

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.006.003

滇中亚高山林地土壤团聚体结构及其对 优先路径的影响

卢华兴¹, 赵洋毅^{1,2*}, 段旭^{1,2}, 朱梦雪¹, 涂晓云¹, 杨文艳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] 分析滇中亚高山林地土壤团聚体结构对土壤优先路径形成的影响, 揭示林地土壤优先路径的形成与发生机理, 深化对森林生态系统土壤水文过程的认识, 为滇中林区水源涵养林建设、天然林植被恢复与重建提供科学依据。[方法] 选取滇中亚高山云南松林、华山松林、滇油杉林、高山栎林 4 种林地土壤为研究对象, 利用染色示踪法, 结合 Photoshop CS 5、Image Pro Plus 6.0、Surfer 15 图像处理软件提取土壤优先路径, 同时系统评价土壤团聚体结构特征, 采用相关分析、主成分分析、灰色关联分析、耦合度分析等方法探讨土壤团聚体结构对优先路径的影响。[结果] (1) 研究区 4 种林地土壤具有良好的团聚体结构, 结构稳定性依次为: 华山松林>滇油杉林>云南松林>高山栎林, 土壤团聚体结构受林地类型、土层深度的影响显著 ($P < 0.05$), 且与不同粒级水稳定性团聚体含量有相关性。(2) 林地土壤优先流具有优势性, 华山松林优先路径的连通性优于云南松林、高山栎林和滇油杉林, 优先路径数量随着土层深度增加逐渐减少。(3) 粒径 > 0.25 mm 水稳定性团聚体含量 (WSA)、平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD)、平均质量比表面积 (MWSSA)、结构体破坏率 (PAD)、分形维数 (D) 能较好地评价土壤团聚体结构特征, 与优先路径数量的关联度 > 0.62 , 属于中等关联, 是影响优先路径形成的重要因素。(4) 滇中亚高山林地土壤团聚体结构与优先路径数量的平均耦合度为 0.683, 系统属于弱协调, 耦合协调程度依次为: 0.728 (云南松林) > 0.681 (华山松林) > 0.663 (高山栎林) > 0.662 (滇油杉林)。[结论] 土壤团聚体结构是影响土壤优先路径形成与发生的重要因素, 但对优先路径的产生不起决定性作用。

关键词: 优先路径; 团聚体结构; 耦合关系; 染色示踪法; 滇中亚高山

中图分类号: S714

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)06-0023-12

土壤水分和溶质运移是土壤学研究的难点和热点^[1], 优先流是一种常见的非均匀性土壤水分运动, 是土壤水和溶质绕过土壤基质优先通过导水能力强的优先路径, 快速向土壤深层和地下水运移的现象^[2]。优先流在地表水、地下水和土壤水的运移

和转化过程中起着关键作用, 其发生可以减少地表径流和增加入渗^[3], 提高土壤含水率、碳储量和养分含量, 促进林木生长^[4], 同时提高水资源利用效率与森林涵养水源能力^[5], 对地下水补给和森林水文有显著影响^[6]。土壤团聚体结构作为评价土壤特

收稿日期: 2021-11-10 修回日期: 2022-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31860235, 42067005); 云南省基础研究计划项目 (202001AT070136); 云南省教育厅研究生基金项目 (2021Y243); 云南省万人计划青年拔尖人才专项 (YNWR-QNBJ-2019-226, YNWR-QNBJ-2019-215); 国家林业和草原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长期科研基地项目 (2020132550); 云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站项目 (2020132078); 云南省自然生态监测网络项目 (2020-YN-13)

* 通讯作者: 赵洋毅 (1980-), 男, 吉林农安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持和林业生态工程研究。E-mail: yyz301@foxmail.com

征和土壤质量的重要指标^[7],在维持土壤孔隙和通气性、提高水分渗透性和持水能力^[8]、协调养分的消耗和积累、改善土壤肥力^[9]、促进植物根系伸展^[10]等方面起着重要作用。开展土壤优先路径和团聚体结构研究,在生态文明建设新形势下对提高水源涵养林质量、林区生态功能重建和生态环境保护具有深远意义。

土壤结构是土壤水分运动和优先流及优先路径形成的影响因素之一,牛健植等^[11]根据“空间异质性 = 空间变异 = 土壤结构”的观点,认为土壤优先流的异质性主要来源于土壤结构。优先流可以发生在任何非结构性土壤层,而结构性土壤首先出现在表层^[12];吴庆华^[13]证实,结构性好的土壤,优先流现象和染色深度更明显。程金花等^[14]发现,土壤结构差异导致土壤含水量不同,对优先流和优先路径的形态特征和表现形式起重要作用。通常情况下,透水性不好的土层容易发生侧向流,结构性好的粉砂和黏质土壤层,优先路径以大孔隙流为主^[15]。团聚体结构是最常见的土壤结构,然而,国内外学者对于土壤团聚体结构与优先流及优先路径的关系持有不同的观点,Jarvis等^[16]研究发现,土壤团聚体结构在水平方向上促进土壤水分、溶质与土壤基质接触,延长部分土壤水分快速向下运移的时间,从而在垂直方向上抑制优先流及优先路径的发育;Bouma^[17]提出,大团聚体结构具有毛细屏蔽作用,使土壤水分和溶质仅能沿着大孔隙通道运动而不能进入土壤基质,对优先流和基质流起分离作用;而Wuest^[18]发现,优先流区域的土壤团聚体含量显著高于基质流区域。由此可见,土壤结构(尤其是团聚体结构)是土壤水分运动不可或缺的因素,对优先流和优先路径的形成、发生有直接作用,但土壤团聚体结构对优先流及优先路径如何响应仍然具有不确定性。

滇中亚高山磨盘山地处我国云贵高原、横断山地和青藏高原南缘的地理结合部,区位特征明显,是云南亚热带北部气候与南部气候的复合型生态过渡带,兼具低纬气候、季风气候和山地气候的特点^[19]。植被类型多以中山半湿性常绿阔叶林为主^[20],由于长年受强风、低温和土壤脊薄影响,海拔2 900 m左右地带形成罕见的高山矮曲林(高山栎林),保留着原始的森林群落面貌。此外,磨盘山作为云南新平县重要的水源涵养林区,其森林生态系统发挥着涵养水源、保持水土和调节气候等重要的生态功

能^[20]。目前,针对云南低纬度高海拔森林区域土壤优先路径和团聚体结构的研究鲜有报道。因此,本研究以该地区云南松(*Pinus yunnanensis* Franch.)林、华山松(*Pinus armandii* Franch.)林、高山栎(*Quercus semecarpifolia* Smith.)林和滇油杉(*Keteleeria evelyniana* Mast.)林4种林地土壤为研究对象,通过野外染色示踪、室内图像处理 and 土壤团聚体测定,分析4种林地土壤团聚体结构及优先路径特征,探讨以下问题:(1)研究区4种林地类型对土壤团聚体结构、土壤优先路径是否有影响?(2)土壤团聚体结构与优先路径存在何种关系?通过以上研究,揭示滇中林地土壤优先路径形成机理,深化对磨盘山森林生态系统土壤水文过程的认识,以为滇中亚高山森林管理、林区水源涵养林建设、天然林植被恢复与重建提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于云南省玉溪市新平县磨盘山国家林业和草原局森林生态系统定位观测研究站和长期科研基地内(23°46'18"~23°54'34" N, 101°12'06"~101°12'12" E),气候类型为中亚热带高原性气候,海拔1 260.0~2 914.4 m,相对高差大;最高气温33℃,最低气温-2.2℃,年平均气温15℃,年日照时数为2 380 h;降雨主要集中在6—8月,年均降水量1 050 mm,干湿分明、雨热同季。土壤基岩以砂岩类岩石为主,土壤类型主要是第三纪古红土发育的山地红壤、玄武岩红壤和棕黄壤^[19],局部地区有黄壤分布,土壤整体偏酸性,pH值3.74~4.96,土层厚度1 m左右,以中厚土壤层为主。滇中亚高山磨盘山是以云南特有中山半湿性常绿阔叶林为主的重要林区,森林资源丰富,植被类型多样,且随海拔上升呈垂直分布特征,有亚热带常绿阔叶林、亚热带中山针阔混交林、针叶林(以华山松、滇油杉、云南松纯林为主)和高山栎林等森林类型^[21],是云南森林群落的重要组成部分。

2 研究方法

2.1 样地布设

在研究区4种林地内设置面积为100 m × 100 m的固定样地各1块,分别在各个固定样地内选择植被均匀、林分结构一致、地形相似、土壤形成母质

一致的地段布设 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试验, 同时, 在各个样方内利用 5 点取样法分层采集原状混

合土样, 采样深度为 0~50 cm, 以土层深度 10 cm 为间隔, 混合土样带回实验室风干后, 用于测定土壤团聚体结构, 样地基本状况见表 1。

表 1 研究区 4 种林地基本状况

Table 1 Basic conditions of four forest lands in the study area

林地类型 Forest land type	起源 Origin	海拔 Altitude/m	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)	土壤类型 Soil type	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	郁闭度 Canopy density	林内主要乔、灌木树种 Main trees and shrubs in the forest
云南松林 <i>P. yunnanensis</i> forest	天然次生林 Secondary forests	2 158	西北 NW	15	棕黄壤 Brown yellow soil	11.59	0.73	云南松(<i>Pinus yunnanensis</i> Franch.)、川梨(<i>Pyrus pashia</i> Buch.-Ham. ex D. Don)、野坝子(<i>Elsholtzia rugulosa</i> Hems.)、榿栎(<i>Quercus aliena</i> Blume)、川滇栎木(<i>Alnus ferdinandi-coburgii</i> Schneid.)
华山松林 <i>P. armandii</i> forest	人工林 Planted forests	2 346	西南 SW	18	棕黄壤 Brown yellow soil	74.78	0.75	华山松(<i>Pinus armandii</i> Franch.)、青冈(<i>Cyclobalanopsis glauca</i> (Thunberg) Oersted)
高山栎林 <i>Q. semecarpifolia</i> forest	天然林 Natural forests	2 904	西北 NW	16	棕黄壤 Brown yellow soil	29.16	0.92	高山栎(<i>Quercus semecarpifolia</i> Smith)、光叶柯(<i>Lithocarpus mairei</i> (Schottky) Rehder)、麻栎(<i>Quercus acutissima</i> Carr.)
滇油杉林 <i>K. evelyniana</i> forest	天然林 Natural forests	2 292	西南 NW	20	棕黄壤 Brown yellow soil	54.81	0.70	滇油杉(<i>Keteleeria evelyniana</i> Mast.)、马缨杜鹃(<i>Rhododendron delavayi</i> Franch.)、小铁仔(<i>Myrsine africana</i> Linn.)

2.2 染色示踪及优先路径提取

于 2020 年 7 月 1 日至 9 月 10 日开展染色示踪试验, 以浓度 4 g·L⁻¹ 的亮蓝溶液 20 L (模拟当地 24 h 累计降雨量 40 mm) 作为染色示踪剂, 试验过程参考卢华兴等^[22] 前期的研究报道。示踪试验所获取的染色图像通过 Photoshop CS5、Image Pro Plus 6.0 和 Surfer 15 等图像处理软件进行解译, 以获取不同影响半径范围下优先路径的位置分布特征和数量特征, 优先路径的提取过程参考卢华兴等^[23] 在滇南地区的研究方法。

2.3 土壤团聚体结构测定与参数计算

原状混合土样自然风干后除去粗根及石砾等杂物, 将大土块沿着自然断裂面剥离为 1 cm 大小的土块, 参照林业行业标准 LY/T 1227—1999, 用机械筛分法测定 > 5.0、2.0~5.0、1.0~2.0、0.5~1、0.25~0.5、< 0.25 mm 6 个粒级水稳定性团聚体含量, 然后计算粒级 > 0.25 mm 水稳定性团聚体含量 (WSA)、平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD)、平均质量比表面积 (MWSSA)、结构体破坏率 (PAD)、分形维数 (D) 等团聚体结构特征参数^[24-27]。

2.4 数据分析

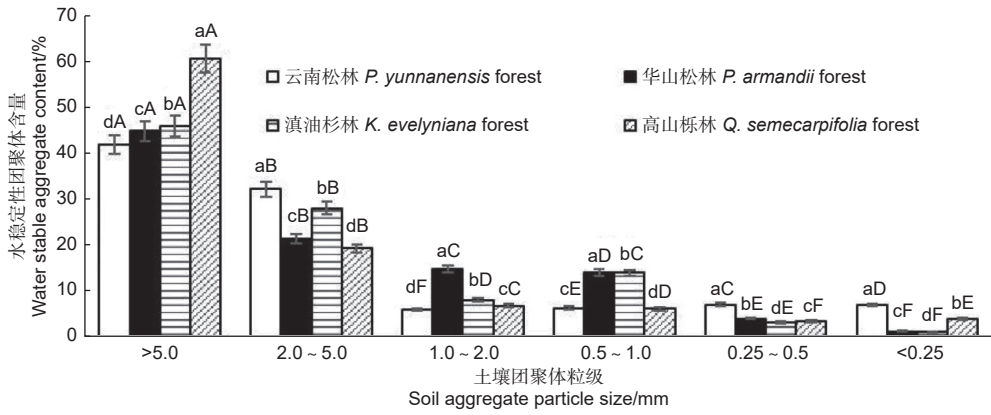
所有数据用 Excel 2016 软件进行初步整理和

分析; 用 SPSS 20.0 统计软件进行 Duncan 差异性分析、双因素方差分析; 用 Origin 2021 软件进行主成分分析和 Pearson 相关分析; 用 DPS 软件进行灰色关联分析, 然后计算灰色关联度^[28] 和耦合度^[29]。

3 结果与分析

3.1 土壤团聚体结构特征

3.1.1 不同林地及粒级土壤团聚体特征变化 由图 1 可知: 6 个粒级水稳定性团聚体中, 高山栎林地 > 5.0 mm 水稳定性团聚体含量最大, 含量为 60.65%; 华山松林地 1.0~2.0、0.5~1.0 mm 水稳定性团聚体含量最大, 而其它 2.0~5.0、0.25~0.5、< 0.25 mm 3 个粒级水稳定性团聚体含量最大的是云南松林地。比较同一林地不同粒级水稳定性团聚体含量, 研究区 4 种林地土壤水稳定性团聚体多分布于 > 5.0、2.0~5.0 mm 粒级中, 大粒级的水稳定性团聚体占主导地位。总体看, 研究区 4 种林地土壤水稳定性团聚体含量变化趋势表现为随粒级的减小基本呈减小的趋势, 且 4 种林地不同粒级土壤团聚体含量差异显著 ($P < 0.05$), 在同一粒级范围内, 林地类型对团聚体含量的影响差异显著 ($P < 0.05$)。



注：小写字母表示同一粒级不同林地间土壤水稳定性团聚体含量差异显著 ($P < 0.05$)；大写字母表示同一林地不同粒级间土壤水稳定性团聚体含量差异显著 ($P < 0.05$)。

Notes: Small letters indicate that the content of soil water stable aggregates in different woodlands of the same particle size is significantly different ($P < 0.05$); Capital letters indicate that there are significant differences in the content of soil water stable aggregates among different particle sizes in the same forest land ($P < 0.05$).

图 1 研究区 4 种林地土壤水稳定性团聚体含量

Fig. 1 Content of soil water stable aggregates in four forest lands in the study area

由表 2 可知：不同林地类型对土壤团聚体结构影响显著 ($P < 0.05$)，且不同林地类型对各个土壤团聚体结构特征指标的影响作用不同。研究区 4 种林地土壤团聚体结构差异大，较其他 3 种林地，高山栎林地 MWD、GMD、D 值最大，而 WSA、MWSSA、PAD 等特征指标占有优势的林地依次分别是滇油杉林、云南松林、华山松林，其中，4 种林地 WSA 平均值均大于 90%。WSA 值越高，土壤结构越稳定，土壤抗蚀性越好^[24]，表明研究区 4 种林地土壤具有稳定的土壤结构和良好的抗蚀性。MWD、GMD 可反映不同粒级团聚体的分布状况，MWD 和 GMD 值越大，土壤平均粒径团聚度和稳定性越好^[25]，由此说明，高山栎林地有助于增加土壤团聚

度，提高土壤稳定性。分形维数是土壤结构几何形状的参数，可以反映水稳定性团聚体含量对土壤结构与稳定性的影响趋势，即土壤分形维数越小，土壤团聚体结构的稳定性越好^[27]。根据分形维数大小可认为，4 种林地土壤团聚体结构的稳定性依次为：华山松林 > 滇油杉林 > 云南松林 > 高山栎林。综上所述，林地类型对土壤团聚体结构稳定性的影响程度较大。

3.1.2 林地类型与土层深度对团聚体结构的影响

由表 3 可知：林地类型和土层深度对土壤团聚体结构产生的影响作用不同，林地类型和土层深度对 WSA、MWD、GMD、MWSSA、PAD 和 D 均影响极显著 ($P < 0.01$)；林地类型与土层深度的交

表 2 研究区 4 种林地土壤团聚体结构特征

Table 2 Structural characteristics of soil aggregates in four forest lands in the study area

林地类型 Forest land type	>0.25 mm 水稳定性团聚体含量 WSA/%	平均质量直径 MWD/mm	几何平均直径 GMD/mm	平均质量比表面积 MWSSA/(cm ² ·g ⁻¹)	结构体破坏率 PAD/%	分形维数 D
云南松林 <i>P. yunnanensis</i> forest	93.10 ± 2.11 d	3.39 ± 0.30 c	2.56 ± 0.50 d	1.72 ± 0.55 a	1.93 ± 1.28 b	2.30 ± 0.14 a
华山松林 <i>P. armandii</i> forest	98.81 ± 0.32 b	3.33 ± 0.18 d	2.60 ± 0.18 c	1.33 ± 0.11 b	14.83 ± 3.75 a	2.04 ± 0.03 c
滇油杉林 <i>K. evelyniana</i> forest	98.97 ± 0.73 a	3.52 ± 0.16 b	2.83 ± 0.20 b	1.21 ± 0.12 d	12.66 ± 2.67 a	2.18 ± 0.08 b
高山栎林 <i>Q. semecarpifolia</i> fores	96.07 ± 2.11 c	3.87 ± 0.38 a	3.17 ± 0.54 a	1.24 ± 0.35 c	3.00 ± 2.61 b	2.31 ± 0.06 a

注：小写字母表示同一土壤团聚体结构特征指标不同林地间显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: Small letters indicate the significant difference between different woodlands in the structural characteristic index of the same soil aggregate ($P < 0.05$).

互效应对 WSA、MWD、GMD、MWSSA 和 PAD (0.05) 的影响极显著 ($P < 0.01$), 而对 D 的影响显著 ($P <$

表 3 林地类型、土层深度与土壤团聚体结构的双因素方差分析

Table 3 Two factor ANOVA of forest land type, soil depth and soil aggregate structure

指标 Index	>0.25 mm 水稳定性团聚体 含量 WSA/%	平均质量直径 MWD/mm	几何平均直径 GMD/mm	平均质量比表面积 MWSSA/(cm ² ·g ⁻¹)	结构体破坏率 PAD/%	分形维数 D
林地类型 Forest land type	6 766.08**	91.82**	107.35**	41.37**	6 942.44**	28.17**
土层深度 Soil depth	597.69**	4.29**	7.26**	8.62**	175.76**	6.56**
林地类型 × 土层深度 Forest land type × Soil depth	498.81**	35.19**	63.12**	20.86**	342.03**	2.22*

注: 表中数据为 F 值; * 表示差异显著 (双侧) ($P < 0.05$); ** 表示差异极显著 (双侧) ($P < 0.01$)。

Notes: The data in the table is F value; * means significant difference ($P < 0.05$) (bilateral); ** means extremely significant difference ($P < 0.01$) (bilateral).

3.1.3 土壤团聚体结构与各粒级的相关分析 由表 4 可知: 各个粒度水稳定性团聚体含量与团聚体结构特征指标存在相关关系。粒度 > 5.0 mm 水稳定性团聚体含量与 MWD、GMD 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 1.0~2.0 mm 水稳定性团聚体含量与 MWD 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与 GMD、D 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 但与 PAD 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。0.5~1.0 mm 水稳定性团聚体含量与 WSA、PAD 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 MWD、D 呈极显著或显著负相关。0.25~0.5 mm 水稳定性团聚体含量与 WSA、MWD、GMD 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 但与 MWSSA、D 呈极显著或显著正相关。粒度 < 0.25 mm 水稳定性团聚体含量与 WSA、PAD 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与 MWSSA、D 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。用相关系数来评价不同粒度水稳定性团聚体含量对团聚体结构特征指标的贡献, 粒度 2.0~5.0 mm 水稳定

性团聚体含量对所有土壤团聚体结构影响不大; 粒度 > 5.0、1.0~2.0、0.25~0.5 mm 水稳定性团聚体含量对 MWD、GMD 的贡献较大, 相关系数的绝对值大于 0.56; 粒度 0.5~1.0、< 0.25 mm 水稳定性团聚体含量对 PAD、D 的贡献较大, 相关系数的绝对值大于 0.64。由此说明, 不同粒度水稳定性团聚体含量是团聚体结构稳定性的重要影响因素。此外, 各个团聚体结构特征指标之间也存在相关性, WSA 与 MWSSA、D、PAD 均呈极显著相关 ($P < 0.01$), MWD 与 GMD、MWSSA, GMD 与 MWSSA 以及 PAD 与 D 均呈极显著相关 ($P < 0.01$), 说明上述各个指标适用于评价团聚体结构特征。

3.2 土壤优先路径特征

3.2.1 不同林地土壤优先路径的位置分布 由图 2 可看出: 云南松林地染色半径 > 10 mm 的优先路径在 0~50 cm 土层中的连通性最好, 染色半径 ≤

表 4 不同粒度水稳定性团聚体含量与土壤团聚体结构的相关分析

Table 4 Correlation analysis between water stable aggregate content of different particle sizes and soil aggregate structure

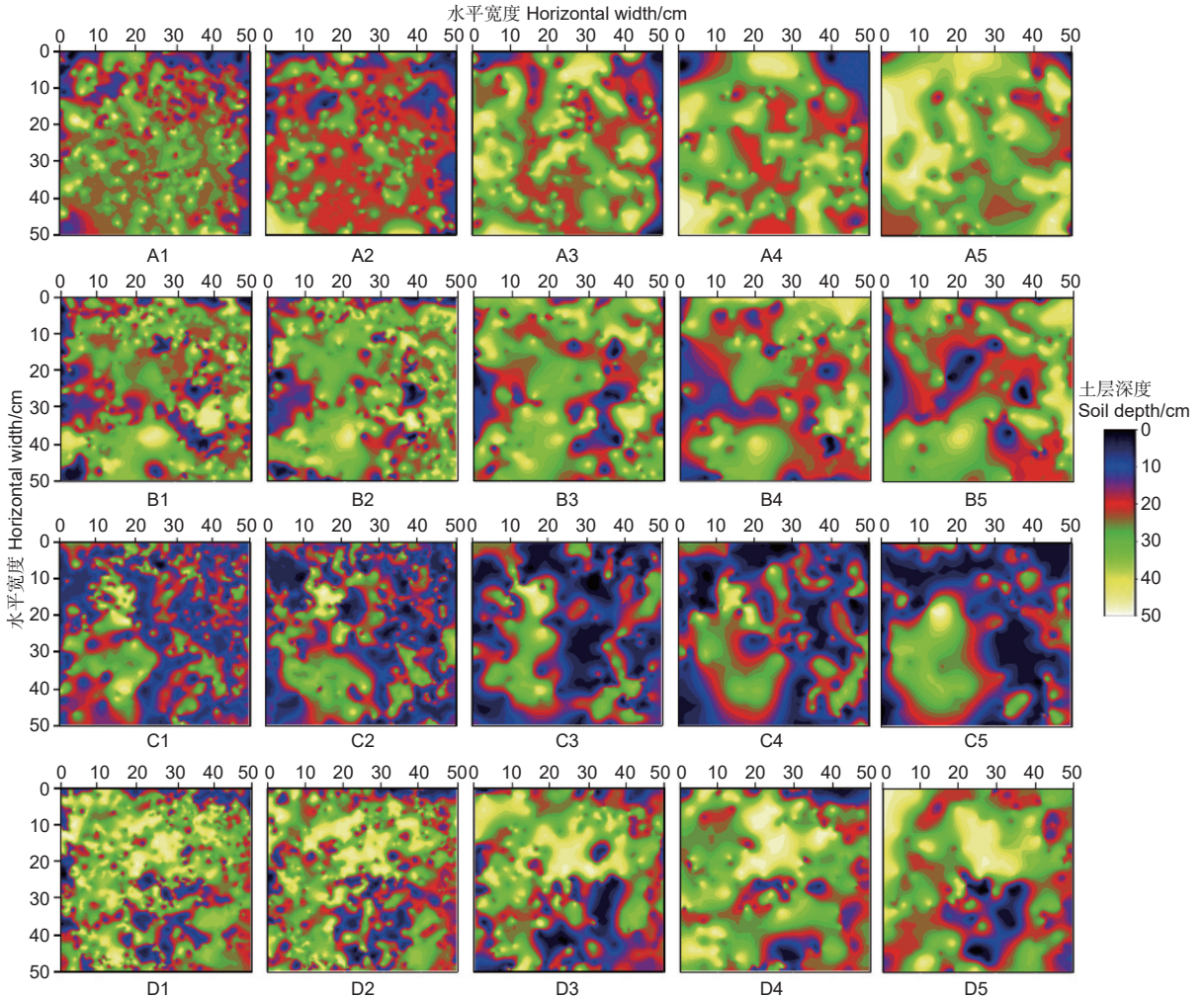
指标 Index	不同粒度水稳定性团聚体含量 Content of water stable aggregates of different particle sizes						WSA	MWD	GMD	MWSSA	PAD	D
	>5.0 mm	2.0~5.0 mm	1.0~2.0 mm	0.5~1.0 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm						
WSA	-0.035	0.164	0.246	0.619**	-0.592**	-1.000**	1					
MWD	0.773**	0.034	-0.639**	-0.511*	-0.628**	-0.183	0.183	1				
GMD	0.623**	0.203	-0.562*	-0.388	-0.756**	-0.376	0.376	0.965**	1			
MWSSA	-0.284	-0.355	0.200	-0.064	0.931**	0.749**	-0.749**	-0.711**	-0.852**	1		
PAD	-0.296	-0.092	0.525*	0.912**	-0.136	-0.706**	0.706**	-0.369	-0.235	-0.189	1	
D	0.304	-0.216	-0.466*	-0.642**	0.466*	0.791**	-0.791**	0.116	-0.071	0.506*	-0.682**	1

注: * 表示在 0.05 水平 (双侧) 显著相关; ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 显著相关。表 6 同。

Notes: * means significant correlation at 0.05 level (bilateral); ** means significant correlation at 0.01 level (bilateral). Table 6 is the same as it.

1 mm 的优先路径连通性最差；华山松林地染色半径 1~2.5、2.5~5、5~10 和 > 10 mm 的优先路径连通性相似，相比以上 4 个染色半径，染色半径 ≤ 1 mm 优先路径的连通性最差。滇油杉林地和 高山栎林地在 0~50 cm 土壤优先路径的连通程度具有一致性，即染色半径 5~10、> 10 mm 的优先

路径连通性较好，染色半径 ≤ 1 、1~2.5 mm 的优先路径连通性相对较差。研究区内 4 种林地土壤优先路径的连通性存在一定差异性，主要原因是林木根系^[23] 和土壤结构^[16-18] 显著影响其对应染色半径范围内优先路径的连通性。



注：A. 云南松林，B. 华山松林；C. 滇油杉林，D. 高山栎林；数字 1~5 表示土壤优先路径的染色半径分别为 ≤ 1 、1~2.5、2.5~5、5~10 和 > 10 mm。

Notes: A. *P. yunnanensis* forest; B. *P. armandii* forest; C. *K. evelyniana* forest; D. *Q. semecarpifolia* forest; Numbers 1 to 5 indicate that the dyeing radii of soil priority paths are ≤ 1 , 1~2.5, 2.5~5, 5~10 and > 10 mm respectively.

图 2 研究区 4 种林地土壤优先路径的位置特征

Fig. 2 Location characteristics of soil priority paths of four forest lands in the study area

比较 4 种林地同一染色半径下不同土层深度优先路径的连通性发现：华山松林地染色半径 ≤ 1 、1~2.5 mm 的优先路径在 20~30 cm 的土层中连通性较好，而染色半径 5~10、> 10 mm 的优先路径在 30~40、40~50 cm 的土层中连通性最好。滇油杉林地染色半径 ≤ 1 、1~2.5、2.5~

5、5~10 mm 的优先路径在 0~20 cm 的表层土壤中连通性较好，染色半径 > 10 mm 的优先路径在 30~40 cm 土层连通性最好。高山栎林地土壤优先路径的连通性在 30~40、40~50 cm 土层中最佳，与云南松林地基本一致。整体而言，以华山松林地 5 个染色半径的优先路径连通性最好，其次

是云南松林地和高山栎林地, 滇油杉林地的优先路径连通性最差。

3.2.2 不同染色半径土壤优先路径的数量特征 由表5可知: 研究区4种林地中, 高山栎林地优先路径数量最多(3 974), 其次是云南松林地和滇油杉林地, 华山松林地的土壤优先路径数量最少(2 770)。水平方向上, 4种林地同一土层不同染色半径的优先路径数量由大到小均表现为: ≤ 1 、1~2.5、2.5~5、5~10、 > 10 mm, 即随着染色半径的增大, 同一土层优先路径的数量逐渐减小, 说明林地土壤中小径级的土壤孔隙在数量上占有一定的优势, 大径级土壤孔隙可能是小径级土壤孔隙演化形成的。垂直方向上, 4种林地5个染色半径的

优先路径数量在土层深度方向的变化存在差异, 4种林地土壤优先路径总数以及滇油杉林地、高山栎林地不同染色半径的优先路径数量均随土壤深度的增加而降低, 表层土壤优先路径数量显著大于深层, 说明土壤优先路径数量随土壤深度增加而降低^[23]。由于林地土壤空间异质性, 云南松林地和华山松林地不同染色半径的优先路径数量均随土壤深度的变化无明显规律性。

3.3 土壤团聚体结构与优先路径的关系

3.3.1 土壤优先路径数量与团聚体结构的相关分析 由表6可知: 各个染色半径范围内(≤ 1 、1~2.5、2.5~5、5~10和 > 10 mm)优先路径数量之间及与优先路径总数均呈极显著正相关($P <$

表5 研究区4种林地不同染色半径下土壤优先路径的数量

Table 5 Number of soil priority paths under different dyeing radii of four forest lands in the study area

林地类型 Forest land type	土层深度 Soil depth /cm	不同染色半径范围内优先路径的数量 Number of priority paths within different dyeing radii					总数 Total
		≤ 1 mm	1~2.5 mm	2.5~5 mm	5~10 mm	> 10 mm	
云南松林 <i>P. yunnanensis</i> forest	0~10	1 063 ± 9.89 a	788 ± 3.53 a	239 ± 11.31 a	121 ± 5.66 a	78 ± 8.48 a	2 289 ± 20.50 a
	10~20	261 ± 25.16 b	156 ± 12.72 b	47 ± 4.94 c	38 ± 28.99 bc	29 ± 24.04 bc	530 ± 90.51 b
	20~30	65 ± 2.82 c	93 ± 10.61 c	101 ± 1.41 b	57 ± 2.12 b	53 ± 4.24 ab	370 ± 12.02 c
	30~40	119 ± 3.53 bc	65 ± 4.24 d	36 ± 5.77 c	22 ± 9.94 bc	10 ± 2.83 c	251 ± 7.78 d
	40~50	38 ± 7.07 c	25 ± 7.78 e	8 ± 2.12 e	3 ± 1.41 c	1 ± 0.02 c	74 ± 11.31 e
	总数 Total	1 545	1 126	430	240	171	3 513
华山松林 <i>P. armandii</i> forest	0~10	476 ± 7.78 a	345 ± 9.19 a	115 ± 6.36 a	98 ± 19.09 a	83 ± 14.14 a	1 115 ± 28.28 a
	10~20	280 ± 11.31 b	149 ± 2.12 b	42 ± 1.41 c	55 ± 4.95 b	38 ± 11.31 b	563 ± 4.24 b
	20~30	170 ± 4.24 c	156 ± 5.65 b	58 ± 0.71 b	53 ± 3.54 b	43 ± 4.24 b	479 ± 2.83 c
	30~40	157 ± 0.71 c	95 ± 3.54 c	45 ± 4.95 c	36 ± 0.71 bc	16 ± 4.95 c	347 ± 14.85 d
	40~50	121 ± 2.83 d	93 ± 3.53 c	26 ± 0.70 d	16 ± 1.41 c	12 ± 0.71 c	267 ± 2.12 e
	总数 Total	1 203	836	284	256	191	2 770
滇油杉林 <i>K. evelyniana</i> forest	0~10	467 ± 82.73 a	451 ± 79.19 a	178 ± 29.69 a	131 ± 14.84 a	108 ± 10.61 a	1 334 ± 53.08 a
	10~20	291 ± 12.02 b	280 ± 4.24 b	86 ± 0.71 b	59 ± 0.70 b	54 ± 3.54 b	768 ± 12.73 b
	20~30	173 ± 8.49 c	201 ± 4.26 bc	66 ± 1.41 b	56 ± 0.71 b	40 ± 9.19 bc	535 ± 5.66 bc
	30~40	125 ± 1.41 cd	145 ± 4.22 c	53 ± 2.12 b	36 ± 1.41 c	34 ± 4.24 c	393 ± 2.12 cd
	40~50	70 ± 2.12 d	44 ± 13.43 d	16 ± 10.61 c	9 ± 4.24 d	5 ± 2.12 d	142 ± 24.04 d
	总数 Total	1 125	1 121	398	290	239	3 171
高山栎林 <i>Q. semecarpifolia</i> forest	0~10	506 ± 8.49 a	430 ± 12.02 a	155 ± 4.95 a	69 ± 8.49 a	53 ± 10.61 a	1 212 ± 3.54 a
	10~20	460 ± 2.83 b	296 ± 12.50 b	123 ± 4.94 b	68 ± 0.71 a	51 ± 7.07 a	997 ± 2.12 b
	20~30	372 ± 16.97 c	243 ± 9.19 c	83 ± 7.07 c	40 ± 13.44 b	21 ± 2.83 b	758 ± 16.97 c
	30~40	284 ± 2.83 d	184 ± 2.83 d	72 ± 1.41 c	44 ± 1.41 b	30 ± 9.89 b	614 ± 7.07 d
	40~50	214 ± 4.24 e	123 ± 1.41 e	30 ± 2.83 d	15 ± 2.12 c	13 ± 2.12 b	394 ± 1.41 e
	总数 Total	1 836	1 275	462	235	167	3 974

注: 同一列中不同小写字母表示不同土层深度优先路径数量的差异性 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate the difference in the number of preferential paths at different soil depths ($P < 0.05$).

0.01)。土壤优先路径总数与 MWD、GMD、PAD 均呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 MWSSA 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 而与 D 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。土壤优先路径数量与 MWD、GMD、MWSSA、

PAD、D 等多个土壤团聚体结构特征指标具有相关性, 说明土壤优先路径的形成在一定程度上受土壤团聚体结构的影响。

表 6 不同影响半径优先路径数量与土壤团聚体结构的相关分析

Table 6 Correlation analysis between the number of priority paths with different influence radii and soil aggregate structure

染色半径 Dyeing radii /mm	不同染色半径范围内优先路径的数量 Number of priority paths within different dyeing radii					总数 Total	WSA	MWD	GMD	MWSSA	PAD	D
	≤ 1 mm	1~2.5 mm	2.5~5 mm	5~10 mm	> 10 mm							
≤ 1	1	0.953**	0.783**	0.781**	0.706**	0.968**	0.210	0.414	0.424	-0.387	0.304	0.527*
1~2.5		1	0.886**	0.878**	0.828**	0.983**	0.291	0.369	0.418	-0.398	0.372	0.517*
2.5~5			1	0.940**	0.905**	0.883**	0.152	0.367	0.411	-0.326	0.253	0.557*
5~10				1	0.965**	0.891**	0.311	0.246	0.330	-0.331	0.458*	0.397
> 10					1	0.835**	0.391	0.280	0.390	-0.409	0.355	0.304
总数 Total						1	0.278	0.447*	0.482*	-0.445*	0.516*	0.622**

3.3.2 优先路径影响因素的主成分分析 通过主成分分析对 6 个土壤团聚体结构特征指标进行主成分提取, 由表 7 可知: 主成分 1、2、3 的初始特征值均 > 1, 累积方差贡献率为 94.643%, 说明这 3 个主成分基本能反映不同林地土壤团聚体结构特征的有效信息占 94.643%, 仅有 5.357% 的信息损失。在主成分 1 中, MWD、GMD、MWSSA 载荷值的绝对值较大, 均 > 0.87, 其中, MWSSA 的载荷值为负值, 其它指标的载荷值均为正值, 说明 MWSSA 越小, 土壤团聚体结构越好。在主成

分 2 中, WSA、PAD、D 载荷值的绝对值 > 0.79, 其中, WSA、PAD 的载荷值为负值。主成分 3 中, PAD、D 载荷值的绝对值较大。比较 3 个主成分所有指标载荷值的绝对值, > 0.8 的指标依次为 GMD (0.955) > MWSSA (-0.930) > MWD (0.875) > PAD (-0.871), 说明这 6 个土壤团聚体结构特征指标中, GMD、MWSSA、MWD、PAD 能较好地评价土壤团聚体结构特征, 对优先路径形成的贡献度较大。

表 7 土壤团聚体结构特征的主成分分析

Table 7 Principal component analysis of structural characteristics of soil aggregates

指标 Index	载荷值 Load value						初始特征值 Initial eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累积贡献率 Cumulative contribution rate/%
	WSA	MWD	GMD	MWSSA	PAD	D			
主成分1 Principal component 1	0.545	0.875	0.955	-0.930	0.044	0.306	3.156	45.093	45.093
主成分2 Principal component 2	-0.793	0.285	0.138	0.300	-0.871	0.796	2.281	32.587	77.679
主成分3 Principal component 3	0.089	-0.321	-0.247	0.064	0.425	0.420	1.187	16.964	94.643

3.3.3 土壤团聚体结构和优先路径的灰色关联分析 将土壤优先路径数量作为母序列, 土壤团聚体结构特征作为子序列, 即子序列为: 土壤团聚体结构特征 = {WAS, MWD, GMD, MWSSA, PAD, D}, 进行灰色关联分析, 由图 3 可知: 各个土壤团聚体结构特征指标与优先路径数量的关联系数介于 0.601~0.782, 均值为 0.672, 属于中等或较强

关联, 表明不同林地土壤优先路径数量与土壤团聚体结构特征指标间有一定的关联作用, 且联系和反馈较为紧密。云南松、华山松、滇油杉林地 PAD 的关联系数最大, 分别为 0.782、0.701、0.742, 属于较强关联, 说明 PAD 对土壤优先路径的影响和反馈作用较明显; 高山栎林地 MWSSA 的关联系数达 0.771, 说明高山栎林地 MWSSA 是影响土

壤优先路径形成的关键土壤团聚体结构特征指标。将 4 种林地土壤优先路径数量与各个团聚体结构特征指标的平均关联度按大小排序依次为 0.742 (PAD) > 0.683 (GMD) > 0.675 (MWD) > 0.666 (D) $>$

0.660 (WSA) > 0.630 (MWSSA), 均 > 0.62 , 关联度为中度, 说明这类指标是影响土壤优先路径的重要土壤团聚体结构指标, 与上文主成分分析的结论基本一致。

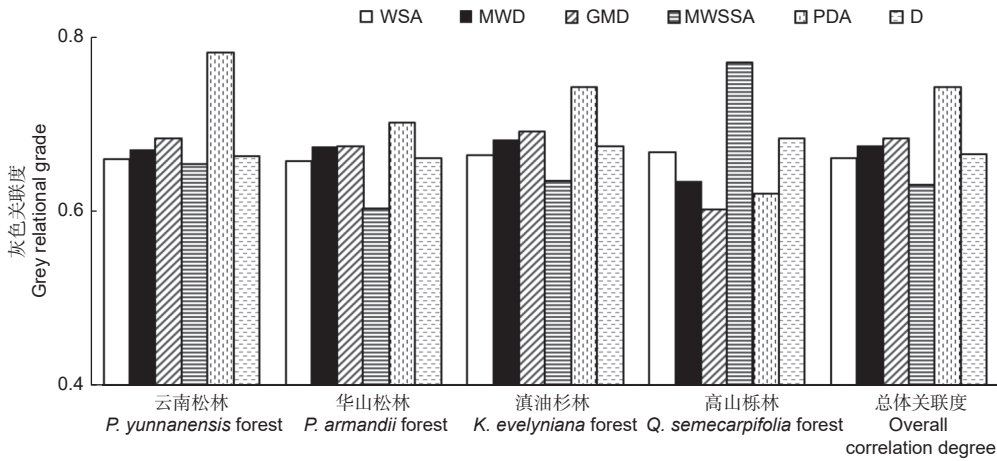


图 3 研究区 4 种林地土壤团聚体结构的灰色关联度

Fig. 3 Grey relational degree of soil aggregate structure of four forest lands in the study area

3.3.4 土壤团聚体结构和优先路径的耦合度分析

考虑土壤团聚体结构与优先路径的相互作用和耦合程度, 利用耦合度模型计算不同林地土壤团聚体结构特征指标和优先路径的耦合协调程度。4 种林地土壤团聚体结构和优先路径的耦合度介于 $0.662 \sim 0.728$, 平均耦合度为 0.683 , 系统整体水平属于弱协调, 说明土壤团聚体结构与优先路径的形成并未达到最佳的耦合协调状态, 可能是 4 种林地的植被类型存在差异, 植被在生长过程中根系向四周延伸, 破坏土壤结构的稳定性, 不利于形成良好的土壤团聚体结构。4 种林地类型的系统耦合协调程度按耦合度 C 值排序为: 0.728 (云南松林) > 0.681 (华山松林) > 0.663 (高山栎林) > 0.662 (滇油杉林), 其中, 云南松林地耦合度最大, 属于中度协调, 其粒径 $2.0 \sim 5.0$ mm 水稳定性团聚体和 MWSSA 显著大于其他 3 种林地, 且云南松林地优先路径总数量显著大于华山松、滇油杉林地, 说明大粒级的团聚体提高土壤结构的复杂和变异程度, 增加土壤孔隙数量, 有利于优先流现象的发生和优先路径数量的增多, 从而使得优先路径和土壤团聚体结构性能稳步改善, 协调发展。滇油杉林地土壤层中存在不同粒级的石砾, 破坏土壤团聚体结构, 阻碍优先路径的形成, 导致系统耦合协调程度下降。

4 讨论

4.1 林地类型对土壤团聚体结构的影响

团聚体结构是土壤结构的基本反映, 团聚体的粒径分布和稳定性对土壤肥力状况、结构稳定性及抗蚀性有重要影响^[8]。研究表明, 研究区 4 种林地土壤水稳定性团聚体差异明显, 大粒级团聚体含量占一定优势, 且随粒级减小团聚体含量呈减小的趋势, 这可能与研究区林地土壤缺少人为活动有关。王铁浩等^[30]认为, 土壤团聚体结构在林木生长和植被恢复过程中依靠自然演变, 小粒级团聚体逐渐向大粒级团聚体转变; 吴秀坤等^[31]发现, 林地表层土壤地被植物和枯落物的覆盖, 增加表层土壤入渗率, 有效防止雨滴对土壤大粒级团聚体的冲击, 有利于大团聚体的形成和保持。4 种林地粒径 > 0.25 mm 水稳定性团聚体含量均大于 90% , 说明研究区林地具有良好的土壤结构和抗蚀性^[24]。林地土壤表层枯落物被分解后, 归还土壤转化为有机质, 有效促进土壤颗粒之间的胶结作用^[25], 增加土壤团聚体的数量和稳定性^[32]。聂浩亮等^[33]发现, 林分类型对土壤有机质含量影响显著, 林分类型影响凋落物产量和分解速率, 进而造成土壤有机质含量存在差异^[34]。研究区 4 种林分中, 华山松和滇油杉林地土壤有机质含量较高, 且这 2 种林分土壤有机质含量差异规律与团聚体结构稳定性一致。孙金

兵等^[35]证实,土壤有机质含量与水稳定性团聚体含量显著相关,土壤颗粒与有机质的胶结作用可以改善土壤结构,有利于土壤团聚体的形成。土壤团聚体结构稳定性受土层深度和植被类型的影响,魏霞等^[26]研究发现,土层深度变化对土壤团聚体结构特征存在显著影响,随土层深度的增加,土壤结构稳定性逐渐减弱,且植被类型对土壤结构的影响比土层深度更大,本研究结果与之基本一致。

4.2 林地类型对土壤优先路径的影响

研究区4种林地土壤优先流现象明显,但由于受土壤空间异质性^[12]和优先流自身特征^[11](环绕性、快速穿透性和侧向入渗等)影响,优先路径的发育程度存在差异。从优先路径的位置分布看,华山松林地优先路径的连通性最好,其次是云南松林地和高山栎林地,滇油杉林地连通性最差;从优先路径数量看,数量大小依次为:高山栎林(3 974) > 云南松林(3 513) > 滇油杉林(3 171) > 华山松林(2 770),优先路径连通性较好的林地土壤在数量上不一定占有优势,相反,优先路径数量最大的林地土壤连通性并不是最佳,这可能是染色图像处理过程中造成的误差,导致同一林地土壤优先路径的连通性和数量不一致。研究区4种林地优先路径发育均较好,程竞萱等^[36]研究发现,在重庆四面山土壤优先流发育程度为天然针阔混交林地 > 天然阔叶林地 > 农地; Zhang 等^[37]提出,林地土壤比果园土壤有更多的优先流动路径,均说明林地土壤优先流具有优势性。研究区4种林地表层土壤优先路径数量较多,显著多于深层土壤,其原因主要还是表层土壤团聚体结构稳定性好,枯落物的分解增加表层土壤有机质含量和团聚体数量^[38]。随着土层深度增加,土壤团聚体结构稳定性和水分下渗能力减弱,优先路径数量逐渐减少,这与卢华兴等^[23]在滇南地区的研究结果一致。华山松林地土质疏松,大孔隙数量多,有利于水分在土壤层中垂直运移,且其土壤表层枯落物和腐殖质较厚,增加土壤有机质含量,形成更多的团粒结构,提高土壤孔隙的通透性和优先路径的连通性^[39]。挖掘染色剖面时发现,滇油杉林地土壤中含有不同粒级的石砾,这可能是导致滇油杉林地土壤优先路径连通性较差的原因。

4.3 土壤团聚体结构对优先路径的影响

通过主成分分析、相关分析和灰色关联分析,

表明土壤团聚体结构影响土壤优先路径的形成。华山松林地表层土壤土质疏松,云南松林地深层土壤黏性大、透水性差,土壤结构可能是导致云南松和华山松林地优先路径数量随土壤深度分布不规律的主要原因。程金花等^[14]认为,土壤结构是形成优先路径的基础,土壤结构通过改变土壤含水率间接影响优先路径的形成; Wuest^[18]研究发现,基质流区域的土壤团聚体结构含量明显比优先路径附近区域低。土壤优先路径数量与各个土壤团聚体结构特征指标的关联水平属于中等或较强关联,其中, PAD 的关联度平均值达 0.742, MWSSA 的关联度最小,说明 PAD 最能反映土壤团聚体结构对土壤优先路径的影响程度。魏霞等^[26]认为, PAD 是反映土壤团聚体受到侵蚀后崩解、破坏的程度,而 MWSSA 反映土壤团聚体质量的准确性不高,不利于土壤团聚体结构特征的表达。4种林地土壤团聚体结构和优先路径的平均耦合度为 0.683,系统整体水平属于弱协调,说明土壤团聚体结构并不是优先路径形成的限制因素,优先路径的形成可能受其他因素(如林木根系)的影响。程金花等^[40]认为,林地土壤中的林木根系能够产生孔隙,促进优先路径的形成,同时也能使土壤团聚体破碎,堵塞土壤孔隙而不利于优先路径的形成。

5 结论

(1) 4种林地土壤具有良好的团聚体结构,其稳定性依次为:华山松林 > 滇油杉林 > 云南松林 > 高山栎林,土壤团聚体结构受林地类型、土层深度的影响显著($P < 0.05$),且与不同粒径水稳定性团聚体有相关性。

(2) 林地土壤优先流具有优势性,华山松林优先路径的连通性优于云南松林、高山栎林和滇油杉林,0~10 cm 表层土壤土质疏松,优先路径数量较多,随着土层深度增加,优先路径数量逐渐减少。

(3) WSA、MWD、GMD、MWSSA、PAD、D 能较好地评价土壤团聚体结构特征,与优先路径数量的关联度大于 0.62,属于中度关联,土壤团聚体结构是影响优先路径形成的重要因素。

(4) 不同林地类型土壤优先路径与土壤团聚体结构的耦合度为 0.683,系统整体水平属于弱协调,土壤团聚体结构不是优先路径形成的限制因

素,4种林地耦合协调程度依次为:0.728(云南松林)>0.681(华山松林)>0.663(高山栎林)>0.662(滇油杉林)。

参考文献:

- [1] Bundt M, Widmer F, Pesaro M, *et al.* Preferential flow paths: Biological 'hot spots' in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(6): 729-738.
- [2] Jarvis N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(3): 523-546.
- [3] 石 辉,刘世荣.森林土壤大孔隙特征及其生态水文学意义[J]. *山地学报*, 2005, 23(5): 23-29.
- [4] Sukhija B S, Reddy D V, Nagabhushanam P, *et al.* Recharge processes: piston flow vs preferential flow in semi-arid aquifers of India[J]. *Hydrogeology Journal*, 2003, 11(3): 387-395.
- [5] 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.
- [6] 阮芯竹,程金花,张洪江,等.重庆四面山不同林地土壤大孔隙特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 68-74,80.
- [7] 李阳兵,魏朝富,谢德体,等.岩溶山区植被破坏前后土壤团聚体稳定性研究[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(10): 232-234.
- [8] 单桂梅,张春平,刘 霞,等.沂蒙山区小流域坡耕地土壤颗粒结构与养分退化特征[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(5): 76-82.
- [9] 王景燕,胡庭兴,龚 伟,等.川南坡地不同退耕模式对土壤团粒结构分形特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(6): 1410-1416.
- [10] 谢贤健,胡学华,王 珊,等.玉米不同育苗方式下土壤团聚体及颗粒分形特征[J]. *土壤通报*, 2012, 43(5): 1049-1053.
- [11] 牛健植,余新晓,邵文伟,等.森林生态系统优先流研究[M].北京:科学出版社,2013.
- [12] 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.
- [13] 吴庆华.基于土壤水入渗补给的优先流定量研究[D].北京:中国地质科学院,2013.
- [14] 程金花,王 伟,吴煜禾,等.长江三峡紫色砂页岩区优先流形成及其运动机理[M].北京:科学出版社,2016.
- [15] 田香姣.四面山两种土地利用方式下的优先流特征[D].北京:北京林业大学,2015.
- [16] Jarvis N, Larsbo M, Roullet S, *et al.* The role of soil properties in regulating non-equilibrium macropore flow and solute transport in agricultural topsoils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(1): 282-292.
- [17] Bouma J. Influence of soil macroporosity on environmental quality[J]. *Advances in Agronomy*, 1991, 46: 1-37.
- [18] Wuest S B. Comparison of preferential flow paths to bulk soil in a weakly aggregated silt loam soil[J]. *Vadose Zone Journal*, 2009, 8(3): 623-627.
- [19] 张雨鉴,王克勤,宋娅丽,等.滇中亚高山森林植物叶—凋落叶—土壤生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(21): 7648-7658.
- [20] 侯 芳,王克勤,宋娅丽,等.滇中亚高山典型森林生态系统碳储量及其分配特征[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(10): 1825-1835.
- [21] 郑兴蕊,王克勤,宋娅丽,等.滇中亚高山不同森林土壤酶活性对模拟N沉降的响应[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(2): 50-62.
- [22] 卢华兴,段 旭,赵洋毅,等.滇中磨盘山典型林分土壤优先流特征及其归因分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(7): 48-62.
- [23] 卢华兴,段 旭,赵洋毅,等.滇南地区普洱茶树根系对土壤优先流路径形成的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 80-87.
- [24] 苏 静,赵世伟.土壤团聚体稳定性评价方法比较[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(5): 114-117.
- [25] 李 娟,韩隽昌,陈 超,等.黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 248-253,259.
- [26] 魏 霞,贺 燕,魏 宁,等.祁连山区主要植被类型下土壤团聚体变化特征[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(2): 148-155.
- [27] Young I M, Crawford J W. The fractal structure of soil aggregates: its measurement and interpretation[J]. *Journal of Soil Science*, 1991, 42(62): 187-192.
- [28] 薛 鸥,魏天兴,刘 飞,等.公路边坡植物群落多样性与土壤因子耦合关系[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(1): 91-100.
- [29] 谢贤健,李永飞.不同巨桉林下紫色土壤抗蚀性与土壤因子的耦合关系分析[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 97-102.
- [30] 王轶浩,耿养会,黄仲华.三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 5493-5499.
- [31] 吴秀坤,李永梅,李朝丽,等.纳版河流域土地利用方式对土壤水稳性团聚体的影响[J]. *土壤通报*, 2013, 44(6): 1356-1363.
- [32] 蔡立群,杜 伟,罗珠珠,等.陇中坡地不同退耕模式对土壤团粒结构分形特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 200-202,208.
- [33] 聂浩亮,薄慧娟,张润哲,等.北京海坨山典型林分土壤有机碳含量及有机碳密度垂直分布特征[J]. *林业科学研究*, 2020, 33(6): 155-162.
- [34] Lange M, Eisenhauer N, Sierra C A, *et al.* Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1-8.
- [35] 孙金兵,高 菲,宋金凤,等.长白山两种森林类型土壤颗粒有机碳和黑碳分布特征[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(2): 222-231.
- [36] 程竟萱,程金花,郑 欣,等.不同植被覆盖下土壤优先流特征及影响因素[J]. *河南农业大学学报*, 2018, 52(6): 973-982.
- [37] Zhang Y, Cao Z, Hou F, *et al.* Characterizing preferential flow paths in texturally similar soils under different land uses by combining drainage and dye-staining methods[J]. *Water*, 2021, 13(2): 219.
- [38] 魏虎伟.重庆四面山两种林地土壤优先流路径特征及其影响因素[D].北京:北京林业大学,2015.
- [39] 官 琦,徐则民,田 林.植被发育玄武岩斜坡土体大孔隙尺寸及其主要影响因素[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 2888-2896.
- [40] 程金花,张洪江,张晓晖,等.重庆四面山根系及土壤特性对优先流路径分布的影响[J]. *世界科技研究与发展*, 2011, 33(4): 519-523.

Soil Aggregate Structure of Subalpine Woodland and Its Influence on Priority Path in Central Yunnan

LU Hua-xing¹, ZHAO Yang-yi^{1,2}, DUAN Xu^{1,2}, ZHU Meng-xue¹, TU Xiao-yun¹, YANG Wen-yan¹

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

Abstract: [Objective] To analyze the influence of soil aggregate structure on the formation of soil priority path for subalpine woodland in central Yunnan for providing scientific basis for the construction of water conservation forest, the restoration and reconstruction of natural forest vegetation in central Yunnan forest area. [Method] Based on four subalpine woodland soils of *Pinus yunnanensis* forest, *Pinus armandii* forest, *Quercus semecarpifolia* forest and *Keteleeria evelyniana* forest in central Yunnan, the soil priority path was extracted by using dye tracing method, combined with Photoshop CS 5, image pro plus 6.0 and surfer 15 image processing software. The structural characteristics of soil aggregates were systematically evaluated, and the effect of soil aggregate structure on priority path was explored by correlation analysis, principal component analysis, grey correlation analysis and coupling degree analysis. [Result] Results showed that: (1) the soil of four subalpine forest lands in the study area had good aggregate structure, and the structural stability in the *P. armandii* forest was the largest, followed by *K. evelyniana* forest, *P. yunnanensis* forest, and *Q. semecarpifolia* forest. The soil aggregate structure was significantly affected by forest land type and soil depth ($P < 0.05$), and it was correlated with the content of water stable aggregates in different particle sizes. (2) The preferential flow of forest land soil had advantages. The connectivity of priority paths in *P. armandii* forest was better than that of *P. yunnanensis* forest, *Q. semecarpifolia* forest, and *K. evelyniana* forest. In addition, the number of priority paths gradually decreased with the increase of soil depth. (3) The content of water stable aggregates with particle size > 0.25 mm (WSA), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), mean weight soil specific area (MWSSA), percentage of aggregate destruction (PAD) and fractal dimension (D) could better evaluate the structural characteristics of soil aggregates. The correlation with the number of priority paths was more than 0.62, which was important factor affecting the formation of priority paths. (4) The average coupling degree between soil aggregate structure and the number of priority paths for subalpine forest land in central Asia was 0.683, and the system belonged to weak coordination. The coupling coordination degree in *P. yunnanensis* forest was the largest (0.728), followed by *P. armandii* forest (0.681), *Q. semecarpifolia* forest (0.663), and *K. evelyniana* forest (0.662). [Conclusion] Soil aggregate structure is an important factor that affects the formation and occurrence of soil priority path, but it does not play a decisive role in the formation of priority path.

Keywords: priority path; aggregate structure; coupling relationship; dye tracing method; subalpine in central Yunnan

(责任编辑: 徐玉秀)