

西南干旱特征及其成因研究进展

庞晶¹ 覃军¹

摘要

在全球变暖背景下,中国极端天气气候事件频发.近年来,发生在中国西南的严重干旱事件给当地造成了重大的经济损失和严重的社会影响,引起政府部门和科学界的高度重视.因此,总结西南干旱的观测事实和规律,探讨干旱成因,为西南干旱的预测预警提供依据,是一项具有现实意义也极具理论价值的研究课题.文章根据近年来有关西南干旱的研究进展,从影响干旱的几个主要方面着手,总结西南干旱的最新研究成果,并分析研究中尚存在的不足,以期对今后的工作有所帮助.

关键词

西南干旱;特征;成因;研究进展

中图分类号 P46

文献标志码 A

收稿日期 2011-12-26

作者简介

庞晶,女,硕士生,主要研究方向为大气环境. pangjing582@126.com

覃军(通信作者),男,博士,高级工程师,硕士生导师,主要从事大气环流异常与气候变化研究. qinjunj@126.com

0 引言

西南地区主要包括广西壮族自治区、重庆市、四川省、贵州省和云南省,介于 $91^{\circ}21' \sim 112^{\circ}04'E$ 、 $20^{\circ}54' \sim 34^{\circ}19'N$ 之间^[1].该地区是世界上地形最复杂的区域之一,世界上海拔最高、地形最复杂的青藏高原以及云贵高原、横断山区和四川盆地等构成了该区域大陆地貌的主要特征.本区域水资源较为丰富,以亚热带季风气候为主,典型特征是冬干夏湿、干湿分明,年降雨量在900 mm以上.

过去普遍认为干旱主要发生在中国北方地区,且危害严重.近年来,随着极端天气气候事件频繁出现,干旱的发生频率和强度也明显增加,特别是近几年南方地区干旱也频繁发生,如2003年江南和华南以及西南部分地区发生严重伏秋连旱;2005年华南南部出现严重的秋冬春连旱,云南发生近50 a来少见的严重春旱;2006年川渝地区出现百年难遇的伏旱,2007年出现严重的冬春干旱连夏旱;2009年秋至2010年春发生西南大旱.众多事实表明:西南干旱的研究不仅具有紧迫的现实意义,而且是一项具有科学价值的理论课题.

由于在全球变暖背景下旱涝等极端天气气候事件发生更为频繁,因此旱涝成因及预测研究备受关注.很多研究表明:干旱过程常常是某种状态的异常环流型持续发展和长期维持的结果^[2-4].因此,深入认识旱涝事件的时空发展特征及其气候背景,对了解影响旱涝的因子以及提高旱涝事件的预测水平有很大的帮助.本文先介绍近几十年来西南干旱的观测事实和特征,然后对干旱成因研究进行了总结.

1 西南地区干旱特征

历史上西南地区干旱总体呈现“每年有旱情,三至六年一中旱,七至十年一大旱”的特点.1950—2007年的干旱灾害统计资料显示,本区域几乎每年都有不同程度的干旱灾害发生,大范围、长时间的严重干旱5~10 a就会出现一次^[1].据统计,1951—1990年的40 a间该地区曾发生干旱12次(分别是1963、1965、1969、1970、1972、1975、1978、1979、1981、1987、1988和1989年),且1949年以来,干旱有缓慢加重的趋势.1959—1966年、1978—1980年、1985—1993年和1999年至今这几个时间段是西南5省旱灾频繁发生的时期,即间隔10 a左右发生一次大范围冬春连旱,其中尤以1985—1993年间发生的频率

1 中国地质大学(武汉)环境学院,武汉,430074

最高、连旱时间最长^[5]。

贺晋云等^[6]的研究表明:整体上四川盆地西南部、横断山区南端、广西南部沿海和贵州北部是近50年来(1960—2009年)极端干旱发生频率明显增加的地区;年代际变化上,20世纪60—80年代极端干旱呈逐渐减少趋势,高发区交替出现在东南—西北—东,90年代下降明显,整个地区都转湿,进入21世纪后,极端干旱距平呈现正距平,且增幅较大,区域间差异却显著减小。韩静艳^[7]运用1960—2009年资料得到,进入21世纪以后是西南地区最为干燥的一段时间,各类季节干旱发生频率很高,其中夏季干旱发生最多,冬季次之,且多季连旱的现象较为普遍。黄晚华等^[8]得到的西南地区季节性干旱演变特征为:年度干旱呈波动趋势,春旱、冬旱站次比总体上呈略有减少趋势,而夏旱、秋旱总体上呈略有增加的趋势。对中国区域近56a地表湿润指数分析的结果指出:我国西南地区当前正处于一个干旱化过程,但不同地区干湿变化特征及干旱化的持续时间和位相却有差别^[9]。

鉴于干旱渐趋严重,对干旱程度的评估是很重要的,但同时干旱的精确量化亦是一个艰难的地球物理学问题。为此人们提出了许多专门的指数。目前,关于干旱指标已有大量的研究^[10-12]。由于对干旱理解的不同和行业的不同,对干旱的分类亦不同。美国气象学会在总结各种干旱定义的基础上将干旱分为4种类型:气象干旱、农业干旱、水文干旱、社会经济干旱。气象干旱指标主要有降水量距平百分率、相对湿润指数、标准化降水指数、土壤相对湿度指数、帕尔默干旱强度指数等单项干旱指数以及综合气象干旱指数,目前国际上应用最为广泛的干旱指数是帕尔默干旱强度指数(PDSI)。干旱指数的确定可用于评估干旱发生程度并一定程度上影响干旱变化原因的分析^[13],但由于干旱的形成原因复杂,影响因素多,因此干旱指标的适用性具有明显的地域性和时间尺度限制。

2 西南干旱成因研究

2.1 水汽输送对西南干旱的影响

水汽输送是形成降水的必要条件,也是研究大气环流持续和变化的一个重要方面,通过对水汽输送的研究可以探讨气候的形成和天气过程的发生与发展。段安民等^[14]的研究表明,降水场和水汽通量场有很好的配置关系。文献^[15]研究表明,西南地区东部水汽来源主要有2个:第1条主要来自青藏高

原转向孟加拉湾经缅甸和云南进入西南地区东部;第2条水汽经由孟加拉湾南部,强大的水汽输送带继续向东输送至中南半岛及南海,与南海越赤道气流所携带的水汽汇合后转向至西南地区东部。同时,由西太平洋副热带高压西侧转向的偏南水汽对向西南地区东部水汽输送也有影响。与西南地区东部夏季降水相联系的水汽通道中,印度洋水汽通道强度最强,太平洋水汽通道强度最弱。西南地区东部夏季降水与纬向通道的强度变化关系密切,而与经向通道的水汽输送强度变化关系不明显。

何华等^[16]在研究1980—1991年云南出现的46次暴雨过程时,发现大暴雨前孟加拉湾至云南一带维持的强水汽输送对暴雨的产生起到了重要作用。晏红明等^[17]分析多年平均初夏850 hPa的水汽输送场,认为5月西南地区的水汽输送主要来自赤道印度洋附近的西南气流。然而,也有研究^[18]显示孟加拉湾和南海都是我国南方降水的主要水汽来源。鲁亚斌等^[19]探讨了2006年10月上旬云南严重连阴雨期间的水汽输送特征,发现在连阴雨期间,ITCZ(热带辐合带)异常活跃,先后有4个热带气旋活动,200616号强台风“象神”横穿中南半岛进入孟加拉湾,减弱之后再度发展成孟加拉湾低压,由此提供了孟加拉湾水汽通道,ITCZ水汽通过副高外围气流向中南半岛输送,提供了第2条水汽通道,2条水汽通道呈“人”字形,为连阴雨发生发展提供了有利的水汽条件。陈艳^[20]则指出当热带印度洋至孟加拉湾地区的水汽输送强,而南海至东亚大陆地区的水汽输送弱时,降水量偏多,反之偏少。文献^[20-21]对水汽输送给云南夏季风爆发和初夏5月降水异常的影响进行了研究,发现云南5月降水量显著的年际变化与大尺度水汽输送异常密切相关。事实上,张人禾^[22]的研究已经表明,印度季风区水汽输送强度和东亚季风区水汽输送强度存在反相关关系,即当印度季风区水汽输送强时则东亚地区的水汽输送偏弱。由此可见,在印度季风区水汽输送强的年份往往就可能出现云南5月降水偏多的情况。

2.2 青藏高原对西南干旱的影响

研究表明,气候要素的突变时间多数是先从青藏高原开始的,西南地区气候要素在高海拔地区比低海拔地区突变时间为早,说明青藏高原的气候变化对西南地区东部的气候变化有指示作用^[23]。

李永华等^[24]指出当高原主体东南部大气热源偏强时(该区域的平均大气热源值定义为热源指

数),西南地区东部夏季降水偏多的可能性就大.当夏季青藏高原关键区大气热源值偏强(偏弱)时,西太平洋副高和南亚高压脊线位置偏南(偏北),东亚夏季风偏弱(偏强),出现有利于西南地区东部夏季降水偏多(偏少)的环流形势,同时,西南地区东部夏季水汽输送增强(减弱),水汽辐合上升运动也增强(减弱),因此,该地区夏季降水容易偏多(偏少),出现洪涝(干旱)的可能性大,而高原北侧东北侧和高原西侧降水明显偏少(偏多)^[14].马振锋^[25]发现6—8月越赤道气流与3—5月高原位势高度场存在显著的正相关.所以,可以把春季青藏高原高度场变化作为预报夏季越赤道气流强弱,进而预测四川盆地汛期降水多少的依据之一.陈忠明等^[26]利用高原地气温差资料计算了1961—1996年高原地面热源强度,并用它来反映高原热状况,结果发现四川盆地盛夏伏旱发生强度与前一年初夏青藏高原加热强度有显著负相关,其相关系数达 -0.51 ,通过 0.01 显著性水平检验.另外,青藏高原积雪量可改变热状况,进而影响夏季风以及西南地区夏季降水^[27].

应用奇异值分解(SVD)技术研究青藏高原地面加热场与高原上空 100 hPa 高度场及其东侧川渝地区夏季降水场的时空联系和旱涝预测的关系时发现,地面加热场与高度场的第一模态具有高度的时空相关;前期青藏高原地面加热场通过影响后期高原上空 100 hPa 高度场,导致未来高原东侧川渝地区夏季降水异常,并由此提出了一种基于SVD技术的旱涝预测思路^[28].高原地表热源异常也可以通过强迫 500 hPa 东亚大气环流异常来影响四川盆地降水^[26].刘新等^[29]则指出,夏季青藏高原的加热强(弱)的年份,高原及邻近地区的上升运动、下层辐合及上层辐散均增强(减弱),使高原加热对周边地区低层暖湿空气的抽吸效应和对高层大气向周边地区的排放作用加强(减弱),从而影响着高原和周边地区的环流以及亚洲季风区大尺度环流系统,而且高原的加热强迫能够激发产生一支沿亚欧大陆东部海岸向东北方向传播的Rossby波列,其频散效应可影响到更远的东太平洋以至北美地区的大气环流.

另有研究^[30]显示,我国西南地区11—3月降水和前期11月南支槽指数在 $10\sim 12\text{ a}$ 周期变化上存在显著的反相关系,前期11月南支槽区负(正)距平,南支槽指数偏弱(强),南支槽加深(变浅),水汽输送充足(不足),西南地区降水偏多(偏少).并且前期 500 hPa 高度场是我国西南地区11—3月旱涝

情况的一种预测信号.与此同时,董海萍等^[31]对比分析了2001年5月云南严重洪涝与2005年5月云南严重干旱的环流特征后指出:2001年5月东亚大槽位置偏西强度偏强,同时南支槽较强,冷暖空气易于云南地区交汇,形成强降水;2005年5月东亚大槽偏东,南支槽较弱,致使云南地区冷暖空气难以交汇,易形成干旱.由此强调了南支槽水汽输送的重要性.

总之,青藏高原由于特殊的地形和热源效应在季节上的差异,可以改变大尺度的大气环流,进而通过水汽、季风等因素来影响西南地区的降水,一定程度上影响着西南干旱,可提供相应的旱涝预测思路.

2.3 海温对西南干旱的影响

何溪澄等^[32]通过对比1997—1998和1998—1999年2个典型的多雨年和少雨年指出,多雨年与ENSO事件的暖期相联系.对全球海温场的分析发现,当赤道东太平洋海温异常偏低(La Nina),赤道印度洋海温偶极子呈盘位相时,我国南方秋季易出现大范围干旱.EL Nino年,西南地区降水一致偏多,La Nina年,西南地区中部降水偏多,东、西部降水偏少^[33].鲍媛媛等^[34]研究了前期海温与西南地区东部夏季旱涝的关系,指出2006年1—3月赤道东太平洋海温呈显著负距平,南太平洋海域海温呈显著正距平,利于西南地区东部出现严重干旱.刘华^[35]发现ENSO和IOD(印度洋偶极子)事件联合发生时有利于我国西南地区降水增加,却使长江中下游以南东南沿海的降水量减少,全国范围(云南省除外)呈现温度的正异常分布,出现暖春现象. ENSO的出现有利于我国两河中上游西北、西南地区春季增温. EL Nino发生条件下,副热带高压稍微西伸,位势高度场梯度增大,华南高空维持辐散的西北气流,西南低涡向北移动,西南季风活跃.这是造成IOD与ENSO联合发生年、IOD独立发生年2种情况下中国春季降水气温存在上述差异的环流分布.李永华等^[15]指出,西南地区东部夏季降水偏多的海温分布特点是:在印度洋地区,孟加拉湾和赤道东印度洋海温偏高,在太平洋,南海及菲律宾附近地区洋面海温偏高,西风漂流区海温偏低,而赤道太平洋中东部南侧海温偏高,总体说来,降水偏多时两大洋海温的分布与高原南侧通道、太平洋通道偏强时的海温分布相类似,而与印度洋通道水汽输送偏强时的海温分布大体相反.利用合成的EL Nino年和La Nina年资料的分析结果也显示出EL Nino事件显著地影响东亚冬、夏

季风的循环^[36].而杨骏等^[37]认为中国西南地区以及周边的泰国和越南部分地区只受厄尔尼诺现象的间接影响,当地的干旱还有其他因素.

2.4 季风对西南干旱的影响

西南地区由于其特殊的地理环境,夏季可同时受南亚季风、东亚季风以及中高纬天气系统的交叉影响,具有独特的季风气候特征.受季风气候的影响,云南有十分显著的干湿季节.在季节转换期间,随着中南半岛和我国南海地区低层东南风和高层偏东风的建立,东南亚夏季风爆发,标志着东南亚及邻近地区开始进入季风雨季.而初夏5月是亚洲大气环流开始发生季节性转变的月份,雨季开始的早晚和季风的强度对云南5月降水量的多少有很大的影响.通过对2004年7月我国西南地区3次强降水过程的分析后发现,季风的活跃及其与北方南下冷空气的结合,可造成我国南部地区出现大范围强降水^[20].另外,季风爆发期间水汽输送的异常也是季风系统异常变化的一种反映,从而影响着初夏降水量的变化^[38].对2009年12月我国西南地区干旱进行分析发现,此时西南地区水汽输送增加,但贝加尔湖低压较常年异常偏强,使得冷空气偏东偏北,西南地区冷暖空气不能交汇,不利于降水的发生,故12月份西南干旱与我国冬季冷空气异常有关^[21].西南地区降水偏少年的环流特征为在孟加拉湾地区为显著的反气旋性环流异常,西南地区西部位于反气旋东北侧为异常西北风控制,此时中高纬南下到我国的冷气路径偏东,在西南地区东部为弱西风控制,这种环流异常不利于冷暖空气在西南地区交汇,容易导致降水偏少^[27,39].文献^[40]指出,反气旋式环流和异常的气旋式环流的增强,使中国西南地区东北风逐渐减弱为西南夏季风和东南夏季风,由此造成夏季气温增高、日降水量减少.在秋季,暖而干的气流控制着该地区,造成显著增温、降水减少事件.对大尺度大气环流变化的研究显示,反气旋的加强、位势高度的增高、季风的减弱以及欧亚大陆的水汽输送造成了中国西南地区极端气候的变化.

2.5 极地涛动对西南干旱的影响

以极地和绕极中高纬地区气压距平呈反位相分布为主要特征的北极涛动(AO)或环状模(NAM)能很好地反映极涡强度的变化特征^[41],与极涡有着密切的关系.具体表现为,夏季亚洲极涡强度的减弱,正好对应于北极涛动(AO)指数在该时段的显著升高,而夏季亚洲极涡在近几十年的面积缩小和强度

减弱是中国夏季降水长期变化的一个可能原因,夏季亚洲极涡面积偏小使得西南南部等地区降水偏少^[42].因此蒋兴文等^[39]利用1961—2010年的多种观测资料指出,当NAM偏强(弱)时,西南地区降水偏多(少),2010年冬季西南地区的干旱更有可能是由NAM异常引起的,而不是El Nino.龚道溢等^[43]指出,当AO指数偏强时,我国大部分地区冬季气温偏高,同时降水也偏多.AO和西伯利亚高压对我国冬季气候的影响在年际和年代际尺度上有不同的特征.在年际尺度上西伯利亚高压对我国气温的影响要远强于AO,而AO对我国降水的影响则比西伯利亚高压的影响要显著.这种关系也可以通过比较分析对流层低层和中高层环流形势在AO不同位相时的变化得到进一步验证.冬季是AO模态最显著、变率最强的季节,所以研究AO对西南干旱的影响多选择冬季.

3 结果与讨论

通过上述的归纳与总结,可以认为西南干旱的成因是多方面的.

1) 西南地区东部水汽来源主要有3个(印度洋水汽通道、孟加拉湾水汽通道、太平洋水汽通道),其中印度洋水汽通道强度最强.西南地区东部夏季降水与纬向通道的强度变化关系密切,而与经向通道的水汽输送强度变化关系不明显.当印度洋水汽通道输送强,而太平洋水汽通道输送弱时,西南地区降水偏多,反之偏少.

2) 青藏高原在夏季时作为大气热源,影响西太平洋副高、南亚高压、东亚夏季风、水汽运动的变化,当夏季青藏高原关键区大气热源值偏强(偏弱)时,西太平洋副高和南亚高压脊线位置偏南(偏北),东亚夏季风偏弱(偏强),出现有利于西南地区东部夏季降水偏多(偏少)的环流形势,同时,西南地区东部夏季水汽输送增强(减弱),水汽辐合上升运动也增强(减弱),因此,该地区夏季降水容易偏多(偏少),出现洪涝(干旱)的可能性大.冬季由青藏高原产生的南支槽会影响水汽输送和冷暖空气的交汇,当南支槽较弱时,冷暖空气难以交汇,水汽条件不足,易形成干旱.由此可见,青藏高原地表热源异常是通过强迫出大尺度大气环流异常来影响西南地区降水的.

3) 赤道东太平洋海温异常偏低(La Nina)、南太平洋海温异常偏高、印度洋偶极子呈负位相,均可

使西南地区降水偏少. 总体来说,降水偏少时两大洋海温的分布与高原南侧通道、太平洋通道偏强时的海温分布相反,而与印度洋通道水汽输送偏强时的海温分布大体相类似.

4) 盛夏时期东南亚季风与冷空气的相互作用可影响西南地区的降水,冷空气大规模向南爆发,与暖空气交汇,有利于降水的发生. 东南亚季风可为西南地区带来水汽,因此,当其偏强(弱)时,西南地区降水偏多(少). 西南地区降水偏少年的环流特征为在孟加拉湾地区为显著的反气旋性环流异常,西南地区西部位于反气旋东北侧为异常西北风控制,此时中高纬南下到我国的冷气路径偏东,在西南地区东部为弱西风控制. 这种环流异常不利于冷暖空气在西南地区交汇,容易导致降水偏少.

5) 夏季亚洲极涡强度的减弱,正好对应于北极涛动(AO)指数在该时段的显著升高,而夏季亚洲极涡面积偏小使得西南南部等地区降水偏少. 因此,AO偏强(弱)时,西南地区气温偏高(低)、降水偏多(少),此影响比西伯利亚高压对降水的影响要显著. 将160站平均气温序列与AO指数作相关分析,相关系数为0.43,超过了95%的置信度水平^[5],当然这主要是根据统计分析得到的结果,而AO对区域气候的影响是一个比较复杂的问题,其影响机制等方面还需要进行更深入和细致的研究.

目前国内外学者对干旱特征的研究主要是通过选取几个代表性气象台站资料,从单一台站的角度通过干旱指标分析各台站干旱变化特征. 事实上,每次干旱事件都具有特定的持续时间和影响范围,即区域持续性干旱事件,而干旱作为一个区域性事件,如果用单一台站资料描述整个区域干旱事件的发生、发展和变化情况往往存在代表性差的问题. 虽有一些学者也进行了区域性的干旱化研究,但大多只是针对干旱变化的总体趋势进行了研究,尚没有针对区域性的持续干旱过程特征的研究,即客观识别和分析干旱事件的时空分布特征、持续时间、发生频次、强度变化等的研究方法.

另外,目前对于西南干旱的成因研究多集中在北半球,南半球海温和环流对其影响的研究不多,这可能成为今后研究的一个方向.

参考文献

References

[1] 马建华. 西南地区近年特大干旱灾害的启示与对策[J]. 人民长江, 2010, 41(24): 7-12

- MA Jianhua. Revelation and countermeasures of catastrophic drought disasters in recent years in southwest China[J]. Yangtze River, 2010, 41(24): 7-12
- [2] 毕慕莹. 近四十年来华北干旱的特点及其成因[M]//叶笃正, 黄荣辉. 旱涝气候研究进展. 北京: 气象出版社, 1990: 23-32
- BI Muying. The characteristic and causes of drought in north China in the recent nearly 40 years [M] // YE Duzheng, HUANG Ronghui. The climate research of drought and flood. Beijing: China Meteorological Press, 1990: 23-32
- [3] 卫捷, 张庆云, 陶诗言. 1999及2000年夏季华北严重干旱的物理成因分析[J]. 大气科学, 2004, 28(1): 125-137
- WEI Jie, ZHANG Qingyun, TAO Shiyan. Physical causes of the 1999 and 2000 summer severe drought in north China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004, 28(1): 125-137
- [4] 陶诗言, 徐淑英. 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征[J]. 气象学报, 1962, 32(1): 1-10
- TAO Shiyan, XU Shuying. Some aspects of the circulation during the periods of the persistent drought and flood in Yangtze and Huai-ho valleys in summer [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1962, 32(1): 1-10
- [5] 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[J]. 中国水利, 2011(9): 17-19
- LIU Jiangang, TAN Xuming, WAN Jinhong, et al. Comparative analysis between the 2010 severe drought in southwest China and typical drought disasters [J]. China Water Resources, 2011(9): 17-19
- [6] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 近50年西南地区极端干旱气候变化特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1179-1190
- HE Jinyun, ZHANG Mingjun, WANG Peng, et al. Climate characteristics of the extreme drought events in southwest China during recent 50 years [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(9): 1179-1190
- [7] 韩静艳. 气候变化下西南地区旱涝时间变化规律研究[D]. 郑州: 华北水利水电学院, 2011
- HAN Jingyan. The change law of drought and flood events in southwest regions under climate change [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2011
- [8] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近58 a演变特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 50-59
- HUANG Wanhua, YANG Xiaoguang, LI Maosong, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(7): 50-59
- [9] 马柱国, 任小波. 1951—2006年中国区域干旱化特征[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(4): 195-201
- MA Zhuguo, REN Xiaobo. Drying trend over China from 1951 to 2006 [J]. Advances in Climate Change Re-

- search, 2007, 3(4):195-201
- [10] 袁文平,周广胜.干旱指标的理论分析与研究展望[J].地球科学进展,2004,19(6):982-991
YUAN Wenping, ZHOU Guangsheng. Theoretical study and research prospect on drought indices[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(6):982-991
- [11] 王劲松,郭江勇,周跃武,等.干旱指标研究的进展与展望[J].干旱区地理,2007,30(1):60-65
WANG Jinsong, GUO Jiayong, ZHOU Yuewu, et al. Progress and prospect on drought indices research[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(1):60-65
- [12] 王密侠,马成军,蔡焕杰.农业干旱指标研究与进展[J].干旱地区农业研究,1998,16(3):119-124
WANG Mixia, MA Chengjun, CHAI Huanjie. Research progress in agricultural drought index[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998, 16(3):119-124
- [13] 翟盘茂,邹旭恺.1951—2003年中国气温和降水变化及其对干旱的影响[J].气候变化研究进展,2005,1(1):16-18
ZHAI Panmao, ZOU Xukai. Changes in temperature and precipitation and their impacts on drought in China during 1951—2003[J]. Advances in Climate Change Research, 2005, 1(1):16-18
- [14] 段安民,刘屹岷,吴国雄.4—6月青藏高原热状况与盛夏东亚降水和大气环流的异常[J].中国科学: D辑,2003,33(10):997-1004
DUAN Anmin, LIU Yimin, WU Guoxiong. The thermal conditions of Tibetan plateau from April to June and the abnormal of the precipitation and atmospheric circulation in east Asia in summer[J]. Science in China: Series D, 2003, 33(10):997-1004
- [15] 李永华,徐海明,高阳华,等.西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征[J].气象学报,2010,68(6):932-943
LI Yonghua, XU Haiming, GAO Yanghua, et al. The characteristics of moisture transport associated with drought/flood in summer over the east of the southwestern China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2010, 68(6):932-943
- [16] 何华,孙绩华.云南冷锋切变暴雨过程的环流及水汽输送特征[J].气象,2003,29(4):48-52
HE Hua, SUN Jihua. Circulation and moisture flux characteristics at middle and lower levels during heavy rains in Yunnan[J]. Meteorological Monthly, 2003, 29(4):48-52
- [17] 晏红明,肖子牛,王灵.孟加拉湾季风活动与云南5月降雨量[J].高原气象,2003,22(6):624-630
YAN Hongming, XIAO Ziniu, WANG Ling. Activities of Bay of Bengal monsoon and beginning date of rain season in Yunnan[J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(6):624-630
- [18] 陈世训,高绍风,杨蕊.5—6月我国南方降水的水汽来源及其异常[C]//全国热带夏季风学术会议文集组编.全国热带夏季风学术会议文集(1982).昆明:云南人民出版社,1983:97-110
CHEN Shixun, GAO Shaofeng, YANG Song. The water vapor source and abnormal of precipitation in south China from May to June[C]//The Corpus from National Conference on Summer Monsoon. The proceedings of national conference on summer monsoon(1982). Kunming: Yunnan People's Publishing House, 1983:97-110
- [19] 鲁亚斌,普贵明,赵宁坤,等.“2006.10”云南严重秋季连阴雨水汽输送特征和湿 Q 矢量分析[J].气象科学,2009,29(1):64-70
LU Yabin, PU Guiming, ZHAO Ningkun, et al. Analysis on water vapour transporting features and wet Q vector of severe autumn lasting rainfall in October. 2006 in Yunnan province[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2009, 29(1):64-70
- [20] 陈艳.东南亚夏季风的爆发与演变及其对我国西南地区天气气候影响的研究[D].南京:南京信息工程大学大气科学学院,2006
CHEN Yan. A study of the southeast Asian summer monsoon onset, evolution and its influence on the weather and climate over the southwest of China[D]. Nanjing: School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Sciences & Technology, 2006
- [21] 张凯静.大气水汽变化与我国旱涝关系研究[D].兰州:兰州大学大气科学学院,2010
ZHANG Kaijing. Relationship between atmospheric water vapor and drought-flood in China[D]. Lanzhou: School of Atmospheric Science, Lanzhou University, 2010
- [22] 张人禾.来自印度季风区的水汽输送与东亚上空水汽输送和中国夏季降水的关系[J].大气科学进展,2001,18(5):1005-1007
ZHANG Reuhe. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China[J]. Advances in Atmospheric Science, 2001, 18(5):1005-1007
- [23] 马振锋,彭骏,高文良,等.近40年西南地区的气候变化事实[J].高原气象,2006,25(4):633-642
MA Zhenfeng, PENG Jun, GAO Wenliang, et al. Climate variation of southwest China in recent 40 years[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(4):633-642
- [24] 李永华,卢楚翰,徐海明,等.夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系[J].大气科学,2011,35(3):422-434
LI Yonghua, LU Chuhan, XU Haiming, et al. Contemporaneous relationships between summer atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and drought/flood in eastern southwest China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(3):422-434
- [25] 马振锋.西南地区夏季降水预测模型[J].气象,2002,28(11):29-32
MA Zhenfeng. Forecasting of summer precipitation over southwest region of China[J]. Meteorological Monthly, 2002, 28(11):29-32
- [26] 陈志明,闵文彬,刘富明.青藏高原地表热源异常与四川盆地夏季降水的关联[J].气象,2003,29(5):9-12
CHEN Zhongming, MIN Wenbin, LIU Fuming. Relationship between surface heating fields over Qinghai-Xizang Plateau and precipitation in Sichuan basin during summer

- [J]. *Meteorological Monthly*, 2003, 29(5): 9-12
- [27] 邹旭恺, 高辉. 2006年夏季川渝高温干旱分析[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 149-153
ZOU Xukai, GAO Hui. Analysis of severe drought and heat wave over the Sichuan basin in the summer of 2006 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(3): 149-153
- [28] 李跃清. 青藏高原地面加热及上空环流场与东侧旱涝预测的关系[J]. 大气科学, 2003, 27(1): 107-114
LI Yueqing. 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*, 2003, 27(1): 107-114
- [29] 刘新, 李伟平, 吴国雄. 夏季青藏高原加热和北半球环流年际变化的相关分析[J]. 气象学报, 2002, 60(3): 267-277
LIU Xin, LI Weiping, WU Guoxiong. Interannual variation of the diabatic heating over the Tibetan Plateau and the northern hemispheric circulation in summer [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(3): 267-277
- [30] 王斌, 李跃清. 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, 2010, 30(4): 26-35
WANG Bin, LI Yueqing. Relationship analysis between south branch trough and severe drought of southwest China during autumn and winter 2010 [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2010, 30(4): 26-35
- [31] 董海萍, 赵思雄, 曾庆存. 我国低纬高原地区初夏强降雨天气研究 II: 2005 与 2001 年 5 月云南旱涝成因的对比分析[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 460-473
DONG Haiping, ZHAO Sixiong, ZENG Qingcun. Study of strong heavy rainfall in low latitude plateau area in China during early summer. Part II: Comparison between circulation and climatology causing flood in May 2001 and drought in May 2005 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(3): 460-473
- [32] 智协飞, 郭锐. 中国南方秋季干旱的时空分布特征及其可能成因[C]//中国气象学会. 中国气象学会 2006 年年会论文集. 北京: 中国气象学会出版社: 1488-1489
ZHI Xiefei, GUO Rui. The spatial and temporal distribution characteristic of drought in summer southern China and its possible causes [C]// Chinese Meteorological Society. The Proceedings of Chinese Meteorological Society Annual Meeting 2006. Beijing: China Meteorological Society Press: 1488-1489
- [33] 何溪澄, 丁一汇, 何金海, 等. 中国南方地区冬季风降水异常的分析[J]. 气象学报, 2006, 64(5): 594-604
HE Xicheng, DING Yihui, HE Jinhai, et al. An analysis on anomalous precipitation in southern China during winter monsoons [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 64(5): 594-604
- [34] 鲍媛媛, 康志明, 金荣花, 等. 川渝地区夏季旱涝与海温异常浅析[J]. 气象, 2007, 33(5): 89-93
BAO Yuanyuan, KANG Zhiming, JIN Ronghua, et al. Analysis of floods and droughts in Chongqing and East Sichuan [J]. *Meteorological Monthly*, 2007, 33(5): 89-93
- [35] 刘华. 近 50 年中国降水和温度的统计分析和海洋对其影响初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学海洋地球科学学院, 2009
LIU Hua. Statistical analysis on the precipitation and temperature over China in nearly 50 years and preliminary study on the impact of ocean [D]. Qingdao: College of Marine Geosciences, Ocean University of China, 2009
- [36] 陈文. El Nino 和 La Nina 事件对东亚冬夏季风循环的影响[J]. 大气科学, 2002, 26(5): 595-610
CHEN Wen. Impacts of El Nino and La Nina on the cycle of the east Asian winter and summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, 26(5): 595-610
- [37] 杨骏, 朱丽, 赵洁民. 探寻干旱成因[J]. 农产品市场周刊, 2010(14): 32-33
YANG Jun, ZHU Li, ZHAO Jiemin. Exploring the causes of drought [J]. *Farm Produce Market Weekly*, 2010(14): 32-33
- [38] 陈艳, 丁一汇, 肖子牛, 等. 水汽输送对云南夏季风爆发及初夏降水异常的影响[J]. 大气科学, 2006, 30(1): 25-37
CHEN Yan, DING Yihui, XIAO Ziniu, et al. The impact of water vapor transport on the summer monsoon onset and abnormal rainfall over Yunnan province in May [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(1): 25-37
- [39] 蒋兴文, 李跃清. 西南地区冬季气候异常的时空变化特征及其影响因子[J]. 地理学报, 2010, 65(11): 1325-1335
JIANG Xingwen, LI Yueqing. The spatio-temporal variation of winter climate anomalies in southwestern China and the possible influencing factors [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(11): 1325-1335
- [40] Li Z X, He Y Q, Wang P Y, et al. Changes of daily climate extremes in southwestern China during 1961—2008 [J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 80: 255-272
- [41] 孙兰涛, 吴辉碁, 李响. 对北极极涡的认识[J]. 极地研究, 2006, 18(1): 52-62
SUN Lantao, WU Huiding, LI Xiang. Our understanding of arctic vortex [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2006, 18(1): 52-62
- [42] 王遵娅, 丁一汇. 夏季亚洲极涡的长期变化对东亚环流和水汽收支的影响[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1): 20-29
WANG Zunya, DING Yihui. Impacts of the long-term change of the summer Asian polar vortex on the circulation system and the water vapor transport in East Asia [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(1): 20-29
- [43] 龚道溢, 王绍武. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 559-568
GONG Daoyi, WANG Shaowu. Influence of arctic oscillation on winter climate over China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 559-568

Advances in characteristics and causes of drought research in southwest China

PANG Jing¹ QIN Jun¹

¹ School of Environmental Studies, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074

Abstract As the consequence of global warming, China has been affected by extreme weather events more frequently. In recent years, the severe drought events have caused significant economic losses and serious social impact in southwest China, which attracted great attention from the government departments and the scientific community. This research subject is of significant importance and great theoretical value as its findings will reveal the trends and main causes of drought in southwest China, and will provide basis for predicting and establishing early warning system. This paper summarizes the research advances of drought in southwest China, analyzes the characteristics and possible causes of drought, points out the remaining problems with the purpose to provide reference for future research work.

Key words drought in southwest China; characteristics; causes; research advances