文章编号　1672-6634(2021)04-0103-08　　**DOI**　10.19728/j.issn1672-6634.2021.04.013

黄土高原六道沟小流域不同立地条件下深层土壤水分及粘粒分布特征

张梦杰[1],孙树臣[2]

(1.湖南省水利水电科学研究院,湖南 长沙 410007;2.聊城大学 环境与规划学院,山东 聊城 252059)

摘　要　土壤水分是干旱半干旱地区生态建设的主要限制因子,在有限降雨条件下,深层土壤水分对土地利用和植被恢复的响应特征是植被恢复能否实现可持续发展的关键。为明确深层土壤水分时空变化特征,在黄土高原北部六道沟小流域的柠条、山杏、苜蓿、撂荒、沙地、沟道和农地分别布设 960 cm 深的中子管,利用中子仪(CNC503DR)测定了 2014-2017 年土壤水分含量共计 19 次。研究结果表明:0-200 cm 范围内,柠条处理土壤含水量最低(平均含水量 9.5%),其次分别是沙地(10.4%)、苜蓿(10.6%)、山杏(12.6%)、撂荒(13.0%)、农地(14.2%),侵蚀沟沟底土壤含水量最高(15.6%)。沙地处理 200 cm-960 cm 土壤水分平均值仅为 6.6%,其次是山杏(10.7%)、苜蓿(11.6%)、柠条(13.5%)、撂荒(16.1%)、农地(18.0%),侵蚀沟沟底土壤含水量高达 21.0%(200-460 cm)。侵蚀沟沟底点位土层深度只有 460 cm,但是 380-460 cm 土层土壤含水量达到了 25%以上。农地、柠条和撂荒处理中 900 cm 以下土壤含水量呈明显的增加趋势,特别是农地处理,960 cm 深度处土壤含水量高达 30.3%。随着土层深度的增加,土壤含水量标准差逐渐降低且趋于稳定。土壤质地与土壤水分标准差和变异系数呈显著相关,土壤含水量标准差随粘粒含量的增加呈指数增加($R^2=0.5134$),变异系数则呈对数减少($R^2=0.7274$)。各处理粘粒含量差异明显,沙地处理中 0-400 cm 土层土壤粘粒含量较为稳定(9.2%),400 cm 以后大幅下降(1.8%)。侵蚀沟底土壤粘粒含量最高,0-460 cm 土层粘粒含量平均值达到了 12.3%.0-960 cm 土壤含水量随粘粒含量的增加呈指数关系显著增加($R^2=0.7097$)。对 0-200 cm 和 200-960 cm 土层土壤粘粒含量和土壤含水量分别做回归分析,R^2 值分别为 0.4138 和 0.7684。表层土壤含水量受降水、植被和土壤质地的多重影响,而土壤粘粒含量是影响深层土壤含水量及其稳定性的决定性因素,相关研究结果可以为黄土高原地区土壤水资源高效管理和利用及生态建设可持续发展提供科学指导。

关键词　立地条件;土壤水分;时空分布特征;土壤质地;黄土高原

中图分类号　S152.7

文献标识码　A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)

Soil Moisture Distribution of Deep Soil Layer under Different Habitats in Liudaogou Catchment of the Loess Plateau and the Influence Factors

ZHANG Mengjie[1],SUN Shuchen[2]

(1.Hunan Institute of Water Resources and Hydropower Research,Changsha 410007,China;
2.School of Environment and Planning,Liaocheng University,Liaocheng 252059,China)

Abstract　Soil moisture is the main limit for ecology construction in the arid and semi-arid regions.Due

收稿日期:2020-07-04

基金项目:国家自然科学基金项目(41701243);聊城大学博士启动基金项目(318051748)资助

通讯作者:孙树臣,男,博士,讲师,研究方向:土壤水分与植物相互作用关系,E-mail:sunshuchen@lcu.edu.cn。

to the limited rainfall, the response of deep soil moisture to land use and vegetation restoration is the key factor to sustainable development of vegetation restoration. In order to reveal the spatial and temporal variation of deep soil moisture, neutron tubes were inserted in the area of caragana(*Caragana Korshinskii*), alfalfa(*Medicago Sativa*), apricot(*Armeniaca sibirica*), fallow, sandy land, gully and crop land in the Liudaogou watershed of the Loess Plateau. A total of 19 times of soil moisture content from 2014 to 2016 were determined by neutron meter(CNC503DR). The results showed that soil planted with caragana occupied the lowest soil water content(mean 9.5%), followed by sandy land(10.4%), alfalfa(10.6%), apricot(12.6%), fallow(13.0%), cropland(14.2%). The soil water content was highest in the eroded gully bottom(15.6%). The average soil water content of 200 - 960 cm in sandy land was only 6.6%, followed by apricot(10.7%), alfalfa(11.6%), caragana(13.5%), fallow(16.1%), cropland(18.0%), and gully bottom 21.0%(200-460 cm). The soil depth of at the erosion gully bottom was only 460 cm, but the soil moisture content in the 380-460 cm soil layer reached more than 25%. The soil water content in the soil layer below 900 cm in cropland, caragana and fallow treatments showed an obvious increasing trend, especially in the cropland plot, the soil water content at 960 cm depth reached 30.3%. With the increase of soil depth, the standard deviation of soil moisture content decreases and tends to be stable. Soil moisture was significantly associated with standard deviation and coefficient of variation and soil texture. With the increase of clay content, the standard deviation of soil water content exponentially increased($R^2=0.5134$), and the variation coefficient of soil moisture content logarithmic decreased($R^2=0.7274$). The soil clay content differed obviously among these treatments. The clay contents is relatively stable within 0-400 cm soil layer in the sand plot(average 9.2%), however, they declined sharply in the layer of 400-960 cm(average 1.8%). The soil clay content in eroded gully bottom was the highest, and the average clay content in 0-460 cm reached 12.3%. The soil water content of 0-960 cm increased exponentially with the increase of clay content($R^2=0.7097$). The soil moisture were highly depended on soil clay content, the R^2 values were 0.4138 and 0.7684 in 0-200 cm and 200-960 cm, respectively. Soil moisture in the shallow layer is affected by rainfall, vegetable, soil texture and so on. While the deep soil moisture content and its stability is mainly controlled by soil clay content. Our results can provide scientific guidance for efficient management and utilization of soil water resources and sustainable development of ecological construction in the Loess Plateau.

Key words site condition; soil water; spatial and temporal distribution characteristics; soil texture; Loess Plateau

0 引言

水分是黄土高原等干旱、半干旱地区生态环境建设的重要限制因素。在该地区,大量学者针对点位、田间、坡面、流域及区域等多尺度条件下的土壤水分时空变异性进行了研究[1-4]。研究表明表层土壤水分(3-5 cm)在局部区域变异性较强,地表覆盖度和土壤性质对土壤水分具有重要影响,灌木林下土壤与灌木之间土壤水分差异显著[5]。基于土壤水分时间稳定性理论,压砂地土壤水分时空分布随着土层深度增加土壤水分变异性减弱,表层土壤水分变异性最强。古尔班通古特沙漠不同沙丘部位 0-200 cm 土壤水分变异系数随着土层变深由 13.6%减小到 0.8%[6]。Qiu 等[7]对陕西省大南沟流域土壤水分空间变异性特征进行研究,指出 0-75 cm 土壤水分变异系数随土壤含水量升高而降低,土地利用方式、坡向、海拔和坡位是影响表层 5 cm 土壤水分的主要因素[6,8],海拔、坡位和坡向是影响 10-25 cm 土壤水分空间变异的主要因素,土地利用、海拔和坡度是影响 40-75 cm 土壤水分的主要因素。而另有研究表明土壤含水量越高土壤水分变异性越大[9],坡度和土壤质地(特别是黏粒含量)是影响 0-60 cm 土壤水分时间稳定性的最主要因素[10]。在黄土高原刺槐坡面地区,0-5 m 土壤水分变异系数为 26%。而 5 m 深沟谷土壤水分变异性更高,变异系数达到 60%[11]。影

响土壤水分的主要环境因子在不同土层深度有所差别。目前相关研究主要关注 0-2 m 土壤水分的时空变异特征及影响因素，对深层土壤水分的研究相对较少。

深层土壤储水量及其时空变化，在一定程度上可以反映土壤储水潜力及其对气候变化的响应。长期定位监测深层土壤水分动态变化，对黄土高原土壤水库的评估及植被建设的可持续发展尤为重要[12]。研究不同立地条件下深层土壤水分垂直分布及其影响因素，有利于科学确定土地可持续发展的管护对策与措施，推动地区生态环境的健康和谐发展。本研究在陕北地区六道沟小流域，选择不同立地条件小区，通过连续监测土壤水分，对比分析 0-960 cm 土层土壤水分时空变化，揭示深层土壤水分的主要影响因素。

1　研究区概况

地处黄土丘陵区和毛乌素沙地南缘过渡带的陕西省神木市属黄土高原典型的半干旱地区，是水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心。六道沟流域距离神木市以西 14 km（38°46′-38°51′N，110°21′-110°23′E），流域面积为 6.89 km^2，域内平均沟壑密度为 7.4 km/km^2，沟谷地占总面积的 32.7%。海拔为 1094-1274 m。流域多年平均降水量为 437.4 mm，其中 6-9 月降水量约占全年的 65%-85%，年平均气温为 8.4 ℃。土壤类型主要为沙黄土、红黄土、风沙土和淤土。土地利用类型主要有林草地、灌草地和草地，主要植物种有柠条（*Caragana Korshinskii*）、苜蓿（*Medicago Sativa*）、山杏（*Armeniaca sibirica*）和长芒草（*Stipa bungeana*）等。

2　实验布设与数据分析

2014 年 8 月，在六道沟流域选择柠条、苜蓿、撂荒、农地、山杏、沙地、沟道处埋设 10 m 长中子管，用于土壤水分的长期定位监测。通过土钻配合加长杆钻孔埋设中子管，连接铝质中子管并放置于钻孔内，铝管与土体间隙使用过筛后干细土填充。地表露出 40 cm 管头，因此实际测定深度为 960 cm。因为沟道内基岩埋藏深度为 460 cm，土层较浅，实际测定深度为 460 cm 剖面的土壤含水量。

通过中子仪（CNC503DR）测定每个点位不同深度的土壤体积含水量，并使用标定方程确定体积含水量。于 2014 年 10 月至 2017 年 7 月，累计测定 19 次剖面土壤水分的时间序列数据。深层土壤水分时间动态分析采用每一时间各点位的平均土壤含水量；不同立地条件下土壤剖面水分分布特征研究采用每一点位累计 19 次测得的平均土壤含水量。利用神木侵蚀与环境实验站雨量桶测定降雨量，观测期内降雨量变化如图 1。

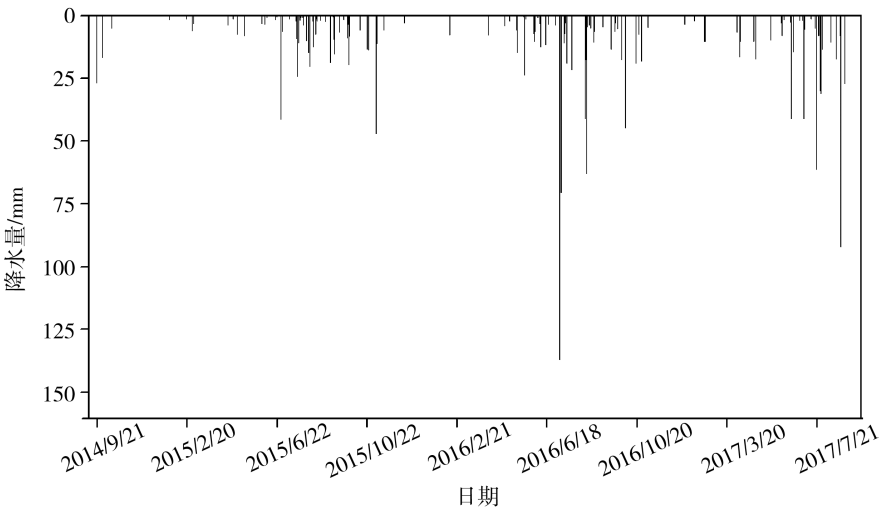

图 1　六道沟小流域 2014-2017 年降雨量

埋设中子管之前，利用土钻和洛阳铲取土，每 20 cm 采集一次扰动土样，进行土壤剖面颗粒组成分析。同时测定表层土壤原状土（0-30 cm），用标准环刀（100 cm^3）采集土样密封后立即带回室内称重，采用烘干法测定土壤容重并计算总孔隙度，采用定水头法测定土壤饱和导水率（Ks）。本实验未测定 30 cm 以下土壤容重与饱和导水率。在中子管附近 100 cm 范围内放置 50 cm×50 cm 样方框，刈割框内植物地上部分，并收集样方内枯落物。所有样本带回实验室后在 65 ℃条件下烘 48 h 至恒重，测定生物量。不同处理土壤性质和植被盖度见表 1。利用 CNC503DR 型中子仪测定各样点土壤含水量[13]。0-100 cm 土壤层每隔 10 cm 深度测定一次土壤含水量，100 cm 以下土层每隔 20 cm 测定一次土壤含水量。0-10 cm 土层中子仪测量值由方程（1）$SWC=0.111\times CR+3.9565$（$R^2=0.8966$，$p<0.001$）计算体积含水率；10 cm 以下土层由方程（2）$SWC=0.091\times CR+1.8995$（$R^2=0.7579$，$p<0.001$）计算土壤含水量。式中，$SWC$ 为土壤体积含水率，CR

是中子仪计数数值。本文中土壤含水率均为土壤体积含水率。土壤水分等相关数据处理在 Excel 2016 中完成,利用 SPSS 16.0 进行 Pearson 相关性分析,利用 T 检验分析差异显著性,图在 Origin 9.0 中完成。

3 结果与分析

3.1 土壤水分时空分布特征

不同处理 0-960 cm 土壤含水量分布特征如图 2。0-200 cm 范围内,柠条处理土壤含水量最低(平均含水量 9.5%),其次分别是沙地(10.4%)、苜蓿(10.6%)、山杏(12.6%)、撂荒(13.0%)、农地(14.2%),侵蚀沟沟底土壤含水量最高(15.6%)。但是 200 cm 以下土壤水分和 0-200 cm 土层水分差异较大,其中沙地处理 200-960 cm 土壤水分平均值仅为 6.6%,其次分别是山杏(10.7%)、苜蓿(11.6%)、柠条(13.5%)、撂荒(16.1%)、农地(18.0%),侵蚀沟沟底土壤含水量高达 21.0%(200-460cm)。侵蚀沟沟底点位土层深度只有 460 cm,但是 380-460 cm 土层土壤含水量达到了 25%以上,远高于其它处理同土层含水量。

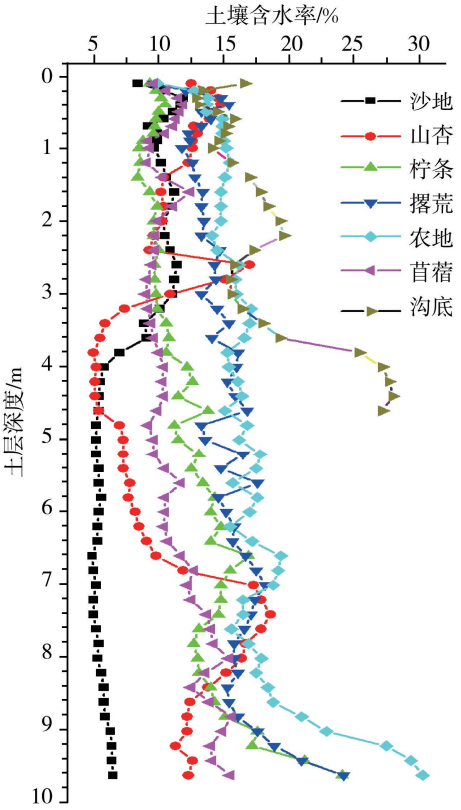

图 2 不同处理土壤水分空间分布

除沙地处理外,其它处理 200 cm 以下土层含水量呈波动性增加趋势,沙地 400-960 cm 土层含水量较为稳定,且明显低于其它处理。农地、柠条和撂荒处理中 900 cm 以下土壤含水量呈明显的增加趋势,特别是农地处理,960 cm 深度处土壤含水量高达 30.3%。

表 1 各样点土壤理化性质及植被盖度

点位	深度/cm	粘粒/%	粉粒/%	沙粒/%	容重 /g·cm^{-3}	饱和导水率 /mm·min^{-1}	植被盖度/%
柠条	10	9.9	36.5	53.6	1.34	0.449	80
	20	11.1	44.9	44	1.42	0.298	
苜蓿	10	9.8	38.8	51.3	1.4	0.422	55
	20	7.2	42.0	50.8	1.45	0.369	
撂荒	10	10.2	41.8	48	1.41	0.552	60
	20	7.9	41.2	50.8	1.43	0.484	
农地	10	11.9	42.5	45.7	1.35	0.393	30
	20	9.5	43.1	47.4	1.43	0.297	
山杏	10	12.4	53.6	34	1.48	0.445	45
	20	12.1	54.7	33.3	1.49	0.421	
沟底	10	10.2	46.8	43	1.38	0.341	35
	20	9.9	44.5	45.6	1.41	0.316	
沙地	10	8.2	56.1	35.7	1.47	0.459	25
	20	8.9	55.3	35.8	1.49	0.446	

不同处理土壤含水量的标准差和变异系数垂直分布如图 3 所示。和深层土壤相比,0-100 cm 范围内土壤含水量具有较强的变异性,土壤含水量标准差随着土层深度的增加逐渐降低且趋于稳定。侵蚀沟沟底土壤水分标准差波动性较强,且数值高于其它处理。但是,沟底土壤水分变异系数在所有处理中相对较低(平均值 0.24),远低于沙地处理(0.37)。和标准差相比,不同处理间深层土壤水分的变异系数差别较大,随深度变化相对稳定。但是沙地处理 400-960 cm 土层土壤水分变异系数明显大于其它处理。土壤水分变异系数同样表现出上层土壤大于深层土壤的规律。

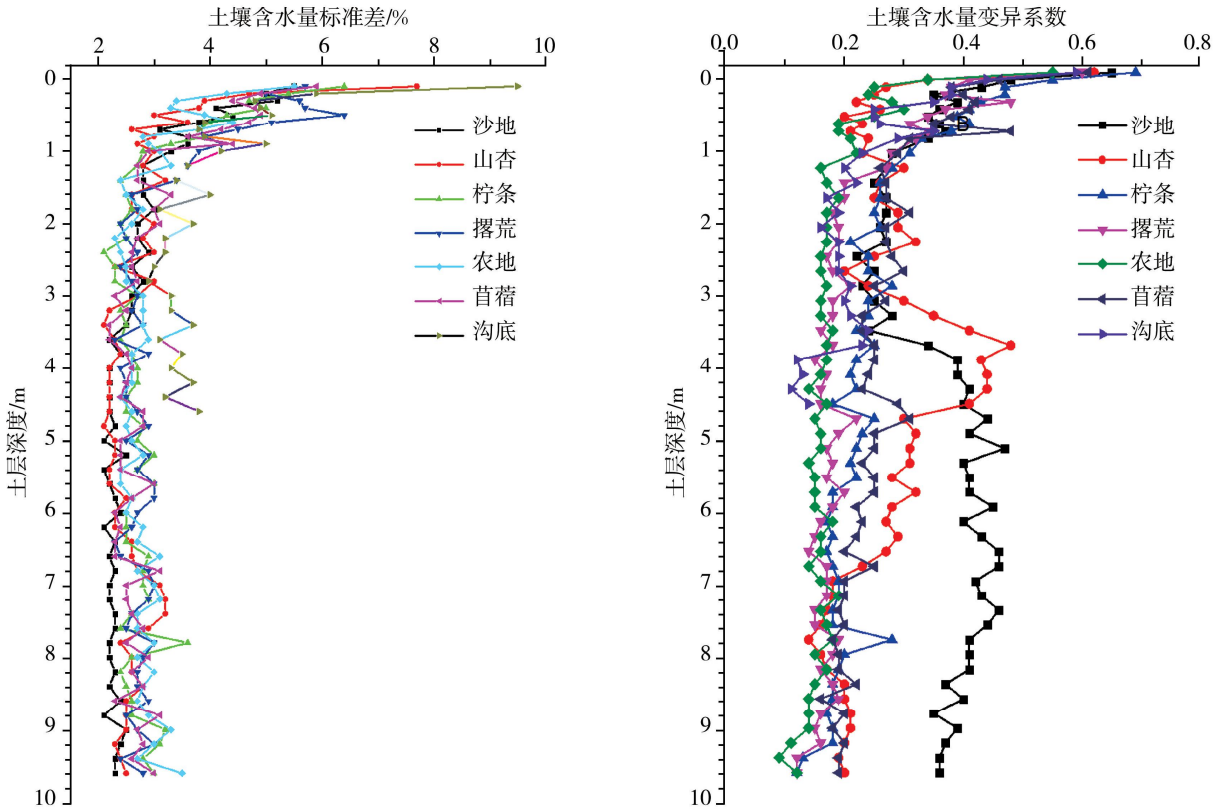

图 3　不同处理土壤含水量标准差(*SD*)和变异系数(*CV*)

除了土壤深度以外，土壤质地也显著影响土壤水分标准差和变异系数。土壤含水量标准差随土壤中粘粒含量的增加呈显著的指数增加趋势($R^2=0.5134$)，而土壤含水量变异系数则呈对数关系减少($R^2=0.7274$)(图 4)。

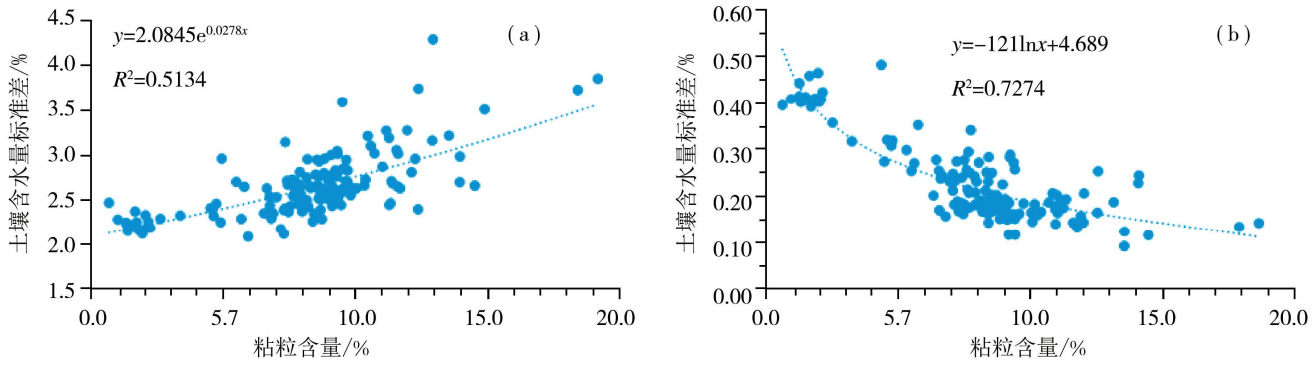

图 4　土壤含水量标准差(A)和变异系数(B)分别与粘粒含量的回归关系

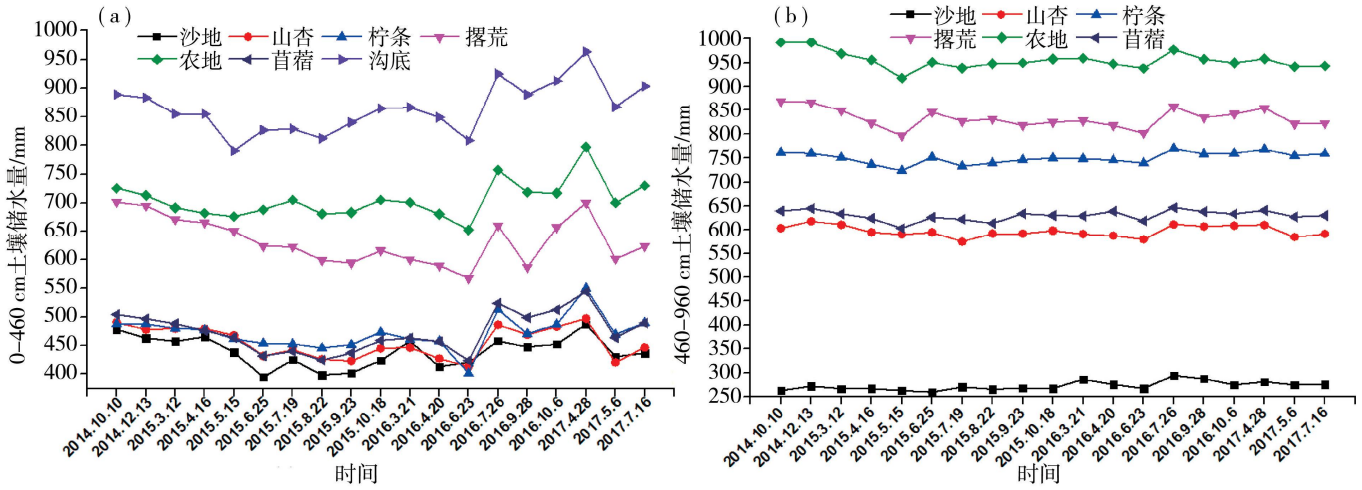

图 5　各处理 0-460 cm 土层和 460-960 cm 土层土壤储水量随时间变化

如图 5 所示，不同处理间 0-460 cm 土壤储水量随时间变化规律高度相似，储水量主要受降雨事件和植物对水分消耗作用的影响。2015 年 6 月前降雨稀少，强烈的蒸散发使土壤湿度相对较低。在雨季期间，土

壤储水量得到补充。2015 年 4 月至 2015 年 5 月,各处理 0-460 cm 土壤储水量均有所降低。2016 年 7 月 8 日和 2016 年 7 月 10 日分别出现了 137.1 mm 和 70.6 mm 的高强度降水,导致各处理 0-460 cm 储水量都有所增加。特别是沟道处理,降雨前后储水量增量达到了 117 mm。而 460-960 cm 土层土壤储水量对降雨和植物耗水的响应不明显,在降雨前后和植物生长季土壤储水量波动较小。

3.2 不同立地条件下土壤粘粒空间分布特征

0-960 cm 土层粘粒含量变化如图 6 所示,各处理粘粒含量差异明显。沙地处理中 0-400 cm 土层土壤粘粒含量较为稳定(9.2%),400 cm 以后大幅下降(1.8%)。山杏处理表现出类似变化规律,但是 600 cm 以下土层粘粒含量较沙地高。柠条、苜蓿、撂荒和农地处理粘粒含量变化相对稳定。沟底粘粒含量最高,0-460 cm 土层粘粒含量平均值达到了 12.3%,沟底粘粒含量变化趋势和土壤水分变化趋势高度相似(图 2 和图 6)。对 0-960 cm 土壤粘粒含量和土壤含水量做回归分析,结果表明土壤含水量随粘粒含量的增加呈指数关系显著增加($R^2=0.7097$)。对 0-200 cm 和 200-960 cm 土层土壤粘粒含量和土壤含水量分别做回归分析,R^2 值分别为 0.4138 和 0.7684(图 7),深层土壤含水量和土壤粘粒含量有高度相关性。

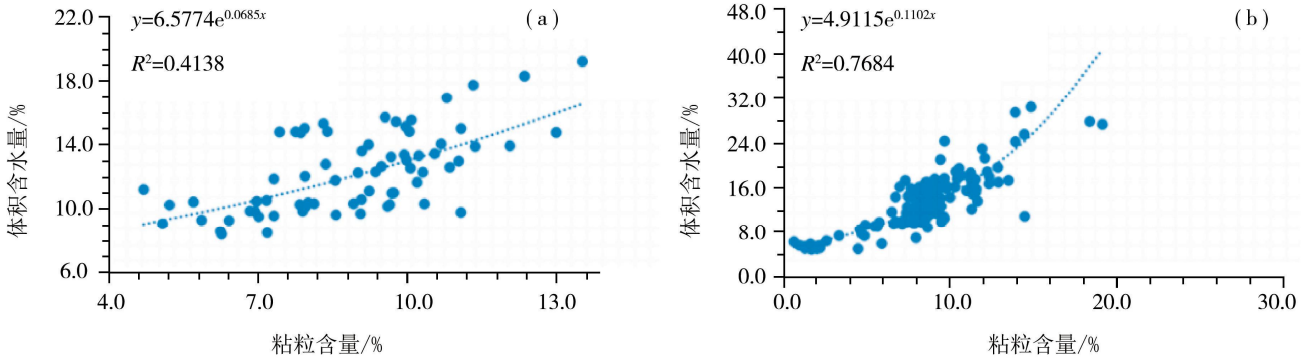

图 7 0-200 cm 土层(A)和 200-960 cm 土层(B)土壤粘粒含量和土壤含水量的回归分析

4 讨论

4.1 土壤水分空间分布及其与土壤粘粒含量的关系

20 世纪末,为减少土壤侵蚀,保护黄土高原生态环境,中国政府在黄土高原大规模实施“退耕还林还草”工程。随着大规模的植被恢复,土壤水分大幅降低,深层土壤水分减少量超过 35%[14]。土壤水分时空变化主要受气象条件、蒸散、植被特征及土壤性质等的共同影响。在本研究中,农地和撂荒的土壤储水量明显高于其它处理,柠条和苜蓿处理水分含量较低(图 5),这与前人研究结果相似。下渗雨水不断被植物根系利用,土壤水分沿土层深度增加而逐渐减少[15-16]。但是本研究中,并没有发现这一变化规律,本研究各处理土壤水分呈波动性变化。除沙地处理外,上层土壤体积含水量(0-460 cm)总体上低于下层(460-960 cm),特别是在沟道处理和农田处理中,下层土壤含水量达到了 25%以上。沙地处理地表植被盖度很低,植被耗水量较小,土壤水分不会被植被大量消耗,但是和其它处理相比,沙地土壤含水量处于较低水平,只有 5%左右,我们认为这和土壤质地密切相关。其它研究也表明土壤质地的空间异质性造成土壤导水率产生空间变异,从而间接地导致土壤水分空间分布差异。因此,土壤质地是土壤水分空间分布特征的重要影响因素[17],特别是在较为干旱期间,土壤水分变异性主要受土壤性质的影响[18]。相同降水条件下,在根系活动范围内,土壤水分分布主要是由土壤质地和植物耗水特性共同决定[19,20],在根系活动较弱的深层土壤内,土壤水分分布特征主要受土壤质地

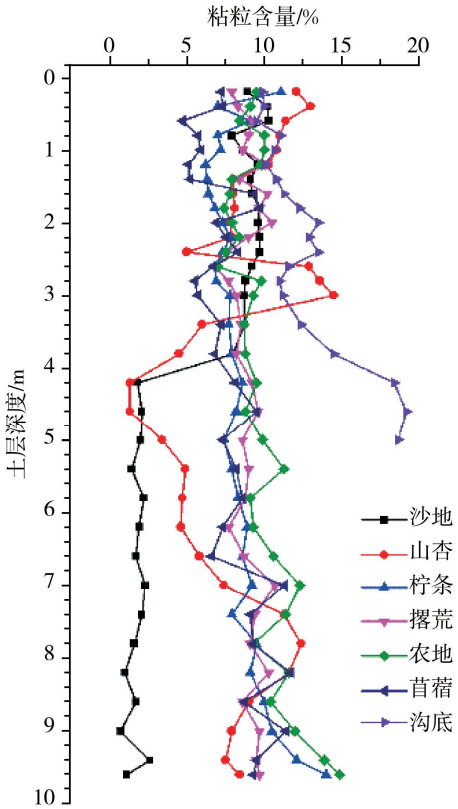

图 6 不同处理 0-960 cm 土壤粘粒含量空间分布

影响[21]。本研究结果表明无论在含水量较低的沙地以及含水量较高的沟道，其土壤含水量与土壤粘粒均具有显著的相关性。

4.2　土壤含水量变异性分析

土壤水分具有明显的时空变异性，即使在小流域和坡面尺度，土壤水分都显示出较大的异质性。人工植被增强了土壤水分的变异性，不同立地条件土壤含水量时空变异性特征差异很大[22,23]。在植物根系层，降水特征、蒸发强度以及植物分布等对土壤水分的影响较大，故为水分变化不稳定层。由于受降水入渗及植物根系吸水的影响更小，深层土壤水分与表层相比变化较小[24,25]。在本研究中得到类似结果，浅层土壤储水量随时间推移发生明显变化，而深层土壤储水量变异较小(图 5)。降雨也是影响土壤含水量空间变异的主要因素之一[19]。本研究中，和 2016 年 6 月相比，2016 年 7 月各处理中 0-460 cm 土层土壤储水量急剧上升，而 9 月份土壤储水量又明显下降，这主要是受到极端降雨和高强度植被耗水的影响。除沙地处理，其它处理 2 m 以下土壤水分比较稳定，随着土壤深度的增加土壤水分变异系数降低(图 3)。而高变异层厚度是由植被覆盖和降雨量决定的[26-29]。沙地处理深层土壤水分变异性远大于表层，可能是深层较低的粘粒含量导致的。本研究结果表明土壤粘粒含量是影响土壤水分时空变异的重要因素。回归分析发现，土壤水分变异系数和土壤粘粒含量呈显著相关关系(图 4)，土壤质地对深层土壤水分的变异性具有重要影响，不同深度条件下土壤物理性质的差别可能也是引起土壤水分时空变化的重要原因。

5　结论

陕北地区土壤水分和土壤质地空间异质性较大，不同处理中 0-200 cm 土壤含水量受植物影响表现出明显差异，柠条地 0-200 cm 土层平均含水量仅为 9.5%。0-100 cm 土层土壤含水量具有较强的时间变异性，土壤含水量标准差随着土层深度的增加逐渐降低且趋于稳定。但是，深层土壤含水量时空分布与上层土壤差异较大，200-960 cm 土壤含水量变异系数较低，而且与土壤粘粒含量显著相关。深层土壤水分受植被影响较小，土壤粘粒含量是其空间分布特征的主要影响因素。

参　考　文　献

[1]　高晓东，吴普特，张宝庆，等.黄土丘陵区小流域土壤有效水空间变异及其季节性特征[J].土壤学报，2015，52(1)：57-67.

[2]　张晨成.黄土高原退耕还林低土壤水分效应研究[D].陕西杨凌：中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心，2017.

[3]　赵亚丽.黄土区不同尺度深层土壤水分研究[D].陕西杨凌：中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心)，2017.

[4]　张永坤.黄土区人工柠条地土壤水文性质的时空变异性[D].陕西杨凌：中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心)，2018.

[5]　CANTON Y，SOLE-BENET A，DOMINGO F.Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid badlands of SE Spain[J].Journal of Hydrology，2004，285(1-4)：199-214.

[6]　周宏飞，肖祖炎，姚海娇，等.古尔班通古特沙漠树枝状沙丘土壤水分时空变异特征[J].水科学进展，2013，24(6)：771-777.

[7]　QIU Y，FU B J，WANG J，et al.Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau，China[J].Journal of Arid Environments，2001，49(4)：723-750.

[8]　MARTINEZ C，HANCOCK G R，KALMA J D，et al.Spatio-temporal distribution of near-surface and root zone soil moisture at the catchment scale[J].Hydrological Processes，2008，22(14)：2699-2714.

[9]　LEE E，KIM S.Pattern similarity based soil moisture analysis for three seasons on a steep hillslope[J].Journal of Hydrology，2017，551：484-494.

[10]　SUR C，JUNG Y，CHOI M.Temporal stability and variability of field scale soil moisture on mountainous hillslopes in Northeast Asia[J].Geoderma，2013，207：234-243.

[11]　WANG Y，SUN H，ZHAO Y.Characterizing spatial-temporal patterns and abrupt changes in deep soil moisture across an intensively managed watershed[J].Geoderma，2019，341：181-194.

[12]　ENTIN J K，ROBOCK A，VINNIKOV K Y，et al.Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics[J].Journal of Geophysical Research：Atmospheres，2000，105(129)：11865-11877.

[13] JIA Y H,SHAO M A,JIA X X.Spatial pattern of soil moisture and its temporal stability within profiles on a loessial slope in Northwestern China[J].Journal of Hydrology,2013,495(15):150-161.

[14] YANG L,WEI W,CHEN L D,et al.Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau,China[J].Journal of Hydrology,2012,475:111-122.

[15] 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.

[16] 车宗玺,李进军,汪有奎,等.祁连山西段草地土壤温度、水分变化特征[J].生态学报,2018,38(1):105-111.

[17] 潘颜霞,王新平,苏延桂,等.荒漠人工固沙植被区土壤水分的时空变异性[J].生态学报,2009,29(2):993-1000.

[18] 佘冬立,邵明安,俞双恩.黄土区农草混合利用坡面土壤水分空间变异性[J].农业机械学报,2010,41(7):57-63.

[19] 王志强,刘宝元,刘刚,等.黄土丘陵区人工林草植被耗水深度研究[J].中国科学(地球科学),2009,39(9):1297-1303.

[20] 刘晓丽,汪有科,马理辉,等.密植枣林地深层土壤水分垂直变化与根系分布关系[J].农业机械学报,2013,44(7):90-97.

[21] 盛丰,方妍,张仁铎.运用染色示踪方法研究土壤质地对土壤水非均匀流动特征的影响[J].土壤通报,2012,43(1):25-30.

[22] 曹扬,赵忠,渠美,等.刺槐根系对深层土壤水分的影响[J].应用生态学报,2006,17(5):765-768.

[23] 赵文智.科尔沁沙地人工植被对土壤水分异质性的影响[J].土壤学报,2002,39(1):113-119.

[24] ROSENBAUM U,BOGENA H R,HERBST M,et al.Seasonal and event dynamics of spatial soil moisture patterns at the small catchment scale[J].Water Resources Research,2012,48(10):3472-3476.

[25] LI T C,SHAO M A,JIA Y H,et al.Profile distribution of soil moisture in the gully on the northern Loess Plateau,China[J].Catena,2018,171:460-468.

[26] 曾泽群,雷泽勇,魏晓婷.基于水分变化的沙地樟子松人工林土壤分层特征[J].干旱区资源与环境,2017,31(12):161-165.

[27] 徐志尧,张钦弟,杨磊.半干旱黄土丘陵区土壤水分生长季动态分析[J].干旱区资源与环境,2018,32(3):145-151.

[28] 杨磊,张涵丹,陈利顶.黄土宽梁缓坡丘陵区次降雨对土壤水分补给效率与阈值研究[J].中国科学(地球科学),2018,48(4):457-466.

[29] 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.

(上接第 94 页)

[21] 徐田军,吕天放,陈传永,等.种植密度和植物生长调节剂对玉米茎秆性状的影响及调控[J].中国农业科学,2019,52(4):629-638.

[22] 史晓芳,仇松英,史忠良,等.播期和播量对冬小麦尧麦 16 群体性状和产量的影响[J].麦类作物学报,2017,37(3):357-365..

[23] 王丽娜,韩玉林,邹少奎,等.密度和播期对冬小麦新品种周麦 32 号产量构成和品质性状的影响[J].中国种业, 2019(11):56-59.

[24] 乔玉强,刘良柏,王平信,等.小麦新品种华成 3366 绿色增产技术研究[J].现代农业科技,2017(23):11-12.

[25] 梁玉超,张永强,石书兵,等.施氮量对滴灌冬小麦茎部特征及其抗倒伏性的影响[J].麦类作物学报,2017,37(11):1467-1472.

[26] 朱新开,王祥菊,郭凯泉,等.小麦倒伏的茎秆特征及对产量与品质的影响[J].麦类作物学报,2006(1):87-92.

[27] 邵庆勤,周琴,王笑,等.种植密度对不同小麦品种茎秆形态特征、化学成分及抗倒性能的影响[J].南京农业大学学报,2018,41(5):808-816.

[28] 魏凤珍,李金才,王成雨,等.氮肥运筹模式对小麦茎秆抗倒性能的影响[J].作物学报,2008(6):1080-1085.

[29] 刘颖,伊淼,王建国,等.氮、钙配施对花生根系生长及氮肥利用的影响[J].聊城大学学报(自然科学版),2020,33(4):98-104.

[30] 常海娜,周静,宋娇敏,等.不同供钾水平对大白菜幼苗生长和根系形态的影响[J].聊城大学学报(自然科学版),2015,28(3):56-59.

[31] 彭佃亮.小麦倒伏与茎秆木质素代谢的关系及其对籽粒产量和淀粉特征的影响[D].泰安:山东农业大学,2014.

[32] 孟令志,买春艳,于立强,等.黄淮冬麦区部分小麦品种(系)抗倒伏相关性状分析[J].麦类作物学报,2016,36(7):888-895.

[33] 张明伟.扬麦系列品种抗倒特性与氮素调控效应研究[D].扬州:扬州大学,2015.