

DOI: 10.5846/stxb201911142414

王东丽, 刘阳, 郭莹莹, 谢伟, 郭建军, 汤国水, 赵晓亮, 连昭, 于百和. 半干旱矿区排土场苜蓿恢复过程中土壤颗粒分形的演变特征. 生态学报, 2020, 40(13): 4585-4593.

Wang D L, Liu Y, Guo Y Y, Xie W, Guo J J, Tang G S, Zhao X L, Lian Z, Yu B H. The fractal characteristics of soil particles during the restoration of *Medicago Sativa* in a semi-arid mining dump. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4585-4593.

半干旱矿区排土场苜蓿恢复过程中土壤颗粒分形的演变特征

王东丽^{1,*}, 刘 阳¹, 郭莹莹¹, 谢 伟², 郭建军², 汤国水³, 赵晓亮¹, 连 昭¹, 于百和²

1 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 阜新 123000

2 神东天隆集团有限责任公司生态研究院, 鄂尔多斯 017000

3 辽宁工程技术大学矿业学院, 阜新 123000

摘要: 种植苜蓿恢复模式在半干旱矿区植被恢复中占重要地位。为掌握其恢复过程中土壤颗粒分形的演变特征, 选择恢复年限分别为 2 a、4 a、6 a 和 10 a (M2、M4、M6 和 M10) 的苜蓿种植地为研究对象, 通过野外分层采样与室内测定, 依据颗粒体积分形理论, 研究了排土场苜蓿恢复过程中土壤颗粒分形的演变特征及与土壤特性的关系。结果表明: 研究区土壤各粒径含量以砂粒为主, 粉粒次之, 粘粒最少; 随着苜蓿恢复过程, 粘粒与粉粒含量整体表现为先增加后下降的趋势, 且在 M4 阶段达到最佳, 砂粒反之。土壤分形维数变化在 2.09—2.57, 在苜蓿恢复过程中先增大后减小, 在 M4 阶段达到最大。土壤分形维数与粘粒、粉粒具有极显著正相关性 ($P < 0.01$), 与砂粒具有极显著负相关性 ($P < 0.01$); 土壤分形维数与电导率呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与 pH 值和速效钾含量呈显著负相关关系 ($P < 0.05$), 与碱解氮含量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。在半干旱矿区排土场采用苜蓿恢复模式, 可用土壤分形维数表征土壤特性, 应重视恢复年限的调控, 适时进行适宜的利用与改造, 确保矿区生态恢复的可持续性。

关键词: 半干旱矿区; 排土场; 苜蓿恢复; 颗粒组成; 分形维数

The fractal characteristics of soil particles during the restoration of *Medicago Sativa* in a semi-arid mining dump

WANG Dongli^{1,*}, LIU Yang¹, GUO Yingying¹, XIE Wei², GUO Jianjun², TANG Guoshui³, ZHAO Xiaoliang¹, LIAN Zhao¹, YU Baihe²

1 College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

2 Ecological Research Institute, Shendongtianlong Group Corporation Ltd. Ordos 017000, China

3 School Of Mines, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

Abstract: The ecological environment of semi-arid mining area is fragile with the severe site conditions, so it is difficult for the ecological reconstruction and vegetation restoration. *Medicago Sativa*, as an important restoration plant, not only has strong resistance to stress, but also is useful to improve soil structure and nutrients. Thus, restoration model of planting *M. Sativa* plays an important role in vegetation restoration in semi-arid mining areas. To assess the effects of planting time on soil improvement, the evolution of soil particles fractal characteristics were studied by using methods of field stratified

基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金计划项目; 内蒙古自治区科技计划项目 (201701024); 辽宁省自然资源科技创新项目 (2019)

收稿日期: 2019-11-14; **修订日期:** 2020-05-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: starhome0522@163.com

sampling and indoor measuring. Planting fields of *M. Sativa* with 2, 4, 6 and 10 years (M2, M4, M6 and M10) were selected as the research objects, while the new dump without planting and that with natural restoration were chosen as control treatment. Based on the particle size of fractal theory, the soil particles fractal characteristics of different planting years and its relationship with soil properties were measured and analyzed. The results showed that the content of soil particle size in the study dump was mainly sand, followed by silt and least clay. Compared with the new dump without planting and that with natural restoration, the content of clay and silt particles as a whole showed a trend of first increasing and then decreasing as the recovery of planting *M. Sativa* processed, and reached the optimal level at M4 stage, while sand particles showed the opposite trend. The vertical profile of soil particle size varied in different models. The soil particle size of the new dump with natural restoration tended to be clay and silt particles on 0—10 cm soil, while that of M2 and M4 stage tended to clay and silt particles on 20—60 cm soil. The fractal dimension of soil varied from 2.09 to 2.57, first increasing and then decreasing during the recovery process of planting *M. Sativa*, and reaching the maximum at M4 stage. The fractal dimension of soil had extreme significantly positive correlation with clay and silt ($P < 0.01$), and extreme significantly negative correlation with sand ($P < 0.01$). The fractal dimension of soil was extreme significantly negative correlated with conductivity ($P < 0.01$), significantly negative correlated with pH value and rapidly available potassium content ($P < 0.05$), and significantly correlated positive with available nitrogen content ($P < 0.05$). The soil fractal dimension can be used to determine the soil characteristics in the semi-arid mining dump. To sum up, the soil and vegetation population of planting *M. Sativas* will degrade after some restoration time, so it is necessary to pay attention to regulation of restoration time of planting *M. Sativas*. It is suggested that appropriate utilization and transformation should be carried out timely to ensure the sustainability of ecological restoration of mining abandon land in semi-arid region.

Key Words: semi-arid mining areas; dump; recovery of *M. Sativa*; particle composition; fractal dimension

半干旱矿区生态环境脆弱,立地条件恶劣,生态重建与植被恢复困难。苜蓿作为主要的生态恢复物种,具有较强的适生性,其庞大的根系不仅能够改良土壤孔隙结构,其根系分泌物、代谢物还可增加土壤有机质,改善土壤团粒结构^[1]。另外,苜蓿作为豆科植物,具有很强的根瘤固氮作用,能够增加土壤碳氮养分水平,而且苜蓿作为绿肥,还可为土壤改良提供充足的有机质来源^[2-3]。目前,苜蓿成为我国北方半干旱矿区生态重建中的先锋种与优势种,在矿区植被恢复中占据重要地位,对区域的脆弱生态环境修复、土壤结构改善、土壤肥力提高起着极为重要的作用^[4]。然而,苜蓿在恶劣生境下寿命缩短,限制其改良土壤效应,其在条件严苛的矿区的演变规律亟需明确。

土壤是由形状与大小各异的土壤颗粒组成的多孔介质,作为土壤结构体的基本单元,土壤颗粒在一定程度上决定了土壤的结构和性质,并间接影响了土壤的水分特性、肥力状况等理化性质^[5-6]。Tyler^[7]、杨培岭^[8]等提出土壤颗粒粒径分布的质量分形计算公式,吴承祯等^[9]研究表明分形维数可以很好地反映土壤的肥力特征。随着激光衍射技术的发展和应用,土壤颗粒体积分布特征更容易且精确得到,王国梁等^[10]在前人的公式和模型的基础上,采用土壤颗粒体积分形维数的概念,被越来越多的学者应用于土壤分形特征的研究中。大量研究表明土壤颗粒的分形特征与土壤理化特性具有一定的关系,对矿区生态环境具有一定的指示作用^[11-13]。目前针对矿区土壤分形特征的研究主要侧重不同区域、不同废弃地类型或植被类型下土壤颗粒分形特征的研究,以及土壤分形维数与土壤类型、水分、养分状况、土壤机械组成、土壤侵蚀等关系^[14-17]。王金满等^[18]研究表明半干旱黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒组成具有明显的多重分形特征,但对于广泛种植苜蓿地随植被恢复过程的相关研究未见报道。

因此本研究针对半干旱露天矿排土场不同恢复年限的苜蓿草地,分析种植苜蓿恢复过程中土壤颗粒分形特征及与土壤特性的关系,探讨矿区排土场苜蓿恢复模式效益,进而为半干旱矿区排土场生态重建实践提供科学指导。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本研究区为武家塔露天矿(39°15′16″—39°17′50″N,110°05′55″—110°10′48″E),地处鄂尔多斯高原腹地,为黄土高原和毛乌素沙地两大地貌单元之间的过渡带,地形特征为西北高、东南低,基本呈一斜坡状,属于半干旱半沙漠的高原大陆性气候,年平均降水量370—410 mm,多集中在6—9月,且多以暴雨的形式出现。冬季严寒,夏季炎热干燥,春季多风,全年少雨,温差较大(-27.9—36.6℃),年平均气温为5.5—8.1℃,无霜期152—169 d。研究区区域性土壤类型为黄土和风沙土,并且零星分布着草甸土和栗钙土型沙土。

研究区主要植被类型为温带草原植被,优势植被为耐寒耐旱的旱生小叶灌木、半灌木,主要为沙柳(*Salix cheilophila*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)等。武家塔4#排土场复垦深度1 m左右,平台上采取种植刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、沙柳(*Salix cheilophila*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)和苜蓿(*M. sativa*)牧草等10余种植被恢复模式,完成复垦面积200多公顷,其中苜蓿种植面积占50%以上。

1.2 样地选择

选择武家塔矿区4#排土场平台人工种植年限分别为2 a、4 a、6 a和10 a苜蓿地为研究对象,同时为了比较人工种植苜蓿恢复与天然恢复的差别,以新排土与天然撂荒地为对照,各样地覆土来源一致,且覆土工艺均为逐层覆压,总厚度为1 m,具体样地信息见表1。

表1 样地的基本信息

Table 1 The basic information of sample sites

序号 Serial number	样地编号 Plot number	植被恢复模式 Vegetation restoration model	恢复年限/a Restoration year	植被群落优势种 Dominant species of vegetation community
1	XPT	新排土	—	—
2	LHD	撂荒地	2	猪毛菜,灰绿藜,沙蓬 <i>Salsola collina</i> , <i>Chenopodium glaucum</i> , <i>Agriophyllum squarrosum</i>
3	M2	苜蓿地-2	2	苜蓿,猪毛菜,阿尔泰狗娃花 <i>M. sativa</i> , <i>S. collina</i> , <i>Heteropappus altaicus</i>
4	M4	苜蓿地-4	4	苜蓿,猪毛菜,阿尔泰狗娃花 <i>M. sativa</i> , <i>S. collina</i> , <i>H. altaicus</i>
5	M6	苜蓿地-6	6	苜蓿,灰绿藜,狗尾草 <i>M. sativa</i> , <i>C. glaucum</i> , <i>Setaria viridis</i>
6	M10	苜蓿地-10	10	苜蓿,糙隐子草,猪毛蒿 <i>M. sativa</i> , <i>Cleistogenes squarrosa</i> , <i>Artemisia scoparia</i>

1.3 样品采集

2017年8月进行土壤样品的采集。在所选择样地内,随机选取3个样点,在每个样点附近采取多点混合采集法分层采集,一般设置6—10个点。采集土样时需先用工具将其植被枯枝落叶层去掉,按照0—5、5—10、10—20、20—40、40—60 cm分层进行取样,每个采集点对应土层的土样混合为1个样品,再将土样带回到实验室。

1.4 土壤颗粒组成及土壤理化性质指标的测定

筛分法:将土样分别置于套筛(孔径依次为2.00、1.00、0.50、0.25、0.10 mm)顶部,底层安放底盒,顶部盖筛盖,用振荡式机械筛分仪,在最大运动频率300次/min准确振荡2 min后,从上部依次取筛,得到2.00—1.00、1.00—0.50、0.50—0.25、0.25—0.10 mm的土壤,分别收集称量。

取通过直径0.10 mm筛孔样品大约3 g放入小烧杯中,依次加入适量的蒸馏水与双氧水,放在电炉上加热并且不断搅拌,直至再无气泡产生,从而去除土样中有机质,再用六偏磷酸钠来浸泡24 h使土粒之间分散。

处理后的土样再用 LS—POP(6) 激光粒度仪来测定土壤粒径,其所测粒径为 0.0002—0.50 mm 之间,并可借助仪器附带软件中的分级功能,得到土壤的任意两粒径之间体积百分含量。

土壤理化性质测定采用常规测定方法^[19]。土壤 pH 用 PHS—P 型酸度计测定;有机质用重铬酸钾—外加热容量法测定;速效钾用火焰光度法;测定全磷和速效磷用钼锑抗比色法测定;全氮用半微量开氏法消煮,全自动定氮仪测定;碱解氮用碱解扩散法测定;电导率用浸提法测定;含水量用烘干法测定。

1.5 数据分析处理

根据 LS—POP(6) 激光粒度仪测得的土壤粒径体积分布数据,采用王国梁等提出的土壤颗粒体积分形维数计算方法^[10],具体计算公式如下:

$$\left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{V(\delta < \bar{d}_i)}{VT} \quad (1)$$

$$\lg\left\{\frac{V(\delta < \bar{d}_i)}{VT}\right\} = (3 - D)\lg\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}} \quad (2)$$

式中, \bar{d}_i 为某级粒径平均直径; $V(\delta < \bar{d}_i)$ 表示粒径小于 \bar{d}_i 的颗粒体积; VT 为颗粒总体积, d_{\max} 为最大粒径值; D 为土壤颗粒分形维数。

运用 Excel 2018 进行数据的整理,运用 SPSS 20.0 进行回归性分析,采用 Sigmaplot 10.0 进行制图。

2 结果与分析

2.1 排土场不同苜蓿恢复过程中土壤颗粒的组成特征

本研究采用美国制土壤粒径分级方法,即粘粒 (<0.002 mm)、粉粒 (0.002—0.05 mm) 和砂粒 (0.05—2.00 mm)。由图 1 中可以看出不同恢复模式下粘粒含量所占的比例最少;在新排土、撂荒地、M2、M4 恢复模式下,粉粒含量所占比例最高,砂粒次之;在 M6、M10 恢复模式下,砂粒含量所占比例最高,其次是粉粒;可见研究区土壤以粉粒与砂粒为主,粘粒极少,且随着苜蓿恢复过程,土壤由以粉粒为主向以砂粒为主变化,即呈现出沙化趋势。相对于新排土、撂荒草地土壤各粒径组成变化不显著 ($P>0.05$),而不同年限苜蓿恢复模式土壤各粒径组成存在不同程度的变化。其中,粘粒在 M2 与 M4 阶段显著高于其它恢复模式下,且在 M4 阶段达到最高值,随后显著下降 ($P<0.05$);而砂粒在 M4 阶段最低,随后显著上升 ($P<0.05$),主要与其群落在 4 a 之后开始衰退及导致的土壤退化有关。可见在研究区苜蓿恢复一定时间内能够显著促进土壤粘粒化,随着恢复进程土壤显著沙化。

不同苜蓿恢复模式下土壤粒径组成在土壤垂直剖面变化各异。如图 2 所示,撂荒地土壤在表层 0—10 cm,较新排土呈现由砂粒向粉粒转化;在 M2 与 M4 阶段,土壤各粒径组成在土壤剖面上变化幅度较大,在 20—60 cm 粘粒和粉粒呈现增加趋势,而砂粒呈现下降趋势;在 M6 阶段,粘粒与粉粒均下降,而砂粒明显增大,且在各土层间变化幅度较小;而达到 M10 阶段,粉粒有所增加,而砂粒表现为减少。

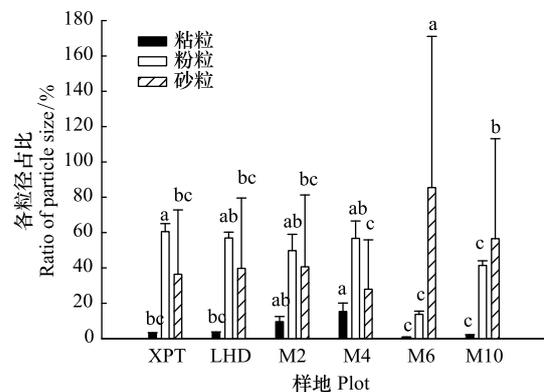


图 1 不同苜蓿种植恢复年限土壤粒径组成

Fig.1 Soil particle size composition of different restoration years of *M. Sativa* planting

a, b, c 表示不同苜蓿恢复年限间土壤各粒径占比的差异显著性 ($P<0.05$); XPT 为新排土, LHD 为撂荒地, M2 为 2 年生苜蓿地, M4 为 4 年生苜蓿地, M6 为 6 年生苜蓿地, M10 为 10 年生苜蓿地

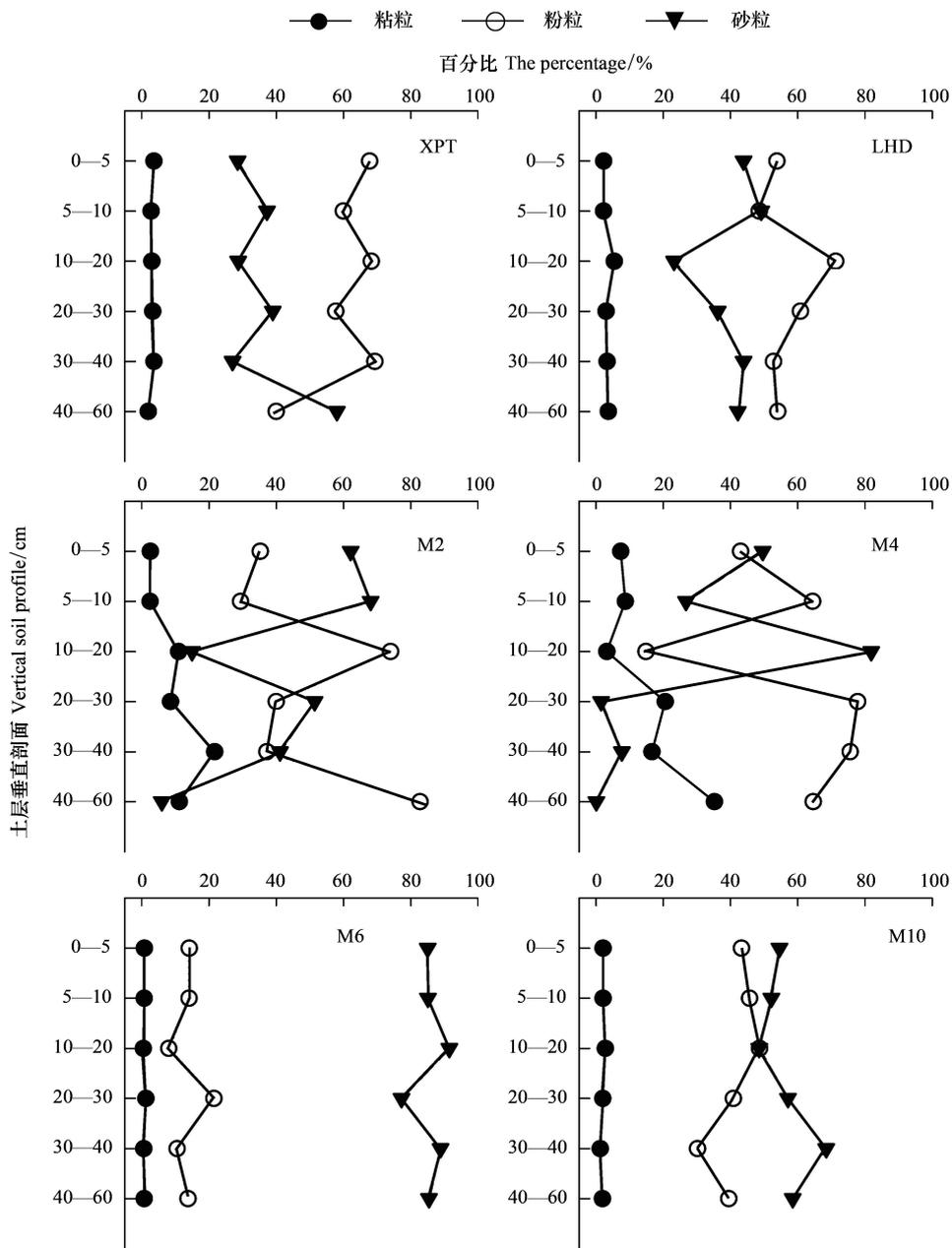


图2 不同苜蓿种植恢复年限下不同土层土壤颗粒组成

Fig.2 Soil particle composition in different soil layers under different restoration years of *M. Sativa* planting

2.2 排土场不同苜蓿恢复过程中土壤分形维数特征

如图 3 所示,土壤分形维数在不同恢复模式下各异,变化范围为 2.14—2.46,撂荒地相比于新排土没有显著变化,而在 M2 与 M4 模式下,土壤分形维数显著增加,在 M4 达到最大值(2.46),而随着恢复过程显著下降(2.14)再上升(2.31),主要由于在 M6 阶段苜蓿群落与土壤退化,导致土壤分形维数发生逆向演替,而进入 M10 阶段,群落由天然植物物种侵入,开始天然恢复演替阶段。

对土壤颗粒组成与土壤颗粒分形维数进行相关分析(图 4),发现土壤粘粒和粉粒含量与土壤颗粒分形维数具有极显著正相关关系($P<0.01$),土壤砂粒含量与土壤颗粒分形维数具有极显著负相关关系($P<0.01$),这与石战飞等^[20]的研究结论一致。同时研究发现粘粒与 D 值回归方程的决定系数 R^2 最大为 0.634,表明土壤

粘粒含量对 D 值的影响较大。

2.3 土壤体积分形维数在垂直剖面的演变特征

如图 5 所示,土壤颗粒分形维数 D 值在垂直剖面上不同苜蓿恢复过程的变化规律各异,变化范围为 2.09—2.57。新排土与撂荒地的土壤颗粒分形维数 D 值在垂直剖面上整体无明显变化,各土层分形维数 D 值相差不大,表明在垂直剖面上自然恢复对土壤分形维数影响不大;不同恢复年限的苜蓿地,其土壤分形维数在垂直剖面上的变化各异,苜蓿地 2 a 与苜蓿地 4 a 随着土层深度的增加,分形维数 D 值整体上随之增大;苜蓿地 6 a 和苜蓿地 10 a 随着土层深度的增加,分形维数 D 值整体上随之减小;表明不同恢复年限的苜蓿地在垂直剖面上,分形维数的变化呈现一定的规律。

2.4 土壤分形维数与土壤理化性质的关系

在不同苜蓿恢复阶段,土壤分形维数与土壤理化性质的关系表现各异。由表 2 可知,土壤分形维数与电导率呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$),与 pH 值和速效钾呈显著负相关关系 ($P < 0.05$),与碱解氮呈显著正相关关系 ($P < 0.05$);表明分形维数可表征研究区苜蓿恢复过程中土壤的一些理化性质,即分形维数 D 值越大,电

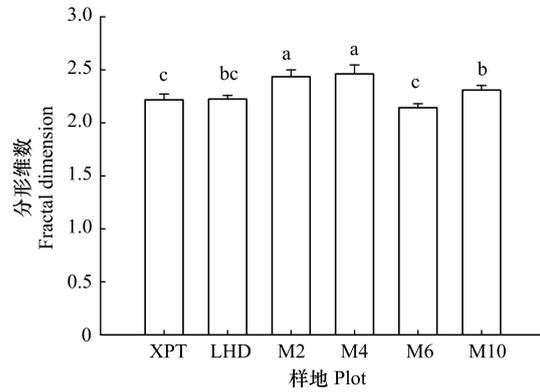


图 3 不同苜蓿种植恢复年限下土壤分形维数特征
Fig.3 Fractal dimension characteristics of soil under different planting restoration years of *M. Sativa*

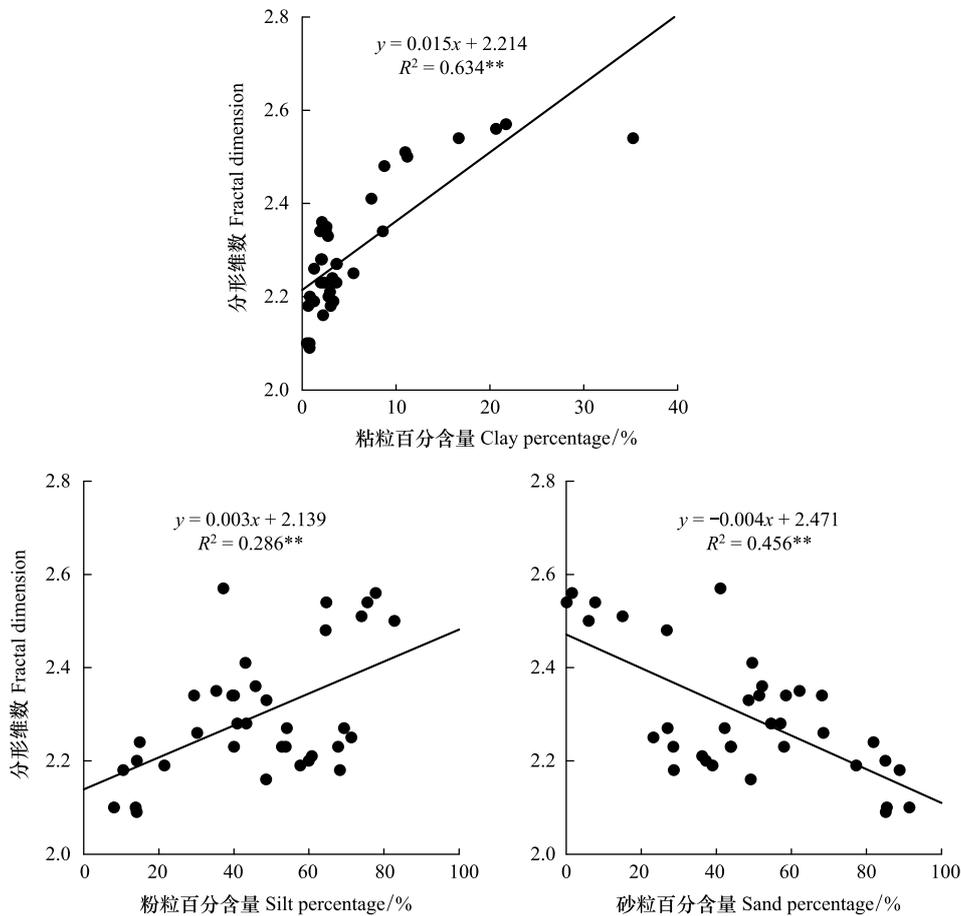


图 4 土壤颗粒组成与土壤体积分形维数的相关关系
Fig.4 Correlation between soil particle composition and fractal dimension of soil volume

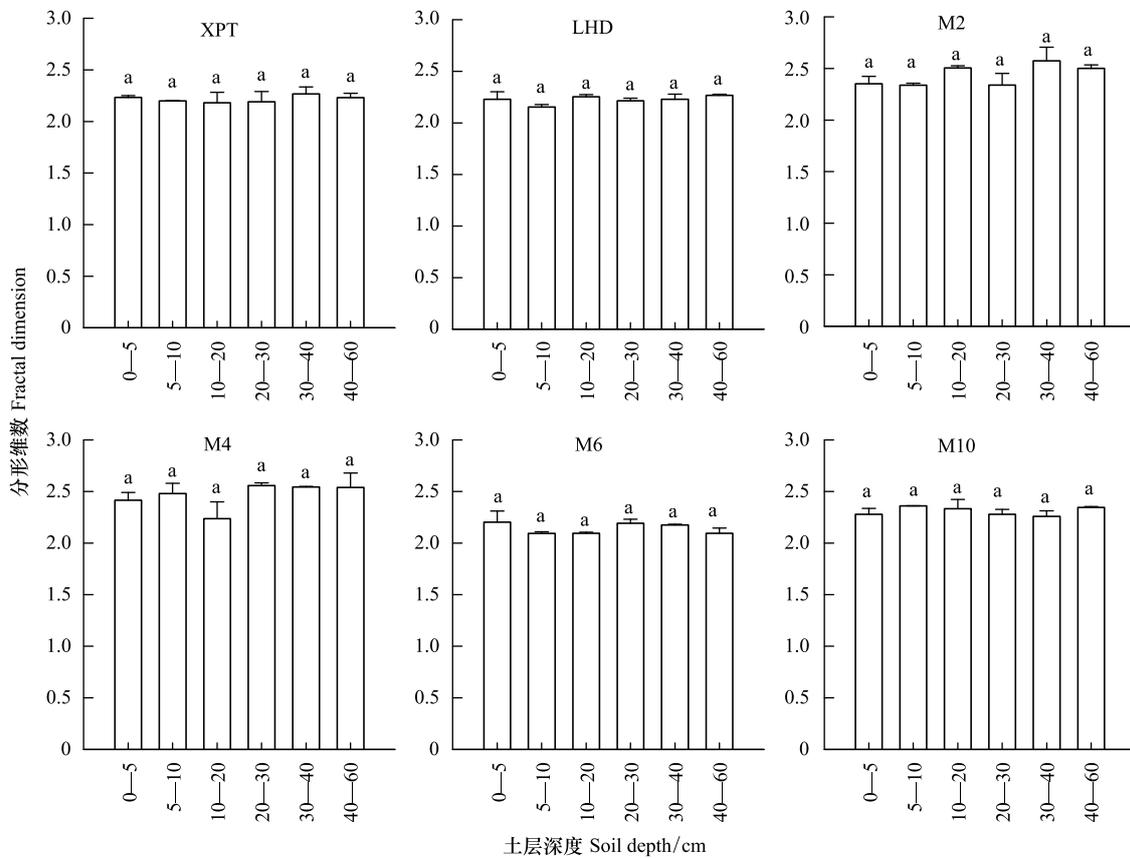


图 5 不同苜蓿种植恢复年限下土壤体积分形维数在垂直剖面的演变特征

Fig.5 The evolution characteristics of soil volume fractal dimension in vertical section under different planting and restoration age of *M. Sativa*

导率、pH 值越小,速效钾含量越低,但碱解氮含量越高。另外,分形维数 *D* 值与全氮含量、全磷含量、有机质、含水量、速效磷含量均未达到显著水平。

表 2 土壤体积分形维数与土壤性质相关关系

Table 2 Correlation between soil volume fractal dimension and soil properties

土壤指标 Soil index	分形维数 (<i>D</i>) Fractal dimension	pH	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	速效钾 Rapidly available potassium	碱解氮 Available nitrogen	有机质 Organic matter	电导率 Conductivity	含水量 Water content	速效磷 Rapid available phosphorus
pH	-0.112 *	1								
全氮 Total nitrogen	-0.102	0.004	1							
全磷 Total phosphorus	-0.08	-0.018	0.016	1						
速效钾 Rapidly available potassium	-0.156 *	-0.058	0.746 **	0.105	1					
碱解氮 Available nitrogen	0.158 *	-0.012	-0.008	-0.002	-0.002	1				
有机质 Organic matter	-0.002	0.091	-0.048	-0.0001	-0.009	-0.01	1			
电导率 Conductivity	-0.267 **	0.493 **	0.245 **	-0.003	0.345 **	-0.022	0.296	1		
含水量 Water content	-0.037	0.006	0.071	0.071	0.144 *	0.188 **	0.0001	0.018	1	
速效磷 Rapid available phosphorus	-0.057	-0.001	0.670 **	0.105	0.375 **	-0.004	-0.066	0.076	0.071	1

** 表示极显著相关 $P < 0.01$, * 表示显著相关 $P < 0.05$, $N = 36$

3 讨论

土壤颗粒在一定程度上决定了土壤的结构和性质,土壤颗粒体积分形维数与土壤颗粒组成具有密切的联系^[21]。本研究表明,研究区排土场土壤颗粒组成与土壤颗粒分形维数具有相关性,其中土壤粘粒与土壤分形维数具有显著的正相关关系,与风沙区不同种植年限苜蓿地^[3]、风沙区煤矿复垦地^[22]的研究结果一致,可见土壤颗粒粘粒含量所占比重对土壤颗粒分形维数的影响最为显著。同时,随着苜蓿恢复年限的增加土壤粘粒含量所占比重先增大后减小,即土壤质地表现为先细粒化后沙化的规律,在 M4 阶段细粒化程度最高,这与其它自然生态系统或者植被恢复方式的相关研究结果不一致,如风沙区不同种植年限苜蓿地、半干旱沙区不同植被恢复年限、不同退耕年限林草地,均随着恢复时间的延长,表现为土壤颗粒分形维数增大,土壤质地细粒化^[23-25]。可见,研究区苜蓿恢复模式只能在短期内具有改善土壤颗粒组成的作用,恢复一定年限后其改善土壤颗粒组成的作用下降。主要在于矿区排土场作为人工塑造生态系统,立地条件差、生境脆弱,苜蓿种植 4 a 后群落发生明显的退化。土壤分形维数在垂直剖面上的变化特征可表征植物根系对土壤颗粒组成的作用。本研究发现,不同苜蓿恢复过程中土壤颗粒分形维数 D 值在垂直剖面上变化各异,新排土与撂荒地不同土层颗粒体积分形维数之间无明显变化, M2 与 M4 土壤分形维数在垂直剖面上整体上随土层深度加深而增大, M6 与 M10 土壤分形维数在垂直剖面上整体上随土层深度加深而减小,表明苜蓿恢复 2 a 与 4 a 时,其根系能够促进深层土壤粘粒化,具有改良土壤粒径组成的作用。然而,张社齐等^[26]通过研究黄土高原刺槐人工林地,表明不同树龄刺槐人工林地的土壤颗粒分形维数在土壤剖面的不同深度上趋于均一,而且小于同种质地的其他土壤;党亚国等^[27]研究也表明黄土高原典型剖面土壤颗粒体积分形特维数在不同土层间差异不显著;贾晓红等^[28]通过研究沙冬青灌丛地的土壤颗粒大小分形维数空间的变异,发现在垂直剖面上分形维数随土层加深呈减少趋势。可能在于研究区排土场土壤多为人为覆盖的生土,且从未有过植被定居,而其他生态系统均为自然生态系统,深层土壤颗粒组成较排土场更佳。

众多研究表明,土壤分形维数可较好地反映土壤的肥力特征^[29-30]。本研究发现,排土场苜蓿恢复模式下土壤分形维数与土壤电导率、速效钾、碱解氮、pH 值具有相关关系,可以用土壤分形维数表征土壤速效养分状况;石占飞等^[20]通过研究陕北神木矿区土壤颗粒体积分形特征,表明分形维数 D 值可以表征土壤养分变化程度,这与本研究结果较一致。同时,本研究发现在苜蓿恢复过程中,土壤分形维数与土壤养分整体呈先增加后下降的规律,在 M4 阶段时,土壤分形维数最大,养分状况最佳;而黄晓娜等^[31]研究发现煤矿塌陷区随着复垦年限的增加,土壤理化性质变好,分形维数也随之增大。这与本研究结果存在一定的差异,主要在于苜蓿恢复模式属于人工恢复方式,群落物种单一,加之本研究区植物恢复种为苜蓿,其优势性导致其它植物种入侵、定居的难度,而且随着其对土壤水分与养分消耗过度,使得土壤在恢复一定年限后发生退化。

因此,半干旱矿区排土场苜蓿恢复过程中,土壤分形特征与土壤特性在一定恢复年限内,随着恢复年限的增加逐渐变好,在 M4 阶段时达到最佳状态。故在类似生态系统采用苜蓿恢复模式时,可考虑与其它植物种进行混播配置或补播改造,增加群落的物种多样性,防治其退化;亦可在其土壤改良最佳阶段,结合土壤与水管理进行复垦利用等。

4 结论

武家塔露天矿排土场土壤各粒径含量大小整体表现为粘粒<粉粒<砂粒。较新排土与自然撂荒而言,随着苜蓿恢复过程,粘粒与粉粒含量整体表现为先增加后下降的趋势,且在 M4 阶段达到最佳,砂粒反之。不同恢复阶段,分形维数整体上先增大到 2.46 后减小到 2.31,在 M4 阶段达到最大,在垂直剖面上的变化规律表现各异。土壤分形维数与土壤颗粒组成、土壤 pH、电导率、速效钾含量、碱解氮含量密切相关,且整体在 M4 阶段达到最佳,土壤分形维数可以用来表征其土壤改良效果。因此,在半干旱矿区排土场进行苜蓿恢复时应注意恢复年限的调控,适时进行适宜的利用与改造,确保矿区生态恢复的可持续性。

参考文献 (References):

- [1] 吴旭东, 张晓娟, 谢应忠, 徐坤, 杨菁. 不同种植年限紫花苜蓿人工草地土壤有机碳及土壤酶活性垂直分布特征. 草业学报, 2013, 22(1): 245-251.
- [2] 王雪, 李志萍, 孙建军, 冯长松, 李绍钰. 中国苜蓿品种的选育与研究. 草业科学, 2014, 31(3): 512-518.
- [3] 陈林, 杨新国, 宋乃平, 王磊. 风沙区不同种植年限苜蓿地土壤团粒组成分形特征研究. 中国水土保持, 2014(10): 54-57.
- [4] 张少华. 陇东黄土高原干旱草地利用方向和途径的探讨. 草业科学, 1997, 14(5): 4-7.
- [5] 鲁植雄, 张维强, 潘君拯. 分形理论及其在农业土壤中的应用. 土壤学进展, 1994, 22(5): 40-45, 35-35.
- [6] 董莉丽, 郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分形特征. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 35-41.
- [7] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(4): 987-996.
- [8] 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. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [9] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究. 土壤学报, 1999, 36(2): 162-167.
- [10] 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. 土壤学报, 2005, 42(4): 545-550.
- [11] 齐雁冰, 常庆瑞, 惠洪河. 人工植被恢复荒漠化逆转过程中土壤颗粒分形特征. 土壤学报, 2007, 44(3): 566-570.
- [12] 刘志强, 高吉喜, 田美荣, 栗忠飞, 王亚萍, 董明坤. 生态修复区植物群落土壤粒径的分形特征. 生态学杂志, 2017, 36(2): 303-308.
- [13] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 赵文武, 汪亚峰. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析—以黄土丘陵沟壑区为例. 生态学报, 2007, 27(7): 3081-3089.
- [14] 张佳瑞, 王金满, 祝宇成, 李博, 王平. 分形理论在土壤学应用中的研究进展. 土壤通报, 2017, 48(1): 221-228.
- [15] 杨阳, 段海侠. 排土场不同土地利用类型土壤的分形特征. 中国水土保持科学, 2013, 11(6): 98-104.
- [16] 张军红, 徐义萍. 不同植被恢复模式对矿区土壤性质的影响. 南方农业, 2019, 13(7): 22-25.
- [17] 彭东海, 侯晓龙, 何宗明, 刘露奇, 蔡丽平, 林静雯, 江瑞荣, 黄福才, 钟均华. 金尾矿废弃地不同植被恢复模式对土壤理化性质的影响. 水土保持学报, 2015, 29(6): 137-140.
- [18] 王金满, 张萌, 白中科, 杨睿璇, 郭凌俐. 黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒组成的多重分形特征. 农业工程学报, 2014, 30(4): 230-238.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 石占飞, 王力, 王建国. 陕北神木矿区土壤颗粒体积分形特征及意义. 干旱区研究, 2011, 28(3): 394-400.
- [21] 李涵韬, 余健, 方凤满, 王菲. 复垦对土壤颗粒组成、分形维数、团聚体影响. 环境科学与技术, 2015, 38(8): 11-16.
- [22] 张孝中, 徐崑尧, 王惠泽. 风沙区煤矿复垦地土壤颗粒的组成与分形特征. 水土保持通报, 2018, 38(6): 121-126.
- [23] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征. 地理研究, 2007, 26(3): 518-525.
- [24] 华瑞, 徐学选, 张少妮, 赵传普. 不同退耕年限林草地土壤颗粒分形特征研究. 水土保持学报, 2016, 30(4): 206-209.
- [25] 夏江宝, 张淑勇, 王荣荣, 赵艳云, 孙景宽, 刘京涛, 刘庆. 贝壳堤岛3种植被类型的土壤颗粒分形及水分生态特征. 生态学报, 2013, 33(21): 7013-7022.
- [26] 张社奇, 刘云鹏, 张国桢, 王国栋, 党亚爱. 黄土高原刺槐人工林地土壤颗粒分形特征研究. 安全与环境学报, 2006, 6(1): 96-99.
- [27] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 赵坤. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分形特征. 农业工程学报, 2009, 25(9): 74-78.
- [28] 贾晓红, 李新荣, 张景光, 张志山, 王新平, 谭会娟. 沙冬青灌丛地的土壤颗粒大小分形维数空间变异性分析. 生态学报, 2006, 26(9): 2827-2833.
- [29] 刘金福, 洪伟, 吴承祯. 中亚热带几种珍贵树种林分土壤团粒结构的分形特征. 生态学报, 2002, 22(2): 197-205.
- [30] 周萍, 刘国彬, 候喜禄. 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤团粒结构分形特征. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 75-82.
- [31] 黄晓娜, 李新举, 刘宁, 闵祥宇. 煤矿塌陷区不同复垦年限土壤颗粒组成分形特征. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1140-1146.