

DOI: 10.5846/stxb201807301613

邓元红,王世杰,白晓永,吴路华,操玥,李朝君,李汇文,胡泽银.西南地区土壤湿度与气候之间的互馈效应.生态学报,2018,38(24):8688-8699.
Deng Y H, Wang S J, Bai X Y, Wu L H, Cao Y, Li C J, Li H W, Hu Z Y. Relationship between soil moisture and climate and its memory in Southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): 8688-8699.

西南地区土壤湿度与气候之间的互馈效应

邓元红^{1,2,3}, 王世杰^{1,3}, 白晓永^{1,3,*}, 吴路华^{1,2,3}, 操玥^{1,2,3}, 李朝君^{1,3,4},
李汇文^{1,2,3}, 胡泽银^{1,2,3}

1 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 安顺 562100

4 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001

摘要: 土壤湿度控制着陆气之间的水热交换, 与气候具有互馈效应。为了揭示中国西南地区土壤湿度与气候之间的关系, 基于 39 年 GLDAS 数据, 采用线性倾向估计、偏相关等方法探究了该区域土壤湿度与降水、气温的时空规律及相关性, 分析了土壤湿度记忆性 (Soil Moisture Memory, SMM) 的空间分布及季节特征。主要结论如下: (1) 1979—2017 年, 西南地区仅表层 (0—10 cm) 年平均土壤湿度呈显著减少趋势 ($P < 0.001$), 气候倾向率为 $0.7 \text{ kg/m}^2/10 \text{ a}$, 年降水量呈不显著增加趋势, 而年平均气温呈显著的增加趋势 ($P < 0.001$)。 (2) 多年平均状态下, 表层与更深层 (10—40、40—100、100—200 cm) 的土壤湿度呈相反的空间格局, 中层 (10—40、40—100 cm) 土壤湿度最高。 (3) 基于像元的偏相关系数表明研究区土壤湿度总体上与降水关系更密切, 二者呈正相关, 但在 0—10 cm 部分地区相关性不显著。 (4) 西南地区 SMM 总体上以 60—90 d 为主, 且 SMM 均值以夏季最长, 其次为冬季和春季, 秋季最短; 同时, 对比各深度的 SMM, 发现 0—10 cm 的土壤湿度对整个西南地区长期的气候预测具有更好的代表性。研究结果可为研究西南地区陆-气相互作用以及气候预测与模式评估等提供参考依据。

关键词: 土壤湿度; 西南地区; 记忆性; 偏相关

Relationship between soil moisture and climate and its memory in Southwest China

DENG Yuanhong^{1,2,3}, WANG Shijie^{1,3}, BAI Xiaoyong^{1,3,*}, WU Luhua^{1,2,3}, CAO Yue^{1,2,3}, LI Chaojun^{1,3,4},
LI Huiwen^{1,2,3}, HU Zeyin^{1,2,3}

1 Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Anshun 562100, China

4 School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

Abstract: Soil moisture controls the water and heat exchange between the land and atmosphere, and has mutual feedback effects with climate. To reveal the relationship between soil moisture and climate in Southwest China, this study analyzed the spatial-temporal regularity and correlation of soil moisture with precipitation and temperature, using linear tendency estimation and partial correlation, respectively, based on 39-year GLDAS data, and determined the spatial distribution and seasonal characteristics of soil moisture memory (SMM). The main conclusions were as follows: (1) from 1979 to 2017,

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502102); 中国科学院科技服务网络计划(KFJ-STZ-ZDTP-036); “西部之光”人才培养计划(A类)([2018]X); 贵州省科技计划(2017-2966)

收稿日期: 2018-07-30; 修订日期: 2018-11-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baixiaoyong@vip.skleg.cn

<http://www.ecologica.cn>

the annual average soil moisture in the surface layer (0—10 cm) of Southwest China showed a significant decreasing trend ($P < 0.001$), the climatic tendency rate was $0.7 \text{ kg/m}^2/10 \text{ a}$, the annual precipitation showed no significant increasing trend, but the annual average temperature showed a significant increasing trend ($P < 0.001$); (2) under the multi-year average condition, the spatial pattern of soil moisture in the surface layer was opposite to that in the deeper layer (10—40, 40—100, 100—200 cm), and the soil moisture in the middle layer (10—40, 40—100 cm) was the highest; (3) pixel-based partial correlation coefficients show that soil moisture in the study area is generally more closely related to precipitation, and are positively correlated, but at a depth of 0—10 cm, the correlation was not significant in some areas; (4) SMM in Southwest China was mainly 60—90 days, the mean SMM of the study area was the longest in summer, followed by winter and spring, and the shortest in autumn; meanwhile, compared with other SMM depths, soil moisture at a depth of 0—10 cm was more representative for long-term climate prediction in Southwest China. The results from this study could provide a reference for the study of land-air interaction, climate prediction, and model assessment in Southwest China.

Key Words: soil moisture; Southwest China; memory; partial correlation

土壤湿度是衡量陆地土壤干湿状况的重要指标,它联系了岩石圈、水圈、生物圈、大气圈之间物质的运移和能量的交换^[1-2]。土壤湿度的多少影响植物的生长发育状况以及农作物的产量^[3];同时,土壤湿度影响水循环过程中的蒸发和径流形成等环节;其次,土壤湿度影响土壤中化学物质的运移^[4];此外,土壤湿度通过改变陆地地表向大气输送感热、潜热的分配比例,地表的反照率、土壤的热容量、地表蒸发和植被生长状况,影响地表能量、水分的再分配,对气候产生影响^[5-6],因此揭示土壤湿度的时空分布、影响因素及其气候效应是水文学、气候学等领域的重要研究内容^[7-9]。

土壤湿度与气候要素之间存在互馈效应^[10-13]。目前,许多学者采用站点观测数据、再分析资料、遥感土壤水分反演数据等研究土壤湿度对气候的影响^[7,14-15],发现土壤湿度是气候异常持续性的影响因子^[16-18],陆地土壤湿度异常存在着数周至数月的记忆性,可以对后期的气象或气候进行预测^[19-20]。Seneviratne 等^[21]利用 AGCM 模型研究发现在土壤湿度为中等的地区土壤湿度的记忆性最高,土壤的极端干燥或潮湿状态往往会增加土壤水分的记忆;Orth 等^[22]基于站点数据研究发现在欧洲地区,土壤湿度记忆在某些季节持续高达 40 d;国内,李若麟等^[23]研究表明全球的土壤湿度记忆性长达 20—110 d 不等;程善俊等^[24]发现与表层土壤湿度相比,黄土高原半干旱地区深层的土壤湿度能较稳定地记忆区域气候的变化过程。中国西南地区分布着大面积的喀斯特地貌,土壤水分是喀斯特作用、土壤侵蚀的重要影响因子,更是喀斯特石漠化严重地区植被生长的限制性因子,因而有关土壤湿度的研究多集中于西南地区土壤水分的影响因素及影响机制^[3],对该区域土壤湿度的气候效应的研究偏少;此外,受地形影响,西南地区土壤湿度观测数据集在时空上不连续,导致针对西南地区多层次、像元尺度的土壤湿度的记忆性及其与气候之间的关系的研究甚少。左志燕等^[25]采用 1982—2001 年 ERA-40 土壤湿度再分析资料研究发现中国西南地区春季各层的土壤湿度均呈变干的趋势;邓彪等^[26]基于站点数据研究发现 1994—2011 年四川盆地表层土壤湿度呈微弱的上升趋势;王硕甫等^[27]研究发现在西南地区(川、贵、渝、滇)与浅层(10 cm)相比,中层(50 cm)的土壤湿度与气温、降水之间的相关性略强。

鉴于此,本文基于 1979—2017 年 GLDAS(Global Land Data Assimilation System) 土壤湿度数据,以包括青藏高原部分地区在内的中国西南为研究区,完成以下研究目的:1) 基于观测站点实测数据评价 GLDAS 土壤湿度数据在研究区的适用性。2) 利用线性倾向估计、距平分析揭示 39 年来西南地区土壤湿度与降水、气温的变化趋势及空间分布格局。3) 采用 Pearson 相关和偏相关分析不同深度的土壤湿度与降水、气温之间的时空相关性。4) 计算土壤湿度记忆性,探讨中国西南地区土壤湿度记忆性的空间分布特征及季节特征。本文研究结果对深入了解西南地区土壤湿度特征,区域陆面过程模拟和气候预测提供参考依据。

1 研究区

如图 1 所示, 本文中国西南研究区主要包括广西、云南、贵州、重庆、四川、青海西南部、西藏东北部地区, 后文分别统一简称为桂、滇、黔、渝、川、青、藏, 经纬度范围为 19.45° — 37.63° N, 83.66° — 113.25° E, 面积约为 233 万 km^2 。研究区覆盖我国地形第一阶梯向第二阶梯过渡带, 平均海拔为 2906 m, 相对高差为 7198 m, 地形高差悬殊, 地貌类型复杂。以横断山为界, 横断山以东分布有四川盆地、云贵高原, 西部分布着青藏高原; 气候类型从东南向西北依次为热带季风气候、亚热带季风气候、高原高山气候; 同时, 桂、滇、黔、川等南方地区分布着具有二元三维结构的典型喀斯特地貌^[28], 生态环境脆弱, 部分地区存在着严重的土壤侵蚀与石漠化问题^[29-31], 土壤水分是喀斯特土壤退化的关键因子^[32]; 此外, 青藏高原地区平均海拔在 4000 m 以上, 广泛分布着多年冻土, 其面积占世界多年冻土的 7%, 主要位于青藏高原内腹的昆仑山与唐古拉山之间的区域^[33]。春夏两季青藏高原土壤湿度为增加期, 进入秋季为减少期, 冬季则为稳定期^[34-35]。

2 资料与方法

2.1 数据源与预处理

计算土壤湿度的记忆性需要长时间序列的土壤湿度数据。然而, 土壤湿度的时空变率大, 研究区时空连续的土壤湿度站点观测资料匮乏, 遥感观测数据只能反演出表层土壤湿度, 因此本文采用了全球陆面数据同化系统 GLDAS (Global Land Data Assimilation System) 陆面模式 NOAH 提供的 1979—2017 年 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的 3 h 土壤湿度数据, 土壤深度分为 0—10、10—40、40—100、100—200 cm。GLDAS 结合地面观测和卫星数据产品, 通过数据同化生成了最优近实时的地表状态变量, 克服了地面观测的局限性^[36], 大量研究评价结果表明了 GLDAS 数据具有较高的可信度^[37-39], 目前, 已被广泛应用于土壤湿度研究、遥感反演土壤湿度结果验证、气候气象预测、水资源管理、旱涝灾害等研究领域^[40-42]。为评价 GLDAS 土壤湿度在研究区的适用性, 采用了 ISMN (International Soil Moisture Network) 提供的土壤湿度观测数据, ISMN 收集整理了来自世界 50 多个观测网络的土壤湿度数据, 现已被广泛用于多源土壤湿度数据的验证^[43-44]。由于各观测站点的观测仪器、测量深度、采样间隔等不一致, 本文筛选出测量深度在 0—10 cm、质量符合标准的实测数据, 用于验证 0—10 cm 的 GLDAS 土壤湿度, 站点位置见图 1。研究区降水和气温数据为美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的地球系统研究实验室 (ESRL) 提供的 1979—2017 年 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的降水数据和气温数据 (<https://www.esrl.noaa.gov/>)。在数据预处理方面, 通过算术平均将土壤湿度 3 h 数据处理为日数据, 同时由于该土壤湿度数据单位为 kg/m^2 , 即用研究层内单位面积的含水量表示, 本文将表层到深层的土壤湿度分别乘以 0.1、0.3、0.6、1, 消除土层厚度的影响^[24]; 将土壤湿度实测数据、降水数据和气温数据通过最邻近算法进行插值, 使其与 GLDAS 土壤湿度数据的时空分辨率相匹配; 为消除量纲的影响, 将土壤湿度实测数据与 GLDAS 数据均进行了归一化处理。

2.2 方法

2.2.1 线性倾向估计

用 y_i , t_i 分别表示样本量为 n 的气候变量及其对应的时间, 建立 y_i 与 t_i 之间的一元线性回归, 具体公式

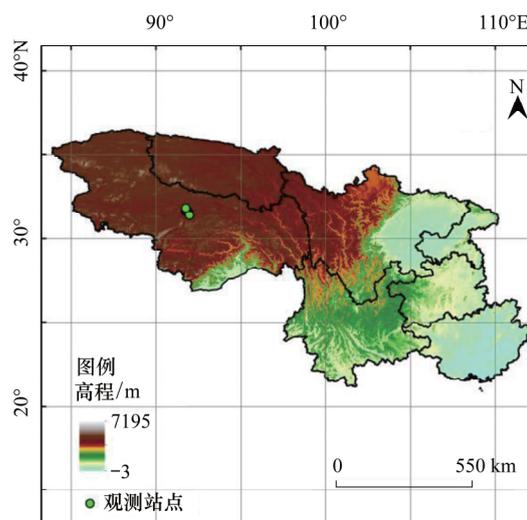


图 1 研究区的位置及土壤湿度观测站点分布

Fig. 1 Location of study area and spatial distribution of soil moisture observation stations

如下:

$$\hat{y}_i = \alpha + \beta t_i \quad (1)$$

式中,用最小二乘法去估计公式(1)中回归常数 α 、回归系数 β ,估计方法可参考文献^[45];其中 β 即为倾向值, $\beta \times 10$ a 为气候倾向率,即为每 10 年气象要素 y_i 的变化率^[46]。 β 大于(小于)0 表示气候变量随时间呈上升(下降)趋势, β 绝对值的大小代表气候变量随时间变化的速率或幅度。本文分别对 1979—2017 年各层土壤湿度、降水、气温的进行线性倾向估计,其中 $t_1 = 1979$, $t_2 = 1980$, \dots , $t_{39} = 2017$ 。

2.2.2 相关系数与偏相关系数

本文计算了西南地区 0—10 cm 土壤湿度实测数据与 GLDAS 数据的相关系数,同时也计算了各深度的 GLDAS 土壤湿度与降水、气温在时空上的相关系数,具体计算方法如下,

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

式中, X 、 Y 、 \bar{X} 、 \bar{Y} 分别表示两个变量及变量的平均值, r 为变量的相关系数, N 为样本量。

偏相关系数。在 3 个变量 x_i 、 x_j 、 x_h 中,排除其中一个变量的影响后计算的剩余两个变量的偏相关系数,公式为:

$$r_{ij \cdot h} = \frac{r_{ij} - r_{ih} r_{jh}}{\sqrt{(1 - r_{ih}^2)(1 - r_{jh}^2)}} \quad (3)$$

式中, r_{ij} 、 r_{ih} 、 r_{jh} 分别表示变量 x_i 和 x_j , r_i 和 x_h , x_j 和 x_h 的相关系数, $r_{ij \cdot h}$ 是在固定变量 x_h 后 x_i 和 x_j 的偏相关系数。本文在像元尺度上分别计算了不同深度的土壤湿度与降水、气温之间的偏相关系数。

2.2.3 土壤湿度记忆性的计算

土壤湿度记忆性定义为土壤湿度的滞后自相关系数低于 99% 的置信度检验时的滞后天数,它的大小可以用土壤湿度的自相关系数来衡量^[23],计算公式如下:

$$R_{(lag)} = \frac{1}{n - lag} \sum_{i=1}^{n-lag} (X_i - \bar{X})(X_{i+lag} - \bar{X})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}} \quad (4)$$

式中, lag 为滞后的天数, $lag = 1, 2, 3, \dots$, X_i 为 1979—2017 年同一日期的平均土壤湿度; n 为 365 d, \bar{X} 为 X_i , $i = 1, 2, 3, \dots$ 的平均土壤湿度。本文将季节划分为春季(MAM, 3、4、5 月)、夏季(JJA, 6、7、8 月)、秋季(SON, 9、10、11 月)、冬季(DJF, 12、1、2 月),进而计算了研究区不同季节、不同深度的土壤湿度记忆性。

3 结果与分析

3.1 GLDAS 土壤湿度的适用性评价

表 1 所示,研究区 6 个实测站点的土壤湿度与匹配的 GLDAS 土壤湿度数据均呈十分显著的正相关关系,通过了 99.9% 的显著性检验。总体相关性较好,为 0.48—0.58,这说明在未考虑站点与像元的尺度(即 $1^\circ \times 1^\circ$) 差异的情况下,GLDAS 土壤湿度数据与实测数据仍具有较好的一致性,能够较真实地反映中国西南地区土壤湿度状况。

3.2 土壤湿度与气候的时空特征

3.2.1 土壤湿度趋势分析及空间分布特征

图 2 表明,1979—2017 年西南地区各深度的土壤湿度距平时间序列均呈不同幅度的波动变化,且总体上存在较好的一致性,即存在同相位,该特点在 1991 年之后表现的最为明显。表 2 显示西南地区各深度的土壤湿度在变化趋势上存在差异性,0—10、10—40、100—200 cm 土壤湿度均呈减少的趋势,但仅 0—10 cm 的土壤

湿度倾向值显著(通过 0.001 显著性水平),气候倾向率为 $0.7 \text{ kg/m}^2/10 \text{ a}$,西南地区 40—100 cm 的平均土壤湿度呈微弱的增加趋势,但变化趋势不显著;此外,1979—2017 年不同深度的年均土壤湿度年际间变化明显,存在 2—3 a 的变化周期(图 2),该特点与我国东部地区土壤湿度变化周期一致^[47];其中,在 1996 年,西南地区各层土壤湿度均达到最小值,土壤为干旱状态(负距平)。在空间分布上,西南地区多年平均状态下的土壤湿度存在显著差异(图 3),在表层(0—10 cm)滇、藏、川交界处等研究区中部的土壤湿度最低,而藏中、青南的土壤湿度最高;10—40、40—100、100—200 cm 的土壤湿度的空间分布具有良好的一致性,总体上,从东南向西北土壤湿度逐渐减少,主要表现在渝、黔、桂、川东地区土壤湿度偏高。在垂直分布上,图 3 显示西南地区中层(10—40、40—100 cm)的土壤湿度显著高于 0—10、100—200 cm 的土壤湿度,该结果与王硕甫等^[27]人的结论一致,统计显示,从表层到深层,西南地区平均的多年土壤湿度均值依次为 31.58、43.81、43.44、24.93 kg/m^2 (表 1);同时,0—10 cm 土壤湿度的高、低值区分别处于西南地区的西部和中部,而更深层的土壤湿度的高、低值区的空间分布与其相反,这可能是由于西南地区西部为高寒地区,表层存在多年冻土导致。

表 1 表层土壤湿度实测数据与 GLDAS 数据的相关性

Table 1 Correlation coefficients between surface in-situ soil moisture data and GLDAS data

观测网 Network	站点 Station	海拔 Elevation/m	深度 Depth/m	观测时间段 Observation period	相关系数 Pearson's r
CTP_SMTMN	L10_M17	4552	0—0.05	2010.08.01—2012.12.12	0.580***
	L12_M22	4671	0.1—0.1	2010.08.01—2011.08.25	0.576***
	L07_M13	4628	0—0.05	2010.08.01—2012.01.01	0.519***
	L08_M14	4574	0—0.05	2010.08.01—2012.01.01	0.510***
	L17	4559	0.1—0.1	2012.06.17—2016.08.11	0.506***
	L04_M02	4818	0.1—0.1	2010.08.01—2012.01.01	0.481***

显著性标记: 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '*'

3.2.2 降水和气温的趋势分析及空间分布特征

图 2 显示,总体上,1979—2017 年西南地区平均的年降水量呈不显著的增加趋势,而年平均气温呈极显著线性增加趋势,气候倾向率为 $0.4^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ (表 2)。二者年际变化均十分明显,其中,年降水量在 1981 年达到最大,在 1992 年达到最小;在 1982—1989、1991—1997、2003、2006—2007、2009、2011 年,西南地区降水偏少(负距平),在其他年份降水量偏多。同时,从图 2 可以看出西南地区平均的年平均气温存在 3—4 年的变化

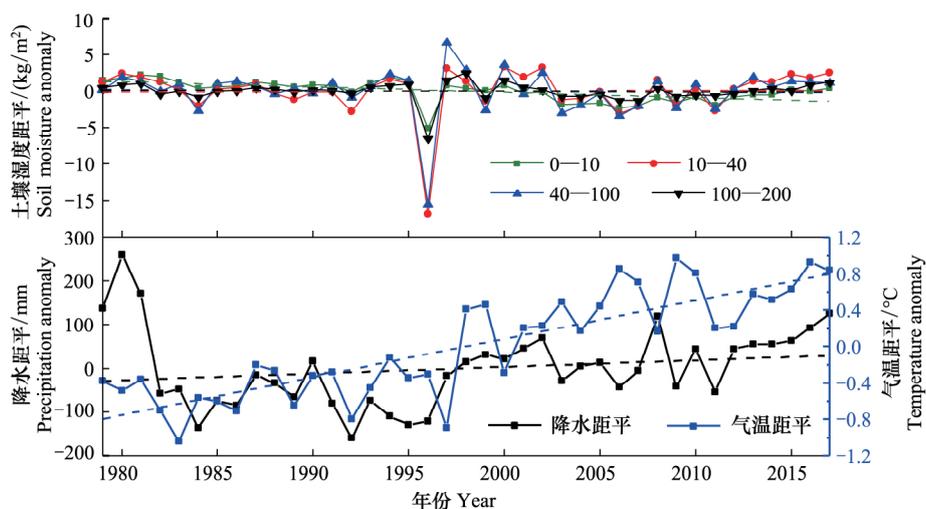


图 2 西南地区平均的年平均土壤湿度距平、年降水距平和年平均气温距平变化趋势

Fig. 2 Change trend of annual average soil moisture anomalies, annual precipitation anomalies and annual mean temperature anomalies in Southwest China

周期; 在 1983 年 西南地区年平均气温最低, 为 6.93℃, 而在 2009 年达到最高值, 为 8.95℃; 在 1979—1997、2000 年西南地区处于偏冷气候期(负距平), 在其他年份基本处于偏暖气候期(正距平)。此外, 对比气温距平与降水距平的变化曲线, 西南地区平均的年降水量与年均气温在 1986、1989、2011 等年份呈反相位, 而在 1980、2003、2006、2009 年呈同相位。

表 2 1979—2017 年西南地区平均的土壤湿度、降水、气温的线性倾向估计

Table 2 Linear trend estimation of soil moisture, precipitation and temperature in Southwest China from 1979 to 2017

统计参数 Statistical parameter	土壤湿度 Soil moisture / (kg/m ²)				降水/mm Precipitation	气温/℃ Temperature
	0—10 cm	10—40 cm	40—100 cm	100—200 cm		
平均值 Mean value	31.58	43.81	43.44	24.93	764.88	7.97
皮尔逊相关系数 Pearson's r	-0.57***	0.02	-0.04	-0.05	0.19	0.84***
调整的确定系数 Adjusted R ²	0.30	-0.03	-0.03	-0.02	0.01	0.70
倾向值 Slope	-0.07***	0.01	-0.01	-0.01	1.49	0.04***

显著性标记: 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '*'

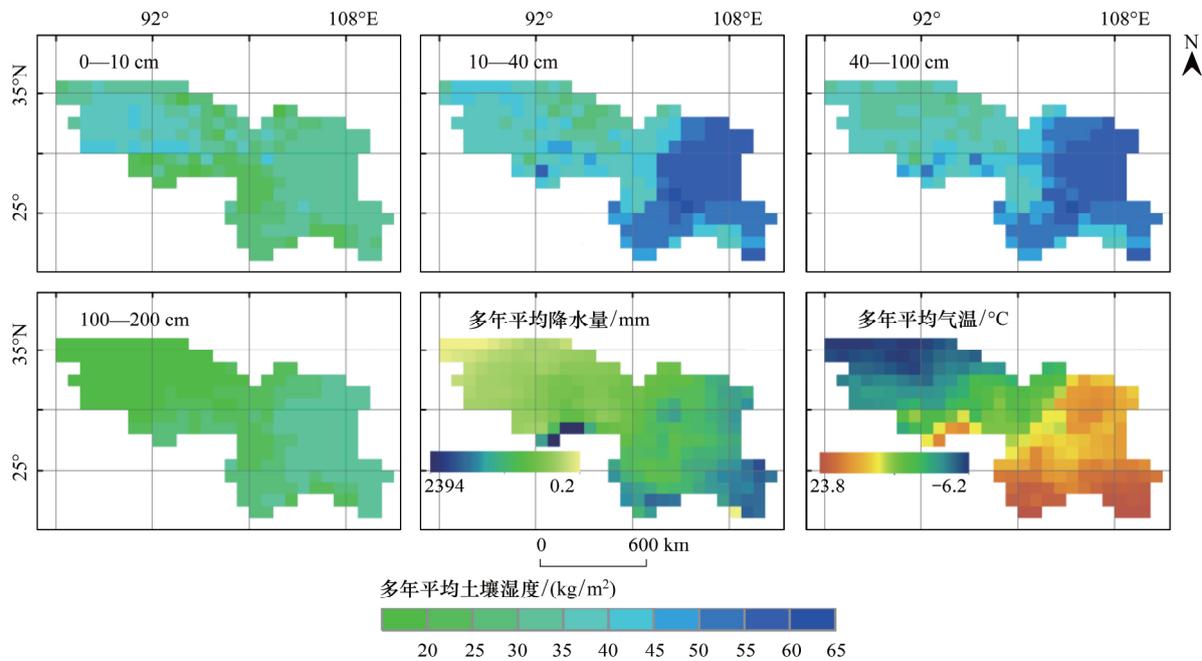


图 3 多年平均状态下西南地区土壤湿度、年降水量及气温的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of multi-annual mean soil moisture, annual precipitation and temperature in Southwest China

在空间分布上, 西南地区多年平均年降水量由东南向西北递减(图 3), 该分布特征与较深层的土壤湿度分布相似(图 3)。具体表现为滇西、川北、研究区青藏地区的年降水量在 800 mm 以下, 但在研究区藏东南边缘地带年降水量最高在 2000 mm 以上, 桂东北等少部分地区年平均降水量在 1600 mm 以上。西南地区多年平均气温空间分布特征与年降水量分布相似, 即从东南向西北, 气温逐渐降低(图 3), 这可能是受海拔高度和纬度的影响。例如, 藏、青等地区平均海拔高达 4000 m 以上, 多年平均气温在 0℃ 以下; 云南和广西的南部地区纬度低, 多年平均温度偏高, 在 20℃ 以上, 研究区东北部四川盆地因海拔低, 气温比同纬度地区高。以上说明西南地区从东南向西北, 气候由高温多雨到低温少雨。

3.3 土壤湿度与降水、气温的时空相关性

图 2 中多年平均土壤湿度距平与年降水量距平、年平均气温距平的变化曲线在部分年份存在同相位, 但整

体的相关性不清晰;图 3 中,1979—2017 年多年平均状态下的土壤湿度、降水量、气温在空间分布上存在良好的一致性,因此,为进一步探究土壤湿度与降水、气温之间的时空相关性,本文分别从时间、空间维度计算了土壤湿度与降水、气温之间的 Pearson 相关系数(表 3)。

表 3 西南地区不同深度的土壤湿度与降水、气温之间的时空相关系数

Table 3 Temporal and spatial correlation coefficients between different depths of soil moisture and precipitation, temperature in Southwest China

维度 Dimension	气候要素 Climate factor	土壤湿度 Soil moisture			
		0—10 cm	10—40 cm	40—100 cm	100—200 cm
时间 Time	降水	0.17	0.47**	0.32 [*]	0.36 [*]
	气温	-0.50 [*]	0.02	-0.13	-0.05
空间 Space	降水	-0.34***	0.59***	0.64***	0.78***
	气温	-0.39***	0.68***	0.75***	0.85***

显著性标记: 0.001 ‘***’ 0.01 ‘**’ 0.05 ‘*’

由表 3 可知,在时间维度上,西南地区各层年平均土壤湿度与年降水量均呈正相关,且 10—40 cm 的土壤湿度与降水的相关性最强且最显著,但表层 0—10 cm 的土壤湿度与年降水量之间相关性不显著;同时,0—10 cm 的年平均土壤湿度与年平均气温呈显著的负相关关系,这说明 1979—2017 年气温的升高可能是表层土壤湿度干化的重要原因,而更深层的土壤湿度与年平均气温之间无显著的相关关系。在空间上,西南地区多年平均状态下的 0—10 cm 土壤湿度与年降水量、年平均气温均呈极显著的负相关关系,但根据水量平衡原理,土壤湿度与降水量为正相关关系,这与本文研究结果不同,原因有待进一步分析;同时,表 3 显示,10—40、40—100、100—200 cm 的土壤湿度与降水、气温均呈极显著的正相关关系,且随着深度增加,相关性均增强。以上说明,西南地区偏深层的土壤湿度与气候因子(降水、气温)之间的空间分布型具有良好的一致性,这可能受地形控制的结果。

3.4 西南地区土壤湿度记忆性的时空分布特征

大量研究表明土壤湿度异常具有较长的持续性,即土壤湿度的记忆性(Soil Moisture Memory, SMM),这种记忆性可以预测季节尺度的气候状况,本文逐像元计算了西南地区不同深度不同季节的 SMM^[48-49]。如图 4、图 5 所示,西南地区 SMM 存在明显的空间差异性和季节差异,总体变化范围为 19—111 d 左右,以 60—90 d 为主,这说明西南地区的土壤湿度可能对后期 2—3 个月的天气或气候产生影响,该计算结果与 Dirmeyer 等^[50]、李若麟等^[23]的研究结果一致。具体地,在春季(MAM),表层(0—10 cm)偏干地区的 SMM 偏短,为 30—60 d 左右,主要位于渝、黔、川北部等地区,而在西藏中北部地区、广西东部地区的 SMM 长达 80 d 及以上;从 0—10 cm 到 10—40、40—100 cm,西南地区大部分区域的 SMM 变短,其中在 40—100 cm,青、藏等 44.3% 的地区的 SMM 短于 50 d,而相比之下,西南地区 100—200 cm 的 SMM 略偏长,以 60—70 d 为主。夏季(JJA)在 0—10 cm,湿润地区的 SMM 偏长,例如桂、黔、渝三省的西部地区, SMM 长达 3 个月以上;同时,在 100—200 cm,西南地区 SMM 长达 3 个月以上的范围达到最大,占比 25.3%,主要分布在云南、四川东南部,青海东部等地区;秋季(SON),西南地区不同土深的 SMM 高低值空间分布格局与春季相似,存在细微差异,例如,在秋季,青藏地区中部 0—10、10—40 cm 的 SMM 达到全年最长为 80 d 以上,这可能是由于在春季青藏高原地区土壤湿度持续减少的结果。冬季(DJF),在 0—10 cm,西南地区的 SMM 的空间差异较小,95% 地区的 SMM 长达 2—3 个月;同时,随着深度的增加,西南地区冬季 SMM 短于 2 个月的西部地区空间分布变化规律总体上与春季相似,但云南、四川东北部的 SMM 天数增加。

4 讨论

4.1 西南地区土壤湿度与气候因子的相关性

对比表 3 中土壤湿度与降水、气温在时间维度上的相关性,发现在表层(0—10 cm),土壤湿度与气温的

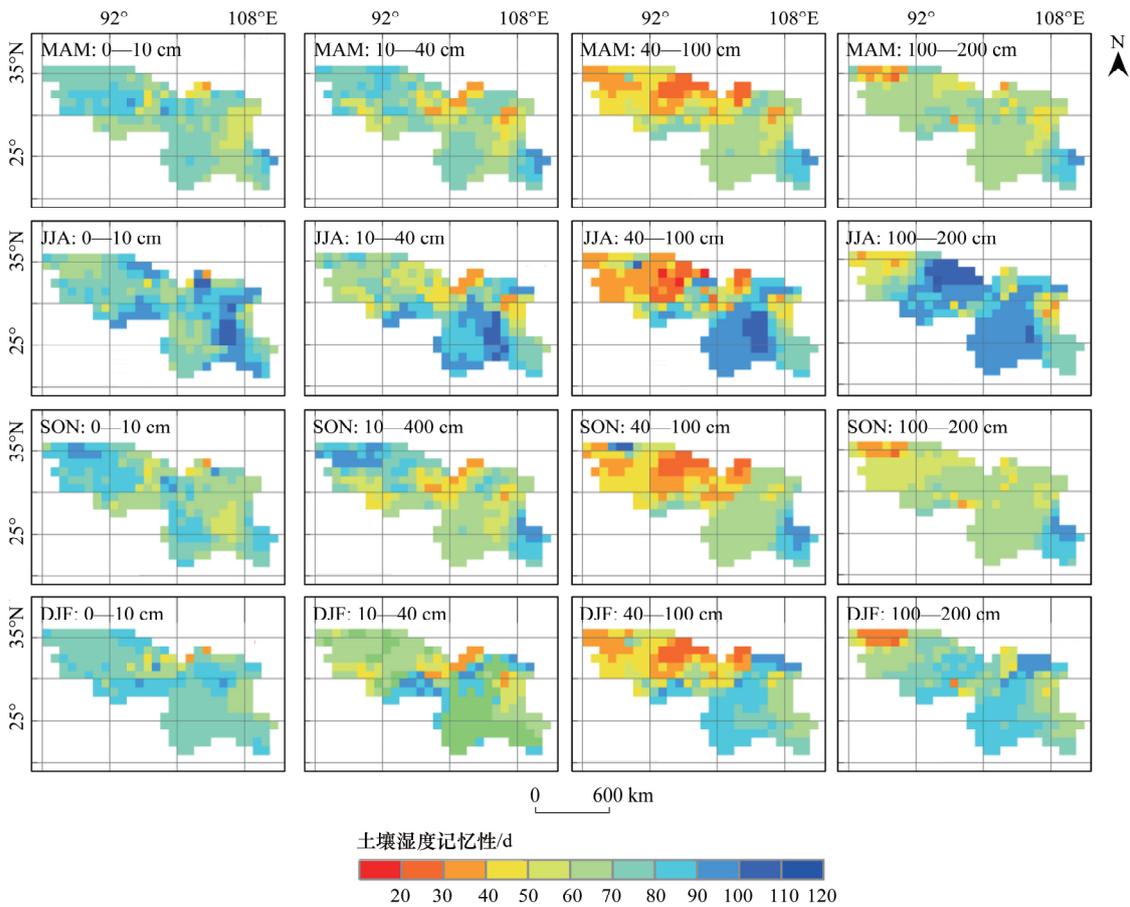


图 4 西南地区不同季节不同深度土壤湿度的记忆性

Fig.4 Soil moisture memory in different seasons and depths in Southwest China

MAM: 3、4、5 月; JJA: 6、7、8 月; SON: 9、10、11 月; DJF: 12、1、2 月

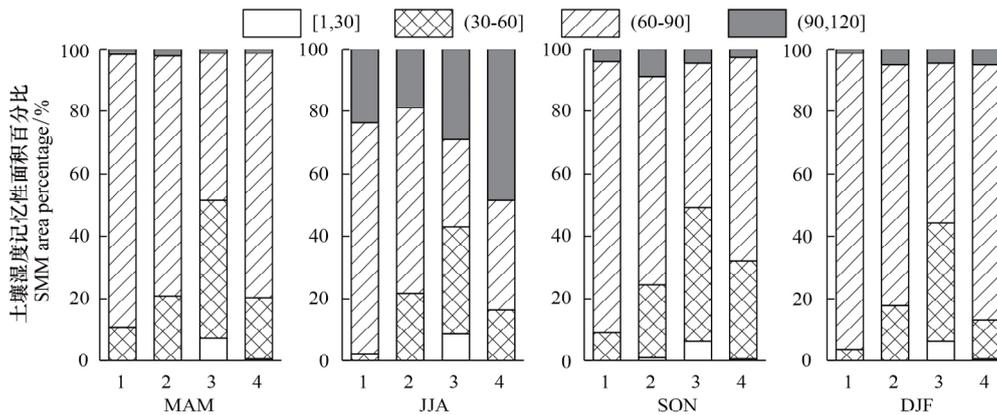


图 5 西南地区不同季节不同深度的土壤湿度记忆性 (SMM) 的面积百分比

Fig.5 Area percentage of soil moisture memory (SMM) in different seasons and depths in Southwest China

图中 1、2、3、4 分别代表深度 0—10、10—40、40—100、100—200 cm

相关性比其与降水之间的相关性更强; 在更深层(10—40、40—100、100—200 cm) ,土壤湿度与降水的相关性比其与气温的相关性更强 ,这意味着 ,西南地区表层土壤湿度可能主要受气温控制 ,而更深层的土壤湿度主要受降水的影响 ,即降水多(少) 影响更深层土壤储水量的多(少) ,从而表现为更深层土壤湿度的高(低) 。然而 ,Pearson 相关系数不能排除降水与气温之间的相互关系 ,为此 ,本文逐像元计算研究区土壤湿度与降水、气

温的偏相关系数。结果表明,西南地区不同地区、深度的土壤湿度与降水的偏相关系数范围为 -0.35 — 0.72 不等,而土壤湿度与气温的偏相关系数变化范围为 -0.66 — 0.73 不等。

为进一步判断对研究区土壤湿度影响更强的气候因子(降水、气温),本文逐像元比较土壤湿度与降水、气温的偏相关系数绝对值,保留最大值(图6)。在图6中,西南地区东南部的桂、滇、黔、渝及川南 0 — 10 cm的土壤湿度与降水的关系更加密切,二者呈显著的正相关关系,且在云南地区的偏相关系数最大;同时,西南中西部的四川盆地北部、青藏高原中部地区土壤湿度与降水、气温的偏相关系数不显著,这说明该地区的土壤湿度主要受到降水、气温以外因素的影响;此外,西南地区的西北部少部分地区的土壤湿度与气温呈强度的正相关。随着深度增加,土壤湿度与降水、气温呈显著相关的地区范围扩大,这说明更深层的土壤湿度与降水、气温的关系更加密切。具体地,滇、桂等西南地区南部,青海等西南地区西北部 10 — 40 、 40 — 100 、 100 — 200 cm的土壤湿度与降水的相关性更加密切; 30°N 附近的四川盆地等研究区中部、东北部地区的土壤湿度与气温的关系更加密切,二者呈显著的负相关关系。综上所述,西南地区的土壤湿度整体上主要受降水影响,二者呈正相关关系,但在表层,西南地区青藏高原,四川南部地区的土壤湿度与降水、气温关系均不显著。

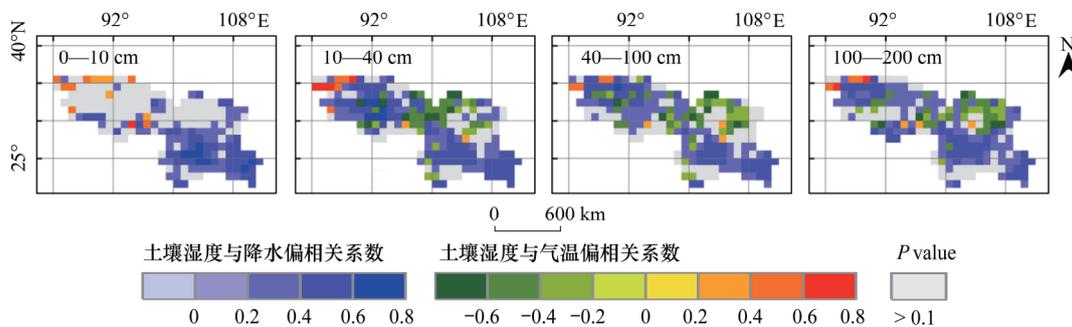


图6 1979—2017 西南地区土壤湿度与降水、气温之间的偏相关系数

Fig.6 Partial correlation coefficients between different depths of soil moisture and precipitation, temperature in Southwest China from 1979 to 2017

研究区中灰色部分为偏相关系数的 P 值大于 0.1 的区域

4.2 土壤湿度记忆性的气候效应

土壤湿度是影响陆-气相互作用的关键因子,对陆地气候变化的影响仅次于海洋温度,其记忆性对后期数周至数月的降水、气温有一定的预测作用^[7]。对比分析西南地区不同土壤深度的 SMM(图4—5),结果表明,总体上表层 0 — 10 cm的 SMM 偏长,西南地区西北部 40 — 100 cm的 SMM 最短且区域分异显著,这说明西南地区 0 — 10 cm的土壤湿度对未来整个西南地区长时期的气候预测更具代表性。同时,统计不同季节研究区 SMM 均值,发现西南地区季节性差异主要体现在夏季不同深度的平均 SMM 最长,其次为冬季、春季,秋季的平均 SMM 最短,其中,西南地区 100 — 200 cm的 SMM 季节变化最为明显。此外,在雨季(夏季),中国西南的湿润地区深层的 SMM 比表层的更长,在 100 — 200 cm西南地区 SMM 长达 3 — 4 个月的地区范围达到最大,这可能是由于夏季湿润地区降水等活动频繁,而表层土壤湿度受到大气的直接影响,包含了随机气象事件的噪声,因而持续性差^[51-52];西南地区西北部,即青藏高原高寒地区表层 SMM 在夏季最短,秋季最长。这可能是由于夏季时,高原处于雨季,表层土壤湿度受到季风降水活动影响大,因而表层的土壤湿度记忆性偏短;在秋季,土壤湿度持续减少,表层土壤逐渐冻结,之后进入稳定期, SMM 偏长^[34]。

5 结论

本文以中国西南地区为研究区,采用线性倾向估计、距平分析、Pearson 相关和偏相关等方法揭示了1979—2017年西南地区土壤湿度、降水、气温的变化规律和空间分布格局,分析了不同深度的土壤湿度与降水、气温之间的时空相关性,探讨了中国西南地区土壤湿度记忆性的空间分布特征及季节特征。主要结论

如下:

(1) 西南地区各深度的年平均土壤湿度整体上波动相位具有较好的一致性,但长期趋势存在差异性。0—10 cm 的土壤湿度呈显著减少趋势($P < 0.001$),气候倾向率为 $0.7 \text{ kg/m}^2/10 \text{ a}$,而 10—40、40—100、100—200 cm 土壤湿度无显著变化趋势。中层(10—40、40—100 cm)土壤湿度高于表层(0—10 cm)和深层(100—200 cm),且多年平均状态下,表层土壤湿度与更深层的土壤湿度的呈相反空间分布格局。

(2) 1979—2017 年西南地区年降水量整体上呈不显著增加趋势,而年平均气温呈极显著的增加趋势($P < 0.001$),每 10 a 升温 0.4°C ;多年平均状态下年降水量与年平均气温均由东南到西北递减的空间格局。

(3) 在空间分布上,更深层的土壤湿度与降水、气温之间的相关性更强。在长期变化上,偏相关系数表明西南地区的土壤湿度整体上主要受降水影响,二者呈正相关关系,但在表层,研究区青藏高原、四川南部地区的土壤湿度与降水、气温关系均不显著。

(4) 西南地区土壤湿度记忆性(SMM)存在明显的空间差异性和季节差异,总体变化范围为 19—111 d 左右,主要以 60—90 d 为主;其中 0—10 cm 的土壤湿度对整个西南地区长期(2—3 个月)的气候预测具有更好的代表性;在季节上,西南地区平均的 SMM 在夏季最长,其次为冬季、春季,秋季最短。

(5) 在雨季,湿润地区深层土壤湿度的记忆性比表层更长;受降水、冻土的消融与冻结等过程的影响,研究区青藏高原地区表层 SMM 在夏季最短,秋季最长。

致谢: 兰州大学李若麟博士帮助写作。

参考文献(References):

- [1] Legates D R, Mahmood R, Levina D F, DeLiberty T L, Quiring S M, Houser C, Nelson F E. Soil Moisture: a central and unifying theme in Physical Geography. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2011, 35(1): 65–86.
- [2] 简鹏飞,朱喜,何志斌,杜军,陈龙飞. 土壤水分时间稳定性研究进展. *生态学报*, 2018, 38(10): 3403–3413.
- [3] 王家文,周跃,肖本秀,李江苏. 中国西南喀斯特土壤水分特征研究进展. *中国水土保持*, 2013, (2): 37–41.
- [4] 郭大应,熊清瑞,谢成春,冯艳. 灌溉土壤硝态氮运移与土壤湿度的关系. *灌溉排水*, 2001, 20(2): 66–68, 72–72.
- [5] 马柱国,符淙斌,谢力,陈文海,陶树望. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题. *地球科学进展*, 2001, 16(4): 563–566.
- [6] 王晓婷,郭维栋,钟中,崔晓燕. 中国东部土壤温度、湿度变化的长期趋势及其与气候背景的联系. *地球科学进展*, 2009, 24(2): 181–191.
- [7] Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. The effect of soil moisture on the short-term climate and hydrology change—a numerical experiment. *Monthly Weather Review*, 1984, 112(3): 474–490.
- [8] 李明星,马柱国,牛国跃. 中国区域土壤湿度变化的时空特征模拟研究. *科学通报*, 2011, 56(16): 1288–1300.
- [9] 林朝晖,刘辉志,谢正辉,王爱慧,刘少锋. 陆面水文过程研究进展. *大气科学*, 2008, 32(4): 935–949.
- [10] Walker J, Rowntree P R. The effect of soil moisture on circulation and rainfall in a tropical model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1977, 103(435): 29–46.
- [11] Tuttle S, Salvucci G. Empirical evidence of contrasting soil moisture-precipitation feedbacks across the United States. *Science*, 2016, 352(6287): 825–828.
- [12] 马柱国,魏和林,符淙斌. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系. *气象学报*, 2000, 58(3): 278–287.
- [13] Stéfanon M, Drobinski P, D'Andrea F, Lebeaupin-Brossier C, Bastin S. Soil moisture-temperature feedbacks at meso-scale during summer heat waves over Western Europe. *Climate Dynamics*, 2014, 42(5/6): 1309–1324.
- [14] 郭维栋,马柱国,王会军. 土壤湿度——一个跨季度降水预测中的重要因子及其应用探讨. *气候与环境研究*, 2007, 12(1): 20–28.
- [15] 张人禾,刘栗,左志燕. 中国土壤湿度的变异及其对中国气候的影响. *自然杂志*, 2016, 38(5): 313–319.
- [16] Namias J. Surface-atmosphere interactions as fundamental causes of drought and other climatic fluctuations. *Arid Zone Research*, 1963, 20: 345–359.
- [17] 刘永强,叶笃正,季劲钧. 土壤湿度和植被对气候的影响——I. 短期气候异常持续性的理论分析. *中国科学 B 辑*, 1992, 22(4): 441–448.
- [18] 刘永强,叶笃正,季劲钧. 土壤湿度和植被对气候的影响——II. 短期气候异常持续性的数值试验. *中国科学 B 辑*, 1992, 22(5):

- 554–560.
- [19] Guo Z C , Dirmeyer P A . Evaluation of the second global soil wetness project soil moisture simulations: 1. Intermodel comparison. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , 2006 , 111(D22) : D22S02.
- [20] Douville H , Chauvin F . Relevance of soil moisture for seasonal climate predictions: a preliminary study. *Climate Dynamics* , 2000 , 16(10/11) : 719–736.
- [21] Seneviratne S I , Koster R D , Guo Z C , Dirmeyer P A , Kowalczyk E , Lawrence D , Liu P , Mocko D , Lu C H , Oleson K W , Verseghy D . Soil moisture memory in AGCM simulations: analysis of global land-atmosphere coupling experiment (GLACE) data. *Journal of Hydrometeorology* , 2006 , 7(5) : 1090–1112.
- [22] Orth R , Seneviratne S I . Analysis of soil moisture memory from observations in Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , 2012 , 117(D15) : D15115.
- [23] 李若麟, 保鸿燕, 李课臣, 王澄海. 全球土壤湿度的记忆性及其气候效应. *冰川冻土*, 2016, 38(6) : 1470–1481.
- [24] 程善俊, 管晓丹, 黄建平, 季明霞. 利用 GLDAS 资料分析黄土高原半干旱区土壤湿度对气候变化的响应. *干旱气象*, 2013, 31(4) : 641–649.
- [25] 左志燕, 张人禾. 中国东部春季土壤湿度的时空变化特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(11) : 1428–1437.
- [26] 邓彪, 肖天贵. 四川盆地区表层土壤湿度时空变化特征分析. *成都信息工程学院学报*, 2013, 28(1) : 49–55.
- [27] 王硕甫, 殷美祥, 冯鑫媛. 1991—2011 年中国西南地区土壤湿度的时空特征. *广东气象*, 2018, 40(1) : 53–57.
- [28] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势. *地球科学进展*, 2007, 22(6) : 573–582.
- [29] Zeng C , Wang S J , Bai X Y , Li Y B , Tian Y C , Li Y , Wu L H , Luo G J . Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology using RUSLE with GIS. *Solid Earth* , 2017 , 8(4) : 721–736.
- [30] Bai X Y , Wang S J , Xiong K N . Assessing spatial-temporal evolution processes of karst rocky desertification land: indications for restoration strategies. *Land Degradation & Development* , 2013 , 24(1) : 47–56.
- [31] Chen F , Zhou D Q , Bai X Y , Zeng C , Xiao J Y , Qian Q H , Luo G J . Responses of soil physical and chemical properties to karst rocky desertification evolution in typical karst valley area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* , 2018 , 108(3) : 032012.
- [32] 赵中秋, 后立胜, 蔡运龙. 西南喀斯特地区土壤退化过程与机理探讨. *地学前缘*, 2006, 13(3) : 185–189.
- [33] 王根绪, 李元首, 吴青柏, 王一博. 青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(8) : 743–754.
- [34] 卓嘎, 陈涛, 周刊社, 罗珍. 2009–2010 年青藏高原土壤湿度的时空分布特征. *冰川冻土*, 2015, 37(3) : 625–634.
- [35] 杨健, 马耀明. 青藏高原典型下垫面的土壤温湿特征. *冰川冻土*, 2012, 34(4) : 813–820.
- [36] Rodell M , Houser P R , Jambor U , Gottschalk J , Mitchell K , Meng C J , Arsenault K , Cosgrove B , Radakovich J , Bosilovich M , Entin J K , Walker J P , Lohmann D , Toll D . The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society* , 2004 , 85(3) : 381–394.
- [37] Kato H , Rodell M , Beyrich F , Cleugh H , van Gorsel E , Liu H , Meyers T P . Sensitivity of land surface simulations to model physics , land characteristics , and forcings , at four CEOP sites. *Journal of the Meteorological Society of Japan* , 2007 , 85A: 187–204.
- [38] Cho E , Moon H , Choi M . First assessment of the advanced microwave scanning radiometer 2 (AMSR2) soil moisture contents in Northeast Asia. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* , 2015 , 93(1) : 117–129.
- [39] 程善俊. 气温和降水对全球土壤湿度变化的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [40] Vreugdenhil M , Dorigo W , Broer M , Haas P , Eder A , Hogan P , Bloeschl G , Wagner W . Towards a high-density soil moisture network for the validation of SMAP in Petzenkirchen , Austria // Proceedings of 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Melbourne , VIC , Australia: IEEE , 2013: 1865–1868.
- [41] Kim H , Parinussa R , Konings A G , Wagner W , Cosh M H , Lakshmi V , Zohaib M , Choi M . Global-scale assessment and combination of SMAP with ASCAT (active) and AMSR2 (passive) soil moisture products. *Remote Sensing of Environment* , 2018 , 204: 260–275.
- [42] Renzullo L J , Van Dijk A I J M , Perraud J M , Collins D , Henderson B , Jin H , Smith A B , McJannet D L . Continental satellite soil moisture data assimilation improves root-zone moisture analysis for water resources assessment. *Journal of Hydrology* , 2015 , 519: 2747–2762.
- [43] Dorigo W A , Wagner W , Hohensinn R , Hahn S , Paulik C , Xaver A , Gruber A , Drusch M , Mecklenburg S , van Oevelen P , Robock A , Jackson T . The international soil moisture network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrology and Earth System Sciences* , 2011 , 15(5) : 1675–1698.
- [44] Albergel C , de Rosnay P , Gruhier C , Muñoz-Sabater J , Hasenauer S , Isaksen L , Kerr Y , Wagner W . Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations. *Remote Sensing of Environment* , 2012 , 118: 215–226.
- [45] Montgomery D C , Peck E A . Introduction to Linear Regression Analysis. New York: Wiley , 1982: 2775–2776.

- [46] 孙兰东, 刘德祥. 西北地区热量资源对气候变化的响应特征. *干旱气象*, 2008, 26(1): 8-12.
- [47] 廖捷. 小波分析在我国东部土壤湿度变化研究中的应用. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(S2): 188-192.
- [48] Meng L, Long D, Quiring S M, Shen Y J. Statistical analysis of the relationship between spring soil moisture and summer precipitation in East China. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(5): 1511-1523.
- [49] McColl K A, Alemohammad S H, Akbar R, Konings A G, Yueh S, Entekhabi D. The global distribution and dynamics of surface soil moisture. *Nature Geoscience*, 2017, 10(2): 100-104.
- [50] Dirmeyer P A, Schlosser C A, Brubaker K L. Precipitation, recycling, and land memory: an integrated analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, 10(1): 278-288.
- [51] Meng L, Quiring S M. Observational relationship of sea surface temperatures and precedent soil moisture with summer precipitation in the U.S. Great Plains. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(6): 884-893.
- [52] Oglesby R J, Marshall S, Erickson III D J, Roads J O, Robertson F R. Thresholds in atmosphere-soil moisture interactions: results from climate model studies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D14): 4224.