

黄土丘陵区不同土地利用方式 土壤团粒结构分形特征

周萍^{1,2}, 刘国彬^{1,3}, 侯喜禄¹

(11 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌; 21 中国科学院研究生院, 100049, 北京;
31 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌)

摘要 土壤团粒、水稳性团粒和微团粒状况是影响土壤结构和性质的重要因素。运用分形理论研究黄土丘陵区纸坊沟流域7种不同土地利用方式土壤团粒结构的分形特征。结果表明: 表层土壤团粒的分形维数在11641~21114之间, 其大小顺序为人工草地> 果园> 坡耕地> 乔木林地> 灌丛> 天然草地> 人工梯田。土壤水稳性团粒的分形维数在11774~21384之间, 其变化顺序为果园> 乔木林地> 人工草地> 坡耕地> 天然草地> 人工梯田> 灌丛, 二者均表现出0.025 mm 粒级土壤团粒含量越低, 分形维数越高的规律; 分形维数与0.5 mm、5~2 mm 和0.025 mm 粒级的土壤团粒、水稳性团粒呈极显著负相关($P < 0.01$), 与<0.025 mm 粒级的呈极显著正相关($P < 0.01$); 结合团粒结构体破坏率可知, 灌丛土壤结构与稳定性最好, 其次为天然草地, 人工草地最差; 表层土壤微团粒结构分形维数在21360~21487之间, 大小顺序为天然草地> 乔木林地> 坡耕地> 人工梯田> 人工草地> 果园> 灌丛, 灌丛有助于促进土壤微结构形成, 分形维数与0.025~0.05 mm 和>0.001 mm 粒级土壤微团粒含量呈极显著负相关($P < 0.01$), 与<0.001 mm 粒级土壤微团粒含量呈极显著正相关($P < 0.01$); 下层土壤质地主要与成土母质有关, 人为干扰小, 3种分形维数间存在显著正相关水平($P < 0.05$), 土壤有机质含量与3种分形维数显著负相关($P < 0.05$)。土壤团粒结构分形特征可作为土壤评价指标之一, 分形理论为土壤结构、性质和评价研究提供了新方法。

关键词 团粒; 微团粒; 土地利用方式; 分形维数; 黄土丘陵区

Fractal features of soil aggregate structure under different land use in the Hilly2gully region of Loess Plateau

Zhou Ping^{1,2}, Liu Guobin^{1,3}, Hou Xilu¹

(11 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi;
21 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing; 31 Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi: China)

Abstract The status of soil aggregates, water stable aggregates and microaggregates are important factors affecting soil structures and features. Based on the fractal theory, the fractal dimension of soil aggregates and microaggregates structure under seven different land use types in Zhifang Hilly2gully region was studied. The results showed that: the fractal dimension of the upper layer (0 to 20 cm) soil aggregate structure under these seven land use types ranged from 11641 to 21114. The fractal dimension of soil aggregate of artificial meadow was highest, followed by orchard, slope crop2land, arbor forest land, shrub land, natural meadow and artificial terrace. The fractal dimension of water stable soil aggregate ranged from 11744 to 21384, the fractal

收稿日期: 2007205209 修回日期: 200820220

项目名称: 中国科学院西部行动计划/黄土高原水土保持与可持续生态建设试验示范研究0(KZCX2XB205); 国家重点基础研究发展计划/中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究0(2007CB407205); 国家自然科学基金重点项目/黄土高原生态恢复的环境效应及评价0(90502007)

第一作者简介: 周萍(1981), 女, 博士研究生。主要研究方向: 植被恢复和生态系统服务功能。E2mail: zhouping04@mails.gu2cas.ac.cn

责任作者简介: 刘国彬(1958), 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 水土保持与流域管理。E2mail: gblu@ms.iswc.ac.cn

dimension of orchard water stable soil aggregate of artificial meadow was highest, followed by arbor forest land, artificial meadow, slope cropland, natural meadow, artificial terrace and shrub land. Both of the conditions showed the same law: The lower total amount of the soil aggregates (more than 0.25 mm) was, the higher fractal dimension was. There were remarkable negative correlation between the fractal dimension and not less than 5 mm, 5 to 2 mm and not less than 0.25 mm soil aggregates and water stable aggregates contents. But significant positive correlation with less than 0.25 mm soil aggregates. Considered the rate of soil structural damage, the soil structure and stability of shrub land was the highest, the next was natural meadow, artificial meadow was the lowest among these seven land use types. In the upper soil layer (0 to 20 cm) the range of fractal dimension of soil microaggregate was 2.1360 to 2.1487. The fractal dimension of soil microaggregate of natural meadow was highest, followed by arbor forest land, slope cropland, artificial terrace, artificial meadow, orchard, and shrub land was the lowest of that. It was showed that shrub land and natural meadow were beneficial to forming soil microaggregates. The correlation analysis results showed that fractal dimension had remarkable negative correlation with 0.125 to 0.105 mm and more than 0.1001 mm microaggregates, also had positive correlation with less than 0.1001 mm microaggregates. But the soil texture of lower layers (20 to 60 cm) were relevant to the parent material and little affected by human beings activities. There existed significant positive correlation among three fractal dimensions ($P < 0.05$), also had negative correlation between soil organic matter and fractal dimensions ($P < 0.05$). The fractal dimension could be one of the indices of soil quantity evaluation. The fractal theory was also considered as a new tool to research on the soil structure and features.

Key words soil aggregate; microaggregate; land use types; fractal dimension; Hilly-gully region of Loess Plateau

Mandelbort 在他的专著^[12]中提出了分形和分形维数的概念,为研究不规则事物提供了有效方法。P. A. Burrough^[3]又将分形应用到自然生态和环境学科领域中,分形理论成为当代新兴的学术思想,具有较大的应用潜力。土壤由大小与形状各异的土壤颗粒组成,表现出不规则几何形状且具有自相似性,说明土壤是具有分形特征的系统^[45]。20 世纪 80 年代起,分形理论应用到土壤学领域中的土壤结构、水分特征以及溶质转移等方面的研究中^[69],推动了土壤形态、结构、过程等问题的解决,并在一定程度上使其定量化^[10,11]。土壤团粒结构是反映土壤特征和评价土壤质量的重要指标之一,其表征形式有土壤团聚体组成、水稳性团聚体组成、微团聚体组成等。不同土地利用方式对土壤团粒的形成、数量和质量有重要影响。关于土壤团粒结构的数量和质量特征,一般从团粒粒径质量百分比和 MWD(平均质量直径)等方面进行分析,但这不能完全反映土壤团粒结构对土壤性质的综合影响。K. J. Falconer^[12]、L. M. Arya 等^[13]首先研究了土壤颗粒的分形现象及其分形维数的计算,D. L. Turcotte^[4]又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^[14]提出了用粒径的质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。

黄土丘陵区植被生态恢复过程中,土壤质量评价,微生物量碳氮,土壤侵蚀,养分流失和土壤肥力退化等研究已有报道,但有关土壤团粒变化的研究不多,且涉及不同土地利用方式的研究仅局限于土壤性质的测定,对土壤团粒结构分形维数的研究较少。笔者试图在前人研究的基础上,以黄土丘陵区纸坊沟流域为研究单元,根据实测资料,运用分形理论描述不同土地利用方式的土壤团粒结构分形维数特征及其结构特性,探讨不同土地利用方式对土壤结构和土壤性质的影响,以为流域植被恢复及土壤肥力特征描述提供新尺度和新方法,为合理利用土地和制订切实可行的水土保持措施提供基本依据。

1 研究区概况

研究区位于陕西省安塞县纸坊沟小流域, E 109°13'46"~ 109°16'03", N 36°42'42"~ 36°46'28", 海拔 1 100~ 1 400 m, 流域面积 8 127 km², 属黄土丘陵沟壑区第 2 副区, 暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡地区, 年日照时间 2 415.16 h, 年辐射量 5 521.7 kJ/

cm², 年平均气温 818 e, \ 0 e 积温 3 73315 e, \ 10 e 积温 3 11319 e, 无霜期 157~ 194 d。年平均降雨量 54215 mm, 分布不均, 7、8、9 月份降雨量占全年降雨量的 6111%, 且多暴雨。流域植被属于暖温带落叶阔叶林区向暖温带草原区过渡的森林草原植被。1938) 1973 年, 由于毁林开荒及人类活动的影响, 地带性植被已经破坏殆尽, 流域生态系统严重退化^[15]。

2 研究方法

211 样地选择和样品采集 为研究纸坊沟流域内不同土地利用方式土壤团粒、水稳性团粒和微团粒的变化特征, 根据流域地貌特征、植被和土地利用状况, 以典型性和代表性为原则, 于 2006 年 9 月中旬,

在坡向、坡度、坡位和海拔基本一致的刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 乔木林地, 狼牙刺 (*Sphora davidii*) 灌丛, 铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*) 2 茭蒿 (*Artemisia gi2 raldii*) 2 长芒草 (*Stipa bungeana*) 天然草地, 玉米 (*Zea mays*) 人工梯田, 苜蓿 (*Medicago sativa*) 人工草地, 苹果 (*Malus pumila* Mill) 果园和茵陈蒿 (*Artemisia capil2 laries*) 2 香青兰 (*Dracoccephalum moldavica*) 坡耕地等不同地上分别选取 30 m @30 m 的标准地 (表 1)。在各样地上挖取表层 0~ 20 cm 土壤剖面并采集 1 kg 原状土样 (用硬质铝盒装好, 保证不受挤压) 备用, 各样地均设 3 次重复, 再用直径为 3 cm 的土钻, 采用蛇形五点取样法, 采集 0~ 20、20~ 40 和 40~ 60 cm 土壤样品, 也均设 3 次重复, 并用 GPS 定位, 详细记录采样点周围的景观信息。

表 1 样地的基本情况

Tab. 1 General information of sites

土地利用方式	植被类型	地貌部位	坡向	坡度/(b)	坡位	海拔/m	土壤类型
乔木林地	刺槐	梁坡	NW45	26	坡中上部	1 249	黄绵土
灌丛	狼牙刺	梁坡	N45W	24	坡中部	1 029	黄绵土
天然草地	铁杆蒿, 茭蒿, 长芒草	梁坡	S20E	18	坡中部	1 286	黄绵土
人工梯田	玉米	梁坡	N	22	坡中上部	1 175	黄绵土
人工草地	苜蓿	梁坡	NE	24	坡中部	1 207	黄绵土
果园	苹果	梁坡	S 20E	22	坡中部	1 121	黄绵土
坡耕地	茵陈蒿, 香青兰	梁坡	E	22	坡中上部	1 315	黄绵土

212 样品分析测试

土壤团聚体分离方法: 依据 I. C. Mendes 等^[16]和彭新华等^[17]的干筛和湿筛法进行土壤团粒和水稳性团粒的分离。用英国马尔文公司的 MS2000 型激光粒度仪测定土壤微团粒含量。

213 分形维数模型

前人研究表明, 土壤是具有分形特征的系统^[45]。运用分形理论建立土壤团粒结构的分形模型^[11219]: 粒径 d_i 小于某一特定测量尺度的累积土粒质量 m_i 与 d_i 之间的分形关系式为

$$(d_i / d_{max})^{3-D} = m_i / m_0$$

式中: d_{max} 为最大土粒的粒径, mm; m_i 为粒径大于 d_i 的累积土粒质量, kg; m_0 为各粒级质量的总和, kg; D 为分形维数。

分别以 $\lg(m_i / m_0)$ 、 $\lg(d_i / d_{max})$ 为纵、横坐标作图, 则 3- D 是该实验直线的斜率, 故可用回归分析方法对土壤分形维数 (D) 进行测定。

214 数据统计分析

对所得实验数据用 Excel 和 SPSS 1110 统计分析软件进行分析处理。

3 结果分析

不同土地利用方式表层土壤团粒及水稳性团粒的组成及分形维数统计结果见表 2。

311 不同土地利用方式土壤团粒及水稳性团粒组成分析

由表 2 可以看出, 7 种土地利用方式中, 表层土壤团粒 (干筛) 状况为: \ 5 mm 粒径的土壤团粒含量变化范围在 40126%~ 69160% 之间, 变化顺序为人工梯田 > 乔木林地 > 灌丛 > 天然草地 > 坡耕地 > 果园 > 人工草地; 5~ 2 mm 粒径的土壤团粒含量变化范围在 8104%~ 15161% 之间, 果园, 人工草地, 坡耕地和人工梯田在这个粒级的含量高于天然草地、灌丛和乔木林地, 表明人为活动强烈的土地利用方式在这一粒径范围内土壤团粒含量高于天然的、未经人为扰动或人为干预较少的土地利用方式, 乔木林地和灌丛土壤团粒在这一粒径范围内的含量仅占 8104% 和 8153%, 这与乔木和灌丛的根系在表土层的分布状况有很大的关系; 在 2~ 1 mm、1~ 015 mm 和 015~ 0125 mm 粒径范围内, 果园表土的土壤团粒

占的比例大于其他土地利用方式, 分别达到 8173%、7188% 和 4172%, 这与果园每年的施肥有关, 施用有机肥, 特别是有机肥和无机肥配施有利于增加 2~ 1 mm, 1~ 0.15 mm 和 0.15~ 0.125 mm 团聚体含量, 不同粒径的团粒在营养元素的保持、供应及转

化能力等方面发挥着不同的作用^[20]。0.125~ 2 mm 团聚体是土壤肥力的重要物质条件, 可用该粒径团粒的相对增加来评价植被恢复或土壤改良措施的土壤生态效应^[22,22]; < 0.125 mm 粒径的土壤团粒含量最大的为天然草地, 最小的为人工草地。

表 2 不同土地利用方式土壤团粒及水稳性团粒组成及分形维数

Tab. 2 Composition of soil aggregate and water stable soil aggregate and fractal dimension under different land use

土地利 用方式	处理 方法	土壤团粒组成/% (均值? 标准差)						结构体 破坏率/%	相关 系数	分形 维数
		< 5 mm	5~ 2 mm	2~ 1 mm	1~ 0.15 mm	0.15~ 0.125 mm	< 0.125 mm			
乔木林地	干筛	62146? 1612	8104? 0169	4162? 0158	4152? 0114	3107? 0178	17129? 12156	42124? 14120	01952? 01017	11974? 01017
	湿筛	29130? 2111	3100? 0145	4110? 0126	5130? 0126	6110? 0129	52120? 14159		01943? 01015	21382? 01022
灌丛	干筛	60163? 1218	8153? 2132	6107? 0174	5137? 0189	3101? 0111	16140? 1145		01964? 01014	11963? 01028
	湿筛	69110? 1314	9140? 1198	3190? 0116	3160? 0114	1170? 0126	12130? 11120		01962? 01012	11774? 01051
天然草地	干筛	60109? 1512	10126? 2101	6123? 1123	4193? 0169	2197? 0176	9116? 1112		01977? 01007	11942? 01021
	湿筛	33170? 8126	10140? 1125	6100? 2114	5130? 0146	3120? 0191	20160? 6159	12158? 1125	01973? 01005	21003? 01019
人工梯田	干筛	69160? 1110	10162? 5160	3196? 0124	2181? 0109	1155? 0115	11147? 10132	26179? 9112	01979? 01002	11641? 01064
	湿筛	48170? 6147	6120? 0189	3130? 0117	4140? 0126	2120? 1101	35120? 10136		01953? 01003	11983? 01018
人工草地	干筛	40126? 9155	13165? 4156	6195? 1154	6150? 0147	4103? 0178	28161? 9112		01984? 01006	21114? 01018
	湿筛	12160? 3121	2110? 0169	2180? 0146	4140? 0156	3160? 0123	74150? 12160	64140? 9156	01945? 01004	21344? 01017
果园	干筛	48127? 1113	15160? 4126	8173? 0169	7188? 0187	4172? 0158	14180? 2159	38138? 5162	01984? 01001	21107? 01021
	湿筛	29140? 6112	3180? 0112	4190? 0156	8170? 1156	5170? 0198	47150? 5198		01939? 01005	21384? 01014
坡耕地	干筛	60109? 1412	14117? 1156	5186? 0169	4116? 0119	2140? 0104	13132? 2165		01950? 01012	21000? 01029
	湿筛	33170? 9188	4110? 0145	4100? 0187	6150? 0126	5170? 0125	46100? 9169	38187? 11176	01939? 01009	21283? 01019

从表 2 也可看出, 7 种土地利用方式中, < 5 mm 的水稳性团粒(湿筛)变化顺序为灌丛> 人工梯田> 天然草地> 坡耕地> 果园> 乔木林地> 人工草地, < 0.125 mm 粒径的土壤水稳性团粒含量最高的为灌丛, 最小的为人工草地。可见, 无论是 < 5 mm 还是 < 0.125 mm 粒径, 灌丛土壤水稳性团粒含量在所有土地利用方式中最高, 说明灌丛土壤组成状况最好, 土壤结构稳定, 这与灌丛长期自然演替过程中冠幅具有多层次结构、地上部分持水量大且每年有大量的凋落物归还土壤, 土壤腐殖质积累多, 利于土壤水稳性团粒的形成有关。人工草地 < 0.125 mm 土壤水稳性团粒最小, 这可能与其表层土壤人为扰动较大, 破坏了表土的土壤团粒结构, 使土壤的抗冲性减弱有关。

7 种土地利用方式中, 表土团粒结构体的破坏率表现为人工草地> 乔木林地> 坡耕地> 果园> 人工梯田> 天然草地> 灌丛, 其中, 结构体破坏率最大的人工草地是结构体破坏率最小的灌丛的 14 倍左右。天然草地由于其根系分布较浅且须根发达, 表层土壤团粒的破坏率也相对较小, 由此可知, 对于黄

土高原特殊的地形地貌及侵蚀环境, 植被恢复过程中保护天然草灌措施是必要的。乔木林地表层土壤团粒的结构体破坏率达到 42142%, 这与其根系发达且扎根较深, 表层土中分布的根量较少有关。人工草地的结构体破坏率在各种土地利用方式中最大, 表明其结构和稳定性较差, 这可能是因为人工草地地表枯落物极少, 土壤腐殖质含量相对较少, 加之开垦耕种人为活动干扰强烈所致。综合干、湿筛法, 灌丛土壤结构与稳定性最好, 其次为天然草地。

3.1.2 不同土地利用方式土壤团粒及水稳性团粒分形特征

土壤团粒结构分形维数反映了它对土壤结构与稳定性的影响趋势, 即团粒结构的分形维数愈小, 土壤愈具有良好的结构与稳定性^[23]。以 $\lg(m/m_0)$ 和 $\lg(d_i/d_{max})$ 为纵、横坐标, 应用回归分析方法计算出 7 种土地利用方式土壤团粒结构的分形维数。由表 2 可以看出, 回归分析的相关系数均在 0.93 以上且达到极显著水平 ($P < 0.01$), 表层土壤团粒(干筛)结构的分形维数在 1.1641~ 2.1114 之间, 其变化顺序为人工草地> 果园> 坡耕地> 乔木林地> 灌丛> 天

然草地> 人工梯田, 基本表现为 \ 0125 mm 粒径的团粒含量越低, 其分形维数越高, 这与丁文峰等^[24]的研究结果一致。

7 种土地利用方式表层土壤水稳性团粒(湿筛)的分形维数在 11774~ 21384 之间, 其变化顺序为果园> 乔木林地> 人工草地> 坡耕地> 天然草地> 人工梯田> 灌丛, 也表现出 \ 0125 mm 粒径的团粒含量越低, 其结构的粒径分布分形维数越高的规律。通过分形维数与土壤团粒、水稳性团粒间的相关性分析结果(表 2)可看出, \ 5 mm, 5~ 2 mm 和 \ 0125 mm 的团粒与分形维数呈显著负相关, 与 < 0125 mm 粒径的土壤团粒和结构体破坏率显著正相关。同时土壤团粒结构的分形维数也反映了 \ 0125 mm 粒径的土壤团粒、土壤水稳性团粒的分形维数越小, 则

土壤越具有良好的结构与稳定性。7 种土地利用方式中, 人工草地土壤团粒干筛的分形维数最高, 而果园土壤团粒湿筛的分形维数最高, 且人工草地的土壤结构体破坏率最高。表明人工草地土壤的结构与稳定性在 7 种土地利用方式中最差, 土壤团粒孔隙分布最不均匀, 通透性差, 这可能是土壤腐殖质含量相对较少, 有机物分解和腐殖质再合成的强度较弱, 使土壤中的养分易于流失有关。从一个侧面反映了土壤团粒结构分形维数越大, 土壤肥力越低。

3.1.3 不同土地利用方式土壤微团粒组成及其分形特征

7 种土地利用方式不同土层深度土壤微团粒组成及其分形维数统计结果如表 3 所示。

表 3 不同土地利用方式不同土层深度土壤微团粒组成及其分形维数

Tab. 3 Composition analysis of soil microaggregates and fractal dimension of different soil layers under different land use

土层深度 cm	微团粒/mm	土壤微团粒组成/(均值±标准差)						
		乔木林地	灌丛	天然草地	人工梯田	人工草地	果园	坡耕地
0~ 20	[1~ 0125]	3136±0159	11191±2115	4152±1106	0175±0106	0193±0124	3133±1123	1145±0114
	(0125~ 0105]	29158±9147	44108±16154	30110±1112	35165±4156	32111±11172	33185±14121	31158±10156
	(0105~ 0101]	47162±14137	33125±8126	45159±15162	47115±9118	50170±16189	46137±16198	50117±12136
	(0101~ 01005]	7125±3175	4146±1103	7143±0196	6112±0146	6126±1126	6137±0156	6121±1110
	(01005~ 01001]	9138±2114	5107±1156	9152±2165	7154±1145	7139±2101	7160±1114	7149±1149
	< 01001	2181±1101	1123±0198	2170±0105	2179±0107	2161±0197	2148±1110	3109±0197
	分形维数	21484±01029	21360±01019	21487±01014	21469±01031	21460±01023	21458±01019	21481±01021
相关系数	01908±01005	01943±01002	01911±01005	01920±01004	01914±01003	01919±01001	01917±01004	
20~ 40	[1~ 0125]	0131±0109	5151±1126	1175±0104	1112±0104	0100±0103	0100±0102	0170±0104
	(0125~ 0105]	28144±8149	40124±8197	30119±10121	30143±8192	31196±16198	34190±11178	29112±10123
	(0105~ 0101]	52109±16143	40142±6141	49161±14120	50198±12146	53181±17114	49158±15146	53162±15169
	(0101~ 01005]	7113±1197	5127±0198	7104±1147	6141±2151	5154±1123	5173±2110	6143±0149
	(01005~ 01001]	8196±2116	6124±1102	8166±2116	8131±3125	6128±2165	7124±1178	7113±0178
	< 01001	3108±0197	2133±0189	2174±0149	2175±0147	2141±1102	2154±0169	3101±0115
	分形维数	21490±01039	21442±01031	21475±01015	21472±01036	21439±01021	21455±01019	21475±01016
相关系数	01906±01005	01936±01007	01909±01001	01910±01002	01912±01002	01917±01006	01912±01004	
40~ 60	[1~ 0125]	0162±0109	)	1102±0104	0180±0117	0125±0104	0129±0109	0137±0121
	(0125~ 0105]	28164±5147	)	30199±10141	32158±14121	30128±6145	31131±5198	32108±8147
	(0105~ 0101]	53107±14101	)	50102±15169	49177±16143	53168±12123	50152±17182	53145±14156
	(0101~ 01005]	6193±5196	)	6172±2156	6117±0126	6131±2146	6165±1121	5150±0158
	(01005~ 01001]	7198±1142	)	8145±1147	7192±2113	6191±1142	8141±1108	5190±0149
	< 01001	2177±0119	)	2181±0114	2176±0149	2157±0169	2181±0179	2169±0147
	分形维数	21471±01033	)	21476±01016	21470±01031	21453±01028	21475±01021	21451±01011
相关系数	01907±01003	)	01911±01002	01914±01002	01910±01007	01910±01003	01915±01005	

由表 3 可以看出: 表层(0~ 20 cm) 土壤 1~ 0.125 mm 粒径的微团粒含量由大到小顺序为灌丛> 天然草地> 乔木林地> 果园> 坡耕地> 人工草地> 人工梯田。0.125~ 0.101 mm 粒径范围内土壤微团粒含量相差不大, 变动范围在 75.169% ~ 82.181% 之间。0.101~ 0.1001 mm 粒径下土壤微团粒含量变化顺序为天然草地> 乔木林地> 人工梯田> 人工草地> 果园> 坡耕地> 灌丛。

20~ 40 cm 土层中, 1~ 0.125 mm 粒径土壤微团粒含量的变化趋势和表层相同, 只是变化范围仅在 51.51% ~ 0 之间, 在这一土层范围内最低。7 种土地利用方式土壤微团粒含量都集中在 0.125~ 0.105 mm 和 0.105 ~ 0.101 mm 中, 变化范围在 79.180% ~ 85.177% 之间, 这 2 个粒径范围的土壤微团粒含量也受人为干扰活动影响很大。在 0.101~ 0.1005 mm 和 0.1005~ 0.1001 mm 范围的土壤微团粒的含量也表现出人工土地利用方式小于天然土地利用方式的规律, 但其土壤微团粒的含量仅占到 11.51% ~ 16.109%。 < 0.1001 mm 粒径的土壤微团粒含量几乎无差异, 最大是乔木林地, 最小是灌丛。

在 40~ 60 cm 土层中, 由于灌丛土壤中的石渣含量高而未进行分析, 其余 6 种土地利用方式 1~ 0.125 mm 粒径的土壤微团粒含量只有天然草地大于 1%, 其他土地利用方式含量大小顺序为天然草地> 人工梯田> 乔木林地> 坡耕地> 果园> 人工草地。0.125~ 0.101 mm 粒径的土壤微团粒含量变化范围在 81.101% ~ 85.153% 之间, 最大的是坡耕地, 最小的是天然草地。0.125~ 0.101 mm 粒径的土壤微团粒含量和 > 0.1005 mm 粒径的土壤微团粒含量表现出相同的变化规律。 < 0.1001 mm 粒径的土壤微团粒含量变化范围在 21.57% ~ 21.81% 之间, 几乎无差异, 说明这一粒径的土粒受土地利用方式影响很小。灌丛和天然草地 1~ 0.105 mm 土壤微团粒含量偏高, 这与灌丛和天然草地组成复杂, 土壤腐殖质积累多, 有机质含量高有关。综合土壤剖面来看, 天然草地和灌丛变化幅度较大, 说明这 2 种土地利用方式对于土壤微团粒结构的形成有促进作用。

同样, 利用回归分析法计算 7 种土地利用方式

土壤微团粒结构分形维数特征的变化规律, 可知 0~ 20 cm 表层土壤的分形维数在 21360~ 21487 之间, 变化顺序为天然草地> 乔木林地> 坡耕地> 人工梯田> 人工草地> 果园> 灌丛。表层各粒级微团粒含量与分形维数之间相关分析结果表明: 1~ 0.125 mm, 0.125~ 0.105 mm 和 > 0.1001 mm 粒级的土壤微团粒与分形维数表现为极显著负相关($P < 0.101$), 而 < 0.1001 mm 粒级的土壤微团粒与分形维数表现为极显著正相关($P < 0.101$); 20~ 40 cm 土层的分形维数变化顺序为乔木林地> 坡耕地> 天然草地> 人工梯田> 果园> 灌丛> 人工草地, 此土层土壤微团粒在 1~ 0.125 mm 粒径区间的分形维数变化趋势和表层土壤微团粒含量变化相一致; 40~ 60 cm 土层的土壤微团粒分形维数变化顺序为天然草地> 果园> 乔木林地> 人工梯田> 人工草地> 坡耕地> 灌丛, 该土层土壤质地与母质形成发育过程有关, 受人为活动干扰较小。总体来看, 不同土地利用方式剖面土壤微团粒分形维数变化较大, 表层土壤微团粒的分形维数变化规律与相应的土壤团粒含量变化趋势相似, 而表层土壤的改变体现了人类活动干扰对于土壤性质的影响, 因此, 土壤微团粒的分形维数可表征土壤结构质量的高低。

3.1.4 土壤团粒、水稳性团粒和微团粒的分形维数比较及与土壤抗蚀性关系分析

分形维数可以在一定程度上反映土壤团粒, 水稳性团粒和微团粒的含量、土壤均一性、土壤通透性、抗蚀性、土壤肥力等并揭示其规律性。从土壤团粒、水稳性团粒和微团粒的分形维数与土壤抗蚀性关系分析(表 4)可知, 这 3 种分形维数之间存在正相关关系, 且土壤团粒和水稳性团粒分形维数间的相关性达到显著水平($P < 0.105$), 水稳性团粒分形维数与土壤密度、有机质间存在显著负相关关系($P < 0.105$)。土壤微团粒分形维数与有机质间存在显著负相关关系($P < 0.105$), 这与 V. Rasiyah 等^[25]的研究结果相同。可以说干扰增强, 导致土壤有机质来源和土壤中具有强团聚能力的有机质减少, 因此, 土壤团粒分形维数增加。土壤全氮和有机质间的正相关关系也达到显著性水平($P < 0.105$)。

表 4 3 种分形维数与土壤性质的相关分析

Tab. 4 Correlation analysis between three fractal dimension and soil characters

	团粒分形维数	水稳性团粒分形维数	微团粒分形维数	土壤密度	土壤全氮	土壤有机质
水稳性团粒分形维数	0.1786*	0.1000	0.1429	- 0.1900*	- 0.1686	- 0.1850*
微团粒分形维数	0.1107	0.1429	0.1000	- 0.1607	- 0.1214	- 0.1786*
土壤密度	- 0.1071	- 0.1900*	- 0.1607	0.1000	- 0.1179	- 0.1714*
土壤全氮	- 0.1250	- 0.1686	- 0.1214	- 0.1179	0.1000	0.1779*

注: * 0为 $P < 0.105$ 。

4 结论与讨论

1) 黄土丘陵区纸坊沟流域内 7 种不同土地利用方式土壤团粒结构(干筛)的分形特征研究结果表明,天然草地、灌丛和人工梯田的土壤团粒分形维数较其他土地利用类型的低,土壤结构团聚状况好、稳定性高、破坏率小、抗侵蚀能力强、保持水土和改善土壤肥力功能强,而人工草地最差。针对黄土丘陵区的黄土特性和侵蚀环境,加强草地和灌丛地的保护,对保持和提高物种多样性,改善生态环境意义重大。土壤团粒和水稳性团粒分形维数的变化规律不一致,需进一步加强分形学在土壤结构性状与土壤肥力特征方面的研究。笔者所讨论的 7 种土地利用方式土壤结构分形特征差异基本表现为天然草地利用方式下的分形维数小于受人为活动干扰较大的人工草地土地利用方式的分形维数,至于人为活动是如何影响土壤结构和性质的、影响程度如何等问题仍有待深入探讨和研究。

2) 通过分形维数与土壤团粒、水稳性团粒各粒径的相关性分析可知: 5 mm 、 $5\sim 2\text{ mm}$ 和 0.125 mm 团粒与分形维数呈极显著负相关关系,与 $< 0.125\text{ mm}$ 粒径的团粒和结构体破坏率显著正相关,而表层微团粒与分形维数间关系为 $1\sim 0.125\text{ mm}$ 、 $0.125\sim 0.105\text{ mm}$ 和 $> 0.1001\text{ mm}$ 粒级的微团粒与分形维数呈极显著负相关关系, $< 0.1001\text{ mm}$ 粒级的微团粒与分形维数呈极显著正相关关系。单一粒径的集中程度对分形维数的数值也产生重要影响。团粒和水稳性团粒分形维数间的相关性达到显著水平 ($P < 0.105$),有机质与 3 种分形维数显著负相关 ($P < 0.105$),水稳性团粒分形维数与土壤密度间也存在显著负相关关系 ($P < 0.105$)。

3) 不同土地利用方式土壤微团粒的分形维数在不同土层剖面变化较大。表层土壤分形维数变化规律与相应土壤微团粒含量变化趋势相似,表层土壤的改变体现了人类活动干扰对于土壤性质的改变,因此,土壤微团粒的分形维数也可以表征土壤结构质量的高低。下层土壤质地情况与成土母质形成发育过程有关,受人为活动干扰较小。流域不同土地利用方式土壤的微团粒分形维数存在较大差异,其中,天然草地和灌木林地有助于土壤微团粒的形成。

4) 在计算土壤团粒和微团粒分形维数时采用双对数线性回归法,此法是将非线性模型参数的求解转化为线性模型参数的求解,求解得到的参数即

分形维数对于双对数后的线性方程而言是最优的,但对于原分形模型不一定是最优的;因此,建议在进行土壤团粒分形维数计算时采用其他的最优化方法直接求解模型的分形维数,如采用遗传算法、改进单纯形法等^[26],以期在一定程度上提高所计算分形维数的精度。

5 参考文献

- [1] Mandelbrot B B. Fractal geometry and Dimension. San Francisco: Freeman, 1977: 12234
- [2] Mandelbrot B. The fractal geometry of nature, San Francisco: Freeman. 1979: 2362237
- [3] Burrough P A. The fractal dimension of landscapes and other environmental data. Nature, 1981, 294: 240242
- [4] Turcotte D L Fractal fragmentation. Geography Res, 1986, 91 (12): 19201926
- [5] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: Application. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55: 1231238
- [6] Michel R, Garison S. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: Applications. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55: 12301244
- [7] Perfect E, Rasiah V, Kay B D. Fractal dimensions of soil aggregate size distributions calculated by number and mass. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 14071409
- [8] Rasiah V, Kay B D, Perfect E. New mass-based model for estimating fractal dimensions of soil aggregates. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57: 892895
- [9] Scott W T, Stephen W W. Fractal scaling of soil particles size distributions: Analysis and limitation. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 362369
- [10] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望. 土壤学进展, 1994, 22(1): 1210
- [11] 林鸿益, 李映雪. 分形论: 奇异性探索. 北京: 北京理工大学出版社, 1992: 4048
- [12] Falconer K J. Fractal geometry: John Wiley and sons. Fractal geometry, 1989: 80159
- [13] Arya L M, Paris J F. A physical empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle size distribution and bulk density data. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45: 102321031
- [14] 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. 科学通报, 1993, 38(20): 189621899
- [15] 卢宗凡, 梁一民, 刘国彬. 黄土高原生态农业. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997: 1018
- [16] Mendes I C, Bandick A K, Dick R P, et al. Microbial biomass and activities in soil aggregates affected by winter

- cover crops. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 872-881
- [17] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2003, 23(10): 1722-183
- [18] Katz A J, Thompson A H. Fractal Sandstone Pores: Implications for conductivity and pore formation. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, 54(12): 1322-1328
- [19] 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. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 12-14
- [20] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价. *土壤学报*, 2001, 38(1): 42-53
- [21] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤团聚体及其有机碳的变化. *土壤通报*, 2000, 31(5): 192-195
- [22] Vania S F, Salcedo I H. Declines of organic nutrient pools in tropical semiarid soils under subsistence farming. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 2152-224
- [23] 宫阿都, 何毓蓉. 金沙江干热河谷区退化土壤结构的分形特征研究. *水土保持学报*, 2001, 15(3): 112-115
- [24] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团聚体结构分型特征. *地理研究*, 2002, 20(6): 700-706
- [25] Rasiah V, Kay B D, Perfect E. New mass-based model for estimating fractal dimensions of soil aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 891-895
- [26] 吴承祯, 洪伟. 杉木数量经营学引论. 北京: 中国林业出版社, 2000: 292-300

(责任编辑: 宋如华)

(上接第 70 页)

- [5] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望. *土壤学进展*, 1994, 22(1): 12-10
- [6] 鲁植雄, 潘君拯. 分维与土壤特性时空变异性研究进展. *农业工程学报*, 1994, 10(4): 14-19
- [7] Perfect E, Kay B D. Fractal theory applied to soil aggregation. *Soil Sci Soc Am J*, 1991, 55: 1552-1558
- [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
- [9] 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. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896-1899
- [10] 宫阿都, 何毓蓉. 金沙江干热河谷区退化土壤结构的分形特征研究. *水土保持学报*, 2001, 15(3): 112-115
- [11] 王玉杰, 王云琦, 夏一平, 等. 鲁中山区采取不同生态修复措施时的土壤粒径分形与孔隙结构特征. *中国水土保持科学*, 2007, 5(2): 73-80
- [12] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团聚体结构分形特征. *地理研究*, 2002, 20(6): 700-706
- [13] 赵世伟, 苏静, 杨永辉, 等. 宁南黄土丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响. *水土保持研究*, 2005, 12(3): 22-28
- [14] 马祥华, 焦菊英, 白文娟. 黄土丘陵沟壑区退耕植被恢复地土壤水稳性团聚体的变化特征. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(3): 69-74
- [15] 宁夏云雾山草原自然保护区管理处. 宁夏云雾山自然保护区科学考察与管理文集. 银川: 宁夏人民出版社, 2001: 2-131
- [16] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法. 北京: 科学出版社, 1978: 72-88
- [17] 刘云鹏, 王国栋, 张社奇, 等. 陕西 4 种土壤粒径分布的分形特征研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2003, 31(2): 92-94
- [18] 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. *中国水土保持科学*, 2006, 4(4): 42-51
- [19] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团聚体结构的分形特征研究. *土壤学报*, 1999, 36(2): 162-167

(责任编辑: 程云)