

DOI: 10.5846/stxb201504250853

严正升, 郭忠升, 宁婷, 张文文. 枝条覆盖对半干旱黄土丘陵区平茬柠条林地土壤水分的影响. 生态学报, 2016, 36(21): - .

Yan Z S, Guo Z S, Ning T, Zhang W W. Effects of branch mulch on soil water of pruned *Caragana korshinskii* forestland in the semi-arid Loess Hilly Region. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(21): - .

枝条覆盖对半干旱黄土丘陵区平茬柠条林地土壤水分的影响

严正升^{1,2}, 郭忠升^{1,3,*}, 宁婷^{1,2}, 张文文^{1,2}

1 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要: 为了研究枝条覆盖对林地土壤水分的影响, 提高土壤水分利用效率。2013 年 5—9 月, 以半干旱黄土丘陵区平茬柠条林为对象, 采用中子水分仪对未覆盖和枝条覆盖林地土壤水分进行定位观测, 研究了枝条覆盖对林地土壤水分的影响。研究期间共观测到降雨 28 次, 总降雨量达 495.9 mm。未覆盖和覆盖林地降雨补给量与降雨量之间均呈极显著正相关关系。枝条覆盖使林地降水入渗补给系数由 0.50 增加至 0.70, 明显提高了林地次降水补给量和入渗深度。覆盖林地各月土壤水分消耗量均高于对照林地, 整个生长季, 前者比后者多消耗了 37.56 mm 土壤水分, 仅相当于所增加的降雨补给量的 1/3。在丰水年, 覆盖一直表现出对林地土壤水分的正效应, 剖面 0—260 cm 范围内土壤水分条件有明显改善。

关键词: 半干旱黄土丘陵区; 覆盖; 平茬; 柠条; 土壤水分

Effects of branch mulch on soil water of pruned *Caragana korshinskii* forestland in the semi-arid Loess Hilly Region

YAN Zhengsheng^{1,2}, GUO Zhongsheng^{1,3,*}, NING Ting^{1,2}, ZHANG Wenwen^{1,2}

1 Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling 712100, China

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

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: In the semi-arid Loess hilly region where there are insufficient water resources, the condition of soil water is the most important factor limiting plant growth. Studies have shown that biological mulching can effectively increase rainfall infiltration depth and reduce surface runoff, as well as reduce invalid evaporation from the soil surface. However, most studies on biological mulching technologies focused on straw and grass mulching, and there is a lack of information on the effect of branch mulching, particularly in pruned *Caragana korshinskii* forestland. In the semi-arid Loess hilly region, soil drying is a serious environmental problem in artificial *C. korshinskii* forestland. The positive effects of branch mulching on soil water conditions may have great significance for vegetation restoration and ecological construction. To understand these effects and to apply the technology for increasing soil water use efficiency, we measured volumetric soil water content (VSWC) using a neutron probe in mulched and unmulched shrubland, of pruned *C. korshinskii* from May to October 2013. Twenty-eight rainfall events were observed during the period and the total rainfall amounted to 495.9mm. Approximately 60% of rainfall events were less than 10mm, and the maximum rainfall was 90.3mm. Regression analysis showed significant

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271539)

收稿日期: 2015-04-25; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guozs@ms.iswc.ac.cn

positive correlations between rainfall and recharge amounts in both mulch plots and control plots. Furthermore, branch mulch increased the recharge amount. However, when the rainfall was less than 3.1mm, the recharge amount of soil water in mulched shrubland was less than unmulched shrubland. In addition, branch mulch increased the infiltration depth of rainfall, and the rate of rainwater harvesting was improved from 0.50 to 0.70. When the rainfall was >9.4mm, the recharge depth of soil water in unmulched shrubland was less than mulched shrubland. At the same time, there was more evapotranspiration in mulch plots than in control plots. During the growing season, total water consumption in mulch plots was 37.56mm greater than in control plots, which was merely 1/3 of the rainwater more infiltrated because of mulching management. Therefore, there was a positive effect of branch mulch on soil water resources in the wet years, reflected as the increase of soil water content in the 0—260cm depth profile. This study demonstrated that branch mulching can substantially increase the infiltration depth and recharge amount of rainfall in pruned *C. korshinskii* forestland and improve the utilization rate of rainwater.

Key Words: semi-arid Loess Hilly Region; mulch; pruning; *Caragana korshinskii*; soil water

半干旱黄土丘陵区水资源紧缺,土壤水分是限制当地植物生长发育的关键因素。在该区植被建设过程中,人工林草地普遍出现土壤干燥化现象,甚至形成土壤干层^[1-2]。一旦深层土壤通体干化,土壤水分将难以恢复^[3],直接影响到植物生产力的稳定提高及其生态效益的正常发挥^[4]。及时地补偿和恢复土壤水分,是该区大面积发展人工林草地的战略性决策问题^[5]。

土壤水分亏缺的调控途径主要有两条:一是增加土壤水分补给,二是降低土壤水分消耗^[6]。众多研究结论表明,以秸秆覆盖和生草覆盖为代表的生物覆盖可有效增加降水入渗,减少地表径流,抑制土壤水分的无效蒸发^[7-9]。其中,秸秆覆盖已广泛应用于我国北方旱作农业区,在降水资源的高效利用及可持续农业生产中发挥了有力作用^[10]。殷淑燕等^[11]研究表明果园覆草技术有助于解决黄土高原果园土壤的干燥化问题,可提高降水下渗率,减少流失量和蒸散量,提高土壤含水量,形成水、肥、气、热、生物因素平衡的果园生态系统。黄金辉等^[12]也认为黄土高原地区果园的保护性耕作体系也应以免耕覆草为主。相比之下,针对旱化人工生态林土壤水分恢复的相关研究开展较少^[13]。

柠条是半干旱黄土丘陵区营造水土保持林、防风固沙林的主要灌木树种。受林地土壤干燥化的不利影响,多年生柠条林生长退化乃至衰败现象突出^[6,14-15]。平茬可有效解决柠条植株衰败老化的问题,促进柠条林更新复壮^[16]。李耀林等^[17]研究了平茬对半干旱黄土丘陵区柠条林地土壤水分的影响,结果表明,平茬后,萌发柠条迅速更新复壮。但平茬后萌生柠条林覆盖度较低,土壤蒸发和地表径流都比较强烈,加之新生柠条呼吸旺盛,蒸腾速率较高,需要消耗大量的水分,导致平茬仅可在短时间内改善土壤水分环境,大部分时间则恶化了土壤水分环境。在此基础上,本研究以平茬人工柠条林为研究对象,采用平茬下来的柠条枝条对林地进行覆盖,并以无覆盖林地作为对照,对两处理林地土壤水分动态进行长期定位观测与分析,旨在揭示枝条覆盖对平茬(柠条)林地的土壤水分效应,为旱化柠条林地水分恢复工作的开展提供理论依据和技术支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏固原上黄生态试验站,地处宁南半干旱黄土丘陵区 35°59'—36°02' N, 106°26'—106°30' E 范围内。区内沟沿线以下坡度>25°,海拔高度 1534—1824 m。研究区降雨年际变化大,年降雨量变化在 634.7 mm(1984 年)—259.9 mm(1991 年),平均为 414.9 mm;年内降水分配不均,主要集中在 6—9 月,期间降雨量可占到年降雨量的 70%以上,无霜期 152 d。土壤类型为黄绵土,植被类型为森林草原向典型草原过渡。原生植被以多年生丛生低矮禾草为主,伴有少量旱生灌木、半灌木,代表植物有长芒草(*Stipa bungeana*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、茼蒿(*Artemisia giraldii*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等。柠条是当地营造水

土保持生态林的主要灌木树种。

1.2 试验设计与观测项目

1.2.1 样地布设

经面上踏查,选择研究区内立地条件和林分条件基本一致的代表性地段建立试验地。所选柠条林为 1987 年采用条播方式营造,丛间距约 2 m,单丛柠条分枝数在 30—50 枝之间。单枝平均株高 138.62 cm,平均基径 0.90 cm,均重 106.82 g,柠条单枝重(G)与株高(H)、基径(D)之间的关系可以用 $G=0.86D^2H-4.27$ 来表示, $r^2=0.937$ 。平茬工作于 2013 年 4 月柠条生长季前进行,随后划定面积为 4 m×4 m 的固定样地,并在样地内相邻两柠条丛的中间位置安放一根中子仪铝合金套管,管长 400 cm。同时,在试验地东面相距 50 cm 处设置简易雨量器,进行降雨资料的采集。

试验设 2 个处理:平茬对照林和平茬覆盖林,每个处理各重复两次。覆盖林地的布置方法如下:从平茬下来的新鲜柠条枝条中,选取株高、基径处于中等水平的枝条围绕原柠条丛所在位置进行交错覆盖,单位面积覆盖量约为单位面积平茬量的一半,平均覆盖率约 60%。对照林地不进行覆盖。

1.2.3 土壤含水量的测定

采用 CNC503A(DR)型智能中子水分仪进行剖面土壤含水量观测。时间上,观测从 2013 年 5 月 1 日开始到 2013 年 9 月 30 日结束,每半月进行一次;位置上,在土深 5 cm 处进行第一次观测,20 cm 处第二次观测,20—380 cm 土层范围内观测间隔确定为 20 cm。同时,根据天气预报与经验,不定期于降雨前后 2 h 内分别测定剖面土壤含水量。

1.2.4 萌蘖株株高、基径的测定

柠条萌发后,每块样地各选取 5 株萌生枝条标记为固定样株,采用米尺测其株高,游标卡尺测其基径,测定时间同土壤水分。

1.3 数据处理

补给深度为次降雨前后两次测定的剖面土壤水分变化图中两条曲线交点到地表的距离。当地降雨历时一般较短,降雨过程中气温低、湿度大,土壤水分蒸发有限,因此降雨前后两次测得的剖面土壤储水量之差即次降雨对土壤水分的补给量。降雨量与土壤水分补给量的差值是降雨耗损量,损耗的主要形式是林冠截留和地表径流。某一段时间始末最大蒸散发深度内土壤储水量之差加上期间降水对土壤水分的总补给量为该段时间内的土壤蒸散发量。在该地区,土壤储水量的变化量可简化为补给量与土壤蒸散发量的差值。降雨入渗补给系数即补给量与相应降雨量的比值。

土壤水资源的计算

$$D_w = 0.1 \sum_{i=1}^n VSWC_i \cdot H_i$$

式中, D_w 为土壤水资源,mm; n 为土层总数; $VSWC$ (*Volumetric soil water content*) 为各观测层土壤容积含水量,%; H 为各观测层所代表的土层深度,cm。本研究中, $n=20$,除表层(5 cm 处) H_1 和末层(380 cm 处) $H_{21}=10$ 外,其余土层 $H=20$ 。

本文采用 SPSS 18.0 进行数据处理和显著性检验,Excel 2007 进行回归分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 覆盖对林地土壤水分补给的影响

2.1.1 覆盖对林地次降雨补给量的影响

降水是研究区土壤水分的唯一补给源。2013 年为丰水年,5—9 月共观测到降雨事件 28 次(图 1),总降雨量达 495.9 mm,远超过研究区多年平均降雨量。降雨量分级呈现明显的偏态分布,近 60% 的降雨事件的次降雨量都在 10 mm 以下。次降雨量在 20—50 mm 之间的降雨有 5 场,50 mm 以上的降雨有 3 场,次最大降雨量为 7 月 8 日到 10 日的 90.3 mm。

降雨只有入渗到土壤中,才能对土壤水分进行有效补给。根据降雨量的多寡,选取试验期间 8 场具有代表性的降雨事件,统计相关数据如表 1。对降雨量(P)与降雨对林地土壤水分的补给量(R_p)进行回归分析,结果表明:对照林地两变量之间的关系为: $R_{p1} = 0.50P - 0.28$, $r^{21} = 0.992$;覆盖林地则为 $R_{p2} = 0.70P - 0.90$, $r^{22} = 0.993$ 。显著性检验结果表明,两处理林地 R_p 与 P 之间均呈极显著正相关关系。进一步地,令 R_{p1} 和 R_{p2} 分别等于 0,可知两处理林地有效降雨量的初始值分别为 1.28 mm 和 0.57 mm。再令 $R_{p1} = R_{p2}$,即 $0.50P - 0.28 = 0.70P - 0.90$,求得 P 等于 3.10 mm。也就是说,当次降雨量小于 3.10 mm 时,降雨对覆盖林地土壤水分的补给量小于无覆盖林地,这主要是由于覆盖所用的枯枝落叶会截留一部分降水所致;而当次降雨量在 3.10 mm 以上时,由于覆盖增加了地表粗糙度,避免了雨水直接打击地面造成土壤板结和径流损失,次降水补给量随之增加。最终,覆盖使降水入渗补给系数由无覆盖时的 0.50 提高到 0.70,遇强降水时便能起到良好的水土保持作用。

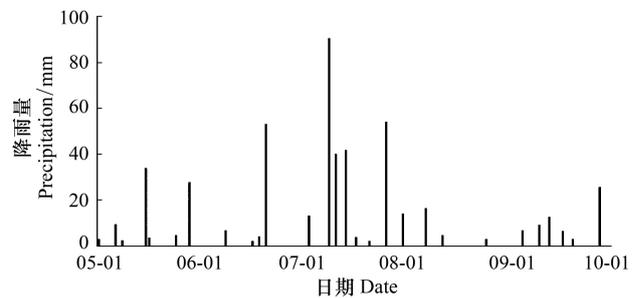


图 1 试验期间 28 场降雨事件的次降雨量

Fig. 1 Rainfall amount for 28 individual events during the experiment

表 1 不同降雨量下的土壤水分补给深度与补给量

Table 1 The recharge depth and recharge amount of different rainfall amount

降水日期 Date	次降雨量 Rainfall amount/mm	雨前表层土壤含水量 Initial soil water content /%		补给深度 Recharge depth/cm		补给量 Recharge amount/mm		损耗量 Loss amount/mm	
		对照 CK	覆盖 Mulch	对照 CK	覆盖 Mulch	对照 CK	覆盖 Mulch	对照 CK	覆盖 Mulch
		2013-07-21	2.0	8.72	13.06	20	5	0.72	0.45
2013-05-24	4.6	5.26	7.37	40	20	2.04	2.18	2.56	2.42
2013-05-06	9.4	6.14	6.65	40	40	4.46	6.42	4.94	2.98
2013-08-17	16.4	8.29	13.69	60	60	8.00	9.06	8.40	7.34
2013-05-28	27.7	7.28	8.04	40	80	12.23	19.82	15.47	7.88
2013-07-12	40.0	12.29	14.87	60	80	19.26	24.85	20.74	15.15
2013-06-22	53.2	5.65	7.70	80	100	29.28	39.78	23.92	13.42
2013-07-08	90.3	7.82	9.98	120	140	44.00	61.60	46.30	28.70

2.1.2 覆盖对林地降雨入渗深度的影响

降雨量是影响降雨入渗深度的主要因子之一。由表 1 可知,两处理林地次降雨入渗深度都表现出随降雨量增加而增加的趋势。相比之下,当降雨量小于 9.4 mm 时,雨后相同时间内,覆盖林地的土壤水分补给深度小于对照林地;降雨量大于 9.4 mm 时,则反之。

观测期内降雨密集,连续的降雨有利于土壤水分向深层补充(图 2)。以 7 月 15 日为起点,至 8 月 1 日、8 月 16 日和 8 月 31 日,对照林地土壤水分分别下渗到了 160 cm、180 cm 和 200 cm;覆盖林地则下渗到了 180 cm、200 cm 和 220 cm。截至 9 月 14 日时,在覆盖林地,降雨下渗至了 260 cm,而在对照林地,土壤水分入渗深度只有 220 cm,且对新人渗土层的入渗量也明显小于前者。土壤水分补给深度随补给量增加而增加。覆盖增加了林地土壤水分补给量,引起上下土层之间更大的水势差,因而为土壤水分的持续下渗提供了更有利条件。

2.2 覆盖对林地土壤水分存储的影响

在充沛的降水补给下,整个柠条生长季,两处理林地 0—380 cm 剖面土壤水资源均呈现不同程度地增加(图 3)。对比分析结果显示,生长季初,两处理林地土壤水资源接近,到生长季末,覆盖林地土壤水资源比未

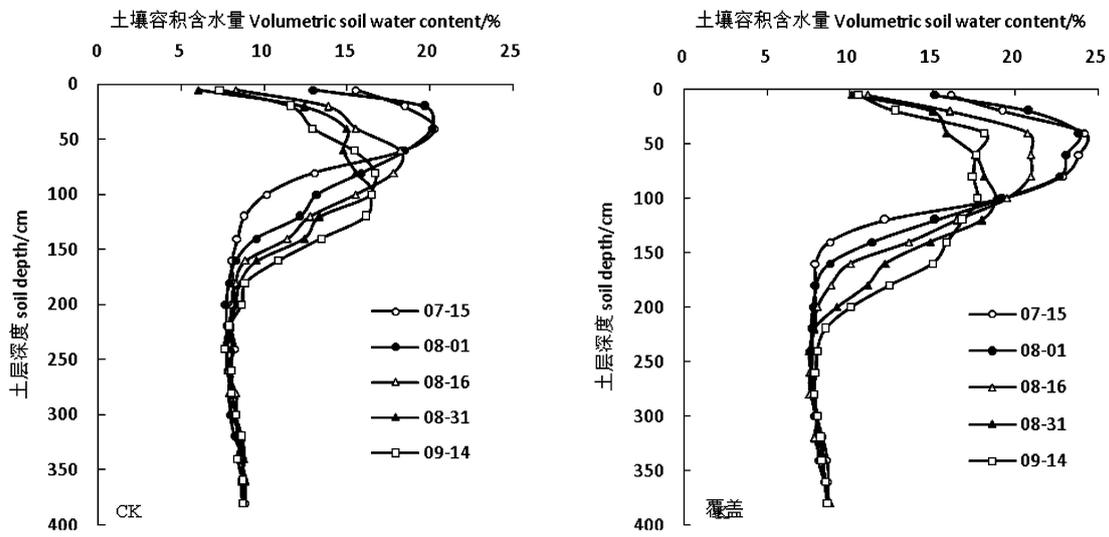


图 2 连续降雨条件下覆盖对降雨入渗深度的影响

Fig.2 Effects of mulching on infiltration depths under continuous rainfall conditions

覆盖林地高出了 54.58 mm。事实上,整个观测期内覆盖林地土壤水资源一直大于未覆盖林地,说明覆盖对平茬林地剖面土壤水资源有正效应。由于覆盖在降雨量较大时可显著地增加次降水入渗量,所以这种正效应在强降水过后体现地更为明显。其中,在 7 月 15 日,两林地土壤水资源相差达到了 61.81 mm。

从图 4 可以看出,两处理林地土壤含水量的垂直变化规律大致相同。除了近地表土层(0—40 cm)含水量受蒸散发作用及生长季末新一轮降雨的影响而呈现波动性变化以外,对照林地和覆盖林地的剖面土壤含水量均呈现出先减少后稳定的变化趋势。尽管如此,二者在土壤含水量上却有显著差异。这种差异集中体现在地表到土深 260 cm 范围内:生长季初,两处理林地剖面土壤水分状况相对一致,而在生长季末,0—260 cm 范围内的覆盖林地剖面土壤含水量已显著高于对照林地。覆盖使该范围内平均土壤含水量由 12.11% 提高到 14.24%,更有效地缓解了相应土层范围内的土壤干燥化。

2.3 覆盖对林地土壤水分消耗的影响

平茬消除了柠条林冠,柠条蒸腾量几乎降为零。因此,平茬初期的林地土壤水分消耗以柠条丛间土壤蒸发为主。不久,新生柠条开始萌发,萌生林呼吸作用旺盛,蒸腾速率较高,也需要消耗一定量的土壤水分。由表 2 可知,从生长季初到生长季末,两处理林地土壤水分消耗量均呈现出先增加后减少的变化趋势,最大消耗量出现在 7 月。相比之下,覆盖林地各月土壤水分消耗量都要高于对照林地。这与覆盖增加了降水入渗密切相关。一方面,土壤水分高补给量使得覆盖林地土壤剖面,

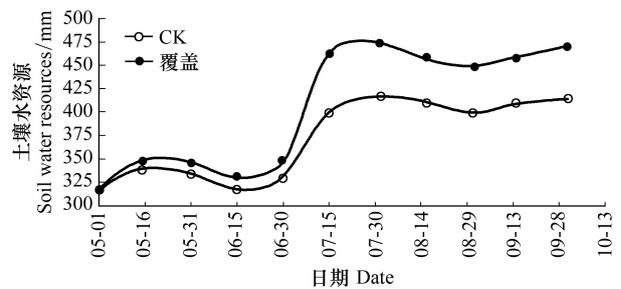


图 3 覆盖对林地 0—380 cm 范围内土壤水资源的影响

Fig.3 Effects of mulching on soil water resources in 0—380 cm

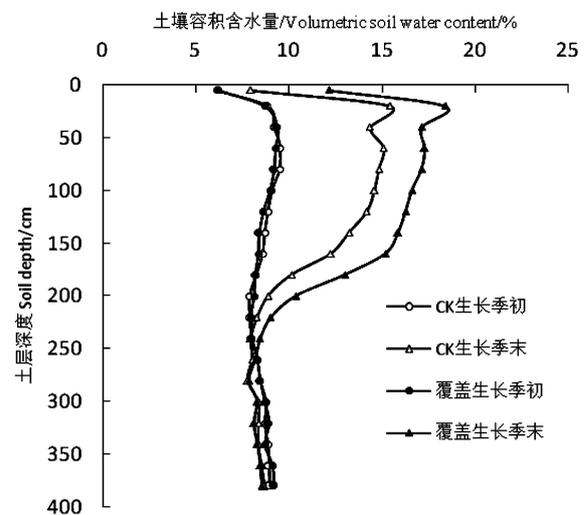


图 4 覆盖对林地 0—380 cm 土壤含水量的影响

Fig.4 Effects of mulching on soil water content in 0—380 cm

特别是近地表土层含水量较对照林地要高,土壤水分蒸发量随之增加;另一方面,土壤水分高补给量也为覆盖林地萌生林的生长发育提供了更佳的水分环境,导致其株高和基径的生长速率明显均大于对照林地(图5)。柠条生长量大,自然需要消耗更多的水分。整个生长季,覆盖林地耗水量比对照林地多出了 37.56 mm。

表 2 覆盖对林地各月土壤水分消耗量的影响

Table 2 Effects of mulching on monthly soil water consumption

项目 Item	处理 Treatment	月份 Month					合计 Total
		5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	
降雨量 Rainfall amount		84.20	65.90	258.50	23.90	63.40	495.90
补给量 Recharge amount	CK	39.74	35.36	126.92	11.47	32.83	246.33
	覆盖	57.40	47.81	174.72	13.43	45.57	338.94
变化量 Change amount	CK	16.46	-4.10	86.67	-18.08	14.96	95.91
	覆盖	28.99	2.35	123.76	-24.21	20.54	151.43
消耗量 Consume amount	CK	23.28	39.46	40.25	29.56	16.52	149.06
	覆盖	28.41	45.47	50.96	37.65	23.13	186.62

3 讨论

如何最大限度地拦蓄降水^[18],减少地表径流和蒸发损失^[19],增加土壤水库的容蓄能力,是解决半干旱黄土丘陵区人工林草地土壤干燥化问题的根本所在。本研究表明,枝条覆盖能明显增加次降水对平茬柠条林地的入渗深度和补给量,使降水入渗补给系数由 0.50 增加到 0.70,雨水资源化率得到显著提高,水土流失现象也得到有效抑制。理论上,覆盖在增加地表粗糙度的同时,还可起到遮阴的作用,从而降低乱流热通量和土壤热通量^[20]。但是,本研究在试验设计之初没有区分土壤水分无效蒸发量和萌生林生长发育耗水量,致使覆盖对土壤水分蒸发的抑制作用未被证实,仅得到了“试验期间覆盖林地各月土壤水分消耗量均大于对照林地”的结论。高鹏程等^[8]研究表明,在初始含水量较低时,秸秆覆盖的保水效果更加显著。类似地,枝条覆盖

在干旱对柠条林地的保水作用可能更佳。而在丰水年,覆盖林地剖面土壤湿度明显高于对照林地,土壤蒸发量随之增加,加之覆盖林地柠条生长量大,也要消耗更多的土壤水分。尽管如此,试验期间,覆盖林地多消耗的土壤水分也仅相当于所多补给的土壤水分的 1/3。总的来说,在丰水年,枝条覆盖可明显改善平茬柠条林地土壤水分状况,为萌发柠条的生长发育提供更佳的水分条件,从而提高其生产力。

旱化人工林草地土壤水分的自然恢复,其依据在于人工林草植被进入生长衰败期后对水分利用强度的减少^[3]。这往往需要很长的时间,不仅水分恢复的速度较慢,恢复深度也比较有限^[5,21]。人工恢复,如本研究中的枝条覆盖法,可加快土壤水分恢复的进程,且恢复深度在丰水年当年已明显大于对照林地。需要指出的是,无论是自然恢复还是人工恢复,其恢复进程最终都取决于当地的年降雨量与降雨的季节分配^[22-23]。黄土丘陵区“十年九旱”、“连旱集中”的气候^[24],将是该区土壤水分恢复难以逾越的沟壑。本研究观测期较短,关于覆盖在丰水年对土壤水分所产生的积极效应能维持多久,还有待于进一步研究。此外,柠条枝条覆盖的最佳覆盖量也有待确定。

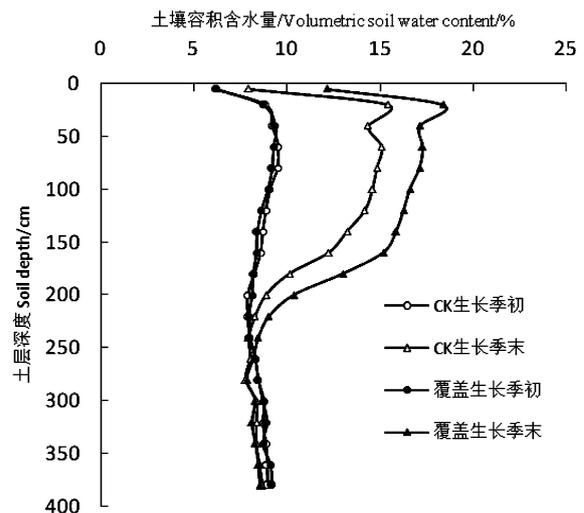


图 5 覆盖对柠条萌蘖株高和基径生长的影响

Fig. 5 Effects of mulching on height and basic diameter of sprouting *Caragana korshinskii*

参考文献 (References):

- [1] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, Warrington D N. Investigation of factors controlling the regional-scale distribution of dried soil layers under forestland on the Loess Plateau, China. *Surveys in Geophysics*, 2012, 33(2): 311-330.
- [2] Zhao J B, Du J, Chen B Q. Dried earth layers of artificial forestland in the Loess Plateau of Shanxi Province. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(1): 114-126.
- [3] 万素梅, 贾志宽, 韩清芳, 杨宝平. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干层形成及水分恢复. *生态学报*, 2008, 28(3): 1045-1051.
- [4] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2008, 143(1/2): 91-100.
- [5] 程积民, 万惠娥, 王静, 雍绍萍. 黄土丘陵区沙打旺草地土壤水分过耗与恢复. *生态学报*, 2004, 24(2): 2979-2983.
- [6] 郭忠升. 黄土丘陵半干旱区土壤水资源利用限度. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3029-3035.
- [7] 吴钦孝, 赵鸿雁. 黄土高原森林水文生态效应和林草适宜覆盖指标. *水土保持通报*, 2000, 20(5): 32-34.
- [8] 高鹏程, 张国云, 孙平阳, 张一平. 秸秆覆盖条件下土壤水分蒸发的动力学模型. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(10): 55-58.
- [9] Yang Y M, Liu X J, Li W Q, Li C Z. Effect of different mulch materials on winter wheat production in desalinized soil in Heilonggang region of North China. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2006, 7(11): 858-867.
- [10] 蔡太义, 贾志宽, 黄耀威, 黄会娟, 杨宝平, 张睿, 韩清芳, 聂俊峰. 中国旱作农区不同量秸秆覆盖综合效应研究进展 I 不同量秸秆覆盖的农田生态环境效应. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(5): 63-68.
- [11] 殷淑燕, 黄春长. 黄土高原苹果基地土壤干燥化原因及其对策. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(2): 76-80.
- [12] 黄金辉, 廖允成, 高茂盛, 殷瑞敬. 耕作和覆盖对黄土高原果园土壤水分和温度的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(11): 2652-2658.
- [13] 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.
- [14] 程积民, 万惠娥, 王静, 雍绍萍. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究. *林业科学*, 2005, 41(2): 37-41.
- [15] 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.
- [16] 张海娜, 方向文, 蒋志荣, 冯彦皓. 柠条平茬处理后不同组织游离氨基酸含量. *生态学报*, 2011, 31(9): 2454-2460.
- [17] 李耀林, 郭忠升. 平茬对半干旱黄土丘陵区柠条林地土壤水分的影响. *生态学报*, 2011, 31(10): 2727-2736.
- [18] 孙长忠. 黄土高原荒坡径流生产潜力研究. *林业科学*, 2000, 36(5): 12-16.
- [19] 李海防, 卫伟, 陈利顶, 郭二辉, 黄勇. 黄土高原林草地覆盖土壤水量平衡研究进展. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 287-293.
- [20] 邢述彦, 郑秀清, 陈军锋. 秸秆覆盖对冻融期土壤墒情影响试验. *农业工程学报*, 2012, 28(2): 90-94.
- [21] 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 韩艳锋. 黄土丘陵半干旱区人工林迹地土壤水分恢复研究. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 77-83.
- [22] 赵景波, 王长燕, 岳应利, 杜娟. 西安地区人工林土壤干层与水分恢复研究. *自然资源学报*, 2007, 22(6): 890-895.
- [23] 方新宇, 李军, 王学春, 任晶晶. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干燥化与草粮轮作水分恢复效应. *中国农业科学*, 2010, 43(16): 3348-3356.
- [24] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 433-438.