

# 土壤短期吹蚀的粒度分维研究\*

杨秀春 刘连友 严平

(北京师范大学中国沙漠研究中心, 北京师范大学资源科学研究所, 北京 100875)

**摘要** 基于风洞实验数据, 对砂质壤土与壤质砂土短期吹蚀的粒度分形结构及其分维变化进行了探讨。结果表明: (1) 在砂质壤土与壤质砂土的不同吹蚀时段, 各自床面的粒度组成是具有分形结构特征的, 在风洞里不同风速与时间下的吹蚀并未改变两种土壤所具有的分形结构, 改变的只是分形结构的定量描述参数分维; (2) 无论是在初始状态还是在一定的风速和时间下, 砂质壤土的分维都小于壤质砂土的分维; (3) 两种不同质地的土壤在不同的吹蚀时段床面粒度分维与 < 0.05 mm 的颗粒(即粉粘粒)含量之间都存在着显著的正相关性; (4) 两种土壤在吹蚀的过程中由于土壤性状的差异, 其床面粒度分维会随时间和风速的不同而出现相异的变化过程。

**关键词** 土壤; 土壤粒度; 分形

中图分类号 S152.3 文献标识码 A

分形理论产生之后, 以其对系统自相似性的揭示, 成为研究和处理复杂现象的强有力工具, 已被广泛地应用到天文、地理、生物、计算机、哲学等诸多领域之中<sup>[1]</sup>。分形理论在土壤学中也有一定的应用。Turcotte 研究了土壤分维的计算方法<sup>[2]</sup>, Rieu 和 Sposito 以及 Perrier 等建立了包含土壤孔隙分维的描述土壤水力特征的数学模型<sup>[3~5]</sup>, 吴承祯和洪伟探讨了不同林分经营模式下土壤肥力与分维之间的关系<sup>[6]</sup>, 张世熔和邓良基等分析了耕层土壤颗粒表面的分维及其与主要土壤特征的关系<sup>[7]</sup>, 黄冠华和詹卫华通过研究指出可应用土壤颗粒的质量分维结合幂函数模型来估算土壤水分特性曲线<sup>[8]</sup>。概括而言, 相关研究表明土壤是具有分形性质的系统, 土壤粒径、颗粒表面积、颗粒体积、孔隙大小等都具有自相似性, 这就为土壤时空特性的定量化研究提供了新的思路与工具。在相关研究中还尚未见到关于同一土壤类型粒度分形结构动态变化情况探讨的报道, 而这对于认识土壤时空特性具有重要意义, 本文基于风洞实验数据, 探讨了土壤短期吹蚀的粒度分维特征。

## 1 土壤粒度分维计算方法

在分形理论中, 碎形是一种被广泛研究的重要

现象。由于构造过程作用的结果, 地球表面是破碎的, 而进一步的风化过程使得岩石更加破碎, 产生各种碎形体。碎形体在外力的侵蚀、搬运和沉积作用下, 又形成各种类型的沉积物。对于碎形分形性质的研究, 前人曾经用各种各样的统计关系来描述碎块的大小和频度分布, 使用最普遍的是幂指数关系。本研究土壤粒度分维值的计算即采用了该方法。

对于粒度分维的计算, 一般是通过各级粒径颗粒质量的测定来计算粒度分布与其质量之间的分维。

根据分形理论, 如果分形关系存在, 则有关系式

$$N(r) \propto r^{-D} \quad (1)$$

式中  $r$  定义为颗粒体积的立方根,  $N(r)$  定义为粒径大于  $r$  的颗粒数目,  $D$  为分维数。对上式求导, 可得

$$dN(r) \propto r^{-D-1} dr \quad (2)$$

设  $m(r)$  为直径小于  $r$  的颗粒累积质量,  $m$  为总质量, 由破碎物颗粒大小与频度的经验关系——Weibull 分布, 可得

$$m(r)/m \propto r^b \quad (3)$$

式中  $b$  为幂指数。对此式求导则有

$$dm(r) \propto r^{b-1} dr \quad (4)$$

在假定沉积物颗粒密度不变的情况下, 颗粒的

\* 国家科技攻关项目(2002BA517A04)和国家自然科学基金项目(40071018)资助

作者简介: 杨秀春(1975~), 女, 河北迁安人, 博士研究生, 主要从事土壤风蚀及保护性耕作技术研究

收稿日期: 2002-10-24; 收到修改稿日期: 2003-10-18

质量与其直径的立方成正比, 即频度的增量与质量的增量满足以下关系

$$dm(r) \propto r^3 dN(r) \quad (5)$$

经过(5)式、(4)式与(2)式之间的变量代换, 可得

$$r^{b-1} dr \propto r^{3*} r^{-D-1} dr \quad (6)$$

所以, 粒度的分维为

$$D = 3 - b \quad (7)$$

$b$  可以由  $m(r)/m \propto r^b$  的系列关系通过  $m(r)/m$  与  $r$  的双对数关系来求得, 如此, 在计算得到斜率值的基础上再换算得到  $D$  值。

## 2 土壤样品与处理

本研究的土壤样品采自内蒙古正蓝旗, 土壤质地类型为砂质壤土与壤质砂土, 前者相当于中国土壤系统分类的筒育正常干旱土, 后者相当于筒育干

润均腐土。吹蚀样品用 95 cm × 30 cm × 25 cm 规格的采样箱原状取回, 每块样品重约 50 kg。样品经过 8~10 周的自然风干, 用手铲对 0~10 cm 的表土层翻耕后, 在中国科学院兰州沙漠研究所风洞实验室进行了模拟吹蚀。在吹蚀前采集床面 0~1 cm 深度的初始状态样品, 然后根据吹蚀时间逐段在吹蚀床面下的 0~1 cm 深度采样, 然后对各时段床面样品进行粒度分析。粒度成分用吸管法分析, 用 5% HCl 对样品进行分散处理, 得到粒度成分的 7 级粒径范围: > 2 mm、2~1 mm、1~0.5 mm、0.5~0.25 mm、0.25~0.1 mm、0.1~0.05 mm 和 < 0.05 mm。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同时段床面土壤粒度分布

经过对采集样品的粒度分析, 得到砂质壤土和壤质砂土不同时段床面粒度分布, 见表 1 与表 2。

表 1 砂质壤土不同时段床面粒度分布情况

Table 1 Particle size distribution of sandy loam soil surface at different time of wind erosion with various wind speeds

土壤类型 Soil type	风速 Wind speed (m s <sup>-1</sup> )	吹蚀时间 Time(min)	粒度分布 Particle size distribution(%)							
			> 2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.1 mm	0.1~0.05 mm	< 0.05 mm	
砂 质 壤 土	10	初始态	20.82	7.71	12.16	15.56	20.72	11.65	11.38	
		10	26.53	8.27	11.65	14.86	18.93	10.19	9.58	
		20	29.88	7.59	10.90	14.23	18.45	9.50	9.45	
		30	34.32	7.09	10.50	13.80	17.31	8.96	8.02	
		40	37.88	7.59	10.13	13.48	15.46	8.03	7.43	
		50	40.23	7.90	10.29	12.51	14.55	7.62	6.91	
		60	43.70	7.47	9.94	11.60	13.46	7.15	6.68	
		18	3	29.60	6.58	10.81	14.14	18.63	10.58	9.66
	6	6	31.71	6.89	10.71	13.84	17.82	9.98	9.05	
		9	34.80	7.13	10.89	13.93	16.97	8.30	7.98	
		12	38.94	7.00	10.76	12.88	15.26	7.64	7.53	
		15	43.90	6.84	10.26	11.85	13.92	6.77	6.46	
		18	46.16	7.48	9.81	10.72	12.74	6.54	6.55	
		26	1	39.18	7.12	10.98	12.48	14.63	7.66	7.95
			2	41.37	7.26	10.08	12.18	14.14	7.09	7.52
			3	41.96	7.49	10.73	12.07	13.07	7.52	7.16
			4	44.54	8.02	10.84	11.78	12.60	5.98	6.24
			5	45.00	8.04	10.47	11.43	12.74	6.53	5.78
6	46.38		8.09	10.49	11.19	11.82	6.23	5.79		

表 2 壤质砂土不同时段床面粒度分布情况

Table 2 Particle size distribution of loamy sand soil surface at different time of wind erosion with various wind speeds

土壤类型 Soil type	风速 Wind speed ( $\text{m s}^{-1}$ )	吹蚀时间 Time(min)	粒度分布 Particle size distribution(%)						
			> 2 mm	2~ 1 mm	1~ 0.5 mm	0.5~ 0.25 mm	0.25~ 0.1 mm	0.1~ 0.05 mm	< 0.05 mm
壤 质 砂 土	10	初始态	30.78	7.42	5.30	4.38	12.21	23.31	16.61
		10	32.59	7.89	5.83	4.43	10.49	19.95	18.82
		20	33.50	8.05	5.74	4.49	10.17	18.75	19.30
		30	34.45	8.10	5.52	4.31	9.58	17.14	20.90
		40	35.62	7.89	5.53	4.43	9.75	17.54	19.24
		50	37.08	8.10	5.30	4.07	9.45	16.33	19.68
		60	38.64	8.03	5.18	4.33	9.06	16.05	18.71
	18	3	40.06	8.02	5.69	4.25	9.50	14.96	17.52
		6	40.40	9.22	5.88	4.34	9.22	13.78	17.16
		9	42.73	8.73	5.54	3.81	8.37	13.66	17.81
		12	44.49	8.48	4.98	3.49	7.66	13.95	16.94
		15	44.82	8.67	5.05	3.83	8.01	12.67	16.94
		18	48.31	7.45	4.77	3.44	7.87	12.11	16.05
		26	1	53.39	7.47	4.32	3.21	6.69	11.22
	2		55.03	6.72	3.77	2.89	6.85	12.20	12.54
	3		61.45	6.53	3.60	2.46	5.41	9.05	11.50
	4		69.77	7.11	3.59	2.08	3.56	5.38	8.50
	5		72.31	6.15	2.98	1.84	3.58	5.68	7.46
6	74.02		5.87	2.79	1.90	3.78	5.16	6.48	

从表 1 与表 2 可见, 经过吹蚀, 无论是砂质壤土还是壤质砂土的床面都发生了复杂的变化, 表土层大于 2 mm 的颗粒明显地增加, 而小于 0.25 mm 的颗粒则明显地减少。

### 3.2 不同时段床面土壤粒度分维值

根据表 1 与表 2 的数据, 结合(1)~(7)式对两种土壤样品在不同风速与不同时段下的可能分形结构进行分析, 得到两种土壤样品不同吹蚀时段的粒度分维值及其相关系数, 见表 3 中所列。

### 3.3 土壤粒度分维及其与不同土壤颗粒含量之间的关系

结果表明(见表 3), 在两种土壤样品的不同吹蚀时段, 不同床面颗粒粒度分维与颗粒含量之间的相关系数均较高, 经  $F$  显著性检验, 它们均大于  $F$  显著性

检验相关系数临界值 0.811 4 ( $F_{0.05} = 0.811 4$ ), 所以, 在两种土壤样品的不同吹蚀时段, 各自床面的粒度组成是具有客观的分形结构特征的, 改变的只是分形结构的定量描述参数分维; 无论是就初始态还是在一定的风速和时间吹蚀下, 砂质壤土的分维都小于壤质砂土的分维。初始态砂质壤土的分维为 2.480 7, 而初始态壤质砂土的分维则为 2.669 9; 在  $10 \text{ m s}^{-1}$  风速与吹蚀时间为 60 min 的情况下, 砂质壤土的分维为 2.427 3, 而壤质砂土的分维则为 2.717 5, 存在两种土壤粒度分维的客观差异。

两种土壤样品在三种风速与相应时间下的床面粒度分维与相应组分(> 2 mm、2~ 1 mm、0.1~ 0.05 mm、< 0.05 mm)之间的关系如图 1、图 2。

表 3 两种土壤样品不同吹蚀时段的粒度分维值及其相关系数<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation coefficient between fractal dimension of particle and particle content at different time of wind erosion

土壤类型 Soil type	风速 Wind speed (m s <sup>-1</sup> )	时间 Time(min)	分维 Fractal dimension	相关系数 Correlation coefficient	土壤类型 Soil type	风速 Wind speed (m s <sup>-1</sup> )	时间 Time(min)	分维 Fractal dimension	相关系数 Correlation coefficient		
砂质壤土	10	初始态	2.480 7	0.958 5*	壤质砂土	10	初始态	2.669 9	0.879 6*		
		10	2.454 1	0.961 1*			10	2.700 5	0.905 7*		
		20	2.460 4	0.961 4*			20	2.707 9	0.913 9*		
		30	2.435 4	0.959 5*			30	2.728 2	0.924 7*		
		40	2.428 3	0.964 4*			40	2.713 5	0.919 2*		
		50	2.420 7	0.966 2*			50	2.723 6	0.925 6*		
		60	2.427 3	0.967 8*			60	2.717 5	0.925 9*		
		18	3	2.469 5			0.956 0*	18	3	2.704 5	0.932 9*
			6	2.459 9			0.957 9*		6	2.699 4	0.944 4*
			9	2.431 7			0.963 2*		9	2.719 5	0.940 1*
			12	2.433 4			0.966 4*		12	2.719 2	0.933 3*
			15	2.414 8			0.967 5*		15	2.716 3	0.945 0*
	18		2.432 2	0.970 9*	18	2.718 5	0.941 1*				
	26	1	2.449 3	0.969 1*	26	1	2.707 9	0.939 8*			
		2	2.444 8	0.969 6*		2	2.699 6	0.920 3*			
		3	2.437 8	0.970 2*		3	2.712 1	0.943 0*			
		4	2.405	0.975 2*		4	2.693 3	0.973 9*			
		5	2.394 2	0.970 4*		5	2.686 7	0.960 6*			
		6	2.400 3	0.973 7*		6	2.665 0	0.962 2*			

1) 相关系数通过  $m(r)/m$  与  $r$  的双对数关系求得 Correlation coefficients calculated by logarithm relationship between  $m(r)/m$  and  $r$

\* 表示 0.05 显著水平 ( $n=6, r_{0.05}=0.8114$ ) Symbol \* represents statistical significance at 0.05 ( $n=6, r_{0.05}=0.8114$ )

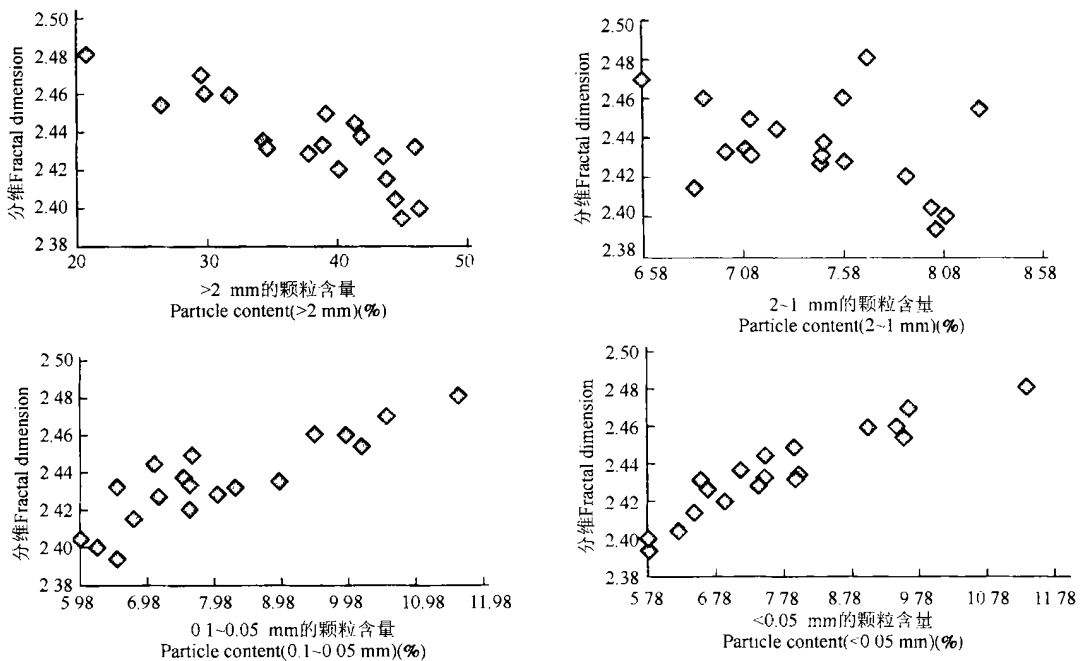


图 1 砂质壤土不同时段床面粒度分维与组分关系

Fig 1 Relationship between fractal dimension of particle size and particle content in different size classes on sandy loam soil surface at different time of wind erosion

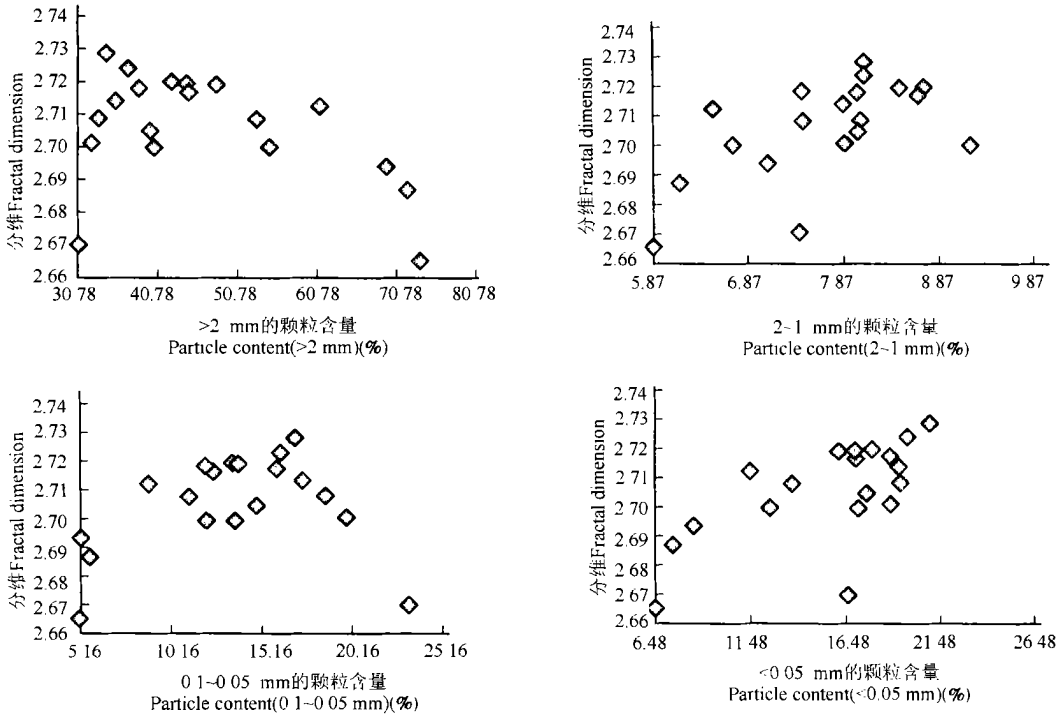


图2 壤质砂土不同时段床面粒度分维与组分关系

Fig 2 Relationship between fractal dimension of particle size and particle content in different size classes on loamy sand soil surface at different time of wind erosion

利用最小二乘法对图 1 中各图散点进行线性回归分析, 可得砂质壤土在三种风速与相应时间下的床面粒度分维与各组分的定量关系, 如下:

床面粒度分维 ( $D$ ) 与  $> 2 \text{ mm}$  的颗粒含量 ( $\theta_{> 2 \text{ mm}}$ ) 之间的关系为

$$D = -0.0027\theta_{> 2 \text{ mm}} + 2.5374 \quad r = 0.8450 \quad (8)$$

床面粒度分维 ( $D$ ) 与  $2 \sim 1 \text{ mm}$  的颗粒含量 ( $\theta_{2 \sim 1 \text{ mm}}$ ) 之间的关系为

$$D = -0.0187\theta_{2 \sim 1 \text{ mm}} + 2.5749 \quad r = 0.3833 \quad (9)$$

床面粒度分维 ( $D$ ) 与  $0.1 \sim 0.05 \text{ mm}$  的颗粒含量 ( $\theta_{0.1 \sim 0.05 \text{ mm}}$ ) 之间的关系为

$$D = 0.0126\theta_{0.1 \sim 0.05 \text{ mm}} + 2.3338 \quad r = 0.8753 \quad (10)$$

床面粒度分维 ( $D$ ) 与  $< 0.05 \text{ mm}$  的颗粒含量 ( $\theta_{< 0.05 \text{ mm}}$ ) 之间的关系为

$$D = 0.0145\theta_{< 0.05 \text{ mm}} + 2.3234 \quad r = 0.9361 \quad (11)$$

利用最小二乘法对图 2 中各图散点进行线性回归分析, 可得壤质砂土在三种风速与相应时间下的

床面粒度分维与各组分的定量关系, 如下:

床面粒度分维 ( $D$ ) 与  $> 2 \text{ mm}$  的颗粒含量 ( $\theta_{> 2 \text{ mm}}$ ) 之间的关系为

$$D = -0.0005\theta_{> 2 \text{ mm}} + 2.731 \quad r = 0.4407 \quad (12)$$

床面粒度分维 ( $D$ ) 与  $2 \sim 1 \text{ mm}$  的颗粒含量 ( $\theta_{2 \sim 1 \text{ mm}}$ ) 之间的关系为

$$D = 0.0114\theta_{2 \sim 1 \text{ mm}} + 2.618 \quad r = 0.5914 \quad (13)$$

床面粒度分维 ( $D$ ) 与  $0.1 \sim 0.05 \text{ mm}$  的颗粒含量 ( $\theta_{0.1 \sim 0.05 \text{ mm}}$ ) 之间的关系为

$$D = 0.0008\theta_{0.1 \sim 0.05 \text{ mm}} + 2.6941 \quad r = 0.2387 \quad (14)$$

床面粒度分维 ( $D$ ) 与  $< 0.05 \text{ mm}$  的颗粒含量 ( $\theta_{< 0.05 \text{ mm}}$ ) 之间的关系为

$$D = 0.0026\theta_{< 0.05 \text{ mm}} + 2.6652 \quad r = 0.6526 \quad (15)$$

通过对 (8) 式、(10) 式与 (11) 式的显著性检验 ( $F_{0.05} = 0.4555$ ), 就砂质壤土而言, 不同吹蚀时段床面粒度的分维与  $> 2 \text{ mm}$ 、 $0.1 \sim 0.05 \text{ mm}$  以及  $< 0.05 \text{ mm}$  的颗粒含量之间关系显著。砂质壤土不同吹蚀时段床面粒度的分维与  $> 2 \text{ mm}$  的颗粒含量之间呈负相关关系, 与  $0.1 \sim 0.05 \text{ mm}$  以及  $< 0.05 \text{ mm}$  的颗粒含量

之间存在着正相关关系,而与 2~ 1 mm 的颗粒含量之间相关性不显著,(9)式通不过显著性检验。根据对(13)式和(15)式的显著性检验( $F_{0.05} = 0.4555$ ),就壤质砂土而言,不同吹蚀时段床面粒度的分维与 2~ 1 mm 的颗粒含量以及 < 0.05 mm 的颗粒含量之间存在着显著的相关性,而与 > 2 mm 的颗粒含量和 0.1~ 0.05 mm 的颗粒含量之间相关性不显著,(12)式和(14)式通不过显著性检验。就砂质壤土与壤质砂土这两种土壤样品,在不同的吹蚀时段床面的粒度分维与 < 0.05 mm 的颗粒含量之间都存在着显著的正相关性,而与其它粒级颗粒含量之间的相关性不一致。

### 3.4 土壤粒度分维随吹蚀时间的变化

分析两种土壤样品在不同吹蚀时段的床面粒度分维的变化情况(见表 3),砂质壤土床面粒度分维在不同风速与时间下,在总体上呈现出减小的趋势。壤质砂土床面粒度分维在风速为  $10 \text{ m s}^{-1}$  与  $18 \text{ m s}^{-1}$  的情况下,随着吹蚀时间的增加,分维在总体上都呈现出变大的趋势,即出现了增维的现象;而在风速为  $26 \text{ m s}^{-1}$  的情况下,则分维在 1~ 3 min 出现升维趋势,而在 3~ 6 min 则出现降维趋势,总体来看,在该风速下分维随时间的增加呈现降维的趋势。实例表明,不同的土壤类型在吹蚀的过程中会由于具体情况的差异,其床面粒度分维会随时间和风速的不同而出现相异的变化过程。

### 参考文献

[1] 朱晓华,杨秀春. 客观的分形世界与世界的自组织及其启示.

科学技术与辩证法,2002,19(5):13~ 17. Zhu X H, Yang X C. Objective world of fractal and self-organized world and its significance (In Chinese). Science Technology and Dialectics, 2002, 19(5): 13~ 17

- [2] Tuotte D L. Fractal fragmentation. J. Geography Res., 1986, 91(12): 1 921~ 1 926
- [3] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties II. Application. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55: 1 231~ 1 238
- [4] Perrier E, Bird N, Rieu M. Generalizing the fractal model of soil structure: The pore-solid fractal approach. Geoderma, 1999, 88(3/4): 137~ 164
- [5] Perrier E M A, Bird N R A. Modelling soil fragmentation: the pore solid fractal approach. Soil Till. Res., 2002, 64(1/2): 91~ 99
- [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): 162~ 167. Wu C Z, Hong W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns(In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(2): 162~ 167
- [7] 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. Zhang S R, Deng L J, Zhou Q, et al. Fractal dimensions of particle surface in the plowed layers and their relationship with main soil properties(In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(2): 221~ 226
- [8] 黄冠华,詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用. 土壤学报,2002,39(4): 490~ 497. Huang G H, Zhan W H. Fractal property of soil particle size distribution and its application(In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 490~ 497

## FRACTAL DIMENSION OF SOIL PARTICLE SIZE BY WIND EROSION IN A SHORT PERIOD

Yang Xiuchun Liu Lianyou Yan Ping

(*China Center for Desert Research, Institute of Resources Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

**Abstract** Based on the fractal theory and experimental data in wind tunnel, the fractal character of soil particle size in a short period was preliminarily discussed in this paper. Also, the trend of fractal dimension on soil surface during different deflation periods was analyzed. Some conclusions can be drawn as follows:

(1) During the different blowing intervals, fractal structure exists in the grain size distributions of sandy loam and loamy sand. Furthermore, fractal characters of two soils don't change with the different wind speeds and time in the wind tunnel. But their fractal dimensions change as the time gone.

(2) Whether the initial stage of deflation or the consequent stage with definite wind speed and time, the fractal dimensions of sandy loam are all smaller than that of loamy sand.

(3) During the different soil deflation process, regression analysis indicated that there was significant positive correlation between the fractal dimensions of the grain sizes of the two soils with different texture and the content of the clay ( $< 0.05$  mm), but the correlations between the fractal dimensions and the contents of the rest grain size are different. In generally, the more the content of clay is, the larger the fractal dimension of grain size is.

(4) Because of the different situation of the two soils with different texture during the deflation process, correspondingly the fractal dimensions of grain size had different process of variation with the different wind speed and time.

**Key words** Soil; Soil particle size; Fractal