

# 晋西黄土区退耕还林 20 年后典型林地的持水能力

王高敏<sup>1</sup> 杨宗儒<sup>2</sup> 查同刚<sup>3</sup> 张志强<sup>3</sup> 吕志远<sup>1</sup> 张晓霞<sup>3</sup> 王红艳<sup>3</sup> 朱嘉磊<sup>1</sup>

(1 北京林业大学林学院 2 山西省吉县林业服务中心

3 北京林业大学水土保持学院,水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室)

**摘要:**为探究晋西黄土区退耕 20 年后典型林地间持水能力的差异,选取山西省吉县蔡家川流域退耕 20 年的次生林和油松人工林、刺槐人工林、油松×刺槐人工混交林 4 种典型林分为研究对象,同时以耕地作为对照,通过外业调查和室内测定,比较分析了该地区退耕林分间林地(枯落物层和土壤层)的最大持水量和有效持水量。结果表明:1)次生林枯落物层的最大持水量和有效持水量为 201.20 和 154.32 t/hm<sup>2</sup>,分别是人工林的 1.35~2.14 倍和 1.33~2.06 倍,人工林之间表现为油松×刺槐人工混交林>刺槐人工林>油松人工林;2)退耕林地土壤层的最大和有效持水量分别介于 5 102~5 563 t/hm<sup>2</sup>和 1 007~1 251 t/hm<sup>2</sup>之间,均显著高于耕地的 4 695 和 812 t/hm<sup>2</sup>;典型退耕林地间土壤有效持水量表现为次生林>油松×刺槐人工混交林>油松人工林>刺槐人工林,最大持水量为次生林>油松×刺槐人工混交林>刺槐人工林>油松人工林;3)与退耕引起土壤非毛管孔隙度增加相一致,林地的最大持水量和有效持水量较耕地分别增加了 10.7%~22.8%和 32.9%~73.1%,表明退耕对林地持水能力的影响在有效持水量方面更突出;4)退耕林分间林地持水能力表现为次生林>油松×刺槐人工混交林>刺槐人工林>油松人工林。林地最大持水量和有效持水量显著高于耕地,这主要源于土壤性质改善引起的土壤层持水能力增强,同时枯落物层的持水功能也发挥了一定作用。总之,退耕 20 年后林地持水能力显著增强,不同林分间次生林持水能力较好,表明次生林宜作为该地区退耕后植被恢复的主要参考。

**关键词:**晋西黄土区;退耕还林;林地;最大持水量;有效持水量

中图分类号:S715.7 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2015)05-0088-08

WANG Gao-min<sup>1</sup>; YANG Zong-ru<sup>2</sup>; ZHA Tong-gang<sup>3</sup>; ZHANG Zhi-qiang<sup>3</sup>; LÜ Zhi-yuan<sup>1</sup>; ZHANG Xiao-xia<sup>3</sup>; WANG Hong-yan<sup>3</sup>; ZHU Jia-lei<sup>1</sup>. **Water-holding capacity of different forestlands 20 years after converted from farmland in loess region, western Shanxi Province.** *Journal of Beijing Forestry University* (2015)37(5) 88-95 [Ch, 35 ref.]

1 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China;

2 Forestry Service Center of Jixian County, Jixian, Shanxi, 042200, P. R. China;

3 School of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China.

To compare the water conservation capacity of four typical forest stands converted from farmland 20 years ago in loess region, western Shanxi Province, the maximum water-holding capacity ( $WC_m$ ) and effective water-holding capacity ( $WC_e$ ) of litter and soil layers in secondary forest (SF), *Pinus tabuliformis* plantation (P), *Robinia pseudoacacia* plantation (R) and *P. tabuliformis* × *R. pseudoacacia* plantation (P × R) were examined based on field investigations and laboratory analyses in July 2013, with the farmland as a control (CK). The results were as follows: 1)  $WC_m$  and  $WC_e$  of litter layer in

收稿日期:2014-10-10 修回日期:2014-11-04

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD07B03)。

第一作者:王高敏。主要研究方向:森林生态。Email:wanggaomin723@163.com 地址:100083 北京市清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者:查同刚,博士,副教授。主要研究方向:土壤退化与生态恢复。Email:zhtg73@bjfu.edu.cn 地址:同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

secondary forest were 201.20 and 154.32 t/ha, respectively, which were 1.35–2.14 times and 1.33–2.06 times of those in the plantations. Both  $WC_m$  and  $WC_e$  showed the trend as  $P \times R > R > P$ . 2) The  $WC_e$  of the soil layer in four forest stands ranged between 5 102–5 563 t/ha, and the  $WC_e$  was 1 007–1 251 t/ha, which were significantly higher than 4 695 and 812 t/ha of the farmland (CK), respectively. The  $WC_e$  showed the trend as  $SF > P \times R > P > R$ , while  $WC_m$  as  $SF > P \times R > R > P$ . 3) The  $WC_e$  of the forestlands increased about 32.9%–73.1% and much higher than the  $WC_m$  increment about 10.7%–22.8%, which was consistent with the changes of non-capillary porosity. This implied more significant effects of the conversion of farmland to forest (CFF) on  $WC_e$  than  $WC_m$ . 4) The water-holding capacity of the converted forestlands showed the trend as  $SF > P \times R > R > P$  with significantly higher  $WC_m$  and  $WC_e$  than the farmland. This was mainly resulted from the improvement of soil characteristics and then the increase of water-holding capacity in the soil, and also certain water-holding effect of litter layers. In general, the water-holding ability has been significantly improved through the CFF in loess area of western Shanxi Province. The water-holding capacity of the secondary forest was better than the other three plantations, indicating that the secondary forest should be the main type of vegetation restoration in CFF program in the loess region.

**Key words** loess region of western Shanxi Province; conversion of farmland to forestland; forestland; maximum water-holding capacity; effective water-holding capacity

林地持水能力主要取决于枯落物层和土壤层,是森林水源涵养功能的重要指标之一<sup>[1-4]</sup>。枯枝落叶层(又称枯落物层)主要是由凋落的叶、枝、皮、花、果、种子等植物器官堆积而成<sup>[5-6]</sup>,作为森林植物群落水文效应的第2活动层<sup>[7]</sup>,可为森林土壤提供机械保护作用,免除下层土壤受雨滴的直接打击,同时截持降水、阻延地表径流、抑制土壤水分蒸发,在林地持水能力方面发挥着重要功能;土壤层是森林水文作用的第3活动层,大气降水可以沿着土壤毛管孔隙和非毛管孔隙下渗,使土壤持水处于饱和状态,体现其最大持水能力;一部分供植物蒸腾和地表蒸发,一部分则贮存起来或通过渗透汇入溪流,从而体现出森林水源涵养和保持水土的功能<sup>[8-11]</sup>。不同林分类型其枯落物层的结构、组成、种类、数量和性质都存在一定的差异,因而影响到林地截持降水、储蓄水分、调节径流的功能<sup>[12-13]</sup>;林地土壤的持水能力与植被、地形、土壤性质等密切相关,导致不同林分类型的水源涵养能力有所差异,主要体现于林地最大和有效持水能力方面的变化<sup>[14-15]</sup>。

晋西黄土区作为黄河的重要水源地,降雨稀少且季节分配不均,水土流失严重<sup>[16-17]</sup>。自1993年以来开展的退耕还林等植被恢复措施增加了地表枯落物输入,改善了土壤理化性质,在提高林地持水能力、增强林分涵养水源功能方面发挥了重要作用<sup>[18-20]</sup>。有关退耕还林后林地枯落物层和土壤特

征变化的研究较多,主要集中在枯落物蓄积和持水过程、土壤理化性质和林地土壤水分平衡等方面<sup>[16,20-21]</sup>,但关于退耕林地保持和供给水分能力变化及其影响因子的量化研究则相对较少。本文采用最大持水量和有效持水量这2个指标,定量研究晋西黄土区退耕还林的典型林分林地持水能力变化及其原因,旨在为该地区植被恢复的生态效益评价提供依据,同时为退耕林分的经营管理提供指导。

## 1 研究地概况

蔡家川流域位于山西省临汾市吉县境内,110°45′~110°48′E、36°14′~36°18′N,海拔904~1 592 m。该地区属半干旱大陆性季风气候,年均降水量为575.9 mm,集中于6—8月份,年均气温10℃,无霜期平均为172 d。该流域属典型的黄土残垣丘陵沟壑区,地形破碎,主要以山地、坡地为主。该区域在1992年实行中日治山工程项目<sup>[22]</sup>,在退耕地采取封禁封育和人工栽植等措施,形成了以辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、山杨(*Populus davidiana*)为主的次生林(secondary forest, SF)和油松(*Pinus tabulaeformis*, P)人工林、刺槐(*Robinia pseudoacacia*, R)人工林、油松×刺槐(P×R)人工混交林。林下植被主要有黄刺玫(*Rosa xanthina*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等。

土壤类型为褐土,黄土母质。农耕地以采取“广种薄收”式粗放经营的玉米(*Zea mays*)地为主。

## 2 研究方法

### 2.1 样地布设和调查采样

2013年7月,经查阅林相图和实地踏查,按照典型性和代表性原则,在试验区选择立地条件相近的油松人工林、刺槐人工林、油松×刺槐人工混交林

和以山杨为主的次生林(退耕20年)各1块,同时以玉米农耕地作对照(CK)。在各样地内布设3块20 m×20 m的样方(间隔20 m以上)进行植被调查,同时测定坡向、坡度等(表1)。在每个样方中按“S”型布设5个1 m×1 m的小样方,收集全部枯落物,同时挖掘土壤剖面,按0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm分层采集环刀土样和土壤分析布袋样品。

表1 研究样地基本情况

Tab.1 Basic information of the research sites

林地类型 Forest type	胸(地)径 Breast (ground) diameter/cm	高度 Height/m	密度 Density/ (plant·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度 Canopy density	坡度 Slope/ (°)	坡向 Aspect/ (°)
P	12.2(±0.55)	5.3(±0.34)	2 100	0.42	20	NE25
R	12.3(±0.47)	8.6(±0.32)	1 820	0.57	21	NE23
P×R	12.3(±0.43)× 13.4(±0.38)	6.3(±0.55)× 9.1(±0.48)	1 100× 600	0.79	22	NE20
SF	15.8(±0.60)	9.8(±0.41)	1 900	0.71	22	NE32
CK	3.85(±0.12)	2.36(±0.14)	75 000	0.37	21	NE19

注:P. 油松人工林 *Pinus tabuliformis* plantation; R. 刺槐人工林 *Robinia pseudoacacia* plantation; P×R. 油松×刺槐人工混交林 *Pinus tabuliformis*×*Robinia pseudoacacia* plantation; SF. 次生林 Secondary forest; CK. 对照耕地(玉米地) Control check farmland(corn field). 下同 The same below. 胸(地)径和高度数值为平均值±标准差 The data of diameter and height is mean value±standard deviation; 胸径对象为林地的乔木,地径对象为耕地的玉米 DBH is for the trees of forestlands, the ground diameter is for the corns of farmland.

### 2.2 室内分析测定

#### 2.2.1 枯落物现存量 and 持水能力

用室内浸泡法测定林下枯落物的持水量<sup>[23]</sup>。将所采集枯落物风干,浸泡至恒质量(24 h左右)称量,遮阴条件下静置(实验过程中以不具有水滴出现为准,约5 min左右)并称质量,最后烘干称质量获得现存量。按式(1)和(2)计算枯落物最大持水量和有效持水量。

$$W_{Lmax} = (G_{24} - G_0) / G_0 \times 100\% \times M_0 \quad (1)$$

$$W_{Le} = (G_t - G_0) / G_0 \times 100\% \times M_0 \quad (2)$$

式中: $W_{Lmax}$ 、 $W_{Le}$ 为枯落物最大持水量( $t/hm^2$ )和有效持水量( $t/hm^2$ ); $G_0$ 、 $G_{24}$ 、 $G_t$ 分别为枯落物烘干质量(g)、浸水24 h后质量(g)和静置至不滴水后的质量(g); $M_0$ 为枯落物现存量( $t/hm^2$ )。

#### 2.2.2 土壤性质与持水能力

土壤水分-物理性质采用环刀法测定<sup>[24]</sup>,包括土壤密度、孔隙度(总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度)和含水量等指标;土壤有机质含量测定采用重铬酸钾容量法<sup>[25]</sup>。参照孙艳红等<sup>[26]</sup>的方法,土壤最大持水量和有效持水量按式(3)和(4)计算。持水量数据对应的土层厚度为1 m。

$$W_{Smax} = (1 - D_p / D_v) \times 100\% \times H \quad (3)$$

$$W_{Se} = P_{non} H \quad (4)$$

式中: $W_{Smax}$ 、 $W_{Se}$ 分别表示土壤最大持水量( $t/hm^2$ )和有效持水量( $t/hm^2$ ); $D_p$ 、 $D_v$ 分别表示土壤密度( $g/cm^3$ )和土粒密度( $g/cm^3$ ); $P_{non}$ 为非毛管孔隙度(%); $H$ 为土层厚度(m)。

### 2.3 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2010和SPSS 16.0软件对枯落物层和土壤层各项指标进行数据处理,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)对不同林分各项指标进行差异显著性分析( $P=0.05$ ),用Origin8.6根据处理结果作图。

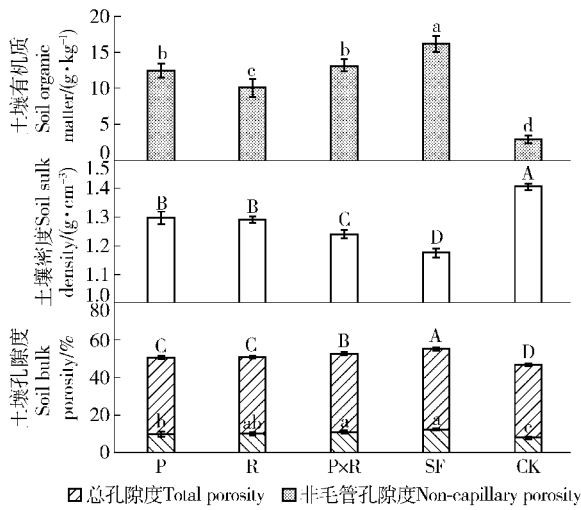
## 3 结果与分析

### 3.1 土壤层持水能力

#### 3.1.1 土壤有机质、土壤密度和孔隙特征

退耕林地土壤层有机质含量均显著大于耕地(图1)。典型退耕林分间土壤有机质含量表现为次生林>油松×刺槐人工混交林>油松人工林>刺槐人工林。次生林有机质含量显著高于人工林,达到16.21 g/kg,是耕地土壤有机质含量的5.43倍。人工林中刺槐纯林土壤有机质含量最低,但仍达到耕地的2.4倍。退耕还林20年后植被恢复显著提高

了土壤的有机质含量。



上图不同小写字母表示各林地间有机质含量差异显著 ( $P < 0.05$ )；中图不同大写字母表示各林地间土壤密度差异显著 ( $P < 0.05$ )；下图不同大写字母表示各林地间总孔隙度差异显著，不同小写字母表示非毛管孔隙度差异显著 ( $P < 0.05$ )。In the upper figure, different small letters mean significant differences of soil organic matter ( $P < 0.05$ ) among different forestlands; in the middle figure, different capital letters mean significant differences of soil bulk density ( $P < 0.05$ ) among different forestlands; in the lower figure, different capital letters mean significant differences of total porosity and different small letters mean significant difference of the non-capillary porosity ( $P < 0.05$ ) among varied forestlands.

图1 不同林地有机质含量、土壤密度和孔隙特征

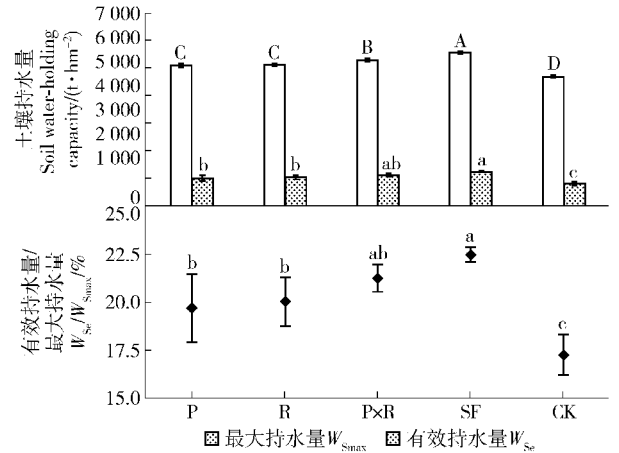
Fig.1 Characteristics of soil organic matter, soil bulk density and soil porosity in different forestlands

退耕林地的土壤密度为  $1.18 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ ，显著低于耕地的  $1.41 \text{ g/cm}^3$ 。次生林土壤密度显著小于人工林地，总体表现为次生林  $<$  油松  $\times$  刺槐人工混交林  $<$  刺槐人工林  $<$  油松人工林。退耕还林20年后土壤密度显著减小。退耕林地土壤总孔隙度介于  $51.0\% \sim 55.6\%$  之间，相比耕地显著增加了  $8.7\% \sim 18.5\%$ ，不同林地间表现为次生林  $>$  油松  $\times$  刺槐人工混交林  $>$  刺槐人工林  $>$  油松人工林。土壤非毛管孔隙度介于  $10.1\% \sim 12.5\%$  之间，相比耕地显著增加了  $20.0\% \sim 50.1\%$ ，不同林地间表现为次生林  $>$  油松  $\times$  刺槐人工混交林  $>$  油松人工林  $>$  刺槐人工林。

### 3.1.2 土壤层最大持水量和有效持水量

不同林地土壤层最大持水量和有效持水量均显著大于耕地(图2)。退耕林地土壤最大持水量介于  $5102 \sim 5563 \text{ t/hm}^2$  之间，表现为次生林  $>$  油松  $\times$  刺槐人工混交林  $>$  油松人工林  $>$  刺槐人工林，分别是耕地的  $1.18$ 、 $1.13$ 、 $1.09$  和  $1.08$  倍。土壤有效持水

量介于  $1007 \sim 1251 \text{ t/hm}^2$  之间，表现为次生林  $>$  油松  $\times$  刺槐人工混交林  $>$  刺槐人工林  $>$  油松人工林，分别是耕地土壤有效持水量的  $1.54$ 、 $1.36$ 、 $1.27$  和  $1.24$  倍。退耕林地土壤层的有效持水量占最大持水量比例的范围在  $19.7\% \sim 22.5\%$ ，显著高于耕地的  $17.3\%$ ，不同退耕林地间表现为次生林  $>$  油松  $\times$  刺槐人工混交林  $>$  刺槐人工林  $>$  油松人工林。



上图不同大写字母表示各林地间最大持水量差异显著，不同小写字母表示有效持水量的差异显著 ( $P < 0.05$ )；下图不同小写字母表示各林地有效持水量占最大持水量比例的差异显著 ( $P < 0.05$ )。In the upper figure, different capital letters mean significant differences of soil maximum water-holding capacity ( $W_{Smax}$ ), different small letters mean significant difference of soil effective water-holding capacity ( $W_{Se}$ ) among different forestlands ( $P < 0.05$ ); in the lower figure, different small letters mean significant difference of the proportion of  $W_{Se}$  to  $W_{Smax}$  among different forestlands ( $P < 0.05$ ).

图2 不同林地土壤层最大持水量和有效持水量特征

Fig.2 Characteristics of maximum and effective water-holding capacity of soil layers in different forestlands

### 3.2 枯落物层持水能力

不同退耕林地枯落物的现存量在  $26.31 \sim 35.54 \text{ t/hm}^2$  之间，依次为次生林  $>$  油松  $\times$  刺槐人工混交林  $>$  油松人工林  $>$  刺槐人工林。次生林与人工林之间差异显著，3种人工林之间差异不显著。

各退耕林地间枯落物的最大持水量和有效持水量呈现出相同的规律，均为次生林  $>$  油松  $\times$  刺槐人工混交林  $>$  刺槐人工林  $>$  油松人工林，且4种退耕林地之间差异显著。油松人工林枯落物持水能力最差，次生林、油松  $\times$  刺槐人工混交林和刺槐人工林的最大持水量分别是油松人工林的  $2.14$ 、 $1.59$  和  $1.33$  倍，有效持水量分别是油松人工林的  $2.06$ 、 $1.54$  和  $1.32$  倍。枯落物层最大持水量介于  $94.10 \sim 201.20 \text{ t/hm}^2$  之间，是同一林分土壤层持水量的  $1.5\% \sim 4.0\%$ ；有效持水量介于  $72.00 \sim 154.32 \text{ t/}$



hm<sup>2</sup>之间,是同一林分土壤层的7%~13%。

### 3.3 林地总持水能力

林地总持水量包括枯落物层持水量和土壤层持水量,耕地没有地表枯落物。退耕林地总有效持水量和总最大持水量均显著大于耕地,其中总有效持水量介于1 079~1 405 t/hm<sup>2</sup>之间,较耕地(CK)增加了32.9%~73.1%,总最大持水量介于5 196~5 763 t/hm<sup>2</sup>,较耕地增加了10.7%~22.8%。退耕林地中次生林总最大持水量和总有效持水量均显著高于人工林,总体顺序为次生林>油松×刺槐人工混交林>刺槐人工林>油松人工林。

退耕林地中,枯落物最大持水量占林地总持水量的1.8%~3.5%,土壤层占95%以上;枯落物有效持水量占林地总持水量的6.7%~11.0%,土壤层占90%左右。枯落物层最大持水量占林地总增加量的18.8%~22.7%,有效持水量占林地总增加量的5.8%~31.0%。表明枯落物在增加土壤持水能力方面发挥了一定作用,但土壤持水量增加是林地总持水能力增强的主因。林地总有效持水量占总最大持水量比例达到20%以上,高于耕地的17.3%。

## 4 结论与讨论

### 4.1 讨论

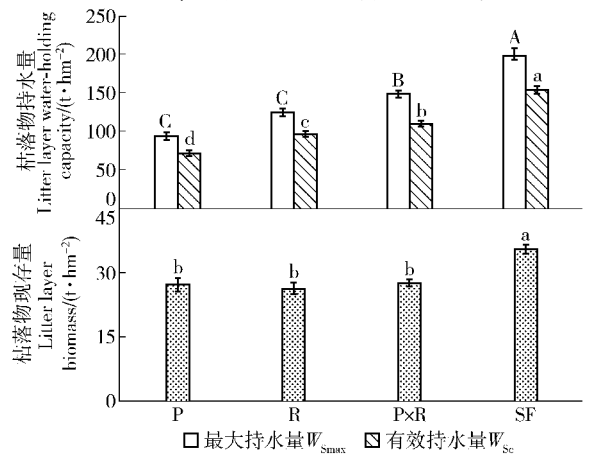
#### 4.1.1 林地有效持水量与最大持水量

林地持水量包括土壤层和枯落物层。本研究中,退耕林地的最大持水量和有效持水量均显著高于耕地,但相对而言,林地有效持水量增加了32.9%~73.1%,最大持水量增加了10.7%~22.8%,土壤有效持水量增加程度高于最大持水量。梁伟等<sup>[27]</sup>在陕西黄土区的研究也得出了相似的结果:林地对照农田最大持水量增加约8%,有效持水量增加约75.3%。这与退耕林地土壤非毛管孔隙度变化幅度高于总孔隙度是一致的(图1)。其原因可能与黄土地区林木根系的穿插作用导致土壤大孔隙增加密切相关<sup>[28]</sup>。林地土壤有效持水量变化高于总持水量,表明退耕对于提高林地水源涵养功能的有效持水能力方面更明显。

#### 4.1.2 退耕林分林地持水能力变化

植被以土壤为基质进行生长,植被-土壤之间具有互动效应:一方面土壤为植物生长提供水分、养分和矿质元素,对植物群落的类型、分布和动态产生影响;另一方面,植物生物量的积累和分解、根系的

直接穿插作用和凋落物腐解等改变林地的地表凋落物状况和土壤理化性质<sup>[29-30]</sup>。本研究表明,相比农耕地,退耕林分土壤性质如有机质含量、土壤密度和孔隙状况均得到改善(图1),土壤层最大持水量和有效持水量也显著增加(图2),枯落物显著增加(图3),林地总持水量显著增强(表2)。很多研究均得到相似的结果,如梁伟等<sup>[31]</sup>研究表明,黄土区退耕林地的土壤孔隙度明显增加,最大持水能力是耕地的1.23~1.77倍;丁绍兰等<sup>[23]</sup>对比林分与荒地的结果表明,林分土壤理化性质均有显著改善,有效持水量是荒地的2.47~4.07倍。赵勇钢等<sup>[32]</sup>发现宁夏典型黄土草原区退耕后,土壤的持水能力和供水能力均有显著上升。在东北大兴安岭、华北土石山区、川西亚高山和川南坡地的研究均表明:退耕改善了土壤物理性质,提高了土壤持水能力<sup>[9,33-35]</sup>。枯落物层有效持水量占林地有效持水量较耕地增量的25.8%~31.0%,最大持水量占林地最大持水量较耕地增量的18.8%~22.7%,表明退耕20年后,枯落物层在改善林地持水能力方面发挥了一定作用。土壤层最大持水量和有效持水量的权重分别增加了77.3%~81.2%和69.0%~74.2%,表明土壤性质如有机质含量、土壤密度和孔隙度的改善导致的土



上图不同大写字母表示各林间枯落物最大持水量的差异显著,不同小写字母表示枯落物有效持水量的差异显著( $P < 0.05$ );下图不同小写字母表示各林间枯落物现存量的差异显著( $P < 0.05$ )。In the upper figure, different capital letters mean significant differences of litter maximum water-holding capacity ( $W_{Lmax}$ ), different small letters mean significant difference of litter effective water-holding capacity ( $W_{Le}$ ) among different forestlands ( $P < 0.05$ ); in the lower figure, different small letters mean significant difference of litter layer biomass among different forestlands ( $P < 0.05$ ).

图3 不同林间枯落物持水量和现存量

Fig. 3 Water-holding capacity and biomass of litter layer in different forestlands

表2 不同林地的总持水能力

Tab.2 Total water-holding capacity of different forestlands

林地类型 Forest types	最大持水量 $WC_m$					有效持水量 $WC_e$					总有效持水量/总最大持水量 $W_{Te}/W_{Tmax}/%$
	总量 Total capacity/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )	增量 Increment/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )	增量 Increment/ CK/%	枯落物最大持水量/总量 $W_{Lmax}/Total$ capacity/%	枯落物最大持水量/增量 $W_{Lmax}/Increment/$ %	总量 Total capacity/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )	增量 Increment/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )	增量 Increment/ CK/%	枯落物有效持水量/总量 $W_{Le}/Total$ capacity/ %	枯落物有效持水量/增量 $W_{Le}/Increment/$ %	
P	5 196.10c	500.77	10.67	1.81	18.79	1 079.00c	267.00	32.88	6.67	26.97	20.76
R	5 249.17c	553.84	11.80	2.39	22.66	1 125.58c	313.58	38.62	8.64	31.01	21.44
P × R	5 462.87b	767.54	16.35	2.73	19.44	1 241.45b	429.45	52.89	8.92	25.80	22.73
SF	5 763.87a	1 068.54	22.76	3.49	18.83	1 405.32a	593.32	73.07	10.98	26.01	24.38
CK	4 695.33d						812.00d				17.29

注:不同小写字母表示各列中差异显著 ( $P < 0.05$ ); 增量均相对于 CK 比较。Notes: Different small letters in the same row mean significant differences among different forestlands ( $P < 0.05$ ); The increments are all compared with CK.

壤层持水性能提高是林地持水能力提高的主导因素。

#### 4.2 结论

1) 4种退耕林地枯落物层现存量次生林显著高于3种人工林分类型, 达到  $35.54 t/hm^2$ 。枯落物的最大持水量和有效持水量分别介于  $94.10 \sim 201.20 t/hm^2$  和  $72.00 \sim 154.32 t/hm^2$  之间, 呈现出相同的变化规律, 4种林分之间差异显著, 表现为次生林 > 油松 × 刺槐人工混交林 > 刺槐人工林 > 油松人工林。

2) 4种退耕林地土壤层的持水能力均显著大于耕地, 最大持水量达到  $5 102 \sim 5 563 t/hm^2$ , 比耕地高出  $8\% \sim 18\%$ , 有效持水量达到  $1 007 \sim 1 251 t/hm^2$ , 比耕地高出  $24\% \sim 54\%$ 。不同退耕林分间土壤有效持水量和最大持水量表现为次生林 > 人工混交林 > 人工纯林。

3) 退耕20年后, 林地的持水能力显著高于耕地, 最大持水量和有效持水量分别提高了  $10.7\% \sim 22.8\%$  和  $32.9\% \sim 73.1\%$ , 退耕对林地持水能力的影响在有效持水量方面更突出。不同林地间的持水能力差异显著, 表现为次生林 > 油松 × 刺槐人工混交林 > 刺槐人工林 > 油松人工林。退耕20年后林地持水能力显著增强, 这主要源于退耕林地土壤有机质、土壤密度和孔隙状况等性质的改善, 导致土壤层持水能力显著增强; 同时林地特有的枯落物层也发挥了一定作用。

#### 参 考 文 献

[1] 邓继峰, 丁国栋, 吴斌, 等. 宁夏盐池地区3种林分枯落物层和土壤水文效应[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(2): 108-114.  
DENG J F, DING G D, WU B, et al. Hydrological effects of

forest litter and soil of three kinds of forest stands in Yanchi District, Ningxia of northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(2): 108-114.

[2] 白晋华, 胡振华, 郭晋平. 华北山地次生林典型森林类型枯落物及土壤水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 84-89.

BAI J H, HU Z H, GUO J P. Study on the hydrological effect of typical forest litters and soil of natural second forest in north China Mountainous Region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 84-89.

[3] 张志强, 余新晓, 赵玉涛, 等. 森林对水文过程影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 113-116.

ZHANG Z Q, YU X X, ZHAO Y T, et al. Advance in researches on the effect of forest on hydrological process [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(1): 113-116.

[4] MIYATA S, KOSUGI K, GOMI T, et al. Effects of forest floor coverage on overland flow and soil erosion on hill slopes in Japanese cypress plantation forests [J]. Water Resources Research, 2009, 45: 1-17.

[5] 朱金兆, 刘建军, 朱清科, 等. 森林凋落物层水文生态功能研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5): 30-34.

ZHU J Z, LIU J J, ZHU Q K, et al. Hydro-ecological functions of forest litter layers [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5): 30-34.

[6] 张保华, 何毓蓉, 周红艺, 等. 长江上游典型区亚高山不同林型土壤结构性与水分效应[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 127-129.

ZHANG B H, HE Y R, ZHOU H Y, et al. Structural property and water effect of soils from different subalpine forests in the upper reach of Yangtze River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(4): 127-129.

[7] 鲍文, 包维楷, 丁德蓉, 等. 岷江上游人工油松人工林凋落量及其持水特性[J]. 西南农业大学学报, 2004, 26(5): 567-569.

- BAO W, BAO W K, DING D R, et al. Study on litter-fall and water holding capacity of litter in an artificial *Pinus tabulaeformis* forest in the upper reaches of the Minjiang River[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2004, 26(5): 567-569.
- [8] 田超,杨新兵,李军,等. 冀北山地不同海拔蒙古栎林枯落物和土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 222-227.
- TIAN C, YANG X B, LI J, et al. Hydrological effects of forest litters and soil of *Quercus mongolica* in the different altitudes of north Mountain of Hebei Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 222-227.
- [9] 陈强,赵雨森,辛颖. 大兴安岭北坡火烧迹地植被恢复后枯落物与土壤持水能力研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(2): 308-313.
- CHEN Q, ZHAO Y S, XIN Y. Litter and soil water-holding capacity of burned area in northern slope of the Great Khingan after vegetation restoration[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(2): 308-313.
- [10] 陈琳,赵廷宁,赵陟峰. 晋西半干旱黄土地区典型林分枯落物及土壤水文效应[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(23): 14106-14108.
- CHEN L, ZHAO T N, ZHAO S F. Hydrological effects of typical forest litters and soil in semi-arid loess area of West Shanxi Province [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(23): 14106-14108.
- [11] 刘永宏,成邦,武建萍. 准格尔旗黄土丘陵区人工林水文生态效益评价研究[J]. 内蒙古林业科技, 2009, 35(4): 29-34.
- LIU Y H, CHENG B, WU J P. Evaluation on hydrological-ecological effects of plantation in loess hilly area in Zhungeer, Inner Mongolia [J]. Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2009, 35(4): 29-34.
- [12] HELALIA A M. The relation between soil infiltration and effective porosity in different soils [J]. Agriculture Water Management, 1993, 24: 39-47.
- [13] 王威,郑小贤,宁杨翠. 北京山区水源涵养林典型森林类型结构特征研究[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(1): 60-63.
- WANG W, ZHENG X X, NING Y C. Structural characteristics of typical water conservation forests in mountain areas of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(1): 60-63.
- [14] 李德生,张萍,张水龙,等. 黄前库区森林土壤蓄水能力研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2004, 28(1): 25-28.
- LI D S, ZHANG P, ZHANG S L, et al. A study on water conservation capacity of forest soil in Huangqian Reservoir area [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences, 2004, 28(1): 25-28.
- [15] CHENG J D, LIN L L, LU H S. Influences of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 165: 11-28.
- [16] 朱继鹏,高甲荣,胡封兵. 晋西黄土区不同森林植被的林地水源涵养功能[J]. 林业资源管理, 2005(3): 47-50.
- ZHU J P, GAO J R, HU F B. Functions of water conservation of different forestlands in Loess Plateau in western Shanxi Province [J]. Forest Resources Management, 2005(3): 47-50.
- [17] 郑芳,张建军. 晋西黄土区不同植被覆盖流域的水文响应[J]. 生态学报, 2010, 30(20): 5475-5484.
- ZHENG F, ZHANG J J. Hydrological response to changes in vegetation covers at a watershed scale in western Shanxi Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(20): 5475-5484.
- [18] 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[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7056-7066.
- ZHANG J J, LI H M, XU J J. Soil moisture dynamics of water and soil conservation forest on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7056-7066.
- [19] 刘卉芳,朱清科,魏天兴. 晋西黄土区森林植被对流域径流的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 5-9.
- LIU H F, ZHU Q K, WEI T X. Impact of forests on runoff in small watershed in western Shanxi of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(2): 5-9.
- [20] 李民义,张建军,王春香,等. 晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 125-137.
- LI M Y, ZHANG J J, WANG C X, et al. Effects of land use types on soil physical properties in Loess Plateau of western Shanxi [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(3): 125-137.
- [21] 张建军,张岩,张波. 晋西黄土区水土保持林地的土壤水分[J]. 林业科学, 2009, 45(11): 63-69.
- ZHANG J J, ZHANG Y, ZHANG B. Soil water content in water and soil conservation forests on the hilly Loess Plateau [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(11): 63-69.
- [22] 贺庆棠,远藤藤造. 中国黄土高原治山技术培训项目合作研究论文集[C]. 北京:中国林业出版社, 1994.
- HE Q T, ENDO T. Selected papers of training programs on afforestation and technology of mountain hazards controlling in the Loess Plateau of China. [C]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1994.
- [23] 丁绍兰,杨乔媚,赵串串. 黄土丘陵区不同林分类型枯落物层及其林下土壤持水能力研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 105-108.
- DING S L, YANG Q M, ZHAO C C. Study on water-holding ability of litter and soil in different forest distributions in loess hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 105-108.
- [24] 张甘霖,龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京:科学出版社, 2012: 8-37.
- ZHANG G L, GONG Z T. Soil survey laboratory methods [M]. Beijing: Science Press, 2012: 8-37.
- [25] 何斌,温远光,袁霞,等. 广西英罗港不同红树植物群落土壤理化性质与酶活性的研究[J]. 林业科学, 2002, 38(2): 21-26.
- HE B, WEN Y G, YUAN X, et al. Studies on soil physical and chemical properties and enzyme activities of different mangrove

- communities in Yingluo Bay of Guangxi [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(2): 21-26.
- [26] 孙艳红, 张洪江, 王玉杰. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 106-113.  
SUN Y H, ZHANG H J, WANG Y J. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Jinyun Mountain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 106-113.
- [27] 梁伟, 白翠霞, 孙保平, 等. 黄土丘陵区退耕地土壤水分有效性及蓄水性能[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(4): 37-40.  
LIANG W, BAI C X, SUN B P, et al. Soil water availability and soil water storage capacity in forest or grass lands converted from farmlands in loess hilly and gully region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(4): 37-40.
- [28] 耿玉清, 单宏臣, 谭笑, 等. 人工针叶林林冠空隙土壤的研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(4): 16-19.  
GENG Y Q, SHAN H C, TAN X, et al. Soils in forest gaps in artificial coniferous forests [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(4): 16-19.
- [29] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001: 598-599.  
SONG Y C. *Vegetation ecology* [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2001: 598-599.
- [30] 周璟, 张旭东, 周金星, 等. 我国植被恢复对土壤质量的影响研究综述[J]. *世界林业研究*, 2009, 22(2): 56-61.  
ZHOU J, ZHANG X D, ZHOU J X, et al. Review on impact of vegetation restoration on soil quality in China [J]. *The World of Forestry Research*, 2009, 22(2): 56-61.
- [31] 梁伟, 白翠霞, 孙保平, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕还林(草)区土壤水分-物理性质研究[J]. *中国水土保持*, 2006(3): 17-18.  
LIANG W, BAI C X, SUN B P, et al. Study on soil moisture-physical properties of returning land for farming to forestry (grass) region in gullied rolling loess area [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2006(3): 17-18.
- [32] 赵勇钢, 赵世伟, 曹丽花, 等. 典型草原区退耕及封育草地土壤水分物理性质研究 [J]. *水土保持通报*, 2007, 27(6): 41-44.  
ZHAO Y G, ZHAO S W, CAO L H, et al. Soil moisture physical properties of farming-withdrawn land and enclosed grassland in a typical grassland [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(6): 41-44.
- [33] 陈礼清, 孙泽平, 李德文, 等. 川西亚高山植被恢复过程中的土壤和地被物水源涵养能力评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(7): 1048-1052.  
CHEN L Q, SUN Z P, LI D W, et al. Water-holding capacity of soil and ground cover following ecosystem restoration in subalpine coniferous forest zone, western Sichuan Province [J]. *Resources and Environment in Yangtze River Basin*, 2014, 23(7): 1048-1052.
- [34] 王卫军, 赵婵璞, 任仙, 等. 华北落叶松人工林林分密度对土壤持水能力的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(10): 95-98.  
WANG W J, ZHAO C P, REN X, et al. The influence of stand density on soil water-holding capacity of *Larix principis-rupprechtii* Mayr. plantation [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2013, 33(10): 95-98.
- [35] 王景燕, 胡庭兴, 龚伟, 等. 川南坡地不同退耕模式土壤及枯落物持水特性 [J]. *四川农业大学学报*, 2012, 30(1): 24-29.  
WANG J Y, HU T X, GONG W, et al. Water-holding characteristics of soil and litter in several slope farmlands with different defarming patterns in southern Sichuan Province of China [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2012, 30(1): 24-29.

(责任编辑 李 契  
责任编辑委 杨晓晖)