

论 20 世纪 30 年代美国沙尘暴成因

Siegfried D. Schubert¹, Max J. Suarez¹, Philip J. Pegion^{1, 2},
Randal D. Koster¹, Julio T. Bacmeister^{1, 3}

(1. Earth Sciences Directorate, National Aeronautics and Space Administration/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland 20771, USA;

2. Science Applications International Corporation, Beltsville, Maryland 20705, USA;

3. Goddard Earth Sciences and Technology Center (GEST), University of Maryland, Baltimore, MD 21250, USA)

摘 要 20 世纪 30 年代,美国经历了这个世纪最强的一次干旱灾难。干旱影响了美国几乎三分之二的土地以及墨西哥和加拿大的部分地区,同时,在美国大平原南部频繁发生的强沙尘暴震惊世界。通过研究,我们给出了模式模拟的结果,说明那次干旱事件是由那 10a 间热带海表温度异常引起,而大气和陆面的相互作用增加了干旱的严重性。我们也将 20 世纪发生在北美的其它干旱事件同 30 年代的干旱进行了对比。

关键词 美国大平原;沙尘暴;干旱;热带 SSTs 异常

中图分类号 P425.5

文献标识码 A

20 世纪 30 年代,美国出现了连续 10a 的严重降水不足和高温天气,使得大平原的很多土地趋于干旱化,干旱和伴随干旱的沙尘暴造成了美国历史上最为严重的环境灾难之一,导致大平原南部的许多地区变成了“沙窝”(Dust Bowl)^[1~2]。

尽管对形成干旱的一些重要过程的认识已经取得了一定的进展,但是一次干旱事件能够多年持续的物理机制还没有很好地建立^[3~7]。很多研究已用气象和海洋观测的历史记录来确定缓慢变化的太平洋海表温度(SSTs)与美国大平原降水之间的统计关系^[8~9]。然而,观测资料的时间太短,对于长期的干旱,不足以提供肯定性的结果。考虑到 20 世纪 50 年代前高空气象观测资料的不足,认识 30 年代干旱事件的形成原因具有很大的挑战性。

最近,利用最先进的大气环流模式(AGCMs)进行的几项研究已表明 SST 异常是怎样产生持续干旱环境的机制。特别是发现了热带 SST 异常与最近北半球中纬度多数地区的持续干旱^[10]、美国大平原干旱^[11]以及 20 世纪 70 和 80 年代非洲 Sahel 地区干旱的形成有一定的关系^[12]。

在强迫美国大平原长期降水变化方面,太平洋 SST(泛太平洋型)的重要性使我们预料在干旱非

常严重的沙尘暴时期,它会是一个重要因子。然而,在 20 世纪 30 年代,整个热带太平洋 SSTs 异常却令人惊讶地弱,这促使我们对 SST 异常与沙尘暴产生之间的关系进行更深一步的探索。

我们的研究基于运用 NASA 季节到年际预测计划(NSIPP)的大气环流模式进行的一组百年长度的数值模拟^[13],在文献 11 和 12 中也运用了同样的模式,只是这里模式运行的水平分辨率相对较粗^[14]。基本的模式模拟是由实测的逐月 SSTs 资料^[15]强迫模式运行,通过 14 个百年(1902~2001)积分后得到的模拟集合,下面称这些模拟为 C20C 模拟,因为它们作为 20 世纪气候计划的一部分而运行的^[16],这些模拟的差别仅在于每次运行时的大气初始场不同。这样,这 14 个模拟中的相似性程度——“信号”给我们提供了 SSTs 在多大程度上控制大平原地区气候变化的评估,而模拟结果间的离散度——“噪音”也给我们提供了大平原地区气候变化的不可预测分量的一个估计。

图 1(下)利用实测数据^[17]和 14 个模拟数据给出大平原地区的区域平均降水时间序列,筛选保留的时间尺度 >6a。实测降水距平和模拟距平的时间序列显示出相当一致的变率,在整个世纪中,长时间

降水偏多和偏少的时期也是同样的。实测和集合平均距平的相关系数是 0.57, 集合平均和单个模拟距平的相关系数在 0.53~0.79 之间, 这是我们能预料的与实测值间的最高相关系数。然而, 在各集合样本中存在值得注意的离散现象, 在有些时段内各集合样本的曲线趋向于彼此相随。特别地, 在 20 世纪 30 年代几乎所有的模拟值都显示出“干”的趋势, 这与观测结果一致。所有集合样本的模拟中, 40 年代初 30 年代的干旱状态快速过渡为较湿润状态, 这再次与观测结果一致。总体说来, 就实测降水距平落在各集合样本的散布区内而言, 模拟和实测结果一致。

图 1(上)给出沙尘暴时期(1932~1938)平均了的集合降水距平和实测降水距平。实测值显示覆盖

美国中部的大部分地区, 降水不足 $>0.1 \text{ mm/d}$, 中心在 Kansas 州的降水不足达到峰值, 超过 0.3 mm/d , 模拟距平与实测结果一致, 其降水不足的峰值相同, 而中心又在 Kansas 州。两者主要的不同在于模拟中墨西哥出现大的降水不足, 而在实测中没有出现^[18]。另外, 模拟值没有捕获到干旱的全部空间范围, 尤其是没有模拟出在大平原北部和加拿大部分地区观测到的干旱。我们进一步分析了各集合样本的模拟, 结果表明上面的模拟与实测不同是由于模拟值是集合平均的结果, 在平均时将个体模拟距平的离散信号滤除了。事实上, 在各集合样本中, 干旱的空间分布型变率很大, 其中一些显示负降水距平 ($<0.1 \text{ mm}$) 明显延伸进入加拿大且覆盖的区域超过了观测距平覆盖的范围。

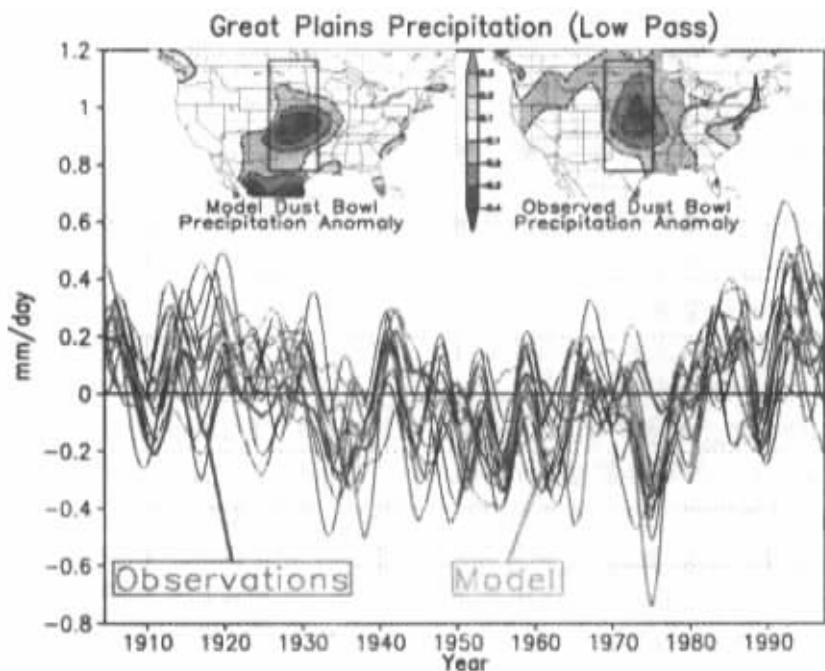


图 1 美国大平原地区(30°N~50°N, 95°W~105°W; 见图中矩形区)区域平均的降水距平时间序列

(为了过滤掉 $<6\text{a}$ 时间尺度的波动, 用了滤波。细黑色曲线取自于 C20C 模拟的 14 个集合样本的模拟输出结果, 绿色实线表示集合平均值, 红色实线是实测值)* 两幅小图表示沙尘暴时期(1932~1938 年)模拟平均降水距平(左)和观测距平(右), 单位: mm/d *

图 1 也揭示了 20 世纪 70 年代中期模式模拟的一些相当特殊的结果。当实测值和集合样本中的 2 个模拟结果显示轻度或中度湿润趋势时, 12 个集合样本的模拟值却预测出甚至比 20 世纪 30 年代更为严重的干旱, 这勾画出干旱预测问题的概率特征。如果我们相信模式输出的结果, 那么 70 年代美国中部接近正常气候状态是幸运的事, 因为模式模拟结

果中出现严重干旱的可能性相当高(12/14)。事实上, 在大平原地区, 有每隔 20a(1910s, 1930s, 1950s)出现干旱的历史趋势, 加上 70 年代中期在美国中部部分地区出现的严重干旱现象, 两者共同使我们推测快要进入一个长干旱时期了^[19~20]。

图 2 给出我们对沙尘暴时期全球海表温度(SST)距平^[15, 21]的最佳估算。必须强调的是这一

时间平均场是利用经验正交函数方法以相当有限的船舶观测资料的外推为基础的。图 2 显示大部分地区,包括热带太平洋、北太平洋以及南太平洋的许多海域都是负距平,热带大西洋、北大西洋以及南太平

洋的一些区域是正距平。令人惊讶地是热带距平值趋小,一般 $<0.3^{\circ}\text{C}$ 。最大距平出现在北大西洋和亚洲沿海附近,这些地区超过 0.5°C 。

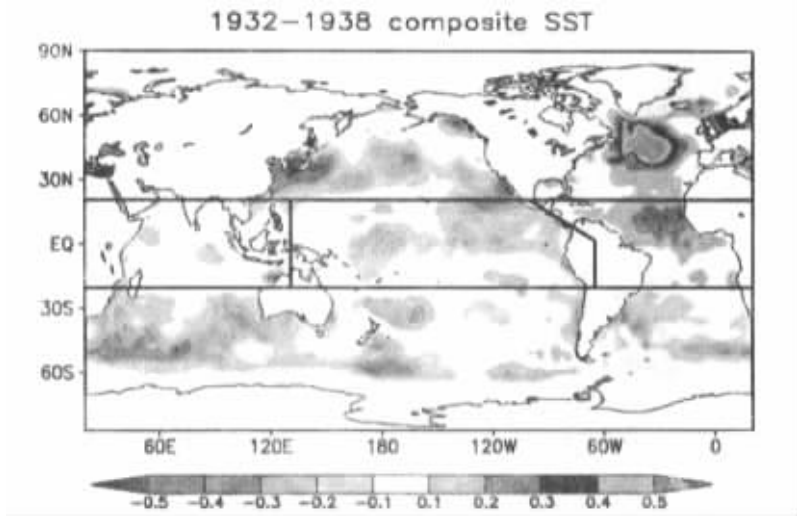


图 2 沙尘暴时期(1932~1938 年)全球平均 SST 距平
(各矩形区表示用于理想 SST 强迫试验的不同分区:热带海洋、印度洋、太平洋、大西洋;
距平值是 1902~1999 年气候平均 SST 与 1932~1938 年平均 SST 的差值^[15]。单位: $^{\circ}\text{C}$)

为了理解上述每个特征对 20 世纪 30 年代干旱的重要性,我们运行了一组理想试验。在这些试验中,使 1932~1938 年沙尘暴时期的平均 SST 距平,仅用于一些特别分区(见图 2 所示),海洋的其余部分使用气候平均 SSTs。表 1 列出了所有试验。我们的目的是将 3 个热带海域(印度洋、太平洋及大西洋)和热带以外海域对这次干旱事件的贡献区分开^[22]。

表 1 理想 SST 强迫试验

(距平值是 1902~1999 年气候平均 SST 与 1932~1938 年平均 SST 的差值^[22],所有模拟都是百年积分,区域在图 2 中给出)

强迫试验	海表温度
控制试验	气候平均 SST(1902~1999 年平均)
全球试验	全球 SST 异常
热带试验	SST 异常只限于热带,其余用气候平均 SST
太平洋试验	SST 异常只限于热带太平洋
太平洋和大西洋试验	SST 异常只限于热带太平洋、热带大西洋
太平洋和印度洋试验	SST 异常只限于热带太平洋、热带印度洋
固定 β 试验	全球 SST 异常,抑制陆-气相互作用

首先,我们用 1932~1938 年时间平均的 SST 距平强迫模式,检验大平原降水是否会产生如 C20C 模拟中集成的相同时间平均响应。图 3(上)是 C20C 模拟的 1932~1938 年集合平均降水距平与全球试验输出的降水距平比较,两者的结果十分相似,除了干异常外,理想强迫也再现了西北太平洋及东

南沿岸的一些湿异常。两种模拟也存在一些不同,最明显地,在全球试验中,模拟的降水不足范围延伸至 Alabama,而在 C20C 模拟中没有出现。虽然存在这样的差异(差异准是由于全球试验假设的结果),但是,由该模式模拟的 20 世纪 30 年代大平原的基本干旱特征似乎可以解释为对时间平均的全球 SST 距平的响应,而在那 10a 间 SSTs 的年际变化在形成干旱的过程中至多起着第二位的作用。

其次,我们想区分热带和热带以外海洋 SST 的影响。热带试验模拟结果(图 3 左下)显示只用热带 SST 异常强迫模式就可再现干旱的主要特征。全球试验减去热带试验差值图(图 3 右下)显示热带以外 SSTs 的影响小得多,热带以外 SST 异常趋向于扩展干旱的范围,特别是从大平原中部向东、南延伸,同时在西北太平洋也增加了湿异常的区域。

不同模式模拟的沙尘暴中心区(图 4 矩形区)平均的降水距平,包括不同热带海域及热带以外地区 SST 的贡献,在图 S1(略)中给出。其结果显示热带太平洋和热带大西洋的贡献是主要的,而热带印度洋和热带以外海域 SST 的影响则很小^[22]。同时,图 S1 也重复给出了全球试验模拟的结果,只是这次在模拟中抑制了陆面与大气的相互作用(固定 β 试验)^[22],阻止这种反馈使模拟的降水不足减少了 50%,说明陆-气相互作用似乎使干旱的严重性增

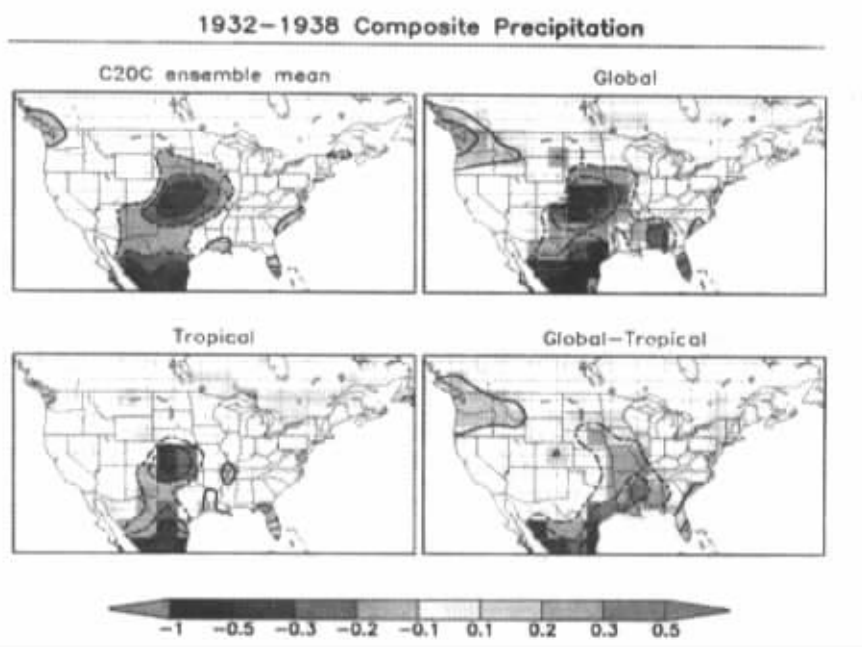


图3 (左上) C20C 模拟的 1932~1938 年平均的集合平均降水距平;

(右上) 全球试验输出的百年平均降水距平(见图 2 和表 1)(左下) 热带试验输出的百年平均降水距平;

(右下) 全球试验输出-热带试验输出结果。除 C20C 模拟外,其余图阴影区表示 t 统计试验 0.10 的显著性水平,其等值线间隔与阴影间隔(见彩色标尺)相同,虚线等值线表示负值区。单位: mm/d。

加了许多。与固定 β 试验模拟结果联系更紧密的信度间隔(图 S1)显示,没有土壤湿度反馈,降水变率很大地减小,这与先前使用同样模式进行的几个研究结果一致^[7,11]。固定 β 试验模拟的降水异常的空间分布显示降水不足减小的范围覆盖了大平原地区(图 4),这些结果与先前大平原地区对土壤湿度变化特别敏感的研究^[7]相一致。

到目前为止所给的结果都是年平均状态,然而,众所周知,大平原地区的大多数降雨都倾向于春夏两季。图 5 给出了实测值、由全球试验模拟及固定 β 试验模拟的大平原地区平均降水异常的季节分布。全球试验模拟值与实测结果十分相似^[23],尽管存在低估降水不足的总倾向。最大降水不足出现在暖季,而其中大约一半的降水不足出现在夏季,令人稍感惊讶的是秋季降水不足超过春季。比较起来,冬季降水异常相当小,事实上,观测到的冬季距平是小的正值。抑制陆-气相互作用的主要影响是明显地减少了夏季的降水不足。图 5 还给出 C20C 模拟的集合平均降水距平及 90% 的信度间隔,将这些值与全球试验模拟值相比较,提供了更进一步的证据,表明全球试验再现了 C20C 模拟的基本特征——降水异常的年循环。C20C 模拟距平的信度间隔在冬、春季包含了零值,进一步证实沙尘暴核心区的有效降水异常只限于夏、秋两季。

上面这些结果表明,要认识热带 SST 异常与沙尘暴区的联系机制,必须注意夏、秋两季^[24]。对夏季环流变化的一个分析(未给出)指出,太平洋 SST 负异常的作用是在对流层上部产生一个全球尺度的响应(热带地区负高度距平,中纬度地区正高度距平),从而抑制了大平原的降水。大西洋 SST 正异常在赤道两侧的对流层上部产生 2 个反气旋性环流异常,赤道北侧的异常延伸至墨西哥湾及美国南部;而在对流层底部,产生一个气旋性环流异常,从而阻止了由墨西哥湾进入北美大陆的湿润气流。值得一提的是,对大西洋的响应几乎排除了夏、秋两季。

然而,20 世纪 30 年代发生在美国的干旱,其严重性、范围及持续时间是这个世纪罕见的,代用气候记录表明在过去 400a 中每 100a 在大平原地区就会出现 1~2 次大的干旱事件^[25]。在 13 世纪末期和 16 世纪,也有迹象表明,曾发生过比 20 世纪更严重、持续时间更长的数十年严重干旱事件^[25]。例如,在 Nebraska 的树轮分析结果显示 13 世纪末期开始的那次干旱事件持续了 38a^[26]。分析 20 世纪美国中部的其它主要干旱事件^[11],结果表明都对应于热带太平洋 SST 异常偏冷。然而,只有 30 年代的干旱,除太平洋 SST 异常偏冷外,还有大西洋 SST 异常偏暖。图 1 显示从 20 世纪 80 年代初开始(1987~1989 年例外),大平原地区降水一般比正常

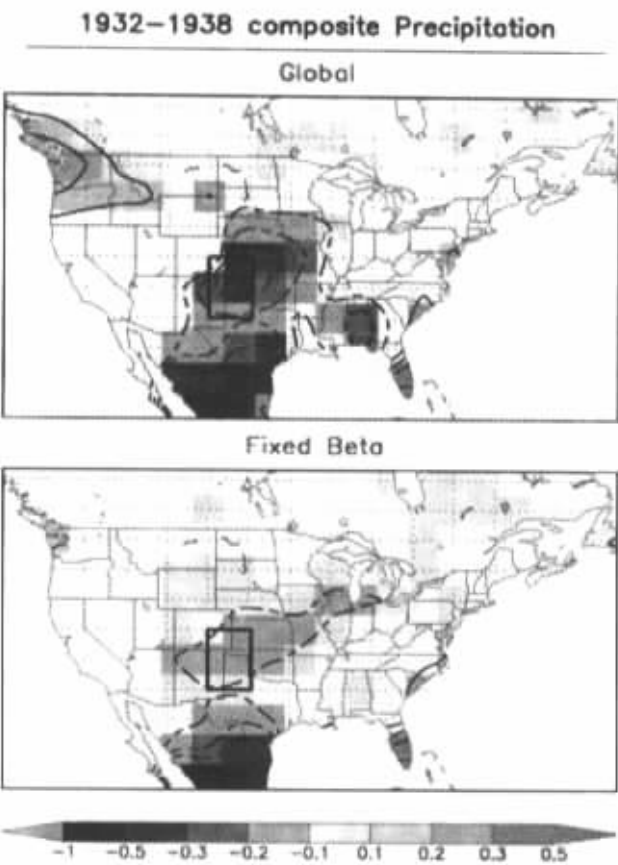


图 4 (上)全球试验模拟的平均降水距平(下)固定 β 试验模拟的平均降水距平.阴影区表示 t 统计试验 0.10 的显著性水平,其等值线间隔与阴影间隔(见彩色标尺)相同,虚线等值线表示负值区,矩形区表示沙尘暴核心区($36^{\circ}\sim 39^{\circ}\text{N}$, $99.5^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{W}$).单位: mm/d

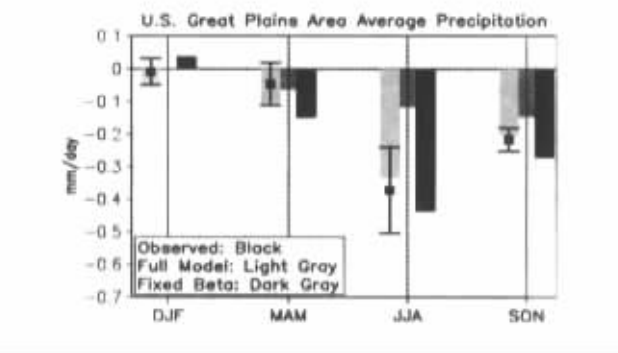


图 5 美国大平原平均降水距平的季节变化(黑柱表示沙尘暴时期(1932~1938 年)的实测平均值,浅灰色条表示全球试验模拟的百年平均降水距平值,深灰色条表示固定 β 试验模拟的百年降水距平值;小方块及相伴的细线是由 C20C 模拟的 1932~1938 年集合平均降水距平及 90% 信度间隔.横坐标值表示季节 DJF:12,1,2 月;MAM:3,4,5 月;JJA:6,7,8 月;SON:9,10,11 月.注意 DJF (冬季),固定 β 试验模拟的距平值太小,未能在图中显示)

偏多,另一方面,美国西部(尤其是西南部)的大部分地区,包括大平原的一些地区,在过去的 5a 中降水比正常偏少,造成中度或极度干旱^[27]。近期干旱的原因尚不清楚,尽管通过我们 C20C 模拟,对 SSTs 和美国南部长期降水变化的关系进行了初步的探索,结果表明与前面讨论的泛太平洋型有一定的联系,但是与大平原相比较,美国西南部的降水似乎与印度洋 SST 有更强的联系。

王涓力译自于《科学》2004 年 3 月,303 卷,1855-1859

附:References and Notes

[1] D. Worster, *Dust Bowl: The Southern Great Plains in the 1930s* (Oxford University Press, New York, 1979).

[2] The "Dust Bowl" was loosely defined to be the region encompassing the western third of Kansas, southeastern Colorado, the Oklahoma Panhandle, the northern two-thirds of the Texas Panhandle, and northeastern New Mexico.

[3] J. Namias, *Mon. Weather Rev.* 83, 199 (1955).

[4] K. E. Trenberth, G. W. Branstator, P. A. Arkin, *Science* 242, 1640 (1988) [ISI].

[5] R. Atlas, N. Wolfson, J. Terry, *J. Clim.* 6, 2034 (1993). [CrossRef] [ISI].

[6] K. C. Mo, J. Nogues-Paegle, R. W. Higgins, *J. Clim.* 10, 3028 (1997) [CrossRef] [ISI].

[7] R. D. Koster, M. J. Suarez, M. Heiser, *J. Hydrometeorol* 1, 26 (2000) [CrossRef] [ISI].

[8] M. Ting, H. Wang, *J. Clim.* 10, 1853 (1997). [CrossRef] [ISI].

[9] M. Barlow, S. Nigam, E. H. Berbery, *J. Clim.* 14, 2105 (2001). [CrossRef] [ISI].

[10] M. P. Hoerling, A. Kumar, *Science* 299, 691 (2003). [Abstract/Free Full Text].

[11] S. D. Schubert, M. J. Suarez, P. J. Pegion, R. D. Koster, J. T. Bacmeister, *J. Clim.* 17, 485 (2004). [CrossRef] [ISI].

[12] A. Giannini, R. Saravanan, P. Chang, *Science* 302, 1027 (2003). [Abstract/Free Full Text].

[13] J. Bacmeister, P. J. Pegion, S. D. Schubert, M. J. Suarez, "An atlas of seasonal means simulated by the NSIPP 1 atmospheric GCM" (NASA Tech. Memo. No. 104606, volume 17, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 2000).

[14] The model was run with a 3° latitude by 3.75° longitude horizontal grid as compared with the 2° latitude by 2.5° longitude grid used in the earlier study (11). The resolution change was made for computational efficiency and does not appear to have much impact on the model's basic climatology or its variability.

[15] N. A. Rayner et al. *J. Geophys. Res.* 108, A407 (2003).

[16] C. Folland, J. Shukla, J. Hiner, M. Rodwell, in *CLIVAR Exchanges* vol. 7 no. 2 (June 2002) pp. 37-39.

- [17] R. Vose et al. , " The global historical climatology network : long - term monthly temperature , precipitation , sea level pressure , and station pressure data " (ORNL/CDIAC - 53 , NDP - 041 . Carbon Dioxide Information Analysis Center , Oak Ridge National Laboratory , Oak Ridge , Tennessee , 1992).
- [18] Mexico experienced somewhat above - normal precipitation during the 1930s . This may have been due , in part , to a number of hurricanes that made landfall over Mexico , especially during 1933 and 1936 . The coarse resolution of the model runs precludes the simulation of hurricanes ; this may account for some of the unrealistic dry conditions simulated by the model over Mexico .
- [19] J. R. Borchert , *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 61 , 1 (1971). [ISI].
- [20] N. J. Rosenberg , in *North American Droughts* , N. J. Rosenberg , Ed. (AAAS Selected Symposia Series , Westview Press , Boulder Colorado , 1978) , pp. 1 - 7 .
- [21] The SST anomalies used to force the model were computed separately for each calendar month as the sum of a mean annual cycle (computed for the period 1902 to 1999) and the SST anomaly field for that calendar month . In Fig. 2 , we show only the time - averaged anomalies .
- [22] Materials and methods are available as supporting material on Science Online .
- [23] It should be noted that current AGCMs (including this model) tend to have difficulty simulating warm - season continental rainfall . In the Great Plains , this is primarily due to a poor representation of nighttime precipitation and appears to be strongly tied to deficiencies in how the models represent convective rain . The good comparison with observations shown in Fig. 5 indicates that despite any such deficiencies in the warm season precipitation climatology , the NSIPP model produces a realistic annual cycle in the response to the SST forcing .
- [24] It can be argued that precipitation deficits during summer are the result of anomalies that are " remembered " from the previous spring and winter . In these calculations , any such memory of the previous season 's condition would come from the land surface . The Fixed Beta run suggests , that at most , such an impact would account for 50% of the summer precipitation deficit . Furthermore , the lack of substantial ensemble mean precipitation deficits over the continental United States during the spring and winter seasons (not shown) suggests that the impact of the land is primarily a contemporaneous feedback and not the result of memory of the previous season 's anomalies . We note that the observations do show substantial precipitation deficits to the north and east of the core region during spring , but similar anomalies are also obtained for some of the individual model runs , suggesting that the observed precipitation anomalies in the spring may not have been forced by SST anomalies .
- [25] C. A. Woodhouse , J. T. Overpeck , *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 79 , 2693 (1998) [CrossRef] [ISI].
- [26] D. L. Bark , in *North American Droughts* , N. J. Rosenberg , Ed. (AAAS Selected Symposia Series , Westview Press , Boulder Colorado , 1978) , pp. 9 - 23 .
- [27] U. S. Drought Monitoring Page (www.drought.unl.edu/dm/monitor.html).
- [28] Y. Zhang , J. M. Wallace , D. Battisti , *J. Clim.* 10 , 1004 (1997). [CrossRef] [ISI].
- [29] This work was supported by the NASA Earth Science Enterprise 's Global Modeling and Analysis Program and the NASA Seasonal - to - Interannual Prediction Project .