

# 千百年尺度祁连山地区干湿变化对暖期的响应

周雪如, 李 育

(兰州大学资源环境学院干旱区水循环与水资源研究中心, 兰州 730000)

**摘要:** 全球升温导致区域干湿格局转变, 千年尺度中全新世暖期和百年尺度中世纪暖期可以为探究现代的气候趋势提供历史相似型。通过湖相沉积、冰芯、孢粉、树轮等古气候记录和PMIP3/CMIP5计划的古气候模型模拟数据对比分析, 结果表明, 祁连山地区中全新世暖期(7.2—6.0 ka BP)东亚夏季风强盛, 降水较多, 气候温暖湿润; 中世纪暖期(950—1250 AD)与小冰期表现为暖干—冷湿气候机制。现代观测数据显示, 祁连山地区呈现暖湿化, 但现代的气候机制与自然因子主导下暖期的响应机制差异较大, 表明了人类活动对自然发展下气候环境的影响。因此, 自然因素与人类活动共同作用是准确预测研究区未来干湿格局的基础。

**关键词:** 祁连山; 中全新世暖期; 中世纪暖期; 现代暖期; 干湿变化

DOI: 10.11821/dlxb202205007

## 1 引言

大量观测资料表明, 全球地表平均温度逐渐升高, 对比过去几万年来气温, 现代变暖的速率与幅度都是不同寻常的, 直接导致气候系统不稳定, 极端冷暖事件频繁发生且强度增大<sup>[1]</sup>。全球变暖对陆地水分循环的影响直接与人类的生产生活和生态平衡相关联, 研究陆地干湿格局对全球变暖的响应, 评估干湿趋势已成为最重要的科学问题之一。古气候研究是我们理解未来气候变化的重要基础之一, 也是有限的器测气候数据之外, 检验气候模型预测结果的唯一途径, 因此, 历史暖期是预测现代暖期的一把钥匙<sup>[2]</sup>。本文将通过分析现代暖期气候趋势, 将千年百年尺度的历史暖期作为历史相似型, 为预测未来干湿格局提供背景参考。

中国近百年的升温速率明显高于同期全球平均水平, 是全球气候变化的敏感区和影响显著区, 但气候研究在多时间尺度上结合分析较少, 区域间的变化趋势存在显著差异, 西北地区环境类型复杂, 东西部年降水量甚至呈相反趋势<sup>[3-4]</sup>。祁连山是西北地区重要的地理单元, 地处青藏高原东北缘和“丝绸之路经济带”的咽喉地段, 是中纬度西风环流和亚洲季风协同影响的典型区域, 也是生物多样性保护的优先区域。近些年, 由于全球变暖和人类活动加剧, 祁连山地区自然环境遭受到严重破坏, 生态环境和人类社会面临严峻的挑战, 急需厘清区域干湿变化趋势和产生的影响<sup>[5-6]</sup>。

祁连山及其周边地区分布着大量河湖相沉积、冰芯、孢粉、树轮等古气候记录。使用良好的气候记录, 结合CRU (Climatic Research Unit, CRU) 数据和PMIP3/CMIP5

收稿日期: 2020-06-02; 修订日期: 2022-04-12

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(42077415); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0202) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42077415; The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research, No. 2019QZKK0202]

**作者简介:** 周雪如(1998-), 女, 河南信阳人, 硕士生, 研究方向为全新世气候变化。E-mail: zhouxr20@lzu.edu.cn

**通讯作者:** 李育(1981-), 男, 甘肃兰州人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为气候变化。E-mail: liyu@lzu.edu.cn

(The Third Phase of Palaeoclimate Modeling Intercomparison Project/The Fifth Phase of the Coupled Model Intercomparison Project, PMIP3/CMIP5) 计划的古气候模型模拟数据以及现代观测技术得到的气象要素数据<sup>[7]</sup>, 可以分析祁连山地区典型历史暖期和现代暖期的气候格局。选取距现在最近, 影响最大, 千年尺度的中全新世暖期 (Middle Holocene, MH) 和百年尺度的中世纪暖期 (Medieval Warm Period, MWP) 两个时段, 分别探讨祁连山地区干湿变化对暖期的响应机制和气候差异, 并与现代暖期进行相似性分析, 从而预测该地区未来的干湿趋势。研究有助于理解祁连山地区原生生态环境的变化韵律, 为祁连山生态修复提供科学支撑。

## 2 研究区概况

祁连山是中国西北高大山系之一 (图1), 呈西北—东南走向, 西与阿尔金山脉相连, 东与秦岭、六盘山相接, 南临柴达木盆地, 北侧是河西走廊, 范围 $94^{\circ}10'E\sim 103^{\circ}04'E$ 、 $35^{\circ}50'N\sim 39^{\circ}19'N$ , 海拔4000~6000 m。地处青藏高原区、西北干旱区、东部季风区的交汇地带, 位于季风水汽输送通道上, 中西部受西风环流控制, 东部受东南季风和西南季风影响, 同时与青藏高原环流系统交汇<sup>[8]</sup>。夏季来自季风的湿润气流北进西伸, 冬季受内蒙古干冷空气、西北寒冷气流波及, 使得祁连山地区气候响应敏感, 降水变率大<sup>[9]</sup>。降水又与所处经纬度、地形坡向和坡度等因素相关, 季节和年际变化较大, 普遍从东到西降水减少。山区随海拔升高, 温度递减, 雨量递增, 太阳总辐射量增加, 表现出明显海拔地带性<sup>[8]</sup>。

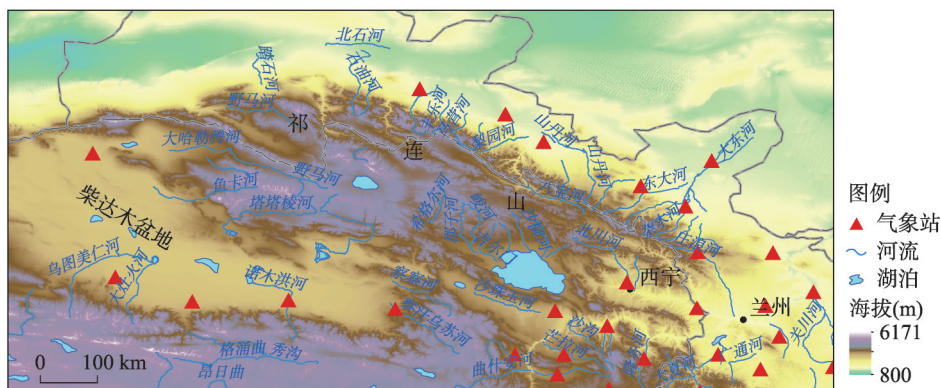


图1 祁连山及周边地区气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Qilian Mountains

区域内土壤类型丰富, 山区植被较好, 生物多样性丰富, 分布大量盆地、河流、冰川、湖泊, 是黑河、石羊河、大通河等重要河流的发源地, 并逐步发育形成了多个径流区<sup>[5]</sup>, 具有重要的作用。同时, 也发挥着“青藏高原生态屏障”和“北方防沙带”作用, 形成了具有重要意义的祁连山生态功能区<sup>[5-8]</sup>。但是, 随着探矿采矿、旅游开发、农牧等各项人类活动加剧, 生态环境变得更加脆弱; 气候变暖, 出现了雪线上移、冰川亏损、冻土退化、森林上线抬升等现象。区域发展方面, 祁连山地区人口密集, 位于丝绸之路经济带的咽喉地段, 经济发展和生态保护出现矛盾, 需要探寻生态生计双赢的绿色发展道路。

3 数据与方法

3.1 现代观测

研究一个地区干湿情况的传统方法是利用降水单一要素作为干湿变化的指标。但全球变暖背景下，温度升高必然使得地表蒸发增加，降水和蒸发变化必然导致一个地区的水分收支发生改变，影响该地区气候格局<sup>[9]</sup>。因此，本文综合使用英国东英吉利大学的CRU格点数据集（来源于The CEDA Web Processing Service）、祁连山地区30个气象站点气温降水日数据（图1）和中国地面国际交换站气候资料日值数据集（V3.0）蒸发数据（均来源于中国气象数据网）3个基本气象要素，探讨该地区干湿变化。

为了更加直观分析该地区干湿情况，基于研究区的降水和蒸发数据，以降水减蒸发（Annual precipitation-annual evaporation, P-E）作为湿度指数，解释对应时段的干湿变化。湿度指数越大，地区越湿润，反之湿度指数越小表明气候越干旱。结合一元回归分析法进行趋势分析，可以得到祁连山地区现代暖期气温降水蒸发以及湿度变化。

3.2 古气候记录与模型

古气候模拟比较计划（PMIP）是一项利用气候模型来理解过去气候变化和预估未来气候变化的国际计划，其第三阶段（PMIP3）进一步加强了与第五次国际耦合模式比较计划（CMIP5）的联系，为AR5提供了大量的科学分析事实<sup>[7]</sup>。为研究祁连山地区中全新世暖期和中世纪暖期的基本干湿状况，本文使用PMIP3/CMIP5计划的古气候模型，各时期模型使用情况如表1所示。所有模型数据均下载自ESGF（Earth System Grid Federation）联盟（<https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>），并基于祁连山内流区现代观测数据对全球模式进行统计降尺度，达到区域尺度。考虑到模型极值影响，进行样条插值法（Spline）取多模型中值得到MH、MWP的气温、降水、蒸发基本气象要素数据，计算干湿指标H。同时，MH与前工业革命时期（Pre-Industrialization, PI, 0 ka），MWP与小冰期（Little Ice Age, LIA, 1450—1850 AD）进行对比分析，以更好地理解不同时期潜在的机制差异。

祁连山地区及其周边分布着大量河湖相沉积、风成沉积、冰芯、树轮、孢粉等古气候记录（表2、表3），总有机碳（TOC）、总氮（TN）、碳酸盐含量（CaCO<sub>3</sub>）、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、蒿科与藜科植物孢粉含量比值（A/C）、碳氮比（C/N）、湖泊盐度（Salinity）、湖泊水位高度（Lake level）、磁化率（MS）、孢粉（Pollen）等代用指标记录着地质历史时期气候变化，可以有效指示着区域干湿变化。本文收集多条古气候记录，通过数据处理分析，使用代用指标判断记录指示一个时期一个地区的干湿等级。将一个地点干湿等级定义为同一地点同

表1 模型统计  
Tab. 1 PMIP3/CMIP5 models used in this study

模型名称	分辨率(1°×1°)	MH	MWP/LIA	PI
bcc-csm1-1	64×128	√	×	√
CCSM4	192×288	√	×	√
CNRM-CM5	128×256	√	×	√
CSIRO-Mk3-6-0	96×192	√	×	√
CSIRO-Mk3L-1-2	56×64	√	√	√
EC-EARTH-2-2	160×320	√	×	×
FGOALS-g2	60×128	√	×	√
FGOALS-gl	40×72	×	√	×
FGOALS-s2	108×128	√	×	√
GISS-E2-R	89×144	√	√	√
HadCM3	72×96	×	√	×
HadGEM2-CC	144×192	√	×	×
HadGEM2-ES	144×192	√	×	×
IPSL-CM5A-LR	96×96	√	√	√
MIROC-ESM	64×128	√	√	√
MPI-ESM-P	96×192	√	√	√
MRI-CGCM3	160×320	√	√	√

表2 中全新世暖期的古气候记录

Tab. 2 Paleoclimate proxy records of MH used in this study

名称	纬度(N)	经度(E)	时间段(ka BP) <sup>a</sup>	代理指标	来源
敦德冰芯	38°06′	96°24′	7.2—6.0	冰芯δ <sup>18</sup> O	[10]
扁都口	38°13′	100°52′	7.2—6.0	剖面 MS、CaCO <sub>3</sub> 、Redness	[11]
			7.2—6.0	剖面 TOC	[12]
			7.2—6.0	钻孔(PG1901)TOC、C/N	[13]
东吉湖	35°18′	98°32′	7.2—6.0	钻孔(CKL-2004)TOC、TN、Gypsum	[14]
茶卡盐湖	36°38′~36°45′	99°02′~99°12′	7.2—6.0	乔木花粉百分比	[15]
达连海	36°114′	100°24′	7.2—6.0	钻孔(DG03)CaCO <sub>3</sub> 、δ <sup>18</sup> O、δ <sup>13</sup> C、TOC、C/N	[16]
尕斯库勒湖	36°11′	100°06′	7.2—6.0	钻孔(GGH-A)δ <sup>18</sup> O	[17]
			7.2—6.0	多个岩心 TOC、TN、C/N、CaCO <sub>3</sub>	[18]
哈拉湖	38°12′~38°25′	97°24′~97°47′	7.2—6.0	钻孔(H8)δ <sup>18</sup> O	[19]
洪水河	38°10′~38°46′	102°45′~102°53′	7.2—6.0	剖面 TOC、CaCO <sub>3</sub> 、δ <sup>18</sup> O、δ <sup>13</sup> C	[20]
花海	40°11′~40°34′	96°30′~97°40′	7.2—6.0	剖面 TOC、CaCO <sub>3</sub>	[21]
克鲁克湖	37°14′~37°20′	96°51′~96°57′	7.2—6.0	钻孔(HL05-2)MS、CaCO <sub>3</sub> 、A/C	[22]
青海湖	36°15′~38°20′	97°50′~101°20′	7.2—6.0	湖泊水位	[10]
			7.2—6.0	钻孔(1F)TOC、盐度	[23]
			7.2—6.0	钻孔(QH-2000)孢粉浓度	[24]
			7.2—6.0	TOC、C/N	[25]
三角城	37°02′~39°17′	100°57′~104°57′	7.2—6.0	沉积剖面 TOC、CaCO <sub>3</sub>	[26]
盐池	37°04′	96°50′	7.0—6.4	剖面 TOC、TC、TN、C/N、CaCO <sub>3</sub>	[27]

注: a 均为日历年。

表3 中世纪暖期的古气候记录

Tab. 3 Paleoclimate proxy records of MWP used in this study

名称	纬度(N)	经度(E)	时间段(AD)	代理指标	来源
敦德冰芯	38°06′	96°24′	950—1300	δ <sup>18</sup> O	NOAA
Toson Lake	37°04′~37°13′	96°50′~97°03′	950—1294	TOC	[28]
苏干湖	38°51′	93°54′	930—1323	碳酸盐δ <sup>13</sup> C	[29]
			935—1330	碳酸盐δ <sup>18</sup> O	
			950—1302	岩芯盐度和碳酸盐δ <sup>18</sup> O	[30]
青藏高原东北部树轮	37°~38°44′	97°~100°	950—1300	RecPNoFilt	NOAA
祁连山中部祁连圆柏	38°26′	99°56′	950—1300	祁连圆柏轮宽指数	[31]
柴达木盆地祁连圆柏	36°40′~37°30′	97°03′~98°24′	950—1300	利用树轮资料重建过去降雨量变化	[32]
青海都兰祁连圆柏	36°12′~36°18′	98°14′	950—1300	祁连圆柏树轮指数距平	[33]
德令哈祁连圆柏	37°26′~37°28′	97°13′~98°03′	950—1300	DLH1-5 树轮宽度指数	[34]
乌兰祁连圆柏	36°40′~36°44′	98°13′~98°24′	950—1300	WL3-4 树轮宽度指数	[34]
哈利哈图祁连圆柏	37°03′	98°40′	950—1300	祁连圆柏树轮宽度指数	[35]

注: NOAA 为美国国家海洋和大气管理局(<https://www.noaa.gov/>); RecPNoFilt 重建降水量(树轮、mm、6—7月、树轮宽度;参考时期为1956—2011 AD)。

一时期多条气候指标指示的平均干湿状况, 干湿等级越偏负表明这一时期该地点越湿润, 反之越干。以中全新世暖期为例, 先选取研究区一条古气候记录, 计算代理指标在中全新世暖期的算术平均值, 然后与同一指标对应工业时期数据的  $A \pm SD$  (算术平均值  $\pm$  标准偏差) 进行比较, 根据记录指示的干湿状况, 判断中全新世暖期该记录指示的湿度, 干湿等级分为湿润 ( $W = -2$ )、半湿润 ( $M = 0$ ) 和干旱 ( $D = 2$ )。例如, 一个地点共 3 个代理指标, 两条指示干旱, 一条指示半湿润, 则该地点的湿度等级为  $1.33 = (2 \times 2 + 0 \times 1) / 3$ 。同理, 中世纪暖期与小冰期 (1450—1850 AD) 进行比较, 判断中世纪暖期时祁连山地区湿度。

## 4 祁连山地区各暖期的气候变化

### 4.1 暖期时间尺度

**4.1.1 现代暖期时间范围** 近百年全球增温速率前所未有, 1951—2012 年全球平均地表温度的升温速率约是 1880 年以来升温速率的两倍<sup>[1]</sup>, 祁连山在近几十年加速变暖且幅度较大<sup>[36]</sup>。综合考虑早期记录残缺、祁连山地区中国气象台观测起始时间及 CRU 数据长度等原因, 本文选取 1958—2018 年共 60 年数据来研究现代暖期气候变化<sup>[37]</sup>。

**4.1.2 千年尺度的中全新世暖期** 全新世大暖期是指全新世以来气候最温暖的时期<sup>[38]</sup>, 期间存在一个稳定温暖湿润的中全新世时期, 但各区域暖期响应时间不同。早期根据北欧孢粉  $^{14}\text{C}$  定年, 提出 9.5—2.5 ka BP ( $^{14}\text{C}$  年代) 是全新世温暖时期, 适用范围仅在欧洲北部及亚洲北部地区<sup>[39]</sup>。格陵兰冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  同位素反映高温期在 8.0—4.0 ka BP (未经标注者均为日历年)<sup>[39]</sup>。施雅风根据全新世时期冰川、孢粉、植物、土壤、湖泊、树轮等古气候记录提出中国全新世大暖期是 8.5—3 ka BP ( $^{14}\text{C}$  年代), 中全新世期间夏季风降水及中国北方降水显著增加, 到达稳定的暖湿阶段<sup>[40]</sup>。祁连山敦德冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  含量显示 8.5 ka BP 左右气温已高于现代, 温暖湿润期出现在约 7.2—6.0 ka BP, 大概 2.9 ka BP 后呈现多次连续降温波动<sup>[39]</sup>。中国全新世始于约 10.5 ka BP, 之后经过剧烈波动, 约 7.2—6.0 ka BP 达到稳定的暖湿期, 之后经过数次气候事件<sup>[40]</sup>。研究选择全新世大暖期最稳定温暖湿润时段, 即中全新世 7.2—6.0 ka BP 时期, 探讨祁连山千年尺度暖期干湿变化。

**4.1.3 百年尺度的中世纪暖期** Lamb 根据来自北欧和北大西洋地区的资料和证据, 表明欧洲中世纪时期一些地区比现在温暖, 称为中世纪暖期<sup>[41]</sup>。大量研究表明 MWP 具有全球性, 但各地区起止时间存在争议。全球/半球或是模式模拟结果显示, 各地区中世纪暖期基本上出现于 800—1400 AD 范围<sup>[42]</sup>。李健等全球海气藕合气候模式模拟结果表明, 中国的中世纪暖期大概是 1000—1260 AD<sup>[43]</sup>。初子莹等初步重建了过去千年中国地温序列, 指出 1000—1310 AD 与中世纪暖期对应<sup>[44]</sup>。葛全胜等重建的过去 2000 年中国温度变化曲线, 显示 930—1310 AD 为暖期<sup>[45]</sup>。根据冰芯、树轮、历史文献、湖泊沉积及孢粉等高分辨率的代用资料, 综合表明中国东部在 900—1300 AD 出现温暖期<sup>[46]</sup>, 西部地区稍晚。基于上述, 研究选择 950—1300 AD 研究祁连山地区中世纪暖期气候变化。

### 4.2 气候变化

**4.2.1 现代暖期 (1958—2018 年) 干湿变化** 使用祁连山地区各气象站点的气温月值、降水月值、蒸发日值数据计算年平均气温、降水累积量和蒸发累积量, 再对其进行空间上的算术平均值计算, 得到了 1958—2018 年祁连山区域的逐年平均气温、降水量以及蒸发量的算术平均值, 并结合一元线性回归进行趋势分析, 做出祁连山地区多年气温降水蒸发变化曲线 (图 2)。1958—2018 年祁连山地区气温总体呈上升趋势, 年平均气温为

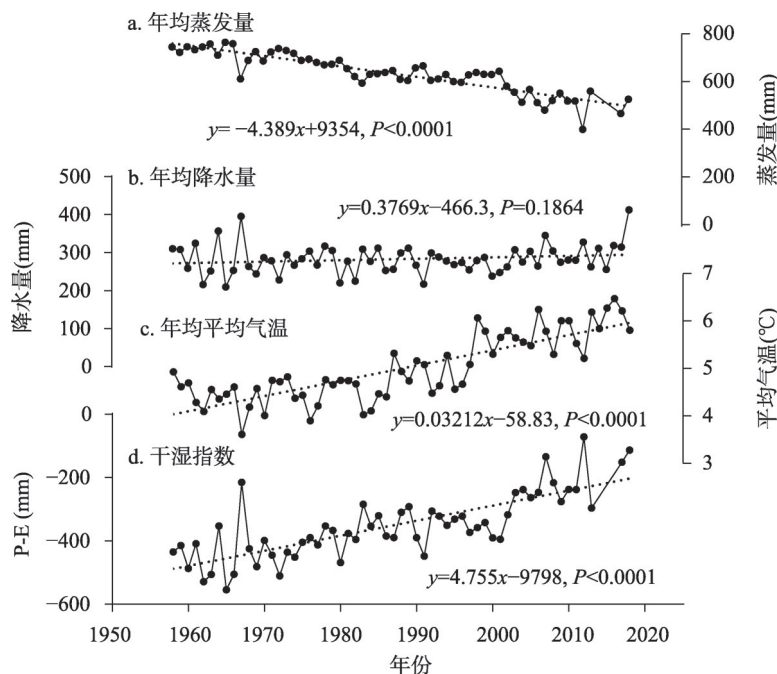


图2 祁连山地区年均气温降水蒸发和湿度变化

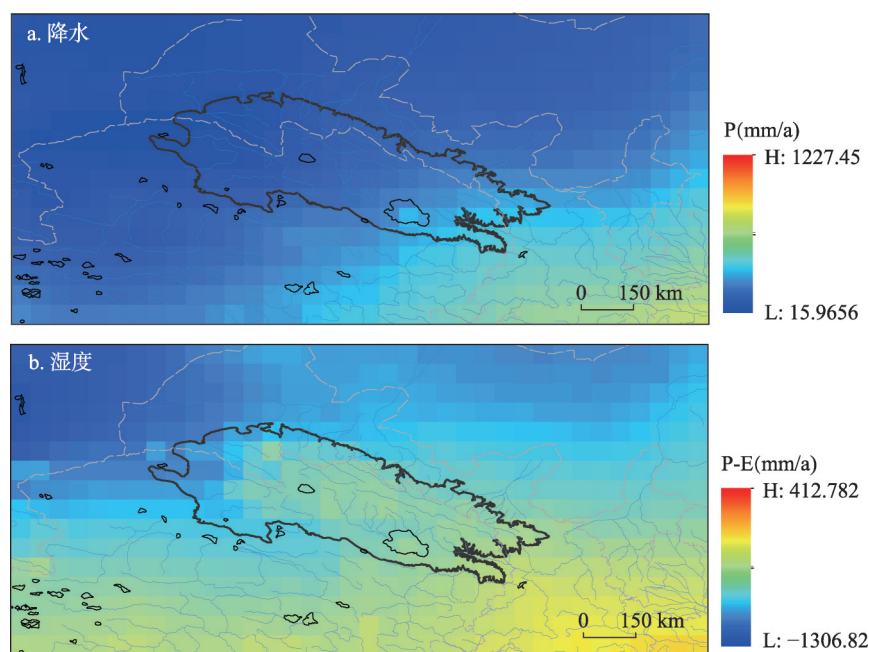
Fig. 2 Annual mean temperature, precipitation, evaporation and dry-wet index changes in the Qilian Mountains

5.0 °C, 增温幅度为0.32 °C/10a, 尤其在20世纪90年代增温幅度更大, 进入21世纪后变暖幅度有所减缓; 降水量年际波动频繁, 多年平均降水量为282.92 mm, 1958—2018年降水量呈缓慢增长趋势, 增加速率为0.38 mm/a; 祁连山地区蒸发量逐年减少, 多年平均蒸发量为634.73 mm, 下降速率为4.39 mm/a。上述可得, 祁连山地区不断变暖, 降水逐年增多, 蒸发却逐年减少。

通过逐年降水量以及蒸发量的算术平均, 计算得出湿度指数(P-E)变化(图2d)表明, 祁连山地区整体上湿度不断增加, 2000年左右增湿幅度突然跃升, 波动频繁, 未来湿度有持续上升的趋势。结合气温不断增加, 祁连山地区呈现暖湿化趋势, 与施雅风等人得出的西北地区气候由暖干转向暖湿结论一致<sup>[4]</sup>。

CRU是一套覆盖完整、高分辨率的资料, 能够很好的揭示中国年平均气象要素变化<sup>[47]</sup>。1958—2018年祁连山地区年平均降水及年潜在总蒸发数据(图3)显示, 该地区降水的空间差异小, 越靠近东南方向降水量会有所增加; 湿度呈纬向分布, 由北到南逐渐增加, 区域干湿的空间差异主要由蒸发导致。同时, 蒸发与温度分布密不可分, 温度的不断升高会引起蒸发增加。IPCC指出现代以来全球气温升高与人类活动增强有关<sup>[1]</sup>。因此, 造成现代暖期气候格局的机制可能是: 近代以来, 由于大气中温室气体和硫化物气溶胶增加, 中纬度地区增温明显, 环流活动加强, 导致降水量增加, 呈现暖湿化趋势<sup>[48]</sup>。

**4.2.2 中全新世暖期(7.2—6.0 ka BP)干湿变化** 大量证据表明, 全新世气候复杂, 在到达稳定前曾发生千年或百年尺度的周期的冷暖事件<sup>[39]</sup>。根据祁连山地区部分古气候重建资料, 约在中全新世暖期(7.2—6.0 ka BP)出现稳定的温暖湿润阶段。在该时期, 扁都口剖面的磁化率(Magnetic susceptibility, MS)增加(图4a), 表明受到东亚夏季风加强影响, 祁连山地区水热组合发生变化, 环境得到改善<sup>[11]</sup>; 洪水河剖面TOC含量增加, 并在约



注：数据来源 CRU。

图3 1958—2018年祁连山地区的降水与湿度

Fig. 3 Precipitation and moisture index in the Qilian Mountains in 1958-2018

7 ka BP 达到峰值, 表明湖泊处于较高的初级生产力水平和暖湿的气候环境 (图 4b) [20]; 花海盆地以碳酸盐沉积为主, 湖泊  $\text{CaCO}_3$  含量除了 6.7 ka BP 一个干旱事件, 整体呈现为凹谷, 表明入湖水量增大, 气候湿润 (图 4c) [21]; 克鲁克湖钻孔 HL05-2 的  $\text{CaCO}_3$  含量自 8 ka BP 骤降 (图 4d) 后稳定在低值, 表明降水量较多, 碳酸盐析出较少 [22]; 尕斯库勒湖 DG03 剖面  $\text{CaCO}_3$  含量平均 16%, 含量较低, 波动不大 (图 4e), 说明湖泊相对比较稳定, 气候较为湿润 [16]; 青海湖钻孔 1F TOC 含量从 5 ka BP 下降至全新世晚期 (图 4f), 波动较小, 指示水分条件好 [23]; 温暖湿润的气候, 适宜树木生长, 同时森林扩张具有滞后性, 达连海森林孢粉在全新世中期处于较低水平 (图 4g), 但后期呈上升趋势 [15]; 三角城沉积剖面的有机质碳同位素组成在  $-30\text{‰}$ ~ $-20\text{‰}$ , 更为偏轻 (图 4h), 说明降雨量较大, 陆生植被相对繁盛 [26]; 更尕斯库勒湖钻孔 GGH-A 的 C/N 值稳定 (图 4j), 比值绝大部分低于 10, 湖泊沉积物以水生植物藻类为主, 表明湖泊水位较高, 气候湿润 [17]; 敦德冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  在全新世中期处于高值期 (图 4j), 表明气候以温暖为特征 [10]。

中全新世暖期共 14 条古气候记录代用指标的干湿等级分布如图 5, 有 11 条记录显示等级  $\leq 0$ , 只有 3 条记录显示干旱状态 (0~2)。整体上看, 在全新世中期 (7.2—6.0 ka BP) 祁连山地区温暖湿润, 受季风波及范围影响, 祁连山地区呈现北到南干湿指数越来越小, 对应地区越来越湿润的现象。

综上所述, 全新世中期温暖湿润, 由强盛的东亚季风带来大量降水, 使得祁连山地区湖泊处于较高的初级生产力, 植被向西迁移, 森林逐渐扩张。

**4.2.3 中世纪暖期 (950—1250 AD) 干湿变化** 祁连山地区部分古气候重建资料的统计结果如图 6。青藏高原东北部树轮重建的降水量 (图 6a) 在中世纪暖期 (950—1300 AD) 逐渐降低, 平均值较小冰期 (1450—1850 AD) 小; 有研究发现干旱区祁连圆柏的生长受限蒸发或降水综合作用 [40], 即受到湿度影响, 各地区祁连圆柏轮宽指数如图 6b~6d 所

示:中世纪暖期(950—1300 AD)轮宽指数均值分别为0.061、0.927、0.954,在小冰期(1450—1850 AD)均值分别是-0.086、1.056、1.080, MWP时期轮宽指数均大于LIA时期,表明MWP时期较干旱<sup>[33-34]</sup>。哈利哈图下限轮宽指数序列(图6g)显示, WMP时期显著低于LIA时期,气候较干燥<sup>[35]</sup>。然而,祁连山中部上限祁连圆柏宽度与温度变化相关性较好<sup>[38]</sup>,其轮宽指数变化(图6e)表明, MWP时期较LIA时期气温较高。由柴达木盆地祁连圆柏重建降水量(图6f)可以直观得出, MWP降水量较LIA时期较少,中世纪暖期较早<sup>[32]</sup>。苏干湖盐度在MWP时期显著低于LIA时期,则MWP较LIA时期温暖干燥<sup>[30]</sup>。由于MWP期间温度高降水少,敦德冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 含量在LIA时期也较多(图6i)。因此,相较于小冰期,祁连山地区中世纪暖期为暖干气候, MWP-LIA表现暖干—冷湿组合特征。

祁连山地区MWP干湿等级分布(图5)显示,10条古气候记录中有9条显示等级 $\geq 0$ ,只有1条记录显示湿润(-2~-1)状态。在950—1300 AD,祁连山地区干湿程度大体与小冰期相近,东部地区受到更多因素对气候产生影响,其干湿波动较西北地区明显。同时,记录显示祁连山地区干旱地点多于湿润地点,即MWP较LIA时期是一个干旱暖期。

综上所述,在数百年来,祁连山地区表现为暖干—冷湿组合特征。造成这种变化的可能机制可能是:暖期较高温度产生较大的蒸发,降水量不足以补给,导致湿度降低,暖期温暖干燥。也有研究猜测是因为季风在暖期推进过程使得季风边缘区偏干,北半球冷期时西南风加强,青藏高原低温导致北侧下沉气流减弱以及北大西洋涛动(NAO)整体偏负使风暴路径南移等<sup>[49]</sup>。

#### 4.3 MH和MWP气候差异

在千年尺度上,祁连山地区中全新世气候变化的空间差异与季风环流和西风环流在

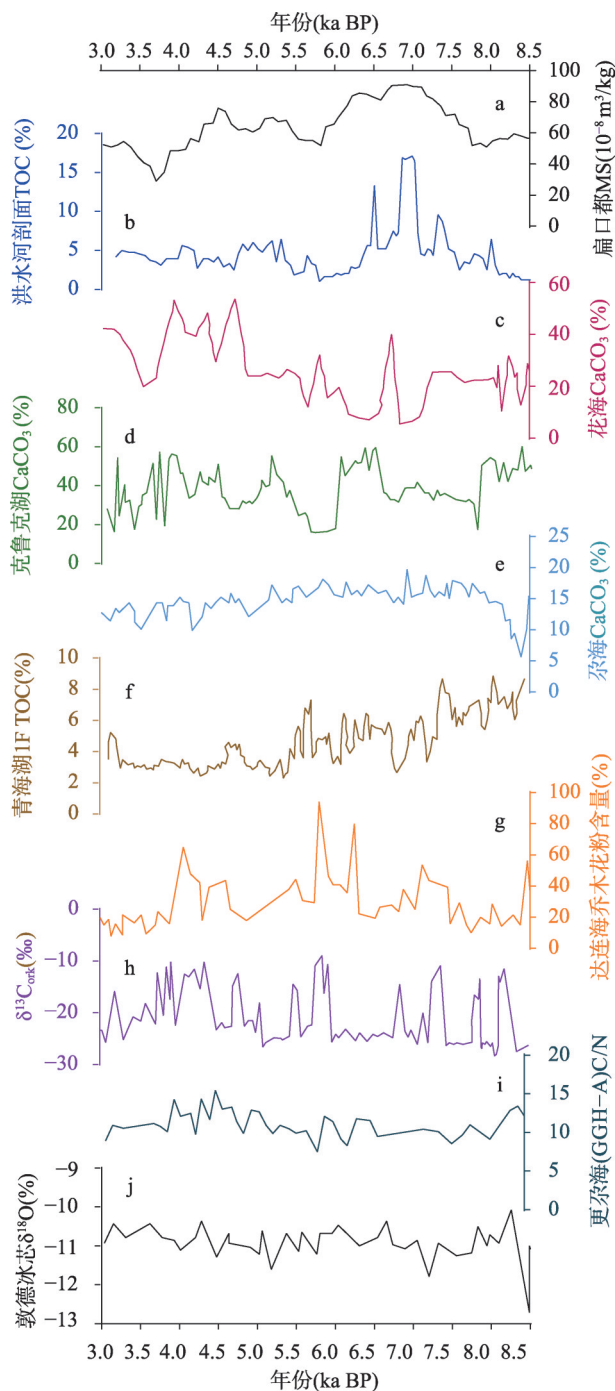


图4 中全新世暖期典型气候记录中古环境代用指标变化  
Fig. 4 Changes of paleoenvironmental proxies during the MH

这一区域的相互作用过程有关<sup>[50]</sup>, 受自然变率影响。多种古气候模型模拟中全新世暖期与前工业革命时期的气温、湿度指数对比图(图7)显示, 祁连山地区在中全新世暖期呈现西北部较寒冷湿润, 东南部较温暖干燥的空间差异, 但总体上为温暖湿润。这种气候主要是因为中全新世时期中纬度地区随气温升高, 西风环流北撤减弱, 夏季风西进北上, 季风到达区域降水量增加。

百年尺度上, 多模型模拟中世纪暖期与小冰期的气温、湿度指数对比, 结果(图7)显示, 祁连山地区气温从西北到东南递减, 且中世纪暖期整体较干旱, 较湿润地区集中在东南部。在中世纪暖期, 中国石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著偏负, 表明亚洲夏季风增强, 雨带北移, 水汽输送到达祁连山东南部带来大量降水<sup>[51]</sup>。然而, 中世纪暖期较小冰期温暖干燥, 其可能原因是: 在中世纪暖期, 祁连山地区由于较高的温度致使蒸发增加, 导致有效湿度减小, 以及季风推进过程中边缘偏干等。目前大多数研究认为, MWP与LIA形成主要受到辐射影响, 其次是太阳活动及火山活动<sup>[52]</sup>, 太阳活动驱动着亚洲季风, 影响降水量从而改变地区湿度。

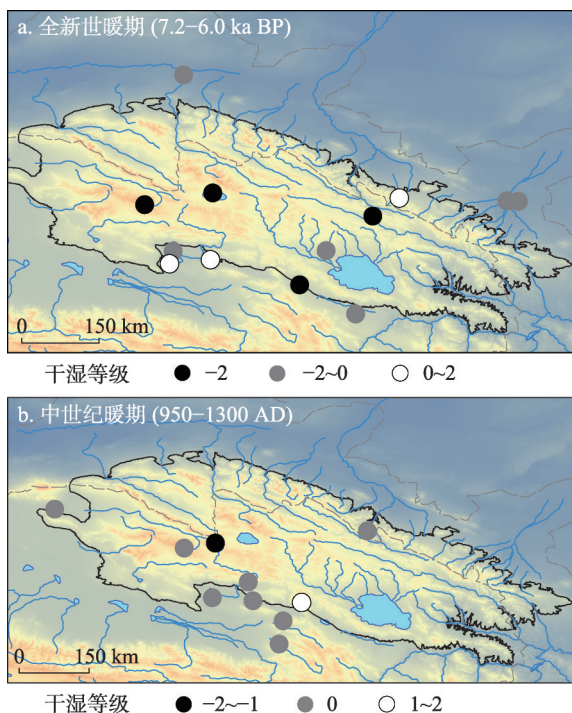


图5 祁连山地区中全新世暖期和中世纪暖期湿度等级  
Fig. 5 Dry-wet map based on multi-proxy records  
of the Qilian Mountains in the MH and MWP

## 5 讨论

### 5.1 千百年尺度祁连山地区对暖期的响应机制

对比分析古环境重建序列以及气候模型单因子或组合强迫试验等发现, 地质历史时期的暖期由自然因子引发, MH温度和降水主要受到地球轨道参数的控制, MWP增温则是主要受太阳短波辐射变化驱动的“海洋恒温机制”所致, 降水量与太阳辐射显著相关<sup>[52]</sup>, 现代暖期则主要是因为人类活动加剧, 温室气体浓度增加导致的全球气温升高<sup>[48]</sup>, 严重影响气候变化。祁连山地区的降水主要受到各种环流控制, 其中重点是季风、西风以及青藏高原环流<sup>[8]</sup>。研究发现, 千年尺度上MH受到强盛的东亚夏季风影响, 祁连山地区整体温暖湿润, 西风环流随距离不断减弱, 从西北到东南出现冷湿—暖干的变化。在百年尺度的MWP期间, 该地区不同于季风影响区的气候模式, 表现出温暖干燥特征, 主要是由于太阳辐射增强, 温度升高使得降水和蒸发量收支改变。近些年, 受到人类活动影响, 温室气体和硫化物气溶胶增加, 中纬度地区明显增温, 环流活动加强, 降水增加, 蒸发减弱, 出现明显暖湿化趋势。因此, 千百年尺度历史暖期的干湿变化由自然因子主导, 而现代暖期受到温室气体增加和人类活动影响较大。

### 5.2 对现代暖期的指示意义

气候变化普遍具有周期性, 历史暖期的干湿变化可以为现代变暖的气候变化提供一

个历史参照。中亚地区中全新世暖期与现代暖期气候的相关研究表明, 二者的夏季降水变化型存在一定程度的相似<sup>[53]</sup>。但是, 两个时期的地表气温空间分布差异较大, 中全新世暖期呈同心圆状分布, 现代暖期呈纬向分布, 且前者的副高较后者强, 东部偏南气流强盛, 这种现象与中全新世暖期受到地球轨道参数主控和现代暖期受到人类活动影响较大相关<sup>[54]</sup>。参照千年尺度的中全新世暖期的气候特征, 未来祁连山地区气候达到稳定前必将经历多次冷暖事件, 当前的暖湿化也许是短时间的气候间隔, 更长时间尺度上的干湿格局还是主要由季风强弱、影响范围、方向与西风环流之间相互作用控制。

中世纪暖期与现代暖期气候的研究显示, 在百年尺度上全球温度异常的空间格局、温度变化幅度都大致相同, 中国地区降水变化在两个时期的时空格局类似, 但存在明显区域差异<sup>[55-56]</sup>。中国温度变化时空分布的不一致性, 是由于中世纪暖期主要受到太阳辐射和火山活动等自然因子控制, 现代气温主要受到人类活动增强影响。同时, 意识到中世纪暖期自然因子对降水量的影响之和比温室气体的影响高一个数量级, 现代暖期则相反<sup>[57]</sup>。参

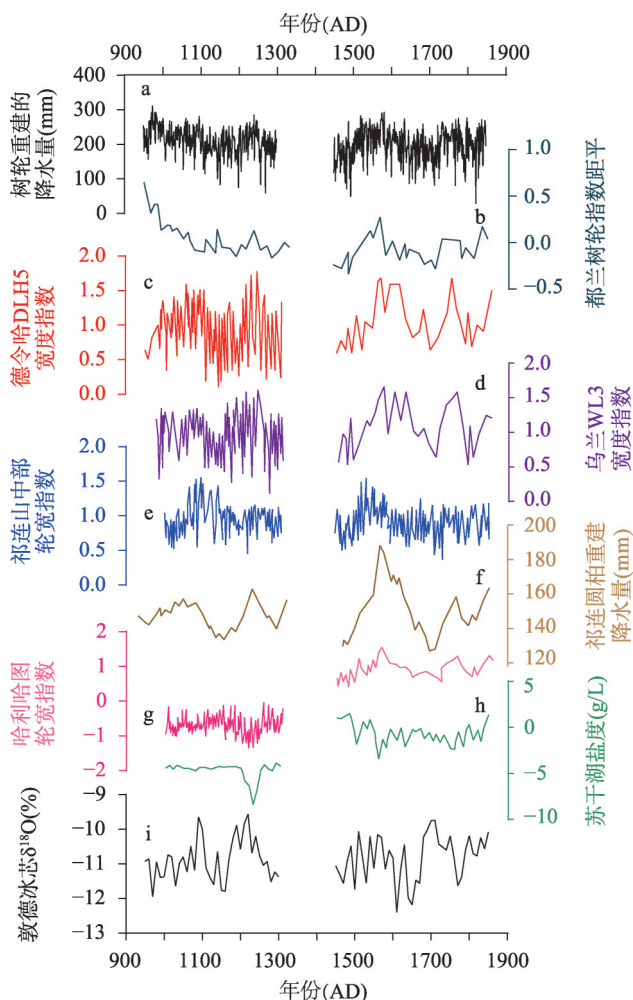


图6 祁连山地区中世纪暖期与小冰期典型气候记录中古环境代用指标变化

Fig. 6 Changes of paleoenvironmental proxies in the Qilian Mountains during the MWP and the LIA

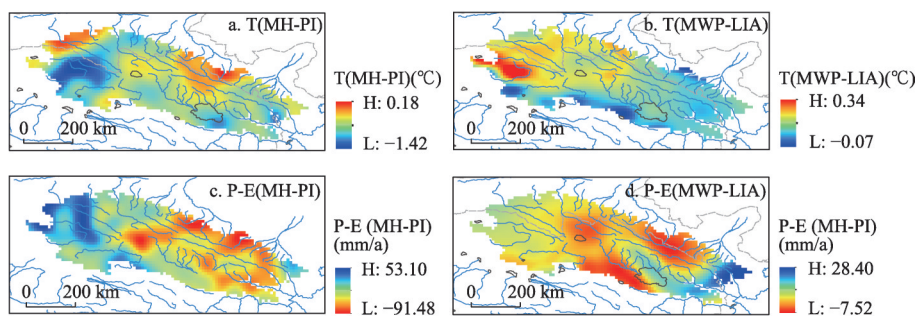


图7 祁连山地区中全新世暖期和中世纪暖期基于古气候模型的气温和湿度指数

Fig. 7 Temperature and moisture index based on paleoclimate model in the Qilian Mountains during the MH and MWP

照百年尺度的中世纪暖期,现代以来人类活动影响引发热带海温异常,夏季风处于持续衰退<sup>[51]</sup>,未来祁连山地区在不断变暖,高温影响地表水分收支,祁连山地区未来可能呈现暖干状况。

随着人类社会的演变,人地关系由适应自然生态系统转向改变生存环境,人为因素在逐渐夺取气候环境变化的主导权<sup>[58]</sup>。中全新世暖期与中世纪暖期气候主要受到自然变率(地球轨道参数,太阳辐射、火山活动)影响,而现代暖期气候变化受到人类活动大于自然因子。当前人类活动持续多样化,气候温暖化持续时间尺度也难以预测,即使现代暖期与历史暖期的气候有众多相似之处,过去气候也只能作为自然驱动下气候变化趋势的参考,用历史暖期气候响应机制来预测未来需要进一步评估。自然因素与人类活动共同作用将是准确预测研究区未来干湿格局的基础。

## 6 结论

通过古气候记录、古气候模型及现代观测资料研究祁连山地区中全新世暖期、中世纪暖期与现代暖期干湿变化,发现不同冷暖阶段气候及其成因均存在差异,探讨千百年尺度祁连山地区干湿变化对暖期的响应机制,主要结论如下:

(1) 千年尺度:全新世大暖期受地球轨道参数主控,暖期鼎盛期东亚夏季风强盛带来大量降水,祁连山地区温暖湿润。

(2) 百年尺度:中世纪暖期主要受到太阳辐射影响,温度升高。同时,夏季风为祁连山带来降水,但高温蒸发造成水分大量流失,水分收支不平衡,使得气候温暖干燥。

(3) 现代暖期:人类活动加剧,温室气体含量上升使得增温明显,环流增强带来降水增加,祁连山地区气候呈现暖湿化趋势。现代气候是受到自然因子与人类活动影响相互作用的结果。

(4) 中全新世暖期、中世纪暖期与现代暖期的气候主控因子、形成原因及发展条件并不相同。前两者是自然因素主控,后者人类活动成为影响该地区干湿格局的重要因素。因此,自然因素与人类活动共同作用是准确预测研究区未来干湿格局的基础。

## 参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis//Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] von Deimling T S, Held H, Ganopolski A, et al. Are paleo-proxy data helpful for constraining future climate change? Past Global Changes News, 2008, 16(2): 20-21.
- [3] China Meteorological Administration Climate Change Centre. Blue Book on Climate Change in China (2021). Beijing: Science Press, 2021. [中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2021). 北京: 科学出版社, 2021.]
- [4] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219-226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.]
- [5] Zhang Yaorong. Climatic variation over Qilian Mountain region in last 50 years [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2009. [张耀宗. 近50年来祁连山地区的气候变化[D]. 兰州: 西北师范大学, 2009.]
- [6] Li Xin, Gou Xiaohua, Wang Ninglian, et al. Tightening ecological management facilitates green development in the Qilian Mountains. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2928-2937. [李新, 勾晓华, 王宁练, 等. 祁连山绿色发展: 从生态治理到生态恢复. 科学通报, 2019, 64(27): 2928-2937.]
- [7] Zheng Weipeng, Man Wenmin, Sun Yong, et al. Short commentary on CMIP6 paleoclimate modelling intercomparison project phase 4 (PMIP4). Climate Change Research, 2019, 15(5): 510-518. [郑伟鹏, 满文敏, 孙咏, 等. 第四次国际古气候模拟比较计划(PMIP4)概况与评述. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 510-518.]

- [8] Li Yingjun. Tree-ring based climate reconstruction for Qilian Mountain [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. [李颖俊. 祁连山地区树轮记录的气候变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.]
- [9] Ma Zhuguo, Huang Gang, Gan Wenqiang, et al. Multi-scale temporal characteristics of the dryness/wetness over northern China during the last century. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 29(5): 671-681. [马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征. *大气科学*, 2005, 29(5): 671-681.]
- [10] Shi Yafeng, Kong Zhaochen. Climate fluctuation and vital events of Holocene in China. *Science in China: Series B*, 1992(12): 1300-1308. [施雅风, 孔昭宸. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件. *中国科学: B 辑*, 1992(12): 1300-1308.]
- [11] Yu Y T, Yang T B, Li J J, et al. Millennial-scale Holocene climate variability in the NW China drylands and links to the tropical Pacific and the North Atlantic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 233(1/2): 149-162.
- [12] Wu Guangjian, Pan Baotian, Guan Qingyu, et al. Study on hydro-thermal characteristic of eastern Qilian mountains in Holocene and present. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(2): 160-165. [邬光剑, 潘保田, 管清玉, 等. 祁连山东段全新世与现代水热组合特征研究. *地理科学*, 2000, 20(2): 160-165.]
- [13] Opitz S, Wünnemann B, Aichner B, et al. Late Glacial and Holocene development of Lake Donggi Cona, north-eastern Tibetan Plateau, inferred from sedimentological analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 337/338: 159-176.
- [14] Liu X Q, Dong H L, Rech J A, et al. Evolution of Chaka Salt Lake in NW China in response to climatic change during the Latest Pleistocene-Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(7/8): 867-879.
- [15] Cheng B, Chen F H, Zhang J W. Palaeovegetational and palaeoenvironmental changes since the last deglacial in Gonghe Basin, northeast Tibetan Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(1): 136-146.
- [16] Chen Zhong, Ma Haizhou, Cao Guangchao, et al. Carbonate content in the core DG03 of lake Gahai and its palaeoenvironmental significance. *Journal of Salt Lake Research*, 2007, 15(2): 6-11. [陈忠, 马海州, 曹广超, 等. 尕斯库勒湖 DG03 孔碳酸盐含量及其环境意义. *盐湖研究*, 2007, 15(2): 6-11.]
- [17] Qiang M R, Song L, Jin Y X, et al. A 16-ka oxygen-isotope record from Genggahai Lake on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau: Hydroclimatic evolution and changes in atmospheric circulation. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 162: 72-87.
- [18] Song L, Qiang M R, Lang L L, et al. Changes in palaeoproductivity of Genggahai Lake over the past 16 ka in the Gonghe Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57: 2595-2605.
- [19] Yan D D, Wünnemann B. Late Quaternary water depth changes in Hala Lake, northeastern Tibetan Plateau, derived from ostracod assemblages and sediment properties in multiple sediment records. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 95: 95-114.
- [20] Zhang Hucai, Ma Yuzhen, Wünnemann B, et al. A Holocene climatic record from arid northwestern China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2000, 162(3/4): 389-401.
- [21] Wang Chenhua. Environment changes documented by geochemistry in Huahai Lake [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006. [王晨华. 花海湖泊环境变化的地球化学记录研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.]
- [22] Zhao C, Yu Z C, Zhao Y, et al. Holocene millennial-scale climate variations documented by multiple lake-level proxies in sediment cores from Hurlig Lake, Northwest China. *Journal of Paleolimnology*, 2010, 44(4): 995-1008.
- [23] Li Xiangzhong, Liu Weiguo. Water salinity and productivity recorded by ostracod assemblages and their carbon isotopes since the early Holocene at Lake Qinghai on the northeastern Qinghai-Tibet Plateau, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 407: 25-33.
- [24] Liu Xingqi, Wang Sumin, Shen Ji. The grainsize of the Core QH-2000 in Qinghai Lake and its implication for paleoclimate and paleoenvironment. *Journal of Lake Sciences*, 2003, 15(2): 112-117. [刘兴起, 王苏民, 沈吉. 青海湖 QH-2000 钻孔沉积物粒度组成的古气候古环境意义. *湖泊科学*, 2003, 15(2): 112-117.]
- [25] Shen ji, Liu Xingqi, Matsumoto R, et al. A high-resolution climatic change since the Late Glacial Age inferred from multi-proxy of sediments in Qinghai Lake. *Science in China: Series D*, 2004, 34(6): 582-589. [刘兴起, 沈吉, Matsumoto R, 等. 晚冰期以来青海湖沉积物多指标高分辨率的古气候演化. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(6): 582-589.]
- [26] Zhang Chengjun, Chen Fahu, Shang Huaming, et al. The paleoenvironmental significance of organic carbon isotope in lacustrine sediments in the arid China: An example from Sanjiaocheng Palaeolake in Minqin. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(1): 89-94. [张成君, 陈发虎, 尚华明, 等. 中国西北干旱区湖泊沉积物中有机质碳同位素组成的环境意义: 以民勤盆地三角城古湖泊为例. *第四纪研究*, 2004, 24(1): 89-94.]

- [27] Li Yu, Zhang Chengqi, Zhou Xuehua, et al. An evidence of millennial-scale summer monsoon boundary change in the northwest China: Analysis results from saline minerals in lake sediments of Yanchi lake and Zhuye lake. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(3): 524-536. [李育, 张成琦, 周雪花, 等. 我国西北夏季风边界千年尺度变化的证据——来自盐池和猪野泽盐类矿物分析结果. *沉积学报*, 2015, 33(3): 524-536.]
- [28] Ling Y, Dai X Q, Zheng M P, et al. High-resolution geochemical record for the last 1100 yr from Lake Toson, northeastern Tibetan Plateau, and its climatic implications. *Quaternary International*, 2018, 487(10): 61-70.
- [29] Qiang Mingrui, Chen Fahu, Zhang Jiawu, et al. Climatic changes documented by stable isotopes of sedimentary carbonate in Lake Sugan, northeastern Tibetan Plateau of China since 2 ka BP. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(13): 1385-1393. [强明瑞, 陈发虎, 张家武, 等. 2 ka 来苏干湖沉积碳酸盐稳定同位素记录的气候变化. *科学通报*, 2005, 50(13): 1385-1393.]
- [30] Chen Fahu, Chen Jianhui, Holmes J, et al. Moisture changes over the last millennium in arid central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(7/8): 1055-1068.
- [31] Liu Xiaohong, Qin Dahe, Shao Xuemei, et al. Temperature variations recovered from tree-rings in the middle Qilian Mountain over the last millennium. *Science in China: Series D*, 2004, 34(1): 89-95. [刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 等. 祁连山中部过去近千年温度变化的树轮记录. *中国科学: D辑*, 2004, 34(1): 89-95.]
- [32] Shao Xuemei, Liang Eryuan, Huang Lei, et al. A reconstructed precipitation series over the past millennium in the northeastern Qaidam Basin. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(3): 122-126. [邵雪梅, 梁尔源, 黄磊, 等. 柴达木盆地东北部过去 1437a 的降水变化重建. *气候变化研究进展*, 2006, 2(3): 122-126.]
- [33] Yang Bao, Kang Xingcheng, Shi Yafeng. Decadal climatic variations indicated by Dulan tree-ring and the comparison with temperature proxy data from other regions of China during the last 2000 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(5): 397-402. [杨保, 康兴成, 施雅风. 近 2000 年都兰树轮 10 年尺度的气候变化及其与中国其它地区温度代用资料的比较. *地理科学*, 2000, 20(5): 397-402.]
- [34] Shao Xuemei, Huang Lei, Liu Hongbin, et al. Precipitation change since last millennium from tree ring in Delingha, Qinghai. *Science in China: Series D*, 2004, 34(2): 145-153. [邵雪梅, 黄磊, 刘洪滨, 等. 树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化. *中国科学: D辑*, 2004, 34(2): 145-153.]
- [35] Zhu Haifeng, Zheng Yonghong, Shao Xuemei, et al. Recent millennium temperature changes records by tree ring in Wulan, Qinghai. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(15): 1835-1841. [朱海峰, 郑永宏, 邵雪梅, 等. 树木年轮记录的青海乌兰地区近千年温度变化. *科学通报*, 2008, 53(15): 1835-1841.]
- [36] Lu Yuemin, Li Zongxing, Feng Qi, et al. Analysis of extreme temperature changes in Qilian Mountains in the past 60 years. *Plateau Meteorology*, 2019, 38(5): 959-970. [吕越敏, 李宗省, 冯起, 等. 近 60 年来祁连山极端气温变化研究. *高原气象*, 2019, 38(5): 959-970.]
- [37] Wang Shaowu, Gong Daoyi. Temperature during some stages of the Holocene in China. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(4): 39-46. [王绍武, 龚道溢. 全新世几个特征时期的中国气温. *自然科学进展*, 2000, 10(4): 39-46.]
- [38] Wang Shaowu. Megathermal. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(5): 383-384. [王绍武. 全新世大暖期. *气候变化研究进展*, 2011, 7(5): 383-384.]
- [39] Peng Xiaoying, Zhong Wei, Zhao Yingjuan, et al. Preliminary research in the Holocene Hypsithermal climate change. *Journal of South China Normal University: Natural Science Edition*. 2005, 37(2): 52-60. [彭晓莹, 钟巍, 赵引娟, 等. 全新世大暖期气候环境特征及其机制的再认识. *华南师范大学学报: 自然科学版*, 2005, 37(2): 52-60.]
- [40] Xu Hai. Advance in research on the Holocene climate fluctuations. *Geology Geochemistry*, 2001, 29(2): 9-16. [徐海. 中国全新世气候变化研究进展. *地质地球化学*, 2001, 29(2): 9-16.]
- [41] Wang Shaowu. Medieval warm period and little ice age. *Advances in Climate Change Research*, 2010, 6(5): 388-390. [王绍武. 中世纪暖期与小冰期. *气候变化研究进展*, 2010, 6(5): 388-390.]
- [42] Zuo Xinxin, Jin Heling. An overview of studies on medieval warm period. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(1): 136-142. [左昕昕, 靳鹤龄. 中世纪暖期气候研究综述. *中国沙漠*, 2009, 29(1): 136-142.]
- [43] Liu Jian, Gao Jianhui, Wang Sumin. Modeling study on the climate change during the Medieval Warm Period. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(2): 97-105. [刘健, 高建慧, 王苏民. 中世纪暖期温度变化的模拟. *湖泊科学*, 2006, 18(2): 97-105.]
- [44] Chu Ziyang, Ren Guoyu, Shao Xuemei, et al. A preliminary reconstruction of mean surface air temperature over the last 1000 years in China. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(4): 826-836. [初子莹, 任国玉, 邵雪梅, 等. 我国过去千年地表温度序列的初步重建. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 826-836.]

- [45] Ge Quansheng, Zheng Jingyun, Man Zhimin, et al. Several problems of temperature change research in China for the past 2000 years. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(4): 449-456. [葛全胜, 郑景云, 满志敏, 等. 过去2000年中国温度变化研究的几个问题. *自然科学进展*, 2004, 14(4): 449-456.]
- [46] Gao Jianhui, Liu Jian, Wang Sumin. Overview on studies of medieval warm period in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(3): 376-383. [高建慧, 刘健, 王苏民. 中国中世纪暖期气候研究综述. *地理科学*, 2006, 26(3): 376-383.]
- [47] Wen Xinyu, Wang Shaowu, Zhu Jinhong, et al. An overview of China climate change over the 20th century using UK UEA/CRU high resolution grid data. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(5): 894-904. [闻新宇, 王绍武, 朱锦红, 等. 英国CRU高分辨率格点资料揭示的20世纪中国气候变化. *大气科学*, 2006, 30(5): 894-904.]
- [48] Zhao Zongci, Ding Yihui, Xu Ying, et al. Detection and prediction of climate change for the 20th and 21st century due to human activity in northwest China. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(1): 26-34. [赵宗慈, 丁一汇, 徐影, 等. 人类活动对20世纪中国西北地区气候变化影响检测和21世纪预测. *气候与环境研究*, 2003, 8(1): 26-34.]
- [49] Chen Fahu, Chen Jianhui, Huang Wei. A discussion on the westerly-dominated climate model in mid-latitude Asia during the modern interglacial period. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 23-32. [陈发虎, 陈建徽, 黄伟. 中纬度亚洲现代间冰期气候变化的“西风模式”讨论. *地学前缘*, 2009, 16(6): 23-32.]
- [50] An Z S, Colman S M, Zhou W J, et al. Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka. *Scientific Reports*, 2012, 2: 619. DOI: 10.1038/srep00619.
- [51] Cui Yingfang, Zhao Kan, Zhao Bin, et al. Spatiotemporal model and mechanism of monsoon rainfall in China during the medieval warm period and the current warm period. *Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition*, 2019, 42(4): 145-152. [崔英方, 赵侃, 赵彬, 等. 中世纪暖期和现代暖期中国季风降水时空模式及其机制. *南京师范大学学报: 自然科学版*, 2019, 42(4): 145-152.]
- [52] 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, 29(Suppl.1): 79-86. [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.]
- [53] Shi F, Lu H Y, Guo Z T, et al. The position of the Current Warm Period in the context of the past 22000 years of summer climate in China. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48: e2020GL091940. DOI: 10.1029/2020GL091940.
- [54] Zhao Liang, Liu Jian, Liu Bin, et al. Comparison of the summer surface air temperature and precipitation over east Asia between the Holocene thermal maximum and the RCP4.5 scenario. *Quaternary Sciences*, 2019, 39(3): 731-741. [赵亮, 刘健, 刘斌, 等. 全新世暖期鼎盛期与未来变暖情景下东亚夏季降水和气温变化对比. *第四纪研究*, 2019, 39(3): 731-741.]
- [55] Shi Feng, Yang Bao, Zhao Sen, et al. Spatial pattern reconstruction of typical centennial warm periods of global temperature over the past millennium. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(6): 1125-1135. [史锋, 杨保, 赵森, 等. 全球过去千年典型暖期温度空间格局重建. *第四纪研究*, 2014, 34(6): 1125-1135.]
- [56] Yan Mi, Wang Zhiyuan, Liu Jian. Simulation of the characteristics and mechanism of Chinese typical warm periods over the past 1500 years. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(6): 1166-1175. [严蜜, 王志远, 刘健. 中国过去1500年典型暖期气候的模拟研究. *第四纪研究*, 2014, 34(6): 1166-1175.]
- [57] Wang Zhiyuan, Liu Jian. Modeling study on the characteristics and mechanisms of global typical warm periods over the past 2000 years. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(6): 1136-1145. [王志远, 刘健. 过去2000年全球典型暖期特征与机制的模拟研究. *第四纪研究*, 2014, 34(6): 1136-1145.]
- [58] Dong Guanghui, Qiu Menghan, Li Ruo, et al. Using the Fulcrum Cognitive Model to explore the mechanism of past human-land co-evolution. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1): 15-29. [董广辉, 仇梦晗, 李若, 等. 探讨过去人地关系演变机制的“支点”概念模型. *地理学报*, 2021, 76(1): 15-29.]

## Response of dry-wet change to millennial and centennial warm periods in the Qilian Mountains

ZHOU Xueru, LI Yu

(College of Earth and Environmental Sciences, Center for Hydrologic Cycle and Water Resources  
in Arid Region, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Due to global warming, dry-wet condition of the Qilian Mountains has experienced significant change in recent decades. Thus, predicting future climate change is critical for studies on the environmental evolution. To explore the climate trends under increasing temperature, we took the millennial-scale Middle Holocene Warm Period and the centennial-scale Medieval Warm Period, as "historical analogues" to compare with undergoing global warming. In this paper, we integrated abundant paleoclimate records (e.g., fluvio-lacustrine deposits, ice cores, pollen, and tree rings) in the Qilian Mountains region and paleoclimatic model simulation of the PMIP3/CMIP5 project to assess the response of dry-wet change during warm periods. Results show that strong East Asian summer monsoon brought a warm and humid climate with more precipitation during the Mid-Holocene warm period (7.2-6.0 ka BP). The Medieval Warm Period (950-1250 AD) and the little ice period show a combination of warm-dry and cold-wet climate. Modern observational data show that the climate of the study region is becoming warm and humid. Modern climates have similarities with historical warm periods at millennial and centennial scales. However, the historical analogues are due to the orbital parameters and insolation. In modern warm period they are caused by greenhouse gases and human activities. Therefore, in order to predict the future dry and wet pattern in the study area accurately, the joint effect of natural factors and human activities should be elucidated.

**Keywords:** Qilian Mountains; Middle Holocene; Medieval Warm Period; modern warm period; dry and wet change