

实验年限对砒砂岩改良风沙土微观结构的影响

罗昔联¹, 汪怡珂^{1,2}, 韩霁昌², 顾兆林¹
(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710049, 西安; 2. 陕西省土地工程建设集团, 710075, 西安)

摘要: 为了厘清植物种植过程对砒砂岩改良风沙土的微观结构的影响,利用扫描电子显微镜 (SEM)扫描土壤团聚体并结合 Sierpinski 分形模型,借助砒砂岩改良土地实验,定量研究了 0 年 (对照组)、3 年、6 年、9 年 4 个实验年限下的砒砂岩改良风沙土的微观结构特征及演变过程。结果表明:随着作物种植年限的增加,在种植第 6 年和第 9 年后的土壤微团聚体出现了较多数量的桥接状垒结、填集状垒结、包膜状垒结,粒径小于 50 μm 颗粒显著增加,颗粒方向及颗粒形状从简单向复杂转变;改良土颗粒的 Sierpinski 分维值在种植 9 年后达到 1.204 8,相比于种植 3 年土壤增加了 9.88%,表明在种植作用下土壤结构得到显著的改良。

关键词: 风沙土;微观结构;图像处理;扫描电镜

中图分类号: TU411.92 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202112020 **文章编号:** 0253-987X(2021)12-0172-08



OSID 码

Influence of Planting Years on Microstructure of Sandy Soil Amended by Soft Rock

LUO Xilian¹, WANG Yike^{1,2}, HAN Jichang², GU Zhaolin¹
(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Xi'an 710075, China)

Abstract: To clarify the influencing mechanism of different planting years on the microstructure of sandy soil amended by soft rock, the evolution processes of soil microstructure under four planting periods of 0 year, 3 years, 6 years and 9 years are quantitatively analyzed in the experimental field by SEM (scanning electron microscope) and Sierpinski fractal model. The results show that a certain number of the soil with bridge-like barriers, filling-like barriers and envelope-like barriers appear in the micro-aggregates of the soil with crops planted for 6 years and 9 years. With the increasing planting years, the soil particles with diameter less than 50 μm significantly increase and the particle orientation and particle shape vary from simple to complex. The Sierpinski distribution fractal dimension reaches 1.204 8 after 9 years planting, an increase of 9.88% over that after 3 years planting. The microstructure of the soil is significantly improved due to the planting effect.

Keywords: sandy soil; microstructure; image processing; scanning electron microscope

我国快速城镇化进程导致耕地面积呈现出日益减少的趋势^[1],有效开发和利用后备耕地资源是确
保耕地红线、提高国家粮食安全的重要策略^[2]。毛乌素沙漠是中国四大沙漠之一,总面积达到 3.98×

10⁶ km²,由于该区域有相对充足光照条件和降水量^[3],因此改造成可耕地潜力巨大。但是,由于毛乌素沙漠的风沙土具有黏土含量低、胶结度差、渗透率高、保水性差等特征,导致土壤沙化侵蚀严重和生态环境脆弱等特征,因而难以直接开展农业种植活动,迫切需要对土壤结构进行改良。

除了风沙土以外,毛乌素沙漠还广泛分布着黏土含量高和保水能力强的砒砂岩,研究表明,将砒砂岩与风沙土壤按一定比例混合,可以有效改变土壤结构并增强持水能力,形成适合作物生长的改良土壤^[4-5]。目前,对于该种改良土的评价工作已经广泛开展,如程杰等开展了改良土固沙机制及固沙效果的场地实验评估^[6],发现改良土可以有效固结表面沙粒,提高土壤含水量,为植被生长创造条件;摄晓燕等研究了不同配比改良土的氮和磷吸附特性,为改良土的植物种植施肥提供依据^[7]。土壤微结构单元及其单元之间的接触方式决定了土壤的物理学特性,利用砒砂岩改良沙漠风沙土本质也是改变土壤微结构。然而,经过改良以后的风沙土的微观结构并不是固定不变的,受植物种植影响很大^[8],现有研究还较少涉及作物种植对于砒砂岩改良沙地微观结构影响的长期评估。

随着扫描电子显微镜(SEM)及分形理论的发展,定量观测和分析土壤微观结构成为研究土壤的重要手段^[9-10]。Bartoli 等最早利用 SEM 分析了风沙土的微观结构,证明了使用分型维数研究沙土微观结构的可行性^[11]。刘梦云等对不同利用方式土壤的团粒结构和微团聚体结构及其分形特征进行分析和研究,认为颗粒数量分布具有良好的分形特性,且分型维数与细颗粒含量及黏粒含量呈正相关^[12]。陶高粱等以 Sierpinski 垫片和 Menger 海绵模型为基础,提出了孔隙体积分形模型、颗粒体积分形模型及孔径或粒径分布分形模型,并通过 SEM 图像进行了验证^[13]。杨建等提出根据描述孔隙结构的分形几何模型,分析松散地层孔隙结构的分形特征^[14]。可见,土壤微观结构中颗粒的数量分布、体积分布及表面积都具有分形特性,而且大多都通过对土壤的微结构特征来解释宏观的力学特性^[15-16]或土壤孔隙水流的渗流特征^[17-18]。关于定量研究砒砂岩添加风沙土的微观结构特征,来解释实验年限对砒砂岩改良风沙土效果影响的研究目前还较少。

本文针对最佳复配比砒砂岩改良风沙土^[19],采集种植 0 年、3 年、6 年、9 年实验种植土壤,利用环境扫描电镜在接近外界环境条件下观测软土微观结

构形态和特征;采用全局阈值分割法、局部阈值分割法进行图像处理并获取微结构参数,基于土体微结构的分形特征,引入分形几何学的相关理论进行非确定结构参数,观察不同实验年限下,砒砂岩改良风沙土的微观结构变化规律。

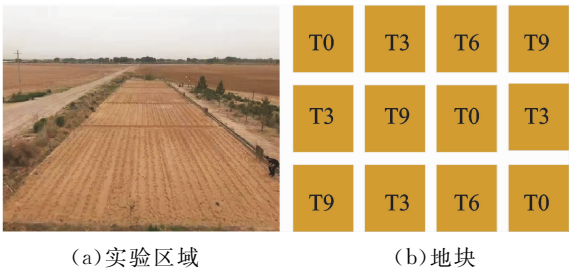
1 实验场地及方法

1.1 实验区概况

田间实验场地位于中国毛乌素沙漠南部榆林市榆阳区大纪汗村江克梁,实验点海拔 1 206~1 215 m,降雨主要集中在秋季,雨热同期,年平均水量在 400~440 mm 之间,年极端降雨量最小为 159.6 mm,最大为 695.4 mm。年平均光照时间在 2 600~3 100 h 之间,日照百分率为 59%~71%之间。场地年平均气温在 6.0~8.5℃之间,温度≥10℃的天数为 168 天,属典型的暖温带和季风气候区。

1.2 实验设计

实验区主要土壤为风沙土,颗粒细,营养含量低,植被易破坏;砒砂岩为风沙土的修复材料,属褐色砒砂岩,实验中将砒砂岩与沙的质量混合比例设置为 1:2,共设计 12 个实验地块,实验年限为 0 年(T0)、3 年(T3)、6 年(T6)和 9 年(T9),每个种植年份为 1 个实验地块,并设两个重复,每个实验地块在长度和宽度方向均为 2 m,如图 1 所示。每个小区表层 30 cm 覆盖体积比 2:1 的风沙土与砒砂岩混合土壤,30 cm 以下为原始的风沙土。砒砂岩、风沙土及复配改良土的主要理化性质如表 1 所示。实验期间各地块采用小麦-玉米轮作模式,其中小麦品种为小堰 22,玉米品种为伟科 702,各处均采用常规耕作和当地传统水肥管理措施。



(a)实验区域 (b)地块

图 1 实验区域地块示意图

Fig. 1 Test field and blocks

1.3 采样与分析

每年玉米收获后,采用 5 点取样法在每个实验点采集 0~30 cm 土壤层中的 5 个土壤样品,并将 5 个样品混合均匀,除去土壤中的根系及小石块,在实验室中风干、研磨、过 2 mm 筛。采用美国 FEI Q45

表 1 土壤主要理化性质

Table 1 Main physical and chemical properties of soil

土壤类型	颗粒配比/%			质量密度/ (g · cm ⁻³)	全氮量/ (g · kg ⁻¹)	全磷量/ (g · kg ⁻¹)	全钾量/ (g · kg ⁻¹)	有机质量/ (g · kg ⁻¹)	pH 值
	砂粒	粉粒	黏粒						
砒砂岩	54.05	38.51	7.44	1.61	0.44	0.50	22.26	2.26	8.26
风沙土	95.00	4.15	0.85	1.52	0.75	0.75	26.51	3.32	8.48
改良土	59.57	34.61	5.82	1.37	59.57	34.61	5.82	1.52	8.41

扫描电子显微镜在环境扫描模式下对准备好的样品进行观测,观测时从 100 倍逐渐放大至3 000倍,逐级拍照,得到不同实验年限下复配土的 SEM 微观形貌图。对 SEM 图像进一步定量分析,能够获得颗粒定向性、颗粒分布、孔隙大小、接触带形态、粒间连通性等微结构信息。

1.4 土壤微观结构特征提取

SEM 图像的定量分析步骤如下:①图像预处理,剔除原图像中明显的凹陷或突起,对曝光度、亮度、对比度和灰度系数校正值进行调整;②图像分割,利用颗粒孔隙及裂隙图像识别与分析系统(PCAS)求取各 SEM 图像的最佳分割阈值,并对图像进行二值化分割处理和调整滤除图像中存在的孤立单点,处理过程如图 2 所示;③微观结构提取,利用 PCAS 系统,进一步提取土壤的颗粒形态、颗粒排列形式和颗粒接触关系等微观特征参数。



黑色区域代表颗粒骨架;彩色区域代表孔隙

图 2 图像处理过程

Fig. 2 Image processing process

1.5 土壤微观特征的分形描述分析

本文进一步采用 Sierpinski 分形模型对土壤微观结构的颗粒形状、表面起伏性等参数进行颗粒分布分维进行综合表征和分析。Sierpinski 分形模型的数学表达式如下

$$D_s = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\ln N}{\ln a} = -K \tag{1}$$

式中: D_s 为 Sierpinski 分形维数,表征颗粒表面复杂度和体积分布复杂度; a 为图像分维网格边长; n 为图像分维网格总数; N 为图像分维中土体结构单元体及孔隙所占格子数; K 为 $\ln a - \ln N$ 拟合函数的斜率。Sierpinski 分形模型的求解步骤为:①选定 3

种不同的 a 值,采用 sandbox 法对前述 1.2 节中二值化图像进行网格剖分(如图 3 所示),分别统计出不同网格剖分下的 n 和 N 值;②绘制 $\ln a - \ln N$ 散点分布图,并采用最小二乘法求出散点拟合直线,获得拟合函数的斜率 K ;③利用式(1)求出土壤微观结构的分形维数。

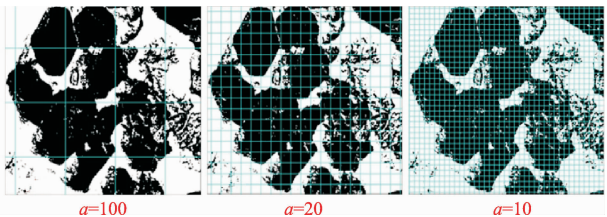


图 3 不同边长网格构建图

Fig. 3 Construction of grid with different edge lengths

2 实验结果

2.1 土壤微结构的 SEM 表现特征

图 4 为不同实验年限下复配土在扫描电镜下分别放大 100 倍、500 倍、1 000 倍、2 000 倍的微观结构图像。观察放大 100 倍图像颗粒分布可以看出,随着实验年限的增加,土壤呈现聚集趋势。在砒砂岩与风沙土充分混合后的初始阶段(0 年),土壤颗粒分散明显,而实验年限为 3 年的复配土较为分散,6 年部分颗粒开始出现聚集现象,种植 9 年后,出现大量聚集,松散单个颗粒明显减少。通过 500 倍图像可以对复配土表面进行较为清晰的观察,对比刚刚混合的种植 0 年复配土,发现种植 3 年后复配土颗粒表面较为光洁,而随着实验年限的增加,土体颗粒表面出现较多的附着物。高倍图像(1 000 和 2 000 倍)显示,种植 3 年的复配土颗粒较分散,颗粒间界线比较分明,胶结物质较少。相比之下,种植 6 年和 9 年之后的复配土颗粒相互接触,连接紧密,孔隙变小,颗粒间胶结物质丰富。在相同的视场范围下,种植 3 年复配土的微团聚体主要以单一状垒结存在,大多数为 200~400 μm 的沙粒,且颗粒表面较为光

滑。砒砂岩与沙复配土 6 年、9 年的微团聚体则出现了一定数量的桥接状垒结、填集状垒结、包膜状垒结。在包膜状垒结表面,片状及块状的细粒矿物相互充填,形成 2~40 μm 直径的孔隙。土壤质量恢复的核心和基础是土壤结构的重建和恢复,而土壤结构作为土壤质量的一个重要方面,可以在很大程度上反映土壤质量水平。在多年的作物种植过程中,灌溉施肥、植物根系分泌物、土壤中生物活动及其产物、腐殖质等增加了土壤有机质含量,使得土壤团聚得更好,土体结构得到很大的改善和提升。

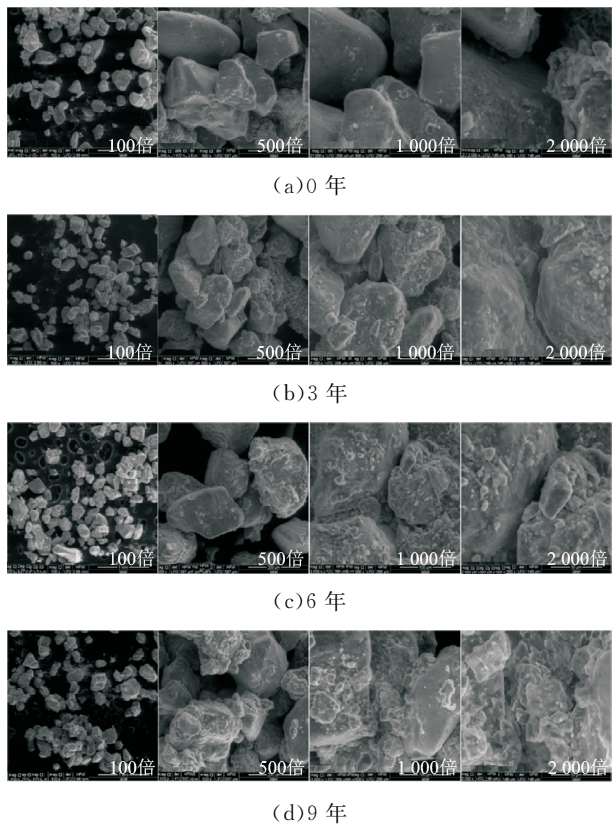


图 4 不同实验年限复配土扫描电镜图像
Fig. 4 SEM images of the soil of different planting years

2.2 土壤微结构颗粒变化分析

土壤颗粒的粒径、形状及颗粒方向性分布特征是决定土壤性质的因素之一,与土壤的工程特性具有密切的关系^[20]。基于扫描电镜图像,进一步利用 PCAS 孔隙图像识别与分析系统分别对扫描电镜图像进行量化分析,采用 SPSS 25 软件包中的相应程序对量化结果进行统计分析,多重比较采用 LSD 法。

2.2.1 颗粒大小分析 表 2 所示为不同实验年限下,复配土的等效直径及粒径百分数分布统计结果。从表中可以看出,随着实验年限的增大,复配土体结

构结构单元体的粒径优势区间并未发生较大改变,仍然为石英颗粒所在粒径区间 100~200 μm ,通过对分形维数进行方差分析发现,实验年限与颗粒分形维数存在显著负相关关系,且不同实验年限间颗粒等效粒径具有显著性差异。随着实验年限的增加,土壤微观颗粒出现大量粒径较小的胶体颗粒,土壤等效粒径逐渐减小,在种植第 6 年和 9 年时,由 3 年时的 109.26 μm 减小分别为 103.32 μm 、101.6 μm 。同样,从不同粒径的分布比例可以看出,种植过程中不同实验年限下砒砂岩改良风沙土效果的差异性。在未进行种植的情况下,等效粒径最大,粒径小于 50 μm 微粒最少,种植 3 年后,等效粒径降低 1.2%,粒径大于 100 μm 的颗粒占据总的质量分数 88.5%;作物种植 6 年,大颗粒数量变化不大,细小颗粒含量增加,特别是小于 50 μm 微粒质量分数增加 8.1%,等效粒径降低;作物种植 9 年,相对于种植 6 年变化不大,100~200 μm 区间为粒径分布的主要区间,细小颗粒继续增加,出现对土壤颗粒的包埋现象,等效粒径继续减小。在作物种植过程中,结构单元体等效粒径呈降低趋势表明,复配土在作物实验年限增加的情况下,土壤团聚结构的微观粒径发生改变,微粒小于 50 μm 占比增加,等效粒径逐年减小,土壤结构发生改变。王楠等研究了黄棕壤不同粒径下黏土矿物的含量,发现粒径越小原生矿物含量越少,黏粒矿物含量则越多^[21],与本研究结果类似。

表 2 不同实验年限下复配土团聚体等效直径及粒径分布

Table 2 Equivalent diameter and particle size distributions of compound soil of different planting years

实验 年限 /a	等效粒径 / μm	粒径分布百分比/%			
		<50	50~100	100~200	>200
		μm	μm	μm	μm
0	110.34±0.18a	0.3	8.1	62.7	28.9
3	109.26±0.31b	1.1	10.5	67.4	21.1
6	103.32±0.24c	9.2	10.5	63.1	17.2
9	101.60±0.11d	10.7	12.1	60.3	15.9

注:字母 a、b、c、d 表示不同种植年限间数据存在显著性差异。

2.2.2 颗粒形状分析 本文采用圆形度和平均形状系数两个参数对颗粒形状进行分析。圆形度为颗粒面积的投影与颗粒周长的比值,圆形度的取值范围在 0~1 之间,数值越大,则颗粒越接近圆形,当圆

形度为 1 时,区域就是一个标准的圆形。平均形状系数为颗粒同面积圆的周长与颗粒周长的比值,同样反映了颗粒的形状信息,颗粒形状越复杂,土壤的圆形度与形状系数越小,微观颗粒孔隙越复杂,土壤渗透能力越低,保水、持水能力越强。

表 3 所示为不同实验年限复配土团聚体单元体形状统计结果。初始状态下,风沙土的圆形度与土壤的平均形状系数各软土样竖直切面结构单元体的平均圆形度为 0.871 4,表明原状风沙土结构单元体形状相对浑圆,这与石英颗粒的矿物晶体形状类似。在添加砒砂岩后,未种植土壤颗粒圆形度及平均形状系数依然较高,通过实验年限为 0 年时,颗粒圆形度及平均形状系数分别为 0.791 6 和 0.628 8。通过方差分析,发现实验年限对于颗粒圆形度和平均形状系数均有显著影响。随着实验年限的增加,与刚添加砒砂岩的土壤相比,土壤颗粒平均形状系数分别在实验年限 3 年、6 年和 9 年时降低 13.77%, 19.51%和 34.35%,平均形状系数分别为 0.542 2、0.506 1和 0.412 8,不同实验年限间平均形状系数具有显著性差异。复配土仍然较为分散,随着实验年限的增加,土壤结构出现粘结,结构孔隙变复杂,土壤微观颗粒粘结,颗粒表面更加粗糙,同时导致圆形度与形状系数降低,当实验年限为 9 年时,土壤颗粒被胶结物质包埋,土壤颗粒变大,微观结构更为复杂,圆形度进一步降低为 0.519 6。

表 3 复配土团聚体结构单元体形状统计结果
Table 3 Statistical unit shapes of aggregates in the compound soil

实验年限/a	圆形度	平均形状系数
0	0.791 6±0.004 4a	0.628 8±0.009 0a
3	0.682 6±0.001 8b	0.542 2±0.012 1b
6	0.637 1±0.001 9c	0.506 1±0.008 9c
9	0.519 6±0.003 0d	0.412 8±0.002 3d

2.2.3 颗粒方向性分析 基于 SEM 图像,以每 10°为一个角度间隔,划分 18 个方位区间,统计颗粒长轴所指方向在每个角度间隔内的数量概率,可以得到土壤颗粒方向分布的玫瑰图如图 5 所示,进一步利用概率熵^[22]定量分析不同实验年限情况下土壤颗粒方向的分布规则,计算过程如下

$$H_m = - \sum_{i=1}^n P_i \log_n P_i \tag{2}$$

式中: N 为方位区数; P_i 为颗粒在某一方位角度内的概率; H_m 为概率熵,表示土体中颗粒规则程度的

参数,取值在 0~1 之间。当概率熵为 0 时,表明所有的结构单元体排列方向均在同一角度间隔,显示出颗粒排列的有序度最高;当概率熵为 1 时,表明单元体完全随机排列,在每一角度间隔中,结构单元体出现的概率相同,完全无序概率熵越大,说明结构单元体排列越混乱,有序性降低。根据式(2)得到不同实验年限土壤颗粒概率熵,见表 4。

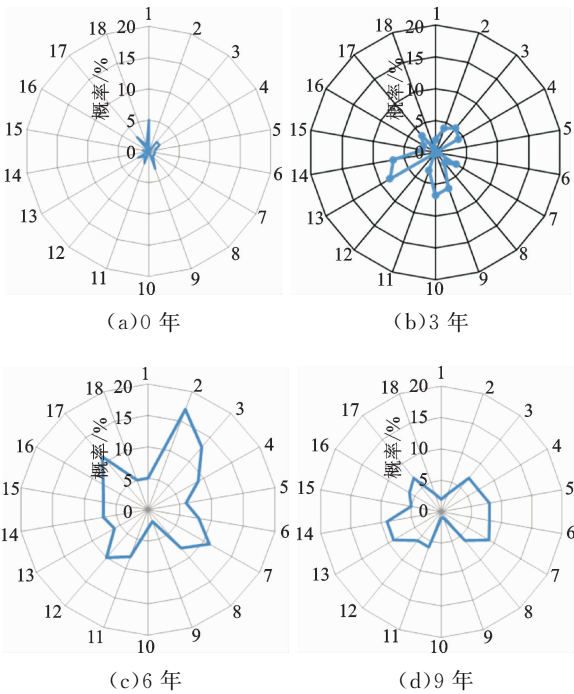


图 5 不同实验年限下复配土颗粒玫瑰图
Fig. 5 Rose diagram of compound soil particles of different planting years

表 4 不同实验年限复配土颗粒概率熵
Table 4 Probability entropy of soil particles of different planting years

实验年限/a	概率熵
0	0.642 7±0.011 7d
3	0.877 4±0.005 4c
6	0.931 6±0.009 2b
9	0.966 5±0.008 1a

从图 5 可以看出,随着实验年限的增加,总的颗粒个数显著增加,且多数颗粒的方向也在逐步发生变化,方向分布由单一方向,转变为种植 6 年情况下的双向,随后在第 9 年,分布方向更加多维,存在 4 个比较突出的方向。土壤颗粒方向性的具体表征为概率熵。在添加砒砂岩后,未种植土壤颗粒概率熵为 0.642 7。实验年限与概率熵具有显著相关关系,

实验年限为 3 年时,土壤颗粒排列杂乱无序,随机分布,没有明显峰值,概率熵从 0 年的 0.642 7 提高到 3 年的 0.877 4,提高了 36.52%;随着实验年限增加,其胶结物质增加,小颗粒显著增多,致使颗粒的定向性更低,排列的最优方向主要集中为 30°~70°和 130°~140°,概率熵提高了 44.95%,为 0.931 6;实验年限为 9 年时,颗粒排列无序,排列方向较多较杂,结构单元体排列的概率熵最大,达到了 0.966 5。多重方差分析结果表明,不同实验年限间概率熵均具有显著性差异。上述结果说明,随着实验年限的增加,颗粒排列的定向性越差,由有序向无序转变,随着小颗粒的增多,颗粒排列形式更为多样。

2.3 不同年限的风沙改良土壤颗粒不确定结构变化定量

图 6 为利用 Sierpinski 分形模型计算得到的 $\ln a-\ln N$ 图。由图可知,不同种植年限的砒砂岩改良的风沙土,微观团聚结构颗粒分形维数在 1.096 5~1.353 7 范围,通过对分形维数进行方差分析,发现实验年限与颗粒分形维数存在显著相关关系。随着实验年限的增加,砒砂岩改良风沙土颗粒分形维数增加,在种植 0 年情况下,微颗粒分形维数为 1.096 5;种植 3 年,颗粒分形维数 1.170 7,相对种植 0 年增加 6.76%;种植 6 年,颗粒分形维数 1.204 8,相对于种植 0 年增加 9.88%;种植 9 年后分形维数增加至 1.352 4,土壤颗粒结构逐步趋于复杂和稳定。多重方差分析结果表明,不同实验年限间颗粒分形维数具有显著性差异。土壤颗粒分形维数由大到小分别为种植 9 年、种植 6 年、种植 3 年、种植 0 年,可知,随着实验年限的增加,土壤颗粒越细粒化,Sierpinski 分形维数逐渐增大,较好的表征土壤结构变好的变化趋势。

表 5 不同实验年限复配土颗粒分形维数

Table 5 Fractional dimension of soil particles of different planting years

实验年限/a	分形维数
0	1.096 5±0.014 1d
3	1.170 7±0.004 1c
6	1.204 8±0.009 7b
9	1.352 4±0.008 1a

3 讨 论

实验年限对于土壤微观结构的影响可能与供试土壤类型相关。朱冰冰等研究表明植被恢复年限的增加土壤水稳性团聚体,分形维数减小^[23]。黄静等研究表明,不同种植年限的风沙土种植荒草、种植黄豆及玉米后,除含水量较高外,抗冲性、全效养分、有机质及速效养分均处于较低水平;不耕种的风沙土各项指标均最差^[24]。魏斌萌等通过将不同比例的砒砂岩添加至风沙土,证明砒砂岩能够有效改良风沙土,且随着实验年限的增加,复配土砂粒含量明显减少,且粉粒和黏粒含量增加^[25]。

种植年限对于土壤颗粒的作用,也与土壤中有有机质含量的增加有关。花东文等研究发现,砒砂岩改良的风沙土种植 1 年土壤养分变化不显著,随着种植年限的增加,土壤肥力显著增加,且种植年限越长,土壤有机质、全氮、全磷、全钾等相关指标增加越显著^[26]。

本文采用砒砂岩与风沙土以 1:2 的质量比例进行混合,采用扫描电子显微镜对于不同实验年限的土壤微观结构进行观察,并量化分析不同实验年限砒砂岩改良的风沙土颗粒的特征。从微观角度对砒砂岩改良风沙土的效果进行了定量分析发现,实验年限与颗粒圆形度、平均形状系数和等效粒径间存在反相关关系,且不同实验年限间的颗粒圆形度、平均形状系数和等效粒径均存在显著性差异;实验年限与颗粒概率熵和分形维数存在正相关关系,不同实验年限间的颗粒概率熵和分形维数存在显著性差异。实验结果与魏斌萌和花东文的实验结果相同,可见砒砂岩对于风沙土微观结构具有很好的促进作用,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。

4 结 论

由于土壤颗粒的复杂性和组成的多样性,单一

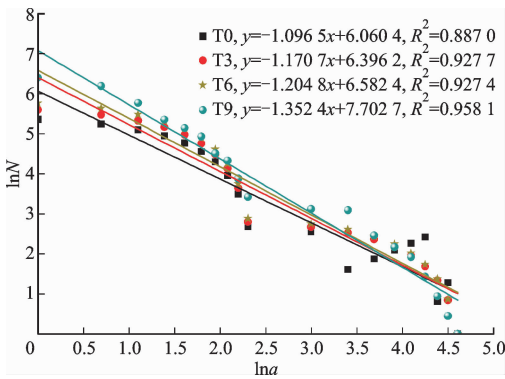


图 6 不同实验年限改良土 $\ln a-\ln N$ 图

Fig. 6 Plot of $\ln a-\ln N$ for amended soil of different planting years

指标无法全面地描述土壤颗粒的结构演变过程。本文通过 SEM 图像分析技术和 Sierpinski 分形模型,全面地定量评估不同实验年限情况下,实验年限对于砒砂岩改良风沙土的作用效果,结果表明实验年限增加对砒砂岩改良风沙土的微观结构具有显著的改善作用,主要表现在以下方面。

(1)复配土中粒径小于 $50\ \mu\text{m}$ 颗粒增加,且土壤等效粒径降低,土壤形状、方向逐渐与风沙土产生区别,土壤形状因子及圆形度降低,方向更加多样。复配土产生更多的颗粒间胶结,微观结构逐渐摆脱风沙土简单的石英晶体颗粒形状。

(2)通过 Sierpinski 分形模型对结构单元体分布进行描述,表明实验年限增加了颗粒结构的复杂程度,改善土壤颗粒分布结构,增加了土壤颗粒的复杂性及土壤结构的稳定性,且结构因子改良程度由大到小顺序为种植 9 年、种植 6 年、种植 3 年,其中种植 9 年情况下,土壤结构指数达到较高水平。所以实验年限的增加,有助于土壤结构的重建和土壤质量的改良。

参考文献:

- [1] 田凤山. 加强国土资源管理保障经济社会可持续发展[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2002, 22(4): 1-6.
TIAN Fengshan. On strengthening management of state land resources to safeguard sustainable development of economy and society [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences), 2002, 22(4): 1-6.
- [2] 周亚莉, 袁晓玲. 现代农业发展水平评价及其金融支持: 以陕西省为例 [J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2010, 30(1): 19-26.
ZHOU Yali, YUAN Xiaoling. Assessment of development level of modern agriculture and related financial support for Shaanxi province [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences), 2010, 30(1): 19-26.
- [3] SUN Zenghui, HAN Jichang, WANG Huanyuan, et al. Use and economic benefit of soft rock as an amendment for sandy soil in Mu Us Sandy Land, China [J]. Arid Land Research and Management, 2021, 35(1): 15-31.
- [4] 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 Research, 2018, 222: 85-93.

- [5] 汪怡珂, 罗昔联, 花东文, 等. 毛乌素沙地复配土壤水分特征曲线模型筛选研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(6): 167-173.
WANG Yike, LUO Xilian, HUA Dongwen, et al. Screening of water characteristic curve model based on different mass ratios of feldspathic sandstone and sand compound soil [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(6): 167-173.
- [6] 程杰, 韩霖昌, 王欢元, 等. 毛乌素沙地砒砂岩固沙机理研究 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 124-127.
CHENG Jie, HAN Jichang, WANG Huanyuan, et al. Study on sand-fixing mechanism by feldspathic sandstone in Mu Us Sandy Land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 124-127.
- [7] 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): 165-173.
SHE Xiaoyan, WEI Xiaorong, WEI Yanchun, et al. Effects of soft rock modified sandy soil on NH_4^+ -N adsorption characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 165-173.
- [8] 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): 34-40.
ZHANG Haiou, XIE Jiancang, NAN Haipeng, et al. Dynamic change characteristics of soil particle composition of soft rock and sand compound soil in Mu Us Sandy Land [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(6): 34-40.
- [9] BRODOWSKI S, AMELUNG W, HAUMAIER L, et al. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy [J]. Geoderma, 2005, 128(1/2): 116-129.
- [10] CHOBBASTI A J, KUTANAEI S S. Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(5): 981-988.
- [11] BARTOLI F, PHILIPPY R, DOIRISSE M, et al. Structure and self-similarity in silty and sandy soils: the fractal approach [J]. Journal of Soil Science, 1991, 42(2): 167-185.
- [12] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰. 不同土地利用方式的土壤团粒及微团粒的分形特征 [J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 47-51.
LIU Mengyun, CHANG Qingrui, QI Yanbing. Fractal features of soil aggregate and microaggregate under

- different land use [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(4): 47-51.
- [13] 陶高粱, 张季如. 表征孔隙及颗粒体积与尺度分布的两类岩土体分形模型 [J]. *科学通报*, 2009, 54(6): 838-846.
- TAO Gaoliang, ZHANG Jiru. Two types of rock and soil fractal models characterizing the volume and scale distribution of pores and particles [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(6): 838-846.
- [14] 杨建, 陈家军, 杨周喜, 等. 松散砂粒孔隙结构、孔隙分形特征及渗透率研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2008, 35(3): 93-98.
- YANG Jian, CHEN Jiajun, YANG Zhouxi, et al. A study of pore structure, pore fractal feature and permeability of unconsolidated sand [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2008, 35(3): 93-98.
- [15] 薛茹, 胡瑞林, 毛灵涛. 软土加固过程中微结构变化的分形研究 [J]. *土木工程学报*, 2006, 39(10): 87-91.
- XUE Ru, HU Ruilin, MAO Lingtao. Fractal study on the microstructure variation of soft soils in consolidation process [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(10): 87-91.
- [16] 张淑娟, 贺秀斌, 鲍玉海, 等. 三峡水库消落带土壤团聚体微结构变化特征 [J]. *山地学报*, 2020, 38(3): 360-370.
- ZHANG Shujuan, HE Xiubin, BAO Yuhai, et al. Change features of soil aggregate microstructure in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Mountain Research*, 2020, 38(3): 360-370.
- [17] 巩学鹏, 唐朝生, 施斌, 等. 黏性土干/湿过程中土结构演化特征研究进展 [J]. *工程地质学报*, 2019, 27(4): 775-793.
- GONG Xuepeng, TANG Chaosheng, SHI Bin, et al. Evolution of soil microstructure during drying and wetting [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(4): 775-793.
- [18] 刘华, 何江涛, 赵茜, 等. 酸污染原状黄土渗透微观特征演变规律试验研究 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(3): 765-772.
- LIU Hua, HE Jiangtao, ZHAO Qian, et al. Experimental study on evolution of micro-permeability characteristics of acid-contaminated undisturbed loess [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(3): 765-772.
- [19] CHENG Jie, HAN Jichang, XIE Jicang, et al. The long-term performance of composited soil with feldspathic sandstone amendment on sandy soil and its effects on corn yield [J]. *Plant Soil and Environment*, 2019, 65(8): 395-400.
- [20] 张世文, 张立平, 袁君, 等. 基于分形理论和地质统计学的表层土壤颗粒大小分布变化特征 [J]. *中国农业科学*, 2014, 47(13): 2591-2601.
- ZHANG Shiwen, ZHANG Liping, YUAN Jun, et al. Characterizing variation of topsoil particle size distribution based on fractal theory and geostatistics [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(13): 2591-2601.
- [21] 王楠, 姚佳佳, 高彦征, 等. 黄棕壤中不同粒径组分的提取分级与表征 [J]. *中国环境科学*, 2012, 32(12): 2253-2260.
- WANG Nan, YAO Jiajia, GAO Yanzheng, et al. Particle size distribution in yellow-brown soil: fractionation and characterization [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(12): 2253-2260.
- [22] 王哲熙. 黄泛区粉砂土改良及微观结构参数变化规律研究 [D]. 开封: 河南大学, 2020: 57-60.
- [23] 朱冰冰, 李鹏, 李占斌, 等. 子午岭林区土地退化/恢复过程中土壤水稳性团聚体的动态变化 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(3): 124-128, 134.
- ZHU Bingbing, LI Peng, LI Zhanbin, et al. Dynamics of water stable aggregate in land degradation/restoration process of Zi wuling forest farm [J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2008, 36(3): 124-128, 134.
- [24] 黄静, 吴祥云, 闫晗. 不同土地利用方式对风沙土理化性质的影响 [J]. *环境化学*, 2013, 32(11): 2090-2098.
- HUANG Jing, WU Xiangyun, YAN Han. Effects of different land use patterns on physico-chemical properties of aeolian sandy soil [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(11): 2090-2098.
- [25] 魏彬萌, 赵宣. 添加砒砂岩对风沙土性质的改良及时间效应 [J]. *水土保持研究*, 2017, 24(6): 16-21.
- WEI Binmeng, ZHAO Xuan. Effect of addition of feldspathic sandstone on improvement of aeolian sand soil quality and the time effect [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(6): 16-21.
- [26] 花东文, 李娟, 王欢元. 土地整治年限对风沙土区土壤养分的影响 [J]. *西部大开发(土地开发工程研究)*, 2018, 3(12): 40-44.
- HUA Dongwen, LI Juan, WANG Huanyuan. Effect of land consolidation history on soil quality of sand soil region [J]. *Land Development and Engineering Research*, 2018, 3(12): 40-44.

(编辑 杜秀杰)