

中更新世以来华北平原植被演化及其气候响应

杨吉龙^{1,2}, 胥勤勉^{1,2}, 胡云壮^{1,2}, 袁海帆^{1,2}, 肖国桥³, 周新郢⁴
YANG Jilong^{1,2}, XU Qinmian^{1,2}, HU Yunzhuang^{1,2}, YUAN Haifan^{1,2},
XIAO Guoqiao³, Zhou Xinying⁴

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

2. 中国地质调查局泥质海岸带地质环境重点实验室, 天津 300170;

3. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

4. 脊椎动物演化与人类起源重点实验室/中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044

1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2. CGS Key Laboratory of Muddy Coast Geo-environment, Tianjin 300170, China;

3. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

4. Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins of Chinese Academy of Sciences, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Beijing 100044, China

摘要: 中更新世以来气候转型与陆地植被生态系统演变是近年来全球变化研究领域关注的热点问题。基于华北平原东部 G3 孔上部的孢粉分析结果、磁性地层年代, 对中更新世以来华北平原植被演化及其气候响应过程进行研究。结果显示华北平原地区近 1.6Ma 以来植被演化可分为 4 个阶段: 1.6~1.2Ma 为密度较高的暖温带针阔叶混交林, 1.2~0.7Ma 为开阔的暖温带落叶阔叶林, 0.7~0.3Ma 为阔叶疏林草原, 0.3Ma 以来为暖温带落叶阔叶林。华北平原地区中更新世植被转型期对应 O 同位素 36 阶段, 显示转型开始发生于 1.2Ma, 与全球中更新世转型期对应良好。其主要特征表现为林地减少, 针叶林比例下降, 藜科、蒿属、禾本科等草地面积显著增加。0.7Ma 前后华北平原林地进一步退化, 区域植被由原来的落叶阔叶林向疏林草原转变, 0.3Ma 后区域乔木比例可能有所回升。周期性气候变化对植被的影响在花粉谱中也有一定显示, 1.2Ma 之前主要表现为植被林地类型的交替发展, 而 1.2Ma 则主要表现为草原与森林交替发展。

关键词: 华北平原; 磁性地层; 孢粉; 古植被演化

中图分类号: P534.63⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2016)10-1745-07

Yang J L, Xu Q M, Hu Y Z, Yuan H F, Xiao G Q, Zhou X Y. Palaeovegetation evolution and its response to the climate change since Middle Pleistocene in the North China Plain. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(10): 1745-1751

Abstract: The climate transition and the terrestrial vegetation ecosystem evolution since Middle Pleistocene are outstanding hotspot in recent global change studies. Based on pollen analysis and the magnetostratigraphy in G3 core in the eastern part of the North China Plain (NCP), the palaeovegetation since Mid Pleistocene was reconstructed. It reveals the vegetation evolution process and climatic response of NCP during the same time. The results show that the process of regional vegetation evolution can be divided into four stages: 1.6~1.2Ma, warm temperate coniferous and broad-leaved mixed forest with relative high density; 1.2~0.7Ma, mainly open warm temperate deciduous broad-leaved forest; 0.7~0.3Ma, broadleaf woody grassland; 0.3~0Ma, alternate appearance of mainly deciduous broad-leaved forest and woody grassland. The most significant vegetation change in NCP occurred at the time point 1.2Ma, which was around oxygen isotope stage 36 corresponding with the so-called Mid Pleistocene climate transition. At the time point,

收稿日期: 2016-05-19; 修订日期: 2016-09-05

资助项目: 中国地质调查局项目 (编号: 1212011120170, 1212011120089)

作者简介: 杨吉龙 (1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水文地质及第四纪地质研究。E-mail: jilong.y@163.com

both broadleaf and coniferous forest proportions declined, while grassland dominated by Chenopodiaceae, Artemisia and Gramineae increased significantly. At about 0.7 Ma, the forest in NCP deteriorated further and regional vegetation transformed from deciduous broad-leaved forest to woody grassland. Since 0.3 Ma, the proportion of arboreal has risen again. The impact of climate cycles on vegetation is also shown in the pollen spectrum. Before 1.2Ma, the vegetation represented mainly the alternate development of warm temperate and temperate forest types, and after 1.2Ma, the vegetation mainly represented the alternate development of forest and grassland.

Key words: North China Plain; magnetostratigraphy; pollen; palaeovegetation evolution

早中新世后,随着青藏高原隆升,亚洲季风增强,中国北方大部地区逐渐脱离原有的行星气候控制的干旱气候状况,向今天的暖温带季风气候系统转变^[1-2],其生态系统也由原来的草原及荒漠草原为主的植被景观,转变为森林草原-落叶阔叶林为主^[2]。亚洲季风区的典型暖温带植被系统不仅对全球周期性气候变化具有明显的指示意义,而且对过去数百万年时间的气候转型具有较好的响应,因此,是近年来研究过去全球变化的重点^[3-4]。

晚新近纪以来,全球气候经历了几次重要的调整过程,其中最重要的就是中更新世时期全球气候格局的调整,又称中更新世转型^[5-6]。其特征为从“高频低幅”的早更新世气候向中更新世以来“低频高幅”的气候波动,其气候变化周期由40ka的地轴倾斜度周期,转变为100ka的轨道偏心率周期^[7]。期间全球气候降温,陆地表面大部分地区因此变得更加寒冷干燥,冰期时,形成北美、欧洲的冰盖,非洲撒哈拉沙漠形成,亚洲内陆环境进一步干旱化,冬季季风强度增加等^[7-9]。研究中更新世气候格局的重新调整,以及转型前后气候周期性对华北地区植被的影响,有利于了解不同区域植被对全球气候环境变化的响应特征,为研究重大气候转型中的生态环境效应提供重要对比参照物^[10]。

华北平原主要包括淮北平原、黄河平原和海河平原三大区块,位于中国北方地区的东部,属典型的季风区。华北平原北部海河下游地区的凹陷盆地中沉积了厚度大于5000m的新生带地层^[11],其中第四系厚280~410m,最厚约450m。目前,基于这些新生带地层,华北地区的古植被研究已有较多积累,如河北黄骅HB1、衡水HS1及天津CQ1孔花粉谱^[12-14],天津G2孔^[15]。但是由于地层中花粉鉴定数量偏少、地层年代学不完善,以及区域地貌、沉积环境等多元因素的影响,用高质量孢

粉数据来探讨更新世以来华北地区植被转型与气候变化问题的研究并不多见。本次研究利用华北地区东部天津滨海新区沉积凹陷中G3钻孔的岩心材料,通过古地磁年代序列及较高质量的孢粉分析数据重建区域植被历史,并结合已有的植被重建资料,探讨第四纪以来华北地区的植被演变特征及气候变化过程。

1 研究区自然地理概况

位于北纬32°~40°、东经114°~121°的华北平原是中国东部最主要的平原,平均海拔低于50m,由黄河、海河、淮河等带来的泥沙沉积而成。华北平原属暖温带季风气候,四季变化明显,冬季寒冷、少雪;春季干旱,夏季气温高、湿度大、降水集中;全年平均气温8~15℃。年平均降水量南部淮河区800~1000mm,黄河下游600~700mm,海河下游为500~600mm,年降水量分配不平衡,多年平均水面蒸发量为1625mm,降水随季节变化显著,冬、春季少,夏季集中^[16]。

研究区自然植被主要由暖温带落叶阔叶林组成。在现代植被中,阔叶类的落叶栎(*Quercus*)植被组成受纬向的温度效应控制非常明显,在南部为麻栎(*Quercus acutissima*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*),向北逐渐过渡为蒙古栎(*Quercus mongolica*)和辽东栎(*Quercus liaotungensis*)。针叶类以松属(*Pinus*)占主要地位,以赤松(*Pinus densiflora*)为主。另外常见温带的枫桦(*Betula costata*)、五加(*Eleutherococcus senticosus*)、核桃楸(*Juglans mandshurica* Max.)、椴属(*Tilia*)等。华北平原,尤其是海河平原,湖泊和沼泽广布,沼泽植被以芦苇(*Phragmites*)、香蒲(*Typha*)、水葱(*Scirpus*)、苔草(*Carex*)等为主^[17]。

全新世晚期以来,由于人类活动的持续加强,华北地区原生落叶阔叶林遭到大规模破坏,形成了今天普遍的灌丛及灌丛草原,其中灌木以荆条、酸枣为主,草丛以黄背草和白羊草为建群种。

2 研究材料与研究方法

2.1 钻孔地理位置与磁性地层

天津 G3 钻孔(孔口坐标:北纬 117°25′59.5″、东经 38°49′57.6″)位于华北平原东部天津滨海地区的海河南侧,构造上属于黄骅拗陷中的板桥凹陷。孔口高程 2.65m,孔深 905m(图 1)。岩心直径 100mm,全孔取心率 90.0%以上。因此,取心率和岩心状况满足磁性地层学及其他研究的要求。

G3 孔 200m 以上磁性地层中共有 6 个极性段,

包括 3 个正极性段(N1~N3)和 3 个负极性段(R1~R3),正极性段分别为 N1(0~85.0m)、N2(95.5~105.9m)和 N3(177~191.8m),负极性段分别为 R1(85.0~95.5m)、R2(105.9~177.0m)和 R3(191.8~212.5m)。其中 N1(0~85.0m)以正极性为主,并且包含明显的全新世海相层,对应布容极性时(Brunhes),故确定 N1(0~85.0m)对应 C1n(0~0.781Ma)。85.0~212.5m(R1~R3)以负极性为主,对应松山极性时(Matuyama),其中,N2(95.5~105.9m)对应 C1r.1n(0.988~1.072Ma),为

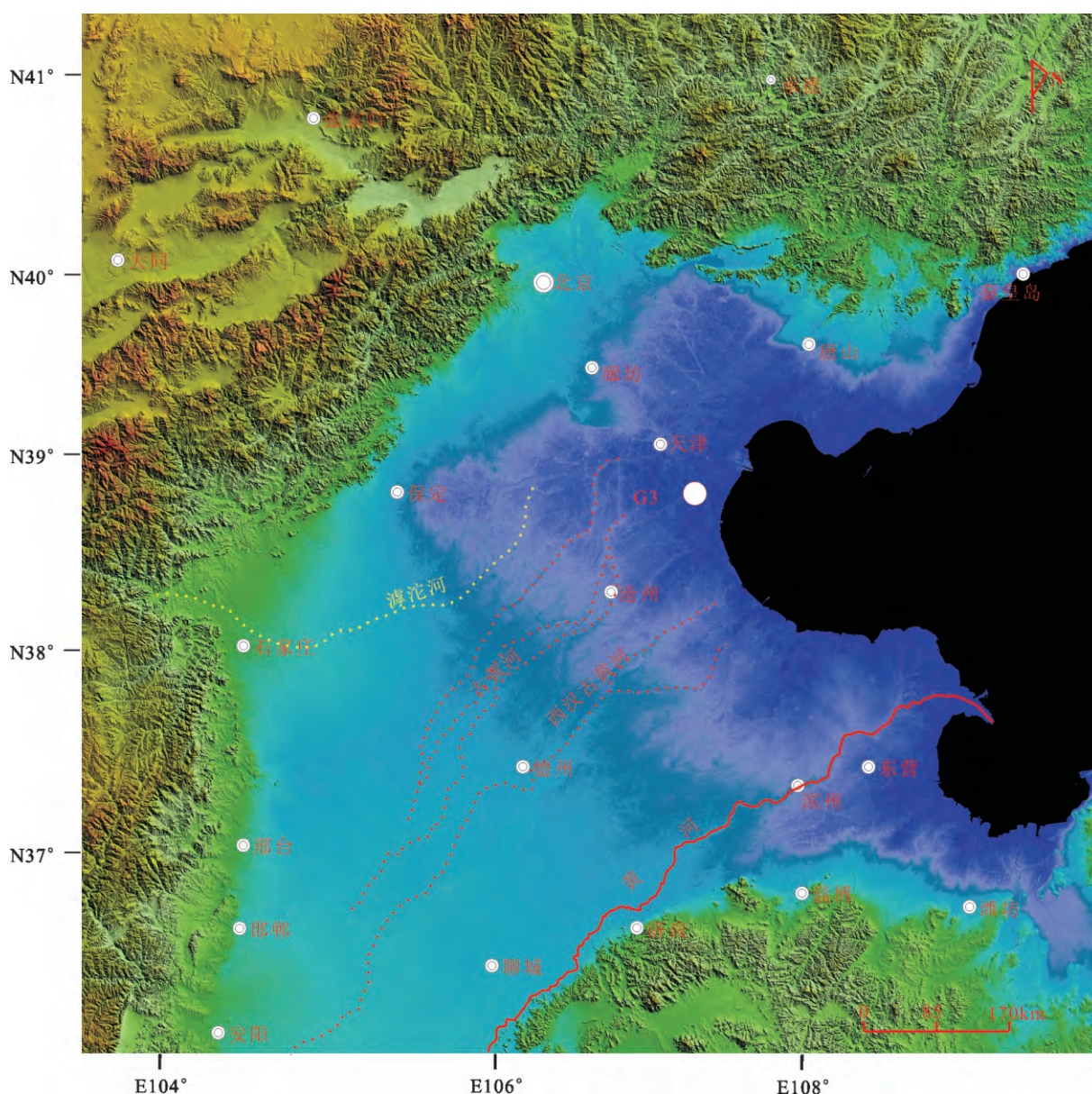


图1 G3钻孔区域位置

Fig.1 Location of the Borehole G3

贾拉米罗(Jaramillo)正极性亚时,奥尔都微(Olduvai)正极性亚时持续事件长,且强度大,在渤海湾沿岸其他钻孔中亦有出现,因此推断N3(177~191.8m)对应C2n(1.778~1.945Ma),为Olduvai正极性亚时(图2)。

2.2 花粉分析方法

天津滨海新区大港G3钻孔花粉样品取样深度在0~905m之间,取样间隔岩性为粘土、亚粘土、亚砂土和砂。每个样品重量为100g,经盐酸和氢氟酸处理、直径7 μm 筛网筛选提取花粉化石。花粉鉴定统计在400倍日本OLYMPUS光学生物显微镜下进行,每个样品鉴定统计的花粉数是观察统计3个玻片以上得到的。

在取得的165个样品的大部分中发现了花粉化石,但仅在160m以上发现连续而丰富的花粉,160m以下花粉数量稀少,绝大多数样品中不足50粒。160m以上共42个样品中花粉相对丰富,其中绝大多数样品鉴定粒数高于100粒,样品平均粒数为218粒。本文选择具有连续有效花粉数据的0~160m地层(0~1.7Ma),用Tilia软件对花粉图谱进行百分比图谱的绘制(图3)。

2.3 研究结果

在42个有效样品中,共鉴定了9167粒花粉,分

属48个科属。其中针叶乔木花粉有铁杉属(*Tsuga*)、冷杉属(*Abies*)、云杉属(*Picea*)和松属(*Pinus*),落叶阔叶乔木花粉有桦属(*Betula*)、鹅耳枥属(*Carpinus*)、桤木属(*Alnus*)、栗属(*Castanea*)、落叶栎属(*Quercus*)、椴属(*Tilia*)、胡桃属(*Juglans*)、榆属(*Ulmus*)、糙叶树属(*Aphananthe*)、枫香属(*Liquidanber*)、山核桃属(*Carya*)、无患子科(Sapindaceae),灌木植物花粉有嚼床科(Acanthaceae)、胡秃子科(Elaeagnaceae)、榛属(*Corylus*)、虎榛子属(*Ostryopsis*)、麻黄属(*Ephedra*)、忍冬科(Caprifoliaceae)、蔷薇科(Rosaceae)。草本植物花粉有早生的地榆属(*Sangnisorba*)、葎草属(*Humulus*)、藜科(Chenopodiaceae)、菊科(Compositae)、蒿属(*Artemisia*)、茜草科(Rubiaceae)、唇形科(Labiataea)、豆科(Leguminosae)、茄科(Solanaceae)、蓼属(*Polygonum*)、十字花科(Crciferae)、石竹科(Caryophllaceae)、伞形花科(Umbellales)等,水生植物有禾本科(Gramineae)、泽泻科(Alismataceae)、香蒲属(*Typha*)、莎草科(Cyperaceae)、荇菜属(*Nymphoides*)。蕨类植物孢子有石松科(Lycopodiaceae)、水龙骨属(*Polypodium*)、凤尾蕨属(*Pteridium*)、卷柏属(*Selaginella*)、水蕨科(Parkeriaceae)、单缝孢子(Monolites)和三缝孢子(Trilites)。

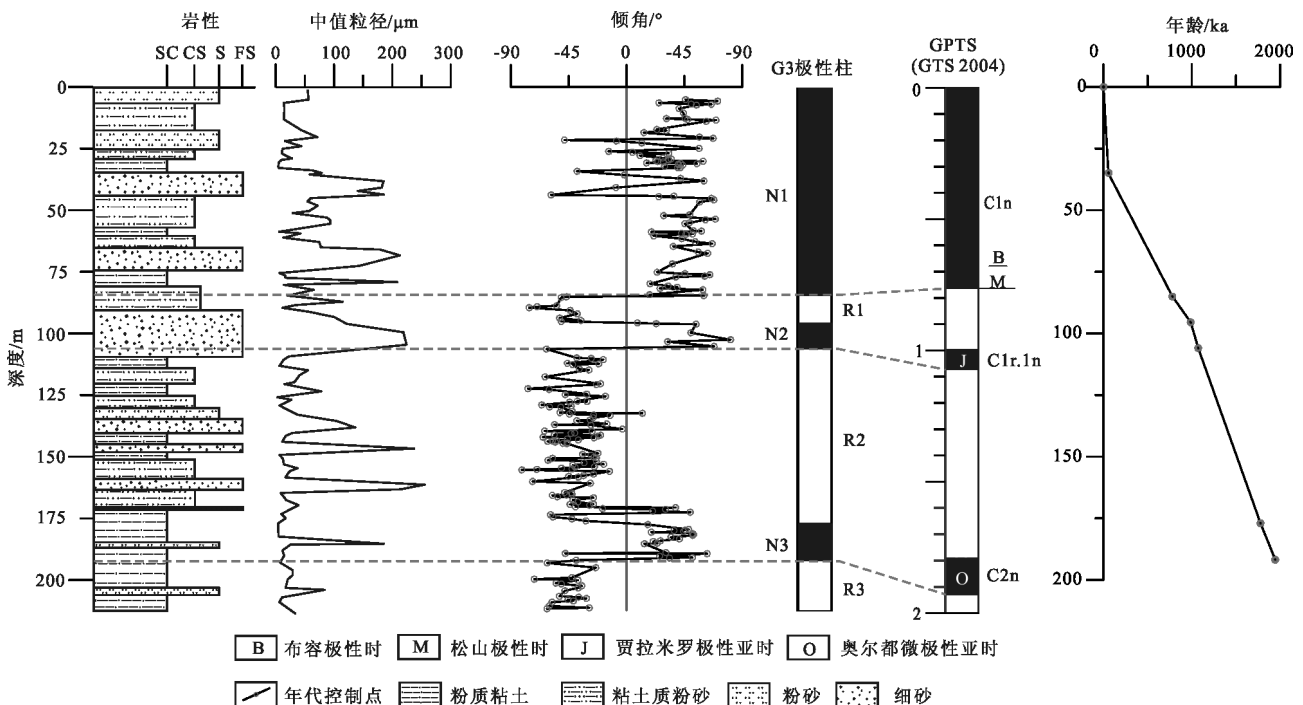


图2 G3孔200m以上岩心柱状图及磁性地层

Fig. 2 Core column and geomagnetic polarity of the upper 200m strata of Borehole G3

通过 Canoco 4.5 软件对 G3 孔中孢粉属种排序 (图 4),发现所有属种可分为 4 个类群:①以云杉、松为代表的温性针叶林;②以栎属、榛属、栗属、胡桃等为主的落叶阔叶林;③以蒿属、藜科、禾本科和桦属为主的草原及疏林草原;④以榆属、蔷薇科、胡颓子和铁杉为主的暖温性灌丛。根据属种的分布规律推断,图 4 中第一主轴(横轴)指示湿度,第二主轴(纵轴)指示温度。

如图 3 所示,根据孢粉聚类分析结果,将 G3 孔中花粉百分比图谱分为 4 个带。

(1)孢粉带 I :松属-云杉属-藜属-菊科-蕨类组合(1.6~1.2Ma)

乔木平均为 58.6%,以松(12.7%~84.2%)和云杉(0~10.6%)为主,早期有少量铁杉,后过渡为云杉,此外还包含含量较低的栎属、榆属、椴属、桦属、胡桃属等常见暖温性阔叶乔木;草本中藜科最多,平均为 8.1%,菊科含量平均 4.3%,最高 14.3%,蒿属含量少于菊科,平均仅 2.8%。蕨类孢子在本带含量较丰富,以石松为主,另外还有水龙骨、凤尾蕨等蕨类。

本段组合指示暖温带针阔叶混交林的特点,其中松属为主要建群种,其花粉的突出代表性使松属在此时具有绝对优势。其中重要的变化在 1.5Ma 前后,针叶林成分由铁杉向云杉转变的过程,显示一次降温事件,由此又可以划分出 2 个阶段,即 I - 1

(1.6~1.5Ma)和 I - 2(1.5~1.2Ma)。草本组合显示,1.5Ma 以前,菊科含量较高,而到后期,禾本科含量逐渐增加,菊科花粉基本消失,显示了区域草地环境由湿转干的过程。

(2)孢粉带 II :松属-栎属-藜-蒿组合(1.2~0.7Ma)

本段乔木花粉整体比例下降,松属比例由上段的平均 51%下降至 15%左右,云杉、铁杉等针叶树基本消失,但落叶栎属比例由带 I 的 1.2%,显著上升为 13.0%,同时桦属花粉也显著增加,另有少量栗属、榆属、胡桃属等阔叶树。草本花粉组成也发生重要改变,藜科、蒿属比例大幅度增加,并伴随禾本科与香蒲属花粉的增加。蒿属平均值由原来的 2.7%增加为 20.7%。

本段孢粉组合指示暖温带落叶阔叶林的植被特征。草本花粉,尤其是蒿属的比例大幅度增加,显示华北地区在该阶段林地消退与草原发展,指示该时期气候干旱化。

(3)孢粉带 III :栎属-松属-藜-蒿-香蒲组合(0.7~0.3Ma)

本段乔木花粉比例最低,松属平均值由 15%进一步下降,栎属略有下降,伴随较多的桦属与少量云杉属、铁杉属,并出现了零星的枫香属、山核桃属花粉。草本中藜科和蒿属依然占据主导地位,显示草原继续发展,而香蒲比例大幅度上升,显示周边

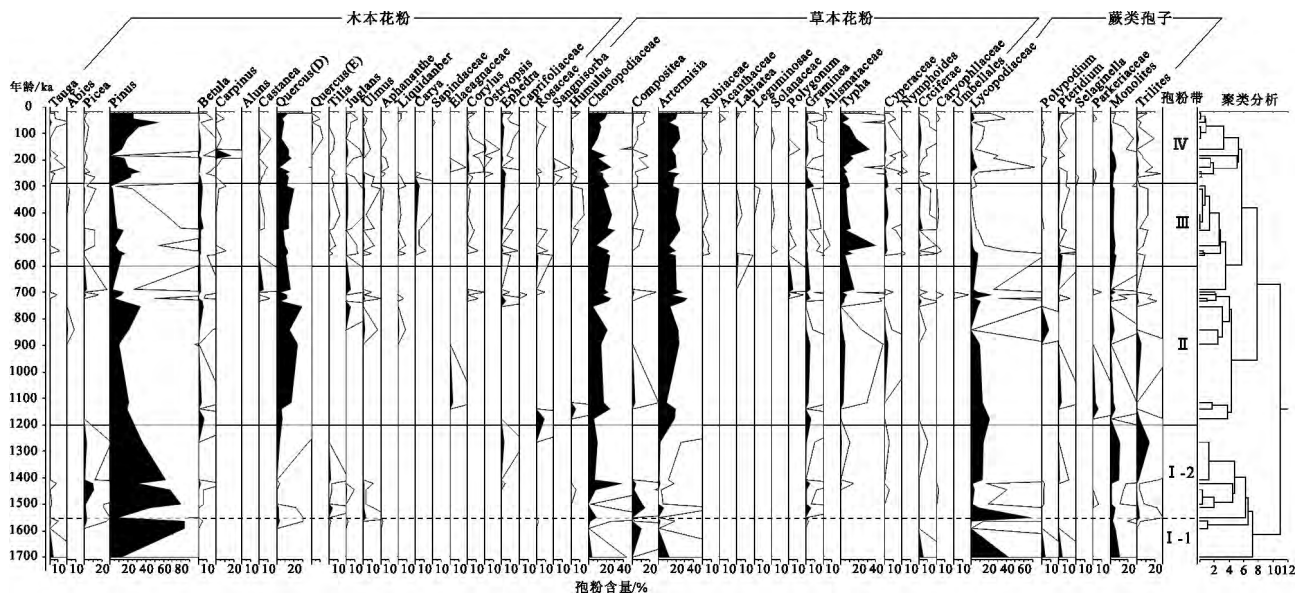


图 3 G3 孔花粉百分比图谱

Fig. 3 Sporepollen diagram of Borehole G3

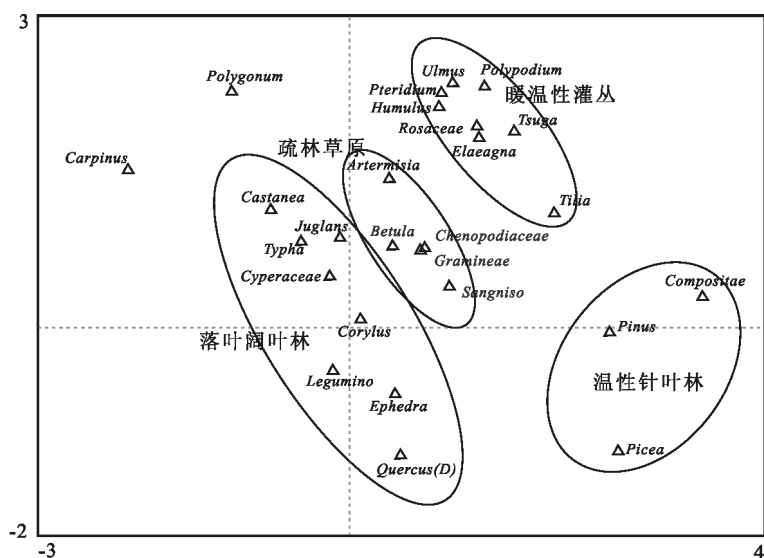


图4 G3孔孢粉出现属种DCA排序结果

Fig. 4 The pollen species DCA sequencing results of Borehole G3

地区湖泊湿地的扩展。本段孢粉组合指示疏林草原的植被景观,同时,湖泊湿地开始大规模发育。

(4)孢粉带IV:松属-栎属-藜-蒿-香蒲组合(0.3~0Ma)

本段针叶乔木花粉比例回升,松属增加至22.1%,云杉、铁杉花粉含量也有显著增加,而阔叶类乔木比例下降,栎属略微下降,枫香属、山核桃属消失,出现少量椴属、栗属、榆属、胡桃属等阔叶树。草本主要变化为藜科比例下降和香蒲比例升高。本段孢粉组合指示以暖温带落叶阔叶林为主的植被景观,湖泊湿地持续发育。

3 讨论

3.1 演变趋势

中更新世气候转型期间,全球冰量整体增加了约15%,平均温度显著下降。对于其转型时间,大部分研究显示其大约开始于1.2Ma^[6],另一些研究认为稍晚,在约1.05Ma,或是0.9Ma前后,另外有人认为这种转型也可能是以一种渐进的方式进行的,始于1.2Ma,到约0.6Ma才完成转型^[18]。

G3孔指示的中国华北平原地区中更新世植被转型期,对应上述的孢粉带II,显示华北地区植被转型开始发生于1.2Ma,主要表现为林地减少,喜湿的针叶林比例下降,较为干旱的落叶阔叶林增加,同时藜科、蒿属、禾本科等草地面积显著增加。这

种变化在1.2Ma左右的某个时间点发生,大致相当于深海O同位素36阶段。黄骅HB1、衡水HS1、天津CQJ2孔、天津G2孔的1.28~2.80Ma为暖温带落叶阔叶林的景观,整体上较暖湿。1.28Ma以来,典型暖温带阔叶乔木花粉比例减小,华北平原草地扩张,而黄骅HB1孔与衡水HS1孔在中更新世前后也发生了类似事件^[12-15]。

尽管由于孢粉数据分辨率的问题,所有这些钻孔的花粉百分比变化在时间上没有完好吻合,但是1.2Ma前后,中更新世转型期推动华北平原地区植被整体向干旱类型发展是具有普遍性的。

此后,大约在0.7Ma前后又发生一次重大转型,林地进一步退化,区域植被由原来的落叶阔叶林向疏林草原转变,对应深海O同位素18阶段。之后这种趋势一直延续到0.3Ma左右才发生转变。黄骅HB1孔中,0.8~0.7Ma以后以蒿属和香蒲属为主,草本花粉出现,并分别达到12.5%和10.9%,衡水HS1孔中以蒿和藜科为代表的草本花粉在0.78Ma后也显著增长,显示华北平原0.7~0.8Ma前后草地植被显著扩张^[12-14]。此后,在约0.3Ma,即大约O同位素8阶段以后,华北地区植被中林地比例再度增加,可能与深海O同位素11阶段以后的7阶段,5阶段等几次典型的高温期有关。

3.2 周期性气候变化的区域植被响应

尽管由于样品分辨率的问题,周期性气候变化导致的区域植被变化未能完全被花粉谱记录,以致花粉谱更多地指示了区域植被在万年尺度的长期发展趋势。但是,不论是1.2Ma之前的40ka轨道倾角周期性,还是1.2Ma之后的100ka轨道偏心率周期,周期性气候变化对植被的影响,在花粉谱中确有一定表现。

例如在孢粉带I中,以松为代表的乔木花粉比例的波动变化为10%~80%,可能对应该时期由地轴倾角40ka周期变化导致的区域植被的变化。在带IV也有类似的波动响应。由此可见,不论是1.2Ma之前40ka周期的“高频低幅”变化,还是1.2Ma之后,100ka周期的“低频高幅”变化,对华北地区的植被都有显著影响。

如图 3 所示,华北地区植被在 1.6~1.2Ma 期间在 40ka 气候周期“高频低幅”的变化中,主要表现为松属、常绿栎、铁杉属、胡桃属的交替变化,指示了区域暖温性与温性植被林地类型的交替变化。而 1.2Ma 之后随着草原植被的扩张,100ka 周期的“低频高幅”变化造成的华北地区区域植被的响应更多地表现为草原与森林的交替发展。

4 结 论

华北平原东北部天津 G3 孔孢粉数据及周边地区已有花粉研究表明,华北平原地区 1.6Ma 以来的植被演化主要可以分为 4 个阶段:①1.6~1.2Ma 密闭度较高的暖温带针阔叶混交林;②1.2~0.7Ma 开阔的暖温带落叶阔叶林;③0.7~0.3Ma,阔叶疏林草原;④0.3Ma 至今,暖温带落叶阔叶林。

中国华北平原地区中更新世植被转型期对应于孢粉带 II,显示该转型始于 1.2Ma,大致对应深海 O 同位素 36 阶段。主要特征为林地减少、喜湿的针叶林比例下降,较为干旱的落叶阔叶林增加,同时,藜科、蒿属、禾本科等草地面积显著增加。

大约在 0.7Ma 前后又发生一次重大转型,林地进一步退化,区域植被由原来的落叶阔叶林向疏林草原转变,对应深海 O 同位素 18 阶段。

G3 孔代表的花粉谱显示,1.6Ma 以来气候周期性的变化对华北地区区域植被有较显著的影响。在 1.2Ma 之前,受 40ka 轨道倾斜度气候周期性的影响,主要表现为植被林地类型的交替发展;在 1.2Ma 之后,受 100ka 轨道偏心率气候周期性影响,主要表现为草原与森林交替发展。

致谢:古地磁实验得到中国科学院地质与地球物理研究所古地磁实验室的帮助,孢粉鉴定由中国地质调查局水环中心张文卿工程师完成,审稿人阅读文稿并提出宝贵意见,一并表示诚挚谢意。

参考文献

[1]Guo Z T, Sun B, Zhang Z S, et al. A major reorganization of Asian climate by the early Miocene[J]. *Climate of the Past*, 2008, 4(3): 153-174.
[2]Sun X J, Wang P X. How old is the Asian monsoon system? --Pal-

aeobotanical records from China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 222(3): 181-222.

- [3]Jiang H C, Ding Z L. Temporal and spatial changes of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau through the last glacial cycle: evidence from spore-pollen records[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2005, 133(1): 23-37.
[4]Wu F L, Fang X M, Ma Y Z, et al. Plio-Quaternary stepwise drying of Asia: evidence from a 3Ma pollen record from the Chinese Loess Plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 257(1): 160-169.
[5]Clark P U, Archer D, Pollard D, et al. The middle Pleistocene transition: characteristics, mechanisms, and implications for long-term changes in atmospheric pCO₂[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(23): 3150-3184.
[6]Wang P X, Tian J, Cheng X R, et al. Carbon reservoir changes preceded major ice-sheet expansion at the mid-Brunhes event[J]. *Geology*, 2003, 31(3): 239-242.
[7]Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic ¹⁸O records[J]. *Paleoceanography*, 2005, 20(1): 1-17.
[8]Demenocal P B. African climate change and faunal evolution during the Pliocene-Pleistocene[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 220(1/2): 3-24.
[9]Holbourn A, Kuhnt W, Schulz M, et al. Impacts of orbital forcing and atmospheric carbon dioxide on Miocene ice-sheet expansion[J]. *Nature*, 2005, 438(7067): 483-487.
[10]Muttoni G, Scardia G, Kent D V. Human migration into Europe during the late Early Pleistocene climate transition[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 296(1): 79-93.
[11]徐杰, 冉勇康. 渤海海域第四系发育概况[J]. *地震地质*, 2004, 26(1): 24-32.
[12]范淑贤, 翟子梅, 张学斌, 等. 天津北部 4Ma BP 以来古植被与古气候[J]. *古地理学报*, 2010, 12(6): 654-662.
[13]范淑贤, 刘海坤, 徐建明, 等. 3.5Ma BP 以来河北衡水地区古植被与环境演化[J]. *现代地质*, 2003, 23(1): 75-81.
[14]范淑贤, 刘海坤, 赵华, 等. 3.2Ma BP 以来河北黄骅地区孢粉花粉地层学与古气候变迁[J]. *微体古生物学报*, 2009, 26(2): 173-180.
[15]杨吉龙, 秦雅飞, 胥勤勉, 等. 7.65Ma BP 以来天津滨海新区的植被演变特征[J]. *地质学报*, 2015, 89(6): 1134-1142.
[16]张家诚, 林之光. 中国气候[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
[17]中国植被编辑委员会. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
[18]Berger, W H, Bickert T, Schmidt H, et al. Quaternary oxygen isotope record of pelagic foraminifers: site 806, Ontong Java Plateau Proceedings ODP[J]. *Scientific Results*, 1993, 130(22): 381-395.