晋西黄土区典型人工植被对土壤球囊霉素和团聚体稳定性的影响

朱兴菲，刘小芳，赵勇钢，刘新春，高 冉，栗文玉

（山西师范大学 生命科学学院，山西 临汾 041000）

摘 要：[目的] 阐明晋西黄土区典型人工植被类型对球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)和团聚体稳定性的影响，以及两者之间的关系，为黄土高原地区人工植被建设与管理提供科学依据。[方法] 选取晋西三川河流域 4 种典型人工植被(苜蓿、刺槐、侧柏和核桃)，以农地为对照，分析 0—100 cm 土层中 GRSP 组分、有机碳(SOC)和团聚体稳定性指标在不同植被类型下的分布差异及其相关性。[结果] 不同植被类型下易球囊霉素(EE-GRSP)、总球囊霉素(T-GRSP)以及两者的比值在 0—30 cm 土层存在显著差异，均以核桃地最高，而苜蓿地较低。不同植被下 EE-GRSP/SOC 和 T-GRSP/SOC 均随着土层深度增加而增加，分别为 1.78～6.77，4.07～19.11。与农地相比，侧柏和苜蓿地分别增加了 39.67%，36.62%的 EE-GRSP/SOC 以及 39.25%和 46.70%的 T-GRSP/SOC，而核桃分别减少了 31.07%和 36.93%。平均重量直径与 T-GRSP 和 SOC 呈显著正相关关系，而与 EE-GRSP/SOC 呈显著负相关关系($p<0.05$)。[结论] 不同人工植被对表层土壤 GRSP 的组分有明显影响，土壤团聚体稳定性不仅与 GRSP 的组分有关，也与其对 SOC 的贡献有重要关系。

关键词：人工植被；球囊霉素；团聚体稳定性；土壤有机碳；相关性分析

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)06-0080-08 **中图分类号**：S154.4

文献参数：朱兴菲，刘小芳，赵勇钢，等. 晋西黄土区典型人工植被对土壤球囊霉素和团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持通报，2018，38(6)：80-87. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.013. Zhu Xingfei, Liu Xiaofang, Zhao Yonggang, et al. Effects of representative artificial vegetation types on glomalin-related soil protein and aggregate stability on Loess Plateau in Western Shanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 80-87.

Effects of Representative Artificial Vegetation Types on Glomalin-Related Soil Protein and Aggregate Stability on Loess Plateau in Western Shanxi Province

ZHU Xingfei, LIU Xiaofang, ZHAO Yonggang, LIU Xinchun, GAO Ran, LI Wenyu

(*College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi* 041000, *China*)

Abstract: [Objective] The objective of the study was to elucidate the effects of representative artificial vegetation types on soil glomalin-related soil protein (GRSP) and aggregate stability, and to evaluate the relationship between the latter two factors on the Loess Plateau in Western Shanxi Province in order to provide basic data for artificial vegetation restoration project. [Methods] Four representative artificial vegetation types, *Medicago sativa*, *Robinia pseudoacacia*, *Platycladus orientalis*, and *Juglans regia*, were selected in the Sanchuan River Basin, western Shanxi Province, with a cropland as the control. Soil samples were taken from a depth of 0—100 cm to analyze the distribution differences of easily extractable-GRSP (EE-GRSP), total-GRSP (T-GRSP), soil organic carbon (SOC), and aggregate stability among different vegetation

收稿日期：2018-04-16 **修回日期**：2018-06-04

资助项目：山西省自然科学基金项目“晋西黄土区植被自然恢复土壤有机碳固定与稳定性机制”(201601D021103)；国家自然科学基金项目“草地演替中土壤结构演变与降雨—入渗过程的互作机理”(41401242)

第一作者：朱兴菲(1993—)，女(汉族)，山西省朔州市人，硕士研究生，研究方向为恢复生态研究。E-mail：1419512783@qq.com。

通讯作者：刘小芳(1980—)，女(汉族)，山西省榆次市人，博士，讲师，硕士生导师，主要从事植物生理生态研究。E-mail：liuxiaofang04@163.com。

types. The relationship between these parameters were evaluated by Pearson analysis. [Results] The EE-GRSP and T-GRSP concentrations and the EE-GRSP/T-GRSP ratio significantly differed in the 0—30 cm surface soil across different vegetation types, with the highest and lowest values being found in the *J. regia* and *M. sativa* plots, respectively. Both the EE-GRSP/SOC and T-GRSP/SOC ratios always increased with the increase of soil depth, having ranges of 1.78～6.77 and 4.07～19.11, respectively. The EE-GRSP/SOC and T-GRSP/SOC increased in the *P. orientalis* (39.67% and 36.62%) and *M. sativa* (39.25% and 46.70%) plots as compared with the ones in cropland, while they decreased in the *J. regia* plot (31.07% and 36.93%). Mean weight diameter was positively correlated with T-GRSP and SOC ($p<0.05$) and negatively correlated with EE-GRSP/SOC ($p<0.05$). [Conclusion] Different artificial vegetation types considerably influenced GRSP components in the surface soil. Soil aggregate stability was not only related to the concentration of soil GRSP components, but also to their contribution to SOC.

Keywords: artificial vegetation type; soil glomalin; aggregate stability; organic carbon; Pearson analysis

晋西黄土丘陵沟壑区植被退化,地形破碎,土壤结构稳定性差,是我国水土流失最严重的地区之一。人工植被恢复是该地区生态环境建设的重要举措,通过植被—土壤系统间的互馈效应,有利于改善土壤质量,提升土壤功能,调控水土流失。土壤团聚体是矿物颗粒与有机物质相互作用而组成的土壤结构的基本单元,其形成过程和稳定性与土壤有机碳储存于固定密切相关,也是评价土壤质量和健康的重要指标[1]。研究[2]表明,黄土高原的土地利用类型、植被恢复方式及进程等都会影响土壤团聚体稳定性。例如,张社奇[3]研究发现不同林龄的人工油松和刺槐都降低了土壤颗粒的分形维数,这是由于在凋落物和植物根系的作用下,土壤腐殖化程度较好且土壤黏结介质具有较好的持久性,提升土壤团聚能力。球囊霉素相关土壤蛋白(glomalin-related soil protein, GRSP)是由丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)的菌丝壁分泌产生的一种可溶性糖蛋白,可作为胶结剂增强土壤颗粒黏附力,促进土壤团聚体形成,提高土壤结构稳定性[4]。GRSP 是土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)的重要组成部分,占 SOC 总量的 7%～37%[5],根据其在土壤中的可利用性和周转时间方面的差异可将其组分分为易提取球囊霉素(easily extracted GRSP, EE-GRSP)和总球囊霉素(Total GRSP, T-GRSP)[6]。GRSP 对土壤环境变化的反应可能不同,并受土地利用方式和植被类型的影响。对免耕、传统耕作和休闲地的研究表明,由于 AMF 真菌受人为活动的影响,使得植物根系中的真菌菌丝减少,致使免耕及休闲地土壤 GRSP 含量高于传统耕作[7-8]。对黄土高原林区皆伐油松幼林地、灌木地、撂荒地的研究发现,灌木林土壤团聚体 GRSP 含量显著大于其他处理,这主要是由于灌木地优势物种虎榛子的根系发达,根瘤菌容易进入植物根系,形成较多菌丝促进 GRSP 含量的形成[9-10]。

在晋西黄土丘陵沟壑区,人工植被(如刺槐、侧柏和苜蓿等)和人工经济林(如核桃、苹果等)大范围种植,其对土壤功能的影响一直是关注的重要问题[11]。目前,关于该地区植被恢复对表层(<40 cm)土壤碳储量与固定和结构稳定性等方面的研究已有较多[12-14],但对深剖面(0—100 cm)GRSP 组分对 SOC 的贡献及其与团聚体稳定性关系的研究较少,这对于深入理解人工植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响机制有所不足。因此,本文以 5 种不同人工植被为研究对象,分析其 GRSP 组分和 SOC 在剖面的分布特征,阐明 GRSP 对有机碳的贡献,揭示 GRSP 组分与土壤结构稳定性的关系,以期为黄土高原地区人工植被建设与管理提供一定的科学依据。

1　材料和方法

1.1　研究区概况

试验区位于山西省吕梁市离石区三川河流域的大土河和徐家沟区域(北纬 37°21′—37°42′,东经 110°55′—111°35′),属于典型黄土丘陵沟壑区,温带大陆性气候,海拔 920～940 m,无霜期 110～170 d,年平均气温为 8.9 ℃,年日照时数为 2 633.8 h,有效积温达 3 298 ℃,年平均降水量为 450～550 mm,主要集中在 7—9 月。灌木植被主要有荆条(*Vitex negundo*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等,草本植物主要有蒿类、狗尾草(*Setaria viridis*)等。

1.2　样品采集和分析

2017 年 7 月,选取 4 种该区域典型人工植被类型,包括核桃(*Juglans regia*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)和苜蓿(*Medicago sativa*),并以农地为对照。农地一般为

玉米和杂粮作物轮作，仅施入少量农家肥，无化肥施入。农地种植年限大于20 a，苜蓿种植3 a，核桃、刺槐和侧柏的林龄分别为16，17，8 a。在预先选好的样地上，每个样地沿坡面布置3条长50 m、宽10 m的样带，在样带上沿坡面布置3个样方（草地1 m×1 m，乔木10 m×10 m），每个样地共9个样方。将每个样方的腐殖质去除后，挖100 cm深的土壤剖面，按（0—10 cm，10—20 cm，20—30 cm，30—40 cm，40—70 cm，70—100 cm）土层进行采样。按两部分采集土样，一部分为混合样，另外一部分为原状土样。混合样以四分法取适量土样置于塑料袋中，带回实验室，风干，去除植物根系、石块等杂质，研磨过筛后，待测。原状土样去除植物根系等杂质后，轻掰成小块，风干后待测。

GRSP的提取和测定过程按照修改后Wright等[15]的方法进行测定。EE-GRSP测定：风干土样过2 mm的筛，称取1.00 g土样倒于试管中，加入8 ml（20 mmol/L，pH=7.0）的柠檬酸钠浸提剂，在121 ℃，103 kpa条件下灭菌60 min，冷却后以10 000 r/min离心5 min，收集上清液。T-GRSP测定：称取1.00 g土样倒于试管中，加入8 ml（50 mmol/L，pH=8.0）的柠檬酸钠浸提剂，在121 ℃，103 kPa条件下灭菌60 min，冷却后以10 000 r/min离心5 min，收集上清液，反复浸提3次。吸取上清液1 mL加入5 ml考马斯亮蓝G-250染色剂，用紫外分光光度计（759型）在595 nm波长下比色。制作牛血清蛋白标准液，并用考马斯亮蓝法显色，根据绘制的标准曲线，求出EE-GRSP和T-GRSP的含量。本研究依据Wang等人[5]的研究结果，采用土壤生态系统提取的球囊霉素中SOC约占36.8%这一数值，以此计算SOC在EE-GRSP和T-GRSP中的含量，分析GRSP对SOC的贡献。

土壤团聚体的测定采用干筛法[16]测定。准确称取风干土样200.0 g，放入孔径为2，0.25，0.053 mm的套筛，在8411型电动振筛机（浙江上虞区道墟张兴纱厂）上振动10 min（转速1 400 r/min），将留在套筛上的风干土进行称重，计算各粒级团聚体含量占总土重的重量百分比，并以此计算平均重量直径（mean weight diameter，MWD），计算公式为：

$$MWD=\sum_{i=1}^{n}X_iW_i$$

式中：X_i——某极别团聚体直径（mm）的中值，W_i——团聚体的百分含量。

土壤pH值的测定采用pHS-3C型酸度计测定（土水比为1∶2.5），土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法进行测定[16]。

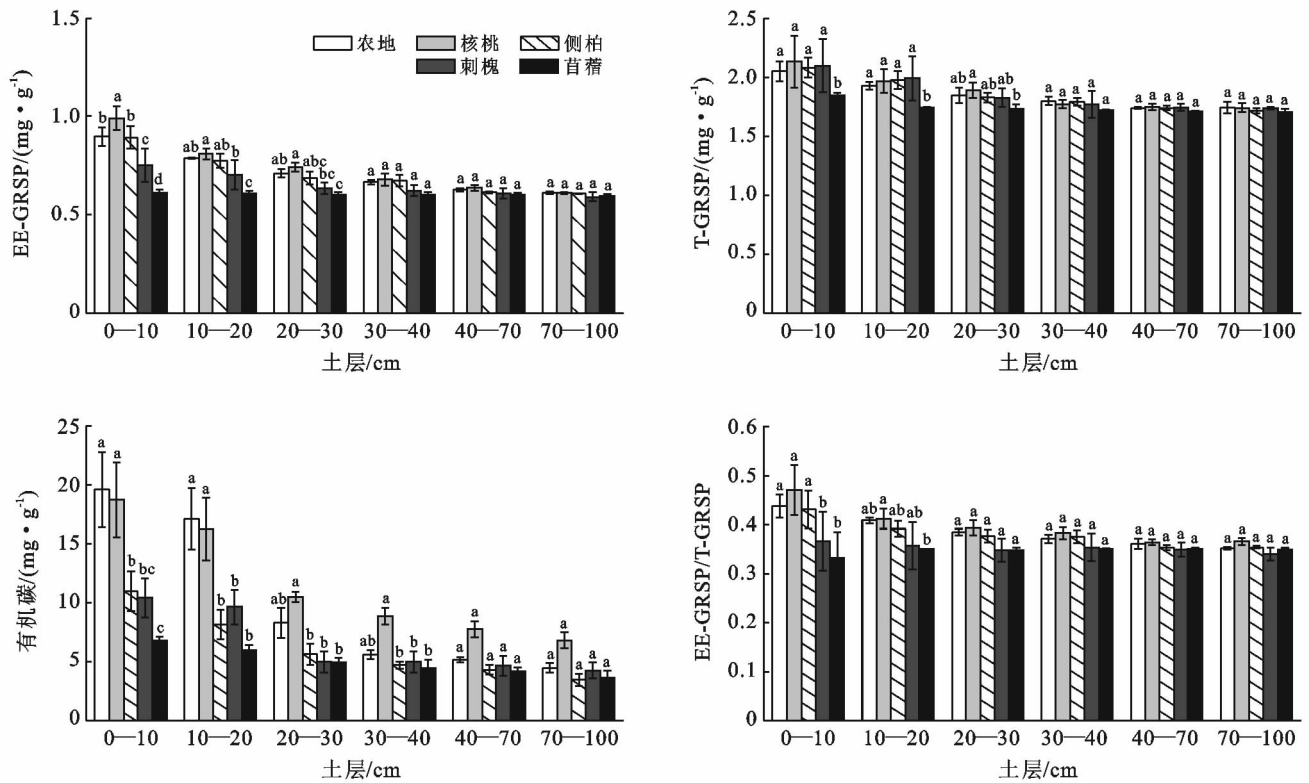
1.3 处理数据

采用SPSS17.0软件对不同人工植被类型和不同土层进行双因素方差分析，基于最小显著性差异法（Least significant difference，LSD）进行多重比较（$p<0.05$）。在Origin软件中采用线性拟合函数分析T-GRSP，EE-GRSP与有机碳和MWD的关系。

2 结果与分析

2.1 不同人工植被土壤球囊霉素与有机碳剖面分布

由图1可以看出，不同人工植被的T-GRSP和EE-GRSP含量随着土层深度的增加而降低，不同植被类型之间在0—30 cm土层存在显著性差异（$p<0.05$），但30 cm以下土层无显著差异（$p>0.05$）。苜蓿T-GRSP含量在0—30 cm土层均最低，在0—20 cm显著低于其他样地（$p<0.05$），在20—30 cm则显著低于核桃（$p<0.05$）。与农地0—30 cm土层T-GRSP平均含量相比，苜蓿降低了8.63%，核桃、刺槐和侧柏分别增加了2.73%，1.49%，1.03%。苜蓿EE-GRSP含量在0—30 cm土层也均最低，核桃则最高。核桃EE-GRSP含量在0—10 cm土层显著高于其他样地（$p<0.05$），在10—30 cm则显著高于刺槐和苜蓿（$p<0.05$）。与农地0—30 cm土层EE-GRSP平均含量相比，刺槐、苜蓿分别降低了1.61%和8.63%，核桃、侧柏分别增加了25.04%和8.04%。农地、核桃和侧柏样地SOC含量随着土层增加而逐渐降低，且在0—40 cm剖面分布上有显著性差异（$p<0.05$），而刺槐和苜蓿则无显著性差异（$p>0.05$）。其中，农地和核桃0—20 cm土层SOC显著高于较深土层（>30 cm），侧柏0—10 cm土层SOC显著高于40 cm以下土层。不同样地间的SOC含量在0—20 cm土层具有显著性差异（$p<0.05$），而20 cm以下土层则无显著性差异（$p>0.05$）。农地和核桃SOC含量显著高于其他样地，但二者之间并无显著差异（$p>0.05$）。与农地相比，刺槐、侧柏和苜蓿0—20 cm平均含量分别降低了45.31%，47.85%和65.18%。农地、核桃和侧柏样地土壤EE-GRSP/T-GRSP比值随着土层的增加逐渐降低，在0—20 cm土壤剖面有显著性差异（$p<0.05$）。在10—20 cm土层核桃显著高于苜蓿（$p<0.05$）。在20—100 cm土层各样地间无显著性差异（$p>0.05$）。与农地相比，侧柏、刺槐和苜蓿在0—20 cm土层的EE-GRSP/T-GRSP平均值分别降低了2.88%，14.62%，19.46%，核桃则增加了4.23%。



注:不同小写字母表示相同土层不同植被类型之间差异显著($p<0.05$)。

图 1　不同人工植被土壤球囊霉素和有机碳剖面分布

2.2　不同人工植被土壤球囊霉素与有机碳关系

图 2 为不同人工植被类型球囊霉素与有机碳的关系。由图 2 可知,不同人工植被类型 EE-GRSP 和 T-GRSP 含量随着有机碳含量的增加而呈线性增加($p<0.01$),EE-GRSP/T-GRSP 的比值也与 SOC 含量具有极显著正相关关系($p<0.01$)。

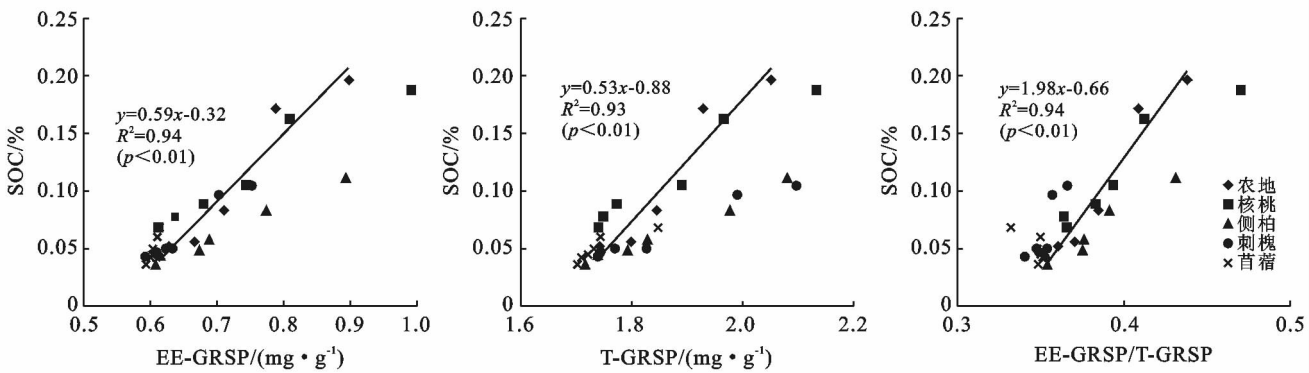


图 2　不同人工植被类型球囊霉素与有机碳的关系

不同人工植被 EE-GRSP/SOC 和 T-GRSP/SOC 比值均随着土层的增加而呈现增加,说明 EE-GRSP 和 T-GRSP 对 SOC 的贡献率均逐渐增加(表 1)。不同样地在 0—100 cm 土层 EE-GRSP/SOC 和 T-GRSP/SOC 分别为 1.78～6.77,4.07～19.11,且样地间和土层间存在显著差异($p<0.05$)。所有样地中,核桃其值最低,与农地相比,EE-GRSP/SOC 和 T-GRSP/SOC 在 30—40 cm,70—100 cm 土层的有显著差异($p<0.05$),两个土层分别降低了 55.6%,60.4%和 56.52%,51.1%。侧柏、刺槐和苜蓿样地的 EE-GRSP/SOC 和 T-GRSP/SOC 在各土层间没有显著差异($p>0.05$),其中侧柏的 EE-GRSP/SOC 和苜蓿的 T-GRSP/SOC 数值较高,与农地相比,分别增加了 39.7%,36.5%。

表 1 不同人工植被土壤球囊霉素对有机碳的贡献

贡献率/%	土层/cm	农地	核桃	侧柏	刺槐	苜蓿
EE-GRSP/SOC	0—10	1.81^{bC}	2.08^{abA}	3.16^{abC}	2.70^{abB}	3.33^{aC}
	10—20	1.78^{bC}	1.94^{bA}	3.70^{aC}	2.75^{abB}	3.78^{aBC}
	20—30	3.28^{bcBC}	2.61^{cA}	4.54^{abBC}	4.89^{aA}	4.51^{abBC}
	30—40	4.41^{aAB}	2.84^{bA}	5.58^{aAB}	4.82^{aA}	5.21^{aAB}
	40—70	4.47^{abAB}	3.06^{bA}	5.35^{aAB}	5.01^{aA}	5.29^{aAB}
	70—100	5.08^{bA}	3.36^{cA}	6.77^{aA}	5.29^{abA}	6.34^{abA}
T-GRSP/SOC	0—10	4.07^{bD}	4.33^{bB}	7.33^{abD}	7.89^{abB}	10.03^{aC}
	10—20	4.34^{bCD}	4.69^{bB}	9.35^{aCD}	8.10^{abB}	10.80^{aBC}
	20—30	8.55^{bcBC}	6.63^{cAB}	11.99^{abBC}	14.32^{aA}	12.93^{abBC}
	30—40	11.95^{aAB}	7.45^{bAB}	14.77^{aAB}	13.92^{aA}	14.91^{aAB}
	40—70	12.44^{abAB}	8.42^{bAB}	15.15^{aAB}	14.51^{aA}	15.06^{aAB}
	70—100	14.46^{bA}	9.24^{cA}	19.11^{aA}	15.68^{abA}	18.13^{abA}

注:不同小写字母表示相同土层不同植被类型之间差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示相同植被类型不同土层之间差异显著($p<0.05$)。

2.3 不同人工植被类型土壤团聚体分布及其稳定性

不同样地的团聚体主要分布在大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(0.25～0.053 mm)中,而粉黏粒级(<0.053 mm)最少(表 2)。

表 2 不同人工植被土壤团聚体含量分布及其稳定性

土层/cm	样地	团聚体粒级/%				平均重量直径 MWD/mm
		>2 mm	2～0.25 mm	0.25～0.053 mm	<0.053 mm	
0—10	农地	46.5^{a}	25.6^{ab}	26.0^{b}	1.9^{a}	1.88^{ab}
	核桃	35.1^{b}	25.4^{ab}	35.6^{ab}	4.0^{a}	1.83^{ab}
	刺槐	38.5^{ab}	19.6^{b}	38.3^{a}	3.6^{a}	2.03^{ab}
	侧柏	32.0^{b}	30.9^{a}	34.9^{ab}	2.2^{a}	1.78^{b}
	苜蓿	40.8^{ab}	30.3^{a}	27.6^{b}	1.3^{a}	2.16^{a}
10—20	农地	37.9^{a}	25.3^{ab}	31.3^{a}	5.6^{a}	2.00^{a}
	核桃	32.6^{a}	23.5^{b}	37.5^{a}	6.5^{a}	1.74^{a}
	刺槐	36.0^{a}	25.4^{ab}	33.7^{a}	4.9^{a}	1.93^{a}
	侧柏	31.7^{a}	31.3^{a}	35.1^{a}	2.0^{a}	1.73^{a}
	苜蓿	36.6^{a}	31.8^{a}	30.7^{a}	0.9^{a}	1.98^{a}
20—30	农地	22.2^{b}	26.6^{a}	43.3^{a}	7.9^{a}	1.50^{b}
	核桃	32.2^{a}	24.1^{a}	36.6^{b}	7.2^{a}	1.74^{ab}
	刺槐	35.1^{a}	23.8^{a}	37.9^{ab}	3.3^{a}	1.87^{ab}
	侧柏	39.3^{a}	25.2^{a}	34.7^{b}	0.9^{a}	1.71^{ab}
	苜蓿	36.8^{a}	26.5^{a}	34.0^{b}	2.8^{a}	1.96^{a}
30—40	农地	28.7^{b}	26.0^{b}	38.9^{a}	6.5^{a}	1.37^{b}
	核桃	27.8^{b}	33.9^{a}	35.8^{a}	2.6^{a}	1.58^{ab}
	刺槐	32.9^{ab}	24.5^{b}	37.4^{a}	5.2^{a}	1.79^{a}
	侧柏	29.6^{ab}	34.1^{a}	34.7^{a}	1.7^{a}	1.65^{ab}
	苜蓿	34.5^{a}	37.4^{a}	26.7^{b}	1.4^{a}	1.87^{a}
40—70	农地	19.6^{b}	29.6^{bc}	42.7^{a}	8.1^{a}	1.16^{c}
	核桃	23.9^{b}	32.1^{abc}	38.6^{ab}	5.5^{abc}	1.39^{bc}
	刺槐	23.2^{b}	27.8^{c}	41.8^{a}	7.2^{ab}	1.33^{bc}
	侧柏	28.7^{a}	35.1^{a}	35.0^{b}	1.3^{c}	1.60^{ab}
	苜蓿	33.0^{a}	34.2^{ab}	29.9^{c}	2.9^{bc}	1.80^{a}
70—100	农地	17.6^{c}	28.5^{b}	44.9^{a}	9.0^{a}	1.08^{c}
	核桃	23.9^{bc}	32.1^{ab}	38.6^{a}	5.5^{a}	1.38^{abc}
	刺槐	22.4^{bc}	28.4^{b}	40.7^{a}	8.5^{a}	1.31^{bc}
	侧柏	26.3^{ab}	32.3^{ab}	38.3^{a}	3.1^{a}	1.50^{ab}
	苜蓿	30.7^{a}	35.1^{a}	30.3^{b}	3.9^{a}	1.70^{a}

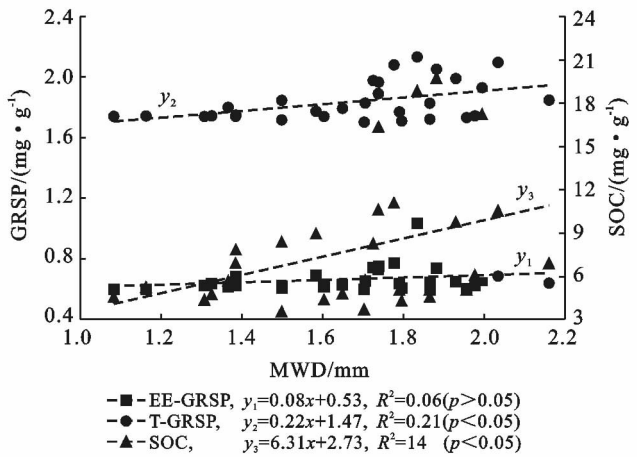
注:不同小写字母表示相同土层同一粒级不同植被类型之间差异显著($p<0.05$)。

大于 2 mm 团聚体含量的范围在 17.60%～46.50%,除 10—20 cm 土层外,各土层不同样地间有显著性差异($p<0.05$)。2～0.25 mm 团聚体含量范围在 19.60%～37.40%,除 20—30 cm 土层外,各土层不同样地间有显著性差异($p<0.05$)。0.25～0.053 mm 团聚体含量的范围在26.0%～44.9%,除 10—20 cm 土层外,各土层不同人工植被类型之间有显著性差异($p<0.05$)。<0.053 mm 团聚体含量的范围在 0.90%～9.00%,仅在 40—70 cm 土层各样地间有显著性差异($p<0.05$),其中侧柏显著低于刺槐和农地。

由表 2 可知,不同人工植被类型的 MWD 值随着土层的增加而逐渐降低,除 10—20 cm 土层外,各土层不同样地间有显著差异($p<0.05$),且苜蓿较高。与农地相比,苜蓿在 20—100 cm 土层显著($p<0.05$)增加了 30.54%～57.26%,侧柏在 40—100 cm 土层显著($p<0.05$)增加了 37.87%～38.40%,核桃在 20—100 cm 土层无显著差异($p>0.05$),刺槐仅在 30—40 cm 土层显著($p<0.05$)增加了 31.05%。

2.4　GRSP,SOC 以及团聚体稳定性之间的关系

由图 3 可知,T-GRSP 和 SOC 与 MWD 有显著正相关关系($p<0.05$),但 EE-GRSP 与 MWD 无显著关系($p>0.05$)。EE-GRSP/SOC 与 MWD 有显著负相关关系($p<0.05$),但 T-GRSP/SOC 与 MWD 无显著关系($p>0.05$)。



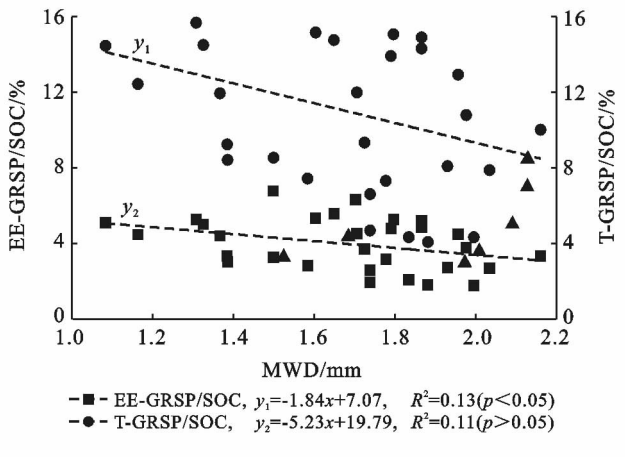


图 3　土壤球囊霉素和有机碳及其比值与平均重量直径之间的关系

3　讨 论

本研究中 EE-GRSP 和 T-GRSP 含量、EE-GRSP/T-GRSP 比值随着土层增加而逐渐下降,不同人工植被类型间仅在 0—30 cm 土层有显著差异($p<0.05$,图 1)。这与前人的研究结果一致,这种变化可能与土壤有机质和蛋白质的空间分布和异质性有关[17]。表层土壤由于枯枝落叶、根系分泌物和微生物生物量等输入较多[18],导致土壤养分较高,AMF 活性强,AMF 的侵染率和孢子密度大,会释放更多的球囊霉素[19]。本研究中的核桃 GRSP 组分要高于其他样地,这可能与适当施肥有关。施肥可以增加根系生物量,AMF 能和大部分植物根系形成互惠共生体,进而增加 GRSP 含量。有研究表明,多年生植物丛植菌根真菌的侵染率很高[20]。李博文[21]对青藏高原高寒草甸土壤施加氮肥,发现可以增加 AMF 的生物量和球囊霉素(EE-GRSP 和 T-GRSP)含量。本研究中,不同人工植被 EE-GRSP 和 T-GRSP 与有机碳呈极显著正相关关系($p<0.01$,图 2),这是由于球囊霉素本身就是有机碳的重要组成部分,其含量与有机碳的变化密切相关。

5 种不同人工植被类型的 EE-GRSP/SOC、T-GRSP/SOC 贡献均随着土层加深而逐渐增加,且深层(40—100 cm)GRSP 对 SOC 的贡献大约是土壤表层(0—40 cm)的 1.4～1.9 倍(表 1)。前人对不同土地利用方式和植被类型下的研究也有相似结果[22-23]。土壤剖面中 GRSP 组分对 SOC 贡献率取决于 EE-GRSP,T-GRSP 和 SOC 三者的变化。SOC 含量与枯枝落叶、根系分泌物和微生物等因子有关,与表层土壤有机质相比,深层有机物质来源较少,影响新的有机物质形成,因此随着土层增加 SOC 含量降低幅度较大[24]。GRSP 具有丰富的蛋白质和碳水化合物,这是对土壤有机碳贡献的基础[25]。但其含量会随着土壤深度的增加而降低,主要是由于 GRSP 在土壤剖面的分布受土壤理化性质变化的影响较大[22]。表层的 GRSP 主要受到 SOC 和土壤养分的影响,而深层 GRSP 主要受到土壤理化性质如容重、pH 值等的影响,土壤养分越高,容重越低,GRSP 会累积的越

多[22]。有研究表明,土壤深度增加对EE-GRSP减少的影响较大,但对T-GRSP的影响却小得多[22]。因此表现出深层GRSP对SOC的贡献比土壤表层要高很多。

不同人工植被类型土壤团聚体分布中以>2,2~0.25 mm粒级大团聚体含量为主,粉黏粒(<0.053 mm)含量最少,苜蓿、刺槐和侧柏的MWD值较农地要大(表2)。这与前人[26-27]的研究结果相似。AMF分泌的GRSP是由碳水化合物组成的糖蛋白,有研究发现在土壤团聚体中测得的GRSP碳水化合物含量是其它物质的3~10倍[28]。GRSP还从AMF的菌丝中脱落分泌到土壤当中,并通过其独特的黏结性质,将土壤中的细小颗粒黏结在一起,形成大团聚体[23]。研究表明,土壤中的球囊霉素粘附土壤颗粒的能力比其他糖类物质高3~10倍[29]。GRSP还可以识别和保护有助于团聚体稳定性的多糖和微生物等[30],能够保护SOC不会被分解,促进土壤中SOC的累积,提升团聚体稳定性[31]。本研究中,T-GRSP与MWD值有显著正相关关系($p<0.05$,图3),这是由于EE-GRSP被认为是新产生的或几乎分解的部分,易发生变化,而T-GRSP性质相对比较稳定不容易改变,因此与土壤团聚体稳定性表现出更好地相关性。

4 结论

晋西黄土区不同人工植被类型对EE-GRSP,T-GRSP和EE-GRSP/T-GRSP的影响主要在0—30 cm,且各土层间的含量存在差异显著,并与SOC有显著正相关关系。EE-GRSP和T-GRSP对SOC的贡献具有重要影响,其贡献率分别为1.78~6.77,4.03~19.11。人工植被恢复对T-GRSP含量的增加提高了其对SOC的贡献作用,能够促进土壤大团聚体(>0.25 mm)的形成和MWD的增加,提升土壤团聚体稳定性。这对于深入理解黄土区人工植被恢复措施下SOC与土壤结构稳定性的关系提供了一定的科学依据。

[参 考 文 献]

[1] 丁启朔.耕作力学研究的土壤结构及其评价方法[D].江苏 南京:南京农业大学,2006.

[2] 罗珠珠,李玲玲,牛伊宁,等.土壤团聚体稳定性及有机碳组分对苜蓿种植年限的响应[J].草业学报,2016,25(10):40-47.

[3] 张社奇.黄土高原油松、刺槐人工林地土壤生态系统的功能特征研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2004.

[4] Lovelock C E, Wright S F, Clark D A, et al. Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape[J]. Journal of Ecology, 2004,92(2):278-287.

[5] Wang Qiong, Wang Wenjie, He Xingyuan, et al. Role and variation of the amount and composition of glomalin in soil properties in farmland and adjacent plantations with reference to a primary forest in North-eastern China [J]. PLoS One, 2015,10(10):e0139623.

[6] Rillig M C, Wright S F, Allen M F, et al. Rise in carbon dioxide changes soil structure [J]. Nature, 1999, 400:628.

[7] Liang Wenju. Effect of tillage systems on glomalin-related soil protein in an aquic brown soil [J]. Research Journal of Biotechnology, 2010,5(3):10-13.

[8] 张成霞,南志标.放牧对草地土壤理化特性影响的研究进展[J].草业学报,2010,19(4):204-211.

[9] 景航,史君怡,王国梁,等.皆伐油松林不同恢复措施下团聚体与球囊霉素分布特征[J].中国环境科学,2017,37(8):3056-3063.

[10] 白淑兰,白玉娥,方亮,等.土生空团菌与虎榛子形成的菌根及其对虎榛子生长的影响[J].林业科学,2004,40(6):194-196.

[11] 石宗琳,王加旭,梁化学,等.渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究[J].土壤学报,2017,54(2):387-399.

[12] 赵荣玮,张建军,李玉婷,等.晋西黄土区人工林地土壤水分特征及其对降雨的响应[J].水土保持学报,2016,30(1):178-183.

[13] 张晓霞,杨宗儒,查同刚,等.晋西黄土区退耕还林22年后林地土壤物理性质的变化[J].生态学报,2017,37(2):416-424.

[14] 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):125-130.

[15] Wright S F, Upadhyaya A, Buyer J S. Comparison of n-linked oligosaccharides of glomalin from arbuscular mycorrhizal fungi and soils by capillary electrophoresis [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(13): 1853-1857.

[16] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.

[17] 阙弘,葛阳洋,康福星,等.南京典型利用方式土壤中球囊霉素含量及剖面分布特征[J].土壤,2015,47(4):719-724.

[18] 王振,王子煜,韩清芳,等.黄土高原苜蓿草地土壤碳、氮变化特征研究[J].草地学报,2013,21(6):1073-1079.

[19] Bauer A, Black A L. Quantification of the effect of soil

organic matter content on soil productivity [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(1): 185-193.

[20] Bao Yuying, Yan Wei. Arbuscular mycorrhizae and their structural types on common plants in grasslands of mid-western inner mongolia [J]. Chinese Biodiversity, 2004, 12(5): 501-508.

[21] 李博文.施肥对青藏高原高寒草甸球囊霉素土壤相关蛋白及其环境因子的影响[D].甘肃 兰州:兰州大学,2016.

[22] Wang Wenjie, Zhong Zhaoliang, Wang Qiong, et al. Glomalin contributed more to carbon, nutrients in deeper soils, and differently associated with climates and soil properties in vertical profiles [J]. Scientific Reports, 2017,7(1):1-13.

[23] Singh A K, Rai A, Pandey V, et al. Contribution of glomalin to dissolve organic carbon under different land uses and seasonality in dry tropics [J]. Journal of Environmental Management, 2017,192:142-149.

[24] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter: A key but poorly understood component of terrestrial C cycle [J]. Plant & Soil, 2011,338(1/2):143-158.

[25] Rillig M C, Wright S F, Nichols K A, et al. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils [J]. Plant & Soil, 2001,233(2):167-177.

[26] 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.

[27] 黎宏祥,王彬,王玉杰,等.不同林分类型对土壤团聚体稳定性及有机碳特征的影响[J].北京林业大学学报,2016,38(5):84-91.

[28] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Plant & Soil, 1998, 198(1):97-107.

[29] Franzluebbers A J, Wright S F, Stuedemann J A. Soil aggregation and glomalin under pastures in the Southern Piedmont USA [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(3):1018-1026.

[30] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management [J]. Plant & Soil, 1984,76(1/3):319-337.

[31] Zhang Jing, Tang Xuli, He Xinhua, et al. Glomalin-related soil protein responses to elevated CO_2 and nitrogen addition in a subtropical forest: Potential consequences for soil carbon accumulation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015,83:142-149.

(上接第 79 页)

[参 考 文 献]

[1] 张爱平,杨世琦,张庆忠,等.宁夏灌区农田退水污染形成原因及防治对策[J].中国生态农业学报,2008,16(4):1037-1042.

[2] 刘国强,杨世琦.宁夏引黄灌区农田退水污染现状分析[J].灌溉排水学报,2010,29(1):104-108.

[3] 张爱平,杨世琦,易军,等.宁夏引黄灌区水体污染现状及污染源解析[J].中国生态农业学报,2010,18(6):1295-1301.

[4] 胡宜刚,吴攀,赵洋,等.宁蒙引黄灌区农田排水沟渠水质特征[J].生态学杂志,2013,32(7):1730-1738.

[5] 邱小琮,王德全,尹娟,等.宁夏农业面源污染及其影响因子解析[J].水土保持学报,2012,26(5):190-194.

[6] 张学军,陈晓群,刘宏斌,等.宁夏引黄灌区稻田氮磷流失特征初探[J].生态环境学报,2010,19(5):1202-1209.

[7] 倪细炉,杨智,李志刚,等.银川平原主要湖泊湿地水环境现状调查与分析[J].环境工程,2012,30(S2):563-565.

[8] 李祚泳,丁晶,彭荔红.环境质量评价原理与方法[M].北京:化学工业出版社,2004.

[9] 章新,贺石磊,张雍照,等.水质评价的灰色关联分析方法研究[J].水资源与水工程学报,2010,21(5):117-119.

[10] 陆卫军,张涛.几种河流水质评价方法的比较分析[J].环境科学与管理,2009,34(6):174-176.

[11] 龚磊,卢文喜,辛欣,等.对应分析方法在白城市洮北区地下水水质评价中的应用[J].水资源保护,2011,27(1):38-41.

[12] 曾永,樊引琴,王丽伟,等.水质模糊综合评价法与单因子指数评价法比较[J].人民黄河,2007(2):45,65.

[13] 于洪涛,吴泽宁.灰色关联分析在南水北调中线澧河水质评价中的应用[J].水灌溉,2010(3):39-41,45.

[14] 吴雅琴.水质灰色关联评价方法[J].甘肃环境研究与监测,1998(3):25-28.