大气科学学报 2022 年 第 45 卷 第 1 期:40-50
论 著 http://dqkxxb.cnjournals.org

青藏高原春末土壤湿度对初夏降水的影响

央金卓玛①,罗布②*,卓嘎③④
① 西藏自治区人工影响天气中心,西藏 拉萨 850000;
② 西藏自治区气象台,西藏 拉萨 850000;
③ 西藏高原大气环境科学研究所,西藏 拉萨 850000;
④ 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,四川 成都 610072
*联系人,E-mail:93343586@ qq.com

2021-05-06 收稿,2021-12-02 接受
国家自然科学基金资助项目(41765012);高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放基金项目(SZKT201907);西藏自治区科技厅中央引导地方项目(XZ202001YD0021C)

摘要 为了研究青藏高原(简称高原)春末(5 月)土壤湿度与初夏(6 月)降水的关系,利用 1979—2019 年 ERA-Interim 土壤湿度月平均资料和同时段高原 109 站观测降水资料,分析了高原春季土壤湿度与汛期(5—9 月)降水之间的关系。结果表明:春末表层(0~28 cm)土壤湿度与高原初夏降水呈显著的正相关,在空间上土壤湿度南北反向模态对应高原初夏降水的南北偶极子模态,并且存在两个高相关区域;在此基础上,定义了一个反映春末土壤湿度西北与东南梯度的指数(I_{smg}),发现该指数与 6 月降水南北反向模态存在明显的负相关,且这种关系从 2000 年以来更为显著。通过一组 I_{smg} 加倍的数值敏感性试验,结果得知高原初夏降水正常和偏多年 I_{smg} 加倍后能够通过增强高原热源,抽吸周边大气向高原中部聚拢,造成高原中部唐古拉山脉一带大气增温增湿、导致降水增加明显,不过这种机制在旱年作用不太明显。

关键词
青藏高原;
土壤湿度;
初夏降水;
土壤湿度梯度指数;
敏感性试验

在气候变暖的大背景下,青藏高原(简称高原,下同)的降水呈现复杂的变化特征。有研究表明,在 20 世纪高原大部分地区降水量在逐年递减,尤其是高原南部降水减少最为明显,而高原东北部和东南部的降水呈增加趋势(韦志刚等,2003;马晓波和胡泽勇,2005)。进入 21 世纪高原大部分降水则表现为降水量增多而降水日数减少的特征(韩熠哲等,2017),呈明显的极端降水显著增多趋势(靳铮等,2020;汤秋鸿等,2020)。

影响高原汛期降水的主要影响因子有海温和大气环流变化。假拉和周顺武(2002)通过将高原降水与印度洋海温、暖池区域的对流活动建立统计联系来进行季节预测,认为夏季高原东部降水与前期印度洋北部海温存在良好的正相关;周顺武和假拉(2003)通过分析高原夏季旱涝年份的印度洋区域大气环流差异表明索马里赤道海区的风场异常与高原夏季降水的关系最为密切。同时,西太平洋海温变化及其大气响应同样能够影响高原夏季降水,周顺武等(2001)通过合成不同 ENSO 位相研究表明,在 ENSO 的暖(冷)位相期高原大部分地区夏季降水以偏少(多)为主。其次,高原降水还显著受到副热带高原、伊朗高原以及南亚高压位置摆动和强度大小的影响(林志强等,2015;马秀梅等,2017)。但是,目前大多数的研究都是基于高原降水的季节尺度分析,没有考虑到其季节内差异,且很少涉及陆面过程对降水的影响分析,而高原降水存在显著的季节内振荡特征(周顺武等,2011;次仁央宗等,2016)。同时陆-气相互作用对区域气候异常的影响研究日渐成熟,作为陆地下垫面的一个重要物理量,土壤湿度与气候要素之间存在着互馈效应(马柱国

引用格式:央金卓玛,罗布,卓嘎,2022.青藏高原春末土壤湿度对初夏降水的影响[J].大气科学学报,45(1):40-50.
Yangjin Z M,Luo B,Zhuo G,2022.Effect of soil moisture in late spring on precipitation in early summer over the Qinghai-Tibet Plateau [J].Trans Atmos Sci,45(1):40-50.doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20210506001.(in Chinese).

等,2000;Tuttle and Salvucci,2016),因此土壤湿度常被用于气候预测参量,且中高纬度的土壤湿度对大气的影响与海温的作用相当(National Research Council,1994;马柱国等,2001)。国内外已有不少学者着眼于土壤湿度与降水的相互作用研究(Walker and Rowntree,1977;左志燕和张人禾,2007)。

近年来,高佳佳等(2021)利用奇异值分解方法研究了高原春季土壤湿度与夏季降水的关系,其中前两个模态分别对应高原北部春季土壤湿度较大时,对应高原北部地区和东南部地区夏季降水偏少,第二模态说明高原大部分地区春季土壤湿度较大时,高原北部、中部地区夏季降水偏多,南部夏季降水偏少。从该研究结果来看,高原春季土壤湿度的不同模态对应着夏季降水的不同分布形态。但是该研究没有考虑到土壤湿度和降水的季节内差异,也没有给出物理解释。因此,本文利用 ERA-Interim 逐月土壤湿度资料和高原降水资料,分析前期土壤湿度和后期降水的关系。在此基础上,通过一组敏感性试验来进一步验证前期土壤湿度的变化对后期降水的影响,并给出了可能的物理机理。

1　资料、方法和模式简介

1.1　资料简介

文中使用的观测资料为国家气候中心提供的青藏高原地区 1979—2019 年 109 个气象站点的汛期逐月降水资料,各站点分布如图 1,可见高原大部分观测资料集中在东部地区而高原西部观测站点稀疏。

文中土壤湿度资料来自 1979—2019 年欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA-Interim 数据。研究表明,ERA-Interim 再分析资料揭示的中国土壤湿度分布特征和量值与实况最为接近(左志燕和张人禾,2008;Liu et al.,2014)。该资料含有 4 层土壤湿度数据,层次分别为:0~7 cm、7~28 cm、28~100 cm、100~289 cm,单位为 m^3/m^3(Van den Hurk et al.,2000)。

1.2　方法和模式简介

1.2.1　SVD 方法

在讨论高原春季土壤湿度和汛期降水关系时使用奇异值分解(SVD,Singular Value Decomposition)方法(李丽平等,2018)。

1.2.2　WRF 模式简介和试验方案

WRF 模式(Weather Research and Forecast Model)是美国环境预测中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合开发的中尺度天气预报模式和同化系统。采用完全可压缩以及非静力模式,水平方向采用 Arakawa C 网格点,垂直方向则采用地形跟随质量坐标。

物理参数化方案设置中微物理过程采用新的 Thompson 方案;短波辐射采用 Rrtmg scheme 方案;长波辐射采用 RRTMG 方案;陆面过程采用 Noah 方案;积云参数化采用 Tiedtke scheme 方案;边界层方案采用 Mellor-Yamada-Janjic(MYJ)方案。

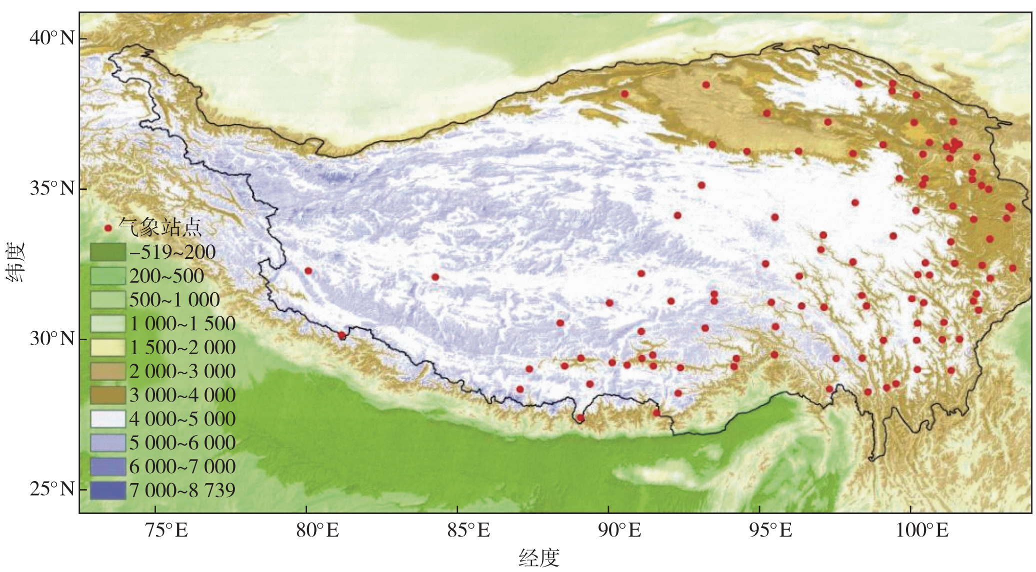

图 1　青藏高原气象站点和海拔高度(阴影,单位:m)分布

Fig.1　Distribution of meteorological stations and altitudes (shaded part, unit: m) on the Qinghai Tibet Plateau

文中模式采用 1°×1°的 6 h 间隔 NCEP/FNL 资料为模式初始场和侧边界条件,积分时间分别为:2009 年(旱年)、2017 年(涝年)和 2018 年(正常年)的 5 月 1 日—6 月 30 日,水平分辨率为 27 km,垂直层次为 34 层,时间步长为 180 s,地图投影采用兰波托投影,模拟的网格区域中心定为(88.0°E,33.9°N),网格格点数为 115×70。利用以上参数分别进行控制试验和改变土壤湿度的敏感性试验,分析前期土壤湿度变化对后期降水以及其他物理量的影响研究时统一采用敏感性试验减去控制试验的差值。

2　诊断分析结果

高原大部分地区处于季节性冻土带,而高原春季土壤正处于剧烈的反复冻融过程中,其冻融过程伴随着土壤水分、二氧化碳等温室气体的释放与存储过程(李述训等,2002;杨梅学等,2006)。土壤水分通过改变大气垂直层的湿度梯度、下垫面反射率、粗糙度等变量直接影响感热、潜热的参数,高原春季感热的变化对中国东部季风降水有重要的指示作用(姚秀萍等,2019;王欢和李栋梁,2020),土壤特殊的记忆性能将高原春季温度、降水等气象信息通过水分形式储存在土壤中,不同于感热的瞬变特性,土壤湿度的演变更加稳定,有利于作为汛期降水预测的关键因子(Shukla and Mintz,1982)。考虑到高原汛期降水存在显著的季节内差异,以下将逐月分析高原汛期降水和春季土壤湿度之间的联系。

2.1　高原春末土壤湿度和初夏降水的关系

首先将 4 月和 5 月 4 层土壤湿度和 5—9 月降水场逐月分别进行 SVD 分解。表 1 是各场相关系数,从表 1 可见,除土壤湿度与降水的关系表现出很高的同期相关外,5 月 0~7 cm、7~28 cm 两个表层土壤湿度与 6 月降水的相关系数均超过了 0.7,4 月各层土壤湿度与汛期降水的相关系数未超过 0.7,5 月土壤湿度与汛期其他时段(7 月、8 月、9 月)降水的相关系数也未能超过 0.6,春末土壤湿度与降水的关系在一个月内达到最佳,表明高原春季区域的浅层土壤湿度与大气的反馈效应在一个月内持续性最佳,超过一个月后大气变化主要受到海温等外强迫的影响(邓元红等,2018)。

表 1　4 月和 5 月各层土壤湿度与 5—9 月降水场相关系数

Table 1　Correlation coefficient between soil moisture of each layer in April and May, and precipitation from May to September

土壤深度/cm	土壤湿度月份	相关系数				
		5 月降水	6 月降水	7 月降水	8 月降水	9 月降水
100~289	4	0.63	0.56	0.51	0.50	0.53
	5	0.69	0.64	0.56	0.49	0.56
28~100	4	0.59	0.52	0.50	0.48	0.56
	5	0.70	0.69	0.50	0.55	0.57
7~28	4	0.52	0.54	0.52	0.46	0.54
	5	0.78	0.72	0.46	0.49	0.59
0~7	4	0.52	0.54	0.52	0.49	0.53
	5	0.82	0.70	0.44	0.45	0.57

由于 5 月表层(0~28 cm)土壤湿度和 6 月降水的相关最佳,以下将重点分析两者的关系。图 2 为 5 月表层土壤湿度与 6 月降水场的异类相关图。SVD 第一模态贡献总方差的 46.64%,能够解释 5 月土壤湿度与 6 月降水的大部分相关,其中左场(图 2a)表现为南北偶极型,这与高原汛期降水的 EOF 第一模态分布十分相似,表明跟土壤湿度相关密切的降水场是高原主要的降水模态。土壤湿度相关场(图 2b)也表现为类似南北反向变化分布形态,表明高原 5 月土壤湿度的南北梯度变化与 6 月降水的第一模态关系密切,既南部土壤湿度高而北部湿度低时容易出现 6 月降水“南涝北旱”模态,反之亦然。

为了进一步分析土壤湿度和降水之间的年际协同变化关系,分别将高原西北部(86°~93°E,35°~38°N)和东南部(97°~102°E,28°~31°N)两个关键区域(图 2b 中黑框区域)的土壤湿度与 6 月降水第一模态时间序列(PC1)计算相关发现两者的相关系数分别为-0.21(西北区)和 0.28(东南区)。而将南北两个土壤湿度梯度与降水计算相关则能达到-0.34,通过了信度为 0.05 的显著性检验。显然南北两个土壤湿度梯度与降水的关系更为密切。因

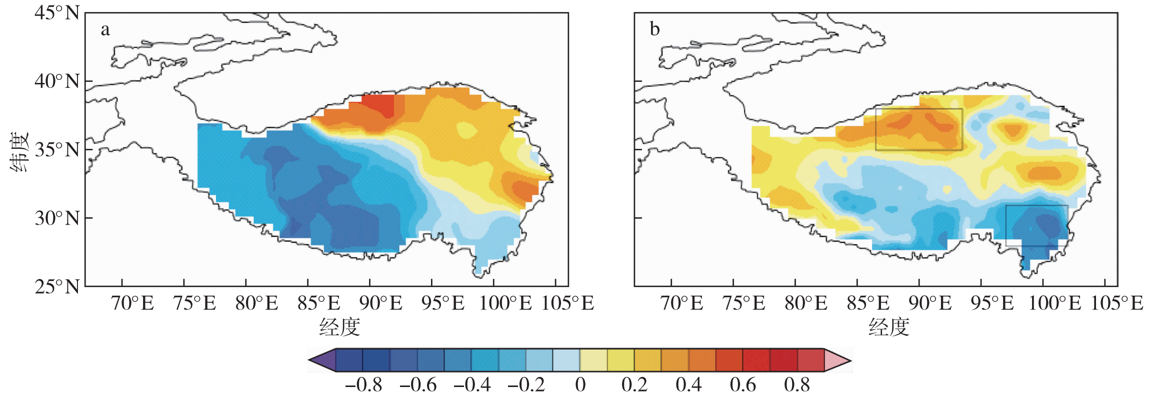

图 2　高原 6 月降水(a)与 5 月表层土壤湿度(b)的 SVD 相关系数分布(b 中黑色方框是相关系数绝对值超过 0.7 的区域)

Fig.2　SVD correlation coefficient distribution of (a) precipitation in June and (b) soil moisture in May on the plateau (the black box in Fig b is the area where the absolute value of the correlation coefficient exceeds 0.7)

此,定义一个计算 1979—2019 年 5 月高原土壤湿度梯度的公式(soil moisture gradient index,I_{smg})。

$$I_{smg}=S_{td}(S_{WS\_sm})-S_{td}(S_{ES\_sm})。\quad (1)$$

式中:S_{WS_sm}、S_{ES_sm}分别为高原西北部(86°~93°E,35°~38°N)和东南部(97°~102°E,28°~31°N)土壤湿度序列;S_{td}为标准化简写;I_{smg}为高原土壤湿度梯度指数。

图 3 是 I_{smg}与 6 月降水 PC1 变化曲线。可以看出在 41 a 中 I_{smg}和降水时间序列的距平符号有 27 a 不同,距平异号率为 65.85%,尤其在 2000 年以来,两者的年际变化更是趋于完全相反,异号率达到 75%。也就是说当前期 I_{smg}指数为负时,6 月降水大多呈现北多南少型,因此,可以将 I_{smg}作为 6 月降水预测较为稳定的前兆信号。

土壤湿度与反照率和地气温差等变量直接相关,能够在一定程度上反映高原春季感热的变化,土壤湿度的变化通过影响局地蒸发量进而与潜热相关密切,所以该 I_{smg}实际上与高原 5 月热源的南北差异息息相关。

3　春末土壤湿度对初夏降水分布影响的数值试验

鉴于 I_{smg}与高原降水第一模态关系密切(南北偶极型),那么是否存在一种与高原热源相联系的内在机制使得土壤湿度梯度的变化能够引起高原降水雨带南北的摆动。为了验证这种推测,下面将通过一组数值敏感性试验来进一步分析两者的关系。模式方案如下:将高原 5 月西北部(86°~93°E,35°~38°N)土壤湿度值减少一半,同时将东南区(97°~102°E,28°~31°N)的土壤湿度值增加一倍,以此达到将 I_{smg}加倍的目的,通过敏感性试验减去控制试验的差值分析该情景下 6 月降水的响应情

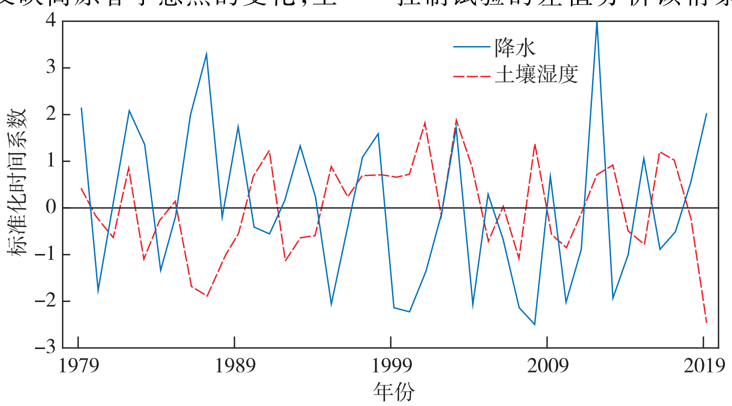

图 3　1979—2019 年高原地区 5 月土壤湿度梯度指数(红色虚线)与 6 月降水第一模态时间序列变化曲线(蓝色实线)

Fig.3　I_{smg} (red dotted line) and precipitation PC1 (blue solid line) from 1979 to 2019

况,出于计算量的考虑,分别选择涝年、旱年和正常年份来代替 1979—2019 年气候态进行敏感性试验。本文中选择年份的标准是将高原平均降水序列标准化之后选择超过 1 的为涝年,小于 1 的为旱年、在正负 1 之间的为正常年份,其次选择高原区域内降水分布无明显异常的年份进行模拟,这样选择出来的正常年份是 2018 年、涝年是 2017 年、旱年是 2009 年。

首先评估 WRF 模式对高原 6 月降水的模拟能力。图 4 是 2018 年 6 月 TRMM 卫星降水分布(图 4a)和 WRF 模式控制试验模拟结果(图 4b)。由图可见,WRF 能够基本再现高原降水东南多西北少的分布形态,尤其是较好地刻画了雅鲁藏布江沿岸和东南部的两个大值中心,但是在量级上存在一定的高估,在南部地形陡峭地区产生了较多的虚假降水。由于本文最后分析的是敏感性试验和控制实验的差值,模式的系统性误差可以自行消除,所以 WRF 模式的模拟能力完全满足试验需求。

图 5 是正常年份 I_{smg} 指数加倍后 6 月降水的变化情况。可以看出,总体上高原北部的降水增多而南部降水减少,其中沿唐古拉山脉迎风坡的降水增加最为明显,其北部区域降水增加并不明显,甚至有些区域略有减少,这与张人禾等(2016)指出的土壤湿度在季风边缘区对降水的影响最为显著的结论相似。说明高原 5 月土壤湿度梯度加大有利于 6 月降水雨带往北推进,这与前面通过统计分析的 I_{smg} 指数与 6 月高原降水第一模态关系密切的结论也相一致。从降水量级上看,土壤湿度梯度增加后,6 月高原范围内降水增加 446.7 mm,占 6 月总降水量的 17.8%。

不同于其他季节,高原春季土壤经历着类似“呼吸”作用的冻融过程,并与上层大气进行着充分的能量、水分交换,属于非常典型的地-气间相互作用的季节。为了研究土壤湿度变化所引起的地表能量通量变化,分别计算了控制试验和敏感性试验的地面向上热量通量和 500 hPa 的风场差异,结果发现(图 6),将 I_{smg} 指数加倍后,春末高原对大气的加热作用更为明显,表现为高原大部分的地面向上热通量增加,使得地面能够加热上空大气能力增强,高原热源效应增强。从风场表现来看,在 500 hPa 上高原南部的水汽通道上出现非常显著的南风分量,使得来自南边海洋的水汽更容易达到高原腹地,配合高原北部的北风异常在高原中部形成异常幅合区,这就解释了 I_{smg} 指数加倍后降水在高原中部增加最多的原因。

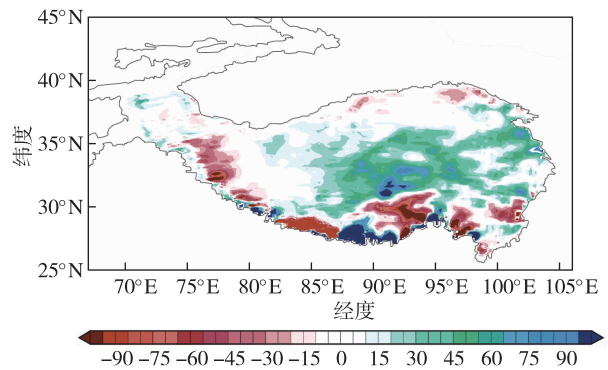

图 5　I_{smg} 指数加倍后敏感性试验与控制试验 6 月累积降水量的差值(单位:mm)

Fig.5　Difference of cumulative precipitation in June between sensitivity test and control test after index doubling(unit:mm)

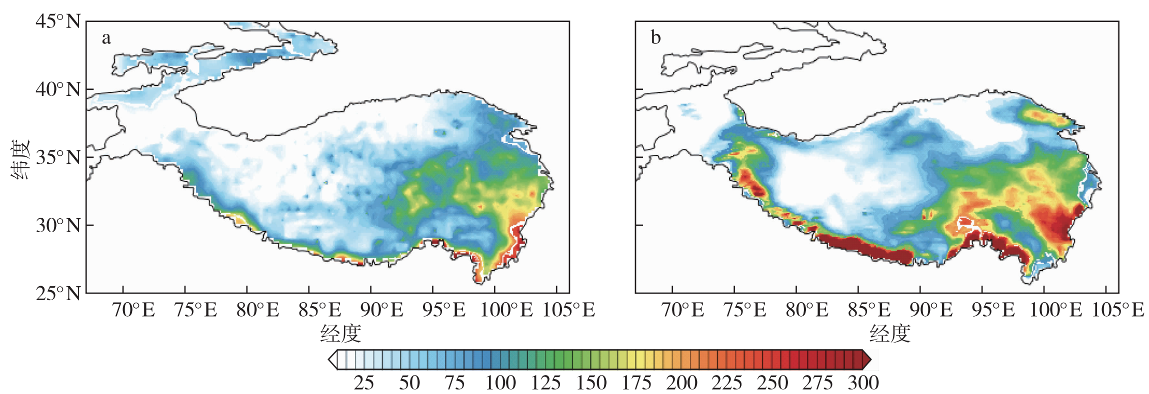

图 4　2018 年 6 月 TRMM 卫星降水分布(a)和 WRF 模式控制试验累积降水模拟结果(b)(单位:mm)

Fig.4　(a) TRMM satellite precipitation distribution and (b) cumulative precipitation simulation results of the WRF model control experiment performed in June 2018(unit:mm)

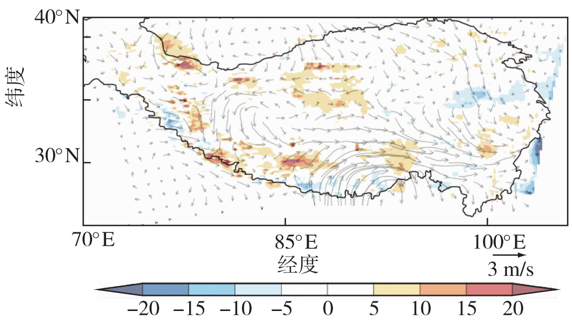

图 6 同图 5,但为地面向上热量通量(阴影,单位:w · m^{-2})和 500 hPa 风场(箭矢,单位:m/s)

Fig.6 Same as Fig.5,but showing the ground upward heat flux (shadow, unit: w · m^{-2}) and 500 hPa wind field (vector, unit: m/s)

通常来说,地面热源的增强能够引起各物理量垂直方向上的响应,图 7 给出了 I_{smg} 指数加倍后沿 90°E 平均的局地经圈环流、温度和相对湿度的变化情况。可以看到,高原两侧的垂直风加强并向高原腹地辐合,高原上空对流中上层大气增温,使得原本就存在的高原“烟囱”效应更加明显,将周围更多的大气抽吸至高原上空,导致高原春季“感热泵”(吴国雄等,1999)效率更加显著。同样,高原大部分区域上空的相对湿度增大,在高原增温增湿和垂直风切的作用下,唐古拉山脉(34°N)南部上空形成异常的辐合区,产生更多的降水,而在其北侧对流层上空相对湿度减弱、空气温度减小导致降水减少。

土壤湿度对降水的作用大致可以分成与蒸散有关的局地作用和地表能量平衡有关的非局地作用。为了区分非局地作用和局地作用对降水分布和量级的差异,分别计算了两种试验的大尺度降水和对流性降水差异(图 8)。结果发现,大尺度降水差异(图 8a)与总降水差异分布类似,均使得北边降水增多而南边降水减少,表现出雨带北移的特征,而对流性降水异常主要出现在高原东南部(图 8b),这恰是敏感性试验中土壤湿度加倍的地方,土壤湿度的增加使得蒸散增强,导致大气水汽增多,表现为对流性降水明显增多,抵消了一部分由于降水雨带北进造成的雨量减少。另一方面,由于蒸散过程中吸收地表热量减小了地气温差,造成大气不稳定性减小从而使得降水减少,这可能是土壤湿度增加后仍然有部分区域对流性降水减少的原因。可以看出,土壤湿度与降水之间并非简单的线性反馈过程,两者之间存在复杂的互馈关系。从量级上看,非局地作用使

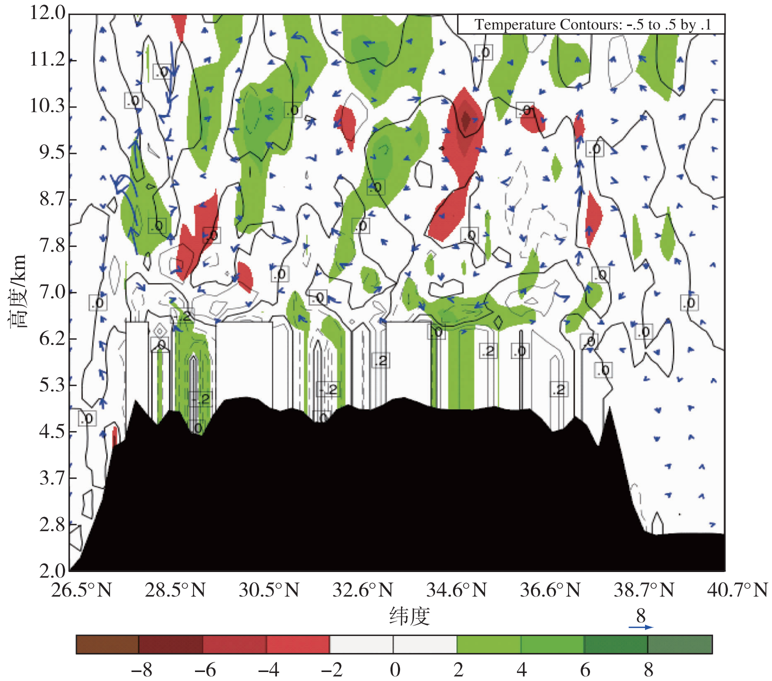

图 7 同图 5,但为沿 90°E 垂直温度(等值线,虚线为负值,实线为正值;单位:℃)、相对湿度(阴影,单位:%)以及风场(蓝色流线箭头,垂直速度×−20;单位:m/s)(黑色阴影部分为沿 90°E 的高原地形剖面)

Fig.7 Same as Fig 5,but showing the vertical temperature along 90°E (isoline,the dotted line is negative,solid line is positive),relative humidity (shaded part),wind field (blue streamline arrow,vertical velocity multiplied by −20).(The black shaded part is the plateau terrain profile along 90°E)

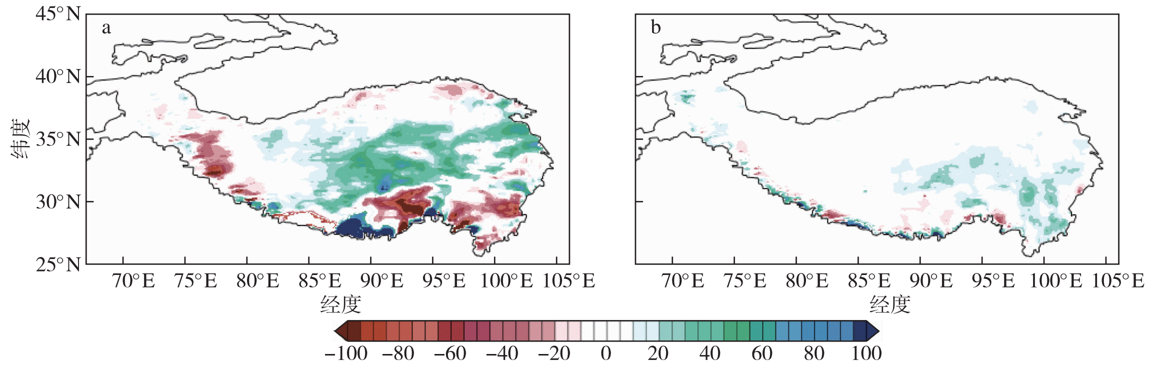

图 8　2018 年(正常年)I_{smg} 加倍后敏感性试验与控制试验 6 月格点(大尺度)降水量差值(a)和积云尺度(对流性)降水量差值(b)

Fig.8　Difference between (a) grid (large-scale) precipitation and (b) cumulus (convective) precipitationin June of sensitivity test and control test after I_{smg} doubling in 2018 (normal year)

得高原区域 6 月降水增加 217.3 mm,对流性降水增加了 229.4 mm,量级上两者的影响相当,但是从降水空间分布的改变来说,非局地作用是降水雨带北移的主要影响因素。

图 9 是高原旱涝年份的模拟结果。在涝年,土壤湿度梯度增加引起的降水差异主要表现为沿高原次尺度地形呈带状的增-减分布(图 9a),总体上高原区域平均降水增加 18.3%,略多于正常年份,增加区域集中在唐古拉山脉南侧,且以大尺度降水增加为主(图 9b),对流性降水差异主要在高原东南部(图 9c),且增减量级大致相当,对总降水量级的增加贡献不大。从旱年降水差异情况来看(图 9d),土壤湿度梯度的改变对降水总量影响微小,区域平均降水减少 0.7%,且主要由大尺度降水支配(图 9e)。这可能是因为尽管土壤湿度梯度的增加能够通过影响高原加热场抽吸更多的周边水汽,但是旱年背景场的水汽条件本身不足,加之旱年土壤湿度较小,其记忆性较湿土壤弱(赵家臻等,2021)导致对初夏的降水影响减弱所致。

综上所述,数值敏感性试验表明,在 6 月降水正常和偏多年份 I_{smg} 指数所表征的高原南北土壤湿度梯度的增加能够通过影响高原春末热源强度,增强高原"烟囱"效应使得周边大气更多的向高原腹地聚拢,容易出现更强的南风异常携带更多的南来水汽将降水雨带推至更北端,造成高原南部降水减少和北部降水增多,且降水分布形态异常主要由大尺度降水的变化主导。但是,在旱年土壤湿度梯度的变化对降水量级和分布形态的影响微小,可能是由于旱年土壤记忆力减弱和背景场水汽匮乏导致。

4　结论与讨论

为了研究高原春季土壤湿度与汛期降水的关系,计算了 ERA-Interim 逐月土壤湿度与观测降水之间的季节内相关系数,发现 5 月表层土壤湿度与 6 月降水的相关最为密切。其次,在空间上存在两个高相关区,且土壤湿度的梯度与 6 月降水的相关比单独计算两个独立高相关区更为显著,由此定义了一个反映高原南北土壤湿度梯度指数(I_{smg}),发现 1979—2019 年间它与 6 月降水的距平异号率达到 65.85%。最后通过一组敏感性试验得知,高原热源在联接前期土壤湿度和后期降水中起到了关键的作用。具体结论如下:

1)计算春季 4 层土壤湿度与汛期降水之间的场相关系数,发现 5 月表层(0~7 cm)和次表层(7~28 cm)土壤湿度与 6 月高原降水呈现很高的正相关,相关系数均超过 0.7。其次,通过 SVD 方法分析两者之间的空间耦合模态表明,春末土壤湿度南北反向模态与夏初高原降水的南北偶极子模态相关密切,能够解释 46.6%的总方差,且 5 月土壤湿度分别在高原西北角和东南角与 6 月降水存在两个高相关区。

2)定义了一个反映 5 月土壤湿度南北梯度的 I_{smg} 指数,发现它与 6 月降水第一模态的时间序列存在显著的负相关,且这种关系从 2000 年以来更为显著。

3)通过一组 I_{smg} 加倍的敏感性试验结果得知,在正常年份和旱年土壤湿度梯度的增加能够使得降水雨带北移,造成高原 6 月北部降水增加南部减少,正好对应 6 月降水第一模态的反位相,验证了两者

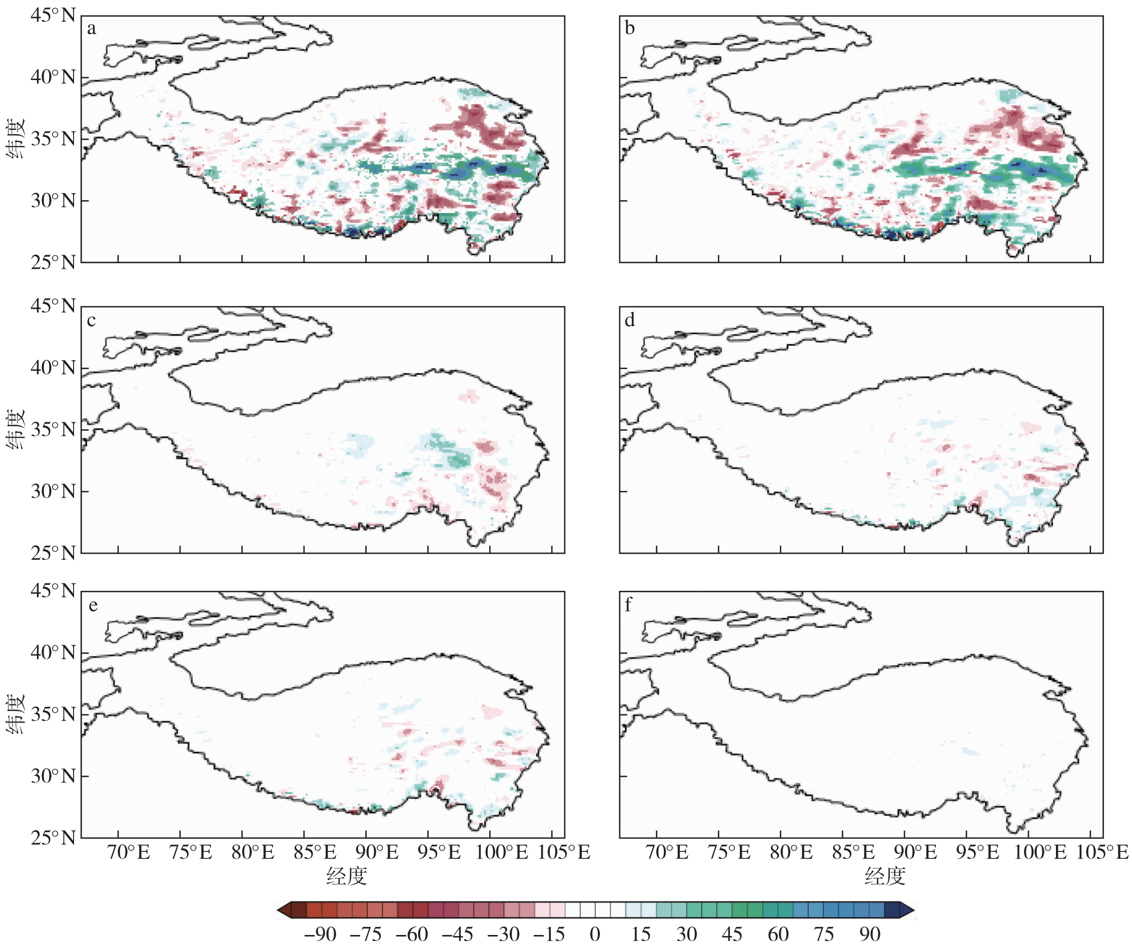

图 9　2017 年(a,b,c;涝年)和 2009 年(d,e,f;旱年)高原 6 月总降水量(a、d)、大尺度(b、e)和对流性(c、f)降水在土壤湿度梯度加倍试验后的差值(单位:mm)

Fig.9　Difference of soil moisture gradient after doubling the test by (a,d) the total precipitation,(b,e) large-scale, and (c,f) convective precipitation in June of the plateau in (a,b,c) 2017 (flood year) and (d,e,f) 2009 (dry year)(unit:mm)

在统计上的反相关关系。

4)机制分析表明,土壤湿度梯度的增加能够增强高原热源强度,在高原“感热泵”的作用下抽吸周边大气向高原腹地聚拢,将 6 月降水雨带推进至更北端,且这种改变主要由大尺度降水主导。但在旱年这种机制作用并不明显。

在前人研究基础上,本文分区域分时段更加细致的研究了高原春季土壤湿度与汛期降水的关系,并用数值敏感性试验对两者的关系进行了机理研究,得出了一些有意义的结论。当然,本文还存在一些问题和不足,如使用的土壤湿度数据是再分析产品,尽管有文献证明其在中国区域的可用性,但在高原上还需进行进一步验证和评估。其次,由于分析时段较长,在数值模拟时考虑到计算量的问题只选取了三个年份进行了数值模拟,其代表性还有待于进一步验证。

参考文献(References)

次仁央宗,柯宗建,陈丽娟,等,2016.西藏夏季降水的季节内变化特征及其影响系统[J].气象,42(11):1342-1350.　Ciren Y Z,Ke Z J,Chen L J,et al.,2016.Intraseasonal variation characteristics of summer precipitation over Tibet and the corresponding large-scale circulation anomalies[J]. Meteor Mon,42(11):1342-1350.doi:10. 7519/j.issn.1000-0526. 2016. 11. 006.(in Chinese).

邓元红,王世杰,白晓永,等,2018.西南地区土壤湿度与气候之间的互馈效应[J].生态学报,9(24):8688-8699.　Deng Y H,Wang S J,Bai X Y, et al.,2018.Relationship between soil moisture and climate and its memory in Southwest China[J].Acta Ecol Sin,9(24):8688-8699.doi: 10. 5846/stxb201807301613.(in Chinese).

高佳佳,杜军,卓嘎,2021.青藏高原春季土壤湿度与夏季降水的关系[J].大气科学学报,44(2):219-227. Gao J J,Du J,Zhuo G,2021.Relationship between soil moisture in spring and precipitation in summer over the Tibetan Plateau[J].Trans Atmos Sci,44(2):219-227.doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20200720001.(in Chinese).

韩熠哲,马伟强,王炳赟,等,2017.青藏高原近 30 年降水变化特征分析[J].高原气象,36(6):1477-1486. Han Y Z,Ma W Q,Wang B Y,et al.,2017.Climatic characteristics of rainfall change over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1980 to 2013[J].Plateau Meteor,36(6):1477-1486.doi:10. 7522/j.issn.1000-0534. 2016. 00125.(in Chinese).

假拉,周顺武,2002.西藏高原夏季旱涝年 OLR 分布差异[J].应用气象学报,13(3):371-376. Jia L,Zhou S W,2002.OLR distribution in summer in dryness/wetness years over Tibetan Plateau[J].J Appl Meteorol Sci,13(3):371-376.(in Chinese).

假拉,周顺武,2003.印度洋海温异常对印度季风、高原夏季降水的影响[J].高原气象,22(s1):132-137. Jia L,Zhou S W,2003.The effect of Indian ocean SST anomaly on Indian monsoon and summer precipitation over Tibetan Plateau[J].Plateau Meteor,22(s1):132-137.doi:10. 3321/j.issn:1000-0534. 2003.z1. 017.(in Chinese).

靳铮,游庆龙,吴芳营,等,2020.青藏高原三江源地区近 60 a 气候与极端气候变化特征分析[J].大气科学学报,43(6):1042-1055. Jin Z,You Q L,Wu F Y,et al.,2020.Changes of climate and climate extremes in the Three-Rivers Headwaters′Region over the Tibetan Plateau during the past 60 years[J].Trans Atmos Sci,43(6):1042-1055. doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20201008001.(in Chinese).

李丽平,马晨誉,倪语蔓,等,2018.中国冬夏季气温和降水异常耦合关系的 SVD 与 MEOF 分析对比[J].大气科学学报,41(5):647-656. Li L P,Ma C Y,Ni Y M,et al.,2018.Comparison of SVD and MEOF analysis on anomalous coupling relationship between temperature and precipitation in winter and summer in China[J].Trans Atmos Sci,41(5):647-656.doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20180528001.(in Chinese).

李述训,南卓铜,赵林,2002.冻融作用对地气系统能量交换的影响分析[J].冰川冻土,24(5):506-511. Li S X,Nan Z T,Zhao L,2002.Impact of soil freezing and thawing process on thermal exchange between atmosphere and ground surface[J].J Glaciol Geocryol,24(5):506-511.doi:10. 3969/j.issn.1000-0240. 2002. 05. 005.(in Chinese).

林志强,薛改萍,何晓红,2015.伊朗高压东伸对西藏高原汛期降水的影响[J].气象,(2):153-159. Lin Z Q,Xue G P,He X H,2015.Effects of eastward stretching Iran high on precipitation in rainy season over Tibetan Plateau[J].Meteor Mon,(2):153-159.doi:10. 7519/j.issn.1000-0526. 2015. 02. 003.(in Chinese).

Liu L,Zhang R H,Zuo Z Y,2014.Intercomparison of spring soil moisture among multiple reanalysis data sets over Eastern China[J].J Geophys Res:Atmos,119(1):54-64.doi:10. 1002/2013JD020940.

马晓波,胡泽勇,2005.青藏高原 40 年来降水变化趋势及突变的分析[J].中国沙漠,25(1):137-139. Ma X B,Hu Z Y,2005.Precipitation variation characteristics and abrupt change over Qinhai-Xizang plateau in recent 40 years[J].J Desert Res,25(1):137-139.doi:10. 3321/j.issn:1000-694X.2005. 01. 024.(in Chinese).

马秀梅,刘晓燕,代青措,2017.副热带高压影响下青海东部两次暴雨对比分析[J].青海科技,24(3):72-77. Ma X M,Liu X Y,Dai Q C,2017. Comparative analysis of two rainstorms in eastern Qinghai under the influence of subtropical high[J].Qinghai Science and Technology,[J].Qinghai Sci Technol,24(3):72-77.(in Chinese).

马柱国,魏和林,符淙斌,2000.中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系[J].气象学报,58(3):278-287. Ma Z G,Wei H L,Fu C B,2000.Relationship between regional soil moisture variation and climatic variability over East China[J].Acta Meteorol Sin,58(3):278-287.doi:10. 3321/j.issn:0577-6619. 2000. 03. 003.(in Chinese).

马柱国,符淙斌,谢力,等,2001.土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题[J].地球科学进展,16(4):563-566. Ma Z G,Fu C B,Xie L,et al.,2001.Some problems in the study on the relationship between soil moisture and climatic change[J].Adv Earth Sci,16(4):563-566.doi:10. 3321/j.issn:1001-8166. 2001. 04. 019.(in Chinese).

National Research Council,1994.GOALS (Global Ocean Atmosphere-Land System) for Predicting-to-International Climate [M].Washington D C:National Academy Press.

Shukla J,Mintz Y,1982.Influence of land-surface evapotranspiration on the earth′s climate[J].Science,215(4539):1498-1501.doi:10. 1126/science.215. 4539. 1498.

Stéfanon M,Drobinski P,D’Andrea F,et al.,2014.Soil moisture-temperature feedbacks at meso-scale during summer heat waves over Western Europe [J].Climate Dyn,42(5/6):1309-1324.doi:10. 1007/s00382-013-1794-9.

汤秋鸿,刘宇博,张弛,等,2020.青藏高原及其周边地区降水的水汽来源变化研究进展[J].大气科学学报,43(6):1002-1009. Tang Q H,Liu Y B,Zhang C,et al.,2020.Research progress on moisture source change of precipitation over the Ti-betan Plateau and its surrounding areas[J].Trans Atmos Sci,43(6):1002-1009. doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20201003001.(in Chinese).

Tuttle S,Salvucci G,2016.Empirical evidence of contrasting soil moisture-precipitation feedbac-ks across the United States[J].Science,352(6287):825-828.

Van den Hurk BJJM,Viterbo P,Beljaars ACM,et al.,2000.Offline validation of the ERA-40 surface scheme [R].ECMWF Technical Memorandum.

Walker J,Rowntree P R,1977.The effect of soil moisture on circulation and rainfall in a tropical model[J].Quart J Roy Meteor Soc,103(435):29-46.

doi:10. 1002/qj.49710343503.

王欢,李栋梁,2020. 21 世纪初青藏高原感热年代际增强对中国东部季风雨带关键区夏季降水年代际转折的影响[J].地球物理学报,63(2):412-426. Wang H,Li D L,2020.Impacts of decadal variability in sensible heat over the Tibetan Plateau on decadal transition of summer precipitation over dominant regions of monsoon rainfall band in Eastern China since the early 2000s[J].Chin J Geophys,63(2):412-426.doi:10. 6038/cjg2020M0397.(in Chinese).

韦志刚,黄荣辉,董文杰,2003.青藏高原气温和降水的年际和年代际变化[J].大气科学,27(2):157-170. Wei Z G,Huang R H,Dong W J,2003.Interannual and interdecadal variations of air temperature and precipitation over the Tibetan Plateau[J].Chin J Atmos Sci,27(2):157-170.(in Chinese).

吴国雄,刘屹岷,刘平,1999.空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响 Ⅰ:尺度分析[J].气象学报,57(3):257-263. Wu G X,Liu Y M,Liu P,1999.The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high Ⅰ: scale analysis[J].Acta Meteorol Sin,57(3):257-263(in Chinese).

杨梅学,姚檀栋,Hirose Nozomu,等,2006.青藏高原表层土壤的日冻融循环[J].科学通报,51(16):1974-1976. Yang M X,Yao T D,Nozomu H,et al.,2006.Daily freeze-thaw cycle of topsoil in Qinghai Xizang Plateau [J].Chin Sci Bull,51(16):1974-1976.doi:10. 3321/j.issn:0023-074X.2006. 16. 020.(in Chinese).

姚秀萍,张硕,闫丽朱,2019.青藏高原大气热源及其影响的研究进展[J].大气科学学报,42(5):641-651. Yao X P,Zhang S,Yan L Z,2019.Research progress on the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and its influence[J].Trans Atmos Sci,42(5):641-651.doi:10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20181227001.(in Chinese).

张人禾,刘栗,左志燕,2016.中国土壤湿度的变异及其对中国气候的影响[J].自然杂志,38(5):313-319. Zhang R H,Liu L,Zuo Z Y,2016. Variations of soil moisture over China and their influences on Chinese climate[J].Chin J Nat,38(5):313-319.doi:10. 3969/j. issn. 0253-9608. 2016. 05. 001.(in Chinese).

赵家臻,王爱慧,王会军,2021.中国地区土壤湿度记忆性及其与降水特征变化的关系[J].大气科学,45(4):799-818. Zhao J Z,Wang A H,Wang H J,2021.Soil moisture memory and its relationship with precipitation characteristics in China region[J].Chin J Atmos Sci,45(4):799-818.doi:10. 3878/j.issn.1006-9895. 2007. 20149.(in Chinese).

周顺武,假拉,2003.印度季风的年际变化与高原夏季旱涝[J].高原气象,22(4):410-415. Zhou S W,Jia L,2003.Interannual variation of Indian monsoon and summer flood/drought over Tibetan Plateau[J].Plateau Meteor,22(4):410-415.doi:10. 3321/j.issn:1000-0534. 2003. 04. 016.(in Chinese).

周顺武,王传辉,杜军,等,2011.青藏高原汛期降水的时空分布特征[J].气候与环境研究,16(6):723-732. Zhou S W,Wang C H,Du J,et al.,2011.Characteristics of spatial and temporal distribution of precipitation in flood season over the Tibetan Plateau[J].Clim Environ Res,16(6):723-732.(in Chinese).

左志燕,张人禾,2007.中国东部夏季降水与春季土壤湿度的联系[J].科学通报,52(14):1722-1724. Zuo Z Y,Zhang R H,2007.Relationship between summer precipitation and spring soil moisture in eastern China [J].Chin Sci Bull,52(14):1722-1724.doi:10. 3321/j.issn:0023-074x. 2007. 14. 021.(in Chinese).

左志燕,张人禾,2008.中国东部春季土壤湿度的时空变化特征[J].中国科学(地球科学),38(11):1428-1437. Zuo Z Y,Zhang R H,2008.Spatiotemporal variation of soil moisture in spring in eastern China [J].Sci Sin Terrae,38(11):1428-1437.(in Chinese).

Effect of soil moisture in late spring on precipitation in early summer over the Qinghai-Tibet Plateau

YANGJIN Zhuoma[1], LUO Bu[2], ZHUO Ga[3,4]

[1] *Weather Modification Center of Tibet Autonomous Region*, *Lhasa* 850000, *China*;
[2] *Meteorological Observatory of the Tibetan Autonomous Region*, *Lhasa* 850000, *China*;
[3] *Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Science*, *Lhasa* 850000, *China*;
[4] *Heavy Rain and Drought-Floods Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province*, *Chengdu* 610072, *China*

In order to study the relationship between soil moisture and summer precipitation on the Qinghai Tibet Plateau in spring, the relationship between soil moisture and summer (May to September) plateau precipitation was analyzed by using era interim soil moisture data from 1979 to 2019 and the observed precipitation data of 109 stations in the same period, which was then verified through a series of sensitivity numerical experiments. The results show that there is a significant positive correlation between surface soil moisture (0—28 cm) in late spring (May) and plateau precipitation in early summer (June). In addition, the North-South reverse mode of soil moisture corresponds to the north-south dipole mode of plateau precipitation in early summer, and there are two high correlation regions. Secondly, an index reflecting the soil moisture gradient at the end of spring is defined. The Smg_Index is the negative correlation between the time series of the first mode of precipitation in June, and this relationship has become more significant since the mid-90s. According to the numerical sensitivity test, after Smg_Index doubled, the surrounding atmosphere converged to the center of the plateau by enhancing the plateau heat source, thereby causing increase of atmospheric temperature and humidity in the Tanggula mountains in the center of the plateau, in turn resulting in an obvious increase of precipitation. However, this mechanism does not play a significant role in dry years.

Tibet Plateau; soil moisture; summer precipitation; soil moisture gradient index; sensitivity experiment

doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20210506001

（责任编辑：袁东敏）