

## 降水驱动下表层土壤水分变化规律

胡新, 陈勇强 (河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 河南焦作 454000)

**摘要** 为了解降水后表层土壤水分变异特点, 基于美国气象监测网(U. S. Climate Reference Network, USCRN)站点提供的5 cm土壤水分和降水数据, 运用曲线拟合和同期平均法分析降水作用下美国大陆表层土壤水分的变化规律。结果表明, 降水后, 土壤水分变化阶段可分为剧变阶段、缓变阶段、稳定阶段。在降水的强影响周期, 降水结束12 h内, 表层土壤水分下降剧烈, 随前期降水强度增大, 剧变阶段结束时刻距离前期降水越长。在降水的弱影响周期, 东部区域由缓变阶段到稳定阶段比其他区域需要时间久, 在稳定阶段土壤水分以天为单位呈现周期性波动。

**关键词** 土壤水分; 降水; 同期平均法; 美国气象监测网

**中图分类号** S152.7 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2019)21-0058-03

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.21.018



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Variation of Surface Soil Moisture Driven by Precipitation

HU Xin, CHEN Yong-qiang (School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000)

**Abstract** In order to understand the variation characteristics of surface soil moisture after precipitation, based on the 5 cm soil moisture and precipitation data provided by the U. S. Climate Reference Network, curve fitting and simultaneous average method were used to analyze the variation rules of surface soil moisture in the United States after precipitation. The results showed that the change of soil moisture can be divided into drastic change stage, slow change stage, and stable change stage, after precipitation. In the period of strong influence of precipitation, within 12 hours after the end of precipitation, the surface soil moisture decreased drastically, and the precipitation intensity increased with the previous period, and the longer the time required for the end of the dramatic phase. In the weak influence period of precipitation, the eastern region took longer from the slow-changing phase to the stable phase, and the soil moisture in the stable phase presented cyclical fluctuations in days.

**Key words** Soil moisture; Precipitation; Simultaneous average method; U. S. Climate Reference Network

土壤水分是植物生长的必要条件, 其多寡直接影响人类生命健康和动植物群落发展<sup>[1]</sup>。同时土壤水分参与全球水循环, 影响能量平衡, 与全球气候变化关系密切<sup>[2-3]</sup>。表层土壤水分邻近地面生物圈, 易受环境因素的影响, 变动最为频繁和剧烈。掌握表层土壤水分变化规律对农业生产、气候预测等至关重要。

降水输入是表层土壤水分获得补充最直接、快速、主要的来源, 也是造成表层土壤水分突变的原因<sup>[4]</sup>。降水入渗的发生需要一定的条件, 降水量过小, 降水在降水事件结束时将全部蒸散损耗, 只有在降水量达到一定程度, 降水才会发生下渗<sup>[5]</sup>。入渗量与降水强度呈正相关, 同时降水的入渗受表面地表覆盖、微地形和表面粗糙度影响强烈<sup>[6-7]</sup>。不同深度的土壤层水分含量的变化幅度是不一样的<sup>[8]</sup>。以往研究多集中在特定条件或较小区域下降水对不同层土壤水分的影响, 而对于大区域在降水后表层土壤水分的普遍变化规律研究较少。

在前人工作的基础上, 基于美国115个气候监测站2015—2017年的5 cm土壤水分和降水资料, 运用曲线拟合和同期平均法对降水后表层土壤水分的变化特征加以分析和描述, 以期加深对土壤水分变化规律的认识, 为雨后土壤水分管理和预测提供科学依据。

### 1 材料与方法

**1.1 研究区概况** 美国大陆位于北美洲中部, 幅员辽阔, 地形复杂, 各地气候差异较大, 大体可分为5个气候区。东北部沿海的温带气候区, 冬季寒冷, 夏季温和多雨。东南部亚热带气候区, 气候温暖湿润。中央平原的大陆性气候区呈大陆性气候特征, 冬季寒冷, 夏季炎热。西部高原干燥气候区为内陆性气候。太平洋沿岸的海洋性气候区冬暖夏凉, 雨量充沛<sup>[9]</sup>。总体上东部和西部沿海区域降雨丰富, 西部高原降雨较少。

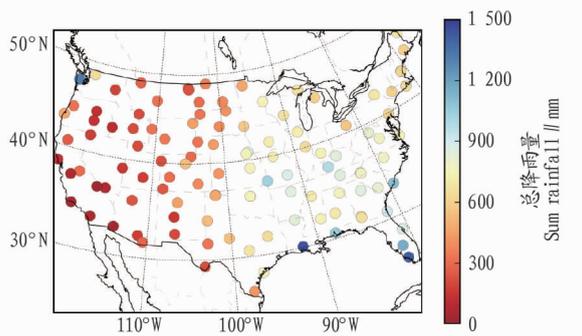


图1 USCRN 站点4—10月降雨量

Fig. 1 USCRN site rainfall from April to October

**1.2 数据来源** 5 cm土壤水分和降水数据来源于美国气象监测网(U. S. Climate Reference Network, USCRN)<sup>[10]</sup>, 由于美国北部在冬季会出现冻融现象, 影响正常情况下土壤水分变化规律。文中选取4—10月的数据作为研究对象。2015—2017年各站点非冻融期平均累计降水量如图1所示。针对5 cm土壤水分和降水数据, 按照有此项观测、无长期连续无

**基金项目** 国家自然科学基金青年基金项目(41501363); 河南省科技厅项目(172102110033)。

**作者简介** 胡新(1992—), 男, 河南南阳人, 硕士, 从事微波遥感土壤水分反演研究。

**收稿日期** 2019-05-14

效值、总记录满 1 年的标准对站点进行质量控制,分别在 2015、2016、2017 年选择 68、62、85 个站点。由于小于 5 mm 降水对土壤水分的影响几乎可以忽略不计<sup>[11]</sup>,笔者只研究 5 mm 以上强度降水后土壤水分的变化规律,降水强度等级划分标准适合参照表 1 的 12 h 降水总量(mm)。

表 1 降水强度等级划分标准

Table 1 Criteria for classification of precipitation intensity mm

| 降水等级<br>Precipitation grade | 12 h 降水总量<br>Total precipitation for 12 hours | 24 h 降水总量<br>Total precipitation for 24 hours |
|-----------------------------|---|---|
| 小雨 Light rain               | <5.0  | 0.1~9.9                                       |
| 中雨 Moderate rain            | 5.0~14.9                                      | 10.0~24.9                                     |
| 大雨 Heavy rain               | 15.0~29.9                                     | 25.0~49.9                                     |
| 暴雨 Rainstorm                | 30.0~69.9                                     | 50.0~99.9                                     |
| 大暴雨 Downpour                | 70.0~139.9                                    | 100.0~249.9                                   |
| 特大暴雨 Torrential rain        | ≥140.0  | ≥250.0  |

### 1.3 研究方法

**1.3.1 曲线拟合。**以  $y$  表示样本量为  $n$  的某一变量,用  $x$  表示所对应  $y$  的时间,建立拟合曲线来表达  $x$  与  $y$  之间的关系。

$$y=f(x,c) \quad (1)$$

式中  $c=(c_1,c_2,c_3,\dots,c_n)$  是一些待定参数。以加权最小二乘作为衡量拟合优度的标准,选择参数  $c_i$  使得拟合模型与实际观测值在各点残差的加权平方和达到最小。

**1.3.2 同期平均法。**利用几个周期的时间数列,计算同期平均数,以消除外部或偶然因素的影响,将定期变化的趋势更加明显地反映出来。

$$\bar{x}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{i,j} \quad (j=1,2,3,\dots,n) \quad (2)$$

其中  $k$  为周期数, $j$  为周期长度。

## 2 结果与分析

表层土壤水分在 3 d 后保留了降落在陆地上雨水的 14%,3 d 后在干旱地区以及排水到地下水储存最低的地区表层土壤雨水储存量最高<sup>[2]</sup>。因此把降水结束第 3 天看作降水强弱影响的分界线。

**2.1 降水强影响下表层土壤水分变异性** 2015—2017 年 4—10 月,美国大陆区域中雨(Moderate rain)、大雨(Heavy rain)、暴雨(Rainstorm)、大暴雨(Heavy rainstorm)结束后 3 d 内土壤水分下降速率(Decline rate of SM)以及相应的 5 次项拟合曲线:中雨 M\_r(fitting)、大雨 H\_r(fitting)、暴雨 Rs(fitting)、大暴雨 H\_rS(fitting),如下图 2 所示。

通过土壤水分下降速率散点分布和拟合曲线可以发现:

(1)降水结束后,表层土壤水分总体上都表现为下降趋势。其中,中雨、大雨、暴雨之后,土壤水分的下降速率基本都保持为正值,而大暴雨结束,12 h 后会出个别时刻土壤水分上升的情况。这可能与大暴雨影响下,土壤水分出现饱和现象有关。

(2)不同强度降水结束后 1 d 之内的土壤水分下降速率有较大差异。大暴雨、暴雨、大雨和中雨在降水结束后的下降速率分别为 0.01、0.054、0.031、0.008  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ,变化

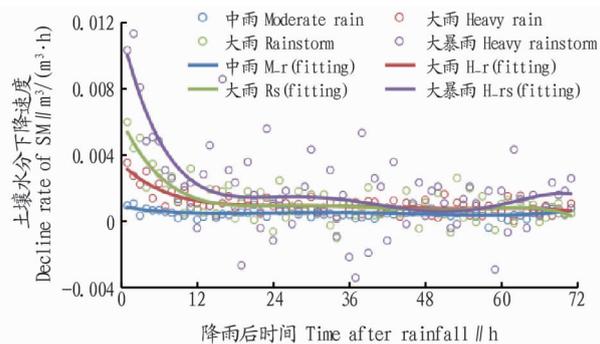


图 2 不同强度降水后 3 天内土壤水分的下降速率

Fig. 2 Reduction rate of soil moisture in three days after precipitation with different intensities

较为剧烈。

(3)1 d 之后,土壤水分的下降速率保持一个平缓稳定的水平。大暴雨、暴雨、大雨和中雨的下降速率达到稳定需要的时间分别为 16、13、11、6 h。24 h 之后,各级别降水的土壤水分下降速率逐渐接近。

**2.2 降水弱影响下表层土壤水分时空变异性** 研究区降水后 4~21 d 同期土壤水分的变化状态(图 3)发现,土壤水分的变化以天为单位进行有规律的波动,22:00 到次日 14:00 土壤水分处于下降状态,从 14:00 开始到 22:00,土壤水分处于上升状态。随着土壤水分的逐渐减少,其下降速率和波动范围逐渐降低,波动范围由 0.009  $\text{m}^3/\text{m}^3$  下降为 0.007 4  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ,日平均下降速率由 0.005 6 减小为 0.001 2  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,变化规律由波动式快速下降转变为稳定波动。

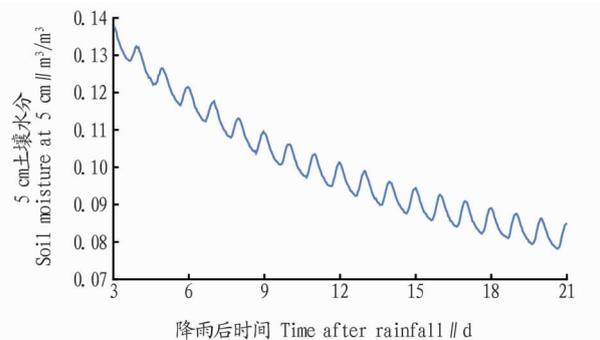


图 3 降水结束后 4~21 d 同期平均土壤水分

Fig. 3 Average soil moisture for 4~21 days after precipitation

将总样本按照 2 次降水间隔达到 7、14、21、>21 d 的标准将其分为 4 个子样本,截取降水结束后相应时间段的土壤水分分区进行分析,区域划分标准为 40°N 以北、40°N 以南、100°W 以东、100°W 以西。

各时间段区域日同期平均土壤水分变化速率(The variation of SM)如图 4 所示。

(1)降水结束后 4~7 d。美国东部区域土壤水分处于不断下降状态,西、南、北部区域土壤水分处于下降、上升不断交替的状态,其中最高下降速率和最低下降速率都出现在西部区域,分别出现于 03:00 和 18:00。南、北部区域土壤水分变化速率的表现与东部区域相似,但是变化幅度较小,在时

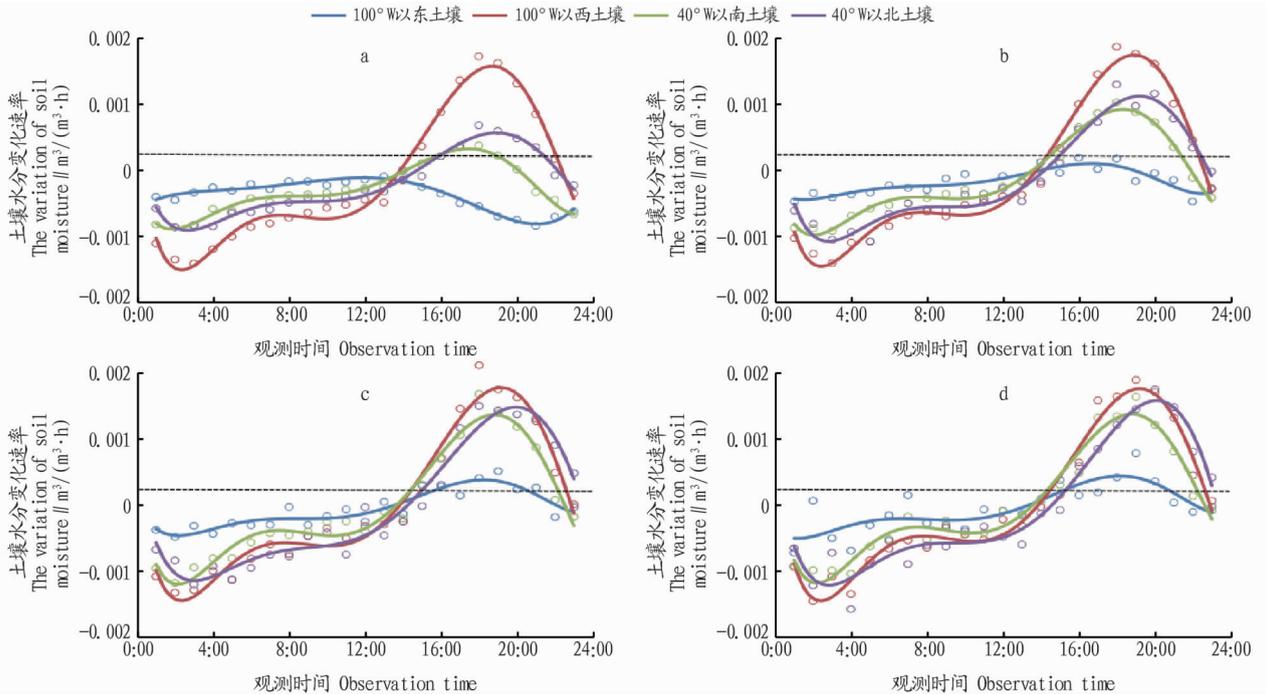
间节点上稍有差异。

(2)降水结束后8~14 d。西部区域土壤水分的变化速率和态势与降水结束后4~7 d极为相似,北部、南部区域土壤水分变化态势与前4 d基本一样,变化幅度有了一定程度的增长,东部区域的土壤水分依旧是持续下降状态,但是下降速度有所减小。

(3)降水结束15 d以后,西部区域土壤水分保持与前两个时间段的状态一致。南、北部区域土壤水分变化趋势

保持不变,变化幅度更为接近西部区域。东部区域土壤水分不再是不断下降的状态,在14:00—20:00土壤水分出现回升。

结果表明,在降水弱影响阶段,越干旱的区域越早呈现以天为周期的稳定波动状态,在降水丰富的东部区域15 d以后由缓变状态逐渐过渡至稳定状态。东、西部巨大差异产生的原因可能是由于东部区域降水较多,深层土壤储水量丰富,减弱表层土壤水分变化。



注:a为降雨后4~7 d,b为降雨后8~14 d,c为降雨后15~21 d,d为降雨后21 d以上

Note:a is 4-7 days after rainfall,b is 8-14 days after rainfall,c is 15-21 days after rainfall and d is more than 21 days after rainfall

图4 美国不同区域5cm土壤水分日平均变化速率

Fig. 4 Average daily variation rate of soil moisture at 5 cm in different regions of the United States

### 3 结论与讨论

采用曲线拟合和同期平均法对降水后表层土壤水分进行处理,发现:①在降水结束后,表层土壤水分进入剧变阶段,水分含量急剧下降,之后进入缓变阶段呈现为以天为周期的波动式下降状态,最后土壤水分进入稳定阶段,表现为每日同期变化速率保持不变的波动式稳定。②每个阶段持续时间长短与降水强度关系密切,降水强度越大、持续时间越长,进入稳定阶段需要的时间越久。③表层土壤水分的下降速度与距离前期降水结束时间呈负相关。

受试验据制约,该研究还存在一些不足:①表层土壤水分变化受外界影响因素较多,该文只研究了前期降水影响下表层土壤水分的普遍变化规律,未能分析多种影响因素下土壤水分的变化,无法建立适用的预测模型。②东部区域与其他3个区域差别巨大,除了降水影响可能还存在其他影响因素,需要继续探讨。

### 参考文献

[1] 张志南,武高林,王冬,等.黄土高原半干旱区天然草地群落结构与土壤水分关系[J].草业学报,2014,23(6):313-319.

[2] MCCOLL K A,ALEMOHAMMAD S H,AKBAR R, et al. The global distribution and dynamics of surface soil moisture[J]. Nature geoscience, 2017, 10(2): 100-104.

[3] GALLEGO-ELVIRA B,TAYLOR C M,HARRIS P P, et al. Global observational diagnosis of soil moisture control on the land surface energy balance[J]. Geophysical research letters, 2016, 43(6): 2623-2631.

[4] 卢森堡,黄土丘陵区油松和沙棘水分来源及其对降雨的响应[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.

[5] 鲁瑞洁,唐清亮,魏殿生,等.青海湖湖东沙地不同沙丘降雨入渗研究[J].中国沙漠,2013,33(3):797-803.

[6] 贺美娜,童永平,王云强,等.黄土区坡面尺度微地形和次降雨对5 m土壤水分影响的典型个例分析[J].地球环境学报,2017,8(4):357-366.

[7] 尹秋龙,焦菊英,寇萌.极端强降雨条件下黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分特征[J].自然资源学报,2015,30(3):459-469.

[8] 王二虎,全文伟,鲁建立,等.暴雨过程对不同深度土壤含水量的影响分析[C]//第27届中国气象学会年会现代农业气象防灾减灾与粮食安全分会场论文集.北京:中国气象学会,2010.

[9] 美国[EB/OL].[2019-03-05].http://www.worlduc.com/blog2012.aspx?bid=44879936.

[10] BELL J E,PALECKI M A,BAKER B, et al. U. S. climate reference network soil moisture and temperature observations[J]. Journal of hydrometeorology, 2013, 14(3): 977-988.

[11] 刘翊.荒漠草原人工柠条林土壤水分动态及其对降水脉动的响应[D].银川:宁夏大学,2013.

[12] 经管百科:人大经济论坛[EB/OL].[2019-03-05].http://www.pinggu.com/user-space-991351-0-4.html.