风沙区煤矿复垦地土壤颗粒的组成与分形特征

张孝中[1], 徐崟尧[2], 王惠泽[2]
(1.陕西省水土保持勘测规划研究所, 陕西 西安 710004; 2.陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119)

摘 要:[目的] 研究风沙区煤矿复垦地土壤颗粒的组成与分形特征,为恢复和改善矿区土壤生态功能提供科学依据。[方法] 结合分形理论对陕北风沙区大柳塔煤矿复垦地 3 种植被类型和未复垦的裸沙地土壤颗粒组成及其分形维数进行对比研究。[结果] ①研究区复垦地的土壤颗粒组成以细砂为主。乔木、灌木林地和裸沙地的土壤颗粒次集中于中砂,而草地的土壤颗粒次集中于极细砂。植被覆盖对土壤细粒物质含量的影响具有层次性,3 种植被类型 0—30 cm 土壤中黏、粉粒含量显著高于裸沙地。②土壤颗粒分形维数为 1.306～2.490,均值依次为:草地(2.425)＞灌木林地(2.300)＞乔木林地(1.626)＞裸沙地(1.550),且不同植被类型的分形维数变化也具层次性。各深度上,草地与灌木林地的分形维数无显著差异,且皆显著高于乔木林与裸沙地。③分形维数与土壤颗粒组成密切相关,与黏、粉粒含量显著正相关,与粗砂含量显著负相关,但与土壤含水量和有机质则无显著相关性。[结论] 大柳塔煤矿复垦地的土壤颗粒组成及分形维数差异较大,植被类型为草地或灌木对矿区土壤颗粒细化、改善环境有较好的促进作用。

关键词:土壤颗粒组成; 分形维数; 植被类型; 复垦地; 煤矿
文献标识码:A **文章编号**:1000-288X(2018)06-0121-06 **中图分类号**:S152

文献参数:张孝中, 徐崟尧, 王惠泽.风沙区煤矿复垦地土壤颗粒的组成与分形特征[J].水土保持通报, 2018,38(6):121-126. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.018. Zhang Xiaozhong, Xu Yinyao, Wang Huize. Composition and fractal dimension characteristics of soil particles in reclaimed land of coal mine in wind-sandy area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(6):121-126.

Composition and Fractal Dimension Characteristics of Soil Particles in Reclaimed Land of Coal Mine in Wind-sandy Area

ZHANG Xiaozhong[1], XU Yinyao[2], WANG Huize[2]
(1. *Shaanxi Province Planning and Research Institute of Soil and Water Conservation, Xi'an, Shaanxi* 710004, *China*; 2. *School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi* 710119, *China*)

Abstract: [Objective] Soil particle composition and fractal dimension was observed in reclaimed soils in order to provide scientific evidences for restoring and improving ecological function of mined soils in wind-sandy area. [Methods] We compared the soil particle composition and its fractal dimension characteristics under three vegetation types and unreclaimed substrates in Daliuta coal mine based on fractal theory. [Results] ① Soil in this wind-sandy area was predominantly fine sand, with the remainder mainly comprised of medium sand at arbor forest, shrubbery and bare sand, while comprised of very fine sand at grassland sites. The effect of vegetation type on soil fine particles varied with soil layers. The content of clay and silt in 0—30 cm of reclaimed soils was significantly higher than that in bare sandy land. ② Fractal dimension of soil particles was 1.306～2.490, and the average value was as follows: grassland (2.425)＞shrubbery (2.300)＞arbor forest (1.626)＞bare sand land (1.550). Changes in fractal dimension were layer-dependent. There is no significant difference between grassland and shrubbery in all soil layers. However, the fractal dimension of grassland and shrubbery is significant higher than that of arbor forest and bare sand land. ③ Fractal dimension is tightly related to soil particle composition, but not to soil moisture and soil organic matter. We found a significantly positive relationship with the clay and silt content, and a negative relationship with the coarse

收稿日期:2018-06-10 **修回日期**:2018-07-19
第一作者:张孝中(1961—),男(汉族),陕西省澄城县人,硕士,高级工程师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:zxz211@126.com。

sand content. [Conclusion] It is a quite difference in soil particle composition and fractal dimension between vegetation types. Grassland and shrubbery land could promote the soil grain refinement which can be adopted to reverse the mined environment.

Keywords: soil particle composition; fractal dimension; vegetation type; reclaimed land; coal mine

土壤作为一种由水分、空气和不同颗粒等各类物质所组成的多孔介质,其本身是具有不规则的形状和自相似性特征的复杂几何体[1-2],因此土壤具有一定的分形特性。作为土壤固相的基本组成单元,土壤颗粒继承了其母质的分形特点。自 Mandelbort[3],Tyler[4]、杨培岭等[5]学者将分形理论引入土壤科学研究、不断优化分形维数计算模型以来,中国学者对土壤颗粒分形维数的研究在土壤环境修复[1,6-7]、土地利用变化[8-9]、植被生态恢复[10-11]等方面取得了大量成果。齐雁冰等[1]、陈小红等[6]通过对干旱区土壤的分形维数变化来表征沙漠化的正逆过程。贾晓红等[11]认为分形维数可作为土壤评价定量指标,其大小与土壤的细粒化和养分状况呈显著正相关。王富等[12]则将分形维数与土壤容重、有机质、孔隙度进行相关分析,指出荒坡封育是水库水源涵养区土壤恢复的最佳方式。由此可见,土壤颗粒的分形特征不仅能表征土壤理化性状,还对区域生态环境具有一定的指示作用。

煤矿在建设生产环节中挖损地表、重塑地貌形态、破坏周边植被等会对矿区土壤产生强烈破坏,改变土壤的结构和质地,进而对土壤颗粒及其分形特征造成影响。目前,关于煤矿区复垦地的土壤颗粒分布及分形特征的研究较少,仅有对煤矿的排土场和塌陷区进行初步研究[13-15]。大柳塔煤矿地处毛乌素沙地的东南缘,是陕蒙 2 省交界之地,有煤炭"黑三角"之称。为消除 20 世纪 80 年代大柳塔矿区露天剥采方式对生态环境造成巨大影响,大柳塔于 90 年代起开展植被复垦工作。因此,本文采用土壤分形理论对大柳塔煤矿的复垦地土壤进行研究,说明不同植被类型下土壤颗粒的分布和分形特征,分析不同植被类型的分形维数与土壤性质的相关性,探讨风沙区煤矿植被修复的物种选择,为恢复和改善矿区土壤生态功能提供建议。

1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市神木县的大柳塔煤矿(109°33′—110°30′E,39°01′—39°30′N),该区是陕西省与内蒙古自治区的交界处,在气候上处东亚季风的北缘,是典型的暖温带大陆性半干旱气候,年均温在 7.0 ℃左右,年均降水量 340～470 mm,且集中在 7—8 月,蒸发量与降水量之比为 4∶1。研究区处在毛乌素沙地东南缘,是毛乌素沙地与黄土高原的过渡区,地貌上主要为固定沙丘和盖沙黄土梁,海拔高度在 1 227～1 469 m。土壤类型以风沙土为主,土壤含水量、养分均较低,部分地区存在少量的黑垆土、草甸土[16]。大柳塔煤矿经过 20 世纪 80 年代的露天开采,原地带性植被已遭到破坏。现今大柳塔矿区的主要人工植被有小叶杨(*Populus simonii*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、旱柳(*Salix matsudana*)、沙柳(*Salix psammophila*)、硬质早熟禾(*Poa sphondylodes*)、沙地柏(*Sabina vulgaris*)等。

2 研究方法

2.1 土样采集

土壤样品采集时间在 2016 年 7 月中下旬,采样地在大柳塔矿区复垦地有代表性的 3 处不同植被类型及 1 处未经复垦的裸沙地,样地基本情况详见表 1。每个样地随机选择 3 个样点,用直径为 5 cm 的土钻取土,取土间隔为 5 cm,深度为 70 cm。取土后立即将样品放入塑封袋中密封保存,每块样地取土样 45 个,共计 135 个土样。通过询问矿区居民和工作人员,获得样地的复垦年限均在 16～20 a。

表 1 研究区样地基本情况

植被类型	经纬度	海拔/m	土壤类型	盖度/%	Shannon-Winner 多样性	Simpon 优势度	Pielou 均匀度	主要植物类型
乔木林地	110.13°E,39.07°N	1 278	风沙土	53.7	2.010	0.205	0.809	小叶杨、旱柳
灌木林地	110.04°E,39.12°N	1 317	风沙土	51.5	2.074	0.165	0.835	柠条、沙柳
草 地	110.07°E,39.30°N	1 330	风沙土	47.5	2.325	0.133	0.935	硬质早熟禾、细叶鸢尾
裸沙地	110.09°E,39.10°N	1 295	风沙土	—	—	—	—	—

注:Shannon-Winner 多样性、Simpon 优势度、Pielou 均匀度数据来源于文献[17]。

2.2 样品测定

土壤颗粒组成采用激光粒度仪(Mastersizer 2000)进行测定,试验步骤:①将野外采集回的土样进行烘干处理后过 2 mm 筛,从而去除土壤中>2 mm 的石砾;②取 0.5 g 土样放入 500 ml 烧杯,依次加入浓度为 10%H_2O_2 和 HCl 溶液各 5 ml 去除土壤中的有机质和碳酸盐;③向烧杯内部注满蒸馏水静置72 h 后抽出上层清液,反复注水—抽水—静置至 pH 为中性;④测试粒径前加入 0.1 ml/L 分散剂$(NaPO_3)_6$后,使用激光粒度仪测定土壤粒径,并借助仪器自带的分级功能可得到任意两个粒径间的体积比例。粒径分级标准参考美国制:黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、极细砂粒(0.05~0.1 mm)、细砂粒(0.1~0.25 mm)、中砂粒(0.25~0.5 mm)和粗砂粒(0.5~2 mm)。土壤含水量采用烘干法,有机质含量则采用重铬酸钾—外加热法。

2.3 土壤颗粒分形维数模型

分形理论在土壤物理研究中已广泛运用,而土壤颗粒具备自相似特征,引入分形理论可以更好地反映土壤性质变化[2]。Mandelbrot 等[3]首次提出二维空间的分形维数模型,Tyler[4]、杨培岭等[5]在前人基础上总结建立了可用土壤颗粒的质量分布来计算的质量分形模型。随着激光衍射技术的广泛运用,王国梁等[18]采用了土壤颗粒的体积百分比来描述土壤分形维数特征,这一方法解决了质量分形模型中不同粒级的土壤颗粒具有相同密度的假设[2,18-19],因此本文主要采用土壤颗粒体积分形维数,计算公式为:

$$\frac{V(r<R)}{V_T}=\left(\frac{r_i}{R_{\max}}\right)^{3-D}$$

式中:D——分形维数;r_i——任意两颗粒的均值($r_i>r_{i+1}$,$i=1,2,3,\cdots$);$R_{\max}$——最大土壤颗粒(mm);$V(r<R)$——颗粒小于 R 的土壤颗粒累积体积;V_T——各土壤颗粒的体积总和。计算过程为:首先将上式两遍同取对数,转化成为对数方程;然后建立对数方程的线性拟合公式,所得公式的斜率即为 $3-D$;最后即可求出分形维数 D 值。

2.4 数据处理

所用数据采用 Excel 2007 对土壤颗粒分布与体积分形维数进行归类整理与计算,采用 SPSS 19.0 进行相关性分析和 LSD 单因素方差分析。

3 结果与分析

3.1 土壤颗粒组成特征

土壤的颗粒组成是土壤重要的特征和属性之一,它能表征土壤结构的优劣程度,反映土壤质地的均一性[2,5],同时对土壤养分状况、水分含量、孔隙分布等土壤性质方面有着重要影响[10]。通过分析土壤的颗粒组成可以反映研究区不同植被类型下土壤颗粒的大小和组成。通过表 2 可以看出,不同植被类型下的土壤颗粒组成分布及差异。研究区 3 种植被类型与未复垦裸沙地的土壤颗粒组成主要集中在细砂(0.1~0.25 mm),这与前人研究结果较一致[20]。乔木林、灌木林、草地和裸沙地的细砂含量分别占各自土壤颗粒总体积含量的 48.019%,38.179%,38.529% 和 48.584%,且灌草地的细砂含量显著($p<0.05$)低于乔木林与裸沙地。乔木林、灌木林和裸沙地的土壤颗粒组成次集中于中砂(0.25~0.5 mm),其含量分别占 34.735%,24.519% 和 37.494%;而草地的土壤颗粒次集中于极细砂(0.05~0.1 mm),其含量占到 20.258%。由于研究区地处风沙区,其土壤类型为风沙土,故土壤颗粒组成以砂粒为主[12],各植被类型的<0.05 mm 黏、粉粒的体积含量均在 10% 以下,黏、粉粒的含量少。

在不同土层深度下,乔木林、灌木林和草地土壤中黏、粉粒(<0.05 mm)含量主要集中于 0—30 cm 土层内,且随土层深度增加,黏、粉粒含量逐渐减少;而裸沙地由于细粒物质含量接近于 0,因此其在不同土层间黏、粉粒含量的差异并不显著。不同深度下砂粒(0.05~2 mm)含量的变化在裸沙地上较为显著,由于裸沙地的地表裸露、缺少植被对表层土壤的覆盖与保护,抗风蚀能力下降,在风沙区干燥大风的环境下表层土易被风蚀[7],致使 0—10 cm 土壤的砂粒含量要显著低于 20—40 cm。

植物复垦总体上能够改善研究区复垦地的土壤颗粒组成、防止土地沙化的加剧。在不同植被类型下,实施复垦的草地、灌木林的土壤粒径大体与未复垦的裸沙地差异显著($p<0.05$),仅有乔木林与裸沙地在各级粒径上无显著差异($p>0.05$)。从土壤颗粒的组成上看,草地、灌木林的细粒物质(<0.1 mm)含量明显高于乔木林地和裸沙地。在 0—70 cm 内,草地的黏粒、粉粒和极细砂粒的含量均显著($p<0.05$)高于相同土层的乔木林与裸沙地;灌木林土壤在粉粒和极细砂的平均含量上也显著($p<0.05$)高于乔木林与裸沙地。而在粗粒物质含量中,草地、灌木林土壤中细砂、中砂粒的平均含量均显著($p<0.05$)低于乔木林与裸沙地,说明在研究区风沙环境条件下,以草本、灌木为主的植被类型对煤矿复垦地在改良土壤质地、细化土壤颗粒的作用要明显优于乔木。

表 2 不同植被类型下不同土层深度的土壤颗粒组成

植被类型	土层深度/cm	体积分数/%					
		黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002～0.05 mm)	极细砂 (0.05～0.1 mm)	细砂 (0.1～0.25 mm)	中砂 (0.25～0.5 mm)	粗砂 (0.5～2 mm)
乔木林地	0—10	0.326^{aA}	1.435^{aA}	7.453^{aA}	39.694^{aA}	34.823^{aA}	13.400^{aA}
	10—20	0.067^{bA}	0.717^{abA}	7.812^{aA}	46.161^{aA}	33.235^{aA}	10.576^{aA}
	20—30	0.000^{bA}	0.570^{abA}	6.976^{aA}	45.552^{aA}	35.387^{aA}	10.374^{aA}
	30—40	0.000^{bA}	0.260^{bA}	5.551^{aA}	47.658^{aA}	37.465^{aA}	8.548^{aA}
	40—50	0.000^{bA}	0.196^{bA}	5.550^{aAC}	52.548^{aA}	35.229^{aA}	6.085^{aA}
	50—60	0.001^{bA}	0.289^{bA}	7.290^{aA}	54.870^{aA}	31.478^{aA}	5.495^{aA}
	60—70	0.000^{bA}	0.477^{bA}	6.303^{aAC}	49.647^{aA}	35.529^{aA}	7.090^{aA}
	平均	0.056^{A}	0.563^{A}	6.705^{A}	48.019^{A}	34.735^{A}	8.795^{A}
灌木林地	0—10	0.792^{aA}	3.305^{aA}	16.517^{aB}	37.019^{aA}	23.413^{aA}	12.344^{abA}
	10—20	1.117^{bB}	3.391^{aB}	16.095^{aB}	40.049^{aA}	23.292^{aB}	9.273^{abA}
	20—30	1.472^{bB}	4.911^{aB}	18.874^{aB}	40.633^{aA}	19.830^{aA}	4.459^{bA}
	30—40	1.007^{aAB}	2.956^{bAB}	14.505^{aB}	40.144^{aA}	25.298^{aB}	10.178^{abA}
	40—50	0.778^{aAB}	2.536^{bA}	11.649^{aA}	33.950^{aB}	27.572^{aA}	18.443^{aA}
	50—60	0.915^{aAB}	2.591^{bA}	12.952^{aA}	39.289^{aB}	26.604^{aA}	12.467^{abA}
	60—70	1.104^{aAB}	3.657^{bA}	13.560^{aA}	36.167^{aB}	25.623^{aAB}	12.576^{abB}
	平均	1.026^{A}	3.335^{B}	14.879^{B}	38.179^{B}	24.519^{B}	11.391^{A}
草地	0—10	3.125^{aB}	12.040^{aB}	24.605^{aC}	27.742^{aA}	7.162^{aB}	1.247^{aB}
	10—20	1.946^{aC}	6.324^{bC}	21.767^{abB}	36.578^{abA}	15.257^{abB}	5.482^{aA}
	20—30	2.535^{aB}	9.182^{bB}	23.186^{bB}	32.160^{abA}	11.210^{bA}	3.365^{aA}
	30—40	1.443^{bB}	5.488^{abB}	17.081^{bB}	45.814^{bA}	16.973^{abB}	2.226^{aA}
	40—50	1.868^{bB}	6.324^{abB}	18.776^{abB}	44.340^{bB}	14.174^{abB}	1.871^{aB}
	50—60	2.061^{bB}	7.012^{abB}	19.416^{abB}	41.471^{bB}	13.322^{abB}	2.695^{aB}
	60—70	1.938^{bB}	7.071^{abB}	16.978^{bB}	41.602^{bB}	15.574^{abB}	2.696^{aA}
	平均	2.131^{A}	7.634^{B}	20.258^{B}	38.529^{B}	13.382^{B}	2.797^{A}
裸沙地	0—10	0.000^{aA}	0.000^{aA}	2.908^{aA}	30.607^{aA}	38.137^{aA}	28.348^{aA}
	10—20	0.000^{aA}	0.178^{aA}	12.017^{bA}	66.005^{bA}	18.892^{bA}	2.553^{bA}
	20—30	0.000^{aA}	0.000^{aA}	11.722^{bA}	74.004^{bA}	14.226^{bA}	0.049^{bA}
	30—40	0.000^{aA}	0.138^{aA}	5.460^{aA}	40.205^{bA}	39.396^{aA}	14.526^{aA}
	40—50	0.000^{aA}	0.000^{aA}	0.005^{aA}	30.799^{aA}	56.294^{bA}	12.903^{aA}
	50—60	0.000^{aA}	0.000^{aA}	0.077^{aA}	50.615^{bA}	46.871^{bA}	2.437^{bA}
	60—70	0.000^{aA}	0.000^{aA}	0.073^{aA}	47.856^{bA}	48.010^{bA}	4.062^{bA}
	平均	0.000^{A}	0.045^{A}	4.609^{A}	48.584^{A}	37.404^{A}	9.268^{A}

注:不同小写字母表示相同植被、不同深度下差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示相同深度、不同植被类型下差异显著($p<0.05$)。下同。

3.2 土壤颗粒分形维数特征

土壤颗粒的分形维数不仅可以表征土壤颗粒的大小与均匀性,还能反映不同植被类型对土壤的改良程度[21]。土壤质地越细,土壤中微小的孔隙更为发育,土壤结构越复杂,其分形维数越大;土壤质地越粗,土壤结构则更加松散,其分形维数越小[1]。研究区复垦地的土壤颗粒分形维数的范围在 1.550～2.425,其值顺序为:裸沙地<乔木林<灌木林<草地(表 3)。不同植被类型下,乔木林的分形维数与未复垦的裸沙地并无显著差异($p>0.05$),而草地和灌木林的分形维数则显著($p<0.05$)高于乔木、裸沙地。研究区草地的土壤颗粒分形维数值为 2.425,已接近石占飞等[22]研究的红碱淖生态保护区(2.43),灌木林的分形维数值与同属风沙区的神木凉水井煤矿(2.33)相近,只有乔木林与裸沙地的土壤分形维数明显较小,这说明大柳塔煤矿复垦地主要植被类型中,草本或灌木在改善土壤环境、细化土壤颗粒的作用要显著优于乔木。在土壤的垂直剖面上,可以得出研究区复垦地 0—70 cm 土壤颗粒分形维数的深度变化情况(表 3)。通过表 3 可以得出,除草地外,乔木林、灌木林和裸沙地的土壤颗粒分形维数皆随土层深度的增加而降低,说明大柳塔煤矿复垦地的土壤粒径随深

度的增加而逐渐变粗,这与表 2 中土壤颗粒分布的变化相一致。而草地的分形维数则呈现先降低后增加的趋势,其数值在 30—40 cm 出现低值后波动增加,这可能是由于植被根系对土壤有较好的改良效果。在不同的土层深度下,0—10 与 20—70 cm 的分形维数彼此均有显著差异($p<0.05$),而 20—70 cm 的分形维数彼此差异不显著($p>0.05$),其原因是植被复垦增加了地表粗糙程度,能够显著降低携带沙粒的气流流速,从而能够从中截获更多的细粒物质在土壤表层集聚,使研究区表层(0—10 cm)土壤中黏、粉粒的含量显著高于其他土层。

表 3　不同植被类型下不同土层深度的土壤颗粒分形维数

土层深度/cm	乔木林地	灌木林地	草地	裸沙地
0—10	2.127^{aA}	2.461^{aB}	2.490^{aB}	1.814^{aA}
10—20	1.859^{aA}	2.343^{bB}	2.403^{bB}	1.653^{aA}
20—30	1.575^{bA}	2.342^{bB}	2.402^{bB}	1.623^{aA}
30—40	1.542^{bA}	2.299^{bB}	2.371^{bB}	1.528^{aA}
40—50	1.529^{bA}	2.273^{bB}	2.409^{bB}	1.509^{aA}
50—60	1.438^{bA}	2.273^{bB}	2.482^{aB}	1.420^{aA}
60—70	1.315^{bA}	2.213^{bB}	2.417^{bB}	1.306^{aA}
平 均	1.626^{A}	2.300^{B}	2.425^{B}	1.550^{A}

3.3　分形维数与土壤性质的关系

将研究区不同植被类型下的分形维数与土壤理化性质进行相关性分析(表 4)。可以看出,分形维数与土壤颗粒有明显的相关性。在各植被类型下,分形维数与黏粒、粉粒和极细砂含量都呈正相关,且与黏、粉粒分别都达到了显著水平($p<0.05$);而分形维数与细砂、中砂和粗砂含量则呈负相关,且与粗砂含量呈极显著负相关($p<0.01$),这说明土壤颗粒的粗细程度与分形维数密切相关,土壤细粒物质含量越多,则分形维数值越大;土壤粗粒物质越多,分形维数值越小,与杨培岭等[5]、杨金玲等[19]的研究结果相近。土壤含水量与乔木林、灌木林和裸沙地的分形维数呈负相关,而与草地则呈正相关。土壤有机质含量则与各植被类型的分形维数皆呈正相关,与裸沙地的分形维数呈负相关。草地增加地表的粗糙程度利于空气中细粒物质的截留[17];同时,草本植物的需水量要低于乔、灌木,土壤处于相对湿润的条件下增加起沙风速,减少了细粒物质的吹蚀量,从而使研究区草地土壤中黏粒、粉粒的含量明显高于其他植被类型,在一定程度上起到保水保肥的作用,因此草地的土壤含水量、有机质与其分形维数值呈正相关。而裸沙地由于未经植物的复垦作用,地表在无植被保护下,土壤中细粒物质极易被吹蚀,裸沙地的土壤颗粒由较粗的砂粒组成,土壤水分、养分含量均较小,进一步加剧沙地土壤的粗化程度,因而裸沙地的土壤分形维数与含水量、有机质均呈负相关。

表 4　不同植被类型的分形维数与土壤性质相关性

土壤性质	乔木林地	灌木林地	草地	裸沙地
含水量	-0.879^{**}	-0.953^{**}	0.034	−0.713
有机质	0.757	0.604	0.043	−0.429
黏 粒	0.888^{**}	0.608^{*}	0.682^{**}	0.545^{*}
粉 粒	0.766^{*}	0.704^{*}	0.844^{**}	0.796^{*}
极细砂	0.556	0.638	0.449	0.509
细 砂	-0.810^{*}	−0.215	−0.484	−0.016
中 砂	−0.080	−0.544	−0.712	−0.522
粗 砂	-0.870^{**}	-0.276^{**}	-0.366^{**}	-0.557^{**}

注:** 表示极显著相关($p<0.01$);* 表示显著相关($p<0.05$)。

4　结 论

(1) 研究区的土壤颗粒组成以细砂(0.1～0.25 mm)为主。乔木林、灌木林和裸沙地的土壤颗粒次分布在中砂(0.25～0.5 mm),而草地的土壤颗粒次分布于极细砂(0.05～0.1 mm)。在土壤垂直剖面上,乔木林、灌木林和草地的土壤表层 0—30 cm 黏、粉粒(<0.05 mm)含量要显著高于裸沙地。

(2) 大柳塔煤矿复垦地的土壤颗粒分形维数为:裸沙地(1.550)<乔木林地(1.626)<灌木林地(2.300)<草地(2.425),且草地与灌木林的分形维数显著高于裸沙地、乔木林。大柳塔煤矿采用草本或灌木复垦能够促进土壤质地的修复与改良。

(3) 分形维数与土壤颗粒的组成关系显著,与土壤黏粒、粉粒含量呈显著正相关,与土壤粗砂含量显著负相关。分形维数与含水量、有机质的关系并不显著。土壤颗粒分形维数可用来表征和评价矿区的土壤颗粒变化特征。

[参 考 文 献]

[1] 齐雁冰,常庆瑞,惠泱河. 人工植被恢复荒漠化逆转过程中土壤颗粒分形特征[J]. 土壤学报,2007,44(3):566-570.

[2] 张佳瑞,王金满,祝宇成,等. 分形理论在土壤学应用中的研究进展[J]. 土壤通报,2017,48(1):221-228.

[3] Mandelbort B B. The Fractal Geometry of Nature[M]. San Francisco: W H Freeman, 1983:488.

[4] 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.

[5] 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.
[6] 陈小红,段争虎,谭明亮,等. 沙漠化逆转录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.
[7] 刘志强,高吉喜,田美荣,等. 生态修复区植物群落土壤粒径的分维特征[J]. 生态学杂志,2017,36(2):303-308.
[8] 王德,傅伯杰,陈利顶,等. 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[J]. 生态学报,2007,27(7):3081-3089.
[9] 杨婷,景航,姚旭,等. 黄土丘陵不同土地利用方式下土壤颗粒组成及其分形维数特征[J]. 水土保持研究,2016,23(3):1-5.
[10] 刘霞,姚孝友,张光灿,等. 沂蒙山林区不同植物群落下土壤颗粒分形与孔隙结构特征[J]. 林业科学,2011,47(8):31-37.
[11] 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[J]. 地理研究,2007,26(3):518-525.
[12] 王富,贾志军,董智,等. 不同生态修复措施下水库水源涵养区土壤粒径分布的分形特征[J]. 水土保持学报,2009,23(5):113-117.
[13] 杨阳,段海侠. 排土场不同土地利用类型土壤的分形特征[J]. 中国水土保持科学,2013,11(6):98-104.
[14] 余健,房莉,李涵韬,等. 采煤塌陷地及其复垦土壤颗粒分布与分形特征[J]. 中国矿业大学学报,2014,43(6):1095-1101.
[15] 黄晓娜,李新举,刘宁,等. 煤矿塌陷区不同复垦年限土壤颗粒组成分形特征[J]. 煤炭学报,2014,39(6):1140-1146.
[16] 聂树人. 陕西自然地理[M]. 陕西 西安:陕西人民出版社,1981:266-273.
[17] 徐崟尧,孙虎,崔徐甲,等. 陕西大柳塔煤矿复垦地植被群落与土壤因子的关系[J]. 地球与环境,2018,46(1):82-88.
[18] 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.
[19] 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.
[20] 杨根生,陈渭南,刘阳宣,等. 晋陕蒙三角地带能源基地开发中的土地沙漠化问题[J]. 干旱区资源与环境,1988,2(1):46-56.
[21] Su Yongzhong, Zhao Halin, Zhao Wenzhi, et al. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification[J]. Geoderma, 2004,122(1):43-49.
[22] 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[J]. 干旱区研究,2011,28(3):394-400.

(上接第 120 页)

[13] 王秀兰,包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展,1999,18(1):81-87.
[14] 李晓文,方创琳,黄金川,等. 西北干旱区城市土地利用变化及其区域生态环境效应:以甘肃河西地区为例[J]. 第四纪研究,2003,23(3):280-290.
[15] Leo B, Jerome F, Charles J S, et al. Classification and regression trees[M]. Florida: CRC Press, 1984.
[16] 刘勇洪,牛铮,王长耀. 基于 MODIS 数据的决策树分类方法研究与应用[J]. 遥感学报,2005,9(4):405-412.
[17] 胡文敏,赵京,何介南,等. 近 15 年来环洞庭湖区土地利用变化及其景观效应[J]. 中南林业科技大学学报,2017(12):91-97.
[18] 崔佳,臧淑英. 哈大齐工业走廊土地利用变化的生态环境效应[J]. 地理研究,2013,32(5):848-856.
[19] 陈刚. 四川盆周山地土地利用/覆盖景观空间格局演替研究[D]. 四川 成都:成都理工大学,2011.
[20] 张娜. 景观生态学[M]. 北京:科学出版社,2014.
[21] 刘铁冬,许大为. 景观生态学案例分析:河流景观格局与生态脆弱性评价[M]. 北京:科学出版社,2015.