

砒砂岩与沙复配土壤组成变化及玉米产量可持续性分析

张海欧^{1,2,3,4}, 曹婷婷^{2,3,4}, 杨晨曦^{2,3}

(1.陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075; 2.陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 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, 西安 710021; 4.陕西省土地整治工程技术研究中心, 西安 710021)

摘 要:砒砂岩与沙复配成土技术在毛乌素沙地土地整治中已广泛应用,然而,探索适合当地主要粮食作物高产稳产的砒砂岩与风沙土的适宜混合比例,提高复配土壤的农业适应性有待进一步研究。利用 2010—2018 年田间定位试验数据,分析玉米种植模式下不同比例复配土壤粉粒和黏粒含量及空间迁移规律,探索玉米产量可持续性及其稳定性。结果表明:(1) 随着试验的开展,0—30 cm 土层中不同比例复配土壤粉粒、黏粒含量均向下层土体运移,运移速率为 $1:5 > 1:1 > 1:2$,下层土壤中的粉粒和黏粒含量增加,使得土体剖面耕层增加至 30—40 cm 土层厚度。(2) 玉米产量在 $1:1$, $1:2$, $1:5$ 复配土壤上差异较大,与 2010 年相比较,到 2018 年产量分别提高了 43.9%, 105.9%, 58.5%, 并且 $1:2$ 复配土壤上玉米多年平均产量超过了 15 000 kg/hm²,与当地高产田产量持平。(3) $1:2$ 复配土壤对玉米增产的效果最优,SYI 值最大,CV 值最小,即产量稳定性和可持续性最好。因此,确定 $1:2$ 复配比例最适合玉米生长,其朝着有利于玉米生长发育并获得高产的方向发展。

关键词:复配土壤; 粉粒; 黏粒; 迁移规律; 产量可持续性

中图分类号:S152.3⁺2; S518.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0275-06

Analysis of Soil Particle Size Change and Corn Yield Sustainability in Soft Rock and Sand Compound Soil

ZHANG Haiou^{1,2,3,4}, CAO Tingting^{2,3,4}, YANG Chenxi^{2,3}

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

Abstract: The technology of soft rock and sand compound soil has been widely used in the land remediation of Mu Us sandy land. However, exploring the suitable mixing ratio of soft rock and aeolian sandy soil that is suitable for the high and stable yield of the main local economic crops, and improving the agricultural adaptability of the compound soil needs further research. We used the field positioning test data from 2010 to 2018 to analyze the silt and clay contents and spatial migration rules of the compound soil at different proportions under the corn planting mode, and explore the sustainability and stability of corn yield. The results showed that: (1) with the development of the test, silt and clay of the compound soil in the 0—30 cm soil layer migrated to the lower soil, and the migration rate decreased in the order: $1:5 > 1:1 > 1:2$; the silt and clay contents in the lower soil layer increased, making the plough layer of the soil profile increase to the thickness of 30—40 cm; (2) corn yields were significantly different in $1:1$, $1:2$ and $1:5$ compound soils; compared with the yields in 2010, the annual yields of corn increased by 43.9%, 105.9% and 58.5%, respectively, in 2018; moreover, the annual average yield of corn in $1:2$ compound soil exceeded 15 000 kg/hm² for many years, which was equal to the yield of local high-yield fields; (3) the $1:2$ compound soil had the best effect on increasing corn yield, with the maximum SYI value and the minimum CV value, the yield stability and sustainability were the best. Therefore, the $1:2$ compound ratio was determined to be the most suitable for corn growth, which was in favor of corn growth and development and obtaining high yield.

收稿日期:2020-12-09

修回日期:2020-01-19

资助项目:陕西省土地整治重点实验室开放基金“基于土地整治工程新增耕地的土壤有机碳稳定性研究”(2019-JC07)

第一作者:张海欧(1985—),女,陕西西安人,博士研究生,主要从事土地整理复垦和土地工程的研究。E-mail:244254409@qq.com

Keywords: compound soil; silt; clay; migration law; yield sustainability

毛乌素沙地以光照资源丰富,光合效率高,成为玉米等作物主要生产基地,春玉米正是榆林当地的主要农作物之一,其经济效益巨大。然而,沙地受风蚀堆积作用,地貌多为起伏不平的沙丘,颗粒呈无团聚的分散状态,抗风蚀性差,土体营养物质贫瘠,不利于植物生长,只在“肥力岛”处滋生有零星的小灌丛,植被极为稀疏,无经济价值。韩霖昌等^[1]研究发现砒砂岩具有天然保水剂的作用,揭示了砒砂岩的保水机理,提出了规模化使用砒砂岩改良毛乌素沙地的可行性,即将一定量的砒砂岩和沙两种物质经科学配比,使其成为满足作物生长的新增耕地的耕作土壤层。风沙土中添加砒砂岩能够改善土壤质地^[2],提升黏粒含量和有机质含量^[3],降低氮素的淋溶和损失^[4],提高土壤结构稳定性和肥力^[5-6]。然而,探索适合当地主要粮食作物高产稳产的砒砂岩与风沙土的适宜混合比例,提高复配土壤的农业适应性有待进一步研究。本文利用2010—2018年砒砂岩与沙体积比为1:1,1:2,1:5复配土壤的田间定位试验数据,分析随着玉米种植年限的增加不同比例复配土壤粉粒和黏粒含量及空间迁移规律,探索玉米产量可持续性及其稳定性,以期砒砂岩与沙复配土壤—植被系统的良性循环发展提供理论基础。

1 试验区概况与方法

1.1 试验区概况

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野外科学观测试验小区,开展长期监测。研究区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,具备生产出高产量玉米的环境条件。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

自2010年砒砂岩与沙复配成土整治示范工程项目完成起,建立了复配土长期定位试验小区长5 m×

宽12 m。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,共计9个试验小区。种植当地主要粮食作物春玉米(榆丹9号),每年播种时间为5月中旬,9月下旬进行收获,种植制度为一年一季。播种前1~2 d施入复合肥(90 kg N/hm²,40 kg P/hm²,75 kg K/hm²),在玉米拔节期以187 kg N/hm²追施尿素1次。灌溉的时间和量,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。为了避免由于种植不同玉米品种而对试验造成的影响,按照试验周期内所种植的玉米品种,将试验分为2个时间段,2010—2014年和2015—2018年种植玉米品种分别为榆丹9号、先玉335。试验于每年玉米收获后采用“S”形采样方法,分别采集各处理下0—30 cm土样,进行土壤物理和养分指标测定及分析。

土壤颗粒组成测定采用马尔文激光粒度分析仪 Mastersizer 2000(英国),其粒度分级采用1951年美国农业部(USDA)制的分级标准。每年按小区收获计算玉米实收产量。

1.3 产量稳定性及可持续性指数计算

(1) 产量稳定性计算。采用变异系数(CV)表示产量稳定性,衡量随着年际变化同一品种作物平均产量间的变异程度,其值越小,表明产量稳定性越高^[7]。

$$CV = \sigma / \bar{Y}$$

式中: \bar{Y} 为平均产量; σ 为标准差。

(2) 产量可持续性指数计算

产量可持续性指数(SYI)作为衡量土地可持续生产力的指标,其值越大,说明可持续性越好^[8-9]。

$$SYI = (\bar{Y} - \sigma) / Y_{\max}$$

式中: Y_{\max} 为试验点最高产量。

2 结果与分析

2.1 复配土壤粉粒和黏粒迁移规律分析

土壤是由不同粒径的黏粒、粉粒和砂粒等颗粒组成,合理的机械组成是土壤良好发育的基础,其影响着植物根系的生长^[10-11]。不同种植年限1:1,1:2,1:5复配土体剖面粉粒和黏粒迁移规律分别见图1—3所示,试验小区0—30 cm土层为砒砂岩与沙复配土壤,相比较于30 cm以下原始沙地土层中粉粒、黏粒含量高。随着玉米种植年限的增加,3种比例复配土壤表层中粉粒和黏粒含量均有向下层土体运移,

使下层土壤中的粉粒和黏粒含量增加。2010—2013 年表层土壤中粉黏粒含量呈下降趋势,30 cm 以下土层其含量增加,2014 年之后表层土壤粉粒、黏粒含量整体呈稳定状态,30 cm 以下土层粉粒、黏粒含量增加速率减缓。其中,1:1 复配土壤 10—20 cm 土层中粉粒含量积累最多,30—40 cm 土层中粉粒含量次之,黏粒含量在 0—15 cm 土层中积累量最多。1:2 复配土壤中 10—20 cm 土层中粉粒和黏粒含量均积累最多。1:5 复配土壤中 0—10 cm 土层中粉粒含量最大,10—20 cm 土层中黏粒含量最大。

随着试验的开展,表层土壤粉粒、黏粒含量向下运移的速率 $1:5>1:1>1:2$,这是由于风沙土中随着砒砂岩含量的增加,粉粒、黏粒含量逐渐增加,1:5 复配土壤中砂粒含量多,属于砂质土壤,颗粒粗糙,组成的粒间大孔隙数量多。2014 年之后 1:2 复

配土壤表层粉粒、黏粒积累速率大于 $1:5,1:1$,并且其向下运移速率小于 $1:1,1:5$,这可能是作物种类、种植年限及混合比例等因素之间的交互作用影响了不同比例复配土壤的理化性状,使得玉米种植模式下 1:2 复配土壤稳定性较好。随着上层土壤中粉粒、黏粒的运移,2014 年之后,30—40 cm 土层粉粒、黏粒含量累积量不断增加,2016—2018 年 1:1, 1:2,1:5 复配土壤粉粒含量平均值分别为 24.09%, 8.75%,53.23%,分别是 2010 年的 3.10 倍、2.89 倍和 6.89 倍,黏粒含量平均值为 3.94%,1.87%,2.49%,与 2010 年相比较分别提高了 4.19 倍、5.04 倍和 1.47 倍,40 cm 以下土层中粉粒含量在 6% 以下、黏粒含量在 2% 以下,仍然很少,没有达到作物生长需求。因此,随着作物种植年限的增加和粉粒、黏粒的向下运移,使得土体剖面的耕层增加至 30—40 cm 土层厚度。

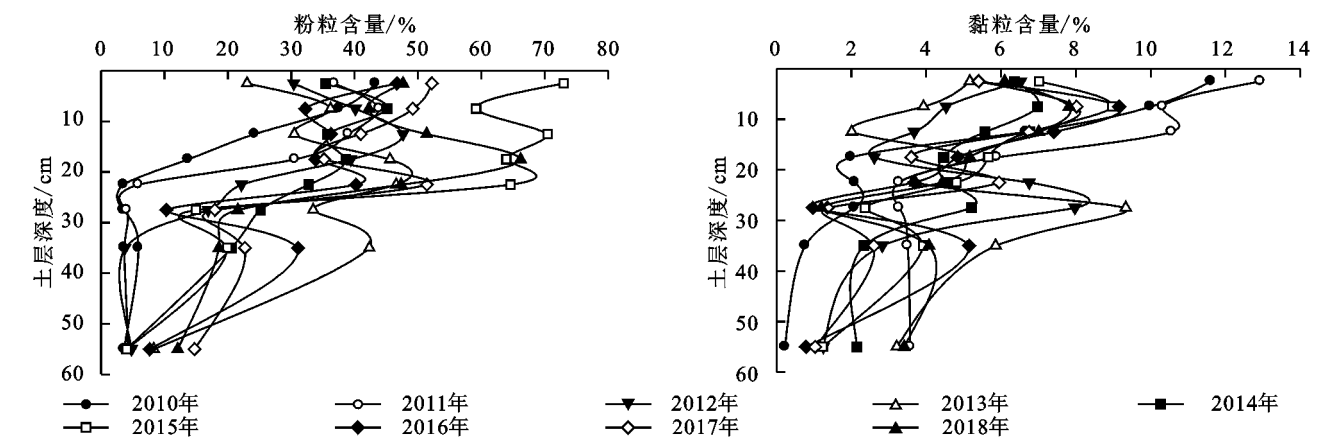


图 1 玉米不同种植年限 1:1 复配土壤黏粒和粉粒迁移规律

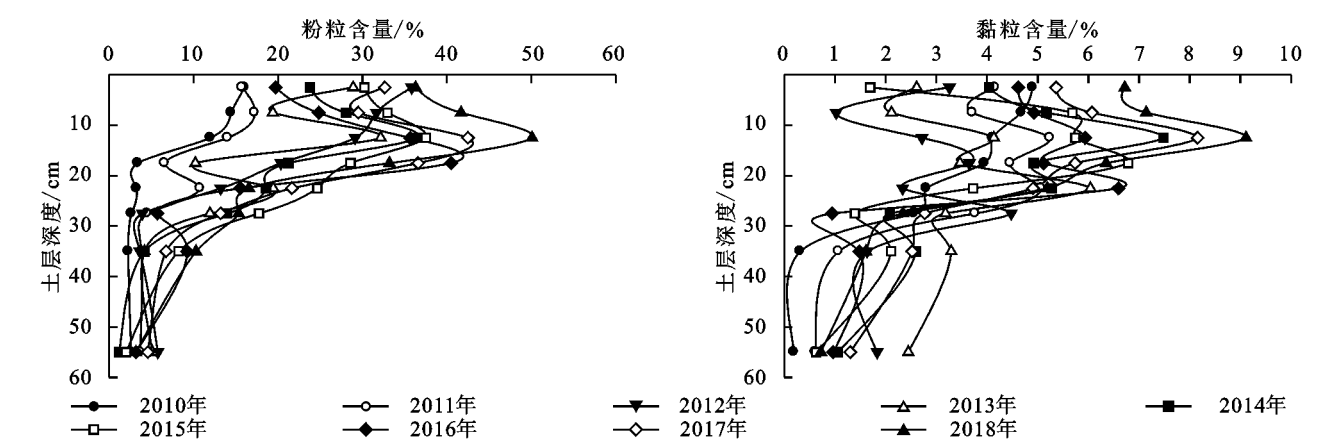


图 2 玉米不同种植年限 1:2 复配土壤黏粒和粉粒迁移规律

2.2 不同比例复配土壤上玉米产量的变化特征

土壤的发育状况及肥力水平高低在一定程度上决定了土地生产力的好坏,而土壤生产力作为土壤质量的重要组成部分,其高低水平衡量了土壤质量的好坏^[12]。土壤肥力、气候条件及人为管理措施等多因素共同作用影响着作物产量,因此作物产量的高低和变化的趋势可以作为土壤可持续性分析的一个重要

衡量指标^[13]。从图 4 可以看出,3 种比例复配土壤随着玉米种植年限的增加产量整体呈现出上升趋势,不同复配比例间产量差异较大,说明混合比例对玉米产量有着重要的影响,即不同比例复配土壤结构和肥力特征不同。与 2010 年相比较,到 2018 年 1:1,1:2, 1:5 复配土壤玉米产量分别提高了 43.9%,105.9%, 58.5%,2015 年之后 3 种比例复配土壤玉米产量增加

速率显著,大小顺序为 1:2>1:5>1:1,尤其是 1:2 复配土壤 2015 年之后产量大于或等于当地高产田玉米产量,1:5 复配土壤玉米产量接近当地高产田产量。这

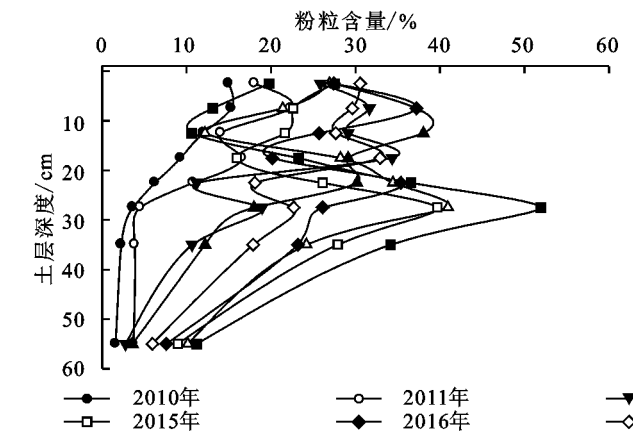


图 3 玉米不同种植年限 1:5 复配土壤黏粒和粉粒迁移规律

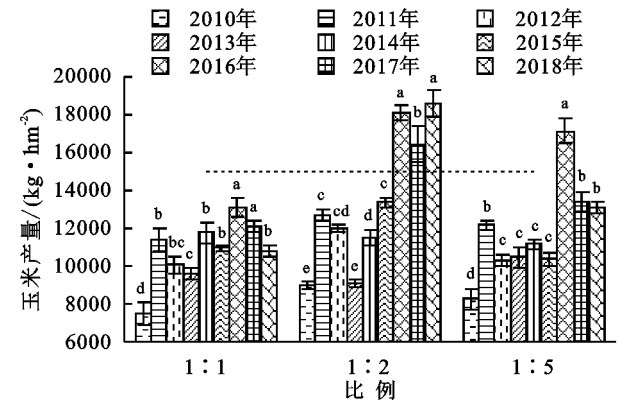


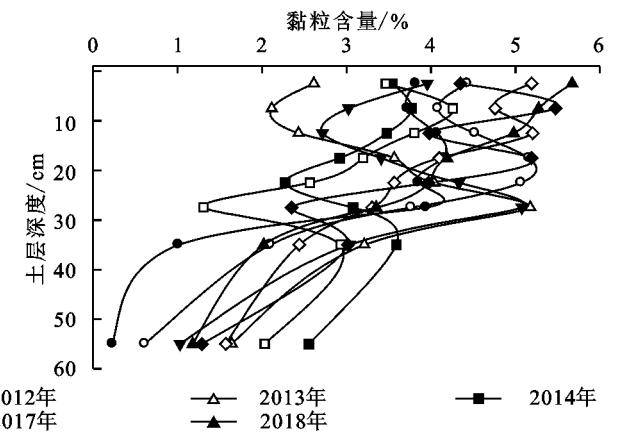
图 4 3 种比例复配土壤上玉米产量随时间的变化

不同比例复配土壤上玉米产量随时间变化的拟合方程见图 5,方程的斜率即为玉米产量年变化速率 [g/(kg·a)]。随着玉米种植季数的增加不同比例复配土壤产量整体呈现出上升的趋势,其中 1:2 复配土壤上玉米产量增加速率极显著($p<0.001$),每年达到 1 249 kg/hm²;其次是 1:5 复配土壤上玉米产量增加速率较显著($p<0.005$),每年为 792.7 kg/hm²;1:1 复配土壤上玉米产量与种植年限相关性较小,每年增加速率为 546.8 kg/hm²。因此,由于复配土壤质地、种植年限、作物生长特性等之间的交互作用,1:2 复配土壤对玉米产量提升更加显著。

2.3 玉米产量可持续性 & 稳定性分析

由表 1 可知,不同比例复配土壤上玉米产量可持续性指数(SYI)不同,1:2 复配土壤能显著提高玉米 SYI 值。不同比例复配土壤上玉米 SYI 值大小顺序为,2010—2014 年:1:5>1:2>1:1;2015—2018 年:1:2>1:5>1:1,两个时间段中 1:2,1:5 复配土壤产量可持续性较好。在 2015 年以后,3 种比例复配土壤 SYI 均大于 0.6,产量可持续性均较好,说明 2015 年之后复配土壤向良好的土壤状态发育,尤其 1:2 复配

是由于 2015 年之后,砒砂岩与沙复配土壤结构及肥力状况达到相对稳定的有机—无机复合状态,并且 1:2 复配土壤产量增加速率最大,产量最高。



土壤 SYI 值高达 0.771,产量可持续性最好。

注: ** 年变化率极显著($p<0.001$), * 年变化率显著($p<0.005$)。

图 5 不同比例复配土壤上玉米产量随时间的拟合方程

不同比例复配土壤上玉米生产的 CV 越小,表示稳定性越高。不同比例复配土壤上玉米产量的 CV 值不同,2010—2018 年 1:1 复配土壤 CV 值较大,1:5 复配土壤 CV 值次之,1:2 复配土壤 CV 值最小,因此 1:2 复配土壤上玉米产量稳定性最高。2015—2018 年玉米平均产量大小顺序为:1:2>1:5>1:1,并且 1:2 复配土壤上玉米多年平均产量超过了 15 000 kg/hm²,与当地高产田产量持平。综上表明,1:2 复配土壤上玉米产量最高,产量稳定性和可持续性最好,说明砒砂岩与沙混合比例为 1:2 时最适合玉米生长。

表 1 不同比例复配土壤上玉米产量可持续性指数和变异系数						
砒砂岩:沙	2010—2014 年(榆丹 9 号)			2015—2018 年(先玉 335)		
	产量平均值/ (kg·hm ⁻²)	CV/%	SYI	产量平均值/ (kg·hm ⁻²)	CV/%	SYI
1:1	10864	25.5	0.526	12493	19.1	0.635
1:2	10956	14.7	0.729	16617	13.2	0.771
1:5	10474	13.2	0.746	13236	18.7	0.646

3 讨论

砒砂岩与沙复配成土,首要是进行风沙土颗粒组

成优化,引入砒砂岩中粉粒、黏粒,改良沙地的不良粒径组成。然而这种新造复配土壤属于非均质土壤,粒径组成状态是否稳定,在利用期间受耕作、灌溉以及其农艺措施作用的影响较大,进而影响土壤结构的发育。高亚军等^[14]研究结果表明,由于土壤颗粒组成在剖面中的垂直分异及其在土体中的含量不同,土壤颗粒组成的变化与黏粒的形成过程就是土壤的发育过程,黏粒丰富的土壤中,胶体含量越多,吸附土壤养分的能力越强。植被演替对土壤结构和质量的变化也具有重要的影响,植被对土壤条件的响应是生物界最常见的自然现象之一^[15]。砒砂岩与沙复配成土技术就是通过重构沙地土体构造和根区土层的颗粒,然而在新造土壤利用过程中,其土层中黏粒、粉粒含量的变化,对土壤的质量演替过程的研究有着重要的作用。研究发现玉米的种植促进了土壤细颗粒和养分在垂直剖面上的分化,使得耕层厚度增加。

土壤颗粒组成在土体剖面中的垂直分布及含量直接影响着土壤的水、肥、气、热等特性^[16],因此,可以说土壤的形成就是黏粒的形成与机械组成的变化^[17-18]。复配土壤上作物种植不仅能有效地阻止沙地细颗粒物质的流失,还能促进细颗粒物质的沉积,增加细颗粒物质含量。2011—2013 年试验区表层(0—30 cm)土层 3 种比例复配土壤粉粒、黏粒含量呈下降趋势,2014 年之后整体呈稳定状态,在 30—40 cm 土层形成了一层相对致密的黏化层,黏化层的形成可有效防止水肥的渗漏,有利于提高复配土土体的保水保肥性。这主要是由于种植初期,新造复配土壤处于发育初期结构不稳定,土壤结构松散,土体空隙较大,具有很强的滑动性,粉粒、黏粒易被雨水冲刷向下层迁移。2014 年之后玉米根系不断产生的胶结物质,根系分泌物对土壤颗粒的黏结,加强了土壤颗粒之间的联结形成土壤微团聚体,从而降低了粉粒、黏粒的向下迁移。同时,表层耕作土壤中枯枝落叶的分解和种植过程中有机肥的施用,使表层土壤质地和养分的改善,土壤稳定性提高,新造复配土壤结构不断向良好的状态发育。

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^[19-21]。为了获得玉米的高产,首先要选择适合玉米生长的土壤。研究发现,2015 年以后,随着土壤结构发育状态相对稳定,3 种比例复配土壤 SYI 较大,CV 值减小,尤其 1:2 复配土壤对玉米增产的效果最优,SYI 值明显高于 1:1,1:5,CV 值小于 1:1,1:5,即产量稳定性和可持续性最好,说明 1:2 复配土壤受耕作管理措施、气象因素及环境条件影响较小,土壤结构发育及肥力水平较高。这主要是由于随着种植年限的增加,玉米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。这与张卫华等^[22]、孙增慧等^[23]研究结果一致,其研究显示玉米种植下砒砂岩和风沙土按 1:2 复配后土壤养分累积和水分的利用效率较好。Dorraj 等^[24]研究显示土壤改良剂对沙质土壤中玉米产量具有显著影响。说明,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。

4 结论

复配土耕种年限和植被生长的综合作用,改善了新造复配土壤粉粒、黏粒含量的空间分布特征,使得土体剖面的耕层增加至 30—40 cm 土层厚度,土壤颗粒级配趋于合理化,提高了土壤结构稳定性。1:2 复配土壤对玉米增产的效果最优,SYI 值最大,CV 值最小,即产量稳定性和可持续性最好。因此,1:2 复配土壤理化性状改良效果最好,使其朝着有利于玉米生长发育并获得高产的方向发展,确定 1:2 复配比例最适合玉米生长,提高了农业适应性,该复配模式可作为研究区砒砂岩改良风沙土复配比例的最佳选择。本研究为促进砒砂岩与沙复配土壤—植被系统的良性循环和稳定性的提高提供理论依据。

参考文献:

- [1] Han J C, Xie J C, Zhang Y. 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.
- [2] 张露,韩霖昌,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,2014,23(4):166-172.
- [3] 柴苗苗,韩霖昌,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,2013,41(10):179-184,192.
- [4] 罗林涛,程杰,王欢元,等.玉米种植模式下砒砂岩与沙复配土氮素淋失特征[J].水土保持学报,2013,27(4):58-66.
- [5] 李娟,韩霖昌,李晓明.砒砂岩与沙复配成土对小麦光合生理和产量的影响[J].麦类作物学报,2014,34(2):203-209.
- [6] 魏彬萌,王益权,李忠徽.烟杆生物炭对砒砂岩与沙复配土壤理化性状及玉米生长的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):219-222.
- [7] 张雅蓉,李渝,刘彦伶,等.长期施肥对黄壤有机碳平衡及玉米产量的影响[J].土壤学报,2016,53(5):179-189.
- [8] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India[J]. Field Crops Research, 2005,93(2/3):264-280.

- [9] 李忠芳,唐政,李继光,等.长期施肥对辽西褐土区土壤有机碳含量和玉米产量的影响[J].土壤与作物,2013,2(4):150-156.
- [10] Ghanbarian B, Daigle H. Fractal dimension of soil fragment mass-size distribution: A critical analysis[J]. Geoderma, 2015,245:98-103.
- [11] Meysam M, Mahmoud S, Mohammad H M, et al. Characterizing spatial variability of soil textural fractions and fractal parameters derived from particle size distributions[J]. Pedosphere, 2019,29(2):224-234.
- [12] 徐明岗,梁国庆,张夫道,等.中国土壤肥力演变[M].北京:中国农业科学技术出版社,2006.
- [13] 左小安,赵学勇,赵哈林.沙地退化植被恢复过程中灌木发育对草本植物和土壤的影响[J].生态环境学报,2009,18(2):643-647.
- [14] 高亚军.陕北农牧交错带土地荒漠化演化机制及土壤质量评价研究[D].陕西省杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [15] 刘勇.黄土高原植被演替过程中植被与土壤养分、水分关系研究进展[J].吉林农业科学,2010,35(5):25-27.
- [16] 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.
- [17] Abbas A, Mohammad-Reza N, Hassan R, et al. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility[J]. Journal of Hydrology, 2011,400(3):305-311.
- [18] 华瑞,徐学选,张少妮,等.不同退耕年限林草地土壤颗粒分形特征研究[J].水土保持学报,2016,30(4):206-209.
- [19] 李忠芳,徐明岗,张会民,等.长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续性特征[J].应用生态学报,2010,21(5):1264-1269.
- [20] 罗倩,张珍明,向准,等.不同种植年限乌王茶产地土壤物理性质及生长特征[J].西南农业学报,2017,30(12):2746-2750.
- [21] 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.
- [22] 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):122-127.
- [23] Sun Z H, Han J C. Effect of soft rock amendment on soil hydraulic parameters and crop performance in Mu Us Sandy Land, China[J]. Field Crops Research, 2018,222:85-93.
- [24] Dorraji S S, Golchin A, Ahmadi S. The effects of hydrophilic polymer and soil salinity on corn growth in sandy and loamy soils[J]. Clean-Soil Air Water, 2015,38(7):584-591.

(上接第274页)

- [12] Sattar M N, Lee J Y, Shin J Y, et al. Probabilistic characteristics of drought propagation from meteorological to hydrological drought in South Korea[J]. Water Resources Management, 2019,33(7):2439-2452.
- [13] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// Proceedings of the 8 th Conference on Applied Climatology,1993,17(22):179-183.
- [14] Vicente-Serrano S M, López-Moreno J I, Beguería S, et al. Accurate computation of a streamflow drought index[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012,17(2):318-332.
- [15] Malik A, Kumar A, Singh R P. Application of heuristic approaches for prediction of hydrological drought using multi-scalar streamflow drought index[J]. Water Resources Management, 2019,33(11):3985-4006.
- [16] 周扬,李宁,吉中会,等.基于 SPI 指数的 1981—2010 年内蒙古地区干旱时空分布特征[J].自然资源学报,2013,28(10):1694-1706.
- [17] Zhou H, Liu Y, Liu Y. An approach to tracking meteorological drought migration[J]. Water Resources Research, 2019,55(4):3266-3284.
- [18] Zhou H, Liu Y. SPI based meteorological drought assessment over a humid basin: Effects of processing schemes[J]. Water, 2016,8(9):373.
- [19] 王东,张勃,安美玲,等.基于 SPEI 的西南地区近 53 a 干旱时空特征分析[J].自然资源学报,2014,29(6):1003-1016.
- [20] 王晓利,张春艳,侯西勇.1961—2017 年环渤海地区气象干旱时空特征及致灾危险性评估[J].生态学报,2019,39(13):4647-4659.
- [21] 李运刚,何娇楠,李雪.基于 SPEI 和 SDI 指数的云南红河流域气象水文干旱演变分析[J].地理科学进展,2016,35(6):758-767.
- [22] Van Loon A F, Laaha G. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics[J]. Journal of hydrology, 2015,526:3-14.
- [23] 李宗发.贵州喀斯特地貌分区[J].贵州地质,2011,28(3):177-181.