

重庆山地血橙园土壤粒径分形特征^①

李天阳¹, 何丙辉¹, 张 怡², 刘金雪³, 田家乐¹

1. 西南大学 资源环境学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715;

2. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 3. 长江师范学院 经济与工商管理学院, 重庆 408100

摘要: 为了定量描述重庆山地血橙园土壤粒径分形维数特征, 本试验以重庆山地血橙园内血橙—红薯、血橙—花生、血橙—玉米、血橙—纯林、血橙—茄子 5 种模式下的土壤为研究对象, 通过野外调查及室内分析试验, 测定了不同模式土壤的粒径分布及理化性质, 计算了分形维数, 探讨了分形维数与土壤粒径分布及理化性质的关系, 结果表明: 血橙园不同模式下土壤质地可分为砂质粘壤土和壤质粘土两类, 分形维数与土壤质地具有很好的一致性; 土壤砂粒与分形维数达到显著相关($p < 0.05$), 土壤粘粒含量与分形维数达到极显著相关($p < 0.01$), 分形维数大小首先决定于粘粒含量、其次为砂粒含量和粉粒含量; 分形维数与土壤容质量、毛管孔隙度呈正相关, 与土壤 pH 值呈极显著正相关($p < 0.01$), 与非毛管孔隙度、总孔隙度、有机质、全氮、全磷、全钾含量呈负相关, 土壤分形维数能客观表征血橙园土壤粒径分布, 反映土壤肥力特征。

关键词: 土壤粒径分布; 理化性质; 分形维数; 血橙园; 山地

中图分类号: X171.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2015)11-0114-08

重庆是典型的山地城市, 地貌类型以山地为主, 丘陵、中低山约占总面积的 94%, 其中坡度大于 15°的山地面积占 85%^[1]. 大面积的山地在人为的陡坡开垦与降雨等因素综合干扰下, 产生强烈的水土流失. 据重庆市第三次水土流失遥感调查结果, 重庆市中度以上水土流失面积占全市总面积的 47.36%, 强度、极强度和剧烈侵蚀的面积之和占总面积的 16.72%, 平均土壤侵蚀模数达到了 3 548.18 t/a · km², 每年的土壤侵蚀总量达 1.85 亿 t^[2]. 强烈的水土流失不仅导致河道泥沙淤积, 还会引起耕地土壤肥力下降, 江河湖水富营养化^[3]. 引起土壤侵蚀的因素包括了地形地貌、降雨、植被、土壤等, 其中土壤结构稳定性及理化性质是土壤性质好坏的重要表征指标, 其与水土流失、农业面源污染的关系研究很多^[4-7]. 土壤颗粒是土壤结构形成的基础物质, 不同土壤粒径含量的组成构成了不同的土壤质地类型, 进而影响了土壤的物理、化学和生物学过程^[8]. 由于不同粒径土壤理化性质不同, 因此土壤的粒径分布在某种程度上决定了土壤的结构和性质^[9], 所以合理地表征土壤粒径分布就显得尤为重要, 分形理论就是一种定量描述土壤粒径分布的有力工具^[10-12]. 利用分形理论定量描述土壤粒径分布是建立在 Mandelbrot 对自然界中不规则但有着自相似结构的几何体研究之上的^[13], 后经 Arya^[14] 和 Turcotte^[15] 等人推导建立了基于土壤颗粒数量与颗粒直径的关系式, 但此类关系式难于直接用于常规实验数据计算, 其后 Tyler 和 Whecraft^[30] 及杨培岭等^[16] 忽略各粒径土壤颗粒密度差异, 建立了质量分形模型。

目前, 分形模型已经广泛应用于不同土地利用类型^[31-33], 不同森林植被覆盖^[9,22,26] 及外力作用^[17-18] 对土壤结构的影响研究, 但是利用分形理论对耕地资源匮乏, 山地水土流失严重的重庆地区, 特别是对重庆山地农林复合经营模式下土壤结构研究还较少, 因此, 很有必要加强该区域农林复合经营模式下土壤结

① 收稿日期: 2013-09-13

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAD31B03); 国家林业局公益性行业科研专项课题(201104043)。

作者简介: 李天阳(1988-), 男, 四川蓬溪人, 硕士, 主要从事城市水土保持研究。

通信作者: 何丙辉, 博士, 教授。

构性质变化的比较研究. 本文以重庆山地血橙示范园为研究基地, 利用质量分形模型研究血橙园内不同模式土壤粒径分布特点, 测定土壤理化性质, 探讨分形维数与土壤颗粒组成及理化性质的关系, 为深入了解山地血橙园土壤质量, 筛选生态经济效益显著的农林复合模式, 防治山地水土流失及农业面源污染提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市璧山县河边镇(106°09′—106°13′E、29°34′—29°43′N), 海拔变化为 270~400 m, 为中亚热带湿润季风气候区, 具有气候湿润, 雨量充沛的特点. 多年年平均气温 18.3℃, 平均降雨量 1 047.3 mm, 平均日照时数 1 296.3 h, 平均风速 1.6 m/s, 平均相对湿度 80%, 无霜期 337 d. 土壤类型以紫色土为主, 局部分布有黄壤、潮土、红壤、水稻土, 土层深度≤30 cm. 植被为常绿阔叶林带, 主要分布有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柏树(*Cupressus funebris*)、白栎(*Quercus fabri*)等, 经济林以塔罗科血橙(*Citrus sinensis* (L.) Osbeck.)为主, 栽植年限为 2a, 栽植面积为 0.47 km², 栽植密度为 1 200 株/hm², 血橙园与红薯(*Ipomoea batatas* Lam)、花生(*Arachis hypogaea*)、玉米(*Zea mays*)、茄子(*Solanum melongena*)等农作物混作.

1.2 土壤样品采集

2012 年 8 月, 在研究区内按照血橙—红薯、血橙—花生、血橙—玉米、血橙—茄子、血橙纯林(对照) 5 种模式各选择 3 块条件基本一致的典型样地, 每块样地选择 3 个点, 用环刀分别对 0~10、10~20 cm 土层采样, 同时在每个点按照“S 形”5 点法分别采集 0~10、10~20 cm 土层混合样, 用四分法剔除多余土壤, 最终采集 1 kg 左右的混合样品带回实验室, 弃除砾石草根等杂物, 风干、过筛后备用. 不同模式采样点的基本情况见表 1.

表 1 不同模式基本情况

模式	地形	地势	坡度	坡向	土壤类型	植被覆盖率/%
血橙—红薯	山中部	缓坡	10°	SE30°	紫色土	65
血橙—花生	山中部	缓坡	10°	SE30°	紫色土	70
血橙—玉米	山中上部	缓坡	12°	S	紫色土	45
血橙纯林	山中下部	缓坡	15°	SW10°	紫色土	30
血橙—茄子	山中下部	缓坡	8°	EN15°	紫色土	35

1.3 样品测定及数据分析

土壤粒径分布按国际制采用比重计法测定, 土壤容质量及孔隙度采用环刀法测定, 土壤 pH 采用电位法, 土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定, 全氮采用半微量开式蒸馏法测定, 全磷采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定, 全钾采用 NaOH 熔融—火焰光度法^[19].

采用 Spss18.0 和 Excel2007 进行实验数据的分析.

1.4 土壤粒径分形维数计算方法

土壤粒径的分形维数采用质量分形模型计算^[16]:

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

(1)

式中: δ 为土壤颗粒的粒径变量, d_i 为两筛分粒级 d_i 和 d_{i+1} 间粒径的平均值, d_{\max} 表示最大粒级土粒的平均直径, $W(\delta < d_i)$ 表示粒径小于 d_i 的土壤颗粒累积质量, W_0 表示土壤各粒级质量之和, D 值即为分形维数.

将方程(1)两边取对数, 可变形为:

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

(2)

由方程(2) 可以看出 $\lg \frac{W(\delta < d_i)}{W_0}$ 和 $\lg \frac{d_i}{d_{\max}}$ 之间为线性关系, 其中 $3 - D$ 为直线斜率, 因此可利用回归分

析法求得 D 值.

2 结果与分析

2.1 血橙园不同模式土壤粒径分布特征

由表 2 可以看出, 血橙园土壤虽然为紫色土, 但其土壤质地可以分成两类, 一类为血橙—红薯、血橙—花生、血橙—玉米模式下的砂质粘壤土, 另一类为血橙纯林、血橙—茄子模式下的壤质粘土. 各模式土壤不同粒级颗粒含量均达到极显著水平($p<0.01$). 在 $2.0\sim0.2\text{ mm}$ 粒级范围内, 血橙—红薯模式颗粒含量最大, 达到了 37.86% , 血橙—茄子模式颗粒含量最小, 为 2.47% , 二者相差了 $1\,432.79\%$, 此外, 血橙—花生、血橙—玉米、血橙—纯林模式下的颗粒含量分别比血橙—茄子模式大 $1\,202.83\%$, 209.31% , 203.64% . 在 $0.2\sim0.02\text{ mm}$ 范围内, 血橙—玉米模式的颗粒含量最大, 为 48.63% , 血橙—红薯模式的颗粒含量最小, 为 27.58% , 二者相差 76.32% , 血橙—茄子、血橙纯林、血橙—花生模式的颗粒含量分别比血橙—红薯模式大 56.42% , 40.75% , 27.84% , 在 $2.0\sim0.02\text{ mm}$ 范围内颗粒含量则表现为血橙—花生(67.44%) $>$ 血橙—红薯(65.44%) $>$ 血橙—玉米(56.27%) $>$ 血橙纯林(46.32%) $>$ 血橙—茄子(45.61%). 在 $0.02\sim0.002\text{ mm}$ 范围内, 血橙—茄子模式含量最大, 为 28.01% , 血橙—花生模式含量最小, 为 16.13% , 二者相差 73.65% , 而血橙纯林、血橙—玉米、血橙—红薯的颗粒含量分别比血橙—花生大 64.85% , 54.87% , 18.04% . 在 $<0.002\text{ mm}$ 粒级中, 血橙纯林的含量最大, 为 27.10% , 血橙—红薯模式土壤颗粒含量最小, 为 15.53% , 二者相差 74.50% , 血橙—茄子、血橙—玉米、血橙—花生模式分别比血橙—红薯模式大 69.93% , 20.80% , 5.86% . 血橙园各模式土壤质地及粒径分布出现上述差异的原因在于不同模式地上植被组成及地下根系分布不同, 使得各模式改善土壤性质的效果不同.

表 2 不同模式土壤粒径分布及分形维数

模 式	土壤质地	粒 径 分 布				分形维数 D	决定系数 R^2
		$2.0\sim0.2/mm$	$0.2\sim0.02/mm$	$0.02\sim0.002/mm$	$<0.002/mm$		
血橙—红薯	SCL	37.86A	27.58E	19.04C	15.53C	2.669B	0.966
血橙—花生	SCL	32.18B	35.26D	16.13D	16.44C	2.670B	0.974
血橙—玉米	SCL	7.64C	48.63A	24.98B	18.76B	2.667B	0.946
血橙纯林	LC	7.50C	38.82C	26.59AB	27.10A	2.722A	0.930
血橙—茄子	LC	2.47D	43.14B	28.01A	26.39A	2.714A	0.928

注: 不同大写字母表示达到 0.01 显著水平. SCL: 砂质粘壤土; LC: 壤质粘土.

2.2 血橙园土壤分形维数特征及其与粒径分布的关系

根据方程(2)计算出的土壤颗粒分形维数见表 2, 由表 2 可以看出, 血橙纯林模式的土壤颗粒分形维数最大, 为 2.722, 其后依次为血橙—茄子 2.714, 血橙—花生 2.670, 血橙—红薯 2.669, 血橙—玉米 2.667, 对分形维数进行变异分析, 其变异系数(CV)为 0.964% , 一般认为, $CV<10\%$ 为弱变异, $10\%<CV<100\%$ 为中等变异性, $CV>100\%$ 为高度变异性^[29], 这说明了血橙园土壤颗粒分形维数变异性极弱. 各模式的分形维数回归方程决定系数 R^2 在 $0.928\sim0.974$ 之间, 这说明了分形维数能很好地表征血橙园土壤粒径分布, 而对分形维数进行方差分析结果表明各模式的土壤颗粒分形维数总体达到极显著水平($p<0.01$), 其中血橙—红薯、血橙—花生、血橙—玉米模式与血橙纯林、血橙—茄子模式之间差异极显著, 这与土壤质地分类结果一致.

图 1 表示了血橙园土壤各粒级颗粒含量与分形维数之间的关系, 由图 1 可以看出, 分形维数与 $2.0\sim0.2\text{ mm}$ 颗粒含量之间呈负相关, 可由方程 $y=-392.45x+1\,072.6(n=5, R^2=0.433\,5)$ 描述; 与 $0.2\sim0.02\text{ mm}$ 颗粒含量之间呈正相关, 方程式为 $y=59.354x-120.88(n=5, R^2=0.041\,2)$; 与 $0.02\sim0.002\text{ mm}$ 颗粒含量之间呈正相关, 可由方程 $y=137.36x-346.33(n=5, R^2=0.534)$ 描述; 与 $<0.002\text{ mm}$ 颗粒含量之间呈极显著正相关, 可由方程 $y=195.71x-505.32(n=5, R^2=0.931, p<0.01)$ 描述; 此外分形维数与 $2\sim0.02\text{ mm}$ 颗粒含量之间呈显著负相关, 可由方程 $y=-333.1x+951.72(n=5, R^2=$

0.780 2, $p<0.05$)描述. 同时, 比较上述方程的决定系数, 可以看出粘粒含量(<0.002 mm)能解释分形维数 93.1%的信息, 砂粒($2\sim0.02$ mm)含量则能解释 78.02%, 粉粒($0.02\sim0.002$ mm)最少, 为 53.4%, 这说明决定血橙园土壤颗粒分形维数大小的首先是粘粒含量, 然后是砂粒含量, 而粉粒含量的影响最弱. 综合分析表明随着土壤砂粒的增加, 分形维数减小, 随着粉粒、特别是粘粒含量的增加, 分形维数增大. 可见, 分形维数大小能反应出土壤结构几何形状的组成, 土壤质地越细, 容易形成良好的结构, 分形维数就大, 反之分形维数就小.

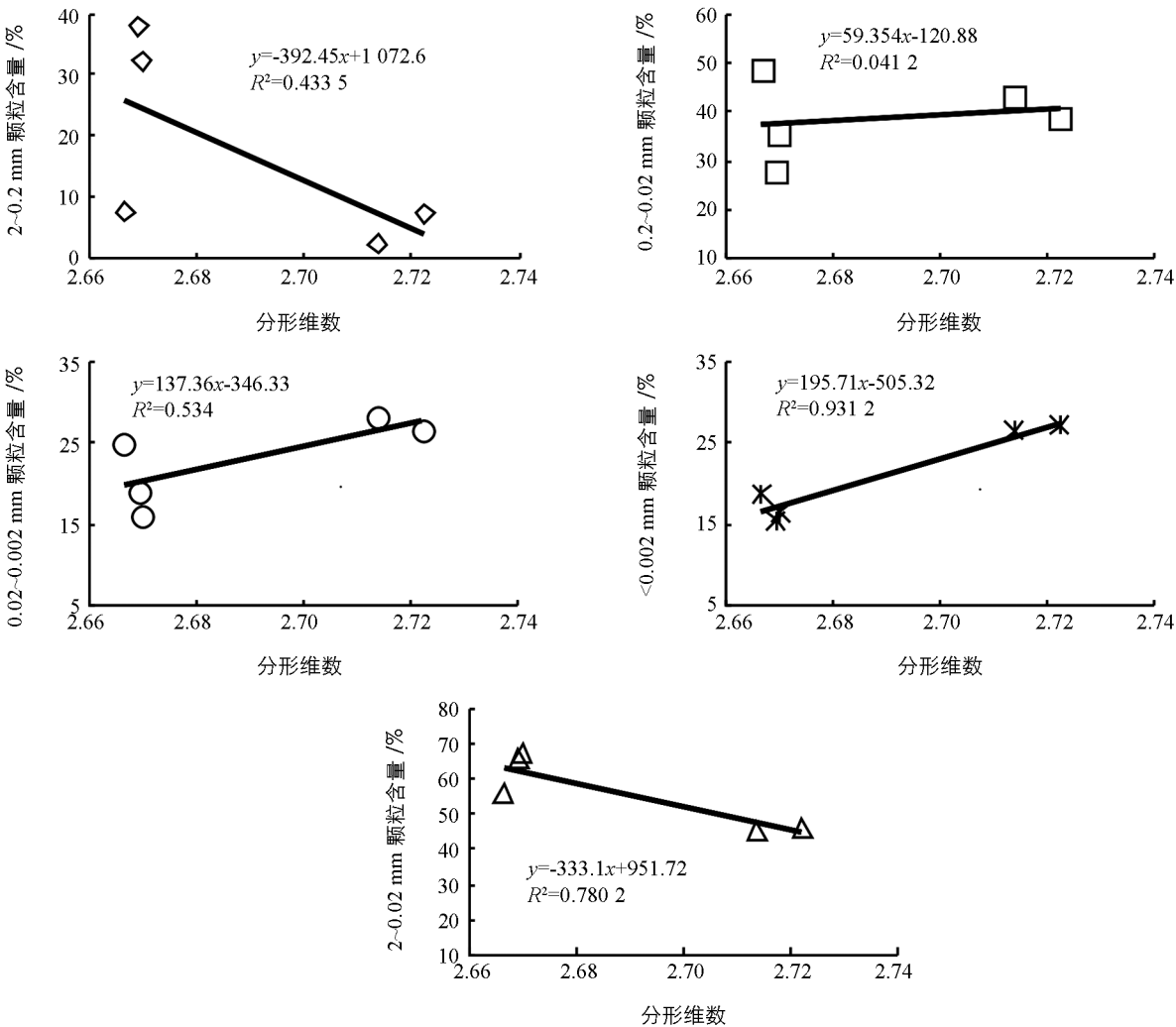


图 1 分形维数与土壤不同粒级颗粒含量的关系

2.3 血橙园土壤分形维数与土壤理化性质的关系

表 3 为土壤的基本理化性质, 对血橙园土壤颗粒分形维数与土壤理化性质之间进行回归分析(图 2), 土壤颗粒分形维数与土壤容质量呈正相关, 关系式为 $y = 2.0369x - 4.1667(n=5, R^2=0.5781)$; 与非毛管孔隙度呈负相关, 关系式为 $y = -112.01x + 314.76(n=5, R^2=0.5956)$; 与毛管孔隙度呈正相关, 关系式为 $y = 24.049x - 28.714(n=5, R^2=0.0459)$; 与总孔隙度呈负相关, 关系式为 $y = -88.001x + 286.15(n=5, R^2=0.1744)$; 与有机质呈负相关, 关系式为 $y = -24.293x + 79.535(n=5, R^2=0.086)$; 与全氮含量呈负相关, 关系式为 $y = -1.6787x + 5.3917(n=5, R^2=0.757)$; 与全磷含量呈负相关, 关系式为 $y = -1.5814x + 5.0048(n=5, R^2=0.0651)$; 与全钾含量呈负相关, 关系式为 $y = -24.592x + 85.539(n=5, R^2=0.081)$; 与土壤 pH 呈极显著正相关, 关系式为 $y = 49.865x - 128.1(n=5, R^2=0.9317, p<0.01)$. 各理化性质指标之间可能存在着多重共线性, 因此, 在进入值为 0.05, 剔除值为 0.10 条件下, 对各理化性质与分形维数进行逐步多元线性回归分析, 发现血橙园土壤颗粒分形维数只与 pH 值呈极显著相关.

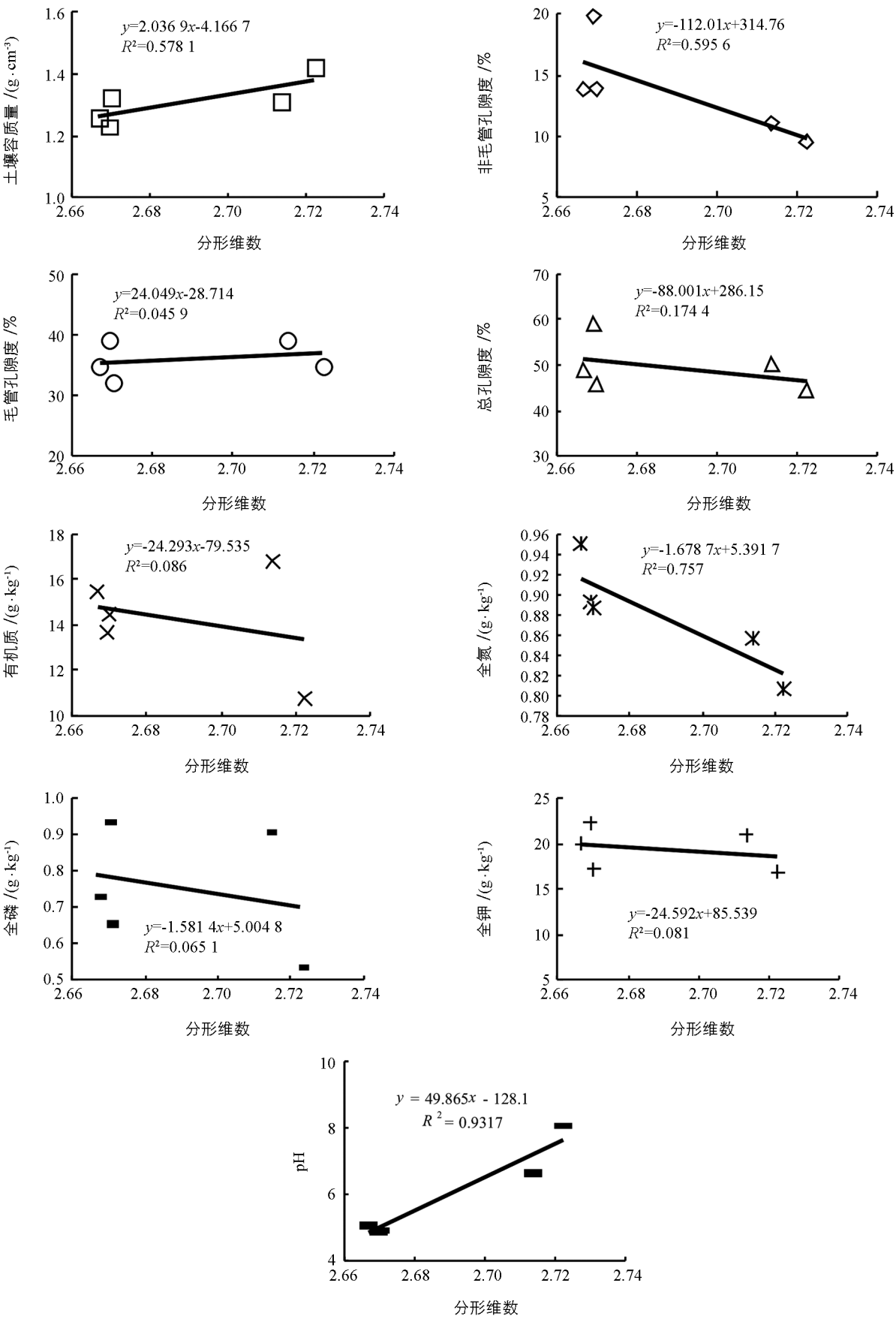


图 2 土壤颗粒分形维数与土壤理化性质关系

表 3 土壤理化性质

模式	土壤容质量/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	非毛管孔 隙度/%	毛管孔隙 度/%	总孔隙 度/%	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH
血橙—红薯	1.23	19.85	39.13	58.98	13.66	0.89	0.93	22.24	4.93
血橙—花生	1.32	13.88	31.98	45.85	14.44	0.88	0.65	17.20	4.96
血橙—玉米	1.26	13.82	34.88	48.70	15.45	0.95	0.73	19.92	5.10
血橙纯林	1.42	9.49	36.25	44.25	10.78	0.81	0.54	16.84	8.10
血橙—茄子	1.31	11.09	38.94	50.03	16.79	0.85	0.91	20.94	6.69

3 讨 论

土壤质地一方面反映了岩石风化、地质沉积过程，以及成土的特征；另一方面又是影响土壤性质及耕作性能的重要因素，它和农业生产有着非常紧密的联系^[20]。在国际制土壤质地分类系统中，砂质粘壤土是指粘粒($<0.002\text{ mm}$)含量在 15%~25%之间，同时砂粒($2.0\sim0.02\text{ mm}$)含量在 55%~85%之间，而壤质粘土中粘粒($<0.002\text{ mm}$)含量在 25%以上^[21]，因此砂质粘壤土与壤质粘土相比，其土壤中大孔隙更多，通气性、透气性更强，但保水和蓄水性能更弱。土壤质地与土壤分形维数密切相关。刘梅龄等^[22]认为土壤质地类型对分形维数的作用有显著差异，即使是同一类型的群落也因土壤质地不同，其分形维数也有差异。本文中，血橙园的土壤类型分为砂质粘壤土及壤质粘土，而各类型土壤的分形维数差异也达到极显著水平($p<0.01$)，砂质粘壤土的分形维数在 2.670 以下(包括 2.670)，壤质粘土的分形维数则大于 2.710，表明用分形维数划分血橙园土壤质地类型可辨性高。分形维数能集中反映土壤的结构和性质，通过分析土壤粒径分布的分形维数可以定量地了解土壤的特征。目前，关于土壤粒径分布与分形维数的关系研究很多，结论也较为一致^[8-11, 16, 20, 22]，即分形维数与土壤砂粒含量呈负相关，与土壤粉粒、粘粒呈正相关。本研究中，土壤粒径分布的分形维数与土壤砂粒($2.0\sim0.02\text{ mm}$)呈显著负相关($p<0.05$)，与粉粒($0.02\sim0.002\text{ mm}$)呈正相关，与粘粒($<0.002\text{ mm}$)呈极显著正相关，说明分形维数可以很好地定量反映血橙园土壤各粒级物质分布状况，而在这个过程中，粘粒含量对分形维数的解释量最大，达到了 93.1%，表明分形维数主要受粘粒含量大小决定，这与贾晓红等^[23]、张世熔等^[24]的研究结果类似。

土壤粒径分形维数用于土壤质地类型划分的同时也可用于分析和预测土壤的理化性质。Su 等^[25]研究发现土壤粒径分形维数与土壤有机质、全氮呈显著的线性正相关，与 pH 值相关性不显著。林武星等^[26]认为土壤粒径分形维数与土壤容质量呈显著正相关，与有机质、全氮、全磷呈显著负相关。Liu 等^[27]发现土壤粒径分形维数与土壤粉粘粒、毛管孔隙度、总孔隙度呈显著正相关，而与土壤砂粒及非毛管孔隙度呈显著负相关。本研究中，分形维数与土壤理化性质关系的分析结果表明，土壤粒径分形维数与土壤容质量、毛管孔隙度呈正相关，与土壤 pH 值呈极显著正相关，与非毛管孔隙度、总孔隙度、有机质、全氮、全磷、全钾含量呈负相关，而运用逐步多元线性回归分析，土壤粒径分形维数则与土壤 pH 呈极显著正相关，这说明土壤粒径分形维数可以客观地反映血橙园土壤肥力特征。除此之外，总结前人研究结果^[22-29]，发现土壤粒径分形维数与土壤理化性质相关性表现不一致，这可能与不同地区土地利用方式不同有关。土地利用方式不同，使得即使是相似的土壤粒径组成，其土壤理化性质也有可能产生较大差异，导致土壤粒径分形维数与土壤理化性质相关性表现出较大差异。本研究中，血橙与不同农作物混作，导致各种模式地上部分植被组成及地下根系分布不同，使得即使是同一种土壤质地，但土壤粒径分布也表现出显著差异，因此使得理化性质表现出差异，分形维数与土壤理化性质的相关性表现出不一致。

4 结 论

1) 血橙园土壤质地类型可划分为两类：砂质粘壤土和壤质粘土。不同混作模式下土壤粒径分布表现出极显著差异($p<0.01$)，土壤粒径分形维数总体上也表现出极显著差异($p<0.01$)，但分形维数与土壤质地分类表现出一致性。

2) 土壤粒径分形维数与土壤砂粒($2.0\sim0.02\text{ mm}$)含量呈显著负相关，与粉粒($0.02\sim0.002\text{ mm}$)含量

呈正相关、与粘粒($<0.002\text{ mm}$)含量呈极显著正相关。粘粒($<0.002\text{ mm}$)含量能解释 93.1% 的分形维数信息, 砂粒($2.0\sim0.02\text{ mm}$)含量能解释 78.02%, 粉粒($0.02\sim0.002\text{ mm}$)含量能解释 53.4%, 说明分形维数首先决定于粘粒含量, 其后分别为砂粒、粉粒。综合而言, 随着土壤砂粒的增加, 分形维数减小, 随着粉粒、粘粒含量的增加, 分形维数增大。

3) 土壤粒径分形维数与土壤容质量、毛管孔隙度呈正相关, 与土壤 pH 值呈极显著正相关, 与非毛管孔隙度、总孔隙度、有机质、全氮、全磷、全钾含量呈负相关。土壤粒径分形维数能客观反映血橙园土壤肥力特征。

参考文献:

- [1] 重庆农业委员会. 重庆农业概况—自然资源[EB/OL]. (2013-07-05) <http://www.cqagri.gov.cn/zw/nygk.asp>.
- [2] 吴佩林, 鲁奇, 甘红. 重庆市水土流失的影响因素及防治对策[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(1): 21-24.
- [3] 张洪江. 土壤侵蚀原理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- [4] 郑子成, 杨玉梅, 李廷轩. 不同退耕模式下土壤抗蚀性差异及其评价模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 199-205.
- [5] 张怡, 何丙辉, 唐春霞. “大横坡+小顺坡”耕作模式对氮及径流流失的影响[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2013, 38(3): 107-112.
- [6] 吴希媛, 张丽萍. 坡地水土流失对水体富营养化贡献的研究进展[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 296-298.
- [7] 霍洪江, 汪涛, 魏世强, 等. 三峡库区紫色土坡耕地氮素流失特征及其坡度的影响[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(11): 112-117.
- [8] 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, 281.
- [9] 周先容, 陈劲松. 川西亚高山针叶林土壤颗粒的分形特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(8): 891-894.
- [10] 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.
- [11] 王富, 贾志军, 董智, 等. 不同生态修复措施下水库水源涵养区土壤粒径分布的分形特征[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 113-117.
- [12] 伏耀龙, 张兴昌, 王金贵. 岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 120-125.
- [13] MANDELBROT B B. The Fractal Geometry of Nature[M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1982.
- [14] 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(6): 1023-1031.
- [15] TURCOTTE D L. Fractal and Fragmentation[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(B2): 1921-1926.
- [16] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [17] 王展, 张玉龙, 虞娜, 等. 冻融作用对土壤微团聚体特征及分形维数的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 83-88.
- [18] 林慧龙, 任继周. 践踏和降水对环县典型草原土壤颗粒分维特征的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(4): 202-209.
- [19] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [20] 曾宪勤, 刘和平, 路炳军, 等. 北京山区土壤粒径分布分形维数特征[J]. 山地学报, 2008, 26(1): 65-70.
- [21] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 刘美龄, 叶勇, 曹长青, 等. 海南东寨港红树林土壤粒径分布的分形特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2008, 27(9): 1557-1561.
- [23] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J]. 地理研究, 2007, 26(3): 518-525.
- [24] 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.
- [25] SU Y Z, ZHAO H L, ZHAO W L, et al. Fractal Features of Soil Particle Size Distribution and the Implication for Indicating Desertification[J]. Geoderma, 2004, 122(1): 43-49.
- [26] 林武星, 黄雍容, 郑郁善, 等. 闽南山地不同密度桉树人工林土壤肥力的分形研究[J]. 山地学报, 2012, 30(6): 663-668.
- [27] LIU X, ZHANG G C, GARY C. H, et al. Fractal Features of Soil Particle-Size Distribution as Affected by Plant Communities in the Forested Region of Mountain Yimeng, China[J]. Geoderma, 2009, 154(1-2): 123-130.
- [28] XU G C, LI Z B, LI P. Fractal Features of Soil Particle-Size Distribution and Total Nitrogen Distribution in a Typical

- Watershed in the Source Area of the Middle Dan River, China [J]. Catena, 2013, 101(2): 17–23.
- [29] 缪驰远, 汪亚峰, 魏欣, 等. 黑土表层土壤颗粒的分形特征 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(9): 1987–1993.
- [30] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal Scaling of Soil Particle Size Distributions: Analysis and Limitations [J]. Soil Sci. Am. 1992. 56(2): 362–369.
- [31] WANG D, FU B J, ZHAO W, et al. Multifractal Characteristics of Soil Particle Size Distribution under Different Land-Use Ttypes on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2008, 72(1): 29 – 36.
- [32] WANG X D, LI M H, LIU S Z, et al. Fractal Characteristics of Soils under Different Land-Use Patterns in the Arid and Semiarid Regions of the Tibetan Plateau, China [J]. Geoderma, 2006, 134(1–2): 56–61.
- [33] 张 兵, 史东梅, 谢均强, 等. 紫色土丘陵区不同种植模式下团聚体分形特征 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2009, 31(3): 119–125.

Fractal Dimension Characteristics of Soil Particle-Size Distribution in a Blood Orange Orchard of Chongqing

LI Tian-yang¹, HE Bing-hui¹, ZHANG Yi²,
LIU Jin-xue³, TIAN Jia-le¹

1. College of Resources and Environment, Southwest University; Key Laboratory of Eco-environments in the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China;

2. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. School of Economics and Business Administration, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China

Abstract: In order to quantitatively describe the fractal dimension characteristics of blood orange (*Citrus sinensis*) orchard in hilly area of Chongqing, soil particle size distribution and physico-chemical properties of the soil under 5 interplanting modes (blood orange-sweet potato, blood orange-peanut, blood orange-maize and blood orange, blood orange-eggplant) were tested based on field investigation and laboratory analysis. The fractal dimensions were computed and the relationships between fractal dimension and soil physico-chemical properties were discussed. The results indicated that soil texture of different types in blood orange orchard could be divided into two categories: sandy clay loam and loamy clay, and fractal dimension had the same rule as soil texture. The contents of soil sand had negative relationship with fractal dimension while contents of soil clay had a significant positive relationship with fractal dimension ($p < 0.01$). Fractal dimension was first determined by the content of clay, and then by the content of sand and silt. Fractal dimension had significant positive relationship with pH values ($p < 0.01$) and had positive relationship with soil bulk density and capillary porosity while negative relationship with non-capillary porosity, total porosity, soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and total potassium. In conclusion, soil fractal dimension can objectively characterize blood orange orchard soil particle size distribution and reflect the characteristics of soil fertility.

Key words: soil particle-size distribution; physical and chemical properties; fractal dimension; *Citrus sinensis* (L.) Osbeck; mountainous region

