

中国西北干旱区小冰期的湿度变化特征

陈建徽¹, 陈发虎¹, 张家武¹, 杨 保²

(1. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要: 选取中国西北干旱区 11 条具有明确古湿度指示意义的气候记录, 结合冰芯、地层沉积、湖泊沉积、树木年轮、河流阶地等各种研究资料和历史记载, 研究中国西北干旱区小冰期的湿度变化。结果表明研究区小冰期 (1400-1920 AD) 从整体而言处于相对湿润的阶段: 区内高大山系降水处于较高时段——西昆仑山古里雅冰芯积累量增大, 天山山间湖泊水位回升, 祁连山敦德冰芯孢粉总浓度增加; 而盆地内流系统水量也出现了相应的变化——塔里木盆地克里雅河和塔里木河流量增大, 准噶尔盆地艾比湖水水位上升, 巴丹吉林沙漠地下水补给量上升, 居延海入湖水量增大, 湖面扩展, 青海湖盆地降水增加, 有效湿度增大, 苏干湖水体盐度降低, 入湖水量/蒸发量之比升高。同时, 较高分辨率的湿度资料显示, 研究区东—南边缘地带在小冰期内部存在次一级的干湿波动, 两个湿度较高的时期出现在 16 世纪和 18 世纪, 分别与小冰期内部的两个相对温暖时期有很好的对应。中国西北相对湿润的小冰期主要是西风带强度增加和位置南移造成该区域降水增多和全球性普遍降温导致有效湿度增大两个因素共同作用的结果, 研究区边缘地带小冰期内部冷干暖湿的配置则主要体现了夏季风的影响。

关键词: 小冰期; 中国西北干旱区; 湿度

1 引言

小冰期 (Little Ice Age, LIA) 最初是一个冰川学概念, 但目前它在很大程度上已成为一个气候学概念, 专指介于“中世纪暖期”(Medieval Warm Period, MWP) 和 20 世纪暖期之间的寒冷时期^[1, 2]。由于研究区域不同, 代用指标各异, 加上测年精度的限制, 对于小冰期的起始时间各作者的观点并不一致^[3, 4]; 但同时应该指出, 将小冰期的结束时间定为 19 世纪后半叶或 20 世纪早期已为大多数研究者所接受^[5]。近年来, 半球尺度古温度重建成为热点, 小冰期在过去千年气候变化中的位置得到了详尽的研究^[6-10]; 同时, 随着全球各区域高分辨率古气候记录的不断发表, 在小冰期的概念和性质方面, 以下两点认识获得了较好的支持: 1. 小冰期是全球性的气候异常^[11], 以较低的温度为主要特征。2. 小冰期不是几百年持续不断的冷期, 其内部存在暖波动^[3, 12], 各冷阶的寒冷程度也存在差异, 小冰期期间欧洲的最低温度出现在 17 世纪, 而北美的小冰期于 19 世纪达到高潮^[13]。

前人对中国小冰期气候变化的研究较多, 王绍武^[2, 14]、张德二^[15]、王苏民^[16]等先后进行过综述。部分学者也根据重建的我国过去 2000/1000 年温度序列, 探讨了小冰期气候特征^[17-20], 其中, Yang 等^[20]利用历史文献、冰芯、湖泊沉积物和树轮等资料重建了中国过去 2000 年的温度变化序列, 将 1400-1920 AD 这一整体低温时段界定为小冰期, 较好地刻画了我国小冰期阶段的温度特征, 本文将以其作为温度序列, 探讨西北小冰期的温湿配置特

收稿日期: 2007-09-20; 修订日期: 2007-10-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (90502008); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目 (40421101) 联合资助 [Foundation: Key Project for National Natural Science Foundation of China, No.90502008; Innovation Team Project for National Natural Science Foundation of China, No.40421101]

作者简介: 陈建徽 (1981-), 男, 博士研究生, 主要从事气候变化与湖泊生态研究。E-mail: chenjianhui.lzu@hotmail.com

通讯作者: 陈发虎 (1962-), 男, 教授, 中国地理学会常务理事。主要从事环境变化研究。E-mail: fhchen@lzu.edu.cn

点。对于小冰期内部的次级冷暖波动,无论东部季风区还是西北干旱区认识都较为一致:三个冷期大体上出现于 15 世纪, 17 世纪和 19 世纪,其持续时间和强度存在着区域差异^[19, 21-24]。小冰期的湿度变化具有更强的区域性:华北地区降水增多,长江中下游及其以南的区域降水相对减少^[25],气温和降水变化并没有明确的对应关系;对西北干旱区的小冰期气候,虽然王宗太^[26]利用较老的资料进行过综述,但由于早期资料在空间分布、分辨率、年代控制和代用指标等方面的限制,迄今为止,对该区小冰期的湿度变化状况和温度降水配置尚无全面清晰的认识,随着近年来新的湿度代用资料不断发表,亟需对西北干旱区各种湿度代用指标进行集成,较为系统地总结该区域小冰期湿度变化的特点和规律,并探讨其成因和驱动机制。

2 区域和资料

2.1 研究区概况

中国西北干旱区大致指贺兰山—乌鞘岭—日月山一线以西,昆仑山以北,包括青藏高原东北缘在内的广袤内陆区域(图 1)。本区以高大山脉和广阔盆地相间分布为主要地形特征,北疆的准噶尔盆地北有阿尔泰山南有天山;南疆的塔里木盆地为天山、西昆仑山和阿尔金山所环抱;河西¹走廊北山以北,贺兰山以西是阿拉善高原;青藏高原东北缘则有东昆仑山、柴达木盆地和祁连山。中国西北干旱区深居内陆腹地,气候具有强烈的大陆性,降水稀少,是亚洲中部干旱荒漠区的组成部分,除阿拉善高原为高平原型荒漠外,均为山间盆地型荒漠^[27]。

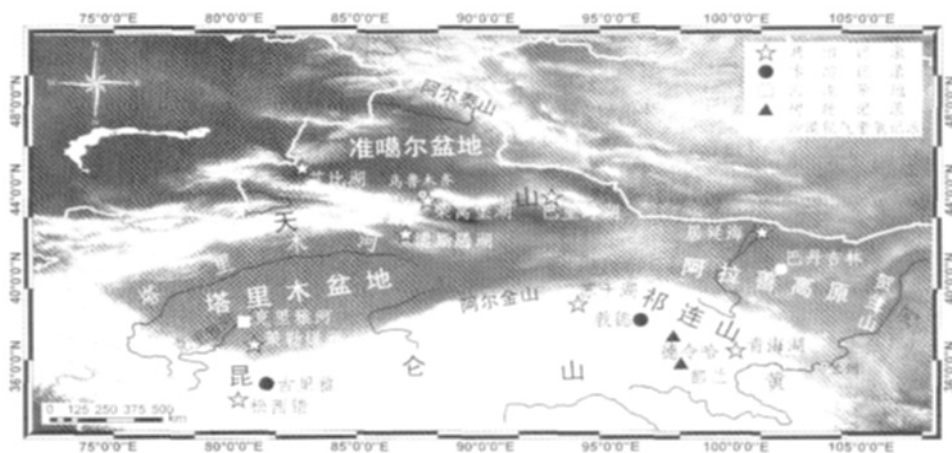


图 1 中国西北干旱区地形及小冰期古气候代用记录位置示意图

Fig. 1 DEM map showing locations of paleoclimatic records in arid Northwest China during the LIA

2.2 资料的筛选

本文选取湿度代用资料时遵循以下三个原则:(1)代用资料应该具有较为明确的湿度指示意义。(2)代用资料的分辨率要足以反映百年或至少数百年尺度的气候变化。(3)年代框架应足以保证气候记录的相对可靠。据此,选择了 11 条湿度代用记录(表 1)。

3 西北干旱区小冰期湿度变化的证据

3.1 新疆地区小冰期湿度变化特征

冰芯积累量是恢复古降水变化的良好代用指标。从位于西昆仑山 35.2°N, 81.5°E 处的古里雅冰帽钻取的冰芯记录是我国 2000a 气候变化的最好代用资料之一^[30]。已有的研究表

表 1 中国西北干旱区小冰期湿度变化集成选取的主要代用记录

Tab. 1 Basic information on the selected humidity proxy records in arid Northwest China during the LIA					
研究点	经纬度	平均分辨率 (年)	代用指标类型	指示意义	文献
古里雅	35°12'N, 81°30'E	10	冰芯积累量	降水	[28]
松西错	34°30'N, 80°23'E	150-200	Artemisia 与 Chenopodiaceae 孢粉的比率 (A/C)	相对湿度	[29]
策勒绿洲	35°~39°N, 80°~82°E	160	沉积物地层学和地球化学指标	沉积环境	[30]
博斯腾湖	42°05'N, 87°03'E	30	Artemisia 与 Chenopodiaceae 孢粉的比率 (A/C)	相对湿度	[31]
艾比湖	45°01'N, 82°52'E	30	湖芯有机碳同位素	降水	[32]
巴丹吉林沙漠	39°20'~41°30'N, 99°48'~104°14'E	25	包气带氯离子浓度	地下水 补给量	[33]
居延海	42°06'N, 101°15'E	40	介形类组合、色素、Sr/Ba 和碳酸盐	相对湿度	[34]
敦德	38°06'N, 96°24'E	100	冰芯孢粉浓度	相对湿度	[35]
青海湖	36°32'~37°15'N, 99°36'~100°47'E	5	湖芯自生碳酸盐氧同位素	有效降水	[36]
青海湖	36°32'~37°15'N, 99°36'~100°47'E	30	湖芯红色	降水	[37]
苏干湖	38°51'N, 93°54'E	50	湖芯摇蚊亚化石组合	相对湿度	本文

明, 古里雅冰芯积累量变化可以反映较大空间尺度内的降水变化特征^[39]。因此, 根据古里雅冰芯 1000 年来的积累量变化曲线^[28](图 2b), 分析该区域降水变化特征如下: 1000-1500 AD 从整体上看处于一个干旱时段, 其中 1400 AD 积累量低至 188.6 mm。1500-1830 AD 冰芯积累量较高, 基本处于平均线以上并分别于 1550 AD、1700 AD 和 1740 AD 达到 426.7 mm、407.6 mm 和 389.4 mm 的峰值。1830-1960 AD 积累量处于较低水平, 其中 1870 AD 低至 148.1 mm, 直至 1960 AD 积累量再次回升。由此可见, 在小冰期气候特征最为显著的时段, 古里雅冰芯的积累量记录指示了过去 1000 年中高于平均值的降水量, 在大尺度上表现出冷湿的气候特点。同时应该指出, 在小冰期内部存在次一级的干湿波动, 1450-1500 AD, 1570-1690 AD, 1830-1880 AD 是相对干燥的时段。

青藏高原西北部松西错 (34°30'N, 81°23'E) 的孢粉记录为古里雅冰芯累积量所反映的相对湿润的小冰期提供了支持。Van Campo & Gasse^[41]发现松西错的蒿 (Artemisia) 和藜 (Chenopodiaceae) 分别源自草原和荒漠植被环境, 因此两者的孢粉比率 (A/C) 可以作为该区域湿度的替代指标。松西错钻孔孢粉分析表明 600 ¹⁴C a BP 以后的 A/C 值较高, 指示了小冰期是该区域湿度较高的时段^[29](图 3A)。

塔里木盆地南缘策勒绿洲 (35°~39°N, 80°~82°E) 达木沟和塔格勒沉积地层和地球化学研究表明, 该区域在 630~200 ¹⁴C a BP 湿度较其前 300 年为高, 出现了软泥炭化层与亚粘土层, 而 Al₂O₃/SiO₂、Rb/Sr 值也相对较高, 该结论同样与古里雅冰芯所记录的相对湿润的小冰期相一致^[30](图 3B)。

在河流流量方面, Liu^[42]的研究指出, 塔里木盆地南缘河流的流量在 1450-1850 AD 之间较前期有较大增加 (图 3C)。Yang 等^[43]在塔里木盆地克里雅河流域的研究表明, 最新的一级河流阶地发育于小冰期时段 (图 3D), 这与历史记载是相吻合的: 16 世纪和 19 世纪初, 克里雅河能够汇入塔里木河^[44]。

陈发虎等^[31]对南疆博斯腾湖近 1000 年来的环境演变进行了研究, 湖积物孢粉分析的结果表明, 湿度代用指标 A/C 值从 15 世纪末起迅速增高, 直至 19 世纪末都维持在比较高的水平, 同时, 沉积物碳酸盐含量显著降低, 且粒度明显偏粗, 这些指标的变化指示了研究区小冰期相对湿润的环境状况 (图 3E)。并且, 不连续的历史记载表明, 博斯腾湖的洪涝灾害在清代频繁发生^[45]; 而清初的史料则显示, 由博斯腾湖、塔里木河和克里雅河共同补给的罗布泊面积辽阔^[46], 这为博斯腾湖代用指标记录的湿度变化特征提供了支持。

秦伯强等^[47]对中国西北及毗邻地区全新世 1 万年来内陆湖泊的水位变化进行了研究,

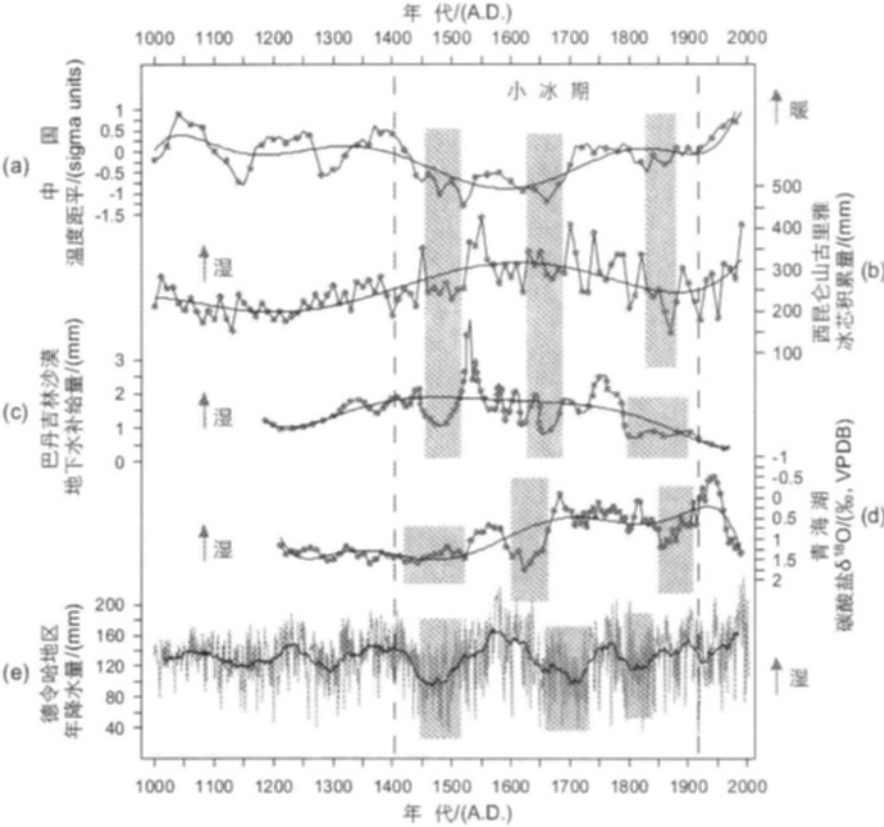


图 2 1000 年来中国温度距平及西北干旱区代表性高分辨率湿度记录: (a) 中国温度距平的“加权”综合重建曲线^[26]; (b) 古里雅冰芯净积累量^[26]; (c) 巴丹吉林沙漠地下水补给量变化^[33]; (d) 青海湖自生碳酸盐氧同位素变化^[26]; (e) 德令哈地区树轮重建年降水量^[40]

Fig. 2 Temperature variation in China and representative high-resolution humidity records in arid Northwest China during the last millennium. (a) "Weighted" composite temperature reconstruction for whole China^[26]; (b) Decadal net accumulation record of the Guliya ice core^[26]; (c) Groundwater replenishment change in Badain Jaran Desert^[33]; (d) $\delta^{18}\text{O}$ variation in Qinghai Lake^[26]; (e) Tree-ring reconstructed precipitation in Delingha region^[40]

反映了这一地区的干湿变化情况。他们的结果表明, 天山东部的巴里坤湖 (图 3F), 准噶尔盆地南缘的柴窝堡湖 (图 3G), 在小冰期时湖泊水位均处于回升或停留阶段。

艾比湖位于准噶尔盆地西南部 (44°54'~45°08'N, 82°35'~83°10'E), 是重建区域古环境变化的理想地点。已有的研究表明, 艾比湖湖积物有机质碳同位素在一定程度上反映了流域降水状况^[40]。通过对 1500 年来艾比湖沉积物有机质碳同位素的变化进行分析, 发现约 1460-1860 AD 期间, 有机质碳同位素整体偏负, 并且湖积物烧失量指示的有机质含量也处于高值阶段, 这些指标揭示了此区域在小冰期以较高的湿度为特征^[32](图 3H)。

3.2 阿拉善高原小冰期湿度变化特征

巴丹吉林沙漠 (39°~41°N, 99°~104°E) 属于阿拉善台块的坳陷盆地, 位于全球西风带中部, 靠近夏季风末端, 受人类活动影响较小, 是研究古气候变化的理想场所。但由于缺少有效的古环境信息提取方法, 近千年来的高分辨率古气候研究非常薄弱。马金珠等^[33]利用包气带 Cl^- 计算地下水补给量的氯质量平衡 (CMB) 方法, 重建了巴丹吉林沙漠南缘 800 年来的地下水补给历史 (图 2c), 进而反映研究区域的湿度变化情况: 从较长时间尺度来看, 1291-1800 AD 是地下水补给量较高的阶段 (图 3I), 其中, 1530 AD 出现了 4.28 mm 的全部

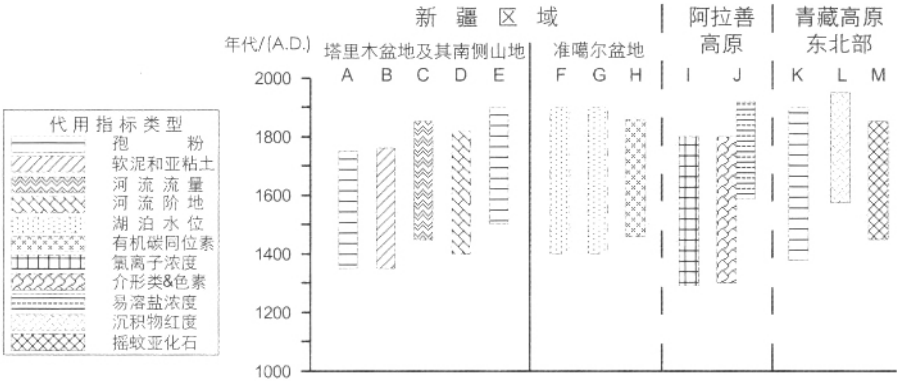


图 3 中国西北干旱区各类型代用指标记录的近千年来相对湿润阶段: A. 松西错孢粉记录; B. 策勒绿洲地层学证据; C. 塔里木盆地南缘河流流量; D. 克里雅河河流阶地; E. 博斯腾湖孢粉记录; F. 柴窝堡湖水位; G. 巴里坤湖水位; H. 艾比湖有机碳同位素记录; I. 巴丹吉林沙漠地下水补给量; J. 东居延海介形类 & 色素记录、东居延海易溶盐浓度变化; K. 敦德冰芯孢粉记录; L. 青海湖沉积物红度; M. 苏干湖摇蚊亚化石组合 (注: D 列、F 列和 G 列外框虚线表明原始资料虽指出小冰期湿度相对较高, 但没有确切的偏湿阶段年代范围, 仅作参考)

Fig. 3 Compilation of the relatively humid periods indicated by different types of proxy data in arid Northwest China since 1000 AD. A. Evidence of pollen data from Sumxi Co; B. Evidence from sedimentologic characteristics in Cele; C. River runoff recorded by historic documents in southern fringe area of Tarim Basin; D. Keliya river terrace; E. Pollen records in Bosten Lake; F. Lake level of Chaiwopu; G. Lake level of Balikun; H. Evidence from $\delta^{13}C$ values of organic matter in Ebi Lake; I. Groundwater replenishment amounts in Badain Juran Desert; J. Evidence of ostracod assemblage & pigment (left column) and of sediment redness (right column) from Eastern Juyan Lake; K. Pollen evidence from Dunde icecore; L. Sediment redness in Qinghai Lake; M. Chironomid assemblage in Sugan Lake (Notes: Dash-line frames of column D, F and G indicate the relatively humid LIA without certain chronological limits in the original publications)

面最高值; 而 1180-1290 AD, 1800-1990 AD 则是两个相对干旱的时期, 前一干旱期的平均补给量不足 1.3 mm, 而 19 世纪以来的补给量均值则小于 1 mm。

张振克等^[34]对东居延海湖积岩心进行了多指标分析, 获得了该区域 2600a 以来的环境变迁记录。其中, 700~160 ¹⁴C a BP 期间, 碳酸盐含量及 Sr/Ba 比的低值, 介形类化石组合 *Cypridopsis* sp-*Limnocythere dubiosa*, 反映了湖水盐度明显降低, 沉积物叶绿素及其衍生物总量的峰值, 则指示了湖泊外源有机质输入的增大。颤藻黄素的低值主要是因为低温限制了该类生物的生长。据此可以认为东居延海在小冰期期间是较为冷湿的 (图 3J)。

另外, 张洪等^[49]对东居延海易溶盐沉积的研究也表明, 1590-1920AD 该区域降水逐渐增多, 入湖水量增大, 湖泊处于扩大阶段 (图 3J)。

3.3 青藏高原东北部小冰期湿度变化特征

敦德冰芯 (38°06'N, 96°24'E) 是青藏高原东北部高分辨率古气候重建的重要载体, 冰芯中的孢粉记录可以提供过去气候变化和植被响应的敏感信息^[50]。Liu 等^[33]通过对敦德冰芯中孢粉记录的分析, 重建了全新世以来的湿度变化历史, 结果表明, 1380-1900 AD 期间, 孢粉浓度和 A/C 值相对较高, 指示了较高的植被密度和孢粉产量, 从而表明了小冰期该区域相对湿润的气候状况 (图 3k)。

青海湖作为半干旱区大型封闭湖泊, 其自生碳酸盐氧同位素具有反映流域相对湿度的潜力^[51], Henderson 等^[52]的研究证实了这一点。同时, 湖积物中的粗颗粒含量在高分辨率古气候研究中可以反映入湖水量的多少^[53], 因此可作为区域降水的代用指标。通过将青海湖短钻岩芯的自生碳酸盐氧同位素和粗颗粒含量相结合进行分析, 张家武等^[36]重建了该区域 800 年来的降水变化 (图 2d), 结果显示: 1500 AD 以前, 高原北部以干旱气候为主, 该时段 $\delta^{18}O$ 始终处于较高水平, 同时粗颗粒含量的相对低值也为该观点提供了支持。氧同位素和

粗颗粒含量均指示 1500-1950 AD 青海湖总体上处于一个湿度相对较高的时期。同时,注意到 1560-1650 AD 和 1780-1860 AD 期间又是两个次一级的相对干旱时段。

Ji 等^[37]利用湖泊沉积物红度 (redness) 指示青海湖区域的降水状况。湖积物红度主要由沉积物中的氧化铁含量所决定,氧化铁源于湖区红色地层或黄土沉积,由于流水冲刷进入湖中,因此,降雨量与湖积物红度正相关。青海湖沉积物红度图表明,16 世纪晚期至 20 世纪中期,湖区处于相对湿润的阶段 (图 3L)。

位于柴达木盆地北缘的苏干湖沉积记录可为西北内陆干旱区古气候重建提供有价值的信息,摇蚊亚化石作为有效的水体盐度代用指标,通过高咸水种和低咸水种摇蚊头壳丰度的变化可以间接推演区域气候和环境演变。对苏干湖 SG01 孔近千年来的摇蚊亚化石分析结果表明,1450-1850 AD 期间,低咸水种丰度显著增加,指示了小冰期期间较高的入湖水量与蒸发量之比 (图 3M),是对苏干湖区小冰期相对湿润气候状况的反映。

综上所述,青藏高原东北部小冰期的冷湿状况同新疆地区和阿拉善高原各气候代用指标的变化所反映的湿度特征有着较好的对应。

4 讨论

4.1 探索中国西北干旱区小冰期湿度变化规律的重要意义

从全球角度来看,小冰期时段湿度方面的响应在各区域有较大差异,加拿大西南^[54]、地中海欧洲^[55]和北大西洋周围的很多区域^[56]在小冰期期间都处于冷湿的气候状况;南非东北部^[57]、落基山南部^[58]、委内瑞拉北部^[59]和阿根廷中部^[60]的小冰期出现干旱气候;而美国北部大平原地区小冰期的水文特征则相当复杂,并无明显的有效湿度升高或降低的证据^[61]。这些状况在一定程度上体现了湿度相对于温度而言有更强的区域性。同时,亚洲中部干旱区的温湿组合在不同时间尺度上各有特点^[62-67],并愈来愈得到古气候研究者的关注^[63, 65, 67]。小冰期从整体而言是数百年尺度的气候异常,探索中国西北小冰期期间的湿度变化规律,对认识亚洲内陆干旱区在数百年尺度上的温度降水配置,从而更加可靠地预测全球变暖背景下的区域水资源前景有着重要意义。

4.2 中国西北干旱区小冰期湿度变化的主要特征

西昆仑山、塔里木盆地、天山区域和准噶尔盆地的气候代用资料对青藏高原西北缘及新疆的湿度状况可有较好的反映,青藏高原东北部的降水在青海湖、祁连山敦德冰芯、柴达木盆地苏干湖的气候指标中得到体现,巴丹吉林沙漠和居延海的古气候资料对阿拉善高原的环境变化也具有代表性。因此,通过以上对包括冰芯、地层沉积、湖泊沉积、河流阶地和历史文献在内的多种不同气候档案进行归纳梳理,可获得对西北干旱区小冰期湿度变化特征比较清晰的了解,结合 Yang 等^[20]的温度变化曲线 (图 2a),对该区小冰期的气候特征作如下讨论:

(1) 从较长时间尺度来看,小冰期作为一个整体时段,其降水或者相对湿度较前期是增加的,体现了中国西北小冰期冷湿的环境特征。相对湿润的小冰期在世界其他区域有广泛报道:地中海欧洲、北大西洋周围的很多区域在小冰期期间都经历了不同寻常的冷湿状况^[54, 56, 68]。阿拉斯加西北 Farewell Lake 沉积岩芯的地化指标表明冷湿的小冰期在北太平洋周围也有记录^[69]。低纬地区,赤道东非在小冰期处于一个明显的湿润阶段^[70]。而在南半球,阿根廷南部 Patagonia 的小冰期气候同样具有冷湿的特点^[71]。但由于影响湿度的因素较为复杂,造成这些区域小冰期冷湿状况的原因不尽相同。同时我们注意到,中亚 Amu Darya 和 Syr Darya 河 14-19 世纪流量增加^[72],里海小冰期期间水位显著提高^[73];蒙古高原的岱海、达赉诺尔、乌布苏诺尔、贝加尔湖的水位在小冰期均处于回升或停留阶段^[47],这指示了中国西北小冰期相对湿润的气候状况在亚洲内陆具有较大的区域意义。

(2) 时间分辨率较高的研究^[28, 33, 36]表明, 研究区小冰期内部还存在着次级干湿波动: 古里雅冰芯积累量记录了 1450-1500 AD, 1570-1690 AD, 1830-1880 AD 的次级干燥期, 分别与小冰期内三次冷期一一对应 (图 2b)。巴丹吉林沙漠的地下水补给量变化也指示了在相对湿润的小冰期时段内, 存在次一级的冷干阶段 (1450-1500 AD 及 1610-1680 AD) (图 2c)。青海湖湿度 / 有效湿度的变化表明, 在小冰期整体湿度增加的背景下, 1560-1650 AD 和 1780-1850 AD 期间是两个次一级的相对干旱时段 (图 2d), 虽然相位略有差异, 但基本与小冰期中的寒冷阶段一致; 德令哈^[40] (图 2e) 和都兰^[74] 的树轮年表也很好地反映出高原东北部在小冰期内冷干暖湿的组合特点; 另外, 400a 来的敦德冰芯积累量曲线^[75] 对于 1600-1700 AD 及 1800-1870 AD 之间的相对干旱阶段同样有着清晰的记录。

(3) 西北干旱区小冰期期间具有湿度较高的气候特征, 这主要与西风带强度和位置的变化有关: 一方面, 小冰期的低温造成西风强盛, 携带的水汽增加^[76]; 另一方面, 北大西洋涛动负异常使西风带南移^[77], 冷空气南侵比现代更加频繁, 有利于冷暖气流交汇在比现代更南的纬度, 形成诱发更多降雨的环流形势^[78]。同时, 西北干旱区蒸发强烈, 温度降低会减少蒸发蒸腾量, 从而导致有效湿度的较大增加^[79]。另外值得注意的是, 显示小冰期内部冷干暖湿配置的气候代用记录均位于西北干旱区的东—南边缘地带, 气候相对温暖时季风增强为这些区域带来更多的降水; 而干旱区内部在小冰期期间的次级干湿波动格局有待于更多高分辨率气候变化研究的开展。

5 结论

(1) 小冰期时段, 中国西北干旱区的环境状况在整体上以相对湿润为特征, 这主要是西风带强度和位置的变化引起降水量的增大与低温造成有效湿度的增加共同作用的结果。

(2) 高分辨率的湿度代用资料进一步揭示, 中国西北干旱区的东 - 南边缘地带, 小冰期内部存在次级的干湿波动, 表现出冷干暖湿的组合形式, 主要体现了夏季风的影响。正确认识西北干旱区腹地小冰期内的次级湿度变化特征有待于更多高分辨率代用资料的发表。

参考文献 (References)

- [1] Bradley R S, Jones P D. Climate since A.D. 1500. London: Routledge, 1992. 649-655.
- [2] Wang Shaowu, Ye Jinlin, Gong Daoyi. Climate in China during Little Ice Age. *Quaternary Sciences*, 1998, 18(1): 54-62.
[王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢. 中国小冰期的气候. *第四纪研究*, 1998, 18(1): 54-62.]
- [3] Grove J M. The initiation of the "Little Ice Age" in regions around the North Atlantic. *Climatic Change*, 2001, 48: 53-82.
- [4] Landsberg H E. Historic weather data and early meteorological observations. In: Hecht A D (ed.). *Palaeoclimatic Analysis and Modelling*. New York: Wiley, 1985. 27-69.
- [5] Ogilvie A E J, Jónsson T. "Little Ice Age" Research: A perspective from Iceland. *Climatic Change*, 2001, 48: 9-52.
- [6] Jones P D, Briffa K R, Barnett T P et al. High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: Interpretation, integration and comparison with General Circulation Model control-run temperatures. *Holocene*, 1998, 8(4): 455-471.
- [7] Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(6): 759-762.
- [8] Jones P D, Osborn T J, Briffa K R. The evolution of climate over the last millennium. *Science*, 2001, 292: 662-667.
- [9] Morberg A, Sonechkin D M, Holmgren K et al. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 2005, 433: 613-617.
- [10] Osborn T J, Briffa K R. The spatial extent of 20th-century warmth in the context of the past 1200 years. *Science*, 2006, 311: 841-844.
- [11] Soon W, Baliunas S. Proxy climatic and environmental changes of the past 1000 years. *Climate Research*, 2003, 23: 89-110.
- [12] Grove J M. The onset of the Little Ice Age. In: Jones P D, Ogilvie A E J, Davies T D et al. (eds). *History and Climate: Memories of the Future?* New York: Kluwer Academic Publishers, 2001. 153-185.

- [13] Jones P D, Briffa K R. The "Little Ice Age": Local and global perspectives. *Climatic Change*, 2001, 48: 5-8.
- [14] Wang Shaowu, Wang Risheng. Little Ice Age in China. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36(3): 217-220. [王绍武, 王日昇. 中国的小冰河期. *科学通报*, 1990, 35(10): 769-772.]
- [15] Zhang De'er. The Little Ice Age in China and its correlations with global change. *Quaternary Sciences*, 1991, 11(2): 104-111. [张德二. 中国的小冰期气候及其与全球变化的关系. *第四纪研究*, 1991, 11(2): 104-111.]
- [16] Wang Sumin, Liu Jian, Zhou Jing. The climate of Little Ice Age Maximum in China. *Journal of Lake Sciences*, 2003, 15(4): 369-376. [王苏民, 刘健, 周静. 我国小冰期盛期的气候环境. *湖泊科学*, 2003, 15(4): 369-376.]
- [17] Wang Shaowu, Wen Xinyu, Luo Yong et al. The reconstruction of temperature series in China for the last 1000 years. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(8): 958-964. [王绍武, 闻新宇, 罗勇等. 近千年中国温度序列的建立. *科学通报*, 2007, 52(8): 958-964.]
- [18] Zheng Jingyun, Wang Shaowu. Assessment on climate change in China for the last 2000 years. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 21-31. [郑景云, 王绍武. 中国过去 2000 年气候变化的评估. *地理学报*, 2005, 60(1): 21-31.]
- [19] Ge Q S, Zheng J Y, Fang X Q et al. Winter half-year temperature reconstruction for the middle and lower reaches of the Yellow River and Yangtze River, China, during the past 2000 years. *Holocene*, 2003, 13(6): 933-940.
- [20] Yang B, Braeuning A, Johnson K R et al. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(9): 10.1029/2001GL014485.
- [21] Zhu Kezhen. A preliminary study on climate changes since the last 5000 years in China. *Acta Archaeologica Sinica*, 1972, (1): 168-189. [竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. *考古学报*, 1972, (1): 168-189.]
- [22] Wang S W, Gong D Y, Zhu J H. 20th century climate warming in China in the context of Holocene. *Holocene*, 2001, 11(3): 313-321.
- [23] Yao Tandong, Xie Zichu, Wu Xiaoling et al. Climatic change since Little Ice Age recorded by Dunde ice cap. *Science in China (Series B)*, 1991, 34(6): 760-767. [姚檀栋, 谢自楚, 武筱龄等. 敦德冰帽中的小冰期气候记录. *中国科学(B 辑)*, 1990, 20(11): 1196-1201.]
- [24] Zhang Xiangsong, Wang Zongtai. Variability and future changes in glaciers in Northwest China. In: Shi Yafeng (ed.). *Impact of Climatic Change on the Water Resources in Northwest and North China*. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1995. 53-78. [张祥松, 王宗太. 西北冰川变化及其趋势. 见: 施雅夫 主编. *气候变化对西北华北水资源的影响*. 济南: 山东科学技术出版社, 1995. 53-78.]
- [25] Wang Shaowu, Dong Guangrong (eds.). *Environmental Characteristics and Changes in Western China*. Beijing: Science Press, 2002. 43-53. [王绍武, 董光荣 主编. *中国西部环境特征及其演变*. 北京: 科学出版社, 2002. 43-53.]
- [26] Wang Zongtai. The Little Ice Age of Northwest China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1991, 5(3): 64-74. [王宗太. 中国西北地区的小冰期. *干旱区资源与环境*. 1991, 5(3): 64-74.]
- [27] Ren Mei'e, Yang Renzhang, Bao Haosheng (eds.). *An Outline of China's Physical Geography*. Beijing: The Commercial Press, 1979. 324-337. [任美锒, 杨炯章, 包浩生 主编. *中国自然地理纲要*. 北京: 商务印书馆, 1979. 324-337.]
- [28] Yao Tandong, Thompson L G, Qin Dahe et al. Variations in temperature and precipitation in the past 2000a on the Xizang (Tibet) Plateau: Guliya ice core records. *Science in China (Series B)*, 1996, 39(4): 425-433. [姚檀栋, 秦大河, 田立德等. 青藏高原 2ka 来温度与降水变化: 古里雅冰芯记录. *中国科学(D 辑)*, 1996, 26(4): 348-353.]
- [29] Van Campo E, Cour P, Huang S X. Holocene environmental changes in Bangong Co basin (Western Tibet). Part 2: The pollen record. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1996, 120: 49-63.
- [30] Zhong Wei, Xiong Heigang. Paleo-climatic and environmental development since about 4 ka B.P. and the relation with abandonments of ancient cities in southern Xinjiang. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(4): 343-347. [钟巍, 熊黑钢. 塔里木盆地南缘 4ka B.P. 以来气候环境演化与古城镇废弃事件关系研究. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 343-347.]
- [31] Chen Fahu, Huang Xiaozhong, Zhang Jiawu et al. Humid Little Ice Age in arid central Asia documented by Bosten Lake, Xinjiang, China. *Science in China (Series D)*, 2006, 49(12): 1280-1290. [陈发虎, 黄小忠, 张家武等. 新疆博斯腾湖记录的亚洲内陆干旱区小冰期湿润气候研究. *中国科学(D 辑)*, 2007, 37(1): 77-85.]
- [32] Wu Jinglu, Liu Jianjun, Wang Sumin. Climatic change record from stable isotopes in Lake Aibi, Xinjiang during the past 1500 years. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(5): 585-590. [吴敬禄, 刘建军, 王苏民. 近 1500 年来新疆艾比湖同位素记录的气候环境演化特征. *第四纪研究*, 2004, 24(5): 585-590.]
- [33] Ma Jinzhu, Chen Fahu, Zhao Hua. Groundwater recharge and climatic change during the last 1000 years from unsaturated zone of SE Badain Jaran Desert. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 48(14): 1469-1474. [马金珠, 陈发虎, 赵华. 1000 年以来巴丹吉林沙漠地下水补给与气候变化的包气带地球化学记录. *科学通报*, 2004, 49(1): 22-26.]
- [34] Zhang Zhenke, Wu Ruijin, Wang Sumin et al. Environmental changes recorded by lake sediments from east Juyanhai Lake in Inner Mongolia during the past 2600 years. *Journal of Lake Sciences*, 1998, 10(2): 44-51. [张振克, 吴瑞金, 王苏民等. 近 2600 年来内蒙古居延海湖泊沉积记录的环境变迁. *湖泊科学*, 1998, 10(2): 44-51.]
- [35] Liu K B, Yao Z Y, Thompson L G. A pollen record of Holocene climatic changes from Dunde ice cap,

- Qinghai-Tibetan Plateau. *Geology*, 1998, 26(2): 135-138.
- [36] Zhang Jiawu, Jin Ming, Chen Fahu et al. High-resolution precipitation variations in the Northeast Tibetan Plateau over the last 800 years documented by sediment cores of Qinghai Lake. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(14): 1451-1456. [张家武, 金明, 陈发虎等. 青海湖沉积岩芯记录的青藏高原东北部过去 800 年以来的降水变化. *科学通报*, 2004, 49(1): 10-14.]
- [37] Ji J, Shen J, Balsam W et al. Asian monsoon oscillations in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau since the late glacial as interpreted from visible reflectance of Qinghai Lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1-2): 61-70.
- [38] Shi Yafeng, Yao Tandong, Yang Bao. Decadal climatic variations recorded in Guliya ice core and comparison with the historical documentary data from East China during the last 2000 years. *Science in China (Series D)*, 1999, 42(Supp.): 91-100. [施雅风, 姚檀栋, 杨保. 近2000a古里雅冰芯 10a 尺度的气候变化及其与中国东部文献记录的比较. *中国科学(D 辑)*, 1999, 29(增刊 1): 79-86.]
- [39] Yao Tandong, Jiao Keqin, Yang Meixue. Precipitation variations recorded in Guliya ice core in the past 400 years. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(4): 288-293. [姚檀栋, 焦克勤, 杨梅学. 古里雅冰芯中过去 400a 降水变化研究. *自然科学进展*, 1999, 9(12): 1161-1165.]
- [40] Shao Xuemei, Huang Lei, Liu Hongbin et al. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Delingha, Qinghai. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(7): 939-949. [邵雪梅, 黄磊, 刘洪滨等. 树轮记录的德令哈地区千年降水变化. *中国科学(D 辑)*, 2004, 34(2): 145-153.]
- [41] Van Campo E, Gasse F. Pollen- and diatom-inferred climatic and hydrological changes in Sumxi Co basin (Western Tibet) since 13,000 yr B.P. *Quaternary Research*, 1993, 39: 300-313.
- [42] Liu B (ed.). *Climate Changes in Southern Tarim Basin*. Tokyo: Ancient and Present-Day Bookstore, 1976.
- [43] Yang X P, Zhu Z D, Jaekel D et al. Late Quaternary palaeoenvironment change and landscape evolution along the Keriya River, Xinjiang, China: the relationship between high mountain glaciation and landscape evolution in foreland desert regions. *Quaternary International*, 2002, 97/98: 155-166.
- [44] Yang X P. Geomorphological investigations in arid NW China with special attention to Badanjilin and Takelamagan. *Goettinger Geographische Abhandlungen*, 1991, 96: 1-124. [Geomorphologische Untersuchungen in Trockenräumen NW-Chinas unter besonderer Berücksichtigung von Badanjilin und Takelamagan. *Göttinger Geographische Abhandlungen*, 1991, 96: 1-124.]
- [45] Tian Wencheng (ed.). *Bohu County Annals*. Urumqi: Xinjiang University Press, 1993. 73. [田文成 主编. 博湖县志. 乌鲁木齐: 新疆大学出版社, 1993. 73.]
- [46] Mahpir J, Tursunov A A (eds.). *An Introduction to the Hydro-ecology in the Central Asia*. Urumqi: Xinjiang Science, Technology and Hygiene Press, 1996. 149. [加帕尔·买合皮尔, A·A·图尔苏诺夫 主编. 亚洲中部湖泊水生态学概论. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1996. 149.]
- [47] Qin Boqiang, Shi Yafeng. Changes of inland lakes of Asia since Holocene. In: Shi Yafeng (ed.). *Advances on Studies of Climate in China and Sea Level Variation*. Beijing: China Ocean Press, 1992. 134-135. [秦伯强, 施雅风. 全新世一万年来亚洲内陆湖泊的变化. 见: 施雅风 主编. *中国气候与海平面变化研究进展*. 北京: 海洋出版社, 1992. 134-135.]
- [48] Wu Jinglu, Shen Ji, Wang Sumin et al. Characteristics of an early Holocene climate and environment from lake sediments in Ebinur region, NW China. *Science in China (Series D)*, 2005, 35(2): 258-265. [吴敬禄, 沈吉, 王苏民等. 新疆艾比湖地区湖泊沉积记录的早全新世气候环境特征. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(7): 569-575.]
- [49] Zhang Hong, Jin Heling, Xiao Honglang et al. Soluble salt sediments of east Juyan Lake and its indicating palaeoclimate environment changes. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(4): 409-415. [张洪, 靳鹤龄, 肖洪浪等. 东居延海易溶盐沉积与古气候环境变化. *中国沙漠*, 2004, 24(4): 409-415.]
- [50] Fredskild B, Wagner P. Pollen and fragments of plant tissue in core samples from the Greenland ice cap. *Boreas*, 1974, 3: 105-108.
- [51] Leng M J. Stable-isotopes in lakes and lake sediment archives. In: Mackay A, Battarbee R, Birks J et al. (eds.). *Global Change in the Holocene*. London: Arnold, 2003. 124-139.
- [52] Henderson A C G, Holmes J A, Zhang J W et al. A carbon- and oxygen-isotope record of recent environmental change from Qinghai Lake, NE Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(14): 1463-1468.
- [53] Chen Jing'an, Wan Guojiang, Zhang David Dian et al. Environmental records of lacustrine sediments in different time scales: Sediment grain size as an example. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(10): 954-960. [陈敬安, 万国江, 张峰等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录: 以沉积物粒度为例. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(6): 563-568.]
- [54] Nederbragt A J, Thurow J W. A 6000 yr varve record of Holocene climate in Saanich Inlet, British Columbia, from digital sediment colour analysis of ODP Leg 169s cores. *Marine Geology*, 2001, 174(1-4): 95-110.

- [55] Grove A T. The "Little Ice Age" and its geomorphological consequences in Mediterranean Europe. *Climatic Change*, 2001, 48: 121-136.
- [56] Ogilvie A E J, Barlow L K, Jennings A E. North Atlantic climate c. A.D. 1000: Millennial reflections on the Viking discoveries of Iceland, Greenland and North America. *Weather*, 2000, 55: 34-45.
- [57] Holmgren K, Karlén W, Lauritzen S E et al. A 3000-year high-resolution stalagmite-based record of palaeoclimate for northeastern South Africa. *Holocene*, 1999, 9(3): 295-309.
- [58] Petersen K L. A warm and wet little climatic optimum and a cold and dry Little Ice Age in the southern Rocky Mountains, USA. *Climatic Change*, 1994, 26(2/3): 243-269.
- [59] Haug G H, Hughen K A, Sigman D M et al. Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene. *Science*, 2001, 293: 1304-1308.
- [60] Cioccale M A. Climatic fluctuations in the central region of Argentina in the last 1000 years. *Quaternary International*, 1999, 62: 35-47.
- [61] Fritz S C, Ito E, Yu Z et al. Hydrologic variation in the northern Great Plains during the last two millennia. *Quaternary Research*, 2000, 53(2): 175-184.
- [62] Li Jijun. The patterns of environmental changes since late Pleistocene in northwestern China. *Quaternary Sciences*, 1990, 10(4): 197-204. [李吉均. 中国西北地区晚更新世以来环境变迁模式. 第四纪研究, 1990, 10(4): 197-204.]
- [63] Luo Chao, Yang Dong, Peng Zicheng et al. Climatic and environmental records in the sediment of the Luobei billabong in Lop-Nur, Xinjiang in recent 32ka. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(1): 114-121. [罗超, 杨东, 彭子成等. 新疆罗布泊地区近 3.2 万年沉积物的气候环境记录. 第四纪研究, 2007, 27(1): 114-121.]
- [64] Shi Yafeng, Kong Zhaochen, Wang Sumin et al. Climates and environments of the Holocene megathermal maximum in China. *Science in China (Series B)*, 1994, 37(4): 481-493. [施雅风, 孔昭宸, 王苏民等. 中国全新世大暖期鼎盛阶段的气候与环境. 中国科学(B 辑), 1993, 23(8): 865-873.]
- [65] Chen Fahu, Huang Xiaozhong, Yang Meilin et al. Westerly dominated Holocene climate model in arid central Asia: Case study on Bosten Lake, Xinjiang, China. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(6): 881-887. [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. 第四纪研究, 2006, 26(6): 881-887.]
- [66] Shi Yafeng. Glacier recession and lake shrinkage indicating a climatic warming and drying trend in central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(1): 1-13. [施雅风. 山地冰川和湖泊萎缩指示的亚洲中部气候干暖化趋势及未来展望. 地理学报, 1990, 45(1): 1-13.]
- [67] Shi Y F, Shen Y P, Kang E S et al. Recent and future climate change in northwest China. *Climatic Change*, 2006, 80: 379-393.
- [68] Grove J M. The century time-scale. In: Driver T S, Chapman G P (eds.). *Time-scales and environmental change*. London: Routledge, 1996. 39-87.
- [69] Hu F S, Ito E, Brown T A et al. Pronounced climatic variations in Alaska during the last two millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 2001, 98: 10552-10556.
- [70] Verschuren D, Laird K R, Cumming B F. Rainfall and drought in equatorial East Africa during the past 1100 years. *Nature*, 2000, 403: 410-413.
- [71] Villalba R. Tree-ring and glacial evidence for the medieval warm epoch and the little ice age in southern South America. *Climatic Change*, 1994, 26: 183-197.
- [72] Boomer I, Aladin N, Plotnikov I et al. The palaeolimnology of the Aral Sea: A review. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 1259-1278.
- [73] Karpichev Y A. Variations in the Caspian sea level in the historic epoch. *Water Resources*, 2001, 28(1): 1-14.
- [74] Zhang Q B, Cheng G D, Yao T D et al. A 2326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(14): 1739-1742.
- [75] Yao T D, Xie Z C, Yang Q Z. Temperature and precipitation fluctuations since 1600a provided by Dunde Ice Cap, China. In: *International Symposium on Glaciers-Ocean-Atmosphere Interactions*, Moscow: IAHS publ 208, 1991. 61-70.
- [76] Zhang Jiacheng. Historical drought and aridification in China. In: Li Kerang (ed.). *The Drought Disaster and Its Reduction Measures in China*. Zhengzhou: Henan Science & Technology Publishing House, 1999. 117-136. [张家诚. 中国历史时期的干旱与干旱化. 见: 李克让 主编, 中国历史时期的干旱与干旱化. 郑州: 河南科学技术出版社, 1999. 117-136.]
- [77] Hurrell J W, van Loon H. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Climatic Change*, 1997, 36: 301-326.
- [78] Xue Bin. Research on Chinese lake status data base since late Quaternary. In: Yu Ge, Xue Bin, Liu Jian et al. (eds.). *Lake Records from China and the Palaeoclimate Dynamics*. Beijing: China Meteorological Press, 2001. 17-83. [薛滨.

中国晚第四纪湖泊数据库研究. 见: 于革, 薛滨, 刘健 等主编. 中国湖泊演变与古气候动力学研究. 北京: 气象出版社, 2001. 17-83.]

[79] Yu Ge, Xue Bin, Wang Sumin et al. Lake records and LGM climate in China. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(13): 1158-1164. [于革, 薛滨, 王苏民 等. 末次盛冰期中国湖泊记录及其气候意义. *科学通报*, 2000, 45(3): 250-255.]

Humidity Variability in the Arid Northwest China during LIA Derived from Different Proxy Records

CHEN Jianhui¹, CHEN Fahu¹, ZHANG Jiawu¹, YANG Bao²

(1. MOE Key Laboratory of West China's Environmental System, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Eleven major humidity proxy records and other supplementary evidences including different natural archives such as ice-cores, sedimentary records, river terraces, lake-level fluctuations as well as historical documents are involved to reconstruct the humidity variability in the arid Northwest China during the Little Ice Age (LIA) from 1400 AD to 1920 AD. The result shows that as a whole, the LIA is a relatively humid period in this region, contrasting to last 100 years during global warming and medieval warming period. For instance, precipitation in high marginal mountains of the study area was of a high value reflected by the various proxy records from west Kunlun, Tianshan and Qilian mountains. Accordingly, the discharge of big endorheic rivers such as the Tarim and Keliya rivers increased; the surface areas of terminal lakes in desert field expanded, e.g., at Juyan Lake and Ebinur Lake; the water levels rose at lakes in intermontane basins, such as Bosten Lake, Balikun Lake and Qinghai Lake; the groundwater recharge rates in the Badain Jaran Desert were increased; and the water salinity of Sugan Lake also significantly decreased during the LIA. Furthermore, the humidity records with a relatively high resolution from the eastern-southern fringe of the arid Northwest China indicate that there is a secondary oscillation of wet and dry within the LIA. The relatively high humidity during the LIA in Northeast China possibly results from the increase of precipitation in this region due to the strengthening and southward shift of westerlies and the decrease of evapotranspiration caused by the cooling during that time.

Key Words: arid Northwest China; Little Ice Age (LIA); humidity variability