

doi: 10.12097/gbc.2024.01.044

内蒙古西乌旗地区中—晚更新世孢粉记录及其古气候意义

杨兵¹, 陈喜庆¹, 葛天助¹, 韦一^{2*}, 刘迁²

YANG Bing¹, CHEN Xiqing¹, GE Tianzhu¹, WEI Yi^{2*}, LIU Qian²

1. 自然资源实物地质资料中心, 河北 廊坊 065201;

2. 华北科技学院安全工程学院, 河北 廊坊 065201

1. Cores and Samples Centre of Nature and Resources, Langfang 065201, Hebei, China;

2. School of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, Hebei, China

摘要: 为重建内蒙古西乌旗地区巴音华盆地中—晚更新世之交古气候, 探讨其变化规律及对全球古气候的响应, 对该盆地 ZK03 钻孔和 ZK04 钻孔孢粉化石进行系统鉴定, 利用有序聚类分析划分孢粉组合, 结合共存因子分析法对孢粉组合定量化建立研究区的古气候参数值。鉴定出孢粉 68 个科属, 自下而上划分出 (I) 松属 (*Pinus*)—桦属 (*Betula*)—香蒲属 (*Typha*) 孢粉组合; (II) 栎属 (*Quercus*)—麻黄属 (*Ephedra*)—蒿属 (*Artemisia*) 孢粉组合; (III) 莎草科 (*Cyperaceae*)—香蒲属 (*Typha*)—水龙骨科 (*Polypodiaceae*) 孢粉组合。其中, 组合 I、组合 II 时代为中更新世, 组合 III 时代为晚更新世。植被类型经历了阔叶林—草原型兼有少量针叶林→阔叶林—草原型→稀树—草原型的转变。古气候经历了由相对温暖的湿润型气候到相对凉爽的半干旱型气候再到相对温暖的湿润型气候的 3 期转变, 各期分别对应的年均气温和年降雨量在数值上也体现了由高到低再到高的变化过程。其中, 在中更新世/晚更新世之交, 气候经历由凉到温的变化趋势, 与格陵兰冰芯氧同位素所指示的全球平均温度变化趋势相耦合。

关键词: 西乌旗; 更新世; 孢粉组合; 古气候; 地质调查工程; 共存因子分析

中图分类号: P534.63⁺1; P532 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2024)06-1047-12

Yang B, Chen X Q, Ge T Z, Wei Y, Liu Q. Sporopollen record during Mid-Late Pleistocene from West Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and its paleoclimatic significance. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(6): 1047-1058

Abstract: In order to reconstruct the paleoclimate and explore its evolution model and response to the global paleoclimate during the Mid-Late Pleistocene in the Bayinhua Basin, West Ujimqin Banner, Inner Mongolia, the sporopollen of ZK03 and ZK04 in the basin were systematically identified. Combining Coniss analyze with Co-existence Approach, we quantitatively reconstruct the palaeoclimate parameters in research area. 68 genera are identified and divided into 3 assemblages as: (I) *Pinus*-*Betula*-*Typha* assemblage; (II) *Quercus*-*Ephedra*-*Artemisia* assemblage; (III) *Cyperaceae*-*Typha*-*Polypodiaceae* assemblage. The age of assemblage I and assemblage II was Middle Pleistocene, while the age of assemblage III was Late Pleistocene. The vegetation types experienced the transformation as broadleaved - steppe type with a small amount of coniferous forest vegetation→broadleaved - steppe type vegetation→savanna- steppe vegetation. Palaeoclimate experienced three periods of transition from relatively warm and humid climate to relatively warm and cool semi-arid climate and then to relatively warm and humid climate. The annual average temperature and

收稿日期: 2024-01-26; 修订日期: 2024-05-22

资助项目: 国家自然科学基金项目《青藏高原原始新世—渐新世古海拔演化的介形类和同位素证据》(批准号: 41702366)、中国地质调查局项目《实物地质资料采集更新与数字化应用》(编号: DD20230138)和中央高校基本科研业务费《古近纪华北—华南非海相介形类动物化石差异演化及其地质意义》(编号: 3142018004)

作者简介: 杨兵(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地层古生物研究及地质矿产调查工作。E-mail: yangbinwbsy@126.com

* 通信作者: 韦一(1989-), 女, 博士, 副教授, 从事微体古生物研究。E-mail: ostracods@126.com

annual rainfall corresponding to each period also showed a numerical process of change from high to low and then to high. The trend from cool to warm at the turn of the Middle Pleistocene/Late Pleistocene can be well coupled with the trend of global mean temperature that indicated by the oxygen isotopes of Greenland ice core.

Key words: West Ujimqin Banner; Pleistocene; sporopollen assemblages; paleoclimate; geological survey engineering; Co-existence Approach

更新世是现代环境形成和人类演化的关键时期。自进入更新世以来,全球气候频繁波动,经历了周期性的冰期—间冰期波动(刘博华等, 2024)。中更新世转型(MPT)使得全球气候格局发生重大调整(Wang et al., 2003; Clark et al., 2008; 王婷等, 2017),大部分地区气候变得异常寒冷,全球持续降温(杨吉龙等, 2016),形成了以10万年为周期的气候波动。冰期时,形成北美、欧美的冰盖,非洲撒哈拉沙漠的形成,亚洲内陆环境进一步寒冷干燥,冬季季风强度增加(Demenocal, 2004),直至晚更新世进入末次间冰期。更新世期间地球热力学系统发生了显著的变化。内蒙古中北部地区属中温带干旱半干旱大陆性气候,由于其地域自然环境的特殊性,对气候环境变化响应十分敏感(王永等, 2010; 张晓飞等, 2019)。对该地区古气候的研究,不仅能恢复该时期内蒙古中北部地区的古气候,也能对全球古气候变化的研究提供重要的背景信息。

植被能随气候的变化发生快速的更替和迁移,且植物历来有自动“温度计”之称(王伟铭等, 1990; 韦一等, 2022),对环境变化的研究有重要的意义。沉积物中的孢粉记录是古植被气候信息的良好载体,通过孢粉记录可以恢复研究区的植被面貌、重建

古气候和古环境(Guiot et al., 1989; 李博等, 2015; 刘凯等, 2023)。目前,前人对内蒙古西乌旗地区古气候的重建工作相对较少,仅崔海超(2009)和张晓飞等(2019)通过孢粉恢复了新生代古环境,崔海超(2009)研究认为其时代为晚更新世晚期—全新世,而张晓飞等(2019)仅使用传统定性手段分析了古气候变化,且在中更新世/晚更新世这一重要转折期的研究精度较低,未能反映该时期的精确气候波动。本文通过对内蒙古西乌旗地区巴彦华盆地中更新世/晚更新世之交孢粉组合进行了精确划分,利用传统分析手段结合定量法—共存因子分析法(The Co-existence Approach),量化地建立研究区的古气候参数值,恢复该地区的古环境,探讨古气候特征,并通过对比全球温度变化趋势,探讨研究区孢粉信息对该时期全球古气候变化的响应。

1 地质概况

本次选取内蒙古自治区西乌旗地区巴音华盆地巴音华苏木北500 m处ZK03钻孔24.01~45.72 m之间层位和巴音华苏木东约10 km处ZK04钻孔71.00~85.00 m之间层位进行取样分析和研究(图1)。其中,ZK03钻孔24.01~45.72 m段沉积物以

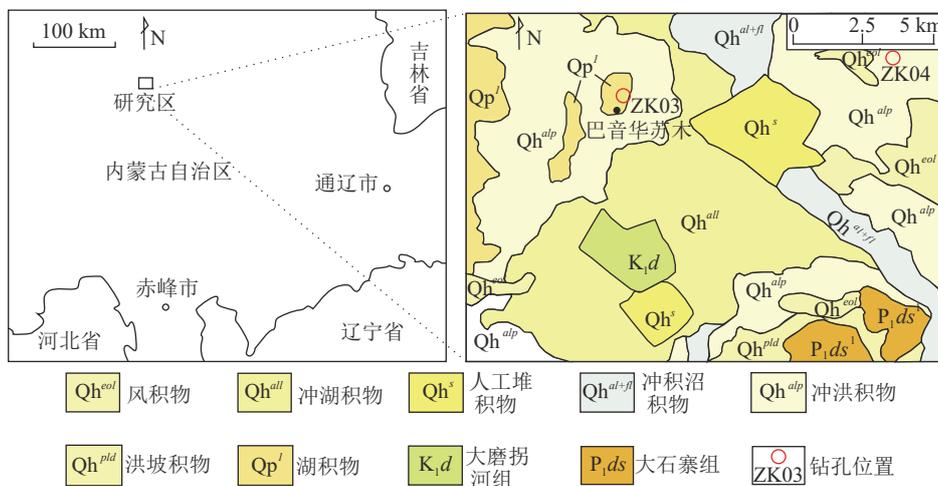


图1 内蒙古西乌旗地区地质简图

Fig. 1 Geologic map of West Ujimqin Banner area, Inner Mongolia

湖积物为主, 夹少量冲洪积物, 主要岩性为含砾粘土、粘土质砂、含砾沙土、粘土等。与下伏白垩系大磨拐河组呈角度不整合接触。分别在 45.43 m 和 32.46 m 处测得光释光(OSL)年龄为 153.14 ± 7.35 ka 和 135.74 ± 7.64 ka(自然资源实物地质资料中心, 2015)。ZK04 钻孔 71.00~85.00 m 段沉积物为湖相沉积, 主要岩性为粘土、砂质粘土、粗砂、粘土质细—中砂、粘土质粗砂、粗砂, 其下部见有粘土质砂砾石层及冲刷面。分别在 83.70 m 和 71.19 m 处测得光释光(OSL)年龄为 126.28 ± 5.3 ka 和 124.29 ± 5.91 ka(自然资源实物地质资料中心, 2015)。

在 ZK03 钻孔 24.01~32.46 m 段, 沉积物以湖积物为主, 夹少量冲积物。主要岩性为粘土、粉砂质粘土、含角砾粘土、粘土质粉砂及中、细砂等。该段岩心无年龄数据, 但该段上部为褐红色冲积物含角砾粘土, 与该段之间存在冲刷面, 冲刷面以上层序为粘土质粉砂—棕色粉砂质粘土。在邻近的 ZK04 钻孔中也可见褐红色含角砾粘土标志层及冲刷面, 且在冲刷面以上的层序也可进行对比, 因此在该层位上 2 个钻孔的年龄可以进行对比。ZK04 钻孔冲刷面上部的砂质夹层的光释光年龄为 126.28 ± 5.2 ka, 对应 ZK03 钻孔 24.01 m 处冲刷面上部的砂质层。根据地质年代表数据, 上更新统底界的年龄为 0.126 Ma(Cohen et al., 2018; 杨兵等, 2019)。由此可知, ZK03 钻孔 24.01~45.72 m 段的地质年代为中更新世, ZK04 钻孔 71.00~85.00 m 段的地质年代为晚更新世, 二者以冲刷面为界线。

2 研究方法

本次分别对内蒙古自治区西乌旗巴音华盆地 ZK03 钻孔和 ZK04 钻孔取样。共采集 17 件样品, 其中, 在 ZK03 钻孔 45.43~32.46 m 段内采集 6 件样品, 编号分别为 bf1、bf2、bf3、bf4、bf5、bf6。在 ZK03 钻孔 32.46~24.01 m 段内采集 5 件样品, 编号分别为 bf7、bf8、bf9、bf10、bf11。在 ZK04 钻孔 83.70~71.19 m 段内采集 6 件样品, 编号分别为 bf12、bf13、bf14、bf15、bf16、bf17(图 2)。在粘土层中取样间隔约为 1.5 m。在每个样品中取干重 50 g, 先用 10% 的稀盐酸浸泡 6 h, 去除样品中的钙质沉积物, 再用氢氟酸浸泡 6 h, 去除样品中的硅质沉积物。然后加盐酸后水浴加热, 再将样品洗至中性, 用比重为 2.1 以上的重液在离心机上进行离心浮选, 再

经冰乙酸水稀释、集中, 纯净水清洗至中性后放入试管, 最后制活动薄片在生物显微镜下进行观察、鉴定、统计。每个样品中孢粉统计个数在 200 粒以上。本次研究共采集孢粉样品 17 件, 但其中 bf1、bf2、bf3、bf13 这 4 件样品镜下仅分别观察到几粒至十几粒孢粉, 未达到统计意义。

3 孢粉组合特征

在内蒙古自治区西乌旗巴音华盆地 ZK03 钻孔和 ZK04 钻孔中—上更新统共采集孢粉样品 13 件, 共分析、鉴定出 68 个科属, 其中, 裸子植物花粉有 8 个科属, 被子植物(木本)花粉有 35 个科属, 被子植物(草本)花粉有 16 个科属, 蕨类植物孢子有 9 个科属。根据镜下孢粉鉴定统计分析结果, 按照植物的生态类型特征进行归纳整理, 选取 45 个典型代表性植物孢粉种类及 4 个综合指标(裸子植物、被子植物(木本)、被子植物(草本)、蕨类植物), 运用孢粉专业作图软件(Tilia)作出孢粉百分比含量图式, 并根据有序聚类分析结果, 将 13 个孢粉样品划分为 3 个孢粉组合(图 3), 各孢粉组合特征反映的植被类型分述如下。

(1) 松属—桦属—香蒲属孢粉组合(I)

本组合位于 ZK03 钻孔 33.1~34.3 m 处, 沉积时代为 153.1~135.8 ka。组合中被子植物(木本)(31.3%~34.7%, 平均值 33.0%)和被子植物(草本)(23.9%~30.5%, 平均值 27.8%)相对占有优势。其次为蕨类植物(18.9%~23%, 平均值 20.7%)和裸子植物(15.9%~21.8%, 平均值 18.5%)。其中, 裸子植物以松属(9.6~13.1%, 平均值 11.1%)为主, 该属在本组合裸子植物中占有绝对优势, 此外还含有少量铁杉属(*Tsuga*)、油杉属、雪松属(*Cedrus*)、罗汉松属等属, 以及柏科(Cupressaceae)、杉科等科。被子植物(木本)分异度较高, 其中桦属(6.6%~7.9%, 平均值 7.0%)和栎属(5.6%~6.6%, 平均值 6.1%)含量相对较高, 榆属(*Ulmus*)(2.6%~4.4%, 平均值 3.4%)、栗属(1.8%~5.1%, 平均值 3.1%)、桤木属(*Alnus*)(0.9%~4.3%, 平均值 3.1%)次之, 还可见胡桃属(*Juglans*)、枫香属(*Liquidambar*)、朴属(*Celtis*)、枫杨属、椴属(*Tilia*)、山毛榉属、楝属(*Melia*)、麻黄属、胡颓子属(*Elaeagnus*)、木犀(*Osmanthus*)、漆树属等属和芸香科(Rutaceae)、桑科(Moraceae)等科, 但含量均低于 2.0%。被子植物(草本)中香蒲属

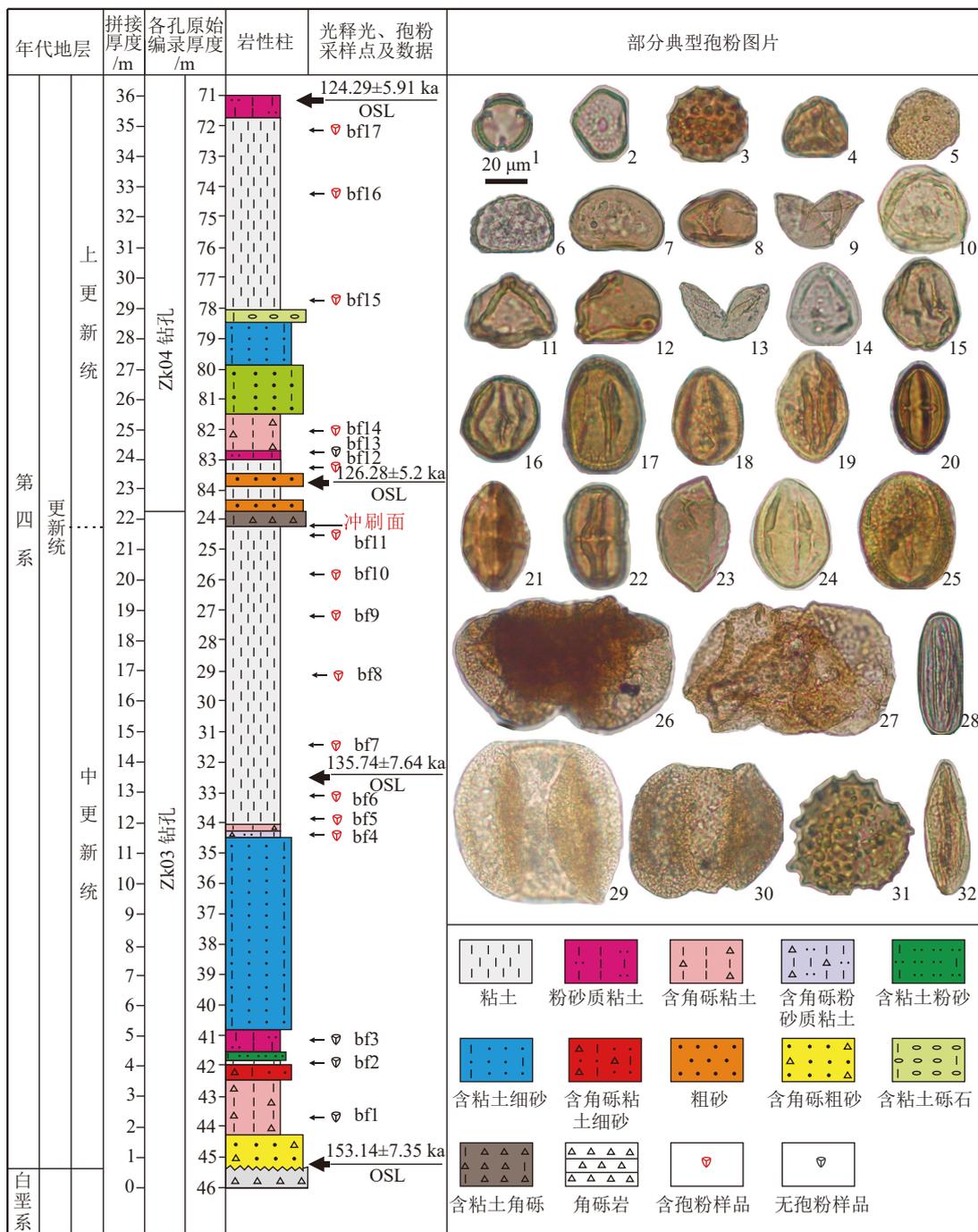


图 2 西乌旗地区巴音华盆地中—晚更新世钻孔柱状图及典型孢粉化石

Fig. 2 Bore column and typical palynological fossils of Mid-Late Pleistocene in Bayinhua Basin, West Ujimqin Banner area

1—蒿属(*Artemisia*); 2—香蒲属(*Typha*); 3—藜科(*Chenopodiaceae*); 4—凤尾蕨属(*Pteris*); 5—莲座蕨属(*Angiopteris*); 6, 7—多足蕨属(*Polymodium*); 8—鳞盖蕨属(*Microlepria*); 9, 13—杉科(*Taxodiaceae*); 10—榆属(*Ulmus*); 11, 12—桦属(*Betula*); 14—榛属(*Corylus*); 15—枫杨属(*Pterocarya*); 16—槭树属(*Acer*); 17—蓼属(*Polygonum*); 18—十字花科(*Cruciferae*); 19—栎属(*Quercus*); 20—山毛榉属(*Fagus*); 21—唇形科(*Labiatae*); 22—栗属(*Castanea*); 23—禾本科(*Gramineae*); 24—*Rhus*(漆树属); 25—大戟科(*Euphorbiaceae*); 26—松属(*Pinus*); 27—罗汉松属(*Podocarpus*); 28, 32—麻黄属(*Ephedra*); 29—云杉属(*Picea*); 30—油杉属(*Keteleeria*); 31—菊科(*Compositae*)

(9.5%~11.4%, 平均值 10.5%) 占绝对优势, 含量超过草本植物总量的 1/3, 禾本科、莎草科及狐尾藻属

(*Myriophyllum*)、蒿属含量相对较高, 平均值略高于 2.0%。此外, 还见有少量藜科(*Chenopodiaceae*)、菊

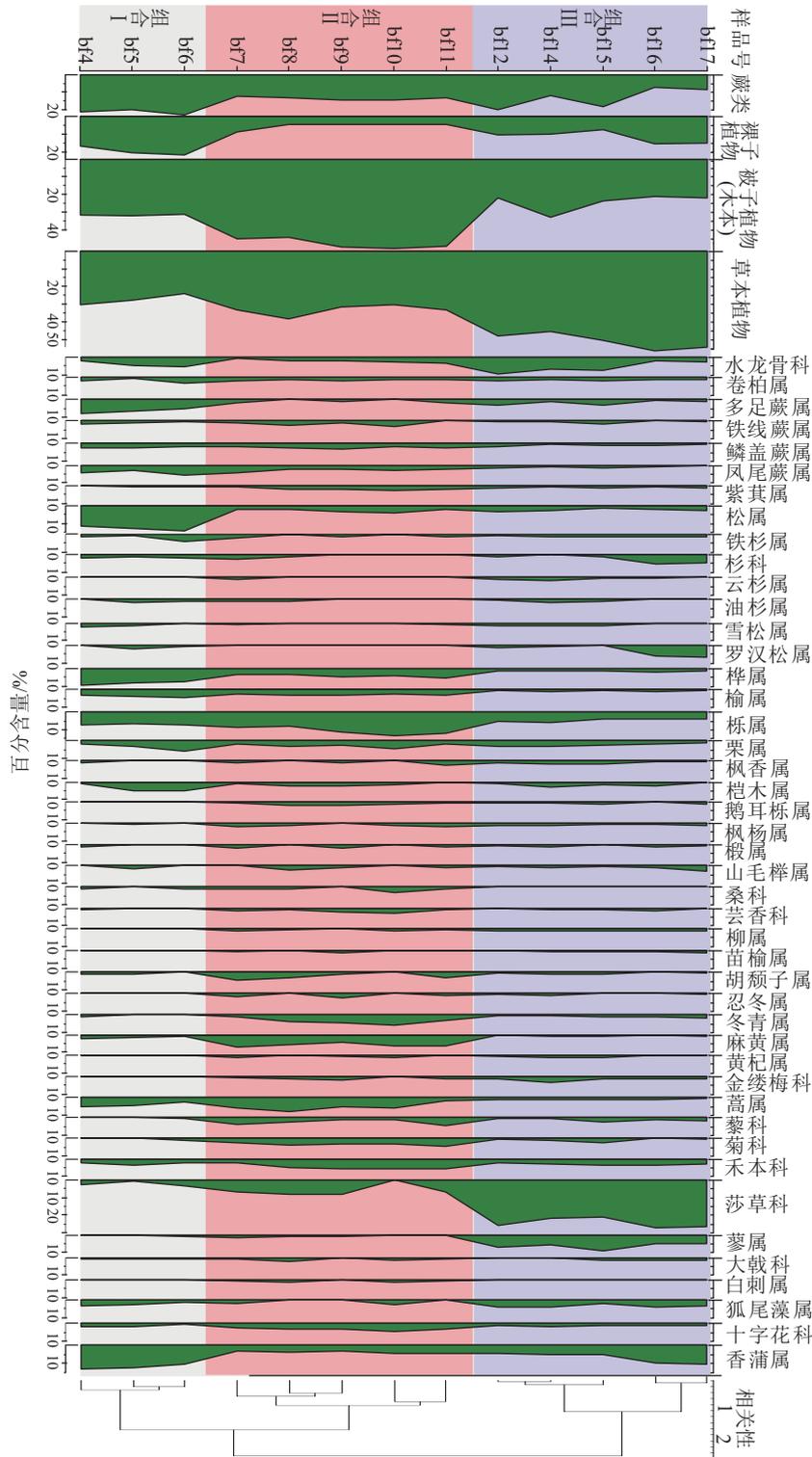


图 3 西乌旗巴音华盆地中一晚更新世重要孢粉垂向分布图

Fig. 3 Vertical distribution of major representatives of spore and pollen through the Mid-Late Pleistocene in Bayinhua Basin, West Ujimqin Banner area

科、唇形科、大戟科、石竹科(Caryophyllaceae)、苦
苣苔科(Gesneriaceae)、百合科(Liliaceae)及蓼属、薔

薇属(*Rosa*), 其平均含量均小于 1.5%。蕨类植物中
水龙骨科(8.8%~9.9%, 平均值 9.4%)含量最高, 凤尾

蕨属(*Pteris*)、水蕨属(*Ceratopteris*)、卷柏属(*Selaginella*)、毛蕨属(*Amgustus*)、紫萁属(*Osmunda*)、铁线蕨属(*Adiantum*)、鳞盖蕨属等属含量均较少。

由于本组合最低层位孢粉采样位于 34.3 m 处,但该组合底界光释光年龄样品采于 45.43 m 处。二者距离相差较远,故组合 I 底界年代远小于 153.1 ka,但该段无其他年龄控制,故暂以 45.43 m 处的光释光年龄代替组合 I 底界的年龄。

(2) 栎属-麻黄属-蒿属孢粉组合(II)

本组合位于 ZK03 钻孔 24.6~31.5 m 处,沉积时代为 135.8~126.3 ka。组合中被子植物(木本)(44.2%~53.5%,平均值 50.6%)含量最高,被子植物(草本)(27.6%~35.0%,平均值 30.1%)次之,蕨类植物(12.6%~16.2%,平均值 14.4%)和裸子植物(3.6%~7.0%,平均值 5.0%)含量较少。该组合中裸子植物极不发育,仅含有少量松属、铁杉属、云杉、油杉属、雪松属及柏科、杉科,其平均含量大多小于 1.5%。被子植物(木本)分异度较高,其中栎属含量明显高于其他科属,含量在 6.3%~11.2% 之间,平均值为 8.9%。麻黄属(3.8%~5.6%,平均值为 5.0%)含量次之。桦属、榆属、栗属、胡颓子属、冬青属(*Ilex*)等属含量相对较高,平均含量在 2.0%~3.5% 之间。此外,还可见有少量枫香属、桤木属、鹅耳枥属(*Carpinus*)、榉属(*Zelkova*)、枫杨属、椴属、山核桃(*Carya*)、黄杞属(*Engelhardtia*)、桔梗属(*Platycodon*)、苗榆属(*Ostrya*)、榛属、柳属(*Salix*)、木犀属、槭树属、漆树属、紫树属(*Nyssa*)等属,以及金缕梅科(*Hamamelidaceae*)、杜鹃科(*Ericaceae*)、芸香科、桑科等,其平均含量均小于 1.5%。被子植物(草本)中蒿属(1.8%~7.0%,平均值 4.6%)、禾本科(1.8%~4.8%,平均值 4.0%)、莎草科(0~7.3%,平均值 5.0%)含量相对较高,藜科、菊科、十字花科和香蒲属次之,还可见少量白刺属(*Nitria*)、蓼属、蔷薇属等属及百合科、大戟科、石竹科、苦苣苔科等科,平均含量均小于 1.0%。蕨类植物中见有水蕨属、卷柏属、多足蕨属、铁线蕨属、鳞盖蕨属、凤尾蕨属、紫萁属、毛蕨属等属及水龙骨科,其含量相差不大,平均含量在 2.0%~3.0% 之间。

(3) 莎草科-香蒲属-水龙骨科孢粉组合(III)

本组合位于 ZK04 钻孔 72.2~83.4 m 处,沉积时代为 126.3~124.3 ka。组合中被子植物(草本)

(42.2%~50.8%,平均值 47.0%)含量最高,被子植物(木本)(27.6%~35.0%,平均值 30.1%)次之,蕨类植物(8.6%~19.6%,平均值 13.1%)和裸子植物(6.6%~14.2%,平均值 10.5%)含量较少。该组合中裸子植物总体含量不高,见有松属、铁杉属、云杉属、油杉属、雪松属、罗汉松属及柏科、杉科,仅罗汉松属含量略高,含量在 0~6.0% 之间,平均值为 3.4%。被子植物(木本)分异度较高,但除 *Quercus* (3.2%~4.9%,平均值 3.9%)含量略高外,其余桦属、榆属、胡桃属、麻黄属、枫香属、桤木属、鹅耳枥属、榉属、枫杨属、椴属、山核桃、黄杞属、紫树属、桔梗属、苗榆属、榛属、柳属、木犀属、槭树属、漆树属等属,以及金缕梅科、杜鹃科、芸香科等科的平均含量均小于 1.5%。被子植物(草本)中莎草科占据绝对优势,其含量在 17.8%~24.4% 之间,平均值为 21.4%。其次为香蒲属,平均含量为 6.3%。狐尾藻属、蓼属及禾本科含量略低于香蒲属,平均值在 2.6%~5.5% 之间。还可见少量蒿属、蔷薇属,以及藜科、菊科、百合科、大戟科、石竹科、苦苣苔科、十字花科等科,其平均含量均小于 1.5%。蕨类植物水龙骨科(2.1%~8.4%,平均值 5.0%)占有绝对优势,其余水蕨属、卷柏属、多足蕨属、铁线蕨属、鳞盖蕨属、凤尾蕨属、紫萁属、毛蕨属含量较少且较均等,大部分平均值小于 1.5%。

4 讨论

4.1 古植被与古气候恢复

为恢复古植被并重建古气候,依据孢粉母体植物的生态属性(寇香玉, 2005),将孢粉分为 3 个生态类型进行统计,包括植被类型、代表性植被气候带属性、代表性植被干湿属性。根据 3 个孢粉组合特征,可以将本剖面产出的植物分为 3 种植被面貌,并对应 3 种气候类型。

(1) 气候期 1: 对应于松属-桦属-香蒲属孢粉组合代表的植被面貌

该组合中阔叶植被与草本植被含量相差不大,二者在组合中占据主导地位。阔叶植被中以温带型植被桦属和温带-亚热带型栎属、榆属、桤木属为主,占据 1/2 以上,且在阔叶植被中大多以中生和湿生分子为主,仅见少量麻黄属、胡颓子属等旱生分子。草本植被中以湿生分子香蒲属为主,狐尾藻属、莎草科等湿生分子也占有较大比例,藜科、菊科、禾

本科、蒿属等旱生分子零星散布,所占比例较小。蕨类植物在本组合中所占比例较大,均为喜湿喜热型分子。本组合中针叶植被比例在 15.9%~21.8% 之间,其中以松属为主,占据约 1/2 比例,但据前人统计,松属的花粉产量大且传播距离远,属于超代表性花粉(李文漪等,1990;萧家仪,1996)。本组合中松属花粉平均含量低于 20%,不足以说明研究区存在松林,因此针叶植被的含量比例可能比本文中统计数更低。综上所述可以看出,该时期植被类型为阔叶林-草原型兼有少量针叶林(图 4),气候环境为相对温暖的湿润型气候。

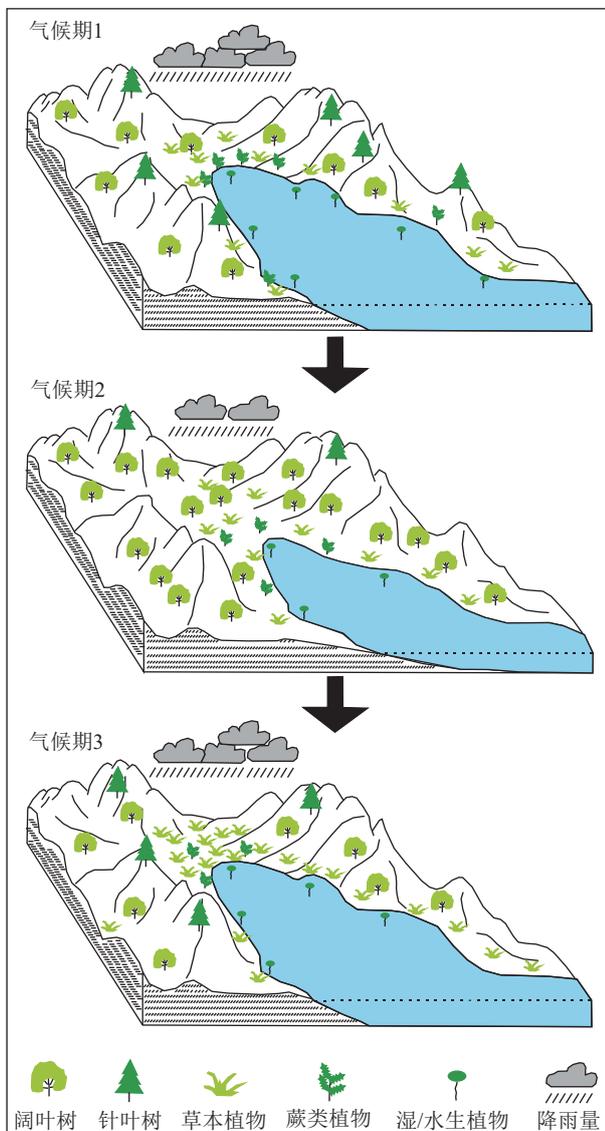


图 4 西乌旗巴音华盆地各气候期植被变迁示意图

Fig. 4 Vegetation evolution of each climate stage in Bayinhua Basin, West Ujimqin Banner area

(2)气候期 2: 对应于栎属-麻黄属-蒿属孢粉组合所代表的植被面貌

该组合与组合 I 相比,针叶植被急剧衰退,阔叶植被大幅度增加,占总含量的 1/2 以上。阔叶植被中以胡桃属、鹅耳枥属、朴属、榉属、椴属、柳属、榛属、苗榆属、忍冬属(*Lonicera*)等属为代表的温带型分子相比组合 I 明显增多。以麻黄属、胡颓子属为代表的干旱型分子也显著增加。草本植被所占比例与组合 I 相比虽没有明显变化,但是以蒿属、蓼属、藜科、菊科、禾本科为代表的旱生分子显著增加,湿生代表性植被香蒲属、狐尾藻属显著衰退。此外,本组合中还出现了组合 I 中未出现的典型干旱型代表分子白刺属。不过湿生植被莎草科的含量相对较高,说明其干旱程度相对较轻,属于半干旱型。蕨类植物含量相对减少,说明该时期湿度略微减弱,温度略微降低。针叶植被在本组合中的平均含量小于 5%,由于针叶植被大多相对高大,花粉可漂移的距离相对较远,异地外来花粉的可能性较大,所以该组合中可能不含有针叶型植被。综上所述可以看出,该时期植被类型为阔叶林-草原型(图 4),气候环境为相对温凉的半干旱型气候。

(3)气候期 3: 对应于莎草科-香蒲属-水龙骨科孢粉组合所代表的植被面貌

该组合与组合 II 相比显著的特征就是草本植被大幅度增加,约占总含量的 50%。阔叶植被的含量急剧下降,比例不到 30%。草本植被中湿生型代表分子莎草科含量占有绝对优势,香蒲属、狐尾藻属等湿生分子相比组合 II 也显著增加,干旱型代表分子藜科、菊科、禾本科及蒿属的含量显著下降,白刺属消失。阔叶植被中桦属、榆属、鹅耳枥属、朴属等温带型分子含量略有下降,亚热带型分子含量略有增加,干旱型分子麻黄属和胡颓子属明显减少,枫香属、桤木属、山毛榉属、紫树属等喜湿型分子略有增加。蕨类植物含量变化不大。针叶植被含量比组合 II 中略有增加,但是由于其含量较低,且松属具有超代表性,所以针叶植被不足以指示气候环境。总体来说,该时期植被类型为稀树-草原型(图 4),气候环境为相对温暖的湿润型气候。

4.2 共存因子分析

近 20 年来,古气候的研究经历了从定性到定量,以及从研究当今气候向研究地质历史时期气候的发展。由于第四纪化石植被与现生植被具有较清晰的亲缘性,且大多现生植被具有较明显的定量

气候参数属性,所以越来越多的学者利用二者之间的关系定量重建古气候。目前,针对孢粉化石的定量研究,较常见的方法是共存因子分析法(the Coexistence Approach)(Mosbrugger et al., 1997)。该方法是以现存最近亲缘类群的原理为基础,即假定化石植物与其现存最近亲缘类群所需要的气候与生态环境条件相同或相近。采用多个化石植物的现存最近亲缘类群现代气候参数和古地理参数变化范围的叠加产生共存区间,经转化得到古气候参数的定量数值(韦一等, 2021)。

本次研究由于年代与现在较近,孢粉名称为现生植被名称,所以无需查询其现存最近亲缘类群。孢粉共存因子分析法主要分为以下3步:①根据资料统计孢粉植物的地理分布;②根据前人气象局资料查询各孢粉植物分布范围内的各项气象数据;③选取各孢粉植物分布范围内的各项气象数据进行叠加,获得孢粉组合气候参数范围(寇香玉, 2005; 史冀忠等, 2008)。本文讨论该地区古气候类型,重点选取各孢粉组植物的年均温(MAT)和年均降雨量(MAP)2个参数进行叠加(表1;图5)。

表1 巴音华盆地中—晚更新世孢粉植物群及其气候参数

Table 1 Palynofloras in the Mid-Late Pleistocene in Bayinhua Basin and their climatic parameter

孢粉类型	年均温/°C		年降雨量/mm		孢粉类型	年均温/°C		年降雨量/mm	
	最小	最大	最小	最大		最小	最大	最小	最大
木本针叶植物					木犀属	-4.9	25.5	61.5	2394.5
松属	-5.2	24.7	170.5	2822.7	芸香科	-5.2	25.5	61.5	1869.9
铁杉属	-0.4	23.8	279.4	2394.5	柳属	-5.2	23.8	16.4	1942.5
杉科	5.7	24.7	459.5	2447.1	榛属	-3.2	21.9	318.5	2394.5
云杉	-4.9	22.7	291.6	1815.6	苗榆属	-4.9	23.2	291.6	1815.6
油杉属*	11.2	24.7	613.8	1815.6	胡颓子属	-4.1	25.5	7.6	2822.7
雪松属	10.2	20.9	33.4	1663.9	杜鹃科 [#]	-4.9	24.7	403.4	1869.9
罗汉松属	8.5	24.7	797.5	1653.5	忍冬属	-4.1	25.5	303.9	1869.9
柏科	-7.3	23.8	10.0	2447.1	冬青属 [#]	-1.2	25.5	201.6	2822.7
木本阔叶植物					麻黄属	-4.9	19.8	16.4	1113.3
桦属	-4.9	23.2	291.6	1815.6	黄杞属	-1.6	24.7	257.5	1653.5
榆属	-5.2	25.5	16.4	1900.3	金缕梅科	8.5	25.5	531.0	1293.7
胡桃属	-1.6	23.0	257.5	2074.4	山核桃	11.3	22.6	601.1	1942.5
栎属	-5.2	25.5	209.1	1900.3	草本植物				
栗属	5.4	25.5	613.8	2822.7	蒿属	-4.9	25.5	303.9	1869.9
枫香 [#]	8.5	23.2	474.6	1942.5	藜科	-5.2	25.5	303.9	1869.9
桤木属	-5.2	23.8	355.2	2394.5	菊科	-4.9	24.7	303.9	1869.9
鹅耳枥属	2.3	25.5	570.3	1785.2	禾本科	-4.9	25.5	303.9	2447.1
朴属	4.9	25.5	318.5	1869.9	莎草科 [#]	-4.9	25.5	303.9	2394.5
榉属	9.0	23.8	573.9	2822.7	蓼属 [#]	-4.9	24.7	16.4	1785.2
枫杨属	5.7	23.8	257.5	1540.2	蔷薇属	-4.9	24.7	303.9	2072.8
椴属	-5.2	22.6	209.1	2394.5	唇形科	-4.9	24.7	16.4	1942.5
山毛榉属 [#]	5.7	18.5	554.9	2394.5	大戟科	-5.2	25.5	33.4	2822.7
楝属	7.6	25.5	475.0	1870.0	苦苣苔科	2.3	25.5	474.6	1815.60
漆树属	-0.4	23.8	277.6	2394.5	白刺属 [@]	-1.6	14.9	0	1031
木兰属	-0.4	25.5	318.5	2822.7	石竹科	-4.9	25.5	601.1	1942.5
杨梅属*	11.3	24.7	613.8	2074.4	狐尾藻属 [#]	0.9	25.5	340.5	2822.7
紫树属 [△]	-1.1	23.9	305.0	2645.0	十字花科 [#]	-5.2	24.7	16.4	2129.5
槭树属	-1.1	24.0	115.0	2559.0	香蒲属 [#]	-4.9	24.7	16.4	1815.6
桑科	3.97	27.17	-	-					

注: *据李相传, 2010; [#]据杨毅, 2015; [△]据王浩飞, 2019; [@]据徐增连, 2015; 其他据徐景先, 2002

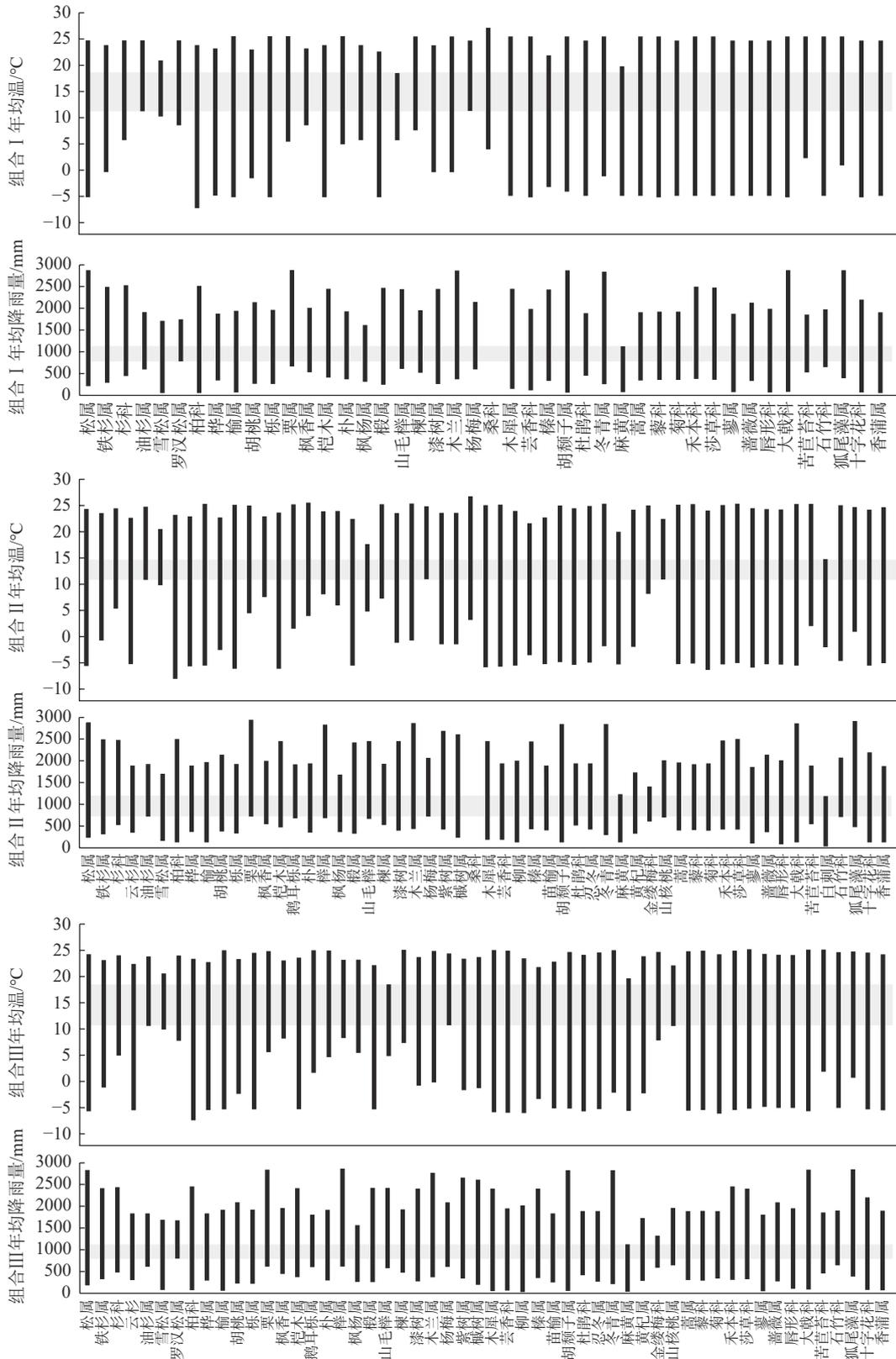


图 5 西乌旗地区巴音华盆地孢粉植物类群中种子植物类群年均温度和年均降雨量共存区间

Fig. 5 Coexistence interval of mean annual precipitation and mean annual temperature of seed plants in palynoflora from the Bayinhua Basin, West Ujimqin Banner

采用共存因子分析法分别定量恢复了西乌旗地区中一晚更新世之交3个气候期的古气候,获得古气候参数如下:气候期1的年均降雨量(MAP)均在797.5~1113.3 mm之间,年均温度(MAT)均在11.3~18.5℃之间;气候期2的年均降雨量均在613.8~1031 mm之间,年均温度均在11.3~14.9℃之间;气候期3的年均降雨量均在797.5~1113.3 mm之间,年均温度均在11.3~18.5℃之间。

共存分析法在研究古环境时,只对孢粉植物生存的地区内的气候参数进行分析,对孢粉含量变化指示的环境波动无能为力。例如,共存因子分析法中麻黄属所指示环境的年均温为-4.9~19.8℃,年降雨量为16.4~1113.3 mm。当麻黄属含量发生变化时,由占总含量的10%增加到25%,共存分析法得出的数值是相同的,但是实际上环境发生了明显变化。由此可以看出,共存分析法的精度适合划分相对大尺度的气候带或气候区。而在该气候带内气候的相对波动需要用孢粉植物的植被面貌和相对含量的变化来体现。因此,本次孢粉共存因子分析法得出的结果是用来辅助证明用传统定性方法恢复古气候的结果。通过对比可知,使用传统定性分析得出,从气候期1至气候期3,气候经历了从相对温暖的湿润型气候→相对温凉的半干旱型气候→相对温暖的湿润型气候的转变,而使用共存因子分析得出的各气候期年均温和年均降雨量参数值的变化趋势与之完全耦合。

4.3 古气候响应

从全球范围看,中更新世/晚更新世之交是地球热力学系统系统发展的重要转折期,全球气候受冰期—间冰期旋回的影响而波动(杨吉龙等,2016)。全球性气候多次发生波动,冷暖更迭,植物类型受其影响非常大(王丽鑫等,2023)。本次研究选取旱生代表分子白刺属、麻黄属、蒿属、禾本科、藜科(徐增连,2015),湿生代表分子香蒲属、狐尾藻属、莎草科(史冀忠等,2008)作为西乌旗地区的干湿度指标;选取喜热型代表分子罗汉松属、铁杉属、枫香属、楝属、木兰属(*Magnolia*)、漆树科、芸香科及蕨类(徐增连,2015)作为温度指标,再结合孢粉共存因子分析得出的各组合的年均温和年降雨量作为温度和干湿度的辅助指标,与代表全球温度变化趋势的格陵兰冰芯氧同位素曲线对比(Johnsen et al., 1997; 雒聪文等,2019)(图6),得出各气候期具有以下特征。

气候期1(153.1~135.8 ka):该时期格陵兰冰芯氧同位素主体表现为负漂移,指示全球温度上升,全球处于间冰期(Johnsen et al., 1997; 雒聪文等,2019)。研究区孢粉组合I中旱生分子代表含量整体偏低,湿生分子含量相对较高,喜热分子整体均较高。

气候期2(135.8~126.3 ka):格陵兰冰芯氧同位素主体表现为正漂移,指示全球温度下降(Johnsen et al., 1997; 雒聪文等,2019),同时期银川盆地孢粉组合显示该时期温度转凉(杨振京等,2001);河北阳原盆地地球化学元素指标也指示该时期温度转凉(吉云平等,2016)。孢粉组合II中旱生分子代表含量整体大幅度增加,湿生分子含量大幅度下降,喜热分子也有一定的降低。从孢粉共存因子分析得出的气候参数可以看出,该时期相比气候期1,年均温和年均降雨量均有所下降。

气候期3(126.3~124.3 ka):126 ka开始进入晚更新世,126~70 ka,为末次间冰期,海平面上升,全球气候变暖(庄振业等,1999; 萧家仪等,2005; 杨旭等,2017)。格陵兰冰芯氧同位素从126 ka起表现为负漂移,指示温度上升(Johnsen et al., 1997; 雒聪文等,2019)。在中国,河北阳原盆地地球化学元素指标指示该时期为温暖湿润的气候(吉云平等,2016);北京平谷区磁化率研究得出,该时期为温暖湿润的气候(何付兵等,2020)。在该阶段,研究区孢粉组合III中旱生分子代表含量急剧下降,湿生分子含量大幅度上升,喜热分子也有一定的上升。从孢粉共存因子分析得出的气候参数可以看出,该时期相比气候期2年均温和年均降雨量均有所提升。

整体看,西乌旗地区孢粉组合反映的3个气候期在时间上与腾格里沙漠西北缘青土湖ZK1孢粉组合基本对应(王丽媛等,2014),其中气候期1对应于该孔孢粉组合II,气候期2对应于孢粉组合III,气候期3对应于孢粉组合IV的下部。而其孢粉组合表现出的湿度变化趋势为偏干—干—偏湿;温度变化趋势为偏温—凉—偏温。其温度和湿度变化趋势基本与研究区各气候期对应。从长期变化趋势看,研究区孢粉植物群记录的古气候信息与全球总体温度变化趋势也能很好地耦合(图6)。

5 结论

(1)在西乌旗巴音华盆地ZK03钻孔和ZK04钻

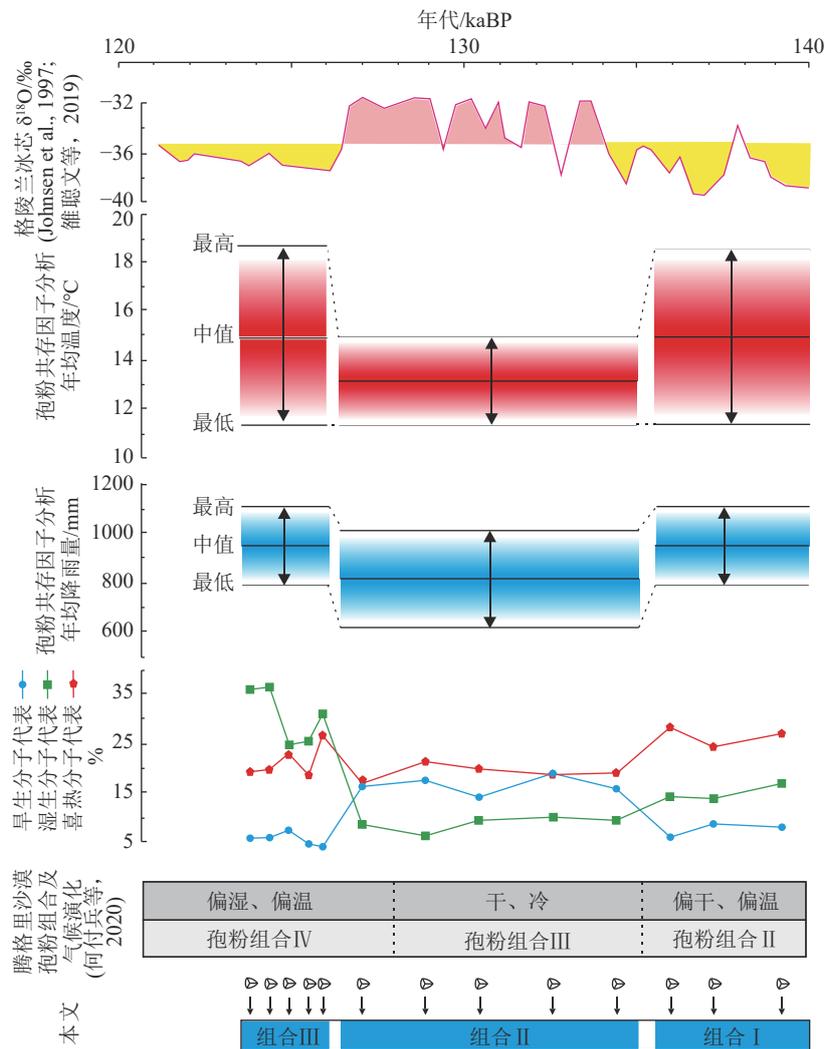


图 6 巴音华盆地中更新世/晚更新世之交各生物类群百分含量、年均温度、年均降雨量与格陵兰冰芯氧同位素及腾格里沙漠气候演化对比图

Fig. 6 Comparison of percentage of biomass, average annual temperature, average annual rainfall with oxygen isotopes in Greenland ice cores and Tengger Desert climatic evolution during Mid-Late Pleistocene in Bayinhua Basin

孔 153.1~124.3 ka 时间段, 共鉴定出孢粉化石 68 个科属, 可划分为 3 个孢粉组合, 自下而上分别为组合 I, 松属-桦属-香蒲属孢粉组合; 组合 II, 栎属-麻黄属-蒿属孢粉组合; 组合 III, 莎草科-香蒲属-水龙骨科孢粉组合。其中, 组合 I 和组合 II 属于中更新世, 组合 III 属于晚更新世。

(2) 中更新世晚期—晚更新世早期, 西乌旗巴音华地区植被类型经历了阔叶林-草原型兼有少量针叶林→阔叶林-草原型→稀树-草原型的转变。

(3) 通过传统组合特征分析结合共存因子分析法得出, 西乌旗巴音华盆地中更新世晚期—晚更新世早期可划分为 3 个气候期, 分别与 3 个孢粉组合沉积时间对应。其中, 气候期 1 为相对温暖的湿润

型气候, 年均温为 11.3~18.5℃, 年降雨量为 797.5~1113.3 mm; 气候期 2 为相对温凉的半干旱型气候, 年均温为 11.3~14.9℃, 年降雨量为 613.8~1031 mm; 气候期 3 为相对温暖的湿润型气候, 年均温为 11.3~18.5℃, 年降雨量为 797.5~1113.3 mm。在中更新世/晚更新世之交, 气候经历了由凉到温的转变, 温度变化趋势与格陵兰冰芯氧同位素指示的全球平均温度变化趋势一致。

参考文献

Clark P U, Archer D, Pollard D, et al. 2008. The middle Pleistocene transition: Characteristics, mechanisms, and implications for long-term changes in atmospheric pCO₂[J]. Quaternary Science Reviews, 25(23):

- 3150–3184.
- Cohen K M, Finney S C, Gibbard P L, et al. 2018. The ICS International Chronostratigraphic Chart. <http://www.stratigraphy.org/ICSChart/ChronostratChart2018-08Chinese>.
- Demencol P B. 2004. African climate change and faunal evolution during the Pliocene–Pleistocene[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1/2): 3–24.
- Guiot J, Pons A, De Beaulieu L, et al. 1989. A 140000 year continental climate reconstruction from two European pollen records[J]. *Nature*, 338: 309–313.
- Johnsen S J, Clausen H B, Dansgaard W, et al. 1997. The $\delta^{18}\text{O}$ record along the Greenland Ice Core Project deep ice core and the problem of possible Eemian climatic instability[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 102(C12): 26397–26410.
- Mosbrugger V, Utescher T. 1997. The coexistence approach: a method for quantitative reconstruction of Tertiary terrestrial paleoclimate data using plant fossils[J]. *Palaeogeogr, Palaeoclimatol, Palaeoecol*, 134: 61–86.
- Wang P X, Tian J, Cheng X R, et al. 2003. Carbon reservoir changes preceded major ice–sheer expansion at the mid–Brunhes event[J]. *Geology*, 31(3): 239–242.
- 崔海超. 2009. 西乌珠穆沁旗地区第四纪沉积物特征及其环境变化意义[D]. 吉林大学硕士学位论文: 1–87.
- 何付兵, 马雪利, 吴超, 等. 2020. 北京平原区中更新世晚期以来古环境演变——以平谷 Zk09 钻孔为例[J]. *城市地质*, 15(3): 288–295.
- 吉云平, 杨振京, 赵华, 等. 2016. 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*, 18(3): 487–496.
- 寇香玉. 2005. 新生代孢粉分析与古气候定量重建的研究[D]. 中国科学院植物研究所博士学位论文: 1–98.
- 李博, 文雪峰, 赵斌, 等. 2015. 南阳盆地更新世以来的孢粉分析及其古气候记录[J]. *地质科技情报*, 34(1): 49–56.
- 李文漪, 姚祖驹. 1990. 表土中松属花粉与植物间数量关系的研究[J]. *植物学报*, 32(12): 943–950.
- 李相传. 2010. 浙江东部晚新生代植物群及其古气候研究[D]. 兰州大学博士学位论文: 1–150.
- 刘博华, 吴芳, 张绪教, 等. 2024. 青藏高原东北缘红寺堡盆地晚更新世沉积物元素地球化学特征及其环境指示意义[J]. *地质通报*, 43(1): 33–45.
- 刘凯, 宋运红, 杨凤超, 等. 2023. 松嫩平原北部全新世黑土剖面孢粉组合及其对环境演化的制约[J]. *地质通报*, 42(12): 2121–2131.
- 雒聪文, 马玉贞, 王凯, 等. 2019. 东亚地区 MIS 5 时期孢粉记录的植被与气候研究进展[J]. *地球科学进展*, 34(5): 540–551.
- 史冀忠, 刘招君, 柳蓉, 等. 2008. 辽宁抚顺盆地始新世古气候定量研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 38(1): 50–55.
- 王浩飞, 郑军, 付孝红, 等. 2019. 贵州盘州地区早渐新世古气候定量重建[J]. *地质科技情报*, 38(1): 90–99.
- 王丽媛, 辛蔚, 程捷. 2014. 腾格里沙漠西北缘青土湖晚第四纪孢粉组合特征与环境变迁[J]. *古地理学报*, 16(2): 239–248.
- 王丽鑫, 代友旭, 王利鹏, 等. 2023. 新疆色帕巴依—柯坪地区中—晚更新世孢粉组合特征及其对古气候的指示[J]. *中国地质*, 50(4): 1268–1276.
- 王婷, 孙有斌, 刘星星. 2017. 中更新世气候转型: 特征、机制和展望[J]. *科学通报*, 62(33): 3861–3872.
- 王伟铭, 张大华. 1990. 内蒙古商都-化德盆地第三纪孢粉组合——兼论中国草原植被的形成[J]. *微体古生物学报*, 7(3): 239–253.
- 王永, 姚培毅, 迟振卿, 等. 2010. 内蒙古黄旗海全新世中晚期环境演变的沉积记录[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 29(2): 149–156.
- 韦一, 杨兵, 夏浩东, 等. 2021. 抚顺盆地中-晚始新世古植被与古气候[J]. *地球科学*, 46(5): 1848–1861.
- 韦一, 杨兵, 邓会娟. 2022. 百色盆地渐新世古植被与古气候[J]. *地质科技通报*, 41(4): 197–206.
- 萧家仪, 王丹, 吕海波, 等. 2005. 苏北盆地晚更新世以来的孢粉记录与气候地层学的初步研究[J]. *古生物学报*, 44(4): 591–598.
- 萧家仪. 1996. 圩墩遗址第五次发掘植物孢粉和硅酸体分析[J]. *东南文化*, 1: 47–50.
- 徐景先. 2002. 云南中西部地区晚第三纪孢粉植物群及其古植被和古气候研究[D]. 中国科学院植物研究所博士学位论文: 1–168.
- 徐增连. 2015. 青藏高原东北缘循化盆地渐新世—中新世孢粉记录与东亚季风演化[D]. 中国地质大学(武汉)博士学位论文: 1–125.
- 杨兵, 夏浩东, 尚磊, 等. 2019. 全球标准层型剖面和点位(GSSP)研究进展[J]. *地质科技情报*, 38(1): 8–17.
- 杨吉龙, 胥勤勉, 胡云壮, 等. 2016. 中更新世以来华北平原植被演化及其气候响应[J]. *地质通报*, 35(10): 1745–1751.
- 杨旭, 白志强, 陈建强, 等. 2017. 廊坊地区中晚更新世以来沉积地层与环境演化[J]. *地质科技情报*, 36(4): 60–64.
- 杨毅. 2015. 浙江天台-宁海嵊县组孢粉植物群及其古环境和古气候[D]. 兰州大学硕士学位论文: 1–70.
- 杨振京, 童国榜, 刘志明, 等. 2001. 银川盆地中更新世以来的孢粉组合与古环境变化[J]. *地球学报*, 22(4): 369–374.
- 张晓飞, 王永立, 黄猛, 等. 2019. 内蒙古西乌旗中更新世晚期以来古环境变迁的孢粉记录[J]. *地质科技情报*, 38(5): 174–185.
- 庄振业, 许卫东, 刘东生, 等. 1999. 渤海南部 S3 孔晚第四纪海相地层的划分及环境演变[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 19(2): 27–35.
- 自然资源实物地质资料中心. 2015. 内蒙古 1: 5 万呼格吉勒图幅(L50E018019)区域地质矿产调查报告[R].