

1981-2020 年青藏高原春季土壤湿度时空变化特征及其与高原季风的关系

索朗塔杰^{1, 2}, 杜军^{1, 2}, 卓嘎^{1, 2}, 益西卓玛³, 平措桑旦^{1, 2}

1. 青藏高原大气环境科学研究所/青藏高原大气环境研究重点实验室, 西藏拉萨 850001

2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川成都 610072

3. 西藏自治区气候中心, 西藏拉萨 850001

摘要: 本研究利用欧洲中心 ERA5 再分析资料的逐日土壤湿度(土壤体积含水量)、降水量、位势高度场以及风场数据, 重点分析了 1981-2020 年高原春季浅层(0-7cm)土壤湿度的时空变化特征, 并探讨了青藏高原土壤湿度与高原季风的关系。青藏高原春季土壤湿度西北偏干, 东南部相对偏湿的分布特征。对高原春季土壤湿度进行经验正交函数(EOF)分析后发现, 其第一模态呈中部与东、西部反向变化特征, 该模态存在准 3 年(2-4 年)的振荡周期, 这一周期特征在 2000~2010 年表现的更为显著; 第二模态呈南北反向分布, 较好地表征高原地区气候带与下垫面覆盖状况。研究发现, 高原夏季风与高原春季土壤湿度变化之间存在密切的隔季相关, 高原夏季风异常变化是翌年春季土壤湿度变化的主要原因。

关键词: 青藏高原; 春季土壤湿度; 高原季风; 气候变化; 年代际变化

文章编号: 2021131C

中图分类号

文献标识码

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2111.21131

Characteristics of spring soil moisture evolution over the Tibetan Plateau from 1981 to 2020 and its relationship with the plateau monsoon

Suolang Tajie^{1, 2}, Jun Du^{1, 2}, Zhuo Ga^{1, 2}, Yixi Zhuoma³, Pingcuo Sangdan^{1, 2}

1. Tibet Plateau Atmospheric Environmental Science Research Institute/Key Laboratory of Atmospheric Environment Research in Tibet Plateau, Lhasa 850001

2. Heavy Rain and Drought -Floods Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

3. Tibet Autonomous Region Climate Center, Lhasa 850001

Abstract: This study uses the daily soil moisture (Soil volumetric water content), Precipitation, Geopotential height field and wind field data from the European Center ERA5 reanalysis data, focusing on the analysis of the shallow (0-7cm) soil moisture of the plateau spring from 1981 to

收稿日期 2021-07-21 网络预出版日期

作者简介 索朗塔杰, 男, 1984 年出生, 硕士研究生、工程师, 从事高原天气气候研究工作。E-mail: Suota@nuist.edu.cn

通讯作者 卓嘎, E-mail: zhuoga2013@yahoo.com

项目资助 国家自然科学基金项目(41765012)、中国气象科学研究院青藏高原与极地气象科学研究所开放课题(ITPP2021K02)、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(SZKT202004, SZKT201907)

Funded by National Natural Science Foundation of China (41765012) An open project of the Institute of Tibetan Plateau and Polar Meteorology(ITPP2021K02), Chinese Academy of Meteorological Sciences and Plateau and Basin Heavy Rain, Drought and Flood Disaster, Sichuan Provincial Key Laboratory Open Fund Project (SZKT202004, SZKT201907)

2020 It also discusses the relationship between soil moisture on the Tibetan Plateau and the plateau monsoon. The distribution characteristics of spring soil moisture on the Tibetan Plateau are dry in the northwest and relatively wet in the southeast. After the empirical orthogonal function (EOF) analysis of the spring soil moisture in the plateau, it is found that the first mode has the characteristics of reverse change in the middle and east and west, and this mode has a quasi 3-year (2-4 years) oscillation period. This periodic feature was more pronounced from 2000 to 2010; the second mode has a north-south reverse distribution, which better characterizes the climatic zone and underlying surface coverage in the plateau area. The study found that there is a close inter-season correlation between the plateau summer monsoon and the plateau spring soil moisture change, and the abnormal change of the plateau summer monsoon is the main reason for the spring soil moisture change in the following spring.

Keywords: Tibetan Plateau; Spring soil moisture; Plateau Monsoon; Climate change; Inter-decadal variation

引言

上世纪 50 年代, Namias (1958) 就发现土壤水分的季节性异常对大气环流季节性变化有重要作用。土壤湿度作为气候变化地-气过程研究中的重要物理变量之一, 它积累了地表水文过程的大部分信息。土壤湿度表征土壤水分含量的程度, 它通过影响地表的反照率、陆面植被的生长状况以及蒸发等来改变陆-气之间的能量交换。土壤湿度的变化也会影响土壤本身的热力性质和水文过程, 进而影响到气候变化和气候异常。同时, 气候变化也通过地-气相互作用对土壤湿度的变化产生深刻的影响 (马柱国等, 2001; Njoku et al, 2003; 杜川利等, 2003)。研究土壤湿度的变化特征与大气环流的关系, 对合理利用水土资源、推动气候变化、生态保护研究、提升天气气候预测的准确率和洪涝干旱风险评估与监测等研究具有重要的科学意义和实践价值。

青藏高原 (以下简称高原) 是世界上海拔最高、面积最大、地形结构最为复杂的高原。坐拥广袤的冰川、雪山和冻土, 能够长时间记忆高原地区陆面干湿过程, 也是长江、黄河等 7 条东亚重要河流的源头, 拥有丰富的水资源。众多国内外学者基于再分析、卫星反演与数值模式等资料对高原土壤湿度变化的时空特征及其对大气环流、下游区降水的影响进行了大量的科学研究 (李登宣, 王澄海, 2016; 李哲等, 2017; 高荣等, 2017; 晏红波, 周国清, 2017)。权晨等 (2018) 发现青藏高原高寒湿地土壤冻融过程中, 土壤温度整体表现出夏高冬低的变化特征。王瑞等 (2009) 通过海气耦合模式 (NCAR CCSM3) 分析后认为, 春季高原主体土壤湿度在年际变化尺度上可通过潜热、感热通量共同激发遥相关波列影响我国长江流域降水。Chow et al. (2008) 利用区域气候模式设计敏感性试验, 研究发现当高原春季土壤偏湿, 夏季长江流域降水增加, 南方降水则减少。卓嘎等 (2017) 研究发现青藏高原春季土壤湿度与长江中下游降水量呈负相关关系。肖志祥等 (2015) 研究发现青藏高原土壤湿度与孟加拉湾风暴频次有关, 其土壤水分记忆能力跟季节变化密切相关。王静等 (2018b)

总结分析认为造成这些结论差异的主要原因是这些研究中采用的资料和试验设计的方法不同所致。所有研究结果均表明,高原土壤湿度的变化能够引起大气环流的异常变化,从而导致高原地区及其下游地区的气候异常。另外,土壤湿度作为气候变化的前兆信号,研究春季土壤湿度变化对提升夏季(汛期)降水预报预测水平具有重大科学意义。

季风是衡量大气环流变化的重要参考指标,季风的强弱变化能够较好的表征大气环流的异常变化特征。早在 1979 年汤懋苍等(1979)证实了高原存在独立的季风系统,同年由叶笃正和高由禧(1979 年)分析了高原季风各要素场气候态的结构特征,研究发现高原地区冬季和夏季存在两种基本相反的温压场类型,之后 kuo et al.(1981)通过数值模拟研究发现高原地区受大地形作用,建立高原季风提供了动力和热力条件。至此,高原季风得到了事实分析和模拟实验的证实。为了较为客观的反映高原季风强弱变化特征,本文利用高度场与风场资料,采用客观识别方法计算了两种高原夏季风指数进行了对比分析,并分析了其与高原春季土壤湿度的关系。

综上所述,所有研究结果充分验证了高原土壤湿度对高原及其下游地区气候变化的重要影响,而人们对大气环流异常变化对高原土壤湿度的反馈作用认识还尚浅。鉴于这一薄弱环节,本文利用欧洲中心 ERA5 再分析逐日土壤湿度、位势高度场、降水以及风场资料,分析了 1981-2020 年高原春季浅层(0-7cm)土壤湿度的时空演变特征,探讨了高原土壤湿度与高原夏季风之间的关系。

1 资料与方法

1.1 资料

本研究主要利用 1981-2020 年 ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的 ERA5 产品 10cm 浅层逐日土壤湿度(土壤体积含水量)、降水量资料(空间分辨率 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$)、位势高度场以及风场资料(空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$);资料来源(<https://cds.climate.copernicus.eu>)。其中,ERA5 再分析资料给出的土壤湿度主要反演其地面土壤体积含水量,单位: m^3/m^3 。王静等(2018a)研究表明高原土壤湿度在表层到深层的变化具有较好的一致性。因此,本文只选用了表层(0-7cm)土壤湿度数据作为分析对象,讨论了青藏高原春季土壤湿度时空演变特征。

由于高原地广人稀、地形非常复杂,土壤湿度观测资料稀缺,观测台站主要分布在中东部地区,且建站时间较迟,没有足够的时间序列可进行长期异常变化特征分析。人工观测数据无论是空间分辨率还是时间分辨率都不足以描述高原土壤湿度的区域特征。而再分析数据有效弥补了数据时空分辨率上的这一问题。另外,Zeng et al.(2015)用 2002-2012 年高原那曲站和玛曲站土壤湿度监测网资料,对欧洲中心(ECMWF)再分析资料和七套卫星资料进行了评估,结果表明所有产品都基本可以描述土壤湿度变化动态,其中,ERA-Interim 产品在数值上最接近观测值。张文君等(2008)对目前国际应用较为广泛的 4 套再分析土壤湿度产品在中国区域的可靠性进行对比分析发现,ERA40 的年际变化与观测值相关最好。而 ERA5 产品是继 ERA-Interim 和 ERA40 之后最新推出的再分析数据,它主要利用物理模

型数据与较多的观测数据（雷达、卫星、地面观测等）进行四维同化处理，是 ERA-Interim 产品的更新升级版。因此，相对来说，ERA5 产品具有较好的可用性和可靠性。

1.2 方法

采用 Morlet 小波功率谱方法分析 1981-2020 年高原春季土壤湿度序列的振荡周期。功率谱作为应用非常广泛的分析序列周期的方法，其优点在于可根据给出的置信水平提取不同频的显著周期信号。为描述整个高原土壤湿度的时频周期，文中把海拔高度超过 2500m 的区域作为整体进行区域平均，并将该序列的长期线性趋势去除后进行小波分析。为研究高原土壤湿度的时空变化特征，本文还采用了经验正交函数（EOF）、t 检验、谐波分解、线性回归、合成分析等统计方法。春季指每年 3-5 月平均值，夏季指每年 6-8 月平均值。

众多学者采用客观识别方法判断高原季风强弱年，逐步构建目前较为常用的高原季风指数计算方法（Plateau Monsoon Index, PMI, 用字母 I 代替）（汤懋苍, 1998; Tang and Reiter, 1984; 齐冬梅等, 2009; 荀学义等, 2018）。本文主要采用齐冬梅等（2009）提出的 U 风分量计算高原夏季风指数（ I_u ）的算法，具体方法为：取（27.5°N~30°N, 80°E~100°E）范围 600hPa 平均的西风分量距平与（35°N~37.5°N, 80°E~100°E）范围内平均的东风分量距平之差作为高原夏季风指数 I_u （式 1），即：

$$I_u = U'_{600[27.5^{\circ}N \sim 30^{\circ}N, 80^{\circ}E \sim 100^{\circ}E]} - U'_{600[35^{\circ}N \sim 37.5^{\circ}N, 80^{\circ}E \sim 100^{\circ}E]} \quad (1)$$

其差值越大，高原夏季风越强；反之，则高原夏季风越弱。

为对比分析，本文还利用汤懋苍等（1998）提出的高度场资料计算高原季风指数的方法（ I_z ），并与 I_u 指数进行相互验证（图 1），两种算法得出的高原夏季风指数正负位相变化基本一致，相关系数高达 0.87，能够较好的表征高原季风的强弱变化特征，因此，后文分析中仅给出 U 风分量计算得出的结果。实际上，考虑到高原很多台站实际观测气压低于 600hPa，本文计算高原季风指数时分别使用 500hPa 和 400hPa 西风分量和位势高度场算出的结果与上述结果进行了对比（图略），其结果差别不大。

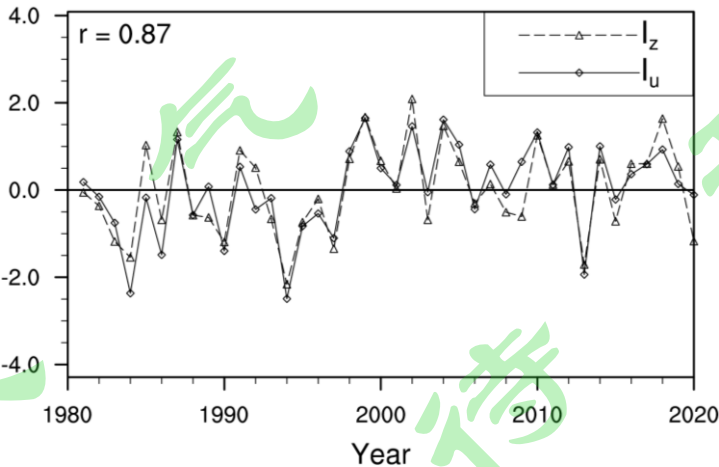


图 1 两种高原季风指数（ I_u : U 风分量, I_z : 高度场）算法对比.

Fig1 Comparison of two plateau monsoon index (I_u : U wind component, I_z : Height field) algorithms.

文中格点数据区域平均时，由于高原与平原地区的海拔落差较大，造成高原到平原地区

的过渡区土壤湿度水平梯度大。因此，根据海拔高度 2500m 作为高原分界线，如果满足格点位置在区域（25.5 °N~40.5 °N，73.0 °E~104.2 °E）海拔高度 $h > 2500\text{m}$ 界限以内，则保留数据，否则设为缺测处理，图 2 给出了海拔高度超过 2500m 的高原高程地形图。

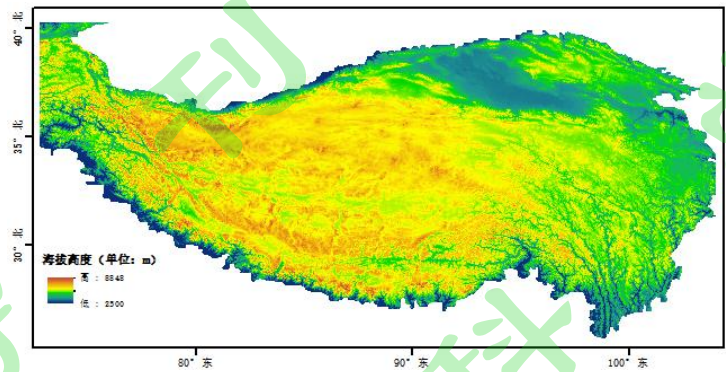


图 2 海拔超过 2500 米的青藏高原地形图（单位：m）。

Fig.2 Terrain of the Tibetan Plateau with an altitude of more than 2500 meters(Unit: m).

2 春季土壤湿度时空变化特征

气候平均上，青藏高原春季土壤湿度空间呈西北偏干，东南部相对偏湿的分布特征（图 3），最大值可达 $0.5\text{m}^3/\text{m}^3$ 以上，低值区位于高原西部地区及 37°N 以北地区，其中偏北地区（柴达木盆地）的土壤湿度不足 $0.1\text{m}^3/\text{m}^3$ ，土壤湿度的这种地理分布特征，较好的反映高原地区气候带及其下垫面实际状况。说明高原土壤湿度分布特征与海拔高度、下垫面分布密切相关，高原东南部地区海拔相对较低，南部输送上来的水汽较为充沛，西北部地区则相反，这与孙夏（2019）等研究结果一致。

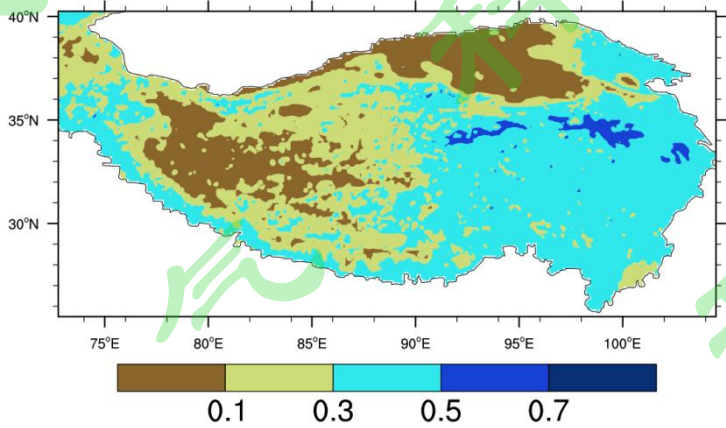


图 3 40a1981-2020 年气候平均青藏高原春季平均土壤湿度空间分布（单位： m^3/m^3 ）。

Fig.3 Spatial distribution of average spring soil moisture over the Tibetan Plateau from 1981 to 2020(Unit: m^3/m^3).

图 4 给出了 1981-2020 年青藏高原主体（海拔 $h > 2500\text{m}$ ）春季土壤湿度进行区域平均并标准化之后序列的变化及其趋势线。整体上看，近 40 年来青藏高原土壤湿度异常变化出现了三次标准差超过 ± 2 的年份，分别为 1985 年的-2.8、2003 年的+2.3 和 2019 年的+2.8。从变化趋势上看总体呈增湿趋势，平均每 10 年增湿 $0.3\text{m}^3/\text{m}^3$ 。这与高原气温、平均降水变化趋势较为一致（艾雅雯等，2020，徐洪亮等，2021），说明土壤湿度与气温、降水的变化

密切相关，它可通过高原地表热力效应（感热、潜热、蒸发以及地面长波辐射等）影响边界层和自由大气的演变，进而影响地面气温和降水的异常变化。实际上，土壤湿度的长期异常变化特征还叠加了年际与年代际的自然波动、全球变暖以及人类活动等影响信号。

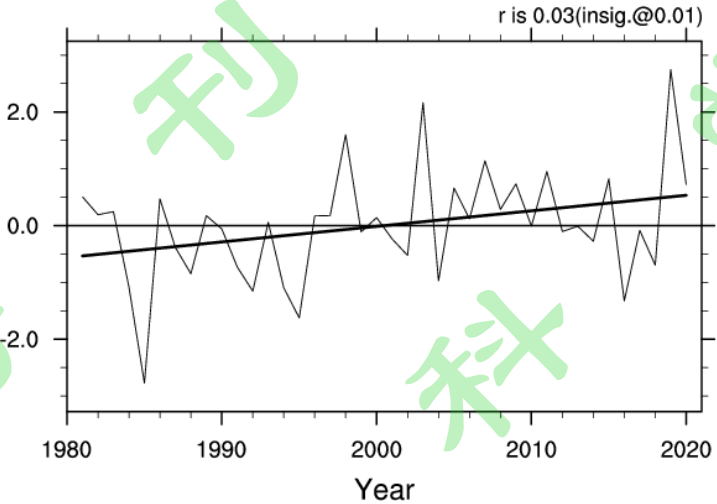


图 4 1981-2020 年青藏高原春季平均土壤湿度年际变化及其线性趋势（单位： m^3/m^3 ）。折线：年际变化，直线：线性趋势

Fig.4 The interannual variation and linear trend of the spring average soil moisture on the Tibetan Plateau from 1981 to 2020 (unit: m^3/m^3). Broken line: inter-annual change, straight line: linear trend

2.1 EOF 展开

为揭示青藏高原春季土壤湿度的典型时空变化特征，本文对 1981-2020 年高原区域土壤湿度进行了 EOF 分解，得到前 3 个主要空间模态和对应标准化时间系数。图 5 给出了 EOF 分解的第一空间模态（图 5a）和时间变化特征（图 5b）。第一模态解释了总方差的 29.1%，说明该模态可以描述原始数据接近 1/3 的异常变化信息。从空间分布可以看出，青藏高原春季土壤湿度变化最主要的模态基本表现为中部与东（95°E 以东）、西（70°E 以西）部反向变化特征，中部地区（高原腹地：30°N~35°N，75°E~95°E）是土壤湿度变率最大区域，说明该区域土壤湿度异常的气候敏感区。从时间系数变化来看（图 5b），整体上看，与青藏高原春季平均土壤湿度线性趋势（图 4）变化类似，其长期变化特征还叠加有年际与年代际的波动。

为分析高原春季土壤湿度的年代际变化特征，图 5b 还给出了扣除趋势之后春季土壤湿度谐波分解前 3 波合成图（红色虚线）。需要说明的是，针对 40 年的时间序列进行谐波分解，它最多可以分解 $40/2=20$ 波，其中，第 0 波为均值，第 1 波为 20 年为正 20 年为负的波动周期，依次类推，第 3 波对应着 $40/3 \approx 13$ 年（6.5 年为正 6.5 年为负）的波动（索朗塔杰等，2020）。由图可知，谐波分解前 3 波的变化特征与时间系数 PC-1 变化特征基本一致，且前 3 波累计方差贡献率达 20.7%，说明 EOF 第一模态存在明显的年代际变化特征。尽管如此，前 3 波与 PC-1 正负符号并不完全一致，尤其是 2011 年之后谐波分解结果呈负异常时 PC-1 序列为正异常，说明 EOF 第一模态不仅存在年代际变化特征，还叠加有土壤湿度整体增加的趋势，扣除掉趋势影响的高原春季土壤湿度年代际变化大致可以分为：1983~1996 年的偏干期和 1997~2012 年的偏湿期。

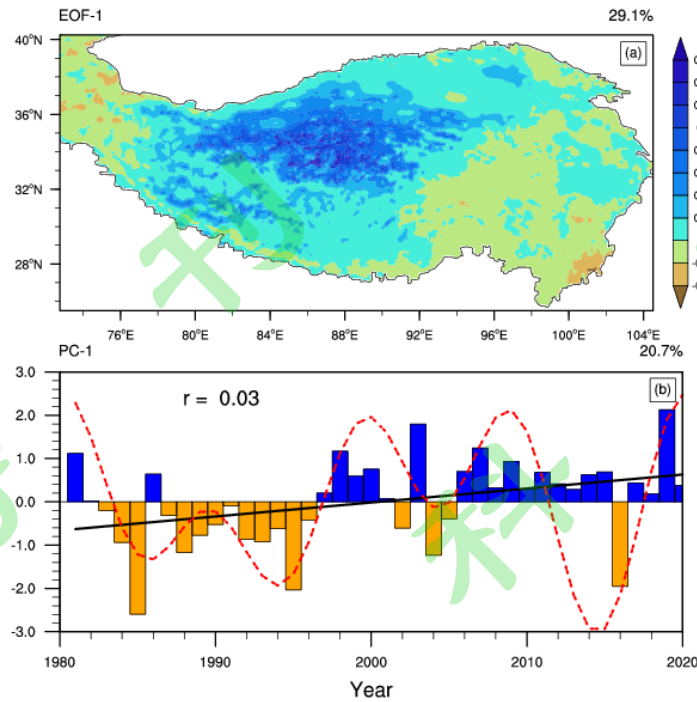


图 5 高原春季土壤湿度 EOF 展开第一模态。a: 空间型; b: 标准化之后的时间系数（柱状）及年代际分量曲线（谐波分解前 3 波合成图：红色虚线）；图中 r 表示线性趋势斜率。谐波分解前 3 波累计方差贡献置于右上角。

Fig.5 The first mode of spring soil moisture based on EOF on the plateau. a: Spatial type; b: Standardized time coefficient (bar) and decadal component curve (3 waves before harmonic decomposition: red dashed line); r in the figure represents the linear trend slope. The cumulative variance contribution of the first 3 waves of harmonic decomposition is placed in the upper right corner.

EOF 分解第一模态时间系数变化 (PC-1) 表明, 近 40 年来高原土壤湿度不仅存在趋势变化特征, 还叠加有年际和年代际的周期振荡, 并且通过谐波分解大致划分了年代际的波动特征。为进一步分析各波动的显著周期, 对扣除趋势影响后的 PC-1 进行了 Morlet 小波功率谱分析 (图 6)。由图可知, 高原春季土壤湿度异常变化存在准 3 年 (2-4 年)、准 10 年 (9-11 年) 和准 20 年的明显波动周期, 其中, 准 3 年波动周期在 2000-2010 年之间更为显著, 准 10 年波动周期在上世纪 90 年代至本世纪初呈显著特征, 虽然准 20 年周期波动的功率也较强, 但受到数据序列长度限制, 其显著区基本落在边界效应影响区域, 可能存在着一一定的分析误差。

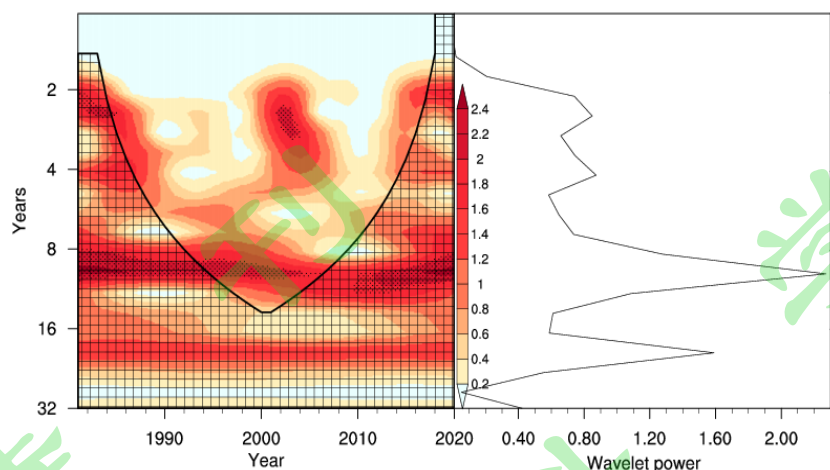


图6 EOF 第一模态时间系数 PC-1 的 Morlet 小波功率谱分析图；左图中网格处为边界效应影响域，黑色小点为通过 95%显著性检验，右图小波功率谱。

Fig.6 Morlet wavelet power spectrum analysis diagram of the time coefficient PC-1 of the first mode from EOF; the grid on the left is the boundary effect area, the black dots pass the 95% significance test, and the right image refers to the wavelet power spectrum.

图 7 给出了 EOF 展开的第二个模态和相应的时间系数，第二模态解释了原序列总方差的 13.7%，空间模态（图 7a）主要变化特征表现为近似南北反向型异常分布特征，35°N 以北基本为负值区，其以南为正值区，大值中心位置与第一模态类似，位于高原腹地（32°N~34°N，84°E~92°E），该模态异常分布特征与高原春季土壤湿度地理分布（图 3）特征较为一致，最大变率区位于高原腹地及柴达木盆地，较好的表征了高原气候带与下垫面覆盖的实际状况。从时间系数（图 7b）变化来看，该模态表现出比较明显的趋势变化特征。

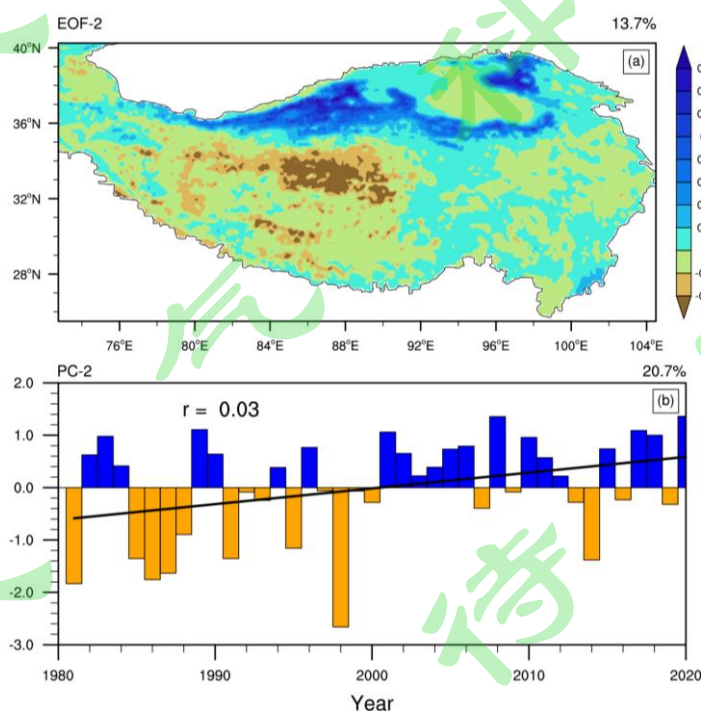


图 7 同图 5，但为 EOF2 和 PC-2。

Fig.7 Same as Fig.5, But for second mode.

图 8 给出了 EOF 第二模态时间系数扣除趋势影响 (PC-2) 的小波功率谱分析, PC-2 的小波分析发现两处显著振荡周期, 分别为 2-4 年和 5-6 年, 其余显著周期均落在边界效应区域, 因此后文不进行讨论; 除此之外, 高原春季土壤湿度第三模态 (图略) 自西向东呈正-负-正的异常变化结构, 其方差贡献率为 8%, 且呈明显的上升趋势。

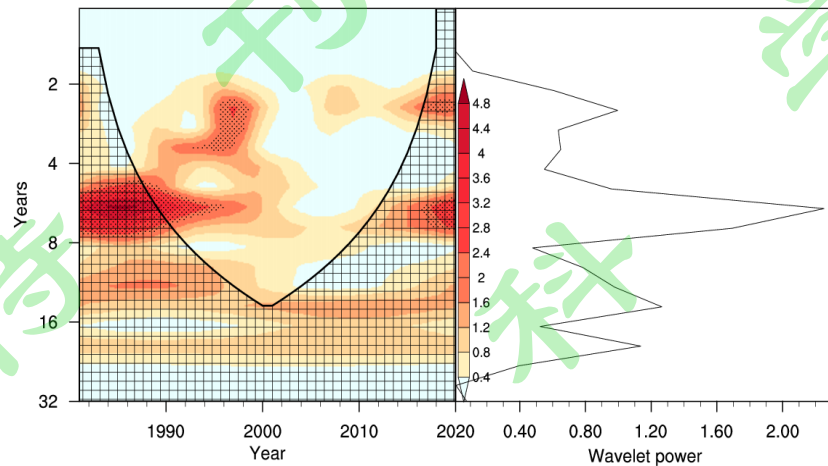


图 8 同图 6, 但为 PC-2 的 Morlet 小波功率谱分析图。

Fig.8 Same as Fig.6, But for the time coefficient of the second mode.

综上所述, 近 40 年来高原春季土壤湿度 EOF 第一模态以中部与东、西部反向变化为主, 时间系数 PC-1 表征高原春季土壤湿度整体呈明显增加趋势并叠加有年际、年代际变化特征。第二模态呈南北反向型, 其空间分布特征较好的反映了高原气候带与下垫面覆盖实际状况。

3 土壤湿度与高原季风的关系

土壤湿度是气候变化陆-气过程中的重要物理变量, 土壤湿度的异常变化通过地气热量交换, 引起大气环流的异常变化 (Koster et al, 2001; Zhang and Zou, 2011; 周娟等, 2017)。实际上, 大气环流的周期性变化也会影响土壤湿度的异常变化 (邓元红等, 2018), 高原季风的强弱变化能够直接影响高原的降水量与土壤湿度的异常变化。前文采用 EOF 分解分析了近 40 年来青藏高原春季土壤湿度的时空变化特征, 其空间分布特征较好的反映高原气候带与下垫面覆盖实际状况。PC-1 与 PC-2 表明高原土壤湿度异常变化呈明显的趋势变化特征, 并存在准 3 年 (2-4 年) 年际振荡周期叠加有年代际变化特征。本节将讨论高原春季土壤与高原夏季风之间的关系。

图 9 分别给出了高原夏季风指数与春季土壤湿度 (图 9a)、高原夏季 (MJJ) 降水 (图 9b) 的超前滞后相关图, 发现高原夏季风指数与次年春季高原土壤湿度呈正相关, 相关系数达 0.43, 且通过了 0.01 显著性检验 (图 9a)。而高原夏季风指数与夏季降水呈同时正相关, 相关系数为 0.43, 也通过了 0.01 的显著性检验 (图 9b)。实际上, 从图 9c 上可以看出高原夏季风与高原夏季降水正负位相变化比较一致, 春季土壤湿度变化落后于前两者, 但这种滞后关系在 2014 年之后, 似乎出现了反位相变化特征, 这可能与影响土壤湿度的其他主导因子异常变化有关, 比如随着全球变暖高原蒸发量增大等, 其具体物理过程还需通过数值试验

等其他手段进一步验证。

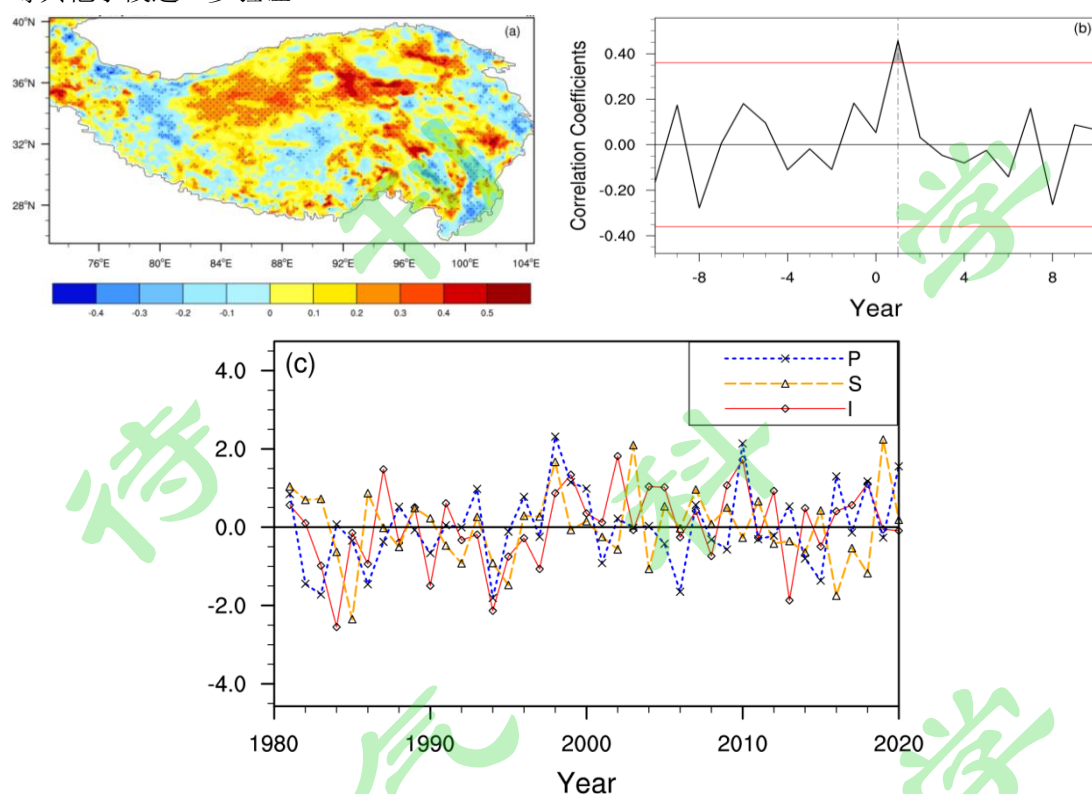


图9 a: 高原夏季风指数与高原夏季降水相关场(黑点表示通过0.01显著性检验); b: 高原季风指数与春季土壤湿度的超前滞后相关图(红色横线为0.01显著性水平参考线,灰色阴影区为通过0.01显著性检验); c: 去趋势标准化的夏季风指数、春季土壤湿度以及夏季降水的年际变化(P、S、I分别代表高原夏季降水、高原春季土壤湿度与高原夏季风值数)。

Fig. 9 a: The correlation field between the plateau summer monsoon index and the plateau summer precipitation (black dots indicate that it has passed the 0.01 significance test); b: the leading and lagging correlation diagram between the plateau monsoon index and spring soil moisture (the red horizontal line is the 0.01 significance level reference line, and the gray The shaded area has passed the 0.01 significance test); c: de-trend standardized summer monsoon index, spring soil moisture and interannual variation of summer precipitation (P, S, I represent the plateau summer precipitation, the plateau spring soil moisture and the plateau summer monsoon, respectively Value)

为进一步分析高原夏季风通过降水的变化对次年春季土壤湿度的影响过程,图10分别给出了1981-2020年夏季(MJJ)500hPa气候态高度场(图10a)及高原强夏季风年与弱夏季风年(图10b)500hPa差值场(Shi N et al, 2019)。从500hPa气候态高度场上看(图10a),中高纬度地区西风带定长波基本呈三槽两脊型,三个槽分别位于大西洋东部-欧洲西部地区、乌拉尔山地区以及我国东北-日本地区,分别对应着大西洋大槽、欧洲大槽以及东亚大槽;低纬度地区高原东西两侧由稳定的伊朗副热带高压和西太平洋副热带高压所控制。差值分析(图10b)可以看出,中高纬度欧亚大陆地区存在显著的异常波列,其中,西侧的负异常中心位于欧洲西北侧,中间的双中心正异常所控制的区域包括欧洲中西部延伸至我国蒙古地区,而其南侧分裂出了显著的负异常区域,中心位于青藏高原西北地区(高原基本被负异常控制),说明高原季风年际变化与中高纬西风带中长波年际尺度传播密切相关,高原西北地区负值中心对应着强的高原夏季风,说明强季风年高原地区低值系统活跃。与此同时,西太

平洋副热带高压活动区出现明显的正异常中心，西太副高活动与高原天气系统的生成、发展和移动密切相关，副高西伸加强时，高原天气系统加强、东移缓慢，在副高的强迫下孟湾地区的暖湿水汽汇聚北上至高原，造成高原地区的持续性降水。综上所述，高原强夏季风对应着高原地区夏季降水偏多。海拔 2500 以上的高原入冬比同纬度地区偏早，高原土壤湿度记忆能力强于同纬度地区（赵家臻等，2021）。降水可补充土壤水分流失，这也是春季高原土壤湿度增大的主要因素之一。

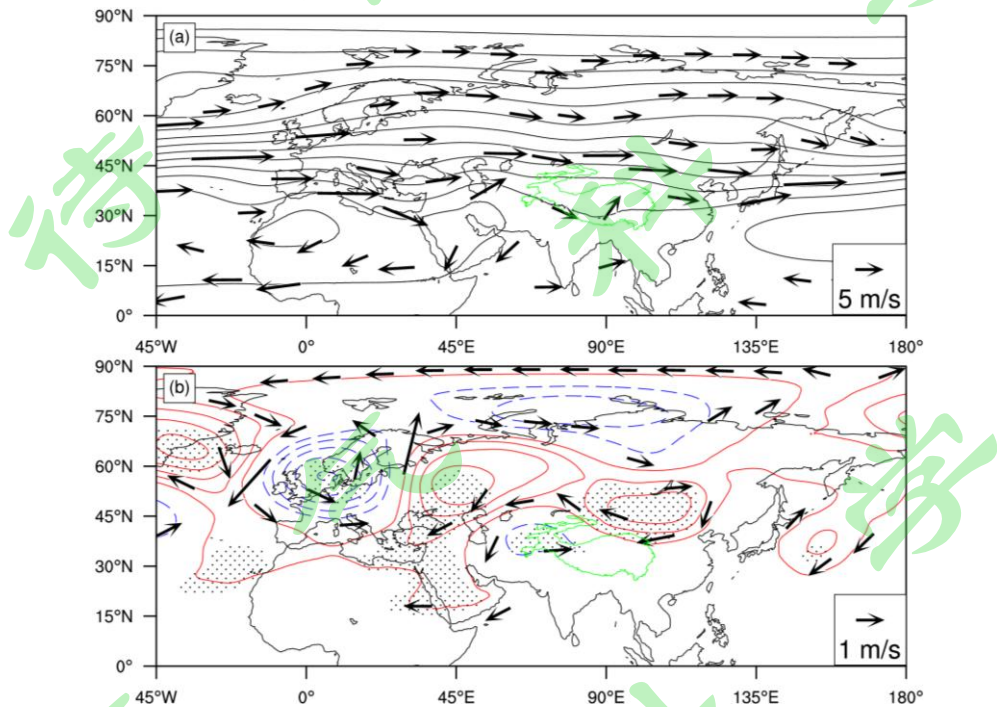


图 10 (a) 夏季 (MJJ) 500hPa 气候态高度场、(b) 强高原夏季风年与弱高原夏季风年 500hPa 差值场。等值线表示高度场(等值线间隔为 100hPa, (单位: gpm), 箭头表示风场(单位: m/s), 右下角给出的风速大小表示只显示 $\geq$ 该值的风场, 黑色小点为通过 0.01 显著性检验区域, 绿色等值线为青藏高原 (海拔 $> 2500\text{m}$) 边界线。

Fig.10 (a) 500hPa climatic height field in summer (MJJ), (b) 500hPa difference field between strong plateau summer monsoon year and weak plateau summer monsoon year. The contour line represents the height field (the contour interval is 100hPa, (unit: gpm), the arrow represents the wind field (unit: m/s), the wind speed given in the lower right corner means that only the wind field $\geq$ this value is displayed, black The small dot is the area that passed the 0.01 significance test, and the green contour is the boundary line of the Tibetan Plateau (altitude $> 2500\text{m}$).

为分析大气环流垂直变化特征，图 11 给出了夏季 (MJJ) 200hPa 气候态环流场 (图 11a) 与强高原夏季风年减去弱高原夏季风年 (图 11b) 200hPa 环流场合成图 (Shi N et al, 2019)，如图 11a 所示，夏季青藏高原对流层上层存在稳定的南亚高压，中高纬地区被西风急流所控制，相对而言，强季风年南亚高压所控制的范围更大。从差值分布 (图 11c) 可以看出，欧亚大陆上空存在与 500hPa 类似的异常波列，正负异常中心位置比较一致，青藏高原西北侧显著负异常中心范围更大，说明西风带年际尺度传播的环流异常呈正压结构，且由对流层主导向上传播。

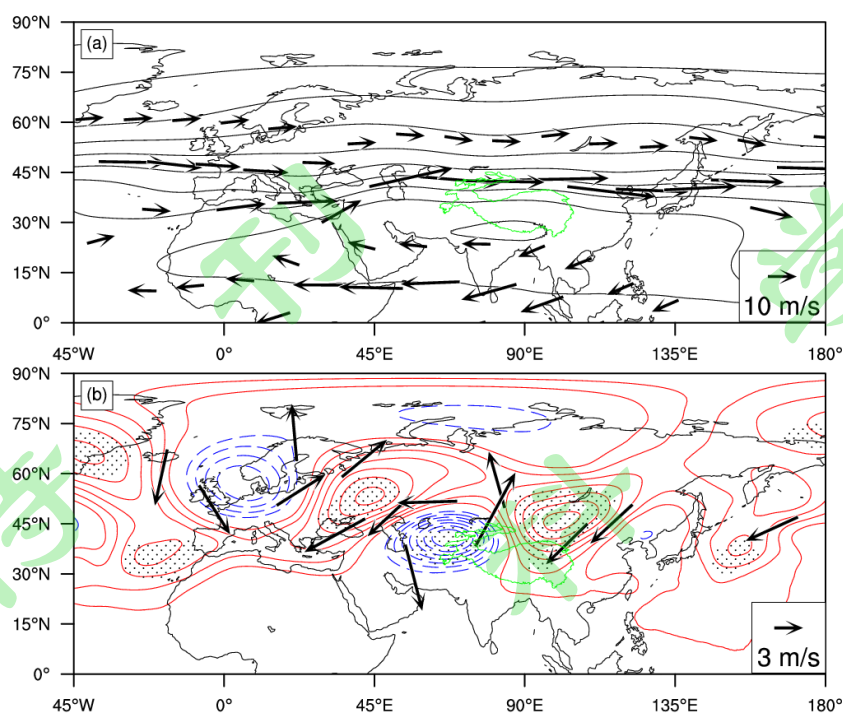


图 11 同图 10，但为 200hPa 环流场合成图。

Fig.11 Same as Figure 10, But synthesized at 200hPa.

4 讨论与结论

4.1 年代际变化

图 12 给出了高原春季土壤湿度、高原夏季风以及夏季降水量谐波分解前 3 波（年代际）变化特征，三者谐波分解前 3 波累计方差贡献率均超过了 20%，分别为 20.7%、33.5%和 39.3%，表明三者存在明显的年代际变化特征。三个要素变化特征对比来看，高原夏季降水和高原夏季风的年代际变化基本一致，尤其正负位相变化基本发生在同一年，高原春季土壤湿度自 1984 年之后年代际尺度变化与高原夏季风比较一致，整体上看，三者在年代际尺度上的变化特征比较一致，相关系数均超过 0.5 以上，土壤湿度与季风指数相关系数为 0.61，季风指数与夏季降水量相关系数高达 0.71，土壤湿度与夏季降水量的相关系数为 0.51。综上所述，1981-2020 年青藏高原春季土壤湿度在年代际尺度上与高原夏季风、夏季降水密切相关，其年代际变化大致可以划分为：1983~1996 年偏干期和 1997~2012 年的偏湿期。

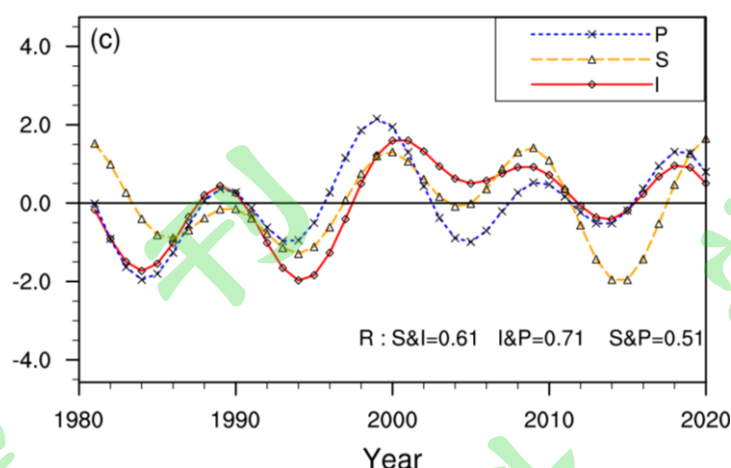


图 12 高原春季土壤湿度、高原夏季风与高原夏季降水年代际分量变化特征（谐波分解前 3 波）。右上角图例中给出各要素前 3 波累计方差贡献率，S、I、P 分别代表土壤湿度、高原夏季风指数与高原夏季降水量，要素之间的相关系数在右下角给出。

Fig.12 Variation of interdecadal components of plateau spring soil moisture, plateau summer monsoon and plateau summer precipitation (the first three waves of harmonic decomposition). The legend in the upper right corner gives the contribution rate of the cumulative variance of the first three waves of each element. S, I, and P represent soil moisture, the plateau summer monsoon index and the plateau summer precipitation, respectively. The correlation coefficients between the elements are given in the lower right corner.

为分析高原土壤湿度在年代际尺度上的环流特征，本文也分析了土壤湿度偏湿年与偏干年对应 500hPa 环流场的差值（图略）。整体上看，中高纬度（30°N 以北）地区存在明显的异常波列，环流异常波列传播时青藏高原西北侧为气旋式异常，而东北侧被反气旋式异常控制，这种结构对应着西伯利亚冷空气堆积和乌拉尔山阻塞高压加强，有利于水汽在高原地区聚集，此时高原整体基本为不明显的负异常区域。高原地区低值系统活跃，冷空气活动频繁也是高原降水增多的主要环流结构。年代际尺度上高原偏南地区的大气和西太平洋副热带高压活动变化不大，与年际尺度环流变化特征相比，引起高原降水增多的环流特征并不相同，进一步表明，年代际尺度高原降水异常变化主要由中高纬度地区定长波传播异常导致。

4.2 结论

本文利用 1981-2020 年欧洲中心（ERA5）提供的浅层（10cm）土壤湿度、降水量、高度场以及风场再分析资料，分析了青藏高原春季土壤湿度的时空变化特征及其与高原季风的关系。得到以下结论：

（1）青藏高原春季土壤湿度呈西北偏干，东南部相对偏湿的分布特征。EOF 展开的前三个模态累计解释方差达 51%，第一模态空间结构呈中部与东、西部反向变化特征，对应时间系数（PC-1）呈增加趋势并叠加有年际和年代际变化特征，第二模态主要表现为减少的近似南北反向型异常分布，分布特征能够较好的表征高原气候带与下垫面的实际状况。

（2）高原夏季风的异常变化是导致高原春季土壤湿度年际和年代际变化的主要原因。年际尺度上高原夏季风与次年高原春季土壤湿度表现为明显的正相关关系，相关系数达 0.43，并通过 0.01 的显著性检验；强季风年对应的环流中高纬地区环流表现为两槽一脊型，西太副高西进北抬，高原西北侧存在准正压结构的负异常中心，沿副高西脊线边缘的偏北气流给高

原提供充沛的水汽,进而增加高原夏季降水,随后入冬使土壤水分以冻土方式记忆,至翌年春季冻土随气温升高逐渐融化,从而土壤湿度增加。高原春季土壤湿度存在明显的年代际变化特征,并且与高原夏季风、高原夏季降水量在年代际尺度上呈同时正相关关系,相关系数均超过了 0.5 以上,表明高原夏季风与夏季降水量的年代际异常变化是春季土壤湿度发生年代际变化的主要原因。

土壤湿度与大气相互作用过程复杂,土壤湿度可通过感热、潜热等方式影响大气环流的异常变化,而大气环流的变化则通过降水等方式影响土壤湿度。本文分析了大气环流对高原春季土壤湿度的响应,其具体物理过程仍需通过数值试验等方法进一步验证和探讨。

参考文献 (References)

- 艾雅雯, 孙建奇, 韩双泽, 等. 2020. 1961~2016 年中国春季极端低温事件的时空特征分析 [J]. 大气科学, 44(6):1305-1319. AI Yawen, SUN Jianqi, HAN Shuangze, et al. 2020. Spatial and Temporal Features of Spring Extreme Low Temperature Events in China during 1961-2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6): 1305-1319 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19223.
- Zeng J Y, Zhen L A, Chen Q, et al. 2015. Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in-situ observations [J]. Remote Sens Environ. 34(3): 91- 110.
- Chow K C, Chan J C L, Shi X L, et al. 2008. Time-lagged effects of spring Tibetan Plateau soil moisture on the monsoon over China in early summer [J]. Int J Climatol, 28(1):55-67.
- 杜川利, 刘晓东, WU Wanli. 2008. CLM3 模拟的 1979-2003 年中国土壤湿度及其对全球变暖的可能响应 [J]. 高原气象, 27(3):463-473. LIU Chuanli, LIU Xiaodong, WU Wanli. 2008. CLM3-Simulated Chinese Soil Moisture during 1979-2003 and Its Possible Response to Global Warming [J]. PLATEAU METEOROLOGY, 27(3):463-473. doi: 1000- 0534(2008) 03-0463-11.
- 高荣, 韦志刚, 钟海玲. 2017. 青藏高原陆表特征与中国夏季降水的关系研究 [J]. 冰川冻土, 39(4): 741-747. GAO Rong, WEI Zhigang, ZHONG Hailing. 2017. Relationship between land surface characteristics in the Tibetan Plateau and summer precipitation in China [J]. JOURNAL OF GLACIOLOGY AND GEOCRYOLOGY, 39(4): 741-747. doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0084.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. 2019. (2019): ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on <1-12-2020>), doi:10.24381/cds.6860a573(欧洲中心网站参考)
- Koster R D, Suarez M J. 2001. Soil moisture memory in climate models [J]. J Hydrology, 2:558-570.
- Kuo H L, Qian Y F. 1981. Influence of the Tibetan Plateau on cumulative and diurnal changes of weather and climate in summer [J]. Mon Wea Rev, 109 (11): 2337-2356.
- 李登宣, 王澄海. 2016. 青藏高原春季土壤湿度与中国东部夏季降水之间的关系 [J]. 冰川冻土, 38(1): 89 - 99. Li Dengxuan, Wang Chenghai. 2016. The relation between soil moisture over the Tibetan Plateau in spring and summer precipitation in the eastern China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 38(1):89 - 99. doi: 10. 7522 /j. issn. 1000-0240.
- 李哲, 王磊, 王林等. 2017. 基于 AMSR-E 反演青藏高原夏季表层土壤湿度 [J]. 高原气象,

- 36(1):67-78. Li Zhe, Wang Lei, Wang Lin, et al. 2017. Top-layer soil moisture retrieval over the Qinghai-Xizang Plateau in summer based on AMSR-E data [J]. Plateau Meteorology, 36(1):67-78. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00085.
- 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):563-568. Ma Z G, Fu C B, Xie L, et al. 2001. Some problems in the study on the relationship between soil moisture and climate change [J]. Adv Earth Sci, 16(4):563-568.
- Namias J. 1958. Persistence of midtropospheric circulation between adjacent months and seasons [M]. Rossby Memorial Volume, Rockefeller Institute press and Oxford University press, 240-248.
- Njoku E G, Jackson T J, Lakshmi V, et al. 2003. Soil moisture retrieval from AMSR-E [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 41(2):215-229.
- 权晨, 周秉荣, 朱生翠等. 2018. 青藏高原高寒湿地冻融过程土壤温湿变化特征 [J]. 干旱气象, QUAN Chen, ZHOU Bingrong, ZHU Shengcui, XIAO Hongbin, et al. Variation Characteristics of Soil Temperature and Moisture During the Freezing and Thawing Periods in Alpine Wetland in Tibetan Plateau. Journal of Arid Meteorology. doi:10.11755/j.issn.1006-7639-02-0219.
- Shi N, Wang Y, Wang X, et al. 2019. Interdecadal Variations in the Frequency of Persistent Hot Events in Boreal Summer over Midlatitude Eurasia [J]. Journal of Climate, 32(16), 5161-5177, doi:10.1175/JCLI-D-18-0706.1.
- 孙夏, 范广洲, 张永莉等. 2019. 夏季青藏高原不同层次土壤湿度时空变化特征 [J]. 干旱气象, 37(2): 252-261. SUN Xia, FAN Guangzhou, ZHANG Yongli, et al. Temporal and Spatial Variation Characteristics of Soil Moisture at Different Layers of the Tibetan Plateau in Summer. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(2): 252-261. doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-02-0252.
- 索朗塔杰, 施宁, 王艺橙, 等. 2020. 我国冬季极端低温指数的年代际变化特征[J]. 大气科学, 44(5): 1125-1140. SuolangTajie, SHI Ning, WANG Yicheng, et al. 2020. Interdecadal Variation Characteristics of Extreme Low Temperature Index in Winter in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 1125-1140. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.19242
- 汤懋苍, 沈志宝, 陈有虞. 1979. 高原季风的平均气候特征 [J]. 地理学报, 34: 33-42. Tang Maocang, Shen Zhibao, Chen Youyu. 1979. On climatic characteristics of the Xizang Plateau monsoon [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 34: 33-42.
- 汤懋苍. 1998. 青藏高原季风的形成、演化及振荡特征 [J]. 干旱气象, 16 (1): 3-16. Tang Maocang. 1998. The formation, evolution and oscillation characteristics of the Tibetan Plateau monsoon [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 16 (1): 3-16.
- Tang M C, Reiter E R. 1984. Plateau monsoons of the Northern Hemisphere: A comparison between North America and Tibet [J]. Mon. Wea. Rev., 112: 617-637, doi:10.1175/1520-0493(1984)112<0617:PMOTNH>2.0.CO;2.
- Tollefson, J. 2014. Climate change: The case of the missing heat [J]. Nature 505,(7483): 276-278. doi.org/10.1038/505276a
- 王静, 何金海, 祁莉等. 2018b. 青藏高原土壤湿度的变化特征及其对中国东部降水影响的研究进展 [J]. 大气科学学报, 41(1):1-11. Wang J, He J H, Qi L, et al. 2018b, The variation characteristics of soil moisture in Tibet Plateau and its influences on the precipitation in eastern China : Recent progress [J]. Trans Atmos Sci, 41(1):1-11.

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20170806001.(in Chinese).

- 王静, 祁莉, 吴志伟等. 2018a. 多套土壤湿度替代资料在青藏高原的适用性分析 [J]. 高原气象, 37(2): 371-381. WANG Jing, QI Li, WU Zhiwei, et al. 2018a. Applicability Analysis of Soil Moisture from Multiple Substitute Data in Tibetan Plateau [J]. PLATEAU METEOROLOGY, 37(2): 371-381. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00074.
- 王瑞, 李伟平, 刘新等. 2009. 青藏高原春季土壤湿度异常对我国夏季降水影响的模拟研究 [J]. 高原气象, 28(6):1233-1241. Wang R, Li W P, Liu X, et al. 2009. Simulation of the impacts of spring soil moisture over the Tibetan Plateau on summer precipitation in China [J]. Plateau Meteorol(in Chinese). 28(6):1233-1241.
- 肖志祥, 段安民. 2015. 孟加拉湾热带风暴对青藏高原降水和土壤湿度的影响 [J]. 中国科学: 地球科学, 45: 625-638. Xiao Z X, Duan A M. 2015. Can the tropical storms originated from the Bay of Bengal impact the precipitation and soil moisture over the Tibetan Plateau? [J]. Science China:Earth Sciences, 45: 625-638. doi: 10.1007/s11430-014-5028-8.
- 徐洪亮, 常娟, 郭林茂等. 2021. 青藏高原腹地多年冻土区活动层水热过程对气候变化的响应 [J]. 高原气象, 40(2):229-243. XU Hongliang, CHANG Juan, GUO Linmao, et al. 2021. Response of Thermal-Moisture Condition within Active Layer in the Hinterland of the Qinghai-Xizang Plateau to Climate Change [J]. Plateau Meteorology, 40(2):229-243. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00071.
- 徐洪亮, 常娟, 郭林茂等. 2021. 青藏高原腹地多年冻土区活动层水热过程对气候变化的响应 [J]. 高原气象, 40(2):229-243. XU Hongliang, CHANG Juan, GUO Linmao, et al. 2021. Response of Thermal-Moisture Condition within Active Layer in the Hinterland of the Qinghai-Xizang Plateau to Climate Change [J]. Plateau Meteorology, 40(2):229-243. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00071.
- 荀学义, 胡泽勇, 崔桂凤等. 2018. 青藏高原季风对我国西北干旱区气候的影响 [J]. 气候与环境研究, 23 (3): 311-320. Xun Xueyi, Hu Zeyong, Cui Guifeng, et al. 2018. The effect of Tibetan Plateau monsoon on the climate in the arid area of Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (3): 311-320, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17024.
- 晏红波, 周国清. 2017. 地表土壤湿度光学遥感反演方法研究进展 [J]. 亚热带资源与环境学报, 12(2):82-89,95. YAN H B, ZHOU G Q. 2017. Surface soil moisture retrieval from optical remote sensing: Current status and perspectives [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 12(2):82-89,95.
- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 62-73. Ye D Z, Gao Y X. 1979. Qinghai-Xizang Plateau Meteorology[M]. Beijing: Science Press, 62-73.
- 张文君, 周天军, 宇如聪. 中国土壤湿度的分布与变化 I. 多种资料间的比较 [J]. 大气科学, 2008, 32(3): 581-597. ZHANG Wen-Jun, ZHOU Tian-Jun, YU Ru-Cong. Spatial Distribution and Temporal Variation of Soil Moisture over China Part I: Multi-data Intercomparison[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(3): 581-597. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.15
- Zhang R H, Zuo Z Y. 2011. Impact of Spring Soil Moisture on Surface Energy Balance and Summer Monsoon Circulation over East Asia and Precipitation in East China [J]. Journal of Climate, 24(13):3309-3322.
- 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 Jiazhen, WANG Aihui, WANG Huijun. 2021. Soil Moisture

Memory and Its Relationship with Precipitation Characteristics in China Region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),45(4):799–818 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.20149

周娟, 文军, 王欣等. 2017. 青藏高原季风演变及其与土壤湿度的相关分析 [J]. 高原气象, 36(1):45-56. Zhou Juan, Wen Jun, Wang Xin, et al. 2017. Analysis of the Qinghai-Xizang Plateau monsoon evolution and its correlation with soil moisture [J]. Plateau Meteorology, 36(1):45-56. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00003.

卓嘎, 德吉卓玛, 尼玛吉. 2017. 青藏高原土壤湿度分布特征及其对长江中下游 6、7 月降水的影响 [J]. 高原气象, 36(3):657-666. Zhuo G, Deji Z M, Nima J, 2017. Distribution of soil moisture over the Tibetanan Plateau and its effect on the precipitation in June and July over the mid-lower reaches of Yangtze River Basin [J]. Plateau Meteor, 36(3): 657-666.(in Chinese).