

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2023080

高雅琦,肖莺,秦鹏程,等.2022年长江上游流域夏季干旱气候特征及成因分析[J].中国防汛抗旱,2023,33(3):12-17.GAO Yaqi,XIAO Ying,QIN Pengcheng,et al.Climatic characteristics and cause analysis on the summer drought in the upper reaches of the Yangtze River[J].China Flood & Drought Management,2023,33(3):12-17.(in Chinese)

2022年长江上游流域夏季干旱气候特征及成因分析

高雅琦 肖 莺 秦鹏程 熊开国 刘 敏

(武汉区域气候中心,武汉 430074)

摘 要:基于1981—2022年夏季逐日气象干旱综合指数资料,分析了长江上游夏季干旱的气候特征,利用全球再分析资料和环流指数监测资料,从Rossby波传播、西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)和水汽输送3个方面分析了干旱期间的环流特征。结果表明:长江上游夏季干旱事件发生频率为3~4次/10 a,环流特征表现为干旱期间欧亚地区对流层中高层呈“正—负—正”的波列,异常中心分别位于欧洲北部地区,巴尔喀斯湖附近及我国大部地区。中高纬度扰动在沿西风带向东传播时,没有出现在东亚向东南方向传播的特征,造成冷空气活动位置偏北,很难影响到长江上游。副热带的西太副高偏强偏西和偏小偏东,长江上游都可能出现干旱。孟加拉湾水汽输送弱,南海水汽输送经过长江流域进入更北地区,导致长江上游处在水汽辐散区,不利于流域降水的产生。

关键词:长江上游;气象干旱;大气环流;2022年

中图法分类号:S423

文献标识码:A

文章编号:1673-9264(2023)03-12-06

0 引 言

2022年夏季,长江流域出现大范围异常高温干旱事件,长江流域夏季降雨量较常年同期偏少32.5%,为1961年以来历史同期最少^[1],平均气温、最高气温和最低气温较历史同期偏高1.9℃、2.4℃和1.4℃,均为历史同期最高,平均高温日数(日最高气温≥35℃)为36.1 d,为历史同期最多^[2]。此次高温干旱事件造成水资源供给、电力供应及人畜饮水困难,作物减产等,带来了严重经济和社会影响^[3]。长江流域的干旱事件空间特征较为明显,高温干旱事件在长江中下游地区发生频率较高^[4],但进入21世纪后,长江上游也多次发生极端干旱事件^[5],如2006年、2009年、2011年。研究干旱的最重要目的之一是弄清其成因及物理机制,从而更好地作出预测。

目前的研究多针对长江上游的干旱事件个例进行气

候成因分析,如李永华等^[6]、彭京备等^[7]、齐冬梅等^[8]针对2006年夏季西南地区干旱分析了中高纬度环流、西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)、南亚高压、低层流场、水汽输送等方面的异常气候特征。林纾等^[1]、郝立生等^[9]针对2022年夏季我国高温干旱特征分析其环流形势。影响气候异常的因素每年有其独特性,但也需要了解共性特征,这有利于提取具有指示性意义的信号因子构建干旱预测概念模型。本文对长江上游夏季历史上干旱事件的环流背景进行了综合分析,为进一步认识长江上游异常干旱发生规律,同时也为改进气候预测技术提供一些科学参考依据。

1 资料与方法

利用1981—2022年长江上游273站逐日的气象干旱综合指数(MCI),根据《区域性干旱过程监测评估》(QX/T 597—2021)中固定区域干旱过程监测方法^[10],确定长江上

收稿日期:2023-03-01

第一作者信息:高雅琦,女,工程师,E-mail:919396584@qq.com。

通信作者信息:肖莺,女,高级工程师,E-mail:125177860@qq.com。

基金项目:湖北省自然科学基金(2022CFD014);长江流域气象开放基金(CJLY2022Y07);国家重点研发计划(2018YFC1508002);中国长江电力股份有限公司(242102001)。

游气象干旱过程的开始时间、结束时间、持续时间及强度。选用美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心再分析日资料的位势高度场、风场、湿度场、温度场、长波辐射场等数据进行合成分析。西太副高指数来自国家气候中心130项环流指数中的西太平洋副热带高压面积、强度、脊线和西伸脊点指数监测。MCI数据来源于国家气象业务内网,西太副高指数来源于国家气候中心官网。

1.1 固定区域干旱监测方法

MCI考虑了60 d内有效降水、30 d内蒸散、季节尺度90 d降水和近半年尺度150 d降水的综合影响,依据MCI划分的气象干旱强度等级见表1。

表1 气象干旱强度等级划分

指数值	等级
$MCI > -0.5$	无旱
$-1.0 < MCI \leq -0.5$	轻旱
$-1.5 < MCI \leq -1.0$	中旱
$-2.0 < MCI \leq -1.5$	重旱
$MCI \leq -2.0$	特旱

当某日监测区域内站点平均干旱强度的等级达到轻旱及以上,且至少有一站干旱等级达到中旱以上,则认为该日发生区域干旱。区域日干旱强度(I_d)计算公式为:

$$I_d = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^j MCI_i$$

式中: MCI_i 为区域内干旱等级达到轻旱及以上的第*i*个站点的干旱指数; k 为区域内总站数; j 为区域内干旱等级达到轻旱及以上的站点数。

当区域日干旱强度的等级达到轻旱及以上,且连续15 d及以上,至少有1 d达到中旱及以上等级,则确定发生一次区域干旱过程。区域性干旱过程时段内第1次出现轻旱的日期,为区域干旱开始日。干旱过程发生后,当连续5 d出现区域日干旱等级为无旱时,则确定区域干旱过程结束,干旱过程结束前最后1 d区域日干旱等级达到轻旱及以上的日期为区域干旱结束日。区域性干旱过程开始日到结束日(含结束日)的总天数为区域干旱过程日数。区域累积干旱强度是区域日干旱强度与持续时间的综合,计算公式为:

$$D(n) = n^{-0.5} \sum_{i=1}^n I_d(i)$$

式中: $D(n)$ 为累积干旱强度; n 为区域干旱过程日数; $I_d(i)$ 为区域干旱过程内第*i*天的区域日干旱强度的绝对值。

1.2 T-N波作用通量

利用对数气压坐标下二维的T-N波作用通量能够很好地识别纬向非均匀气流中振幅较大的Rossby波的传播特征,其公式为^[11]:

$$TNF = \frac{p \cos \varphi}{2|U|} \left(\frac{u}{a^2 \cos^2 \varphi} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda^2} \right] + \frac{v}{a^2 \cos^2 \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] \right. \\ \left. - \frac{u}{a^2 \cos^2 \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] + \frac{v}{a^2} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda^2} \right] \right)$$

其中

$$\psi' = \frac{\Phi'}{f}$$

式中: φ 为纬度; λ 为经度; a 为地球半径; f 为科氏参数; p 为相对1 000 hPa的气压比值; $U=(u, v)$ 为风场的气候场; Φ' 为位势高度场相对于气候场的扰动; ψ' 为准地转流函数。

2 长江上游流域夏季干旱气候特征

长江上游1981—2022年夏季逐日(6月1日至8月31日)的 I_d 如图1所示,其中虚线为 $I_d = -0.5$ 的等值线,表示长江上游出现气象干旱。长江上游的干旱年际波动较大,干旱在同一时间段连续出现概率较小。除了2006年、2011年和2022年,干旱持续时间在10~30 d。日干旱强度小于-1的时间出现在2006年、2011年和2022年的8月中后期,而这3年干旱持续时间在50 d以上,说明前期干旱持续影响后,进入盛夏干旱程度明显增强。

根据QX/T 597—2021中固定区域干旱过程监测方法,识别出长江上游地区1981—2022年夏季的17场干旱过程,结果如表2所示。长江上游夏季干旱事件发生频率为3~4次/10 a,平均干旱历时为34 d。20世纪80年代至20世纪末干旱事件持续时间在20~30 d。1993年按照标准定义

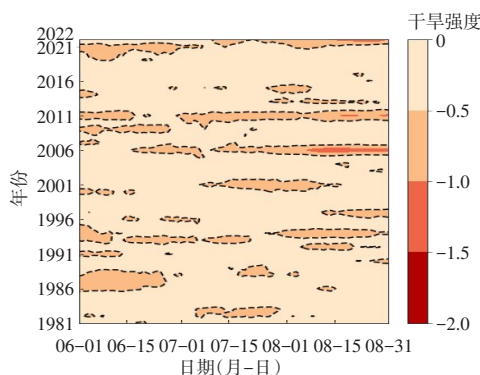


图1 长江上游1981—2022年夏季逐日干旱强度

表2 长江上游夏季干旱事件监测

开始时间(年-月-日)	结束时间(年-月-日)	持续时间/d	强度
1983-07-06	1983-07-30	25	3.03
1986-06-01	1986-06-19	19	3.09
1988-06-03	1988-06-25	23	3.25
1988-07-18	1988-08-04	18	2.31
1992-08-06	1992-08-28	23	3.04
1993-06-01	1993-07-21	51	4.57
1994-07-26	1994-08-31	37	4.70
1997-08-12	1997-08-31	20	3.25
2000-06-01	2000-06-17	17	2.35
2001-07-07	2001-08-17	42	4.45
2006-06-17	2006-08-31	76	7.89
2009-06-01	2009-06-27	27	3.58
2011-06-01	2011-06-22	22	3.31
2011-06-30	2011-08-31	63	6.77
2013-07-28	2013-08-28	32	3.11
2021-06-01	2021-07-07	37	4.08
2022-07-11	2022-08-31	52	6.67

的持续时间是51 d,但图1可以看到1993年6月11—14日,7月6—7日日干旱等级为无旱,在此期间有短暂降水过程缓和干旱。进入21世纪后发生了3次超长持续性干旱,分别是2006年76 d,2011年63 d,2022年52 d,这3年干旱的强度大,给长江上游带来了严重的经济损失^[7,12]。

为了解长江上游干旱期间大气大尺度环流特征,图2给出了17次干旱过程期间所对应的同期100 hPa和500 hPa位势高度距平场(填色)的合成,其中打点区域表示95%显著性检验。可以看到对流层高层和中层均反映出欧洲北部地区位势高度距平场为正值,巴尔喀斯湖附近为负值,我国大部地区为正值,表现出“正—负—正”的大圆波列。值得注意的是欧洲北部的高压脊,巴尔喀斯湖附近

的低压槽,以及我国的高压在在对流层中高层表现出明显的正压结构,当气流南北运动弱时,有利于正压稳定维持。长江上游上空的正位势高度距平通过了显著性检验,说明该因子对流域干旱影响是显著相关的。图2中给出了南亚高压16 800 gpm特征线(图2(a)红线)和西太副高5 880 gpm特征线(图2(b)红线)的夏季气候态状况,以及干旱期间位势高度距平场(黑线等值线)的合成,南亚高压和副热带高压的位置和面积接近气候态,强度大于气候态,说明部分干旱年副高的面积偏小,脊线偏东,后面将仔细分析副高特征。

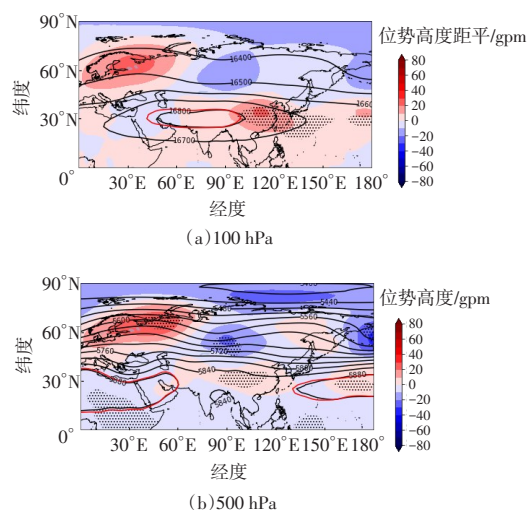


图2 长江上游干旱期间对应的100 hPa和500 hPa位势高度场及其距平场的合成

3 大气环流异常特征

3.1 Rossby波传播

长江流域降水是由低纬地区的水汽输送和中高纬地区的冷空气活动共同造成的,中高纬冷空气活动及南下往往伴随长波槽脊的传播发生,波动活动发生异常,必然造成冷空气活动异常。对流层中上层Rossby波的能量由西北大西洋或东欧平原向东至东亚及北太平洋地区频散,对影响我国夏季气候的重要天气系统起着形成与维持的重要作用^[13]。T-N波作用通量可以很好地诊断中高纬波动能量的传播特征。图3是干旱发生前20~11 d、干旱发生前10~1 d及干旱期间500 hPa高度距平场及T-N波作用通量场合成分布情况,箭头代表波动能量传播方向。干旱发生前20~11 d来自北大西洋的扰动分两支传播,一支沿中高纬

向东传播,另一支向低纬度的北非传播,阿拉伯半岛至伊朗为正距平,说明伊朗高压正在形成加强。干旱发生前11~1 d低纬度的北非传播支明显加强,伊朗高压加强东伸,青藏高原上空正距平形成,而中高纬度的扰动波列明显减弱,东亚纬向环流特征明显。干旱发生期,中高纬波动

活动加强,继续向东传播,但没有出现在东亚向东南方向的传播特征,导致来自巴湖至贝湖地区的冷空气活动偏北。可以看出,Rossby波传播发生异常,造成冷空气活动偏北,而长江流域持续受异常高压控制,引发长江流域异常干旱事件。

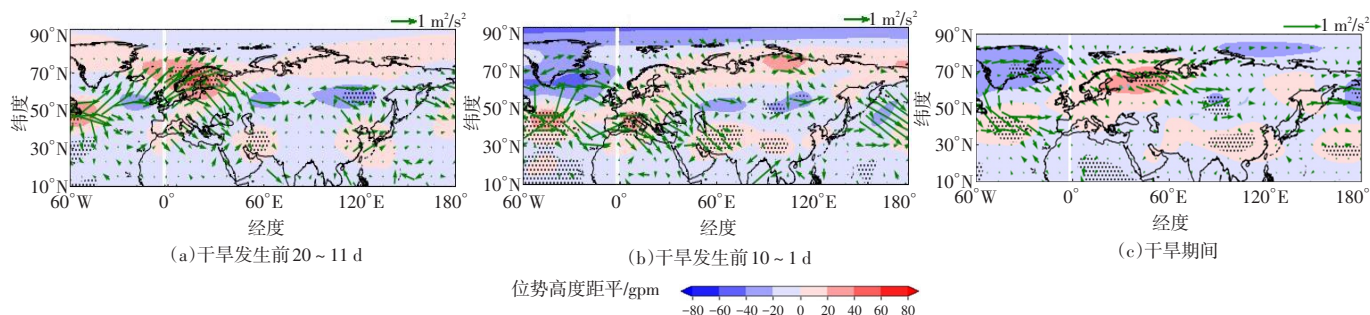


图3 干旱发生前期及干旱期间500 hPa高度距平场和T-N波作用通量场合成

3.2 西太副高

西太副高是影响长江流域降水非常重要的副热带系统,图4给出了长江上游干旱期间所对应的同期西太副高西伸脊点指数特征值,可以看出12次干旱事件西太副高的脊点较气候态偏西,而有5次干旱事件脊点偏东。脊点偏西年通常伴随干旱面积偏大、强度偏强,通过对12次干旱事件对应时间的向外长波辐射(OLR)距平场合成图(图5)来看,在菲律宾及其以东地区为OLR负距平区,西太平洋暖池上空对流活动强,使得哈德莱(Hadley)环流增强且它的下沉区偏北,从而造成西太副高偏强且位置偏北^[14],还可以看到,夏季青藏高原为OLR正距平区,表明凝结潜热较常年是减弱的,青藏高原凝结潜热减弱可致西太副高偏强且位置偏北^[15]。

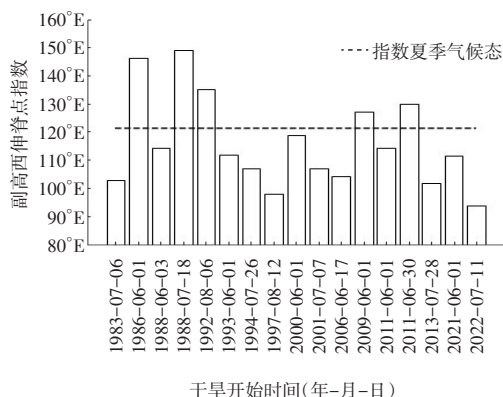


图4 长江上游17次干旱事件对应的西太副高西伸脊点指数

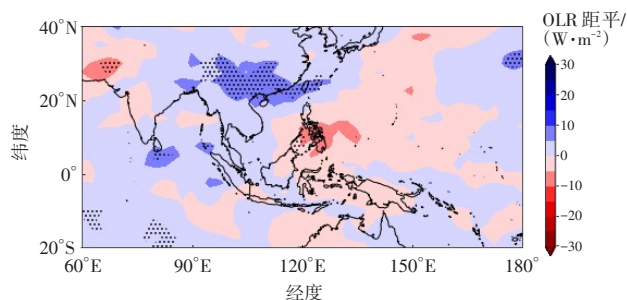


图5 干旱期间OLR距平场合成

脊点偏东年通常伴随干旱面积偏小,通过对脊点偏东年的干旱前期和同期环流形势演变来看,副高较早的加强北抬,整个长江流域受正位势高度距平控制,导致长江流域温高雨少。但随着北方冷空气活动及台风北上导致副高东退,长江流域自西向东出现降水过程,干旱略有缓解。但由于冷空气势力不足、冷空气路径偏东,长江上游仍受正位势高度距平控制,长江上游干旱维持,但高温开始减弱。造成长江上游干旱时西太副高表现出两种形态,一是西太副高偏强偏西,长江上游大部地区受副热带高压控制,容易出现高温少雨天气;另一种是西太副高偏小偏东,配合中高纬度环流不利于暖湿空气和冷空气影响长江上游,导致少雨干旱,与前者的差异是高温特征并不明显。

3.3 水汽特征

水汽输送的通道与输送通量的大小对降水具有重要影响,长江上游的水汽来源主要有两个:一是来自印度洋

经孟加拉湾和中南半岛,二是来自南海及西太平洋^[6]。从干旱期间对流层(1 000~300 hPa)整层积分水汽输送通量距平场合成(图6)可以看到,西北太平洋东风偏强,水汽异常向西输送减弱了孟加拉湾西南水汽向长江流域的输送,同时西北太平洋的偏东气流在南海转向,并入东亚副热带夏季风,加强了向东亚地区的水汽输送,水汽基本上是经过长江流域而进入更北地区。从水汽通量散度场也可以看到,长江上游东部至长江中游处在水汽辐散区,不利于流域降水的产生。

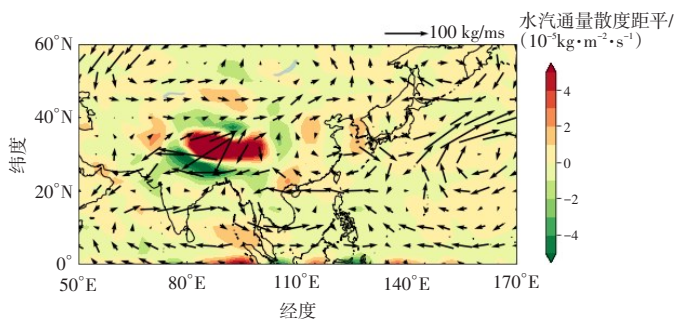


图6 干旱期间对流层(1 000~300 hPa)整层积分的水汽输送通量距平场及水汽通量散度距平场合成

4 结 论

本文通过对长江上游地区夏季MCI时间序列的分析,确定了1981—2022年长江上游夏季干旱事件,从Rossby波传播、西太副高和水汽输送3个方面进行了分析,讨论了大尺度环流异常与长江上游干旱的关系,得到如下结论:

(1)长江上游夏季干旱事件发生频率为3~4次/10 a,进入21世纪后发生了3次超长持续性干旱,分别是2006年、2011年和2022年,受持续性干旱影响进入盛夏干旱异常程度明显增强。

(2)夏季干旱期间欧亚地区对流层中高层呈“正—负—正”的大圆波列,异常中心分别位于欧洲北部地区,巴尔喀斯湖附近及我国大部地区。

(3)环流异常协同作用的影响。干旱前期,源自北大西洋地区的异常扰动向低纬度的北非传播,伊朗高压形成并不断加强,干旱期间中高纬波动活动向东传播,在东亚地区没有出现向东南方向的传播特征,造成冷空气活动位置偏北、偏东,很难影响到长江流域。副热带的西太副高表现出两种形态,一是西太副高偏强偏西,长江上游大部地区

受副热带高压控制,容易出现高温少雨天气;另一种是西太副高偏小偏东,配合中高纬度环流不利于暖湿空气和冷空气影响长江上游,导致少雨干旱。来自孟加拉湾的水汽明显减弱,来自南海的水汽经过长江流域而进入更北地区,导致长江上游处在水汽辐散区,不利于流域降水的产生。

以上研究基于长江上游夏季干旱期间大气大尺度环流合成分析,侧重于对环流异常的特征进行分析。全球气候变暖引起极端气候事件频发、重发已成为气候新常态^[17],需要从气候变暖背景下环流异常、三大洋(太平洋、大西洋、印度洋)海温异常和极冰等多方面综合认识各圈层的协同作用机制,这样才能在掌握持续干旱的形成规律及其预报预测方法上取得更好效果。

参考文献

- [1] 林纾,李红英,黄鹏程,等.2022年夏季我国高温干旱特征及其环流形势分析[J].干旱气象,2022,40(5):748-763.
- [2] 夏军,陈进,余敦先.2022年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J].水利学报,2022,53(10):1143-1153.
- [3] 夏智宏,刘敏,秦鹏程,等.2022年长江流域高温干旱过程及其影响评估[J].人民长江,2023,54(2):21-28.
- [4] 姜雨彤,郝增超,冯思芳,等.长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征[J/OL].水资源保护.http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20220718.1138.004.html.
- [5] 李泽明,陈皎,董新宁.重庆2011年和2006年夏季严重干旱及环流特征的对比分析[J].西南大学学报(自然科学版),2014,36(8):113-122.
- [6] 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.
- [7] 彭京备,张庆云,布和朝鲁.2006年川渝地区高温干旱特征及其成因分析[J].气候与环境研究,2007,12(3):464-474.
- [8] 齐冬梅,李英,李跃清,等.2006年高原夏季风强弱变化及其与西南地区东部夏季气温和降水的关系[J].干旱气象,2015,33(4):555-565.
- [9] 郝立生,马宁,何丽辉.2022年长江中下游夏季异常干旱高温事件之环流异常特征[J].干旱气象,2022,40(5):721-732.
- [10] 全国气候与气候变化标准化委员会.区域性干旱过程监测评估方法:QX/T 597—2021[S].北京:气象出版社,2021.
- [11] Takaya K, Nakamura H. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow[J]. Journal of the Atmospher-

- ic Sciences, 2001, 58: 608–627.
- [12] 邹旭恺, 高荣, 陈鲜艳, 等. 2022年长江流域夏伏旱监测评估[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(10): 12–16.
- [13] 施春华, 金鑫, 刘仁强. 大气动力学中三种Rossby波作用通量的特征差异和适用性比较[J]. 大气科学学报, 2017, 40(6): 850–855.
- [14] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响[J]. 大气科学, 1994, 18(2): 141–151.
- [15] 赵声蓉, 宋正山, 纪立人. 青藏高原热力异常与华北汛期降水关系的研究[J]. 大气科学, 2003, 27(5): 881–893.
- [16] 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.
- [17] 张强. 科学解读“2022年长江流域重大干旱”[J]. 干旱气象, 2022, 40(4): 545–548.

Climatic characteristics and cause analysis on the summer drought in the upper reaches of the Yangtze River

GAO Yaqi, XIAO Ying, QIN Pengcheng, XIONG Kaiguo, LIU Min

(Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074)

Abstract: Based on the daily meteorological drought comprehensive index data in the summer of from 1981 to 2022, the study analyzed in detail the climate characteristics of summer drought in the upper reaches of the Yangtze River. Based on global reanalysis data and the circulation characteristic index, the circulation characteristics during drought are analyzed from Rossby wave propagation, West Pacific subtropical high(WPSH) and water vapor transport. The results showed that the frequency of summer drought events in the upper reaches of the Yangtze River was 3-4 times every 10 years. The “+ - +” circulation pattern was located in the middle and upper troposphere of Eurasia during the drought period. The anomaly centers are located in northern Europe, near the Balkhas Lake and most of China. The mid-high latitude disturbance propagates eastward along the westerlies, without the characteristic of propagating southeastward in East Asia, resulting in the northward location of cold air activity, which hardly affected the upper reaches of the Yangtze River. Drought may occur when WPSH in the subtropical zone was strong to the west and small to the east, and drought may occur in the upper reaches of the Yangtze River. The water vapor transport from the Bay of Bengal was weak, and that from the South China Sea passed through the Yangtze River and influenced the northern region, resulting that the upper reaches of the Yangtze River was in divergence, which was not conducive to precipitation in the basin.

Keywords: upper reaches of the Yangtze River; meteorological drought; atmospheric circulation; 2022

责任编辑 姚力玮