

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.03.04

云南2009—2014年持续性气象水文干旱特征及成因分析

荣艳淑¹, 巩琳^{1,2}, 卢寿德²

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 黄河水利委员会中游水资源保护局, 山西晋中 030600)

摘要:基于戴-帕尔默干旱强度指数(Dai Palmer drought severity index, Dai-PDSI)和径流干旱指数(streamflow drought index, SDI),分析云南地区2009—2014年持续性气象干旱与水文干旱时空演变特征,并利用NCAR/NCEP再分析资料,从西太平洋副热带高压、青藏高原、南支槽、对流层垂直运动及水汽垂直分布等视角,分析2009—2014年云南持续性干旱的原因。结果表明:①2009—2014年是云南地区自1961年以来最严重的一次持续性极端干旱过程,2009年10月—2010年9月是最干旱的时段;夏季与冬季是干旱最严重的两个季节。②在空间上,云南中东部旱情最重,东南部稍轻。③水文干旱伴随气象干旱而生,金沙江和南盘江出现重度水文干旱,澜沧江出现中等水文干旱,从强度上讲,水文干旱弱于气象干旱。④夏季西太平洋副热带高压偏西偏强,青藏高原持续偏强、中心偏西,云南上空的大气持续受它们控制,盛行下沉气流;冬季南支槽偏弱,不利于引导孟加拉湾水汽北上;在其他季节,大气多以下沉运动为主,对流层水汽严重不足。

关键词:气象干旱;水文干旱;持续性干旱;干旱成因;云南省

中图分类号:P49

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2018)03-0022-08

Analysis on characteristics and causes of persistent meteorological and hydrological drought in Yunnan from 2009 to 2014

RONG Yanshu¹, GONG Lin^{1,2}, LU Shoude²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Water Resources Protection Bureau of Middle Reaches, Yellow River Conservancy Commission, Jinzhong 030600, China)

Abstract: Spatio-temporal change characteristics of the persistent meteorological and hydrological drought in Yunnan from 2009 to 2014 were analyzed based on Dai Palmer drought severity index (Dai-PDSI) and streamflow drought index (SDI). The causes of persistent drought were investigated based on the NCAR/NCEP reanalysis data from various perspectives including: the West Pacific subtropical high, Tibetan high, Southern Branch Trough, tropospheric vertical motion, and vertical distribution of water vapor. The results showed that the persistent drought from 2009 to 2014 was the longest drought in Yunnan since 1961. The driest period was from October, 2009 to September, 2010, and summer and winter were two driest seasons. The drought in the east of Yunnan was the heaviest and the drought in the southeastern part was slightly light. Hydrologic drought was accompanied by meteorological drought. The heaviest hydrological drought was in Jinsha River and Nanpan River. Secondary hydrological drought occurred in the Lancang River. In terms of strength, hydrologic drought is weaker than meteorological drought. In summer, the atmosphere over Yunnan was controlled continuously by downward flow due

基金项目:国家自然科学基金(51420105014);“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFA0601504)

作者简介:荣艳淑(1961—),女,教授,博士,主要从事水文气象和气候变化方面研究。E-mail:ysron@hhu.edu.cn

to that the West Pacific subtropical high was stronger and westward and the Tibetan high center was westward. In winter, the Southern Branch Trough was weak and could not help to guide the water vapor from Bengal Bay to Yunnan. In other seasons, downward flow prevailed and water vapor was seriously shortage in troposphere.

Key words: meteorological drought; hydrological drought; persistent drought; drought causes; Yunnan Province

干旱是一种影响大、范围广、危害深的频发性和慢性的自然灾害,严重威胁着人类社会生活 and 经济发展^[1-4]。近年来,随着全球气候变暖,我国西南地区干旱事件增多、旱灾明显加重^[5-7]。特别是2009年以来,云南地区持续遭受干旱影响,连年干旱的叠加效应使农作物大面积减产甚至绝收,云南多处水库塘坝干涸,山区群众饮水和农业灌溉困难,生态环境受到影响,经济损失严重^[8-9]。

云南气候独特,干湿季节分明,雨季(5—10月)降水占全年降水总量的85%左右,而干季(11月—次年4月)降水只占15%左右,因此,云南冬春和初夏是最易发生干旱的季节^[10],干旱成因也有差异。2003年夏季和2006年夏季,云南都出现了严重干旱,高温伴随降水减少,使干旱影响日趋严重^[11]。2009年秋季到2010年春季,云南又出现了严重的秋、冬、春连续严重干旱^[8]。云南楚雄地区更是连续5年干旱^[7],引起人们对云南地区持续性干旱成因的关注。

研究表明,云南冬季干旱主要与南支槽、孟加拉湾水汽输送以及极涡、北极涛动(Arctic oscillation, AO)、北大西洋涛动(North Atlantic oscillation, NAO)异常有关^[12-13];云南夏季干旱主要与西太平洋副热带高压、南亚高压及亚洲夏季风有关^[14-15];云南春季、秋季干旱多与西风带环流系统异常有关^[16-18]。

目前研究多着眼于某个干旱事件,特别是针对2009—2010年秋冬季节云南干旱问题^[8, 19]。实际上,始于2009年秋季的干旱并未终止,曾有人在2014年讨论云南地区持续4年的干旱问题下^[8]。这样长的持续性干旱在云南历史上有记载以来从未出现过,其形成原因值得深入探讨。笔者拟对2009年开始的云南气象和水文干旱进行详细讨论,并就干旱成因进行初步分析。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

云南省位于中国西南部,地形复杂多变,由西北部横断山区向东南部云贵高原过渡,海拔高度由5000 m逐渐降低为1000 m,气候也由西北部的山地立体气候,逐渐变为东北部亚热带季风气候和南部热带季风气候。云南省大部地区年降水量在100 mm

左右,南部可达1600 mm以上。但是,降水在时空分布上极不均匀,特别是干季降水量只占全年15%左右^[10],容易发生干旱。

1.2 数据来源

①逐月戴—帕尔默干旱强度指数(Dai Palmer Drought Severity Index, Dai-PDSI)数据。取自美国国家海洋和大气管理局网站(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>),水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,时间长度为1960—2014年。选取与云南省区域范围最接近的16个格点数据(图1),以该区域的算术平均值作为云南地区的平均Dai-PDSI。②逐月流量数据。取流域内溪洛渡、天一和糯扎渡3个水文站(图1中的红色五星)的月平均流量数据,均经过还原计算,资料长度为1960—2014年。③美国环境预测中心(NCEP),美国国家大气研究中心(NCAR)逐月再分析资料。选取了位势高度、风场、垂直速度、比湿、水汽通量等,高度从1000 hPa到100 hPa,水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,时间长度与前两类数据相同。④逐月降水数据。从中国气象数据共享服务网获得云南省28个气象站点(图1中的空心圆)的逐月平均降水量数据,资料长度为1961—2014年。所有数据的气候平均态时用1971—2000年平均值表示,距平用月值与气候平均态的偏差表示。

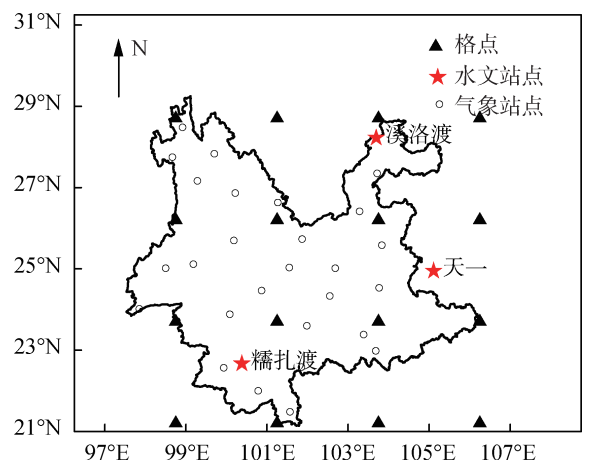


图1 云南区域格点、水文站点及气象站点空间分布

2 研究指标与研究方法

2.1 研究指标

Dai-PDSI是Dai等^[20]在帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)基础上改进而

来的,是考虑了全球气候变暖情况后的修正指数。径流干旱指数(streamflow drought index, SDI)是依据 Nalbantis 等^[21]的定义而计算的, SDI 值有月、季、半年和年尺度的序列,分别用 SDI1、SDI3、SDI6 和 SDI12 表示。两类干旱指标的等级划分见表 1。

表 1 Dai-PDSI 和 SDI 对应的干旱等级

干旱程度	干旱等级	
	Dai-PDSI	SDI
轻旱	(-2, -1]	(-1, -0.5]
中旱	(-3, -2]	(-1.5, -1]
重旱	(-4, -3]	(-2, -1.5]
特旱	≤ -4	≤ -2

2.2 研究方法

a. 应用皮尔逊相关分析反映两个随机变量之间的线性相关关系。设有两个变量 x_1, x_2, \dots, x_n 和 y_1, y_2, \dots, y_n , 两个变量之间相关系数 r 的计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

当 r 的数值越接近 ± 1 , 表示两个序列的线性关系越好; 越接近零, 表示两个序列的线性关系越不好。

b. 使用距平 P_a 和距平百分率 P_f 反映数据与平均值的差异, 其中, P_a 反映序列中某个数值与平均值的偏差, P_f 反映序列中某个数值与平均值的偏离程度。其表达式为

$$P_a = P_i - P_m \quad (2)$$

$$P_f = (P_i - P_m) / P_m \times 100\% \quad (3)$$

式中: P_i 表示某序列中 i 时刻的数值; P_m 为 1971—2000 年气候基准期的平均值。

c. 应用合成分析方法对多个特定时段的气象要素平均值进行综合分析。

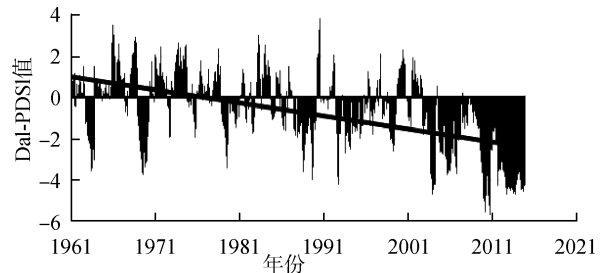
3 结果与讨论

3.1 气象干旱特征

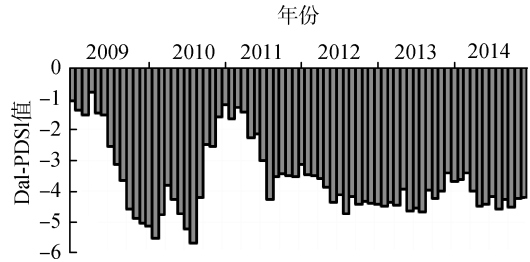
3.1.1 时间演变特征

云南省区域平均 Dai-PDSI 随时间变化情况见图 2。在 1961—2014 年(图 2(a)), 云南干旱指标显示了 3 个阶段性特征: ①1960—1980 年, 干旱次数较少、间隔时间较长; ②1990—2000 年, 干旱次数明显增多、间隔明显缩短; ③2000 年以后, 干旱次数增多、强度增大、持续时间也明显延长, 特别是 2009 年以来, 云南出现持续干旱。

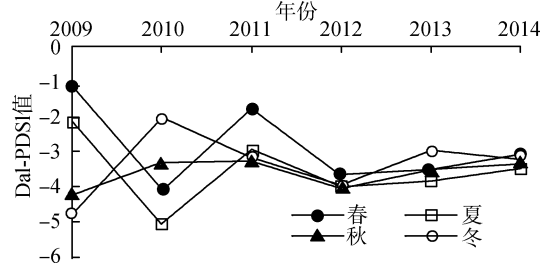
从图 2(b) 可以看到, 2009 年以来干旱迅速增强, 在该年秋季达到极端干旱, 在 2011 年春季干旱



(a) 1961—2014 年



(b) 2009—2014 年



(c) 2009—2014 年季节变化

图 2 云南省区域平均 Dai-PDSI 随时间变化情况

强度减弱为轻到中旱, 之后干旱强度再次增大, 达到重度和极端干旱。众多文献讨论过 2009 年秋冬到 2010 年春季西南地区重大干旱过程^[8-9, 12-13, 19-23]。但是, 西南其他地区在 2010 年秋季以后干旱明显缓解, 然而, 云南干旱仅仅程度略有减弱, 干旱并未结束。以季节为时间尺度时, 云南干旱存在几个严重的干旱季节(图 2(c)), 其中, 2009 年秋季和冬季、2010 年春季和夏季、2012 年夏季和秋季均达到特旱(Dai-PDSI 值不大于 -4)程度。因此, 云南自 2009 年以来的干旱已达到最近 60 多年来罕见的程度。

图 3 是云南省 2009—2014 年逐月降水量距平百分率的时间变化情况。图 3 中仅有短暂几个月出现接近和超过 50% 的降水距平百分率, 与图 2(b) 对比, 可见这几月份恰恰是干旱程度略有减轻的

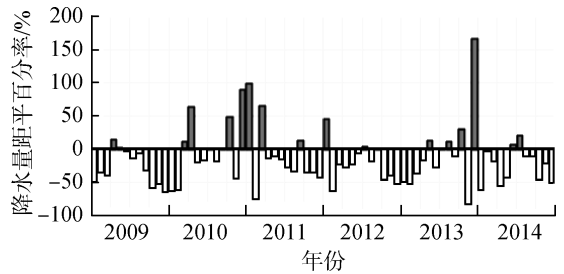
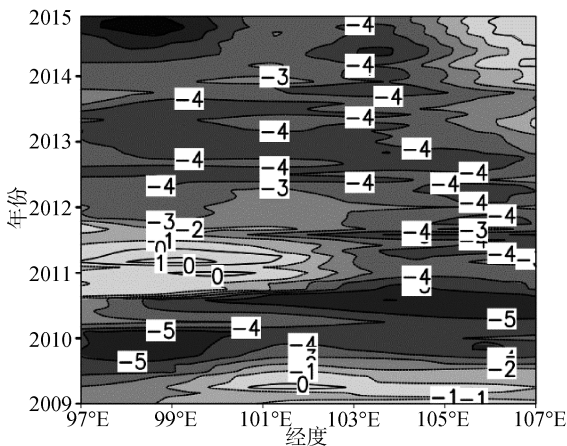


图 3 云南省逐月平均降水距平百分率的时间变化

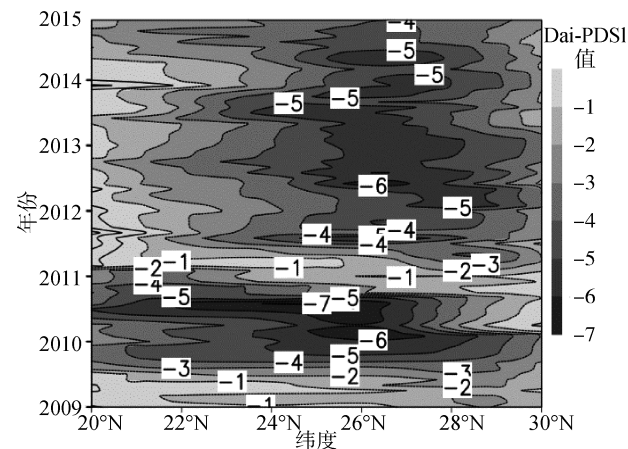
时段。此外,其余各月降水基本为负距平百分率或很小的正距平百分率,表明降水减少是云南干旱持续和加重的主要原因。

3.1.2 空间演变特征

为了全面分析 2009—2014 年云南持续干旱的空间演变规律,从经度-时间剖面图和纬度-时间剖面图(图 4)两个角度分析云南干旱的空间演变规律。从东西方向上看(图 4(a)),2009 年夏季云南东、西两侧旱情严重、中部稍弱。2009 年秋季开始,干旱从云南东西两侧向中间扩展,并逐渐在全省蔓延。从 2010 年秋季开始,云南西部旱情略有缓解,但是,东部仍存在极端干旱。2011 年冬季开始,重旱到极端干旱在全省漫延,东部在 2014 年干旱略有缓解。从南北方向上看(图 4(b)),2009 年春季到夏季,北部有轻到中旱,2009 年冬季到 2010 年夏季,极端干旱从北部贯穿到南部。2010 年冬季到 2011 年春季,干旱程度减轻。但是,从 2011 年夏季开始,极端干旱区集中在中北部($23^{\circ}\text{N} \sim 29^{\circ}\text{N}$),云南南部稍有减轻。



(a) 经度-时间剖面($21^{\circ}\text{N} \sim 29^{\circ}\text{N}$ 平均)



(b) 纬度-时间剖面($98^{\circ}\text{E} \sim 106^{\circ}\text{E}$ 平均)

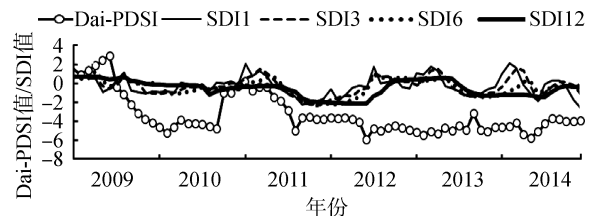
图 4 2009—2014 年云南地区 Dai-PDSI 剖面

纵观 2009—2014 年云南干旱在空间上的演变可以发现,云南极端干旱呈现中心不固定、中部和东北部干旱最重、东南部干旱稍轻的特点。

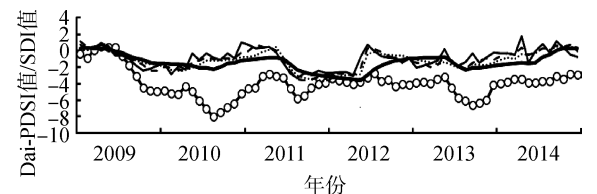
3.2 水文干旱特征

云南境内分布着众多水域及河流,气象干旱出现的同时,很多池塘、小河干涸,流域水位下降,这是水文干旱的表现。为了解云南水文干旱的程度,以金沙江、南盘江及澜沧江的控制流域为界,将云南省大致分成北部、东部和西部 3 个区域,北部归为金沙江流域,代表站取溪洛渡;东部归为南盘江流域,代表站取天一;西部归为澜沧江流域,代表站取糯扎渡。利用以这 3 个代表站的 SDI 值,分析水文干旱的演变过程。

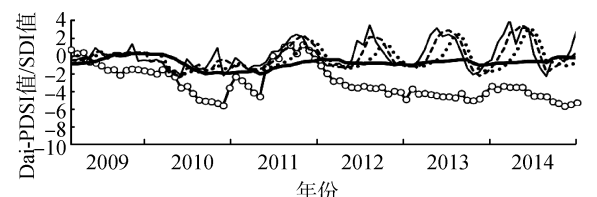
图 5 是 3 个水电站 SDI 值和 3 个区域 Dai-PDSI 值在 2009—2014 年期间的演变过程。云南北部(图 5(a))、云南东部(图 5(b))和云南西部(图 5(c))稳定地形成气象干旱的时间分别是 2009 年 2 月、2009 年 7 月和 2008 年 4 月,溪洛渡、天一和糯扎渡 SDI 达到水文干旱标准的时间分别是 2009 年 5 月、2009 年 7 月和 2008 年 12 月。在时间响应上,云南北部金沙江和西部澜沧江的水文干旱滞后于气象干旱,云南东部的南盘江水文干旱几乎与气象干旱同时出现。在强度上,云南北部金沙江和东部南盘江超过 53% 的月份水文干旱达到了重旱和特旱的强度,云南西部澜沧江的水文干旱只有中等强度。



(a) 北部,溪洛渡



(b) 东部,天一



(c) 西部,糯扎渡

图 5 代表站 SDI 值和 3 个分区 Dai-PDSI 平均值时间序列

因此,云南气象干旱出现时,水文干旱相伴而

生。3 个水电站的水文干旱过程与气象干旱均有一致的演变规律,但是,水文干旱强度略低于气象干旱,这可能与水电站用水库水量调节河道水量损失、使流域水文响应强度下降有一定关系。

3.3 干旱成因分析

干旱形成的表面原因是降水减少,根本原因是大气环流异常。云南自 2009 年进入干旱状态,到 2014 年仍未显示终止的迹象。

3.3.1 夏季环流异常

由图 2(c) 可知,2009—2014 年持续干旱过程中,夏季干旱很严重。图 6 给出了 2009—2014 年逐月 500 hPa 和 100 hPa 平均位势高度和距平的时间-经度剖面图,在这两个高度层可以清楚地看到西太平洋副热带高压和青藏高原高压的演变过程。

在图 6(a) 中,2010 年、2013 和 2014 年夏季西太平洋副高(5 880 gpm 等值线)的西边界均显著超过平均位置(130°E),西太平洋副高面积也明显大于平均值,这是对流层中层西太平洋副高显著增强的标志。2009 年夏季和 2012 年夏季,西太平洋副高西伸较少,但是,90°E—110°E 区域内仍有位势高度升高现象,表明那里可能受较强的大陆高压控制。只有 2011 年夏季西太平洋副高没有向西扩张,但是,该年春季和秋季太平洋副高面积和强度显著增强、西伸较大,表明西太平洋副高只在夏季有短暂

减弱,其他季节仍然很强。对流层顶层的青藏高原(16 800 gpm 等值线)中心基本在 90°E 以西(图 6(b)),因此,它是西部型青藏高原。钱永甫等^[20]的研究表明,西部型青藏高原可控制中国 105°E 以西的广大地区,使那里盛行下沉气流,降水显著减少。

因此,对流层中层持续被增强的西太平洋副高控制,对流层高层受青藏高原影响,对流层中层和上层持续在下沉气流控制下,均不利于形成降水,这可能是云南这几年夏季干旱严重的原因之一。

3.3.2 冬季环流异常

2009—2014 年多个冬季干旱也非常严重。在云南,冬季天气形势中南支槽占有重要地位。图 7 给出了 2009—2014 年冬季 700 hPa 位势高度、相对涡度和水汽通量距平的空间分布图,图 7 中黑色粗线代表高空槽,其中,孟加拉湾北部的槽就是南支槽,云南北部的槽是西风带气流从青藏高原北侧绕流后在高原东南侧形成的槽,称为高原东侧槽。为了解南支槽的强度,可使用文献[23]的方法,计算南支槽的强度指数。

2009—2010 年冬季是云南干旱最严重的冬季,南支槽和高原东侧槽均存在,但是,南支槽强度指数显著偏弱,槽区只有向西的水汽通量距平,水汽只集中在南支槽区附近,并没有向云南输送。在这种形势下,云南冬季降水显著偏少。在 2011/2012、2012/2013、2013/2014 和 2014 年秋冬季,云南干旱均为重旱程度。这几个冬季中,南支槽或者很弱,或者不存在,水汽不能在云南地区汇集。2010/2011 冬季云南干旱为中等程度,在图 7 中,该冬季南支槽有一定的强度,但是,槽区只有来自西风带的水汽通量距平,并未出现来自孟加拉湾或南海的水汽通量,因此,这个冬季降水仍然显著偏少。

因此,云南地区连续多个冬季南支槽偏弱,无法在槽前形成稳定的西南水汽输送气流,不利于降水形成,这可能是导致冬季降水偏少的原因之一。

3.3.3 垂直运动与水汽条件异常

图 8 和图 9 分别是云南气候基准期的垂直速度和比湿速度-时间剖面图,图 10 和图 11 分别是 2009—2014 年垂直速度距平和比湿距平的高度-时间剖面图。云南平均海拔在 2 000 m 左右,因此,图 8—11 给出了 700 hPa 以上的高度-时间剖面图。

云南 4—11 月垂直运动以上升运动(垂直速度为负值)为主(图 8);12 月—至次年 3 月 600 hPa 以上的高空基本为下沉运动(垂直速度为正值),只在 600 hPa 以下的薄层中有较小的上升运动。在 2009—2014 年期间(图 10),云南的垂直速度基本

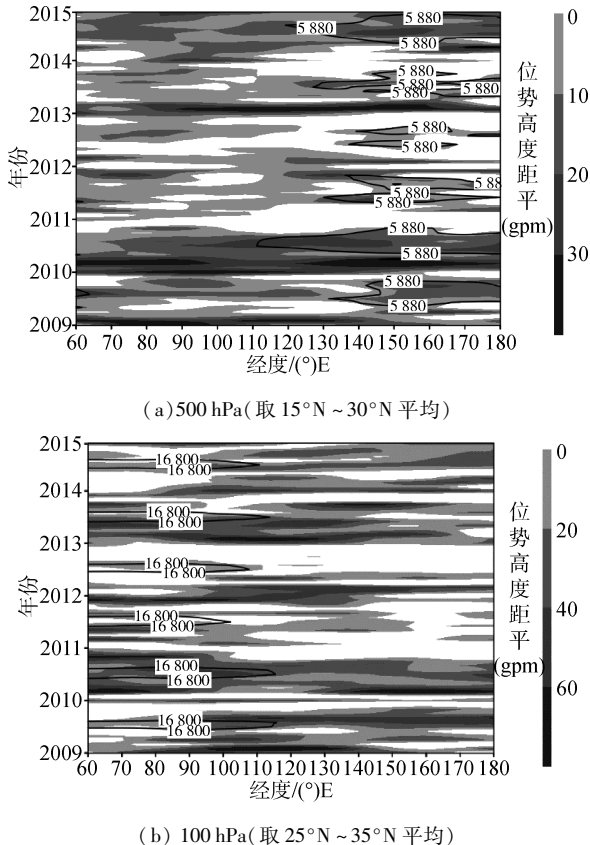


图 6 2009—2014 年逐月平均位势高度及距平时间-经度剖面

以正距平为主, 鲜有负距平, 只在 2009 年春季、2012 年夏季、2013 年春季和 2014 年春季到夏季出现较小的负距平, 表明这一时期云南地区的上升运动变得很弱, 或者下沉运动增强, 对降水非常不利。

在气候基准期中云南地区夏季比湿最大(图 9), 比湿可伸展到对流层上层, 其余季节比湿较小, 而且更多集中在对流层中下层。在 2009—2014 年(图 11), 从对流层低层到高层, 多数时间内比湿为负距平, 只有短暂时间出现比湿正距平。因此, 在

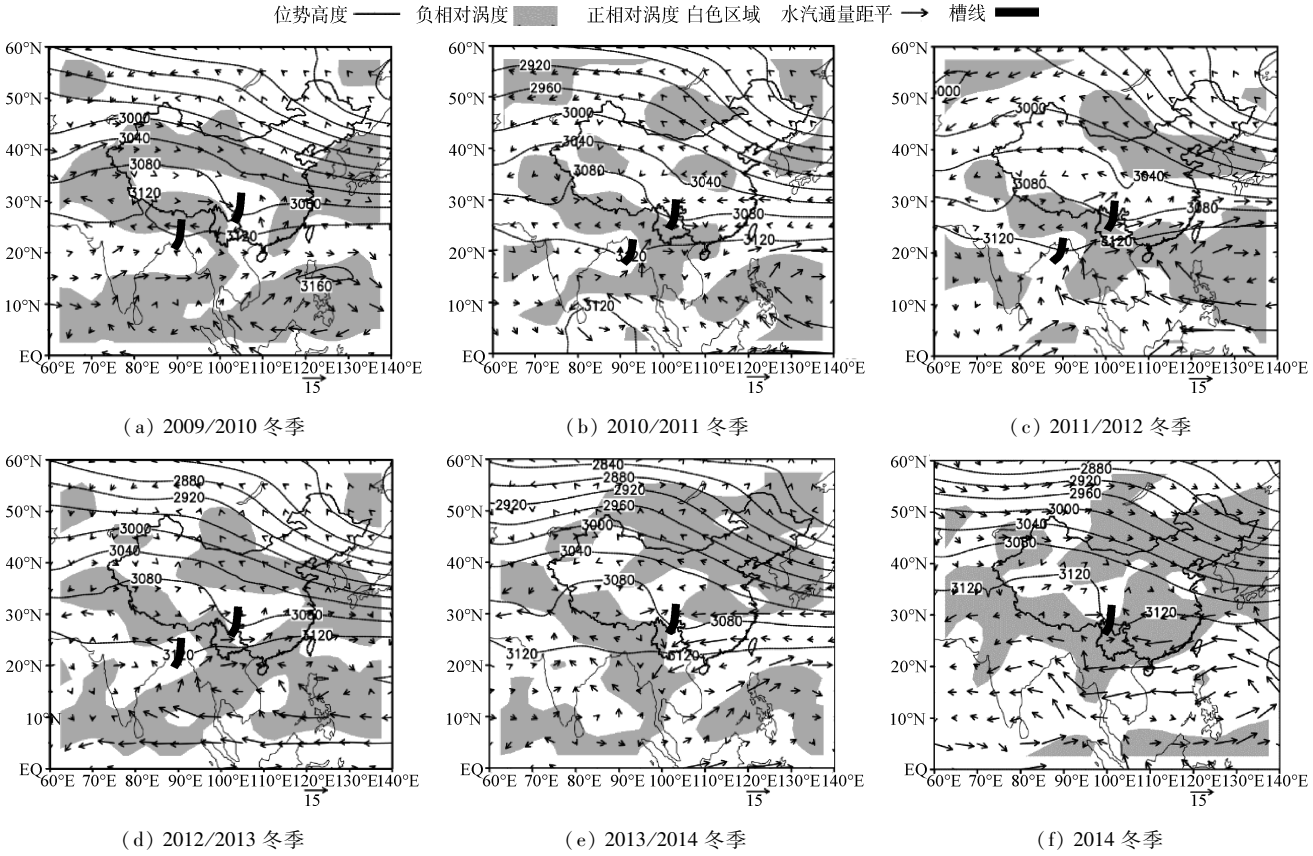


图 7 2009—2014 年冬季 700 hPa 位势高度、相对涡度和水汽通量距平空间分布 (单位: $g \cdot m \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$)

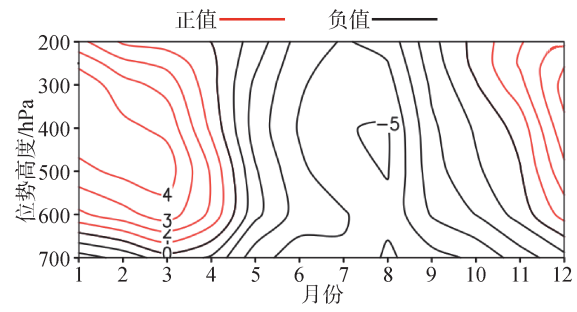


图 8 基准期平均垂直速度高度-时间剖面 (单位: $0.01 Pa/s$)

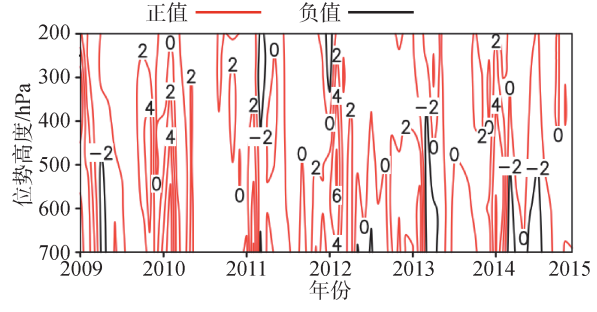


图 10 2009—2014 年垂直速度距平高度-时间剖面 (单位: $0.01 Pa/s$)

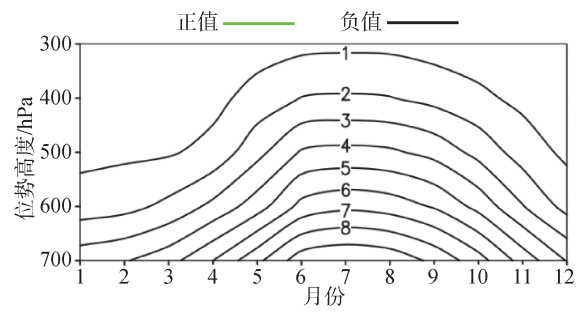


图 9 基准期平均比湿高度-时间剖面 (单位: g/kg)

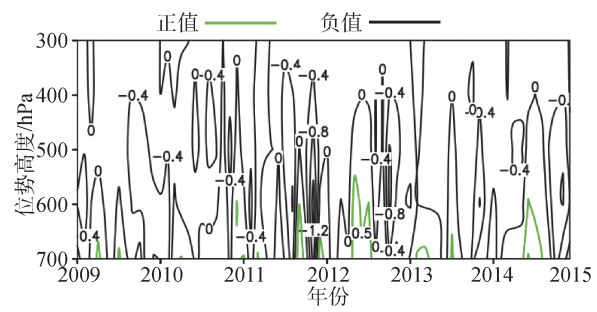


图 11 2009—2014 年比湿距平高度-时间剖面 (单位: g/kg)

2009—2014年,云南上空的大气湿度显著减少,也不利于形成降水。

4 结论

a. 云南省自1961年以来,干旱过程越来越多,干旱间隔越来越短,2009—2014年成为云南历史上有记载以来干旱持续时间最长、极端干旱月数最多、干旱强度最大的一个干旱期。从年尺度上看2010年是最干旱的一年;从季节尺度上看,2010年夏季干旱最重,2009/2010年冬季干旱次之;从月尺度上看,2010年8月是最早的月份。从空间分布上看,干旱从云南东西两侧向中部发展,2011年以后,干旱稳定在中东部,因此,云南中东部旱情最重,东南部干旱稍轻。

b. 云南境内的金沙江、南盘江及澜沧江所控制的流域在2009—2014年期间均发生水文干旱,金沙江和南盘江出现重度水文干旱,澜沧江出现中度水文干旱,水文干旱强度弱于气象干旱。

c. 2009—2014年期间夏季干旱是西太平洋副高和青藏高原共同影响的结果。在它们的双重控制下,多个夏季云南地区盛行下沉气流,不利于降水形成,垂直运动也证实了这一结论。

d. 在2009—2014年期间多个冬季南支槽显著减弱或消失,无法引导孟加拉湾水汽向云南输送,也无明显水汽在云南汇集。大气比湿的垂直分布也证实了云南地区大气干燥,水汽含量很少。

参考文献:

[1] 秦建国,张泉荣,洪国喜,等. 太湖地区2011年春季严重干旱成因与预测[J]. 水资源保护,2012,28(6):29-32. (QIN Jianguo,ZHANG Quanrong,HONG Guoxi, et al. Causes of a severe drought in spring of 2011 in Taihu Lake area and drought prediction [J]. Water Resources Protection,2012,28(6):29-32. (in Chinese))

[2] 张弘,王文卓,李琼芳,等. 不同干旱指数在唐山地区旱情评价中的应用[J]. 水资源保护,2013,29(6):64-69. (ZHANG Hong,WANG Wenzhuo,LI Qiongfang, et al. Drought evaluation of Tangshan region using multiple drought indices [J]. Water Resources Protection,2013(6):64-69. (in Chinese))

[3] 慈晖,张强,白云岗,等. 标准化降水指数与有效干旱指数在新疆干旱监测中的应用[J]. 水资源保护,2015,31(2):7-14. (CI Hui,ZHANG Qiang,BAI Yungang, et al. Application of standardized precipitation index and effective drought index in drought monitoring in Xinjiang [J]. Water Resources Protection,2015,31(2):7-14. (in Chinese))

[4] 吴志勇,林青霞. 西江流域水文干旱时空特征分析[J]. 水资源保护,2016,32(1):51-56. (WU Zhiyong,LIN

Qingxia. Analysis on spatial and temporal characteristics of hydrological drought in Xijiang River [J]. Water Resources Protection,2016,32(1):51-56. (in Chinese))

[5] 李韵婕,任福民,李忆平,等. 1960-2010年中国西南地区区域性气象干旱事件的特征分析[J]. 气象学报,2014,72(2):266-276. (LI Yunjie,REN Fuming,LI Yiping, et al. A study of the characteristics of the southwestern China regional meteorological drought events during 1960-2010[J]. Acta Meteorologica Sinica,2014,72(2):266-276. (in Chinese))

[6] 韩兰英,张强,姚玉璧,等. 近60年中国西南地区干旱灾害规律与成因[J]. 地理学报,2014,69(5):632-639. (HAN Lanying,ZHANG Qiang,YAO Yubi, et al. Characteristics and origins of drought disasters in Southwest China in nearly 60 years[J]. Acta Geographica Sinica,2014,69(5):632-639. (in Chinese))

[7] 贾春强,董延军,彭俊台,等. 南盘江流域旱涝时空分布规律研究[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(1):104-108. (JIA Chunqiang,DONG Yanjun,PENG Juntao, et al. Spatial-temporal laws of droughts and floods cross Nanpan River Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2014,28(1):104-108. (in Chinese))

[8] 黄荣辉,刘永,王林,等. 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,2012,36(3):443-457. (HUANG Ronghui,LIU Yong,WANG Lin, et al. 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,2012,36(3):443-457. (in Chinese))

[9] 胡学平,王式功,许平平,等. 2009—2013年中国西南地区连续干旱的成因分析[J]. 气象,2014,40(10):1216-1229. (HU Xueping,WANG Shigong,XU Pingping, et al. Analysis on causes of continuous drought in Southwest China during 2009—2013 [J]. Meteorological Monthly,2014,40(10):1216-1229. (in Chinese))

[10] 段旭,尤卫红,郑建萌. 云南旱涝特征[J]. 高原气象,2000,19(1):84-90. (Duan Xu,YOU Weihong,ZHENG Jianmeng. The drought and flood feature in Yunnan [J]. Plateau Meteorology,2000,19(1):84-90. (in Chinese))

[11] 李永华,徐海明,刘德. 2006年夏季西南地区东部特大干旱及其大气环流异常[J]. 气象学报,2009,67(1):122-132. (LI Yonghua,XU Haiming,LIU De. Features of the extremely severe drought in the east of Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer 2006 [J]. Acta Meteorologica Sinica,2009,67(1):122-132. (in Chinese))

[12] 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 2009/2010 [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,2010,30(4):26-35. (in Chinese))

- [13] 胡学平. 近 50 年中国西南地区干旱变化特征及冬半年持续干旱成因研究[D]. 兰州:兰州大学,2015.
- [14] 杨开斌,克来木汗·买买提,葛朝霞,等. 西南地区夏季干旱影响因素分析及干旱预测[J]. 水电能源科学, 2016, 34(3): 11-14. (YANG Kaibin, KELAIMUHAN Maimaiti, GE Zhaoxia, et al. Influencing factors analysis and prediction of summer drought in Southwest China[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2016, 34(3): 11-14. (in Chinese))
- [15] 王遵娅,任福民,孙冷,等. 2011 年夏季气候异常及主要异常事件成因分析[J]. 气象,2012,38(4):448-455. (WANG Zhunya, REN Fumin, SUN Leng, et al. Analysis of climate anomaly causation in summer 2011 [J]. Meteorological Monthly, 2012, 38 (4): 448-455. (in Chinese))
- [16] 晏红明,段旭,程建刚. 2005 年春季云南异常干旱的成因分析[J]. 热带气象学报,2007,23(3):300-306. (YAN Hongming, DUAN Xu, CHENG Jiangan. Study on a sever drought event over Yunnan in spring 2005 [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23 (3): 300-306. (in Chinese))
- [17] 晏红明,程建刚,郑建萌,等. 2009 年云南秋季特大干旱的气候成因分析[J]. 南京气象学院学报,2012,35(2):229-239. (YAN Hongming, CHENG Jiangan, ZHENG Jianmeng, et al. The climate cause of heavy drought in Yunnan in autumn 2009[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2012, 35 (2): 229-239. (in Chinese))
- [18] 黄慧君,李庆红,高月忠,等. 云南省 2009/2010 年秋冬季罕见干旱诊断分析[J]. 热带地理,2011,31(1):28-33. (HUANG Huijun, LI Qinghong, GAO Yuezhong, et al. Diagnosis of the severe drought in autumn/winter 2009—2010 in Yunnan Province [J]. Tropical Geography, 2011, 31 (1): 28-33. (in Chinese))
- [19] 严华生,李艳,晏红明,等. 热带海温变化对云南初夏干湿转换季节雨量的影响[J]. 热带气象学报,2002,18(2):165-172. (YAN Huasheng, LI Yan, YAN Hongming, et al. Influence of SST variations of the tropical ocean on rainfall during the season when dryness turns to wetness in early summer in Yunnan [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2002, 18 (2): 165-172. (in Chinese))
- [20] DAI A, TRENBERTH K E, QIAN T. A global data set of palmer drought severity index for 1870—2002; relationship with soil moisture and effects of surface warming [J]. Journal of Hydrometeorology, 2009, 5 (6): 1117-1130.
- [21] NALBANTIS I, TSAKIRIS G. Assessment of hydrological drought revisited. [J]. Water Resources Management, 2009, 23 (5): 881-897.
- [22] 钱永甫,张琼,张学洪. 南亚高压与我国盛夏气候异常[J]. 南京大学学报(自然科学版),2002,38(3):295-307. (QIAN Yongfu, ZHANG Qiong, ZHANG Xuehong. The South Asian high and its effects on China's mid-summer climate abnormality [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2002, 38 (3): 295-307. (in Chinese))
- [23] 张亮,荣艳淑,魏佳. 冬半年南支槽与乌江流域汛期径流的关系探讨[J]. 气象科学,2018,37(6):766-775. (ZHANG Liang, RONG Yanshu, WEI Jia. Relationship between wintertime southern branch trough and runoff of Wujiang basin in flood period [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2018, 37 (6): 766-775. (in Chinese))

(收稿日期:2018-01-16 编辑:徐娟)

(上接第 21 页)

- [12] CONG Z T, SHEN Q N, ZHOU L, et al. Evapotranspiration estimation considering anthropogenic heat based on remote sensing in urban area [J]. Science China Earth Sciences, 2017, 60 (4): 659-671.
- [13] 刘家宏,王建华,李海红,等. 城市生活用水指标计算模型[J]. 水利学报,2013,44(10):1158-1164. (LIU Jiahong, WANG Jiahua, LI Haihong, et al. A mathematic model for rational domestic water demand considering climate and economic development factors [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (10): 1158-1164. (in Chinese))
- [14] 郭伟,刘洪福,张文清. 佳木斯市城市蒸散发量计算[J]. 黑龙江大学工程学报,1998(3):51-53. (GUO Wei, LIU Hongfu, ZHANG Wenqing. Evaporation calculation for Jiamusi city [J]. Journal of Hei longjiang Hydraulic Engineering College, 1998 (3): 51-53. (in Chinese))
- [15] RAMAMURTHY P, BOU-ZEID E. Contribution of impervious surfaces to urban evaporation [J]. Water Resources Research, 2014, 50 (4): 2889-2902.
- [16] QIN D Y, LYU J Y, LIU J H, et al. Theories and calculation methods for regional objective ET [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54 (1): 150-157.
- [17] 刘家宏,王浩,高学睿,等. 城市水文学研究综述[J]. 科学通报,2014(36):3581-3590. (LIU Jiahong, WANG Hao, GAO Xuerui, et al. Review on urban hydrology [J]. Chinese Science Bulletin, 2014 (36): 3581-3590. (in Chinese))
- [18] 周琳. 北京市城市蒸散发研究[D]. 北京:清华大学,2015.
- [19] 夏军,石卫,王强,等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J]. 水资源保护,2017,33(1):1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (1): 1-8. (in Chinese))

(收稿日期:2018-01-01 编辑:彭桃英)