



不同土层复配方案对土壤水稳性团聚体及有机质的影响

黄云鑫, 李裕瑞, 刘彦随, 张轩畅, 常贵蒋, 冯巍仑

引用本文:

黄云鑫, 李裕瑞, 刘彦随, 等. 不同土层复配方案对土壤水稳性团聚体及有机质的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(6): 894–903.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0455>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响

吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 孙海岩, 汪景宽

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 1–10 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0199>

玉米秸秆颗粒还田对土壤有机碳含量和作物产量的影响

张莉, 李玉义, 逢焕成, 王婧, 丛萍, 张珺瞳, 郭建军

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 160–168 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0137>

黄土高原东部潇河流域农田土壤有机质时空变异及影响因素

解文艳, 周怀平, 杨振兴, 冯悦晨, 白雪, 杜艳玲

农业资源与环境学报. 2019, 36(1): 96–104 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0195>

油菜绿肥翻压还田对新疆盐碱土壤的改良效果研究

刘慧, 李子玉, 白志贵, 刘建国

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 914–923 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0566>

增施有机肥对稻田亚耕层土壤的培肥效应

韩上, 武际, 张祥明, 胡鹏, 杨友兵, 李敏, 王慧, 唐杉

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 334–341 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0319>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄云鑫, 李裕瑞, 刘彦随, 等. 不同土层复配方案对土壤水稳性团聚体及有机质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 894–903.

HUANG Yun-xin, LI Yu-rui, LIU Yan-sui, et al. Effects of different soil-layer compounding schemes on soil water-stable aggregates and organic matter[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(6): 894–903.



开放科学 OSID

不同土层复配方案对土壤水稳性团聚体及有机质的影响

黄云鑫¹, 李裕瑞², 刘彦随^{1,2*}, 张轩畅², 常贵蒋², 冯巍仑¹

(1. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:为探究“治沟造地”重大工程项目(GLCP)中新增耕地快速改良的方法,达到营造良好土壤、提升新增耕地生产能力的目的,以延安羊圈沟流域的GLCP为背景,利用马兰黄土(ML)和红黏土(RC)对新造耕地0~30 cm土层进行复配试验。结果表明:当RC为20 cm、ML为10 cm(T3处理)时,复配层土壤孔隙度较对照处理增加了16.7%,容重下降了11.1%。与对照组相比,T3处理0~10、10~20、20~30 cm土层中>0.25 mm水稳性团聚体含量($W_{0.25}$)显著增加,分别增加了11.8、12.3倍和27.9倍;T2(RC为25 cm、ML为5 cm)、T3处理更利于大团聚体的形成,较对照组除在0.25~0.5、0.5~1 mm的粒级有较大增加外,在2~5 mm和>5 mm粒径范围也有明显增加。0~20 cm土层中,即使在考虑对照组前期土壤有机质积累的情况下,T3处理的土壤有机质也与对照组相近甚至更高,且高于其他试验组,表现出更好的有机质赋存能力。T3处理的玉米生长状况较好,其地上生物量最高,较对照组提高了23.9%。研究表明,当复配土壤RC为20 cm、ML为10 cm时,土壤具有最佳的性状和生产力。试验初步证明土层复配是一种可行的快速营造高质量土壤的方法,该方法可为GLCP新造地的改良及类似土地整治工程的实施提供实践参考。

关键词:土层复配;土体结构;水稳性团聚体;土壤有机质;治沟造地工程(GLCP)

中图分类号:P56

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)06-0894-10

doi: 10.13254/j.jare.2019.0455

Effects of different soil-layer compounding schemes on soil water-stable aggregates and organic matter

HUANG Yun-xin¹, LI Yu-rui², LIU Yan-sui^{1,2*}, ZHANG Xuan-chang², CHANG Gui-jiang², FENG Wei-lun¹

(1. Faculty of Geographical Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: A method of rapidly improving the newly cultivated land in the region of an engineering project called the Gully Land Consolidation Project (GLCP) was explored, which could achieve the purpose of creating good soil and improving the production capacity of the newly cultivated land. In this study, based on the GLCP in the Yangjuangou catchment of Yan'an, Malan Loess (ML) and red clay (RC) were used to conduct a compounding test on the 0~30 cm soil layer in newly cultivated land. The results showed that when RC was 20 cm and ML was 10 cm (T3), the soil porosity increased by 16.7% and bulk density decreased by 11.1% compared with those of the control group. In addition, >0.25 mm water-stable aggregates in the 0~10, 10~20, and 20~30 cm soil layers were significantly increased by 11.8, 12.3, and 27.9 times, respectively, compared with those in the control group. In addition to the large increase in grain size between 0.25~0.5 mm and 0.5~1 mm, the water-stable aggregates in the particle size ranges of 2~5 mm and >5 mm also increased significantly in treatments T2 (RC 25 cm, ML 5 cm) and T3, indicating that these treatments were more conducive to the formation of large aggregates. The soil organic matter (SOM) content of treatment T3 was relatively higher at different depths. Especially in the soil layer of 0~20 cm, the SOM content of treatment T3 was approximately equal to or higher than that of the control group even considering the accumulation of SOM at the early stage of the control group, showing the better SOM storage capacity of treatment T3. In addition, the growth status of maize in

收稿日期: 2019-09-11 录用日期: 2019-11-08

作者简介: 黄云鑫 (1993—), 男, 四川眉山人, 硕士研究生, 主要从事土地可持续利用与农业农村发展研究。E-mail: yxhuang@mail.bnu.edu.cn

*通信作者: 刘彦随 E-mail: liuys@igsrr.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0504701); 国家自然科学基金项目(41471143)

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program (2017YFC0504701); The National Natural Science Foundation of China (41471143)

treatment T3 was better, and its aboveground biomass was the highest, which was 23.9% higher than that of the control group. This study showed that when RC was 20 cm and ML was 10 cm, the soil had the best properties and productivity. The experimental results preliminarily show that soil-layer compounding is a feasible method to build good soil quickly. This method also provides a practical reference for the improvement of the newly cultivated land in the GLCP and the implementation of similar land consolidation projects.

Keywords: soil-layer compounding; soil structure; water-stable aggregates; soil organic matter; Gully Land Consolidation Project (GLCP)

黄土高原是世界上最大的黄土覆盖区,也是一个水土流失非常严重的生态脆弱区^[1]。为治理黄土高原严重的水土流失,改善区域环境,国家于20世纪90年代开始在黄土高原实施退耕还林(草)政策。该政策的实施一定程度上减轻了黄土高原地区的水土流失,改善了区域生态环境^[2]。但同时,大量的坡耕地转变为林地、草地,农业生产由坡面下移至沟道,耕地面积减少,在一定程度上造成了人-地关系的紧张^[3],部分区域出现重新垦殖的现象。为缓解人地矛盾,中央在2013年启动了延安“治沟造地”重大工程。工程实施过程中,将沟道两侧的山坡梯级切下,把沟道分层填平形成耕地^[4]。工程的实施,增加了耕地面积,改善了项目区内的土地利用结构和景观^[5],对巩固退耕还林(草)成果和缓解紧张的人-地关系产生了明显作用。

但在工程实施之前,原本沟道中的土壤多为坡耕地流失的土壤淤积而成,并且经过长时间的耕作,土壤的结构、养分等条件都较好。而工程新造地块的表土主要来源于沟道两旁削坡得到的未经熟化的深层土壤,这部分土壤通常包括马兰黄土和红黏土。马兰黄土土质松软,遇水易发生湿陷,容易被雨水侵蚀,而红黏土土质较为致密,保水性强,干燥情况下比较坚硬。单纯的以某种土壤新造的地块,要么易跑水跑肥,要么不利于作物生长,其土壤结构、肥力等难以在短期内达到原来沟道土壤的水平。而新时期,对于土地整治的要求已从单纯的数量要求转向质量要求^[6],整治土地的质量关系到后续土地的可持续利用。因此,需要研制快速营造良好土壤的技术方法,以提升新增耕地的生产能力。当前常用的土壤改良方法可分为物理方法、生物方法、化学方法;按具体的措施分,有客土改良、秸秆还田、施用改良剂等方法。客土改良能快速改善土壤的容重、孔隙度、pH值、养分含量等性质^[7-8],秸秆还田^[9-10]及合理施用有机肥能起到改善土壤结构和养分含量的效果^[11],合理的耕种方式也对保持和改良土壤的性质具有重要意义^[12-13]。除以上常用方法外,也有学者开展了新方法的探索,如

利用砒砂岩和沙土进行复配^[14],结果表明利用沙土和砒砂岩复配能显著地改善沙土的土壤结构,使原本跑水跑肥的沙土成为性质良好的土壤。但囿于原料和成本,目前这种方法的应用和相关研究还比较少。结合研究区域的状况,笔者认为良好土体的营造是新造土地首先需要解决的问题。而考虑到马兰黄土和红黏土在区域内广泛分布的现实情况以及二者在性质上良好的互补性,同时基于前人的研究成果^[14],认为土壤复配理论上适用于本区域的土壤改良。因此,依托试验基地,本研究利用马兰黄土和红黏土进行不同比例的土层复配试验,以期找到一种较好的复配方案,为快速营造良好土壤、提升新增耕地的生产能力提供一种可行的方法,也为今后类似的土地整治工程提供实践参考。

在对复配方案的效果进行评价时,土壤的质量是首要条件。良好的土壤很大程度上取决于良好的土壤性质,而土体结构和土壤养分是其中两个重要因子。土体结构由土壤团聚体、土壤容重、土壤孔隙度等指标决定,其中土壤团聚体是土体结构的重要评价指标,其性质很大程度上决定了土壤土体结构的好坏,影响土壤理化性质^[15],从而影响土壤的肥力。有机质含量则是土壤养分的重要指标,也是土壤养分的重要基础。常用的土壤质量评价方法有单因子法和多因子综合评价法,为了快速地对各方案做出评价,本研究选取了具有代表性的土壤水稳性团聚体和有机质来反映土壤的质量,同时通过作物的生长指标反映土地的生产能力。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究的试验样地位于延安市宝塔区的羊圈沟流域,该流域位于黄土高原中部(图1a),介于109°31′~109°71′E,36°42′~36°82′N。流域面积2.02 km²,海拔在1 050~1 295 m之间,为典型的黄土丘陵沟壑区。区域气候为半干旱大陆性季风气候,日平均日照时数为6.9 h,年平均气温为8.8℃,年最低平均

温度为-6.9℃,最高平均温度为26℃。区域年平均降水量535mm,多集中在7—9月,占全年降水量的79%,降雨多为短时强降雨^[16]。

2013年延安市实施了“治沟造地”重大工程,羊圈沟流域作为项目区的一部分,有27.84hm²的土地得到了综合整治^[17]。通过整治,增加了流域的耕地面积,配置了灌溉设施,极大改善了区域的生产生活条件。在此基础上,提升整治后土地的质量,提高土地生产能力,满足可持续农业生产的需求成为新的任务。

1.2 试验设计

在农业生产中,土地资源是最重要的生产要素,其质量的好坏直接影响农业生产的效率。为促进土地的可持续利用,营造更好的土体,利用红黏土和乌兰黄土进行了土层复配试验。红黏土结构致密,乌兰黄土结构疏松,二者在结构上具有天然的互补性。试验所用的乌兰黄土和红黏土均来源于项目区附近坡面,易于获得,并且在黄土高原地区广泛分布。试验小区原地块均为“治沟造地”工程中的新造地,均于2014年项目竣工后开始作物种植,种植作物为玉米。试验小区于2017年4月建造,试验组设置方式为:先将原耕地的表层30cm土壤剥离,然后根据试验设计

要求,将不同厚度比的乌兰黄土(ML)和红黏土(RC)覆盖在剥离表土的地块上,共覆土30cm,然后用旋耕机将两种土壤旋耕至均匀混合(图1d)。试验总计8种方案,小区规格为5m×15m,具体试验方案如表1所示。其中,对照处理T0为原状土(YS),是“治沟造地”工程新造地,已经过3年的耕种。在试验地块上进行种植,种植作物为玉米。

1.3 数据获取与处理

试验所需土壤样品均采集于2018年7月。容重采用环刀法测定,土壤孔隙度通过公式(1)计算得到,

表1 土层复配方案(cm)

处理 Treatments	红黏土 RC	乌兰黄土 ML	原状土 YS
T0	0	0	30
T1	30	0	0
T2	25	5	0
T3	20	10	0
T4	15	15	0
T5	10	20	0
T6	5	25	0
T7	0	30	0

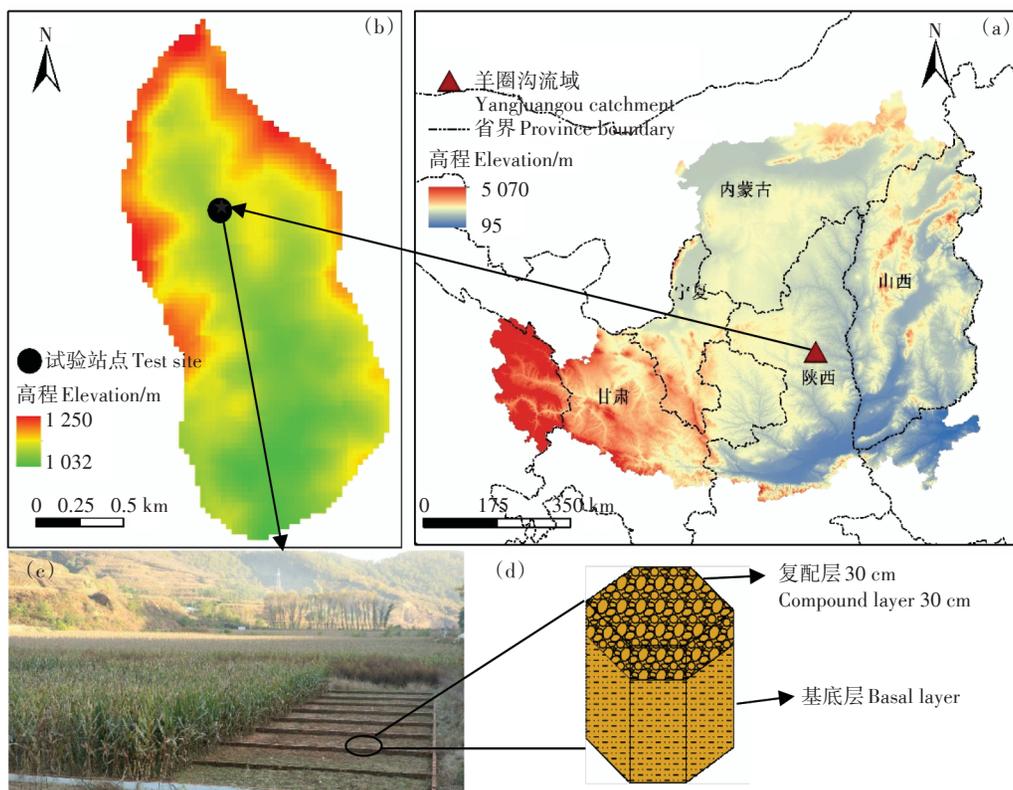


图1 试验小区及土层复配示意图

Figure 1 Schematic diagram of test site location and compound soil

土壤比重由比重瓶法测得为 $2.56 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。采集时,每个小区随机选取3个样点,每个样点按0~10、10~20、20~30 cm进行分土层取样。

其中,土壤机械组成采用 Bettersize 2000 激光粒度分布仪进行检测,粒径分组采用美国制标准。水稳性团聚体含量采用湿筛法进行测算,按粒径大小分为5个粒级,分别为0.25~0.5、0.5~1、1~2、2~5、>5 mm。土壤有机质采用重铬酸钾氧化-硫酸亚铁还原滴定法测定^[18];土壤酸碱度利用pH计测定;阳离子交换量利用乙酸铵进行浸提测定^[18]。

土壤孔隙度计算:

$$SP = 1 - (D/d) \quad (1)$$

式中:SP为土壤孔隙度; D 为土壤容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; d 为土壤密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

水稳性团聚体含量由式(2)计算得到

$$W_i = \frac{M_i}{M_T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_i 为粒径大于*i* mm的水稳性团聚体百分含量,%; M_T 为供试土样总质量,g; M_i 为粒径大于*i* mm的水稳性团聚体质量,g。

方差分析采用SPSS Statistics 22软件,以LSD法进行多重比较,绘图采用Excel 2016。

2 结果与分析

2.1 不同复配方案下土壤基本性质

对各组0~30 cm表土的基本理化性质进行分析,结果如表2所示。在试验组的复配土壤中,随着RC比例的减少、ML比例的增加,土壤颗粒中黏粒的含量下降,而砂粒的含量增加,但土壤的质地均为黏壤土。作为土体结构重要指标的容重和孔隙度也随着RC和

ML配比不同发生改变,试验组的容重均比对照组小,孔隙度除T7外,均较对照组大,其中T3处理的土壤有最小的容重和最大孔隙度,分别为 $1.36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和0.49,较对照组T0降幅为11.1%,增幅为16.7%。容重和孔隙度的变化说明不同比例的ML和RC进行配比会对土壤的结构产生影响。此外,T2和T3处理的CEC显著高于其他各组($P < 0.05$),较对照组分别提高101.5%和52.7%。

2.2 不同复配方案下水稳性团聚体含量

对各组0~10、10~20、20~30 cm土层>0.25 mm水稳性团聚体含量($W_{0.25}$)进行了比较和分析,结果如图2所示。0~10 cm的土层,从T0处理到T7处理,随着ML含量的增加, $W_{0.25}$ 呈现先上升后下降的态势,试验组的含量除T7处理外均显著高于T0处理,其中T3处理的 $W_{0.25}$ 最高(34.44%),为对照组(2.70%)的12.8倍。10~20 cm的土层,T3处理的含量(40.43%)显著高于其他各组处理($P < 0.05$),是对照组T0(3.05%)的13.3倍。20~30 cm的土层,T2处理的 $W_{0.25}$ 为49.72%,T3处理的 $W_{0.25}$ 为39.82%,均显著高于其他各组($P < 0.05$)。总体而言,T3处理的 $W_{0.25}$ 在各深度土层均有较大的占比,说明该处理的土壤具有更好的团聚体结构。

2.3 不同复配方案下水稳性团聚体粒径分布特征

水稳性团聚体的含量和粒径组成均会对土体结构产生影响,从而影响土壤性质,大粒径团聚体的含量越高土体结构相对越好。基于此,对8个处理>0.25 mm水稳性团聚体的粒径($R_{0.25}$)分布情况进行了分析,结果如表3所示。

对于某一处理,0~10 cm的土层中, $R_{0.25}$ 主要集中在0.25~0.5 mm的粒径范围内,其中T2、T3、T4处理

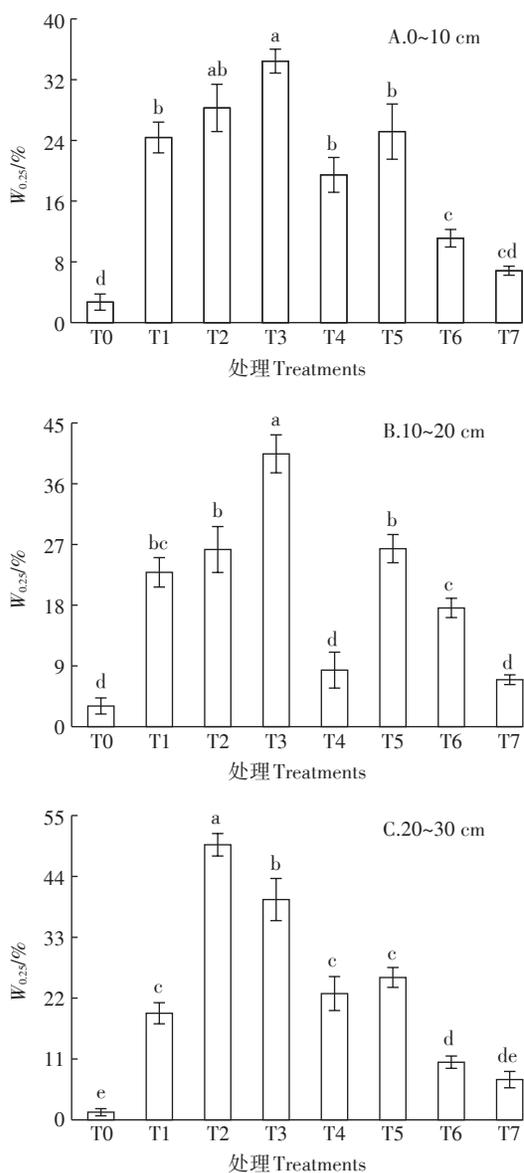
表2 不同处理0~30 cm土壤基本性质

Table 2 Soil basic properties in 0~30 cm layer of different treatments

处理 Treatments	机械组成 Particle size/%			土壤容重 Soil bulk density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤孔隙度 Soil porosity	酸碱度 pH	阳离子交换量 CEC/($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)
	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand				
T0	5.0	70.8	24.2	1.53	0.42	8.54	9.82d
T1	17.3	73.1	9.5	1.40	0.47	8.44	11.96c
T2	7.9	73.6	18.5	1.38	0.48	8.50	19.79a
T3	6.9	72.4	20.7	1.36	0.49	8.49	15.00b
T4	5.4	70.3	24.3	1.41	0.47	8.52	10.94cd
T5	4.2	67.6	28.2	1.38	0.48	8.47	8.51d
T6	4.8	70.3	24.9	1.43	0.46	8.46	9.86d
T7	4.1	65.4	30.5	1.38	0.42	8.47	7.58d

注:不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicate the significant differences among treatments($P < 0.05$).



不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同
The different letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below

图2 各土层不同处理>0.25 mm水稳性团聚体含量($W_{0.25}$)
Figure 2 The >0.25 mm water-stable aggregates ($W_{0.25}$) of different treatments at different depths

0.5~1 mm的水稳性团聚体也有较高占比;10~20 cm的土层,对于各处理,0.25~0.5 mm的水稳性团聚体含量仍显著高于其他粒级水稳性团聚体的含量($P<0.05$);20~30 cm的土层,各处理水稳性团聚体的粒径分布特征与0~10 cm土层一致。

对于不同处理,0~10 cm的土层,T3处理 $W_{0.25}$ 较T0处理增加了11.8倍,其中0.25~0.5 mm水稳性团聚体占增加总量的39.9%,0.5~1 mm水稳性团聚体占增加总量的39.1%。10~20 cm的土层,T3处理 $W_{0.25}$ 较

T0处理增加了12.3倍,其中0.25~0.5 mm水稳性团聚体占增加总量的41.2%,0.5~1 mm水稳性团聚体占增加总量的29.8%,2~5 mm水稳性团聚体占增加总量的14.1%,其他粒级的水稳性团聚体增加量较少。20~30 cm的土层,T2、T3处理 $W_{0.25}$ 较T0处理均显著增加,T2处理水稳性团聚体除0.25~0.5、0.5~1 mm粒级的有较大的增长外,2~5 mm和>5 mm粒级也增加较多,后两者合计占增量的27.8%;T3处理与T2处理情况类似,0.25~0.5 mm水稳性团聚体占增加总量的34.3%,0.5~1 mm水稳性团聚体占增加总量的37.4%,>5 mm水稳性团聚体占增加总量的10.1%。

总体而言,对各组处理, $R_{0.25}$ 大多集中在0.25~0.5 mm的粒径范围内。而与T0处理的原状土相比,除T7处理外,各试验组水稳性团聚体的含量都有显著增加,且增加的水稳性团聚体主要分布在0.25~0.5、0.5~1 mm的粒径范围内,T2、T3处理的水稳性团聚体在2~5、>5 mm粒径范围内也有较明显的增加。

2.4 不同复配方案下土壤有机质含量

土壤有机质含量是反映土壤肥力和农业可持续性的重要指标,图3反映了不同复配方案土壤的有机质(SOM)含量情况。不同处理SOM含量存在差异。0~10 cm的土层,除T3处理的SOM含量($8.76 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)与对照处理($9.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)相近外,T1、T2、T4、T5、T6、T7处理SOM均显著低于T0处理,T3处理的SOM含量显著高于其他各试验处理($P<0.05$);10~20 cm的土层,T3处理的SOM含量($7.32 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)与T2、T4处理没有显著差异,但显著高于对照处理24.5%($P<0.05$);20~30 cm的土层,T2、T3、T4、T5处理的SOM含量与对照组没有显著差异,但均显著高于T1、T6、T7处理。除在10~20 cm土层中,T3处理的SOM含量显著高于T0外,在其余土层各试验组的SOM含量并没有较T0处理显著增加,甚至比T0处理含量更低,但这并不能说明对土壤进行复配不能提高SOM的含量,因为对照组为原状土,其在2014年造地工程结束后就开始了耕作,土壤经多年熟化,且此前有施用有机肥,理论上SOM会较未经熟化的复配土壤更高,因此土层复配能否对表层土壤有机质含量产生影响还需要长期的试验证明。但即使考虑对照组前期SOM的积累,T3处理也表现出了较好的SOM赋存能力。

2.5 不同复配方案下作物生长状况

土壤的理化性质会直接影响作物的生长状况,图4是各处理玉米在8月份的叶面积指数及地上生物量。叶面积指数反映了作物对光能的利用状况,其大

表3 不同处理0~30 cm各粒级水稳性团聚体含量(%)

Table 3 The content of water-stable aggregates of 0~30 cm soil in different treatments(%)

深度 Depth/cm	不同处理 Different treatments	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	2~5 mm	>5 mm
0~10	T0	1.63±0.16Da	0.38±0.02Cb	0.25±0.02Bb	0.41±0.13Cb	0.00±0.00Cb
	T1	12.31±0.73ABa	8.27±0.72Bb	1.89±0.03ABc	1.85±0.26ABc	0.00±0.00Cc
	T2	14.28±1.94Aa	9.84±1.96ABb	1.33±0.04ABc	2.64±0.44ABc	0.18±0.11BCc
	T3	14.29±0.71Aa	12.81±1.23Aa	2.61±0.70Ab	3.16±0.25Ab	1.58±0.65Ab
	T4	6.97±0.79BCb	10.35±1.84ABa	0.58±0.22Bc	0.76±0.13Cc	0.79±0.02Bc
	T5	10.27±1.64Ba	8.51±0.46Ba	2.47±0.93Abc	3.59±0.77Ab	0.33±0.19BCc
	T6	6.44±0.27Ca	1.60±0.19Cbc	1.12±0.20Bc	2.08±0.24Bb	0.04±0.02BCd
10~20	T7	3.11±0.70CDa	0.60±0.02Cb	0.54±0.18Bb	1.32±0.21BCb	1.27±0.24ABb
	T0	1.16±0.12Da	0.46±0.11Cb	0.74±0.36Bab	0.70±0.25Cab	0.00±0.00Bb
	T1	13.93±0.61ABa	5.39±1.42BCb	1.38±0.52Bc	1.65±0.92BCc	0.00±0.00Bc
	T2	12.70±1.78Ba	6.13±1.94Bb	2.19±0.11ABb	2.45±1.27BCb	2.77±1.83Ab
	T3	16.55±0.05Aa	11.58±4.01Aab	3.66±0.71Ab	5.98±0.92Ab	2.65±0.61Ab
	T4	4.86±1.36Ca	2.55±1.28BCab	0.36±0.02Bb	0.61±0.01Cb	0.00±0.00Bb
	T5	11.27±0.95Ba	5.50±0.73BCb	2.94±1.02Ab	4.22±0.60ABb	2.45±0.77Ab
20~30	T6	8.01±0.60Ca	2.26±0.48BCbc	1.32±0.11Bc	2.85±0.28Bb	2.81±0.39Ab
	T7	5.61±0.23Ca	0.50±0.05Cb	0.50±0.09Bb	0.35±0.03Cbc	0.00±0.00Bc
	T0	0.64±0.12Da	0.30±0.12Cb	0.19±0.04Bbc	0.24±0.01Cbc	0.00±0.00Bc
	T1	13.75±1.34Ba	3.41±0.54Cb	0.69±0.07Bc	1.41±0.25Cbc	0.00±0.00Bc
	T2	17.24±0.22Aa	13.78±1.00Aa	4.84±1.41Ac	8.64±0.96Ab	5.22±1.53Abc
	T3	13.84±0.76Ba	14.68±1.73Aa	3.89±1.04Ab	3.51±1.16Bb	3.90±1.27Ab
	T4	12.01±1.63Ba	8.65±2.69Ba	0.77±0.27Bb	1.39±0.46Cb	0.00±0.00Bb
	T5	14.94±0.64ABa	7.21±0.38Bb	1.42±0.38Bcd	1.97±0.55BCc	0.19±0.11Bd
	T6	7.29±0.23Ca	1.62±0.04Cb	0.42±0.04Bd	1.08±0.14Cc	0.00±0.00Be
	T7	5.04±1.50Ca	1.57±0.33Cb	0.30±0.02Bb	0.36±0.13Cb	0.00±0.00Bb

注:不同大写字母表示同一深度相同粒级不同处理间差异显著,不同小写字母表示相同深度同一处理不同粒级间差异显著($P<0.05$)。

Notes: Different uppercase letters indicate significant difference of the same particle size among different treatments, while different lowercase letters indicate significant difference between different particle sizes in the same soil profile ($P<0.05$).

小与作物的最终产量密切相关。从图4中可以看出, T0、T3、T4、T5处理之间叶面积指数没有显著差异,但T5叶面积指数显著大于T1、T2、T6、T7处理。而对于地上生物量, T3处理显著高于其他处理,为15.85 t·hm⁻²,比对照组高23.9% ($P<0.05$)。说明T3处理(红黏土为20 cm、马兰黄土为10 cm)更有利于作物干物质的积累和玉米秸秆产量的提高。而玉米秸秆作为一种重要的饲喂草料,其产量的提高对于研究区畜牧业发展具有重要意义。

3 讨论

数据分析结果表明,不同比例土层复配会影响土壤的理化性质,其中最直接的影响就是对土壤机械组成的改变,ML比例的增大增加了土壤中砂粒的含量,同时黏粒含量减少,而RC的作用相反。与此同时,当RC/ML为20 cm:10 cm(T3)时,土壤具有最小的容重

和最大的孔隙度,较对照组T0容重降低11.1%、孔隙度提高16.7%。该现象说明不同的ML和RC复配比例会对土体的结构产生差别化影响。

对于 $W_{0.25}$,各试验处理较对照组都显著增加($P<0.05$),其中T3处理增加最明显。同时,研究还发现与对照组相比,T2、T3处理的 $R_{0.25}$ 除在0.25~0.5、0.5~1 mm的粒径范围有明显增加外,在2~5、>5 mm粒径范围内也有较明显的增加,说明这两种处理更利于大团聚体的形成和稳定,这可能与团聚体的形成和稳定机制有关。关于团聚体的形成,Edwards等^[19]认为团聚体是通过有机无机复合体为基础形成的,实质是黏粒通过多价金属阳离子连结而吸附有机分子的过程。Tisdall等^[20]认为团聚体是按粒径大小逐级形成的,即小的团聚体通过胶结作用形成较大的团聚体。在此过程中,受到有机质、微生物、耕作方式等多种因素的影响,且不同阶段的主导因素不同^[21-23]。在团聚体形

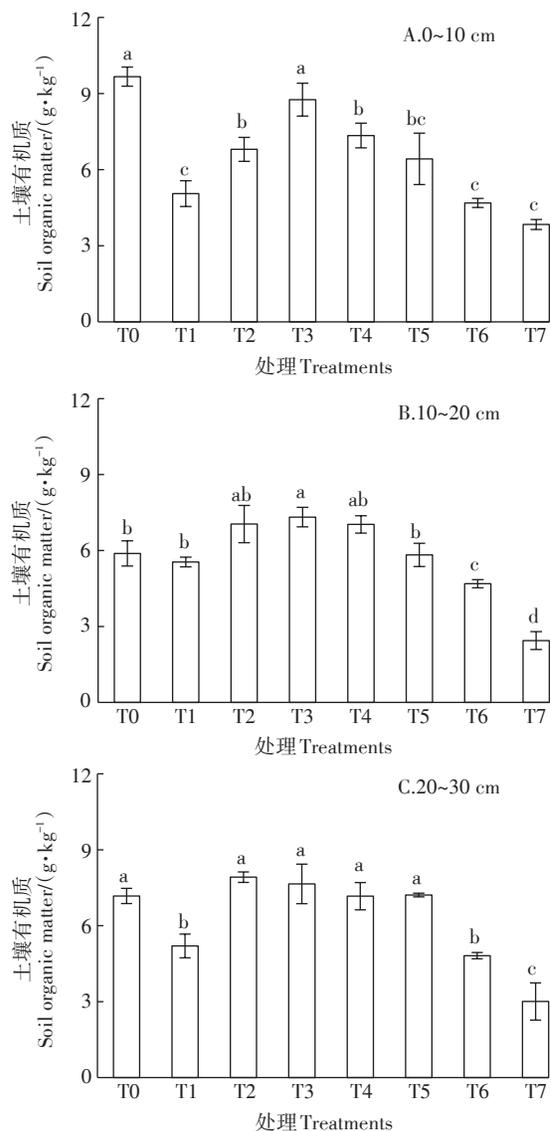


图3 不同处理土壤有机质含量

Figure 3 The content of SOM in different treatments

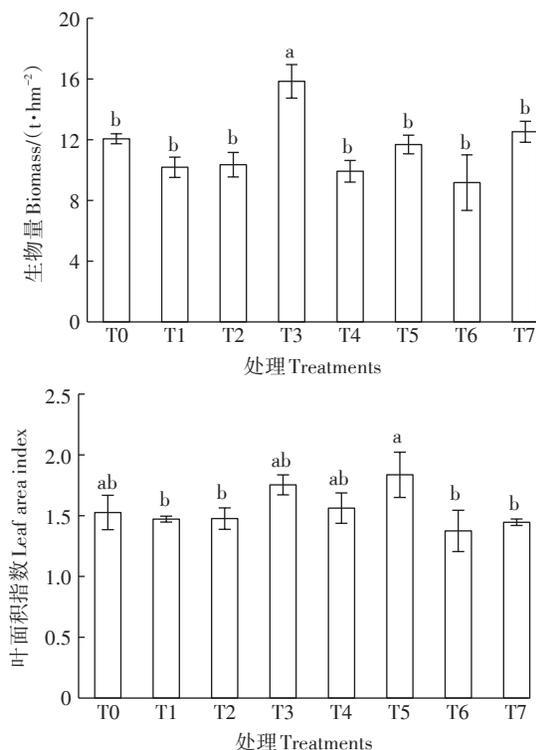


图4 不同处理玉米生长状况比较

Figure 4 Comparison of growth status of maize in different treatments

成的早期,尤其是在有机质含量较低的土壤中,黏土是一个重要的因素^[22]。通常情况下,黏粒胶体带负电荷,土壤颗粒通过无机胶体(黏土)和多价金属键之间的化学键进行连结,在此阶段黏土占主导地位^[24-25],能促进团聚微粒的形成^[26],为进一步形成更大的团聚体提供物质基础。本试验中,改变ML和RC的比例,实质上是改变了土壤的机械组成,当RC和ML的比例达到一个合适的值时,土壤中既具有足够的黏粒作为黏结剂,又具有足够的粉粒、砂粒作为团聚体形成的骨架,黏粒与其他颗粒在多价金属键的作用下快速形成小微粒,为更大团聚体的形成提供充足的原材料。随着土壤中的团聚微粒数量不断累积,一方面会通过团聚微粒间的直接作用团聚形成大团聚体;另一

方面团聚微粒会在黏土-多价金属-有机质化学键的作用下进一步凝聚,形成微团聚体^[21],进而再形成大团聚体。在后一过程中,由于黏粒胶体和有机胶体带负电荷,其与团聚微粒表面的有机质之间会发生排斥作用,因此在该过程中,有机质和黏粒的数量并非越多越好,而阳离子能减小带负电荷的黏粒与有机质以及有机质之间的排斥作用,对团聚体的形成起促进作用。T3处理的黏粒含量在各处理中相对适中,在满足第一阶段形成足够多团聚微粒的情况下,对微团聚体形成过程也不会产生较大的排斥作用,加之T3处理具有较高的CEC,因此黏土-小颗粒-有机质化学键的作用可能会更强,能增强小团聚体之间的团聚作用,促进大团聚体形成,因此其 $W_{0.25}$ 相对更高。而在微团聚体向大团聚体转化的过程,微生物和有机质起主导作用。有机质是团聚体形成过程中的主要结合物质,是连结各微粒、小团聚体的化学键的重要组成部分,与大团聚体的形成和水稳性密切相关^[27-28],能起到改善团聚体质量、增加大团聚体数量的作用^[29-30]。因此,SOM含量较高可能是T3处理 $W_{0.25}$ 较其他处理高的另一个重要原因。而微生物在此过程中,一方面通过真菌和放线菌的菌丝对团聚体起到网络、

连结作用^[25],另一方面微生物分泌的有机酸能溶解释放矿物表面的阳离子,增强阳离子的键桥作用^[31]。T2、T3处理的孔隙度相对较大,土壤透气性较好,SOM的含量也相对较高,为微生物提供了较好的生存环境,微生物活动可能会更活跃,菌根菌丝及微生物分泌物对团聚体的网络、胶结作用可能更强,对水稳性团聚体的形成和稳定具有积极意义^[32-33],而较大的CEC也进一步增强了大团聚体的抗崩解能力^[34],这可能也是T2、T3处理 $W_{0.25}$ 相对较高的原因,二者在2~5、>5 mm粒径范围内也有较明显的增加可能也与此有关。

由于对照组前期经过多年耕种,理论上其初始SOM含量较各试验组应更高,各试验组的复配方式能否增加土壤中有机碳的含量,仍需多年的试验来进一步证明。但各试验组之间的对比结果说明,当RC为20 cm、ML为10 cm时,SOM含量在不同深度总体上较其他各组更高。这可能与T3处理>0.25 mm的水稳性团聚体含量较高有关,已有研究表明有机质多集中赋存于>0.25 mm的团聚体中^[34],这可能是因为在团聚形成的过程中会将一部分有机化合物包裹,使这部分有机质难以与空气接触,减少SOM因矿化过程的损失,从而使得这部分SOM能更稳定地赋存^[35-37],进而增加SOM的含量。还有研究表明,SOM的含量与土壤的质地和结构有关。Simonetti等^[38]研究表明,以微米级或纳米级孔隙为主的黏质土壤,能够通过矿物表面的相互作用和层状硅酸盐的夹层作用来保护土壤有机碳;Fateme等^[39]研究显示,当土壤中的黏粒含量在5%~10%时,能降低有机碳的分解速度,增加土壤中有机质的赋存量。T3处理的黏粒含量为6.9%,土质较黏重,可能也对减缓SOM分解有积极作用。此外,T3处理的孔隙度较大,具有更好的透气性,利于好氧微生物活性提升,对土壤中有机物的分解作用更强,能促进团聚体外部的有机物分解转化为有机质,从而增加SOM的来源,这在Kravchenko等^[40]的研究中也得到体现。T3处理具有较优的容重、孔隙度、团聚体等指标,营造了一个较好的物理环境,为土壤自身形成更好的养分条件奠定了良好的结构基础^[41]。

总体而言,合理比例的土层复配能起到改善土壤结构、提升土壤有机质含量的效果,达到提高土地生产能力的目的。但由于试验时间较短,指标较少,对团聚体只探究了其水稳性,对其机械稳定性未做探讨,因此仍需进行长期的观测试验,以全面验证试验

结果中的良好效果能否长期稳定或者进一步提升。黄土丘陵区具有巨大的土地整治潜力,进一步论证该方法的技术、经济可行性对于提升“治沟造地”项目区的土地质量,促进沟道土地资源的可持续利用和农牧业发展具有重要的实践意义,同时可为将来类似的土地整治工程提供实践参考。

4 结论

利用红黏土和马兰黄土对“治沟造地”工程新造地块表层30 cm的土壤进行复配,改变了表层土壤的性质,对土壤团聚体的分布特征和稳定性产生了显著的影响,同时对土壤有机质的含量也产生了一定的影响。

(1)T3处理土壤的容重显著减小,孔隙度显著增大。T1、T2、T3、T5、T6处理的 $W_{0.25}$ 在各土层均较对照组显著增加,其中T3处理增加最明显。

(2)T2、T3处理更有利于水稳性大团聚体的形成,除在0.25~0.5、0.5~1 mm粒径范围较对照处理有大幅增加外,在2~5 mm及>5 mm粒级范围内也有较大提高。

(3)T3处理的SOM在各土层均与对照组相近甚至更高,其可能具有更好的SOM赋存能力。

(4)T3处理的玉米生物量显著提高,表现出更高的生产能力。

(5)利用红黏土和马兰黄土复配进行耕层土壤的快速营造在技术和理论上是基本可行的,且当复配土中二者的厚度分别为20 cm和10 cm时,能大幅改良土壤的性状和生产力。

参考文献:

- [1] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y. Soil erosion and its response to the changes of precipitation and vegetation cover on the Loess Plateau[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(6): 1091-1106.
- [2] Han J C, Zhang Y. Land policy and land engineering[J]. *Land Use Policy*, 2014, 40(40): 64-68.
- [3] Chen Y P, Wang K b, Lin Y S, et al. Balancing green and grain trade [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(8): 739-741.
- [4] 刘彦随,李裕瑞.黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程原理与设计技术[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(10): 1-9.
LIU Yan-sui, LI Yu-rui. Engineering philosophy and design scheme of gully land consolidation in Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(10): 1-9.
- [5] 李裕瑞,李怡,范朋灿,等.黄土丘陵沟壑区沟道土地整治对乡村人地系统的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(5): 241-250.
LI Yu-rui, LI Yi, FAN Peng-can, et al. Impacts of land consolidation

- on rural human-environment system in typical watershed of loess hilly and gully region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(5):241-250.
- [6] 赵瑞, 吴克宁, 陈甜倩. 面向土地整治的耕地质量评价优化[J]. 生态学杂志, 2019, 38(8):2433-2441.
ZHAO Rui, WU Ke-ning, CHEN Tian-qian. Optimization of cultivated land quality evaluation for land consolidation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(8):2433-2441.
- [7] 刘永兵, 李翔, 刘永杰, 等. 土地整治中底泥质耕作层土壤的构建方法及应用效果[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9):242-248.
LIU Yong-bing, LI Xiang, LIU Yong-jie, et al. Construction method and application effect on tillage layer soil by sediment in land consolidation engineering[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(9):242-248.
- [8] 李品芳, 杨永利, 兰天, 等. 天津滨海盐渍土客土改良后的土壤理化性质与持水特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7):149-156.
LI Pin-fang, YANG Yong-li, LAN Tian, et al. Physicochemical properties and water holding characteristics of Tianjin coastal saline soil improved by foreign soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(7):149-156.
- [9] 王秋菊, 刘峰, 迟凤琴, 等. 秸秆还田及氮肥调控对不同肥力白浆土氮素及水稻产量影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14):105-111.
WANG Qiu-ju, LIU Feng, CHI Feng-qin, et al. Effect of straw returning and nitrogen fertilizer regulation on nitrogen and rice yield in albic soil with different fertilities[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(14):105-111.
- [10] 孙隆祥, 陈梦妮, 薛建福, 等. 秸秆还田对麦梁两熟农田土壤团聚体特征的短期效应[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6):36-44.
SUN Long-xiang, CHEN Meng-ni, XUE Jian-fu, et al. Short-term response of soil aggregate characteristics to different annual straw incorporation rates in winter wheat-summer sorghum cropping system[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(6):36-44.
- [11] 吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 等. 长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(1):1-10.
LÜ Xin-xin, DING Xue-li, ZHANG Bin, et al. Effects of long-term fertilization and plastic-mulching on the stability and organic carbon contents of brown soil aggregates[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(1):1-10.
- [12] 殷志遥, 黄丽, 薛斌, 等. 稻-油轮作下保护性耕作对土壤肥力的影响及评价[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(11):1604-1614.
YIN Zhi-yao, HUANG Li, XUE Bin, et al. Effect of conservation tillage on soil fertility under rice-rape rotation system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(11):1604-1614.
- [13] 刘威, 张国英, 张静, 等. 2种保护性耕作措施对农田土壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3):117-122.
LIU Wei, ZHANG Guo-ying, ZHANG Jing, et al. Effect of two conservation tillage measures on soil aggregate stability[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3):117-122.
- [14] 韩霖昌, 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.
HAN Ji-chang, LIU Yan-sui, LUO Lin-tao. Research on the core technology of remixing soil by soft rock and sand in the Maowusu sand land region[J]. *China Land Science*, 2012, 26(8):87-94.
- [15] Algayer B, Bissonnais Y L, Darboux F. Short-term dynamics of soil aggregate stability in the field[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(4):1168-1176.
- [16] Wang L H, Ma B, Wu F Q. Effects of wheat stubble on runoff, infiltration, and erosion of farmland on the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall[J]. *Solid Earth*, 2017, 8(2):1-28.
- [17] Feng W L, Liu Y S, Chen Z F, et al. Theoretical and practical research into excavation slope protection for agricultural geographical engineering in the Loess Plateau: A case study of China's Yangjuangou catchment[J/OL]. *Journal of Rural Studies*, <http://doi.org/10.1016/J.rurstud.2019-01-020>.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
LU Ru-kun. Methods of agricultural chemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [19] Edwards A P, Bremner J M. Dispersion of soil particles by sonic vibration[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 18(1):47-63.
- [20] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 33(2):141-163.
- [21] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1):3-22.
- [22] 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.
WANG Qing-kui, WANG Si-long. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3):415-421.
- [23] Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(3):1042-1049.
- [24] 章明奎, 何振立. 成土母质对土壤团聚体形成的影响[J]. 热带亚热带土壤科学, 1997(3):198-202.
ZHANG Ming-kui, HE Zhen-li. Effect of parent materials on formation of soil aggregate[J]. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1997(3):198-202.
- [25] 文倩, 关欣. 土壤团聚体形成的研究进展[J]. 干旱区研究, 2004, 21(4):434-438.
WEN Qian, GUAN Xin. Progress in the study on soil aggregate formation[J]. *Arid Zone Research*, 2004, 21(4):434-438.
- [26] 李裕瑞, 范朋旭, 曹智, 等. 基于扫描电镜解析毛乌素沙地砒砂岩与沙复配成土的微观结构特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(4):707-719.
LI Yu-rui, FAN Peng-xu, CAO Zhi, et al. Analysis of micro-structure of composited soil with feldspathic sandstone and sand through the scanning electronic microscope in Mu Us sandy land region[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2019, 27(4):707-719.
- [27] Wilson G W T, Rice C W, Rilling M C, et al. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: Results from long-term field experiments[J]. *Ecology Letters*, 2010, 12(5):452-461.

- [28] 侯晓静, 杨劲松, 王相平, 等. 不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 818-827.
HOU Xiao-jing, YANG Jin-song, WANG Xiang-ping, et al. Effects of fertilization on soil organic carbon and distribution of SOC in aggregates in tidal flat polders[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 818-827.
- [29] 赵京考, 刘作新, 韩永俊. 土壤团聚体的形成与分散及其在农业生产上的应用[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6): 163-166.
ZHAO Jing-kao, LIU Zuo-xin, HAN Yong-jun. Review on formation and dispersion of aggregates and their application in agriculture[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(6): 163-166.
- [30] 石纹霞, 刘世亮, 赵颖, 等. 猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(5): 431-438.
SHI Wen-xuan, LIU Shi-liang, ZHAO Ying, et al. Effects of pig manure organic fertilizer application on available nutrient content and soil aggregate distribution in fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(5): 431-438.
- [31] Tisdall J M. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils [J]. *Plant & Soil*, 1994, 159(1): 115-121.
- [32] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62: 1367-1377.
- [33] 史奕, 陈欣, 沈善敏, 等. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1495-1498.
SHI Yi, CHEN Xin, SHEN Shan-min. Mechanisms of organic cementing soil aggregate formation and its theoretical models[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1495-1498.
- [34] Dimoyiannis D G, Tsadilas C D, Valmis S. Factors affecting aggregate instability of Greek agricultural soils[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1998, 29(9/10): 1239-1251.
- [35] Plante A F, McGill W B. Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies[J]. *Soil & Tillage Research*, 2002, 66(1): 79-92.
- [36] Chevallier T, Blancchart E, Albrecht A, et al. The physical protection of soil organic carbon in aggregates: A mechanism of carbon storage in a vertisol under pasture and market gardening (Martinique, West Indies) [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2004, 103(2): 375-387.
- [37] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 828-838.
MAO Xia-li, LU Kou-ping, HE Li-zhi, et al. Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 828-838.
- [38] Simonetti G, Francioso O, Ferro N D, et al. Soil porosity in physically separated fractions and its role in SOC protection[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2017, 17(1): 1-15.
- [39] Fetemeh R, Ahmad G, Ali B A A, et al. Effects of exchangeable cations, mineralogy and clay content on the mineralization of plant residue carbon[J]. *Geoderma*, 2017, 307: 150-158.
- [40] Kravchenko A N, Guber A K. Soil pores and their contributions to soil carbon processes[J]. *Geoderma*, 2016, 287: 31-39.
- [41] Abbott L K, Murphy D V. Soil biological fertility[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003.