

甘肃窑街植物群的地质时代及古地理区系研究

辛存林,王露茜,季健健,张亚梅,王晶菁

西北师范大学地理与环境科学学院,兰州,730070

内容提要:本文对甘肃窑街组古植物群及古地理进行研究,共发现植物化石 31 属 63 种,以银杏类(36.5%)和真蕨类(22.2%)繁盛,松柏类(17.5%)和苏铁类(15.9%)占一定比例,楔叶类(6%)、不明位置的果与穗(1.9%)为特征。在此基础上结合植物群组成分子指示的时代特征,以及与国内同期其它植物群的对比,认为窑街组植物群的地质时代为中侏罗世早中期(Aalenian-Bajocian)。利用聚类分析法对甘肃窑街及其余 11 个研究较为细致的中国北方中侏罗世植物群进行对比,探讨甘肃窑街古地理归属,并对中国北方中侏罗世植物区进行初步划分。利用分支生物地理分析法研究甘肃窑街植物群的亲缘关系,结果表明窑街中侏罗世植物群与内蒙古高头窑植物群关系较为亲近;讨论了甘肃窑街新发现的屈囊蕨属在中国的地理分布特征,发现其分布与中国北方中侏罗世的初步区划结果吻合。

关键词:窑街;中侏罗世;古植物群;地质时代;古地理区划

地史时期的植物地理分布不仅受气候条件影响,而且还受环境因素控制,因而不同分布区的植物则可以指示其古植物地理区划(Sun Keqin et al., 2000)。植物化石作为研究地史时期地理、气候的媒介,一直是古生物学者研究的重点,随着现代科学技术的发展及电子计算机的广泛应用,对植物化石的研究不断地积累和深入(MacLeod et al., 1991; Wang Yongdong et al., 2009; Kostina et al., 2015; Jiang Zikun et al., 2016; Cao Tingli et al., 2017),这也为研究古植物地理区系提供了深厚的基础。

古植物地理区系研究涉及层面较广,包含地史时期植物的地理分布、变化规律和植物地理区系划分等内容,总体来说是根据植物在不同植物群的分布来确定植物地理区系方面的研究。Tao Junrong (1981)对晚白垩纪以来西藏地区植物区系的发展与邻近地区的相互关系以及晚白垩纪—古近纪初的植被和气候、新近纪的植被和气候进行了讨论;Li Xingxue et al. (1985)研究了西藏地区的二叠纪地层及其所含植物化石,并讨论了其古植物地理分区

意义;Sun Ge(1987)研究了中国晚三叠世植物地理区划问题,并讨论了植物地理分区的依据。显微镜及其他技术的应用使古植物在形态、解剖等方面已有很大突破,因而通过孢粉化石探讨古植物区划的研究也已获得了发展(Glasspool et al., 2004; Li Jianguo et al., 2008; Guo Xianpu et al., 2011; Ezequiel, 2013; Miao Huixin et al., 2018)。总体来看,这些研究成果都是在植物化石群研究的积累上对其所处地史时期的植物区划进行了初步的定性描述。

随着计算机软件工具的发展与应用,古植物学研究也日益精细,从最初的定性研究过渡到定量与定性相结合的阶段。Sun Fusheng(1989)对晚二叠世安加拉植物地理区的内部划分采用了聚类分析方法;Wang Jun et al. (1999)用聚类分析法对中国二叠纪华夏植物群 25 个分布区、831 种化石植物进行了古生物地理区划;Liu Yan et al. (2006)选取属级分类单元作为统计变量,对中国早中侏罗世较具代表性的植物群的相似程度进行了定量分析。这些研究将聚类分析方法与古植物区划研究进行了有机结

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41262001)、甘肃省科技支撑基金(编号 1104FKCA116)共同资助的成果。

收稿日期:2018-02-01;改回日期:2018-04-25;网络发表时间:2019-01-15;责任编辑:黄敏。

作者简介:辛存林,1967 年 10 月生,男,甘肃秦安人,教授,从事古植物学、地质矿产与勘查等方面的科研和教学工作。Email: xincunling@163.com。

引用本文:辛存林,王露茜,季健健,张亚梅,王晶菁. 2019. 甘肃窑街植物群的地质时代及古地理区系研究. 地质学报, 93(2):302~316, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019017.
Xin Cunlin, Wang Luhan, Ji Jianjian, Zhang Yamei, Wang Jingjing. 2019. Geological age and paleogeographical study of the Yaojie Flora in Gansu Province. Acta Geologica Sinica, 93(2): 302~316.

合,极大地促进了古植物地理学研究的发展。但是中国侏罗纪植物地理区系的相关研究目前仍较少,仅 Lin Heping et al. (1993)应用主成分分析研究欧亚大陆早侏罗世植物区系划分;Deng Shenghui et al. (2017)以古生物学和沉积学资料为主,结合地球化学和植物化石气孔器参数等资料系统分析了中国侏罗纪的气候特征、气候分区及其演变过程。

甘肃窑街盆地是西北地区重要的中侏罗世植物化石产地,前人已在此区域做了许多研究工作。主要包括:窑街组植物群组成及地质时代(Sun Bainian,1986);植物叶片化石气孔推断中侏罗世的古大气 CO₂ 浓度(Yan Defei et al. , 2004);窑街组孢粉组合研究推断古气候环境(Xin Cunlin et al. , 2006);蕨类植物的原位孢子与分散孢子研究,为重建锥叶蕨属植物的地理分布、生态特征提供了线索(Xin Cunlin et al. , 2010, 2011)。上述成果极大丰富了窑街组植物群的研究资料,但对窑街组植物群在植物古地理区划方面的系统研究还较少。本文运用类比分析、聚类分析法和分支生物地理学方法,进一步厘定窑街组植物群组成及地质时代,进而探讨中侏罗世中国北方植物地理区系的划分以及甘肃窑街植物地理归属问题,并基于窑街组新发现的屈囊蕨属植物(*Gonatosorus shansiensis*)在中国中生代的分布规律,对植物地理区划结果予以验证。

1 研究区地质概况

窑街盆地是印支运动后,在中祁连隆起基础上由于均衡补偿而下沉形成的侏罗纪断陷含煤盆地,是中、新生代形成和发展起来的内陆盆地(图 1)。

该盆地位于中祁连山隆起带—哈拉古隆起的东端,民和盆地中央隆起的西部边缘(Wang Jin et al. ,2017)。该区煤系地层的基底是前寒武系皋兰群变质岩系,其侏罗纪地层主要出露于窑街、炭洞沟、獐儿沟、大沙沟和享堂峡及其以北的大通河两岸等地。

窑街组是一套河流—湖沼—河流相岩石组合,总厚度约 235m。其上覆地层为享堂组,与窑街组呈假整合接触,与其下伏地层炭洞沟组也呈假整合接触。窑街组依地层顺序自下而上可分为(图 2):砂砾岩段(J₂y¹)、含煤岩段(J₂y²)、铝质泥岩段(J₂y³)、油页岩段(J₂y⁴)、砂泥岩段(J₂y⁵)。

2 材料与方法

2.1 研究材料

化石材料采集于甘肃窑街煤田窑街组含煤岩段(J₂y²)、泥岩段(J₂y³)、油页岩段(J₂y⁴)和砂泥岩段(J₂y⁵),共采集植物化石 200 余块。保存于西北师

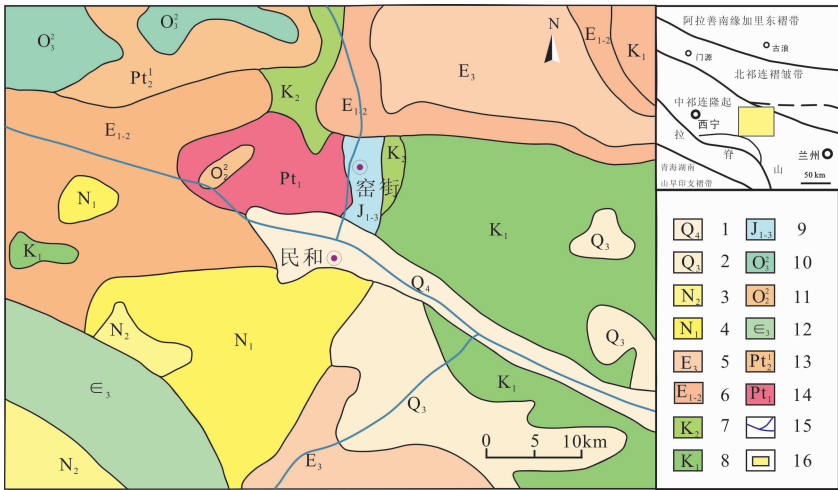


图 1 甘肃窑街盆地附近地质简图

Fig. 1 Geology sketch of Yaojie Basin, Gansu Province

1—全新统;2—更新统;3—上新统;4—中新统;5—渐新统;6—古新统一始新统;7—上白垩统;8—下白垩统;9—侏罗系;
10—上奥陶统;11—中奥陶统;12—上寒武统;13—中元古界;14—古元古界;15—河流;16—研究区
1—Holocene; 2—Pleistocene; 3—Pliocene; 4—Miocene; 5—Oligocene; 6—Paleocene - Eocene; 7—Upper Cretaceous; 8—Lower Cretaceous; 9—Jurassic; 10—Upper Ordovician; 11—Lower Ordovician; 12—Upper Cambrian; 13—Middle Proterozoic; 14—Paleoproterozoic; 15—river; 16—study region

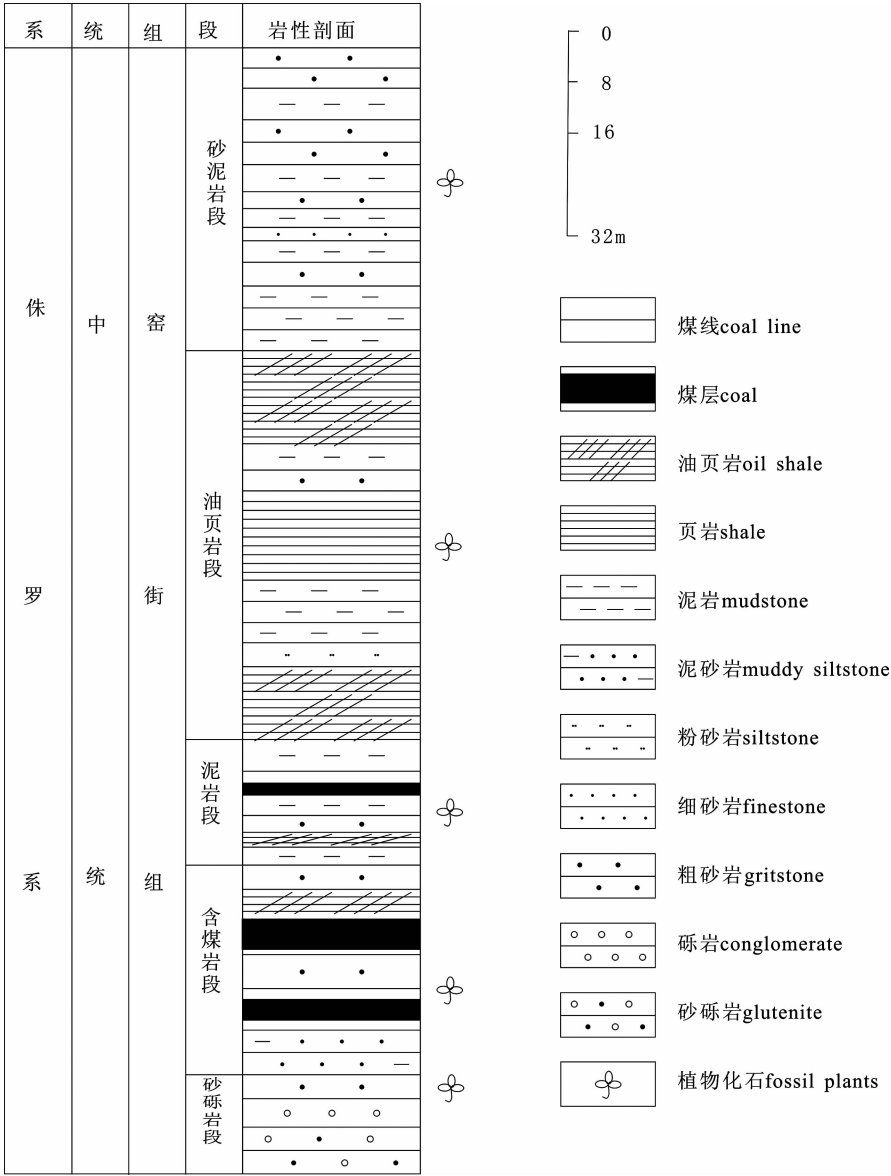


图 2 甘肃窑街中侏罗统地层剖面柱状图

Fig. 2 The stratigraphic section through the Yaojie Formation, Gansu Province

范大学地理与环境科学学院地质实验室。

2.2 研究方法

2.2.1 聚类分析法

运用聚类分析法对植物群相似性系数进行探讨,通过相似程度的高低来推断植物群之间的亲缘关系远近,从而进行植物地理区的划分。本文用 SPSS22.0 软件进行处理,步骤如下:

(1)选取与当前植物群同期的其他主要植物化石产地,明确各自的植物群组成名单,以“种”这一分类级别作为变量进行赋值,存在赋值为“1”,不存在赋值为 0,得到原始编码数据表。

(2)参考前人的经验和研究资料,选用系统聚类分析法,相似性系数采用 Hamann 算法。对原始数

据进行处理后,得到相似性系数矩阵,最终结果输出为谱系图,再作出具体的植物地理分区图。

2.2.2 分支生物地理学方法

分支生物地理学是通过寻找生物区系的格局来理解分布区的关系(Zhang Mingli,2000)。依据不同种类植物的系统发育分支图,结合这些植物在特定分布区中的存在情况,得到多个植物群产地间的地理区划图。具体思路如下:

生物 A、B、C 的系统发育分类如图 3—①所示,D、E、F 的系统发育分类如图 3—②所示,其中①类和②类生物种分别具有各自的祖先。若①类和②类生物在植物分布区 α 、 β 、 γ 中存在的位置分别如图 3—③、④所示,则将③、④叠加后得到研究区域的生

物区系分支图 3—⑤。

3 植物化石组成及特征

3.1 植物化石组成

兰州窑街组含丰富的植物化石,经过系统的采集、分类和鉴定,并结合前人研究资料(Sun

Bainian,1986;Yan Defei et al.,2004),发现共有植物化石 31 属 63 种(表 1),包括在窑街组新发现的 *Gonatosorus shansiensis*。植物群以银杏类(36.5%)和真蕨类(22.2%)繁盛,松柏类(17.5%)和苏铁类(15.9%)占一定比例,楔叶类(6%)、不明位置的果与穗(1.9%)为特征。

表 1 窑街组植物群各类群组成
Table 1 The plant assemblage of the Yaojie Flora

纲(化石果类)	种	种百分含量(%)
真蕨纲	<i>Coniopteris simplex</i> Harris, <i>Coniopteris hymenophylloides</i> Brongniart, <i>Coniopteris spectabilis</i> Brick, <i>Coniopteris bella</i> Harris, <i>Coniopteris burejensis</i> (Zalessky) Seward, <i>Coniopteris margaretae</i> Harris, <i>Coniopteris lanzhouensis</i> Sun, <i>Coniopteris</i> sp., <i>Eboracia lobifolia</i> (Phillips) Thomas, <i>Gonatosorus shansiensis</i> (Sze) Wang, <i>Clathropteris</i> sp., <i>Hausmannia</i> (Protorhipis) <i>ussuriensis</i> Kryshstofovich, <i>Cladophlebis whitbiensis</i> (Brongniart) var. <i>punctata</i> Brick, <i>Rhizomopteris yaojieensis</i> sp. nov.	22.2
银杏纲	<i>Ginkgo huttoni</i> (Sternberg) Heer, <i>Ginkgo digitata</i> (Brongniart) Heer, <i>Ginkgo</i> sp., <i>Ginkgoites chilinensis</i> Lee, <i>Ginkgoites sibiricus</i> (Heer) Seward, <i>Ginkgoites obrutschewi</i> Seward, <i>Ginkgoites biformis</i> sp. nov., <i>Ginkgoites elegans</i> sp. nov, <i>Ginkgoites yaojieensis</i> sp. nov, <i>Baiera gracilis</i> Bean Ms, <i>Baiera furcata</i> (L. et H.) Braun, <i>Baiera</i> sp., <i>Sphenobaiera</i> sp., <i>Ixostrobus lepidus</i> (Heer) Harris, <i>Czekanowskia setacea</i> Heer, <i>Czekanowskia</i> sp., <i>Solenites murrayana</i> L. et H., <i>Phoenicopsis angustifolia</i> Heer, <i>Phoenicopsis speciosa</i> Heer	36.5
松柏纲	<i>Podozamites lanceolatus</i> (L. et H.) Braun, <i>Podozamites</i> sp., <i>Elatides</i> cf. <i>thomasii</i> Harris, <i>Ferganiella paucinervis</i> Li, <i>Ferganiella.</i> cf. <i>podozamites</i> Lih, <i>Elatocladus</i> sp., <i>Brachyphyllum obesum</i> Heer, <i>Brachyphyllum</i> sp., <i>Pityostrobus</i> sp., <i>Schizolepis</i> sp.	17.5
苏铁纲	<i>Pterophyllum subaequale</i> Hartz, <i>Pterophyllum</i> sp., <i>Anomozamites</i> sp. cf. <i>Nilssoniopteris vittata</i> (Brongniart) Florin, cf. <i>Nilssoniopteris tenuinervis</i> (Braun) Harris, <i>Nilssoniopteris ingens</i> sp. nov., <i>Tyrmia nathorsti</i> (Schenk) Ye, <i>Nilssonia</i> cf. <i>mosseraiyi</i> Stockmans et Mathieu, <i>Nilssonia orientalis</i> Heer	15.9
楔叶纲	<i>Neocalamites hoerensis</i> (Schimper) Halle, <i>Equisetites lateralis</i> (Phillips) Phillips, <i>Gansuphyllites multinervis</i> Xu et Shen, <i>Radicites</i> sp.	6
化石果类	<i>Carpolithus</i> sp.	1.9

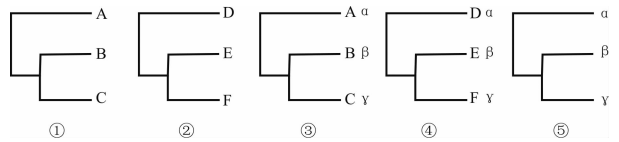


图 3 分支生物地理学方法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of branch biogeography

3.2 窑街植物群的特征

根据植物的系统分类,窑街植物群的组成特征如下:

(1)真蕨类(7 属 14 种),占植物组成总数的 22.2%,在组合中比较发育,为植物群组合中较为繁盛的类群。主要为锥叶蕨属(*Coniopteris*),其特征是羽片线形至披针形,以宽角着生于轴上,小羽片叶边常分裂为楔形、线形或圆形的裂片,主要有 *Coniopteris hymenophylloides*、*C. simplex* 等(图 4b~f, h~k),为中侏罗世常见分子;另外还有屈囊

蕨属、爱博拉契蕨属等其他属种(图 4a, g),数量相对较少。

(2)银杏类(7 属 23 种),占植物组成总数的 36.5%。主要为银杏属(*Ginkgo*)和似银杏属(*Ginkgoites*),其叶为扇状,半圆形至圆三角形,具明显叶柄;叶片不分裂或分裂为 2~8 舌状或倒楔形裂片,正中缺裂常常最深;叶脉稀疏不定,一般情况下,每一小裂片中含 4~6 条近平行的叶脉,银杏属的代表分子有 *Ginkgo huttoni*、*G. digitata* (图 5a, b);似银杏属的代表分子有 *Ginkgoites chilinensis*、*Ginkgoites sibiricus* 等(图 5c, d, e, g)。拜拉属(*Baiera*)、楔拜拉属(*Sphenobaiera*)也有发现,拜拉属(*Baiera*)其叶片常深裂为狭窄的线形裂片,裂片左右对称,含 2~4 条近平行叶脉,较银杏属(*Ginkgo*)和似银杏属(*Ginkgoites*)略稀疏;而楔拜拉属(*Sphenobaiera*)叶脉为扇状脉,每一裂片含至



图 4 甘肃窑街植物群真蕨类植物

Fig. 4 The filicopsida in Yaojie Flora, Gansu Province

(a)—裂叶爱博拉契蕨, 样品 YJ301; (b)—简单锥叶蕨, 样品 YJ302; (c,d)—美丽锥叶蕨, 样品 YJ303, YJ304; (e)—奇丽锥叶蕨, 样品 YJ305; (f)—布列亚锥叶蕨, 样品 YJ306; (g)—山西屈囊蕨, 样品 YJ307; (h)—膜蕨型锥叶蕨, 样品 YJ103; (i,j)—兰州锥叶蕨, 样品 YJ105; (k)—玛格丽特锥叶蕨, 样品 YJ109。比例尺=1cm

(a)—*Eboracia lobiifolia* (Phillips) Thomas, sample YJ301; (b)—*Coniopteris simplex* Harris, sample YJ302; (c,d)—*Coniopteris bella* Harris, sample YJ303, YJ304; (e)—*Coniopteris spectabilis* Brick, sample YJ305; (f)—*Coniopteris burejensis* (Zalessky) Seward, sample YJ306; (g)—*Gonatosorus shansiensis* (Sze) Wang, sample YJ307; (h)—*Coniopteris hymenophylloides* Brongniart, sample YJ103; (i,j)—*Coniopteris lanzhouensis* Sun, sample YJ105; (k)—*Coniopteris margaretae* Harris, sample YJ109. Scale bar=1cm

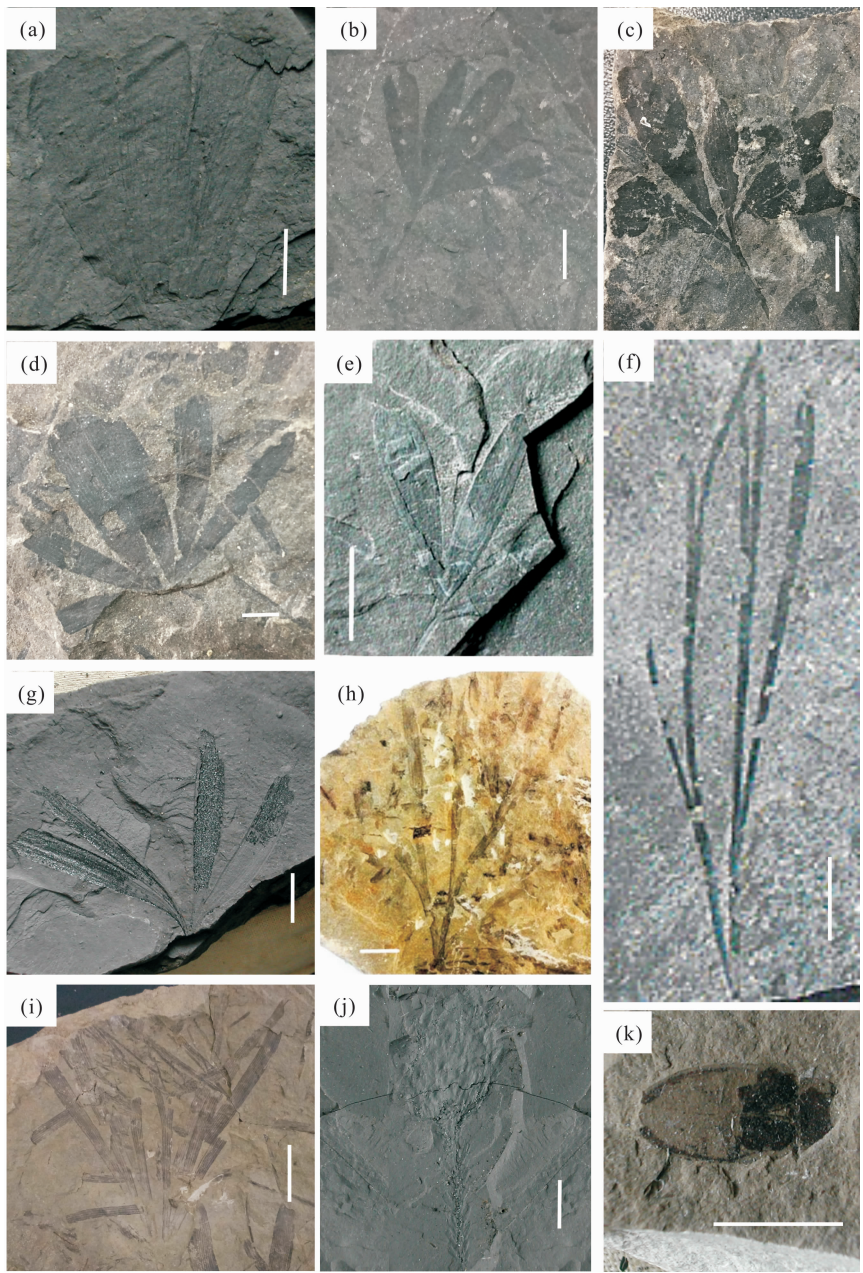


图 5 甘肃窑街植物群银杏类及其他类植物

Fig. 5 The Ginkgophytes and other palaeoplants in Yaojie Flora, Gansu Province

(a)—指状银杏, 样品 YJ324; (b)—胡顿银杏, 样品 YJ325; (c)—吉林似银杏, 样品 YJ326; (d)—西伯利亚似银杏, 样品 YJ327; (e)—奥勃鲁契夫似银杏, 样品 YJ328; (f)—叉状拜拉, 样品 YJ123; (g)—一似银杏(未定种), 样品 YJ329; (h)—楔拜拉(未定种), 样品 YJ124; (i)—狭叶拟刺葵, 样品 YJ330; (j)—松型球果(未定种), 样品 YJ331; (k)—化石果(未定种), 样品 YJ332。比例尺=1cm

(a)—*Ginkgo digitata* (Brongniart) Heer, sample YJ324; (b)—*Ginkgo huttoni* (Sternberg) Heer, sample YJ325; (c)—*Ginkgoites chilinensis* Lee, sample YJ326; (e)—*Ginkgoites obrutschewi* Seward, sample YJ328; (f)—*Baiera furcata* (L. et H.) Braun, sample YJ123; (g)—*Ginkgoites* sp., sample YJ329; (h)—*Sphenobaiera* sp., sample YJ124; (i)—*Phoenicopsis angustifolia* Heer, sample YJ330; (j)—*Pityostrobus* sp. Harris, sample YJ331; (k)—*Carpolithus* sp., sample YJ332. Scale bar=1cm

少 4 条叶脉, 可与拜拉属(*Baiera*)区分, 主要有 *Baiera furcata*、*Sphenobaiera* sp. 等(图 5f, h)。其他属种相对较少, 如 *Phoenicopsis angustifolia* (图 5i)。

(3) 松柏类(7 属 11 种), 占植物组成总数的 17.5%。松柏类植物在当前植物群中也较为繁盛, 以松柏目为主, 化石保存较好, 分异度较高, 除少量标本有球果保存外(图 5j), 其余多为枝叶印痕, 总体

数量不多。

(4) 苏铁类(5 属 7 种), 占植物组成总数的 15.9%。侧羽叶属(*Pterophyllum*)较为发育, 叶羽状, 叶片线形, 基本全部着生于羽轴两侧, 叶脉平行, 分叉 1~3 次。

(5) 楔叶类(4 属 4 种), 占植物组成总数的 6%。主要为似木贼属(*Equisetites*), 茎较细弱, 分为节和节间, 节部具有叶鞘和叶齿, 节间或长或短, 表面带有不明显和不规则的纵肋或沟; 根茎也带有节和节间, 节部常常带有地下生长的块茎(球茎)。

(6) 化石果类(1 属 1 种), 占植物组成总数的 1.9%, 为裸子植物的种子化石(图 5k)。

根据窑街植物群的组成分子和特征分析, 当前植物群中银杏类、真蕨类最为丰富, 真蕨类又以锥叶蕨属占优势。苏铁类次之, 属种分异度相对较高。松柏类、苏铁类、楔叶类都有发现, 但化石数量较少。在植物地理区系上应属于北方 *Coniopteris-Phoenicopsis* 植物群。

4 窑街组植物群的地质时代

4.1 植物群组成分子的时代指示

我国中生代陆相地层及植物群可根据植物群在地层上发生的先后次序进行划分(Sze, 1956), 而早、中侏罗世的代表植物群为 *Coniopteris-Phoenicopsis*, *Coniopteris* 和 *Phoenicopsis*。窑街植物群真蕨类占比 22.2%, 以锥叶蕨属(*Coniopteris*)为主。锥叶蕨属第一次出现于早侏罗世, 自中侏罗世变得常见, *Sphenopteris* sp., *Coniopteris furssenkoi* 和 *C. simplex* 是中侏罗世植物群的特征植物(Kostina et al., 2013)。*Coniopteris hymenophylloides* 在窑街组发现较多, 而 Li Peijuan et al. (1988) 认为 *C. hymenophylloides* 是 *Coniopteris-Phoenicopsis* 中期组合的代表。*Eboracea lobifolia* 是中侏罗世西伯利亚植物区的特征种。楔叶类植物 *Neocalamites hoerensis* 于外高加索中侏罗世巴通阶 Tkvarchelian 植物群被发现(Sun Ge et al., 2010), 在中国中侏罗世早期植物群中也有记录。

窑街植物群银杏类占比 36.5%, 有 7 属 23 种, 在植物群中占有重要地位。银杏属(*Ginkgo*)化石记录最早为中侏罗世早中期, 河南义马组地层是其著名产地(Quan Cheng et al., 2010), 银杏类的叶化石在繁盛时期几乎遍及全球。*Czekanowskia rigida* 和 *Phoenicopsis angustifolia* 最早发现在俄

罗斯伊尔库茨克盆地中侏罗世 Prisajan 组, *Baiera furcata* 是中侏罗世英国约克郡植物群重要的组成分子之一, 也广泛分布于东亚地区的中侏罗统地层中。

似枞属(*Elatides*)最早发现于瑞典南部的晚三叠世到早侏罗世地层中(Wang Zixi et al., 2015), 在中国最早于新疆维吾尔自治区哈密的三道岭中侏罗世西山窑组、青海省中侏罗世大煤沟组、河北省和山西省的中侏罗统、黑龙江省上侏罗统发现。松柏类的费尔干杉属是早、中侏罗世中亚和西伯利亚南部植物区的一个独特的种类。

综上所述, 当前植物群主要组成分子显示了中侏罗世植物群特征, 同时也具有部分早侏罗世分子(表 2), 具有较典型的中侏罗世面貌。

4.2 与国内外相关植物群的对比

为进一步认识窑街组植物群, 以及对植物群的地质时代进行详细划分, 本文挑选中侏罗世研究程度较高和地质时代划分清晰准确的国内外植物群, 与窑街植物群进行对比分析, 以补充更多的时代证据。

4.2.1 与蒙古中侏罗世植物群的对比

蒙古南部地区 Orgilokhbulag 组地层中的 Nariin-Sukhait 植物群(Kostina et al., 2013), 含有 57 种化石植物, 包括: 苔藓类、楔叶类、真蕨类、苏铁类、本内苏铁类、银杏类、薄果穗植物、松柏类及分类位置不明的裸子植物, Orgilokhbulag 组的地质时代为中侏罗世, 此植物群归属于典型的西伯利亚植物区西西伯利亚省。Nariin-Sukhait 植物群各主要门类植物占植物群总数的比例为: 真蕨纲 29.8%, 银杏纲 28.1%, 松柏纲 12.3%, 苏铁纲 3.5%, 以及其它占比较小的植物类群。该植物群以真蕨纲和银杏纲最为繁盛, 松柏纲次之, 与窑街组植物群中各门类植物占比很相似。这两个植物群相同或相近的分子有 *Equisetites* cf. *lateralis*、*Coniopteris hymenophylloides*、*C. simplex*、*Eboracea lobifolia*、*Ginkgo* ex gr. *sibirica*、*Sphenobaiera* sp.、*Czekanowskia* ex gr. *rigida*、*Phoenicopsis* ex gr. *angustifolia*、*Elatides* sp.、*Podozamites* cf. *lanceolatus*、*Podozamites* sp.、*Radicites* sp.、*Carpolithes* sp., 多种共有分子表明了两个植物群之间相似的植物面貌, 反映出二者处于相似的生境中, 时代为中侏罗世。

蒙古中部地区 Bakhar 组地层中的 Tsagan-Ovoo 植物群(Kostina et al., 2015), 植物群的时代为早一中侏罗世(Aalenian), 各主要门类植物占植

表 2 窑街植物群主要成分的地史分布

Table 2 Geological distribution of main components

in Yaojie flora

种名	三叠纪(T)			侏罗纪(J)			白垩纪(K)	
	T ₁	T ₂	T ₃	J ₁	J ₂	J ₃	K ₁	K ₂
<i>Equisetites lateralis</i>			+	+	+			
<i>Neocalamites hoerensis</i>			+	+	+			
<i>Gansuphyllites multinervis</i>					+			
<i>Radicites</i> sp.			+	+	+			
<i>Coniopteris hymenophylloides</i>				+	+			
<i>C. simplex</i>				+	+			
<i>C. spectabilis</i>					+			
<i>C. bella</i>					+			
<i>C. burejensis</i>				+	+	+	+	
<i>C. margaretae</i>					+			
<i>C. lanzhouensis</i>					+			
<i>Eboracia lobifolia</i>				+	+			
<i>Gonatosorus shansiensis</i>					+			
<i>Clathropteris</i> sp.			+	+	+			
<i>Hausmannia ussuriensis</i>			+	+	+			
<i>Cladophlebis whitbiensis</i> var. <i>punctata</i>				+	+			
<i>Rhizomopteris yaojieensis</i> sp. nov					+			
<i>Ginkgo digitata</i>			+	+	+	+	+	
<i>G. huttoni</i>			+	+	+	+	+	
<i>G. sibiricus</i>			+	+	+	+		
<i>Ginkgoites chilinensis</i>					+	+		
<i>G. obrutschewi</i>				+	+			
<i>Baiera gracilis</i>				+	+	+		
<i>B. furcata</i>				+	+	+		
<i>Sphenobaiera</i> sp.			+					
<i>Czekanowskia setacea</i>			+	+	+	+	+	
<i>Solenites murrayana</i>				+	+	+		
<i>Phoenicopsis angustifolia</i>				+	+	+		
<i>P. speciosa</i>			+	+	+	+	+	
<i>Ixostrobus lepidus</i>				+	+			
<i>Podozamites lanceolatus</i>			+	+	+	+	+	
<i>Elatides</i> cf. <i>thomasi</i>					+	+	+	
<i>Ferganiella paucinervis</i>			+					
<i>Elatocladus</i> sp.				+	+	+		
<i>Brachyphyllum obesum</i>					+	+		
<i>Schizolepis</i> sp.				+	+			
<i>Pterophyllum subaequale</i>			+	+	+			
<i>Anomozamites</i> sp.			+	+	+			
cf. <i>Nilssoniopteris vittata</i>				+	+	+		
<i>Tyrmia nathorsti</i>			+	+	+			
<i>Nilssonia</i> cf. <i>mosseraiyi</i>				+	+			
<i>N. orientalis</i>			+	+	+	+	+	

物群总数的比例为:真蕨纲 31.3%,银杏纲 50%,苏铁纲 3.1%,松柏纲 3.1%。以银杏纲和真蕨纲植物繁盛,多样性高,还有少量的苏铁纲和松柏纲植物,这与窑街组植物群的门类植物占比类似。两个植物群相同和相近的分子有:*Equisetites* cf. *lateralis*、*Sphenopteris* sp.、*Czekanowskia* cf.

rigida、*Phoenicopsis angustifolia*,这两个植物群相似的组成特征表明它们具有相近的地质时代。

4.2.2 与青海柴达木植物群的对比

青海侏罗纪植物群最早由 Sze(1959)研究,后经进一步研究(Zhang Fade et al., 2012),丰富了植物群内容,有植物化石 42 属 115 种,各纲所占的比例为:真蕨纲占比 34%,银杏纲占比 32%,松柏纲占比 14%,苏铁纲占比 11%。可知该植物群以真蕨纲和银杏纲为主要组成部分,松柏纲和苏铁纲占小部分的比,这一特征与窑街组植物群相近。除了石松类(Lycopsida)窑街组无记录外,其余科属植物窑街组皆存在。这两个植物群相同或相近的分子有:*Coniopteris simplex*、*C. hymenophylloides*、*C. simplex*、*C. burejensis*、*C. margaretae*、*Eboracia lobifolia*、*Hausmannia ussuriensis*、*Ginkgoites sibiricus*、*Phoenicopsis angustifolia*、*Podozamites lanceolatus*、*Elatocladus* sp.、*Brachyphyllum obesum*、*Schizolepis* sp.,两者蚌壳蕨科锥叶蕨属植物都较繁盛,体现了相似的生存环境,两者的地质时代均为中侏罗世。

4.2.3 与北京西山门头沟植物群的对比

北京西山门头沟植物群是我国研究程度较高的植物群(Chen Fen et al., 1980),自下而上分成下窑坡组、上窑坡组和龙门组,下窑坡组时代为早侏罗世,上窑坡组和龙门组的时代为中侏罗世。上窑坡组和龙门组为门头沟植物群的上组合,有 55 种植物化石,蕨类植物占比 38.2%,苏铁类占比 22%,银杏类占比 20%,松柏类占比 14.5%,蕨类植物占最大的比例,次之为苏铁纲和银杏纲植物。除了石松类(Lycopsida)、紫萁科(Osmundaceae)、种子蕨类(Pteridospermopsida)窑街组无记录外,其余科属植物窑街组皆存在。这两个植物群相同或相近的分子有:*Equisetites lateralis*、*Neocalamites hoerensis*、*Coniopteris hymenophylloides*、*Eboracia lobifolia*、*Ginkgo huttoni*、*Ginkgoites sibiricus*、*Baiera gracilis*、*Phoenicopsis angustifolia*、*Podozamites lanceolatus*、*Ferganiella paucinervis*、*Elatocladus* sp.、*Anomozamites* sp.、cf. *Nilssoniopteris vittata*、*Tyrmia nathorsti*、*Nilssonia* cf. *Mosseraiyi*。两者相同种类较多,而上窑坡组和龙门组时代分别为中侏罗世早中期,据此推测窑街植物群地质时代为中侏罗世早中期。

4.2.4 与英国约克郡植物群的对比

约克郡植物群至少有 150 年的研究历史,可以

说是当前世界上研究最详细、最深入的中侏罗世植物群,其时代为大家所公认属于巴柔期(Bajocian)至巴通期(Bathonian)。约克郡植物群有植物 82 属 226 种(Harris, 1969),各门类植物占植物群总数的比例为:楔叶纲 4.4%,真蕨纲 12.4%,种子蕨纲 8%,苏铁纲 39.4%,银杏纲 12.5%,松柏纲 14.1%。这与窑街组各类植物所占比重明显不同,可能是由于古地理和古气候环境不同造成的,约克郡植物群属于欧洲—中国植物区。但这两个植物群也有一些共有的种类,如:真蕨纲的 *Coniopteris hymenophylloides*, *C. simplex*, *C. bella*, *C. burejensis*, *C. margaretae* 等,窑街组中真蕨纲植物繁盛,又以锥叶蕨属占优势,与约克郡植物群中的锥叶蕨属植物大致相同,但约克郡植物群的真蕨纲植物中紫萁科、马通科和合囊蕨科也很发育,而在窑街组中没有发现。同时约克郡植物群中苏铁类植物占最大比例(39.4%),约有 50 种,而窑街组中苏铁类占比较小(15.9%),仅有 10 种,而中侏罗晚期(巴通期—卡洛维期)植物群是以苏铁类和银杏类为主,真蕨类植物则要单调一些。因而推测窑街组植物群的延续时代比约克郡植物群的延续时代短一些,即不会达到巴通期(Bathonian)。

综上所述,窑街组植物群其地质时代应该为中侏罗世阿林期(Aalenian)—巴柔期(Bajocian)。

5 植物古地理区系研究

综合考虑地层发育、气候特征及植物群特性, Vakhrameev et al. , (1991)将全球中侏罗世古植物区系划分为五个大区,包括:温带西伯利亚区(Siberian)、亚热带欧洲—中国区(Euro-sinian)、热带赤道区、南半球的亚热带和澳大利亚区这五个大

区。我国侏罗纪植物群南方和北方两大植物区系的分界线大致为昆仑—秦岭—大别山一线(Deng Shenghui et al. , 2017),其中北方植物群处于湿润、半湿润暖温带和亚热带。

5.1 窑街古植物地理归属

选取我国中侏罗世主要的植物群统计植物化石,未定种视情况进行取舍,对在多个植物群中存在小于 2 和大于 12 的植物种予以删除,以控制分异度及减少其对精度的影响,再用 SPSS22.0 软件进行聚类分析,对不同的算法进行试验,笔者选用 Hamann 算法进行相似性计算,可得聚类分析近似性矩阵(表 3),并做出了系统聚类分析图(图 6)。

根据聚类分析图,甘肃窑街植物群所属的中国北方中侏罗世植物群可以划分为两大地理单元:Ⅰ区包括北京西山和河南义马,Ⅱ区具体细分包括以下几个部分(图 7):①内蒙古东胜、山西宁武;②甘肃窑街、内蒙古高头窑;③青海柴达木;④辽西海房沟、新疆沙尔湖、内蒙古石拐;⑤吉林万宝、新疆哈密。

(1)对Ⅰ区进行分析,根据聚类结果,北京西山和河南义马同属于一个植物地理单元。在中侏罗世,北京西山和河南义马处于华北高地的东侧,燕山山脉的南部,被太行山、密云—喜峰口断裂带和紫金关断裂带包围(Zhang Yueqiao et al. , 2007)。该大地构造背景使得上述两个植物群具有相近的区域环境,植物交流相对较便利,形成了相近的植物种属,是决定聚类分析结果的重要因素。虽然此地理单元西侧为中侏罗世大型稳定盆地鄂尔多斯盆地,但大地构造条件给该盆地与本单元在植物交流上造成不便,因此,该区与鄂尔多斯盆地中的其它植物群亲缘关系相对较远。

表 3 聚类分析近似性矩阵
Table 3 Approximation matrix of cluster analysis

	甘肃 窑街	辽西 海房沟	吉林 万宝	河南 义马	青海 柴达木	新疆 沙尔湖	内蒙古 高头窑	内蒙古 东胜	内蒙古 石拐	北京 西山	山西 宁武	新疆 哈密
甘肃窑街	1											
辽西海房沟	0.304	1										
吉林万宝	0.348	0.391	1									
河南义马	-0.087	0	0	1								
青海柴达木	0.261	0.261	0.348	-0.087	1							
新疆沙尔湖	0.283	0.413	0.283	-0.022	0.326	1						
内蒙古高头窑	0.261	0.261	0.391	0.13	0.261	0.152	1					
内蒙古东胜	0.13	0.13	0.261	0.13	0.174	0.065	0.304	1				
内蒙古石拐	0.283	0.37	0.37	0.022	0.326	0.348	0.239	0.152	1			
北京西山	-0.022	-0.022	-0.022	0.109	-0.152	-0.087	0.065	0.239	-0.087	1		
山西宁武	0.326	0.283	0.37	0.152	0.283	0.348	0.283	0.413	0.391	0.043	1	
新疆哈密	0.391	0.217	0.435	-0.087	0.261	0.152	0.348	0.217	0.239	0.196	0.283	1

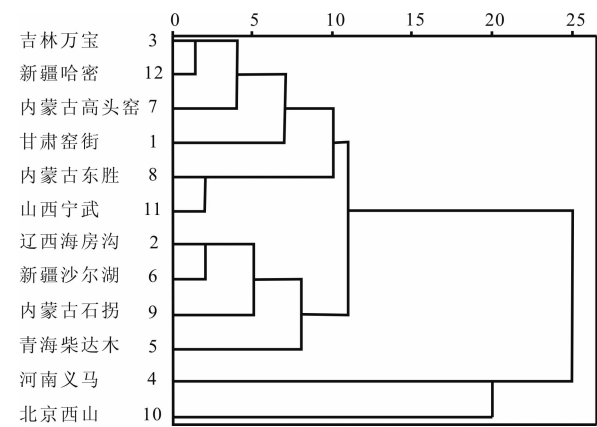


图 6 中国北方中侏罗世主要植物群聚类分析图
Fig. 6 Cluster analysis of the main plant groups in from Middle Jurassic in northern China

(2) II 区包括中国北方的西北、东北和华北西部,根据聚类分析结果可再划分为 5 个植物地理单元。II ①区包括内蒙古东胜和山西宁武。在中侏罗

世,山西宁武地区属于宁武—静乐盆地,上述两处均位于鄂尔多斯盆地的东北缘,植物交流便利,因此划归同一植物地理单元。II ②区包括甘肃窑街和内蒙古高头窑。归因于两地地理位置相对较近以及气候条件相对一致。II ③区青海柴达木盆地单独成一支。在中侏罗世,该区北邻古祁连山,南邻昆仑山,东邻陇西地块,且与其它植物群距离较远,据此形成了该植物群的独特性。柴达木盆地的侏罗系在盆地北部山前地带比较发育,其中大煤沟剖面最为发育,研究程度高,种属相对于其他植物群多,在聚类分析原始数据中与其它组分差异度大,可能也是聚合度较低的原因。II ④区包括辽西海房沟、新疆沙尔湖、内蒙古石拐,中侏罗世时分别属于燕—辽盆地、吐哈盆地和石拐子盆地,石拐子盆地与燕—辽盆地受燕山运动的影响,二者同位于内蒙古隆起及其南缘 (Zhang Guishuang et al., 2015),植物交流相对便利。新疆沙尔湖位于吐哈盆地内部,且侏罗纪受其

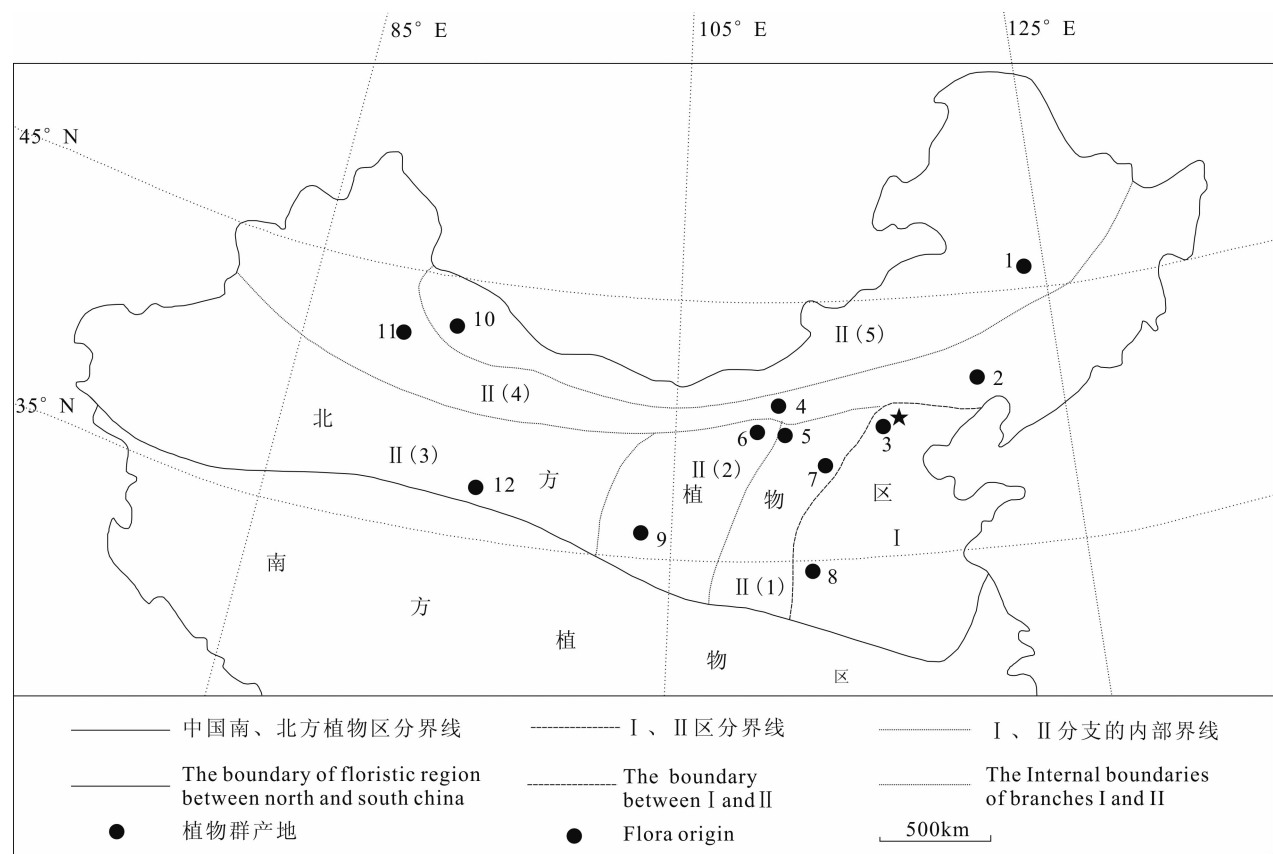


图 7 甘肃窑街植物群植物地理归属图
Fig. 7 Geographical ascription of Yaojie Flora in Gansu Province
1—吉林万宝盆地;2—辽西海房沟;3—北京西山;4—内蒙古石拐;5—内蒙古东胜;6—内蒙古高头窑;7—山西宁武;
8—河南义马;9—甘肃窑街;10—新疆哈密;11—新疆沙尔湖;12—青海柴达木
1—Wanbao, Jilin; 2—Haifanggou, Liaoning; 3—Xishan, Beijing; 4—Shiguai, Inner Mongolia; 5—Dongsheng, Inner Mongolia;
6—Gaotouyao, Inner Mongolia; 7—Ningwu, Shanxi; 8—Yima, Henan; 9—Yaojie, Gansu;
10—Hami, Xingjiang; 11—ShaEhu, Xingjiang; 12—Qaidam, Qinghai

南、北造山带的影响,形成了相对独立的小区。上述三地划归为同一植物区,可能与聚类分析的样本选择有关,或者有其它的影响因素,如植物特性、大地构造背景、岩相古地理情况和古气候条件等。Ⅱ⑤区包括吉林万宝盆地和新疆哈密盆地,两个相距很远的植物群被聚为一类,与Ⅱ④中情况较为类似,在大地构造背景并不一致的情况下,可能是由于植物特性和区域古气候条件相互作用的结果。

由上述分析可知,甘肃窑街中侏罗世植物群与内蒙古高头窑植物群系较为亲近,这两个植物群可划归为西伯利亚植物区下属的一个小型植物地理单元。由于中国南北方植物区之间的界线与西伯利亚植物区和欧洲—中国植物区的分界线一致,可推测西伯利亚植物区与欧洲—中国区的分界线在窑街植物群以南。

5.2 窑街植物群亲缘关系分析

分支生物地理学方法可判断各纲植物的亲缘关系,借此来判断各个植物群之间的亲缘关系,同时也可对上述分析结果进行一定的验证。在综合考虑聚类分析区划后,选取了内蒙古石拐(Ge Yuhui et al., 2010)、内蒙古高头窑(Ge Yuhui et al., 2004)这两个植物群,利用分支生物地理法与甘肃窑街植物群进行对比分析,讨论其亲缘关系。由于研究程度及地质年代限制,当前研究仅挑选几个代表性属种的系统关系来进行讨论,具体分析如下:

(1) 锥叶蕨属(*Coniopteris*)植物在出现初期植物体较小,羽轴纤弱,小羽片也较小,末次羽片下行基部无线形变态小羽片,随着时间的推移才逐渐变得粗壮,同时变态小羽片也逐渐演变完善(Deng Shenghui et al., 2001)。*Coniopteris simplex*、*C. tatungensis* 小羽片纤细,近于卵形,全缘,末次羽片下行基部无线形变态小羽片,可认为是较为原始的属种,同时 *C. hymenophylloides*、*C. burejensis* 二者变态小羽片发育,小羽片、羽轴也较 *C. simplex*、*C. tatungensis* 大,分裂程度也更高,可认为是较为进化的属种。在此基础上结合这四种锥叶蕨植物的分布(图 8a),推测甘肃窑街植物群与内蒙古高头窑植物群更为亲近。

(2) 银杏类植物在甘肃窑街植物群中较为繁盛,Zhou Xingwen(2006)得出银杏类植物演化总趋势是向着叶裂片由窄变宽,利于光合作用的方向发展,认为宽裂片型的似银杏属(*Ginkgoites*)较无裂型的银杏属(*Ginkgo*)原始,在此基础上结合这两属植物的分布(图 8b),也可推出甘肃窑街植物群与内蒙古

高头窑植物群更为亲近。
综上所述,在甘肃窑街、内蒙古高头窑和内蒙古石拐三个植物群中,甘肃窑街与高头窑植物群亲缘关系更近(图 8c),而这一结果与聚类分析所得结果一致,也从侧面印证了此前甘肃窑街古植物地理归属的定量结果具有一定参考价值。

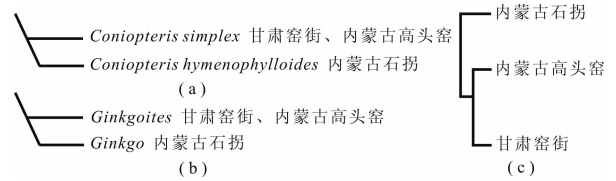


图 8 植物群分支生物地理分析
Fig. 8 Biogeographic analysis of plant group branch

5.3 基于屈囊蕨属的地理分布验证区划结果

在植物化石采集过程中,发现了一蕨类植物化石,经鉴定为蚌壳蕨科屈囊蕨属山西屈囊蕨(*Gonatosorus shansiensis*),其在窑街盆地窑街组地层尚属首次发现。屈囊蕨属蕨叶二次羽状分裂,羽片线形,互生,小羽片枝脉蕨型,基部下排小羽片变态成两瓣状,目前在中国已发现 4 种,记录较少。根据前人研究资料(Sun Keqin et al., 2010),结合国家岩矿化石标本资源共享平台的数据,中国中生代的屈囊蕨属只在中侏罗世(J₂)和早白垩世(K₁)存在(图 9)。

(1) 中国中生代屈囊蕨属植物仅分布于北方地区,南方地区尚无记录。此种现象并不独特,同属蚌壳蕨科的 *Acanthopteris*(刺蕨属)也仅限于中国北方地区和西伯利亚地区分布(Deng Shenghui, 2007)。此两属植物都只分布于中国北方及其以北地区,推测原因可能是:在中侏罗世,蚌壳蕨科繁盛,具有广阔的生境,但此两属植物适应于湿润—半湿润的暖温带、亚热带气候,而当时我国受此种气候条件控制的区域是中国北方,南方则为干旱—半干旱气候(Deng Shenghui et al., 2017),不适宜刺蕨属与屈囊蕨属植物生长;在早白垩世,蚌壳蕨科植物以温暖潮湿的西伯利亚—加拿大区为分布中心,在热带、亚热带或较干旱地区罕见,而中国北方属于西伯利亚植物区南部,可以解释此种现象。

(2) 从中侏罗世到早白垩世,中国屈囊蕨属植物的分布区从西北地区中部和华北地区逐渐转移到东北地区,表现出逐渐向北推进的趋势。①早、中侏罗世南北差异扩大,北方向温暖湿润气候转变,中侏罗世后期到晚侏罗世乃至早白垩世早期,除东北的局

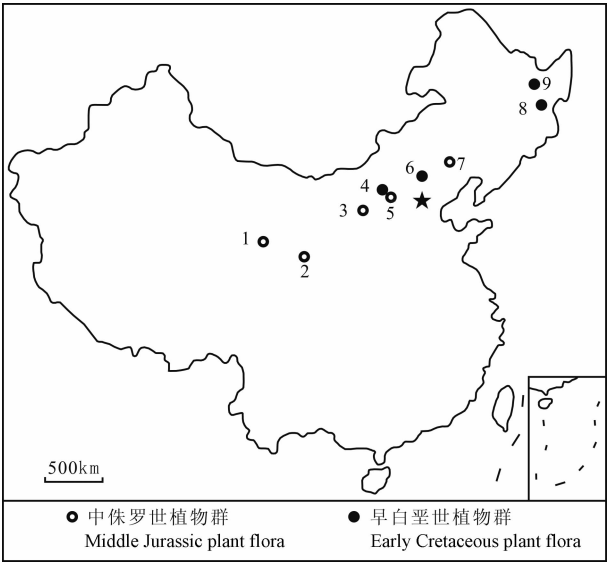


图 9 中国中生代屈囊蕨属分布图

Fig. 9 Distribution of *Goniatosorus* from Mesozoic in China

- 1—青海柴达木盆地东北缘;2—甘肃窑街盆地;3—山西大同;
4—河北张家口;5—河北下花园;6—河北丰宁;7—内蒙古宁城道
虎沟;8—黑龙江鸡西盆地;9—黑龙江双鸭山
1—Qaidam, Qinghai; 2—Yaojie, Gansu; 3—Datong, Shanxi;
4—Zhangjiakou, Hebei; 5—Xiahuayuan, Hebei;
6—Fengning, Hebei; 7—Daohugou, Inner Mongolia;
8—Jixi, Heilongjiang; 9—Shuangyashan, Heilongjiang

部外,全国普遍干旱或半干旱,出现沙漠化(Deng Shenghui et al., 2017)。植物具有各自的生理特性,对某种特定的气候类型具有稳定的适应现象,且蕨类植物在进化上具有保守性(Hao Yunqing et al., 2009),而蚌壳蕨科植物反映温暖潮湿气候或生境。因此可以解释上述现象为植物对古气候变化的响应。②燕山运动贯穿中侏罗世到早白垩世,晚侏罗世至早白垩世早期的燕山造山带发生不同程度的垮塌,发育了一系列相互平行的 NNE 向巨型伸展带及裂谷或断陷盆地群。早白垩世中、晚期继承并增强了晚侏罗世一早白垩世早期的伸展作用,中国大陆普遍发育区域性裂谷—断陷盆地群。早白垩世末期,区域性伸展和裂谷环境辐射到东北亚俄罗斯远东地区,为屈囊蕨属植物向东北方迁移提供了通道。

(3)中侏罗世时期屈囊蕨属植物分布稀疏,但在山西大同、甘肃窑街以及青海柴达木盆地都有发现,这三个植物群恰好分属本文所示区划中的三个比邻小区Ⅱ①、Ⅱ②、Ⅱ③,同属于大区Ⅱ区,分区较为相近,进一步验证了本文所作区划的合理性。

综上所述,中国中生代屈囊蕨属植物主要分布于北方地区,并且从中侏罗世到早白垩世,从西北地

区中部和华北地区逐渐转移到东北地区,表现出逐渐向北推进的趋势,而这种趋势也与中侏罗世至早白垩世潮湿气候带分布变化趋势吻合(Deng Shenghui et al., 2017)。同时其地理分布指示的植物地理区划主要集中在同一个大区比邻的小区Ⅱ①、Ⅱ②、Ⅱ③,其结果与上述两种方法所得结论基本相吻合,表明本文的植物地理区划结果具有一定的参考价值。

6 结论

(1)本文研究的甘肃窑街组含丰富的植物化石,经过系统的采集、分类和鉴定,并结合前人研究资料,共有植物化石 31 属 63 种,包括在窑街组新发现的 *Goniatosorus shansiensis*。植物群由银杏类(36.5%)、真蕨类(22.2%)、松柏类(17.5%)、苏铁(15.9%)和楔叶类(6%)组成,银杏类和真蕨类最为繁盛,松柏类和苏铁类次之,楔叶类较为贫乏,种子蕨类没有代表。

(2)从植物群的组成比例、植物群组成分子的时代指示和与国内外同期其它植物群的对比,认为窑街组植物群的地质时代为中侏罗世早中期,即(Aalenian-Bajocian)阿林期至巴柔期。

(3)利用聚类分析法和分支生物地理分析法,结合屈囊蕨属植物在中国中生代的分布特征,探讨中侏罗世中国北方植物地理区系的划分以及窑街植物群的植物地理归属问题。结果显示甘肃窑街中侏罗世植物群与内蒙古高头窑植物群关系较为亲近,这两个植物群可划归为西伯利亚植物区下属的一个小型植物地理单元,表明西伯利亚植物区与欧洲—中国区的分界线在窑街植物群以南。

References

Cao Tingli, Cheng Cheng, Li Shuangying, Pang Changxing, Wei Xing. 2017. Clay Mineral Characteristics of Permian Carbonate Rocks in Zhen' an Area, Shanxi Province and its Paleoclimate Significance. *Geological Review*, 63(02): 363~374 (in Chinese with English abstract).
Chen Fen, Dou Yawei, Yang Guanxiu. 1980. The Jurassic Mengtougou~Yudaishan Flora from Western Yanshan, North China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 19(06): 3~12+95~97 (in Chinese with English abstract).
Deng Shenghui. 2007. Palaeoclimatic Implications of Main Fossil Plants of the Mesozoic. *Journal of Palaeogeography*, 9(6): 559~574 (in Chinese with English abstract).
Deng Shenghui, Chen Fen. 2001. The Early Cretaceous Filicopsida from northwest China. Beijing: Geological Publishing House, 76~108. (in Chinese with English abstract).
Deng Shenghui, Lu Yuanzheng, Zhao Yi, Fan Ru, Wang Yongdong, Yang Xiaojun, Li Xing, Sun Bainian. 2017. The Jurassic Palaeoclimate Regionalization and Evolution of China. *Earth Science Frontiers*, 24(1): 106~142 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Ezequiel I V. 2013. New cyathealean tree fern, Yavanna chimaerica gen. et sp. nov., from the Early Cretaceous of Livingston Island, Antarctica. *Cretaceous Research*, 44: 214~222.
- Ge Yuhui, Sun Chunlin, Liu Maoxiu. 2004. Discovery of Middle Jurassic flora from Gaotouyao area in Northeastern margin of Erdos Basin. *Global Geology*, 23(2): 107~111 (in Chinese with English abstract).
- Ge Yuhui, Sun Chunlin, Wang Yufen. 2010. The flora from Zhagou Formation in Shiguai Basin, Inner Mongolia and the geological age. *Global Geology*, 29(2): 175~182 (in Chinese with English abstract).
- Glasspool I J, Hilton J, Collinson M E. 2004. Foliar physiognomy in Cathaysian gigantopterids and the potential to track Palaeozoic climates using an extinct plant group. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 205(1): 69~110 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xianpu, Wang Daning, Ding Xiaozhong, Zong Wenming, Zhou Wei. 2011. Early~Middle Cretaceous sporopollen assemblages and new progress on biogeography in the North part of Tarim Basin. *Geological review*, 7(6): 870~880 (in Chinese with English abstract).
- Hao Yunqing, Jiang Hong, Yu Shuquan, Jin Jing, Ma Yuandan. 2009. Evolutionary conservatism of floristic characteristics of relict *Alsophila spinulosa* community. *Acta ecologica sinica*, 29(8): 4102~4111 (in Chinese with English abstract).
- Harris T M. 1969. The Yorkshire Jurassic Flora. III. Bennettiales. *British Museum (Natural History)*, 1~204.
- Jiang Zikun, Wang Yongdong, Tian Ning, Zhang Wu, Zheng Shaolin. 2016. Paleoclimate and Paleoenvironment implications of the Middle-Late Jurassic Tiaojishan Formation, Western Liaoning Province: Evidence from Fossil Wood Date. *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 1669~1678 (in Chinese with English abstract).
- Kostina E I, Herman A B. 2013. The Middle Jurassic flora of South Mongolia: composition, age and phytogeographic position. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 193: 82~98.
- Kostina E I, Herman A B, Kodrul T M. 2015. Early Middle Jurassic (possibly Aalenian) Tsagan~Ovoo Flora of Central Mongolia. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 220: 44~68.
- Li Jianguo, Zhang Yiyong, Cai Huawei, Guo Zhenyu, Wan Xiaoqiao. 2008. Cretaceous and Paleogene Palynological Successions at Zhongba, Tibet and Its Significance. *Acta geologica sinica*, 82(5): 584~593 (in Chinese with English abstract).
- Li Peijuan, He Yuanliang, Wu Xiangwu, Mei Shengwu, Li Bingyou. 1988. Early and Middle Jurassic Strata and Their Floras from Northeastern Border of Qaidam Basin, Qinghai. *Jiangsu Nanjing: Nanjing University Press*, 1~231 (in Chinese with English abstract).
- Li Xingxue, Wu Yiming, Fu Zaibin. 1985. Preliminary study on a mixed Permian flora from Xiagangjiang Gerze district Xinjiang and its palaeobiogeographic significance. *Acta Palaeontologica Sinica*, 24(2): 24~44 + 145~148 (in Chinese with English abstract).
- Lin Heping, Sun Chunlin, Yuan Qingyang. 1993. The application of robust principal component analysis to Early Jurassic floristic division of Eurasia continent. *Journal of Changchun University of Earth sciences*, 23(2): 219~223 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yan, Li Lu. 2006. Preliminary Analysis on the Similarity Coefficient Study of Representative Jurassic Floras from China. *Chinese Bulletin of Botany*, 23(4): 380~388 (in Chinese with English abstract).
- MacLeod S E, Hills L V. 1991. Worldwide stratigraphic and geographic distribution of selected Jurassic~Cretaceous plant macrofossils and their significance to the northern Bowser Basin, British Columbia, Canada. *Review of palaeobotany and palynology*, 70(1~2): 47~65.
- Miao Huixin, Zhang Jiaodong, Zhou Xingui, Liu Deliang, Li Zhensheng, Song Licai, Zeng Qunan, Liu Xufeng, Bi Caiqin, Sun Fuli. 2018. Characteristics and Age Assignment of the Spore-Pollen Assemblages of Pre-Jurassic Basement Strata in Well Ancan-1, Hefei Basin. *Acta Geologica Sinica*, 92(3): 466~481 (in Chinese with English abstract).
- Quan Cheng, Zhou Zhiyan. 2010. Occurrence of Oligocene *Ginkgo* megafossils from Heilongjiang Province and its paleophy to geographic significance. *Acta Palaeontologica Sinica*, 49(4): 439~442 (in Chinese with English abstract).
- Si Xingjian. 1959. Jurassic flora of Qaidam, Qinghai. *Acta Palaeontologica Sinica*, 7(1): 3~34 (in Chinese with English abstract).
- Si Xingjian. 1956. The fossil flora of the Mesozoic oil-bearing deposits of the Dzungaria-basin, Northwestern Sinkiang. *Acta Palaeontologica Sinica*, 4(4): 461~476 (in Chinese with English abstract).
- Sun Bainian. 1986. A Preliminary Study of Middle Jurassic Fossil Plants from Yaojie Coal-Field of Lanzhou. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 22(1): 113~118. (in Chinese with English abstract).
- Sun Fusheng. 1989. On Subdivision of Angara floral province in Light of cluster analysis. *Acta Palaeontologica Sinica*, 28(6): 773~785 (in Chinese with English abstract).
- Sun Ge. 1987. Geographic regionalization of Late Triassic geofloras in China and principles for palaeophytogeographic division. *Acta geologica sinica*, 1(1): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Sun Ge, Miao Yuyan, Mosbrugger V. 2010. The Upper Triassic to Middle Jurassic strata and floras of the Junggar Basin, Xinjiang, Northwest China. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 90(3): 203~214.
- Sun Keqin, Shi Xiaoying, Cui Jinzhong. 2000. Phytogeographical Provinces of the Carboniferous and Permian in the World. *Beijing: Chinese Bulletin of Botany*, 17(3): 193~203 (in Chinese with English abstract).
- Sun Keqin, Cui Jinzhong, Wang Shijun. 2010. Fossil Flora of China (Volume 2): Fossil Pteridophytes in China, Higher Education Press, 179~295 (in Chinese with English abstract).
- Tao Junrong. 1981. Succession of the floras in Xizang during Upper Cretaceous paleogene and neogene. *Acta botanica sinica*, 23(2): 58~63 (in Chinese with English abstract).
- Vakhrameev V A, Hughes N F. 1991. Jurassic and Cretaceous floras and climates of the Earth. *Cambridge University Press*, 1~318.
- Wang Jin, Liu Chunhui, Mao Teng, Yuan Xiucui, Li Yijie, Sun Bainian. 2017. Characteristics of biomarkers of middle Jurassic source rocks and fossil cuticles from Yaojie Basin, Gansu Province. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 53(4): 427~435 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jun, Zhang Quanxing, Shen Xinglong. 1999. Permian phytogeography of Cathaysian flora in China in the Light of cluster analysis. *Acta Palaeontologica Sinica*, 38(4): 530~543 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yongdong, Tian Ning, Jiang Zikun, Mei Shengwu. 2009. Recent progresses on the studies of fossil ferns from the early Jurassic Hsiangchi flora in northwest Hubei, China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 48(3): 527~540 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zixi, Wang Xuelian, Chen Jingwei. 2015. *Elatides sandaolingensis* sp. (Cupressaceae sensu lato)-A new fossil conifer with cones from the Middle Jurassic of Xinjiang, northwestern China. *Palaeoworld*, 25(2): 239~250.
- Xin Cunlin, Chen Shiwei, Du Weidong, Wei Ming. 2011. Relationship between spore in situ and dispersed spore of *Coniopteris margaretae* of the middle Jurassic from Yaojie, Gansu province. *geological science and technology information*, 30(5): 36~40 (in Chinese with English abstract).
- Xin Cunlin, Sun Bainian, Wei Lijie, Xiao Liang. 2006. Sporopollen

assemblage of the Middle Jurassic period from Yaojie, Gansu and its paleoenvironmental significance. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 42(3): 8~13 (in Chinese with English abstract).

Xin Cunlin, Wei Ming, Meng Jian, Chen Shiwei, Du Weidong. 2010. Relationship between in situ pollen of *pityostobus* sp. and dispersed pollen in Jurassic of Yaojie, Gansu. Acta Micropalaeontologica Sinica, 27(1): 85~91 (in Chinese with English abstract).

Yan Defei, Sun Bainian. 2004. The discovery of *Solenites murrayana* L. et H. in Yaojie Coal Filed, Gansu and its geological significance. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 40(3): 84~88(in Chinese with English abstract).

Zhang Fade, Tong Haikui. 2012. Discussion of plants fossils and its geological ages of the Lower~Middle Jurassic in Mangya area, Qinghai province. Northwest Geology, 45(1): 86~93 (in Chinese with English abstract).

Zhang Guishuang, Xie Mingzhong. 2015. Study on Jurassic Coal Measures in Inner Mongolia Uplift and Its South Margin. Coal Geology of China, 27(02): 6~12, 25 (in Chinese with English abstract).

Zhang Mingli. 2000. Historical biogeography: theory and method. Earth Science Frontiers, 7(s2): 33~44 (in Chinese with English abstract).

Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Zhao Yue, Zhang Tian. 2007. Jurassic Tectonics of North China: a Synthetic View. Acta geologica sinica, 81(11): 1462~1480 (in Chinese with English abstract).

Zhou Xingwen. 2006. Development and Evolution of Leaves of *Ginkgo Biloba*. Journal of Shenyang University, 18(4): 83~86 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

曹婷丽, 程成, 李双应, 庞长兴, 魏星. 2017. 陕西镇安二叠系碳酸盐岩粘土矿物特征及其对古气候的指示. 地质论评, 63(02): 363~374.

陈芬, 窦亚伟, 杨关秀. 1980. 燕山西段侏罗纪门头沟—玉带山植物. 古生物学报, 19(06): 3~12+95~97.

邓胜徽. 2007. 中生代主要植物化石的古气候指示意义. 古地理学报, 9(6):559~574.

邓胜徽, 陈芬. 2001. 中国东北地区早白垩世真蕨类植物. 地质出版社, 76~108.

邓胜徽, 卢远征, 赵怡, 樊茹, 王永栋, 杨小菊, 李鑫, 孙柏年. 2017. 中国侏罗纪古气候分区与演变. 地学前缘, 24(1): 106~142.

葛玉辉, 孙春林, 刘茂修. 2004. 鄂尔多斯盆地东北缘高头窑地区中侏罗世植物群的发现. 世界地质, 23(2):107~111.

葛玉辉, 孙春林, 王玉芬. 2010. 内蒙古石拐盆地召沟组植物群及地质时代. 世界地质, 29(2): 175~182.

郭宪璞, 王大宁, 丁孝忠, 宗文明, 周玮. 2011. 塔里木盆地北部早—中白垩世孢粉时代和生物地理区系研究新进展. 地质论评, 57(6):870~880.

郝云庆, 江洪, 余树全, 金静, 马元丹. 2009. 桫欏植物群落区系进化保守性. 生态学报, 29(8): 4102~4111.

蒋子堃, 王永栋, 田宁, 张武, 郑少林. 2016. 辽西北票中晚侏罗世髯髯山组木化石的古气候、古环境和古生态意义. 地质学报, 90(8): 1669~1678.

李建国, 张一勇, 蔡华伟, 郭震宇, 万晓樵. 2008. 西藏仲巴白垩纪~古近纪孢粉组合及其意义. 地质学报, 82(5): 584~593.

李佩娟, 何元良, 吴向午, 梅盛吴, 李炳有. 1988. 青海柴达木盆地

东北缘早, 中侏罗世地层及植物群. 南京: 南京大学出版社, 1~231.

李星学, 吴一民, 付在斌. 1985. 西藏改则县夏岗江二叠纪混合植物群的初步研究及其古生物地理区系意义. 古生物学报, 24(2): 24~44+145~148.

林和平, 孙春林, 苑清扬. 1993. 应用稳健主成分分析研究欧亚大陆早侏罗世植物区系分区. 长春地质学院学报, 23(2): 219~223.

刘艳, 李录. 2006. 中国主要侏罗纪植物群相似性系数的初步研究. 植物学报, 23(4): 380~388.

苗慧心, 张交东, 周新桂, 刘德良, 李振生, 宋立才, 曾秋楠, 刘旭锋, 毕彩芹, 孙福利. 2018. 合肥盆地安参 1 井前侏罗纪基底地层的孢粉组合特征与时代归属. 地质学报, 92(03): 466~481.

全成, 周志炎. 2010. 黑龙江渐新世银杏大化石及其古气候和植物地理意义. 古生物学报, 49(4): 439~442.

斯行健. 1959. 青海柴达木侏罗纪植物群. 古生物学报, 7(1): 3~34.

斯行健. 1956. 新疆西北部准噶尔盆地中生代含油地层的植物群. 古生物学报, 4(4):461~476.

孙柏年. 1986. 兰州窑街煤田中侏罗世植物化石的初步研究. 兰州大学学报, 22(1): 113~118.

孙阜生. 1989. 用聚类分析方法探讨晚二叠世安加拉植物地理区的内部划分. 古生物学报, 28(6): 773~785.

孙革. 1987. 论中国晚三叠世植物地理分区及古植物分区原则. 地质学报, 1(1): 1~9.

孙克勤, 史晓颖, 崔金钟. 2000. 全球石炭纪和二叠纪植物地理分区. 植物学报, 17(3): 193~203.

孙克勤, 崔金钟, 王士俊. 2010. 中国化石植物志(第二卷)中国化石蕨类植物. 北京: 高等教育出版社, 179~295.

陶君容. 1981. 西藏地区晚白垩纪以来植物区系的发展. 植物生态学报(英文版), 23(2): 58~63.

王瑾, 刘春辉, 毛腾, 袁修财, 李义杰, 孙柏年. 2017. 甘肃窑街中侏罗统植物化石角质层与烃源岩生物标志化合物特征. 兰州大学学报(自科版), 53(4):427~435.

王军, 张全兴, 沈光隆. 1999. 用聚类分析法探讨中国二叠纪华夏植物群的植物地理区划. 古生物学报, 38(4):530~543.

王永栋, 田宁, 蒋子堃, 梅盛吴. 2009. 鄂西早侏罗世香溪植物群真蕨植物群研究进展. 古生物学报, 48(3):527~540.

辛存林, 陈世伟, 都卫东, 魏明. 2011. 甘肃窑街中侏罗世 *Coniopteris margaretae* 的原位孢子与分散孢子的关系. 地质科技情报, 30(5): 36~40.

辛存林, 孙柏年, 韦利杰, 肖良. 2006. 甘肃窑街中侏罗世孢粉组合及其古环境意义. 兰州大学学报, 42(3): 8~13.

辛存林, 魏明, 孟健, 陈世伟, 都卫东. 2010. 甘肃窑街侏罗纪 *Pityostrobus* sp. 的原位花粉与分散花粉的关系. 微体古生物学报, 27(1):85~91.

阎德飞, 孙柏年. 2004. *Solenites murrayana* L. et H. 在甘肃窑街煤田的发现及其地质意义. 兰州大学学报, 40(3): 84~88.

张发德, 童海奎. 2012. 青海茫崖地区中—下侏罗统植物化石与时代讨论. 西北地质, 45(1): 86~93.

张贵双, 谢明忠. 2015. 内蒙古隆起及其南缘侏罗纪煤系研究. 中国煤炭地质, 27(02): 6~12, 25.

张明理. 2000. 历史生物地理学的理论和方法. 地学前缘, 7(s2): 33~44.

张岳桥, 董树文, 赵越, 张田. 2007. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新认识. 地质学报, 81(11): 1462~1480.

周兴文. 2006. 银杏(*Ginkgo biloba*)叶的形态发育与演化. 沈阳大学学报, 18(4): 83~86.

Geological age and paleogeographical study of the
Yaojie Flora in Gansu Province

XIN Cunlin* , WANG Luhan, JI Jianjian, ZHANG Yamei, WANG Jingjing

College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou, 730070

* Corresponding author: xincunling@163.com

Abstract

The paleoflora of the Yaojie Formation in Gansu Province and its paleogeographcial features were studied in this paper. A total of 31 genera including 63 species were identified, including newly discovered *Gonatosorus shansiensis*. Ginkgopsida (36.5%) and Filicopsida (22.2%) are most abundant, and Coniferopsida (17.5%) and Cycadopsida (15.9%) are less abundant, followed by Sphenoposida (6%) and Fructus et Semina (1.9%). On the basis of fossil compositions and time characteristics indicated by the flora, comparison with some similar floras at home and abroad, suggest that the geological age of the Yaojie Formation should belong to the Aalenian to Bajocian period. The cluster analysis was employed to compare the Yaojie flora of Gansu with other 11 flora from northern China to discuss the geographic attribution of the Yaojie flora, and the Middle Jurassic flora in northern China was preliminarily classified. In addition, the branch biogeographic method was used to analyze the affinity relation of the Yaojie flora. The results show that the Middle Jurassic Yaojie flora has close affinity to the Gaotouyao flora in Inner Mongolia. This study also investigated the geographical distribution characteristic of the genus *Gonatosorus* in the Mesozoic of China, which was newly discovered Yaojie of Gansu. It is basically in agreement to the division of the Middle Jurassic in northern China. The results show that Yaojie flora belongs to the Siberian flora region and has a close relationship with Gaotouyao flora in Inner Mongolia, the two floras can be classified as a small plant subordinate in Siberian flora region, and the boundary between the Siberian and Europe-China flora region is supposed in the south of Yaojie flora.

Key words: Yaojie Formation; Middle Jurassic; palaeoflora; the geological age; paleogeography