



## 湖泊沉积物记录的过去两千年青藏高原南部干湿变化及其驱动机制

李秀美, 严涵, 范宝伟, 张辰光, 邢伟

引用本文:

李秀美, 严涵, 范宝伟, 张辰光, 邢伟. 湖泊沉积物记录的过去两千年青藏高原南部干湿变化及其驱动机制[J]. 信阳师范学院学报自然科学版, 2021, 34(4): 584–588. doi: 10.3969/j.issn.1003–0972.2021.04.013

LI Xiumei, YAN Han, FAN Baowei, ZHANG Chenguang, XING Wei. Climatic Changes During the Last Two Millennia on the Southern Tibetan Plateau Based on Lake Sediment and Its Forcing Mechanisms[J]. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 34(4): 584–588. doi: 10.3969/j.issn.1003–0972.2021.04.013

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2021.04.013>

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 青藏高原中西部湖泊生物标志物记录的过去两千年气候变化

Climatic Changes During the Past 2000 Years Based on Lake Biomarkers from the Central and Western Tibetan Plateau

信阳师范学院学报自然科学版, 2019, 32(2): 239–244. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2019.02.012>

#### 1951–2015年信阳极端温度事件变化及其对全球变暖的响应

Study on Extreme Temperature Events in Xinyang During 1951–2015 and Their Response to Climate Change

信阳师范学院学报自然科学版, 2017, 30(1): 82–86. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2017.01.018>

#### 1870年以来河南省年平均气温变化特征

Characteristics of Annual Mean Temperature of Henan Province Since 1870

信阳师范学院学报自然科学版, 2018, 31(3): 432–436. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2018.03.017>

#### 南北过渡带地区浅层地温的全球变化响应——以信阳城区为例

Response of Shallow Ground Temperature in the North–South Transition Zone under Global Warming: A Case Study of Xinyang City

信阳师范学院学报自然科学版, 2019, 32(3): 397–402. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2019.03.010>

#### 公元前221年–公元2000年河南省气象灾害时空分布特征

Spatial–temporal Characteristics of the Meteorological Disasters in Henan Province from BC 221 to AD 2000

信阳师范学院学报自然科学版, 2020, 33(4): 579–585. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2020.04.011>

DOI:10.3969/j.issn.1003-0972.2021.04.013

文章编号:1003-0972(2021)04-0584-05

# 湖泊沉积物记录的过去两千年青藏高原南部 干湿变化及其驱动机制

李秀美<sup>1</sup>, 严 涵<sup>2</sup>, 范宝伟<sup>1\*</sup>, 张辰光<sup>1</sup>, 邢 伟<sup>1</sup>

(1. 信阳师范学院 地理科学学院/豫南岩矿宝石鉴定及加工中心, 河南 信阳 464000;

2. 新疆农业大学 草业与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**基于青藏高原南部过去2000 a高分辨率的降水/湿度重建序列,通过区域对比以及集成分析方法,探讨了青藏高原南部过去2000 a气候干湿变化的时空特征,并对典型时段中世纪暖期(AD 600—1400年)和小冰期(AD 1400—1900年)高原南部气候变化的特征和机制进行了着重探讨。结果显示:整体而言,过去2000 a青藏高原南部气候变化显著,表现出AD 1—600年由湿转干、AD 600—1400年干旱以及AD 1400年后湿润的特征;对比分析表明,青藏高原南部在中世纪暖期和小冰期“暖干”/“冷湿”的特征,与高原东南部以及西北部地区相似,而与高原东部地区相反;过去2000 a青藏高原南部气候干湿变化可能与印度季风和西风强度变化、西风在青藏高原上的季节性移动以及蒸散发强度变化有关。

**关键词:**青藏高原南部;湖泊沉积物;干湿变化;中世纪暖期

**中图分类号:**P467 **文献标识码:**A

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Climatic Changes During the Last Two Millennia on the Southern Tibetan Plateau Based on Lake Sediment and Its Forcing Mechanisms

LI Xiumei<sup>1</sup>, YAN Han<sup>2</sup>, FAN Baowei<sup>1\*</sup>, ZHANG Chenguang<sup>1</sup>, XING Wei<sup>1</sup>

(1. College of Geographic Science/Southern Henan Center for Mineral Rock and Gem-Jade Identification and Processing,

Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China;

2. College of Grassland and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** Based on the high resolution precipitation/moisture series over the Southern Tibetan Plateau in the past two millennia, the spatiotemporal pattern of drought-wet change over the Southern Tibetan Plateau are discussed by regional comparison and integrated analysis. The characteristics and mechanisms of climate change during the two typical periods, i. e. the Medieval Climate Anomaly (MCA, AD 600—1400) and the Little Ice Age (LIA, AD 1400—1900), are discussed emphatically. The results show that climate over the Southern Tibetan Plateau has changed significantly in the past two thousand years. It changed from wet to dry in AD 1—600, keeping dry in AD 600—1400, and then wet after AD 1400. The LIA and MCA climate conditions on the Southern Tibetan Plateau were found to be generally similar to those in the south-eastern and Northwestern Tibetan Plateau areas, but anti-phase with those in the Southwestern and Eastern Tibetan Plateau areas. The variation of dry and wet climate over the Southern Tibetan Plateau in the past two thousand years may be related to the intensity changes of Indian monsoon and westerlies, the seasonal movement of westerly jet over the Tibetan Plateau, and the intensity changes of evapotranspiration.

**Key words:** Southern Tibetan Plateau; lake sediments; dryness change; medieval climate anomaly

### 0 引言

青藏高原被称为“世界屋脊”,位于东亚季风、印度季风和西风环流等大尺度大气环流系统的交

互影响区,因其独特的地形与地理位置被称为全球气候变化的“起动机”与“放大器”,是全球变化研究的重点区域。在季风与西风影响下青藏高原气候变

收稿日期:2020-12-25;修订日期:2021-08-24;\*. 通信联系人, E-mail: lixm@xynu.edu.cn; bwfan@xynu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41901105);信阳师范学院“南湖学者奖励计划”青年项目

作者简介:李秀美(1988—),女,山东济南人,副教授,博士,主要从事湖泊生物地球化学循环与气候环境变化研究工作。

化表现出明显的区域性特征<sup>[1]</sup>. 过去 2000 a 是衔接地质记录和器测、历史文献资料的时间窗, 是全球变化研究关注的核心内容之一, 该时段气候记录为研究气候自然变率以及人类活动在全球气候系统变化中的作用提供了重要依据<sup>[1, 2]</sup>. 深入分析青藏高原过去 2000 a 气候变化的基本格局与区域特征, 有助于揭示该区百年尺度的地球系统动力学机制, 为预测全球变暖背景下青藏高原水资源的变化趋势提供依据, 对目前全球增温可能引发的气候突变具有重要的预警意义.

过去十几年来, 研究者通过不同的气候载体已经对青藏高原过去 2000 a 古气候重建做了大量研究工作, 并取得了一系列研究成果. 但是, 过去 2000 a 青藏高原南部的气候变化特征和机制还不甚清晰, 目前关于中世纪暖期 (Medieval Climate Anomaly, MCA) 以及小冰期 (Little Ice Age, LIA) 等特征时段青藏高原南部的气候干湿变化特征还存在争议<sup>[3]</sup>. 例如, 孙湘君等<sup>[4]</sup>的研究表明青藏高原南部气候特征表现为 MCA 干旱, LIA 湿润. 然而, CHEUNG 等<sup>[5]</sup>的研究表明高原南部表现为 MCA 湿润, LIA 干旱的气候特征. 造成上述争议的一个主要原因是上述古气候记录涵盖的是全新世以来的气候变化, 而对于过去 2000 a 这一时间尺度气候记录的分辨率较低, 影响了该时段气候重建结果的准确性. 此外, 青藏高原现代降水稳定同位素的研究结果表明, 青藏高原南部现在受印度季风的强烈影响<sup>[6]</sup>, 然而历史时期季风与西风环流对高原南部的影响还不甚清晰. 近年来发表的青藏高原南部过去 2000 a 高质量的降水/湿度记录逐渐增多<sup>[3, 7-10]</sup>, 本文对这些记录进行对比分析及集成研究, 以期探究高原南部过去 2000 a 气候干湿变化的特征, 并着重对典型时段 (MCA 和 LIA) 的气候变化特征和机制进行探讨.

## 1 材料与研究方法

### 1.1 数据选取及标准

本研究收集的代用序列来源于近年来公开发表的论文, 对气候记录的选取主要依据以下几条标准: (1) 代用序列的采样点位置必须位于青藏高原南部; (2) 代用序列时间尺度要涵盖过去 2000 a 并且记录连续没有间断; (3) 代用序列必须具有明确的气候指示意义, 可以明确地反映降水/湿度变化; (4) 序列的时间分辨率至少为 40 a; (5) 指标序列变化主要受气候变化驱动, 而不是受人类活动控制.

基于上述原则, 本文共收集到了 5 条反映青藏高原南部地区过去 2000 a 降水/湿度变化的高分辨率代用序列. 各代用序列的基本信息见表 1, 序列的地理位置见图 1.

表 1 湖泊降水记录的基本信息

Tab. 1 Information of the lake sediment records

位置	纬度	经度	分辨率/a	气候指标	参考文献
昂仁金错	29.3	87.2	24	粒度	[8]
帕茹错	29.8	92.4	26	粒度	[10]
纳木错	30.0	90.0	29	粒度	[9]
羊卓雍错	29.0	91.0	40	孢粉	[3]
达则错	31.8	87.5	16	叶蜡氢同位素	[7]

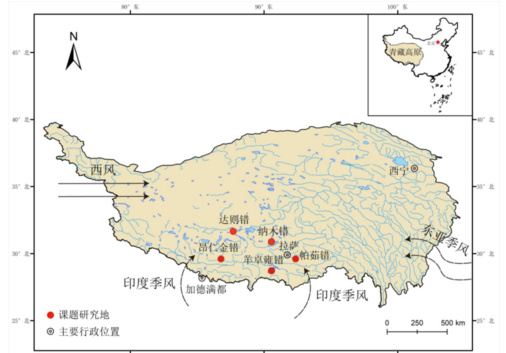


图 1 青藏高原以及本文研究湖泊的地理位置图

Fig. 1 Geographical location map of Tibetan Plateau and the lakes studied in this paper

### 1.2 数据处理

考虑到收集的代用序列具有不同的分辨率 (表 1), 为了便于对采集的所有记录进行比较和分析, 对降水/湿度序列按以下步骤进行处理: (1) 先用 spline 函数把各记录插值到年分辨率, 再对插值后的记录进行 30 a 滑动平均 (这样可以尽可能保证代用序列中的气候信息不遗失); (2) 对所有 30 a 滑动平均后的序列进行标准化; (3) 取所有标准化后的降水/湿度记录的平均值, 作为整个青藏高原南部过去 2000 a 降水/湿度的集成序列, 该序列并不代表降水/湿度的实际变化, 而只反映了降水/湿度的相对幅度大小.

近期, 对青藏高原过去 2000 a 定量温度记录的集成研究表明, 青藏高原过去 2000 a 温度变化可以划分为 4 个世纪尺度的冷暖期, 即 AD 0—600 年和 AD 1400—1900 年的冷期, 以及 AD 600—1400 年和 20 世纪的暖期<sup>[11]</sup>. 其中 AD 600—1400 年和 AD 1400—1900 年分别对应于青藏高原的中世纪暖期和小冰期<sup>[11]</sup>. 本研究以这 4 个冷暖时段为基础, 探究这 4 个时段内青藏高原南部气候干湿变化的特征. 关于干湿变化, 如果某时段的降水/湿

度值高于过去 2000 a 平均值,则该时段气候特征定义为湿润;反之,如果某时段“降水/湿度”值低于过去 2000 a 平均值,则该时段气候特征定义为干旱。

## 2 结果与分析

### 2.1 青藏高原南部降水/湿度集成序列记录的气候干湿变化特征

青藏高原南部降水/湿度集成序列显示(图 2a),AD 0—600 年,高原南部气候变化呈现出由湿润转干旱的变化趋势,中世纪暖期(AD 600—1400 年),青藏高原南部降水/湿度集成序列值低于过去 2000 a 平均值,指示该时期高原南部气候干旱,小冰期(AD1400—1900 年)以及最近 100 a,青藏高原南部降水/湿度集成序列值高于过去 2000 a 平均值且呈波动上升趋势,指示该时期高原南部气候湿润。

时段均表现为由湿转干的气候变化特点(图 2 b,c, d),而羊卓雍错在该时期气候变化呈现干—湿—干的特点,且羊卓雍错在 AD 150—450 年气候湿润(图 2 e)。达则错在 AD 420—550 年存在约 100 a 的弱湿润期(图 2f)。整体而言,公元初 600 年青藏高原南部大部分地区气候存在干旱化趋势。

中世纪暖期(AD 600—1400 年),高原南部大多数湖泊表现为干旱化特征。昂仁金错和达则错降水波动较为明显(图 2b, f)。羊卓雍错、帕茹错与纳木错在该时段气候干湿波动较小,气候表现为干旱化特征。然而达则错在该时段存在约 350 a 的湿润期,最湿期出现在 AD 900a 前后(图 2f)。

小冰期(AD 1400—1900 年)青藏高原南部湖泊记录以湿润特征为主,其间夹杂着短期的干旱化波动。近百年来,高原南部的昂仁金错、帕茹错、羊卓雍错和纳木错气候湿润,达则错在近 50 a 气候有干旱化趋势。

## 3 讨论

### 3.1 中世纪暖期和小冰期气候特征的区域对比

青藏高原南部的湖泊沉积物记录在中世纪暖期/小冰期总体表现为“暖干”/“冷湿”的气候特征。这与高原东南部以及高原西北部地区的气候变化特征较为一致,而与高原东部地区的气候变化特征相反。高原东南部的泸沽湖和洱海<sup>[12]</sup>以及高原西北部的古里雅冰芯<sup>[13]</sup>和卡拉库里湖<sup>[14]</sup>在中世纪暖期/小冰期均表现为“暖干”/“冷湿”的气候特征,然而高原东部的万象洞以及黄谷洞<sup>[15]</sup>均表现为“暖湿”/“冷干”的气候特征。这表明青藏高原过去 2000 a 气候变化有很强的区域性特征,可能与不同区域受大气环流系统的影响程度不同有关。另外,根据青藏高原现代降水同位素的观测结果,青藏高原南部位于印度季风影响区<sup>[6]</sup>。研究表明,在过去的几千年里,中纬度季风区表现为“暖湿”/“冷干”的气候特征,且该暖湿组合特征在 MCA 和 LIA 期间更为显著<sup>[16]</sup>。然而高原南部的湖泊沉积物记录在中世纪暖期/小冰期表现的“暖干”/“冷湿”的气候特征与上述研究结果并不一致。关于高原南部气候特征的解释有两种观点,一种观点认为西风对高原南部气候变化有重要影响。近期对高原南部羊卓雍错湖泊沉积物的研究认为过去一千年亚洲夏季风并没有影响到青藏高原南部,反倒是西风对高原南部气候影响较大,因此高原南部表现出与西风影响区一致的气候特征<sup>[3]</sup>。另一种观点认为高原南部

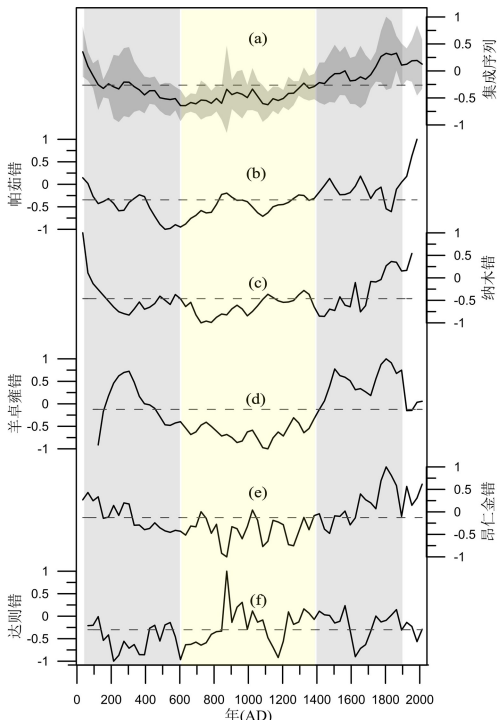


图 2 过去 2000 a 青藏高原南部湖泊沉积物重建的降水/湿度记录(虚线为各指标过去 2000a 的平均值)

- (a)本研究集成的青藏高原南部降水/湿度序列,灰色阴影为集成序列的误差范围;(b)帕茹错粒度记录<sup>[10]</sup>;  
(c)纳木错粒度记录<sup>[9]</sup>;(d)羊卓雍错孢粉记录<sup>[3]</sup>;  
(e)昂仁金错粒度记录<sup>[8]</sup>;(f)达则错沉积物叶蜡氢同位素记录<sup>[7]</sup>

Fig. 2 Precipitation/moisture records of the Southern Tibetan plateau during the past 2000 years

(Dashed line indicates the mean value of the past 2000 years)

### 2.2 高原南部不同湖泊记录的气候干湿变化特征

过去 2000 a 青藏高原南部不同湖泊记录的气候干湿变化总体上较为一致,但也存在一定的差异性。AD 0—600 年,昂仁金错、帕茹错和纳木错在该



受印度季风影响,且与东亚季风影响地区之间存在显著的水文气候差异;东亚季风和印度季风影响区的气候模式不同,东亚季风区表现为“暖湿”/“冷干”的气候模式,而印度季风影响区表现为“暖干”/“冷湿”的气候模式<sup>[12]</sup>.东亚季风和印度季风气候的差异及成因是当前国际气候研究的热点也是难点问题,在此不做过多探讨.

### 3.2 青藏高原南部过去 2000 a 气候变化的可能驱动机制

季风与西风在冰期—间冰期、千年、十年和季节尺度上交互影响着青藏高原,为青藏高原不同地区带来水汽<sup>[17]</sup>.探究过去 2000 a 季风与西风强度变化有助于揭示青藏高原南部气候变化的可能机制.阿拉伯海有孔虫数量与印度季风强度有关,可以指示印度季风强弱变化,有孔虫数量随着印度季风强度的增强而增多<sup>[18]</sup>.该海洋有孔虫记录表明中世纪暖期印度季风强度明显弱于小冰期(图 3 a).小冰期增强的印度季风会给高原南部带来更多的降水.

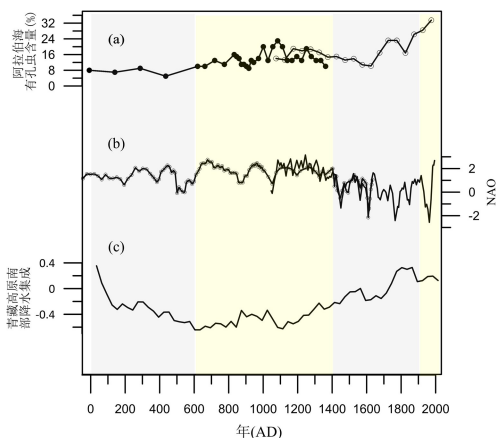


图 3 过去 2000 a 青藏高原南部降水/湿度集成记录与印度季风和西风强度纪录

(a)阿拉伯海有孔虫含量记录的印度季风强度变化<sup>[18]</sup>;

(b)北大西洋涛动指数记录的西风强度变化<sup>[20]</sup>;

(c)青藏高原南部降水/湿度集成记录

Fig. 3 Composite moisture record of

the southern Tibetan plateau and its climate forcings

西风强弱及其在青藏高原上季节性的来回移动也可能影响青藏高原降水分布的变化.模型研究发现西风急流在青藏高原上的平均位置存在季节性南北移动:冬季西风增强,西风急流平均位置在青藏高原南部;春季西风急流平均位置从高原南部逐渐北移,强度减弱;夏季西风急流的平均位置到达青藏高原最北端;秋季西风平均位置逐渐往青藏高原南段移动<sup>[19]</sup>.西风急流在青藏高原上季节性的来回移动以及与之相关的西风和夏季风强度的

变化势必会影响青藏高原降水分布的变化.基于树轮以及湖泊沉积物记录重建的北大西洋涛动指数(NAO)可以指示西风强度变化,NAO值越负,指示西风强度越大<sup>[20]</sup>.NAO在小冰期显著偏负,证明小冰期西风强度明显增强(图 3b).小冰期西风增强会导致西风从青藏高原南端北移的时间推迟<sup>[19]</sup>,进而使西风带在青藏高原南部停留的时间比正常年份偏长,给高原南部带来更多的西风水汽.小冰期增强的印度季风也给高原南部带来大量的降水.因此,高原南部在小冰期降水丰沛.然而在中世纪暖期,NAO值偏正,西风强度较弱(图 3b),西风在青藏高原上北移的时间偏早,带给高原南部的水汽减少.加之中世纪暖期印度季风强度弱于小冰期,进一步导致了中世纪暖期高原南部降水少于小冰期.

此外,太阳辐射驱动下的温度变化会导致青藏高原蒸发强度的变化,进而影响青藏高原气候干湿变化.中世纪暖期青藏高原温度较高<sup>[11]</sup>,蒸发强烈,加之高原南部降水较少(图 3c),此时段高原南部气候干旱.反之,小冰期温度低,蒸发受到抑制,印度季风以及西风带给高原南部降水较多,高原南部气候湿润.

过去 2000 a 青藏高原南部不同湖泊记录的气候干湿变化总体上较为一致,但也存在一定的差异性.高原南部不同湖泊气候记录间存在的干湿差异可能与代用资料指示气候变化的敏感性、定年手段以及样品分辨率等因素有关.目前,过去 2000 a 青藏高原南部古气候与古环境数据记录仍然比较稀缺.未来还需要重建更多高质量(有准确的年龄控制、精确地气候指示意义和高分辨率)的古气候记录,以更深入地揭示季风和西风在青藏高原上的相互作用及其对青藏高原南部气候变化的影响.

## 4 结论

过去 2000 a 青藏高原南部气候变化显著,整体表现出 AD 0—600 年由湿转干、AD 600—1400 年干旱以及 AD 1400 年后湿润的气候特征.青藏高原南部在中世纪暖期和小冰期“暖干”/“冷湿”的气候特征,与高原东南部以及高原西北部地区的气候变化特征较为一致,而与高原东部地区的气候变化特征相反.印度季风强度、西风强度以及西风在青藏高原上季节性的来回移动是青藏高原南部降水变化的主要影响因素;太阳辐射驱动下温度变化导致的蒸散发强度变化也是影响青藏高原南部干

湿变化的重要因素。中世纪暖期温度较高,高原南部蒸发强烈,加之高原南部受印度季风和西风带来的水汽较少,气候暖干;反之,小冰期温度较低,高原南部蒸发微弱,印度季风与西风给高原南部带来

更多的水汽,形成了高原南部冷湿的气候。未来,在青藏高原还需要重建更多高分辨率、有准确的年龄控制以及精确气候指示意义的古气候记录,以更深入揭示青藏高原南部气候变化的特征及机制。

## 参考文献:

- [1] 李秀美, 范宝伟. 青藏高原中西部湖泊生物标志物记录的过去两千年气候变化[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2019, 32(2): 239-244.  
LI Xiumei, FAN Baowei. Climatic changes during the past 2000 years based on lake biomarkers from the central and Western Tibetan Plateau[J]. Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition), 2019, 32(2): 239-244.
- [2] 葛全胜, 郑景云, 郝志新. 过去 2000 年亚洲气候变化(PAGES-Asia2k)集成研究进展及展望[J]. 地理学报, 2015, 70(3): 355-363.  
GE Quansheng, ZHENG Jingyun, HAO Zhixin. PAGES synthesis study on climate changes in Asia over the last 2000 years: Progresses and perspectives[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(3): 355-363.
- [3] GUO C, MA Y, MENG H, et al. Changes in vegetation and environment in Yamzhog Yumco Lake on the southern Tibetan Plateau over past 2000 years[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 501: 30-44.
- [4] 孙湘君, 杜乃秋, 陈因硕, 等. 西藏色林错湖相沉积物的花粉分析[J]. 植物学报, 1993, 35(12): 943-950.  
SUN Xiangjun, DU Naiqiu, CHEN Yinshuo, et al. Holocene palynological records in lake Selincuo, Northern Xizang[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 1993, 35(12): 943-950.
- [5] CHEUNG M C, ZONG Y, ZHENG Z, et al. A stable mid-late Holocene monsoon climate of the central Tibetan Plateau indicated by a pollen record[J]. Quaternary International, 2014, 333: 40-48.
- [6] YAO T, MASSON-DELMOTTE V, GAO J, et al. A review of climatic controls on  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations[J]. Reviews of Geophysics, 2013, 51(4): 525-548.
- [7] LI X, LIANG J, HOU J, et al. Centennial-scale climate variability during the past 2000 years on the central Tibetan Plateau[J]. Holocene, 2015, 25(6): 892-899.
- [8] CONROY J L, HUDSON A M, OVERPECK J T, et al. The primacy of multidecadal to centennial variability over late-Holocene forced change of the Asian Monsoon on the southern Tibetan Plateau[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, 458: 337-348.
- [9] KASPER T, HABERZETTL T, DOBERSCHÜTZ S, et al. Indian ocean summer monsoon (IOSM)-dynamics within the past 4 ka recorded in the sediments of lake Nam Co, Central Tibetan Plateau (China)[J]. Quaternary Science Reviews, 2012, 39: 73-85.
- [10] BIRD B W, POLISAR P J, LEI Y, et al. A Tibetan Lake sediment record of holocene Indian summer monsoon variability[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 399: 92-102.
- [11] LI X, ZHANG Y, WANG M, et al. Centennial-scale temperature change during the Common Era revealed by quantitative temperature reconstructions on the Tibetan Plateau[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8: 360.
- [12] SHENG E, YU K, XU H, et al. Late holocene Indian summer monsoon precipitation history at Lake Lugu, northwestern Yunnan province, Southwestern China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 438: 24-33.
- [13] YANG B, ACHIM B, SHI Y, et al. Evidence for a late Holocene warm and humid climate period and environmental characteristics in the arid zones of northwest China during 2.2-1.8 kyr B.P.[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(D2): DOI: 10.1029/2003JD003787.
- [14] AICHNER B, FEAKINS S J, LEE J E, et al. High-resolution leaf wax carbon and hydrogen isotopic record of the late Holocene paleoclimate in arid Central Asia[J]. Climate of the Past, 2015, 11(4): 619-633.
- [15] TAN L, CAI Y, AN Z, et al. Centennial-to decadal-scale monsoon precipitation variability in the semi-humid region, northern China during the last 1860 years: Records from stalagmites in Huangye Cave[J]. Holocene, 2011, 21(2): 287-296.
- [16] CHEN F, CHEN J, 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.
- [17] SUN Z, YUAN K, HOU X, et al. Centennial-scale interplay between the Indian Summer Monsoon and the Westerlies revealed from Ngamring Co, southern Tibetan Plateau[J]. The Holocene, 2020, 30(8): 1163-1173.
- [18] GUPTA A K, ANDERSON D M, OVERPECK J T. Abrupt changes in the Asian Southwest Monsoon during the Holocene and their links to the North Atlantic Ocean[J]. Nature, 2003, 421(6921): 354-357.
- [19] CHIANG J C H, FUNG I Y, WU C H, et al. Role of seasonal transitions and westerly jets in East Asian paleoclimate[J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 108: 111-129.
- [20] OLSEN J, ANDERSON N J, KNUDSEN M F. Variability of the North Atlantic oscillation over the past 5 200 years[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(11): 808-812.

责任编辑:张建合