

# 不同时间尺度的阿尔泰山北部和南部降水对比研究

张东良<sup>1,2</sup>, 兰 波<sup>1,2</sup>, 杨运鹏<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 常年受到西风影响的阿尔泰山地区, 是古气候研究的重点区域之一。利用阿尔泰山北部和南部的11个气象站观测数据和已发表的古气候数据(包括树轮、冰芯和湖芯), 详细对比了不同时间尺度上(季节、年、几十年、百年和千年尺度)阿尔泰山北部和南部的降水变化。结果表明, 阿尔泰山北部器测时段降水是逐渐下降的, 而阿尔泰山南部降水反而呈现逐渐增加的趋势。这种反相的降水关系也体现在过去200年、过去1000年和全新世时段, 说明阿尔泰山北部和南部降水在季节、年、几十年、百年和千年尺度上均存在相反的趋势。不同时间尺度上降水存在的相反关系表明阿尔泰山是一个重要的气候边界。但不同时间尺度上出现相反变化的原因需进一步详细探讨, 这不仅有助于了解区域水汽变化的历史, 也有助于加深理解欧亚草原丝绸之路文化的演替。

**关键词:** 阿尔泰山; 降水; 不同时间尺度; 古气候

DOI: 10.11821/dlxb201709003

## 1 引言

常年受到西风影响的阿尔泰山地区, 是古气候研究的重点区域之一(图1a)。该山脉呈西北—东南走向, 耸立于亚洲腹地的干旱荒漠和干旱半荒漠地带, 西部与哈萨克丘陵相连, 北部与西西伯利亚平原比邻, 东部与萨彦岭相靠, 南部与准噶尔盆地相接。按阿尔泰山西北—东南走向可以将其分为北部和南部。阿尔泰山北部属于俄罗斯和蒙古, 包括阿尔泰山北坡、萨彦岭和蒙古高原西部, 山川众多、湖泊遍地区是该区域的地理特点。山区发育河流主要有卡通河(鄂毕河左侧支流)、比亚河(鄂毕河右侧支流)。阿尔泰山南部属于中国和哈萨克斯坦, 包括阿尔泰山南坡、准噶尔盆地和斋桑泊谷地, 发育有额尔齐斯河和乌伦古河两大水系。

近20年来, 有关阿尔泰山全新世(即过去11500年前)气候变化研究已取得了相当丰硕的成果<sup>[1-10]</sup>。最近学者们对阿尔泰山北部和南部的古气候重建资料进行了综述, 其中有两个综述较为突出。第一个是Ran等<sup>[11]</sup>综述的阿尔泰山南部(新疆北部)全新世资料。结果揭示新疆北部在过去8000年前以前气候较为干旱, 约8000年以来区域湿度逐渐增加。第二个是Wang等<sup>[12]</sup>综述的阿尔泰山北部全新世资料。他们的结果揭示自全新世以来, 阿尔泰山区域气候呈现逐渐变干的趋势。可见, 阿尔泰山北部和南部全新世气候在千年尺度上呈现完全相反地变化。但是, 这种相反的关系是否在其他时间尺度上(季

收稿日期: 2017-05-01; 修订日期: 2016-07-22

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目(41502168); 国家自然科学基金国际合作项目(41361140361) [Foundation: National Natural Science Young Foundation of China, No.41502168; Project of International Cooperation and Exchanges of NSFC, No.41361140361].

**作者简介:** 张东良(1990-), 男, 汉族, 甘肃省通渭人, 博士研究生, 主要从事中亚过去气候变化研究。

E-mail: zhdliex@163.com

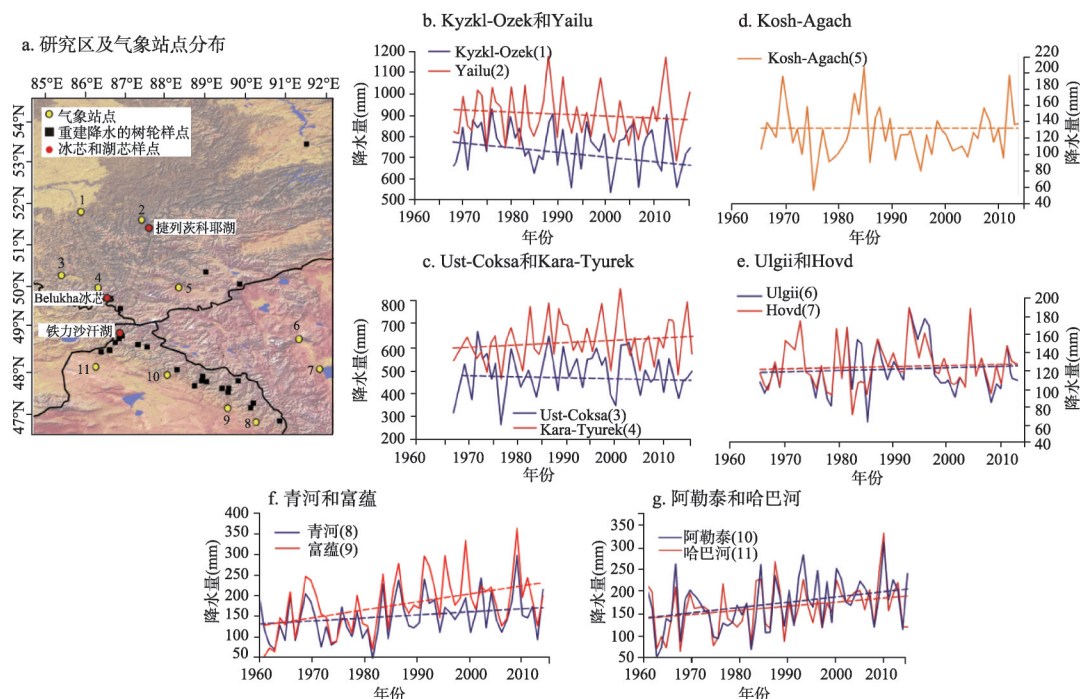


图1 研究区域及本文所选气候记录点示意图和各个气象站器测时段年降水量变化  
Fig. 1 Map showing the study area and relevant study sites as well as annual precipitation variations of meteorological stations during the instrumental interval

节、年、十年、百年尺度)依然是存在的呢? 本文将通过追踪阿尔泰山北部和南部已发表的不同时间段的气候记录(包括器测时段、过去200年时段和过去1000年时段), 来讨论不同时间尺度上其北部和南部的降水(或水文)变化特征。

## 2 资料来源

本文所选用器测降水数据来自11个气象站(5个位于俄罗斯境内、2个位于蒙古境内、4个位于中国境内), 分布位置如图1所示, 相关信息如表1所示。其中俄罗斯境内的5个气象站分别是Kyzyl-Ozek、Yailu、Ust-Coksa、Kosh-Agach和Kara-Tyurek, 数据来自俄罗斯水文气象信息研究所, 观测时段是1966-2015年。蒙古境内的两个气象站是Ulgii和Hovd, 数据来自Malyigina等<sup>[13]</sup>文章, 没有获得原始资料, 观测时段是1959-2015年。中国境内的气象站分别是青河、富蕴、阿勒泰和哈巴河, 数据来自中国气象局气象数据中心(<http://data.cma.cn/>), 观察时段为1954-2015年。在本文的分析中, 这11个气象站均选择的是月降水数据。

本文选择的过去200年时段的降水数据来自区域树轮和冰芯(冰芯仅在阿尔泰山北部)的重建, 分布位置如图1所示和相关信息如表2所示。本文选择的过去1000年时段的降水关联数据来自区域湖芯的重建, 分布位置如图1所示和相关信息如表3所示。其中阿尔泰山北部过去1000年唯一的高分辨率(约11 a/cm)气候资料来自捷列茨科耶湖(Teletskoye湖)<sup>[14-15]</sup>, 阿尔泰山南部过去1000年唯一的高分辨率(约7 a/cm)气候资料来自铁力沙汗湖<sup>[16]</sup>。

表1 阿尔泰山北部和南部气象站点的相关信息								
Tab. 1 Information of meteorological stations in the northern and southern Altai Mountains								
	序号	气象站名	纬度	经度	海拔(m)	暖季降水(mm)	冷季降水(mm)	年降水(mm)
阿尔泰山北部	1	Kyzyl-Ozek	51.90°N	86.0°E	331	569.3	160.2	729.5
	2	Yailu	51.77°N	87.6°E	480	749.5	57.7	807.2
	3	Ust-Coksa	50.30°N	85.6°E	978	385.5	74.7	460.3
	4	Kara-Tyurek	50.00°N	86.4°E	2600	486.0	106.2	592.2
	5	Kosh-Agach	50.00°N	88.4°E	1760	105.3	16.5	121.7
	6	Ulgii	48.90°N	91.9°E	171	114.1	5.9	120.1
	7	Hovd	48.00°N	91.4°E	1400	121.6	7.0	128.6
阿尔泰山南部	8	青河	46.67°N	90.38°E	1220	109.8	67.9	177.7
	9	富蕴	46.98°N	85.52°E	826.6	106.5	83.7	190.1
	10	阿勒泰	47.03°N	88.08°E	736.9	107.0	92.9	200.0
	11	哈巴河	48.05°N	86.40°E	534	112.1	79.8	191.9

表2 阿尔泰山北部和南部树轮和冰芯的相关信息					
Tab. 2 Information of tree rings and ice core in the northern and southern Altai Mountains					
位置	序号	研究区	方差解释量(%)	序列长度(a)	数据来源
阿尔泰山北部	1	Koksu、Mongun、Aktash	—	200(1800-2005 AD)	Sidorova等 <sup>[17]</sup>
	2	Abakan附近	56	127(1875-2012 AD)	Shah等 <sup>[18]</sup>
	3	Belukha冰芯	—	750(1250-2000 AD)	Henderson等 <sup>[19]</sup>
阿尔泰山南部	1	东南端	65.5	184(1825-2009 AD)	Chen等 <sup>[20]</sup>
	2	西北端	40.7	252(1760-2012 AD)	Chen等 <sup>[21]</sup>
	3	西北端	36.6	524(1481-2004 AD)	张同文等 <sup>[22]</sup>
	4	南部	40.7	188(1818-2006 AD)	胡义成等 <sup>[23]</sup>
	5	东南端	—	221(1790-2011 AD)	Xu等 <sup>[24]</sup>
	6	南部	46.5	160(1850-2012 AD)	张瑞波等 <sup>[25]</sup>

表3 阿尔泰山北部和南部湖芯的相关信息								
Tab. 3 Information of lacustrine cores in the northern and southern Altai Mountains								
位置	研究区	纬度	经度	海拔(m)	年均夏季温(℃)	年均冬季温(℃)	年均降水量(mm)	数据来源
阿尔泰山北部	捷列茨科耶湖	54.65°N	87.67°E	434	11.5	−12.5	300	Andreev等 <sup>[14]</sup> ; Kalugin等 <sup>[15]</sup>
阿尔泰山南部	铁力沙汗湖	48.82°N	87.00°E	1576	22	−15	184	Li等 <sup>[16]</sup>

3 结果分析

3.1 器测时段

3.1.1 阿尔泰山北部 图1b~1e显示了阿尔泰山北部7个气象站器测时段的年降水变化情况,这些年降水变化均通过了95%的显著性检验,阿尔泰山南部的降水变化趋势也通过了95%的显著性检验。通过线性相关性分析发现,近50年来北部的7个气象站降水数据变化表现各异。具体来说,位于迎风坡的Kara-Tyurek站降水以0.9 mm/10a的速率增加,其他3个位于迎风坡的气象站(Kyzkl-Ozek、Yailu和Ust-Coksa)降水数据均呈现了逐渐下

降的趋势，其中 Kyzkl-Ozek 年降水数据下降最快，达到 2.38 mm/10a。位于阿尔泰山背风坡的 3 个气象站（Kosh-Agach、Ulgii 和 Hovid）降水数据在近 50 年没有出现较大变化。

进一步分析位于俄罗斯境内的 5 个气象站的暖季（4-9 月）和冷季（10-次年 3 月）降水变化（图 2）。需要说明的是由于缺乏蒙古境内的两个气象站的原始数据，故没有对其进行冷暖季节的降水分析。从图 2 可以看出，除 Kara-Tyurek 暖季降水有增加的趋势外，其余所有气象站数据无论是暖季还是冷季，降水均呈现了下降的趋势。其中 Kyzkl-Ozek 暖季和冷季降水数据下降最明显。

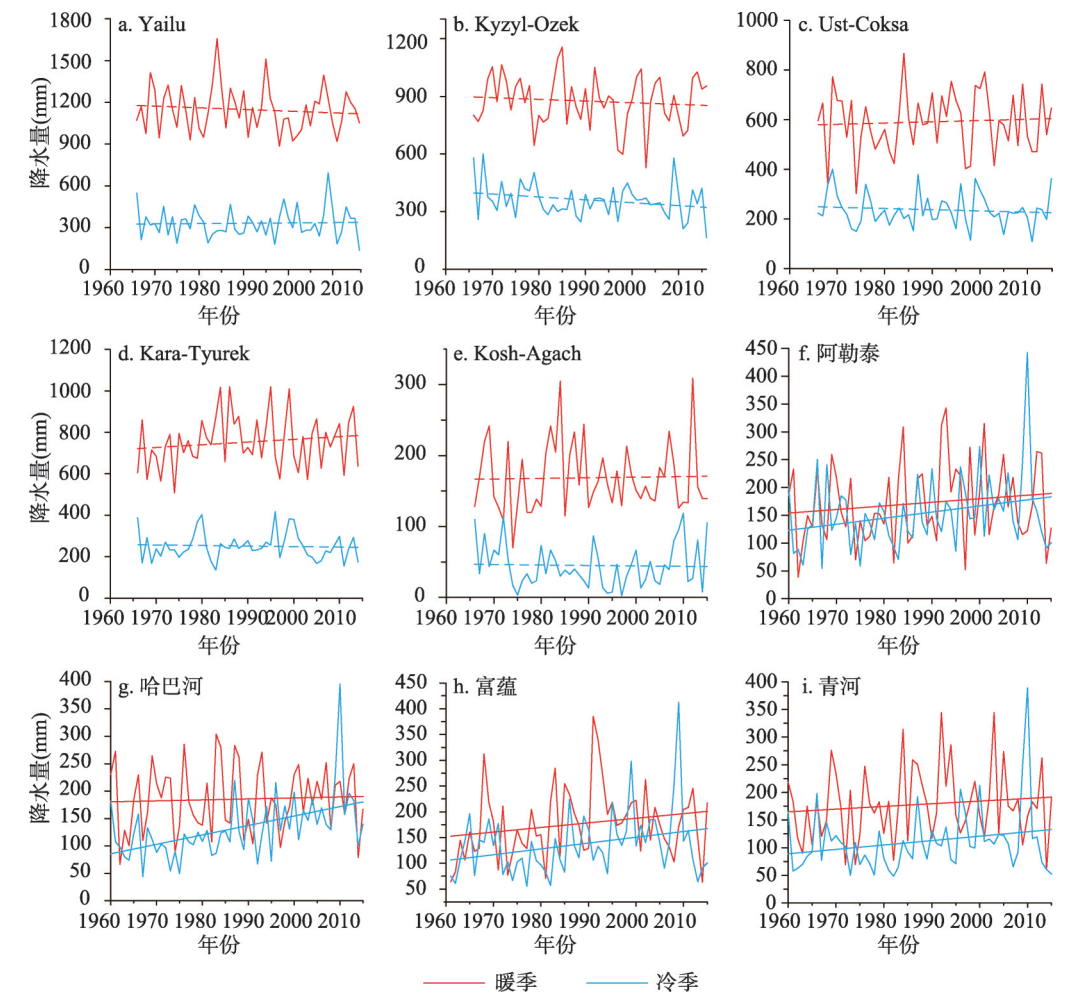


图2 阿尔泰山北部(a~e)和南部(f~i)各气象站器测时段暖季和冷季降水量变化  
Fig. 2 Warm-season and cold-season precipitation variations of meteorological stations  
in the northern (a~e) and southern (f~i) Altai Mountains.

**3.1.2 阿尔泰山南部** 与阿尔泰山北部的 7 个气象站的年降水数据相比，阿尔泰山南部的 4 个气象站近 50 年的年降水数据增加速率远大于北部的变化（图 1）。其中富蕴年降水增加最快，增加速率达 19.25 mm/10a，远高于中亚天山的降水增加速率（8.4 mm/10a）<sup>[26]</sup>。这种降水增加趋势同样体现在暖季和冷季变化上（图 2），富蕴仍然是暖季和冷季降水增加最快的气象站，增加速率分别是 8.93 mm/10a 和 11.28 mm/10a。此外，4 个气象站冷季



降水增加速率大于暖季降水增加速率。这个变化与整个新疆北部的降水变化情况是一致的<sup>[26-27]</sup>。

### 3.2 过去200年时段

**3.2.1 阿尔泰山北部** 阿尔泰山北部树轮重建的降水序列仅扩展至过去200年, 其树轮序列相关信息如表2所示。Sidorova等<sup>[17]</sup>利用西伯利亚落叶松树轮碳氧同位素重建了阿尔泰山北部的7-8月降水(图3a)。结果揭示约1800-1830年前降水较高, 约1830-1880年时段降水逐渐下降, 之后持续了近10年的高降水时段, 随后降水量出现明显下降并呈现低值波动。Shah等<sup>[18]</sup>发表的松树树轮宽度资料揭示近一百年最干旱年份出现在1910-1914年、1940-1946年、1961-1965年, 最湿润年份出现在1969-1973年、1993-1997年、2000-2004年(图3b)。此外, 阿尔泰山北部Belukha冰芯揭示了过去200年的冰川积累量(图3c), 结果揭示高积累时段出现在约1810-1845年、1860-1880年和1930-1990年; 低积累时段出现在约1845-1860年、1880-1930年、1990年以来<sup>[19]</sup>。对比分析可以看出, 阿尔泰山北部过去200年夏季降水量和年降水量波动基本是同步的。

**3.2.2 阿尔泰山南部** 与阿尔泰山北部树轮重建的降水类似, 阿尔泰山南部树轮降水重建也主要集中在过去200年, 其树轮样点如图1a所示, 树轮序列相关信息如表2所示。在年降水重建中, Chen等<sup>[20-21]</sup>选择西伯利亚云杉作为重建树种, 主要考虑其生长在阿尔泰山南部受干旱胁迫, 对区域降水十分敏感, 其中降水变率的解释方差分别达到了65.5%(东南端)和40.7%(西北端)(图4a、4b), 阿尔泰山南部东南端和西北端过去200年年降水(上年7月-6月)同步变化且降水量总体一致, 高降水时段出现在1825-1828年、1839-1851年、1856-1875年、1889-1897年、1912-1918年、1924-1931年、1937-1942年、1956-1962年、1969-1972年和1985-2006年, 低降水时段出现在1829-1838年、1852-1855年、1876-1888年、1898-1911年、1919-1923年、1932-1936年、1943-1955年、1963-1968年、1973-1984年和2007-2009年。

最近几位学者关注了阿尔泰山树轮所记录的季节降水变化<sup>[22-25]</sup>。对于夏季降水, 重建结果揭示19世纪中期是夏季降水偏多期, 19世纪末到20世纪中期降水整体偏少, 随后至今是一个较长的降水偏多期<sup>[25]</sup>(图4d)。对于冬季降雪, 过去200年1-2月积雪量偏少时段出现在1867-1900年, 持续了34年。积雪量偏多时段出现在1820-1866年、1901-1941年、1989-2002年。其中持续时间最长的阶段为1901-1941年, 长达41年(图4e)<sup>[23]</sup>。作为温度和降水共同作用的夏季相对湿度(图4c)揭示从1790-1830年相对湿度呈现下降的趋势, 最小值出现在1817-1830年。随后至1946年相对湿度围绕平均值上下波动, 1946-1990年相对湿度较高, 随后相对湿度开始下降, 最低值出现在2004-2011年<sup>[24]</sup>。

总体来看, 阿尔泰山南部过去200年年降水具有同步变化的趋势(图4a、4b)。而对于夏季降水, 虽然1915-1940年时段出现低降水(图4d), 但增加的冬季积雪量(图4e)

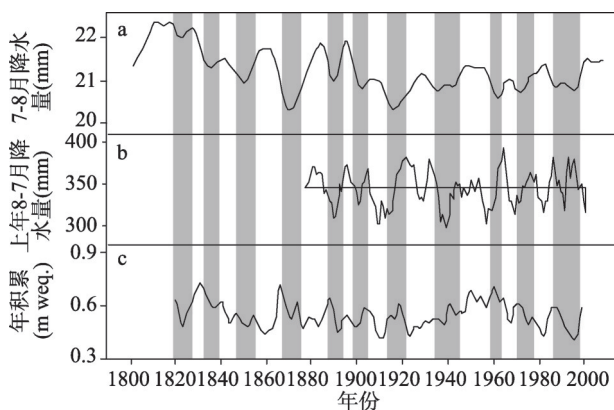


图3 阿尔泰山北部过去200年的降水量变化(a. 树轮同位素重建的7-8月降水量<sup>[17]</sup>; b. 树轮宽度重建的上年8月-7月降水量<sup>[18]</sup>; c. Belukha冰芯重建的冰川年积累量(m w.e.)<sup>[19]</sup>  
Fig. 3 Precipitation variations of the past 200 years in the northern Altai Mountains (a. Tree-ring isotope-based precipitation during June-August<sup>[17]</sup>; b. Tree-ring width-based precipitation during August-June<sup>[18]</sup>; c. Glacier accumulation in Belukha Ice Core<sup>[19]</sup>)

弥补了年降水出现低值, 避免了阿尔泰山南部干旱的发生。此外, 1985-2005年时段是过去200年最湿润时段(图4), 得到了器测时段高降水的支持<sup>[26-27]</sup>。但是在2005年之后区域湿度指标均呈现明显地下降, 尤其是夏季相对湿度(图4c), 主要与此阶段下降的夏季降水和高温条件下加强的蒸发有关。但是对这种干旱现象出现的强度和持续时间还不清楚, 需要进一步借助代用指标重建和相关模型进行分析和预测。同时值得关注的是, 这一干旱对区域生态系统的影响。

3.3 过去1000年时段

3.3.1 阿尔泰山北部 捷列茨科耶湖是阿尔泰山北部最大的淡水湖, 湖盆体积约48 km<sup>3</sup>。

湖区年平均降水约300 mm, 年均夏季温度约12 ℃, 年均冬季温度约-12.5 ℃(表3)。湖泊沉积物烧失量、地化指标和硅藻含量揭示了过去800年的气候信息(图5a): 约1210-1480年高含量的浮游/底栖硅藻比率、Sr/Rb值和磁化信号表明区域气候暖湿。约1480-1580年沉积物烧失量降低, 下降的Sr/Rb值表明湖泊侧向供应较低, 同时底栖硅藻占主导, 区域气候转向寒冷。约1580-1840年气候进一步变冷, 湖泊沉积物中低的烧失量和硅藻丰富度、低Sr/Rb值和丰富的底栖硅藻表明气候是相当干的。自1840年以来气候逐渐向暖湿转变<sup>[15]</sup>。

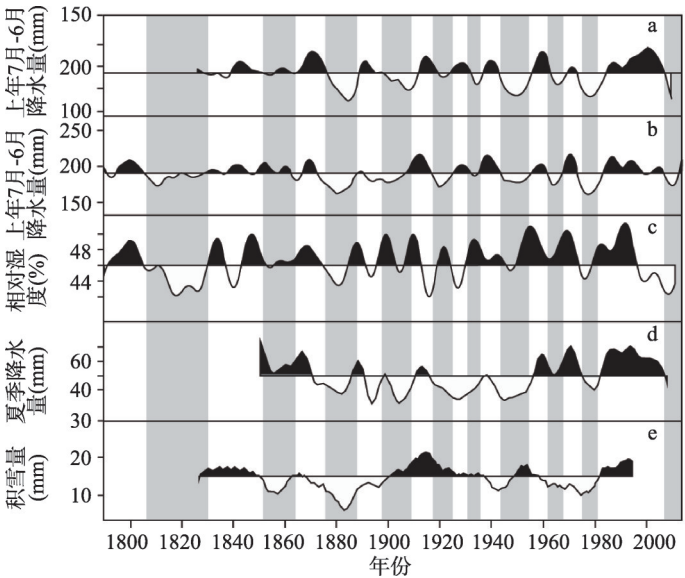


图4 阿尔泰山南部树木记录在过去200年降水记录(a. Chen等<sup>[20]</sup>; b. Chen等<sup>[21]</sup>; c. Xu等<sup>[24]</sup>; d. 张瑞波等<sup>[25]</sup>; e. 胡义成等<sup>[23]</sup>)  
Fig. 4 Precipitation variations of the past 200 years in the southern Altai Mountains (a. Chen et al.<sup>[20]</sup>; b. Chen et al.<sup>[21]</sup>; c. Xu et al.<sup>[24]</sup>; d. Zhang et al.<sup>[25]</sup>; e. Hu et al.<sup>[23]</sup>)

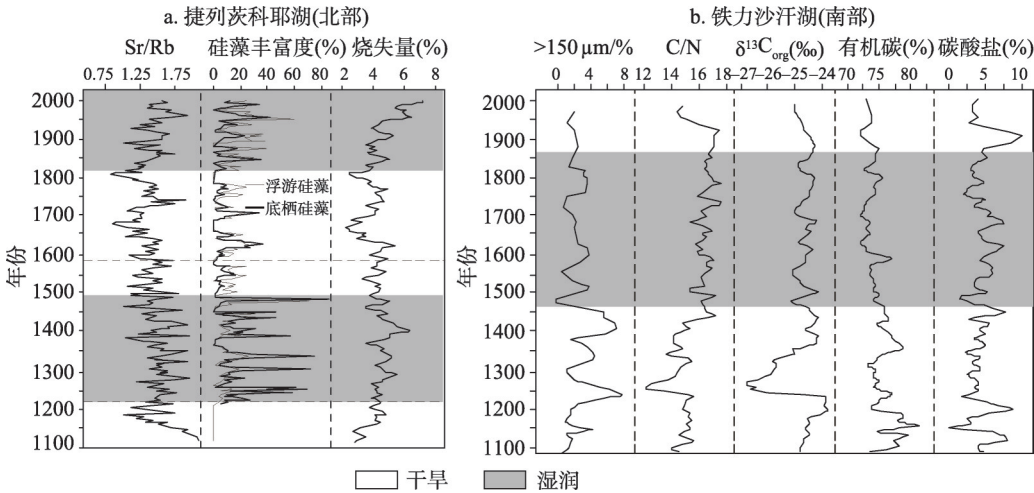


图5 阿尔泰山北部和南部过去1000年资料对比图

Fig. 5 Comparison of paleoclimatic data of the past 1000 years in the northern and southern Altai Mountains

捷列茨科耶湖孢粉资料也揭示了与地化指标类似的气候变化情况<sup>[14]</sup>。具体来说, 约1050-1100年时段冷杉和云杉含量较高、碳粒含量较低, 表明区域气候相对湿润。约1100-1200年时段, 大量出现的碳粒和较高含量的赤羊皮、桦木、蒿属、禾本科、藜科和水龙骨科孢粉表明气候相对冷干。接下来的时段(约1200-1410年)增加的孢粉浓度和相对较低含量的赤羊皮、桦木、蒿属、禾本科、藜科和水龙骨科孢粉含量及低频率的火灾事件, 表明气候是湿润的。约1410-1560年时段明显增加的蒿属孢粉表明气候是干旱的。1560年以来区域气候持续变冷干。自1820年以来变湿的气候导致火灾事件明显下降, 区域的植被覆盖状况接近于现代分布。

总体来看, 捷列茨科耶湖沉积物中元素、硅藻、孢粉等指标揭示在约1050-1100年时段气候暖湿、约1100-1200年冷干、约1200-1480年暖湿、约1480-1820年冷干。自1820年以来区域气候开始好转<sup>[14-15]</sup>。这一序列气候资料的重建得到了更靠北的Shira湖(54.50°N, 90.20°E)<sup>[28]</sup>和SIB04泥炭(56.80°N, 78.73°E)<sup>[29]</sup>资料的支持。

**3.3.2 阿尔泰山南部** 铁力沙汗湖位于阿尔泰山南部西北端喀纳斯湖的西部, 湖面积达0.02 km<sup>2</sup>。Li等<sup>[16]</sup>在<sup>210</sup>Pb、<sup>137</sup>Cs和AMS <sup>14</sup>C测年基础上, 利用湖芯地球化学指标重建了铁力沙汗湖过去1000年的气候/水文变化历史(图5b)。详细地讲, 约1090-1450年时段(中世纪暖期), 沉积物>150 μm含量和有机碳含量较高, C/N比值、δ<sup>13</sup>C<sub>org</sub>和碳酸盐含量整体偏低, 这些记录表明此阶段湖泊处于湿地环境或者低水位阶段, 气候是偏干的。约1450-1870年时段(小冰期), 沉积物>150 μm含量和有机碳含量较低, C/N比值、δ<sup>13</sup>C<sub>org</sub>和碳酸盐含量整体偏高, 这些记录表明此阶段湖水位比上一阶段高, 气候是偏湿的。自小冰期结束至2012年, 低的C/N比值和低的δ<sup>13</sup>C<sub>org</sub>值表明此阶段湖水位较低, 湖泊周边湿地处于扩张期, 总体揭示此阶段气候较为干旱。

铁力沙汗湖重建的过去1000年的气候与水文变化历史, 得到了铁力沙汗湖以南地区湖泊资料的广泛支持, 包括玛纳斯湖<sup>[30-31]</sup>、艾比湖<sup>[32]</sup>、博斯腾湖<sup>[33]</sup>、罗布泊<sup>[34]</sup>。例如, 博斯腾湖湖芯孢粉记录揭示中世纪暖期植被以荒漠草原为主, 表明气候较为干旱; 小冰期植被以草原植被为主, 气候较为湿润<sup>[33]</sup>。相似地, 过去1000年的气候与水文波动历史出现在哈萨克斯坦南部的巴尔喀什湖<sup>[35]</sup>和蒙古西部Khuisiin湖<sup>[36]</sup>的研究中。

## 4 对比与讨论

器测阶段(即过去50年时段)阿尔泰山北部和南部年降水基本呈现了相反的变化趋势。具体地讲, 阿尔泰山北部降水总体呈现了下降的趋势(除Kara-Tyurek), 而阿尔泰山南部降水均呈现了增加的趋势。南部降水增加幅度远大于北部的下降幅度。这种年降水的变化也体现在季节(暖季和冷季)降水变化中, 其中冷季降水波动最为显著。

过去200年时段, 整个阿尔泰山北部年降水没有出现较大的区域差异, 相对应的阿尔泰山南部年降水也没有出现较大的区域差异。本文从夏季降水和年降水角度对阿尔泰山北部和南部过去200年的降水变化进行了对比。首先是夏季降水。本文选择树轮同位素重建的夏季降水进行了对比(图6a), 结果揭示阿尔泰山北部夏季降水<sup>[17]</sup>与南部夏季降水<sup>[25]</sup>呈现相反的关系。其次是年降水。本文在阿尔泰山北部选择Belukha冰芯重建的冰川积累量<sup>[19]</sup>, 南部选择树轮宽度重建的上年7月-6月降水<sup>[20]</sup>, 结果揭示北部与南部年降水也基本呈现了相反的变化趋势(图6b)。可见, 在十年际尺度上, 阿尔泰山北部和南部降水呈现相反的趋势。这种相反的变化趋势不仅体现在年变化上, 也体现在季节变化上。



在器测和过去 200 年时段,阿尔泰山北部和南部降水变化呈现了相反地变化。这种反相关系依然存在于过去 1000 年中。具体来说,阿尔泰山北部中世纪暖期是湿润的,而小冰期是干旱的(资料来自捷列茨科耶湖);阿尔泰山南部中世纪暖期是干旱的,而小冰期是湿润的(资料来自铁力沙汗湖)。令人意外的是,这种相反的关系也存在于全新世阶段。阿尔泰山北部气候最湿润期出现在全新世早期(约 10000-5000 年前),而全新世晚期(约 5000 年前-至今)气候变得干旱<sup>[12]</sup>。而阿尔泰山南部全新世早期气候以干旱为主,最湿润期出现在全新世晚期<sup>[11]</sup>。南部重建得到了最新发表的黄土<sup>[6, 37]</sup>、泥炭<sup>[10, 38]</sup>和风尘<sup>[39]</sup>资料的广泛支持。可见,阿尔泰山北部和南部降水变化在季节、年、几十年、百年和千年尺度上均存在相反的趋势。这一相反的变化表明阿尔泰山是一个重要的气候边界。

此外,在全球变暖背景下,阿尔泰山北部气候变得暖干,而阿尔泰山南部气候变得暖湿。这种温度—降水气候模式与过去其他时间尺度的气候模式是不一致的。例如在过去 1000 年,阿尔泰山北部经历了湿润的中世纪暖期和干旱的小冰期,阿尔泰山南部经历了干旱的中世纪暖期和湿润的小冰期。再例如全新世期间,阿尔泰山北部经历了暖湿的全新世早期(约 10000-5000 年前)和冷干的全新世晚期(约 5000 年前-至今),阿尔泰山南部经历了暖干的全新世早期和冷湿的全新世晚期。目前的资料还不能对这些不一致性产生的原因做出分析。近 50 年来阿尔泰山北部和南部大气水汽供给特征的详细分析是下一步研究工作。同时,对于过去 200 年时段、过去 1000 年时段和全新世时段,阿尔泰山北部和南部相反的气候特征变化,不仅需要更多的古气候资料的支持,而且也需要进一步借助气候模型来分析当时的大气水汽循环特征。

## 5 结论

为更好地理解阿尔泰山北部和南部的气候变化特征,本文从不同的时间尺度(季节、年、几十年、百年和千年尺度)来分析阿尔泰山北部和南部的降水变化。对比分析表明,阿尔泰山北部和南部降水在季节、年、几十年、百年和千年尺度上均存在相反的趋势。这种降水的反相关系表明阿尔泰山是一个重要的气候边界。

进一步的工作可主要在以下两个方面展开:第一,详细分析器测时段的区域大气水汽循环特征,找出造成阿尔泰山北部和南部在现代气候背景下降水相反的原因;第二,进一步借助气候模型来分析过去 200 年、过去 1000 年甚至全新世以来的大气水汽循环特征,探讨阿尔泰山北部和南部出现差异的原因。

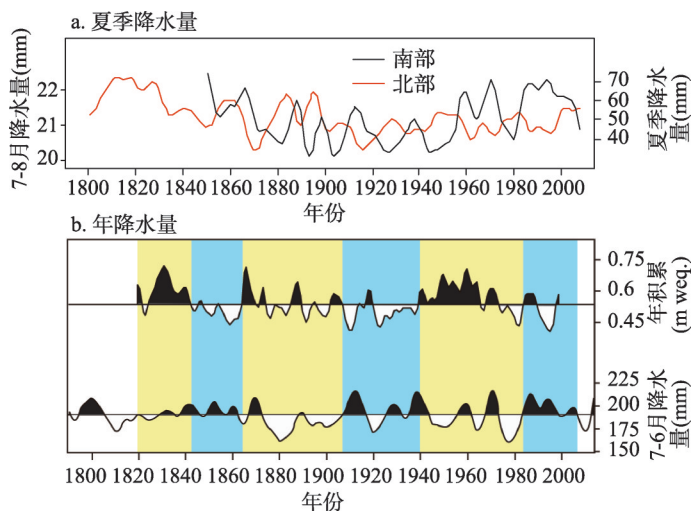


图6 阿尔泰山北部和南部过去200降水对比图

Fig. 6 Comparison of precipitation variations during the past 200 years in the northern and southern Altai Mountains



## 参考文献(References)

- [1] Blyakharchuk T A, Wright H E, Borodavko P S, et al. The role of pingos in the development of the Dzhangyskol lake-pingo complex, central Altai Mountains, southern Siberia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 257: 404-420.
- [2] Blyakharchuk T A, Wright H E, Borodavko P S, et al. Late glacial and Holocene vegetation changes on the Ulagan high-mountains plateau, Altai Mountains, southern Siberia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 209: 259-279.
- [3] Blyakharchuk T A, Wright H E, Borodavko P S, et al. Late Glacial and Holocene vegetational history of the Altai Mountains (southwestern Tuva Republic, Siberia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 245: 518-534.
- [4] Blyakharchuk T A, Chernova N A. Vegetation and climate in the Western Sayan Mts according to pollen data from Lugovoe Mire as a background for prehistoric cultural change in southern Middle Siberia. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 75: 22-42.
- [5] 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. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(3): 351-364.
- [6] Chen F H, Jia J, Chen J, et al. A persistent Holocene wetting trend in arid central Asia, with wettest conditions in the late Holocene, revealed by multi-proxy analyses of loess-paleosol sequences in Xinjiang, China. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 146: 134-146.
- [7] 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. *The Holocene*, 2017, 27(5): 683-693.
- [8] Liu X Q, Herzschuh U, Shen J, et al. Holocene environmental and climatic changes inferred from Wulungu Lake in northern Xinjiang, China. *Quaternary Research*, 2008, 70: 412-425.
- [9] 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. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28: 540-554.
- [10] Zhang Y, Meyers P A, Liu X Y, et al. Holocene climate changes in the central Asia mountain region inferred from a peat sequence from the Altai Mountains, Xinjiang, northwestern China. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 152: 19-30.
- [11] Ran M, Feng Z D. Holocene moisture variations across China and driving mechanisms: A synthesis of climatic records. *Quaternary International*, 2013, 313/314: 179-193.
- [12] Wang W, Feng Z D. Holocene moisture evolution across the Mongolian Plateau and its surrounding areas: A synthesis of climatic records. *Earth-Science Reviews*, 2013, 122: 38-57.
- [13] Malygina N, Papina T, Kononova N, et al. Influence of atmospheric circulation on precipitation in Altai Mountains. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(1): 46-59.
- [14] Andreev A A, Pierau R, Kalugin I A, et al. Environmental changes in the northern Altai during the last millennium documented in Lake Teletskoye pollen record. *Quaternary Research*, 2007, 67: 394-399.
- [15] Kalugin I, Daryin A, Smolyaninova L, et al. The 800 year long annual records of air temperature and precipitation over Southern Siberia inferred from high-resolution time-series of Teletskoye Lake sediments. *Quaternary Research*, 2007, 67: 400-410.
- [16] Li Y, Qiang M, Zhang J, et al. Hydroclimatic changes over the past 900 years documented by the sediments of Tietai Lake, Altai Mountains, Northwestern China. *Quaternary International*, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2016.07.053>.
- [17] Sidorova O V, Siegwolf R T W, Myglan V S, et al. The application of tree-rings and stable isotopes for reconstructions of climate conditions in the Russian Altai. *Climate Change*, 2013, 120(1/2): 153-167.
- [18] Shah S K, Touchan R, Babushkina E, et al. August to July precipitation from tree rings in the forest-steppe zone of Central Siberia (Russia). *Tree-Ring Research*, 2015, 71(1): 37-44.
- [19] Henderson K A, Laube A, Gaggeler H W, et al. Temporal variations of accumulation and temperature during the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: D03104.
- [20] Chen F, Yuan Y J, Wei W S, et al. Precipitation reconstruction for the southern Altay Mountains (China) from tree rings of Siberian spruce, reveals recent wetting trend. *Dendrochronologia*, 2014, 32: 266-272.
- [21] Chen F, Yuan Y J, Zhang T W, et al. Precipitation reconstruction for the northwestern Chinese Altay since 1760 indicates

- the drought signals of the northern part of inner Asia. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(3): 455-463.
- [22] Zhang T W, Yuan Y J, Yu S L, et al. June to September precipitation series of 1481-2004 reconstructed from tree-ring in the western region of Altay Prefecture, Xinjiang. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(4): 659-667. [张同文, 袁玉江, 喻树龙, 等. 树木年轮重建阿勒泰西部 1481-2004 年 6-9 月降水量序列. *冰川冻土*, 2008, 30(4): 659-667.]
- [23] Hu Yicheng, Wei Wernshou, Yuan Yujiang, et al. Reconstruction and analysis of January-February snowfall in the Altay prefecture during 1818-2006. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(2): 319-327. [胡义成, 魏文寿, 袁玉江, 等. 基于树轮的阿勒泰地区 1818-2006 年 1-2 月降雪量重建与分析. *冰川冻土*, 2012, 34(2): 319-327.]
- [24] Xu G, Liu X, Qin D, et al. Relative humidity reconstruction for northwestern China's Altay Mountains using tree-ring  $\delta^{18}\text{O}$ . *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(2): 190-200.
- [25] Zhang Ruibo, Shang Huaming, Yuan Yujiang, et al. Summer precipitation variation in the southern slope of the Altay Mountains recorded by tree-ring  $\delta^{13}\text{C}$ . *Journal of Desert Research*, 2015, 35(1): 106-112. [张瑞波, 尚华明, 袁玉江, 等. 基于树轮  $\delta^{13}\text{C}$  的阿尔泰山南坡夏季降水变化分析. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 106-112.]
- [26] Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 18-26. [陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究. *地理学报*, 2017, 72(1): 18-26.]
- [27] Xu C C, Li J, Zhao J, et al. Climate variations in northern Xinjiang of China over the past 50 years under global warming. *Quaternary International*, 2015, 358: 83-92.
- [28] Hildebrandt S, Muller S, Kalugin I A, et al. Tracing the North Atlantic decadal-scale climate variability in a late Holocene pollen record from southern Siberia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 426: 75-84.
- [29] 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. *The Holocene*, 2015, 25(9): 1425-1436.
- [30] Lan B, Zhang D L, Yang Y P. Evolution of lake Ailike (northern Xinjiang of China) during past 130 years inferred from diatom data. *Quaternary International*, 2017. doi: 10.1016/j.quaint.2016.014.
- [31] Song M, Zhou A, Zhang X, et al. Solar imprints on Asian inland moisture fluctuations over the last millennium. *The Holocene*, 2015, 25(12): 1935-1943.
- [32] Ma L, Wu J L, Hong Y, et al. The medieval warm period and the Little Ice Age from a sediment record of Lake Ebinur, Northwest China. *Boreas*, 2011, 40(3): 518-524.
- [33] Chen F, Huang X, Zhang J, et al. Humid little ice age in arid central Asia documented by Bosten Lake, Xinjiang, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(12): 1280-1290.
- [34] 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. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 131: 33-50.
- [35] Feng Z D, Wu H N, Zhang C J, et al. Bioclimatic change of the past 2500 years within the Balkhash Basin, eastern Kazakhstan, Central Asia. *Quaternary International*, 2013, 311: 63-70.
- [36] Tian F, Herzschuh U, Dallmeyer A, et al. Environmental variability in the monsoon-westerlies transition zone during the last 1200 years: Lake sediment analyses from central Mongolia and supra-regional synthesis. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 73: 31-47.
- [37] Ran M, Feng Z. D. Variation in carbon isotopic composition over the past ca. 46,000 yr in the loess-paleosol sequence in central Kazakhstan and paleoclimatic significance. *Organic Geochemistry*, 2014, 73: 47-55.
- [38] Hong B, Gasse F, Uchida M, et al. Increasing summer rainfall in arid eastern-central Asia over the past 8500 years. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5279.
- [39] Long H, Shen J, Tsukamoto S, et al. Dry early Holocene revealed by sand dune accumulation chronology in Bayanbulak Basin (Xinjiang, NW China). *The Holocene*, 2014, 24(5): 614-626.

## Comparison of precipitation variations at different time scales in the northern and southern Altai Mountains

ZHANG Dongliang<sup>1,2</sup>, LAN Bo<sup>1,2</sup>, YANG Yunpeng<sup>1,2</sup>

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** As one of the most important regions for paleoclimate study, the Altai Mountains are influenced by the prevailing westerly airflow throughout a year. In order to get a better understanding of the precipitation variations at different time scales (i.e., season, year, multi-decades, centennial and millennial scales) in the northern and southern Altai Mountains, we investigate the observed data from 11 meteorological stations and published paleoclimate documents (including tree rings, ice cores and lake cores) in the northern and southern Altai Mountains. The results show that the precipitation during the observed interval experiences a decreasing trend in the northern Altai Mountains, whereas an increasing trend in the southern Altai Mountains. The out-of-phase relationship of precipitation in the northern and southern Altai Mountains also exists in the two centennial intervals, the last millennium and the Holocene epoch. We propose that the out-of-phase relationships of precipitation variations at different time-scales (i.e., season, year, multi-decades, centennial and millennial scales) indicate that the Altai Mountains are an important climatic boundary. However, the reasons of out-of-phase relationship at different time-scales remains to be investigated in the future. The next work is not only helpful to understand the history of regional water vapor change, but also contributes to the understanding of the succession of the Silk Road culture along the Europe-Asian steppe.

**Keywords:** Altai Mountains; precipitation; different time scales; paleoclimate