

DOI: 10.16359/j.cnki.cn11-1963/q.2016.0040

末次盛冰期以来沙漠 - 黄土过渡带植被 演替及其对气候变化的响应

杨青, 李小强*, 周新郢

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

摘要: 末次盛冰期 (LGM) 以来的增温期和全新世高温期是人类古文化进步的重要时期。黄土高原北部沙漠 - 黄土过渡带两个自然剖面高分辨率花粉分析结果显示, 该区 LGM 以来为草原植被景观, 但优势群落和伴生植物随气候变化而有所不同, 温度和降水变化对植被演替有着重要的控制作用。气候干冷时, 以耐干旱的草本植物种属为主, 群落成分单一, 植被盖度低; 增温期和高温期, 出现少量暖温带乔木植物如胡桃科、栎属等, 植被盖度高, 群落发育良好。全新世暖期是植被发育良好、植被盖度高的适宜期。本研究为黄土高原地区未来增温下植被响应的分析提供了历史相似型。

关键词: 沙漠 / 黄土过渡带; MIS3 阶段; 花粉记录; 植被演替; 增温响应

中图法分类号: K871.11; 文献标识码: A; 文章编号: 1000-3193(2016)03-0469-12

Vegetation succession in response to climate changes since the LGM in the desert-loess transition zone, North China

YANG Qing, LI Xiaoqiang*, ZHOU Xinying

Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins at the Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044

Abstract: Human culture was profoundly influenced by climate change. The increasing warmth of the anathermal in the Last Deglaciation and the Megathermal Period of the Holocene are two important periods for cultural evolution. Sensitive vegetation responses to climate change can be traced by fossil pollen records. The loess-paleosol sections of Caijiagou(CJG), Yulin (38.1°N, 109.8°E) and Hanjialiang(HJL), Fugu(39.5°N, 111.1°E), located in the desert-loess transition zone, northern Loess Plateau, were selected to conduct high-resolution pollen analysis. Based on a field survey, as well as the comparison of magnetic susceptibility curves, grain size curves

收稿日期: 2014-11-20; 定稿日期: 2015-04-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2015CB953803)、国家自然科学基金项目 (41301042; 41172161)

作者简介: 杨青, 女, 30 岁, 博士后, 第四纪地质学专业, 主要从事植被演变与全球变化研究, Email: yangqing@ivpp.ac.cn

通讯作者: 李小强, Email: lixiaoqiang@ivpp.ac.cn

Citation: Yang Q, Li XQ, Zhou XY. Vegetation succession in response to climate changes since the LGM in the desert-loess transition zone, North China[J]. Acta Anthropologica Sinica, 2016, 35(3): 469-480

and the $\delta^{18}\text{O}$ record of stalagmite from Sanbao/Hulu caves during the last 50 ka, we established a depth-age mode of these profiles.

Forty-four pollen samples were palynologically identified to rebuild the vegetation succession in the region, and to explore its response to climate changes since the LGM. At least 300 pollen grains were counted for most samples. Forty-seven families and 20 genera of pollen were identified. Four to five pollen assemblage zones were divided according to the variations of major pollen percentages, pollen concentrations and modern surface pollen research for the CJG and HJL profiles, respectively.

A detailed history of vegetation succession and its response to climate changes since the LGM was reconstructed. For the CJG section, the pollen assemblage consisting mainly of *Artemisia* seems to represent a desert steppe during the LGM. During the Last Deglaciation, the pollen assemblage mainly consisting of *Rununculaceae* and *Poaceae* might reflect the appearance of a sparse steppe environment. In the Younger Dryas, the *Artemisia* and *Poaceae* assemblage might suggest the development of a meadow steppe. During the Holocene Optimum, the meadow-steppe dominated by *Artemisia* appeared. For the HJL section, steppe dominated by *Artemisia* lasted from the LGM to the Holocene Optimum, but the pollen concentration of the Last Deglaciation and Holocene Optimum was significantly higher than that of MIS-3 and the LGM. Moreover, accompanying drought-resistant plants such as *Chenopodiaceae* and *Taraxacum*-type appeared during the LGM, but suffruticosa plants of *Zygophyllaceae* appeared during the Last Deglaciation due to the improvement of water availability.

Our results showed that the vegetation succession of the Desert/Loess transitional zone was mainly controlled by the changes of temperature and water availability since the LGM. During the cold/dry period of the LGM, local vegetation was dominated by drought-resistant species with low vegetation coverage and monotonous community. During the anathermal of the Last Deglaciation and Megathermal Period of the Holocene, vegetation coverage increased with some megaphanerophytes. Our research provides a valuable modern analogue for the study of vegetation in response to global warming.

Keywords: Desert-loess transition zone; LGM; Pollen record; Vegetation succession; Response to climate warming

1 前 言

气候环境变化深刻影响了人类文化进步或衰退。已有研究表明,一般在气候条件适宜时人口会大幅增长,而气候条件恶化时则会引发人类社会经济文化结构转变、人口迁徙等^[1,2]。旧石器时代,古人类古文化繁衍大都对应于温暖湿润的气候环境^[3]。MIS-3阶段(60 ka–25 ka BP)^[4]晚期气候较其前后的 MIS-2 和 MIS-4 阶段偏温暖湿润,是末次冰期

中一个气候比较温暖的间冰阶。当时人类活动相当活跃，世界范围内该时期人类文化遗址不仅数量众多，而且文化面貌也发生显著变化。周口店田园洞穴遗址和河南织机洞旧石器遗址的研究均表明 MIS-3 阶段中晚期动植物资源丰富，为古人类生存活动提供了良好的自然条件^[5,6]。

冰期结束进入温暖的全新世后，农业开始逐步出现^[7]。大多数古生态学和环境考古研究表明，全新世温暖期是人类文明大发展的关键时期。该时期全球温度较高，陆地生态系统生产力较高、生物多样性增加、突变气候事件频率与幅度较小。黄土高原孕育了灿烂的新石器时代文化，早期旱作农业在这里出现并迅猛发展^[8-11]。作为中华文明重要的策源地，黄土高原农业的起源、仰韶时期文化的扩张、龙山时期文化的聚合乃至文明在中原地区的出现，都与气候适宜的温暖期大致对应^[12-17]。作为与目前全球增温的历史相似时期，开展末次冰期以来的末次冰消期增温过程和全新世高温期的环境效应研究，是评估环境变化对人类活动影响的基础。

黄土高原地处干旱-半干旱区，其西缘、北缘都与亚洲内陆荒漠邻接，对气候变化有较高的敏感度^[18]。黄土-古土壤的发育、沙漠扩展与退缩都与区域内气候的冷暖干湿波动有着密切的关系。气候干冷时期，黄土发育、湖泊水位下降、沙漠扩展；气候暖湿期，则古土壤发育、湖泊水位上升、沙漠退缩并出现固定半固定沙丘。利用各种指标对黄土-古土壤的形成时代、环境变迁及其与全球气候变化的联系研究已经取得了国际瞩目的成果^[19-22]。

植被是自然生态系统中最活跃的因子，对气候波动具有非常敏感的反应。花粉作为全球陆地分布最广的古环境信息来源之一，是重建植被演化重要的替代指标。利用花粉指标，结合粒度、磁化率等辅助指标，开展分析沙漠-黄土过渡带植被对气候的响应，可较好地揭示未来可能增温幅度下环境和生态系统对气候变化的响应，对确定气候环境变化与人类活动适应性研究有重要的意义。

目前，末次盛冰期 (LGM) 以来的温度、降水量变化已有大量研究，而本研究立足于沙漠/黄土过渡地带的植被对气候增温的响应开展了研究，为黄土高原植被对气候变化的响应及其北部沙漠进退提供可靠的生物指标记录。本文选择了位于沙漠/黄土过渡带的榆林蔡家沟 (CJG) 和府谷韩家梁 (HJL) 的黄土-古土壤剖面，通过高分辨率花粉分析，恢复这一地区末次盛冰期、全新世高温期、增温过程（包括末次冰消期的快速增温过程）中植被特征，重建沙漠/黄土过渡带植被对增温过程和高温期气候环境变化的响应。

2 研究剖面、地层年代及实验方法

2.1 研究剖面

榆林的蔡家沟 (38.1°N, 109.8°E) 和府谷韩家梁 (39.5°N, 111.1°E) 剖面位于黄土高原北部与毛乌素沙漠东缘交界的沙漠/黄土过渡带的半干旱区 (图 1)。

蔡家沟剖面和韩家梁剖面都包含古土壤层 S_0 和黄土层 L_1 上部，表层均覆盖着约 10cm 厚的现代表层土。两个剖面全新世古土壤 S_0 呈深色，其中含有较高的有机质。蔡家

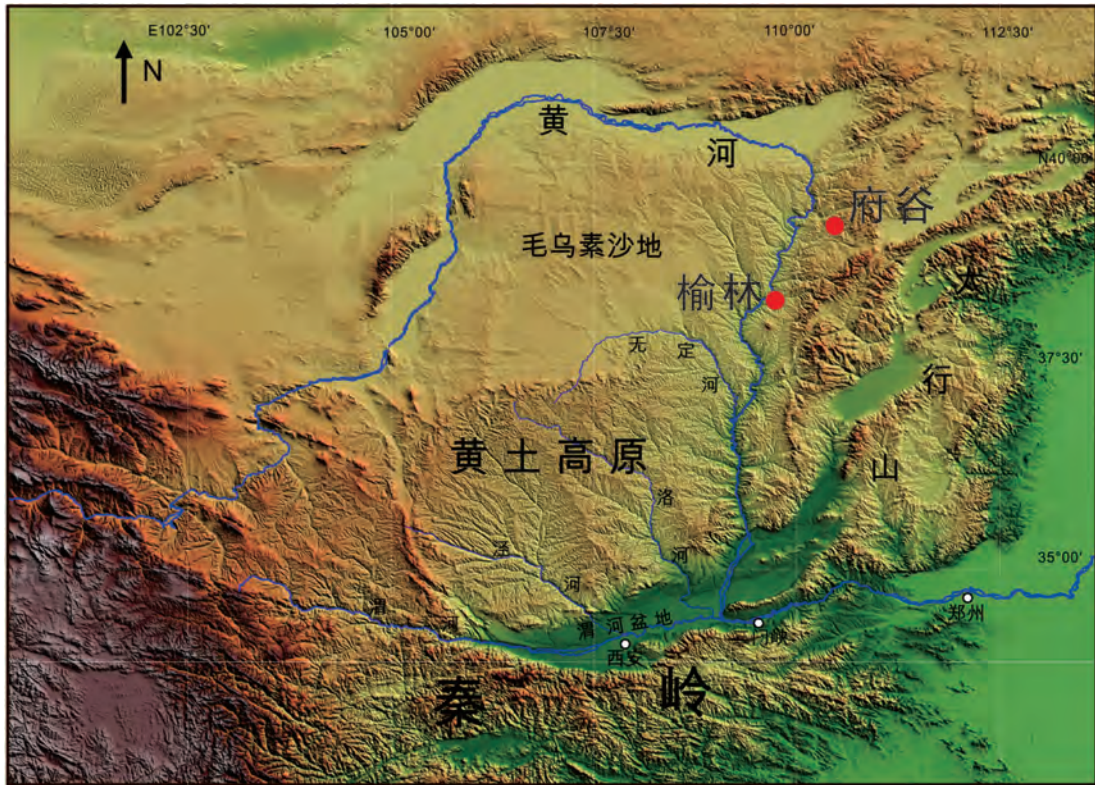


图 1 榆林蔡家沟、府谷韩家梁剖面地理位置示意图
Fig.1 Location of Caijiagou, Yulin and Hanjialiang, Fugu Sections

沟剖面 S_0 深度约为 10-125 cm，韩家梁剖面 S_0 深度约为 10-80 cm。受到剥蚀作用或农业活动的干扰较强烈， S_0 上部有部分缺失。 S_0 以下为末次冰期沉积的黄土层 L_1 ，颜色为灰黄色，厚度较大。 L_1 通常可划分为 5 个亚层，分别为 L_{1-1} ， L_{1-2} ， L_{1-3} ， L_{1-4} ， L_{1-5} 。其中 L_{1-2} 和 L_{1-4} 为弱发育土壤，其余三亚层为典型黄土层^[23]。前人研究结果显示 L_{1-1} 沉积时间对应于 MIS-2 (~28–11 ka)，其中包括末次盛冰期 (LGM) (~26.5–19 ka)， L_{1-2} 、 L_{1-3} 、 L_{1-4} 共同对应 MIS-3，其中 L_{1-2} 对应于 MIS-3 晚期 (~40–28 ka)^[24-26]。

2.2 沙漠 / 黄土过渡带的黄土深度 – 年龄模式

为获得地层年龄的可靠对比，对蔡家沟、韩家梁两个剖面的磁化率和粒度进行了测量。磁化率在中国科学院地球环境研究所环境磁学实验室完成，粒度数据由中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室完成。磁化率作为气候代用指标，在土壤、河流、湖泊和海洋沉积物的研究中得到了广泛应用，可为探索沉积物物源、恢复古沉积环境和地层对比提供有效的手段^[27-34]。黄土剖面磁化率曲线与深海沉积物的氧同位素记录具有良好的可对比性^[35]，是黄土区气候环境变化和黄土–古土壤地层划分的可靠依据。发育较好的全新世古土壤 (S_0)，磁化率曲线常表现为明显的峰值，年龄区间为 10 ka~4 ka BP。黄土层 L_1 整体上磁化率值低且数值的变化范围很小^[19]。粒度也是古气候研究中的一个传统指标，能够提供区域降水、湖泊水位波动、风尘活动及冰川进

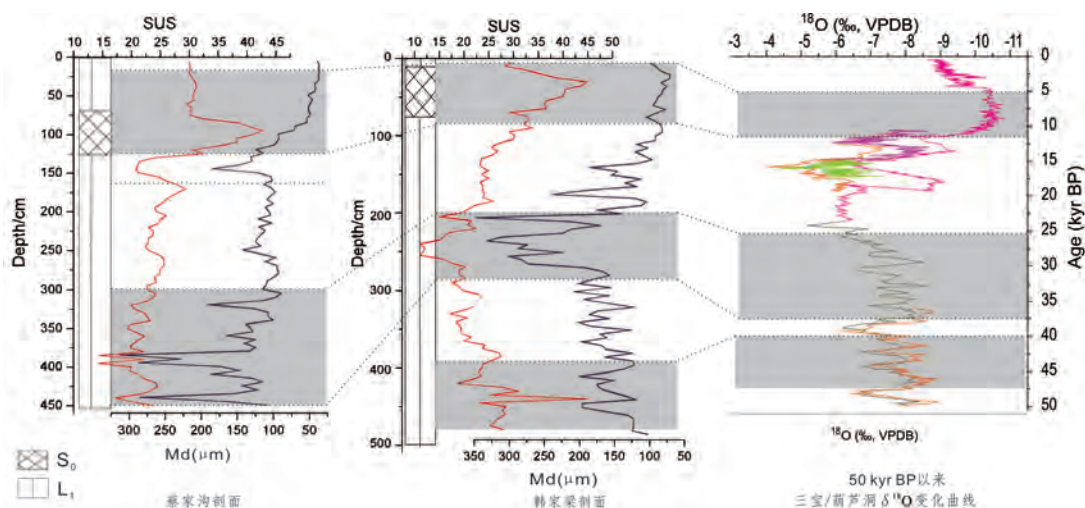


图2 蔡家沟、韩家梁剖面磁化率、粒度曲线与三宝/葫芦洞 50 ka BP 以来石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线对比图
 Fig.2 Comparison of magnetic susceptibility and grain size curves of Caijiagou and Hanjialiang sections and the $\delta^{18}\text{O}$ curves of stalagmite from Sanbao/Hulu caves for the last 50 ka

退等古气候环境信息。中国末次冰期的气候事件与北大西洋之间的关系表明中国粉尘堆积、大陆冰量与全球气候之间存在密切的内在联系^[36]。通过野外观察，并利用磁化率、粒度曲线与具有良好年代控制的三宝/葫芦洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线^[37,38] 对比(图2)，能够大致确定黄土-古土壤序列的时段。

蔡家沟剖面 130~450 cm 沉积物比对深度-年龄关系如下：450~300 cm，末次盛冰期；300~160 cm 对应于末次冰消期；160~125 cm 大致对应新仙女木事件(Younger Dryas, 简称 YD)；125~50 cm 大致与全新世适宜期相对应；50~10 cm 大致可视为全新世 4 ka 以来的堆积。HJL 剖面比对深度-年龄关系如下：480~395 cm，大致对应于 MIS-3 早-中期；395~280 cm 大约对应于 MIS-3 晚期；280~200 cm 为末次盛冰期；200~80 cm 为末次冰消期；80~10 cm 大约为全新世适宜期。

2.3 花粉分析

以 20 cm 间距，分别在蔡家沟剖面和韩家梁剖面采集 20 个、24 个孢粉分析样品。黄土花粉分析采用筛析-重液综合分析法^[39]，在中国科学院地球环境研究所孢粉实验室完成。共分析花粉样品 44 个，其中韩家梁剖面共 24 个，23 个样品统计到 300 粒以上花粉，1 个样品统计到 149 粒；蔡家沟剖面共 20 个，3 个样品统计到 250~500 粒以上花粉，4 个样品统计 100~250 粒，6 个样品统计到 50~100 粒，7 个样品花粉极少。花粉浓度以外加石松孢子计算获得，花粉图谱采用 Tilia 和 CorelDraw12 软件绘制完成。

3 孢粉记录及古植被结果

榆林蔡家沟、府谷韩家梁 2 个剖面 44 块花粉样品鉴定出的花粉分属 47 个科属，有

松属 (*Pinu*)、云杉属 (*Picea*)、桦属 (*Betula*)、栎属 (*Quercus*)、柏科 (*Cupressaceae*)、壳斗科 (*Fagaceae*)、鹅耳枥属 (*Carpinus*)、榆属 (*Ulmus*)、柳属 (*Salix*)、榛属 (*Corylus*)、铁杉属 (*Tsuga*)、椴科 (*Tiliaceae*)、胡桃科 (*Juglandaceae*)、蒿属 (*Artemisia*)、藜科 (*Chenopodiaceae*)、麻黄属 (*Ephedra*)、菊科 (*Compositae*)、禾本科 (*Poaceae*)、豆科 (*Leguminosae*)、怪柳属 (*Tamarix*)、蓼科 (*Polygonaceae*)、蔷薇科 (*Rosaceae*)、毛茛科 (*Ranunculaceae*)、唐松草属 (*Thalictrum*)、蒺藜科 (*Zygophyllaceae*)、白刺属 (*Nitraria*)、百合科 (*Liliaceae*)、葎草属 (*Humulus*)、十字花科 (*Cruciferae*)、石竹科 (*Caryophyllaceae*)、香蒲属 (*Typha*)、小檗科 (*Berberidaceae*)、沙棘属 (*Hippophae*)、锦葵科 (*Malvaceae*)、白刺属 (*Nitraria*)、狼毒属 (*Stellera L.*)、瑞香科 (*Thymelaeaceae*)、苋科 (*Amaranthaceae*)、旋花科 (*Convolvulaceae*)、茜草科 (*Rubiaceae*)、忍冬科 (*Caprifoliaceae*)、鼠李科 (*Rhamnaceae*)、茄科 (*Solanaceae*)、桑科 (*Moraceae*)、伞形科 (*Umbelliferae*)、荨麻科 (*Urticaceae*)、老鹳草属 (*Geranuim L.*)，包括了我国干旱—半干旱区大多数花粉类型。

以所有乔木、灌丛、草本以及水生植物花粉为基数，分别计算不同类型花粉的百分比、浓度，将含量较高的主要花粉种属绘制成图谱。

3.1 蔡家沟剖面花粉组合特征

根据剖面花粉组合特征的变化及该区表土花粉研究资料^[40-46]，自下而上将剖面分为 5 个花粉组合带 (图 3)，各花粉组合带分别描述如下：

带 CJG-I (330~300 cm，末次盛冰期)，以蒿属为主 (83%) 的草本植物花粉含量占绝对优势 (99%)，藜科 (11%) 和禾本科 (2%) 花粉都有一定含量。花粉浓度 (5 粒 /g) 非常低。蒿属 / 藜科 (A/C) 比值大于 2(7.4)，(蒿属 + 藜科) / 禾本科 [(A+C)/P] 比值为 42，显示以蒿属为主的荒漠草原植被景观。

带 CJG-II (300~160 cm，末次冰消期)，藜科 - 蒿属 - 毛茛科 - 禾本科 - 怪柳属 - 胡桃科组合。草本植物花粉含量高 (67%~85%)，以藜科 (6%~23%)、蒿属 (7%~19%)、毛茛科 (3%~35%)、禾本科 (1%~23%) 为主，豆科 (2%~10%) 有一定含量。水生植物葎草属也有较少含量 (0~5%)。乔木植物花粉含量显著增加 (15%~33%)，以胡桃科 (0~14%) 为主，

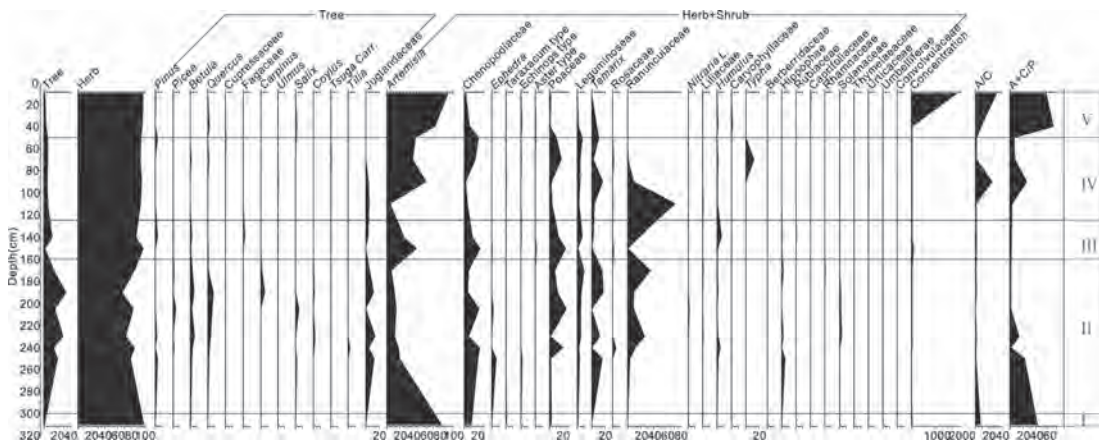


图 3 蔡家沟剖面主要花粉百分比图谱
Fig 3 Percentage diagram of main pollen types from Caijiagou section

栎属(1%~8%)、桦属(2%~6%)等有一定含量。花粉浓度(2~5粒/g)非常低。A/C小于2(0.6~2), (A+C)/P值由早期的23迅速降低到2, 尔后升高到14, 到后期持续小于5, 显示为以毛茛科和禾本科为主的疏林草原-草甸草原的植被景观。

带 CJG-III (160~125 cm, YD 事件), 蒿属-禾本科-藜科-毛茛科组合。草本植物花粉含量显著升高(88~98%), 以蒿属(26%~45%)、禾本科(13%~24%)、藜科(12%~24%)、毛茛科(1%~17%)为主, 还有少量豆科(2%~3%)和蕈草属(1%~7%)。花粉浓度(12~73粒/g)持续保持低值。A/C比值介于1.8~2.1之间, (A+C)/P值都小于5, 显示为以蒿属和禾本科为主的草甸草原植被景观。

带 CJG-IV (125-50 cm, 全新世适宜期), 蒿属-毛茛科-柽柳属-禾本科-豆科组合。草本植物花粉仍然占优势(94%~95%), 以蒿属为主(5%~59%), 毛茛科从早期72%迅速降低到9%, 尔后消失, 禾本科(2%~10%)、豆科(2~8%)和灌木植物柽柳属(3%~11%)有一定含量, 藜科含量(2%~24%)较低。乔木植物胡桃科在前期有一定含量(4%~5%)。花粉浓度(3~5粒/g)非常低。A/C比值处于大于2和小于2的波动状态(1.1~25.3), (A+C)/P值早期小于5, 中后期大于5, 显示为以蒿属为主的草甸草原植被景观, 伴生有喜温湿的毛茛科、禾本科、豆科等草本植物及胡桃科为主的乔木植物。

带 CJG-V (50-10 cm, 全新世4 ka BP以后), 蒿属-柽柳属组合。草本植物花粉占绝对优势(90%~98%), 以蒿属为主(72%~92%), 灌木植物柽柳属也有一定含量(0-7%), 喜温湿的禾本科、豆科、毛茛科含量显著下降或消失。胡桃科在这一时期也有出现, 早期有少量栎属出现(2%)。花粉浓度(3~1807粒/g)变化显著, 晚期的高值可能受表土花粉的影响。A/C比值大于2(8.4~32.1), (A+C)/P值大于5, 显示为以蒿属为主的荒漠草原植被景观。

3.2 韩家梁剖面花粉组合特征

根据剖面花粉组合特征的变化及该区表土花粉研究资料^[40~46], 自下而上将剖面分为5

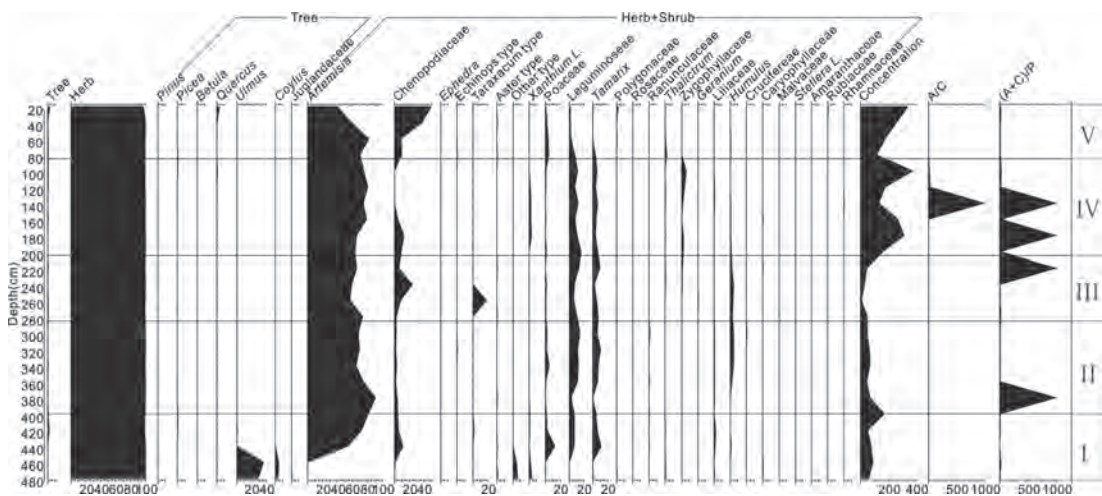


图4 韩家梁剖面主要花粉百分比图谱

Fig.4 Percentage diagram of main pollen types from Hanjiliang section

个花粉组合带(图4),各花粉组合带分别描述如下:

带 HJL-I (480~395 cm, MIS3 早-中期), 蒿属-豆科-藜科-柽柳属-禾本科组合。草本植物占绝对优势(98~100%), 以蒿属(54%~81%)为主, 藜科(4%~11%)、豆科(7%~12%)、柽柳属(0~11%)和禾本科(1%~12%)都有一定含量, 还有少量唐松草属和水生植物百合科出现。花粉浓度(55~174 粒/g)较低。A/C 大于 2(4.9~17.9), (A+C)/P 值大于 5, 显示以蒿属为主的草甸草原植被景观。

带 HJL-II (395~280 cm, MIS3 晚期), 蒿属-豆科-柽柳属-藜科组合。草本植物占绝对优势(~100%), 以蒿属(65%~91%)为主, 并且含量较前一阶段有所升高, 豆科(3%~15%)、柽柳属(0~10%)有一定含量, 而藜科(2~4%)和禾本科(0~5%)含量明显下降。还有少量菵草属(1%~5%)。花粉浓度(47~69 粒/g)仍保持较低水平。A/C 值显著大于 2, (A+C)/P 值显著大于 5, 显示以蒿属为主的草原植被景观。

带 HJL-III (280~200 cm, 末次盛冰期), 蒿属-藜科-菊科-豆科-柽柳属组合。草本植物依旧占绝对优势(99%~100%)。以蒿属(44%~74%)为主, 藜科(2~43%)和菊科蒲公英类型(0~18%)含量有所升高, 豆科(5%~13%)和柽柳属(2~9%)有一定含量, 并含有少量菵草属(~3%)。花粉浓度(11~49 粒/g)有所下降, 为整个剖面最低值。A/C 值在中后期为 1, 其余时段都大于 2, (A+C)/P 值显著大于 5, 显示以蒿属为主的干草原植被景观。

带 HJL-IV (200~80 cm, 末次冰消期), 蒿属-豆科-柽柳属-藜科-蒺藜科组合。草本植物花粉持续占绝对优势(99~100%), 蒿属(63%~81%)为主, 含量有所升高。藜科(0~13%)含量明显降低。豆科(7%~16%)和灌木植物柽柳属(4%~7%)及蒺藜科(0~6%)都有一定含量。花粉浓度(133~378 粒/g)显著升高。A/C 大于 2, (A+C)/P 值显著大于 5, 显示为以蒿属为主的草甸草原植被景观。

带 HJL-V(80~10 cm, 全新世适宜期), 蒿属-藜科-禾本科-豆科组合。草本植物花粉占绝对优势(97%~100%), 以蒿属(41%~82%)为主, 藜科含量(9~50%)逐渐升高, 禾本科(1%~4%)、豆科(1%~4%)都有一定含量。花粉浓度(117~350 粒/g)较高, 呈逐渐升高趋势。A/C 早期大于 2, 晚期小于 2, (A+C)/P 值显著大于 5(18~140), 显示为以蒿属为主的草原植被景观。

4 讨 论

第四纪气候的最大特征是周期性的冰期-间冰期气候波动^[47], 中国 2.5 Ma 以来的黄土-古土壤沉积序列清晰的记录了 37 个冰期-间冰期旋回^[48]。大量研究表明, 末次冰期气候总体寒冷干燥, 间冰阶 MIS-3 则相对温暖湿润, 表现为 MIS-3 早-中期(55 ka~34 ka BP)温湿程度较高, 晚期(34 ka~25 ka BP)湿度降低, 气候趋向冷干^[49], 随后进入气候干冷的末次冰期盛冰期(25 ka~18 ka BP)^[50]。18 ka~10 ka BP 的末次冰消期是末次冰盛期向冰后期(全新世)转换的过渡时期, 全球温度升高, 两极冰川开始快速消融, 全球海平面逐渐上升, 并且存在一系列快速的气候波动^[51-56]。该阶段早期湿度略有增加但仍较干燥, 中期气候转为温偏湿, 对应于博令(Bølling)和阿勒罗得(Allerød)暖期, 晚期气候回返,

出现 YD 事件^[51]。YD 事件结束后, 进入温暖的全新世阶段。全新世早期温度快速升高, 呈现暖湿的气候特征, 10 ka ~4 ka BP 为全新世适宜期, 4 ka BP 以后气候逐渐干旱化^[57-59]。

气候变化对陆地生态系统产生重要的影响。陆地植被是生态系统中重要的一环, 区域性植物类型的变化、植被带在空间上的迁移受到气候变化的控制和影响并反馈于气候。干旱-半干旱地区植物生长的限制因子主要是水分, 花粉浓度变化对生态环境变迁具有指示意义, 一般而言, 花粉浓度指示了植被盖度, 花粉浓度高则植被盖度高^[60-62]。蒿属和藜科花粉在干旱-半干旱区花粉组合中是最重要的成分, 常见于草原、荒漠草原和荒漠植被群落中。二者都具有超代表性, 两者含量各高于 30% 时, 认为周围有该植物群落分布。通常蒿属花粉具有指示区域生态的意义, 藜科花粉对干旱生境的指示意义更明显。蒿属/藜科比值可用于反映气候干湿程度^[63]。禾本科植被在相对湿润的草甸草原、森林草原及苔原中占有重要地位, 其花粉为低代表性。(蒿属+藜科)/禾本科代表花粉干旱指数, 指数大于 5 指示为荒漠草原植被景观, 小于 5 指示为草甸草原或森林草原^[64]。

位于黄土高原北部、毛乌素沙漠东缘的两个剖面都显示了 LGM 以来以草本植物占优势的植物群落变化。CJG 剖面显示该区主要经历了蒿属为主的荒漠草原 (LGM)、毛茛科和禾本科为主的疏林草原-草甸草原 (末次冰消期)、蒿属和禾本科为主的草甸草原 (YD 事件)、蒿属为主的草甸草原 (全新世适宜期)。HJL 剖面显示, 不论是冷干的末次冰盛期, 还是暖湿的全新世适宜期, 或是处于升温过程的末次冰消期, 该区花粉组合都是以蒿属植物为主的草原面貌, 但气候冷暖、干湿变化对其植被盖度及伴生植物类型会产生影响。HJL 剖面的花粉浓度显示了末次冰消期和全新世适宜期的植被盖度都显著高于 MIS-3 和 LGM 时段。该剖面 LGM 时段耐干旱的藜科和蒲公英类型都开始出现; 到末次冰消期, 水分条件显著改善, 灌木植物藜科开始出现; 而全新世中晚期水热条件逐渐恶化, 耐干旱的藜科植物比例增加。

本研究化石孢粉记录与古植被重建结果显示, 黄土高原干旱/半干旱地区水分增加、温度升高都有利于植被盖度和群落发育。末次盛冰期的冷干气候, 导致榆林和府谷地区植被盖度降为最低, 植物以蒿属为主, 并伴生有耐干旱的藜科、菊科蒲公英类型; 末次冰消期水分条件显著改善, 府谷一带植被盖度随之升高, 榆林地区则出现了少量暖温带胡桃科、栎属、桦属等乔木, 均显示了植被随温度和湿度的升高而有所改善; 全新世温暖期植被盖度高, 发育有暖温带乔木植物, 全新世温暖期季风增强^[65]导致降水量增加, 成为沙漠/黄土过渡区植被状况良好的主要原因。

基于本论文研究结果, 结合笔者前期在陕西定边姬塬剖面、内蒙古和林格尔剖面的孢粉分析结果^[18], 重建了 MIS-3 阶段以来黄土高原-沙漠黄土过渡带的植被演替过程, 能够为沙漠进退过程提供可靠的证据: 1) MIS-3 阶段气候较为暖湿, 植被景观表现为疏林草原-草原类型, 最南端的姬塬地区发育有云杉疏林, 含少量铁杉属、栎属和胡桃科植物, 最北部的和林格尔发育有榛属灌丛, 含云杉属、桦属、栎属、壳斗科、鹅耳枥属等多种乔木植物, 显示这一时期植被状况良好, 沙漠大范围收缩; 2) 末次盛冰期气候显著干冷, 自西南向东北植被都以耐冷干的藜科、蒲公英、蒿属等为主, 而北部和林格尔地区甚至出现一定含量的沙生植物如豆科、怪柳属、柳属等, 显示了沙漠在一定程度上扩张, 北部扩张范围较大; 3) 末次冰消期水热条件显著改善, 蒿属、禾本科、毛茛科等喜温湿的草本

植物替代了耐干冷的植物, 灌丛植物如柽柳属、蒺藜科等都有一定含量的, 甚至还出现了柳属、胡桃科、栎属、桦属、榆属等乔木植物, 植物盖度也有较大升高, 显示这一时期沙漠有较大范围退缩; 4) 全新世适宜期气候温暖湿润, 以蒿属、蒲公英、豆科等喜温湿的植物为主, 并且发育有一定量的暖温带乔木植物如胡桃科等, 植物多样性显著增加, 显示这一时期沙漠仍控制在较小范围内。5) 全新世 4 ka BP 以后, 喜温湿的植物显著降低或者消失, 榆林地区出现蒿属为主的荒漠草原植被景观, 府谷地区耐干旱的藜科植物比例增加, 显示这一时期水热条件逐渐恶化, 沙漠有所扩张。

5 结 论

末次盛冰期以来黄土高原北部沙漠 / 黄土过渡带温度和降水的变化对植被演替有着重要的控制作用。末次盛冰期气候干冷, 研究区植被主要以耐干旱的植物种属为主, 群落成分单一, 植被盖度低; 末次冰消期快速增温过程中, 开始出现少量胡桃科、栎属、桦属等暖温带乔木植物, 植被盖度显著升高, 植被群落发育也趋向良好; 全新世高温期发育有一定含量胡桃科、栎属等暖温带乔木植物, 植被盖度较高; 全新世晚期随着气候向干旱化发展, 耐干旱的植物逐渐增多。研究表明, 沙漠 / 黄土过渡区全新世暖期是植被发育良好、植被盖度高的适宜期, 可以作为黄土高原地区未来增温下植被响应预测与评估的历史相似型。

参考文献

- [1] Kohler T, Kresl J, West CV, et al. Be there then: A modeling approach to settlement determinants and spatial efficiency among late ancestral Pueblo populations of the Mesa Verde region [A]. In: Kohler TA, Gummerman GJ, eds. Dynamics in Human and Primate Societies [C]. London: Oxford University Press, 1999
- [2] Wilkinson T, Gibson M, Christiansen J, et al. Modeling settlement systems in a dynamic environment: Case studies from Mesopotamia [A]. In: Kohler T, Leeuw S (eds). Modeling Socioecological Systems [C]. Santa Fe: SAR Press, 2007
- [3] 高星, 袁宝印, 裴树文, 等. 水洞沟遗址沉积 — 地貌演化与古人类生存环境 [J]. 科学通报, 2008, 53(10): 1200-1206
- [4] Antje HLV, Workshop participants. Global distribution of centennial-scale records for Marine Isotope Stage (MIS) 3: A database [J]. Quaternary Science Reviews, 2002, 21(10): 1185-1212
- [5] 李潇丽, 张双权, 魏明瑞, 等. 周口店田园洞 MIS3 阶段古人类生存环境 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 39(3): 133-140
- [6] 夏正楷, 刘德成, 王幼平, 等. 郑州织机洞遗址 MIS 3 阶段古人类活动的背景 [J]. 第四纪研究, 2008, 28(1): 96-102
- [7] 张兰生, 方修琦, 任国玉. 全球变化 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
- [8] 石兴邦. 下川文化的生态特点与粟作农业的起源 [J]. 考古与文物, 2000, (4): 17-57
- [9] Zhao ZJ. The Middle Yangtze region in China is one place where rice was domesticated: phytolith evidence from the Diaotonghuan Cave, Northern Jiangxi [J]. Antiquity, 1998, 72: 885-897
- [10] Lu HY, Zhang JP, Wu NQ, et al. Phytoliths analysis for the Discrimination of Foxtail Millet (*Setaria italica*) and Common Millet (*Panicum miliaceum*) [J]. PLoS ONE, 2009, 4(2): 1-15
- [11] Barton L, Newsome SD, Chen FH, et al. Agricultural origins and the isotopic identity of domestication in northern China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(14): 5523-5528
- [12] 施雅风, 孔昭宸. 中国全新世大暖期气候与环境 [M]. 北京: 海洋出版社, 1992, 1-18
- [13] 王守春. 黄河流域气候环境变化的考古文化与文字记录 [A]. 见: 施雅风, 孔昭宸 编, 中国全新世大暖期气候与环境 [C]. 北京: 海洋出版社, 1992, 175-184
- [14] 庞奖励, 黄春长. 关中地区新石器文化发展与环境演变耦合关系研究 [J]. 地理科学, 2003, 2(4): 448-453

- [15] An CB, Tang LY, Barton L, et al. Climate change and cultural response around 4000cal yr BP in the western part of Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Research*, 2005, 63: 347-352
- [16] 刘峰贵, 侯光良, 张镜铨, 等. 中全新世气候突变对青海东北部史前文化的影响 [J]. *地理学报*, 2005, 60(5): 733-741
- [17] 水涛. 论甘青地区青铜时代文化和经济形态转变与环境变化的关系 [A]. 见: 周昆叔, 宋豫琴主编, 环境与考古研究 (第二辑) [C]. 北京: 科学出版社, 2000, 65-71
- [18] 杨青, 李小强, 周新郢, 等. MIS 3 阶段以来沙漠 / 黄土过渡区植被演替及其对气候变化的响应 [J]. *第四纪研究*, 2011, 31(6): 962-971
- [19] 刘东生. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985
- [20] An Z, Kukla G, Porter S, et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130 000 years [J]. *Quaternary Research*, 1991, 36: 29-36.
- [21] Ding Z, Rutter N, Han J, et al. A coupled environmental system formed at about 2.5 Ma in East Asia [J]. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1992, 94: 223-242.
- [22] Guo Z, Ruddiman W, Hao Q, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 2002, 416: 159-163.
- [23] Yang SL, Ding ZL. Advance-retreat history of the East-Asian summer monsoon rainfall belt over Northern China during the last two glacial-interglacial cycles [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 274: 499-510
- [24] Kukla G. Loess stratigraphy in central China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1987, 6: 191-207, 209-219
- [25] Ding ZL, Derbyshire E, Yang SL, et al. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record [J]. *Paleoceanography*, 2002, 17: 1-21
- [26] Lu YC, Wang X, Wintle AG. A new OSL chronology for dust accumulation in the last 130,000 yr for the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Research*, 2007, 67: 152-160
- [27] Heller F, Liu TS. Magnetism of Chinese loess deposits [J]. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 1984, 77(1): 125-141
- [28] Kukla G, An ZS. Loess stratigraphy in Central China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1989, 72: 203-225
- [29] Kukla G, Heller F, Liu XM et al. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility [J]. *Geology*, 1988, 16(9): 811-814
- [30] Zhou LP, Oldfield F, Wintle A, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese Loess [J]. *Nature*, 1990, 346: 737-739
- [31] Maher BA, Thompson R. Mineral magnetic record of the Chinese loess and paleosols [J]. *Geology*, 1991, 19(1): 3-6
- [32] 韩家懋, 侯光良, 刘东生, 等. 马兰黄土和离石黄土的磁学性质 [J]. *第四纪研究*, 1991, (4): 310-324
- [33] 刘秀铭, 刘东生, John Shaw. 中国黄土磁性矿物特征及其古气候意义 [J]. *第四纪研究*, 1993(3): 281-287
- [34] 孙继敏, 丁仲礼, 刘东生. 50 万年来沙漠 - 黄土边界带的环境演变 [J]. *干旱区地理*, 1995, 18(4): 1-9
- [35] Heller F, Liu TS. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China [J]. *Nature*, 1982, 300: 431-433
- [36] Poeter SC, An ZS. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciations [J]. *Nature*, 1995, 375: 305-308
- [37] Wang YJ, Cheng H, Edwards RL, et al. Millennial and orbital scale changes in the East Asian monsoon over the past 224 000 years [J]. *Nature*, 2008, 451: 1090-1093
- [38] Wang YJ, Cheng H, Edwards RL, et al. A high resolution absolute dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China [J]. *Science*, 2001, 294: 2345-2348
- [39] 李小强, 杜乃秋. 第四纪花粉的无酸碱分析法 [J]. *植物学报*, 1999, 41(7): 782-784
- [40] 王琚瑜, 宋长青, 孙湘君. 内蒙古中部表土花粉研究 [J]. *植物学报*, 1996, 38(11): 902-909
- [41] 李宜垠, 张新时, 周广胜. 中国北方几种常见表土花粉类型与植被的数量关系 [J]. *科学通报*, 2000, 45(7): 761-765
- [42] 许清海, 李月丛, 赵登海, 等. 中国北方典型灌丛群落表土花粉组合特征 [J]. *古地理学报*, 2006, 8(2): 157-164
- [43] 许清海, 李月丛, 阳小兰, 等. 北方草原区主要群落类型表土花粉分析 [J]. *地理研究*, 2005, 24(3): 394-402
- [44] 许清海, 李月丛, 阳小兰. 中国北方几种主要森林群落表土花粉组合特征研究 [J]. *第四纪研究*, 2005, 25(5): 585-597
- [45] 李月丛, 许清海, 肖举乐, 等. 中国北方森林植被主要表土花粉类型对植被的指示性 [J]. *第四纪研究*, 2005, 25(5): 598-608
- [46] 舒军武, 毛方园, 王伟铭, 等. 内蒙古中部四子王旗荒漠草原过渡带表土花粉分析 [J]. *微体古生物学报*, 2009, 26(4): 405-413
- [47] 刘东生. 第四纪环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1997, 198-221
- [48] 丁仲礼, 刘东生. 2.5 Ma 前后中国北方气候转型事件的初步确定 [J]. *科学通报*, 1990, 35(14): 1090-1092

- [49] 吴乃琴, 刘秀平, 顾兆炎, 等. 末次盛冰期黄土高原蜗牛化石记录的气候快速变化及其影响机制 [J]. 第四纪研究, 2002, 22(3): 283-291
- [50] 陈一萌, 陈发虎, 陈兴盛, 等. 中国干旱、半干旱区末次冰期以来气候变化规律 [J]. 干旱区地理, 2004, 27(2): 161-165
- [51] Alley R, Meese D, Shuman C, et al. Abrupt increase in Greenland snow accumulation at the end of the Younger Dryas event [J]. Nature, 1993, 362: 527-528
- [52] Bond G, Heinrich H, Broecker W, et al. Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic ocean during the last glacial period [J]. Nature, 1992, 360: 245-249
- [53] 孙爱芝. 黄土高原西部末次冰消期以来的植被及环境变化研究 [D]. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2007
- [54] 尚雪. 青海湖地区 34 cal ka BP 以来的植被历史与气候变化 [D]. 西安: 中国科学院地球环境研究所博士学位论文, 2009
- [55] Chen FH, Zhu Y, Li JJ, et al. Abrupt Holocene changes of the Asian monsoon at millennial- and centennial- scales: Evidence from lake sediment document in Minqin Basin, NW China [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46 (23): 1942-1947
- [56] Jiang WJ, Guo ZT, Sun XJ, et al. Reconstruction of climate and vegetation changes of Lake Bayanchagan (Inner Mongolia): Holocene variability of the East Asian monsoon [J]. Quaternary Research, 2006, 65: 411-420
- [57] Xiao J, Si B, Zhai D, et al. Hydrology of Dali Lake in central-eastern Inner Mongolia and Holocene East Asian monsoon variability [J]. Journal of Paleolimnology, 2008, 40: 519-528
- [58] Wu W, Liu T. Possible role of the "Holocene Event 3" on the collapse of the Neolithic Cultures around the Central Plain of China [J]. Quaternary International, 2004, 117: 153-166
- [59] Tan L, Cai Y, Yi L, et al. Precipitation variations of Longxi, northeast margin of Tibetan Plateau since AD 960 and their relationship with solar activity [J]. Climate of the Past, 2008, 4: 19-28
- [60] Li XQ, Zhou WJ, An ZS, et al. The vegetation and monsoon variations at the desert-loess transition belt at Midiwan in northern China for the last 13 ka [J]. The Holocene, 2003, 13(5): 779-784
- [61] Shen J, Liu XQ, Wang SM, et al. Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18,000 years [J]. Quaternary International, 2005, 136(1): 131-140
- [62] Chen FH, Yu ZC, Yang ML, et al. Holocene environmental change inferred from a high-resolution pollen record, Lake Zhuyeze, arid China [J]. The Holocene, 2006, 16(5): 675-784
- [63] El-Moslimany AP. Ecological significance of common nonarboreal pollen: examples from drylands of the Middle East [J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 1990, 64(1-4): 343-350
- [64] Fowell SJ, Hansen BC, Peck JA, et al. Mid to late Holocene climate evolution of the lake telmen basin, north central Mongolia, based on palynological data [J]. Quaternary Research, 2003, 59(3): 353-363
- [65] An ZS, Porter SC, Kutzbach JE, et al. Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon [J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19(8): 743-762