

贵州省不同地貌类型土壤湿度变化及其对气候变化的响应

赵飞飞¹, 张显云¹, 付婷¹, 廖留峰², 聂士海¹

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省生态气象和卫星遥感中心, 贵阳 550002)

摘 要:为探究贵州省不同地貌类型土壤湿度时空变化及其对气候变化的响应,基于欧洲中期天气预报中心第五代再分析资料数据集(ERA5),通过一元线性回归、滑动平均、Mann-Kendall 突变检验、滑动 T 检验及相关性分析法,分析了贵州省土壤湿度时空变化特征,揭示了温度和降水的变化对土壤湿度的影响。结果表明:(1) 31 年来,贵州省表层(0—7 cm)、中层(7—28 cm)及深层(28—100 cm)土壤湿度均呈显著降低趋势,并随着土层深度的增加而加快;(2) 贵州省不同深度土壤湿度的下降速率均表现为西快东慢的空间分布特征,其中峰丛洼地地区下降最为明显;(3) 1979—2009 年,研究区各层土壤湿度与降水间的相关性更强,相关性呈东高西低的空间分布特征,但在喀斯特盆地和喀斯特峡谷地区,土壤湿度与温度间的相关关系更为密切;(4) 2001 年后,各层土壤湿度与降水的相关系数平均减小了 10.29%,而与温度的相关系数却增加了 137.59%,该现象在喀斯特高原以及峰丛洼地最为明显,表明温度可能是造成土壤湿度 2001 年突变的主导因素。

关键词:土壤湿度; 时空变化; M-K 突变检验; 气象因子

中图分类号:P237

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0217-09

Variation of Soil Moisture of Its Response to Climate Change in Different Geomorphological Types of Guizhou Province

ZHAO Feifei¹, ZHANG Xianyun¹, FU Ting¹, LIAO Liufeng², NIE Shihai¹

(1. Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Ecological Meteorology and Satellite Remote Sensing Center, Guiyang 550002, China)

Abstract: In order to explore the temporal and spatial variation of soil moisture in different geomorphological types in Guizhou Province and its response to climate change, based on the fifth generation reanalysis data set of the European Center for Medium Range Weather Forecast, the linear regression, sliding average, Mann-Kendall mutation test, sliding T test and correlation analysis were used to analyze the temporal and spatial variation characteristics of soil moisture in Guizhou Province, and the influence of changes in temperature and precipitation on soil moisture was revealed. The results show that: (1) in the past 31 years, the soil moisture contents in the surface layer (0—7 cm), middle layer (7—28 cm) and deep layer (28—100 cm) of Guizhou Province had shown a significant decrease trend, which was accelerated with the increase of soil depth; (2) the decreasing rate of soil moisture at different depths in Guizhou Province was characterized by spatial distribution characteristics of quickness in the west and slowness in east, among which the decline was most obvious in peak-cluster depression area; (3) from 1979 to 2009, the correlation between soil moisture and precipitation in each layer of the study area was stronger than that between soil moisture and temperature, showing a spatial distribution characteristic of high in the east and low in the west; however, in karst basins and karst valleys, the correlation between soil moisture and temperature was closer; (4) after 2001,

收稿日期: 2020-11-23

修回日期: 2020-12-14

资助项目: 国家自然科学基金(41701464, 41901225); 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2017]1054, [2017]1026, [2016]1028); 贵州省科技支撑计划([2017]2593); 贵州大学引进人才科研项目(贵大人基合字(2016)51 号, (2015)28 号)

第一作者: 赵飞飞(1995—), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 研究方向为遥感土壤水分反演。E-mail: 912066249@qq.com

通信作者: 张显云(1974—), 男, 贵州遵义人, 硕士, 副教授, 主要从事 RS, GNSS 的理论及应用研究。E-mail: mec.xy Zhang@gzu.edu.cn

the correlation between soil moisture and precipitation in each layer decreased by 10.29% on average, while the correlation with temperature increased by 137.59%; this phenomenon was most obvious in karst plateaus and peak cluster, indicating that temperature might be the leading factor causing the abrupt change of soil moisture in 2001.

Keywords: soil moisture; spatiotemporal variation; M-K mutation test; meteorological factors

土壤湿度 (Soil Moisture, SM) 一般是指非饱和土壤中存储的水量^[1], 它不仅是植被生长发育所需水分的主要来源, 还是陆气系统中的一个重要参数^[2-5]。土壤湿度蕴含了地表水文变化过程的大部分信息, 并通过影响地表的反照率、热容量、光合作用、蒸发和蒸腾, 改变向大气传输的感热、潜热通量等, 从而影响气候变化^[6-7], 因此, 土壤湿度对天气及气候的时空演变具有不可估量的作用^[8], 开展土壤湿度变化及其对气温、降水变化响应的研究, 揭示土壤湿度与气象因子间的耦合作用, 对土壤水资源的合理利用及气候变化的研究具有重要意义。

土壤湿度对气候的反馈机制具有显著的地域差异性^[9-10], 已有学者对区域土壤湿度的时空演变特征及其与气候因子间的关系进行了大量研究。王芳等^[11]对三江平原土壤湿度的变化特征、气象因子对土壤湿度的影响进行了研究, 结果表明研究区土壤湿度呈降低趋势, 气温、降水对不同深度层土壤湿度的影响程度存在差异。严丽等^[12]的研究结果表明陇东黄土高原农田表层的土壤湿度与气温呈负相关、与降水呈正相关。王硕甫等^[13]研究了西南地区土壤湿度的时空变化特征, 结果表明贵州省土壤湿度下降最为显著; 西南地区土壤湿度与降水、气温间的相关性分别为正相关和负相关; 相较于浅层土壤的土壤湿度, 中层土壤的土壤湿度与气温、降水间的相关性更高。袁淑杰等^[14]认为气象因子对土壤湿度的影响具有滞后性, 降水是影响土壤湿度的主要因子。陈姗姗等^[15]基于欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 发布的第四代再分析资料 (ERA-Interim), 发现东北冻土区土壤湿度总体呈下降趋势, 蒸散发和降水是诱发该现象的主要原因。

根据贵州省林业局发布的贵州省岩溶地区第三次石漠化监测成果公报 (<http://lyj.guizhou.gov.cn/>) 可知, 贵州是全国石漠化面积最大、类型最多、程度最深、危害最为严重的省份, 其地势格局复杂、生态环境脆弱, 导致在贵州境内进行大范围土壤湿度的采集难度大。土壤湿度对生态地质环境安全和社会经济发展具有十分重要的意义, 但迄今为止针对贵州喀斯特区域大范围、不同地貌类型、不同土层深度层土

壤湿度的时空变化及其对气候变化响应的相关研究较少。有鉴于此, 本文在研究贵州土壤湿度时空变化特征的基础上, 采用一元线性回归、滑动平均法、M-K 突变检验、滑动 T 检验法和 Pearson 相关分析法, 揭示不同地貌类型下土壤湿度对气候变化的响应。

1 研究区概况

贵州省位于中国西南腹地 (24°37'—29°13'N, 103°36'—109°35'E), 属亚热带湿润季风气候, 常年降雨量充沛, 平均温度为 14~16℃。贵州属典型喀斯特山区, 平均海拔 1 100 m, 地势西高东低, 境内崇山峻岭, 山脉连绵, 河谷交错, 地势格局极为复杂, 地貌类型主要有高原、山地、丘陵和盆地, 其中山地和丘陵面积占全省面积的 92.5%^[16]。根据地形、岩性、地质构造条件以及岩溶发育的特征, 将贵州省分为 6 个地貌区, 即峰丛洼地、喀斯特槽谷、喀斯特高原、喀斯特盆地、喀斯特峡谷、非喀斯特区^[17-18] (图 1)。

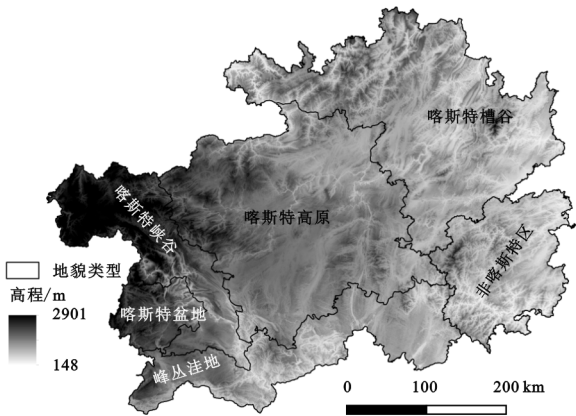


图 1 研究区地理位置及地貌类型

2 数据与方法

2.1 数据

再分析土壤湿度数据集与传统的土壤湿度监测数据相比, 具有时间跨度长、空间连续性好等优点。ECMWF 发布的第五代再分析资料 (ERA5) 使用了最新的地球系统模式、数据同化方法等, 对气候变化的模拟更好, 在中国区域的数据质量较高。Chen 等^[19]的研究表明, 与 ERA-Interim 资料相比, ERA5 土壤湿度数据在中国大部分地区与实测数据间的相关性较好。王一昕^[20]也对 ERA5 土壤湿度数据在中国区域的适用性进

行了评估,结果表明 ERA5 土壤湿度能够较好地再现土壤湿度的年际和季节周期。ECMWF 发布的 ERA5 温度、降水数据集在中国的可靠性也通过卫星及站点观测资料等得到了较好的验证^[2,22]。

本文采用 ERA5 土壤湿度(<https://cds.climate.copernicus.eu/>)作为研究数据源,其单位为体积比(m^3/m^3),所采用土壤湿度数据的时间分辨率为月,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,土层深度分别为 0—7 cm, 7—28 cm, 28—100 cm(以下分别简称为:表层、中层、深层),时间跨度为 1979—2009 年。此外,气象数据(气温和降水)同样源于 ERA5,其时空分辨率、时间跨度与土壤湿度保持一致。

2.2 方法

采用一元线性回归^[15]、滑动平均法计算分析 1979—2009 年土壤湿度、气温和降水的时空变化趋势;采用 M-K 突变检验^[17]及滑动 T 检验^[23]相结合,对研究时段内土壤湿度的突变性检验,在此基础上采用 Pearson 相关系数分析土壤湿度与气象因子间的相关关系。

3 结果与分析

3.1 土壤湿度与气象因子时空变化特征

3.1.1 土壤湿度的时域变化特征 图 2 为 1979—2009 年贵州省土壤湿度及气象因子的时间变化特征曲线。由图 2A、2B 及 2C 可知,贵州省各层土壤湿度均呈现出不同幅度的波动变化,变化趋势总体上具有较强的相似性,呈现出明显的下降趋势;不同土层深度土壤湿度的下降速率存在差异,由大到小依次为:深层>中层>表层;各层土壤湿度在 1979—1986 年呈增加趋势,而 1987—1999 年趋于平稳,至 2000 年后则呈现出明显的下降趋势。值得注意的是,1979—2009 年研究区各层土壤湿度均呈现出 2~3 a 的变化周期,这与我国西南地区土壤湿度的变化周期一致^[24];2009 年贵州省各层土壤湿度均达到最小值,这可能与 2009—2010 年西南地区降水偏少,发生特大干旱有关^[25]。由图 2D 可知,温度作为影响土壤湿度的重要因子,31 a 来总体呈显著上升趋势,速率达 $0.02^\circ\text{C}/\text{a}$ 。其中,1979—1984 年贵州省温度呈下降趋势,1985—1995 年温度变化较为平缓,而自 1996 年后温度呈上升趋势。从图 2E 可看出,多年降水变化呈现出显著的下降趋势,其中 2002 年后急剧下降,至 2009 年达到最小降雨量。

综上所述,31 a 来研究区温度总体表现为上升趋势、降水表现为下降趋势,导致研究区不同深度土壤湿度总体呈现出下降趋势,导致 2000 年后各深度层的土壤湿度快速向干旱化方向发展。

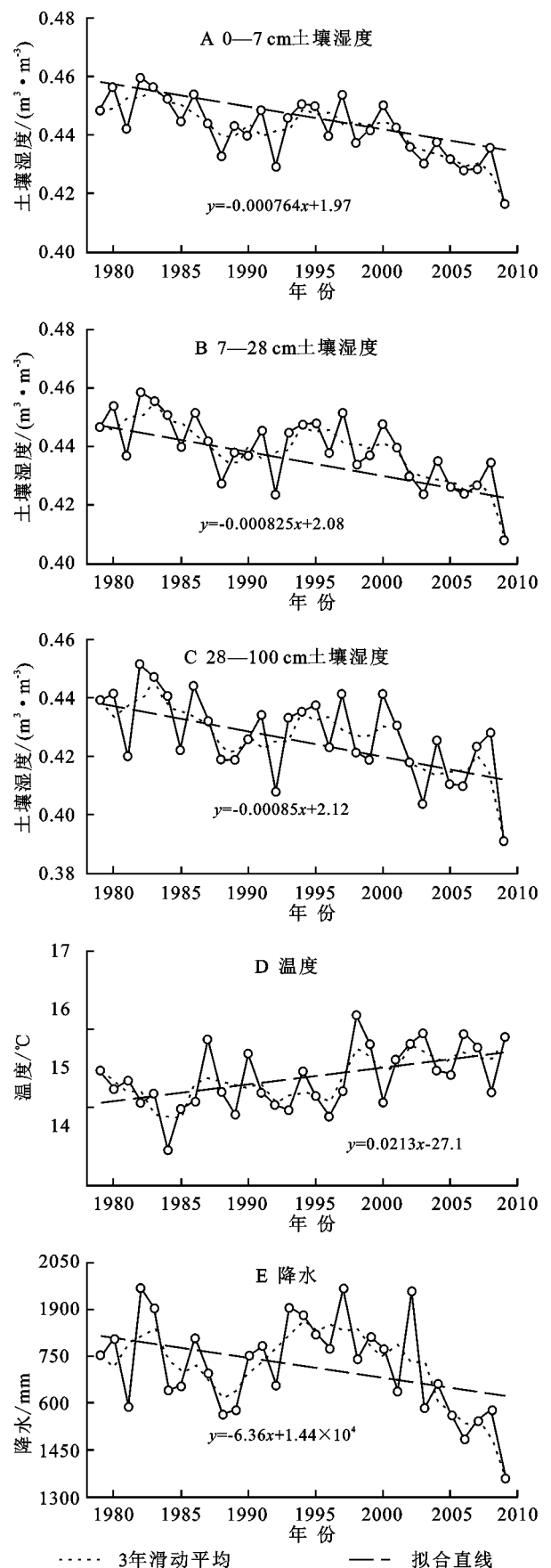


图 2 1979—2009 年贵州省土壤湿度及气象因子的时间变化特征曲线

3.1.2 土壤湿度变化趋势的空间特征 采用一元线

性回归逐像元对土壤湿度、温度及降水的变化率进行计算,得1979—2009年贵州省土壤湿度及气象因子变化趋势的空间分布特征(图3)。由图3可知,贵州省表层、中层土壤湿度呈下降趋势。贵州西部地区降水偏少,加之存在不同程度的石漠化,地表水资源相对贫乏且漏失严重,导致该地区土壤湿度的下降速率明显高于东部;而峰丛洼地地区因其岩层含水性特点,降水快速注入地下,汇入地下河系,土壤蓄水能力较差,造成峰丛洼地地区的土壤湿度下降速率更快;而深层土壤湿度在非喀斯特部分地区土壤湿度出现了增加的情况,面积约占全省面积的0.18%;全省温度总体呈上升趋势,最大增温速率约为最小速率的4倍;降水呈下降趋势。

综上所述,除深层部分区域外,贵州省不同深度层土壤湿度呈现出不同程度的下降,下降速率由东向西递增。土壤湿度与温度、降水的变化趋势具有一定的相似性。峰丛洼地地区温度上升速率及降水减少速率较快等原因,不同深度的土壤湿度下降趋势较为明显。由此可知,土壤湿度的变化趋势与温度、降水均存在相关性。然而,深层土壤湿度在非喀斯特地区出现了上升趋势,有待进一步分析。

3.2 土壤湿度与气象因子间的相关性分析

3.2.1 土壤湿度与气象因子突变检验 由3.1.1节可知,31 a来研究区不同深度的土壤湿度与气象因子呈波动变化态势,土壤湿度与气象因子可能存在突变现象。基于M-K突变检验与滑动T检验(滑动年数5 a)相结合的方法,对研究区土壤湿度、温度及降水进行突变检验。

M-K突变检验结果见图4。由图4A,4B,4C可知,表层、中层、深层土壤湿度的UF曲线均在1985年附近及以后均小于0,且均在2002年后超过0.05显著水平线,表明不同深度层土壤湿度呈现出显著下降趋势;由图4D,4E可知,1998年以后研究区温度增温趋势加剧,并在2007年超出显著水平线,上升趋势明显,而2004年前降水长期在“0”刻度上下波动,2004年后呈持续下降趋势。在0.05显著水平线区间,表层、中层土壤湿度的UF与UB曲线相交于2001年左右(图4A,4B),并于2002年后两者呈显著下降趋势,结合滑动T检验分析知,2001年土壤湿度出现的下降突变可信。由图4C可看出,深层土壤湿度的UF与UB曲线在0.05显著水平线区间中存在多个交点(1992年、1998年、2001年),结合下降趋势与滑动T检验,仅2001年为可信突变点。温度的

UF与UB曲线同样存在多个交点(1998年、1999年、2000年),且2000年后温度上升明显,表明温度在2000年发生突变。图4E可看出,降水的UF与UB曲线相交于2005年且通过滑动T检验,且在2005年后下降显著。综合几个因素,土壤湿度在2000年后表现为显著降低趋势。

综上所述,基于M-K突变检验、滑动T检验,发现贵州省不同深度层土壤湿度以均在2001年左右发生突变,而温度与降水则分别于2000年和2005年发生突变。为更好揭示土壤湿度与气象因子间的响应关系,以2001年为界,分别对1979—2000年和2001—2009年不同地貌类型下不同深度层土壤湿度与温度及降水间的相关关系进行分析,以期揭示贵州省不同地貌类型下土壤湿度对气候变化的响应以及找出导致研究区土壤湿度突变的主导因素。

3.2.2 土壤湿度与气象因子间的时域相关性 贵州省不同地貌区土壤湿度与气候因子间的相关系数见图5。从全省看,相较于温度,31 a来研究区降水与不同深度层土壤湿度间的相关性更强。其中,表层土壤湿度和中层土壤湿度与降水间的相关性相当,相关系数分别为0.76,0.75($p < 0.001$),而深层土壤湿度与降水间的相关性稍弱($R = 0.71$, $p < 0.001$),这主要是因为研究区表层土壤湿度的主要直接来源是降水和降雪,深层土壤的水分是通过表层土壤的渗透而得,顾及蒸发蒸散等的消耗,达到深层土壤的降水较少,从而导致其与降水间的相关性较其他两层弱。各层土壤湿度与温度均呈现出显著负相关,随着深度加深,相关性逐渐减弱。以上表明降水是影响土壤湿度变化的主要因素,而温度的上升可能会造成土壤的干化。

从不同地貌类型看,由于峰丛洼地、喀斯特槽谷、喀斯特高原和非喀斯特区降水较为充沛,地表水资源相对丰富,31 a来对应地区的土壤湿度与降水呈显著正相关,与温度呈显著负相关,且降水对各层土壤湿度的影响更大,这与全省结果相符;而在喀斯特盆地、喀斯特峡谷区域,各层土壤湿度与温度间的相关性更强,平均相关系数分别约-0.77, -0.80($p < 0.01$),说明这两种地貌下温度与土壤湿度间的关系更加密切。其次,在同种地貌下,不同深度的土壤湿度与温度、降水间的相关性也有所差异,如喀斯特槽谷和非喀斯特区,深层土壤湿度与温度、降水间的相关性小于表层土壤湿度和中层土壤湿度,而表层、中层土壤湿度与温度、降水的相关性更为显著。

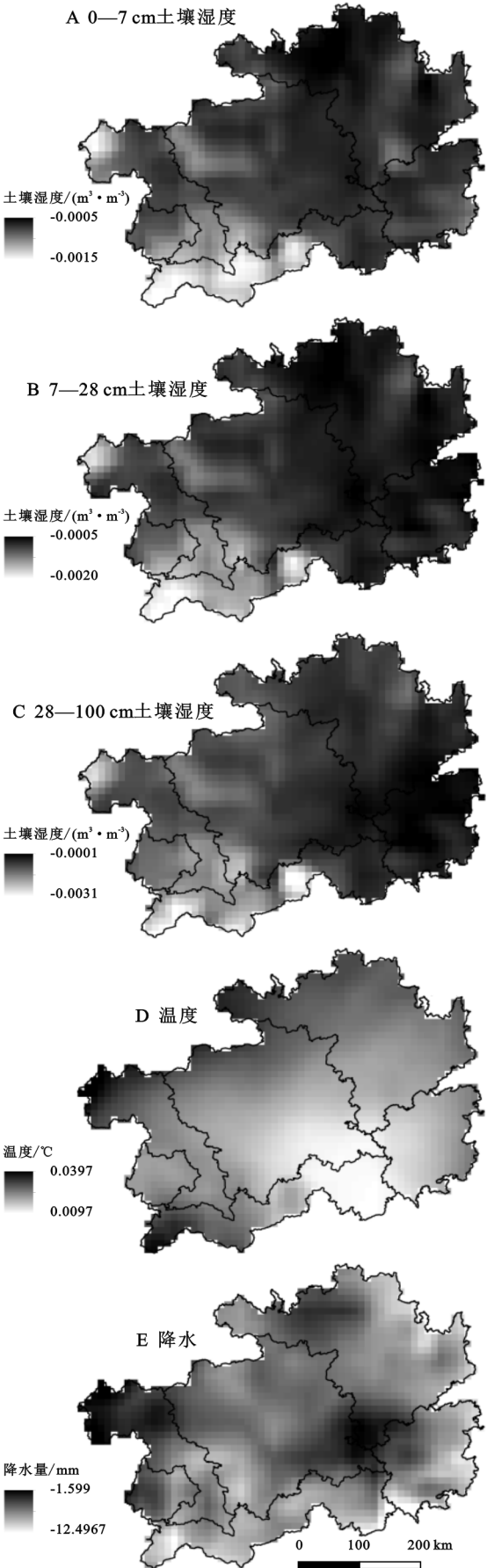


图 3 1979—2009 年贵州省土壤湿度及气象因子变化趋势的空间分布特征

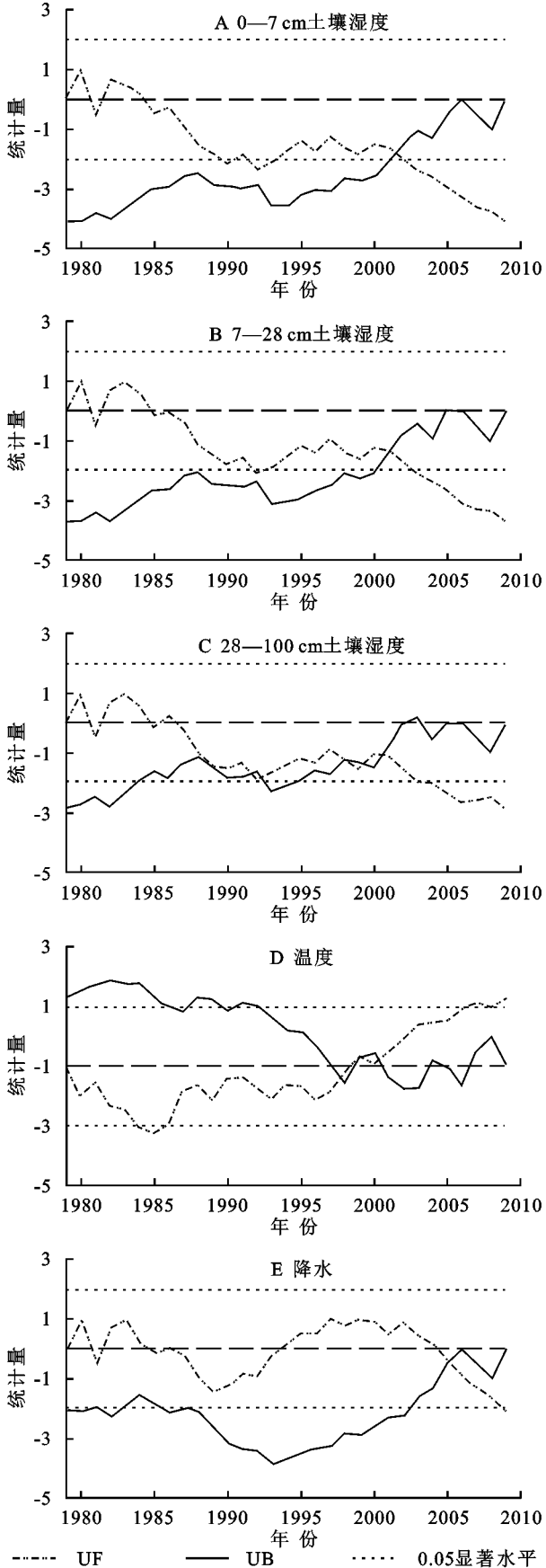


图 4 1979—2009 年贵州省土壤湿度及气象因子 M-K 突变检验

结合土壤湿度突变,相较于 2000 年以前,2001

年以后表层土壤湿度与降水间的相关性增加了约6.25% (R 从 0.64 增加到 0.68, 二者相关性检验的 $p < 0.05$); 中层和深层土壤湿度与降水间的相关性分别减少了 13.24%, 23.88%, 这是由于研究区年降水呈下降趋势, 导致土壤入渗深度减小, 从而使得降水与土壤湿度间的相关性减弱, 这一现象对于深层土壤更为明显; 而土壤湿度与温度间的负相关性却分别增加了 96.30%, 130.77%, 185.71%。从地貌类型看, 喀斯特高原地区降水与各层土壤湿度的相关性分别减弱了 6.67%, 19.67%, 39.34%, 而与温度的负相关性却分别增强了 107.69%, 162.5%, 242.11%; 峰丛洼地、喀斯特槽谷、喀斯特盆地、喀斯特峡谷土壤湿度与温度、降水间的相关性总体都有不同程度增强 (峰丛洼地中层土壤湿度、喀斯特槽谷深层土壤湿度除外), 但土壤湿度与温度间的相关性增幅更为明显。其中, 峰丛洼地地区土壤湿度与温度间相关性的增幅最为突出, 其三层土壤湿度与温度间相关性的增强幅度约为降水的 3.4~8.7 倍。但也存在一定的例外, 如非喀斯特区的表层、中层土壤湿度, 以及喀斯特槽谷表层土壤湿度, 它们与降水间相关性的增强幅度则大于温度且显著。降水分布的不均匀和区域温度变化的不同, 加之不同地貌区岩性、地形、地质构造条件以及岩溶发育特征不尽相同, 造就了贵州省不同地貌条件下的土壤湿度与气象因素间相关程度的差异性。

综上所述, 1979—2009 年贵州省不同地貌下不同土层深度的土壤湿度与温度、降水间的相关性具有差异性, 降水是控制土壤湿度变化的主要气候因子, 但在全球变暖的趋势下, 温度与土壤湿度的负相关性逐渐增强, 降雨减少与气温增加可能是造成研究区土壤湿度下降突变的主要因素, 以喀斯特高原、峰丛洼地最为突出。温度的上升可能会较大地影响土壤湿度的衰减, 并可能会成为驱动土壤湿度变化的主导因素。

3.2.3 土壤湿度与气象因子间相关性的空间分布特征 1979—2009 年贵州省不同深度的土壤湿度与气象因子间的相关关系分布见图 6。由图 6 可知, 全省土壤湿度整体上与温度的负相关性由东向西递增; 而土壤湿度与降水呈正相关, 空间上表现为东高西低的特点, 这主要与贵州省降水呈西多东少的分布特征有关。其中, 土壤湿度与温度负相关性较高的地区主要为喀斯特峡谷、喀斯特盆地和峰丛洼地东部。土壤湿度与温度也存在正相关的地区, 如: 喀斯特高原东南部 (深层土壤), 其原因有待进一步分析。随着土层深度的增加, 峰丛洼地土壤湿度与降水间的相关性逐渐增强, 但在喀斯特

高原地区则有所减弱。喀斯特槽谷土壤湿度与降水的平均相关系数高于其他地貌类型。值得注意的是, 在喀斯特高原东南部、峰丛洼地东部各层土壤湿度与温度、降水间的相关性较弱, 表明温度和降水可能均不是控制该地区土壤湿度变化的主要因素。

基于 3.2.1 节中的突变检验结果, 分别计算了 1979—2000 年、2001—2009 年贵州省不同深度土壤湿度与气象因子间的相关关系。计算结果表明, 相比于 1979—2000 年、2001—2009 年土壤湿度与温度间的正相关性增强, 这一现象主要集中在喀斯特高原、喀斯特槽谷、峰丛洼地以及非喀斯特区的交界处。喀斯特槽谷南部土壤湿度与温度间的正相关性随着土层深度的增加逐渐增强, 而与降水间的相关性则逐渐减弱。土壤湿度与降水间的正相关性有所增强, 但同时也出现了负相关地区, 主要分布于喀斯特高原南部地区, 并随着土层深度的增加, 降水对土壤湿度的抑制作用也随之增强, 这有待进一步分析。

综上所述, 多年来贵州省土壤湿度与温度间的相关性呈出由东向西递增 (负相关性) 的特征; 土壤湿度与降水呈正相关, 空间上表现为东高西低。以 2001 年为界, 贵州省土壤湿度与温度间的相关性增强, 而不同地貌类型下土壤湿度与温度及降水间相关性的空间分布在 2001 年前后也有较大差异, 主要表现在喀斯特槽谷南部、喀斯特高原南部。

4 讨论

在温度及降水的共同作用下, 贵州省表层、中层、深层土壤湿度均呈显著下降趋势, 这与左志燕^[7]、王硕甫^[13]及邓元红^[24]等的研究结果一致。由不同地貌下不同土层深度的土壤湿度与气候因子间的相关性可知, 全省土壤湿度与降水间具有更强的相关性, 但土壤湿度与气候因子间的相关性在不同地貌类型下存在差异。以 2001 年为分界点, 分析不同时间段各层土壤湿度与气象因子间的相关性知, 2001 年后土壤湿度与温度间的相关性增强, 而与降水间的相关性则出现不同程度的减弱, 该现象在峰丛洼地、喀斯特高原地区更为突出, 表明 2001 年后温度对土壤湿度的影响大于降水, 这与 Li 等^[23]的研究结果相似。由不同深度土壤湿度与气象因子间相关性的空间分布发现, 部分地区 (喀斯特高原东南部, 峰丛洼地东部) 各层土壤湿度与温度、降水间的相关性不强, 这表明该地区可能存在其他主导着土壤湿度变化的因素。

本文研究尚存在以下不足: (1) 受 ERA5 再分析资料空间分辨率的限制, 本研究未能揭示出小区域

的土壤湿度变化特征及其与气候因子间的相关性特征;(2) 土壤湿度是温度、降水、植被覆盖、蒸发、土壤类型、土地利用等影响因素共同作用的结果,而本研究仅分析了土壤湿度与温度及降水间的相关关系;(3) 因区域气候因子变化较为复杂,仅从空间位置上

探究了不同地貌类型下土壤湿度、温度及降水的变化特征及响应关系。鉴于以上不足,还需结合空间分辨率更高的多源遥感数据及气象资料,综合考虑多种因素的共同作用,进一步探究不同地貌类型下土壤湿度变化的形成机理。

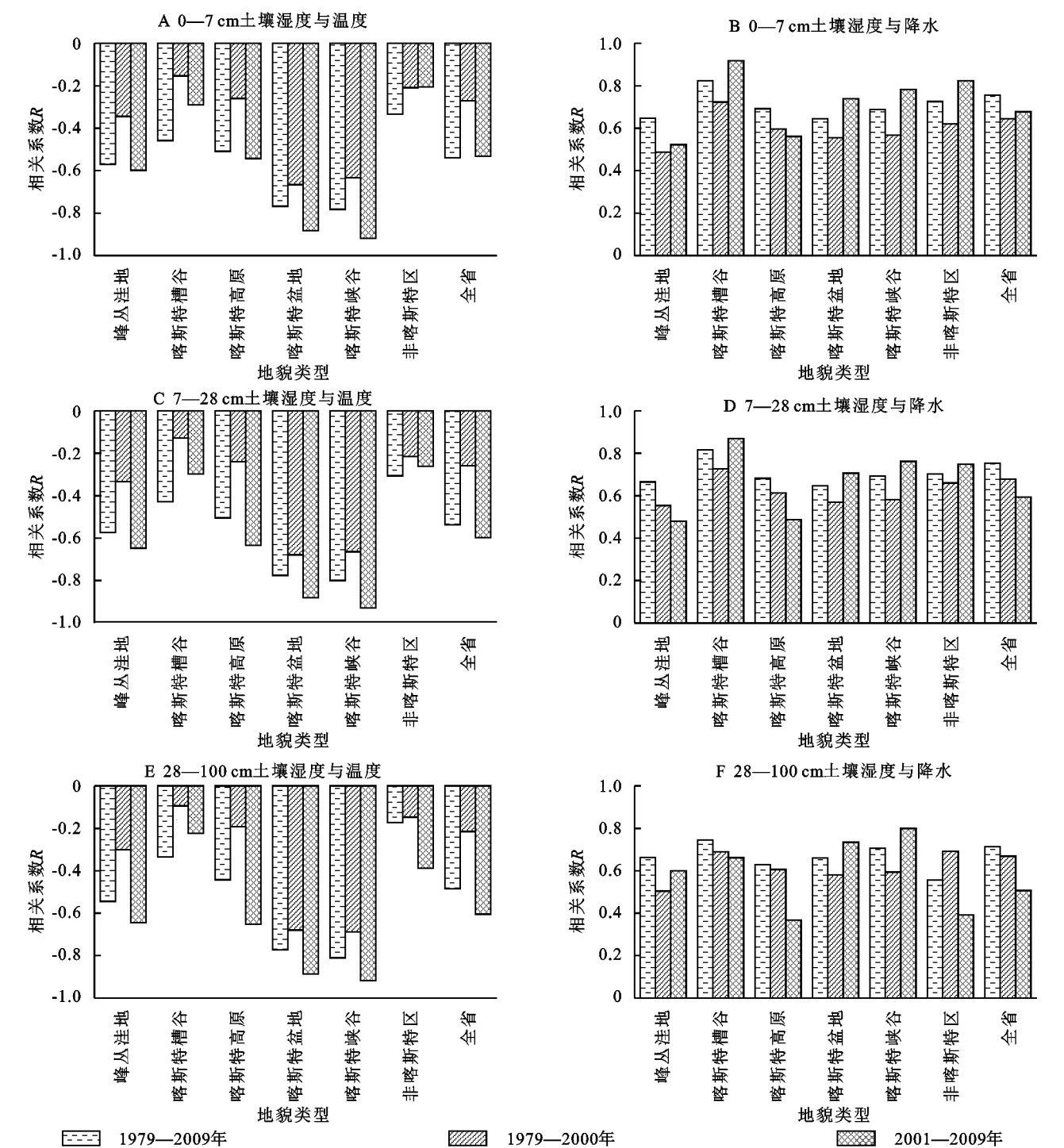


图5 贵州省不同地貌区土壤湿度与气候因子间的时域相关系数

5 结论

(1) 31年来,贵州省各深度的年平均土壤湿度均呈显著下降趋势,但长期趋势存在一定差异性,深

层(28—100 cm)土壤湿度变化速率大于中层(0—7 cm)和表层(7—28 cm);温度以 $0.02^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 的速度上升,降水呈下降趋势,二者的综合作用促成了研究区土壤湿度的下降。

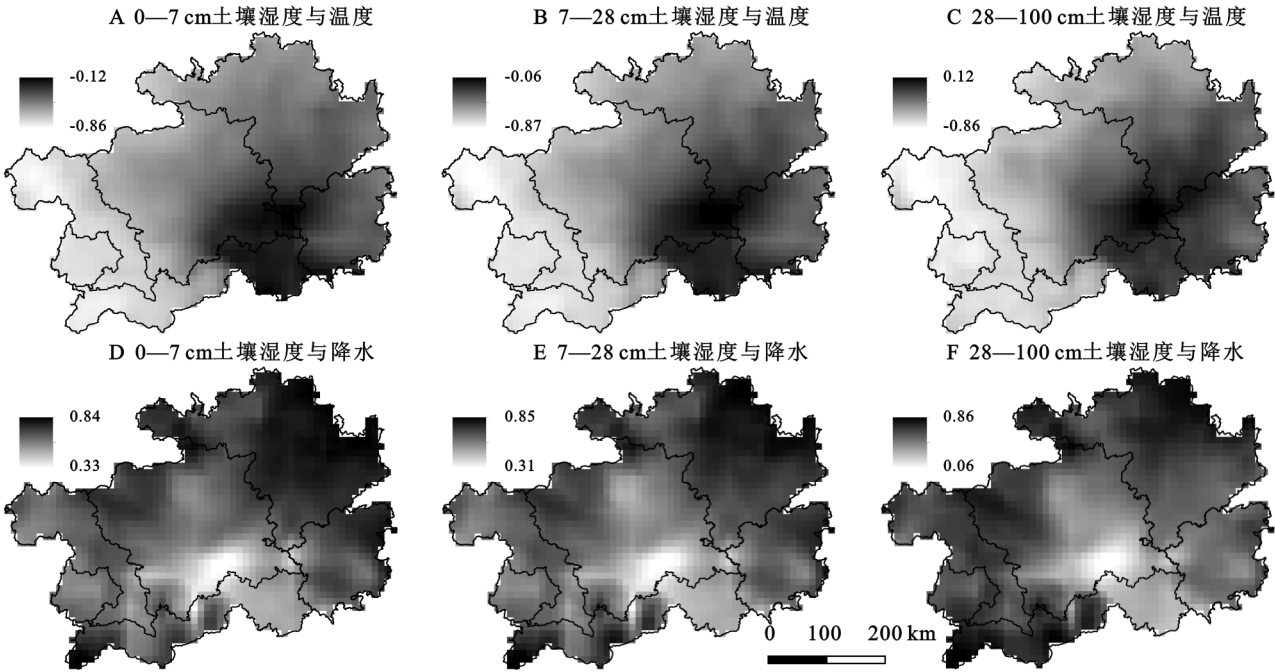


图 6 1979—2009 年贵州省土壤湿度与气象因子间相关关系的空间分布特征

(2) 受温度、降水空间异质性的影响,贵州省土壤湿度下降趋势表现为由东向西逐渐增大;受温度上升、降水减少等的影响,峰丛洼地各深度的土壤湿度下降最为明显,年最大下降速率达 $-0.0014\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

(3) 多年来,贵州省各层土壤湿度与降水间的相关性较强且相关性显著($R>0.7$),高于其与温度间的最大相关系数(-0.54),但近年来二者间的相关性呈衰减趋势,空间分布上呈现出东高西低的态势,这说明多年来降水可能是影响贵州省各层土壤湿度的主要因素。但在喀斯特盆地和喀斯特峡谷地区,温度与各层土壤湿度的平均相关系数分别约为 -0.77 , $-0.80(p<0.01)$,强于降水与土壤湿度间的相关性(R 分别为 $0.65,0.70,p<0.01$)。

(4) 基于 M-K 突变检验、滑动 T 检验法,发现各层土壤湿度均在 2001 年左右发生突变。以 2001 年为界,发现 2001 年后全省各深度层土壤湿度与降水间的相关性平均减小约 10.29%,而与温度间的相关性却平均增加了约 137.59%;其中以喀斯特高原尤为突出,土壤湿度与降水、温度的相关性分别变化了 -21.89% , 170.77% ;峰丛洼地各层土壤湿度与温度间相关性的增强幅度约为降水的 3.4~8.7 倍。空间分布上,2001 年后喀斯特槽谷南部土壤湿度与温度间的正相关性随着土层深度的增加而增强;喀斯特高原南部土壤湿度与降水间的负相关性增强,表明温度可能是造成土壤湿度突变下降的主导因素。

参考文献:

[1] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating

soil moisture—climate interactions in a changing climate: A review[J]. *Earth Science Reviews*, 2010, 99 (3):125-161.

[2] Anagnostopoulos V, Petropoulos G P, Ireland G, et al. A modernized version of a 1D soil vegetation atmosphere transfer model for improving its future use in land surface interactions studies[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2017, 90 (APR.):147-156.

[3] Ma H, Zhang L, Sun L, et al. Farmland soil moisture inversion by synergizing optical and microwave remote sensing data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18 (3):673-685.

[4] Torres-Rua A, Ticlavilca A, Bachour R, et al. Estimation of Surface Soil Moisture in Irrigated Lands by Assimilation of Landsat Vegetation Indices, Surface Energy Balance Products, and Relevance Vector Machines[J]. *Water*, 2016, 8(4):167-167.

[5] 周鹏,丁建丽,王飞,等.植被覆盖地表土壤水分遥感反演[J].*遥感学报*, 2010, 14(5):959-973.

[6] 马柱国,符淙斌,谢力,等.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*, 2001, 16(4):563-568.

[7] 左志燕,张人禾.中国东部春季土壤湿度的时空变化特征[J].*中国科学 D 辑:地球科学*, 2008, 38(11):1428-1437.

[8] Kumar S V, Dirmeyer P A, Peters-Lidard C D, et al. Information theoretic evaluation of satellite soil moisture retrievals[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204:392-400.

[9] 陈景丽,孙旭光,唐红昇,等.江苏省土壤湿度观测资料与再分析资料对比分析研究[J].*气象科学*, 2018, 38(4):

523-530.

[10] 戴长勇,左志燕.中国东部前冬、春土壤湿度与夏季气候的关系[J].气象科技,2010,38(3):300-305.

[11] 王芳,张宇,梁静.三江平原土壤湿度变化及其对气象条件的响应[J].水土保持研究,2020,27(5):172-176.

[12] 严丽,王飞,蒋冲,等.陇东黄土高原农田土壤湿度演变对气候变化的响应[J].水土保持通报,2012,32(3):11-16.

[13] 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[J].广东气象,2018,40(1):53-57.

[14] 袁淑杰,何兴潼,谷晓平,等.贵州喀斯特区域土壤湿度持续下降时期气象要素对土壤湿度影响研究[J].土壤通报,2018,49(2):320-328.

[15] 陈珊珊,臧淑英,孙丽.多年冻土区土壤湿度的动态变化及影响[J].水土保持研究,2020,27(3):113-118.

[16] 张蓓蓓,蔡宏,田鹏举,等.2000—2017 年贵州省植被覆盖时空变化特征及其对气候变化的响应[J].地球与环境,2020,48(4):461-470.

[17] Tong X, Wang K, Yue Y, et al. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2017,54:105-113.

[18] 袁道先.西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究[M].北京:科学出版社,2014.

[19] Chen Y, Yuan H. Evaluation of nine sub-daily soil moisture model products over China using high-resolution in situ observations[J]. Journal of Hydrology, 2020,588:125054.

[20] 王一听.基于多源土壤湿度数据的中国高敏感区探究[D].南京:南京大学,2019.

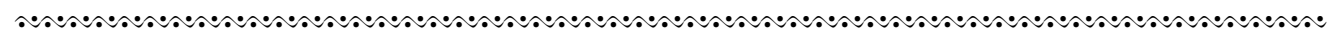
[21] Xue C, Wu H, Jiang X, et al. Temporal and spatial change monitoring of drought grade based on ERA5 analysis data and fast method in the belt and road area during 1989—2017 [J]. Advances in Meteorology, 2019,2019 (428):1-10.

[22] 孙赫,苏凤阁,黄敬恒,等.第三极西风和季风主导流域源区降水呈现不同梯度特征[J].科学通报,2020,65(1):91-104.

[23] Li X, Liu L, Li H, et al. Spatiotemporal soil moisture variations associated with hydro-meteorological factors over the Yarlung Zangbo River basin in Southeast Tibetan Plateau[J]. International Journal of Climatology, 2020,40(1):188-206.

[24] 邓元红,王世杰,白晓永,等.西南地区土壤湿度与气候之间的互馈效应[J].生态学报,2018,38(24):8688-8699.

[25] 严建武,陈报章,房世峰,等.植被指数对旱灾的响应研究:以中国西南地区 2009—2010 年特大干旱为例[J].遥感学报,2012,16(4):720-737.



(上接第 216 页)

[27] 李裕瑞,刘彦随,龙花楼.黄淮海典型地区村域转型发展的特征与机理[J].地理学报,2012,67(6):771-782.

[28] 万年县人民政府.2019 年万年县政府工作报告[EB/OL]. (2019-03-08) [http:// www. zgwn. gov. cn/zgwn/zfgzbg/201903/ebbf6fde82424d6190a7ee9e235aee73.shtml](http://www.zgwn.gov.cn/zgwn/zfgzbg/201903/ebbf6fde82424d6190a7ee9e235aee73.shtml).

[29] 李彤玥.韧性城市研究新进展[J].国际城市规划,2017,32(5):15-25.

[30] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973,4(1):1-23.

[31] 孟丽君,黄灿,陈鑫,等.曲周县耕地利用系统韧性评价[J].资源科学,2019,41(10):1949-1958.

[32] Folke C. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses[J]. Global Environmental Change, 2006,16(3):253-267.

[33] 刘彦随.新时代乡村振兴地理学研究[J].地理研究,2019,38(3):461-466.

[34] Wilson G. Multifunctional ‘quality’ and rural community resilience [J]. Transactions of the Institute of British Geographers,2010,35(3):364-381.

[35] 徐建华.地理建模方法[M].北京:科学出版社,2010.

[36] 唐常春,孙威.长江流域国土空间开发适宜性综合评价[J].地理学报,2012,67(12):1587-1598.

[37] 董文静,王昌森,张震.山东省乡村振兴与乡村旅游时空耦合研究[J].地理科学,2020,40(4):628-636.

[38] 周明茗,王成.乡村生产空间系统要素构成及运行机制研究[J].地理科学进展,2019,38(11):1-10.

[39] 李玉恒,宋传奎,阎佳玉,等.深度贫困地区乡村地域系统演化研究:以河北省阳原县为例[J].地理科学进展,2020,39(6):951-959.

[40] 贺艳华,邬建国,周国华,等.论乡村可持续性与乡村可持续性科学[J].地理学报,2020,75(4):736-752.