

DOI: 10.5846/stxb201606241237

安文明, 梁海斌, 王 聪, 王帅, 李宗善, 吕一河, 刘国华, 傅伯杰. 黄土高原阴/阳坡向林草土壤水分随退耕年限的变化特征. 生态学报, 2017, 37(18): 6120-6127.

An W M, Liang H B, Wang C, Wang S, Li Z S, Lü Y H, Liu G H, Fu B J. Dynamic characteristic of soil water with an increase in restoration years on the shady and sunny slope aspects of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6120-6127.

黄土高原阴/阳坡向林草土壤水分随退耕年限的变化特征

安文明^{1,2}, 梁海斌^{1,2}, 王 聪¹, 王 帅¹, 李宗善^{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: 研究地点位于半干旱的黄土高原区, 在坡向导致的土壤水分差异的基础上, 分析该区域撂荒草地和人工林地土壤水分随退耕年限的变化特征, 进而以自然草地为参照, 分析不同坡向人工林地土壤水分亏缺程度。结果表明: 总体上, 阴坡土壤水分显著高于阳坡, 撂荒草地、自然草地和林地土壤水分在阴/阳坡之间的差异分别为: 3.1%、2.6%、1.5%; 可见, 人工林地降低了由坡向导致的土壤水分的差异。在阴/阳坡上, 撂荒草地土壤水分随退耕年限增加皆呈显著增加趋势, 并且, 总体上, 土壤水分的增加程度随年限增加而增大, 尤其在深层的土壤水分。而林地土壤水分在阴坡和阳坡皆呈显著降低的趋势; 通过对比阴/阳坡不同土层土壤水分随退耕年限变化趋势, 阳坡人工林地上层土壤水分(0—1m 和 1—2m) 随年限增加降低程度有所减少, 然而, 较深层(2—3m 和 3—4m) 土壤水分在后期降低程度更大, 而阴坡土壤水分随年限增加的降低程度呈现与阳坡相反的趋势; 人工刺槐林地导致的土壤水分亏缺程度(以自然草地土壤水分作为参考) 随着年限增加呈增加趋势, 且随深度增加呈增加趋势, 总体上, 阳坡人工林地除 0—1m 土层的土壤水分亏缺程度高于阴坡, 其余土层平均土壤水分亏缺程度在前、中、后期皆低于阴坡。

关键词: 土壤水分; 坡向; 恢复年限; 土壤亏缺; 黄土高原

Dynamic characteristic of soil water with an increase in restoration years on the shady and sunny slope aspects of the Loess Plateau

AN Wenming^{1,2}, LIANG Haibin^{1,2}, WANG Cong¹, WANG Shuai¹, LI Zongshan^{1,*}, LÜ 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: This study was conducted in the semi-arid the Loess Plateau of China. On the basis of the differences in soil water content due to different slope aspects, the dynamic characteristic of soil water content in an abandoned farmland and artificial forestland with an increase in restoration years was analyzed, and on the basis of the amount of soil water in a native grassland, the soil water deficit in the artificial forestland on different slope aspects was also analyzed. Overall, the soil water content in the shady slope was significantly higher than that in the sunny slope; the difference in soil water content between the two slope aspects was 3.1% for the abandoned farmland; 2.6%, native grassland; and 1.5%, artificial forestland. Therefore, the excessive consumption of the artificial forestland with respect to soil water diminished the

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

收稿日期: 2016-06-24; 修订日期: 2016-12-01

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

difference in soil water due to the different slope aspects. The soil water content of the abandoned farmland presented a significantly increasing trend with an increase in restoration years, and the degree of increase would also increase with the increase in restoration years. However, in the artificial forestland, a decreasing trend was observed; for the sunny slope, the degree of decrease in soil water content would decrease with an increase in restoration years at the layers of 0—1 m and 1—2 m; however, the degree of decrease in soil water content at the layers of 2—3 m and 3—4 m would increase with an increase in restoration years, and that was contrary at the shady slope. The soil water deficit in the artificial forestland presented an enhanced trend with the progress of ecological restoration and increase in soil depth. Overall, excepting the layers of 0—1 m, the soil water deficit in the artificial forestland on the sunny slope was lower than that on the shady slope.

Key Words: soil water content; slope aspect; restoration years; soil water deficit; the Loess Plateau

土壤水分是影响植被生长的关键因子之一,是连接土壤-植被-大气的关键纽带,对维持生态系统平衡和可持续性具有重要意义^[1-3]。尤其对于降雨稀少的干旱与半干旱区域,土壤水分是主要的限制因子之一^[4]。土壤水分受多因子影响(气候、植被、地形、土壤特性等),在较大尺度上(区域、全球等),气候和土壤特性是其主要影响因子,而在较小尺度上(坡面、流域等),土壤水分主要受地形、植被影响^[5-7]。

黄土高原属于典型的干旱与半干旱区,土壤疏松、水土流失严重,区内沟壑纵横、地形条件复杂。为控制严重的水土流失,退耕还林草工程的实施,使得土地利用方式有了大规模转变,人工恢复植被已成为黄土高原主要植被类型^[8-9];而人工植被对土壤水分的过度消耗已经导致了土壤水环境的干化,甚至造成了生态系统退化,譬如在黄土高原普遍分布的土壤干层及“小老树”现象^[10-15]。因此,土壤水分对土地利用改变的响应已经成为研究热点,许多学者已展开了相关研究^[4-5,10,13-14]。地形通过对太阳辐射的影响间接影响土壤水分^[16-19],研究发现,就坡向来说,土壤水分含量大小一般遵循:阴坡>半阴坡>半阳坡>阳坡,而且土壤储水量以及土壤水分有效性同样遵循该大小关系^[20-22],即坡向在决定土壤水环境中起到重要的作用。因此,以不同坡向导致的土壤水环境差异为基础进行土壤水分对生态恢复响应的研究有重要的生态学意义。目前,对于坡向导致的土壤水分的空间异质性虽已有较多研究,但在此基础上进行的土壤水分随不同退耕年限的变化趋势及土壤水分亏缺差异的研究还比较少,因此,本文以黄土高原典型丘陵沟壑区撂荒草地和人工林地为研究对象,定量描述坡向因子(阴坡和阳坡)对土壤水分空间差异性的影响,阐明撂荒草地和人工林地土壤水分的差异性,并分析撂荒草地和人工林地土壤水分随恢复年限梯度的动态变化规律,进而探讨人工林地土壤水分的亏缺程度。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究中的野外数据采集主要集中在延安地区,采样点主要集中于延安市宝塔区(N36°33.13'; E109°26.58')、安塞县(N36°54.33'; E109°10.88')、志丹县(N36°45.23'; E108°37.22')3个区域(图1),属于典型的黄土沟壑区,平均海拔高度1000—1500m,年均气温7.8—8.5℃,年平均降雨量500—530mm,年均蒸发量1600—1800mm,该区域属于森林草原过渡带,土壤类型主要为黄绵土,并且该地区属于主要的退耕还林区域,在此背景下,人工刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)分布面积大,成为主要植被恢复类型。

1.2 研究方法

1.2.1 采样点设置

试验于2015年5—6月份进行,采样期间天气晴好,没有发生持续降雨天气。本研究设置两个坡向(阴坡和阳坡),阳坡定义为南偏东/西15°以内,阴坡定义为北偏东/西15°以内。于每个坡向中选3种地类(撂荒草地、自然草地、人工刺槐林地),采样点的分布见图1。阳坡共设置撂荒草地8个草地样方:5a撂荒草地、8a撂荒草地、15a撂荒草地、20a撂荒草地、30a撂荒草地、35a撂荒草地、2个自然草地,优势物种主要是长芒草

(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischcemum*)、白莲蒿(*Artemisia sacrorum*)、冰草(*Agropyron cristatum*), 采样点主要位于安塞纸坊沟、延安羊圈沟、志丹双河镇; 林地设置 8 个刺槐林地样方, 包括 5、8、16、20、25、30、35、40a, 采样点主要位于安塞纸坊沟、延安羊圈沟、志丹双河镇。阴坡共设置 9 个草地样方: 5a 撂荒地、10a 撂荒地、15a 撂荒地、16a 撂荒地、20a 撂荒地、30a 撂荒地、33a 撂荒地、35a 撂荒地、两个自然草地, 优势物种主要为冰草(*Agropyron cristatum*)、华北米蒿(*Artemisia giraldii*)、白羊草(*Bothriochloa ischcemum*)和长芒草(*Stipa bungeana*), 采样点主要位于安塞纸坊沟、延安羊圈沟、延安羊圈沟; 设置 8 个刺槐林地样方: 5、10、15、19、25、30、33、45a, 采样点主要位于延安羊圈沟、延安燕沟、志丹双河镇。

1.2.2 采样方法

于每个采样点进行土壤样品的采集, 采样用传统的土钻取样法, 采样深度 4m, 采样间隔 20cm, 每个样方采两个土壤剖面用以计算平均值, 土壤采得后装入专业铝盒, 称量鲜重后以 105℃ 烘干 24h, 用以计算土壤质量含水量; 土壤样品采样的同时, 记录样地的经纬度、海拔、坡度、坡向等地理信息, 样地年限的获取主要通过询问了解退耕情况的当地人, 同时, 于林地采样时, 进行年轮数据采集, 用以判定林木生长年龄。

1.2.3 分析方法

土壤含水量的计算方法采用公式 1:

$$\text{土壤含水量}(\%) = \frac{\text{鲜重} - \text{干重}}{\text{干重}} \times 100\% \quad (1)$$

每个样地土壤水分平均值是两个重复土壤剖面的平均值获得, 在进行土壤水分随退耕年限的变化趋势时, 将年限分为三个阶段: 退耕初期(5—10a)、退耕中期(15—25a)、退耕后期(30a 以上); 并将土层分为四层: 0—1m、1—2m、2—3m、3—4m, 并分别进行分析土壤水分变化特征。

2 结果与讨论

2.1 阴坡与阳坡土壤水分对比

通过计算阴坡与阳坡各地类平均土壤水分含量以对比阴/阳坡土壤水分的差异, 如图 2 所示。从总体水平来看, 本研究调查的 3 种地类(撂荒草地, 自然草地和林地)的阴坡土壤水分要高于阳坡的土壤水分, 阴坡土壤水分整体上比阳坡高 2.4%, 其中撂荒草地高 3.1%, 自然草地高 2.6%, 人工林地高 1.5%(图 2, 表 1)。坡向通过影响地表太阳辐射量而影响地温, 进而间接影响土壤蒸发和植被蒸腾^[20, 23], 导致阴坡的土壤储水量相对较高, 这与前人研究的结论相符^[21-22], 因此, 对于小区/小流域等较小尺度的土壤水分研究中, 不同坡向间土壤水分的差异应该作为土壤水分空间异质性的前提或背景。

值得注意的是, 人工林地土壤水分在阴/阳坡的差异明显比撂荒草地和自然草地小, 这在一定程度上说明人工

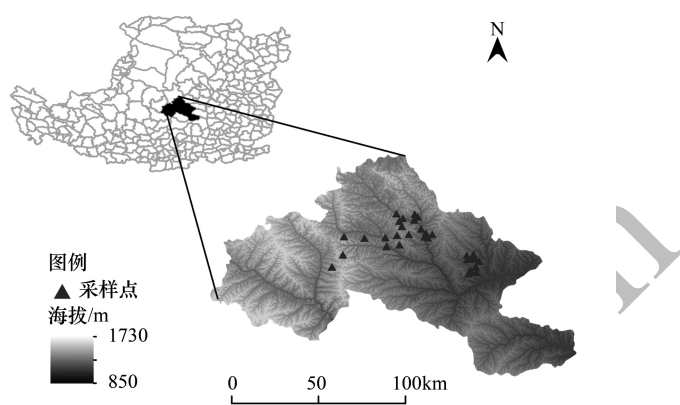


图 1 采样点示意图

Fig. 1 Location of the study area and experimental sites in two zones

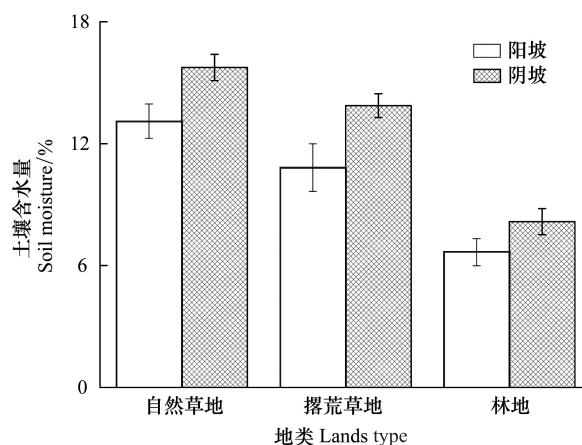


图 2 阴坡与阳坡土壤水分对比

Fig. 2 The comparison of soil water content between the sunny slope and shady slope

造林活动将会降低由于地形因素导致的土壤水分含量的差异^[24]。

表 1 阴坡与阳坡不同土层土壤水分含量方差分析

Table 1 The ANOVA of soil water content at different soil layer of the sunny slope and shady slope

坡向 Slope Aspect		自然草地 NG	std	撂荒草地 AF	std	林地 FL	std
阳坡 Sunny Slope	0—1	14.75a	1.90	14.06a	2.35	7.93b	2.06
	1—2	11.87a	0.32	8.94b	0.58	6.49c	0.09
	2—3	13.04a	0.26	9.91b	0.28	6.27c	0.15
	3—4	13.01a	0.31	9.91b	0.87	6.26c	0.21
阴坡 Shady Slope	0—1	15.73ab	0.87	14.73bc	1.52	12.10c	3.47
	1—2	14.98a	0.54	12.65b	0.66	7.42c	0.19
	2—3	16.15a	0.34	14.11b	0.20	7.20c	0.11
	3—4	17.00a	0.50	14.75b	0.58	6.74c	0.26

NG: native grassland, AF: abandoned farmland, FL: forestland, std: 标准差/ standard deviation

对比相同坡向中的 3 种地类的土壤水分可以看出,不管在阴坡还是阳坡,土壤水分含量总是遵循自然草地>撂荒草地>林地,在阳坡,撂荒草地土壤水分比自然草地少 2.29%,林地比撂荒草地少 4.2%,且在阴坡的数值分别为 1.9%和 5.7%。图 3 为 3 种地类的土壤水分在土层 1—4m 的剖面变化规律图,1m 以上土层土壤水分,在阴坡和阳坡的自然草地和撂荒草地都成明显的下降趋势,而 1m 以下土层土壤水分呈现一定程度的波动式增加趋势,阳坡自然草地土壤水分含量在 11.6%—13.4%波动,撂荒草地土壤水分含量为 8.2%—10.9%,在阴坡分数值分别为 14.1%—17.4%和 11.9%—15.7%,且在 1m 以下土层撂荒草地与自然草地的土壤水分含量差异更显著(图 3,表 1)。在阴坡和阳坡,人工林地的土壤水分在整个剖面显著低于撂荒草地和自然草地,且林地土壤水分随着深度增加呈降低的趋势,阳坡林地土壤水分范围为 6.0%—6.6%,阴坡土壤水分分为 6.4%—7.5%。土壤水分剖面分布与植被根系分布有直接关系^[25],研究表明,黄土高原生态恢复中,人工刺槐林地有密集的深根系,因此对于深层土壤水分的消耗更为显著^[26],而草地根系主要集中在 1m 以内,因此对土壤水分的消耗主要集中于土壤表层^[4, 8]。

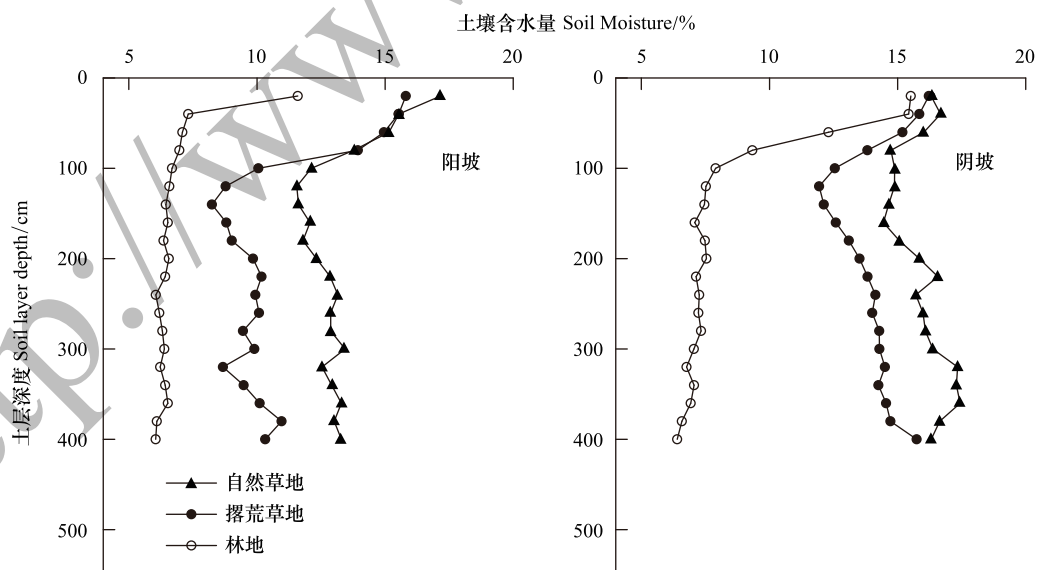


图 3 阴坡与阳坡土壤水分剖面分布图

Fig.3 The profile distribution of soil water content of the sunny slope and shady slope

2.2 阴坡与阳坡土壤水分随退耕年限的变化特征

图 4 显示了不同坡向上的撂荒草地和林地土壤水分随退耕年限的变化趋势。对于撂荒草地而言,阴/阳

坡样地土壤水分随退耕年限增加皆呈现显著增加趋势(图 4a)。撂荒草地的演替过程属于正向演替^[27-29],而以降雨为主要来源的土壤水分是表征气候特征的一个重要参数;因此在植被自然演替的过程中,土壤水分状况也必然朝着适合于当地自然条件(即自然草地状态)的方向发展,从此意义上讲,撂荒草地是一种对土壤水分保持与恢复有积极作用的生态恢复方式。另外,阴坡撂荒草地土壤水分在调查年限范围内(5—50a)的土壤水分的变化幅度为 3.0%,阳坡土壤水分变化幅度为 4.7%,这在一定程度上说明阳坡撂荒草地随恢复年限梯度的土壤水分增加量要大于阴坡草地。对于人工林地而言,阴/阳坡土壤水分随着退耕年限的增加皆呈现显著的降低趋势(图 4b),人工刺槐林属于高耗水林型^[30-31],为了满足自身生长的需求,随着年限的增加,对水分的消耗将逐渐增加,尤其是对深层土壤水分的消耗,甚至导致土壤水分严重亏缺,而形成土壤干层,王云强等研究表明,刺槐林地的土壤干层的厚度和深度随生长年限的增加而呈增加的趋势^[32]。严重的土壤水分亏缺对人工林地会产生严重的负面影响,例如在黄土高原普遍存在的“小老树”,以及人工林地退化后形成的稀疏林木的草地景观^[11, 14, 17]。阴坡林地土壤水分在调查的年限范围内(5—45a),土壤水分的变化程度为 2.0%,而阳坡为 1.8%。本研究中为了更为详细的展现土壤水分随年限的变化,图 5 显示了阴/阳坡草地和林地不同土层土壤水分从退耕初期到中期,中期到后期,以及后期撂荒草地到自然草地的变化。对于撂荒草地而言,四个土层的土壤水分随着植被演替的过程都呈正向的增加,然而,在不同的阶段,每一土层的土壤水分的变化程度是不同的(图 5),对于阳坡来说草地来讲,退耕初期到中期,土壤水分在 2—3m 增加最大,而中期到后期,土壤水分在 3—4m 增加最大(图 5a),对于阴坡草地来讲,退耕初期到中期,土壤水分在 1—2m 增加最大,而中期到后期,土壤水分在 2—3m 增加最大(图 5b)。另外,值得注意的是,总体上,撂荒草地土壤水分在演替中期到后期的增加程度高于早期到中期(图 5a, b),这说明随着草地演替的进行,在植被群落逐渐趋于相对稳定的演替后期,撂荒草地群落对土壤水环境的恢复和保持的作用更为积极。对于林地而言,四个土层的土壤水分随着恢复发展都皆呈减少的趋势。在阳坡,从退耕初期到中期,林地土壤水分降低的程度随深入增加成减少趋势(图 5c),而在中期到后期阶段,该减少程度随深度增加呈增加趋势;在阴坡,从退耕初期到中期,人工林地土壤水分降低程度随深度增加呈增加趋势,而在退耕中期到后期,土壤水分降低程度随深度增加呈降低的趋势(图 5d)。

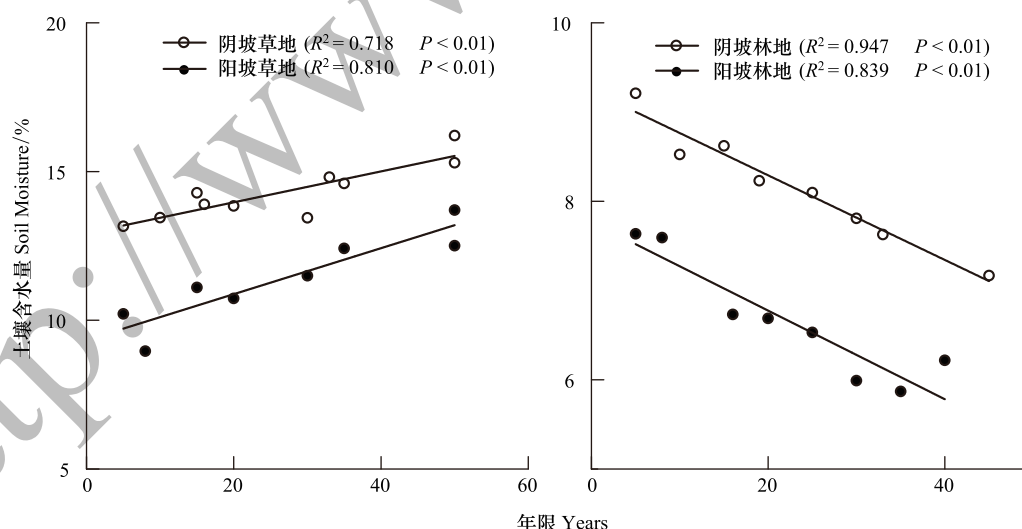


图 4 阴坡与阳坡土壤水分随退耕年限的变化趋势

Fig. 4 The dynamic characteristic of soil water content with increase in "growth years" of the sunny slope and shady slope

2.3 人工林地土壤水分亏缺的变化特征

林地土壤水分含量相对于自然草地土壤水分含量的减少比例可以反应造林引起的土壤水分亏缺程度^[4, 33]。图 6 显示了不同坡向人工林在不同土壤层次引起的土壤水分亏缺程度。总体上,人工林的土壤水分

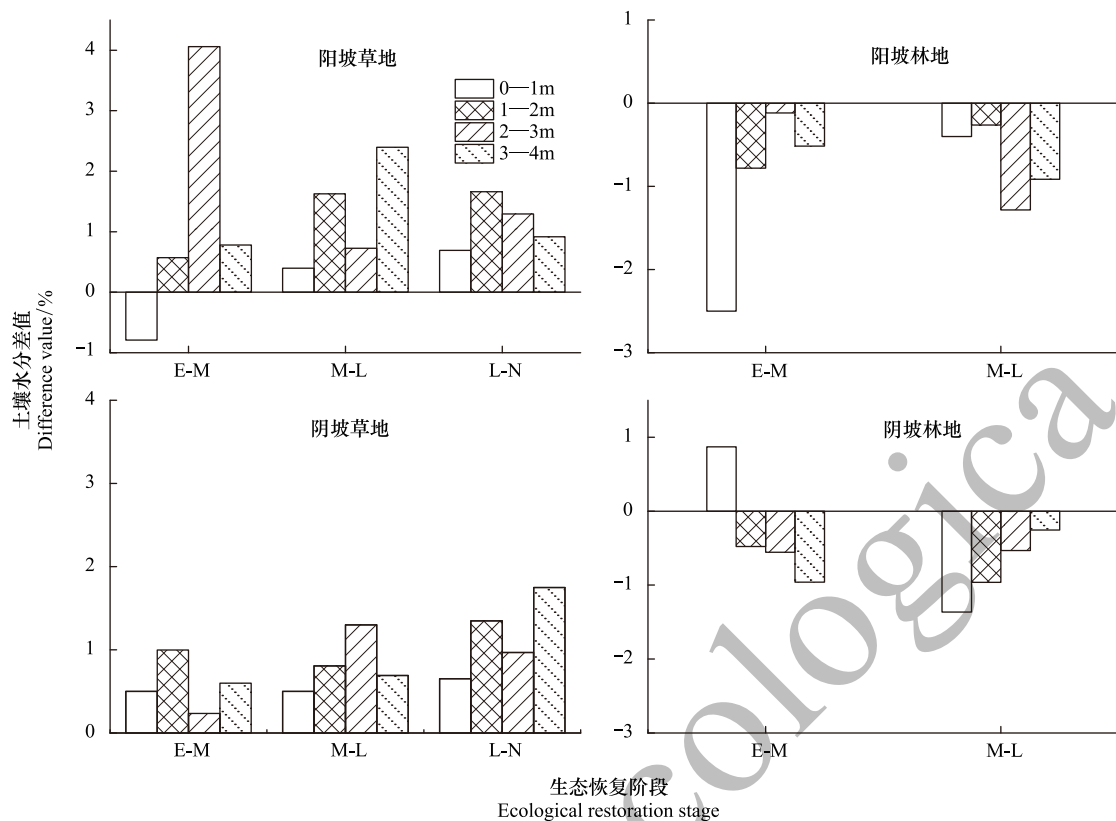


图5 不同土壤层次的土壤水分在不同生态恢复阶段的变化特征

Fig.5 The variation characteristics of soil water content at different soil layer between the ecological restoration stages

E-M:前期到中期 The Early Stage To Medium Stage, M-L:中期到后期 The Medium Stage To The Later Stage, L-N: 后期到自然草地 The Later Stage To Native Grassland

亏缺程度随着造林年限的增加(前-中-后)呈增强的趋势,且随着土层深度的增加,土壤水分亏缺程度增强。对比阴坡与阳坡,在0—1m土层,阳坡土壤水分亏缺程度明显高于阴坡,而对于所调查的其余3个土层,阳坡人工林地平均土壤水分亏缺程度在前、中、后期分别为44.66%、48.47%、54.83%,均低于阴坡人工林地的平均土壤水分亏缺,分别为50.94%、55.03%、58.77%。这说明,随着长期的人工造林的发展,在坡向引起的土壤水分差异的基础上,人工林对阴坡的负面影响更为强烈,造成的土壤水分亏缺更为严重,尤其对于深层土壤水分更为明显。

3 结论

(1)阴坡土壤水分含量显著高于阳坡,并且在所选的3种地类(自然草地、撂荒草地、林地)中皆是如此。然而,每种地类在两坡向间的差异是不同的,人工林地缩小了坡向引起的土壤水分的差异;不管阳坡还是阴坡,林地对土壤水分的过度消耗使其整体上都低于草地(撂荒草地和自然草地),因此,人工林地对土壤水分的消极影响在土壤水分含量和空间异质性上都有体现。

(2)在以空间代时间的方法进行长时间序列的土壤水分动态分析中,人工林地土壤水分的动态趋势与撂荒草地展现了截然相反的趋势,人工林地土壤水分随着林地生长年限的增加呈显著的降低趋势,而且在本研究中分的4个土层深度中都能发现显著的降低趋势,即林地对土壤水分的消耗随时间的增加呈累加趋势,最终导致的结果是随着年限的增加由林地导致的土壤水分亏缺程度逐渐增强。而撂荒草地的土壤水分随退耕年限的增加整体上呈上升的趋势,而且在本研究中的四个土层深度土壤水分随年限都呈上升趋势,因此,撂荒草地作为一种主要的生态恢复方式对土壤水分的恢复有一定的积极作用。

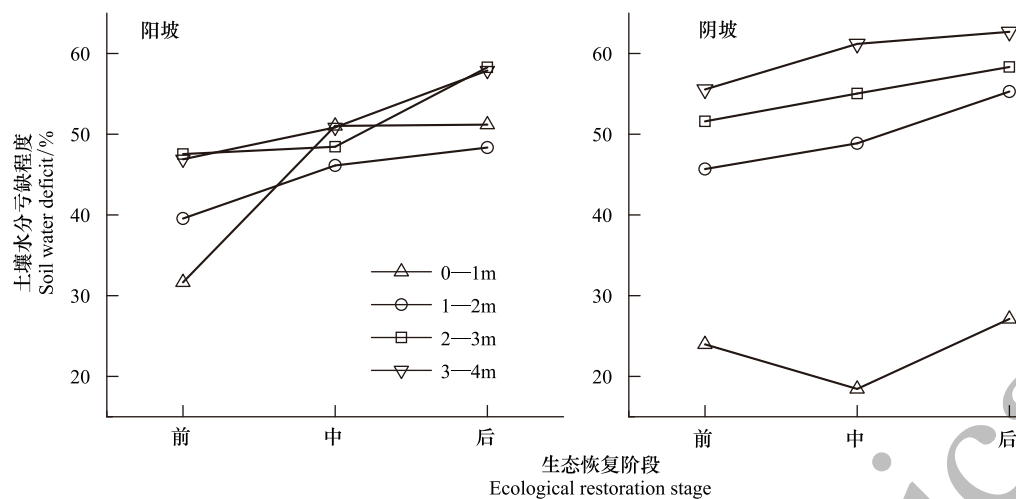


图6 人工林地不同土壤层土壤水分在不同生态恢复阶段的土壤水分亏缺程度

Fig.6 The soil water deficit of artificial forestland at different soil layer at different ecological restoration stages

基于以上分析,在以阴/阳坡土壤水分差异的基础上,黄土高原人工林地对土壤水分的过度消耗导致水分含量显著低于草地,由此导致的土壤水分亏缺程度随着恢复年限增加而呈增强的程度,而且总体上土层越深亏缺程度越严重。作为黄土高原植被重建的一种方式,自然撂荒草地对土壤水分的恢复和保持作用均要优于人工林地,应该是一种比较合理的植被恢复策略。

参考文献 (References):

- [1] Penna D, Borga M, Norbiato D, Fontana G D. Hillslope scale soil moisture variability in a steep alpine terrain. *Journal of Hydrology*, 2009, 364 (3/4): 311-327.
- [2] 郭忠升. 半干旱区柠条林利用土壤水分深度和耗水量. *水土保持通报*, 2009, 29(5): 69-72.
- [3] 莫保儒, 蔡国军, 杨磊, 芦娟, 王子婷, 党宏忠, 王多锋, 戚建莉. 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征. *生态学报*, 2013, 33(13): 4011-4020.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 武江涛. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分空间变异研究[D]. 太原: 山西大学, 2015.
- [8] 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.
- [9] Yang X H, Jia Z Q, Ci L J. Assessing effects of afforestation projects in China. *Nature*, 2010, 466(7304): 315-315.
- [10] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. *生态学报*, 1983, 3(2): 91-101.
- [11] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 14-22.
- [12] 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题. *林业科学*, 1996, 32(1): 78-85.
- [13] 张哲. 黄土丘陵区地形因子对土壤水分的影响及其尺度效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [14] 杨文治, 田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源. *土壤学报*, 2004, 41(1): 1-6.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李军, 陈兵, 李小芳, 赵玉娟, 次仁央金, 蒋斌, 胡伟, 程积民, 邵明安. 黄土高原不同植被类型区人工林地深层土壤干燥化效应. *生态学报*, 2008, 28(4): 1429-1445.
- [18] 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.

- [19] 朱乐天, 焦峰, 刘源鑫, 贺国鑫. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分时空变异特征. 水土保持研究, 2011, 18(6): 115-118.
- [20] 韩蕊莲, 侯庆春. 延安试区刺槐林地不同立地条件下土壤水分变化规律. 西北林学院学报, 2003, 18(1): 74-76.
- [21] 马祥华, 白文娟, 焦菊英, 焦峰. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中的土壤水分变化研究. 水土保持通报, 2004, 24(5): 19-23.
- [22] 王孟本, 李洪建. 林分立地和林种对土壤水分的影响. 水土保持学报, 2001, 15(6): 43-46.
- [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, 2003, 12(1): 52-55.
- [24] Fu B J, Wang J, Chen L D, Qiu Y. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China. Catena, 2003, 54(1/2): 197-213.
- [25] Rosenbaum U, Bogen H R, Herbst M, Huisman J A, Peterson T J, Weuthen A, Western A W, Vereecken H. Seasonal and event dynamics of spatial soil moisture patterns at the small catchment scale. Water Resources Research, 2012, 48(10): W1054.
- [26] 赵荣玮, 张建军, 李玉婷, 张艳婷, 田宁宁. 晋西黄土区人工林地土壤水分特征及其对降雨的响应. 水土保持学报, 2016, 30(1): 178-183.
- [27] 郝文芳, 梁宗锁, 陈存根, 唐龙. 黄土丘陵区弃耕地群落演替过程中的物种多样性研究. 草业科学, 2005, 22(9): 1-8.
- [28] 唐龙, 梁宗锁, 杜峰, 郝文芳. 陕北黄土高原丘陵区撂荒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.
- [29] 贾沐霖. 水蚀风蚀交错区退耕植被演替过程研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [30] 陈杰, 刘文兆, 张勋昌, 侯喜禄, 胡梦珩, 王兵. 黄土丘陵沟壑区林地水文生态效应. 生态学报, 2008, 28(7): 2954-2963.
- [31] 王延平, 邵明安, 张兴昌. 陕北黄土区陡坡地人工植被的土壤水分生态环境. 生态学报, 2008, 28(8): 3769-3778.
- [32] 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.
- [33] Yang L, Wei W, Chen L D, Mo B R. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2012, 475: 111-122.