广西典型喀斯特地区不同林地土壤粒度分布的单重与多重分形特征

孙 哲，马雄忠，陈宇航
（南宁师范大学 地理科学与规划学院，广西 南宁 530001）

摘　要：［目的］揭示广西典型喀斯特地区不同林地土壤粒度分布的分形特征及其与土壤性质的关系，为石漠化地区林业可持续发展提供科学指导。［方法］测定桉树、马尾松人工林及天然次生林土壤的粒度分布与性质。采用分形模型计算各类林地土壤的单重与多重分形维数，同时探讨土壤分形维数与土壤性质的关联。［结果］相较于天然次生林，桉树与马尾松人工林的容重小 23%和 15%，总孔隙度增大 27%和 17%，黏粒含量分别减少 58%与 42%，砂粒增多 24%与 14%，单重分形维数（D_s）下降 6%与 4%，且有效磷、速效钾和全钙含量均减少（前者分别减少 68%，49%，6%，后者分别减少 42%，40%，25%）。〔容量维度（D_0）－关联维数（D_2）〕，D_q 值域的跨度（ΔD），奇异谱宽（$\Delta\alpha$）是反映土壤粒度分布不同维度上异质性的多重分形参数。这 3 个参数数值上桉树（0.13，1.29，1.52）与马尾松（0.13，0.99，1.18）人工林均大于天然林（0.08，0.83，1.02）。此外，人工林土壤的多重分形参数与土壤养分含量存在更显著的相关性（$p<0.05$）。［结论］喀斯特地区的人工林的种植与经营不当，可能促使土壤细颗粒的流失和关键养分的枯竭，导致土壤粒度分布集中于小概率密集区，增加土壤粒度分布的异质性，进一步加速石漠化的过程。单重分形维数（D_s）能够反映喀斯特林区土壤肥力的退化程度，而多重分形参数还能精细揭示土壤粒径在微观层面上的非均匀分布特征，表明分形维数可作为喀斯特地区人工林土壤质量精准评价的潜在指标。

关键词：喀斯特地区；人工林；土壤粒度分布；单重和多重分形维数；土壤养分

文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2025)01-0010-10　　**中图分类号：**S714.5

文献参数：孙哲，马雄忠，陈宇航.广西典型喀斯特地区不同林地土壤粒度分布的单重与多重分形特征［J］.水土保持通报，2025，45(1)：10-19. Sun Zhe，Ma Xiongzhong，Chen Yuhang. Fractal and multifractal characteristics of soil particle-size distribution in different forest types in typical karst regions of Guangxi［J］. Bulletin of Soil and Water Conservation，2025，45(1)：10-19. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.002；CSTR：32312.14.stbctb.2025.01.002.

Fractal and multifractal characteristics of soil particle-size distribution in different forest types in typical karst regions of Guangxi

Sun Zhe，Ma Xiongzhong，Chen Yuhang
（*School of Geographical Science and Planning*，*Nanning Normal University*，*Nanning*，*Guangxi* 530001，*China*）

Abstract：［Objective］The relationship between the fractal characteristics of soil particle size distribution and properties in different forest types in the typical karst regions of Guangxi Zhuang Autonomous Region（GZAR）was investigated in order to provide scientific guidance for sustainable forestry development in rocky desertification areas.［Methods］The particle size distribution and properties of soil in *Eucalyptus* spp.，*Pinus massoniana*，and natural secondary forests were determined. Single and multiple fractal dimensions of soil from different forest types were calculated using fractal models，and the their correlations with soil properties were explored.［Results］Compared to natural secondary forests，the bulk densities of *Eucalyptus* spp. and *P. massoniana* plantations were 23% and 15% lesser，respectively. However，the total porosities of

收稿日期：2024-08-19　　**修回日期：**2024-10-26　　**采用日期：**2024-10-28
资助项目：广西科技基地和人才专项“广西喀斯特地区典型人工林区土壤结构及水分输运分形特征研究”（桂科 AD23026075），“南流江河岸带典型乡土物种根系特征及其对岸坡稳定性影响研究”（桂科 AD22080050）；广西自然科学基金项目（2024GXNSFBA010295；2024GXNSFBA010098）；广西高校中青年教师科研基础能力提升项目（2022KY0386；2024KY0398）
第一作者：孙哲（1989—），男（汉族），广西壮族自治区南宁市人，博士，讲师，主要从事土壤生态等方面的研究。Email：sunzhe@lzb.ac.cn。

Eucalyptus spp. and *P. massoniana* plantations were greater by 27% and 17%, respectively, than that of natural secondary forests. The clay contents in *Eucalyptus* spp. and *P. massoniana* plantations were lower (58% and 42%, respectively) whereas the sand contents were higher (24% and 14%, respectively), than that of natural secondary forests. Additionally, the single fractal dimensions (D_s) were 6% and 4% lesser in *Eucalyptus* spp. and *P. massoniana* plantations, respectively, than that of secondary natural forests. Furthermore, the available phosphorus, readily available potassium, and total calcium contents for *Eucalyptus* spp. were 68%, 49%, and 6% lower, and, those for *P. massoniana* were 42%, 40%, and 25% lower, respectively, than those of secondary natural forests. D_0-D_2, ΔD and $\Delta\alpha$ were the multifractal parameters that reflect the heterogeneity of soil particle size distribution across different dimensions; for *Eucalyptus* spp. (0.13, 1.29, 1.52) and *P. massoniana* (0.13, 0.99, 1.18) plantations these values were higher than those for natural forests (0.08, 0.83, 1.02). Furthermore, there was a significant correlation between multifractal parameters and soil nutrient content in the different plantations. [Conclusion] Improper cultivation and management of plantations in karst regions may promote the loss of fine soil particles and depletion of key nutrients. This, in turn, can result in a concentration of the soil particle size distribution in low-probability dense areas, increasing the heterogeneity of the soil particle size distribution and further accelerating the process of rocky desertification. The single fractal dimension D_s can reflect the degree of soil fertility degradation in karst forest areas, and the multifractal parameters can reveal the heterogeneous distribution characteristics of soil particle size at the microlevel in detail. Therefore, single and multiple fractal dimensions have the potential to become precise indicators for evaluating the soil quality of plantations in karst regions.

Keywords: karst regions; plantation forest; soil particle size distribution; single and multifractal dimensions; soil nutrients

西南喀斯特地区是我国生态环境的薄弱区,水土流失削弱了土壤的生产力,导致岩石裸露,土地生态功能退化,严重威胁到地区的生态安全,并对经济社会发展构成了阻碍[1]。广西喀斯特地区占自治区总面积 37.8%,石漠化面积占喀斯特地区 41%,近 30 a 来通过大规模的人工林种植,为当地的生态恢复和经济发展开辟了新的道路[2]。然而,大量种植的人工林,尤其是采用纯林抚育管理的区域,由于林分结构简单化,对土壤养分需求趋于单一,这进一步加速了土壤肥力的衰退,并可能加速石漠化的进程[3-4]。

当前的人工林土壤研究侧重于土壤的化学性质、养分含量及植被生长状况等方面,较少从土壤微观结构这一关键维度进行深入探讨[5]。这种局限性忽略了土壤粒度分布(PSD)作为土壤物理性质中至关重要的一环,它对土壤的机械行为、水热特性及可蚀性等产生了显著的影响[6]。尽管通常认为土壤粒度分布在小尺度上是恒定的,但实际成土过程中物理、化学和生物因素的复杂相互作用,连同自然和人为活动的叠加效应,都可能在局部尺度上引起土壤粒度分布的明显变化[7]。传统的土壤质地分析依赖于不同粒级重量百分比的测量,这种方法无法全面揭示土壤粒径的分布情况,难以捕捉土壤质地的微妙变化,也不足以阐释土壤粒度分布在多尺度上的异质性[8]。分形几何理论,以其自相似性原则,精妙地描述了物体在不同尺度上的重复模式[9]。已有的研究[10-11]证实,分形理论在捕捉土壤粒度分布的微观尺度非全局异质性方面显示出了极高的有效性。相比于单重分形维数,多重分形理论可以从土壤粒度分布微观结构中提取出更多有价值的信息,如土壤质量、细粒含量、土壤形成因素和空间变异性等[12-14]。尽管目前对喀斯特地区土壤分形特征的研究已见诸于报道,但关于土壤粒度分布特征的研究大多仍停留在传统质地分析以及单重分形维数层面[15-16]。通过多重分形理论对喀斯特地区土壤微观结构的研究较少[17]。对土壤微观结构的认识的不足,可能会限制我们对喀斯特地区林业发展过程中土壤质量的全面了解,进而影响生态修复措施的效果和可持续性[18]。

因此,本研究基于单重及多重分形理论,深入剖析广西地区典型喀斯特地貌下不同林地土壤的复杂结构,揭示土壤粒度分布不同维度的分形特征与土壤性质的内在联系,以期填补当前喀斯特区域林地土壤微观结构研究领域的空白,为我国石漠化严重地区的人工林可持续发展提供土壤质量的精确评估与科学化管理科学的方法。

1　研究区概况

研究区(23°03′56″N, 108°12′14″E)位于广西壮族自治区南宁市武鸣区宁武镇,距离朝燕林场宁武分

厂南侧大约 3.5 km。这里属于南亚热带季风气候，年平均气温 21.7 ℃，年平均日照时数 1 660 h，年平均降雨量 1 300 mm。研究区是典型的喀斯特峰丛洼地地貌，其四周石山环绕，中间低平，为较明显的盆状地形，岩性以碳酸盐岩为主，主要发育黄棕色和棕红色石灰土，内有大面积的人工林和天然次生林，其中人工林以桉树林（*Eucalyptus*）和马尾松林（*Pinus massoniana*）为主，天然次生林主要树种为刺槐（*Robinia pseudoacacia*）和构树（*Broussonetia papyrifera*）。桉树林主要施桉树专用肥（主要元素为氮、磷、钾），马尾松林主要施氮磷钾复合肥。

2 研究方法

2.1 土壤样品采集与测定

2024 年 5 月，在研究区选取地形坡度相近、光照和水分条件基本一致的 3 种林地类型：马尾松人工林、桉树人工林和天然次生林作为采样区。每种林地类型采样区选定 3 块样地，每块样地均采用五点采样法，在 0—10 cm，10—20 cm，20—30 cm 和 30—40 cm 的土层，沿 3 个不同的方向使用直径 61.8 mm，高 20 mm 的环刀采集原状土样，并在现场进行了称重。采集的土样被带回实验室进行测量土壤粒度分布、容重、总孔隙度，pH 值，有机质、碱解氮、有效磷、速效钾和全钙。土壤粒分布的体积分数采用英国马文尔公司生产的 MasterSizer 2000 型激光粒度分析仪进行分析，测量范围为 0.02～2 000 μm。土壤容重采用环刀法测定、总孔隙度用水饱和法测定、有机质的含量用重铬酸钾容量法测定；碱解氮含量用碱解扩散法测定；有效磷含量用钼锑抗比色法测定；速效钾含量用 NH_4Ac 浸提—火焰光度计法测定；全钙用碱熔法测定。

2.2 土壤单重分形维数计算

采用土壤颗粒体积分形模型来计算出土壤单重分形维数 D_s[19]，其关系式为：

$$\frac{V_{r<R}}{V_T}=\left(\frac{R}{\lambda_v}\right)^{3-D_s} \tag{1}$$

式中：R 表示某一特定的粒径；$V_{r<R}$ 表示粒径小于 R 的颗粒累积体积；V_T 表示土壤颗粒的总体积；λ_V 土壤粒径分级中最大粒径。

对关系式两边取对数：

$$\lg[V_{r<R}/V_T]=(3-D_s)\times\lg(R/\lambda_V) \tag{2}$$

以 $\lg[V_{r<R}/V_T]$ 为纵坐标，$\lg(R/\lambda_V)$ 为横坐标求直线拟合方程的斜率，可得单重分形维数 D_s。

2.3 土壤多重分形参数计算

采用盒计数法[20]进行土壤粒径分布的多重分形分析。激光粒度分析仪的测量范围 $A=[0.02,2\ 000\ \mu m]$，通过等比和等差增量被划分为 100 个区间 $I_i=[\varphi_i,\varphi_{i+1}]$，$i=1,2,3\cdots100$，即确保 $\lg(\varphi_{i+1}/\varphi_i)$ 恒为 0.062。根据测量结果，得到每个区间粒径的体积百分比 v_i。接着建立了一个无量纲范围 $B=[0,\lg(2\ 000/0.02)]=[0,5]$，通过二分法将 B 划分为总数为 $2k$ 个等距的子区间 B_j，子区间的长度均为 $\varepsilon=5.00\times2^{-k}$。为保证每一个有效子区间内至少有一个测量值，$k$ 的取值为 1～4，因此，B 被划分为 2，4，8，16 个子区间，对应的 ε 值分别为 2.5，1.25，0.625，0.312。定义概率密度 $p_j(\varepsilon)$，其为子区间 B_j 内所有测量值 v_i 的加和。基于 $p_j(\varepsilon)$ 构建一个配分函数族 $p_j(q,\varepsilon)$：

$$p_j(q,\varepsilon)=\frac{p_j(\varepsilon)^q}{\sum_{j=1}^{N(\varepsilon)}p_j(\varepsilon)^q} \tag{3}$$

则广义分形维数（D_q）计算公式为：

$$D_q=\lim_{\varepsilon\to0}\frac{1}{q-1}\frac{\lg\left[\sum_{j=1}^{N(\varepsilon)}p_j(\varepsilon)^q\right]}{\lg\varepsilon}\qquad(q\neq1) \tag{4}$$

$$D_1=\lim_{\varepsilon\to0}\frac{\sum_{j=1}^{N(\varepsilon)}p(\varepsilon)\lg p_j(\varepsilon)}{\lg\varepsilon}\qquad(q=1) \tag{5}$$

颗粒分布的多重分形奇异性指数为：

$$\alpha(q)=\lim_{\varepsilon\to0}\frac{\sum_{j=1}^{N(\varepsilon)}p_j(q,\varepsilon)\lg p_j(\varepsilon)}{\lg\varepsilon} \tag{6}$$

相对于 $\alpha(q)$ 的颗粒分布的多重分形谱函数为：

$$f[\alpha(q)]=\lim_{\varepsilon\to0}\frac{\sum_{j=1}^{N(\varepsilon)}p_j(q,\varepsilon)\lg p_j(q,\varepsilon)}{\lg\varepsilon} \tag{7}$$

式中：$p_j(q,\varepsilon)$ 为第 i 个子区间 q 阶概率；q 为取值范围为[−10，10]的实数；D_q 为土壤粒径分布的广义分形维数；$\alpha(q)$ 为多重分形奇异指数；$f[\alpha(q)]$ 为多重分形谱函数；ε 与 $N(\varepsilon)$ 分别为划分 B 的子区间长度以及对应的子区间数量；$p_j(\varepsilon)$ 为划分 B 的第 j 个子区间内测量值的加和。

如果测试对象是均匀分形，多重分形广义维数谱 D_q—q 曲线将是一条直线。如果存在非均匀分形特征，D_q 将随着 q 的增加而呈现反 S 形递减函数，D_q—q 曲线的陡峭程度反映了分形结构的异质性程度。当 $q\gg1$ 时，大概率分布区域的信息被放大；当 $q\ll-1$ 时，小概率分布区域的信息被放大。容量维度 D_0，信息熵维度 D_1 和关联维数 D_2 是 3 个常用的分形参数组合。多重分形广义维数谱 $f[\alpha(q)]$—$\alpha(q)$ 对土壤粒径分布的局部分形结构的复杂性和不规则性

的进一步量化[21]。首先,如果 $f[\alpha(q)]$为常数,则研究对象为单分形,而如果 $f[\alpha(q)]-\alpha(q)$为单峰曲线,则研究对象具有多重分形特征。其次,奇异谱宽 $\Delta\alpha=\alpha_{max}-\alpha_{min}$描述了分形结构上不同区域、不同尺度和不同局部条件的特征。最后,$\Delta f=f(\alpha_{max})-f(\alpha_{min})$表示多重分形谱的形状特征。当 $\Delta f<0$ 时,小概论粒径变异性程度高,而当 $\Delta f>0$ 时,大概论粒径变异性程度高于小粒径[21]。重点分析的多重分形参数为 D_0,D_1/D_0,D_0-D_2,ΔD,$\Delta\alpha$ 和 Δf。其物理意义如下:D_0 反映了每个子区间是否包含测量值,其值越大,说明土壤粒度分布的范围越广泛;D_1/D_0 比值反映了土壤粒度分布的相对分散性,D_1/D_0 值越接近 1,表明测量值更倾向于集中在某些特定的子区间,若越接近 0,说明土壤粒度在所有有效子区间内分布越均匀;D_0-D_2 的差值进一步展示大概率分布区的不均匀程度,这个差值越大意味着土壤粒度测量有效值聚集程度越大,分布越集中;D_q 值域的跨度 ΔD,即 D_{-10}与 D_{10}之间的差值,其越大说明土壤粒度分布整体不均匀性越大;$\Delta\alpha$ 值越大,表示局部土壤粒度分布的结构密度越不均匀;当 $\Delta f<0$ 时,小概论粒径变异性程度高,而当 $\Delta f>0$ 时,大概论粒径变异性程度高于小粒径,Δf 绝对值越大说明影响程度越高[21-22]。

2.4　统计分析

使用 IBM SPSS Statistics 19.0 软件进行数据统计和处理。其中采用单因素方差分析(ANOVA)(最小显著性差异(LSD)和邓肯方差齐性检验(Duncan test)评估不同林地样品的组间土壤分形维数和土壤养分是否存在显著差异($p<0.05$);采用皮尔森相关系数(Pearson correlation)在 $p<0.05$ 的显著水平上评估土壤粒度分布单重分形维数、多重分形维数参数与土壤理化性质的相关性。通过双尾检验法(Two-tailed test)检验相关系数的显著水平。

3　结果分析

3.1　土壤质地、理化性质与单重分形维数

根据国际土壤质地分类标准,研究区的土壤主要类型为砂质壤土(图 1a)。桉树林、马尾松和天然林土壤黏粒(<2 μm)平均百分含量分别为 5%,7%和 12%;粉粒(2～50 μm)平均百分含量分别为 29%,32%和 35%;砂粒平均百分含量分别为 66%,61%和 53%。人工林(桉树林和马尾松林)土壤细颗粒(黏粒和粉粒)百分含量小于天然林。在桉树林中,土壤自地表至深层均为砂质壤土。马尾松林的表层土壤富含腐殖质,0—10 cm 深度的土壤以砂壤土为主,随着土层深度的增加,土壤质地逐渐变得较为粗糙。而天然林在 0—10 cm 和 30—40 cm 的土层中,土壤为壤土,其质地沿深度方向呈现出中间较粗、上下较细的分布特征。如图 1b 所示,人工林(桉树林和马尾松林)与天然林的单重分形维数(D_s)、容重、总孔隙度、有效磷和速效钾存在显著性差异(LSD 检测,$p<0.05$)。桉树林土壤的单重分形维数 D_s 值介于 2.23～2.30,并随着土层深度的增加而上升。马尾松林的 D_s 值在 2.27～2.35,且随着深度的增加而降低。天然林的 D_s 值则在 2.37～2.49,同样随着深度增加而减少。人工林土壤整体呈现弱碱性,天然林土壤整体呈现弱酸性。在总孔隙度、有机质和碱解氮含量方面,桉树林和马尾松林的土壤高于天然林,但在容重、有效磷、速效钾和全钙含量上却低于天然林(表 1)。

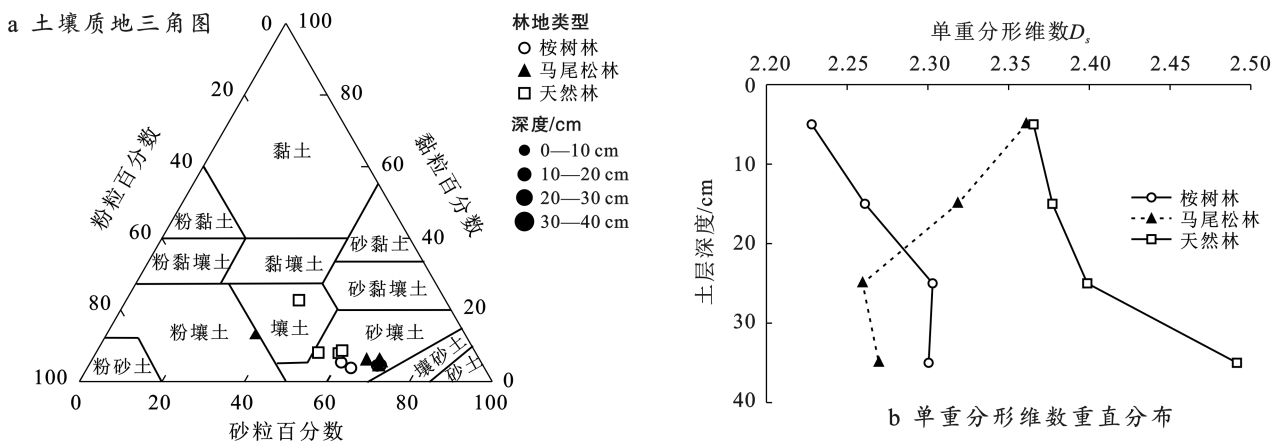


图 1　不同林地类型土壤质地三角图(a)和单重分形维数垂直分布(b)

Fig.1　Soil texture triangle diagram (a) and vertical distribution of single fractal dimension (b) in different forest lands

表 1 不同林地类型土壤单重分形维数和土壤理化性质

Table 1 Single fractal dimension, and soil physical and chemical properties of soil in different forest land

指 标	桉树林	马尾松林	天然林
单重分形维数(D_s)	2.27±0.03[a]	2.30±0.05[a]	2.41±0.06[b]
容重/(g·cm^{-3})	1.05±0.04[a]	1.15±0.07[a]	1.36±0.09[b]
总孔隙度/%	60.02±1.33[a]	56.72±2.79[a]	48.58±0.83[b]
有机质/(g·kg^{-1})	28.25±11.28[a]	23.27±9.95[a]	19.41±4.28[a]
碱解氮/(mg·kg^{-1})	80.05±35.80[a]	75.80±36.48[a]	56.49±17.34[a]
有效磷/(mg·kg^{-1})	3.74±2.03[a]	5.92±3.05[a]	11.63±2.98[b]
速效钾/(mg·kg^{-1})	58.00±31.35[a]	60.50±27.05[a]	100.50±7.77[b]
全钙/(mg·kg^{-1})	1.72±0.71[a]	1.37±0.37[a]	1.83±0.40[a]
pH 值	7.43±0.49[a]	7.24±0.30[a]	6.89±0.11[a]

注:不同字母表示不同林地存在显著差异($p<0.05$)。下同。

3.2 土壤粒径分布的多重分形特征

研究样点土壤的 D_q 值随着 q 值的增加呈现出了典型的反 S 形曲线,表明研究区域的土壤粒度分布具有多重分形特性,而不是简单的单分形结构(图 2)。在 D_q—q 曲线上,所有土壤样本的 D_q($q<0$)的下降梯度(0.38~0.81)大于 D_q($q>0$)的下降梯度(0.49~1.63),这说明研究区域土壤粒度分布的变化在稀疏区域比在密集区域更为敏感,即该区域土壤粒度分布的稀疏区域的非均匀性要大于密集区域。在 0—20 cm 的土层中,桉树林土壤的 ΔD 均值为 1.55 大于马尾松林(0.88)和天然林(0.87);而在 20—40 cm 的土层中,天然林的 ΔD 均值为 0.79,小于桉树林(1.03)和马尾松林(1.09)。这些结果揭示了人工林和天然林不同土层深度下土壤粒度分布的复杂性和差异性。总体而言,相比天然林,人工林土壤粒度分布的整体不均匀性更强。

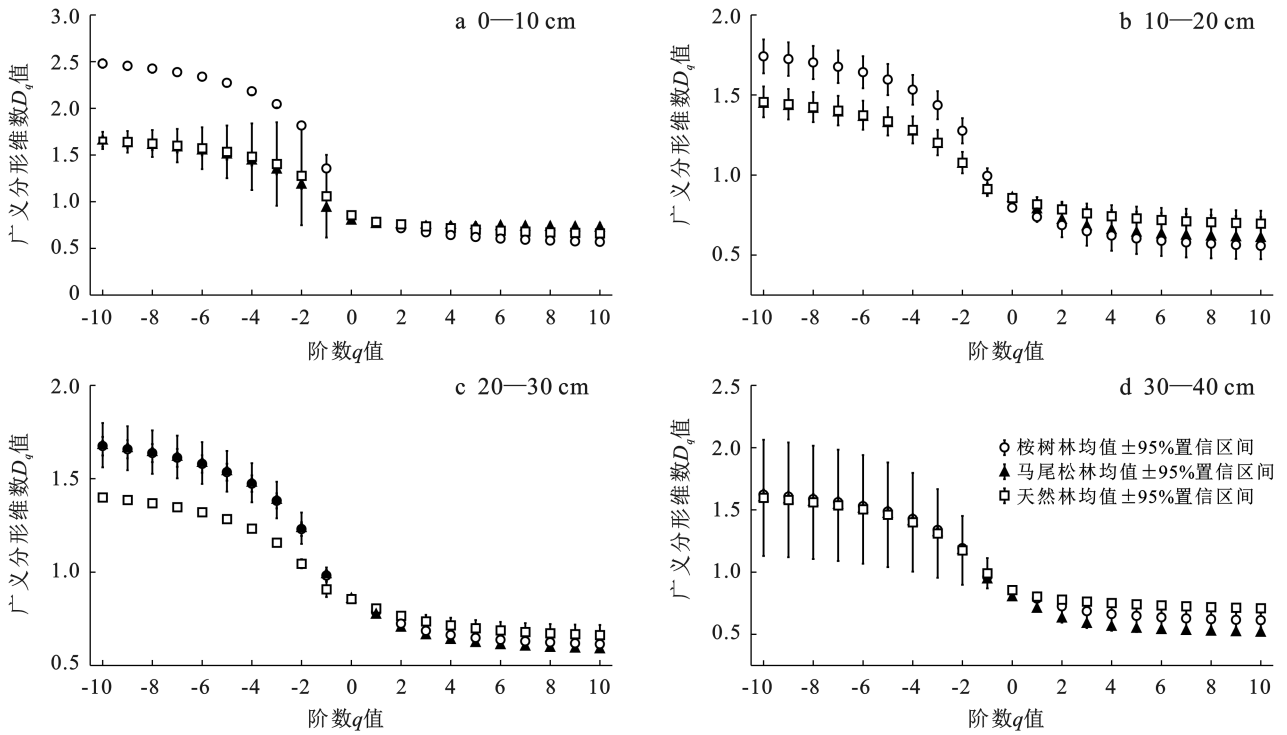


图 2 各林地类型不同土层深度的土壤粒径分布广义维数谱(D_q—q)

Fig.2 Generalized dimension spectrum (D_q—q) of soil particle size distribution at different depths for different forest land types

土体粒度分布奇异谱呈现出形状和幅度不对称的上凸型曲线,这揭示了研究区域的土壤在自然演变和人为活动的双重作用下,局部区域经历了多样化的复杂过程,从而表现出显著的非均质性(图 3)。所有土样的 Δf 值范围为−0.54~−0.08,均小于 0,这表明小概率粒径分布的变异在整个土壤粒径分布不均匀性中占有较大的影响力。在 0—20 cm 土层中,桉树林的 $\Delta\alpha$ 均值为 1.81,大于马尾松林(1.07)和天然林(1.06);而在 20—40 cm 土层中,天然林的 $\Delta\alpha$ 均值为 0.98,小于桉树林(1.23)和马尾松林(1.29)。总体而言,相比天然林,人工林土壤粒度分布的局部异质性更强。表 2 为不同林地类型土壤粒度分布的常用多重分形维数参数的统计数据。D_0 值的顺序为:马尾松林<桉树林<天然林,反映了人工林的土壤粒度分布的范围更狭窄。D_1/D_0 值的顺序为:马尾松林<桉树林<天然林,反映了人工林土壤粒度分布的相对分散性更高,测量值更倾向于均匀分布在各个子区间。D_0-D_2 值表现为:天然林<马尾松=桉树林,反

映了人工林土壤粒径更倾向于集中于大概率的密集区域。$\Delta\alpha$ 值的大小顺序为:天然林<马尾松林<桉树林,$\Delta\alpha$ 值越小,表示局部土壤粒度分布的结构密度越均匀。至于 Δf 的绝对值,其大小顺序表现为:马尾松林<天然林<桉树林,在所有 Δf 值均为负数的情况下,绝对值越大,说明小概率粒径分布的变异性在宏观粒度分布的非均匀性中起着更显著的主导作用。

以上多重分形参数的比较结果综合反映了相比于天然林,人工林的土壤粒度分布的范围更狭窄且相对分散性更低,土壤粒度更倾向于集中于大概率的密集区域,局部分布的结构密度的异质性更强。

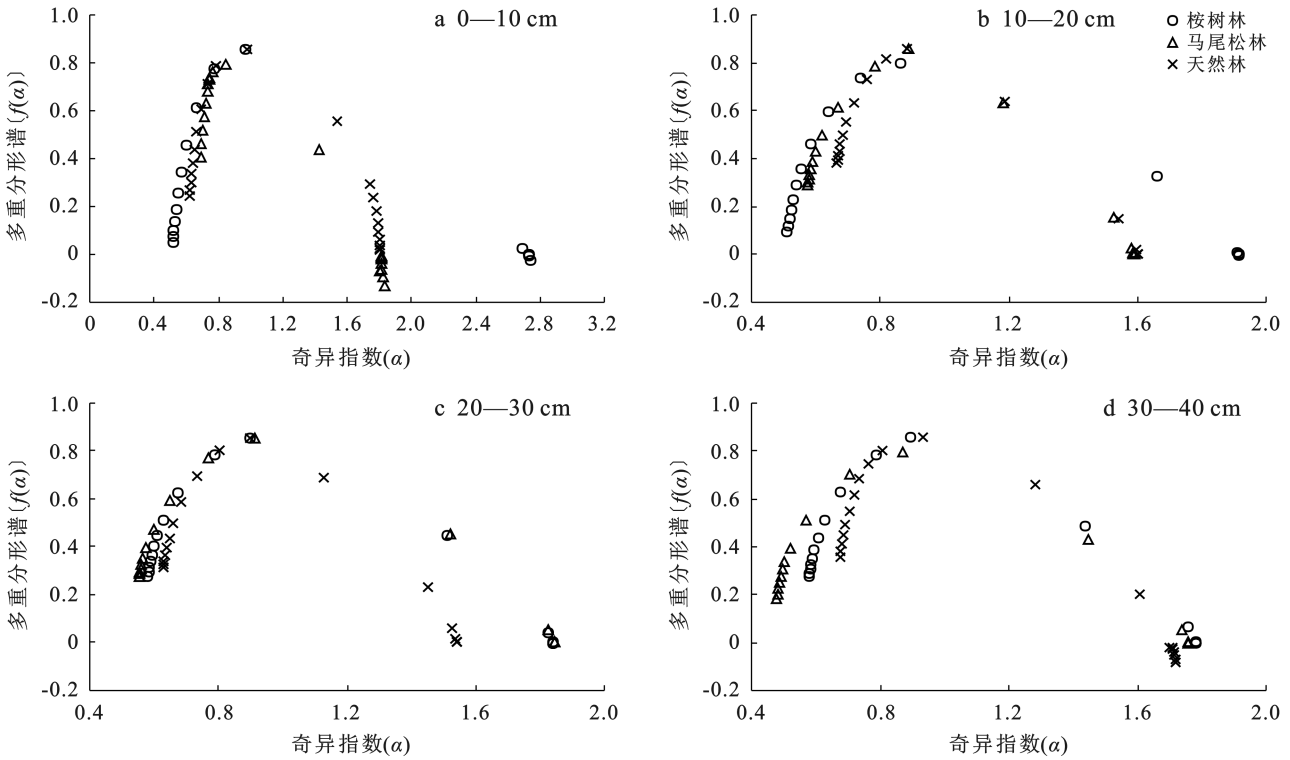


图 3　各林地类型不同土层深度的土壤粒径分布多重分形奇异谱〔$f(\alpha)$—α〕

Fig.3　Multifractal singularity spectra〔$f(\alpha)$—α〕of soil particle size distribution at different depths for different forest land types

表 2　不同林地类型土壤粒径分布的多重分形维数参数

Table 2　Multifractal dimension parameters of soil particle size distribution for different forest land types

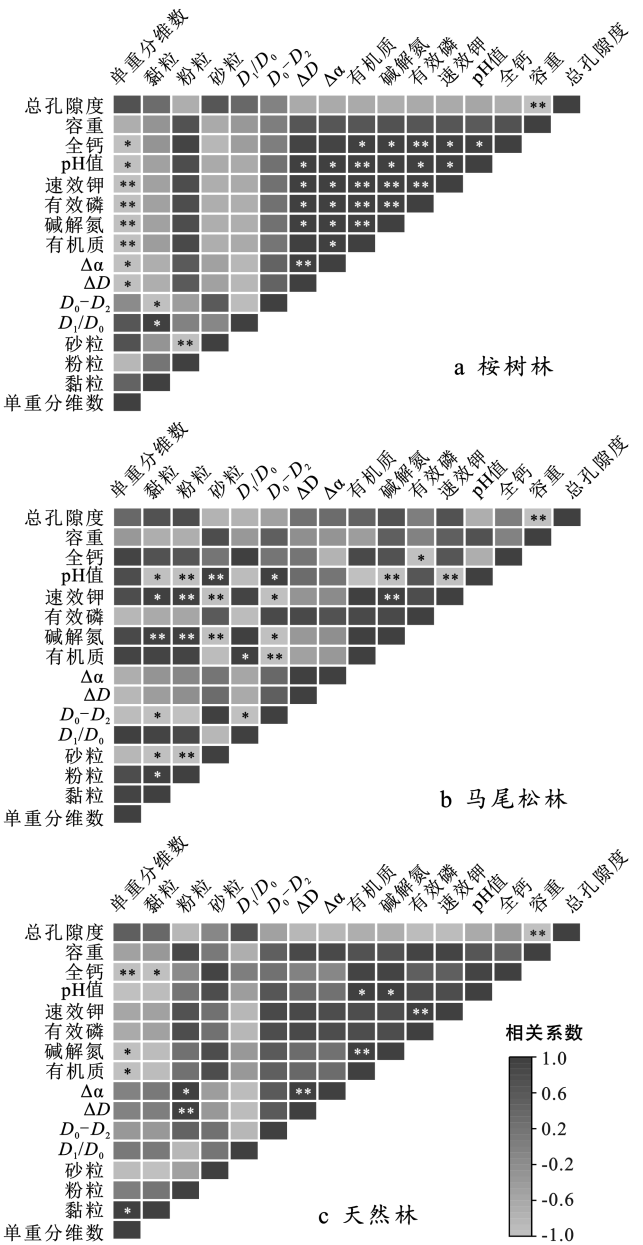
林地类型	D_0	D_1/D_0	D_0-D_2	ΔD	$\Delta\alpha$	Δf
桉树林	0.84^{a}	0.92^{a}	0.13^{a}	1.29^{a}	1.52^{a}	-0.18^{a}
马尾松林	0.83^{a}	0.91^{a}	0.13^{a}	0.99^{ab}	1.18^{ab}	-0.32^{b}
天然林	0.86^{a}	0.94^{a}	0.08^{b}	0.83^{b}	1.02^{b}	-0.34^{b}

注:D_0 为每个子区间是否包含测量值;D_1/D_0 为土壤粒度分布的相对分散性;D_0-D_2 为大概率分布区的不均匀程度;ΔD 为 D_q 值域的跨度,即 $D_{-10}-D_{10}$;$\Delta\alpha$,Δf 为多重分形参数。

3.3　分形维数与土壤理化性质的相关分析

图 4 展示了不同林地类型土壤粒度分布的单重分形维数(D_s)、土壤质地以及多重分形相关参数(D_1/D_0,D_0-D_2,ΔD 和 $\Delta\alpha$)与土壤理化性质之间的相关分析结果。在桉树林土壤中,单重分形维数 D_s 与土壤中的有机质、碱解氮、有效磷、速效钾存在极显著的负相关关系($p<0.01$),与全钙、pH 值、多重分形参数 ΔD 和 $\Delta\alpha$ 均显示出显著的负相关性($p<0.05$)。而多重分形参数 ΔD 和 $\Delta\alpha$ 与碱解氮、有效磷、速效钾之间则呈现出显著的正相关性($p<0.01$)。有机质与 $\Delta\alpha$ 之间也呈现出显著的正相关性($p<0.01$)。黏粒与 D_0-D_2 之间有显著的负相关性($p<0.01$),而与 D_1/D_0 之间有显著的正相关性($p<0.01$)。这反映尽管桉树林土壤粒度分布的不均匀性与养分含量关系密切,但仅依据简单的黏粒、粉粒和砂粒的土壤质地分类,没有呈现与土壤养分之间具有统计意义的相关关系。对于马尾松林土壤,碱解氮和速效钾与黏粒存在极显著的正相关($p<0.01$)、与砂粒存在极显著的负相关($p<0.01$),并与 D_0-D_2 表现出显著的正相关性($p<0.05$)。有机质与 D_0-D_2 之间也存在极显著

的负相关性($p<0.01$),而与 D_1/D_0 之间则有显著的正相关性($p<0.05$),这可能意味着马尾松林土壤养分含量与土壤质地存在更密切相关关系,尤其受到的土壤粒度分布的局部集中程度影响。在天然林土壤中,单重分形维数 D_s 与黏粒呈现出显著的正相关性,而与有机质呈现出显著的正相关性($p<0.01$)。这表明在天然林中,土壤的单重分形特征主要受土壤细颗粒含量的影响,D_s 越小反映细颗粒流失越严重。而对于土壤养分与多重分形维数参数之间的相关性则不显著,这表明天然林土壤的养分分布与土壤粒度分布的复杂性之间的关系不如人工林明显。



注:* 表示在 $p<0.05$ 水平显著; * * 表示在 $p<0.01$ 水平显著。

图 4 不同类型林地土壤质地、土壤养分与分形维数参数的相关分析

Fig.4 Correlation analysis of soil texture, soil nutrients and fractal dimension parameters for different types of forest land

4 讨论

4.1 不同林地土壤粒度分布的单重与多重分形特征

在所研究的喀斯特地区,与天然次生林相比,桉树人工林和马尾松人工林种植区域的土壤单重分形维数 D_s 显著降低。杨惠玲等[23]的研究表明,林地土壤的单重分形维数普遍高于荒草地,天然次生混交林的土壤颗粒单重分形维数最高,而人工林相对较低。高泽永等[24]研究提出,土壤颗粒单重分形维数能够反映土壤颗粒的均匀程度及不同粒径的分布含量,数值越小,意味着土壤荒漠化程度越高。因此,研究区域的喀斯特地区人工林种植,存在导致土壤地力退化并加剧石漠化的风险。多重分形广义维数谱和多重分形奇异谱的分析结果表明,研究区域内不同林地类型的土壤粒径分布普遍具有多重分形特性。这意味着单重分形维数可能无法全面揭示土壤粒度分布的复杂性,尤其是在区分和解释土壤颗粒在不同尺度上的异质性和不均匀性方面存在局限[8]。

表 3 对比了已有研究中与本研究区具有相似环境条件的其他研究区域土壤粒度分布的单重与多重分形特征分析结果。在众多研究结果中,单重分形维数(D_S)可作为评估喀斯特地区石漠化程度的公认指标,其值越小,往往意味着该地区的石漠化程度越严重。通过综合对比,本研究区域的 D_S 值范围(2.21~2.41)显示出一种中等偏低的状态,这预示着天然林区的石漠化程度较轻,而人工林区则介于轻度至中度石漠化之间。本研究的土壤粒度分布的主要多重分形参数,包括 D_0,D_1/D_0,D_2 以及 $\Delta\alpha$ 的数值范围与其他研究区域在相似立地条件下的结果大致相符。进一步对比发现,与其他相似地区的人工种植区域及林地生态修复区相比,本研究区域的人工林在 D_S,D_1/D_0 以及 D_2 等参数上均呈现出偏低的水平。这一发现表明,研究区人工林土壤的石漠化程度更为显著,细颗粒物质的流失导致土壤粒度分布呈现出更为强烈的均质化趋势。因此研究区人工林种植及经营管理方式的合理性值得进一步探讨。

4.2 不同林地土壤粒度分布及土壤养分的影响因素

尽管研究区天然林土壤中的有机质和碱解氮含量相对较低,但其粉土和黏土的比例却明显高于人工种植的桉树林和马尾松林。这与通常认为的土壤有机质含量与细颗粒含量呈正相关的观点相矛盾。原因是广西的喀斯特地貌区主要由石灰石等可溶性岩石构成,极易受到水的侵蚀,形成了复杂的地表和地下溶洞、漏斗系统,导致使得土壤覆盖层变得异常薄弱,水土流失突出[27]。人工林由于翻耕和施肥活动,

土壤结构变得更加疏松(容重更小,总孔隙度更大),有机质和碱解氮含量相应提高。虽然有机质可以提高土壤的团粒性,但如果土壤管理措施不当,人工林的土壤抗侵蚀能力反而会受到削弱,特别是在强降雨或地表径流的冲击下,土壤细颗粒更易流失[28]。相比之下,天然林土壤未经耕作,结构更为紧密,植被覆盖也相对完整。这些因素共同作用,使得喀斯特地区天然林土壤的抗蚀性可能强于人工林[4]。与天然林土壤相比,桉树林和马尾松林的 D_0-D_2 和 $\Delta\alpha$ 的数值提高,而 D_0 则降低。这些变化揭示了人工林的种植加剧了土壤细颗粒的流失的同时,还增强了喀斯特地区土壤在小概率区域的局部密集程度和变异性,从而推动了土壤整体向均匀性粗颗粒化的发展,这与宏观土壤质地分析的结果相吻合。人工林的种植和经营增加了土地利用的强度,同时降低了生态多样性,进一步削弱了植被保持水土的能力[29]。此外,有研究[5]指出,土壤肥力中有效磷、速效钾和全钙等关键指标的缺乏,可能对广西人工林的生态健康与可持续发展构成严重威胁。在研究区域内,桉树人工林与马尾松人工林的种植地带,土壤中的有效磷、速效钾以及全钙含量均呈现出下降趋势。因此,人工林的种植可能加速了土壤细颗粒和关键养分的流失。相关分析的结果揭示了天然林与人工林土壤养分(涵盖有机质、碱解氮、有效磷及速效钾)与一系列表征土壤粒度分布非均匀性的多重分形参数(具体包括 D_1/D_0,D_0-D_2,ΔD 及 $\Delta\alpha$)的相关性存在明显差异。在人工林土壤养分含量较高的样本中,其整体及局部的分形结构展现出了更为显著的测度分布非均匀性特征(ΔD 和 $\Delta\alpha$ 更大),同时,在小概率区间内,粒度分布的集中度相对较低(D_0-D_2 较小)。考虑到桉树林与马尾松林的土壤均为砂质壤土,并且 Δf 值小于 0,这揭示了位于小概率分布区间内的黏粒,其变异性在土壤粒度分布的非均匀性格局中起着主要作用。因此,黏粒含量与 D_0-D_2 的相关性尤为显著($p<0.05$);对于桉树林,土壤各种养分相互间存在更为明显的相关关系。值得注意的是,尽管两种人工林土壤的 D_s 均与黏粒含量有正相关性,但均未能达到统计意义的水平($p>0.05$),这与大多数文献的结果不同。与此相反,天然林的土壤 D_s 与黏粒含量存在显著正相关性($p<0.05$),与前人的研究成果相一致[10,22]。但是天然土壤养分与多重分形参数的相关性则不那么明显。这可能意味着人工林的种植和经营,特别是施肥活动,对土壤质地和粒度分布的分形结构产生了显著的影响,减弱了 D_s 与土壤质地的相关性,但增强了多重分形参数与各种土壤养分含量的相关性。因此分形维数可作为综合评估土壤质量的一个潜在指标。由于研究条件的限制,本研究所涉及的广西喀斯特地区人工林类型还不够全面,同时在评估体系中也未能纳入表征土壤透气性、透水性能以及保水能力等参数。因此,研究结果在一定程度上存在局限性。此外,尽管多重分形维数参数具有精准量化土壤粒度分布不均匀性的能力,但应用于生产实践,还需要开展更多的实证研究,验证土壤粒度分布分形理论在喀斯特地区不同土壤管理实践和植被恢复策略中的有效性和适用性。通过这些努力,可以为喀斯特地区乃至更广泛地区的土壤管理和生态恢复提供更加科学和精确的工具。

表 3　本研究区与其他研究区域相似立地条件中土壤粒度分布的单重与多重分形特征比较

Table 3　Comparison of single and multifractal characteristics of soil particle size distribution under similar site conditions between study area and other research regions

来 源	研究地点	立地条件	单重分形维数(D_s)	多重分形参数
本研究	广西武鸣	喀斯特地貌;人工林,天然林	人工林(2.21～2.30); 天然林(2.41)	(D_0:0.83～0.84; D_1/D_0:0.91～0.92; D_2:0.70～0.71; $\Delta\alpha$:1.18～1.52); (D_0: 0.86; D_1/D_0: 0.94; D_2: 0.77; $\Delta\alpha$:1.02)
朱瑞东等[17]	贵州贞丰县—关岭县交界处	喀斯特高原峡谷地貌;火龙果、花椒、玉米、核桃、柚木等种植地	2.51～2.71	D_0:0.82～0.86; D_1/D_0:0.91～1.02; D_2:0.73～0.88; $\Delta\alpha$:0.87～1.23
Su 等[25]	山东省泰安市	土质岩石山区;林地生态恢复区	2.51～2.65	D_0:0.86～0.94; D_1/D_0:0.95～0.99; D_2:0.84～0.92
陈海[18]	贵州省毕节	喀斯特不同等级石漠化区;农林复合经营地	无、轻石漠化区(1.91～2.02);中、重石漠化区(1.86～1.90)	—
罗楠等[26]	贵州省晴隆县	喀斯特石漠化高原峡谷区;耕地、退耕还草地、草地及林草间作地	耕地(2.70)、退耕还草地(2.69)、草地(2.74)及林草间作地(2.72)	—
龙建等[16]	贵州省 3 个不同类型的喀斯特地区	喀斯特不同等级石漠化区;坡耕地,弃耕地,撂荒地	无、轻石漠化区(2.56～2.71);中、重、极严重石漠化区(2.13～2.31)	—

5 结论

(1) 在广西喀斯特地区的研究中发现,与天然次生林相比,桉树林和马尾松林的土壤容重分别减少23%和15%,总孔隙度分别提高27%和17%;黏粒含量分别减少58%和42%,砂粒含量分别增高24%和14%;土壤粒度分布的单重分形维数 D_s 降低6%和4%,同时有效磷减少68%和49%,速效钾减少42%和40%,全钙减少6%和25%。这表明人工林的种植和经营可能促进了该地区土壤地力的衰退和石漠化过程。

(2) 研究区域的土壤粒径分布普遍展现出多重分形特性。与天然林相比,人工林的土壤粒度分布在小概率区域表现出更高的局部密集程度和变异性,此外,多重分形参数与各种土壤养分含量的相关性在人工林中表现得更为显著。

(3) 土壤粒度分布的单重分形维数 D_s 以及多重分形参数(D_1/D_0,D_0-D_2,ΔD 和 $\Delta\alpha$)能够敏感且准确地量化喀斯特地区人工林土壤分形结构的整体和局部的不均匀性,并且与土壤养分紧密相关。这些参数有潜力作为广西喀斯特地区人工林土壤精准施肥和管理的指标。

参考文献(References)

[1] Gong Ni, Zhao Yuluan. Evolution and effects of the social-ecological system in karst mountainous regions: A case study of Guangxi, China [J]. Journal of Resources and Ecology, 2024,15(4):991-1003.

[2] 段文军,王金叶.广西喀斯特和红壤地区桉树人工林土壤理化性质对比研究[J].生态环境学报,2013,22(4):595-597.
Duan Wenjun, Wang Jinye. Comparative study on the physical and chemical properties of eucalyptus plantation soil in Guangxi karst and red soil area [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013,22(4):595-597.

[3] 赵隽宇,张泽尧,覃祚玉,等.长期连作下广西杉木人工林主产区土壤肥力演变特征与评价[J].中南林业科技大学学报,2020,40(9):124-131.
Zhao Junyu, Zhang Zeyao, Qin Zuoyu, et al. Evolution characteristics and evaluation of soil fertility in main producing areas of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Guangxi under long-term cropping [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020,40(9):124-131.

[4] 陈佳,陈洪松,冯腾,等.桂西北喀斯特地区不同土地利用类型土壤抗蚀性研究[J].中国生态农业学报,2012,20(1):105-110.
Chen Jia, Chen Hongsong, Feng Teng, et al. Anti-soil erodibility of different land use types in Northwest Guangxi karst regions [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012,20(1):105-110.

[5] 林丽珍,付军,刘奇林,等.不同连栽代次桉树人工林土壤肥力评价[J].桉树科技,2024,41(1):14-19.
Lin Lizhen, Fu Jun, Liu Qilin, et al. Evaluation of soil fertility in different successive generations of *Eucalyptus* plantations [J]. Eucalypt Science & Technology, 2024, 41(1):14-19.

[6] Shangguan Wei, Dai Yongjiu, Liu Baoyuan, et al. A soil particle-size distribution dataset for regional land and climate modelling in China [J]. Geoderma, 2012,171: 85-91.

[7] Perfect E, Kay B D. Applications of fractals in soil and tillage research: A review [J]. Soil and Tillage Research, 1995,36(1/2):1-20.

[8] Cheng Senhao, Engel B A, Wu Haoxing, et al. Classification,deconstruction and evaluation of frost heave models: How modeling methods cause simulation error [J]. Journal of Hydrology, 2022,614:128573.

[9] Mandelbrot B B, Wheeler J A. The fractal geometry of nature [J]. American Journal of Physics, 1983,51(3): 286-287.

[10] Gao Zeyong, Niu Fujun, Lin Zhanju, et al. Fractal and multifractal analysis of soil particle-size distribution and correlation with soil hydrological properties in active layer of Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Catena, 2021,203:105373.

[11] Li Yi, Li Min, Horton R. Single and joint multifractal analysis of soil particle size distributions [J]. Pedosphere, 2011,21(1):75-83.

[12] Ju Xinni, Jia Yuhua, Li Tongchuan, et al. Morphology and multifractal characteristics of soil pores and their functional implication [J]. Catena, 2021,196:104822.

[13] Liao Renkuan, Yu Haoliang, Yang Peiling. Multifractal analysis of soil particle size distribution to evaluate the effects of gypsum on the quality of sodic soils [J]. European Journal of Soil Science, 2020,72(4):1726-1741.

[14] Soto-Gómez D, Pérez-Rodríguez P, Vázquez Juíz L, et al. 3D multifractal characterization of computed tomography images of soils under different tillage management: Linking multifractal parameters to physical properties [J]. Geoderma, 2020,363:114129.

[15] 熊波,王建力,张天文,等.渝东南岩溶山区耕地利用变化下土壤颗粒体积分形特征研究[J].中国岩溶,2011,30(3):295-301.

Xiong Bo, Wang Jianli, Zhang Tianwen, et al. Study on volume fractal features of soil particle under different land use types in southeast karst mountain of Chongqing [J]. Carsologica Sinica, 2011,30(3):295-301.

[16] 龙健,李娟,邓启琼,等.贵州喀斯特山区石漠化土壤理化性质及分形特征研究[J].土壤通报,2006,37(4):635-639.

Long Jian, Li Juan, Deng Qiqiong, et al. Soil properties and fractal features in the rocky desertification process of karst regions, Guizhou Province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006,37(4):635-639.

[17] 朱瑞东,肖世兰,张国.喀斯特石漠化区不同植被恢复下土壤颗粒分形特征[J].江西农业大学学报,2024,46(2):516-529.

Zhu Ruidong, Xiao Shilan, Zhang Guo. Fractal characteristics of soil particle under different vegetation cover restoration in karst rocky desertification area [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2024,46(2):516-529.

[18] 陈海.喀斯特石漠化综合治理区土壤颗粒分形及团聚体稳定性研究[D].贵州 贵阳:贵州师范大学,2019.

Chen Hai. Fractal characteristics of soil particle under different vegetation cover restoration in karst rocky desertification area [D]. GuiYang, Guizhou: Guizhou Normal University, 2019.

[19] 王国梁,周生路,赵其国.土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J].土壤学报,2005,42(4):545-550.

Wang Guoliang, Zhou Shenglu, Zhao Qiguo. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005,42(4):545-550.

[20] Bertol I, Schick J, Bandeira D H, et al. Multifractal and joint multifractal analysis of water and soil losses from erosion plots: A case study under subtropical conditions in Santa Catarina Highlands, Brazil [J]. Geoderma, 2017,287:116-125.

[21] Kravchenko A N, Boast C W, Bullock D G. Multifractal analysis of soil spatial variability [J]. Agronomy Journal, 1999,91(6):1033-1041.

[22] 孙梅,孙楠,黄运湘,等.长期不同施肥红壤粒径分布的多重分形特征[J].中国农业科学,2014,47(11):2173-2181.

Sun Mei, Sun Nan, Huang Yunxiang, et al. Multifractal characterization of soil particle size distribution under long-term different fertilizations in upland red soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014,47(11):2173-2181.

[23] 杨慧玲,高鹏,王华伟,等.大黑山生态修复区不同植被类型土壤颗粒的分形特征[J].中国水土保持科学,2009,7(5):52-57.

Yang Huiling, Gao Peng, Wang Huawei, et al. Characteristics of soil particles fractal dimension under different forest stands of the ecological restoration area in Dahei Mountain area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009,7(5):52-57.

[24] 高泽永,王一博,文晶,等.长江源多年冻土区热融湖塘的形成对土壤沙化过程的影响[J].中国沙漠,2014,34(3):758-764.

Gao Zeyong, Wang Yibo, Wen Jing, et al. The influence of thermokarst lake formation on soil desertification process in permafrost regions of the source region of the Yangtze Rive [J]. Journal of Desert Research, 2014,34(3):758-764.

[25] Su Wei, Gao Yuemeng, Gao Peng, et al. Effects of different vegetation Restoration types on the fractal characteristics of soil particles in earthy-rocky mountain area of Northern China [J]. Forests, 2022,13(8):1246.

[26] 罗楠,舒英格,陈梦军,等.喀斯特山区不同草地土壤结构及分形特征[J].草业学报,2020,29(7):11-22.

Luo Nan, Shu Yingge, Chen Mengjun, et al. Soil structure and fractal characteristics of different land categories in a karst rocky desertification area [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020,29(7):11-22.

[27] 蒋忠诚,罗为群,邓艳,等.广西岩溶区的水土流失特点及其防治[J].广西科学,2018,25(5):449-455.

Jiang Zhongcheng, Luo Weiqun, Deng Yan, et al. Features and treatment of soil erosion in karst areas of Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 2018,25(5):449-455.

[28] 舒成博,沈影利,刘刚,等.南方山区典型小流域桉树人工林种植对水土流失的影响[J].应用生态学报,2023,34(4):1015-1023.

Shu Chengbo, Shen Yingli, Liu Gang, et al. Impacts of Eucalyptus plantation on soil and water losses in a typical small watershed in mountainous area of Southern China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(4):1015-1023.

[29] 李阳兵,魏朝富,李先源,等.土地利用方式对岩溶山地土壤种子库的影响[J].山地学报,2002,20(3):319-324.

Li Yangbing, Wei Chaofu, Li Xianyuan, et al. The soil seed banks in karst mountains as affected by land use [J]. Journal of Mountain Research, 2002,20(3):319-324.