

黄土高原陇东盆地朝那红黏土 8.1~2.6 Ma 的孢粉记录

马玉贞 吴福莉 方小敏 李吉均 安芷生 王 维

(兰州大学西部环境教育部重点实验室 资源环境学院, 兰州 730000; 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质
国家重点实验室, 西安 710054. E-mail: yzhma@lzu.edu.cn)

摘要 晚中新世至上新世是当代东亚季风系统和中国西北现代生态环境格局形成演化的关键时期. 文中通过对黄土高原陇东盆地朝那剖面 8.1~2.6 Ma 期间的孢粉记录研究, 建立了这期间古生态环境序列. 在 8.10~6.73 Ma 期间, 地带性植被可能是以禾本科为优势种的疏林草原, 在山地有雪松、松等山地针叶林分布, 推测为暖温带半湿润气候. 在 6.73~5.67 Ma 期间, 植被类型可能是森林草原, 以榆为主, 伴生着栎、柳、胡桃、桦的阔叶杂木林和以禾本科为优势种的禾草草原发育, 反映气候温暖较湿润. 在 5.67~3.71 Ma 期间, 蒿、禾草草原和松、云杉针叶林发育, 山地气候温凉湿润, 丘陵和低地温暖半干旱. 其中, 在 4.61~4.07 Ma 期间曾一度温暖较湿润. 在 3.71~2.58 Ma 期间, 地带性植被可能为柏疏林, 林中混生有榆, 尤其是早先一直存在的反映温暖环境的雪松和铁杉此时消失, 反映环境较前期有较大的改变, 气候季节性明显增强.

关键词 黄土高原 红黏土 孢粉记录 植被演化 冬夏季风

季风环流的起源和发展、中国西北和中亚地区的荒漠化与干旱化以及黄土高原植被演化与水土流失等一系列相关的重大科学问题一直为科学界和社会所瞩目. 近年来, 在六盘山以东的黄土高原中部若干第三纪红黏土剖面的年代学和风尘沉积通量、粒度、磁化率、沉积速率、Rb/Sr 比等记录的季风气候演化研究方面取得了显著成果, 这些研究表明以冬、夏季风为特征的东亚季风气候自晚中新世(7~8 Ma)已存在, 3.6~2.6 Ma 青藏高原的加速隆升可能导致了东亚冬、夏季风在这一期间的显著加强^[1~5], 但风尘沉积的岩性、游离铁、全铁值变化表明约 4.8~4.0 Ma 东亚夏季风最为强盛, 然后有一个明显的减弱^[6,7], 土壤钙结核的 $\delta^{13}\text{C}$ 揭示 C_4 草本植物也从 4 Ma 开始急剧扩展^[8]. 而对黄土高原第三纪红黏土的微形态、矿物组合、颗粒形态和大小以及磁化率的研究则进一步认为, 六盘山以西秦安剖面风尘和冬季风搬运体系在 22 Ma 就已经存在, 而以东的黄土高原中部古土壤所反映的夏季风在 3.5 Ma 加强^[9]. 植物群是陆相地层中环境与气候演变直接和敏感的记录者, 本文以黄土高原中部最长序列且已进行精确测年的朝那红黏土剖面孢粉记录为基础, 进行较详细的植被和气候演化研究, 以期对上述科学问题提供新的生态环境学证据.

1 剖面和自然地理概况

朝那剖面位于黄土高原中部的陇东盆地甘肃省

灵台县朝那镇南约 5 km 的郑家什字村(107°21' E, 35°7' N)(图 1). 现代气候属暖温带半湿润区, 年均气温 8~9℃, 最热月均温 22~24℃, 年降水量 350~500 mm; 现代植被属暖温性森林草原, 主要建群植物有长芒草(*Stipa bungeana*)、芨芨蒿(*Artemisia giraldii*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等, 在海拔 1000 m 以下河谷地, 有野古草(*Arundinella hirta*)、大油芒(*Spodiopogon sibiricus*)、黄背草(*Themeda triandran*)等暖性禾草. 在低山丘陵, 有兴安胡枝子(*Lespedeza dahurica*)、酸枣(*Zizyphus jujub*)、白刺花狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)等灌木, 山地有辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、桧柏(*Juniperus chinensis*)、华山松(*Pinus armandi*)、山杨(*Populus davidiana*)和白桦(*Betula platyphylla*)等^[10,11].

剖面顶部海拔高度为 1464 m, 地层出露十分清楚, 第三系红黏土厚达 126 m, 共由 5 段(~)组成, 从上往下依次为: 第 1 段(0~21 m)厚 21 m (), 颜色总体上为棕红色, 土壤发育程度较高, 可见较多铁锰胶膜. 第 2 段(21~45 m)厚 24 m (), 总体上为浅棕红色, 较上一段淡, 夹 5 条宽约 50~80 cm 明显的灰白色结核条带. 第 3 段(45~68 m)厚 23 m (), 颜色为整个红黏土剖面中最红的一段, 呈深棕红色, 胶膜和结核发育. 第 4 段(68~98 m)厚 30 m (), 呈棕黄色, 结核零星分布. 第 5 段(98~126 m)厚 28 m (), 呈浅棕黄色,

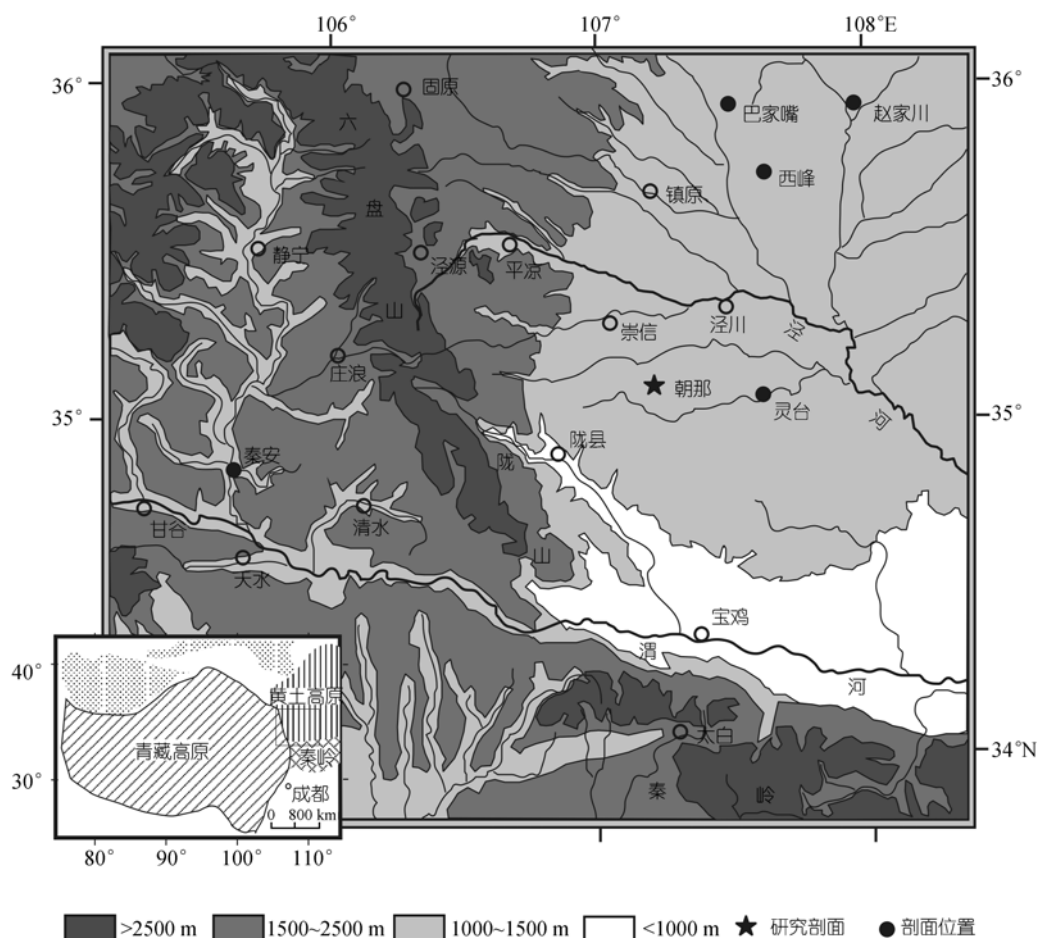


图1 剖面位置图和主要研究点

结核少见,成壤作用不明显.整个红黏土不整合于下白垩统青灰色砂岩、粉砂岩互层之上(图2).该剖面红黏土古地磁测年为 $8.1\sim 2.58\text{ Ma}$ ^[12](图2).

2 孢粉记录

红黏土地层中共采集近130个样品,采样间距1 m左右.室内分析时每个样品取150~200 g,先用35%~36% HCl去除钙质,再用HF(73%)除硅质成分后,用超声波清洗器过筛清洗,尔后用小管净化,最后用甘油保存制活动片鉴定统计.130个样品均获孢粉化石,90%以上的样品孢粉粒数达到100粒以上.在该剖面中共鉴定出26科33属植物花粉.乔木种类主要有柏科(Cupressaceae)、刺柏属(*Juniperus*)、松属(*Pinus*)、云杉属(*Picea*)、雪松属(*Cedrus*)、铁杉属(*Tsuga*)、冷杉属(*Abies*)、榆属(*Ulmus*)、桦属(*Betula*)、栎属(*Quercus*)、柳属(*Salix*)和胡桃属(*Juglans*)等,灌

木与草本种类主要有禾本科(Gramineae)、蒿属(*Artemisia*)、紫菀(*Aster*)型、春黄菊(*Echinops*)型和藜科(*Chenopodiaceae*)等(图3).依据重要种属百分比变化,并结合针叶树、温带、暖温带阔叶树和草本植物之间的比例关系及孢粉浓度,从上到下共划分出4个大带(图4).为了便于讨论植物和气候演化,孢粉组合从下(老)到上(新)叙述如下.

带4 126~97 m, 8.10~6.73 Ma, 禾本科-雪松属-松属组合带.此带孢粉浓度低.孢粉组合中,针叶树略优势(25.00%~73.47%),主要由松属(7.50%~44.90%)和雪松属(2.50%~21.74%)组成,含有少量的柏科(0~20.34%)、云杉属(0~20.00%)、铁杉属(0~5.00%)和刺柏属(0~3.77%);草本植物次之(20.34%~65.00%),主要由蒿属(2.17%~35.16%)、禾本科(4.47%~25.00%)、藜科(2.56%~22.73%)、紫菀型(0~7.50%)和春黄菊型(0~7.23%)组成;落叶乔木含量较低(6.15%~

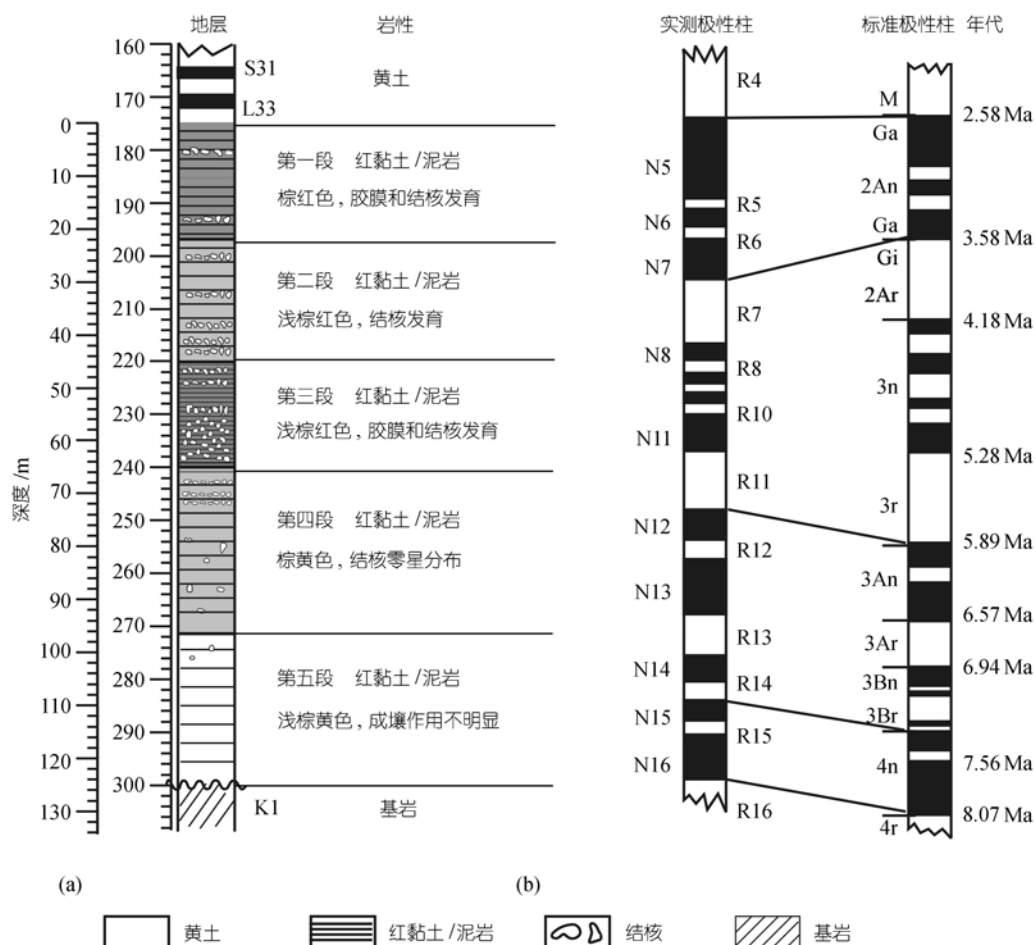


图 2 辽东盆地朝那剖面地层、磁化率、古地磁及年代综合图

(a) 朝那剖面红黏土地层深度; (b) 地层及古地磁柱引自宋友桂等^[12]

23.86%), 有榆属(2.53%~12.00%)、栎属(0~17.39%)、柳属(0~8.19%)和桦属(0~6.67%)等, 并有零星胡桃属出现。

本带可分为两个亚组合带。突出特征是: 在带 4-2 (129~120 m, 8.10~7.76 Ma)中, 雪松属(2.50%~7.89%)和禾本科(4.47%~21.62%)含量较低, 但松属(15.00%~44.90%)含量较高; 带 4-1 (120~97 m, 7.76~6.73 Ma)中, 雪松属(6.33%~21.74%)和禾本科(5.7%~25.00%)含量较高而松属(7.50%~29.73%)含量较低。

带 3 97~67 m, 6.73~5.67 Ma, 禾本科-榆属-松属组合带。此带孢粉浓度低, 落叶乔木增加成为整个剖面中含量最高带(9.46%~35.56%), 针叶树含量下降(16.67%~46.15%), 草本植物基本保持不变(32.79%~59.09%)。和上带相比, 以榆属(6.32%~35.56%)和胡

桃属(0~5.70%)含量增加, 雪松属(0~9.6%)和栎属(0~7.41%)含量降低, 松属(7.19%~38.89%)和禾本科(6.67%~29.27%)含量基本保持不变为特征。其他种类, 如柏科、刺柏属、云杉属、铁杉属、桦属、柳属、蒿属、紫菀型、春黄菊型和藜科等含量与前带基本相同。

带 2 67~30 m, 5.67~3.71 Ma, 蒿属-松属-云杉属组合带。此带孢粉浓度较高, 落叶乔木含量降低(3.60%~23.33%), 针叶树含量上升(12.95%~75.39%), 草本植物基本保持不变(18.29%~65.49%)。孢粉组合中, 最明显的特征是松属(7.06%~59.62%)、云杉属(4.35%~36.96%)和蒿属(6.52%~46.60%)的含量较上带非稳定性的大增, 榆属(1.92%~12.21%)和禾本科(4.42%~22.95%)含量较上带强烈性降低。另外, 栎属(0.71%~13.33%)、柳属(1.22%~10.71%)、桦属(1.19%~2.43%)含量较低且胡桃属零星出现。该带又可分为

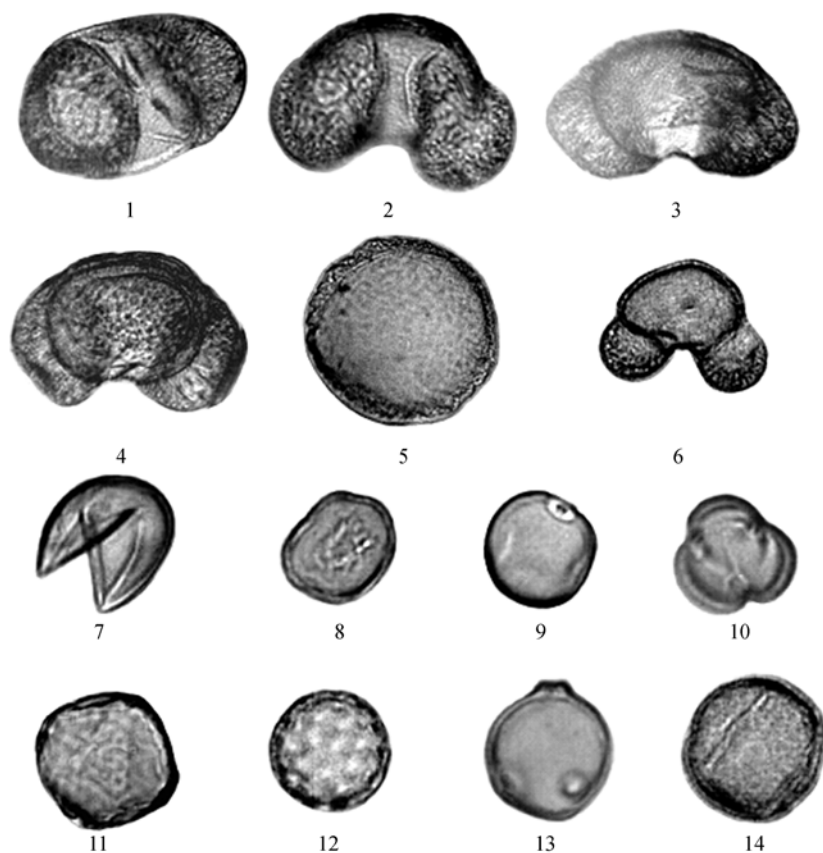


图3 主要花粉形态

1. 云杉属; 2. 冷杉属; 3. 雪松属; 4. 铁杉属; 5. 松属; 6. 刺柏属; 7. 柏科; 8. 禾本科; 9. 蒿属; 10. 榆属; 11. 藜科; 12. 桦属; 13. 栎属

三个亚组合带。

带 2-3 67~49 m, 5.67~4.61 Ma, 松属-蒿属-云杉属组合带。最显著的特点是松属(7.06%~59.62%)和蒿属(6.98%~46.60%)含量大增, 在整个剖面中, 该亚带为两者含量最高峰; 且以松属和云杉属(4.35%~36.59%)为主的针叶树(占 44.29%~79.81%)和以蒿属和禾本科(4.88%~17.30%)为主的草本植物(占 51.43%~61.90%)以 4 个旋回交替出现。落叶乔木含量较带 3 大大减低(4.29%~21.18%), 主要表现在榆属(0~9.30%)和胡桃属(0~1.22%)的含量突降上。

带 2-2 49~37 m, 4.61~4.01 Ma, 松属-禾本科-榆属组合带。在孢粉组合中, 针叶树含量较高且较稳定(占 20.34%~64.05%); 草本植物含量略有下降(23.04%~59.32%), 落叶乔木含量略有上升(7.69%~23.33%)。针叶树主要由松属(9.52%~43.98%)和云杉属(8.10%~22.39%)组成, 但值得注意的是, 雪松属(1.31%~12.77%)和铁杉属(1.92%~6.38%)含量虽然较低但持续出现。草本植物中蒿属除在一个样品中含

量较高外(35.71%)在其他样品中含量均较低(4.92%~35.71%), 而禾本科(6.48%~22.95%)、紫菀型(2.09%~10.17%)及春黄菊型的含量较前亚带有所增加成为草本植物的主要分子。落叶乔木栎属(2.13%~13.11%)、柳属(0.65%~10.71%)和榆属(0.79%~13.56%)含量较前亚带均有所增加。

带 2-1 37~30 m, 4.01~3.71 Ma, 蒿属-云杉属-藜科组合带。草本植物含量增加成为优势分子(59.65%~73.53%), 主要由蒿属(28.35%~36.76%)、藜科(2.17%~24.41%)和禾本科(4.42%~10.62%)组成, 而紫菀型、春黄菊型含量较前亚带降低。针叶树大幅度降低(13.97%~25.98%), 主要由云杉属(1.77%~19.30%)和松属(7.02%~16.54%)组成; 虽铁杉属还继续出现但雪松属消失。落叶乔木略有下降(8.33%~16.81%), 主要由榆属(3.90%~7.96%)、柳属(0.82%~5.88%)及栎属和桦属组成, 但含量均较前亚带降低, 而胡桃属则消失。

带 1 30~0 m, 3.71~2.58 Ma, 柏科-榆属组合带。

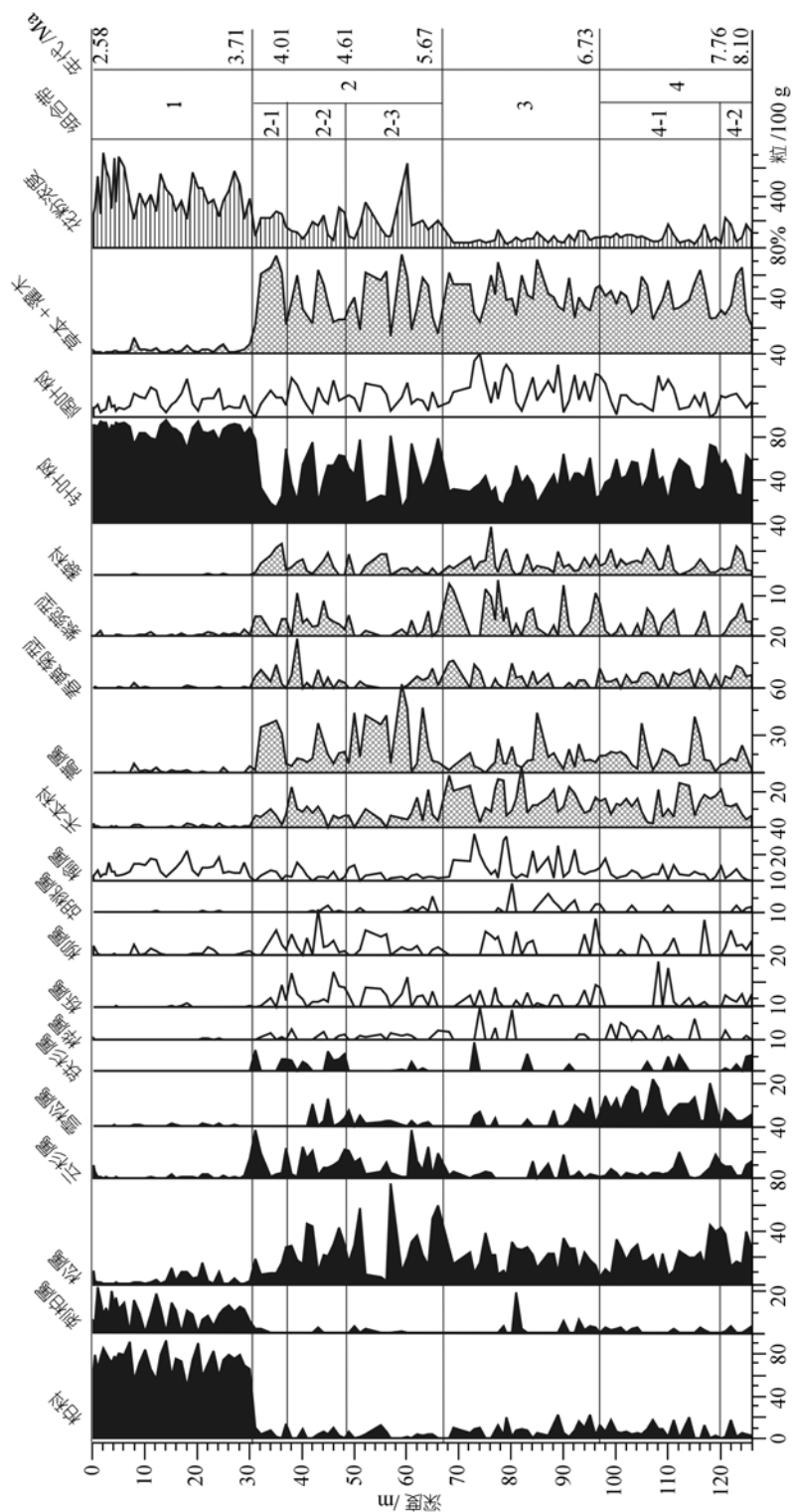


图 4 辽东盆地朝那红黏土剖面孢粉图谱

在整个剖面中,此带孢粉浓度最高.针叶树突增成为绝对优势分子(73.27%~96.15%),主要由柏科(48.10%~85.87%)和刺柏属(5.43%~18.84%)组成;草本植物大幅度降低(0.56%~6.19%),主要由蒿属(0~4.89%)、禾本科及紫菀型(0.00~2.56%)组成;落叶乔木含量略有减少(4.02~24.29%),主要由榆属(2.94%~22.86%)和柳属(0.00~2.30%)组成.

3 古环境探讨

现代表土孢粉研究表明:禾本科具低代表性,即使在现代植被中做为建群种和优势种出现时,平均也仅占 3.0%~6.0%^[13~18].蒿属和藜科具有超代表性,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^[13~15,18~21].松属花粉产量大且可以随气流搬到较远的距离,孢粉组合中出现 25%~30%以下的松属时,都有可能处于无松林带^[13~15,17,22,23].在云杉分布区及边缘,云杉花粉含量大于 20%~80%;当云杉花粉含量小于 1%~5%时,是来自远距离传播;荒漠和荒漠草原中云杉花粉含量多数为 2%~3%^[14,15,23~25].而河流携带山区木本植物花粉对平原冲积物孢粉组合的影响多在 30%以下^[26].一般情况下,桦属和栎属在含量大于 3%~5%时,可以考虑附近有林地;柳属花粉产量小且主要降落在植株附近^[14,15,27,28].榆属花粉的代表性争论较大,在黄土高原采集的现代表土中榆属花粉从未超过 1%,甚至在含有榆树的阔叶杂木林下也是如此,可能说明在黄土高原榆属花粉产量很低;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最高可达 34%^[29],其他的研究工作也表明:榆的花粉具低代表性^[22,27,28],但也有人认为榆的花粉百分比与植被值相差不大,属于具代表性类型^[30].

在带 4(8.10~6.73 Ma)孢粉组合中,禾本科的含量占 4.47%~25.00%,由于禾本科的表现不足,可能为建群种和优势种;榆属花粉含量占 2.53%~12.00%,可能当地有榆生长;藜科和蒿属的含量绝大多数低于 30%,可能为外来花粉;松属(7.50%~44.90%)、云杉属(0~20.00%,大部分小于 5%),为外来花粉或远山有松和云杉生长.在这个时期(8.10~6.73 Ma)地带性植被可能是以禾本科为建群种的疏林草原,疏林是以榆为主,伴生着栎、柳、胡桃、桦及槭(*Acer*)、椴(*Tilia*)和桤(*Fraxinus*)阔叶杂木树;山地生长着雪

松、松、云杉、及柏科、刺柏和铁杉.

值得注意的是,在该阶段孢粉组合中有较高含量的雪松属(2.50%~21.74%),雪松属为一古老植物,其花粉常见于北半球白垩世-早第三纪的沉积中,中新世仍有分布,但在帕米尔、青藏地区晚第三纪的植被成分中占有重要的地位.本属植物目前尚有 4 种,主要产地在地中海南部及东部山地,在我国分布于喜马拉雅西段南坡海拔 1200~3000 m 山地,在 1800~2500 m 的地带出现纯林;常与乔松(*Pinus excelsa*)、喜马拉雅冷杉(*Abies webbiana*)、喜马拉雅云杉(*Picea marimda*)等混生.雪松属生长需要一定的湿度条件,适宜于降水量丰沛,冬季降水(雪)较多的山地环境^[31,32].雪松的含量较高不仅反映了暖热而湿润的气候环境,而且反映了这时冬季风和夏季风均不甚强,冬季降水(雪)较多,气温年较差还较小.鉴于 8.10~6.73 Ma 期间孢粉组合中雪松含量不太高,地带性植被可能是以禾本科为建群种的疏林草原,并还有一定的铁杉和胡桃,故可以初步推断出为暖温带半湿润气候,可能冬季风和夏季风均不甚强.

在带 3 孢粉组合中,禾本科(6.67%~29.27%)可能为建群种和优势种;榆属花粉含量占 6.32%~35.56%,也可能为建群种;松属、云杉属、藜科和蒿属均为外来花粉.在这个时期(6.73~5.67 Ma)植被类型可能为森林草原,以榆为主,伴生着栎、柳、胡桃、桦及槭、椴和椴的阔叶杂木林和以禾本科为优势种的禾草原发育,山地被以松、云杉、雪松、及柏科、刺柏和铁杉组成的针叶林所覆盖.

第 3 组合带可能与现代黄土高原海拔为 1000~1400 m,年平均温度为 7.5~9.8℃,年降水量为 400~550 mm,气候为暖温带半干旱的黄土区植被相似,在那里,灰榆(*Ulmus glaucescens*)、黄榆(*U. macrocarpa*)、山杏、杜梨、油松和侧柏乔木树种主要分布在沟谷相对湿润的地方,以长芒草、白羊草和铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)为优势成分的草原主要分布在丘顶梁脊^[33].和现代黄土区相比较,孢粉组合中中生的禾本科为优势成分,蒿为外来成分,并且还有一定量的铁杉、栎和胡桃存在,另外雪松属花粉含量虽然降低,但仍可达 9.6%,故推断当时气候也许温暖较湿润.

在带 2 组合中,松属(7.06%~59.62%)和云杉属(4.35%~36.96%)的含量可视为近山或研究区附近有松和云杉生长;蒿属(6.52%~46.60%)的含量说明蒿

在当时当地存在;榆和禾本科在当地虽然继续生长,但发育程度较低。在这个时期(5.67~3.71 Ma)植被类型可能为森林(疏林)草原,生态景观大概是:蒿、菊和禾本科禾草生长于林间、山坡、丘陵和低地;栎、柳、榆和桦的阔叶杂木疏林生长在山坡上和沟谷中;山地被针叶林所覆盖,针叶林的组成为松、云杉、及柏科、刺柏、雪松和铁杉。这种景观说明植被垂直分带明显,山地气候温凉湿润,丘陵和低地温暖半干旱。其中在 4.61~4.07 Ma 曾一度较温暖较湿润,在孢粉组合上表现为栎属、柳属、榆属、雪松属、铁杉属、紫菀型和春黄菊型含量增加。

在 3.71~2.58 Ma 期间,柏科和刺柏属为绝对优势分子,伴生有榆属。当时的生态景观可能是柏疏林,林中混生有榆,及零星的栎、柳、桦,而松花粉可能是外来成分。

该孢粉组合反映出的植被类型可和现代甘肃东部和陕西北部侧柏疏林对比。在现代甘肃东部和陕西北部黄土高原海拔 1200~1700 m,年降雨量为 500~550 mm,年平均气温为 10 左右的暖温带森林草原亚带山地上,阳坡常以侧柏疏林为主,偶夹黄榆、辽东栎和小叶朴(*Celtis bungeana*)等,阴坡以辽东栎、山杨和东北白桦林为主,间或还有油松^[34]。现代侧柏是暖温带湿润区和半湿润区常见的针叶树,为喜暖旱中生植物,适于夏季热多雨,冬季冷干的气候(冬夏季风加强)。在现代黄土高原区,侧柏主要受热量控制,处于年平均气温 9 等值线附近,一般不进入年平均温度 8 以下地区,年降雨量一般不低于 450 mm,年相对湿度不低于 55%,低于这些指标,特别是热量指标(8),则侧柏完全消失,这种生态分布特点,表明侧柏形成于干暖的气候条件下,而且侧柏林分布的地区,大多是其他树木难以定居的空间^[35,36]。故当时(3.71~2.58 Ma)的环境较前期大为改观,可能气候温暖半湿润,夏季热多雨,冬季干冷,气候季节性明显增强,季风气候明显,冬夏季风显著同时加强,雪松属和铁杉属花粉在这个时期的几近消失也证明了这一点。但由于柏科的生态幅度较宽,这个解释可能需要今后更多指标的印证。

4 讨论与结论

陇东盆地朝那剖面孢粉记录所反映的植被演化与气候变迁有如下四点特征:

() 在 8.10~6.73 Ma 期间,地带性植被类型可能是以禾本科为优势种的疏林草原,在山地有雪松

和松山地针叶树生长,可以初步推断为暖温带半湿润气候,当时存在植被垂直分带,冬季风和夏季风均不甚强,年降水的季节分配比较均匀,气温年较差还较小。在这一时期的岩性特征(第五段)表现出成壤作用不明显,结核少见,古土壤发育是全剖面最弱层(图 2),与地表疏林草原的景观基本吻合。

() 在 6.73~5.67 Ma 期间,植被类型可能为森林草原。以榆为主,伴生着栎、柳、胡桃、桦的阔叶杂木林和以禾本科为优势种的禾草草原发育,反映气候温暖较湿润。在这个时期(大致相当第四岩性段的下部)土壤发育比第五岩性段强(图 2),与植被反映的情况基本相似。

() 5.67~3.71 Ma 期间,蒿和禾草草原与松、云杉针叶林发育,山地气候温凉湿润,丘陵和低地温暖半干旱,这也许是对六盘山地区在 5.2 Ma 前后显著抬生^[12]的一种生态反映。但在 4.61~4.07 Ma 曾一度温暖较湿润。这个时期(大致相当第四岩性段的顶部至第二岩性下中段)的岩性与植被反映的环境有一定的差距,原因需进一步的工作。

() 在 3.71~2.58 Ma 期间,地带性植被类型可能为柏疏林,林中混生有榆,尤其早先一直存在的雪松此时消失,反映环境较前期有较大的改变,气候季节性明显增强,可能冬季气候明显冷干,夏季热多雨,冬夏季风显著同时加强,但由于柏科的生态幅度较宽,这个解释可能需要今后更多指标的印证。这一时期的岩性(第一段),古土壤发育特征和分层最典型,可见典型的土壤淋溶结构和钙积层,土壤微形态研究也说明这一特征^[9],也可能指示了水热较为集中,即季节性增强的特征。

在本研究区南面的渭河盆地中新世晚期和上新世早中期的花粉组合中,也发现少量雪松,虽松属和麻黄含量较高,但榆属和山核桃属(*Carya*)含量也较高,并有少量温带亚热带植物如枫香属(*Liquidambar*)、芸香属(*Ruta*)、油杉属(*Keteleeria*)、罗汉松属(*Podocarpus*)和木兰属(*Magnolia*)等^[37],这与朝那剖面有良好的可比性。在本研究区东面的榆社盆地湖泊沉积(5.1~3.8 Ma)花粉组合中,虽已有大量云杉和少量冷杉、落叶松等暗针叶林成分出现,但仍以亚热带和温带落叶阔叶树如榆属、桦属、栎属、枫香属和山核桃属为主,并有少量亚热带常绿树如罗汉松属和木兰属^[38],表明气候较本研究区温暖湿润。

其他地区的孢粉记录也显示出相似的特征,如临夏盆地 8.5~6.0 Ma 期间为草原植被,6.0~5.0 Ma 期

间为森林-草原植被^[39], 5.0~4.4 Ma期间旱化加强, 植被为干草原^[39]; 酒西盆地 8.6~6.6 Ma期间为草原植被, 6.64~5.67 Ma为疏林草原, 5.67~5.42 Ma期间旱化加强, 植被为荒漠草原, 3.60 Ma旱化进一步加强, 暖温带阔叶树消失, 3.30~2.56 Ma期间, 云杉林和荒漠草原交替出现, 反映气候强烈波动^[40].

本剖面的孢粉记录与黄土高原区其它指标所反映的环境变化有较好的可比性. 如陕西府谷老高川成土碳酸盐的碳同位素组成特征表明, 7.3~5.3 Ma期间为C₃+C₄ 混合型植被, C₄ 植被生物量达 40%, 到 5.3~4.4 Ma期间, C₄ 型植被的生物量增加到 70%^[41]; 陕西府谷老高川地区三趾马动物群性质的变化说明在 8~7 Ma该区植被为草原-草原疏林, 7~5.2 Ma转变为森林^[42], 在中新世晚期(约 5.3 Ma)气候急剧寒冷, 由于气候的恶化, 使以鹿类为主的森林性动物群发生灾害死亡事件^[43]; 黄土高原若干剖面第三纪红黏土的年代学和风尘沉积通量、粒度、磁化率、沉积速率、Rb/Sr比等的研究表明 3.6~2.6 Ma东亚冬、夏季风显著加强^[1~6], 并认为可能是由青藏高原的加速隆升所导致^[44~46].

这种现象在世界其他地区也有表现, 如南巴基斯坦大约在 8.0 Ma之后, 泛滥平原上的植被由C₃ 型转变为C₄ 型; 5.3~3.0 Ma期间气候进一步旱化, $\delta^{13}\text{C}$ 值相对变大, 表明发育近于纯的C₄ 植被^[47]; 反映亚洲和南美洲干旱发展的南、北太平洋粉尘沉积通量在 8~7.7 Ma增高, 特别是在 3.6 Ma突然陡增, 并被解释为与青藏高原大幅度快速隆升有关^[48].

风尘沉积的游离铁、全铁值变化表明约 4.8~4.0 Ma东亚夏季风最为强盛, 然后有一个明显的减弱^[7], 土壤钙结核的 $\delta^{13}\text{C}$ 揭示C₄ 草本植物也从 4 Ma开始急剧扩展^[8]. 这在本剖面的孢粉谱中也有记录(3-2 亚组合带, 4.61~4.07 Ma).

本剖面孢粉记录显示了 6.73, 5.67, 4.61 和 3.71 Ma 为环境的重要转变时期, 它们虽然在大的框架上与其他部分指标所反映的在一些环境事件基本一致, 但似乎更全面和高分辨率的记录了气候环境变化事件的序列和细节, 尤其是生态气候环境的细节信息.

另外, 值得说明的是, 由于在红黏土中提取孢粉颗粒比较困难, 在本项研究中 90%的样品花粉鉴定数量高于 100 粒, 低于 300 粒(在国际上第四纪的花粉统计数量一般要求在 300 粒以上), 虽然可以用来重建第三纪的古生态环境序列, 但所提供的有些信息

可能仍然有待进一步的研究证实.

致谢 本文得到中国科学院引进国外杰出人才计划(人教字[2000]05 号)、教育部科学技术重大研究项目和国家自然科学基金(批准号: G1988040809, 40171094)及国家自然科学基金创新研究群体科学基金(NSFC40121303)联合资助.

参 考 文 献

- 1 An Z S, Kutzbach J E, Prell S C. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times. *Nature*, 2002, 411: 62~66
- 2 安芷生, 王苏民, 吴锡浩, 等. 中国黄土高原的风积证据: 晚新生代北半球大冰期开始及青藏高原的隆升驱动. *中国科学, D 辑*, 1998, 28(6): 481~490
- 3 安芷生, 孙东怀, 陈明扬, 等. 黄土高原红黏土序列与晚第三纪的气候事件. *第四纪研究*, 2000, 20(5): 435~446
- 4 安芷生, 刘晓东. 东亚季风气候的历史与变率. *科学通报*, 2000, 45(3): 238~249[PDF]
- 5 孙有斌, 安芷生. 最近 7 Ma黄土高原风尘通量纪录的亚洲内陆干旱化的历史和变率. *中国科学, D辑*, 2001, 31(9): 169~776 [摘要] [PDF]
- 6 Ding Z L, Xiang S F, Sun J M, et al. Pedostratigraphy and paleomagnetism of a ~7.0 Ma eolian loess-red clay sequence at Lingtai, Loess Plateau, north-central China and the implications on paleomonsoon evolution. *Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol*, 1999, 152: 49~66[DOI]
- 7 杨石岭, 丁仲礼. 7.0 Ma 以来中国北方风尘沉积的游离铁、全铁值变化及其古季风指示意义. *科学通报*, 2000, 45(22): 2453~2456
- 8 Ding Z L, Yang S L. C₃/C₄ vegetation evolution over the last 7.0 Myr in the Chinese Loess Plateau: evidence from pedogenic carbonate $\delta^{13}\text{C}$. *Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol*, 2000, 160: 291~299[DOI]
- 9 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, 159~163
- 10 黄大燊. 甘肃植被. 兰州: 甘肃科技和技术出版社, 1997. 170
- 11 吴征镒. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1995. 799~822
- 12 宋友桂, 方小敏, 李吉均, 等. 晚新生代六盘山隆升过程初探. *中国科学, D辑*, 2001, 31(增刊): 142~148[摘要] [PDF]
- 13 黄赐璇. 西藏西部表土花粉研究. *干旱区地理*, 1993, 16(4): 75~83
- 14 李文漪, 阎顺. 柴窝堡盆地第四纪孢粉学研究. 见: 施雅风等编. 新疆柴窝堡盆地第四纪气候环境变迁及水文地质事件. 北京: 海洋出版社, 1990. 46~72
- 15 李文漪. 中国第四纪植被与环境. 北京: 科学出版社, 1998. 48~49

- 16 王琚瑜, 宋长青, 孙湘君. 内蒙古中部表土花粉研究. 植物学报, 1996, 38(11): 902~909
- 17 吴玉书, 孙湘君. 昆明西山林下表土中花粉与植被间的数量关系. 植物学报, 1987, 29: 204~211
- 18 阎顺. 新疆第四纪孢粉组合特征及植被演替. 干旱区地理, 1991, 2: 1~8
- 19 El Moslinmny A. The ecological significance of common nonar-boreal pollen example from dryland of the Middle East. Rev Pa-laeobot Palyn, 1990, 64: 343~350[DOI]
- 20 Wright H E, Mcandrews J H, van Zeist W. Modern pollen rain in Western Iran, and its relation to plant geography and Quaternary vegetational history. J Ecol, 1967, 55: 415~443
- 21 翁成郁, 孙湘君, 陈因硕. 西昆仑山地区表土花粉组成特征与植被数量关系. 植物学报, 1993, 35: 69~79
- 22 张佳华, 孔昭宸, 杜乃秋. 北京地区百花山、东灵山表土花粉的特征分析. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(3): 101~113
- 23 阎顺. 新疆表土松科花粉分布的探讨. 干旱区地理, 1993, 16(3): 1~9
- 24 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
- 25 李文漪. 神农架巴山冷杉花粉与植物关系及其森林植被之演替. 地理学报, 1991, 46(2): 186~193
- 26 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
- 27 刘会平, 唐晓春, 王开发, 等. 神农架北坡表土常见花粉的 R 值研究. 地理科学, 2001, 21(4): 378~380
- 28 Liu Hongyan, Cui Haiting, Richard Pott, et al. The surface pollen of the woodland-steppe ecotone in southeastern Inner Mongolia. Review of Palaeobotany and Palynology, 1999, 105: 237~250[DOI]
- 29 孙湘君, 宋长青, 王琚瑜, 等. 黄土高原南缘 10 万年以来的植被——陕西渭南黄土剖面的花粉记录. 科学通报, 1995, 40(13): 1222~1224
- 30 李宜垠, 张新时, 周广胜, 等. 中国北方几种常见表土花粉类型与植被的数量关系. 科学通报, 2000, 45(7): 761~765[PDF]
- 31 黄赐璇, 梁玉莲. 藏北高原北部地区湖相沉积的孢粉分析. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 西藏第四纪地质. 北京: 科学出版社, 1983. 153~161
- 32 郑亚惠. 吉隆盆地沃马组孢粉组合. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 西藏第四纪地质. 北京: 科学出版社, 1983. 145~152
- 33 朱志诚. 秦岭及其以北黄土区植被地带性特征. 地理科学, 1991, 11(2): 157~164
- 34 侯学煜. 中国植被地理及优势植物化学成分. 北京: 科学出版社, 1982. 79~83
- 35 朱志诚. 秦岭北坡及陕北黄土高原区侧柏林初步研究. 植物生态学与地植物学丛刊, 1984, 8(4): 279~293
- 36 岳明. 陕西南部侧柏林演替时期的划分及其特征. 植物生态学报, 1998, 22(4): 327~335
- 37 孙秀玉, 范永琇, 邓茨兰, 等. 渭河盆地新生代孢粉组合. 中国地质科学院院报(地质研究所分刊), 1980, 1(1): 84~109
- 38 Shi Ning, Cao Jiaxin, Lars Konigsson. Late Cenozoic vegetational history and the Pliocene-Pleistocene boundary in the Yushe basin, S.E. Shanxi, China. Grana, 1993, 32: 260~271
- 39 马玉贞, 李吉均, 方小敏. 临夏地区 30.6-5.0Ma 红层孢粉植物群与气候演化记录. 科学通报, 1998, 43(3): 301~304
- 40 马玉贞, 方小敏, 李吉均, 等. 酒西盆地晚第三纪-第四纪早期植被与气候变化. 中国科学, D辑, 2004, 34(2): 107~116[摘要] [PDF]
- 41 陈明扬, 赵惠敏. 7.3~1.9 Ma 期间中国黄土高原碳同位素记录与古季风气候. 科学通报, 1997, 42(2): 174~177
- 42 薛祥熙, 张云翔, 岳乐平. 陕西府谷老高川三趾马动物群的出现及时代分期. 科学通报, 1995, 40(5): 447~449
- 43 张云翔, 陈丹玲, 薛祥熙. 中国北方 5.3Ma 动物群的年龄分布特征与气候恶化事件. 科学通报, 1997, 42(7): 743~736
- 44 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(14): 1457~1471
- 45 方小敏, 李吉均, 朱俊杰, 等. 临夏盆地约 30 Ma 以来 CaCO_3 含量变化与气候演变. 见: 青藏高原形成、演化、环境变迁与生态系统研究. A. 北京: 科学出版社, 1995. 55~65
- 46 方小敏, 李吉均, 朱俊杰, 等. 临夏盆地环境变迁与青藏高原隆起的世界影响. 见: 青藏高原与全球变化研讨会论文集. B. 北京: 气象出版社, 1995. 41~51
- 47 Quade J, Cerling T E, Bowman J R. Development of Asian monsoon revealed by marked ecological shift during the latest Mio-cene in northern Pakistan. Nature, 1989, 342: 163~166[DOI]
- 48 Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the northern hemisphere. Paleoclimatology, 1998, 13(3): 215~224[DOI]

(2004-10-10 收稿, 2005-04-18 收修改稿)