

文章编号:1006-7639(2005)-01-0090-05

美国西部的长期干旱变化

Edward R. Cook¹, Connie A. Woodhouse², C. Mark Eakin²,
David M. Meko³, David W. Stahle⁴

(1.Lamont- Doherty Earth Observatory, Palisades, NY10964, USA; 2.National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Climatic Data Center, Boulder, CO 80305, USA;3.Laboratory of Tree- Ring Research, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA; 4.Department of Geosciences, University of Arkansas, Fayetteville, AR 72701, USA)

摘 要:一些水文气候资料分析表明,美国西部正在经历着多年的严重干旱。然而,利用重建的覆盖美国西部大部分地区的过去 1200 年的网格化干旱资料进行分析,看出与更早时期出现的极端干旱和发生在公元 800~1300 年间(中世纪暖期 MWP))的大范围严重干旱相比,现在正经历的干旱还不算很严重。如果美国西部干旱程度的加强是一种对气候变暖的自然响应,那么任何将来温度增暖的趋势都将会加剧美国西部地区的长期干旱。

关键词:美国西部;干旱变化;重建

2002 年,美国本部 50%以上的地区发生了中等干旱到严重干旱,降水记录表明降水短缺遍及整个美国西部地区^[1]。加拿大草原诸省的大部分地区也发生了严重的干旱事件,并且延伸到墨西哥的广大地区,尤其是墨西哥的北部和西部地区。这些地区的许多地方,2002 年的干旱实际上是开始于 1999 年末或更早的干旱事件的持续,那次大范围的干旱已持续了大约 3 a。2002 年末到 2003 年初,许多地方干旱已有所减缓,但是直至 2004 年的整个夏季,美国西部地区仍然持续着严重的干旱^[2]。

这次干旱事件突出了 2 个问题,一是半干旱的美国西部地区对降水短缺的极端脆弱性,二是需要更好地理解北美地区长期的干旱变化及其成因。为此,我们利用几百年长的具有年分辨率的树木年轮记录来重建北美大部分地区干湿的年变化。重建的干旱指标是夏季 Palmer 干旱指数 ($PDSI$)^[3],Palmer 干旱指数是美国^[4]和全球其它陆地区^[5-6]广为使用的反映相对干湿状态的指标。

新的 $PDSI$ 重建基于水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的 286 个规则网格点(图 1)^[7],这些网格点覆盖了北美的大部分地区,是较早的仅覆盖美国本部内地区的 155 个分辨率为 $2^{\circ} \times 3^{\circ}$ 的干旱重建资料格点^[8]的大幅

度延伸。另外,重建的 $PDSI$ 在美国的大部分地区尤其是西部地区,时间长度是 600~1 200 a,比以前所有重建工作的时间间隔延长了 300 多 a,而以前的重建都始于 1700 年。最后,格点重建资料的方差恢复允许用仪器观测的 $PDSI$ 数据一直外推到 2003 年。这就使我们能够将目前美国西部发生的干旱与重建资料中可追溯到公元 800 年时出现的干旱进行比较,这期间包括了所谓的中世纪暖期(MWP)。

研究区是北美网格(图 1)中不规则的黑色多边形区,文中以后简称为“西部”。西部有 103 个网格点,每一个点夏季 $PDSI$ 的重建时间序列一般都是从 1380 年到 1978 年,其中最少有 68 个网格点的重建资料延伸到了公元 800 年。这些重建资料是运行通过了检验的主成分回归程序得到的,该程序是由先前对整个美国强干旱进行重建发展而来的^[8-9]。但是,现在有 602 个数百年到数千年长的树轮年表用来作为 $PDSI$ 的预测因子^[7],要比以前的网络密集得多。与以前相同^[8],一个分段校准和验证方案用来发展和检验网格点回归模式,且在每个格点上使用随时间变化的树轮预测因子子集来使 $PDSI$ 重建资料的时间长度达到最大^[7]。对随时间变化子集方法的检验^[7]说明这种方法处理重建资料尤其是当重建资

料作为西部区域平均来考查时^[10]有很重要的技巧。

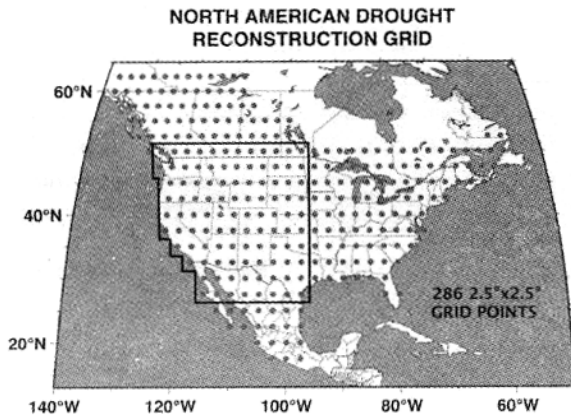


图1 北美夏季干旱重建网格和美国西部大部分地区(粗黑线勾勒的不规则多边形)。在286个总网格点中,103个在美国西部地区且每个格点的重建资料时间至少延伸到1380年,其中有68个网格点的重建延伸到了公元800年。这些为美国西部地区受干旱影响面积的重建提供了基础^[7]。

在这个空间尺度上,就有可能对过去1200 a 西部的长期干旱历史进行深刻考查。为此,我们使用干旱面积指数(DAI)^[7]。DAI是在任何给定的年份对超出给定的PDSI临界值(如 $PDSI < -1$)的重建格点总数的简单计算,利用超出临界值的网格点数除网格点总数得到受干旱影响面积的百分数评估。同样,在一个给定的范围,它是一个受干旱影响面积的非参数化表达。因为任何网格点对受干旱影响的总面积都有潜在贡献,所以DAI也无疑有PDSI型表示的自然空间的年变化。

在计算西部DAI之前,我们用器测资料恢复了每个格点上PDSI重建资料在时间集回归中丢失的信息^[7],在干旱网格中解释PDSI方差(即回归系数 R^2)时,对时空变化进行校正,为以重建的PDSI变率最大振幅为依据的DAI提供了估计。恢复丢失的信息对目前发生的干旱相对变化没有很大意义^[7],因此,这里所作的方差恢复只是作为偏差更正,从而使DAI重建资料与过去真正的气候状态可能更为相近。

在PDSI重建资料中恢复了丢失的信息后,我们用增补的、格点化的器测资料对1979~2003年的重建资料进行了更新^[7],这使得目前的干旱也放到了合适的长期序列中。我们对DAI也进行了“固定格点”分析,从而测定如果1380年的103个有效网格点数目下降到公元800年的68个后^[7],是否可能

对DAI重建资料的精确度有负面影响,结果表明1380年以前西部DAI记录中丢失的空间信息是可以忽略不计的。

以 $PDSI < -1$ 为临界值,达到95%的BOOTSTRAP双边置信度^[7],重建西部DAI(图2A)。年DAI估算用60 a低通滤波平滑,从而突出干旱面积年代或更长时期的变化,这样做强调了更早时期的干旱事件,使得目前西部相对较短期的干旱相形见绌。用这种滤波方式表示的DAI重建资料并没有使目前多年干旱的影响最小化(图2B),相反,它强调了更长时期、更严重的干旱在过去出现过并且可能会在将来出现。4个最干时期($p < 0.05$)集中在公元936年、1034年、1150年和1253年,全部出现在公元900~1300年间大范围严重干旱的400 a时期,而这段时期正与中世纪暖期(MWP)相一致,在西部部分地区正是一个以异常增温^[11]和异常水文气候变化^[12]为特征的时期。DAI重建资料也同时揭示了一个意想不到的变化,1300年之后出现了持续600 a的持久湿润时期,一直延续到1920年。4个最湿润时期($p < 0.05$),都发生在1300~1920年这段时期中,其中一个出现在20世纪初期并达到最大降水量^[15]。

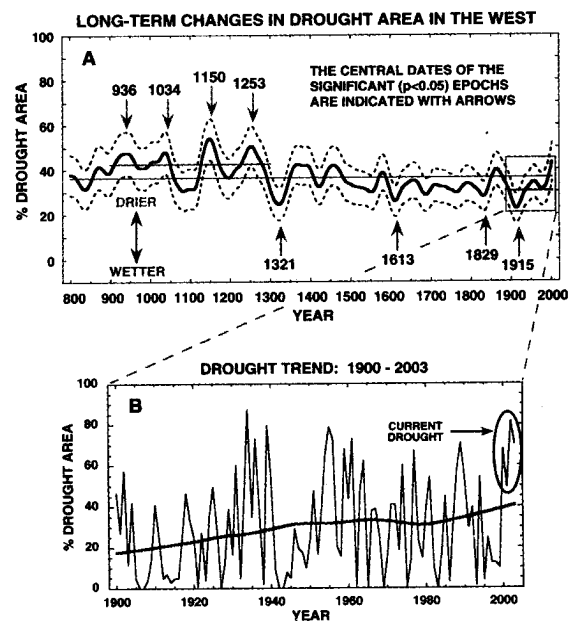


图2 美国西部干旱面积的长期变化。(A)西部已平滑过的DAI(干旱面积指数)重建资料(黑色实线),给出了置信度为95%的BOOTSTRAP双边置信区间(黑色点线)和长期平均(细水平黑线)。应用60 a平滑是为了突出年代到百年的干旱变化。4个最干旱时期 $p < 0.05$,置信限度在长期平均之上)都出现在1300年以前,而4个最湿润时期出现在1300

年之后。公元 900~1300 年时期平均值 (红色线: 42.4%) 与 1900~2003 年时期平均值 (蓝色线: 30%) 的差别明显, 2 个时期的差值 12.4% 表明在西部更早的那个时期平均干旱面积 ($PDSI < -1$) 增加到 41.3%, 它在统计意义上 ($p < 0.001$) 经过与 t 检验等同的一阶自相关自由度校正。其中, 公元 900~1300 年时期的一些 $PDSI$ 估算是外推值, 因为它们超出了 1928~1978 年的器测 $PDSI$ 数据校准时期^[7], 作为回归基础的估算值, 这些外推值与在校准时期之内的值比较有更大的不确定性, 但是它们仍然对于干旱具有高度敏感的树木的实际生长记录为基础。因此, 我们认为重建的 DAI 表示了西部地区的真实气候状态, 特别是在 900~1300 年的极度干旱时期^[7]。(B) 1900~2003 年期间分辨率为年的干旱面积变化。它更清楚地揭示了目前的干旱相对于 20 世纪其它干旱事件的严重性, 以及自 1900 年以来干旱程度加重的不规则趋势 (红色平滑线)。

自从 20 世纪开始, 西部大范围的干旱以一种不规则的方式在加重。重建资料中高分辨率段 (图 2B) 呈现出 20 世纪 30 年代典型的沙尘暴形式的干旱和 50 年代的严重干旱。虽然目前的干旱在每年受干旱影响面积的最大百分率方面与那些过去发生的事件没有很大不同, 但是, 它的 4 a 期似乎在过去的 104 a 中不同寻常。无论如何, 与重建资料中约在公元 936 年、1034 年、1150 年和 1253 年出现的大干旱相比, 目前的干旱并不是一个突出的极端事件, 因为它持续的时间远非那么长。这个发现表明西部可能经历远比 20 世纪器测气候记录中出现过的包括目前的干旱更为严重的干旱事件。

考虑到这一点, 验证公元 900~1300 年间极端干旱时期的存在是重要的。在西部的各个地区都有大量的相互独立的描述过去干旱的指示物。这些指示物包括湖底和河床中出现的树桩 (加利福尼亚州)^[12], 树上出现的超常火烧痕迹 (加利福尼亚州)^[16], 湖底沉积物中出现过多的木炭 (加利福尼亚州、爱达荷州和怀俄明州)^[17~19], 湖水盐度增加 (北达科他州)^[20], 沙丘活化 (内布拉斯加州)^[21], 湖底沉积物中氧同位素比的变化 (内华达州)^[22], 地衣中草酸盐残余 (得克萨斯州)^[23]。尽管这些记录在数据精确度和分辨率上有所不同, 但是它们提供了相互独立的直接或推测的证据, 说明公元 900~1300 年是一个极度干旱时期 (图 3), 它们共同支持时空更完整的 DAI 重建资料中出现的持续 400 a 的严重干旱现象。

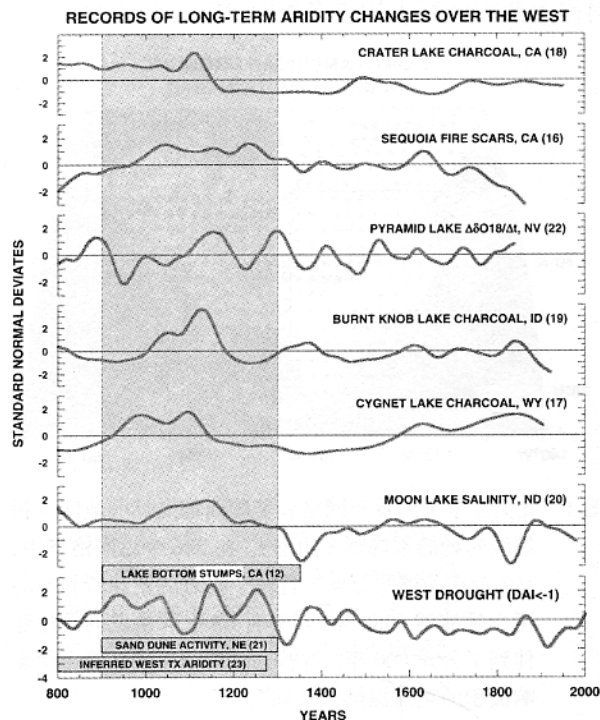


图 3 西部各地区长期干旱变化的 9 个独立记录^[12, 16~23]

与 DAI 重建资料的比较。平滑过的所有时间序列记录突出多年代到百年的变率并为比较目的而用标准正态偏差表示, 黄色矩形条注明了干旱区间, 其中湖底树桩记录的黄色条间的断裂表示 2 个干旱期之间的一个较湿润区间; 茶色阴影区突出出现在 DAI 重建资料中的 900~1300 年间的极端持久干旱时期。所有这些独立记录都显示了那个时期极度干旱的多年代区间, 共同为我们以长期的具有干旱敏感性的树轮记录为基础的 DAI 重建提供了支持。括号中的数字是引用文献。

考虑到上述结果以及目前干旱对西部的影响, 对理解公元 900~1300 年间的极端干旱如何能够发展和持续那样久是非常重要的。这样做使得确定我们也许会回到一个相似的更严重、更长干旱时期的可能性成为可能。极端干旱时期与中世纪暖期 (MWP) 的完全巧合, 表明那个时期异常增暖的气候条件可能提高了西部干旱发生的频率和延长了干旱持续时期。用考虑了高浓度的温室气体来运行海—气耦合模式的模拟结果, 也同样表明北美洲内陆表面的异常增温会导致因高蒸发需要与土壤水分减少而引起的夏季干旱的加重^[24]。

太平洋的变化在年际内到年代际时间尺度上也在减少向西部地区的水汽输送^[25], 这些对干旱与湿润的气候遥相关的影响已经反映在各种气候模式

中,包括 ENSO 与太平洋年代际变率(例如,太平洋年代际振荡)^[26~28],它们能共同模拟出西部干旱发展的趋势。大西洋的年代际变率也与大尺度的美国干旱相联系,但有关的物理机制还不清楚,尤其是在大平原的西部^[28]。还有北半球的增温也与美国 20 世纪的干旱发生频率有相关的迹象,伴随着西太平洋和印度洋海表温度(SSTs)在 20 世纪末期的异常升高,导致 1998 年以来发生北半球中纬度地区的大范围干旱。如此,大尺度的增温,正如中世纪暖期出现的增温,再一次表明是公元 900~1300 年间西部发生极端干旱事件的一个贡献因子。

热带太平洋的异常增温也会通过激发东太平洋“冷舌区”洋流上涌的方式导致西部干旱发生频率的增大。这种 Bjerkness 式的气—海耦合系统对热带大气外部加热的动力响应在观测和理论范围内都曾经有过争议^[30],上升洋流的增多使热带东太平洋海表温度(SSTs)降低,从而促使拉尼娜事件的发展,而拉尼娜事件与西部的干旱有联系^[26]。

西部干旱发展的机制最近通过用过去 1 000 a 中火山信号的强弱波动与太阳辐射强迫对太平洋海洋距平模式 Zebiak-Cane 进行辐射强迫而得到了另外的支持^[31]。火山信号由来自赤道地区的火山喷发引发的一系列脉冲辐射强迫事件组成,它们在相对较短的厄尔尼诺—拉尼娜时间尺度上影响热带太平洋海表温度(SSTs)。相反,较低频的太阳辐射强迫的结果是在多年代或更长时间尺度上比较弱的、更平均的 SSTs 响应。

当 Z-C 模式用这种方式强迫,模式运行初期(大约在 1100~1250 年)的高太阳辐射与弱火山活动,使热带东太平洋海表温度趋向于变冷,形成拉尼娜事件发展的条件。公元 800~1250 年中世纪时期在秘鲁发生极端干旱事件的证据支持了这一结果^[32],那是一个与 800~1300 年西部极端干旱时期近乎相同的期间。这样,Z-C 太平洋海洋距平模式的模拟结果^[31]为拉尼娜事件如何能够在中世纪暖期持续发展提供了一个仿真的物理机制,一个引发秘鲁^[32]与西部^[26]两地区干旱的环境。

如果 Z-C 模式模拟结果可信,那么似乎存在的热带太平洋的持续增温(无论是自然强迫还是人类活动引起的结果),将会促使与持久干旱有关的拉尼娜条件发展。假如这种情形发生,尤其与北美州中部大陆的干旱连在一起,那么,在 DAI 重建资料中预示的空前干旱就即将在西部出现。

王涓力译自于《科学》2004 年 11 月,306 卷:1015~1018

References and Notes

- [1] J. Lawrimore, S. Stephens, "Climate of 2002 annual review" (NOAA National Climatic Data Center, available at <http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/2002/ann/events.html>), 2003.
- [2] D. Miskus, U.S. Drought Monitor (National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA, Climate Prediction Center, available at www.drought.unl.edu/dm/monitor.html), 2004.
- [3] W. C. Palmer, "Meteorological drought" (Res. Pap. No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, DC, 1965).
- [4] R. R. Heim Jr., Bull. Am. Meteorol. Soc. 83, 1149 (2002).
- [5] A. Dai, K. E. Trenberth, T. R. Karl, Geophys. Res. Lett., 25, 3367 (1998).
- [6] A. Dai, K. E. Trenberth, T. Qian, J. Hydrometeorol., in press.
- [7] Materials and methods are available as supporting material on Science Online.
- [8] E. R. Cook, D. M. Meko, D. W. Stahle, M. K. Cleaveland, J. Clim. 12, 1145 (1999).
- [9] Z. Zhang, M. E. Mann, E. R. Cook, Holocene 14, 502 (2004).
- [10] The calibration and verification statistics used to assess the goodness-of-fit and validity of the PDSI reconstructions are (i) the calibration period coefficient of multiple determination or regression R² (CRSQ), (ii) the verification period square of the Pearson correlation coefficient or r² (VRSQ), (iii) the reduction of error (RE), and (iv) the coefficient of efficiency (CE) (8). The magnitudes of these statistics, as measures of explained variance, are strongly dependent on the number of tree-ring chronologies available for PDSI reconstruction at each grid point (7) (fig. S3). When these statistics are calculated for the 103 grid point West regional average PDSI reconstruction, CRSQ, VRSQ, RE, and CE are 0.86, 0.73, 0.78, and 0.72, respectively, for the most highly replicated post-1800 period of the reconstruction, based on a median of 41 tree-ring predictors per grid point reconstruction, and 0.68, 0.54, 0.64, and 0.53, respectively, when based on the smallest subset of tree-ring predictors available at the start of each grid point reconstruction (a median of 2 per grid point) (7) (fig. S3). Although there is indeed a decline in calibration and verification skill as the number of tree-ring chronologies available for reconstruction declines, the latter set of statistics still indicates highly significant hindcast skill.
- [11] V. C. LaMarche Jr., Science 183, 1043 (1974).
- [12] S. Stine, Nature 369, 546 (1994).
- [13] Other high-resolution paleoclimate records from lakes scattered across the northern prairies of North America also show abrupt moisture regime shifts around the AD 1300 period.
- [14] K. R. Laird et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 100, 2483 (2003).
- [15] F. K. Fye, D. W. Stahle, E. R. Cook, Bull. Am. Meteorol. Soc. 84, 901 (2003).

- [16] T. W. Swetnam, *Science* 262, 885 (1993).
- [17] S. H. Millspaugh, C. Whitlock, P. J. Bartlein, *Geology* 28, 211 (2000).
- [18] J. A. Mohr, C. Whitlock, C. N. Skinner, *Holocene* 10, 587 (2000).
- [19] A. Brunelle, C. Whitlock, *Quat. Res.* 60, 307 (2003).
- [20] K. R. Laird, S. C. Fritz, K. A. Maasch, B. F. Cumming, *Nature* 384, 552 (1996).
- [21] J. A. Mason, J. B. Swinehart, R. J. Goble, D. B. Loope, *Holocene* 14, 209 (2004).
- [22] L. Benson et al., *Quat. Sci. Rev.* 21, 659 (2002).
- [23] J. Russ, D. H. Loyd, T. W. Boutton, *Quat. Int.* 67, 29(2000).
- [24] R. T. Wetherald, S. Manabe, *Clim. Change* 43, 495 (1999).
- [25] A. Gershunov, T. P. Barnett, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 79, 2715 (1998).
- [26] J. E. Cole, J. T. Overpeck, E. R. Cook, *Geophys. Res. Lett.* 29, 10.1029/2001GL013561 (2002).
- [27] M. Barlow, S. Nigam, E. H. Berbery, *J. Clim.* 14, 2105 (2001).
- [28] G. J. McCabe, M. A. Palecki, J. L. Betancourt, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 101, 4136 (2004).
- [29] M. Hoerling, A. Kumar, *Science* 299, 691 (2003).
- [30] M. A. Cane et al., *Science* 275, 957 (1997).
- [31] M. E. Mann, M. A. Cane, S. E. Zebiak, A. Clement, *J. Clim.*, in press.
- [32] B. Rein, A. Luukkonen, F. Sirocko, *Geophys. Res. Lett.* 31, L17211, 10.1029/2004GL020161 (2004).
- [33] We gratefully acknowledge the NOAA International Tree-Ring Data Bank (www.ncdc.noaa.gov/paleo/treering.html) and its many contributors for much of the tree-ring data used in this work. In addition, many tree-ring records not yet in the public domain were kindly contributed to our drought reconstruction project by a number of tree-ring scientists doing work in the United States, Canada, and Mexico. All are gratefully appreciated. We also thank M. A. Cane, R. Seager, M. E. Mann, and two anonymous reviewers for helpful comments. Drought reconstructions discussed in this paper can be found at www.ncdc.noaa.gov/paleo/pdsi.html. Supported by NOAA grant no. NA06GP0450 and NSF grant no. ATM 03-22403. This is Lamont-Doherty Earth Observatory contribution no. 6681.