

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.04.023

董莉丽, 寇萌. 渭北黄土丘陵区人工林类型对土壤属性的影响. 土壤, 2021, 53(4): 841–849.

渭北黄土丘陵区人工林类型对土壤属性的影响^①

董莉丽, 寇萌

(咸阳师范学院资源环境与历史文化学院, 陕西咸阳 712000)

摘要: 为了研究渭北黄土丘陵区人工林类型对土壤属性的影响, 选取位于同一坡面上的刺槐纯林、油松纯林和苹果园土壤为研究对象, 分析了土壤结构稳定性, 土壤有机碳、无机碳和土壤呼吸等土壤属性在 3 种人工林土壤剖面的变化特征, 并探讨了土壤有机碳和无机碳在水稳性团聚体形成中的作用。结果表明: 3 种人工林土壤团聚体破碎率均较高, 各团聚体水稳性指标值、土壤有机碳含量、土壤呼吸在 3 个样地的顺序均为油松林>刺槐林>苹果园, 土壤无机碳含量的顺序为刺槐林>苹果园>油松林。土壤有机碳和无机碳含量之间呈负相关关系, 且二者分别与团聚体水稳性呈正相关和负相关关系, 但同时, 无机碳含量存在一个阈值, 当低于或高于这一阈值时, 其含量与团聚体水稳性分别呈正相关或负相关关系, 因此, 当无机碳含量较高时, 应降低其含量, 并提高土壤有机碳含量, 以改善土壤结构, 降低土壤遭受侵蚀的风险; 土壤结构稳定性各指标之间及其与土壤有机碳含量和土壤呼吸呈极显著正相关关系。可见, 人工林类型显著影响各项土壤属性, 油松林在提高土壤质量方面的作用大于刺槐林。

关键词: 土壤团聚体水稳性; 土壤碳; 人工林类型; 黄土丘陵区

中图分类号: S714.2 **文献标志码:** A

Effects of Artificial Forest Types on Soil Properties in Loess Hilly Area of Weibei of Shaanxi

DONG Lili, KOU Meng

(College of Resources, Environment, History and Culture, Xianyang Normal University, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: The soils were collected from *Robinia pseudoacacia* pure forest, *Pinus tabulaeformis* pure forest and apple orchard on the same slope, soil structure stability (aggregate composition), organic carbon, inorganic carbon and soil respiration were determined, and then the effects of artificial forest types on soil properties in the loess hilly area of Weibei of Shaanxi and the roles of soil organic and inorganic carbon in the formation of water stable aggregates were discussed. The results showed that disaggregation rates of soil aggregates were high under the three forest types. Water stability indexes of soil aggregates, soil organic carbon and respiration in the three forest types were in the order of *Pinus tabulaeformis* > *Robinia pseudoacacia* > *Malus pumila*, soil inorganic carbon was in the order of *Robinia pseudoacacia* > *Malus pumila* > *Pinus tabulaeformis*. Negative correlation existed between soil organic carbon and inorganic carbon, and they were positively and negatively correlated with water stability of aggregates respectively. Meanwhile, inorganic carbon had a threshold value, positive or negative correlation with water stability of aggregates existed when it was lower or higher than the threshold value. Therefore, when inorganic carbon is high, measures should be taken to decrease it and increase soil organic carbon for the improvement of soil structure and the alleviation of soil erosion. Significant positive correlations existed among different stability indexes of soil structure and between stability indexes of soil structure with soil organic carbon and respiration. In conclusion, artificial forest type can significantly affect soil properties and *Pinus tabulaeformis* is better than *Robinia pseudoacacia* in improving soil quality.

Key words: Water stability of soil aggregates; Soil carbon; Type of plantation; Loess hilly region

我国广泛开展的退耕还林还草等生态建设工作, 在防治土壤侵蚀, 提高土壤有机碳储量, 进而改善土壤质量等方面起到重要作用。土壤结构和有机碳是对土壤管理极其敏感的两个重要属性^[1], 且二者之间的相

互作用又与土壤碳库功能密切相关。土壤团聚体水稳性与土壤抗蚀性密切相关, 可用于表征土壤结构的稳定性^[2]。黄土高原地区土壤中的水稳性团聚体在保持土壤肥力、减少水土流失等方面有重要作用^[3]。例如, 李娟

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41907053)、陕西省教育厅科研计划项目(20JK0971)和咸阳师范学院校级项目(XSYK19027)资助。

作者简介: 董莉丽(1979—), 女, 陕西扶风人, 博士, 副教授, 主要从事生态修复与环境效益评价。E-mail: 527172621@qq.com

等^[4]研究认为土壤水稳性大团聚体(>0.25 mm 团聚体)含量越高,则土壤结构越稳定,土壤越能抵抗水力侵蚀。王文鑫等^[5]研究认为土壤可蚀性 K 值与水稳性团聚体平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)呈极显著负相关关系,而与团聚体分形维数(D)和团聚体破碎率(PAD)呈极显著正相关关系。有关该地区土壤团聚体水稳性及土壤碳含量的研究主要集中在不同土地利用类型^[4]、植被类型及植被恢复年限^[5-7]、植被带^[8]等的影响方面。比如,李柏桥等^[6]研究认为退耕还林还草可增加土壤大团聚体的数量。另外,有学者就团聚体稳定性与土壤碳含量之间的关系开展了相关研究。例如:石宗琳等^[7]研究认为果园土壤团聚体的农艺质量显著退化与有机碳和碳酸钙含量的递减有直接关系,并认为碳酸钙对土壤结构水稳性起重要作用,而有机碳不是水稳性团聚体的主要胶结剂。郭玉文等^[9]研究认为黄土颗粒间分布着大量碳酸钙,起到颗粒间胶结物的作用。Kumar 等^[1]也认为钙有利于有机胶体和黏土颗粒之间的胶结作用。而王文鑫等^[5]认为有机碳含量的增加对团聚体形成和稳定性起着重要的作用。耿韧等^[10]研究也认为农地、草地和林地团聚体稳定性均受土壤有机碳的显著影响。这些研究有助于人们理解和评价植被恢复措施和年限对土壤碳含量和土壤结构稳定性的影响,并有利于人们进一步认识土壤结构稳定性与土壤碳含量的关系。

陕西省礼泉县北部的叱干镇位于黄土高原丘陵沟壑区南部,拥有大面积的人工刺槐(*Robinia pseudoacacia*)纯林和较小面积油松(*Pinus tabulaeformis*)纯林。另外,该区域大部分农田已被苹果(*Malus pumila*)园等经济林取代^[7]。有关油松和刺槐林土壤特征的对比研究主要集中在土壤养分^[11]、水分特征^[12]、生产力及生态化学计量特征^[13-14]、土壤微生物群落结构^[15]及土壤微团聚体分形特征^[16]等方面。但有关本研究区刺槐林、油松林和苹果园土壤剖面不同土层土壤结构水稳性及其与土壤碳含量的关系研究鲜见报道。本研究分析土壤团聚体水稳性各指标及土壤有机碳、无机碳和土壤呼吸等在土壤剖面不同土层和同一土层不同人工林类型下的变化特征,重点探讨团聚体水稳性与土壤碳含量的关系,以期进一步认识土壤结构的稳定性影响因素,并为在该区域植被重建过程中,树种的选择及不同树种所产生的生态环境效益评价等工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区及样地概况

研究区位于陕西省咸阳市礼泉县北部的黄土丘

陵区。礼泉县地处关中平原北部,属暖温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温 12.96℃,无霜期 214 d,年平均降水量 537~546 mm,海拔在 402~1 467 m。礼泉县早在 20 世纪 60 年代,在其北部的南坊镇和叱干镇栽植五万多亩的刺槐林,并在 1999 年,成为我国首批退耕还林试点县之一。本文选择位于同一个坡面(108°27' E, 34°43' N)上的两种生态林即刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)林,一种经济林即苹果(*Malus pumila*)园为研究样地,样地海拔从高到低依次分布着油松林、刺槐林和苹果园,其平均胸径分别为 15.42、12.73 和 12.98 cm,其中,刺槐林在 20 世纪 90 年代进行过间伐,目前现存的为二代树,3 个人工林样地土壤 pH 分别为 7.97、8.33 和 8.42,土壤类型均为钙积褐土。

1.2 样品采集与分析

每个样地选择 3 个样方,在每个样方挖取土壤剖面,按 10 cm 分层采集土壤样品,将每个样方土壤剖面相同土层的土壤样品混合,利用四分法获得每个样地不同土层的土壤样品。将所有样品带回实验室后,室内风干,去除杂质。将一部分土壤样品干筛,得到 >10、7~10、5~7、2~5、1.2~2、<1.2 mm 的机械稳定性团聚体样品;另一部分经研磨,获得过 0.25 mm 和 1 mm 筛的土壤样品。过 0.25 mm 筛的土壤样品用于测定土壤有机碳含量,过 1 mm 筛的土壤样品用于测定土壤碳酸钙含量和 24h 土壤呼吸量。土壤有机碳含量采用重铬酸钾-浓硫酸氧化法^[17];土壤碳酸钙含量采用气量法测定,数值乘以 0.12,即为无机碳含量^[18];土壤呼吸采用静态碱液吸收法^[19]。

土壤水稳性团聚体的测定:称取 2~5 mm 的干筛团聚体样品 5~10 g,轻轻放入 200 ml 烧杯中,用洗瓶沿烧杯壁缓慢注入约 50 ml 蒸馏水,静置 30 min 后,用装有酒精的洗瓶将土壤样品冲洗到孔径为 0.05 mm 的筛子中,并轻轻晃动筛子约 2 min 后,再将筛子上的土壤用酒精冲入烧杯中,放在 50℃ 的烘箱中静置 24 h 后,过孔径为 2、1、0.5、0.2、0.1 mm 的套筛,并称量,最终得到不同大小的水稳性团聚体质量占比。

1.3 数据处理与分析

土壤水稳性团聚体分形维数的计算公式^[20]如下:

$$\frac{\lg m_{(r \leq R_i)}}{m_T} = (3 - D) \lg \frac{\bar{R}_i}{\bar{R}_{\max}} \quad (1)$$

式中: D 为土壤团聚体分形维数; $m_{(r \leq R_i)}$ 为直径小于等于第 i 组的土壤团聚体累积质量占比; m_T 为团聚体总质量; \bar{R}_i 为第 i 组平均直径; \bar{R}_{\max} 为最大直径

组的平均直径。

土壤团聚体平均质量直径 (MWD)和几何平均直径(GMD)由以下公式计算:

$$MWD = \sum_{i=1}^6 R_i m_i / 100 \quad (2)$$

$$GMD = e^{\sum_{i=1}^6 m_i \ln \bar{R}_i / \sum_{i=1}^6 m_i} \quad (3)$$

式中: \bar{R}_i 为第 i 组平均直径; m_i 为第 i 组团聚体质量占比。

土壤团聚体的破碎率(PAD)由以下公式计算:

$$PAD = (MWD_{dry} - MWD) / MWD_{dry} \quad (4)$$

式中: MWD 为水稳性团聚体平均质量直径; MWD_{dry} 为机械稳定性团聚体平均质量直径。

土壤水稳性团聚体的偏倚系数(C_s)和峰凸系数(C_E)的计算方法及其意义见参考文献^[21]。

本文数据采用 Microsoft Excel 2007 软件进行计算和处理; 利用 SigmaPlot10.0 绘制土壤属性图; 利用 R 语言绘制散点图矩阵^[22]; 运用 SPSS16.0 进行独立样本 t 检验和单因素方差分析, 采用最小显著差异法对同一土层不同样地和同一样地不同土层各土壤属性进行多重比较, 显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 土壤团聚体水稳性特征

当土壤水稳性团聚体的偏倚系数 $C_s > 0$ 时, 表明土壤较大直径团聚体较多; $C_s < 0$ 时, 则直径较小的团聚体数量较多。当土壤水稳性团聚体的峰凸系数 $C_E > 0$ 时, 表明土壤团聚体组成相对集中; 当 $C_E < 0$ 时, 则土壤中各级别团聚体含量相对均衡^[21]。由图 1 可知, C_s 值在油松林的 30~40、40~50、50~60 和 70~80 cm 土层为正值, 表明在油松林这 4 个土层中, 直径较大的水稳性团聚体数量较多; C_s 值在刺槐林和苹果园土壤剖面所有土层均为负值, 表明这些土壤团聚体水稳性差, 在快速湿润条件下, 大团聚体遇水分散为较小团聚体。 C_E 值仅在油松林的 70~80 cm 土层为正值, 表明在该土层中直径较大的水稳性团聚体较多, 且分布相对集中。

根据公式(1), 通过线性拟合的方法, 可计算出土壤水稳性团聚体的分形维数(D), 结果见图 1。在刺槐林、油松林和苹果园, 线性拟合的相关系数分别在 0.87~0.94、0.93~0.97、0.84~0.89, 且线性相关均显著, 表明利用线性拟合的方法得到的 D 值可信。刺槐林、油松林和苹果园的 D 值分别在 2.86~2.90、2.71~2.76、2.90~2.94。在所有土层, D 值均表现

为油松林最小, 刺槐林次之, 苹果园最大, 且差异显著。 D 值在同一样地不同土层表现为: 刺槐林和苹果园表层(0~10 cm)土壤 D 值最小, 而油松林的 70~80 cm 土层最小, 表层最大。

根据公式(2)和(3), 分别计算土壤团聚体 MWD 和 GMD, 由图 1 可知, 刺槐林、油松林和苹果园不同土层土壤 MWD 分别在 0.18~0.27、0.35~0.57、0.11~0.15 mm; GMD 分别在 0.09~0.12、0.17~0.28、0.07~0.09 mm。MWD 和 GMD 在各土层的大小顺序一致, 均为油松林>刺槐林>苹果园。

根据公式(4), 计算出土壤团聚体破坏率 PAD, 由图 2 可知, PAD 在刺槐林、油松林和苹果园的不同土层分别在 93%~97%、83%~95%、94~98%, 平均值分别为 95%、89% 和 97%。除表层土壤外, PAD 在 3 个样地均表现为苹果园>刺槐林>油松林, 与 D 值的大小顺序一致。PAD 在油松林样地剖面上表现为随土层深度的增加而逐渐降低, 而在刺槐林和苹果园样地, 表层最小。

2.2 土壤碳含量

土壤有机碳(SOC)和无机碳(SIC)含量见图 3。由图 3 可知, SOC 在刺槐林、油松林和苹果园 3 个样地不同土层的含量分别在 4.55~18.00、9.67~29.02 和 4.81~13.10 g/kg, 在各土层的大小顺序均为油松林>刺槐林>苹果园; 在刺槐林和油松林 0~80 cm 土层的平均值分别为 7.40 g/kg 和 13.76 g/kg, 在苹果园 0~50 cm 土层的平均值为 7.44 g/kg。SOC 含量在表层土壤较高, 表下层较低。SOC 含量在刺槐林和苹果园表下层土壤之间的差异不显著。

SIC 在刺槐林、油松林和苹果园 3 个样地不同土层的含量分别在 23.29~27.69、4.11~11.88 和 14.81~16.92 g/kg, 在各土层的大小顺序均为刺槐林>苹果园>油松林; 在刺槐林和油松林 0~80 cm 土层的平均值分别为 26.04 g/kg 和 8.83 g/kg, 在苹果园 0~50 cm 土层平均值为 15.84 g/kg。差异显著性分析表明, SIC 含量在同一土层不同样地之间的差异均显著。SIC 含量在剖面上基本表现为随土层深度的加深而逐渐增加的趋势。

2.3 土壤呼吸

由图 3 可知, 24h 土壤呼吸(SR)量在刺槐林、油松林和苹果园 3 个样地不同土层分别为 34.75~132.25、52.67~164.42、41.84~127.68 ml/kg, SR 在刺槐林和油松林 0~80 cm 土层的平均值分别为 59.39 ml/kg 和 90.55 ml/kg, 在苹果园 0~50 cm 土层的平均值为 69.16 ml/kg。SR 在刺槐林和苹果园之间差异不显著。

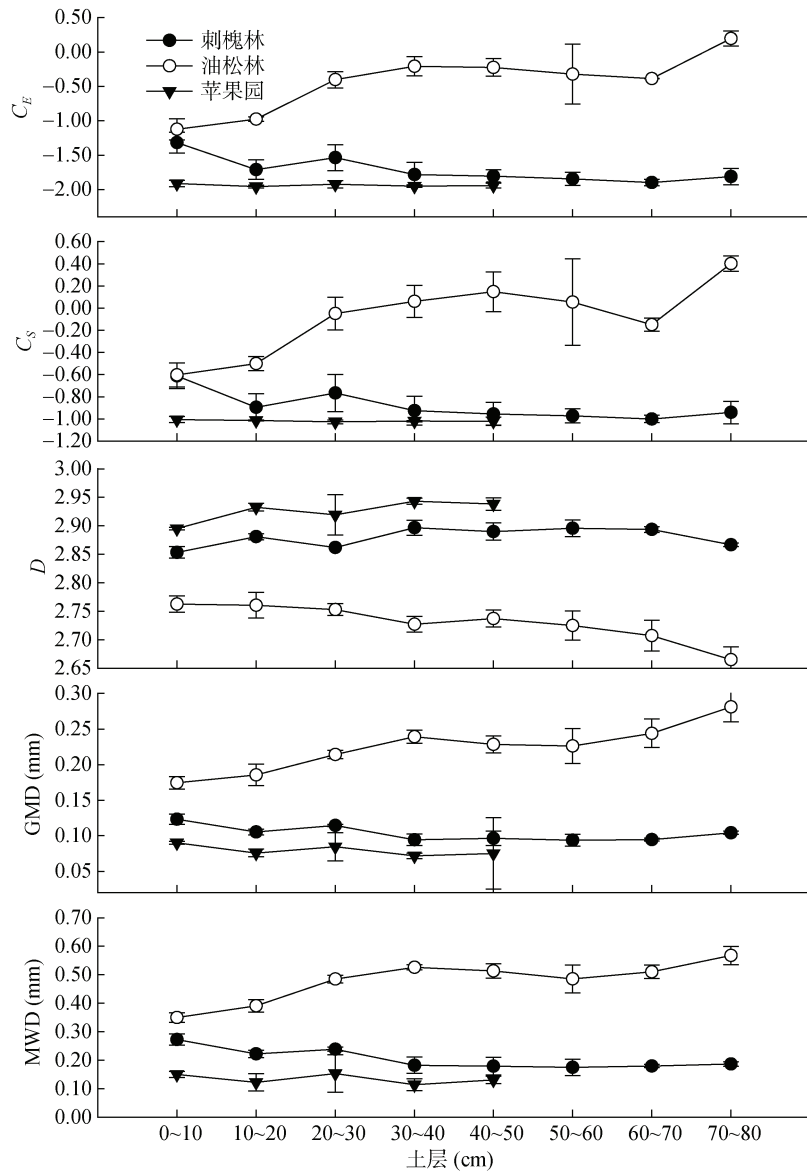


图 1 土壤团聚体水稳性参数

Fig. 1 Water stability parameters of soil aggregates

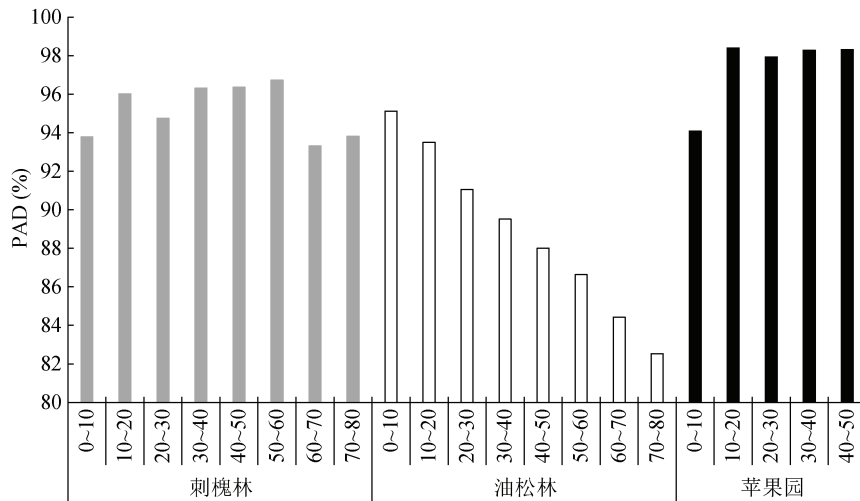


图 2 团聚体破坏率(%)

Fig. 2 Percentages of aggregate destruction

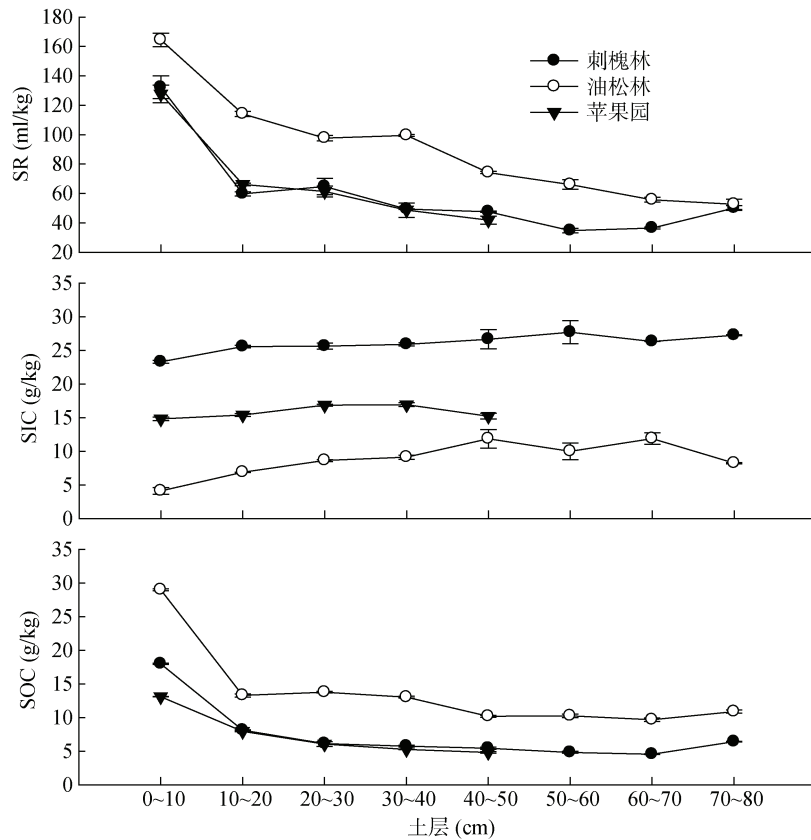


图 3 土壤碳含量和土壤呼吸特征

Fig. 3 Soil carbon contents and soil respiration characteristics

2.4 各指标间的相关性

利用 R 基础绘图系统中的 pairs() 函数绘制各土壤属性之间的散点图矩阵, 分别见图 4~图 6。由图 4 可以看出, 不同粒径的水稳性团聚体中, 0.1~0.2 mm 团聚体质量占比与较大(>0.2 mm)和较小(<0.1 mm)团聚体质量占比相关性较小。较大团聚体质量占比之间呈极显著正相关关系, 相关系数在 0.81~0.94, 且均与 MWD 呈极显著正相关关系, 相关系数在 0.89~0.99。较大团聚体(>0.2 mm)和较小团聚体(<0.1 mm)质量占比之间呈极显著线性负相关关系。由图 5 可以看出, MWD_{dry} 仅与 PAD 显著正相关, 与其他各指标之间的相关性不显著。D 值与 PAD 呈线性正相关关系(0.90), 二者与 MWD、GMD、C_s 和 C_e 之间均呈显著负相关关系。MWD、GMD、C_s、C_e 之间呈极显著线性正相关关系(相关系数>0.98), 其中, C_s 和 C_e 的相关系数为 1.00。由图 6 可以看出, SOC 含量与 SR 和 MWD 呈正相关关系, 相关系数分别为 0.92 和 0.43, 三者与 SIC 含量均呈负相关关系。

3 讨论

3.1 人工林类型对土壤属性的影响

相对于刺槐林和油松林, 苹果园土壤水稳性团聚

体 MWD 最小, 在 0.114~0.153 mm, 与郭玉文等^[3]研究得出的黄土母质的 MWD 约为 0.1 mm 的结论接近。可见, 果园土壤团粒结构的稳定性与其母质相似。在土壤剖面各土层内, SOC 含量、SR、MWD、GMD、C_s 和 C_e 在 3 种人工林下的大小顺序一致, 为油松林>刺槐林>苹果园, 而 D 和 PAD 的变化顺序与之相反, 为苹果园>刺槐林>油松林。可见, 相对于经济林, 生态林建设可显著提高 SOC 含量和土壤结构的水稳性。许多学者^[5,23-24]研究也都认为在植被恢复过程中, 水稳性大团聚体含量增加显著, MWD 显著升高, 土壤结构趋于稳定。在两种生态林类型中, 相对于刺槐林, 油松林的生态效益更加明显。其中, 油松林 SOC 含量显著大于刺槐林, 这一结论与前人^[14]的研究结论一致。这主要是由于油松林枯落物中的碳含量大于刺槐林, 且分解较慢, 有利于养分的积累^[13]。Chen 等^[25]研究发现, 油松林细根生物量大于刺槐林, 且细根生物量与 SOC 含量正相关。Cao 等^[26]研究发现, 油松非结构性碳浓度大于刺槐。油松林土壤结构水稳性最好, 这主要是由于松科植物可向土壤提供更多的有机碳, 并可改善土壤的疏水性^[27-28]。例如, Mataix-Solera 等^[27]研究发现, 与其他树种相比较, 地中海松的

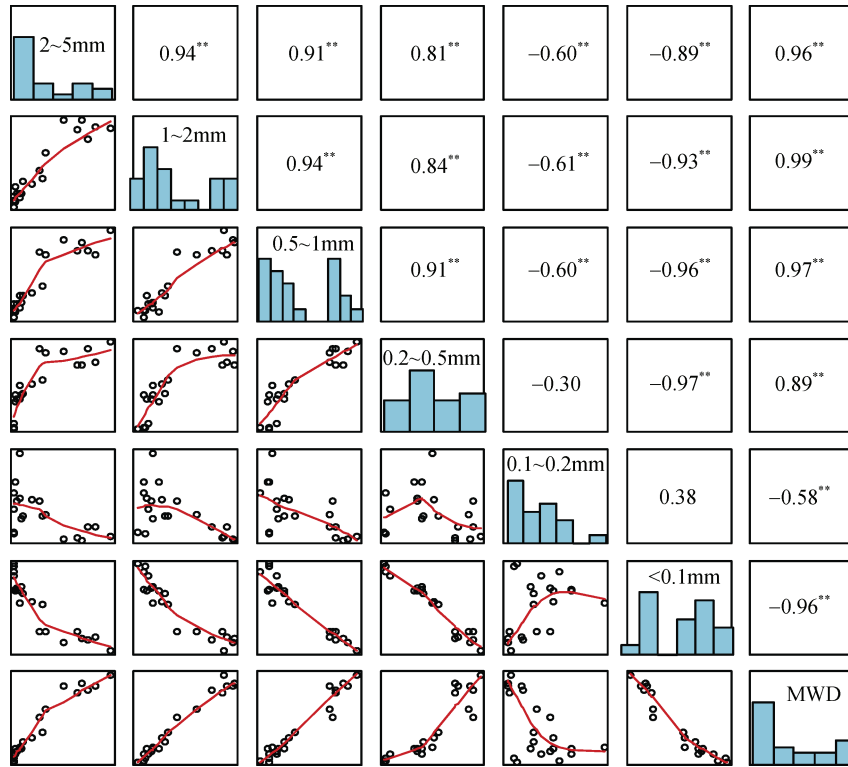


图 4 水稳性团聚体不同粒径质量占比及 MWD 散点图矩阵
 Fig. 4 Scatter matrixes of water stable aggregates with different sizes and MWD

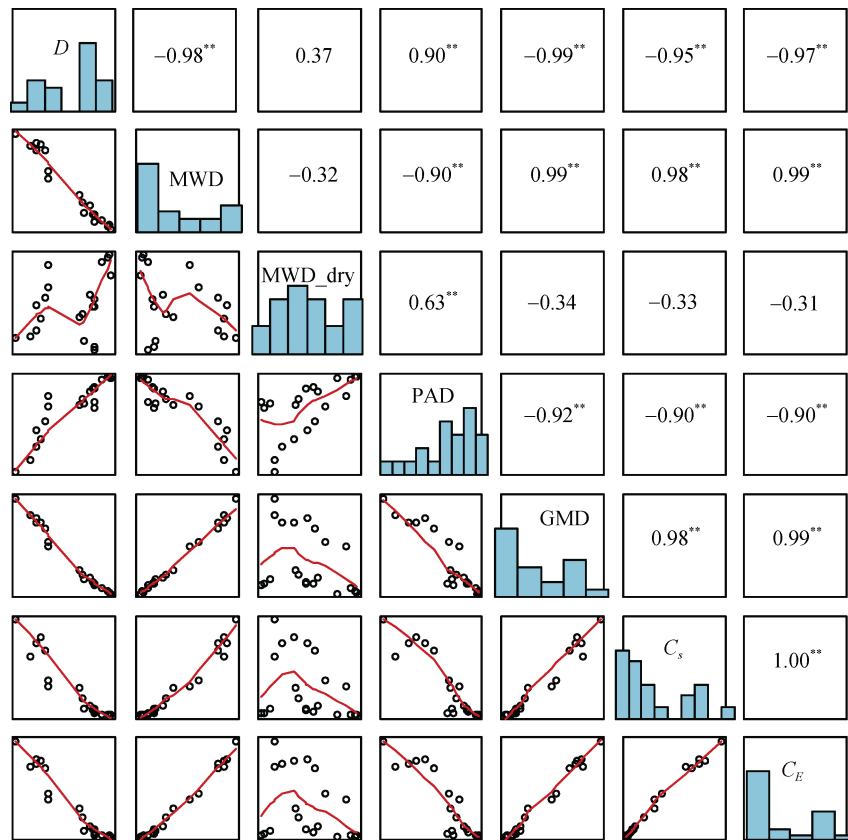


图 5 各团聚体稳定性指标的散点图矩阵
 Fig. 5 Scatter matrixes of indexes of aggregate stability

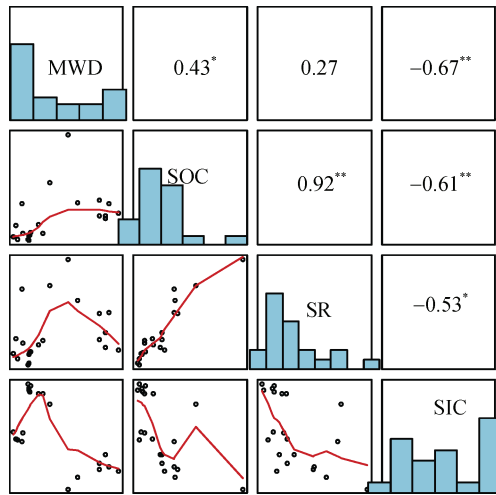


图 6 四个土壤属性的散点图矩阵
Fig. 6 Scatter plot matrixes of four soil properties

枯枝落叶中富含蜡质和芳香类物质，因此，可在土壤中产生更多的疏水性物质，而有机碳含量的增加与土壤疏水性物质的增加密切相关。疏水性物质在团聚体的形成和稳定性方面起重要作用^[28]。油松林细根生物量大于刺槐林^[25]，而细根又有利于水稳性团聚体的形成^[29]。人工纯林在我国黄土高原地区环境保护和土壤保持方面起重要作用，刺槐由于其广泛的适应性，而作为最重要的造林树种^[30]。但刘增文等^[11]发现油松和刺槐纯林都会引起土壤养分降低。而郭宝妮等^[16]则认为刺槐林地的肥力状况和物理性质好于油松林地；魏安琪等^[15]也认为，刺槐更能改善土壤微生物状况；Liu 等^[31]在我国亚热带严重退化的红壤地区研究发现，土壤微生物生物量碳含量的顺序为阔叶林>针阔混交林>针叶林。因此，文中油松林生态效益更加显著这一结论还需要进一步验证。

3.2 土壤碳含量对团聚体水稳性的影响

SOC 含量与土壤结构稳定性指标在 3 种人工林下的变化顺序一致，且彼此呈显著正相关关系。一方面，土壤团聚体是由有机碳与土壤矿物胶结而形成，SOC 是大团聚体形成和稳定的最重要因素^[32]，增加 SOC 含量可显著提高团聚体的稳定性，进而可有效防止土壤侵蚀^[5]；另一方面，SOC 也受到大团聚体的保护^[33]。

SIC 含量与 MWD 关系较复杂(图 7)。由图 7 可以看出，SIC 在不同的含量区间，表现出与 MWD 不同的相关性。其中，当 SIC 含量较低时(在油松林土壤剖面上)，其与 MWD 呈线性正相关关系；当 SIC 含量较高时(在刺槐林土壤剖面上)，其与 MWD 呈线性负相关关系；当 SIC 含量居中时(在苹果园土壤剖面上)，其与 MWD 无相关性。郭玉文等(2004)^[3]研究

认为，溶解出的 Ca^{2+} 越多，团粒的 MWD 越小，导致团粒结构越分散。而其(2008)^[9]则认为，碳酸钙作为微结构中的骨架颗粒，在维持结构稳定性方面发挥着重要作用。因此，本文假设，SIC 含量存在某一阈值范围，当高于该阈值时，在快速湿润过程中，随碳酸钙的溶解，土壤团粒结构随之破坏；当低于该临界值时，碳酸钙可作为土壤团粒胶结剂。郭玉文等 2004^[3]和 2008^[9]研究中的供试土壤碳酸钙的含量分别为 26.1% 和 13.61%，因此两篇文章中得出的结论不同，可能与供试土壤碳酸钙含量不同有关。Wuddivira 和 Camps-Roach^[34]研究发现，在 Ca^{2+} 浓度为 2.7 和 3.1 cmol/kg 的土壤中添加 Ca^{2+} 会增加水稳性团聚体含量，相反，在 Ca^{2+} 浓度为 13.9 cmol/kg 的土壤中添加 Ca^{2+} ，则会使更多团聚体分散。Virto 等^[35]也认为，相对于碳酸盐含量为 30% 的土壤，含量为 15% 的碳酸盐在团聚体中起主要胶结作用。另外，石宗琳等^[7]也认为，土壤碳酸钙含量与 MWD 和 GMD 呈极显著正相关关系，而与 PAD 呈极显著负相关关系，其供试土壤碳酸盐含量较低，在 4.0% ~ 6.5%。以上研究与本文这一假设相符。这主要是由于碳酸钙含量较低时，其中的 Ca^{2+} 可作为键桥，将石灰性土壤中黏土矿物与胡敏酸连接起来，形成稳定的土壤团粒结构；但如果碳酸钙含量较高时，有机碳和黏粒含量相对较少，则过多的碳酸钙溶解于水，而溶于水的 Ca^{2+} 有较大的水合半径，会促使团粒结构破碎^[34]。本文中的苹果园土壤有机碳含量最少，而无机碳含量较多，土壤结构稳定性最差，遇水极易散开，从而具有较大的土壤侵蚀和养分流失的风险。因此，在果园管理中，应多施用有机肥，将团聚体胶结剂由无机碳逐渐改变为有机碳，并利用节水灌溉以减少由于无机碳的淋溶和移动导致的团粒结构的破坏^[9]。

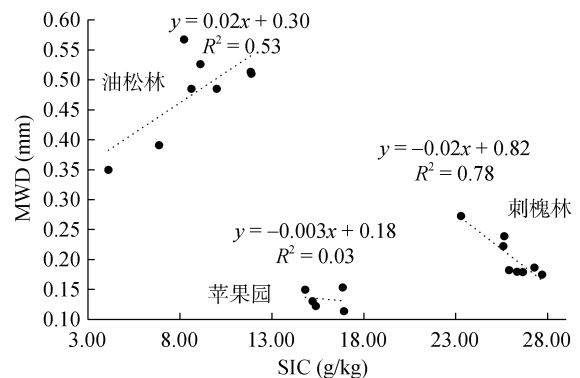


图 7 3 种人工林下土壤水稳性团聚体 MWD 和土壤 SIC 含量的关系

Fig. 7 Correlations between MWDs of water stable aggregates and SIC contents under three artificial forest types

相对于表下层, 表层 SOC 含量显著最高, 这与表层土壤中有大量的枯枝落叶有关。虽然油松林 SOC 含量在表层最高, 但是, 油松林土壤团聚体水稳性在土壤剖面上表现为随土层深度的增加而增加。可见, 当表下层 SOC 含量较低时, 碳酸盐作为土壤团粒的胶结剂, 增加了大团聚体稳定性^[29]。土壤中的碳酸钙含量随土层深度的增加而增加, 这主要是由于在降雨的作用下, 上部移动的碳酸钙在下部土层聚集^[9]。

4 结论

人工林类型显著影响水稳性团聚体构成比例和稳定性。相对刺槐林和苹果园土壤, 油松林土壤剖面不同土层大团聚体含量、MWD、GMD、Cs、Ce 等土壤团聚体水稳性指标显著最大, 而分形维数 D 值和团聚体破碎率(PAD)最小, 各土层土壤团粒结构为良好状态, 且油松林土壤有机碳含量和土壤呼吸也最高。3 种人工林类型中, 油松林生态效益最显著, 刺槐林居中, 而苹果园土壤有机碳含量最小, 团聚体破碎率高, 水稳性差, 因此应增加果园有机肥的施入。在土壤无机碳含量较高时, 会引起黄土丘陵区土壤结构破碎, 此时, 可通过提高土壤有机碳含量, 降低土壤无机碳含量, 以改善土壤结构, 降低土壤遭受侵蚀的风险; 而在油松林下, 土壤碳酸钙含量较低时, 其在水稳性团聚体形成中起胶结作用。建议在黄土丘陵区进行植被建设时, 选择种植油松为宜。

参考文献:

- [1] Kumar R, Rawat K S, Singh J, et al. Soil aggregation dynamics and carbon sequestration[J]. *Journal of Applied and Natural Science*, 2013, 5(1): 250–267.
- [2] 王国会, 王建军, 陶利波, 等. 围封对宁夏荒漠草原土壤团聚体组成及其稳定性的影响[J]. *草地学报*, 2017, 25(1): 76–81.
- [3] 郭玉文, 加藤诚, 宋菲, 等. 黄土高原黄土团粒组成及其与碳酸钙关系的研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(3): 362–368, 493–494.
- [4] 李娟, 韩霖昌, 陈超, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 248–253, 259.
- [5] 王文鑫, 王文龙, 郭明明, 等. 黄土高原沟壑区植被恢复对沟头土壤团聚体特征及土壤可蚀性的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(16): 2845–2857.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 徐红伟, 吴阳, 乔磊磊, 等. 不同植被带生态恢复过程土壤团聚体及其稳定性——以黄土高原为例[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(6): 2223–2232.
- [9] 郭玉文, 张玉龙, 党秀丽, 等. 由灌溉引起的黄土湿陷过程中碳酸钙行为研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(6): 1034–1039.
- [10] 耿韧, 张光辉, 洪大林, 等. 黄土高原农地草地林地土壤团聚体稳定性沿降水梯度的变化特征[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 141–148.
- [11] 刘增文, 段而军, 刘卓玛姐, 等. 黄土高原半干旱丘陵区不同树种纯林土壤性质极化研究[J]. *土壤学报*, 2009, 46(6): 1110–1120.
- [12] 常译方, 毕华兴, 高路博, 等. 晋西黄土区刺槐和油松林地土壤水分动态变化[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(4): 21–27.
- [13] 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.
- [14] Cao Y, Zhang P, Chen Y M. Soil C: N stoichiometry in plantations of N-fixing black locust and indigenous pine, and secondary oak forests in Northwest China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(4): 1478–1489.
- [15] 魏安琪, 魏天兴, 刘海燕, 等. 黄土区刺槐和油松人工林土壤微生物 PLFA 分析[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(4): 88–98.
- [16] 郭宝妮, 张建军, 黄明, 等. 吉县蔡家川流域不同树龄刺槐林和油松林土壤微团聚体分形特征研究[J]. *土壤通报*, 2012, 43(4): 787–792.
- [17] 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.
- [18] 王莲莲, 杨学云, 杨文静. 土壤碳酸盐几种测定方法的比较[J]. *西北农业学报*, 2013, 22(5): 144–150.
- [19] 黄懿梅, 安韶山, 刘连杰, 等. 黄土丘陵区土壤基础呼吸对草地植被恢复的响应及其影响因素[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(5): 862–869.
- [20] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896–1899.
- [21] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 340–347.
- [22] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>, 2019.
- [23] 钟思远, 张静, 褚国伟, 等. 沿海侵蚀台地不同恢复阶段土壤团聚体组成及其与丛枝菌根真菌的关系[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(2): 219–226.
- [24] Wang Y X, Ran L S, Fang N F, et al. Aggregate stability and associated organic carbon and nitrogen as affected by soil erosion and vegetation rehabilitation on the Loess Plateau[J]. *CATENA*, 2018, 167: 257–265.
- [25] Chen L L, Mu X M, Yuan Z Y, et al. Soil nutrients and water affect the age-related fine root biomass but not production in two plantation forests on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 135: 173–180.

- [26] Cao Y, Li Y N, Chen Y M. Non-structural carbon, nitrogen, and phosphorus between black locust and Chinese pine plantations along a precipitation gradient on the Loess Plateau, China[J]. *Trees*, 2018, 32(3): 835–846.
- [27] Mataix-Solera J, Arcenegui V, Guerrero C, et al. Water repellency under different plant species in a calcareous forest soil in a semiarid Mediterranean environment[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(17): 2300–2309.
- [28] Chrenková K, Mataix-Solera J, Dlapa P, et al. Long-term changes in soil aggregation comparing forest and agricultural land use in different Mediterranean soil types[J]. *Geoderma*, 2014, 235/236: 290–299.
- [29] Boix-Fayos C, Calvo-Cases A, Imeson A C, et al. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators[J]. *Catena*, 2001, 44(1): 47–67.
- [30] Zhang X X, Liu Z W, Zhu B C, et al. Impacts of mixed litter decomposition from *Robinia pseudoacacia* and other tree species on C loss and nutrient release in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2016, 27(3): 525–532.
- [31] Liu Y Q, Wei X H, Guo X M, et al. The long-term effects of reforestation on soil microbial biomass carbon in sub-tropic severe red soil degradation areas[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 285: 77–84.
- [32] Fernández-Ugalde O, Virto I, Barré P, et al. Mechanisms of macroaggregate stabilisation by carbonates: Implications for organic matter protection in semi-arid calcareous soils[J]. *Soil Research*, 2014, 52(2): 180.
- [33] Nie X D, Li Z W, Huang J Q, et al. Thermal stability of organic carbon in soil aggregates as affected by soil erosion and deposition[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 82–90.
- [34] Wuddivira M N, Camps-Roach G. Effects of organic matter and calcium on soil structural stability[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(3): 722–727.
- [35] Virto I, Gartzia-Bengoetxea N, Fernández-Ugalde O. Role of organic matter and carbonates in soil aggregation estimated using laser diffractometry[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(5): 566–572.