

黄土高原丘陵区不同植被恢复方式下土壤水分特征 ——以桥子沟流域为例

马建业¹, 李占斌^{2†}, 马波¹, 王贺¹, 张乐涛², 李朝栋¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100, 陕西杨凌;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100, 陕西杨凌)

摘要: 为研究黄土高原丘陵沟壑区不同植被恢复方式下的土壤水分特征, 以天水典型对比小流域——桥子西沟(自然恢复的荒草地)和桥子东沟(人工恢复的刺槐林地)为例, 基于2流域5—8月0~100 cm深度土壤质量含水量和氢氧同位素浓度, 定量分析不同植被恢复方式下降水和坡向对土壤水分影响。结果表明: 以刺槐林地为主的流域土壤含水量低于以荒草地为主的流域(16.72%)约3.70%, 对降水量的响应较弱, 各土层含水量变异系数较高。土壤水分存在临界变化深度, 刺槐林地为主的流域在10 cm以下含水量趋于稳定, 最大蒸发深度为55 cm, 荒草地为主的流域在30 cm以下含水量开始增加, 最大蒸发深度为30 cm。两流域含水量均遵循阴坡>半阴坡>半阳坡 δ_0^{18} 的分布不符合这一规律。以刺槐林地为主的流域含水量随坡向变化较小, 而以荒草地为主的流域受坡向影响较大, 坡向对土壤水分的影响受植被因子的制约。以自然恢复荒草地为主的恢复方式可以较好的增加土壤水库蓄水量, 有利于流域生态的可持续发展。

关键词: 对比流域; 质量含水量; 氢氧同位素; 植被; 坡向

中图分类号: P344 文献标志码: A 文章编号: 2096-2673(2017)04-0008-08

DOI: 10.16843/j.sswc.2017.04.002

Soil water characteristics under different vegetation recovery modes in hilly and gully region of the Loess Plateau:

A case study of the Qiaozigou Watershed

MA Jianye¹, LI Zhanbin², MA Bo¹, WANG He¹, ZHANG Letao², LI Chaodong¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

Abstract [Background] The hilly and gully region of the Loess Plateau, which is suffering from lacking in water resources, is the most serious soil erosion region in Loess Plateau. Generally, the soil moisture is an effective indicator to evaluate the influence of soil and water conservation measures. The objectives of this paper were to study the redistribution process of precipitation and the effect on the stability of soil reservoir under different modes of vegetation recovery. **[Methods]** Based on paired watersheds, the effect of precipitation and slope aspect on soil moisture were quantitatively analyzed under different modes of vegetation restoration. Paired watersheds included two typical small watersheds in the hilly and gully regions of Loess Plateau: Qiaozi West Watershed (waste-grassland of natural restoration)

收稿日期: 2017-01-09 修回日期: 2017-05-17

项目名称: 国家自然科学基金重点项目“黄土高原生态建设的生态—水文响应研究机理”(41330858); 西北农林科技大学博士科研启动基金(2452015345)

第一作者简介: 马建业(1995—)男, 硕士研究生。主要研究方向: 流域生态水文。E-mail: Majianye126@126.com

†通信作者简介: 李占斌(1962—)男, 博士, 研究员。主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。E-mail: zhanbinli@126.com

and the Qiaozi East Watershed (black locust forestland of artificial restoration). Samples were collected at 9 soil layers in the upstream, midstream and downstream of two paired watersheds. The 9 soil depths were 0 - 2, 2 - 4, 5 - 15, 15 - 25, 25 - 35, 35 - 45, 45 - 65, 65 - 85, and 85 - 100 cm, respectively. This project was carried out about 4 times throughout the period from May to August. Characteristics of soil mass water content and isotope concentration of hydrogen and oxygen (δ_0^{18}) within 0 - 100 cm soil layer were calculated. [Results] The results showed that there were significant differences in the redistribution of soil water under different vegetation restoration modes ($P < 0.05$). Soil water content of watershed mainly comprising of black locust forestland (16.72%) is lower than that of the watershed mainly comprising of waste-grassland (20.42%). The variation coefficient of soil water content was relatively higher and the response of soil water content to precipitation was weaker in the former watershed. Critical depth for soil moisture was identified for the two watersheds. The water content was relatively stable (about 12.19%) under the soil depth about 10 cm in the black locust forestland. However, the water content increased with the soil depth when the soil depth blew 30 cm in the waste-grassland. The maximum evaporation depth of waste-grassland was 30 cm, which was shallower than that in the black locust forestland (about 55 cm). The soil mass water content in different slope aspects in Qiaozi West Watershed ranked in the follows: shady slope (19.60%), half negative slope (17.65%), half-sunny slope (14.24%), and the content were lower respectively about 6.68%, 4.98%, 1.03% in each slope aspect of Qiaozi East Watershed than the former watershed. Additionally, the concentration of ^{18}O in different slope aspects ranked in the follows: negative slope (-5.57‰), half-sunny slope (-5.64‰) and shady slope (-6.08‰) in Qiaozi West Watershed, while the concentration were -5.74‰, -6.21‰, -6.03‰ in Qiaozi East Watershed, respectively. [Conclusions] There were differences for soil moisture in the same slope aspect under different vegetation restoration modes in the hilly and gully region of the Loess Plateau. In natural restoration watershed, the influence of slope aspect on soil water content is greater than that of artificial restoration watershed. Compared with the artificial restoration mode, the natural restoration can greatly increase the capacity of soil water storage, which is beneficial to improve and sustain the watershed ecology.

Keywords: paired watershed; soil mass water content; hydrogen and oxygen isotope; vegetation; slope aspect

土壤水分是干旱半干旱地区限制植物生长的主要因素之一^[1-2]。探明其空间分布及垂直变异状况对于因地制宜恢复黄土高原植被具有极重要的意义^[3]。国内外学者对土壤水分及其影响因素的研究已做了大量工作。例如:黄志刚等^[4]指出降雨、地形和土地利用等环境因子会影响降雨的入渗再分配以及蒸发蒸腾等水文过程;陈洪松等^[5]认为不合理的植被选择和栽植密度会加剧土壤干化;Famiglietti等^[6]发现土壤水分变异受地形和土壤特性二者的综合影响。随着科学技术的发展,越来越多的方法应用于土壤水研究,氢氧同位素示踪技术相对而言具有较高的灵敏性和准确性^[7],在该领域应用较为广泛。如K. S. Lee等^[8]应用氢氧同位素对土壤水的运移路径做了相关分析,王贺等^[9]研究表明坡向对土壤水的 δ_0^{18} 具有显著影响。黄土高原丘陵沟

壑区是黄土高原水土流失最为严重的区域之一,水资源匮乏,生态环境脆弱。随着西部大开发战略的实施,国家在黄土高原开展了一系列退耕还林工程,在生态环境质量、水土保持方面取得了卓有成效的改变,而保水功效是衡量水土保持措施成效的指标之一;因此,研究植被恢复方式与土壤水分的关系有助于综合评估流域生态治理水平,优化植被恢复方式。目前关于植被与土壤水分关系的研究已有诸多报道,但基于土壤含水量与氢氧同位素综合研究植被恢复方式对土壤水分的影响研究较为少见。位于天水罗玉沟子流域的桥子东、西沟自1957年开始对比流域建设,现已在两流域形成各自独特的植被体系,为本研究提供较好的实验基础和平台^[10]。本实验通过土壤含水量与氢氧同位素结合分析的方法,研究2对比流域的土壤水分特征,分析不同植被恢复

方式对土壤水库蓄水量贡献程度,以期为黄土高原丘陵沟壑区的小流域生态的可持续恢复提供依据。

1 研究区概况

研究区位于甘肃省天水市桥子沟小流域(E 105°42'22"~105°43'01", N 34°36'19"~34°36'57"),属黄土高原丘陵沟壑区第3副区,流域面积2.45 km²。该区属于干旱少雨的大陆性气候,年均降水量526.1 mm,降水变幅大,年内分配不均,5—10月降水占全年的83.5%;年均干旱指数1.3,年均气温11℃;土壤以黄土质黑褐土和红色黄土质黑褐土型粗骨土为主。桥子沟流域按地形可分为桥子东、西2条独立的子流域,2子流域状况基本相似,东沟面积1.36 km²,呈半扇形,干沟长2 km,沟道比降8%,为人工恢复流域,主要植物种有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、樱桃(*Cerasus pseudocerasus*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)等。西沟1.09 km²,呈羽毛状,干沟长2.18 km,沟道比降8%,为自然恢复流域,主要植物种有冰草(*Agropyron cristatum*)、车前草(*Plantago depressa*)、白蒿(*Leontopodium dedekensii*)等。

2 材料与方法

2.1 土壤样品采集

土壤样品采集于2015年雨季(5—8月)进行,期间实验区域内降水量丰沛,植被生长茂盛。分别在桥子东、西沟2对比小流域上游、中游、下游进行采样。每个样地内由坡脚沿坡面向上每隔5 m选取1个采样点,共选取3个采样点作为重复。由于实验条件的限制,在西沟共选取4个坡面样地,12个采样点,在东沟流域共选取5个坡面样地,18个采样点。用GPS定位每个点的坐标。以直径为5 cm的土钻,钻取深度为0~2、2~4、5~15、15~25、25~35、35~45、45~65、65~85、85~100 cm,共9层土样,采集后将一部分土样装入铝盒用封口膜密封以测定土壤质量含水量,将另一部分土样盛装于20 mL棕色玻璃试剂瓶中,密封并冷藏以测定土壤水氢氧同位素浓度。每层取2个土样作为重复。分别于2015年5月22日、6月29日、7月24日和8月22日进行4次采样。每个样地的植被类型、地形属性、地貌特征等信息见表1。

表1 实验样地基本信息

Tab. 1 Watershed information in the experimental plots

流域 Watershed	编号 No.	区位 Location	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	群落 Community	样地位置 Plot location
桥子西沟 Qiaozi West Watershed	1	上游(UR)	38	东北(NE)	冰草(AC)、车前(P)、白蒿(L)	坡地(SF)
	2	中游(MR)	30	东南(SE)	冰草(AC)、车前(P)、白蒿(L)	坡地(SF)
	3	下游(LR)	35	西北(NW)	冰草(AC)、车前(P)、白蒿(L)	坡地(SF)
	4	下游(LR)	28	东南(SE)	冰草(AC)、车前(P)、白蒿(L)	坡地(SF)
桥子东沟 Qiaozi East Watershed	5	上游(UR)	34	北(NN)	刺槐(R)	坝上坡地(USD)
	6	上游(UR)	25	南(SS)	刺槐(R)	坝上坡地(USD)
	7	中游(MR)	25	西(WW)	刺槐(R)	坡地(SF)
	8	中游(MR)	10	东北(NE)	刺槐(R)	坡地(SF)
	9	下游(LR)	3	西北(NW)	刺槐(R)	坡地(SF)

Note: UR, MR and LR are upper reaches, middle reaches, and lower reaches. NW, SE, NN, WW and NE are northwest, southeast, north, north, west and northeast. AC, P, L and R are *Agropyron cristatum*, *Plantago depressa*, *Leontopodium dedekensii* and *Robinia pseudoacacia*. SF and USD are sloping field and upstream slope of dam.

土样在室内用烘干法在105℃下烘干10 h以上。土壤含水量由以下计算公式得到:

$$W = (W_1 - W_2) / W_2 \times 100.$$

式中:W为所测样品的土壤含水量,%;W₁为烘干前土壤样品质量,g;W₂为烘干后土壤样品质量,g。

2.2 降水样品采集

在每个试验样地坡面上方,均使用木桩固定1

个J16022型雨量筒,用以收集降水样品。布设前,向雨量筒内雨水收集器中加入适量液体石蜡油防止水分蒸发。采集降水样时,使用15 mL一次性注射器抽取石蜡油层以下的水层部分,将采集到的降水样品盛装于15 mL棕色玻璃试剂瓶中,拧紧瓶盖并用封口膜密封,以防止水分蒸发损失。采集完成后,将样品及时放入冰箱中冷藏以保证良好的测试结果。

2.3 氢氧同位素测定

将土壤样品带回西安理工大学水资源研究所实验室,使用 LI-2000 液态水真空抽提系统(LICA, China) 进行土壤水抽提。全部样品均使用 DLI-100 型液态同位素激光分析仪 LGR LWIA (Los Gatos Research Inc, USA) 进行 D 和 ¹⁸O 的测定,结果以同位素比率 δ 表示:

$$\delta_x = (R_{\text{Sample}}/R_{\text{Standard}} - 1) \times 1000\text{‰}$$

式中: δ_x 为待测样品中同位素组成相对于标准参照物的千分偏差 ‰; R_{Sample} 为样品中待测元素的重轻同位素丰度的比例; R_{Standard} 为标准物质中待测元素的重轻同位素丰度的比例。此处以维也纳标准平均海洋水 V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water ‰) 为标准物质, δ_D 和 δ_{18O} 测定精度分别为 $\pm 0.3\text{‰}$ 和 $\pm 0.1\text{‰}$ [11]。

2.4 数据处理

采用 Excel 2010 对每个流域各个采样点 4 次采样数据进行均值处理,并挑选出 2 个流域各坡向的数据进行均值计算,用 SPSS 20.0 软件进行数据统计分析和显著性检验 ($P < 0.05$)。Excel 2010 软件进行作图。

3 结果与分析

3.1 土壤含水量对降水量的响应

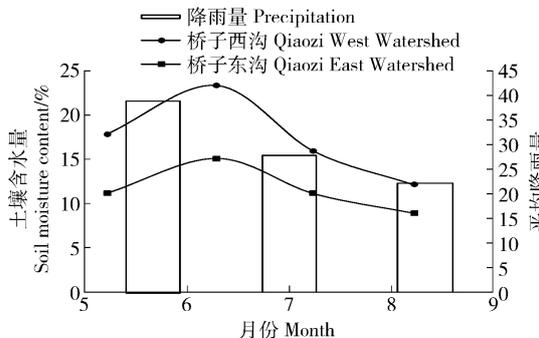
图 1(a) 表示 0~100 cm 土层平均质量含水量与采样间隔期内平均降水量的关系,以 5 月 22 日土壤含水量为前期含水量,对比流域土壤含水量随降水量均呈现先增加后减少的趋势。5 月 22 日—8 月 22 日采样期间平均降水量分别为 38.8、27.8 和 22.3 mm,5 月土壤水分经过降水补充,使得 6 月西

沟土壤含水量增加 5.46%,东沟增加 4.14%。7 月由于降水量的减少,比 6 月土壤含水量分别减少 7.41% 和 3.78%;8 月的含水量比 7 月分别减少 3.78% 和 2.20%,表明西沟流域 0~100 cm 土层含水量对降水量的响应强于东沟。

图 1(b) 为 2 流域土壤水 δ_D - δ_{18O} 关系图,GMWL 为 Craig [12] 提出的全球大气降水线,LMWL 为桥子沟流域雨季的大气降水线,EL-1 为西沟流域土壤水 δ_D - δ_{18O} 拟合曲线,方程为 $\delta_D = 5.52\delta_{18O} - 20.07$, $R^2 = 0.85$; EL-2 为东沟土壤水拟合曲线,方程为 $\delta_D = 4.19\delta_{18O} - 29.03$, $R^2 = 0.73$ 。2 流域土壤水的 δ_D - δ_{18O} 趋势线斜率和截距均小于当地降水线,说明土壤水是由当季降水与原有土壤水混合而成,且土壤水同位素浓度相对降水越贫化时,前期降水对土壤水的补充比例越大。东沟土壤水斜率较小,氢氧同位素 ($\delta_D = -47.98\text{‰}$, $\delta_{18O} = -4.52\text{‰}$) 较西沟 ($\delta_D = -49.47\text{‰}$, $\delta_{18O} = -5.33\text{‰}$) 更加富集,表明西沟土壤水更多来自降水补充,东沟土壤水中的前期土壤水所占比例较大。可能是由于东沟刺槐林的林冠截留作用使部分降水被截留,雨水在经历了 2 次蒸馏后部分回落到地面,使得土壤水的同位素输入浓度值较高。刺槐林生长季节对土壤水分消耗较大,土壤含水量整体较低,且随降水的变动较小,使得降水对土壤水的混合稀释作用较弱。

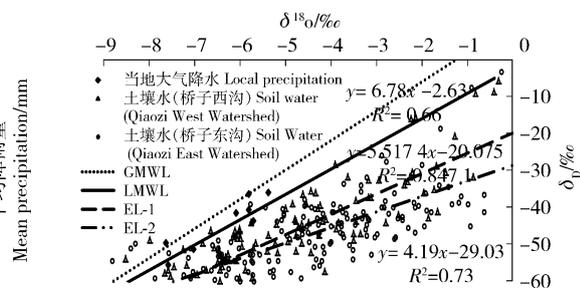
3.2 不同土层土壤水分特征

2 对比流域不同土层平均土壤含水量的变异系数见表 2,各层含水量变异系数均表现为随土层深度增加而减小,下层土壤含水量较为稳定,受降水量、蒸发、地形等外界因素的影响较小。西沟各层土壤含水量变异系数为 0.09~0.53,东沟为



(a) 土壤含水量随降水量的变化

(a) Variation of soil moisture content with precipitation



(b) 土壤水中 δ_D - δ_{18O} 关系

(b) Relation of δ_D - δ_{18O} in soil water

(δ_{18O} : concentration of ¹⁸O, δ_D : concentration of D)

图 1 0~100 cm 土壤水分与月均降水量响应关系

Fig. 1 Response of soil moisture to monthly mean precipitation in 0-100 cm

0.11~0.56,除15~35 cm 土层变异系数低于西沟,其他土层变异系数均较高。表明东沟各土层

土壤含水量的稳定性较差,受外界条件的影响较大。

表2 桥子沟流域不同深度土壤含水量变异系数

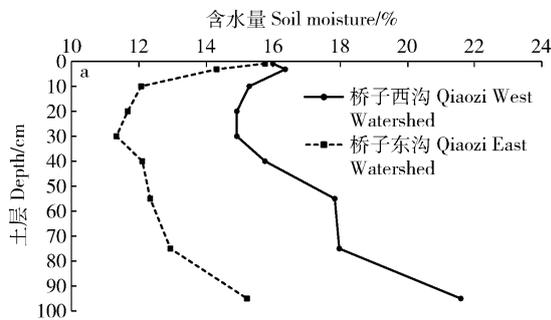
Tab.2 Variation coefficient of soil water content in different depth of Qiaozhi Watershed

流域 Watershed	0~2 cm	2~5 cm	5~15 cm	15~25 cm	25~35 cm	35~45 cm	45~65 cm	65~85 cm	85~100 cm
桥子西沟 Qiaozhi West Watershed	0.53	0.44	0.34	0.28	0.27	0.25	0.14	0.09	0.13
桥子东沟 Qiaozhi East Watershed	0.56	0.47	0.37	0.25	0.18	0.34	0.21	0.11	0.17

图2为土壤含水量随土层深度的分布。如图2(a)所示,西沟0~100 cm 土层平均含水量为15.96% 较东沟(12.83%)高3.13%。2流域土壤含水量随土层深度均表现为先减小后增大,0~10 cm 为土壤含水量减小层,10~30 cm 为过渡层,含水量变化不大,30~95 cm 为增加层。东沟流域75~95 cm 土层含水量出现异常增大,增幅约占30~95 cm 土层含水总增幅的59%。

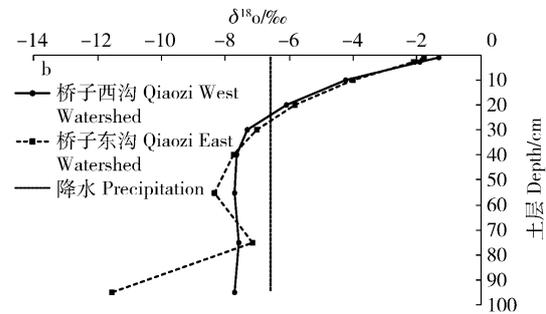
图2(b)为 δ_0^{18} 随土层分布状况,2流域0~10 cm 土层 ^{18}O 浓度较为相近,约为 -2.56‰ ;10~40 cm

土层,东沟 δ_0^{18} 较为富集,比西沟高约为 0.38‰ ;西沟在30 cm 土层以下 δ_0^{18} 值(约为 -7.67‰)逐渐趋近平行于降水线(-6.58‰),东沟在40~75 cm 土层趋近降水线,在75~95 cm 土层 δ_0^{18} 值由 -7.13‰ 贫化到 -11.55‰ ,且偏离降水线。西沟土壤水最大蒸发深度为30 cm,东沟为55 cm。依据氢氧同位素浓度和土壤含水量在土层中的变化,可以推断,西沟各层土壤水和东沟0~75 cm 土壤水均来自于降水的直接补给,东沟75~95 cm 土层土壤水水分异常是可能接受外源水补给。



(a) V 土壤含水量随土层的变化

(a) Variation of soil moisture content with the soil depth



(b) δ_0^{18} 随土层的变化

Variation of δ_0^{18} with the soil depth

图2 土壤水分随土层深度的变化

Fig.2 Variation of soil moisture with the soil depth

3.3 坡向对土壤水分的影响

图3给出2流域土壤含水量和 δ_0^{18} 与坡向的关系。3种坡向下西沟各层土壤含水量均高于东沟,西沟和东沟均遵循阴坡(19.60% , 12.92%) > 半阴坡(17.65% , 12.67%) > 半阳坡(14.24% , 13.21%)。西沟在0~30 cm 出现土壤含水量的最低值,各坡向含水量差异较大;东沟各坡向含水量在0~10 cm 土层快速降低,在10~95 cm 趋于稳定,且含水量相近,约为 12.19% 。说明该值可能为研究区土壤能够保障刺槐正常生命活动水分最低值,而2对比流域地形条件相似,植被差异可能为东沟土壤含水量较低的主要原因。

图3(d)~(f)为阴坡、半阴坡、半阳坡土壤水

δ_0^{18} 随土层的变化,两流域不同坡向 δ_0^{18} 均由表层向深层逐渐贫化。西沟为阴坡(-6.08‰) < 半阳坡(-5.64‰) < 半阴坡(-5.57‰),东沟半阳坡(-6.21‰) < 阴坡(-6.03‰) < 半阴坡(-5.74‰)。西沟土壤水最大蒸发深度为阴坡(55 cm) > 半阴坡(30 cm) > 半阳坡(20 cm) 蒸发最大深度以下土壤水中 ^{18}O 浓度趋近平行于降水线。东沟土壤最大蒸发深度均约为55 cm;在阴坡20 cm 和55~75 cm 以及半阴坡的30~40 cm 和75 cm 处 δ_0^{18} 值出现异常相近且接近于降水中 δ_0^{18} 值,可能因刺槐退化根系残留通道和蚯蚓孔洞形成优势流的发育通道,降水以优势流的形式跃层补给,同位素浓度异常。半阴坡75~95 cm 处 δ_0^{18} 值偏离降水线,可能是由于

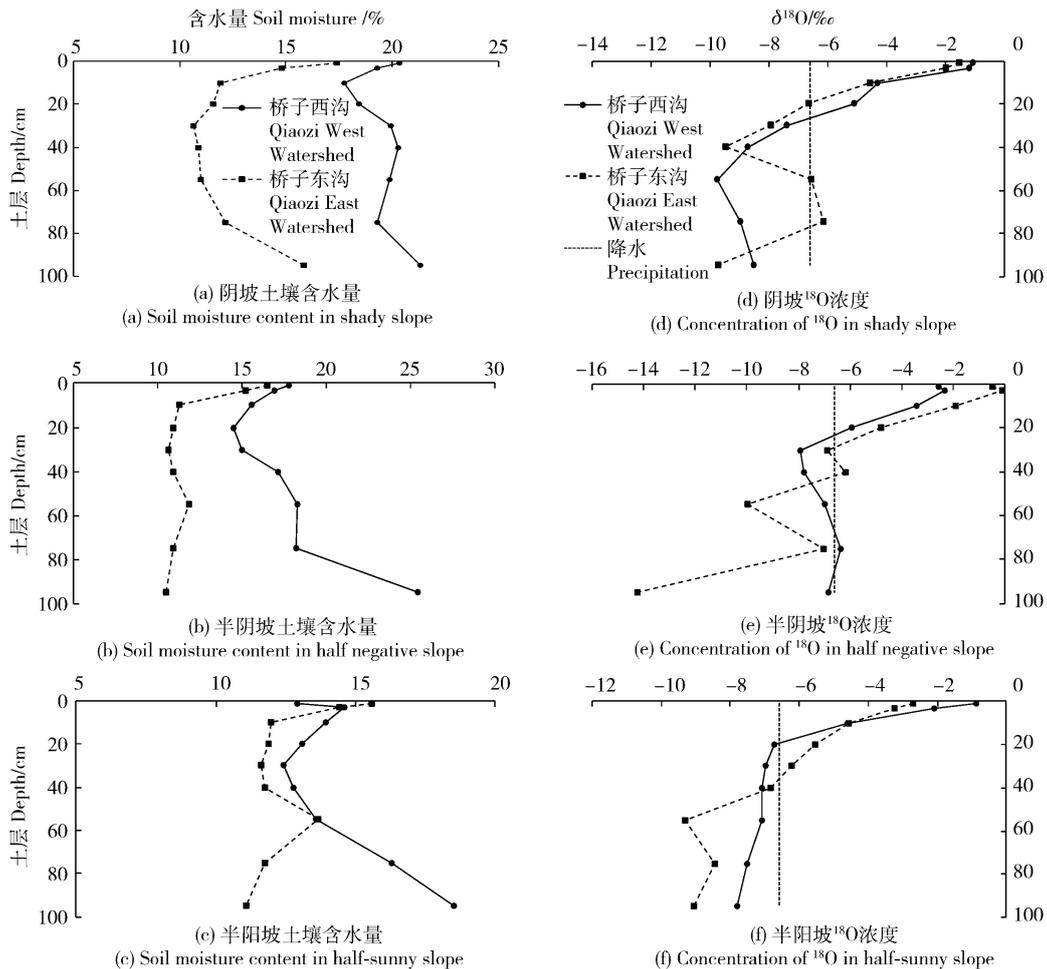


图 3 不同坡向土壤水分分布

Fig. 3 Distribution of soil moisture in different slope aspects

该采样点位于沟头坝上坡地,使得地下水位人为抬升^[13],对深层土壤水进行补给。

4 讨论

土壤水分随土层深度的变化与地形、土地利用方式、植被类型、根系密度及深度等因素有关^[14]。本实验中以自然恢复荒草地为主的西沟流域 0 ~ 100 cm 土层含水量高于以人工恢复刺槐林地为主的东沟流域,各土层变异系数较低,可能是因东沟主要恢复植物种刺槐为多年生木本植物,生长发育周期较长,根系密度大,20 ~ 140 cm 土层为主要吸水层^[15],主要吸水深度随着降水量的变化而不断移动^[16],对土壤水分的影响较大;同时由于林冠截留影响,从草地到林地土壤可补给水量减少 25% ~ 45%,植被的蒸腾作用也会加强土壤水分像空气中散失^[17],使刺槐林地土壤水分长期处于欠饱和状态,各层土壤含水量变异系数较高。以荒草地自然

恢复为主的流域由于植被水分利用深度较小,地表存在较多的地面枯草层,蒸散量较小,土壤水库储存量较高^[18],变异系数较低。

地形因子通过影响坡面的光照、气温、降水等性质,使土壤水分存在较大差异。西沟阴坡由于接受太阳辐射少,蒸发强度较小,植被生长茂盛,枯草层较厚,能有效拦截径流,使更多的降水以入渗的形式储存于土壤水库,导致阴坡含水量较高。植被茂密的根系使得土壤疏松多孔,对蒸发敏感性较强,其蒸发深度较大。东沟流域由于林地的蒸腾蒸发作用较强,各坡向土壤含水量相近且都低于西沟,刺槐属于深根系植物,对下层土壤改良效果较好,蒸发影响深度较深。研究表明极端强降雨过后,植被成为影响土壤水分的决定因子^[19]。说明坡向等地形因子对土壤水分的作用受植被因子的制约,植被是造成土壤水库变动的主要因素。在黄土高原丘陵沟壑区,以自然恢复荒草地为主的恢复模式能够较大的提升土

壤水库蓄水量,增强植被的抗旱性。

5 结论

不同植被恢复方式下土壤水分及其在土层中的分布存在明显差异。以刺槐林地为主的流域 0 ~ 100 cm 土层土壤水受到的蒸发分馏作用较强,最大蒸发深度约为 55 cm,土壤含水量对降水量的响应较低,受坡向影响较小,各土层变异系数较高。以荒草地为主的流域最大蒸发深度为 30 cm,土壤含水量受降水量的影响较大,各坡向之间土壤含水量差异较大,各土层变异系数较低;但是 2 流域各层含水量变异系数均随深度增加而减小。

西沟和东沟土壤含水量随坡向的变化均遵循阴坡 (19.60% , 12.92%) > 半阴坡 (17.65% , 12.67%) > 半阳坡 (14.24% , 13.21%),但 δ_0^{18} 对坡向的响应不符合这一规律。以刺槐林地为主的流域不同坡向之间含水量差异较小,以荒草地为主的流域受坡向影响较大。坡向对土壤水分的影响受到植被因子的制约,以荒草地为主的恢复方式对增加土壤水库蓄水量的贡献较大,提高流域植被的抗旱能力,减少水土流失的发生。

6 参考文献

- [1] 姜汉桥,段昌群,杨树华,等. 植物生态学[M]. 北京: 高等教育出版社,2004: 115.
JIANG Hanqiao, DUAN Changqun, YANG Shuhua, et al. Phytocology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 115.
- [2] SIMMONS M T, ARCHER S R, TEAGUE W R, et al. Tree (*Prosopis glandulosa*) effects on grass growth: an experimental assessment of above-and below ground interactions in a temperate savanna [J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(4): 314.
- [3] 李玲芬,延军平,刘冬梅,等. 干旱-半干旱地区不同植被条件下土壤含水量变化及植被建设途径分析. 水土保持通报, 2009, 1: 22.
LI Lingfen, YAN Junping, LIU Dongmei, et al. Variation of soil moisture in arid and semi-arid areas under different vegetation and the ways of ecological construction [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 1: 22.
- [4] 黄志刚,欧阳志云,李锋瑞,等. 南方丘陵区不同坡地利用方式土壤水分动态[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3136.
HUANG Zhigang, OUYANG Zhiyun, LI Fengrui, et al. Spatial and temporal dynamics in soil water storage under different use types of sloping fields: a case study in a high land region of southern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3136.
- [5] 陈洪松,邵明安,王克林. 黄土区深层土壤干燥化与土壤水分循环特征[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2491.
CHEN Hongsong, SHAO Ming'an, WANG Kelin. Desiccation of deep soil layer and soil water cycle characteristics on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2491.
- [6] FAMIGLIETTI J S, RUDNICK J W, RODLL M. Variability in surface moisture content along a hill slope transect: Rattlesnake Hill, Texas [J]. Journal of Hydrology, 1998, 2(10): 259.
- [7] 张小娟,宋维峰,王卓娟. 应用氢氧同位素技术研究土壤水的原理与方法[J]. 亚热带水土保持, 2015, 1: 32
ZHANG Xiaojuan, SONG Weifeng, WANG Zhuojuan. The principle and method of soil water isotope technology research and application [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2015, 1: 32.
- [8] LEE K S, KIM J M, LEE D R, et al. Analysis of water movement through an unsaturated soil zone in Jeju Island, Korea using stable oxygen and hydrogen isotopes [J]. Journal of Hydrology, 2007, 345(3/4): 199.
- [9] 王贺,李占斌,马波,等. 黄土高原丘陵沟壑区流域不同水体氢氧同位素特征: 以纸坊沟流域为例[J]. 水土保持学报, 2016(4): 85.
WANG He, LI Zhanbin, MA Bo, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in different waters of the loess hilly and gully region: a case study of the Zhifanggou watershed [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2016(4): 85.
- [10] 谢媛媛,余新晓,张满良. 基于 GIS 的桥子沟流域土壤侵蚀初步分析[J]. 水土保持研究, 2005(5): 267.
XIE Yuanyuan, YU Xinxiao, ZHANG Manliang, Primary analysis of soil erosion intensity in Qiaozigou watershed based on GIS [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005(5): 267.
- [11] 王贺,李占斌,马波,等. 黄土高原丘陵沟壑区不同水体间转化特征: 以韭园沟流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2016(3): 19.
WANG He, LI Zhanbin, MA Bo, et al. Characteristics of waters transformation in the hilly and gully region of the Loess Plateau: a case study of the Jiuyuangou watershed [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016(3): 19.
- [12] CRAIG H. Isotopic variation switch meteoric water [J].

- Science, 1961, 133: 1702.
- [13] 姚西文. 纸坊沟流域淤地坝地水分环境与可持续发展[J]. 甘肃水利水电技术, 2004, 4: 384.
YAO Xiwen. Check dam land water environment and sustainable development of the Zhifanggou watershed [J]. Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology, 2004, 4: 384.
- [14] 马非, 张亚红, 谢应忠. 半干旱黄土高原丘陵区不同植被条件下土壤水分研究进展[J]. 农业科学研究, 2007, 1: 76.
MA Fei, ZHANG Yanghong, XIE Yingzhong. Progress of the soil moisture under different vegetation conditions in semi-arid hill area of the Loess Plateau [J]. Journal of Agricultural Sciences, 2007, 1: 76.
- [15] 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, 5: 765.
CAO Yang, ZHAO Zhong, QU Mei, et al. Effects of *Robinia pseudoacacia* roots on deep soil moisture status [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 5: 765.
- [16] 张铁钢, 李占斌, 李鹏, 等. 土石山区不同植物土壤水分利用方式对降雨的响应特征[J]. 应用生态学报, 2016(5): 1461.
ZHANG Tiegang, LI Zhanbin, LI Peng, et al. Response characteristics of soil water use patterns by different plants to precipitation in rocky mountainous area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016(5): 1461.
- [17] 李海防, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土高原林草地覆盖土壤水量平衡研究进展[J]. 水土保持研究, 2013(1): 287.
LI Haifang, WEI Wei, CHEN Liding, et al. Progress in the study of soil water balance under forest and grassland covers on the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013(1): 287.
- [18] 杨永东, 张建生, 蔡国军, 等. 黄土高原丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分动态变化[J]. 水土保持研究, 2008(4): 149.
YANG Yongdong, ZHANG Jianjun, CAI Guojun, et al. Soil water dynamics of different vegetation in gully and hilly regions of the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008(4): 149.
- [19] 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(3): 459.
YIN Qiulong, JIAO Junying, KOU Meng. The soil moisture characteristics under different vegetation types after extremely heavy rainfall on the hilly-gullied Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2015(3): 459.