

紫色土坡耕地不同坡位不同高度地埂 土壤颗粒组成及分形特征

周萍, 文安邦, 严冬春, 史忠林

(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041)

摘要:对比分析西南紫色土区植物固结地埂和等高植物篱的结构差异,并运用分形理论研究了西南紫色土坡耕地不同坡位不同高度地埂土壤的分形特征。结果表明:有地埂存在的坡耕地地埂土壤的颗粒组成主要分布在0.002~0.02 mm粒径范围内,较无地埂的对照坡耕地该粒径范围的含量高2.41%。说明地埂的存在增强了其对坡面上方侵蚀泥沙的拦截作用。而不同坡位地埂土壤的分形维数变化如下:坡面上部>坡面中部>坡面下部,且同一坡位有地埂土壤的分形维数小于无地埂土壤的分形维数。不同地埂高度土壤的分形特征变化规律为:CK>LS-H10G>LS-H15G。地埂土壤颗粒分形维数D值与黏粒和砂粒体积百分含量相关性较好,地埂土壤的分形维数可作为西南紫色土坡耕地地埂土壤质量评价的定量指标之一。

关键词:紫色土;坡耕地;不同坡位;地埂;颗粒组成;分形特征

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)02-0084-05

Particle Distribution and Fractal Features of Hedge Soils With Different Hedge Heights Along the Slope Position of the Purple Sloping Cultivated Lands

ZHOU Ping, WEN Anbang, YAN Dongchun, SHI Zhonglin

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences,

Key Laboratory of Mountain Environment Evolution and Its Regulation, Chengdu 610041, China)

Abstract: We compared the structure of terracing hedgerow with contour hedgerow and used the fractal theory to deal with the fractal features of hedge soils with different hedge heights along the slope position of the sloping cultivated lands in the purple soils of southeastern China. The results showed that the main particle distribution belonged to 0.002~0.02 mm of the terracing hedgerow and was 2.41% higher than the contrast treatment (sloping cultivated lands without hedgerow), which meant that the hedges could enhance the interception of eroded soils. Meanwhile, the fractal dimension with the different slope positions changed as the order: the upper slope position>the middle slope position>the lower slope position. And the fractal dimensions of the sloping cultivated lands with different hedge heights were lower than those without hedge height. The higher the hedge height was, the lower value of fractal dimension was, and the highest values of fractal dimension was the contrast treatment without hedge, followed by the sloping cultivated lands with 10 cm hedge height and with 15 cm hedge height. And correlation analysis results showed that the fractal dimension had remarkable negative correlation with contents of clay and sand. The fractal theory was also considered as a new tool to evaluate the structure and features of hedge soil on the sloping cultivated lands in the southeastern China.

Keywords: purple soil; sloping cultivated lands; different slope positions; hedge; particle distribution; fractal dimension

土壤颗粒是土壤结构形成的物质基础,不同粒度组合构成不同的土壤质地类型,进一步影响土壤的物理、化学和生物学过程^[1]。土壤颗粒具有自相似性

质,Mandelbort B B 的专著《Fractal: Form Chance and Dimension》^[2]提出了分形和分维概念,并建立了二维空间的颗粒大小分形特征^[3],为研究不规则事物

提供了有效工具。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,其结构性质具有统计学上的自相似性,具有分维特性^[4]。20 世纪 80 年代起分形理论应用到土壤学领域,Falconer^[5]、Arya 和 Paris^[6]首先研究了土壤颗粒的分形现象及其分形维数的计算;Turcotte^[7]提出了多孔介质的粒径分布与分形维数关系公式;Perfect 等^[8]对分形理论在土壤学中的应用做了详细的分析,杨培岭等^[9]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。随后,分形理论被广泛用于土壤颗粒性质的研究,主要涉及土壤质量分形、体积分形、表面积分形及孔隙分形等^[10]。土壤颗粒分形维数成了土壤质地均一性、通透性、抗蚀性以及肥力诊断的一个综合定量指标^[11]。近年来,运用分形理论及各种分形模型计算土壤团粒、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、过程、均匀程度、水分特征、溶质转移和侵蚀度等方面的研究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^[12-17]。但目前对紫色土坡耕地地埂土壤的分形特征及其与土壤抵抗侵蚀能力之间的研究报道不多。因此,本文以定量表征土壤粒径大小的分形维数为手段,采用已有的分形模型对西南紫色土区不同坡位不同高度地埂土壤的分形特征进行研究,同时探讨地埂土壤分形特征及其与地埂土壤抗冲性和抗剪强度之间的关系,阐明坡耕地不同坡位不同高度地埂土壤的分形特性,有助于了解坡耕地地埂的存在对坡面侵蚀及产流产沙的影响。

水土流失时刻威胁着人类的生存和发展,中国是世界上水土流失最严重的国家之一。西南紫色土区处长江上游,水土流失面积占区域总面积的 43%,造成水土流失的主要原因之一是坡地耕作,特别是在陡坡地上进行耕作。坡耕地是重要的国土资源,特别是在中国西南丘陵和山地地区,坡耕地面积大,陡坡耕地比例高。西南地区土壤侵蚀的 60%来自于坡耕地。大于 15°的坡耕地占 35%。坡耕地是江河泥沙的主要来源,长江来沙量的 60%~78%源于坡耕地^[18]。坡耕地严重的水土流失使该区坡耕地的土层变薄,养分流失加剧,生产力低下,严重阻碍了该区农业的可持续发展。坡改梯技术是该区坡耕地整治的主要措施,但是坡改梯的改造投入成本高、劳动力投入高,稳定性差,当地农民不愿意接受,在西南地区不宜推广。而该区传统的坡耕地植物固结地埂是区域传统的坡耕地水土保持农业措施,能够有效控制坡面土壤侵蚀和水土流失。植物固结地埂是它的长期存在有其合理性,且突出强调植物地埂对土壤的有效固结作用。因此,本文

选择西南紫色土区坡耕地不同坡位不同高度地埂土壤的分形特征及抗蚀减沙效果,以期为三峡库区坡耕地合理、高效、可持续利用提供理论依据和数据支持。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于西南典型紫色土区,三峡库区水土保持与环境研究站(107°3′—108°14′E, 30°03′—30°35′N)附近。该区地势起伏较大,呈“三山两槽”地形,系深丘浅丘连低山地貌,海拔为 117~1 680 m。属亚热带东南季风区山地气候,雨量充沛,年降水量 1 100~1 400 mm,降水多集中在 4—10 月,占全年的 70%以上^[19];年日照时间 1 327 h,太阳总辐射能 347 kJ/m²,无霜期 340 d,年均温 18.2℃,≥10℃的年积温 5 891.4℃,相对湿度 80%。地层分布为第四系坡残积土层(Q4dl + el)及侏罗系紫色岩中统沙溪庙组砂泥岩(J2s),岩性为泥岩和砂岩,呈互层结构,泥岩为紫红色,中厚层状,水平层理,砂岩呈黄色,裂隙发育,岩质较软,中等风化基岩体较完整,质硬;土壤为中性紫色土,质地中壤或轻壤,富含钾、钙、锰、铁等矿质元素,耕地土层厚度一般在 0.3~0.6 m。区域主要种植作物有玉米(*Zea mays*)、红薯(*Ipomoea batatas*)、小麦(*Triticum aestivum*)、蚕桑(*Morus alba*)、苎麻(*Boehmeria nivea*)、黄豆(*Glycine max*)和柑橘(*Citrus reticulata*)等。

表 1 西南地区紫色土土壤特征

土壤有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	pH 值	阳离子交换率/ (cmol · kg ⁻¹)
6.76	0.98	6.77	32.82

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择和样品采集 在踏查典型流域的基础上,根据典型性和代表性原则选择坡向、坡度和坡长较一致的两个坡面为研究对象,坡面一为撂荒地,坡面二为有植物地埂的坡耕地。样品采集日期为 2015 年 4 月(表 2)。采样采用平行双剖面线法,即沿选定坡面自上而下每间隔 30 cm 和 60 cm 分别采样,同一坡位采集 6 个土壤样品,然后将同一坡位土壤样品混合,根据坡耕地坡长采集坡面上部(距坡顶 6 m),坡面中部(距坡顶 12 m)和坡面下部(距坡顶 18 m)土壤样品,以减少采样点受微地貌因素的影响。采集深度为 20 cm 的表层土壤,取土钻内径 3.5 cm,每个采样点至少采集 1.5 kg 土样,放入编号的自封袋并做好记录带回实验室。将土样自然风干后,去除砾石、树叶、植物根系等杂质,用塑料滚筒研磨,过 2 mm 筛,收集<2 mm 土样保存。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。取 0.5 g 处理好的土样放入 500 ml 烧杯中,加 30%

过氧化氢(H_2O_2),在可调节电炉上加热(72°C)去除有机质;然后加盐酸(HCL)去除碳酸盐;加纯水稀释,静置,除去上清液以除酸,反复静置,除酸直至pH值在 $6.5\sim 7.0$ 。加入5 ml配制的浓度为 0.5 mol/L 的六偏磷酸钠($(\text{NaPO}_3)_6$)溶液对样品浸泡分

表2 取样坡面基本特征

项目	编号	坡长/m	坡度/ $^\circ$	地埂高度/cm	地埂植物	土壤类型
坡面1	CK	18	15	0	无	紫色土
坡面2	LS-H10G	18	15	10	蚕豆	紫色土
坡面3	LS-H15G	18	15	15	蚕豆	紫色土

1.2.2 土壤颗粒分形维数的计算模型 土壤是具有分形特征的系统^[4,7,20],运用分形理论建立土壤团粒结构的分形模型^[21-22]:杨培岭等^[7]将Katz和Thompson的方法^[16]进行改进,将土壤颗粒质量分布代表数量分布,用极限法推导出土壤颗粒的质量与土壤粒径分布分形维数的关系式求得分形维数。其计算公式为:

$$3-D = \lg(w_i/w_0) / \lg(d_i/d_{\max})$$

式中: d_i 为两相邻粒级 d_i 与 d_{i+1} 间土粒平均直径(mm); d_{\max} 为最大粒级土粒平均直径(mm); w_i 为直径小于 d_i 的累积质量(g); w_0 为土壤样品总质量(g); $\lg(M_i/M_0)$ 、 $\lg(R_i/R_{\max})$ 为纵、横坐标绘图; $3-D$ 为线性拟合方程的斜率; D 为土壤颗粒分形维数。

1.2.3 数据统计分析 对所得试验数据用Excel和SPSS 18.0统计分析软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 植物固结地埂的结构及与等高植物篱的比较

植物固结地埂是指沿等高线方向构建地埂或坎,通常相邻二地块坡度变化不大时采用地埂,而坡度变化较大采用埂坎^[23],且在埂坎上横坡带状种植一种或两种多年生,有一定经济效益的草、灌或木本植物,地埂能有效减少坡耕地上方来水来沙,埂坎上的植物能够有效固结地埂,从而起到控制坡耕地水、土和养分流失。植物固结地埂区别于坡耕地等高植物篱的主要特点是地埂植物篱将空间由单一的坡耕地坡面扩大到土埂田坎,且突出强调了植物对地埂土壤的固结作用。植物固结地埂的坡耕地能有效控制坡面上方的来水来沙,其截水拦沙效果显著。

等高植物篱是一种空间农林复合经营模式,即在坡地上沿等高线每隔 $4\sim 8\text{ m}$,沿等高线高密度种植双行(株距 $5\sim 10\text{ cm}$,行距 $30\sim 50\text{ cm}$)密集种植生长速度快、萌生力强的灌木或灌化乔木,植物篱间为耕作带,种植作物^[24](图1)。该技术可滞缓径流、拦截泥沙,是一种很好的水土保持措施,技术上无可非议。群众不愿意接受等高植物篱技术的原因主要是影响作物生长、不利于农事耕作,且经济效益不高的缘故。

散,然后在英国马尔文公司生产的MS2000激光粒度仪上进行测试,激光粒度仪量程为 $0.02\sim 2\,000\text{ }\mu\text{m}$,重复性误差 $\leq \pm 0.5\%$ 。根据研究需要,将测试结果在激光粒度仪粒度分级系统中进一步分为黏粒($<0.002\text{ mm}$),粉粒($0.002\sim 0.05\text{ mm}$)和砂粒($0.05\sim 2\text{ mm}$)。

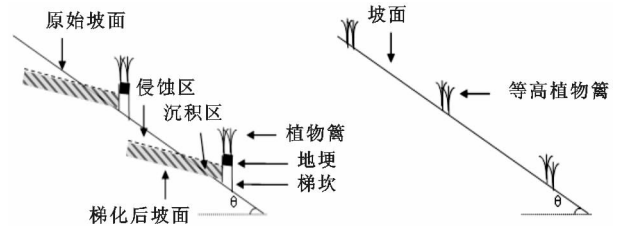


图1 植物固结地埂与等高植物篱的组成与结构

有地埂和地埂植物存在的坡面较无地埂的坡面或是种植等高植物篱的坡面土壤侵蚀减少。这主要是因为,地埂和地埂植物的存在,对上坡面的来水来沙有一定的阻挡作用,使得坡面上部的细颗粒泥沙在地埂前面堆积。地埂植物的地上植物部分通过削减径流流速来降低挟沙能力,增加径流的土壤入渗时间来减少土壤流失,同时对侵蚀泥沙具有直接拦截作用。地下部分的根系盘绕土体,可增强土壤的抗冲刷能力^[25]。

2.2 紫色土坡耕地的土壤颗粒组成特征

将从坡面采集的土壤样品的粒径组成按美国土壤质地分类制划分为黏粒($<0.002\text{ mm}$)、粉粒($0.002\sim 0.05\text{ mm}$)和砂粒($0.05\sim 2\text{ mm}$)并进行了体积分数统计(图2)。无地埂的对照坡耕地土壤的颗粒组成主要分布在 $0.002\sim 0.02\text{ mm}$ 粒径范围内,占总颗粒组成的 53.02% ,其次为 $0.02\sim 0.05\text{ mm}$ 粒径的土壤颗粒,占总土壤颗粒组成的 17.47% ,有地埂存在的坡耕地地埂土壤的颗粒组成主要分布在 $0.002\sim 0.02\text{ mm}$ 粒径范围内,地埂土壤颗粒组成在该粒径范围内的较无地埂的对照坡耕地该粒径范围的含量高 2.41% 。说明地埂的存在,对坡面上方的侵蚀泥沙有一定的拦截作用。

2.3 不同坡位地埂土壤分形特征

土壤颗粒组成是土壤结构形成的基础,现有研究已揭示出其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所具有的潜力^[26-28]。运用回归分析方法计算出不同坡位地埂土壤的分形维数均在 $2.830\sim 2.846$,其相关系数均在 0.900 以上且达到显著性水平(图3)。不同坡位地埂土壤的分形维数变化如下:坡面上部 $>$ 坡面中部 $>$ 坡面下部,且同一坡位有地埂土壤的分形维数小于无地埂土壤的分形维数。

表明由于地埂的存在,有效拦截了坡面细颗粒泥沙,使得地埂土壤的分形维数降低,土壤结构改良。

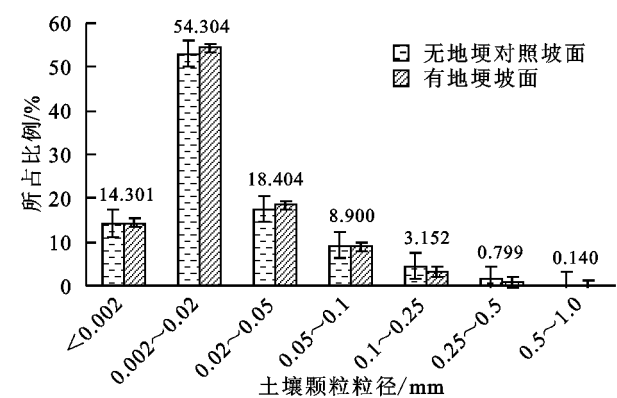


图2 紫色土坡耕地地埂土壤颗粒分布特征

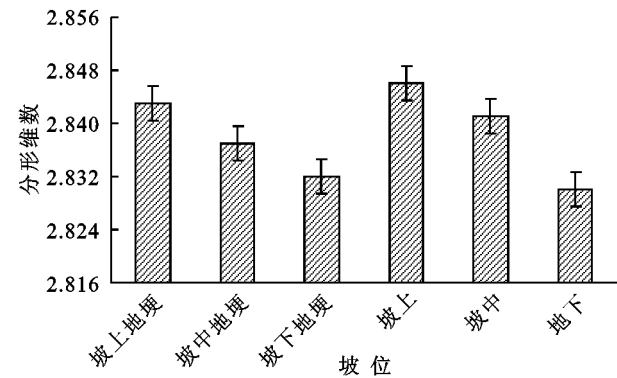


图3 坡耕地不同坡位地埂土壤分形特征

同一坡位,有地埂存在的坡耕地土壤分形维数低于无地埂坡耕地土壤的分形维数。这主要是由于同一坡位,由于地埂上方长有地埂植物或是杂草,地埂土壤含有一定量的根系,使得地埂土壤质地相对松散、通透性较好,这与廖而华等在四川丘陵地区的研究结果一致^[29]。而作为对照样地的无地埂坡耕地,其相同坡位土壤的质地较紧实,透水透气性能较差,其分形维数高达 2.848。

2.4 不同地埂高度土壤的分型特征

不同地埂高度土壤的分形特征变化规律为:CK>LS-H10G>LS-H15G。与对照撂荒样地相比,15 cm 高度地埂土壤的分形维数较 10 cm 高度地埂土壤的分形维数小,对照样地的分形维数最高。随着地埂高度的减小,地埂土壤分形维数逐渐增大。采用 LSD(最小显著性差异)将不同地埂高度土壤的分形维数进行多重比较检验,结果表明,LS-H10G 和 LS-H15G 处理之间的分形维数数值未达到显著性差异,而 LS-H10G 和 LS-H15G 与 CK 对照样地土壤的分形维数存在显著性差异($p<0.05$)(图 4)。研究结果表明,随着地埂高度的增加,地埂土壤对上部坡面土壤颗粒的拦截作用更加显著。

2.5 地埂土壤颗粒分形维数与地埂土壤结构的关系

为了进一步探索不同地埂高度土壤颗粒分形维数

与地埂土壤颗粒组成之间的关系,对不同地埂高度土壤颗粒百分含量与分形维数进行相关分析(图 5)。研究结果表明,地埂土壤颗粒分形维数与土壤黏粒($<0.002\text{ mm}$)百分含量存在指数递增的关系($R^2=0.9008$),且达到显著水平($p<0.05$),与地埂土壤粉粒($0.002\sim0.05\text{ mm}$)体积百分含量存在线性正相关($R^2=0.9658$),与砂粒($>0.05\text{ mm}$)体积百分含量呈对数负相关关系($R^2=0.9802$),且达到极显著水平($p<0.01$)。

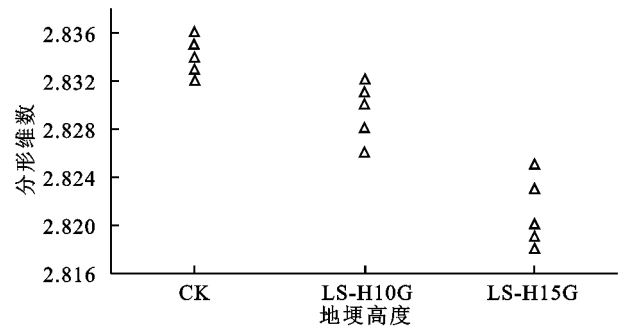


图4 不同地埂高度土壤的分形特征

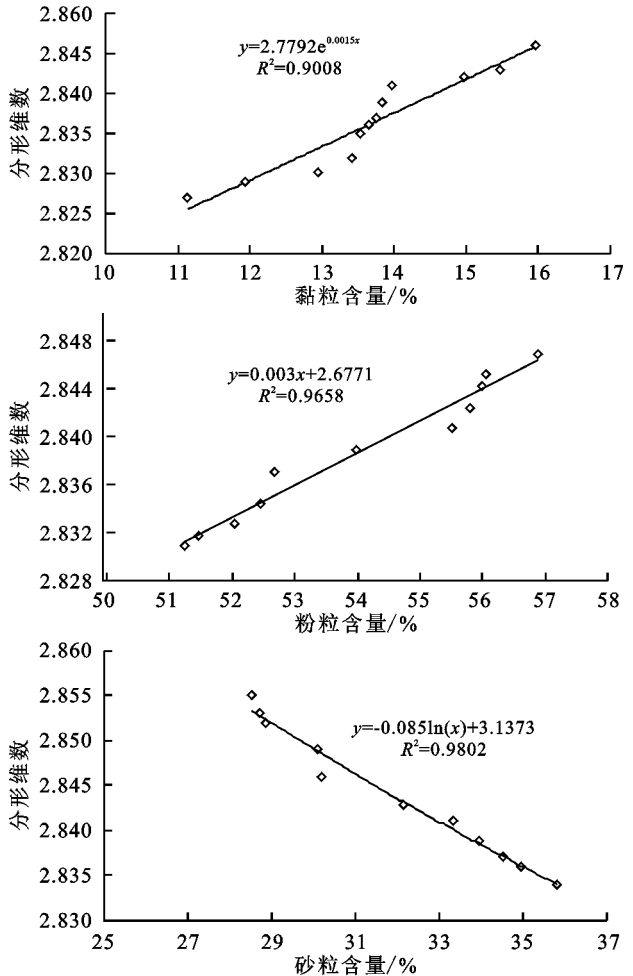


图5 地埂土壤颗粒分形维数与土壤颗粒组成的相关关系

3 结论与讨论

紫色土是指发育于亚热带和热带地区紫色砂页岩母质土壤,在我国主要分布在四川、重庆等低山丘

陵区,而紫色土土质地埂坡耕地的坡面上每隔一定间距有土质地埂的存在,地埂能有效减少坡耕地上方来水来沙,而地埂上的植物能够有效固结地埂。随着耕作时间的逐年延长,土质地埂可有效拦截坡耕地上方来水来沙,逐渐改变坡面微地形,逐步减小坡度,梯化坡地,从而有效控制坡耕地水、土和养分流失^[25]。土壤颗粒组成是土壤的重要属性,它影响着土壤的通气性、渗透性、土壤肥力等,在维持土壤孔隙、提高降雨入渗和防止土壤侵蚀等方面也起着重要的作用^[11,14]。因此本文通过对西南紫色土区坡耕地不同坡位不同高度地埂土壤的颗粒组成及分形特征研究,与无地埂的对照坡耕地比较可得,有地埂存在的坡耕地地埂土壤的颗粒组成主要分布在 0.002~0.02 mm 粒径范围内,较无地埂的对照坡耕地该粒径的含量高 2.41%。说明地埂的存在,对坡面上方的侵蚀泥沙有一定的拦截作用。

土壤粒径分布的分形维数能作为反映土壤的结构状况和发育程度的一项综合定量指标。运用回归分析方法计算出不同坡位地埂土壤的分形维数均在 2.830~2.846,其相关系数均在 0.900 以上,且达到显著性水平。不同坡位地埂土壤的分形维数变化如下:坡面上部>坡面中部>坡面下部,且同一坡位有地埂土壤的分形维数小于无地埂土壤的分形维数。这比谢均强等^[30]在涪陵区研究得出的园地土壤颗粒的分形维数值 2.67 偏大,可能与紫色土的成土母质和成土过程及不同土地利用方式有关,紫色土是在紫色岩风化物上形成并基本保持了母质理化性质。不同坡位地埂土壤的分形维数变化为坡面上部>坡面中部>坡面下部,且同一坡位有地埂土壤的分形维数小于无地埂土壤的分形维数。表明由于地埂的存在,有效拦截了坡面细颗粒泥沙,使得地埂土壤的分形维数降低,土壤结构改良。这个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^[12,29]。不同地埂高度土壤的分形特征变化规律为:CK>LS-H10G>LS-H15G。15 cm 高度地埂土壤的分形维数最小。随着地埂高度的减小,地埂土壤分形维数逐渐增大。分形维数的变化能很好地表征地埂土壤的颗粒组成,地埂土壤颗粒分形维数与土壤黏粒含量存在指数递增的关系($p<0.05$),与地埂土壤粉粒含量存在线性正相关,与砂粒含量呈对数负相关关系($p<0.01$)。表明地埂土壤颗粒分形维数 D 值与黏粒和砂粒体积百分含量相关性较好,地埂土壤的分形维数能够很好地表征地埂土壤颗粒组成。这与董莉丽^[31]在黄土高原地区的研究结果类似。因此,分形维数可以作为西南紫色土坡耕地地埂土壤质量评价的定量指标之一。

参考文献:

- [1] 宋孝玉,李亚娟,李怀有,等.不同地貌类型及土地利用方式下土壤粒径的分形特征[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(9):155-160.
- [2] Mandlebrot B B. Fractals form, chance and dimension [M]. USA:San Francisco, 1977.
- [3] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. USA:San Francisco;W. H. Freeman, 1982.
- [4] 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.
- [5] Krantz S G. Fractal geometry[J]. Mathematical Intelligencer, 1989,11(4):12-16.
- [6] Arya L M, Paris J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981,45(6):1023-1030.
- [7] Turcotte D L. Fractal fragmentation [J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 1986,91(B2):1921-1926.
- [8] Perfect E, Kay B D. Application of fractal in soil and tillage research:A review [J]. Soil & Tillage Research, 1995,36(1/2):1-20.
- [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[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
- [10] Ribolzi O, Patin J, Bresson L M. Impact of slope gradient soil surface features and infiltration on steep slopes in northern Laos [J]. Geomorphology, 2011, 127(1/2):53-63.
- [11] 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.
- [12] Millon H, Orellana R. Mass fractal dimensions of soil aggregates from different depths of a compacted Vertisol[J]. Geoderma, 2001,101(3):65-76.
- [13] 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.
- [14] 张世熔,邓良基,周倩,等.耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系[J].土壤学报,2002,39(2):221-226.
- [15] 刘松玉,张继文.土中孔隙分布的分形特征研究[J].东南大学学报,1997,27(3):127-130.
- [16] 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.
- [17] Perfect E, Rasiah V, Kay B D. Fractal dimensions of soil aggregate-size distributions calculated by number and mass[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992,56(65):1407-1409.
- [18] 李文华.长江洪水与生态建设[J].自然资源学报,1999,14(1):1-8.

得到较好的拟合($p < 0.05$)。撂荒地土壤呼吸的温度敏感性系数 Q_{10} 值变化较大,从而对土壤温度的响应更为敏感,且不同深度土壤的 Q_{10} 值存在较大差异。盐碱地和苜蓿地不同土层的 Q_{10} 值均在 2.0 左右变化,与全球 Q_{10} 的平均水平接近。

(3) 土壤温度总是和土壤水分一起对呼吸速率的变化产生影响,两者之间存在明显的交互作用,建立了不同土地利用方式下土壤呼吸速率与土壤温度和水分的双变量关系,比相应的单变量模型更好地解释了土壤呼吸变异,盐碱地、撂荒地和苜蓿地双变量模型能够解释 91.85%,86.25%和 88.0%的土壤呼吸变异。

参考文献:

- [1] 韩广轩,周广胜,许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望[J]. 植物生态学报,2008,32(3):719-733.
- [2] 马景永,张玉珍,周波,等. 黄土高原不同林龄刺槐林土壤呼吸研究[J]. 水土保持研究,2015,22(3):98-104.
- [3] 骆亦其,周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 北京:高等教育出版社,2007.
- [4] 齐丽彬,樊军,邵明安,等. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同土地利用类型土壤呼吸季节变化及其环境驱动[J]. 生态学报,2008,28(11):5428-5436.
- [5] 付微,黄明斌,邵明安,等. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同立地条件下土壤呼吸特征[J]. 农业工程学报,2013,29(13):74-80.
- [6] 高会议,郭胜利,刘文兆. 黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子[J]. 生态学报,2011,31(18):5217-5224.
- [7] Bouma T J, Bryla D R. On the assessment of root and soil respiration for soils of different textures: interactions with soil moisture contents and soil CO_2 concentrations[J]. Plant and Soil, 2000,227(1/2):215-221.
- [8] 高艳红,张志山,刘立超,等. 水热因子对沙漠地区土壤呼吸的影响[J]. 生态学报,2009,29(11):5995-6001.
- [9] 周非飞,林波,刘庆. 青藏高原东缘亚高山针叶林人工恢复过程中的土壤呼吸特征[J]. 应用生态学报,2009,20(8):1783-1790.
- [10] Townsend A R, Vitousek P M, Holland E A. Tropical soils could dominate the short-term carbon cycle feedbacks to increased global temperatures[J]. Climatic Change, 1992,22(4):293-303.
- [11] 李志刚,侯扶江. 黄土高原不同地形封育草地的土壤呼吸日动态与影响因子分析[J]. 草业学报,2010,19(1):42-49.
- [12] 李英臣,侯翠翠,李小宇,等. 不同秸秆还田方式对黄土高原坡耕地土壤呼吸的影响[J]. 水土保持研究,2015,22(5):122-126.
- [13] 于贵瑞,孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

(上接第 88 页)

- [19] 郭进,文安邦,严冬春,等. 三峡库区紫色土坡地土壤颗粒流失特征[J]. 水土保持学报,2012,26(3):18-21.
- [20] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: I Theory [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991,55(5):1231-1238.
- [21] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: implications for conductivity and pore formation[J]. Physical Review Letters, 1985,54(12):1325.
- [22] 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.
- [23] 韦杰,鲍玉海,金慧芳,等. 三峡库区坡耕地有限顺坡耕作模式及减蚀效应[J]. 灌溉排水学报,2012,31(6):45-48.
- [24] Nair K R. An introduction to agro-forestry [M]. Dordrecht; Kluwer Academic Publishers. Netherlands, 1993.
- [25] 周萍,文安邦,张信宝,等. 植物固结地埂的水土保持功能探析[J]. 人民长江,2012,43(7):81-84.
- [26] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992,56(2):362-369.
- [27] 张保华,何毓蓉,周红艺. 长江上游典型区亚高山不同林型土壤的结构性与水分效应[J]. 水土保持学报,2002,16(4):127-129.
- [28] 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):67-71.
- [29] 廖尔华,张世熔,邓良基,等. 丘陵区土壤颗粒的分形维数及其应用[J]. 四川农业大学学报,2002,20(3):242-245.
- [30] 谢均强,史东梅,张兵,等. 紫色丘陵坡地不同用地类型土壤理化特征分析[J]. 西南大学学报:自然科学版,2008,30(9):108-112.
- [31] 董莉丽,郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分形特征[J]. 中国水土保持科学,2009,7(2):35-41.