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

江仁涛，李富程，沈凇涛
（西南科技大学环境与资源学院，四川 绵阳 621010）

摘要：利用土壤大团聚体含量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、团聚体破坏率(PAD)和团聚体对有机碳贡献率(F)指标，研究不同时间尺度红柳恢复川西北高寒沙地对土壤团聚体稳定性和有机碳分布的影响。结果表明：红柳不同恢复年限土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体都以微团聚体(<0.25 mm)组成为主，随着恢复年限增加，表层(0—20 cm)>2，0.5～2 mm 粒级土壤团聚体含量显著增加，表层(0—20 cm)土壤团聚体 $R_{0.25}$、MWD 和 GMD 表现为 0 年<5 年<10 年<15 年，PAD 呈现相反的特征；红柳恢复引起表层(0—20 cm)土壤有机碳含量显著增加，随着恢复年限增加，>2，0.5～2 mm 粒级团聚体有机碳含量显著提高，>0.5 mm 粒级团聚体对土壤有机碳贡献率高达 34%～60%；红柳恢复对亚表层(20—40 cm)土壤团聚体与有机碳分布特征影响不显著。研究表明土壤团聚体稳定性和有机碳指标可作为川西北高寒沙地土壤生态修复适应性指标，红柳恢复对该区沙化土壤改良具有重要作用。

关键词：高寒草地；沙漠化；生态恢复；土壤团聚体；土壤有机碳
中图分类号：S152.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-2242(2018)01-0197-07
DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.031

Effects of Different Age of Alpine Desertification Land Planted Branchy Tamarisk on Soil Aggregates and Organic Carbon in Northwestern Sichuan

JIANG Rentao, LI Fucheng, SHEN Songtao
(*College of Resource & Environment, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan* 621010)

Abstract: The macro-aggregates content ($R_{0.25}$), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), the percentage of aggregate destruction (PAD) and contribution rates of aggregates to organic carbon (F), which were selected to analyze the effects of different age of alpine desertification land planted branchy tamarisk on soil aggregates stability and organic carbon distribution in northwestern Sichuan. The results showed that soil mechanical stability aggregates and water-stable aggregates were mainly composed of micro-aggregates (<0.25 mm) in different restoration years of branchy tamarisk restoration pattern. With the increase of recovery period, soil surface (0—20 cm) >2, 0.5～2 mm aggregates increased significantly, and the ranking of $R_{0.25}$, MWD and GMD from low to high was: 0 year <5 years <10 years <15 years, while PAD presented opposite trends. The planting of branchy tamarisk caused a significant increase in soil organic carbon content in the surface layer (0—20 cm). With the increase of recovery period, organic carbon content of >2, 0.5～2 mm aggregates increased significantly, and the contribution rates of >0.5 mm aggregates to soil organic carbon was 34%～60%. The effect of planting of branchy tamarisk to soil aggregates and organic carbon on sub-surface layer (20—40 cm) was not significant. The results indicated that soil aggregates stability and organic carbon can be used as the adaptable index of soil ecological restoration in northwestern Sichuan, and the planting of branchy tamarisk has an important effect on improvement of desertification soil.

Keywords: alpine grassland; desertification; ecological restoration; soil aggregates; soil organic carbon

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元，其组成状况和稳定性不仅决定着土壤肥力的高低，而且还影响着土壤的抗侵蚀能力、环境质量和固碳潜力[1]。土壤有机碳对团聚体的形成与稳定性有着重要影响，表层

收稿日期：2017-09-07
资助项目：国家科技支撑计划项目(2015BAC05B05)；国家自然科学基金项目(41401301)；四川省科技支撑计划项目(2014SZ0058)
第一作者：江仁涛(1991—)，男，硕士研究生，主要从事土壤退化机理与恢复研究。E-mail：jrtmoveon@163.com
通信作者：李富程(1982—)，男，博士，讲师，主要从事农业生态与水土保持研究。E-mail：lfckind@163.com

土壤中近 90%的有机碳位于团聚体内，不同粒级团聚体的有机碳含量存在明显差异，已有研究[2]表明，团聚体有机碳含量随着粒级的减小而增加，也有研究[3]指出，大团聚体(>0.25 mm)固定的有机碳较多，微团聚体(<0.25 mm)有机碳含量较低。土壤团聚体与有机碳之间有着密切的联系，团聚体为有机碳提供物理保护，具有固碳功能，土壤有机碳是重要的胶结物质，能够使微团粒团聚形成大团聚体，稳定土壤结构[4]。Luna 等[5]在地中海地区研究表明，不同恢复技术对退化土壤的团聚体稳定性和团聚体有机碳都有显著影响。程曼等[6]在宁南山区研究得出，植被恢复可以增强土壤团聚体水稳性以及提高团聚体有机碳和碳组分含量。安韶山等[7-8]认为黄土丘陵区植被恢复过程中土壤团聚体由大团块向小颗粒转换，粒径分布更为均匀，土壤结构逐渐改善，同时土壤团聚体有机碳的积累量呈上升趋势。王国会等[9]研究表明，围封有利于荒漠草原土壤团聚体的形成，随着围封年限的增加，土壤微团聚体(<0.25 mm)含量总体呈下降趋势。可见，植被恢复对土壤团聚体和有机碳变异规律的影响是目前研究的热点，但主要集中于中低海拔湿润和半湿润区，较少涉及干旱和半干旱区，尤其缺乏对高寒地区沙化土壤团聚体的相关研究。

川西北高寒草地生态环境异常脆弱，在全球气候变化和人类活动等作用下沙化态势严峻，随着退化程度的加剧，地表植被盖度不断下降，土壤有机质消耗殆尽，土壤结构严重破坏，使得生态恢复难度倍增。沙化土壤恢复关键在于土壤结构的改善和生态功能的恢复，目前研究者主要关注川西北沙化草地地表植被的恢复和土壤肥力的变化[10-13]，而对土壤团聚体稳定性和有机碳动态研究较少。因此，本研究选取不同恢复年限的红柳样地为研究对象，应用干筛法与湿筛法比较不同恢复年限土壤团聚体组成特征，探讨沙地生态恢复过程中土壤团聚体及有机碳的变化规律，为川西北沙化草地土壤改良和生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省阿坝藏族羌族自治州红原县，地处青藏高原东缘、紧邻四川盆地，经纬度为 31°51′—33°19′ N，101°51′—103°23′ E。境内海拔多在 3 600 m 以上，地势由东南向西北倾斜，地貌多为丘状高原。黑河、白河流经该区，由南向北注入黄河，东南部河流为长江水系。气候属大陆性高原寒温带季风气候，春秋短促，长冬无夏，年均温 1.1 ℃，年均降雨量为 791.95 mm，除 6—8 月外，月降水量均小于蒸发量，空气极为干燥，太阳辐射强、多大风天气。土壤类型以亚高山草甸土为主，局部地区有沼泽土和荒漠土。川西北沙化治理始于上世纪 90 年代，红原县瓦切镇是四川省沙化草地治理重点示范区，“沙障(高山柳枝)+施肥(牛羊粪)+种草+围栏+管护”是典型的沙化治理模式，经过 20 余年的治理，沙化势头得到一定缓解。

1.2 样品采集

供试土壤于 2016 年 7 月采自红原县瓦切镇沙化草地治理示范区，通过实地调查，在地形地貌、成土母质等自然环境条件基本相同的区域内选取了 0，5，10，15 年红柳恢复样地，在每个样地中选择 3 个样方，样方大小为 10 m×10 m，测定和记录样方基本信息(编号、坐标、海拔、株高、盖度、枯枝落叶层和生物结皮厚度)，每个样方内随机选取 3 个采样点，在距植株主干 30 cm 处采集表层(0—20 cm)和亚表层(20—40 cm)土壤团聚体样品，3 个同层土样混合成 1 个土样，装入采样盒以避免挤压破坏团聚体，共计 24 个混合土样，用于测定土壤团聚体含量、土壤有机碳和团聚体有机碳。样地基本信息见表 1。

表 1 样地描述

样点编号	红柳年限/a	地理位置	海拔/m	株高/m	植被盖度/%	枯枝落叶层和生物结皮厚度/cm
Ⅰ—1	0	33°10′35.977″ N, 102°37′27.476″ E	3433.13		7	0
Ⅰ—2	0	33°10′35.629″ N, 102°37′27.781″ E	3433.28		5	0
Ⅰ—3	0	33°10′35.263″ N, 102°37′27.904″ E	3433.47		8	0
Ⅱ—1	5	33°10′44.132″ N, 102°37′03.726″ E	3432.75	1.28	21	0
Ⅱ—2	5	33°10′43.625″ N, 102°37′03.436″ E	3429.06	0.80	22	0
Ⅱ—3	5	33°10′43.816″ N, 102°37′03.201″ E	3430.66	1.20	20	0
Ⅲ—1	10	33°10′38.405″ N, 102°37′26.842″ E	3435.28	2.61	68	1.8
Ⅲ—2	10	33°10′38.041″ N, 102°37′26.108″ E	3436.44	2.45	71	2.0
Ⅲ—3	10	33°10′38.225″ N, 102°37′24.945″ E	3436.72	2.85	65	1.7
Ⅳ—1	15	33°10′42.193″ N, 102°37′08.306″ E	3428.39	3.65	85	2.5
Ⅳ—2	15	33°10′42.146″ N, 102°37′07.833″ E	3433.44	3.72	87	2.7
Ⅳ—3	15	33°10′42.501″ N, 102°37′07.753″ E	3430.73	3.58	90	2.8

1.3　样品测定

将土样掰成直径约 10 mm 的小土块，除去动植物残体、小石块后平铺在室内自然风干。团聚体测定采用干筛法和湿筛法[14]。干筛法：称取 100 g 风干土置于套筛上，用振荡机振荡 10 min，分离出＞2，0.5～2，0.25～0.5，＜0.25 mm 机械稳定性团聚体，称重并计算出各级团聚体所占百分比。湿筛法：依据干筛法所得的团聚体，按各级团聚体比重配制出 100 g 土样，放入 TTF－100 型团聚体分析仪浸泡 5 min 后振荡 30 min(转速 30 次/min，上下振幅 40 mm)，分离出＞2，0.5～2，0.25～0.5，＜0.25 mm 水稳性团聚体，在 50 ℃烘干称重后计算出各级团聚体所占百分比，每个样品测定 2 次。土壤有机碳和团聚体有机碳采用重铬酸钾外加热法测定。

1.4　计算方法

大团聚体比重($R_{0.25}$)计算公式为：

$$R_{0.25}=\frac{M_{r>0.25}}{M_T}\times 100\%=\left(1-\frac{M_{r<0.25}}{M_T}\right)\times 100\% \tag{1}$$

式中：M_r 为各粒级团聚体重量(g)；M_T 为团聚体总重量(g)。

团聚体平均重量直径(MWD，mm)和几何平均直径(GWD，mm)计算公式为[15]：

$$\mathrm{MWD}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(\overline{R_i}w_i)}{\sum_{i=1}^{n}w_i} \tag{2}$$

$$\mathrm{GMD}=\exp\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}w_i\ln\overline{R_i}}{\sum_{i=1}^{n}w_i}\right] \tag{3}$$

式中：$\overline{R_i}$为某级团聚体平均直径(mm)；w_i 为某级团聚体组分的干重(g)。

团聚体破坏率(PAD，%)计算公式为[15]：

$$\mathrm{PAD}=\frac{W_d-W_w}{W_d}\times 100\% \tag{4}$$

式中：W_d 为＞0.25 mm 机械稳定性团聚体含量(g)；W_w 为＞0.25 mm 水稳性团聚体含量(g)。

团聚体对土壤有机碳的贡献率(F)计算公式为[3]：

$$F=\frac{\mathrm{ASOC}_i\times P_i}{\mathrm{SOC}} \tag{5}$$

式中：ASOC_i为第 i 粒级团聚体有机碳含量(g/kg)；P_i 为第 i 粒级团聚体占总团聚体比率(%)；SOC 为土壤总有机碳含量(g/kg)。

1.5　统计分析

通过单因素方差分析研究不同退化程度、不同土层和不同粒级土壤理化性质及土壤团聚体的差异，显著性检验采用 LSD 方法，显著性水平选择 $P<0.05$。

2　结果与分析

2.1　土壤团聚体分布特征

2.1.1　土壤机械稳定性团聚体　由表 2 可知，对于土壤表层(0—20 cm)，不同恢复年限均以＜0.25 mm 粒级团聚体为主，0.25～0.5 mm 粒级团聚体次之，＞2，0.5～2 mm 粒级团聚体含量较少；随着恢复年限的增加，表层(0—20 cm)＞2 mm 和 0.5～2 mm 粒级土壤团聚体含量显著增加($P<0.05$)，0.25～0.5 mm 粒级团聚体呈现先增加后减少的趋势，＜0.25 mm 粒级团聚体含量显著降低($P<0.05$)。相对于沙地(0 年)，种植红柳 5，10，15 年后土壤表层(0—20 cm)$R_{0.25}$ 分别提高 14.47%，42.33%，54.67%。亚表层(20—40 cm)土壤团聚体组成与表层(0—20 cm)相似，但不同恢复年限各粒级团聚体含量变化不显著。0，5 年红柳表层(0—20 cm)土壤 $R_{0.25}$ 含量略低于亚表层(20—40 cm)，而 10，15 年红柳土壤表层 $R_{0.25}$ 分别比亚表层高 13.87%和 25.39%。这些结果表明红柳恢复对川西北高寒沙地表层(0—20 cm)土壤机械稳定性团聚体组成影响显著，有利于提高大团聚体含量，这与王国会等[9]对宁夏荒漠草原土壤研究结果类似，不同的是，王国会等[9]研究得出 20—40 cm 土层以＞0.25 mm 粒级团聚为主，且高于 0—20 cm 土层，可能由于地表植被和地区降水量差异较大等因素所致，这与本研究区土壤剖面团聚体组成差异较大。川西北高寒沙地红柳恢复达 10 年，地表植被覆盖率提高，土壤有机质不断富集，胶结物质促进微团粒不断汇聚形成大团聚体，最终改变土壤团聚体组成状况。

表 2　不同恢复年限土壤机械稳定性团聚体分布特征

土层深度/cm	红柳年限/a	机械稳定性团聚体/%				$R_{0.25}$/%
		＞2 mm	0.5～2 mm	0.25～0.5 mm	＜0.25 mm	
0—20	0	4.00±2.75c	1.01±0.45c	25.32±1.35b	69.67±4.31a	30.33±4.31c
	5	5.09±2.32c	1.94±0.76c	27.68±1.52a	65.28±3.66b	34.72±3.66b
	10	10.61±1.84b	5.76±2.13b	26.80±1.26a	56.83±3.33c	43.17±3.33a
	15	15.58±3.50a	9.33±3.04a	22.00±1.50c	53.09±5.15c	46.91±5.15a
20—40	0	7.23±0.84a	0.89±0.24b	26.62±1.05a	65.26±1.21a	34.74±1.21b
	5	7.32±1.11a	1.98±0.61a	27.37±1.81a	63.34±2.66ab	36.66±2.66ab
	10	8.13±1.04a	1.97±0.66a	27.81±1.63a	62.09±2.16b	37.91±2.16a
	15	8.02±1.20a	2.55±1.05a	26.84±1.25a	62.59±2.36b	37.41±2.36a

注：表中数据为平均值±标准误差；同一列不同小写字母表示相同粒级团聚体在 $P<0.05$ 水平上的差异显著。下同。

2.1.2 土壤水稳性团聚体 干筛法反映的是原状土壤中非水稳性和水稳性团聚体的总体状况，而湿筛法反映的是水稳性团聚体的特征，能更准确地揭示植被恢复对土壤结构的影响[15]。红柳不同恢复年限土壤水稳性团聚体分布特征见表3。不同恢复年限土壤表层(0—20 cm)以<0.25 mm粒级团聚体占绝对优势，均在74.29%以上，其他粒级团聚体含量较低；随着恢复年限增加，表层(0—20 cm)土壤>2，0.5～2 mm粒级团聚体含量显著增加($P<0.05$)，0.25～0.5 mm粒级团聚体变化较小，<0.25 mm粒级团聚体含量显著降低($P<0.05$)。亚表层(20—40 cm)土壤仍以<0.25 mm粒级团聚体为主体，植被恢复并没有使该土层团聚体组成发生显著变化。相对于沙地(0年)，种植红柳5，10，15年后表层(0—20 cm)土壤$R_{0.25}$分别提高20.10%，59.01%，122.79%，亚表层(20—40 cm)无显著变化。0，5年红柳表层(0—20 cm)土壤$R_{0.25}$与亚表层(20—40 cm)差异较小，10，15年红柳表层(0—20 cm)土壤$R_{0.25}$分别比亚表层(20—40 cm)高28.70%，83.38%。以上结果表明，红柳种植有利于提高表层(0—20 cm)土壤团聚体水稳性。已有相关研究[6,9,16]证实，在不同植被恢复模式下，退化土壤表层水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量都有不同程度增加，团聚体结构分布更趋于均匀、稳定。

表3 不同恢复年限土壤水稳性团聚体分布特征

土层深度/cm	红柳年限/a	水稳性团聚体/%				$R_{0.25}$/%
		>2 mm	0.5～2 mm	0.25～0.5 mm	<0.25 mm	
0—20	0	0.52±0.96c	1.02±1.20c	10.00±1.25b	88.46±2.03a	11.54±2.03c
	5	0.72±0.86c	1.72±0.70c	11.42±1.92b	86.14±2.21a	13.86±2.21c
	10	4.01±0.94b	4.54±2.00b	9.80±1.56b	81.65±3.82b	18.35±3.82b
	15	5.72±2.16a	6.75±2.54a	13.25±2.09a	74.29±6.28c	25.71±6.28a
20—40	0	2.09±0.84a	2.19±0.87a	9.12±1.12a	86.59±1.82a	13.41±1.82a
	5	2.43±0.93a	2.11±0.84a	8.94±0.77a	86.52±1.70a	13.48±1.70a
	10	2.18±0.72a	2.19±1.11a	8.86±1.87a	86.77±2.43a	13.23±2.43a
	15	2.28±1.01a	1.99±0.75a	9.74±1.39a	85.99±2.14a	14.02±2.14a

2.2 土壤团聚体稳定性

由图1可知，不同恢复年限土壤PAD大多在60%以上，表明沙化草地土壤抗水蚀能力差，团聚体易分散。随着红柳恢复年限增加，表层(0—20 cm)土壤PAD明显减小，相对于沙地(0年)，红柳恢复5，10，15年后土壤PAD分别降低2.75%，6.53%，25.81%，其中10，15年红柳样地表层(0—20 cm)土壤PAD明显低于亚表层(20—40 cm)，亚表层(20—40 cm)PAD变化较小。由图2可知，不同恢复年限红柳样地表层(0—20 cm)土壤机械稳定性团聚体MWD表现为：0年<5年<10年<15年，其中10，15年显著高于0，5年红柳样地($P<0.05$)，亚表层(20—40 cm)土壤团聚体MWD差异不显著。机械稳定性团聚体GMD的变化特征与MWD一致。不同恢复年限土壤水稳性团聚体MWD和GMD变化趋势与机械稳定性团聚体类似。两种处理结果均表明，0，5年红柳表层(0—20 cm)土壤团聚体MWD和GMD小于亚表层(20—40 cm)，而10，15年红柳与之呈现相反的特征。红柳恢复过程中有机残体归还相应增多，有机质的富集提供黏合剂，能显著提高表层土壤大粒径团聚体总量和团粒间的联结度，增强团聚体抗水蚀能力，显著提高土壤团聚体稳定性，本研究结果与程曼等[6]、王国会等[9]、罗珠珠等[15]、谢锦升等[17]研究类似，但由于植被恢复模式不同以及土壤形成条件的差异，最终对团聚体的改善效果不一致。

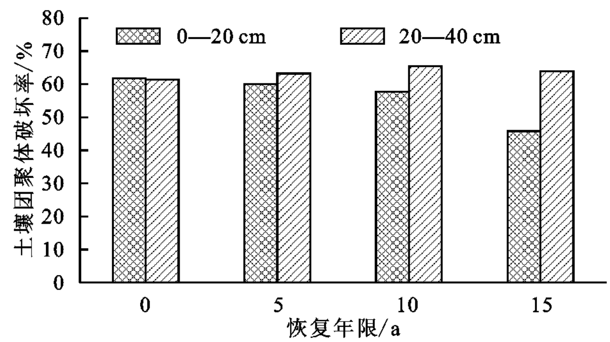
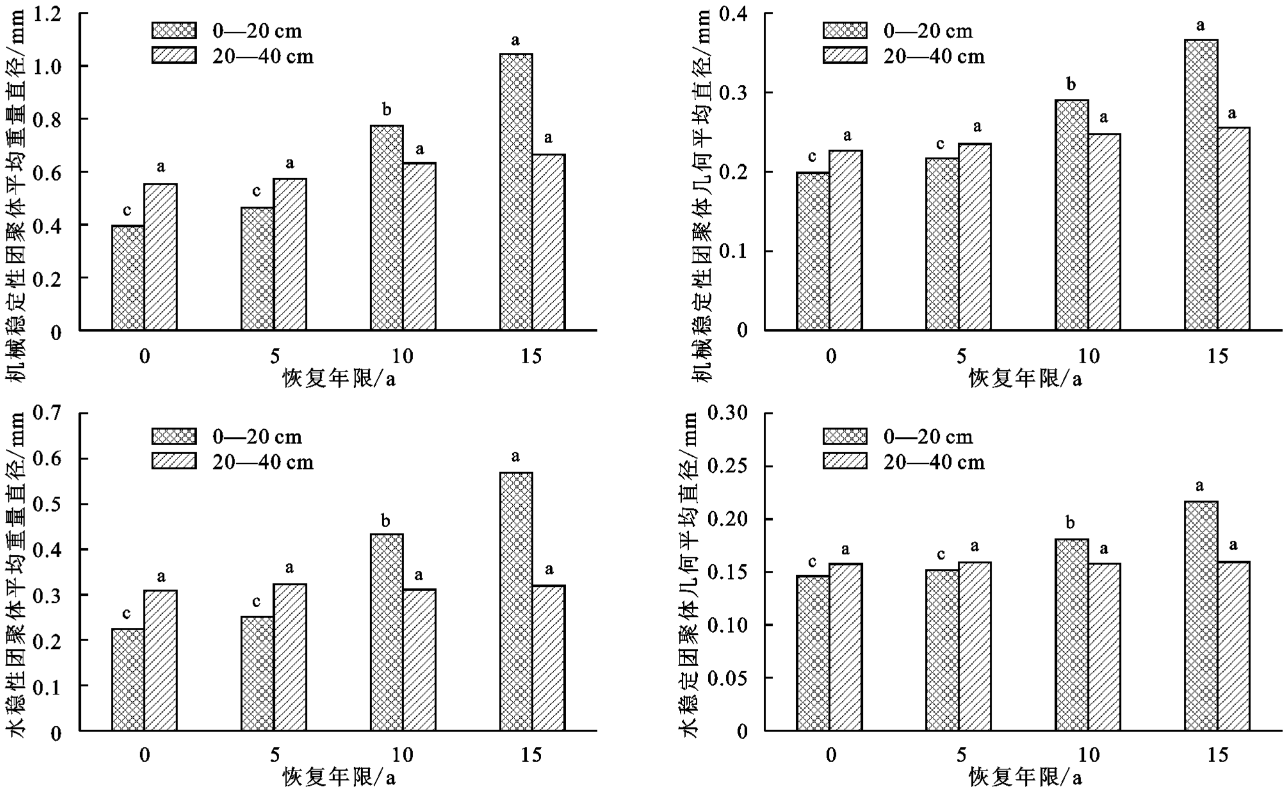


图1 不同恢复年限土壤团聚体破坏率

2.3 土壤有机碳分布特征

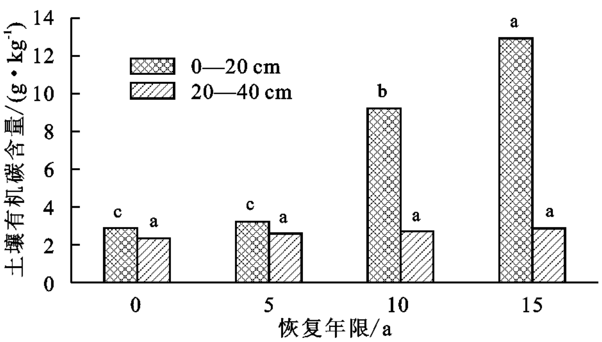
2.3.1 土壤有机碳深度分布 由图3可知，不同恢复年限红柳样地表层(0—20 cm)土壤有机碳含量明显高于亚表层(20—40 cm)。随着恢复年限的增加，表层(0—20 cm)土壤有机碳含量显著增加($P<0.05$)，相对于沙地(0年)，红柳种植10，15年后土壤有机碳分别增加220.61%和349.75%，亚表层(20—40 cm)土壤有机碳含量变化不明显。这与彭佳佳等[11-12]对该区域的研究结果相同。安韶山等[8]也认为植被恢复使黄土丘陵区0—20 cm土层有机碳的含量高于下层(20—40 cm)，说明植被恢复使土壤有机碳的分布具有一定的表聚性，主要在于表层土壤接受的枯枝落叶多，腐殖质含量高，有机碳的积累也最明显。此外，赵哈林等[18]在科尔沁沙地研究得出，生物结皮下表层(0—2.5 cm)土壤有机质等

养分含量高于无结皮沙地,本研究区内恢复 10 年以上的红柳样地生物结皮厚度达 2 cm,这对沙化土壤有机质的累积和大团聚体的形成产生有利影响,从而改善区域生态恢复状况。



注:图中不同小写字母表示同一土层不同恢复年限土壤团聚体平均重量直径和几何平均直径在 $P<0.05$ 水平上的差异显著。

图 2　不同恢复年限土壤机械稳定性团聚体、水稳性团聚体的平均重量直径和几何平均直径



注:图中不同小写字母表示同一土层不同恢复年限土壤有机碳在 $P<0.05$ 水平上的差异显著。

图 3　不同恢复年限土壤有机碳含量

2.3.2　土壤团聚体有机碳分布　由表 4 可知,不同恢复年限红柳样地表层(0—20 cm)土壤大团聚体(>0.25 mm)有机碳含量高于微团聚体(<0.25 mm),最大值出现在 0.5～2 mm 粒级,各粒级团聚体有机碳含量随着恢复年限增加而增大,其中 10,15 年红柳样地土壤团聚体有机碳显著高于 0,5 年红柳样地土壤($P<0.05$)。亚表层(20—40 cm)仍以 0.5～2 mm 粒级团聚体有机碳含量最高,其他粒级团聚体之间有机碳含量差异不大,恢复年限对各粒级团聚体有机碳含量影响不大。安韶山等[8]认为植被恢复后同一深度土壤 0.25～0.5,0.5～1 mm两个粒级团聚体有机碳的含量最高,程曼等[6]认为植被恢复下土壤团聚体有机碳最大值出现在:2～5,1～2,0.25～1 mm 粒级,谢锦升等[17]研究植被恢复后 0.25～2 mm粒级团聚体有机碳含量最高,以上结果均表明,植被恢复有利于提高团聚体有机碳含量,其中大团聚体(>0.25 mm)有机碳含量最高并且对有机碳的富集作用更强,这对于沙化土壤的恢复具有积极意义。

2.3.3　土壤团聚体对有机碳贡献率　由表 5 可知,0,5 年红柳样地表层(0—20 cm)土壤以<0.25 mm 粒级团聚体对有机碳的贡献为主,0.25～0.5 mm 粒级团聚体次之,>2,0.5～2 mm 粒级团聚体贡献率最低;10,15 年红柳样地表层(0—20 cm)土壤 0.5～2,<0.25 mm 粒级团聚体贡献率较高,>2,0.25～0.5 mm 粒级团聚体贡献率较低。表层(0—20 cm)土壤>2,0.5～2 mm 粒级团聚体贡献率随着恢复年限增加而显著提高($P<0.05$),0.25～0.5,<0.25 mm 粒级团聚体贡献率显著降低($P<0.05$)。对于亚表层(20—40 cm),不同恢复年限土壤均以<0.25 mm 粒级团聚体对有机碳的贡献为主,0.25～0.5 mm 粒级团聚体贡献率次之,>2,0.5～2 mm 团聚体贡献率较小,各粒级团聚体对有机碳的贡献率随恢复年限无显著变化。

将各粒级土壤团聚体含量和团聚体有机碳含量综合考虑,能全面客观地反映植被恢复对土壤有机碳库的作用[19]。本研究显示,随着恢复年限增加,表层

(0—20 cm)土壤增加的有机碳集中于>2,0.5~2 mm 两个粒级,这与谢锦升等[17]研究结果类似,其认为新增加的碳可能首先出现在大团聚体中,因而提高了大团聚体中有机碳的分配比例。红柳种植 15 年后,0.5~2 mm 粒级团聚体对有机碳的贡献率最高,主要归因于该粒级团聚体有机碳含量增加幅度大,而 0,5 年红柳样地<0.25 mm 粒级团聚体贡献率最高,主要由于该粒级团聚体所占比重大,所以,团聚体对有机碳的贡献率由团聚体有机碳含量和团聚体比重两个因素决定。川西北高寒沙地植被恢复过程中,红柳半球形树冠更利于保护和捕获掉落物,土壤团聚体与有机碳形成正反馈机制,土壤有机碳把微团聚体胶结成大团聚体,大团聚体中处于分解状态的根系和菌丝极大地增加了其有机碳的浓度[20],其中>2,0.5~2 mm 粒级团聚体固碳效果最明显,这对于提高该区沙化土壤团聚体稳定性和固碳能力具有重要作用。

表 4 不同恢复年限土壤团聚体有机碳的分布特征 单位:g/kg

土层深度/cm	红柳种植年限/a	团聚体粒级范围			
		>2 mm	0.5~2 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
0—20	0	5.45±0.90b	17.03±2.14c	2.88±0.36b	2.61±0.24b
	5	5.70±1.32b	24.14±2.54c	3.36±0.36b	2.47±0.46b
	10	11.71±1.00a	47.98±2.54b	6.76±1.19a	5.63±0.71a
	15	13.78±1.89a	60.05±11.75a	7.94±2.03a	5.95±1.13a
20—40	0	3.04±0.56a	10.83±0.42a	2.47±0.34a	2.05±0.04c
	5	2.93±0.09a	9.91±1.14a	2.63±0.26a	2.36±0.14ab
	10	3.33±0.45a	11.17±0.85a	2.79±0.30a	2.20±0.12bc
	15	2.85±0.42a	10.44±0.78a	2.70±0.21a	2.46±0.13a

注:表中数据为平均值±标准误差;表中同一列不同小写字母表示相同粒级团聚体有机碳在 $P<0.05$ 水平上的差异显著。下同。

表 5 不同恢复年限土壤团聚体有机碳贡献率

土层深度/cm	红柳种植年限/a	团聚体粒级/%			
		>2 mm	0.5~2 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
0—20	0	7.18±4.76b	5.78±1.56d	25.39±2.99a	63.16±1.90a
	5	8.65±3.54b	14.60±5.59c	28.94±1.83a	50.00±6.81b
	10	13.52±2.33a	30.63±13.40b	19.57±2.42b	34.64±2.34c
	15	16.01±3.41a	43.24±15.31a	13.40±2.15b	24.38±2.21d
20—40	0	9.30±1.06a	4.10±1.07b	28.16±4.42a	57.11±3.63a
	5	8.29±0.66a	7.50±2.24a	27.85±3.95a	57.68±2.23a
	10	9.83±1.07a	8.15±1.18a	28.01±3.42a	51.31±3.80a
	15	9.08±1.83a	10.29±2.57a	25.74±5.23a	53.20±7.28a

3 结 论

(1)不同恢复年限土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体都以微团聚体(<0.25 mm)组成为主,显著高于其他粒级团聚体含量($P<0.05$)。随着恢复年限的增加,表层(0—20 cm)土壤>2,0.5~2 mm 粒级团聚体含量显著增加($P<0.05$),亚表层(20—40 cm)团聚体组成变化不明显,表明红柳恢复有利于改善沙化土壤表层(0—20 cm)团聚体组成。

(2)不同恢复年限表层(0—20 cm)土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体 $R_{0.25}$、MWD 和 GMD 随着恢复年限的增加而显著增大($P<0.05$),PAD 与之相反,亚表层(20—40 cm)土壤团聚体稳定性指标无显著变化,表明红柳恢复显著提高沙化土壤表层(0—20 cm)团聚体稳定性。

(3)红柳恢复使沙化土壤表层(0—20 cm)有机碳含量显著增加($P<0.05$),随着恢复年限增加,>2,0.5~2 mm 粒级团聚体有机碳含量显著提高($P<0.05$),>0.5 mm 粒级团聚体对土壤有机碳贡献率高达 34%~60%,亚表层(20—40 cm)土壤有机碳变化较小。

参考文献:

[1] 李玮,郑子成,李廷轩,等.不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J].生态学报,2014,34(21):1827-1836.

[2] Denef K, Zotarelli L, Boddey R M, et al. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(5): 1165-1172.

[3] 郭天雷,史东梅,卢阳,等.几种保护措施对紫色丘陵区坡耕地土壤团聚体结构及有机碳的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):197-203.

[4] 侯晓娜,李慧,朱刘兵,等.生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J].中国农业科学,

2015,48(4):705-712.

[5] Luna L, Miralles I, Andrenelli M C, et al. Restoration techniques affect soil organic carbon, glomalin and aggregate stability in degraded soils of a semiarid Mediterranean region [J]. Catena, 2016, 143: 256-264.

[6] 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.

[7] 安韶山,张扬,郑粉莉.黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应[J].中国水土保持科学,2008,6(2):66-70.

[8] 安韶山,张玄,张扬,等.黄土丘陵区植被恢复中不同粒级土壤团聚体有机碳分布特征[J].水土保持学报,2007,21(6):109-113.

[9] 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.

[10] 万婷,涂卫国,席欢,等.川西北不同程度沙化草地植被和土壤特征研究[J].草地学报,2013,21(4):650-657.

[11] 彭佳佳,胡玉福,蒋双龙,等.生态恢复对川西北沙化草地土壤活性有机碳的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):251-255.

[12] 彭佳佳,胡玉福,肖海华,等.生态修复对川西北沙化草地土壤有机质和氮素的影响[J].干旱区资源与环境,2015,29(5):149-153.

[13] 胡玉福,彭佳佳,邓良基,等.围栏种植红柳对川西北高寒沙地土壤颗粒组成和矿质养分的影响[J].土壤通报,2015,46(1):54-61.

[14] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科技出版社,1978:77-85.

[15] 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.

[16] 蓝良就,张野,黄炎和,等.退化花岗岩植被恢复对团聚体及其有机碳的影响[J].水土保持学报,2012,26(1):190-194.

[17] 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等.植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J].生态学报,2008,28(2):702-709.

[18] 赵哈林,郭轶瑞,周瑞莲,等.植被覆盖对科尔沁沙地土壤生物结皮及其下层土壤理化特性的影响[J].应用生态学报,2009,20(7):1657-1663.

[19] 刘中良,宇万太,周桦,等.长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响[J].土壤,2011,43(5):720-728.

[20] 王静娅,张凤华.干旱区典型盐生植物群落土壤团聚体组成及有机碳分布[J].生态学报,2016,36(3):600-607.

(上接第 196 页)

[25] 刘锋,陈沈良,周永东,等.黄河 2009 年调水调沙期间河口水动力及悬沙输移变化特征[J].泥沙研究,2010(6):1-8.

[26] Zhang Y H, Ding W X, Luo J F, et al. Changes in soil organic carbon dynamics in an Eastern Chinese coastal wetland following invasion by a C_4 plant *Spartina alterniflora* [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(10): 1712-1720.

[27] Cheng X L, Luo Y Q, Chen J Q, et al. Short-term C_4 plant *Spartina alterniflora* invasions change the soil carbon in C_3 plant-dominated tidal wetlands on a growing estuarine Island [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(12): 3380-3386.

[28] Liu J E, Zhou H X, Qin P, et al. Effects of *Spartina alterniflora* salt marshes on organic carbon acquisition in intertidal zones of Jiangsu Province, China [J]. Ecological Engineering, 2007, 30(3): 240-249.

[29] 刘钰,李秀珍,闫中正,等.长江口九段沙盐沼湿地芦苇和互花米草生物量及碳储量[J].应用生态学报,2013,24(8):2129-2134.

[30] 严格,葛振鸣,张利权.崇明东滩湿地不同盐沼植物群落土壤碳储量分布[J].应用生态学报,2014,25(1):85-91.