

黄土丘陵区土壤有机碳含量对侵蚀坡面表层 土壤含水量时空变化的影响

夏彬^{1,2}, 朱世硕³, 郝旺林^{1,2}, 许明祥^{1,3}

(1.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 表层土壤含水量能敏感反映降雨、气温、侵蚀等环境要素的变化, 明确表层土壤含水量时空变化特征可为农业生产及土壤环境效应评价等提供参考。以黄土丘陵区不同有机碳水平的侵蚀坡面为对象, 连续监测了2016年11月至2018年3月0—5 cm土壤含水量的动态变化, 结合降水资料, 分析了不同土壤有机碳水平下侵蚀坡面沉积区、侵蚀区及对照区表层土壤含水量的变化特征。结果表明: (1) 表层土壤含水量不同季节变化差异显著, 夏季变幅最大, 单日最大变幅可达14.3%, 春、秋、冬季的单日最大变幅<8.0%。换言之, 夏季是土壤水分变化的敏感期。(2) 土壤有机碳水平、坡面部位、土壤温度对表层水分变异的影响程度因季节而异。(3) 土壤侵蚀加剧了坡面表层土壤含水量变异, 变异程度表现为沉积区>侵蚀区>对照(未侵蚀)区; 侵蚀前后侵蚀区表层土壤含水量变化量与沉积区变化量的差值随有机碳水平升高从0.85%增加至9.81%。(4) 侵蚀坡面表层土壤含水量的时空异质性随有机碳水平升高呈非线性变化趋势。

关键词: 表层土壤含水量; 侵蚀坡面; 有机碳水平; 不同季节; 变异性

中图分类号: S278

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0175-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.027

Effects of Soil Organic Carbon Content on Temporal and Spatial Changes of Surface Soil Water Content on Eroded Slope in the Loess Hilly Region

XIA Bin^{1,2}, ZHU Shishuo³, HAO Wanglin^{1,2}, XU Mingxiang^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of

Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049; 3. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Surface soil water content can sensitively reflect the changes of rainfall, temperature, erosion and other environmental factors. It can provide reference for agricultural production and evaluation of soil environmental effect to clarify the temporal and spatial variation characteristics of surface soil water content. In this study, the surface soil water content of 0—5 cm soil was continuously monitored from November 2016 to April 2018 on the eroded slopes with different soil organic carbon levels in the loess hilly region. And based on the precipitation data, the variation characteristics of surface soil water content in the sedimentary area, erosion area and control area of erosion slope with different soil organic carbon levels were analyzed. The results showed that: (1) The variation of surface soil water content was significant among different seasons, with the largest variation in summer. The maximum daily variation was 14.3% in summer, and the maximum daily variations in spring, autumn and winter were all less than 8.0%. In other words, summer was the sensitive period of soil water change. (2) The influence of soil organic carbon level, slope area and soil temperature on the variation of surface soil water content varied with seasons. (3) Soil erosion intensified the variation of surface soil water content on the slope, and the variation degree followed the order: sedimentary area > erosion area > control (non-erosion) area. With the increasing of soil organic carbon level, the difference of variation of surface soil water content before and after erosion in erosion area and that in sedimentary area increased from 0.85% to 9.81%. (4) The spatial-temporal heterogeneity of the surface soil water content

收稿日期: 2020-01-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(41771318, 41830758); 国家重点研发计划项目(2017YFC0506503)

第一作者: 夏彬(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀的环境效应研究。E-mail: xiabin17@mailsucas.ac.cn

通信作者: 许明祥(1972—), 男, 博士, 研究员, 主要从事侵蚀环境土壤质量演变研究。E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

on eroded slope showed a non-linear trend with the increasing of soil organic carbon level.

Keywords: surface soil water content; erosion slope; organic carbon levels; different seasons; variability

表层土壤含水量是影响降雨入渗和径流分配的关键因素^[1-2],也是影响地球表面有效能量的分配以及感热和潜热与大气交换的重要因素^[3]。明确表层土壤含水量及其动态对于水资源管理、农田灌溉调度、作物生产和土壤养分迁移和转化至关重要^[4-5]。另一方面,表层土壤含水量会影响土壤透气性、微生物活性等进而影响土壤呼吸与碳排放^[6]。因此,明确表层土壤含水量及其变化特征对水文生态、农业生产、气候预测等研究有重要意义^[7]。

黄土高原地处干旱、半干旱气候区,该区土壤结构松散,水土流失严重^[8-9],生态环境脆弱,降水量少且集中,土壤水分是该区域生态恢复和生态系统可持续性的关键影响因素^[10]。已有研究表明,表层土壤含水量由于受土壤理化性质^[11-14]、植被分布^[15-16]、微地形^[17-18]等因素的影响,波动要大于深层土壤,对外界环境变化的响应尤为敏感^[19-21]。然而,目前有关表层土壤含水量动态变化特征的定量刻画还不够深入。以黄土丘陵区为例,有关该区降雨、土壤结构、土壤有机碳、土地利用方式对土壤含水量的影响虽有研究报道^[22-25],但表层土壤含水量对环境要素变化响应的敏感性、时空变异规律、主要影响因素等尚不明确。

本试验以黄土丘陵区典型水蚀坡面为对象,通过对不同土壤有机碳水平的侵蚀坡面各部位连续观测,研究侵蚀坡面表层土壤(0—5 cm)含水量时空变异特征,揭示表层土壤含水量对降雨、气温、土壤有机碳等环境因素的敏感程度及影响因素,以期明确侵蚀条件下坡面表层土壤含水量的变异规律。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究在中国科学院安塞水土保持综合试验站(108°11′—109°26′E,36°30′—37°19′N)山地试验场坡面小区进行。研究区为典型的黄土丘陵沟壑区,属暖温带半干旱季风气候。平均海拔 1 200 m,相对高差 100~300 m,年均气温 8.8℃,多年平均降水量 505 mm,其中 7—9 月的降水量占全年降水的 61.1%,年蒸发量超过 1 463 mm。该区土壤侵蚀以细沟、浅沟侵蚀为主,地带性土壤(黑垆土)已侵蚀殆尽,土壤以黄土母质上发育来的黄绵土(钙质干润锥形土)为主。

1.2 试验设计

为了在坡面尺度上完整呈现土壤侵蚀过程的主要阶段(侵蚀、沉积),选择“S”形坡面修建小区,小区按坡面位置划分为 3 个部位,坡顶、坡中、坡脚依次为对照区、侵蚀区和沉积区(图 1)。小区面积 2 m×18

m,坡向朝东,坡度 20°。通过施用有机肥,将小区由低到高设置 5 个有机碳水平(C1、C2、C3、C4、C5),各处理不同部位土壤有机碳含量见表 1。每处理设 4 次重复。

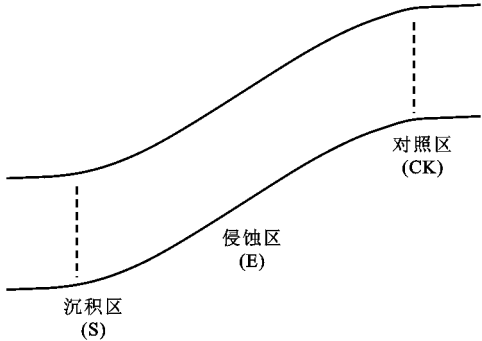


图 1 侵蚀坡面示意

1.3 样品采集与分析

于 2016 年 8 月在试验区坡面各部位采用随机布点采样法采集土样,以反映试验区土壤基本理化性质(表 1)。用土壤水分自动监测设备(Em50, DECA-GON 公司)以 30 min 为间隔连续监测 0—5 cm 土壤含水量(体积含水量)。同时,采用自记式雨量计记录降雨量(图 2),本文选取 2016 年 11 月 1 日至 2018 年 3 月 31 日阶段数据进行分析。

1.4 数据处理

运用 R 语言软件对数据进行处理及绘图。采用一般线性模型(GLM)对表层土壤含水量分季节与坡面部位、有机碳水平、温度、降雨量等因素进行方差分析,季节按照气象划分法以 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至翌年 2 月为冬季。用变异系数(coefficient of variation, CV)表征土壤含水量变异程度。

选择 2017 年 5 月 3 日、6 月 4 日、7 月 29 日 3 次降雨过程作为重复,以降雨前 1 周内 0—5 cm 土壤含水量的最小值和降雨后的最大值差值除以上升所需的天数表征土壤含水量日增长量,以降雨后的最大值和下降 2 周后的表层土壤含水量除以 2 周的天数表征土壤含水量日减少量,其计算公式为:

$$C' = \frac{dC_w}{dt} \tag{1}$$

式中: C' 为单位时间内土壤含水量变化量(%); dC_w 为时段内土壤含水量变化量(%); dt 为该时段内的时间(天)。

按四季划分将不同观测间隔时间下的表层土壤含水量与坡面不同部位、有机碳水平、温度、降雨量等因素用一般线性模型(GLM)进行方差成分估计,定量分析各因素对表层土壤含水量时空变异的影响程度。

表 1 试验区土壤基本理化性质

碳水平	位置	土壤有机碳 SOC/ (g · kg ⁻¹)	土壤微生物碳 MBC/ (mg · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	容重/ (g · cm ⁻³)
C1	对照区	0.94±0.36	77.55±26.87	0.245±0.006	1.16±0.11
	侵蚀区	0.66±0.74	54.57±6.40	0.229±0.005	1.22±0.07
	沉积区	1.05±0.26	95.76±9.89	0.256±0.008	1.28±0.07
C2	对照区	2.04±0.37	94.01±11.06	0.262±0.011	1.27±0.00
	侵蚀区	2.58±0.90	70.41±8.25	0.260±0.049	1.04±0.04
	沉积区	5.22±0.65	117.65±7.12	0.275±0.005	1.28±0.07
C3	对照区	6.94±0.02	135.00±9.81	0.325±0.007	1.23±0.01
	侵蚀区	6.43±0.07	105.42±10.43	0.287±0.009	1.19±0.01
	沉积区	7.08±0.15	159.10±13.73	0.357±0.015	1.28±0.03
C4	对照区	9.85±0.11	190.24±23.80	0.357±0.008	1.28±0.03
	侵蚀区	9.30±0.60	162.77±11.70	0.329±0.029	1.04±0.05
	沉积区	9.93±0.04	207.37±16.61	0.379±0.003	1.28±0.04
C5	对照区	10.34±0.19	202.20±15.56	0.406±0.023	1.12±0.03
	侵蚀区	9.98±0.17	184.29±16.92	0.391±0.013	1.05±0.02
	沉积区	10.67±0.14	211.02±16.46	0.408±0.006	1.15±0.03

注:表中数据为平均值±标准差。

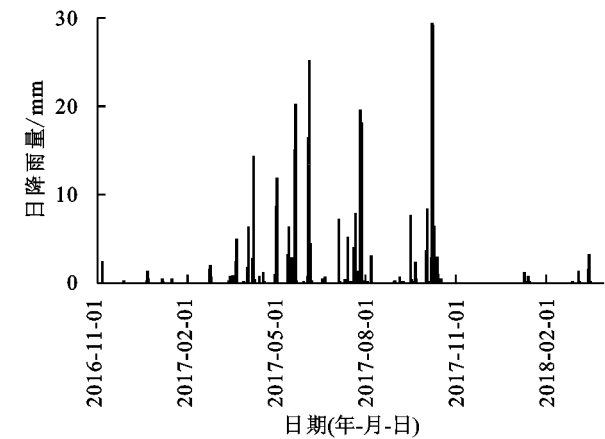


图 2 试验区日降雨量

2 结果与分析

2.1 表层土壤含水量变异性

由表 2 可知,各有机碳水平下坡面表层土壤含水量变异系数分别为 30.61%~48.54%(C1),38.03%~50.08%(C2),39.25%~63.94%(C3),34.82%~50.26%(C4),35.79%~65.71%(C5),即 0—5 cm 土层土壤含水量的变异程度随有机碳水平升高而增大。不同季节表层土壤含水量的变异性差异显著,夏季平均变异系数最大(46.54%),秋季平均变异最小(30.80%)。坡面不同部位间变异性在不同有机碳水平下无一致规律。

2.2 表层土壤含水量的变化幅度

表层土壤含水量的单日变化特征存在明显时空差异(图 3)。单日表层土壤含水量的最大差量在夏季可达 14.31%,而在春、秋、冬三季最大差量均未超过 8%。从全年来看,表层土壤含水量的单日变幅在低碳水平(C1、C2、C3)下较大,高碳水平(C4、C5)下较小,介于 0.67%~3.78%。

以 2017 年 6 月 4 日前后总量约 45 mm 的降雨为例(图 2),降雨会引起表层土壤含水量日间快速变化(图 4)。表层土壤体积含水量在降雨后 1 天内迅速增加 7%左右,且表层土壤含水量的最大值随有机碳水平升高而增大。表层土壤体积含水量达到最大值后开始下降,随时间推移主要分为迅速下降阶段和缓慢下降阶段,下降阶段整体特征呈现出有机碳水平越高含水量越大的规律,在不同部位间变异程度表现为沉积区>侵蚀区>对照(未侵蚀)区,即土壤侵蚀加剧了坡面表层土壤含水量变异。

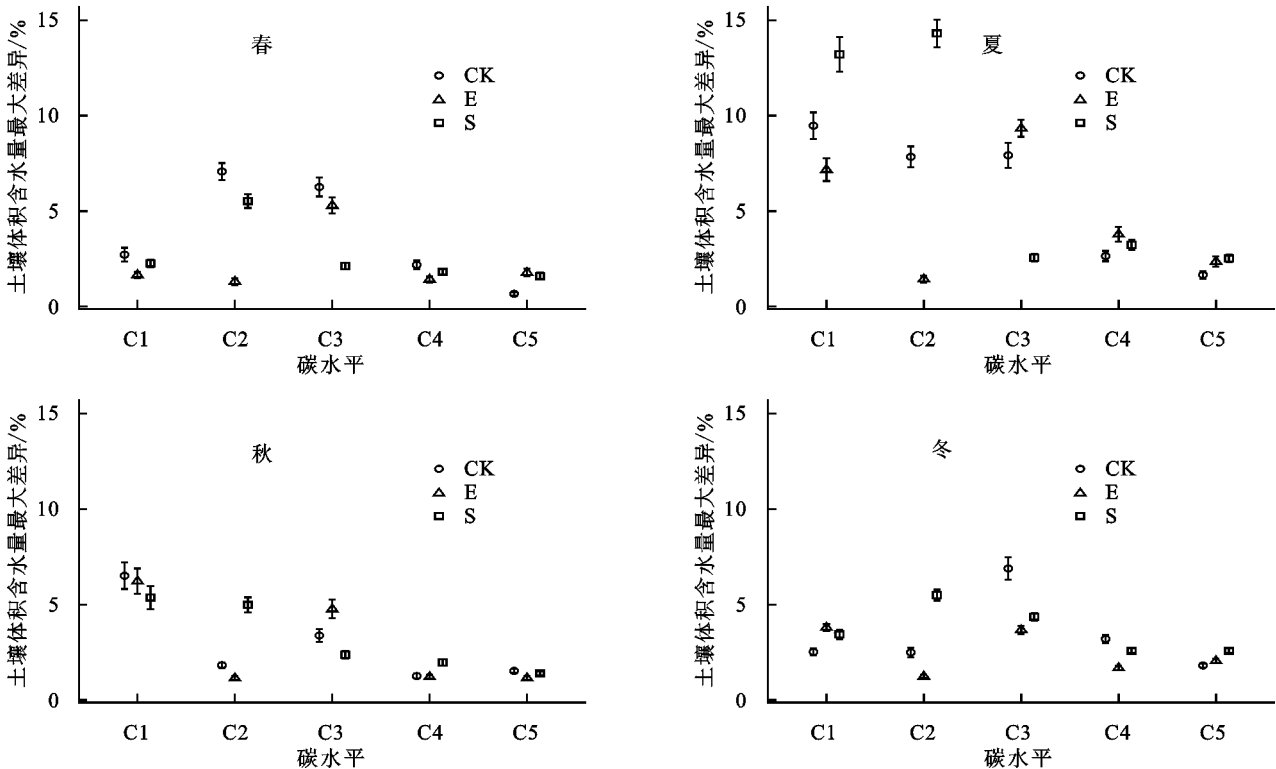
表 2 不同碳水平下坡面表层(0—5 cm)土壤含水量四季变异性

碳水平	位置	春 CV	夏 CV	秋 CV	冬 CV	总 CV
C1	对照区	39.64	46.01	40.93	26.23	48.54
	侵蚀区	24.82	41.50	27.98	18.62	30.61
	沉积区	34.10	50.34	33.00	34.56	44.83
C2	对照区	36.57	40.85	32.13	32.79	41.41
	侵蚀区	40.00	37.04	24.91	13.61	38.03
	沉积区	33.94	47.24	46.55	35.20	50.08
C3	对照区	46.57	56.56	34.27	65.54	63.94
	侵蚀区	33.28	38.05	30.38	24.16	45.18
	沉积区	25.81	46.26	25.98	29.26	39.25
C4	对照区	36.12	37.08	16.16	28.66	34.82
	侵蚀区	33.39	61.29	22.76	15.83	41.40
	沉积区	39.56	49.67	28.59	40.26	50.26
C5	对照区	22.24	41.66	25.77	25.27	35.79
	侵蚀区	69.20	39.44	41.55	50.07	65.71
	沉积区	37.78	65.09	31.05	46.43	46.89
平均值		36.87	46.54	30.80	32.43	45.12

降雨后表层土壤含水量周平均值较降雨前增加(图 5)。侵蚀区表层土壤含水量在降雨前与降雨后均高于

对照区和沉积区,不同有机碳水平间无明显规律。降雨后表层土壤含水量周平均值较降雨前整体增加幅度介于 2.75%~15.00%,综合分析侵蚀坡面各个部位,侵蚀区前后增加量更大,即侵蚀区表层土壤含水量对降雨

响应变异最大。坡面整体降雨后表层土壤含水量周平均值较降雨前随有机碳水平升高变化量增大,侵蚀区与沉积区变化量的差值随有机碳水平升高从 0.85%扩大至 9.81%,高碳水平部位间表层土壤含水量差异更大。



注:CK 为对照区;E 为侵蚀区;S 为沉积区。下同。

图 3 不同季节单日内表层(0—5 cm)土壤含水量最大差异

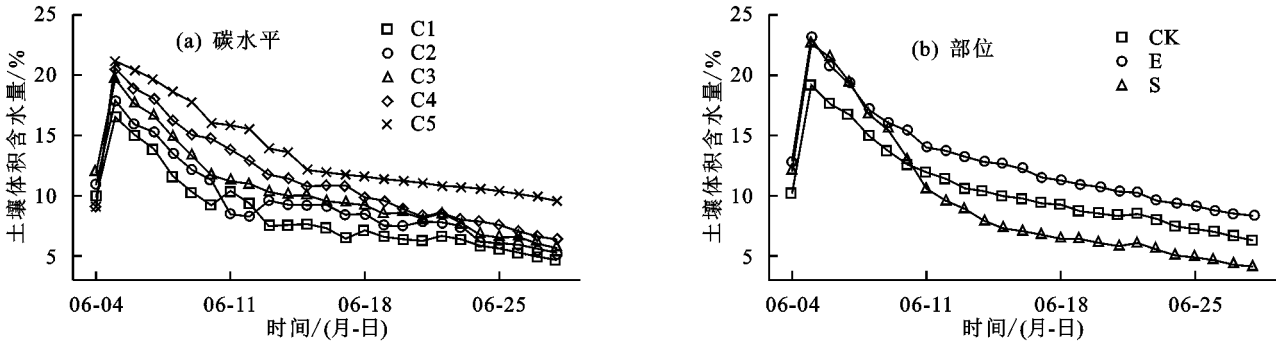


图 4 不同有机碳水平和不同部位 6 月 4 日降雨前后表层(0—5 cm)土壤含水量变化动态

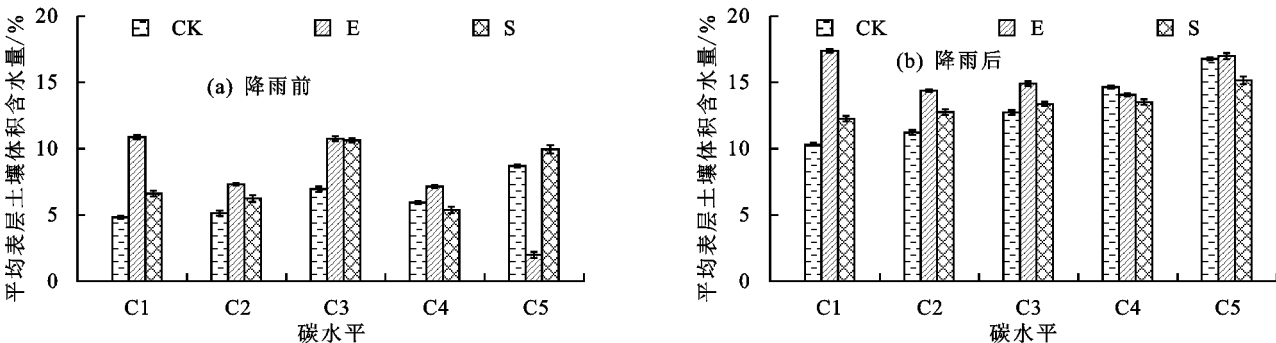


图 5 降雨前后 1 周不同有机碳水平下坡面表层(0—5 cm)土壤含水量

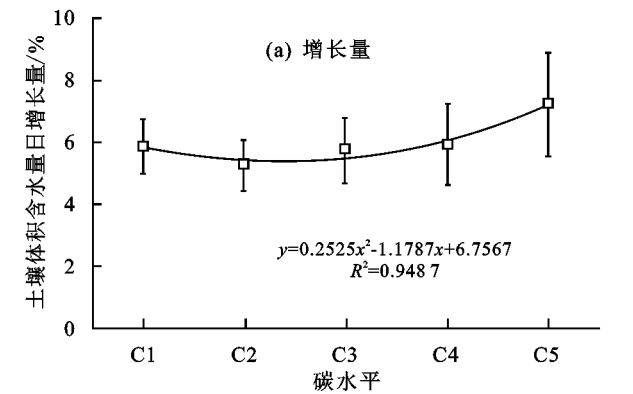
2.3 表层土壤含水量变化速率

表层土壤含水量对降雨的响应速率存在差异。1 次降雨过程中表层土壤含水量的变化可分为升高、下

降 2 个阶段,由图 4 可知,降雨前表层土壤初始含水量在不同有机碳水平下表现为 $C3 > C2 > C1 > C4 > C5 (P < 0.01)$,不同有机碳水平间坡面各部位升

高阶阶段经历时间一致,但增长量有所差异,即增长速率不同。从图 4 可见,侵蚀坡面不同部位表层土壤含水量降低至接近平衡阶段所需时间不同,沉积区耗时最短(6 天)、侵蚀区居中(9 天)、对照区耗时最长(10 天)。C1~C5 水平达到平衡所需时间分别为 4,5,5,15,23 天,即下降时间随有机碳水平升高而增加。

以 3 次降雨后表层土壤含水量的上升和下降 2 个阶段为例,分别计算降雨后表层土壤含水量日增长量和日减少量,以反映表层土壤含水量对降雨的响应



速率。由图 6a 可见,随有机碳水平升高,表层土壤含水量上升速率呈先降低后增加趋势,每天增加速率分别为 5.87%,5.25%,5.73%,5.93%,7.22%;由图 6b 可见,表层土壤含水量下降阶段较上升阶段变化速率明显减缓,随有机碳水平升高呈先降低后增加趋势。含水量每天减少速率分别为 0.86%,0.64%,0.57%,0.77%,0.77%。以上结果表明,降雨后,不同有机碳水平下侵蚀坡面表层土壤含水量有所差异,高碳水平下土壤持水性强,表层土壤含水量能维持更久的时间。

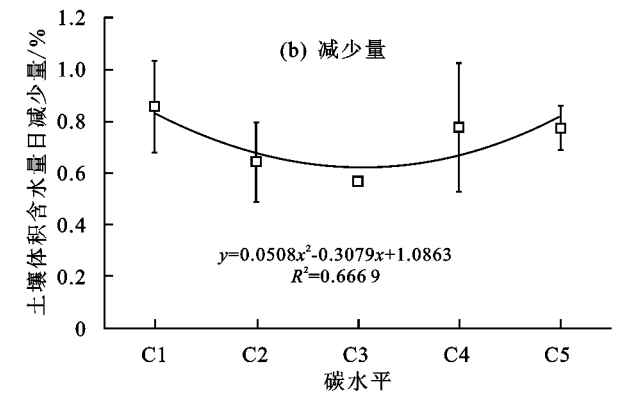


图 6 降雨引起的表层(0—5 cm)土壤含水量日增长量和降雨后表层(0—5 cm)土壤含水量日减少量

2.4 表层土壤含水量影响因素

表层土壤含水量变异特征受多因素综合影响(表 3、表 4)。一般线性模型(GLM)方差成分估计分析结果表明,不同季节下表层土壤含水量变异性受各因子的影响程度不同,而且与时间尺度有关。在以小时为时间间隔的观测尺度下,春季表层土壤含水量的变异来源主要为坡面部位和有机碳水平,分别解释其变异的 42.87%和 41.38%。而夏、秋两季主要受到有机碳水平的影响,分别解释其变异的 53.98%和

57.18%。对于冬季而言,温度是影响变异的主要因素,解释其 79.46%的变异,降雨量引起的表层土壤含水量变异相对较小。在以天为时间间隔的观测尺度下,表层土壤含水量的变异主要影响因素在春、夏两季发生变化,春季坡面部位和有机碳水平的影响程度相对下降,降雨解释了 36.32%的变异,成为引起变异的主要因子,夏季则更多受到温度变化影响,造成了 58.19%的变异,除春季外,部位间表层土壤含水量的差异不大。

表 3 小时尺度下各季节侵蚀坡面不同因子在表层(0—5 cm)土壤含水量变异(方差)中的贡献

方差来源	春季		夏季		秋季		冬季	
	方差	方差贡献率/%	方差	方差贡献率/%	方差	方差贡献率/%	方差	方差贡献率/%
部位	64794**	42.87	41904**	11.43	13348**	2.58	1631**	0.81
碳水平	62553**	41.38	197890**	53.98	296183**	57.18	39777**	19.73
温度	2088**	1.38	94763**	25.85	144744**	27.94	160215**	79.46
降雨	21715**	14.37	32021**	8.74	63746**	12.31	8	0

注:表中**、* 分别表示不同影响因素之间的差异达到 0.001 和 0.01 显著水平。下同。

表 4 日尺度下各季节侵蚀坡面不同因子在表层(0—5 cm)土壤含水量变异(方差)中的贡献

方差来源	春季		夏季		秋季		冬季	
	方差	方差贡献率/%	方差	方差贡献率/%	方差	方差贡献率/%	方差	方差贡献率/%
部位	1348**	29.23	873**	6.09	278**	2.07	32*	1.13
碳水平	1311**	28.43	4123**	28.77	6170**	45.88	833**	29.42
温度	278**	6.03	8339**	58.19	3365**	25.02	1965**	69.41
降雨	1675**	36.32	995**	6.94	3634**	27.02	1	0.04

3 讨论

由于表层土壤处于土壤—大气界面最前沿,与大气直接进行能量与物质交换,对降雨、温度等因素的变化响应灵敏。研究表明,表层土壤含水量变异性

大、不稳定,如 Heathman 等^[26]对美国南部大平原土壤含水量稳定性进行分析发现,大部分地区的表层土壤含水量稳定性不如深层;冉有华等^[27]对黑河流域土壤含水量进行了稳定性分析,结果表明表层土壤含

水量最不稳定。但目前有关表层土壤含水量对环境变化的敏感性、敏感程度并不清楚。本研究通过长期连续动态监测,对比多时间尺度下表层土壤含水量的变异特征,量化了表层土壤含水量的变化速率、变化程度,解析了有机碳水平、坡面部位、季节等因子对表层土壤含水量的影响程度,发现表层土壤含水量对土壤有机碳水平变化的非线性响应关系,对区域农业生产、植被恢复、环境效应评价及预测都有重要参考价值。

表层土壤水分的变异性实质上是土壤蒸发、入渗和保持能力的体现^[28]。有机碳作为土壤中的亲水物质,可以直接吸收水分,影响土壤水分的补给效率,也可以通过改良土壤结构来提高土壤水分的保持能力^[29]。本研究中表层土壤含水量在低碳水平上单日内变异较大,在高碳水平上相对稳定(图3),这与不同有机碳水平下土壤结构差异有关^[30-31],低碳水平下的表层土壤含水量会因外界环境微小波动发生变化,而高碳水平土壤孔隙结构搭配更加合理,因此表层土壤含水量变异较小。在图6中,表层土壤含水量变化速率随土壤有机碳水平升高呈非线性变化趋势,这可能与土壤初始含水量有关。Hermansen等^[24]研究认为,初始土壤含水量会直接影响水分的补给和消耗。结合初始土壤含水量,有机碳对水分入渗和蒸发的影响是两方面作用的综合效应:一方面,随着有机碳水平升高,土壤结构和入渗性能改善,降雨后高碳水平水分状况更好,导致蒸发阶段高碳水平初始土壤含水量较高,反而增加了蒸发量;另一方面,土壤结构的改善增加了持水性,会降低蒸发量。

土壤侵蚀过程导致坡面土壤结构变差,进而影响表层土壤含水量稳定性。降雨发生时,坡面土壤发生剥蚀、搬运和沉积,在空间上进行再分布,并引起土壤结构、养分、持水能力等性质发生变化^[32]。本研究中,侵蚀区表层土壤含水量对降雨响应强烈,且高碳水平部位间表层土壤含水量差异更大,这与侵蚀区土壤结构较差、土壤持水性减弱有关。

黄土丘陵区气候变化具有强烈的季节性,夏、秋季降雨集中,夏季昼夜温差大,冬季总体温度较低^[33],导致不同季节坡面表层土壤含水量的主要影响因素不同。同时,土壤含水量的空间推演具有强烈的时间尺度依赖性,对土壤含水量的特征描述与观测间隔时间有很大关系^[34]。冬季表层土壤含水量变异主要与白天融冻和夜晚冻结有关,而坡面碳背景和部位差异决定了融冻过程的多少及快慢,夏季降雨集中,降雨作为非限制性因子对表层土壤含水量的变异贡献不大,而不同有机碳水平对降雨的响应在短时间有所差异,小时尺度下表层土壤含水量变异主要来源为有机碳水平,6—9月前后日均温差异较大,日尺

度下变异主要来源为温度。冬季温度较低,不论是小时还是日尺度下表层土壤含水量的变异来源都主要是温度。此外,春、秋两季表层土壤含水量还分别受到冬、夏两季土壤及外界环境要素的综合影响。

4 结论

(1)表层土壤含水量变动敏感期主要在夏季,不同季节下敏感性主要影响因素不同。夏季表层土壤含水量单日最大差量可达14.31%,在小时尺度上和日尺度上主要影响因素分别是有机碳水平和温度,分别能解释其变异的53.98%和58.19%,春、秋、冬季最大差异均小于8.00%,春、秋两季表层土壤含水量敏感性受有机碳水平和部位影响,冬季变异主要来源于温度,能解释其变异的69.41%~79.46%。

(2)土壤侵蚀过程导致表层土壤含水量稳定性下降,受有机碳水平影响。降雨后侵蚀坡面表层土壤含水量增加量大小在部位间呈现出侵蚀区>对照(未侵蚀)区的规律,降雨前后侵蚀区表层土壤含水量变化量与侵蚀区变化量的差值随有机碳水平升高从0.85%扩大至9.81%,高碳水平部位间表层土壤含水量差异更大。

(3)有机碳水平对侵蚀坡面表层土壤水分时空异质性的影响是非线性的。降雨后表层土壤含水量经历上升、下降阶段,侵蚀坡面上升时增加速率平均是每天6.00%,下降时减少速率平均为每天0.72%,两阶段变化速率随有机碳水平升高呈先下降后升高的非线性趋势。

参考文献:

- [1] Western A W, Bloschl G. On the spatial scaling of soil moisture[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 217(3/4): 203-224.
- [2] Koster R D, Suarez M J, Higgins R W, et al. Observational evidence that soil moisture variations affect precipitation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(5): 1241.
- [3] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation[J]. *Science*, 2004, 305(5687): 1138-1140.
- [4] Hanson J D, Ahuja L R, Shaffer M D, et al. RZWQM: Simulating the effects of management on water quality and crop production[J]. *Agricultural Systems*, 1998, 57(2): 161-195.
- [5] Hanson J D, Rojas K W, Shaffer M J. Calibrating the root zone water quality model[J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91(2): 171-177.
- [6] Meza F J, Montes C, Bravo-Martinez F, et al. Soil water content effects on net ecosystem CO₂ exchange and actual evapotranspiration in a Mediterranean semiarid savanna of Central Chile[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 8570.

- [7] Monteith J, Unsworth M. Principles of Environmental Physics, Fourth Edition[M]// Plant Growth Regulation, 1991; 177-178.
- [8] Chen H S, Shao M G, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2008, 143 (1/2): 91-100.
- [9] 刘安花, 李英年, 张法伟, 等. 高寒矮蒿草草甸植物生长季土壤水分动态变化规律[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(10): 125-130
- [10] Yang L, Chen L D, Wei W, et al. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions[J]. Journal of Hydrology, 2014, 513: 314-321.
- [11] Hu W, Shao M A, Han F, et al. Watershed scale temporal stability of soil water content [J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 181-198.
- [12] Jacobs J M, Mohanty B P, Hsu E C, et al. SMEX02: Field scale variability, time stability and similarity of soil moisture [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(4): 436-446.
- [13] Da Silva A P, Nadler A, Kay B D. Factors contributing to temporal stability in spatial patterns of water content in the tillage zone[J]. Soil & Tillage Research, 2001, 58(3/4): 207-218.
- [14] Mohanty B P, Skaggs T H. Spatio-temporal evolution and time-stable characteristics of soil moisture within remote sensing footprints with varying soil, slope, and vegetation[J]. Advances in Water Resources, 2001, 24 (9/10): 1051-1067.
- [15] Jia X, Shao M A, Wei X, et al. Hillslope scale temporal stability of soil water storage in diverse soil layers [J]. Journal of Hydrology, 2013, 498: 254-264.
- [16] Brown A E, Zhang L, Mc Mahon T A, et al. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation[J]. Journal of Hydrology, 2005, 310(1/4): 28-61.
- [17] Zhao Y, Peth S, Wang X Y, et al. Controls of surface soil moisture spatial patterns and their temporal stability in a semi-arid steppe[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(18): 2507-2519.
- [18] Grayson R B, Western A W. Towards areal estimation of soil water content from point measurements: Time and space stability of mean response[J]. Journal of Hydrology, 1998, 207(1/2): 68-82.
- [19] Li J K, Islam S. Estimation of root zone soil moisture and surface fluxes partitioning using near surface soil moisture measurements [J]. Journal of Hydrology, 2002, 259(1/4): 1-14.
- [20] Mohanty B P, Famiglietti J S, Skaggs T H. Evolution of soil moisture spatial structure in a mixed vegetation pixel during the Southern Great Plains 1997 (SGP97) Hydrology Experiment[J]. Water Resources Research, 2000, 36(12): 3675-3686.
- [21] Mei X M, Ma L, Zhu Q K, et al. The variability in soil water storage on the loess hillslopes in China and its estimation[J]. Catena, 2019, 172: 807-818.
- [22] Zhang X, Zhao W W, Wang L X, et al. Relationship between soil water content and soil particle size on typical slopes of the Loess Plateau during a drought year [J]. Science of Total Environment, 2019, 648: 943-954.
- [23] Molina A J, Llorens P, Garcia-Estrigana P, et al. Contributions of throughfall, forest and soil characteristics to near-surface soil water-content variability at the plot scale in a mountainous Mediterranean area[J]. Science of the Total Environment, 2019, 647: 1421-1432.
- [24] Hermansen C, Moldrup P, Müller K, et al. Organic carbon content controls the severity of water repellency and the critical moisture level across New Zealand pasture soils[J]. Geoderma, 2019, 338: 281-290.
- [25] 李娟. 有机肥施用量和耕作方式对旱地土壤水分利用效率及作物生产力的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (2): 123-129.
- [26] Heathman G C, Larose M, Cosh M H, et al. Surface and profile soil moisture spatio-temporal analysis during an excessive rainfall period in the Southern Great Plains, USA[J]. Catena, 2009, 78(2): 159-169.
- [27] 冉有华, 李新, 王维真, 等. 黑河流域临泽盐碱化草地网格尺度多层土壤水分时空稳定性分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 141-148.
- [28] 李红星. 土壤蒸发数学模型的建立及其试验验证[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [29] Western A W, Zhou S L, Grayson R B, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relation to dominant spatial hydrological processes[J]. Journal of Hydrology, 2004, 286(1): 113-134.
- [30] Martinez-Mena A, Lopez J, Almagro A, et al. Effect of water erosion and cultivation on the soil carbon stock in a semiarid area of South-East Spain[J]. Soil & Tillage Research, 2008, 99(1): 119-129.
- [31] 胡婵娟, 刘国华, 郭雷, 等. 土壤侵蚀对土壤理化性质及土壤微生物的影响[J]. 干旱区研究, 2014, 31(4): 702-708.
- [32] Lal R. Accelerated soil erosion as a source of atmospheric CO₂ [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 188: 35-40.
- [33] 刘晓清, 赵景波, 于学峰. 黄土高原气候暖干化趋势及适应对策[J]. 干旱区研究, 2006, 23(4): 627-631.
- [34] Gao X D, Wu P T, Zhao X N, et al. Estimating spatial mean soil water contents of sloping jujube orchards using temporal stability[J]. Agricultural Water Management, 2011, 102(1): 66-73.