

引用格式: 韦利杰, 李振宏, 李明涛, 等, 2023. 宁夏清水河盆地晚更新世中晚期孢粉记录及古气候意义 [J]. 地质力学学报, 29 (5): 662–673. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023015

Citation: WEI L J, LI Z H, LI M T, et al., 2023. Palynological records and paleoclimatic significance during the middle and late Late Pleistocene in the Qingshuihe Basin, Ningxia [J]. Journal of Geomechanics, 29 (5): 662–673. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023015

宁夏清水河盆地晚更新世中晚期孢粉记录及古气候意义

韦利杰^{1,2,3}, 李振宏^{1,2,3}, 李明涛⁴, 董晓朋^{1,2,3}, 崔加伟^{1,2,3}, 寇琳琳^{1,2,3}
WEI Lijie^{1,2,3}, LI Zhenhong^{1,2,3}, LI Mingtao⁴, DONG Xiaopeng^{1,2,3}, CUI Jiawei^{1,2,3}, KOU Linlin^{1,2,3}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081;

3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;

4. 中国地质大学 (北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*

3. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*

4. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*

Palynological records and paleoclimatic significance during the middle and late Late Pleistocene in the Qingshuihe Basin, Ningxia

Abstract: Desertification and drought in inland Asia are closely related to human habitation and social sustainability in western China. The climate in western China has experienced multiple shifts in temperature and aridity since the Late Pleistocene. Investigating this region's Late Pleistocene paleoclimatic changes contributes to predicting future climate trends. This study analyzes the pollen records from the Qingshuihe Basin in southern Ningxia during the middle to late Late Pleistocene, revealing four distinct pollen assemblage zones from bottom to top. These zones reflect paleovegetation and paleoclimate changes during the middle to late Late Pleistocene. The results indicate that during the middle Late Pleistocene (75–50 ka B. P.), the region featured a predominantly *Artemisia*-dominated steppe landscape with a cool and relatively dry climate. In the late Late Pleistocene (25–15 ka B. P.), the area experienced alternations between desert-steppe or steppe and forest-steppe, transitioning gradually to desert-steppe. During this period, the winter monsoon strengthened, leading to progressively cooler and drier conditions, with the climate shifting from cool and slightly moist to cold and arid. The further study of the palynological records during the middle and late Late Pleistocene in the Qingshuihe Basin of southern Ningxia holds significant implications for a proper understanding of the natural environmental history of the Loess Plateau and informs decision-making for its management.

Keywords: Ningxia; Qingshuihe Basin; middle and late Late Pleistocene; palynological records; paleovegetation; paleoclimate

摘 要: 亚洲内陆荒漠化和干旱化与中国西部人类生存环境和社会可持续发展密切相关。中国西部地区的气候自晚更新世以来经历了多次冷暖、干湿变化, 研究其晚更新世古气候变化, 有助于预测未来气候

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41972119); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190018, DD20221644)

This research is financially supported by the fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41972119) and the Geological Survey Projects of the China Geological Survey (Grants No. DD20190018, DD20221644).

第一作者: 韦利杰 (1974—), 女, 副研究员, 主要从事古生物学与地层学方面的研究工作。E-mail: weilijie74@163.com

通讯作者: 李振宏 (1973—), 男, 研究员, 主要从事沉积地质与大地构造方面的研究工作。E-mail: lizhenhong@126.com

收稿日期: 2023-02-09; **修回日期:** 2023-06-09; **责任编辑:** 吴芳

的变化趋势。文章分析了宁夏南部清水河盆地晚更新世中晚期的孢粉记录,结果显示孢粉序列可从下至上划分为4个组合带,反映了该地区晚更新世中晚期植被和气候变化规律。研究表明研究区晚更新世中期(75~50 ka B. P.)是植被以蒿属为主的干草原,气候温凉偏干;晚更新世晚期(25~15 ka B. P.)由荒漠草原-干草原和疏林草原交替出现逐渐过渡到荒漠草原,该时期冬季风呈现逐渐增强的趋势,致使气候逐渐变冷变干,气候类型由温凉偏湿过渡到冷干。宁夏南部清水河盆地晚更新世中晚期孢粉记录的深入研究对于正确认识黄土高原自然环境历史演变和黄土高原治理决策的制定具有重要指导意义。

关键词: 宁夏;清水河盆地;晚更新世中晚期;孢粉记录;古植被;古气候

中图分类号: P532; P534.63+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 05-0662-12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023015

0 引言

亚洲内陆荒漠化和干旱化与中国西部人类生存环境和社会可持续发展密切相关,其形成演化过程和驱动机制是当今地学研究的前沿问题,而黄土-古土壤地层中植被、古气候与古环境信息是亚洲内陆荒漠化和干旱化历史最直接的证据(Wang, 1990; Guo et al., 2002; Cai et al., 2013; Zan et al., 2013; Wu et al., 2020; Fang et al., 2020; 綦琳等, 2021)。亚洲内陆荒漠化和干旱化不仅关系到中国西部生态环境的保护与改善,还可能对全球气候变化产生重要影响,它们在不同地区的表现及区域生态响应,还有待进一步研究。

黄土高原地处气候敏感区,其连续发育的黄土-古土壤地层序列,记录了距今约2.58 Ma以来自然环境变迁的过程(Ding et al., 1992, 2002; 孙爱芝等, 2010; An et al., 2015; Deng et al., 2019; Lu et al., 2022),包含了50多个成壤期,是记录第四纪气候变迁过程的最完整的地质体之一(Guo et al., 1996; Wyrwoll et al., 2016)。晚更新世以来,全球气候经历了多次冷暖、干湿变化,研究晚更新世古气候变化,有助于研究现代气候变化特征和未来气候的变化趋势。

宁夏回族自治区南部位于黄土高原西北部的半干旱气候带,是东部季风区、西北干旱区和青藏高原寒旱区的交汇地带,对气候变化极为敏感,是研究中国西部气候变化的理想场所。宁夏南部海原剖面、苏家湾剖面和大地湾剖面的孢粉记录揭示出该区域13~12.1 ka B. P. 以干草原为主,气候寒冷干燥;12.1~9.8 ka B. P. 植被变化显著,期间出现两次显著的湿润期;9.8~7.6 ka B. P. 以疏林草原为主,气候总体温和偏干;7.6~4 ka B. P.

森林和森林草原植被出现,气候温暖湿润;4 ka B. P. 以来草原和荒漠草原植被交替出现,气候在总体干冷的环境下存在次一级的干湿波动(Sun et al., 2007, 2010)。宁夏银川水洞沟遗址晚更新世晚期孢粉组合特征显示该区域在72~29 ka B. P. 时期属于湿地比较发育的温带草原环境,气候相对比较温暖湿润;在29~18 ka B. P. 时期属于湿地逐渐退化的温带荒漠草原环境,气候相对比较温凉干燥(刘德成等, 2011)。宁夏南部晚更新世的孢粉研究仍较贫乏,且未形成完整的演化序列。

文章以宁夏南部清水河盆地九百户剖面和三岔村剖面晚更新世中晚期地层为研究对象,采用孢粉分析和光释光测年方法,结合沉积序列和区域对比,获得了清水河盆地晚更新世中晚期的古植被信息,探讨其古气候意义,为研究黄土高原自然环境历史的演变和制定黄土高原治理决策提供重要依据。

1 区域地质概况

宁夏南部地处秦岭山脉以北、六盘山以西、内蒙古高原以南、河西走廊以东,以流水侵蚀的黄土地貌为主,东、南、西三面为地形破碎、沟谷发育的黄土丘陵区,中部为南高北低的河谷平原区,称为清水河盆地。清水河盆地地势南高北低,海拔由南部六盘山的2955 m降至北部的1200 m左右。宁夏南部位于中国季风区的西缘,冬季受蒙古高压控制,受南下冷空气的影响,夏季处在东南季风西行的末梢,形成典型的大陆性气候。气候总体干燥少雨,雨季多集中于6—9月,年均降水量300~450 mm;日照时间长,太阳辐射量大,年均气温5~8℃;蒸发强烈,干燥度大,年蒸发量高(1500~2000 mm;唐振华等, 2003)。

宁夏南部现在的植被为草原型，其地带性植被自北向南由荒漠草原向干草原（典型草原）过渡。荒漠草原植被主要由红砂（*Reaumuria songarica*）、短花针茅（*Stipa breviflora*）、猪毛菜（*Salsola collina*）、川青锦鸡儿（*Caragana sinica*）、刺旋花（*Convolvulus tragacanthoides*）、猫头刺（*Oxytropis aciphylla*）、披针叶黄华（*Thermopsis lanceolata*）、骆驼蒿（*Peganum nigellastrum*）和蓍状亚菊（*Ajania achilleoides*）等组成。干草原植被主要由长芒草（*Stipa bungeana*）、猪毛蒿（*Artemisia scoparia*）和牛枝子（*Lespedeza potaninii*）等组成，或由短花针茅（*Stipa breviflora*）、长芒草（*Stipa bungeana*）和冷蒿（*Artemisia frigida*）等组成，是更偏早生的干草原植被（中国植被编辑委员会，1980）。

宁夏南部清水河盆地西邻六盘山，晚更新世中晚期河湖相至全新世河流相沉积出露齐全（马兆颖等，2020；寇琳琳等，2021）。清水河盆地内全新世河流相沉积以河漫滩相和河道相为主，主要分布于现在的清水河河谷及河流两侧阶地，岩性以粉砂、黏土质粉砂、粉砂质黏土或黏土为主，

含大量石膏晶体、泥炭层和蜗牛化石，发育斜层理、槽状交错层理、粒序层理、平行层理和虫孔等沉积构造。晚更新世地层自下而上主要包括萨拉乌苏组上部和水洞沟组。萨拉乌苏组是鄂尔多斯西部高原、青藏高原东北缘乃至中国北方晚更新世的一套典型河湖相沉积。萨拉乌苏组的沉积序列自下而上可以划分为三段，一段为一套代表湖盆发育早期的含砾粉砂沉积；二段为一套代表湖盆发育鼎盛期的黏土、粉砂质黏土沉积；三段为一套代表湖盆衰退期的厚层粉砂。水洞沟组自下而上可以划分为两段，一段以灰黑色黏土质粉砂与粉砂质黏土互层沉积为主，含有大量的虫孔、根孔和斑点状石膏晶体，代表了湖盆边缘相沉积；二段主要以灰白色黏土质粉砂为主，代表了一套河流相沉积（马兆颖等，2020）。在宁夏南部红寺堡盆地，地表露头仅仅出露萨拉乌苏组上部厚层粉砂沉积（崔加伟等，2018；黄婷等，2018；李振宏等，2020；刘博华等，2023）。清水河盆地九百户剖面出露萨拉乌苏组三段和水洞沟组一段，三岔村剖面出露水洞沟组二段，这两个剖面出露的萨拉乌苏组三段和水洞沟组相对比较完整。

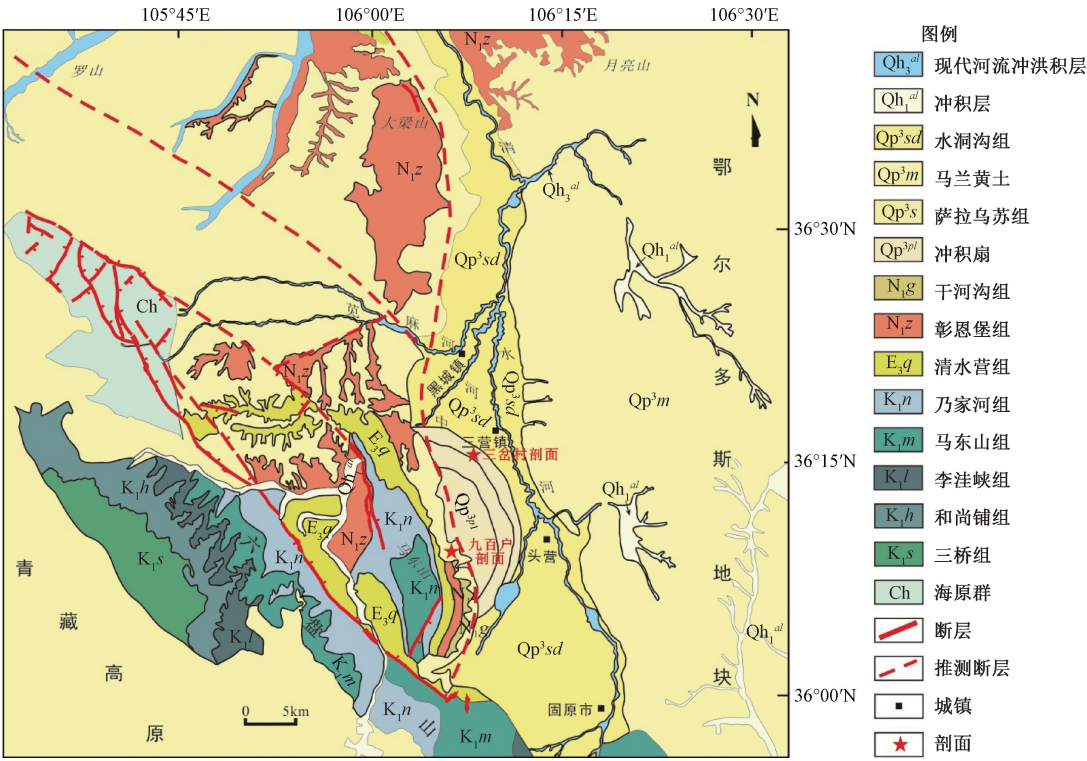


图 1 六盘山及清水河盆地地质简图（据马兆颖等，2020 修改）

Fig. 1 Regional geological map of the Liupan Mountain and the Qingshuihe Basin (modified from Ma et al., 2020)

2 材料与方法

2.1 研究材料

在宁夏南部清水河盆地晚更新世中晚期九百户剖面和三岔村剖面地层中共采集孢粉样品 59 件 (图 2)。

九百户剖面厚约 920 cm, 采集孢粉样品 47 件, 地层及采集孢粉样品情况自下而上为: 920~560 cm 为土黄色粉砂层, 采集孢粉样品 17 件; 560~280 cm 为土黄色泥质粉砂层, 在该层采集光释光样品进行测年, 采集孢粉样品 13 件; 280~215 cm 为土黄色黏土层, 采集孢粉样品 5 件;

215~190 cm 为土黄色粉砂层, 采集孢粉样品 5 件; 190~70 cm 为土黄色黏土质粉砂和黏土互层, 采集孢粉样品 5 件; 70~0 cm 为土黄色泥质粉砂层, 采集孢粉样品 2 件。

三岔村剖面厚约 710 cm, 采集孢粉样品 12 件, 地层及采集孢粉样品情况自下而上为: 710~580 cm 为浅紫红色黏土质粉砂层, 在该层采集光释光样品进行测年, 采集孢粉样品 6 件; 580~480 cm 为土黄色砾石层; 480~320 cm 为浅紫红色黏土质粉砂层, 采集孢粉样品 6 件; 320~145 cm 为土黄色粉砂层; 145~0 cm 为土黄色砾石与浅紫红色黏土质粉砂互层, 在该层采集光释光样品进行测年。

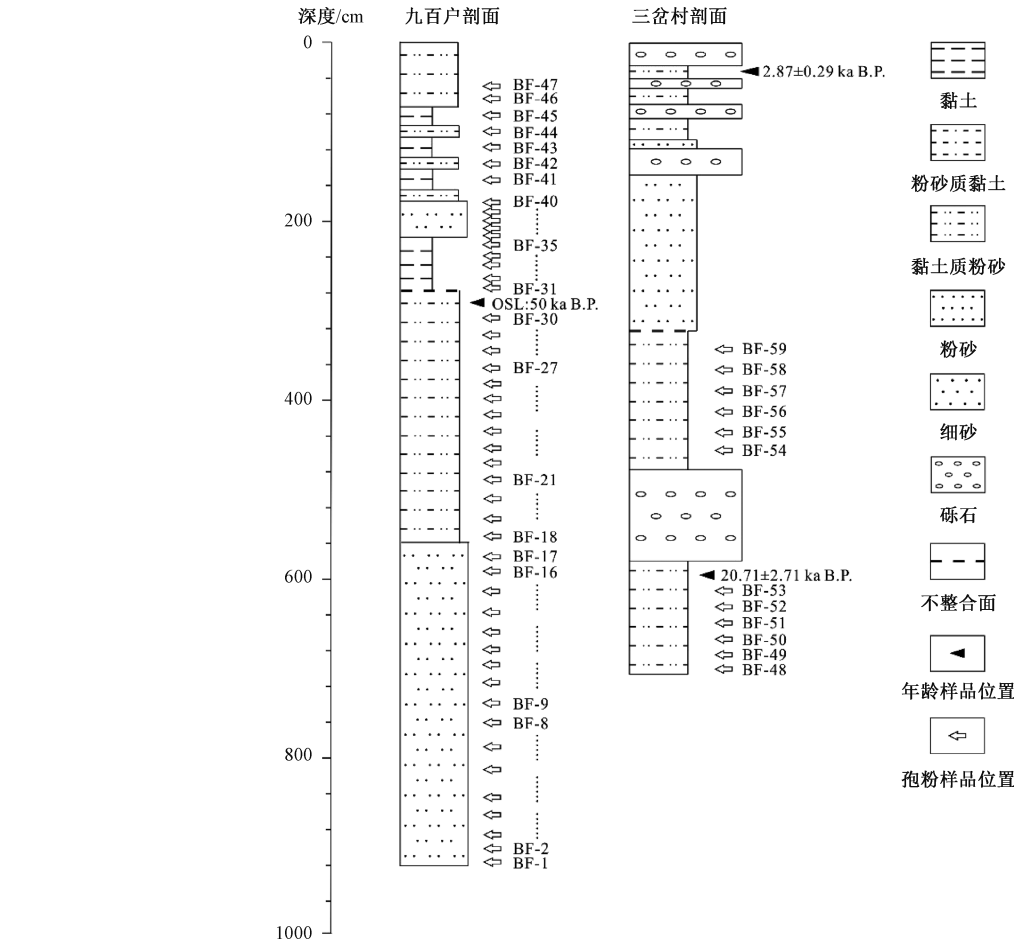


图 2 九百户剖面和三岔村剖面柱状图和采样位置
Fig. 2 Histograms and sampling locations of the Jiubaihu section and Sanchacun section

2.2 研究方法

地层年龄采用光释光测年方法。光释光测年在震科经纬防灾技术研究院实验室完成, 在实验室柔和的红光下从样品中分离石英 (90~125 μm) 进行光释光测年。环境剂量率测试则在核工业北

京地质研究所完成, 等效剂量采用单片再生剂量法, 其中 U、Th 含量用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定, K 含量用 Z-2000 石墨炉原子吸收光谱法 (GFAAS) 测定。最终数据处理则由震科经纬防灾技术研究院完成, 计算年剂量率时也

考虑了宇宙射线的贡献 (Prescott and Hutton, 1994)。详细的实验程序见 Lu et al. (2007) 和 Song et al. (2015) 的相关描述。

孢粉样品前处理、鉴定和分析均在中国地质科学院地质力学研究所孢粉实验室完成。孢粉前处理采用经典的盐酸-氢氟酸法: 首先烘干样品, 每个样品称 100 克干样品并加入 1 片石松子孢子片 (10300 粒/片), 用 20% 盐酸去除碳酸盐, 用 40% 氢氟酸去除硅酸盐, 在超声波清洗器中, 先后过 200 μm 和 7 μm 筛布富集孢粉, 最后转移到 2 ml 的试管中, 加入甘油保存, 以备制取活动片在显微镜下鉴定。孢粉样品的鉴定在德国产 Leica 生物显微镜 LEICA DM 2500 和日本产 Olympus BX-51 型光学显微镜下进行, 照相采用 Olympus DP25 成像系统。最后, 使用 Tilia 软件进行孢粉百分比计算和画图。

3 实验结果

3.1 光释光测年

光释光测年结果表明, 九百户剖面萨拉乌苏组三段顶部的光释光年龄为 50 Ka B. P., 三岔村剖面下部水洞沟组二段的光释光年龄为 20.71 ± 2.71 Ka B. P., 三岔村上部全新世地层的光释光年龄为 2.87 ± 0.29 Ka B. P.。马兆颖 (2021) 研究认为, 晚更新世萨拉乌苏期三段的年龄为 75~50 ka B. P.。一些学者研究认为, 晚更新世萨拉乌苏组与水洞沟组之间, 以及水洞沟组与全新世沉积层之间均为侵蚀不整合接触, 这两期不整合面对应的沉积间断分别发生在约 50~25 ka B. P. 和约 15~11 ka B. P. (崔加伟等, 2018; 马兆颖, 2021)。综合分析, 九百户剖面萨拉乌苏组三段的年龄为 75~50 ka B. P., 九百户剖面水洞沟组一段和三岔村剖面水洞沟组二段的年龄为 25~15 ka B. P.。

3.2 孢粉组合特征

对采集的 59 件样品进行孢粉前处理、鉴定和分析后发现, 其中 27 件样品统计孢粉数量达到 300 粒以上, 9 件样品达到 100 粒以上, 其余 23 件样品少于 100 粒。统计孢粉数量达到 100 粒以上的样品参加孢粉百分含量的计算。此次实验共鉴定孢粉类型分属 33 科 42 属, 主要孢粉类型见图 3。

孢粉百分比含量反映的是某种植物在当时当地植被中的相对丰富程度。孢粉浓度是指单位体

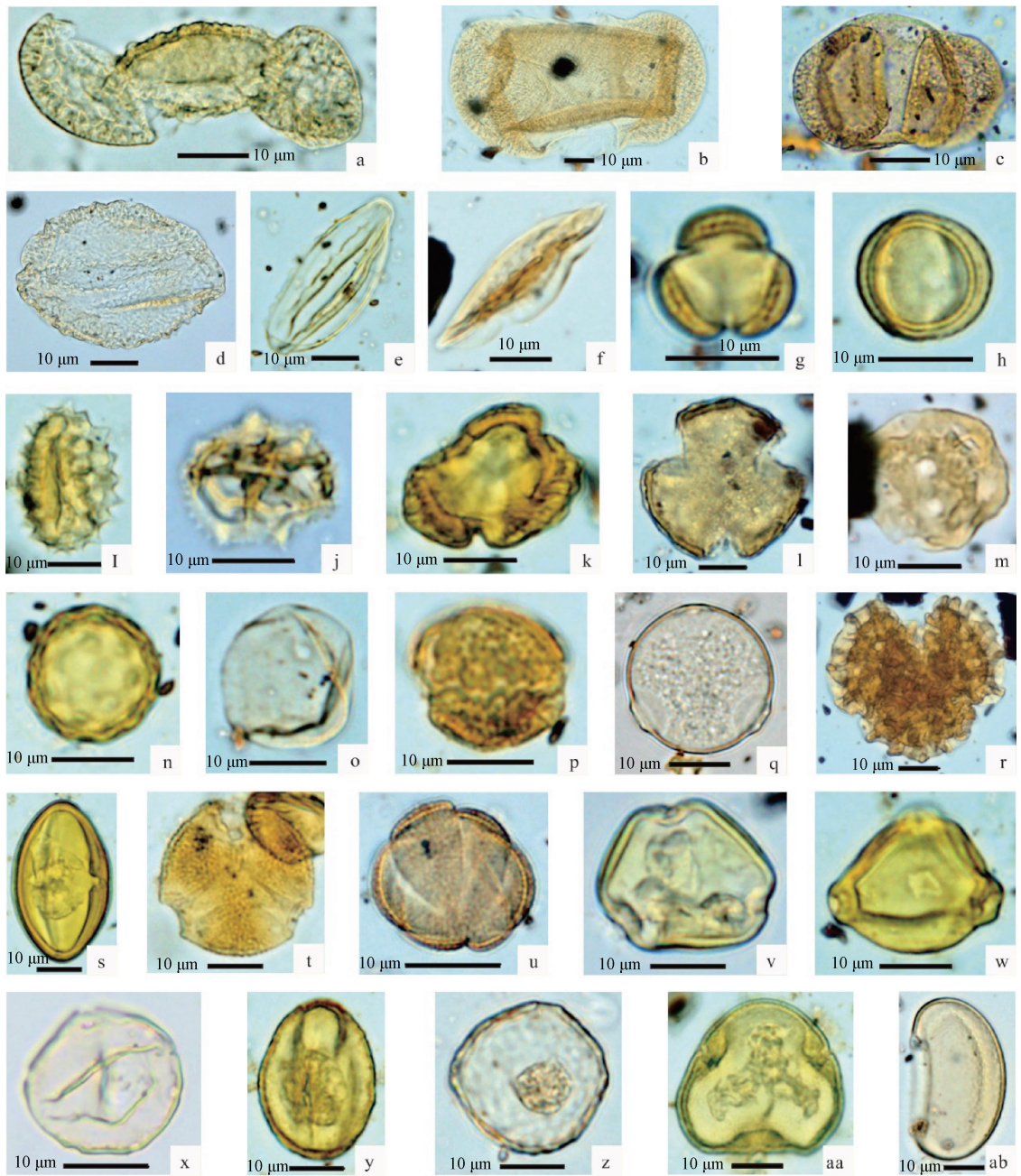
积或单位质量的沉积物中所含的孢粉粒数。根据孢粉统计结果, 建立了主要和具代表性的孢粉百分比图谱和孢粉浓度图 (图 4, 图 5)。中国西北地区植物生长与水分的关系很密切, 水分充足时, 植被多为湿生、中生, 花粉产量高, 花粉浓度高; 水分缺乏时, 情况则相反。所以, 干旱、半干旱区孢粉研究中, 孢粉浓度对于环境的变迁有良好的指示意义 (罗传秀等, 2006)。依据主要孢粉类型、百分比关系、木本植物、草本及灌木植物、针叶树、阔叶树、旱生植物、中生植物、湿生植物及孢粉浓度特征等, 自下而上划分为 4 个孢粉组合带。

(1) I 带: 九百户剖面 (920~280 cm), 萨拉乌苏组三段 (Qp^3s^3), 蒿属-菊科-毛茛科组合带

该孢粉组合带共分析样品 30 件, 仅 7 件样品达到统计孢粉含量, 总体孢粉浓度较低。草本和灌木花粉占绝对优势, 为 92.5%~97.3%, 主要由菊科蒿属型 (Compositae: *Artemisia* type; 65.0%~74.6%)、菊科紫苑属型 (Compositae: *Aster* type; 0~2.1%)、菊科蒲公英属型 (Compositae: *Taraxacum* type; 0~18.3%)、菊科 (Compositae; 0~2.6%)、藜科 (Chenopodiaceae; 6.1%~18.3%)、麻黄科 (Ephedraceae; 0~0.9%)、白刺属 (*Nitraria*; 0~0.7%)、禾本科 (Gramineae; 0~2.9%)、豆科 (Leguminosae; 0~1.8%)、毛茛科 (Ranunculaceae; 0~17.2%)、白花丹科 (Plumbaginaceae; 0~0.7%)、唇形科 (Labiatae; 0~1.8%)、石竹科 (Caryophyllaceae; 0~0.7%)、蓼科 (Polygonaceae; 0~0.7%)、蔷薇科 (Rosaceae; 0~0.9%)、栎树属 (*Koelreuteria*; 0~0.7%)、十字花科 (Cruciferae; 0~0.7%)、木犀科 (Oleaceae; 0~0.9%) 组成, 湿生草本植物仅莎草科 (Cyperaceae; 0~0.7%) 零星出现。木本植物仅占 2.7%~7.5%, 包括松属 (*Pinus*; 0.7%~6.3%)、栎属 (*Quercus*; 0~2.2%)、胡桃科 (Juglandaceae; 0~2.6%) 和榆科 (Ulmaceae; 0~0.3%) 等。蕨类植物仅发现了水龙骨科 (Polypodiaceae; 0~0.7%) 的孢子。

(2) II 带: 九百户剖面 (280~190 cm), 水洞沟组一段下部 (Qp^3sd^1), 蒿属-菊科-蔷薇科组合带

该孢粉组合带共分析样品 10 件, 孢粉浓度不等, 个别样品多达 3008 粒/克。草本和灌木花粉仍占绝对优势, 为 85.1%~98.3%, 菊科蒿属 (18.6%~88.2%) 含量略有下降, 菊科紫苑型 (0~10.6%)



a—松科: 冷杉属; b—松科: 云杉属; c—松科: 松属; d—松科: 铁杉属; e, f—麻黄科; g, h—菊科: 蒿属型; i—菊科: 紫苑属型; j—菊科: 蒲公英属型; k—菊科: 蓝刺头属型; l—毛茛科; m—石竹科; n—藜科; o—禾本科; p—蔷薇科; q—桑科: 葎草属; r—白花丹科; s—蒺藜科: 白刺属; t—龙胆科; u—唇形科; v—无患子科: 栾树属; w—桦木科: 桦属; x—胡桃科; y—壳斗科: 栎属; z—榆科; aa—椴树科; ab—水龙骨科

图 3 宁夏南部清水河盆地晚更新世中晚期主要孢粉类型

Fig.3 Photomicrographs of selected spore-pollen from the Qingshuihe Basin in southern Ningxia during the middle and late Late Pleistocene

a-Pinaceae: *Abies*; b-Pinaceae: *Picea*; c-Pinaceae: *Pinus*; d-Pinaceae: *Tsuga*; e, f-Ephedraceae; g, h-Compositae: *Artemisia* type; i-Compositae: *Aster* type; j-Compositae: *Taraxacum* type; k-Compositae: *Echinops* type; l-Ranunculaceae; m-Caryophyllaceae; n-Chenopodiaceae; o-Gramineae; p-Rosaceae; q-Moraceae: *Humulus*; r-Plumbaginaceae; s-Zygophyllaceae: *Nitraria*; t-Gentianaceae; u-Labiatae; v-Sapindaceae: *Koelreuteria*; w-Betulaceae: *Betula*; x-Juglandaceae; y-Fagaceae: *Quercus*; z-Ulmaceae; aa-Tiliaceae; ab-Polypodiaceae

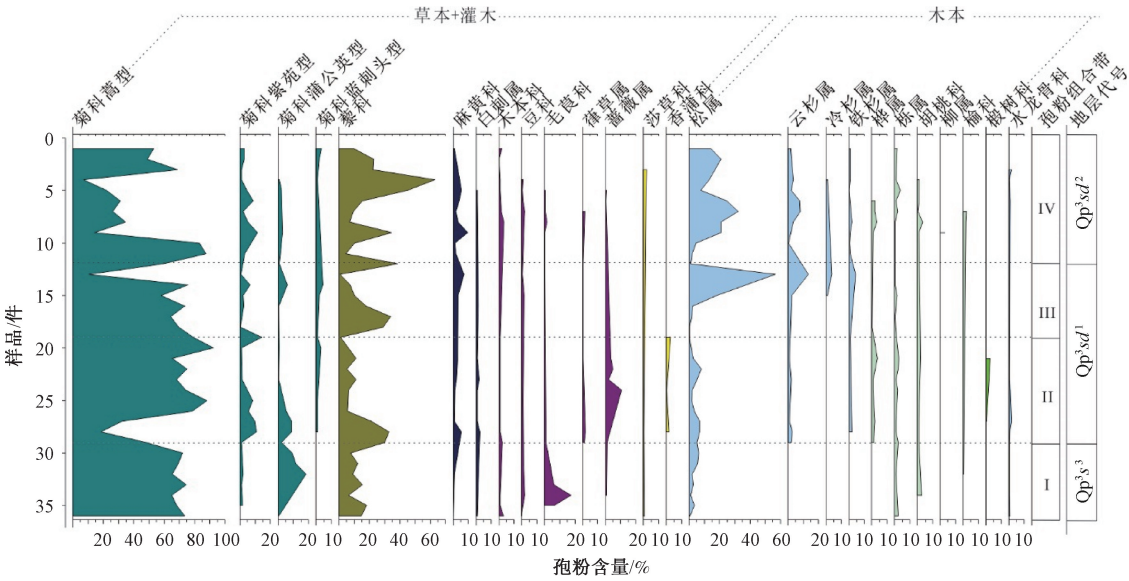


图 4 宁夏南部清水河盆地晚更新世中晚期孢粉百分比图谱
Fig. 4 Pollen percentage diagram of the Qingshuihe Basin in southern Ningxia during the middle to late Late Pleistocene

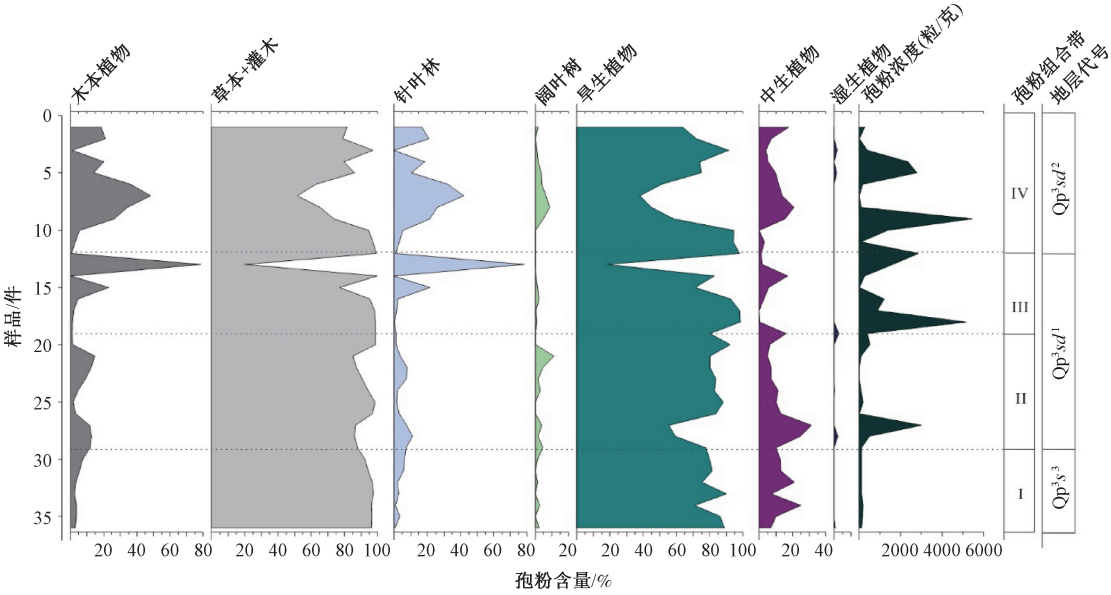


图 5 宁夏南部清水河盆地晚更新世中晚期孢粉图谱
Fig. 5 Pollen diagram of the Qingshuihe Basin in southern Ningxia during the middle to late Late Pleistocene

增多, 菊科蒲公英型 (0~8.9%), 出现菊科蓝刺头型 (Compositae; *Echinops* type; 0~0.9%) 和其他属种菊科 (0~5.4%) 花粉; 旱生藜科 (0~32.7%)、麻黄科 (0~5.3%) 和白刺属 (0~2.7%) 略有增多; 中生草本植物禾本科 (0~2.2%)、豆科 (0~0.8%)、白花丹科 (0~0.9%)、唇形科 (0~1.8%)、石竹科 (0~2.7%) 和栎树属 (0~2.2%) 含量变化不大; 毛茛科 (0~1.1%) 花粉含量下降, 蔷薇科 (0~10.5%) 花粉含量上升; 出现少量的花荵科 (Polemoniaceae;

0~1.8%)、亚麻科 (Linaceae; 0~1.1%) 和桔梗科 (Campanulaceae; 0~0.9%) 花粉; 湿生草本植物有莎草科 (0~0.3%) 和香蒲科 (Typhaceae; 0~1.8%)。木本植物花粉含量上升至 1.7%~14.8%, 花粉类型和数量都略有增多; 其中针叶树松科松属 (1.7%~8.0%) 较丰富, 还包含少量云杉属 (*Picea*; 0~2.7%) 和铁杉属 (*Tsuga*; 0~1.8%); 出现落叶阔叶树花粉桦属 (*Betula*; 0~2.8%)、榛属 (*Corylus*; 0~0.9%)、栎属 (0~2.8%)、胡桃科 (0~1.9%); 出现椴树科花粉 (Tiliaceae; 0~

2.8%)。蕨类植物仅发现水龙骨科(0~1.8%)孢子。

(3) III带:九百户剖面(190~0 cm),水洞沟组一段上部(Qp^3sd^1),蒿属-藜科-菊科组合带

该孢粉组合带共分析样品7件,孢粉浓度较高,最高达5184粒/克。草本和灌木花粉占绝对优势,为77.0%~99.7%;菊科蒿属(57.9%~92.4%)、菊科紫苑型(0~14.3%)、菊科蒲公英型(0~6.0)和菊科蓝刺头型(0~4.4%)花粉略有增多;旱生藜科(0~33.7%)、麻黄科(0~3.2%)和白刺属(0~1.5%)含量变化不大;中生草本植物禾本科(0~0.9%)、豆科(0~1.5%)、唇形科(0~1.0%)和栎树属(0~0.3%)含量略有减少;湿生草本植物仅一个样品中含香蒲科(2.7%)花粉。木本植物花粉浓度0.3%~23.0%,其中松科松属(0~18.2%)、云杉属(0~2.4%)、冷杉属(0~0.9%)和铁杉属(0~0.9%)花粉变化不大;落叶阔叶树桦属(0~0.3%)、栎属(0~1.5%)和胡桃科(0~1.5%)花粉含量略有下降。未见蕨类植物孢子。

(4) IV带:三岔村剖面(710~320 cm),水洞沟组二段(Qp^3sd^2),藜科-蒿属-松科组合带

该孢粉组合带共分析样品12件,孢粉浓度不等,最高达5459粒/克。此组合带的特点是针叶树花粉含量开始增加,最高达78.5%;草本和灌木花粉含量悬殊,为20.0%~99.1%;菊科蒿属(7.0%~87.5%)含量下降明显;菊科紫苑型(0~11.3%)、菊科蒲公英型(0~2.8%)和菊科蓝刺头型(0~3.5%)花粉含量变化不大;旱生藜科(0.7%~62.9%)、麻黄科(0~9.4%)、白刺属(0~1.0%)和怪柳科(*Tamaricaceae*; 0~1.5%)含量有所增加;中生草本植物禾本科(0~3.4%)、豆科(0~2.0%)、毛茛科(0~1.7%)、唇形科(0~1.0%)、石竹科(0~1.0%)、蔷薇科(0~0.3%)和十字花科(0~8.6%)含量略有增加;湿生草本植物莎草科(0~1.9%)零星出现。木本植物花粉显著增加至1.0%~78.5%,其中松科松属(0~56.7%)、云杉属(0~13.4%)、冷杉属(0~3.5%)、铁杉属(0~1.8%)和落叶松属(*Larix*; 0~0.7%)含量开始显著增加;落叶阔叶树花粉类型和数量都有所增加,包含桦属(0~3.3%)、栎属(0~3.7%)、胡桃科(0~3.3%)、柳属(*Salix*; 0~2.8%)、榆科(0~2.0%)和槭

树科(*Aceraceae*; 0~1.0%)。蕨类植物发现水龙骨科(0~1.8%)和里白科(*Gleicheniaceae*; 0~0.7%)孢子。

4 讨论

4.1 宁夏南部晚更新世中晚期的古植被和古环境

孢粉组合带能根据不同孢粉种类百分比的变化有效地识别不同的植被带,它们能较真实地反映孢粉母体植被,记录不同植被带的特征及变化,所以宁夏南部清水河盆地的孢粉数据记录了黄土高原晚更新世以来的古植被和古环境的演化历史。

4.1.1 晚更新世萨拉乌苏组三段孢粉记录(75~50 ka B. P.)

该时期包含孢粉组合带I带,此组合孢粉浓度较低,代表研究区内沉积时期植被覆盖度较低。孢粉组合中草本植物占绝对优势,约92.5%~97.3%,木本植物和蕨类植物含量很少。孢粉组合中干旱和半干旱花粉蒿属占绝对优势,占65.0%~74.6%,比蒿属更耐旱的藜科含量相对较低,仅6.1%~18.3%,耐旱草本植物麻黄科、白刺属和其他菊科分子也有少量发现,耐旱植物的整体含量在71.1%~90.1%。而中生草本植物毛茛科含量稍高,最高达17.2%,喜湿的中生草本植物蒲公英属在组合带上部较高,高达18.3%,组合带中还发现了禾本科、豆科、白花丹科、唇形科等中生分子,中生草本植物的整体含量6.9%~25.2%。零星发现松属(0.7%~6.3%)和落叶阔叶植物花粉(0~2.6%),可能为外来花粉。本孢粉组合带可与黄土高原西部会宁地区晚更新世中期的孢粉组合进行对比,会宁地区为由蒿、藜、白刺和豆科等组成的干草原植被,气候凉干(刘俊峰,1992)。综上分析,75~50 ka B. P.时期,宁夏南部清水河盆地植被覆盖度较低,是以蒿属为主的干草原植被类型,推测研究区的气候类型为温凉偏干。

4.1.2 晚更新世水洞沟组孢粉记录(25~15 ka B. P.)

这一时期是水洞沟组沉积时期,包含孢粉组合带II带、III带和IV带,岩性是古土壤和黄土相间分布,相应的孢粉浓度不等,黄土层的孢粉含量低,每克孢粉含量为几十粒至几百粒,土壤层孢粉含量高,每克孢粉含量几百至几千粒,可能

是由于沉积时期植被演化交替明显。孢粉组合仍以草本植物占绝对优势,木本植物和蕨类植物含量很少。旱生蒿属和更耐干藜科交替繁盛,可能是以蒿属为主的干草原和以藜科为主的荒漠草原交替出现造成的。

该时期孢粉组合带Ⅱ带,孢粉种类和数量同时增加,可能是当时生态环境更适合植物生长。该带沉积初期,藜科含量和蒿属含量相差不大,耐寒菊科紫苑型和喜湿菊科蒲公英型含量都稍高。该带的末期,中生蔷薇科含量稍高。松科花粉含量增多,零星出现云杉和铁杉花粉。落叶阔叶花粉增多,出现一定量的桦属、榛属、栎属和胡桃科花粉,还出现了喜热的椴树科花粉。该时期的植被覆盖度忽高忽低,荒漠-干草原和疏林草原交替出现,气候温凉偏干或温凉偏湿。

孢粉组合带Ⅲ带,孢粉种类和数量比前期略有减少,可能是生态环境恶化,耐寒菊科紫苑型含量基本不变,喜湿菊科蒲公英型含量减少,耐旱菊科蓝刺头型含量增多。偶见香蒲科花粉,未见喜湿蕨类孢子。针叶树和落叶阔叶树种类和数量都有所下降,说明气候比前期更凉更干。该时期的植被覆盖度稍低,植被类型是以干草原为主,气候温凉偏干。

孢粉组合带Ⅳ带,针叶树花粉含量增加明显,最高达 78.5%,云杉属和冷杉属也有一定含量,偶见铁杉属和落叶松属花粉。大部分时期更耐旱藜科花粉含量略高于蒿属,在藜科花粉含量较低的时期,有少量落叶阔叶树生长。总体看来,该时期的植被覆盖率很低,植被以藜科荒漠草原为主,针叶树来源于远处山区,气候冷干。该时期孢粉反映的植被可与晚更新世晚期甘肃静宁地区的植被进行对比,静宁地区在 29~17 ka B. P. 时期植被主要表现为疏林草原和草原的相互消长并向荒漠草原方向演化(唐领余等,2007)。

综上分析,25~15 ka B. P. 时期清水河盆地植被覆盖率很低,植被类型由荒漠-干草原和疏林草原交替出现逐渐过渡到荒漠草原,气候由温凉偏湿过渡到冷干。

4.2 古气候意义

第四纪以来,全球气候相对古近纪和新近纪显著变冷,气候总体变化特征是振荡频繁,冰期和间冰期交替(Zachos et al., 2001; 刘鸿雁, 2002; Kawamura et al., 2007)。中国西部地区自晚

渐新世以来,气候发展趋向大陆性,引起了植被演替,造成干旱草原植被逐渐扩展;到上新世,森林植被已经稀少,植物贫乏(祝淑雅等, 2016)。随着青藏高原不断隆升,自晚更新世以来,东亚季风逐渐取代西风环流控制下的青藏高原东北边缘地区,气候类型也随之发生变化(王乃昂, 1994; 于洪军等, 1997; Liu and Dong, 2013; Sun et al., 2020)。气候变化所引起的植被演替,在宁夏南部地区沉积物的孢粉百分比图谱和孢粉浓度曲线上具有很好的表现,所反映的气候信息同全球性的气候事件具有很好的可比性,说明在生态环境十分脆弱且干旱的宁夏南部地区,其植被的生长对于气候变化具有很强的敏感性。

宁夏南部清水河盆地晚更新世中期(75~50 ka B. P.),植被覆盖度较低,植被以蒿属为主。蒿属与藜科花粉因其含量较高而具超代表性,当孢粉组合中出现少量的藜科和蒿属时,应视为外来花粉,当含量分别超过 30%时,才可以说明当地有蒿属或藜科植物出现(李月丛等, 2005)。该时期喜湿草本植物毛茛科含量较高,毛茛科多数分布于环境较湿润的西南部山地(中国植被编辑委员会, 1980),荒漠区由于气候干旱,毛茛科植被出现较少(Li et al., 2005)。根据马玉贞等(2009)的研究,在充分考虑孢粉组合中主成分的情况下,菊苣-蒲公英型菊科也许可作为气候湿润或较湿润的指标,而层位也正处于末次冰期马兰黄土地层发育的弱土壤带,说明当时当地气候比较温暖湿润,但有湿度减低的趋势,植物以菊科为主。喜湿的菊科蒲公英型含量较高,也说明当时的环境不是很干。宁夏南部位于东部季风区、西北干旱区和青藏高原寒旱区的交汇地带,无论是第四纪时期还是现代,喜暖植物均无繁盛的状况,因此在地层孢粉组合中,草本植物孢粉浓度较高且植物种类也较丰富时,如果有喜暖树种椴树科花粉出现,尽管其所占比例不大,也应视为较暖湿环境的反映。在 75~50 ka B. P.,清水河盆地沉积环境以风成相(黄土沉积)、湖陆过渡相和滨浅湖相为主,该地区处于相对寒冷干旱的气候背景,正对应于深海氧同位素曲线 MIS4 阶段(马兆颖, 2021)。综上所述,清水河盆地该时期气候温凉偏干。

马兆颖(2021)通过开展沉积序列、光释光测年、碳十四测年、色度、粒度和磁化率相结

合的研究认为,宁夏南部清水河盆地晚更新世中晚期(约50~25 ka B. P.),在萨拉乌苏组与水洞沟组之间为侵蚀不整合接触,说明宁夏南部清水河盆地在约50~25 ka B. P. 时期发生沉积间断(马兆颖,2021)。同样,宁夏红寺堡盆地约58~36 ka B. P. 时期和内蒙古萨拉乌苏河流域约56~38 ka B. P. 时期在萨拉乌苏组与水洞沟组之间也存在沉积间断(崔加伟等,2018)。宁夏南部清水河盆地经历沉积间断后,进入晚更新世晚期(25~15 ka B. P.),此时草本和木本都有增加,说明生态环境更适合植物生长。该时期清水河盆地内以冲积扇、河流相、泛滥平原和滨浅湖相沉积为主(马兆颖,2021)。松科花粉在该时期逐渐增加,现代花粉研究表明由于松属花粉具有气囊,可以随风飞行很远的距离,因而花粉组合中出现30%以下松属花粉都有可能处于无松地带(李文漪,1998)。李文漪和姚祖驹(1990)所做的无松植被表土试验中松含量的最高值可达到55.5%。王琚瑜等(1996)研究表明松树花粉占60.9%时,也不能说明周围就一定有松林的存在。云杉和冷杉花粉虽也具气囊,但是体积、重量比松属的大,飞行距离相对较近,其代表性较松属的为好,但其含量较低时,也不能推测周围有云杉或冷杉的存在(李文漪,1998)。该时期沉积开始时期,落叶阔叶树种种类和含量都较高,然后逐渐减少,到该阶段的末期几乎消失。耐旱蒿属也逐渐减少,更耐旱藜科花粉逐渐增多。喜湿菊科蒲公英型花粉逐渐减少,耐寒菊科紫菀型一直保持一定含量。耐旱的麻黄科也逐渐增加。综合分析表明,清水河盆地在该时期呈现冬季风逐渐增强的趋势,致使气候逐渐变冷变干,在该阶段末期进入新仙女木事件(Younger Dryas, YD)阶段,新仙女木事件是末次冰期向全新世间冰期转换过程中的最后一次大规模降温事件,其特点是全球性的快速剧烈降温。宁夏南部清水河盆地晚更新世晚期(约14~11 ka B. P.)在水洞沟组与全新统之间也为侵蚀不整合接触,宁夏南部清水河盆地在约14~11 ka B. P. 时期也发生了沉积间断(马兆颖,2021)。

5 结论

(1) 选用宁夏南部清水河盆地的九百户剖面和三岔村剖面的样品进行孢粉分析,将两个剖面

的孢粉划分为4个孢粉组合带。孢粉序列从下至上依次是萨拉乌苏组三段的蒿属-菊科-毛茛科组合带、水洞沟组一段下部的蒿属-菊科-蔷薇科组合带、水洞沟组一段上部的蒿属-藜科-菊科组合带和水洞沟组二段的藜科-蒿属-松科组合带。

(2) 晚更新世中期(75~50 ka B. P.) 宁夏南部清水河盆地植被覆盖度较低,植被类型是以蒿属为主的干草原,推测研究区的气候温凉偏干。晚更新世中晚期(25~15 ka B. P.) 植被覆盖度很低,植被类型由荒漠-干草原和疏林草原交替出现逐渐过渡到荒漠草原;该时期呈现冬季风逐渐增强的趋势,致使气候逐渐变冷变干,气候由温凉偏湿过渡到冷干;晚更新世晚期,清水河盆地存在干湿波动,但气候总体比较干旱。

致谢: 孢粉前处理部分工作由王卓协助完成,在此致以诚挚的谢意!

References

- AN Z S, WU G X, LI J P, et al., 2015. Global monsoon dynamics and climate change [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43: 29-77.
- CAI M T, FANG X M, WU F L, et al., 2013. Pliocene-Pleistocene stepwise drying of Central Asia: evidence from paleomagnetism and sporopollen record of the deep borehole SG-3 in the western Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau [J]. *Global and Planetary Change*, 94-95: 72-81.
- China Vegetation Editorial Committee, 1980. *Chinese vegetation* [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- CUI J W, LI Z H, LIU F, et al., 2018. Redefinition of the sedimentary time of the Salawusu Formation in the Hongsibu Basin, Ningxia and its significance [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (2): 283-292. (in Chinese with English abstract)
- DENG C L, HAO Q Z, GUO Z T, et al., 2019. Quaternary integrative stratigraphy and timescale of China [J]. *Science China Earth Sciences*, 62 (1): 324-348.
- DING Z L, RUTTER N, HAN J T, et al., 1992. A coupled environmental system formed at about 2.5 Ma in East Asia [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 94 (1-4): 223-242.
- DING Z L, DERBYSHIRE E, YANG S L, et al., 2002. 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*, 17 (3): 1003, doi: 10.1029/2001PA000725.
- FANG X M, AN Z S, CLEMENS S C, et al., 2020. The 3.6-Ma aridity and westerlies history over midlatitude Asia linked with global climatic cooling [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117 (40): 24729-24734.
- GUO Z T, FEDOROFF N, LIU D S, 1996. Micromorphology of the loess-paleosol sequence of the last 130 ka in China and paleoclimatic

- events [J]. Science in China (Series D), 39 (5): 468-477.
- GUO Z T, RUDDIMAN W F, HAO Q Z, et al., 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. Nature, 416 (6877): 159-163.
- HUANG T, LI Z H, LIU F, et al., 2018. The current situation of desertification in the Hongsibu Basin, Ningxia, and its main geological controlling factors [J]. Journal of Geomechanics, 24 (4): 505-514. (in Chinese with English abstract)
- KAWAMURA K, PARRENIN F, LISIECKI L, et al., 2007. Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360, 000 years [J]. Nature, 448 (7156): 912-916.
- KOU L L, LI Z H, DONG X P, et al., 2021. The age sequence of the detrital zircons from the Guanyindian section in Longde, the northeastern margin of the Tibetan Plateau, and its geological significance [J]. Journal of Geomechanics, 27 (6): 1051-1064. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, YAO Z J, 1990. A study on the quantitative relationship between *Pinus* pollen in surface sample and *Pinus* vegetation [J]. Acta Botanica Sinica, 32 (12): 943-950. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, 1998. Quaternary vegetation and environment of China [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- LI Y C, XU Q H, XIAO J L, et al., 2005. Indication of some major pollen taxa in surface samples to their parent plants of forest in northern China [J]. Quaternary Sciences, 25 (5): 598-608. (in Chinese with English abstract)
- LI Y C, XU Q H, ZHAO Y K, et al., 2005. Pollen indication to source plants in the eastern desert of China [J]. Chinese Science Bulletin, 50 (15): 1632-1641.
- LI Z H, CUI J W, LI C Z, et al., 2020. Late Pleistocene sedimentary features and the palaeoclimatic background in Hongsibao Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 48 (6): 233-242. (in Chinese with English abstract)
- LIU B H, WU F, ZHANG X J, et al., 2023. Late Pleistocene element geochemistry and its implications for environmental change in Hongsibu Basin, northeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau [J/OL]. Geological Bulletin of China; 1-16 [2023-08-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20230811.1039.002.html>. (in Chinese with English abstract)
- LIU D C, GAO X, WANG X L, et al., 2011. Palaeoenvironmental changes from sporopollen record during the later Late Pleistocene at Shuidonggou locality 2 in Yinchuan, Ningxia [J]. Journal of Palaeogeography, 13 (4): 467-472. (in Chinese with English abstract)
- LIU H Y, 2002. Quaternary ecology and global change [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- LIU J F, 1992. The spore-pollen records of glaciation-loess cycles in Huining area in the west part of the Loess Plateau since 660000 a B.P. [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 14 (1): 33-43. (in Chinese with English abstract)
- LIU X D, DONG B W, 2013. Influence of the Tibetan Plateau uplift on the Asian monsoon-arid environment evolution [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (34): 4277-4291.
- LU H Y, WANG X Y, WANG Y, et al., 2022. Chinese loess and the Asian monsoon: what we know and what remains unknown [J]. Quaternary International, 620: 85-97.
- LU Y C, WANG X L, WINTLE A G, 2007. A new OSL chronology for dust accumulation in the last 130, 000 yr for the Chinese Loess Plateau [J]. Quaternary Research, 67 (1): 152-160.
- LUO C X, PAN A D, ZHENG Z, 2006. Progresses about the studies on the relationship between topsoil spore-pollen and vegetation in arid areas of Northwest China [J]. Arid Zone Research, 23 (2): 314-319. (in Chinese with English abstract)
- MA Y Z, MENG H W, SANG Y L, et al., 2009. Pollen keys for identification of Coniferopsida and Compositae classes under light microscopy and their ecological significance [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 48 (2): 240-253. (in Chinese with English abstract)
- MA Z Y, DONG X P, ZHANG Q, et al., 2020. Sedimentary response to the uplift of the Liupan Shan since the Late Pleistocene and its environmental effects [J]. Coal Geology & Exploration, 48 (5): 152-164. (in Chinese with English abstract)
- MA Z Y, 2021. Sedimentary characteristics and geological significance of Qingshuihe Basin since Late Pleistocene [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract)
- PRESCOTT J R, HUTTON J T, 1994. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations [J]. Radiation Measurements, 23 (2-3): 497-500.
- QI L, QIAO Y S, LIU Z X, et al., 2021. Geochemical characteristics of the Tertiary and Quaternary eolian deposits in eastern Gansu province: implications for provenance and weathering intensity [J]. Journal of Geomechanics, 27 (3): 475-490. (in Chinese with English abstract)
- SONG Y G, LAI Z P, LI Y, et al., 2015. Comparison between luminescence and radiocarbon dating of late Quaternary loess from the Ili Basin in Central Asia [J]. Quaternary Geochronology, 30: 405-410.
- SUN A Z, MA Y Z, FENG Z D, et al., 2007. Pollen-recorded climate changes between 13.0 and 7.0 ¹⁴C ka BP in southern Ningxia, China [J]. Chinese Science Bulletin, 52 (8): 1080-1088.
- SUN A Z, FENG Z D, MA Y Z, 2010. Vegetation and environmental changes in western Chinese Loess Plateau since 13.0 ka BP [J]. Journal of Geographical Sciences, 20 (2): 177-192.
- SUN A Z, HAN X L, ZHANG D H, 2010. The holocene vegetation change in difference area of the Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 35 (6): 68-72. (in Chinese with English abstract)
- SUN C F, LIU Y, CAI Q F, et al., 2020. Similarities and differences in driving factors of precipitation changes on the western Loess Plateau and the northeastern Tibetan Plateau at different timescales [J]. Climate Dynamics, 55 (9-10): 2889-2902.
- TANG L Y, LI C H, AN C B, et al., 2007. Vegetation history of the western Loess Plateau of China during the last 40 ka based on pollen record [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 46 (1): 45-61. (in Chinese with English abstract)
- TANG Z H, ZHANG J, JIA Z K, 2003. Sustainable using for agriculture

water resources in the dry land south of Ningxia [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 19 (4): 189-194. (in Chinese with English abstract)

WANG F Y, SONG C Q, SUN X J, 1996. Study on surface pollen in middle Inner Mongolia, China [J]. Acta Botanica Sinica, 38 (11): 902-909. (in Chinese with English abstract)

WANG N A, 1994. On forming times of East Asia monsoon [J]. Scientia Geographica Sinica, 14 (1): 81-89. (in Chinese with English abstract)

WANG P X, 1990. Neogene stratigraphy and paleoenvironments of China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 77 (3-4): 315-334.

WU F L, FANG X M, MIAO Y F, 2020. Aridification history of the West Kunlun Mountains since the mid-Pleistocene based on sporopollen and microcharcoal records [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 547: 109680, doi: 10.1016/j.palaeo. 2020.109680.

WYRWOLL K H, WEI J H, LIN Z H, et al., 2016. Cold surges and dust events: establishing the link between the East Asian Winter Monsoon and the Chinese loess record [J]. Quaternary Science Reviews, 149: 102-108.

YU H J, HAN D L, CHU F Y, 1997. Preliminary study on the desert loess deposit group in the north shelf area at the close of Late Pleistocene [J]. Journal of Geomechanics, 3 (4): 33-38. (in Chinese with English abstract)

ZACHOS J, PAGANI M, SLOAN L, et al., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present [J]. Science, 292 (5517): 686-693.

ZAN J B, FANG X M, YANG S L, et al., 2013. Evolution of the arid climate in High Asia since ~1 Ma: evidence from loess deposits on the surface and rims of the Tibetan Plateau [J]. Quaternary International, 313-314: 210-217.

ZHU S Y, WU H B, LI Q, et al., 2016. Aridification in northwestern China since the Late Cenozoic evidenced by the vegetation change [J]. Quaternary Sciences, 36 (4): 820-831. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

崔加伟, 李振宏, 刘锋, 等, 2018. 宁夏红寺堡盆地萨拉乌苏组地层时代重新厘定及意义 [J]. 地质力学学报, 24 (2): 283-292.

黄婷, 李振宏, 刘锋, 等, 2018. 宁夏红寺堡盆地地表沙漠化现状及其地质主控因素 [J]. 地质力学学报, 24 (4): 505-514.

寇琳琳, 李振宏, 董晓朋, 等, 2021. 青藏高原东北缘隆德观音店剖面碎屑锆石年龄序列及地质意义 [J]. 地质力学学报, 27 (6): 1051-1064.

李文漪, 姚祖驹, 1990. 表土中松属花粉与植物间数量关系的研究 [J]. 植物学报, 32 (12): 943-950.

李文漪, 1998. 中国第四纪植被与环境 [M]. 北京: 科学出版社.

李月丛, 许清海, 肖举乐, 等, 2005. 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, 25 (5): 598-608.

李振宏, 崔加伟, 李朝柱, 等, 2020. 红寺堡盆地晚更新世沉积特征及古气候背景 [J]. 煤田地质与勘探, 48 (6): 233-242.

刘博华, 吴芳, 张绪教, 等, 2023. 青藏高原东北缘红寺堡盆地晚更新世沉积物元素地球化学特征及其环境指示意义 [J/OL]. 地质通报: 1-16 [2023-08-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20230811.1039.002.html>.

刘德成, 高星, 王旭龙, 等, 2011. 宁夏银川水洞沟遗址 2 号点晚更新世晚期孢粉记录的古环境 [J]. 古地理学报, 13 (4): 467-472.

刘鸿雁, 2002. 第四纪生态学与全球变化 [M]. 北京: 科学出版社.

刘俊峰, 1992. 黄土高原西部会宁地区 66 万年以来冰期-黄土旋回的孢粉记录 [J]. 冰川冻土, 14 (1): 33-43.

罗传秀, 潘安定, 郑卓, 2006. 西北干旱地区表土孢粉与植被关系研究进展 [J]. 干旱区研究, 23 (2): 314-319.

马玉贞, 蒙红卫, 桑艳礼, 等, 2009. 光学显微镜下松柏类和菊科花粉的分类、鉴定要点及生态意义 [J]. 古生物学报, 48 (2): 240-253.

马兆颖, 董晓朋, 张庆, 等, 2020. 六盘山晚更新世以来抬升过程沉积响应及环境效应 [J]. 煤田地质与勘探, 48 (5): 152-164.

马兆颖, 2021. 清水河盆地晚更新世以来沉积特征及地质意义 [D]. 北京: 中国地质科学院.

慕琳, 乔彦松, 刘宗秀, 等, 2021. 陇东新近纪红黏土与第四纪黄土地球化学特征及其物源和风化指示意义 [J]. 地质力学学报, 27 (3): 475-490.

孙爱芝, 韩晓丽, 张德怀, 2010. 黄土高原不同地貌类型区全新世植被变化研究 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 35 (6): 68-72.

唐领余, 李春海, 安成邦, 等, 2007. 黄土高原西部 4 万多年以来植被与环境变化的孢粉记录 [J]. 古生物学报, 46 (1): 45-61.

唐振华, 张静, 贾志宽, 2003. 宁夏南部旱区农业水资源开发与可持续利用 [J]. 中国农学通报, 19 (4): 189-194.

王琇瑜, 宋长青, 孙湘君, 1996. 内蒙古中部表土花粉研究 [J]. 植物学报, 38 (11): 902-909.

王乃昂, 1994. 论东亚季风的形成时代 [J]. 地理科学, 14 (1): 81-89.

于洪军, 韩德亮, 初风友, 1997. 晚更新世末期北方陆架区沙漠-黄土堆积群的初步研究 [J]. 地质力学学报, 3 (4): 33-38.

中国植被编辑委员会, 1980. 中国植被 [M]. 北京: 科学出版社.

祝淑雅, 吴海斌, 李琴, 等, 2016. 晚新生代以来中国西北植被演化及反映的干旱化过程 [J]. 第四纪研究, 36 (4): 820-831.

开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

可扫码直接下载文章电子版，也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

