

# 中天山山间盆地中晚全新世植被与气候变化

苏展艺, 姚付龙, 夏倩倩, 胡晓峰

伊犁师范大学资源与生态研究所, 资源与环境学院, 新疆伊宁 835000

**摘要** 【目的】新疆天山地处亚欧大陆内部, 位于多个大气环流系统过渡地带, 对气候变化响应敏感。学术界目前对其全新世环境演化的认识尚未统一, 补充更多敏感区域高分辨率气候记录是明确该问题的基础。【方法】以中天山山间盆地那拉提剖面为研究材料, 基于 AMS<sup>14</sup>C 年代测试结果, 以孢粉为古气候代用指标, 重建了研究区中晚全新世以来的植被与气候变化过程。【结果】6 369~3 601 cal yr B.P.期间蒿属 (*Artemisia*)、藜属 (*Chenopodium*) 含量高, 花粉 PCA axis 1 得分偏正, 气候出现干湿波动, 以干为主, 存在气候突变现象。3 601~2 512 cal yr B.P.期间云杉属 (*Picea*) 含量升高, 花粉 PCA axis 2 得分偏正, 气候冷湿。2 512~1 016 cal yr B.P.期间桦木属 (*Betula*) 含量增加, 花粉 PCA axis 1 得分偏正, 气候暖干。发生在 4 766~3 601 cal yr B.P.期间以冷干为特征的气候突变与“4.2 ka B.P.”气候事件有良好响应, 可能是太阳辐射减弱, 中高纬寒冷加剧、北大西洋海面温降低使西风环流减弱导致。【结论】划分出的 3 个花粉带指示中天山山间盆地中晚全新世气候经历了干湿波动(偏干)—冷湿—暖干 3 个阶段。中晚全新世以来研究区接收夏季太阳辐射减少, 北大西洋海面蒸发弱, 西风环流携带水汽少, 气候干旱。晚全新世早期持续的寒冷气候迫使西风环流南移, 叠加北大西洋涛动负相位输送大量水汽, 气候冷湿。晚期冬季太阳辐射增强, 陆地蒸发加大, 气候暖干。

**关键词** 孢粉; 中晚全新世; 中天山; 植被; 气候

**第一作者简介** 苏展艺, 女, 1999 年出生, 硕士研究生, 丝绸之路全新世环境考古, E-mail: suzhanyi99@163.com

**通信作者** 姚付龙, 男, 1982 年出生, 副教授, 丝绸之路全新世环境考古, E-mail: njuwolf@foxmail.com

**中图分类号** P531 **文献标志码** A

## 0 引言

全新世是人类发展史上的里程碑, “新仙女木事件”后各地气候普遍转暖, 自然环境呈现现代面貌, 暖湿植物逐渐向纬度、海拔较高的地域迁移, 为现代人类文明的发展提供了更充足的物质资料<sup>[1]</sup>。已有研究表明全新世时期气候出现多次波动和突变现象, 区域大气环流系统发生多次重组, 对植被演替、人类文明演化等产生了重要影响<sup>[2-5]</sup>。深入研究气候变化格局与过程对洞悉气候事件空间尺度、表现形式、驱动机制及环境与人类活动协同演化具有重要意义。

天山山系盆地和谷地相间排列, 特殊的地貌类型造就了其内部独特的自然和生态环境, 加之受多个大气环流系统的影响<sup>[6]</sup>, 对气候变化反应敏感, 是研究古气候变化的理想区域。

收稿日期:2023-12-28; 收修改稿日期:2024-04-19

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01C457); 国家自然科学基金项目(41961013); 伊犁哈萨克自治州科技计划项目(YJC2023A05)  
[Foundation: Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region of China, No.2022D01C457; National Natural Science Foundation of China (NSFC), No.41961013; Ili Kazakh Autonomous Prefecture Science and Technology Program, No. YJC2023A05]

厘清不同地貌单元全新世气候变化过程,是从长时间尺度上深入认识天山地区水热配置方式及气候时空演变格局的基础<sup>[7]</sup>。学者们以天山两坡的湖泊沉积物、泥炭、黄土等沉积物为研究材料,采用孢粉、地球化学、粒度等古气候代用指标<sup>[8-9]</sup>,开展相关研究并取得了丰硕成果,但对中晚全新世以来的湿度变化尚未形成统一认识。有观点认为中晚全新世以来,天山地区气候经历了由湿转干再转湿的变化<sup>[8,10-11]</sup>,也有观点认为气候一直呈变干趋势<sup>[12]</sup>。此外,气候的振荡和突变现象在此区域地层中也有相关记录,诸如“4.2 ka B.P.”气候事件、小冰期(Little Ice Age, LIA)等气候事件的起讫时间、水热配置等关键问题均在讨论之中。综上所述,天山地区古气候变化格局与过程远比已有认识更复杂,为明确上述问题,迫切需要在气候敏感区域开展更多高分辨率的环境演变研究。

孢粉客观记录了区域植被与气候变化信息,是重建区域范围内环境变化的可靠指标之一<sup>[13-14]</sup>。本文以中天山山间盆地那拉提剖面为研究材料,基于 AMS<sup>14</sup>C 年代—深度模型,依据花粉组合特征,反演研究区中晚全新世以来植被与气候变化过程。

## 1 研究区概况

中天山是伊犁河与开都河的分水岭,高低错落的山脉形成了多个山间盆地和谷地,其中伊犁河谷最典型,该区三面环山,向西开放,垂直方向上阶地发育良好,低级阶地主要靠南岸分布,二级阶地北岸分布更广并与冲积平原相连,少见三、四级阶地<sup>[15]</sup>,向东逐渐收缩,随海拔升高两侧山脉最终汇聚形成隆起(图1)。

伊犁河谷属温带大陆性气候,年均温 8 °C~9.2 °C,1月平均气温-10 °C,极端低温-37.4 °C,7月平均气温 22.5 °C~23.4 °C,极端高温 39.5 °C,气温年较差大。西宽东窄的地貌类型利于西风带裹挟的水汽进入山间盆地,平均年降水量为 400~600 mm,迎风坡处可达 800 mm<sup>[15-16]</sup>。伊犁河谷植被垂直地带性显著,根据课题组野外考察结果并结合相关资料<sup>[16]</sup>描述如下。

山地荒漠—草原带(900~1 100 m):低海拔谷地发育博乐蒿(*Artemisia borotalensis*)、地白蒿(*Artemisia terrae-albae*)为优势种的蒿类荒漠,山麓草原带发育高加索针茅(*Stipa caucasica*)、中亚针茅(*Stipa sareptana*),灌木常见小蓬(*Nanophyton erinaceum*)、新疆锦鸡儿(*Caragana turkestanica*)等。

低山森林带(1 100~1 500 m):天山苹果(*Malus sieversii*)、野杏(*Armeniaca vulgaris*)、野核桃(*Juglans regia*)等组成的野果林在天山植被带结构中属特殊的存在。另外还有宽度为 100~150 m 的草原草甸,主要有短柄草(*Brachypodium pinnatum*)、无芒雀麦(*Bromus*

*inermis*)、野豌豆 (*Vicia sepium*) 等。

中山森林带 (1 500~2 400 m)：以雪岭云杉 (*Picea schrenkiana*) 为建群种，伴生欧洲山杨 (*Populus tremula*)、天山桦 (*Betula tianschanica*)、崖柳 (*Salix xerophila*) 等小乔木。山地河谷中生长有密叶杨 (*Populus densa*)、小叶桦 (*Betula microphylla*) 等。

亚高山、高山草甸带 (2 400~2 900 m)：线叶嵩草 (*Cobresia capilliformis*)、西伯利亚斗篷草 (*Alchemilla sibirica*)、高山糙苏 (*Phlomis alpina*)、短筒鸢尾 (*Iris breviflora*) 等较为常见。

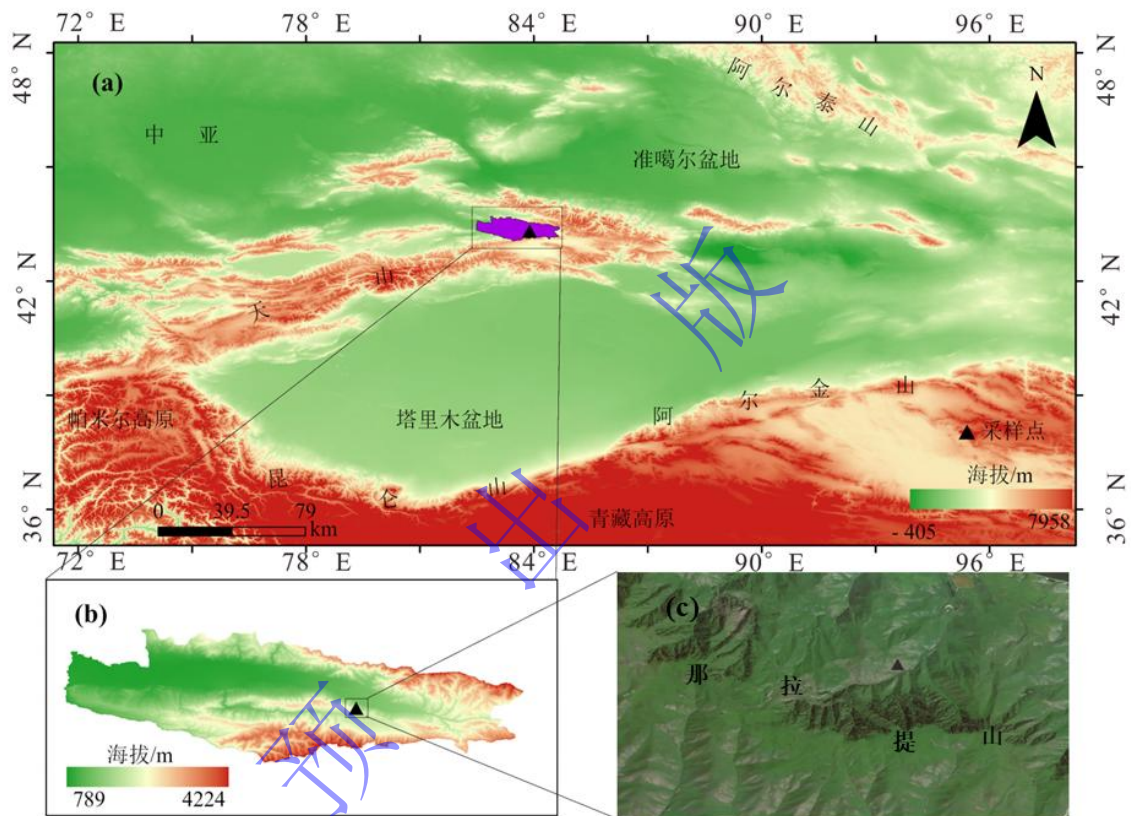


图1 中天山山间盆地那拉提剖面

(a) 采样点地理位置; (b) 采样点高程图; (c) 采样点遥感影像

Fig.1 Nalati Section in the middle Tianshan Mountain basin

(a) geographic location; (b) elevation map; (c) remote sensing image

## 2 材料与方法

### 2.1 样品野外采集与年代测定

那拉提剖面为课题组 2021 年 7 月在伊犁河谷野外考察所得，采样点位于那拉提山附近的农牧交错区 (43°19'N, 83°53'E)，采样时首先清除表面风化物质，直至挖出新鲜地层，后自下而上连续采样，所获样品剖面完整连续，能清晰表示层位年代框架。剖面整体厚度为 240 cm，240~128 cm 间地层数据已发表，本文选取 128~30 cm 间样品作为研究材料，128~90

cm 为灰黄色粉质黏土层, 90~62 cm 为深灰色淤泥, 62~30 cm 为灰黑色泥炭。分别在黏土层的下部和上部、淤泥层的上部、泥炭层的上部各选取一个样品, 送北京大学考古文博学院科技考古实验室进行 AMS<sup>14</sup>C 年代测试, 剖面中未见合适的陆生植物残体, 测年材料均为沉积物全有机质, AMS<sup>14</sup>C 年代使用 CalibRev 7.0.2 软件校正<sup>[17]</sup>。

## 2.2 花粉提取与鉴定

花粉提取采用氢氟酸法, 用天平称取适量烘干样品放入离心管中, 加入 3 片石松孢子(10 135 粒/片) 计算孢粉浓度, 先后加入适量盐酸、氢氧化钠、氢氟酸溶液除去钙、有机质、残留纤维素与硅质物质, 加入醋酸酐与浓硫酸(体积比为 9:1) 形成醋解液除去原生质, 使孢粉形态、纹饰清晰可观, 最后将样品移入指型管中滴加甘油保存备用<sup>[18]</sup>。鉴定时以 400 倍蔡司光学显微镜为观察工具, 以《中国第四纪孢粉图鉴》<sup>[14]</sup>、《中国干旱半干旱地区花粉形态研究》<sup>[19]</sup>为参考资料, 每个样品观察 5~7 个样片, 统计 300 粒以上陆生植物花粉。

## 2.3 数据处理

陆生草本植物及乔灌木花粉含量百分比基于鉴定的陆生植物花粉总数计算, 湿生(水生)草本植物花粉含量百分比则以鉴定的全部花粉数量为基数计算, 运用 Tilia 2.0 软件处理数据并绘制花粉图谱, 调用 Tilia 2.0 软件自带的 CONISS 程序进行聚类分析<sup>[20]</sup>, 以此作为划分地层的重要依据。

那拉提剖面地层花粉主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)在 Canoco 4.5 软件中完成<sup>[21]</sup>, 降趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)显示第 1 主轴的梯度长度值为 1.05 (<2.0), 表明花粉组合与环境变量成线性相关关系, 适用主成分分析法<sup>[8]</sup>, 挑选至少在 5 个样品中含量高于 2.0% 的 17 个花粉类型进行分析。

## 3 结果

### 3.1 年代测试结果

那拉提剖面 4 个样品年代测试结果等信息见表 1, 地层深度与年代关系见图 2。剖面底部、顶部校正年龄分别为 6 369±74 cal yr B.P.、1 016±46 cal yr B.P., 假定两个测年样品间的沉积速率不变, 128~90 cm、90~62 cm、62~30 cm 的沉积速率分别为 0.13 mm/a、0.20 mm/a、0.26 mm/a。

表 1 那拉提剖面年代测试结果

Table 1 Dating results for the Nalati section

样品编号	深度/cm	AMS <sup>14</sup> C	校正年龄
------	-------	---------------------	------

		测年/a BP	/cal yr B.P.
NLT31	30~31	1 120±20	1 016±46
NLT63	62~63	2 225±25	2 215±61
NLT91	90~91	3 355±25	3 601±44
NLT129	128~129	5 580±45	6 369±74

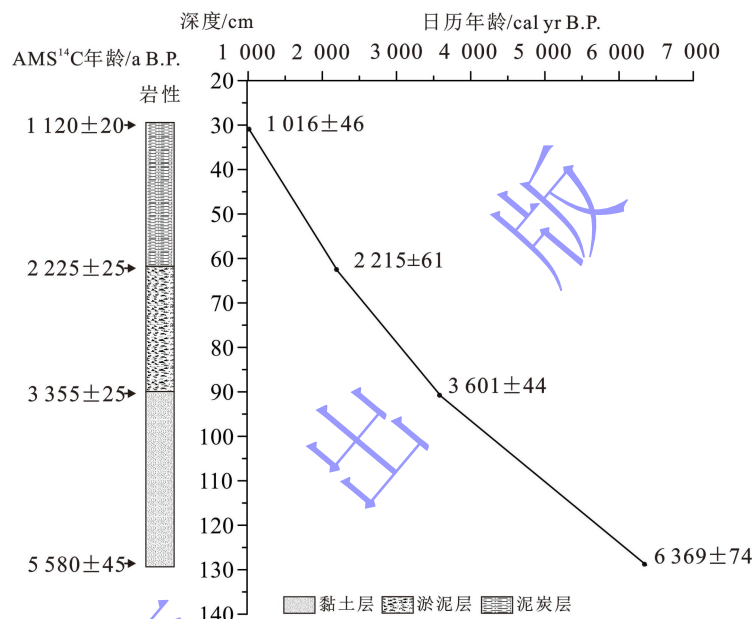


图2 那拉提剖面深度与年代关系图

Fig.2 Depth-age relational graph of the Nalati section

### 3.2 花粉鉴定结果

#### 3.2.1 剖面花粉整体鉴定结果

那拉提剖面 99 个地层样品共鉴定包含 40 个科、属类型的 34 110 粒花粉，平均每个样品 345 粒。乔、灌木花粉 8 413 粒，共 20 个不同类型，含量为 27.7%，以云杉属 (*Picea*)、桦木属 (*Betula*)、麻黄属 (*Ephedra*) 为代表，含量分别为 9.0%、5.6%、4.5%。陆生草本植物花粉 21 947 粒，包含 16 个不同类型，含量为 72.3%，蒿属 (*Artemisia*)、藜属 (*Chenopodium*)、禾本科 (*Poaceae*) 含量位列前三，含量分别为 29.2%、21.5%、16.3%。湿生 (水生) 草本植物花粉 3 750 粒，4 个类型，含量为 11.0%，以莎草科 (*Cyperaceae*) 为主，含量为 7.0%，另有少量香蒲属 (*Typha*) 与毛茛科 (*Ranunculaceae*)。

#### 3.2.2 剖面各层位花粉组合特征

带 I (128~90 cm, 6 369~3 601 cal yr B.P.)。乔、灌木花粉含量为 28.3%，云杉属、桦木属分别为 6.7%、3.7%，麻黄属为 9.6%。陆生草本植物花粉含量为 71.7%，蒿属、藜属分别为 27.1%、27.4%。湿生（水生）草本植物花粉含量低，仅占 7.3%。

带 I -1 (128~106 cm, 6 369~4 766 cal yr B.P.)。乔、灌木花粉含量为 30.8%，麻黄属为 6.6%，云杉属含量为 8.8%，介于 2.7%-16.7%之间。陆生草本植物花粉含量为 69.2%，蒿属、藜属分别为 23.0%、24.1%。湿生（水生）草本植物花粉含量为 9.0%。

带 I -2 (106~90 cm, 4 766~3 601 cal yr B.P.)。乔、灌木花粉含量为 24.8%，云杉属降至 3.6%，桦木属仅见数个，麻黄属为 14.1%，比带 I -1 增加了 4.4%。陆生草本植物花粉为 75.2%，蒿属、藜属分别为 33.1%、32.2%，增幅达 10.1%、8.1%，禾本科骤降至 6.7%。

带 II (90~68 cm, 3 601~2 512 cal yr B.P.)。乔、灌木花粉含量为 30.7%，云杉属、桦木属、柳属 (*Salix*) 分别为 14.7%、2.8%、2.5%，麻黄属仅 1.3%。陆生草本植物花粉含量为 69.3%，蒿属、藜属为 24.8%、14.8%。禾本科为 24.4%，比带 I -2 增加了 17.7%。湿生（水生）草本植物花粉含量为 16.6%，莎草科为 10.9%，香蒲属为 3.7%。

带 III (68~30 cm, 2 512~1 016 cal yr B.P.)。乔、灌木花粉含量为 25.2%，桦木属含量为 9.3%，较带 II 增加了 6.5%，灌木花粉含量均不足 1.5%。陆生草本植物花粉含量为 74.8%，蒿属、藜属、禾本科含量分别为 33.8%、19.4%、16.1%。湿生（水生）草本植物花粉含量为 10.9%，莎草科含量为 7.5%，香蒲属、毛茛科均不足 2.5% (图 3)。

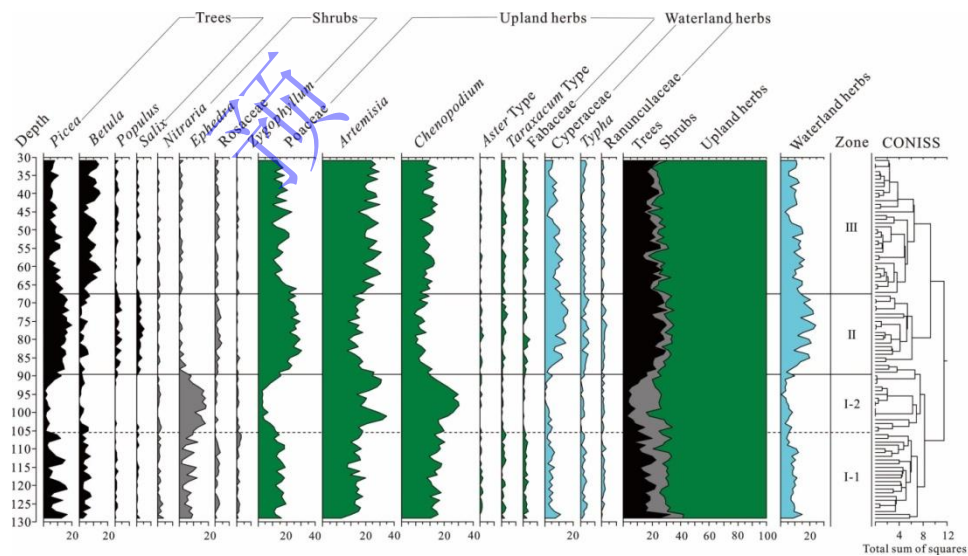


图 3 那拉提剖面花粉分布及含量百分比图谱

Fig.3 Pollen distribution and content percentage map of the Nalati section

### 3.2.3 剖面花粉 PCA 分析结果

PCA 分析结果前 4 轴的特征值分别为 0.545、0.221、0.066、0.047，累积解释量 87.9%，

前 2 轴解释了总变量 76.6% 的变化特征，较好反映了花粉组合差异及气候的水热组合情况。

PCA axis 1 将喜湿的云杉属、禾本科、莎草科等与耐旱的蒿属、藜属、麻黄属等左右分隔，PCA axis 2 将喜阴凉的松属 (*Pinus*)、云杉属等与喜暖的桦木属上下分隔。据此推测 PCA axis 1 反映气候干湿程度，由左向右湿度递减，负半轴湿度大，正半轴湿度小；PCA axis 2 指示气候冷暖状况，由上到下温度递增，正半轴温度低，负半轴温度高（图 4）。

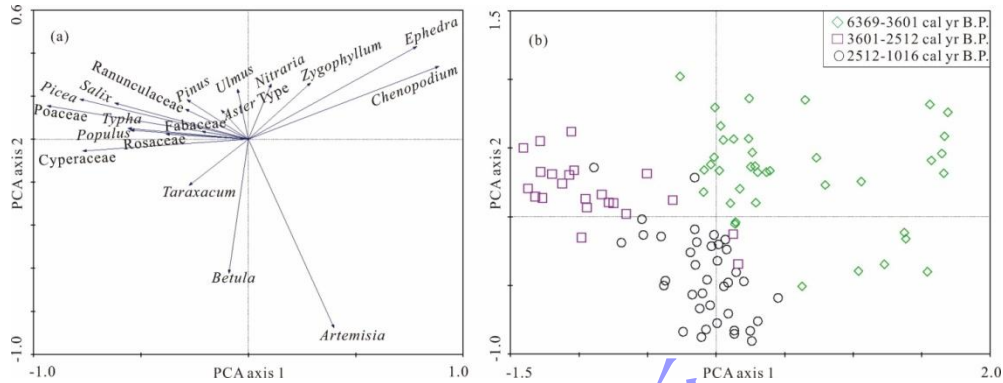


图 4 那拉提剖面花粉 PCA 分析结果

(a) 花粉类型；(b) 花粉样品

Fig.4 Results of principal component analysis (PCA) in pollen record of the Nalati section

(a) Pollen types; (b) Pollen samples

## 4 讨论

### 4.1 研究区各层位花粉组合与气候变化特征

带 I (128~90 cm, 6 369~3 601 cal yr B.P.)。乔、灌木花粉以喜湿的云杉属、耐旱的麻黄属为主，含量此消彼长，陆生草本植物花粉中蒿属、藜属含量优势明显，禾本科含量次之。花粉 PCA axis 1 得分多数偏正。蒿属、藜属是干旱、半干旱区荒漠草原、草原生态系统的重要组成部分，麻黄属主要分布于荒漠植被带，耐旱能力超过藜属<sup>[7]</sup>。花粉组合与主成分分析表明，该层位气候干湿波动明显，以干为主。研究区 240~180 cm 间已发表地层数据显示在 8 602~6 369 cal yr B.P.期间常见杨属、柳属等喜暖湿环境的乔木花粉<sup>[1]</sup>，层位气候以暖湿为主，与“全新世大暖期”的气候特征较为一致<sup>[22]</sup>，随后气候进入波动期，水热配比不协调，甚至失衡。天山两坡湖泊花粉组合中多早生、超早生灌木及藜属、蒿属等草本植物，中生及水生花粉贫乏，流域植被以荒漠草原、草原为主<sup>[23-24]</sup>。阿拉善高原花粉总浓度出现最低值，以早生白刺属 (*Nitraria*) 为主<sup>[25]</sup>。中亚干旱区 Valikhanov 河谷几乎不见乔木植物花粉，植被以早生藜属及麻黄属组成的沙漠草原为主，孢粉组合变化剧烈，气候波动明显<sup>[26]</sup>。北半球高纬度东西伯利亚地区海底岩心孢粉通量出现短暂高值后波动下降（图 5b）。研究区以干为主的气候特征与周边干旱区已有湿度记录基本一致。

4 766~3 601 cal yr B.P.期间花粉组合中喜湿的云杉属含量骤降, 麻黄属含量增至剖面峰值, 早生的蒿属、藜属含量不同程度增加, 气候向冷干突变。这一事件在表现形式等方面与“4.2 ka B.P.”气候事件吻合, 可认为是研究区对该事件的响应。由“4.2 ka B.P.”气候事件引发的北半球大范围内干旱加剧、温度下降、人类文明衰落等现象均有记录。新疆北部古尔班通古特沙漠风沙活动增强(图 5c)。乌伦古湖 A/C 值出现波动, 偏向低值(图 5d)。中天山、东天山植被持续退化<sup>[3,30]</sup>。中国东部季风区、中亚地区以及北半球范围内均出现不同程度的降温与干旱, 巢湖流域指示气候寒冷的棒型植硅体含量明显增加(图 5e)。地中海东部美索不达米亚平原陆源沉积物中风沙供应增加, 干旱化特征显著, 大范围的气候突变导致周边地区社会文化出现衰落<sup>[32]</sup>, 半球范围内南亚、北非、北美洲等均出现不同程度的干旱, 古印度、古埃及文明在此时出现中断甚至衰落<sup>[33-34]</sup>。夏季太阳辐射减弱可能造成北大西洋浮冰增加<sup>[35]</sup>, 海水表层温度下降(图 5f), 北半球高低纬度间热量交换减缓, 大西洋经向翻转环流变慢<sup>[37-38]</sup>, 在赤道辐合带南移的共同作用下, 西风环流势力减弱, 研究区出现气候冷干突变事件。

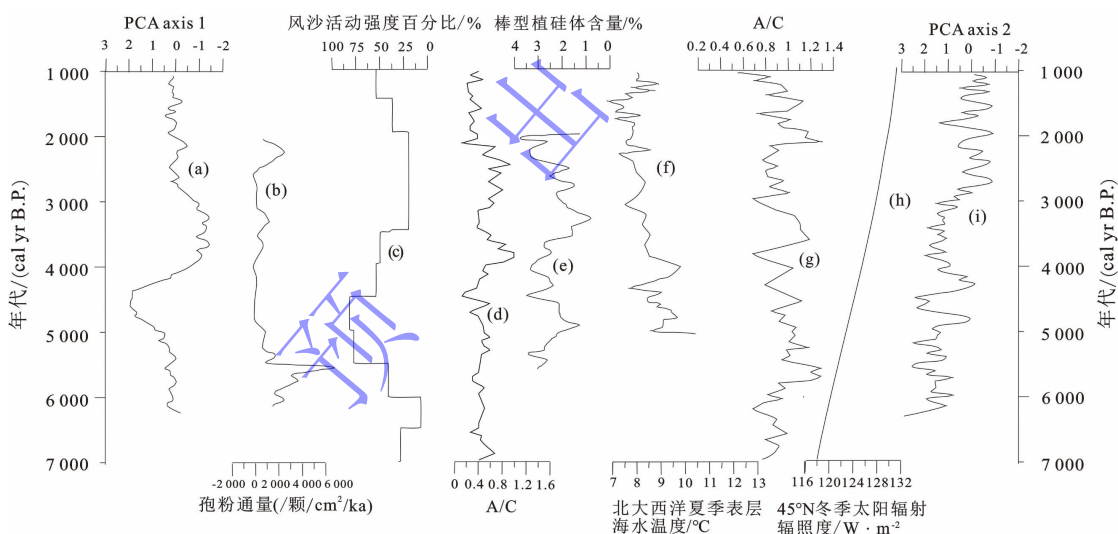


图5 那拉提剖面中晚全新世湿度与温度变化及其与区域气候记录对比

(a) 那拉提剖面(本研究); (b) 东西伯利亚 PS51/80-13 岩心<sup>[27]</sup>; (c) 古尔班通古特沙漠<sup>[28]</sup>; (d) 乌伦古湖剖面<sup>[29]</sup>; (e) 巢湖南灵钻孔<sup>[31]</sup>; (f) 北大西洋冰岛北部陆架 MD99-2269 孔<sup>[36]</sup>; (g) 博斯腾湖剖面<sup>[42]</sup>; (h) 45° N 冬季太阳辐射<sup>[51]</sup>; (i) 那拉提剖面(本研究)

Fig.5 Changes of humidity and temperature in the Middle and Late Holocene in the Nalati section and their comparison with regional climatic records

(a) Nalati Section (this study); (b) Eastern Siberia PS51/80-13 core<sup>[27]</sup>; (c) Gurbantunggut Desert<sup>[28]</sup>; (d) Wulungu Lake Section<sup>[29]</sup>; (e) Chaohu Nanling Borehole<sup>[31]</sup>; (f) Northern shelf of Iceland MD99-2699 hole, North Atlantic<sup>[36]</sup>; (g) Bosten Lake Section<sup>[42]</sup>; (h) Winter solar radiation at 45°N<sup>[51]</sup>; (i) Nalati Section (this study)

带 II (90~68 cm, 3 601~2 512 cal yr B.P.)。花粉组合出现变化, 云杉属、禾本科、莎



草科含量攀升至剖面峰值，蒿属、藜属含量下降，麻黄属近乎消失。雪岭云杉是天山北坡中山森林带的建群种，适应冷湿环境<sup>[8]</sup>，天山地区禾本科为浅根系陆生草本植物，生长过程中需水量大于蒿属<sup>[15,39]</sup>。莎草科植物在研究区主要分布于地表过湿的草甸地带，指示湿润气候<sup>[1,40]</sup>。花粉 PCA axis 1 得分整体偏负（图 5a）、PCA axis 2 得分多数偏正（图 5i），这一时期气候进入冷湿阶段。晚全新世在经历长时间尺度的气候冷干事件后，迎来相对湿润的变化，这种转变在天山两坡植被、湖泊以及沙漠沉积记录中都有体现。气候突变事件后持续的寒冷气候减少了研究区水汽蒸发，土壤含水量增加，天山北麓植被盖度增加，禾本科、莎草科大量发育<sup>[24]</sup>。赛里木湖的 $\delta^{18}\text{O}$  值较低，显示此时气候相对湿润，蒸发减少，有效湿度高<sup>[41]</sup>。博斯腾湖 A/C 值升高（图 5g），盘星藻（*Pediastrum*）增加，湖泊水位升高<sup>[43]</sup>。古尔班通古特沙漠古土壤发育，风沙活动减弱（图 5c），土壤粒度细化反映湿润气候。中亚伊塞克湖沉积记录显示此时云杉属、莎草科等植物花粉增加，存在显著湿润时期<sup>[44]</sup>。北大西洋冰川扩张，造成欧洲中部湖泊水位升高，洪水活动盛行<sup>[45-46]</sup>。

带 III（68~30 cm，2 512~1 016 cal yr B.P.）。云杉属含量降低，桦木属达到剖面峰值，蒿属、藜属缓慢增加，花粉 PCA axis 2 得分偏向指示温暖的负半轴。桦木属为阔叶林属种，喜温暖生境，其数量增加表征相对暖干的环境<sup>[8]</sup>。晚全新世晚期温度回升，湿度下降，气候转向暖干。天山北部平原艾比湖、四厂湖、东道海子等湖泊湖面出现不同程度降低，磁化率值高，建群种以耐旱的藜属为主，气候相对暖干<sup>[24]</sup>。天山南坡植被随气候变干向荒漠演变<sup>[12,47-48]</sup>，考古研究发现晚全新世早期新疆众多湖泊面积扩大，河流量增加，绿洲广阔，人类活动频繁，楼兰等古国繁荣兴盛，人类文明迅速发展，晚全新世晚期温度有所回升，干旱加剧，河流干涸迫使农业活动停滞，精绝、楼兰等古城消失于沙漠之中<sup>[49]</sup>。干旱同样发生在里海、咸海一带，湿地植被减少，蒿属、藜属等草本植物发育与灌木组成典型草原植被，气候干旱<sup>[45,50]</sup>。

#### 4.2 中天山山间盆地气候变化的影响因素及机制

中晚全新世以来，北半球夏季太阳辐射量持续减少，“4.2 ka B.P.”气候事件可认为是中晚全新世温度由暖向冷过渡的年代分水岭<sup>[34]</sup>，该事件后持续的寒冷气候促使北半球高纬度地区大陆冰架扩张，变冷信号向南传递至中纬度地区<sup>[46]</sup>，北大西洋表层海水温度维持低值（图 5f），研究区晚全新世早期持续的低温可能是对此的响应。与之相反，45° N 冬季太阳辐射在晚全新世晚期明显增加（图 5h），削弱了西伯利亚高压强度，研究区温度有所回升，气候变暖。存在于海陆间以及中高纬度间长时间尺度的温度变化较好地反映了太阳辐射强弱变化对区域温度变化的主导作用。

中全新世以来夏季太阳辐射量逐渐减少,北大西洋表层海水温度下降,海面蒸发减小,到达研究区的水汽减少,气候干旱。随后,持续的寒冷环境迫使西风环流向南移动,冰岛低压与亚速尔高压间气压差减小导致北大西洋涛动(North Atlantic oscillation, NAO)呈现负相位,叠加中纬度地区频繁的气旋活动<sup>[41]</sup>,致使研究区在晚全新世早期接收大量西风环流输送的水汽,气候“冷—湿”特征显著。干旱区有效湿度的变化常受温度变化影响<sup>[8]</sup>,晚全新世晚期冬季太阳辐射增强,大陆内部地表蒸发加大,冬季洋面的相对低温减少了水汽蒸发,西风环流有所减弱,可能是研究区气候转向暖干的原因。太阳辐射与北大西洋海水运动的协同作用可认为是研究区中晚全新世湿度变化的驱动因素。

## 5 结论

(1) 6 369~3 601 cal yr B.P.期间,花粉组合中蒿属、藜属占优势,花粉 PCA axis 1 得分偏向湿度低的正半轴,气候以干为特征,并存在一定幅度波动;4 766~3 601 cal yr B.P.期间旱生植物花粉含量剧增,花粉 PCA axis 2 得分偏向寒冷一侧,出现气候突变。3 601~2 512 cal yr B.P.期间花粉组合中喜湿的云杉属、禾本科、莎草科含量高,花粉 PCA axis 2 得分延续寒冷趋势,气候进入冷湿阶段。2 512~1 016 cal yr B.P.期间喜暖的桦木属花粉含量突出,花粉 PCA axis 1 得分回正,温度回升,气候暖干。中晚全新世以来北半球夏季太阳辐射逐渐减弱,海面蒸发小,西风环流携带水汽减少,研究区降水量下降,有效湿度低,气候干旱。此后持续的寒冷气候迫使西风环流在晚全新世早期南移,叠加北大西洋涛动负相位及气旋活动共同为研究区输送大量水汽,气候冷湿。晚全新世晚期冬季太阳辐射增强,研究区气候有所回暖,陆地蒸发加大,有效湿度下降,气候暖干。

(2) 研究区气候在 4 766~3 601 cal yr B.P.时段内发生以冷干为特征的气候突变现象与“4.2 ka B.P.”气候事件在表现形式等方面有良好响应。太阳辐射减弱导致北大西洋表层海水温度降低,海面浮冰扩张,高低纬间热量交换减缓,北大西洋经向翻转环流变慢,西风环流势力变弱,携带水汽减少,诱发此次气候突变现象。

致谢 衷心感谢审稿专家与编辑老师对本文提出的宝贵意见与指导。

## 参考文献 (References)

- [1] 姚付龙, 孙岳珊, 黄健, 等. 天山北坡末次冰消期至早、中全新世气候演化过程及机制探讨[J]. 地层学杂志, 2023, 47(2): 225-235. [Yao Fulong, Sun Yueshan, Huang Jian, et al. Climate evolution and mechanism from the Last Deglaciation to the Early-Middle Holocene on the northern slope of Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. Journal of Stratigraphy, 2023, 47(2): 225-235.]
- [2] Stager J C, Mayewski P A. Abrupt early to mid-Holocene climatic transition registered at the Equator and the Poles[J]. Science, 1997, 276(5320): 1834-1836.

- [3] 陶士臣, 安成邦, 陈发虎, 等. 新疆托勒库勒湖孢粉记录的 4.2 ka BP 气候事件[J]. 古生物学报, 2013, 52(2): 234-242. [Tao Shichen, An Chengbang, Chen Fahu, et al. An abrupt climatic event around 4.2 cal ka BP documented by fossil pollen of Tuolekule Lake in the eastern Xinjiang Uyghur autonomous region[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2013, 52(2): 234-242.]
- [4] Aubert C, Brisset E, Djamali M, et al. Late glacial and early Holocene hydroclimate variability in northwest Iran (Talesh Mountains) inferred from chironomid and pollen analysis[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2017, 58(2): 151-167.
- [5] Yao F L, Ma C M, Zhu C, et al. Holocene climate change in the western part of Taihu Lake region, East China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 485: 963-973.
- [6] 丁一汇. 中国自然地理系列专著: 中国气候[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1-557. [Ding Yihui. Series of monographs on the physical geography of China: China's climate.[M]. Beijing: Science Press, 2013: 1-557.]
- [7] 姚付龙, 朱诚, 夏倩倩, 等. 高分辨率泥炭孢粉记录的天山北坡 2400 cal yr B.P.以来植被演替及其对气候变化的响应[J]. 地层学杂志, 2020, 44(1): 104-112. [Yao Fulong, Zhu Cheng, Xia Qianqian, et al. Vegetation succession and its response to climate changes since 2400 cal yr B.P. by pollen record from a high resolution peat profile in the northern slope of Tianshan, China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2020, 44(1): 104-112.]
- [8] 蒋庆丰, 季峻峰, 沈吉, 等. 赛里木湖孢粉记录的亚洲内陆西凤区全新世植被与气候变化[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2013, 43(2): 243-255. [Jiang Qingfeng, Ji Junfeng, Shen Ji, et al. Holocene vegetational and climatic variation in westerly-dominated areas of Central Asia inferred from the Sayram Lake in northern Xinjiang, China[J]. *Science China (Series D): Earth Sciences*, 2013, 43(2): 243-255.]
- [9] 范义姣, 田伟东, 杨军怀, 等. 新疆天山地区不同海拔黄土记录的末次冰消期以来的环境演变[J]. 第四纪研究, 2021, 41(5): 1244-1253. [Fan Yijiao, Tian Weidong, Yang Junhui, et al. Environmental changes since last deglaciation recorded in loess at different altitude in Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(5): 1244-1253.]
- [10] Chen F H, Chen J H, Holmes J, et al. Moisture changes over the last millennium in arid central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(7/8): 1055-1068.
- [11] 冯兆东, 张同文, 冉敏. 新疆北部及周边地区过去一万年的气候与水文变化[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2017: 1-238. [Feng Zhaodong, Zhang Tongwen, Ran Min. Climatic and hydrological changes in northern Xinjiang and neighboring areas over the past 10,000 years[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2017: 1-238.]
- [12] 张芸, 孔昭宸, 倪健, 等. 新疆草滩湖村湿地 4550 年以来的孢粉记录和环境演变[J]. 科学通报, 2008, 53(3): 306-316. [Zhang Yun, Kong Zhaochen, Ni Jian, et al. Pollen record and environmental evolution of Caotanhucun wetland in Xinjiang since 4550 cal. a BP[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(3): 306-316.]
- [13] 于革. 高分辨湖泊沉积和孢粉记录对气候、水文变化的响应[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 118-124. [Yu Ge. High-resolution records of lacustrine sedimentology and palynology responding to changes in climate and hydrology[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(1): 118-124.]
- [14] 唐领余, 毛礼米, 舒军武, 等. 中国第四纪孢粉图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 1-601. [Tang Lingyu, Mao Limi, Shu Junwu, et al. An illustrated handbook of Quaternary pollen and spores in China[M]. Beijing: Science Press, 2016: 1-601.]
- [15] 陈曦. 中国干旱区自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-801. [Chen Xi. Physical geography of arid land in China[M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-801.]
- [16] 胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 1-443. [Hu Ruji. Physical geography of the Tianshan mountains in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 1-443.]
- [17] Reimer P J, Baillie M G L, Bard E, et al. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP[J]. *Radiocarbon*, 2009, 51(4): 1111-1150.
- [18] Faegri K, Kaland P E, Krzywinski K. Textbook of pollen analysis[M]. 4th ed. Chichester: John Wiley & Sons Inc., 1989: 1-476.
- [19] 席以珍, 宁建长. 中国干旱半干旱地区花粉形态研究[J]. 玉山生物学报, 1994, 11: 119-191. [Xi Yizhen, Ning Jianchang. Study on pollen morphology of plants from dry and semidry area in China[J]. *Yushan Biology*, 1994, 11: 119-191.]
- [20] Grimm E C. CONISS: A fortran 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares[R]. *Comput Geosci*, 1987, 13: 13-35.
- [21] Ter Braak C J F, Smilauer P. CANOCO 4.5. Biometrics[R]. Wageningen: Wageningen University and Research Center, 2002: 500.
- [22] 彭晓莹, 钟巍, 赵引娟, 等. 全新世大暖期气候环境特征及其机制的再认识[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2005(2): 52-60. [Peng Xiaoying, Zhong Wei, Zhao Yinjuan, et al. Preliminary research in the Holocene hypsithermal climate change[J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2005(2): 52-60.]

- [23] 阎顺, 李树峰, 孔昭宸, 等. 乌鲁木齐东道海子剖面的孢粉分析及其反映的环境变化[J]. 第四纪研究, 2004, 24(4): 463-468. [Yan Shun, Li Shufeng, Kong Zhaochen, et al. The pollen analyses and environment changes of the Dongdaohaizi area in Ürümqi, Xinjiang[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(4): 463-468.]
- [24] 姚轶锋, 王霞, 谢淦, 等. 新疆地区全新世植被演替与气候环境演变[J]. 科学通报, 2015, 60(31): 2963-2976. [Yao Yifeng, Wang Xia, Xie Gan, et al. Holocene vegetation succession and climate-environment change in Xinjiang Region[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(31): 2963-2976.]
- [25] 陈发虎, 吴薇, 朱艳, 等. 阿拉善高原中全新世干旱事件的湖泊记录研究[J]. 科学通报, 2004, 49(1): 1-9. [Chen Fahu, Wu Wei, Zhu Yan, et al. A mid-Holocene drought interval as evidenced by lake desiccation in the Alashan Plateau, Inner Mongolia, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(1): 1-9.]
- [26] 黄昌庆, 冉敏, 桑艳礼. 哈萨克斯坦 Valikhanov 剖面孢粉记录的 28000 年气候变化[J]. 科技通报, 2017, 33(9): 54-58, 167. [Huang Changqing, Ran Min, Sang Yanli. Palaeoclimate history recorded by pollen of Valikhanov section during the Last 28000 years in Kazakhstan[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(9): 54-58, 167.]
- [27] Bauch H A, Mueller-Lupp T, Taldenkova E, et al. Chronology of the Holocene transgression at the north Siberian margin[J]. Global and Planetary Change, 2001, 31(1/2/3/4): 125-139.
- [28] 徐宇杰, 刘冰, 孙爱军, 等. 古尔班通古特沙漠及周边区域全新世环境演变研究进展[J]. 干旱区地理, 2023, 46(4): 550-562. [Xu Yujie, Liu Bing, Sun Aijun, et al. Research progress of Holocene environmental evolution in the Gurbantunggut Desert and its surrounding areas[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(4): 550-562.]
- [29] 肖霞云, 蒋庆丰, 刘兴起, 等. 新疆乌伦古湖全新世以来高分辨率的孢粉记录与环境变迁[J]. 微体古生物学报, 2006, 23(1): 77-86. [Xiao Xiayun, Jiang Qingfeng, Liu Xingqi, et al. High resolution sporopollen record and environmental change since Holocene in the Wulungu Lake, Xinjiang[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2006, 23(1): 77-86.]
- [30] Li X Q, Zhao K L, Dodson J, et al. Moisture dynamics in central Asia for the last 15 kyr: New evidence from Yili Valley, Xinjiang, NW China[J]. Quaternary Science Reviews, 2011, 30(23/24): 3457-3466.
- [31] 范斌, 许世远, 俞立中, 等. 巢湖沉积植硅体组合及中全新世以来的环境演变[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 273-279. [Fan Bin, Xu Shiyuan, Yu Lizhong, et al. Phytolith in the sediment of the Lake Chaohu since Middle Holocene and its palaeoenvironmental implications[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, 18(3): 273-279.]
- [32] Cullen H M, deMenocal P B, Hemming S, et al. Climate change and the collapse of the Akkadian empire: Evidence from the deep sea[J]. Geology, 2000, 28(4): 379-382.
- [33] 何鹏, 刘健, 刘斌, 等. 全新世两次典型突变事件下北半球季风降水的变化对比[J]. 第四纪研究, 2019, 39(6): 1372-1383. [He Peng, Liu Jian, Liu Bin, et al. Comparison of changes of northern hemisphere monsoon precipitation between two typical abrupt climate events in Holocene[J]. Quaternary Sciences, 2019, 39(6): 1372-1383.]
- [34] Ran M, Chen L. The 4.2 ka BP climatic event and its cultural responses[J]. Quaternary International, 2019, 521: 158-167.
- [35] 刘浴辉, 孙霞, 郭彩青. 中国全新世 4.2 ka BP 气候事件及其对古文明的影响[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 99-106. [Liu Yuhui, Sun Xia, Guo Caiqing. Records of 4.2 ka BP Holocene event from China and its impact on ancient civilizations[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1): 99-106.]
- [36] Andersen C, Koç N, Jennings A, et al. Nonuniform response of the major surface currents in the Nordic seas to insolation forcing: Implications for the Holocene climate variability[J]. Paleoceanography, 2004, 19(2): PA2003.
- [37] Hong Y T, Hong B, Lin Q H, et al. Correlation between Indian Ocean summer monsoon and North Atlantic climate during the Holocene[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 211(3/4): 371-380.
- [38] 谭亮成, 安芷生, 蔡演军, 等. 4.2 ka BP 气候事件在中国的降雨表现及其全球联系[J]. 地质论评, 2008, 54(1): 94-104. [Tan Liangcheng, An Zhisheng, Cai Yanjun, et al. The Hydrological exhibition of 4.2 ka BP event in China and its global linkages[J]. Geological Review, 2008, 54(1): 94-104.]
- [39] 姚付龙, 马春梅, 敬一丹, 等. 新疆赛里木湖流域表土花粉组合与现代植被关系研究[J]. 微体古生物学报, 2018, 35(4): 423-435. [Yao Fulong, Ma Chunmei, Jing Yidan, et al. Relationship between surface pollen assemblage and the vegetation in the Sayram Lake Region, northern Xinjiang, China[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2018, 35(4): 423-435.]
- [40] 许可可, 杨振京, 宁凯, 等. 中国西北沙漠毗邻区表土花粉与植被和气候的关系: 古气候定量重建的尝试[J]. 沉积学报, 2023, 41(4): 1067-1079. [Xu Keke, Yang Zhenjing, Ning Kai, et al. Relationship between topsoil pollen, vegetation, and climate in desert adjacent areas of northwest China: Implications of palaeoclimate and palaeoecological reconstruction[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(4): 1067-1079.]
- [41] Lan J H, Zhang J, Cheng P, et al. Late Holocene hydroclimatic variation in central Asia and its response to mid-latitude Westerlies and solar irradiance[J]. Quaternary Science Reviews, 2020, 238: 106330.

- [42] 黄小忠. 新疆博斯腾湖记录的亚洲中部干旱区全新世气候变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006: 1-193. [Huang Xiaozhong. Holocene climate variability of arid central Asia documented by Bosten Lake, Xinjiang, China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006: 1-193.]
- [43] 陈发虎, 黄小忠, 杨美临, 等. 亚洲中部干旱区全新世气候变化的西风模式: 以新疆博斯腾湖记录为例[J]. 第四纪研究, 2006, 26(6): 881-887. [Chen Fahu, Huang Xiaozhong, Yang Meilin, et al. Westerly dominated Holocene climate model in arid central Asia: Case study on Bosten Lake, Xinjiang, China[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(6): 881-887.]
- [44] Leroy S A G, Giralt S R. Humid and cold periods in the last 5600 years in Arid Central Asia revealed by palynology of *Picea schrenkiana* from Issyk-Kul[J]. The Holocene, 2021, 31(3): 380-391.
- [45] Ramezani E, Mrotzek A, Marvie Mohadjer M R, et al. Between the mountains and the sea: Late Holocene Caspian Sea level fluctuations and vegetation history of the lowland forests of northern Iran[J]. Quaternary International, 2016, 408: 52-64.
- [46] 郭超, 马玉贞, 李金凤. 中国及周边地区中晚全新世湿度演化及其可能机制[J]. 第四纪研究, 2022, 42(4): 1058-1077. [Guo Chao, Ma Yuzhen, Li Jinfeng. Mid-to Late Holocene moisture evolution in China and surroundings: Spatial patterns and possible mechanisms[J]. Quaternary Sciences, 2022, 42(4): 1058-1077.]
- [47] 钟巍, 舒强, 熊黑钢. 塔里木盆地南缘尼雅剖面的孢粉组合与环境[J]. 地理研究, 2001, 20(1): 91-96. [Zhong Wei, Shu Qiang, Xiong Heigang. Pollen assemblages of Niya section in southern Xinjiang and paleoenvironmental evolution[J]. Geographical Research, 2001, 20(1): 91-96.]
- [48] 段晓红, 张芸, 杨振京, 等. 新疆石河子蘑菇湖湿地 4800 年以来的环境演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(4): 203-211. [Duan Xiaohong, Zhang Yun, Yang Zhenjing, et al. Environmental evolution of the Moguhu Wetland of Shihezi city in Xinjiang since 4800 cal.a BP[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(4): 203-211.]
- [49] 新疆社会科学院考古研究所. 新疆考古三十年[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1983: 1-796. [Institute of Archaeology, Xinjiang Academy of Social Sciences. Thirty years of Xinjiang archaeology[M]. Urumqi: Xinjiang People's Press, 1983: 1-796.]
- [50] Sorrel P, Popescu S M, Klotz S, et al. Climate variability in the Aral Sea Basin (Central Asia) during the Late Holocene based on vegetation changes[J]. Quaternary Research, 2007, 67(3): 357-370.
- [51] Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. Astronomy & Astrophysics, 2004, 428(1): 261-285.

## Middle and Late Holocene Vegetation and Climate Change in the Intermountain Basin of the Middle Tianshan Mountains

SU ZhanYi, YAO FuLong, XIA QianQian, HU XiaoFeng

Institute of Resources and Ecology/College of Resources and Environmental Sciences, Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000, China

**Abstract:** [Objective] The Tianshan Mountains in Xinjiang are located in the inner part of the Asia-Europe continent in the transition zone between the westerly and monsoon circulations. They are sensitive to climate change. Researchers remain divided on the Holocene environmental evolution in the region, and supplementing more high-resolution climatic records in the sensitive areas is the basis for clarifying this issue. [Methods] Samples were taken from the Middle Tien Shan Intermountain Basin, and we reconstructed the vegetation and climate change processes in the study area since the Middle and Late Holocene based on the AMS<sup>14</sup>C dating results and using sporadic pollen as a paleoclimate proxy. [Results and Discussions] From 6369–3601 cal yr B.P.: The period of Artemisia and Chenopodium was characterized by high content, positive pollen principal component analysis (PCA) axis 1 scores, and wet-dry fluctuations in the climate, with dryness as the dominant factor and abrupt climate change. From 3601–2512 cal yr B.P.: The period of spruce Picea content was characterized by elevated content, positive pollen PCA axis 2 scores, and a cold-wet climate. From 2512–1016 cal yr B.P.: The period of Betula was characterized by increased content, positive pollen PCA axis 1 transition scores, and a warm

dry climate. **[Conclusion]** The three pollen zones indicate that the Middle and Late Holocene climate in the Zhongtianshan Intermontane Basin went through three phases of wet-dry fluctuations (off-dry)-cold-wet-warm-dry. Since the Middle to Late Holocene, the study area has received less solar radiation in summer, weak evaporation from the North Atlantic sea surface, and low water vapor carried by the westerly circulation; thus, the climate has been arid. In the early Late Holocene, the westerly circulation shifted to the south. The superimposed negative phase of the North Atlantic Oscillation (NAO) transported large amounts of water vapor, and the climate was cold and humid. Then, the climate became warm and dry owing to the increase of solar radiation in the late winter. The abrupt climate change characterized by cold and dry conditions during 4766–3601 cal yr B.P. was a response to the “4.2 ka B.P.” climatic event, which may have been caused by the weakening of the westerly circulation due to the weakening of solar radiation, the intensification of the cold in the middle and high latitudes, and the lowering of the sea surface temperature in the North Atlantic Ocean.

**Keywords:** pollen; Middle-Late Holocene; middle Tianshan Mountains; vegetation; climate

