杨树低效林下土壤粒径分布与分形特征

童春元[1]，李钢铁[1]，卢立娜[2]，刘朝霞[2]，张晓娟[2]，张玉龙[3]
（1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2.鄂尔多斯市林业治沙科学研究院，内蒙古 鄂尔多斯 017000；3.鄂尔多斯市林业工作站，内蒙古 鄂尔多斯 017000）

摘　要：[目的] 研究鄂尔多斯地区杨树低效林下土壤粒径分布与分形特征，为该地区杨树低效林的成因分析及改造提供基础依据，并为杨树人工林的科学管理提供参考与决策支持。[方法] 使用 Mastersizer3000 激光衍射粒度分析仪测量土壤粒径，采用土壤颗粒体积分形维数模型计算分形维数 D 值，并测定土壤养分。[结果] ①鄂尔多斯地区杨树低效林下土壤颗粒组成主要以细砂粒（42.33%）、极细砂粒（15.72%）、中砂粒（19.77%）为主；主要土壤质地类型为砂土；土壤颗粒的分形维数 D 值在 1.222 5～2.204 5范围内，处于较低水平。②土壤颗粒分形维数 D 值与粉粒、极细砂粒、细砂粒含量呈显著正相关关系，与中砂粒、粗砂粒、极粗砂粒呈显著负相关关系。③随着土层加深，粒径＜250 μm 的土壤颗粒含量增加，粒径＞250μm 的土壤颗粒含量减少；土壤颗粒分形维数 D 值随土层加深而增大，增大幅度不大。④土壤颗粒分形维数 D 值与土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷含量的关系均未达到显著水平，土壤各养分含量的变化对分形维数 D 值没有显著影响。[结论] 鄂尔多斯地区杨树低效林下土壤颗粒组成以砂粒为主，土壤分形维数较低，土壤结构极不均匀，这样的土壤结构对杨树的正常生长发育极为不利，不良的土壤结构也在一定程度上导致了低效林的形成，因此在对杨树低效林进行预防和改造时也要改善林下土壤结构。

关键词：低效林；土壤粒径分布；分形维数；土壤养分
文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2019)05-0308-08　　**中图分类号**：S152.3

文献参数：童春元，李钢铁，卢立娜，等.杨树低效林下土壤粒径分布与分形特征[J].水土保持通报，2019，39(5)：308-315. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.044；Tong Chunyuan，Li Gangtie，Lu Lina，et al. Distribution of soil size and fractal characteristics under low-efficiency poplar forests[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(5)：308-315.

Distribution of Soil Size and Fractal Characteristics Under Low-Efficiency Poplar Forests

Tong Chunyuan[1], Li Gangtie[1], Lu Lina[2], Liu Zhaoxia[2], Zhang Xiaojuan[2], Zhang Yulong[3]
(1. *College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 2. *Ordos Forestry and Destert Control Research Institute, Ordos, Inner Mongolia* 017000, *China*; 3. *Ordos Forestry Workstation, Ordos, Inner Mongolia* 017000, *China*)

Abstract: [Objective] The particle size distribution and fractal characteristics of soil under low-efficiency poplar forests in Ordos region were studied to provide a basis for the cause analysis and transformation of low-efficiency poplar forests in this region, and to provide a reference and decision-making support for the scientific management of poplar plantations. [Methods] We used a Mastersizer 3000 laser diffraction particle size analyzer to measure soil particle size, and a fractal dimension model of soil particle volume to calculate the fractal dimension D, and measured soil nutrients. [Results] ① The main components of soil particles in the low-efficiency poplar forests were fine sand (42.33%), ultra-fine sand (15.72%), and medium sand

收稿日期：2019-03-25　　**修回日期**：2019-04-12
资助项目：林业公益性行业科研专项“浑善达克沙地疏林型植被建设技术研究”(201504412)；国家自然科学基金项目“山杏油脂特性地理变异对环境因子的响应及其适应性评价”(31260202)。
第一作者：童春元(1993—)，女(汉族)，内蒙古自治区鄂尔多斯市人，硕士研究生，研究方向为荒漠化防治。E-mail：1205040490@qq.com。
通讯作者：李钢铁(1963—)，男(汉族)，内蒙古自治区呼和浩特市人，教授，博士导师，主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail：13848817183@163.com。

(19.77%). The main soil texture type was sand and the fractal dimension D of the soil particles was in the range of 1.222 5～2.204 5, which was at a low level. ② The fractal dimension D of soil particles was positively correlated with the silt, ultra-fine sand, and fine sand content, but was negatively correlated with the medium sand, coarse sand, and ultra-coarse sand content. ③ With an increase of the soil layer, the soil particle content with particle size <250 microns increased, whereas the soil particle content with particle size >250 microns decreased. The fractal dimension D value of soil particles increased with an increase of the soil layer; however, the increase was not significant. ④ The relationship among the fractal dimension D of soil particles and the soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, and available phosphorus content was not significant, and the change of soil nutrient content had no significant effect on fractal dimension D. [Conclusion] Sand is the main component of soil particles in low-efficiency poplar forests in the Ordos area. The fractal dimension of the soil is low and the soil structure is very uneven. This type of soil structure is very harmful to the normal growth and development of poplar. This poor soil structure leads to the formation of low-efficiency poplar forests to a certain extent. The soil structure under the forest could be improved by prevention and transformation.

Keywords: low-efficiency forests; soil particle size distribution; fractal dimension; soil nutrient

土壤是由众多大小不等的土壤颗粒按照不同比例组合而成的松散多孔介质[1],具有一定的分形特征。土壤颗粒作为土壤结构的基本单元[2],对土壤养分及其理化性质产生不同程度的影响。土壤粒径分布(particle size distribution, PSD)能够反映土壤分化过程,影响土壤的结构、水分、肥力状况以及植物的生长[1],同时与土壤侵蚀和退化直接相关[3]。

分形理论是描述不规则几何形体的有效方法,通过分形理论,可以由事物内部的自相似性来判断其复杂的结构特征[4-6]。1967 年,Mandelbrot 在“英国的海岸线有多长”一文中首次提出分形理论[7],并在 1977 年出版的《分形:形、机遇与维数》中详细阐明了分形几何的主要内容、中心思想、现实意义和分析方法[8]。此后,分形理论凭其独特的世界观和方法论受到各界科学家的重视[6],并被迅速应用到许多研究领域[9]。

从 1980 年开始,分形理论逐步被应用到土壤科学中[10],其中土壤颗粒分形维数为定量化描述土壤形态结构与理化性质等诸多问题提供了有效途径。有研究表明土壤颗粒分形维数能表征土壤颗粒的分布特征、判断土壤质地是否均匀,还可以有效反映土壤的其他特性,如土壤水分、土壤密度和土壤养分等理化性质对土壤质地产生的直接或间接影响等[11-12]。

低效林是指受人为或自然因素的影响,林分结构和稳定性失调,林木生长发育迟滞,系统功能退化或丧失,导致森林生态功能、林产品产量或生物量显著低于同类立地条件下相同林分平均水平,不符合培育目标的林分总称[13]。鄂尔多斯地区自 2000 年左右,各旗区杨树(*Populus*)人工林体系陆续出现大面积衰退现象,具体表现为:林木生长缓慢、材积小、材质差、病虫害严重等,绝大多数形成了“小老树”林,即低效林。杨树低效林的存在已对现实林分的正常生长造成了严重影响和危害,若不尽快采取有效防范治理措施,将严重阻碍林业及区域的可持续发展,大大降低人工林的生态效益和经济效益。为此,本研究拟通过分析鄂尔多斯地区杨树低效林下土壤颗粒的组成、分布、分形特征,利用土壤颗粒分形维数客观反映土壤的结构性状,探明土壤颗粒分形维数与土壤养分的相关性,了解杨树低效林生长和分布的土壤的条件,以期为研究区杨树低效林的成因分析及改造研究提供基础依据,并为杨树人工林的科学管理提供参考与决策支持[13-14]。

1　研究区概况

研究区位于内蒙古自治区西南部鄂尔多斯市,地处鄂尔多斯高原腹地,地理坐标为 37°35′—40°51′N,106°42′—111°27′E。东、南、西分别与晋、陕、宁毗邻,北及东北与包头、呼和浩特隔河相望[15],总面积达 8.74×10^4 km^2,其中东西约 400 km 长,南北约 340 km 宽。该地区是中国北部地区重要的农牧交错地带,也是草原—草原化荒漠的过渡带,属典型的温带大陆性气候。年平均气温 5.3～8.7 ℃,日最高气温 38 ℃,日最低气温 −31.4 ℃,无霜期 130～160 d。降水量东多西少,时空分布不均匀,年降水量为 170～350 mm,主要集中于 7—9 月份,约为年降水量的 70%。年蒸发量达 2 000～3 000 mm,约为年降水量 7.2 倍。全年 8 级以上大风日数 40 d 以上,多盛行西风及北偏西风,年平均风速 3.6 m/s,最大风速可达 22 m/s[16-17]。

2 材料与方法

2.1 土壤样品采集

取样地分别位于鄂托克前旗洪山塘林场,达拉特旗白土梁林场,伊金霍洛旗霍洛林场,东胜区罕台庙镇撖家塔村 4 个地区。于 2018 年 7 月进行土样采集,每个地区选择立地条件相近的低效林和正常林各设 3 个样地,共 24 个样地,每个样地按 S 型布设 5 个取样点,在每个取样点挖取土壤剖面,每个剖面分 0—20,20—40,40—60 cm 这 3 层取样,并将各层采集的 5 个样点的土壤样品均匀混合,根据 4 分法将其分 3 袋装,带回实验室进行分析。

2.2 土壤样品测定

将采集的土样自然风干,通过 2 mm 筛,除去树根和其他杂物,然后使用英国生产的 Mastersizer3000 激光衍射粒度分析仪测量土壤粒径,粒度分析的粒径范围为 0.02～2 000 μm,土壤粒径分级采用美国制土壤粒级标准(表 1)[18-19]。

土壤有机质含量通过重铬酸钾氧化—外加热法测定;全氮、速效氮和速效磷含量分别采用半微量开氏法、扩散吸收法和碳酸氢钠法测定[10,20]。

表 1 土壤粒级制(美国)

土壤粒径/μm	土壤粒级
<2	黏 粒
2～50	粉 粒
50～100	极细砂粒
100～250	细砂粒
250～500	中砂粒
500～1 000	粗砂粒
1 000～2 000	极粗砂粒

2.3 数据分析与处理方法

本文采用土壤颗粒体积分形维数模型来计算分形维数 D 值,计算公式如下[17]:

$$V_R/V_T=(R/\lambda_V)^{3-D} \quad (1)$$

对式(1)两边取对数可得:

$$\lg(V_R/V_T)=(3-D)\lg(R/\lambda_V) \quad (2)$$

式中:λ_V——土壤粒径分级中最大粒径(μm);R——某特定粒径(μm);V_R——粒径小于 R 的土壤颗粒总体积;V_T——土壤颗粒的总体积;D——土壤颗粒体积分形维数。

分别以式(2)左边为纵坐标,右边为横坐标做散点图,根据最小二乘法,通过添加趋势线,得到线性回归拟合方程和拟合系数(R^2),从拟合方程中得到直线斜率,该斜率就等于式(2)中的$(3-D)$,由此获得每个土壤样品的分形维数 D 值[21-22]。

对试验所得数据的统计分析等相关处理用 Microsoft Excel 2016 和 spss 17.0 进行。

3 结果与分析

3.1 土壤颗粒粒径分布和分形维数的总体特征

研究区土壤颗粒粒径分布及土壤颗粒分形维数 D 值的统计结果见表 2。可以看出,研究区土壤颗粒主要集中在(2～2 000 μm)的粒径范围内,土壤组成以砂粒为主,黏粒和粉粒相对较少,砂粒中又以细砂粒为主,其次为中砂粒、极细砂粒、极粗砂粒、粗砂粒。其中,低效林和正常林下土壤砂粒含量均值分别为 95.36%和 93.23%,粉粒含量均值为 4.48%和6.72%,而黏粒含量均值不足 1%。而在砂粒中,两种林分的极细砂粒含量均值为 15.72%和 16.95%,细砂粒含量均值为 42.33%和 46.91%,中砂粒含量均值为 19.77%和 18.92%,粗砂粒含量均值为 5.66%和 4.22%,粗砂粒含量均值为 11.86%和 6.22%。通过以上对比发现正常林的粉粒、极细砂粒和细砂粒含量高于低效林,而中砂粒、粗砂粒和极粗砂粒含量低于低效林;同时也可看出,4 个地区杨树低效林和正常林下的土壤颗粒分布总体上具有相似性,表现出同质性,并且各地土壤粒径分布较集中,呈非均匀分布。

对照美国土壤质地分类表(表 1)可知,研究区土壤质地可分为砂土和壤质砂土两类,而砂土又为最主要的质地类型。

根据土壤颗粒体积分形维数模型,计算得到研究区土壤颗粒分形维数 D 值在 1.222 5～2.204 5 范围内,其中低效林下 D 值平均值为 1.749 0,正常林下 D 值平均值为 1.873 0。其中鄂托克前旗、达拉特旗、东胜区和伊金霍洛旗 4 个地区杨树低效林下土壤颗粒分形维数均值分别为 1.524 5,1.760 5,1.813 4,1.897 9;正常林下各地区土壤颗粒分形维数均值分别为 1.696 0,1.843 1,1.889 8,2.065 4。从地区上来看,土壤颗粒分形维数 D 值表现为:伊金霍洛旗>东胜区>达拉特旗>鄂托克前旗;从林分类型来看,表现为正常林>低效林,以上分析可知不同地区不同林分下的土壤颗粒组成存在一定的差异,相应的分形维数也随之发生变化,土壤颗粒组成对分形维数 D 值有一定的影响。计算分形维数 D 的拟合方程相关系数 R^2 全部大于 0.8,说明方程拟合效果较好,所得研究区 D 值比较准确,具有统计意义。结合其他学者的相关研究[23],无论从总体还是局部来看,本研究区分形维数 D 值都处于相对较低的水平,土壤粗颗粒含量较高,而细颗粒含量较少,土壤结构极不均匀。

表 2　土壤颗粒粒径分布及分形维数

取样地点	样地类型	土层深度/cm	土壤颗粒分级/μm							D	R^2
			黏粒	粉粒	极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂		
鄂托克前旗	低效林	0—20	0.000 0	0.186 0	10.618 0	55.678 0	16.418 9	1.080 1	16.019 0	1.222 5	0.864 4
		20—40	0.010 0	1.748 0	17.872 0	57.484 9	9.502 4	1.760 0	11.622 7	1.672 6	0.916 6
		40—60	0.045 1	2.475 9	22.926 0	55.011 0	10.684 8	1.713 3	7.143 9	1.678 3	0.935 4
	正常林	0—20	0.010 0	0.000 0	6.221 0	63.039 1	18.576 3	1.795 7	10.357 9	1.498 0	0.623 0
		20—40	0.012 0	2.684 0	11.986 0	63.638 1	16.161 4	0.433 1	5.085 4	1.669 5	0.876 4
		40—60	0.056 0	2.985 0	13.638 0	63.001 9	15.712 7	0.412 0	4.194 4	1.920 6	0.855 8
达拉特旗	低效林	0—20	0.000 0	7.126 2	19.108 5	40.677 6	5.213 0	1.559 4	26.315 3	1.644 1	0.955 4
		20—40	0.017 6	9.054 9	23.950 1	42.174 3	12.876 1	0.926 8	11.000 2	1.765 7	0.951 8
		40—60	0.020 2	11.361 1	25.526 7	43.234 0	11.324 6	0.110 1	8.423 3	1.871 8	0.891 7
	正常林	0—20	0.000 0	8.611 1	19.446 8	42.271 0	8.033 8	1.188 4	20.448 9	1.765 7	0.951 8
		20—40	0.011 0	12.586 1	26.665 9	43.800 4	8.062 1	0.936 1	7.938 4	1.867 2	0.912 1
		40—60	0.062 1	13.014 4	28.512 7	44.425 2	10.013 2	0.940 6	3.031 8	1.896 4	0.918 1
东胜区	低效林	0—20	0.000 0	3.871 5	9.065 0	27.265 9	34.189 0	8.792 1	16.816 5	1.686 2	0.951 2
		20—40	0.087 0	5.181 1	10.523 0	34.725 6	31.819 4	7.278 2	10.385 7	1.864 5	0.938 9
		40—60	0.121 5	6.948 6	15.363 8	36.644 3	26.042 9	5.108 3	9.770 6	1.889 5	0.917 2
	正常林	0—20	0.015 0	5.077 1	12.120 3	39.130 7	31.580 6	4.591 8	7.484 5	1.798 1	0.910 4
		20—40	0.053 1	5.328 1	14.427 6	42.732 1	30.344 4	3.677 0	3.437 7	1.885 8	0.938 2
		40—60	0.097 7	9.818 9	18.631 8	44.144 2	22.792 9	2.980 9	1.533 6	1.985 6	0.919 0
伊金霍洛旗	低效林	0—20	0.060 5	2.076 9	7.220 4	35.692 9	26.572 1	17.540 0	10.837 2	1.725 2	0.934 0
		20—40	0.088 3	2.213 5	12.129 1	38.732 4	26.840 0	12.603 0	7.393 7	1.764 1	0.849 1
		40—60	0.151 0	2.797 9	14.413 8	40.645 8	25.835 4	9.501 5	6.654 5	2.204 5	0.876 3
	正常林	0—20	0.018 5	5.460 5	15.286 4	30.248 1	28.084 0	15.184 0	5.718 5	1.970 5	0.907 5
		20—40	0.068 3	7.131 2	17.031 2	41.513 3	20.616 9	10.040 6	3.598 5	2.081 4	0.850 4
		40—60	0.121 5	8.014 2	19.448 6	44.913 1	17.084 0	8.535 5	1.883 1	2.144 5	0.876 7

3.2　土壤颗粒分形维数与土壤颗粒百分含量的关系

为了深入了解杨树低效林下土壤颗粒分形维数 D 值与土壤颗粒各粒级含量的关系,利用最小二乘法对各地区不同粒级土壤颗粒含量与分形维数 D 值进行统计回归分析,得出土壤颗粒分形维数 D 值与土壤颗粒各粒级含量存在一定的线性关系,结果如表 3 所示。

从表 3 可知,4 个地区的变化趋势基本趋于一致,但在显著性上有所区别。其中 4 个地区的土壤颗粒分形维数 D 值与粉粒、极细砂粒、细砂粒含量均呈极显著正相关关系($p<0.01$);与中砂粒均呈极显著负相关关系($p<0.01$);与粗砂粒含量的相关性在鄂托克前旗和东胜区表现出一致性,均呈显著负相关关系($p<0.05$),但在达拉特旗二者的相关性不显著($p>0.05$),在伊金霍洛旗又呈极显著负相关关系($p<0.01$);与极粗砂粒含量的相关性在鄂托克前旗呈显著负相关关系($p<0.05$),在其他 3 个地区均呈极显著负相关关系($p<0.01$)。

表 4 反映的是正常林下土壤颗粒分形维数 D 与土壤颗粒含量的相关性,各地区变化趋势基本一致,土壤颗粒分形维数 D 值与粉粒、极细砂粒、细砂粒含量均呈正相关关系;与中砂粒、粗砂粒、极粗砂粒均呈负相关关系,其中绝大部分数据表现为极显著相关($p<0.01$),个别数据表现现为显著相关($p<0.05$)。

综上所述,从整体上看,研究区土壤颗粒分形维数 D 值与粉粒、极细砂粒、细砂粒含量呈显著正相关关系,与中砂粒、粗砂粒、极粗砂粒呈显著负相关关系。表现为粉粒、极细砂粒、细砂粒含量越高,土壤分形维数 D 值越高,中砂粒,粗砂粒和极粗砂粒含量越高,分形维数 D 值越低。

3.3　土壤颗粒百分含量及分形维数在垂直剖面上的变化

3.3.1　*土壤颗粒含量在垂直剖面上的变化*　由图 1—2 可知,鄂托克前旗、达拉特旗、东胜区、伊金霍洛旗 4 个地区的土壤颗粒各粒级百分含量随土层深度增加产生变化,且 4 个地区变化趋势相似。土壤中粒径<250 μm(粉粒,极细砂粒、细砂粒)的土壤颗粒含量随土层深度的增加而增加,粒径>250 μm(中沙粒、粗砂粒、极粗砂粒)的土壤颗粒含量随土层深度的增加而减小。

表 3 低效林下土壤颗粒分形维数 D 与土壤颗粒含量(%)的关系

地点	粒径分级	拟合回归方程	R^2	显著性水平
鄂托克前旗	粉 粒	$Y=0.927\ 4X+2.408\ 5$	0.253 1	$p<0.01$
	极细砂粒	$Y=0.030\ 8X+2.487\ 9$	0.937 7	$p<0.01$
	细砂粒	$Y=0.080\ 8X+2.233\ 4$	0.764 6	$p<0.01$
	中沙粒	$Y=-0.008\ 1X+2.991\ 0$	0.975 9	$p<0.01$
	粗砂粒	$Y=-0.005\ 2X+2.988\ 5$	0.778 1	$p<0.05$
	极粗砂粒	$Y=-0.010\ 1X+3.009\ 4$	0.818 7	$p<0.05$
达拉特旗	粉 粒	$Y=0.289\ 2X+2.431\ 3$	0.561 1	$p<0.01$
	极细砂粒	$Y=0.029\ 7X+2.590\ 2$	0.988 5	$p<0.01$
	细砂粒	$Y=0.042\ 7X+0.042\ 7$	0.847 4	$p<0.01$
	中沙粒	$Y=-0.008\ 1X+2.989\ 3$	0.992 0	$p<0.01$
	粗砂粒	$Y=-0.001\ 8X+2.987\ 9$	0.650 6	$p>0.05$
	极粗砂粒	$Y=-0.007\ 9X+3.005\ 3$	0.869 7	$p<0.01$
东胜区	粉 粒	$Y=0.294\ 0X+2.483\ 4$	0.459 8	$p<0.01$
	极细砂粒	$Y=0.042\ 4X+2.584\ 0$	0.999 3	$p<0.01$
	细砂粒	$Y=0.046\ 0X+2.565\ 9$	0.980 0	$p<0.01$
	中沙粒	$Y=-0.017\ 7X+3.024\ 9$	0.892 3	$p<0.01$
	粗砂粒	$Y=-0.006\ 9X+2.988\ 4$	0.995 9	$p<0.05$
	极粗砂粒	$Y=-0.008\ 3X+3.007\ 0$	0.877 5	$p<0.01$
伊金霍洛旗	粉 粒	$Y=0.185\ 4X+2.473\ 6$	0.782 4	$p<0.01$
	极细砂粒	$Y=0.061\ 4X+2.629\ 2$	0.945 7	$p<0.01$
	细砂粒	$Y=0.463\ 9X+1.338\ 3$	0.932 5	$p<0.01$
	中沙粒	$Y=-0.023\ 4X+3.007\ 4$	0.911 7	$p<0.01$
	粗砂粒	$Y=-0.005\ 9X+2.988\ 7$	0.992 3	$p<0.01$
	极粗砂粒	$Y=-0.009\ 7X+3.009\ 1$	0.914 6	$p<0.01$

表 4 正常林下土壤颗粒分形维数 D 与土壤颗粒含量(%)的关系

地点	粒径分级	拟合回归方程	R^2	显著性水平
鄂托克前旗	粉 粒	$Y=0.869\ 8X+1.825\ 5$	0.237 1	$p<0.01$
	极细砂粒	$Y=0.082\ 9X+1.887\ 4$	0.998 1	$p<0.01$
	细砂粒	$Y=0.098\ 3X+1.800\ 8$	0.648 9	$p<0.05$
	中沙粒	$Y=-0.013\ 9X+2.966\ 4$	0.955 3	$p<0.01$
	粗砂粒	$Y=-0.214\ 3X+2.951\ 9$	0.977 8	$p<0.01$
	极粗砂粒	$Y=-0.035\ 3X+2.921\ 9$	0.993 2	$p<0.01$
达拉特旗	粉 粒	$Y=0.239\ 6X+2.039\ 1$	0.276 7	$p<0.01$
	极细砂粒	$Y=0.081\ 6X+2.183\ 2$	0.999 9	$p<0.01$
	细砂粒	$Y=0.108\ 7X+2.183\ 1$	0.912 9	$p<0.01$
	中沙粒	$Y=-0.006\ 8X+2.817\ 4$	0.970 5	$p<0.01$
	粗砂粒	$Y=-0.120\ 9X+2.808\ 9$	0.838 8	$p>0.05$
	极粗砂粒	$Y=-0.021\ 6X+2.685\ 9$	0.969 9	$p<0.01$
东胜区	粉 粒	$Y=0.447\ 1X+1.968\ 6$	0.283 3	$p<0.01$
	极细砂粒	$Y=0.101\ 3X+2.099\ 7$	0.999 9	$p<0.01$
	细砂粒	$Y=0.112\ 7X+2.058\ 2$	0.987 0	$p<0.01$
	中沙粒	$Y=-0.046\ 0X+2.927\ 1$	0.877 8	$p<0.01$
	粗砂粒	$Y=-0.044\ 6X+2.833\ 9$	0.969 3	$p<0.01$
	极粗砂粒	$Y=-0.023\ 7X+2.763\ 2$	0.962 2	$p<0.01$
伊金霍洛旗	粉 粒	$Y=0.721\ 0X+1.877\ 4$	0.192 4	$p<0.05$
	极细砂粒	$Y=0.1769\ 0X+1.818\ 7$	0.999 5	$p<0.01$
	细砂粒	$Y=0.073\ 8X+2.157\ 6$	0.903 7	$p<0.01$
	中沙粒	$Y=-0.144\ 6X+3.809\ 3$	0.946 6	$p<0.01$
	粗砂粒	$Y=-0.016\ 5X+2.999\ 8$	0.988 1	$p<0.01$
	极粗砂粒	$Y=-0.039\ 1X+2.997\ 9$	0.858 9	$p<0.01$

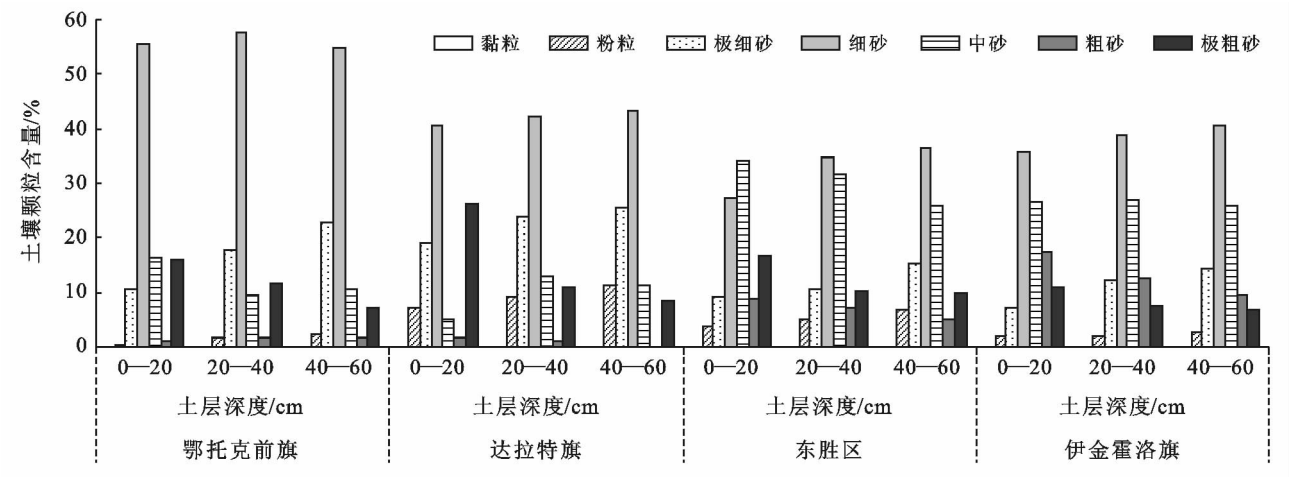


图 1 低效林下土壤颗粒含量在垂直剖面上的变化

3.3.2 土壤颗粒分形维数在垂直剖面上的变化 从图 3 可以得知研究区 4 个旗区杨树低效林与正常林下的土壤颗粒分形维数在土壤剖面垂直方向上的变化规律。低效林下,在 0—20 cm 土层时,土壤颗粒分形维数为鄂托克前旗 1.222 5,达拉特旗 1.644 1,东胜区 1.686 2,伊金霍洛旗 1.725 2,当土层深度为 20—40 cm 时,土壤颗粒分形维数分别为 1.672 6,1.765 7,1.864 5,1.764 1,当土层继续加深到 40—60 cm 土层,土壤颗粒分形维数依次为 1.678 3,1.871 8,1.889 5,2.204 5;正常林下,在 0—20 cm 土层时,土壤颗粒分形维数为鄂托克前旗 1.498 0,达拉特旗 1.765 7,东胜区 1.798 1,伊金霍洛旗 1.970 5,当土层深度为 20—40 cm 时,土壤颗粒分形维数分别为 1.669 5,1.867 2,1.885 8,2.081 4,当土层继续加深到 40—60 cm 土层,土壤颗粒分形维数依次为 1.920 6,1.896 4,1.985 6,2.144 5。

由此看来,4 个旗区的杨树无论是低效林还是正常林,其林下的土壤颗粒分形维数 D 值变化基本一致,随土层深度的增加分形维数 D 值均有增大的趋势,但其增大的范围都很小。且在不同土层深度上 4 个旗区的土壤颗粒分形维数 D 值表现为:伊金霍洛旗>东胜区>达拉特旗>鄂托克前旗,由于各旗区土壤粒径组成和分布的不同,致使土壤颗粒分形维数 D 值的大小存在差异。

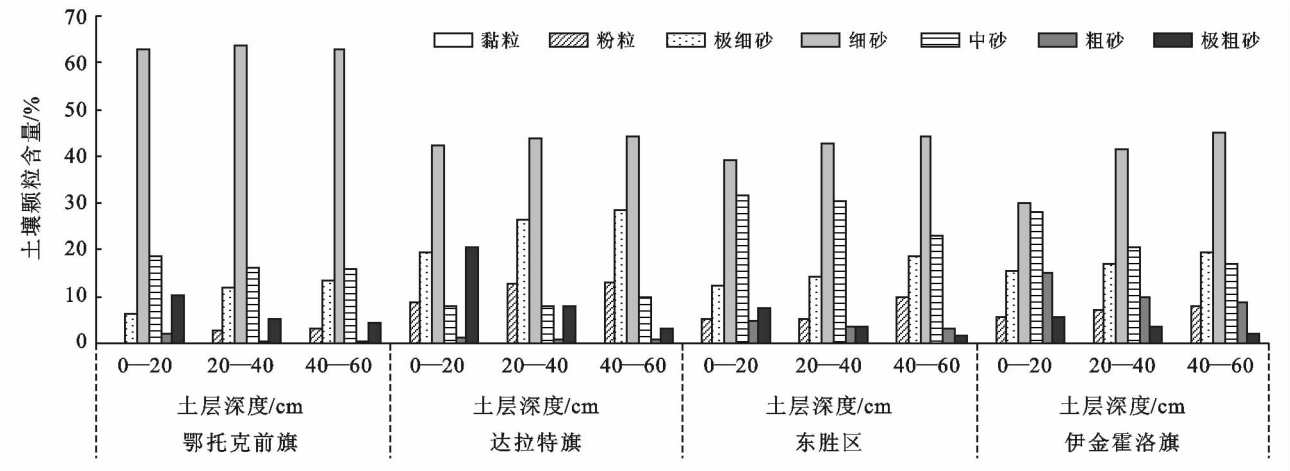


图 2　正常林下土壤颗粒含量在垂直剖面上的变化

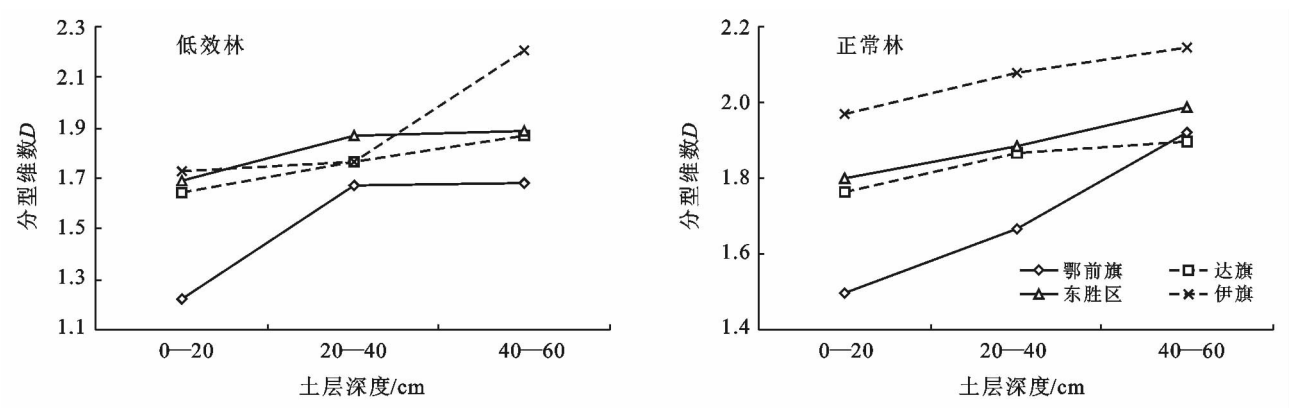


图 3　土壤颗粒分形维数在垂直剖面上的变化

3.4　土壤颗粒分形维数 D 与土壤养分的相关性

由于正常林与低效林下土壤颗粒分形维数 D 与土壤养分的相关性表现基本一致,因此本文将两种林分下的土壤合二为一做出了以下分析。通过对土壤分形维数 D 值和土壤各养分之间的回归分析发现(见图 4),本研究区内,土壤分形维数与土壤有机质含量、土壤全氮含量、土壤速效氮含量以及土壤速效磷含量的关系均未达到显著相关关系,土壤各养分含量的变化对分形维数 D 值没有显著影响,这可能是因为本研究区属于荒漠化地区,此前土壤沙化严重,土壤结构不良,在通过人工植被恢复的过程中,土壤养分状况虽然可以在短时期内得到改善,但土壤的机械组成性状却不能迅速改变[24]。

4　讨论与结论

4.1　讨　论

土壤颗粒是土壤组成必不可少的部分,对植被的生长起着至关重要的作用,并直接影响土壤的基本性质,土壤颗粒的大小、组成与排列状况不同,土壤的养分、水分以及其他性能也会有相应的差异[25]。研究发现,通过土壤颗粒分形维数可以了解土壤颗粒的分布特征,从而可以判断土壤质地是否均匀。

本文对鄂尔多斯地区杨树低效林下土壤分形特征的研究发现,土壤的分形维数介于 1.222 5～2.204 5 之间,总体处于偏低水平。大量研究表明,土壤颗粒分形维数与土壤中的细颗粒物质(黏粒、粉粒)含量密切相关[10,26],土壤细颗粒物质含量越多,分形维数 D 值越大,反之分形维数 D 值越小[10]。

本研究区内细颗粒物质(黏粒、粉粒)含量较低,土壤组成以砂粒为主,且黏粒、粉粒、砂粒比例差异较大,分布极不均匀,因此相应的分形维数 D 值也很低。本文经研究得出,分形维数 D 值与粉粒、极细砂粒、细砂粒的含量呈显著正相关关系,与中砂、粗砂、极粗砂粒呈显著负相关关系,与王文彪等[27]在研究

阴山北麓不同土地利用类型表土颗粒分形特征时的部分结果一致。但还有许多学者认为，随黏粒、粉粒含量的增加土壤分形维数 D 值升高，随砂粒含量的增加土壤分形维数 D 值降低[2,7,11,26]，这与本文研究结果有所不同，首先由于本研究区内黏粒含量极少，不足以探讨其与分形维数 D 值的关系，因此未得出黏粒含量与分形维数 D 值的相关结果，另外还可能是由各环境因子的时空异质性、干扰因子和受干扰程度的不同、植被类型和土地利用方式的不同、粒级分级标准的不同、研究尺度的不同所导致[26,28]。

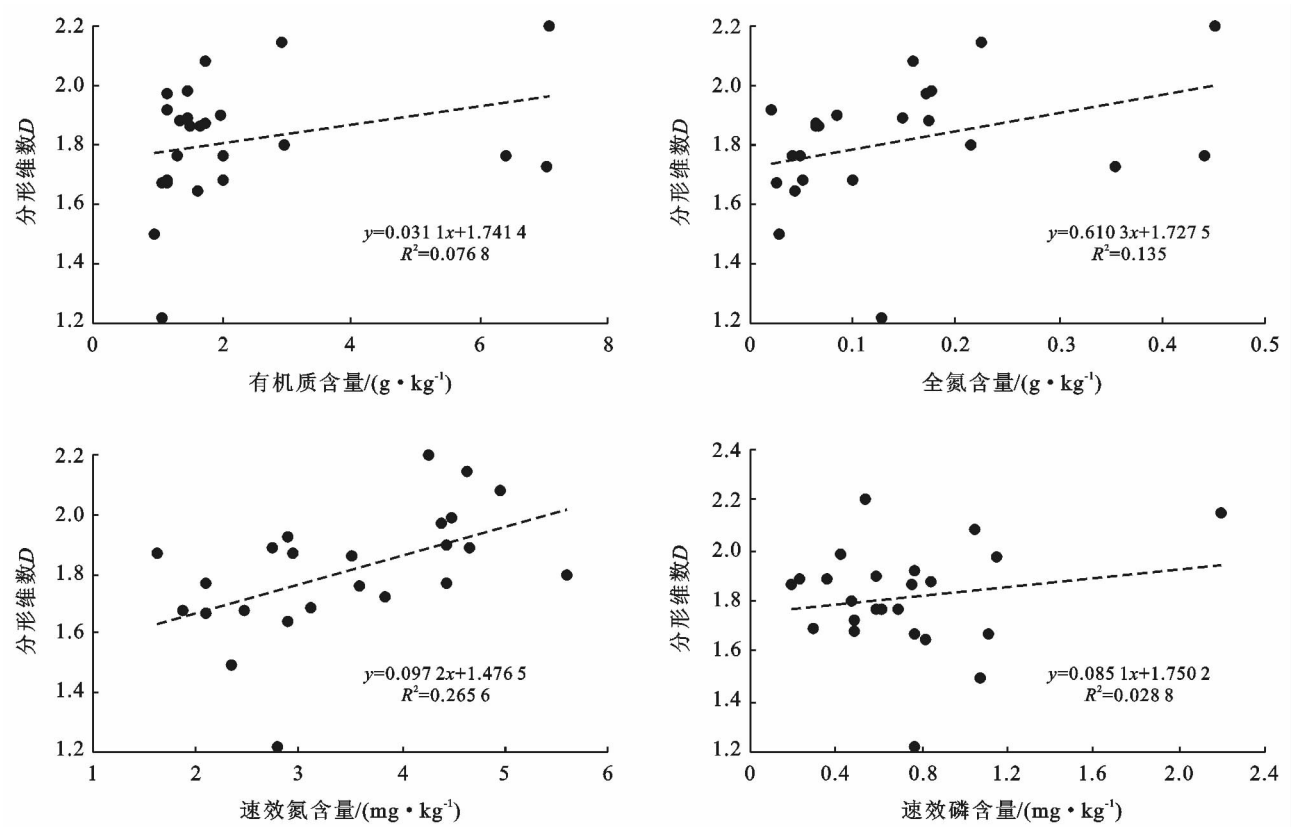


图 4 分形维数与土壤养分的关系

高玉寒等[29]在研究赤峰市敖汉旗几种类型土壤机械组成和分形维数时发现随土层深度的增加，黏粒和粉粒的含量增加，而沙粒的含量减少，这与本文的结果既有相似之处也有不同之处，本文认为随土层深度的加深，土壤中粒径＜250 μm(粉粒，极细砂粒、细砂粒)的土壤颗粒含量增加，粒径＞250 μm(中沙粒、粗砂粒、极粗砂粒)的土壤颗粒含量减小；此外，邓良基等[20]在研究成都平原土壤分形维数时发现：土壤分形维数 D 随着土层深度增加而减小。与本研究所得出的规律恰巧相反，本研究中随土层深度的加深，分形维数 D 值增大，但增大幅度并不明显；由此也可看出分形维数 D 值随细颗粒物质含量由少到多，呈现由小到大的变化趋势。

许多研究还表明，分形维数 D 值对土壤的养分特征也具有一定的指示作用。研究者们在研究方向、内容、研究区域等研究因素上的不同，使得他们的研究结果也有所差异。高传友等[28]在研究北江干流河岸区域不同植被类型土壤的分形分布特征时发现分形维数 D 值与各养分的关系为：与全磷含量呈显著正相关关系，与硝态氮含量呈显著负相关关系，与全氮相关性不显著；而曹樱子等[10]发现土壤全氮和全磷含量与分形维数存在显著正相关关系；王富等[30]认为分形维数与有机质呈负相关关系；而张军红等[2]研究发现分形维数 D 值与土壤有机质、总氮含量呈显著负相关关系；还有学者研究发现分形维数 D 值与有机质、全氮、碱解氮、全磷和速效磷含量呈正相关关系[31]；本研究结果显示，分形维数 D 值与土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷含量的关系没有达到显著水平，与肖冬冬等[32]的部分研究结果一致，这可能是因为本研究区地处毛乌素沙地和库布齐沙漠两大沙质荒漠化地带，发生过严重的土地退化，土壤养分条件差，在通过人工植被恢复的过程中，土壤养分状况虽然可以在短时期内得到改善，但土壤的机械组成性状却不能迅速改变[24]。

4.2 结 论

(1) 鄂尔多斯地区低效林下和正常林下土壤颗粒

组成主要以细砂粒(42.33%和46.91%)、极细砂粒(15.72%和16.95%)和中砂粒(19.77%和18.92%)为主，粉粒含量较少4.48%和6.72%)，黏粒含量最低(1%)；主要土壤质地类型为砂土；土壤颗粒分形维数 D 值在1.222 5～2.204 5范围之内，该值处于较低水平。

(2) 土壤颗粒分形维数 D 值与粉粒、极细砂粒、细砂粒含量呈显著正相关关系，与中砂粒、粗砂粒、极粗砂粒呈显著负相关关系。

(3) 随土层深度的增加，土壤中粒径＜250 μm的土壤颗粒含量增加，而粒径＞250 μm的土壤颗粒含量减少；随土层深度的增加，土壤颗粒分形维数 D 值增大，但增大幅度不大。

(4) 土壤颗粒分形维数 D 值与土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷含量的关系均未达到显著相关关系，土壤各养分含量的变化对分形维数 D 值没有显著影响。

[参 考 文 献]

[1] 冯瑞，郭月峰，张霞，等. 敖汉旗两种主要土壤类型的土壤机械组成[J]. 农业工程，2017，7(6)：100-103.

[2] 张军红，徐义萍，王文鑫，等. 毛乌素沙地油蒿植冠下表层土壤粒径特征分析[J]. 中南林业科技大学学报，2018，38(6)：36-40，55.

[3] 董莉丽，郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分形特征[J]. 中国水土保持科学，2009，7(2)：35-41.

[4] 刘秀珍，李翔，向云，等. 树儿梁小流域坝地土壤颗粒的分形特征[J]. 核农学报，2011，25(2)：337-341，381.

[5] 徐祥明，覃灵华. 西南地区水耕人为土分形特征及与土壤属性的关系[J]. 西南农业学报，2011，24(5)：1838-1843.

[6] 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.

[7] Mandelbrot B. How long is the coast of Britain?: Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science，1967，156(3775)：636-638.

[8] Manderlbrot B B. Fractals: Form, chance and dimension [M]. San Francisco: Free-man，1977.

[9] 解军强. 分形理论的发展研究概述[J]. 科教导刊，2013(25)：184-185.

[10] 曹樱子，王小丹. 藏北高寒草原土壤粒径分布分形维数特征[J]. 山地学报，2014，32(4)：438-443.

[11] 赵清贺，卢训令，汤茜，等. 黄河中下游河岸缓冲带土壤粒径分形特征[J]. 中国水土保持科学，2016，14(5)：37-46.

[12] 徐国策，李占斌，李鹏，等. 丹江中游典型小流域土壤颗粒及分形特征[J]. 中国水土保持科学，2013，11(5)：28-35.

[13] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准：全国营造林综合核查技术规程(LY/T 2083-2013)[S]. 北京：中国标准出版社，2013.

[14] 刘美龄，叶勇，曹长青，等. 海南东寨港红树林土壤粒径分布的分形特征及其影响因素[J]. 生态学杂志，2008，27(9)：1557-1561.

[15] 晋永芬，张兰芳，杭欣宇，等. 鄂尔多斯市旱作农业概况及其发展对策[J]. 科学种养，2015(2)：243.

[16] 吕贻忠，李保国，胡克林，等. 鄂尔多斯夏初不同地形土壤水分的空间变异[J]. 中国农业大学学报，2002，7(5)：38-43.

[17] 蒙吉军，赵春红，刘明达. 基于土地利用变化的区域生态安全评价：以鄂尔多斯市为例[J]. 自然资源学报，2011，26(4)：578-590.

[18] 赵盼盼，李国旗，邵文山，等. 封育对荒漠草原苦豆子群落土壤粒径分形特征的影响[J]. 西北植物学报，2017，37(6)：1234-1241.

[19] 李国旗，赵盼盼，邵文山，等. 封育对荒漠草原沙芦草群落土壤粒径分形维数及理化性质的影响[J]. 草地学报，2018，26(3)：551-558.

[20] 邓良基，林正雨，高雪松，等. 成都平原土壤颗粒分形特征及应用[J]. 土壤通报，2008，39(1)：38-42.

[21] 白一茹，汪有科. 黄土丘陵区土壤粒径分布单重分形和多重分形特征[J]. 农业机械学报，2012，43(5)：43-48，42.

[22] 杜海燕，周智彬，刘凤山，等. 绿洲化过程中阿拉尔垦区土壤粒径分形变化特征[J]. 干旱区研究，2013，30(4)：615-622.

[23] 曾宪勤，刘和平，路炳军，等. 北京山区土壤粒径分布分形维数特征[J]. 山地学报，2008，26(1)：65-70.

[24] 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.

[25] 甘凤玲，王涛，何丙辉，等. 汶川震区不同植被下土壤组成及其分型特征[J]. 水土保持研究，2018，25(1)：84-91.

[26] 刘继龙，马孝义，付强，等. 陕西杨凌土壤粒径分布体积分形维数特征分析及预测[J]. 灌溉排水学报，2012，31(3)：59-62，67.

[27] 王文彪，高君亮. 阴山北麓不同土地利用类型表土颗粒分形特征[J]. 安徽农业科学，2011，39(18)：10899-10902.

[28] 高传友，赵清贺，刘倩. 北江干流河岸带不同植被类型土壤粒径分形特征[J]. 水土保持研究，2016，23(3)：37-42.

[29] 高玉寒，姚云峰，李龙，等. 赤峰市敖汉旗4种类型土壤机械组成及分形维数的垂直分布特征[J]. 江苏农业科学，2017，45(11)：236-239.

[30] 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.

[31] 吕圣桥. 黄河三角洲滩地土壤颗粒分形特征及其与土壤性质的相关性研究[D]. 泰安：山东农业大学，2012.

[32] 肖冬冬，史正涛，刘新有，等. 西双版纳橡胶林土壤颗粒体积分形维数特征[J]. 热带作物学报，2017，38(5)：817-823.