

# 砒砂岩与沙复配土壤质地与有机质动态变化特征

张海欧<sup>1,2,3,4</sup>, 郭振<sup>2,3</sup>, 徐艳<sup>2,3,4</sup>, 曹婷婷<sup>2,3,4</sup>, 杨晨曦<sup>2,3</sup>

(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:**为了研究毛乌素沙地砒砂岩与沙混合构成的一种新型复配土壤在长期种植过程中土壤质量发育状况,基于 2010—2018 年不同比例砒砂岩与沙(1:1, 1:2, 1:5)复配土壤的田间定位试验,综合分析了不同比例复配土壤机械组成、颗粒分形特征、有机质的变化特征及之间的关系。结果表明:(1)随着种植年限的增加,3 种比例复配土壤耕层质地向变细和颗粒组成合理的发展方向,土壤颗粒分形维数和有机质含量总体呈增加趋势;(2)1:2 复配土壤粉黏粒含量、分形维数值和有机质含量增加速率均大于 1:1, 1:5;1:2 复配土壤种植 9 年后有机质含量达到最高值( $6.24 \pm 0.30$ ) g/kg,与种植前相比较提高了 12 倍;(3)不同比例复配土壤颗粒分形维数与有机质含量均存在显著正相关关系( $p < 0.05$ ),粉粒和黏粒是研究区沙化土地复配土壤质地改善和有机质提升最关键的两个粒级。综上,随种植年限的增加,复配土向无机—有机胶体复合状态发展,1:2 复配土壤最适合玉米种植,提高了土壤的稳定性和农业适应性。

**关键词:**复配土壤; 种植年限; 质地; 分形维数; 质量变化

中图分类号:S152.3; S153.6<sup>+</sup> 21

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0093-06

## Dynamic Change Characteristics of Texture and Organic Matter Content of Soft Rock and Sand Compound Soil in Mu Us Sandy Land

ZHANG Haiou<sup>1,2,3,4</sup>, GUO Zhen<sup>2,3</sup>, XU Yan<sup>2,3,4</sup>, CAO Tingting<sup>2,3,4</sup>, YANG Chenxi<sup>2,3</sup>

(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:** In order to study the soil quality development status of a new type of mixed composite soil of soft rock and sand in the Mu Us sandy land during the long-term planting process, based on the field positioning test of different proportions of soft rock and sand compound soil (1:1, 1:2, 1:5) from 2010 to 2018, the change characteristics of soil mechanical composition, particle fractal dimension and organic matter content and the relationship between them were comprehensively analyzed. The results show that: with the increase of planting years, the textures of cultivated layer of the three proportion compound soils have become thinner and better; the particles fractal dimension and organic matter content of compound soil generally showed an increasing trend, among which the increase rates of 1:2 compound soil silt and clay content, fractal dimension value and organic matter content were all greater than 1:1 and 1:5; the organic matter content of the 1:2 compound soil reached the highest value ( $6.24 \pm 0.30$  g/kg) after nine years, which was 12 times higher than that before planting; there was a significant positive correlation between the fractal dimension and the organic matter content of compound soil in different proportions ( $p < 0.05$ ), silt and clay are the two most critical grain sizes for the improvement of compound soil texture and organic matter in the study area; the 1:2 ratio compound soil was determined to be most suitable for maize cultivation, as it best developed a composite state of inorganic and organic colloids that improved the soil stability and subsequent agricultural suitability.

**Keywords:** soft rock and sand compound soil; planting years; texture; fractal dimension; quality succession

毛乌素沙地位于鄂尔多斯高原东南部和陕北黄土高原以北,是我国四大沙地之一。国内外关于沙地治理研究主要以防、挡为主,包括植被、工程以及化学措施,如植被恢复、防护林建设、方格沙障、化学固沙剂等<sup>[1-3]</sup>,在沙地开发利用方面主要做法为拉运黄土覆盖法。但该方法在毛乌素沙地治理中很难实行,一方面,黄土土源较远,拉运黄土工程成本太高;另一方面,陕北属于黄土高原沟壑区,大量开采黄土势必会加速水土流失和环境恶化。从资源角度讲,毛乌素沙地主要以砒砂岩和沙相间分布,砒砂岩干时呈固结状,遇水膨胀,保水性好,但透气性差;沙通体无结构,透水性强但保水性差。相关学者<sup>[4-6]</sup>研究发现,砒砂岩与风沙土的性质具有互补性,认为砒砂岩可以作为将沙地修复为耕地的天然材料,创造性地将砒砂岩与沙按一定比例进行混合后形成新的“复配土”,并通过室内试验分析不同比例复配土壤的理化性质,结合施工实际难度,认为砒砂岩与沙体积混合的适宜比例为1:5~1:1适合作物生长。

砒砂岩与风沙土混合而成的新型复配土壤属非均质土壤,物理、化学性质的稳定尚需一定时间,因此,后期农业种植过程中复配土壤的结构和质量能否稳定发育并可持续利用是首先关注的问题。目前,有关复配土壤的组成特性、物理及化学性质等方面研究文献较多<sup>[7-11]</sup>,但几乎都是从室内模拟、盆栽试验和短期的田间试验开展试验研究,对于长时间序列下不同比例复配土壤的质量演替规律和可持续利用方面的系统研究未见报道。本研究利用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,运用王国梁等<sup>[12]</sup>提出的土壤颗粒体积分布方法,系统分析不同比例复配土壤质地、颗粒分形特征和有机质含量的动态变化,探索复配土壤质量变化特征和稳定性的驱动机制,本研究为深入认识复配土的发生发展规律和可持续利用研究提供科学依据。

## 1 试验区概况

长期定位试验小区位于榆林市榆阳区小纪汗乡大纪汗村(109°28′58″—109°30′10″E, 38°27′53″—38°28′23″N),该研究区域在毛乌素沙地的中温带半干旱大陆性季风气候区,其环境条件具有典型的代表性。该地区气温年际变化较大,1月均温-9.5~-12℃,7月均温22~24℃,降水时空分布不均匀,7—9月(特别是8月)占年降水量(250~440 mm)的60%~75%。降水年际变异性较大(湿润年是干旱年的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和马铃薯

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。

## 2 材料与方法

### 2.1 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。种植当地主要经济作物春玉米,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,所有小区均采用当地农民传统的水肥管理措施。试验于每年玉米收获后采用“S”形采样方法<sup>[13]</sup>,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。

### 2.2 颗粒分型维数计算

不同比例复配土壤颗粒分型维数计算选用土壤颗粒体积分形维数计算方法<sup>[12]</sup>,公式如下:

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{V_{(\delta < \bar{d}_i)}}{V_T} \quad (1)$$

$$\lg \frac{V_{(\delta < \bar{d}_i)}}{V_T} = (3-D) \lg \frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \quad (2)$$

式中: $\bar{d}_i$ 为某级粒径平均直径; $V_{(\delta < \bar{d}_i)}$ 为粒径小于 $\bar{d}_i$ 的颗粒体积; $V_T$ 为颗粒总体积, $\bar{d}_{\max}$ 为最大粒级值。

分别以 $\lg \frac{V_{(\delta < \bar{d}_i)}}{V_T}$ 和 $\lg \frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}$ 为纵、横坐标,进行线性回归分析;(3-D)即为直线的斜率,从而可求出土壤颗粒分型维数D值。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同种植年限复配土壤颗粒组成动态变化特征

土壤颗粒组成是土壤的内在性质,对土壤的形成和发展有着决定性影响,土壤中各级颗粒组成比例适当,使土壤具有良好的结构性<sup>[14-15]</sup>。新造砒砂岩与沙复配土壤,作物种植过程中土壤颗粒组成变化特征是复配土壤结构改善的重要指示。

种植年限对复配土壤的颗粒组成的影响非常显著,由图1—3可知,随着复配土壤上玉米种植年限的增加,3种比例复配土壤均呈现出砂粒(0.05~2 mm)

含量下降,黏粒( $<0.002\text{ mm}$ )和粉粒( $0.002\sim0.05\text{ mm}$ )含量增加的规律。1:1复配土壤2010—2018年,砂粒含量减少了36.0%,粉粒和黏粒含量分别增加了149.1%,16.0%,不同种植年限黏粒和粉粒含量均有显著性差异( $p<0.05$ ),黏粒含量最小增幅为2.0%,最大增幅69.8%,土壤质地呈现出从壤砂—砂壤—粉砂壤—壤土的演变。1:2复配土壤2010—2018年,砂粒含量逐渐降低,与2010年相比较,2018年砂粒含量减少了39.7%;粉粒含量呈不断增加趋势,到2018年增加了224.2%;黏粒含量呈先减少后增加的趋势,2018年达到试验年限的最大值,与2010年相比增加了72.1%,耕层质地发生了从壤砂—砂壤—壤土—粉砂壤的转变。1:5复配土壤从2010—2018年,砂粒含量减少了23.5%,粉粒含量增加了165.2%,黏粒含量增加了29.5%,其年际间不稳定,变化较大,最小增幅为1.4%,最大增幅98.8%,耕层质地发生从壤砂—砂壤的转变。

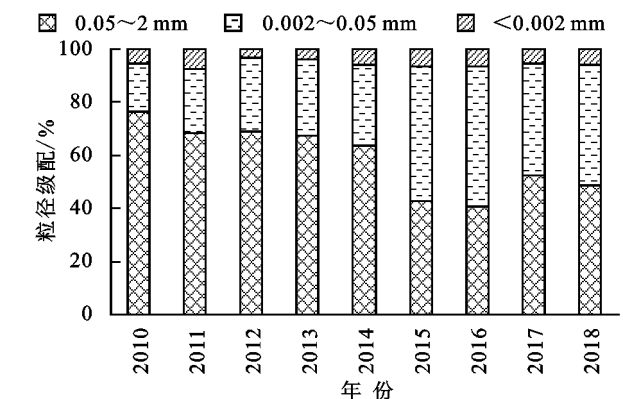


图1 玉米不同种植年限下1:1复配土壤粒径组成分布

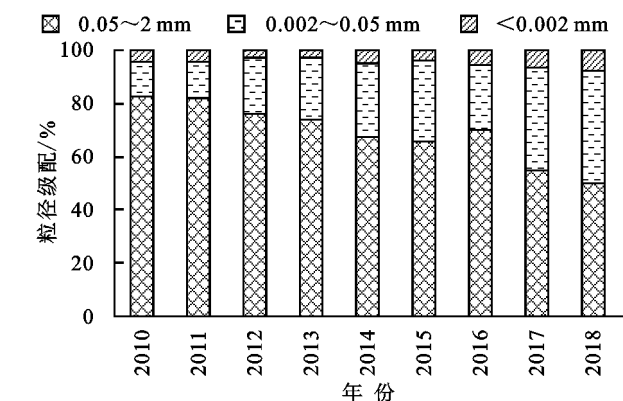


图2 玉米不同种植年限下1:2复配土壤粒径组成分布

### 3.2 不同种植年限复配土壤颗粒分形维数动态变化特征

土壤作为一种由多粒级颗粒组成、有不规则形状自相似结构的多孔介质,具有一定的分形特征,颗粒分形维数是土壤颗粒组成的综合指标<sup>[16-17]</sup>。根据分形维数计算过程,可以推断出土壤质地由粗到细,分形维数D值应由低到高。由图4可知,随着玉米种植年限的增

加,砒砂岩颗粒的逐步风化,粗颗粒递减,细颗粒增加,3种比例复配土壤的黏粒、粉粒含量逐渐增加,砂粒含量逐渐降低,不同比例复配土壤颗粒分形维数整体呈增加趋势。1:2复配土壤颗粒分形维数由2010年的2.50增加至2018年的2.61,提高了4.1%,且不同年际间具有显著性差异( $p<0.05$ )。1:1复配土壤颗粒分形维数2010—2013年年际变化幅度较大,没有明显的变化规律,2014年之后年际间无显著性差异,趋于稳定( $p>0.05$ ),与2010年相比较到2018年提高了0.9%。1:5复配土壤分形维数年际间变幅较大,但整体呈增加趋势,2014年之后呈稳定上升趋势,与2010年相比到2018年分形维数提高了2.1%。

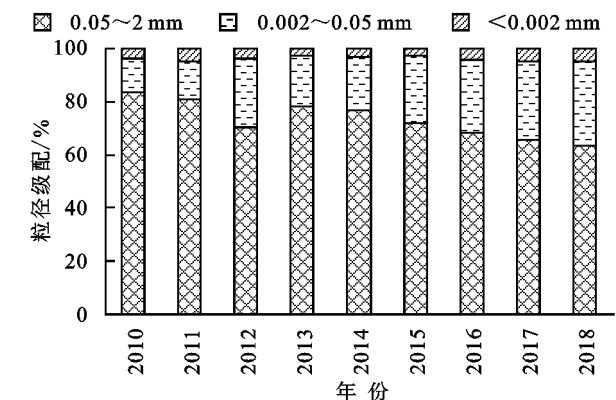


图3 玉米不同种植年限下1:5复配土壤粒径组成分布

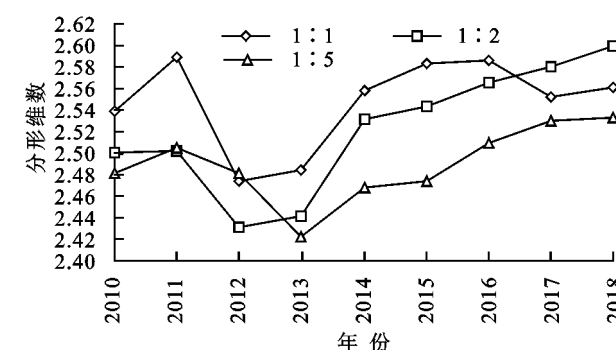


图4 2010—2018年玉米种植模式下1:1,1:2,1:5复配土壤颗粒分形特征

### 3.3 不同种植年限复配土壤有机质含量变化特征

土壤颗粒是有机碳物理保护的物质基础,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<sup>[18]</sup>。不同种植年限0—30 cm耕层砒砂岩与沙体积混合比例为1:1,1:2,1:5复配土壤有机质含量变化特征见图5。1:1,1:2,1:5复配土壤有机质含量随着玉米种植年限的增加总体呈现上升趋势,不同种植年限的土壤有机质含量差异性极显著( $p<0.01$ ),不同复配比例土壤有机质综合比较差异较显著( $p<0.05$ )。1:1复配土壤随着种植年限的增加有机质含量变动幅度较大,但整体呈上升趋势,种植8 a后



(2017 年)达到最高值( $5.17\pm0.17$ ) g/kg,种植 9 a 后,有机质含量与种植前相比较提高了 10 倍。1:2 复配土壤随着种植年限的增加有机质含量呈持续增加趋势,彼此有显著性差异,种植 9 a 后(2018 年)达到最高值( $6.24\pm0.30$ ) g/kg,与种植前相比较提高了 12 倍,增加速率最大。1:5 复配土壤种植 4 a 后(2013 年)有机质含量达到最高值( $5.28\pm0.15$ ) g/kg,其后有所下降,彼此无显著性差异,趋于稳定,种植 9 a 后,有机质含量与种植前相比较提高了 11 倍。

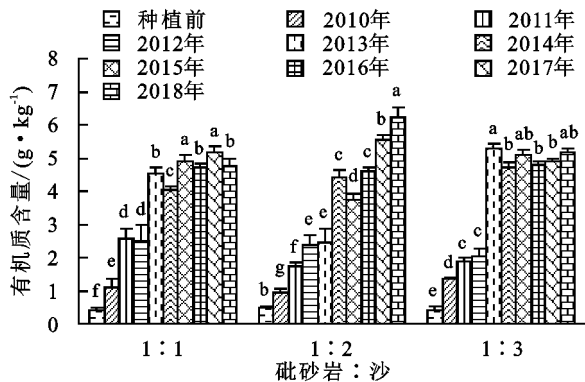


图 5 不同种植年限下 1:1,1:2,1:5 复配土壤有机质含量变化特征

不同比例复配土壤有机质含量随时间的拟合方程见表 1,方程的斜率即为有机质年变化速率。玉米种植 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 1:2 复配土壤有机质含量上升速率显著,每年达到 0.63 g/kg,其次是 1:5 复配土壤有机质含量每年上升速率为 0.55 g/kg,1:1 复配土壤有机质含量上升速率较小,每年为 0.52 g/kg。随着玉米种植年限的增加,1:2 复配土壤机质含量增加速率大于 1:1 与 1:5。

表 1 不同比例复配土壤有机质含量随时间的拟合方程

处理	拟合方程	$R(n=30)$
1:1	$y=0.52x+1.14$	0.9062 *
1:2	$y=0.63x+0.40$	0.9769 **
1:5	$y=0.55x+1.09$	0.8761 **

注:① 拟合方程中  $y$  为土壤有机质含量(g/kg), $x$  为试验年数;② 拟合方程的斜率为有机质含量的年变化速率[g/(kg·a)],相关系数中 \*\* 表示年变化率极显著( $p<0.001$ ),\* 表示年变化率显著( $p<0.005$ ),下表同。

3.4 分形维数值与有机质的关系

1:1,1:2,1:5 复配土壤分形维数与有机质的均呈现极显著正相关关系(表 2),其中 1:2 复配土壤分形维数与有机质的正相关程度最大( $R=0.936$ , $p<0.01$ );其次是 1:5 复配土壤( $R=0.625$ , $p<0.01$ ),1:1 复配土壤分形维数与有机质含量的相关性一般( $R=0.555$ , $p<0.05$ )。综合分型维数与有机质和各粒级含量之间的关系,复配土壤分型维数与粉粒、黏粒和有机质均呈现显著的线性正相关关系,说明了粉

粒和黏粒是研究区沙化土地中土壤质量提升最关键的两个粒级。

表 2 不同比例复配土壤颗粒分型维数与有机质的关系

处理	相关性方程	$R^2$
1:1	$y=13.891x-32.174$	0.3083 *
1:2	$y=20.809x-49.39$	0.8779 **
1:5	$y=18.932x-43.259$	0.3915 *

4 讨论

土壤颗粒组成对沙化土地土壤的发展发育具有决定性的作用,黏粒作为风沙土改良的重要因素一直以来受到众多学者们的关注<sup>[19]</sup>,砒砂岩与沙复配成土核心技术是引入砒砂岩中黏粒和粉粒,移植砒砂岩中的胶体物质,从而改良风沙土的不良质地。罗倩<sup>[20]</sup>、陈玉真<sup>[21]</sup>等研究指出,随着作物种植季数的增加,土壤物理特性呈现出显著的差异,即使在同一时刻和同一区域其特性变化也比较明显。本研究表明,随着复配土种植年限的增加,3 种比例复配土壤均呈现出黏粒和粉粒含量显著上升,1:2 复配土壤增加速率最快,显著高于 1:1,1:5,耕作层趋于细化,更有利于砒砂岩与沙充分混合。这可能是由于复配比例、种植年限及玉米的生长特性等之间的交互作用产生的结果。与邹诚等<sup>[22-23]</sup>研究结果相似,土壤颗粒组成与土壤成土母质和土地利用方式有着密切的关系,其直接决定着土壤结构体的构成。因此,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。

分形维数能够表征土壤颗粒组成,也能反映土壤质地的均一程度<sup>[24-26]</sup>,因此可以很好地表征毛乌素沙地新型复配土壤的组成状况和发育程度。本研究发现,随着复配土壤种植年限的增加,3 种比例复配土壤分形维数值均呈现出整体增加趋势,种植七年后分形维数值大小顺序为:1:1(2.64)>1:2(2.60)>1:5(2.51),分形维数增加速率为 1:2>1:1>1:5,这是由于随着种植年限的增加土壤细颗粒越多,其内部的微小孔隙越多,土壤内部结构越复杂,土壤表面分形维数值越大,与 Behzad<sup>[27]</sup>、缪驰远<sup>[28]</sup>等研究结果一致。而王国梁等<sup>[12]</sup>研究菜地黄泥土时,发现土壤体积分形维数随着种植年限的增加而出现下降趋势,研究结果不一致可能是研究的地区差异和成土母质造成。李德成等<sup>[29]</sup>研究发现,易分化和风化程度高的母质上发育的土壤,其质地较细,相应的颗粒组成分形维数也较大。菜地和沙地的土壤发育程度差别较大,砒砂岩与沙复配土作为沙地治理的一种新型复

配土壤,处于初级发育阶段。

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。随着复配土壤种植年限的增加,1:2 复配土壤分形维数值和有机质含量大于 1:1,1:5,分形维数越高,土壤中细颗粒物质含量越高,土壤中有机质含量越高。这是由于土壤各粒级对植物营养元素的保持能力不同,分形维数越高,土壤中的黏粒含量越丰富,而黏粒的比表面积大,具有很强的粘结性和粘着性,使得养分更易于积累,因此对养分的吸收和固定作用更强。邓廷飞<sup>[23]</sup>, Liu<sup>[30]</sup>,文海燕<sup>[31]</sup>,华瑞<sup>[32]</sup>等研究表明土壤颗粒分形维数随着有机质含量的提高而增加,二者具有正相关关系,与本文研究结果一致。因此,粉粒和黏粒是复配土壤质地改善和有机质提升最关键的两个粒级。

## 5 结 论

毛乌素沙地砒砂岩作为一种沙地改良的天然材料,利用不同体积比的砒砂岩与沙混合构成一种新型复配土壤,通过研究在长期土地利用过程中砒砂岩与沙复配土壤发育过程变化对土壤结构和土壤质量的影响,发现风沙土中添加砒砂岩改变了土壤的自然组成,从而改善了土壤质量。随着复配土上玉米种植年限的增加,1:1,1:2,1:5 三种比例复配土壤整体呈现出从壤砂—砂壤—粉砂壤—壤土的质地演替,质地均向变细变好的方向发展;复配土壤黏粒含量、分形维数值、有机质含量均随试验的开展呈持续增加趋势,其中 1:2 复配土壤的各指标增加速率显著大于 1:1 和 1:5 复配比例,并且后两者各指标年际间波动较大;不同比例复配土壤分型维数与粉粒、黏粒和有机质含量均呈现显著的线性正相关关系,研究发现粉粒和黏粒是研究区沙化土地中土壤质地改善和有机质提升最关键的驱动因素。经过 9 a 种植后复配土向无机、有机胶体复合状态发展,土壤性状呈现出良好的稳定发育趋势,并初步确定 1:2 复配土适合玉米生长,本研究为深入认识毛乌素沙地新造复配土发生发展规律和土壤—植被系统稳定性维持的机理提供科学依据。

### 参考文献:

- [1] Wang N, Xie J C, Han J C, et al. A comprehensive framework on land-water resources development in Mu Us Sandy Land[J]. Land Use Policy, 2014,40:69-73.
- [2] 王愿昌,吴永红,闵德安,等.砒砂岩区水土流失治理措施调研[J].国际沙棘研究与开发,2007,5(1):39-44.
- [3] 王愿昌,吴永红,寇权,等.砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J].中国水土保持科学,2007,5(1):14-18.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Wang N, Xie J C, Han J C. A sand control and development model in sandy land based on mixed experiments of arsenic sandstone and sand: A case study in Mu Us Sandy Land in China [J]. Chinese Geographical Science, 2013,23(6):700-707.
- [7] 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 Res., 2018, 222:85-93.
- [8] Wang H Y, Han J C, Tong W, et al. Analysis of water and nitrogen use efficiency for maize (*Zea mays* L.) grown on soft rock and sand compound soil[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(8): 2553-2560.
- [9] 韩霁昌,李娟,李晓明.砒砂岩与沙复配成土的物理性状及其对冬小麦产量的影响[J].西北农业学报,2013,22(11):15-19.
- [10] 张露,韩霁昌,罗林涛,等.砒砂岩与风沙土复配土壤的持水特性研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(2):207-214.
- [11] 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):58-61,66.
- [12] 王国梁,周生路,赵其国.土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J].土壤学报,2005,42(4):545-550.
- [13] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996.
- [14] 张继义,赵哈林.退化沙质草地恢复过程土壤颗粒组成变化对土壤—植被系统稳定性的影响[J].生态环境学报 2009,18(4):1395-1401.
- [15] 邹诚,徐福利,闫亚丹.黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤机械组成和速效养分影响分析[J].中国农学通报,2018,24(12):424-427.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 贡璐,张海峰,吕光辉,等.塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价[J].*生态学报*, 2011, 31(14):4136-4143.
- [19] 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, 23(4):166-172.
- [20] 罗倩,张珍明,向准,等.不同种植年限鸟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] 陈玉真,王峰,尤志明,等.不同植茶年限茶园土壤的物理性状及渗透性能[J].*山地学报*, 2016, 34(1):38-45.
- [22] 邹诚,徐福利,闫亚丹,黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤机械组成和速效养分影响分析[J].*中国农学通报*, 2008, 24(12):424-427.
- [23] 邓廷飞,刘彦,颜秋晓,等.贵州典型山银花土壤机械组成与养分特性及其关系[J].*水土保持学报*, 2014, 28(5):209-214.
- [24] 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.
- [25] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].*科学通报*, 1993, 38(20):1896-1899.
- [26] Xu G C, Li Z B, Li P. Fractal features of soil particle-size distribution and total soil nitrogen distribution in a typical watershed in the source area of the middle Dan River, China[J]. *Catena*, 2013, 101:17-23.
- [27] Behzad G, Hugh D. Fractal dimension of soil fragment mass-size distribution: A critical analysis[J]. *Geoderma*, 2015, 245/246:98-103.
- [28] 缪驰远,汪亚峰,魏欣,等.黑土表层土壤颗粒的分形特征[J].*应用生态学报*, 2007, 18(9):1987-1993.
- [29] 李德成,张桃林.中国土壤颗粒组成的分形特征研究[J].*土壤与环境*, 2000, 9(4):263-265.
- [30] Liu X, Zhang G C, Heathman G C, et al. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China[J]. *Geoderma*, 2009, 154(1/2):123-130.
- [31] 文海燕,傅华,赵哈林.退化沙质草地开垦和围封过程中的土壤颗粒分形特征[J].*应用生态学报*, 2006, 17(1):55-59.
- [32] 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.

~~~~~

(上接第92页)

# 参考文献:

- [1] 赵国平,史社强,李军保,等.毛乌素沙地采煤塌陷区土壤水分空间变异研究[J].*水土保持学报*, 2017, 31(6):90-93, 219.
- [2] 赵国平,朱建军,张继平,等.神府煤田采煤塌陷引起的生态问题探讨[J].*干旱区资源与环境*, 2017, 31(9):103-107.
- [3] 赵国平,李晖,李旭祥,等.神府煤田风沙区采煤塌陷地表环境动态变化的综合评价[J].*西安交通大学学报*, 2012, 46(5):137-142.
- [4] 赵国平,毕银丽,杨伟,等.神府煤田风沙区采煤塌陷对粒度成分特征的影响[J].*中国沙漠*, 2015, 35(6):1461-1466.
- [5] 何冰,李廷亮,栗丽,等.采煤塌陷区复垦土壤团聚体碳氮分布对施肥的响应[J].*水土保持学报*, 2018, 32(4):184-189, 196.
- [6] 王健,高永,魏江生,等.采煤塌陷对风沙区土壤理化性质影响的研究[J].*水土保持学报*, 2006, 20(5):52-55.
- [7] 赵红梅.采矿塌陷条件下包气带土壤水分分布与动态变化特征研究[D].北京:中国地质科学院, 2006.
- [8] 崔利强,吴波,杨文斌,等.毛乌素沙地东南缘不同植被盖度下土壤水分特征分析[J].*干旱区资源与环境*, 2010, 24(2):177-182.
- [9] 安慧,安钰.毛乌素沙地南缘沙柳灌丛土壤水分及水量平衡[J].*应用生态学报*, 2011, 22(9):2247-2252.
- [10] 孙建华,刘建军,康博文,等.陕北毛乌素沙地土壤水分时空变异规律研究[J].*干旱区农业研究*, 2009, 27(2):244-247.
- [11] 舒培仙,牛东风,李保生,等.毛乌素沙地现代沙丘沙的粒度特征及其意义[J].*中国沙漠*, 2016, 36(1):158-166.
- [12] 尚爱军,卜耀军,艾海舰,等.榆林沙区土壤水分时空格局及动态变化规律研究[J].*水土保持学报*, 2008, 22(4):86-89.