

汉中荒草地整治后耕作层土壤颗粒分形特征

雷 娜^{1,2}, 韩霁昌¹, 穆兴民^{2,3}

(1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075;
2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 运用分形模型, 结合野外调查和室内试验分析汉中市荒草地整治后耕作层土壤颗粒分形特征, 探讨土壤颗粒分形维数与土壤质地、粒径组成以及养分含量的关系, 建立整治后耕作层土壤分形维数预测函数。结果表明: (1) 整治后土壤颗粒分形维数 D 介于 2.55~2.95 之间, 均值为 2.77, 标准差为 0.134, 土壤颗粒分形维数与土壤质地有一定的关系, 表现为土壤质地越细, 分形维数越大。 (2) 土壤颗粒分形维数主要是由黏粒含量决定, 分形维数与黏粒含量呈显著线性正相关 ($R^2=0.978\ 0$); 利用分形维数与土壤黏粒 ($\leq 0.002\ \text{mm}$) 建立的预测模型精确度高 ($R^2=0.982\ 7$), 能够很好的预测土壤颗粒分形维数。 (3) 土壤分形维数与土壤全氮、有效磷和有机质含量的相关关系分别为 0.914, 0.580, 0.513, 分形维数与全氮、有效磷、速效钾含量均呈显著正相关关系, 分形维数可作为衡量土壤肥力状况的有效指标。研究结论表明土壤分形维数 D 能够很好的表征土壤质地、粒径组成以及土壤养分状况, 可为土地整治工程开展后土壤质量评价以及土地资源的永续利用提供一定的参考。

关键词: 分形维数; 荒草地; 土壤颗粒含量; 土地整治

中图分类号: S152 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2016)06-0296-04

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.049

The Fractal Characters of Plough Soil Particles of Waste-grassland
After Renovation in Hanzhong

LEI Na^{1,2}, HAN Jichang¹, MU Xingmin^{2,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100; 2. Shaanxi Provincial Land and Engineering Construction Group CO., LTD., Xi'an 710075; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100)

Abstract: Based on fractal theory, field sampling and laboratory analysis, the fractal dimension of soil waste-grassland after renovation was studied in Hanzhong, correlation of fractal dimension with soil textural, grain diameters and nutrient content were also discussed, and the prediction model of soil fractal dimension after waste-grassland renovation was built. The results showed that as follow: (1) The fractal dimension of plough soil particles was between 2.55~2.95, the mean value and standard deviation was respectively 2.77 and 0.134. The relationship of fractal dimension of soil particles was significant with soil texture ($R^2=0.978\ 0$), characterized by the fine soil texture was, the bigger the fractal dimension was. (2) The fractal dimension of soil particles was mainly decided by the clay content, the between has significant positive correlation; the forecast model built using the fractal dimension and soil clay ($\leq 0.002\ \text{mm}$) was high precision ($R^2=0.982\ 7$), it can better predict fractal dimension of soil particles. (3) The positive correlation relationship existed between soil fractal dimension and total nitrogen, effective phosphorus and available potassium (correlation coefficients: 0.914, 0.580 and 0.513 respectively) respectively. Fractal dimension of soil particles can be used as the effective indicators of soil fertility conditions. Studies concluding that soil fractal dimension can be a good characterization of soil texture, particle size composition and nutrient status, it will provide certain reference for the determination of nutrient content and sustainable use of land resources after land renovation.

Keywords: fractal dimension; waste-grassland; soil grain composition; land consolidation

收稿日期: 2016-07-07
资助项目: 国家科技支撑计划课题(2014BAL01B03)
第一作者: 雷娜(1985—), 女, 在读博士, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 619648133@qq.com
通信作者: 韩霁昌(1966—), 男, 陕西渭南人, 博士, 研究员, 主要从事土地工程、土地经济、水土资源优化配置等科研工作。
E-mail: hanjc_sxdj@126.com

20 世纪 80 年代,美籍数学家本华·曼德博首次提出分形理论,该理论主要用于描述复杂系统的真实属性与状态,能够更贴切的反映客观事物的多样性与复杂性,因而成为当今社会广泛应用于天文、化学、地质、工程、生物等领域的新理论、新科学。土壤的组成、性质、形态均具有复杂多样性,将分形理论引入土壤颗粒的分析中,对于研究土壤理化性状、结构、粒径组成以及土地合理化利用具有重要意义^[1]。目前国内外学者已经开展了相关研究。Roberto 等^[2]进一步研究认为分形理论能够揭示土壤颗粒分形维数,并对土壤理化性状及土壤生态环境具有指示作用。学者们利用分形理论开展了耕地、林地、草地以及风沙土等方面的研究,总结了土壤分形维数与粒径分布^[3-4]、质地^[5]、结构^[6]、团聚体^[7]以及土壤养分状况^[8-9]的关系。可见分形理论作为土壤复杂性和多样性定量化研究的一种新方法已经被应用在土壤研究的各个领域,但是应用分形理论研究土地整治后耕作层土壤颗粒性状以及与养分关系的报道较少。目前仅有陈梦祺^[9]选取重庆市 3 种不同类型的土地整理项目,探讨了分形特征与土壤颗粒组成、土壤养分含量等土壤性质的相关关系。

荒草地是良好的耕地后备资源,通过开展土地整治工程能够实现土地资源集约利用,增加耕地面积,保障粮食安全。汉中市荒草地面积广阔,土地整治工程实施后荒草地耕作层土壤粒径组成、质地以及理化性质决定着耕地质量的优劣。基于此,以汉中荒草地整治为例,利用分形理论,通过野外调查取样,室内分析土壤的理化性质,建立土壤分形维数模型计算土壤分形维数,同时运用 SPSS 统计分析、相关分析等方法探讨整治后土壤耕作层分形特征与土壤颗粒组成、土壤养分含量等土壤性质的相关关系,以期土地整治工程开展后土壤质量评价、养分含量的判定以及土地资源的永续利用提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

汉中市地处陕西省西南部,东与安康市相邻,西与甘肃省陇南市接壤,南频巴山与四川省广元市毗连,北依秦岭与宝鸡市为邻。东经 105°30′50″—108°16′45″,北纬 32°08′54″—33°53′16″。东西最大长度为 258.6 km,南北为 192.9 km。地貌类型多样,以山地为主,占总土地面积的 75.2%,丘陵占 14.6%,平地占 10.2%。属于亚热带气候区,年均气温 14℃。四季分明,气候温润,森林覆盖率为 52%,林草的植被率达 60%,荒草地资源丰富。荒草地是未利用土地中质量相对较好的土地,是发展农林牧业生产的后备土地资源,对于缓解人地矛盾、促进占补平衡以及保障当地粮食安全具有重要意义。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品的采集与分析 取样依托汉中市镇巴县大池镇荒草地开发项目,避开田埂等特殊区域,选取整治后具有代表性的地块,2014 年 10 月在项目区用 GPS 定位记录采样点经纬度,样点确定根据《中华人民共和国环境保护行业标准 HJ/T 166—2004》采集,新增耕地每 20 hm² 取 1 个混合样,每宗地不少于 1 个混合样;水田、水浇地和旱地每种地类不少于 1 个混合样。地形条件变化较大、地形破碎的新增耕地每块样地取混合样 1 个,采样运用典型的“S”型布设土壤采样点,采集 0—20 cm 耕作层土壤样品,充分混匀,挑出碎石与植物残体,用四分法分至 1 kg 左右,共计取样 33 个,带回实验室风干,碾磨,分别过 0.149,1,2 mm 筛,装袋备用。土壤理化性质测定参考相关的国家标准或是行业标准进行测定。pH 采用玻璃电极法用 pH 计测定,水土比例为 2.5:1;电导率采用上海雷磁仪器厂生产的电导率仪测定,水土比为 5:1;粒径组成采用激光粒度分析仪测定,用六偏磷酸钠分散,沙浴加热去除碳酸钙;有机质含量采用重铬酸钾氧化—油浴加热法测定,用瓶口滴定器滴定;全氮含量采用全自动间断化学分析仪测定;有效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提、钼锑抗显色、分光光度法测定;速效钾含量采用中性乙酸溶液浸提—火焰光度计测定。

1.2.2 土壤分形维数模型 有学者参考二维空间颗粒分形维数特征,采用极限法得到土壤分形维数可用土壤粒径分布表示,这种表示方法被众多研究土壤颗粒分形维数的学者采用^[10],具体关系式为:

$$\left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{W_{(<d_i)}}{W_0}$$

对上式两边取对数,得到土壤的分形维数 D 的计算公式:

$$D = 3 - \lg \frac{d_{\max} W_{(<d_i)}}{d_i W_0}$$

式中: d_i 为第 i 个粒级土粒的平均直径; $d_{\max}$ 为最大粒级土粒的平均直径; D 为土壤颗粒表面的分形维数; $W_{(<d_i)}$ 为土粒直径小于 d_i 的累积重量; W_0 表示所有各粒级土粒的重量。

1.2.3 数据处理方法 用 Microsoft Excel 整理试验数据,通过 SPSS 19.0 软件分析土壤颗粒含量(按美国制)、pH、电导率及氮、磷、钾等养分含量各指标与土壤颗粒分形维数之间的相关关系,并对黏粒、粉粒、砂粒含量与土壤颗粒分形维数进行多元回归相关分析。

2 结果与分析

2.1 土壤颗粒分形维数与质地的关系

运用分形模型计算得到汉中荒草地整治后土壤

颗粒分形维数,土壤颗粒分形维数 D 介于 2.55~2.95 之间,均值为 2.77,标准差为 0.134。按照美国制土壤质地分类三角表,样品中土壤质地有砂壤土、壤砂土、粉壤土、粉土 4 种类型,其中粉壤土所占比例较大为 60%,其次是粉土,所占比例为 25%,砂壤土、壤砂土所占比例较小,分别为 10%,5%。粉壤土质地介于黏土和砂土之间,兼有黏土和砂土的优点,通气透水、保水保温性能都较好,是较理想的农业耕种土壤。因此荒草地整治后耕作层土壤质地大部分适合作物生长,土地整治工程比较成功。壤砂土、砂壤土、粉壤土、粉土的颗粒分形维数平均值依次为 2.38, 2.59, 2.81, 2.82(表 1),壤砂土>砂壤土>粉壤土>粉土,在研究区域土壤的质地与土壤分形维数存在一定的关系,即土壤质地越粗,分形维数越小。胡钟胜等^[11]研究宣威市烟田土壤颗粒分形维数,结果表明土壤颗粒分形维数随着土壤质地的粗细程度发生明显变化,土壤质地越细分形维数越大;范燕敏等^[12]研究认为分形维数值增大,土壤黏粒增多,土壤质地变得粘重,结构紧实;樊立娟等^[13]认为,分形维数与黏粒和粉粒含量呈显著的线性正相关,这些研究结果都与本研究所得结论一致。因此,研究区域土壤颗粒分形维数作为评价土壤质地的指标之一是切实可行的。

表 1 土壤颗粒分形维数统计

土壤质地	样本数量	最小值	最大值	平均值	标准差
壤砂土	1	2.38	2.38	2.38	—
砂壤土	2	2.55	2.62	2.59	0.035
粉壤土	12	2.68	2.95	2.81	0.084
粉土	5	2.75	2.92	2.82	0.058

2.2 分形维数与土壤粒径分布的关系

由样品测定结果可知砂粒、粉粒和黏粒的平均含量为 23.82%,67.37%和 8.80%,充分说明粉粒是汉中荒草地整治后土壤颗粒的主要组成部分,大部分土壤质地为粉壤土,说明土壤结构良好。

表 2 土壤分形维数与养分的相关关系

指标	分形维数			最大值	最小值	平均值	标准差
	样本数	相关系数	决定系数 R^2				
pH	20	0.078	0.743	8.75	7.11	7.55	0.129
电导率/($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	20	0.357	0.123	0.041	0.072	0.059	0.002
全氮/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	20	0.914	0.270	11.19	0.27	3.60	7.102
有效磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	20	0.580	0.007	17.2	2.89	7.84	6.705
速效钾/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	20	0.183	0.439	176	122	159	5.123
有机质/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	20	0.513	0.021	33.5	15.7	23.1	5.823

土壤养分含量是表征土地生产力的重要指标,土壤养分含量主要是全氮、有效磷、有机质以及速效钾的含量。农作物的生长需要土壤提供氮素、磷素等。通过分析土壤分形维数与养分含量的相关关系可知土壤分形维数与土壤全氮含量的相关关系达到极显著水

用 SPSS 19.0 软件对土壤颗粒分形维数与土壤黏粒($\leq 0.002 \text{ mm}$)、粉粒($0.002 \sim 0.05 \text{ mm}$)和砂粒($0.05 \sim 2 \text{ mm}$)体积百分比含量分别进行回归分析,分析荒草地整治后耕作层土壤颗粒分形维数(y)与土壤黏粒、粉粒、砂粒百分比含量(x)的相关关系,回归方程分别为: $y=0.34\ln(x)+2.06, R=0.978, P<0.01$,方程达到显著相关水平; $y=0.05\ln(x)+2.856, R=0.250, P<0.01$,方程未达到显著相关水平; $y=0.05\ln(x)+2.399, R=0.278, P<0.01$,方程未达到显著相关水平。3 个回归方程表明,荒草地整治后耕作层土壤颗粒分形维数与黏粒百分比含量之间呈极显著正相关关系,通过了 $P=0.01$ 双尾检验,在本研究中可以认为土壤颗粒的分形维数受黏粒含量的影响,即黏粒含量愈多,分形维数愈大。分形维数与砂粒、粉粒含量关系不显著。这一结论与王力等^[14]、郭中领等^[15]分别通过对安达市碱性草地、北京地区的土壤颗粒分形维数进行研究,均认为的颗粒分形维数主要是由黏粒含量决定一致;虽然多数研究结果都认为黏粒含量对土壤分形维数的影响较大,但也有不同的研究结果,叶雅杰等^[16]通过对松嫩平原盐碱地土壤颗粒分形维数进行研究,却发现土壤颗粒分形维数是由土壤粉粒和细砂粒的含量决定的,粉粒含量越高,土壤颗粒分形维数越大,与黏粒含量的相关性不显著。出现不同的研究结果可能是由于不同地区区域气候、水文、土壤物理性状等差异明显,也可能是采样方法、取样方式等随机因素导致决定分形维数的因子出现变化。因此,在以后的研究中应扩大研究范围,规范取样方法,布设更多的试验区,保证结果的准确性。

2.3 分形维数与土壤养分的关系

将测定的所有样品的土壤颗粒分形维数与 pH、电导率、全氮、有效磷、速效钾以及有机质含量进行相关分析(表 2)。

平,两者高度正相关;土壤分形维数与有效磷、有机质的相关关系达到显著水平,均呈正相关关系;土壤分形维数与速效钾、pH、电导率相关关系未达到显著水平,相关关系不紧密(表 2)。结合土壤分形维数与质地的关系,充分说明土壤分形维数变大,质地变细,土壤中

氮、磷、有机质等养分元素含量增加,保水保肥能力增强;反之,随着土壤分形维数变小,质地变粗,土壤中养分元素含量减少,土壤结构不利于作物生长。这是因为农作物生长所需的大量营养元素主要来自土壤细颗粒物,土壤细颗粒物组分中一部分能缓慢释放成为植物可以利用的形态,这也解释了研究中得出的土壤分形维数与黏粒含量呈正相关这一结论。研究结果与李进峰等^[17]通过实地取样研究,发现土壤颗粒体积分形维数与土壤全氮、有效磷、速效钾、有机质等理化指标有一定的相关关系一致,均证明了土壤颗粒分形维数在一定程度上能够影响土壤养分变化,土壤颗粒分形维数可作为判断土壤肥力的指标之一;单桂梅等^[18]进一步研究认为土壤理化指标与土壤颗粒体积分数相关性不显著,并认为土壤颗粒分形维数对土壤养分指示作用可能具有很强的空间特异性。可见,研究的地域不同结论不同,但这些研究对探索分形理论在土壤结构性状以及揭示土壤肥力特征的规律性等方面有重要意义。不同研究结果的差异性可能与研究区域环境、植被类型、耕作强度、施肥、作物类型及秸秆还田等因素相关。本研究取样时间是土地整治工程完成后作物种植前,因而不受施肥、作物类型及秸秆还田等人为因素的影响,研究结果可信度高。

2.4 荒草地整治后土壤颗粒分形维数预测

研究证明汉中荒草地整治后土壤颗粒分形维数与土壤黏粒($\leq 0.002\text{ mm}$)相关系数为 0.978 9,二者显著正相关,根据同类文献的研究结果,利用测定的汉中荒草地 20 个土壤样品粒径组成的数据建立土壤颗粒分形维数与土壤黏粒($\leq 0.002\text{ mm}$)的对数函数关系(图 1)。

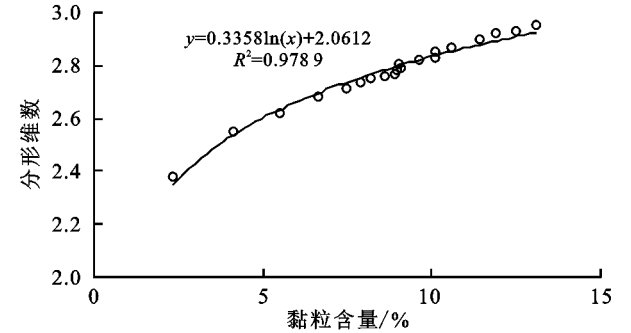


图 1 荒草地整治后耕作层土壤分形维数预测模型

为了证明汉中荒草地整治后土壤颗粒分形维数预测模型在该区域具有可行性,运用预测模型对未利用建模的 13 个土壤样品分形维数进行预测,建立了汉中荒草地整治后耕作层分形维数的预测值(x)和测定的实际值(y)的线性关系(图 2),没有参加建模的 13 个样品土壤颗粒分形维数的预测值与对应测定实际值较接近,预测回归直线的斜率为 0.972 1,斜率

值接近 1,证明拟合程度较好;方差 R^2 为 0.982 1,说明预测值和实际值线性关系达到极显著相关水平,二者之间模拟的精确度高。

对预测值和实际测定值进行比较分析(表 3),由给出的预测值和实际测定值得到的标准差和变异系数可知,预测值与实际测定值之间的差异较小。建立的函数关系可以用于预测汉中荒草地整治后耕作层土壤颗粒分形维数,进而判定土壤的质地和养分特征。

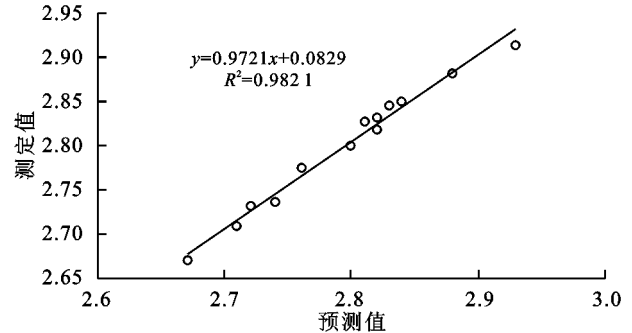


图 2 预测值与测定实际值之间的函数关系

表 3 土壤颗粒分形维数测定值与预测值统计

指标	样本数量	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
测定值	13	2.71	2.93	2.79	0.002	0.001
预测值	13	2.71	2.91	2.80	0.002	0.001

3 结论

(1)土壤颗粒分形维数可作为揭示土壤质地的指标之一。汉中荒草地整治后土壤颗粒分形维数 D 介于 2.55~2.95 之间,均值为 2.77,标准差为 0.134。土壤颗粒分形维数随着土壤质地的粗细程度发生明显变化,土壤质地越细,分形维数越大。

(2)土壤颗粒分形维数主要是由黏粒含量决定。分形维数与黏粒、粉粒、砂粒相关性具有明显差异,其中分形维数与黏粒含量呈显著线性正相关,与砂粒、粉粒含量相关关系不明显;建立的分形维数与土壤黏粒($\leq 0.002\text{ mm}$)预测模型精确度高,能够很好的预测土壤颗粒分形维数。

(3)土壤颗粒分形维数可作为衡量土壤肥力状况的有效指标。通过试验研究,土壤分形维数与土壤全氮含量的相关关系达到极显著水平,两者呈高度正相关;土壤分形维数与有效磷、有机质的相关关系达到显著水平,均呈正相关关系;土壤分形维数与速效钾、pH、电导率相关关系未达到显著水平,相关关系不紧密。

(4)土壤分形维数 D 能够表征土壤质地、结构以及土壤养分状况,可作为土壤质地、粒径组成、土壤肥力诊断的有效方法之一,探讨土壤颗粒分形维数与土壤结构、质地以及土壤养分的定量化关系将是下一步研究的重点。