

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.02.008

中亚热带不同演替森林群落土壤结构分形特征对大孔隙的影响

朱梦雪¹, 赵洋毅^{1,2*}, 王克勤^{1,2}, 段旭^{1,2}, 卢华兴¹, 涂晓云¹

(1. 西南林业大学生态与环境学院, 云南 昆明 650224; 2. 国家林业和草原局云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站, 云南 昆明 650224)

摘要: [目的] 探究中亚热带不同演替森林群落土壤大孔隙及对结构分形特征的响应, 为不同森林群落土壤大孔隙及生态功能予以数据支撑。[方法] 选择滇中磨盘山演替初期的云南松林、演替中期的云南松阔叶树混交林和演替顶级的常绿阔叶林为对象, 利用染色示踪法结合图像形态学分析, 探讨土壤分形特征及其对大孔隙的影响。[结果] 垂直剖面大孔隙数量和总孔隙度总体随土层加深而减小, 水平方向孔隙半径越大, 数量越少; 不同林地间孔隙度大小依次为: 云南松阔叶树混交林>常绿阔叶林>云南松林。孔隙面密度 (M_z) 随土层加深单调递减, 孔隙复杂度 (D_z) 与其相反, 常绿阔叶林 D_z 最大 (2.006), 云南松林最小 (1.595), 说明群落等级越高, 结构越复杂, 大孔隙扭曲变异度大。土壤分形特征表明, 常绿阔叶林土壤结构较其余两种群落好, 土层越深, 土壤结构变差。相关分析显示, M_z 与 $D_{团}$ (团聚体分形维数) 有极显著正相关关系 ($P < 0.01$), D_z 与 $D_{机}$ (土壤机械分形维数) 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 不同径级团聚体含量和 $D_{团}$ 与土壤孔隙面密度的影响较显著。[结论] 土壤大孔隙与结构随演替进程明显提高, 演替顶级群落的土壤结构稳定性最佳, 研究结果可为降低土壤水分、养分流失和提升森林群落的生态服务功能等森林多功能经营提供参考。

关键词: 孔隙面密度; 孔隙复杂度; 林地; 染色示踪; 土壤分形特征

中图分类号: S714.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)02-0067-11

土壤大孔隙是能优先传导土壤水和溶质的半径较大的孔隙^[1], 其空间有较高的自相似性和异质性, 孔隙大量富集形成联通的孔隙通道, 使土壤水和溶质避开基质土壤, 快速运移到深层土壤补给地下水, 产生大孔隙流^[2-3]。大孔隙有重要的生态水文意义, 其数量占孔隙度比例虽小, 却传导 90% 土壤水分和溶质, 同时在水循环和蓄水持水中起重要作用^[4]。研究显示, 用分形值表示土壤孔隙大小、颗粒含量占土壤空间的有效性^[5], 因而引入分形理论以描述土壤非均匀结构特征^[6]。

连通性强的孔隙可调控壤中流过程, 是森林涵

养水源和调节水文功能的重要方式^[7], Soto-Gómez D^[8] 研究表明, 土地有机管理模式土壤大孔隙连通性较好, 而李荣磊等^[9] 研究发现, 土壤中由细小孔隙构成的复杂孔径会阻止 Cl⁻ 的运移, Yu F^[10]、Meng C^[11] 等使用 CT 扫描技术结合原位染色方法, 获取土柱孔隙三维结构, 定量描述土壤孔隙数量和形态特征表明, 不同绿洲农地和不同森林群落土壤孔隙特性有显著差异, 相较于单一林分, 群落结构越复杂, 土壤结构对水、溶质和空气的运输越高效。对大孔隙的研究还集中于其入渗性能, 王金悦^[12] 等通过土壤水分特征研究孔隙特征和入渗性

收稿日期: 2021-08-05 修回日期: 2021-12-05

基金项目: 云南省基础研究计划面上项目 (202001AT070136); 国家自然科学基金项目 (42067005; 31860235); 云南省万人计划青年拔尖人才专项 (YNWR-QNBJ-2019-215; YNWR-QNBJ-2019-226); 国家林草局林业科技创新平台运行项目: 云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站 (2020132078) 和云南玉溪森林生态系统国家长期科研基地 (2020132550); 云南省自然生态监测网络项目 (2020-YN-13)

作者简介: 朱梦雪, 在读硕士, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 2598978473@qq.com

* 通讯作者: 赵洋毅, 博士, 教授。主要研究方向: 水土保持与林业生态工程。E-mail: yyz301@foxmail.com

能, Zhang Y^[13] 等森林群落内植物根系对优先路径的影响。土壤分形特征反映了孔隙状况^[14] 和结构的稳定性^[15-16], Fei Qi^[17] 等研究表明相比土壤颗粒细化, 土壤质量提高, 促进土壤形成良好的结构。对土壤颗粒和团聚体分形研究可知, 土壤中的细颗粒结构对维持土壤良好结构和有机无机胶结过程起主要作用^[18], 土壤分形特征与土壤颗粒大小和含量密切相关。

土壤理化特性和有效养分是群落演替的前提^[19], 土壤水分^[20] 和微生物群落^[21-22] 是群落演替的重要因素, 由水热条件和微生物群落引起的区域内不同地带群落结构呈现出: 演替顶级的群落生物量明显高于演替初期。土壤的通气性、透水性和保水性与孔隙状况有直接的关系, 进而会影响土壤结构和群落的演替, 森林群落演替进程中也伴随着土壤孔隙结构的改善^[23], 提高了土壤孔隙通透性和入渗性能, 增强土壤持水性^[24], 但关于我国中亚热带区不同演替阶段森林群落土壤分形结构对大孔隙特征的影响方面的研究鲜有报道^[25], 相关研究亟待开展。鉴于此, 以云南中部典型的中亚热带山地覆盖度较高的演替初期云南松林 (*Pinus yunnanensis* Franch. PF)、演替中期云南松阔叶树混交林 (*Pinus yunnanensis*-broadleaved mixed forest-PMF) 和演替顶级的常绿阔叶林 (Evergreen-broadleaved forest EF) 为对象, 研究不同演替

森林群落的土壤大孔隙特征及对土壤分形结构的响应关系, 以期揭示森林生态系统调节水文过程和涵养水源生态服务功能等提供科学依据。

1 研究区概况

研究地设于云南省玉溪市新平县磨盘山的国家林业和草原局云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站 (23°46'18"~23°54'34" N, 101°16'06"~101°16'13" E) 内, 地处云贵高原、横断山脉和青藏高原交接处的低纬度地区, 具有典型的山地气候特征, 海拔 1260.0~1 614.4 m, 是云南亚热带北部气候与亚热带南部气候过度区。干湿季分明, 降雨集中在 5—10 月, 年降水量为 1 050 mm, 年均气温为 15.0 °C, 5 月会出现极高温 33.0 °C, 12 月有极端低温为 -2.2 °C。土壤以第三纪古红土发育的山地红壤和玄武岩红壤为主, 高海拔地区有黄棕壤分布。区域内的植被类型随海拔的变化有较为明显的垂直分布特征, 植被覆盖率达 86%。本研究以区域内演替初期的云南松林、演替中期的云南松阔叶树混交林和演替顶级的常绿阔叶林为对象, 样地基本概况见表 1。

2 研究方法

2.1 样地布设及土样采集

在研究区内各林型内, 分别设置有面积为 100 m ×

表 1 研究区样地概况

Table 1 Overview of sample areas

森林群落 Forest community	立地因子 Site factor				林分特征 Stand characteristics		枯落物 Litter		土壤特征 Soil characteristics			优势树种 Dominant tree species
	海拔 Elevation/m	坡向 Aspect	坡度 Slope/°	起源 Origin	林下覆 盖度 Understory coverage/%	地被物 覆盖度 Coverage of ground cover/%	厚度 Depth/ cm	类型 Type	密度 Volumetric weight/ (g·cm ⁻³)	pH	有机质 organic matter/ (g·kg ⁻¹)	
云南松林 <i>Pinus yunnanensis</i> forest	2054.6	西北	8	天然林	50	70	3	棕黄壤	1.296	5.72	26.72	云南松 (<i>Pinus yunnanensis</i> Franch) 金星蕨 (<i>Thelypteridaceae</i>)
云南松阔叶树 混交林 <i>Pinus yunnanensis</i> - broadleaved mixed forest	2157.72	西南	11	天然林	90	85	8	棕黄壤	1.301	5.46	45.53	云南松 (<i>Pinus yunnanensis</i> Franch)、 元江栲 (<i>Castanopsis orthacantha</i> Franch) 等
常绿阔叶林 Evergreen- broadleaved forest	2430	西南	12	天然林	80	95	6	棕黄壤	1.284	5.44	53.66	高山栲 (<i>Castanopsis delavayi</i> Franch)、 滇青冈 (<i>Cyclobalanopsis glaucoides</i> Schotky) 等

100 m 的固定样地各 1 块, 分别在各固定样地内选择植被均匀、地形相似的地段设置 4 块 20 m × 20 m 的样方, 在每个样方内选择 3 个试验点开展染色示踪实验, 同时在各个样方内利用 5 点法分层采集土样, 混合后带回实验室风干, 制备用于测定土壤基本性质、团聚体等^[26]。

2.2 染色示踪试验

在样方内选择地形、坡度及坡向等相近的区域开展实验, 依据样地地形条件, 实验尽可能在平缓的地方, 选定染色区域后, 清除土壤表层杂草、枯落物及砾石等, 表层植物根系用剪刀剪除, 将 70 cm × 70 cm × 60 cm 的铁框缓慢砸入 50 cm 的土体中, 为避免染色溶液在铁框内壁周围快速下渗引起实验误差, 需把铁框内壁 5 cm 的土夯实, 以当地 24 h 内的最大降雨量为试验标准, 用积水渗透法控制马氏瓶装置把 25 L、4 g·L⁻¹ 亮蓝溶液均匀喷洒在铁框内, 染色后用防雨布将铁框盖住, 避免降雨过程对实验的影响, 染色 24 h 后, 除去防雨布和铁框^[27], 考虑到铁框内壁周围土壤水分侧向流及夯实等不稳定情况, 开挖后保留中心 50 cm × 50 cm × 50 cm 的剖面, 用高清相机拍摄染色剖面, 获取的孔隙染色剖面择优处理。

2.3 图像及数据处理

2.3.1 土壤大孔隙提取 用 Image Pro Plus 图像处理软件, 结合图像形态学处理方法, 提取水平剖面上能够产生大孔隙流的大孔隙占图像像素的数量、位置、面积和孔隙半径, 并根据孔隙范围将其划分为 5 个等级: $r \leq 1 \text{ mm}$, $1 < r \leq 2.5 \text{ mm}$, $2.5 < r \leq 5 \text{ mm}$, $5 < r \leq 10 \text{ mm}$, $r > 10 \text{ mm}$, 分别统计各径级的孔隙数量。

2.3.2 土壤大孔隙和分形维数计算 孔隙面密度 (M_z): 特定土壤深度内, 孔隙面积与总面积的比值来定量评价土壤孔隙结构, M_z 越高, 表明孔隙占比越大, 土壤结构越疏松。公式为:

$$M_z = \frac{Az}{A} \quad (1)$$

式中: M_z 为深度 Z 处孔隙面密度; Az 为深度 Z 处的孔隙总面积; A 为深度 Z 处孔隙和土的总面积。

孔隙复杂度 (D_z): 孔隙周长与面积的关系来评价孔隙的复杂程度, D_z 越大, 孔隙越复杂。

公式为:

$$D_z = 2 \frac{\log P_z}{\log A_z} \quad (2)$$

式中: D_z 为深度 Z 处的孔隙复杂度; P_z 为深度 Z 处孔隙周长; A_z 为深度 Z 处的孔隙面积。

土壤机械组成体积分形维数与平均粒径之间的关系 (3), 可反映土壤质量和结构的稳定性能。

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}} \right)^{3-D_{\text{团/机}}} = \frac{W_i(\bar{d}_i < \bar{d}_i)}{W_0} \quad (3)$$

d_{\max} : 土壤颗粒含量最大粒径; \bar{d}_i : 为两相邻粒径 \bar{d}_i 与 \bar{d}_{i+1} 间土粒平均直径平均粒径; $W(\bar{d}_i < \bar{d}_i)$ 粒径小于 \bar{d}_i 的累积量; W_0 : 土壤样品总量; $D_{\text{团/机}}$: 团聚体分形维数、土壤机械分形维数。

2.3.3 数据分析 采用 Microsoft Office Excel 对数据予以处理, 并用 SPSS24.0 对各个森林群落不同径级大孔隙数量、团聚体含量和颗粒组成等进行 LSD 多重比较和单因素方差分析, 比较群落结构和不同土层间土壤孔隙和分形特征间的差异, 显著性差异检验在 0.05 水平; 用 Origin 2021 绘图及分析孔隙特征与土壤分形结构间的相关性; 用通径分析方法探究土壤结构对孔隙特征的影响。

3 结果与分析

3.1 典型林地土壤大孔隙特征

3.1.1 土壤大孔隙数量特征 据图像获取的土壤孔隙数量特征 (表 2)。土层越深, 孔隙数量越少; 同一水平剖面, 孔隙半径越大, 孔隙数量减少, 但局部土层和孔径范围内有所差异。云南松林 10~20 cm 孔隙半径为 $2.5 < r \leq 5 \text{ mm}$ 的孔隙数量最多, 常绿阔叶林 30~40 cm 土层 $5 < r \leq 10 \text{ mm}$ 孔隙数量高于 $2.5 < r \leq 5 \text{ mm}$ 。3 种不同演替的森林群落, 土壤总孔隙度随土层加深减小, 0~30 cm 土壤总孔隙大小变化: 云南松阔叶树混交林 > 常绿阔叶林 > 云南松林, 在 30~50 cm 总孔隙度的变化规律: 常绿阔叶林 > 云南松阔叶树混交林 > 云南松林。

3.1.2 土壤大孔隙结构分形特征 孔隙分形维数可表征大孔隙的分布特征, 图 1 为 3 种林分土壤孔隙分形特征, 由图知, 土壤孔隙面密度 (M_z)

表 2 各林地不同孔径土壤大孔隙数量及孔隙度特征

Table 2 Macropore number and porosity characteristics of soil with different pore size in different forest lands

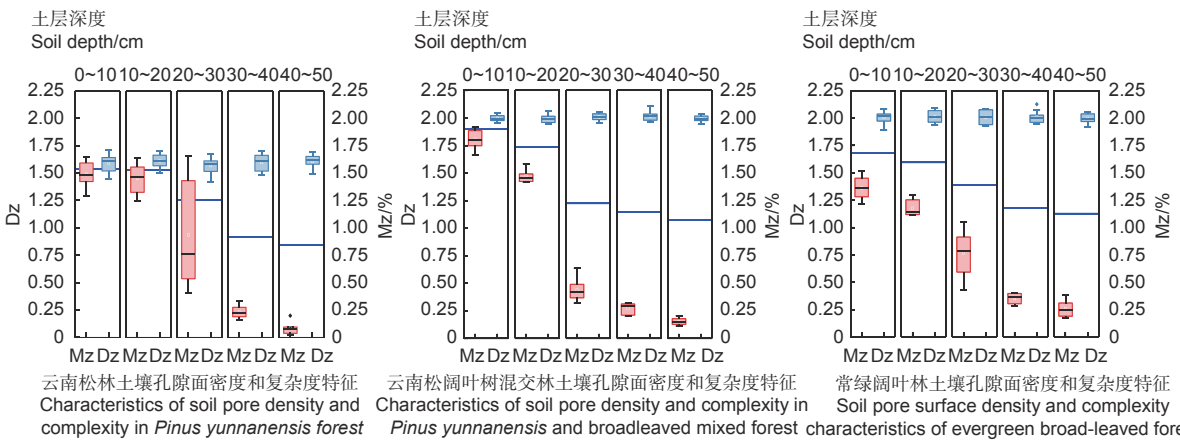
森林类型 Forest type	土层深度 Soil depth/cm	孔隙半径 Pore width/mm					总孔隙度 Total porosity/%
		$r \leq 1$	$1 < r \leq 2.5$	$2.5 < r \leq 5$	$5 < r \leq 10$	$r > 10$	
云南松林 <i>Pinus yunnanensis</i> forest (PF)	0~10	2722 ± 35.36 Ba	1454 ± 36.06 Ca	309 ± 34.65 Cd	159 ± 26.16 Bc	105 ± 6.36 Bc	61.75 Ca
	10~20	1092 ± 36.77 Bb	961 ± 42.43 Bb	2564 ± 48.08 Aa	420 ± 15.56 Aa	267 ± 14.14 Aa	54.19 Cb
	20~30	928 ± 48.08 Bc	64 ± 30.41 Ce	960 ± 47.38 Ab	196 ± 16.97 Ab	202 ± 13.44 Ab	52.55 Bc
	30~40	634 ± 29.70 Bd	101 ± 4.24 Cd	623 ± 43.13 Ac	191 ± 21.92 Ab	124 ± 12.02 Ac	50.93 Bd
	40~50	248 ± 15.56 Be	246 ± 9.90 Bc	269 ± 40.31 Ae	145 ± 33.23 Ad	44 ± 28.99 Ad	48.80 Be
云南松阔叶树混交林 <i>Pinus yunnanensis</i> - broadleaved mixed forest (PMF)	0~10	1363 ± 26.87 Cb	1137 ± 49.50 Ba	331 ± 21.92 Ba	316 ± 11.31 Aa	259 ± 25.46 Aa	71.63 Aa
	10~20	1633 ± 61.52 Aa	962 ± 80.61 Ab	322 ± 81.32 Ca	138 ± 37.48 Cc	130 ± 47.38 Bc	64.04 Ab
	20~30	1064 ± 7.07 Ac	779 ± 36.06 Ac	259 ± 66.47 Bb	207 ± 70.71 Ab	171 ± 50.20 Bb	53.46 Ac
	30~40	748 ± 50.91 Cd	594 ± 44.55 Ad	155 ± 26.16 Bc	215 ± 4.24 Bc	166 ± 28.28 Ad	48.52 Cd
	40~50	450 ± 12.73 Ae	350 ± 41.01 Ae	111 ± 12.73 Bd	74 ± 6.36 Bd	60 ± 19.09 Be	43.77 Ce
常绿阔叶林 Evergreen-broadleaved forest (EF)	0~10	2223 ± 36.77 Aa	1092 ± 26.87 Aa	465 ± 23.33 Aa	241 ± 28.99 Ca	199 ± 19.80 Ca	68.18 Ba
	10~20	1898 ± 48.08 Cb	730 ± 45.96 Cb	339 ± 42.43 Bb	203 ± 8.49 Bb	146 ± 13.44 Bb	59.78 Bb
	20~30	792 ± 43.13 Cc	593 ± 31.11 Bc	272 ± 13.44 Cc	182 ± 17.68 Ac	143 ± 40.31 Cb	60.04 Bc
	30~40	267 ± 32.53 Ad	371 ± 17.68 Bd	160 ± 17.68 Bd	91 ± 14.85 Cd	63 ± 23.33 Bc	56.31 Ad
	40~50	219 ± 34.65 Ce	217 ± 38.18 Ce	115 ± 24.75 Be	68 ± 18.38 Be	38 ± 13.44 Ad	53.79 Ae

表中: PF: 云南松林; PMF: 云南松阔叶树混交林; EF: 常绿阔叶林, 下同; 数值为: 均值 ± 标准差; 大写字母表示相同土层不同森林群落孔隙数量差异显著 ($P < 0.05$); 小写字母表示不同土层间孔隙数量差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: PF: *Pinus yunnanensis* forest. PMF: *Pinus yunnanensis*-broadleaved mixed forest. EF: evergreen-broadleaved forest "Mean ± standard deviation"; The uppercase letters indicated that the pore numbers of different forest communities in the same soil layer were significantly different ($P < 0.05$). The lowercase letters showed significant differences in the number of pores between different soil layers ($P < 0.05$). The following is the same.

随土壤发生层加深而降低, 不同林分变化规律有差异; 土壤孔隙复杂度 (Dz) 随土层加深单调增

大, 云南松林 (1.595) < 云南松阔叶树混交林 (2.003) < 常绿阔叶林 (2.006)。



图中: Mz: 土壤孔隙面密度; Dz: 土壤孔隙复杂度。

Figure: Mz: Soil pore density; Dz: Soil pore complexity.

图 1 3 种林地土壤孔隙面密度与复杂度随土层深度的变化

Fig. 1 Changes of soil pore density and complexity with soil depth in three forest lands

0~20 cm 土层深度内, 不同演替阶段森林群落土壤面密度变化: PMF > PF > EF; 20~30 cm

孔隙面密度大小变化: PF > PMF > EF; 而深层土壤中, 3 种林地中云南松林土壤孔隙面密度最小,

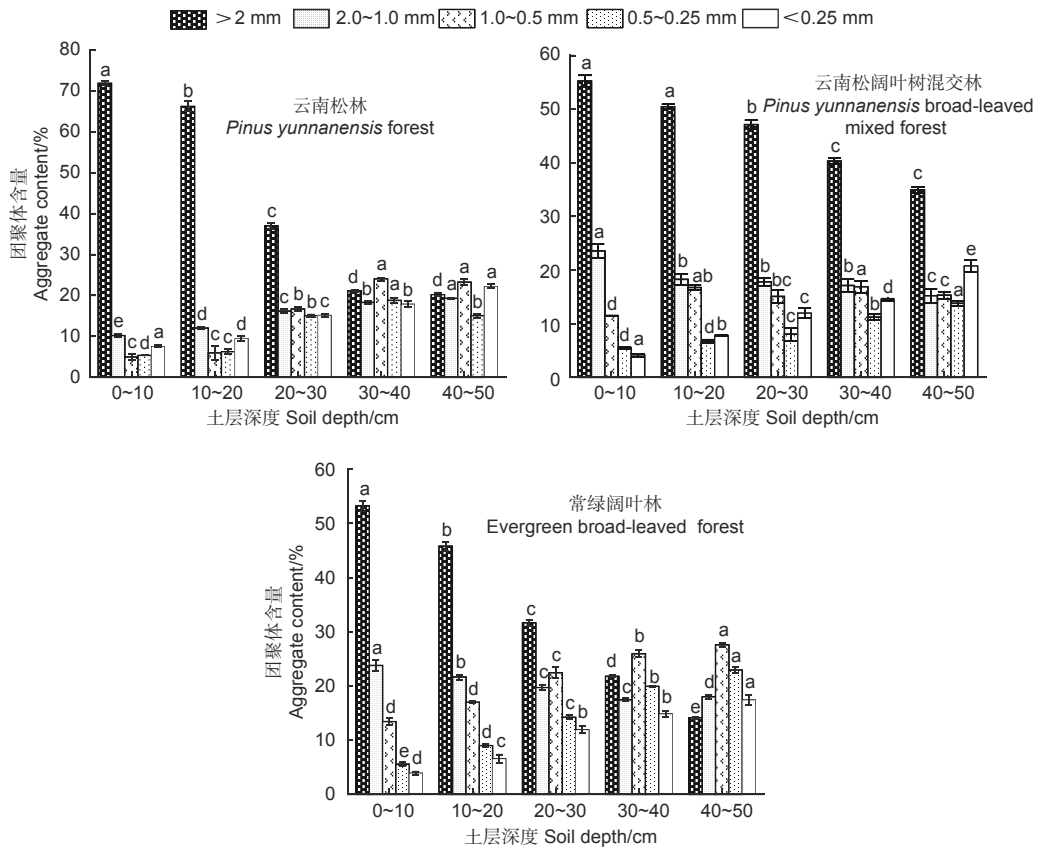
表明 3 种林地内不同土层间孔隙变异程度不同。土壤孔隙复杂度变化规律与孔隙面密度相反, 随土层深度增加递增。常绿阔叶林和云南松阔叶树混交林的 Dz 较云南松林大, 表明常绿阔叶林和云南松阔叶树混交林土壤大孔隙扭曲度较大, 孔隙形态更复杂, 而云南松林 Dz 最小, 大孔隙扭曲度小, 孔隙结构单一。各土层之间孔隙复杂度变化有较大差异, 0~20 cm 和 40~50 cm 土层土壤孔隙复杂度为常绿阔叶林最大, 云南松林最小; 而 20~40 cm 土层, 云南松林最低。

3.2 土壤结构分形特征对大孔隙的影响

3.2.1 土壤团聚体分形特征及其稳定性分析 3 种林地土壤各粒径团聚体含量分布如图 2, > 2 mm 粒径的团聚体占有较大比重。0~50 cm 内云南松林地其含量分别为: 71.82%、66.20%、36.95%、21.09% 和 20.22%; 云南松阔叶树混交林 0~50 cm 含量依次为: 55.23%、50.47%、47.14%、

40.29% 和 34.94%; 常绿阔叶林含量则为: 53.24%、45.79%、31.67%、21.08% 和 14.11%。大粒径团聚体含量随土层中增加而减少, 小粒径团聚体含量随土层变化正相反, > 2 mm、2.0~1.0 mm 团聚体含量减小, 而 1.0~0.5 mm、0.5~0.25 mm 和 < 0.25 mm 等小粒径的团聚体含量呈增加趋势; 土层加深, 各粒径团聚含量在局部上有显著差异 ($P < 0.05$)。

森林土壤长期处于自然状态, 人为扰动小, 土壤以大团聚体 (> 0.25 mm) 为主, 云南松林地 0~50 cm 含量依次为 92.38%、90.47%、84.87%、82.17% 和 77.74%, 云南松阔叶树混交林地 0~50 cm 含量分别为: 95.87%、92.17%、88.02%、85.47% 和 79.28%, 常绿阔叶林 0~50 cm 含量分别为: 96.07%、93.44%、88.07%、85.12% 和 82.59%, 且部分土层各粒径团聚体含量有显著性变化 ($P < 0.05$)。除常绿阔叶林 30~40 cm 外,



注: 柱状图表示含量±标准差; 不同小写字母代表同一土层中各粒径团聚体差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Column diagram indicates "mean ± standard deviation"; Different lowercase letters represent significant differences in particle size aggregates in the same soil layer ($P < 0.05$).

图 2 不同林地不同土层土壤水稳定性团聚体分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of soil water-stable aggregates in different soil layers of different woodlands

其余土层大团聚体含量变化为常绿阔叶林>云南松阔叶树混交林>云南松林, 30~40 cm 其含量为云南松阔叶树混交林>常绿阔叶林>云南松林。

3 种林地土壤团聚体分形维数及土壤结构稳定性特征见表 3, 团聚体分形值 ($D_{\text{团}}$) 随土层增加而减小, 且各不同土层间团聚体分形维数差异性显著 ($P < 0.05$); 土壤团聚体结构破坏率随土层深

度增加单调递增, 各土壤发生层 PAD 显著增加 ($P < 0.05$), 表明随土层增加, 其结构稳定性减弱。据表 3 知, 常绿阔叶林除 30~40 cm 外其余土层土壤团聚体分形维数值较另外两种林地小, 表明其土壤团聚体结构稳定性最佳, 且云南松林 $D_{\text{团}}$ 最大, 其团聚体稳定性最差。

表 3 3 种林地土壤团聚体分形维数和结构稳定性特征

Table 3 Fractal dimension and structural stability of soil aggregates in three forest lands

土层深度 Soil depth/cm	PF- $D_{\text{团}}$	PMF- $D_{\text{团}}$	EF- $D_{\text{团}}$	PF-PAD	PMF-PAD	EF-PAD
0~10	2.611 ± 0.003 a	2.609 ± 0.004 e	2.541 ± 0.002 a	1.436 ± 0.031 e	1.097 ± 0.003 e	1.199 ± 0.041 e
10~20	2.564 ± 0.011 b	2.570 ± 0.013 d	2.457 ± 0.006 b	1.950 ± 0.047 d	1.791 ± 0.003 d	1.960 ± 0.004 d
20~30	2.340 ± 0.018 c	2.338 ± 0.040 c	2.332 ± 0.014 c	6.835 ± 0.235 c	5.494 ± 0.145 c	2.647 ± 0.004 c
30~40	2.324 ± 0.023 d	2.218 ± 0.010 b	2.261 ± 0.003 d	9.756 ± 0.372 b	5.505 ± 0.581 b	4.933 ± 0.003 b
40~50	2.218 ± 0.004 d	2.368 ± 0.005 a	2.150 ± 0.012 e	11.077 ± .0291 a	9.372 ± 0.219 a	8.414 ± 0.007 a

注: 表中数据表示为:“平均值 ± 标准差”; PF: 云南松林; PMF: 云南松阔叶树混交林; EF: 常绿阔叶林; 小写字母表示不同土层之间差异显著 ($P < 0.05$); $D_{\text{团}}$: 土壤团聚体分形维数; PAD: 土壤团聚体破坏率。

Note: The data in the table is expressed: “mean ± standard deviation”. PF: *Pinus yunnanensis* forest. PMF: *Pinus yunnanensis*-broadleaved mixed forest. EF: evergreen-broadleaved forest, the same below. The lowercase letters indicated significant differences among different soil layers ($P < 0.05$). D_{group} : fractal dimension of soil aggregates. PAD: Soil aggregate destruction rate.

土壤 PAD 在不同群落结构表现出较大差异, 不同土层深度, 云南松林其 PAD 值最大, 常绿阔叶林 20~50 cm 土层, 土壤团聚体结构 PAD 最小, 0~20 cm 云南松阔叶树混交林结构稳定性较好, 其原因是林下灌丛植被和表层枯落物覆盖度较高, 致使于 0~20 cm 其结构稳定性稍好。

3.2.2 土壤机械组成分形特征 由表 4 知, 3 种林地各个土壤发生层, 粘粒和粉粒含量随土层加深而增加, 砂粒含量减少; 同一发生层, 土壤质地以粉粒为主。据图 3 得, 土壤机械组成分形维数与粘粒含量有显著正相关关系 ($P < 0.05$), 相关系数达 0.646, 与粉粒含量之间有正相关关系 ($P > 0.05$), 与砂粒含量之间呈显著负相关 ($P < 0.05$), 相关系数为 -0.676。此外, 由表 4 可得, 随土层加深, 土壤机械组成分形维数增加, 表明其结构越不稳定; 3 种林地内, 云南松林机械组成分形维数最大, 0~50 cm 内其分形值分别是云南松阔叶树混交林的 1.032、1.025、1.008、1.012、0.999 倍, 常绿阔叶林的 1.016、1.031、1.013、1.048、1.022 倍, 表明云南松混交林和常绿阔叶林地内各土层结构较云南松林好。

本研究选取土壤孔隙特征和土壤分形结构相关分析见图 3, 由图知, 土壤孔隙面密度与土壤非毛

管孔隙度、总孔隙度、> 2 mm 团聚体含量和团聚体分形维数等之间具有极显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.807、0.696、0.813、0.846, 其与粘粒含量、1.0~0.5 mm、< 0.25 mm 和 0.5~0.25 mm 团聚体含量之间则呈极显著的负相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 -0.818、-0.760、-0.833、-0.782, 与土壤毛管孔隙度和砂粒间呈显著的正相关关系 ($P < 0.05$); 土壤孔隙复杂度与土壤机械组成分形维数则有显著负相关关系 ($P < 0.05$)。

土壤孔隙面密度与土壤中不同径级团聚体含量、机械组成和 $D_{\text{团}}$ 有显著的相关性 (图 3), 本实验采用通径分析法进一步明确各因子对孔隙面密度的影响差异, 结果显示 (表 5), 1.0~0.5 mm 团聚体含量对 M_z 的直接作用最大, 其次是 > 2 mm 团聚体含量, 直接效应系数分别为 1.219 和 0.645, 而粘粒含量 0.5~0.25 mm 径级团聚体含量则呈现负效应; 分析影响因子的间接系数表明, < 0.25 mm 团聚体的间接影响作用最大, 其次为 $D_{\text{团}}$, 间接作用系数为 1.1727、0.6138, 说明土壤结构中, 细颗粒结构对孔隙结构影响较大, 随着孔隙被细小颗粒填充, 土壤结构孔隙通透性和渗透性减弱, 孔隙面密度减少。

表 4 林地土壤质地及颗粒分形特征

Table 4 Soil texture and particle fractal characteristics of forest land

森林类型 Forest type	土层深度 Soil depth cm	粘粒 Clay <0.002 mm/%	粉粒 Silt 0.002 mm~0.05 mm /%	砂粒 Sand 0.05 mm~2 mm /%	土壤机械分形维数 Fractal dimension D _机
PF	0~10	11.2 ± 0.52 Ae	65.98 ± 0.55 Ac	22.81 ± 0.08 Ca	2.731 ± 0.027 Ac
	10~20	15.89 ± 0.30 Ad	76.63 ± 0.52 Aa	7.48 ± 0.82 Bb	2.740 ± 0.001 Ac
	20~30	18.94 ± 0.13 Ac	76.70 ± 0.63 Aa	4.36 ± 0.76 Cc	2.748 ± 0.011 Ab
	30~40	21.03 ± 0.37 Ab	74.97 ± 0.30 Ab	4.00 ± 0.67 Cc	2.754 ± 0.012 Ab
	40~50	21.45 ± 0.27 Aa	74.13 ± 0.86 Ab	4.42 ± 0.13 Cc	2.760 ± 0.028 Aa
PMF	0~10	6.42 ± 0.074 Cc	58.74 ± 0.453 Be	34.85 ± 0.53 Ba	2.645 ± 0.045 Cb
	10~20	7.61 ± 0.091 Cc	69.37 ± 0.563 Bd	23.01 ± 0.47 Bb	2.672 ± 0.008 Bb
	20~30	16.17 ± 0.375 Bb	64.74 ± 0.145 Cc	19.09 ± 0.23 Bc	2.725 ± 0.012 Aa
	30~40	17.02 ± 0.572 Bbc	74.18 ± 0.184 Bb	8.8 ± 0.76 Bd	2.721 ± 0.047 Cb
	40~50	18.4 ± 0.014 Ba	76.65 ± 0.202 Ba	6.95 ± 0.19 Be	2.761 ± 0.006 Cab
EF	0~10	6.72 ± 0.071 Be	54.20 ± 0.036 Ce	39.08 ± 0.044 Aa	2.681 ± 0.015 Bc
	10~20	8.62 ± 0.067 Bd	68.59 ± 0.075 Bb	22.78 ± 0.074 Ac	2.656 ± 0.013 Bd
	20~30	12.63 ± 0.047 Cc	73.37 ± 0.015 Ba	14.01 ± 0.026 Ae	2.712 ± 0.041 Ab
	30~40	11.45 ± 0.105 Cb	65.54 ± 0.038 Cc	23.01 ± 0.029 Ab	2.628 ± 0.015 Bb
	40~50	19.16 ± 0.060 Ca	61.87 ± 0.095 Cd	18.97 ± 0.061 Ad	2.701 ± 0.061 Ba

注: 表中数据表示为“平均值 ± 标准差”; 大写字母表示不同样地间差异显著 ($P < 0.05$); 小写字母则表示不同土层间各组分含量显著性差异 ($P < 0.05$)。

Note: The data “±” in the table is expressed as “mean ± standard deviation”. Capital letters showed significant differences ($P < 0.05$). The lowercase letters indicate the significant difference of each component content in different soil layers ($P < 0.05$).

4 讨论

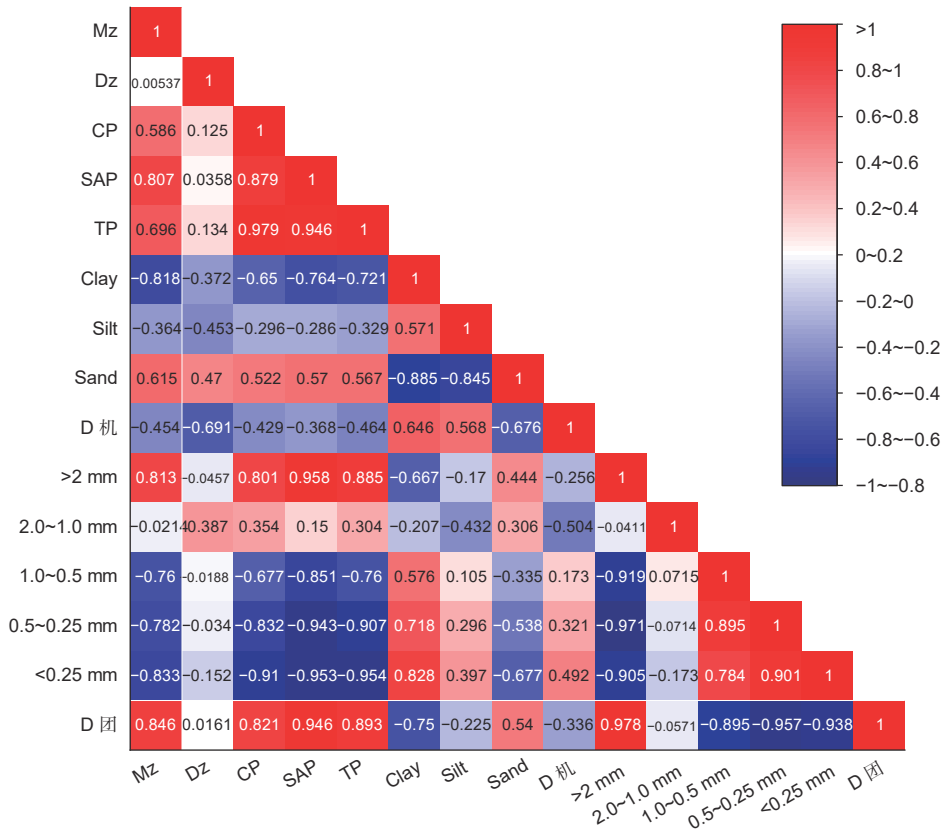
4.1 3 种典型林地土壤大孔隙特征

简单群落向顶级群落演替进程中, 不同林分类型之间, 土壤大孔隙特征差异明显, 土壤有机质和 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 等金属离子逐渐积累, 土壤有效养分增加且趋于多元化^[28], 本研究中, 3 种森林群落孔隙数量和孔隙半径随土层的变化与陈晓冰^[29]、邵一敏^[30] 等研究相同, 土层越深, 土体紧实, 孔隙数量减少; 孔隙半径越大, 数量减少, 但局部土层深度和孔隙半径内, 孔隙数量变化有所差异, 因为大孔隙垂直分布规律与土层中根系含量相关^[31], 不同群落间, 垂直剖面总孔隙度变化明显, 局部土层 (0~20 cm), 云南松阔叶树混交林的 TP 较常绿阔叶林大, 是由于云南松阔叶树混交林内, 小乔木和灌丛覆盖度较高, 丰富的根系网络为大孔隙的形成提供有利条件所致^[32]。

染色实验获取的垂直染色剖面, 不仅反映了土壤水分运动规律, 还反映出大孔隙特性及孔隙面密度特征, 孔隙数量越多, 增强土壤的持水性^[33], 便于为群落植被提供水热条件。研究表明, 各森林群

落间土层加深, 孔隙染色面积变小, Mz 降低, 土壤结构间的紧实度增加^[34], 不利于水源的蓄积, 降低土壤蓄水固土生态功能。不同演替群落内, 上层土壤因灌草覆盖改善土壤内部孔隙状况, 云南松阔叶树混交林下土壤疏松度较好, 而常绿阔叶林较混交林土壤结构稍紧实, 这与王伟等^[35] 研究有差异; 深层土壤则是常绿阔叶林孔隙特性最佳, 该结论与 Meng C^[11]、Zhang Y^[13] 等研究一致, 森林群落等级越高, 种群结构越复杂, 土壤内部产生的孔隙通透性越好, 但剖面孔隙染色面积规律与刘目兴等^[36] 等对不同植被土壤类型的研究结论有出入, 这与不同地域植被类型和土壤结构差异性有关。

孔隙复杂度的波动形态可反映垂直方向上孔隙的变异程度, 结果显示, 常绿阔叶林土壤孔隙变异程度相对较大, 孔隙形态相对复杂, 云南松林土壤孔隙形态较均匀, 变异程度较小, 原因是群落演替过程中, 群落等级越高, 林内树种结构复杂, 根系网络发达, 致使土壤孔隙复杂度变大。孔隙变异度随土层的变化与甘磊等^[34] 研究一致, 土层越深, Dz 越大, 土壤内部孔隙状况越复杂, 扭曲度越高, 且常绿阔叶林地 Dz 更大, 表明林种结构越复



注：图中 Mz：土壤孔隙面密度；Dz：土壤孔隙复杂度；CP：毛管孔隙度；TP：总孔隙度；Clay：粘粒含量；Silt：粉粒含量；Sand：砂粒含量；D_机：土壤机械分形维数；> 2 mm、2.0~1.0 mm、1.0~0.5 mm、0.5~0.25 mm、< 0.25 mm：分别表示> 2 mm、2.0~1.0 mm、1.0~0.5 mm、0.5~0.25 mm、< 0.25 mm 水稳定团聚体含量；D_团：团聚体分形维数。Note: The figure Mz: Soil Pore Density; Dz: Soil pore complexity; CP: Capillary porosity; TP: Total porosity; Clay: Clay content; Silt: Silt content; Sand: Sand content; D_机: Soil mechanical fractal dimension; > 2 mm、2.0~1.0 mm、1.0~0.5 mm、0.5~0.25 mm、< 0.25 mm: > 2 mm、2.0~1.0 mm、1.0~0.5 mm、0.5~0.25 mm、< 0.25 mm Water-stable aggregate content; D_团: Agglomerate fractal dimension.

图 3 大孔隙分形维数与土壤分形结构聚类相关分析

Fig. 3 Correlation analysis between fractal dimension of macropores and soil fractal structure clustering

表 5 土壤孔隙面密度与土壤因子影响关系

Table 5 Relationship between soil pore density and soil factors

自变量 Independent variable	与Y的相关系数 Correlation coefficient with Y	直接作用系数 Direct acting coefficient	间接作用系数/Indirect coefficient						合计 Total
			X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	
X ₁	-0.754	-0.597	—	0.1282	-0.3035	-0.0018	-0.0188	0.0394	-0.1565
X ₂	0.028	0.6045	-0.019	—	-1.1593	0.8538	-0.2018	-0.0019	-0.5282
X ₃	0.121	1.219	0.1486	-0.3335	—	-0.7994	0.1703	0.0052	-0.8088
X ₄	-0.252	-0.921	-0.0012	-0.6063	0.8362	—	0.2032	0.0151	0.447
X ₅	-0.198	0.232	0.0484	-0.5687	0.8947	0.7955	—	0.0028	1.1727
X ₆	0.354	0.074	0.3167	0.0161	0.0853	0.1869	0.0088	—	0.6138

注：表中Y：大孔隙面密度；X₁：粘粒含量；X₂、X₃、X₄、X₅分别表示：> 2 mm、1.0~0.5 mm、0.5~0.25 mm和< 0.25 mm团聚体含量，X₆：团聚体分形维数。

Note: Y: Macropore surface density; X₁: Clay content. X₂, X₃, X₄, X₅ represent aggregate content of > 2 mm, 1.0~0.5 mm, 0.5~0.25 mm and < 0.25 mm, X₆ respectively: represent fractal dimension of aggregate.

杂，土壤大孔隙的变异程度越高，分布形态越不均匀。

4.2 土壤结构分形特征及对大孔隙的影响

长期处于自然状态下的森林土壤以> 0.25 mm

的团聚体为主, 土层越深, 团聚体含量同熊佰炼等研究相同, 随土层中增加而减少^[37], 小粒径团聚体含量则随土层变化增加; 常绿阔叶林 30~40 cm 大团聚体含量为云南松阔叶树混交林>常绿阔叶林>云南松林, 原因为云南松阔叶树混交林内, 林下覆有灌木丛和小乔木树种, 根系的穿插作用改善孔隙通透性和团聚体特征^[38]。其余土层顶级群落土壤大团聚体含量较高, 土壤结构稳定性较其余两种林地好。

顶级群落常绿阔叶林 $D_{团}$ 最小, 土壤结构越好。0~20 cm 土层云南松阔叶树混交林 PAD 最小, 而 30~50 cm 则是常绿阔叶林最小, 表层枯落物堆积分解增加了土壤中的有机质和有效养分含量, 提高土壤的水稳定性, 改善土壤结构。机械组成分形维数越小土壤结构越好, 该研究中, 垂直剖面 10~50 cm 内 $D_{机}$ 均为: 常绿阔叶林<云南松阔叶树混交林<云南松林, 常绿阔叶林土壤结构最佳, 云南松土壤结构最差, 与 Guo X^[39] 对不同树种林分土壤分形结构特征研究结论相同, 0~10 cm 出现异常可能是云南松阔叶树混交林根系网络和表层枯落物分解的共同作用, 大量的腐殖质改善了土壤质地使 $D_{机}$ 变小。Liu X^[23] 研究显示, 森林群落类型会影响大孔隙的小规模聚集, 进而影响土壤持水能力, 且土层越深土壤结构的蓄水能力变差, 这与林立文等^[37]、YI A^[40] 等结论一致。不同演替的森林群落, 同一土壤发生层, EF 和 PMF 的土壤机械组成分形维数明显小于 PF, 群落在不断的演替过程中, 林分复杂的森林群落, 枯落物层较厚, 分解增加土壤有机质含量, 改变土壤物理性质, 改善土壤孔隙结构, 提高土壤结构稳定性。不同群落间土层越深, 粘粒、粉粒含量减少, 砂粒含量增加, 土壤机械分形维数增加。顶级群落在长期的演替过程中, 群落环境复杂, 提高土壤养分, 改善土壤结构。土壤理化性质及自身空间的异质性是影响土壤大孔隙的主要原因之一^[41], 相关性分析表明, Mz 与 $D_{团}$ 呈现显著的相关性, 与 < 0.25 mm、0.25~1 mm 的团聚体含量有极显著负相关关系, 和甘磊等^[35] 研究结论相同; Dz 与 $D_{机}$ 间呈负相关关系。

5 结论

不同演替森林群落大孔隙特征变化差异明显, 3 种林分中, 总孔隙度和孔隙面密度均随土层加深而减小, 而孔隙复杂度则随之增大; 土层越深, 土

粒结构间越紧密, 孔隙特性越差。

土壤分形特征随土层增加有显著变化, 3 种不同演替阶段的森林群落, 顶级群落土壤大孔隙变异程度最大, 孔隙形态更复杂; 由土壤 $D_{团}$ 、 $D_{机}$ 、土壤水稳定性和结构破坏率知, 土层越深, 土壤质量和结构越差, 群落演替等级越高, 总孔隙度和抗破坏率越高, 结构越稳定。顶级群落土壤结构最佳, 云南松林最差。

通径分析表明土壤孔隙特征与土壤理化因子关系密切, 粘粒含量、砂粒含量、 $D_{团}$ 和各等级团聚体含量等是影响孔隙面密度的主要因子, 而 $D_{机}$ 是导致孔隙复杂度变化的主要因素。

参考文献:

- [1] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. *Water Resource Research*, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [2] 牛健植, 余新晓, 张志强. 优先流研究现状及发展趋势[J]. *生态学报*, 2006, 26(1): 231-243.
- [3] Nimmo J R. Preferential flow occurs in unsaturated conditions[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26: 786-789.
- [4] Buczko U, Bens O, Huttli R. Tillage effects on hydraulic properties on macro-porosity in silty and sandy soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 1998-2007.
- [5] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [6] 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.
- [7] 吕刚, 金兆梁, 凌帅, 等. 浑河源头水源涵养林土壤优先流特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 287-292.
- [8] Soto-Gómez D, Pérez-Rodríguez P, Vázquez-Juiz L, et al. Linking pore network characteristics extracted from CT images to the transport of solute and colloid tracers in soils under different tillage managements[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 177: 145-154.
- [9] 李荣磊, 陈留美, 邵明安, 等. 黄土高原不同土质和植被类型下Cl⁻运移特征及影响因素[J]. *土壤学报*, 2021, 58(5): 1190-1201.
- [10] Feng Y, Wang J, Bai Z, et al. Three-dimensional quantification of macropore networks of different compacted soils from open-cast coal mine area using X-ray computed tomography[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 198: 104567.
- [11] Chen M, Niu J, Xiang L, et al. Quantifying soil macropore networks in different forest communities using industrial computed tomography in a mountainous area of North China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(9): 1-14.
- [12] 王金悦, 邓羽松, 李典云, 等. 连栽桉树人工林土壤大孔隙特征及其对饱和导水率的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(19): 7689-

- 7699.
- [13] Zhang Y, Niu J, Zhu W, *et al.* Effects of plant roots on soil preferential pathways and soil matrix in forest ecosystems[J]. *Journal of Forestry Research*, 2015, 26(2): 397-404.
- [14] 周 虎, 李保国, 吕贻忠, 等. 不同耕作措施下土壤孔隙的多重分形特征[J]. *土壤学报*, 2010, 47 (6): 1094-1100.
- [15] 唐海龙, 龚 伟, 王景燕, 等. 青花楸种植对土壤微团聚体分形维数和生化特性的影响[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2019, 47 (1): 90-97.
- [16] 王玉杰, 王云琦, 夏一平, 等. 重庆缙云山典型林分土壤结构分形特征[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4 (4): 39-46.
- [17] Fei Q, Zhang R, Xia L, *et al.* Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 184(6): 45-51.
- [18] 李学斌, 张义凡, 陈 林, 等. 荒漠草原典型群落土壤粒径和养分的分布特征及其关系研究[J]. *西北植物学报*, 2017, 37 (8): 1635-1644.
- [19] Negrete-Yankelevich S, Fragoso C, Newton A C, *et al.* Successional changes in soil, litter and macroinvertebrate parameters following selective logging in a Mexican Cloud Forest[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(2): 340-355.
- [20] 李 朝, 周 伟, 关庆伟, 等. 徐州石灰岩山地侧柏人工林生物量及其影响因子分析[J]. *安徽农业大学学报*, 2010 (4): 669-674.
- [21] Qiang W, He L, Zhang Y, *et al.* Aboveground vegetation and soil physicochemical properties jointly drive the shift of soil microbial community during subalpine secondary succession in southwest China[J]. *Catena*, 2021, 202: 105-251.
- [22] Chai Y, Cao Y, Yue M, *et al.* Soil abiotic properties and plant functional traits mediate associations between soil microbial and plant communities during a secondary forest succession on the Loess Plateau[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 1-15.
- [23] Liu Y L, Zhu G Y, Hai X Y, *et al.* Long-term forest succession improves plant diversity and soil quality but not significantly increase soil microbial diversity: Evidence from the Loess Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 142: 105631.
- [24] 李 平, 王冬梅, 丁 聪, 等. 黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2020, 40 (5): 1610-1620.
- [25] 彭舜磊, 由文辉, 沈会涛. 植被群落演替对土壤饱和导水率的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26 (11): 78-84.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] 陈晓冰. 重庆四面山4种土地利用类型土壤优先流特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [28] 欧阳学军, 黄忠良, 周国逸, 等. 鼎湖山南亚热带森林群落演替对土壤化学性质影响的累积效应研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17 (4): 51-54.
- [29] 陈晓冰, 程金花, 陈引珍, 等. 基于林分空间结构分析方法的土壤大孔隙空间结构研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46 (11): 174-186 + 194.
- [30] 邵一敏, 赵洋毅, 段 旭, 等. 基于分形分析的干热河谷区典型地类土壤优先路径分布特征[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2020, 48 (7): 102-112.
- [31] 骆紫藤. 华北土石山区典型林地根土层优先流特征及其影响因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [32] Mawodza T, Burca G, Casson S, *et al.* Wheat root system architecture and soil moisture distribution in an aggregated soil using neutron computed tomography[J]. *Geoderma*, 2020, 359: 1-30.
- [33] 甘 磊, 张静举, 黄太庆, 等. 基于CT技术的甘蔗地不同耕作措施下土壤孔隙结构研究[J]. *西南农业学报*, 2017, 30 (8): 1843-1848.
- [34] 甘 磊, 李 健, 李 帅, 等. 广西甘蔗地不同耕作方式下土壤孔隙特征[J]. *水土保持研究*, 2020, 27 (6): 122-130.
- [35] 王 伟, 张洪江, 李 猛, 等. 重庆市四面山林地土壤水分入渗特性研究与评价[J]. *水土保持学报*, 2008, 22 (4): 95-99.
- [36] 刘目兴, 吴 丹, 吴四平, 等. 三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和导水率的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36 (11): 3189-3196.
- [37] 熊佰炼, 高 扬, 彭 韬, 等. 喀斯特坡地浅层岩溶裂隙土壤团聚体稳定性与养分垂向变化特征[J]. *土壤学报*, 2021, 58 (6): 1472-1485.
- [38] Hu X, Li X Y, Wang P, *et al.* Influence of enclosure on CT-measured soil macropores and root architecture in a shrub-encroached grassland in northern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 21-30.
- [39] Guo X, Meng M, Zhang J, *et al.* Vegetation change impacts on soil organic carbon chemical composition in subtropical forests[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-9.
- [40] Liu X, Zhang G, Heathman G C, *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: 123-130.
- [41] Min X, Jiao H, Li X. Characterizing effects of mechanical compaction on macropores of reclaimed soil using computed tomography(CT) scanning[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2020, 100(2): 150-161.

Effect of Fractal Characteristics of Soil Structure on Macropores in Different Succession Forest Communities in Mid-subtropical Region

ZHU Meng-xue¹, ZHAO Yang-yi^{1,2}, WANG Ke-qin^{1,2}, DUAN Xu^{1,2}, LU Hua-xing¹, TU Xiao-yun¹

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Yuxi Forestry Ecosystem Research Station of National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] To study the structural fractal characteristics of different successional forest communities in the middle subtropical zone and its influences on soil macropores, so as to provide data support. [Method] The *Pinus yunnanensis* forest in the early succession, the *P. yunnanensis*-broadleaved mixed forest in the middle of succession and succession top evergreen broadleaved forest were chosen as the research objects in Mopanshan Mountain, central Yunnan. The methods of dyeing combined with image morphology analysis were adopted to analyze the fractal characteristics of soil and its influences on macropores. [Result] The number of macropores and total porosity in the vertical section generally decreased with the deepening of soil layer, while the number of horizontal pores decreased with the increase of radius. The order of porosity among different forests was *P. yunnanensis* and broadleaved mixed forest > evergreen broadleaved forest > *P. yunnanensis* forest. The pore surface density (M_z) decreased monotonously with the increase of soil depth, and the pore complexity (D_z) showed the opposite trend. The D_z of evergreen-broadleaved forest was the largest (2.006), while *P. yunnanensis* forest was the smallest (1.595), indicating the higher the community level, the more complex the structure, and the greater the distortion and variation of macropores. Soil fractal characteristics proved that the soil structure of evergreen broadleaved forest was better than that of the other two communities. The soil structure decreased with the increase of depth. The correlation analysis revealed that there existed a positive correlation between M_z and agglomerate fractal dimension ($P < 0.01$), while D_z had a negative correlation with soil mechanical fractal dimension ($P < 0.05$). The contents of different diameter aggregated and agglomerate fractal dimension had remarkably effects on soil pore surface density. [Conclusion] The soil macropores and structure will be greatly improved with the succession process, and the soil structure stability of the top succession community is the best. The research results could provide reference for reducing soil moisture and nutrient loss, thus improving the ecological service function of forest communities.

Keywords: pore surface density; pore complexity; forest land; dyeing; soil fractal characteristics

(责任编辑: 崔 贝)