

# 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征

苏永中, 赵哈林

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

**摘要:**研究了科尔沁沙地农田沙漠化过程中土壤的粗粒化和养分的贫瘠化特征, 土壤颗粒分形维数的变化特征, 以及分形维数与土壤性状的关系。结果表明: 土壤沙粒含量越高, 土壤分形维数越低, 表征农田沙漠化程度越高; 土壤颗粒分形维数与土壤有机 C、全 N、粘粉粒含量之间存在显著的线性关系。说明分形维数能很好地表征农田沙漠化演变中土壤结构和养分状况以及沙漠化的程度, 可作为评价土壤沙漠化演变的一项综合性定量指标。

**关键词:**土壤性状; 沙漠化; 分形维数; 科尔沁沙地

## Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin Sandy Land

SU Yong-Zhong, ZHAO Ha-Lin (Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 71~74.

**Abstract:** The changes of soil particle size distribution and its fractal features as well as the characteristics of soil chemical properties were studied in the desertification process of farmland in Horqin sandy land. The relationships between fractal dimension of soil particle distribution and selected soil properties were discussed. The results showed that: (1), in the transformation from non-desertified farmland to the most severely desertified farmland, soil sand content at the 0~15 cm plough layer increased from 68.8% to 92.5%, organic C and total N contents decreased by 65% and 69%, respectively. (2), the fractal dimension of soil particle size distribution ranged from 2.179 to 2.611. The more the contents of sand, the less the fractal dimension and the higher the desertification degree of farmland. The fractal dimension decreased from 2.554 in the non-desertified farmland to 2.298 in the most severely desertified farmland in the desertification process. (3), There existed remarkable quantitative relationship between fractal dimension and soil properties. Obviously the fractal model could objectively reflected the texture and fertility states and the degree of soil degradation, so it can be used as a comprehensively quantitative index to evaluate the desertification evolution of soil properties.

**Key words:** soil properties; desertification; fractal dimension; Horqin sandy land

文章编号: 1000-0933(2004)01-0071-04 中图分类号: S152.3, S181 文献标识码: A

研究表明, 土壤作为一种由不同颗粒组成, 具有不规则形状和自相似结构的多孔介质, 是具有一定分形特征的系统<sup>[1]</sup>。传统的土壤质地和结构, 是以土壤粒级分布分析为基础, 结合相应的分类标准而确定的。近几年来, 运用各种分形模型计算土壤颗粒、团聚体和孔隙度的分形维数来表征土壤质地和结构组成及其均匀程度, 成为定量描述土壤结构特征的新方法<sup>[1~6]</sup>。

在农田沙漠化过程中, 表层土壤在强烈的风蚀作用下, 土壤细粒物质被吹蚀而发生粗粒化和单粒化的演变, 或发生表层土壤的粗沙覆盖和堆积, 造成土壤结构的破坏, 保水保肥性能恶化, 有机质和养分的丧失<sup>[7~9]</sup>。但以往涉及土壤沙漠化演变的研究多局限于对不同沙化程度土壤性质的测定和沙漠化过程及其机制的分析<sup>[7~9]</sup>, 有关沙漠化过程中土壤分形特征的变化研究鲜见报道。本文运用杨培岭等<sup>[1]</sup>提出的分形模型, 对农田沙漠化演变中土壤颗粒的分形维数变化进行了研究, 并分析了土壤颗粒

**基金项目:** 国家重大基础研究项目(G2000048704)

**收稿日期:** 2002-11-26; **修订日期:** 2003-03-24

**作者简介:** 苏永中(1966~), 男, 甘肃古浪人, 博士, 副研究员。主要从事土壤学和恢复生态学方面的研究。E-mail: stnm@ns.lzb.ac.cn

**Foundation item:** the National Key Basic Research Special Foundation Project of China(No. G2000048704)

**Received date:** 2002-11-26; **Accepted date:** 2003-03-24

**Biography:** SU Yong-Zhong, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in the study of restoration ecology. E-mail: stnm@ns.lzb.ac.cn



分形维数与土壤肥力性状之间的关系,为农田土壤沙漠化演变特征描述和沙漠化程度的定量化测度提供新的方法。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 自然概况

研究区位于内蒙古通辽市奈曼旗境内,地处我国北方半干旱农牧交错带东端的科尔沁沙地腹地。地理位置  $120^{\circ} 19' \sim 121^{\circ} 35' E, 42^{\circ} 14' \sim 43^{\circ} 32' N$ , 海拔 340~360m。属大陆性半干旱气候,年均气温  $6.4^{\circ} C, \geq 10^{\circ} C$  年积温  $3151.2^{\circ} C$ , 无霜期 151d。年均降水量 364.6mm, 年均蒸发量 1972.8mm, 年平均风速 3.5m/s, 大风日数 20~60d。地势相对平缓,第四纪以来堆积了深厚的冲积、湖积和细沙夹粘土层,经过风的吹扬形成坨甸相间的风沙地貌,农田大多位于沙质草甸或坨间缓坡地,沙质属性决定了土壤易遭受风蚀,尤其在地表裸露、干旱多风的春季,风蚀更为强烈;土壤类型主要为沙质栗钙土和风沙土<sup>[7]</sup>。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 研究样地的选取** 在奈曼旗中部 20 km 的范围内,选择 6 个典型的平坦开阔的甸子地作为研究单元,每个甸子地农田均为水浇地,种植玉米,施肥和农作管理水平大体一致。在每个甸子地中,按距离沙源远近不同选择 5 个具明显沙化梯度的农田,距沙源近的地块,表层土壤具风积沙的特征。

**1.2.2 土壤取样与分析** 在每个地块,随机取 20 个 0~15cm 耕层样,均匀混合后,带回中国科学院奈曼沙漠化研究站土壤实验室进行分析。土壤颗粒分析用吸管法,有机质的测定用重铬酸钾氧化-外加热法;全氮用凯氏法<sup>[10]</sup>(意大利产 DK6,UDK140 分析仪) 土壤 pH 和电导率(EC)分别用 1:1 土水比悬液和 1:5 土水比浸提液,用德产 Multiline F/SET-3 分析仪直接测定。

**1.2.3 土壤颗粒分形维数的计算** 本研究应用杨培岭等<sup>[1]</sup>提出的用粒径的重量分布表征的土壤分形模型来计算土壤颗粒的分形维数。土壤颗粒的重量分布与平均粒径间的分形关系式为:

$$(\bar{R}_i/\bar{R}_{max})^{3-D} = M(r < \bar{R}_i)/M_0 \quad (1)$$

式中,  $\bar{R}_i$  为表示两筛分粒级  $R_i$  与  $R_{i+1}$  间粒径的平均值,  $\bar{R}_{max}$  为最大粒级土粒的平均直径,  $M(r < \bar{R}_i)$  为小于  $\bar{R}_i$  的累积土粒质量,  $M_0$  为土壤各粒级质量的总和。由(1)可知式中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,然后分别以  $\lg(M_i/M_0)$ ,  $\lg(\bar{R}_i/\bar{R}_{max})$  为纵、横坐标,  $3-D$  是线性拟合方程的斜率,  $D$  为土壤颗粒分形维数。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤理化性状特征

沙漠化的核心问题是土壤粗粒化,也就是土壤因风蚀而引起细土粒和营养物质吹蚀,逐步由可利用的土地恶变为流沙的过程,也包括现有流沙在风的作用下逐步扩大的过程<sup>[7]</sup>。这一过程必然对土壤理化性状产生深刻的影响。表 1 明显地反映出 6 个甸子地农田沙漠化演变中土壤粒级分布和有机 C、全 N 的梯度变化。可以看出,沙地土壤粒级组成主要集中于 0.25~0.10 mm 的细沙和 0.10~0.05 mm 的极细沙两个粒级,但发展到极严重沙化农田,0.5~0.25 mm 的中粗沙组分显著增加,而极细沙组分显著降低。说明从正常农田向极严重沙化农田的演变,不仅是粘、粉粒的丧失,也包括 0.1~0.05 mm 极细沙的大量吹蚀。6 个取样点平均,正常农田向极严重沙化农田的演变,耕层土壤沙粒含量由 68.8% 增加到了 92.5%,已趋向于流沙化。相应地,粘粉粒含量显著下降(表 2)。表 2 也反映出,伴随着细粒物质的吹蚀,土壤有机 C 和全 N 含量显著下降。沙漠化程度每增加一级,有机 C 和全 N 含量分别下降 1.07g/kg 和 0.182 g/kg;而从正常农田向极严重沙化农田的演变,有机 C 和全 N 分别丧失了 65% 和 69%。回归分析表明,有机 C ( $C_{org}$ ) 和全 N ( $N_{total}$ ) 含量与土壤沙粒含量(S)呈高度的负相关,其线性拟合方程为:

$$C_{org} = 18.255 - 0.1717 S \quad (P < 0.0001, R^2 = 0.7654, n = 30) \quad (2)$$

$$N_{total} = 2.436 - 0.0234 S \quad (P < 0.0001, R^2 = 0.6482, n = 30) \quad (3)$$

从方程(2)和(3)得出,在农田沙漠化和演变中,土壤沙粒含量每增加 1%,也即粘粉粒含量被吹蚀 1%,土壤有机 C 和全 N 含量分别丧失 0.172 g/kg 和 0.0234g/kg。表 1 反映出土壤 pH 并未表现出明显的变化规律,说明沙漠化对土壤 pH 的影响较小,这与以前的研究结论是一致的<sup>[9]</sup>。但土壤电导率随沙化程度的提高而显著降低,这可能与土壤水溶性养分离子在沙漠化过程中下降有关。

### 2.2 土壤颗粒分形特征

运用回归分析法,由(1)式计算出 30 个农田土壤颗粒的分形维数,回归分析所得相关系数均在 0.85 以上,线性相关极显著 ( $P < 0.01$ ),结果见表 1。土壤被认为是一种具有分形特征的分散多孔介质,土壤分形维数是反映土壤结构几何形体的参数<sup>[1]</sup>。由表 1 可知,沙地农田 0~15 cm 耕层土壤颗粒的分维在 2.179~2.611 之间。在维数上表现为沙粒含量越高,分形维数越低。表 2 反映了农田沙漠化演变中土壤颗粒分形维数的变化趋势,随着沙漠化程度的加剧,分形维数逐渐减小,从正常农田向极严重沙漠化农田的演变,分形维数由 2.555 下降到了 2.298。

### 2.3 土壤理化性状与土壤颗粒分形维数的关系

在农田沙漠化的演变过程中,各土壤性状与土壤颗粒分形维数变化的相关分析表明(表 3),分形维数与土壤沙粒含量呈显



著的线性负相关,与粘、粉粒含量,有机 C,全 N 以及电导率呈显著的线性正相关,与土壤 pH 无相关关系。

表 1 沙漠化演变中农田土壤粒级分布、化学性状及土壤颗粒的分形维数

Table 1 Soil particle composition, chemical properties and fractal dimension of soil particle in the farmlands in the desertification process

取样单元 Sampling unit	样号 Sample No.	沙漠化程 度 Deser- tified extent	土壤粒级 (mm) 组成 Particle size distribution							分形维数 Fractal dimension	相关系数 Correlation coefficients	有机 C SOC (g/kg)	全 N Total N (g/kg)	pH (H <sub>2</sub> O)	电导率 EC ( $\mu$ s/cm)
			1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.10	0.1~0.05	0.05~0.02	0.02~0.002	<0.002						
I	1	ED	0.39	17.53	43.19	31.05	3.57	3.13	1.14	2.237	0.9414	2.80	0.278	7.91	63
	2	SD	0.17	6.7	27.74	50.95	7.23	5.09	2.12	2.343	0.9280	3.66	0.387	7.84	143
	3	MD	0.14	5.5	16.26	52.69	9.85	6.34	9.23	2.579	0.8976	5.35	0.596	7.72	127
	4	LD	0.14	5.52	31.12	34.14	8.86	13.03	7.2	2.565	0.9557	7.20	0.914	8.11	112
	5	ND	0.03	4.1	28.77	35.68	10.21	14.81	6.33	2.552	0.9530	6.44	0.657	8.2	104
I	6	ED	0.09	24.56	48.65	24.09	0.52	1.04	1.04	2.179	0.8595	1.22	0.146	7.83	47
	7	SD	0.69	5.69	22.05	60.08	3.95	5.71	1.82	2.322	0.9134	2.46	0.306	7.85	86
	8	MD	1.19	10.14	24.21	46.16	9.29	7.69	1.34	2.299	0.9446	4.51	0.685	7.72	96
	9	LD	0.13	6.18	21.82	48.17	8.38	7.67	7.66	2.554	0.9170	4.77	0.644	7.88	103
	10	ND	0.67	6.32	17.05	46.17	13.18	10.96	5.65	2.523	0.9396	5.41	0.840	7.68	91
II	11	ED	0.49	26.39	35.92	30.12	2.47	0.9	3.71	2.397	0.8498	1.85	0.293	7.82	61
	12	SD	0.5	7.48	19.71	59.85	5.1	3.72	3.64	2.395	0.8849	2.83	0.264	7.88	101
	13	MD	0.05	1.37	16.85	60.06	8.95	7.99	6.75	2.478	0.9116	4.03	0.473	7.98	99
	14	LD	0.96	5.07	14.91	54.78	11.66	9.29	3.33	2.436	0.9306	3.28	0.401	7.82	103
	15	ND	0.47	6.87	14.43	49.36	12.92	10.42	5.53	2.517	0.9349	6.90	0.812	7.63	159
IV	16	ED	0.77	11.37	33.12	43.68	5.35	2.76	2.95	2.374	0.9000	2.53	0.318	7.92	90
	17	SD	0.38	10.96	25.19	47.31	6.46	7.65	2.04	2.358	0.9418	3.33	0.448	7.82	91
	18	MD	0.58	5.91	13.26	56.72	11	10.15	2.38	2.391	0.9291	4.29	0.582	7.74	180
	19	LD	0.53	5.1	12.73	52.92	15.67	9.33	3.77	2.544	0.9287	5.45	0.664	7.79	166
	20	ND	0.98	4.99	13.52	45.79	12.52	12.33	9.98	2.611	0.9337	5.55	0.754	7.69	118
V	21	ED	0.1	17.06	47.19	31.08	1.72	0.84	2.01	2.282	0.8475	2.52	0.331	7.75	78
	22	SD	0.53	7.05	18.13	58.94	7.79	3.58	3.97	2.426	0.8876	5.53	0.713	7.84	95
	23	MD	1.24	9.91	20.62	41.54	12.19	9.65	4.85	2.497	0.9491	6.02	0.945	7.72	107
	24	LD	1.48	14.54	18.66	37.06	10.24	9.8	8.22	2.581	0.9527	6.23	0.843	7.66	122
	25	ND	1.28	11.91	14.2	40.56	12.64	11.43	7.98	2.580	0.9497	8.31	1.353	7.63	189
VI	26	ED	0.29	12.73	31.83	43.49	5.21	4.62	1.82	2.319	0.9350	2.92	0.240	7.92	66
	27	SD	0.67	14.33	22.31	44.42	7.08	6.92	4.27	2.464	0.9364	5.58	0.620	7.76	84
	28	MD	0.61	4.59	11.06	60.24	10.75	6.57	6.18	2.515	0.9011	5.84	0.609	7.74	101
	29	LD	0.04	5.79	37.59	28.76	13.78	8.62	5.42	2.510	0.9578	5.65	0.540	8.08	98
	30	ND	0.02	5.03	33.88	30.63	11.37	12.86	6.21	2.543	0.9604	6.78	0.732	8.17	107

\* ED, 极严重沙化, Extremely desertified; SD, 严重沙化 Severely desertified; MD, 中度沙化 Medium desertified; LD, 轻度沙化 Lightly desertified; ND, 正常农田 Non-desertified

表 2 沙漠化梯度上农田土壤性状及土壤颗粒分形维数

Table 2 Soil properties and fractal dimension of particle size distribution in the farmlands of different desertified degree

沙漠化程度 Desertified extent	土壤粒级分布 Soil particle size distribution			分形维数 Fractal dimension	有机 C Organic C (g/kg)	全 N Total N (g/kg)
	沙粒 Sand 1~0.05 mm	粉粒 Silt 0.05~0.002 mm	粘粒 Clay <0.002 mm			
极严重沙化 Extremely desertified	92.53±3.54	5.39±3.73	2.11±1.04	2.298±0.082	2.31±0.65	0.268±0.068
严重沙化 Severely desertified	85.3±2.48	11.72±2.19	2.98±1.10	2.386±0.054	3.90±1.35	0.399±0.126
中度沙化 Medium desertified	76.81±2.95	18.40±2.43	5.12±2.92	2.460±0.099	5.01±0.84	0.648±0.160
轻度沙化 Lightly desertified	73.02±2.36	21.09±2.96	5.93±2.07	2.532±0.053	5.43±1.33	0.668±0.189
正常农田 Non-desertified	68.8±2.06	24.28±0.60	6.95±1.73	2.555±0.036	6.57±1.06	0.858±0.251

已有的研究表明,土壤颗粒组成或团粒组成的分形维数在作为土壤肥力诊断指标等方面具有很好的应用潜力。如宫阿都等<sup>[11]</sup>的研究认为,土壤粒径的分形维数能客观地反映退化土壤结构状况和退化程度,可以作为退化土壤结构评价的一项综合性指标;刘金福等<sup>[2]</sup>和吴承祯等<sup>[6]</sup>提出,分维能客观表征土壤团粒结构的团聚体、水稳性团聚体及粒径大小组成,为理想的土壤肥力测定指标。本项研究的结果表明:分形维数的变化很好地表征了农田沙漠化演变中土壤的粗粒化和土壤有机 C 和全 N 变

化的趋势。因此,分形维数可以作为沙漠化过程中土壤退化评价的一个综合定量指标。

### 3 结论

农田沙漠化的演变,其实质是土壤的粗粒化和养分的贫瘠化演变过程。土壤粒径的分形维数可以定量地表征沙漠化过程中土壤粗粒化的演变特征和变化规律,分形维数越低,沙漠化程度越高。

土壤分形维数与土壤粒径分布,有机 C 和全 N 呈高度的线性相关,说明土壤分形特征能客观反映土壤肥力特征及其演变的规律性,因此可以作为农田沙漠化演变中土壤肥力特征描述的一个综合性定量指标,为沙漠化生物学过程的了解提供了新的方法。

### References:

- [1] Yang P L, Lou Y P, Shi Y C. Fractal feature of soil on expression by weight distribution of particle size. *Chinese Science Bulletin*, 1993, **38**(20): 1896~1899.
- [2] Liu J F, Hong W, Wu C Z. Fractal features of soil clusters under some precious hardwood stands in the central subtropical region, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(2): 197~205.
- [3] Li D C, Zhang T L. Fractal features of particle size distribution of soils in China. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, **9**(4): 263~265.
- [4] Zhang S R, Deng L J, Zhou Q, et al. Fractal dimensions of particle surface in the plowed layers and their relationships with main soil properties. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, **39**(2): 221~226.
- [5] Liu S Y, Zhang J W. Fractal approach to measuring soil porosity. *Journal of Southeast University*, 1997, **27**(3): 127~130.
- [6] Wu C Z, Hong W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, **36**(2): 163~167.
- [7] Zhao H L, Huang X W, He Z Y. Study on desertification of farmland soil in the Horqin region, Inner Mongolian. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, **33**(3): 242~248.
- [8] Xiao H L, Zhao X, Zhao W Z. Study on Uap-Ustic Isohumisol degradation under farming in Hebei, China. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, **35**(1): 129~134.
- [9] Su Y Z, Zhao H L, Zhang T H, et al. Soil Degradation Process and Character in the Desertification process of Rainfed farmland in Horqin Sandy land. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **16**(1): 25~28.
- [10] Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences. *Physical and Chemical Analysis Methods of Soils*. Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Press, 1978. 7~59.
- [11] Gong A D, He Y R. Study on fractal features of soil structure of degraded soil in dry and hot valley region of Jinsha river. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(3): 112~115.

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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维特征. *生态学报*, 2002, **22**(2): 197~205.
- [3] 李德成, 张桃林. 2000. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究. *土壤与环境*, **9**(4): 263~265.
- [4] 张世熔, 邓良基, 周倩, 等. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系. *土壤学报*, 2002, **39**(2): 221~226.
- [5] 刘松玉, 张继文. 土中孔隙分布的分形特征研究. *东南大学学报*, 1997, **27**(3): 127~130.
- [6] 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): 163~167.
- [7] 赵哈林, 黄学文, 何宗颖. 科尔沁沙地农田沙漠化演变的研究. *土壤学报*, 1996, **33**(3): 242~248.
- [8] 肖洪浪, 赵雪, 赵文智. 河北坝缘筒育干润均腐土耕种中的退化研究. *土壤学报*, 1998, **35**(1): 129~134.
- [9] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地旱作农田土壤退化的过程和特征. *水土保持学报*, 2002, **16**(1): 25~28.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. *土壤理化分析*. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 7~59.
- [11] 宫阿都, 何毓蓉. 金沙江干热河谷退化土壤结构的分形特征研究. *水土保持学报*, 2001, **15**(3): 112~115.

表 3 土壤颗粒分形维数与土壤理化性状之间的关系

Table 3 The relationships between fractal dimension of particle size distribution(D) and soil properties

土壤性状 Soil property	拟合回归方程 Linear regression equation	相关系数 Correlation coefficient r	显著水平 Significant level P
沙粒含量 Sand content	$D=3.3565-0.0115x$	0.901	<0.0001**
粉粒含量 Silt content	$D=2.2396+0.0128x$	0.804	<0.0001**
粘粒含量 Clay content	$D=2.2538+0.0415x$	0.916	<0.0001**
有机 C Organic C	$D=2.196+0.0538x$	0.828	<0.0001**
全 N Total N	$D=2.256+0.3273x$	0.747	<0.0001**
电导率 Electrical conductivity	$D=2.2476+0.0019x$	0.524	0.002**