

冀北—辽西地区侏罗—白垩纪之交期的孢粉植物群演替与古气候变化

王大宁, 王旭日, 季 强*

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘 要: 本文根据冀北—辽西地区侏罗—白垩纪之交期孢粉植物群的地层分布, 划分了 9 个孢粉植物群组合带(自下而上): “桫欏孢-苏铁粉-克拉梭粉”组合带、“克拉梭粉”组合带、“无突肋纹孢-漆平孢-纵肋单沟粉”组合带、“云杉粉-层环孢-无突肋纹孢-膜环弱缝孢”组合带、“云杉粉-无突肋纹孢-凹边瘤面孢”组合带、“辽西孢-刺毛孢-克拉梭粉”组合带、“刺毛孢-有突肋纹孢-无突肋纹孢-三孔孢”组合带、“三角孢-无突肋纹孢-有突肋纹孢”组合带和“无突肋纹孢-克拉梭粉-希指蕨孢-麻黄粉”组合带; 重建了该区当时的古气候和古环境, 认为中侏罗世时期该区处于温暖湿润气候下的低山丘陵环境, 晚侏罗世时期处于干旱气候下的荒原环境, 早白垩世早期处于温凉湿润气候下的低山环境, 早白垩世中期处于温凉湿润气候下的高山环境, 早白垩世晚期处于温暖湿润气候下的低地沼泽环境, 早白垩世最晚期处于干热气候下的低地环境。此外, 本文还根据该区侏罗—白垩纪之交期生物群演化和更替的特征, 提出了“避难所”理论模式。

关键词: 侏罗—白垩纪; 孢粉植物群演替; 古气候变化; 冀北—辽西地区; 中国

中图分类号: P534.52; Q914.81 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2016.04.07

The Palynoflora Alternation and the Paleoclimate Change at the Turning Time between Late Jurassic and Early Cretaceous in Northern Hebei and Western Liaoning

WANG Da-ning, WANG Xu-ri, JI Qiang*

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: According to the stratigraphic distribution of the palynoflora at the turning time of the Jurassic–Cretaceous in northern Hebei and western Liaoning, nine sporopollen assemblage zones can be recognized, which are in ascending order of “*Cyathidites–Cycadopites–Classopollis*” Assemblage Zone, “*Classopollis*” Assemblage Zone, “*Piceites–Podocarpidites–Schizaeoisporites*” Assemblage Zone, “*Cicatricosisporites–Luanpingspora–Jugella*” Assemblage Zone, “*Piceapollenites–Densosporites–Cicatricosisporites–Aeguitriradites*” Assemblage Zone, “*Piceapollenites–Cicatricosisporites–Concavissimisporites*” Assemblage Zone, “*Liaoxisporites–Pilosisporites–Classopollis*” Assemblage Zone, “*Pilosisporites–Appendicisporites–Cicatricosisporites–Triporoletes*” Assemblage Zone, “*Deltoidospora–Cicatricosisporites–Appendicisporites*” Assemblage Zone and “*Cicatricosisporites–Classopollis–Schizaeoisporites–Ephedripites*” Assemblage Zone. Based on the sporopollen assemblages, the authors reconstructed the paleoclimate and paleoenvironment of the study area: warm and humid low mountains and hills in Middle Jurassic, arid wastelands in Late Jurassic, cool and damp low mountains in the early stage of Early Cretaceous, cool and damp high mountains in the middle stage of Early Cretaceous, warm and humid low lands

本文由国家科学技术部 973 项目(编号: 2006CB701405; 2012CB822004)和中国地质调查局地质调查项目(编号: 12120114026801)联合资助。

收稿日期: 2015-12-15; 改回日期: 2016-05-17。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 王大宁, 男, 1936 年生。研究员。主要从事中生代和新生代孢粉地层学研究。

*通讯作者: 季强, 男, 1951 年生。博士生导师, 研究员。主要从事古生物学和地层学研究工作。E-mail: jirod@cags.ac.cn。

and fenlands in the late stage of Early Cretaceous and xerothermic low lands in the latest stage of Early Cretaceous. In addition, this paper proposes a “sanctuary” model for the biota alternation at the turning time between Late Jurassic and Early Cretaceous.

Key words: Jurassic–Cretaceous; palynoflora; paleoclimate change; northern Hebei-western Liaoning region; China

1 孢粉植物群演化与古气候变化

1.1 早白垩世古气候带与古植物地理区系

众所周知,生物的生存和发展与环境条件的变化是密不可分的,是相互影响和制约的。就植物而言,气候带和气候条件则是控制它们生长和分布的主要因素之一,不同的气候带和气候条件会发育出各具特色的植物类群。因此,人们常常根据不同的古植物群特征来恢复或再造各地质时期的古气候和古环境。由于孢子花粉是植物的生殖细胞组织,在遗传基因上具有很强的稳定性,可直接反映母体植物的许多重要属性和特征,因此在恢复古植物群的原来面貌,从而在再造当时的古气候和古环境中具有较高的可靠性。

Brenner(1976)将全球早白垩世孢粉植物群分为4个区,即北劳亚区、南劳亚区、北冈瓦纳区和南冈瓦纳区。北劳亚区位于现代北纬60°附近地区,以具气囊松科花粉占优势为特征,有时罗汉松科花粉亦较常见;南劳亚区包括了现代北半球的中纬度地区,以喜湿热的海金沙科、里白科的孢粉最丰富,也见有一些喜干热的克拉梭粉(*Classopollis*);北冈瓦纳区指现代南美洲和非洲北海岸到赤道以南的一些地区,以麻黄类(*Ephedripites*)孢粉最丰富,有些地区含有一些盔形粉(*Galeacornea*)等地区性特有分子;南冈瓦纳区包括南美洲、非洲的南部地区、澳大利亚、新西兰、印度等,以产有丰富的罗汉松科两气囊花粉,以及较多三气囊粉为特色。

Srivastava(1978)将全世界早白垩世孢粉植物群花粉分为3个区。植物地理区I包括了西北利亚北部、阿拉斯加和加拿大北部地区,以不含喜干热的克拉梭粉为特征;植物地理区II指南美洲北部和非洲北部地区,以含有丰富的伊特拉斯双手粉(*Dicheiropollis etruscus*)为特征;植物地理区III包括欧洲、北美洲大部分地区、亚洲大部分地区、南极洲、澳大利亚、南美洲南部、东非和南非等地区,以含有丰富的克拉梭粉为特征。

Herngreen 和 Chlonova(1981)将全球早白垩世孢粉植物群分为3个大区:北方大区、西非—南美大区和冈瓦纳大区。北方大区包括了除意大利、印度和中南半岛南部以外的整个北半球地区,以含有丰富的蕨类植物孢子和双气囊花粉为特征;西非—

南美大区包括了非洲赤道以北与南纬20°以北的地区、南美洲以及意大利等地区,以含有大量的克拉梭粉(*Classopollis*),以及相当数量的南洋杉粉(*Araucariacites*)、无口器粉(*Inaperturopollenites*)、麻黄粉(*Ephedripites*)及假杜仲粉(*Eucommiidites*)为特征,蕨类植物孢子很少见,双气囊粉很少或没有。冈瓦纳大区包括澳大利亚、新西兰、非洲南部及北半球的印度等地区以产有丰富的具囊松柏类花粉、无口器粉、冠翼粉(*Callialasporites*)、单沟粉(*Monosulcites*)等为特征,罗汉松粉有较稳定的含量,克拉梭粉、麻黄粉及假杜仲粉等很少见。

黎文本(1983)将中国早白垩世孢粉植物群划分为两个性质完全不同的植物区:北方的双囊粉(*Disaccitriletes*)-无突肋纹孢(*Cicatricosisporites*)孢粉植物区和南方的克拉梭粉(*Classopollis*)-希指蕨孢(*Schizaeoisporites*)孢粉植物区。总体来看,北方孢粉植物区的特征是含有大量的双气囊松柏类花粉和丰富多彩的海金沙科孢子,反映了温暖湿润的气候,而南方孢粉植物区的特征是含有大量以克拉梭粉为代表的旱生植物,反映了干热的气候。这两个植物区的分界线大致位于北纬40°~45°之间呈NWW—SEE走向的地带。

1.2 指示性孢粉植物类型

为了更有效地反映地质时期孢粉植物群与古气候的关系,有必要对一些在古气候和古环境再造中具有明显指示意义的孢粉类型进行分析,将今论古,合理推断,才能准确认识和恢复当时的古气候和古环境特征。

1.2.1 蕨类植物

现代蕨类植物广布于世界各地,但多分布于热带和亚热带地区,生长在温暖、阴湿的森林环境、低洼地带或沼泽,其含量的多寡可作为温暖、湿润气候和环境的重要标志之一。

海金沙科是我国早白垩世蕨类植物的主要代表之一,是一类典型反映热带、亚热带湿热气候的植物,常见分子有无突肋纹孢(*Cicatricosisporites*)、有突肋纹孢(*Appendicisporites*)、海金沙孢(*Lygodiumsporites*)、凹边瘤纹孢(*Concavissimisporites*)、非均饰孢(*Impardicispora*)、克鲁克孢(*klukisporites*)、刺毛孢(*Pilosporites*)、斑纹孢(*Maculatisporites*)、具唇孢(*Toroisporis*)、瘤面

海金沙孢(*Lygodioisporites*)等。

桫欏科(*Cyatheaceae*)和蚌壳蕨(*Dicksoniaceae*)主要生长于热带、亚热带潮湿环境,是反映热带、亚热带湿热气候的分子,早白垩世的常见分子有沙罗孢(*Cyathidites*)、金毛狗孢(*Cibotiumspora*)、梳皱孢(*Tripartina*)等。

卷柏科(*Selaginellaceae*)在各气候带均可有分布,多生长在林下、溪边、湿地及阴湿岩石上,是反映沼泽或阴湿环境的植物,我国早白垩世常见分子有膜环弱缝孢(*Aeguitriradites*)、层环孢(*Densoisporites*)、徐氏孢(*Hsuisporites*)、新叉瘤孢(*Neoraistrickia*)、三角刺面孢(*Acanthotriletes*)等。

水龙骨科(*Polypodiaceae*)和里白科(*Gleicheniaceae*)主要生长在热带、亚热带潮湿地区,现在分布在长江以南各省,常见者有里白孢(*Gleicheniidites*)、水龙骨单缝孢(*Laevigatosporites*)等,后者是沼泽环境的代表性分子。

莎草蕨科(*Schizaeaceae*)现在主要分布于澳大利亚、太平洋东部、我国海南岛、台湾和雷州半岛、南半球热带较干燥地区,是炎热干旱气候环境的产物,化石分子主要是希指蕨孢(*Schizaeoisporites*)。

1.2.2 裸子植物

具囊松柏类花粉以松科(*Pinaceae*)和罗汉松科(*Podocarpaceae*)植物为主,主要分布于暖温带,是温带湿润环境的常绿乔木。松科花粉的含量较高常反映了温暖湿润的气候环境,常见分子有双束松粉(*Pinuspollenites*)、单束松粉(*Abietinaepollenites*)、云杉粉(*Piceapollenites*)、雪松粉(*Cedripites*)、冷杉粉(*Abiespollenites*)、油杉粉(*Keteleeriaepollenites*)、冠翼粉(*Callialasporites*)等。

克拉梭粉类(*Classopollis*)植物是晚中生代的重要分子,与已灭绝的掌鳞杉科(*Cheirolepidaceae*)有亲缘关系,其叶片革质鳞片状,可以减少水分蒸发,是典型的干热气候环境的指示性植物。南美、中东、北非等地的早白垩世地层中曾发现高含量的克拉梭粉,而具双囊的松柏类花粉极少见,因此人们一般认为克拉梭粉含量较高与炎热、干旱、盐碱等气候环境有关。

麻黄类植物现在有 40 余种,主要分布中亚、南美、北美等沙漠、干旱荒原和湖滨盐碱地带,在我国分布于西北荒漠地区,因此是典型的干旱气候环境的指示性植物。

1.2.3 被子植物

被子植物,俗称“开花植物”,是现今植物界最高级、最繁荣、最多样化和分布最广的类群,现生者约有 400 科,30 万余种,我国大约有 337 科,3200 属,3 万余种。被子植物具有极强的适应性,广

泛分布于世界各地不同的气候地区。早白垩世是被子植物发展的早期阶段,化石材料很少,多样化不明显,目前可用来进行气候和环境分析的条件还不成熟。

2 冀北—辽西地区晚中生代孢粉组合特征

2.1 孙家湾组的孢粉组合特征

孙家湾组的孢粉可称为“无突肋纹孢(*Cicatricosisporites*)-克拉梭粉(*Classopollis*)-希指蕨孢(*Schizaeoisporites*)-麻黄粉(*Ephedripites*)”组合,主要特征是:(1)蕨类植物孢子占优势,平均含量达 70.5%,最高可达 90%以上;(2)海金沙科和桫欏科孢子有一定的继承性,含量略有降低(21.9%);(3)海金沙科中的无突肋纹孢含量持续增高(28.6%),而有突肋纹孢、刺毛孢和非均饰孢等则少量或个别出现,但光面海金沙孢却较常见;(4)水龙骨单缝孢(*Laevigatosporites*)、三孔孢(*Triporoletes*)、膜环弱缝孢(*Aeguitriradites*),以及隐藏孢(*Crybelosporites*)等喜潮湿、阴暗、沼泽、半水生的分子罕见或完全消失;(5)莎草蕨科的希指蕨孢和裸子植物的克拉梭粉在本组合中类型最多,含量最高,一般为 2.5%~14%,平均含量为 8.2%;以松科和罗汉松科为主的裸子植物花粉含量不高。

孙家湾组的孢粉组合中喜中温、中湿的双囊松柏类花粉稀少,海金沙科和桫欏科孢子为代表的蕨类植物占优势,喜阴湿、沼泽或半水生的蕨类孢子罕见或缺失,喜干旱植物(如克拉梭粉和麻黄粉)和喜干热植物(如希指蕨孢)的出现等特征,反映了当时是热带-亚热带半干热气候。

2.2 阜新组的孢粉组合特征

2.2.1 阜新组上部的孢粉组合特征

阜新组上部的孢粉可称为“三角孢(*Deltoidospora*)-无突肋纹孢(*Cicatricosisporites*)-有突肋纹孢(*Appendicisporites*)”组合,主要特征是:(1)蕨类植物孢子占绝对优势,含量一般为 53.8%~97.9%,平均含量为 75.6%;裸子植物花粉的含量有所降低,一般为 2.5%~46%,平均含量为 24.3%;(2)海金沙科和桫欏科孢子仍占统治地位,前者含量为 11.5%~67%,平均含量为 32.2%;后者含量为 2.5%~50.2%,平均含量为 36.6%;(3)海金沙科中的无突肋纹孢和有突肋纹孢含量继续增加,含量分别是 24.1%与 3.6%,先前极度繁盛的刺毛孢和非均饰孢含量急剧下降;(4)水龙骨科的水龙骨单缝孢较为发育,平均含量为 4.5%,高者可达 15.3%;(5)裸子植物花粉以杉科的无口器粉和克拉梭粉为主,其含量分别为 21.4%与 1.7%,松科和罗汉松科花粉退居次位,含量较低。

本组合以蕨类植物孢子占优势,尤以海金沙科和桫欏科孢子更为突出,而喜中温、中湿的松类花粉显著减少等为特色。因此,阜新组上部的孢粉组合特征反映了典型的亚热带温暖、湿润的气候环境。

2.2.2 阜新组下部的孢粉组合特征

阜新组下部的孢粉可称为“刺毛孢(*Pilosporites*)-有突肋纹孢(*Appendicisporites*)-无突肋纹孢(*Cicatricosisporites*)-三孔孢(*Triporetetes*)”组合,主要特征是:(1)蕨类植物孢子含量有明显增加,几乎与裸子植物花粉平分秋色;(2)蕨类植物孢子类型较沙海组更加多样化,是早白垩世蕨类孢子最丰富多彩的时期;(3)海金沙科孢子占孢粉总数的33.2%,其中无突肋纹孢居首位,平均含量为14.1%;刺毛孢和有突肋纹孢含量急剧增长,含量分别为8.7%和5.8%;该科的常见分子有非均饰孢、凹边瘤面孢、海金沙孢、唇形孢(*Toroisporis*)和克鲁克孢等;(4)喜低洼、湿热环境的分子较常见,如水龙骨单缝孢、膜环弱缝孢及三孔孢等;(5)裸子植物以松科的云杉粉最繁盛,双束松粉亦较丰富;(6)喜干旱的克拉梭粉很少见,含量仅为2.2%。

阜新组下部是早白垩世孢粉植物群发展的鼎盛时期,共出现63属,165种之多。蕨类植物孢子无论在数量或类型上均得到极大发展,特别是喜湿热的海金沙科孢子极为繁盛,喜湿热分子含量达49.8%,喜中温、中湿分子的含量为21.6%,喜干热的分子含量仅为2.2%。

现代蕨类植物主要分布于热带、亚热带地区,生长在温暖、阴湿的环境中,是湿热气候的重要指示性植物;而海金沙科和桫欏科植物又是热带、亚热带潮湿气候的代表性类群。因此,阜新组下部在沉积时期是典型的亚热带温暖、潮湿气候时期。

值得注意的是,真蕨类的蚌壳蕨科(*Dicksoniaceae*),如金毛狗属(*Cibotium*),十分繁盛,反映了当时的气候温暖潮湿。阜新组所含的植物群属于 *Ruffordia-Onychiopsis* 植物群的中期组合,或称 *Acanthopteris* 植物群,代表了温暖、潮湿气候带的植物群。从整体而言,阜新组的孢粉植物群反映了一个典型的亚热带温暖、潮湿的气候环境。

2.3 沙海组的孢粉组合特征

沙海组的孢粉可称为“辽西孢(*Liaoxisporites*)-刺毛孢(*Pilosporites*)-克拉梭粉(*Classopollis*)”组合,主要特征是:(1)蕨类植物孢子含量明显增加,约占孢粉总量的36%,个别含量可高达45%,裸子植物的花粉含量约为65%;(2)蕨类植物孢子仍以海金沙科分子占优势,其中无突肋纹孢和刺毛孢尤为突出,含量分别为5.8%与4.6%,其它常见分子有凹边瘤面孢、非均饰孢及有突肋纹孢;(3)蕨类孢子类型更

加多样化,常见者有具环肋纹孢(*Contignisporites*)、东北孢(*Dongbeispora*)、辽西孢(*Liaoxisporis*)、水龙骨单缝孢(*Laevigatosporites*),以及隐藏孢(*Crybelosporites*)等;(4)层环孢、徐氏孢、膜环弱缝孢、三孔孢,以及希指蕨孢等含量很低;(5)裸子植物中的松柏类双囊粉含量较先前有所降低,但仍占优势地位,含量为58.2%,主要是松科和罗汉松科分子,其中雪松粉含量明显增加,原始松柏类花粉大大减少,一般不超过5%;最值得注意的是,克拉梭粉的含量显著增加,十分常见,平均含量为7.1%,最高可达19.9%。

本组合中蕨类植物,特别是喜湿热的海金沙科孢子含量明显增加,且类型多样化,如具有重要意义无突肋纹孢可达20多种,表明该时期比较适合蕨类植物生长。喜中温、中湿条件的双囊松柏类植物含量明显降低,指示了该时期的气候要比九佛堂组沉积时期略微湿热一些。喜干热的克拉梭粉含量有明显增加,反映了该时期曾出现季节性干热气候。总之,沙海组的孢粉组合特征反映了当时以亚热带温暖、湿热的气候为主,但时有干热气候的扰动。

2.4 九佛堂组的孢粉组合特征

本组的孢粉可称为“云杉粉(*Piceapollenites*)-无突肋纹孢(*Cicatricosisporites*)-凹边瘤面孢(*Concavissimisporites*)”组合,主要特征是:(1)裸子植物花粉占绝对优势,平均含量为84.9%,而蕨类植物孢子平均为15%;(2)裸子植物中松柏类双囊粉十分丰富,含量高达73.1%,主要是松科和罗汉松科花粉,尤以云杉粉占绝对优势(45.5%),古老型松柏类假云杉粉(*Pseudopicea*)和拟云杉粉(*Piceites*)等占有一定位置(6.3%);(3)掌鳞杉科的克拉梭粉含量有所增加,平均含量为4.5%,个别样品中的含量可达10%以上;(4)蕨类植物孢子含量为7.2%,以海金沙科分子为主,如凹边瘤面孢(2.6%~9.8%)和无突肋纹孢(2%~6%),像刺毛孢、海金沙孢、克鲁克孢、坑穴孢(*Ischyosporites*)等其它孢子含量均很低。总体上,本组合中的海金沙科孢子无论在类型上还是在数量上均比义县组有明显增加,表明九佛堂期的气温较义县期略有升高;而喜潮湿环境的层环孢(*Densosporites*)和膜环弱缝孢(*Aeguitriradites*)含量明显减少,则指示了当时空气湿度有所降低;克拉梭粉等干旱分子的含量有所增加,表明当时气候有所波动,可能是季节性干旱或半干旱,或火山喷发所致;具双囊松柏类花粉的丰富多样,说明当时总体上仍以温凉、湿润的气候为主。

值得注意的是,本组合中松科花粉,尤其是云杉粉占绝对优势,在气候生态环境上具有重要意义。现生的以云杉(*Picea*)或冷杉(*Abies*)为主体的森

林主要分布在我国大陆和台湾海拔 2 500 m 以上的山区, 它们对气候条件有着严格的要求, 是一类反映高海拔山地的标志性植物。因此, 本组合中云杉粉和松粉的大量出现, 表明当时沉积地区或盆地是在中、高山地形背景下形成的, 也反映了相对温凉、湿润的气候环境。

2.5 义县组的孢粉组合特征

本组的孢粉可称为“云杉粉(*Piceapollenites*)-层环孢(*Densoisporites*)-无突肋纹孢(*Cicatricosisporites*)-膜环弱缝孢(*Aeguitriradites*)”组合, 主要特征是: (1)裸子植物花粉占优势, 平均含量为 69.8%, 其中松柏类双囊粉含量达 30%, 主要有云杉粉、双束松粉和罗汉松粉等, 气囊与本体分化不完全的原始松柏类花粉含量为 13.4%~15.3%, 其它裸子植物花粉含量低, 如苏铁粉(*Cycadopites*)、无口器粉(*Inaperturopollenites*)、克拉梭粉(*Classopollis*)等; (2)蕨类植物孢子有一定含量(10.8%~35.4%), 卷柏科(*Selaginellaceae*)孢子占优势, 常见者有层环孢、徐氏孢、新叉瘤孢, 及膜环弱缝孢等, 其中层环孢最为丰富; (3)海金沙科孢子有一定含量, 含量均在 4.4%左右, 以无突肋纹孢最常见, 其它还有非均饰孢、凹边瘤面孢、克鲁克孢, 以及海金沙孢等。

义县组的孢粉植物群以喜中温、中湿的松柏类双囊粉(主要是松科和罗汉松科的分子)的大量出现, 适应能力较强的蕨类植物卷柏科孢子(如 *Densoisporites*)含量较高, 生长在热带、亚热带的大海金沙科(如 *Cicatricosisporites*)较为常见, 喜干旱、干热环境的克拉梭粉罕见为特征。现生的松科和罗汉松科裸子植物主要生长在温凉、湿润的丘陵、中高山地环境。值得注意的是, 义县组的孢粉组合中出现了较丰富的层环孢, 它与卷柏类蕨类植物关系密切, 是潮湿气候环境的指示性植物, 主要生长在林下、溪边、湿地、山岩阴暗潮湿的环境中。此外, 组合中还出现了膜环弱缝孢, 这是一类生长在低洼、沼泽环境的植物。因此, 义县组的孢粉组合反映了温暖-温凉、潮湿的亚热带气候, 以及溪流、湖泊和湿地较为发育的丘陵-中高山地环境。

2.6 大北沟组的孢粉组合特征

2.6.1 大北沟组上部的孢粉组合特征

大北沟组上部的孢粉可称为“无突肋纹孢(*Cicatricosisporites*)-滦平孢(*Luanpingspora*)-纵肋单沟粉(*Jugella*)”组合, 其主要特征是: (1)裸子植物的花粉占绝对优势(75%~95%), 其中双囊松柏类花粉最多(49%~78.5%), 主要是单束松粉(*Abietinaepollenites*)、阿里粉(*Alisporites*)、双束松粉(*Pinuspollenites*)、雪松粉(*Cedripites*)、云杉粉

(*Piceapollenites*)等, 还见有少量蛟河粉(*Jiaohepollis*)和纵肋单沟粉(*Jugella*); (2)蕨类植物孢子含量逐渐增加, 约占 5%~25%, 其中出现了较丰富的海金沙科的无突肋纹孢; (3)喜干旱气候环境的莎草蕨科希指蕨孢(*Schizaeoisporites*)含量极低; (4)从整体情况来看, 该组合中喜湿热的分子明显增加, 约占 25.3%, 温凉分子的含量约为 21.3%, 干旱、干热分子的含量仅为 1.5%。

2.6.2 大北沟组上部的孢粉组合特征

大北沟组下段的孢粉可称为“拟云杉粉(*Piceites*)-罗汉松粉(*Podocarpidites*)-希指蕨孢(*Schizaeoisporites*)”组合, 主要特征是: (1)裸子植物的花粉占优势, 含量达 94%, 主要是具囊松柏类花粉和单沟粉, 如云杉粉、拟云杉粉、罗汉松粉、苏铁粉、雪松粉、无口器粉、小囊粉, 以及一些气囊分化不好的原始松柏类花粉; (2)蕨类植物孢子含量较低, 仅为 4.5%, 喜湿热的分子少量出现; (3)喜温凉、中湿的分子含量较高, 约为 32%, 如双束松粉、云杉粉、雪松粉等; (4)喜湿热分子的含量约为 11.5%, 主要是蕨类植物; (5)喜干旱、干热的分子含量很低, 主要是克拉梭粉和希指蕨孢。大北沟组下段孢粉组合中蕨类植物少量出现和喜温湿植物的丰富, 表明当时属于温带半干旱-半湿润气候。

大北沟组上段与下段的孢粉组合特征发生了明显变化: (1)出现了多种典型的早白垩世分子(如 *Cicatricosisporites inflexus*, *C. mirabilis*, *Jiaohepollis annulatus* 和 *Jugella* sp.等), 这些属种迄今在我国晚侏罗世地层中还没有产出的记录; (2)蕨类植物孢子逐渐兴起, 含量由下段的 5%增至 25%; (3)喜中温、中湿的双囊花粉仍占重要位置, 湿热分子的含量明显增加, 由下段的 11%增至 25%。从整体来看, 大北沟组沉积时处在一个由半干旱气候逐渐向温暖、湿润的气候转变的阶段。

2.7 土城子组的孢粉组合特征

土城子组中-下部的孢粉可称为“克拉梭粉(*Classopollis*)”组合, 以裸子植物花粉占绝对优势为特征, 其中克拉梭粉的含量达 90%以上, 其它分子含量很低, 如皱球粉(*Psophosphaera*), 球形粉(*Spheripollenites*), 南洋杉粉(*Araucariacites*)等, 蕨类植物孢子十分贫乏, 含量低于 1%。本组合中克拉梭粉的丰富产出, 反映当时处于炎热、干旱的气候, 是植被稀少的荒原环境。

2.8 髫髻山组的孢粉组合特征

髫髻山组的孢粉可称为“桫欏孢(*Cyathidites*)-苏铁粉(*Cycadopites*)-克拉梭粉(*Classopollis*)”组合, 以蕨类植物孢子和裸子植物花粉的共同繁荣为特征, 但孢子的含量略高于花粉的含量。蕨类植物孢

时代	岩组	生物群	气候	环境	孢粉组合带
早白垩世	孙家湾组	阜新生物群	干热气候	低地环境	“无突肋纹孢—克拉梭粉—希指蕨孢—麻黄粉”组合带
	阜新组		温暖湿润气候	低地沼泽环境	“三角孢—无突肋纹孢—有突肋纹孢”组合带 “刺毛孢—有突肋纹孢—无突肋纹孢—三孔孢”组合带
	沙海组				“辽西孢—刺毛孢—克拉梭粉”组合带
	九佛堂组或义县组	热河生物群	温凉湿润气候	高山环境	“云杉粉—无突肋纹孢—凹边瘤面孢”组合带 “云杉粉—层环孢—无突肋纹孢—膜环弱缝孢”组合带
	大北沟组			低山环境	“无突肋纹孢—漆平孢—纵肋单沟粉”组合带 “拟云杉粉—罗汉松粉—希指蕨孢”组合带
	张家口组				
					区域不整合(燕山运动)
	土城子组			干旱气候	荒原环境 “克拉梭粉”组合带
					区域不整合(燕山运动)
晚侏罗世	髫髻山组	燕辽生物群	温暖湿润气候	低山丘陵环境	“桫欏孢—苏铁粉—克拉梭粉”组合带

图 1 冀北—辽西地区晚中生代孢粉植物群更替与气候环境变化

Fig. 1 The polynoflora alternation and the climate and environment change of Late Mesozoic in northern Hebei and western Liaoning

子中以光面三缝孢含量最高, 达 43%, 其它常见分子有: 旋脊孢 (*Duplexisporites*), 石松孢 (*Lycopodiumsporites*), 新叉瘤孢 (*Neoraetrickia*), 紫萁孢 (*Osmundacidites*) 等。裸子植物中单沟类花粉含量占 22%, 克拉梭粉含量约为 9.5%, 具囊松柏类花粉较少。这个孢粉组合反映当时是丘陵-低山的环境, 反映当时处于亚热带温暖、湿润的气候, 但组合中克拉梭粉含量较高, 表明当时时有干旱气候的扰动, 或有向炎热、干旱气候转变的趋势(顾知微, 1962, 1982, 1995; 斯行健和周志炎, 1962; 米家榕等, 1980; 郝诒纯等, 1982; 王思恩, 1986, 1990, 1998, 1999; 辽宁省地质矿产局, 1989; 王五力等, 1989; 金帆, 1996; 陈丕基, 1998, 1999, 2000; Ji et al., 1998; 常征路等, 1999; 季强等, 1999, 2005, 2006; 季强, 2002; Ji, 2005)。

3 生物群演化和更替对古气候和古环境变化的响应

通过以上孢粉化石资料的分析, 冀北—辽西地

区晚中生代的气候和环境变化大致分为三个阶段。

3.1 中侏罗世—早白垩世早期阶段

髫髻山组(中侏罗世—晚侏罗世早期)的孢粉以喜中温、中湿的具双囊的松柏类花粉和喜湿热的蕨类植物孢子共同繁盛为特征, 反映了典型的温暖、湿润的亚热带气候, 推测当时可能是植被茂盛的丘陵-低山环境。

土城子组(晚侏罗世—早白垩世早期)的孢粉以喜炎热、干旱、盐碱环境的克拉梭粉含量极高(90%以上), 喜温暖、湿润环境的具囊松柏类花粉和蕨类植物孢子含量极低(一般在 2%~3%以下)为特征, 反映了典型的炎热、干旱的热带、亚热带气候, 推测当时可能是植被稀少的荒原环境。

由此可见, 冀北—辽西地区中侏罗世至早白垩世早期的气候和环境发生了较大变化, 由温暖、湿润的气候突然变成了炎热、干旱的气候, 由植被茂盛的丘陵-低山环境突然变为植被稀少的荒原环境。

3.2 早白垩世中期阶段

该阶段(大北沟组—九佛堂组)的孢粉属种随时间逐渐增多, 大北沟组上部有 38 属 58 种, 义县组有 40 属 65 种, 九佛堂组急剧增加到 60 属 110 种; 喜湿热气候的海金沙科和桫欏科孢子含量明显随时间逐渐增加, 其中最重要的分子无突肋纹孢和桫欏孢在大北沟组上部和义县组下部仅少量出现, 在九佛堂组中含量略有增加; 喜中温、中湿气候条件的具囊松柏类花粉始终占有重要位置; 松科花粉, 尤其是云杉粉占绝对优势。云杉(*Picea*)或冷杉(*Abies*)对气候条件有着严格的要求, 是一类反映高海拔山地的标志性植物, 主要分布生长在海拔 2 500 m 以上的高山上。因此, 大北沟组—九佛堂组中云杉粉和松粉的大量出现, 表明当时沉积地区或盆地是在中、高山地形背景下形成的, 也反映了相对温凉、湿润的气候。

3.3 早白垩世晚期阶段

该阶段(沙海组—孙家湾组)的孢粉属种随时间逐渐减少, 沙海组有 61 属 142 种, 阜新组下部发展到 64 属 165 种, 但从阜新组上部开始减少到 54 属 101 种, 孙家湾组仅有 45 属 90 种; 喜湿热气候的海金沙科和桫欏科孢子含量在沙海组中开始增加, 至阜新组其数量和类型均发展到鼎盛阶段; 喜沼泽环境的水龙骨单缝孢从沙海组开始发展, 在阜新组中最繁盛; 喜中温、中湿气候条件的具囊松柏类花粉从沙海组开始逐渐衰败, 在阜新组上部已较为少见; 喜干热的克拉梭粉仅在沙海组和孙家湾组中含量明显增加, 喜干旱、干热的麻黄粉和希指蕨孢含量一直极低, 但在孙家湾组中含量明显增高。

根据以上分析,冀北—辽西地区在早白垩世晚期开始转变为温暖、潮湿的亚热带气候,仅在沙海组 and 孙家湾组沉积时期出现过两次干热气候的扰动。

综上所述,冀北—辽西地区中侏罗世至早白垩世气候和环境变化的三个阶段不仅与燕辽生物群、热河生物群和阜新生物群的消亡与复苏相协和,而且也与构造演化阶段相耦合。晚侏罗世与早白垩世早期之间发生的生物群更替(燕辽生物群的消亡与热河生物群的复苏)在性质和形式上与早白垩世中期与晚期之际发生的生物群更替(热河生物群消亡与阜新生物群复苏)并无多大区别。前者的情况是,燕山运动使冀北—辽西地区的地势抬高,加之晚侏罗世—早白垩世最早期气候突然变得炎热干旱,双重影响使当时的生态环境遭到了极大毁坏,结果导致燕辽生物群在该区消亡;后者的情况是,早白垩世中期的温凉、湿润气候至晚期逐渐转变为温暖、潮湿的气候,由中期的中-高山环境逐渐变为低地或沼泽环境。早白垩世中期和晚期气候与环境的变化是缓慢的、逐步的,因而热河生物群的消亡与阜新生物群的复苏的过程也是渐变的,二者的组成在丰富性和多样性上也是渐变的,动物与植物的含量在更替过程中呈互为消长的关系。在这种意义上,热河生物群是一个以动物为主体的生物群,而阜新生物群则是一个以植物为主体的生物群。

4 生物群更替的“避难所”模式

根据构造演化、盆地演化、生物群演化、古气候、古生态和古地理环境的综合研究,我们认为区域构造运动(燕山运动)并不能真正导致生物群的灭绝,晚侏罗世与早白垩世早期之间发生的生物群更替在性质上并不是“绝灭”与“复苏”的关系,而是“消亡”与“复苏”的关系。冀北—辽西地区“燕辽生物群”的消亡与“热河生物群”的复苏显示了一定的继承性特点,也呈现了明显的阶步性特征,为此本文提出了生物群更替的“避难所”模式。

在晚侏罗世早期,冀北—辽西地区发生了著名的燕山运动(I幕),在髫髻山组与土城子组之间形成了规模巨大的区域不整合面。这次构造运动导致当时环境发生了巨大变化,使得原先植被茂盛的丘陵-低山环境突然变为植被稀少的荒原环境,加之气候变得十分炎热干燥,导致水系衰败萎缩,湖泊干涸消失,生物失去了生存空间和环境,致使燕辽生物群中 95%以上的物种在冀北—辽西地区消亡,纷纷迁徙到气候合适、环境适宜的地区继续生存发展,仅有不到 5%的物种残存到晚侏罗世中—晚期。在早白垩世早期,冀北—辽西地区再次发生了强烈的

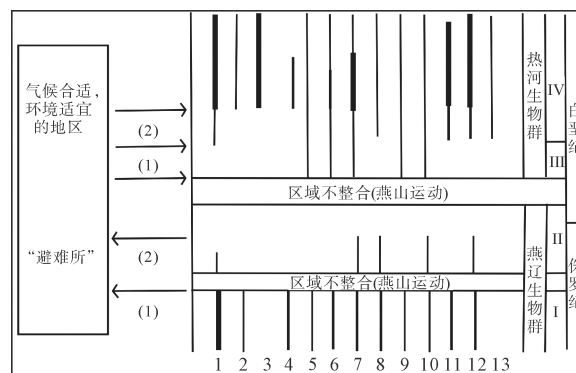


图2 冀北—辽西地区侏罗—白垩纪之交期生物群更替的“避难所”模式图

Fig. 2 A “sanctuary” model for the biota alternation at the turning time between Late Jurassic and Early Cretaceous in northern Hebei and western Liaoning

1-爬行类; 2-哺乳动物; 3-鸟类; 4-两栖类; 5-鱼类; 6-昆虫; 7-叶肢介; 8-介形虫; 9-双壳类; 10-腹足类; 11-蕨类植物; 12-裸子植物; 13-被子植物; I-髫髻山组; II-土城子组; III-大北沟组; IV-义县组;

(1)和(2)箭头方向分别表示生物消失和复苏的期次

1-reptiles; 2-mammalian; 3-birds; 4-amphibian; 5-fishes; 6-insects; 7-conchostracans; 8-ostracoda; 9-bivalves; 10-gastropods; 11-pteridophyte; 12-gymnosperm; 13-angiosperm; I-Tiaojishan Formation; II-Tuchengzi Formation; III-Dabeigou Formation; IV-Yixian Formation; (1) and (2) in the figure representing the order of biotic disappearance and recovery, respectively

构造活动(燕山运动 II 幕),使得该区的生态环境进一步恶化,气候变得越来越炎热干燥,水系濒临枯竭,结果导致燕辽生物群残存下来的物种全部在该地区消失。这些生物并没有真正灭绝,而是沿着先行者的足迹逃往他乡继续生存发展,等待着有朝一日重新返回故里。

燕山运动之后,冀北—辽西地区早白垩世中期的气候条件和地理环境与先前明显有别,长期处于中、高山环境,由早期的亚热带干热气候逐渐转变为温凉、湿润的气候,生态环境逐渐得以恢复,各种生物又重新回到该区。在冀北阶早期,随着水系和生态环境的初步恢复,热河生物群中仅有叶肢介、昆虫、蕨类植物、藻类等 4~5 个门类的生物出现在冀北—辽西地区;在冀北阶晚期,生态环境进一步变好,热河生物群中大约有 7 个门类的生物生活在冀北—辽西地区,常见者有裸子植物、蕨类植物、藻类、双壳类、腹足类、昆虫和鱼类(北票鲟)等。在热河阶早期,冀北—辽西地区的生态环境得以完全恢复,热河生物群中大约有 12 个门类的生物生活在该区,如戴氏狼鳍鱼、东方叶肢介和女星介等是首次出现在该区;在热河阶中期,热河生物群得以蓬勃发展,山上是高大的乔木(各种裸子植物),林间是各种蕨类植物和昆虫,翼龙和鸟类在天空翱翔,恐龙、哺乳动物、爬行动物等在地上争斗,两栖动物和鱼类在水中游荡,原始被子植物在水边绽放,20 多个门类的生物形成了多姿多彩的热河生

物群(赵宗溥和何铸文, 1959; 刘宪亭和周家键, 1965; 张文堂等, 1976; 潘广, 1978, 1981; 陈丕基等, 1980; 洪友崇, 1981; 曹从周, 1982; 叶美娜和厉宝贤, 1982; 王五力, 1987; 王五力等, 1989, 2004; 孙革等, 1992, 2001; 王思恩等, 1994; 侯连海等, 1995; 蒲荣干和吴洪章, 1995; 侯连海, 1996; 季强和姬书安, 1996, 1997; 任东等, 1995, 1996, 1997, 2002; 季强等, 1998, 2002, 2003, 2005, 2006; 罗清华等, 1999; 孙革和郑少林, 2000; 李佩贤等, 2001; 季强, 2002, 2009; 牛宝贵等, 2003; 季强和袁崇喜, 2008; 王思恩和李罡, 2008; 王思恩和季强, 2009)。

致谢: 在工作中得到了中国地质大学(北京)王成善院士和黄永建教授, 中国地质科学院地质研究所柳永清研究员和姬书安研究员, 首都师范大学任东教授的大力支持, 在此一并致谢。

Acknowledgements:

This study was supported by National Program on Key Basic Research Project (973 Program) (Nos. 2006CB701405 and 2012CB822004), and China Geological Survey (No. 12120114026801).

参考文献:

- 曹从周. 1982. 辽西地区侏罗纪火山岩特征[J]. 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊, 3: 47-80.
- 常征路, 王元青, 汪筱林. 1999. 阜新盆地晚中生代地层及其有关问题的讨论[C]//第七届中国古脊椎动物学学术年会论文集, 北京: 海洋出版社: 13-26.
- 陈丕基, 文世宣, 周志炎, 厉宝贤, 林启彬, 张璐瑾, 黎文本, 刘兆生, 李再平. 1980. 辽宁西部晚中生代陆相地层的研究[J]. 南京地质古生物研究所所刊, 1(1): 22-555.
- 陈丕基. 1998. 热河动物群的分布与迁移-兼论中国陆相侏罗-白垩系的界线划分[J]. 古生物学报, 27(6): 659-683.
- 陈丕基. 1999. 热河生物群的分布与扩展[J]. 热河生物群, (11): 1-6.
- 陈丕基. 2000. 中国陆相侏罗、白垩系划分对比述评[J]. 地层学杂志, 24(2): 114-119.
- 顾知微. 1962. 中国的侏罗系和白垩系[C]//全国地层会议学术论文汇编, 北京: 科学出版社: 1-84.
- 顾知微. 1982. 中国侏罗纪地层对比表及说明书[C]//中国各纪地层对比表及说明书. 北京: 科学出版社: 223-240.
- 顾知微. 1995. 热河动物化石群地质时代的研究[C]//中国地质学发展的回顾—孙云铸教授百年诞辰纪念文集. 武汉: 中国地质大学出版社: 93-99.
- 郝治纯, 苏得英, 李友桂, 余静贤, 张望平, 李佩贤, 齐骅, 关绍曾, 郭福祥. 1982. 论中国非海相白垩系的划分及侏罗-白垩系的分界[J]. 地质学报, 56(3): 187-199.
- 洪友崇. 1981. 北方中侏罗世昆虫化石[M]. 北京: 地质出版社: 1-223.
- 侯连海, 周忠和, 顾玉才, 张和. 1995. 侏罗纪鸟类化石在中国的首次发现[J]. 科学通报, 40(8): 726-729.
- 侯连海. 1996. 中国发现侏罗纪龙骨突鸟类[J]. 科学通报, 41(20): 1861-1864.
- 季强, 姬书安, 任东, 卢立伍, 方晓思, 郭子光. 1998. 原始羽毛概念的提出及其在羽毛演化研究中的科学意义[J]. 江苏地质, 22(2): 65-72.
- 季强, 姬书安, 张鸿斌, 尤海鲁, 张建平, 王丽霞, 袁崇喜, 季鑫鑫. 2002. 辽宁北票首次发现初鸟类化石—东方吉祥鸟(新属、新种)[J]. 南京大学学报(自然科学版), 38(6): 1-9.
- 季强, 姬书安. 1996. 中国最早鸟类化石的发现及鸟类的起源[J]. 中国地质, 10: 30-33.
- 季强, 姬书安. 1997. 原始祖鸟(*Protarchaeopteryx* gen.nov.)——中国的始祖鸟类化石[J]. 中国地质, 3: 38-41.
- 季强, 柳永清, 陈文, 姬书安, 吕君昌, 尤海鲁, 袁崇喜. 2005. 再论辽西生物群的时代[J]. 地质评论, 51(6): 609-612.
- 季强, 柳永清, 姬书安, 陈文, 吕君昌, 尤海鲁, 袁崇喜. 2006. 论中国陆相侏罗系-白垩系界线[J]. 地质通报, 25(3): 336-339.
- 季强, 袁崇喜, 季鑫鑫, 邱军. 2003. 论鸟类飞行的起源[J]. 地质评论, 49(1): 1-3.
- 季强, 袁崇喜. 2008. 中国中侏罗世哺乳动物研究新进展[J]. 地球学报, 29(3): 377-384.
- 季强. 2002. 论热河生物群[J]. 地质评论, 48(3): 290-296.
- 季强. 2009. 中国恐龙研究的历史与现状[J]. 地球学报, 30(3): 285-290.
- 金帆. 1996. 辽宁西部晚中生代地层研究之进展及存在问题[J]. 古脊椎动物学报, 34(2): 102-122.
- 黎文本. 1983. 中国早白垩世孢粉植物群及其地理分区[C]//中国古生物地层分区. 北京: 科学出版社: 142-151.
- 李佩贤, 程政武, 庞其清. 2001. 辽西北票孔子鸟 *Confuciusornis* 的层位及年代[J]. 地质学报, 75(1): 1-13.
- 辽宁省地质矿产局. 1989. 辽宁省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社: 252-262.
- 刘宪亭, 周家键. 1965. 辽宁北票晚侏罗世鲟类一新科[J]. 古脊椎动物与人类, 9(3): 237-247.
- 罗清华, 陈丕基, 邹东羽, 孙贤鉢, 李寄鉢. 1999. 中华龙鸟与孔子鸟类的时代—辽宁义县火山凝灰岩激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定[J]. 地球化学, 28(4): 405-409.
- 米家榕, 徐开志, 张川波, 常建平, 姚培毅. 1980. 辽宁北票附近中生代地层[J]. 长春地质学院学报, 1: 1-31.
- 牛宝贵, 和政军, 宋彪, 任纪舜. 2003. 张家口组火山岩 SHRIMP 定年及其重大意义[J]. 地质通报, 22(2): 140-141.
- 潘广. 1978. 阜新盆地与义县-锦州盆地的中生代地层[J]. 科学通报, 6: 34-37.
- 潘广. 1981. 燕辽地区中生代地层[J]. 辽宁地质学报, 1: 26-52.
- 蒲荣干, 吴洪章. 1995. 东北地区中生代孢粉植物群及其地理分区[C]//中国东北环太平洋构造带地层学. 北京: 地质出版社: 221-237.
- 任东, 高克勤, 郭子光, 姬书安, 谭京晶, 宋卓. 2002. 内蒙宁城

- 道虎沟地区侏罗纪地层划分及时代探讨[J]. 地质通报, 21(8-9): 584-591.
- 任东, 郭子光, 卢立伍, 姬书安, 唐烽, 靳悦高, 方晓思, 季强. 1997. 辽宁西部上侏罗统义县组研究新认识[J]. 地质论评, 43(5): 449-459.
- 任东, 卢立伍, 郭子光. 1995. 北京与邻区侏罗—白垩纪动物群及其地层[M]. 北京: 地震出版社: 1-222.
- 任东, 卢立伍, 姬书安, 郭子光, 尹继才, 韩迎健. 1996. 燕辽地区中生代晚期动物群及其古地理、古生态意义[J]. 地球学报(增刊), 17(Z1): 148-154.
- 斯行健, 周志炎. 1962. 中国中生代陆相地层[C]//全国地层会议学术报告汇编. 北京: 科学出版社: 1-180.
- 孙革, 郑少林, 迪尔切 D, 王永栋, 梅盛昊. 2001. 辽西早期被子植物及伴生植物群[M]. 上海: 上海科技教育出版社: 1-227.
- 孙革, 郑少林, 孙学坤, 何承全, 朴太元, 尚玉珂, 张川波, 虞子治, 赵衍华. 1992. 黑龙江东部侏罗—白垩系界线附近地层研究新进展[J]. 地层学杂志, 16(1): 5-8.
- 孙革, 郑少林. 2000. 中国东北中生代地层划分对比之新见[J]. 地层学杂志, 24(1): 60-64.
- 王思恩, 季强. 2009. 冀北张家口组、大北沟组的岩石地层学、生物地层学特征及其在东北亚地层划分对比中的意义[J]. 地质通报, 28(7): 821-828.
- 王思恩, 李罡. 2008. 冀北、辽西地区上侏罗统土城子组的新叶肢介化石[J]. 古生物学报, 47(3): 319-325.
- 王思恩, 张志诚, 姚培毅, 刘桂芳, 于菁珊. 1994. 中国侏罗—白垩纪含煤地层与聚煤规律[M]. 北京: 地质出版社.
- 王思恩. 1986. 冀北晚期中生代地层研究[J]. 地层古生物论文集, 15: 161-180.
- 王思恩. 1990. 热河动物群的起源、演化与机制[J]. 地质学报, (4): 350-360.
- 王思恩. 1998. 中国北部陆相侏罗系与英国海陆交互相侏罗系的对比研究, —兼论中国北部侏罗系的划分与对比[J]. 地质学报, 72(1): 11-21.
- 王思恩. 1999. 热河生物群的古生态与古环境—冀北、辽西叶肢介群落古生态与古环境重建[J]. 地质学报, 73(4): 289-301.
- 王五力, 张宏, 张立君. 2004. 土城子阶、义县阶标准地层剖面及其地层古生物、构造-火山作用[M]. 北京: 地质出版社: 1-407.
- 王五力, 郑少林, 张立君, 蒲荣干, 张武, 吴洪章, 具然弘, 董国义, 元红. 1989. 辽宁西部中生代地层古生物(1)[M]. 北京: 地质出版社.
- 王五力. 1987. 辽宁西部中生代叶肢介化石[C]//辽宁西部中生代地层古生物(3). 北京: 地质出版社: 134-179.
- 叶美娜, 历宝贤. 1982. 中国侏罗纪含植物化石地层的划分与对比[C]//中国各纪地层对比表及说明书. 北京: 科学出版社: 241-253.
- 张文堂, 陈丕基, 沈炎彬. 1976. 中国的叶肢介化石[M]. 北京: 科学出版社: 1-325.
- 赵宗溥, 何铸文. 1959. 北票地区的侏罗纪地层层序及燕山期火山活动、地壳运动及构造形态的几个问题[J]. 地质科学, 2: 45-48.
- ## References:
- BRENNER G J. 1976. Middle Cretaceous floral provinces and early migration of angiosperms[C]//Origin and early evolution of angiosperm (ed. by C. D. Beck). New York: Columbia University Press: 23-44.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Liaoning Province. 1989. Regional Geology of Liaoning Province[M]. Beijing: Geological Publishing House: 252-262(in Chinese).
- CAO Cong-zhou. 1982. On the characteristics of the Jurassic volcanic rocks of the western Liaoning[J]. Bulletin of Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 3: 47-80(in Chinese with English abstract).
- CHANG Zheng-lu, WANG Yuan-qing, WANG Xiao-lin. 1999. Late Mesozoic strata and some discussion about Fuxin basin[C]//Proceedings of the 7th China Vertebrate Paleontology Academic Annual Meeting. Beijing: Ocean Press: 13-26(in Chinese).
- CHEN Pi-ji, WEN Shi-xuan, ZHOU Zhi-yan, LI Bao-xian, LIN Qi-shan, ZHANG Lu-jin, LI Wen-ben, LIU Zhao-sheng, LI Zai-ping. 1980. Some research on Late Mesozoic continental strata of the western Liaoning[J]. Bull. of Nanjing Inst. of Geol. & Palaeont., Acad. Sinica, 1(1): 22-555(in Chinese).
- CHEN Pi-ji. 1998. Distribution and migration of jehol fauna with reference to nonmarine Jurassic-Cretaceous boundary in China[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 27(6): 659-683(in Chinese with English abstract).
- CHEN Pi-ji. 1999. Distribution and spread of the Jehol Biota[J]. Palaeoworld, (11): 1-6(in Chinese with English abstract).
- CHEN Pi-ji. 2000. Comments on the Classification and Correlation of Non-marine Jurassic and Cretaceous of China[J]. Journal of Stratigraphy, 24(2): 114-119(in Chinese with English abstract).
- GU Zhi-wei. 1962. Jurassic and Cretaceous of China[C]//Proceedings of National stratigraphic Conference, Beijing: Science Press: 1-84(in Chinese).
- GU Zhi-wei. 1982. The correlation table of Jurassic strata in China and directions[C]//The correlation table of each strata in China and directions. Beijing: Science Press: 223-240(in Chinese).
- GU Zhi-wei. 1995. Researchs on geological era of Rehe animal fossil[C]//A review of the development of geological science in China: Proceedings of Professor Sun Yun-zhu's 80th Birthday. Wuhan: China University of Geosciences Press: 93-99(in Chinese).
- HAO Yi-chun, SU De-ying, LI You-gui, YU Jing-xian, ZHANG Wang-ping, LI Pei-xian, QI Hua, GUAN Shao-zeng, GUO Fu-xiang. 1982. Stratigraphical division of non-marine Cre-

- taceous and the Juro-Cretaceous boundary in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 56(3): 187-199(in Chinese with English abstract).
- HERNGREEN G F W, CHLONOVA A F. 1981. Cretaceous microfloral provinces [J]. *Pollen et Spores*, XXIII (3-4): 441-531.
- HONG You-chong. 1981. Middle Jurassic fossil insects in the north[M]. Beijing: Geology Publishing House: 1-223(in Chinese).
- HOU Lian-hai, ZHOU Zhong-he, GU Yu-cai, ZHANG He. 1995. Jurassic fossil birds were discovered in China for the first time[J]. *Chinese Science Bulletin*, 40(8): 726-729(in Chinese).
- HOU Lian-hai. 1996. Jurassic keel birds were found in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 41(20): 1861-1864(in Chinese).
- JI Q, CURRIE P J, NORELL M A, JI S A. 1998. Two feathered dinosaurs from northeastern China[J]. *Nature*, 393: 753-761.
- JI Qiang, JI Shu-an, REN Dong, LU Li-wu, FANG Xiao-si, GUO Zi-guang. 1998. A Proposal of the Concept of Protofeathers and Its Significant Scientific Value in the Study on Feathers' Evolution[J]. *Jiangsu Geology*, 22(2): 65-72(in Chinese with English abstract).
- JI Qiang, JI Shu-an, ZHANG Hong-bin, YOU Hai-lu, ZHANG Jian-ping, WANG Li-xia, YUAN Chong-xi, JI Xin-xin. 2002. A New Avialian Bird-Jixiangornis Orientalis gen. et sp. Nov.-from the Lower Cretaceous of Western Liaoning, NE China[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 38(6): 1-9(in Chinese with English abstract).
- JI Qiang, JI Shu-an. 1996. The discovery of the oldest fossil birds and the origin of birds[J]. *Geology in China*, 10: 30-33(in Chinese).
- JI Qiang, JI Shu-an. 1997. Archaeopteryx (*Protarchaeopteryx* gen.nov.): archaeopteryx-typefossils of China[J]. *Geology in China*, 3: 38-41(in Chinese).
- JI Qiang, LIU Yong-qing, CHEN Wen, JI Shu-an, LÜ Jun-chang, YOU Hai-lu, YUAN Chong-xi. 2005. On the Geological Age of Daohugou Biota[J]. *Geological Review*, 51(6): 609-612(in Chinese with English abstract).
- JI Qiang, LIU Yong-qing, JI Shu-an, CHEN Wen, LÜ Jun-chang, YOU Hai-lu, YUAN Chong-xi. 2006. On the terrestrial Jurassic-Cretaceous boundary in China[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 336-339(in Chinese with English abstract).
- JI Qiang, YUAN Chong-xi, JI Xin-xin, QIU Jun. 2003. On the Origin of Birds' Flight[J]. *Geological Review*, 49(1): 1-3(in Chinese with English abstract).
- JI Qiang, YUAN Chong-xi. 2008. New Advances in the Study of Middle Jurassic Mammals in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(3): 377-384(in Chinese with English abstract).
- JI Qiang. 2002. On the Mesozoic Jehol Biota of China[J]. *Geological Review*, 48(3): 290-296(in Chinese with English abstract).
- JI Qiang. 2005. Mesozoic Jehol biota of Western Liaoning, China[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- JI Qiang. 2009. Study on Dinosaur Eggs in China: Yesterday and Today[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(3): 285-290(in Chinese with English abstract).
- JIN Fan. 1996. New Advances in the Late Mesozoic Stratigraphic Research of Western Liaoning, China[J]. *Vertebrata Palasiatica*, 34(2): 102-122(in Chinese with English abstract).
- LI Pei-xian, CHENG Zheng-wu, PANG Qi-qing. 2001. The Horizon and Age of the Confuciusornis in Beipiao, Western Liaoning[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 1-13(in Chinese with English abstract).
- LI Wen-ben. 1983. The Early Cretaceous palynoflora and geographical zone in China[C]//The partitions of paleobiological strata in China. Beijing: Science Press: 142-151(in Chinese).
- LIU Xian-ting, ZHOU Jia-jian. 1965. A new sturgeon from the Upper Jurassic of Liaoning, North China[J]. *Vertebrata Palasiatica*, 9(3): 237-247(in Chinese with English abstract).
- LO Ching-hua, CHEN Pei-ji, TSOU Tung-yu, SUN Shen-su, LEE Chi-Yu. 1999. Age of Sinosauroptryx and Confuciusornis— $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser single-grain and K-Ar dating of the Yixian Formation, NE China[J]. *Geochimica*, 28(4): 405-409(in Chinese with English abstract).
- MI Jia-rong, XU Kai-zhi, ZHANG Chuan-bo, CHANG Jian-ping, YAO Pei-yi. 1980. Mesozoic strata around Beipiao, Western Liaoning[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1: 1-31(in Chinese).
- NIU Bao-gui, HE Zheng-jun, SONG Biao, REN Ji-shun. 2003. SHRIMP zircon dating and its significance of Zhangjiakou group volcanic[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(2): 140-141(in Chinese).
- PAN Guang. 1978. Mesozoic strata of Fuxin Basin and Yixian-Jinzhou Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 6: 34-37(in Chinese).
- PAN Guang. 1981. Mesozoic strata of Yanshan-Liaoning area[J]. *Journal of Liaoning Geology*, 1: 26-52(in Chinese).
- PU Rong-gan, WU Hong-zhang. 1995. Mesozoic palynoflora and geographic zone in Northeast China[C]//Stratigraphy of circum-Pacific tectonic belt in Northeast China. Beijing: Geological Publishing House: 221-237(in Chinese).
- REN Dong, GAO Ke-qin, GUO Zi-guang, JI Shu-an, TAN Jing-jing, SONG Zhuo. 2002. Stratigraphic division of the Jurassic in the Daohugou area, Ningcheng, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(8-9): 584-591(in Chinese with English abstract).
- REN Dong, GUO Zi-guang, LU Li-wu, JI Shu-an, TANG Feng, JING Yue-gao, FANG Xiao-si, JI Qiang. 1997. A further contribution to the knowledge of the Upper Jurassic Yixian Formation in western Liaoning[J]. *Geological Review*, 43(5): 449-459(in Chinese with English abstract).
- REN Dong, LU Li-wu, GUO Zi-guang. 1995. Jurassic—Cretaceous fauna and strata in Beijing and its adjacent region[M]. Beijing: Seismological Press: 1-222(in Chinese).

- REN Dong, LU Li-wu, JI Shu-an, GUO Zi-guang, YIN Ji-cai, HAN Ying-jian. 1996. Late Mesozoic Fauna Assemblages of Yanliao Area, North China, and Its Paleogeological and Paleogeographical Significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 17(Z1): 148-154(in Chinese with English abstract).
- SI Xing-jian, ZHOU Zhi-yan. 1982. Mesozoic Continental stratum of China[C]//A compilation of academic reports in National stratigraphic Conference. Beijing: Science Press: 1-180(in Chinese).
- SRIVASTAVA S K. 1978. Cretaceous spore-pollen floras: A global evolution[J]. *Biological Memoirs*, 3(1): 2-130.
- SUN Ge, ZHENG Shao-li, DILCHER D, WANG Yong-dong, MEI Sheng-hao. 2001. Early angiosperms and their associated plants from western Liaoning, China[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Publishing House: 1-227(in Chinese).
- SUN Ge, ZHENG Shao-lin, SUN Xue-kun, HE Cheng-quan, PU Tai-yuan, SHANG Yu-ke, ZHANG Chuan-bo, YU Zi-zhi, ZHAO Yan-hua. 1922. New progress of Stratigraphic research near the boundary between Jurassic and Cretaceous in eastern Heilongjiang[J]. *Journal of Stratigraphy*, 16(1): 5-8(in Chinese with English abstract).
- SUN Ge, ZHENG Shao-lin. 2000. New Proposal on Division and Correlation of Mesozoic from Northeastern China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 24(1): 60-64(in Chinese with English abstract).
- WANG Si-en, JI Qiang. 2009. Lithostratigraphy and biostratigraphy features of Zhangjiakou Formation and Dabeigou Formation and its significance for stratigraphic subdivision and correlation in the Northeast Asia[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(7): 821-828(in Chinese with English abstract).
- WANG Si-en, LI Gang. 2008. New fossil clam shrimps from the Tuchengzi formation of Northern Hebei and Western Liaoning[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 47(3): 319-325(in Chinese with English abstract).
- WANG Si-en, ZHANG Zhi-cheng, YAO Pei-yi, LIU Gui-fang, YU Qing-shan. 1994. Jurassic-Cretaceous coal-bearing stratum and coal-forming law of China[M]. Beijing: Geology Publishing House(in Chinese).
- WANG Si-en. 1986. The Study of Late Mesozoic in northern Hebei[J]. *Proceedings of Stratigraphic Paleontology*, 15: 161-180(in Chinese with English abstract).
- WANG Si-en. 1990. Origin, evolution and mechanism of the Jehol fauna[J]. *Acta Geologica Sinica*, (4): 350-360.
- WANG Si-en. 1998. Correlation of the Continental Jurassic in the north of China to the Paralic Jurassic in Northwest Scotland, United Kingdom—With a Discussion of the Stratigraphic Subdivision and Correlation of the Jurassic in the North of China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 72(1): 11-21(in Chinese with English abstract).
- WANG Si-en. 1999. Palaeoecology and Palaeoenvironment of the Jehol Biota—A Palaeoecology and Palaeoenvironmental Reconstruction of Conchostracan Palaeocommunities in the Northern Hebei—Western Liaoning Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 73(4): 289-301(in Chinese with English abstract).
- WANG Wu-li, ZHANG Hong, ZHANG Li-jun. 2004. Stratotype, Stratigraphy, Palaeontology and Structure-Volcanism of Tuchengzian Stage, Yixian Stage[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-407(in Chinese).
- WANG Wu-li, ZHENG Shao-lin, ZHANG Li-jun, PU Rong-gan, ZHANG Wu, WU Hong-zhang, JU Ran-hong, DONG Guo-yi, YUAN Hong. 1989. Mesozoic stratigraphic paleontology in Western Liaoning(1)[M]. Beijing: Geology Publishing House(in Chinese).
- WANG Wu-li. 1987. Mesozoic Conchostraca in Western Liaoning[C]// Mesozoic Paleontology in Western Liaoning(3). Beijing: Geological Publishing House: 134-179(in Chinese).
- YE Mei-na, LI Bao-xian. 1982. The division and comparison of Jurassic strata containing plants fossils in China[C]//The correlation table of each strata in China and directions. Beijing: Science Press: 241-253(in Chinese).
- ZHANG Wen-tang, CHEN Pi-ji, SHEN Yan-bin. 1976. Conchostracan of China[M]. Beijing: Science Press: 1-325(in Chinese).
- ZHAO Zong-pu, HE Zhu-wen. 1959. The Jurassic stratigraphic sequence and Yanshanian volcanic activity, crustal movement and structural features in Beipiao area[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2: 45-48(in Chinese).