

黄土高原水蚀风蚀交错带小流域土壤水分 季节变化特征与主控因素

徐 澜^{1,2}, 王云强^{1,2}, 孙 慧^{1,3}, 贺美娜⁴, 童永平^{1,2}, 张萍萍^{1,2}

(1.中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室,西安 710061;2.中国科学院大学,
北京 100049;3.西安地球环境创新研究院,西安 710061;4.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

摘要: 土壤水分是黄土高原水蚀风蚀交错带生态环境恢复的关键因子,具有明显的时空异质性。以水蚀风蚀交错带的代表性流域—老爷满渠小流域为对象,采用网格法(50 m×50 m)共布设了 73 个样点,原位观测 0—5 m 土壤含水率,共测定 23 次(2013 年 6 月至 2019 年 10 月),通过获取每个样点的环境因子,结合经典统计、地统计、随机森林等方法,分析了小流域尺度不同土层深度(每层 1 m,共 5 层)土壤含水率的季节变化特征与影响因素。结果表明:不同土层土壤含水率的空间分布特征和季节性变化规律不同;对于 0—1 m 土层,土壤含水率在夏季和冬季之间存在显著性差异($p < 0.05$),而对于 1 m 以下土层,春季平均土壤含水率高于其他季节,但不显著;无论在何种季节,不同土地利用方式、壤土与砂土间的土壤含水率在 3 m 以上土层均存在显著差异($p < 0.05$),而阴、阳坡的土壤含水率在所有土层均存在显著差异($p < 0.05$);在不同季节,土壤含水率与容重和砂粒呈负相关,与其他环境因子(有机碳含量、黏粒、粉粒、有机碳密度、土地利用、坡向、土壤质地和 pH)呈正相关;除有机碳密度和黏粒较为稳定外,土壤含水率与环境因子的相关性均随土层深度增加呈减少趋势;环境因子对土壤含水率空间变异的整体相对贡献表现为土壤性质>地形>土地利用。研究结果可为研究区深层土壤水资源管理、土壤水文观测与模拟、植被优化布局等提供参考。

关键词: 深层土壤水分; 时空变异性; 土地利用; 随机森林; 黄土高原

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)05-0122-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.05.018

Seasonal Changes of Soil Water Content and Controlling Factors in a Small Watershed in the Water-wind Erosion Crisscross Region of the Loess Plateau

XU Lan^{1,2}, WANG Yunqiang^{1,2}, SUN Hui^{1,3}, HE Meina⁴,

TONG Yongping^{1,2}, ZHANG Pingping^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061;2.University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049; 3.Xi'an Institute for Innovative Earth Environment Research, Xi'an 710061;
4.Northwest Agriculture and Forestry University, College of Resources and Environment, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Soil water is the key factor of eco-environmental restoration in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau, which demonstrates a great temporal and spatial heterogeneity. In this study, the representative LaoYeManQu watershed in the water-wind erosion crisscross region was selected as the research area, and 73 sampling points were set up with a grid of 50 m × 50 m. From June 2013 to October 2019, 23 in-situ observations of soil water content (SWC) in 0—5 m profile was carried out by using neutron probe, and the environmental factors of each sampling point were collected simultaneously. Combined with classical statistics, geostatistics, and random forest, the seasonal variation characteristics and controlling factors of SWC at different soil layers (5 layers in total, one layer per meter) in the watershed were investigated. The results showed that the distribution characteristics and seasonal variations of SWC for soil layers

收稿日期:2021-04-16

资助项目:国家自然科学基金项目(41971045)

第一作者:徐澜(1995—),女,在读硕士研究生,主要从事深剖面土壤水文过程研究。E-mail:xulan18@mailsucas.ac.cn

通信作者:王云强(1981—),男,博士,研究员,主要从事土壤水分生态、土壤性质空间变异研究。E-mail:wangyunq04@163.com

differed. For the 0—1 m soil layer, the mean SWC between summer and winter was significant different ($p < 0.05$); while below 1 m, the mean SWC in spring was higher than that in other seasons, but it was not significant. In the soil layers above 3 m, significant differences were found in SWC among different land uses and between loam and sandy soil for four seasons ($p < 0.05$). For each soil layer, the SWC between shady and sunny slopes also differed significantly in different seasons ($p < 0.05$). SWC in all seasons was negatively correlated with soil bulk density and sand content, and positively correlated with other measured factors. With the increasing of soil depth, the correlations between SWC and measured factors generally decreased except soil organic carbon density and clay content. The factors contributing to SWC variation were soil properties, topography, and land use in sequence. These results could provide reference for the management of deep soil water resources, soil hydrological observation and simulation, and vegetation optimization in the study area and other similar regions characterized by the water and wind erosion crisscross.

Keywords: deep soil water content; spatiotemporal variability; land use; random forest; the Loess Plateau

黄土高原水蚀风蚀交错带是世界上土壤侵蚀最严重的区域之一,同时也是生态脆弱区和水分受限区^[1]。土壤水分作为陆地生态系统水循环的重要组成部分,影响着一系列与之相关的生态水文和生物地球化学循环过程,尤其是在土壤—大气、植物—土壤、地下水—岩石圈等多个界面的物质迁移过程与通量^[2]。有研究^[3]证实,土壤水分是黄土高原水蚀风蚀交错带生态恢复的关键限制因子,特别是深层土壤水分,可为深根系植被提供必要水源并有助于缓解短期的气候干旱,其生态作用不可忽视^[4]。充分认识深层土壤水分的空间分布规律、季节性变异特征及其主控因素,对于黄土高原水蚀风蚀交错带土壤水文观测与模拟、植被优化布局、土壤水资源高效利用具有非常重要的意义。

近年来,许多学者^[5]研究了农田、草地和森林生态系统土壤水分的时空动态变化特征与规律。苏子龙等^[6]研究东北典型黑土区不同土地利用方式下土壤水分的动态变化过程(测定深度为 1 m,分为 7 层)发现,在不同土地利用方式下的土壤含水率随观测期(周期为 10 天,10 次)内降雨量变化而波动,总体呈降低趋势,但各变化曲线有所差异。李谦等^[7]对太湖流域平原区不同土地利用类型(林地、菜地)不同深度(0.1,0.2,0.4,0.6 m)土壤含水率的监测数据进行分析发现,表层土壤含水率波动较深层剧烈,而林地不同深度土壤含水率变化模式相似。

在黄土高原地区,一些学者^[8-10]研究了土壤水分的时空动态变化与规律,比如,唐敏等^[8]利用土壤水分自动监测装置连续测定 4 种土地利用类型(坡耕地、梯田、枣园和草地)的 0—1.6 m 土层土壤含水率(2014—2015 年生长季)发现,在平水年和干旱年,不同土地利用方式土壤含水率的季节变化、蓄水特征及垂直分布均存在差异;杨磊等^[9]研究了浅层(0.2—2

m)和深层(2—8 m)土壤含水率的水分特征发现,农地、草地和林地的浅层土壤含水率因受到植被蒸腾作用和土壤物理蒸发作用影响而消耗较多;贾小旭等^[10]研究黄土高原土壤水分的空间格局发现,该区域的 4 种植被类型土壤含水率呈现不同的垂直分布规律和相似的水平分布趋势。

在黄土高原水蚀风蚀交错带,张梦杰等^[11]研究不同土地利用 0—9.63 m 土壤含水率(2014—2017 年,共监测 19 次)指出,在 0—2 m 范围内,柠条土壤含水率最低,其次分别是沙地、苜蓿、山杏、撂荒、农地;在坡面尺度,王云强等^[12]研究不同土地利用方式下坡面的土壤含水率的空间分布特征及其变异规律发现,草地和农地的土壤含水率在同一土层深度下差异极显著,但二者在垂直方向、坡长方向的变异程度无显著差异,均为中等变异程度;在小流域尺度,Hu 等^[13]结合时间稳定性分析、多元模态分析等方法,系统揭示了浅层(0—0.8 m)土壤含水率的时空变化特征与主控因素发现,土壤质地、植被类型和空气湿度是土壤水分时空变异的主要影响因素;关于小流域深层(0—5 m)土壤含水率的空间分布特征,被发现是土地利用方式、植被类型、地形要素、土壤质地等多因素综合作用的结果^[14];Fu 等^[15]进一步研究小流域 0—5 m 土壤水分时空变异性及其时间稳定性指标的时空变化规律发现,表层 1.5 m 土壤水分的时间变化与降雨事件显著相关。然而,关于小流域深剖面土壤含水率的季节变化规律、主控因素及其深度依赖性,学术界尚未取得系统的科学认识。

鉴于此,本文以黄土高原水蚀风蚀交错区老爷满渠小流域为研究对象,通过高密度方法布设 73 个土壤水分原位观测点,研究小流域尺度深剖面(0—5 m)土壤含水率的季节变化特征及主控因素,以期与研究区及类似区域的植被管理与土壤水资源高效

利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为陕西省神木市以西的老爷满渠小流域(110°26'E,38°49'N),位于典型的黄土高原水蚀风蚀交错带(图 1)。老爷满渠小流域冬春季干旱并伴有风沙,夏秋多雨,年均降水量 437 mm,年均气温 8.4℃,潜在蒸散量 1 337 mm^[15]。降水量年际变化大,年内降水集中在 6—10 月,其降水量占年降水量的 70%~90%。流域内海拔 1 056~1 130 m,沟壑纵横,主沟道两侧分布有多条支沟^[16-17],主要土壤类型为黄绵土、风沙土等。植被类型以紫花苜蓿、长茅草、胡枝子、蒿属植被为主,沙柳、柠条等灌木在流域内也有分布。主要土地利用类型为农地、草地、林地(包括柠条、杏树、杨树等)。

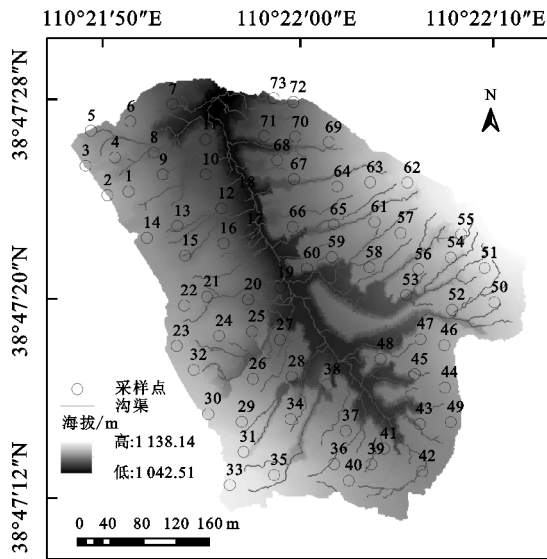


图 1 研究区样点分布

1.2 试验设计与数据收集

2012 年秋季,利用 50 m×50 m 网格法,在老爷满渠流域选择 73 个样点,安装 5 m 深中子管,用于剖面土壤含水率动态变化原位监测,并详细记录各样点土地利用、植被类型、植被盖度、植被密度和植被年限等立地条件。在每个样点,用直径 0.05 m 的土钻,分 8 层(即 0—0.1,0.1—0.2,0.2—0.6,0.6—1.0,1.0—2.0,2.0—3.0,3.0—4.0,4.0—5.0 m)采集扰动土样,带回实验室经自然风干后分别过 1,0.25 mm 筛,测定颗粒组成(MS 3000 激光粒度仪)、pH(1:5 H₂O, pH 计)和有机碳含量(重铬酸钾外加热法)等。同时,在样点附近利用环刀(高度 5 cm,直径 5 cm)采集原状土样,带回实验室利用重量法测定容重等土壤水力参数。随后,在 2013 年 6 月至 2019 年 8 月,利用 CNC503DR 型中子仪以一定间隔(0—1 m 土层以

0.1 m 为间隔,1—5 m 土层以 0.2 m 为间隔)测定剖面土壤含水率,共测定 23 次。土壤含水率经建立的标定曲线^[15]进行标定。

为揭示不同土层土壤含水率的季节性变化规律,将所测的 23 次土壤水分数据分别划分为 4 个季节:春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12 月至翌年 2 月);同时,将 0—5 m 剖面划分为 5 层:0—1,1—2,2—3,3—4,4—5 m。每层的土壤含水率为该层内所有水分测定值的均值。考虑到立地条件的差异,本研究统计了不同土地利用、坡向和土壤质地下的样点数,其中,不同土地利用类型的样点数为:林地 40 个、草地 22 个、农地 11 个;不同坡向的样点数为:阳坡 42 个、阴坡 31 个;土壤质地分类基于美国农业部土壤质地分类标准^[15],分类后得到不同质地的样点数为:壤土 59 个、砂土 24 个。地形因子通过以下方法收集:(1)使用 GPS(精度为 5 m)测量每个样点的海拔、经度和纬度;(2)通过罗盘仪测定坡度和坡向;(3)使用 ArcGIS(10.4.1)软件从 Albers 坐标系下的 5 m×5 m 数字高程模型中提取地形湿度指数、剖面曲率、平面曲率、距河网距离等因子。

1.3 数据分析

土壤含水率是典型的区域化变量,本研究采用地统计学理论,结合半变异函数分析,获得小流域土壤水分克里金空间插值的关键输入参数^[14]。基于获得的地统计学参数,可在 ArcGIS 中利用克里金方法插值生成各样点土壤水分的空间分布图。

本文利用随机森林模型来评估各个因子对土壤水分季节性变化的相对重要性。首先,模型内部会在自变量(环境因子)中选择影响最大的几个特征因子,以此来缩减特征数,一般利用基尼指数或袋外数据的错误率作为评价指标来衡量影响较大的特征因子。其次,模型内部会随机从构造的节点中抽取 2 个样本,用其类别标记不一致的概率。在得到特征值在节点的重要性后,对所有求得的重要性评分做归一化处理。

小流域不同土层土壤含水率的统计特征值,土壤含水率与所获因子的 Pearson 相关分析、单因素方差分析、随机森林模型分析等在 R 软件(R 3.6.1)中进行。

2 结果与分析

2.1 不同季节小流域土壤水分空间分布特征与规律

2.1.1 不同季节不同土层土壤含水率差异 由图 2 可知,老爷满渠小流域不同土层土壤含水率的季节性变化特征。对于 0—1 m 土层,土壤含水率分别在夏季和冬季之间存在显著性差异($p<0.05$),而对于

其他土层,土壤含水率在不同季节之间均无显著差异;对于0—1 m土层,夏季的平均土壤含水率最高,而对于其他土层,春季的平均土壤含水率高于其他季节,但不显著。表层0—1 m的夏季平均土壤含水率最高,可能和该季节降水补给有关,在本研究区,81%的降水量都出现在6—8月,而春季土壤含水率在深层(>1 m)较高,可能归因于雨季降水补给土壤水的滞后效应和冻土融化。杜康等^[18]也报道了类似规律发现,降水补给土壤水需要一定的时间,具有滞后效应。

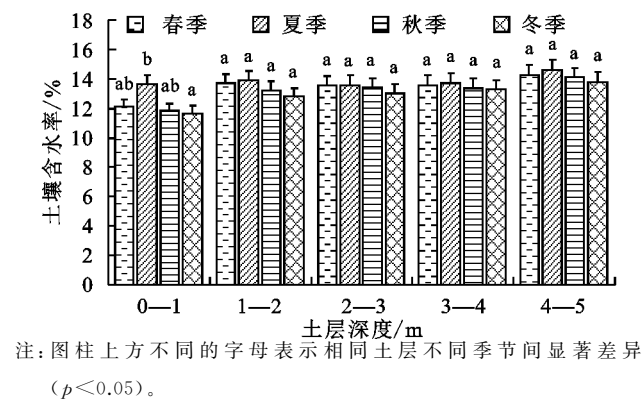


图2 老爷满渠小流域4个季节不同土层的土壤含水率

2.1.2 不同季节土壤含水率空间分布规律 老爷满渠小流域土壤含水率具有明显的空间分布规律,整体上表现为流域东部坡面的土壤含水率高于西部坡面,主沟道的土壤含水率高于其他区域,这种分布格局在0—1,1—2,2—3 m土层表现得尤为明显,而3—4,4—5 m土层土壤含水率则主要呈斑块状分布特征(图1和图3)。结合小流域植被分布^[16]可知,在不同季节下,不同植被类型下土壤含水率分布具有明显差异,显示出植被对土壤含水率的重要影响,并且这种影响作用与其他因子(气候、地形等)叠加,最终形成了现有的土壤含水率分布格局(图3)。对于不同土层,0—1,1—2,2—3 m土层坡面土壤较3—4,4—5 m土层干燥,沟道土壤则较为湿润,当考虑整个小流域时,3—4,4—5 m土层土壤含水率则整体较高。对于不同季节,春季和夏季的土壤含水率整体较高,而秋季和冬季则较低,这是由于在3—5月期间,植被生长缓慢,耗水较少,且有冬季冰雪融化补给土壤水所致,且夏季的含水率较高与当季降雨较多有关^[19]。

2.2 不同立地条件下土壤含水率的季节性变化规律

2.2.1 不同土地利用方式下土壤含水率的季节性变化 对于0—1 m土层,草地、林地、农地土壤含水率均随季节变化而变化,呈现先上升后下降的趋势,具体表现为夏季最高,冬季最低,从春季到夏季的变动幅度最小(图4)。这可能是由于进入夏季,降水的补给作用导

致各土地利用方式下土壤水分缓慢增加。夏季到秋季土壤水分变化较为剧烈,各土地利用土壤水分快速减少,这主要是因为植被进入生长期,蒸散量较大所致^[20-21]。对于1 m以下土层,草地、林地、农地土壤含水率大都随季节变化呈降低趋势,具体表现为春季最高,冬季最低。这主要是因为春季,植被蒸腾较弱且该时期冻土层融化,可以及时补充相应土层土壤水分,进而使得土壤含水率呈现较高状态^[13]。

由图4可知,不同土地利用方式对土壤含水率具有显著影响。对于0—1,1—2 m土层,草地和林地土壤含水率在所有季节均存在显著差异($p < 0.05$),2—3 m土层中,草地和林地年春季、秋季和冬季中存在显著差异($p < 0.05$);而对于3—4,4—5 m的2个土层,不同土地利用土壤含水率在所有季节均无显著差异($p > 0.05$)。这表明随着土层深度增加,土地利用对土壤含水率的影响程度逐渐减弱。林地和草地土壤含水率在3 m以上土层具有显著差异,这与林地(深根系植物)需水量大有关,不仅可以消耗当季降雨,还可以进一步消耗根区土壤水分,而研究区内林地的根系主要分布在3 m以上土层,进而导致该土层土壤水分严重亏缺。

2.2.2 不同坡向土壤含水率的季节性变化 对于0—1 m土层,阳坡和阴坡土壤含水率均随季节变化呈现先升高后降低趋势,表现为夏季最高,冬季最低(图5)。对于1 m以下土层,阳坡和阴坡土壤含水率均随季节变化无显著差异。在整个土壤剖面中,阴坡土壤含水率均显著高于阳坡土壤含水率($p < 0.05$)。这可能归因于坡向影响地表太阳辐射的分配来影响地表温度,进而间接影响土壤蒸发和植被蒸腾,导致阴坡土壤储水量相对较高,已有研究^[22-23]也得出了相似的结论。

2.2.3 不同质地土壤含水率的季节性变化 由图6可知,对于0—1 m土层,壤土和砂土土壤含水率随季节变化呈现先升高后降低趋势,而对于1 m以下土层,壤土和砂土的土壤含水率均在夏季最高,冬季最低。对于0—1,1—2,2—3 m土层,所有季节壤土与砂土的土壤含水率均存在显著差异($p < 0.05$)。主要原因:砂土中粗颗粒多细颗粒少,土壤颗粒间孔隙大,毛细管作用弱,蓄水持水能力差,因此具有较低的土壤含水率;而壤土的结构性、持水性和保水性较好,土壤含水率相对较高^[24]。而对于3—4,4—5 m土层,所有季节壤土与砂土的土壤含水率差异均不显著($p > 0.05$),这可能是因为该土层可以作为隔水层,使得上层土壤中渗流下的水分蓄积在该层位,进而导致

质地对该土层土壤含水率的影响被掩盖。

综上所述,本研究区所代表的水蚀风蚀交错带深

剖面土壤含水率的季节性分布特征受土地利用、坡向

和土壤质地等因素共同作用。

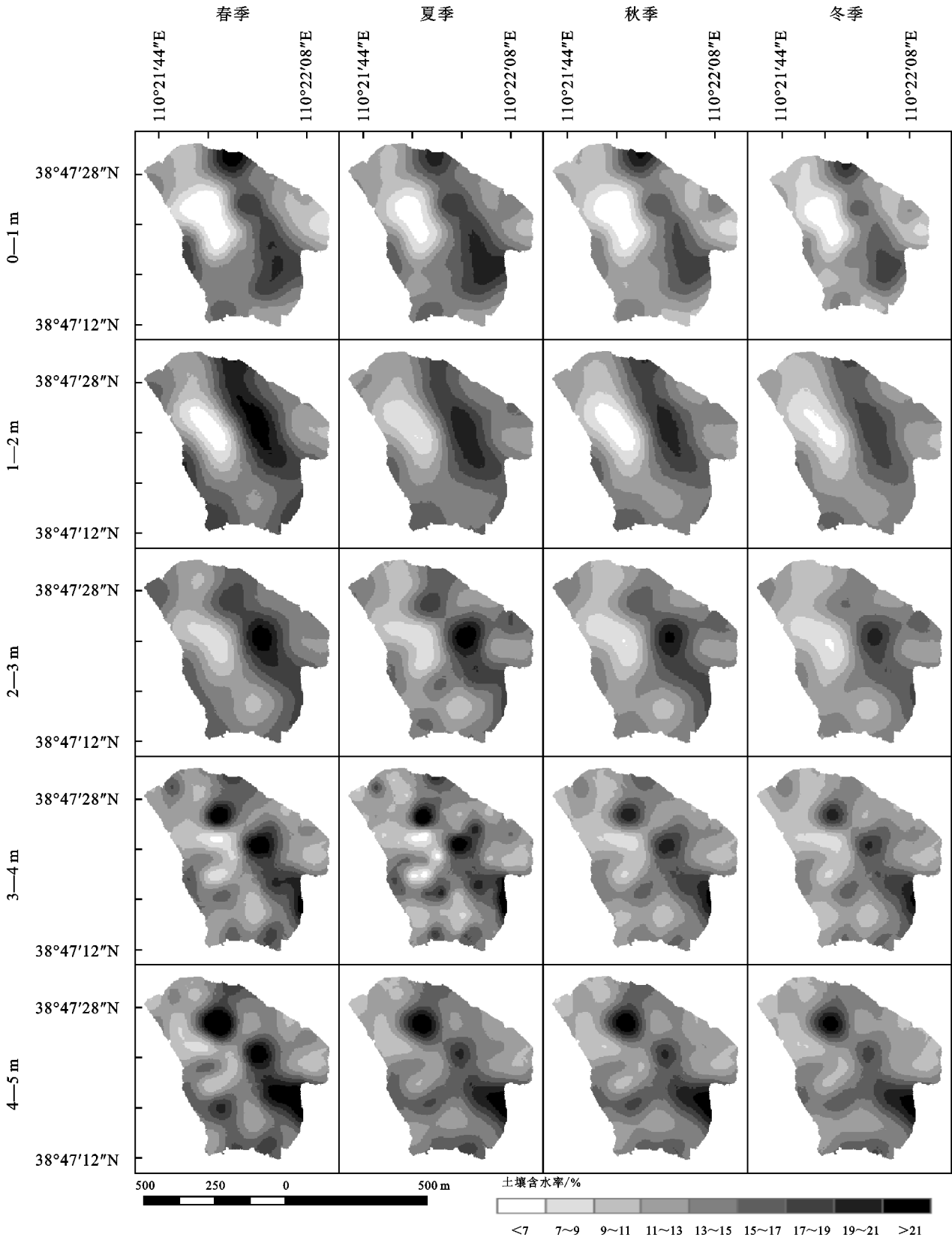


图 3 老爷满渠小流域 4 个季节不同土层土壤含水率空间分布

2.3 不同季节不同土层土壤含水率的影响因素

Pearson 相关分析结果表明,土壤含水率与容重

和砂粒呈负相关,与 pH、粉粒、黏粒、土地利用和有

机碳呈正相关,并且在不同季节和不同土层,这种相

关性具有一致性(图 7)。土壤物理性质(如容重、颗

粒组成等)主要通过控制土壤结构、基质吸力等来影响土壤水分,而土壤有机碳主要通过改善土壤结构、降低土壤容重、增加土壤毛管孔隙度等性质来提高土壤的蓄水和持水性能^[25]。贾小旭等^[10]通过 Pearson 相关分析也发现,土壤含水率与土壤有机碳和黏粒含量呈极显著正相关关系,而与海拔和坡向呈显著负相关关系。在所有季节,随土层深度增加,土壤含水率

与有机碳密度和黏粒的相关性大小较为稳定,没有明显变化趋势;除此之外,土壤含水率与其他因子的相关性整体上随土层深度增加而减少。由于表层土壤受太阳辐射、降水、地形等外界环境的影响较大,使得土壤含水率与环境因子的相关性较大,随着土层深度增加,土壤水分受外界环境的影响变小。由此表明,土壤含水率的影响因素具有深度依赖性。

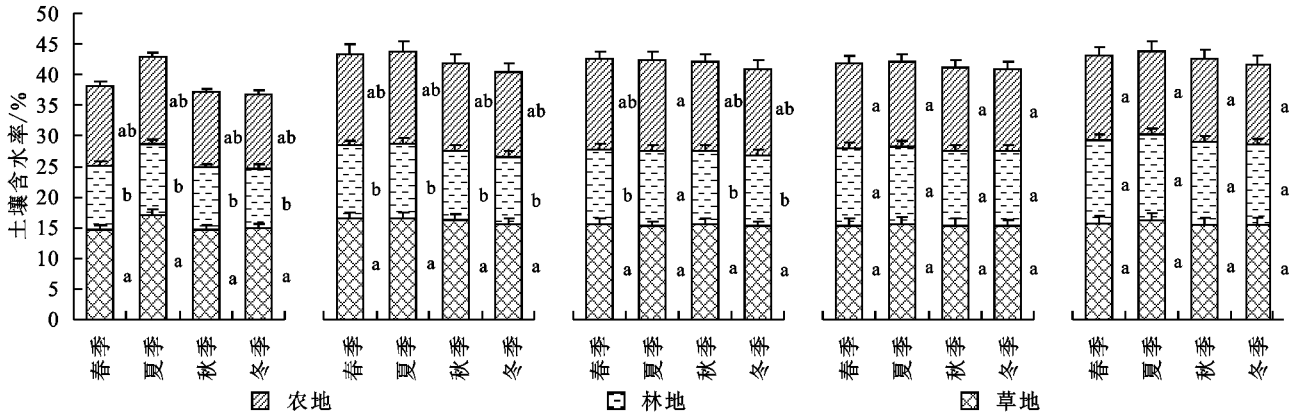


图 4 老爷满渠小流域 4 个季节不同土地利用类型的土壤含水率

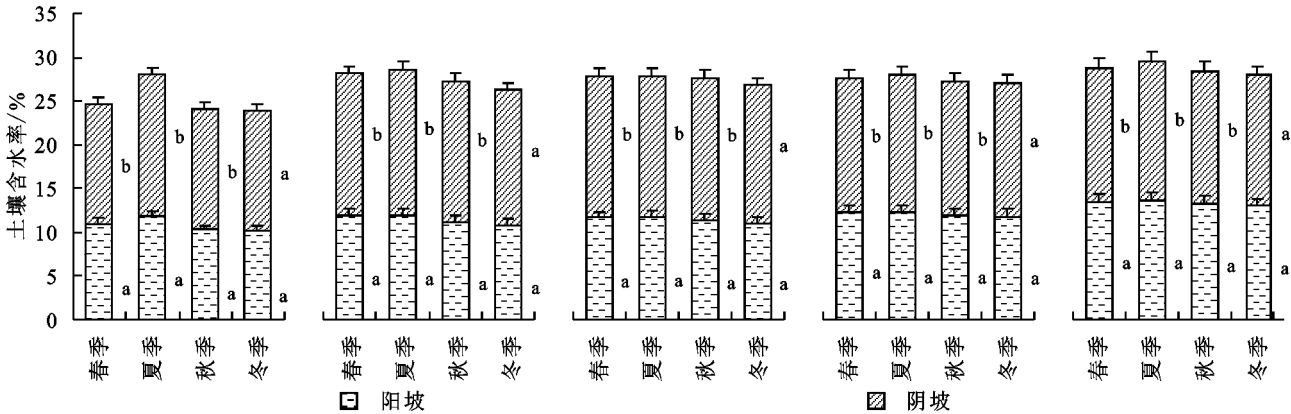


图 5 老爷满渠小流域 4 个季节不同坡向的土壤含水率

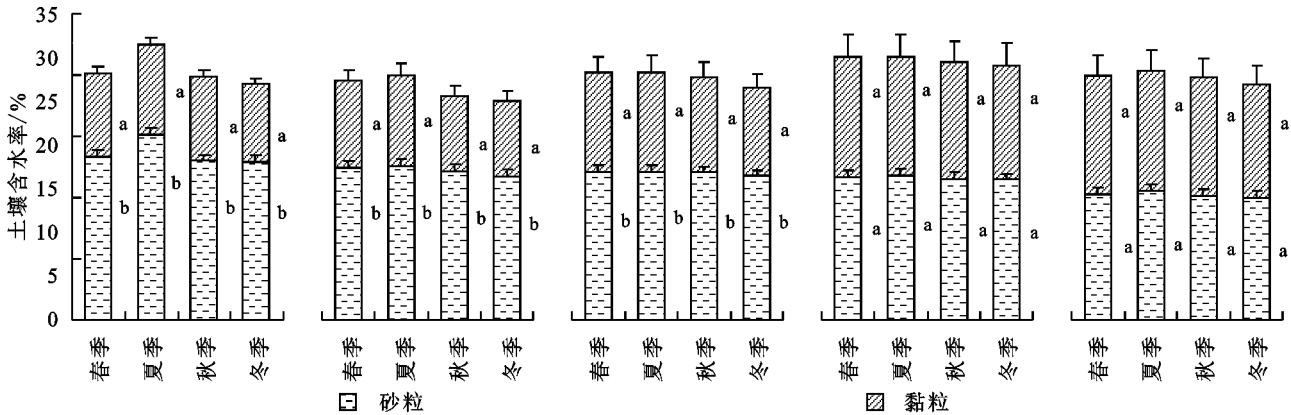


图 6 老爷满渠小流域 4 个季节不同质地的土壤含水率

随机森林模型分析进一步表明,环境因子对土壤含水率的贡献大小整体表现为土壤性质(pH 和容重的顺序除外)>地形因子>土地利用,这种贡献在不同季节和不同土层整体上是-致的(图 8)。对于不同土层,土地利用对 0—1,3—4 m 土层土壤含

水率的贡献较其他土层大,而坡向对 2 m 以上土层土壤含水率的贡献较大。这与不同土地利用下的植被根系分布及其耗水特性密切相关,而坡向的影响可能是通过改变太阳辐射分配而间接影响了土壤含水率的分布,而表层受到其他因素的影响较大,随

着土层深度的增加,坡向对于日照时间、强度的影响逐渐减弱。

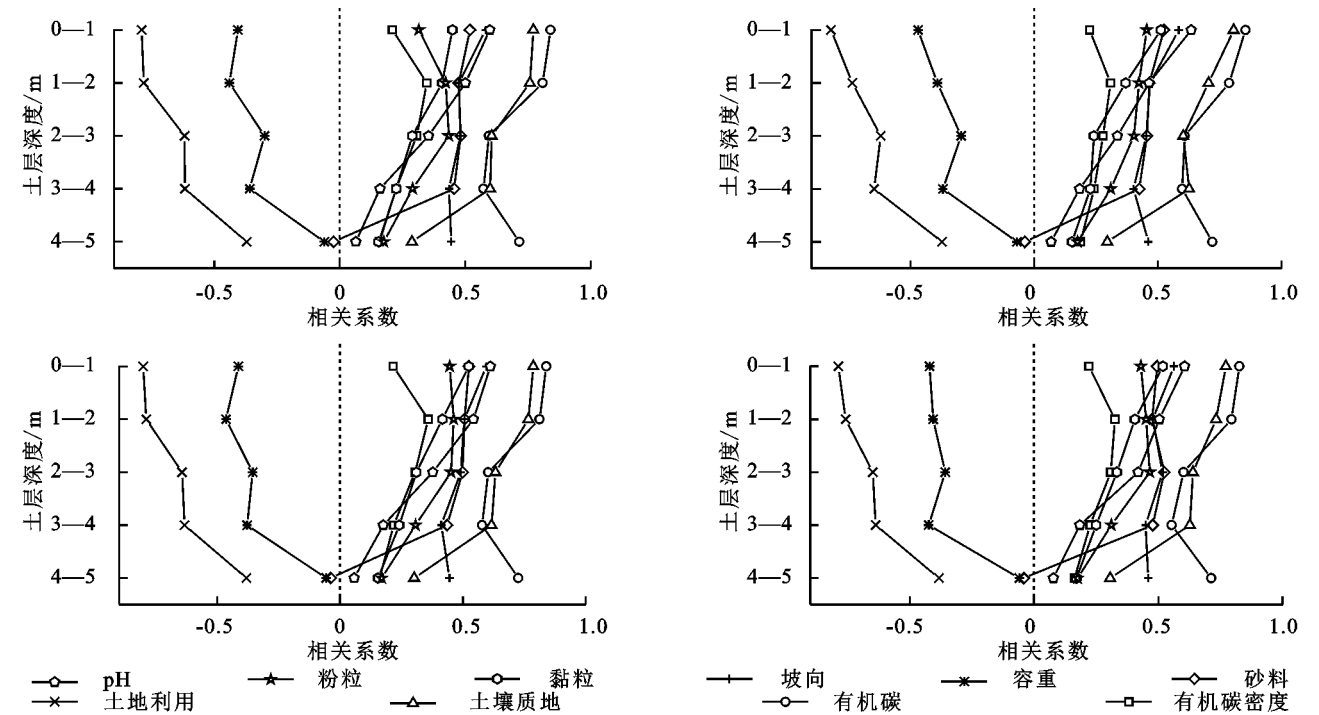


图 7 老爷满渠小流域 4 个季节的土壤含水率和环境因子之间的 Pearson 相关系数分布

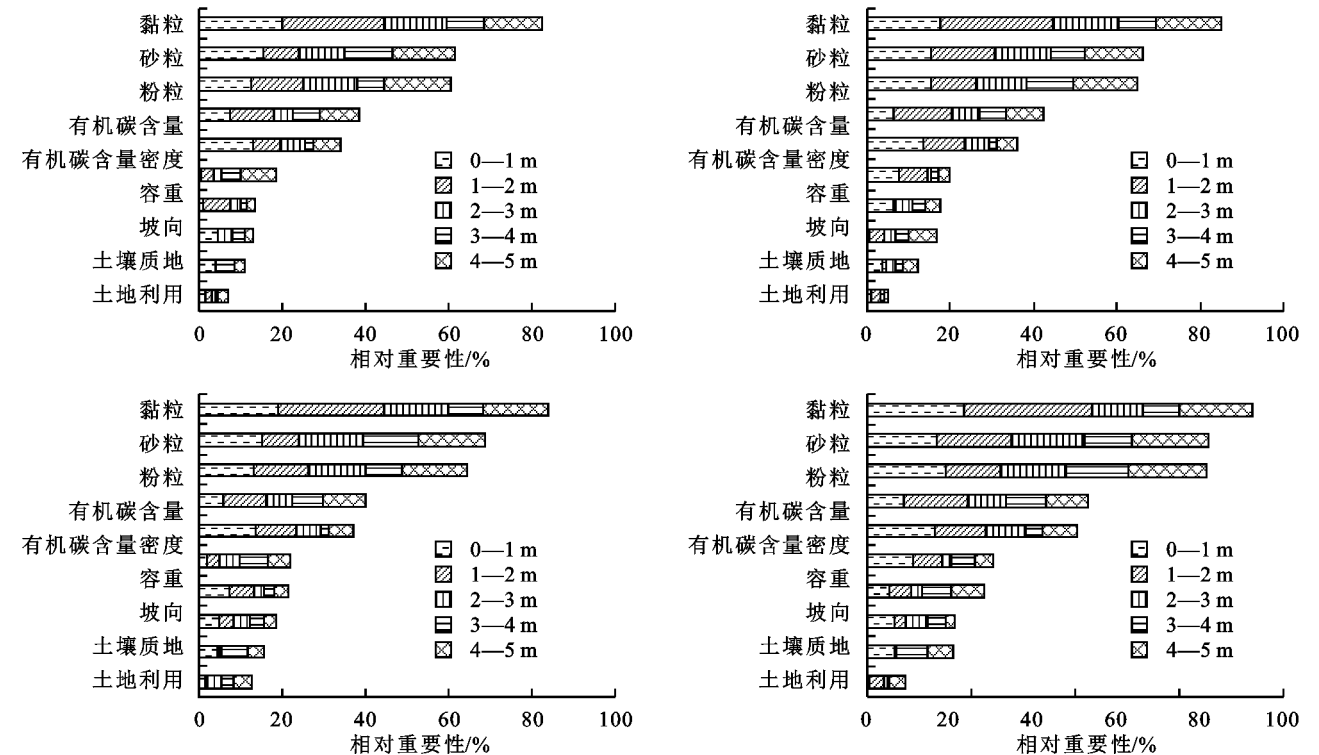


图 8 老爷满渠小流域 4 个季节不同土层土壤含水率的影响因素及其相对重要性

3 结论

(1)对于 0—1 m 土层,土壤含水率在夏季和冬季之间存在显著性差异($p<0.05$);而对于 1 m 以下土层,春季平均土壤含水率高于其他季节,但不显著;土壤含水率空间分布特征因土层和季节的不同而不同,对于不同土层,0—1,1—2,2—3 m 土层坡面土壤较 3—4,4—5 m 土层干燥,沟道土壤较为湿润,小流

域尺度上 3—4,4—5 m 土层土壤含水率则整体较高,对于不同季节,春季和夏季的土壤含水率整体较高,而秋季和冬季则较低。
(2)对于 3 m 以上土层,不同土地利用方式之间、壤土和砂土之间的土壤含水率在所有季节均存在显著差异($p<0.05$);对于所有土层,阴坡、阳坡的土壤含水率在所有季节均存在显著差异($p<0.05$)。
(3)在所有季节,土壤含水率与容重和砂粒呈负

相关,与 pH、粉粒、黏粒、土地利用、坡向和有机碳呈正相关;随土层深度增加,除有机碳密度和黏粒较为稳定外,土壤含水率与其他环境因子的相关性整体上呈减少趋势,表现出明显的深度依赖性;随机森林模型分析发现,环境因子对土壤含水率的贡献大小依次为土壤性质>地形>土地利用。

相关结果可为不同季节小流域尺度土壤水资源合理利用提供参考。今后将进一步加强不同季节植被水分来源与耗水机制研究,深化对水蚀风蚀交错带土壤水分时空变异性及其内在机理的认识。

参考文献:

[1] 邓鑫欣,张加琼,杨明义,等.黄土高原水蚀风蚀交错带坡耕地土壤风蚀特征[J].水土保持研究,2019,26(3):7-12.

[2] 刘丙霞.黄土区典型灌草植被土壤水分时空分布及其植被承载力研究[D].北京:中国科学院大学,2015.

[3] 王建国,樊军,郭德亮,等.黄土高原水蚀风蚀区坡地土壤水分季节变化及水分利用效率[J].水土保持学报,2011,25(3):236-240.

[4] 邵进.黄土塬区深层土壤水文过程及其变化规律研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.

[5] 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,2014,516:317-329.

[6] 苏子龙,张光辉,于艳.东北典型黑土区不同土地利用方式土壤水分动态变化特征[J].地理科学,2013,33(9):1104-1110.

[7] 李谦,郑锦森,朱青,等.太湖流域典型土地利用类型土壤水分对降雨的响应[J].水土保持学报,2014,28(1):6-11.

[8] 唐敏,赵西宁,高晓东,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J].应用生态学报,2018,29(3):765-774.

[9] 杨磊,卫伟,陈利顶,等.半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应[J].地理研究,2012,31(1):71-81.

[10] 贾小旭,邵明安,张晨成,等.黄土高原南北样带不同土层土壤水分变异与模拟[J].水科学进展,2016,27(4):520-528.

[11] 张梦杰,孙树臣.黄土高原六道沟小流域不同立地条件下深层土壤水分及黏粒分布特征[J].聊城大学学报(自然科学版),2021,34(4):103-110.

[12] 王云强,张兴昌,从伟,等.黄土区不同土地利用方式坡面土壤含水率的空间变异性研究[J].农业工程学报,2006,22(12):65-71.

[13] Hu W, Chau H W, Qiu W, et al. Environmental controls on the spatial variability of soil water dynamics in a small watershed[J].Journal of Hydrology,2017,551:47-55.

[14] Zhao Y L, Wang Y Q, Sun H, et al. Intensive land restoration profoundly alters the spatial and seasonal patterns of deep soil water storage at watershed scales [J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2019,280:129-141.

[15] Fu Z H, Wang Y Q, An Z S, et al. Spatial and temporal variability of 0 to 5 m soil-water storage at the watershed scale[J].Hydrological Processes,2018,32(16):2557-2569.

[16] Wang Y Q, Shao M A, Hui S A, et al. Response of deep soil drought to precipitation, land use and topography across a semiarid watershed[J].Agricultural and Forest Meteorology,2020,282:e107866.

[17] 王国鹏,肖波,李胜龙,等.黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮的地表粗糙度特征及其影响因素[J].生态学报,2019,315(10):142-148.

[18] 杜康,张北赢.黄土丘陵区不同土地利用方式土壤水分变化特征[J].水土保持研究,2020,27(6):72-76.

[19] 张敏,刘爽,刘勇,等.黄土丘陵缓坡风沙区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J].水土保持学报,2019,33(3):115-120,128.

[20] 赵传普,徐学选,高朝侠,等.黄土丘陵区不同植被类型下土壤水分动态[J].水土保持通报,2015,35(1):68-72.

[21] 傅子洹,王云强,安芷生.黄土高原水蚀风蚀交错带不同植被类型下土壤水分动态特征[J].地球环境学报,2015,6(3):188-194.

[22] 安文明,梁海斌.黄土高原阴阳坡向林草土壤水分随退耕年限的变化特征[J].生态学报,2017,37(18):6120-6127.

[23] 张凯,徐慧敏,李秧秧.坡向与植物群落对水蚀风蚀交错带土壤有机碳氮的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):156-165.

[24] 乔江波,朱元骏,贾小旭,等.黄土高原关键带全剖面土壤水分空间变异性[J].水科学进展,2017,28(4):515-522.

[25] 张霞,张育林,刘丹,等.种植方式和耕作措施对土壤结构与水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2019,50(3):250-261.