植物营养与肥料学报 2016,22(1): 164 - 170 doi: 10.11674/zwyf.14598
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

草灌植被恢复提高坡地土壤水稳性团聚体和碳、氮含量的有效性：退耕年限的影响

刘文祥，李 勇*，于寒青
(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081)

摘要:【目的】退耕还林还草是防治我国西部土壤侵蚀、恢复土壤肥力的最重要措施。本研究选择陕北黄土高原的神木、吴旗典型丘陵退耕还林还草区,研究不同退耕年限草(苜蓿)灌(沙棘)植被提高 0—10 cm 表层土壤有机碳、速效氮和全氮储量和各级土壤水稳性团聚体含量分布的有效性,旨在揭示退耕还林工程提高坡耕地土壤质量的有效性机理,为我国坡耕地土壤肥力提高措施的选择提供科学依据。**【方法】**应用空间替代时间的方法,选择土壤类型和坡度一致的三个不同退耕年限的全坡地景观(包括坡上部、坡中部和坡下部),采集土壤样品,分析有机碳等指标。**【结果】**草灌植被提高土壤有机碳、速效氮和全氮储量及土壤水稳性团聚体含量的效应随退耕年限的增加而增加；种植 5 年的沙棘林坡地土壤有机碳、全氮和速效氮储量相对于退耕前分别提高了 1.4、0.5、0.3 倍,种植 10 年以上沙棘林地分别提高了 6.6、2.4、1.5 倍；种植 5 年苜蓿使坡耕地土壤有机碳、全氮和速效氮储量分别提高了 0.4、0.1、5.0 倍,种植 10 年以上苜蓿地分别提高了 0.7、0.3、5.2 倍。种植 5 年和 10 年以上的沙棘林提高坡耕地土壤总有机碳的效应分别是种植 5 年和 10 年以上苜蓿的 3.4 和 9.5 倍；种植 5 年和 10 年以上的沙棘林提高坡地土壤全氮储量的效应分别比种植 5 年和 10 年以上苜蓿大 9 倍以上。坡耕地种植 5 年苜蓿提高土壤速效氮的效应是种植 5 年沙棘林的 19.2 倍,种植 10 年以上的苜蓿提高土壤速效氮的效应是种植 10 年以上沙棘林的 3.4 倍。沙棘林对土壤有机碳和全氮的提高效应显著大于苜蓿,而苜蓿对土壤速效氮含量的增加效应显著大于沙棘林。沙棘和苜蓿在提高坡地土壤有机碳和全氮储量的差异大小与退耕前坡地土壤有机碳和全氮储量水平有关,而土壤速效氮储量的差异与其根系的固氮功能差异密切相关,苜蓿根系固氮作用大于沙棘林,显著提高了土壤速效氮含量。种植 5 年和 10 年以上沙棘林使坡地土壤 >0.25 mm 水稳性团聚体含量分别增加了 41% 和 56%,退耕还林植被提高 >0.25 mm 粒级土壤水稳性团聚体含量主要是对粒径为 0.25 ～2 mm 水稳性团聚体含量的增加效应。**【结论】**草灌植被在提高侵蚀坡地土壤有机碳、氮储量和稳定土壤结构方面具有重要作用,在选择提高我国坡耕地土壤肥力的措施时应该考虑这一作用。

关键词: 退耕还林还草；植被恢复年限；土壤碳、氮储量；水稳性团聚体；黄土高原
中图分类号: S152.4；S181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2016)01-0164-07

Soil water stable aggregates and carbon and nitrogen storage enhanced by conversion of farmland to shrub and grass in China Loess Plateau: the influence of conversion cultivation time

LIU Wen-xiang, LI Yong*, YU Han-qing
(*Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract:【Objectives】Conversion of farmland to forests and grassland is the most important factor to aid in the prevention and control of soil erosion as well as to restore soil fertility in western China. Sites subjected to farmland conversion in Shenmu and Wuqi counties (in northern Shaanxi province on the Loess Plateau) were selected to study the effect that conversion to grasses (Alfalfa) and shrubs (Seabuckthorn) had on soil over differing time

收稿日期: 2014-12-25 **接受日期:** 2015-04-28
基金项目: 国家自然科学基金项目(41171231)；国家"十二五"支撑计划项目(2013BAD11B03)资助。
作者简介: 刘文祥(1989—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与碳循环研究。E-mail: wxliu15153234109@163.com
* 通信作者 E-mail: liyong@caas.cn

scales. In this study, we focused specifically on the effects that forest conversion had on the storage of surface soil organic carbon, both total and available nitrogen as well as soil water stable aggregates. This research was part of the Grain for Green Program, with the objective to reveal the mechanisms in forest conversion that affect soil quality of sloped land. The obtained results are expected to provide a scientific basis for improving soil fertility of sloped lands in China.【**Methods**】Using a spatial method, we selected three different types of conversion with same soil types and slope gradient. Taking measurements at various points across the sloped landscape, we analyzed organic carbon, etc after collecting soil samples.【**Results**】Our results show that soil organic carbon, available nitrogen and total nitrogen storage as well as soil water stable aggregates increased significantly along with the restoration time. When these measurements were compared to those from cultivated hillslopes, stocks of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and available nitrogen (AN) all increased after Seabuckthorn planting for 5-years by 1.4, 0.5 and 0.5 times, respectively. Following Seabuckthorn planting for 10 years, SOC, TN and AN levels were found to increase by 6.6, 2.4, 1.5 times, respectively. When assessing the 5-year restorative effects of alfalfa planting, SOC, TN and AN increased by 0.4, 0.1, 5.0 times when compared to cultivated hillslopes, whilst these measurements increased by 0.7, 0.3, 5.2 times when extended to 10 years of alfalfa planting on hillslopes, respectively. Seabuckthorn planting on hillslopes significantly improved SOC and TN levels when compared to slopes planted with alfalfa. However, the available nitrogen in soil was significantly greater in alfalfa-planted hillslopes compared to Seabuckthorn-planted hillslopes. The differences in observed SOC and TN levels between Seabuckthorn-and alfalfa-planted hillslopes were due to the initial levels of these soil components prior to the conversion to forests and grassland. Whereas differences observed in AN between seabuckthorn-planted and alfalfa-planted hillslopes were attributed to the differing nitrogen fixation mechanisms between the two plants. As alfalfa root nitrogen fixations were greater than seabuckthorn, the amount of soil available nitrogen increased significantly in alfalfa-planted soil. Soil water stable aggregate content in > 0.25 mm class increased by 41% and 56%, respectively, in hillslopes planted with Seabuckthorn for 5 and 10 years, respectively. This enhanced water stable aggregate in converted forest vegetation is attributed predominantly to increased particle size of 0.25 – 2 mm water stable aggregate content.【**Conclusions**】Our study suggests that grass and shrub vegetation play an important role in enhancing soil organic carbon and nitrogen storages as well as contributing to the stability of the soil structure. These effects should be considered when choosing measures to enhance soil fertility in sloped farmlands in China and it must be acknowledged how differing management of sloped lands can affect soil organic carbon reserves when using space substitute for time method in small regional scale.

Key words: conversion farmland to forests and grassland; conversion cultivation time; soil carbon and nitrogen storages; water stable aggregates; Loess Plateau

我国西部的黄土高原和长江上游是世界上水土流失最严重的地区之一,其主要原因是陡坡垦荒耕种。如黄土高原 530 000 km^2 的面积中,水土流失面积占 80%,坡耕地土壤侵蚀量占区域土壤总侵蚀量的 60%～80%[1]。由于有机质和土壤养分主要富集在土壤表层,土壤侵蚀造成土壤中大量养分流失,土壤肥力发生严重退化,而且土壤侵蚀产生的泥沙及其氮、磷养分迁移到水库、河流或湖泊,造成水体富营养化。对此,我国政府自 1999 年设立了西部退耕还林还草与植被恢复研究和工程项目,使该地区的土壤侵蚀流失和恶化的生态环境得到有效控制[2-3]。Li 等[2]研究表明,黄土高原植被覆盖率增加 42%,流域冲沟侵蚀减少了 31%,坡耕地侵蚀量减少 46%。彭珍宝等[5]关于南方红壤区自然坡面造林研究表明,红壤山地土壤侵蚀量在造林后,土壤侵蚀量随种植年限的增加而逐渐减少,坡面造林 7 年后土壤侵蚀量达 99%。

退耕还林还草工程,不仅可以减少水土流失,而且能提高土壤质量[6-10]。作为评价土壤肥力的一个重要指标,土壤有机碳不仅能增强土壤的保肥和供肥能力、提高土壤养分的有效性,还可促进团粒结构的形成,改善土壤透水性、蓄水能力及通气性,增强土壤的缓冲性[11]。在植被演替过程中,从坡地退耕还林后到演替至顶极群落阶段,土壤的物理化学

性质也在发生变化,凋落物不断积累和分解使土壤有机质累积量不断增加[6]。研究表明,在植被恢复过程中,土壤有机碳含量逐步得到提高,在土壤剖面中的分布也发生显著的变化[7]。土壤速效氮含量反映了土壤供氮水平,也是表征土壤肥力的主要指标[9]。Lal[12]认为通过生态恢复侵蚀退化土壤能吸收保存60%～75% 的从土壤损失的碳。鹰潭红壤侵蚀区人工植被恢复后,马尾松林、胡枝子林和樟树林地土壤有机碳和氮素含量呈显著增加趋势[13]。黄土高原坡耕地退耕后,遭侵蚀破坏的土体结构趋于恢复,有机碳增加了27.29%,氮增加了46.79%[14]。

粒径大于0.25 mm的水稳性团聚体含量对侵蚀坡地土壤的抗侵蚀性能有重要影响,是稳定表土层结构、提升土壤肥力的物质基础[15]。于寒青等[16]以黄土高原绥德、吴旗、宜川为研究区域,分析了表层水稳性团聚体粒径分布,研究结果显示不同植被恢复类型均显著提高了大于2 mm和0.25～2mm两个粒级水稳性团聚体的含量。植被恢复后土壤结构和土壤养分含量发生变化。程曼等[17]对宁南山区不同植被恢复措施和年限条件下水稳性团聚体粒径的分布进行了研究,结果表明,不同植被恢复措施下,> 5 mm和< 0.25 mm的团聚体含量最多,2～5 mm、0.25～1 mm团聚体含量次之,1～2 mm粒径的团聚体含量最少。

在我国西部丘陵坡地退耕还林过程中,随着退耕年限的增加,土壤碳、氮储量会明显增加[3,10]。例如,艾泽民等[10]在黄土丘陵区研究了退耕还林对0—20cm土层土壤碳、氮储量的影响,结果表明,退耕地种植刺槐林后土壤碳、氮储量并非与退耕年限长短相一致。这些研究在样品采集时主要是选择了山坡某一位置的几个土壤剖面,而没有从全山坡的空间尺度考虑退耕还林的土壤效应,难以反映植被对坡地景观土壤碳、氮储量效应的总体评价。本研究在我国陕北黄土丘陵区,选择不同退耕还林年限的全坡景观,测定了退耕还林过程中坡耕地表层土壤碳、氮储量及水稳性团聚体含量的动态变化,旨在揭示退耕还林工程提高坡耕地土壤质量的有效性机理,为我国坡耕地土壤肥力提高措施的选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国陕北黄土丘陵典型退耕还林还草示范区的神木县和吴旗县。神木县研究区位于东经110°51′,北纬38°83′;海拔高度1094～1274 m,流域北依长城,地处毛乌素沙漠的边缘,属于黄土高原水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心。该区年均气温8.4℃,年均降水量为437.4 mm,属典型温带半干旱大陆性多风气候。研究区域土壤类型主要有砂黄土和风沙土,退耕坡地的人工植被主要有紫花苜蓿、刺槐、柠条、沙柳等。吴旗县研究区位于东经108°22′,北纬36°93′,海拔860～1200m,年均气温7.8℃,年降水量570 mm,气候类型为半干旱温带大陆性季风气候,土壤类型主要为黄绵土。退耕坡地的人工植被主要有沙棘、刺槐、柠条、油松等。

1.2 样点布设与样品采集

为定量评价不同退耕年限草灌植被提高土壤碳、氮储量及水稳性团聚体的有效性,本研究利用了空间替代时间的方法,即在神木和吴旗退耕还林区,选择了土壤类型和坡度(30°)一致的三个不同退耕年限的全坡地景观(包括坡上部、坡中部和坡下部),进行样品采集。在神木,选择退耕已经种植5 a和 >10 a的苜蓿地;在吴旗,选择退耕已经种植5 a、>10 a的沙棘地。为了比较,将一直为农地的坡耕地退耕年限设为0a。在确定的退耕坡地沿顺坡断面按照坡上部、坡中部和坡下部进行采样,每个坡位随机选择3个采样点进行0—10 cm表层土样的采集,然后把不同坡位的样品进行混合,每个退耕年限的坡地(全坡)总计采集3个混合样品,共计采集了18个混合样品,用于分析土壤碳、氮储量,同时环刀采集的样品用于测定土壤容重[18]。在采集土壤碳、氮和容重样品的同时,每个坡位用10 cm×20 cm的大型铝盒随机采集1个原状土壤样,用于土壤水稳性团聚体的粒级分析,共计采集18个原状土样。

1.3 测定方法

土壤有机碳的测定:称取过0.15 mm筛的风干土样0.2500～0.2599 g置于陶瓷小舟内,用滴管滴加10%硝酸至无气泡产生后(去除土壤内无机碳),再滴加1～2滴浓硝酸。放置1 d后于80℃烘干。同时做标准曲线,称取20、40、60、80、100、120 mg碳含量为12%的标准物碳酸钙分别置于陶瓷舟内。用TOC分析仪(德国耶拿公司TC/TN分析仪,主机型号multi C/N 3100,HT1500)进行测定。

土壤速效氮用碱解扩散法[18];土壤全氮用凯氏法测定[18]。

水稳性团聚体团粒分级用湿筛法[19]:取100 g土样放在铺有滤纸的大表面皿上,用滴管缓慢滤纸

向加去离子水，直至使土样完全湿润,然后将湿润的土样置于 2 mm 的筛中浸泡 5 min,使团聚体中残留的空气排出,最大量减少空气对团聚体结构的破坏。振筛时土样通过 2 mm、0.25 mm、0.053 mm 系列筛子。手工振动套筛 2 min,上下振幅 3 cm ,每分钟 25 次手工振筛。振筛后将 2 mm 筛上水中悬浮的枯落物、根系等杂质捞出。而后将套筛取出,水流尽后,依次将各筛上的土壤颗粒冲洗到铝盘中,冲洗过程中尽量保持团粒的结构。最后将土样在 50℃过夜烘干,称重,储存于玻璃瓶。

1.4　数据分析

土壤有机碳、氮密度,即碳、氮储量是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳或氮的储量,因此草灌坡地土壤碳、氮储量的计算公式为[20]：

$$SOC_{density}(N_{density}) = C_i D_i E_i (1 - G_i)/10$$

式中,$SOC_{density}$、$N_{density}$ 指土壤有机碳或氮的密度或储量(g/m^2)；C_i 为土壤有机碳、氮含量(g/kg)；D_i 为容重(g/cm^3)；E_i 为土层厚度(cm)；G_i 为 >2mm 的石砾所占的体积百分比(%)。不同退耕年限的坡地土壤碳、氮储量和水稳性团聚体含量均为 3 个混合样品的平均值。

利用单因素方差分析 LSD 法分析草、灌坡地土壤碳、氮储量和水稳性团聚体含量平均值在不同年限之间的差异显著性,数据分析用 Excel 2007。

2　结果与分析

2.1　不同退耕年限草灌植被对土壤有机碳储量的提高效应

退耕坡地土壤有机碳储量随退耕年限的增加而增加,但其增加的数量大小因植被类型不同而有明显差异(表 1)。在神木研究区,退耕种植 10 a 以上的苜蓿地土壤总有机碳储量显著高于退耕前,提高了 70%,而种植 5 a 的苜蓿地土壤总有机碳仅比退耕前提高了 40%。在吴旗退耕研究区,退耕坡地种植 5 a 和 10 a 以上的沙棘林地土壤总有机碳储量比退耕前提高了 138% 和 664%。退耕前,神木研究区农地土壤有机碳储量高于吴旗研究区。种植 5 a 和 10 a 以上的沙棘林坡耕地土壤总有机碳分别是种植 5 a 和 10 a 以上苜蓿地的 3.4 和 9.5 倍。

2.2　不同退耕年限草灌植被对土壤氮储量的提高效应

尽管退耕坡地土壤全氮储量随退耕年限的增加而增加,但是其增加的幅度显著小于土壤有机碳增加的幅度(表 1)。在神木研究区,退耕种植 5 a 和 10 a 以上的苜蓿,其坡地土壤全氮储量比退耕前分别提高了 4% 和 26%。在吴旗退耕研究区,退耕坡地种植 5a 和 10a 以上沙棘林地土壤全氮储量分别比退耕前提高了 46% 和 242%。种植 5 a 和 10 a 以上沙棘林提高坡地土壤全氮储量的效应分别比种植 5 a 和 10 a 以上苜蓿大 9 倍以上。

种植草灌植被提高土壤速效氮效应的幅度与其提高土壤有机碳的效应相一致,均也随退耕年限的增加呈显著增加。在神木研究区,与坡耕地比较,种植 5 a 和 10 a 以上的苜蓿地土壤速效氮储量分别提高了 497% 和 515%,在吴旗退耕研究区,退耕坡地种植 5 a 和 10 a 以上沙棘林地土壤速效氮储量比退耕前分别提高了 25% 和 150%。坡耕地种植 5 a 苜蓿提高土壤速效氮的效应是种植 5 a 沙棘林的 19.2 倍,种植 10 a 以上的苜蓿提高土壤速效氮的效应是种植 10 a 以上沙棘林的 3.4 倍。

表 1　不同退耕年限草灌植被土壤有机碳、全氮和速效氮储量变化

Table 1　Change in soil organic carbon, total nitrogen and available nitrogen under different time of farmland conversion to grasses and shrubs

采样地点 Sampling sites	植被类型 Vegetation types	退耕年限(a) Vegetation restoration time	有机碳储量(g/m^2) Soil organic carbon storage	全氮储量(g/m^2) Total nitrogen storage	速效氮储量(g/m^2) Available nitrogen storage
神木	苜蓿	0	428.51 ±88.03 b	14.11 ±0.54 b	0.34 ±0.11 b
Shenmu	Alfalfa	5	599.96 ±101.32 b	14.80 ±0.83 a	2.03 ±0.09 a
		>10	728.33 ±39.13 a	17.79 ±0.55 a	2.10 ±0.11 a
吴旗	沙棘	0	257.37 ±8.28 b	13.62 ±3.95 b	1.68 ±0.66 b
Wuqi	Seabuckthorn	5	613.15 ±107.62 b	19.82 ±1.32 ab	2.16 ±0.22 b
		>10	1966.87 ±433.18 a	46.60 ±3.94 a	4.23 ±0.42 a

注(Note)：数据后不同字母表示同一研究区不同退耕年限之间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different letters at the same study site mean significant at 5% level.

2.3 不同退耕年限灌木植被对土壤水稳性团聚体含量的影响

由于神木研究区位于砂黄土区,土壤缺乏水稳性团聚体结构,因此本研究仅对吴旗退耕坡地土壤的水稳性团聚体进行了分析研究。

退耕坡地土壤中 >0.25 mm 水稳性团聚体随退耕年限的增加而增加(表2),退耕种植5 a和10 a以上的沙棘林地 >0.25 mm粒级的水稳性团聚体含量分别提高了41%、56%,>2 mm团聚体含量分别提高了14%和55%,0.25 mm～2 mm水稳性团聚体含量比退耕前分别提高了77%和57%。退耕种植5 a和10 a以上的沙棘林地土壤中 <0.25 mm的水稳性团聚体含量明显下降,>2 mm,0.25 mm～2 mm的水稳性团聚体含量明显增大。

表2 不同退耕年限灌木土壤水稳性团聚体变化

Table 2 Change in water stable aggregates under different time of fanmland conversion to shrubs

退耕年限(a) Restoration time	质量百分比 Quality percentage(%)			
	>2 mm	0.25～2 mm	0.053～0.25 mm	<0.053 mm
0	19.16±15.77	13.01±5.78	33.28±10.77	29.35±3.56
5	21.92±8.10	23.30±10.13	26.80±14.41	18.31±1.23
>10	29.77±6.85	20.39±7.34	22.47±9.46	16.31±2.01

3 讨论

本研究发现,草灌植被提高坡地土壤有机碳、全氮和速效氮储量的效应随退耕年限的增加而增加。薛晓辉等[21]的研究表明,土壤有机质含量随植被的恢复年限增加而增大,但其增长速度并不相同,与本研究的结果相一致。李泽等[22]以黄土高原沟壑区为研究对象,分析了退耕还果对黄土高原土壤氮储量的影响,结果表明,农田退耕为果园20 a后,坡地果园土壤氮储量约为农田的1.7倍。贾晓红等[23]的研究也表明,植被恢复下土壤氮素含量随退耕时间的增加而逐渐增加。

退耕还林和还草在对土壤有机碳和氮的增加效应方面有很大差异(表1),沙棘林对土壤有机碳和全氮的提高效应显著大于苜蓿,而苜蓿对土壤速效氮含量的增加效应显著大于沙棘林。这不仅与草灌植被的固碳固氮功能差异有关,而且与退耕前坡耕地土壤有机碳和全氮储量的初始水平相关。退耕前,神木研究区的土壤有机碳、全氮储量高于吴旗退耕示范区,而速效氮含量低于吴旗退耕示范区。神木研究区较吴旗研究区干旱,植被的生长条件理应比吴旗差,但是也可能由于这两个地区农民对坡耕地的管理方式,包括施肥措施、作物类型和轮作方式等的不同,表现为神木研究区坡耕地土壤有机碳储量高于吴旗研究区的坡耕地。土壤碳、氮储量初始含量越低,草灌植被对土壤肥力的提高效应越显著。胡江波等[24]的研究表明,刺槐、荆条和苜蓿等不同植被恢复模式均提高了土壤有机质和速效氮含量,并且改善效应因植被根系固氮功能差异而不同。苜蓿主根发达,深度可达2～6 m,根系根瘤较多,主要分布在地下20～30 cm的根间,土壤速效氮含量增加明显[25]。沙棘适应能力强,根系可分蘖大量幼苗,对土壤营养成分消耗巨大。但同时,沙棘林地通过自身枯落物的分解和沙棘根系作用,对土壤肥力进行了补充。通过对陕西吴旗县的沙棘林研究,李代琼等[26]发现,沙棘林地的土壤各种化学元素含量均表现一定程度的增加,但其中全氮含量增加最多。黄土丘陵坡耕地种植5 a和10 a以上的苜蓿提高土壤速效氮的效应是种植5 a和10 a沙棘林的19.2和3.4倍,由于苜蓿根系固氮作用大于沙棘林,显著提高了土壤速效氮含量。

坡耕地退耕还林植被在稳定土壤结构方面具有显著效果(表2),退耕坡地土壤中>0.25 mm水稳性团聚体随退耕年限的增加而增加,退耕还林植被提高的 >0.25 mm粒级的水稳性团聚体含量主要是增加了粒径为0.25～2 mm的水稳性团聚体含量。这进一步证明了研究者以前的研究结果[16]。沙棘林提高土壤水稳性团聚体含量的机理可以归结于直接和间接作用两个方面:一是沙棘林显著提高了土壤有机碳的储量(表1),而有机质粘结力和粘着力在促进团粒结构形成时起到了间接作用[27];二是植物根系,尤其是 ≤1 mm的须根对土壤颗粒的缠绕固结,促进了土壤水稳性团聚体含量的形成和增加的直接作用[15]。沙棘林根系对提高土壤 >0.25 mm水稳性团聚体作用的实质是 ≤1 mm须根

对土壤水稳性团聚体含量的增加效应[15]。

总之,退耕还林还草植被对坡地土壤有机碳、氮库的提高效应会显著增加土壤结构的稳定性,从而提高土壤的抗侵蚀性能,而土壤水稳性团聚体含量的增加会提高土壤的抗侵蚀性能,减少土壤养分和水分流失,提高土壤肥力[28]。因此,草灌植被提高坡地土壤水稳性团聚体和碳、氮含量的有效性研究,是今后我国退化坡耕地土壤肥力恢复研究中值得重视的课题。

4　结论

本研究发现,草灌植被在提高侵蚀坡地土壤有机碳、氮储量和稳定土壤结构方面具有重要作用,草灌植被的这些作用均随退耕年限的增加而增加。结果表明,种植 5 a 沙棘林坡地土壤有机碳、全氮和速效氮储量相对于退耕前分别提高了 1.4、0.5、0.3 倍,种植 10 a 以上沙棘林地分别提高了 6.6、2.4、1.5 倍；与退耕前相比,种植 5 a 苜蓿使坡耕地土壤有机碳、全氮和速效氮储量分别提高了 0.4、0.1、5.0 倍,种植 10 a 以上苜蓿地分别提高了 0.7、0.3、5.2 倍。种植 5 a 和 10 a 以上沙棘林使坡地土壤 >0.25 mm 水稳性团聚体含量分别增加了 41% 和 56%,沙棘林对土壤有机碳和全氮的提高效应显著大于苜蓿,而苜蓿对土壤速效氮含量的增加效应显著大于沙棘林。沙棘和苜蓿两种植被类型提高坡地土壤有机碳和全氮储量的差异与退耕前坡地土壤有机碳和全氮储量的初始水平有关,而土壤速效氮储量增加效应的差异与沙棘和苜蓿根系在固氮功能方面的差异密切相关。退耕还林还草植被提高坡地土壤有机碳、氮库和水稳性团聚体含量的有效性原理,应在选择提高我国坡耕地土壤肥力的措施时予以重视。

参 考 文 献：

[1] 唐克丽. 黄河流域的侵蚀与径流泥沙变化[M]. 北京：中国科学技术出版社, 1993.
Tang K L. Erosion and runoff and sediment change in the Yellow River basin [M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 1992.

[2] Li Y, Yu H Q, Geng X C, *et al*. Assessment of effectiveness of soil conservation measures in reducing soil erosion and enhancing soil quality in China using fallout radionuclide techniques [J]. IAEA TECDOC-1665, 2011: 207-224.

[3] Deng L, Liu G, Shangguan Z. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis[J]. Global Change Biology, 2014, 20 (11): 3544-3556.

[4] Valentin C, Poesen J, Li Y. Gully erosion: Impacts, factors and control[J]. CATENA, 2005, 63(2-3): 132-153.

[5] 彭珍宝, 袁正科, 旷建军, 等. 植被恢复过程对丘岗红壤侵蚀量变化的影响[J]. 水土保持研究, 2007, 14(5): 380-383.
Peng Z B, Yuan Z K, Kuang J J, *et al*. The influence of vegetation resume process on erosive volume of red soil in the hill [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(5): 380-383.

[6] 孙丽芳, 李勇, 张晴雯, 等. 植被恢复对侵蚀坡地表层土壤性质的影响[J]. 水土保持通报, 2007, (3): 13-17.
Sun L F, Li Y, Zhang Q W, *et al*. Effect of combining actions of grazing and vegetation rehibilitation on surface soil property of an eroded hillsIope land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, (3): 13-17.

[7] 王征, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(14): 3947-3952.
Wang Z, Liu G B, Xu M X. Effect of re-vegetation on soil organic carbon concentration in deep soil layers in the hilly Loess Plateau of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (14): 3947-3952.

[8] 郭曼, 郑粉莉, 安韶山, 等. 植被自然恢复过程中土壤有机碳密度与微生物量碳动态变化[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 229-232.
Guo M, Zheng F L, An S S, *et al*. Dynamic change of soil organic carbon density and microbial biomass carbon during natural re-vegetation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 229-232.

[9] 张俊华, 常庆瑞, 贾科利, 等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 38-41.
Zhang J H, Chang Q R, Jia K L, *et al*. Effect of plant restoration to soil fertility quality on loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17 (4): 38-41.

[10] 艾泽民, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区不同林龄刺槐人工林碳、氮储量及分配格局[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 333-341.
Ai Z M, Chen Y M, Cao Y. Storage and allocation of carbon and nitrogen in *Robinia pseudoacacia* plantation at different ages in the loess hilly region, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 333-341.

[11] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京：高等教育出版社, 2001.
Li X Y. Soil chemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.

[12] Lal R. Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effect [J]. Progress in Environmental Science, 1999, 4(1): 307-326.

[13] 邓欢, 张斌, 王会利, 等. 侵蚀红壤区不同人工植被恢复下的土壤肥力比较[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(3): 79-85.
Deng H, Zhang B, Wang H L, *et al*. The comparison of soil fertility among severely eroded red soils regenerated with different vegetation types [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2007, 9(3): 79-85.

[14] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 272-278.
Peng W Y, Zhang K L, Chen Y, *et al*. Research on soil quality change after conversion farmland to forest on the loess sloping

croplands[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(2): 272-278.

[15] 李勇. 黄土高原植物根系与土壤抗冲性[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
Li Y. Plant roots and soil resistance to erosion on the loess plateau [M]. Beijing: Sciences Press, 1995.

[16] 于寒青, 李勇, 金发会, 等. 黄土高原植被恢复提高大于0.25 mm粒级水稳性团聚体在土壤增碳中的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 876-883.
Yu H Q, Li Y, Jin F H, *et al*. The role of increasing soil water-stable aggregatess with diameter > 0.25mm by vegetation restoration in enhancement of soil organic carbon in the loess plateau[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(4): 876-883.

[17] 程曼, 朱秋莲, 刘雷, 等. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2835-2844.
Cheng M, Zhu Q L, Liu L, *et al*. Effects of vegetation on soil aggregates stability and organic carbon sequestration in the Ningxia Loess Hilly Region of northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): 2835-2844.

[18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
Lu R K. Soil agricultural chemical analysis method [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999.

[19] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(4): 1071-1076.

[20] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 35-43.
Xie X L, Sun B, Zhou H Z, *et al*. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41 (1): 35-43.

[21] 薛晓辉, 卢芳, 张兴昌. 陕北黄土高原土壤有机质分布研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(6): 69-74.
Xue X H, Lu F, Zhang X C. Distribution of soil organic matters on loess plateau of Northern Shaanxi[J], Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2005, 33(6): 69-74.

[22] 李泽, 郭胜利, 张芳, 等. 退耕还果对黄土高原沟壑区坡地土壤和植被碳、氮储量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17 (4): 919-924.
Li Z, Guo S L, Zhang F, *et al*. Effects of apple orchard converted from cropland on C and N storages in terrestrial system of slopping cultivated land in the Loess Gully Regions[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 919-924.

[23] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复中土壤碳氮变化规律[J]. 植物生态学报, 2007, 31(1): 66-74.
Jia X H, Li X R, Li Y S. Soil organic carbon and nitrogen dynamics during the re-vegetation process in the arid desert region [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(1): 66-74.

[24] 胡江波, 杨改河, 张笑培, 等. 不同植被恢复模式对土壤肥力的影响[J]. 河南农业科学, 2007, (3): 69-72.
Hu J B, Yang G H, Zhang X P, *et al*. Effects of various vegetative restoration patterns on soil fertility [J]. Henan Agriculture Science, 2007, (3): 69-72.

[25] 杨玉海, 蒋平安. 不同种植年限苜蓿地土壤理化特性研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 110-113.
Yang Y H, Jiang P A, Studies on soil properties of Lucerne with different cultivating ages [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(2): 110-113.

[26] 李代琼, 梁一民, 侯喜禄. 黄土高原沙棘建造植被的生态功能及效益试验研究[J]. 沙棘, 2003, (3): 16-21.
Li D Q, Liang Y M, Hou X L. Seabuckthorn built loess plateau vegetation ecological functions and benefits of experimental research [J]. Hippophae, 2003, (3): 16-21.

[27] 吕贻忠, 李保国. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
Lv Y Z, Li B G. Pedology[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2008.

[28] 李勇, 张晴雯, 李璐, 等. 黄土区植物根系对营养元素在土壤剖面中迁移强度的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 427-434.
Li Y, Zhang Q W, Li R, *et al*. Effects of plant root on nutritious elements transport in soil profiles of the Chinese Loess Plateau [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(4): 427-434.