

\*\*\*\*\*  
试验研究  
\*\*\*\*\*

## 不同沙生植被土壤微团聚体分形特征及抗蚀性

张昌胜<sup>1</sup>, 刘国彬<sup>1,2</sup>, 薛蕙<sup>1,2</sup>, 冀智清<sup>1</sup>, 孙彩丽<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 应用分形理论, 以沙裸地为对照, 不同沙生植被类型为研究对象, 分析了不同沙生植被类型对土壤理化性质及抗蚀性的影响。结果表明, 不同沙生植被中, 踏郎土壤微团聚体组成和颗粒组成 1~0.25 mm 粒级含量较高; 白柠条和踏郎的土壤微团聚体分形维数较低, 且显著低于沙裸地。颗粒分形维数为沙蒿和踏郎较高, 白柠条最低。沙裸地可蚀性  $K$  值最大, 花棒和踏郎的可蚀性  $K$  值较小。综合分析表明沙裸地种植植被后, 可以提高土壤质量和抗蚀性, 其中踏郎较其它植被类型能更好地改善沙化土壤质量和提高土壤抗蚀性。

**关键词:** 沙生植被; 微团聚体; 分形维数; 可蚀性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)02-0001-06

中图分类号: S155.4, S157.1

## Anti-erodibility and Microaggregate Fractal Features of Soils Under Different Psammophytes

ZHANG Chang-sheng<sup>1</sup>, LIU Guo-bin<sup>1,2</sup>, XUE Sha<sup>1,2</sup>, JI Zhi-qing<sup>1</sup>, SUN Cai-li<sup>1</sup>

(1. Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The study analyzed the effect of different vegetation on soil physicochemical properties and anti-erodibility using the fractal theory. The results show that the soil under *Hedysarum mongolicum* had a higher content of 1~0.25 mm soil microaggregates and particles than those under the other vegetations. Microaggregate fractal dimensions of the soils under *Caragana korshinkii* and *Hedysarum mongolicum* were lower than those under the other vegetations, even significantly lower than that of bare sand. The highest particle dimensions were found in the soils under *Artemisia desertorum* and *Hedysarum mongolicum*, and the lowest was in the soil under *Caragana korshinki*. Bare sand presented the highest erodibility value ( $K$ ) while the soils under *Hedysarum mongolicum* and *Hedysarum scoparium* had the lower ones. It can be concluded that the vegetation on bare sand could improve the soil quality and anti-erodibility, and *Hedysarum mongolicum* could be the best choice as plant for improving soil quality according to the findings of this study.

**Keywords:** sand vegetation; microaggregate; fractal dimension; erodibility

分形的概念最早由 Mandelbort 提出, 将其定义为整体与构成部分以某种方式相似的“形”为标志建立起来的组合形式; 分形几何的科学应用形成了分形理论<sup>[1]</sup>, 这为研究不规则事物提供了有效方法。土壤组成结构的复杂性及内外因素作用的差异性, 使土壤成为具有不规则形态和自相似性的多孔介质, 具有一定的分形特征<sup>[2]</sup>。目前分形理论广泛应用于土壤研究, 并取得显著成果<sup>[3-5]</sup>。张昌顺等<sup>[6]</sup>指出土壤微团

聚体分形维数能很好地表征土壤的理化性质、肥力及土壤生物活性; 刘梦云等<sup>[7]</sup>对不同土地利用方式的研究表明土壤分形维数可以反映土壤物理性质的优劣; 张超等<sup>[8]</sup>认为根际土壤分形维数比非根际土壤分形维数能更好地反映土壤性质的变化规律; 朱冰冰等<sup>[9]</sup>研究表明土壤团粒结构的分形维数可以作为土壤抗蚀性评价的指标。这些研究表明分形维数在反应土壤性状上具有较强的可行性。

收稿日期: 2011-06-08

修回日期: 2011-07-02

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项“退耕还林(草)工程固碳速率和潜力研究”(XDA05060300); 陕西省科学技术研究发展计划项目“植被演替序列中种子萌发的化感作用研究”(2011JQ5007); 西北农林科技大学青年项目资助计划项目“生态恢复过程土壤微生物根际效应及其多样性研究”(QN2009080)

作者简介: 张昌胜(1985—), 男(汉族), 广西壮族自治区贵港市人, 硕士研究生, 主要从事流域生态研究。E-mail: zcs1222@163.com。

通信作者: 薛蕙(1978—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 助理研究员, 主要从事于微生物生态与恢复生态学研究。Email: xuesha100@163.com。

长期以来沙漠化严重影响人类的生产生活,已经成为全球最关注的环境问题之一。我国北方地区,特别是西北地区沙漠化面积的不断扩大,已引起了广泛的关注。近十多年来的防风固沙工程,荒漠化治理取得了一定的成效。目前针对沙漠化土壤的研究主要有土壤理化性质和植物固沙机制<sup>[10-12]</sup>以及土壤酶等生物学特性等方面<sup>[13]</sup>。而针对西北地区不同沙生植被土壤微团聚体的分形特征及可蚀性研究鲜见报道,本研究以榆林沙生植物园 9 种林龄相近的不同人工植被的土壤为研究对象,分析土壤微团聚体分形特征及可蚀性  $K$  值,旨在为沙漠化治理和该区域植被恢复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙地南缘陕西省榆林市,地处陕西省黄土高原与毛乌素沙漠过渡带的沙生植物园(109°41'75"E, 38°22'38"N),平均海拔 1 300 m,年平均气温 10 °C,年均降水量 400 mm,属于典型的生态脆弱地带。由于长期以来不合理的土地利用,导致土地荒漠化严重,经过几十年的流动沙丘固沙治理,目前该区植被覆盖率达 80% 以上。

在研究区选取种植年限相近,坡位一致的 9 种植物类型为研究对象,分别为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、踏郎(*Hedysarum fruticosum* var. *laeve*)、小

叶杨(*Populus simonii*)、臭柏(*Juniperus sabina*)、白柠条(*Caragana korshinskii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、油松(*Pinus*)。并选择沙裸地(CK)为对照样地。具体样点情况详见表 1。

表 1 研究区样地基本特征

编号	植被类型	种植年限/a	坡度/(°)	海拔/m	植被盖度/%
RP	刺槐	30	26	1 087	67
AD	沙蒿	30	3	1 094	80
HM	踏郎	30	8	1 092	67
HS	花棒	30	15	1 108	78
CA	白柠条	30~35	8	1 097	70
SP	小叶杨	30	25	1 094	57
PS	樟子松	30~35	5	1 094	68
PT	油松	30~35	3	1 093	68
SV	臭柏	30~35	3	1 092	72
CK	沙裸地	0	10	1 088	0

注:所选样地地形为丘间地,土壤类型为风沙土。

### 1.2 样品采集与分析

在各样地选择 3 个研究小区,在每个小区内用 S 形采样方法,分别采集 9 种沙生植被土壤:用土钻法取 0—20 cm 混合土样,每个样地采集 3 个土样。采用常规方法测定土壤全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质含量和 pH 值<sup>[14]</sup>(表 2)。土壤微团聚体及其颗粒组成采用英国马尔文公司生产的 MS2000 型激光粒度仪测定。

表 2 不同植被土壤理化性质

林地	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	pH 值
刺槐(RP)	0.23 <sup>a</sup>	25.36 <sup>b</sup>	0.23 <sup>e</sup>	0.94 <sup>d</sup>	108.16 <sup>b</sup>	5.34 <sup>a</sup>	8.76 <sup>d</sup>
沙蒿(AD)	0.12 <sup>e</sup>	14.80 <sup>f</sup>	0.38 <sup>cd</sup>	0.14 <sup>f</sup>	44.18 <sup>f</sup>	2.11 <sup>e</sup>	9.11 <sup>a</sup>
踏郎(HM)	0.10 <sup>e</sup>	14.52 <sup>f</sup>	0.40 <sup>e</sup>	1.82 <sup>c</sup>	73.39 <sup>d</sup>	1.94 <sup>e</sup>	8.91 <sup>c</sup>
花棒(HS)	0.20 <sup>bc</sup>	23.01 <sup>bc</sup>	0.38 <sup>cd</sup>	2.28 <sup>b</sup>	89.30 <sup>c</sup>	4.34 <sup>b</sup>	8.93 <sup>c</sup>
白柠条(CA)	0.16 <sup>d</sup>	21.51 <sup>cd</sup>	0.38 <sup>cd</sup>	2.91 <sup>a</sup>	77.77 <sup>d</sup>	2.85 <sup>d</sup>	8.81 <sup>d</sup>
小叶杨(SP)	0.17 <sup>cd</sup>	16.98 <sup>ef</sup>	0.35 <sup>d</sup>	0.34 <sup>ef</sup>	152.70 <sup>a</sup>	3.81 <sup>c</sup>	9.04 <sup>b</sup>
樟子松(PS)	0.18 <sup>cd</sup>	29.35 <sup>a</sup>	0.41 <sup>e</sup>	0.23 <sup>f</sup>	53.27 <sup>e</sup>	4.43 <sup>b</sup>	8.95 <sup>c</sup>
油松(PT)	0.18 <sup>cd</sup>	18.94 <sup>de</sup>	0.51 <sup>b</sup>	0.56 <sup>e</sup>	56.20 <sup>e</sup>	3.15 <sup>d</sup>	9.10 <sup>ab</sup>
臭柏(SV)	0.21 <sup>ab</sup>	21.44 <sup>cd</sup>	0.57 <sup>a</sup>	0.21 <sup>f</sup>	58.61 <sup>e</sup>	4.36 <sup>b</sup>	8.94 <sup>c</sup>
沙裸地(CK)	0.06 <sup>f</sup>	10.96 <sup>g</sup>	0.04 <sup>f</sup>	0.12 <sup>f</sup>	37.72 <sup>g</sup>	1.27 <sup>f</sup>	9.06 <sup>ab</sup>

注:同列不同字母表示在  $p < 0.01$  水平上差异显著。

### 1.3 土壤分形维数

目前普遍认为土壤是具有自相似结构的多孔介质,具有一定的分形特征,可以应用分形理论建立土壤团粒结构分形模型<sup>[15]</sup>。小于某一特定测量尺度的累积土粒质量  $m_i$  与  $d_i$  之间的分形关系式:

$$(d_i/d_{\max})^{3-D} = m_i/m_{\max}$$

式中:  $d_i$ ——相邻两筛间粒径的平均值(mm);  $d_{\max}$ ——最大土粒粒径的平均值(mm);  $m_i$ ——粒径小于  $d_i$  的累积土粒质量(kg);  $m_{\max}$ ——为各粒级质量之和(kg);  $D$ ——分形维数。分别以  $\lg(d_i/d_{\max})$  和  $\lg(m_i/$

$m_{max}$ ) 为横、纵坐标作图, 则  $3-D$  为该试验直线的斜率, 故可用回归分析方法测定土壤分形维数( $D$ )。

1.4 土壤团聚度及分散率

土壤团聚度计算公式为:

$$Y_1 = [(x_1 - x_2) / x_1] \times 100\%$$

式中:  $Y_1$ ——土壤团聚度;  $x_1$ ——大于 0.05 mm 微团聚体测量值;  $x_2$ ——大于 0.05 mm 土壤颗粒组成测量值。

分散率计算公式为:  $Y_2 = x_3 / x_4 \times 100\%$

式中:  $Y$ ——分散率;  $x_3$ ——小于 0.05 mm 微团聚体测量值;  $x_4$ ——小于 0.05 mm 颗粒组成测量值。

1.5 土壤可蚀性的计算方法

目前国内计算可蚀性  $K$  值应用较为广泛的计算方法是 Sharply 等<sup>[16]</sup> 在 EPIC( erosion-productivity impact calculator) 模型中概括出的公式:

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256S_a(1 - 0.01S_i)]\} \times (S_i / (C_i + S_i))^{0.3} \times \{1.0 - 0.25C / (C + \exp(3.72 - 2.95C))\} \times \{1.0 - 0.7S_n / (S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n))\}$$

式中:  $S_n = 1 - S_a / 100$ ;  $S_a$ ——砂粒含量(%);  $S_i$ ——粉砂粒含量(%);  $C_i$ ——黏粒含量(%);  $C$ ——有机碳含量(mg/g)。

1.6 数据分析

所测得数据采用 Excel 和 SPSS 12.0 统计分析软件进行分析, 多重比较采用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 不同植被土壤微团聚体组成及其分形维数

土壤微团聚体的组成影响土壤养分的吸收与释放, 具有保持和调节土壤水、肥及生物活动等多种功能<sup>[17]</sup>。研究表明(表 3), 不同植被除 <0.001 mm 及 0.005 ~ 0.001 mm 粒级外, 其它土壤微团聚体粒级及分形维数均具有显著差异。其中 1 ~ 0.25 mm 与 0.25 ~ 0.05 mm 粒级在总量中占绝对比例, 达到 90.86% ~ 98.63%。除了沙蒿和踏郎, 其它植被 0.25 ~ 0.05 mm 粒级含量均高于 1 ~ 0.25 mm 团粒含量, 花棒最高, 小叶杨、樟子松、臭柏等次之, 踏郎最低。不同植被类型微团聚体 0.05 ~ 0.01 mm 粒级变化较大, 为 1.37% ~ 8.29%; 表现为油松最高, 臭柏和花棒次之, 沙裸地与踏郎较低。且在 0.01 ~ 0.005 mm, 0.005 ~ 0.001 mm 及 <0.001 mm 粒级上均表现为油松最高; 不同植被微团聚体分形维数差异显著, 变化表现为: 油松 > 臭柏 > 沙蒿 > 沙裸地 > 樟子松 > 花棒 > 刺槐 > 小叶杨 > 踏郎 > 白柠条。

表 3 不同植被土壤微团聚体组成及其分形维数

植 被	微团聚体组成 / %						分形维数 $D$
	1 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 0.01 mm	0.01 ~ 0.005 mm	0.005 ~ 0.001 mm	< 0.001 mm	
刺槐(HR)	44.72 ± 1.09 <sup>bdac</sup>	52.52 ± 0.08 <sup>bac</sup>	2.69 ± 1.10 <sup>dc</sup>	0.07 ± 0.07 <sup>ed</sup>	0.00 <sup>d</sup>	0.00 <sup>b</sup>	0.80 ± 0.26 <sup>de</sup>
沙蒿(AD)	47.50 ± 3.04 <sup>ba</sup>	45.61 ± 4.32 <sup>c</sup>	6.24 ± 1.14 <sup>b</sup>	0.49 ± 0.07 <sup>ba</sup>	0.16 ± 0.07 <sup>bc</sup>	0.00 <sup>b</sup>	1.39 ± 0.17 <sup>ba</sup>
踏郎(HM)	53.90 ± 6.87 <sup>a</sup>	44.73 ± 6.68 <sup>c</sup>	1.37 ± 0.19 <sup>d</sup>	0.00 <sup>e</sup>	0.00 <sup>d</sup>	0.00 <sup>b</sup>	0.54 ± 0.01 <sup>e</sup>
花棒(HS)	30.14 ± 4.08 <sup>f</sup>	62.16 ± 5.23 <sup>a</sup>	7.54 ± 1.07 <sup>ba</sup>	0.16 ± 0.09 <sup>d</sup>	0.00 <sup>d</sup>	0.00 <sup>b</sup>	0.95 ± 0.22 <sup>de</sup>
白柠条(CA)	40.16 ± 3.86 <sup>bdac</sup>	57.40 ± 3.10 <sup>ba</sup>	2.44 ± 0.75 <sup>dc</sup>	0.00 ± 0.01 <sup>e</sup>	0.00 <sup>d</sup>	0.00 <sup>b</sup>	0.51 ± 0.24 <sup>e</sup>
小叶杨(SP)	36.06 ± 11.26 <sup>fdac</sup>	60.89 ± 11.40 <sup>ba</sup>	3.04 ± 0.27 <sup>c</sup>	0.01 ± 0.02 <sup>e</sup>	0.00 <sup>d</sup>	0.00 <sup>b</sup>	0.76 ± 0.26 <sup>de</sup>
樟子松(PS)	32.64 ± 4.87 <sup>fc</sup>	59.42 ± 4.36 <sup>ba</sup>	7.25 ± 0.91 <sup>ba</sup>	0.49 ± 0.05 <sup>ba</sup>	0.20 ± 0.02 <sup>ba</sup>	0.00 <sup>b</sup>	1.20 ± 0.14 <sup>bc</sup>
油松(PT)	35.54 ± 3.12 <sup>fd</sup>	55.32 ± 2.04 <sup>ba</sup>	8.29 ± 1.10 <sup>a</sup>	0.58 ± 0.10 <sup>a</sup>	0.24 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.05 ± 0.04 <sup>a</sup>	1.59 ± 0.27 <sup>a</sup>
臭柏(SV)	33.97 ± 3.14 <sup>fc</sup>	57.54 ± 2.25 <sup>ba</sup>	7.92 ± 0.87 <sup>a</sup>	0.44 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.12 ± 0.02 <sup>c</sup>	0.00 <sup>b</sup>	1.55 ± 0.03 <sup>ba</sup>
沙裸地(CK)	45.34 ± 0.17 <sup>bac</sup>	52.01 ± 0.20 <sup>bc</sup>	2.41 ± 0.01 <sup>dc</sup>	0.25 ± 0.15 <sup>c</sup>	0.00 <sup>d</sup>	0.00 <sup>b</sup>	1.24 ± 0.02 <sup>bc</sup>

注: 同一列中不同字母表示在  $p < 0.05$  水平上差异显著。

2.2 不同植被土壤颗粒组成及其分形维数

土壤颗粒组成决定着土壤物理、化学和生物学特性<sup>[18]</sup>, 并与水土流失、土壤衰退密切相关。

由表 4 可以看出, 不同沙生植被土壤颗粒组成差异显著。其中 1 ~ 0.25 mm 粒级花棒与踏郎较高, 沙蒿、刺槐次之, 臭柏最低; 0.25 ~ 0.05 mm 粒级白柠条与臭柏较高, 花棒最低; 0.05 ~ 0.01 mm, 0.01 ~ 0.005 mm 粒级均表现为: 臭柏、油松、樟子松高于其它植被,

沙裸地最低; 0.005 ~ 0.001 mm 粒级则表现为: 油松 > 臭柏 > 沙蒿 > 樟子松 > 踏郎 > 小叶杨 > 刺槐 > 白柠条 > 沙裸地 > 花棒; <0.001 mm 粒级除沙蒿最高外, 其变化与 0.005 ~ 0.001 mm 粒级表现基本相同。不同植被颗粒分形维数存在一定差异, 变化为 2.10 ~ 2.31, 分形维数表现为: 沙蒿 > 踏郎 > 油松 > 樟子松 > 臭柏 > 小叶杨 > 沙裸地 ≈ 刺槐 ≈ 花棒 > 白柠条。

表 4 不同植被土壤颗粒组成及其分形维数

植被	土壤颗粒组成/%						分形维数 <i>D</i>
	1~0.25 mm	0.25~0.05 mm	0.05~0.01 mm	0.01~0.005 mm	0.005~0.001 mm	<0.001 mm	
刺槐(HR)	40.34 ± 2.01 <sup>b</sup>	51.21 ± 1.98 <sup>bc</sup>	6.34 ± 0.02 <sup>d</sup>	1.09 ± 0.01 <sup>bc</sup>	0.51 ± 0.01 <sup>cb</sup>	0.52 ± 0.01 <sup>cd</sup>	2.14 ± 0.01 <sup>dc</sup>
沙蒿(AD)	42.60 ± 7.65 <sup>b</sup>	46.02 ± 6.50 <sup>dc</sup>	7.93 ± 0.78 <sup>cb</sup>	1.40 ± 0.14 <sup>ba</sup>	0.76 ± 0.08 <sup>a</sup>	1.29 ± 0.16 <sup>a</sup>	2.31 ± 0.00 <sup>a</sup>
踏郎(HM)	56.46 ± 12.10 <sup>a</sup>	37.88 ± 13.25 <sup>cd</sup>	3.34 ± 0.27 <sup>ef</sup>	1.05 ± 0.33 <sup>c</sup>	0.57 ± 0.19 <sup>b</sup>	0.71 ± 0.36 <sup>cb</sup>	2.27 ± 0.15 <sup>ba</sup>
花棒(HS)	59.63 ± 5.96 <sup>a</sup>	32.32 ± 3.98 <sup>e</sup>	6.53 ± 1.56 <sup>cd</sup>	0.75 ± 0.17 <sup>dc</sup>	0.37 ± 0.09 <sup>c</sup>	0.41 ± 0.17 <sup>d</sup>	2.14 ± 0.05 <sup>dc</sup>
白柠条(CA)	31.88 ± 6.72 <sup>cb</sup>	62.25 ± 6.63 <sup>a</sup>	4.22 ± 0.21 <sup>ef</sup>	0.82 ± 0.06 <sup>dc</sup>	0.43 ± 0.03 <sup>cb</sup>	0.40 ± 0.07 <sup>d</sup>	2.10 ± 0.01 <sup>d</sup>
小叶杨(SP)	33.15 ± 6.06 <sup>cb</sup>	59.26 ± 4.31 <sup>ba</sup>	5.39 ± 1.26 <sup>ed</sup>	1.09 ± 0.26 <sup>bc</sup>	0.56 ± 0.13 <sup>b</sup>	0.56 ± 0.12 <sup>cd</sup>	2.15 ± 0.02 <sup>dc</sup>
樟子松(PS)	34.93 ± 2.62 <sup>b</sup>	54.25 ± 0.90 <sup>bac</sup>	7.87 ± 1.40 <sup>cb</sup>	1.42 ± 0.19 <sup>ba</sup>	0.75 ± 0.08 <sup>a</sup>	0.79 ± 0.07 <sup>cb</sup>	2.21 ± 0.01 <sup>bc</sup>
油松(PT)	35.62 ± 3.00 <sup>b</sup>	52.11 ± 1.95 <sup>bac</sup>	9.04 ± 0.77 <sup>b</sup>	1.54 ± 0.30 <sup>a</sup>	0.82 ± 0.14 <sup>a</sup>	0.89 ± 0.18 <sup>b</sup>	2.22 ± 0.03 <sup>bac</sup>
臭柏(SV)	23.76 ± 0.55 <sup>c</sup>	61.12 ± 0.29 <sup>ba</sup>	11.71 ± 0.12 <sup>a</sup>	1.62 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.81 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.97 ± 0.12 <sup>b</sup>	2.20 ± 0.02 <sup>bdc</sup>
沙裸地(CK)	38.96 ± 0.73 <sup>b</sup>	57.33 ± 0.75 <sup>ba</sup>	2.32 ± 0.08 <sup>g</sup>	0.64 ± 0.06 <sup>d</sup>	0.38 ± 0.03 <sup>c</sup>	0.38 ± 0.03 <sup>d</sup>	2.14 ± 0.02 <sup>dc</sup>

注: 同一列中不同字母表示在  $p < 0.05$  水平上差异显著。

### 2.3 不同植被土壤抗蚀性、团聚度与分散率

可蚀性  $K$  值反映土壤可侵蚀强度, 其值越大说明土壤潜在的受侵蚀能力越强<sup>[19]</sup>, 水土流失越容易, 反之则表明土壤的抗侵蚀能力越强。结果表明(图 1), 不同植被类型土壤可蚀性  $K$  值存在一定差异, 其变化范围为 0.24~0.35, 表现为: 沙裸地 > 臭柏 > 白柠条 = 小叶杨 > 樟子松 = 油松 > 刺槐 > 沙蒿 > 踏郎 > 花棒。

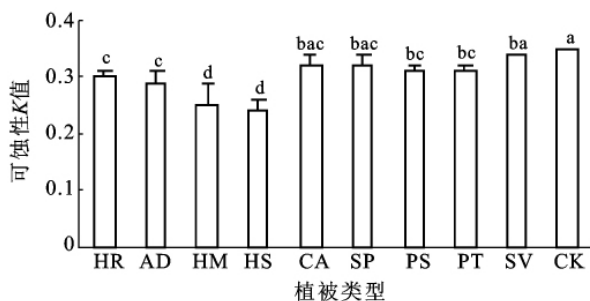


图 1 研究区不同植被类型土壤可蚀性  $K$  值变化

注: 不同字母表示在  $p < 0.05$  水平上差异显著。HR(刺槐), AD(沙蒿), HM(踏郎), HS(花棒), CA(白柠条), SP(小叶杨), PS(樟子松), PT(油松), SV(臭柏), CK(沙裸地)。下同。

土壤团聚结构与土壤稳定性密切相关, 其大小能在一定程度上反映土壤的抗侵蚀能力。由图 2 可知, 臭柏与刺槐的团聚度最大, 小叶杨、沙蒿和踏郎次之, 沙裸地与花棒团聚度最小。分散率则表现为: 花棒 > 樟子松 > 油松 > 沙裸地 > 沙蒿 > 臭柏 > 小叶杨 > 白柠条 > 刺槐 > 踏郎(图 3)。

### 2.4 土壤分形维数、可蚀性 $K$ 值及土壤理化性质相关性分析

对不同植被土壤分形维数、可蚀性  $K$  值、团聚度、分散率与土壤理化性质相关性分析, 结果表明(表 5) 微团聚体分形维数与土壤 pH 值呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 与可蚀性  $K$  值和分散率呈显著正相关 ( $p$

$< 0.05$ ) , 而与土壤速效磷和速效钾含量呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ ); 与碱解氮、全氮、全磷和有机质相关性不显著; 颗粒分形维数与其它指标相关性较弱, 没有达到显著水平; 可蚀性  $K$  值除与微团聚体分形维数呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ) 外还与速效磷含量极显著负相关 ( $p < 0.01$ ); 团聚度与分散率为极显著负相关 ( $p < 0.01$ ); 分散率与土壤 pH 值显著正相关 ( $p < 0.05$ )。

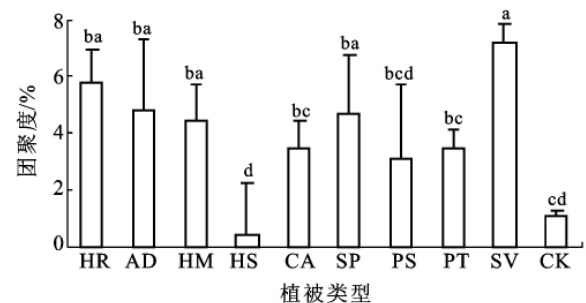


图 2 研究区不同植被类型土壤团聚度分异特征

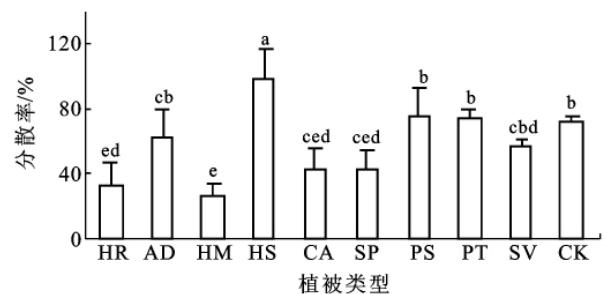


图 3 研究区不同植被类型土壤分散率变化

## 3 讨论

土壤微团聚体的组成直接影响土壤持水和养分的贮存与释放, 良好的微团聚体组成除了具有良好的土壤肥力外, 还具有良好的抗侵蚀功能<sup>[6,9]</sup>。沙漠化

土地水土流失严重,长期的风雨侵蚀使土壤结构遭到极大破坏,随着沙漠化治理工程的实施,植被不断生长,多样性和生物量不断增加,大量凋落物返还土壤中,使得土壤有机质增加,为土壤生物生长提供了较好的条件,土壤得到改善。但是不同的植被类型具有不同的凋落物成分,同时根系生长与分布存在差异,因此土壤微团聚体结构及土壤颗粒组成也存在差异。吕文星等<sup>[20]</sup>对不同林地土壤团聚体研究表明不同林地土壤团聚体构成存在差异;唐炎林等<sup>[21]</sup>研究表明不同林

下土壤颗粒组成存在差异,本研究也得出相同的结论。

本研究发现除油松、臭柏和沙蒿外,其它 6 种植被类型土壤微团聚体分形维数均比沙裸地低,这表明种植植被后沙裸地土壤得到改善。其中白柠条和踏郎的土壤微团聚体分形维数最低,分散率较低,而团聚度较大;有研究表明<sup>[20]</sup>土壤微团聚体分形维数越小,土壤结构相对松散,其通透性越好,稳定性也越好,因此,白柠条和踏郎对土壤团粒结构改善作用较其它植被明显。

表 5 土壤分形维数、可蚀性  $K$  值、团聚度、分散率与土壤理化性质相关性分析

因子	微团聚体分形维数	颗粒分形维数	$K$ 值	团聚度/%	分散率/%	碱解氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速磷/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速钾/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	全磷/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	有机质/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	pH 值
微团聚体分形维数	1	0.33	0.38*	0.12	0.44*	-0.03	-0.64**	-0.53**	0.09	0.24	0.01	0.57**
颗粒分形维数		1	-0.31	0.33	-0.12	-0.13	-0.32	-0.36	-0.22	0.31	-0.28	0.32
$K$ 值			1	0.31	-0.15	-0.11	-0.48**	-0.16	-0.02	-0.13	-0.05	0.18
团聚度				1	-0.70**	0.14	-0.27	0.15	0.31	0.32	0.25	-0.22
分散率					1	0.14	-0.10	-0.34	0.08	0.10	0.08	0.41*

注: \* 表示差异达显著水平 ( $p < 0.05$ ), \*\* 表示差异达极显著水平 ( $p < 0.01$ )。

土壤可蚀性大小与土壤本身的理化性质密切相关<sup>[22-23]</sup>; Royall<sup>[24]</sup>研究指出土壤颗粒粒径大小和分布与侵蚀系数有一定关系,因此可以用土壤颗粒组成与可蚀性  $K$  值的关系评价土壤的抗侵蚀能力。本研究中沙裸地可蚀性  $K$  值均比其它植被土壤的可蚀性  $K$  值大,其中花棒和踏郎的可蚀性  $K$  值最小,这表明植被改善了沙化土壤,提高了土壤抗蚀性。相关性分析可知可蚀性  $K$  值与土壤微团聚体分形维数呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ),这说明微团聚体分形维数越大,可蚀性  $K$  值越大,反之越小;研究表明土壤有机质含量的增加能使土壤颗粒间的有机质交结作用加强<sup>[25]</sup>,从而提高了土壤的抗蚀性。花棒具有较高的有机质含量和较低的微团聚体分形维数,而踏郎与花棒相比虽然其有机质含量相对较低,但其团聚度较大,微团聚体分形维数相对较低且分散率低。因此花棒与踏郎具有较强的抗侵蚀能力,是治理水土流失较为理想的植被类型。

相关性分析表明微团聚体分形维数与速效磷、速效钾含量呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ ),与 pH 值为极显著正相关 ( $p < 0.01$ ),而与有机质、全氮、碱解氮和全磷相关性很小,可能与沙化土壤长期受到严重破坏,恢复缓慢或者与沙漠化土壤自身的性质有关,但仍能在一定程度上反映土壤养分状况。可蚀性  $K$  值与微团聚体分形维数呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ),这与朱冰冰等<sup>[9]</sup>的研究结论一致,再次证明微团聚体分形维数可以作为衡量土壤抗蚀性的指标。油松、臭柏和

沙蒿的微团聚体分形维数比沙裸地大,这可能是由于不同植被凋落物成分差异,植物根系分泌物作用和土壤生物活动影响了土壤团粒及颗粒组成<sup>[8, 26]</sup>;也可能是植被在生长过程中通过不断改变土壤的理化性质、通透性等使土壤不断向着自身生长的需要演变。

## 4 结论

(1) 沙漠化土壤种植植被后,土壤微团聚体结构变化显著。其中 1~0.25 mm 和 0.25~0.05 mm 粒级含量比例较大。微团聚体 1~0.25 mm 粒级团粒为踏郎最高,颗粒组成 1~0.25 mm 粒级为花棒和踏郎较高。分形维数分析表明白柠条和踏郎有利于土壤形成良好的微团聚体和颗粒组成,对土壤具有较好的改良作用。

(2) 不同植被类型对沙化土壤质量的改善及土壤抗蚀性的提高具有不同的作用,沙裸地种植植物后土壤抗侵蚀能力得到提高,与其它树种相比,踏郎能更好地改善土壤质量和提高土壤的抗侵蚀能力。

### [参 考 文 献]

- [1] Mandelbrot B B. From , Chance , and Dimension [M]. San Francisco: Freeman , 1977: 1-234.
- [2] 黄冠华,詹伟华.土壤颗粒的分形特征及其应用[J].土壤学报 2002 39(4): 490-497.
- [3] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J].土壤学报, 1994 31(1): 18-28.

- [4] 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[J].水土保持学报,2001,15(3):112-115.
- [5] 刘金福,洪伟,吴承祯.中亚热带集中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.
- [6] 张昌顺,范少辉,漆良华,等.闽北典型毛竹林土壤微团聚体分形特征研究[J].水土保持学报,2008,22(6):170-175.
- [7] 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型特征[J].中国水土保持科学,2006,4(4):47-51.
- [8] 张超,刘国彬,薛蕙,等.黄土丘陵区不同林龄人工刺槐林土壤抗蚀性演变特征[J].中国水土保持科学,2010,8(2):1-7.
- [9] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.黄丘区植被恢复过程中土壤团粒分形特征及抗蚀性演变[J].西安理工大学学报,2009,25(4):377-382.
- [10] 曹成有,蒋德明,全贵静,等.科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工固沙区土壤理化性质的变化[J].水土保持学报,2004,18(6):108-111.
- [11] 贺山峰,蒋德明,阿拉木萨,等.科尔沁沙地小叶锦鸡儿灌木林固沙效应的研究[J].水土保持学报,2007,21(1):84-87.
- [12] 赫晓慧,常庆瑞,温仲明,等.农林交错带不同人工植被下荒漠化土壤肥力的变化[J].中国沙漠,2006,26(6):915-919.
- [13] 余娜,刘济民,张超,等.不同沙生植被土壤酶活性分异特征研究[J].水土保持研究,2010,17(1):77-81.
- [14] 刘光松.中国生态系统研究网络观测与分析标准方法:土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1998.
- [15] 梁士楚,董鸣,王伯荪,等.英罗港红树林土壤粒径分布的分形特征[J].应用生态学报,2003,14(1):11-14.
- [16] Sharply A N, Williams J R. EPIC—Erosion/Productivity Impact Calculator: I Model Documentation [M]. Washington D C: USDA—ARS,1990.
- [17] 沈慧,姜凤崎,杜晓军,等.水土保持林土壤肥力及评价指标[J].水土保持学报,2000,14(2):60-65.
- [18] 苏里坦,宋郁东,陶辉.不同风沙土壤颗粒的分型特征[J].土壤通报,2008,39(2):244-248.
- [19] 宋阳,刘连友,严平,等.土壤可蚀性研究评述[J].干旱区地理,2006,29(1):124-131.
- [20] 吕文星,张洪江,王伟,等.重庆四面山不同林地土壤团聚体特征[J].水土保持学报,2010,24(4):192-197.
- [21] 唐炎林,邓晓保,李玉武,等.西双版纳不同林分土壤颗粒组成及其肥力比较[J].中南林业科技大学学报,2007,27(1):70-75.
- [22] 张科利,彭文英,杨红.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.
- [23] 徐燕,龙健.贵州喀斯特山区土壤物理性质对土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2005,19(1):157-159.
- [24] Dan Royall. Particle-size and analytical considerations in the mineral magnetic interpretation of soil loss from cultivated landscapes[J]. Catena,2004,57(2):189-207.
- [25] 周萍,刘国彬,侯喜禄.黄土丘陵区不同恢复年限草地土壤微团粒分型特征[J].草地学报,2008,16(4):396-402.
- [26] 宋日,刘利,马丽艳,等.作物根系分泌物对土壤团聚体大小及其稳定性的影响[J].南京农业大学学报,2009,32(3):93-97.