

DOI: 10.5846/stxb201707031198

安文明, 韩晓阳, 李宗善, 王帅, 伍星, 吕一河, 刘国华, 傅伯杰. 黄土高原不同植被恢复方式对土壤水分坡面变化的影响. 生态学报, 2018, 38(13):

An W M, Han X Y, Li Z S, Wang S, Wu X, Lv Y H, Liu G H, Fu B J. Effects of different vegetation restoration types on the slope difference of soil water content in Loess Plateau, China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13):

黄土高原不同植被恢复方式对土壤水分坡面变化的影响

安文明^{1,2}, 韩晓阳¹, 李宗善^{1*}, 王 帅¹, 伍 星¹, 吕一河¹, 刘国华¹, 傅伯杰¹

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:在黄土高原大规模退耕还林(草)背景下,土地利用变化对土壤水分及其时空结构会产生极大影响。本研究以坡面为研究对象,根据两种植被恢复类型(撂荒草地和人工刺槐林地)土壤水分坡面变化趋势的差异,探究不同植被恢复方式对土壤水分坡面空间结构影响。结果表明:所调查的两个区域(延安羊圈沟和长武烧窑湾)皆表现为人工刺槐林地坡平均土壤含水量显著低于撂荒草地坡;且人工刺槐林地坡的土壤水分的坡面差异性皆比撂荒草地坡低。虽然两种恢复类型的土壤水分沿坡底到坡顶皆呈现降低的趋势,但是该降低趋势在两种恢复类型间存在一定差异:撂荒草地坡土壤水分沿坡面的变化趋势随深度增加有加强的趋势,且总体上,长武烧窑湾撂荒草地坡土壤水分沿坡面变化趋势比延安羊圈沟更明显;相比之下,人工刺槐林地坡土壤水分沿坡面的变化趋势随深度增加有变弱的趋势,且该趋势明显比撂荒草地坡弱;两个地区刺槐林地坡土壤水分沿坡面变化趋势不存在明显差异。综上所述,虽然不同降雨背景下土壤水分会表现出一定差异,但土壤水分的坡面变化趋势及不同恢复方式对其影响是相似的,即人工刺槐林地坡对土壤水分的过度消耗不仅会导致土壤水分亏缺,而且削弱了土壤水分的坡面变化趋势;而撂荒草地对土壤水分及其空间结构的维持有相对积极的意义。通过分析不同植被恢复方式对土壤水分坡面变化趋势的影响,能够更深入的了解不同植被恢复方式的土壤水文效应,同时可为以坡面为单元的退耕还林中植被科学配置提供一定的参考。

关键词:土壤水分;坡面;刺槐林;撂荒地;黄土高原

Effects of different vegetation restoration types on the slope difference of soil water content in Loess Plateau, China

AN Wenming^{1,2}, HAN Xiaoyang¹, LI Zongshan^{1*}, WANG Shuai¹, WU Xing¹, LV Yihe¹, LIU Guohua¹, FU Bojie¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Along with large-scale "Grain for Green" in the Loess Plateau of China, the land-use change significantly affected the soil water content (SWC) and its spatial-temporal pattern. In this study, we investigated the hill slopes, and the effects of different vegetation restoration types (abandoned farmlands and black locust forestlands) on the spatial pattern or heterogeneity of the SWC were explored based on the differences in the slope trends of SWC between two vegetation restoration types. The results indicated that the average SWC of black locust forestland slopes was significantly lower than

基金项目:国家自然科学基金项目(41571503)和环保公益项目(批准号:201409055)

收稿日期:2017-07-03; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zslst@rcees.ac.cn

that of the abandoned farmland slopes in both zones. Furthermore, slope differences in the SWC in the black locust forestlands were lower than those in the abandoned farmland slopes. Along the hill slopes, although the SWC both showed decreasing trends from the bottom to top in the two vegetation restoration types, both types also exhibited certain differences in their trends. The decreasing trend of SWC in the abandoned farmland increased with increasing soil depth. Furthermore, the decreasing trend of the abandoned farmland SWC was more obvious in Shaozhongwan of Changwu county than it was in Yangjuangou catchment of Yan'an. In contrast, the decreasing trend of the black locust forestland decreased with increasing soil depth. Moreover, the decreasing trend in the black locust forestland from the bottom to top was lower than that of the abandoned farmland. In addition, the variation trend of the SWC along slopes in the black locust forestlands showed no obvious differences between the two zones. In summary, although the different rainfall background would lead to differences in SWC, its variation trend along with the hill slopes including the effects attributed to different vegetation restoration types were similar between the two zones. Moreover, the excessive consumption of soil water by the black locust forestland not only led to soil water deficits but also diminished the variation trend of SWC along the slopes. In contrast, the abandoned farmlands maintained relatively positive SWC and spatial patterns. By analyzing the effects of different vegetation restoration types on the variation trends of SWC along the slopes, the soil hydrological effect of different vegetation restoration methods could be enriched. Moreover, our findings could provide a useful reference for the scientific allocation of vegetation during the "Grain for Green" process based on the slopes.

Key Words: soil water content; slope; black locust forestland; abandoned farmland; Loess Plateau

在干旱与半干旱地区,土壤水分是植被生长的主要限制因子之一^[1-2]。因此,在黄土高原的植被重建中,土壤水分是一个重要的参考因素。在黄土高原地区,纵观已经实施的大规模的植被重建工程,引入植被已经成为黄土高原的主要植被类型^[3],例如刺槐。一般情况下,引入植被都具有较高的水分需求,过度消耗土壤水分^[4-6]。因此,虽然一些引入植被在前期生长都较好,但是随着土壤水分的过度消耗,人工林退化的现象逐渐显现^[7],其直接的原因是土壤水分的严重亏缺,甚至永久性土壤干层的形成^[8-10]。相比之下,撂荒草地作为一种自然生态恢复方式,遵循自然演替规律,对土壤水环境有相对积极的影响^[11-12]。

事实上,在自然状态下,土壤水分在气候、土壤、地形及植被的共同作用下表现出极大的时空异质性^[13-14],并且有很强的尺度效应,一般在较大尺度上,气候和土壤对土壤水分的异质性影响较大,而在较小尺度上(流域、坡面等),地形和土地利用是影响土壤水分异质性的重要因素^[15-17]。因此,不同重建植被方式对土壤水分时空结构或异质性的影响也是该区域土壤水文研究的一项重要内容。黄土高原是典型的黄土沟壑区,在流域尺度,地形是影响土壤水分空间异质性的重要因素^[18-20]。除坡向、坡度和海拔的影响外,坡面土壤水分的差异性也是土壤水分异质性的重要组成部分。坡面是影响植被的一个基本单元^[21],同时,坡面尺度的土壤水分也呈现一定的变化趋势,现有研究表明,土壤水分沿坡面的变化基本呈现下坡位>中坡位>上坡位的趋势^[18,22-23],即从坡底到坡顶呈现水分降低的趋势。因此,充分了解坡面土壤水分的分配及变化对优化植被重建配置有重要的现实意义,例如王军等通过对坡面不同土地利用土壤水分研究证明,对于水土保持比较合理的土地利用结构为撂荒地-灌木地-间作地-林地,既能有效防止水土流失,又对保持水土都相对积极的作用^[24]。因此,本文在植被重建的背景下,以刺槐林地坡和撂荒草地坡为研究对象,探讨两种主要的植被重建方式(人工林和撂荒草地)对坡面土壤水分差异的影响,以期今后的植被重建及其优化提供一定的科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于延安羊圈沟村小流域(36°42'14.873"N; 109°31'18.476"E)和长武县王东村烧窑湾(35°14'6.

78°N; 107°40'40.012"E)(图1)。延安羊圈沟属于典型的黄土丘陵沟壑区,平均海拔高度 1000—1500 m,年均气温 8.5℃,年平均降雨量 500—530 mm,采样点所在区域属于森林草原过渡带,主要土壤类型为黄绵土;长武县烧盅湾属于黄土塬区,平均海拔高度 950—1300 m,年均气温 9.2℃,年平均降雨量 570—600 mm,采样点所在区域属于落叶阔叶带,主要土壤类型为黑垆土和黄绵土。两个区域均是退耕还林还草的区域,其中退耕地和人工地规模较大,刺槐(*Robinia pseudoacacia*)是人工植被重建的主要引入植被。

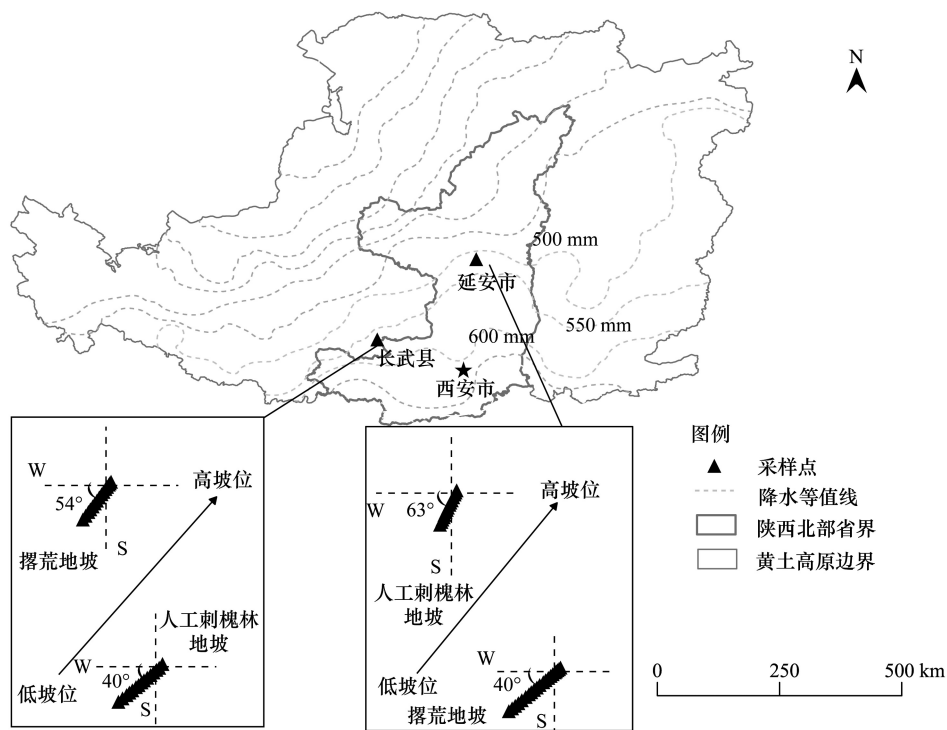


图1 研究区示意图

Fig.1 Location of the study areas

1.2 研究方法

1.2.1 采样点设置

为对比研究不同植被恢复方式对坡面土壤水分差异性的影响,分别于延安羊圈沟和长武县烧盅湾选择两个典型的坡面进行采样(图1),每个区域分别包含一个人工刺槐林地坡和一个撂荒草地坡,为了增强可对比性,所选择的每个坡面均具有相似的地形(坡度、坡向和海拔)(表1)。于延安羊圈沟所选人工刺槐林地坡种植年限约为 30 a,种植密度为 3000 株/hm²,立地密度约为 2500 株/hm²(平均株距约 2.2 m),撂荒草地坡约为 32 a,主要植被类型有长芒草(*Stipabungeana*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、苔草(*Carex spp.*)等;于长武县烧盅湾所选人工刺槐林地种植年限约为 35 a,种植密度为 4000 株/hm²,立地密度约为 3400 株/hm²(平均株距约 1.7 m),撂荒草地年限约为 33 a,主要植被类型为米蒿(*Artemisiadalai lamae*Krasch)、狗尾草(*Setaria viridis*)、车前(*Plantago asiatica*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)等。所有恢复年限均通过咨询当地熟悉土地情况的居民。野外采样于 2016 年 9—10 月进行。根据实验区周围气象站点及试验站实测数据,延安羊圈沟 9 月和 10 月的月均降雨量分别约为 26 mm 和 12 mm,日均温分别为 15℃和 9℃长武县烧盅湾 9 月和 10 月月均降雨量分别约为 31 mm 和 17 mm,日均温分别为 18℃和 12℃。事实上,采样期间,多为晴朗天气,偶有阴天或少量降雨。据前人研究知,黄土高原区在持续降雨情况下,雨水渗透深度为 0—2 m 以内,2 m 以下影响较小^[25-26],而采样期间并无持续降雨事件发生,偶发性的少量降雨几乎对样品没有影响。于每个坡面以 10 m 间隔从下而上设置采样点,其中延安羊圈沟人工刺槐林地坡共设置 15 个采样点,撂荒草地坡共设置 20 个采样点;长武

县烧盅湾人工刺槐林地坡共设置和撂荒草地坡均设置 15 个采样点。

表 1 采样坡面信息
Table 1 General information of sampling slope in two zones

地点 Sites		总坡度 Slope gradient	坡向 Slope aspect	海拔 Elevation /m	坡长 Slope length /m	恢复年限 Restoration years/ a
延安羊圈沟	撂荒地坡	24°	西偏南 40°	1124—1216	230	32
	人工林地坡	23°	西偏南 63°	1135—1210	190	30
长武烧盅湾	撂荒地坡	21°	西偏南 54°	1135—1210	170	33
	人工林地坡	23°	西偏南 40°	1140—1220	200	35

1.2.2 采样方法

采用传统的土钻取样法于每个采样点进行土壤样品的采集。每个采样点的采样深度为 300 cm, 采样间隔为 20 cm。每个采样剖面共收集 15 个土壤样品。每个点设置两个采样剖面用以计算平均值。采得土壤样品后放入专业铝盒并密封, 在称得样品鲜重后, 以 105℃ 烘干 24 h, 最终计算土壤水分含量。剖面坡度及坡向用罗盘测量, 同时用 GPS 记录每个样点的海拔高度和经纬度。

1.2.3 分析方法

每个采样点的土壤水分含量用所采的两个剖面计算平均值。为了分析不同土层沿坡面变化趋势, 将所采的 300 cm 深的土壤剖面分为 5 层 (20—60, 80—120, 140—180, 200—240, 260—300 cm)。每个坡面平均土壤含水量是通过计算每个坡面所有点的平均值, 每个坡面不同土层土壤水分含量是通过计算相应坡面所有点相应土层平均值。撂荒草地坡与刺槐林地坡土壤水分含量差异通过 SPSS 19.0 采用独立样本 T 检验进行统计分析; 土壤水分沿坡面的变化趋势通过一元线性回归的方法进行分析。采样点示意图通过 ArcGIS 10.0 绘制, 数据分析图皆由 Origin 9.0 绘制。

2 结果

2.1 两种植被恢复下的土壤水分对比

据本研究所调查的坡面平均土壤含水量, 两个区域皆表现出人工刺槐林地坡低于撂荒草地坡。其中, 延安羊圈沟人工刺槐林地坡平均土壤含水量比撂荒草地坡低 4.90%, 降低程度为 43%; 而长武烧盅湾人工刺槐林地坡平均土壤含水量比撂荒草地坡低 7.53%, 降低程度为 44% (表 2)。而且, 通过独立样本 T 检验知, 撂荒草地坡土壤水分含量皆显著高于人工刺槐林地坡 (表 2, $P < 0.01$)。根据对本研究中设计的不同土层土壤水分含量分析, 撂荒草地坡与人工刺槐林地坡土壤水分含量存在于所有土层中 (图 2)。标准差可以反应土壤水分的空间离散性或者异质性。本研究中, 两个区域的人工刺槐林地坡土壤含水量的标准差皆明显低于自然撂荒草地 (表 2), 而且, 随深度的增加, 人工刺槐林地坡土壤含水量的标准差更低, 相比之下, 撂荒草地坡标准差随深度增加变化不大 (图 2)。

表 2 两个区域刺槐林地坡和撂荒草地坡土壤水分统计信息
Table 2 Statistical information of soil moisture in black locust forestland and abandoned farmland of two zones

地点 Site	植被类型坡 Vegetation type	平均值 Mean/%	标准差 SD	最大值 Max/%	最小值 Min/%	t 值	P
延安羊圈沟	撂荒草地坡	11.31	1.82	14.02	8.20	10.39	<0.01
	人工刺槐林地坡	6.41	0.92	7.79	4.59		
长武烧盅湾	撂荒草地坡	17.22	2.67	21.17	11.82	10.60	<0.01
	人工刺槐林地坡	9.70	0.66	10.90	8.57		

2.2 两种植被恢复土壤水分坡面变化趋势

本文采用一元线性回归的方式来探讨和比较土壤水分沿坡面的变化趋势, 并采用线性回归的斜率表示土

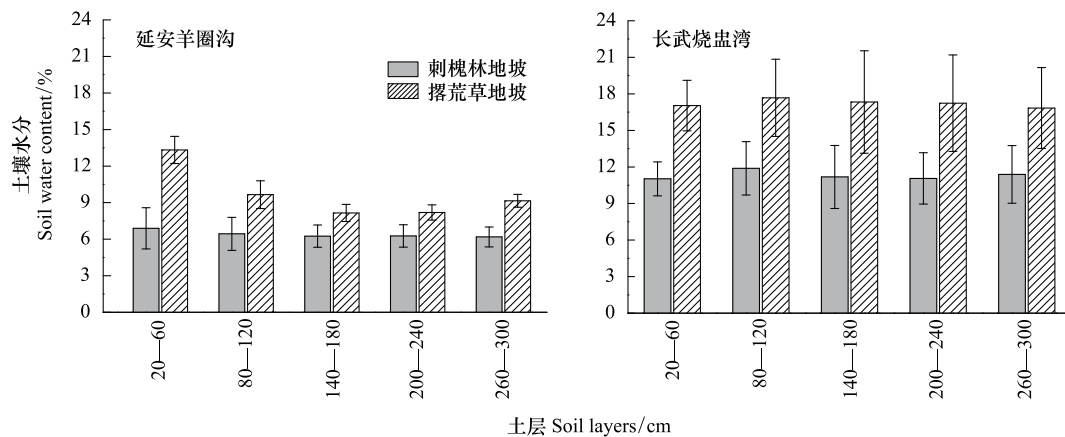


图2 两区域刺槐林地坡和撂荒草地坡土壤水分对比

Fig.2 Comparison of soil water content between black locust forestland and abandoned farmland in the two zones

壤水分沿坡面变化趋势的程度。结果显示,土壤水分含量沿坡底向坡顶皆呈现降低的趋势。而且,在调查的两个区域的人工刺槐林地坡和撂荒草地坡皆可发现降低的趋势(图3,图4)。对于不同土层土壤水分而言,沿坡面的变化趋势有不同表现。对撂荒草地坡而言,土壤水分沿坡底向坡顶的变化随深度增加有增强的趋势。如延安羊圈沟撂荒草地坡土壤水分在表层(20—60 cm和80—100 cm)沿坡面的变化斜率分别为 -0.054 和 -0.239 ($R^2 = 0.00165, P < 0.05$),而较深层(260—300 cm)的为 -0.301 (图3);长武县烧窑湾撂荒草地坡有相似趋势(图4)。相反,人工刺槐林地坡的土壤水分含量沿坡面的变化趋势有随深度增加而减弱的趋势。如长武县烧窑湾人工刺槐林地坡土壤水分在表层(20—60 cm和80—100 cm)沿坡面的变化斜率分别为 -0.178 和 -0.185 ($R^2 = 0.472, P < 0.05$),而较深层(260—300 cm)的为 -0.090 ($R^2 = 0.559, P < 0.01$)(图4),延安羊圈沟刺槐林地坡有相似的趋势(图3)。对比两种恢复方式,总体上,两个区域撂荒草地坡土壤水分沿坡面变化趋势皆比人工刺槐林地坡更明显(图3,图4)。对比两个区域,长武县烧窑湾撂荒草地坡土壤水分沿坡面的变化趋势强于延安羊圈沟撂荒草地坡,而对于人工刺槐林地坡来讲,土壤水分沿坡面的变化趋势并没有明显的差异(图3,图4)。

3 讨论

人工引入植被是黄土高原植被恢复与重建中的一种重要方式^[6-7,27]。然而,近年来,对于引入植被过度消耗并导致严重的土壤水分亏缺的现象已有诸多报道^[4,15,24]。一方面水分需求高的人工引入植被(如刺槐)对土壤水分的过度消耗将导致土壤干燥化,甚至永久性土壤干层的出现^[9,28]。相比之下,作为一种自然生态恢复方式的撂荒草地,对土壤水分的影响更为积极。正如本研所得结果,撂荒草地坡的土壤含水量显著高于人工刺槐林地坡(表2,图2)。另一方面人工引入植被对土壤水分的过度消耗将对土壤水分的时空异质性造成影响。有研究表明,在植被恢复中采用高耗水的人工引入植被会扰乱土壤水分的空间结构,甚至降低土壤水分的空间异质性^[2,24]。这在本研究中也有一定的体现,在所调查的两个区域的坡面,人工刺槐林地坡的土壤水分的空间离散性(标准差)总是明显低于撂荒草地坡(表2,图2)。事实上,土壤水分在多因子的影响下具有极大的时空异质性,气候(温度、降雨等),地形(坡向、坡度、坡位等),土地利用/植被等对土壤水分的时空异质性皆有重要影响^[15-16]。

其中,坡面(坡位)土壤水分的差异性是小流域尺度上土壤水分空间异质性的重要组成部分。研究表明,自然状态下,若坡面植被类型基本一致,土壤水分沿坡底到坡顶有降低的趋势^[18,22-23]。形成该趋势的原因可能是:一方面,高坡位接受太阳辐射更多,温度更高,蒸发量越大,导致土壤水分越低,另一方面,由于重力作用,降水及土壤水分由从高处向地处汇聚的趋势^[23]。然而,土地利用结构的改变势必会改变土壤水分的坡面

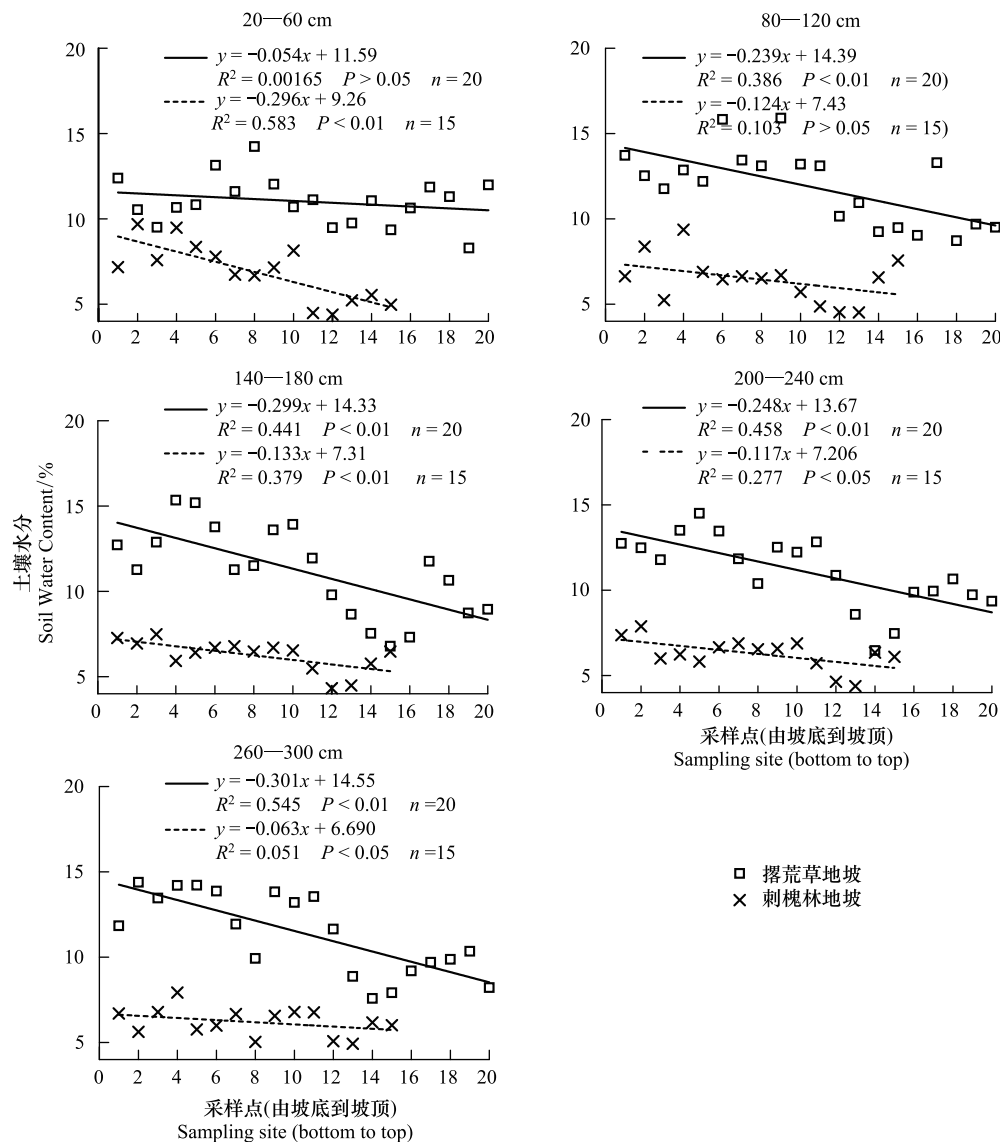


图3 延安羊圈沟刺槐林地和撂荒草地土壤水分沿坡面变化趋势(由坡底向坡顶)

Fig.3 Variation trends of soil moisture in black locust forestland and abandoned farmland from the bottom slope to the top slope in YananYangjuangou

变化趋势。研究表明,在一个坡面上的多样化的土地利用结构会扰乱坡位对土壤水分差异的影响^[18,24]。基于此,本研究在保证其他地形因子(坡向、坡度等)相似的前提下,探讨不同的植被恢复方式(人工和自然)对坡面土壤水分变化趋势的影响。在所选的两个小流域的两种地类中,所得到的土壤水分沿坡面的变化趋势总体上是一致的,即从坡底到坡顶呈现降低的趋势(图3,图4),这符合前人研究对于坡位对土壤水分影响的结论^[18,22],也说明了坡面/坡位对土壤水分影响趋势的是客观存在的。但是,在不同生态恢复的影响下,该趋势表现了一定的差异性,而这些差异性正是说明了不同生态恢复方式对坡面土壤水分结构的影响。首先,作为自然生态恢复方式的撂荒草地,符合自然的植被演替规律^[11-12],在植被群落演替过程中,土壤水分将是气候和植被共同作用的结果^[1,29],所以,撂荒草地所表现的土壤水分差异,更能体现土壤水分的自然差异。例如本研究中,撂荒草地坡平均土壤水分是显著高于人工刺槐林地的。而反应在土壤水分坡面变化上,撂荒草地坡土壤水分沿坡底向坡顶的变化趋势更为明显(图3,图4),且随深度的增加,该趋势加强。这应该是与自然状态下土壤水分坡面变化趋势相一致的一种状态。因此,撂荒草地在植被恢复中对土壤水分的积极意义不仅

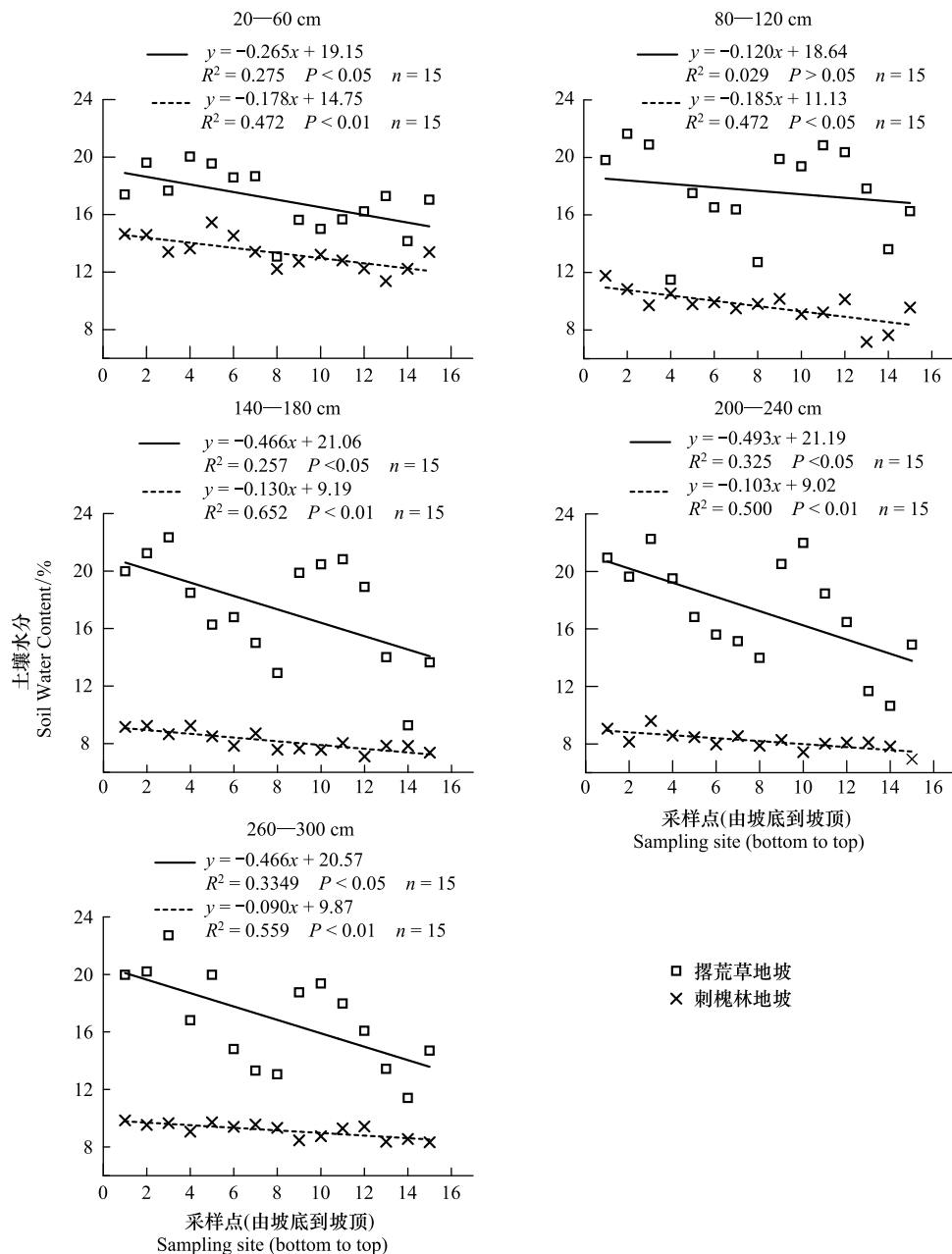


图4 长武烧畛湾刺槐林地和撂荒草地土壤水分沿坡面变化趋势(由坡底向坡顶)

Fig.4 Variation trends of soil moisture in black locust forestland and abandoned farmland from the bottom slope to the top slope in ChangwuShaozhongwan

表现在对土壤含水量的恢复和保持,在土壤水分结构的维持上也有积极的意义。相比之下,在人工刺槐林地坡土壤水分沿坡面变化趋势明显较弱(图3,图4)。对土壤水分的过度消耗不仅导致了土壤干燥化及亏缺,过低的土壤水分含量也导致其空间差异性的降低,本研究结果显示人工刺槐林地坡差异性(标准差)较撂荒草地坡低(图2),而这应该是人工刺槐林地坡土壤水分沿坡面变化趋势较弱的最直接的原因。从此意义上讲,人工刺槐林地应该是削弱了地形因素对土壤水分的影响,改变土壤水分的自然状态的空间变化趋势,而这也应该作为人工引入植被对土壤水文消极影响的一个重要体现。而且,本研究结果也显示,人工刺槐林地坡土壤水分沿坡面的变化趋势随深度增加而变弱。如在260—300cm深度,土壤水分沿坡面几乎没有太明显的变化趋势(图3,图4)。事实上,由于刺槐林地普遍具有深根系统,并通过根系提水,使得较深层土壤水分消

耗量更大^[2],且难以得到雨水补充,导致较深层土壤水分下降更为明显。人工刺槐林地降低土壤含水量的同时削弱了坡面/坡位对土壤水分的影响。这应该也是人工林对土壤水分环境消极影响中不可忽略的一部分。此外,对比研究中的两个区域相应的坡面,人工刺槐林地间的差值为 3.29%,而撂荒草地间的差值为 5.91% (表 2)。人工刺槐林明显降低了两个区域的土壤水分差异,而且,总体上,长武县烧畛湾撂荒草地坡土壤水分在各层的坡面离散性(标准差)(图 2)皆高于延安羊圈沟撂荒草地坡;就坡面变化趋势而言,长武县烧畛湾撂荒草地坡土壤水分沿坡面变化趋势也强于延安羊圈沟刺槐林地坡(图 3,图 4)。相比之下,人工刺槐林地坡土壤水分的坡面标准差及变化趋势在两个区域相差皆不明显(图 2-图 4)。这说明土壤水分的过度消耗不仅降低了不同区域背景下的土壤含水量的差异,而且也降低了坡面/坡位对土壤水分影响的差异性。

通过以上分析,自然状态下,坡面土壤水分的变化趋势是客观存在的。高耗水的人工刺槐林地不仅过度消耗了土壤水分,导致低土壤含水量,而且对土壤水分的坡面结构或趋势的影响是非常明显的。这应该也是人工刺槐林对土壤水分负面效应的一个体现。相比之下,撂荒草地对于维持或恢复土壤水分的坡面变化趋势上有更为积极的意义。

4 结论

不同恢复方式对土壤水文的影响是多方面的。人工刺槐林地不仅通过过度消耗土壤水分而降低了土壤含水量,使其显著低于撂荒草地,而且,对土壤水分的空间结构也产生不可忽略的影响。本研究中,人工刺槐林地坡土壤水分坡面差异性总体上比撂荒草地坡低,说明人工刺槐林地坡削弱了土壤水分的差异性或降低了水分的异质性。就土壤水分的坡面变化趋势来讲,撂荒草地土壤水分沿坡底到坡顶的降低趋势更为明显,且随深度增加呈现加强的趋势,这应该是与自然条件下土壤水分的坡面变化趋势相符合的;相比之下,人工刺槐林地坡土壤水分的坡面变化趋势较弱,而且土层越深,土壤水分的坡面变化趋势越弱,人工刺槐林降低了土壤水分的坡面变化。因此,就土壤水分含量及其空间结构的保持上来讲,撂荒草地应是比人工引入植被更为合理的植被恢复方式。这说明不合理的植被重建措施不仅会影响土壤水分储量,而且会扰乱土壤水分的自然差异性。就土壤水分的坡面变化趋势而言,作为植被重建时的基本单元,应该充分考虑其水分变化及分布规律,合理选择和配置植被,以达到控制侵蚀及水土保持的最大生态效益。

致谢: 特别感谢位于延安羊圈沟村的黄土高原生态恢复与水土保持观测研究站和位于长武县的中国科学院长武黄土高原农业生态试验站为我们提供的支持和帮助。同时,非常感谢两位匿名审稿人及各位编辑的意见和建议。

参考文献(References):

- [1] Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research*, 2000, 36(1): 3-9.
- [2] Yang L., Chen L. D., Wei W., Yu Y., Zhang H. D. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions. *Journal of Hydrology*, 2014, 513: 314-321.
- [3] Chen L. D., Wang J. P., Wei W., Fu B. J., Wu D. P. Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau Region, China. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1291-1298.
- [4] Chen L. D., Huang Z. L., Gong J., Fu B. J., Huang Y. L. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China. *CATENA*, 2007, 70(2): 200-208.
- [5] 李军, 王学春, 邵明安, 赵玉娟, 李小芳. 黄土高原不同密度刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林地水分生产力与土壤干燥化效应模拟. *生态学报*, 2008, 28(7): 3125-3142.
- [6] 张建军, 李慧敏, 徐佳佳. 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响. *生态学报*, 2011, 31(23): 7056-7066.
- [7] 侯庆春, 韩蕊莲. 黄土高原植被建设中的有关问题. *水土保持通报*, 2000, 20(2): 53-56.
- [8] Wang Y. Q., Shao M. A., Shao H. B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(1/2): 9-17.

- [9] 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. 生态学报, 2005, 25(10): 2491-2498.
- [10] 王志强,刘宝元,路炳军. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究. 生态学报, 2003, 23(9): 1944-1950.
- [11] 郝文芳. 陕北黄土丘陵区撂荒地恢复演替的生态学过程及机理研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010.
- [12] 唐龙,梁宗锁,杜峰,郝文芳. 陕北黄土高原丘陵区撂荒地演替及其过程中主要乡土牧草的确定与评价. 生态学报, 2006, 26(4): 1165-1175.
- [13] Gómez-Plaza A, Martínez-Mena M, Albaladejo J, Castillo VM. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments. *Journal of Hydrology*, 2001, 253(1/4): 211-226.
- [14] Western AW, Zhou S L, Grayson R B, McMahon T A, Blöschl G, Wilson D J. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 2004, 286(1/4): 113-134.
- [15] Yao X L, Fu B J, Lü Y H, Chang R Y, Wang S, Wang Y F, Su C H. The multi-scale spatial variance of soil moisture in the semi-arid Loess Plateau of China. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(5): 694-703.
- [16] 邱扬,傅伯杰,王军,张希来,孟庆华. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 2007, 26(1): 100-107.
- [17] 张瑞,曹华,王云强,黄传琴,谭文峰. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分空间变异性及其影响因素. 水土保持研究, 2012, 19(5): 52-58.
- [18] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,黄志霖,贵立德,吴祥林. 黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响. 第四纪研究, 2003, 23(3): 334-342.
- [19] 朱德兰,吴发启. 不同地形部位土壤水分的年变化分析. 中国水土保持科学, 2003, 1(4): 28-31.
- [20] 梁宁霞. 小流域尺度地形对土壤水分的影响及尺度效应[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- [21] 田迅,高凯,张丽娟,于永奇,韩国栋. 坡位对土壤水分及植被空间分布的影响. 水土保持通报, 2015, 35(5): 12-16.
- [22] 吴维臻. 坡面尺度土壤水分空间异质性特征及其与地形因子的关系[D]. 兰州:兰州大学, 2014.
- [23] 徐学选,刘文兆,高鹏,穆兴民. 黄土丘陵区土壤水分空间分布差异性探讨. 生态环境学报, 2003, 12(1): 52-55.
- [24] 王军,傅伯杰. 黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响. 地理学报, 2000, 55(1): 84-91.
- [25] 庞敏,侯庆春,薛智德,韩蕊莲. 延安研究区主要自然植被类型土壤水分特征初探. 水土保持学报, 2005, 19(2): 138-141.
- [26] 何福红,黄明斌,党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征. 水土保持通报, 2002, 22(4): 6-9.
- [27] 许喜明,陈海滨,原焕英,王辉. 黄土高原半干旱区人工林地土壤水分环境的研究. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 60-64.
- [28] 王云强. 黄土高原地区土壤干层的空间分布与影响因素[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.
- [29] Legates D R, Mahmood R, Levia D F, DeLiberty T L, Quiring S M. Soil moisture: a central and unifying theme in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(1): 65-86.