

不同配比下复配土的土壤颗粒组成、 分形维数与质地变化特征

程杰^{1,2,3,4}, 王欢元^{2,3,4}, 解建仓¹, 孟婷婷^{2,3,4}, 石磊^{2,3,4}

(1.西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048; 2.陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075; 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 710000; 4.陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 西安 710075)

摘要:为探讨砒砂岩与沙复配成土后土壤颗粒及质地变化,采用不同比例的砒砂岩与沙(1:1,1:2,1:5)复配成土进行了小区试验。对种植 N 年的砒砂岩与沙混合后的复配土颗粒特征及质地变化进行了分析。结果表明:(1)1:1 复配土中粉粒(0.002~0.05 mm)含量较高,占 49.37%,1:2,1:5 复配土主要是砂粒(0.05~2 mm),含量分别为 52.74%,75.55%。(2)复配土颗粒体积分形维数表现为 $1:1 > 1:2 > 1:5 > 0:1$;(3)土壤体积分形维数和黏粒体积含量呈显著的正相关关系,而与粉粒和砂粒的体积含量相关性较小;(4)在风沙土中添加不同比例的砒砂岩后,砂土(0:1)质地逐步发生从砂土—壤砂土(1:2,1:5)—砂壤土(1:1)—粉砂壤(1:1)的转变。结论表明:土壤颗粒越细粒,土壤颗粒体积分形维数越高,可很好地表征沙地质地结构变化;随着种植年限的增加,1:1 复配土地质地变化最为显著。砒砂岩中的黏粉粒改善了风沙土结构,表明砒砂岩可作为改良风沙土的材料。

关键词:粒径;土壤颗粒体积分形维数;质地

中图分类号:S155

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0030-05

Particle Composition, Fractal Dimension and Texture Change Characteristics of Compound Soil Under Different Ratios

CHENG Jie^{1,2,3,4}, WANG Huanyuan^{2,3,4}, XIE Jiancang¹, MENG Tingting^{2,3,4}, SHI Lei^{2,3,4}

(1.Institute of Water Resources and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 3.Key Laboratory of Degraded and Unutilized Land Remediation Engineering, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710000, China; 4.Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to investigate the changes of soil particles and texture after the sandstone and sand were incorporated into soil, different ratios of soft rock and sandy soil (1:1, 1:2, 1:5) were used to form soils for plot experiment. The particle characteristics and texture changes of the soft rock and sandy soil-compounded soils with several years of plant growth were analyzed. The results showed that: (1) the silt content of the compound soil of 1:1 (0.002~0.05 mm) was higher, accounting for 49.37%, compound soils of 1:2 and 1:5 were mainly composed of sand (0.05~2 mm), the contents was 52.74% and 75.55%, respectively; (2) the fractal dimension of compound soil particles decreased in the order $1:1 > 1:2 > 1:5 > 0:1$; (3) there was a significant positive correlation between soil volume fractal dimension and clay volume content, correlations of soil volume fractal dimension with the volume content of silt and sand were weak; (4) while adding different proportions of soft rock in the sandy soil, the texture of sand (0:1) gradually changes from sand loamy soil (1:2, 1:5) to sand loam soil (1:1) and silty soil (1:1). The conclusions of the study indicate that the finer the grain size of the soil is, the higher the fractal dimension of the soil particle volume is, which can well characterize the structural change of the soil texture of structure of sandy land. The texture change of compounded soil (1:1) was the most significant. The clay and silt particles in sand-

收稿日期:2019-04-20

修回日期:2019-05-20

资助项目:自然资源部公益性行业科研专项项目“毛乌素沙地土地综合整治技术研究及示范应用”(201411008)

第一作者:程杰(1986—),女,重庆万州人,工程师,博士研究生,主要从事水资源系统工程、土地整理复垦、土地工程和项目管理等相关研究工作。E-mail:568761241@qq.com

通信作者:解建仓(1963—),男,陕西眉县人,教授,博士生导师,主要从事水资源及水利信息化研究。E-mail:jcxie@mail.xaut.edu

stone improves the structure of aeolian sandy soil, which indicates that sandstone could be used as the material for improving aeolian sandy soil.

Keywords: particle size; soil particle volume fractal dimension; texture

毛乌素沙地是我国 4 大沙地之一,面积 3.98 万 km^2 [1],该区光照条件充足,降水量相对丰沛,具有巨大的耕地挖掘潜力[2],但区内土地风蚀沙化严重,生态环境脆弱。尤其是该区分布着约 1.67 万 km^2 的砒砂岩,“无水坚硬如泥,遇水松散”,极易发生侵蚀,被称为“地球生态癌症”[3]。为探索和开发毛乌素沙地与砒砂岩的综合治理,国内外学者在砒砂岩与沙的相互特性及复配成土上开展了大量研究,发现砒砂岩矿物组成丰富[4],其黏粒含量高,具有较高的持水能力,而沙土黏粒含量少,胶结程度低,结构性差,具有高渗透性,持水能力差,砒砂岩与沙在构成土壤机械组成与性质上表现出互补性,将二者按照一定比例复配可形成新的土壤(简称:复配土),可增强风沙土的持水能力[5],利于作物生长[6-7]。

土壤是一种由大小不一和形状各异的颗粒及孔隙组成的多孔介质,这些颗粒的大小、组合比例及排列状况直接影响着土壤的结构、生产力等,并具有明显的分形特征[8-9]。利用分形理论可描述颗粒组成等物理结构特征[10],已有研究表明,通过土壤颗粒分形维数可反映出土壤结构、属性、肥力及土壤退化等。对于风沙土而言,砂粒含量高,而沙地改良的有效方法是增加黏粉粒含量,以提高抗蚀性,改变颗粒组成从而改变砂土质地[11]。因此,复配土的颗粒变化及分形特征可较好地反映复配土的结构状态,然而,目前关于应用土壤颗粒分形维数探讨砒砂岩与沙复配土的颗粒特征研究尚未见报道,因此,本文分析砒砂岩改良风沙土土壤颗粒分形维数变化特征,旨在进一步了解不同复配土土壤特性及结构变化,为砒砂岩与

沙复配成土技术,在毛乌素沙地乃至全世界同类地区进行生态整治提供理论与技术支持。

1 试验区概况与方法

1.1 试验区概况

试验小区设在陕西地建土地工程技术研究院富平中试基地($108^{\circ}57'—109^{\circ}26'E$, $34^{\circ}42'—35^{\circ}6'N$),海拔 375.8~1 420.7 m,半干旱大陆性气候,年平均降水量 527.2 mm (1960—1995 年),年内降雨分布极不均匀,多集中在 7—9 月,占全年降雨量的 49%,其他季节较干旱。年总辐射量 5 187.4 MJ/m^2 ,年平均日照时数约 2 389.6 h,年均气温为 13.1 $^{\circ}\text{C}$,降水年际变率大,年降水变异系数(CV)达 21.2%。该区自然条件基本上满足小麦、玉米、棉花等作物的生长需求[12]。

1.2 试验设计

试验处理设计为砒砂岩与沙的混合体积比例分别为 1:1, 1:2, 1:5, 每个处理 3 次重复,共计 9 个试验小区,每个小区面积为 2 m \times 2 m。小区排列顺序采用随机排列方法,均在表层 30 cm(耕作层)覆盖不同比例的复配土,30 cm 以下为当地土壤。添加的砒砂岩处理过筛小于 4 cm,确保砒砂岩与沙按比例均匀混合,砒砂岩与沙均拉运于毛乌素沙地榆林市榆阳区大纪汗村。小区采用小麦—玉米轮作模式,其中小麦品种为小堰 22,玉米品种为伟科 702。2010 年 6 月—2018 年 10 月,各处理均采用常规耕作和当地传统水肥管理措施,施肥为有机肥。不同复配比例的复配土及原始风沙土的主要理化性质见表 1。

表 1 土壤主要理化性质

砒砂岩: 风沙土	机械组成/%			质地 (美国制)	容重含量/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	全氮含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全钾含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机质含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
	砂粒	粉粒	黏粒						
0:1	95.00	4.15	0.85	砂土	1.61	0.75	0.75	26.51	3.32
1:1	54.05	38.51	7.44	砂壤土	1.37	0.44	0.50	22.26	2.26
1:2	59.57	34.61	5.82	砂壤土	1.52	0.54	0.55	23.67	2.61
1:5	75.97	20.42	3.61	壤砂土	1.56	0.65	0.65	25.09	2.97

1.3 测试方法

每年于作物种植前以及收获后采集土壤样品。每个试验小区按照“S”形 5 点取样法采集 0—30 cm 耕层土样。除去粗根及小石块,将土样自然条件下风干。采用四分法(对角线法)分土,然后所有风干土壤过 2.0 mm 筛子。用马尔文激光粒度分析仪(Mastersizer 2000)分别测定其颗粒组成,每种土样重复 3 次。依据美国农业部制土壤质地三角图确定质地。

1.4 颗粒分形维数计算

土壤颗粒分形维数通常可分为质量分形维数和体积分形维数。土壤颗粒质量分形维数在计算时需要假设不同粒级的土壤具有相同的密度,存在着一定的不合理性。随着激光衍射技术的深入研究和应用,可准确获得土壤颗粒体积分布的大小和数量,因此本文采用 Tyler 等[13]提出的体积分形模型计算土壤颗粒体积分形维数来表示土壤颗粒分形维数,公式为:

$$\frac{V(d < d_i)}{V_t} = \left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)^{3-D_v}$$

式中: d 为粒径; d_i 为粒径分区中的第 i 级粒级, 其值一般为该粒级区间上下限的算术平均值; d_{\max} 为所有土壤颗粒中的最大粒径, 本研究中 $d_{\max} = 2000$; V 为粒径小于 d_i 的土壤颗粒累积体积; V_t 为全部土壤颗粒总体积。

计算步骤为: 在各分级区间, 计算 d_i 的算术平均值及累积体积, 画出对数图, 拟合的直线斜率为 $3 - D_v$, 根据斜率从而求出土壤颗粒体积分形维数 D_v 值。

2 结果与分析

2.1 不同配比下土壤粒级组成

依据中国制分级标准(1987年)对土壤粒径进行分级: 细黏粒(<0.001 mm), 粗黏粒($0.001 \sim 0.002$ mm), 细粉粒($0.002 \sim 0.005$ mm), 中粉粒($0.01 \sim 0.005$ mm), 粗粉粒($0.01 \sim 0.05$ mm), 细砂粒($0.05 \sim 0.25$ mm), 粗砂粒($0.25 \sim 1$ mm)。砒砂岩与沙按不同比例复配后土壤颗粒粒径分布见图 1。1:1 复配土的中粉粒($0.01 \sim 0.005$ mm)含量最高, 体积分数为 26.82%, 次之为粗砂粒($0.01 \sim 0.05$ mm)25.55%, 最低为细黏粒(<0.001 mm)5.13%; 1:2 复配土中细砂粒($0.05 \sim 0.25$ mm)最高为 38.65%, 次之为粗粉粒($0.01 \sim 0.05$ mm)21.30%, 最低为细黏粒(<0.001 mm)3.94%; 1:5 复配土的中粗砂粒($0.25 \sim 1$ mm)体积高达 55.48%, 并从粗砂粒到细黏粒依次递减, 细黏粒(<0.001 mm)含量仅为 2.40%。从复配土黏粒(<0.002 mm)、粉粒($0.05 \sim 0.002$ m)、砂粒

($1 \sim 0.05$ mm)的累积粒径来看, 黏粒(<0.002 mm)和粉粒($0.05 \sim 0.002$ m)的累积粒径含量均表现为 $1:1 > 1:2 > 1:5$, 砂粒($1 \sim 0.05$ mm)的累积粒径含量表现为 $1:5 > 1:2 > 1:1$, 表明复配土中砒砂岩含量越高, 颗粒粒径越细。

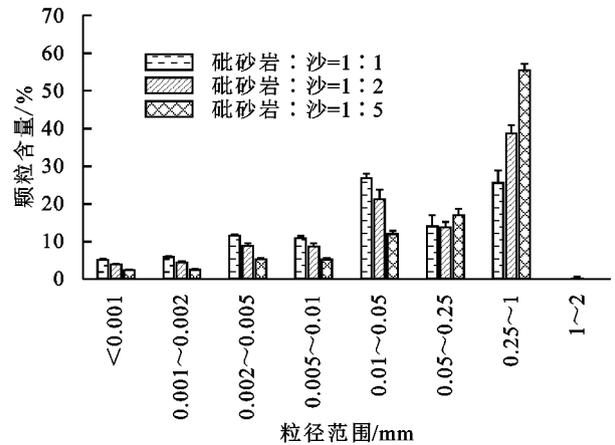


图 1 复配土颗粒粒径分布

2.2 不同配比下土壤颗粒分形维数变化

用最小二乘法对复配土粒径分布的对数图中回归曲线进行拟合(表 2), 由表 2 可知, 不同复配比例的拟合方程决定系数(R^2)均高于 0.8, 最大值达到 1, 平均值均在 0.9 以上, 说明拟合方程效果极好, 达到了显著和极显著水平。从同一复配比土壤颗粒体积分形维数来看, 土壤颗粒分形维数变化差异不大, 变异系数均低于 0.5, 说明样品的颗粒粒径组成较为稳定。从不同复配比的土壤颗粒体积分形维数来看, 土壤颗粒分形维数表现为 $1:1 > 1:2 > 1:5 > 0:1$ 。

表 2 不同配比下土壤颗粒分形维数及拟合方程决定系数

复配比例 (砒砂岩:风沙土)	样品数	土壤颗粒分形维数					决定系数(R^2)		
		最小值	最大值	均值	标准差	变异系数	最小值	最大值	均值
0:1	18	2.23	2.53	2.39	0.10	0.04	0.96	1.00	0.98
1:1	18	2.40	2.63	2.54	0.08	0.03	0.81	1.00	0.94
1:2	18	2.28	2.57	2.49	0.11	0.04	0.88	1.00	0.97
1:5	18	2.26	2.55	2.47	0.11	0.04	0.90	1.00	0.97

2.3 土壤颗粒分形维数与土壤粒级组成的关系

由土壤颗粒分形维数计算公式可知, 土壤颗粒分形维数与土壤各粒级粒径的累积量密切相关, 按美国制土壤粒径分级标准, 将土壤粒级分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒($0.05 \sim 0.002$ m)、砂粒($1 \sim 0.05$ mm), 对各粒级体积百分比与土壤颗粒分形维数进行回归分析(图 2-4)。

土壤颗粒分形与黏粒体积百分含量直接呈显著的对数关系(图 2), $p = 0.001^{**}$, 决定系数($R^2 = 0.9982$)较高。表现为随着黏粒含量的增加, 分形维数显著增加。复配土粉粒相互之间呈显著相关, $p = 0.001^{**}$, 但拟合方程的 R^2 (0.089 8) 较小, 说明土壤颗粒分形与粉粒质量百分含量直接的相关性很小(图

3)。由土壤颗粒分形与砂粒体积百分含量的拟合与粉粒体百分含量拟合类似, $p = 0.002^{**}$, 说明复配土砂粒体积百分含量显著相关, 但砂粒的拟合方程 R^2 (0.030 2) 更小, 说明土壤颗粒分形维数与砂粒体积百分含量相关性更小(图 4)。

2.4 不同配比下复配土质地变化

质地是土壤中大小各异的颗粒组合状况, 是土壤结构体形成的基础, 与土壤通气、保水、保肥性及耕作难易程度有着密切的关系。不同配比下砒砂岩改良风沙土质地变化见图 5。随着种植年限的增加, 风沙土结构体中赋存的关键粒级含量(黏粒和粉粒)逐渐提高, 在种植 6 a 内, 1:1, 1:2, 1:5 黏粒平均含量分别

为(4.60±2.15)%,(3.34±1.62)%,(3.08±1.40)%,较沙地而言,1:1黏粒含量提高了62.13%,1:2,1:5也提高了40%以上;1:1,1:2,1:5粉粒平均含量分别为(31.14±13.72)%,(21.72±7.38)%,(19.80±6.20)%,较沙地而言,不同配比下的粉粒含量均提高了70%以上,其中1:1粉粒含量提高了81.93%。

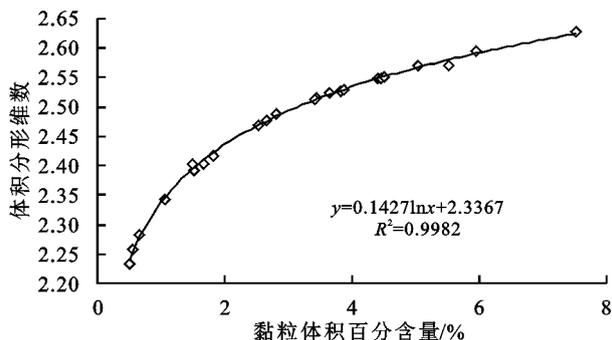


图 2 黏粒含量对土壤颗粒体积分形维数的影响

从不同种植年限下各复配土质地变化来看,在风沙土中添加砒砂岩后,风沙土的质地得到了显著改变,并与添加砒砂岩的比例有关,1:1复配土发生了从砂土—砂壤土—粉砂壤的转变。1:2,1:5中粉粒含量虽随着种植年限的增加而增加,但1:5质地

仍为壤砂,1:2在种植4a后由壤砂变为砂壤。沙地(0:1)的质地并未随着种植年限的增加而改变。

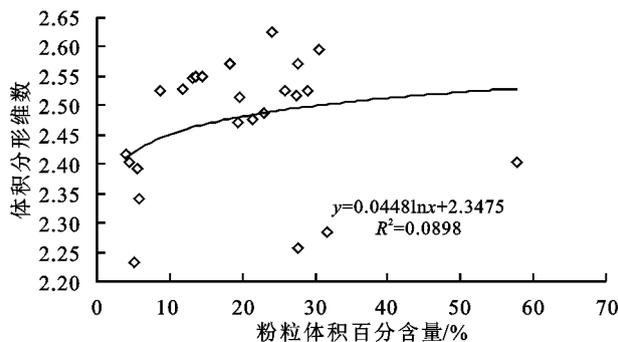


图 3 粉粒含量对土壤颗粒体积分形维数的影响

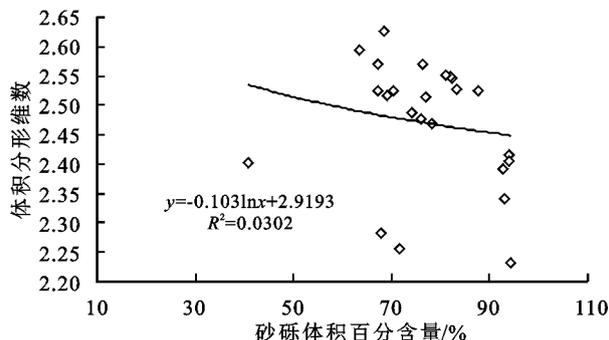


图 4 砂粒含量对土壤颗粒体积分形维数的影响

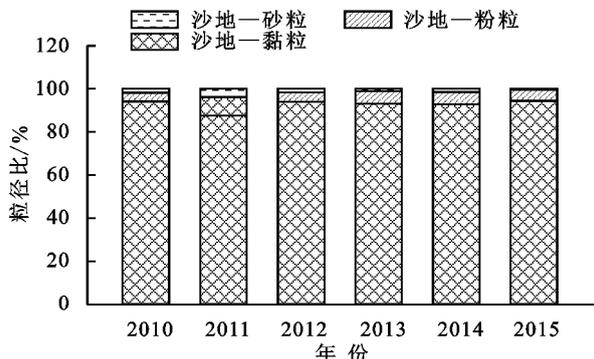
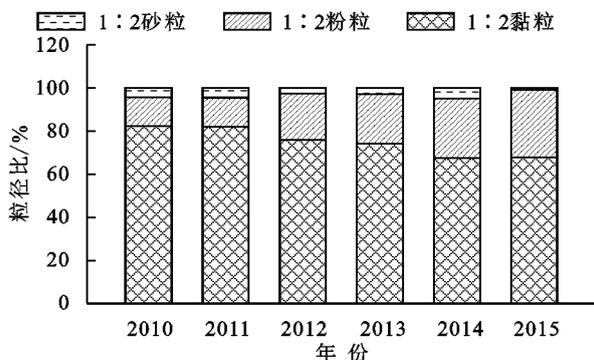
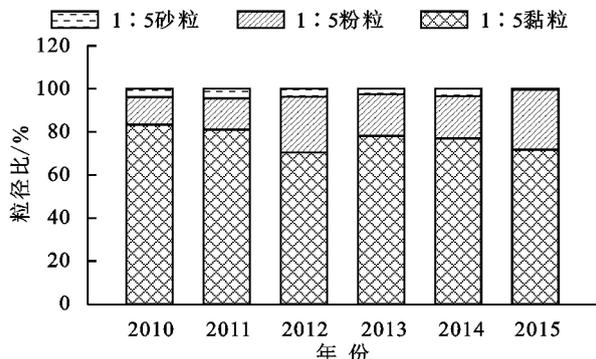
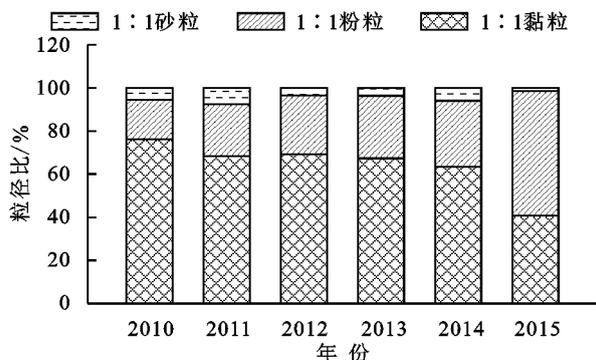


图 5 不同配比下砒砂岩改良风沙土质地变化

3 讨论

3.1 土壤颗粒组成与分形维数的关系

从颗粒组成来看,砒砂岩混合比例越高,复配土中的黏粉粒含量越高;此外,1:1复配土土壤颗粒主要集中在粉粒段(0.002~0.05 mm),粉粒含量占49.37%,而

1:2,1:5复配土土壤颗粒主要集中在砂粒段(0.05~2 mm),含量分别为52.74%,75.55%。这可能是由于砒砂岩黏粒含量高达10.3%~30.3%^[14],而沙土90%为砂粒,且颗粒孔隙大,当砒砂岩与风沙土混合后,砒砂岩的黏粒填充到沙土孔隙中,因此砒砂岩混合越多,复配土中的黏粒、粉粒含量越高。

从土壤颗粒体积分形维数来看,分形维数表现为 $1:1>1:2>1:5$,这是由于砒砂岩在风沙土中的含量越高,黏粉粒含量就越高,土壤颗粒就越细粒化,分形维数越高,表征土壤结构逐渐变好的变化趋势。陈小红等^[15]在研究沙漠化的逆转过程时发现,随着沙漠化程度的减小,土壤颗粒分形维数逐渐变大,说明砂粒含量越小,分形维数越大,与本研究结果一致。罗雅曦等在研究腾格里沙漠草方格固沙林地土壤颗粒组成及分形维数的关系时也得到了一致的研究结果。

从土壤粒级与颗粒体积分形维数拟合来看,土壤体积分形维数和土壤黏粒体积含量呈显著的正相关关系,而与粉粒和砂粒的体积含量相关性较小(图4),这与王国梁等^[17]研究土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用结果一致。杨金玲等^[11]在对比土壤颗粒粒径分布重量分形维数和体积分形维数也发现,体积质量分形维数与黏粒关系更加密切。

3.2 不同种植年限下复配土粒级与质地的关系

复配土中粉粒含量基本随着种植年限的增加而改变,尤其是 $1:1$ 复配土中粉粒含量明显增加,质地也随之改变,总的来说质地是一个变化较为缓慢的过程。这可能是由于随着种植年限的增加,有机肥不断施入,作物根系分泌物增加,土体中微生物种类变多,代谢产物也随之增加^[18-19],促进了复配土颗粒的优化,但粒径的改变需要达到一定数量后才能引起质地的改变。

4 结论

(1) 砒砂岩与风沙土混合后,明显提高风沙土中的黏粉粒含量,复配土中的黏粉粒含量均表现为 $1:1>1:2>1:5$, $1:1$ 复配土中粉粒(0.002~0.05 mm)含量达到49.37%, $1:2,1:5$ 复配土仍以砂粒(0.05~2 mm)为主,含量分别为52.74%,75.55%。砒砂岩可以显著改变风沙土的质地,砂土(0:1)质地发生从砂土—壤砂土(1:2,1:5)—砂壤土(1:1)—粉砂壤(1:1)的转变。建议通过长期的小区、大田试验,进一步研究砒砂岩与风沙土混合后的土体稳定性,以提出砒砂岩与风沙土的最佳配比,改良毛乌素沙地或是全世界同类地区。

(2) 砒砂岩复配比例越高,土壤颗粒越细粒,即土壤颗粒体积分形维数越高, D_v 介于2.23~2.63,表现为 $1:1>1:2>1:5>0:1$ 。土壤体积分形维数与黏粒含量正相关,主要由黏粒含量决定,而与粉粒和砂粒含量相关性较小。

土壤颗粒体积分形维数 D_v 能较好地表征砒砂岩与沙复配成土的土壤质地结构,建议继续深入研究土壤颗粒分形维数与复配土养分间的定量关系。

参考文献:

[1] 闫峰,吴波,王艳.2000—2011年毛乌素沙地植被生长状

况时空变化特征[J].地理科学,2013,33(5):602-608.

- [2] 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.
- [3] 孙增慧,韩霖昌,毛忠安,等.砒砂岩改良风沙土对作物产量影响的RZWQM2模型模拟[J].农业机械学报,2018,49(7):235-243.
- [4] Bazhenov M L, Chauvin A, Audibert M, et al, Permian and Triassic paleomagnetism of the southwestern Tien Shan: timing and mode of tectonic rotations[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1993,118(1/4):195-212.
- [5] 摄晓燕,张兴昌,魏孝荣.适量砒砂岩改良风沙土的吸水性和保水特性[J].农业工程学报,2014,30(14):115-123.
- [6] 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.
- [7] 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(8):87-94.
- [8] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(4):987-996.
- [9] Neuman, Shlomo P. Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media[J]. Water Resources Research, 1990,26(8):1749-1758.
- [10] 谢贤健,韩光中.不同巨桉人工林土壤分形特征及抗蚀性分析[J].土壤,2014,46(4):725-731.
- [11] 杨金玲,李德成,张甘霖,等.土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J].土壤学报,2008,45(3):413-419.
- [12] 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.
- [13] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992,56(2):362-369.
- [14] 孙绪博,彭飏,孙婴婴.毛乌素沙地砒砂岩矿物组成研究[J].土地开发工程研究,2018,12(3):29-34.
- [15] 陈小红,段争虎,谭明亮,等.沙漠化逆转过程中土壤颗粒分形维数的变化特征:以宁夏盐池县为例[J].干旱区研究,2010,27(2):297-302.
- [16] 罗雅曦,刘任涛,张静,等.腾格里沙漠草方格固沙林地土壤颗粒组成、分形维数及其对土壤性质的影响[J].应用生态学报,2019,30(2):525-535.
- [17] 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.
- [18] 叶协锋,李志鹏,于晓娜,等.培肥措施对烟田土壤团聚体及土壤碳库的影响[J].土壤通报,2018,49(2):385-391.
- [19] 李倩,马琨,冶秀香,杨金娟,等.不同培肥方式对土壤有机碳与微生物群落结构的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(12):1866-1875.