

文章编号: 1000-0690(2000)05-0397-06

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

杨 保, 康兴成, 施雅风

(中国科学院寒区旱区与环境工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 据高分辨率的青海都兰树轮年表, 将过去2000年的气候变化划分为2300 S以前的高温期, 2400 S~8000 S冷暖波动强烈的低温期, 8100 S~10700 S显著高温期, 即中世纪暖期, 10800 S~18800 S的低温期, 其中包括14200 S~18700 S的小冰期, 以及18900 S后的升温期。统计发现11次极端高温或低温事件, 以及几次大的突变事件全部出现于中世纪之前, 指示1500 S~11000 S期间气候运行的高度不稳定性。和中国东部、古里雅冰芯和青藏高原南部温度代用资料比较后发现, 公元初至3世纪前期的东汉暖期, 3世纪后期至7世纪初的魏晋南北朝冷期(期间约3800 S~4600 S暖), 中世纪暖期以及小冰期等几次重大的气候事件在中国东部、都兰和青藏高原南部序列中均存在。古里雅冰芯仅记录了前两次重要事件, 中世纪暖期以及小冰期在该序列中表现微弱。20世纪的升温在古里雅冰芯最显著, 都兰、中国东部次之, 而高原南部似乎不明显。

关 键 词: 青海都兰年表; 近2000年; 中国东部古里雅冰芯

中图分类号: P532 文献标识码: A

近2000年气候与环境变化研究在国际地圈-生物圈计划(IGBP)中古全球变化计划(PAGES)和全球气候研究计划(WCRP)中气候变率和可预报性研究(CLIVAR)中均有特殊重要性, 它的时间分辨率要求至少到10年。在此基础上取得的气候指标统计基础, 才有可能研究气候变率的可预报性和特殊气候型的可持续性。康兴成等^[1]经严格定年建立的都兰树轮年表序列, 是我国目前分辨率以年计的最长气候序列, 样本取自青海都兰县夏日哈乡境内的鄂拉山(36°12'~36°18' N, 98°14' E)地区海拔3100~3700 m的祁连圆柏(*Sabina przewalskii*), 已发表的资料是基于31年滑动尺度上进行的初步分析, 王绍武等^[2]在研究中国小冰期时发现都兰树轮年表对青海与西藏地区的温度变化有一定的代表性, 可见都兰树轮年表在研究我国过去气候变化中提供了一个宝贵的资料。本文在上述基础上, 分析其10年尺度的气候变化特征, 并与古里雅冰芯、中国东部和青藏高原南部温度代用指标序列比较, 以

证见过去2000年中国气候变化中区域变异的某些特征(图1)。

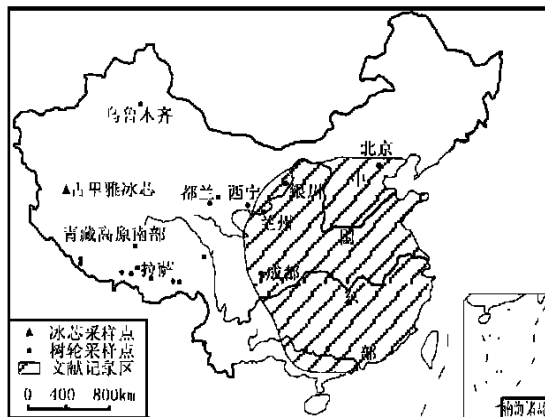


图1 青海都兰、古里雅冰芯、青藏高原南部
以及中国东部位置的分布

Fig. 1 The geographical distribution of Dulan, Guliya ice core, the southern Qinghai-Tibet Plateau and East China

收稿日期: 1999-09-13; 修订日期: 2000-02-20

基金项目: 中国科学院“九五”重大项目(KZ951-A1-204-02, KZ951-A1-402-03)资助。

作者简介: 杨 保(1971-)男, 博士生, 主要从事全球变化和风沙物理学的研究。E-mail: yangbao@ns.lzb.ac.cn

1 近 2 000 年都兰树轮指数表征的 10 年尺度的气候变化

1.1 都兰树轮指数曲线指示的温度变化基本特征

都兰树轮年表的取样区位于干旱、半干旱的高寒气候区,共有 140 多个样本,长达 1 500 年以上的有 2 个,1 000~1 500 年长的有 8 个,500~1 000 年长的有 70 个,500 年以下的有 60 个,它们均来自生

长良好的活树。经读数、交叉定年、树轮生长趋势拟合后,最终选取了 120 个样本序列确定最终年表、标准化年表。该年表绝大多数样本的处理和分析在美国亚利桑那大学树轮实验室进行。

为确定树轮生长对气候要素的响应程度,国内外广泛使用响应函数分析方法。选择附近都兰气象站为参照点,经过正交变换和全变量多元回归计算,所得响应函数结果^[3]如图 2 所示。

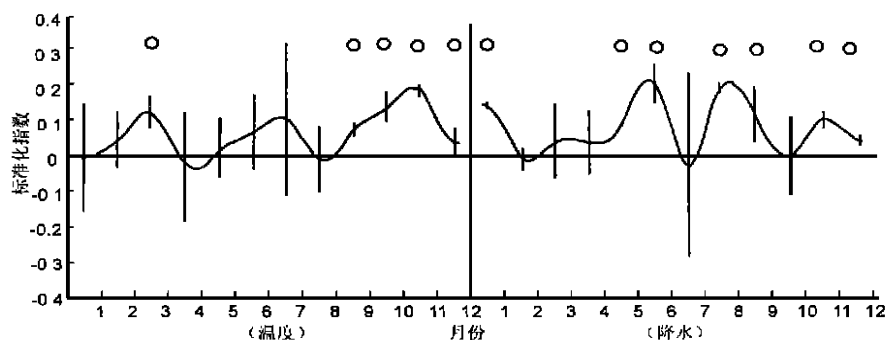


图 2 都兰树轮年表与都兰站气候要素的响应函数结果(O 为显著因子)

Fig. 2 Response function results between tree ring indices and climatic factors of Dulan region(1954–1993) (O is significant factor)

图 2 中的横坐标分别为 1~12 月的气温和降水,纵坐标为响应程度的标准化指数值,大于零为正响应,反之则为负响应。图中同时标出了每个因子响应值的 95% 置信线。从都兰树轮指数对气候因子的响应来看,树木生长对气温和降水的响应大多为正值。其中,气温因子连续四个月显著的表现于秋季,而连续显著的降水因子最多为两个月。从所占方差量来看,温度方差贡献 50.07%,降水量方差贡献 13.77%,合计 63.84%,说明该年表包含有较多的气候信息,与降水相比,对温度的反映更强一些。另外,从年表与都兰站的温度和降水的相关性方面考虑,其与都兰站温度的相关系数 0.69 远超过临界值 0.403,与降水相关仅达到 5% 的显著水平。为进一步揭示温度和降水因子影响树轮指数的具体范围,采用响应趋势面进行分析可知,从窄年轮段到宽年轮段,温度的影响保持一致,即高温对应宽年轮。而降水的影响主要局限于窄年轮段(< 1.2),当年轮指数大于 1.2 时,降水响应隐藏了。因此,本文将都兰树轮指数作为温度的代用指标进行讨论。但是,树轮指数的大小除了受气候因子影响外,还有其它环境因子(如土壤、地形等)和树木自身生理过程影响,以及人为因素的作用,如去除树木生长趋势时采

用不同的平滑手段可产生不同的树轮指数值,所以在以树轮指数值外推温度变化时免不了存在一定的误差。

为适应 CLIVAR 计划要求,作者等^[4]对古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录以 10 年计为准,为统一起见,本文所用年轮资料亦为树轮指数序列的 10 年平均值(如 1980~1989 年合计平均为 1980'S,余类推),该序列的起始年份为 155 年,结束年份为 1993 年。

图 3 为都兰树轮指数近 2 000 年的 10 年平均值的距平曲线。其中粗实线为 3 次多项式拟合结果。近 2 000 年树轮指数最高值出现于 870'S,距平值 0.64,按都兰树轮指数-温度相关关系(1),较历年平均值(即重建的公元 155~1993 年 9~12 月温度平均值,以下如不特别指明与此类同)高达 1.2°C ,比近 40 年温度观测结果平均值高 0.9°C 。最低值出现于 350'S,距平值为 -0.47 ,折合温度为 -0.9°C ,最高、最低相差 1.11,以温度表示则为 2.08°C 。考虑到都兰树轮指数标准差为 0.2,现将近 2 000 年都兰树轮指数变化分为 5 级(表 1)。

从表 1 可以发现,无论是极端高温事件,还是极端低温气候事件,它们均发生于 1 000'S 之前,之后并未出现。

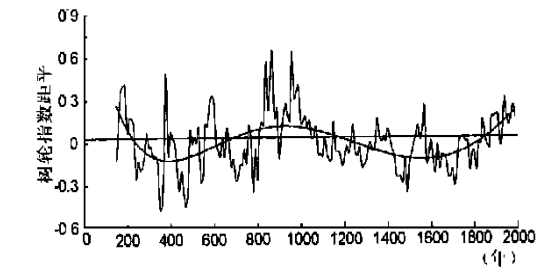


图 3 近 2 000 年青海都兰树轮指数 10 年平均值曲线
Fig. 3 Decadal mean values of tree ring indices
from Dulan, Qinghai Province during the last 2000 years

表 1 都兰树轮指数所指示的温度等级统计表

Table 1 The statistics of temperature classes indicated by Dulan tree ring index variations

树轮指数级别	指数范围	出现次数	出现频率(%)	分布特征
极高温	> 0.4	8	4.32	800~ 990' S5 次, 另为 180' S, 190' S 和 380' S
高温	0.2~ 0.4	12	6.49	590~ 980' S 为 8 次, 20 世纪 3 次, 170' S 一次
中温	- 0.2~ - 0.2	140	75.68	分布较散
低温	- 0.2~ - 0.4	22	11.89	集中于 1440~ 1810' S(11 次) 和 440~ 550' S(6 次)
极低温	< - 0.4	3	1.62	出现于 350' S, 360' S, 470' S

1.2 都兰树轮指数指示近 2 000 年温度变化阶段
气候序列的累积距平曲线能够判断序列持续上升和持续下降的分界点, 本文用之来分析气候演化的阶段性特征。将近 2 000 年都兰温度变化划分为 5 个阶段:

- 1) 230' S 以前的高温期。该段距平累积曲线的倾斜率很高, 且为正, 表明温度正距平值高。查证有两次极高温事件、一次高温事件出现于此期。
- 2) 240' S~ 800' S 冷暖波动强烈的低温期。在持续达 57 个年代的时段内, 3 个极低温年代均出现于此期, 近 2 000 年 22 个低温事件有 11 个落入此期, 一个极端高温事件和四个高温年代也发生了, 指示该时段变冷趋势下的奇寒暴暖事件。
- 3) 810' S~ 1070' S 的显著高温期。此时段距平累积曲线的斜率很陡, 在短短 27 个年代内累积距平从- 2.83 上升为 3.03, 增加幅度达 5.86, 换算温度为 11℃, 即平均每 10 年增加 0.4℃, 统计发现 8 个极端高温事件中有 5 个出现于此期, 12 个高温事件里有 5 个在该时段发生, 也就是说近 2 000 年所有高温和极高温事件的一半出现于这一时期。这个高温期相当于全球变化中的中世纪暖期。
- 4) 1080' S~ 1870' S 的低温期。在持续长 80 个年代的时期内, 只有 22 个年代距平高于平均值之上, 与第二阶段类似, 22 个低温事件中 11 个发生于

图 3 所示 10 年际都兰树轮指数的变化, 不少是以突变方式完成的。典型的如 360' S~ 380' S 间树轮指数值上升幅度 0.93, 折合温度达 1.74℃, 800' S~ 840' S 间, 树轮指数上升 0.83, 870' S~ 900' S 间树轮指数下降 0.75, 以及 900' S~ 960' S 间树轮指数上升 0.74 等。上述突变事件均发生于中世纪之前, 联系到发生的极端温度事件, 可以推断中世纪之前气候处于不稳定轨道, 之后运行稳定, 与张丕远等^[3]通过历史文献记录得出的近 2 000 年来 1230 A. D. 前中国东部气候超常不稳定推论较类似。

此期, 体现出中世纪暖期后强烈的降温趋势。目前大家公认的小冰期(1 550~ 1 850 A. D.) 在该时段有显明的表现, 但开始时间要早一些, 为 1420' S, 结束时间也相对晚, 为 1870' S。

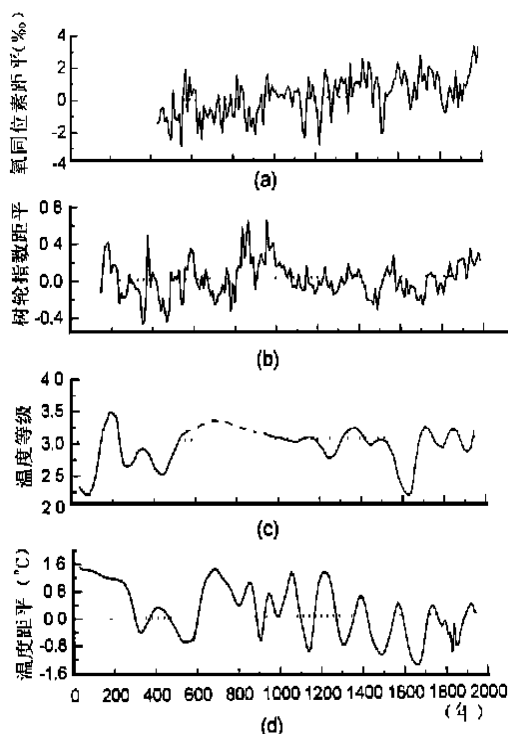
5) 1880' S 以后的升温期。20 世纪北半球的升温在都兰曲线上有显著表现, 该时段中只有一个年代出现了负距平(1920' S 距平为- 0.03), 两个高温事件(1940' S、1980' S 距平分别为 0.31 和 0.26) 发生于此期, 但是它们暖的程度不及中世纪暖期。

2 近 2 000 年都兰树轮指数与中国其它地区温度代用资料的比较

为理解近 2 000 年中国温度变化的基本特征, 要对不同区域的同期分辨率较高的温度代用资料加以对比, 才能找出各大区域气候演化的相似性和差异性。本文以都兰树轮为中心, 比较三个不同方向且相隔遥远的 2 000 年气候记录。

图 4 展示了近 2 000 年中国四个温度序列的变化情况。其中, 曲线(a) 为古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 序列^[4,5] 该冰芯(35°12' N, 81°30' E) 位于青藏高原的西北部, 海拔 6 200 m。曲线(b) 即为都兰树轮指数曲线, 曲线(c) 是青藏高原南部温度等级资料^[6], 该资料来源于树木年轮(28°~ 37°N, 85°~ 99°E), 其中 1 260 A. D. 之后的子序列综合了昌都、八宿、天峻等 11 个树

轮年表,海拔 3 500~ 4 500 m, 7 世纪至 20 世纪期间由于资料缺乏以虚线表示。曲线(d)来源于中国东部文献记录^[7],该资料覆盖了兰州、成都以东以华北和华东为主的中国大部分地区,对早先发表的竺可桢温度曲线^[8]作了相当改进,在我国东部有相当的代表性。



(a) 古里雅冰芯^[4,5]; (b) 都兰树轮;

(c) 青藏高原南部^[6]; (d) 中国东部^[7]

图 4 都兰树轮、古里雅冰芯、中国东部以及青藏高原南部温度记录的对比

Fig. 4 Comparison of Dulan tree ring indices with the temperature proxy data from Guliya ice core, East China and the south of Qinghai-Tibet Plateau

(a) Guliya ice core^[4,5]; (b) Dulan tree ring; (c) the south of Qinghai-Tibet Plateau^[6]; (d) East China^[7]

近 2 000 年东部曲线头一段时间为突出的暖峰,比 20 世纪还暖,都兰树轮指数曲线的第一阶段与其呼应,但不是过去近 2 000 年以来的最暖时段,青藏高原南部曲线在 2~ 3 世纪前期表现为暖期,年平均气温较现今高,古里雅冰芯记录指示 270' S 之前属于高温的气候^[4]。新疆西汉时期(20 a B. C.、

6~ 24 a A. D.) 偏冷,到公元二三世纪的后汉,则是一个温暖的时期^[9]。东部文献研究指出 280 A. D. 是暖期向冷期过渡的突变,与都兰指数以 240' S 为冷暖期的分界点存在位相差,但都兰指数与竺可桢^[8]“自 240 A. D. 变冷”的结论相符合, Sultan Hameed 等^[10]也指出公元 2 世纪出现短暂的温暖气候,其后很快被寒冷气候所替代。而高原南部于第 3 世纪后期气候转为寒冷。邻国日本也显示该段是一个暖期^[11]。可以看出,尽管不同地区研究资料得出由暖转冷的具体年代有些差别,但 4 世纪后期以前的东汉暖期在中国是普遍存在的。

3 世纪后期至 7 世纪,无论在古里雅冰芯和都兰树轮,还是高原南部和中国东部,各曲线无一例外地表现为明显的冷期,虽然期间存在暖波动(约 380' S~ 460' S),但持续时间很短。其中都兰树轮指数显示该冷期是公元 150' S 以来最冷的时期,古里雅冰芯在该时段显示为特别突出的冷期,其中 550' S 是仅次于 1220' S 的另一极端寒冷事件,而中国东部、邻国日本^[11~ 13]和高原南部的寒冷程度不如小冰期显著。由此看来,虽然这一冷期在各序列中的表现不尽相同,但均以寒冷为主要特征。

冷期过后,中国东部气候快速变暖,进入著名的隋唐温暖期,暖期持续至 1 260' S,时间长达约 650 年。其他作者在研究中国东部以及邻国日本时也得到较为一致的结论,该暖期堪称为中国东部的中世纪暖期。都兰树轮指数指示该时段前期(800' S 之前)以寒冷气候为主要特征,后期(1080' S 之后)表现为较弱的冷暖波动,810' S~ 1070' S 时段是显著的中世纪暖期,且温暖程度是过去近 2 000 年中最高的。吴祥定等^[6]推断 7~ 12 世纪是个温暖期,但近来冯松用数条证据显示该时期为显著的冷期^①。古里雅冰芯记录指示该时段主要以寒冷气候为主,新疆西部地区约 2/3 时期表现为冷期^[9],喀拉昆仑山冰川在该期表现为明显的冰进^[11]。说明古里雅冰芯代表的青藏高原西北部 and 新疆地区、青藏高原南部在该段时期与中国中部、东部在该时期气候有重大差别。上述现象表明中世纪暖期在我国表现出强烈的区域性特征,中国东部持续时间最长,高原南部次之,都兰虽然持续时间较短,但高温的特征十分显著,而青藏高原西北部却表现出相反的温度变化特征。

①个人交流。

小冰期阶段(1420' S 以来),除古里雅冰芯外,各曲线均指示气候再度转为寒冷,并持续至 20 世纪初。其中,中国东部和青藏高原南部最寒冷的气候出现于 17 世纪,而都兰在 15 世纪和 17 世纪均为冷期,寒冷程度相差很小。对古里雅冰芯,该时段虽然经历了多次冷暖循环,但暖期持续时间长于冷期。

广泛出现于北半球的 20 世纪增温现象,在古里雅冰芯、都兰树轮以及中国东部均有记录,不同之处在于出现于古里雅冰芯中的升温是其过去近 2 000 年中最显著的,且温度最高,都兰 20 世纪的温暖程度仅次于中世纪暖期,而中国东部的升温相对来说并不很强烈,且温暖程度不及东汉暖期和中世纪暖期。青藏高原南部比较特殊,20 世纪不暖,存在一个弱冷期。

3 讨论和结论

高分辨率的青海都兰树轮指数为研究中国过去 2 000 年气候变化提供了一个十分宝贵的信息。响应函数分析结果表明,树轮指数对都兰站 9~12 月的秋季温度有显著的正响应,与温度相比,对降水的响应不如温度显著,表现在二者所占方差量方面,温度方差贡献 50.07%,降水量方差贡献 13.77%,在与树轮指数的相关上,树轮指数与 9~12 月温度的相关系数 0.69 远超过其临界值 0.403(1% 的显著水平),其机理目前尚不清楚,但与邻近的敦德冰芯^[12](38°06' N, 96°24' E) $\delta^{18}\text{O}$ 和天峻^[13](37°N, 99°E) 树轮指数近千年序列分别求相关,相关系数则为 0.22 和 0.37,分别达到 95%(0.195)、99%(0.27) 的置信水平,而前两者均对温度有较好的反映,说明都兰树轮指数对温度是有相当反映的。与 3~6 月降水相关仅达到 5% 的显著水平。响应趋势面分析发现降水影响主要局限于窄年轮段(< 1.2),树轮指数大于 1.2 时,降水响应不明显。基于树轮指数 10 年尺度上的分析表明,240' S 开始降温,3 世纪后期至 5 世纪末是一个非常显著的冷期,之后气温回升;9~11 世纪末为本区的中世纪暖期,其中 870' S、960' S 是近 2 000 年以来温度最高的两个年代。之后逐渐进入小冰期气候阶段,于 19 世纪 80 年代气温骤然上升,标志着小冰期的结束;20 世纪是近 2 000 年来稍弱于中世纪暖期的另一温暖时段。此外,气候由暖转冷、由冷转暖时大多是以突变完成的,几次比较大的突变都发生于中世纪之前。

和居于不同纬度带和经度带的中国东部、古里

雅冰芯以及青藏高原南部温度记录比较,发现公元初至 3 世纪前期的东汉暖期,3 世纪后期至 7 世纪的魏晋南北朝冷期,在各个序列均存在。中世纪暖期在中国东部、青海都兰以及青藏高原南部有鲜明的表现,其中,该暖期在中国东部开始于约 6 世纪末,经历了隋朝、唐朝和宋朝的大部分时间,在都兰出现于 810' S~1070' S,但在古里雅冰芯所代表的高原西北部 and 新疆地区以及高原南部却以暖期为主。15~19 世纪的小冰期在都兰、中国东部和高原南部表现较为强烈,在古里雅冰芯却以暖期为主。20 世纪的气候变暖在中国东部、古里雅冰芯和都兰均发生了,其中尤以古里雅冰芯升温最为迅速,而高原南部似乎不太明显。

参考文献:

- [1] 康兴成, Graumlich L J, Sheppard P. 青海都兰地区 1 835 年来的气候变化——来自树轮资料[J]. 第四纪研究, 1997, (1): 70~75.
- [2] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢. 中国小冰期的气候[J]. 第四纪研究, 1998, (1): 54~64.
- [3] 张丕远, 王铮, 刘啸雷, 等. 中国近 2 000 年来气候演变的阶段性[J]. 中国科学 (B 辑), 1994, 24(9): 998~1008.
- [4] 施雅风, 姚檀栋, 杨保. 近 2 000 年古里雅冰芯 10 年尺度的气候变化及其与中国东部文献记录的比较[J]. 中国科学 (D 辑), 1999, 29(增刊 1): 79~86.
- [5] 姚檀栋, 秦大河, 田立德, 等. 青藏高原 2 K a 来温度与降水变化——古里雅冰芯记录[J]. 中国科学 (D 辑), 1996, 26(4): 348~353.
- [6] 吴祥定, 林振耀. 青藏高原近二千年来气候变迁的初步探讨[A]. 中央气象局气象科学研究所天气气候研究所. 全国气候变化学术讨论会文集[C]. 北京: 科学出版社, 1981. 18~25.
- [7] 张丕远(主编). 中国历史气候变化[M]. 济南: 山东科技出版社, 1996. 435~436.
- [8] 竺可桢. 中国近 5 000 年来气候变迁的初步研究[J]. 中国科学, 1973, 3(2): 291~296.
- [9] 李江风. 新疆三千年来的气候变化[A]. 新疆大学, 干旱区新疆第四纪研究论文集[C]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985. 1~7.
- [10] Hammeed S, 龚高法. 中国历史时期温度变化[A]. 张翼, 张丕远等. 气候变化及其影响. 北京: 气象出版社, 1993. 70~77.
- [11] 张祥松. 冰川的气候变迁记录[A]. 李克让, 张丕远(主编). 中国气候变化及其影响[C]. 北京: 海洋出版社, 1992. 103~139.
- [12] Thompson L G, Mosley Thompson E, Davis M E, et al. A 1 000 year climate ice-core record from the Guliya ice cap, China: its relationship to global climate variability[J]. Annals of

Glaciology, 1995, 21: 175~ 181.

在冰川上的反映[C]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊.

[13] 刘光远, 王玉玺, 张先恭, 等. 祁连山近千年的年轮气候及其

北京: 科学出版社, 1984 (第5号). 97~ 108.

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

YANG Bao¹, KANG Xing-cheng², SHI Ya-feng^{1,2}

(Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000)

Abstract: Based on high-resolution tree-ring data from Dulan area of Qinghai Province, five spells have been divided: the warm period before 230' s A. D., the cold period between 240' s A. D. and 800' s A. D., the significantly warm period between 810' s A. D. and 1070' s, i. e. "Medieval Warm Period", the cold period including the "Little Ice Age" 1420' s- 1870' s and the warming period since 1880' s. All the eleven coldest or warmest decades and several great abrupt changes took place before the Middle Ages, indicating that climatic system operated in great instability during the period 150' - 1100' s A. D.. Comparison of the tree-ring data with other temperature proxy data from East China, Guliya ice core as well as the south of Qinghai-Tibet Plateau shows that such great climatic events as Eastern Han warm period between the beginning of the 1st century and the previous fifty years of the third century, the cold period covering the span of Wei, Jin and the Southern and Northern Dynasties, the well-known "Medieval Warm Period" as well as the "Little Ice Age" appeared in such series as East China and Dulan area. Only the first two climatic events were recorded conspicuously in Guliya ice core while the "Medieval Warm Period" and "Little Ice Age" is far weaker. Also, the well-defined "Medieval Warm Period" didn't occur in the south of Qinghai-Tibet Plateau. The warming since the 20th century is the warmest in the last 200 years in Guliya ice core, the second in Dulan area and East China, but it scarcely seems pronounced in the eastern part of Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: Chronology of Qinghai Dulan area; The last two millennia; East China Guliya ice core