

樊风,段玮,杨家康. 云南土壤湿度长期变化的初步研究. 应用气象学报,2015,26(4):409-421.
doi:10.11898/1001-7313.20150403

云南土壤湿度长期变化的初步研究

樊 风 段 玮* 杨 家 康

(云南省气象科学研究所,昆明 650034)

摘 要

利用 1948—2013 年美国 NOAA/CPC 全球 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 月平均格点化土壤湿度资料、1951—2013 年云南地区 125 个站月降水和 1993—2013 年 22 个站月土壤湿度观测资料对云南土壤湿度及其表征的旱涝长期变化进行时空分布及演变特征分析。结果表明:云南地区旱涝变化的空间结构相对简单且具有大尺度特征,长期变化特征明显。由 20 世纪 50 年代的滇中部地区偏旱,其余地区偏涝,逐步发展为相反;20 世纪 90 年代开始滇中部地区偏涝,其余地区偏旱,且旱情日趋加重,范围扩展,2010 年、2012 年和 2013 年严重干旱蔓延至云南全省。研究揭示,云南冬半年旱涝与前期海温异常密切相关,冬半年云南地区旱涝不同的 EOF 模态时间变化对应着不同的前期海温异常变化分布。云南全省旱涝一致的第 1 模态对应前期孟加拉湾、阿拉伯海、西太平洋以及大西洋的海温异常正相关。云南西北—东南旱涝反向的第 2 模态对应前期孟加拉湾、南海、西太平洋及东太平洋 ENSO 区海温异常负相关。

关键词: 云南; 土壤湿度; 旱涝; 时空分布

引 言

云南地处我国西南边陲,是一个多山地区(横断山脉从这里跨过),地势西北高东南低,河流众多,自然资源和水利资源十分丰富,特殊的地理位置和复杂地形也造就了多变的立体气候。受南亚季风和东亚季风共同影响,云南干湿季分明^[1-2]。

农业在云南的国民经济中占有十分重要的地位。因此,大范围、长时间的旱涝将会对这里的国民经济和人民的日常生活以及生态环境产生严重影响和破坏。近年来(尤其是 2010 年、2012 年和 2013 年),长时间、大范围的严重干旱造成的巨大直接经济损失^[3-5],已引起了人们的普遍关注。云南有亚洲水塔之称,众多的河流起源或流经这里,如怒江、澜沧江、金沙江、珠江、红河、伊洛瓦底江等。严重旱涝意味着该地区异常的水资源变化,这不仅对云南本地而且对下游地区的水资源也会产生严重影响。因

此,研究和认识云南全省范围大尺度、长时间的干旱与洪涝的时空分布特征和变化规律^[6-8]以及它们的成因和可预报性已是客观需要。

旱涝的成因与降水的异常变化直接关联,但由于降水特殊的时空变化特性,直接用降水资料监测和分析研究旱涝变化局限性很大。因此,出现了各种用来分析和监测旱涝的指数和特殊资料^[9-11]。土壤湿度是广泛应用的因子之一,通常定义为单位厚度土壤中的含水量。土壤湿度可被视为经过蒸发及径流、重力等调整(平滑)后贮存于土壤中的累积降水,其单位可与降水、蒸发一致为毫米(mm),以其为基础旱涝定义可简单表述为土壤湿度异常(即距平),偏离气候平均态越多旱涝越重,这与由降水定义旱涝是一致的。土壤湿度的单位也可用类似大气相对湿度(单位:%)的表征方式,如土壤含水率分为重量含水率、体积含水率,定义分别为土壤中水分的重量与相应固相物质重量的比值,及土壤中水分占有的体积和土壤总体积的比值。

2014-12-01 收到,2015-04-10 收到再改稿。

资助项目:国家自然科学基金青年项目(41205067),云南省科技惠民计划(2014RA002)

* 通信作者, email: duanwain@hotmail.com

近10年国内逐渐开展了一些土壤湿度可用性的研究工作。对于土壤湿度观测,我国气象部门人工观测始于1981年。2010年以前为每月逢8观测(每月的8日、18日和28日),2010年以后增加每月逢3的观测(每月的3日、13日和23日)。观测采用人工取土后烘干称重法测量,由各地农业气象部门观测。由于业务面向农业服务,主要关注浅层土壤湿度变化,观测时需标注观测前是否进行灌溉^[12]。目前国内研究主要集中于浅层(20 cm以内)。左志燕等^[13]和Liu等^[14]利用浅层(10 cm)土壤湿度资料与多种土壤湿度再分析资料的分析研究指出欧洲中期预报中心(ECMWF)的ERA40和ERA-Interim、美国国家航空航天局(NASA)全球模拟与同化办公室(Global Modeling and Assimilation Office)的MERRA(Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications)、美国国家环境预报中心(NCEP)的CFSR(Climate Forecast System Reanalysis)和NCAR-R1(National Center for Atmospheric Research-Reanalysis1)、日本气象厅的JRA-25(Japanese 25-year Reanalysis)的浅层(10 cm)土壤湿度资料均能较好地再现地理分布及其年际变化;其研究也特别指出,中国土壤湿度观测比较复杂,目前用于研究的观测资料大多约为10年左右的时间尺度,不能满足土壤湿度不同时间尺度特征的研究,同时分布主要集中于东北、华北,长江以南等地区较少且存在观测不连续、取土点等不确定性问题。土壤湿度再分析资料具有分布均匀、长时间尺度和高时空分辨率的优势,因此,对于中国区域尺度和长时间尺度的气候研究是个较好的补充。

土壤湿度具有一些独特特征,和海温一样,具有变化缓慢(即记忆力长)的特点^[15-16]。与降水相比,土壤湿度的统计分布特征更趋近于正态分布。陆地表面的土壤作为旱涝事件的直接载体,用其湿度变化描述和分析旱涝事件具有其独特的优势。目前,从土壤湿度出发的旱涝变化特征研究报道不多。

本文利用云南省气象站观测的月平均降水资料和土壤湿度资料,NOAA/CPC的月平均全球格点化土壤湿度资料,主要从土壤湿度的异常变化着手,研究云南地区旱涝长期变化的时空特征并对其成因进行初步探讨。

1 资料与方法

本文所用资料为1948年1月—2013年12月NOAA/CPC $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 月平均陆地表面水文格点化资料中全球土壤湿度资料(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.cpcsoil.html>)^[17]。该资料由格点化月平均陆地表面降水和2 m气温^[18-19]资料作为强迫,代入NOAA/CPC改进的基于收支强迫平衡的非耦合陆面水文循环模式(H96)从而产生相应的陆地表面(厚1.6 m,对于常用的土壤孔隙率0.47,其最大含水容量为760 mm,参见文献^[17])土壤湿度、蒸发和径流等资料。该资料已被广泛应用于地球科学及相关领域,是一套可信度和科研价值较高的土壤湿度资料^[20-21]。本文主要分析区域为 $21^\circ \sim 29^\circ \text{N}$, $97^\circ \sim 106^\circ \text{E}$,该范围大致覆盖云南省和部分邻近地区(图1)。

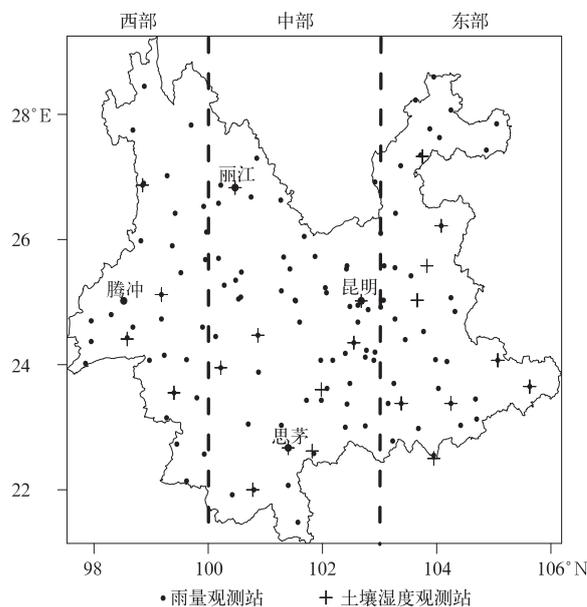


图1 云南省气象站空间分布

Fig. 1 Domain of Yunnan and location of meteorological stations

本文所用降水观测资料为1951年1月—2013年12月云南地区125个站逐月降水资料。土壤湿度观测资料为1993年1月—2013年7月云南地区22个站(昭通、六库、丽江、宣威、保山、昆明、沾益、陆良、路西、景东、玉溪、耿马、临沧、景洪、思茅、元江、江城、蒙自、河口、文山、广南、富宁)逐月10 cm,

20 cm, 50 cm 层土壤湿度资料, 土壤湿度观测站在云南境内分布均匀。降水及土壤湿度观测站点分布如图 1 所示。

分析采用降水异常(即距平)和土壤湿度异常(即距平)反映旱涝, 异常(距平)偏离的程度直接反映旱涝的程度, 与降水异常(干旱)表征干旱类似。分析采用时间系列分析、自相关和遥相关分析、年平均和多年平均的距平分析、经验正交函数分析等方法, 对 1948—2013 年云南旱涝长期变化的时空分布特征及其成因进行初步探讨。

2 NOAA/CPC 土壤湿度资料在云南的适用性

为验证本文所用土壤湿度资料在云南地区的适用性, 本文开展了与土壤湿度站点观测有限的对比。由于土壤湿度的时空变率较大, 它不仅受地表降水、

蒸发、径流、土壤属性及地表植被种类等影响, 还受观测的取土、表层、灌溉等不确定性因素影响。为了减少上述不确定性, 通常的做法是用区域平均值分析代替站点值。从云南地区 22 个站 3 层平均的土壤湿度监测资料(1993 年 1 月—2013 年 7 月)逐月异常(逐月异常为某月与 21 年该月平均值的差, 去除年变化信号影响)与其邻近格点上相应的 NOAA/CPC 土壤湿度逐月异常对比(图 2a), 两者吻合较好, 两者相关系数为 0.75, 达到 0.01 显著性水平。具体地看, 除 1997 年对于其他年月的土壤湿度变化, NOAA/CPC 土壤湿度均有较好的匹配。

由图 2b 可知, 20 年中两者的年变化特征亦基本一致, 即年变化特征得到了较好再现。观测的土壤湿度相比更湿, 这可能与国内现行土壤观测主要针对农业气象应用、其采样点可能受灌溉影响表现的更湿有直接关系。

降水是影响土壤湿度变化的最主要因素之一。

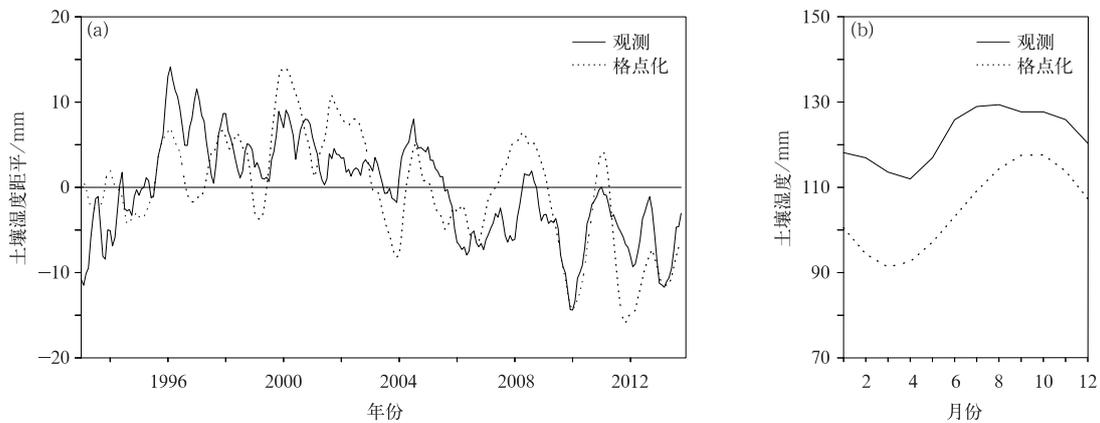


图 2 云南省 22 个站观测和格点化土壤湿度对比

(a)1993 年 1 月—2013 年 7 月逐月变化, (b)20 年平均年变化

Fig. 2 Comparison of 22 observed and gridded soil moisture in Yunnan

(a)monthly soil moisture anomalies for Jan 1993—Jul 2013,

(b)20-year mean annual soil moisture

陆面模式中所用降水资料质量直接影响模式产生的土壤湿度的质量。本文选用部分记录长久而又比较完整的云南省各地气象站观测的月平均站点降水资料对其邻近格点上 NOAA/CPC 格点化月平均降水开展进一步验证。结果表明: 在大多数情况下, 云南省气象站邻近格点月平均降水资料与观测吻合很好, 如滇中—滇东昆明(56778)、滇西北丽江(56651)、滇西腾冲(56739)、滇南思茅(56964)(图

3), 其平均相关系数为 0.97, 达到 0.01 显著性水平, 均方根误差亦在较小范围内。

此外, 土壤湿度是影响地球重力变化的主要因素, 利用 GRACE 重力卫星数据与 NOAA/CPC 土壤湿度资料间接相互可靠性检验^[21] 及与 GRACE 重力卫星对云南地区储水量和 2005 年、2010 年干旱事件的分析表明, 在孟加拉湾及其邻近的云南地区, 两者变化吻合的很好^[22]。

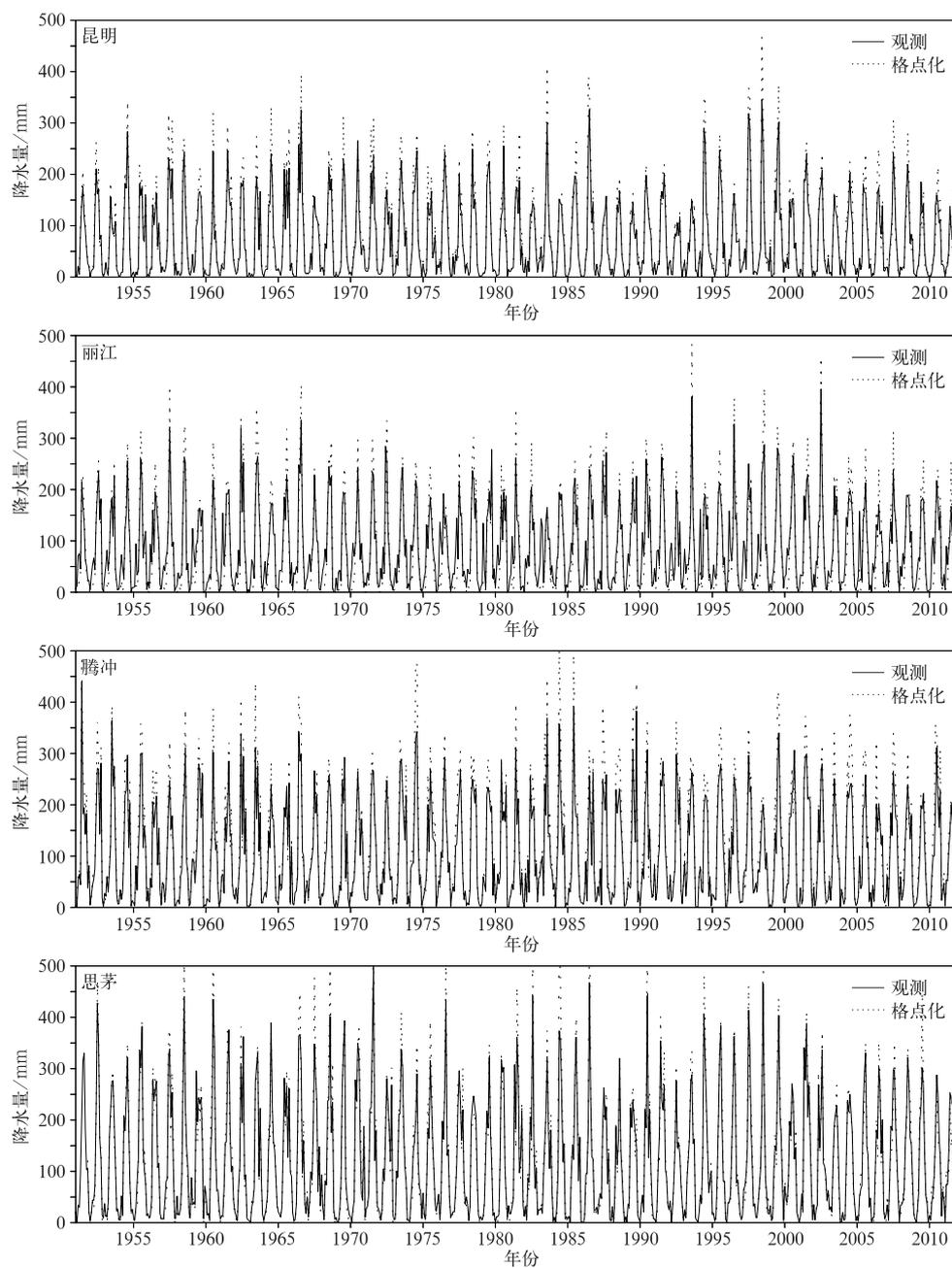


图3 云南省气象站月平均观测和格点化降水量对比

(4个站平均相关系数为0.97, 均方根误差为30.8 mm)

Fig. 3 Comparison of observed and gridded monthly precipitation in Yunnan

(averaged anomaly correlation from above 4 stations is 0.97,

root mean square error is 30.8 mm)

因此,NOAA/CPC 土壤湿度资料能较好地再现云南地区的土壤湿度气候变化特征,在云南地区有较好的适用性,此外,资料时间序列更长,数据也较为规整。以下所有分析均基于格点化的 NOAA/CPC 土壤资料进行。

3 初步分析结果

3.1 云南地区月平均降水和土壤湿度的长期变化特征

图4给出1948—2013年共66年云南西部地区

($21^{\circ}\sim 29^{\circ}\text{N}$, $97^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$)、中部地区($21^{\circ}\sim 29^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 103^{\circ}\text{E}$)及东部地区($21^{\circ}\sim 29^{\circ}\text{N}$, $103^{\circ}\sim 106^{\circ}\text{E}$)观测的月平均降水,模式产生的土壤湿度异常及多年平均(气候)特征。由图 4a 可以看到,云南各地月平均降水的年际变化特征基本一致。月平均降水的气候平均值(图 4c),即年变化显示,云南各地的降

水过程的变化相对一致,主要降水过程出现在每年的 5—10 月,降水自西向东逐渐减少。降水最少的月份通常出现在 1 月(15~20 mm),而降水最大的月份通常出现在 7 月(220~260 mm),其年变幅(即 7 月的气候平均值减去 1 月的气候平均值)大约为 200~240 mm,干湿季节分明^[23-24]。

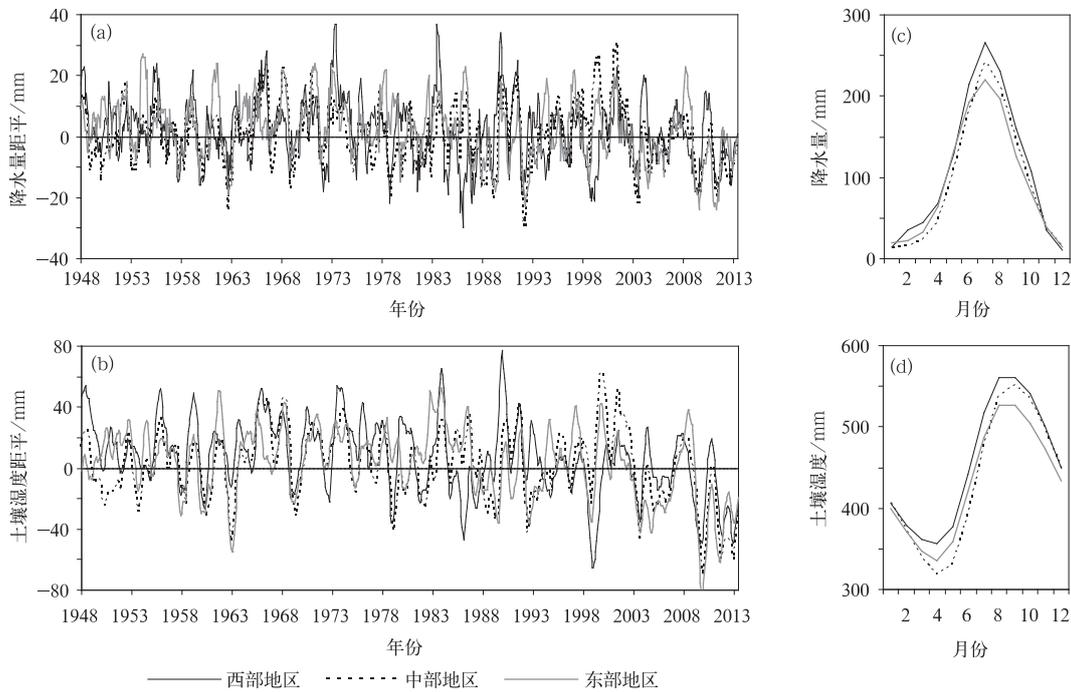


图 4 云南西部地区、中部地区、东部地区 9 个月滑动平均陆面降水和土壤湿度异常的长期变化及气候平均特征

(a)逐月降水量距平变化,(b)逐月土壤湿度距平变化,(c)降水量气候平均,(d)土壤湿度气候平均

Fig. 4 Long-term (9-month running mean) variations and their climatologies of monthly precipitation and soil moisture in western, central and eastern Yunnan
(a)monthly precipitation anomalies,(b)monthly soil moisture anomalies,
(c)climatic monthly precipitation,(d)climatic monthly soil moisture

由图 4b 可以看到,导致云南各地月平均土壤湿度的年际变化主要是由降水的年际变化所致。与月平均降水相比,月平均土壤湿度的年际变化相对缓慢且平滑。1948—2013 年云南西、中、东各地出现的主要旱涝事件(即对应于那些平均土壤湿度异常相对较大的正负值)均被模拟较好,如 1954 年、1958 年、1960 年、1963 年、1969 年、1979 年、1987 年、1989 年、1992 年、1999 年、2004 年、2005 年、2006 年、2010 年、2012 年、2013 年的干旱和 1956 年、1959 年、1962 年、1966 年、1968 年、1971 年、1974 年、1978 年、1984 年、1986 年、1990 年、1997 年、2000 年、2002 年、2006 年的洪涝,它们与许多实际观测和分析^[2-7]一致。这也从侧面验证了 NO-

AA/CPC $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 月平均土壤湿度在研究区域能够反映云南旱涝变化特征。

云南各地月平均土壤湿度的气候平均值显示(图 4d),土壤湿度最小值(约 320~350 mm)出现在 4 月,较降水最小月份偏晚约 3 个月。气候平均的土壤湿度最大值(约 530~570 mm)出现在 9 月,较降水气候平均值最大值出现月份滞后约 2 个月,其年变幅(即 9 月的气候平均值减去 4 月的气候平均值)与降水的年变幅大致相同。月平均土壤湿度的气候极值较其降水极值出现的时间显著延后的原因主要取决于陆地表面的水份收支,即降水与陆面水文循环的蒸发及径流的调节所致^[14-15]。从土壤表面到土壤深层,这类滞后现象逐步增加,这里不作进

一步讨论。由于土壤中的水份对植物生长非常重要^[25],通常人们将长时间的低于平均水平的土壤湿度异常导致的干旱称之为农业干旱。

3.2 云南地区月平均降水、土壤湿度异常的空间自相关分析

陆地表面气象或水文要素异常的时间滞后空间

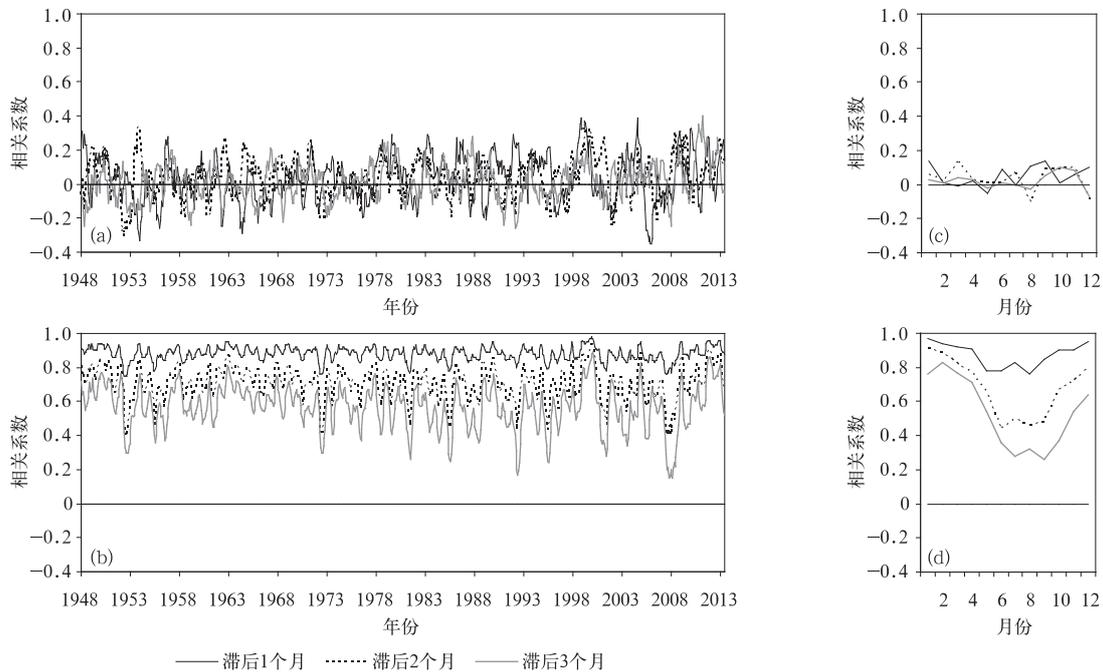


图5 云南地区月平均降水量、土壤湿度异常滞后1~3个月的空间自相关系数的时间系列及其气候平均值
(a)降水量逐月变化,(b)土壤湿度逐月变化,(c)降水量逐月气候平均,(d)土壤湿度逐月气候平均

Fig. 5 Time series and their climatologies of 1-3-month lagged spatial autocorrelations of monthly precipitation anomalies and soil moisture anomalies in Yunnan (a) monthly precipitation, (b) monthly soil moisture, (c) climatic monthly precipitation, (d) climatic monthly soil moisture

结果显示,该地区不同时间滞后的月平均降水异常空间自相关系数(图5a)相对其月平均陆地表面土壤湿度异常的空间自相关系数较小,但其年际变化偏大,大多数时间在 ± 0.2 之间变化,其气候平均值(图5c)没有明显的季节变化。相比之下,云南地区土壤湿度异常的时间滞后空间自相关系数(图5b)较其降水异常的时间滞后空间自相关系数偏高,如1个月滞后的空间自相关系数在大多数情况下为 $0.8\sim 0.9$,年际变化相对降水较小。在多数情况下,2个月滞后和3个月滞后的土壤湿度异常的空间自相关系数分别为 $0.5\sim 0.9$ 和 $0.3\sim 0.8$,年际变化较1个月滞后的空间自相关系数偏大。各不同时间滞后的土壤湿度异常的空间自相关气候平均值(图5d)也呈明显的季节性变化。平均而言,冬半

自相关,可大致代表该要素的持续性特征或记忆的长短。图5给出了云南及邻近地区1948年1月—2013年12月的月平均降水异常和陆地表面土壤湿度异常1~3个月时间滞后空间自相关时间系列以及它们的气候平均(年循环)值。

年平均值远大于夏半年的平均值。

由此可见,陆地表面的降水和土壤湿度的物理特性和统计特征明显不同,陆地表面土壤湿度异常的持续性(或记忆力)远大于其降水异常的持续性。旱涝均由降水异常变化引起,大多数情况下,气象旱涝与农业旱涝出现的时间和变化基本一致。但在干枯陆面与饱和陆面不同背景下,一场大范围暴雨造成的后果可以完全不同。由此可见,气象旱涝出现的时间与农业旱涝出现的时间可以不同。

3.3 云南地区旱涝的时空分布及变化特征

由时间系列分析可以看到,相对月平均降水而言,月平均的土壤湿度具有更好的物理特性和统计特征,因此,常被用于旱涝的监测与分析。在此,采用经验正交函数(EOF)分析法探讨1948年1月—

2013 年 12 月云南地区旱涝(土壤湿度异常)的时空分布特征及变化特点。图 6 显示云南地区土壤湿度异常的经验正交函数分析的前 4 个模态的空间分布及其相对应的时间系数变化。在 EOF 处理上采用空间场乘时间系数均方根,而时间序列主成分除以时间系数均方根的做法,这在气候分析中是常见的

变换^[26]。这样空间场物理意义更为清楚,从 EOF 的空间场即可直观地看出分析要素的大小(或贡献、振幅等等),且处理后时间系数是标准化的,PC1, PC2, PC3, PC4, 分别表示第 1 ~ 第 4 模态对应的时间系数。

土壤湿度异常的经验正交函数分析揭示,云南

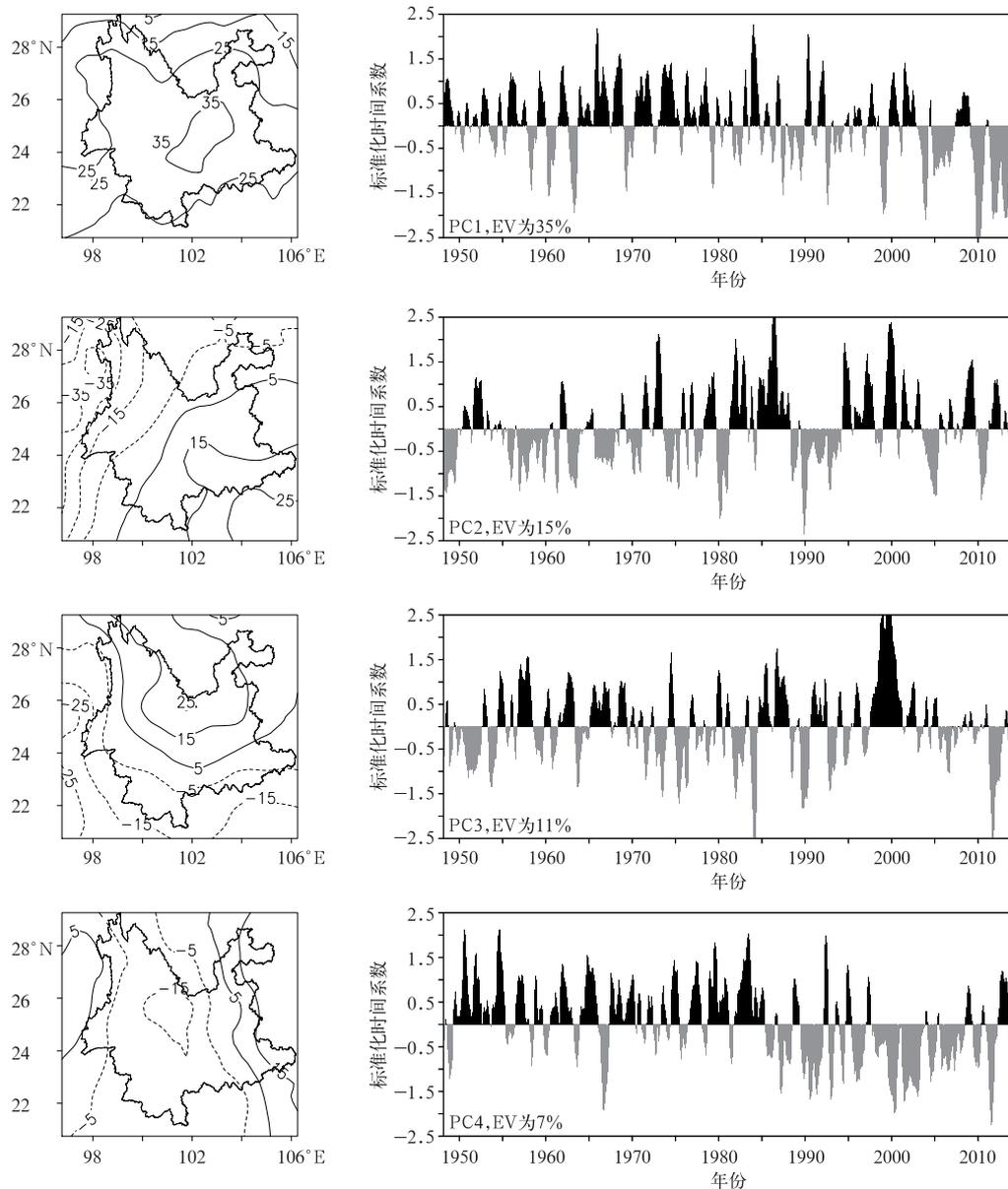


图 6 1948 年 1 月—2013 年 12 月云南地区土壤湿度变化的经验正交函数分析

(左图为 EOF 空间场乘其时间系数均方根,单位:mm;右图为标准化时间系数)

Fig. 6 EOF analysis of soil moisture anomalies in Yunnan for Jan 1948—Dec 2013

(EOF patterns scaled by the root mean square value of the associated PCs,unit:mm,PCs are normalized)

地区旱涝变化的空间分布特征相对简单,其第 1 模态显示云南地区旱涝变化最重要的空间分布特征是

结构相对简单的云南全省范围大尺度的干旱或洪涝异常。它间接反映出云南地区月平均降水异常的空

间分布具有大尺度特征。其时间系数的正负变化表明:在20世纪50年代—80年代末洪涝多于干旱,而过去20多年则干旱多于洪涝,过去10年尤其如此(图4b),呈明显的长期变化特征。该模态可解释云南地区土壤湿度变化总方差(EV)的35%。

土壤湿度异常经验正交函数分析的第2模态主要显示云南地区旱涝变化的空间分布差异,即滇西北旱时,滇东南涝,反之亦然。其时间系数的正负变化表明在1980年之前,常出现滇西北涝、滇东南旱,长期变化也比较明显。平均而言,该模态可解释云南地区土壤湿度变化总方差的15%。分析和对比其相对应的降水经验正交函数分析的主要模态及其相对应的时间系数(图略)发现,它们与ENSO对云南地区降水影响的投影吻合较好^[27],其时间系数与前期东太平洋的海温异常呈较好的负相关。表明云南地区旱涝的这一部分长期变化部分源自ENSO的影响。

云南地区土壤湿度异常经验正交函数分析的第3模态主要呈现出滇西南及附近地区旱、滇东北及附近地区涝(反之亦然)的空间分布特征。其时间系数具有明显的年际变化,但长期变化不明显。该模态可解释云南地区土壤湿度变化总方差的11%。

云南地区土壤湿度异常经验正交函数分析的第4模态呈1985年之前常出现滇西、滇东涝及滇中旱的分布特征。1985年之后则相反,常出现滇西、滇东旱,滇中涝的空间分布特征,且具有明显的长期变化。该模态可解释云南地区土壤湿度变化总方差的7%。

云南地区土壤湿度异常经验正交函数分析的前4个模态可解释云南地区土壤湿度变化总方差的68%,且每个模态可能具有特定的物理含意及其成因。

3.4 云南地区旱涝的时间-经度变化

由3.3节可知,云南地区土壤湿度变化的空间分布特征,其东西向分布的变化较其南北向分布变化更明显。因此,纬向平均(21°~29°N)的土壤湿度异常的时间-经度变化(图7)用来进一步分析云南地区旱涝的东西变化特征。由图7可以看到,在大多数情况下,云南地区的旱涝具有大尺度特征(横跨全省),除少数年份外,其东西方向上的传播并不明显。纵观1948—2013年云南地区土壤湿度的异常

变化,前30年云南地区的洪涝多于干旱,而后30年云南地区的干旱则明显多于洪涝。进入21世纪以来,旱情日趋严重,特别是2010年、2012年和2013年的干旱,其旱情之重,范围之广,时间之长,极为罕见。

3.5 云南地区旱涝的长期距平分析

为进一步分析云南地区旱涝长期变化的时空分布特征,在此进行年代际分析,将某年代10年平均与1948—2013多年(66年)平均求距平,共得到20世纪50年代、60年代、70年代、80年代、90年代和21世纪前10年,共6个年代。

图8给出了云南地区土壤湿度每10年平均的距平分布。可以看出,相对1948年—2013年过去66年的平均状态而言,20世纪50年代,云南的中部地区偏旱,其余地区大多偏涝。20世纪60年代云南东南及邻近地区的干旱较为严重,而除中西部部分地区外,其余地区偏涝。20世纪70年代,除部分滇东南和滇中北地区偏旱外,云南大部分地区偏涝,尤其是滇西南、滇中部至滇东部地区为甚。20世纪80年代云南地区旱涝的发展逐步演变为相反的变化,干旱主要出现在滇西北地区,而洪涝主要出现在滇东南及附近地区。从20世纪90年代至21世纪前10年,云南地区洪涝主要在滇中部地区和滇东南部分地区,干旱地区主要出现在滇西部和滇东部。滇西北地区已偏旱30多年,而滇东北、滇东南地区的旱情趋于严重,尤其是过去4年的平均状况,极其严重的旱情几乎蔓延至全省范围。1948—2013年云南地区的旱涝呈较明显的长期变化,由原来的滇中部偏旱、其余地区偏涝,转而相反为滇中部地区偏涝、其余地区偏旱,且旱情有增多、增强并蔓延的趋势。这与文献[28-29]的结论一致。

3.6 遥相关分析

由图6可以看出,云南地区旱涝的时空分布特征相对简单,即空间分布尺度相对较大且长期变化特征显著。为进一步研究云南地区旱涝的可能成因及其潜在的可预报性,应用遥相关分析探讨1948—2013年云南地区逐月、逐季、半年和全年的土壤湿度变化的经验正交函数分析前4个模态的时间系数与前1个月的全球海温^[30-31]异常的滞后遥相关。结果表明:冬半年海表温度变化与云南地区土壤湿度变化的相关比与夏半年变化的相关偏高。

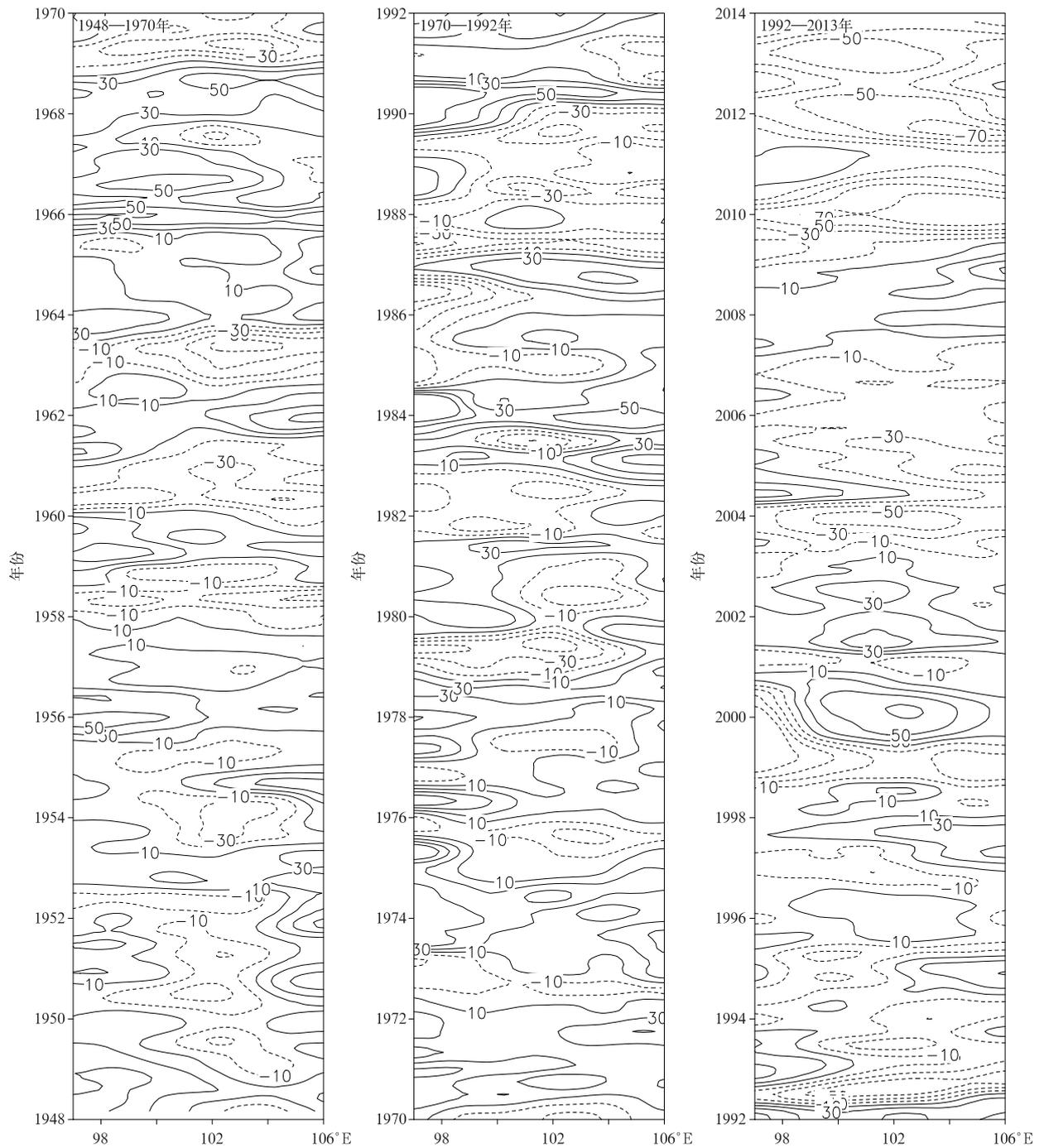


图 7 1948 年 1 月—2013 年 12 月云南土壤湿度时间-经度变化(单位:mm)

Fig. 7 Time-longitude evolution of soil moisture in Yunnan for Jan 1948—Dec 2013(unit:mm)

图 9 给出 1948 年—2013 年冬半年云南地区土壤湿度变化的经验正交函数分析前 4 个模态的时间系数(11 月—次年 4 月)与相应前 1 个月(10 月—次年 3 月)全球海表温度异常的遥相关。结果显示:云南地区土壤湿度经验正交函数分析的第 1 模态表

现为全省范围干旱或洪涝的异常,它们的时间变化与前 1 个月邻近海域的孟加拉湾、阿拉伯海、西太平洋以及北大西洋的海表温度异常存在较好的正相关。

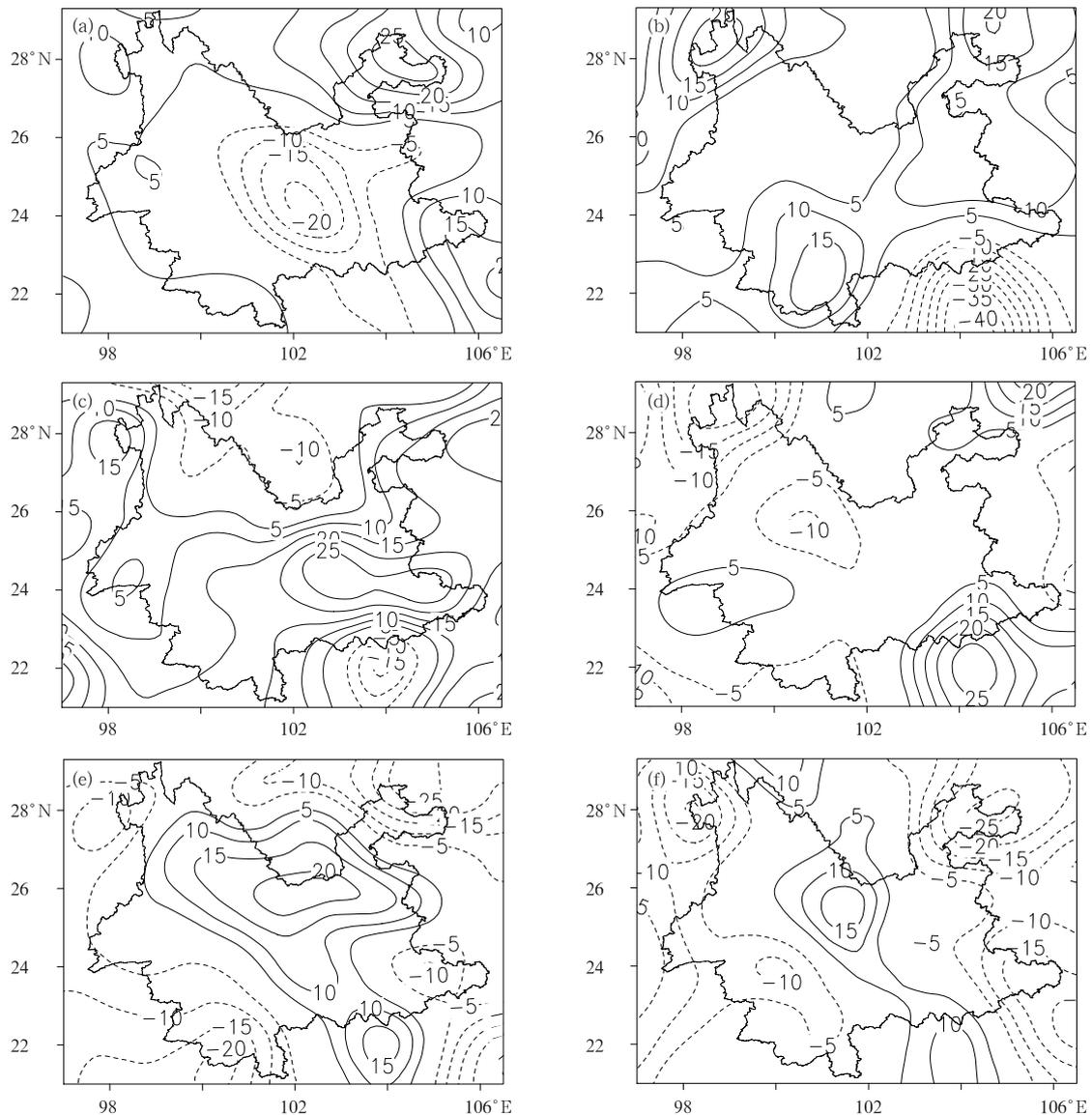


图8 云南地区土壤湿度的长期距平分析(单位: mm) (a)20世纪50年代,(b)20世纪60年代,
(c)20世纪70年代,(d)20世纪80年代,(e)20世纪90年代,(f)21世纪前10年

Fig. 8 Decadal soil moisture variations in Yunnan(unit:mm)

(a)1950s,(b)1960s,(c)1970s,(d)1980s,(e)1990s,(f)2000s

云南地区土壤湿度经验正交函数分析的第2模态(其相应的空间分布表现为云南及附近地区西北—东南向旱涝正负距平的变化)的时间系数与前1个月邻近海域的孟加拉湾、南海、西太平洋、印度洋的海表温度异常存在负相关,同时,它也与前1个月东太平洋 ENSO 敏感区的海温异常存在负相关。由于 ENSO 的可预报性相对较好,对云南地区旱涝异常预报有益。

云南地区土壤湿度变化的经验正交函数分析的第3模态(其相应的空间分布特征表现为云南及附

近地区西南—东北向旱涝的正负异常)的时间系数,除与邻近海域的孟加拉湾、阿拉伯海以及部分西太平洋海表温度异常有关外,也与前1个月赤道及北大西洋的海表温度异常存在一定相关。

云南地区土壤湿度变化的经验正交函数分析的第4模态(其相应的空间分布特征主要表现为云南中部与其东西部旱涝的正负异常)的时间系数除与全球海表温度异常的关系类似其第1模态,也与部分南半球 30°S 附近的海表温异常存在一定相关。

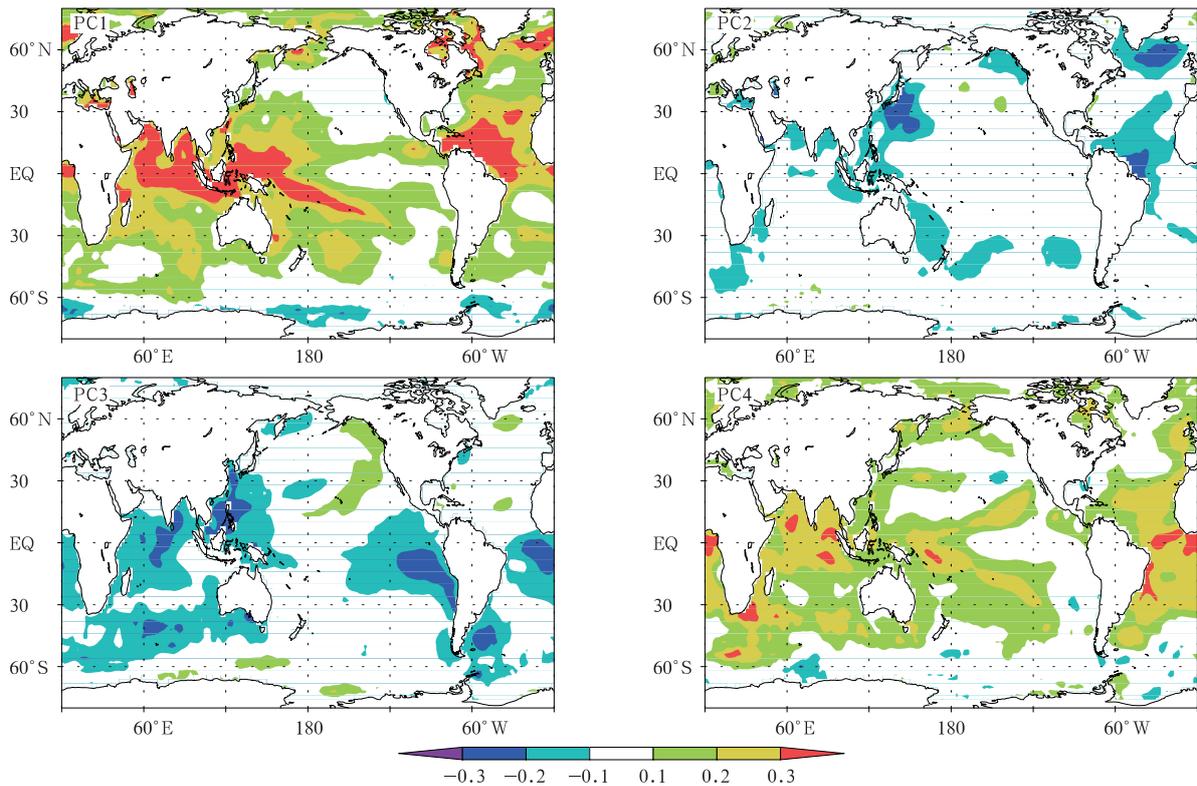


图 9 1948 年—2013 年冬半年云南地区土壤湿度异常经验正交函数分析的前 4 个模态时间系数 PC1~PC4 与相应前 1 个月全球海表温度异常的遥相关(阴影区达到 0.05 显著性水平)
 Fig. 9 Tele-connection between PC1~PC4 of soil moisture anomalies in Yunnan and previous month global SST anomalies for cool season of 1948—2013 (the shaded denotes passing the test of 0.05 level)

同样,用云南地区陆地表面土壤湿度变化的经验正交函数分析的前 4 个模态的时间系数与前 2 个月的全球海表温度异常作遥相关分析,其结果与上述结论基本一致(图略)。

4 结论和讨论

旱涝分析多见于利用降水开展,本文主要利用 NOAA/CPC $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 月平均土壤湿度资料对云南地区旱涝长期变化的时空分布及演变特征进行研究。主要结论如下:

1) 利用云南省气象站月降水资料、土壤湿度观测资料与 NOAA/CPC 格点化降水、土壤湿度的多种分析适用性分析验证显示:NOAA/CPC $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 月平均土壤湿度资料在云南及附近地区有较好的适用性,能够反映月、年尺度以及气候态下的多尺度土壤湿度变化特征,尤其对 1948—2013 年旱涝的发生与演变特征描述有很好的可靠性。

2) 云南地区旱涝变化的时空分布特征具有相对简单的大尺度空间结构和明显的长期变化特征。云南地区的旱涝变化由 20 世纪 50 年代的中部偏旱、其余地区偏涝逐步发展为相反的变化。从 20 世纪 70 年代开始,中部偏涝、其余地区偏旱且旱情日趋严重,并有蔓延之势,尤其是 2010 年、2012 年和 2013 年严重干旱蔓延至云南全省范围。

3) 利用云南地区土壤湿度异常资料与前期的全球海温异常资料进行遥相关分析揭示:云南地区冬半年旱涝变异与前期海温异常密切相关,冬半年云南地区旱涝不同的 EOF 模态时间变化对应不同的前期海温异常变化分布。云南全省旱涝一致的第 1 模态对应前期孟加拉湾、阿拉伯海、西太平洋及北大西洋的海温异常正相关。云南西北—东南旱涝反向的第 2 模态对应前期孟加拉湾、南海、西太平洋以及东太平洋 ENSO 区的海温异常负相关。云南西南—东北旱涝反向的第 3 模态对应前期孟加拉湾、阿拉伯海和西太平洋部分海域的海温异常负相关。

云南中部与其东西两侧旱涝反向的第4模态则对应前期孟加拉湾、阿拉伯海、西太平洋以及北大西洋的海温异常正相关。

由于一个地区旱涝长期变化的成因非常复杂,既与气候系统的自然变率(如降水 and 气温的长期变化)有关,还受到该地区地表植被的变化和人类活动(如人口增加、大范围农业生产活动的变更、大中型水电站的建设)等变化影响。本文仅从土壤湿度出发,对云南地区的旱涝长期变化的时空分布特征及成因进行了初步讨论,深入理解云南旱涝长期变化的时空分布及演变的物理机制有待进一步研究。

致谢:对中国科学院地理研究所刘苏峡研究员、中国气象科学研究院刘栗博士、国家气象信息中心、云南省气候中心和昆明农业气象试验站同事给予的土壤湿度监测资料表示感谢。

参考文献

- [1] 陈隆勋,朱乾根,罗会邦,等. 东亚季风. 北京:气象出版社,1991.
- [2] 郭品文,宋超辉. 南亚和东亚热带夏季风分界域变化. 应用气象学报,2014,25(5):527-537.
- [3] 彭贵芬,刘瑜,张一平. 云南干旱的气候特征及变化趋势研究. 灾害学,2009,24(4):40-44.
- [4] 杨辉,宋洁,晏红明,等. 2009/2010年冬季云南严重干旱的原因分析. 气候与环境研究,2012,17(3):315-326.
- [5] 钱维宏,张宗婕. 西南区域持续性干旱事件的行星尺度和天气尺度扰动信号. 地球物理学报,2012,55(5):1462-1471.
- [6] 邹旭旭,张强. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究. 应用气象学报,2008,19(6):679-687.
- [7] 中国气象局. 中国气象干旱图集. 北京:气象出版社,2010:117.
- [8] 李强子,闫娜娜,张飞飞,等. 2010年春季西南地区干旱遥感监测及其影响评估. 地理学报,2010,65(7):771-778.
- [9] 侯威,杨杰,赵俊虎. 不同时间尺度下气象旱涝强度评估指数. 应用气象学报,2013,24(6):695-703.
- [10] 谢五三,王胜,唐为安,等. 干旱指数在淮河流域的适用性对比. 应用气象学报,2014,25(2):176-184.
- [11] 李清泉,孙丞虎,袁媛,等. 近20年我国气候监测诊断业务技术的主要进展. 应用气象学报,2013,24(6):666-676.
- [12] 陈金华,杨再强,杨太明,等. 安徽省土壤水分监测预测系统. 应用气象学报,2011,22(2):249-256.
- [13] 左志燕,张人禾. 中国东部春季土壤湿度的时空变化特征. 中国科学:地球科学,2008,38(11):1428-1437.
- [14] Liu Li, Zhang Renhe, Zuo Zhiyan. Intercomparison of spring soil moisture among multiple reanalysis data sets over eastern China. *Journal of Geographical Research: Atmospheres*, 2014,119(1):54-64.
- [15] 李崇银,刘会荣,宋洁. 2009/2010年冬季云南干旱的进一步研究——前期土壤湿度影响的数值模拟. 气候与环境研究,2013,18(5):551-561.
- [16] 孙菽芬. 陆面过程的物理、深化机理和成熟化模型. 北京:气象出版社,2005:1-11.
- [17] Fan Y, Huug van den Dool. Climate Prediction Center global monthly soil moisture data set at 0.5° resolution for 1948 to present. *J Geophys Res*, 2004, 109(10):1-8, doi:10.1029/2003JD004345.
- [18] Chen M, Xie P, Janowiak J E, et al. Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations. *J Hydrometeorology*, 2002,3(3):249-266.
- [19] Fan Y, Huug van den Dool. A global monthly land surface air temperature analysis for 1948-present. *J Geophys Res*, 2008, 113(1):1984-2012, doi:10.1029/2007JD008470.
- [20] Fan Y, Huug van den Dool. Verification and intercomparison of multi-model simulated land surface hydrological datasets over the US. *J Hydrometeorology*, 2011,12:531-555.
- [21] Wahr J, Swenson S, Zlotnicki V, et al. Time-variable gravity from GRACE: First results. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L11501. doi:10.1029/2006GL028001.
- [22] 王杰,黄英,曹艳萍,等. 利用GRACE重力卫星观测研究近7年云南省水储量变化. 节水灌溉,2012(5):1-5;15.
- [23] 许美玲,段旭,杞明辉,等. 云南省天气预报员手册. 北京:气象出版社,2011:1-5.
- [24] 秦剑, 琚建华, 解明恩. 低纬高原天气气候. 北京:气象出版社,1997:65-85.
- [25] 云文丽,侯琼,王海梅,等. 不同土壤水分对向日葵光合作用影响的影响. 应用气象学报,2014,25(4):476-482.
- [26] Yun Fan, Huug van den Dool. Bias Correction and forecast skill of NCEP GFS ensemble week-1 and week-2 precipitation, 2-m surface air temperature, and soil moisture forecasts. *Wea Forecasting*, 2011,26(3):355-370.
- [27] Global Temperature and Precipitation Linear Regressions and Correlations. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/ENSO/regressions/>.
- [28] 程建刚,解明恩. 近50年云南区域气候变化特征分析. 地理科学进展,2008,27(5):19-26.
- [29] 刘建刚,谭徐明,万金红,等. 2010年西南特大干旱及典型场次旱灾对比分析. 中国水利,2011:9;17-20.
- [30] Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880-2006). *J Climate*, 2008,21(10):2283-2296.
- [31] 肖子牛. 印度洋偶极性异常海温的气候影响. 北京:气象出版社,2006:1-16.

Preliminary Results on Long-term Soil Moisture Variation in Yunnan

Fan Feng Duan Wei Yang Jiakang

(Yunnan Institute of Meteorological Sciences, Kunming 650034)

Abstract

Long-term spatial-temporal distributions of soil moisture anomalies related drought-flood events and their evolution features in Yunnan, China of recent 66 years are explored using 1948–2013 NOAA CPC $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ global monthly soil moisture data, along with 125-station based monthly observed precipitation for period of 1951–2013, and monthly soil moisture observation from 22 stations for the period of 1993–2013. Comparing with precipitation, soil moisture has some unique physical properties and statistical features, such as longer memory and closer to normal distribution, making it an important component for drought-flood analyzing and monitoring. The mutual validation reveals that the gridded NOAA CPC monthly soil moisture data can capture those major observed drought-flood events very well. The preliminary results show that spatial structures of soil moisture anomaly related drought-flood events in Yunnan, China have relatively simple and large-scale features. The first four leading EOF modes can explain more than 2/3 of total variance of soil moisture variations. The soil moisture related drought-flood events also have obvious long-term variations or trends, such as from 1950s it is drier in central Yunnan and wetter in most rest parts, and then the condition gradually evolved to the opposite, from 1990s the central part of Yunnan becomes wetter than most rest parts. The drought condition tends to become worse since then, especially for the years of 2010, 2012 and 2013, when extreme drought conditions extends to almost everywhere in Yunnan. Further study on possible causes for this spatial-temporal evolution reveals some good relationships between monthly soil moisture variations and global sea surface temperature anomalies (SSTA) one or two months ago, especially in cool season. The 1st EOF mode of soil moisture anomalies, which represents soil moisture anomalies through the whole Yunnan, has good correlation with previous month's SSTA nearby the Bay of Bengal, Arab Sea, the western tropical Pacific and the remote Atlantic, and the 2nd EOF mode which reflects soil moisture anomalies related drought-flood variations from northwest to southeast Yunnan also well correlates with previous month's SSTA in the Bay of Bengal, the South China Sea, western Pacific, and the remote eastern tropical Pacific ENSO region and the tropical Atlantic. The 3rd EOF mode and 4th EOF mode of soil moisture anomalies, which present south to north and east to west drought-flood variations in Yunnan, also relate to unique SSTA in previous months.

Key words: Yunnan; soil moisture; drought-flood; spatial-temporal distribution