

黄土丘陵区不同恢复年限草地土壤微团粒分形特征

周 萍^{1,2}, 刘国彬^{1*}, 侯喜禄¹

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

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 运用分形理论研究黄土丘陵区不同恢复年限草地土壤微团粒的粒径组成、分形维数特征及与土壤理化性质关系,使分形学在土壤微团粒性状与土壤肥力特征研究中得到进一步应用,并为评价草地生态系统土壤特征及生态恢复提供新方法。结果表明:表土层分形维数随植被恢复年限的增加而减少;剖面土壤沙粒含量越高,微团粒分形维数越低,粘粒规律相反,而粉粒与分形维数相关性不显著;土壤质地由粗到细使得分形维数由小到大变化;分形维数也可有效地表征不同植被恢复年限的草地土壤结构和养分的变化趋势;分形维数与土壤容重、非活性孔度、全磷、速效钾及氨态氮之间存在正相关性,与土壤活性孔度、孔隙比、有机质、全氮、碱解氮及硝态氮表现出负相关。

关键词: 黄土丘陵区; 恢复年限; 土壤微团粒; 分形特征

中图分类号: S154.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2008)04-0396-07

Study on Fractal Features of Soil Microaggregates during Different Restoration Stages in the Loess Hilly Region

ZHOU Ping^{1,2}, LIU Guo-bin^{1*}, HOU Xi-lu¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The composition of soil microaggregate and condition of soil structure are important factors to affect soil character and fertility and soil microaggregate in different restoration year have different fractal dimension feature. The particle size component and fractal dimension of soil microaggregats as well as the relationship between fractal dimension and soil physical and chemical characters were studied using fractal dimension theory under different restoration stages of grasslands in the Hilly Loess Region. The objective of this study was to apply the fractal dimension theory to soil microaggregate and soil nutrient investigation and supply a new tool for grassland ecosystem evaluation. The results show that the longer the restoration time, the less the fractal dimension of soil microaggregates in the upper layer; the higher the sand content, the higher the fractal dimension; however, the clay content had an opposite trend and the silt content had no significant correlation with the fractal dimension. The fractal dimension could effectively represent the trends of soil texture and soil nutrients under different restoration stages. Positive correlation existed between fractal dimension and bulk density, non-capillary porosity, porosity ratio, total phosphorus, available potassium, and ammoniac nitrogen, while fractal dimension had negative correlation with capillary porosity, soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, and nitrate nitrogen. The research suggests that the fractal dimension of soil microaggregats could be a comprehension index of soil quantity evaluation.

Key words: Hilly Loess Region; Restoration stages; Soil microaggregates; Fractal dimension

收稿日期: 2007-08-20; 修回日期: 2007-11-20

基金项目: 中科院科学院西部行动计划(KZCX2-XB2-05); 国家重点基础研究发展计划; 国家自然科学基金重点项目(90502007); 中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究(2007CB407205)

作者简介: 周萍(1981-), 女, 陕西汉中, 博士生, 研究方向为植被恢复和生态系统服务功能, E-mail: zhouping04@mails.gucas.ac.cn;

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: gblu@ms.iswc.ac.cn

1967年 B. B. Mandelbort 首次提出了分形的概念^[1]并于1975年创立了分形几何学(fractal geometry),在此基础上形成了研究分形性质及其应用的科学,称为分形理论(fractal theory)^[2],为研究不规则事物提供了有效方法,使分形理论成为当代新兴的学术思想。土壤是由水、空气和粒径不同的各类物质组成的具有不规则形状和自相似性的多孔介质,具有分形特性^[3]。Arya 和 Paris^[4]将分形理论应用到土壤学领域研究了土壤颗粒的分形现象及其分形维数的计算;Turcotte^[5]提出了多孔介质材料的粒径分布与分形维数关系公式;杨培岭等^[6]提出用粒径的重量分布取代粒径的数量分布直接计算粒径分布的分形维数,表征土粒直径的大小和质地组成的均匀程度。近年来,分形理论已经被用来解释土壤科学中许多复杂的现象和过程,计算土壤团粒、微团粒和孔隙度的分形维数以表征土壤粒径的大小组成、土壤质地、形态、结构、均匀程度、水分特征、溶质转移和侵蚀度等,并在一定程度上使其定量化,是描述土壤结构特征的新方法^[3,7,8]。并将多重分形等理论应用于多重分形介质中的扩散运动研究^[9]及土壤结构和性质的研究^[10]。

植被恢复是黄土高原水土流失区生态恢复的重要而有效的措施,植被的恢复同时对土壤物理、化学性状产生深刻影响。但目前对黄土丘陵区植被恢复演替过程中草地土壤微团粒分形特征及其变化规律的研究报道不多。本文运用分形理论结合已有分形模型研究该区不同演替阶段草地土壤微团粒的分形特征,同时探讨土壤微团粒分形维数与土壤容重、孔隙度、养分之间的关系,有助于了解不同植被演替阶段土壤微团粒的分布和特征,为植被恢复的土壤质量定量化评价和肥力重建提供新方法,并为进一步了解草地生态系统土壤特征及生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省安塞县纸坊沟小流域,地理位置在 109°13'46" ~ 109°16'03" E, 36°42'42" ~ 36°46'28" N, 海拔 1100 ~ 1400 m, 流域面积 8.27 km², 属黄土丘陵沟壑区第2副区, 气候区划上属暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡区。流域内大部分土壤是在黄土母质上发育而成的黄土幼年土-黄绵土, 占总土地面积的 77.1%。年日照总时数 2415.6 h, 年辐射量 552.7 kJ/cm², 年均气温 8.8℃, 0 积

温为 3733.5℃, 10 积温 3113.9℃, 无霜期 157 ~ 194 d。年均降水量 542.5 mm, 分布不均, 7、8、9 月降水量占年降水量的 61.1%, 且多暴雨, 是该流域水土流失的主要原因。现已成为黄土高原地区生态建设的样板流域, 是国家级退耕还林还草示范区^[11]。

纸坊沟流域植被可划分为 3 个植被型, 5 个植被亚型, 20 个群丛组, 草本主要有铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)、白羊草(*Borthriochloa ischaemum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaries*)、披针苔草(*Carex lanceolata*) 群丛等, 灌木主要有狼牙刺(*Sophora davidii*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、黄蔷薇(*Rosa hugonis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*) 群丛等; 乔木分布相对较少, 主要是刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*) 和山杨(*Populus tremuloides*) 群丛。植物类型具有森林和草原成分大量并存的特点^[12]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择和样品采集 在坡向、坡度、坡位和海拔基本一致的不同恢复年限天然草地上分别设置 3 个 5 m × 5 m 样方(表 1)。于 2006 年 9 月中旬在所设定的标准地内采用蛇形 5 点取样法按 0 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层用环刀取原状土后在室内测定容重和孔隙度并分层取土壤混合样(去除枯落物层)测定土壤微团粒结构和养分含量。

1.2.2 测定方法 土壤微团粒结构用英国马尔文公司生产的 MS2000 型激光粒度仪测定。有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法(GB7857-87), 全氮采用半微量凯氏法(GB7848-87), 碱解氮采用碱解-扩散法(GB7849-87), 硝态氮和铵态氮采用 KCl 浸提, AutoAnalyzer3 流动元素分析仪测定, 全磷采用碱熔-钼锑抗比色法(GB7852-87), 速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法(GB7856-87)。

1.2.3 土壤颗粒分形维数的计算模型 运用分形理论建立土壤颗粒的分形模型^[7,13]: 粒径 d_i 小于某一特定测量尺度的累积土粒质量 W_i 与 d_i 之间的分形关系式为: $(d_i/d_{max})^{3-D} = W_i/W_o$ 。式中: d_{max} 为最大土粒的粒径, mm; W_i 为粒径大于 d_i 的累积土粒质量, kg; W_o 为各粒级质量的总和; D 为分形维数。分别以 $\lg(W_i/W_o)$ 、 $\lg(d_i/d_{max})$ 为纵、横坐标, 则 $3-D$ 是 $\lg(W_i/W_o)$ 和 $\lg(d_i/d_{max})$ 的实验直线的斜率, 故可用回归分析方法对土壤微团粒的分形维数 (D) 进行测定。

表1 样地基本情况

Table 1 General information of the sampling sites

样地号 Plot no.	主要物种 Main species	恢复年限 Restoration year	海拔(m) Altitude(m)	坡向 Slope aspect	地形 Relief	坡位 Slope situation	坡度 Gradient	土壤类型 Soil type
1 #	香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i> L.、阿尔泰狗娃花 <i>Heropappus altaicus</i> (Willd.) Novopokr.、猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> Waldst. et Kitag.	4	1168	SW28°	沟坡 Gully	中部 Middle	29°	黄绵土 Cultivated loessial soils
2 #	铁杆蒿 <i>A. sacrorum</i> 、早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i> Trin. ex Bunge、蛇葡萄 <i>Ampelopsis brevipedunculata</i> (Maxim.) Trautv.	12	1157	SW20°	沟坡 Gully	上部 Upper	24°	黄绵土 Cultivated loessial soils
3 #	铁杆蒿 <i>A. sacrorum</i> 、胡枝子 <i>Lespedeza formosa</i> (Vog.) Koehne、马豆 <i>Vicia sativa</i> L.、草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i> Pall.	20	1125	SW42°	沟坡 Gully	中部 Middle	26°	黄绵土 Cultivated Loessial soils
4 #	铁杆蒿 <i>A. sacrorum</i> 、茭蒿 <i>A. giraldii</i> 、长芒草 <i>S. bungeana</i> 、黄花列当 <i>Orobancha pycnostachya</i> Hance	28	1176	SW10°	沟坡 Gully	上部 upper	28°	黄绵土 Cultivated loessial soils
5 #	长芒草 <i>S. bungeana</i> 、铁杆蒿 <i>A. sacrorum</i> 、茭蒿 <i>A. giraldii</i> 、狼牙刺 <i>Sophora davidii</i> (Franch.) Skeels、杠柳 <i>Periploca sepium</i> Bunge	40	1090	SW20°	沟坡 Gully	中部 Middle	25°	黄绵土 Cultivated loessial soils

1.2.4 数据统计分析 用单因素方差分析(ANOVA) 检验不同恢复年限及不同土层土壤微团粒含量及土壤分形维数之间的差异。若存在显著性差异进一步采用 LSD 进行多重比较。统计分析应用 SPSS 软件。

2 结果与分析

2.1 土壤微团粒组成及其分形特征

土壤微团粒数量和质量可用于评价土壤结构性能、抗分散强度和保水保肥能力^[14]。不同恢复年限的天然草地表层(0~20 cm)土壤 1~0.05 mm 粒级(砂粒)含量变化为 5 # > 4 # > 3 # > 1 # > 2 #, 随着恢复年限的增加而逐渐变大, 下层土壤的砂粒含量与恢复年限也表现出相同的变化规律(表 2)。在 0~60 cm 土壤剖面上, 不同恢复年限的天然草地 0.05~0.001 mm 粒级(粉粒)土壤微团粒含量随着土层加深而增大, 而 <0.001 mm 粒级(粘粒)含量除了 1 # 样地外, 在剖面上也随着土层加深而增大。随着植被恢复演替的进行, 0.05~0.001 mm 粒级含量先增后减, 而 <0.001 mm 粒级表现为逐渐减小趋势。说明植被恢复早期, 粘粒含量高, 这意味着土壤更紧实, 必然占用通气孔隙, 孔隙过小则土壤持水多以低效或无效的非活性水为主, 加剧了土壤的水肥矛盾^[15]。随着植被恢复年限的延长, 地表枯落物增多使土壤有机质含量增加和胶体质量提高, 粘粒含量减少, 土壤通气性变好, 土壤结构得到改善有利于植被恢复。

现有研究已揭示出分形维数在定量描述土壤质地、均一程度、物理性状及肥力特征等方面具有潜

力^[16,17]。运用回归分析计算出不同恢复年限草地 0~60 cm 剖面土壤微团粒分形维数在 2.360~2.494 之间, 其相关系数均在 0.900 以上且达到显著性水平。不同恢复年限表层(0~20 cm)和 20~40 cm 土层土壤的微团粒分形维数大小顺序为: 1 # > 2 # > 3 # > 4 # > 5 #。由于草地根系都较浅且主要分布在上层, 因此上层土壤微团粒受到的影响大且明显, 而 40~60 cm 土层微团粒的分形维数与恢复年限相关性不大。这主要是由于随着植被演替的进行, 草地由一年生演变为多年生植被, 地表年枯落物增加了地表土壤有机物来源, 使土壤颗粒间有机质胶结作用加强, 且多年生植物的地下根系较多, 根在土壤中的穿透和扎伸能力增强, 使土壤结构相对松散、通透性好^[18], 土壤结构得到改善。0~60 cm 土壤剖面的沙粒含量变化是 4 # > 5 # > 3 # > 2 # > 1 #, 随着恢复年限的增加, 沙粒含量越高, 土壤颗粒粗粒化越明显且颗粒直径增大, 分形维数减小。此结果与土壤质地由粗到细变化其分形维数由小到大的结论相一致^[12]。粉粒含量为 2 # > 3 # > 1 # > 4 # > 5 #, 粉粒与土壤微团粒分形维数与草地恢复年限的相关性不显著。粘粒含量为 1 # > 2 # > 3 # > 5 # > 4 #, 表现为恢复年限时间越短, 粘粒含量越高、质地越细、分形维数越高。此外, 单一粒级的集中程度对分形维数也会产生重要影响^[19]。因此, 对土壤微团粒的各粒级含量与分形维数进行了回归分析(表 3), 表层土壤微团粒的分形维数与 <0.001 mm 粒级含量之间呈极显著正相关($P < 0.01$), 而与 0.05~0.01、0.01~0.005 和 0.005~0.001 mm 之间呈显著正相关($P < 0.05$), 与 1~0.25 和 0.25~0.05 mm 粒级含量相关性不显著。鉴于此, 以 0.05 mm

为界对 >0.05 mm 和 <0.05 mm 粒级含量与分形维数进行回归分析发现,它们与分形维数分别呈负相关和正相关,即 >0.05 mm 粒级含量越高分形维数越小,<0.05 mm 粒级含量越高分形维数越大,

但相关性均未达到显著性水平。这也进一步验证了土壤微团粒分形维数作为反映土壤结构几何形体的参数,实质上反映了土壤颗粒对空间填充的能力,并与颗粒大小、数量及其分布均匀程度密切相关。

表 2 不同退耕年限草地土壤微团粒组成及其分形维数特征

Table 2 Component and fractal dimension of soil microaggregates during different restoration stages

土深(cm) Soil depth (cm)	粒径 Particle size (mm)	样地号(均值 ±标准差)		Plot no. (mean ±stand deviation)		
		1 #	2 #	3 #	4 #	5 #
0 ~ 20	1 ~ 0.25	0.810 ±0.09 ^{Ca}	4.420 ±0.44 ^{Ba}	1.840 ±0.72 ^{Ca}	4.010 ±0.41 ^{Ba}	11.910 ±0.77 ^{Aa}
	0.25 ~ 0.05	31.640 ±10.26 ^{Aa}	27.060 ±9.24 ^{Aa}	29.500 ±7.26 ^{Aa}	36.580 ±12.16 ^{Aa}	44.080 ±16.11 ^{Aa}
	0.05 ~ 0.01	49.230 ±9.32 ^{Aa}	48.010 ±10.16 ^{Aa}	50.580 ±15.23 ^{Aa}	46.210 ±11.04 ^{Aa}	33.240 ±10.25 ^{Ba}
	0.01 ~ 0.005	6.790 ±1.02 ^{Aa}	7.840 ±0.99 ^{Aa}	6.910 ±1.22 ^{Aa}	4.900 ±1.24 ^{Ba}	4.460 ±1.09 ^{Ba}
	0.005 ~ 0.001	8.230 ±0.78 ^{Aa}	9.860 ±1.08 ^{Aa}	8.490 ±1.98 ^{Aa}	6.080 ±1.03 ^{Ba}	5.070 ±0.78 ^{Ba}
	<0.001	3.300 ±0.41 ^{Aa}	2.820 ±0.69 ^{ABa}	2.680 ±0.99 ^{BCa}	2.220 ±0.53 ^{Ca}	1.230 ±0.24 ^{Da}
	分形维数 Fractal dimension		2.494 ±0.015 ^{Aa}	2.488 ±0.013 ^{Aa}	2.471 ±0.010 ^{ABa}	2.431 ±0.014 ^{Ba}
相关系数 Correlation coefficient		0.915 ±0.005	0.902 ±0.004	0.907 ±0.001	0.926 ±0.004	0.942 ±0.004
20 ~ 40	1 ~ 0.25	0.820 ±0.02 ^{Ba}	0.000 ±0.02 ^{Cb}	0.540 ±0.04 ^{BCb}	0.910 ±0.25 ^{Bb}	5.510 ±1.07 ^{Ab}
	0.25 ~ 0.05	29.160 ±9.14 ^{Aa}	26.660 ±10.19 ^{Aa}	28.260 ±7.65 ^{Aa}	37.270 ±10.24 ^{Aa}	40.240 ±13.18 ^{Aa}
	0.05 ~ 0.01	52.360 ±10.98 ^{Aa}	53.500 ±13.87 ^{Aa}	52.830 ±12.96 ^{Aa}	48.170 ±11.07 ^{Aa}	40.420 ±11.04 ^{Aa}
	0.01 ~ 0.005	6.690 ±2.13 ^{ABa}	7.610 ±0.96 ^{Aa}	6.920 ±2.31 ^{ABa}	4.940 ±1.08 ^{Ba}	5.270 ±0.28 ^{ABa}
	0.005 ~ 0.001	7.730 ±3.14 ^{ABa}	9.270 ±1.13 ^{Aa}	8.600 ±1.07 ^{Aa}	6.290 ±1.11 ^{Ba}	6.240 ±0.56 ^{Ba}
	<0.001	3.240 ±1.08 ^{Aa}	2.970 ±0.48 ^{ABa}	2.850 ±0.77 ^{ABCa}	2.410 ±0.65 ^{BCa}	2.330 ±0.23 ^{Cb}
	分形维数 Fractal dimension		2.488 ±0.016 ^{Aa}	2.486 ±0.014 ^{ABa}	2.477 ±0.011 ^{ABa}	2.441 ±0.011 ^{Ba}
相关系数 Correlation coefficient		0.912 ±0.003	0.899 ±0.005	0.905 ±0.003	0.922 ±0.004	0.936 ±0.002
40 ~ 60	1 ~ 0.25	0.070 ±0.07 ^{Cb}	0.650 ±0.26 ^{Bc}	0.000 ±0.06 ^{Cc}	0.000 ±0.05 ^{Cc}	1.870 ±0.27 ^{Ac}
	0.25 ~ 0.05	29.010 ±11.97 ^{Aa}	24.840 ±9.11 ^{Aa}	27.530 ±7.52 ^{Aa}	34.550 ±10.12 ^{Aa}	35.190 ±14.25 ^{Aa}
	0.05 ~ 0.01	52.000 ±15.03 ^{Aa}	53.300 ±17.14 ^{Aa}	54.350 ±13.45 ^{Aa}	51.180 ±15.24 ^{Aa}	44.410 ±11.18 ^{Ab}
	0.01 ~ 0.005	7.580 ±1.23 ^{ABa}	8.290 ±0.88 ^{Aa}	6.930 ±1.05 ^{BCa}	5.270 ±1.23 ^{Ca}	6.880 ±1.26 ^{BCa}
	0.005 ~ 0.001	8.200 ±2.01 ^{ABa}	9.900 ±1.07 ^{Aa}	8.270 ±2.01 ^{ABa}	6.480 ±1.05 ^{Ba}	8.850 ±1.04 ^{Ab}
	<0.001	3.130 ±0.78 ^{Aa}	3.010 ±0.98 ^{Aa}	2.920 ±0.54 ^{Aa}	2.520 ±0.67 ^{Aa}	2.800 ±0.11 ^{Ac}
	分形维数 Fractal dimension		2.480 ±0.020 ^{Aa}	2.492 ±0.027 ^{Aa}	2.478 ±0.028 ^{Aa}	2.447 ±0.011 ^{Aa}
相关系数 Correlation coefficient		0.915 ±0.004	0.894 ±0.006	0.904 ±0.005	0.917 ±0.006	0.917 ±0.003

注:同一行不同大写字母间差异显著 ($P < 0.05$),同一列不同小写字母间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Means with different capital letters in the same row are significantly different at the 0.05 level; means with different small letters in the same column are significantly different at the 0.05 level

2.2 土壤的物理和化学性质特征

植被恢复后期的草地土壤物理性质较恢复早期的好(表 4),当植被演替到后阶段,土壤腐殖质积累较多,且不同种类植物根系在不同土层中穿插、挤压,使土壤疏松多孔,非毛管孔隙发达,渗透性好,土壤性质各方面指标值要优于演替早期的草地^[20]。非毛管孔隙表征土壤滞留和下渗水分、发挥水源涵养作用的能力,决定着土壤通(气)透(水)功能的强弱^[21]。已有研究表明:结构性良好、水-气关系协调的土壤总孔隙度在 40% ~ 50% 之间,非毛管孔隙度

超过 10%,非毛管孔隙度与毛管孔隙度比例在 1 ~ 2 ~ 1 ~ 4^[22]。与这些结果相比,本研究土壤的总孔隙度(>50%)并不低,但非毛管孔隙度与毛管孔隙度比例演替前期小于后期,说明毛管孔隙数量和土壤保蓄能力偏低。因此,提高毛管孔隙度能更有效地改善大小孔隙比例和孔隙结构并促进植被恢复演替。不同植被恢复阶段的草地土壤养分变化表现出表层土壤养分含量高于下层土壤(表 5),土壤有机质,全氮和碱解氮随植被恢复年限的增加而增加^[23,24]。而全磷,速效钾和氨态氮随恢复年限的增加而减小。

表3 不同退耕年限草地土壤微团粒分形维数与土壤容重和养分的关系

Table 3 Correlation analysis between soil microaggregates fractal dimension and soil characters

指标 Index	回归方程相关系数 Regression function and correlation coefficient	指标 Index	回归方程相关系数 Regression function and correlation coefficient
1 ~ 0.25 mm	$y = -0.0116x + 2.5019$ $R^2 = 0.8301^*$	非活性孔度 Non-capillary porosity	$y = 0.115x + 1.8835$ $R^2 = 0.7766$
0.25 ~ 0.05 mm	$y = -0.0078x + 2.7109$ $R^2 = 0.9001^*$	活性孔度 Capillary porosity	$y = -0.0112x + 3.0272$ $R^2 = 0.8215^*$
0.05 ~ 0.01 mm	$y = 0.0074x + 2.1136$ $R^2 = 0.8769^*$	土壤孔隙度 Soil porosity	$y = -0.0137x + 3.2555$ $R^2 = 0.7766$
0.01 ~ 0.005 mm	$y = 0.0342x + 2.2373$ $R^2 = 0.7955^*$	有机质 Soil organic matter	$y = -0.0694x + 2.5197$ $R^2 = 0.7961^*$
0.005 ~ 0.001 mm	$y = 0.0258x + 2.2542$ $R^2 = 0.817^*$	全氮 Total nitrogen	$y = -1.3388x + 2.5302$ $R^2 = 0.7585$
<0.001 mm	$y = 0.0692x + 2.2794$ $R^2 = 0.9645^{**}$	全磷 Total phosphorus	$y = 4.6185x + 2.2023$ $R^2 = 0.8201^*$
>0.05 mm	$y = -0.003x + 2.697$ $R^2 = 0.0135$	碱解氮 Available nitrogen	$y = -0.0019x + 2.5214$ $R^2 = 0.6583$
<0.05 mm	$y = 0.0164x + 2.1758$ $R^2 = 0.6835$	速效钾 Available potassium	$y = 0.001x + 2.4071$ $R^2 = 0.7851$
容重 Bulk density	$y = 0.4727x + 1.908$ $R^2 = 0.8215^*$	氨态氮 Ammonia nitrogen	$y = 0.0243x + 2.178$ $R^2 = 0.6846$
土壤空隙比 Porosity ratio	$y = -0.2317x + 2.7845$ $R^2 = 0.8231^*$	硝态氮 Nitrate nitrogen	$y = -0.0241x + 2.5783$ $R^2 = 0.8100$

表4 不同退耕年限草地土壤容重及孔隙度特征

Table 4 Soil bulk density and soil porosity characters of grasslands during different restoration stages

样地号 Plot no.	土层/cm Soil layer (cm)	容重/ $g \cdot cm^{-3}$ Bulk density ($g \cdot cm^{-3}$)	土壤空隙比 Porosity ratio	非活性孔度/% Non-capillary porosity (%)	活性孔度/% Capillary porosity (%)	土壤孔隙度/% Soil porosity (%)
1 #	0 ~ 20	1.22 ±0.10	1.18 ±0.08	5.47 ±3.69	48.64 ±4.71	54.11 ±7.07
	20 ~ 40	1.32 ±0.09	1.01 ±0.05	5.95 ±2.66	44.16 ±4.75	50.11 ±6.21
	40 ~ 60	1.33 ±0.09	0.99 ±0.07	5.99 ±1.18	43.77 ±3.08	49.77 ±7.26
2 #	0 ~ 20	1.08 ±0.09	1.45 ±0.05	4.88 ±1.05	54.18 ±5.06	59.06 ±9.06
	20 ~ 40	1.09 ±0.07	1.44 ±0.07	4.91 ±1.19	53.95 ±2.37	58.86 ±5.29
	40 ~ 60	0.98 ±0.09	1.87 ±0.08	4.42 ±1.02	58.51 ±5.25	62.93 ±5.06
3 #	0 ~ 20	1.14 ±0.05	1.33 ±0.04	5.12 ±1.64	51.94 ±3.12	57.06 ±9.73
	20 ~ 40	1.07 ±0.06	1.47 ±0.06	4.83 ±0.83	54.64 ±2.36	59.47 ±8.95
	40 ~ 60	1.18 ±0.07	1.26 ±0.08	5.28 ±1.75	50.37 ±9.06	55.66 ±9.06
4 #	0 ~ 20	1.18 ±0.10	1.25 ±0.02	5.30 ±1.25	50.27 ±7.19	55.57 ±4.09
	20 ~ 40	1.16 ±0.11	1.29 ±0.01	5.24 ±0.85	50.82 ±9.62	56.06 ±6.42
	40 ~ 60	1.31 ±0.13	1.02 ±0.04	5.89 ±1.15	44.68 ±3.26	50.57 ±7.35
5 #	0 ~ 20	0.96 ±0.08	1.76 ±0.04	4.33 ±1.41	59.37 ±3.79	63.70 ±8.92
	20 ~ 40	1.05 ±0.07	1.03 ±0.05	5.87 ±2.25	44.93 ±4.72	50.80 ±7.02
	40 ~ 60	1.07 ±0.05	1.47 ±0.06	4.83 ±0.95	54.63 ±8.91	59.47 ±8.49

2.3 土壤分形特征与其物理和化学性质的关系

不同恢复年限草地的回归结果间的差异未达到显著水平,且由表2多重比较可看出,3个土层间的差异不显著,因此将草地的恢复年限及3个土层数据合并后,在各项指标间作回归分析。土壤微团粒的分形维数与土壤容重、非活性孔度之间存在一定的正相关,而与土壤活性孔度、土壤孔隙比表现出一定的负相关(表3)。因此土壤微团粒分形维数可作为定量描述土壤质地、紧实度和孔隙结构等方面的

综合指标。土壤微团粒分形维数与土壤养分的相关分析表明,其与有机质、全氮、碱解氮、和硝态氮呈负相关,且只与有机质的相关性达到显著水平($P < 0.05$),这是由于植被恢复可以在较短的时间内提高土壤表层养分的含量,但却不能迅速改变土壤的微团粒组成性状。与全磷、速效钾和氨态氮正相关且与全磷达到显著水平($P < 0.05$)。再次验证了土壤微团粒结构分形维数可作为表征土壤通透性、抗蚀性、稳定性及土壤肥力的理想指标^[25]。

表5 不同退耕年限草地土壤养分特征

Table 5 Soil nutrient characters of grasslands during different restoration stages

样地号 Plot no.	土层/cm Soil layer cm	有机质(g·kg ⁻¹) SOC(g·kg ⁻¹)	全氮(g·kg ⁻¹) (TN, g·kg ⁻¹)	全磷(g·kg ⁻¹) TP(g·kg ⁻¹)	碱解氮(mg·kg ⁻¹) AN(mg·kg ⁻¹)	速效钾(mg·kg ⁻¹) AK(mg·kg ⁻¹)	氨态氮(mg·kg ⁻¹) NH ₄ -N(mg·kg ⁻¹)	硝态氮(mg·kg ⁻¹) NO ₃ -N(mg·kg ⁻¹)
1 #	0~20	4.50 ±0.23	0.31 ±0.02	0.41 ±0.02	20.95 ±2.25	83.49 ±10.78	12.13 ±0.79	4.27 ±0.46
	20~40	2.41 ±0.47	0.18 ±0.02	0.38 ±0.01	4.41 ±0.89	62.79 ±7.42	11.44 ±0.78	3.52 ±0.46
	40~60	2.16 ±0.12	0.18 ±0.01	0.39 ±0.03	8.82 ±0.97	63.69 ±9.47	9.97 ±1.13	3.38 ±0.15
2 #	0~20	16.15 ±0.86	0.97 ±1.01	0.67 ±0.04	63.94 ±10.43	150.62 ±19.54	13.21 ±0.71	11.47 ±1.10
	20~40	10.05 ±0.86	0.64 ±0.07	0.62 ±0.05	37.48 ±5.11	78.68 ±5.46	12.50 ±0.87	8.98 ±1.12
	40~60	7.49 ±0.71	0.50 ±0.04	0.64 ±0.03	28.67 ±3.14	80.79 ±4.56	12.58 ±0.89	7.15 ±0.41
3 #	0~20	10.62 ±0.98	0.67 ±0.06	0.51 ±0.03	44.10 ±8.12	117.10 ±11.23	12.18 ±0.64	5.70 ±0.62
	20~40	10.11 ±0.63	0.52 ±0.04	0.58 ±0.05	34.18 ±7.23	81.54 ±6.15	11.66 ±0.78	5.04 ±0.52
	40~60	4.94 ±0.14	0.36 ±0.02	0.58 ±0.07	22.05 ±3.46	71.98 ±7.15	11.87 ±0.75	4.55 ±0.23
4 #	0~20	8.28 ±0.49	0.54 ±0.04	0.54 ±0.04	31.61 ±2.14	35.29 ±3.24	16.15 ±0.99	5.51 ±0.41
	20~40	4.46 ±0.46	0.34 ±0.02	0.53 ±0.04	20.21 ±1.79	36.36 ±8.56	16.70 ±1.15	4.93 ±0.32
	40~60	2.53 ±0.23	0.23 ±0.03	0.52 ±0.05	8.01 ±0.85	35.12 ±5.23	12.76 ±1.04	4.76 ±0.42
5 #	0~20	20.06 ±0.73	1.10 ±0.09	0.38 ±0.02	65.41 ±5.63	105.15 ±11.24	11.76 ±0.56	9.42 ±0.69
	20~40	6.00 ±0.63	0.39 ±0.06	0.42 ±0.01	24.25 ±3.25	51.20 ±2.46	9.13 ±0.79	6.60 ±0.41
	40~60	15.70 ±1.14	0.89 ±0.09	0.54 ±0.01	55.13 ±5.24	74.02 ±3.29	12.19 ±1.42	9.98 ±1.03

Note: SOC: soil organic matter; TN: total nitrogen; TP: total phosphorus; AN: available nitrogen; AK: available potassium; NH₄-N: ammonia nitrogen; NO₃-N: nitrate nitrogen

3 讨论与结论

通过对黄土丘陵区纸坊沟流域内不同恢复年限草地土壤的微团粒研究,表明分形维数的变化能很好地表征植被恢复演替过程中土壤的粗粒化和理化性质变化的趋势。因此,分形维数可以作为植被恢复演替过程中土壤质量定量评价的指标之一。

土壤粒径分布的分形维数不仅能表征土壤颗粒粒径大小的影响,而且能反映质地均一的程度,土壤颗粒分形维数越高,表征土壤结构越紧实,土壤质地粘重、通透性较差,而分形维数越小,则土壤质地相对松散、通透性较好^[6]。不同恢复年限的天然草地土壤 1~0.05 mm 粒级含量低于下层土壤的,随植被恢复年限的增长,土壤砂粒含量增加,分形维数变小,0.05~0.001 mm 粒级含量随土层加深而增大,且随恢复年限先增大后减小,而 <0.001 mm 粒级表现为随恢复年限的增长逐渐减小,<0.001 mm 粒级含量越多意味着土壤越紧实,通透性差。因此用土壤颗粒组成的分形维数来描述土壤质地是可行的。运用回归分析方法得出不同恢复年限草地 0~60 cm 剖面土壤微团粒分形维数均在 2.360~2.494 之间。随着草地恢复年限的增加表层分形维数减小,且土壤质地由粗到细变化使得颗粒大小分形维数由小到大变化。此外单一粒级的集中程度对分形维数的数值也会产生重要的影响,表明表层土壤分形维数与 <0.001 mm 粒级土壤微团粒含量之间呈

极显著正相关 ($P < 0.01$),而与 0.05~0.01、0.01~0.005 和 0.005~0.001 mm 之间呈显著正相关 ($P < 0.05$),与 1~0.25 和 0.25~0.05 mm 粒级含量相关性未达到显著水平。这为土壤微团粒分形维数作为反映土壤结构几何形体和分布均匀程度提供了依据。不同恢复年限土壤微团粒分形维数在土壤剖面上差异显著。

分形维数也可有效地表征不同植被恢复年限的草地土壤结构和养分的变化趋势。土壤微团粒的分形维数与土壤容重、非活性孔度、全磷、速效钾和氨态氮间存在正相关性,与土壤活性孔度、土壤孔隙比有机质、全氮、碱解氮和硝态氮表现出负相关。土壤分形特征能很好反映土壤理化性质特征及其演变过程,对深入探讨分形学在土壤结构性状与土壤肥力特征中的应用以及土壤综合评价具有重要意义,并有助于植被恢复研究中土壤形态、过程等复杂问题的解决,建立了草地土壤微团粒的分形维数与土壤物理和化学特征间的定量关系模型,可作为黄土丘陵区植被恢复过程中土壤性质描述的一项综合性定量指标,为评价该区不同植被恢复阶段草地生态系统提供新方法,对黄土丘陵生态环境的恢复与重建具有重要指导意义。

参考文献

- [1] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature [M]. San Francisco: Freeman, 1979. 236-237
- [2] Mandelbrot B B. Form, chance, and Dimension [M]. San Francisco: Freeman, 1977. 1-234

- [3] 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
- [4] Arya L M, Paris J F. A physical empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle size distribution and bulk density data [J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45: 1023-1031
- [5] Turcotte D L. Fractal fragmentation [J]. Geography Res., 1986, 91(12): 1921-1926
- [6] 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
- [7] Perfect E, Rasiyah V, Kay B D. Fractal dimensions of soil aggregate size distribution calculated by number and mass [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 1407-1409
- [8] 苏永中.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
- [9] Lovejoy S, Schertzer D, Silas P. Diffusion in one2dimensional multifractal porous media [J]. Water Resource Res., 1998, 34 (12): 3283-3291
- [10] 徐永福,田美存.土壤的分形微结构[J].水利水电科技进展,1996,16(1):25-29
- [11] 卢宗凡,梁一民,刘国彬.黄土高原生态农业[M].西安:陕西科学技术出版社,1997.15-18
- [12] 王国梁,刘国彬,刘芳.黄土丘陵区纸坊沟流域植被特点与生态交错带效应[J].西北植物学报,2002,22(5):1102-1108
- [13] 梁士楚,董鸣,王伯荪,等.英罗港红树林土壤粒径分布分形特征[J].应用生态学报,2003.14(1):11-14
- [14] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海科技出版社,1983.23
- [15] 官阿都,何毓蓉.金沙江干热河谷区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
- [16] Tyler S W, Wheatcrafu S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: analysis and limitations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 362-366
- [17] 张季如,朱瑞庚,祝文华.用粒径的数量分布表征的土壤分形特征[J].水利学报,2004,(4):67-71
- [18] 刘金福,洪伟.不同起源格氏栲林地的土壤分形特征[J].山地学报,2001,19(6):565-569
- [19] 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
- [20] 张蕴薇,韩建国,韩永伟,等.农牧交错带退耕还草对土壤物理性状的影响[J].草地学报,2002,10(2):100-105
- [21] 于志民,余新晓.水源涵养林效益研究[M].北京:中国林业出版社,1999.45-55
- [22] 林大仪.土壤学[M].北京:中国林业出版社,2002.57-67
- [23] 王堃,吕进英,邵新庆.沙漠化草地的恢复与重建途径[J].草地学报,2004,12(4):240-245
- [24] 程杰,高亚军.云雾山封育草地土壤养分变化特征[J].草地学报,2007,15(3):273-277
- [25] 何东进,洪伟,吴承祯,等.毛竹杉木混交林土壤团粒结构的分形特征研究[J].热带亚热带植物学报,2002,10(3):215-221

(责任编辑 梁艳萍)

(上接第 395 页)

- [7] Saile-Mark M, Tevini M. Effects of solar UV-B radiation on growth, flowering and yield of central and southern European bush bean cultivars [J]. Plant ecology, 1997, 128: 115-125
- [8] Li Y, Wang X. Effect of the enhanced UV-B irradiation on the spring wheat physiology, yield and quality [J]. Academic of Environment Science, 1998, 18(5): 12-18
- [9] Wang H, Yan P. Effects of enhanced UV-B radiation on seed germination and seedling growth of maize [J]. Academic of Chinese Agriculture, 2004, 20(3): 80-83
- [10] Yan B, Dai Q. Effect of the enhanced UV-B irradiation on both the active oxygen metabolism and the membrane system of the rice tissue [J]. Academic of Plant Physiology, 1996, 22(4): 30-38
- [11] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutase purification and quantitative relationship with water soluble protein in seedlings [J]. Plant Physiol., 1997, 59: 315-318
- [12] Zhao S, Li H, Sun Q, et al. The fundamental principle of the trial technique of bio-chemistry [M]. Beijing Publishing Company of High Education, 2000. 248- 250
- [13] Zhang S, Liu Z. The biology of anti-press in plant [M]. Beijing Publishing Company of Agriculture, 1994. 369-382
- [14] Chen Z, Guo S. Influence of enhanced UV-B radiation on crop morphology and physiological function Chinese [J]. Journal of Agrometeorology, 2006, 27(2): 102-106
- [15] Zhao P, Zeng X, Song G. A review response of terrestrial plants to enhanced UV-B radiation [J]. Chin J. Appl. Environ Biol., 2004, 10(1): 122-127
- [16] Li H, Zhuang Q, Shen W. Effects of ozone depletion induced UV-B increase on terrestrial plants [J]. Forum of 21 century youth scholars 2002, 21 世纪青年学者论坛. 23(4)
- [17] Yao J, Yu X, Qiu S, et al. Review of the Prospects for Mechanism of plant drought tolerance [J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2007, 22 (增刊): 51-56
- [18] Sun C, Cheng X, Liu Z. Status and advances in studies on the physiology and biochemistry mechanism of crop drought resistance [J]. Rain Fed Crops, 2002, 22 (5): 285-288
- [19] McCord J M. Superoxide dismutase: an enzymic function for erythrocyte [J]. Biol. Chem., 1969, 224: 6049-6055
- [20] Li Y, He Y, Zu Y. Effect of enhanced UV-B radiation on physiological metabolism, DNA and protein of crops: a review [J]. Chinese J. of Applied Ecology, 2006, 17(1): 25-32

(责任编辑 孟昭仪)