黄土残塬沟壑区不同人工林土壤团粒分形维数 与基本特性的关系

付 刚,刘增文,崔芳芳

(西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要]【目的】研究土壤团粒分形维数及其与团粒基本特征之间的关系,为防止土壤退化及减少土壤侵蚀提供理论指导。【方法】在黄土残塬沟壑区,利用分形理论对刺槐纯林、油松纯林、侧柏纯林3种纯林和油松×刺槐、油松×侧柏、油松×狼牙刺3种混交林林地及天然草地土壤表层团粒的分形特征进行了分析。【结果】刺槐纯林土壤团粒分形维数最小;0~10 cm 土层土壤分形维数为2.2525~2.757,与>5 mm和0.5~2 mm两粒级土壤团粒含量呈极显著相关,与其他粒级土壤团粒含量相关性不显著;10~20 cm 土壤团粒分形维数为2.5294~2.7017,与>5 mm 粒级团粒含量呈显著性负相关,与其他粒级土壤团粒含量相关性不显著。【结论】土壤团粒分形维数与粒径>0.25 mm 土壤水稳性团粒总量、稳定性系数、重量平均粒径、几何平均粒径均呈负相关。

[关键词] 人工林;土壤团粒;水稳性团粒;分形维数 [中图分类号] S714.2 [文献标识码] A [文章编号] 1671-9387(2008)09-0101-07

Fractal features of soil aggregate under different artificial forests and their relationships with main aggregate prosperities in Gullied Loess Plateau

FU Gang, LIU Zeng-wen, CUI Fang-fang

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The research is to study the fractal features of soil aggregate and their relationship with the main aggregate prosperities to provide theoretical instruction for preventing the soil degeneration and reducing soil erosion. [Method] Based on the fractal theory, the fractal dimension of soil aggregate of six artificial forests and natural meadow in Gullied Loess Plateau was analyzed. [Result] Results show that the fractal dimension of soil aggregate in pure stands of black locust is the smallest. The fractal dimension of layer 0-10 cm ranged from 2. 252 5 to 2. 757, and the correlation between the total quantity the aggregate of >5 mm and 0.5-2 mm was very significantly, but not significant to others. The fractal dimension of soil aggregate of layer 10-20 cm ranged form 2. 529 4 to 2. 701 7, and it was significantly negative correlated to the total amount aggregate of >5 mm, but not significant to others. [Conclusion] There was remarkable negative correlation between the fractal dimension of soil aggregate of >0.25 mm, ASI (aggregate stability index), MWD (mean weight diameter) and GMD (geography mean diameter).

^{* [}收稿日期] 2007-09-23

[[]基金项目] 国家自然科学基金项目(30471376);西北农林科技大学 2005 年人才计划项目

[[]作者简介] 付 刚(1982-),男,湖北黄冈人,在读硕士,主要从事森林生态研究。E-mail:fg2002075@yahoo.com.cn

[[]通讯作者] 刘增文(1965-),男,陕西横山人,副教授,博士,主要从事森林生态与水土保持研究。

Key words: artificial forest; soil aggregate; water-stable aggregate; fractal dimension

土壤团粒是土壤的重要组成部分,其特性取决 于土壤的各种物理、化学及生物学性质,是土壤抗冲 刷能力的重要标志之一^[1-3]。有研究表明,土壤物理 性质随土壤团粒分形维数的变化而变化,即分形维 数越小,>0.25 mm 的团粒含量越高,土壤的结构 越稳定,抗冲刷能力越强^[4-7]。

分形理论于 1977 年由 Mandelbort 提出^[8]。土 壤由于组成结构的复杂性及内部众多因素的微观差 异性,也是可分形的系统^[9],可通过不同粒径土壤质 量的分布间接反映粒径分布,进而来描述土壤分形 特征[10]。影响土壤团粒分形维数的因素很多,包括 有机质、土壤微生物、胶结物质、土地利用方式以及 土壤矿质类型等[11]。目前,有关耕层土壤颗粒表面 分形维数、不同土地利用方式下的土壤团粒和微团 粒的分形以及岩溶山区植被破坏前后土壤团粒分形 特征的研究已有报道[3.9.12],但将分形理论应用于黄 土高原残塬沟壑区森林生态系统的研究还未见报 道。为此,本试验运用分形理论以及相关模型,对黄 土残塬沟壑区不同人工林土壤团粒特性进行了研 究,探讨了该区土壤团粒的分布及变异特征,对土壤 团粒的稳定性提出了新的量化方法和手段,以期为 防止土壤退化和土壤侵蚀提供理论及现实依据。

1 研究区域概况

研究地区位于黄土高原南部渭北残塬沟壑区陕 西淳化县英烈林场境内。这里地处暖温带半湿润森 林草原生物气候带,年平均降雨量 600.6 mm,年平 均气温 10.5 ℃,平均无霜期 190 d,海拔 1 025~ 1 823.5 m,伊万诺夫湿润度平均值为 0.7。刺槐 (Robinia pseudoacaia)、油松(Pinus tabulae formis)、侧柏(Platycladus orientalis)是当地的主要 造林树种和成林资源,分布于不同地貌部位和不同 立地条件的坡地上,林地土壤类型为褐色土类的白 缮土亚类,林下植被以禾草、蒿类及悬钩子为主。

2 材料与方法

2.1 标准地的选取

于 2006-08 在研究区域内根据立地条件(包括 地形、地貌、坡度、坡向、密度等)相对一致的标准,选 取符合要求的刺槐、油松、侧柏人工纯林样地以及油 松×刺槐、油松×侧柏、油松×狼牙刺混交林地各 1 块,用于试验。

2.2 土壤样品的采集与处理

在各标准地内分别选取 3 块典型地块,挖取坡 面土壤,各坡面均按 0~10 cm、10~20 cm 采集土 样。所有土样带回实验室迅速测定含水率后风干, 一部分将大土块小心剥成粒径为 1 cm 左右土粒;另 一部分粉碎后分别过 2,1 和 0.25 mm 的筛备用。

2.3 测定指标与方法

2.3.1 土壤团粒含量的测定(千筛) 随机选取每份土样中剥成1 cm 左右的土粒2份,每份 300~400g,采用旋转筛分法(顺时针或逆时针)过 5,2,0.5和 0.25 mm 套筛。收集各粒级土壤团粒,用物理天平分别称量各粒级土壤团粒质量(去掉石块质量),记录数据。选取其中1份土样,取各粒级土壤团粒的 1/2 混合均匀,用塑料袋分装,待测定。

2.3.2 水稳性团粒含量的测定 采用 Yoder 标准 程序^[13-14],在沉降桶中装满水,将团粒测定中分装好 的土壤过 5,2,0.5,0.25 mm 套筛,沉降 20 min 后 将每一粒级的土壤水稳性团粒小心刮入瓷碗中并放 入烘箱中烘干,取出冷却后,称量每一粒级土壤水稳 性团粒的质量,记录数据。

2.4 计算方法

2.4.1 土壤团粒分形维数计算模型 采用 Katz 模型计算土壤团粒分形维数,参考杨培岭等^[10]、李阳 兵等^[15]和 Katz 等^[16]的方法,利用公式推导出土壤 颗粒的重量分布与平均粒径间的分形关系:

 $T(\delta > \overline{R}_{i})/T_{0} = (\overline{P}_{i}/\overline{P}_{max})^{3-D}.$ (1) 式中: $T(\delta > \overline{R}_{i})$ 是粒径小于 \overline{R}_{i} 土壤团粒质量的累 积量; δ 是码尺; T_{0} 是各粒级土粒的质量和; \overline{R}_{i} 是两 筛孔级 R_{i} 与 R_{i+1} 的平均直径; D 是土壤表面分形维 数。

对式(1)取对数得:

 $D=3-lg(T_i/T_0)/lg(\bar{R}_i/\bar{R}_{max})$ 。 (2) 最后以 $lg(T_i/T_0)$ 和 $lg(\bar{R}_i/\bar{R}_{max})$ 分别为纵坐标和横 坐标作图,将每项回归分析的斜率代入(2)式,便可 以得到团粒分形维数(D)。

2.4.2 各粒级土壤团粒稳定系数及土壤团粒稳定 性指标的计算 粒径>0.25 mm 水稳性团粒含量 的多寡,在一定程度上反映了土壤的抗侵蚀能力。 团粒在雨水冲蚀过程中,会随着侵蚀力的改变而改 变,这种改变不仅是物理结构的变化,同时也包含着 各粒径质量百分含量的变化,这种变化表现为大粒 径团粒在水动力作用下,通过"气爆"或"水爆"发生

(5)

破碎进入下一粒级^[11,17],由此可以建立土壤团粒稳 定性系数方程。本研究采用干筛和湿筛法联合模拟 雨水冲蚀过程,测定土壤团粒的破坏程度及稳定性 系数。干筛后不同筛级范围内的土壤团粒含量构成 矩阵 W_i:

$$\boldsymbol{W}_{i} = \{\boldsymbol{W}_{1}, \boldsymbol{W}_{2}, \boldsymbol{W}_{3}, \boldsymbol{W}_{4}, \cdots, \boldsymbol{W}_{i}\}.$$
(3)

湿筛后不同筛级范围内水稳性团粒(烘干)含量

$$\begin{cases} W_{1}X_{1} = N_{1}, \\ W_{1}(1 - X_{1}X_{2} + W_{2}X_{2}) = N_{2}, \\ W_{1}(1 - X_{1})(1 - X_{2})X_{3} + W_{2}(1 - X_{2})X_{3} + W_{3}X_{3} = N_{3}, \\ \cdots \\ W_{1}(1 - X_{1})(1 - X_{2})\cdots(1 - X_{i-1})X_{i} + W_{2}(1 - X_{2})\cdots(1 - X_{i-1})X_{i} + W_{i}X_{i} = N_{i}, \end{cases}$$

本试验中, X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 分别代表土壤团 粒保存在>5,2 \sim 5,0.5 \sim 2,0.25 \sim 0.5和<0.25 mm 筛级的机率(稳定系数)。

采用各个粒级保存机率 X_i (稳定系数)的和作为土壤团粒稳定性系数(Aggregate stability index, ASI):

$$ASI = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_i \, . \tag{6}$$

2.4.3 土壤团粒质量平均粒径及几何平均直径的 计算 根据分形理论^[7],不同粒径的土壤团粒间存 在形相似性,其与土壤团粒分形也存在着一定关系。 对某一粒径的土壤团粒重量进行累加,可以计算出 土壤团粒质量平均粒径(Mean weight diameter, MWD),计算公式如下: 构成另一矩阵 N_i:

$$\boldsymbol{N}_{i} = \{N_{1}, N_{2}, N_{3}, N_{4}, \cdots, N_{i}\}_{\circ}$$

$$(4)$$

土壤团粒筛分时筛级为 1,2,3,4,…,*i*,每个筛 级的团粒在筛分时保存在自己筛级范围内的机率 (稳定系数)为 $X_1,X_2,X_3,X_4,\dots,X_i$;破裂后进入下 一个筛级的机率为 $1-X_1,1-X_2,1-X_3,1-X_4,$ …, $1-X_i$,则干筛和湿筛团粒之间的关系如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^{k} w_{i} \overline{x}_{i} \,. \tag{7}$$

几何平均直径(Geography mean diameter, GMD)计算公式如下:

$$GMD = \exp\left[\left(\sum_{i=1}^{k} w_i \lg x_i\right) / \left(\sum_{i=1}^{n} w_i\right)\right]_{\circ}$$
(8)

式中: w_i 为干筛法第*i*筛级土壤团粒含量; x_i 为第*i*筛级的直径; x_i 为第*i*筛级与第*i*-1筛级直径的平均值。

3 结果与分析

3.1 土壤团粒含量与分形维数的关系

土壤团粒含量与分形维数的关系见表1。

表 1 黄士残塬沟壑区不同人工林土壤团粒的组成及分形维数

T.I.I. 1	Δ	- 6				f		
Table I	Amount	OT	apprepare	and	apprepare	tractal	aime	ensions
- uoro -	I IIIO GIIIC	~ -	ussi osuco		un strongeree	II GOUGI		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

人工林	土层/cm	各粒级土壤团粒含量/(g・kg ⁻¹) The amount aggregate of each diameter					
Forests	Soil layer	$>5~\mathrm{mm}$	$2\!\sim\!5~\mathrm{mm}$	0.5 \sim 2 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm	dimensions
油松林	0~10	227.4	382.4	261.4	87.1	88.1	2.732 9
Pinus tabulae formis	$10 \sim 20$	259.3	401.7	226.2	38.1	74.6	2.701 7
油松×刺槐 Pinus tabulae formis×	0~10	194.5	277.5	296.2	148.1	160.2	2.757 0
Robinia pseudoacaia	$10 \sim 20$	293.1	264.7	249.9	61.4	131.0	2.659 9
油松×侧柏 Pinus tabulae formis×	0~10	225.2	280.8	274.5	137.3	142.8	2.731 5
Platycladus orientalis	$10 \sim 20$	328.5	268.7	198.0	59.1	145.7	2.618 3
侧柏林	0~10	268.3	330.9	256.0	128.0	94.3	2.703 4
Platycladus orientalis	$10\!\sim\!20$	235.9	132.7	240.0	43.3	81.8	2.650 5
刺槐林	$0 \sim 10$	576.1	216.3	134.2	29.5	44.0	2.252 5
Robinia pseudoacaia	$10 \sim 20$	405.5	211.5	185.2	56.9	140.9	2.529 4
油松×狼牙刺 Pinus tabulae formis×	0~10	414.6	234.0	226.8	35.2	89.4	2.531 7
Sophora davidii	$10 \sim 20$	334.0	254.7	261.3	45.8	104.1	2.624 3
天然荒草地	0~10	256.5	335.1	240.9	80.3	113.2	2.700 9
Natural meadow	$10\!\sim\!20$	316.2	363.2	203.8	40.1	7.67	2.646 1

由表1可以看出,不同人工林土壤团粒分布及 粒径构成不同。6种林地和天然荒草地0~10 cm 土层土壤团粒分形维数为 2.252 5~2.7570,其变异 系数为 18.24%,分形维数大小顺序为油松×刺槐 混交林>油松纯林>油松×侧柏混交林>侧柏纯 林>天然荒草地>油松×狼牙刺混交林>刺槐纯 林;10~20 cm 土层土壤团粒分形维数为 2.529 4~ 2.701 7,变异系数为 5.31%,分形维数大小顺序为 油松纯林>油松×刺槐混交林>侧柏纯林>天然荒 草地>油松×狼牙刺混交林>油松×侧柏混交林> 刺槐纯林。0~10 cm 土层土壤团粒分形维数的变 异系数较大,这与枯落物分解状况有关,说明林内物 质循环过程对 0~10 cm 土层的影响较大。0~10 cm 和 10~20 cm 土层团粒 $lg(\bar{R}_i/\bar{R}_{max})$ 与 $lg(T_i/T_0)$ 的决定系数 R^2 均大于 0.97,线性相关性达极显 著水平。

分形维数与各粒级团粒含量(W_i)间的关系见表 2。由 2可以看出, $0 \sim 10$ cm 土壤团粒分形维数

与>5 mm 和 0.5~2 mm 粒级团粒含量相关性达到 极显著水平(P < 0.01),与其他各粒级土壤团粒含 量相关性不显著;10~20 cm 土壤团粒分形维数与 >5 mm 的土壤团粒含量相关性达显著水平(P < 0.05),与其他粒级土壤团粒含量相关性均不显著。 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤团粒分形维数分 别与>5 mm 土壤团粒的含量呈极显著和显著负相 关,即>5 mm 的土壤团粒含量越多,分形维数越 小。

3.2 土壤团粒稳定性系数与分形维数及稳定系数 间的相关关系

土壤表层水稳性团粒组成及其稳定系数见表

3.

表 2 黄土残塬沟壑区不同人工林土壤团粒分形维数与各粒级团粒含量间的线性关系

Table 2 Correction between soil fractals and the total amount aggregate of each diameter

不同粒级土壤团粒含量 The total amount	0∼10 cr Soil layer of	n 土层 0-10 cm	10~20 cm 土层 Soil layer of 10-20 cm			
aggregate of each diameter	回归模型 Regression models	相关系数 Correlationcoefficient	回归模型 Regression models	相关系数 Correlationcoefficient		
$W_1(>5 \text{ mm})$	$D=3.035 9-0.013 1W_1$	-0.991 5**	$D=2.8944-0.0084W_1$	-0.878 6*		
$W_2(2\sim 5 \text{ mm})$	$D=1.9777+0.0222W_2$	0.719 3	$D=2.5551+0.0029W_2$	0.485 8		
$W_3(0.5 \sim 2 \text{ mm})$	$D=1.8167+0.0337W_3$	0.966 3**	$D=2.408+0.0101W_3$	0.541 4		
$W_4(0.25 \sim 0.5 \text{ mm})$	$D = 2.3477 + 0.0306W_4$	0.804 7	$D=2.771\ 2-0.028\ 1W_4$	-0.509 8		
$W_5 (<0.25 \text{ mm})$	$D=2.237\ 2+0.037\ 6W_5$	-0.7937	$D=2.7527-0.0111W_5$	-0.651 4		

注:*.显著相关(P<0.05);**.极显著相关(P<0.01)。

Note: *. Correlation is significant (P < 0.05); * *. Correlation is very significant (P < 0.01).

表 3 黄土残塬沟壑区不同人工林土壤表层水稳性团粒组成及稳定性系数

Table 3 Composition of soil surface water-stable aggregate and soil aggregate stability index (ASI)

人工林	土层/cm	各粒级水稳性团粒组成/(g・kg ⁻¹) The water-stable aggregate of each diameter					
Forests	Soil layer	$>5\mathrm{mm}$	$2\sim 5\mathrm{mm}$	0.5 \sim 2mm	0.25~0.5mm	<0.25mm	ASI
油松	0~10	56.8	195.2	312.0	58.3	312.8	1.99
Pinus tabulae formis	$10 \sim 20$	116.7	211.4	285.6	40.5	272.1	2.27
油松×刺槐 Pinus tabulae formis×	0~10	19.7	63.7	179.5	119.3	610.2	1.57
Robinia pseudoacaia	$10\!\sim\!20$	24.0	58.2	216.9	109.7	601.9	1.70
油松×侧柏 Pinus tabulae formis×	0~10	53.7	140.7	256.3	67.9	447.9	1.96
Platycladus orientalis	$10 \sim 20$	12.1	40.8	161.6	120.5	668.1	1.52
侧柏	0~10	102.1	175.6	265.0	61.7	302.2	1.97
Platycladus orientalis	$10 \sim 20$	75.9	211.2	313.4	58.0	230.1	6.21
刺槐	0~10	200.4	165.3	361.7	145.3	476.0	2.28
Robinia pseudoacaia	$10\!\sim\!20$	61.8	104.0	236.2	123.9	426.6	1.88
油松×狼牙刺 Pinus tabulae formis×	0~10	144.3	165.1	255.9	41.1	343.1	2.12
Sophora davidii	$10\!\sim\!20$	11.7	86.7	308.8	126.8	447.3	1.82
天然荒草地	0~10	118.7	184.7	225.4	54.5	317.5	2.14
Natural meadow	$10\!\sim\!20$	119.6	200.0	239.1	43.9	312.3	2.07

表 3 表明,0~10 cm 土层中,刺槐纯林土壤团

粒稳定性最高(ASI为2.28),油松×刺槐混交林最

低(ASI为1.57);10~20 cm 土层中,侧柏纯林土壤 团粒稳定性最高(ASI为6.21),油松×侧柏混交林 最低(ASI为1.52)。土壤团粒分形维数(D)与 (ASI)之间的关系如下:

 $0 \sim 10$ cm 土层: D = 3.756 2 - 0.562 1×ASI (r = -0.693 0)。

 $10\sim 20$ cm 土层: D=2.616 8+0.006 4×ASI (r=0.200 9)。

对各级 ASI 进行分析, $0 \sim 10$ cm 土层中, X_1 与 X_2 , X_2 与 X_3 , X_3 与 X_4 , X_4 与 X_5 的相关系数分 别为 0.821 0,0.479 9,0.682 8,-0.851 9;10~20 cm 土层中, X_1 与 X_2 , X_2 与 X_3 , X_3 与 X_4 , X_4 与 X_5 的相关系数分别为 0.741 0,0.960 0,0.895 5 和 0.991 2.0~10 cm 土层连续筛级间土壤 ASI 的相 关性比 10~20 cm 土层差,这在一定程度上表明0~ 10 cm 土层受物质循环影响程度较大,各粒级团粒 形成或破坏机理不同且形相似性不明显:10~20 cm 土层团粒结构保存较好,受物质循环影响不明显,各 粒级团粒之间相关系数较大,形相似性明显。分析 土壤团粒稳定性系数与土壤团粒分形维数的相关性 结果显示,0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤 ASI 与 土壤团粒分形维数间的相关系数分别为一0.8917 和-0.315 8,这在一定程度上说明土壤团粒稳定性 与上层土壤团粒分形维数之间关系密切,即土壤团 粒分形维数越大,稳定性越低,土壤耐冲蚀能力越 差;土壤团粒稳定性与 10~20 cm 土壤团粒分形维 数相关性不显著。

3.3 MWD、GND 与土壤团粒分形维数的关系

天然荒草地和 6 种林地土壤团粒 MWD 分布情况为:0~10 cm 土层中刺槐纯林 MWD 最大(5.262

mm),油松刺槐混交林最小(2.8759mm);10~20 cm 土层中刺槐纯林 MWD 最大(4.0519mm),侧 柏纯林最小(2.5598mm)。各种营林模式下,刺槐 纯林土壤中粒径>0.25mm的团粒含量最大,其原 因主要是因为刺槐为落叶树种,每年枯落物凋落量 较大,腐殖质积累量高,有机质含量高,容易形成大 的团粒结构,加上刺槐林地不同种类植物根系在土 层中的穿插、挤压,使得土体构型变得空虚^[18-19]。天 然荒草地和6种营林模式下土壤团粒GMD为 1.17~1.57,0~10cm 土层团粒GMD比10~20 cm 土层的小(刺槐林除外)。

从图 1,2 可以看出,0~10 cm 土层团粒分形维 数与土壤团粒 MWD 和 GMD 均呈显著负相关关 系,其相关系数分别达到-0.977 和-0.883 3;10~ 20 cm 土层团粒分形维数与 MWD 和 GMD 的相关 系数分别为-0.402 6 和-0.02,这说明 0~10 cm 土壤团粒分形维数更能表征研究区域各森林生态系 统内土壤颗粒状态。作为森林生态系统,枯枝落叶 的分解以及微生物的作用能够有效的改善林下土壤 肥力,而土壤肥力状况与土壤团粒含量密切相关,所 以土壤表层团粒分形很大程度取决于枯落物的数量 和种类。

利用形相似理论^[7,10]及公式(7),对天然荒草地和6种人工林土壤团粒进行分析,其MWD和GWD 之间的关系为:

 $0 \sim 10$ cm 土层: MWD = 5.837 7×GWD - 4.133 (r=-0.919 4**);

 $10\sim 20$ cm 土层: MWD=4.670 1×GWD-3.061 9 (r=-0.680 1)。



图 1 黄土残塬沟壑区不同人工林土壤团粒分形维数与土壤 MWD 的关系

Fig. 1 Relationship between fractal dimension and mean weight diameter of soil aggregate

0~10 cm 土层土壤团粒重量平均粒径与几何

平均粒径间存在极显著相关关系,作为反映团聚体

大小的指标,二者均能达到评价效果。



图 2 黄土残塬沟壑区不同人工林土壤团粒分形维数与土壤 GMD 的关系

Fig. 2 Relationship between fractal dimension and geography mean diameter of soil aggregate

4 讨 论

黄土高原森林生态系统处于植被恢复阶段,土 壤团粒含量及各种指标也在发生着动态变化[20]。 土壤肥力结构及成土母质影响着土壤团粒的构成及 水稳定性。杨建国等[21]研究表明,影响土壤团聚体 的主要因子群是铝、全铁、全氮和有机质,其次为粘 粒、物理性粘粒。另外,植物根系也是影响土壤团粒 组成的重要因子。刘苑秋等[22] 通过对退化红壤重 建森林初期细根特征及其作用机理的研究发现,植 物细根能显著提高粒径>5 mm 及粒径>0.25 mm 水稳性团聚体的总量。吴彦等^[23]研究表明,直径≤ 1 mm 须根可以提高土壤水稳性团聚体数量,使粒 径>3 mm的水稳性团聚体含量增加。森林土壤团 粒结构的复杂性不仅取决于树种,而且受制于林下 植被,所以林下植被也是重要参考依据之一。黄土 高原人工林植被恢复过程中,由于各树种的差异,林 下植被的更新状况也有所不同。在研究区域内,刺 槐纯林下植被丰富,以悬钩子为主,盖度达到60%~ 80%,而油松纯林下植被稀少,以喜阴植物为主,盖 度不到10%。可见,黄土高原植被恢复区是一个复 杂的生态系统。

分形学是一种研究和处理不规则客体的理论工具,分形维数与土壤团粒组成存在明显对应关系^[18]。土壤团粒分形理论涉及到土壤团粒结构、组成以及形成和破碎机制。本研究探讨了土壤分形维数与团粒稳定性指标(ASI)、结构因子(MWD、GMD)之间的关系,结果发现土壤表层团粒分形维数与这些因子呈负相关。虽然国内外有很多专家学者对土壤团粒分形理论做了大量工作,但是很少有

人将土壤团粒和水稳性团粒结合起来进行研究,本 研究将二者有机结合起来,建立了土壤团粒稳定性 模型,初次从土壤团粒方面将稳定性指标量化。本 研究虽然取得了一些进展,但还不能充分阐明土壤 团粒的破碎和抗冲蚀机理,因此还有待更深入的研 究。另外,土壤团粒形成的微观机制还停留在假说 阶段^[24],各种键化、胶结理论也需要更进一步研究。

5 结 论

土壤团粒分形维数与粒径>0.25 mm 土壤水 稳性团粒总量、稳定性系数、重量平均粒径、几何平 均粒径均呈负相关。土壤表层团粒分形维数可以作 为评价土壤结构质量的标准之一。

[参考文献]

- [1] 沈晶玉,周心澄,张伟华. 祁连山南麓植物根系改善土壤抗冲性研究[J].中国水土保持科学,2004,2(4):87-91.
 Shen J Y,Zhou X C,Zhang W H. Effect of plant root system on the Anti-scour ability of soil in the south of QiLian mountain [J]. Science of Soil and Water Conservation,2004,2(4):87-91. (in Chinese)
- [2] 章明奎,何振力,陈国潮.利用方式对红壤水稳性团粒形成的影响[J].土壤学报,1997,34(4):359-366.
 Zhang M K,He Z L,Chen G C. Formation of water-stable aggregates in red soils as affected by land use [J]. Acta Pedol Sin,1997,34(4):359-365. (in Chinese)
- [3] 丁文峰,丁登山.黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分型特征[J].地理研究,2002,21(6):700-706.
 Ding W F,Ding D S. The fractal features of soil granule structure before and after vegetation destruction on Loess Plateau
 [J]. Geographical Research,2002,21(6):700-706. (in Chinese)
- [4] 宁丽丹,石 辉,周海军,等.岷江上游不同植被下土壤团粒特 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]. Chin J Appl Ecol, 2005, 16(8): 1405-1410. (in Chinese)

- [5] Limon O A, Govaerts B, Deckers J, et al. Soil aggregate and microbial biomass in a permanent bed wheat-maize planting system after 12 years [J]. Field Crops Research, 2006(97): 302-309.
- [6] Gulser C Y. Effect of forage cropping treatments on soil structure and relationships with fractal dimensions [J]. Geoderma, 2006(131):33-44.
- [7] Gibson J R, Lin H, Bruns M A. A comparison of fractal analytical methods on 2-and 3-dimensional computed topographic scans of soil aggregate [J]. Geoderma, 2006(134):335-348.
- [8] Mandelbrot B B. Fractal from chance and dimension [M]. San-Francisco: Freeman, 1977.
- [9] 刘梦云,常庆瑞,齐雁冰.不同土地利用方式的土壤团粒及微团 粒的分形特征[J].中国水土保持科学,2006,4(4):47-51. Liu M Y,Chang Q R,Qi Y B. Fractal features of soil aggregate and micro-aggregate under different land use [J]. Science of Soil and Water Conservation,2006,4(4):47-51. (in Chinese)
- [10] 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.
 Yang P L,Luo Y P,Shi Y C. Fractal feature of soil on expression by weight distribution of particle size [J]. Chinese Science Bulletin,1993,38(20):1896-1899. (in Chinese)
- [11] 卢金伟,李占斌.土壤团粒研究进展[J].水土保持研究,2002, 9(1):81-85.

Lu J W, Li Z B. Advance in soil aggregate study [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 81-85. (in Chinese)

- [12] 张世熔,周 倩,伍国锋. 耕层土壤颗粒表面的分形及其与主要土壤特性的关系 [J]. 土壤学报,2002,39(3):221-226.
 Zhang S R, Zhou Q, Wu G F. Fractal dimensions of particle surface in the plowed layers and their relationships with main soil properties [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(3):221-226. (in Chinese)
- [13] Cerda A. Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types [J]. Catena, 1998, 32:73-86.
- [14] Barral M T, Arias M, Guerif J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregate [J]. Soil &. Tillage Res, 1998, 46:261-272.
- [15] 李阳兵,魏朝富,谢德体,等. 岩溶山区植被破坏前后土壤团聚体分形特征研究[J]. 土壤通报,2006,37(1):51-55.
 Li Y B,Wei C F,Xie D T,et al. The fractal features of soil aggregate structure before and after vegetation destruction on karst mountain area [J]. Chin J Soil Sci,2006,37(1):51-55. (in Chinese)
- [16] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: implication for conductivity and pore formation [J]. Phys ReV Lett,

1985,54(12):1325-1328.

- [17] Snyder S L, Koorevaar P. Air pressure within soil aggregate during quick wetting and subsequent "explosion" [J]. Meded Dake Laudbou Rijisuniv Gent, 1976, 37: 1095-1106.
- [18] 刘金福,洪 伟,吴承祯.中亚热带几种珍贵树种林分土壤团 粒结构的分形维数特征 [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 [J]. Acta Ecological Sinica,2002,22(2):197-205. (in Chinese)
- [19] 龚 伟,胡庭兴,王景燕. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土 壤团粒结构的分形特征 [J]. 植物生态学报,2007,31(1):56-65.
 Gong W, Hu T X, Wang J Y. Study on fractal features of soil

aggregate structure under natural evergreen broadleaved forest and artificial regeneration in southern Sichuan province [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(1): 56-65. (in Chinese)

[20] 安韶山,黄懿梅,李壁成,等.黄土丘陵区植被恢复中土壤团聚 体演变及其与土壤性质的关系[J].土壤通报,2006,37(1): 45-50.

> An S S, Huang Y M, Li B C, et al. Characteristics of soil water stable aggregates and relationship with soil properties during vegetation rehabilitation in a Loess Hilly region [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(1):45-50. (in Chinese)

[21] 杨建国,安韶山,郑粉莉.宁南山区植被自然恢复中土壤团聚 体特征及其与土壤性质关系 [J].水土保持学报,2006,20 (1):72-75

Yang J G, An S S, Zheng F L. Characteristics of soil water stable aggregates and relationship with soil properties during vegetation rehabilitation in Ningxia Loess Hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(1):72-75. (in Chinese)

[22] 刘苑秋,罗良兴,刘亮英,等.退化红壤重建森林初期细根特征 及其作用机理研究[J].应用生态学报,2005,16(9):1735-1739.

Liu Y Q,Luo L X,Liu L Y,et al. Fine-root character and its action mechanism of forest at its initial reestablished stage on degraded red soil [J]. Chin J Appl Ecol,2005,16(9):1735-1739. (in Chinese)

- [23] 吴 彦,刘世全,付秀琴,等. 植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(1):45-49.
 Wu Y,Liu S Q,Fu X Q,et al. Study on improving soil's water stable aggregates amounts by botanic Roots[J]. Soil Erosion and Soil and Water Conservation,1997,3(1):45-49. (in Chinese)
- [24] 黄昌勇.土壤学 [M].北京:中国农业出版社,2003:80-89. Huang C Y. Soil science [M]. Beijing: China Agricultural Press,2003:80-89. (in Chinese)