

# 木荷防火林土壤分形维数与土壤养分的关系

邓浩俊

肇庆学院旅游与历史文化学院, 广东 肇庆

收稿日期: 2026年7月9日; 录用日期: 2026年8月21日; 发布日期: 2026年9月22日

## 摘要

为探究不同林龄木荷防火林带土壤颗粒组成、分形维数及养分含量的变化特征。以8a、18a和32a木荷防火林带为研究对象, 测定土壤不同粒级含量及全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾等指标, 采用单因素方差分析和回归分析方法, 分析分形维数与各养分指标的相关性。结果表明, 土壤颗粒组成以砂粒和粉粒为主, 黏粒含量较低。随林龄增加, 砂粒含量呈先降后升的变化趋势, 粉粒含量呈先升后降的变化趋势, 黏粒含量持续升高; 而分形维数逐次降低, 8a、18a和32a分别为2.72、2.64和2.58。土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮和速效钾含量随林龄增加总体呈升高趋势, 有效磷在各林龄间无显著差异。分形维数与全磷、全钾和碱解氮呈显著负相关; 与全氮、有效磷和速效钾的相关性未达显著水平。木荷防火林带建设促进了土壤养分积累, 但土壤质地总体偏砂。研究结果可为南方木荷防火林带土壤质量评估与可持续经营提供科学依据。

## 关键词

木荷, 防火林带, 土壤颗粒组成, 分形维数, 土壤养分

# Relationship between Soil Fractal Dimension and Soil Nutrients in *Schima superba* Firebreak Forests

Haojun Deng

School of Tourism and Historical Culture, Zhaoqing University, Zhaoqing Guangdong

Received: July 9, 2026; accepted: August 21, 2026; published: September 22, 2026

## Abstract

This study examined the variations in soil particle size composition, fractal dimension, and nutrient

content within *Schima superba* firebreak forests of varying stand ages. Soil samples from 8-year-old, 18-year-old, and 32-year-old *Schima superba* firebreak forests were analyzed for particle size fractions and concentrations of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK). One-way analysis of variance (ANOVA) and regression analyses were used to investigate the relationships between fractal dimension and the measured nutrient indices. The results indicated that the soil was predominantly composed of sand and silt, with a low clay content. As stand age increased, the sand content first decreased and then increased, the silt content initially increased before decreasing, and the clay content progressively increased. Conversely, the fractal dimension successively decreased, with values of 2.72, 2.64, and 2.58 recorded for the 8a, 18a, and 32a stands, respectively. The concentrations of TN, TP, TK, AN, and AK generally rose with increasing stand age, whereas AP did not differ significantly among the stand ages. A significant negative correlation was observed between the fractal dimension and TP, TK, and AN; however, its correlations with TN, AP, and AK were not statistically significant. The establishment of *Schima superba* firebreak forests enhanced soil nutrient accumulation, although the soil texture remained predominantly sandy. These findings offer a scientific basis for assessing soil quality and guiding the sustainable management of *Schima superba* firebreak forests in southern China.

## Keywords

*Schima superba*, Firebreak Forest, Soil Particle Size Composition, Fractal Dimension, Soil Nutrients

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

全球年均森林火灾发生次数约为 8 万起, 气候变暖的持续加速导致雷击火、强风及暖干天气等极端气候事件频发, 显著提升了火灾发生概率, 也给防火管理带来更大压力[1][2]。在众多防火手段中, 建设生物防火林带因其简单实用且能有效遏制林火蔓延, 已被纳入综合火险管理体系[3], 但这类林带生态系统较为脆弱, 容易受外界干扰[4], 其多设于山脊等立地条件恶劣地带, 土壤贫瘠且水土流失严重, 不利于林木生长[5]; 为维持防火功能, 需定期清除凋落物与林下植被, 致使有机质归还减少, 土壤退化进程加快[6]。

我国南方山脊上营建的木荷(*Schima superba*)防火林带虽在分割林分连续性 & 快速扑救火灾方面效果显著[7], 但山地环境本身具有土壤侵蚀强、滑坡泥石流多发等不稳定特征, 长期稳定性难以保障; 加之湿热气候下强烈的淋溶作用造成养分流失与细粒物质减少, 土壤质量与生态功能面临退化风险[4]。然而, 现有相关成果多侧重于林分结构特征与防火效能评估[3][8], 针对木荷防火林带土壤理化特性的专题研究不足, 少量涉及土壤养分的报道也仅限于木荷-马尾松等混交林对比[9][10], 缺乏对土壤理化性质、粒径组成特征分析。

土壤作为由不同粒径颗粒组成的多孔介质, 其形态、结构和功能均呈现出复杂的自相似特征, 被证实具有典型的分形特性[11]。研究表明, 分形维数不仅能够表征土壤粒径大小组成和质地均一程度, 还能综合反映土壤发生、肥力水平、土地利用类型影响及退化程度等多重信息, 同时在研究土壤空间变异时具有揭示复杂程度和挖掘尺度信息的独特优势[12]-[15]。基于此, 本研究以亚热带不同林龄的木荷防火林为对象, 通过分析土壤理化性质、粒度组成与养分特征之间的关系, 确立不同林龄木荷防火林土壤颗粒体积分形维数的变化规律, 以期为该区域防火林维护和恢复提供基础科学依据。

2. 研究方法

2.1. 研究区概况

研究区位于广东省肇庆市的北岭山国家森林公园(112°29'0"E~112°29'40"E, 23°6'39"N~23°7'12"N), 属于典型的亚热带季风气候区。地质基础以砂岩和页岩为主, 表层土壤为腐殖质含量较低的薄层红壤。植被类型为亚热带常绿阔叶林。公园内的生物防火林带建设分两期完成。首期工程(1994~2007 年)沿山脚与山脊线共建成防火林带 265.46 km, 覆盖面积 386.11 公顷; 二期工程(2008~2016 年)进一步拓展林带网络, 新增长度 160 km、面积 310 公顷。林带以木荷(*Schima superba*)为主要建群树种, 造林平均成活率达 92.9%。截至目前, 该区域累计建成木荷防火林带总长度 425.46 km, 总面积达 696.11 公顷。

2.2. 样品的采集与测定

本研究对 8 年(8a)、18 年(18a)及 32 (32a)年生三个不同林龄的木荷防火林带开展了野外调查(表 1)。这三个林龄分别对应木荷人工林的幼龄期、中龄期和成熟期, 可系统反映林木不同生长发育阶段对土壤性质的影响。每个调查样地设置为 20 m × 20 m 的正方形, 采用“S”形路线布设采样点, 每个样地内设置 3 个重复采样区。受山脊地形影响, 各林分土壤层均较浅薄: 8 年生林分有效土层厚度约 20 cm; 18 年生与 32 年生林分土壤厚度略深, 但多数样点仍仅为 20~25 cm。为保持采样深度一致, 所有林分均统一采集 0~20 cm 土层的混合样品, 用于后续土壤理化性质的测定与分析。颗粒组成使用型激光粒度分析仪进行土壤颗粒分析; 土壤全氮(TN)、全磷(TP)和全钾(TK)分别使用凯氏定氮法、NaOH 熔融 - 钼锑抗比色法测定; 速效氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)分别使用碱解扩散法、盐酸 - 氟化铵浸提法和醋酸铵浸提法进行测定。

Table 1. Overview of the sample plot

表 1. 样地概况

| 样点  | 海拔/m | 林分密度/棵·ha <sup>-1</sup> | 平均胸径/cm | 坡度/° | SOC/g·kg <sup>-1</sup> | pH   |
|-----|------|-------------------------|---------|------|------------------------|------|
| 8a  | 208  | 2600                    | 9.63    | 26   | 21.37                  | 4.09 |
| 18a | 220  | 1600                    | 16.34   | 23   | 30.34                  | 4.04 |
| 32a | 219  | 1200                    | 19.33   | 24   | 31.38                  | 4.39 |

2.3. 数据处理

土壤颗粒组成依据美国制分级体系进行划分, 将粒径小于 0.002 mm 的定为黏粒, 介于 0.002 mm 与 0.05 mm 之间的归为粉粒, 而粒径在 0.05 mm 至 2 mm 范围内的则为砂砾。本研究采用土壤分形模型计算土壤单分形维数[11]。采用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 以检验不同林龄木荷防火林带土壤性质之间的差异。

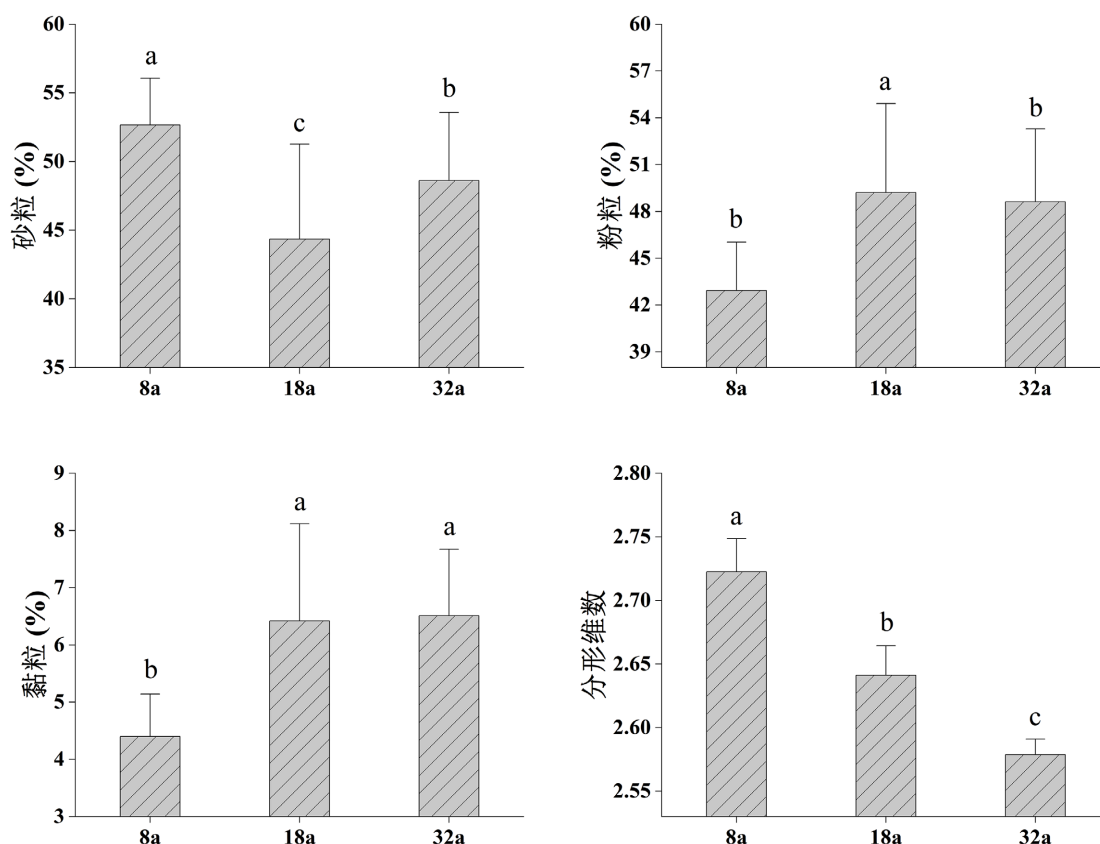
3. 结果分析

3.1. 土壤粒级和分形维数变化特征

土壤颗粒组成以砂粒和粉粒为主, 占比超过 93%, 黏粒含量较低。随着林龄的增加, 砂粒含量呈先降后升的变化趋势, 8a 林分最高(52.66%), 18a 林分最低(44.36%), 32a 林分回升至 48.62%, 各林龄间差异均达显著水平(图 1)。粉粒含量的变化趋势与砂粒相反, 8a 林分最低(42.93%), 18a 林分升至最高

(49.22%), 32a 林分降至 44.87%, 18a 林分显著高于 8a 和 32a 林分, 后二者间无显著差异。黏粒含量随林龄增加持续升高, 8a 林分仅为 4.40%, 18a 和 32a 林分分别增至 6.42%和 6.51%, 较 8a 林分分别提升 45.9%和 48.0%, 18a 与 32a 林分间差异不显著, 但二者均显著高于 8a 林分。

土壤分形维数随林龄增加逐次降低, 8a、18a 和 32a 林分分别为 2.72、2.64 和 2.58, 各林龄间差异均达显著水平。8a 林分砂粒含量最高、黏粒含量最低, 分形维数最大; 18a 林分粉粒和黏粒含量均显著升高, 分形维数随之降低; 32a 林分粉粒含量较 18a 明显下降, 但黏粒含量维持稳定, 分形维数进一步降低。



**Figure 1.** Characteristics of soil particle size and fractal dimension variation. Different lowercase letters indicate significant differences ( $P < 0.05$ )

**图 1.** 土壤粒级和分形维数变化特征。不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

### 3.2. 土壤养分特征和分形维数的关系

在全量养分方面, 土壤全氮含量以 18a 林分最高(2.10 g/kg), 显著高于 8a 林分(1.58 g/kg), 32a 林分(1.87 g/kg)介于二者之间, 与两林龄均无显著差异。全磷和全钾含量则呈现一致的随林龄增加持续升高的趋势, 32a 林分全磷(0.38 g/kg)和全钾(14.81 g/kg)均显著高于 8a 和 18a 林分, 其中 32a 较 8a 全磷提升 52.0%, 全钾提升 30.1%, 表明木荷防火林带的长期发育对磷、钾元素的积累具有明显的促进作用。

在速效养分方面, 碱解氮含量随林龄增加逐次升高, 8a、18a 和 32a 林分分别为 0.14、0.18 和 0.22 g/kg, 各林龄间差异均达显著水平, 32a 较 8a 提升 57.1%, 反映出氮素有效性对林龄的响应最为敏感。速效钾含量在 18a 和 32a 林分间无显著差异(38.21 和 38.87 mg/kg), 但均显著高于 8a 林分(23.21 mg/kg), 增幅约 66%。有效磷含量在各林龄间无显著差异, 变幅仅为 2.32~2.48 mg/kg。

分形维数与各养分指标呈负相关趋势,但相关性强度因养分种类不同而存在明显分异(图 2)。TN、AP、AK 与分形维数的决定系数( $R^2$ )分别为 0.02、0.07 和 0.02,且  $P>0.05$ ,相关性均未达显著水平,表明土壤颗粒分形特征难以有效解释上述三类养分含量的空间变异。相较之下,TP、TK、AN 与分形维数呈显著负相关( $P<0.01$ ), $R^2$ 依次为 0.30、0.33 和 0.26,其中 TK 的拟合效果最优。分形维数越大,表征土壤细颗粒组分占比越高,而 TP、TK、AN 含量与之呈显著负相关,表明随着土壤黏粒含量的提升,三者含量呈下降趋势。

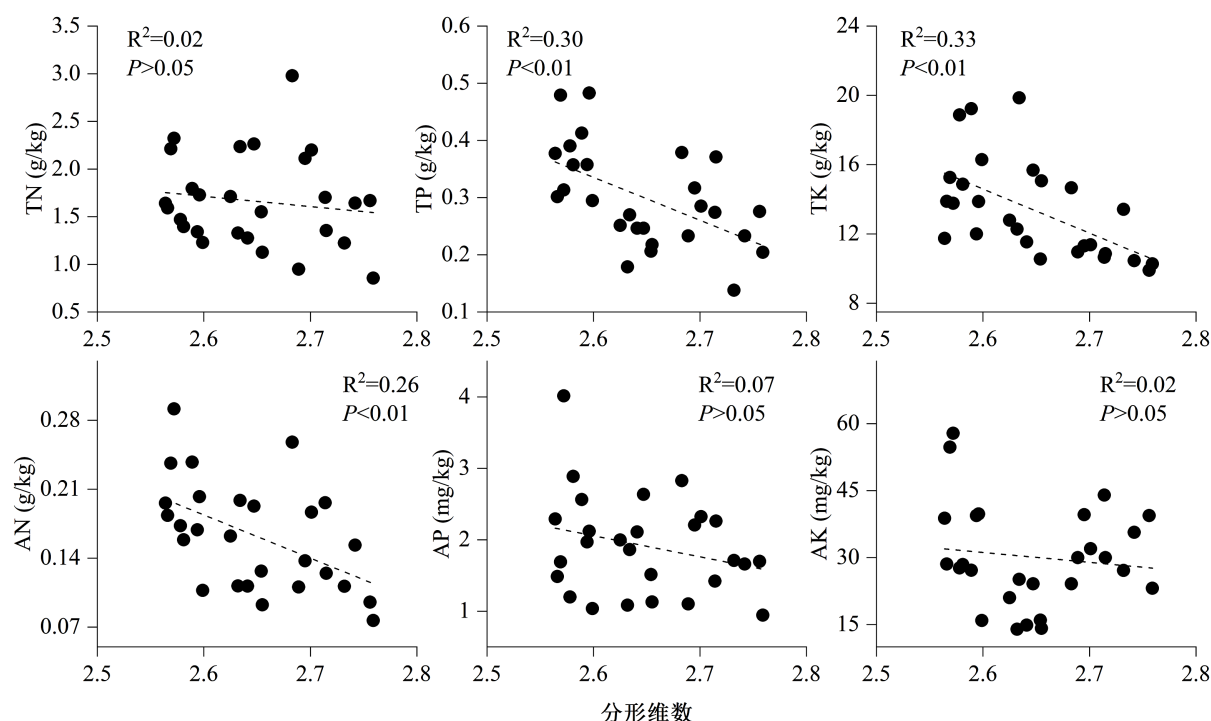


Figure 2. Relationship between soil nutrient characteristics and fractal dimension

图 2. 土壤养分特征和分形维数的关系

## 4. 讨论

### 4.1. 土壤粒径组成及养分指标在不同林龄木荷防火林的差异性

土壤全氮、全磷、全钾等全量养分均随林龄增长持续累积,老龄林分各类养分含量显著高于 8 年生林分,体现明显的养分富集效应。该结果与 7~42 年生木荷人工林相关研究结论吻合[16]。除有效磷外,18 年、32 年生林分土壤速效养分含量均显著高于 8 年生林分。尽管每年 9~12 月会定期清除地表植被与凋落物,但湿热环境下大量有机质归还土壤,仍使木荷防火林带维持较高有效养分储量。木荷生长发育过程中,根系生长对周边土体产生机械挤压下渗水流携带细颗粒向下迁移填充大孔隙,进一步加剧土壤紧实化[17],研究观测到粉粒、黏粒含量随林龄升高,也佐证了这一解释。随林龄增加,黏粒含量持续升高,但土壤分形维数反而逐次降低。分形维数作为表征土壤颗粒大小分布复杂性和自相似性的综合指标,其值越接近 3,表明颗粒组成越复杂、质地越细[15]。从理论上讲,黏粒含量的增加应驱动分形维数升高,但本研究结果与之不符。究其原因,分形维数的计算并非仅由黏粒含量单一因素决定,而是受砂粒、粉粒和黏粒三者级配结构的综合制约[11]。18a 林分粉粒和黏粒的同时增加使颗粒分布趋于均匀连续,分形维数较 8a 下降;至 32a 林分,粉粒含量明显回落而黏粒维持稳定,颗粒组成从三组分相对均衡向砂粒 -

粉粒主导, 颗粒分布均匀性下降, 分形维数进一步降低。砂粒含量随林龄的先降后升, 反映了林分发育过程中侵蚀与固土的动态博弈。8a 幼林阶段, 林冠郁闭度低、地表裸露, 降水溅蚀和坡面径流导致细颗粒优先流失, 砂粒相对富集; 随着林龄的增加, 根系网络扩展、凋落物积累增加(SOC 由 21.37 升至 30.34  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 根系固土与地表拦沙效应增强, 粉粒和黏粒同步上升。

#### 4.2. 土壤分形维数对养分特征的影响

本研究中, 土壤分形维数与 TN、AP 和 AK 的相关性未达显著水平, 而与 TP、TK 和 AN 呈显著负相关, 且各指标间的决定系数差异明显。这一结果与已有文献中的结论存在较大差异: 多数研究报告分形维数与土壤全氮、全磷、碱解氮和速效钾呈显著正相关, 例如科尔沁沙地和腾格里沙漠的研究也表明, 分形维数与全氮、全磷含量均显著正相关[13][17]; 闽南山地 3 种典型植被类型的研究同样发现, 分形维数与全氮、全磷、碱解氮均呈显著正相关[18]。然而, 闽南山地 3 种典型植被类型的研究分形维数与有效磷和速效钾的呈显著负相关[18]。造成差异的根本原因在于分形维数的生态学含义随研究尺度与土壤类型而变化。本研究区的砂质土壤属于细颗粒极度匮乏的类型: 8a 林分黏粒含量仅为 4.40%, 32a 亦不足 7%, 可能与研究区土壤发育于砂岩和页岩, 富含铁、铝氧化物有关。在酸性条件(pH 4.04~4.39)下对磷酸根具有强烈专性吸附, 使磷以 Fe-P 和 Al-P 形态固定, 而非依赖物理吸附; 钾主要赋存于原生矿物晶格层间, 释放受化学风化控制, 与颗粒粗细关联不大[11][12]。碱解氮的负相关则源于团聚体的物理保护作用[11]: 18a 和 32a 林分因粉粒、黏粒增加形成更多团聚体, 减缓有机氮矿化, 表现为分形维数下降伴随碱解氮积累。这与黄土高原地区的研究结果一致, 土壤结构体分形维数与有机质、全氮含量呈极显著负相关, 说明分形维数与养分的关系在不同的土壤类型和研究条件下可能呈现相反的模式[19]。

#### 4.3. 研究局限

本研究采用的“空间代替时间”方法虽能揭示不同林龄间的差异性趋势, 但无法完全排除立地初始条件的空间异质性和土壤性质造成的潜在影响, 各林龄样地虽海拔相近, 但坡向、坡位及局部侵蚀历史可能存在细微差异, 这在一定程度上可能放大了或掩盖了真实的林龄效应。此外, 受山脊地形土壤浅薄的客观限制, 本研究仅采集了 0~20 cm 表层土壤, 未能揭示深层颗粒组成与养分储量的变化规律, 而木荷作为深根系树种, 其根系对深层土壤的改造作用不容忽视。因此, 本结论应谨慎外推至其他母质类型或气候条件。

### 5. 结论

本研究分析了不同林龄木荷防火林带土壤颗粒组成、分形维数及养分含量的变化特征及其相互关系。研究区土壤颗粒组成以砂粒和粉粒为主, 二者合计占比超过 93%, 黏粒含量较低, 土壤质地总体偏砂。随着林龄增加, 砂粒含量呈先降后升的变化趋势, 粉粒含量则先升后降, 黏粒含量持续升高, 土壤分形维数逐次降低, 各林龄间差异均达显著水平, 表明分形维数的变化受砂粒、粉粒和黏粒级配结构的综合制约, 而非仅由黏粒含量单一因素决定。土壤全氮、全磷、全钾及碱解氮、速效钾含量随林龄增加总体呈升高趋势, 其中全磷、全钾和碱解氮各林龄间差异显著, 有效磷在各林龄间无显著差异且整体处于严重缺磷水平, 是研究区土壤肥力的主要限制因子。回归分析表明, 分形维数与全磷、全钾和碱解氮呈显著负相关, 与全氮、有效磷和速效钾的相关性未达显著水平, 反映出分形维数对不同养分的解释能力存在明显分异。木荷防火林带的长期发育对土壤养分积累具有明显促进作用, 其中碱解氮和速效钾对林龄响应最为敏感。然而, 上述结论主要适用于我国南方砂岩-页岩母质发育的酸性薄层红壤、且黏粒含量极低的山脊防火林带生境, 外推至其他母质类型或黏粒含量较高的土壤时需审慎。

## 基金项目

肇庆学院科研启动基金项目“亚热带森林流域生态系统有机碳输移与水文过程耦合研究”。

## 参考文献

- [1] Balch, J.K., Abatzoglou, J.T., Joseph, M.B., Koontz, M.J., Mahood, A.L., McGlinchy, J., *et al.* (2022) Warming Weakens the Night-Time Barrier to Global Fire. *Nature*, **602**, 442-448. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04325-1>
- [2] Senande-Rivera, M., Insua-Costa, D. and Miguez-Macho, G. (2022) Spatial and Temporal Expansion of Global Wildland Fire Activity in Response to Climate Change. *Nature Communications*, **13**, Article No. 1208. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28835-2>
- [3] Xu, M., Wang, W.W., Li, P.F. and Zhang, Y. (2023) Selection of High Efficient Fungi for Litter Degradation in Firebreak Belt. *Forest Research*, **36**, 132-137.
- [4] Xiang, W., Ouyang, C., An, H., Wang, F. and Yang, W. (2024) Mechanism Analysis and Dynamic Simulation of Landslide-Generated Debris Flow Influenced by Forest Fire Prevention Road. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **83**, Article No. 72. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03567-3>
- [5] Hu, W., Li, Y., Xu, Q., Huang, R., McSaveney, M., Wang, G., *et al.* (2022) Flowslide High Fluidity Induced by Shear Thinning. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **127**, 1-19. <https://doi.org/10.1029/2022jb024615>
- [6] Jing, Y., Zhao, X., Liu, S., Tian, P., Sun, Z., Chen, L., *et al.* (2023) Influence of Tree Species on Soil Microbial Residue Accumulation and Distribution among Soil Aggregates in Subtropical Plantations of China. *Ecological Processes*, **12**, Article No.32. <https://doi.org/10.1186/s13717-023-00444-x>
- [7] Zhang, M., Ye, X., Zhang, S., Liu, Y., Chen, S., Fan, H., *et al.* (2022) Complete Chloroplast Genome Sequence of *Schima superba* (Teaceae). *Mitochondrial DNA Part B*, **7**, 68-69. <https://doi.org/10.1080/23802359.2021.1985405>
- [8] Cui, X., Alam, M.A., Perry, G.L., Paterson, A.M., Wyse, S.V. and Curran, T.J. (2019) Green Firebreaks as a Management Tool for Wildfires: Lessons from China. *Journal of Environmental Management*, **233**, 329-336. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.043>
- [9] Yan, K., Zhao, F., Si, L., *et al.* (2025) Research Progress on Forest Firebreaks and Firebreak Systems. *Scientia Silvae Sinicae*, **61**, 197-208.
- [10] He, X., Lei, Y., Xue, C., *et al.* (2019) Carbon Density Uncertainty Estimates for *Schima superba* in Guangdong Province. *Scientia Silvae Sinicae*, **55**, 163-171.
- [11] Tyler, S.W. and Wheatcraft, S.W. (1992) Fractal Scaling of Soil Particle-size Distributions: Analysis and Limitations. *Soil Science Society of America Journal*, **56**, 362-369. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600020005x>
- [12] 贾重建, 卢瑛, 吴刚, 等. 广东罗浮山土壤颗粒分形维数分布特征[J]. 土壤学报, 2022, 53(5): 1049-1055.
- [13] 赵龙飞, 秦富仓, 董晓宇, 等. 腾格里沙漠两种白刺生境土壤粒度和养分的评价[J]. 水土保持学报, 2025, 45(3): 213-223.
- [14] 王学林, 陈江波, 刘昊, 等. 雅鲁藏布江中下游宽谷地带土壤粒径分形维数及抗风蚀能力[J]. 中国沙漠, 2026, 46(3): 330-340.
- [15] 廖竞业. 不同林龄木荷人工林土壤质量差异分析[J]. 林业科技通讯, 2023(12): 136-139.
- [16] Lv, D.P., Zhang, S.Y., He, B. and Zhang, Z.H. (2023) Characteristics of Soil Macropore and Water Infiltration under Different Land Use in Hilly Red Soil Region of Northern Guangdong. *Chinese Journal of Soil Science*, **54**, 1290-1298.
- [17] 姚姣转, 刘廷玺, 童新, 等. 科尔沁沙地沙丘-草甸相间地土壤颗粒的分形特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(2): 433-440.
- [18] 林狄显. 闽南山地 3 种典型植被类型土壤分形与养分特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(8): 48-52.
- [19] 刘毅, 李世清, 李生秀. 黄土高原不同生境土壤结构体分形维数研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008(1): 86-92+100.