

宁夏南部 13.0~7.0 ^{14}C ka BP 期间的孢粉记录及古气候演化

孙爱芝 马玉贞* 冯兆东 李霏 仵慧宁

(兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000; 北京师范大学资源学院, 北京 100875; Department of Geology, Baylor University, Waco TX 76798, USA. * 联系人, E-mail: yzhma@lzu.edu.cn)

摘要 宁夏南部海原剖面的孢粉记录揭示出, 13.0~7.0 ^{14}C ka BP 植被演替明显, 气候干湿波动显著. 末次冰期向全新世过渡期间, 气候波动频繁, 且具突变性. 12.1~11.0 ^{14}C ka BP 研究区植被由干草原迅速演化为森林, 湿度明显增加, 可与博令/阿勒罗得事件对比, 且表现为后期的暖湿程度明显高于前期; 11.0~9.8 ^{14}C ka BP 气候明显变干, 可与新仙女木期对比, 期间气候存在明显波动且表现为后期更干. 全新世早期气候波动明显, 但总体温暖偏干. 约 7.6 ^{14}C ka BP 气候又开始变湿润. 研究区孢粉记录的气候干湿波动与全球性的气候变化具有可比性, 这对深入理解万年以来具有千年尺度变化的全球气候变化机制具有重要意义.

关键词 孢粉记录 植被 古气候演化 宁夏南部

从末次冰期向现代间冰期(即全新世)过渡时期的气候变化特征一直是“全球变化研究”的热点问题之一. 国内外学者对这一问题的研究已取得了许多成果 [1~11], 但在气候稳定与否 [1~3] 和时段特征 [4~11] 等方面还存在激烈的争议. 要理解这一时期全球气候变化规律及驱动机制, 就需要从全球不同的气候敏感地带获取可靠的高分辨率的气候记录. 宁夏南部位于黄土高原西北部的半干旱气候地带, 植被对气候变化的响应比较敏感. 前人曾在这一地区获得较为丰富的晚第四纪孢粉资料 [12], 但没有年代控制. 本文选择宁夏南部作为研究区, 依据 9 个 AMS ^{14}C 年代建立年代序列, 通过高分辨率的孢粉资料揭示 13.0~7.0 ^{14}C ka BP 期间该区的古植被与古气候变化, 这对深入理解万年时间尺度的全球气候变化机制具有重要的意义.

1 研究区概况、剖面地层及年代

研究区位于宁夏南部黄土丘陵地带(图 1), 年均温 7~9 $^{\circ}\text{C}$, 年均降水量 300~450 mm, 年蒸发量 1500~2000 mm. 由于研究区人为干扰严重, 仅在黄土丘陵区的梁峁顶部和塬边地段上, 保存有面积较小的草原群落, 主要有本氏针茅(*Stipa bungeana*)、短花针茅(*S. breviflora*)、大针茅(*S. grandis*)、克氏针茅(*S.*

kryocii)、百里香(*Thymus mongolicus*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)和冷蒿(*Artemisia frigida*)等. 在研究区西侧是南华山和屈吴山, 最高海拔都超过 2800 m, 植被垂直地带性比较明显.

海原剖面(36 $^{\circ}$ 26'N, 105 $^{\circ}$ 58'E, 1600 m)位于清水河支流——芄麻河的南岸(清水河流域面积约为 14481 km 2), 地貌上属芄麻河二级阶地, 剖面厚 850 cm, 地层自下而上为(图 2):

850~750 cm 为灰黄色粉砂层, 中值粒径平均为 22.6 μm .

750~580 cm 为灰褐色黏土层, 中间夹薄的灰色粉砂层. 该层可观察到粉末状的 CaCO_3 和尚未完全分解的植物残体, 部分含有蜗牛壳体, 中值粒径平均为 12.6 μm .

580~380 cm 为灰黄色粉砂层, 有机质含量很少, 中值粒径平均为 23.4 μm .

380~360 cm 为灰色粉砂质黏土层, 有机质含量较高, 中值粒径平均为 13.8 μm .

360~250 cm 为带黄绿斑点黄土层, 中值粒径平均为 30.8 μm .

250~220 cm 为灰色粉砂质黏土层, 有机质含量较高, 中值粒径平均为 16.1 μm .

220~65 cm 为强土壤化的风积-冲积相沉积层, 中值粒径平均为 14.2 μm . 上部偏黑, 有较多 CaCO_3 填充和粒土填充的根孔; 下部不见 CaCO_3 , 根孔较粗.

65~0 cm 为流水改造过的弱发育古土壤层, 有

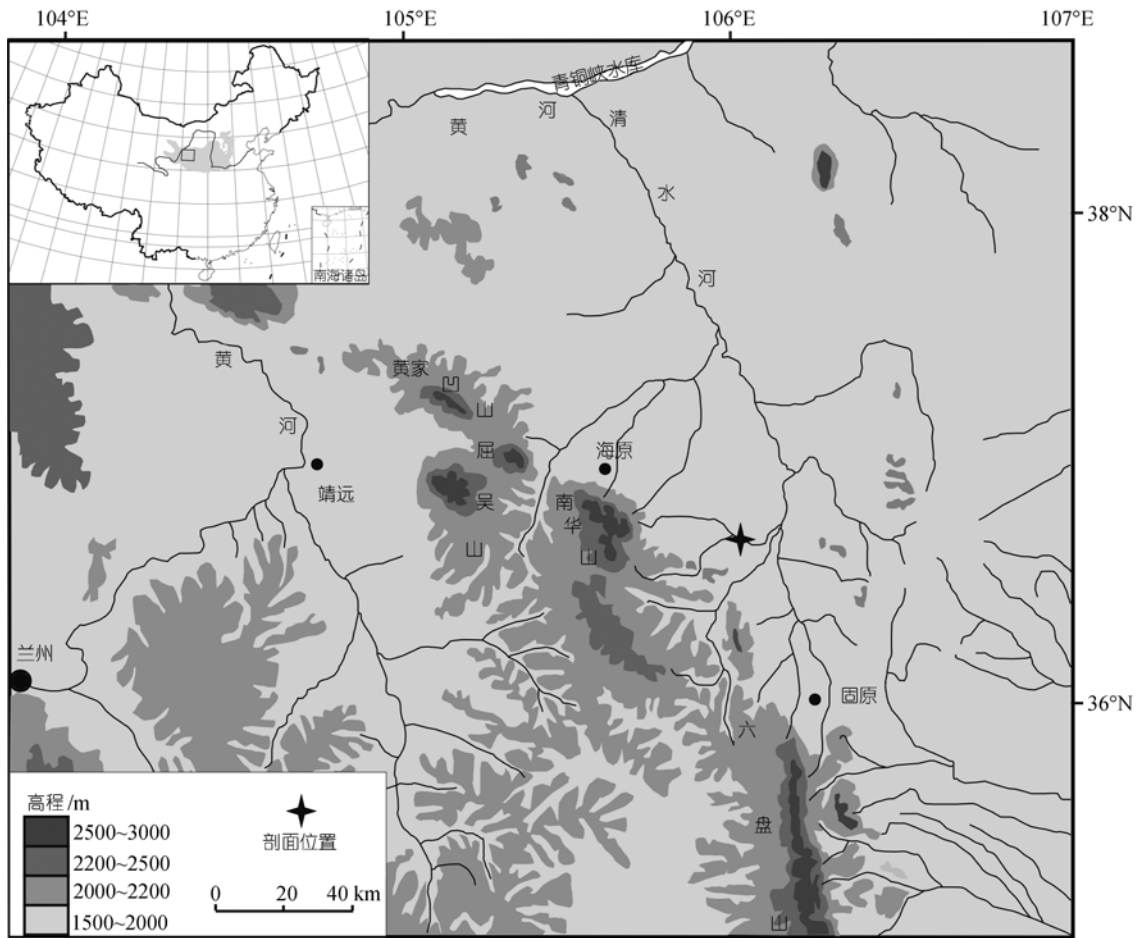


图 1 研究区概况及剖面位置图

很多保存良好的炭屑，根孔较多，被团粒填充，中值粒径平均为 13.2 μm 。

该剖面测年材料为富含有机质的沉积物，共获得 11 个不同深度的 AMS ^{14}C 年龄(表 1, 测年在美国亚利桑那大学完成)。其中深 265 cm((10459±57) ^{14}C a BP)和 335~334 cm((10987±59) ^{14}C a BP)处样品可能受再搬运物质的污染，年龄明显偏老，在建立剖面年代序列时未考虑这两个年代。利用其余 9 个 AMS ^{14}C 年代建立年代标尺，外推得到底部(850 cm)年龄为 12.7 ^{14}C ka BP, 顶部(0 cm)年龄为 7.2 ^{14}C ka BP, 剖面地层平均沉积速率为 1.5 mm/a(图 2)。年代测定显

示本研究剖面时代属于晚冰期和早中全新世。前人对清水河支流臭水河(位于芄麻河南边)附近的海原县李俊堡第四系地层的研究 [13] 也显示，在其二级阶地上部仅有全新世早期形成的灰褐色黏质砂土，也未见全新世中晚期发育的地层。但在整个地区是否缺失中全新世-晚全新世的风成沉积，有待进一步研究。

剖面样品按 2~5 cm 间隔采集，共获得 210 个样品，分别进行了孢粉和粒度分析。孢粉的提取采用酸碱法和过筛法，每个样品按岩性取 30~150 g, 先进行 5%~10% HCl 处理和 HF(36%)除硅质成分后，再用超

表 1 海原剖面 AMS ^{14}C 年龄

编号	56718	56716	56717	56719	56720	56721	56723	56724	56725	56726	56727
深度/cm	25~30	138~140	155	265	334~335	460~462	530~531	630	708	734	752
^{14}C 年龄/a BP	7370±46	7843±55	8006±47	10459±57	10987±59	10405±57	11007±57	10856±62	11359±59	11327±58	12216±64

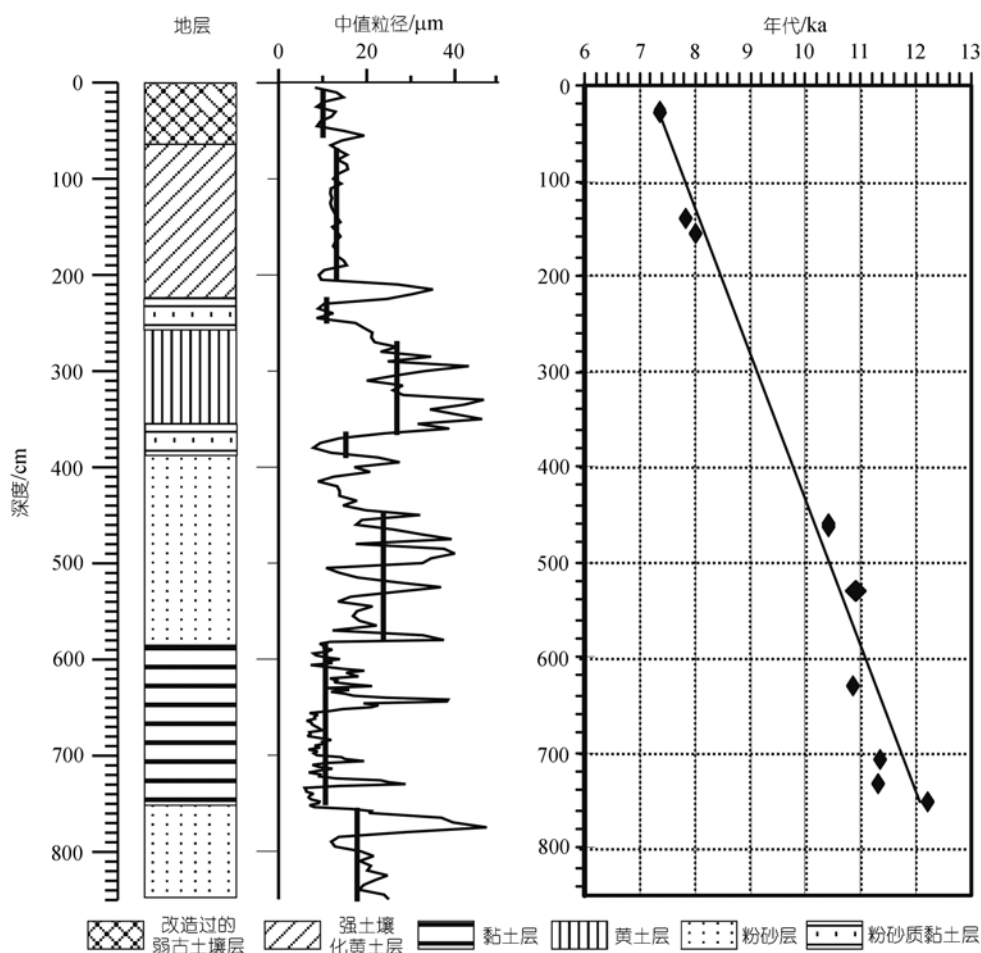


图2 剖面地层、中值粒径及年代-深度模式图

声波清洗器过筛清洗, 然后用小指管净化, 最后用甘油保存制活动片进行鉴定. 鉴定均采用与正式出版的孢粉图版 [14-16] 和现代孢粉标准片对比进行. 每个样品统计的孢粉总数(未包括孢子数量)都在 300 粒以上, 本文百分比的计算以花粉总和为基数, 重量浓度用外加石松孢子法计算. 粒度分析在 Mastersizer 2000 激光粒度仪上完成. 孢粉和粒度分析均在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成.

2 孢粉记录

该剖面共鉴定出 34 科 48 属花粉, 依据花粉类型和针叶树、阔叶树及草本植物(文中草本植物是指草本和灌木植物的统称, 下同)之间的百分比关系及孢粉总浓度特征, 自下而上共划分 6 个大带(图 3).

带 1 850~754 cm(12.7~12.1¹⁴C ka BP), 为蒿属(*Artemisia*)-藜科(*Chenopodiaceae*)-禾本科(*Gramineae*)组合带, 与底部的粉砂层相对应. 本带孢粉总浓度较

高($0.08 \times 10^3 \sim 4.39 \times 10^3$ 粒/g), 孢粉组合中草本植物占绝对优势(70.55%~97.49%), 主要由蒿属(7.58%~64.05%)、藜科(6.10%~44.30%)和禾本科(1.86%~7.83%)组成, 并含一定量的紫菀型(*Aster* type)、蓼属(*Polygonum*)和百合科(*Liliaceae*); 针叶树含量次之(0.96%~22.09%), 主要由松属(*Pinus*) (0.64%~15.43%)、云杉属(*Picea*)和侧柏属(*Platycladus*)组成; 阔叶树含量最低(0.31%~4.50%), 主要有榆属(*Ulmus*) (0.00%~1.92%)、栎属(*Quercus*)和桦属(*Betula*).

带 2 754~582 cm(12.1~11.0¹⁴C ka BP), 为松属-云杉属-侧柏属-蒿属组合带, 与剖面下部的黏土层相对应. 此带孢粉总浓度为整个剖面最高段(最高达 7.69×10^3 粒/g). 该带最明显的特征是, 针叶树花粉含量剧增, 草本植物含量锐减. 可进一步划分为 3 个亚带:

亚带 2a (754~650 cm, 12.1~11.4¹⁴C ka BP)和 2c

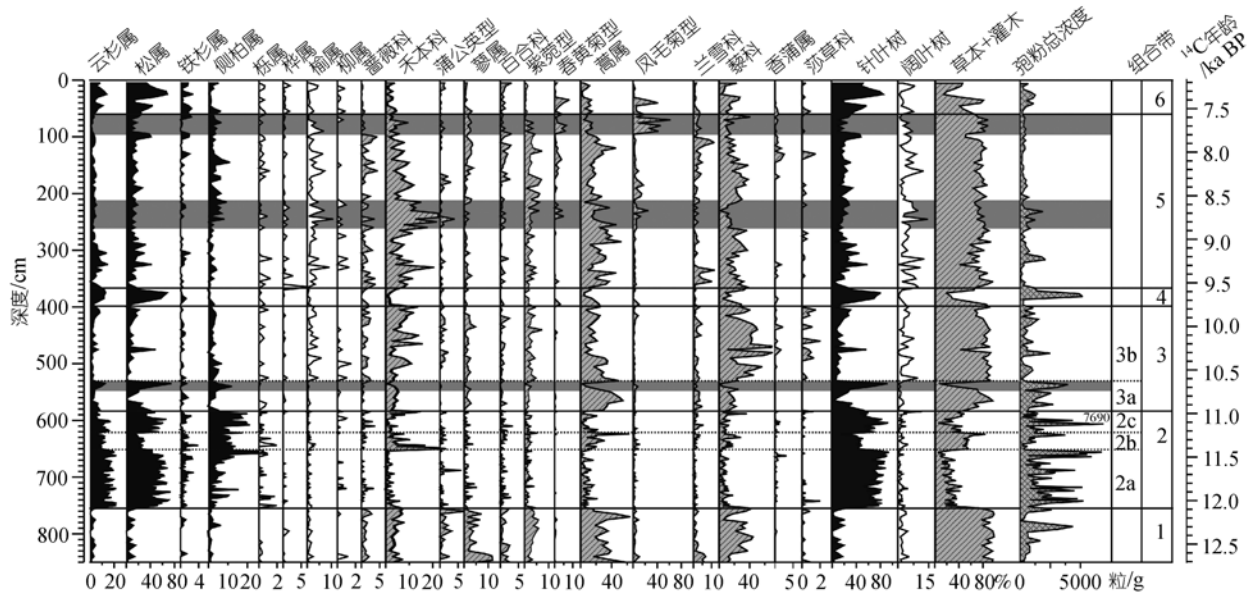


图 3 剖面孢粉百分比图谱

(620~582 cm, 11.2~11.0 ¹⁴C ka BP)中, 孢粉总浓度很高($0.46 \times 10^3 \sim 7.69 \times 10^3$ 粒/g). 孢粉组合中针叶树含量剧增(47.47%~95.16%), 主要由松属(30.47%~73.95%)、云杉属(3.11%~22.19%)和侧柏属(0.49%~17.63%), 有 3 个样品含量超过 20%)组成, 还含有一定量的铁杉属(*Tsuga*)(0~2.98%); 草本含量锐减(4.19%~48.42%), 主要有蒿属(0.47%~29.01%)、藜科(0.51%~18.30%, 有 1 个样品达 36.71%)、紫菀型和禾本科; 阔叶树含量变化不大(0~5.05%), 主要有榆属(0~1.93%)、栎属和柳属(*Salix*). 与亚带 2a 相比, 亚带 2c 中侧柏属含量较高(4.18%~17.80%), 云杉属含量有所下降(4.29%~17.05%). 另外, 亚带 2a 中 90% 的样品中松属含量大于 40%, 为该剖面松属的稳定高含量段.

亚带 2b(650~620 cm, 11.4~11.2 ¹⁴C ka BP)的孢粉总浓度较高($0.16 \times 10^3 \sim 3.75 \times 10^3$ 粒/g), 为侧柏属-松属-蒿属组合带. 孢粉组合中, 草本含量突然增加(30.34%~62.83%, 有 1 个样品含量高达 83.49%), 主要由蒿属(7.74%~31.01%)、藜科(3.63%~28.71%)和禾本科(0.97%~16.90%, 有 2 个样品含量超过 20%)组成; 针叶树含量减少(15.29%~52.63%), 主要由松属(9.17%~30.38%)、侧柏属(1.53%~17.32%)、云杉属和铁杉属组成; 阔叶树含量较带 1 略有增加(0.63%~5.14%), 主要有榆属(0~3.54%)和栎属.

带 3 582~395 cm (11.0~9.8 ¹⁴C kaBP), 为藜科-蒿属-禾本科组合带, 与剖面中部的粉砂层相对应.

该带可分为 2 个亚带. 亚带 3a (582~530 cm, 11.0~10.6 ¹⁴C ka BP)的孢粉总浓度较高($0.39 \times 10^3 \sim 3.96 \times 10^3$ 粒/g). 孢粉组合中, 草本含量增大(63.21%~95.03%), 主要由蒿属(23.58%~54.30%)、藜科(11.91%~26.70%)和禾本科(3.46%~5.33%)组成; 针叶树含量急剧减少(3.64%~34.55%), 主要有松属(1.62%~26.42%)和云杉属(1.32%~6.50%); 阔叶树含量较低(0.28%~2.85%), 主要是榆属(0.28%~1.22%). 其中有 2 个相邻样品的针叶树含量很高(分别为 66.78%, 93.15%), 而草本和阔叶树含量很低(图 3 中灰色阴影标注). 亚带 3b (530~395 cm, 10.6~9.8 ¹⁴C ka BP)的孢粉总浓度是整个剖面的两个最低段之一($0.08 \times 10^3 \sim 2.50 \times 10^3$ 粒/g, 80% 的样品浓度低于 1000 粒/g). 孢粉组合中最显著的特征是藜科含量增大(23.23%~72.34%), 为该剖面含量最高段, 其他草本植物花粉主要有蒿属(6.25%~49.68%)、禾本科(1.83%~15.63%)、兰雪科(*Plumbaginaceae*)、麻黄属(*Ephedra*)和蒺藜属(*Tribulus*); 阔叶树含量略增加(0~8.17%), 主要有榆属(0~5.96%)和柳属; 针叶树含量较带 2 明显减少(4.79%~31.54%), 主要有松属(1.09%~21.28%)和侧柏属(0~5.63%).

带 4 395~365 cm (9.8~9.6 ¹⁴C ka BP), 为松属~云杉属组合带, 与中部的粉砂质黏土层相对应. 孢粉总浓度迅速增加(最高达 5.18×10^3 粒/g), 孢粉组合中针叶树含量快速增加(25.12%~81.62%), 主要有松属(15.44%~67.66%)和云杉属(8.54%~12.89%); 阔叶树(0.28%~1.92%)和草本(17.66%~63.78%)含量下降, 主

要有藜科(4.35%~32.05%)、蒿属(4.56%~14.91%)和榆属(0.00%~1.24%)。

带5 365~60 cm (9.6~7.6 ^{14}C ka BP), 为禾本科-蒿属-藜科组合带, 相对应的地层从下而上分别为黄土层、粉砂质黏土层、强土壤化的风积-冲积相沉积层。该带孢粉总浓度下降($0.05\times 10^3\sim 2.09\times 10^3$ 粒/g), 但有波动。孢粉组合中草本含量占绝对优势(49.46%~95.58%), 主要有蒿属(4.34%~52.61%)、禾本科(1.62%~33.44%)和藜科(0.39%~40.74%), 其中蒿属和禾本科与藜科含量呈互相消长变化, 还有一定的兰雪科、蔷薇科(Rosaceae)和凤毛菊型(*Saussurea* type)花粉; 针叶树含量下降(2.95%~59.89%), 但仍较带3的含量高, 主要有松属(1.77%~42.22%)、云杉属(0.29%~14.78%)和侧柏属(0~9.28%); 阔叶树含量也有增加(0.26%~15.00%), 主要是榆属(0~10.84%)。值得注意的是, 中段260~215 cm(8.9~8.6 ^{14}C ka BP, 图3灰色阴影部分)的孢粉总浓度和阔叶树花粉浓度较高, 孢粉组合中, 禾本科(7.77%~33.44%)和榆属(0.63%~10.84%)含量达整个剖面的峰值段; 侧柏属含量也较高(0~9.28%)。在90~60 cm(7.7~7.6 ^{14}C ka BP)处凤毛菊型花粉出现高含量(5.56%~62.12%)(图3中灰色阴影标注)。

带6 60~00 cm (7.6~7.2 ^{14}C ka BP), 为松属-云杉属-禾本科组合带, 位于最上部弱发育古土壤层。该带孢粉总浓度较高($0.18\times 10^3\sim 1.25\times 10^3$ 粒/g)。孢粉组合中, 针叶树含量增大(17.49%~85.63%), 主要由松属(11.66%~71.83%)、云杉属(4.08%~11.84%)、铁杉属(0.33%~2.84%)和侧柏属组成; 阔叶树含量略有下降(0.85%~8.52%), 主要有榆属(0.53%~4.42%)、桦属和栎属; 草本植物含量下降幅度较大(13.80%~55.29%, 仅有两个样品含量超过60%), 主要有藜科(2.81%~26.90%)、蒿属(1.85%~14.71%)、禾本科(0.43%~4.41%)和百合科。

3 古植被古气候演化

前人对现代表土孢粉做了大量的研究工作, 本文对植被与气候的重建主要依据绝大部分学者的观点, 总结如下: () 松属花粉产量大, 且可以随气流搬到较远的距离, 花粉组合中出现25%~30%以下的松属时, 都有可能处于无松林带 [17~22]。在云杉林及邻近地区, 云杉花粉含量介于20%~80%; 当云杉含量小于5%时, 可能来自远距离传播(荒漠和荒漠草原中云杉花粉含量多数为2%~3%) [18~20, 23, 24]。另外, 河

流携带山区针叶树植物花粉对平原冲积物孢粉组合的影响多在30%以下 [25]。() 榆属花粉的代表性争论较大, 在中条山海拔1700 m的含有榆属的阔叶杂木林下表土中榆属花粉含量最高可达34% [26], 其他的研究工作表明, 榆属的花粉具低代表性 [21, 27], 也有些研究者认为榆属花粉百分比与植被值相差不大, 属于具代表性类型 [28]。() 蒿属和藜科具超代表性, 当孢粉组合中出现少量的藜科和蒿属时, 应视为外来花粉。但当他们的含量分别占30%时, 应该说在当时当地存在蒿属和藜科 [17~19, 21]。() 禾本科具低代表性, 即使在现代植被中作为建群种和优势种出现时, 平均也仅占3.0%~6.0% [17~19, 29]。

该剖面中阔叶树含量及浓度较低, 除榆属外, 其他(如桦属、栎属和柳属等)含量均低于5%, 可能在研究区研究时段内这些树种不发育。

根据海原剖面孢粉组合, 结合孢粉总浓度、木本及草本花粉浓度变化特征(图3, 4)重建的黄土高原宁夏南部13.0~7.0 ^{14}C ka BP期间的植被及气候演化序列如下:

12.7~12.1 ^{14}C ka BP, 草本花粉浓度明显高于木本花粉浓度, 而且草本花粉含量占绝对优势, 显示此时草本植物占优势。蒿、藜科和禾本科的花粉浓度较高, 可能在当地发育, 并伴生有紫菀、百合科和蓼属等; 松属、云杉属和榆属的花粉浓度较低, 可能为外来花粉。推测研究区的植被为干草原, 气候比较干旱。柳树湾剖面 [30]和山西柿子滩遗址 [31]的孢粉记录都显示13~12.0 ^{14}C ka BP, 草本植物占绝对优势, 属温和干旱的草原环境, 这与我们的研究结果一致。

约12.1 ^{14}C ka BP开始针叶树花粉含量剧增且孢粉浓度和针叶树花粉浓度快速增加, 表明研究区植被由干草原迅速过渡为森林, 湿度较前期明显增加。12.1~11.4 ^{14}C ka BP, 针叶树花粉浓度很高, 孢粉组合中松属、云杉属和侧柏属的含量及浓度较高, 反映它们可能在当时当地发育, 推测研究区植被为以松和云杉为主的针叶林类型, 气候湿润。11.4~11.2 ^{14}C ka BP期间, 侧柏属(含量稳定且大部分高于8%)、榆属、蒿属和禾本科含量增加, 而松属和云杉属含量及浓度降低。考虑到侧柏属和榆属花粉为低代表性, 而松属和云杉属花粉为超代表性, 我们认为这一时期侧柏可能替代松和云杉成为优势种群。研究区当时的植被类型可与现代甘肃东部和陕西北部的侧柏林对比 [32], 林中混生有榆, 草本层以禾本科和蒿属为主,

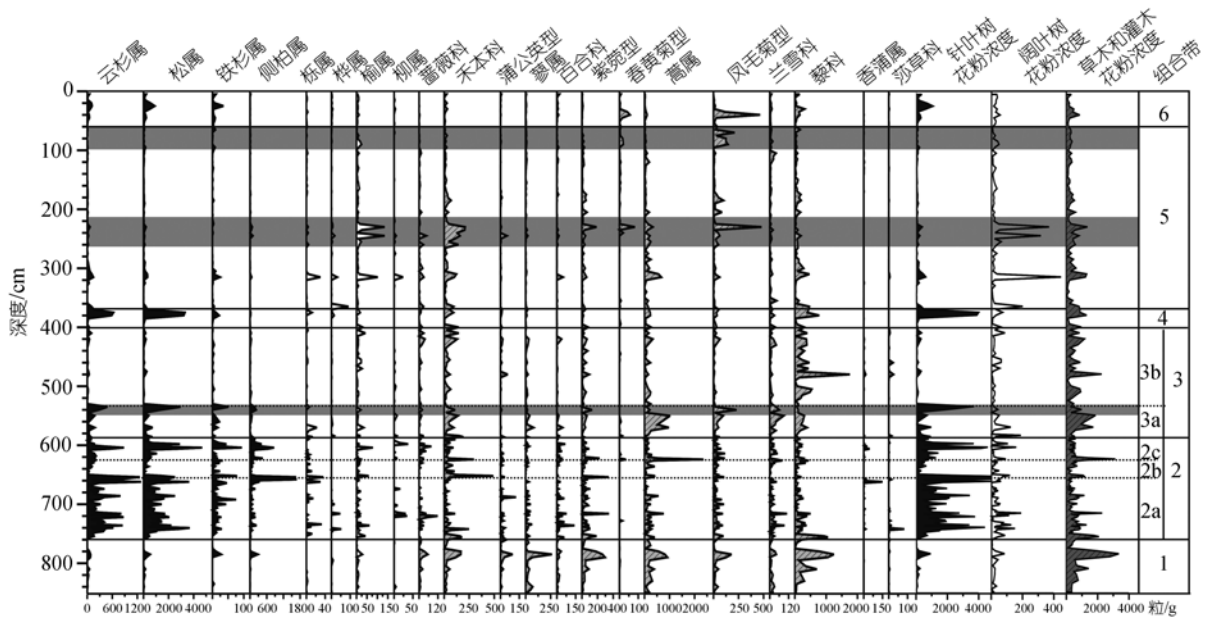


图 4 剖面孢粉重量浓度图谱

气候温和偏干。11.2~11.0 ¹⁴C ka BP 期间，松属含量及浓度增加，侧柏属含量及浓度仍较高，这一时期的植被可能是以侧柏和松为主的针叶林，气候较温暖湿润。

11.0~10.6 ¹⁴C ka BP 期间，草本花粉浓度迅速上升，其中蒿属含量和浓度剧增，禾本科和藜科含量和浓度也有明显上升，针叶树花粉浓度下降；这表明草本植物开始代替木本植物成为研究区的优势群落，该时期的植被可能为蒿建群的草原，气候明显变干。10.6~9.8 ¹⁴C ka BP 期间，孢粉总浓度迅速下降，其中针叶树花粉浓度急剧下降至整个剖面较低段，孢粉组合中藜科含量和浓度都很高，可能指示研究区此时植物贫乏稀疏，生态景观是藜科为优势种和建群种的荒漠草原，气候为整个研究时段的最干早期。11.0~9.8 ¹⁴C ka BP 期间有两个相邻样品的针叶树花粉浓度和含量出现峰值，但阔叶树和草本花粉浓度较低。

约 9.8~9.6 ¹⁴C ka BP 期间，针叶树花粉含量和浓度快速上升，主要以松属和云杉属为主；阔叶树和草本花粉浓度也有增加，植被快速过渡为以松和云杉为主的针叶林，气候变得温凉湿润。

9.6~7.6 ¹⁴C ka BP 期间，孢粉总浓度和针叶树花粉浓度较低，故含量较高的松属、云杉属及藜科可能为外来成分；而阔叶树花粉浓度略有增加，含量较高的榆属和大量中生草本反映研究区植被可能为疏林

草原景观。该期孢粉组合中具有两个明显特征：() 禾本科和蒿属与藜科含量变化互为消长，表明这一时期气候波动频繁；() 8.9~8.6 ¹⁴C ka BP 阔叶树花粉浓度出现峰值，草本和针叶树花粉浓度也有增加，榆属、禾本科和侧柏属的含量和浓度都较高，可能在当时当地生长，森林草原发育，气候较温暖湿润。另外，7.7~7.6 ¹⁴C ka BP 凤毛菊型花粉含量及浓度很高，是否代表气候的短暂变化，有待进一步的研究。

7.6~7.2 ¹⁴C ka BP 期间，松属和云杉属含量及浓度的增加也许指示了研究区针叶树松和云杉又开始扩张，阔叶树榆可能较发育，草本仍以禾本科为主，植被逐渐向森林草原过渡，反映气候又开始变湿润。这一时期在黄土高原西部 [11] 和内蒙古高原的大部分地区 [33,34] 都表现为植被繁茂的气候适宜期，是否预示着研究区全新世最适宜期的开始，还需进一步研究。

4 对比与讨论

4.1 博令/阿勒罗得期

12.1~11.0 ¹⁴C ka BP (14.0~12.9 cal ka) 期间植被由干草原迅速演化为森林，气候快速变湿，可与博令 (Bölling)/阿勒罗得 (Allërod) 事件对比，期间气候存在次一级的干湿波动。气候的快速变化及不稳定性与格陵兰冰芯 [3]、深海沉积 [2]、古里雅冰芯 [4] 及中国石笋 [10,35] 记录中都有很好的对比。

期间研究区植被由以松和云杉为主的针叶林,逐步过渡到喜暖干的侧柏林,最后演化为以侧柏和松为主的针叶林,表明后期气候的暖湿程度明显高于前期. 沙漠/黄土过渡带的孢粉记录 [36]也显示出,约 12.5~11.2 ^{14}C ka BP期间花粉浓度较高,且后期的花粉浓度和有机碳含量明显超过前期,反映植被盖度和降水逐渐增加的温和湿润气候. 中卫和米浪沟剖面的粒度和磁化率指标显示 [37], B/A期间(14.4~12.9 ka BP, TL年代)粒度较细,磁化率值较高,且阿勒罗得期间的粒度较博令期更细,磁化率值更高,也反映阿勒罗得期的湿润程度明显超过了博令期. 古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录 [38]到B/A期间温度呈上升趋势,南京葫芦洞 [39]及贵州董歌洞石笋中的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录 [10]也显示B/A期间夏季风增强,降水量呈上升趋势. 这些都与我们的研究结果一致.

4.2 新仙女木事件

11.0~9.8 ^{14}C ka BP(12.9~11.2 cal ka)期间研究区孢粉资料揭示的气候快速变干可与新仙女木事件(Younger Dryas)对比. 南京葫芦洞石笋 [39]及贵州D4石笋 [10]记录的YD事件开始时间约为 12.9 ka BP(TIMs-U系测年), 终了时间为 11.6 ka BP左右, 研究区YD事件的开始时间约为 12.9 cal ka, 但结束时间(约 11.2 cal ka)却滞后约 300~400 a, 可能与植被对气候快速变化的响应滞后有关.

YD期间研究区气候存在明显波动且表现为后期更干. 来自中国沙漠/黄土过渡带的孢粉记录 [30,36]显示, 11.2~10.6 ^{14}C ka BP期间花粉浓度低, 仅有少量旱生草本, 呈现半荒漠景观; 10.2~10.0 ^{14}C ka BP期间为仅见个别花粉、零星耐旱植物生长的荒漠景观, 似乎也反映后期气候较前期更为干旱. 古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 和 Ca^{2+} 浓度记录 [4]到YD期间, 气温越来越低, 大气尘埃含量逐渐增加, 也显示后期气候较前期更寒冷干燥; 董歌洞石笋中的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录 [10]显示, 新仙女木期谷值也出现在晚期. 这些都与我们的结果一致.

值得注意的是, 沙漠/黄土过渡带的孢粉记录 [30,36]还揭示YD期中段木本和草本花粉浓度出现峰值, 为湿润草原景观, 气候曾一度变湿润. 而本文的孢粉记录显示, 中段仅有两个相邻样品的针叶树花粉浓度和含量出现峰值, 而阔叶树和草本花粉浓度较低, 这一差异可能是由于沙漠/黄土过渡地带的植被对气候变化更敏感或是样品分辨率不同产生的, 还需要结合其他指标作进一步研究.

4.3 早全新世气候

9.6~7.6 ^{14}C ka BP期间气候波动频繁, 研究区这一气候特征并不是孤立的, 在青藏高原部分地区 [40]和石羊河流域 [41]的研究中也有类似的气候特征. 但研究区气候总体表现为温暖偏干, 可能主要是由于温度波动上升较快, 尽管降水量也有增加, 但温度上升较快导致有效湿度下降, 植被覆盖度较低. 靳鹤龄等 [42]在总结了多个沙漠-黄土边界带的不同剖面地层、孢粉和磁化率等资料后, 认为早全新世气候表现为气温波动升高, 偏干的特征. 来自青海湖的孢粉记录也揭示出 10.4~8.6 ^{14}C ka BP气候温暖偏干的特征. 而柳树湾剖面 [30]和糜地湾剖面 [36]的孢粉记录则显示, 10~7.5 ^{14}C ka BP期间木本和草本花粉浓度达到峰值, 为生长小片落叶阔叶树的疏林草原景观, 成为全新世气候中最为适宜的一段时期. 出现这种差异, 可能与不同作者对孢粉谱及孢粉组合总体变化特点的解释不同有关.

5 结论

() 剖面孢粉资料显示, 研究区 13.0~7.0 ^{14}C ka BP 期间的植被演化大体经历了干草原→针叶林→侧柏林→针叶林→草原→荒漠草原→针叶林→疏林草原→森林草原的演化过程, 相应的气候依次经历了以下几个阶段: 12.7~12.1 ^{14}C ka BP, 温和偏干; 12.1~11.4 ^{14}C ka BP, 凉湿; 11.4~11.2 ^{14}C ka BP, 温和偏干; 11.2~11.0 ^{14}C ka BP, 较温暖湿润; 11.0~10.6 ^{14}C ka BP, 半干旱; 10.6~9.8 ^{14}C ka BP, 干旱; 9.8~9.6 ^{14}C ka BP, 温凉湿润; 9.6~7.6 ^{14}C ka BP, 温暖偏干; 7.6~7.2 ^{14}C ka BP, 较温暖湿润.

() 末次冰期向全新世过渡期间, 气候波动频繁, 且具突变性. 12.1~11.0 ^{14}C ka BP 研究区植被由干草原迅速演化为森林, 期间气候存在明显干湿波动, 且表现为后期暖湿程度超过前期. 11.0~9.8 ^{14}C ka BP 气候快速的变干可与新仙女木事件对比, 期间气候也存在明显波动且表现为后期更干.

YD 事件后针叶树花粉含量和浓度快速上升, 表明末次冰期向全新世的转变也具突变性. 早全新世温度和降水量波动增加, 但由于温度上升较快, 导致有效湿度下降, 气候总体温暖偏干, 期间也出现变湿的明显变化. 约 7.6 ^{14}C ka BP 开始, 植被逐渐向森林草原过渡, 反映气候又开始变湿润.

() 研究区孢粉记录的气候干湿波动与全球性

的气候变化具可比性,说明在生态环境比较脆弱的黄土高原地区,高分辨率的孢粉分析是研究气候变化的理想方法之一。

致谢 安成邦博士、汪卫国博士、张军硕士参加了野外工作,在此深表谢意。

参 考 文 献

- 1 Broecker W S. Massive iceberg discharges as triggers for global climate change. *Nature*, 1994, 374: 421—424[DOI]
- 2 Bond G, Shower W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, 278: 1257—1266[DOI]
- 3 O'Brien S R, Mayevoski P A, Meeker L D, et al. Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core. *Science*, 1995, 270: 1962—1964[DOI]
- 4 杨志红,姚檀栋,皇翠兰,等. 古里雅冰芯中的新仙女木事件记录. *科学通报*, 1997, 42(18): 1975—1978
- 5 An Z S, Stepen C P, Zhou W J, et al. Episode of strengthened Summer Monsoon climate of Younger Dryas age on the Loess Plateau of central China. *Quat Res*, 1993, 39: 45—54[DOI]
- 6 汪品先,卞云华,李保华,等. 西太平洋边缘海的“新仙女木事件”. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1996, 26(5): 452—460
- 7 Guo Z T, Petti-Maire N, Kropelin S. Holocene non-orbital climatic events in present-day arid areas of northern Africa and China. *Glob Planet Change*, 2000, 26(1-3): 97—103[DOI]
- 8 周卫建,卢学峰,武振坤,等. 若尔盖高原全新世气候变化的泥炭记录与加速器放射性碳测年. *科学通报*, 2001, 46(12): 1040—1044
- 9 刘兴起,沈吉,王苏民,等. 青海湖 16 ka 以来的花粉记录及其古气候古环境演化. *科学通报*, 2002, 47(17): 1351—1355
- 10 覃嘉铭,袁道先,程海,等. 新仙女木及全新世早中期气候突变事件: 贵州茂兰石笋氧同位素记录. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(1): 69—74
- 11 Feng Z D, Tang L Y, Wang H B, et al. Holocene vegetation variations and the associated environmental changes in the western part of the Chinese Loess Plateau. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2006, 241(3-4): 440—456[DOI]
- 12 李天斌. 宁夏同心县清水河全新世地层. *中国区域地质*, 1997, 16(3): 253—258
- 13 宁夏回族自治区地质矿产局. 宁夏回族自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1990. 228—232
- 14 Moorer P D, Web J A, 著. 李文漪,肖向明,刘光锈,译. 孢粉分析指南. 南宁: 广西人民出版社, 1987
- 15 王伏雄,钱南芬,张玉龙,等. 中国植物孢粉形态. 北京: 科学出版社, 1995
- 16 王开发,王宪曾. 孢粉学概论. 北京: 北京大学出版社, 1983
- 17 吴玉书,孙湘君. 昆仑西山林下表土中孢粉与植被间的数量关系. *植物学报*, 1987, 29: 204—211
- 18 李文漪,阎顺. 柴窝堡盆地第四纪孢粉学研究. 见: 施雅凤,文启忠,曲耀光,等,编. 新疆柴窝堡盆地第四纪气候环境变迁和水文地质事件. 北京: 海洋出版社, 1990. 46—72
- 19 李文漪. 中国第四纪植被与环境. 北京: 科学出版社, 1998. 48—49
- 20 阎顺. 新疆表土松科孢粉分布的探讨. *干旱区地理*, 1993, 16(3): 1—9
- 21 张佳华,孔昭宸,杜乃秋. 北京地区百花山、东灵山表土孢粉的特征分析. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16(3): 101—113
- 22 Ma Y Z, Zhang H C, Pachui H J, et al. Modern pollen-inferred Holocene climate change in the Tengger Desert, NW China. *Holocene*, 2004, 14(6): 841—850[DOI]
- 23 阎顺,许英勤. 新疆阿勒泰地区表土孢粉组合. *干旱区研究*, 1989, 1: 26—33
- 24 翁成郁,孙湘君,陈因硕. 西昆仑山地区表土孢粉组成特征与植被数量关系. *植物学报*, 1993, 35: 69—79
- 25 许清海,吴忱,孟令尧,等. 华北平原不同地貌单元冲积物孢粉组合特征. *科学通报*, 1994, 39(19): 1792—1795
- 26 孙湘君,宋长青,王玮瑜,等. 黄土高原南缘 10 万年以来的植被-陕西渭南黄土剖面的孢粉记录. *科学通报*, 1995, 40(13): 1222—1224
- 27 Liu H Y, Cui H T, Richard P, et al. The surface pollen of the woodland-steppe ecotone in southeastern Inner Mongolia. *Rev Palaeobot Palynology*, 1999, 105: 237—250[DOI]
- 28 李宜垠,张新时,周广胜,等. 中国北方几种常见表土孢粉类型与植被的数量关系. *科学通报*, 2000, 45(7): 761—765
- 29 王玮瑜,宋长青,孙湘君. 内蒙古中部表土孢粉研究. *植物学报*, 1996, 38(11): 902—909
- 30 李小强,周卫建,安芷生,等. 沙漠-黄土过渡带 13 kaBP 以来季风演化的古植被记录. *植物学报*, 2000, 42(8): 868—872
- 31 夏正楷,陈戈,郑公望,等. 黄河中游地区末次冰消期新旧石器文化过渡的气候背景. *科学通报*, 2001, 46(14): 1204—1208
- 32 侯学煜. 中国植物地理及优势植物化学成分. 北京: 科学出版社, 1982. 79—83
- 33 王玮瑜,孙湘君. 内蒙古察素齐泥炭剖面全新世古环境变迁的初步研究. *科学通报*, 1997, 42(5): 514—518
- 34 杨志荣,史培军,方修琦. 大青山调角海子地区 11 kaBP 以来的植被与生态环境演化. *植物生态学报*, 1997, 21 (6): 551—563
- 35 Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon. *Science*, 2004, 304(23): 575—578[DOI]
- 36 周卫建,李小强,董光荣,等. 新仙女木期沙漠-黄土过渡带高分辨率泥炭记录. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1996, 26(2): 118—124
- 37 李森,强明瑞,李保生,等. 末次冰消期东亚季风区西北缘气候快速变化事件. *地质评论*, 2004, 50(1): 106—112
- 38 姚檀栋. 末次冰期青藏高原的气候突变-古里雅冰芯与格陵兰 GRIP 冰芯对比研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1999, 29(2): 175—184
- 39 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene Monsoon record from Hulu cave, China. *Science*, 2001, 249(14): 2345—2348[DOI]
- 40 唐领余,沈才明, Liu K B, 等. 南亚季风演变: 西藏新的高分辨率的古气候记录. *科学通报*, 1999, 44(18): 2004—2007
- 41 Shi Q, Chen F H, Zhu Y, et al. Lake evolution of the terminal area of Shiyang River drainage in arid China since the Last Glaciation. *Quat Int*, 2002, (93-94): 31—43
- 42 靳鹤龄,董光荣,苏志珠,等. 全新世沙漠-黄土边界带空间格局的重建. *科学通报*, 2001, 46(7): 538—543