



基于孢粉定量重建的阿尔泰山过去两千年降水变化

李月静, 张样洋, 李耀明, 张东良

Quantitative reconstruction of precipitation changes in the Altai Mountains over the past two thousand years based on pollen analysis

LI Yuejing, ZHANG Yangyang, LI Yaoming, and ZHANG Dongliang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024041701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

福建琅岐岛表土孢粉与植硅体组合对农业活动的指示

Pollen and phytolith assemblages in topsoil as indicators of agricultural activities in Langqi Island, Fujian Province

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(1): 55-66

2.5 Ma以来中国陆地孢粉记录反映的古气候变化

Climate changes on Chinese continent since 2.5 Ma: Evidence from fossil pollen records

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 175-191

湖相介形类壳体微量元素在古环境重建中的应用

Trace elements in non-marine Ostracods and their application to paleoenvironment reconstruction

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 192-199

全新世以来福建宁德地区环境演变及人类活动的孢粉记录

Palynological evidence for palaeoenvironmental change and human activity in Ningde of Fujian Province during Holocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 170-181

东海嵎山岛末次冰期黄土有机碳同位素特征及其古环境意义

Characteristics of organic carbon isotope and the paleoenvironmental significances of loess in Shengshan Island during the Last Glacial Period

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(1): 159-169

赣中玉华山泥炭地沉积来源的粒度端元法分析与2 000 aBP以来气候环境重建

Climatic and environmental changes since 2 kaBP by End Member Modeling analysis on grain size data from a peat core of Yuhua Mountain, Jiangxi Province

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 165-173



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李月静, 张样洋, 李耀明, 等. 基于孢粉定量重建的阿尔泰山过去两千年降水变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(3): 157-165.
LI Yuejing, ZHANG Yangyang, LI Yaoming, et al. Quantitative reconstruction of precipitation changes in the Altai Mountains over the past two thousand years based on pollen analysis[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(3): 157-165.

基于孢粉定量重建的阿尔泰山过去两千年降水变化

李月静^{1,2,3}, 张样洋⁴, 李耀明^{1,2,3}, 张东良^{1,2,3}

- 中国科学院新疆生态与地理研究所, 干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室, 乌鲁木齐 830011
- 中国科学院中亚生态与环境研究中心, 乌鲁木齐 830011
- 中国科学院大学, 北京 100049
- 河南大学地理科学学院, 开封 475004

摘要: 为预测未来新疆降水趋势, 更好地了解区域长时间尺度降水变化特征是当前古环境研究的关注点。本文基于新疆北部 88 cm 玉什库勒泥炭岩芯孢粉数据和收集附近 800 km 范围内 627 个现代表土孢粉, 利用现代类比 (MAT) 方法, 定量重建了阿尔泰山过去 2 000 a 的降水量变化。结果显示, 玉什库勒降水量范围为 132~300 mm, 0—1010 AD 为湿润时期 (平均为 224 mm), 1010—2020 AD 为变干时期 (平均为 182 mm), 其中最高降水量出现在约 750 AD (300 mm), 最低降水量出现在约 1910 AD (132 mm)。结合阿尔泰山树轮记录的气温数据, 过去 2 000 a 水热模式呈现了暖湿-冷湿-暖干-冷干-暖湿的演变过程, 该变化过程受到 NAO 和太阳辐射变化引起的西风带南移影响。本研究有助于我们更深入地理解阿尔泰山气候变化机制和规律, 为未来的气候预测提供重要参考。

关键词: 孢粉; 定量重建; 降水; 过去 2 000 a; 阿尔泰山

中图分类号: P532

文献标识码: A

DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2024041701](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024041701)

Quantitative reconstruction of precipitation changes in the Altai Mountains over the past two thousand years based on pollen analysis

LI Yuejing^{1,2,3}, ZHANG Yangyang⁴, LI Yaoming^{1,2,3}, ZHANG Dongliang^{1,2,3}

- State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China
- Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China
- University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
- College of Geography Science, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: To predict future precipitation trends in Xinjiang, better understanding the regional precipitation on long time scales is important for the regional paleoenvironmental research. The precipitation changes in the Altai Mountains over the past 2 000 years were quantitatively reconstructed based on palynological data from the Yushekule Peat that collected from an 88 cm long drill core at the south piedmont of the Altai Mountains in north Xinjiang and 627 modern topsoil samples collected in nearby 800 km-ranged areas using a modern analogue technique (MAT) method. Results show that the precipitation in the Yushekule Peat fluctuated between 132 mm and 300 mm, from a wet period (ca. 224 mm) during 0—1010 AD to a dry period (ca. 182 mm) during 1010—2000 AD. The maximum precipitation occurred at 750 AD (ca. 300 mm) and the minimum at 1910 AD (ca. 132 mm). Combined with the temperature data recorded in tree ring in the Altai Mountains, the hydrothermal model in the past 2000 years demonstrated an evolution process from warm-wet, cold-wet, warm-dry, cold-dry, to warm-wet under the influence of the southward shift of westerlies caused by NAO and solar radiation changes. This study contributes to a deeper understanding of the mechanisms and patterns of climate change in the Altai Mountains, and provides an important reference for future climate prediction.

Key words: pollen and spore; quantitative reconstruction; precipitation; past 2000 years; Altai Mountains

资助项目: 中国科学院青年创新促进会项目“新疆萨乌尔山泥炭发育特征及其区域环境演变”(2022447)

作者简介: 李月静 (1998—), 女, 硕士研究生, 资源与环境专业, E-mail: liyuejing22@mailsucas.ac.cn

通讯作者: 张东良 (1990—), 男, 副研究员, 主要研究干旱区古环境与古生态, E-mail: zhdl@ms.xjb.ac.cn

收稿日期: 2024-04-17; 改回日期: 2024-07-06. 文凤英编辑

位于西北干旱区的新疆,现代气候受西风系统和东亚冬季风系统的共同调控^[1-2]。随着全球变暖(尤其是最近几十年来),在新疆以夏季降水为主的区域,降水量普遍增加,甚至出现强夏季暴雨^[3],这对当地的生态环境和居民生活产生了重大影响。因此,了解新疆长时间尺度降水变化,对理解现代西风影响降水的特征和预测未来降水的趋势具有重要的参考意义。

目前对新疆及其周边过去千年气候变化的研究主要基于树轮^[4-5]、冰芯^[6]、湖泊沉积物^[7-8]和风沙沉积^[9]。然而,不同指标得出的结论对气候变化与控制机制间关系的解释存在差异。Chen^[10]等通过评估过去千年区域有效湿度变化发现,有效湿度与温度在百年时间尺度上负相关,即湿(干)气候与冷(暖)特征。这种“冷湿/暖干”模式得到了塔里木盆地^[11]和玛纳斯湖^[12]的数据支持。但咸海沉积记录^[13]表明,在小冰期进入中亚的水汽少于中世纪暖期,即呈现“冷干/暖湿”模式,并得到了来自西伯利亚南部基于阿米巴虫重建的地下水位深度记录的支持^[14]。

可见,关于新疆及其周边湿度特征仍存在明显的争论,这可能归咎于区域湿度受到气温和降水的

双重调控^[15]和缺乏对区域降水的定量重建。因此,本文利用已报道的玉什库勒泥炭孢粉资料^[16]对过去 2 000 年降水变化进行定量重建,期望该工作可以加深对阿尔泰山过去 2 000 年降水量特征及其驱动因素的理解。

1 研究区概况

玉什库勒泥炭(46°45′~46°57′N、90°46′~90°61′E,海拔 2 374 m)位于新疆北部青河县东北 44 km,发育于冰川作用形成的 U 形谷底部,是小青格里河的发源地(图 1)。该泥炭的地下水位深约 0.5 m,以降水和积雪融水为主要补给^[17]。现代植物种类主要有帕米尔苔草、阿尔泰苔草、灰藓等^[18]。玉什库勒泥炭表层 10 cm 有机质含量高达 90% 以上,整体呈酸性^[18]。研究区现代气候为温带大陆性气候。根据青河气象站记录,年均气温为-0.2℃,最冷和最热的月份分别是 1 月(-23.5℃)和 7 月(18.5℃);年均降水量为 177.7 mm,暖季(4—9 月)降水量占年均降水量的 61%,冷季(10 月至次年 3 月)降水量占 39%^[15]。

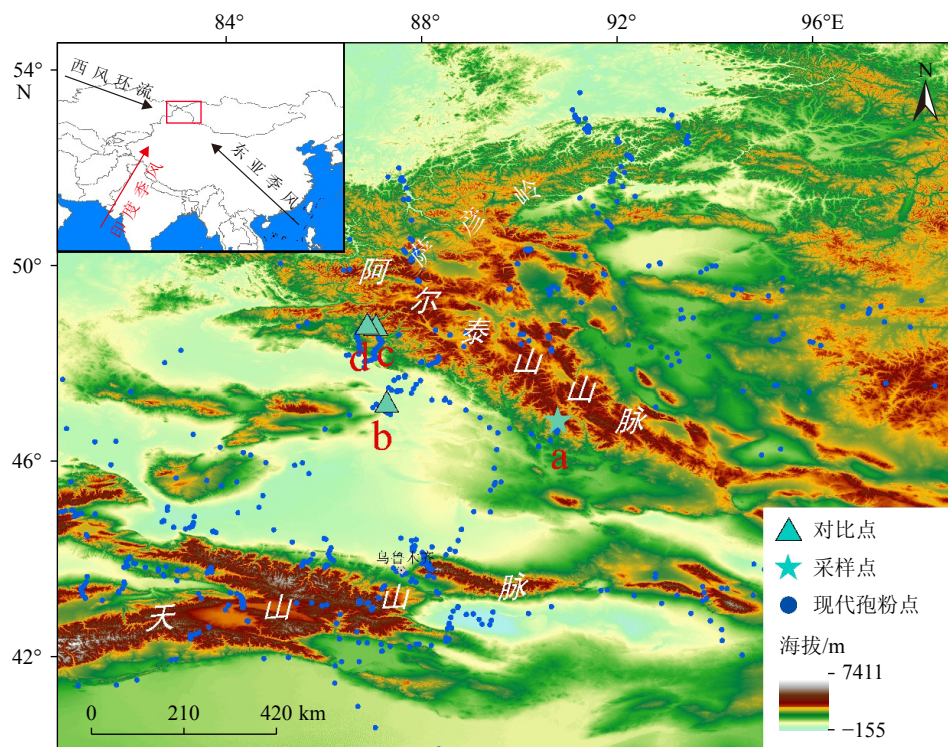


图 1 玉什库勒泥炭地理位置及其文中提及的研究点

a: 玉什库勒泥炭, b: 乌伦古湖^[19], c: 喀纳斯湖^[20], d: 娜仁夏泥炭^[21]。

Fig.1 Geographic location of Yushenkule Peat and the sites mentioned in this study

a: Yushenkule Peat, b: Wulungu Lake^[19], c: Kanas Lake^[20], d: Narenxia Peat^[21].

2 材料与方法

2.1 采样和测年

在玉什库勒泥炭(46°49'N、90°52'E, 海拔 2636 m)获得长度为 88 cm 的岩芯, 按照 1 cm 间隔分样, 共获得 88 个样品。以 10 cm 间隔挑选植物残体作为测年材料, 送至亚利桑那大学 AMS ¹⁴C 实验室进行年代的测试, 相关结果见表 1^[15]。在 R 软件中调用 Bacon 程序建立深度-年龄模型^[22](图 2)。

2.2 孢粉分析

实验室孢粉提取采用常规的 HCl-NaOH-HF 处

表 1 玉什库勒泥炭 AMS¹⁴C 测年结果^[15]

Table 1 AMS¹⁴C dating results of the Yushenkule Peat^[15]

实验室代码	深度/cm	测年材料	¹⁴ C 年龄/a BP
AA104612	20	植物残体	477±39
AA104613	30	植物残体	811±39
AA104614	40	植物残体	1108±39
AA104615	50	植物残体	1176±40
AA104616	60	植物残体	1546±41
AA104617	70	植物残体	1558±58
AA104618	80	植物残体	1951±40

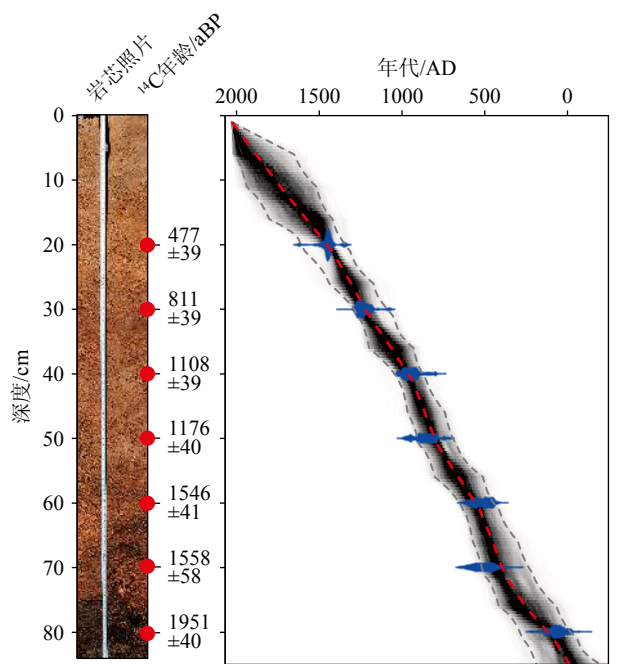


图 2 玉什库勒的深度-年代模型^[15]

Fig.2 Depth-age model for the Yushenkule Peat^[15]

理法^[23], 在 OlympusBX-53 光学显微镜下开展孢粉的鉴定和统计工作, 每个样品统计至少 600 粒陆生孢粉^[16], 记录所出现的石松孢子数。在计算花粉百分含量时, 以陆生花粉分类群的总和作为分母, 蕨类孢子的百分比则根据陆生孢粉与蕨类孢子的总和计算。得出孢粉百分比后, 用 Tilia1.7.16 软件绘制孢粉图, 并对其进行有序聚类分析(CONISS), 为花粉分区提供参考^[16]。需要注意的是, 因本剖面莎草科(Cyperceae)是湿地局地生长的植被, 在定量重建时去除莎草科重新计算了孢粉百分比。

2.3 基于孢粉的定量重建

基于花粉的气候定量重建的可靠性取决于现代花粉校准集的质量^[24-27]。为确保重建结果的可信度, 需要考虑 3 点: ① 现代花粉数据集包含足够和均匀分布的采样点; ② 从总体中选择现代花粉数据的适当“范围策略”; ③ 现代花粉数据集生物气候变化具有良好的代表性。为保证重建的可信度, 本研究从东亚孢粉数据集和中国现代孢粉数据集中选择用于古气候重建的现代孢粉数据集^[28-29], 采用基于半径距离的筛选策略充分选择现代孢粉数据点^[27]。

本文收集了研究区 800 km 范围内的现代表土花粉作为气候-花粉校准集, 该校准集由 627 个样本和 115 个花粉物种组成, 涵盖了现代生物气候空间范围, 这些空间范围涵盖了玉什库勒过去 2 000 年生物气候时空范围。通过设置气候变量的上限和下限, 确保堆叠花粉数据集中生物气候变量的良好代表性^[19]。本文筛选现代花粉点的气候变量的上限和下限设定为: 年均降水量(P_{ann}): 36~596 mm; 年均温(T_{ann}): -9.96~9.92 °C; 最冷月平均气温(T_{min}): -15.96~4.28 °C; 最热月平均气温(T_{max}): -3.96~17.1 °C。通过 ArcGIS10.2 软件, 从 WorldClim 数据集(第二版)(<http://www.worldclim.org>)获取现代花粉点的气候信息。

排序技术通过计算气候因子对花粉种群变化的解释量来评估用于重建的气候变量的适用性^[19]。首先, 对校准集中的花粉组合做去趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)。当 DCA 第一梯度轴的长度>4 时, 基于正态分布的典型对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)更适合评估气候因子与花粉组合的关系; 当 DCA 第一梯度轴的长度<3 时, 基于线性分布模型的冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)则更为适合; 当 DCA 第一梯度轴的长度为 3~4 时, 两者皆可^[19]。对于每个气候变量, 用约束特征值与第一个无约束

特征值的比值(λ_1/λ_2)来评估气候变量是否适合重建。一般来说,比值越高,气候变量越适合重建^[30]。

匹配度检验法被用来评估重建模型的可信度,是通过计算每个化石孢粉组合与现代孢粉组合之间的平方弦距离来评估二者之间的匹配度^[31]。当平方弦距离 $<5\%$ 时,说明两者之间有“良好的类比型”;当平方弦距离 $>5\%$ 且小于 10% 时,表明该化石孢粉样品在现代校准集中“有类比型”,反之则认为是“无类比型”^[32]。用预测值与实测值的决定系数 R^2 和预测的均方根误(Root Mean Squared Error of Prediction, RMSEP)^[31]评价模型性能。其中, R^2 值越大, RMSEP 越小,模型的性能越好。

3 结果

3.1 孢粉记录的重述

Zhang 等^[16]对玉什库勒泥炭孢粉数据进行了详细描述。在所分析的 88 个样品中,共鉴定出 55 种不同陆生化石孢粉,包括 15 种木本孢粉(主要为松属(*Pinus*)、落叶松属(*Larix*)和桦木属(*Betula*))和 40 种草本孢粉(主要为莎草科(*Cyperaceae*)、禾本科(*Poaceae*)、蒿属(*Artemisia*)、藜科(*Chenopodiaceae*)和石竹科(*Caryophyllaceae*))。根据孢粉组合变化和 CONISS 分析结果,玉什库勒泥炭孢粉记录可以分为 5 个孢粉带(图 3)。

孢粉带 A(83~62 cm; 12—520 AD)以草本植物为主,包括莎草科(64.81%~84.99%)、蒿属(6.67%~15.44%)、禾本科(1.85%~9.81%)和藜科(0.72%~6.16%),木本孢粉含量较少(1.06%)。

孢粉带 B(61~43 cm; 520—900 AD)相对于孢粉带 A,莎草科孢粉含量降低(51.46%)、禾本科(25.16%)和石竹科(2.01%)孢粉含量增加。

孢粉带 C(42~29 cm; 900—1230 AD)的特征是松属(0.28%)、落叶松属(0.26%)和云杉属(*Picea*, 0.23%)孢粉含量增加,但仍以莎草科植物为主。

孢粉带 D(28~15 cm; 1230—1580 AD)与上一个孢粉带相比,莎草科(61.59%)孢粉含量降低,蒿属(20.32%)、禾本科(7.65%)、藜科(4.97%)、松属(0.57%)、落叶松属(0.45%)以及云杉属(0.37%)孢粉含量增加。

孢粉带 E(14~1 cm; 1580—2020 AD)的特征是木本孢粉达到最大值(1.93%),蒿属(30.79%)、藜科(6.03%)、禾本科(11.04%)、石竹科(1.38%)孢粉含量持续增加,而莎草科孢粉含量(46.04%)持续减少。

3.2 定量重建的可行性

根据排序分析, DCA 的第一轴长度为 3 SD(标准差单位)。选择 CCA 对现代表土花粉组合与现代气象因子进行分析。使用方差膨胀因子(Variance Inflation Factors, VIF)检验环境变量之间的共线性,

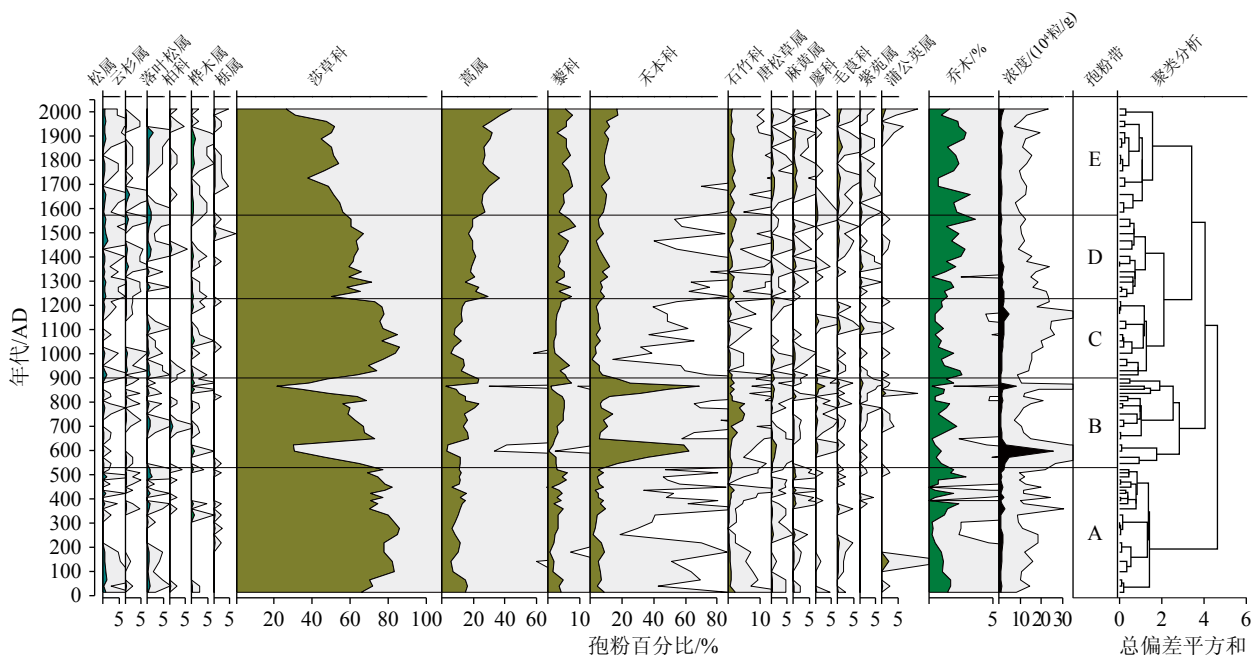


图 3 玉什库勒泥炭孢粉图^[16]

Fig.3 Pollen distribution in the Yushenkule Peat^[16]

表 2 典型对应分析 (CCA) 与现代孢粉数据的统计和 4 个气候变量的统计汇总

Table 2 Statistics of canonical correspondence analysis (CCA) and modern pollen data, and four climatic variables for the Yushenkule Peat sequence

气候变量	VIF(含 T_{ann})	VIF(不含 T_{max})	VIF(不含 T_{min})	VIF(不含 T_{ann})
P_{ann}	1.83	1.66	1.66	1.82
T_{min}	71 037.7	101.55		19.14
T_{max}	88 268.9		103.79	22.29
T_{ann}	312 085.7	107.37	98.34	

结果如表 2 所示: 校准集中的 T_{ann} 与 T_{max} 、 T_{min} 显著相关; 在分别排除 T_{max} 和 T_{min} 后, T_{max} 和 T_{min} 气候参数的 VIF 值均大于 30; 在排除 T_{ann} 后, 校准集中的 P_{ann} 、 T_{max} 和 T_{min} 的 VIF 值均小于 30, 这表明共线性的影响已经大大降低。因此, T_{ann} 被排除在重建之外。CCA 轴 1 (6.55%) 和轴 2 (1.59%) 解释了 8.14% 的 3 个气候变量花粉组合之间的变异。花粉分类群与气候变量主要分布在轴 1 上, P_{ann} 与轴 1 之间的夹角较小 (λ_1/λ_2 值较大), 表明 P_{ann} 是重建的最佳变量 (图 4a)。

显著性检验 (96.5%) 结果表明, 重建的 P_{ann} 超过了预期的 95% 显著性水平 (图 4b)。该模型具有较高的 R^2 (0.52) 和相对较低的 RMSEP (90.29) (图 5)。另外, 用平方弦距离法对校准集做相似性检验 (图 6b), 结果显示 98.8% 的化石孢粉组合的平方弦距离 < 5%, 具有较好的现代相似性, 1.2% 的化石孢粉组合的现代相似性较差, 其平方弦距离为 5%~10%, 较差的相似性发生在约 150 AD; 其中蓝色和红色竖线分别表示 5% 分位数和 10% 分位数。综上所述, 该模型适用于降水量的定量重建。

3.3 孢粉定量重建结果

基于玉什库勒泥炭定量重建结果如图 6a 所示, 降水量在 132~300 mm 之间波动, 其均值为 205 mm。玉什库勒降水量的变化趋势特征划分为两个阶段: 第 I 阶段 (0—1010 AD) 平均降水量高, 上下波动幅度大, 呈不显著下降; 第 II 阶段 (1010—2020 AD) 降水量显著下降。这两个阶段可细分 5 个亚阶段: 第 1 阶段 (0—500 AD) 的变化特征是平均高降水量和高振幅波动且基本保持不变; 第 2 阶段 (500—1010 AD) 的降水量最高 (平均值 228 mm), 且波动频率小于上一阶段 (0—500 AD), 在约 750 AD 降水量出现最大值 (约 300 mm)。第 3 阶段 (1010—1300 AD) 降水量下降, 平均值为 189 mm; 第 4 阶段

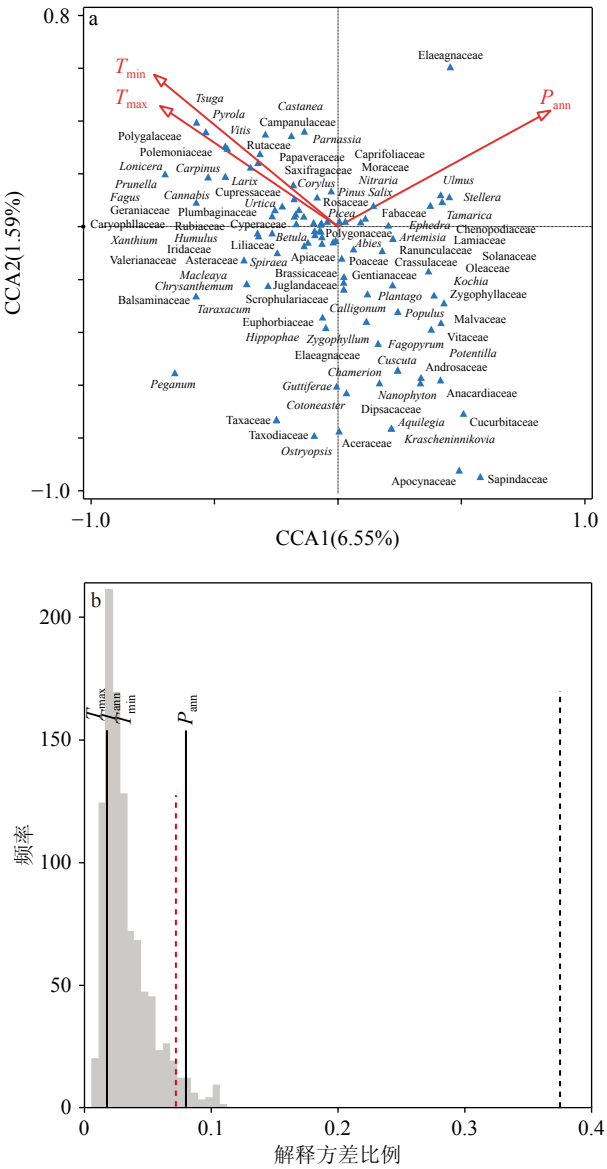


图 4 典型对应分析 (CCA) 轴显示孢粉分类群和 3 个气候变量 (a) 与 YSKL 序列气候重建的统计显著性检验 (b)

Fig.4 Axes of canonical correspondence analysis (CCA) showing the relationships between pollen taxa and four climatic variables (a) for the Yushenkule Peat and statistical significance test of climatic reconstructions of Yushenkule Peat sequence using the MAT method (b)

(1300—1600 AD) 降水量高于前一个阶段, 平均值为 197 mm; 第 5 阶段 (1600—2020 AD) 是过去两千年降水量最少的阶段 (约 165 mm), 近 200 年降水量有所回升。

4 讨论

4.1 区域对比

基于玉什库勒孢粉定量重建降水量结果显示:

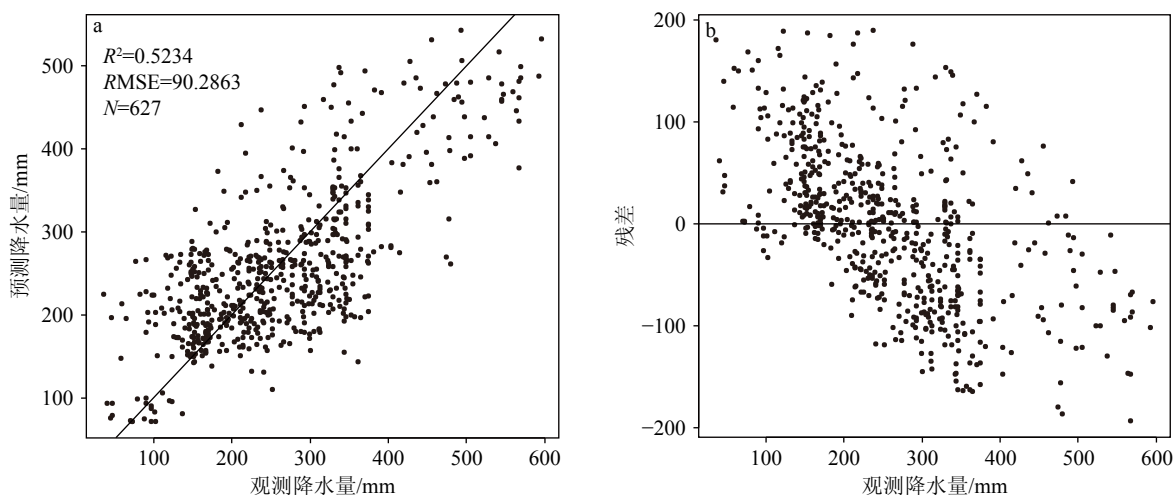


图 5 玉什库勒泥炭 P_{ann} 的观测值 (a) 与预测值的散点图 (b)

Fig.5 Scatter plots of observed P_{ann} (a) vs. predicted P_{ann} (b) for the Yushenkule Peat

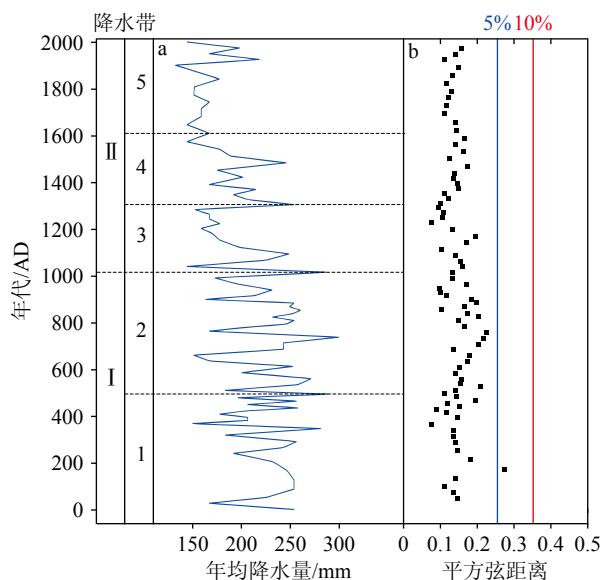


图 6 基于孢粉的降水量重建结果 (a) 与从每个化石组合到最近的现代类似物的平方弦距离 (b)

Fig.6 Quantitative reconstruction of precipitation (a) and squared chord distances from each fossil assemblages to the nearest modern analogues (b) based on palynological data

0—1010 AD 降水量较高, 年均降水量为约 225 mm; 1010—2000 AD 降水量降低, 平均值为约 183 mm, 记录了阿尔泰山过去 2 000 a 降水量逐渐降低的变化特征(图 7a), 该特征得到了乌伦古湖^[19](图 7d)、喀纳斯湖^[20](图 7e)、娜仁夏泥炭^[21](图 7f)以及区域模拟^[33]降水量的支持。Zhang^[16]等和 Yang^[15]等分别对玉什库勒泥炭进行孢粉主成分分析(PCA)(图 7b)和泥炭沉积中 $\delta^{13}C$ (图 7c)进行研究, 结果同样揭示了阿尔泰山过去 2 000 a 气候变干的趋势。

结合阿尔泰山树轮所记录的气温序列^[4]可以发

现, 罗马暖期(RWP, 0—500 AD)降水量和温度均处于较高状态, 该时期的气候特征为“暖湿”。进入黑暗时代冷期(DACP, 500—800 AD), 气候转为“冷湿”。中世纪暖期(MWP, 800—1400 AD)降水量降低, 气候是“暖干”的。小冰期(LIA, 1400—1850 AD)降水量较低, 温度降低, 气候特征可以描述为“冷干”。现代暖期(CWP, 1850 年至今)温度和降水量均持续上升, 气候由“冷干”转向“暖湿”。可见, 过去 2 000 a 水热模式呈现了暖湿-冷湿-暖干-冷干-暖湿的演变过程, 呈现既不符合“暖干-冷湿”模式, 又不符合“暖湿-冷干”的模式。

4.2 驱动机制

基于玉什库勒泥炭孢粉定量重建的降水量, 不仅与区域记录的降水量重建(图 7)显示出一致性, 还与来自欧洲的树轮和海洋沉积记录显示出同步变化^[34-35]。这种一致性促使我们研究水汽通过西风环流从欧洲穿过欧亚大陆达到新疆的路径以及其与北大西洋涛动(NAO)的关系。但当前关于 NAO 和区域降水量的关系有两种观点, 第一种观点认为 NAO 正相(即亚速尔高压和冰岛低压之间的气压差增加)有利于新疆降水增加^[8], 另一种认为负相 NAO(即亚速尔高压和冰岛低压之间的气压差降低)有利于新疆降水增加^[36]。

通过与来自特隆赫姆斯峡湾记录的初级生产力所记录的高质量 NAO 指数^[35]对比可以看出, 在 0—1010 AD 期间, 区域降水特征与 NAO 指数在百年尺度上具有正向关系(图 7g), 这表明 NAO 正相驱动了区域降水量的增加。从机理角度来说, 当 NAO 正相时, 亚速尔群岛高压和冰岛低压之间的海

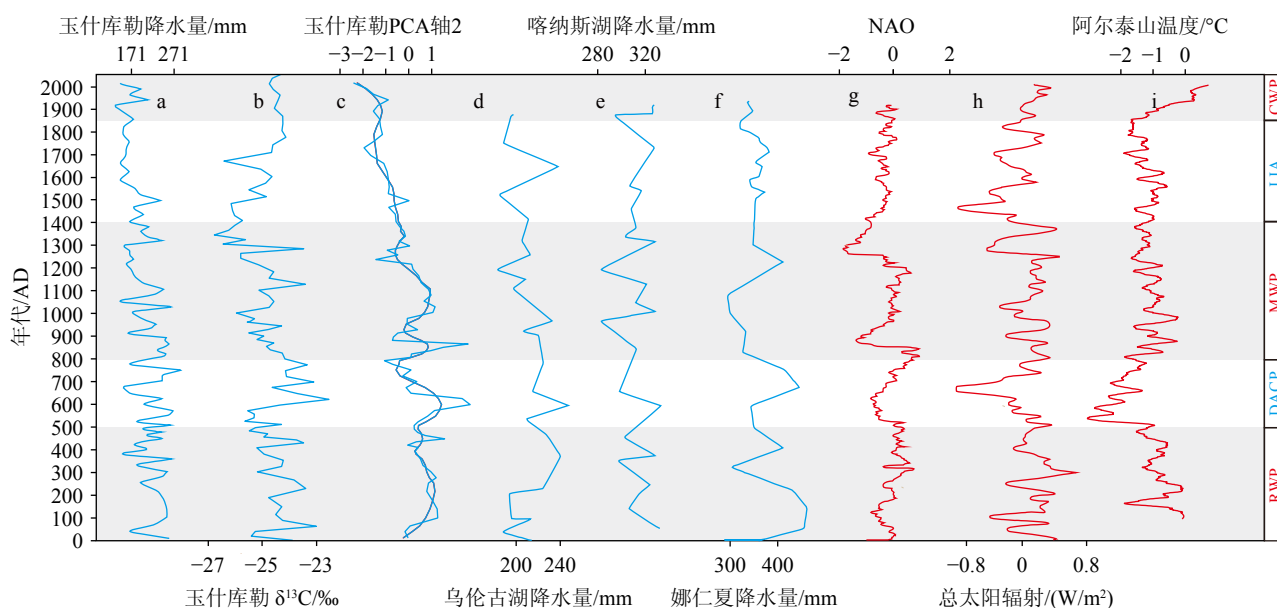


图 7 阿尔泰山南部降水量序列对比

a: 玉什库勒年均降水量(本研究), b: 玉什库勒 $\delta^{13}\text{C}$ 含量^[15], c: 玉什库勒 PCA 轴 2^[16], d: 乌伦古湖降水量^[19], e: 喀纳斯湖降水量^[20], f: 娜仁夏降水量^[21], g: 北大西洋涛动^[35], h: 总太阳辐射^[37], i: 阿尔泰山温度^[4]。

Fig.7 Comparison of the precipitation sequence in the southern Altai Mountains

a: Precipitation in the Yushenkule Peat (this study), b: $\delta^{13}\text{C}$ -indicated moisture in the Yushenkule Peat^[15], c: PCA axis 2 in the Yushenkule Peat^[16], d: precipitation in the Wulungu Lake^[19], e: precipitation in the Kanas Lake^[20], f: precipitation in the Narenxia Peat^[21], g: NAO^[36], h: total solar irradiance^[37], i: temperature data in the Altai Mountains^[4].

平面压强增加,使更多的水汽通过西风环流输送到阿尔泰山。加上较高的总太阳辐射^[37]驱动西风环流强度和北大西洋蒸发水汽的增加,为中纬度地区提供更多的水汽,导致阿尔泰山降水量增加。

1010 AD 之后,降水量变化与 NAO 的关系变得不明晰,甚至在多世纪尺度上显示出负相关关系(图 7g),这可能与总太阳辐射减弱及其关联的区域水汽循环变化有关(图 7h)。详细来说,过去千年总太阳辐射有所减弱,引起中纬度西风带强度下降,且引起西风带南移^[38],导致更少的水汽被输送至阿尔泰山。尽管该时段厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)强度增加,增强的 ENSO 导致中亚低压槽的发生,导致来自阿拉伯海的水汽供应增加,使得阿尔泰山降水量增加^[21, 39]。但 ENSO 输送的水汽通量有限,并未很好的弥补西风带南移所造成的区域降水量下降。可见,过去两千年阿尔泰山降水量受到 NAO、总太阳辐射和 ENSO 等因素共同作用的影响。

5 结论

(1) 阿尔泰山过去 2 000 a 降水量最大值为 300 mm, 最小值为 132 mm, 其均值为 205 mm。过去 2 000 a 可分为湿润的 0—1010 AD(降水量约

224 mm)和偏干的 1010—2000 AD(降水量约 182 mm)。最大降水量出现在 600—800 AD, 年均量为 288 mm。最小降水量出现在 1500—2000 AD, 年均量为 162 mm。

(2) 过去 2 000 a 水热模式呈现了暖湿-冷湿-暖干-冷干-暖湿的演变过程, 该变化过程与 NAO、太阳辐射变化引起的西风带的南移密切相关。

参考文献 (References)

- [1] Tarasov P, Dorofeyuk N, Tseva E M. Holocene vegetation and climate changes in Hoton-Nur Basin, northwest Mongolia[J]. *Boreas*, 2000, 29(2): 117-126.
- [2] Rudaya N, Tarasov P, Dorofeyuk N et al. Holocene environments and climate in the Mongolian Altai reconstructed from the Hoton-Nur pollen and diatom records: a step towards better understanding climate dynamics in Central Asia[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(5-6): 540-554.
- [3] Chen F H, Chen J H, Huang W et al. Westerlies Asia and monsoonal Asia: spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 192: 337-354.
- [4] Büntgen U, Myglan V S, Ljungqvist F C et al. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(3): 231-236.
- [5] Fang K Y, Davi N, Gou X H et al. Spatial drought reconstructions for

- central High Asia based on tree rings[J]. *Climate Dynamics*, 2010, 35(6): 941-951.
- [6] Aizen V B, Aizen E M, Joswiak D R et al. Climatic and atmospheric circulation pattern variability from ice-core isotope/geochemistry records (Altai, Tien Shan and Tibet)[J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 43: 49-60.
- [7] Li Y, Qiang M R, Zhang J W et al. Hydroclimatic changes over the past 900 years documented by the sediments of Tiewaike Lake, Altai Mountains, Northwestern China[J]. *Quaternary International*, 2017, 452: 91-101.
- [8] Chen F H, Huang X Z, Zhang J W et al. Humid little ice age in arid central Asia documented by Bosten Lake, Xinjiang, China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(12): 1280-1290.
- [9] Liu W G, Liu Z H, An Z S et al. Wet climate during the 'Little Ice Age' in the arid Tarim Basin, northwestern China[J]. *The Holocene*, 2011, 21(3): 409-416.
- [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] Putnam A E, Putnam D E, Andreu-Hayles L et al. Little Ice Age wetting of interior Asian deserts and the rise of the Mongol Empire[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 131: 33-50.
- [12] Song M, Zhou A F, Zhang X N et al. Solar imprints on Asian inland moisture fluctuations over the last millennium[J]. *The Holocene*, 2015, 25(12): 1935-1943.
- [13] Huang X T, Oberhänsli H, von Suchodoletz H et al. Dust deposition in the Aral Sea: implications for changes in atmospheric circulation in central Asia during the past 2000 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(25-26): 3661-3674.
- [14] Willis K S, Beilman D, Booth R K et al. Peatland paleohydrology in the southern West Siberian Lowlands: comparison of multiple testate amoeba transfer functions, sites, and *Sphagnum* $\delta^{13}\text{C}$ values[J]. *The Holocene*, 2015, 25(9): 1425-1436.
- [15] Yang Y P, Zhang D L, Lan B et al. Peat $\delta^{13}\text{C}_{\text{cellulose}}$ -signified moisture variations over the past ~2200 years in the southern Altai Mountains, northwestern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 174: 59-67.
- [16] Zhang D L, Yang Y P, Ran M et al. Vegetation dynamics and its response to climate change during the past 2000 years in the Altai Mountains, northwestern China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2022, 16(2): 513-522.
- [17] 兰波. 过去 2 000 a 新疆北部的湿度变化及其控制机理 [D]. 中国科学院新疆生态与地理研究所博士学位论文, 2017. [LAN Bo. Moisture variations in northern Xinjiang and the modulating mechanisms during past 2000 years[D]. Doctor Dissertation of Xinjiang Institute of Ecology and Geography Chinese Academy of Sciences, 2017.]
- [18] 努尔巴依·阿布都沙力克, 叶勒波拉提·托流汉, 孔琼英. 阿勒泰地区沼泽湿地调查研究 [J]. *乌鲁木齐职业大学学报*, 2008, 17(1): 8-13. [Abdusalih N, Tolewhan E, KONG Qiongying. Swamp wetland research in Altay prefecture[J]. *Journal of Urumqi Vocational University*, 2008, 17(1): 8-13.]
- [19] Tian F, Wang W, Rudaya N et al. Wet mid-late Holocene in central Asia supported prehistoric intercontinental cultural communication: clues from pollen data[J]. *CATENA*, 2022, 209: 105852.
- [20] Huang X Z, Peng W, Rudaya N et al. Holocene vegetation and climate dynamics in the Altai Mountains and surrounding areas[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(13): 6628-6636.
- [21] Feng Z D, Sun A Z, Abdusalih N et al. Vegetation changes and associated climatic changes in the southern Altai Mountains within China during the Holocene[J]. *The Holocene*, 2017, 27(5): 683-693.
- [22] Blaauw M. Methods and code for 'classical' age-modelling of radiocarbon sequences[J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5(5): 512-518.
- [23] Faegri K, Kaland P E, Krzywinski K. Textbook of Pollen Analysis[M]. 4th ed. Chichester: Wiley, 1989.
- [24] 王伏雄, 钱南芬, 张玉龙, 等. 中国植物花粉形态 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1995. [WANG Fuxiong, QIAN Nanfen, ZHANG Yulong et al. Pollen Flora of China[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1995.]
- [25] 陈海燕, 徐德宇, 廖梦娜, 等. 中国现代花粉数据集 [J]. *植物生态学报*, 2021, 45(7): 799-808. [CHEN Haiyan, XU Deyu, LIAO Mengna et al. A modern pollen dataset of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(7): 799-808.]
- [26] Cao X Y, Tian F, Ding W. Improving the quality of pollen-climate calibration-sets is the primary step for ensuring reliable climate reconstructions[J]. *Science Bulletin*, 2018, 63(20): 1317-1318.
- [27] Cao X Y, Tian F, Telford R J et al. Impacts of the spatial extent of pollen-climate calibration-set on the absolute values, range and trends of reconstructed Holocene precipitation[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 178: 37-53.
- [28] Cao X Y, Tian F, Herzschuh U et al. Human activities have reduced plant diversity in eastern China over the last two millennia[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(16): 4962-4976.
- [29] Cao X Y, Tian F, Xu Q H et al. Modern pollen dataset for Asia[EB/OL]. (2022-05-21). <https://doi.org/10.11888/Paleoenv.tpdc.272378>.
- [30] Juggins S. Quantitative reconstructions in palaeolimnology: new paradigm or sick science?[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 64: 20-32.
- [31] 崔安宁, 吕厚远, 侯居峙, 等. 青藏高原湖泊纹层孢粉记录在过去 2 000 a 雨季时长和雨季降水时空变化 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(3): 808-820. [CUI Anning, LV Houyuan, HOU Juzhi et al. Spatiotemporal variation of rainy season span and precipitation recorded by lacustrine laminated pollen in the Tibetan Plateau during the past two millennia[J]. *Science China Earth Sciences*, 2024, 67(3): 789-801.]
- [32] 梁琛, 赵艳, 秦锋, 等. 孢粉-气候定量重建方法体系的建立及其应用: 以青藏高原东部全新世温度重建为例 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(7): 977-994. [LIANG Chen, ZHAO Yan, QIN Feng et al. Pollen-based Holocene quantitative temperature reconstruction on the eastern Tibetan Plateau using a comprehensive method framework[J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(8): 1144-1160.]
- [33] Chen F H, Yu Z C, Yang M L et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(3-4): 351-364.

- [34] Büntgen U, Urban O, Krusic P J et al. Recent European drought extremes beyond Common Era background variability[J]. [Nature Geoscience](#), 2021, 14(4): 190-196.
- [35] Faust J C, Fabian K, Milzer G et al. Norwegian fjord sediments reveal NAO related winter temperature and precipitation changes of the past 2800 years[J]. [Earth and Planetary Science Letters](#), 2016, 435: 84-93.
- [36] Xu G B, Liu X H, Qin D H et al. Drought history inferred from tree ring $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the central Tianshan Mountains of China and linkage with the North Atlantic Oscillation[J]. [Theoretical and Applied Climatology](#), 2014, 116(3-4): 385-401.
- [37] Steinhilber F, Beer J, Fröhlich C. Total solar irradiance during the Holocene[J]. [Geophysical Research Letters](#), 2009, 36(19): L19704.
- [38] Lan J H, Xu H, Lang Y C et al. Dramatic weakening of the East Asian summer monsoon in northern China during the transition from the Medieval Warm Period to the Little Ice Age[J]. [Geology](#), 2020, 48(4): 307-312.
- [39] Li W, Mu G J, Lin Y C et al. Abrupt climatic shift at ~ 4000 cal. yr B. P. and late Holocene climatic instability in arid Central Asia: evidence from Lop Nur saline lake in Xinjiang, China[J]. [Science of the Total Environment](#), 2021, 784: 147202.