

黄土高原不同生境土壤结构体分形维数研究

刘毅^{1,2},李世清^{1,2},李生秀²

(1 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;

2 西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

[摘要] **【目的】**研究不同生境条件下土壤结构体分形维数及其与主要土壤特性的关系。**【方法】**根据植被和土壤类型,从黄土高原不同地域分别采集 22 个 0~20 cm 土层土壤样品,利用干筛法测定其结构体组成,分析土壤结构体分形维数及其影响因子。**【结果】**黄土高原 22 个土壤样品结构体的分形维数为 2.267~2.843。土壤类型不同,其土壤结构体的分形维数具有明显的差异,分形维数表现为干润砂质新成土>黄土正常新成土>简育干润均腐土>土垫旱耕人为土。回归分析发现,土壤结构体分形维数与土壤有机质、全氮含量具有极显著的负相关关系,相关系数分别为-0.591 9 和-0.640 7($n=22$)。对黄土正常新成土,除 5~10 mm 结构体外,土壤结构体分形维数与各粒径含量均呈现出明显的线性关系,正负相关性以 0.25 mm 为界,即其分形维数与>0.25 mm 的结构体含量呈负相关,与<0.25 mm 的结构体含量呈正相关。多元线性回归分析表明,结构体分形维数与 0~0.25,1~2,2~5,5~10 mm 结构体含量的偏相关关系达到显著水平,而与 0.25~1 mm 结构体含量的偏相关系数不显著。**【结论】**在黄土高原地区,土壤结构体分形维数随纬度增加而增加,土垫旱耕人为土结构体分形维数最低,干润砂质新成土结构体分形维数最高,同时土壤结构体的分形也受土地利用方式的影响,分形维数表现为人工林地>农地>自然林地>裸地。

[关键词] 土壤结构体;分形维数;黄土高原;土壤生境

[中图分类号] S152.3;S152.4

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2008)01-0086-07

Fractal dimensions of soil aggregates under different environments in the Loess Plateau

Liu Yi^{1,2}, Li Shi-qing^{1,2}, Li Sheng-xiu²

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** This study is to investigate the fractal dimensions of soil aggregates and their relationship with important soil properties in different environments. **【Method】** In terms of the types of vegetation and soil, 22 soil samples from different profile (0—20 cm, 20—40 cm and 40—60 cm) were collected from different regions in the Loess Plateau. We determined the composition of soil aggregates with dry sieved method, and analysed fractal dimensions of soil aggregates and the effect factors. **【Result】** The results indicated that the fractal dimensions of soil aggregates ranged between 2.267—2.843 for the twenty-two soil samples. Fractal dimensions of soil aggregates were different in various types of soils, Ust-Sandic Entisols>Los-Orthic Entisols>Hap-Ustic Isohumisols>Eum-Orthic Anthrosols. Regression analysis indicated that there was a highly significant negative correlation between fractal dimension and organic

* [收稿日期] 2007-01-22

[基金项目] 国家自然科学基金项目(90502006);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(10501-104);西北农林科技大学创新团队项目

[作者简介] 刘毅(1978—),男,湖南新化人,在读博士,主要从事土壤-植物营养研究。E-mail:lyle3521@126.com

[通讯作者] 李世清(1963—),男,甘肃秦安人,教授,博士,博士生导师,主要从事土壤-植物营养研究。E-mail:sqli@ms.iswc.ac.cn

matter and total nitrogen. The correlation coefficient was -0.5919 for the relationship between fractal dimension and organic matter and -0.6407 for the relationship between fractal dimension and total nitrogen. In the soils that was classified as Los-Orthic Entisols, having a significant correlation between the fractal dimension and the amount of material in each aggregate size class except for the 5–10 mm aggregate size class. The boundary between positive and negative correlation was 0.25 mm. Fractal dimensions were negatively correlated with the amount of aggregates with diameter >0.25 mm and positively correlated with the amount of aggregates with diameter 0–0.25 mm. Multivariate linear regression analysis indicated a significant partial correlation between the fractal dimension of soil aggregates and the amount of aggregates in the 0–0.25 mm, 1–2 mm, 2–5 mm and 5–10 mm size classes, while the partial correlation coefficient between the fractal dimension of soil aggregates and the amount of aggregates in the 0.25–1 mm size class was not significant. 【Conclusion】 The fractal dimensions of soil aggregates increased with increased latitude on the Loess Plateau. Also, the fractal dimensions largely varied with soil, among which Eum-Orthic Anthrosols was the lowest and Ust-Sandic Entisols was the highest, and it was affected by types of vegetation, which is: artificial woods land $>$ farming land $>$ wildwood land $>$ bare land.

Key words: soil aggregate; fractal dimension; Loess Plateau; soil eco-environment

分形理论是当代新兴学术思想之一,从曼德勃罗特(Mandelbort)1967年在美国《科学》杂志上发表题为“英国的海岸线有多长”^[1]开始,到他的专著《Fractal: Form Chance and Dimension》^[2]、《The Fractal Geometry of Nature》^[3]的发表,形成了以分维数、自相似性及无限可分为特点,可利用迭代算法描述的分形几何的概念。土壤是具有自相似结构的多孔介质,具有一定的分形特性^[4-6]。多年以来,国外对土壤分形特征的研究取得了显著进展, Rieu 等^[5-6]、De Gennes 等^[7]、Toledo 等^[8]以及 Bird 等^[9-10]均对土壤分形以及其与土壤孔隙和土壤水分的关系进行了大量研究,并建立了相应的数学模型;国内也有不少关于土壤分形及其影响因素的研究报道,黄冠华等^[11]通过对土壤水分特征曲线的分形模拟发现,土壤水分特征曲线模型的分形维数与基于质量的土壤颗粒分布的分形维数,具有良好的线性相关关系。张季如等^[12]研究发现,土壤颗粒的粒径分布具有一定的统计分形特征,分维数能够有效反映粒径大小和分布的均匀程度。Tyler 等^[13]、杨培岭等^[14]将粒径分布与对应的土壤颗粒质量分布相联系,提出了确定土壤颗粒大小分布分形维数的新方法,同时从理论上证明了质量分形可代替粒径分形。本试验应用杨培岭等^[14]改进的 Katz 分形模型,研究了黄土高原不同生境条件下土壤结构体的分形维数,探讨了分形维数与各粒级结构体含量的单相关和偏相关关系,揭示了结构体分形维数与有机质、全氮含量间的相关性,分析了土壤类型及土地利用方式对土壤结构体分形维数的影响,以期对土

壤肥力特征的描述提供新的尺度和方法。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

从黄土高原由北向南依次在陕西神木、安塞、富县、洛川、杨凌等地分别采取林地、草地和农田生态系统 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土样(表 1),并记录海拔高度和经、纬度;土壤类型根据中国土壤系统分类标准确定^[15]。土壤样品采集后装入密封袋,带回实验室风干后筛分为不同大小的土壤结构体,确定各级结构体含量。

1.2 方法

土壤结构体采用沙维诺夫法分级(干筛法)^[16],即将自然风干的土壤除去植物残体及小石块后,称取 500 g 放置在套筛的最大孔径(5 mm)土壤筛上面,套筛下面土壤筛孔径依次为 2, 1 和 0.25 mm,底层放置底盒,以备收取 0~0.25 mm 结构体。将盛土套筛放在电动振筛机上振荡 5 min 后,从上至下依次取样,称重,求得结构体组成。结构体分析采用上海华东仪器厂生产的电动振筛机进行。

有机质含量用重铬酸钾外加热法测定,全氮含量用凯氏法消解后,全自动定氮仪测定^[16]。

1.3 基本原理

具有自相似结构的多孔介质土壤,由大于某一粒径($d > d_i, i = 1, 2, \dots$)的土粒构成的体积 $V(d > d_i)$,可由类似 Katz 等^[17]的公式表示,即:

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

式中: δ 是尺码, d_i 是粒径大小, A, k 是描述形状、尺

度的常数, D 是分形维数。

杨培岭等^[14]在 Katz 法的基础上,提出了用粒径质量分布资料表征的土壤分形模型,即:

$$\frac{W(\delta<\overline{d}_i)}{W_0}=(\frac{\overline{d}_i}{k})^{3-D}。(2)$$

式中: $W(\delta<\overline{d}_i)$ 是直径小于 $\overline{d}_i$ 的土粒的累积质量, W_0 是全部各粒级土粒的质量和, $\overline{d}_i$ 表示两筛分粒级 d_i 与 d_{i+1} 间粒径的平均值。设 $\overline{d}_{\max}$ 为最大粒级土粒的平均直径,则不难得出 $W(\delta>\overline{d}_{\max})=0$,代入

式(2)有 $k=\overline{d}_{\max}$ 。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为:

$$(\frac{\overline{d}_i}{\overline{d}_{\max}})^{3-D}=\frac{W(\delta<\overline{d}_i)}{W_0}。(3)$$

则有:

$$D=3-\frac{\lg(W_i/W_0)}{\lg(\overline{d}_i/\overline{d}_{\max})}。(4)$$

式中: W_i 为直径小于 $\overline{d}_i$ 的土粒的累积质量。显然, $(3-D)$ 是 $\lg(\overline{d}_i/\overline{d}_{\max})$ 和 $\lg(W_i/W_0)$ 回归直线的斜率,因此通过回归分析方法即可获得 D 值。

表 1 供试土壤的特性
Table 1 Properties of soil samples

编号 No.	采样点 Sampling place	经纬度 Longitude latitude	海拔/m Altitude	地形 Terrain	植被 Vegetation	土壤类型 Soil type
1	神木六道沟 Shenmu Liudaogou	E110°22′1.38″ N38°47′35.22″	1 198	坡地 Sloping land	黄豆 Soybean	干润砂质新成土 Ust-Sandic Entisols
2	神木六道沟 Shenmu Liudaogou	E110°22′2.22″ N38°47′35.1″	1 202	坡地 Sloping land	弃耕土壤 Decultivated soil	干润砂质新成土 Ust-Sandic Entisols
3	神木六道沟 Shenmu Liudaogou	E110°22′6.78″ N38°47′34.5″	1 291	坡地 Sloping land	苜蓿 Alfalfa	干润砂质新成土 Ust-Sandic Entisols
4	神木六道沟 Shenmu Liudaogou	E100°22′3.66″ N38°47′40.44″	1 216	坡地 Sloping land	弃耕土壤 Decultivated soil	干润砂质新成土 Ust-Sandic Entisols
5	神木六道沟 Shenmu Liudaogou	E110°21′57.6″ N38°47′41.28″	1 189	坡地 Sloping land	苜蓿 Alfalfa	干润砂质新成土 Ust-Sandic Entisols
6	神木六道沟 Shenmu Liudaogou	E110°21′56.7″ N38°47′42.05″	1 188	坡地 Sloping land	黄豆 Soybean	干润砂质新成 土 Ust-Sandic Entisols
7	安塞墩山 Ansai Dunsan	E109°18′51.18″ N36°51′13.56″	1 289	坡地 Sloping land	谷子(农地) Millet (Farming land)	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols
8	安塞墩山 Ansai Dunsan	E109°18′48.24″ N36°51′12.72″	1 293	坡地 Sloping land	沙打旺(农地) <i>Astragalus adsurgens</i> (Farming land)	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols
9	安塞墩山 Ansai Dunsan	E109°19′5.88″ N36°51′33.6″	1 193	坡地 Sloping land	刺槐(人工林) <i>Robinnia pseudoscacia</i> (Artificial forest land)	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols
10	安塞纸坊沟 Ansai Zhifanggou	E109°15′9.72″ N36°44′52.8″	1 137	坡地 Sloping land	刺槐(人工林) <i>Robinnia pseudoscacia</i> (Artificial forest land)	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols
11	安塞纸坊沟 Ansai Zhifanggou	E109°15′13.02″ N36°44′33.6″	1 250	坡地 Sloping land	柠条(人工林) <i>Caragana korshinskii</i> (Artificial forest land)	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols
12	安塞纸坊沟 Ansai Zhifanggou	E109°15′9.48″ N36°44′25.2″	1 123	坡地 Sloping land	谷子(农地) Millet (Farming land)	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols
13	富县子午岭 Fuxian Ziwuling	E109°08′55.2″ N36°05′27.48″	1 228	坡地 Sloping land	新垦农田(裸地) Fresh assart (Bare land)	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols
14	富县子午岭 Fuxian Ziwuling	E109°08′55.2″ N36°05′27.48″	1 228	坡地 Sloping land	松树(自然林) Pine (Natural forest land)	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols
15	富县子午岭 Fuxian Ziwuling	E109°08′55.2″ N36°05′27.48″	1 228	坡地 Sloping land	新垦农田(裸地) Fresh assart (Bare land)	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols
16	富县子午岭 Fuxian Ziwuling	E109°08′55.2″ N36°05′27.48″	1 228	坡地 Sloping land	混交林(自然林) Mixed for- est (Natural forest land)	黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols
17	富县子午岭 Fuxian Ziwuling	E109°26′59.7″ N35°59′34.44″	1 196	坡地 Sloping land	蒿草 <i>Kobresia capillfolia</i>	简育干润均腐土 Hap-Ustic Isohumisols
18	富县子午岭 Fuxian Ziwuling	E109°26′59.7″ N35°59′34.44″	1 196	坡地 Sloping land	蒿草 <i>Kobresia capillfolia</i>	简育干润均腐土 Hap-Ustic Isohumisols
19	洛川 Luochuan	E109°24′25.8″ N35°43′52.5″	1 116	平地 Flat land	苜蓿 Alfalfa	简育干润均腐土 Hap-Ustic Isohumisols
20	洛川 Luochuan	E109°24′25.8″ N35°43′51.88″	1 115	平地 Flat land	玉米 Maize	简育干润均腐土 Hap-Ustic Isohumisols
21	杨凌 Yangling	E108°5′10.71″ N34°17′4.35″	520	平地 Flat land	小麦 Wheat	土垫旱耕人为土 Eum-Orthic Anthrosols
22	杨凌 Yangling	E108°5′10.71″ N34°17′4.35″	520	平地 Flat land	小麦 Wheat	土垫旱耕人为土 Eum-Orthic Anthrosols

2 结果与分析

2.1 黄土高原土壤结构体的分形维数

在获得 $\lg(W_i/W_0)$ 和 $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 的基础上,通过回归分析计算可得到土壤结构体大小分布的分形维数 D 值(表 2)。从表 2 可以看出,22 种土壤结构

体分形维数分布在 2.267~2.843,因土壤结构体表面的拓扑是 2,故其分维增值为 0.267~0.843。该结果与杨培岭等^[14]采用相同方法测定的 11 种壤质砂土、粘土等的结果基本一致。表现为>0.25 mm 的结构体含量越低,其结构体大小分布的分形维数越高。

表 2 黄土高原土壤结构体的分形维数及土壤有机质和全氮含量

编号 No	不同粒径结构体含量/(g·kg ⁻¹) Amount of aggregate in different grades					分形维数 Fractal dimensions	相关系数 Correlation coefficient	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter	全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen
	0~0.25 mm	0.25~1 mm	1~2 mm	2~5 mm	5~10 mm				
1	235.3	110.5	69.3	196.9	388.1	2.662	0.969 2	4.25	0.238
2	520.0	111.1	62.7	147.0	159.2	2.843	0.983 5	2.95	0.264
3	247.2	165.8	115.8	249.1	222.1	2.657	0.997 3	3.94	0.240
4	454.3	111.0	79.3	177.7	177.7	2.808	0.983 1	3.00	0.214
5	475.7	104.0	67.7	171.7	181.0	2.821	0.977 3	6.75	0.305
6	352.3	175.8	94.6	209.9	167.5	2.745	0.997 3	5.19	0.247
7	404.2	128.6	79.9	203.7	183.6	2.779	0.986 9	10.29	0.510
8	357.1	150.0	76.1	186.2	230.5	2.754	0.990 1	10.29	0.531
9	377.1	91.1	63.7	180.3	287.8	2.771	0.957 7	12.54	0.720
10	439.2	128.1	88.9	200.2	143.6	2.796	0.990 0	14.29	0.563
11	468.0	134.4	59.1	150.3	188.3	2.820	0.986 3	15.15	0.696
12	412.3	124.3	49.9	136.2	277.4	2.797	0.967 6	15.89	0.808
13	255.9	292.4	115.6	156.4	179.7	2.675	0.983 4	14.12	0.747
14	117.4	233.3	131.1	224.5	293.7	2.487	0.991 9	40.64	1.517
15	116.4	280.8	160.3	218.4	224.0	2.481	0.980 3	26.53	1.210
16	103.4	222.0	124.3	209.3	341.0	2.461	0.992 2	30.40	1.407
17	141.4	176.8	105.2	178.7	397.9	2.541	0.995 4	17.92	0.978
18	215.2	141.1	93.5	189.2	360.9	2.638	0.988 6	18.88	0.808
19	70.0	152.9	112.2	216.3	448.6	2.369	0.997 4	11.97	0.593
20	106.1	140.5	107.5	250.6	395.3	2.461	0.997 2	13.39	0.689
21	62.4	152.7	109.6	216.2	459.1	2.343	0.996 8	18.09	0.926
22	46.6	90.5	91.7	236.5	534.7	2.267	0.995 0	24.57	1.163

注:相关系数为 $\lg(W_i/W_0)$ 和 $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 间的相关系数。
Notes:the correlation coefficient in this table is between the $\lg(W_i/W_0)$ and the $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$.

2.2 分形维数与土壤有机质、全氮含量的关系

土壤有机物质是土壤结构体形成的主要胶结物质,是土壤团聚化作用的主要影响因子,由于土壤有机氮占土壤全氮的 95% 以上,有机质是土壤全氮的主要载体,二者之间具有很高的相关性^[18],因此土壤有机质和全氮可能与结构体分形维数间存在某种联系。本试验对 22 个土壤样本结构体分形维数与有机质和全氮含量的相关性进行了分析,其结果见表 3。由表 3 可见,土壤结构体分形维数与土壤有机质、全氮含量具有极显著负相关关系,相关系数分别为-0.591 9 和-0.640 7,表明土壤结构体分形维数随土壤有机质和全氮含量的增加而降低,这与刘金福等^[19]研究结果一致,而与苏永中等^[20]有关土壤颗粒分形维数与土壤有机碳、全氮含量相关性的研究结果不一致。笔者认为,产生这种差异的原因

主要是由于研究对象不同所致,前者主要用土壤团粒结构大小来表征土壤分形维数,而后者则用土壤颗粒矿物组成来表征土壤分形维数。
为进一步分析不同土壤类型土壤结构体分形维数对土壤有机质、全氮含量的影响,本研究又对土壤样本容量较大的黄土正常新成土($n=10$)和干湿砂质新成土($n=6$)结构体的分形维数与其有机质和全氮含量分别进行了相关性分析,结果亦例于表 3。由表 3 可以看出,对黄土正常新成土,土壤结构体分形维数与土壤有机质、全氮含量具有极显著负相关关系,相关系数分别为-0.873 2 和-0.919 9;对干湿砂质新成土而言,土壤结构体分形维数与土壤有机质、全氮含量的相关系数分别为 0.006 4 和-0.400 0,均未达到显著水平。这可能是由于供试干湿砂质新成土有机质含量过低(干湿砂质新成土

的有机质平均含量为 4.35 g/kg,而黄土正常新成土的平均有机质含量为 19.01 g/kg),对土壤团聚化作

用的贡献小,因而对其结构体分形的影响作用相对较弱,但这一问题仍需进一步研究。

表 3 分形维数与土壤有机质、全氮含量的回归关系

Table 3 Regression relation between D and the content of soil organic matter and total nitrogen

土壤类型 Soil type	自变量 Independent variable x	样本数 Sample number	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	R
全部土壤 All soil samples	有机质(x_1) Organic matter	22	$D=2.797-0.011 x_1$	-0.591 9**	$R_{(0.05,20)}=0.432$
	全氮(x_2) Total nitrogen	22	$D=2.843-0.297 x_2$	-0.640 7**	$R_{(0.01,20)}=0.537$
黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols	有机质(x_1) Organic matter	10	$D=2.924-0.013 x_1$	-0.873 2**	$R_{(0.05,8)}=0.632$
	全氮(x_2) Total nitrogen	10	$D=3.001-0.367 x_2$	-0.919 9**	$R_{(0.01,8)}=0.765$
干湿砂质新成土 Ust-Sandic Entisols	有机质(x_1) Organic matter	6	—	0.006 4	$R_{(0.05,4)}=0.811$
	全氮(x_2) Total nitrogen	6	—	0.400 0	$R_{(0.01,4)}=0.917$

2.3 分形维数与土壤各粒级含量的关系

由计算过程可知,D值的计算与结构体由小到大的累积含量有关,各土样粒径与该粒级累积含量的对数的相关系数(表2)均大于0.957 7($n=5$, $R_{0.05}=0.811$, $R_{0.01}=0.917$),呈极显著正相关。在

此基础上,本研究对分形维数D与各粒级含量之间的关系进行了进一步探讨,为了避免不同土壤类型的影响,仅选用黄土正常新成土的10个土样(7~16号土样)进行分析,其结果见表4。

表 4 黄土正常新成土分形维数与不同粒径土壤结构体含量的回归关系

Table 4 Regression relation between D and the amount of material in each aggregate size class of Los-Orthic Entisols

自变量 Independent variable	回归模型 Regression model	相关系数 Correlation coefficient
5~10 mm 结构体含量(x_1) Amount of the soil aggregate of 5-10 mm	$D=2.978-0.013 x_1$	-0.538 3
2~5 mm 结构体含量(x_2) Amount of the soil aggregate of 2-5 mm	$D=3.287-0.032 x_2$	-0.667 0*
1~2 mm 结构体含量(x_3) Amount of the soil aggregate of 1-2 mm	$D=3.031-0.037 x_3$	-0.901 7**
0.25~1 mm 结构体含量(x_4) Amount of the soil aggregate of 0.25-1 mm	$D=2.967-0.016x_4$	-0.779 6**
0~0.25 mm 结构体含量(x_5) Amount of the soil aggregate of 0-0.25 mm	$D=2.374+0.010 x_5$	0.989 5**

注(Note): $R_{(0.05,8)}=0.632$, $R_{(0.01,8)}=0.765$ 。

由表4可知,除粒径5~10 mm土壤结构体外,D与各粒径土壤结构体含量均呈显著或极显著线性关系;粒径5~10 mm土壤结构体含量与D间的相关系数为-0.538 3,相关性未达到显著水平,这可能与该粒径较大及不同粒径结构体含量分布不均有关。

由表4可见,分形维数与粒径>0.25 mm土壤结构体含量呈负相关关系,与粒径0~0.25 mm土壤结构体含量呈正相关关系,正负相关性以粒径0.25 mm为界。这表明随着微结构体(0~0.25 mm土壤结构)含量增加,其结构体分维数增加;反之,则结构体分形维数减小。这与宁丽丹等^[21]的研究结果一致。但若将5个粒级的土壤结构体含量与分形维数D进行多元回归相关分析,则D与5~10 mm(x_1)、2~5 mm(x_2)、1~2 mm(x_3)、0~0.25 mm(x_5)粒径土壤结构体含量的偏相关关系达显著水平,而与0.25~1 mm结构体含量(x_4)的偏相关关系不显著,其多元线性回归模型为:

$$D=2.936-0.06 x_1-0.02 x_2-0.21x_3+0.04x_5,$$
$$R=0.994^{**},$$
$$(n=5,df=7,R_{0.05}=0.838,R_{0.01}=0.904)。$$

2.4 土壤类型对结构体分形维数的影响

由表5可以看出,不同土壤所处的气候条件以及形成过程不同,其土壤结构体分形维数也就具有明显的差异,分形维数表现为干润砂质新成土(2.756)>黄土正常新成土(2.682)>筒育干润均腐土(2.502)>土垫旱耕人为土(2.305)。这主要是由于干润砂质新成土有机质含量和粘粒含量少,导致>0.25 mm的团粒含量低,分形维数高;而土垫旱耕人为土有机质和粘粒含量均较高,其>0.25 mm的团粒含量高,分形维数低。这些结果进一步说明,土壤分形维数的差异与气候条件、土壤形成过程以及土壤质地的不同有关^[22]。

2.5 土地利用方式对结构体分形维数的影响

已有研究表明,土壤粒径分布分形维数随土地利用、土地覆盖的不同而发生规律性的改变,土地利

用方式主要通过影响土壤有机质含量而对土壤结构体分形维数产生影响^[23]。本研究为避免不同土壤类型的影响,仅选用植被类型比较明确、典型的 10 个(7~16 号土样)黄土正常新成土样本,分析土地利用方式对土壤结构体分形的影响以及土壤结构体分形维数与土壤特性的关系,其结果如表 6 所示。由表 6 可见,在不同的土地利用方式下,土壤结构体分形维数不同,表现为人工林地>农地>自然林地>裸地。这主要是由于农地受人为耕作活动的影

表 5 不同类型土壤的分形维数及有机质、全氮的含量

土壤类型 Soil types	分形维数 Fractal dimension	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter	全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen
干润砂质新成土 Ust-Sandic Entisols	2.756	4.35	0.251
黄土正常新成土 Los-Orthic Entisols	2.682	19.01	0.871
筒育干润均腐土 Hap-Ustic Isohumisols	2.502	15.54	0.767
土垫早耕人为土 Eum-Orthic Anthrosols	2.305	21.33	1.044

表 6 不同土地利用方式下土壤结构体分形维数及土壤有机质、全氮的含量

土地利用方式 Land use patterns	分形维数 Fractal dimension	有机质/ (g·kg ⁻¹) Organic matter	全氮/ (g·kg ⁻¹) Total nitrogen
农地 Farming land	2.777	12.16	0.616
人工林地 Artificial forest land	2.796	13.99	0.660
自然林地 Natural forest land	2.630	24.30	1.050
裸地 Bare land	2.578	20.32	0.979

3 讨 论

土壤被认为是一种具有分形特征的分散多孔介质,是因为它的结构性状具有统计意义上的自相似性质。土壤分形维数是反映土壤结构几何形状的参数,在维数上表现出粘粒含量越高、质地越细、分形维数越高^[24]。土壤结构体分形维数的大小,在一定程度上能够反映土壤水稳性团聚体含量对土壤结构与稳定性的影响趋势,即团粒结构大小分布的分形维数愈小,则土壤愈具有良好的结构与稳定性^[25],反之,土壤结构体分形维数越大,土壤结构体稳定性越差^[26]。本试验结果表明,黄土高原 22 个土样土壤结构体分形维数为 2.267~2.843。不同类型土壤结构体的分形维数表现为:干润砂质新成土>黄土正常新成土>筒育干润均腐土>土垫早耕人为土。同时,土壤结构体的分形也受土地利用方式的影响,分形维数

响,对土壤团聚体具有破坏作用,且表层通气性又好,微生物活动强烈,有机质分解快,土壤有机质含量较低;人工林地由于退耕时间较短,输入土壤的新有机碳有限,其有机质含量略高于农田土壤,土壤结构体分形维数也与农田土壤比较接近;自然林地由于输入土壤的有机物质多,土壤团聚化作用强;裸地(是由自然林地开垦不久的径流小区)由于开垦时间短,土壤有机质含量较高,其土壤结构体分形维数低。

表现为:人工林地>农地>自然林地>裸地。因此,作者认为,土壤结构体分形维数能客观反映团粒结构的结构性状,可以作为土壤结构优劣的评价指标。已有研究表明,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^[19-20]。本研究也发现,土壤结构体分形维数与土壤有机质、全氮含量有一定的关系,特别是与有机质、全氮含量较高的土壤相关性较高。回归分析表明,土壤结构体分形维数随土壤有机质、全氮含量的增加而降低,说明除土壤类型以及颗粒组成对土壤结构体分形维数有影响外,土壤有机质也是影响结构体分形维数的重要因子,而且在有机质含量较高的土壤中,有机质的影响起主导作用。

土壤结构的好坏直接影响着土壤的通气性和透水性,最终对土壤质量产生影响,是很重要的土壤质量指标^[27-28]。有研究表明,土壤有机碳在多年保护性种植或耕作后,新碳的固定主要发生于>0.25 mm 团聚体中^[29]。本研究表明,土壤结构体的分形维数与各粒径含量均呈明显的线性关系,正负相关性以 0.25 mm 为界:分形维数与粒径>0.25 mm 土壤结构体含量呈负相关,与粒径 0~0.25 mm 土壤结构体含量呈正相关,说明在土壤团聚化,即土壤结构体从微团粒(<0.25 mm)到团粒(>0.25 mm)的转化过程中,有机质起着极其重要的作用,进而影响到土壤结构体分形维数以及土壤的结构性。

[参考文献]

[1] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain, statistical

self similarity and fractional dimension[J]. Science,1967,155: 636-638.

[2] Mandelbrot B B. Form chance and dimension[M]. San Francisco:Freeman,1977:1-234.

[3] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco:Freeman,1982:45-256.

[4] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望[J]. 土壤学进展,1994,22(1):1-10.

Li B G. Application and outlook of fractal theory in soil science [J]. Progress in Soil Science,1994,22(1):1-10. (in Chinese)

[5] Rieu M,Sposito G. Fractal fragmentation,soil porosity,and soil water properties I . Theory[J]. Soil Science of America Journal,1991,55:1231-1238.

[6] Rieu M,Sposito G. Fractal fragmentation,soil porosity,and soil water properties II . Application[J]. Soil Science of America Journal,1991,55:1239-1244.

[7] De Gennes G. Partial filling of a fractal structure by a wetting fluid[M]// Adler D,Fritzsche E,Ovshinsky S R. Physics of Disordered Materials. New York: Plenum Press, 1985: 227-241.

[8] Toledo P G,Novy R A,Davis H t,et al. Hydraulic conductivity of porous media at low water content[J]. Soil Science Society of America Journal,1990,54:673-679.

[9] Bird N R A,Bartoli F,Dexter A R. Water retention models for fractal soil structure[J]. European Journal of Soil Science, 1996,47:1-6.

[10] Bird N R A,Perrier E,Rieu M. The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions[J]. European Journal of Soil Science,2000,51(3):55-63.

[11] 黄冠华,詹卫华. 土壤水分特性曲线的分形模拟[J]. 水科学进展,2002,13(1):55-60.

Huang G H,Zhan W H. Modeling soil water retention curve with fractal theory[J]. Advances in Water Science,2002,13 (1):55-60. (in Chinese)

[12] 张季如,朱瑞庚,祝文化. 用粒径的数量分布表征的土壤分形特征[J]. 水利学报,2004(4):67-79.

Zhang J R,Zhu R G,Zhu W H. Fractal features of soils characterized by grain size distribution[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004(4):67-79. (in Chinese)

[13] Tyler S W,Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: analysis and limitations[J]. Soil Science of America Journal,1992,56:362-369.

[14] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征土壤分形特征[J]. 科学通报,1993,38(20):1896-1899.

Yang P L,Luo Y P,Shi Y C. Using weight distribution of soil particle size to express soil fractal features[J]. Chinese Science Bulletin,1993,38(20):1896-1899. (in Chinese)

[15] 龚子同. 中国土壤系统分类[M]. 北京:科学出版社,1999.

Gong Z T. *Chinese soil taxonomy*[M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)

[16] 中国科学院南京土壤研究所主编. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社,1978:514-518.

Institute of Soil Science,Chinese Academy of Science. Physical and chemical analysis of soil[M]. Shanghai:Shanghai Science and Technology Press,1978:514-518. (in Chinese)

[17] Katz A J,Thompson A H. Fractal sandstone pores: Implications for conductivity and pore formation[J]. Phys Rev Lett, 1985,54(12):1325-1328.

[18] 李世清,李生秀,杨正亮. 不同生态系统土壤氨基酸氮的组成及含量[J]. 生态学报,2002,22(3):379-386.

Li S Q,Li S X,Yang Z L. Constituent and amount of amino acid in different ecological system soils [J]. Acta Ecologica Sinica,2002,22(3):379-386. (in Chinese)

[19] 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[J]. 生态学报,2002,22(2):197-205.

Liu J F,Hong W,Wu C Z. Fractal features of soil clusters under some precious hardwood stands in the central subtropical region China[J]. Acta Ecologica Sinica,2002,22(2):197-205. (in Chinese)

[20] 苏永中,赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J]. 生态学报,2004,24(1):71-74.

Su Y Z,Zhao H L. Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin Sandy Land[J]. Acta Ecologica Sinica,2004,24(1):71-74. (in Chinese)

[21] 宁丽丹,石辉,周海军,等. 岷江上游不同植被下土壤团聚体特征分析[J]. 应用生态学报,2005,16(8):1405-1410.

Ning L D,Shi H,Zhou H J,et al. Quantitative characteristics of soil aggregates under different vegetations in upper reach of Minjiang River[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2005, 16(8):1405-1410. (in Chinese)

[22] 李德成,张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究[J]. 土壤与环境,2000,9(4):263-265.

Li D C,Zhang T L. Fractal features of particle size distribution of soils in China[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000,9(4):263-265. (in Chinese)

[23] 胡云锋,刘纪远,庄大方,等. 不同土地利用/土地覆盖下土壤粒径分布的分维特征[J]. 土壤学报,2005,42(2):336-339.

Hu Y F,Liu J Y,Zhuang D F,et al. Fractal dimension of soil particle size distribution under different land use/land coverage[J]. Acta Pedologica Sinica,2005,42(2):336-339. (in Chinese)

[24] 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.

Huang G H,Zhan W H. Fractal property of soil particle size distribution and its application[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002,39(4):490-497. (in Chinese)

[25] 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.

Wu C Z,Hong W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns[J]. Acta Pedologica Sinica,1999,36(2):162-167. (in Chinese)