黄土丘陵沟壑区不同退耕模式的土壤水文性质影响对比

葛俸池[1,2]，许明祥[1,2]

(1.西北农林科技大学林学院，陕西 杨凌 712100；
2.西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室，陕西 杨凌 712100)

摘要：为系统评价黄土丘陵沟壑区在“退耕还林(草)”工程实施后不同退耕模式下的土壤水分涵养功能，选取 0－200 cm 土层的蓄水量、土壤含水量分层比、土壤水吸力和土壤含水量年际变化率作为土壤层水分蓄存、渗透、保持和稳定性的表征指标，分别对比了不同退耕模式下的土壤水文性质。结果表明：(1)各退耕模式下土壤蓄水量差异显著，撂荒模式的土壤蓄水量最高，为还灌和还乔模式下的 1.6，1.7 倍；(2)还乔模式下表层土壤水分的渗透性最优，深层土壤水分的渗透潜力最大；(3)各退耕模式的土壤持水性差异显著，还乔模式下土壤水分的保持能力突出；(4)撂荒模式土壤水分的稳定性最佳，各模式 0－200 cm 内土壤水分的稳定性在 30 年前后出现拐点，土壤含水量的年际变化率由负转正，并在 120 cm 以下土层较为稳定。

关键词：退耕模式；土壤水文性质；土壤水分渗透；土壤水分保持；土壤水分稳定性

中图分类号：S714.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2021)01-0154-07

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.023

Comparison of Soil Hydrologic Properties Under Different Conversion Patterns in the Hilly-gully Region of the Loess Plateau

GE Fengchi[1,2], XU Mingxiang[1,2]

(1.*College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100; 2.*State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100)

Abstract: In order to systemically evaluate soil water conservation function under the different conversion patterns after implementation of “The Grain For Green” program in the hilly and gully region of the Loess Plateau. This study selected 0－200 cm soil water storage, stratification ratio of soil water content, soil moisture suction, and inter-annual change rate of soil water content as the representative indicator of storage, infiltration, maintenance and stability of soil, which is to compare soil hydrologic properties separately in different patterns. The results showed that: (1) Soil water storage (SWS) under different conversion patterns was significantly different. The maximum SWS of grassland model was about 1.6 and 1.7 times of that under shrub and arbor model; (2) The arbor forest pattern had the best permeability of surface soil water and the biggest permeability potential of deep soil water; (3) Soil water retention under different conversion patterns was significantly different. The arbor forest pattern had the best soil water retention capacity; (4) The grassland pattern had the best stability of SWC, and the stability of SWC within 0－200 cm of each model had an inflection point around 30 years. The annual change rate of SWC changed from negative to positive, and the soil layer below 120 cm was more stable.

Keywords: conversion pattern; soil hydrologic properties; soil water permeability; soil water retention; soil moisture stability

气候干旱[1]及不合理土地利用使黄土高原水土流失严重，加强水土保持是生态治理中亟待解决的核心问题。从上世纪末实施“退耕还林(还草)”工程后，黄土高原的植被覆盖低[2]和水土流失严重的问题明显改善[3]。但大面积不合理的植被选种及配置模式加剧了深层土壤水分消耗[4-6]，形成了不同程度的干层[7]；另一方面森林植被蒸散增加使深层土壤水与地下水无法有效补给[8]，土壤层的水文调节功能退化突出。

土壤水分涵养功能是越来越多受到关注的土壤生态系统重要服务功能之一[9-11]，广义上指通过土壤

收稿日期：2020-06-18
资助项目：国家自然科学基金项目(41771318，41830758)；国家重点研发计划项目(2017YFC0506503)
第一作者：葛俸池(1994—)，男，博士研究生，主要从事生态系统水源涵养功能评价研究。E-mail：gefc@nwafu.edu.cn
通信作者：许明祥(1972—)，男，博士，研究员，主要从事土壤质量与生态系统服务评价研究。E-mail：xumx@nwsuaf.edu.cn

层对各水文过程的作用而形成的拦蓄降水、调节径流、改善水质等作用[12],狭义上指生态系统在一定时空范围和条件下将水分保持在系统内的能力[13-14]。国内学者从不同角度进行了研究,如对北京东灵山森林生态系统不同水文作用层次进行了比较[15];已有学者[16]利用 Invest 模型研究表明,陕北黄土高原退耕后不同土地利用方式下的水源涵养量整体以减少为主;定量评估了不同退耕模式的水源涵养功能并表明以林地最优[17]。国外学者[18]更注重研究流域产水量变化和相关植被水文过程,在美国东部的研究[19]表明,森林的层次结构增加了壤中径流和地下径流。目前退耕还林(草)工程恢复植被后未形成系统的土壤水分涵养功能评价指标与方法,对土壤水分涵养功能还缺乏较为全面的认识,通过对比分析半干旱黄土丘陵区人工林草地对土壤水文性质的影响,能够深入认识区域水资源可持续性对植被恢复的限制。

为了定量评价黄土丘陵沟壑区不同退耕模式对土壤水文性质的影响并从土壤物理性质方面探讨能反映土壤水分涵养功能变化的指标,在土壤的蓄水能力、渗透能力、持水能力、水分稳定性这 4 个方面,研究评价了不同退耕模式下土壤水分涵养功能,以期为区域植被恢复和生态系统管理提供科学建议。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究地点位于陕北黄土丘陵沟壑区的延安市安塞区(108°05′44″—109°26′18″E,36°30′45″—37°19′03″N),属典型的森林草原带,地形复杂,沟壑纵横,海拔 997～1 731 m,为典型的梁峁状沟壑区。该地区主要受暖温带半干旱大陆性气候影响,年均气温 8.8 ℃,年降水量 500 mm,其中雨季 6—9 月占 72.9%。该区域的自然植被几已全遭破坏,退耕后的人工林以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus simonii*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主,撂荒坡主要为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、茭蒿(*Artemisia giraldii*)、长芒草(*Stipa Bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等处于不同演替阶段的草本群落。土壤属黄绵土,其粉粒占 64%以上,土质疏松,抗蚀抗冲性差,水土流失严重。

1.2　试验方法

1.2.1　*样地选择*　首先对研究区主要土地利用类型和退耕模式的土壤水分状况进行文献检索,之后于 2018 年 6－8 月在试验区实地调查、选点并取样,选择了不同退耕模式下典型植被类型的 32 块样地,其中退耕还乔(刺槐)12 块、退耕还灌(柠条)9 块、退耕还草(撂荒草地)11 块。同时详细调查记录了样地立地信息(经纬度、海拔、利用年限)以及地貌特征(坡向、坡度、坡位)等相关信息(表 1)。为避免初始土壤湿度对当季土壤湿度的影响,选取样地的退耕年限均为 10 年以上;为便于退耕模式直接比较,采样点立地条件基本一致(表 1)。

表 1　样地基本情况

退耕模式	林龄/a	样地数	纬度/(°)	经度/(°)	海拔/m	坡向	坡度/(°)	坡位
	10	3	36.88	109.33	1254	半阴半阳	30	坡中
退耕还乔	20	3	36.86	109.35	1290	半阴半阳	30	坡中
(刺槐林)	30	3	36.75	109.25	1231	半阴半阳	30	坡下
	40	3	36.74	109.26	1268	半阴半阳	32	坡中
	20	2	36.74	109.31	1332	半阴半阳	32	坡中
退耕还灌	30	2	36.74	109.26	1255	半阴半阳	28	坡中
(柠条林)	40	2	36.76	109.27	1226	半阴半阳	34	坡中
	50	3	36.82	109.26	1343	半阴半阳	28	坡中
	10	3	36.82	109.26	1322	半阴半阳	25	坡中
退耕撂荒	20	3	36.84	109.35	1129	半阴半阳	35	坡中
(撂荒草地)	30	2	36.74	109.31	1340	半阴半阳	30	坡上
	40	3	36.75	109.25	1221	半阴半阳	37	坡中

1.2.2　*测定指标及方法*　各项指标的测定均在 2018 年 7－10 月完成。采用烘干法[20]测定土壤含水量,用土钻每隔 10 cm 采集 0－200 cm 土壤样品,将其装入铝盒并用胶带封口带回实验室,于 105 ℃烘箱中烘干至恒重,计算土壤质量含水量(SWC,%):

$$SWC=(G_1-G_2)/(G_2-G)\times 100\% \quad (1)$$

式中:G_1 为铝盒与湿土质量(g);G_2 为铝盒与干土质量(g);G 为空铝盒质量(g)。

用环刀法[21]测定各层土壤容重(BD,g/cm^3)。分 3 层(0－20,20－40,40－60 cm)采集土样计算土壤蓄水量(SWS,mm),计算公式为:

$$SWS=BD\times SMC\times H\times 0.1 \quad (2)$$

式中:H 为土层厚度(cm)。

用离心机法[22]测定 0－10 cm 土层的土壤持水

能力，即将环刀原状土样浸泡至饱和，将土样在 20 ℃下从低速向高速顺序离心，使之达到水分平衡，每次离心后迅速称重；土样烘干称重，计算不同水吸力下的土壤体积含水率（θ，%）：

$$\theta = a \times S^b \tag{3}$$

式中：S 为土壤水吸力（100 kPa）；a、b 为待拟合参数。

用改进的室内环刀法[23]测定了 0－10 cm 土层的土壤渗透性，环刀内径 10 cm，总高度 12 cm，其中取土部分高 10 cm，其上 2 cm 用于盛水。将环刀浸入水中 8～12 h，浸水时保持水面与土壤表面平齐。测定方法同环刀法，后将测定的稳定入渗速率换算成 10 ℃时的稳定入渗系数（K_{10}），计算公式为：

$$V = (10 \times Q_n)/(t_n \times S) \tag{4}$$

$$K_t = (V \times L)/(H \times L) \tag{5}$$

$$K_{10} = K_t/(0.7 + 0.03t) \tag{6}$$

式中：V 为土壤稳定入渗速率（mm/min）；Q_i 为时段 t_i 中土壤渗出水量（mL）；S 为渗透筒横截面面积（cm^2）；L 为土层厚度（cm）；H 为水层厚度（cm）；K_t 为温度 t 下渗透系数（mm/min）。

水分下渗主要是在土壤水势梯度驱动下进行，因此，本研究以不同土层间含水量的比值（SR）作为土壤水分补给潜力的表征指标，计算公式为：

$$SR = SWC_t/SWC_s \tag{7}$$

式中：SWC_t 为上层土壤含水量（%）；SWC_s 为下层土壤含水量（%）；SR_1 为 0－50 cm /50－100 cm，SR_2 为 0－50 cm /150－200 cm。

1.2.3 数据处理 用 SPSS 22.0 对数据进行差异显著性检验和多重比较，用 Origin 2016 绘图并进行回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同退耕模式下的土层蓄水量

在 0－200 cm 土层内含水量存在明显的退耕模式差异（图 1a），各模式的土壤含水量在 0－30 cm 土层内逐渐降低，还林和撂荒模式分别在 30－90，30－160 cm 土层内缓慢增加。不同退耕模式下的土壤蓄水量差异显著，表现为退耕撂荒＞退耕还灌＞退耕还乔（图 1b）。其 0－200 cm 土层的蓄水量以撂荒草地最高（356.3 mm），约为还灌（219.7 mm）和还乔模式（211.0mm）的 1.6，1.7 倍，且不同模式间差异极显著（$p = 0.000\ 1$）。

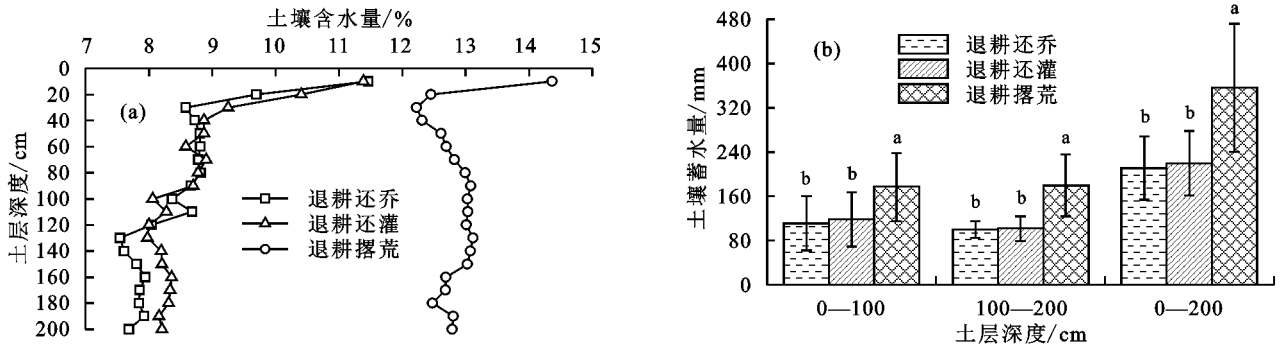


图 1 不同退耕模式土壤含水量及蓄水量

各模式的土壤蓄水量存在明显的恢复年限差异（图 2）。还乔（刺槐）模式下，不同土层的蓄水量随利用年限增加整体表现先减后增，具体为 40 年＞10 年＞30 年＞20 年，且在 0－200 cm 土层差异极显著（$p = 0.000\ 1$）。还灌模式下的土壤蓄水量随利用年限增加表现为先增后减再增，除 100－200 cm 土层外均以 50 年柠条林地蓄水量最高，其次是 30，40，20 年柠条林地。在撂荒模式下，不同土层下的蓄水量均先减后增，具体为 40 年＞10 年＞20 年＞30 年。不同土层的蓄水量在各恢复年限间差异显著，尤其 0－200 cm 土层蓄水量在撂荒 30 年后最低（241.9 mm），仅为撂荒 10 年（423.1 mm）、20 年（260.2 mm）和 40 年草地（461.8 mm）的 51.8%，92.9%，53.4%。

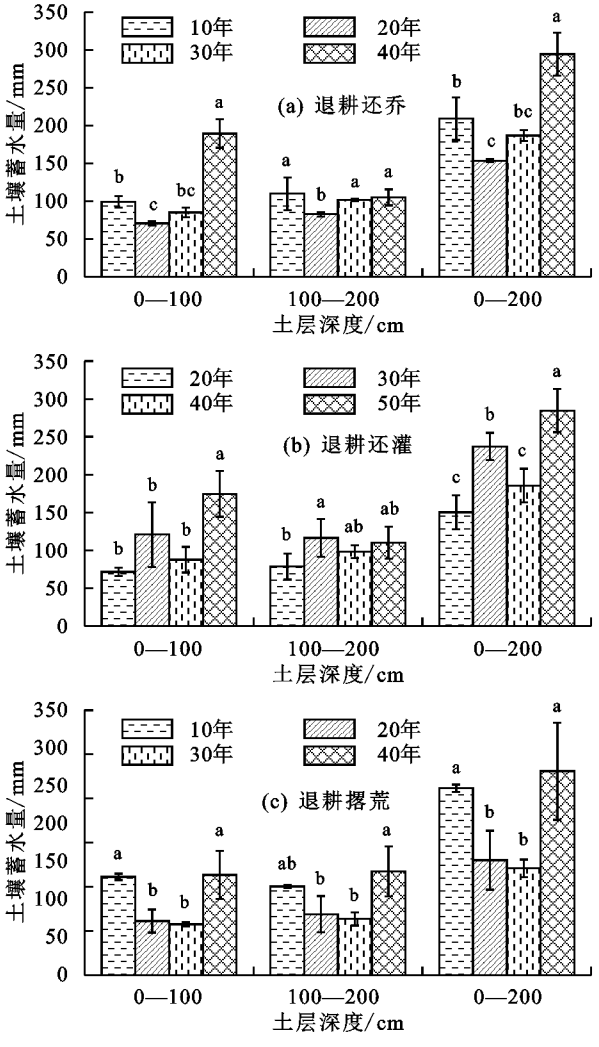
2.2 不同退耕模式下土壤渗透特征

不同退耕模式的土壤水分渗透性差异显著（图 3），表现为退耕还乔＞退耕还灌＞退耕撂荒。还乔模式的稳定入渗速率为 1.4 mm/min，约为还灌和撂荒模式的 1.2，1.6 倍；在渗透系数方面，退耕还乔为 0.9 mm/min，是还灌和撂荒模式的 1.2，1.5 倍。这说明在其他条件相同时，还乔模式下表层土壤有较高的土壤水分渗透速度和渗透能力。

上层与下层土壤含水量的比值（SR_1 为 0－50 cm/50－100 cm，SR_2 为 0－50 cm/150－200 cm）在不同退耕模式下均大于 1，整体表现为退耕还灌＞退耕还乔＞退耕撂荒（图 4）。这表明还林模式下的土壤渗透驱动力要优于撂荒模式。对 SR_1，还乔模式最大，约为 1.1，为还灌和撂荒模式的 1.0，1.1 倍；对 SR_2 也呈现出相似趋势，具体为退耕还灌（1.3）＞退耕还乔（1.2）＞退耕撂荒（1.0）。同时，各退耕类型下均表现为 $SR_2 > SR_1$。

SR 随利用年限增加变化的情况拟合效果较好（图 5）。在还乔模式下，SR_1 与 SR_2 随退耕年限增加

均表现为先降后增,其中 SR_2 的波动性和差异性更显著($p=0.000\ 1$),且 $SR_2(1.3)>SR_1(1.1)$;退耕 10 年后的 SR 均大于 1,20 年后的 $SR_1>1$ 和 $SR_2<1$,30 年后的 SR 均小于 1 并到达最低值,到 40 年时二者均大于 1 且 SR_2 达到 2.17 左右。在还灌模式下,SR_2 呈现出与还乔模式相似的规律,各恢复年限的 $SR_2(1.4)>SR_1(1.2)$。在退耕撂荒模式下,SR_1 的变幅较小,随退耕年限增长表现相对稳定;而 SR_2 波动较大,先降后增,并在 30 年前后出现拐点;按照拟合曲线,不同年限下的 SR_1 均大于 1;而 SR_2 在退耕 10 年时大于 1,其余年限均小于 1,并在 40 年时恢复到接近于 1。

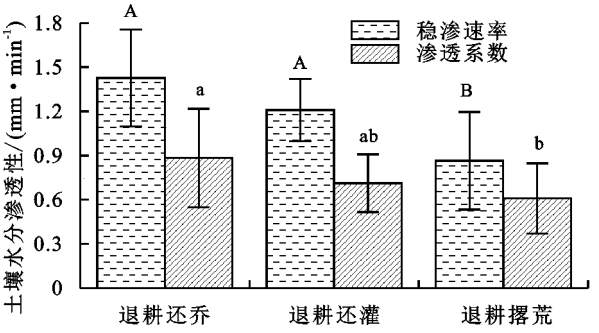


注:图柱上方不同小写字母表示相同退耕模式下同一土层深度内不同年限间差异显著($p<0.05$)。

图 2　不同恢复年限各模式土壤蓄水量

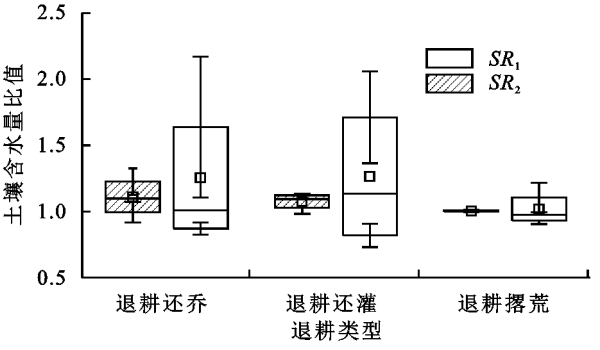
2.3　不同退耕模式下的土壤水分特征曲线

不同恢复模式下,表层(0－10 cm)土壤的水分特征曲线呈现出规律性变化(图 6),即土壤体积含水率随土壤水吸力增加而降低,其变化可分为 3 段:在水吸力为 0～0.25,0.25～1,>1 Pa 的范围内,土壤含水率表现为迅速降低、缓慢降低、非常缓慢降低并趋于平缓。可用幂函数来表示土壤水分特征曲线(表 2)。



注:图柱上方不同大写字母表示不同退耕模式下稳渗速率差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示不同退耕模式下渗透系数差异显著($p<0.05$)。

图 3　不同退耕类型土壤水分渗透性



注:框图中□为平均值;┄为中位值;—为最大(小)值。

图 4　不同退耕类型土壤含水量分层比值

不同恢复模式下的土壤水分特征曲线有一定差异。在相同吸力下(图 5),还乔模式下的土壤体积含水率较高,而其他 2 种模式的土壤含水率差异不大,表现为退耕还乔>退耕还灌>撂荒草地。方差分析(表 3)表明,当吸力为 0.1 Pa 时,退耕还乔模式下的土壤含水率显著高于还灌和撂荒模式,当吸力为 0,0.2,0.6,0.8 Pa 时,还乔模式土壤含水率显著高于撂荒地,而在其他情况下退耕模式间的含水率差异不显著。

2.4　不同退耕模式下的土壤水分稳定性

将不同退耕年限 0－200 cm 土壤含水量年均变化速率作为土壤水分稳定性指标,进一步分析不同退耕模式下的土壤水分稳定性差异。

由图 7 可知,不同退耕模式下 0－200 cm 土壤含水量年际变化率整体呈现出随退耕年限增加而逐年增大的趋势,10～50 年内每 10 年为 1 个阶段,每个阶段内年际变化率依次为－3.4%/a,1.6%/a,4.1%/a 和 5.3%/a(图 7),且在退耕年限内还灌(2.7%/a)>还乔(1.2%/a)>撂荒(－0.1%/a)。还乔和撂荒模式下 0－200 cm 土壤含水量的年际变化率以 20～30 年最小,为 2.2%/a 和－1.1%/a;30～40 年间增大,为 5.7%/a 和 8.0%/a;还灌模式以 30～40 年最稳定,为－1.5%/a;40～50年间增大,为 5.3%/年。在 0－200 cm 土层剖面内,各模式下 0－120 cm 土层每 10 年的年际变化率增幅最大,依次为－3.7%/a,1.4%/a,6.2%/a 和 8.7%/a,且

不同退耕年限 0－120 cm 土壤水分的变异性最大，还乔、还灌和撂荒分别为13.2%，20.9%，7.9%。这说明退耕 30 年左右是土壤含水量年际变化率由降低到增加的转择点，成为土壤水分稳定性的拐点，0－120 cm 的土壤含水量年际变化率最大。

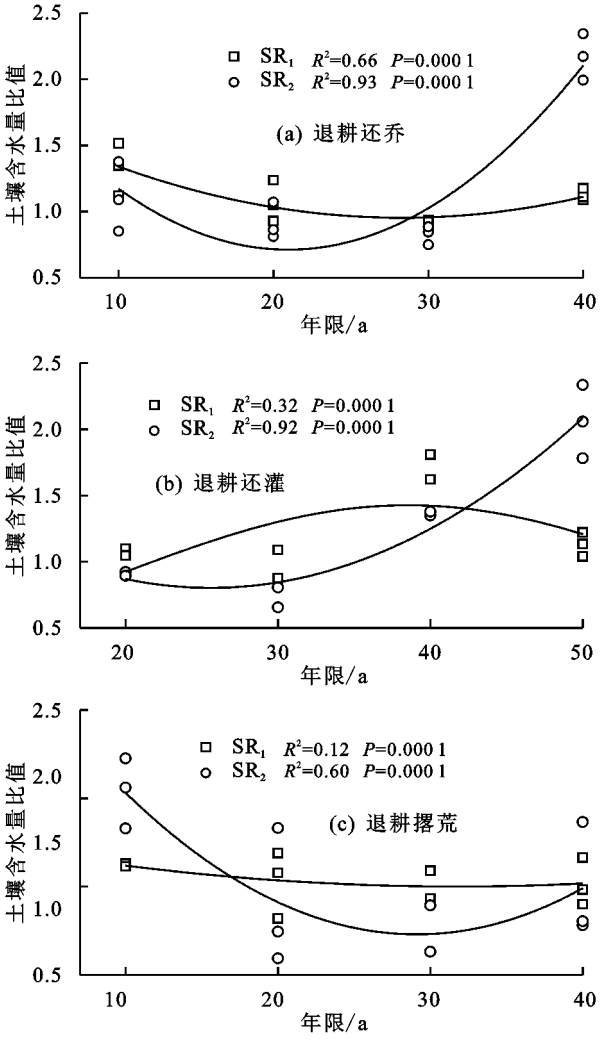


图 5 不同恢复年限土壤含水量分层比

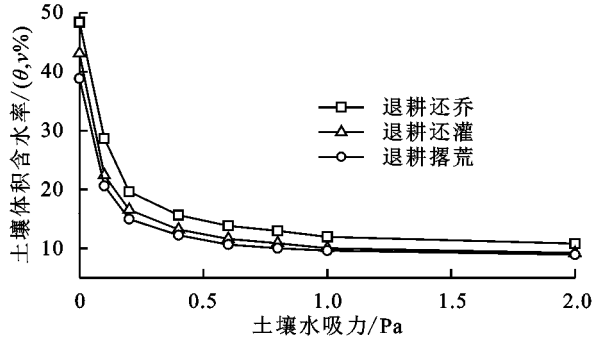


图 6 不同退耕模式下表层(0－10 cm)土壤水分特征曲线

表 2 土壤水分特征曲线幂函数式

利用方式	a	b	$y=ax^b$	R^2
退耕还乔	12.818	－0.165	$Y=12.818x^{-0.165}$	0.9565**
退耕还灌	10.907	－0.1659	$Y=10.907x^{-0.1659}$	0.9701**
撂荒草地	10.222	－0.1615	$Y=10.222x^{-0.1615}$	0.9729**

注：$n=12$；y 为土壤体积含水率(θ，%)；x 为土壤水吸力(Pa)。

表 3 不同退耕模式下表层(0－10 cm)土壤持水性能多重比较

退耕模式	0 Pa	0.1 Pa	0.2 Pa	0.6 Pa	0.8 Pa
退耕还乔	48.53a	28.70a	19.46a	13.71a	12.74a
退耕还灌	43.20b	22.53b	16.45ab	11.56ab	10.76ab
撂荒草地	39.12b	20.24b	15.17b	10.97b	10.14b

注：表中数据为土壤体积含水率(θ，%)；同列不同小写字母表示差异达 5%显著水平。

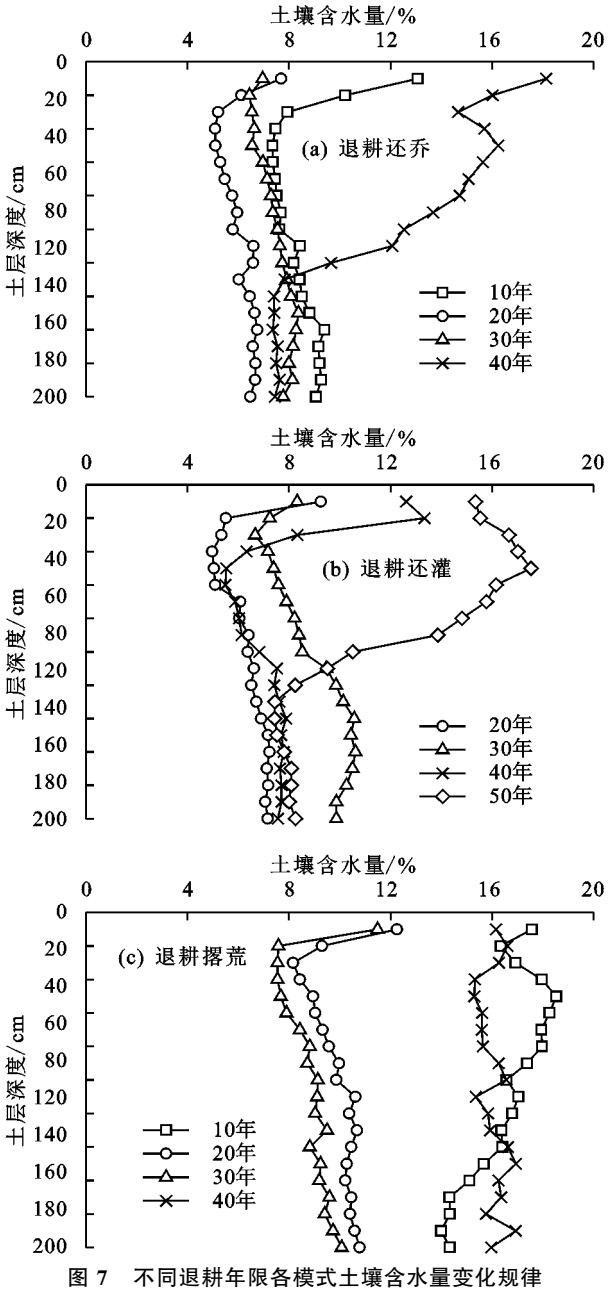


图 7 不同退耕年限各模式土壤含水量变化规律

3 讨 论

3.1 土壤水分蓄存指标及影响因素

土壤蓄水量和蓄水能力直接关系到土壤水文调节功能的发挥[24]。在土层深厚的黄土高原(大多数地块土层厚度超过 100 m)[25]，土壤蓄水能力主要受降雨、土壤孔隙度、植被类型、前期含水量等的影响[26-27]而该区域土壤“水库”的“库容”巨大，因此土壤蓄水能力评价更多关注实际储水量的变化。黄土高

原在退耕还林(草)后,增大了植被盖度和蒸散发,提高了土壤孔隙度和持水能力,减少了地表径流,在很大程度上既增加了降雨拦截量又削弱了土壤实际储水量。在大气降水和土壤蒸发、植物蒸腾的共同作用下,0－2 m 土层成为土壤水分的主要活跃层,但 2 m 以下土壤水分变化相对较小[28],所以研究活跃土壤层水分状况更有意义。本研究中不同退耕模式和退耕年限的 0－200 cm 土壤蓄水量(SWS)的显著差异,是不同植被的耗水状况、对降雨的拦蓄状况和土壤水分入渗状况的综合反映。撂荒草地根系多分布在 0－100 cm 土层[29],对深层土壤水分的消耗较少,同时草地植被蒸腾耗水量和对降雨的截留量较小,水分能够更多更快的接触地表土壤,土壤水分蓄存量较大,SWC 和 SWS 在各土层均较高;还林模式虽在一定程度上增多了土壤孔隙,显著提高了表层土壤蓄水功能,但较高的地上生物量造成蒸腾过高且分布在 0－2 m 土层的细根[30]也消耗了较多深层土壤水,加之较大的冠层截留降雨,导致降雨需经过林冠和枯落物层的拦蓄才能进入土壤层,土壤水分的入渗量较小从而导致 SWC 和 SWS 均显著低于撂荒模式[31]。单从土壤蓄水量来看时,以撂荒模式最优,且在退耕初期和末期最高。

3.2　土壤水分渗透性指标及影响因素

降水是研究区域土壤水分入渗补给的主要来源。在其他条件一定的情况下,土壤渗透性主要与水头压力(地表水层厚度)、土壤结构、植被盖度和枯落物层厚度等有关。黄土丘陵区植被恢复后,较高的植被盖度使大多数降雨事件的水分难以入渗补给到深层土壤,而对于蒸腾耗水较多的林地、灌木和人工草地而言,根系吸水不断减少土壤水分,进一步加剧了土壤干燥化,导致临时性或永久性的土壤干层。影响土壤水分渗透能力的因素之一是水势梯度驱动[32],因此本研究提出将 0－10 cm 土壤的渗透性和受降雨影响较大的 0－200 cm 土层内不同土层土壤含水量的比值(SR)作为土壤水分渗透能力和潜力的表征指标。SR 能克服时空代替的缺陷性,并忽略不同立地条件(如坡度、坡向等)的差异性[33],为评价不同植被类型下的土壤水分渗透潜力提供了一个新指标。但在实际野外采样时,应尽可能避免在雨后土壤水分再分布过程中采样,本研究中取样日期均在多日无雨或次降雨 3 天后,能较好反映土壤上下层含水量的差异。在多日连续无降雨的条件下,土壤上下层的含水量都很低,SR 的值越大,表明下层土壤水分的消耗越大,在水势梯度下也难以实现对深层土壤水分的渗透补给;而次降雨结束后,水分在土壤剖面内完成了再分布时,SR 的值越大,表明土壤上下层含水量的绝对差值越大,土壤水分的实际入渗补给越差;反之,SR 的值越小或接近于 1,表明较多雨水能入渗补给深层土壤。在本研究中,表层土壤的水分入渗能力以还乔模式最优,这与枯落物覆盖和土壤性质改善有关,刺槐林地的枯落物量显著多于柠条林和撂荒草地,可防止土壤结皮形成,增加土壤有机质含量和孔隙度,从而利于土壤水分入渗。另外,本研究发现,SR_1 和 SR_2 随退耕年限增加均呈现先小后大的变化趋势,退耕 30 年前后是土壤水分渗透潜力由弱变强的转折点(图 5)。在 30 年前,SR_1 和 SR_2 在还乔、还灌和撂荒模式下的年均变化速率分别为－1.54%和－0.86%,0.04%和－1.26%,－1.96%和－1.28%;在 30 年后,变为 2.26%和 0.76%,0.02%和 16.23%,9.10%和 0.98%。这说明退耕 30 年后各退耕模式的 0－200 cm 土层内均存在水分难以渗入深层土壤的现象,但有着较大的入渗补给的水势驱动力。

3.3　土壤水分持水性指标及影响因素

土壤的持水能力及持水特征是影响土壤水文调节能力的重要因素[24],这可在一定程度上由土壤水分特征曲线来反映,是由土壤孔隙度的大小与组成所决定的,也与土壤的有机质含量和粒径组成等因素有关[34]。退耕还林(灌)模式增大了土壤孔隙度与有机质含量,促进了团聚体形成[35],使土壤持水能力得以提高[36]。在本研究中,当土壤水吸力较低(0～1 Pa)时,土壤所能保持的水量主要取决于较粗孔隙的分布,与土壤结构密切相关;而在吸力较高时(＞1 Pa),不同退耕模式下的土壤持水量差异不大,主要与该区土壤质地均一、黏粒含量差异不大、矿物类型一致有关。撂荒模式的生物量较乔灌模式少,使土壤有机质含量和养分积累较弱[37],对冲刷抗击能力较小,土壤紧实和结构较差[38]使土壤持水能力较低。因此,还林模式土壤改良效应和持水能力增加的效果较为突出。

3.4　土壤水分稳定性指标及影响因素

土壤水分稳定性指土壤水分空间模式随时间变化的相对稳定性[39-40],可在一定程度上反映土壤剖面水分利用的可持续性。黄土丘陵区退耕还林后,土壤质地、入渗及持水能力得到改善,土壤剖面的蓄水量与时间稳定性随退耕年限增加得到了一定程度的改善。本研究发现,不同退耕模式的土壤水分年际变化率由负转正,并在退耕 30 年左右出现拐点。这表明退耕 30 年前 0－200 cm 土层含水量以减少为主,呈负向波动,土体内供植被生长的水分含量逐年减少;而植被恢复 30 年后出现相反的情况,土壤含水量逐年增加,呈正向波动,并以 0－120 cm 土层内最为显著。原因可能是人工林在 30 年后逐渐老化衰落,对土壤水分的消耗减弱,枯落物积累使土壤理化性质改良效应明显[41]。而撂荒草地在 30 年后逐渐向稀疏

灌木形态演替,植被盖度和地上生物量有所减少,对土壤水分的消耗减弱,土壤含水量上升。

4 结 论

(1)不同退耕模式下的土壤蓄水量差异显著,退耕撂荒地 0—200 cm 土层蓄水量(356.3 mm)最高,约为还灌(219.7 mm)和还乔模式(211.0 mm)的 1.6,1.7 倍。

(2)还乔模式下,土壤表层水分的渗透性最优,深层土壤水分的渗透潜力最大,退耕 30 年则是土壤水分渗透潜力由弱变强的转择点。

(3)不同恢复模式下土壤持水能力有一定差异。土壤水分保持能力在还乔模式下较高,而其他退耕模式差异不大。

(4)撂荒模式的土壤水分稳定性优于还林模式,0—200 cm 土层的水分稳定性在 30 年前后出现拐点,并在 120 cm 以下土层较为稳定。

参考文献:

[1] 李志,赵西宁.1961—2009 年黄土高原气象要素的时空变化分析[J].自然资源学报,2013,28(2):287-299.

[2] Zhang B Q, He C S, Burnham M, et al. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China [J]. Science of the Total Environment,2016,539:436-449.

[3] Lv Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A poolicy-priven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the loess plateau of China [J].PLoS One,2012,7(2):e31782.

[4] Yang L, Chen L D, Wei W, et al. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions [J].Journal of Hydrology, 2014, 513(1): 314-321.

[5] Wang S, Fu B J, Gao G Y, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China [J].Catena,2013,101:122-128.

[6] 梁海斌,薛亚永,安文明,等.黄土高原不同退耕还林植被土壤干燥化效应[J].水土保持研究,2018,25(4):77-85.

[7] 杨文治.黄土高原土壤水资源与植树造林[J].自然资源学报,2001,16(5):433-438.

[8] 梅雪梅.晋西黄土区坡地土壤水分时空分布及影响机制研究[D].北京:北京林业大学,2019.

[9] Gunton R M, Asperen E N, Basden A, et al. Beyond ecosystem services: Valuing the invaluable [J].Trends in Ecology and Evolution,2017,32(4):249-257.

[10] Thevs N, Beckmann V, Akimalieva A, et al. Assessment of ecosystem services of the wetlands in the Ili River Delta, Kazakhstan [J].Environmental Earth Sciences,2017,76(1):e30.

[11] 郝梦雅,任志远,孙艺杰,等.关中盆地生态系统服务的权衡与协同关系动态分析[J].地理研究,2017,36(3):592-602.

[12] 周佳雯,高吉喜,高志球,等.森林生态系统水源涵养服务功能解析[J].生态学报,2018,38(5):1679-1686.

[13] 吕一河,胡健,孙飞翔,等.水源涵养与水文调节:和而不同的陆地生态系统水文服务[J].生态学报,2015,35(15):5191-5196.

[14] 唐玉芝,邵全琴.乌江上游地区森林生态系统水源涵养功能评估及其空间差异探究[J].地球信息科学学报,2016,18(7):987-999.

[15] 莫菲,李叙勇,贺淑霞,等.东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价[J].生态学报,2010,31(17):5009-5016.

[16] 包玉斌,李婷,柳辉,等.基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J].地理研究,2016,35(4):664-676.

[17] 王玉纯,赵军,付杰文,等.石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异[J].生态学报,2017,38(13):4637-4648.

[18] Bonell M, Purandara B K, Venkatesh B, et al. The impact of forest use and reforestation on soil hydraulic conductivity in the Western Ghats of India: Implications for surface and sub-surface hydrology [J].Journal of Hydrology (Amsterdam),2010,391(1/2):47-62.

[19] Julian J P, Gardner R H. Land cover effects on runoff patterns in eastern Piedmont (USA) watersheds [J]. Hydrological Processes,2014,28(3):1525-1538.

[20] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000:67-81.

[21] 徐孝庆,胡沐钦.林地综合效益计量评价[M].北京:科学出版社,1992:32-93.

[22] 刘娜娜,赵世伟,杨永辉,等.云雾山封育草原对表土持水性的影响[J].草地学报,2006,14(4):338-342.

[23] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996:130-133.

[24] 郭美丽.延河流域退耕植被恢复过程中土壤蓄水性能变化研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2017.

[25] 郭建设.黄土高原与黄土地貌[J].地理教育,2007(5):32.

[26] 廖超林,傅灵艺,盛浩,等.紫色丘陵区旱地撂荒自然恢复提高土壤蓄水性能[J].农业工程学报,2014,30(21):111-119.

[27] Wang C, Zhao C Y, Xu Z L, et al. Effect of vegetation on soil water retention and storage in a semi-arid alpine forest catchment [J].Journal of Arid Land,2013,5(2):207-219.

[28] 吕渡,杨亚辉,赵文慧,等.黄土高原沟壑区不同植被对土壤水分分布特征影响[J].水土保持研究,2018,25(4):60-64.

[29] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. Ecological Applications,2000,10(2):423-436.

(下转第 168 页)

式对深层土壤含水量的影响[J].应用生态学报,2017,28(3):847-855.

[7] 白盛元,汪有科,马建鹏,等.黄土高原半干旱区降雨入渗试验研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):218-223.

[8] 李萍,李同录,付昱凯,等.非饱和黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(10):3551-3560.

[9] 张常亮,李萍,李同录,等.黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J].水利学报,2014,45(6):728-734.

[10] Huang M, Gallichand J. Use of the SHAW model to assess soil water recovery after apple trees in the gully region of the Loess Plateau [J]. Agricultural Water Management,2006,85(1/2):67-76.

[11] 缪凌,董建国,汪有科,等.黄土丘陵区不同土地利用类型下的深层土壤水分变化特征[J].水土保持研究,2016,23(2):13-18.

[12] 周玉红,董建国,汪有科,等.几种典型覆盖下的土壤水分恢复研究[J].水土保持研究,2015,22(2):334-339.

[13] 张文飞,汪星,汪有科,等.黄土丘陵区深层干化土壤中节水型修剪枣树生长及耗水[J].农业工程学报,2017,33(7):140-148.

[14] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林地土壤入渗过程分析[J].土壤学报,2009,46(5):953-958.

[15] 张敬晓,汪星,汪有科,等.黄土丘陵区林地干化土壤降雨入渗及水分迁移规律[J].水土保持学报,2017,31(3):231-238.

[16] 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 [J]. Journal of Hydrology,2010,381(1/2):9-17.

[17] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2011,151(4):437-448.

[18] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China [J]. Geoderma,2010,159(1/2):99-108.

[19] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China [J]. Geoderma,2008,143(1):91-100.

[20] 刘丙霞,任健,邵明安,等.黄土高原北部人工灌草植被土壤干燥化过程研究[J].生态学报,2020,40(11):3795-3803.

[21] 万素梅,贾志宽,韩清芳,等.黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干层形成及水分恢复[J].生态学报,2008,28(3):1045-1051.

[22] 冯金超,党宏忠,王檬檬,等.晋西黄土区苹果园生长季土壤水分动态[J].水土保持研究,2020,27(1):139-145.

[23] 汪星,高志永,汪有科,等.修剪与覆盖对黄土丘陵区枣林土壤干层的修复效应[J].林业科学,2018,54(7):24-30.

[24] 王志强,刘宝元,王旭艳,等.黄土丘陵半干旱区人工林迹地土壤水分恢复研究[J].农业工程学报,2007,23(11):77-83.

[25] 孙剑,李军,王美艳,等.黄土高原半干旱偏旱区苜蓿—粮食轮作土壤水分恢复效应[J].农业工程学报,2009,25(6):33-39.

(上接第 160 页)

[30] Jin T T, Fu B J, Liu G H, et al. Hydrologic feasibility of artificial forestation in the semi-arid Loess Plateau of China [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2011,15(8):2519-2530.

[31] 尹秋龙,焦菊英,寇萌.极端强降雨条件下黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分特征[J].自然资源学报,2015,30(3):459-469.

[32] 梁海斌.晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条林地土壤水分特征研究[D].太原:山西大学,2014.

[33] Xu M X, Wang Z, Zhao Y G. Stratification ratio of soil organic carbon as an indicator of carbon sequestration and soil quality in ecological restoration [J]. Restoration Ecology,2017,26(3):555-562.

[34] 苏杨,朱健,王平,等.土壤持水能力研究进展[J].中国农学通报,2013,29(14):140-145.

[35] 吴彦,刘世全,付秀琴,等.植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(1):45-49.

[36] 李航,严方晨,焦菊英,等.黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤有效水和持水能力[J].生态学报,2018,38(11):3889-3898.

[37] 温仲明,焦峰,赫晓慧,等.黄土高原森林边缘区退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化的影响[J].草业学报,2007,16(1):16-23.

[38] 王凯博,陈美玲,秦娟,等.子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系[J].西北植物学报,2007,27(10):2089-2096.

[39] Vachaud G A, Silans A P D, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function1 [J]. Soil Science Society of America Journal,1985,49(4):822-828.

[40] Coppola A, Comegna A, Dragonetti G, et al. Average moisture saturation effects on temporal stability of soil water spatial distribution at field scale [J]. Soil and Tillage Research,2011,114(2):155-164.

[41] 刘江华,刘国彬,陈淑芸.刺槐林地土壤水分与林下植物生物量的关系[J].水土保持研究,2009,16(3):57-60.