

山东省不同土地利用方式土壤颗粒组成及其分形维数特征

张海廷, 时延庆

(济宁市水文局, 山东 济宁 272019)

摘要:选取山东省 120 个不同土壤剖面,应用分形理论研究不同土地利用方式的土壤颗粒分形特征以及与土壤养分的相关关系。结果表明:(1) 不同土地利用方式土壤铵态氮、硝态氮、速效磷、全磷、全氮、有机质含量均表现为林地和草地显著高于耕地和农地($p < 0.05$),其中林地和草地土壤铵态氮、硝态氮、速效磷、全磷、全氮、有机质含量差异均不显著($p > 0.05$)。(2) 不同土地利用方式土壤粒径分布中,黏粒含量占主导地位,黏粒含量百分比 45.98%~67.12%,粗砂粒含量相对较低。(3) 不同土地利用方式土壤颗粒分布的分形维数随着土层深度增加逐渐增大,0—10 cm 土层土壤颗粒分布分形维数变化幅度较小,而 40—50 cm 变化幅度较大。(4) 回归分析表明不同土地利用方式土壤颗粒分形维数与土壤粒径呈显著或极显著的线性负相关。(5) 相关分析表明不同土地利用方式土壤分形维数均与土壤有机质含量呈显著负相关,与土壤铵态氮、硝态氮、速效磷、全磷、全氮呈正相关。综上所述,不同土地利用方式下土壤颗粒组成差异较大,草地和林地相对于耕地和农地大颗粒含量明显增多,小颗粒明显减少,土壤颗粒分布的分形维数可以作为表征土壤肥力的状况指标。

关键词:土地利用方式;土壤颗粒;分形维数

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)01-0126-06

Soil Particle-Size Distribution and Fractal Dimension of Different Land Use Types in Shandong Province

ZHANG Haiting, SHI Yanqing

(Jining Bureau of Hydrology, Jining, Shandong 272019, China)

Abstract: Taking field sampling, and using laboratory analysis method and the fractal theory of particle volume, we studied soil particle-size distribution and fractal dimension of different land use types. The results showed that: (1) soil ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, available phosphorus, total phosphorus, total nitrogen and organic matter content of different land use types were significantly higher in forestland and grassland than those in the cultivated land and farmland ($p < 0.05$), were not significantly different between forestland and grassland had ($p > 0.05$); (2) coarse silt was dominant in soil, in addition to the coarse sand grains, the land uses had significant effects on the contents of the rest fractions, the hierarchy was not obvious, and fractal dimension of soil particles was 45.98%~67.12%; (3) fractal dimension of soil particles increased with the soil depth, and there was a lower rangeability in the surface soil layer and a higher rangeability in 40—50 cm soil layer; (4) regression analysis showed that there was a strong negative liner relationship between soil particle-size and fractal dimension; (5) correlation analysis showed that fractal dimension significantly positively related to soil moisture content, and significantly negatively related to soil organic matter content, positively related to soil nutrients. In total, the land uses of loess hilly-gully region have the greater influence on soil particle composition, the particle sizes of grassland and forest land shift from the small particles to the large particles compared with farmland.

Keywords: land use type; soil particle-size; fractal dimension

土壤是由大小和形态各异的固体颗粒及孔隙组成的物质,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、肥力状况以及侵蚀强度等理化性质^[1-2]。由于其自身的构成及其特性,具有自相似特征或分形特征,通常用土壤粒径大小分形维数(又称分维数或分维)来描述其分形特征^[3]。近年来随着分形几何学的发展,分形理论及其方法逐步应用到土壤科学研究中,涉及了土壤机械组成、水分特征、土壤肥力等方面,在一定程度上推动土壤形态、过程等复杂问题的定量化解决。分形理论在土壤特性的研究中应用非常广泛,如土壤结构、水分特征以及有机质等方面,已成为定量化研究土壤复杂性和不规则性的一种有效工具^[4]。研究表明,土壤粒径分形维数不仅可以表征土壤的颗粒分布特征和质地均匀程度,还可以用于反映土壤的风蚀化程度等;土壤的分形维数与各粒径颗粒的含量均显著相关,而且影响着土壤养分的分布特征^[5]。

由于土壤内部的物理、化学、生物等过程的相互影响以及各种地质过程和人为措施的干扰,土壤在形态、结构、功能等方面表现为复杂的自然体^[6]。虽然土壤结构在表现上是一个不规则的几何形体,却是有着自相似结构的多孔介质。因此可以利用分形几何学研究土壤的性状特征^[7]。把分形理论及其方法应用到土壤学领域,可推动土壤形态、过程等复杂问题的解决,并可在一定程度上使其定量化。自 Tyler 等提出土壤颗粒粒径分布的质量分形维数计算公式后,分形维数便在土壤科学研究中得到了广泛应用。杨培岭等^[8]提出了一种用质量分形代替粒径分形的土壤颗粒分形维数的求解模型,并从理论上证明该模型的合理性。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^[7]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。

土地利用是人类干预土壤肥力最重要、最直接的活动,通过改变土壤营养循环强度、总量及路径,通过改变土壤的水热条件等从而影响土壤养分的流动与转化。土地利用变化可引起许多自然现象和生态过程变化,揭示土壤颗粒组成变化特征是土地利用和管理活动研究中的一个重要部分^[7,10]。通过不同土地利用方式土壤颗粒时空分异特征,可以分析土壤的发育状况,物理化学性状及生态环境变化情况,研究表明土壤分形维数值可以作为土壤侵蚀方式的判断指

标^[11]。土地利用变化可以改变地表覆被状况,并影响许多生态过程,如增加生物多样性、多样化食物链和营养级组成,降低地表侵蚀和改变径流、土壤环境等;反之,由于植被的劣变,容易引发土地沙漠化、土壤盐渍化、草场退化、生物多样性减少、区域气候环境恶化等一系列生态环境问题^[12-13]。合理的土地利用可以改善土壤结构,增强土壤对外界环境变化的抵抗力;不合理的土地利用会导致土壤质量下降,增强土壤侵蚀,降低生物多样性^[14-15]。近年来,对土壤颗粒分形的研究屡见不鲜,但对土壤颗粒分形的研究和针对沿海地区土壤分形特征的文章鲜见报道。本文利用分形理论,研究不同土地利用方式下土壤颗粒分形特征,分析不同土地利用下土壤颗粒的分形维数以及分形维数与土壤养分、有机质含量、土壤含水量的相关关系,以期揭示土壤颗粒组成,将土壤颗粒分形维数应用该区生态建设与恢复提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

于2014—2016年的9月中旬,按照不同的土地利用方式、面积比例、坡度和坡向进行土样采集,采样点遍布整个山东省,共计采样点120个,每种土地利用方式设置5个重复样地(样地面积为100 m×100 m左右),每个样地相距100 m左右,随机设置5个采样点,每个采样点间距在10 m以上,每个采样点重复取5次作为平行,5个平行之间间隔2 m,为了保证取样的一致性,所取样的土壤坡度均小于5°(合计: $n=120$)(图1)。采用四分法取样(保留1 kg左右),按0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm,30—40 cm,40—50 cm,50—60 cm深度由下向上分层采集各土层的土壤样品,每层采土样约1.0 kg;所取样品现场过2 mm筛后带回实验室风干后去除杂质对其养分和有效养分进行测定。

1.2 土壤养分测定

土壤颗粒组成采用吸管法测定,根据美国农业部制将土壤颗粒级别分为粗砂粒(2~0.5 mm)、中砂粒(0.5~0.25 mm)、细砂粒(0.25~0.05 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm);土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定;土壤含水量用铝盒烘干法(105℃下烘8 h)测定;铵态氮、硝态氮用流动分析仪测定;全磷含量采用酸溶—钼锑抗比色法测定;速效磷含量采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定。

1.3 土壤分形维数测定

1983年Mandelbrot等^[16]首先建立了二维空间的颗粒大小分形特征模型,Tyler、杨培岭等^[8]在此基础上对模型进行推广,提出用粒径的质量分布表征的

土壤分形模型,本文采用杨培岭等^[8]的以不同级别颗粒的质量分布表征的土壤分形模型。土壤颗粒质量分布与平均粒径的分形关系式为:

$$\frac{W(\delta < d_i)}{W_o} = (\frac{d_i}{d_{max}})^{3-D}$$

式中: d_i 表示粒径的平均值; d_{max} 表示最大粒径的平均值; $W(\delta < d_i)$ 为粒径小于 d_i 的累积土粒质量; W_o 为土壤各粒级质量的总和。各土壤颗粒的粒径及小于某一粒径土壤重量可通过土壤的机械分析确定,然后对该式两边取对数,分别 $\lg(W(\delta < d_i)/W_o)$, $\lg(d_i/d_{max})$ 为纵、横坐标,进行线性拟合, $3-D$ 则是线性拟和方程的斜率; D 为土壤颗粒分形维数,无量纲。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式土壤养分分布特征

根据研究区不同土地利用方式,对其土壤养分进行分析(表 1)。见表 1,不同土地利用方式土壤养分有明显

的不同。土壤铵态氮、硝态氮、速效磷、全磷、全氮、有机质含量均表现为:林地和草地显著高于耕地和农地($p < 0.05$),其中林地和草地土壤铵态氮、硝态氮、速效磷、全磷、全氮、有机质含量差异均不显著($p > 0.05$),除了耕地和农地土壤全磷差异不显著($p > 0.05$),其他养分含量耕地和农地差异均显著($p < 0.05$)。

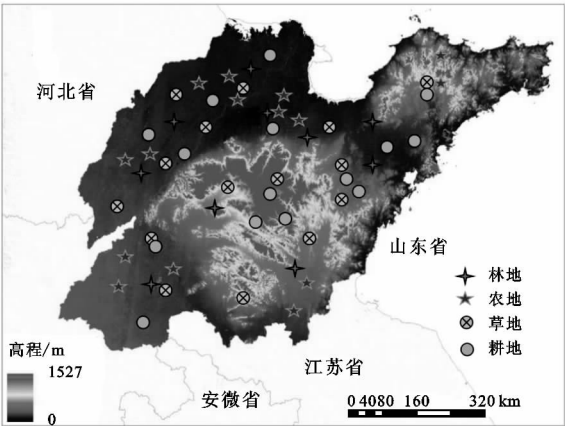


图 1 研究区采样分布图

表 1 不同土地利用方式下土壤养分分布特征

项目	铵态氮/ (mg · kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	有机质/ (g · kg ⁻¹)
林地	56.36±3.25a	123.65±15.10a	16.23±2.26a	1.69±0.26a	1.02±0.24a	19.23±1.23a
农地	24.78±1.02c	68.02±3.56c	6.21±0.54c	0.84±0.07b	0.62±0.05c	11.05±1.54c
草地	53.24±4.56a	115.87±13.21a	15.02±3.15a	1.71±0.85a	1.01±0.36a	18.14±2.05a
耕地	35.29±2.17b	92.15±8.74b	9.25±1.59b	1.03±0.26b	0.85±0.17b	15.36±2.41b

注:不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$),下同。

2.2 不同土地利用方式土壤颗粒分布特征

根据研究区不同土地利用方式土壤粒径分布及分形维数等进行分析(表 2)。由表 2 看出,不同土地利用方式土壤粒径分布有明显的不同,黏粒含量占主导地位,黏粒含量百分比在 45.98%~67.12%之间。细砂粒和中砂粒含量百分比分别位于 5.70%~18.06%和 2.05%~9.25%之间,粗砂粒含量相对较低。研究区土壤颗粒分形维数变化范围是 2.783~2.963,表明

土壤质量较好。有较高分形维数的地类对应于较高的土壤质量。因此,与单纯依靠土壤粒径分布或土壤质地相比,土壤颗粒分形维数在比较不同植被土地质量时能提供更多的信息。不同土地利用类型的分形维数表现为耕地>草地>农地>林地,说明耕地的土壤相对更好,这是因为条件好、土层厚的土地主要用来种植农作物,而大多数林地植被生长在立地条件相对较差的环境。

表 2 土壤颗粒的粒径分布与分形特征

项目	颗粒组成					分形 维数 D	R^2	F
	粗砂 2~0.5 mm	中砂 0.5~0.25 mm	细砂 0.25~0.05 mm	粉粒 0.05~0.002 mm	黏粒 <0.002 mm			
林地	2.69	2.05	16.49	9.58	45.98	2.783	0.963	85.36
农地	0.46	4.52	5.70	13.25	66.23	2.785	0.952	92.14
草地	1.20	3.06	18.06	5.36	52.36	2.894	0.947	102.38
耕地	0.96	9.25	7.65	3.02	67.12	2.963	0.972	96.41

2.3 不同土地利用方式土壤颗粒分形特征

由图 2 可知,不同土地利用方式土壤颗粒分形具有明显的分形特征,各土地利用方式下土壤颗粒分形特征均表现为黏粒含量>细沙含量>中砂含量>粉

粒含量>粗砂含量,其中,农地和耕地土壤黏粒含量最高,土壤黏粒平均含量变化范围在 45.98%和 67.12%之间;土壤粉粒平均含量变化范围在 3.02%和 13.25%;粉粒平均含量变化范围在 5.70%和 18.06%之间;细砂含

量变化范围在 4.36%和 15.26%;土壤粗砂含量变化范围在 0.49%和 2.96%。

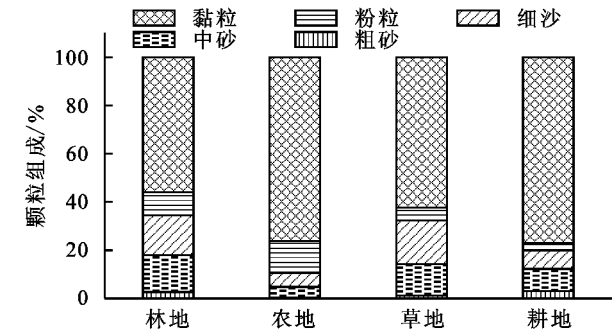


图 2 不同土地利用方式土壤颗粒分形特征

2.4 土壤颗粒分布的分形维数在剖面中的变化

从图 3 可以看出,不同土地利用方式土壤颗粒分布的分形维数随着土层深度增加逐渐增大,随着土层深度增加逐渐接近;0—10 cm 土层土壤颗粒分布分形维数在不同深度土壤之间变化幅度较小,而 40—50 cm 变化幅度较大。总体上,随土层深度增加土壤颗粒分布的分形维数逐渐增大,说明土地利用方式是

决定深层土壤颗粒分布分形维数的关键因素。

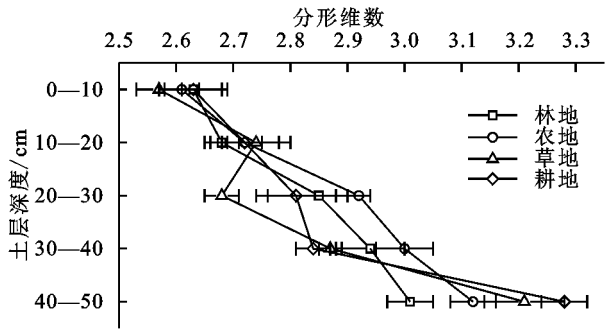


图 3 不同土地利用方式土壤颗粒分形维数

2.5 土壤颗粒分形维数与土壤粒径分布的关系

土壤粒径分布与土壤分形维数(D)的关系见表 3。由表可知,林地土壤分形维数与粗砂粒呈线性负相关,且分别达到极显著水平;农地土壤分形维数与粉粒呈线性极显著负相关;草地土壤分形维数与黏粒含量呈线性负相关,且达到极显著水平,这与陈子玉及高君亮等的研究一致。耕地土壤分形维数与黏粒含量呈极线性负相关,且达到极显著水平,与土地利用方式有较大的差异。

表 3 土壤颗粒的粒径分布与分形特征

项目	拟合方程	R^2	Adjust R^2	F	n
林地	$D=-0.0025 d_{2-0.5}+2.698$	0.7623 **	0.7015	86.30	90
农地	$D=-0.0009 d_{0.05-0.002}+2.902$	0.8596 **	0.8147	95.69	90
草地	$D=-0.0014 d_{0.25-0.05}+2.156$	0.6102 *	0.5983	103.54	90
耕地	$D=-0.0028 d_{0.5-0.25}+2.017$	0.7854 **	0.7289	97.16	90

注:*, $p<0.05$; **, $p<0.01$ 。下表同。

由表 4 中相关性分析结果可以看出,土壤颗粒组成分形维数与土壤砂粒含量呈极显著负相关($p<0.01$),与黏粒含量呈极显著正相关($p<0.01$),与粉粒含量相关性不显著。这表明土壤颗粒分布的分形维数对各个粒级土粒含量反映程度的大小不同,土壤中砂粒含量越少,黏量越高,分形维数越大。砂粒

及黏粒相对含量决定土壤颗粒组成的分形维数。其他学者在不同条件下的研究均得到土壤砂粒、黏粒含量与土壤颗粒组成分形维数之间相关一致性的结论,苏永忠等、柳妍妍等、吕胜桥等研究表明粉粒含量与土壤颗粒组成分形维数呈显著相关性,与本研究结论不一致。

表 4 土壤颗粒的粒径分布与分形特征

项目	粗砂	中砂	细沙	粉粒	黏粒
	2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.05 mm	0.05~0.002 mm	<0.002 mm
林地	-0.923 **	-0.803 **	0.913 **	0.956 **	0.917 **
农地	-0.526 *	-0.756 **	0.236	0.783 **	0.326
草地	-0.898 **	-0.876 **	0.725 **	0.689 **	0.516 *
耕地	-0.786 **	-0.723 **	0.498 *	0.913 **	0.903 **

2.6 土壤颗粒分形维数与土壤养分的关系

土壤颗粒分形维数与土壤养分及有机质含量的相关关系见表 5。土壤颗粒是构成土壤结构的重要基础物质,一定程度上会影响表征土壤结构状况的指标。由表 5 可知,分形维数均与土壤有机质含量呈显著负相关。说明分形维数的大小可以表征土壤的密实程度,随着黏粒含量的增加,分形维数越高,土壤黏

粒含量越丰富。一方面,黏粒含量高的土壤有利于形成土壤团聚体,形成良好的结构,增加土壤毛管孔隙;另一方面单位土粒表面积越大,土壤对水分子的吸附力(粘滞力)越大,在土壤孔隙比相同的情况下,毛细管尺寸越小,与接触面水膜引起的毛细管压力的作用降低了水的势能,使其保持在土壤孔隙中不易排出,

则土壤的持水性增强。有机质含量越高,研究区土壤就相对疏松,分形维数就越低。另外,总氮与有机质含量呈显著正相关,这是因为总氮中有机氮含量占主要部分,有机质含量高,总氮含量也就相对较高。

表 5 不同土地利用方式下土壤分形维数与养分之间的相关性

项目	土壤性质	分形维数	铵态氮/ (mg · kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	有机质/ (g · kg ⁻¹)
林地	分形维数	1						
	铵态氮	0.035	1					
	硝态氮	0.021	0.896**	1				
	速效磷	−0.027	0.058	0.163	1			
	全磷	0.069	0.147	0.087	0.253	1		
	全氮	0.231	0.854**	0.902**	0.158	0.036	1	
	有机质	−0.563*	0.699**	0.563*	0.569*	0.152	0.805**	1
	分形维数	1						
农地	铵态氮	0.014	1					
	硝态氮	0.026	0.804**	1				
	速效磷	−0.017	0.014	0.114	1			
	全磷	0.009	0.157	−0.047	0.230	1		
	全氮	0.278	0.807**	0.914**	−0.306	0.025	1	
	有机质	−0.629**	0.523*	0.512*	0.629**	0.114	0.756**	1
	分形维数	1						
	铵态氮	0.147	1					
草地	硝态氮	0.288	0.823**	1				
	速效磷	−0.174	0.174	0.105	1			
	全磷	0.203	−0.105	0.470*	0.179	1		
	全氮	0.511*	0.816**	0.879**	0.003	0.047	1	
	有机质	−0.578*	0.523*	0.625**	0.587*	0.103	0.789**	1
	分形维数	1						
	铵态氮	0.145	1					
	硝态氮	0.047	0.814**	1				
耕地	速效磷	−0.096	0.017	0.058	1			
	全磷	0.152	0.236	0.147	0.256	1		
	全氮	0.113	0.521*	0.875**	0.024	0.147	1	
	有机质	−0.699**	0.785**	0.645**	0.632**	0.023	0.589*	1

注:*,**分别表示在 0.05,0.01 水平上差异显著(双尾)。

3 讨论

土壤颗粒组成是土壤重要的物理特性之一,对土壤肥力状况、水分特征等物理性质有着明显影响,在反映土地利用方式变化对土壤侵蚀的影响有重要的意义。本研究中土壤颗粒组成以黏粒含量占主导地位,与前人研究结果相似^[16-18]。相较于坡耕地,天然林、人工林和草地,土壤大粒径颗粒呈现增加趋势,其中林地增加幅度达到显著水平。耕地由于人为耕作导致土壤结构体破坏,小粒径颗粒很难形成大颗粒,另一方面由于耕作管理方式和土壤侵蚀的作用,坡耕地的作物秸秆和根系很难返回到土壤中,从而降低了有机物质对土壤颗粒的粘结作用,因此耕地的耕作层小粒径颗粒较多。草地和林地由于无耕作措施,增加

了根系对土壤团聚体的粘结作用,促进了小颗粒通过团聚作用形成大颗粒,在本研究中林地中大粒径增加幅度要大于草地,这主要是由于林地较草地有更好的植被群落结构,凋落物和根系更为丰富,对小粒径颗粒的粘结作用更加大,另外良好的植被层次保证了林地水分条件更好,为微生物提供了更好的生境,促进了微生物的生长与代谢,进一步促进了小粒径团聚为大粒径^[19]。

分形维数常被用来反映土壤质地、均一程度、物理性状及肥力特征,与土壤结构稳定性关系紧密,分形维数越小结构稳定性越强^[20]。本研究中发现林地和农地分形维数均低于耕地和草地,表明林地的土壤结构较好,结构性更强,这和林地具有较好的植被群落结构和复杂的根系系统有关,根系对土壤的穿插和缠结加速了土壤结构体的形成,根系表面的分泌物、

根毛等物质也促进了土壤颗粒的粘结,提高了结构体的稳定性。草地虽然较坡耕地没有显著变化,但是在0—50 cm 仍旧呈降低趋势,表明耕作对结构体的影响还是比较明显的。土壤颗粒分形维数的大小与土壤质地密切相关。土壤质地越粗分形维数越小,质地越细分形维数越大。杨培岭等发现,土壤颗粒质量分形维数与土壤黏粒、粉粒、砂粒的质量百分含量均具有极显著的相关关系,其中黏粒含量越高,土壤质量分形维数越大,粉粒和砂粒含量越高,土壤质量分形维数越低^[2,21]。本研究土壤黏粒、粉粒含量与土壤有机质、土壤全氮含量均达到了极显著负相关水平,而土壤砂粒含量与土壤有机质、全氮含量为正相关,而土壤颗粒组成与土壤全磷含量均未达到显著水平,这和党亚爱等^[14]的研究结果相似,证明了土壤颗粒组成继承了土壤母质的特征,受环境生态等过程的影响。

对分形维数与不同粒级土壤颗粒质量含量的相关分析表明,土壤分形维数与粗砂含量、中砂含量和细砂含量均呈负相关关系,相关系数都较低,可能与斑块状植被的分布格局,植被的盖度、高度,微地形的起伏变化等因素有关,尚需进一步研究;而分形维数与粉砂含量呈正相关关系,即粉砂含量越高,分形维数越大。陈小红等^[22]结合相关分析法和回归分析法得出,黑河中游荒漠—绿洲边缘区生态过渡带的土壤颗粒分形维数与砂粒含量呈显著负相关,与黏粉粒及各养分指标均呈显著的正相关;对土壤颗粒分形维数变化幅度的影响依次为黏粒、粉粒、砂粒,且分形维数对黏粒含量的变化最为敏感。贾晓红等^[23]认为,分形维数与黏粒和粉粒含量呈显著的线性正相关。本文研究的结果与上述结果基本一致,即土壤中黏粒、粉粒含量越高,土壤分形维数就越大;而砂粒含量越高,土壤分形维数就越低说明植被覆盖度较低,表层土壤干燥,风沙活动频繁发生的同时,往往伴随土壤表层细颗粒物质的损失,因为,只有细颗粒物质才能随气流飘扬出区域外。土壤中细颗粒物质的损失致使表层土壤粗粒化程度加剧,分形维数减少。因此,土壤质量分形维数在很好地反映土壤中不同粒径的颗粒损失状况的同时,还可以反映沙化的程度。由于土壤细颗粒物质含量的增加和粗颗粒物质含量的降低,共同导致了土壤颗粒分形维数的增加,有利于土壤水分的有效保持和储存,可促进斑块植被的自然恢复。

4 结论

(1) 不同土地利用方式土壤铵态氮、硝态氮、速效磷、全磷、全氮、有机质含量均表现为:林地和草地

显著高于耕地和农地($p < 0.05$),其中林地和草地土壤铵态氮、硝态氮、速效磷、全磷、全氮、有机质含量差异均不显著($p > 0.05$)。不同土地利用方式土壤粒径分布中,黏粒含量占主导地位,黏粒含量百分比为45.98%~67.12%,粗砂粒平均含量相对较低。

(2) 不同土地利用方式土壤颗粒分布的分形维数随着土层深度增加逐渐增大,0—10 cm 土层土壤颗粒分布分形维数变化幅度较小,而40—50 cm 变化幅度较大。

(3) 回归分析表明不同土地利用方式土壤颗粒分形维数与土壤粒径呈显著或极显著的线性负相关($p < 0.05$, $p < 0.01$)。相关分析表明不同土地利用方式土壤分形维数均与土壤有机质含量呈显著负相关,与土壤铵态氮、硝态氮、速效磷、全磷、全氮呈正相关。综上所述,不同土地利用方式下土壤颗粒组成差异较大,草地和林地相对于耕地和农地大颗粒含量明显增多,小颗粒明显减少,土壤颗粒分布的分形维数可以作为表征土壤肥力状况指标。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王丽,刘霞,张光灿,等. 鲁中山区采取不同生态修复措施时的土壤粒径分形与孔隙结构特征[J]. 中国水土保持科学,2007,5(2):73-80.
- [3] 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.
- [4] 李德成,张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究[J]. 生态环境学报,2000,9(4):7-9.
- [5] 李涵韬,余健,方凤满,等. 复垦对土壤颗粒组成、分形维数、团聚体影响[J]. 环境科学与技术,2015(8):11-16.
- [6] 黄冠华,詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报,2002,39(4):490-497.
- [7] 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.
- [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[J]. 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[J]. 土壤学报,1999,36(2):162-167.
- [10] 李毅,李敏, Bingcheng, 等. 土壤颗粒分布体积分形维数与数量分形维数之间的关系[J]. 农业工程学报,2012,28(23):82-91.
- [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.

- 法比较分析[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(1): 37-44.
- [14] 张文龙, 李玉环, 姬祥. 基于地统计学的耕层土壤有机质空间变异及不同插值模型的比较[J]. 中国农学通报, 2011, 27(6): 256-260.
- [15] 谢云峰, 陈同斌, 雷梅, 等. 空间插值模型对土壤 Cd 污染评价结果的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 30(4): 847-854.
- [16] 赵巧丽, 郑国清, 冯晓, 等. 河南省安阳县三种土壤全氮含量空间插值方法的比较分析[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1162-1166.
- [17] 马静, 张仁陟, 陈利. 耕地地力评价中土壤养分的空间插值方法比较研究: 以会宁县土壤速效钾为例[J]. 安徽农学通报, 2011, 17(17): 91-93.
- [18] 史文娇, 刘纪远, 杜正平, 等. 基于地学信息的土壤属性高精度曲面建模[J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1574-1581.
- [19] 刘劲松, 陈辉, 杨彬云, 等. 河北省年均降水量插值方法比较[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3493-3500.
- [20] 林琳, 李纯厚, 戴明, 等. 海洋浮游植物丰度的空间插值优化[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 2880-2888.
- [21] Triantafyllis J, Odeh I O A, Mcbratney A B. Five Geostatistical Models to Predict Soil Salinity From Electromagnetic Induction Data Across Irrigated Cotton[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(3): 869-878.
- [22] Kuriakose S L, Devkota S, Rossiter D G, et al. Prediction of soil depth using environmental variables in an anthropogenic landscape: A case study in the Western Ghats of Kerala, India[J]. Catena, 2009, 79(1): 27-38.
- [23] 杨琳, 朱阿兴, 秦承志, 等. 运用模糊隶属度进行土壤属性制图的研究: 以黑龙江鹤山农场研究区为例[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 9-15.
- [24] 郭龙, 张海涛, 陈家赢, 等. 基于协同克里格插值和地理加权回归模型的土壤属性空间预测比较[J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 1037-1042.
- [25] 杨顺华, 张海涛, 郭龙, 等. 基于回归和地理加权回归 Kriging 的土壤有机质空间插值[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1649-1656.
- [26] 范晓梅, 刘高焕, 刘红光. 基于 Kriging 和 Cokriging 方法的黄河三角洲土壤盐渍化评价[J]. 资源科学, 2014, 36(2): 321-327.
- [27] 易湘生, 李国胜, 尹衍雨, 等. 土壤厚度的空间插值方法比较: 以青海三江源地区为例[J]. 地理研究, 2012, 31(10): 1793-1805.
- [28] 杨琳, 朱阿兴, 张淑杰, 等. 土壤制图中多等级代表性采样与分层随机采样的对比研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 28-37.
- [29] Zhang H, Lu L, Liu Y, et al. Spatial sampling strategies for the effect of interpolation accuracy[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2015, 4(4): 2742-2768.
- [30] 史文娇, 岳天祥, 石晓丽, 等. 土壤连续属性空间插值方法及其精度的研究进展[J]. 自然资源学报, 2012, 27(1): 163-175.
- [31] 杨雨亭, 尚松, 浩李超. 土壤水分空间插值的克里金平滑效应修正方法[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 208-213.
- [32] 王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征[J]. 地理研究, 2001, 20(2): 161-169.
- [33] 范胜龙, 黄炎和, 林金石. 表征土壤有机碳区域分布的优化空间插值模型研究: 以福建省龙海市为例[J]. 水土保持研究, 2011, 18(6): 1-5.
- [34] Liu W, Du P, Zhao Z, et al. An adaptive weighting algorithm for interpolating the soil potassium content [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 23889.



(上接第 131 页)

- [12] 慈恩, 杨林章, 程月琴, 等. 不同耕作年限水稻土土壤颗粒的体积分形特征研究[J]. 土壤, 2009, 41(3): 396-401.
- [13] 丁敏, 庞奖励, 刘云霞, 等. 黄土高原不同土地利用方式下土壤颗粒体积分形特征[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 161-165.
- [14] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分形特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 74-78.
- [15] 伏耀龙, 张兴昌, 王金贵. 岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 120-125.
- [16] Mandelbrot B B, Wheeler J A. The Fractal Geometry of Nature[J]. New York: WH Freeman, 1983.
- [17] 巨莉, 文安邦, 郭进, 等. 三峡库区不同土地利用类型土壤颗粒分形特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 234-237.
- [18] 余健, 廖媛媛, 张平究, 等. 长江下游江心洲土壤颗粒特征及分形规律[J]. 生态学杂志, 2012, 31(3): 626-631.
- [19] 李敏. 土壤颗粒分布分形及物理性质的空间变异性[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [20] 李敏, 李毅. 土壤颗粒数量分布的局部分形及多重分形特性[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011(11): 216-222.
- [21] 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.
- [22] 陈小红, 段争虎, 何洪泽. 荒漠—绿洲边缘区生态过渡带的土壤颗粒分形特征[J]. 土壤, 2009, 41(1): 97-101.
- [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[J]. 地理研究, 2007, 26(3): 518-525.