



引文格式: 赵森, 龚磊, 吴玺, 等. 张掖盆地晚更新世至中全新世气候变化: 孢粉学和重矿物学证据[J]. 西北地质, 2024, 57(2): 230-243. DOI: 10.12401/j.nwg.2023067

Citation: ZHAO Miao, GONG Lei, WU Xi, et al. Climate Changes of Late Pleistocene to Middle Holocene in Zhangye Basin, NW China: Evidence from Pollen and Heavy Mineral[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 230-243. DOI: 10.12401/j.nwg.2023067

张掖盆地晚更新世至中全新世气候变化: 孢粉学和重矿物学证据

赵森^{1,2}, 龚磊^{1,*}, 吴玺¹, 蔡五田¹, 张文卿¹, 安永会¹, 李康¹, 刘作鹏¹

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 为确定张掖盆地晚第四纪沉积地层时代和探讨其蕴含的古气候信息, 笔者利用孢粉分析、重矿物分析、光释光测年等方法对研究区晚更新世以来气候变化特征进行了重建, 并确认了当地全新世和晚更新世地层界限。结果表明: 地层自下而上划分为 4 个孢粉组合带和植被类型及气候特征: ①深度为 56.8~26.4 m, 年龄为 112.7~63.3 ka, 属末次间冰期, 粉组合为松-板栗-藜-菊-蒿, 针阔叶混交林草原植被, 为晚更新世温暖较湿润气候。②深度为 26.4~2.6 m, 年龄为 63.3~11.8 ka, 与末次冰期相当, 孢粉组合为松-麻黄-藜-蒿, 植被类型为针阔叶混交林草原植被, 为晚更新世干燥寒冷气候。③深度为 2.6~0.8 m, 年龄为 11.8~8.9 ka, 全新世早期, 孢粉组合为松-藜-蒿, 稀树针阔叶混交林草原植被, 较凉较干气候。④深度为 0.8~0.15 m, 年龄为 8.9~7.8 ka, 全新世早期向中期过渡期, 孢粉组合为松-藜-菊-蒿, 稀树针阔叶混交林草原植被, 为温暖较干气候。孢粉组合所揭示的晚更新世—中全新世气候变化特征, 对于揭示张掖盆地甚至西北干旱区的古气候变化具有重要意义。

关键词: 张掖盆地; 古气候; 冰期; 孢粉分析; 重矿物

中图分类号: P57; P467

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)02-0230-14

Climate Changes of Late Pleistocene to Middle Holocene in Zhangye Basin, NW China: Evidence from Pollen and Heavy Mineral

ZHAO Miao^{1,2}, GONG Lei^{1,*}, WU Xi¹, CAI Wutian¹, ZHANG Wenqing¹, AN Yonghui¹, LI Kang¹, LIU Zuopeng¹

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, Hebei, China;
2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to explore the paleoclimatic evolution characteristics and stratigraphic age of Zhangye basin, we reconstructed the climate change characteristics of the study area since the late Pleistocene by means of

收稿日期: 2022-08-26; 修回日期: 2022-12-29; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家重点研发计划专项课题“农田氮素地下淋溶原位监测多参数传感器研发”(2023YFD1701801), 中国地质调查局项目“河西走廊黑河流域 1:5 万水文地质调查”(121201012000150004)。

作者简介: 赵森(1988-), 女, 工程师, 从事第四纪古气候、水文地质研究。E-mail: 494136150@qq.com。

* 通讯作者: 龚磊(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为干旱区水资源、水环境演化和生态系统服务研究。E-mail: gonglei@mail.cgs.gov.cn。

sporopollen analysis, heavy mineral analysis and optical luminescence dating, and confirmed the stratigraphic boundary between Holocene and late Pleistocene. The results show that the strata are divided into four spore-pollen assemblage zones, the vegetation types and climatic characteristics from bottom to top: ① the depth ranges from 56.8 m to 26.4 m (the age is 112.7~63.3 ka), which is the last interglacial period, the spore-pollen assemblage is Pinus-Castanea-Chenopodiaceae-Compositae-Artemisia, coniferous and broad-leaved mixed forest steppe vegetation, which is the warm and humid climate in the late Pleistocene. ② the depth ranges from 26.4 m to 2.6 m (the age is 63.3~11.8 ka), which is the last glacial period, the spore-pollen assemblage is Pinus-Ephedra-Chenopodiaceae-Artemisia, and the vegetation type is coniferous and broad-leaved mixed forest steppe vegetation, which is the dry and cold climate of late Pleistocene. ③ the depth ranges from 2.6 m to 0.8 m (the age is 11.8~8.9 ka), which is the postglacial, the spore-pollen assemblage is Pinus-Chenopodiaceae-Artemisia, mixed broadleaf-conifer forest steppe vegetation, early Holocene cool and dry climate. ④ the depth ranges from 0.8 m to 0.15 m (the age is 8.9~7.8 ka), which is the postglacial, the spore-pollen assemblage is Pinus-Chenopodiaceae-Compositae-Artemisia, broadleaf-conifer mixed forest steppe vegetation, which is the warmer and drier climate of Holocene. The late Pleistocene to mid-Holocene climate evolution characteristics revealed by the spore-pollen assemblages are of great significance for revealing the paleoclimate changes in the Zhangye basin and even the arid area of Northwest China.

Keywords: Zhangye basin; paleoclimate; glacial period; sporopollen analysis; heavy mineral

河西走廊的黑河流域位于中国西北内陆干旱区,生态环境脆弱,新生代以来青藏高原的隆起对该地区的气候有着重要的影响(李吉均, 2013; 祁晓凡等, 2022),独特的自然地理条件使其对全球气候变化的响应更加敏感。研究该地区的河流相沉积物特征,对于探明古气候变化具有重要意义。目前,对于黑河流域气候变化的研究多集中在河流径流量变化和大气循环方面(崔延华等, 2017; 祁晓凡等, 2017; 梁鹏飞等, 2022; 冯嘉兴等, 2023)以及表土花粉研究,对于其古气候的形成演化研究程度较弱。例如,陈雪梅(2012)、常婧(2016)利用黑河中游地区河床和表土样品的孢粉记录,分析了河流相沉积物中孢粉的来源以及其所代表的环境意义,全新世以来的环境演化以及农业活动强度,但是对于张掖盆地中游地区晚更新世以来的气候研究,由于缺乏晚更新世—全新世地层精确的年代控制,仍处于不明了状态。笔者以张掖盆地河流沉积地层中孢粉为主要研究对象,同时结合重矿物分析及光释光测年分析,对钻孔剖面地层时代和晚更新世以来古气候特征进行了详细厘定,为研究区末次间冰期以来的古植被古环境恢复以及古气候变化提供基础数据。

1 研究区地质概况与钻孔特征

张掖盆地位于黑河流域中部走廊平原,盆地南北

分别以祁连山和合黎山—龙首山为边界,东、西分别为永固隆起和榆木山隆起(王具文等, 2019),海拔为1284~2500 m,相对高差为1200 m。主要地貌类型有山前冲积平原、山前冲洪积平原、荒漠戈壁平原、河谷冲积平原和走廊淤积平原、风积沙丘等。研究区属温带大陆性干旱气候,气候特点为降雨稀少、蒸发强烈,年降水量小于200 mm,年水面蒸发量大于2050 mm(王文祥等, 2021)。

研究区钻孔HQ8位于张掖盆地平原堡附近,处于黑河及其支流山丹河交汇处(图1)。地理坐标为E 100°21'00.74", N 39°05'58.83", 钻孔HQ8研究深度至505.65 m,由于56.8~505.65 m深度的孢粉数量极度稀少。所以,笔者只选取相对孢粉含量较高的深度(0.15~56.8 m)进行研究。钻孔编号ZY-1位置在张火公路203号,地理坐标为E 100°28'34.34", N 38°56'51.60",剖面深度为0.8~93.4 m,取样11块。

根据岩性,笔者将钻孔HQ8自上而下分为6层(图2):第1层深度为0~16.8 m,岩性为棕黄色、灰黄色,巨厚层状,含砾亚砂土夹中粗砂、中细砂层,发育块状递变层理,粒径10~40 mm的砾石含量高。磨圆度较差,分选性较好。第2层深度为16.8~24.65 m,岩性为黄橄榄、橄榄棕,厚层状,含砾中粗砂,发育水平层理、小型交错层理,含零星锈染斑点。第3层深度为24.65~26.05 m,岩性为橄榄灰、灰橄榄,厚层状亚砂土,砾石粒径范围为2~90 mm,块状层理,分选

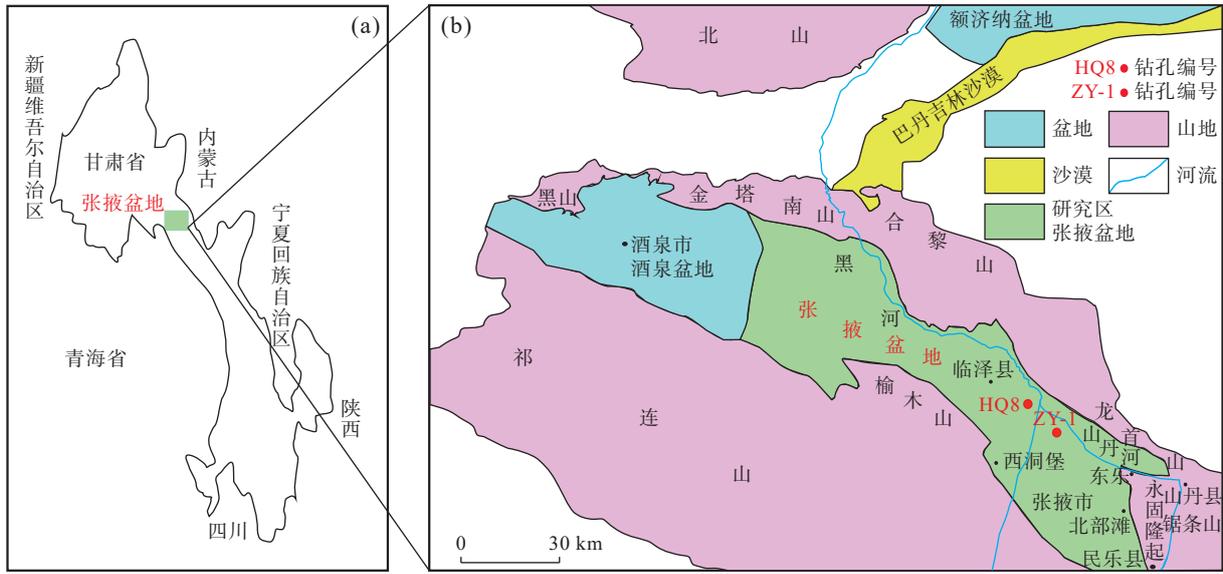
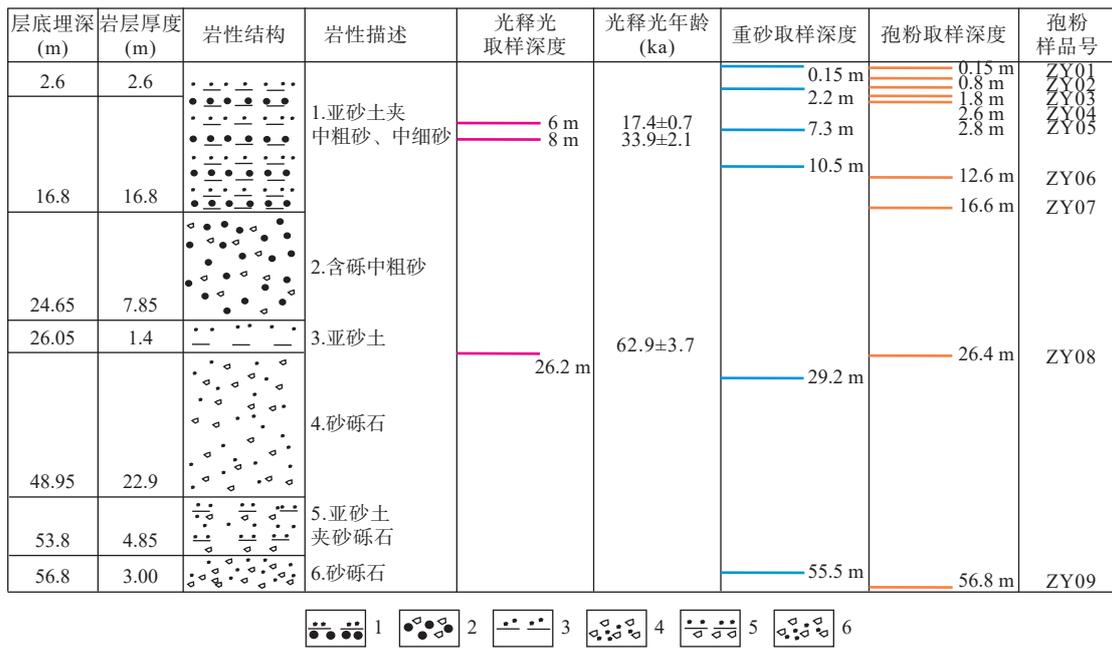


图1 研究区地质略图(a)与钻孔HQ8位置图(b)

Fig. 1 (a) Simplified geologic map of study area and (b) location of borehole HQ8



1.亚砂土夹中粗砂、中细砂；2.含砾中粗砂；3.亚砂土；4.砂砾石；5.亚砂土夹砂砾石；6.砂砾石

图2 钻孔HQ8柱状图及采样位置图

Fig. 2 Comprehensive histogram of borehole HQ8

差,次圆状。第4层深度为26.05~48.95 m,岩性为橄榄灰、浅灰色砂砾石,分选性一般,砾石次棱角、次圆状。第5层深度为48.95~53.8 m,岩性为暗棕黄色亚砂土夹砂砾石,发育斜层理、波状层理、水平层理,偶有锈染砂纹并夹香肠状富碳屑透镜体。第6层深度为53.8~56.8 m,岩性为黄橄榄色砂砾石,发育块状层理、水平层理,含大量锈染斑点。

2 研究方法

2.1 光释光测年

光释光测年共取样品3个,取样深度分别为6.0 m、8.4 m和26.2 m。光释光测年主要是依据测定样品等效剂量和环境剂量率,计算样品的埋藏年龄(赖忠平

等, 2013; 张克旗等, 2015)。用饱和指数方法进行拟合, 样品再生剂量点不太分散, 生长曲线没有明显饱和, 认为测试数据可信。采用细颗粒简单多片再生法获得等效剂量值, 测年物质为细颗粒(4~11 μm)石英。其中, 等效剂量(De)采用石英单测片再生法(Single Aliquot Regeneration, SAR)测定。在样品环境剂量率的测定中, 样品的U、Th和K含量是用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)测得, 宇宙射线的贡献是根据Prescott等(1994)推荐的数据估计的; 为了计算样品埋藏层的含水量对样品所接收的剂量率的影响, 样品的含水量采用经验值 $5\pm 1\%$ 进行估算, 并用Fleming提出的校正方法, 对环境剂量率进行了修正。样品的测定由自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心使用Daybreak 2200光释光仪测定。

2.2 重矿物分析

人工重砂共测试样品6个, 取样深度分别为0.15 m、2.2 m、7.3 m、10.5 m、29.2 m、55.5 m, 样品编号对应为ZS01~ZS06。鉴定工作由河北省区域地质矿产调查研究所测试完成。鉴定依据《地质矿产实验室测试质量管理规范》中的岩石矿物鉴定标准(DZ/T0130.9-2006), 分离出电磁、无磁和强磁3部分重矿物; 通过双目体式镜下鉴定所分离出的重矿物并进行分类, 利用高精度天平对不同种类的重矿物进行称重, 通过重矿物平均密度换算为质量百分比。

2.3 孢粉分析

在钻孔HQ8深度0.15~56.8 m处分别选取深度为0.15 m、0.8 m、1.8 m、2.6 m、2.8 m、12.6 m、16.6 m、26.4 m、56.8 m, 采集具有代表性的岩心样品进行孢粉分析9个, 样品编号为ZY01-ZY09。在钻孔ZY-1中, 剖面厚度为0.8~93.4 m, 选取深度为0.8 m、2.0 m、3.5 m、5.7 m、7.4 m、29.5 m、30.0 m、31.0 m、67.9 m、86.8 m、93.4 m的11个具有代表性的岩芯样品进行孢

粉分析, 样品编号为XX01-XX09, 每块样品重量为100 g。实验处理流程经过称取、酸处理、水洗、重液浮选、离心、制片等过程(Wu et al., 2010; 李育, 2011)。每块孢粉样品加入100 ml的HCl溶液, 目的是去除样品中的钙质, 再加入100 ml的HF溶液, 目的是去除样品中的硅质; 加入5 g碳酸氢钠, 使溶液中和至中性, 再加入重液浮选; 反应充分后加水离心洗至中性; 加甘油制片(Ma et al., 2019; Wang et al., 2020)。实验与鉴定由中国地质调查局水文地质环境地质调查中心实验室完成。使用Tilia软件绘制孢粉图, 并使用地层约束聚类分析(CONISS)确定花粉组合带。

3 研究结果

3.1 光释光年龄

文中研究测定钻孔深度为6.0 m、8.4 m、26.2 m处的光释光年龄对应地层时代为(17.4 \pm 0.7) ka、(33.9 \pm 2.1) ka、(62.9 \pm 3.7) ka(表1), 测定年代结果由上至下年代逐渐变老, 没有出现年代颠倒现象, 符合地层层序律。应用内差值法获得孢粉样品所在深度的年龄(表2), 其中深度为56.8 m的年龄小于内插值计算出来的年龄(112.7 ka), 因为岩性有多个砂砾石快速沉积层, 估算的年龄是极大值。根据目前第四纪年龄分配方案, 全新统底界应该在10 ka附近, 晚更新世底界应该在130 ka附近(樊隽轩等, 2021)。因此, 整个地层剖面从上至下应该划为全新统、上更新统。根据内差值法获得的各个深度的年龄, 认为全新统所在深度应该在2.6 m以内, 具体深度需要之后结合孢粉分析确定。

3.2 重矿物物源分析、风化系数及古气候

重矿物物源分析结果(表3)显示, 物源区母岩类型没有较大的变化, 主要来源于岩浆岩和变质岩, 说

表1 光释光测年结果表

Tab. 1 The results of OSL dating of the borehole HQ8

深度(m)	U(10^{-6})	Th(10^{-6})	K(%)	等效剂量E.D(Gy)	年剂量Dy(Gy/Ka)	含水量(%)	年龄(ka)
6.0	1.86 \pm 0.07	11.39 \pm 0.30	2.17 \pm 0.08	69.66 \pm 1.12	4.01 \pm 0.16	5 \pm 1	17.4 \pm 0.7
8.4	2.67 \pm 0.04	13.55 \pm 0.30	2.14 \pm 0.06	150.77 \pm 6.99	4.45 \pm 0.18	5 \pm 1	33.9 \pm 2.1
26.2	1.19 \pm 0.06	6.67 \pm 0.26	1.63 \pm 0.03	169.91 \pm 7.21	2.70 \pm 0.11	5 \pm 1	62.9 \pm 3.7

表2 内差值法得出孢粉样品深度对应的年龄表

Tab. 2 The age corresponding to the depth of the sample was obtained by internal difference method

深度(m)	0.15	0.8	1.8	2.6	2.8	6.0	8.4	12.6	16.6	26.2	26.4	56.8
年代(ka)	7.8	8.9	10.5	11.8	12.2	17.4	33.9	40.7	47.3	62.9	63.3	<112.7

表3 重矿物物源分析表

Tab. 3 The provenance analysis of heavy minerals

样品编号	岩浆岩矿物	重矿物组成			物源分析
		高级变质矿物	低级变质矿物	再造沉积物	
ZS01(0.15 m)	自形锆石、磷灰石、金红石、锐钛矿、单斜辉石、普通角闪石、电气石、磁铁矿、石英、长石、白云母	石榴子石、绿帘石、阳起石、绿泥石	白钛石、蚀变矿物	重晶石	主要为岩浆岩和变质岩,少数为再造沉积物
ZS02(2.2 m)	自形锆石、磷灰石、金红石、锐钛矿、单斜辉石、普通角闪石、电气石、磁铁矿、石英、长石、黑云母、白云母	石榴子石、绿帘石、阳起石、绿泥石	白钛石、蚀变矿物	重晶石	主要为岩浆岩和变质岩,少数为再造沉积物
ZS03(7.3 m)	自形锆石、磷灰石、金红石、锐钛矿、单斜辉石、普通角闪石、电气石、钛铁矿、磁铁矿、石英、长石、黑云母、白云母	石榴子石、绿帘石、阳起石、绿泥石	白钛石、蚀变矿物	重晶石	主要为岩浆岩和变质岩,少数为再造沉积物
ZS04(10.5 m)	自形锆石、磷灰石、金红石、锐钛矿、单斜辉石、普通角闪石、电气石、磁铁矿、石英、长石、黑云母、白云母	石榴子石、绿帘石、阳起石、绿泥石	白钛石、蚀变矿物	重晶石	主要为岩浆岩和变质岩,少数为再造沉积物
ZS05(29.2 m)	自形锆石、磷灰石、金红石、单斜辉石、普通角闪石、电气石、磁铁矿、石英、长石、黑云母、白云母、火山岩屑及花岗岩屑	石榴子石、绿帘石、阳起石、绿泥石	白钛石、蚀变矿物	—	主要来源于岩浆岩和变质岩
ZS06(55.5 m)	自形锆石、磷灰石、金红石、单斜辉石、普通角闪石、电气石、磁铁矿、石英、长石、黑云母、白云母、火山岩屑及花岗岩屑	石榴子石、绿帘石、蓝闪石、阳起石、绿泥石	白钛石、蚀变矿物	—	主要来源于岩浆岩和变质岩

明现在重矿物的不同组合特征反映的主要是后期沉积过程中受到改造而发生变化,而不是物源区母岩类型的改变(Morton et al., 1999)。非海相沉积环境中的化学风化作用主导了重矿物的组合特征,而化学风化作用在温暖湿润的环境下强烈,在寒冷干旱的环境中则相反(刘瑾等, 2020)。

前人通常采用重矿物的风化系数(表4)来表示风化作用强弱(牛东风等, 2015)。风化系数 $K = \frac{\text{不稳定矿物}(\%) + \text{较稳定矿物}(\%)}{\text{稳定矿物}(\%) + \text{极稳定矿物}(\%)}$, 即风化系数越大, 岩石中相对稳定矿物含量较多, 相对不稳定矿物含量较少, 气候越寒冷; 风化系数越小, 气候越温暖湿润。

研究结果显示, 钻孔深度 0.15 m、2.2 m、7.3 m、10.5 m、29.2 m、55.5 m 的重矿物风化系数分别为 0.96、0.57、0.37、0.32、1.44、0.70。由于风化系数越大, 气候越寒冷, 深度 0.15 m 和 29.2 m 相对于研究的其他深度气候是更加寒冷。因此, 2.2 m、7.3 m、10.5 m、55.5 m 的风化系数相对较小, 气候相对温暖。

3.3 孢粉鉴定与主要孢粉类型

孢粉鉴定在 400 倍光学显微镜下鉴定, 共鉴定到 1762 粒孢粉, 孢粉浓度计算公式为 $PC = P/M$, PC 为孢粉浓度, P 为鉴定的花粉总数, M 为样品质量。通过计算得到孢粉平均浓度 18 粒/g。

孢粉中主要是木本植物花粉最为丰富, 草本植物花粉次之, 蕨类植物孢子极少。其中乔木植物花粉有松属(Pinus)、铁杉属(Tsuga)、栎属(Quercus)、榛属(Corylus)、板栗属(Castanea); 灌木植物花粉有麻黄属(Ephedra)、蔷薇科(Rosaceae); 草本植物花粉有藜科(Chenopodiaceae)、菊科(Compositae)、蒿属(Artemisia)、豆科(Leguminosae); 蕨类植物有卷柏科(Selaginellaceae)、凤丫蕨属(Coniogramme)、单缝孢子(Monoletes)。典型孢粉形态见(图4)。

3.4 孢粉组合反映古气候特征

根据分析孢粉植物的生态类型来重建该地区古植被类型, 以恢复古气候(刘森等, 2019; Li et al., 2019; 韦一等, 2021)。根据地层的孢粉信息和 CONISS 分析,

表 4 重矿物质量百分含量(%)及风化系数

Tab. 4 The results of the mass percentages of the heavy minerals and coefficient of weathering

稳定性划分	矿物名称	深度 (m) (样品编号)						
		0.15(ZS01)	2.2(ZS02)	7.3(ZS03)	10.5(ZS04)	29.2(ZS05)	55.5(ZS06)	
极稳定矿物	锆石	0.62	3.33	2.29	1.52	0.73	1.39	
	金红石	0.06	0.72	0.43	0.13	0.02	0.26	
	锐钛矿	—	0.01	0.01	—	—	—	
	电气石	0.21	0.43	0.90	0.12	—	—	
	白钛石	0.01	0.20	0.45	0.17	0.04	1.92	
	黄铁矿	0.01	—	—	—	0.05	0.01	
稳定矿物	赤褐铁矿	43.91	51.04	53.24	57.22	12.18	35.32	
	磁铁矿	1.68	3.96	3.03	3.56	24.09	15.61	
	重晶石	0.09	1.11	2.51	1.49	—	—	
	钛铁矿	—	—	3.95	9.28	—	—	
	铬铁矿	—	—	—	0.32	0.10	—	
	榍石	—	—	—	—	0.20	0.35	
	磷灰石	—	0.06	0.05	0.02	—	0.03	
	较稳定矿物	石榴子石	4.12	2.71	9.34	9.60	3.05	8.19
	绿帘石	6.19	8.83	8.84	7.00	3.05	16.24	
	单斜辉石	2.50	2.58	1.97	5.63	3.71	1.49	
不稳定矿物	普通角闪石	11.31	9.10	1.32	0.80	9.15	4.13	
	阳起石	20.62	11.46	3.29	0.92	34.89	8.45	
风化系数		0.96	0.57	0.37	0.32	1.44	0.70	

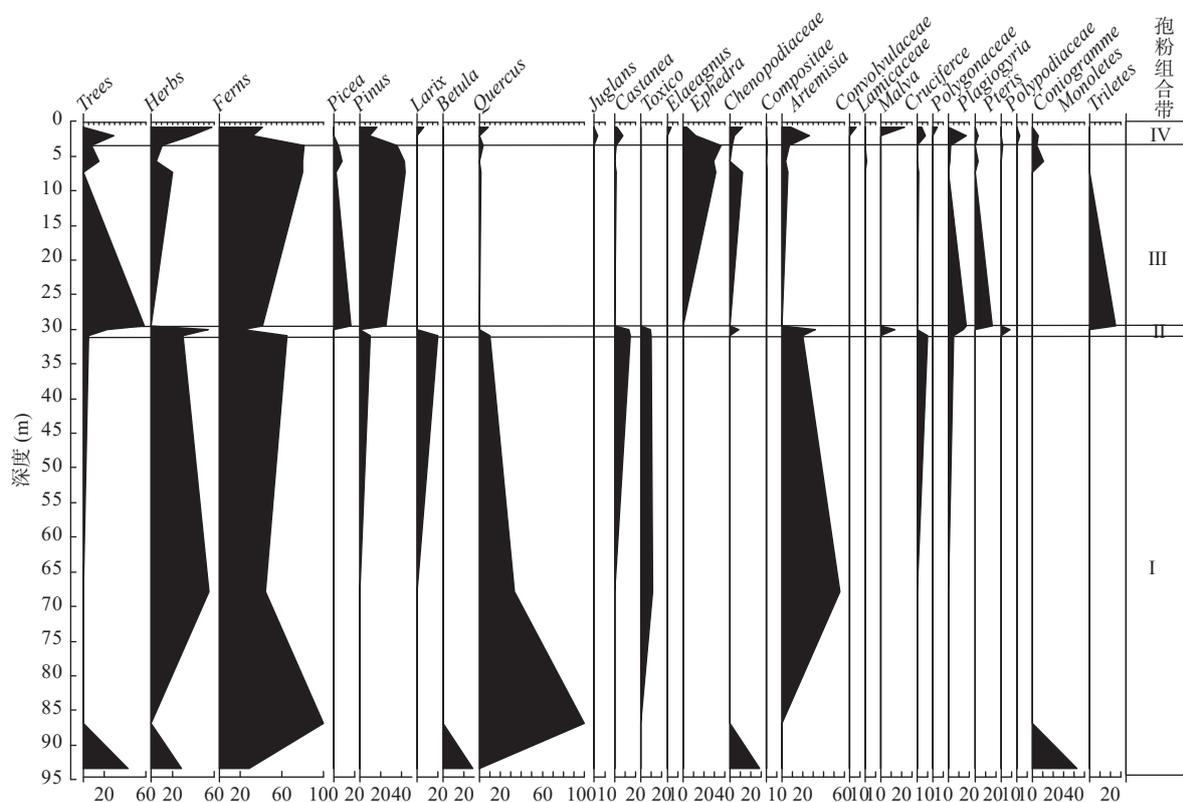
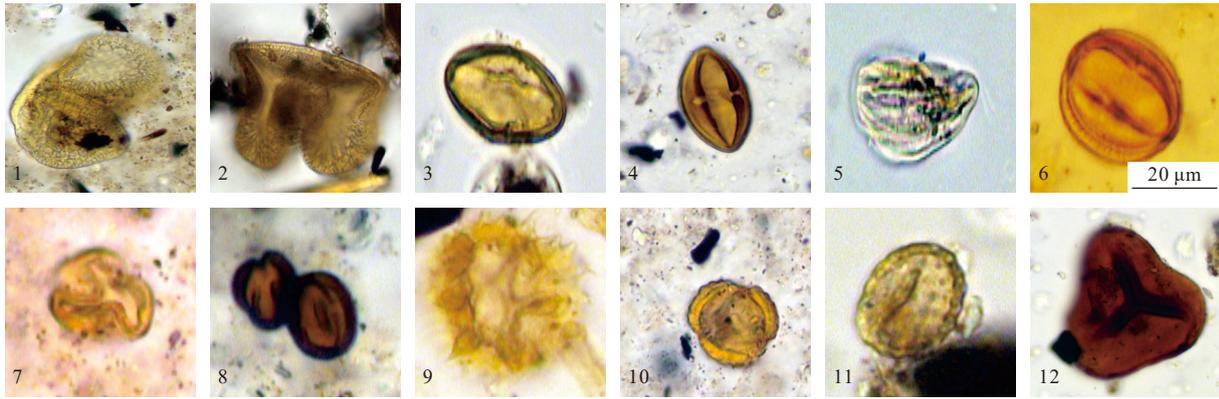


图3 TY-1 钻孔孢粉组合特征图

Fig. 3 Features of sporopollen assemblage of borehole TY-1



1.松属 *Pinus*, 样品号 ZY08, 深度 26.4 m; 2.松属 *Pinus*, 样品号 ZY04, 深度 2.6 m; 3.栎属 *Quercus*, 样品号 ZY09, 深度 56.8 m; 4.栗属 *Castanea*, 样品号 ZY06, 深度 12.6 m; 5.麻黄属 *Ephedra*, 样品号 ZY01, 深度 0.15 m; 6.蔷薇科 *Rosaceae*, 样品号 ZY07, 深度 16.6 m; 7.蔷薇科 *Rosaceae*, 样品号 ZY03, 深度 1.8 m; 8.蒿属 *Artemisia*, 样品号 ZY06, 深度 12.6 m; 9.菊科 *Compositae*, 样品号 ZY09, 深度 56.8 m; 10.菊科 *Compositae*, 样品号 ZY01, 深度 0.15 m; 11.藜科 *Chenopodiaceae*, 样品号 ZY08, 深度 0.8 m; 12.凤丫蕨属 *Coniogramme*, 样品号 ZY04, 深度 2.6 m

图4 HQ8 钻孔孢粉图(比例尺 1 : 400)

Fig. 4 The picture of sporopollen of the borehole HQ8

依据不同植物之间的占比关系,并结合孢粉浓度、蒿藜比(A/C值)、乔木花粉与非乔木花粉比($\ln(\text{NAP}/\text{AP})$ 值)、藜和麻黄之和(C+E)值和古里雅冰芯对应气候趋势(图6),将钻孔 56.8~0.15 m 地层自下而上划分为 4 个孢粉组合带(图5)。4 个孢粉组合带特征以及

对应的古气候特征分别叙述如下。

(1) 孢粉组合带 I: 松-板栗-藜-菊-蒿(56.8~26.4 m, 112.7~63.3 ka)。此带包括两个样品,编号是 ZY08、ZY09。本带孢粉含量较高,木本植物花粉占优势,含量为 42.86%~100% (平均为 71.43%),主要是松属

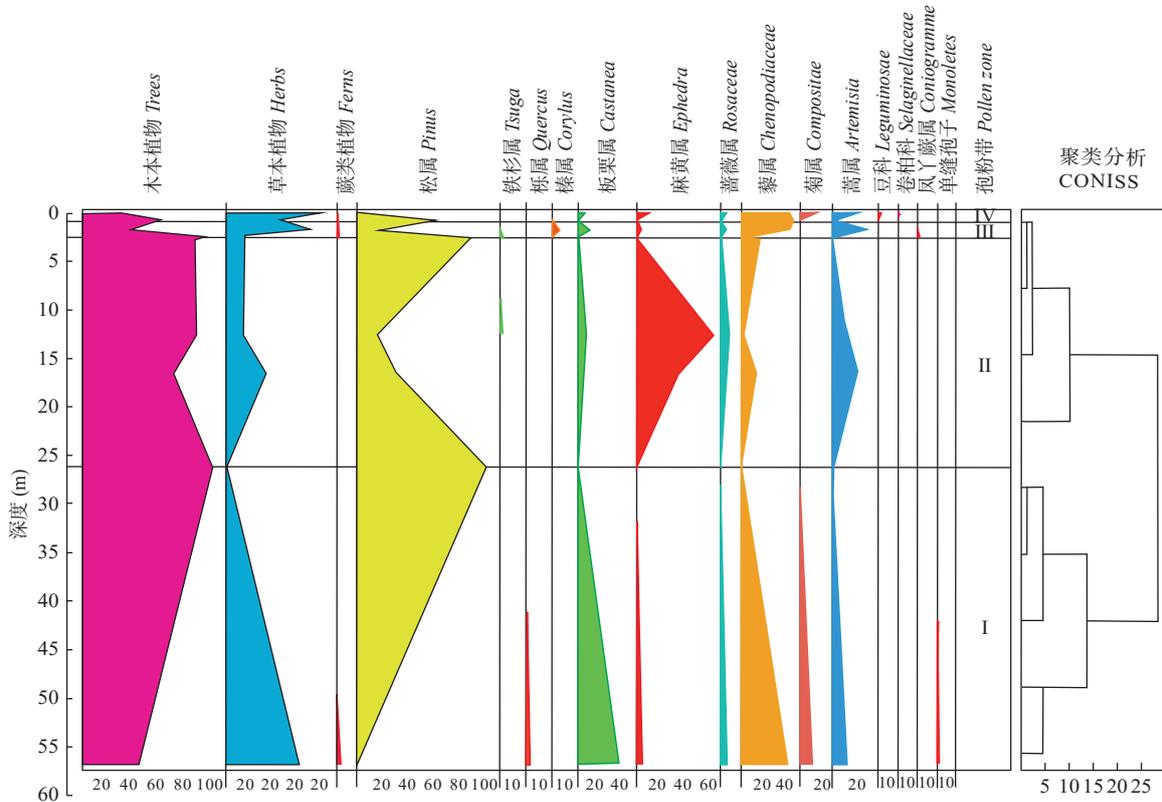
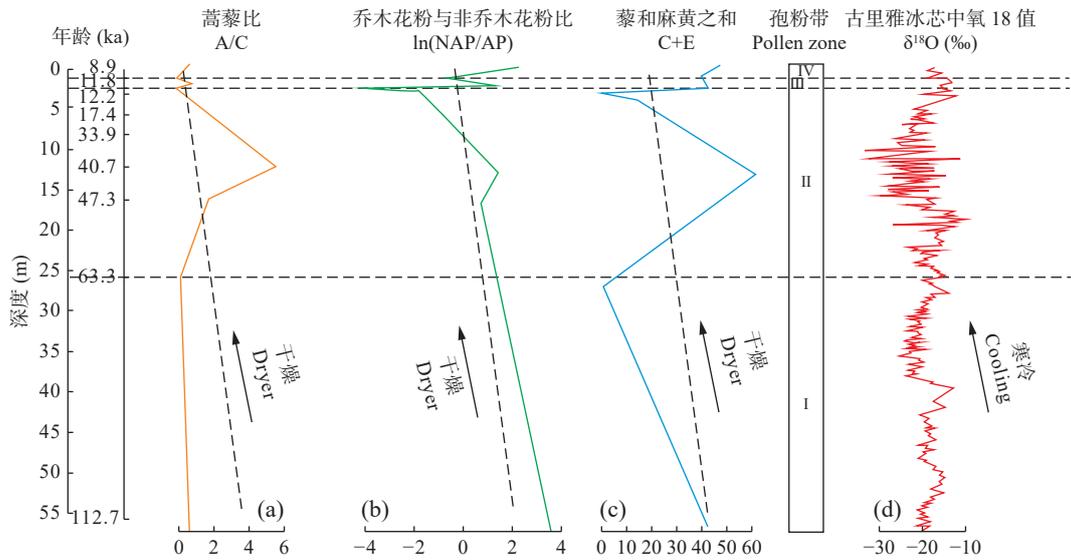


图5 HQ8 钻孔孢粉组合特征图

Fig. 5 The features of sporopollen assemblage of borehole HQ8



a. 蒿藜比 A/C 值随深度变化趋势; b. 乔木花粉与非乔木花粉比 $\ln(NAP/AP)$ 值随深度变化趋势; c. 藜和麻黄之和 (C+E) 值随深度变化趋势; d. 古里雅冰芯中 $\delta^{18}O$ 随深度变化趋势(Thompson et al., 1989; 姚檀栋, 1997; 袁林旺等, 2000)

图 6 钻孔中蒿藜比 A/C 和乔木花粉与非乔木花粉比 $\ln(NAP/AP)$ 和藜和麻黄之和 C+E 值与古里雅冰芯中 $\delta^{18}O$ 变化趋势对比图

Fig. 6 Comparison of A/C, Ln(NAP/AP) and C+E values in boreholes with $\delta^{18}O$ in Guliya ice core

(50.57%), 其中柞属(0.86%)、板栗属(16.29%)、麻黄属(2.00%)、蔷薇科(1.71%)。草本植物花粉为 0.00%~56.00% (平均为 28%), 其中藜科(17.72%)、菊科(4.86%)、蒿属(5.43%)。蕨类植物孢子占 0.57%, 有单缝孢子。代表植被类型是针阔叶混交林草原植被。此阶段的气候在整体上是温暖湿润的。

在气候的波动方面, 此时, A/C 值为 0.73, 通常意义上认为其值小于 0.5 代表荒漠植被区, 草原区一般大于 1; 同时其值越小越说明气候干燥, 越大代表越湿润, 而 $\ln(NAP/AP)$ 值在 56.8~26.4 m 逐渐减小, 反映气候逐渐湿润。

(2) 孢粉组合带 II: 松-麻黄-藜-蒿 (26.4~2.6 m, 63.3~11.8 ka)。此带包括 4 个样品, 编号是 ZY04、ZY05、ZY06、ZY07。本带孢粉含量较低, 木本植物花粉占优势, 含量为 69.59%~98.13% (平均为 85.11%), 主要是松属(57.14%)、铁杉属(0.84%)、板栗属(2.18%)、麻黄属(22.56%)、蔷薇科(2.39%)。草本植物花粉为 0.93%~0.40% (平均为 11.66%), 其中藜科(6.94%)、蒿属(7.71%)。蕨类植物孢子占 0.23%, 有凤丫蕨属。代表针阔叶混交林草原植被。此阶段的气候在整体上是干燥寒冷的。

在气候的波动方面, 其中深度 26.4 m 处, 孢粉极少, 反映此时气候干燥寒冷, 并且, 由前文光释光年

龄得出的 26.2 m 深度的年龄为 (62.9±3.7) ka, 对应古里雅冰芯记录中 GR 曲线出现低值, 证实了此时气候干燥寒冷(Thompson et al., 1989; 姚檀栋, 1997; 袁林旺等, 2000)。钻孔深度为 2.8 m 处孢粉含量极低, 仅发现少量的藜科和松属, 表明气候极度干燥寒冷; 而 2.6 m 处孢粉数量大, 出现大量铁杉和松属等温暖指示植物, A/C 值在 2.6 m 达到峰值, 反映气候温暖湿润。

(3) 孢粉组合带 III: 松-藜-蒿 (2.6~0.8 m, 11.8~8.9 ka)。此带包括两个样品, 编号是 ZY03、ZY02。本带孢粉含量较低, 草本植物花粉占优势, 含量为 40.00%~65.63% (平均为 52.82%), 其中藜科(38.75%), 代表性的有蒿属(14.06%)。木本植物花粉占比 34.38%~60.00% (平均为 47.19%), 其中松属(36.25%)、榛属(3.12%)、板栗属(4.69%)、麻黄属(1.56%)、蔷薇科(1.56%)。未发现蕨类植物孢子。此时, A/C 值是 0.38, 比值较小; $\ln(NAP/AP)$ 数值较大, 代表稀树针阔叶混交林草原植被, 气候较凉干旱为主。

(4) 孢粉组合带 IV: 松-藜-菊-蒿 (0.8~0.15 m, 8.9~7.8 ka)。此带包括 1 个样品, 编号是 ZY01。孢粉含量高, 草本植物花粉占优势, 含量占比高达 72.25%, 木本植物花粉 27.16%, 蕨类植物孢子占 0.58%, 发现卷柏科。此阶段的气候在整体上是温暖较干的。

在气候的波动方面,此时, A/C 值是 0.56, 略大于 2.6 m 处该值比值较大; $\ln(NAP/AP)$ 在 0.15 m 数值大, 反映气候温暖较干旱。代表稀树针阔叶混交林草原植被。此外藜和麻黄加和值 ($C+E$) 值越大, 代表气候越干旱。各指标与古里雅冰芯反映温度作图比较, 变化趋势一致。

3.5 孢粉组合代表的气候特征与地层划分

(1) 孢粉带 I—孢粉带 IV 中, 只有孢粉带 III 的孢粉含量较低, 根据孢粉组合代表的植被所反映的气候变化规律符合全球全新世时期气候变化规律, 孢粉带 III 和孢粉带 IV 为全新世时期的沉积; 结合光释光年龄测定结果(表 2), 推断全新统与更新统分界线在 2.6 m, 即 2.6~0.15 m 是全新统。

(2) 孢粉带 I 的孢粉含量较高, 为针阔叶混交森林草原植被, 气候温暖湿润, 为暖期时候的沉积, 参考光释光年龄为 (33.9 ± 2.1) ka, 即上更新统 (Q_3)。

(3) 孢粉带 II 的孢粉含量高, 为针阔叶混交林草原植被, 气候温暖湿润, 即上更新统 (Q_3)。

(4) 孢粉带 III 为针阔叶混交森林草原植被, 由晚更新世 (Q_3) 冷期寒冷气候开始转暖的北方期的沉积, 是气候较凉较干时候的沉积, 即全新统 (Q_4)。

(5) 孢粉带 IV 为针阔叶混交森林草原植被, 是温暖较干气候下的沉积, 与现代当地植被面貌基本吻合, 也即为现代沉积(全新统 Q_4)。

3.6 钻孔 ZY-1 孢粉特征

剖面厚度 0.8~93.4 m, 取样 11 块。根据地层所负载的古植物孢粉信息, 划分为 4 个孢粉组合带(图 3), 现由下而上分别叙述。

(1) 孢粉组合带 I: 落叶松-栎-蒿为主带。代表地段 93.4~31 m, 包括 3 个样品。本带孢粉含量低, 共发现 19 粒孢粉。木本植物花粉占孢粉总量的 57.67%, 有桦木属、栎属、漆树属。草本植物花粉占 28.04%, 有藜科、蒿属。蕨类植物孢子占 14.29%, 有单缝孢子。代表稀疏的针阔叶混交林草原植被, 反应气候干冷。

(2) 孢粉组合带 II: 松-蒿-瘤足蕨-凤尾蕨为主带。代表地段 31~29.5 m, 包括 3 个样品。本带孢粉含量较低, 共发现 54 粒孢粉。木本植物花粉占孢粉总量的 43.13%, 有松属、落叶松、栎属、板栗属、漆树属。蕨类植物孢子占 28.69%, 有瘤足蕨科、凤尾蕨科、水龙骨科、单缝孢子。草本植物花粉占 28.18%, 有藜科、蒿属、锦葵属、十字花科。代表针阔叶混交林草原植被, 反应气候较暖稍润。

(3) 孢粉组合带 III: 云杉-松-麻黄-藜-瘤足蕨-凤尾

蕨为主带。代表地段 29.5~3.5 m, 包括 3 个样品。本带孢粉含量高, 共发现 687 粒孢粉。木本植物花粉占孢粉总量的 80.48%, 有云杉科、松属、栎属、板栗属、麻黄属。草本植物花粉占 11.87%, 有藜科、菊科、蒿属、唇形科、十字花科。蕨类植物孢子占 7.65%, 有瘤足蕨科、凤尾蕨科、水龙骨科、单缝孢子。代表针阔叶混交森林植被, 反应气候温暖湿润。

(4) 孢粉组合带 IV: 松-麻黄-蒿-瘤足蕨为主带。代表地段 3.5~0.8 m, 包括两个样品。本带孢粉含量较高, 共发现 113 粒孢粉。草本植物花粉含量上升, 由前带的 11.87% 上升到 48.39%, 有藜科、蒿属、旋花科、锦葵、十字花科、蓼科。木本植物花粉含量下降, 由 80.48% 下降到 36.99%, 但是植物属种比较丰富, 有松属、落叶松属、栎属、胡桃属、板栗属、胡颓子、蔷薇科。蕨类植物孢子占 14.62%, 有瘤足蕨科、凤尾蕨科、凤丫蕨属、单缝孢子。代表针阔叶混交林草原植被, 反应气候有向暖干方向发展的趋势。

本次研究中自 112.7 ka 以来的孢粉组合代表的气候变化趋势, 与古里雅冰芯中 $\delta^{18}O$ 所反映的 125 ka 以来温度变化趋势具有一致性(Thompson et al., 1989; 姚檀栋, 1997; 袁林旺等, 2000), 同时与上文重矿物风化系数反映的气候变化趋势相似, 自下而上趋向于干燥寒冷(表 5)。

4 讨论

4.1 邻近盆地气候特征对比分析

此前, 对张掖盆地晚更新世以来的古气候定量化研究程度较弱, 前人在相邻的酒泉盆地、民乐盆地做过相关研究, 酒泉盆地、民乐盆地与张掖盆地(均属于河西走廊盆地群), 它们在构造上均位于塔里木-华北板块与祁连-阿尔金板块挤压碰撞所形成的北祁连褶皱带上。因此, 在区域内具有相似的地貌特征、演化背景、成因及沉积层序。通过对比相邻盆地, 以及吉兰泰盐湖(彭卫, 2018)、黄土高原的临夏、洛川和富县剖面(李秉成等, 2004)、黄土高原西部黄土(甘肃静宁、定西、秦安等地晚更新世晚期以来几个黄土剖面)(唐领余等, 2007)地层中孢粉所反映的古气候演变规律, 证明本次研究的可验证性、可以反映出当地气候变化具有一致性。

(1) 自第四纪晚更新世以来, 酒泉盆地在晚更新世早期(末次间冰期)(150~60 ka)处于温暖期, 之后进入寒冷期(苏建平, 2005); 民乐盆地在末次间冰

表5 孢粉分析与重矿物风化系数对气候的指示对照表

Tab. 5 The comparison of the weathering coefficient of heavy minerals and their climatic indicators and palynological analysis results

地层时代	气候	钻孔深度(m)	孢粉特征 (地层从下至上)	孢粉反映气候 变化趋势	重砂风化系数对孢粉 反映气候变化的佐证
全新世	冰后期	0.8~0.15	较少-很多	寒冷干燥-温暖湿润	2.2 m温暖~0.15 m寒冷
		2.6~0.8	很多-较少	温暖湿润-寒冷干燥	
		2.8~2.6	较少-很多	寒冷干燥-温暖湿润	
	末次冰期	7.3~2.8	较多-较少	温暖湿润-寒冷干燥	7.3 m比2.2 m温暖
		10.5~7.3	增加趋势	升温	10.5 m比7.3 m温暖
晚更新世		26.05~10.5	很少-很多	寒冷干燥-温暖湿润	29.2 m寒冷~10.5 m温暖
		29.2~26.05	孢粉含量极少	持续寒冷干燥	
	末次间冰期	53.8~29.2	很多-很少	温暖湿润-寒冷干燥	55.5 m较29.2 m温暖湿润
		56.8~53.8	增加趋势	升温	

期即将结束的过渡时期—晚更新世末次冰期早期(70.23~55.99 ka)(Li et al., 2011; 王丽媛等, 2018), 气候由间冰期的暖湿气候完全转换成了干冷的特点; 与张掖盆地 26.2 m 处光释光年龄 62.9 ka 基本吻合, 孢粉含量极低, 气候干冷。吉兰泰盐湖(彭卫, 2018), 在 MIS5(85.8~72.1 ka)期间, 森林草原植被类型, 湿度较高, 气候温暖湿润。在黄土高原临夏、洛川和富县的末次间冰期(128~75 ka)的植被中(李秉成等, 2004), 发现了温带和亚热带的树种, 如栎树、漆树、枫杨、黄连木, 以及亚热带树种如铁杉、化香、山核桃、枫香、黄杞等。气候是温暖湿润的。

(2)晚更新世中期(末次冰期), 酒泉盆地在 60~40 ka 出现第三次冰期, 气候寒冷干旱, 沙漠区有所扩展, 木本植物少见, 草本植物只有少量耐旱的蒿、藜和麻黄; 民乐盆地在晚更新世末次冰期中期(55.99~23.60 ka)气温较为回升, 但是整体寒冷干燥, 对应本次研究的张掖盆地钻孔 8.4 m(33.9±3.7) ka, 孢粉含量较之前有增加, 但是气候依然较为干冷。吉兰泰盐湖在 MIS4、MIS3(71.9~29.5 ka)期间, 以蒿属、藜科、麻黄属为主的典型草原/荒漠草原, 荒漠植被有大面积的发育。气候以冷干为主(彭卫, 2018)。黄土高原西部黄土剖面(甘肃静宁、定西、秦安等地晚更新世晚期以来几个黄土剖面)的孢粉组合研究结果显示, 在 46.4~29 ka 期间, 花粉浓度较低反映当时森林草原植被覆盖较低。以针叶林植被类型为主, 松和云杉占优势气候寒冷(唐领余等, 2007)。

(3)酒泉盆地晚更新世晚期(末次冰期)(40~12 ka), 此阶段较为温暖湿润的气候是青藏高原夏季特强季风事件引起的, 原本河西走廊 30 000~16 000 ka 期间(末次冰期)以寒冷气候为主(施雅风等, 1997), 12~10 ka 由于新仙女木事件气候转冷; 民乐盆地晚更新世

末次冰期晚期的盛冰期所处时代(约 23.60~13.78 ka)气候异常寒冷, 与本次研究的张掖盆地钻孔在 6.0 m(17.4 ka)气候异常寒冷的分析结果对应吻合。吉兰泰盐湖 MIS2(29.5~12 ka), 周围植被为以蒿属、藜科、禾本科为主的典型草原, 有零星荒漠分布, 附近山地松林、云杉林发育, 气候干燥寒冷(彭卫, 2018)。黄土高原西部黄土剖面在 29~11.7 ka 期间, 花粉浓度很低, 主要是草本植物呈现由森林—森林草原急剧变化至稀疏草原阶段。20.4 ka, 开始进入末次盛冰期(LGM), 花粉浓度很低, 由草原向荒漠草原方向演化。气候整体干燥寒冷(唐领余等, 2007)。

(4)全新世, 酒泉盆地在 10~7 ka 期间, 气候转温暖湿润。民乐盆地在全新世(10.22 ka 至今)气候最为温暖湿润; 与张掖盆地深度 2.6~0.15m(10.5~7.8 ka), 气候变化经历了转暖-干燥寒冷-转暖的变化过程一致, 与古里雅冰芯氧同位素的气候轮回特征吻合(Thompson et al., 1989; 姚檀栋, 1997; 袁林旺等, 2000)。吉兰泰盐湖(12~9 ka), 以蒿属、藜科为主的典型草原为主, 荒漠扩张。温度上升, 温暖较干燥(彭卫, 2018)。黄土高原西部黄土剖面, 在 11.7~7.5 ka 时期, 气温逐渐升高, 开始阶段花粉浓度低, 以草本植物为主, 主要是蒿属、禾本科、菊科 8.8 ka 开始松属、落叶阔叶等木本植物增加, 草本植物蒿属、禾本科、菊科仍较多。植被类型从荒漠草原阶段-疏林草原阶段或森林草原景观。气候总体特征为温凉略干(唐领余等, 2007)(表 6)。

4.2 钻孔 HQ8、ZY-1 中孢粉分带代表的气候特征对比

此次研究的两个钻孔距离较近, 可做对比研究, 通过孢粉组合特征进行了分带, 将代表性孢粉差异与深度相近的孢粉带反应的古气候变化特征进行对比, 对比结果如下(表 7)。

表6 钻孔HQ8反映的张掖盆地与酒泉盆地、民乐盆地气候演化对比表
 Tab. 6 The comparison of climatic evolution between Zhangye basin and adjacent Jiuquan basin and Minle basin in the HQ8 borehole

时代	酒泉盆地	民乐盆地	张掖盆地	吉兰泰盐湖	黄土高原临夏、洛川和富县剖面	
晚更新世 早期(末次 间冰期)	年龄(ka)	150~60	70.23~55.59	112.2~62.9(深度 为56.8~26.2 m)	MIS5(85.8~72.1 ka)	128~75
	孢粉组合 特征	孢粉组合特征: 木 本植物主要有松属、 桦属、柳属; 草本 植物以耐旱的蒿、 藜、豆科、蔷薇为 主, 森林草原景观 (苏建平, 2005)	气候由间冰期的暖 湿气候完全转换成 了干冷的特点, 波 动不是很大, 约在 60.76 ka附近最为 干冷(Li et al., 2011; 王丽媛等, 2018)	对应本次研究 的26.2 m, 年龄 是(62.9±3.7) ka 孢粉含量极低。 气候干燥寒冷	森林草原, 湿度 较高	临夏、洛川和富县的末 次间冰期的植被中, 发 现了一些跨越温带和亚 热带的树种, 如栎树、 漆树、枫杨、黄连木, 以及亚热带树种如铁杉、 化香、山核桃、枫香、 黄杞等(李秉成等, 2004)
晚更新世 中期(末次 冰期)	气候特征	气候暖湿润, 植被 茂盛	气候由暖湿转为干冷	气候温暖湿润	黄土高原及其毗邻地区 晚更新世气候变化与全 球变化是同步的, 温暖 湿润	
	年龄(ka)	60~40	55.59~23.60	62.9~33.9(深度 26.4~8.4 m)	MIS4、 MIS3(71.9~29.5 ka)	黄土高原西部黄土剖面 46.4~29 ka
晚更新世 晚期(末次 冰期)	孢粉组合 特征	孢粉组合特征: 木 本植物少见, 草本 植物有少量蒿、藜、 麻黄(苏建平, 2005)	气温回升, 降水增 加, 冬季风表现得 不强烈, 但在40.61 ka和53.34 ka附近依 然较为干冷(Li et al., 2011; 王丽媛 等, 2018)	对应本次研究 的8.4m, 年龄 是(33.9±3.7) ka。 孢粉含量较之 前的增加。气 候依然较为干 冷	周围植被主要以 蒿属、藜科、麻 黄属为主的典型 草原/荒漠草原, 荒漠植被有大面 积的发育, 附近 山地有松林发育 和胡桃科为主的 落叶林(彭卫, 2018)	花粉浓度较低, 反映当 时森林草原植被覆盖较 低。46.4~46.2 ka森林 草原阶段。46~29 ka 针叶林阶段。这时段以 松和云杉占优势, 花粉 浓度较高, 应是针叶林 繁盛时期(唐领余等, 2007)
	气候特征	寒冷干燥, 冷期	气温较为回升, 但是整体寒冷干燥	气候冷干为主	气候寒冷后较湿润	
晚更新世 晚期(末次 冰期)	年龄(ka)	40~12	23.60~10.22	33.9~10.5(深度 为8.4~1.8 m)	MIS2(29.5~12 ka)	29~11.7 ka
	孢粉组合 特征	孢粉组合特征: 木 本植物有云杉、松、 桑、木樨、桦、柳、 榆等, 草本植物有 蒿、藜、麻黄、禾 本科、十字花科、 茄科(苏建平, 2005)	该段分为盛冰期与 晚冰期两个阶段。 盛冰期 (23.60~13.78 ka) 该阶段属于晚更新 世末次冰期中的盛 冰期, 该阶段气候 异常寒冷(Li et al., 2011; 王丽媛等, 2018)	对应本次研究 的6.0 m, 年龄 是(17.4±0.7) ka。 孢粉含量极低	孢粉以蒿属、藜 科、禾本科为主 的典型草原, 有 零星荒漠分布, 附近山地松林、 云杉林发育有落 叶榆属疏林发育 (彭卫, 2018)	29~23.4 ka森林-森林 草原急剧变化阶段。 23.4~20.4 ka稀疏草原 阶段。花粉浓度很低, 主要是草本植物, 反映 为稀疏草原植被。进入 末次盛冰期(LGM)。 20.4~17 ka草原向荒漠 草原方向演化。花粉浓 度很低。17~13.2 ka荒 漠草原-森林阶段。11.7 ka以后孢粉贫乏, 植被 又向荒漠草原发展(唐 领余等, 2007)
晚更新世 晚期(末次 冰期)	气候特征	12~10 ka之间由 于新仙女木事件气 候转冷。气候冷热 频繁交替, 以温暖 湿润为主	气候变为异常寒冷	气候干燥寒冷	气候整体干燥寒冷	

续表 6

时代	酒泉盆地	民乐盆地	张掖盆地	吉兰泰盐湖	黄土高原临夏、洛川和富县剖面
年龄 (ka)	10~7 ka	10.22 ka~	10.5~7.8 ka (深度 1.8~0.15 m)	12~9 ka	11.7~7.5 ka
全新世 (冰后期)	孢粉组合特征	全新世时期, 气温急剧升高, 降雨也随着变多 (Li et al., 2011; 王丽媛等, 2018)	对应本次研究的深度 2.6 m, 孢粉含量很多	以蒿属、藜科为主的典型草原为主, 荒漠扩张 (彭卫, 2018)	11.7~8.8 ka 荒漠草原植被类型。花粉浓度低, 以草本植物为主, 主要有蒿属、禾本科、菊科, 表明发育稀疏草原-荒漠草原植被, 可能表明晚冰期的气候寒冷干旱。后期木本植物增加, 显示温度湿度增高。8.8~7.5 ka 疏林草原阶段。木本植物开始增加, 尤其是松属增多, 落叶阔叶树种零星出现。草本植物蒿属、禾本科、菊科较多。呈现疏林草原或森林草原景观 (唐领余等, 2007)
气候特征	在 10~7 ka, 气候转温暖湿润	气候转暖后干燥寒冷后转暖	气候转暖后干燥寒冷后转暖	温度上升, 温暖较干燥	气候总体特征为温暖略干

表 7 钻孔 HQ8、ZY-1 孢粉带反映的气候特征对比表

Tab. 7 Comparative table of climatic characteristics of pollen zones in borehole HQ8 and ZY-1

孢粉带	地层深度 (m)		代表性孢粉		气候特征	
	钻孔 HQ8	钻孔 ZY-1	钻孔 HQ8	钻孔 ZY-1	钻孔 HQ8	钻孔 ZY-1
I	56.8~26.4	93.4~31	松-板栗-藜-菊-蒿	落叶松-栎-蒿	温暖湿润-干冷	气候较干冷
II	26.4~2.6	31~3.5	松-麻黄-藜-蒿	松-蒿-瘤足蕨-凤尾蕨-云杉-麻黄-藜	温暖湿润	较暖稍润-温暖湿润
III	2.6~0.8		松-藜-蒿		较凉干旱	
IV	0.8~0.15	3.5~0.8	松-藜-菊-蒿	松-麻黄-蒿-瘤足蕨	温暖较干旱	向暖干方向发展

4.3 全新世和更新世地层界限的初步确认

此前对于张掖盆地的地层研究程度较浅、晚更新世至全新世地层缺乏精确的年代控制, 此次研究结合古里雅冰芯记录中 GR 曲线值 (Thompson et al., 1989; 姚檀栋等, 1997; 袁林旺等, 2000)、新仙女木事件发生时间 (Ma et al., 2012; Igor et al., 2020)、光释光年龄、孢粉数量与气候特征种属等多个分析指标, 综合判断出地层时代以及气候变化趋势。在深度 6.0 m 处, 光释光测试年龄是 17.4 ka, 早于新仙女木事件发生时间 12.5~11.5 ka, 推测应该是晚更新世晚期, 同时钻孔深度 2.8 m 处孢粉含量极低, 表明气候极度干燥寒冷, 该处地层光释光内插值法计算所得年龄为 12.2 ka, 而 2.6 m 处地层年龄为 11.8 ka, 所以推断深度 2.8~2.6 m 地层所处时代是新仙女木事件发生时期, 气候寒冷干燥。而深度 2.6 m 处发生明显转折, 孢粉含量极高, 出现大量的铁杉和松属等温暖指示植物, A/C 值在 2.6 m

达到峰值, 反映了气候温暖湿润, 由于全新世与更新世地层的界限是以第四纪冰期-次亚冰期结束、气候转暖为标志, 全新世开始于 11.7 ka。因此, 将钻孔所在地区地层的全新世和晚更新世地层界限划定为深度 2.6 m。

5 结论

(1) 研究区 56.8 m 以上地层时代可以划分为两个时代: 其中 2.6~0.15 m 对应地层时代是全新世, 钻孔深度为 56.8~2.6 m 对应地层时代是晚更新世。

(2) 张掖盆地平原堡钻孔沉积特征所反映的气候环境特征表现为明显的冷暖交替现象, 此次划分出了研究区的末次间冰期、末次冰期、冰后期。其中钻孔深度为 56.8~26.4 m, 对应气候是末次间冰期; 钻孔深度为 26.4~2.6 m, 对应气候是末次冰期; 在钻孔深度为 2.6 m

(62.9 ka)和 2.6 m(11.8 ka)出现极端寒冷气候转折;钻孔深度为 2.6~0.8 m,对应气候是早全新世的相对冷期;钻孔深度为 0.8~0.15 m,对应气候是早全新世到中全新世过渡的相对暖期。

参考文献(References):

- 常婧. 黑河中游孢粉记录及第四纪环境变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- CHANG Jing. Pollen records and the Quaternary environment change in the middle reach of Heihe River[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- 陈雪梅. 黑河流域晚全新世农业活动及环境演变的孢粉学研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- CHEN Xuemei. Palynological Study on Agricultural Activities and Environmental Evolution during the Late Holocene in Heihe River Basin, NW China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- 崔延华, 宋悦, 粟晓玲. 祁连山区气候变化对黑河出山径流的影响[J]. *人民黄河*, 2017, 39(5): 15-20.
- CUI Yanhua, SONG Yue, SU Xiaoling. Impacts of Climate Change in Qilian Mountain Area on Run off in the Heihe River Basin[J]. *Yellow River*, 2017, 39(5): 15-20.
- 冯嘉兴, 蒙琪, 王茜. 黑河干流中游地区近 40 年来地下水环境变化特征及其成因[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 243-253.
- FENG Jiaying, MENG Qi, WANG Xi. Characteristics and Causes of Groundwater Environment Changes in the Middle Reaches of the Mainstream of the Heihe River in Recent 40 Years[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 243-253.
- 赖忠平, 欧先交. 光释光测年基本流程[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(5): 683-693.
- LAI Zhongping, OU Xianjiao. Basic procedures of optically stimulated luminescence (OSL) dating[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(5): 683-693.
- 李育, 王乃昂, 李卓仑, 等. 石羊河流域全新世孢粉记录及其对气候系统响应争论的启示[J]. *中国科学*, 2011, 56(2): 161-173.
- LI Yu, WANG Naiang, LI Zhuolun, et al. Holocene palynological records in Shiyang River Basin and their implications for the debate on climate system response[J]. *Science China*, 2011, 56(2): 161-173.
- 李吉均. 青藏高原隆升与晚新生代环境变化[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(2): 154-159.
- LI Jijun. Uplift and late Cenozoic environmental changes of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2013, 49(2): 154-159.
- 梁鹏飞, 辛惠娟, 李宗省, 等. 祁连山黑河径流变化特征及影响因素研究[J]. *干旱区地理*, 2022, 4: 1-13.
- LIANG Pengfei, XIN Huijuan, LI Zongxing, et al. Runoff variation characteristics and influencing factors in the Heihe River Basin in the Qilian Mountains[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 4: 1-13.
- 樊隽轩, 王向东, 陈中强, 等. 国际地层委员会动态与《国际年代地层表》(2021/07 版)[J]. *地层学杂志*, 2021, 45(3): 460-466.
- FAN Junxuan, WANG Xiangdong, CHEN Zhongqiang, et al. International Commission on Stratigraphy and International chronostratigraphic table (2021/07)[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2021, 45(3): 460-466.
- 刘瑾, 陈兴强, 王平, 等. 渭河-三门峡盆地三门组沉积充填特征、物源区及其构造意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(7): 2673-2683.
- LIU Jin, CHEN Xingqiang, WANG Ping, et al. Sedimentary Characteristics, Provenance and Tectonic Significance of the Sanmen Formation in Weihe-Sanmenxia Basin[J]. *Earth Science*, 2020, 45(7): 2673-2683.
- 刘淼, 张渝金, 孙守亮, 等. 辽西金羊盆地北票组孢粉组合及其时代和古气候意义[J]. *地球科学*, 2019, 46(1): 287-292.
- LIU Miao, ZHANG Yujin, SUN Shouliang, et al. Palynological Assemblages of Beipiao Formation in Jinyang Basin of West Liaoning, and Their Age and Paleoclimatic Significances[J]. *Earth Science*, 2019, 46(1): 287-292.
- 李秉成, 孙建中. 黄土高原晚更新世的植被与气候环境[J]. *地理研究*, 2004, 23(5): 641-648.
- LI Bingcheng, SUN Jianzhong. Vegetation and climate environment during the late Pleistocene in Loess Plateau, China[J]. *Geographical Research*, 2004, 23(5): 641-648.
- 牛东风, 李保生, 王丰年, 等. 不同沉积相重矿物组成及其对气候的指示——以米浪沟湾全新统 MGS1 层段为例[J]. *实验室研究与探索*, 2015, 34(7): 7-11.
- NIU Dongfeng, LI Baosheng, WANG Fengnian, et al. Heavy Mineral Composition and Its Climatic Indication for the MGS1 Segment in the Holocene in Milangouwan[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2015, 34(7): 7-11.
- 彭卫. 孢粉记录黄土高原西部更新世晚期人类活动的背景研究. [D]兰州: 兰州大学, 2018.
- PENG Wei. Environmental background of human activities during the late Pleistocene revealed by pollen records from the western Loess Plateau. [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- 祁晓凡, 李文鹏, 崔虎群, 等. 黑河流域中游盆地地表水与地下水转化机制研究[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(3): 29-43.
- QI Xiaofan, LI Wenpeng, CUI Huqun, et al. Study on the conversion mechanism of surface water and groundwater in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 29-43.
- 祁晓凡, 李文鹏, 李海涛, 等. 黑河流域气象要素与全球性大气环流特征量的多尺度遥相关分析[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(3): 564-572.

- QI Xiaofan, LI Wenpeng, LI Haitao, et al. Multi-scale teleconnections between meteorological elements of Heihe River Basin and global climate indices[J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(3): 564–572.
- 施雅风, 刘晓东, 李炳元, 等. 距今 40-30 ka 青藏高原特强季风事件及其发差周期关系[J]. *科学通报*, 1997, 44(14): 1475–1480.
- SHI Yafeng, LIU Xiaodong, LI Bingyuan, et al. The relationship between extra-strong monsoon events and their periodicity over the Qinghai-Tibet Plateau 40-30 ka ago[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 44(14): 1475–1480.
- 苏建平, 仵彦卿, 李麒麟, 等. 第四纪以来酒泉盆地环境演变与祁连山隆升[J]. *地球学报*, 2005, 26(5): 443–448.
- SU Jianping, WU Yanqing, LI Qilin, et al. Environmental Evolution of the Jiuquan Basin and Its Relation with the Uplift of the Qilian Mountains since the Quaternary[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2005, 26(5): 443–448.
- 唐领余, 李春海, 安成邦, 等. 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*, 2007, 46(1): 45–61.
- TANG Lingyu, LI Chunhai, AN Chengbang, et al. Vegetation History Of The Western Loess Plateau Of China During The Last 40 ka Based On Pollen Record[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2007, 46(1): 45–61.
- 韦一, 杨兵, 夏浩东, 等. 抚顺盆地中—晚始新世古植被与古气候[J]. *地球科学*, 2021, 46(5): 1848–1861.
- WEI Yi, YANG Bing, XIA Haodong, et al. Paleovegetation and Paleoclimate during Mid-Late Eocene in Fushun Basin[J]. *Earth Science*, 2021, 46(5): 1848–1861.
- 王具文, 张旭儒, 宁天祥, 等. 张掖盆地地热资源流体化学特征研究[J]. *地下水*, 2019, 41(4): 17–19.
- WANG Juwen, ZHANG Xuru, NING Tianxiang, et al. Study on Fluid Chemical Characteristics of Geothermal Resources in Zhangye Basin[J]. *Ground Water*, 2019, 41(4): 17–19.
- 王文祥, 李文鹏, 蔡月梅, 等. 黑河流域中游盆地水文地球化学演化规律研究[J]. *地学前缘*, 2021, 28(4): 184–193.
- WANG Wenxiang, LI Wenpeng, CAI Yuemei, et al. The hydrogeochemical evolution of groundwater in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(4): 184–193.
- 王丽媛, 程捷, 韩金, 等. 河西走廊民乐盆地晚更新世以来的气候变迁[J]. *中国矿业*, 2018, 27: 80–89.
- WANG Liyuan, CHENG Jie, HAN Jin, et al. Climate changes during the Late Pleistocene of Minle basin in Hexi corridor[J]. *China Mining Magazine*, 2018, 27: 80–89.
- 袁林旺, 陈晔, 周春林, 等. 柴达木盆地自然伽玛曲线与古里雅冰芯记录的末次间冰期以来气候环境变化过程的对比[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(4): 327–332.
- YUAN Linwang, CHEN Ye, ZHOU Chunlin, et al. Correlation of Environmental and Climatic Change Between Qaidam Basin Gamma Ray Logging Curve and Guliya Ice Core $\delta^{18}\text{O}$ Record Since the Last Interglacial Cycle[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(4): 327–332.
- 姚檀栋, 施雅风, 秦大河, 等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究[J]. *中国科学*, 1997, 27(5): 447–452.
- YAO Tandong, SHI Yafeng, QIN Dahe, et al. Climate change records since the last interglacial period in the Gurya ice core[J]. *Science in China*, 1997, 27(5): 447–452.
- 张克旗, 吴中海, 吕同艳, 等. 光释光测年法-综述及进展[J]. *地质通报*, 2015, 34(1): 183–203.
- ZHANG Keqi, WU Zhonghai, LÜ Tongyan, et al. Review and progress of OSL dating[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(1): 183–203.
- Igor O, Lars W, Achim B, et al. An annually resolved record of Western European vegetation response to Younger Dryas cooling[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 231: 1–15.
- Li M Y, Zhang S R, Xu Q H, et al. Spatial patterns of vegetation and climate in the North China Plain during the Last Glacial Maximum and Holocene climatic optimum[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2019, 8: 1279–1287.
- Li X Q, Sun N, Dodson J, et al. The impact of early smelting on the environment of Huoshiliang in Hexi Corridor, NW China, as recorded by fossil charcoal and chemical elements[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2011, 305: 329–336.
- Ma Q F, Zhu L P, Wang X M, et al. Late glacial and Holocene vegetation and climate variations at Lake Tangra Yumco, central Tibetan Plateau[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 174: 16–25.
- Ma Z B, Cheng H, Tan M, et al. Timing and structure of the Younger Dryas event in northern China[J]. *Quaternary Science Review*, 2012, 4: 83–93.
- Morton A C, Hallsworth R C. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124: 3–29.
- Prescott J R, Hutton J T. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long-term time variations[J]. *Radiation Measurements*, 1994, 23(2–3): 497–500.
- Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, et al. Holocene-Late Pleistocene Climate Ice Core Records from Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Science*, 1989, 246(4929): 474–477.
- Wang L S, Wang X Q, Shen J H, et al. Late Pleistocene environmental information on the Die xi paleodammed lake of the upper Minjiang River in the eastern margin of the Tibetan Plateau. China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(5): 1172–1187.
- Wu F L, Fang X M, Miao Y F, et al. Environmental indicators from comparison of sporopollen in early Pleistocene lacustrine sediments from different climatic zones[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(26): 2981–2988.