



中国西南超级干旱的变化特征和多尺度异常叠加效应分析

王林^{1,2}, 陈文^{3*}, 黄刚^{4*}, 王婷⁵, 王秋琳⁶, 宿小蕴⁴, 任子璇⁷,
Chakrit CHOTAMONSAK^{8,9}, Atsamon LIMSAKUL¹⁰, Kritanai TORSRI¹¹

1. 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候与环境重点实验室, 北京 100029;
2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072;
3. 云南大学地球科学学院大气科学系, 昆明 650500;
4. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029;
5. 中国科学院大气物理研究所碳中和研究中心, 北京 100029;
6. 杭州市气象局, 杭州 310051;
7. 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029;
8. Department of Geography, Faculty of Social Sciences, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand;
9. Environmental Science Research Center, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand;
10. Climate Change and Environmental Research Center, Technopolis, Klong 5, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand;
11. Hydro-Informatics Innovation Division, Hydro-Informatics Institute, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Bangkok 10900, Thailand

* 通讯作者, E-mail: chenwen-dq@ynu.edu.cn(陈文), wangting@mail.iap.ac.cn(王婷)

收稿日期: 2023-12-12; 收修改稿日期: 2024-05-07; 接受日期: 2024-05-17; 网络版发表日期: 2024-06-06

国家自然科学基金面上项目(42175041)、国家自然科学基金重点项目(42230605)、中国科学院国际伙伴计划未来伙伴网络专项项目(060GJHZ2022104FN)、中国科学院大气物理研究所“十四五规划”青年项目、高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放研究基金项目(SZKT202204)资助

摘要 最近十几年来, 中国西南地区超级干旱频发, 导致了严重的经济损失和生态环境破坏. 本文分析了1961~2022年中国西南超级干旱的变化特征, 揭示了多尺度干旱的叠加效应, 并探讨了驱动多尺度干旱异常的大气环流机制. 超级干旱的本质是由多时间尺度极端干旱事件叠加引起的复合型干旱, 通过对比2006年和2022年典型干旱个例, 证实了多尺度干旱叠加的决定性作用. 基于多尺度综合指数(CMI)识别, 2006~2014年间中国西南集中出现多次超级干旱事件. 其中, 长时间尺度的蒸发增强和降水亏缺的年代际背景是必要条件, 决定了超级干旱的整体格局; 短时间尺度的降水异常和蒸发异常激发了超级干旱的爆发, 决定了超级干旱的确切发生时间, 包括2006年8~9月、2009年11月至2010年5月、2011年7~10月、2012年4~5月以及2013年1~4月等. 统计分析表明, 降水异常叠加对超级干旱的贡献是蒸发作用的2.4倍. 在影响多尺度降水的环流机制上, 短期和长期尺度的异常空间模态相似, 均为南海地区的气旋式环流和西南地区的东北风异常, 以及西南地区的下沉异常中心. 2006~2014年期间, 西南地区跨季节持续性降水减少的可能原因是北太平洋PDO极端负位相和西太平洋暖池异常增温. 具体的

中文引用格式: 王林, 陈文, 黄刚, 王婷, 王秋琳, 宿小蕴, 任子璇, Chotamonsak C, Limsakul A, Torsri K. 2024. 中国西南超级干旱的变化特征和多尺度异常叠加效应分析. 中国科学: 地球科学, 54(7): 2114–2132, doi: [10.1360/SSTe-2023-0313](https://doi.org/10.1360/SSTe-2023-0313)

英文引用格式: Wang L, Chen W, Huang G, Wang T, Wang Q, Su X, Ren Z, Chotamonsak C, Limsakul A, Torsri K. 2024. Characteristics of super drought in Southwest China and the associated compounding effect of multiscale anomalies. Science China Earth Sciences, 67(7): 2084–2102, <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1341-4>

动力过程为: PDO负位相在北太平洋激发反气旋式环流异常,西南侧的东北风延伸至亚洲东南部,不利于水汽输送;暖池增温在西北侧激发出气旋式环流异常,也在西南地区上空形成东北风异常,同时暖池地区的上升运动在高层辐散至西南地区上空辐合形成补偿下沉运动.上述两种遥强迫的共同作用,在长时间尺度上形成了气候背景状态中不利于西南地区降水的因素,为短时间尺度降水异常叠加形成超级干旱提供了重要的先决条件.

关键词 超级干旱, 多尺度, 叠加效应, 机理分析, 中国西南地区

1 引言

中国西南地区包括四川、重庆、贵州、云南和广西,人口占全国的1/6,粮食产量占全国的16%.西南地区是中国乃至南亚、东南亚地区的“江河源”,是长江、珠江、澜沧江、雅鲁藏布江等重要河流的源头和上游,拥有中国46%的水资源.西南地区的区位和地形见图1.

尽管西南地区属于自然地理格局中的湿润区,但近年来却遭遇了频发的极端干旱事件.2006年川渝地区发生了严重的高温干旱灾害,造成了两地饮水困难,农作物受旱面积320多万公顷,粮食减产500万吨左右(Li等, 2011).仅仅3年后,从2009年秋季到2010年春季云贵川等地发生了持续近8个月的严重干旱.这次严重干旱不仅使灾区大量农作物歉收或绝收,而且致使2500万人生活用水困难,造成了巨大的经济损失(黄荣辉等, 2012).2011年夏季西南地区再次遭遇极端干旱,累计受灾人口3876.3万人,1039.8万人、537.7万头大牲畜发生临时性饮水困难,农作物受灾面积 334.4×10^4 公顷,绝收 55.0×10^4 公顷,直接经济损失约213亿元(段海霞等, 2011).2013年1~4个月,西南部分地区再次出现持续严重干旱,干旱造成云南、四川、贵州和重庆4省(市)2938.7万人受灾,725.9万人饮水困难,434.8万人需要生活救助(胡学平等, 2015).

西南地区地理位置特殊,是南亚季风与东亚季风交汇的区域,其天气气候变化和成因都非常复杂(Chen等, 2023, 2024).对于西南干旱的气候学研究大致可以分为三类,一是西南地区干旱的历史演变特征分析,二是西南干旱发生的大尺度环流背景和成因分析,三是西南干旱的未来预估.相关的研究工作数量众多,但限于篇幅,我们无法一一回顾,可参考Wang等(2015a)关于西南干旱研究进展的综述性论文.另外,张强等(2024)全面总结了近年来干旱形成机制、预测理论方

法及灾害风险特征等方面的最新研究进展.在此,我们主要列举近几年关于西南干旱研究的一些成果,对上述三个研究方向分别进行举例说明.

对于西南干旱演变的特征,Wang等(2022)基于定性的多尺度综合指标分析了近60年东亚极端干旱的变化特征,指出其发生频率在最近10年显著提高,中国主要包含两个热点区域:北方的过渡带地区和西南地区.王林和陈文(2012)基于近百年的序列指出,除了近期以外,1940年前后西南地区也经历了非常严重的干旱.Liu等(2017)分析了西南地区干旱气候变化的空间差异,指出干旱持续时间、强度和联合重现期间隔的空间变异性显著下降,说明干旱更趋于广泛,而不是集中在某些分区域.

对于西南干旱发生的大尺度环流背景和成因分析,主要关注于极端个例分析、年际和年代际变化的成因分析.对于极端个例分析,Zhang(2020)对比分析了2006年和2011年夏季极端干旱水汽来源及其变化,发现2006年的干旱主要是因为印度季风和西风带水汽输送的减少,而2011年的干旱则是印度季风、西风带和东亚夏季风的水汽输送共同减少所致.Sun等(2019)分析了2009~2011年期间的极端干旱事件,指出2009年和2011年的干旱强度主要归因于降水量的减少,而2010年降水和蒸发的影响则相当.个例分析中,除了关注气候系统内部变率的影响,还有一部分工作关注了人类活动外强迫的贡献,如Wang等(2021).在年际时间变化尺度上,Jiang等(2017)指出西南夏季降水具有两种主要的模态,第一模态特征为除四川中部以外的全区一致变化,第二模态表现为南北降水的反向变化.他们进一步指出,菲律宾海对流活动的强弱与第一模态密切相关,而西部海洋大陆的对流活动则影响第二模态的形成.对于秋季降水,Wang等(2015b)指出热带西北太平洋海温有重要的影响,其中的关键动力过程是其暖海温异常会激发南海异常气旋式环流,减

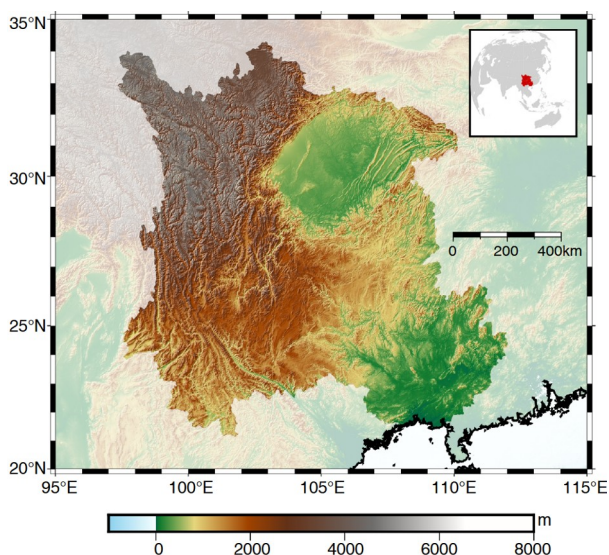


图1 中国西南地区的地理位置(右上角子图)和地形高程图(主图)

弱向中国西南地区的水汽输送,从而抑制降水.除了热带系统, Hao等(2022)指出夏季北大西洋NAO对西南秋季降水也有重要影响,NAO负位相导致后续11月西南更干旱,主要的动力过程是沿副热带急流和大圆路径的两个波列.另外, Wu等(2023)和Tao等(2023)还讨论了西南雨季开始和结束时间的年际变化及其成因.在年代际尺度上, Wang等(2018)指出西南秋季气候在1994年经历了由“湿”向“干”的年代际转变.基于统计诊断方法,表明印太暖池可能是影响西南年代尺度干旱的关键区.印太暖池在1994年也发生了年代际转折,由冷海温转向暖海温,与西南干湿年代际转变发生的时间完全一致.主要的动力过程包括:南海的气旋式异常环流、青藏高原南侧的东南风异常、赤道印度洋的水汽输送路径偏东和西南地区的补偿下沉气流. Jia等(2021)还指出,北大西洋海温年代际变化激发的大气遥相关波列也有重要影响.除此之外, Tan等(2017)分析了冬季降水的年代际变化,指出2000年后西南地区的冬季降水持续亏缺,这种年代际转变与AO转向负位相以及频繁发生的中太平洋型El Niño有关; Dong等(2023)分析了夏季降水的年代际变化,指出主要的海温外强迫包括孟加拉湾、西太平洋暖池和北太平洋西部.除了气候系统内部变率的影响, Huo等(2021)指出增加的人为气溶胶的直接效应、间接效应以及所诱导的环流变化导致西南地区秋季降水量的减少.

对于西南干旱的未来情景预估, Wang等(2014)基于CMIP5资料评估了未来西南干旱的演变趋势,在21世纪初期,预估的降水变化具有空间不一致性,大部分区域降水减少而西北部山区的降水增加.而在21世纪中后期,西南地区降水整体增加,主要原因是来自孟加拉湾的西南风水汽输送加强.蒸发表现为逐步增加的趋势,主要原因是净辐射、温度的增加和相对湿度的减小.虽然降水和蒸发都增加,但蒸发增加的速率超过了降水,即降水对干旱的缓解作用完全被强烈的蒸发所抵消.同时,极端干旱和偏湿事件的发生概率均有显著增加,使得西南地区未来的气候将变得更加极端. Leng等(2020)指出未来西南地区秋季、冬季和春季的干旱风险更高.

这些研究对于理解西南干旱的变化和成因具有重要意义,但还存在一些不足.以往研究多集中在分析某一单独时间尺度的干旱特征和成因,例如极端事件发生时段的异常,而较少关注不同时间尺度的叠加效应.事实上,最新研究结果表明,高影响力的干旱本质上是由多时间尺度极端干旱事件的叠加引起的复合型干旱事件即超级干旱(Wang等, 2023),西南地区也不例外(Wang等, 2016).近期,已经有了一些研究工作注意到区分不同时间尺度干旱的变化规律及其形成机制的异同(Zhang和Wu, 2021; Zhang等, 2022).因此,迫切需要在以往研究的基础上,开展全面系统的西南超级干旱变化特征分析,揭示不同时间尺度干旱和大气环流驱动因子的耦合叠加效应.

2 数据

降水和潜在蒸发(PET)数据来自于英国东安格利亚大学发布的最新CRU TS4.07月度网格数据集(Harris等, 2020).该数据集提供了1901~2022年全球陆地 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 分辨率的逐月降水量和基于Penman-Monteith方案估算的潜在蒸发数据.考虑到数据质量,选择1961年之后的数据进行分析.同时,我们还采用实际蒸发数据作为佐证,是由荷兰阿姆斯特丹大学和根特大学联合研发的全球陆地蒸发产品(Global Land Evaporation Amsterdam Model, GLEAM),版本是最新的v3.7b,空间分辨率为 0.25° ,时间跨度为2003~2022年(Miralles等, 2011; Martens等, 2017).v3.7b版本产品主要由卫星资料驱动Priestley-Taylor模型计算,源数据包

括辐射通量、土壤水分、降水、气温、植被光学厚度和雪水当量等。我们提取了2003~2022年西南地区去除年循环的月均潜在蒸发和实际蒸发的区域平均时间序列, 计算两者相关系数为0.43, 通过了0.0001的显著性水平检验。这说明西南地区作为亚热带湿润区, 实际蒸发变化很大程度上是由潜在蒸发所控制。在下文讨论中, 我们多采用“蒸发”指代, 但在涉及量化分析时我们会明确指出是“潜在蒸发”。

为了定量识别超级干旱, CMI指数来自超级干旱在线产品平台<https://superdrought.com>。该产品基于CRU TS4.07的数据计算得到, 提供了1961~2022年期间全球陆地0.5°分辨率的逐月指数值。同时, 还基于CRU TS4.07数据计算了3、6、12、24和48个月时间尺度的标准化降水蒸散指数(SPEI, Vicente-Serrano等, 2010)。在处理上, 为反映区域干旱整体特征, 通常有两种计算方式: 一是直接利用格点指数值进行区域平均, 这也是最常用的; 二是先对区域内的原始降水和潜在蒸发值进行平均, 再基于平均后的值计算区域指数。需要说明的是, 这两种计算方式结果的具体量值存在一定差异, 直接平均格点指数会相对低估, 但两者的变化趋势是一致的, 不影响对干旱变化规律判断。因此本研究在分析西南地区干旱状况时, 兼顾考虑第二种计算方式。

为佐证CMI指数的结果, 还采用美国得克萨斯大学空间研究中心(Center for Space Research, CSR)发布的基于GRACE重力卫星反演的陆地总水储量资料(Tapley等, 2019)。陆地总水储量资料包括地表水、土壤水、径流和地下水等, 用等效水高表示(单位: cm)。所采用的数据版本为最新的RL06.2的Mascon产品, 时间跨度为2002年4月至今, 空间分辨率为0.5°×0.5°, 时间分辨率为1个月(Save等, 2016)。Mascon是新一代的GRACE产品, 全称是Mass concentration, 其最大优点是不需要进行任何后处理, 在使用上更加方便, 而传统的球谐系数解法需要进行低阶项替换和补充、去除条带等后处理(张岚和孙文科, 2022)。

大气环流资料使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的第五代全球大气再分析月均数据集ERA5(Hersbach等, 2020)。ERA5提供了自1940年起至今的全球大气、陆面和海洋要素的月均格点资料, 水平分辨率为0.25°×0.25°。本研究使用的数据时间范围为1961~2022年, 变量包括整层水汽通量、风场和垂

直速度场等。海表面温度(SST)资料来自NOAA/NCEI提供的1854年至今的月平均海表温度扩展重建资料(Extended Reconstructed SST, ERSST), 版本是v5, 空间分辨率是2°×2°(Huang等, 2017)。ERSST海温资料的分析时段亦选择1961~2022年。此外, 太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)指数来自于NOAA/NCEI, 下载地址为<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/pdo/>。

3 方法

3.1 超级干旱的概念和多尺度综合指数(CMI)

首先简要介绍提出超级干旱概念的背景和必要性。与极端降水和极端温度的研究不同, 干旱的独特性在于多时间尺度特征, 是干旱研究中一个非常关键的概念。它与气候学研究中常说的年际、年代际变化这样的时间尺度概念不同, 实际上是指干旱的多类型性特征, 即水资源以不同的形式贮存在自然界中, 包括降水、土壤水分、地下水、河流水、湖泊水库水等, 它们对缺水的响应时间尺度各不相同。依照定义, 干旱时间尺度是指在评估某一特定月份的干湿状况时, 选择一个向前追溯的时间窗口进行考虑, 对该时间窗口内的累积水分平衡与多年同期平均进行比较, 最终判断出该月的干湿状况。例如, 3个月时间尺度就是统计前2个月和当月的累积水分平衡情况; 6个月时间尺度就是统计前5个月和当月的累积水分平衡情况。通常计算3个月、6个月、12个月、24个月和48个月时间尺度的干旱指数。随着时间尺度的增加, 可以将干旱大致分为气象干旱、农业干旱和水文干旱, 干旱指数的变化也会趋于平缓。因此, 对于同一地理区域和同一时间点, 如果考虑不同的时间尺度(即不同的干旱类型), 干湿状态可以完全不同。例如, 3个月的降水亏缺会导致气象干旱以及土壤含水量减少而引起的农业干旱, 但对水文系统的影响比较小, 即河道流量、水库蓄水量等仍处于正常状态甚至是偏湿的状态; 相反, 长期的(几个季度或几年)的降水偏少会导致严重的水文干旱, 但是在这个时期中的某次强降水会使土壤处于偏湿的状态, 但水文系统仍然处于干旱状态。这种明显的“异步”状态给区域整体极端干旱判定带来了很大的困难。

正是基于不同水资源要素可能出现“异步”状态的

现象,“超级干旱”(Super Drought)这一全新概念被提出(Wang等, 2023). 超级干旱是指在多个时间尺度上同时发生极端干旱的现象, 可以视为不同类型极端干旱的叠加, 属于一种复合型极端干旱事件. 如果仅在某一时间尺度上出现极端干旱, 其破坏性影响可能有限; 而当多种时间尺度的极端干旱同时发生时, 会对水资源系统造成全面、严重的影响. 超级干旱的物理意义是总可用水资源严重短缺, 而非某个部分的缺水. 同时还揭示出, 干旱中极端事件的本质原因并不是某个指标达到历史低值, 而是不同时间尺度干旱是否产生叠加, 这才是区分一般干旱和高影响力干旱的关键所在.

为了定量表示超级干旱, Wang等(2023)考虑不同尺度干旱之间的非线性特征和复杂的相互作用, 建立基于Vine Copula的完整算法框架体系, 最终构建了拥有自主知识产权的多尺度综合指数(Comprehensive Multiscalar Index, CMI). CMI指数概率化地将不同时间尺度上的干旱信息进行融合, 通过整个测度空间来确定异常的量值, 从而反映多尺度干旱的综合状况. 通过区域和全球尺度验证, 表明CMI指数能很好地反映多尺度干旱的综合特征, 在反映总体水资源变化和整体极端性上显著优于传统的干旱指数, 是监测和识别超级干旱的有利工具. 另外, 构建CMI指数的方法具有很强的通用性和适应性, 对原始输入数据没有特定要求. 理论上, 不同类别的干旱相关变量, 如降水、土壤湿度、地下水等都可以作为输入数据源, 灵活地构建Vine Copula模型.

下面简要介绍CMI指数的计算步骤, 具体方法参见Wang等(2023). 第一步是数据准备与预处理, 基于降水和潜在蒸发数据, 计算不同时间尺度 k 的累积水分

平衡, $D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (PET_{n-i} - P_{n-i}), n \geq k$, 其中 n 是月份, k 是

时间尺度; 然后, 通过经验概率积分变换方法将 D_n^k 的边缘分布转换为 $[0, 1]$ 区间内的均匀分布. 第二步是Vine Copula模型构建与拟合检验, 首先计算不同尺度间两两变量的Kendall秩相关系数, 根据最大生成树算法选择令Kendall秩相关系数绝对值总和最大的结构, 以确定正则藤的结构; 然后, 采用赤池信息准则(AIC)确定每条连接边对应的二元Copula函数类型, 并利用极大似然方法进行参数估计, 其中候选二元Copula包

括独立Copula、椭圆Copula族(2个)、Archimedean Copula族(8个), 其中Archimedean Copula(除Frank)族可进行 90° 、 180° 、 270° 的旋转; 最后, 采用Rosenblatt概率积分变换法对Vine Copula模型的拟合效果进行检验. 第三步是CMI指数的生成, 首先通过蒙特卡罗模拟获得Vine Copula的分布函数, 再利用Kendall函数将Copula测度转换为Kendall测度, 接着使用标准正态分布将Kendall测度标准化, 最后乘以 -1 得到CMI指数, 用于评估综合干旱风险和识别超级干旱.

本研究中, 我们选取了3、6、12、24和48个月共5个时间尺度的累积水分平衡序列来构建CMI指数. 这几个时间尺度的选择综合考虑了从短期到长期多个时间尺度的代表性以及计算效率的平衡(Wang等, 2023). 需要说明的是, 在Vine Copula构建过程中, 我们采用“Kendall秩相关系数绝对值最大值”作为标准, 主要是用于确定藤的结构, 即决定哪两个变量优先发生耦合, 而非是从5个时间尺度中最终只选择2个时间尺度参与CMI的计算. 事实上, 由于相邻时间尺度的相关性最大, 因此形成的藤结构依次是3-6-12-24-48个月, 这种结构恰好属于一类特殊的D-vine Copula. 通过全球尺度的检验, Wang等(2023)发现针对多尺度干旱的问题, 这种D-vine结构在绝大多数情况下都是最优的选择. 综上所述, CMI指数的计算考虑了全部5个典型时间尺度的贡献, 且基于Vine Copula的计算框架能够很好地刻画不同时间尺度之间复杂的相互关系和非线性特征.

3.2 超级干旱在线产品平台

为了促进成果的转换应用, 便于研究人员和决策部门获取超级干旱相关信息, 建立了超级干旱在线产品平台(<https://superdrought.com>), 发布逐月全球超级干旱监测信息和历史数据集. 监测产品每月对CMI指数进行更新, 提供最新的干旱状况信息. 用户可以通过交互方式查看任意区域的数值, 实现对当前超级干旱发生情况的掌握. 历史资料库包含了1961年至2022年全球陆地逐月CMI指数数据集, 以 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的网格netCDF格式提供, 根据源数据的更新, 会不定期对数据库内容进行更新, 用户可以自主提取和分析感兴趣的历史时期和区域的超级干旱特征. 平台内容将持续更新, 功能不断完善.

3.3 驱动因子的多尺度处理

多尺度干旱的叠加效应是形成超级干旱的重要机制. 因此, 需要对驱动干旱的关键变量, 包括降水、蒸发量以及影响气候系统的大气环流和海温, 进行多尺度处理, 进而揭示多尺度干旱叠加机制. 对于降水和蒸发这两个变量, 由于它们可以进行累加, 因此我们计算不同时间尺度的累加值, 这与CMI指数计算过程中不同时间尺度的累积水分平衡方法是一致的. 具体而言, 对于某个时刻 n , 我们定义 $Q_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} Q_{n-i}$, $n \geq k$,

这里 k 表示时间尺度, Q_n^k 表示从当前月 n 起向前 $k-1$ 个月的累积降水或蒸发量. 对于大气环流和海温等变量, 由于像风速这样的变量不适宜直接取累加值, 因此采用不同滑动窗口期取平均值的方法, 来代表不同时间尺度的大气和海洋驱动作用. 具体而言, 对于某个时刻 n , 我们定义 $S_n^k = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} S_{n-i}$, $n \geq k$, 这里 S 表示大气或海温变量, S_n^k 表示从当前月 n 起向前 $k-1$ 个月变量的平均值. 然后, 对于不同的自然月, 计算这些累加值或累

加平均值相对于该月气候平均值的距平, 得到各累加变量的距平值.

4 西南地区的超级干旱变化特征和多尺度干旱叠加

4.1 基于CMI指数的超级干旱变化特征

图2给出了1961~2022年西南地区平均的逐月降水量距平和CMI指数的变化. 基于图2a, 西南地区的降水具有显著的月际变率, 标准差为20.5mm, 近60年来没有显著的上升或者下降趋势. 如果从降水量距平的角度, 完全无法分辨出极端干旱事件. 一方面, 例如2009年秋至2010年春的大范围持续干旱, 但西南地区的平均降水量距平仅为-10.5mm, 只有标准差的一半. 另一方面, 降水量负距平排名前两位的出现在1990年8月和1992年8月, 量值分别为-83mm和-75mm, 但是这两个月份均没有发生极端干旱事件. 除了采用降水量距平指标, 任一时间尺度的SPEI指数在识别干旱极端事件中也存在类似的局限性, 详细解读见网络版附录A(<http://earthn.scichina.com>). 因此, 传统方式不能

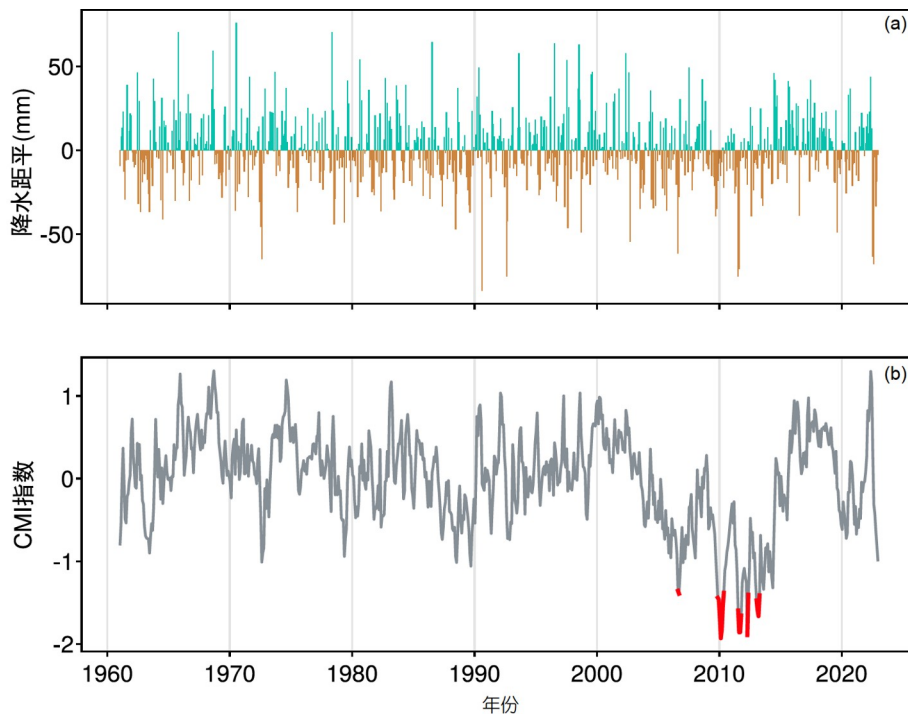


图2 1961~2022年西南地区平均的降水距平(a)和CMI指数(b)的时间序列
(b)中CMI小于-1.3时标记为红色

表征极端干旱事件. 其原因是: 重大干旱事件一般是多个时间尺度或多类型干旱叠加形成的(Wang等, 2023; 张强等, 2020), 而传统指数没有对干旱进行综合衡量, 仅反应了某一个时间尺度或某一类型的干旱特征, 不能反映水资源的整体状况, 会产生错误判断.

多尺度综合指数CMI融合了多尺度干旱信息, 用于量化判断干旱的综合严重程度, 当其达到一定的阈值时, 能够反映真实的极端干旱状态. 图2b展示了西南地区平均的CMI指数1961~2022年的变化. 2000年之前, CMI指数围绕0值波动, 其极端低值罕有突破-1, 这表明西南地区整体水资源保持相对稳定. 但自21世纪初开始, CMI指数出现持续的下降趋势, 在2010年左右达到历史最低值, 之后CMI指数缓慢回升至正常水平. 采用-1.3作为判定超级干旱事件的阈值, 结果发现2006年到2014年期间集中出现了多次超级干旱事

件, 其中包括2006年8~9月、2009年11月至2010年5月、2011年7~10月、2012年4~5月以及2013年1~4月等. 识别出的超级干旱与当时发生的严重社会经济破坏事件高度一致, 充分证明了CMI指数是判定区域干旱综合严重程度和识别超级干旱事件的有效手段.

4.2 多尺度干旱的叠加作用

下面继续分析这几次超级干旱过程的多尺度水资源异常协同作用, 图3给出了1963~2022年西南地区平均的3、6、12、24、48个月时间尺度SPEI指数以及CMI指数量值. 结果发现, 在几次超级干旱过程中, 不同尺度的SPEI指数均显示出低于正常水平的异常负值, 代表着各种类型的水资源要素同时出现供应短缺. 例如, 2009年11月至2010年5月的超级干旱期间, 6和12个月时间尺度的SPEI达到-2以下的极端干旱值, 3、

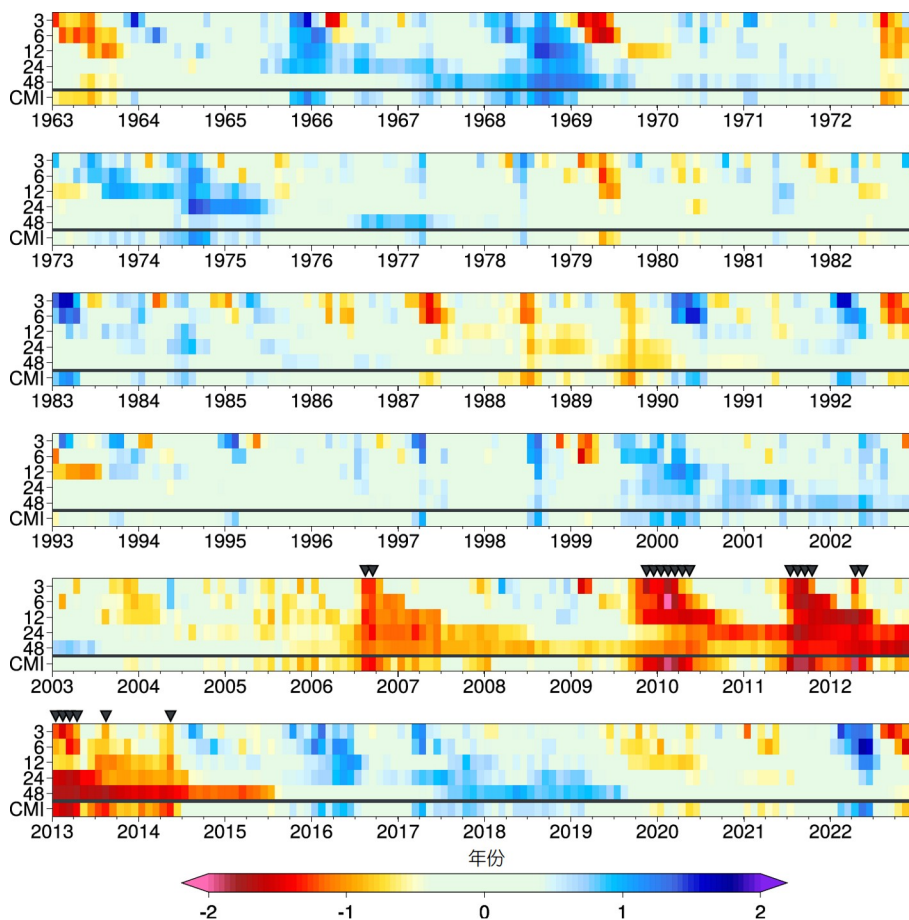


图3 1963~2022年西南地区平均的3、6、12、24、48个月时间尺度SPEI指数以及CMI指数量值
纵坐标的3、6、12、24、48表示所在时间尺度的SPEI指数, 纵坐标的CMI表示CMI指数

24和48个月时间尺度SPEI也都低于-1。这说明气象、农业和水文系统的干旱同时发生, 导致区域内总体水资源严重减少, 构成超级干旱状态。与之相对应的, CMI指数显示出低于-2的极端负值。需要注意的是, 这里的量值是先对原始变量区域平均再计算的SPEI值和CMI值。

为了进一步说明多尺度干旱叠加的关键作用, 这里比较分析了2006年8月和2022年8月中国西南地区发生的两次典型干旱事件的差异, 如图4所示。由于24和48个月时间尺度的空间分布与12个月时间尺度类似, 因此这里不再展示。2022年8月的区域平均降水距平为-68mm, 比2006年8月-61mm的降水亏缺还要严重。进一步对比3个月时间尺度的SPEI指数(图4a和4g), 尽管2006年8月SPEI<-2格点占西南地区的25%, 要高于2022年8月, 但两个年份小于-1格点的百分比均为50%左右, 且2022年8月小于0的格点几乎覆盖整个西南区域, 高于2006年8月的75%。总体来说, 如果仅根据降水量或短期SPEI, 两次干旱的强度相当。但事实上, CMI指数揭示两次干旱事件有本质的差别, 2006年8月发生超级干旱, CMI数值为-1.9, 但2022年8月没有发生, CMI仅为-0.7。产生这一差异的原因在于, 2022年8月之前, 西南地区降水持续偏多, 维持显著偏湿状态(图3), 到了8月份, 虽然降水显著偏少, 短时间尺度干旱几乎覆盖整个西南区域(图4g), 但中长时间尺度的干旱未形成(图4h和4i), 所以多尺度干旱并未发生叠加。图4k的频率分布也显示, 随着时间尺度的增加, 概率分布逐渐向右也就是湿润方向偏移, 12个月及以上时间尺度的SPEI指数大于0的情况占到区域面积76%以上。相反, 在2006年8月, 在空间上各时间尺度均处于严重干旱(图4a~4c), 同时各个时间尺度的SPEI频率分布均显著左偏(图4e)。分析图3可以发现, 2006年8月的超级干旱可以追溯到2003年秋季开始的频繁季节性降水短缺, 导致中长时间尺度水文干旱已建立并持续存在, 在此基础上2006年夏季出现的严重气象干旱, 促使各个时间尺度的干旱同时发生并产生叠加, 最终形成了超级干旱。利用GRACE卫星资料分析陆地总储水量变化, 发现2006年8月西南地区负异常水储量面积占88%, 减少量超过-10cm的区域占22%(图4d和4f); 而2022年8月仍有47%的格点处于偏湿状态, 仅1%的格点出现大于-10cm的总水资源亏缺(图4j和4l)。

上述结果清楚地表明, 中国西南地区发生的几次

重大干旱事件正是由于不同时间尺度干旱的叠加所致。这也再一次印证了超级干旱概念的必要性, 即强调区域内不同类型水资源要素共同出现极端状态才构成高影响的干旱事件; 同时也验证了CMI指数能够有效整合多尺度信息, 准确判断区域干旱的综合严重程度。

5 多尺度驱动变量和环流异常的叠加效应分析

5.1 多尺度降水和蒸发的相对贡献及作用

上一节分析了多尺度干旱叠加的作用, 下面分析多尺度驱动变量及环流异常的叠加效应。首先, 定量归因降水和蒸发的贡献, 然后评估多尺度驱动变量对超级干旱的作用, 最后分析影响多尺度蒸发和降水异常的气候成因。

为了定量分析降水和蒸发两个因子对超级干旱的贡献, 通过控制降水和潜在蒸发使用观测值或气候平均态的试验, 定量拆分降水贡献、潜在蒸发贡献以及两者共同作用的贡献(Yin等, 2023), 详细的归因方法参见附录B。图5a给出了西南地区超级干旱发生月份时CMI指数中降水异常、潜在蒸发异常和两者共同作用的贡献。结果表明, 降水的贡献位于39%~71%, 平均为59%; 潜在蒸发的贡献位于6%~48%, 平均为25%; 两者共同作用的贡献位于1%~39%, 平均为16%。如果不考虑两者的共同作用, 平均而言, 降水的贡献是潜在蒸发贡献的2.4倍。因此, 降水的贡献占主导地位, 而蒸发的贡献相对较小。为了直观解释降水的贡献在超级干旱占主导地位的结论, 图5b~5d计算了2003~2022年西南地区月均降水、潜在蒸发和实际蒸发的标准差, 用以表示各变量的变率特征。结果发现, 潜在蒸发和实际蒸发的变率幅度近似一致, 区域平均标准差约为24mm; 而降水量的标准差达到80mm, 是蒸发的3.3倍。由于水分平衡的变化取决于潜在蒸发减去降水(PET-P)的变化, 降水变化范围更大必然导致水分平衡的变化也更为明显。因此从变率角度可合理解释降水异常驱动的水分平衡变化对超级干旱事件的主导贡献。

这里还有必要回答如下的疑问: 既然降水的贡献占主导, 为什么图2a中月降水距平却对超级干旱没有指示意义? 这主要是两个方面的原因: 一是干旱相对降水异常存在一定的时间滞后, 即降水偏少需经过一

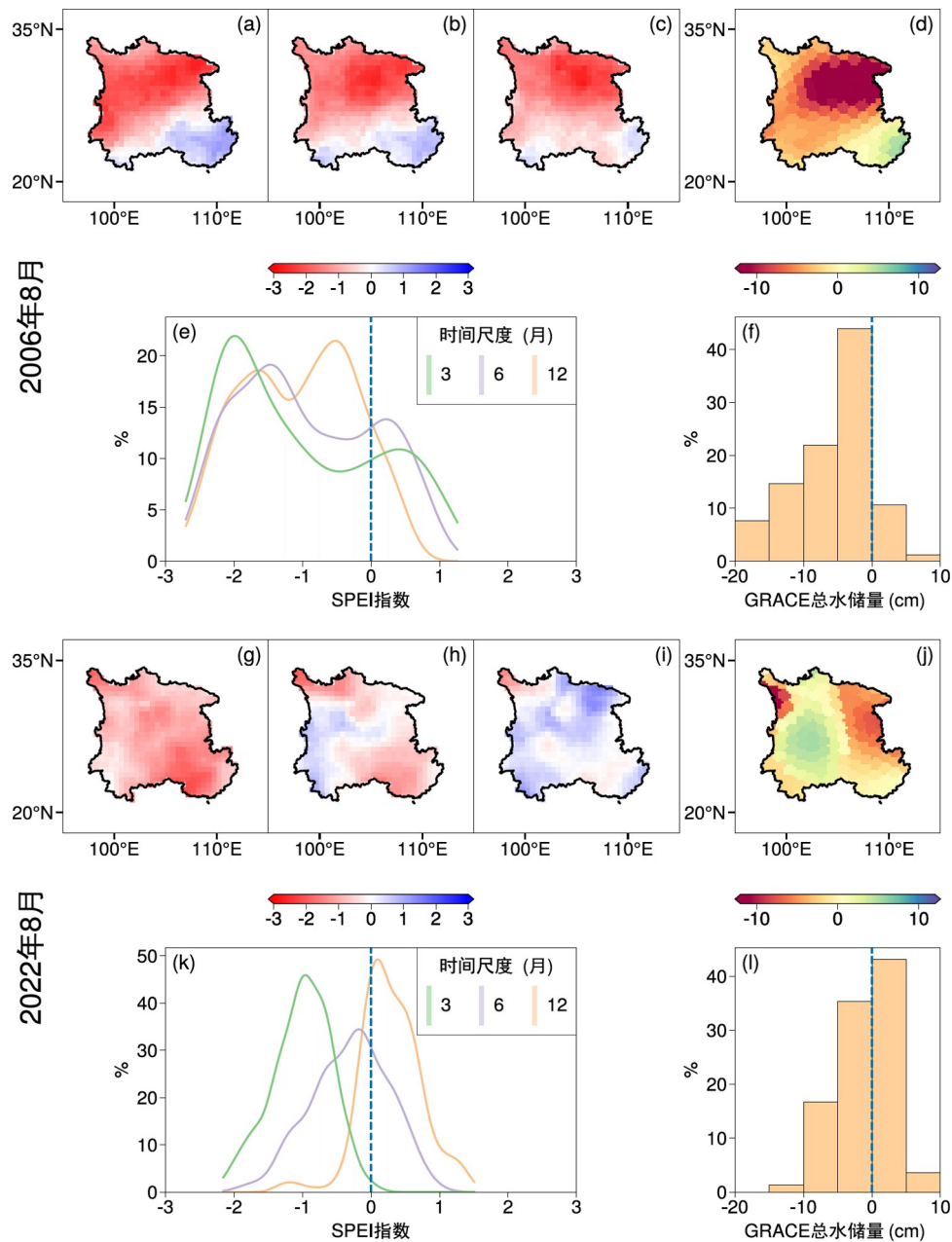


图4 2006年8月与2022年8月西南地区干旱形势的对比

(a)~(c) 2006年8月3、6、12个月时间尺度SPEI的空间分布; (d) GRACE总陆地储水量的异常空间分布; (e) SPEI指数的频率分布和(f) GRACE总陆地储水量异常的频率分布. (g)~(l)与(a)~(f)相同, 但为2022年8月的情形

段时间的积累才会最终形成干旱; 二是不同类型的干旱对降水异常的响应时间尺度不尽相同, 除了月/季尺度的气象干旱, 还需要更长时间尺度累积的农业和人文干旱. 这提示我们在分析干旱时, 需要充分关注其多尺度演变特征. 某一月份降水的显著偏少, 并不一定意味着其他中长时间尺度的干旱状况已经形成. 根

据超级干旱的定义, 只有当多个时间尺度干旱同时达到严重程度时, 才构成真正意义上的极端干旱事件. 因此, 月尺度降水距平虽然贡献占主导, 但其不足以独立指示超级干旱, 还需要考虑多尺度的“累积”和“叠加”效应才能准确揭示超级干旱的发生, 这两者之间并不矛盾.

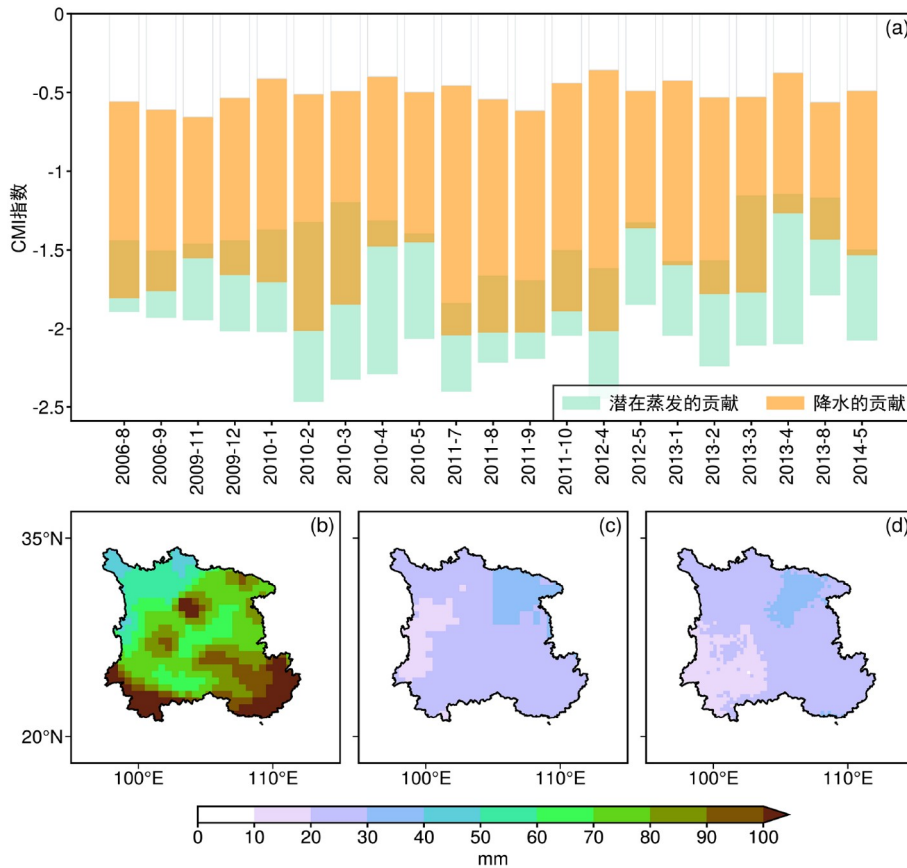


图5 西南地区超级干旱期间降水和潜在蒸发异常的贡献和变率特征

(a) 西南地区超级干旱发生月份CMI指数中降水异常(橙色)、潜在蒸发异常(青色)和两者共同作用(褐色)的贡献, 空白部分表示当降水和潜在蒸发同时取气候平均态时的基准态CMI指数. (b)-(d) 2003~2022年月际降水、潜在蒸发和实际蒸发的标准差(单位: mm)

下面评估多尺度驱动变量对超级干旱的作用. 图6给出了1961~2022年3个月和24个月时间尺度累加的潜在蒸发和降水的变化. 需要说明的是, 为了节省篇幅, 以3个月和24个月分别代表短时间尺度和长时间尺度. 从图6b和6d可以看到, 西南地区在2006~2014年间频繁出现超级干旱, 主要是由长时间尺度(24个月)的蒸发和降水的年代际异常所决定的. 具体来说, 从2003年开始, 24个月时间尺度的蒸发持续处于高位, 直到2017年才恢复正常, 期间潜在蒸发量的平均正异常达到57.6mm, 最大正异常高达105.6mm, 是1961年以来前所未见的(图6b). 与此同时, 从2004年开始, 24个月时间尺度的降水持续偏少, 尽管中间略有短暂恢复, 但整体保持显著的下降趋势, 直到2015年才恢复到正常水平, 期间降水的平均亏缺量达到-96mm, 最低时降水负异常高达-336mm, 也是1961年来从未出

现过的. 在这样的年代际背景下, 当短时间尺度(3个月)的气候出现显著异常时, 就会触发超级干旱的发生. 数据显示, 在几次超级干旱过程中, 3个月时间尺度的潜在蒸发均有显著增加, 平均增加量值为19.8mm; 而3个月时间尺度的降水则显著减少, 平均减少量值为-60mm. 需要说明的是, 从历史纪录来看, 这些短时间尺度的异常情况并不罕见, 只是超级干旱产生的必要条件, 真正关键的是它们与年代际背景的叠加效应.

上述分析可以总结为, 西南超级干旱的频发主要源自多时间尺度驱动变量异常的叠加, 其中年代际背景是必要条件, 决定了超级干旱的整体格局; 而短时间尺度的降水和蒸发异常激发了超级干旱的爆发, 决定了超级干旱的确切发生时间. 这种多尺度的气候异常叠加才是形成超级干旱的核心所在.

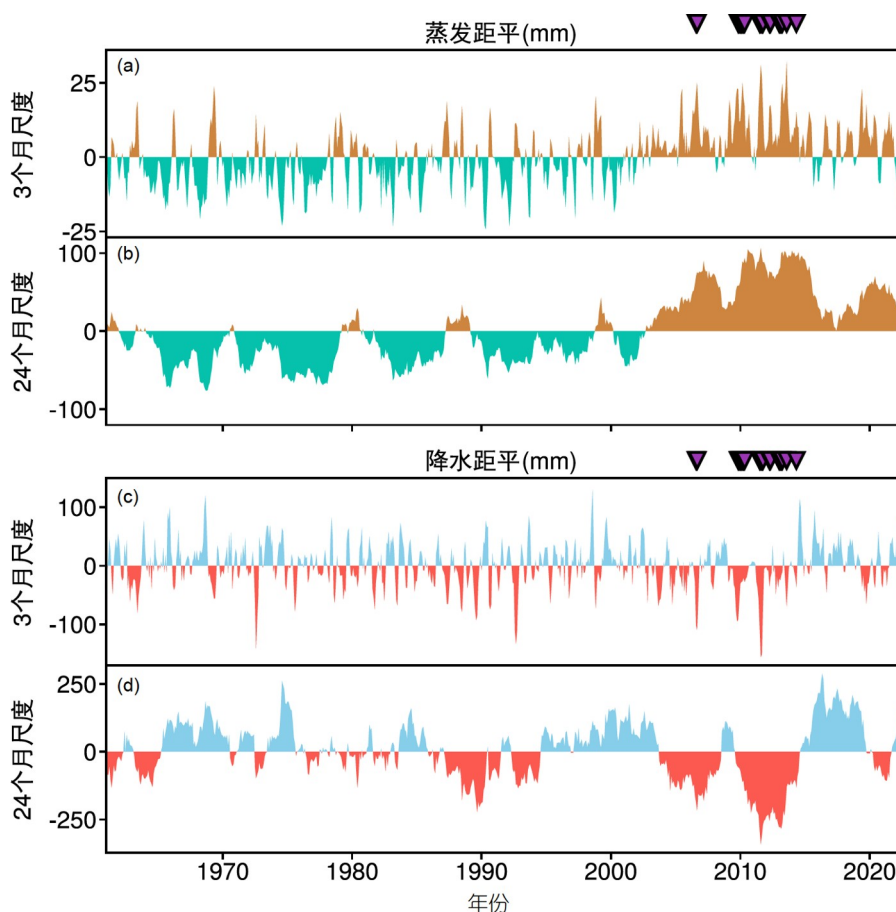


图 6 1961~2022年3个月和24个月时间尺度累加的潜在蒸发((a), (b))和降水((c), (d))变化

5.2 影响多尺度蒸发变化的主要驱动因子分析

下面分析影响多尺度蒸发变化的主要驱动因素。蒸发的变化主要取决于4个气象要素,即气温、辐射、大气湿度和风速,它们通过不同的物理过程影响蒸发强度。为与CRU潜在蒸发的计算保持一致,本文采用了与之相同的Penman-Monteith计算方案,详细的计算公式见Allen等(1998)。主要使用的CRU数据包括月平均、最高和最低气温、实际水汽压和云量,风速则使用气候平均值。其中,云量用于估算净辐射。根据公式,不同因素通过不同的物理过程导致了潜在蒸发的增加:一方面,温度升高或大气湿度降低直接导致饱和水汽压差增大,从而促进蒸发;另一方面,云量减少意味着到达地面的净辐射增加,为蒸发提供了更多的能量。

为了定量区分不同因子的相对贡献,我们采用了控制变量法进行分析。例如,在分析温度的贡献时,我

们将温度设置为气候平均态,用实际的潜在蒸发减去固定温度后计算的潜在蒸发,其差值就可以近似地代表温度变化对蒸发的贡献。同理,湿度和辐射的贡献也可以通过类似的方法估算得到。通过对几次超级干旱个例的分析,我们发现无论是短期还是长期时间尺度,湿度变化对蒸发的影响都非常小,可以忽略不计。温度升高和辐射增加是影响蒸发的主要因子,对蒸发异常的贡献分别为41%和59%。

通过进一步对1961~2022年西南地区的气温和云量数据进行线性趋势分析,发现该时期内气温存在显著的上升趋势,平均增温速率为 $0.015^{\circ}\text{C a}^{-1}$,显著性水平超过0.001。这表明,在过去的60年中,西南地区经历了明显的变暖。与此同时,云量并没有表现出统计上显著的长期趋势。将气温变化分解为长期趋势和年际变率两个部分,并采用控制变量法分别评估了它们对蒸发的相对贡献。结果表明,在西南超级干旱发生的几

个时段内, 温度异常是由长期增暖趋势和年际尺度的波动共同导致的, 贡献各占50%.

综上所述, 西南地区超级干旱发生时段蒸发的增加主要归因于温度和辐射的变化, 且这两个因子的贡献率大致相当. 进一步的分析表明, 温度的长期增暖趋势和年际尺度的异常变率对蒸发的影响同等重要, 而辐射的作用则主要源于年际尺度的波动. 另外, 时间尺度对相关贡献率的量值影响不大.

5.3 影响多尺度降水异常的环流成因

根据3.3节大气和海洋变量的多尺度处理, 下面分析影响多尺度降水异常的大气环流机制. 区域降水的变化主要受两个因素影响和控制: 水汽条件和垂直

运动.

为了揭示不同时间尺度上这两个因素的变化及其对降水的影响, 我们首先绘制并分析了图7和图8. 图7展示了1961~2022年西南地区3、6、12、24和48个月尺度水汽通量和散度异常的纬度-时间剖面图, 图8展示了多尺度垂直速度和比湿异常的高度-时间剖面图. 从这两组图可以看出, 随着时间尺度的增加, 水汽通量散度、垂直速度和比湿等变量的变化逐渐趋于平缓, 正负异常的持续时间增加. 在短期3个月时间尺度上, 区域降水距平和水汽通量散度及500hPa垂直速度异常显示出显著的负相关, 相关系数分别为-0.58和-0.8, 均通过了0.001的显著性水平检验. 这表明西南地区短期尺度上的降水变化主要由水汽条件和对流活动的异

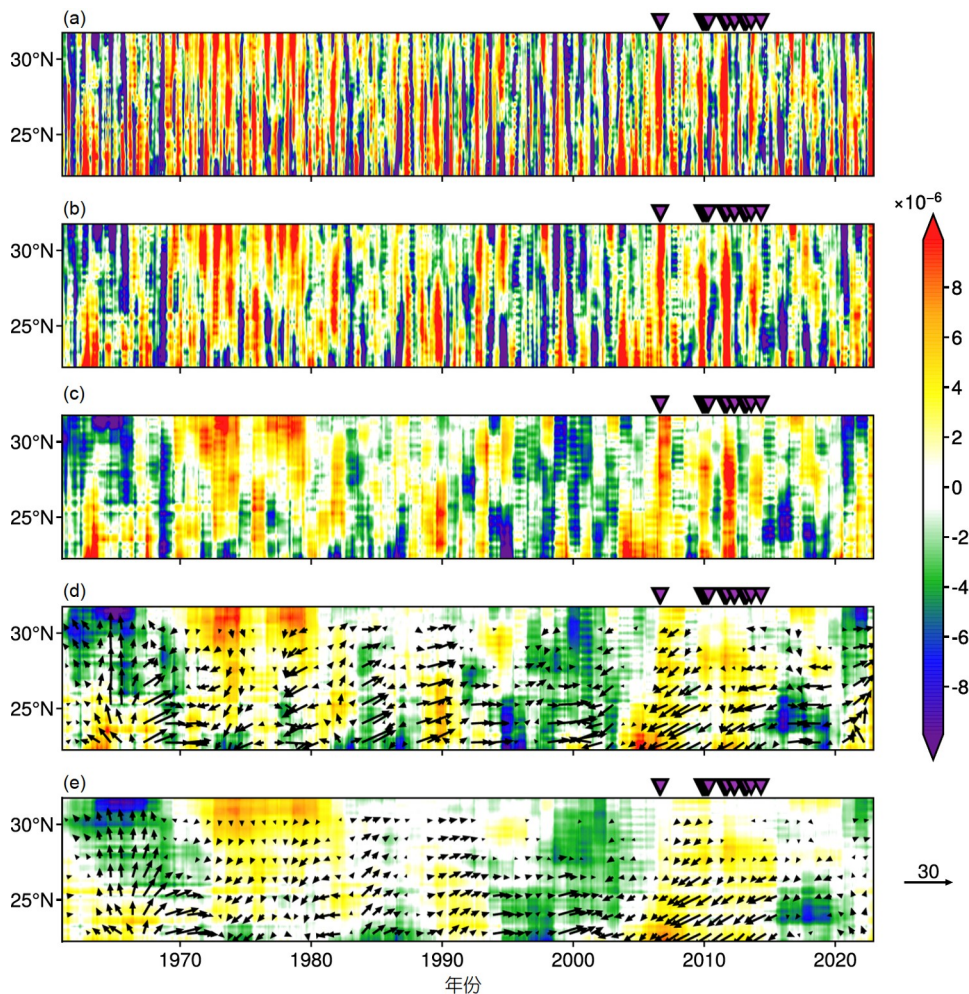


图7 1961~2022年不同时间尺度的西南地区异常整层水汽通量散度的纬度-时间剖面图

(a)~(e) 时间尺度分别为3、6、12、24、48个月(单位: $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 填色). 其中, 24个月(d)和48个月(e)时间尺度上还叠加了对应的整层水汽通量异常(单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$, 箭头)

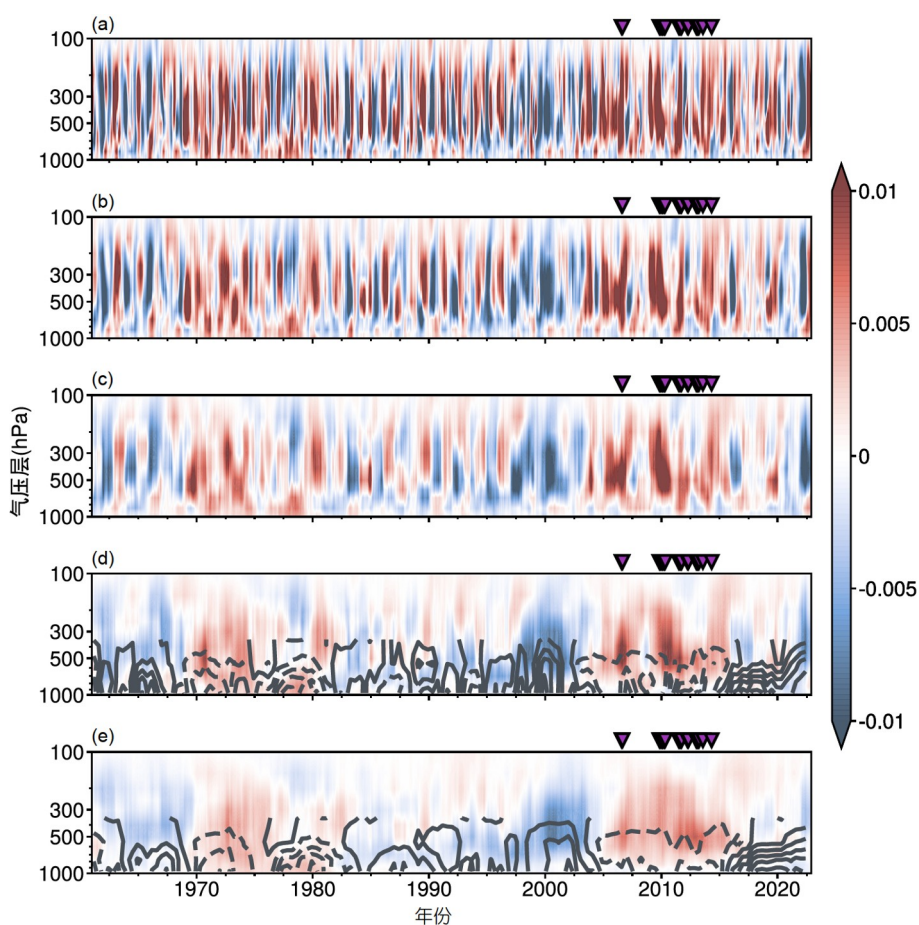


图8 1961~2022年不同时间尺度的西南地区平均的异常垂直速度的高度-时间剖面图

(a)~(e) 时间尺度分别为3、6、12、24、48个月(单位: Pa s^{-1} , 填色). 其中, 24个月(d)和48个月(e)时间尺度的变化还叠加了对应时间尺度的比湿异常(单位: kg kg^{-1} , 等值线, 实线表示正异常, 虚线表示负异常)

常控制, 对流活动的影响更大一些. 在长时间尺度上, 水汽和垂直运动都呈现出明显的年代际变化特征, 持续的热力和动力异常会形成较为稳定的干湿态背景. 例如, 在1970年前后、2000年前后和2015~2020年, 存在显著的南风水汽输送增强, 水汽显著增加并伴随着上升气流, 对应这些时段的降水增多; 而在1980年前后和2006~2014年, 存在持续的东北风异常, 不利于水汽从南侧海洋向西南地区的输送, 对应的水汽含量减少且存在明显的下沉运动, 这会抑制对流活动和降水的生成. 在2006~2014年这一超级干旱频发时段, 存在最为显著的东北风水汽输送异常, 以及持续的水汽辐散和整层下沉气流, 形成了长期尺度上不利于降水的环流异常背景. 在此基础上, 短期尺度环流异常的叠加导致了超级干旱的发生.

进一步分析超级干旱发生时西南地区和东亚地区不同时间尺度上的环流异常空间特征, 如图9所示. 这里我们选取了3个月和24个月时间尺度分别代表短期和长期干旱, 展示了区域内部垂直运动、可降水量联合分布特征, 以及大尺度环流异常的空间格局. 选择这两个时间尺度是有代表性的: 一方面, 3个月和24个月时间尺度可以反映干旱的短期和长期效应; 另一方面, 3个月和24个月时间尺度的相关性相对较低, 说明两个变量之间的独立性更强, 有必要分别进行探讨. 因此, 选取最具代表性的两个时间尺度进行分析, 可以更加简洁地概括成因机制. 当然, 为了完整起见, 我们在附录C中补充所有5个典型时间尺度的水汽通量和垂直速度异常的合成分布图. 从附图S2和S3可以看到, 3个月时间尺度和6个月时间尺度具有相似性, 24个月时

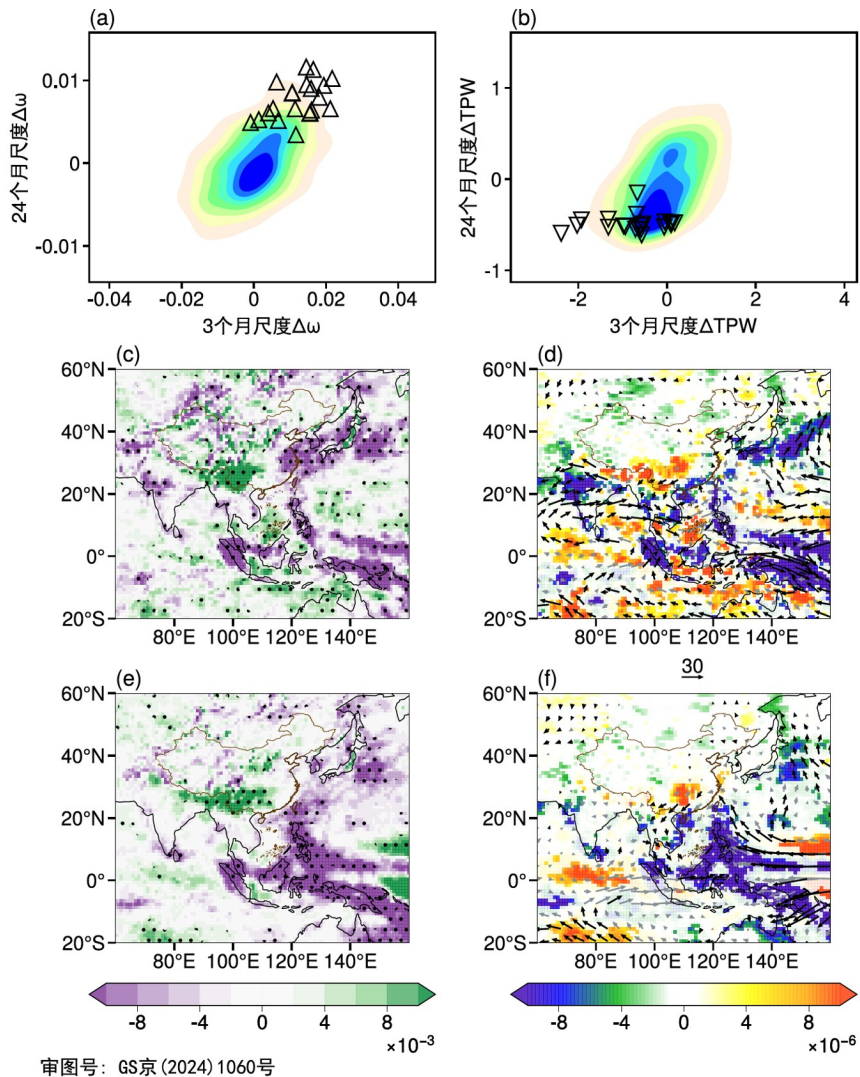


图9 西南地区超级干旱期间多尺度垂直运动、水汽条件和环流异常的耦合特征

(a) 3个月(横坐标)和24个月(纵坐标)时间尺度西南地区平均500hPa垂直速度距平(单位: Pa s^{-1})的联合密度分布(填色), 以及超级干旱发生月份对应的数值(三角形); (b)同(a), 但为柱总降水量(单位: kg m^{-2}); (c) 超级干旱发生月份合成的3个月时间尺度500hPa垂直速度空间分布; (d) 超级干旱发生月份合成的3个月时间尺度整层水汽通量(单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$, 箭头)和水汽通量散度异常空间分布(单位: $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 填色); (e)和(f)同(c)和(d), 但为24个月时间尺度. 对于垂直速度空间分布((c), (e)), 打点表示通过0.1的显著性检验; 对于水汽通量矢量((d), (f)), 通过0.1显著性检验的用黑色表示, 未通过检验的用灰色表示, 对于水汽通量散度填色, 未通过0.1显著性检验的设置90%的透明度

间尺度和12与48个月时间尺度更为接近, 这进一步说明这样的选择是合理和有针对性的. 需要特别强调的是, 尽管图9重点分析了3个月和24个月时间尺度的环流异常特征, 但CMI指数的计算并不仅仅基于这两个时间尺度, 而是综合考虑了全部5个典型时间尺度的贡献.

通过统计西南局区域内可降水量和500hPa垂直速度的3个月短期和24个月长期尺度联合分布, 发现超

级干旱发生时, 两种时间尺度上的垂直速度均对应显著的正距平而可降水量呈现负异常状态(图9a和9b). 这表明超级干旱应该该区域内部环流状态的多尺度极端异常. 此外, 垂直速度的正异常更为显著, 说明动力条件异常在西南超级干旱形成中起主导作用. 在局地分析的基础上, 再来看大尺度环流特征. 这里采用合成分析的方法, 即对所有超级干旱事件发生的月份进行合成, 如图5a中的标注. 另外, 合成场的显著性检验

对于3个月时间尺度采用传统的 t 检验方法,但是由于24个月时间尺度存在比较显著的自相关性,所以采用块自助法(Block Bootstrap)进行检验.该方法是一种非参数重采样技术,适用于存在自相关的时间序列数据,通过重复抽取连续的数据块来保留原始数据的自相关结构(Lahiri, 2003),这里的重复抽样次数设置为1万次.通过合成分析东亚地区超级干旱发生时短期和长期尺度的500hPa垂直速度和水汽通量场等,比较了不同尺度上的大气环流空间特征的异同,见图9c~9f.结果表明,在垂直速度上,短期和长期尺度的异常空间模式存在一定的相似度,均对应西南地区显著的下沉异常中心.但在长期尺度上,与之对应的对流增强区域主要位于印太暖池到热带西北太平洋地区,而在短期尺度上对应长江中下游地区至日本的显著上升异常.在水汽通量方面,短期和长期尺度均有西南地区的水汽通量辐散和东北风异常.但在短期尺度,异常气旋主要局限于南海北部,而长期尺度对应的异常气旋扩展并覆盖整个南海和赤道地区.同时,在短期尺度上,高原南侧到孟加拉湾地区为东风异常控制,不利于来自孟加拉湾的水汽输送,但是在长时间尺度上,北印度洋地区没有显著的异常.总体上,超级干旱对应着短期和长期尺度环流异常的叠加,从而导致区域极端干旱事件的产生.

本研究还分析了影响西南地区短时间尺度(3个月)降水异常的环流系统在不同季节中的差异,采用回归分析的方法分析了春、夏、秋、冬季与西南地区降水异常关联的水汽输送异常的特征(图略).结果表明,主要的环流特征与前述的合成分析结果是一致的,即对应南海上空的气旋式异常和孟加拉湾上空的东风异常.这两种异常均会抑制来自热带海洋的水汽向西南地区的输送,不利于降水的生成.但在不同季节中,这两种水汽输送系统的相对影响有所不同:在夏秋季,南海气旋异常和孟加拉湾东风异常对西南地区降水的影响同样重要;而在春季,则主要是北印度洋异常气流控制的水汽供给对降水的影响更大;冬季由于本身降水距平较小,因此可不予考虑.本研究主要关注不同时间尺度干旱信号的叠加效应,已有大量文献探讨了短时间尺度干旱事件的成因,因此这里不再展开讨论.

下面重点分析2003~2014年期间,西南地区在长时间尺度(如24个月)上出现降水持续偏少年代际背景的可能形成机制.需要指出的是,尽管已有一些工作对西

南降水的年代际变化进行了分析,但多数着重于某一季节的变化.事实上,仅仅某一季节降水的年代际减少是不足以形成超级干旱所需要的长期干旱背景的,因为其他季节的变化可能会抵消该季节降水的异常.本研究关注的长时间尺度降水变化,反应的是跨季节尺度上的降水累积效应,因此代表了不同季节影响的综合.该年代际背景的形成,为后来在短时间尺度环流异常叠加的基础上出现超级干旱事件,提供了重要的先决条件.

图10展示了2003~2014年平均的大尺度海温和环流异常的三维特征.低层给出了海温内部变率的异常分布,以及对应的850hPa环流异常;高层给出了200hPa的辐散风异常以及散度分布.这两层异常场之间,通过一个斜向剖面描绘了(30°N, 100°E)到(0°, 130°E)区域风场的垂直结构.其中垂直速度进行了100倍的放大以突出显示.剔除海温外强迫信号参考Dai等(2015)的方法,这里采用36个CMIP6多模式(附录D)集合平均的全球平均海温序列作为外强迫信号,将观测到的各网格点海温异常序列与该全球平均海温变化进行回归,回归场视为外强迫引起的变化,残差部分为内部变率.从三维结构中可以清楚识别出两个重要的遥强迫系统对西南年代际干旱背景的控制作用:北太平洋的PDO负位相状态以及西太平洋暖池增强的对流.首先来看PDO负位相的影响.在该位相下,北太平洋中高纬度为正的海温异常区,而北美西海岸至赤道中东太平洋地区为负的海温异常区.前者激发的反气旋式环流异常使得其西南侧的东北风延伸至亚洲东南部地区,不利于水汽向西南地区的输送,对应降水的抑制.需要指出的是,观测得到的这一PDO负位相对应的环流异常形势,与已有文献采用PDO冷事件驱动的大气模型模拟所得到的响应特征基本一致(Yang等, 2017).为反映PDO的长期演变,图11b给出了1961~2022年PDO指数的时间序列变化.从中可以看出,2003年之后PDO指数持续偏负并达到60年来的最低值,与西南地区超级干旱背景时段一致.但是,统计分析表明,从长期看PDO指数与西南24个月尺度的降水并无明显的相关性.其原因可能在于形成西南降水年代际变化的因素较为复杂,2003~2014年期间PDO负位相所起的作用更为突出,而其他时段的年代际背景机制还有待深入解析.

下面再来看热带西太平洋暖池的作用.从去除外

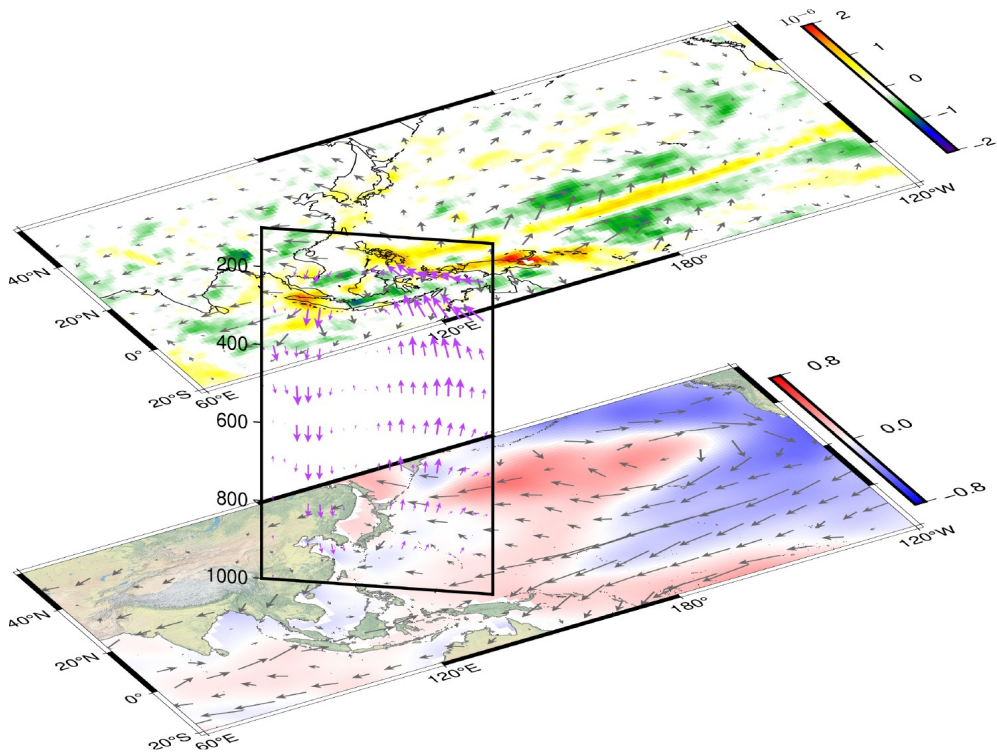


图 10 2003年1月至2014年12月平均24个月时间尺度的维空间特征

低层为去除外强迫信号的海温异常分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)和850hPa风场(单位: m s^{-1}), 高层为200hPa辐散风(单位: m s^{-1})和散度(单位: s^{-1}), 低层和高层之间的为(30°N, 100°E)到(0°, 130°E)斜剖面的风场. 其中, 斜剖面风场的垂直速度乘以100

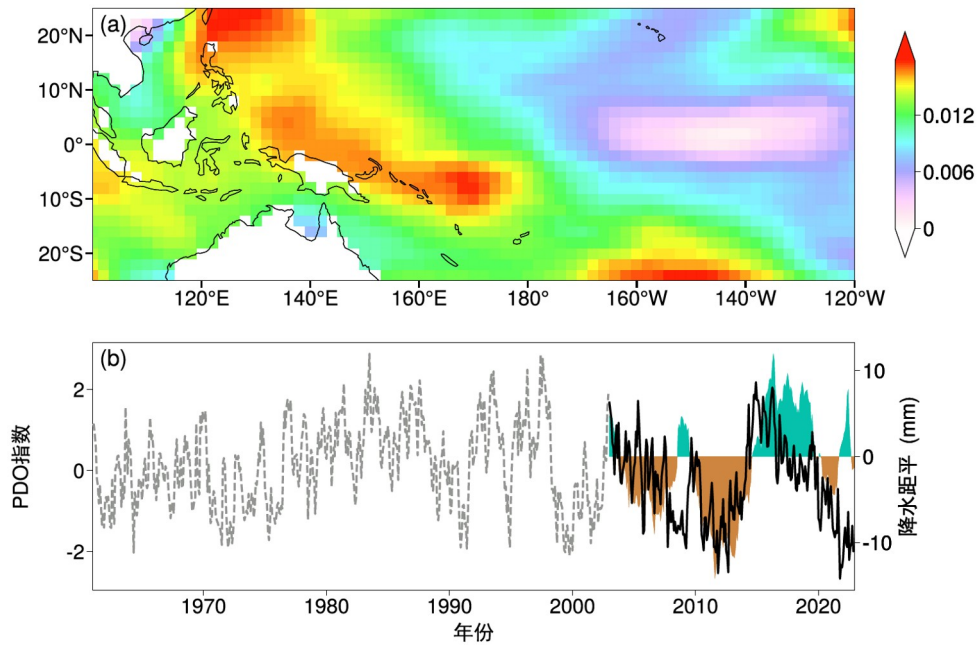


图 11 1961~2022年平均海温的线性趋势(a)和PDO指数和24个月时间尺度降水的变化(b)

(a)中单位 $^{\circ}\text{C a}^{-1}$, (b)中左坐标轴为PDO指数(折线), 右坐标轴为降水(填充)

强迫后的海温异常分布(图10低层)可以看出, 当PDO为负位相时, 尽管西太平洋暖池对应正的海温异常, 但其量值并不显著. 因此, 该区域的对流增强可能是外强迫导致的, 而不是气候系统内部变率的结果. 图11a给出了近60年的年平均海温线性趋势. 可以看到, 最显著的海温增温区位于西太平洋暖池上空, 而热带中东太平洋的海温趋势则较弱. 西太暖池异常增温激发暖池上空增强的对流响应, 并根据Gill响应模态在其西北侧激发出气旋异常, 使得中国西南上空处于不利于水汽输送的东北风异常控制. 此外, 暖池上空持续的强烈上升运动在高空辐散后, 其中一支气流趋向西南上空, 形成了异常下沉.

因此, PDO负位相和西太平洋暖池对流增强这两种遥强迫的共同作用, 在长时间尺度上形成了西南地区气候背景状态中不利于降水的关键要素, 为后续在短时间尺度降水极端事件的叠加形成超级干旱事件提供了重要的先决条件.

6 总结

本文基于多尺度综合指数CMI, 全面系统的分析了1961~2022年中国西南地区超级干旱的变化特征, 以及多尺度干旱和环流异常的叠加效应. 主要结论如下:

超级干旱对应不同时间尺度极端干旱的叠加, 对比分析了2006年和2022年典型干旱个例, 证实多尺度干旱信息的综合考虑至关重要, 强调区域极端干旱事件的本质是多尺度水资源共同短缺.

2006~2014年间中国西南集中出现多次超级干旱事件. 其中, 长时间尺度的蒸发增强和降水亏缺的年代际背景是必要条件, 决定了超级干旱的整体格局; 短时间尺度的降水异常和蒸发异常激发了超级干旱的爆发, 决定了超级干旱的确切发生时间, 包括2006年8~9月、2009年11月至2010年5月、2011年7~10月、2012年4~5月以及2013年1~4月等.

定量分析发现, 降水的贡献占主导地位, 而蒸发的贡献相对较小, 降水的贡献是潜在蒸发贡献的2.4倍. 蒸发的增加主要归因于温度和辐射的变化, 且这两个因子的贡献率大致相当.

在影响多尺度降水的环流机制上, 通过对超级干旱个例的合成分析, 发现短期和长期尺度的异常空间

模态相似. 表现为南海地区的气旋式环流和西南地区的东北风异常, 以及西南地区的下沉异常中心, 从而抑制区域降水的生成, 实现了不同时间尺度异常的耦合叠加.

2006~2014年, 西南地区出现最显著的东北风水汽输送异常及水汽辐散下沉特征. 这主要源于2003年之后, PDO转换为极端负位相和西太平洋暖池海温的显著增暖, 在长期尺度上形成了不利于西南地区降水的气候背景, 为短时间尺度降水异常叠加形成超级干旱提供了重要的先决条件.

PDO负位相和西太平洋暖池增暖影响引起西南地区跨季节持续性减少的主要动力过程在于, PDO负位相在北太平洋激发反气旋式环流异常, 西南侧的东北风延伸至亚洲东南部, 不利于水汽输送; 暖池增温在西北侧激发出气旋式环流异常, 从而在西南地区上空形成东北风异常, 同时暖池地区的上升运动在高层辐散至西南地区上空辐合形成补偿下沉运动.

总之, 研究成果强调了不同时间尺度气候异常的耦合叠加效应在形成超级干旱中的核心作用, 这对于深入理解区域尺度极端干旱事件的本质及其成因具有重要的参考价值.

参考文献

- 段海霞, 王素萍, 冯建英. 2011. 2011年夏季全国干旱状况及其影响与成因. *干旱气象*, 29: 392-400
- 胡学平, 许平平, 宁贵财, 王式功, 尚可政. 2015. 2012-2013年中国西南地区秋、冬、春季持续干旱的成因. *中国沙漠*, 35: 763-773
- 黄荣辉, 刘永, 王林, 王磊. 2012. 2009年秋至2010年春我国西南地区严重干旱的成因分析. *大气科学*, 36: 443-457
- 王林, 陈文. 2012. 近百年西南地区干旱的多时间尺度演变特征. *气象科技进展*, 2: 21-26
- 张岚, 孙文科. 2022. 重力卫星GRACE Mascon产品的应用研究进展与展望. *地球与行星物理论评*, 53: 35-52
- 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 黄建平, 马柱国, 王芝兰, 王素萍, 王莺, 张宇. 2020. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望. *气象学报*, 78: 500-521
- 张强, 李栋梁, 姚玉璧, 王芝兰, 王莺, 王静, 王劲松, 王素萍, 岳平, 王慧, 韩兰英, 司东, 李清泉, 曾刚, 王欢. 2024. 干旱形成机制与预测理论方法及其灾害风险特征研究进展与展望. *气象学报*, 82: 1-21
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56, Rome, <http://www.fao.org/>

docrep/X0490E/X0490E00.htm

- Chen W, Zhang R, Wu R, Wen Z, Zhou L, Wang L, Hu P, Ma T, Piao J, Song L, Wang Z, Li J, Gong H, Huangfu J, Liu Y. 2023. Recent advances in understanding multi-scale climate variability of the Asian monsoon. *Adv Atmos Sci*, 40: 1429–1456
- Chen W, Piao J, Chen S, Wang L, Zhao W, Wang Z, Wang Q. 2024. Multi-scale variations and future projections of dry-wet conditions over the monsoon transitional zone in East Asia: A review. *Fundam Res*, doi: 10.1016/j.fmre.2024.01.023
- Dai A, Fyfe J C, Xie S P, Dai X. 2015. Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability. *Nat Clim Change*, 5: 555–559
- Dong Z, Gui S, Yang R, Cheng J, Yang H, Ma J. 2023. Interdecadal variation of precipitation over Yunnan, China in summer and its possible causes. *Front Environ Sci*, 11: 1281202
- Hao S, Li J, Mao J. 2022. Interannual relationship between summer North Atlantic Oscillation and subsequent November precipitation anomalies over Yunnan in Southwest China. *J Meteorol Res*, 36: 718–732
- Harris I, Osborn T J, Jones P, Lister D. 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci Data*, 7: 109
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Nicolas J, Peubey C, Radu R, Schepers D, Simmons A, Soci C, Abdalla S, Abellan X, Balsamo G, Bechtold P, Biavati G, Bidlot J, Bonavita M, De Chiara G, Dahlgren P, Dee D, Diamantakis M, Dragani R, Flemming J, Forbes R, Fuentes M, Geer A, Haimberger L, Healy S, Hogan R J, Hólm E, Janisková M, Keeley S, Laloyaux P, Lopez P, Lupu C, Radnoti G, de Rosnay P, Rozum I, Vamborg F, Villaume S, Thépaut J. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quart J R Meteorol Soc*, 146: 1999–2049
- Huang B, Thorne P W, Banzon V F, Boyer T, Chepurin G, Lawrimore J H, Menne M J, Smith T M, Vose R S, Zhang H M. 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons. *J Clim*, 30: 8179–8205
- Huo F, Jiang Z, Ma H, Li Z, Li Y. 2021. Reduction in autumn precipitation over Southwest China by anthropogenic aerosol emissions from eastern China. *Atmos Res*, 257: 105627
- Jia X J, Gu Q, Qian Q F, Wu R. 2021. Wet-to-dry climate shift of the Sichuan Basin during 1961–2010. *Clim Dyn*, 57: 671–685
- Jiang X, Shu J, Wang X, Huang X, Wu Q. 2017. The roles of convection over the Western Maritime continent and the Philippine Sea in interannual variability of summer rainfall over Southwest China. *J Hydrometeorol*, 18: 2043–2056
- Lahiri SN. 2003. Resampling Methods for Dependent Data. Springer Science & Business Media
- Leng X, Liu X, Gao Y, Liu Y, Yang Q, Sun G, Peng Y, Huang Y. 2020. Drought assessment of southwestern China based on HadGEM2-ES model under representative concentration pathway 4.5 scenario. *Nat Hazards*, 102: 307–334
- Li Y, Xu H, Liu D. 2011. Features of the extremely severe drought in the east of Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer 2006. *Acta Meteorol Sin*, 25: 176–187
- Liu M, Xu X, Sun A Y, Wang K. 2017. Decreasing spatial variability of drought in southwest China during 1959–2013. *Int J Clim*, 37: 4610–4619
- Martens B, Miralles D G, Lievens H, van der Schalie R, de Jeu R A M, Fernández-Prieto D, Beck H E, Dorigo W A, Verhoest N E C. 2017. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geosci Model Dev*, 10: 1903–1925
- Miralles D G, Holmes T R H, De Jeu R A M, Gash J H, Meesters A G C A, Dolman A J. 2011. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrol Earth Syst Sci*, 15: 453–469
- Save H, Bettadpur S, Tapley B D. 2016. High-resolution CSR GRACE RL05 mascons. *J Geophys Res-Solid Earth*, 121: 7547–7569
- Sun S, Li Q, Li J, Wang G, Zhou S, Chai R, Hua W, Deng P, Wang J, Lou W. 2019. Revisiting the evolution of the 2009–2011 meteorological drought over Southwest China. *J Hydrol*, 568: 385–402
- Tan H, Cai R, Chen J, Huang R. 2017. Decadal winter drought in Southwest China since the late 1990s and its atmospheric teleconnection. *Int J Clim*, 37: 455–467
- Tapley B D, Watkins M M, Flechtner F, Reigber C, Bettadpur S, Rodell M, Sasgen I, Famiglietti J S, Landerer F W, Chambers D P, Reager J T, Gardner A S, Save H, Ivins E R, Swenson S C, Boening C, Dahle C, Wiese D N, Dobslaw H, Tamisiea M E, Velicogna I. 2019. Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nat Clim Chang*, 9: 358–369
- Tao W, Huang G, Wang P, Wang Y, Gong H, Dong D. 2023. The onset and cessation of rainy season over the Hengduan Mountains. *Clim Dyn*, 61: 4773–4791
- Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J Clim*, 23: 1696–1718
- Wang L, Chen W, Zhou W. 2014. Assessment of future drought in Southwest China based on CMIP5 multimodel projections. *Adv Atmos Sci*, 31: 1035–1050
- Wang L, Chen W, Zhou W, Huang G. 2015a. Drought in Southwest China: A review. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 8: 339–344
- Wang L, Chen W, Zhou W, Huang G. 2015b. Teleconnected influence

- of tropical Northwest Pacific sea surface temperature on interannual variability of autumn precipitation in Southwest China. *Clim Dyn*, 45: 2527–2539
- Wang L, Chen W, Zhou W, Huang G. 2016. Understanding and detecting super-extreme droughts in Southwest China through an integrated approach and index. *Quart J R Meteorol Soc*, 142: 529–535
- Wang L, Huang G, Chen W, Zhou W, Wang W. 2018. Wet-to-dry shift over Southwest China in 1994 tied to the warming of tropical warm pool. *Clim Dyn*, 51: 3111–3123
- Wang L, Chen W, Fu Q, Huang G, Wang Q, Chotamonsak C, Limsakul A. 2022. Super droughts over East Asia since 1960 under the impacts of global warming and decadal variability. *Intl J Clim*, 42: 4508–4521
- Wang S, Huang J, Yuan X. 2021. Attribution of 2019 extreme spring–early summer hot drought over Yunnan in Southwestern China. *Bull Am Meteorol Soc*, 102: S91–S96
- Wang L, Huang G, Chen W, Wang T. 2023. Super drought under global warming: Concept, monitoring index, and validation. *Bull Am Meteorol Soc*, 104: E943–E969
- Wu C, Li Q, Dong L, Yan H, Wang D, Sun X. 2023. Rainy season onset date in Southwest China and the related atmospheric circulations. *Atmos Res*, 298: 107127
- Yang Q, Ma Z, Fan X, Yang Z L, Xu Z, Wu P. 2017. Decadal modulation of precipitation patterns over Eastern China by sea surface temperature anomalies. *J Clim*, 30: 7017–7033
- Yin Z, Yang S, Wei W. 2023. Quantitative attribution of vertical motions responsible for the early spring drought conditions over southeastern China. *Clim Dyn*, 61: 2655–2672
- Zhang C. 2020. Moisture sources for precipitation in Southwest China in summer and the changes during the extreme droughts of 2006 and 2011. *J Hydrol*, 591: 125333
- Zhang J, Wu R, Jia X, Zhang Y. 2022. Contribution of precipitation and temperature to multiscale drought variations over Asia: Dependence on the time scale. *Intl J Clim*, 42: 8804–8821
- Zhang Y, Wu R. 2021. Asian meteorological droughts on three time scales and different roles of sea surface temperature and soil moisture. *Intl J Clim*, 41: 6047–6064

(责任编辑: 李肇新)