

黄土丘陵区竹节式聚水沟的蓄水特性 *

蔺君¹ 汪有科^{2,3*} 卫新东^{3,4} 肖森¹ 张雪³

(¹西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; ²中国科学院水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ³西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; ⁴长安大学资源学院, 西安 710054)

摘要 竹节式聚水沟是近年来陕北黄土丘陵区大力推广应用的一种雨水集蓄利用新技术。为了研究不同填充物(树枝、秸秆、石子)聚水沟的蓄水特性,在自然状态和模拟降雨条件下对各聚水沟土壤水分状况和拦蓄水能力进行测定,研究各种填充物的持蓄水特性。结果表明:自然状态下,5—10月各处理土壤储水量变化呈先降低后升高的趋势。5月,树枝沟、石子沟、秸秆沟和水平阶地30~200 cm 土壤储水量分别为186.76、177.23、169.26 和185.76 mm;与5月相比,10月树枝沟、石子沟和秸秆沟土壤储水量分别增加14.24、20.28 和21.23 mm,水平阶地降低6.52 mm。10月各处理30~200 cm 垂直剖面上土壤水分恢复深度不同,秸秆沟和树枝沟恢复深度最大,达到140 cm,石子沟次之,为110 cm,水平阶地恢复深度最小,仅为80 cm。模拟降雨条件下不同填充物聚水沟的拦蓄水总量为:秸秆沟(99.5 L)>石子沟(91 L)>树枝沟(71.5 L)。浸水试验测得树枝和秸秆的持水率与浸水时间存在对数函数关系,而吸水速率与浸水时间存在幂函数关系,持水率与吸水速率之间呈负对数关系。秸秆的吸持水能力较树枝强;石子的吸持水能力很弱,随时间基本不发生变化,持水率与吸水速率之间呈线性负相关。3种聚水沟在黄土丘陵区均具有较好的推广应用价值,以秸秆沟的拦蓄水、持水效果最好。

关键词 竹节式聚水沟 持蓄水特性 土壤水分 黄土丘陵区

文章编号 1001-9332(2013)12-3373-08 **中图分类号** S157.6, S278 **文献标识码** A

Water impounding characteristics of bamboo-shaped rainwater harvesting ditch in the hilly loess region. LIN Jun¹, WANG You-ke^{2,3}, WEI Xin-dong^{3,4}, XIAO Sen¹, ZHANG Xue³ (¹College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ⁴College of Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(12): 3373–3380.

Abstract: Bamboo-shaped rainwater harvesting ditch (BRHD) is a new water harvesting and application technology being promoted in the hilly loess region of North Shannxi Province. This paper measured the soil moisture condition and water storage capacity of BRHDs filled with straw, branch or gravel through field and simulated rainfall experiments to evaluate the water holding and absorption capacity of different BRHD fillers. From May to October, the water storage of BRHDs showed a decrease trend at first and then increased in field experiment. The water storage depths within 30–200 cm profile of branch ditch (BD), gravel ditch (GD) and straw ditch (SD) were 186.76, 177.23 and 169.26 mm in May, respectively, and increased by 14.24, 20.28 and 21.23 mm in October, respectively. In contrast, the water storage depth of the level bench was reduced by 6.52 mm in October from 185.76 mm in May. The soil water restoration depth was different between BRHDs with different fillers and the level bench within 30–200 cm profile in October. The SD and BD had the deepest restoration depth (140 cm), followed by GD (110 cm), and the level bench was the minimum (80 cm). Through rainfall simulation experiment, the amount of water intercep-

*“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD29B04)和陕西省科技统筹创新工程项目(2011KTCL02-02)资助。

**通讯作者. E-mail: gizwyk@vip.sina.com

2013-03-22 收稿, 2013-09-25 接受.

ted by BRHD was in the order of SD (99.5 L) > GD (91 L) > BD (71.5 L). The water-holding rate of straw and branch showed logarithmic function with soaking time, while the water-absorption rate followed a power function. Moreover, there was a negative logarithm correlation between water-holding rate and water-absorption rate. Straw showed a better water holding and absorption capacity than branch. Gravel had a weak water holding and absorption capacity which was almost not changed during soaking, while it displayed a negative liner correlation between water holding rate and absorption rate. The three kinds of BRHDs could be applied in the hilly loess region, and that filled with straw would exhibit the best capacity of water interception and holding.

Key words: bamboo-shaped rainwater harvesting ditch; water holding and impounding characteristics; soil water content; hilly loess region.

土壤水分是影响黄土丘陵半干旱区植被生长发育和生态环境恢复的主要因子。该区土层深厚,自然降水几乎成为浅层土壤水分补给的唯一来源。由于黄土丘陵区降水不足,外加长期不合理的土地利用,致使土壤水分过度开发,出现了严重的土壤水分亏缺,造成了农作物产量低而不稳^[1-2]、林木生长不良^[3]、土壤干燥化加剧^[4-5]等严重后果。水土保持措施是黄土丘陵区改造下垫面性质的主要人类活动因素,直接影响到土壤水分的静态分布和动态过程^[6],因此有关水土保持措施与土壤水分相互作用的研究历来备受关注^[7-10]。但长期以来,大部分研究主要集中在传统措施对土壤水分影响方面,专门针对黄土丘陵区生态经济林建设提出的新措施研究较少。在充分借鉴前人研究基础上,本文提出了一项新的水土保持措施——竹节式聚水沟技术。该措施是在坡地林木株间沿等高线开挖壕沟,之后在沟内填充蓄水材料并压实,以期发挥最大的聚水保墒功效。前期相关研究结果表明,该措施较水平阶地有更强的聚水改土效果^[11]。为了进一步探明该措施的持蓄水特性,本文对自然状态和模拟降雨条件下不同填充物聚水沟土壤水分和拦蓄水量进行测定,同时对3种不同填充材料的持蓄水能力进行室内浸水试验,旨在为竹节式聚水沟的实地应用提供理论依据,使当地降水资源得到有效利用,为当地实现生态、经济双赢的可持续发展提供新的土壤水分增效方式和途径。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验于2012年5—10月在陕西省米脂县远志山西北农林科技大学试验基地($37^{\circ}40' - 38^{\circ}06' N$, $100^{\circ}15' - 110^{\circ}16' E$)进行,属于典型的黄土高原丘陵沟壑区。该区属中温带半干旱气候,根据米脂县多年气象数据,年均温 $8.8^{\circ}C$, $\geq 10^{\circ}C$ 积温 $3281^{\circ}C$,

年日照时数2372.7 h,年均无霜期165 d;年均降雨量451.6 mm,降水多集中于7—9月,最大年降雨量704.8 mm,最小年降雨量186.1 mm。试验区土壤为黄绵土,剖面发育不明显,土质均一,渗透性能良好,属于粉质壤土,土壤容重为 $1.2 \sim 1.35 g \cdot cm^{-3}$,0~100 cm土壤湿润层的田间持水量约20%,有效N、P、K含量分别为 34.73 、 2.90 、 $101.9 mg \cdot kg^{-1}$,有机质含量为 $2.1 g \cdot kg^{-1}$,pH为8.6,土壤较贫瘠。

自然状态下聚水沟土壤水分监测试验区选择在基地内南向坡中位置,坡度 30° ,地形平整均一,栽植枣树,株行距为 $2 m \times 3 m$,田间密度为 1665 株 $\cdot hm^{-2}$ 。于2012年4月在原有水平阶地基础上采用聚水沟的整地方式,聚水沟长 \times 宽 \times 深为 $100 cm \times 30 cm \times 30 cm$ 。模拟降雨条件下土壤水分监测选择在未栽植枣树的坡地进行,其他条件均与自然状态下相同。聚水沟示意图如图1所示。

1.2 试验方法

在试验区内地内枣树株间分别布设填充碎石子($1.0 cm < d < 1.5 cm$)、秸秆和树枝(长度为 $10 \sim 15 cm$)的3种聚水沟各15个,聚水沟表面积为 $0.3 m^2$,同时选取试验区内未布设聚水沟的水平阶地作为对照,单个聚水沟的填充量分别为:石子沟 $225 kg$,秸秆沟 $9 kg$,树枝 $26.1 kg$ 。土壤水分测定采用智能中子水分仪法,用来测定水分的中子仪铝合金套管分别安装在聚水沟的上侧、中间和下侧,水平阶安装位置与聚水沟相同,用3个管测得数据的平均值代

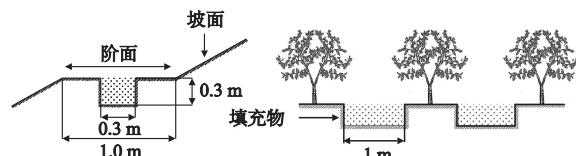


图1 竹节式聚水沟断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the BRHD profile.

表各处理的土壤水分,重复3次。测定前对中子仪进行标定,标定方程为: $y = (0.0557x + 4.9673) \times 100\%$ (x 为中子数, y 为土壤体积含水量)。定位监测自然条件下聚水沟土壤水分,5—10月每月两次,间隔15 d左右。各聚水沟从沟底部开始测定,水平阶地从地表以下10 cm处开始测定,每间隔10 cm深度测定记录一次。降雨量用全自动雨量计测得。

选择与自然条件下定位监测小区地形相似的裸地作为模拟降雨试验小区,小区面积与自然条件下聚水沟拦水面积相同(6 m^2),分别布设上述3种聚水沟,同时在每种聚水沟小区旁边建相同面积径流小区,用以收集径流。采用悬挂微喷系统自制人工降雨装置进行模拟降雨试验,雨强率定结果为 $0.92\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,能够反映当地降雨特征。记录降雨开始时间和聚水沟蓄满时间,测量径流小区径流量。聚水沟的蓄水总量计算公式为:

$$W = ixt \times 0.3 + Q/2$$

式中: W 为聚水沟蓄水总量(L); i 为降雨强度($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); t 为聚水沟蓄满历时(min); Q 为蓄满产流量(L)。

用室内浸泡法测定各种填充材料的持水率及其吸水速率^[12]。将3种材料带回实验室后,分别称其自然状态下质量及除石子外的2种材料烘干后质量(80℃下烘至恒量),以石子自然状态质量和其余2种材料干质量推算填充物蓄积量。将填充材料按照田间密度装入直径10 cm、高20 cm的PVC管中,管下部用细尼龙网封闭,浸没于清水中,在水中分别浸泡0.25、0.5、1、1.5、2、4、6、8、10、12、24 h后称量。每次取出后静置5 min左右,直至填充材料不滴水为止,迅速称各自湿质量并进行记录,由此计算各填充材料在不同浸水时间的持水量、持水率和吸水速率,每种填充材料各重复3次。

2 结果与分析

2.1 自然条件下聚水沟土壤水分状况

2.1.1 不同填充物聚水沟土壤储水量的季节动态从图2可以看出,2012年5—10月,降雨月动态呈双峰变化趋势,最高值分别出现在7和9月,7—9月降雨总量占整个生长季的56.2%。7月以前,聚水沟和水平阶地土壤储水量一直在降低,这与降雨量变化趋势相反。进入雨季以后,土壤储水量开始增加,其动态变化与降雨变化趋势一致。各聚水沟土壤储水量均在10月达到最大值,8月降到最小值,10月比5月的土壤储水量有所增加,其中,树枝沟、石

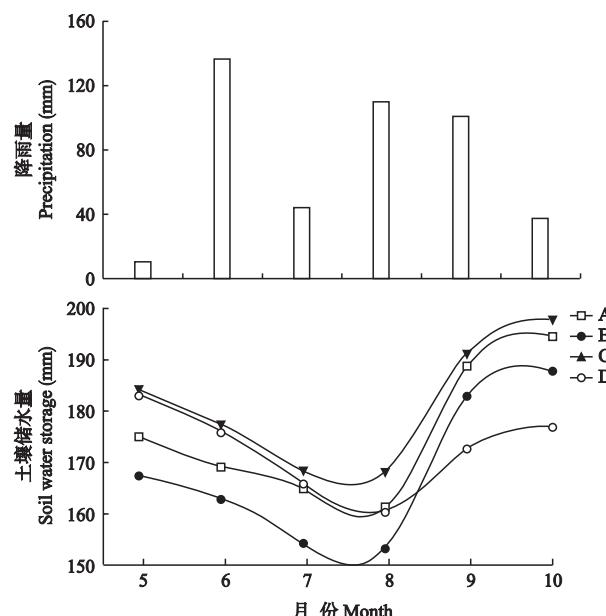


图2 不同措施30~200 cm土壤储水量和降雨量的变化
Fig. 2 Dynamics of 30~200 cm soil water storage under different measures and precipitation.

A: 石子沟 Gravel ditch; B: 稻秆沟 Straw ditch; C: 树枝沟 Branch ditch; D: 水平阶地 Level bench. 下同 The same below.

子沟和稻秆沟分别增加14.24、20.28和21.23 mm。水平阶地的土壤储水量在5月最大(185.76 mm)、8月最低(162.30 mm),整个雨季过后土壤水分没有得到恢复,反而降低了6.52 mm。水平阶地在5月的土壤储水量仅次于树枝沟,但之后各月水平阶地储水量的增加效果并不明显,远远低于各类型聚水沟,特别是7月以后,各聚水沟土壤储水量大幅增加,最终明显高于水平阶地。10月,树枝沟、石子沟和稻秆沟分别比水平阶地的储水量高21.79、18.28和11.27 mm。说明降雨对聚水沟和水平阶地土壤水分的补偿能力不同,通过布设聚水沟,能够在水平阶地基础上进一步增加土壤水分储量。 t 检验结果表明,各种聚水沟与水平阶地土壤储水量无显著性差异,但各种聚水沟之间土壤储水量差异均达到极显著水平。这说明聚水沟较水平阶地对土壤水分的恢复效果更明显,其恢复效果与沟内填充的材料密切相关。
2.1.2 不同填充物聚水沟土壤水分的垂直分布受降雨补给和土壤蒸发、植物蒸腾作用的影响,各聚水沟和水平阶地5—10月土壤水分随土层深度发生了明显变化。由图3可知,5—10月,各种措施80 cm以上土壤水分都有不同程度恢复,80 cm以下土壤水分都存在不同程度的消耗。10月,石子沟土壤水分在0~110 cm深度均得到恢复,稻秆沟和树枝沟恢复深度可达到140 cm,水平阶地土壤水分恢复深度最浅,仅80 cm。说明在水平阶地上开挖聚水沟,

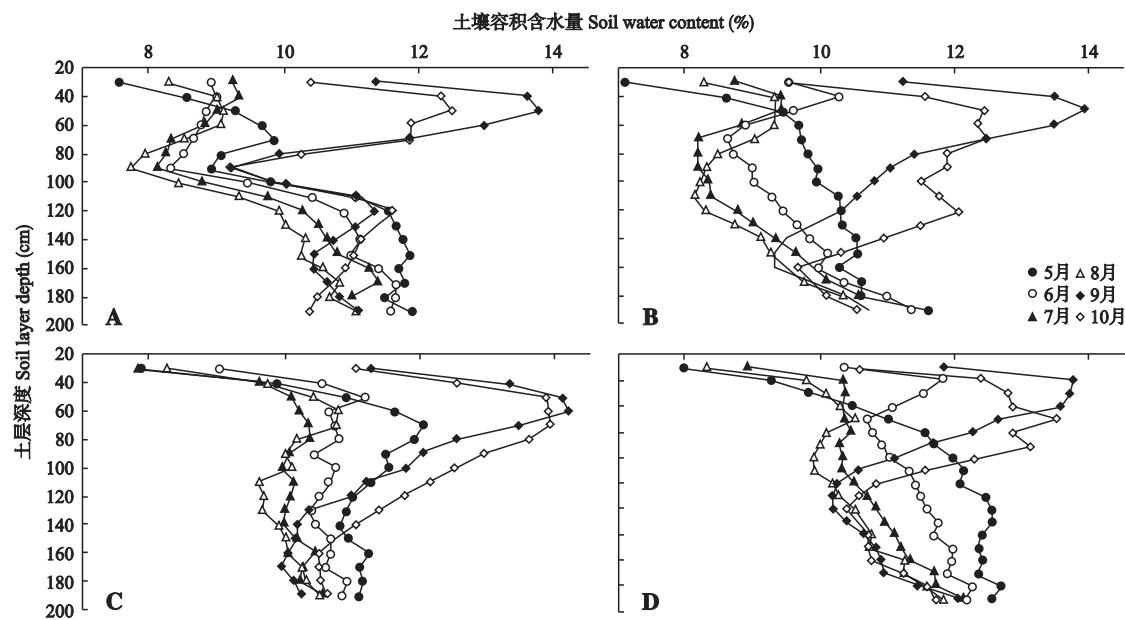


图3 5—10月不同措施聚水沟土壤水分的垂直变化

Fig. 3 Vertical change of soil water under different measures from May to October.

可以进一步增加土壤水分恢复深度。5月,各聚水沟和水平阶地垂直剖面土壤水分随深度总体上均呈递增趋势,这主要是因为表层土壤蒸发损失水分较多,而5月是枣树萌芽展叶期,根系吸水很弱,下层水分较高。10月,石子沟垂直剖面上土壤水分最大值出现在50 cm 深处,50 cm 以下土壤水分迅速降低,其中,90~120 cm 土壤水分与5月基本持平;秸秆沟和树枝沟土壤水分均在50 cm 处达到最大,在50~80 cm 深度范围内土壤水分基本保持恒定,80 cm 以下明显下降;水平阶地土壤水分在30~70 cm 范围内基本保持恒定,70 cm 以下土壤水分逐渐降低。在黄土丘陵沟壑区,土壤水分不仅与降水有关,还与植被根系吸水和土壤蒸发有密切关系。聚水沟和水平阶地均有不同程度的保水作用,聚水沟保水作用明显表现在30~140 cm 土层内,由于沟内填充材料的孔隙状况和吸水性不同,降雨的补偿深度也有所不同。水平阶地80 cm 以上有降雨补偿,土壤水分较5月明显升高,这与张北赢等^[9]研究结果一致。各措施恢复深度以下土层的土壤水分消耗主要是由于枣

树生长耗水所致。60 cm 以上土层的土壤水分在9月达到最大值,与该时期降水较多、土面蒸发和枣树耗水减少有关。

2.2 模拟降雨条件下聚水沟蓄水量

聚水沟拦蓄水量的多少不仅取决于沟本身大小,也与沟内填充材料的种类和蓄积量有关。根据模拟降雨试验结果,分析得到不同填充材料聚水沟的拦蓄水总量。从表1可以看出,不同填充材料聚水沟的蓄满时间不同,树枝沟最先蓄满,石子沟次之,碎秸秆沟蓄满时间最长,说明聚水沟内填充不同材料后其拦蓄水总量不同。聚水沟拦蓄水总量大小顺序为:碎秸秆沟(99.5 L)>石子沟(91 L)>树枝沟(71.5 L)。这与自然条件下对3种聚水沟土壤水分的监测结果一致,即在雨季末期,秸秆沟土壤储水增量最多,石子沟次之,树枝沟最低。沟内填充物自身性质不同是导致聚水沟拦蓄水量存在差异的主要原因。与石子和树枝相比,秸秆不仅吸水能力强而且填充入沟后其间大孔隙很多,坡上部的径流一部分被秸秆吸持,另一部分通过孔隙流到沟底,不断下渗。

表1 模拟降雨条件下聚水沟拦蓄水量

Table 1 Total water-interception amount of BRHD under simulated rainfall condition

聚水沟类型 Type of BRHD	坡度 Slope gradient (°)	前期土壤含水量 Initial soil water content (%)	降雨强度 Rainfall density (mm·min ⁻¹)	蓄满历时 Saturated duration (min)	降雨量 Precipitation (mm)	径流量 Runoff (L)	拦蓄水总量 Water impounding amount (L)
树枝沟 BD	30	9.2	0.92	47	43.45	117.06	71.5
秸秆沟 SD	30	9.0	0.92	68	62.65	161.4	99.5
石子沟 GD	30	9.5	0.92	59	54.28	149.63	91

虽然石子的吸水能力最差,填充入沟后所形成的孔隙比秸秆和树枝小,但它可以起到分散、过滤和缓冲径流的作用,坡上产生的径流入沟后,会通过这些较小孔隙在沟内均匀分布,之后再缓慢到达沟底部,最大限度地避免了含沙水流对沟底土壤孔隙的淤塞,增加了沟内水分的入渗量。树枝填充入沟后会形成很大的孔隙,含有泥沙的径流入沟后大部分直接到达沟底,在沟底缓慢淤积,对径流在沟内的下渗产生一定的阻碍作用,因此较其他两种沟的拦蓄水量小。

2.3 聚水沟不同填充材料的持水能力

2.3.1 填充材料持水量与持水率 自然状态下,每种聚水沟实际填充密度为:砾石 $2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,树枝 $290 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,秸秆 $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 按照田间密度在室内装填3种填充物,进行室内浸水试验,经持水量深度换算后得到3种不同填充物的持水量(表2). 不同填充物蓄积量计算结果为:石子>树枝>秸秆,这主要是因为不同材料自身物理性质存在差异,以及填充量不同造成的. 石子密度最大,填充量最多;树枝材料本身密实,但填充后空隙较大;碎秸秆质地最轻、松软有弹性,填充密度最低,蓄积量最少. 从不同填充物持水量随时间变化来看,树枝和秸秆在浸水24 h以后达到最大持水量,其中,树枝持水量从7.12 mm增加到8.70 mm,增长率为22.2%,秸秆持水量从3.46 mm增加到5.32 mm,增长率为53.8%;石子在浸水0.25 h后持水量基本保持不变,最小仅为0.94 mm.

持水率表征不同填充材料的潜在持水能力^[9]。浸水开始后,除石子外的2种填充物持水率迅速增加,随着浸水时间延长,持水率趋于稳定,石子持水

表2 不同填充物的填充量和持水量

Table 2 Filling storage and water-holding amount of different fillers

填充物类型 Type of filler	自然含水率 Water content of filler (%)	自然状态填充量 Filling amount in field (t · hm ⁻²)	填充物蓄积量 Filler storage (t · hm ⁻²)	各时间段持水总量 Water holding amount during each period (mm)												
				0.25 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h	12 h	24 h		
树枝 Branch	21.0	43.46	38.20	7.12	7.35	7.64	7.99	8.24	8.38	8.42	8.46	8.54	8.66	8.70		
秸秆 Straw	19.4	14.99	12.56	3.46	3.87	4.05	4.27	4.49	4.74	4.99	5.20	5.26	5.30	5.32		
石子 Gravel	0	363.14	363.14	0.84	0.91	0.93	0.94	0.94	0.94	0.95	0.94	0.94	0.95	0.94	0.94	0.94

表3 填充物吸水速率(V)及其与浸水时间(t)的关系式

Table 3 Equation between the water absorption rate of filler and the immersion time

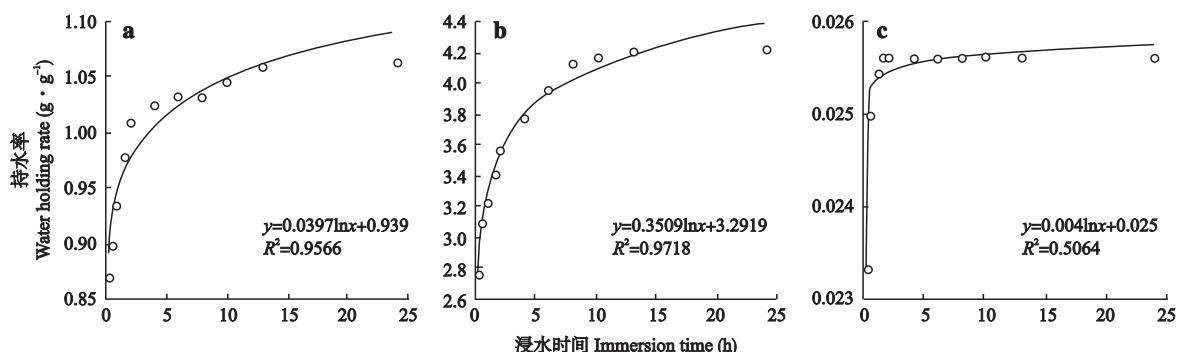


图 4 不同填充材料持水率与浸水时间的关系

Fig. 4 Relationship between the water holding rate of filler and the immersion time.

a) 石子 Gravel; b) 稻秆沟 Straw; c) 树枝 Branch. 下同 The same below.

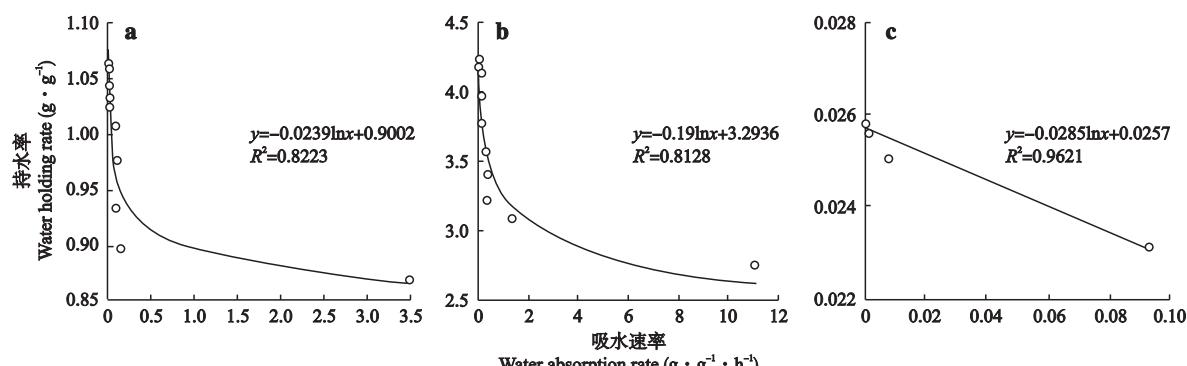


图 5 不同填充材料持水率与吸水速率的关系

Fig. 5 Relationships between water absorption rate and water holding rate of fillers.

物吸水速率与浸水时间的方程式(表3).

从图5可知,树枝和秸秆的持水率与吸水速率呈负对数关系,二者满足如下关系: $y = -alnx + b$. 式中: y 为持水率 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); x 为吸水速率 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); a 、 b 为系数. 石子的持水率与吸水速率呈线性负相关关系.

3 讨 论

水分短缺是限制干旱半干旱地区植被恢复的关键因子,由于干旱引起的植被生长缓慢、造林成活率低等问题尤为严重. 生态环境建设过程中,林木的经济生产力是生态恢复的巨大推动力,走生态与经济双高效的道路是实现半干旱地区植被恢复和可持续发展的有效途径. 有研究表明^[13~14],在我国半干旱的黄土高原地区,由于降雨量偏少、树种选择不合理以及高密度的种植方式,一些人工林地中土壤水分长期处于亏缺状态,对该区高密度种植条件下的生态经济枣林实现长期可持续发展提出了新的挑战. 通过改变微地形来增加降雨的集蓄和利用,对该区植被恢复和水土保持以及生态系统功能的改善发

挥着极为重要的作用.

本文提出的竹节式聚水沟技术属于微地形改造的一种类型,类似于传统水土保持工程措施中的竹节水平沟,不同之处在于其内部填充了其他蓄水保墒材料. 微地形的改造可以切断水分在坡面和土壤中的流路,改变了降水在自然坡面上的分配条件,促进降水就地入渗,为当地植被的恢复与防止土壤干燥化创造条件. 黄土丘陵区多是短历时的强降雨,以超渗产流为主,而雨滴对土壤的不断冲击破坏了表土层土壤结构,形成土壤结皮,改变了土壤原来的孔隙状况和紧实度,降低土壤的入渗能力,从而降低了产流的临界雨强,更增加了产流的可能性^[15]. 与黄土相比,聚水沟中填充的各种材料孔隙较大,具有更好的持蓄水能力,可以使坡面上产生的径流不断存蓄其中,起到一个小型蓄水库的作用. 材料填入沟中后,相当于把阶地上局部土壤替换成其他更容易蓄水的材料,并没有改变水平阶地的整地方式,也不会因人为踩踏而遭破坏,作为人工经济林地的一项集雨保墒措施,有较好的耐久性和实用性. 填充材料同时也改变了入沟水流的运动过程,使水流在沟内

均匀分布,避免了沟内部土壤孔隙淤塞,起到增加入渗的作用。5—10月是当地枣树的生长季,蒸腾耗水强烈,而自然降水也主要集中在该时期,是土壤水分恢复的关键阶段。在枣树生长季末,不同填充物聚水沟平均可以提高30~200 cm土层土壤储水量18.58 mm,较水平阶地增加水分垂直入渗30~60 cm。田波等^[16]用菇渣堆施来提高土壤储水量的结果与本研究结果一致。Abu-Zreig等^[17-18]在约旦利用沙砾填充水平沟来增加降水平利用率的试验结果也与本文相仿。在相同强度的模拟降雨条件下,不同填充物聚水沟蓄水量存在差异。这主要是因为不同材料的自身性质不同,导致其在沟内的填充量不同,对入沟水流吸持与再分配的能力也存在差异,进而影响到不同填充物聚水沟对坡面径流拦蓄能力的不同。本文采用室内浸水法初步研究了不同材料的吸持水能力。这只是对自然状态下的一种极限值模拟,只反映该种条件下各种材料吸持水能力的大小,可为选择适当的填充材料提供一定依据,而聚水沟整体的聚水效果发挥还要在实地应用过程中进行不断监测。

半干旱黄土区土壤肥力状况低下、土壤物理性质恶化,不仅对植被生长产生不利影响,同时也降低了区域生态系统的生产力水平^[14]。国内外很多学者已经证实土内蓄水保墒和沟内施肥措施不仅提高土壤水分含量,还可以改良土壤的物理性质^[19-20],提高土壤生产力水平^[21-23]。本研究采用碎秸秆和树枝等生物质材料填充入沟后,可以在土内不断腐解,将自身所含养分释放出来,同时由于沟内能够存蓄坡面上的水分,水分与养分相耦合,更有利于肥效的发挥,促进枣树生长。但填充材料的腐解和土壤结构与肥效的改良需要一个长期、持续的过程,其改良效果也需要长期试验去验证。而肥力状况的变化必然会引起土内微生物和土壤酶的改变。因此,今后还将开展不同填充材料聚水沟对土壤养分、土壤酶和微生物影响等方面的研究。

参考文献

- [1] Li J (李军), Chen B (陈兵), Li X-F (李小芳), et al. Soil desiccating effects of forestlands, grasslands and croplands in zones different in rainfall pattern on the Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2008, **45**(1): 40~49 (in Chinese)
- [2] Deng Z-Y (邓振镛), Zhang Q (张强), Wang Q (王强), et al. Influence of water storage capacity on yield of winter wheat in dry farming area in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(18): 5281~5290 (in Chinese)
- [3] Wang Z-Q (王志强), Liu B-Y (刘宝元), Xu C-D (徐春达), et al. Survival capability analysis of four kinds of artificial forests in Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2002, **16**(4): 25~29 (in Chinese)
- [4] Chen HS, Shao MA, Li Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2008, **143**: 91~100
- [5] Wang L, Wang QJ, Wei SP, et al. Soil desiccation for loess soils on natural and regrown areas. *Forest Ecology and Management*, 2008, **255**: 2467~2477
- [6] Mu X-M (穆兴民). Interaction of soil and water conservation measures with soil water in the Loess Plateau in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2000, **16**(2): 41~45 (in Chinese)
- [7] Liu XH, He BL, Li ZX, et al. Influence of land terracing on agricultural and ecological environment in the Loess Plateau regions of China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **62**: 797~807
- [8] Zhang H (张海), Zhang L-X (张立新), Bai Y-F (柏延芳), et al. Effects of management models in sloping fields on soil moisture and vegetation restoration in the hilly and gully regions of the Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2007, **23**(11): 108~113 (in Chinese)
- [9] Zhang B-Y (张北赢), Xu X-X (徐学选), Liu W-Z (刘文兆). Soil water condition under different measures of soil and water conservation in loess hilly and gully region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2009, **25**(4): 54~58 (in Chinese)
- [10] Li P (李萍), Zhu Q-K (朱清科), Zhao L-L (赵磊磊), et al. Soil moisture of fish-scale pit during rainy season in loess hilly and gully region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2011, **27**(7): 76~81 (in Chinese)
- [11] Lin J (蔺君), Wang Y-K (汪有科), Wei X-D (卫新东), et al. Effects of bamboo knot-shaped ditches on rainwater harvesting and soil structure amelioration in the hilly loess region of China. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2013, **28**(1): 163~169 (in Chinese)
- [12] Zhang F (张峰), Peng Z-D (彭祚登), An Y-X (安永兴), et al. Water-holding characteristics of the litter under main tree species plantations in Beijing Xishan mountainous areas. *Guangxi Forestry Science* (广西林业科学), 2010, **46**(10): 6~14 (in Chinese)
- [13] Cao SX, Chen L, Xu CG, et al. Impact of three soil types on afforestation in China's Loess Plateau: Growth and survival of six tree species and their effects on soil properties. *Landscape and Urban Planning*, 2007, **83**: 208~217
- [14] Cao SX, Chen L, Shankman D, et al. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: Lessons in ecological restoration. *Earth-Science Reviews*, 2011, **104**: 240~245

- [15] Cheng Q-J (程琴娟), Cai Q-G (蔡强国), Zheng M-G (郑明国). Effects of soil crust on critical rainfall intensity of runoff production. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2007, **27**(5): 678–682 (in Chinese)
- [16] Tian B (田波), Shi L-H (时连辉), Wang X-F (王秀峰), et al. Effect of spent mushroom compost on soil quality and turf growth. *Chinese Journal of Grassland* (中国草地学报), 2011, **33**(5): 101–106 (in Chinese)
- [17] Abu-Zreig M, Mousa A, Nisreen H. Rainfall harvesting using sand ditches in Jordan. *Agricultural Water Management*, 2000, **46**: 183–192
- [18] Abu-Zreig M, Abdullah T. Field evaluation of sand-ditch water harvesting technique in Jordan. *Agricultural Water Management*, 2011, **98**: 1291–1296
- [19] Zhang J-J (张建军), Wang Y (王勇), Fan T-L (樊廷录), et al. Effects of different tillage and fertilization modes on the soil physical and chemical properties and crop yield under winter wheat / spring corn rotation on dryland of east Gansu, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(4): 1001–1008 (in Chinese)
- [20] Shi L-H (时连辉), Han G-H (韩国华), Zhang Z-G (张志国), et al. Effect of mulching with straw com-
- posts on soil properties of landscape. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2010, **26**(1): 113–117 (in Chinese)
- [21] Zougmoré R, Zida Z, Kambou NF. Role of nutrient amendments in the success of half-moon soil and water conservation practice in semiarid Burkina Faso. *Soil and Tillage Research*, 2003, **71**: 143–149
- [22] Zougmoré R, Mando A, Stroosnijder L, et al. Economic benefits of combining soil and water conservation measures with nutrient management in semiarid Burkina Faso. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, **70**: 261–269
- [23] Li T-L (李廷亮), Xie Y-H (谢英荷), Hong J-P (洪坚平), et al. Change characteristics of soil moisture and nutrients in rain-fed winter wheat field under different fertilization modes in Southern Shanxi of China during summer fallow period. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(6): 1601–1608 (in Chinese)

作者简介 蔺君,男,1986年生,硕士研究生。主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: nmgjnlj@163.com

责任编辑 杨弘
