张顾炜,曾刚,倪东鸿,等. 2016. 西南地区秋季干旱的年代际转折及其可能原因分析 [J]. 大气科学, 40 (2): 311-323. Zhang Guwei, Zeng Gang, Ni Donghong, et al. 2016. Decadal shift of autumn drought in Southwest China and its possible causes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (2): 311-323, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14294.

西南地区秋季干旱的年代际转折及其可能原因分析

张顾炜^{1,2} 曾刚^{1,3} 倪东鸿¹ 周国兵⁴

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室,南京 210044
2 大连市气象服务中心,大连 116600
3 高原大气与环境四川省重点实验室,成都 610225
4 重庆市气象局,重庆 401147

摘 要 采用 1961~2012 年中国气象局 753 站降水和温度资料、NCEP/NCAR 全球大气再分析资料、NOAA 海 表温度资料等,应用观测统计分析和全球大气环流模式 NCAR CAM5.1 数值模拟,基于标准化降水蒸散指数 (SPEI),对我国西南秋季干旱的年代际转折及其可能原因进行了分析。观测分析结果表明:(1)西南秋季干旱的主要分布型为全区一致型;西南秋季 SPEI 在 1994 年发生年代际突变,突变后(前)为偏旱(涝)期。(2)西南秋季偏旱期的主要环流特征是,西太平洋副热带高压位置偏西、面积偏大、强度偏强,南支槽偏弱,西南地区存在下沉运动。(3)热带东印度洋一西太平洋的海表温度年代际升高对西南秋季 SPEI 在 1994 年发生年代际突变 有重要作用,该关键海区海表温度异常升高,一是会使秋季西南地区 500 hPa 高度场偏高,南支槽减弱;二是产生偏强的 Hadley 环流,使得我国西南地区存在下沉运动;三是会在西太平洋激发气旋性环流,使我国西南地区被 偏北气流控制,削弱了向我国西南地区的水汽输送,容易造成该地区的秋季干旱。应用 NCAR CAM5.1 全球大气环流模式进行了关键海区海表温度年代际变化的敏感性试验,验证了观测分析结果,即秋季关键海区海表温度年代际升高对西南秋季年代际变旱有重要作用。

关键词 标准化降水蒸散指数 中国西南地区 秋季干旱 年代际转折
文章编号 1006-9895(2016)02-0311-13 中图分类号 P461 文献标识码 A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14294

Decadal Shift of Autumn Drought in Southwest China and Its Possible Causes

ZHANG Guwei^{1, 2}, ZENG Gang^{1, 3}, NI Donghong¹, and ZHOU Guobing⁴

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing 210044

2 Meteorological Service Center of Dalian, Dalian 116600

3 Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225

收稿日期 2014-10-16; 网络预出版日期 2015-03-16

作者简介 张顾炜, 男, 1989年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化研究. E-mail: kobezane24@hotmail.com

- 通讯作者 曾刚, E-mail: zenggangted@hotmail.com
- 资助项目 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目 2013CB430202,江苏省自然科学基金面上项目 BK20131431,公益性行业(气象)科研专项 GYHY201306020,重庆市气象局开放式研究基金项目 kfj-201302,高原大气与环境四川省重点实验室开放课题 PAEKL-2013-K1,江苏省高校"青蓝工程"
- Funded by National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2013CB430202), Project Funded by the Natural Sciences Foundation of Jiangsu Province (Grant BK20131431), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201306020), Opening Fund from Chongqing Meteorological Bureau (Grant KFJJ-201302), Opening Fund from Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province (Grant PAEKL-2013-K1), "Qinglan" Project of Jiangsu Province

4 Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing 401147

Based on the precipitation and temperature data of 753 observation stations in China for the period Abstract 1961-2012, as well as National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCAR) reanalysis and National Oceanic and Atmospheric Administration Extended Reconstructed Sea Surface Temperature v3b data, this study uses the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) to discuss the decadal shift of autumn drought in Southwest China and its possible causes through observational analysis and NCAR Community Atmosphere Model, version 5.1 (CAM5.1) numerical simulations. The observational results show that the main distribution for the entire district of autumn drought in Southwest China is in the same phase, and the drought has been getting worse since 1994. It is also found that when the western Pacific subtropical high is positioned further west, and is larger and stronger than usual, it is drier in Southwest China. A weak Indo-Burmese trough and local vertical subsidence movement are also key atmospheric circulation factors for autumn drought in Southwest China. The autumn drought in Southwest China is significantly correlated with the sea surface temperature anomaly (SSTA) over the eastern Indian Ocean and western Pacific (EIWP) region, which is the key region for the cause of Southwest China experiencing more drought since 1994. The positive SSTA in this key region enhances the 500 hPa geopotential height over Southwest China in autumn. It also induces cyclonic circulation around the western Pacific, and an enhanced Hadley cell. In such cases, Southwest China is controlled by both northerly wind and subsidence motion, reducing the amount of water vapor transported to Southwest China. A series of numerical simulations using NCAR CAM5.1 confirm the above observational results and show that the autumn positive SSTA in the EIWP region plays an important role in causing the autumn drought in Southwest China on the decadal scale.

Keywords Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, Southwest China, Autumn drought, Decadal shift

1 引言

中国西南地区地质构造复杂,地貌类型多样,是 世界上地形最复杂的地区之一。这里既有高原又有盆 地和丘陵,是一个典型的气候多变区(徐裕华,1991)。 近年来,我国西南地区旱灾频发,如:2005 年春夏 云南异常干旱,2006 年夏季川渝高温干旱,2009~ 2010 年秋冬春西南地区连续性干旱,以及 2011~ 2012 年冬春季西南干旱(彭京备等,2007;晏红明 等,2007; 邹旭恺和高辉,2007;李永华等,2009; 王斌和李跃清,2010;黄荣辉等,2012;王晓敏等, 2012)。黄荣辉等(2012)指出,20世纪 50 年代后 期至 80 年代初期,西南地区秋季降水偏多,80 年代 初期至 21世纪初,西南地区夏季降水偏少,而2002~ 2009 年期间西南地区秋季降水严重偏少。

造成西南地区干旱的原因很多,已有的研究多 集中于夏季干旱成因分析。例如: 邹旭恺和高辉 (2007)指出,2006年盛夏西南地区东部的异常高 温干旱事件可能是受全球变暖和天气扰动共同作 用的结果;李永华等(2012a,2013)指出,西南 地区东部夏季旱涝与夏季副热带高压南北位置的 变化以及南亚高压脊线位置的变化关系非常密 切;王斌和李跃清(2010)通过分析 2009~2010 年秋冬季西南地区干旱指出,该时期西南地区严重 干旱的发展、演变和减弱与同期 500 hPa 南支槽活动及整层水汽输送有着密切的联系。以往的研究表明,影响西南地区干旱气候的环流场及天气系统主要有西太平洋副热带高压、西风带环流、南亚高压、东南亚夏季风、南支槽、昆明静止锋等(叶笃正等,1957;李跃清,2000;马振锋,2002,2003;刘瑜等,2010;庞晶和覃军,2013;尹晗和李耀辉,2013;陈欢等,2014;张天宇等,2014)。

干旱指标是研究干旱气候的基础,也是衡量干 旱程度的关键标准。目前应用较广泛的干旱指标有 Palmer 干旱指数(PDSI; Palmer, 1965)、标准化 降水指数(SPI; McKee et al., 1993)、相对湿润度 指数(*M*; Richard and Heim, 2002)以及降水距平 百分率等。Vicente-Serrano et al. (2010)在标准化 降水指数(SPI)的基础上引入潜在蒸散项,构建 了标准化降水蒸散指数(SPEI), SPEI 融合了 SPI 和 Palmer 干旱指数的优点,更多考虑了温度的因 素,从而能更敏感地反映出气候变暖对干旱化的影 响。王林和陈文(2012)基于 SPEI 对西南地区近 五百年的干旱演变特征进行分析,证明 SPEI 在西 南地区具有较好的适用性。

20世纪 90年代之后西南地区秋季干旱频繁发 生(Yu et al., 2014),然而针对西南秋季干旱的研 究还较少。刘宣飞和袁慧珍(2006)指出,印度洋 海表温度异常和西南秋季降水的变化存在一定联 系; Zhang et al. (2013)指出,2009年暖池型厄尔 尼诺对当年西南秋季干旱有直接影响;黄荣辉等 (2012)指出,热带西太平洋和热带印度洋的升温 造成了从2009年秋季到2010年春季西南地区的严重 干旱。以往对西南秋季干旱的探讨,多集中于个例分 析,且大多数干旱指数的构建只考虑了降水因素,很 少考虑气温的影响。因此,本文将基于 SPEI 这种更 为全面的干旱指标,采用观测分析和数值模拟相结合 的方法,分析西南秋季干旱的时空变化特征,确定 影响西南秋季干旱的关键海区并分析其影响机制, 期望为监测、预测西南秋季干旱提供科学依据。

2 资料、方法和模式介绍

所用资料有:(1) 1961~2012 年中国 753 站逐 日降水和气温资料中西南地区三省一市(云南省、贵 州省、四川省和重庆市)内的无缺测的 77 个台站资 料(站点分布见图 1a);(2)中国国家气候中心提供 的 74 项环流指数;(3) NCEP/NCAR 逐月再分析资 料集,包括位势高度场、风场、温度场、垂直速度场 和比湿场等,水平分辨率为 2.5°×2.5°(Kalnay et al., 1996);(4) NOAA 提供的 ERSST v3b 资料,水平分 辨率为 2.0°×2.0°(Smith et al., 2007)。

所用方法主要有经验函数正交分解(EOF)、 Mann-Kendall 非参数统计检验、T检验、相关及合成 分析等方法(魏凤英, 2007)。采用 1971~2000 年 30 年平均值作为气候平均态。SPEI 的等级划分见表 1。台站资料主要包括月平均降水量及气温,用于计 算 SPEI,计算过程详见 Vicente-Serrano et al. (2010)。

表1 标准化降水蒸散指数(SPEI)的干旱等级

Table 1Drought levels based on the SPEI (standardizedprecipitation evapotranspiration index)

SPEI 数值	干旱等级
-1.0 <spei≪-0.5< th=""><th>轻微干旱</th></spei≪-0.5<>	轻微干旱
-1.5 <spei≤-1.0< th=""><th>中等干旱</th></spei≤-1.0<>	中等干旱
-2.0 <spei≤-1.5< th=""><th>严重干旱</th></spei≤-1.5<>	严重干旱
SPEI≪−2.0	极端干旱

文中数值试验所用模式是美国国家大气研究 中心 (NCAR) 2011 年研制发布的 CAM5.1 全球大 气环流模式,它是 NCAR 通用地球系统模式 (Community Earth System Model 1.0.4, CESM1.0.4)的大气模块,既可与海洋、海冰模式 耦合运行,也可独立运行。相对于之前的版本, CAM5.1 的物理参数化方案有了实质性修改,例如: 更新了湿边界层和浅积云对流方案,改进了对低云 的模拟等(Neale et al., 2012)。本文试验均采用模 式的 T42 水平分辨率,即纬向均匀分布 128 个格点, 经向分布 64 个格点,垂直方向共 30 层,采用 σ-p 混合坐标;使用模式自带的真实地形、海陆分布等 边界条件。为了与 NCEP/NCAR 再分析资料作比较, 所有试验结果均采用双线性插值方法处理成 2.5°×2.5°水平网格资料。文中秋季指 9~11 月。

3 西南秋季干旱的时空特征

图 1b、c 分别给出了 1961~2012 年西南秋季 气温距平、降水距平的年际变化,可见:西南秋季 气温和降水呈现相反的变化趋势,气温具有显著的 上升趋势,而降水却具有明显的减少趋势。11 年滑 动平均曲线显示,西南秋季气温和降水均在 20 世 纪 90 年代初期发生了年代际变化,在这之前温度 距平几乎为负,降水距平多为正,而之后两者则分 别为正和负,特别是 21 世纪以来,气温上升和降 水减少的趋势尤为明显。

SPEI 引入潜在蒸散项,将气温因素考虑到对干 旱程度的判定之中,因此本文选用这种更为全面的 指标来作为旱涝评判标准。本文提取 1961~2012 年西南地区 77 个台站的月平均气温和降水,计算 各站秋季 SPEI,并进行 EOF 分析。图 2a 为 EOF 第一模态的空间分布,其方差贡献率为 23.0%。可 见,西南全区符号一致,因此可将此空间分布型称 为全区一致型。第一模态的时间系数具有明显的下 降趋势(图 2b),特别是 21 世纪以来几乎为负,结 合特征值的分布可知,西南干旱呈加重趋势。EOF 第二模态的方差贡献率为 11.6%,空间分布型为东 西反向型(图略),其余模态的方差贡献率均未超 过 10.0%。因此,西南秋季干旱主要表现为全区一 致型,且 21 世纪以来干旱加剧。

图 3a 为西南地区秋季 SPEI (77 站 SPEI 的平 均值)的时间变化。可见, SPEI 呈显著下降趋势, 20 世纪 90 年代初期之后西南地区秋季多为干旱, 2009 年 SPEI 指数最小(-1.36),为近 50 年最干旱年 份,这与采用其他干旱指标的研究结论一致(王斌 和李跃清,2010;黄荣辉等,2012;王晓敏等,2012; 尹晗和李耀辉,2013)。对西南秋季 SPEI 做 Mann-Kendall 突变检验(图 3b),结果表明西南秋 季 SPEI 在 1994 年发生了年代际突变,1994 年之后



图 1 (a)西南地区 77 站分布; (b) 1961~2012 年西南秋季气温距平(单位: ℃; 实线为 11 年滑动平均); (c) 1961~2012 年西南秋季降水距平 (单位: mm; 实线为 11 年滑动平均)

Fig. 1 (a) Distribution of 77 meteorological stations in Southwest China, and the (b) temperature anomaly (units: °C) and (c) rainfall anomaly (units: mm) in Southwest China in autumn 1961–2012 (solid line: 11-year moving average)

SPEI显著下降,且多为负值(干旱)。对照图 1b 可 知,西南秋季气温也是在 1994 年之后开始显著升 高的,表明气候变暖对该地区的干旱确实起到了促 进作用。

4 西南秋季干旱对应的大气环流特 征

上文分析得出西南秋季 SPEI 在 1994 年发生年 代际突变,将 1994 年之前(即 1961~1993 年)定 义为偏涝期,1994~2012 年定义为偏旱期。下文主 要从西太平洋副热带高压、南支槽、水汽输送和垂 直运动等方面,对偏旱期和偏涝期做合成差值分 析,寻找导致西南地区秋季干旱发生年代际变化的 可能原因。

利用中国国家气候中心提供的 74 项环流指数 中的西太平洋副热带高压各项特征指数与西南秋 季 SPEI 作相关分析(表 2)。可见:西南秋季 SPEI 与西太平洋副热带高压的面积指数、强度指数和西

伸脊点(西伸脊点值为经度,越小越偏西)都有很 好的相关性,均通过0.05水平的显著性检验,其中 与面积指数的相关系数通过 0.01 水平的显著性检 验。由此可知,当西太平洋副热带高压位置偏 西、面积偏大、强度偏强时,西南秋季 SPEI 偏 低,发生干旱。由秋季 500 hPa 位势高度及其差值 场(偏旱期减偏涝期,下同)(图 4a)可以看出, 相对于偏涝期,偏旱期西太平洋副热带高压的面积 偏大、西伸明显,使得西南地区受其控制,导致西 南地区降水偏少;同时,西南地区位于显著正高度 差值区域,通过0.05水平的显著性检验,这样由于 西太平洋副热带高压的控制导致西南地区秋季气 温偏高,而高温又是引发干旱的一个重要因素。与 偏涝期相比,南支槽区为显著正差值区域,通过了 0.05 水平的显著性检验,表明南支槽偏弱,槽前 西南气流减弱,导致从孟加拉湾向西南地区输送 的水汽强度减弱, 西南地区水汽匮乏, 易致西南 干旱。



图 2 西南地区秋季 SPEI (standardized precipitation evapotranspiration index)的 EOF (empirical orthogonal function)第一模态的(a)空间分布和(b)时间系数

Fig. 2 (a) Eigenvectors and (b) time coefficients of the first EOF (empirical orthogonal function) mode of autumn SPEI (standardized precipitation evapotranspiration index) in Southwest China



图 3 (a) 1961~2012 年西南地区秋季 SPEI 的时间变化; (b) SPEI 的 Mann-Kendall 检验结果(虚直线表示 0.05 的显著性水平线) Fig. 3 (a) Autumn SPEI in Southwest China from 1961 to 2012, and (b) the Mann-Kendall test result for SPEI (dashed straight lines indicate the 0.05 significance level)

表 2 1961~2012 年西太平洋副热带高压特征指数与西南 地区秋季 SPEI 的相关系数

Table 2Correlation coefficients between western Pacificsubtropical high indices and autumn SPEI in SouthwestChina from 1961 to 2012

西太平洋副热带高压	面积	强度	北界	西伸	脊线
特征指数	指数	指数	位置	脊点	位置
与西南地区秋季 SPEI	-0.383**	-0.268*	-0.081	0.268*	-0.089
的相关系数					
				1	

*表示通过 0.05 水平的显著性检验, **表示通过 0.01 水平的显著性检验

图 4b 为整层水汽通量差值场, 阴影区为显著 差值区域, 通过 0.05 水平的显著性检验。可见, 孟 加拉湾被偏东气流控制, 而在西太平洋存在一个气 旋性差值环流, 它导致西南地区存在偏北的水汽输 送, 并且在西南大部分地区存在显著的水汽输送负 差值, 表明偏旱期从孟加拉湾北部向西南地区的水 汽输送比偏涝期明显偏弱。由图 4c 可见, 西南地 区存在显著的差值下沉区, 不利于水汽由低层向高 层输送, 导致降水减少。因此, 偏旱期从海洋向西 南地区输送的水汽偏少, 西南地区多为下沉运动, 不利于水汽由低层向高层输送, 导致降水减少, 易 出现旱情。

5 热带印度洋一太平洋海表温度异常对西南秋季干旱的影响

我国西南地区距离热带印度洋和热带太平洋 都较近,容易受这两个海区海表温度异常的影响 (黄荣辉等, 2012; 李永华等, 2012b; Zhang et al., 2013)。因此,用西南秋季 SPEI 分别与前期夏 季(6~8月)、同期秋季(9~11月)热带印度洋 一太平洋海表温度(sea surface temperature, SST) 作相关分析,结果见图 5a (夏季)和图 5c (秋季)。 可以发现,在热带东印度洋一西太平洋有一大片负 相关区域 (通过 0.01 水平的显著性检验),本文将 该区域(15°S~15°N, 70°~150°E)选作影响西南 干旱的关键海区。把夏季和秋季关键海区的区域平 均海表温度异常 (sea surface temperature anomaly, SSTA)分别与西南秋季 SPEI 作相关分析(图 5b、 d),可见它们与西南秋季 SPEI 存在很好的负相关 关系,均通过0.01水平的显著性检验,表明当前期 夏季和同期秋季关键区海表温度异常偏高时,西南 秋季 SPEI 偏低,易出现干旱。同时可见,关键海



图4 (a)秋季西太平洋副热带高压位置及 500 hPa 高度差值场(单位: dagpm; 黑色实线表示偏早期秋季西太平洋副热带高压位置, 蓝色虚线为偏 涝期); (b)秋季整层水汽通量差值场(单位: kg m⁻¹ s⁻¹); (c) 700 hPa 垂直速度差值场(图中黑色阴影为地形,单位: 10⁻² Pa s⁻¹, 正值表示下沉, 负值表示上升)。差值场均为偏旱期减去偏涝期; 图中阴影区均为差值场,且均表示通过 0.05 水平的显著性检验,暖色为显著正异常,冷色为显著 负异常

Fig. 4 (a) Location of the western Pacific subtropical high in the drought period (black solid line) and flood period (blue dashed line), with 500 hPa geopotential height differences (units: dagpm), (b) vertically integrated water vapor transport flux differences (units: kg m⁻¹ s⁻¹); (c) vertical velocity differences at 700 hPa [units: 10^{-2} Pa s⁻¹; black shading is the terrain; positive (negative) values denote downward (upward) motion]. Warm (cold) color shading indicates significant positive (negative) anomalies passing test at the 0.05 significance level; differences are for the drought period minus the flood period



图 5 1961~2012 年西南秋季 SPEI 与 (a) 前期夏季、(c) 同期秋季热带东印度洋—西太平洋海表温度的相关系数分布(阴影区表示通过 0.01 水平的显著性检验的负相关区域); (b) 前期夏季、(d) 同期秋季关键海区海表温度距平(柱)和西南秋季 SPEI (线条)的时间序列 Fig. 5 Distributions of correlation coefficients between autumn SPEI in Southwest China and SST in the EIWP (eastern Indian Ocean and western Pacific) region in (a) summer and (c) autumn from 1961 to 2012 (shading indicates significant negative anomalies over the 99% confidence level). Time series of SSTA (bars) in the key sea region (15°S–15°N, 70°–150°E) in (b) summer and (d) autumn, with autumn SPEI (line) in Southwest China

区在 20 世纪 80 年代后期出现增暖,1994 年以后海 表温度距平均为正,与西南秋季干旱频发期有较好 的对应关系,表明关键海区的海表温度异常与西南 秋季干旱存在密切联系。

2 期

No. 2

热带洋面一般通过自身增暖影响经圈或纬圈 环流来进一步影响其他区域气候。在西南秋季偏旱 年,赤道附近存在差值上升运动,而我国西南地区 (20°~30°N)则存在差值下沉运动,表明从赤道 附近到西南地区存在一个增强的 Hadley 环流(图 6)。用该 Hadley 环流的 500 hPa 上升支垂直速度减 去下沉支垂直速度的差值表示 Hadley 强度指数,差 值为正(负)时表示 Hadley 环流减弱(增强)。利 用 1961~2012 年 Hadley 强度指数,分别与夏季、 秋季关键海区 SSTA 及西南秋季 SPEI 作相关分析 (表 3)。结果表明,该 Hadley 环流强度指数与夏 季、秋季 SSTA 呈显著的负相关,而与西南秋季 SPEI 呈显著的正相关,说明关键海区海温异常增高时, Hadley 环流增强,西南地区受下沉运动控制,西南 秋季易发生干旱。

已有的研究表明,当西太平洋暖池异常增暖时,可通过其上空对流活动的异常,引起西太平洋 副高的位置和强度的变化(金祖辉和陈镌,2002)。



图 6 经向一垂直环流差值场 (偏早期减偏涝期)沿 97°~112°E 平均 的纬度一高度剖面。灰色阴影区表示通过 0.05 水平的显著性检验; 黑 色阴影区为地形; 垂直风速单位: 10^{-2} Pa s⁻¹, 经向风速单位: m s⁻¹ Fig. 6 Latitude-pressure section of vertical circulation differences (drought period minus flood period) averaged from 97°E to 112°E (shadings denote significant differences at the 95% confidence level; black shading is the terrain, units of vertical and meridional wind velocity are 10^{-2} Pa s⁻¹ and m s⁻¹, respectively)



图 7 1961~2012 年(a)前期夏季、(b)同期秋季热带东印度洋一西太平洋海表温度异常(SSTA)与 500 hPa 高度相关场(阴影区表示通过 0.01 水平的显著性检验的正相关区域)

Fig. 7 Distributions of correlation coefficients between SST in the EIWP region in (a) summer and (b) autumn and 500 hPa geopotential height from 1961 to 2012 (shading indicates significant positive anomalies over the 99% confidence level)

将前期夏季和同期秋季该关键海区的 SSTA 和秋季 500 hPa 高度场做相关分析(图 7),从图中可以看 出,两个时段的 SSTA 和 500 hPa 高度场存在显著 的正相关,通过了 0.01 水平的显著性检验。说明该 关键海区的海表温度异常增暖时,大范围的海表热 力偏强会使秋季西南地区 500 hPa 高度场偏高,南 支槽偏弱,西北太平洋副热带高压增强,与之前分 析得到的西南秋季偏旱期的西北太平洋副热带高 压的特征(图 4a)相符。

表 3 1961~2012 年 Hadley 强度指数与关键海区前期夏季 SSTA(Sea Surface Temperature Anomaly)、同期秋季 SSTA 及西南秋季 SPEI 的相关系数与 Hadley 强度指数的相关系 数

Table 3Correlation coefficients between the Hadleyintensity index and summer/autumn SSTA (Sea SurfaceTemperature Anomaly) in the key sea region, and autumnSPEI in Southwest China from 1961 to 2012

	夏季	秋季	西南秋
	SSTA	SSTA	季 SPEI
与 Hadley 强度指数的相关系数	-0.470*	-0.540*	0.588*

*表示通过 0.01 水平的显著性检验。

6 数值试验

通过上述观测分析可知,在前期夏季和同期秋季,热带东印度洋一西太平洋海表温度异常与西南秋季 SPEI 存在显著的负相关关系。那么,该关键海区的海表温度异常对西南秋季干旱年代际变化是否存在影响?以及哪个季节的海温异常起着更重要、更直接的作用?为了解决这两个问题,本文利用NCAR全球大气环流模式CAM5.1进行数值模



图 8 1979~2012 年 GOGA 试验(实线)和观测(虚线)的西南秋季 SPEI

Fig. 8 Autumn SPEI in Southwest China from simulations in the GOGA experiment (solid line) and observations (dashed line) from 1979 to 2012

拟研究。

数值试验设计方案详见表 4。各试验均采用了 5 个不同的初值场来驱动模式,且 GOGA 试验从 1978年1月1日起进行积分模拟了 34年,EXP_I、 EXP_II和 EXP_III 试验均从1月1日起进行积分各 模拟了 10年。由全球海洋、全球大气试验(GOGA) 结果计算出西南秋季 SPEI,并与 1979~2012年观 测的西南秋季 SPEI 进行比较(图 8)。结果显示, 两者具有显著的相关关系,相关系数为 0.471,通 过 0.01 水平的显著性检验,表明全球海表温度异常 对西南秋季干旱具有重要影响。

将各组敏感性试验模拟的降水和 850 hPa 风场的差值场(图 9)、500 hPa 垂直速度的差值场(图 10a-c)、西太平洋副热带高压的位置和 500 hPa 高度差值场(图 10d-f)以及平均经圈环流的差值场(图 11),分别与观测结果进行对比分析。

表4 数值试验方案

Table 4 Schemes of numerical experiments								
ĺ	简称	全称	分辨率	组数	方案设计			
G	OGA	全球海洋、全球大	T42	5	全球 1978~2012 年观测 SST 驱动 NCAR CAM5.1 大气环流模式积分 34 年			
		气试验						
EXP_I	EXP_I_W	前期夏季至同期	T42	5	6~11 月关键海区(15°S~15°N, 70°~150°E)海表温度为偏旱期(1994~2012 年)海温			
		秋季暖试验			合成,其余区域为气候态海温,驱动 NCAR CAM5.1 大气环流模式积分 10 年			
	EXP_I_C	前期夏季至同期	T42	5	6~11 月关键海区(15°S~15°N, 70°~150°E)海表温度为偏涝期(1961~1993 年)海温			
		秋季冷试验			合成,其余为气候态海温,驱动 NCAR CAM5.1 大气环流模式积分 10 年			
EXP_II	EXP_II_W	前期夏季暖试验	T42	5	同 EXP_I_W, 但 6~8 月关键海区海表温度为偏旱期(1994~2012 年)海温合成, 9~			
					11 月为气候态海温			
	EXP_II_C	前期夏季冷试验	T42	5	同 EXP_I_C, 但 6~8 月关键海区海表温度为偏涝期(1961~1993 年)海温合成, 9~			
					11 月为气候态海温			
EXP_III	EXP_III_W	同期秋季暖试验	T42	5	同 EXP_I_W, 但为 9~11 月关键海区海表温度为偏旱期海温合成、6~8 月为气候态海			
					温			
	EXP_III_C	同期秋季冷试验	T42	5	同 EXP_I_C, 但为 9~11 月关键海区海表温度为偏涝期(1961~1993 年)海温合成、6~			
					8月为气候态海温			



图 9 秋季降水场(单位: mm d⁻¹; 阴影区表示降水差值为负)和 850 hPa 风场(箭矢; 单位: m s⁻¹)的差值分布(暖试验减冷试验): (a) EXP_I; (b) EXP_II; (c) EXP_III

Fig. 9 Differences of precipitation (units: mm d^{-1} ; shading denotes negative precipitation differences) and 850 hPa winds (vectors; units: m s⁻¹) in autumn (warm experiment minus cold experiment): (a) EXP_I; (b) EXP_II; (c) EXP_III

(1)前期夏季至同期秋季海表温度暖、冷试验的差值场(暖试验减冷试验,即 EXP_I_W 减 EXP_I_C)表明:在贵州和云南东部存在降水负差值,暖试验模拟出的西南秋季 SPEI 为-0.46,冷试验模拟的西南秋季 SPEI 为 0.50;孟加拉湾受偏东气流控制(图 9a);赤道地区为上升运动差值区(图 10a);暖试验较冷试验西太平洋副热带高压位

置偏西、面积偏大,南支槽减弱(图 10d); Hadley 环流略有增强(图 11a)。模拟结果和观测结果较为 一致。

(2)前期夏季暖、冷试验的差值场(暖试验减 冷试验,即 EXP_II_W 减 EXP_II_C)表明:西南 地区大部分为降水正差值,暖试验模拟出的西南秋 季 SPEI 为 0.65(偏涝),冷试验模拟的西南秋季 SPEI



图 10 秋季 500 hPa 垂直速度的差值场(阴影;单位: 10⁻² Pa s⁻¹; 正值表示下沉,负值表示上升):(a) EXP_I;(b) EXP_II;(c) EXP_III。秋季 西太平洋副热带高压位置及 500 hPa 高度差值场(单位: dagpm, 实线为暖试验,虚线为冷试验):(d) EXP_I;(e) EXP_II;(f) EXP_III。差值场 均为暖试验减冷试验

Fig. 10 Differences of vertical velocity [shading; units: 10^{-2} Pa s⁻¹; positive (negative) values denote downward (upward) motion] at 500 hPa in autumn: (a) EXP_I; (b) EXP_II; (c) EXP_III. Location of the western Pacific subtropical high in the warm experiment (solid line) and cold experiment (dashed line), with 500 hPa geopotential height differences (units: dagpm): (d) EXP_I; (e) EXP_II; (f) EXP_III. Differences are for the warm experiment minus the cold experiment

为-0.33; 低层风场从孟加拉湾到西南地区存在偏 西、偏南气流(图 9b),赤道地区为上升差值区, 但是西南地区也为上升差值区(图 10b); 暖试验较 冷试验西太平洋副热带高压位置偏西、面积偏大、 强度偏强,南支槽强度偏弱,西南地区位于正高度 场差值控制下(图 10e); Hadley 环流下沉支偏南, 西南地区为上升运动(图 11b)。模拟结果与观测结 果有所偏差。

(3)同期秋季暖、冷试验的差值场(暖试验 减冷试验,即EXP_III_W减EXP_III_C)表明:西 南地区全区为降水负差值,暖试验模拟出的西南秋 季 SPEI 为-0.75(偏旱),冷试验模拟出的西南秋季 SPEI 为 0.33;西太平洋地区存在一个气旋性差值环 流,孟加拉湾受偏东气流控制且西南地区受偏北气 流控制(图 9c);赤道地区为上升运动差值区,西 南地区为下沉运动差值区(图 10c);暖试验较冷试 验西太平洋副热带高压位置偏西、面积偏大,南支 槽强度偏弱,西南地区位于正高度场差值控制下 (图 10f); Hadley 环流增强(图 11c)。模拟结果与 观测结果基本一致。

上述分析结果表明: 三组试验均能模拟出偏 旱、偏涝期西太平洋副热带高压位置和面积以及南 支槽强度的变化;前期夏季至同期秋季海表温度异 常敏感性试验模拟出的结果与观测结果较为一致, 前期夏季海表温度异常敏感性试验模拟出的结果 与观测结果相差较大,同期秋季海表温度异常敏感 性试验模拟出的结果最接近观测结果。可知: 当关 键海区海表温度在前期夏季和同期秋季同时或分 别年代际增暖时,秋季西南地区 500 hPa 高度场升 高,西太平洋副热带高压位置偏西、面积偏大且南 支槽强度减弱,有利于西南地区发生干旱;当关键 海区海表温度在前期夏季和同期秋季同时年代际 增暖或只在同期秋季年代际增暖时,秋季西南地区 会发生干旱。因此,同期秋季关键海区的海表温度 年代际增暖对西南秋季年代际变旱有着非常重要 的作用。



2 期

图 11 秋季经向一垂直环流差值场(暖试验减冷试验)沿 97°~112°E 平均的纬度一高度剖面(图中黑色阴影区为地形;垂直速度单位:10-2 Pa s⁻¹, 经向风速单位: m s⁻¹): (a) EXP_I; (b) EXP_II; (c) EXP_III Fig. 11 Latitude-pressure sections of vertical circulation differences (warm experiment minus cold experiment) averaged from 97°E to 112°E in autumn (black shading is the terrain; units of vertical and meridional wind velocity are 10^{-2} Pa s⁻¹ and m s⁻¹, respectively): (a) EXP I; (b) EXP II; (c) EXP III

结论与讨论 7

本文利用观测资料和 NCAR CAM5.1 全球大气

环流模式, 基于 SPEI 指数分析了西南秋季干旱特 征,重点探讨了其年代际转折及其可能原因,得到 如下主要结论:

(1) 西南秋季干旱的主要空间分布型为全区一 致型,该分布型随着气候变暖呈加重趋势。西南秋 季 SPEI 在 1994 年发生年代际突变, 其中 1961~ 1993 年为偏涝期, 1994~2012 年为偏旱期, 与该 区气温和降水的突变时间一致,1994年以后西南地 区秋季气温升高、降水减少、干旱加重。

(2) 西南秋季偏旱期主要环流特征是, 西太平 洋副热带高压位置偏西、面积偏大、强度偏强,南 支槽偏弱,西南地区存在下沉运动。

(3) 观测分析和数值模拟结果均表明,热带东 印度洋一西太平洋的海表温度年代际升高对西南 秋季 1994 年后的年代际干旱具有重要作用。该关 键海区夏季和秋季海表温度年代际升高,会引起秋 季西南地区 500 hPa 高度场升高,西太平洋副热带 高压位置偏西, 面积偏大以及南支槽减弱, 有利于 西南地区发生干旱;该关键海区秋季海表温度年代 际升高,一方面产生偏强的 Hadley 环流,使得我国 西南地区存在下沉运动,另一方面在西太平洋激发 气旋性环流,使我国西南地区被异常偏北气流控 制,减弱了向我国西南地区的水汽输送,容易造成 该地区秋季干旱。综上所述,秋季该关键海区的海 表温度年代际增暖对西南秋季 20 世纪 90 年代后呈 干旱化趋势具有重要作用。

统计西南地区各偏旱年的海表温度异常分布时 发现: 1998 和 2007 年赤道中东太平洋异常偏冷, 而 2002、2003 和 2009 年赤道中东太平洋则异常偏暖。 黄荣辉等(2012)和 Zhang et al. (2013)指出, 2009 年的 El Niño 事件对西南秋季干旱起到了一定作用; Zhang et al. (2014) 又指出中部型和东部型 El Niño 对南方旱涝有不同的影响。本文仅分析了西南秋季 干旱的年代际变化,对于西南秋季干旱的年际变化 以及与热带海表温度的关系,尚需进一步深入研究。

参考文献(References)

- 陈欢, 王式功, 李永华, 等. 2014. 重庆市夏季极端旱涝成因分析 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 36 (1): 120-128. Chen Huan, Wang Shigong, Li Yonghua, et al. 2014. Genesis analysis of summer flood/drought extremes in Chongqing [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition) (in Chinese), 36 (1): 120-128.
- 黄荣辉, 刘永, 王林, 等. 2012. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重 干旱的成因分析 [J]. 大气科学, 36 (3): 443-457. Huang Ronghui, Liu Yong, Wang Lin, et al. 2012. Analyses of the causes of severe drought

occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 443–457.

- 金祖辉, 陈隽. 2002. 西太平洋暖池区海表水温暖异常对东亚夏季风影 响的研究 [J]. 大气科学, 26 (1): 57-68. Jin Zuhui, Chen Jun. 2002. A composite study of the influence of SST warn anomalies over the western Pacific warm pool on Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (1): 57-68.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–470.
- 李永华, 徐海明, 刘德. 2009. 2006 年夏季西南地区东部特大干早及其大 气环流异常 [J]. 气象学报, 67 (1): 122–132. Li Yonghua, Xu Haiming, Liu De. 2009. Features of the extremely severe drought in the east of Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in 2006 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (1): 122–132.
- 李永华, 青吉铭, 李强, 等. 2012a. 夏季南亚高压的年(代)际变化特征 及其对西南地区东部旱涝的影响 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 34 (9): 71–81. Li Yonghua, Qing Jiming, Li Qiang, et al. 2012a. Inter-annual and inter-decadal variations of South Asian high in summer and its influences on flood/drought over western Southwest China [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition) (in Chinese), 34 (9): 71–81.
- 李永华, 卢楚翰, 徐海明, 等. 2012b. 热带太平洋—印度洋海表温度变 化及其对西南地区东部夏季旱涝的影响 [J]. 热带气象学报, 28 (2): 145–156. Li Yonghua, Lu Chuhan, Xu Haiming, et al. 2012b. Anomalies of sea surface temperature in Pacific–Indian Ocean and effects on drought/flood in summer over eastern of Southwest China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 28 (2): 145–156.
- 李永华, 青吉铭, 李强, 等. 2013. 西南地区东部夏季旱涝的西太平洋副 高特征 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 35 (3): 106–116. Li Yonghua, Qing Jiming, Li Qiang, et al. 2013. Features of western Pacific subtropical high (WPSH) associated with drought/flood in summer over the eastern part of Southwest China [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition) (in Chinese), 35 (3): 106–116.
- 李跃清. 2000. 青藏高原上空环流变化与其东侧旱涝异常分析 [J]. 大气 科学, 24 (4): 470–476. Li Yueqing. 2000. Surface heating in the Tibetan Plateau and general circulation over it and their relations with the prediction of drought–flood at its eastern side [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (4): 470–476.
- 刘宣飞, 袁慧珍. 2006. 印度洋偶极子与中国秋季降水的关系 [J]. 南京 气象学院学报, 29 (5): 644-649. Liu Xuanfei, Yuan Huizhen. 2006. Relationship between the Indian Ocean dipole and autumn rainfall in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29 (5): 644-649.
- 刘瑜,赵尔旭,黄玮,等. 2010. 云南近 46 年降水与气温变化趋势的特 征分析 [J]. 灾害学, 25 (1): 39–44, 63. Liu Yu, Zhao Erxu, Huang Wei, et al. 2010. Characteristic analysis of precipitation and temperature trend in Yunnan Province in recent 46 years [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 25 (1): 39–44, 63.
- 马振锋. 2002. 西南地区夏季降水预测模型 [J]. 气象, 28 (11): 29–33. Ma Zhenfeng. 2002. Forecasting of summer precipitation over southwest region of China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 28 (11):

29–33.

- 马振锋. 2003. 高原季风强弱对南亚高压活动的影响 [J]. 高原气象, 22 (2): 143–146. Ma Zhenfeng. 2003. Impact of strong/weak plateau summer monsoon on South Asia high activity [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (2): 143–146.
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C]// Eighth Conference on Applied Climatology. Anaheim, CA: Amer Meteor Soc, 179–184.
- Neale R B, Chen C C, Gettelman A, et al. 2012. Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 5.0) [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-486 + STR.
- Palmer W C. 1965. Meteorological Drought [M]. New York: U. S. Weather Bureau.
- 庞晶, 覃军. 2013. 西南干旱特征及其成因研究进展 [J]. 南京信息工程 大学学报 (自然科学版), 5 (2): 127–134. Pang Jing, Qin Jun. 2013. Advances in characteristics and causes of drought research in southwest China [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition) (in Chinese), 5 (2): 127–134.
- 彭京备,张庆云,布和朝鲁. 2007. 2006 年川渝地区高温干旱特征及其成 因分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 464–474. Peng Jingbei, Zhang Qingyun, Bueh Cholaw. 2007. On the characteristics and possible causes of a severe drought and heat wave in the Sichuan–Chongqing region in 2006 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 464– 474.
- Richard R, Heim J. 2002. A review of twentieth century drought indices used in the United States [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83 (8): 1149– 1165.
- Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. 2007. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880–2006) [J]. J. Climate, 21 (10): 2283–2296.
- Vicente-Serrano S M, Begueria S, Lopez-Moreno J I. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. J. Climate, 23 (7): 1696–1718.
- 王斌,李跃清. 2010. 2010 年秋冬季西南地区严重干旱与南支槽关系分析 [J]. 高原山地气象研究, 30 (4): 26–35. Wang Bin, Li Yueqing. 2010. Relationship analysis between south branch trough and severe drought of Southwest China during autumn and winter 2009/2010 [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 30 (4): 26–35.
- 王林,陈文. 2012. 近百年西南地区干旱的多时间尺度演变特征 [J]. 气 象科技进展, 2 (4): 21–26. Wang Lin, Chen Wen. 2012. Characteristics of multi-timescale variabilities of the drought over last 100 years in Southwest China [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2 (4): 21–26.
- 王晓敏,周顺武,周兵. 2012. 2009/2010 年西南地区秋冬春持续干旱的 成因分析 [J]. 气象, 38 (11): 1399–1407. Wang Xiaomin, Zhou Shunwu, Zhou Bing. 2012. Causative analysis of continuous drought in Southwest China from autumn 2009 to spring 2010 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38 (11): 1399–1407.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社. Wei Fengying. 2007. Modern Climate Statistic Diagnosis and Prediction Technology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

徐裕华. 1991. 西南气候 [M]. 北京: 气象出版社. Xu Yuhua. 1991.

Climate of Southwest China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

- 晏红明,段旭,程建刚. 2007. 2005 年春季云南异常干旱的成因分析 [J]. 热带气象学报,23 (3): 300–306. Yan Hongming, Duan Xu, Cheng Jian'gang. 2007. Study on a severe drought event over Yunnan in spring 2005 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (3): 300–306.
- 叶笃正,罗四维,朱抱真. 1957. 西藏高原及其附近的流场结构和对流 层大气的热量平衡 [J]. 气象学报,28 (2): 108–121. Ye Duzheng, Luo Siwei, Zhu Baozhen. 1957. The wind structure and heat balance in the lower troposphere over Tibetan Plateau and its surrounding [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 28 (2): 108–121.
- 尹晗,李耀辉. 2013. 我国西南干旱研究最新进展综述 [J]. 干旱气象, 31 (1): 182–193. Yin Han, Li Yaohui. 2013. Summary of advance on drought study in Southwest China [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 31 (1): 182–193.
- Yu M X, Li Q F, Hayes M J, et al. 2014. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the standardized precipitation

evapotranspiration index: 1951–2010? [J]. International Journal of Climatology, 34 (3): 548–558.

- 张天宇, 唐红玉, 雷婷, 等. 2014. 重庆夏季旱涝急转与大气环流异常的 联系 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 36 (1): 79–87. Zhang Tianyu, Tang Hongyu, Lei Ting, et al. 2014. The relationship between summer drought-flood abrupt alternation in Chongqing and the anomalous of atmospheric circulation [J]. Journal of Yunnan University (Natural Science Edition) (in Chinese), 36 (1): 79–87.
- Zhang W J, Jin F F, Zhao J X, et al. 2013. The possible influence of a nonconventional El Niño on the severe autumn drought of 2009 in Southwest China [J]. J. Climate, 26 (21): 8392–8405.
- Zhang W J, Jin F F, Turner A. 2014. Increasing autumn drought over southern China associated with ENSO regime shift [J]. Geophys. Res. Lett., 41 (11): 4020–4026.
- 邹旭恺,高辉. 2007. 2006 年夏季川渝高温干旱分析 [J]. 气候变化研究 进展,3 (3): 149–153. Zou Xukai, Gao Hui. 2007. Analysis of severe drought and heat wave over the Sichuan basin in the summer of 2006 [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (3): 149–153.