

文章编号:1000-8551(2011)02-0337-05

树儿梁小流域坝地土壤颗粒的分形特征

刘秀珍¹ 李翔¹ 向云¹ 李静波¹ 毕如田¹ 牛越先²

(1. 山西农业大学资源环境学院,山西 太谷 030801; 2. 山西省水土保持生态环境建设中心,山西 太原 030002)

摘要: 土壤颗粒的分形维数是重要的土壤物理特性,为研究坝地土壤颗粒分形维数的内涵和利用土壤颗粒的分形维数来描述与土壤性质的关系,本研究计算了树儿梁小流域坝地土壤颗粒的分形维数,并分析了分形维数与各粒级组成及其土壤养分的关系。结果表明:树儿梁坝地土壤颗粒的分形维数随土壤黏粒的增加而增大,坝前、坝中、坝尾土壤颗粒的分形维数分别为 2.7278、2.7184 和 2.685,符合 Stokes 沉降原理,坝地颗粒组成各粒级含量及变化范围整体差异较小,在垂直剖面上变化都很微弱。坝地土壤颗粒的分形维数与有机质含量呈显著正相关;与阳离子代换量、全钾、缓效钾、速效钾呈极显著正相关。利用土壤颗粒的分形维数来描述土壤性质具有积极的应用意义。

关键词: 坝地;土壤颗粒;分形维数

THE FRACTIONAL CHARACTERISTIC OF SOIL PARTICLE ABOUT DAM LAND IN SHUERLIANG SMALL RIVER VALLEY

LIU Xiu-zhen LI Xiang XIANG Yun LI Jing-bo BI Ru-tian NIU Yue-xian

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801;

2. Ecological Environment Building Center of Soil and Water Conservation in Shanxi, Taiyuan, Shanxi 030002)

Abstract: Soil particle is one of the important physical properties of soil. In order to study the connotation of soil particle fractal dimension and the description soil properties by using soil particle fractal dimension, this study calculated the soil particle fractal dimension of dam land in Shuerliang small river valley, and analyzed the relation of fractal dimension and composition of various soil particle and nutrient. Results showed that the fractal dimensions of particle size distribution (PSD) of soils increased with the increase of soil clay content in dam land in Shuerliang, and the fractal dimensions of PSD in the front, the middle and the end of the dam respectively were 2.7278, 2.7184 and 2.685, which met the Stokes' rule. The overall difference of the various size particles content of particle constitution of dam land and the change range were very small, the changes in the vertical profile were very weak. There was significantly positive correlation between the fractal dimensions of PSD and the content of soil organic matter in dam land. The fractal dimensions of PSD were highly significantly positive-related with the soil cation exchange capacity, total potassium, slowly available potassium and readily available potassium. So it is positively significant to describe soil nature with the fractional dimension of soil particle.

Key words: dam land; soil particle; fractal dimension

坝地是坡面侵蚀泥沙经水力搬运后在沟道坝(库)区淤积而成的耕地。它是在水土保持基础上派

生出来的最具发展潜力的新型耕地类型,具有兼顾控制区域水土流失、减轻下游地区洪涝灾害、提高作物单

收稿日期:2010-07-01 接受日期:2010-11-19

基金项目:山西省淤地坝建设资助项目(2007HX13)

作者简介:刘秀珍(1955-),女,山西忻州人,硕士,教授,研究方向为土壤生态研究。E-mail: sxaulxz@yahoo.com.cn

产等多项功能^[1]。坝地农业是黄土高原水土流失区的特色农业。分形理论最早是 Mandelbrot^[2]提出的,此后备受自然科学家和社会科学家的重视,成为现今国际上许多学科的前沿研究课题之一。分形理论是描述不规则几何形体的有效方法^[3],通过应用分形理论,可以借助事物内部的自相似性质来洞察隐藏于混乱现象中的精细结构,为人们从局部认知整体,从有限认知无限提供新的途径,并为可能的新发现、新规律提供崭新的语言和定量的描述^[4]。土壤是一种由不同颗粒组成、不规则形状和自相似结构的多孔介质,具有一定的分形特性^[5-7]。把分形理论及其方法应用到土壤学领域,不仅为土壤值的合理表达提出了一种新的概念,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^[8]。研究表明,土壤分形维数可表征土壤粒径的大小组成,还能反映质地的均一程度,因此,以分形维数表征土壤质地差异的研究成为近期热点^[9-13]。土壤颗粒是土壤结构形成的重要基础物质,不同级别土粒含量的组合构成不同的土壤质地类型,进而影响土壤的物理、化学和生物学过程。土壤分形维数作为土壤肥力诊断的一个综合性定量指标,对深入研究土壤其他理化性质以及人为因素与土壤颗粒分形维数之间的关系,进一步揭示土壤颗粒分形维数的内涵,利用土壤颗粒的分形维数来描述与土粒表面特性相关的某些土壤性质和土壤结构等的关系,将具有积极的意义。本文以树儿梁小流域为研究对象,计算了树儿梁小流域土壤颗粒的分形维数,并探讨了它与各粒级组成及其土壤养分的关系,以期为坝地土壤研究提供参考。

1 研究区概况

树儿梁小流域位于山西省河曲县北部,为国家黄河委 7 省区水土流失山西监测点。地理坐标为东经 111°17' ~ 111°26', 北纬 39°21' ~ 39°25' 之间,属黄河一级支流。该流域属黄土丘陵沟壑区第一副区,山高坡陡,沟壑纵横,梁峁起伏,地势为东高西低,流域内 5° 以上的坡面占总面积的 92.74%。该流域属温带大陆性季风气候,四季分明,多年平均气温 6.8℃,极端最高气温 37℃,极端最低气温 -30℃,光照资源丰富,年日照时数 2855.7h,日照率在 60% 以上,年总辐射量 147.2kcal/cm², ≥10℃ 的活动积温 2580℃,年平均风速 1.9m/s,无霜期 120d,年均降雨量 426.3mm,蒸发量 1850.7 ~ 2037.5mm。树儿梁小流域土壤侵蚀模数为 9800t/km²·a^[14],属于强度侵蚀,流域主沟道长

12km,流域控制面积为 82km²。研究区树儿梁骨干坝坝高 52m,淤地面积 13.3hm²,土壤类型为灰褐土。

2 研究方法

2.1 样品的采集与分析方法

2.1.1 样品采集 2007 年 10 月,在树儿梁淤地坝内沿坝中线在坝前、坝中、坝尾挖掘土壤剖面,按照 0 ~ 20cm, 20 ~ 40cm, 40 ~ 60cm, 60 ~ 80cm, 80 ~ 100cm, 100 ~ 130cm, 130 ~ 160cm, 160 ~ 200cm 分层采样,土样在室内风干,按分析要求过筛。

2.1.2 分析方法 粒径分析采用六偏磷酸钠饱和液分散土粒乙种比重计法测定^[15];土壤养分测定均采用土壤农化分析法^[16]。有机质采用重铬酸钾外加热氧化法测定;全氮采用凯氏蒸馏法测定;全磷采用 NaOH 熔融钼锑抗比色法测定;全钾采用 NaOH 熔融火焰光度法测定;土壤缓效钾采用 1mol/L 热 HNO₃ 浸提,火焰光度法测定;水解氮的测定采用碱解扩散法;速效磷采用 NaHCO₃ 浸提钼锑抗比色法测定;速效钾采用 1mol/L NH₄Ac 浸提,火焰光度法测定。土壤阳离子代换量采用 NaOAc-NH₄OAc 交换,火焰光度法测定。试验结果采用 Excel 2003 和 DPS 6.0 软件进行统计分析,土壤粒级采用美国农业部分级标准^[17]。

2.2 土壤粒径分形原理与计算方法

土壤粒径分布遵循自相似原理,由大于某一粒径 d_i ($d_i > d_{i+1}$, $i = 1, 2, \dots$) 的土粒构成体积 $V(\delta > d_i)$, 可由类似 Katz^[7,9] 的公式表示:

$$V(\delta > d_i) = A[1 - (d_i/k)^{3-D}] \quad (1)$$

式中, δ 为码尺, A 、 k 为描述形状、尺度的常数。

通常粒径分析资料是由一定粒径间隔的颗粒重量分布表示的,以 \bar{d}_i 表示二筛分粒级 d_i 与 d_{i+1} 间粒径的平均值, $W(\delta > \bar{d}_i)$ 为大于 \bar{d}_i 的累积土粒重量, W_0 为土壤各粒级重量的总和,可导出:

$$W(\delta > \bar{d}_i)/W_0 = 1 - (\bar{d}_i/k)^{3-D} \quad (2)$$

设 d_{\max} 为最大粒级土粒的平均直径, $W(\delta > \bar{d}_{\max}) = 0$, 代入式(2)有 $k = \bar{d}_{\max}$ 。由此得出土壤颗粒的重量分布与平均粒径间的分形关系式:

$$W(\delta > \bar{d}_i)/W_0 = 1 - (\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})^{3-D} \quad (3)$$

或

$$(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})^{3-D} = W(\delta < \bar{d}_i)/W_0 \quad (4)$$

对上式两边取对数,即得:

$$(3 - D) \lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max}) = \lg[W(\delta < \bar{d}_i)/W_0] \quad (5)$$

分别以 $\lg(W_i/W_0)$ 、 $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 为纵、横坐标,不难看

出 $3 - D$ 是 $\lg(\bar{d}_i / \overline{d_{\max}})$ 和 $\lg(W_i / W_0)$ 的直线的斜率, D 为土壤颗粒分形维数。

3 结果与分析

3.1 坝地土壤颗粒的分形特征

根据分形维数公式(5), 计算得树儿梁坝地 0 ~ 200cm 土层土壤分形维数(D), 为了分析土壤质地与分形维数的关系, 对照国际土壤质地分类标准对其进行质地划分^[17], 结果见表 1。

由表 1 可见, 树儿梁坝地土壤各土层颗粒分形维数在 2.621 ~ 2.858 之间, 各土层土壤颗粒与分形维数的相关系数为 0.809 ~ 0.955 ($n = 5$, $r_{0.05} = 0.811$, $r_{0.01} = 0.917$), 除坝中 160 ~ 200cm 相关性不显著外, 其他各层都达到显著和极显著水平。

土壤分形维数是反映土壤结构几何形状的参数, 表现出粘粒含量越高、质地越细, 分形维数越高, 除粘粒含量对土壤颗粒粒径分布的分形特征影响很大外, 单一粒级的集中程度对分形维数的数值也会产生重要影响^[7, 8]。由表 1 可以看到, 坝中 160 ~ 200cm 土层中 < 0.002mm 粒级的颗粒含量高达 34.28%, 它的分形维数也最高, 为 2.858; 坝尾 0 ~ 20cm 土层中 0.25 ~ 0.05mm 和 0.05 ~ 0.02mm 粒级的颗粒含量达 33.56% 和 44.81%, 其分形维数则最低, 为 2.621。表明分形维数不仅能表征土壤粒径的大小, 还能体现质地组成的均一程度。

3.2 分形维数与土壤机械组成的关系

对表 1 各粒级含量(X)与分形维数(D)进行了回归分析, 其关系式如下:

2 ~ 0.25mm: $D = -0.0649X + 2.7294$ ($r = 0.272$);

0.25 ~ 0.05mm: $D = -0.004X + 2.814$ ($r = 0.823^{**}$);

0.05 ~ 0.02mm: $D = -0.0036X + 2.853$ ($r = 0.633^{**}$);

0.02 ~ 0.002mm: $D = 0.0045X + 2.6255$ ($r = 0.895^{**}$);

< 0.002mm: $D = 0.0094X + 2.5592$ ($r = 0.985^{**}$)。

($n = 24$, $r_{0.05} = 0.396$, $r_{0.01} = 0.505$)。

土壤颗粒的分形维数与 0.02 ~ 0.002mm、< 0.002mm 粒级含量之间呈极显著正相关, 与 0.25 ~ 0.05mm、0.05 ~ 0.02mm 粒级含量之间呈极显著负相关, 而与 2 ~ 0.25mm 相关性不显著($p > 0.05$)。鉴于

此, 以 0.02mm 为界, 对 < 0.02mm 和 > 0.02mm 粒级含量与分形维数进行回归分析, 发现 < 0.02mm 和 > 0.02mm 粒级含量(X)与分形维数(D)分别呈极显著正相关和负相关, 其关系式分别为:

$$D = 0.0032X + 2.5995 \quad (r = 0.944^{**})$$

$$D = -0.0032X + 2.9183 \quad (r = 0.944^{**})$$

即 < 0.02mm 粒级含量越高分形维数越大, > 0.02mm 粒级含量越高分形维数越小。

由表 1 可知, 坝地土壤颗粒组成的粒径主要以 0.25 ~ 0.05mm 和 0.05 ~ 0.02mm 颗粒为主, 这说明径流对于坡面上土粒的冲刷作用具有一定的分选性。一般的侵蚀性降雨都能将细砂和粉粒从坡面冲刷下来, 进而搬运至下游在淤地坝坝前沉积下来。由于较小颗粒粘滞性相对较大, 而较大颗粒地表径流的冲刷不足以对它形成搬运作用, 故使这 2 种粒径范围内的颗粒在淤积物中所占比例较小, 这种颗粒分布特征有助于坝地蓄积养分和吸持水分。在坝中, 各淤积层粒径分布规律大体一致, 即相同粒径的颗粒在各自所在层所占的比例基本相同, 这从侧面反映出坝地土壤颗粒组成在一定时期内具有一定的稳定性。

总体来看, 树儿梁坝地土壤质地主要为砂质壤土、黏壤土、砂质黏壤土、粉砂质黏土、壤质黏土 5 种类型, 体现了它们的淤积过程不同。但坝地各粒级颗粒含量及变化范围整体差异不大, 大都属于壤土类, 有个别属于黏土类, 表明研究区土壤质地相对均一。

在空间分布上, 土壤颗粒分形维数坝前为 2.7278、坝中为 2.7184, 坝尾为 2.685, 符合 Stokes 沉降原理; 在垂直剖面上, 坝地土壤颗粒分形维数随深度增加波动不大, 大都在 2.75 左右摆动。

3.3 分形维数与土壤养分的相关性分析

土壤颗粒组成是构成土壤结构重要的基础物质, 可作为土壤结构、土壤肥力诊断的一个综合性定量指标。表 2 是坝地土壤颗粒的分形维数与有机质、全氮、全磷、全钾、缓效钾、碱解氮、速效磷、速效钾、阳离子代换量相关性。结果表明: 土壤颗粒的分形维数与土壤性状具有较高的相关性, 如与有机质呈显著性正相关, 与阳离子代换量、全钾、缓效钾、速效钾呈极显著正相关, 与其他性状有相关性, 但相关性不显著。土壤颗粒的分形维数和土壤保肥性指标阳离子代换量相关性最高, 即土壤质地越粘分形维数越大, 土壤的保肥性越强。土壤质地状况影响土壤中有机质转化的同时, 也影响到土壤矿物钾的释放, 土壤颗粒的分形维数与速效钾的相关性最好。

表 1 坝地土壤颗粒分形维数的统计结果

Table 1 Statistical results of fractal dimension about soil particles in Dam Land

采样地点 sampling point	采样深度 soil layer(cm)	颗粒组成 soil particle oposition(mm)					质地 soil texture	分形维 数 D	r
		2 ~ 0.25	0.25 ~ 0.05	0.05 ~ 0.02	0.02 ~ 0.002	< 0.002			
坝前 dam-head	0 ~ 20	0.57	22.92	48.13	14.81	13.57	砂质壤土 sandy loam	2.691	0.924 **
	20 ~ 40	0.20	23.28	41.96	18.52	16.04	砂质黏壤土 sandy clay loam	2.720	0.929 **
	40 ~ 60	0.16	9.30	42.17	26.04	22.33	黏壤土 clay loam	2.777	0.906 *
	60 ~ 80	0.18	31.66	42.14	12.39	13.63	砂质壤土 sandy loam	2.687	0.934 **
	80 ~ 100	0.05	29.47	42.04	14.84	13.60	砂质壤土 sandy loam	2.691	0.934 **
	100 ~ 130	0.22	14.00	34.80	29.84	21.14	黏壤土 clay loam	2.772	0.911 *
	130 ~ 160	0.15	3.52	23.77	43.79	28.77	壤质黏土 loamy clay	2.827	0.859 *
	160 ~ 200	0.06	24.60	51.87	12.35	11.12	砂质壤土 sandy loam	2.657	0.920 **
坝中 dam-mid	0 ~ 20	0.32	22.39	43.52	22.51	11.26	砂质壤土 sandy loam	2.674	0.921 **
	20 ~ 40	0.12	21.61	47.01	15.01	16.25	砂质黏壤土 sandy clay loam	2.718	0.923 **
	40 ~ 60	0.50	33.40	39.91	12.47	13.72	砂质壤土 sandy loam	2.688	0.938 **
	60 ~ 80	0.65	45.63	27.49	12.49	13.74	砂质壤土 sandy loam	2.688	0.955 **
	80 ~ 100	0.72	44.51	33.61	9.96	11.20	砂质壤土 sandy loam	2.653	0.946 **
	100 ~ 130	0.13	38.55	32.54	15.01	13.77	砂质壤土 sandy loam	2.693	0.948 **
	130 ~ 160	0.15	21.12	26.53	30.82	21.38	黏壤土 clay loam	2.775	0.923 **
	160 ~ 200	0.13	2.12	8.88	54.59	34.28	粉砂质黏土 silty clay loam	2.858	0.809
坝尾 dam-tail	0 ~ 20	0.47	33.56	44.81	12.45	8.71	砂质壤土 sandy loam	2.621	0.932 **
	20 ~ 40	0.25	33.81	44.79	9.95	11.20	砂质壤土 sandy loam	2.653	0.929 **
	40 ~ 60	0.17	31.39	42.25	14.99	11.20	砂质壤土 sandy loam	2.662	0.934 **
	60 ~ 80	0.36	33.55	39.90	12.47	13.72	砂质壤土 sandy loam	2.688	0.937 **
	80 ~ 100	0.94	30.42	38.69	13.73	16.22	砂质黏壤土 sandy clay loam	2.716	0.939 **
	100 ~ 130	0.09	36.23	42.45	7.50	13.73	砂质壤土 sandy loam	2.679	0.927 **
	130 ~ 160	0.41	14.49	51.31	15.02	18.77	砂质黏壤土 sandy clay loam	2.740	0.912 *
	160 ~ 200	0.04	16.75	49.48	17.49	16.24	砂质黏壤土 sandy clay loam	2.721	0.916 *

注:表中*、**分别表示 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

Note: * and ** mean significant at the 5% and 1% level, respectively.

表 2 坝地土壤养分与颗粒组成分形维数及其相关性分析

Table 2 The relevance analysis between soil nutrition and particles fractal dimension of dam land

采样地点 sampling point	采样深度 soil layer (cm)	分形维数 <i>D</i>	有机质 organic matter (g/kg)	全氮 total nitrogen (g/kg)	全磷 total phosphorus (g/kg)	全钾 total potassium (g/kg)	缓效钾 slowly potassium (mg/kg)	碱解氮 available nitrogen (mg/kg)	速效磷 available phosphorus (mg/kg)	速效钾 available potassium (mg/kg)	代换量 exchange capacity (cmol(+)/kg)
坝前 dam-head	0~20	2.691	3.54	0.34	0.54	18.73	631.76	33.35	1.25	71.65	6.44
	20~40	2.720	1.25	0.22	0.52	20.48	576.96	24.45	1.25	54.09	7.18
	40~60	2.777	4.22	0.38	0.48	20.04	692.62	16.39	4.19	72.06	10.15
	60~80	2.687	2.30	0.29	0.51	18.67	670.97	23.81	3.33	64.61	6.84
	80~100	2.691	0.91	0.26	0.50	19.01	966.73	63.85	3.59	65.64	7.92
	100~130	2.772	1.84	0.16	0.56	21.06	627.05	14.93	4.59	131.35	14.60
	130~160	2.827	2.77	0.23	0.58	21.43	902.28	24.04	2.25	125.90	12.84
	160~200	2.657	0.80	0.24	0.51	18.95	430.98	12.61	3.97	64.68	4.99
坝中 dam-mid	0~20	2.674	4.48	0.28	0.62	20.77	639.64	62.33	1.66	117.83	7.27
	20~40	2.718	1.84	0.22	0.53	22.86	568.03	14.27	1.85	62.57	7.27
	40~60	2.688	2.42	0.26	0.68	18.99	481.54	17.23	3.23	69.54	6.51
	60~80	2.688	1.82	0.17	0.52	18.59	523.53	56.26	5.40	80.93	7.64
	80~100	2.653	1.03	0.22	0.55	19.22	468.80	19.43	4.79	77.40	6.13
	100~130	2.693	1.85	0.08	0.56	20.15	514.87	60.87	3.43	88.28	8.02
	130~160	2.775	2.09	0.30	0.50	20.11	746.68	40.79	4.44	122.02	11.79
	160~200	2.858	4.22	0.29	0.63	20.24	845.07	57.18	3.48	190.76	18.67
坝尾 dam-tail	0~20	2.621	2.87	0.28	0.57	17.25	554.82	90.15	1.84	75.90	5.02
	20~40	2.653	2.43	0.17	0.52	18.11	448.92	17.93	1.84	46.82	5.02
	40~60	2.662	1.38	0.14	0.50	18.55	561.03	17.19	1.25	50.66	5.02
	60~80	2.688	1.85	0.13	0.47	18.83	579.15	29.95	1.85	54.13	6.14
	80~100	2.716	3.70	0.24	0.54	17.60	616.51	66.70	3.42	68.71	7.26
	100~130	2.679	2.87	0.08	0.53	18.68	641.02	25.49	1.65	68.96	7.26
	130~160	2.740	2.89	0.13	0.49	18.91	657.73	10.00	2.84	106.39	10.62
	160~200	2.721	0.80	0.27	0.52	18.53	623.40	21.76	9.14	84.33	9.12
相关系数 correlation coefficient(<i>r</i>)			0.3410*	0.2362	0.1459	0.5535**	0.6571**	0.1187	0.1806	0.7489**	0.9269**

注: $n=24$ $r_{0.05}=0.306$ $r_{0.01}=0.505$ 。

4 结论

河曲树儿梁坝地土壤质地主要为砂质壤土、黏壤土、砂质黏壤土、粉砂质黏土、壤质黏土,其颗粒组成的分形维数随土壤黏性的增加而增大,坝地组成的分形维数坝前>坝中>坝尾,颗粒组成各粒级含量及变化范围整体差异较小,在垂直剖面上变化很微弱,质地相对均一。

坝地土壤颗粒的分形维数与 0.02~0.002mm、<0.002mm 粒级含量之间呈极显著正相关,与 0.25~0.05mm、0.05~0.002mm 粒级含量之间呈极显著负相关,即粘粒含量越高,土壤颗粒的分形维数越高。表明土壤颗粒的分形维数是反映土粒组成和质地均匀程度的一个较好指标。

土壤颗粒组成可作为土壤肥力诊断的一个综合性定量指标,土壤质地状况影响土壤中有机质的转化、土

壤的保肥性、土壤矿物钾的释放。分形维数可以作为土壤肥力特性的定量化指标。

在土壤的各级颗粒组成中,细颗粒物对矿质养分的吸收与保持以及对土壤有机质的结合方面都表现出很大的活性,即土壤质地愈粘分形维数越大,土壤的保肥性越强。

参考文献:

- [1] 赵艺学. 西沟坝地一梯田一坡耕地农业效应的比较[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2):75-78
- [2] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain statistical self similarity and fractional dimension[J]. Science, 1967, 155: 636-638
- [3] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature [M]. W H Freeman, San Francisco, 1983:488
- [4] 朱晓华. 海岸线分维数计算方法及其比较研究[J]. 黄渤海海洋, 2002, 20(2):31-36

(下转第 381 页)