

生态转型模式对吕梁山红枣经济林土壤团聚体及其有机碳分布的影响

王 荟¹, 孙 琳¹, 李嘉琦¹, 沐春恒¹,
樊文华¹, 殷海善², 王改玲¹

(1. 山西农业大学资源环境学院, 山西 太谷 030801; 2. 山西农业大学农业经济管理学院, 山西 太谷 030801)

摘 要:为探究吕梁山红枣经济林不同生态转型模式对土壤团聚体及其有机碳分布的影响, 试验选取该地区5种主要的生态转换模式, 分别为枣林撂荒(AF)、枣林补种黄芪-柴胡(MM)、补种苜蓿(AL)、补植油松(CP)、补植侧柏(PO), 并以清耕枣林为对照(CK), 测定并分析各样地0~20 cm土层中土壤团聚体稳定性、团聚体有机碳与土壤总有机碳含量及其相关性。结果表明:(1)与CK相比, 除AF模式外, 其他生态模式提高了>2.0 mm及>0.25 mm团聚体含量, 增量分别为3.75%~9.31%和1.68%~10.36%; 同时提高了团聚体的平均重量直径、几何平均直径, 增量分别为0.05~0.19、0.03~0.10 mm, CP模式提高幅度最大;(2)所有生态模式显著提高了土壤有机碳含量, 增量为0.24~4.72 g·kg⁻¹, 提高幅度为9.25%~182.10%, 同时提高了土壤各粒径团聚体有机碳含量;(3)土壤有机碳的贡献率主要来自于>0.25 mm团聚体, 所有生态模式均提高了土壤>0.25 mm团聚体有机碳的贡献率, 增量为4.20%~22.96%; (4)土壤有机碳及>0.25 mm团聚体有机碳含量与土壤团聚体稳定性参数呈显著正相关关系, 红枣林补植油松模式最有利于土壤有机碳、>0.25 mm团聚体有机碳含量及团聚体稳定性的提高。

关键词:红枣经济林; 生态转型模式; 土壤有机碳; 土壤团聚体; 吕梁山

中图分类号:S665.1; S154.1 **文献标志码:**A

Effects of ecological transition patterns on the distribution of soil aggregates and organic carbon in jujube economic forest in Lvliang Mountain

WANG Hui¹, SUN Lin¹, LI Jiaqi¹, MU Chunheng¹,
FAN Wenhua¹, YIN Haishan², WANG Gailing¹

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;

2. College of Agricultural Economics and Management, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

Abstract: In order to investigate effects of ecological transition patterns on the distribution of soil aggregates and organic carbon in jujube economic forest in Lvliang Mountain, five ecological transformation modes were selected, namely jujube forest abandoned farmland (AF), jujube forest replanting with *Astragalus-Bupleurum* (MM), replanting with alfalfa (AL), replanting with Chinese pine (CP), replanting with *Platycladus orientalis* (PO), and jujube forest under clear-cutting operation was used as the control (CK). The stability of soil aggregates in 0~20 cm soil layer, the organic carbon content of soil and the organic carbon content of soil aggregates in 0~20 cm soil layer were assessed. The results showed that: (1) Except for AF model, other ecological models increased the ratios of >2.0 mm aggregates and >0.25 mm aggregates by 3.75%~9.31% and 1.68%~10.36%, respectively. Mean weight diameter and geometric mean diameter were increased by 0.05~0.19 mm and 0.03~0.10 mm, CP treatment performed best. (2) All ecological patterns significantly increased soil organic carbon content by 0.24~4.72 g·kg⁻¹, the increase rate was 9.25%~182.10%, and increased the organic carbon content of soil aggregates of all grain sizes. (3) The contributions of soil organic carbon were mainly from >0.25 mm aggregates, which were

increased by 4.20%~22.96% in all ecological models. (4) The organic carbon content of soil and >0.25 mm soil aggregates were significantly positive correlated with soil aggregate stability parameters. Soil organic carbon content, >0.25 mm soil aggregates organic carbon content and soil aggregate stability parameters in the Chinese pine model were the highest in all ecological transformation modes in Lvliang Mountain.

Keywords: jujube economic forest; ecological transformation model; soil organic carbon; soil aggregate; Lvliang Mountain

吕梁山区是山西省水土流失最严重的区域,是国家级限制开发的重点功能区。13.33 万 hm^2 的吕梁山区沿黄红枣经济林是黄土丘陵区水土流失治理的重要生态工程和农民脱贫致富的重要产业。然而,由于近年来市场对于当地红枣的需求减小,吕梁山区红枣经济林成为低效经济林,大部分被撂荒弃管^[1]。而且,当地红枣经济林地多为坡耕地,撂荒并非提高其生态效益的最优模式。于是从2000年开始,按照乔灌结合、林下补灌等原则,少量低效红枣经济林被退耕还林^[2-3]。2020年实施的新一轮退耕还林中,吕梁市又将退化红枣经济林纳入退耕还林范围^[4]。研究吕梁山区红枣经济林转型后的生态效益,优选坡耕地红枣经济林生态转型模式,是吕梁山沿黄红枣经济林实现科学转型的必由之路。

团聚体是土壤结构的基本单元,其数量和分布比例对土壤稳定性具有重要影响^[5]。土壤有机碳(SOC)是形成团聚体的主要胶结物质^[6],影响着土壤团聚体的大小和分布比例^[7]。通常用>0.25 mm团聚体含量($R_{0.25}$)表示土壤团聚体含量。平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)与土壤结构的稳定性呈正相关关系^[8]。根系、水分、土壤养分、耕作措施是影响土壤团聚体稳定性的重要因素。合理、可持续发展的土地利用方式和管理措施(如退耕还林、退耕还草)能增强团聚体稳定性,改善土壤结构。退耕还林(还草)对团聚体稳定性及其机制的影响因退耕模式的不同而不同。李柏桥等^[9]通过对黄土高原南部退耕后的刺槐林地以及苜蓿草地的研究发现,退耕还林还草与未退耕相比,显著增加了>2.0 mm和1.0~2.0 mm粒径团聚体含量,显著减少了<0.25 mm粒径团聚体含量,退耕还草15 a的苜蓿草地有更好的土壤团聚体稳定性和更多的团聚体有机碳积累。范家伟等^[10]对黄土丘陵区退耕刺槐林土壤研究表明,耕地转变为刺槐林地后显著增加了>0.25 mm粒径团聚体比例,显著降低了<0.25 mm粒径团聚体比例。研究发现,在土壤团聚体形成过程中,2.0 mm和0.25 mm是关键临界值^[11],而且>2.0 mm粒径团聚体含量与团聚体稳定

性表现出正相关关系。土地利用方式还是影响土壤有机碳及其在团聚体中分布的重要因素。

目前研究大多集中于农田转换为林地或草地后土壤团聚体稳定性的变化,红枣经济林通过补植、补种转变为生态林后,土壤团聚体稳定性及其变化机制的报道尚不多见。本研究拟以当地红枣经济林生态转换实际情况为依据,选取生态转换年限为5 a的5种典型转换模式(枣林撂荒、枣林补种中药材、补种苜蓿、补植油松和补植侧柏)样地为研究对象,并以常规耕作枣林为对照,探究生态转型对吕梁山区红枣经济林土壤团聚体及团聚体有机碳分布的影响,旨在为该地区生态转化模式的选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地选择在山西省吕梁市临县,其地处黄河中游沿岸吕梁山区($110^{\circ}31'12''\sim 110^{\circ}54'36''\text{E}$, $37^{\circ}32'24''\sim 38^{\circ}06'02''\text{N}$),属于温带大陆性季风气候,地形地貌是典型的黄土丘陵沟壑区。该地区海拔724~1 025 m,年平均气温6~13℃,平均降水量300~700 mm,且主要集中于7—9月。土壤类型是以黄土为母质直接耕种发育而成的黄绵土,土壤结构性差、土体疏松、肥力水平低。地形大多为 $10^{\circ}\sim 13.5^{\circ}$ 的坡耕地,耕作难度较大。1999年和2019年退耕还林政策实施以来,主要的土地利用模式为枣树树间补植补种乔木、灌木和草本植物,主要有油松、侧柏、刺槐、山杏、白榆、柠条、连翘、苜蓿、远志、黄芪、柴胡等。

1.2 样地选择

经过翻阅大量资料、野外走访村民和联系询问当地工作人员后,选择了土壤质地相同、坡度相近、枣树树龄相近(20 a以上)、生态转换年限相同(5 a),转换模式分别为枣林撂荒(AF)、枣林补种黄芪-柴胡(MM)、补种苜蓿(AL)、补植油松(CP)、补植侧柏(PO)的5块地为研究样地,并以清耕作业下的枣林为对照(CK)。样地面积2 000 m^2 ,在进行生态转型前,枣林密度为600 棵 $\cdot \text{hm}^{-2}$,株距3 m,行距5

m。清耕作业的管理模式为一年内 3 次耕作,除去地表所有覆盖物,包括杂草。枣林撂荒模式中,从撂荒开始不采用任何管理方式,任杂草自然生长;采样时主要优势杂草种类有:狗尾巴草、地锦草、臭蒿、铁杆蒿。枣林补种黄芪-柴胡模式中,枣树下间行种植黄芪和柴胡,黄芪和柴胡采用穴播的播种方式,播种行距 33 cm、穴距 27 cm。枣林下套种苜蓿模式中,苜蓿亦采用穴播的播种方式,播种密度为 9

穴·m⁻²;采样时,黄芪、柴胡、苜蓿生长状况良好,间杂的主要野草有:臭蒿、黄蒿、狗尾巴草。枣林补植油松和补植侧柏模式中,油松和侧柏采用移栽方式,补植密度为 1 650 棵·hm⁻²;采样时,油松和侧柏高度 3~4 m、胸径 13~16 cm;林下杂草主要有:牛筋草、臭蒿、铁杆蒿、甘草头。采样时,各样地枣树的胸径 13~19 cm,高度 4~5 m。样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic situation of sample plot

样地 Sample plot	经纬度 Latitude and longitude	海拔 Altitude /m	郁闭度 Degree of canopy closure/%	坡度 Degree of slope/(°)	坡向 Aspect of slope	容重 Bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	碱解氮 Alkali hydrolyzed nitrogen /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷 Available phosphorus /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 Quick-acting potassium /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	110°34'48"E, 38°06'02"N	1025.07	10~15	12.0	阳 Sunny	1.33	15.63	2.21	115.92
AF	110°32'24"E, 38°05'24"N	937.38	40~50	13.5	半阳 Semi sunny	1.23	20.15	2.17	90.87
MM	110°31'12"E, 38°01'48"N	878.65	40~50	12.5	半阳 Semi sunny	1.22	21.82	2.24	113.59
AL	110°43'48"E, 37°44'24"N	798.69	70~80	13.0	阳 Sunny	1.36	22.68	2.45	121.17
CP	110°47'24"E, 37°32'24"N	724.21	90~95	10.0	半阳 Semi sunny	1.51	33.38	2.74	104.40
PO	110°54'36"E, 37°44'24"N	770.85	70~80	12.0	阳 Sunny	1.28	24.08	2.67	79.13

1.3 样品采集及指标分析

供试土壤于 2022 年 8 月采集。在每种生态转换模式的样地中,设置 3 个采样小区(20 m×20 m),每个采样小区内随机取 3 个采样点,去除地表枯落物后,每个采样点分别采集 0~20 cm 土层的原状土壤保存至已标记好的大铝盒,以防土壤结构发生断裂。运回实验室后,将土壤平铺在报纸上,置于阴凉干燥的地方,剔除动植物残体和小石头,在半干的状态下,沿其自然裂缝掰成 1 cm 左右的小土块,直至完全风干,供团聚体分级使用。

同时在每个采样小区中,按“S”型 5 点采样法采集 0~20 cm 土层土样,混匀后带回实验室,自然风干、过筛、储存,用于土壤基本理化性质分析。

水稳性团聚体采用 Elliott^[12]提出的湿筛法测定,得到>2.0 mm、0.25~2.0 mm、0.053~0.25 mm 和<0.053 mm 粒级的水稳性团聚体含量;采用重铬酸钾-容量法测定土壤有机碳含量和团聚体各粒级有机碳含量^[13]。计算>0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$,%)、团聚体平均重量直径(MWD ,mm)、团聚体几何平均直径(GMD ,mm),以及团聚体各粒级有机碳对土壤有机碳的贡献率(CR ,%),计算公式如下^[14]:

$$R_{0.25} = \frac{M_{0.25}}{M} \times 100\%$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i$$

$$GMD = \exp \left| \frac{\sum_{i=0}^n W_i \ln X_i}{\sum_{i=0}^n W_i} \right|$$

$$CR = \frac{OC_i \times W_i}{SOC} \times 100\%$$

式中, $M_{0.25}$ 表示>0.25 mm 团聚体质量(g); M 是湿筛称土质量(g); W_i 表示第*i*个粒径团聚体质量占总质量的百分比(%); X_i 表示第*i*个粒径团聚体平均直径(mm); OC_i 表示第*i*个粒径团聚体土壤有机碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); SOC 表示土壤有机碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2016 进行数据整理;采用 SPSS 23 进行数据分析,利用单因素方差分析中 Duncan 法检验不同处理下各指标的差异性,利用 Pearson 法对土壤有机碳含量与土壤团聚体稳定性进行相关性分析;采用 Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

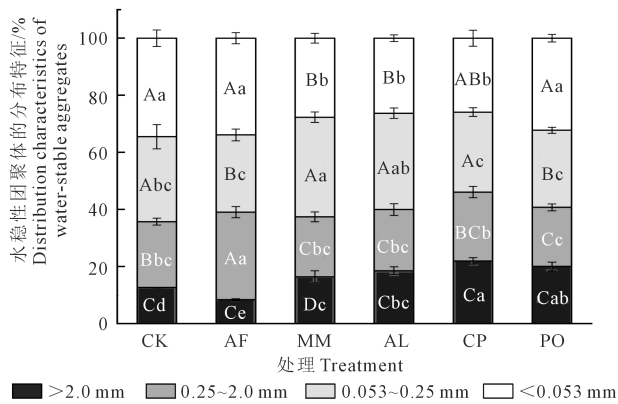
2.1 不同生态转型模式样地土壤团聚体分布及稳定性特征

从图1可以看出,与CK比较,除AF处理外,其余处理显著增加土壤>2.0 mm水稳性团聚体含量($P<0.05$),增幅为3.75%~9.31%,CP处理增加最多;AF处理显著增加0.25~2.0 mm水稳性团聚体含量;MM、AL、CP处理显著降低<0.053 mm水稳性团聚体含量($P<0.05$),CP处理降低幅度最大,为8.63%。不同生态转型模式对0.053~0.25 mm水稳性团聚体影响较小,总体表现为MM、AL>CK、CP>AF、PO。

从表2可以看出,AL、CP、PO处理均显著提高了 $R_{0.25}$ 值($P<0.05$),其中CP处理提高最多,较CK提高10.35%。MM、AL、CP、PO处理显著提高土壤团聚体MWD值和GMD值($P<0.05$),其中CP处理的MWD值和GMD值均为最大,分别为0.77 mm和0.33 mm。

2.2 不同生态转型模式样地土壤及土壤团聚体有机碳含量

从图2可以看出,不同生态转型模式影响土壤有机碳含量(SOC)($P<0.05$)。与CK处理相比,所有处理SOC均显著增加,具体表现为CP>PO>AL>AF>MM>CK,增加范围为0.24~4.72 g·kg⁻¹,其中CP处理增加幅度最大,较CK增加182.00%;MM处理增加幅度最小,较CK增加9.25%。



注:不同小写字母表示同一粒径不同处理间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示同一处理不同粒径间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters indicate a significant difference between different treatments of the same particle size ($P<0.05$), different uppercase letters indicate a significant difference between different sizes of the same treatment ($P<0.05$). The same below.

图1 不同生态转型模式样地土壤水稳性团聚体分布特征
Fig.1 Distribution characteristics of soil water-stable aggregates in different ecological transition models

从图3可以看出,各处理不同粒径的土壤团聚体有机碳含量总体表现为:(>2.0 mm)>(0.25~2.0 mm)>(0.053 mm)>(0.053~0.25 mm)。各粒径中,不同处理团聚体有机碳总体表现为CP、PO>AL>AF、MM>CK。在CP和PO处理中,>2.0mm团聚体有机碳含量分别是CK的3.72倍和2.13倍。各处理0.25~2.0 mm团聚体有机碳含量均显著大于CK($P<0.05$),其中AL、CP、PO增幅较大,增长175.21%~185.74%。除MM处理外,其他处理较CK均显著提高了0.053~0.25 mm团聚体和<0.053 mm团聚体的有机碳含量($P<0.05$)。

表2 不同生态转型模式样地土壤水稳性团聚体稳定性特征
Table 2 Characteristics of aggregate stability of soil water-stable in different ecological transition models

处理 Treatment	$R_{0.25}/\%$	MWD/mm	GMD/mm
CK	35.72±0.01c	0.58±0.01d	0.23±0.00d
AF	39.02±0.02bc	0.57±0.03d	0.24±0.01cd
MM	37.39±0.01bc	0.63±0.02c	0.26±0.01bc
AL	39.95±0.02b	0.68±0.02bc	0.28±0.01b
CP	46.07±0.03a	0.77±0.04a	0.33±0.03a
PO	40.71±0.00b	0.69±0.02b	0.27±0.01b

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate a significant difference between different treatments ($P<0.05$).

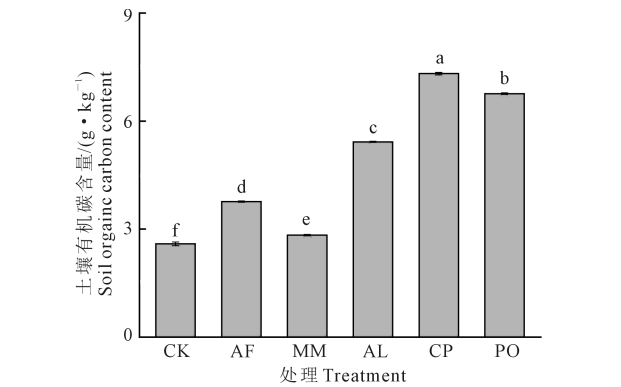


图2 不同生态转型模式样地土壤有机碳含量
Fig.2 Soil organic carbon content in different ecological transition models

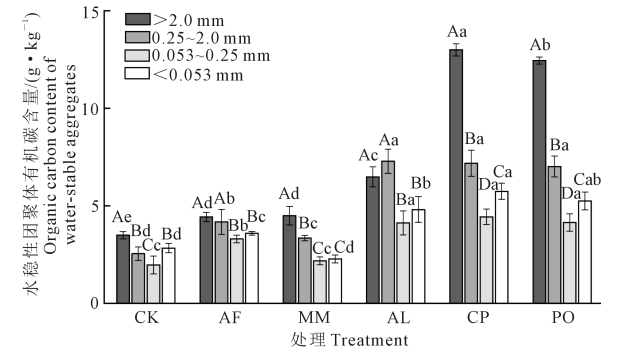


图3 不同生态转型模式样地土壤水稳性团聚体有机碳含量
Fig.3 Organic carbon content of soil water-stable aggregates in different ecological transition models

2.3 不同生态转型模式样地土壤团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率

由图 4 可知,红枣经济林生态转型后,各粒径团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率发生了变化。与 CK 相比,除 AF 处理外,其他处理均提高>2.0 mm 团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率($P<0.05$),提高范围为 5.15%~21.96%,其中提高最多的为 CP 处理;AF、AL 处理显著提高 0.25~2.0 mm 团聚体有机碳贡献率;CP、PO 处理显著降低 0.25~0.053 mm 团聚体的贡献率;所有处理均减小<0.053 mm 团聚体有机碳贡献率。

2.4 土壤有机碳与土壤团聚体稳定性参数间的相关性

由表 3 可知,土壤有机碳含量与>2.0 mm、0.25~2.0 mm、0.053~0.25 mm 团聚体有机碳含量呈现显

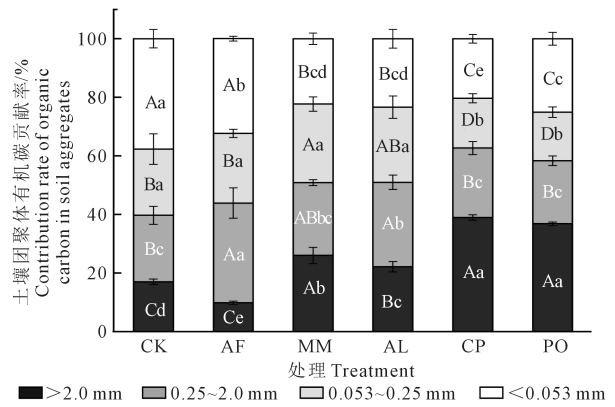


图 4 不同生态转型模式样地土壤各粒径团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率
Fig.4 Contribution rate of organic carbon to aggregate in different ecological transition models

表 3 土壤有机碳及土壤团聚体有机碳含量与团聚体稳定性参数间的相关性
Table 3 Correlation between soil and soil aggregate organic carbon contents and aggregate stability parameters

项目 Item	MWD	GMD	R _{0.25}	SOC
>2.0 mm 团聚体有机碳 >2.0 mm aggregate organic carbon	0.938 **	0.962 **	0.976 **	0.904 *
0.25~2.0 mm 团聚体有机碳 0.25~2.0 mm aggregate organic carbon	0.834 *	0.777	0.798	0.884 *
0.053~0.25 mm 团聚体有机碳 0.053~0.25 mm aggregate organic carbon	0.767	0.747	0.851 *	0.868 *
<0.053 mm 团聚体有机碳 <0.053 mm aggregate organic carbon	0.818 *	0.768	0.864 *	0.944 **
MWD		0.966 **	0.886 *	0.918 **
GMD			0.934 **	0.840 *
R _{0.25}				0.881 *

注:表中数字代表相关系数r,*和**分别表示在P<0.05和P<0.01水平上显著相关。
Note: The numbers in the table represent the correlation coefficientr,* and ** indicate significant correlation at the P<0.05 and P<0.01 levels, respectively.

著正相关($P<0.05$);与<0.053 mm 团聚体有机碳含量呈现极显著正相关($P<0.01$),相关系数为0.944。 MWD 值、 GMD 值、 $R_{0.25}$ 值是表征土壤团聚体稳定性的主要参数。土壤有机碳含量与 MWD 值存在极显著正相关关系($P<0.01$),与 GMD 值、 $R_{0.25}$ 值存在显著正相关关系($P<0.05$)。>2.0 mm 团聚体有机碳与 MWD 值、 GMD 值、 $R_{0.25}$ 值均呈现极显著正相关关系($P<0.01$),相关系数分别为 0.938、0.962、0.976。<0.053 mm 的团聚体有机碳与 MWD 值和 $R_{0.25}$ 值呈现显著正相关($P<0.05$)。

3 讨 论

3.1 不同生态转型模式对土壤团聚体分布和稳定性的影响

团聚体的分布比例影响土壤的结构稳定性, $R_{0.25}$ 是维持土壤结构稳定的基础^[15]。已有研究表明,耕地弃耕后自然演替的生态转型模式能显著提高>0.25 mm 土壤团聚体数量^[16]。本研究表明,除枣林撂荒模式外,其余 4 种生态转型模式显著提高了土壤>2.0 mm 团聚体含量,降低了<0.053 mm 团聚体含量,这与陈文媛等^[17]对于黄土丘陵区退耕还林土壤的研究结果相似。其原因可能是经济林地退耕后,地表草本、枯落物及地下植物根系增多^[18],土壤有机物来源增加,而有机碳能胶结土壤颗粒^[19],促进土壤团聚体由粉黏粒向团聚体转换^[20]。

MWD 值、 GWD 值越大,说明土壤结构越稳定^[21]。已有研究表明^[22],由耕地转换为生态林地的生态转型模式能显著提高团聚体 MWD 值和 GMD 值。本研究发现,除撂荒处理外,其余各处理较清耕均显著提高 MWD 值和 GMD 值,这与罗晓虹等^[23]的研究结果相似。说明生态转型有利于土壤>0.25 mm 团聚体形成,增强土壤稳定性。本研究还发现补植油松和侧柏处理的土壤团聚体 MWD 值、 GMD 值大于补植药材、苜蓿,其中补植油松的生态转型模式的>0.25 mm 土壤团聚体含量及土壤 MWD 值、 GMD 值更高。这可能是因为,油松、侧柏属于乔木植物,混交乔木的林地生态群落更加完善^[24],地表植被枯落物除了乔木枯落物,还有自然演替出的草类,为土壤提供了更多的有机胶结物质,同时表层根系对土壤的穿插和缠结促进了土壤团聚结构的形成,这与 Liu、Zeng 等^[25-26]的研究结果相似。

3.2 不同生态转型模式对土壤及土壤团聚体有机碳含量的影响

土壤有机碳是团聚体形成的主要胶结物质,团聚体为有机碳提供物理保护^[27-28]。已有研究发现,

耕地转换为撂荒地或次生林地后均提高了土壤有机碳含量^[29]。本研究发现,与清耕相比,不同生态转型模式显著提高了土壤有机碳的含量,表现为 $CP > PO > AL > AF > MM > CK$ 。造成 SOC 含量存在差异的原因一方面可能是红枣经济林中补植油松、侧柏后,归还于土壤的枯落物数量高于补栽苜蓿、药材、撂荒处理,更高于清耕;另一方面,油松、侧柏枯落物含有更多难降解的纤维素和木质素等,从而促进了土壤有机碳的积累^[30]。这一结果与潘英杰等^[31]对黄土高原天然次生林植被演替的研究结果相似。

5种生态转型模式,显著增加了 >2.0 mm 团聚体和 $0.25 \sim 2.0$ mm 团聚体有机碳含量。这是因为清耕处理地表植被覆盖度低,降雨时雨滴的溅蚀作用和地表超渗径流使土壤大团聚体受到的破坏^[32]。而生态转型后,地表植被覆盖增加,促进了腐殖质在土壤中积累,土壤侵蚀降低,大团聚体受到破坏减弱,减缓了团聚体内部有机质的矿化和氧化^[33],加上新补充的有机碳,从而使团聚体有机碳含量增加。

团聚体有机碳贡献率由团聚体有机碳含量和团聚体分布比例共同决定^[34]。研究表明,不同生态转型模式下土壤团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率主要来自 >0.25 mm 团聚体, <0.053 mm 团聚体次之, $0.053 \sim 0.25$ mm 团聚体最低。这与龙启霞等^[35]的研究结果相似。本研究还发现,各粒级团聚体对土壤有机碳贡献率随着生态转型模式的不同也有所不同。所有生态转型模式较清耕处理均提高了 >0.25 mm 团聚体的贡献率,降低了 <0.053 mm 团聚体的贡献率,其中补植油松处理 >0.25 mm 团聚体贡献率最高。这说明不同生态转型模式促进了土壤有机碳向 >0.25 mm 团聚体的富集,提高了 >0.25 mm 团聚体的贡献率,其中补植油松处理的 >0.25 mm 团聚体的贡献率较清耕处理提高最多,说明补植油松的生态转型模式较其他模式更合适吕梁山区红枣经济林。

3.3 土壤团聚体有机碳含量与稳定性参数间的相关性分析

研究表明, <0.053 mm 团聚体有机碳与土壤有机碳含量呈极显著正相关关系,说明 <0.053 mm 团聚体较其他粒径能更敏感地反映土壤有机碳含量的变化。土壤有机碳含量与 MWD 值、 GMD 值和 $R_{0.25}$ 值均呈显著正相关关系,表明土壤有机碳含量的增加可以为团聚体的形成提供更多的胶结物质,将 $0.25 \sim 0.053$ mm 团聚体和 <0.053 mm 团聚体胶结形成 >2.0 mm 团聚体,提高了土壤团聚体的稳定性。

>2.0 mm 团聚体有机碳与 MWD 值、 GMD 值和 $R_{0.25}$ 值呈极显著正相关关系,而 $0.25 \sim 2.0$ mm、 $0.053 \sim 0.25$ mm 粒径团聚体有机碳与 MWD 值、 GMD 值和 $R_{0.25}$ 值相关系数较低,说明 >2.0 mm 团聚体有机碳较其他较小粒径团聚体有机碳能更敏感地反映土壤团聚体的稳定性,有机碳在 >2.0 mm 粒径团聚体中比在其他较小粒径团聚体中维持团聚体稳定性的作用更大^[36]。

4 结 论

1) 红枣经济林生态转型提高了土壤 >2.0 mm 水稳性团聚体含量,以及团聚体 $R_{0.25}$ 值、 MWD 值、 GMD 值,降低了 <0.053 mm 水稳性团聚体含量,增加了团聚体的稳定性。各处理土壤团聚体稳定性总体表现为 $CP > PO$ 、 AL 、 $MM > AF > CK$ 。

2) 红枣经济林生态转型显著提高了土壤有机碳含量;亦提高了各粒径,尤其是 >2.0 mm 粒径团聚体有机碳含量。各处理土壤及团聚体有机碳含量总体表现为 $CP > PO > AL > AF > MM > CK$ 。

3) 土壤有机碳的贡献率主要来自于 >0.25 mm 团聚体, $0.053 \sim 0.25$ mm 团聚体次之, <0.053 mm 团聚体最低。不同生态转型模式提高了土壤 >0.25 mm 团聚体有机碳的贡献率,降低了 <0.053 mm 团聚体对土壤有机碳的贡献率。

4) 土壤有机碳含量与各粒径团聚体有机碳含量、土壤稳定性参数呈显著正相关关系。 >2.0 mm 团聚体有机碳与土壤团聚体稳定性参数呈极显著正相关关系。

因此,红枣经济林中补植油松对提高土壤及团聚体有机碳含量、增加团聚体稳定性的效果最优,补植油松是吕梁山区红枣经济林优选的生态转型模式。

参 考 文 献:

- [1] 殷海善, 赵丹, 孟志兴. 吕梁山红枣经济林成本收益的盈亏平衡分析[J]. 山西农业科学, 2019, 47(7): 1268-1271, 1276.
YIN H S, ZHAO D, MENG Z X. Equilibrium analysis of the cost and income of jujube economic forest in the Lyuliang Mountain[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(7): 1268-1271, 1276.
- [2] 徐远慧, 冯璐, 屈媛媛, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕还草年限对土壤性质和入渗性能的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 57-63.
XU Y H, FENG L, QU Y Y, et al. Effects of different restoration years of grain for green on soil properties and infiltration performance in loess gully region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 57-63.
- [3] 殷海善, 乔月, 刘焕焕, 等. 吕梁山沿黄红枣经济林退耕还林地生态调查研究[J]. 山西农业科学, 2021, 49(2): 243-246.

YIN H S, QIAO Y, LIU H H, et al. Ecological investigation on forest-land transformed from farmland of jujube economic forest along Yellow River in Lvliang Mountain [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2021, 49(2): 243-246.

[4] 吕梁市人民政府. 关于大力推进新一轮退耕还林还草工作的实施意见[EB/OL]. (2020-06-22) [2023-07-20]. http://www.lvliang.gov.cn/llxxgk/zfxgk/xgkml/zcjd_21560/202011/t20201102_1446020.html.

The People's Government of Lvliang City. Implementation opinions on vigorously promoting the new round of returning farmland to forest and grassland[EB/OL]. (2020-06-22) [2023-07-20]. http://www.lvliang.gov.cn/llxxgk/zfxgk/xgkml/zcjd_21560/202011/t20201102_1446020.html.

[5] 聂富育, 杨万勤, 杨开军, 等. 四川盆地西缘 4 种人工林土壤团聚体及有机碳特征[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3): 542-547.

NIE F Y, YANG W Q, YANG K J, et al. Soil aggregates and organic carbon in four plantations on the western edge of the Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2017, 23 (3): 542-547.

[6] KAHLON M S, LAL R, ANN-VARUGHESE M. Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio [J]. Soil and Tillage Research, 2013, 126: 151-158.

[7] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 159-165.

YUAN J J, TONG Y A, LU S H, et al. Biochar and nitrogen amendments improving soil aggregate structure and jujube yields[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (3): 159-165.

[8] 吴宪, 张婷, 王蕊, 等. 化肥减量配施有机肥和秸秆对华北潮土团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 933-941.

WU X, ZHANG T, WANG R, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with application of organic fertilizer and straw on fluvo-aquic soil aggregate distribution and stability in North China[J]. Ecology and Environment Sciences, 2020, 29(5): 933-941.

[9] 李柏桥, 付玉, 李光录, 等. 退耕年限与方式对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(3): 238-244.

LI B Q, FU Y, LI G L, et al. Effects of age and type of conversion from cropland to forest land and grassland on stability and organic carbon in soft aggregates [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(3): 238-244.

[10] 范家伟, 朱广宇, 上官周平, 等. 黄土丘陵区刺槐林土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性动态变化[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 19-26.

FAN J W, ZHU G Y, SHANG GUAN Z P, et al. Dynamics changes of soil aggregate stability and soil erodibility of *Robinia pseudoacacia* plantations in hilly region of the loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 19-26.

[11] 姜勇祥, 蓝家程, 龙家辉. 喀斯特石漠化地区退耕模式对土壤团

聚体组成和稳定性的影响[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2020, 38(4): 10-17.

JIANG Y X, LAN J C, LONG J H. Effects of de-farming patterns on the composition and stability of soil aggregates in Karst rocky desertification area [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2020, 38(4): 10-17.

[12] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627-633.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-35.

BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30-35.

[14] 张玉铭, 胡春胜, 陈素英, 等. 耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(9): 1558-1570.

ZHANG Y M, HU C S, CHEN S Y, et al. Effects of tillage and straw returning method on the distribution of carbon and nitrogen in soil aggregates [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1558-1570.

[15] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4695-4704.

LI J L, JIANG C S, HAO Q J. Impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun Mountain [J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4695-4704.

[16] 王月玲, 王思成, 马璠, 等. 宁南黄土丘陵区撂荒地恢复过程中土壤水稳性团聚体的变化特征[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(21): 310-314.

WANG Y L, WANG S C, MA F, et al. Characteristics of soil water-stable aggregates in abandoned lands during vegetation restoration in loess hilly region of southern Ningxia [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(21): 310-314.

[17] 陈文媛, 徐学选, 华瑞, 等. 黄土丘陵区林草退耕年限对土壤团聚体特征的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(4): 1486-1492.

CHEN W Y, XU X X, HUA R, et al. Effects of forestlands and grasslands on soil aggregates under different vegetation restoration ages in loess hilly region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37 (4): 1486-1492.

[18] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 267-273, 298.

LIU J Y, ZHOU Z C, SU X M. Review of the mechanism of root system on the formation of soil aggregates [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 267-273, 298.

[19] LI Q, LIU G B, ZHANG Z, et al. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the Loess soil [J]. Catena, 2017, 153: 61-65.

[20] SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 7-31.

[21] WANG J Y, DENG Y S, LI D Y, et al. Soil aggregate stability and its response to overland flow in successive *Eucalyptus* plantations in

- subtropical China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807 (Part 3): 151000.
- [22] ZHANG Y, E S Z, WANG Y N, et al. Long-term manure application enhances the stability of aggregates and aggregate-associated carbon by regulating soil physicochemical characteristics[J]. *Catena*, 2021, 203: 105342.
- [23] 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(8): 3816-3824.
- LUO X H, WANG Z F, LU C, et al. Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(8): 3816-3824.
- [24] 金晓, 陈丽华. 晋西黄土区不同植被类型土壤抗冲性及表层根系分布特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 120-126.
- JIN X, CHEN L H. Soil anti-scourability and root distribution characteristics in surface soil under different vegetation types in the loess region of Western Shanxi Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 120-126.
- [25] LIU Y F, LIU Y, SHI Z H, et al. Effectiveness of re-vegetated forest and grassland on soil erosion control in the semi-arid Loess Plateau [J]. *Catena*, 2020, 195: 104787.
- [26] ZENG Q C, DARBOUX F, MAN C, et al. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China)[J]. *Catena*, 2018, 167: 276-283.
- [27] GHIMIRE R, LAMICHHANE S, ACHARYA B S, et al. Tillage, crop residue, and nutrient management effects on soil organic carbon in rice-based cropping systems: a review[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(1): 1-15.
- [28] LI J Y, YUAN X L, GE L, et al. Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 304: 107126.
- [29] 徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 等. 缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响[J]. *环境科学*, 2013, 34(10): 4009-4016.
- XU P, JIANG C S, HAO Q J, et al. Effects of the different land use on soil labile organic matter and carbon management index in Junyun Mountain[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(10): 4009-4016.
- [30] 章广琦, 张萍, 陈云明, 等. 黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(4): 1328-1336.
- ZHANG G Q, ZHANG P, CHEN Y M, et al. Stoichiometric characteristics of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystems in the Loess hilly-gully region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(4): 1328-1336.
- [31] 潘英杰, 何志瑞, 刘玉林, 等. 黄土高原天然次生林植被演替过程中土壤团聚体有机碳动态变化[J]. *生态学报*, 2021, 41(13): 5195-5203.
- PAN Y J, HE Z R, LIU Y L, et al. Dynamics of soil aggregate-associated organic carbon during secondary forest succession in the Loess Plateau, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(13): 5195-5203.
- [32] SHI P, ARTER C, LIU X Y, et al. Soil aggregate stability and size-selective sediment transport with surface runoff as affected by organic residue amendment[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 95-102.
- [33] 张曼夏, 季猛, 李伟, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其结合有机碳的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(4): 598-604.
- ZHANG M X, JI M, LI W, et al. Effect of land use patterns on soil aggregate stability and aggregate-associated organic carbon [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2013, 19(4): 598-604.
- [34] 江仁涛, 李富程, 沈淦涛. 不同年限红柳恢复川西北高寒沙地对土壤团聚体和有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 197-203.
- JIANG R T, LI F C, SHEN S T. Effects of different age of alpine desertification land planted branchy tamarisk on soil aggregates and organic carbon in Northwestern Sichuan[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 197-203.
- [35] 龙启霞, 蓝家程, 姜勇祥. 生态恢复对石漠化地区土壤有机碳累积特征及其机制的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(18): 7390-7402.
- LONG Q X, LAN J C, JIANG Y X. Effects of soil organic carbon fractions on aggregates under ecological restoration in rocky desertification region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(18): 7390-7402.
- [36] 韩贞贵, 周运超, 任娇娇, 等. 马尾松人工林土壤各粒径团聚体湿筛后的有机碳分配[J]. *生态学报*, 2021, 41(23): 9388-9398.
- HAN Z G, ZHOU Y C, REN J J, et al. Distribution of organic carbon after wet sieving of soil aggregates of various particle sizes in Masson Pine plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(23): 9388-9398.