

# 黄土丘陵沟壑区竹节式聚水沟聚水改土效应研究

蔺 君<sup>1</sup>,汪有科<sup>2,3\*</sup>,卫新东<sup>3,4</sup>,肖 森<sup>1</sup>,赵 霞<sup>3,5</sup>,卢俊寰<sup>3,6</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨陵 712100;2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所,陕西 杨陵 712100;  
3. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨陵 712100;4. 长安大学 资源学院,陕西 西安 710054;  
5. 甘肃农业大学 工学院,甘肃 兰州 730070;6. 广西壮族自治区国土资源厅 土地整理中心,广西 南宁 530028)

**摘 要:**试验以水平阶地为对照,于7-9月在典型黄土丘陵沟壑区陕西省米脂县测定了竹节式聚水沟中间、上侧和下侧的土壤水分,并于4月初和9月末测定了聚水沟样地的土壤容重。结果表明:7-9月,各时期聚水沟整体土壤水分均高于水平阶地且差异均达到极显著性水平( $p<0.01$ ),200 cm土层内聚水沟的储水量比水平阶地最高增加了53.54 mm,增长率为29.5%;各时期聚水沟不同位置上土壤水分含量表现为沟中间>上侧>下侧,且中间与上、下侧土壤水分差异各时期均达到极显著性水平,上侧土壤水分变化幅度较下侧小;各时期聚水沟整体土壤水分含量表现为0~40 cm土层最高,且从7月30日后呈不断下降趋势,>40~100 cm土层次之,各时期变化幅度较小,>100~200 cm土层最低,但呈不断增长趋势;沟内填充材料可以显著降低沟底10 cm以内土层的土壤容重,增大总孔隙度( $p<0.05$ )。竹节式聚水沟较水平阶地更能增加土壤水分含量,缓解浅层土壤干层形成,同时也具有改良土壤结构的作用,作为黄土丘陵沟壑区集聚水、保墒、改土于一体的新技术具有较好的推广应用价值。

**关键词:**黄土丘陵沟壑区;竹节式聚水沟;土壤水分;土壤结构;微地形改造

**中图分类号:**S278      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2013)01-0163-07

## Effects of Bamboo Knot-shaped Ditches on Rainwater Harvesting and Soil Structure Amelioration in the Hilly Loess Region of China

LIN Jun<sup>1</sup>, WANG You-ke<sup>2,3\*</sup>, WEI Xin-dong<sup>3,4</sup>, XIAO Sen<sup>1</sup>, ZHAO Xia<sup>3,5</sup>, LU Jun-huan<sup>3,6</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
4. College of Resources, Changan University, Xian, Shaanxi 710054, China;  
5. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;  
6. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Department of Land and Resources of Guangxi, Nanning, Guangxi 530028, China)

**Abstract:** Bamboo knot-shaped water harvesting ditches (BWHD) between the rows of jujube trees across the slope were built up. The ditches were filled with crushed biological materials to retain the rainfall. The soil moisture content of BWHDs at three sampling positions (top, middle, and the bottom) between July and September were measured, while the level bench terrace was used as the control. The soil bulk density (BD) and soil porosity (P) before and after constructing the ditches were also measured. The mean overall moisture content of BWHD was higher than that of the control throughout the observation period, and the difference between BWHD and the control was highly significant ( $p<0.01$ ). BWHD significantly ( $p<$

收稿日期:2012-09-13 修回日期:2012-10-31

基金项目:国家科技支撑计划(2011BAD29B04);陕西省科技统筹创新工程(2011KTCL02-02)。

作者简介:蔺君,男,硕士研究生,主要研究方向:水土资源高效利用。E-mail: nmgjnlj@163.com

\* 通信作者:汪有科,男,研究员,博士生导师,主要研究方向:水土保持与节水灌溉。E-mail: gjzwyk@vip.sina.com

0.05) enhanced the soil water storage in 0-200 cm profile compared with the control with the maximum difference of 53.54 mm in September (29.5% higher). The mean BWHD soil moisture contents of the three sampling positions were in the order of middle>top>bottom. The difference between the middle position and the top or bottom was highly significant ( $p<0.01$ ). A comparison of the different layers showed that the overall soil moisture content was the highest in the 0-40 cm BWHD layer, although there was a decreasing trend from the end of July until the end of September. The >40-100 cm layer was higher than the >100-200 cm layer and it was relatively stable throughout the observation period. The >100-200 cm layer was the lowest, although there was an increasing trend. BWHD significantly ameliorated the physical properties of 10 cm bottom soil layer by reducing the  $BD$  and increasing the  $P$  ( $p<0.05$ ). Therefore, BWHD improved the soil moisture level and reduced soil desiccation in the 0-200 cm soil layers compared with the control, and they had a better soil structure ameliorative function. BWHD could have widespread value as a new application that could promote water harvesting, moisture conservation, and soil structure amelioration in the Hilly Loess Region of China.

**Key words:** Hilly Loess Region; bamboo knot-shaped water harvesting ditches; soil moisture; soil structure; micro-topography reconstruction

黄土丘陵沟壑区是黄土高原水土流失最严重的地区,年土壤侵蚀模数可以达到  $2\,000\sim2\,500\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$  [1]。降水是维持当地植物生长的唯一水分来源,土壤水分不足已经成为限制林木正常生长发育及水土保持效益发挥的瓶颈。长期的水土流失导致该地区土壤质量下降、地形破碎、沟壑纵横,外加水资源短缺这一限制因子,成为阻碍本地区经济可持续发展与生态环境脆弱的根本原因。在当地发展生态型经济枣林是控制水土流失,防止土壤退化,改善生态环境和推动地区经济发展的有效措施。有研究表明 [2-4],在黄土区各类林、草地中普遍存在着土壤干燥化的现象,而土壤干燥化不仅限制已有植被的生长发育,同时也会对黄土高原的生态恢复与重建带来不可逆转的损害。因此在当地发展合理密度的生态经济林,应该考虑到采取适当的水土保持措施,充分集蓄有限的降水,不断提高土壤质量,以保证林木正常生长所需的水分条件和土壤环境。

众多学者对黄土区各种水土保持措施与土壤水分之间的关系进行了大量研究,景维杰 [5] 等人研究了黄土丘陵区不同间距水平阶的集水造林效果。穆兴明 [6] 研究了坡面工程措施和植被措施对土壤水分的影响。张金柱 [7] 等的研究表明隔坡沟状梯田能够改善土壤水分状况。张海 [8] 等比较了隔坡梯田、大台田、大鱼鳞坑等坡地治理模式的土壤水分状况。近几年,张北赢 [9] 等研究对比了梯田、鱼鳞坑、水平阶等措施在雨季前后的土壤储水状况。还有研究表明,土内的蓄水保墒措施对土壤结构有明显的改良作用 [10-12]。王珍 [13-14] 等进行了不同方式的秸秆还田试验研究,认为粉碎并氨化后的秸秆施入土壤中,更有利于土壤有效水分的保存,同时还能显著

改善土壤团聚结构,降低土壤容重,增加土壤孔隙度,起到改良土壤结构的功能。但长期以来,对各种水土保持措施的聚水改土效果同时进行研究的比较少,特别是针对黄土丘陵区生态经济林地特点而提出更合理的水土保持措施更是鲜有报道。

在充分借鉴前人研究成果的基础上,作者提出了一项新的集聚水、保墒与改土一体化的水土保持措施,竹节式聚水沟技术。于2011年4-9月在陕西省米脂县山地微灌枣树示范基地布设聚水沟,以水平阶地为对照,进行定位试验,初步研究了竹节式聚水沟的聚水改土效应,旨在探明竹节式聚水沟的土壤水分变化规律及对土壤结构的影响,为正确评价聚水沟的水分生态效应提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验设于2011年4-9月在陕西省米脂县山地微灌枣树示范基地,属于典型的黄土高原丘陵沟壑区。该区年平均温度为  $8.8^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温  $3\,281^{\circ}\text{C}$ ,日照时数为  $2\,372.7\text{ h}$ ,无霜期  $160\sim170\text{ d}$ 。年平均降水量  $451.6\text{ mm}$ ,最大年降水量  $704.8\text{ mm}$ ,最小年降水量  $186.1\text{ mm}$ 。降水量少,蒸发量大,且降水年内分配不均,属于中温带半干旱性气候。2011年7-9月份降水量为  $368.5\text{ mm}$ ,占多年年平均降水量的  $81.6\%$ 。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  $1.2\sim1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  $0\sim60\text{ cm}$  土壤计划湿润层的田间持水量为  $20\%$  左右,有效 N、P、K 含量分别为  $34.73$ 、 $2.90$ 、 $101.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有机质含量为  $0.21\%$ ,pH 为  $8.6$ ,土壤较为贫瘠。

试验区选取在示范基地中的 9 年生旱作枣林地,东向坡中,坡度为 30°,于 2006 年采用水平阶整地,阶面宽度为 1 m,株距 2 m,行距 3 m,平均树高为 1.9 m,冠幅为 1.8 m×1.9 m,田间栽植密度为 111 株·(667 m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>。于 2011 年 4 月在枣林地选取坡度、坡位、树势一致的 2 块样地作为试验小区,每个小区面积为 200 m<sup>2</sup>,选取其中一个小区开挖规格为 1 m×0.3 m×0.3 m 的竹节式聚水沟,即在林地株间的水平阶上沿等高线开挖壕沟,之后在沟内

填充用于无土栽培的生物质蓄水材料,每个沟内填充 60 kg,该材料是由树皮、牛粪、草炭等按照一定比例搭配,再在其中添加 N、P、K 等营养元素,经自动化工序搅拌复合而成,酸碱度适宜,能提高土壤的持水、保肥、通气能力,目前被大量用于建植、育苗等行业。采用该措施之后,坡地水平阶被截成竹节样的长方形蓄水坑,从平面上看,就像一段段剖开的楠竹,故而得名。另一个小区为水平阶样地。竹节式聚水沟示意图如图 1。

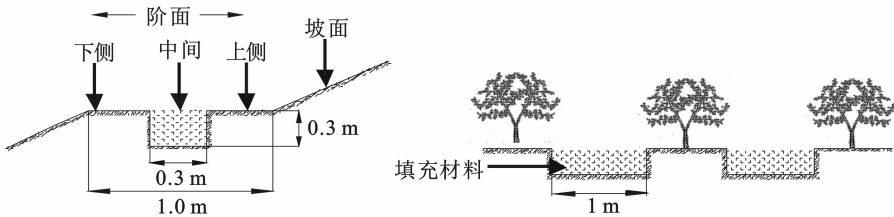


图 1 竹节式聚水沟断面及采样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the BWHD, showing the cutting of the soil profile and the sample point of the BWHD

### 1.2 研究方法

2011 年 7—9 月在每个小区随机选取 3 个水平阶和 3 个聚水沟作为重复,采用土钻法连续测定土壤含水量,取样深度为 2 m,1 m 以上每隔 10 cm 取一次样,1 m 以下每隔 20 cm 取一次样。每个水平阶和聚水沟分为中间、上侧和下侧(上侧和下侧为距水平阶或聚水沟中间 50 cm 的位置)进行土钻取样。土壤含水量用烘干法测得,沟内部 0~30 cm 填充的是生物质材料,采用自然风干法测其含水量。共监测了 6 次,其中监测前一天有降雨的是 7 月 17 日和 7 月 30 日,没有降雨的是 8 月 14 日、8 月 30 日、9 月 14 日和 9 月 29 日。在布设聚水沟之前及试验结束后测定聚水沟样地土壤容重。土壤容重采用环刀法测得,在 4 月初和 9 月末在样地中挖剖面,从 30 cm 深度开始取样,间隔 20 cm,重复 3 次。降雨量用全自动雨量计测得。分层计算土壤储水量,容重统一采用第一次的测定值。公式如下:

$$W_i = h_i \cdot a_i \cdot \theta \cdot 10 / 100 \quad (1)$$

$$W = \sum W_i \quad (2)$$

式中:  $W_i$  为每层土壤储水量(mm);  $W$  为土壤总储水量(mm);  $h_i$  为分层厚度(20 cm);  $a_i$  为土壤容重( $g \cdot cm^{-3}$ );  $\theta_i$  为土壤含水率(%). 60 cm 土层以上,每 20 cm 采用不同容重,60 cm 以下采用同一容重值。

### 1.3 数据分析与绘图

用 Excel 2003 和 SPSS 12.0 对数据进行处理和分析,OriginLab 8.5 进行绘图。采用单因素方差分析聚水沟对土壤水分、土壤容重和孔隙度的影响,差异程度采用 LSD 多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 聚水沟对土壤水分的影响

绘制 7—9 月降雨量与各小区 0~200 cm 土层平均土壤含水量变化图(取 3 个位置平均值,图 2),从图 2 中可知,各样地土壤水分变化与降雨量变化趋势基本一致,在整个测定时期呈现双峰变化规律,具体表现为在 7 月 30 日和 8 月 30 日含水量最高,其余时期较低。聚水沟和水平阶样地各时期土壤水分平均值均在 7 月 30 日最大,分别为 11.96% 和 8.45%,最小值分别为 9.37% 和 6.88%。在 7—9 月,聚水沟土壤水分平均值较水平阶相对提高 33.6%。这是因为沟内的填充物相对于土壤可以更大程度拦蓄降水径流增加入渗,其本身吸持的水分可以不断的供给下层和侧面土壤,相当于一个临时性水源,改善了沟内部及周边的土壤水分状况。各

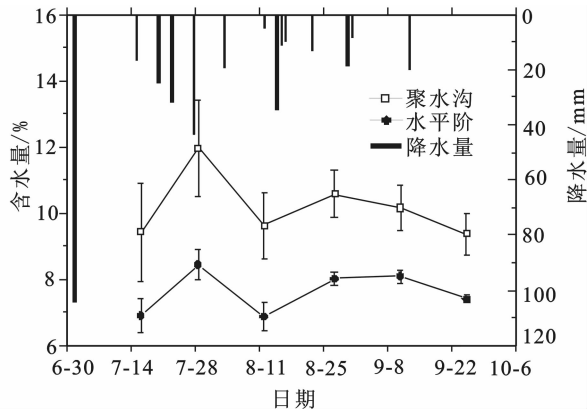


图 2 各时期 0~200 cm 土壤含水量及降水量变化图

Fig. 2 Dynamics of rainfall and the mean soil moisture content (0-200 cm) of BWHD and control plots

时期比较,聚水沟土壤水分一直最高,而水平阶样地最低,且它们之间的差异随前期降水量不同而发生变化。7月30日前一天降水量较大(43.7 mm),聚水沟土壤水分比水平阶高出41.6%,之间差异达到最大。9月份降水量最少,它们之间差异也最小,只比水平阶高25.5%(9月14日)。对相同观测时期聚水沟与水平阶地的土壤含水量样本均值进行 $t$ 检验,结果表明在7—9月各个时期,聚水沟土壤水分与水平阶相比均达到极显著性水平( $p<0.01$ )。说明开挖聚水沟增加土壤水分效果明显。

为了定量描述土壤所含的实际水量,将聚水沟和水平阶样地各层的土壤含水量换算成储水量(不包括沟内填充物)。从图3中可以看出,7—9月各时期聚水沟土壤储水量一直高于水平阶地,其间差异均达到显著性水平( $p<0.05$ ),较水平阶地相对提高了20.4%、28.7%、28.5%、23.9%、18.4%和18.8%,平均比水平阶提高了23.14%。7月30日聚水沟储水量比水平阶地高了47.25 mm,之间差异最大。这主要是由于在水平阶地上开挖聚水沟,能够更多的拦蓄坡面径流,水流在入沟以后可以不断入渗,而填充的聚水材料也可以起到一定的保墒作用,使水分不断地在土壤中积累。如果按照当地的造林规格( $1\,665\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ )来计算,每个聚水沟的聚水面积为 $6\text{ m}^2$ ,在9月底聚水沟样地最多可以比水平阶地多储水 $89.18\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ,可以为每株枣树多提供53.54 mm的水分。

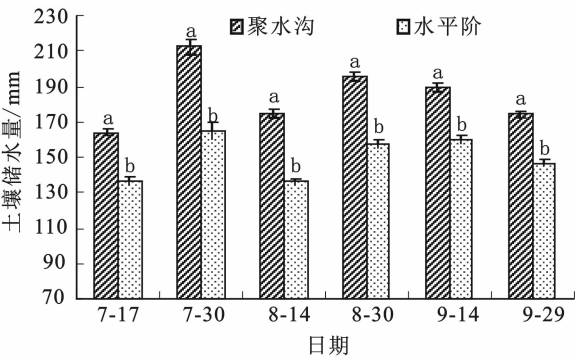


图3 0~200 cm 土层土壤储水量变化图  
Fig. 3 Soil water storage (0-200 cm) with the BWHD and control treatments during the observation period  
注:不同字母表示差异显著( $p<0.05$ ),图4同。

2.2 聚水沟不同位置和土层土壤水分状况

从图4中可以看出,各时期聚水沟中间土壤水分一直保持最高水平,上侧次之,下侧水分状况最差。这主要是因为沟内能更多的积蓄水分,再加上当地黄绵土垂直入渗性能较强,促使沟中间含水量较高;而聚水沟下部靠近外侧坡面,侧向蒸发较大导致水分含量一直较低。这与赵合理<sup>[15]</sup>、

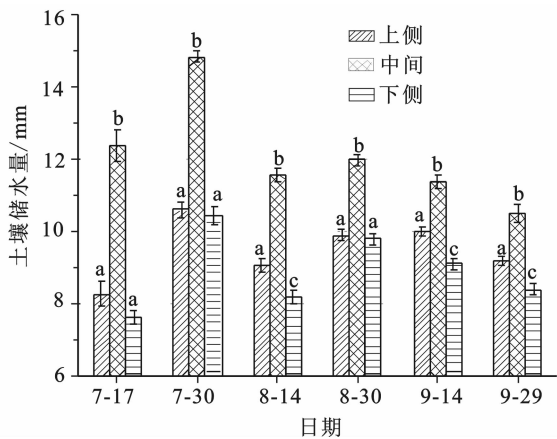


图4 聚水沟不同位置0~200 cm 土层平均土壤含水量比较  
Fig. 4 Comparison of the mean soil moisture (0-200 cm) at different BWHD positions

吴发启<sup>[16]</sup>等人对梯田不同位置土壤水分状况研究结果相一致。在测定前一天有降雨情况下(7月17日和7月30日),聚水沟中间的土壤含水量与上侧和下侧差异较大;前期一段时间没有降雨时这种差异性会有所减小。这主要是因为7月17日和7月30日的前一天产生有效降雨,降雨量分别为17 mm和43.7 mm,产生的径流汇集在聚水沟中,水分被填充的生物质材料所吸持,在这种情况下沟内土壤的入渗边界可以近似认为是非充分供水点源入渗边界,即入渗能力始终大于供水能力<sup>[17]</sup>。在这种入渗条件下<sup>[18]</sup>,由于基质势和重力势的共同作用,初期水分更多的是向下入渗,而侧渗相对较少,随着蓄水材料吸持的水分不断减少导致其供水能力不断下降,沟中间水分会向四周不断的分布均匀,故雨后聚水沟中间与两侧土壤含水量相差较大,如果之后没有充足的水分补给这种差异会有所减小。

对同一时期测定的聚水沟不同位置土壤含水量样本均值进行 $t$ 检验,结果显示各时期聚水沟中间的土壤含水量与上侧和下侧相比均达到极显著性水平。在7月17日、7月30日和8月30日3个时期,聚水沟上侧和下侧土壤水分差异不显著,其他时期差异均达到显著性水平。这主要是由于降雨引起的,同时也与聚水沟改变了入沟水流在土壤中的再分布过程密切相关。在长时间没有降雨的情况下(8月14日,9月14日,9月29日),由于下侧土壤蒸发较强烈,土壤水分不能得到补充,导致与上侧水分出现较大差异。7月30日与7月17日相比,聚水沟上侧土壤水分相对增加28.0%,下侧却增加了36.6%;8月30日与8月14日相比,聚水沟上侧土壤水分相对增加9.4%,而下侧则增加了19.5%。说明聚水沟上下侧土壤水分受降雨影响变化显著,而上侧土壤含水量变化幅度较下侧小。

用3个位置土壤水分均值来表示聚水沟整体的

土壤水分状况,然后再进行分层比较,如图 5 所示,

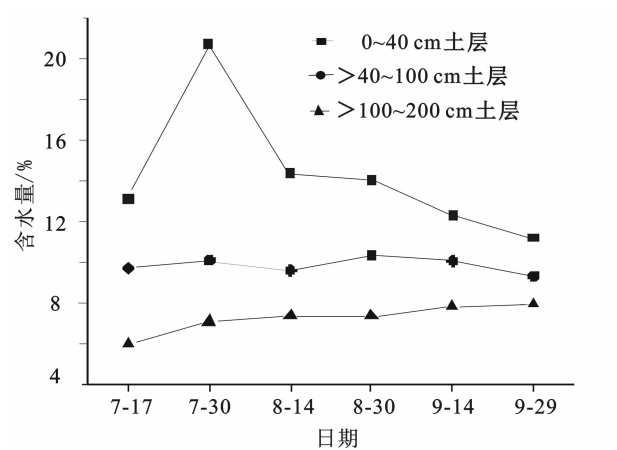


图 5 聚水沟不同土层平均土壤含水量比较  
Fig. 5 Comparison of soil moisture in different layers of the overall BWHD

由图可知聚水沟各时期 0~40 cm 土层土壤水分最高,>40~100 cm 次之,>100~200 cm 土层最低。总体上看,0~40 cm 土层的含水量在 7 月 30 日以后随时间呈不断下降趋势,降低幅度达 45.7%。对该区枣树根系的研究结果表明,0~40 cm 是枣树吸收根系的主要分布层,吸收根系可占到总量的 79%<sup>[19]</sup>。0~40 cm 土层是土壤水分最不稳定的一层,这主要是由于该层不仅受外界降雨、蒸发、气象等条件影响剧烈,同时也受枣树根系的分布与吸水影响显著。该层土壤含水量在 7 月 30 日测定时达到最大值 20.74%,其中生物质材料的含水量为 30.08%,这主要是由于前一天的强降雨引起大量水分蓄存在生物质材料和表层土壤中所致,根据该层土壤水分变化特征,可以将该层看作是蓄水层。>40~100 cm 土层土壤含水量基本稳定,变化幅度在 9.36%~10.36% 之间。该土层中仍然分布有少量的吸收根系,其水分来源主要是靠上层水分的传输,受外界条件影响较小,所以土壤含水量较上层有不

同程度的降低而且变化幅度较小。从 8 月 30 日到 9 月 29 日该层土壤水分也有小幅度的降低,说明在降雨减少、上层水分降低的情况下,根系可以从该层吸收少量水分来满足枣树生长,起到一个临时性补给的作用,可以把该层看作是保水层。而在>100~200 cm 土层中,土壤含水量呈现不断增长趋势,增幅达 31.8%。该土层中枣树吸收根系分布已经很少,并且土壤开始变得非常密实,在整个雨季过程中有水分渗入到该层并且不断积蓄,相当于一个浅层的土壤水库,因此可以将该层看作增水层。

2.3 沟内填充物对土壤容重和孔隙度的影响

土壤容重是土壤结构状况的一个综合性指标,反应了土壤的压实和孔隙状况,对土壤的通气、透水、抗蚀及植物根系生长产生重要影响<sup>[20]</sup>。土壤孔隙度能够反映土壤水、肥、气、热交换是否通畅,是评价土壤质量的重要指标<sup>[21]</sup>。从表 1 可知,在 20~40 cm 土层,聚水沟土壤容重明显低于水平阶样地,降低了 6.06%;总孔隙度增加了 6.09%,之间差异均达到显著性水平。聚水沟内填充物对 40 cm 以下土壤容重也有一定改善作用,但与之前相比统计学差异并不显著。这可能是由于聚水沟内填充的生物质材料,其本身疏松多孔隙、富含肥效,再加上雨水在其内部的储蓄,为微生物的繁衍提供了有利条件,而微生物活动能够产生大量的土壤胶结物质,改善了沟底浅层土壤的结构,提高了土壤的孔隙度。同样在 20~40 cm 土层,毛管孔度和非毛管孔度均有所提高,但并没有达到显著性水平,分别高了 6.80% 和 3.17%。40 cm 以下土壤的毛管孔度和非毛管孔度受土壤熟化程度和树木根系分布影响很大,变化规律不明显。毛管孔隙增大,有利于该层贮存更多的有效水分,可供给枣树根系吸收的有效水的比例也会增大。土壤非毛管孔隙越大,土壤的通透性能就越好,有利于水分的持续下渗<sup>[22]</sup>。

表 1 布设聚水沟前后土壤容重、孔隙度变化									
Table 1 Changes in soil bulk density (BD) and porosity (P) for constructing bamboo-style water harvesting ditches									
土层 /cm	土壤容重 BD/(g·cm <sup>-3</sup> )		孔隙度 P/%						
			总孔隙度 Pt/%		毛管孔隙度 Pc/%		非毛管孔隙度 Pnc/%		
	水平阶	聚水沟	水平阶	聚水沟	水平阶	聚水沟	水平阶	聚水沟	水平阶
0~20	1.32(0.025)	——	51.22(0.543)	——	40.96(1.432)	——	10.26(0.835)	——	——
20~40	1.32(0.012)b	1.24(0.009)a	50.26(0.441)b	53.32(0.352)a	40.47(1.204)a	43.22(1.020)a	9.79(0.778)a	10.10(0.884)a	——
40~60	1.33(0.015)a	1.29(0.015)a	49.69(0.509)a	51.41(0.588)a	38.75(0.895)a	38.60(1.693)a	10.94(0.399)a	12.81(1.110)a	——
60~80	1.36(0.010)a	1.34(0.012)a	48.70(0.356)a	49.60(0.489)a	39.65(1.173)a	40.46(1.030)a	9.05(1.030)a	9.14(0.590)a	——
80~100	1.36(0.009)a	1.38(0.015)a	48.49(0.350)a	47.93(0.543)a	44.18(0.666)b	40.94(0.574)a	4.30(0.374)b	6.99(0.448)a	——
平均	1.34(0.007)	1.31(0.017)	49.29(0.282)	50.56(0.643)	40.17(0.541)	40.81(0.698)	9.20(0.567)	9.76(0.716)	——

注:表内括弧中数据为标准误(SE);同一行数据中标有不同字母表示其统计差异显著( $p<0.05$ )。

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、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干旱半干旱地区植被恢复与可持续发展的有效途径。有研究表明<sup>[23-24]</sup>,在我国干旱的

黄土高原地区,由于降水量偏少、树种选择不合理以及高密度的种植方式已经使一些人工林地中土壤水分长期处于亏缺状态,这对该区高密度种植条件下的生态经济枣林如何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服务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,不同的是在其内部填充了生物质蓄水材料。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的结构,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<sup>[25]</sup>。聚水沟中填充的生物质材料与黄土相比孔隙较多,不易产生结皮,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;填充生物质材料同时也改变了入沟水流的运动过程,使水流在沟内不断的分布均匀,避免了沟内部土壤孔隙淤塞,起到增加入渗的作用。本试验结果表明聚水沟可以显著提高0~200 cm土层内土壤水分储量,这与田波<sup>[26]</sup>等人用菇渣堆施提高土壤储水量的研究结果相一致。M. Abu-Zreig<sup>[27-28]</sup>等在约旦利用沙砾填充水平沟来收集降水的试验结果也与本文相同。

半干旱黄土区土壤物理性质的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<sup>[24]</sup>。很多学者已经证实土内蓄水保墒和沟内施肥措施可以改良土壤的物理性质<sup>[10-12,29]</sup>。本研究采用无土栽培的生物质材料堆施入沟,显著降低了沟底10 cm以内土壤容重,增大了土壤孔隙度,这与时连辉<sup>[30]</sup>、田波<sup>[26]</sup>等利用秸秆腐解物和菇渣覆盖土壤得到的研究结果一致。类似的研究有R. Zougmore<sup>[31]</sup>等在鱼鳞坑内堆施有机物和矿质肥料后种植高粱,不仅提高了土壤的水分含量,同时也为高粱生长提供了养料,提高了土壤的生产力水平。

## 4 结论

竹节式聚水沟与水平阶相比,储水能力更强,在7—9月土壤储水量平均较水平阶提高了23.14%。各时期聚水沟不同位置上0~200 cm的土壤水分含量均表现为沟中间>上侧>下侧。0~40 cm土层聚水

沟土壤水分随时间呈不断下降趋势,降低幅度达45.7%;>40~100 cm土层土壤水分基本稳定,变化幅度较小,在9.36%~10.36%之间;>100~200 cm土层土壤水分呈不断增长趋势,增幅达31.8%。

沟内填充的生物质材料可以在短期内显著降低沟底部10 cm土层土壤容重,降低幅度为6.06%,增加土壤总孔隙度,增加幅度为6.09%。

## 参考文献:

[1] SHI H,SHAO M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China[J]. Journal of Arid Environments,2000,45:9-20.

[2] 李军,陈兵,李小芳,等. 黄土高原不同降水类型区林地、草地与农田土壤干燥化效应比较[J]. 土壤学报,2008,45(1):40-49. LI J,CHEN B,LI X F,*et al.* soil desiccating effects of forest-lands,grasslands and croplands in zones different in rainfall pattern on the Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008,45(1):40-49. (in Chinese)

[3] CHEN H S,SHAO M A,LI Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. Geoderma,2008,143:91-100.

[4] WANG L,WANG Q J,WEI S P,*et al.* Soil desiccation for loess soils on natural and regrown areas[J]. Forest Ecology Management,2008,255:2467-2477.

[5] 景维杰,韩蕊莲,侯立春,等. 不同间距水平阶集水及造林效果的研究[J]. 西北林学院学报,2004,19(3):38-40. JING W J, HAN R L, HOU Q C,*et al.* A studying of the effects of water storing and afforestation on terrace with different row spacing[J]. Journal of Northwest Forestry University,2004,19(3):38-40. (in Chinese)

[6] 穆兴明. 黄土高原土壤水分与水土保持措施相互作用[J]. 农业工程学报,2000,16(2):41-45. MU X M. Interaction of soil and water conservation measures with soil water in the Loess Plateau in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16 (2):41-45. (in Chinese)

[7] 张金柱,于宗周,李保国,等. 隔坡沟状梯田土壤水分变化规律探讨[J]. 水土保持通报,1995,15(2):58-63. ZHANG J Z,YU Z Z,LI B G,*et al.* The law of variation of soil water in terraced and trenched field with slope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995, 15 (2): 58-63. (in Chinese)

[8] 张海,张立新,柏延芳,等. 黄土峁状丘陵区坡地治理模式对土壤水分环境及植被恢复效应[J]. 农业工程学报,2007,23(11):108-113. ZHANG H,ZHANG L X,BAI Y F,*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 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2007,23(11):108-113. (in Chinese)

[9] 张北赢,徐学选,刘文兆. 黄土丘陵沟壑区不同水保措施条件下土壤水分状况[J]. 农业工程学报,2009,25(4):54-58. ZHANG B Y,XU X X,LIU W Z. Soil water condition under different measures of soil and water conservation in Loess Hilly and Gully Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009,25(4):54-58. (in Chinese)

[10] 宋吉红,王百田,林富荣. 黄土高原旱地果园土壤蓄水保墒技术定量研究[J]. 水土保持学报,2000,14(4):95-98.  
SONG J H,WANG B T,LIN F R. Quantity research on technology of water reserving and soil moisture keeping in dry land orchard on Loess Plateau[J]. Journal of Soil Water Conservation,2000,14(4):95-98. (in Chinese)

[11] 刘贤赵,王庆,衣华鹏. 苹果树盘环状深沟施肥对土壤理化性状的影响[J]. 土壤通报,2006,37(2):404-406.  
LIU X Z,WANG Q,YI H P. Effects of deep-ditch fertilization pattern on soil physical and chemical properties in an apple orchard[J]. Chinese Journal of Soil Science,2006,37(2):404-406. (in Chinese)

[12] 刘贤赵,王庆,衣华鹏. 旱地苹果园环状深沟施肥综合效应初报[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(5):77-82.  
LIU X Z,WANG Q,YI H P. Integrated effects of annularity deep-ditch fertilizing on dry land apple[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2005,23(5):77-82. (in Chinese)

[13] 王珍,冯浩,吴淑芳. 秸秆不同还田方式对土壤低吸力段持水能力及蒸发特性的影响[J]. 土壤学报,2011,48(3):533-539.  
WANG Z,FENG H,WU S F. Effect of different straw-incorporation methods on soil water retention capacity and evaporation[J]. Acta Pedologica Sinica,2011,48(3):533-539. (in Chinese)

[14] 王珍,冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤结构及土壤蒸发特性的影响[J]. 水土保持学报,2009,23,(6):224-251.  
WANG Z,FENG H. Study on the influence of different straw-returning manners on soil structure and characters of soil water evaporation[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2009,23,(6):224-251. (in Chinese)

[15] 赵合理,蒋定生,范兴科. 不同水土保持措施对坡面降水再分配的影响[J]. 水土保持研究,1996,3(2):75-83.  
ZHAO H L,JIANG D S,FAN X K. Effect of different soil and water conservation measures to rainfall redistribution on slope[J]. Research of Soil and Water Conservation,1996,3(2):75-83. (in Chinese)

[16] 吴发启,张玉斌,余雕,等. 黄土高原南部梯田土壤水分环境效应研究[J]. 水土保持研究,2003,10(4):128-130.  
WU F Q,ZHANG Y B,SHE D, *et al.* Preliminary study on soil water environmental effect of level terrace in southern Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation,2003,10(4):128-130. (in Chinese)

[17] 汪志荣,王文焰,王全九,等. 点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J]. 水利学报,2000(6):39-43.  
WANG Z R,WANG W Y,WANG Q J, *et al.* Experimental study on soil water movement from a point source[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000(6):39-43. (in Chinese)

[18] BEN-ASHER J,LOMEN D O,WARRICK A W. Linear and nonlinear models of infiltration from a point source[J]. Soil Science Society of America Journal,1978,42(1):3-6.

[19] 魏国良,汪有科,王得祥,等. 梨枣人工林有效吸收根系密度分布规律研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(1):133-138.  
WEI G L,WANG Y K,WANG D X, *et al.* Study on the distribution characteristics of effective root density in *Ziziphus jujube* cv. lizao plantation[J]. Journal of Northwest A & F University:Nat. Sci. Ed.,2010,38(1):133-138. (in Chinese)

[20] LOGSDON S D,KARLEN D L. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage[J]. Soil and Tillage Research,2004,78:143-149.

[21] PAGLIAI M,VIGNOZZI N,PELLEGRINI S. Soil structure and the effect of management practices[J]. Soil and Tillage Research,2004,79:131-143.

[22] 张社奇,王国栋,刘建军,等. 黄土高原刺槐林地土壤水分物理性质研究[J]. 西北林学院学报,2004,19(3):11-14.  
ZHANG Sh Q,WANG G D,LIU J J, *et al.* Soil hydro-physical properties of *Robinia pseudoacacia* plantation forestland in Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University,2004,19(3):11-14. (in Chinese)

[23] CAO S X,CHEN L,XU C G, *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[J]. Landscape and Urban Planning,2007,83:208-217.

[24] CAO S X,CHEN L,SHANKMAN D, *et al.* Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions:lessons in ecological restoration [J]. Earth-Science Reviews,2011,104:240-245.

[25] 程琴娟,蔡强国,郑明国. 黄土土壤结皮对产流临界雨强的影响分析[J]. 地理科学,2007,27(5):678-682.  
CHENG Q J,CAI Q G,ZHENG M G. Effects of soil crust on critical rainfall intensity of runoff production [J]. Scientia Geographica Sinic,2007,27(5):678-682. (in Chinese)

[26] 田波,时连辉,王秀峰,等. 菇渣堆肥对土壤及草坪生长的影响[J]. 中国草地学报,2011,33(5):101-106.  
TIAN B,SHI L H,WANG X F, *et al.* Effect of spent mushroom compost on soil quality and turf growth[J]. Chinese Journal of Grassland,2011,33(5):101-106. (in Chinese)

[27] ABU-ZREIG M,ATTOM M,HAMASHA N. Rainfall harvesting using sand ditches in Jordan[J]. Agricultural Water Management,2000,46:183-192.

[28] ABU-ZREIG M,TAMIMI A. Field evaluation of sand-ditch water harvesting technique in Jordan[J]. Agricultural Water Management,2011,98:1291-1296.

[29] 方日尧,赵惠青,同延安. 渭北旱原冬小麦深施肥沟播综合效应研究[J]. 农业工程学报,2000,16(1):49-52.  
FANG R Y,ZHAO H Q,TONG Y A. Research on integrated effect deep application of fertilizer and furrow-sowing winter wheat on weibeirainfed highland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2000,16(1):49-52. (in Chinese)

[30] 时连辉,韩国华,张志国,等. 秸秆腐解物覆盖对园林土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(1):113-117.  
SHI L H,HAN G H,ZHANG Z G, *et al.* Effect of mulching with straw composts on soil properties of landscape [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2010,26(1):113-117. (in Chinese)

[31] ZOUGMORE R,ZIDA Z,KAMBOU N F. Role of nutrient amendments in the success of half-moon soil and water conservation practice in semiarid Burkina Faso[J]. Soil and Tillage Research,2003,71:143-149.