

贵州省喀斯特区域土壤水分持续上升时期 气象要素对土壤水分的影响

何兴潼¹, 袁淑杰¹, 谷晓平², 潘媿³, 于飞²

(1. 成都信息工程大学 大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 贵州省山地环境气候
研究所, 贵州 贵阳 550002; 3. 四川省气象局气象服务中心, 四川 成都 610072)

摘要: [目的] 系统分析气象环境要素对贵州省喀斯特地区土壤水分变化的影响, 为该喀斯特区域土壤水分的预报、生态环境恢复以及农业产业化的优化布局提供理论参考。[方法] 基于贵州喀斯特区域 10 个自动土壤水分观测站 2011—2015 年逐日土壤水分、降水量、气温、地表温度、相对湿度、风速和日照时数资料, 针对不同农业气候区逐日土壤水分持续上升且气温持续上升或下降两个不同时段, 分析气象要素对土壤水分的影响。[结果] ①气象要素对土壤湿度的影响具有一定的滞后性, 其滞后时间为 10~30 d。②降水、气温、地表温度为影响土壤水分变化的最主要因子, 与土壤水分相关系数为 0.66~0.95; 风速对土壤水分变化的影响较弱, 相关系数<0.40, 相对湿度、辐射的相关系数仅在气温下降时期>0.60。③气温越高、累计降水量越小, 则累计降水滞后时间越短, 但气温和地表温度滞后时间越长。④研究时段内累计降水大于 22.4~135 mm(气温持续上升)或 11.2~54.7 mm(气温持续下降)时, 其余气象要素的变化不能改变土壤水分的上升趋势。⑤不同农业气候区气象要素与土壤水分关系模型绝大部分<5%, 误差较小, 较准确反映了气象要素对土壤水分的影响。[结论] 贵州省喀斯特区域 10 cm 逐日土壤水分对气候要素的响应存在滞后性, 而气象要素对土壤水分变化的滞后时间、相关系数的差别, 主要原因是农业气候区、气象要素、逐日土壤水分变化阶段不同引起。

关键词: 贵州喀斯特地区; 土壤水分; 降水; 气温; 地表温度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)02-0087-08

中图分类号: P463.26

文献参数: 何兴潼, 袁淑杰, 谷晓平, 等. 贵州省喀斯特区域土壤水分持续上升时期气象要素对土壤水分的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 87-94. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.02.015. He Xingtong, Yuan Shujie, Gu Xiaoping, et al. Response of soil moisture in arising term to meteorological factors over karst area of Guizhou Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 87-94.

Response of Soil Moisture in Arising Term to Meteorological Factors over Karst Area of Guizhou Province

HE Xingtong¹, YUAN Shujie¹, GU Xiaoping², PAN Ti³, YU Fei²

(1. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China; 2. Guizhou Institute of Mountain Environment Climate, Guiyang, Guizhou 550002, China; 3. Meteorological Service Center of Sichuan Meteorological Bureau, Chengdu, Sichuan 6100072, China)

Abstract: [Objective] A systematic analysis of the impact of meteorological elements on soil moisture in karst area of Guizhou Province was conducted to provide theoretical reference for the prediction of soil moisture, restoration of ecological environment and the optimization of agricultural industrialization in this karst area. [Methods] The effects of meteorological factors on soil moisture were analyzed using two divisional dataset. One dataset is that had increased daily soil moisture and air temperature, another dataset is that had arose soil moisture but declined air temperature. Meteorological factors had daily soil moisture, precipitation, temperature, surface temperature, relative humidity, wind speed and sunshine duration of 10 soil moisture automatic observation stations in karst area of Guizhou Province from 2011 to 2015. [Results] ① The effect

收稿日期: 2017-09-09

修回日期: 2017-09-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“喀斯特地区土壤水分对气象要素响应规律研究”(41365008); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“气候变暖背景下我国南方旱涝灾害的变化规律和机理及其影响与对策”(2013CB430206)

第一作者: 何兴潼(1994—), 男(汉族), 四川省南充市人, 硕士研究生, 研究方向为应用气象学、气象防灾减灾等。E-mail: 1445248375@qq.com.

通讯作者: 袁淑杰(1966—), 女(汉族), 河北省抚宁县人, 博士, 教授, 主要从事应用气象学、气象防灾减灾等方面的研究。E-mail: ysj@cuit.edu.cn.

of different meteorological factors on the daily soil moisture was lagged to some extent and its lagging time were 10~30 days. ② Precipitation, temperature and surface temperature were the main influence factors of soil water change, having correlation coefficients of 0.66~0.95. The effects of wind speed on soil moisture change were generally weak in majority of agroclimatic zones, its correlation coefficients were less than 0.40. The correlation coefficients of radiation, relative humidity and soil moisture were greater than 0.60 when air temperature was declined. ③ High preceding air temperature and low previous cumulative precipitation were followed by reduced lagging days of precipitation, but the lagging days of air temperature and surface soil temperature were prolonged meanwhile. ④ Precipitation played a major role in the daily soil moisture changes. Changes of other meteorological factors cannot change the downward trend of daily soil moisture when accumulative precipitation was more than 22.4~135 mm in arising stage of air temperature, or when it was greater than 11.2~54.7 mm in declining stage. ⑤ The model between soil moisture and meteorological factors had small ($< 5.00\%$), can reflected accurately the influences of meteorological factors on soil moisture. [Conclusion] The response of 10 cm daily soil moisture to climatic factors in Guizhou karst region was lagged. The differences of the lagging time and the correlation coefficient between meteorological elements and soil moisture were mainly caused by stage differences of agroclimatic zones, meteorological factors and daily soil moisture changes.

Keywords: karst region of Guizhou Province; soil moisture; precipitation; temperature; surface temperature

土壤水分作为地表水文过程一个综合指标,不仅是植被生长发育必要的环境因素,在水文循环中还起着重要作用^[1],通过与植被、大气之间的传输改变能量收支平衡,影响气候和生态系统分布^[2-3]。影响土壤水分变化的因子很多,除土壤自身物理属性外^[4],还有环境、气象等要素^[5-6],但对某一特定地区而言,气象要素的影响起到主导作用^[7],以贵州为中心的中国西南喀斯特区域,是生态脆弱的独特环境单元,土壤水分是喀斯特生态环境的主要制约因子^[8],因此系统分析气象环境要素对贵州喀斯特地区土壤水分变化的影响,它的研究对于贵州喀斯特区域土壤水分的预报、生态恢复、农业产业化布局的指导具有重要作用和实际意义^[9]。许多国内外学者很早以前就开始了土壤水分的研究,探究了土壤水分和各种气象要素的联系,Philip^[10]提出了完整的土壤—植物—大气连续体概念;Nielsen^[11]把地统计学引入土壤学,土壤水分的研究取得了很大进展;Cho等^[12]发现研究发现土壤水分与降水呈正相关,与气温呈负相关。马柱国等^[13-14]研究发现温度升高和降水减少会对土壤水分的降低产生明显效果;左志燕等^[15]利用1982—2001年观测及再分析资料揭示了春季长江中下游到华北土壤水分与中国夏季东北和长江流域降水呈正相关;赵荣玮等^[16]研究发现土壤水分对降水的响应深度与降水量呈正比;韩湘云等^[17]研究发现气温、降水、相对湿度、水汽压是土壤水分季节变化的主控因子;李辑等^[18]研究了辽西干旱春播区土壤相对湿度、气象因子相关关系,建立了相应土壤相对湿度动态预测模型。尽管土壤水分与气象要素之间的关系方面

的研究很多,但大多集中在东部、西北等地区,针对喀斯特区域的土壤水分相关研究相对较少,由于受观测条件的制约,大多采用年、月、旬土壤水分资料、分析同一时间气象要素与土壤水分之间的关系。近年来,随着观测手段不断进步,逐日土壤水分自动观测网点的初步形成,使得研究逐日气象要素对土壤水分的影响成为可能,由于气象要素对土壤水分的影响有一定的滞后性,某日土壤水分不仅与当日气象要素有关,可能与前几或几十日气象要素相关。因此,本研究应用2011—2015年贵州省喀斯特区域不同农业气候区10个自动土壤水分观测站逐日土壤水分及地面气象观测资料,针对逐日土壤水分持续上升情况下,分区研究逐日气象要素对土壤水分的影响,并应用多元线性回归方法建立逐日土壤水分与各气象要素之间的关系,得到不同农业气候区逐日土壤水分持续上升时期土壤水分与各气象要素关系模型。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

研究区(25°—29°N,104°—109°E)地处云贵高原东部梯级大斜坡地带,属亚热带湿润季风气候,四季分明,年均温14~16℃,年均降水量1100~1400mm,海拔高度平均在1100m,地势由西向东降低,南北两边急剧降入广西、四川盆地,地貌以高原山地、丘陵和盆地为主,其中92.5%的面积为高原山地和丘陵,格局复杂,海拔梯度大;该区域植被以亚热带分布为主,土层浅薄,蓄水能力有限且保水能力差,土壤水分变化受气象要素的制约与影响较大,喀斯特地貌

占贵州省总面积的 61.9%,属于典型喀斯特区域。本研究根据前人的研究结果^[19],将研究区域分为 5 个区,分别为:Ⅰ:温热农业气候区(以罗甸县为代表);Ⅱ:温暖农业气候区〔Ⅱa:伏旱区(以榕江县为代表),Ⅱb:湿润区(以铜仁、思南县为代表)〕;Ⅲ:温和农业气候区〔Ⅲa:伏旱区(以遵义市为代表),Ⅲb:湿润区(以独山县为代表),Ⅲc:春干区(以安顺、兴仁县为代表)〕;Ⅳ:温凉农业气候区(以毕节市为代表);Ⅴ:高寒农业气候区(以威宁县为代表)。

1.2 资料来源

本研究所用资料均来源于贵州省气象局,主要包括:2011—2015 年 10 个自动土壤水分观测站逐日土壤水分、降水、气温、地表温度、相对湿度、风速和日照时数资料。土壤水分指土壤相对含水量,即

$$\text{土壤相对湿度} = \frac{\text{土壤含水量}(\text{g}/\text{cm}^3)}{\text{田间持水量}(\text{g}/\text{cm}^3)} \times 100\%$$

本文所提到的土壤水分是指 10 cm 土壤相对含水量。

1.3 研究方法

研究方法主要包括:滑动平均法,太阳辐射模型计算方法,回归分析法。

(1) 滑动平均法^[20]。对样本量为 n 的序列 x ,其滑动平均序列表示为:

$$y_{j+k-1} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{i+j-1} \quad (j=1, 2, \dots, n-k+1) \quad (1)$$

式中: k ——滑动长度; x ——气象要素序列; y ——相应气象要素序列的滑动平均值,本研究相关性是指气象要素滑动值与土壤水分的相关性。

(2) 太阳总辐射模型计算。前人研究^[21]表明太阳总辐射可以表示为:

$$Q = Q_0 \times (a + b \cdot s) \quad (2)$$

式中: Q ——地表所受总辐射($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$); Q_0 ——地外太阳辐射; a, b ——经验系数,为常数项; s ——日照百分率,本文中辐射均指太阳总辐射。

(3) 回归分析法。建立土壤水分与气象要素多元回归方程,分析拟合结果。

2 结果分析

利用贵州喀斯特不同农业气候区 2011—2015 年逐日土壤水分、降水量、气温、地表温度、空气相对湿度、辐射、风速资料,针对各区逐日土壤水分持续上升且气温持续上升阶段和气温持续下降两种情况,分别计算不同滑动日数降水量滑动累计值及其他要素滑动平均值与土壤水分的相关系数。

2.1 逐日土壤水分持续上升且气温持续上升时期

2.1.1 温暖伏旱区(榕江县为代表) 表 1 为温暖伏旱区(榕江)土壤水分与各气象要素不同滑动日数相关系数。由表 1 可知:①土壤水分与各气象要素的相关系数总体为 0.60~0.98,且通过了 0.01 的显著性检验;少数相关系数 <0.35 ,且没有通过 0.05 的显著性检验。②15 d 滑动累计降水与土壤水分相关系数最大,相关性最好,累计降水对土壤水分的最佳滞后时间定为 15 d;同理,气温、地表温度、相对湿度、辐射和风速滑动平均日数分别选取为 30,30,30,25,15 d;③累计降水、气温和地表温度与土壤水分的相关性最好,这 3 个因子对土壤水分的影响较大,相关系数在 0.88~0.98,对土壤水分的变化起主导作用;相对湿度、辐射和风速与土壤水分相关性相对较弱,对土壤水分变化起次要作用。

表 1 温暖伏旱区(榕江)土壤水分与各气象要素的相关系数

气象要素	选取时段	滑动日数/d					
		5	10	15	20	25	30
累计降水	20130211—20130324	0.78**	0.89**	0.90**	0.89**	0.89**	0.89**
	20150422—20150523	0.71**	0.88**	0.92**	0.97**	0.97**	0.98**
气温	20130211—20130324	0.70**	0.60**	0.62**	0.70**	0.85**	0.90**
	20150422—20150523	0.67**	0.84**	0.91**	0.91**	0.90**	0.93**
地表温度	20130211—20130324	0.83**	0.78**	0.71**	0.75**	0.88**	0.88**
	20150422—20150523	0.78**	0.87**	0.88**	0.92**	0.95**	0.98**
相对湿度	20130211—20130324	0.30	0.15	-0.19	-0.53**	-0.65**	-0.69**
	20150422—20150523	0.64**	0.65**	0.78**	0.87**	0.94**	0.97**
辐射	20130211—20130324	0.14	0.13	0.43**	0.65**	0.76**	0.80**
	20150422—20150523	-0.10	-0.05	0.18	-0.32	-0.74**	-0.59**
风速	20130211—20130324	-0.15	-0.24	-0.13	-0.02	-0.02	-0.26
	20150422—20150523	-0.21	-0.18	-0.37*	-0.49**	-0.40*	-0.31

注:*,**,*分别表示显著性水平为 0.01 和 0.05。下同。

2.1.2 温暖湿润区(铜仁县为代表) 表 2 为温暖湿润区(铜仁)土壤水分与各气象要素不同滑动日数相关系数。

由表 2 可知: ①土壤水分与各气象要素的相关系数为 0.48~0.85,且通过了 0.01 的显著性检验;少数相关系数<0.30,且没有通过 0.05 的显著性检验。②20 d 滑动累计降水与土壤水分相关系数最大,相关

性最好,累计降水对土壤水分的最佳滞后时间定为 20 日;同理,气温、地表温度、相对湿度、辐射和风速滑动平均日数分别选取为 30,30,25,15,20 d; ③累计降水、气温、地表温度和辐射与土壤水分的相关性最好,相关系数在 0.76~0.85,对土壤水分的变化起主导作用;相对湿度和风速与土壤水分相关系数较小,对土壤水分变化起次要作用。

表 2 温暖湿润区(铜仁县)土壤水分与各气象要素的相关系数

气象要素	选取时段	滑动日数/d					
		5	10	15	20	25	30
累计降水	20110306—20110408	0.58**	0.57**	0.61**	0.75**	0.72**	0.83**
气温	20110306—20110408	0.38*	0.73**	0.78**	0.75**	0.76**	0.84**
地表温度	20110306—20110408	0.48**	0.79**	0.74**	0.80**	0.79**	0.85**
相对湿度	20110306—20110408	0.34*	-0.29	-0.42*	-0.18	-0.42*	-0.41*
辐射	20110306—20110408	-0.05	-0.56**	-0.76**	-0.72**	-0.68**	-0.74**
风速	20110306—20110408	-0.51**	0.17	0.36*	0.50**	0.48**	0.41*

2.1.3 温和伏旱区(遵义为代表) 表 3 为温和伏旱区(遵义)土壤水分与各气象要素不同滑动日数相关系数。

由表 3 可知: ①土壤水分与各气象要素的相关系数总体为 0.44~0.88,且通过了 0.01 的显著性检验;少数相关系数<0.30,且没有通过 0.05 的显著性检验。②25 d 滑动累计降水与土壤水分相关系数最

大,相关性最好,累计降水对土壤水分的最佳滞后时间定为 25 d;同理,气温、地表温度、相对湿度、辐射和风速滑动平均日数分别选取为 15,10,25,10,5 d; ③累计降水、气温、地表温度、相对湿度和辐射与土壤水分的相关性最好,相关系数在 0.67~0.88,对土壤水分的变化起主导作用;风速与土壤水分相关系数较小,对土壤水分变化起次要作用。

表 3 温和伏旱区(遵义市)土壤水分与各气象要素的相关系数

气象要素	选取时段	滑动日数/d					
		5	10	15	20	25	30
累计降水	20150507—20150621	0.25	0.39**	0.49**	0.65**	0.80**	0.80**
气温	20150507—20150621	0.57**	0.73**	0.88**	0.82**	0.79**	0.82**
地表温度	20150507—20150621	-0.43**	0.84**	0.79**	0.81**	0.79**	0.82**
相对湿度	20150507—20150621	0.66**	0.61**	0.55**	0.60**	0.78**	0.76**
辐射	20150507—20150621	-0.64**	-0.67**	-0.55**	-0.50**	-0.65**	-0.64**
风速	20150507—20150621	-0.44**	-0.38**	-0.13	-0.05	-0.16	-0.20

2.1.4 其余农业气候区 同 2.1.1 方法对其余农业气候区进行分析处理,由于篇幅所限,表 4—5 分别为温和春干区、温凉区和高寒区农业气候区各气象要素最佳滞后日数、相关系数。

在所研究农业气候区中,累计降水、气温、地表温

度与土壤水分相关性最好均为正相关,相关系数为 0.76~0.93 且通过了 0.01 的显著性检验,其最佳滞后日数为 20~30 d;辐射、相对湿度、风速与土壤水分相关性普遍较弱,相关系数为 0.55~0.71,相应最佳滞后日数为 15~30 d。

表 4 其余农业气候区不同气象要素与土壤水分相关系数

农业气候区	站点	气象要素					
		累计降水	气温	地表温度	相对湿度	辐射	风速
温和春干	兴仁	0.93**	0.76**	0.87**	0.56*	-0.61**	0.41*
温凉	毕节	0.90**	0.84**	0.81**	0.68**	-0.54*	0.39*
高寒	威宁	0.89**	0.83**	0.93**	0.55*	-0.79**	0.47*

表 5 其余农业气候区不同气象要素与土壤水分的最佳滞后日数

农业气候区	站点	气象要素/d					
		累计降水	气温	地表温度	相对湿度	辐射	风速
温和春干	兴仁	10	20	20	30	15	15
温凉	毕节	25	15	15	20	10	10
高寒	威宁	30	10	10	20	10	10

2.2 逐日土壤水分持续上升且气温持续下降阶段

2.2.1 温暖伏旱区(榕江县为代表) 表 6 为温暖伏旱区(榕江县)土壤水分与各气象要素不同滑动日数相关系数。由表 6 可知:①土壤水分与各气象要素的相关系数总体为 0.65~0.95,且通过了 0.01 的显著性检验。②25 d 滑动累计降水与土壤水分相关系

数最大,相关性最好,累计降水对土壤水分的最佳滞后时间定为 25 d;同理,气温、地表温度、相对湿度、辐射和风速滑动平均日数分别选取为 15,20,20,15,15 d;③累计降水、气温、地表温度、相对湿度、辐射和风速与土壤水分的相关性均很好,所选 6 个因子对土壤水分变化明显相关。

表 6 温暖伏旱区(榕江)土壤水分与各气象要素的相关系数

气象要素	选取时段	滑动日数/d					
		5	10	15	20	25	30
累计降水	20150812—20150912	0.03	0.25	0.66**	0.75**	0.92**	0.88**
	20151106—20151205	0.31	0.41*	0.64**	0.79**	0.92**	0.87**
气温	20150812—20150912	-0.72**	-0.83**	-0.90**	-0.86**	-0.89**	-0.91**
	20151106—20151205	-0.68**	-0.62**	-0.81**	-0.79**	-0.78**	-0.73**
地表温度	20150812—20150912	-0.04	-0.28	-0.41*	-0.68**	-0.53**	-0.31
	20151106—20151205	-0.58**	-0.54**	-0.77**	-0.74**	-0.75**	-0.71**
相对湿度	20150812—20150912	0.78**	0.90**	0.94**	0.90**	0.88**	0.86**
	20151106—20151205	0.62**	0.71**	0.77**	0.83**	0.81**	0.67**
辐射	20150812—20150912	-0.82**	-0.92**	-0.95**	-0.90**	-0.85**	-0.85**
	20151106—20151205	-0.83**	-0.78**	-0.88**	-0.91**	-0.88**	-0.79**
风速	20150812—20150912	-0.81**	-0.91**	-0.95**	-0.90**	-0.93**	-0.91**
	20151106—20151205	-0.24	-0.35	-0.65**	-0.48**	-0.51**	-0.37*

2.2.2 温暖湿润区(铜仁县为代表) 表 7 为温暖湿润区(铜仁县)土壤水分与各气象要素不同滑动日数相关系数。由表 7 可知:①土壤水分与各气象要素的相关系数总体为 0.42~0.89,且通过了 0.01 的显著性检验;少数相关系数<0.30,且没有通过 0.05 的显著性检验。②25 d 滑动累计降水与土壤水分相关系数最大,相关性最好,累计降水对土壤水分的最佳滞后时间定为 25 d;同理,气温、地表温度、相对湿度、辐射和风速滑动平均日数分别选取为 20,25,20,25,15 d;③累计降水、气温、地表温度和相对湿度与土壤水分的相关性最好,相关系数在 0.72~0.89,对土壤水分的变化起主导作用;辐射和风速与土壤水分相关性较差,对土壤水分变化起次要作用。

2.2.3 温和伏旱区(遵义市为代表) 表 8 为温和伏旱区(遵义市)土壤水分与各气象要素不同滑动日数

相关系数。由表 8 可知:①土壤水分与各气象要素的相关系数总体为 0.86~0.92,均通过了 0.01 的显著性检验。②20 d 滑动累计降水与土壤水分相关系数最大,相关性最好,累计降水对土壤水分的最佳滞后时间定为 20 d;同理,气温、地表温度、相对湿度、辐射和风速滑动平均日数分别选取为 15,25,20,15,25 d;③累计降水、气温、地表温度、相对湿度、辐射和风速与土壤水分的相关性均很好,所选 6 个因子对土壤水分变化起明显相关。

2.2.4 其余农业气候区 同 2.1.4 方法对其余农业气候区进行分析处理,由于篇幅所限,不具体列出,表 9—10 分别为温热区、温暖湿润区、温和春干区和温凉区农业气候区各气象要素相关系数、最佳滞后日数。上述研究区中,累计降水和相对湿度为正相关,气温、地表温度、辐射和风速为负相关;累计降水、气

温、地表温度、相对湿度和辐射与土壤水分相关性最好,相关系数为 0.66~0.97 均通过了 0.01 的显著性检验,相应最佳滞后日数分别为 20~25 d,15~25 d,

15~25 d,10~20 d 和 10~25 d;风速与土壤水分相关性最弱,相关系数为 0.32~0.55,相应最佳滞后日数为 15~20 d。

表 7 温暖湿润区(铜仁县)土壤水分与各气象要素的相关系数

气象要素	选取时段	滑动日数/d					
		5	10	15	20	25	30
累计降水	20120101—20120207	0.50**	0.61**	0.78**	0.85**	0.88**	0.83**
	20140205—20140308	0.67**	0.83**	0.78**	0.79**	0.79**	0.74**
气温	20120101—20120207	-0.72**	-0.73**	-0.81**	-0.78**	-0.73**	-0.73**
	20140205—20140308	0.13	-0.19	-0.55**	-0.81**	-0.89**	-0.88**
地表温度	20120101—20120207	-0.65**	-0.66**	-0.61**	-0.74**	-0.69**	-0.72**
	20140205—20140308	0.28	0.31	-0.43*	-0.51**	-0.72**	-0.40*
相对湿度	20120101—20120207	0.80**	0.87**	0.86**	0.81**	0.75**	0.67**
	20140205—20140308	0.55**	0.47**	0.61**	0.83**	0.85**	0.74**
辐射	20120101—20120207	0.29	0.28	0.28	0.27	0.27	0.12
	20140205—20140308	0.15	0.24	-0.42*	-0.76**	-0.92**	-0.83**
风速	20120101—20120207	-0.14	-0.24	-0.42**	-0.47**	-0.41*	-0.34*
	20140205—20140308	-0.73**	-0.50**	-0.33	-0.10	0.28	0.38*

表 8 温和伏旱区(遵义市)土壤水分与各气象要素的相关系数

气象要素	选取时段	滑动日数/d					
		5	10	15	20	25	30
累计降水	20130813—20130913	0.43*	0.79**	0.83**	0.88**	0.88**	0.82**
气温	20130813—20130913	-0.83**	-0.88**	-0.90**	-0.92**	-0.91**	-0.90**
地表温度	20130813—20130913	-0.47*	-0.46*	-0.69**	-0.72**	-0.90**	-0.88**
相对湿度	20130813—20130913	0.67**	0.81**	0.86**	0.91**	0.90**	0.89**
辐射	20130813—20130913	-0.71**	-0.84**	-0.89**	-0.91**	-0.92**	-0.90**
风速	20130813—20130913	-0.04	-0.35*	-0.56**	-0.72**	-0.86**	-0.83**

表 9 其余农业气候区不同气象要素与土壤水分相关系数

农业气候区	站点	气象要素					
		累计降水	气温	地表温度	相对湿度	辐射	风速
温和春干	兴仁	0.86**	-0.97**	-0.97**	0.61**	-0.87**	-0.46*
温凉	毕节	0.80**	-0.93**	-0.94**	0.66**	-0.81**	-0.46*
高寒	威宁	0.82**	-0.66**	-0.80**	0.70**	-0.78**	-0.32

表 10 其余农业气候区不同气象要素与土壤水分的最佳滞后日数

农业气候区	站点	气象要素/d					
		累计降水	气温	地表温度	相对湿度	辐射	风速
温和春干	兴仁	20	15	15	25	10	25
温凉	毕节	20	10	15	20	15	20
高寒	威宁	20	10	15	10	20	20

2.3 不同农业气候区降水量及气温及平均气温对土壤水分的影响

表 11—12 为不同农业气候区所选研究时段气温上升及下降时段累计降水对土壤水分变化的滑动日数。在无灌溉条件下,一个地区的土壤特性基本不

变,降水是土壤水分变化的根本因子,故降水量达到一定数值后,降水对土壤水分变化起主要作用,其余气象要素的变化不能改变土壤水分的上升趋势;可以看出,逐日土壤水分持续上升且气温持续上升时段,不同农业气候区累计降水大于 22.4~135 mm,逐日

气温持续下降时段,累计降水数值小于上升阶段,为 11.2~54.7 mm。

表 11 不同农业气候区气温上升时累计降水

农业气候区	站点	累计降水/mm	平均气温/℃	滑动日数/d
温暖伏旱区	榕江	33.9	11.6~16.3	15
温暖湿润区	铜仁	22.4	8.4~11.3	20
温和伏旱区	遵义	135.0	17.8~21.6	25
温和春干区	兴仁	27.6	16.6~19.9	10
温凉区	毕节	50.2	17.6~21.5	25
高寒区	威宁	69.7	16.3~17.4	30

2.4 不同农业气候区气象要素对土壤水分影响

由上述分析,分别建立各区逐日土壤水分持续上升且气温上升时段及下降时段最佳滞后时间的气象因子与土壤水分多元线性回归方程如表 13—14 所示。表 13—14 可以看出,在气温持续上升或下降时

期,各区误差率总体<5%(除温暖伏旱区、高寒区误差率>5%);气温持续上升时期温暖伏旱区、温暖湿润区、温和伏旱区的误差率略好于气温持续下降时期,温和春干区、温凉区和高寒区相反。能够较准确的模拟各气象要素对土壤水分的影响,即为逐日土壤水分持续上升时气温上升时段和下降时段的相应规律。

表 12 不同农业气候区气温下降时累计降水

农业气候区	站点	累计降水/mm	平均气温/℃	滑动日数/d
温暖伏旱区	榕江	54.7	26.89~24.81	25
温暖湿润区	铜仁	25.6	7.39~3.92	25
温和伏旱区	遵义	74	26.79~19.91	20
温和春干区	兴仁	18.3	14.13~4.88	20
温凉区	毕节	11.2	12.49~1.75	20
高寒区	威宁	47.3	17.56~15.2	20

表 13 土壤水分的多元线性回归方程(气温上升)

农业气候区	多元线性回归方程	误差率
温暖伏旱区	$W = -21.845 \sim 0.026 P_{25} - 18.069 T_{30} + 24.501 S_{30} + 0.116 E_{25} + 7.727 R_{25} + 21.684 F_{30}$	5.39
温暖湿润区	$W = -380.426 + 0.019 P_{30} + 23.563 T_{30} - 24.032 S_{30} + 4.668 E_{25} - 2.187 R_{15} + 44.616 F_{20}$	0.86
温和伏旱区	$W = -210.152 + 0.015 P_{25} - 5.32 T_{15} + 1.125 S_{20} + 3.885 E_{25} + 3.652 R_{10} - 0.142 F_5$	2.92
温和春干区	$W = -821.284 + 0.012 P_{25} + 45.742 T_{20} - 44.598 S_{20} + 8.841 E_{20} - 1.732 R_{20} + 0.411 F_{20}$	2.15
温凉区	$W = 101.42 + 0.125 P_{25} - 0.235 T_{30} - 0.13 S_{20} - 0.32 E_{20} + 0.47 R_5 - 22.885 F_{25}$	2.94
高寒区	$W = 70.246 + 0.124 P_{25} - 2.214 T_{20} + 19.227 S_{20} - 1.913 E_{30} - 0.233 R_{15} - 25.243 F_{20}$	8.91

注:W,P,T,S,E,R 和 F 分别为土壤湿度、累计降水、气温、地表温度、相对湿度、辐射和风速, X_n ,下角标 n 表示该变量最佳滞后日数。下同。

表 14 土壤水分的多元线性回归方程(气温下降)

农业气候区	多元线性回归方程	误差率
温暖伏旱区	$W = 763.183 + 0.206 P_{25} - 11.746 T_{15} - 1.199 S_{20} - 4.278 E_{20} - 6.910 R_{20} + 17.176 F_{15}$	5.63
温暖湿润区	$W = 69.184 + 0.173 P_{25} + 1.272 T_{25} + 0.260 S_{25} - 0.596 E_{20} - 0.167 R_{25} - 6.113 F_{15}$	1.39
温和伏旱区	$W = -204.669 + 0.072 P_{25} + 4.992 T_{25} - 0.663 S_{25} + 1.464 E_{20} - 2.495 R_{15} + 30.377 F_{20}$	3.51
温和春干区	$W = 251.121 + 0.532 P_{20} - 5.542 T_{20} + 4.715 S_{20} - 0.625 E_{25} - 3.148 R_{25} + 17.709 F_{25}$	2.02
温凉区	$W = 1.833 \sim 0.453 P_{20} - 2.640 T_{25} + 1.544 S_{25} + 0.837 E_{20} + 0.688 R_{25} + 27.550 F_{20}$	2.16
高寒区	$W = -29.484 \sim 0.084 P_{20} + 0.684 T_{20} - 3.711 S_{25} + 1.869 E_{10} + 0.753 R_{20} - 3.311 F_{20}$	6.79

3 结论

(1) 农业气候区不同、气象要素不同、逐日土壤湿度持续上升时段,气象要素对土壤湿度影响的滞后时间不同。

(2) 在土壤水分上升、气温持续上升情况下,降水、气温、地表温度是影响土壤水分变化的主要因子,相关系数>0.75,温和伏旱、温凉、高寒区降水及气温、地表温度的滞后日数分别为 25~30,10~15 d,温暖伏旱、温暖湿润、温和春干区分别为 10~20,20~30 d。

(3) 在土壤水分上升、气温持续下降情况下,降水、气温、地表温度、相对湿度、辐射是影响土壤水分变化的主要因子,相关系数>0.71,其中各区降水、相对湿度、辐射的滞后日数相近,分别为 20~25,20~25,10~15 d,温暖伏旱、温暖湿润、温和伏旱区气温、地表温度的滞后日数较长为 15~25 d,温和春干、温凉、高寒区较短为 10~15 d。

(4) 通过对各区气温持续上升或下降阶段累计降水量和平均气温分析得,累计降水滞后日数与选取时段累计降水量、平均气温有关,即累计降水量越大、平均气温越低,则累计降水的滞后时间越长;气温、地

表温度滞后时间与累计降水量、平均气温负相关,即累计降水量越大、平均气温越低,则累计降水的滞后时间越短。

(5) 基于各区气象要素分别建立的回归方程模型,除温暖伏旱区、高寒区误差率为 5.39%~8.91%,其余各区误差率均在 3.50%以下,气温上升阶段总体误差率优于气温下降阶段,可反映所研究农业气候区近年土壤水分变化受气象要素的变化特征。本研究只考虑了气象要素对 10 cm 层土壤水分的影响,而 10 cm 以下更深土壤湿度与气象要素的相关情况有待进一步研究和探讨。

[参 考 文 献]

- [1] 蒋冲,王飞,穆兴民,等. 黄土高原农田土壤湿度演变及其与气候变化的响应关系[J]. 干旱地区农业研究, 2012,30(3):234-243.
- [2] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation[J]. *Science*, 2004,305(5687):1138-1140.
- [3] 林洁,陈效民,张勇. 气候变化与土壤湿度关系的研究进展[J]. 土壤通报,2012,43(5):1271-1276.
- [4] 李卓,吴普特,冯浩,等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报,2010,47(4):611-620.
- [5] 杨与广,刘志辉,乔鹏. 天山北坡融雪期土壤湿度特征及其影响因子[J]. 干旱区研究,2012,29(1):173-178.
- [6] 李小英,段争虎. 黄土高原土壤水分与植被相互作用研究进展[J]. 土壤通报,2012(6):1508-1514.
- [7] 王素萍,张存杰,宋连春,等. 多尺度气象干旱与土壤相对湿度的关系研究[J]. 冰川冻土,2013,35(4):865-873.
- [8] 刘伟,王世杰,罗维均,等. 贵州荔波喀斯特与非喀斯特地区土壤水运移的对比研究[J]. 地球与环境,2011,39(2):137-149.
- [9] 蔡进军,张源润,潘占兵,等. 宁夏黄土丘陵区苜蓿土壤水分的时空变异特征[J]. 水土保持研究,2016,23(1):75-79.
- [10] Philip J R. Plant Water Relations: Some Physical Aspects[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1966,17(1):245-268.
- [11] Nielsen D R. Spatial variability of field-measured soil-water properties[J]. *Hilgardia*, 1973,42(7):215-259.
- [12] Cho E, Choi M. Regional scale spatio-temporal variability of soil moisture and its relationship with meteorological factors over the Korean peninsula[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,516(17):317-329.
- [13] 马柱国,魏和林,符淙斌. 土壤湿度与气候变化关系的研究进展与展望[J]. 地球科学进展,1999,14(3):299-305.
- [14] 杨永辉,渡边正孝,王智平,等. 气候变化对太行山土壤水分及植被的影响[J]. 地理学报,2004,59(1):56-63.
- [15] 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,2008,38(11):1428-1437.
- [16] 赵荣玮,张建军,李玉婷,等. 晋西黄土区人工林地土壤水分特征及其对降雨的响应[J]. 水土保持学报,2016,30(1):178-183.
- [17] 韩湘云,景元书,李根. 低丘红壤坡面土壤水分变化的气象因素冗余分析[J]. 生态学杂志,2013,32(9):2368-2374.
- [18] 李辑,李雨鸿,胡春丽,等. 辽西干旱区春播期土壤相对湿度动态预测模型研究[J]. 土壤通报,2014,45(4):830-834.
- [19] 王朝文,张玉环. 贵州省农业气候区划[M]. 贵州 贵阳: 贵州人民出版社,1989:55-56.
- [20] 裴益轩,郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报,2001(1):21-23.
- [21] 和清华,谢云. 我国太阳总辐射气候学计算方法研究[J]. 自然资源学报,2010,25(2):308-319.