

添加砭砂岩对风沙土性质的改良及时间效应

魏彬萌, 赵宣

(陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司,
陕西省土地整治工程技术研究中心, 国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 西安 710075)

摘要: 试验利用砭砂岩和风沙土性质上的互补性, 采用田间试验, 将两者按不同的比例(1:1, 1:2, 1:5)复配, 并以黄土与风沙土 1:2 复配作为对照, 以期将砭砂岩与沙复配成土技术大规模推广应用于毛乌素沙地进行农业种植提供科学依据。结果表明, 随着砭砂岩加入比例的增加, 复配土壤砂粒含量减少, 粉粒含量明显增加, 砭砂岩的加入促使风沙土土壤质地由砂土向粉壤土逐渐转变。而且随着作物种植年限的增加, 复配土壤砂粒含量也在明显减少, 粉粒和黏粒含量增加且有逐渐下移的趋势, 这种变化在 0—40 cm 土层尤为突出。各处理 >0.25 mm 水稳性团聚体含量 ($WR_{0.25}$), 平均重量直径 (MWD), 几何平均直径 (GMD) 均随砭砂岩加入比例和作物种植年限的增加而显著增加, >0.25 mm 各级别土壤团聚体含量也基本随砭砂岩加入比例和作物种植年限的增加而增加, 且增加最明显的是 0.25~0.5 mm 级别土壤团聚体含量。各处理 0—30 cm 土层土壤有机质含量随作物种植年限的增加而显著增加。综上, 砭砂岩与沙复配比例为 1:1~1:5 均可不同程度的改善土壤质地和结构, 增加土壤有机质, 且复配比例在 1:1~1:2 时效果最佳。

关键词: 风沙土; 砭砂岩; 质地; 团聚体; 有机质

中图分类号: S156.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)06-0016-06

Effect of Addition of Feldspathic Sandstone on Improvement of Aeolian Sand Soil Quality and the Time Effect

WEI Binmeng, ZHAO Xuan

(Shaanxi Province Land Engineering Construction Group, Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Land and Resources of China, Shaanxi Province Land Reclamation Engineering Technology Research Center, Xi'an 710075, China)

Abstract: The aim of the present study was to develop scientific evidence about application of feldspathic sandstone to improve Mu Us Sandy Land for agriculture cultivation. Four treatments were feldspathic sandstone : sand = 1 : 1, 1 : 2, 1 : 5 and loess : sand = 1 : 2 (CK), and set up and managed with wheat maize rotation system over a 6-year study period. The results showed that sand content in the composite soil decreased with feldspathic sandstone increasing, but silt content increased, indicating that adding feldspathic sandstone promoted the transform of sand soil to loam soil. Furthermore, soil sand content decreased but silt and clay content increased significantly, and gradually move downward with the increase of planting years, in particular, this effect was the most obvious at the soil depth of 0—40 cm. The water stable aggregates >0.25 mm ($WR_{0.25}$), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and the amounts of soil particles >5 mm, 2~5 mm, 1~2 mm and 0.5~1 mm in every treatment increased with duration of planting years, in which the content of 0.25~0.5 mm aggregate was the maximum. Additionally, soil organic matter also increased significantly with the increase of planting years. In summary, sand soil amended with feldspathic sandstone at the ratios of 1 : 1~5 : 1 could improve soil texture and structure and enhance soil organic matter, and the effects of ratios at 1 : 1~2 : 1 on soil improvement were the best.

Keywords: sandy soil; feldspathic sandstone; soil texture; soil aggregate; soil organic matter

毛乌素沙地南缘位于中国北方农牧交错带西部,地质上属于典型的多层次过渡带。该区生态环境脆弱,土壤贫瘠、水分缺乏,再加上不合理的农垦及过度放牧加剧了草地退化^[1],致使毛乌素沙地长期以来无法作为耕地的后备资源进行有效利用^[2]。虽然采用传统的封沙育林育草、生态水利修复等水土保持措施对该区域进行综合治理,但未能从根本上改变沙漠化加剧的势头^[3-4]。改良风沙土的关键在于改良其土壤颗粒组成,增加风沙土中缺乏的黏粒和土壤胶结物质。Saleh 等^[5]通过室内种植试验发现,添加黏粒可显著增加沙土的保水性能,提高水分利用效率,同时也可以显著增加作物产量等。王志等^[6]研究发现,毛乌素沙地南缘半流动沙地垫黄土改良后土壤中中细砂粒比重降低,粉粒含量明显增加,土壤持水、保水能力明显增强,同时土壤有机质、全氮含量显著增加,可见垫黄土对沙地土壤有明显的改良作用。但是毛乌素沙地周围缺少黄土土源,远距离运输成本高且污染严重,经济效益差,因此无法大面积推广。

砒砂岩在毛乌素地区分布广泛,被当地人称为“环境癌症”,其成岩程度低、砂粒间胶结程度差、结构强度低,极易发生水土流失,再加上砒砂岩具有“干时坚如岩石,遇水烂如泥”和肥力极其贫瘠的特征,一般植被很难生长^[7]。但是从矿物组成来看,砒砂岩主要包含石英、蒙脱石和方解石,其中蒙脱石含量高达 30%;从矿物特性来看,蒙脱石作为层状硅酸盐黏土矿物,具有很强的吸附和离子交换能力^[8]。鉴于砒砂岩和风沙土性质上的互补性,近年来,已有学者利用砒砂岩来改良风沙土。摄晓燕等^[9]研究表明,砒砂岩可有效降低风沙土的入渗率和饱和导水率,增加风沙土的饱和含水量和滞留含水量,增强风沙土的持水能力。另外,砒砂岩可以显著减少风沙土对磷的吸附固定,增加风沙土对 NH_4^+ -N 的吸附,具有增加磷肥有效性及土壤持续性供氮的能力,可提高土壤保肥性和肥料的利用率^[10-11]。然而,长期种植作物对砒砂岩和风沙土复配土壤性质的影响的研究较少^[12],而且考虑到砒砂岩优良的矿物组成和特性以及黄土客土法

实施过程中存在的土源缺乏以及产生的经济及环境问题,促使我们假设利用砒砂岩改良当地风沙土土壤质地、结构,进而改善其保水保肥性能。本次试验通过田间试验,将砒砂岩与风沙土按不同比例复配成土,连续种植 5 a 作物后分析土壤的质地、结构及土壤有机质含量变化,筛选出砒砂岩与风沙土的最佳复配比例,以期将为砒砂岩与沙复配成土技术大规模推广应用于毛乌素沙地进行农业种植提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于陕西省渭南市富平县杜村镇褚塬村(109°11'30"E, 34°42'11"N),该区属暖温带半湿润气候区,年均降雨量为 472.97 mm,7—9 月份降雨量占全年降雨量的 49%,年蒸发量为 1 000~1 300 mm,无霜期 225 d,年平均气温 13.4℃,夏季最高气温为 41.8℃,冬季最低气温为 -22℃,年光能辐射总量为 518.4~534.7 kJ/cm²。

1.2 试验设计

试验于 2010 年 6 月至 2015 年 9 月实施。为模拟毛乌素沙地砒砂岩与沙混合层的土地状况,试验小区在 0—30 cm 铺设砒砂岩或黄土与沙的混合物质,30—70 cm 填充风沙土。砒砂岩和沙均取自榆林榆阳区小纪汗乡大纪汗村,黄土采自富平当地土壤,供试土壤性质见表 1。本试验共设 4 个处理,砒砂岩与沙按体积比分别为 1:1(C₁),1:2(C₂),1:5(C₃),黄土:沙=1:2(CK),每个处理重复 3 次,共布设 12 个小区,小区面积为 2 m×2 m=4 m²,采取自南向北“一”字型布设。

试验采用小麦和玉米轮作模式,其中小麦品种为小偃 22,玉米品种为户单 4 号。从 2010 年 6 月到 2015 年 9 月,各小区均采用当地农民传统的水肥管理模式。播种前,施入基肥(磷酸二铵 300 kg/hm²,尿素 150 kg/hm²);在小麦生长期,灌溉 3 次,每次灌水 90 mm,追施尿素 1 次,每次为 150~225 kg/hm²;在玉米种植期间,灌溉 1 次,追施尿素 1 次,每次为 150 kg/hm²。供试土壤的理化性状见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性状

质地	颗粒组成/%			质地	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	速效钾/ (g·kg ⁻¹)	pH
	黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.05 mm)	砂粒 (0.05~2 mm)						
砒砂岩	8.49	78.94	12.57	粉壤土	3~5	0.035	0.0019	0.060	8.35
风沙土	1.11	11.57	87.32	砂土	1~3	0.030	0.0026	0.088	8.85
黄土	13.22	77.30	9.48	粉壤土	6~8	0.330	0.0167	0.104	8.67

1.3 土样采集及测定

分别于 2011 年、2015 年玉米收获后,在各个试验小区用土钻取 0—5,5—10,10—15,15—20,20—

25,25—30,30—40,40—50,50—70 cm 土层土壤样品,每个小区随机取 3 钻混合为一个土壤样品,自然风干后研磨过 2 mm 筛,用于土壤颗粒组成分析。采

集各小区 0—30 cm 土层原状土样 2 kg 左右,去除根系和小石块,取一部分(大约 1.5 kg)沿自然裂隙掰成直径约 1 cm 左右的土块,自然风干,用于土壤团聚体分析;另一部分自然风干后磨细过 0.149 mm 的筛子,用于土壤有机质分析。

土壤颗粒组成采用马尔文(Mastersizer 2000)激光粒度分析仪测定(美国制);土壤团聚体采用萨维洛夫法测定^[13];土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定^[14]。

土壤团聚体平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)的计算方法见式(1)^[15]:

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{X}_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \log \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right]$$

式中: \bar{X}_i 表示任一级别范围内团聚体的平均直径; W_i 表示对应于 \bar{X}_i 的团聚体百分含量。

2 结果与分析

2.1 复配土壤 0—70 cm 土层土壤颗粒组成变化

由于受气候、作物根系、生物活动、土壤肥力以及人为管理的影响,随着种植作物年限的增加,土壤颗粒组成也会随之改变。2011 年和 2015 年玉米收获后,各处理 0—70 cm 土层土壤颗粒组成变化表明,随着砒砂岩加入比例的增加,复配土壤砂粒含量减少,

粉粒和黏粒含量明显增加,砒砂岩的加入促使复配土壤质地由砂土向粉壤土逐渐转变。而且随着作物种植年限的增加,复配土壤砂粒含量也在明显减少,粉粒含量增加,这种变化在 0—40 cm 土层尤为突出。

由图 1—4 可以看出,2011 年作物收获后 C_1, C_2, C_3, CK 处理 0—40 cm 土层土壤砂粒平均含量分别为 55.84%, 65.67%, 77.96%, 63.27%, 粉粒平均含量分别为 40.01%, 31.26%, 19.77%, 31.54%; 2015 年土壤砂粒平均含量分别为 43.17%, 56.35%, 68.63%, 52.73%, 粉粒平均含量分别为 50.17%, 39.16%, 27.87%, 40.37%; 2015 年 C_1, C_2, C_3, CK 处理 0—40 cm 土层土壤砂粒平均含量相比 2011 年分别降低了 22.68%, 14.20%, 11.97%, 16.66%, 粉粒含量分别增加了 25.31%, 25.29%, 40.95%, 28.01%, 黏粒含量分别增加了 61.45%, 46.24%, 54.36%, 32.85%。可见随着砒砂岩加入比例的增加,复配土壤砂粒含量明显下降,粉粒含量明显增加,而且随着种植作物年限的增加,各处理 0—40 cm 土层土壤砂粒含量明显减少,粉粒和黏粒含量明显增加且有逐渐下移的趋势,40 cm 以下,各粒级土壤变化不明显。说明砒砂岩的加入促使风沙土中砂粒质量分数减少,粉粒、黏粒质量分数增加,而且随着作物种植年限的增加,使风沙土过粗的砂土质地逐步得到改善,而且砒砂岩与风沙土 1:2 复配对质地的改良效果和黄土与风沙土 1:2 复配改良效果差不多,因此,从土壤质地改良方面来说,砒砂岩具有一定固沙的可能性。

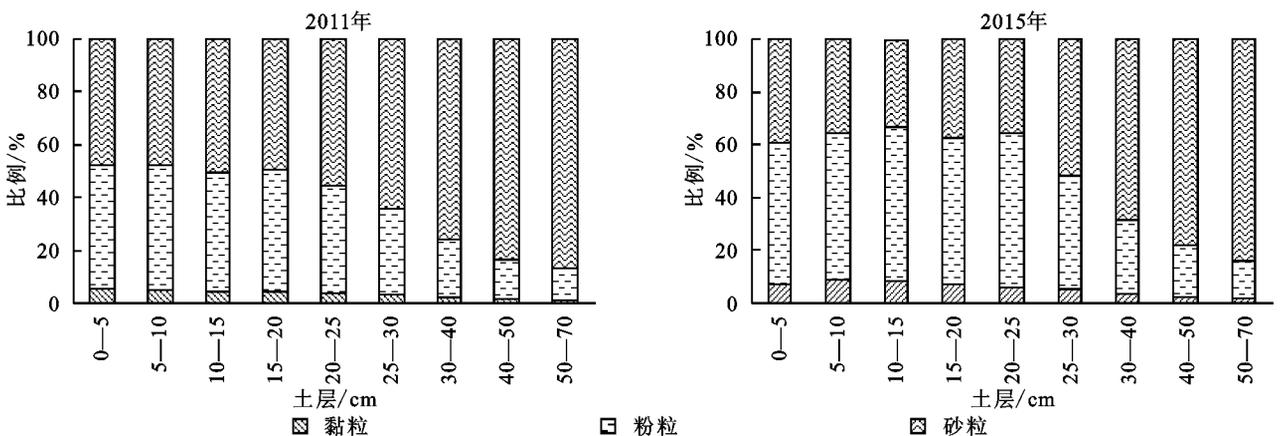


图 1 C_1 复配土 0—70 cm 土层土壤质地特征

2.2 复配土壤结构变化

水稳性团聚体对保持土壤结构的稳定性具有重要贡献,并且关系到土壤水分的入渗与保蓄性能^[16]。了解水稳性团聚体的组成对探讨土壤肥力、土壤结构变化等都有重要的理论和实践意义^[17]。本研究通过综合计算 >5 mm, 2~5 mm, 1~2 mm, 0.5~1 mm, 0.25~0.5 mm 和 >0.25 mm 团聚体的比例,分析了

不同处理下土壤水稳性团聚体的变化(表 2)。

一般认为直径 >0.25 mm 水稳性团聚体含量 ($WR_{0.25}$) 在一定程度上反映了土壤的质量水平和抗侵蚀能力的大小,对保持土壤结构的稳定性具有重要贡献,且其数量与土壤肥力状况呈正相关关系^[18]。本研究表明,各处理 $WR_{0.25}$ 含量均在连续种植作物 5 a 后显著增加,且各处理 $WR_{0.25}$ 含量均随砒砂岩加

入比例的增加而显著增加。

2015 年作物收获后 C_1, C_2, C_3, CK 处理土壤中

$WR_{0.25}$ 含量较 2011 年分别增加了 57.39%, 65.17%, 65.42% 和 42.84%。

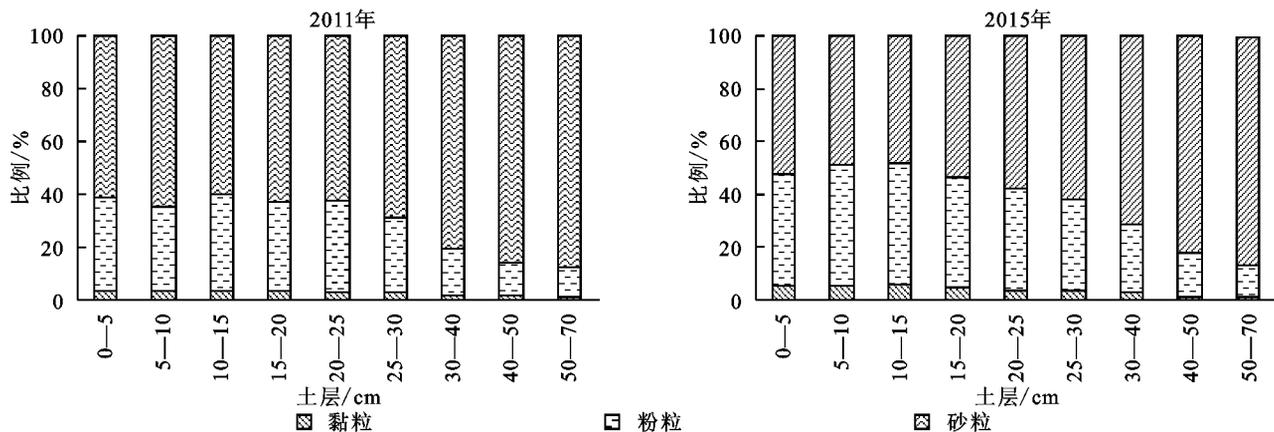


图 2 C_2 复配土 0—70 cm 土层土壤质地特征

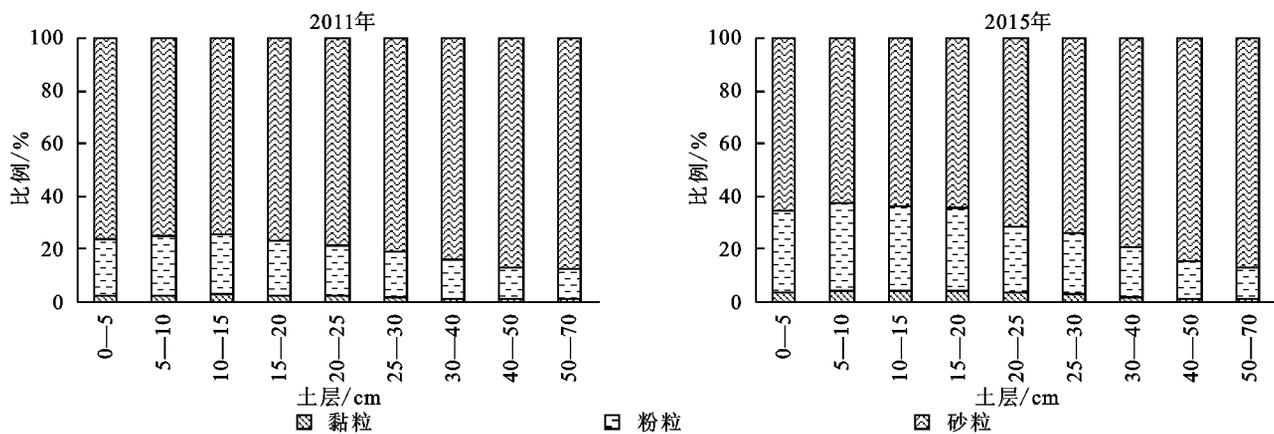


图 3 C_3 复配土 0—70 cm 土层土壤质地特征

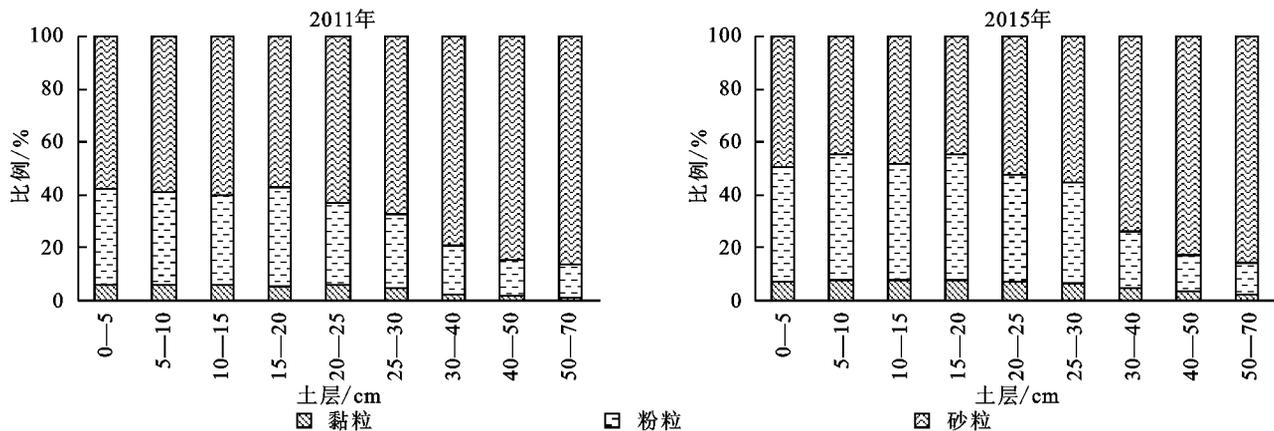


图 4 CK 复配土 0—70 cm 土层土壤质地特征

MWD, GMD 值越大表明土壤的团聚度越高, 土壤结构越稳定, 抗侵蚀能力越强^[19]。各处理 MWD, GMD 也均随砒砂岩加入比例和作物种植年限的增加而显著增加(图 5A, B)。2015 年作物收获后 C_1, C_2, C_3, CK 处理土壤水稳性团聚体 MWD 较 2011 年分别增加了 15.39%, 16.06%, 23.30%, 12.72%; GMD 较 2011 年分别增加了 8.48%, 7.98%, 6.81%, 7.21%。

不同粒径的团聚体具有不同的农学、水文学及环境

学价值, 直径过大的团聚体间孔隙过大, 易漏水漏肥, 直径过小遇水则易堵塞孔隙, 影响水分入渗和土壤的气体交换^[18]。由表 2 可以看出 >0.25 mm 各级别土壤团聚体含量基本随砒砂岩加入比例和作物种植年限的增加而增加, 且各处理中随作物种植年限增加最明显的是 0.25~0.5 mm 级别土壤团聚体含量, 相比 2011 年、2015 年作物收获后 C_1, C_2, C_3, CK 处理该级别土壤团聚体分别提高了 1.62 倍、1.46 倍、1.52 倍、1.10 倍, 而且在

连续种植 5 a 作物后 C_1 和 CK 处理土壤中的 $WR_{0.25}$ 含量基本接近。Вильямс 等^[20] 提出直径在 1~5 mm 的团聚体在农业上是最有价值的,2011 年作物收获后 C_1, C_2, C_3, CK 处理 1~5 mm 的团聚体含量分别为 15.87%,12.40%,9.81%,17.55%,2015 年作物收获

后 C_1, C_2, C_3, CK 处理该级别团聚体含量分别为 18.76%,15.82%,11.84%,20.64%,相比 2011 年分别增加了 18.21%,27.58%,20.69%,17.61%。可见砒砂岩的加入和连年种植作物有助于改善风沙土土壤团聚体状况和提高风沙土结构稳定性。

表 2 复配土壤 0—30 cm 土层土壤水稳性团聚体含量

年份	处理	水稳性团聚体质量分数/%					
		>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	>0.25 mm
2011 年	C_1	5.95c	4.17b	2.35de	3.40c	5.95f	21.81d
	C_2	4.67e	3.17cd	1.37f	3.19cd	5.78f	18.18e
	C_3	2.56g	2.44e	1.93ef	2.88cd	5.07g	14.88f
	CK	6.41bc	4.88a	3.28b	2.98cd	6.62e	24.17c
2015 年	C_1	6.95ab	4.42b	2.60cd	4.79a	15.58a	34.33a
	C_2	5.30d	3.50c	3.04bc	3.98b	14.22b	30.03b
	C_3	3.34f	3.09d	2.39de	3.02cd	12.79d	24.62c
	CK	7.41a	4.82a	3.85a	4.56a	13.87c	34.52a

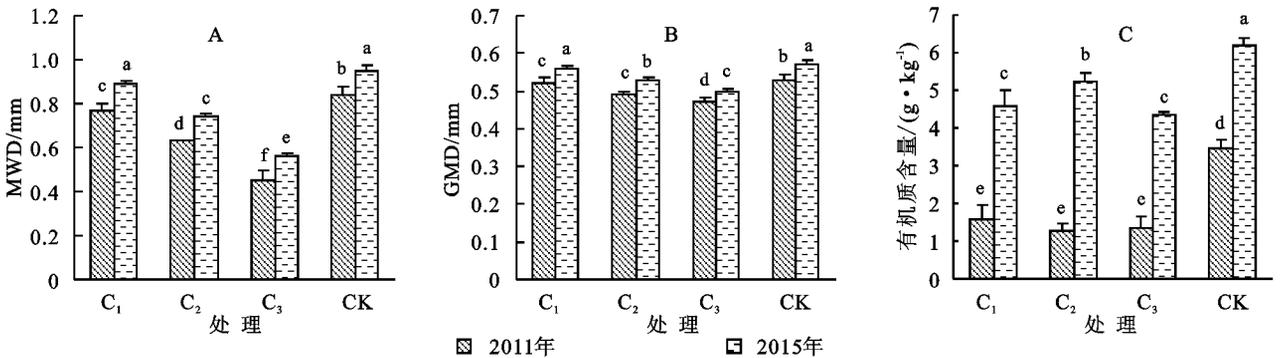


图 5 复配土壤 0—30 cm 土层水稳性团聚体 MWD,GMD,有机质变化

2.3 复配土壤有机质含量变化

由图 5C 可以看出,各处理 0—30 cm 土层土壤有机质含量随作物种植年限的增加而显著增加。2011 年作物收获后 CK 处理土壤有机质含量最高,其他 3 个处理之间差异不显著;连续种植 5 a 作物后,CK 处理土壤有机质含量最高,其次是 C_2 处理, C_1, C_3 处理之间差异不显著。2015 年作物收获后 C_1, C_2, C_3, CK 处理土壤有机质含量分别是 2011 年的 1.93 倍、3.11 倍、2.21 倍和 0.79 倍,可见连续种植作物 5 a 后能显著提高土壤有机质含量,说明种植作物对于复配土壤固碳具有明显的改良效应。

3 讨论

风沙土和砒砂岩是毛乌素沙地的两害,风沙土结构疏松,质地均一,水分在土层空间内的分布较为均匀,一旦水分补给减少,蒸散增加,就会出现整体性缺水。砒砂岩成岩程度和结构强度都很低,且易风化,渗透性能差,但其具有较好的持水能力和保水能力,岩层贮水多,能为植物生长提供水分^[21]。因此,利用二者互补的性质,将风沙土与砒砂岩混合复配成土,

既可以减少或阻止沙地水分渗漏、利于土壤肥力的提升,又可减弱砒砂岩坚硬板结的现象,进而达到治理沙地和改良砒砂岩的目的^[2,22]。

土壤质地是土壤的主要物理性质之一,其与土壤通气性、保水保肥状况以及耕作的难易程度等都有密切关系,是拟定土壤利用、管理和改良措施的重要依据。单独风沙土中砂粒含量达到了 87.32%,是砒砂岩和黄土中砂粒含量的 6.95,9.21 倍,可见对风沙土而言,其质地均一,缺少黏粒,难以形成稳定的土壤结构。砒砂岩的粉粒含量为 78.94%,是风沙土粉粒含量的 6.82 倍,砒砂岩的加入改变了风沙土粒径较粗的问题,随着复配土中砒砂岩质量分数的增加,复配土壤砂粒质量分数减少,粉粒、黏粒质量分数增加。另外,由于受作物根系、降雨以及其他气候、环境因子等的影响,随作物种植年限的增加,风沙土 0—40 cm 土层土壤质地有由砂变壤的趋势,土壤质地逐步得到改善。

本研究表明,各处理 $WR_{0.25}$ 含量、MWD、GMD 均随砒砂岩加入比例和作物种植年限的增加而显著增加。其他各级别土壤团聚体含量也基本随砒砂岩加入比例和作物种植年限的增加而增加,且各处理中

随作物种植年限增加最明显的是 0.25~0.5 mm 级别土壤团聚体含量。而且在连续种植 5 a 作物后, C_1 处理与 CK 处理土壤中 $WR_{0.25}$ 含量、MWD, GMD 基本接近, 可见砒砂岩对于风沙土土壤团聚体的形成具有很好的促进作用, 而且其对于改良风沙土结构方面具有和黄土相似的效果, 可以作为替代黄土的很好材料, 即改良了风沙土, 又治理了砒砂岩, 达到了变“两害”为“一宝”的效果。

有机质是土壤肥力高低的一个重要指标, 也是土壤质量演化趋势的重要标志之一。有机质作为土壤团聚体形成过程中重要的胶结物质, 其含量与土壤水稳性团聚体的稳定性和数量呈正相关关系^[20]。2011 年作物收获后, CK 处理 0—30 cm 土层土壤有机质含量最高, C_1 , C_2 , C_3 复配土有机质含量差异不显著, 连续种植作物 5 a 后, 相比 2011 年各处理土壤有机质含量显著增加, 而且 CK 处理有机质含量依旧最高, 其次是 C_2 处理, C_1 , C_3 处理之间差异不显著。说明各处理耕作层土壤有机质含量随作物种植年限的增加而显著增加, 可见种植作物对于复配土壤固碳具有明显的效应。

4 结论

本试验利用砒砂岩与沙结构上的互补性与科学的作物栽培技术相结合, 发现砒砂岩与沙按不同比例复配后可替代传统的黄土改良风沙土的方法, 且在一定程度可优于传统改良后的土壤。经试验研究发现, 砒砂岩与沙复配比例为 1:1~1:5 均可不同程度的改善风沙土土壤质地和结构, 增加土壤有机质, 且复配比例在 1:1~1:2 时效果最佳, 但考虑到改良成本和资源节约, 建议在毛乌素沙地大面积推广时采用砒砂岩与沙 1:2 的复配比例。另外, 本试验只研究了砒砂岩与沙复配比例对土壤质地、结构和有机质的时间效应, 对土壤其他指标和作物产量的影响还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 童伟, 韩霁昌, 王欢元, 等. 毛乌素沙地治理与利用中存在的问题及解决对策[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(5): 218-221.
- [2] 韩霁昌, 刘彦随, 罗林涛. 毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究[J]. 中国土地科学, 2012, 26(8): 88-94.
- [3] 张露, 韩霁昌, 王欢元, 等. 砒砂岩与风沙土复配后的粒度组成变化[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 45-49.
- [4] 李娟, 韩霁昌, 张卫华, 等. 砒砂岩与沙复配土壤的物理性状和相关光谱特性[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(3):

394-401.

- [5] Ismail S M, Ozawa K. Improvement of crop yield, soil moisture distribution and water use efficiency in sandy soils by clay application [J]. Applied Clay Science, 2007, 37(1): 81-89.
- [6] 王志, 彭茹燕, 王蕾, 等. 毛乌素沙地南缘改良与利用风沙土性质研究水[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 15-16, 21.
- [7] 王欢元, 韩霁昌, 罗林涛, 等. 砒砂岩与沙复配成土过程中沙的调控作用[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 286-290.
- [8] 李长明, 宋丽莎, 王立久. 砒砂岩的矿物成分及其抗蚀性[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 12-16.
- [9] 摄晓燕, 张兴昌, 魏孝荣. 适量砒砂岩改良风沙土的吸水性和保水特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 115-123.
- [10] 摄晓燕, 魏孝荣, 魏艳春, 等. 砒砂岩改良风沙土对铵态氮吸附特性影响研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 166-173.
- [11] 摄晓燕, 魏孝荣, 马天娥, 等. 砒砂岩改良风沙土对磷的吸附特性影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1373-1380.
- [12] 王欢元, 韩霁昌, 杜宜春, 等. 砒砂岩与沙复配成土技术简介及研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(12): 160-161, 186.
- [13] 郑必昭. 土壤分析技术指南[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 刘文利, 吴景贵, 傅民杰, 等. 种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 130-135.
- [16] 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.
- [17] 徐爽, 王益权. 不同类型土壤团聚体化学稳定性分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 174-178.
- [18] 孙蕾, 王益权, 张育林, 等. 种植果树对土壤物理性状的双重效应[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 19-23.
- [19] 崔荣美, 李儒, 韩清芳, 等. 不同有机肥培肥对旱作农田土壤团聚体的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(11): 125-132.
- [20] 柯夫达 B A. 土壤学原理(上册)[M]. 陆宝树, 译. 北京: 科学出版社, 1981.
- [21] 张卫华, 韩霁昌, 王欢元, 等. 砒砂岩对毛乌素沙地风成沙的改良应用研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(10): 123-127.
- [22] 柴苗苗, 韩霁昌, 罗林涛, 等. 砒砂岩与沙混合比例及作物种植季数对复配土壤性质和作物产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(10): 180-182.