

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.007.

王平, 丁智强, 李璐杉, 等. 滇中主要森林类型土壤团聚体稳定性及其变化机制[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 232-242.

Wang Ping, Ding Zhiqiang, Li Lushan, et al. Stability and Mechanisms of Soil Aggregates in Different Forest Types in Central Yunnan[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 232-242.

滇中主要森林类型土壤团聚体稳定性及其变化机制

王平¹, 丁智强^{1,2,3}, 李璐杉⁴, 李玉辉¹

(1. 云南师范大学 地理学部, 昆明 650500; 2. 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007;

3. 福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站, 福建 三明 365002; 4. 云南省楚雄紫溪中学, 云南 楚雄 675099)

摘要: [目的] 团聚体稳定性是评估退化生态系统植被恢复后土壤质量变化的重要指标, 研究滇中地区主要森林类型土壤团聚体稳定性差异及其变化机制, 为该地未来植被恢复、改造过程中的树种选择、森林资源管理提供科学支撑。[方法] 选择云南松林(PY)、华山松林(PA)、银荆林(AD)、旱冬瓜林(ACF)、针阔混交林(TF)、次生常绿阔叶林(SF) 6 种主要森林类型作为研究对象, 以坡旱地(DSL)作为对照, 采集 0—20 cm, 20—40 cm 和 40—60 cm 土样, 利用干、湿筛分法分离测定 >5 mm, $5\sim2$ mm, $2\sim0.25$ mm, <0.25 mm 4 个粒级团聚体含量, 计算水稳性大团聚体含量 ($WR_{>0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和结构破坏率(PAD) 4 个稳定性指标, 对土壤团聚体稳定性进行研究。[结果] (1) 6 种森林类型在 0—60 cm 均以 $0.25\sim2$ mm 的小团聚体为主, 而坡旱地随着土层深度的增加, 粒级从 $0.25\sim2$ mm 向 <0.25 mm 转变; (2) 0—60 cm 土层中坡旱地平均 $WR_{>0.25}$, MWD, GMD 和 PAD 分别为 55.40%, 1.16 mm, 0.52 mm, 40.47%, 6 种森林类型分别为 71.61%~78.20%, 1.97~2.61 mm, 0.93~1.27 mm, 12.59%~20.47%, 团聚体稳定性总体表现为坡旱地最差, 次生常绿阔叶林、针阔混交林最好, 其次是云南松林、旱冬瓜林, 银荆林和华山松林较差; (3) 团聚体稳定性在宏观尺度上受森林类型、土层深度及其交互作用的显著影响 ($p<0.001$), 而在微观尺度上主要受土壤容重、非毛管孔隙度、全钾、有机质、砂粒和黏粒含量的显著影响 ($p<0.05$), 土壤理化性质、养分、质地解释了团聚体稳定性的 90.5%, 其中以理化性质、养分及其交互作用的贡献最大, 解释率为 61.3%, 土壤质地往往与其他因子共同影响团聚体稳定性, 其独立解释率仅为 5.1%。[结论] 滇中地区退耕还林可显著提高土壤团聚体稳定性, 未来的生态恢复应该以营造云南松林和旱冬瓜林为主, 同时避免高强度的人类活动, 改善土壤理化性质和增加土壤养分积累, 促进人工纯林向针阔混交林及常绿阔叶林演化。

关键词: 土壤团聚体; 稳定性; 影响因素; 森林类型; 滇中地区

中图分类号: S157.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0232-11

Stability and Mechanisms of Soil Aggregates in Major Forest Types in Central Yunnan

Wang Ping¹, Ding Zhiqiang^{1,2,3}, Li Lushan⁴, Li Yuhui¹

(1. Department of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

2. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

3. Fujian Sanming Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Sanming, Fujian 365002,

China; 4. Zixi Middle School Chuxiong, Yunnan Province, Chuxiong, Yunnan 675099, China)

Abstract: [Objective] Aggregated stability is an important indicator for assessing changes in soil quality after vegetation restoration in degraded ecosystem. The aims of this study are to investigate the difference of soil aggregate stability and its change mechanism of main forest types in central Yunnan, and to provide scientific

收稿日期: 2023-10-15

修回日期: 2023-11-09

资助项目: 云南省科技计划项目“云南山地河谷生物多样性保护及生态安全屏障建设”子课题“河谷绿色发展与生态安全屏障建设体系研究与示范”(202403AC100028)

第一作者: 王平(1965—), 男, 云南昭通人, 硕士, 教授, 主要从事土壤地理与区域自然地理研究。E-mail: ynwangping@163.com

通信作者: 丁智强(1993—), 男, 云南禄劝人, 博士, 主要从事水土资源与环境变化研究。E-mail: zhiqiang_ding9303@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

support for tree species selection and forest resource scientific management in the process of vegetation restoration and transformation in the future. [Methods] Six primary forest types, including *Pinus yunnanensis* forest (PY), *Pinus armandii* forest (PA), *Acacia dealbata* forest (AD) and *Alnus cremastogyne* forest (ACF), *Theropencedrymion* forest (TF), and Secondary evergreen broad-leaved forest (SF), were selected for the study. Dry slope land (DSL) was used as a control. Soil samples were collected from depths of 0—20 cm, 20—40 cm, and 40—60 cm. Dry sieving and wet sieving methods were employed to classify aggregates into four size classes: >5 mm, $5\sim2$ mm, $2\sim0.25$ mm and <0.25 mm. Four stability indices, including $WR_{>0.25}$, mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and structural failure rate (PAD), were calculated to investigate soil aggregate stability. [Results] (1) Among the six forest types, aggregates with a particle size range of $0.25\sim2$ mm predominated in the 0—60 cm soil layers, while DSL shifted from $0.25\sim2$ mm to <0.25 mm with increasing soil depth. (2) In the 0—60 cm soil layer, $WR_{>0.25}$, MWD, GMD, and PAD values in DSL were 55.40%, 1.16 mm, 0.52 mm, and 40.47%, respectively. The six forest types exhibited aggregate stability ranging from 71.61% to 78.20% for $WR_{>0.25}$, 1.97 mm to 2.61 mm for MWD, 0.93 mm to 1.27 mm for GMD, and 12.59% to 20.47% for PAD. Overall, DSL exhibited the poorest aggregate stability, followed by SF and TF, while PY, ACF, AD, and PA showed relatively lower stability. (3) At the macro scale, soil aggregate stability in the study area was significantly influenced by forest type, soil depth, and their interaction ($p < 0.001$). At the micro scale, it was mainly affected by soil bulk density, non-capillary porosity, total potassium, soil organic matter, sand content, and clay content ($p < 0.05$). Soil physicochemical properties, nutrients, and texture explained 90.5% of aggregate stability, with the greatest contribution coming from the interaction of physicochemical properties and nutrients, accounting for 61.3%. Soil texture often interacted with other factors to influence aggregate stability, with an independent explanatory power of only 5.1%. [Conclusion] In central Yunnan, the stability of soil aggregates can be significantly improved by returning farmland to forest. Future ecological restoration should focus on creating *Pinus yunnanensis* and *Alnus cremastogyne* forest, while avoiding high-intensity human activities, improving soil physical and chemical properties and increasing soil nutrient accumulation, and promoting the evolution of artificial pure forest into *theropencedrymion* forest and secondary forest.

Keywords: soil aggregates; stability; impact factors; forest types; central Yunnan region

稳定的土壤团聚体具有调节土壤土—气界面能量物质交换、改善土壤结构、控制土壤侵蚀、维持养分循环和土壤碳固存等生态水文功能^[1-2],是评价土壤结构和质量的有效指标。团聚体的形成和稳定性受到很多因素的控制,包括植物特性(如树种、根系、覆盖度等)、土壤特性(如质地、养分和理化性质等)以及土地管理等,这些生物和非生物因素在不同尺度上决定了团聚体稳定性^[2-3]。人工抚育是退化生态系统恢复的关键手段,最近的研究表明人工林恢复有助于改善土壤团聚体的稳定性^[4],因此评估不同森林团聚体稳定性及其变化机制可为土壤质量的恢复提供依据。

团聚体粒级结构的分析主要依赖于干筛和湿筛,两种方法能够有效区分不同尺寸的团聚体,进而揭示其分布特征^[1,5],通过测量团聚体粒级分布可进一步计算水稳性大团聚体含量($WR_{>0.25}$)、平均重量直径(Mean weighted diameter, MWD)、几何平均直径

(Geometric mean diameter, GMD)和结构破坏率(Percentage of aggregate destruction, PAD)等指标来评价土壤团聚体稳定性,其有效性在以往的研究中得到广泛报道^[5-7]。然而在大多数研究中,不同土地利用和森林类型团聚体粒级分布的不确定性,造成土壤结构稳定性依然是一个悬而未决的问题。

尽管一些研究报道了植物与土壤团聚体稳定性的广泛联系,但是有关不同森林类型团聚体分布、稳定性差异以及对植物物种变化如何影响团聚体稳定性的认知仍然十分缺乏。植物特性主要包括林型结构、根系、凋落物归还分解以及微生物群落组成等^[8]。群落结构不仅会影响凋落物归还量,还会造成土壤侵蚀强度的差异,多样的群落结构可以改变降水的垂直空间分配,保护土壤免受侵蚀,深厚的凋落物也能通过减少雨滴飞溅效应以及提供有机物分解来削弱地表侵蚀。在地下,根系通过各种方式促进团聚体的形

成和稳定,比如根系的生长挤压或破碎会改变土壤容重,其产生的分泌物不仅是微生物的重要碳源,还是良好的土壤胶合剂,是形成大团聚体的基础^[9]。一项关于植物多样性、根系性状与土壤物理结构的研究表明^[10],植物物种丰富度越高,团聚体稳定性就会增加,而且特定物种和功能群的根性状在这种关系中发挥着重要作用,说明团聚体稳定性与根系密度呈强正相关,但是密度过高可能会导致大团聚体被挤压破坏,从而造成团聚体稳定性的整体下降^[11]。植物群落结构还能通过间接作用提升团聚体稳定性,如 Steinbeiss^[12] 和 Eisenhauer^[13] 等发现 SOC 和土壤微生物生物量会对团聚体稳定性产生积极影响,并且这些因素伴随着群落结构多样性的增加而增加^[14]。

最近的研究将土壤特性与团聚体稳定性联系起来,发现土壤特性在维持团聚体稳定性方面似乎比植物特性更重要^[15]。土壤有机碳、黏土、高价阳离子和真菌菌丝相互结合形成黏合剂^[9,16],促进大团聚体的形成,SOC 和微生物活性还会增加团聚体的疏水性,降低其对水分解的敏感性^[17],另外土壤阳离子交换量、含水量以及细菌真菌胞外多糖等还是影响雨滴飞溅侵蚀的重要因素^[18],其变化直接关系到表层团聚体的分解和飞溅侵蚀强度^[19-20]。然而这些土壤特性对团聚体稳定性的相对贡献依然存在不确定性,特别是在不同森林类型之间,因此需要更多样的研究来获取有关不同森林类型下团聚体稳定性差异及其影响因素的信息,为未来退化生态系统植被恢复过程中的树种选择和抚育管理提供科学依据。

滇中地区有关土壤团聚体稳定性的研究较多,如卢华兴等^[21] 研究滇中亚高山林地土壤团聚体的结构特征,并进一步分析了其对土壤优先流路径形成的影响;张乃木等^[6] 分析了滇中亚高山云南松林和华山松林的团聚体分布特征及其在氮沉降背景下对酶活性的影响;杨馥羽等^[22] 考虑了林火对云南松林土壤团聚体稳定性的影响;吴丽芳等^[23] 讨论滇中岩溶石漠化区人工植被类型土壤团聚体生态化学计量特征;蔡璨等^[6] 基于土壤团聚体分析滇东岩溶断陷盆地地表/地下土壤的可蚀性。虽然研究十分丰富,但所涉及的森林类型较少,部分研究集中在农业土壤上^[24-25],且多以表层土壤为主,对不同森林类型土壤团聚体稳定性及其变化机制了解不足。基于此,本研究以滇中地区 6 种主要森林类型为研究对象,并将坡旱地作为对照,划分 0—60 cm 土层,主要目的是(1) 了解不同森林类型的团聚体粒级分布,(2) 评估不同森林类型团聚体稳定性的差异,(3) 确定影响团聚体稳定性的生物和非生物因素。

1 研究区概况

研究区位于云南高原中部昆明市双河—磨南德水源林自然保护区内,涉及安宁市八街街道办事处南部和晋宁区双河乡,地理坐标:24°28′25″—24°40′36″N,102°15′40″—102°30′22″E。海拔范围 1 930~2 513.4 m,平均海拔 2 129.0 m。气候为低纬高原中亚热带半湿润季风气候,年平均气温 11.6~14.6 °C,年平均降水量 917.0~1 190.0 mm,雨季(5—10 月)和旱季(11 月至次年 4 月)非常分明,雨季降水量约占全年的 70%~80%。出露的岩石有砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩、石灰岩、板岩、千枚岩等。地带性土壤以红壤为主,次为黄棕壤。地带性植被为半湿性常绿阔叶林,经过 20 世纪 50—80 年代的严重破坏,目前以次生林为主,建群种主要为滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides*)、滇石栎(*Lithocarpus dealbatus*)等。此外,还有由栓皮栎(*Quercus variabilis*)、槲栎(*Quercus aliena*)、麻栎(*Quercus acutissima*)与云南松(*Pinus yunnanensis*)、华山松(*Pinus armandi*)等组成的针阔混交林。两者林下小灌木有大白花杜鹃(*Rhododendron decorum*)、碎米花杜鹃(*Rhododendron spiciferum*)、米饭花(*Vaccinium mandarinorum*)、乌饭(*Vaccinium bracteatum*)、厚皮香(*Ternstroemia gymnanthera*)、水红木(*Viburnum cylindricum*)和滇杨梅(*Myrella nana*)等。人工林大面积分布,有云南松、华山松、早冬瓜(*Alnus cremastogyne*)、银荆(*Acacia dealbata*)等纯林。

2 材料与方法

2.1 样地布设和土样采集

2019 年 5 月,在保护区范围内选取植被均匀、立地条件相似、人为干扰较少的云南松林(*Pinus yunnanensis* forest, PY)、华山松林(*Pinus armandii* forest, PA)、银荆林(*Acacia dealbata* forest, AD)、旱冬瓜林(*Alnus cremastogyne* forest, ACF)、针阔混交林(*Theropencedrymion* forest, TF)、次生常绿阔叶林(*Secondary evergreen broad-leaved forest*, SF)作为研究对象,以坡旱地(*Dry slope land*, DSL)作为对照(表 1)。每个类型设置 3 块样地,共 21 个样地,每块样地 20 m×20 m。在每块样地内按 0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm 采集原状土样各 1 kg 放入塑料盒中,同时采集土壤混合样、环刀样和铝盒样。本研究共采集土壤原状土样、混合土样、环刀样、铝盒样各 63 个(或盒、袋)。

2.2 土样处理和指标测定

原状土样运回实验室自然风干除去石块和粗根后,沿土壤自然结构面轻扳为直径小于 10 mm 的土块,使

用干筛和湿筛法^[5]测定不同粒级团聚体重量百分比。具体为先利用干筛法将风干原状土样分离成大团聚体(>5 mm)、中团聚体(2~5 mm)、小团聚体(0.25~2 mm)和微团聚体(<0.25 mm)4 个粒级,求得各粒级机械团聚体百分含量,按比例配成 50 g 湿筛团聚体,然后用湿筛法确定各粒级水稳性团聚体的比例。

表 1 调查样地基本情况
Table 1 Basic Information of Survey Plots

样地 代号	类型	北纬	东经	坡向	平均 海拔/m	平均 坡度/(°)	平均 树高/m	平均 胸径/cm	平均 郁闭度/%
DSL	坡旱地	24°35'33"	102°22'35"	SW12°	1935	13	—	—	—
PY	云南松林	24°31'59"	102°19'27"	NW70°	2156	24	13.6	16.7	76
PA	华山松林	24°31'21"	102°19'15"	SE5°	2272	17	15.2	21.3	92
AD	银荆林	24°37'47"	102°23'34"	SW21°	1945	19	9.3	10.4	74
ACF	旱冬瓜林	24°31'32"	102°19'17"	NW25°	2294	17	9.8	12.6	88
TF	针阔混交林	24°37'44"	102°23'33"	SW40°	1954	20	7.2	8.4	80
SF	次生常绿阔叶林	24°35'27"	102°22'22"	SE20°	1941	19	8.4	15.6	94

混合土样自然风干后磨细、过筛制备为 2 mm, 1 mm和 0.25 mm 的土样,用于测定相关土壤理化指标。其中土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)采用 K₂Cr₂O₇—H₂SO₄氧化法测定,然后基于 1.724 的转换系数计算土壤有机质(Soil organic matter, SOM)含量;土壤酸碱度(pH)采用水浸提电极电位法测定(水土比为 2.5:1);环刀法测定土壤容重(Bulk Density, BD)、毛管孔隙度(Capillary porosity, CP)、非毛管孔隙度(Noncapillary porosity, NCP);采用比重计法测定土壤样品的黏粒(Clay)、粉砂粒(Slit)和砂粒(Sand)含量;全磷(Total phosphorus, TP)采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定;全钾(Total kalium, TK)采用 NaOH 熔融—火焰光度法测定;全氮(Total nitrogen, TN)采用半微量开氏法测定;速效氮(Available nitrogen, AN)采用碱解扩散法测定;速效磷(Available phosphorus, AP)采用盐酸—氟化铵浸提法测定;速效钾(Available kalium, AK)采用 NH₄OAc 浸提—火焰光度法测定,各样地土壤理化指标见表 2。

表 2 各样地土壤理化性质特征
Table 2 Characteristics of Soil Physicochemical Properties in Different Plots

样地代号	DSL	PY	PA	AD	ACF	TF	SF
类型	坡旱地	云南松林	华山松林	银荆林	旱冬瓜林	针阔混交林	次生常绿阔叶林
BD/(g·cm ⁻³)	1.52±0.03	1.41±0.02	1.29±0.03	1.34±0.03	1.31±0.05	1.28±0.02	1.22±0.04
CP/%	30.18±0.47	34.08±1.46	38.07±0.36	34.71±1.09	32.44±0.75	35.9±1.11	37.05±1.11
NCP/%	12.33±1.2	12.86±1.16	13.42±1.06	14.59±1.07	18.22±1.8	15.77±1.71	16.81±1.97
pH	5.16±0.07	4.85±0.07	5.12±0.05	4.83±0.07	5.00±0.06	5.18±0.06	4.93±0.11
AK/(mg·kg ⁻¹)	132.39±13.34	97.94±7.22	111.69±11.22	62.29±9.04	104.73±16.19	76.46±9.72	90.51±22.44
AN/(mg·kg ⁻¹)	24.79±2.74	20.71±4.1	35.1±5.59	20.32±4.59	41.71±3.55	18.96±3.79	26.54±2.92
AP/(mg·kg ⁻¹)	1.68±0.31	1.11±0.34	2.13±0.08	1.79±0.5	1.64±0.39	3.76±1	1.21±0.17
TN/(g·kg ⁻¹)	2.04±0.17	1.24±0.22	2.34±0.18	1.28±0.2	2.55±0.09	1.23±0.22	1.62±0.22
TP/(g·kg ⁻¹)	0.36±0.03	0.84±0.03	0.63±0.01	0.47±0.03	0.6±0.01	0.39±0.03	0.73±0.06
TK/(g·kg ⁻¹)	45.99±1.06	30.36±1.98	47.78±1.57	16.11±1.15	28.58±1.78	26.21±1.21	36.06±2.8
SOM/(g·kg ⁻¹)	14.15±3.92	33.46±9.84	62.6±5.73	24.82±5.99	63.56±7.31	45.45±6.71	29.28±5.77
Clay/%	24.44±0.76	20.84±1.24	8.62±0.54	14.03±0.91	18.07±0.73	12.43±1.25	20.57±0.74
Sand/%	52.33±0.59	59.4±0.94	65.11±1.41	66.25±0.96	55.00±0.45	64.88±1.28	53.8±0.94
Slit/%	23.24±0.55	19.75±1.26	26.27±1.5	19.72±0.79	26.93±0.4	22.69±0.97	25.63±0.78

注:表中数据为 0—60cm 土层的平均值±标准误。

2.3 土壤团聚体稳定性指标计算

水稳性大团聚体百分比(WR_{>0.25})、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、结构破坏率(PAD)的计算公式分别为^[26]:

$$WR_{>0.25} = \frac{M_{>0.25}}{M_T} \times 100\%$$
 (1)

$$MWD = \sum_{i=1}^n \overline{R_i} \times W_i$$
 (2)

$$GMD = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \times \ln \overline{R_i}}{\sum_{i=1}^n W_i} \right)$$
 (3)

$$PAD = \frac{DR_{>0.25} - WR_{>0.25}}{DR_{>0.25}} \times 100\%$$
 (4)

式中:M_T为团聚体总重量(g);M_{>0.25}为>0.25 mm 粒级团聚体的重量;DR_{>0.25}为>0.25 mm 粒级机械

团聚体的百分含量; $WR_{>0.25}$ 为 >0.25 mm 粒级水稳性大团聚体的百分含量; W_i 表示第 i 级团聚体的质量占土壤总质量的百分比(%); \bar{R}_i 表示第 i 级团聚体的平均直径(mm), 本研究中各粒级团聚体的平均直径分别为 7.5, 3.5, 1.125, 0.125 mm。

2.4 统计分析

使用 Kolmogorov-Smirnov 检验和 Levene 检验确定数据的正态分布和方差齐性, 单因素方差分析(ANOVA)和最小显著性差异法(Least significant difference, LSD)用于确定各个森林类型土壤团聚体稳定性指标的差异性, 双因素方差分析用于确定森林类型、土壤层对团聚体稳定性的影响, 显著性水平为 0.05, 使用 Origin 2021b 软件绘制相关图表。在 R(R 4.0.5) 中使用 Factmine 包和 ade4 包的主成分分析确定不同森林类型的团聚体稳定性, 使用 ggcor 包的 Mantel-test 分析确定土壤特性与团聚体稳定性指标的相关性, 基于逐步回归筛选影响土壤团聚体稳定性的变量, 依据归属将变量划分为土壤物理特性、土壤质地和土壤养分 3 个成分, 基于 vegan 包中的方差分解分析(Variance partition analysis, VPA)确定 3 个组分独立和/或共同解释土壤团聚体稳定性的百分比。

3 结果与分析

3.1 土壤水稳性团聚体组成特征

各森林类型水稳性团聚体的粒级分布如图 1 所示。在 0—20 cm 土层中, DSL 及其余 6 种森林类型均以粒径 0.25~2 mm 的中团聚体为主, 大小排序为 $DSL(45.50\%) > PA(42.33\%) > AD(39.24\%) >$

$ACF(36.81\%) > TF(34.85\%) > SF(34.08\%) > PY(32.37\%)$ 。在 20—40 cm 和 40—60 cm 土层, 除 $DSL < 0.25$ mm 的微团聚体含量(48.62%, 47.87%)高于 0.25~2 mm 的中团聚体(42.13%, 43.69%)外, 其余森林类型的土壤团聚体都以 0.25~2 mm 粒级为主, 占比分别在 37.58%~44.25%和 30.12%~42.84%。

此外, 在 0—20 cm 土层, 粒径 >2 mm 的大团聚体含量表现为 $SF(47.42\%) > PY(44.60\%) > TF(43.33\%) > ACF(41.47\%) > AD(37.19\%) > PA(31.07\%) > DSL(17.19\%)$, <0.25 mm 的微团聚体含量则以 DSL 最高(37.31%), 其次是 PA(26.60%), 最少为 SF(18.51%)。从土壤剖面来看, 各森林类型粒径 >2 mm 的大团聚体含量表现为随土层深度增加而逐渐减少的趋势(37.47%→30.24%→29.63%), <0.25 mm 的微团聚体与之相反(24.65%→27.19%→30.64%), 0.25~2 mm 的中团聚体表现为先增加后减少的趋势(37.88%→42.58%→39.73%)。

3.2 土壤水稳性大团聚体和团聚体结构破坏率

由图 2 可知, $WR_{>0.25}$ 在 0—20 cm 土层表现为 $SF(81.49\%) > ACF(78.28\%) > TF(78.18\%) > PY(76.97\%) > AD(76.43\%) > PA(73.40\%) > DSL(62.69\%)$ 。在土壤剖面上, PA, ACF 在各土层无显著差异, DSL, AD, TF, SF 表现为 0—20 cm 显著高于 20—60 cm, PY 表现为 0—40 cm 显著大于 40—60 cm。3 个土层平均 PAD 表现为 DSL 显著高于其他森林类型(40.47%), 其次是 AD(20.47%)、PA(19.52%)和 PY(18.39%), TF, SF 和 ACF 最小, 分布于 12.59%~15.29%; 从土壤剖面来看, DSL 和各森林类型 PAD 均随土层深度增加而逐渐增大。

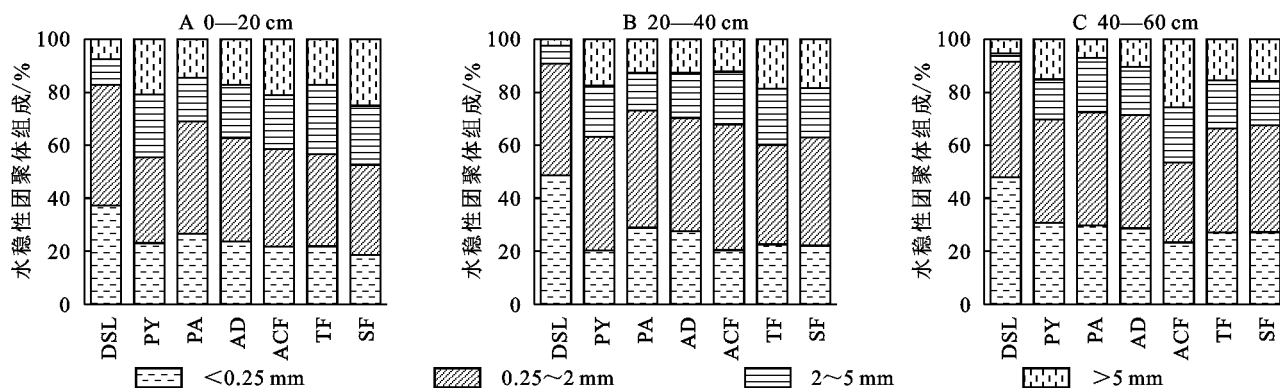


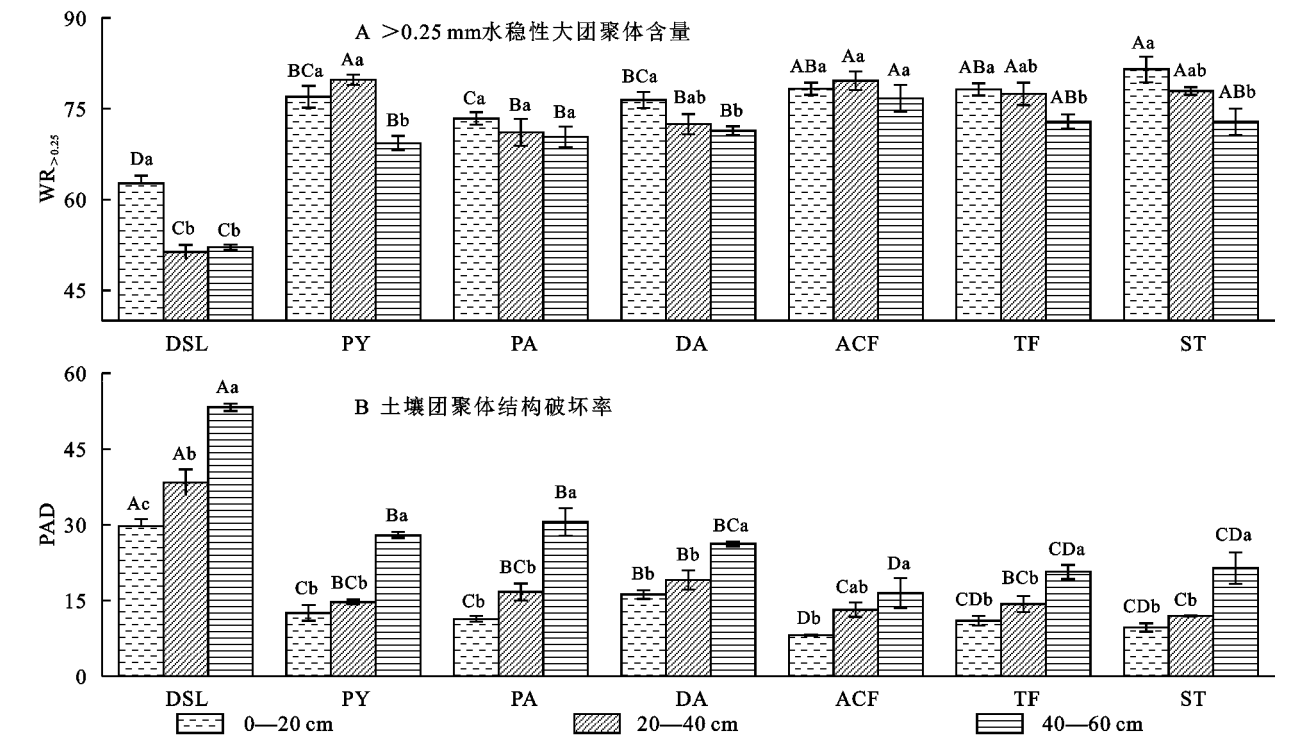
图1 不同植被类型4个粒级土壤水稳性团聚体的组成

Fig. 1 Composition of four particle-size soil water-stable aggregates in different vegetation types

3.3 土壤水稳性团聚体 MWD 和 GMD

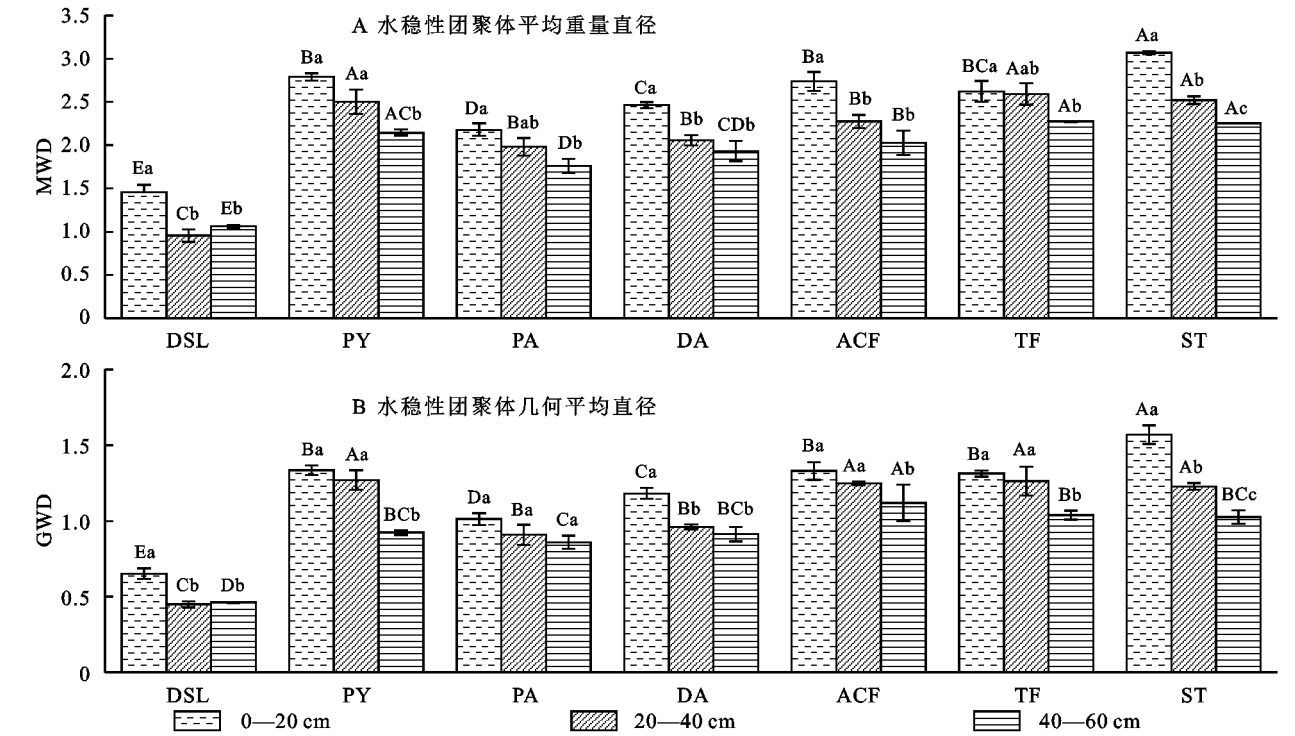
如图 3A 所示, DSL 及各个森林类型土壤水稳性团聚体平均重量直径(MWD)随土层深度增加而显著减小($p < 0.05$), 0—60 cm 土层平均 MWD 表现为 SF, TF 和 PY 最大, 分布在 2.48~2.61 mm, 其次是 ACF, AD 和 PA, 分别为 2.35 mm, 2.15 mm 和 1.97

mm, DSL 最小, 仅为 1.16 mm。如图 3B 所示, DSL 及各个森林类型土壤水稳性团聚体几何平均直径(GMD)同样随土层加深而显著减小($p < 0.05$), 0—60 cm 土层平均 GMD 表现为 $SF(1.27 \text{ mm}) > ACF(1.23 \text{ mm}) > TF(1.20 \text{ mm}) > PY(1.18 \text{ mm}) > AD(1.02 \text{ mm}) > PA(0.93 \text{ mm}) > DSL(0.52 \text{ mm})$ 。



注:不同大写字母表示不同森林类型同层土壤之间的差异,不同小写字母表示同一森林类型不同土层之间的差异($p<0.05$)。

图 2 不同森林类型土壤水稳性大团聚体含量和团聚体结构破坏率变化特征
Fig. 2 Changes in soil $WR_{>0.25}$ and PAD characteristics in different forest types



注:不同大写字母表示不同森林类型同层土壤的差异,不同小写字母表示同一森林类型不同土层的差异($p<0.05$)。

图 3 不同森林类型土壤水稳性团聚体平均重量直径和几何平均直径的变化
Fig. 3 Variations in soil water-stable aggregates MWD and GMD in different forest types

3.4 不同森林类型土壤团聚体稳定性

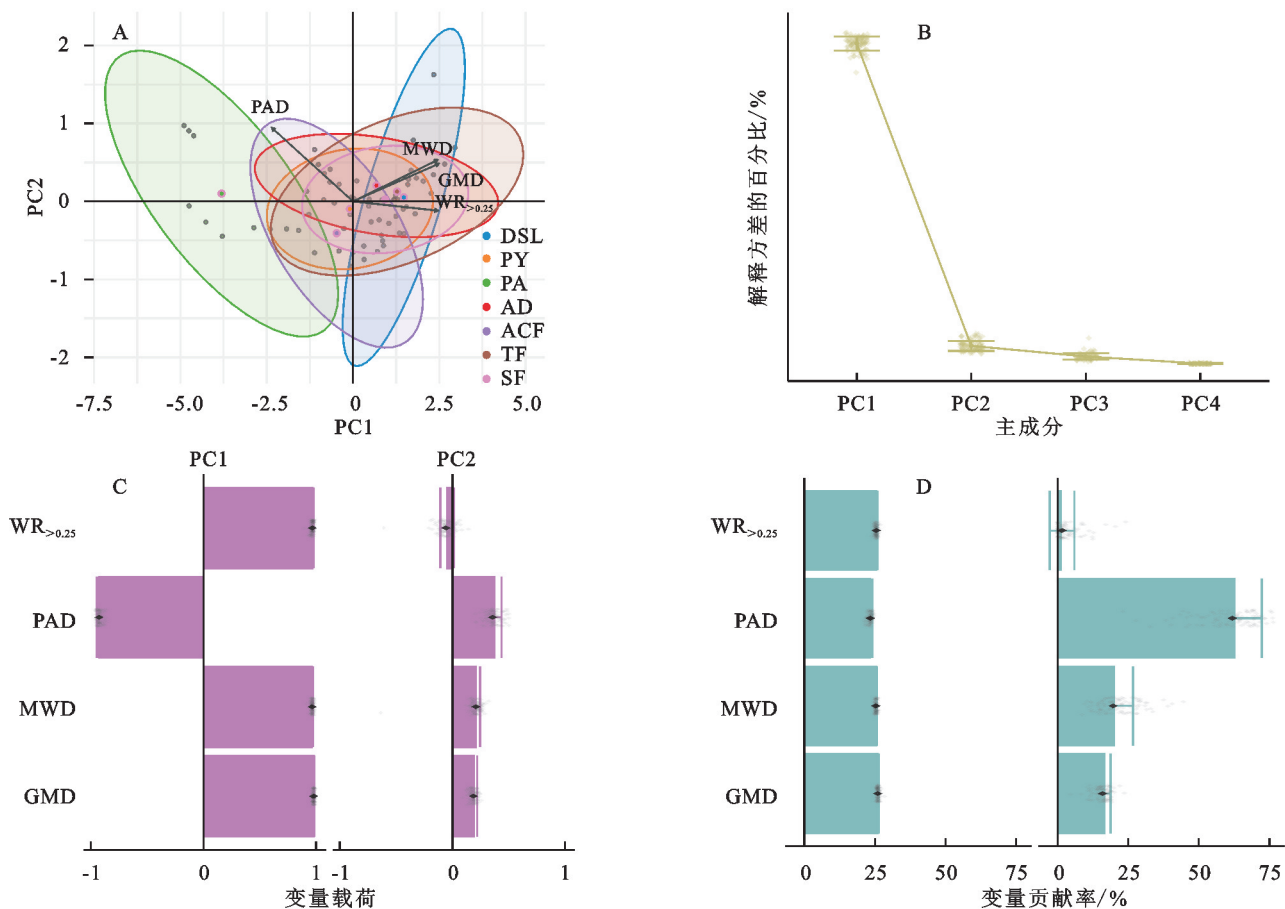
为了分析不同森林类型的土壤团聚体稳定性差异,本研究进一步基于 4 个指标进行主成分分析(PCA),每个变量的特征向量反映其在主成分中的方

向和强度以及变量的相互关系。从结果来看,两个保留的主成分累积解释了数据集 97.1% 的方差变化。从 4 个变量在保留主成分的载荷来看,PAD 对第一主成分有较大负载荷, $WR_{>0.25}$,MWD,GMD 有较大

正载荷,反映了 4 个指标对土壤团聚体稳定性的重要贡献以及 $WR_{>0.25}$, MWD, GMD 的正相关性,在第二主成分上,以 PAD 的载荷最大。每个变量对第一主成分的贡献率基本一致,而 PAD 对第二主成分的贡献率最大, $WR_{>0.25}$ 的贡献率最小。

综合来看,DSL 以及 PA 的土壤团聚体稳定性较

差,而 TF 和 SF 的土壤团聚体稳定性较好,其余处于过渡水平。由于 DSL 以及不同森林类型在沿 $WR_{>0.25}$ 和 PAD 指标加权得到的主成分轴上差异较大,而 MWD 和 GMD 的特征向量几乎平行,因此 MWD 和 GMD 两个指标可以更好地揭示不同森林类型土壤团聚体稳定性(图 4)。



注: A 为由 PCA 产生的双标图; B 为每个主成分(PC)的解释方差; C 为保留主成分上每个变量的载荷条形图; D 为保留主成分上每个变量的贡献率条形图。

图 4 不同森林类型土壤团聚体稳定性变量的主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of soil aggregates stability variables in different forest types

3.5 影响土壤团聚体稳定性的因素

通过双因素方差分析发现森林类型和土层深度均显著影响团聚体稳定性指标的变化($p \leq 0.001$)(表 3)。Mantel-test 相关性分析发现, BD, NCP, TK, SOM, Clay 与各个稳定性指标存在显著相关,而 Sand 与 GMD, MWD, $WR_{>0.25}$ 呈显著相关,与 PAD 无显著相关性, CP 仅与 $WR_{>0.25}$ 呈显著相关, AN, AK, TN 仅与 PAD 呈显著正相关, pH, AP, Slit, TP 等指标则影响较弱(图 5)。

VPA 分析进一步发现土壤理化性质、土壤养分、土壤质地以及它们的相互作用解释了团聚体稳定性指标的 90.5%, 残差为 9.5%, 三者独立解释了团聚体稳定性的 24.8%, 14.1% 和 5.1%, 交互作用解释了

13.6%, 而土壤理化性质和养分的交互作用解释了 22.4%, 土壤养分和质地以及土壤理化性质和质地的交互作用对团聚体稳定性指标的解释较小, 仅为 9.3% 和 1.2%。

表 3 森林类型、土层深度及其交互作用对土壤团聚体稳定性的双因素方差分析

Table 3 Two-factor analysis of variance on soil aggregates stability with forest type, soil depth, and their interaction

指标	森林类型		土层深度		森林类型×土层深度	
	F	p	F	p	F	p
WSA	85.172	<0.001	28.920	<0.001	3.432	0.001
MWD	119.250	<0.001	50.072	<0.001	8.141	<0.001
GMD	88.070	<0.001	44.920	<0.001	5.969	<0.001
PAD	103.305	<0.001	140.469	<0.001	3.683	0.001

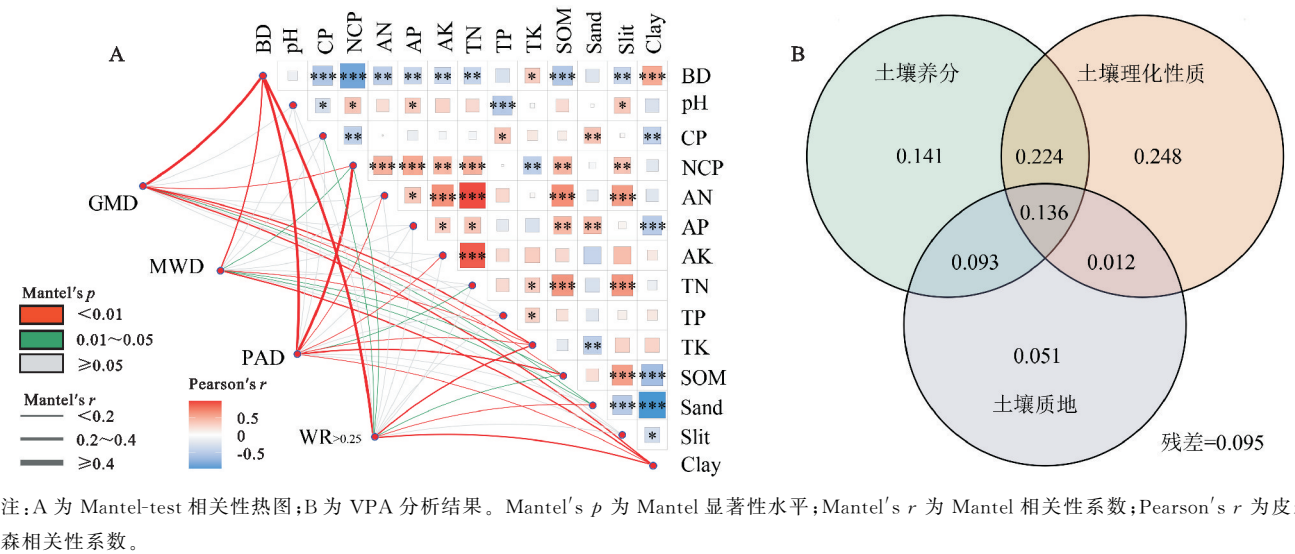


图 5 不同森林类型土壤团聚体稳定性指标的驱动因素分析

Fig. 5 Factor Analysis of Soil Aggregates Stability Indicators in Different Forest Types

4 讨论

4.1 森林类型对土壤团聚体分布的影响

本研究表明,与 3 个土层的林地类型相比,坡旱地大团聚体的比例显著降低,同时中、小团聚体的比例相对较高(图 1),这与 Tang 等^[27]的研究一致,说明人类长期机械耕作可能会导致土壤中的大团聚体破坏分解为小团聚体,使得坡旱地的团聚体稳定性较差(图 4),更容易发生水土流失。

同时不同森林类型可以显著影响土壤团聚体粒级的分布(图 1)。在 6 种森林类型中,云南松林、针阔混交林和次生常绿阔叶林的土壤团聚体粒级分布基本一致,华山松林和银荆林的大团聚体比例相对较小,中团聚体和小团聚体比例相对较大,旱冬瓜林的大团聚体比例相对更大,而中团聚体的比例更小。张乃木等^[5]发现云南松林团聚体以 <0.25 mm 和 $0.25 \sim 2$ mm 的粒级为主,占比均接近 40.00%,华山松林团聚体以 <0.25 mm 的粒级为主,占比 51.49%。吴丽芳等^[23]发现恢复 18 a 的石漠化区云南松人工纯林土壤团聚体质量百分比以 $0.25 \sim 2$ mm (41.69%) 为主,其次是 >2 mm 的 33.91%。

造成这种差异的原因可能与不同森林类型的林型结构、凋落物归还量、林下侵蚀强度差异有关。在次生常绿阔叶林、针阔混交林、旱冬瓜林内有更多根系和凋落物归还分解,从而在土壤中形成更多稳定化合物以及胶合剂^[28],更有利于大团聚体的形成,同时丰富的群落层次结构和地被层有助于减小雨滴的溅蚀和坡面片流的侵蚀^[16],从而有效保护大团聚体的形成和提升团聚体的整体稳定性,这一结果得到 Tang 等^[27]的支持。

4.2 森林类型和土层深度对土壤团聚体稳定性的影响

植物群落既能通过凋落物归还与分解,为土壤提供黏合剂、养分以及改变微生物群落结构,直接影响土壤团聚体的分布与稳定性,也能够通过影响土壤孔隙度、容重、温湿度等特性间接改变团聚体稳定性^[2]。在本研究中,坡旱地的团聚体稳定性最差,这可能是由于坡旱地长期维持单一种植模式、连作以及秸秆收获造成的。研究区坡旱地以种植玉米为主,玉米收获后秸秆会成为牛马等牲畜的饲料,Ghosh 等^[29]发现玉米和小麦轮作能够有效提高土壤团聚体稳定性和有机碳含量,特别是在贫瘠的土壤中;Miao 等^[30]指出,与连续种植玉米相比,秋季休耕有利于土壤结构稳定性和有机碳储存;Song 等^[31]研究则发现秸秆还田能够降低土壤容重和增加孔隙度,并促进大团聚体的形成。所以研究区坡旱地在未来应该以轮作和休耕相结合,并增加秸秆还田率,改善团聚体稳定性和土壤结构。

根据聚集体层次理论,大团聚体主要由植物残体、根系和根分泌物、菌丝和其他新鲜有机物以及矿物质颗粒组成^[32],所以与坡旱地相比,6 种森林类型的土壤团聚体稳定性相对较高,但由于凋落物蓄积量、养分归还和根系类型的不同^[16],所以各个森林类型之间依然存在显著差异(图 4)。云南松的年凋落物量大于华山松和次生常绿阔叶林^[33],但由于针叶凋落物分解速率较低^[34],次生常绿阔叶林的快速分解使得养分归还率更高,土壤有机质丰富,团聚体稳定性表现为云南松林小于次生常绿阔叶林,但是优于华山松林(图 2—4)。同时针阔混交林由于针叶凋落物与阔叶凋落物混合有助于增加凋落物的密度以及降低阔叶凋落物分解速率,较高的凋落物蓄积量有助

于减小侵蚀,维持土壤水分,所以团聚体更加稳定。旱冬瓜林由于树冠大、枝叶繁茂,根系丰富,能够快速提高土壤肥力,改善土壤结构^[35],所以其团聚体稳定性与次生常绿阔叶林以及针阔混交林接近。相关研究发现银荆和华山松林在土壤肥力^[36]以及凋落物层、土壤层的水文功能^[37]均好于旱冬瓜林和华山松林,但是团聚体稳定性在6种森林类型中较差,这可能与二者林下覆被层稀疏,表土层侵蚀较严重有关,图2和图3的团聚体稳定性指标也表明旱冬瓜林和华山松林表层团聚体稳定性较差,但中下层与其他森林类型差异较小。

无论是坡旱地还是森林,土壤团聚体稳定性均随着土层深度而降低(图2,图3),且与深层土壤相比,表层土壤团聚体稳定性的差异更大,卢华兴等研究发现土壤团聚体结构受林地类型、土层深度的影响显著($p<0.05$),且与不同粒级团聚体含量有相关性^[21]。这种表层高稳定性同时与Fakher^[38]、Liu等^[39]的研究一致,这反映了地表凋落物、土壤中死亡根系归还分解导致土壤更加肥沃,有机质、养分含量较高。

4.3 驱动不同森林土壤团聚体稳定性的因素

以往的研究表明土壤特性、环境因素以及土地利用类型均会影响团聚体稳定性^[40]。在本研究中,Mantel-test相关性分析揭示了土壤容重、非毛管孔隙度、全钾、SOM、砂粒和黏粒含量与土壤团聚体稳定性指标之间存在显著相关性(图5A)。SOM作为土壤团聚体的主要黏合剂,其含量越高越有助于大团聚体的形成,Li等^[16]的研究也发现SOM含量与土壤团聚体稳定性呈正相关关系,Xiao等^[9]的研究进一步确定了与团聚体相关的土壤有机质是维持团聚体稳定的重要因素。与SOM一样,BD、NCP与团聚体稳定性指标亦呈显著相关(图5A),Hu等^[41]的研究支持了该结果,其认为土壤毛管孔隙中的静电力和范德华力会导致团聚体分解,进而破坏其稳定性,所以当NCP较大时,对应的BD和CP相对较小,进而减小引起团聚体分解的内力,增加团聚体稳定性。

此外,本研究发现黏粒含量与团聚体稳定性密切相关,表明土壤颗粒差异对团聚体稳定性的作用,这些结果与部分研究一致^[42],高黏粒含量会控制有机质的分布和组成,进而促进大团聚体的形成,而砂粒含量过高可能会阻碍这一过程。与之前研究不同的是,本研究中砂粒含量与团聚体稳定性同样存在显著相关性,而粉砂粒含量对团聚体稳定性的影响可以忽略不计。VPA分析反映了土壤物理性质对团聚体稳定性指标的解释度最大(图5B),然而Tang等^[27]的研究发现土壤养分,如TN才是影响团聚体

稳定性的主要指标。在本研究中TK与团聚体稳定性指标的相关性强于TN,TN仅与PAD存在相关性($p<0.05$)(图5A),这可能是与滇中高原森林氮沉降较大,而受到钾元素的限制有关。

5 结论

6个森林类型土壤团聚体粒级均以0.25~2 mm为主,坡旱地0—20 cm土层以0.25~2 mm为主,20—60 cm土层以 <0.25 mm为主,不同土层上坡旱地和各个森林类型均表现为随深度增加稳定性减弱的趋势。总体而言,滇中地区的退耕还林有助于土壤团聚体稳定性的提升,但不同恢复树种及管理措施存在差异,银荆林和华山松林的团聚体稳定性较差,云南松林、旱冬瓜林相对较好,针阔混交林和次生常绿阔叶林最好。这种差异主要受土壤理化性质(容重和非毛管孔隙度)、养分(全钾和土壤有机质)、质地(砂粒和黏粒含量)的影响,三者的交互作用解释了土壤团聚体稳定性变化的13.6%,而土壤理化性质和养分独立解释了团聚体稳定性的24.8%和14.1%,二者交互作用的解释率为22.4%,土壤质地独立和理化性质、养分的交互作用分别解释了5.1%,1.2%,9.3%,说明土壤质地对团聚体稳定性的影响是与其他因素综合作用的结果。

参考文献(References):

- [1] Peng X H, Horn R, Hallett P. Soil structure and its functions in ecosystems: Phase matter & scale matter [J]. Soil and Tillage Research, 2015,146:1-3.
- [2] 刘亚龙,王萍,汪景宽.土壤团聚体的形成和稳定机制:研究进展与展望[J].土壤学报,2023,60(3):627-643.
Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(3):627-643.
- [3] Blankinship J C, Fonte S J, Six J, et al. Plant versus microbial controls on soil aggregate stability in a seasonally dry ecosystem[J]. Geoderma, 2016,272:39-50.
- [4] Han C, Song M X, Tang Q, et al. Post-farming land restoration schemes exhibit higher soil aggregate stability and organic carbon: Evidence in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Catena,2023,227:107099.
- [5] 张乃木,宋娅丽,王克勤.基于干、湿筛法下滇中森林土壤团聚体酶活性特征对氮沉降的响应[J].水土保持学报,2023,37(1):246-253.
Zhang N M, Song Y L, Wang K Q. Response of enzyme activity characteristics of forest soil aggregates to nitrogen deposition in central Yunnan based on dry and wet screening method[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(1):246-253.

- [6] 綦臻,范弢,陈进豪.滇东岩溶陷盆地地表/地下不同侵蚀场土壤的可蚀性[J].水土保持学报,2022,36(5):66-74.
- Qi C, Fan T, Chen J H. Soil erodibility of different surface and underground erosion fields in Karst Rift basin of eastern Yunnan[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(5):66-74.
- [7] 陈天,程瑞梅,王丽君,等.氮添加对马尾松人工林土壤团聚体氮矿化及土壤酶活性的影响[J].生态学报,2023,43(16):6528-6538.
- Chen T, Cheng R M, Wang L J, et al. Effects of nitrogen addition on the mineralization and enzymatic activities with in soil aggregates in *Pinus massoniana* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(16):6528-6538.
- [8] Demenois J, Rey F, Ibanez T, et al. Linkages between root traits, soil fungi and aggregate stability in tropical plant communities along a successional vegetation gradient [J]. Plant and Soil, 2018,424(1):319-334.
- [9] Xiao L, Yao K H, Li P, et al. Increased soil aggregate stability is strongly correlated with root and soil properties along a gradient of secondary succession on the Loess Plateau[J]. Ecological Engineering, 2020,143:105671.
- [10] Gould I J, Quinton J N, Weigelt A, et al. Plant diversity and root traits benefit physical properties key to soil function in grasslands[J]. Ecology Letters, 2016,19(9):1140-1149.
- [11] Kumar A, Dorodnikov M, Splettstößer T, et al. Effects of maize roots on aggregate stability and enzyme activities in soil[J]. Geoderma, 2017,306:50-57.
- [12] Steinbeiss S, Beßler H, Engels C, et al. Plant diversity positively affects short-term soil carbon storage in experimental grasslands[J]. Global Change Biology, 2008,14(12):2937-2949.
- [13] Eisenhauer N, Bessler H, Engels C, et al. Plant diversity effects on soil microorganisms support the singular hypothesis[J]. Ecology, 2010,91(2):485-496.
- [14] Mori A S, Isbell F, Cadotte M W. Assessing the importance of species and their assemblages for the biodiversity-ecosystem multifunctionality relationship [J]. Ecology, 2023,104(8): e4104.
- [15] Barto E K, Alt F, Oelmann Y, et al. Contributions of biotic and abiotic factors to soil aggregation across a land use gradient[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010,42(12):2316-2324.
- [16] Li H Q, Zhu H S, Liang C L, et al. Soil erosion significantly decreases aggregate-associated OC and N in agricultural soils of Northeast China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022,323:107677.
- [17] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability: A literature analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009,41(1):1-12.
- [18] Saedi T, Shorafa M, Gorji M, et al. Indirect and direct effects of soil properties on soil splash erosion rate in calcareous soils of the central Zagross, Iran: A laboratory study[J]. Geoderma, 2016,271:1-9.
- [19] Liu J F, Hu F N, Xu C Y, et al. Specific ion effects on soil aggregate stability and rainfall splash erosion[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2022,10(4):557-564.
- [20] Ayoubi S, Milikian A, Mosaddeghi M R, et al. Impacts of clay content and type on shear strength and splash erosion of clay-sand mixtures [J]. Minerals, 2022,12(11):1339.
- [21] 卢华兴,赵洋毅,段旭,等.滇中亚高山林地土壤团聚体结构及其对优先路径的影响[J].林业科学研究,2022,35(6):23-34.
- Lu H X, Zhao Y Y, Duan X, et al. Soil aggregate structure of subalpine woodland and its influence on priority path in central Yunnan[J]. Forest Research, 2022,35(6):23-34.
- [22] 杨馥羽,陈奇伯,黎建强,等.计划烧除对云南松林土壤抗蚀和抗冲性的影响[J].浙江农林大学学报,2023,40(1):188-197.
- Yang F Y, Chen Q B, Li J Q, et al. Effect of prescribed burning on soil anti-erodibility and anti-scourability of *Pinus yunnanensis* forest[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2023,40(1):188-197.
- [23] 吴丽芳,王妍,刘云根,等.岩溶石漠化区人工植被类型对土壤团聚体生态化学计量特征的影响[J].东北林业大学学报,2021,49(6):63-69.
- Wu L F, Wang Y, Liu Y G, et al. Effects of artificial vegetation type on the ecological stoichiometric characteristics of soil aggregates in Karst rocky desertification areas[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021,49(6):63-69.
- [24] 杨济达,伏成秀,朱红业,等.基于不同深翻年限土壤团聚体空间分异与稳定性研究[J].西南农业学报,2022,35(12):2843-2849.
- Yang J D, Fu C X, Zhu H Y, et al. Spatial variation and stability of soil aggregates based on different deep turning years[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022,35(12):2843-2849.
- [25] 杨继芬,李永梅,李春培,等.大豆玉米间作提高红壤团聚体中真菌群落结构和多样性[J].植物营养与肥料学报,2023,29(5):889-899.
- Yang J F, Li Y M, Li C P, et al. Soybean-corn intercropping increases fungal community structure and diversity

- in red soil aggregates[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023,29(5):889-899.
- [26] 范家伟,朱广宇,上官周平,等.黄土丘陵区刺槐林土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性动态变化[J].水土保持学报,2023,37(3):19-26.
- Fan J W, Zhu G Y, Shanguan Z P, et al. Dynamics changes of soil aggregate stability and soil erodibility of *Robinia pseudoacacia* plantations in hilly region of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(3):19-26.
- [27] Tang X, Qiu J C, Xu Y Q, et al. Responses of soil aggregate stability to organic C and total N as controlled by land-use type in a region of South China affected by sheet erosion[J]. Catena,2022,218:106543.
- [28] Zeng Q C, Darboux F, Man C, et al. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau(China)[J]. Catena, 2018,167:276-283.
- [29] Ghosh S, Benbi D K. Impacts of cropping systems on soil aggregates and associated carbon and nitrogen storage in four entisols of different antecedent carbon levels [J]. Eurasian Soil Science, 2023,56(3):371-386.
- [30] Miao S J, Qiao Y F, Li P, et al. Fallow associated with autumn-plough favors structure stability and storage of soil organic carbon compared to continuous maize cropping in Mollisols[J]. Plant and Soil, 2017, 416(1):27-38.
- [31] Song K, Yang J J, Xue Y, et al. Influence of tillage practices and straw incorporation on soil aggregates, organic carbon, and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. Scientific Reports, 2016,6:36602.
- [32] Spohn M, Giani L. Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011,43(5):1081-1088.
- [33] 施昀希,黎建强,陈奇伯,等.滇中高原5种森林类型凋落物及营养元素储量研究[J].生态环境学报,2018,27(4):617-624.
- Shi Y X, Li J Q, Chen Q B, et al. Litterfall accumulation and nutrient content in five forest ecosystems in central Yunnan Plateau[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018,27(4):617-624.
- [34] Ni X Y, Lin C F, Chen G S, et al. Decline in nutrient inputs from litterfall following forest plantation in subtropical China[J]. Forest Ecology and Management, 2021,496:119445.
- [35] 单梦颖,杨永刚,吴兆录.云南省中部3种森林土壤含水率、容重和细根重及其垂直分布[J].云南地理环境研究,2013,25(4):38-44.
- Shan M Y, Yang Y G, Wu Z L. Soil moisture content, bulk density and fine root weight as well as their vertical distribution in soils of three forest types in the central Yunnan Province[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2013,25(4):38-44.
- [36] 李品荣,孟广涛,方向京,等.滇中不同植被恢复模式下土壤肥力变化趋势研究[J].水土保持研究,2012,19(6):90-93.
- Li P R, Meng G T, Fang X J, et al. Study on change trends of soil fertility under different vegetation recovery modes in central Yunnan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012,19(6):90-93.
- [37] 刘芝芹,郎南军,彭明俊,等.云南高原金沙江流域森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J].水土保持学报, 2013,27(3):165-169,173.
- Liu Z Q, Lang N J, Peng M J, et al. Hydrological effects of forest litters layer and soil layer in Jinsha River watershed of Yunnan Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013,27(3):165-169,173.
- [38] Abbas F, Zhu Z L, An S S. Evaluating aggregate stability of soils under different plant species in Ziwuling Mountain Area using three renowned methods[J]. Catena, 2021,207:105616.
- [39] Liu Sui Y H, Zhu X P, Li D P, et al. Soil aggregate and intra-aggregate carbon fractions associated with vegetation succession in an alpine wetland of Northwest China[J]. Catena,2019,181:104107.
- [40] Nciizah A D, Wakindiki I I C. Physical indicators of soil erosion, aggregate stability and erodibility[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2015,61(6):827-842.
- [41] Hu F N, Liu J F, Xu C Y, et al. Soil internal forces initiate aggregate breakdown and splash erosion[J]. Geoderma, 2018,320:43-51.
- [42] Schweizer S A, Bucka F B, Graf-Rosenfellner M, et al. Soil microaggregate size composition and organic matter distribution as affected by clay content[J]. Geoderma, 2019,355:113901.