

文章编号: 1008 - 2786 - (2017) 1 - 23 - 09

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000192

云南陆良植烟土壤粒径分布及其分形维数 空间变异研究

李强¹ 李志伟² 王全³ 罗维² 周冀衡¹

(1. 湖南农业大学 烟草研究院 湖南 长沙 410128; 2. 四川中烟工业有限责任公司 四川 成都 610017;

3. 广西中烟工业有限责任公司 广西 南宁 530001)

摘 要: 采用 GPS 定位技术 在陆良烟区采集土壤样品 341 个。采用经典统计学、地统计学和分形数学相结合的方法研究了土壤粒径分布及其分形特征的总体特征、空间变异特征,同时分析了土壤粒径分形维数与土壤颗粒组成及土壤养分的关系,以及土壤粒径及其分形维数的影响因素。结果表明,土壤颗粒含量及其分形维数在不同质地土壤间存在显著或极显著水平差异;粘粒含量和分形维数表现为轻粘土 > 重壤土 > 中壤土 > 轻壤土,砂粒和粉粒含量则相反;土壤颗粒质量分形维数在 2.524 ~ 2.928 之间,平均为 2.823;土壤颗粒分形维数与土壤粘粒含量呈极显著正相关关系,与粉粒及砂粒含量呈极显著负相关关系;土壤颗粒分形维数可直观地反映土壤粒径分布;土壤颗粒含量和土壤粒径分形维数均具有中等的空间相关性,其空间变异是由结构性因素和随机性因素共同决定的结果,变程仅为 0.12 ~ 0.27 km,表明其空间自相关范围较小,空间分布主要呈东西向变化趋势,高低值区域分异和明显;土壤粒径分形维数 D 值与全氮、全磷、全钾、碱解氮和速效钾呈极显著正相关,与有效磷含量呈极显著负相关,土壤分形维数可用于表征土壤养分状况;海拔高度、有机质、土壤类型、地形、轮作模式均对土壤颗粒含量和土壤粒径分形维数有显著影响。

关键词: 植烟土壤;土壤粒径分布;分形维数;陆良

中图分类号: S158; S572

文献标志码: A

土壤粒径分布 (particle size distribution, 简称 PSD) 作为土壤基本物理性状之一,是指土壤固相中不同粗细级别的土壤颗粒所占的比重,常用某一粒径及其对应的累积百分含量曲线来表示。它不仅可表征土壤质地,而且与土壤水分、土壤肥力和土壤侵蚀等有着密切的联系^[1-4],土壤粒径分布成为土壤质量研究的一项重要内容^[5]。人们建立了多种粒径估值模型来描述土壤粒径分布,如逻辑生长模型、对数模型和线性模型等,但这些传统的土壤粒径分布表征方法无法实现不同性质土壤间细微差别的区分和刻画。土壤是一种具有不规则形状和自相似结构的复杂多孔介质,具有一定的分形特征^[6,7],因而

可以利用分形几何学来研究土壤的性状特征。自 S. W. Tyler 等^[8]提出土壤粒径分布的质量分形维数计算公式后,分形维数 (D , D value of fractal dimension) 被广泛用于土壤科学研究中。分形维数 (D) 表征土壤粒径分布和土壤质地的研究成为近年来的研究热点。

烟草是一种品质作物,其品质好坏与土壤质量关系密切。在植烟土壤适宜性评价指标体系中,土壤质地的权重列于首位达 0.3057,其重要程度显而易见^[9]。然而,未见将土壤粒径分形维数引入植烟土壤质地评价的报道。鉴于此,本文以陆良烟区为例,研究了植烟土壤粒径分布分形维数特征,并采用

收稿日期 (Received): 2014 - 10 - 15; 改回日期 (Accepted): 2016 - 09 - 15。

基金项目 (Foundation item): 国家烟草专卖局重大专项“曲靖市精益烟叶生产研究与应用”(2014YN24) 资助。 [Supported by the major projects of State Tobacco Monopoly Bureau ‘Research and application of lean production of tobacco in Qujing City’ (2014YN24).]

作者简介 (Biography): 李强 (1982 -) 男,江苏仪征人,博士,研究方向为烟草生理生态。 [Li Qiang (1982 -), born in Yizheng, Jiangsu province, lecturer, engaged in Tobacco physiology and ecology.] E-mail: zqiangli@126.com

地统计学和 GIS 技术相结合实现分形维数和土壤粒径空间分布的可视化,期望为植烟土壤质地评价提供新方法。

1 材料与方法

1.1 区域自然概况

陆良县位于云南省东部,素有“滇东粮仓”之称,居南盘江上游,北纬 $24^{\circ}44' - 25^{\circ}18'$,东经 $103^{\circ}23' - 104^{\circ}02'$ 。全县东西长 65.6 千米,南北宽 62.8 千米,总面积 2 096 平方千米。境内平均海拔 1 840 米,四面环山,中间是开阔平坦的湖积盆地,是云南省第一平坝,平坝面积 772 平方千米。终年气候温和,春暖干旱,秋凉湿润,冬无严寒较干燥,夏无酷热而多雨,年均气温 14.7°C ,年降雨量 979.6 毫米。土壤主要有:红壤、紫色土、石灰(岩)土和水稻土等。

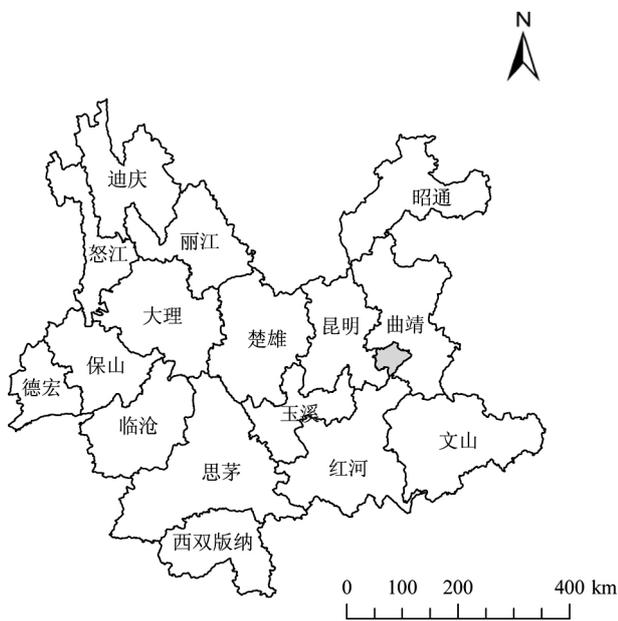


图 1 研究区域位置示意图
Fig. 1 Location of the study area

1.2 土样采集和分析

2010 年 3 月,在陆良基本烟田进行定点取样,共取样 341 个,用手持式 GPS 定位,记录田块中心的经纬度和高程,取样根据田块形状采用五点取样法或“W”形取样法进行取样,每个田块确保 5 人以上,取样深度 0~20 cm,用四分法取大约 1 kg 土样带回实验室。

土样登记编码后经风干、研磨及过筛后,进行土壤养分和土壤粒级测定。采用机械筛分法测定土壤粒级,土壤粒径分级采用美国农业部(USDA)分类系统^[10],将土壤粒级分为 7 个级别: <0.002 $0.002 - 0.05$ $0.05 - 0.1$ $0.1 - 0.25$ $0.25 - 0.5$ $0.5 - 1$, $1 - 2$ mm 并将土壤颗粒分为粘粒(<0.002 mm)、粉粒($0.002 - 0.05$ mm)和砂粒($0.05 - 2$ mm)。土壤 pH 值采用玻璃电极法,土壤有机质采用重铬酸钾氧化法,土壤全氮采用开氏定氮法,土壤全磷和速效磷采用钼锑抗比色法,土壤全钾和速效钾采用火焰光度法,土壤速效氮采用碱解扩散法^[11]。

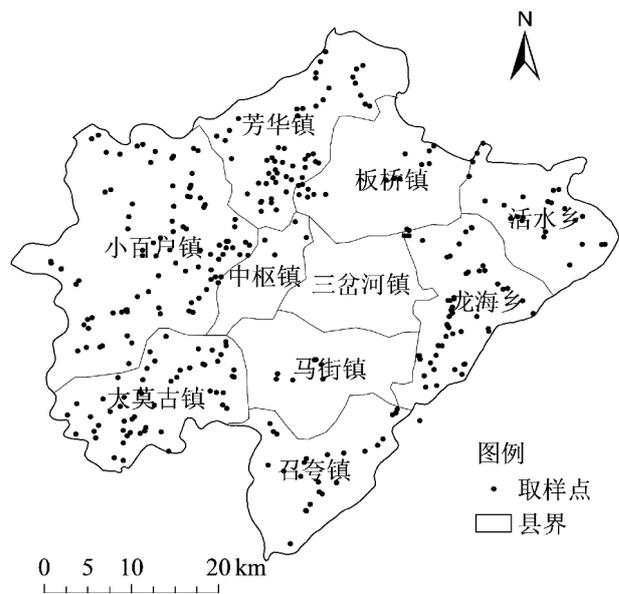


图 2 样点分布图

Fig. 2 Distribution of soil samples

1.3 土壤颗粒分形模型

土壤粒径分布遵循自相似原理,大于某一粒径 R_i (R_{i+1} , $i=1, 2, 3, \dots$) 的土壤颗粒质量之和为 i), 则可表示为^[8]:

$$W_{(r>R_i)} = C_w \left[1 - \left(\frac{R_i}{\lambda_w} \right)^{3-D} \right] \quad (1)$$

式中 R_i 是特征尺度, C_w , λ_w 是描述颗粒形状和尺度的常数。当 $R_i = 0$ 时, (1) 式为计算全部土壤颗粒总质量 W_T , 即 $W_{(r>R_i)} = W_T = C_w$; 当 $R_i = R_{max}$ 时, $\lambda_w = R_{max}$ 。

因而有:

$$\frac{W_{(r>R_i)}}{W_T} = 1 - \left(\frac{R_i}{R_{max}} \right)^{3-D} \quad (2)$$

进一步调整得:

$$\frac{W_{(r>R_i)}}{W_T} = \left(\frac{R_i}{R_{max}} \right)^{3-D} \quad (3)$$

式中 r 为土壤颗粒粒径 mm ; $W_{(r>R_i)}$ 为粒径小于 R_i 的颗粒累积质量(这里的体积均为体积百分数); W_T 为土壤颗粒的总质量; R_{max} 为最大粒径 mm ; D 是土壤颗粒体积分形维数; $W_{(r>R_i)}/W_T$ 是粒径小于的土壤颗粒的累积质量百分数; 计算时 R_i 取某级粒级上限值与下限值的均值。通过对公式(3)取对数后,用直线拟合的方法即可求出土壤粒径分布分形维数 D 值^[7,8]。

1.4 地统计学

地统计学是以区域化变量理论为基础,以半方差函数为基本工具的一种数学方法。半方差函数是描述土壤性质空间变异的一个函数,反映了不同距离观测值的空间自相关程度,它是研究土壤特性空间变异性的关系,同时也是进行空间布局估计的基础。常用半方差函数模型有环状模型(Circular)、有球状(Spherical)、高斯(Gaussian)和指数模型(Exponential)等,公式如下^[12]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (4)$$

式中, $\gamma(h)$ 为半方差函数; h 为步长; $N(h)$ 为观测样点对数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别是区域化变量在空间位置和的实测值。

Kriging 插值法是利用区域化变量的原始数据和半方差函数的结构特点,对未测点的取值进行线性无偏最优估计的一种方法。其算法如下^[14]:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (5)$$

式中 $Z^*(x)$ 为点 x 处的估计值 $Z(x_i)$ 为参与估计的第 i 个有效观测值, N 为参与估计的有效观测值个数, λ_i 为赋予观测值 $Z(x_i)$ 的权重(其和为 1),表示各观测值对估计值 $Z^*(x)$ 的贡献,在保证估值无偏性(即估值偏差的平均值为 0)和最优性

(即估值方差最小)条件下,可由变量半方差函数计算。

2 结果与分析

2.1 土壤粒径和分形维数基本特征及其关系

研究区土壤粒径分布和分形维数的基本统计特征列于表 1,土壤颗粒含量均表现为中等程度的变异,变异系数为粘粒 > 砂粒 > 粉粒,细颗粒变异较大,这与姜娜的研究结果类似,可能与山地区域土壤粘粒水力搬运的作用较大有关。根据土壤粒径分布分形维数计算公式,计算得到 341 个土壤样品的分形维数 D 值,研究区土壤粒径分形维数在 2.52 ~ 2.93,均值为 2.82,变异系数为 2.33%,表现弱变异,主要集中在 2.7 ~ 2.8 和 2.8 ~ 2.9,分别占总样本数的 26.98% 和 61.00%, >2.9 和 <2.7 的样本分别仅为 7.04% 和 4.99%。经 K-S 检验(Kolmogorov-Smirnov test),土壤粉粒和粘粒含量符合正态分布,砂粒含量和分形维数 D 值经对数转换后符合对数正态分布,满足地统计分析的要求。

由表 2 可知,不同质地土壤的砂粒含量、粘粒含量和分形维数差异达极显著水平,粉粒含量差异达显著水平。为进一步明确分形维数与不同粒级含量的关系,对分形维数与砂粒、粉粒和粘粒含量进行了回归分析(图 3),分形维数 D 值与土壤粘粒含量的回归方程为 $y = 178.1x - 469.5 (R^2 = 0.902, P = 0.000)$,呈极显著正相关,与粉粒的回归方程为 $y = -43.81x + 158.5 (R^2 = 0.408, P = 0.000)$,呈极显著负相关,与砂粒的回归方程为 $y = -134.3x + 411.0 (R^2 = 0.830, P = 0.000)$,呈极显著负相关。从决定系数 R^2 的大小来看,分形维数 D 值与粘粒的关系最为紧密,其次是砂粒,最后是粉粒,反映其受土壤细颗粒的影响较大。这一结果表明,土壤颗粒质量分形维数 D 值可以用于判定不同土壤样品间质地的差异。

表 1 土壤粒径和分形维数描述性统计

Tab. 1 Descriptive statistics of soil particle size distribution and related fraction dimension

n 指标	均值	标准差	变异系数	极小值	极大值	P_{K-S1}	P_{K-S2}	分布类型
砂粒	31.73%	9.69	30.55	11.03	56.94	0.019	0.224	对数正态
粉粒	34.84%	4.51	12.94	21.75	46.16	0.912	-	正态
粘粒	33.43%	12.33	36.88	5.94	62.18	0.321	-	正态
分形维数	2.82	0.07	2.33	2.52	2.93	0.005	0.060	对数正态

注: P_{K-S1} 和 P_{K-S2} 分别为原始数据和经对数转换后的 Kolmogorov-Smirnov 正态检验统计量。

表 2 不同质地土壤粒径分布和分形维数

Tab. 2 Soil particle size distribution, D values at separate soil textures

土壤质地	N	砂粒/%	粉粒/%	粘粒/%	分形维数
轻粘土	88	21.08D	30.95b	47.97A	2.89
重壤土	155	30.39C	35.73a	33.88B	2.84
中壤土	93	42.81B	36.87a	20.32C	2.75
轻壤土	5	54.74A	37.66a	7.60D	2.59

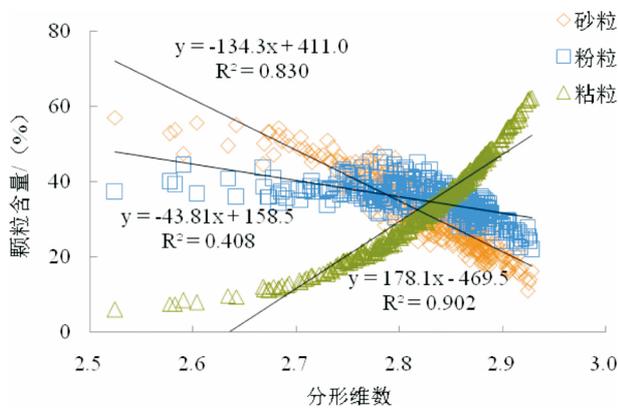


图 3 分形维数与土壤颗粒组成的关系

Fig. 3 Relationship of D value to soil composition

2.2 土壤粒径和分形维数空间变异分析

2.2.1 半方差函数

半方差函数用于描述区域化变量的空间变异,可以反映不同距离观测值之间的变化,被证明是定量研究在空间分布上既有随机性又有结构性的变量的有力工具^[14]。半方差函数模型拟合的好坏决定了空间结构分析的可靠性,进而直接决定了空间插值精度^[15]。因此分别用不同模型对区域土壤颗粒质量百分数和分形维数进行拟合,通过对不同模型的决定系数和残差平方和的比较,获得了各指标的最优半方差函数模型及其相关参数(表 3),并绘制了半方差拟合图(图 4)。由表 3 和图 4 可知,各指

标在变程范围内的点与理论模型曲线十分接近,且决定系数(R^2)在 0.975-0.997,表明选取的模型具有很高的拟合精度,能够很好地反映土壤颗粒及其分形维数空间结构特征。

块金值 C_0 是滞后距离为 0 时的半方差(表 3、图 4),是由随机因素引起变异,较大的块金值表明较小取样尺度上的一些过程不容忽视; C 为偏基台值,也叫结构方差,是由结构性因素引起的变异; $(C_0 + C)$ 为基台值,是半方差随滞后距离递增至一定程度后出现的平稳值,表示系统内总的变异;块金值与基台值之比 $C_0 / (C_0 + C)$ 为块金效应,可以用于度量系统变量的空间相关性程度,以及结构因素和随机因素对空间变异的影响大小,当比值 $< 25\%$,说明系统具有强烈的空间相关性,且空间变异主要受结构性因子影响;如果比例在 $25\% \sim 75\%$,表明系统具有中等的空间相关性,空间变异同时受结构性因素和随机性因素的影响; $> 75\%$ 说明系统空间相关性很弱,且空间变异主要受随机性因子影响^[16]。本研究中,土壤颗粒和土壤粒径分形维数的块金效应均在 $25\% \sim 75\%$,表明土壤颗粒质量分数和土壤粒径分形维数具有中等的空间相关性,其空间变异是结构性因素和随机性因素共同作用的结果。变程表示随机变量在空间上的自相关性尺度,也称为空间最大相关距离,反映了变量空间自相关范围的大小,揭示了结构性因素控制系统变量空间异质性距离的远近^[17]。在变程范围内,变量间存在空间相关性,超过变程范围,则认为变量时相互独立的^[18]。在本研究中,颗粒质量分数和分形维数的变程仅为 0.12-0.27 km,表明其空间自相关范围较小。

2.2.2 空间分布

根据得到的半方差函数理论模型,利用普通克

表 3 土壤颗粒含量和土壤粒径分布分形维数半方差函数模型及其插值精度

Tab. 3 Semi variogram function of soil particle size content and D values and its interpolation precision

指标	模型	块金值	基台值	块金效应	变程	决定系数	残差	插值精度	
		C_0	$C_0 + C$	$C_0 / (C_0 + C)$				RSS	RMSSE
砂粒	指数模型	40.00	84.10	47.56	0.16	0.997	53.4	1.022	0.643
粉粒	高斯模型	9.41	22.35	42.10	0.12	0.978	6.53	1.055	0.591
粘粒	球状模型	65.80	151.00	43.58	0.27	0.979	204.00	1.028	0.642
分形维数	球状模型	0.00161	0.00387	41.60	0.17	0.975	1.55E-07	0.954	0.617

注: RMSSE 为标准化均方根误差; r 为实测值与预测值的相关系数($n = 341$)。

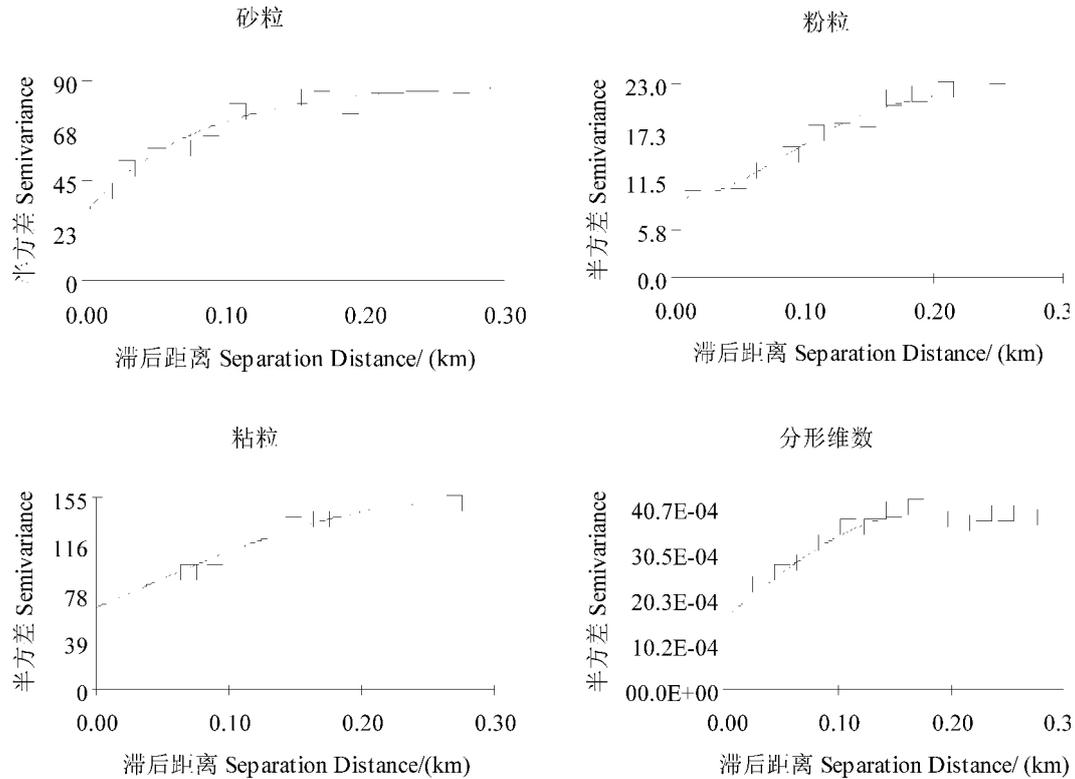


图 4 土壤颗粒含量和土壤粒径分布分形维数半方差函数图

Fig. 4 Semi variogram of soil particle size content and D values

表 4 不同分形维数土壤养分含量的差异

Tab. 4 Soil nutrient contents at different D value groups

分形维数	样本数	全氮/(g/kg)	全磷/(g/kg)	全钾/(g/kg)	碱解氮/(mg/kg)	有效磷/(mg/kg)	速效钾/(mg/kg)
>2.9	24	1.63Aa	0.94ABa	15.64Aa	108.28ABab	23.20Bc	175.52Aa
2.8-2.9	208	1.58Aa	0.99Aa	12.89Ab	114.69Aa	42.38Ab	142.65Ab
2.7-2.8	92	1.15Bb	0.79Bb	8.42Bc	102.83Bb	53.08Aa	104.29Bc
<2.7	17	1.01Bb	0.67Bb	6.99Bc	96.07Bb	56.96Aa	81.80Bd

里格插值法 绘制了土壤颗粒质量分数和粒径分形维数空间分布图(图 5),插值精度见表,RMSSE 接近 1, r 在 0.591 ~ 0.643 ($P < 0.005$),插值精度较高。由图 5 所示,研究区土壤颗粒质量分数和粒径分形维数表现出一定的空间分布规律,高低值区域分异明显。土壤砂粒质量分数大致呈现西高东低的格局,高值区分布在西部,低值区主要分布在东部和南部;土壤粉粒高值区主要分布在西北部,低值区西南部 and 东部;土壤粘粒质量分数大致呈现东高西低的格局,高值区分布在东部和西南部;土壤粒径分形维数 D 值的呈现东高西低的格局,与土壤粘粒空间分布格局相似,高值区分布在东部和西南部。

2.3 土壤分形维数与主要养分的关系

将分形维数 D 与土壤主要养分进行相关分析,

结果显示分形维数 D 值与全氮、全磷、全钾、碱解氮和速效钾呈极显著正相关(相关系数依次为 0.469^{**}, 0.373^{**}, 0.412^{**}, 0.166^{**}, 0.375^{**}, P 值均为 0.000),与速效磷含量呈极显著负相关($r = -0.325^{**}$)。将分形维数 D 值按 0.1 的组距进行分组,并对各分组的主要养分含量进行多重比较(表 4),结果表明,主要养分含量在分形维数分组间差异均达到极显著水平,全氮、全磷和碱解氮含量均以分形维数 D 值 2.8-2.9 分组最高,显著或极显著高于分组 2.7-2.8 和 <2.7,但与分组 >2.9 差异未达显著水平,总体上表现为随分形维数的增加而增加;全钾和速效钾含量以分形维数 D 值 >2.9 分组最高,显著或极显著高于其他分组,其他分组间亦表现出不同水平的差异性,表现为随分形维数的

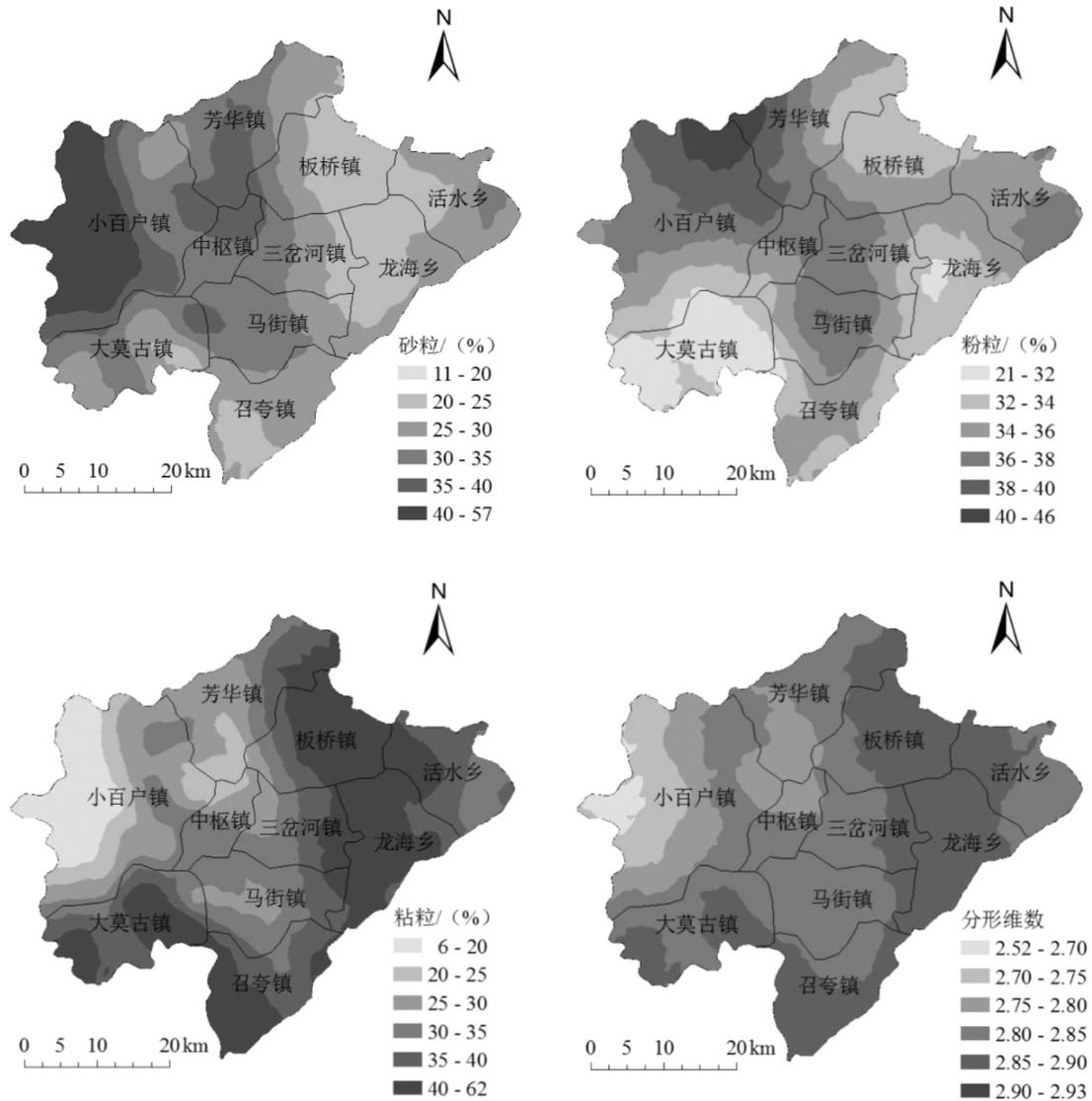


图5 植烟土壤颗粒含量和土壤粒径分布分形维数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of soil particle size content and D values

增加而逐级递增的趋势;有效磷含量与其他各项养分指标的规律相反,以分形维数 D 值 < 2.7 分组最高,且表现为随分形维数 D 值增加而逐级递减的规律,可能与土壤粘粒对有效磷的固定有关。该结果表明,分形维数在一定程度上可用于表征土壤的养分状况。

2.4 土壤粒径和分形维数主要影响因素

2.4.1 海拔和有机质

土壤颗粒含量及其分形维数 D 值与土壤有机质含量和海拔的相关分析结果见表5,砂粒含量和粉粒含量与有机质含量呈负相关关系,分别达极显著和显著水平,粘粒及分形维数 D 值与有机质含量呈极显著正相关;砂粒含量与海拔呈极显著负相关,粘粒及分形维数 D 值与海拔呈极显著正相关,粉粒

与海拔相关性不显著。这一研究表明,海拔和有机质对土壤颗粒含量及其分形维数 D 有一定影响。

表5 土壤颗粒质量分数和粒径分形维数与海拔及有机质的相关性

Tab. 5 Relationship of mass fraction of soil particle and D Value to elevation, organic matter

指标	有机质		海拔	
	相关系数	P 值	相关系数	P 值
砂粒	-0.510**	0.000	-0.350**	0.000
粉粒	-0.115*	0.034	-0.097	0.073
粘粒	0.444**	0.000	0.310**	0.000
分形维数	0.450**	0.000	0.263**	0.000

2.4.2 地形

地形影响土壤颗粒的搬运过程,并最终影响区域土壤的颗粒组成。对不同地形对土壤颗粒及其分形维数的影响进行了方差分析,砂粒含量在不同地形间存在显著差异($P=0.040$),粉粒含量、粘粒含量和分形维数 D 在不同地形间存在极显著差异(P 值分别为 0.000、0.002 和 0.001)。为了进一步了解不同地形间的差异性,进行了多重比较(表 6),砂粒含量均以河槽最高,山地最低;粉粒含量以河槽最高,丘陵最低;粘粒含量以山地最高,河槽最低;分形维数 D 值以山地最高,河槽最低。

2.4.3 土壤类型

不同土壤类型对土壤颗粒及其分形维数的影响的方差分析结果表明,砂粒含量和分形维数 D 在不同土壤类型间无显著差异($P=0.040$),粉粒含量、粘粒含量在不同地形间分别存在极显著差异和显著差异(P 值分别为 0.000 和 0.039)。进一步进行了多重比较(表 7),砂粒含量以新积土最高,红壤最

低;粉粒以水稻土和新积土最高,红壤最低,差异极显著;粘粒含量以红壤最高,水稻土最低,两者差异极显著;分形维数 D 值以红壤最高,水稻土最低。

2.4.4 轮作模式

不同轮作模式对土壤颗粒及其分形维数的影响的方差分析结果显示,3 个粒级的颗粒含量及分形维数 D 值在不同轮作模式间存在极显著差异(P 值分别为 0.000、0.012、0.002 和 0.005),表明轮作模式对土壤粒径分布和土壤粒径分形维数的影响较大。进一步进行了多重比较(表 8),砂粒和粉粒含量均以油菜—烤烟最高,苕子—烤烟最低,差异极显著;粘粒含量均以油菜—烤烟最高,苕子—烤烟最低,差异极显著;粘粒含量和分形维数 D 值以苕子—烤烟最高,油菜—烤烟最低,差异极显著。

3 结论

陆良烟区土壤颗粒含量均表现为中等程度的变

表 6 不同地形土壤颗粒质量分数和粒径分形维数差异

Tab. 6 Mass fraction of soil particle on different terrains and corresponding differences in D values

地形	砂粒 /%	粉粒 /%	粘粒 /%	分形维数
山地	29.91 ± 9.86Ab	34.41 ± 3.95Bc	35.68 ± 11.99Aa	2.83 ± 0.06Aa
丘陵	32.42 ± 9.73Aab	32.92 ± 4.75Bd	34.66 ± 13.16ABa	2.83 ± 0.07Aab
平坝	32.84 ± 7.84Aa	36.57 ± 3.78Ab	30.59 ± 10.13Bb	2.81 ± 0.05Ab
河槽	34.44 ± 9.95Aa	38.79 ± 5.45Aa	26.77 ± 13.3Bb	2.78 ± 0.08Bc

表 7 不同类型土壤颗粒质量分数和粒径分形维数差异

Tab. 7 Mass fraction of soil particle in different soil types and corresponding differences in D values

土壤类型	砂粒 /%	粉粒 /%	粘粒 /%	分形维数
紫色土	31.63 ± 12.97Aa	34.72 ± 7.29ABab	33.65 ± 20.09ABab	2.82 ± 0.09Aa
新积土	32.19 ± 7.92Aa	37.98 ± 4.09Aa	33.93 ± 8.5ABab	2.83 ± 0.04Aa
水稻土	31.72 ± 10.43Aa	37.49 ± 4.18Aa	30.32 ± 9.99Bb	2.81 ± 0.06Aa
红壤	28.09 ± 5.54Aa	33.61 ± 4.08Bb	34.67 ± 13.03Aa	2.83 ± 0.07Aa

表 8 不同轮作模式土壤颗粒质量分数和粒径分形维数差异

Tab. 8 Mass fraction of soil particle in different crop rotation patterns and corresponding differences in D values

轮作模式	砂粒 /%	粉粒 /%	粘粒 /%	分形维数
油菜—烤烟	33.50 ± 8.58Aa	35.88 ± 1.92Aa	30.62 ± 9.12Bb	2.82 ± 0.05Bb
大麦—烤烟	29.78 ± 8.64ABab	35.47 ± 4.13Aa	34.75 ± 11.53Bb	2.83 ± 0.06ABb
豌豆—烤烟	26.78 ± 6.38ABb	34.33 ± 4.18Aab	38.89 ± 9.21ABab	2.85 ± 0.04ABab
萝卜—烤烟	33.32 ± 10.3Aa	33.10 ± 4.08Aab	33.59 ± 13.38Bb	2.82 ± 0.07Bb
苕子—烤烟	24.90 ± 5.31Bb	32.09 ± 3.05Ab	43.01 ± 6.46Aa	2.87 ± 0.02Aa
空闲—烤烟	32.59 ± 9.99Aa	34.64 ± 4.84Aa	32.77 ± 12.71Bb	2.82 ± 0.07Bb

异,均值分别为 31.73% (砂粒)、34.84% (粉粒) 和 33.43% (粘粒),分形维数 D 值表现为弱变异,均值为 2.82,土壤粉粒和粘粒含量符合正态分布,砂粒含量和分形维数 D 值经对数转换后符合对数正态分布。土壤粒径分形维数 D 表现为,为轻粘土 > 重壤土 > 中壤土 > 轻壤土,土壤质地越粘,分形维数越大;土壤颗粒分形维数与土壤粘粒含量呈极显著正相关关系,与粉粒及砂粒含量呈极显著负相关关系,决定系数绝对值表现为 $R^2_{粘粒} > R^2_{砂粒} > R^2_{粉粒}$;表明土壤粒径分布分形维数可用于判定土壤质地的差异,并可直观地反映土壤粒粒构成。

土壤颗粒和土壤粒径分形维数的块金效应均在 25% ~ 75%,表明土壤颗粒质量分数和土壤粒径分形维数具有中等的空间相关性,空间变异是结构性因素和随机性因素共同作用的结果,变程仅为 0.12 ~ 0.27 km,表明其空间自相关范围较小。研究区土壤颗粒质量分数和粒径分形维数空间分布规律明显,土壤砂粒质量分数大致呈现东西变化格局,高值区分布在西部,低值区主要分布在东部和南部;土壤粉粒高值区主要分布在西北部,低值区西南部和东部;土壤粘粒质量分数大致呈现东高西低的格局,高值区分布在东部和西南部;土壤粒径分形维数 D 值的呈现东高西低的格局,与土壤粘粒空间分布格局相似,高值区分布在东部和西南部。分形维数 D 值与全氮、全磷、全钾、碱解氮和速效钾呈极显著正相关,与速效磷含量呈极显著负相关,且土壤养分含量在分形维数分组间的差异达显著或极显著水平,表明分形维数 D 在可用于表征土壤的养分状况。土壤粒径和分形维数的影响因素研究表明,海拔高度、有机质、土壤类型、地形、轮作模式均对土壤颗粒含量和土壤粒径分形维数有显著影响,表现为有机质含量高,土壤分形维数也高;海拔越高,土壤粘粒和分形维数也高;苜蓿-烤烟轮作,土壤分形维数高。因此,低海拔地区可以种植绿肥增加土壤有机质,以提高土壤分形维数和养分含量,高海拔地区可以考虑种植耗地植物维持土壤养分。

参考文献 (References)

- [1] GIMENEZ D, PERFECT E, RAWLS W J, et al. Fractal models for predicting soil hydraulic properties: a review. *Engineering Geology*, 1991, 48(3): 161-183
- [2] 战海霞, 张光灿, 刘霞, 等. 沂蒙山林区不同植物群落的土壤颗粒分形与水分入渗特征 [J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(1): 49-56 [ZHAN Haixia, ZHANG Guangcan, LIU Xia, et al. Fractal features of soil particle size distribution and infiltration characteristics under different vegetation communities in the forestland of yimeng mountains area [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(1): 49-56]
- [3] 姜娜, 邵明安, 雷廷武. 水蚀风蚀交错带坡面土壤入渗特性的空间变异及其分形特征 [J]. *土壤学报*, 2005, 42(6): 904-908 [JIANG Na, SHAO Mangan, LEI Tingwu. Fractal dimension and spatial variability of soil water infiltration properties on natural slope in a water-wind erosion interlaced region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6): 904-908]
- [4] 吕圣桥, 高鹏, 耿广坡, 等. 黄河三角洲滩地土壤颗粒分形特征及其与土壤有机质的关系 [J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 134-138 [LV Shengqiao, GAO Peng, GENG Guangpo, et al. Characteristics of soil particles and their correlation with soil organic matter in lowlands of the yellow river Delta [J]. *Journal of soil and water conservation*, 2011, 25(6): 134-138]
- [5] KRAVCHENKO A N, BOAST C W, BULLOCK D G. Multiracial analysis of soil spatial variability [J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91(6): 1033-1041
- [6] 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 [LI Decheng, ZHANG Taolin. Fractal features of particle size distribution of soils in China [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(4): 263-265]
- [7] 管孝艳, 杨培岭, 吕焯. 基于多重分形的土壤粒径分布与土壤物理特性关系 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42(3): 44-50 [GUAN Xiaoyan, YANG Peiling, LV Ye. Relationships between soil particle size distribution and soil physical properties based on multifractal [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(3): 44-50]
- [8] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53: 987-996
- [9] 王彦亭, 谢剑平, 李志宏. 中国烟草种植区划 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 17-31 [WANG Yanting, XIE Jianping, LI Hongzhi, et al. Tobacco Cropping Regionalization in China [M]. Beijing: Science Press, 2010: 17-31]
- [10] 秦耀东. 土壤物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 60-67 [QIN Yaodong. Soil physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 60-67]
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 23-68 [LU Rukun. The analysis method of Soil Agricultural Chemistry [M]. Beijing: Chinese agricultural science and Technology Press, 2000: 23-68]
- [12] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 65-132 [WANG Zhengquan. Geostatistics and its application in ecology [M]. Beijing: Science Press, 1999: 65-132]
- [13] SHAKIL A R. Geostatistical analysis of soil moisture measurements and remotely sensed data at different spatial scales [J]. *Environmental Geology*, 2004, 45: 339-349
- [14] 赵业婷, 常庆瑞, 李志鹏, 等. 渭北台塬区耕地土壤有机质与全氮空间特征 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(8): 140-148 [ZHAO Yeting, CHANG Qingrui, LI Zhipeng, et al. Spatial char-

- acteristics of soil organic matter and total Nitrogen in Cultivated Land of Weibei Tableland Area [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 140-148]
- [15] 王圣伟, 冯娟, 刘刚, 等. 多嵌套空间尺度农田土壤重金属空间变异研究 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 128-135 [WANG Shengwei, FENG Juan, LIU Gang, et al. Multi-nesting spatial scales of soil heavy metals in farmland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 128-135]
- [16] 李强, 周冀衡, 杨荣生, 等. 曲靖植烟土壤养分空间变异及土壤肥力适宜性评价 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 950-956 [LI Qiang, ZHOU Jiheng, YANG Rongsheng, et al. Soil nutrients spatial variability and soil fertility suitability in Qujing tobacco planting area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(4): 950-956]
- [17] 武德传, 罗红香, 宋泽民, 等. 黔南山地植烟土壤主要养分空间变异和管理分区 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1701-1707 [WU Dechuan, LUO Hongxiang, SONG Zemin, et al. Spatial variability and management zone of soil major nutrients in tobacco fields in Qiannan mountainous region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1701-1707]
- [18] BEKELE A, HUDNALL WH. Spatial variability of soil chemical properties of a prairie-forest transition in Louisiana [J]. Plant and Soil, 2006, 280: 7-21

Spatial Variation of Soil Particle Distribution and Its Fractal Dimensions in a Tobacco Planting Area

—A Case Study of Luliang Tobacco Growing Area

LI Qiang¹, LI Zhiwei², WANG Quan³, LUO Wei², ZHOU Jiheng¹

(1. Tobacco Research Institute, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Sichuan Tobacco Industrial Corporation, Chengdu 610017, China;

3. Guangxi Tobacco Industrial Corporation, Nanning 530001, China)

Abstract: Based on GPS technology, 341 soil samples were collected from areas in Luliang County. Descriptive analysis characteristics, spatial distribution of soil particle and its fractal dimensions (D value) were studied. Relationship between D value and soil particle distribution as well as the main nutrients were analyzed and special attention was paid to the influencing factors of soil particle content and D value. The results indicated that there were significant or very significant differences of soil particle content and D value between different soil textures: light clay > heavy loam > medium loam > light loam. The opposite was observed with the content of sand and silt. Mean of D value was 2.823 with an amplitude of 2.524~2.928. D value had a highly significant positive correlation with the weight percentage of clay soil (<0.002 mm), and at the same time a highly significant negative correlation with the weight percentage of sandy soil (>0.05 mm) and silt (0.002-0.05 mm). There was a moderate spatial correlation between soil particle content and D value. The spatial variability was determined by structural factors and random factors and the variable range was only 0.12-0.27 km. The spatial autocorrelation was of a narrow scope and the spatial distribution was mainly with an east-west trend with high and low values of regional differentiation. There was a highly significant positive correlation between D value and total N, as well as total K, total P, available N, and available K, while there was a highly significant negative correlation between D value and available P. Altitude, organic matter, soil types, terrain, and rotation pattern mode had significant effects on the soil particle content and soil particle size fractal dimension.

Key words: tobacco soil; soil particle distribution; fractal dimension; Luliang