

不同气候带内早更新世湖相沉积孢粉记录的环境对比

吴福莉^①, 方小敏^{①②*}, 苗运法^①, 董铭^③

① 中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室, 北京 100085;

② 兰州大学资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;

③ 云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明 650092

* 联系人, E-mail: fangxm@itpcas.ac.cn

2010-01-27 收稿, 2010-04-28 接受

中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q09-04)、国家自然科学基金(40871098, 40920114001, 40802041)和国家重点基础研究发展计划(2005CB422000)资助

摘要 通过对位于非季风区的柴达木盆地、过渡区的临夏盆地两个早更新世典型湖相沉积剖面孢粉记录的研究, 揭示出早更新世柴达木盆地地带性植被整体以疏林草原/草原为主, 临夏盆地早期为柏疏林草原后演变为针叶林/针叶林草原而后又演变为疏林草原; 已有的季风区黄土高原孢粉资料表明三门古湖早期为疏林草原后演变为松林/针阔混交林, 泥河湾古湖为针叶林后演变为亚热带常绿阔叶林, 表明早更新世时自西向东湿润程度增加, 并且各地气候都较现在湿润, 暗示着当时存在较强的东亚夏季风。

关键词

早更新世
湖相沉积
孢粉
生态环境
东亚夏季风

东亚季风影响着我国自然环境格局的分布, 季风系统的起源与演化一直是地学界争议的热点, 大量研究表明青藏高原的隆起对东亚季风的形成与演化起了决定性的作用^[1-9], 尤其进入第四纪(2.6 Ma 始)以来, 随着青藏高原阶段性强烈隆升, 东亚季风越来越强, 多种代用指标尤其是磁化率记录表明早更新世早期夏季风强度远低于早更新世后期或是中更新世以来^[7-9], 但目前各种指标的机理尤其是对磁化率成因机制的解释仍未达成共识^[10,11], 由此难免模糊我们对其恢复气候变化真实性的认识, 并且早更新世早期东亚大陆湖泊广泛发育, 包括大同-阳原盆地、汾渭盆地等在内的华北地区出现广阔的泥河湾古湖、三门古湖^[12-18], 六盘山以西临夏盆地、渭河上游盆地等此时也广泛沉积巨厚的湖相地层^[17-23], 青藏高原及临近地区的老新湖泊也得到很大发展^[24,25]. 所以, 探讨这一关键时段气候环境变化特征, 对于理解我国现代自然环境格局的形成与东亚季风演化过程及其机制具有重要意义。

湖泊孢粉是研究区域气候和环境变化的理想有

机代用指标之一. 为进一步真实而清晰地重建早更新世期间的环境演化形势, 本文特选取非季风区的柴达木盆地、过渡区的临夏盆地典型连续的湖相地层进行孢粉分析, 并结合前人在季风区黄土高原三门古湖^[15]、泥河湾等地^[13,26]的孢粉资料(图 1), 建立早更新世生态环境变化谱, 重点检验或验证这一时期夏季风的演化特征。

1 研究区自然环境、地层与年代

以大兴安岭-阴山-贺兰山-巴颜喀拉山-冈底斯山一线为界, 中国大陆可分为季风区与非季风区(图 1), 季风区内降水丰富, 且雨热同期; 非季风区降水稀少, 全年相对干旱。

鸭湖剖面(图 1)位于非季风区的柴达木盆地, 现今具有典型的大陆性荒漠气候特征, 寒冷、干旱、富日照、多风. 全年受高空西风控制, 且受到蒙古高压反气旋的影响, 气候十分干燥, 春秋季节不明显. 地表发育典型的雅丹地貌类型, 植被稀疏, 以荒漠植物种类如膜果麻黄(*Ephedra przewalskii*)、梭梭(*Haloxyylon*

ammodendron)、驼绒藜(*Ceratoides compacta*)、琵琶柴(*Reaumuria soongorica*)等为主,分布不均,部分地区甚至无植被分布^[27].构造上该剖面位于鸭湖背斜东北翼,海拔高度为2863~2741 m.露头地层主要由上新统狮子沟组和下更新统七个泉组组成,总厚度678 m.本文研究的下更新统七个泉组厚度约为248 m,与下伏狮子沟组呈整合接触,主要由棕灰色、灰色、土黄色泥岩、砂质泥岩、粉砂岩夹石膏质砂泥岩、浅黄色鲕状砂岩、薄层黄色泥灰岩、碳质泥岩、同生角砾岩及石膏层组成,其中上部含石膏层、芒硝层的盐类沉积渐强,剖面未见顶.构造、古地磁和介形虫演化揭示七个泉组地层年代介于2.6~1.83 Ma之间(Zhang W L未发表资料).

东山顶剖面(图1)位于临夏盆地,处于东部季风区、西北干旱区及青藏高原高寒区三大自然单元的交汇地带,又恰处于季风三角区的顶点部位^[6,20,28],受西风环流和季风环流两个系统的影响,具有较为典型的大陆性季风气候特征.气候温凉半湿润,植被类型为温带草原^[29,30].该剖面海拔高度为2429.5 m,上部为60 m厚的风成黄土及古土壤系列,下伏大夏河第七级阶地砾石层;剖面厚达78.5 m,以粉砂和黏土质粉砂为主,其中剖面上段为土黄色粉砂岩,块状,均匀层理,含许多散乱或层状钙质结核,与其上井沟头组河流相砾石层呈轻微不整合;中段为褐黄色、褐黑色水平纹层状、脉状粉砂岩,部分层段见纹层状泥岩夹层和锈斑、植物、蜗牛、瓣鳃类残片及气孔,中、下部产大量直径5~20 cm左右的云、冷杉腐枝;下段为褐黄色块状粉砂岩,均匀水平层理,含多层次分布的5~10 cm直径的钙结核,底部可见青灰色、锈斑状粉砂岩条带,与积石组砾石层呈不整合接触.经古地磁测年,其沉积时代介于2.4~1.76 Ma之间^[21].

三门峡古湖盆与泥河湾盆地位于黄土高原地区(图1),近地面受季风环流控制,形成冬、春寒冷干旱,夏、秋多雨的特征,明显地表现为温带季风气候.其中三门峡古湖盆位于晋、豫、陕之间的黄河和渭河谷地及其支流谷地,呈东西向,东起三门峡,西至宝鸡.现代植被属温带落叶阔叶林^[27].2001年王苏民等人^[15]对属古三门峡湖盆范围内的山西平陆黄底沟附近4个天然剖面进行了研究,认为厚278.3 m的沉积物代表了近5.0 Ma以来的沉积历史,其中厚185~115 m之间以泥岩、粉砂质泥岩为主,夹砂砾石层,沉积年代介于2.6~1.77 Ma之间.泥河湾盆地位于大同-桑干河盆地的东部,第四纪早、中期发育较广阔的湖



图1 中国大陆干湿分布与研究剖面位置图

相地层,向西可达大同、朔县一带,称为泥河湾古湖^[13].现代植被属森林草原^[27],气候上属半干旱与半湿润地区交界处.1983年周昆叔等人^[26]对河北阳原县红岩村南沟剖面进行了研究,后年代校正为2.5~2.0 Ma^[14];1996年袁宝印等人^[13]对泥河湾大道坡剖面进行了较详细的分析,近期该剖面的磁性地层学研究显示底部只达到Olduvai极性亚时^[14,16].

2 剖面孢粉记录

2.1 鸭湖剖面孢粉记录

鸭湖剖面室内分析时每样称取100~250 g,采用常规的酸碱分析加超声波震荡筛选提取其中的孢粉化石,96块样品中有78块鉴定花粉粒数介于150~586粒之间(图2),分属22科45属.其中乔木种类主要有松属(*Pinus*)、云杉属(*Picea*)、冷杉属(*Abies*)、雪松属(*Cedrus*)、榆属(*Ulmus*)、胡桃属(*Juglans*)、栎属(*Quercus*)和桦属(*Betula*)等,喜热的铁杉属(*Tsuga*)、罗汉松属(*Podocarpus*)、山核桃属(*Carya*)、椴属(*Tilia*)、芸香属(*Ruta*)、楝属(*Melia*)等树种零星出现.灌木与草本种类主要由藜科(*Chenopodiaceae*)、菊科(*Compositae*)的蒿属(*Artemisia*)、蓝刺头(*Echinops*)型以及紫菀(*Aster*)型、麻黄属(*Ephedra*)、怪柳属(*Tamarix*)、白刺属(*Nitraria*)、禾本科(*Gramineae*)、毛茛属(*Ranunculus*)、胡颓子属(*Elaeagnus*)、蔷薇属(*Rosa*)、十字花科(*Cruciferae*)、茄科(*Solanaceae*)及豆科(*Leguminosae*)等组成.孢子见有水龙骨科(*Polypodiaceae*)、卷柏属(*Selaginella*)、石松(*Lycopodium*)、凤尾蕨(*Pteris*)及盘星藻(*Pediastrum*)等,数量不多,未计算在花粉总数之内.

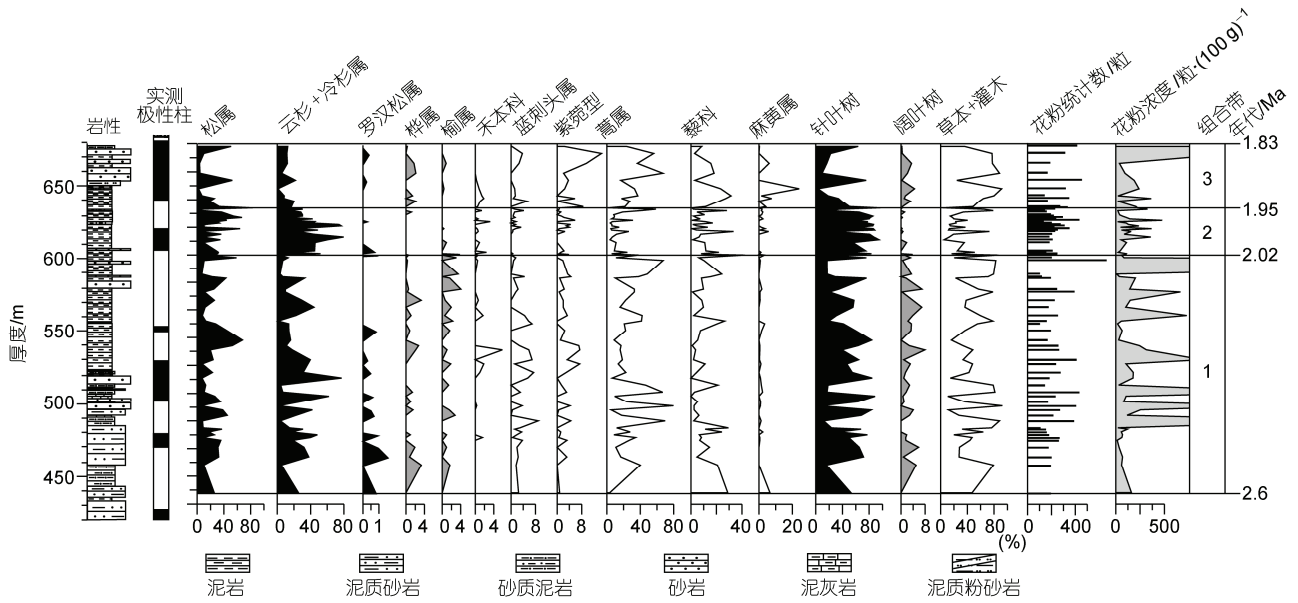


图2 柴达木盆地鸭湖剖面孢粉图谱

根据乔木花粉及主要科属植物花粉含量变化, 孢粉组合由下至上可划分为3个组合带(图2)。

带1(428~600 m, 2.6~2.02 Ma): 该带孢粉浓度相差较大, 少量样品中孢粉未达到统计数字. 孢粉组合中灌木与草本植物花粉(10.6%~92.4%)占优势, 主要为蒿属(6.36%~79.7%)与其他菊科植物花粉. 乔木花粉中云杉和冷杉属花粉含量波动较大(1.1%~39.8%), 松属花粉(5.7%~67.7%)有一定含量, 罗汉松、铁杉属花粉零星出现; 阔叶树中出现少量的桦科(0~2.7%)与榆属(0~4.04%), 亚热带分子偶见.

带2(600~635 m, 2.02~1.95 Ma): 此带范围较窄, 花粉浓度不高, 针叶树花粉含量达到本剖面中的最高值(26.2%~96.5%). 阔叶树花粉零星出现, 含量(0~3.8%)很低, 灌木与草本植物花粉含量(3.1%~51.2%(一个样品中占73%))也较上带降低.

带3(635~678 m, 1.95~1.83 Ma): 该带中针叶树花粉含量明显降低, 主要表现为云、冷杉属花粉含量(0.8%~21%)降低较多, 灌木与草本植物花粉含量较高, 其中蒿属花粉含量(16.6%~56%)较高, 麻黄属也有一定含量(0~7.6%), 菊科中的紫菀型(0~14.5%)花粉后期含量较多, 孢子较少出现.

2.2 东山顶剖面孢粉记录

东山顶剖面室内分析时每样称取 150~250 g, 亦采用酸碱分析加超声波震荡筛选法处理, 80 块样品

孢粉鉴定粒数在 104~337 粒之间(图3). 该剖面共鉴定出 44 科 57 属植物花粉. 乔木种类有松属、云、冷杉属、柏科(Cupressaceae)、雪松属、铁杉属、榆属、桦属、栎属、胡桃属、柳属(*Salix*)、桦属(*Fraxinus*)、芸香属和楝属等, 偶见山核桃属、椴属等, 灌木与草本种类有禾本科、蒿属、紫菀型、蓝刺头型、藜科、白刺属、柽柳属、蔷薇属、蓼属、茄科、豆科、十字花科、毛茛属、胡颓子属、葎草属(*Humulus*)、唐松草(*Talictum*)、木樨科(Oleaceae)等, 此外偶见蕨类孢子.

该剖面孢粉组合大致分为3段(图3).

组合带1(78.5~45 m, 2.4~1.91 Ma): 针叶属花粉含量占据优势(43.7%~79.6%), 灌木和草本植物有一定含量(21.37%~44.44%). 孢粉组合中以柏科(1.79%~26.88%)、松属(16.86%~55.5%)以及禾本科(0~13.73%)植物为主, 含一定量的阔叶树花粉, 如栎属(0~5.9%)、榆属(0~11.2%)、桦属(0~6.86%), 此外还含少量的云杉属(0~5.5%)、蒿属(2.15%~15.56%)、菊科(0~6.38%)、柽柳属(0~4.9%)、白刺属(0~5.55%)等植物花粉, 并有零星麻黄属花粉出现.

组合带2(45~12 m, 1.91~1.8 Ma): 明显特征是灌木和草原植物花粉含量较低(1.14%~48.45%), 乔木花粉中以云杉属(0~52.2%)、松属(4.4%~47.2%)以及一些阔叶树植物花粉如榆属、桦属等为主, 可偶见雪松属、铁杉属及罗汉松属植物花粉, 草本中多为中生的禾草植物. 其中中期(32~27 m, 1.87~1.85 Ma)榆属

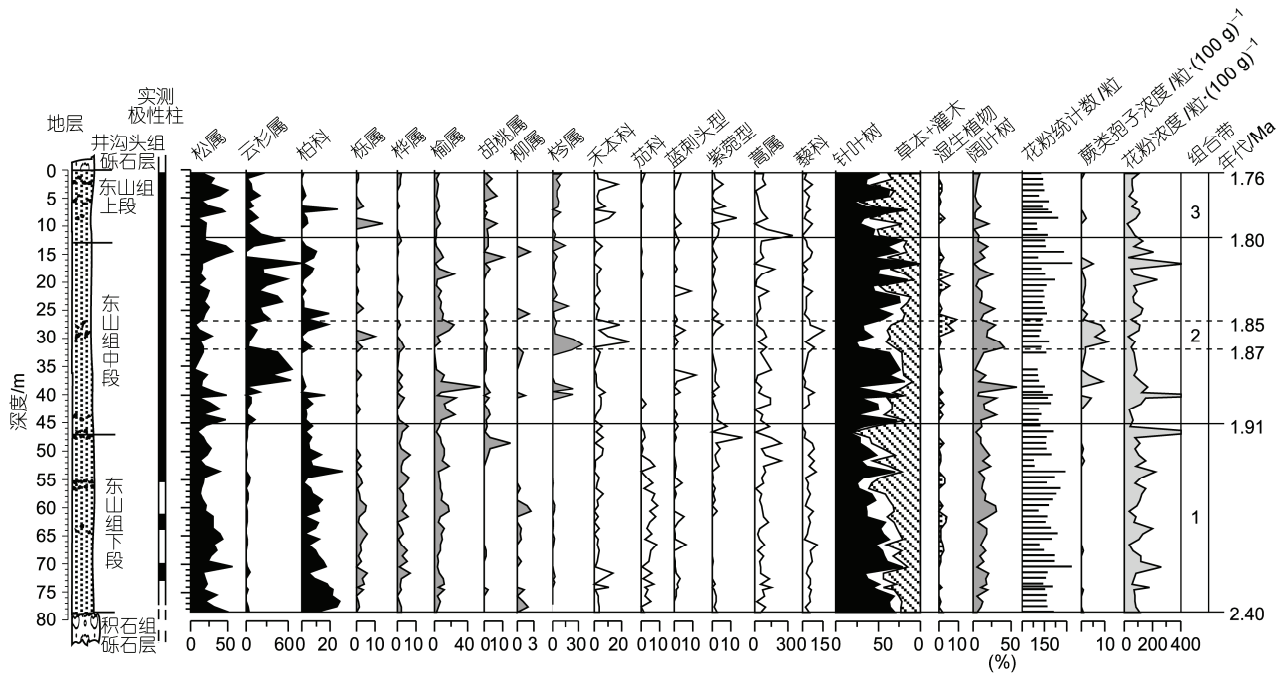


图3 临夏盆地东山顶剖面孢粉图谱

(0~22.86%)和柞属花粉(1.96%~34.48%)含量较高,且见有少量湿生的莎草科(Cyperaceae)植物花粉。

组合带3(12~0 m, 1.8~1.76 Ma): 乔木花粉含量较之前带有所降低, 灌木和草本植物含量增加较多(15.09%~72.73%)。乔木花粉中松属(9.9%~49.3%)、云杉属(1.4%~26.74%)仍占有一定比例, 榆属(1.4%~7.14%)也有一定含量, 栎属除在一个样品中含量较高(14.28%)外, 其余样品中含量不高(0~4.1%), 灌木和

草本植物中蒿属花粉增加较多(1.27%~35.05%), 禾本科(0~16.9%)、菊科植物如紫菀型(0~12.87%)与蒲公英型(0~9.9%)有一定含量, 藜科(0.99%~7.04%)与白刺属(0~3.57%)花粉有少量含量, 偶见麻黄属植物花粉。

2.3 三门古湖孢粉记录

山西平陆黄底沟剖面沉积了上新世以来的地层, 其中早更新世期间孢粉组合带^[15](图4)由下至上简述

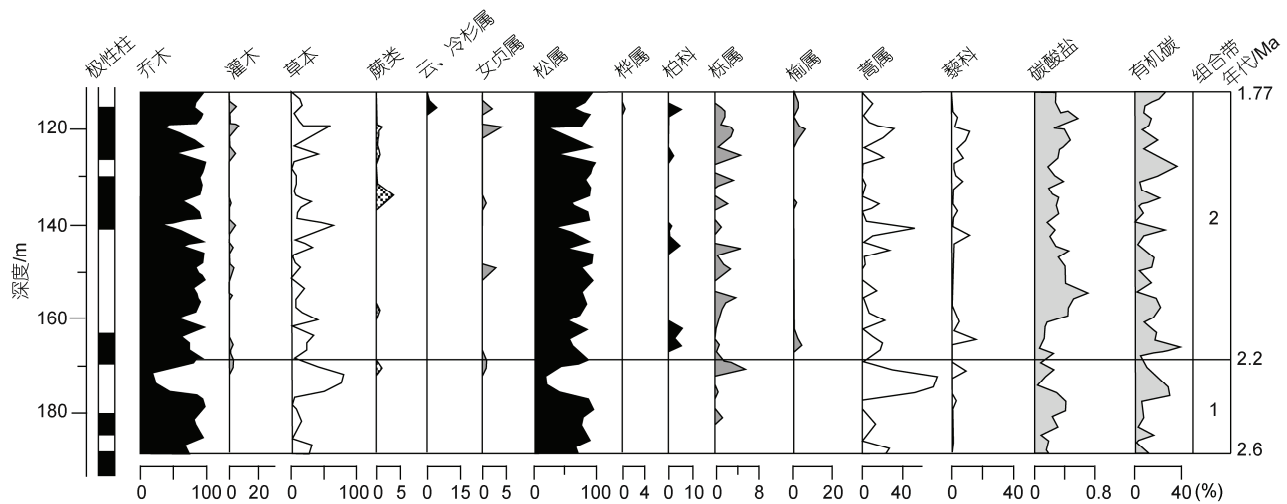


图4 黄土高原三门古湖早更新世孢粉图谱

修改自文献[15]

如下.

带 1(185~167 m, 2.6~2.2 Ma): 植被类型以松属和草本的蒿属为主, 有少量的落叶栎属, 未见灌木、蕨类孢子, 偶见亚热带喜暖的女贞(*Ligustrum*)花粉.

带 2(167~115 m, 2.2~1.77 Ma): 木本花粉占绝对优势, 松属为优势种, 和上一组合带相比, 木本花粉中栎属花粉的含量增加明显, 蕨类孢子含量也处于较高值段, 含有喜暖的亚热带女贞属.

2.4 泥河湾古湖孢粉记录

1983 年周昆叔等人^[26]对泥河湾盆地红崖南沟剖面进行了孢粉分析, 共发现 54 个类型的花粉, 木本以松属、冷杉属、云杉属花粉最多, 其他雪松属、铁杉属、罗汉松属、泪杉属(*Dacrydium*)、柏科、银杏属(*Ginkgo*)个别出现, 小叶或阔叶的桦属、桤木属(*Alnus*)、鹅耳枥属(*Carpinus*)、栎属、山毛榉属(*Fagus*)、栗属(*Castanea*)、榆属、榉属(*Zelkova*)、朴属(*Celtis*)、椴属、山核桃属、桑科(*Moraceae*)、漆属(*Rhus*)、柳属花粉少数或个别出现, 小灌木及草本花粉中以藜、蒿属最多, 其次有蓼科(*Polygonaceae*)、菊科、禾本科, 还有个别的麻黄属、榛属(*Corylus*)、香蒲属等.

剖面由下至上孢粉鉴定结果(图 5)描述如下^[26].

带 1(96.7~89.7 m): 灰黑色黏性土和沙砾沉积物, 发现有大量的花粉. 木本花粉占多数, 达 31.3%~100%, 草本花粉占 0~55.5%. 乔木中, 冷杉属花粉占 23.7%~53.1%, 云杉属花粉占 4.4%~13.5%, 松属

花粉占 0.7%~5.5%, 桤木属花粉占 1.3%~5.3%; 草本花粉中蒿属占 21.3%~83%, 藜科占 9.6%~44.6%, 禾本科占 0.5%~2.8%.

带 2(89.7~83.5 m): 浅棕色沙砾层, 只有个别样品含不多的花粉, 木本有一些松属花粉, 还有个别漆属花粉, 草本有不多的蒿属、藜科花粉.

带 3(83.5~73.5 m): 灰色砂质黏土中含丰富的花粉. 木本花粉占多数, 达 37.7%~100%, 草本花粉占 0~58.1%. 木本花粉中松属占 58.8%~82.8%, 云杉属占 1.8%~19.1%, 榆属占 1.6%~5.2%, 胡桃属占 1.7%, 草本花粉中蒿属占 13.9%~57.8%, 藜科占 19.1%~83%.

带 4(73.5 m 以上), 除个别样品含有较多(88.1%)的松属花粉外, 还有一些蒿属和藜科的花粉, 多数样品均只发现较少的上述同类花粉.

袁宝印等人^[13]于 1996 年对泥河湾大道坡剖面进行了较详细的孢粉分析, 其孢粉 I 带和 II 带后经校正大致相当于 2.0~0.8 Ma^[14](图 6). I 带(149~134 m, 2.0~约 1.84 Ma)以阔叶植物为主, 其中有一些为典型的亚热带植物, 如枫香属(*Liquidambar*)、无患子科(*Sapindaceae*)、膜蕨属(*Hymenophyllum*)、海金沙属(*Lygodium*)等, 乔木花粉中主要为松属、栎属、栗属、栲属(*Castanopsis*)、山毛榉属等. 禾本科花粉十分丰富.

3 讨论

3.1 早更新世生态环境变化

柴达木盆地 2.6~2.02 Ma 期间, 蒿属含量虽波动

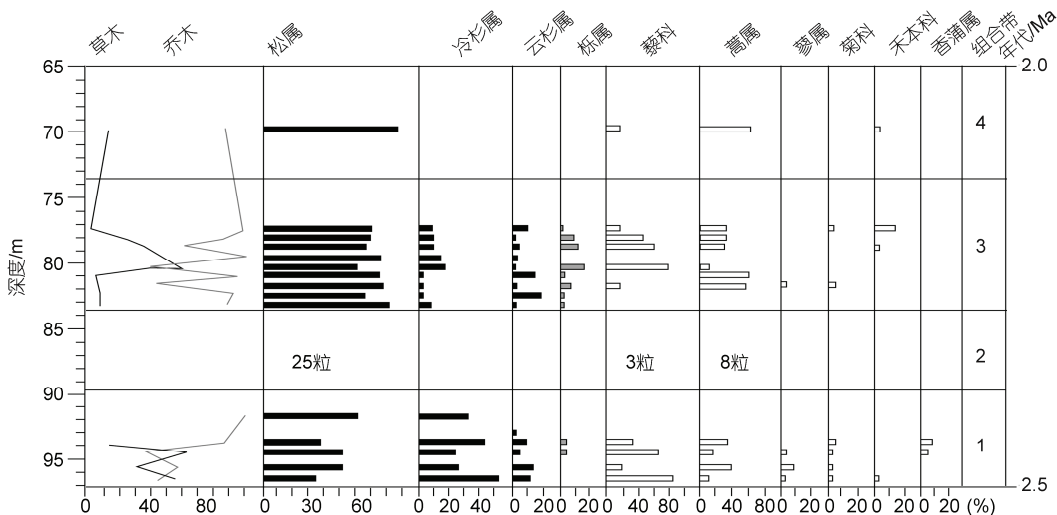


图 5 黄土高原泥河湾盆地南沟剖面孢粉图谱

修改自文献[26]

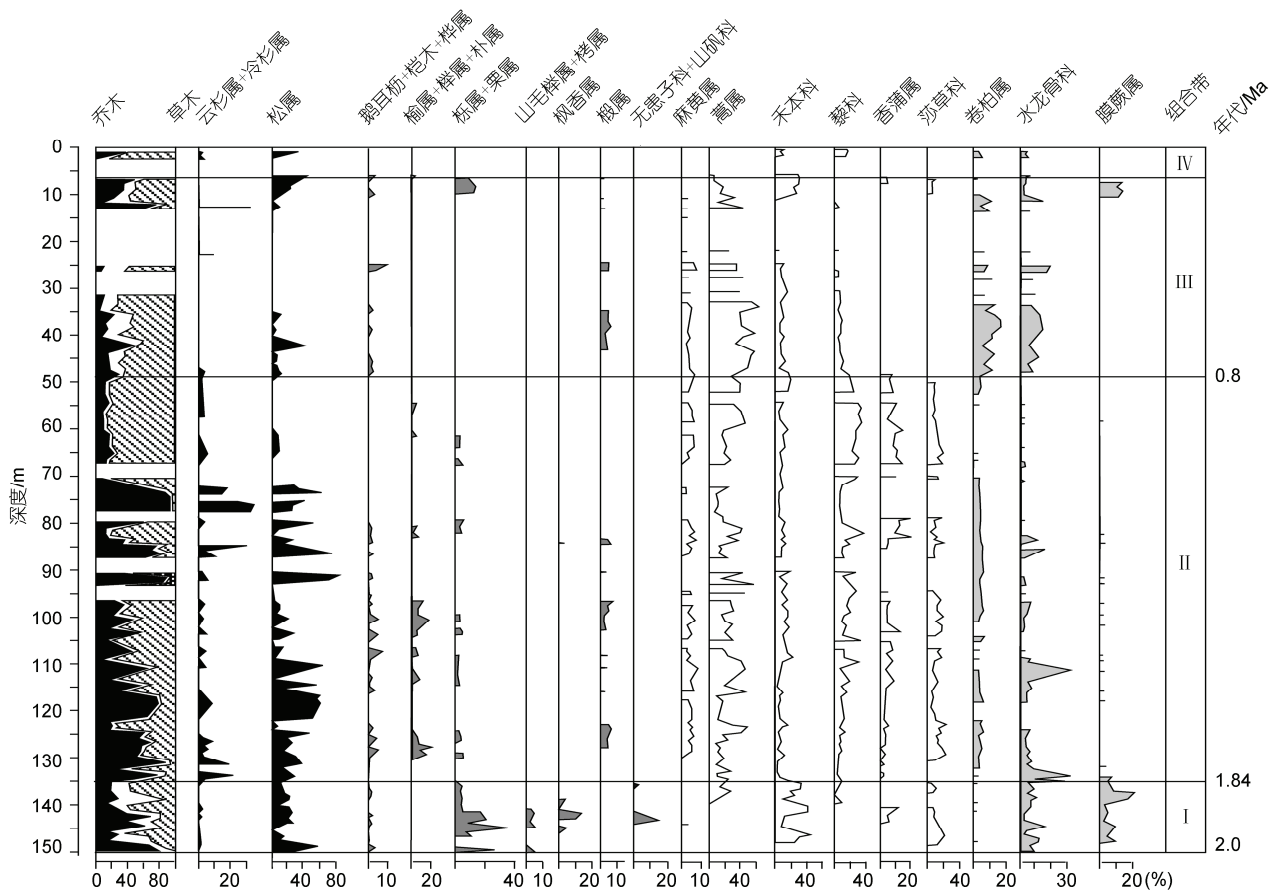


图6 泥河湾大道坡剖面孢粉图谱
修改自文献[13]和[14]

频繁，但总体含量较高，乔木中松属有一定含量，云、冷杉也有出现(图 2)，推测在此期间山地垂直地带性已比较发育，地带性植被可能为疏林草原/草原，湖周围主要分布以蒿属和其他菊科为主的草本植物，山上分布松、桦与榆等，再往上可能分布云杉和冷杉，气候温凉稍干；2.02~1.95 Ma 这一短暂时期，针叶树花粉含量达到本剖面中的高值，其他花粉含量都较低(图 2)，推测当时气候相对冷湿，导致针叶林下限降低；1.95~1.83 Ma 期间，灌木与草本植物重占优势，耐旱的蒿属与麻黄含量较高，菊科中的紫菀型有一定含量(图 2)，地带性植被可能仍为疏林草原/草原，但气候较 2.6~2.02 Ma 期间干旱。野外可见地层上部出现石膏质砂泥岩及含石膏、芒硝层，也指示气候已变干，但厚层石膏层以及代表更干旱的岩盐层出现在本采样剖面的地层之上(地层倾角变得更小无法有效采样)，说明更干旱的气候出现在 1.83 Ma 之后。

临夏盆地 2.4~1.91 Ma 期间柏科、禾本科含量较

高(图 3)，它们可能为建群种或优势种，栎属、榆属、桦属、菊科、白刺等可能为伴随分子，推测当时的地带性植被为柏疏林草原，向阳的山坡分布着较耐旱的柏树，阴坡上生长有一些栎、榆和桦等阔叶树，中间混生着一些松树，或者远山上有松树或云杉生长，丘陵或低地生长着禾草与一些耐旱的蒿等草本植物，推测当时气候温和稍干；1.91~1.8 Ma 期间乔木植物花粉含量较高，尤其是云杉花粉在此带中持续出现，虽然含量上有所波动，但整体偏高(图 3)，推测当时气候较为冷湿导致针叶林分布高度下降，但在 1.87~1.85 Ma 期间阔叶树花粉含量较高(图 3)，气候可能相对暖湿；1.8 Ma 后以松属、云杉、榆属、蒿属等植物花粉为主，并且蒿属植物花粉含量整个剖面中在此阶段最高(图 3)，推测当时植被类型可能为疏林草原，山坡上以针叶树为主，混杂着一些阔叶的杂木树，山谷或低地为蒿草和禾草草原所占据，表现出干旱的趋势。

黄土高原三门古湖孢粉记录(图 4)显示出在

2.6~2.2 Ma 期间植被可能为以松和蒿为主的疏林草原, 混杂有栎、女贞等, 气候较为温暖; 2.2~1.77 Ma 期间演变为松林或以松和栎为主的针阔混交林, 气候整体表现为温暖湿润, 有偏干波动。

泥河湾古湖南沟剖面带 1 孢粉结果(图 5)揭示出当时主要分布以冷杉、云杉与松的针叶林, 其中还混生有少数雪松和油杉, 个别亚热带的罗汉松、山核桃、山毛榉和银杏, 并参杂有北温带的桤木、鹅耳枥、栎、榆和胡桃, 草本花粉也占有一定比例, 说明在湖滨还生长了藜、蒿、蓼、菊、禾草等植物和香蒲、眼子菜等水生植被; 带 2 中以松、蒿、藜为主, 但花粉不多(图 5), 可能是地处湖边, 沉积物以砂砾为主, 不利于花粉的保存; 带 3 中木本花粉仍占优势, 并且针叶树含量较高(图 5), 应为松、云杉、冷杉的针叶林, 其中还伴生有个别的铁杉、泪杉、杉和柏, 阔叶树种花粉含量有所增高, 当时针叶林内应混生有少数的桦、栎、榆、椴、桤木、鹅耳枥、山毛榉、胡桃、山核桃和柳^[26]。大道坡剖面揭示出 2.0 Ma 后阔叶树花粉含量占据优势, 并且亚热带树种丰富(图 6), 植被类型应为常绿阔叶林, 属亚热带湿热气候^[13]。

由上述各剖面孢粉资料恢复的植被状况可以看出泥河湾盆地早更新世主要经历了针叶林到常绿阔叶林的演变, 三门古湖为疏林草原到针阔混交林, 临夏盆地分布以柏为主的疏林草原, 柴达木盆地则分布以菊科植物为主的疏林草原/草原, 并且在泥河湾盆地出现较多的阔叶树尤其是喜热植物, 如枫香、无患子、山毛榉、山核桃、泪杉、银杏等, 至临夏盆地可见山核桃、芸香、铁杉等, 再至鸭湖只零星可见罗汉松、山核桃、楝等, 种类与数量都相对减少, 相应的草本植物花粉含量则由东向西大致呈现出升高趋势(图 7), 揭示出东西向上受降水分布限制, 植被存在明显差异, 东亚季风梯度变化明显。

3.2 早更新世东亚夏季风较强

进入第四纪各湖泊周围植被已出现一些耐旱的蒿属、藜科等植物, 表明气候已出现变干迹象, 但整体而言更新世早期各地气候仍较后期或现在温暖湿润。柴达木盆地野外可见厚层的石膏层及岩盐层出现在本研究剖面地层之上, 表明更干的气候是出现在 1.83 Ma 之后, 植被由疏林草原/草原逐步演变到现今的荒漠; 临夏盆地 1.76 Ma 后东山古湖消亡, 气

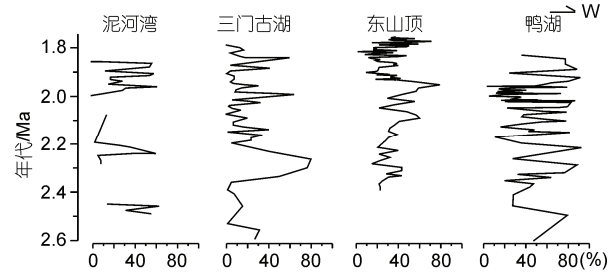


图 7 研究剖面草本植物花粉含量变化图示

候变干^[20-22]; 三门古湖上新世时以针阔混交林为主, 气候湿润^[15], 进入早更新世植被演变为疏林草原后为针阔混交林, 被认为是湖泊扩张期, 1.77 Ma 后植被演变为疏林草原或草原类型, 古三门湖开始萎缩^[15]; 泥河湾盆地早更新世时为湖泊最盛期, 孢粉组合反映此期经历了由较冷湿的“南沟冷期”^[13]转变为亚热带的湿热气候^[14], 约 1.8 Ma 后转变为温和的温带气候类型, 并且开始向干旱方向转化^[14]。这在其他研究中有类似表现, 如洛川发现的哺乳动物化石在奥杜维正极性亚时之前有 *Eucienoceros*, *Ursus* sp., *Lynxshansius* 等, 反映气候较为温和和湿润, 此后到 B/M 界线, 化石记录限于啮齿类和兔形类, 气候较此前干凉, B/M 界线之上, 几乎均为啮齿类, 且以鼯鼠居多, 马兰黄土中还出现了 *Meriomers*, 揭示气候变得干冷, 植被类型以草原、荒漠草原为主^[31]; 其他黄土高原多个地点动物化石结果均揭示出植被变化是自上新世的疏林草原演变为早更新世的灌丛草原再演变为后期的干草原、荒漠^[32], 表明早更新世时气候虽比上新世干旱, 但较早更新世后期以来湿润。

以往研究表明东亚季风可能自渐新世末或中新世初已经形成^[1,33-35], 并且夏季风可能自中中新世以来一直呈退缩趋势^[36-38]。第四纪初东亚大陆湖泊广泛发育, 虽有研究证明它们大多是在上新世构造活跃时期形成的断陷湖盆^[6,14,15,17-20,25,28], 但它们得以在早更新世延续, 可能也部分得益于比现在强的夏季风带来的更多水汽, 并且当时夏季风有可能深入内陆, 影响到现已处于干旱地带的柴达木盆地。对于以往多种反映夏季风变化代用指标机理的解释, 以及青藏高原阶段性隆升导致东亚季风逐步增强机制的理解需重新审视。

致谢 高军平、戴霜、程彧、聂军胜、徐先海、庄广胜、洪澎、胡小飞、马文中、鲁新川、刘胜昌、常华进、王鑫、马斌义参加了鸭湖剖面野外样品采集,余红霞协助完成孢粉室内提取;宋春晖、范马洁参加了东山顶剖面野外样品采集,室内提取由张桂荣协助,鉴定过程中特别得到宋之琛研究员的不懈指导,在此一并致谢。

参考文献

- 1 周廷儒. 古地理学. 北京: 北京师范大学出版社, 1982. 1—342
- 2 张林源. 青藏高原上升对我国第四纪环境演变的影响. 兰州大学学报(自然科学版), 1981, 17: 142—155
- 3 刘东生, 丁梦林. 晚第三纪以来中国古环境的特征及其发展历史. 地球科学, 1983, 4: 15—28
- 4 Wang P X. Neogene stratigraphy and paleoenvironments of China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1990, 77: 315—334
- 5 Kutzbach J E, Prell W, Ruddiman W F. Sensitivity of Eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau. *J Geol*, 1993, 101: 177—190
- 6 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究. 科学通报, 1998, 43: 1569—1574
- 7 An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times. *Nature*, 2001, 411: 62—66
- 8 郭正堂, 彭淑贞, 郝青振, 等. 晚第三纪中国西北干旱化的发展及其与北极冰盖形成演化与青藏高原隆升的关系. 第四纪研究, 1999, 19: 556—567
- 9 周鑫, 郭正堂, 彭淑贞, 等. 西峰剖面午城黄土古风化强度变化与早更新世季风环境演化. 第四纪研究, 2007, 27: 645—650
- 10 Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess. *Nature*, 1990, 346: 737—739
- 11 Maher B A, Thompson R. Mineral magnetic record of the Chinese loess and palaeosoils. *Geology*, 1991, 19: 3—6
- 12 王乃梁, 杨景春, 夏正楷, 等. 山西地堑系新生代沉积与构造地貌. 北京: 科学出版社, 1996. 1—72
- 13 袁宝印, 朱日祥, 田文来, 等. 泥河湾组的时代、地层划分和对比问题. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 26: 67—73
- 14 袁宝印, 同号文, 温锐林, 等. 泥河湾古湖的形成机制及其与早期古人类生存环境的关系. 地质力学学报, 2009, 15: 77—87
- 15 王苏民, 吴锡浩, 张振克, 等. 三门古湖沉积记录的环境变迁与黄河贯通东流研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31: 760—776
- 16 朱日祥, 邓成龙, 潘永信. 泥河湾盆地磁性地层年与早期人类演化. 第四纪研究, 2007, 27: 922—944
- 17 袁宝印, 王振海. 青藏高原隆起与黄河地文期. 第四纪研究, 1995, 15: 353—357
- 18 吴锡浩, 蒋复初, 王苏民, 等. 关于黄河贯通三门峡东流入海问题. 第四纪研究, 1998, 18: 188
- 19 李吉均, 方小敏, 马海洲, 等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆升. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 26: 316—322
- 20 方小敏, 李吉均, 朱俊杰. 临夏盆地约 30 Ma BP 以来 CaCO_3 含量的变化与气候演变. 见: 青藏高原项目专家委员会, 编. 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究学术论文年刊(1994). 北京: 科学出版社, 1995. 55—65
- 21 方小敏, 李吉均, 朱俊杰, 等. 甘肃临夏盆地新生代地层绝对年代测定与划分. 科学通报, 1997, 42: 1457—1471
- 22 王建力, 李吉均, 方小敏. 临夏盆地早更新世东山古湖沉积的高分辨率气候记录. 地理科学, 1998, 18: 349—354
- 23 童国榜, 陈云, 吴锡浩, 等. 中国更新世环境巨变的孢粉植物群记录. 地质力学学报, 1999, 5: 11—21
- 24 刘泽纯, 孙世英, 杨藩, 等. 柴达木盆地三湖地区第四纪地层学和其年代学分析. 中国科学 B 辑, 1990, 20: 120—121
- 25 李炳元. 羌塘高原北部湖泊演化的初步研究. 见: 青藏高原项目专家委员会, 编. 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究. 北京: 科学出版社, 1995. 261—266
- 26 周昆叔, 梁秀龙, 严富华, 等. 从泥河湾层花粉分析谈南沟冷期等问题. 地质科学, 1983, 18: 82—92
- 27 吴征镒. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1995
- 28 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. 第四纪研究, 2001, 21: 381—391
- 29 黄大燊. 甘肃植被. 兰州: 甘肃科学和技术出版社, 1997
- 30 侯学煜. 中国主要植被类型的化学特征和各植被区植被化学地理. 见: 植被生态学研究编辑委员会, 编. 植被生态学研究纪念著名生态学家侯学煜教授. 北京: 科学出版社, 1994. 409—451
- 31 岳乐平, 薛祥熙. 中国黄土磁性地层与生物地层对比. 第四纪研究, 1996, 3: 239—245
- 32 薛祥熙, 张云翔, 岳乐平. 从哺乳动物化石看中国黄土高原红黏土-黄土系列的气候环境及演变. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36: 359—369
- 33 Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 2002, 416: 159—163
- 34 Jia G D, Peng P A, Zhao Q H, et al. Changes in terrestrial ecosystem since 30 Ma in East Asia: Stable isotope evidence from black carbon in the South China Sea. *Geology*, 2003, 31: 1093—1096
- 35 Sun X J, Wang P X. How old is the Asian monsoon system?—Palaeobotanical records from China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 222: 181—222
- 36 Jiang H C, Ding Z L. Spatial and temporal characteristics of Neogene palynoflora in China and its implication for the spread of steppe vegetation. *J Arid Environ*, 2009, 73: 765—772
- 37 Jiang H C, Ding Z L. A 20 Ma pollen record of East-Asian summer monsoon evolution from Guyuan, Ningxia, China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2008, 265: 30—38
- 38 Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stepwise expansion of desert environment across northern China in the past 3.5 Ma and implications for monsoon evolution. *Earth Plane Sci Lett*, 2005, 237: 45—55