycosporoides*组合带

本组合以2件样品为代表(WD-4和WD-8),样品中的化石丰度和分异度较高,化石面貌基本一致。其中蕨类孢子植物化石主要有 *Lycospora rotunda* (圆形鳞木孢)、*L. noctuina* (瘤粒鳞木孢)、*L. spp.* (鳞木孢未定多种)、*Leiotriletes adnatus*、*L. minor* (较小光面三缝孢)、*L. levis* (光面三缝孢)、*L. spp.* (光面三缝孢未定多种)、*Laevigatosporites medius* (中大光面单缝孢)、*L. desmoinesensis* (得梅因光面单缝孢)、*L. minimus* (小光面单缝孢)、*L. vulgaris* (普通光面单缝孢)、*Cyclogranisporites spp.* (圆形粒面孢未定多种)、*Dictyotriletes spp.* (平网孢未定多种)、*Punctatisporites spp.* (圆形光面孢未定多种)、*Apiculatisporis spp.* (圆形锥刺孢未定多种)、*Granulatisporites spp.* (三角粒面孢未定多种)、*Densosporites annulatus* (轮状套环孢)、*Simozonotriletes labellatus* (小唇凹环孢)等。

裸子植物花粉主要包括 *Cycadopites spp.* (苏铁粉未定多种)、*Florinites spp.* (弗氏粉未定多种)、*Pityosporites spp.* (松型粉未定多种)、*Urmites obliquus* (斜形宽沟粉)等。将其命名为第I组合——*Lycospora noctuina*—*Stenozonotriletes lycosporoides*组合。

此组合孢粉化石共计28属25种,以及多个未定种,总化石量332粒;以蕨类植物孢子占绝对优

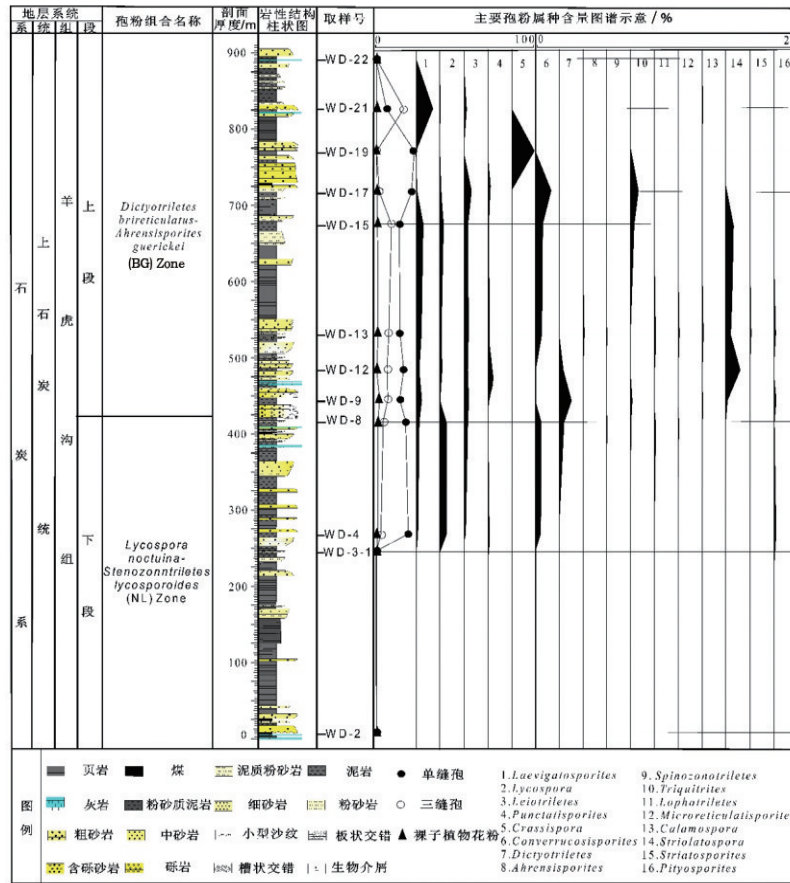


图5 乌达剖面羊虎沟组主要孢粉化石属百分含量图谱

势,平均占总化石粒的97.23%;裸子植物花粉居次要位置,平均为2.77%。蕨类植物孢子以无环三缝孢类稍占优势,平均含量为42.19%,主要为*Leiotriletes adnatus*、*L. levis*、*L. minor*、*L. spp.*、*Punctatisporites spp.*、*Granulatisporites spp.*、*Cyclogranisporites spp.*、*Apiculatisporis spp.*和*Dictyotriletes spp.*,少量或零星出现的有*Calamospora saariana*(萨尔芦木孢)、*Verrucosisporites spp.*(圆形块瘤孢未定多种)、*Lophotriletes gibbosus*(隆凸三角锥刺孢)、*Apiculatasporites sp.*(圆形细刺孢未定种)、*Microreticulatisporites spp.*(细网孢多种)、*Knoxisporites notos*(圈脊陆氏孢)等。具环三缝孢类平均含量为40.18%,以*Lycospora spp.*含量最高,占26.63%,主要为*L. rotunda*和*L. noctuina*,少量或零星出现的有*Triquitrites spp.*(三枕厚角孢多种)、*Stenozonitriletes lycosporoides*(拟鳞木窄环孢)、*Densosporites annulatus*、*Simozonotriletes labellatus*、*Crassispora orientalis*

(东方盾环孢)、*Spinozonotriletes spp.*(刺环孢未定多种)、*Endosporites sp.*(环囊孢未定种)等。单缝孢类平均含量为14.86%,以*Laevigatosporites*占绝大多数,含量13.13%。主要为*L. medius*、*L. desmoinesensis*和*L. vulgaris*。裸子植物花粉仅见零星的*Florinites spp.*、*Pityosporites spp.*、*Cycadopites spp.*等。

### 2.1.2 羊虎沟组上段孢粉 *Dictyotriletes birecticulatus-Ahrensispores guerickei*组合带

上段孢粉化石组合以7件样品为代表(WD-9、WD-12、WD-13、WD-15、WD-17、WD-19、WD-21)。样品中化石丰度和分异度高,各样品中主要组分基本一致,其中蕨类植物孢粉化石主要有*Laevigatosporites medius*、*L. desmoinesensis*、*L. vulgaris*、*L. minimus*、*Leiotriletes adnatus*、*L. levis*、*L. inermis*(无饰光面三缝孢)、*L. minor*、*L. spp.*、*Dictyotriletes birecticulatus*(网饰平网孢)、*Densosporites annulatus*、*D. spp.*(套环孢未定多种)、*Crassispora spp.*(盾环孢

属未定多种)、*Lycospora* spp.、*Cyclogranisporites* spp.、*Verrucosiporites* spp.、*Lycospora noctuina*、*Striolatospora gracilis*(纤细条纹单缝孢)、*S. rarifasciata*(少条带条纹单缝孢)、*Punctatisporites minutus*(细小圆形光面孢)、*P.* spp.、*Apiculatisporis* spp.、*Triquitrites* spp.(厚角孢属未定多种)等。裸子植物花粉主要包括 *Pityosporites* spp.、*Florinites* spp.、*Platysaccus papilionis*(标准蝶囊粉)、*Cycadopites* spp.、*Florinites parvus*(小体弗氏粉)、*Alisporites* sp.、*Platysaccus* spp.(蝶囊粉属未定种)等。将其命名为第II组合: *Dictyotriletes bireticulatus*-*Ahrensiporites guerickei*组合。

此组合7件样品孢粉化石共计32属38种以及多个未定种,总化石量664粒,孢粉组合仍以蕨类植物孢子占绝对优势,平均占总化石含量的96.43%;其次为裸子植物花粉,平均为3.57%。蕨类植物以单缝孢类含量最高,主要为 *Laevigatosporites* spp.,占41.42%,常见 *L. medius*、*L. desmoinesensis*、*L. vulgaris* 和 *L. minimus*,少量或零星出现的有 *Punctatosporites minutus*(小粒面单缝孢)、*Striolatospora gracilis*、*S. rarifasciata* 和 *Striatosporites ovalis*(卵圆梯纹单缝孢)。无环三缝孢类占21.78%~46.73%,平均39.50%,主要为 *Leiotriletes adnatus*、*L.* spp.、*Punctatisporites* spp.、*Verrucosiporites* spp. 和 *Dictyotriletes bireticulatus*,少量或个别出现的有 *Calamospora saariana*、*Trinidadulus diamphidios*(双隔三巢孢)、*Cyclogranisporites* spp.、*Lophotriletes* spp.(三角锥刺孢属未定多种)、*Apiculatisporis* spp.、*Apiculatasporites* sp.、*Raistrickia minuta*(小叉瘤孢)、*Microreticulatisporites gracilis*(细小细网孢)等。具环三缝孢类占6.22%~16.08%,平均12.09%,常见 *Densosporites annulatus* 和 *Crassispora* spp.,少量或零星出现的 *Ahrensiporites guerickei*(桧氏耳角孢)、*Triquitrites tribullatus*(三枕厚角孢)、*Stenozonotriletes* sp.(窄环孢未定种)、*Spinozonotriletes* spp.、*Endosporites* sp.等,上一组合繁盛的 *Lycospora* 类在本组合中大幅度减少。裸子植物花粉仍不发育,但分异度较上一组合稍有上升,有 *Florinites* spp.、*Pityosporites* spp.、*Alisporites* sp.、*Platysaccus papilionis*、

*Cycadopites* spp.等。

## 2.2 孢粉时代意义

### 2.2.1 维斯发 A—B 期 (*Lycospora noctuina*-*Stenozonotriletes lycosporoides*组合)

羊虎沟组下段孢粉组合中出现的种属大部分都是晚石炭世的常见分子。*Lycospora* 类孢子在晚石炭世较为繁盛,到早二叠世开始衰退,在山西组中仅少量可见<sup>[23]</sup>,该类孢子在羊虎沟组下段组合中占重要地位,主要为 *L. rotunda* 和 *L. noctuina*,其中 *L. rotunda* 在中国产地层位为河北开平煤田赵各庄组(煤9)、内蒙古清水河太原组、山西保德本溪组、江苏南京龙潭五通群擂鼓台组下段、甘肃靖远臭牛沟组、红土洼组和羊虎沟组下段<sup>[24]</sup>。*Stenozonotriletes lycosporoides* 在纳谟尔期至维斯发早期出现<sup>[25]</sup>,在中国产地层位为甘肃靖远红土洼组—羊虎沟组<sup>[24]</sup>。*Punctatosporites* 属孢子在西欧维斯发 A 期中部开始出现,维斯发 B 期—斯蒂芬期顶部为高峰,一直延续到二叠纪<sup>[26]</sup>。*Microreticulatisporites nobilis*(高贵细网孢)在西欧于维斯发 B 期底部出现,维斯发期顶部减少,斯蒂芬期底部消失。*Densosporites annulatus* 虽然在石炭纪所占含量较少,但常常出现<sup>[27]</sup>,是美国宾尼法尼亚亚纪孢子带的主要种,西欧维斯发期的重要分子之一<sup>[28]</sup>。*Laevigatosporites* 类孢子始于维宪期,在纳谟尔晚期至维斯发期繁荣,从维斯发 A 期首次大量出现,是维斯发 A 期开始的标志之一<sup>[12,29]</sup>。*Crassispora* 类孢子在陕甘宁盆地中石炭世被发现,为晚石炭世的主要分子,在属种与成分上均发生明显变化,直到早二叠世晚期才开始大量衰退<sup>[30]</sup>。*Spinozonotriletes labellatus* 为山西本溪组孢粉组合的主要分子<sup>[31]</sup>。*Endosporites* 是石炭纪常见分子,始于泥盆纪末,延续到早二叠世<sup>[32-33]</sup>。*Spinozonotriletes* 为晚古生代常见分子,目前仅在新疆北部克拉玛依百口泉井区石炭纪车排子组、布克赛尔县和石炭纪布克河组上段发现<sup>[34]</sup>。另外本组合还见有跨度较大与延续时间长的分子,如 *Leiotriletes adnatus*、*Cyclogranisporites* 等分子,前者延续时代很长,广泛分布于世界各地晚古生代—中生代地层中;后者的时间跨度较大,古生代—中生代均有分布<sup>[35]</sup>。*Apiculatisporis* 类分子在中国三

叠纪<sup>[36]</sup>、二叠纪<sup>[37]</sup>、石炭纪<sup>[32]</sup>、白垩纪<sup>[38]</sup>等均有发现。*Florinites* 最早出现在早石炭世晚期,晚石炭世达到繁荣<sup>[28]</sup>。

内蒙古白彦套海地区羊虎沟组维斯发 A—B 期孢粉组合的主要特征为:(1) 绝大多数为蕨类植物孢子,其中具环三缝孢类含量高,以 *Lycospora* 分布最为普遍,其他常见的还有 *Densosporites*、*Crassispora*、*Spinozonotriletes*、*Triquitrites*、*Ahrensiporites* 等。(2) 无环三缝孢类主要是 *Leiotriletes*、*Punctatisporites* 和具粒、瘤、刺、网等纹饰的 *Granulatisporites*、*Cyclogranisporites*、*Lophotriletes*、*Apiculatisporis*、*Microreticulatisporites* 等。(3) 单缝孢类虽普遍出现,但含量不高,多为 *Laevigatosporites*。(4) 裸子植物花粉很少,主要为 *Florinites*、*Vesicaspora* (聚囊粉属)和 *Pityosporites*<sup>[39]</sup>。该组合主要特征与本组合大体一致,2 个组合应为同一地质时期的产物。甘肃靖远羊虎沟组下段孢子带以 *Radiizonates striatus* (Knox) Staplinet Jansonius (条纹辐脊膜环孢) 的首次出现为底界, *Apiculatisporis abditus* (Loose) Potonié et Kremp (粗强圆形刺瘤孢) 的数量明显增加为特征<sup>[31]</sup>,为西欧维斯发早期<sup>[40]</sup>。该组合中 *Apiculatisporis abditus* (Loose) Potonié et Kremp 大量出现,基本可以对比。宁夏中宁—中卫地区石炭纪—早二叠世第五孢子带,相当于羊虎沟组下段,以含丰富的具环三缝小孢子 *Lycospora* 类为主要特征,另外 *Crassispora* 类也有较高的含量<sup>[8]</sup>。该组合与本组合相似,基本可以对比。宁夏中卫下河沿窑沟剖面羊虎沟组下段孢粉组合<sup>[41]</sup>与本组合大致也可以对比,但其单缝孢类含量明显高于本组合。Duncan<sup>[42]</sup>在英格兰北部 Pennine 盆地中部建立的晚石炭世朗塞蒂安亚期的孢粉带相当于维斯发早期,此组合检测出的孢子与本组合孢子有部分重叠,如 *Trinidulus diamphidios*、*Punctatisporites minutus*、*Kraeuselisporites* 属孢子,但并未说明孢子含量。Bek 等<sup>[43]</sup>在苏迪特盆地建立的 *Acanthotriletes echinatus Murospora* 孢粉带,约为 320~315 Ma,为宾夕法尼亚亚纪巴什基尔期,其顶部对应于维斯发 A—B 期, *Apiculatisporites*、*Punctatisporites*、*Ahrensiporites* 孢子的数量从底部到顶部不断增加为主要标志。

该组合的变化趋势与本组合类似。

将当前 WD-4—WD-8 号样品所含孢粉组合的地质时代定为维斯发 A—B 期较为合适,属于巴什基尔晚期,层位相当于羊虎沟组下段。

### 2.2.2 维斯发 C—D 期 (*Dictyotriletes bireticulatus*—*Ahrensiporites guerickei* 组合)

羊虎沟组下段孢粉组合中出现的种属大部分也都为晚石炭世的常见分子,与上段孢粉组合中出现的主要组分总体一致,另外羊虎沟组下段组合的一些分子继续在上段延续,如 *Lycospora* spp.、*Cyclogranisporites* spp.、*Apiculatisporis* sp.、*Apiculatisporites*、*Densosporites annulatus*、*Spinozonotriletes* spp.、*Endosporites* spp.、*Calamospora saariana*、*Stenozonotriletes* spp.、*Florinites* spp. 等。除此之外,还出现了一些新分子,如 *Dictyotriletes bireticulatus*、*Striolatospora* spp.、*Striatosporites* spp.、*Alisporites* sp.、*Platysaccus papilionis*、*P.* spp. 等。

*Dictyotriletes bireticulatus* 最先从德国鲁尔煤田维斯发 A—B 期发现,是德国和法国萨尔—诺林盆地维斯发 C 期的典型种<sup>[28]</sup>,在欧洲常见于纳缪尔 C 期—维斯发期,维斯发 B 期最为繁盛,在维斯发期顶部消失<sup>[29]</sup>;在中国出现较晚<sup>[24]</sup>,在靖远首次见于靖远组<sup>[44]</sup>,在华北见于本溪组上段<sup>[28]</sup>,在靖远羊虎沟组上段亦有出现<sup>[31]</sup>。*Ahrensiporites* 类的主要种在西欧维斯发 A—B 期较为常见<sup>[29]</sup>,在维斯发 C—D 期开始降低,是甘肃靖远羊虎沟组上段常见分子<sup>[31]</sup>,*Ahrensiporites guerickei* 在欧洲始见于维宪期<sup>[45]</sup>,在中国分布在河北开平的赵各庄组、山西南武本溪组、山西保德太原组、山西朔县本溪组—太原组、内蒙古鄂托克旗本溪组和太原组以及甘肃靖远的靖远组—红土洼组—羊虎沟组<sup>[24]</sup>。*Striolatospora* 类和 *Striatosporites* 类主要分布在晚石炭世<sup>[46]</sup>。*Torispora* 类和 *Thymopora* (赘瘤单缝孢属)类等分子在中国华北、华东、华南和西南地区晚石炭世至晚二叠世均有出现<sup>[28]</sup>。该组合中出现的花粉化石主要分布于二叠纪、三叠纪、侏罗纪等时期<sup>[47-48]</sup>,在石炭纪分布较少。高联达建立的宁夏中宁—中卫地区石炭纪—早二叠世第六孢子带,相当于羊虎沟组上段,以首次出现 *Torispora securis* 和丰富的 *Dic-*

*tyotriletes bireticulatus* 为主要特征。另外还有 *Ahrensiporites guerickei*、*Triquitrites tribullatus*、*Densosporites annulatus*、*Crassispora kosankei* (柯氏盾环孢)、*Striatosporites ovalis* 等重要分子<sup>[8]</sup>。该组合与本组合对比,除 *Torispora securis* 无发现外,其余特征基本一致,可以对比。朱怀诚建立的甘肃靖远羊虎沟组上段孢子带 *Triquitrites tribullatus*、*Ahrensiporites guerickei* 等孢粉分子数量增加,单缝孢占比较高,无肋双气囊花粉数量稀少<sup>[31]</sup>。山西本溪组孢粉组合带以 *Torispora* 类和 *Endosporites* 类常见为特征,蕨类孢子占绝对优势,且以单缝孢子居多;花粉以单囊粉 *Florinites* 为多,双气囊花粉很少,未见有具肋条花粉出现<sup>[31]</sup>。上述2类组合与本组合对比,特征基本一致。葡萄牙西南部 Santa Susana Basin 盆地维斯发 C—D 期 SUS5 和 SUS6 2 个剖面的孢粉化石组合特征为:组合中几乎没有花粉粒, *Verrucosiporites* 和 *Laevigatosporites* 占组合的绝对优势<sup>[49]</sup>。本组合中 *Verrucosiporites* 和 *Laevigatosporites* 2 类孢子占的总比为 43.37%,花粉含量为 2.86%。本组合与该组合特征一致。其他与本组合大致可对比的还有宁夏横山堡 PL 组<sup>[26]</sup>、陕甘宁盆地晚石炭世中期组合<sup>[30]</sup>等。

综上,当前 WD-9—WD-21 号样品所含孢粉组合的地质时代应为维斯发 C—D 期,属于莫斯科期,层位相当于羊虎沟组上段(图 5)。

### 3 古气候特征

#### 3.1 孢粉古气候特征

植物能够产生大量孢子或者花粉,且孢粉质具有耐高温、耐高热的特性,孢粉比植物化石易于保存,加上孢粉体积小,在较大空间中易于扩散,对古植被、古气候反应灵敏,孢粉在地质学上应用广泛。因此孢粉化石对古植被恢复、古气候重建及其地层年代的确定具有重要的意义<sup>[50]</sup>,可利用孢粉化石对地层精细划分与古气候恢复。一定的植物产生一定类型的孢子或花粉;一定时期生长的一些植物产生特有的一定形式的孢子或花粉<sup>[51]</sup>。植物的生长与环境有着密切的关系,一个地区的气候特征对该

地区植物的类型起决定意义,气候的变化会促使植物或者植物群的变异;相反,植物种属的变化在一定程度上也能指示气候的演变<sup>[52]</sup>。由于孢粉母体植物对气温、干湿度具有适应性,可通过孢粉组合和植物群与自然环境之间的联系,推测当时的气候以及变化,阐明各地质历史时期的植被分区及某一地区的气候干湿暖热情况。

乌达剖面孢粉化石丰富,根据古植物学家对化石植物孢子(或花粉)囊中的原位孢子资料与现代孢子花粉形态研究成果<sup>[53-55]</sup>,将鄂尔多斯盆地乌达剖面羊虎沟组所含主要孢粉化石种属的植物亲缘关系进行推测,结果如表 1 所示。

乌达剖面羊虎沟组的孢粉组合占据优势地位的是蕨类孢子,以真蕨类和种子蕨类为主,约为 40%,包括 *Leiotriletes*、*Punctatisporites*、*Dictyotriletes*、*Cyclogranisporites*、*Apiculatisporis* 以及部分 *Laevigatosporites* 等;楔叶纲主要为 *Laevigatosporites*,含量在 30% 左右;石松纲约占 18.98%,其中 *Lycospora* 为 12.35%,*Densosporites* 和 *Crassispora* 分别为 2.91% 和 2.31%,*Spinizonotriletes*、*Stenozonotriletes*、*Endosporites* 以及 *Ahrensiporites* 零星出现。

裸子植物花粉含量较少,仅为 2.91%,主要有科达纲、苏铁银杏类等植物花粉,且以双气囊植物花粉为主,单沟类花粉和单气囊在组合中所占比例较少。从化石组合的特征来看,基本属于华夏植物地理区<sup>[56]</sup>。真蕨纲对生长环境有着严格的要求,因而对气候和生态具有良好的指示意义,现生真蕨纲植物大多分布于热带—亚热带地区<sup>[14]</sup>;另外,真蕨类、种子蕨类植物主要生长于森林、沼泽环境中,是喜温暖湿润的植物类型<sup>[57]</sup>;石松类植物在晚古生代以高大的乔木为主,生长于暖湿海滨低地或沼泽之中,楔叶类等也为喜湿热气候的植物,指示温暖湿润的气候条件<sup>[58]</sup>。据此可以推测,乌达地区羊虎沟组沉积时属于温暖潮湿的热带—亚热带型气候。

#### 3.2 元素地球化学对古气候的指示

除孢粉外,沉积物中某些化学元素的含量在古气候研究中有重要意义。如反映活动组分与惰性组分之间关系的退碱系数  $(K_2O+Na_2O+CaO)/Al_2O_3$ ,如果系数较小,表示气候湿润,淋失较多,化学风化

表1 乌达剖面主要孢粉植被类型

孢粉名称	可能植被类型	可能气候区	花粉/孢子类型	含量百分比/%
<i>Laevigatosporites</i>	大部分为楔叶纲,部分为真蕨纲、种子蕨纲	热带、亚热带潮湿区	单缝孢	32.13
<i>Leiotriletes</i>	真蕨、种子蕨纲	热带、亚热带地区	无环三缝孢	20.18
<i>Lycospora</i>	石松纲鳞木目	暖湿海滨低地或沼泽	具环三缝孢	12.35
<i>Punctatisporites</i>	真蕨、种子蕨纲	热带、亚热带地区	无环三缝孢	6.02
<i>Dictyotriletes</i>	真蕨、种子蕨纲	热带、亚热带地区	无环三缝孢	4.02
<i>Cyclogranisporites</i>	真蕨、种子蕨纲	热带、亚热带地区	无环三缝孢	3.41
<i>Densosporites</i>	石松纲	暖湿海滨低地或沼泽	具环三缝孢	2.91
<i>Crassispora</i>	石松纲	暖湿海滨低地或沼泽	具环三缝孢	2.31
<i>Verrucosporites</i>	真蕨、种子蕨纲	热带、亚热带地区	无环三缝孢	1.81
<i>Apiculatisporis</i>	部分为真蕨纲鞭形蕨目	热带、亚热带潮湿区	无环三缝孢	1.61
<i>Triquitrites</i>	真蕨、种子蕨纲	热带、亚热带地区	具环三缝孢	0.90
<i>Calamospora</i>	芦木类、楔叶纲	热带区暖湿环境	无环三缝孢	0.80
<i>Converrucosporites</i>	真蕨纲	热带、亚热带潮湿区	无环三缝孢	0.70
<i>Granulatisporites</i>	真蕨、种子蕨纲	热带、亚热带地区	无环三缝孢	0.60
<i>Lophotriletes</i>	真蕨、种子蕨纲	热带、亚热带地区	无环三缝孢	0.60
<i>Pityosporites</i>	科达纲、松柏纲	—	双囊粉	1.31
<i>Florinites</i>	科达纲	热带区	单囊粉	0.70
<i>Cycadopites</i>	苏铁纲、银杏纲	热带	单沟类花粉	0.40
<i>Platysaccus</i>	科达纲、松柏纲	—	双囊粉	0.30

作用较强<sup>[59]</sup>。另外,一般认为,当K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>等易溶性盐类不参与沉淀时,Mg/Ca高值指示干旱气候,低值反映潮湿气候<sup>[60]</sup>。CaO/MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比值高低与气温变化有着良好的对应关系,其高值指示温暖时期,低值指示相对寒冷时期<sup>[61]</sup>。

对鄂32、鄂33、乐1、李3、李30、李65等钻井石炭纪羊虎沟组的取心资料进行化学元素鉴定,运用地球化学元素法对古气候进行分析(图1、图6)。结果显示,退碱系数(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O+CaO)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的范围为0.15~0.48间,均值为0.35,表明当时气候湿润,淋失作用强烈。Mg/Ca在0.20~2.21间,均值为0.73,总体比值较低,指示潮湿的气候环境。CaO/MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的值分布在0.03~0.96间,均值为0.34。有研究资料表明<sup>[62]</sup>,平均气温15℃条件下,沉积物的CaO/MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>值主要分布在0.043~0.104,平均值为0.075,相比较而言,羊虎沟组CaO/MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的值主要分布于0.25~0.5之间,均值高于0.075,可以说明羊虎沟组气温大于15℃,CaO/MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的比值总体较大,反映温暖的气候类型。

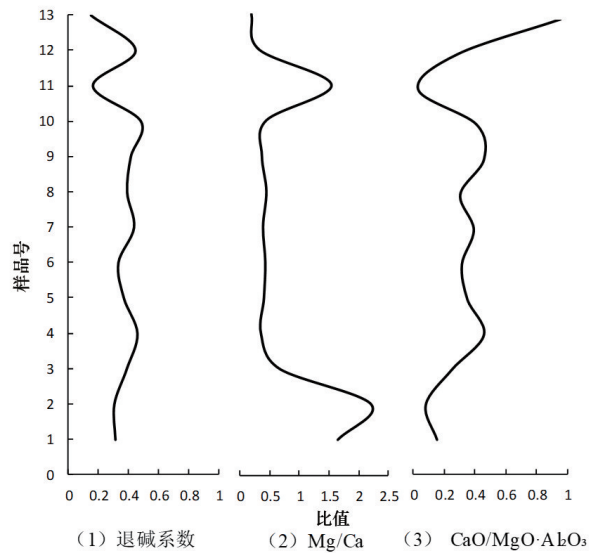


图6 元素地球化学古气候指示

综上,通过退碱系数与Mg/Ca等可以指示干湿性的指数均表示为湿润的气候类型,CaO/MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等与气候冷暖有密切关系的指数反映羊虎沟组为温暖的气候类型,总体上与孢粉所反映的气候类型一致,即羊虎沟组为温暖湿润的气候类型。

## 4 结论

1) 鄂尔多斯盆地西缘羊虎沟组孢粉化石可划分为 2 个孢粉带: *Lycospora noctuina-Stenozonotriletes lycosporoides* 组合(下段)、*Dictyotriletes bireticulatus-Ahrensiporites guerickei* 组合(上段)分别对应维斯发 A—B 期和维斯发 C—D 期,属于巴什基尔晚期和莫斯科期。

2) 2 个孢粉组合主要组分总体一致,即都以蕨类植物孢子化石为主,并伴有少量的裸子植物花粉化石,表明羊虎沟组沉积时期气候较为稳定。

3) 整个剖面中的孢粉植物群以真蕨纲和种子蕨纲、石松纲以及楔叶纲植物为主,孢粉及地球化学元素所指示的古气候特征为温暖潮湿的热带—亚热带气候类型,结合岩性、沉积构造与海百合化石、鲕粒,断定其为海陆过渡的古环境。

鄂尔多斯盆地西缘羊虎沟组较为发育,乌达地区羊虎沟组出露完全,为其研究提供了得天独厚的优势,孢粉化石与地球化学元素均表明羊虎沟组沉积时期处于整体温暖潮湿的气候,属于海陆过渡环境,但在沉积时期气候仍有细微的干湿冷暖变化,后续研究将对组内沉积环境变化进一步讨论。

### 参考文献(References)

- [1] 王子腾, 王康乐, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地西缘羊虎沟组物源区分析[J]. 地球科学与环境学报, 2019, 41(3): 281-296.
- [2] 杨涛, 曹涛涛, 刘虎, 等. 武威盆地上石炭统羊虎沟组页岩气成藏条件[J]. 地质科技情报, 2019, 38(3): 188-198.
- [3] 王崇敬, 徐浩, 杨光, 等. 鄂尔多斯西缘羊虎沟组页岩气聚集地质条件分析[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(2): 18-24.
- [4] Wang C J, Zhang H. Geological conditions of shale gas accumulation of Yanghugou Formation in western margin of Ordos basin[C]//Proceedings of the 2015 International Conference on Economy, Management and Education Technology. Paris: Atlantis Press, 2015: 401-404.
- [5] Perez L V. New palynological data from the Malanzan Formation (Carboniferous), La Rioja Province, Argentina[J]. Ameghiniana, 2009, 46(3): 495-512.
- [6] Lopes G, McLean D, Mangerud G, et al. A new mississippian biozonal scheme for the Finnmark Platform, Norway—Palynostratigraphic integration of exploration wells 7128/4-1 and 7128/6-1[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 92: 94-108.
- [7] 高联达. 宁夏石炭纪、早二叠世孢子带和石炭—二叠系界线[J]. 甘肃地质学报, 1994(1): 11-26.
- [8] 高存山. 鄂尔多斯盆地宜川地区二叠纪孢粉化石组合特征[J]. 山东国土资源, 2018, 34(11): 1-10.
- [9] Juncal M A, Lloret J, Diez J B, et al. New upper carboniferous palynofloras from Southern Pyrenees (NE Spain): Implications for palynological zonation of Western Europe[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2019, 516: 307-321.
- [10] Lopes G, Mangerud G, Clayton G, et al. Palynostratigraphic reassessment of the Late Devonian of Bjornoya, Svalbard[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2021, 286: 104376.
- [11] Jin X, Baranyi V, Caggiati M, et al. Middle Triassic lake deepening in the Ordos Basin of North China linked with global sea-level rise[J]. Global and Planetary Change, 2021, 207: 103670.
- [12] 王永栋. 宁夏中卫晚石炭世维斯发期孢粉组合[J]. 植物学报, 1995(12): 978-993.
- [13] 何汝昌. 再论混生生物群[J]. 石油实验地质, 1989(3): 291-300.
- [14] 江德昕, 王永栋. 内蒙古东胜中侏罗世孢粉植物群与沉积环境[J]. 沉积学报, 2002(1): 47-54.
- [15] 席胜利, 莫午零, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组页岩气勘探潜力——以忠平 1 井为例[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(8): 1235-1246.
- [16] 王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 等. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 沉积学报, 2017, 35(6): 1265-1273.
- [17] 乔建新, 邓辉, 刘池洋, 等. 鄂尔多斯盆地北部晚古生代沉积—构造格局及物源分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2013, 28(1): 12-17.
- [18] 孙克勤, 张周良, 陈丛林, 等. 内蒙古乌达地区早二叠世早期植物群[J]. 现代地质, 1998(4): 131-135.
- [19] 司锦, 胡勇, 侯云东, 等. 鄂尔多斯盆地西缘北段乌达剖面石炭系羊虎沟组地球化学特征及其古环境意义[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(27): 11514-11526.
- [20] 丛琳, 马世忠, 付宪弟, 等. 三肇凹陷东部姚家组一段物源体系分析[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 436-444.
- [21] 汪龙文, 张仁山, 常安之, 等. 中国标准化石手册[M]. 上海: 新知识出版社, 1956: 51.
- [22] Sorby H C. The structure and origin of limestones[J]. Proceedings of Geological Society, 1879, 35: 56-95.
- [23] 陆彦邦, 袁修润. 安徽砾山晚古生代煤系的孢粉组合[J]. 石油实验地质, 1988(1): 44-95.
- [24] 欧阳舒, 卢礼昌, 朱怀诚, 等. 中国晚古生代孢粉化石[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2017: 262-379.

- [25] Cox R S. Preliminary report on the age and palynology of the Bear Gulch Limestone (Mississippian, Montana) [J]. *Journal of Paleontology*, 1986, 60(4): 952-956.
- [26] 王蕙. 宁夏横山堡中、上石炭统孢粉组合[J]. *古生物学报*, 1984(1): 91-106.
- [27] 史骁, 喻建新, 陈斌, 等. 黔北务川-正安-道真地区下二叠统大竹园组和梁山组孢粉学研究[J]. *古地理学报*, 2014, 16(2): 217-226.
- [28] 高联达. 甘肃靖远上石炭统羊虎沟组孢粉组合[C]. *地层古生物论文集(第二十四辑)*, 1994: 113-132.
- [29] Orlova O A, Tevelev A V, Maontov D A, et al. Late Carboniferous *lycopsids* of the Karantrav locality (the Southern Urals)[J]. *Moscow University Geology Bulletin*, 2017, 72(1): 28-36.
- [30] 耿国仓. 陕甘宁盆地西部中石炭世晚期孢粉组合[J]. *植物学报*, 1985(6): 652-679.
- [31] 朱怀诚. 中国石炭系孢粉组合带序列[J]. *微体古生物学报*, 2001(1): 48-54.
- [32] 师天明. 新疆卡拉麦里山滴水泉剖面滴水泉组孢粉化石新发现[C]//中国古生物学会第十二次全国会员代表大会暨第29届学术年会论文摘要集. 南京: 中国古生物学会, 2018: 163-164.
- [33] 王蕙. 塔里木盆地棋盘-杜瓦地区早二叠世孢粉植物群及生态环境[J]. *古生物学报*, 1989(3): 402-414, 431-432.
- [34] 张惠, 王纳申, 孟祥振, 等. 银额盆地苏红图坳陷北部埋汗哈达组碎屑锆石U-Pb测年及其地质意义[J]. *地质通报*, 2019, 38(4): 656-666.
- [35] 刘森, 张渝金, 孙守亮, 等. 辽西金羊盆地北票组孢粉组合及其时代和古气候意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(10): 3393-3408.
- [36] 陶明华, 李博, 贺淑萍, 等. 内蒙古二连盆地三叠系[J]. *地层学杂志*, 2009, 33(3): 260-267.
- [37] 魏文艳, 杨纪磊, 赵都菁, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区二叠纪孢粉组合[C]//中国古生物学会孢粉学会第九届二次学术年会论文摘要集. 南京: 中国古生物学会孢粉学会, 2015: 91-92.
- [38] 薛云飞, 万传彪, 金玉东, 等. 孙吴-嘉荫盆地早白垩世建兴组孢粉组合研究[C]//中国古生物学会孢粉学会十届二次学术年会论文摘要集. 南京: 中国古生物学会孢粉学会, 2019: 19.
- [39] 郁秀荣. 内蒙白彦套海地区中石炭世孢粉组合[J]. *石油实验地质*, 1983(2): 108-115, 165-168.
- [40] 王向东, 胡科毅, 郗文昆, 等. 中国石炭纪综合地层和时间框架[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(1): 139-159.
- [41] 王永栋, 沈光隆, 吴秀元. 宁夏中卫县下河沿太原组生物地层-兼论石炭-二叠系分界[J]. *中国区域地质*, 1995(2): 164-172.
- [42] Duncan M. Provenance of reworked palynomorphs from the Greenmoor Rock (Langsettian, Late Carboniferous) near Sheffield, England[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1995, 89(3/4): 305-317.
- [43] Bek J, Oplustil S. Early Pennsylvanian to early Permian (Bashkirian-Asselian) miospore and pollen assemblages of the Czech part of the Intra-Sudetic Basin[J]. *Bulletin of Geosciences*, 2021, 96(3): 341-379.
- [44] 高联达. 华北石炭纪孢子花粉华北地区古生物图册(三)微体古生物分册[M]. 天津: 地质出版社, 1987: 313-393.
- [45] 欧阳舒. 江苏晚古生代孢粉组合序列[J]. *地层学杂志*, 2000(3): 230-235.
- [46] 杜宝安. 甘肃平凉山西组孢粉组合及其时代[J]. *古生物学报*, 1986(3): 284-295.
- [47] 张渝金, 杨雅军, 吴新伟, 等. 大兴安岭中段东坡龙江盆地中侏罗世孢粉化石[C]//中国古生物学会微体学分会第十六次学术年会、中国古生物学会化石藻类专业委员会第十七次学术年会暨和政化石论坛论文摘要集. 南京: 中国古生物学会微体学分会, 2016: 33-34.
- [48] 黄欣, 郑月娟, 张健, 等. 内蒙古阿荣旗林西组孢粉化石新发现[C]//中国古生物学会第28届学术年会论文摘要集. 南京: 中国古生物学会微体学分会, 2015: 103-104.
- [49] Machado G, Silva I D, Almeida P. Palynology, stratigraphy, and geometry of the Pennsylvanian continental Santa Susana Basin (SW Portugal)[J]. *Journal of Iberian Geology*, 2013, 38(2): 429-448.
- [50] 桂新星, 任建德, 王玺. 内蒙古西乌珠穆沁旗宝格达乌拉组孢粉记录[C]//河南地球科学通报2018年卷——河南省地质学会2018年度学术年会论文集. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2018: 231-235.
- [51] 宋之琛. 孢子花粉分析[M]. 北京: 科学出版社, 1965: 2-3.
- [52] Luengo M S, Vilanova I, Pisano M F, et al. Salt marsh palynological assemblages as modern analogue tools for interpreting past vegetation zones and environmental conditions in the NE coastal plain of Argentina[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2021, 106: 103025.
- [53] Mbesse C O, Bessong M, Takem J E, et al. Palynostratigraphy and paleoenvironmental reconstitution of the Paleocene-Eocene N'kapa Formation: Ngata and Moulongo series (Douala sub-basin, Cameroon)[J]. *Geobios*, 2021, 69: 37-53.
- [54] Jan I U, Stephenson M H. Palynology and correlation of the upper pennsylvanian tobra formation from Zaluch Nala, Salt Range, Pakistan[J]. *Palynology*, 2011, 35(2): 212-225.

- [55] 邢智峰, 付玉鑫, 郑伟, 等. 豫西宜阳上二叠统孙家沟组孢粉组合及其地质意义[J]. 古地理学报, 2021, 23(5): 901-918.
- [56] 姚建新, 肖序常, 高联达, 等. 新疆塔什库尔干县达布太尔地区二叠纪孢粉化石的发现及其地质意义[J]. 古地理学报, 2005(3): 321-326.
- [57] 高存山. 宜川地区二叠纪孢粉化石组合及其古气候意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [58] 董金星, 殷鸿福. 古生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 176.
- [59] 吉云平, 杨振京, 赵华, 等. 河北阳原盆地井儿洼剖面常量元素地球化学特征揭示的中更新世晚期以来气候变化[J]. 古地理学报, 2016, 18(3): 487-496.
- [60] 石军, 邹艳荣, 余江, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷芦苇沟组高有机碳页岩发育的古环境[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(8): 1138-1150.
- [61] 吴丰昌, 万国江, 黄荣贵. 贵州红枫湖纹理沉积物中近代气温记录[J]. 地理科学, 1996(4): 345-350.
- [62] 付金华, 李士祥, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段古沉积环境恢复及意义[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 936-946.

## Palynological characteristics of Yanghugou Formation at western margin of Ordos Basin, NW China, and paleoclimatic implications

WANG Bingxue<sup>1,2</sup>, XU Gaofeng<sup>3</sup>, GUO Huaijun<sup>3</sup>, HAO Zhilei<sup>4</sup>, HE Wenxiang<sup>1,2\*</sup>, HU Yong<sup>1,2</sup>, HOU Yundong<sup>5</sup>, SUN Jifeng<sup>5</sup>

1. College of Resources and Environment, Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China
2. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China
3. Engineering Supervision Office, Changqing Oilfield Company of PetroChina, Qingyang 710018, China
4. Exploration Division of Changqing Oilfield Company, Changqing Oilfield Company of PetroChina, Xi'an 710000, China
5. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oilfield Company of PetroChina, Xi'an 710000, China

**Abstract** The stratigraphic definition of the Carboniferous Yanghugou Formation in Ordos Basin is not clear and there are few studies on paleoclimate and paleoenvironment. To determine the age of the Yanghugou Formation, this paper studies the pollen fossils of the Yanghugou Formation in the Wuda section of the western Ordos Basin and restores the paleoclimate through the genetic relationship between pollen and paleovegetation. According to the species and content changes of palynofossils, two assemblages are established: *Lycospora noctuina-Stenozonotrites lycosporoides* assemblage and *Dictyotritesbireticulatus-Ahrensiporites guerickei* assemblage, which divide the Yanghugou Formation into lower and upper sections. By comparing with Yanghugou Formation in the Baiyantaohai area of Inner Mongolia and the Carboniferous-Early Permian fifth spore belts in the Zhongning-Zhongwei area of Ningxia, the ages of these two spore-pollen assemblages are determined, which are A-B stages and C-D stages of Westphalian, respectively, and equivalent to the Late Bashikian and the Moscovian in the International Age Strata. The spore fossil content of ferns in the lower segment of the Yanghugou Formation is slightly higher than that in the upper segment and the pollen fossil content of gymnosperms is slightly lower, but the overall change not significant, indicating a relatively stable climate of the Yanghugou Formation during the deposition period. The relationship between palynological fossils and ancient plant types is speculated. The ancient plants of the Yanghu Formation were mostly tropical-subtropical. Using the earth's chemical elements, this area should be a warm and humid tropical-subtropical climate.

**Keywords** Yanghugou Formation; pollen assemblage; the Western Margin of Ordos Basin; Wuda area; palaeoclimate ●



(责任编辑 徐丽娇)