毛乌素沙地砒砂岩改良风沙土后土壤质量的演变

张海欧[1,2,3,4], 王 健[1,2,3], 孙小梅[1,2,3]

(1.陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安 710075;
2.陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710021; 3.自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安 710021; 4.陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安 710075)

摘 要: [目的] 研究毛乌素沙地砒砂岩与沙复配土壤长期作物种植后质量的演变,旨在为了解复配土壤结构发育状况及可持续利用提供科学依据。[方法] 基于 2010—2018 年对砒砂岩与沙体积比为 1∶1, 1∶2,1∶5 复配土壤的田间小区试验,主要分析不同种植年限下复配土壤水稳性团聚体、有机质含量及作物产量的动态变化特征。[结果] 随着试验开展,3 种比例复配土壤>0.25 mm 粒径水稳性团聚体含量、平均重量直径(MWD)值和有机质含量整体呈增加趋势,与种植前相比,种植 9 a 后,1∶1,1∶2,1∶5 比例复配土壤>0.25 mm 粒径水稳性团聚体分别增加了 2.71,3.31 和 4.24 倍,成为团聚体的主要组成部分;1∶1, 1∶2,1∶5 比例复配土壤有机质含量分别提高了 8.24,10.62 和 13.76 倍。2011 年不同比例复配土壤马铃薯产量大小顺序为:1∶2>1∶1>1∶5,种植 8 年后 1∶1,1∶2,1∶5 比例复配土壤马铃薯产量分别增加了 3.27,4.25 和 6.96 倍,产量大小顺序为:1∶5>1∶2>1∶1,其中 1∶5 复配土壤马铃薯产量提升速率最显著,多年平均产量高达 53 850 kg/hm^2,与当地高产田产量持平。[结论] 随着马铃薯种植年限的增加,3 种比例复配土壤理化性状得到改良,复配土壤结构得到日益优化,尤其是能有效促进 1∶5 复配土壤有机化和水稳性团聚体的形成,并且马铃薯增产的效果最优。因此 1∶5 复配比例适宜马铃薯生长。

关键词: 砒砂岩; 风沙土; 团聚体稳定性; 有机质; 土壤质量演变; 毛乌素沙地

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2021)04-0033-06 **中图分类号**: S152.4, S153.6

文献参数: 张海欧, 王健, 孙小梅.毛乌素沙地砒砂岩改良风沙土后土壤质量的演变[J].水土保持通报, 2021,41(4):33-38.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.005; Zhang Haiou, Wang Jian, Sun Xiaomei. Quality evolution after aeolian sandy soil improved by feldpathic sandstone in Mu Us Sandy Land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(4):33-38.

Quality Evolution After Aeolian Sandy Soil Improved by Feldpathic Sandstone in Mu Us Sandy Land

Zhang Haiou[1,2,3,4], Wang Jian[1,2,3], Sun Xiaomei[1,2,3]

(1.*Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi* 710075, *China*; 2.*Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi* 710021, *China*; 3.*Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Natural Resources, Xi'an, Shaanxi* 710021, *China*; 4.*Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an, Shaanxi* 710075, *China*)

Abstract: [Objective] The compound soil of Feldpathic Sandstone and sand in Mu Us Sandy Land belongs to artificial reconstructed soil. The quality evolution of the compound soil after long-term crop planting was studied, in order to provide scientific basis for understanding the structure development and sustainable utilization of the compound soil. [Methods] Based on the field plot experiments of compound soil a with volume ratios of 1∶1, 1∶2 and 1∶5 of Feldpathic Sandstone to sand during the period from 2010 to 2018, the dynamic change characteristics of water-stable aggregates, organic matter content and crop yield in the compound soils under different planting years were analyzed. [Results] With the development of the experiment, the

收稿日期:2021-03-09 **修回日期**:2021-05-18

资助项目:陕西省土地工程建设集团内部科研项目"基于高通量测序的砒砂岩与沙复配土土壤微生物群落结构多样性研究"(DJNY2020-13);陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY2020-14);陕西省土地整治重点实验室开放项目(2018-JC18; 2019-JC07)

第一作者:张海欧(1985—),女(汉族),陕西省周至县人,博士,高级工程师,主要从事土地整理复垦和土地工程方面的工作。Email:244254409@qq.com。

content of water-stable aggregates with diameter＞0.25 mm, average weight diameter (MWD) value and organic matter content in the three proportions of compound soils showed an overall increasing trend. After 9 years of planting, water-stable aggregates ＞0.25 mm in 1∶1, 1∶2 and 1∶5 compound soil increased by 2.71, 3.31 and 4.24 times, respectively, and became the main component of aggregates. The soil organic matter content increased by 8.24, 10.62 and 13.76 times, respectively. In 2011, the potato yield order in different proportion of compound soil was showed as: 1∶2＞1∶1＞1∶5, after 8 years of planting, the potato yield increased by 3.27, 4.25 and 6.96 times, respectively, and the yield order was 1∶5＞1∶2＞1∶1. Among them, the potato yield in the 1∶5 compound soil increased most significantly. The average yield for many years was as high as 53 850 kg/ha, which was equal to the yield of local high-yield fields. [Conclusion] With the increase of potato planting years, the physical and chemical properties of the three-proportion compound soil have been improved, and the compound soil structure has been increasingly optimized. In particular, it can effectively promote the formation of 1∶5 compound soil organic and water stable aggregates, and the effect of potato yield increase is the best, so the ratio of 1∶5 compound soil is suitable for potato growth.

Keywords: feldpathic sandstone; aeolian sandy soil; aggregate stability; organic matter; soil quality evolution; Mu Us Sand Land

毛乌素沙地是中国四大沙地之一,长期以来,阻止土地沙化,缓解环境压力,促进生态健康发展,同时,增大耕地面积、保证国家粮食安全,实施沙地综合治理一直是大家关注的热点和需要解决的难题。以生态安全为前提,能够在有限条件下,增大耕地面积更是有价值的沙地治理方向。韩霁昌等[1-4]在毛乌素沙地就地取材,创造性地将与沙地交错分布的砒砂岩按比例与沙复配,移植砒砂岩中富有的黏土矿物,构建了土地抗蚀性、保水保肥性及促进作物生产力形成与提升的内在机制[5-6],实现了"促沙成土"的科学目标。Sun 等[6]通过水分模型分析指出,砒砂岩的添加使得风沙土的水力学参数得到有效改善,能够显著增加作物的产量。摄晓燕等[7]指出,砒砂岩的加入可有效提高风沙土保水保肥能力,降低风沙土的养分流失及水分入渗率。李裕瑞等[8]通过对砒砂岩与沙复配成土的固沙机理、固沙效应、储水性能分析,研究指出固沙导向下砒砂岩与沙最优复配比例为 1∶1～1∶5,其保水和持水性能最强。近年来,砒砂岩与沙快速复配成土技术在毛乌素沙地土地整治与开发利用中推广很快,已见成效。然而,砒砂岩与沙复配成土的稳定良性发展成为促进毛素沙地区域耕地可持续发展的重要前提。

砒砂岩与沙复配土壤属于人为新造土,其质量演变以及作物是否适宜在此土壤中生长,需开展进一步的探索研究。土壤团聚体组成及稳定性作为衡量土壤结构发育状况和可持续利用的重要评价指标,土壤有机质是衡量土壤肥力总体状况的重要指标,其含量及动态平衡直接影响着土壤质量和土地生产力,作物产量的高低和变化趋势能够反映土壤质量的优劣。因此,水稳性团聚体、有机质及作物产量作为自然土壤形成和发育的最重要标志,其成土母质与后期发育土壤具有本质性区别,对新造复配土壤中这些指标的系统与深入研究显得格外重要。长期定位试验是研究土壤质量演变的重要方法和手段,它能够系统、有效地揭示土壤质量变化和发展趋势[9-10]。本文以马铃薯种植模式下不同比例复配土壤为研究对象,利用 2010—2018 年 1∶1,1∶2,1∶5 复配土壤的田间定位试验数据,研究复配土壤的质量发展趋势以及马铃薯在各复配比例上的生产力,探索不同比例复配土壤—植被系统良性循环和发展的驱动因素,对中国退化土地及沙化土地的治理及农业发展具有积极的指导作用。

1 试验区概况与方法

1.1 试验区概况

试验区位于毛乌素沙地榆林市榆阳区,其区域环境条件具有典型的代表性,该地区气温年际变化较大,冬季(1 月)平均温度在－9.5～12 ℃,夏季(7 月)平均温度在 24±2 ℃;降水时空分布不均匀,秋季(尤其 8 月份)降水几乎是全年降水量的 60%～75%,并且年际间降水量也呈现出显著差异,即湿润年是干旱年降水量的 2～4 倍。此外,结合该地区光照条件充足,地下水埋藏较浅等特点,具备生产出高产量马铃薯的环境条件。研究区域以风沙土为主,结构疏松,持水能力差,蒸散量大,导致经常缺水。当地松软易风化的砒砂岩,结构强度低,透水性差,但具有较好的持水能力和保水能力,并且当地地下水能够为植物生长提供水分,因此,将砒砂岩与风沙土按照一定比例混合形成本试验的复配土。

1.2　试验小区设计

研究团队于 2010 年在毛乌素沙地榆林市榆阳区建立了砒砂岩与沙复配成土长期定位试验小区。在当地原始沙地表层按照试验需求,仅将 0—30 cm 土层分别按砒砂岩与风沙土体积比 1∶1,1∶2,1∶5 进行复配后,通过机械翻耙,使其充分混合,每种比例设置 3 个重复试验小区,每个小区长 5 m×宽 12 m,即面积为 60 m^2,共计 9 个试验小区,种植当地主要经济作物马铃薯。当土壤表层 5—10 cm 深地温在 10～12 ℃即可进行播种,当地适宜播期一般为 4 月下旬至 5 月上旬。人工开沟精量栽苗,种植沟深 8～10 cm,起垄覆土 10～15 cm,行距 60 cm,株距 25 cm,每小区总共种植 1 200 株。所有小区均采用相同的灌溉与施肥处理,种植前开沟条施基肥,施肥标准为尿素 300 kg/hm^2,磷酸二铵 375 kg/hm^2,钾肥 180 kg/hm^2,其中基肥要占总施肥量的 80%,其余作为追肥。灌溉的时间和量,采用当地农民普遍采用的模式,根据天气干旱、作物生长需要,以 60 cm 土层内保持田间最大持水量的 75%～80%为宜。马铃薯一般于播前、幼苗期、块茎形成期、淀粉积累期分别灌水,每次灌水相当于 60～90 mm 降雨,每小区每次大约需要 10～16 m^3 灌水。

1.3　试验方法

试验于每年马铃薯收获后采用 S 形采样方法,分别采集各处理下 3 个点位的 0—30 cm 土壤样品,混合均匀,进行土壤物理和养分指标测定。土壤有机碳采用 $K_2Cr_2O_7$-H_2SO_4 外加热法测定。土壤团聚体使用铝盒在每个处理下采集 0—20 cm 表层土壤的原状土样,各处理下采集 3 个点位,密封带回实验室。水稳定性团聚体组成用湿筛法测定[11-12],称取混合后的风干土样 50 g,利用团聚体分析仪测定>2,2～1,1～0.5,0.5～0.25,<0.25 mm 各粒径下水稳性团聚体含量,由于复配土壤结构不稳定,测试方法稍作改动,设置 25 次/min,震荡 3 min,最后将筛子上的不同粒级团聚体土样置于铝盒中,烘干(105 ℃),计算>0.25 mm 水稳性团聚体含量。马铃薯测产方法:每小区选取 2 m×2 m,将其中全部地下部马铃薯块茎挖出称重,折算为标准单位。

1.4　土壤团聚体稳定性的指标计算

采用>0.25 mm 粒级的水稳性团聚体含量(WSAC)、平均重量直径(MWD)等参数指标来衡量团聚体稳定性[13],计算公式为:

$$WSAC=\sum_{i=1}^{n}(W_i) \quad (1)$$

$$MWD=\sum_{i=1}^{n}(\overline{X_i}\cdot W_i) \quad (2)$$

式中:W_i 为不同粒级团聚体含量(g);X_i 为任一级别范围内团聚体的平均直径(mm)。

2　结果与分析

2.1　不同比例复配土壤≥0.25 mm 水稳性团聚体分布

土壤团聚体的形成机制在很大程度上受成土母质、植被类型和管理措施的影响而不同[14-15]。≥0.25 mm的团聚体被称为土壤团粒结构体,其水稳性团聚体的数量及组成是判定土壤结构和质量优劣的重要指标[16]。不同种植年限 3 种比例复配土壤>0.25 mm粒径水稳性团聚体分布状况如图 1 所示。种植前>0.25 mm 粒径百分比含量大小顺序为:1∶1>1∶2>1∶5,随着试验开展,>0.25 mm 粒径百分比含量呈持续增加趋势,1∶1 复配土壤不同年际间差异不显著($p>0.05$),增加速率缓慢,与种植前相比,种植 9 a 后增加了 2.71 倍。1∶2,1∶5 复配土壤>0.25 mm 粒径含量不同年际间差异显著,与种植前相比较,种植 9 a 后分别增加了 3.31 和 4.24 倍。种植 9 a后复配土壤水稳性团聚体>0.25 mm 粒径含量大小顺序为:1∶5>1∶2>1∶1,成为团聚体的主要组成部分,说明马铃薯种植提高了土壤团聚化作用,尤其是更能有效促进 1∶5 复配土壤水稳性团聚体结构的形成。

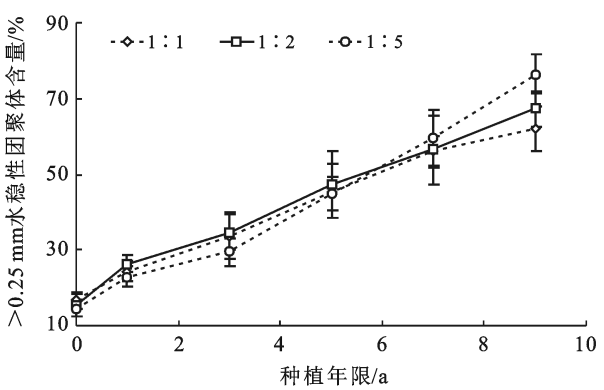
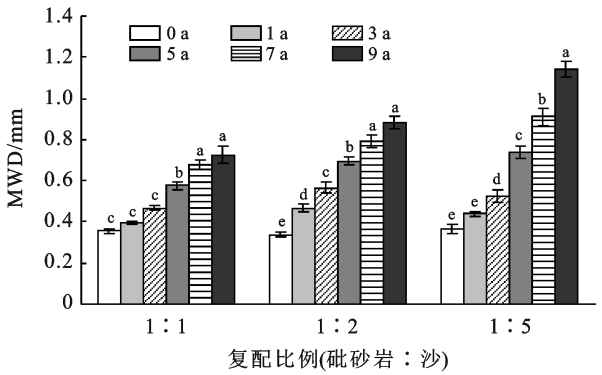


图 1　马铃薯种植模式下不同比例复配土壤>0.25 mm 水稳性团聚体年际变化特征

2.2　不同比例复配土壤水稳性团聚体的稳定性

平均重量直径(WMD)是土壤团聚体稳定性评价的重要指标,其可以反映土壤团聚体粒级大小分布状况,其值越大表示团聚体的平均粒径团聚度越高,稳定性越好[17]。由图 2 可知,不同比例复配土壤随着马铃薯种植年限的增加,水稳性团聚体稳定性均呈增加趋势。1∶1 复配土壤种植前与种植 1 a 和 3 a 后 WMD 值差异不显著($p>0.05$),种植 3 a 后显著增加,种植 3,5,7 a 的 WMD 值具有显著差异($p<0.05$),

随后增加速率缓慢，与种植前相比较，种植 9 a 后 WMD 值增加了 1.05 倍。1∶2 复配土壤种植 1～7 a 间 WMD 值不断增加，种植前与种植 1,3,5,7 a 后均具有显著差异($p<0.05$)，种植 7 季后，差异不显著，增加速率缓慢，趋于稳定，与种植前相比较，种植 9 a 后 WMD 值增加了 1.62 倍。1∶5 复配土壤种植前与种植 1 季后无显著性差异，之后随着种植年限的增加各年际间 WMD 值显著增加，不同年际具有显著差异，与种植前相比较，种植 9 a 后 WMD 值提高了 2.13 倍。种植 9 a 后，不同比例复配土壤 WMD 值顺序总体为：1∶5>1∶2>1∶1，说明马铃薯种植模式下 1∶5 复配土壤团聚体稳定性较高。



注：不同小写字母表示同一比例复配土壤不同种植年限的差异，在 $p<0.05$ 水平显著。下同。

图 2 马铃薯不同种植年限不同比例复配土壤水稳性团聚体的 MWD 变化特征

2.3 不同比例复配土壤有机质年际变化特征

马铃薯种植模式下 0—30 cm 耕层不同比例复配土壤有机质含量随着种植年限的增加总体呈上升趋势(图 3)。1∶1 复配土壤在 2010—2014 年有机质含量持续增加，2014 年之后有略微的减少后再增加，并且年际间无显著性差异($p>0.05$)，2018 年达到最大值(4.34±0.24 g/kg)，与种植前相比有机质含量提高了 8.24 倍。1∶2 复配土壤在 2010—2015 年有机质含量呈持续增加趋势，不同种植年限间差异显著($p<0.05$)，在种植 5 a(2014 年)后，增加速率缓慢，不同年际间无显著性差异($p>0.05$)，有机质含量趋于稳定，2018 年均达到最大值(5.27±0.35 g/kg)，与种植前相比较有机质含量提高了 10.62 倍。1∶5 复配土壤在 2010—2016 年有机质含量增加速率较快，不同年际间有显著性差异($p<0.05$)，2016 年之后缓慢增长，彼此无显著差异($p>0.05$)，种植 9 a 后达到最高值(6.50±0.21 g/kg)，与种植前相比有机质含量提高了 13.76 倍。根据陕西省第二次土壤普查土壤肥力分级标准，1∶1,1∶2 复配土壤有机质含量均处于九级水平，1∶5 复配土壤有机质含量处于 8 级水平，9 级水平含量均较低。

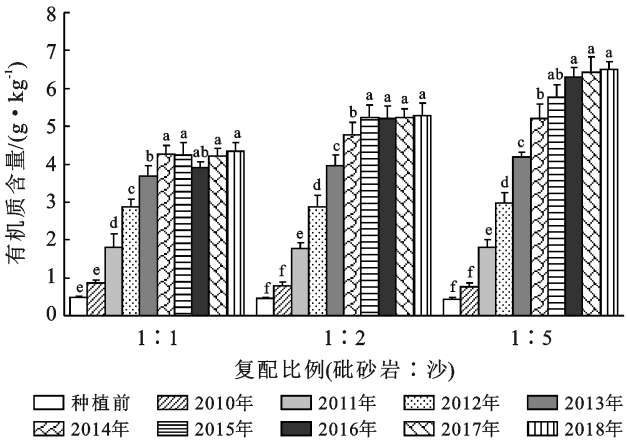


图 3 马铃薯不同种植年限下不同比例复配土壤有机质含量变化特征

马铃薯种植模式下不同比例复配土壤有机质含量随时间变化的拟合方程详见表 1。方程的斜率即为有机质年变化速率。种植 9 a 间，不同比例复配土壤有机质含量总体呈现上升趋势，其中 1∶5 复配土壤有机质含量上升速率显著，每年达到 0.75 g/kg，其次是 1∶2 复配土壤有机质含量每年上升速率为 0.57 g/kg，1∶1 复配土壤有机质含量上升速率较小，每年为 0.40 g/kg。

表 1 马铃薯种植模式下不同比例复配土壤有机质含量随时间的拟合方程

砒砂岩∶沙	拟合方程	$R(n=30)$
1∶1	$y=0.40x+1.37$	$R^2=0.729\ 9^*$
1∶2	$y=0.57x+1.10$	$R^2=0.828\ 8^{**}$
1∶5	$y=0.75x+0.68$	$R^2=0.911\ 1^{**}$

注：方程中 y 为土壤有机质含量 g/kg，x 为试验年数；相关系数中，**年变化率极显著($p<0.001$)，*年变化率显著($p<0.005$)。

2.4 不同比例复配土壤马铃薯产量年际变化特征

由图 4 可知，随着复配土耕种年限的增加，1∶1,1∶2,1∶5 复配比例间马铃薯产量具有显著性差异($p<0.05$)，说明混合比例对马铃薯产量有着重要的影响，即随着时间的推移不同比例复配土壤结构发展和肥力特征不同。2011 年不同比例复配土壤马铃薯产量大小顺序为：1∶2>1∶1>1∶5，2011—2014 年由于复配土壤种植初期，土壤结构和理化性状不稳定，产量年际变化不稳定，增加速率缓慢。2014 年之后随着马铃薯根系对土壤的胶结作用、有机肥的施入等农业管理措施，3 种比例复配土壤结构发育相对完善，马铃薯产量增加速率显著提高，与 2011 年相比

较,到 2018 年 1∶1,1∶2,1∶5 复配土壤马铃薯产量分别增加了 3.27,4.25 和 6.96 倍,尤其是 1∶5 复配土壤 2015 年之后产量大于或等于当地高产田马铃薯产量,1∶2 复配土壤马铃薯产量接近当地高产田产量。

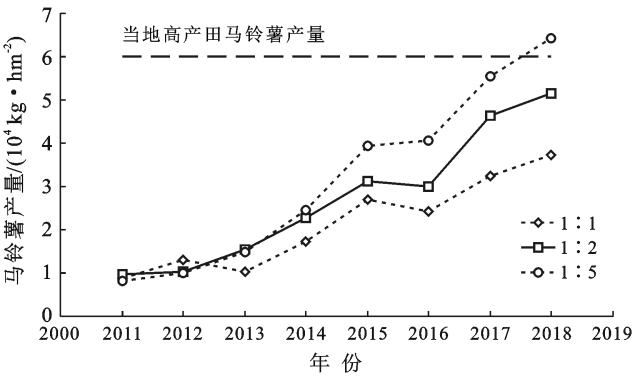


图 4　3 种比例复配土壤上马铃薯产量随时间的变化

3　讨 论

土壤团聚体的粒级分布和稳定性决定土壤的结构特征和养分的保持与供应,≥0.25 mm 水稳性团聚体含量是衡量土壤结构发育和质量优劣的重要指标[18]。复配比例(砒砂岩含量)是风沙土团聚化物质基础,种植季数是团聚化的动力学过程及条件,二者都是影响砒砂岩与沙复配土壤团聚体含量的重要因子。作物种植前,≥0.25 mm 粒径水稳性团聚体在复配土中维持在 14.6%～16.7%之间,含量较低,这主要是由于复配土形成初期,团聚化作用的产生主要是砒砂岩与风沙土之间无机胶结的结果,主要以<0.25 mm 粒径团聚体为主。随着种植年限的增加,≥0.25 mm 粒径水稳性团聚体含量、WMD 值及稳定性呈持续稳定增加趋势,这主要是由于有机肥的施用以及植物根系分泌物和土壤中微生物代谢产物不断增加,促进了土壤颗粒间的有机胶连作用,团聚作用增强,促进了<0.25 mm 粒径转变为中小粒级团聚体,为进一步团聚化做好基础。与江仁涛等[19]研究结果相似,退化及沙化土地作物种植可改善土壤结构,提高团聚体稳定性。于寒青等[20]研究表明陕北黄土高原植被恢复有效提高了>2 mm 和 2～0.5 mm 粒级的土壤水稳性团聚体含量。孙宇婷等[21]对草甸碱土水稳性团聚体研究发现,作物种植年限和长期施用有机肥,使得草甸碱土中土壤水稳性团聚体≥0.25 mm 粒径的含量显著提高。

土壤有机质是土壤肥力和耕地基础地力最重要的物质基础,是评价土壤质量和耕地资源可持续利用的重要指标,土壤有机质含量的高低与地上植被及其根系有机质的输入和分解的动态平衡有着重要关系[22]。随着马铃薯种植年限的增加,1∶1,1∶2,1∶5 3 种比例复配土壤有机质含量整体上均呈现上升趋势,这是由于风沙土中植入无机胶体(砒砂岩),粉粒、黏粒含量增加,土壤有机质易与土壤粉粒、黏粒等细颗粒结合形成有机—无机复合体,有利于对有机碳的物理保护,改善了复配土有机物含量。另一方面,复配土上马铃薯种植,在耕作管理、马铃薯根系有机质的输入和分解等作用下,使得复配土壤生物生境条件改善,有利于累积有机物。然而,随着复配土上马铃薯种植年限的增加,不同比例复配土壤有机质含量差异显著($p<0.05$),与种植前相比较,1∶5 复配土壤有机质含量增加速率大于 1∶1,1∶2。这主要是由于不同土壤质地及植被类型形成的生态系统有差异,然而不同类型的生态系统所生产有机物的数量、组成和向土壤归还方式的不同,它们在成土过程中的作用也存在差异[23]。因此,马铃薯种植模式下,1∶5 复配土壤通过与作物生长特性及农艺措施之间的交互作用,对复配土壤有机质含量提升更加显著。

作物产量的高低和变化趋势在一定程度上能够确切反映土壤生产力水平[23-24],砒砂岩在改良风沙土的理化性质和生物学特性中发挥了至关重要的作用[7,25]。为了使马铃薯能够高产稳产,首先要选择适合马铃薯生长的土壤。本研究结果表明,随着时间的推移,1∶1,1∶2,1∶5 复配比例间马铃薯产量具有显著性差异($p<0.05$),种植 8 a 后马铃薯产量大小顺序为 1∶5>1∶2>1∶1。与 2011 年相比较,1∶1,1∶2,1∶5 复配土壤马铃薯产量分别增加了 3.27,4.25和 6.96 倍,1∶5 复配土壤马铃薯产量提升速率最显著。这主要是由于随着种植年限的增加,马铃薯生长对土质的需求和改善作用,不同质地类型土壤结构发育不同,然而土壤结构和肥力质量是衡量土壤生产力的综合指标,砒砂岩与沙混合比例不同,复配土壤具有不同的特性,各种作物属性不同,对土壤的需求也不同。与 Xu 等[26]研究结果相似,其发现在中国北方半干旱地区合成和天然土壤改良剂显著提高马铃薯产量。马铃薯生长的基本要求是土质疏松、透气性好,有利于薯块膨大的轻砂壤土,因此结合前期研究成果[27],1∶5 复配土壤质地最适宜马铃薯生长。

4　结 论

土壤特性受到土地利用方式、耕作年限、植被、气象因子等因素的影响。经过多年耕种后,不同比例复配土壤结构得到日益改善,但复配土养分含量整体较

低，后期可以通过施用有机肥、种植绿肥、秸秆还田等措施来提高土壤养分。随着马铃薯种植年限的增加，3 种比例复配土壤≥0.25 mm 粒径水稳性团聚体含量、WMD 值和有机质含量均呈持续增加趋势，团聚体稳定性提高，尤其是更能有效促进 1∶5 复配土壤有机化和水稳性团聚体的形成。1∶5 复配土壤改良效果最佳，其对马铃薯增产的效果最优，使其朝着有利于马铃薯生长发育并获得高产的方向发展，多年平均产量高达 53 850 kg/hm^2，与当地高产田产量持平。也进一步说明了土壤—植被系统的相互耦合作用能够促进新造复配土壤不断演进及生态发育。因此，应用砒砂岩改良风沙土为毛乌素沙地的治理提供了切实可行的措施，不仅可以增加沙区农业用地面积，还可促进当地的农业经济可持续发展。

[参 考 文 献]

[1] 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)：87-94.

[2] 韩霁昌，付佩，王欢元，等.砒砂岩与沙复配成土技术在毛乌素沙地土地整治工程中的推广应用[J].科学技术与工程，2013，13(25)：7287-7293.

[3] Han Jichang, Xie Jiancang, Zhang Yang. Potential role of feldspathic sandstone as a natural water retaining agent in Mu Us Sandy Land, Northwest China [J]. Chinese Geographical Science, 2012, 22(5): 550-555.

[4] Han Jichang, Liu Yansui, Zhang Yang. Sand stabilization effect of feldspathic sandstone during the fallow period in Mu Us Sandy Land [J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 4: 428-436.

[5] Wang Ni, Xie Jiancang, Han Jicang, et al. A comprehensive framework on land-water resources development in Mu Us Sandy Land [J]. Land Use Policy, 2014, 40: 69-73.

[6] Sun Zenghui, Han Jichang. Effect of soft rock amendment on soil hydraulic parameters and crop performance in Mu Us Sandy Land, China [J]. Field Crops Res., 2018, 222: 85-93.

[7] 摄晓燕，张兴昌，魏孝荣.适量砒砂岩改良风沙土的吸水和保水特性[J].农业工程学报，2014，30(14)：115-123.

[8] 李裕瑞，范朋灿，曹智，等.毛乌素沙地砒砂岩与沙复配农田的固沙效应及其微观机理[J].中国沙漠，2017(3)：421-430.

[9] 刘彦伶，李渝，张雅蓉，等.长期氮磷钾肥配施对贵州黄壤玉米产量和土壤养分可持续性的影响[J].应用生态学报，2017，28(11)：3581-3588.

[10] 王珊娜.长期施肥下中国典型红壤性水稻土肥力演变特征与持续利用[D].北京：中国农业科学院，2012.

[11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京：中国农业出版社，2008.

[12] 赵玉明，高晓飞，刘瑛娜，等.不同水稳性团聚体测定方法的对比研究[J].水土保持通报，2013，33(2)：138-143.

[13] 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.

[14] 蔡立群，齐鹏，张仁陟.保护性耕作对麦—豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J].水土保持学报，2008，22(2)：141-145.

[15] 王清奎，汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报，2005，36(3)：415-421.

[16] Das B, Chakraborty D, Singh V K, et al. Effect of integrated nutrient management practice on soil aggregate properties, its stability and aggregate-associated carbon content in an intensive rice-wheat system [J]. Soil & Tillage Research, 2014, 136: 9-18.

[17] 王宇，韩兴，赵兰坡.黑土坡面土壤团聚体组成特征研究[J].水土保持通报，2010，30(5)：88-90.

[18] 刘瑞强.亚热带常绿阔叶林演替过程中植物根系对土壤碳累积的影响及机制[D].上海：华东师范大学，2019.

[19] 江仁涛，李富程，沈淞涛.川西北高寒草地退化对土壤团聚体组成及稳定性的影响[J].水土保持研究，2018，25(4)：36-42.

[20] 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)：877-884.

[21] 孙宇婷，周连仁，孟庆峰，等.长期施用有机肥对草甸碱土水稳性团聚体及其碳氮分配的影响[J].中国土壤与肥料，2014(1)：6-10，23.

[22] 陈龙池，廖利平，汪思龙，等.根系分泌物生态学研究[J].生态学杂志，2002，21(6)：57-62.

[23] 苏志珠，刘蓉，梁爱民，等.晋西北沙化土地土壤机械组成与有机质的初步研究[J].水土保持研究，2018，25(6)：61-67.

[24] 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)：179-184，192.

[25] 张露，韩霁昌，马增辉，等.砒砂岩与沙复配“土壤”的质地性状[J].西北农业学报，2014，2014，23(4)：166-172.

[26] Xu Shengtao, Zhang Lei, Mclaughlin N B, et al. Effect of synthetic and natural water absorbing soil amendment soil physical properties under potato production in a semi-arid region [J]. Soil & Tillage Research, 2015, 148: 31-39.

[27] 张海欧，解建仓，南海鹏，等.毛乌素沙地砒砂岩与沙复配土壤颗粒组成动态变化特征[J].中国水土保持科学，2019，17(6)：102-108.