

DOI: 10.5846/stxb202204211092

蔡琳, 杨予静, 种玉洁, 袁义平, 曾翔宇, 姚和风, 陈初明, 李中强, 魏立飞, 余海燕. 亚热带退化森林不同恢复方式对土壤团聚体胶结物质及稳定性的影响. 生态学报, 2023, 43(9): 3689-3698.

Cai L, Yang Y J, Chong Y J, Yuan Y P, Zeng X Y, Yao H F, Chen C M, Li Z Q, Wei L F, Yu H Y. Effects of different restoration approaches of subtropical degraded forests on bonding materials and stability of soil aggregate. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3689-3698.

亚热带退化森林不同恢复方式对土壤团聚体胶结物质及稳定性的影响

蔡琳¹, 杨予静^{1,*}, 种玉洁¹, 袁义平¹, 曾翔宇¹, 姚和风¹, 陈初明², 李中强¹, 魏立飞¹, 余海燕²

¹ 湖北大学, 资源环境学院, 区域开发与环境响应湖北省重点实验室, 武汉 430062

² 湖北省黄冈市罗田县大别山薄刀峰国有林场, 黄冈 438600

摘要: 退化森林的恢复一直是林业和生态学研究的热点。良好的森林土壤结构有助于林木生长发育, 作为土壤最基本的结构单元, 土壤团聚体组成和稳定性是衡量土壤肥力和质量的重要指标, 其团聚结构的形成依靠土壤胶结物质。然而, 土壤胶结物质与团聚体稳定性之间的关系尚不确定。为探明亚热带退化森林的不同恢复方式对团聚体稳定性的影响及其潜在机制, 以自然恢复的次生林为对照(CK), 选取了亚热带三种常见的人工林: 一代杉木林(P1)、二代杉木林(P2)和黄山松林(P3), 测定土壤团聚体稳定性及其胶结物质的含量, 并分析了各胶结物质对团聚体稳定性的影响。研究发现: 不同森林恢复方式显著影响了土壤 pH 值、碳氮比、速效磷含量、团聚体的组成和稳定性。所有森林类型中, 三种人工林的团聚体稳定性显著高于 CK, P2 的大团聚体所占比例最大, 团聚体稳定性最高。恢复方式显著影响了土壤游离氧化铁含量、菌根密度和易提取球囊霉素相关土壤蛋白(EEG)含量。团聚体稳定性与游离氧化铁含量、菌根密度呈正相关, 但与 EEG 含量呈负相关。研究结果表明, 亚热带退化森林的人工恢复比自然恢复更有助于增强土壤团聚体稳定性, 土壤游离氧化铁、菌根密度和 EEG 是显著影响团聚体稳定性的胶结物质。

关键词: 土壤团聚体稳定性; 土壤游离氧化铁、铝; 球囊霉素相关土壤蛋白; 森林恢复方式; 亚热带森林

Effects of different restoration approaches of subtropical degraded forests on bonding materials and stability of soil aggregate

CAI Lin¹, YANG Yujing^{1,*}, CHONG Yujie¹, YUAN Yiping¹, ZENG Xiangyu¹, YAO Hefeng¹, CHEN Chuming², LI Zhongqiang¹, WEI Lifei¹, YU Haiyan²

¹ Hubei Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response, Faculty of Resources and Environmental Sciences, Hubei University, Wuhan 430062, China

² Bodaofeng Forest Farm, Luotian County, Huanggang 438600, China

Abstract: The restoration of degraded forest has been a hot topic in forestry and ecology. As a basic structural unit of soil, soil aggregate composition and stability are important indicators of soil fertility and quality, and the formation of soil aggregate relies on aggregate bonding materials. However, the relationship between aggregate bonding materials and aggregate stability is uncertain. To explore the effects of different restoration approaches of degraded subtropical forests on aggregate stability and its underlying mechanisms, we compared the secondary forest (natural restoration) as a control

基金项目: 国家自然科学基金(32001298); 湖北省教育厅重点项目(D20201001); 大学生创新训练项目(S202110512085)

收稿日期: 2022-04-21; **网络出版日期:** 2022-10-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yyzh158@hubei.edu.cn

(CK), with three different common subtropical plantations which were: (1) first-generation *Cunninghamia lanceolata* (P1), (2) second-generation *C. lanceolata* (P2), and a *Pinus taiwanensis* plantation (P3). We measured the aggregate stability and the contents of different aggregate bonding materials, and then analyzed the influence of these materials on soil aggregate stability. Results showed that forest restoration approach significantly affected soil pH, C/N, available phosphorus, as well as the composition and stability of aggregate. Among all the forests, the aggregate stability was significantly lower in CK than in the other three plantations, and P2 had the greatest proportion of large aggregates and the highest aggregate stability. The forest restoration approach also significantly affected soil free Fe oxide content, mycorrhizal density, and easily extractable glomalin-related soil protein (EEG). Aggregate stability was positively correlated with free Fe oxide content and mycorrhizal density, but negatively correlated with EEG. For subtropical degraded forests, the results indicated that artificial restoration was better than natural restoration to enhance soil aggregate stability, with soil free Fe oxide, mycorrhizal density and EEG being the main bonding materials that significantly affected the aggregate stability.

Key Words: soil aggregate stability; soil free Fe and Al oxides; glomalin-related soil protein; forest restoration; subtropical forests

近年来,对退化森林的恢复已成为全球广泛关注的林学和生态学问题^[1]。与自然恢复相比,次生林的人工恢复因具有生长快、集约性强、获得效益早等特点而得到了广泛应用^[2]。我国是世界人工林面积最大的国家^[3],人工针叶林因经营周期短、短期内能收获较大效益等特点而被长期用于人工恢复种植,其中杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国主要人工针叶树种,通常采用轮伐的经营模式^[4]。作为森林生态系统重要组成部分之一,土壤是植物生长所需营养物质的储存库,对林内植物的生长发育有重要影响。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,结构良好且稳定的团聚体可维持土壤肥力、减缓土壤侵蚀^[5]。通常用 >0.25 mm 团聚体的数量($R_{0.25}$)、团聚体平均重量直径(mean weight diameter, MWD)表征团聚体结构的稳定性^[6]。目前已有大量研究探究了森林恢复对地上植被组成和多样性^[7]、土壤理化性质^[8-9]、土壤微生物^[10]的影响,但关于森林恢复对团聚体稳定性影响的研究尚少。因此,研究不同森林恢复方式下团聚体的稳定性有助于阐明森林恢复对土壤结构的影响,为森林地下生态过程提供新的见解。

土壤中的团聚体胶结物质是土壤团聚体形成和稳定的基础^[11],可分为非生物的和生物的,前者主要包括铁铝氧化物^[12],主要促进土壤颗粒之间聚集形成稳定的团聚体^[13]。生物胶结物质,如菌根和丛枝菌根真菌菌丝分泌的球囊霉素相关土壤蛋白(glomalin-related soil protein, GRSP)也备受关注^[14]。约85%树木根系能形成菌根^[15],菌根可以连接和粘合土壤颗粒,从而提高团聚体稳定性^[16]。GRSP则通过粘结土壤矿物颗粒而形成大团聚体,以此来增加 >0.25 mm 团聚体数量和MWD^[17]。有研究表明,GRSP含量和类型会显著影响团聚体稳定性^[22],但也有人认为GRSP对MWD的影响不显著^[18]。此外,以往研究多从单一因素分析团聚体及其稳定性对外界变化的响应^[19],缺乏多角度的综合分析。因此,研究森林恢复中与团聚体有关的主要胶结物质含量,有助于提升团聚体的稳定性和土壤质量,从而为退化森林的恢复提供科学依据。

鉴于森林恢复对土壤团聚体稳定性的影响尚不清楚,胶结物质对团聚体形成的作用尚不明确,哪种胶结物质对团聚体的形成和稳定性起主要作用仍需进一步探究。亚热带是我国森林分布的主要区域。由此,本研究以自然恢复的次生林作为对照,选取3种人工林,即一代杉木人工林、二代杉木人工林、黄山松(*Pinus taiwanensis*)人工林(其中黄山松是研究区域主要的地带性针叶树种),旨在探究亚热带退化森林的不同恢复方式对团聚体结构及其稳定性的影响。本文假设,(1)退化森林的人工恢复比自然恢复的团聚体稳定性更高;(2)由于亚热带土壤含有较多金属氧化物、树种常形成菌根,所以铁铝氧化物、菌根密度、GRSP是影响亚热带森林恢复中团聚体稳定性的主要因素,并共同作用于团聚体稳定性。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于大别山风景区,湖北黄冈罗田薄刀峰国有林场(30°10'E—32°30'E, 112°40'N—117°10'N),属亚热带季风气候。年平均气温为 12.5℃,极端最高气温为 37.1℃,极端最低气温为-16.7℃,年平均降水量 1832.8 mm,平均相对湿度 79%,年平均日照时数 1400—1600h。母岩由花岗岩、片麻岩组成,土壤为黄棕壤,砂粒(0.05—2.0 mm)、粉粒(0.002—0.05 mm)和粘粒(<0.002 mm)含量分别为 45.9%、39.3%和 14.8%。

由于一场大火,该区森林经历了漫长的退化历史。20 世纪 60 年代后,开始人工栽种针叶林^[20]。根据实地踏查,该区以杉木、黄山松、马尾松(*Pinus massoniana*)为主;阔叶林很少,主要树种是集中在居民区旁的青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)和山槐(*Albizia kalkora*)。恢复的森林除了正常的人工林管理外,通过禁止采伐、薪柴采集和家养放牧以免受人为干扰。

1.2 样地设置与样品采集

本研究以自然恢复的次生林(CK)为对照,选择 3 种不同恢复方式的人工林,即一代杉木人工林(P1)、二代杉木人工林(P2)和黄山松人工林(P3),每种森林 3 个重复(表 1)。在以上森林类型中分别设置 3 个 20×20 m 的固定样地(彼此距离 50 m 以上)。各森林均在 20 世纪 50 年代末期遭遇大火,在火烧迹地上发展而成。除自然恢复的 CK 外,人工林均在 1960 年左右开始栽种。具体而言,CK 在大火后自然演替生长,恢复过程中未受任何人为活动干扰,主要优势种为青冈栎,伴生有马尾松、黄山松等。P1 在 1960 年左右栽植杉木,P2 和 P3 则是在 P1 第一个轮伐期结束时(约 1997 年),皆伐原有杉木后,分别栽植杉木和黄山松而形成的二代杉木人工林和黄山松人工林。P1、P2 和 P3 栽种后 3—4 年,只进行过一次造林管理,主要包括抚育和疏伐林下植被。至 2020 年 10 月土壤采样时,CK、P1、P2 和 P3 的恢复年限约为 60a。

表 1 样地概况

Table 1 The overview of the different forests

	森林恢复方式 Forest restoration approach			
	CK	P1	P2	P3
经度 Longitude	115°35'34.16"	115°35'08.53"	115°35'13.03"	115°35'11.81"
纬度 Latitude	31°07'50.19"	31°06'45.88"	31°06'51.14"	31°06'53.49"
海拔 Elevation/m	846	1079	1088	1110
坡向坡度 Slope aspect	N5°E	N6°E	N3°E	N5°E
平均树高 Average height/m	20.13±4.22	23.57±1.45	19.35±2.36	21.06±7.81
平均胸径 Average DBH/cm	14.62±4.55	20.53±2.16	18.72±1.81	12.45±2.36
林分密度 Density/(株/hm ²)	1541±12	1675±43	1569±56	1632±34
郁闭度 Canopy density	0.65	0.60	0.60	0.60
林下植被盖度 Coverage/%	40±4	45±3	48±3	57±5
主要林下植被 Main understory vegetation	盐肤木(<i>Rhus chinensis</i>)、山胡椒(<i>Lindera glauca</i>)、莢蒾(<i>Viburnum erosum</i>)、钩藤(<i>Uncaria rhynchophylla</i>)	山胡椒、紫藤(<i>Wisteria sinensis</i>)、盐肤木、欆木(<i>Loropetalum chinense</i>)	盐肤木、展毛野牡丹(<i>Melastoma normale</i>)、莢蒾、欆木	展毛野牡丹、钩藤、小通花(<i>Stachyurus chinensis</i>)、杜茎山(<i>Maesa japonica</i>)

DBH:胸径 diameter at breast height;CK:次生林 secondary forest;P1:一代杉木林 first-generation of *Cunninghamia lanceolata* plantation;P2:二代杉木林 second-generation of *C. lanceolata* plantation;P3:黄山松林 *Pinus taiwanensis* plantation

2020 年 10 月对各样地 0—10 cm 土壤进行取样。每次取样时,每个样地用环刀随机采集原状土壤样品 4 个用于测定土壤容重,用 HH2 水分仪(Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK)测量土壤水分和温度。每个样地中用土钻随机收集 6 个土芯,剔除其中植物根系、碎石和动植物残体,混合均匀后风干,用于测定土壤团聚体

结构、理化性质和其他相关指标。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤理化性质、团聚体结构的测定

采用环刀法测定土壤容重和质量含水量。采用电位计法(土:水=1:2.5)测定土壤 pH 值。采用元素分析仪(Vario Macro Cube, Elementar Analysensysteme GmbH, Germany)测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)含量,分别采用碱熔-钼锑抗比色法和双酸浸-钼锑抗比色法测定土壤全磷(TP)和速效磷(AP)含量^[21]。

采用湿筛法^[22]测定团聚体结构,即将沿自然纹理掰开过 8 mm 筛原状风干土壤样品放在团粒分析仪套筛桶内 2 mm 筛子上,用水浸湿 5 min 后,上下移动 10 min,升降 3 cm,30 次/min,以获得 >2 mm、1—2 mm、0.25—1 mm、<0.25 mm 水稳性团聚体。留在筛子上的各级团聚体在 60—70℃ 烘干称重,计算各粒径团聚体的质量分数、>0.25 mm 团聚体比例($R_{0.25}/\%$)、团聚体平均重量直径(MWD/mm),如下:

$$R_{0.25/\%} = \frac{W_{r>0.25}}{W_r} \times 100$$

$$\text{MWD} = \sum_i^n \bar{d} \times m_i$$

式中, $W_{r>0.25}$ 为>0.25 mm 团聚体质量之和; W_r 为各粒径团聚体质量总和; i 为第 i 级团聚体; n 为团聚体总级数, $n=4$; \bar{d} 为第 i 级团聚体颗粒的平均直径; m_i 为第 i 级团聚体的质量分数。

1.3.2 土壤团聚体生物、非生物胶结物质含量的测定

游离氧化铁和游离氧化铝含量采用 DCB 提取法测定^[22],即用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠提取后再用 ICP-OES(ThermoFisher, USA)测定待测液中的 Fe 和 Al 含量,计算得出样品中游离氧化铁和游离氧化铝含量。

菌根密度采用曲利苯蓝染色—方格交叉法测定^[23],即过 2 mm 筛的 4 g 土壤样品混合 100 mL 水和 12 mL 3.7%六偏磷酸钠溶液,经振荡 30 s 后静置 2.5 min,过 0.05 mm 筛,收集筛上过滤物于 0.22 μm 微孔滤膜抽滤,曲利苯蓝染色制片后显微镜下观测。根据菌丝与方格网线交叉点计数计算菌丝密度。

GRSP 根据 Wright 的方法采用考马斯亮蓝比色法进行测定^[24]。参考以往研究^[25]分别测定总球囊霉素相关土壤蛋白(total glomalin-related soil protein, TG)和易提取球囊霉素相关土壤蛋白(easily extractable glomalin-related soil protein, EEG)含量。采用 TG 与 EEG 的差值作为难提取球囊霉素相关土壤蛋白(difficultly extractable glomalin-related soil protein, DEG)含量。

1.4 数据分析与统计

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan 多重比较检验不同森林恢复方式间土壤理化性质、土壤团聚体结构、MWD、铁铝氧化物、菌根密度、GRSP 各组分的差异。方差分析前分别采用 Shapiro-Wilks 和 Hartley's F 检验确定数据正态性和方差齐性。利用 R 软件“Vegan”包的“varpart”函数进行方差分解分析(VPA)检验团聚体生物与非生物胶结物质对研究区团聚体稳定性的相对贡献。采用冗余分析(RDA)判断影响团聚体稳定性的主要胶结物质。采用线性回归模型确定各团聚体胶结物质与 MWD 之间的正负相关关系。所有分析和绘图分别在 R 和 Origin 2018 中进行,显著性设为 $P<0.05$ 水平。图表中数据为平均值±标准差。

2 结果

2.1 森林恢复对土壤理化性质的影响

森林恢复方式显著影响土壤温度、pH 值、C/N 和 AP($P<0.05$),而对土壤含水量、容重、TC、TN、TP、TK 和 AK 无显著影响($P>0.05$,表 2)。不同森林恢复方式中,CK 土壤 AP 含量最高、C/N 最低。

2.2 森林恢复对团聚体结构及稳定性的影响

不同恢复方式显著影响团聚体质量分数和团聚体稳定性(表 3)。研究区域团聚体以 >0.25 mm 为主(占

98%以上), <0.25 mm 的微团聚体仅占 1.01%—1.74%。与 CK 相比, 森林的人工恢复显著提高了 >2 mm 团聚体比例($P<0.05$)。同时, P1、P2 和 P3 的 MWD 分别比 CK 显著增加了 8.6%、13.8% 和 19.3% ($P<0.05$), P2 的 MWD 比 P1 高 4.7% ($P<0.05$), 但 P3 与 P1 和 P2 之间的差异分别不显著 ($P>0.05$)。

表 2 森林恢复方式对土壤理化性质的影响

Table 2 Effect of forest restoration on soil physicochemical properties

土壤性质 Soil properties	森林恢复方式 Forest restoration approach				F	P
	CK	P1	P2	P3		
质量含水量 SM/%	16.43±3.98a	16.31±1.34a	18.35±2.34a	15.53±1.40a	0.229	ns
温度 ST/°C	11.39±0.56b	14.68±0.43a	13.63±0.48a	15.07±0.24a	13.791	0.002
pH 值	5.05±0.06ab	5.20±0.05ab	5.39±0.19a	4.73±0.11b	6.027	0.019
容重 BD/(g/cm ³)	1.15±0.11a	0.98±0.03a	1.10±0.09a	0.75±0.02a	0.935	ns
有机碳 SOC/(g/kg)	64.85±3.27a	59.65±13.90a	49.12±2.57a	68.24±6.68a	1.092	ns
总氮 TN/(g/kg)	5.61±0.24a	4.25±0.66a	3.47±0.25a	4.56±0.47a	4.018	ns
碳氮比 C/N	11.55±0.20b	13.72±0.99ab	14.21±0.29ab	15.02±0.44a	6.774	0.014
全磷 TP/(g/kg)	0.94±0.17a	0.86±0.11a	0.62±0.05a	0.63±0.05a	2.341	ns
速效磷 AP/(mg/kg)	11.8±0.35a	7.99±3.94ab	4.31±0.90b	2.61±0.32b	4.051	0.050

SM: 土壤质量含水量 soil moisture; ST: 土壤温度 soil temperature; BD: 容重 bulk density; SOC: 土壤有机碳 soil organic carbon; TN: 总氮 total nitrogen; C/N: 碳氮比 ratio of SOC to TN; TP: 全磷 total phosphorus; AP: 速效磷 available phosphorus; 不同小写字母表示不同恢复方式的森林土壤性质在 $P<0.05$ 水平差异显著, ns 表示 $P>0.05$

表 3 森林恢复方式对团聚体结构和稳定性的影响

Table 3 Effect of forest restoration on aggregate structure and stability

森林恢复方式 Forest restoration approach	团聚体质量分数 Mass fraction of each aggregate/%				$R_{0.25}/\%$	平均重量直径 MWD/mm
	>2 mm	1—2 mm	0.25—1 mm	<0.25 mm		
CK	62.06±2.44c	15.60±0.34a	20.59±1.88a	1.75±0.22a	98.26±0.22a	3.47±0.11c
P1	69.13±0.47b	13.61±0.07b	16.04±0.52b	1.22±0.02a	98.78±0.02a	3.76±0.02b
P2	78.89±1.99a	7.53±0.92c	12.58±1.25b	1.00±0.18a	98.99±0.18a	4.14±0.08a
P3	73.68±1.03ab	11.93±0.19b	12.72±1.05b	1.68±0.22a	98.32±0.22a	3.94±0.04ab
F	18.257	47.245	8.796	3.976	3.977	16.787
P	0.001	0.001	0.007	ns	ns	0.001

$R_{0.25}$: >0.25 mm 团聚体的数量 number of >0.25 mm aggregate; MWD: 团聚体平均重量直径 mean weight diameter; 不同小写字母表示不同恢复方式的森林土壤团聚体稳定性在 $P<0.05$ 水平差异显著, ns 表示 $P>0.05$

2.3 森林恢复对团聚体胶结物质含量的影响

森林恢复方式显著影响除了游离氧化铝、TG 之外的团聚体胶结物质含量 ($P<0.05$, 图 1)。在非生物胶结物质中, 3 种人工林土壤游离氧化铁含量均显著高于对照 ($P<0.05$), 且 P2 与 P3 之间无显著差异 ($P>0.05$)。对于生物胶结物质, 与 CK 相比, P1 和 P3 的菌根密度略有增加 ($P>0.05$), 但 P2 则有显著增加 ($P<0.05$)。与之相反, P1、P2、P3 的 EEG 较 CK 分别显著下降 5.1%、11.3%、26.8% ($P<0.05$)。P1 和 P3 土壤中 DEG 含量显著高于 CK 或 P2 ($P<0.05$)。

2.4 非生物和生物因素对团聚体稳定性的影响

VPA 结果表明, 研究区团聚体各胶结物质及其交互作用对团聚体稳定性的总贡献率达 72.08% (图 2)。团聚体非生物胶结物质、生物胶结物质单独解释了 21.66% 和 10.76% 的团聚体稳定性变异, 非生物和生物胶结物质的交互作用解释了团聚体稳定性变异的 39.66%, 仍有 27.92% 的团聚体稳定性变异未能被解释。同时, RDA 表明, 团聚体非生物和生物因素共同解释了 $R_{0.25}$ 和 MWD 的变异。其中, 游离氧化铁、菌根密度、EEG 是显著影响 $R_{0.25}$ 和 MWD 的主要因子 ($P<0.05$) (图 3、表 4)。

相关分析表明, MWD 与游离氧化铁含量和菌根密度呈显著正相关 ($P<0.05$), 与 EEG 呈显著负相关 ($P<0.05$), 但 MWD 与游离氧化铝、TG 和 DEG 的相关性不显著 ($P>0.05$, 图 4)。

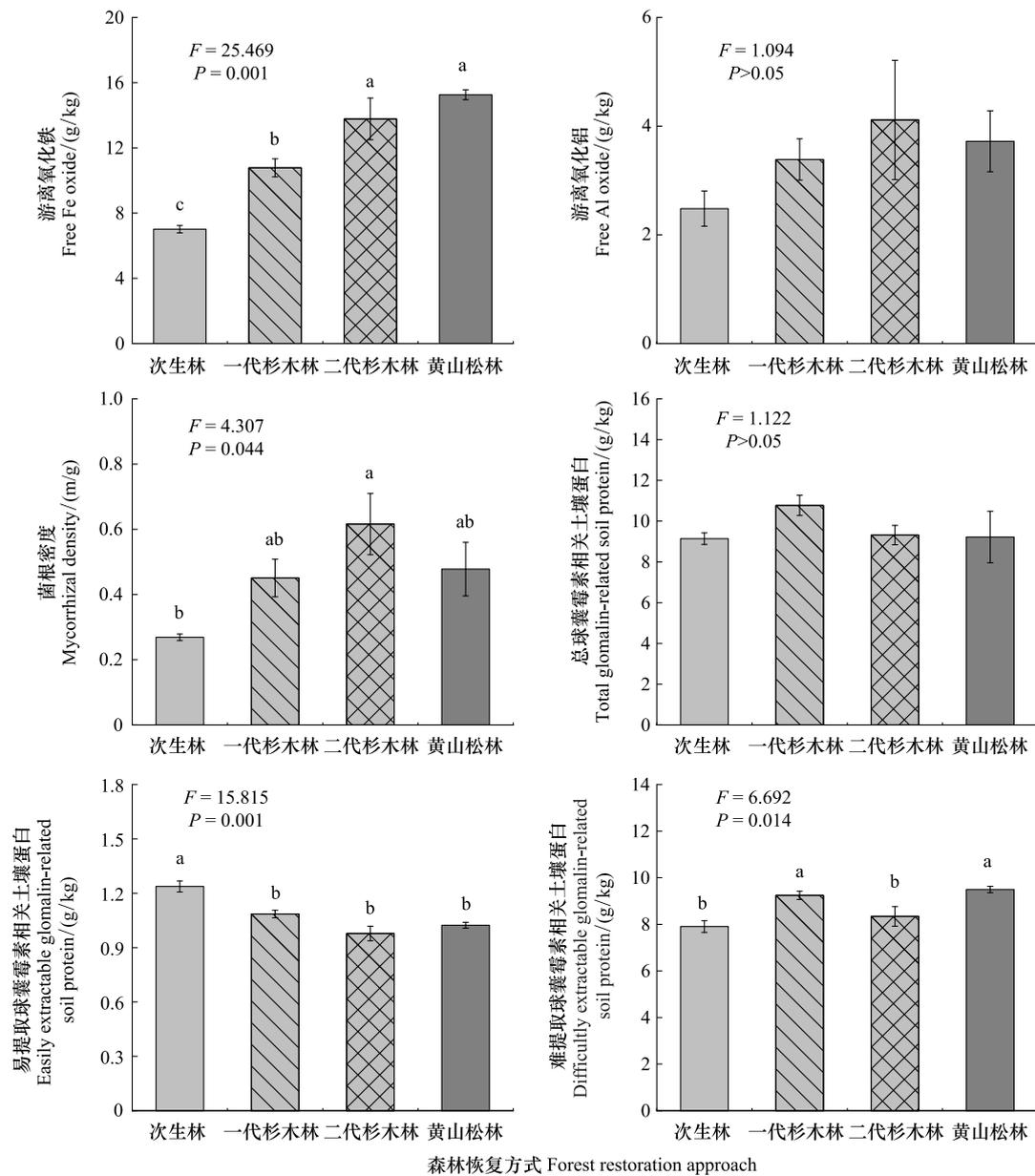


图1 森林恢复方式对土壤游离氧化铁、游离氧化铝、土壤菌根密度、总球囊霉素相关土壤蛋白、易提取球囊霉素相关土壤蛋白、难提取球囊霉素相关土壤蛋白含量的影响

Fig.1 Effects of forest restoration on soil free Fe oxide, free Al oxide, mycorrhizal density, total glomalin-related soil protein, easily extractable glomalin-related soil protein and difficultly extractable glomalin-related soil protein contents

不同小写字母表示不同恢复方式的森林土壤团聚体胶结物质在 $P < 0.05$ 水平差异显著

3 讨论

3.1 森林恢复方式对团聚体稳定性和理化性质的影响

各粒级团聚体在土壤中的比例和稳定性在一定程度上可以反映土壤结构的好坏。通常, $R_{0.25}$ 和 MWD 越大, 土壤团聚程度越好, 稳定性和抗侵蚀能力越强^[26]。本研究表明, 与自然恢复的次生林相比, 人工恢复后土壤团聚体稳定性更高, 主要表现在人工林具有比次生林更多的土壤大团聚体和较高的 MWD (表 3)。3 种人工林中, 二代杉木林大团聚体含量和 MWD 均大于没有进入轮伐期的黄山松和一代杉木人工林, 说明长期经营的杉木林的土壤稳定性较强^[27]。这与以往研究中, 杉木人工林土壤主要以 $>0.25\text{mm}$ 团聚体为主, 相较于

表 4 RDA 分析中团聚体胶结物质对团聚体稳定性的解释率

Table 4 Interpretation rate of aggregate bonding material on aggregate stability in RDA

团聚体胶结物质 Aggregate bonding material	解释量 Explains/%	贡献率 Contribution/%	P
游离氧化铁 Free Fe oxide	33.1	35.9	0.001
菌根密度 Mycorrhizal density	20.6	22.4	0.004
易提取球囊霉素相关土壤蛋白 EEG	19.2	20.1	0.001
游离氧化铝 Free Al oxide	8.3	9.1	ns
总球囊霉素相关土壤蛋白 TG	8.3	8.6	ns
难提取球囊霉素相关土壤蛋白 DEG	3.7	3.9	ns

EEG:易提取球囊霉素相关土壤蛋白 easily extractable glomalin-related soil protein;TG:总球囊霉素相关土壤蛋白 total glomalin-related soil protein;DEG:难提取球囊霉素相关土壤蛋白 difficultly extractable glomalin-related soil protein

其他人工林土壤团聚度更强的结果一致^[4, 28]。这可能是由于杉木人工林的根系多且分布深,而根系通过穿插挤压和缠绕等物理作用促进了大团聚体的形成。同时,轮伐结束后,上代林地的腐殖质层保留了土壤养分的积累,使土壤微粒与氧化物粘连形成大团聚体^[4]。由此看出,退化森林的人工恢复比自然恢复更利于增强团聚体稳定性,这验证了本文的假设 1。

此外,森林恢复方式显著影响了土壤 AP 和 C/N (表 2)。相较而言,人工林土壤 pH 和 AP 较低。土壤 pH 值与 AP 含量有关,针叶林在发育中产生大量内源酸,加剧土壤酸化^[29]。酸性环境下,土壤中存在的铁、铝、锰等离子,对磷有较强的固定作用^[30],从而降低土壤磷的有效性。本研究黄山松人工林的林龄最小,处于植物生长幼年期对 AP 需求量大^[15],也是其土壤 AP 含量低的原因之一。而次生林 C/N 最低,这与以往研究结果一致^[31]。土壤 C/N 越小,有机碳矿化越快^[32],更有助于土壤养分的积累。虽然次生林其他土壤养分含量与人工林相比无显著差异,但已经表现出高于人工林的趋势(表 2)。

3.2 森林恢复方式影响团聚体稳定性的原因

VPA 和 RDA 均表明团聚体各胶结物质及其交互作用影响团聚体稳定性,且非生物胶结物质的作用大于生物胶结物质(图 2、图 3),这与以往研究结果相似^[33],证实了本文的假设 2。在非生物胶结物质方面,与自然恢复相比,人工恢复显著提高了土壤游离氧化铁含量但对游离氧化铝含量无显著影响(图 1);前者可以促进大团聚体形成,与 MWD 呈显著正相关(图 4)。这与以往研究铁铝氧化物都会影响 MWD 的结果存在差异^[12]。原因可能是该区域以壤土为主,其 Al³⁺电荷状态不够稳定从而形成其他稳定的化合物^[30],而土壤中 Fe³⁺较为稳定,替代了粘结能力较弱的 Al³⁺^[34]。Fe³⁺作为键桥,

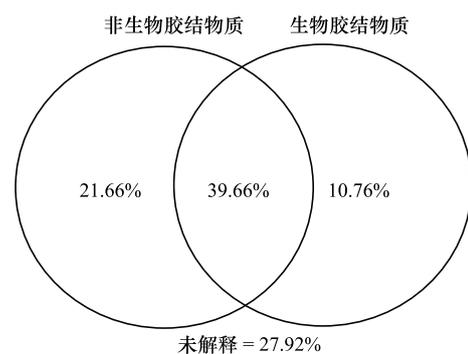


图 2 团聚体非生物与生物胶结物质解释团聚体稳定性变异的方差分解分析(VPA)

Fig.2 Variance variation analysis (VPA) showing the variance in the aggregate stability explained by the abiotic and biotic aggregate bonding materials

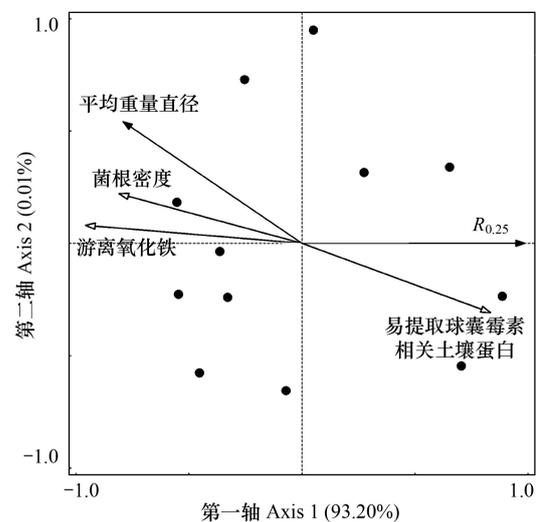


图 3 团聚体胶结物质对团聚体稳定性的冗余分析(RDA)

Fig.3 Redundancy analysis (RDA) for aggregate stability and its possible influencing factors

R_{0.25}: >0.25 mm 团聚体的数量 number of >0.25 mm aggregate; 图中仅显示对土壤团聚体稳定性有显著影响的因子

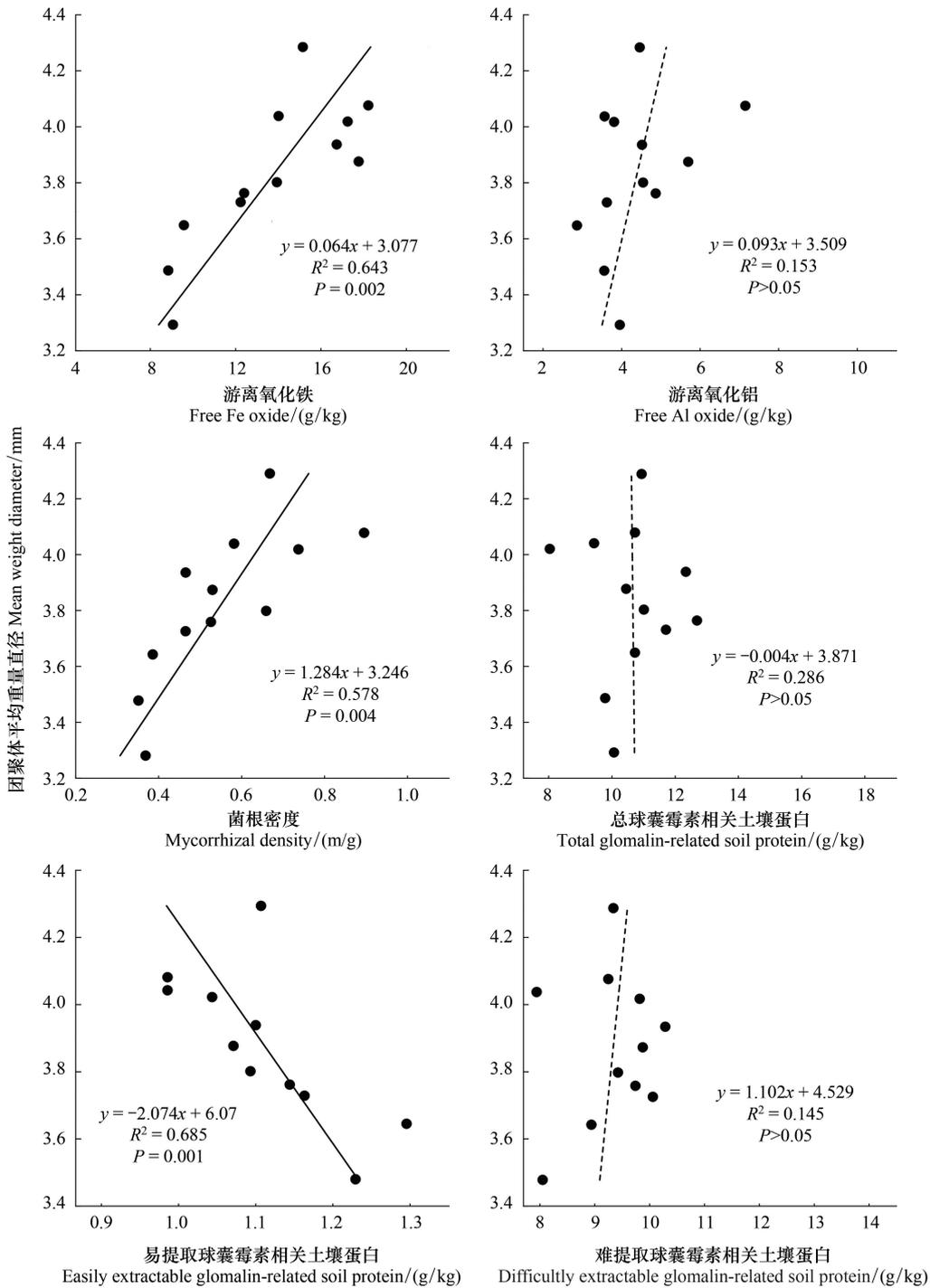


图 4 游离氧化铁、游离氧化铝、土壤菌根密度、总球囊霉素相关土壤蛋白、易提取球囊霉素相关土壤蛋白、难提取球囊霉素相关土壤蛋白与 MWD 的相关性分析

Fig.4 Correlation between soil free Fe oxide, free Al oxide, mycorrhizal density, total glomalin-related soil protein, easily extractable glomalin-related soil protein, and difficultly extractable glomalin-related soil protein with MWD

实线表示显著的相关关系,虚线表示不显著的相关关系,阴影表示 95% 置信区间

使土壤中的无机胶粒相互靠近凝聚形成粘土矿物,吸附在土壤上从而形成氧化膜,促进土粒之间的团聚,形成稳定和不易分散的团聚体^[30],故本研究游离氧化铁而不是游离氧化铝影响团聚体稳定性。

在影响团聚体的生物胶结物质方面,主要是菌根密度和 GRSP 中的易提取成分(图 2、图 3)。研究表明,

人工恢复森林的菌根密度均显著高于自然恢复(图 1),且菌根密度显著正相关于 MWD(图 4)。这一方面是因为菌根有助于稳定团聚体和土壤结构^[35],植物根系与菌丝缠绕形成庞大的网络结构后,与土壤颗粒粘结形成粘土颗粒,为大团聚体的形成创造了条件^[36]。另一方面是因为上代森林的菌根在二代林中得以保留,与错综复杂的植物根系形成了更密的菌根网。此外,丛枝菌根真菌(AMF)可以分泌 GRSP 来增加团聚体含量^[17]。本研究中,与自然恢复相比,人工恢复可以提高 EEG 含量、但降低 DEG 和 TG 含量(图 1)。尽管 TG 对 MWD 的影响不显著,但 MWD 分别与 EEG 和 DEG 呈显著的负相关和正相关关系(图 4)。这可能是由于 TG 中主要成分是稳定的、不易分解的 DEG(本研究 DEG 占 TG 的比例约 90%),AMF 在短期内释放的 EEG 容易降解的缘故。因此,EEG 与 MWD 并不总是正相关。前期研究也表明,EEG 比 TG 对 MWD 的影响更显著^[37]。

由此看出,在菌根、GRSP 等生物因素和氧化铁的共同作用下,亚热带退化森林的人工恢复不仅能够提高大团聚体的比例,还能增加团聚体稳定性。尽管本文深入研究了胶结物质对团聚体稳定性的影响,但是多数学者认为,退化森林恢复方式的选择取决于土壤和森林共同恢复的程度、植被以及恢复目标,包括生物多样性、景观、林下植被等^[38]。所以,今后研究还需要综合考虑以上方面来选择合适的森林恢复方式。

4 结论

与自然恢复的次生林相比,亚热带退化森林的人工恢复土壤具有更高的大团聚体数量和平均重量直径,主要机制在于森林恢复方式显著影响了非生物和生物的团聚体胶结物质含量。在非生物团聚体胶结物质方面,人工恢复通过增加游离氧化铁而不是游离氧化铝来吸附土壤颗粒,促进土粒团聚;在生物团聚体胶结物质方面,人工恢复通过提高菌根密度、易提取球囊霉素相关土壤蛋白含量而促进大团聚体的形成。在非生物和生物因素的共同作用下,亚热带退化森林的人工恢复有助于提高土壤团聚体稳定性。由于菌根能提高土壤菌丝密度,并具有增加 GRSP 的潜力,未来或许可以考虑接种真菌和栽种菌根树种来增强团聚体稳定性。

参考文献(References):

- [1] 朱教君,李凤芹.森林退化/衰退的研究与实践.应用生态学报,2007,18(7):1601-1609.
- [2] 刘世荣,马姜明,缪宁.中国天然林保护、生态恢复与可持续经营的理论与技术.生态学报,2015,35(1):212-218.
- [3] Lauri P, Forsell N, di Fulvio F, Snäll T, Havlik P. Material substitution between coniferous, non-coniferous and recycled biomass-Impacts on forest industry raw material use and regional competitiveness. *Forest Policy and Economics*, 2021, 132: 102588.
- [4] 黄永珍,王晟强,叶绍明.杉木林分类型对表层土壤团聚体有机碳及养分变化的影响.应用生态学报,2020,31(9):2857-2865.
- [5] 窦森,李凯,关松.土壤团聚体中有机质研究进展.土壤学报,2011,48(2):412-418.
- [6] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(1): 11-21.
- [7] 王芸,欧阳志云,郑华,陈法霖,陈圣宾,曾静.南方红壤区 3 种典型森林恢复方式对植物群落多样性的影响.生态学报,2013,33(4):1204-1211.
- [8] 袁在翔,关庆伟,李俊杰,韩梦豪,金雪梅,陈霞.不同植被恢复模式对紫金山森林土壤理化性质的影响.东北林业大学学报,2022,50(1):52-57.
- [9] Peng S M, Liu W, Xu G, Pei X J, Millerick K, Duan B L. A meta-analysis of soil microbial and physicochemical properties following native forest conversion. *CATENA*, 2021, 204: 105447.
- [10] 郑华,欧阳志云,王效科,方治国,赵同谦,苗鸿.不同森林恢复类型对土壤微生物群落的影响.应用生态学报,2004,15(11):2019-2024.
- [11] Huang J X, Kogbara R B, Hariharan N, Masad E A, Little D N. A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 2021, 305: 124685.
- [12] 陈红,马文明,周青平,杨智,刘超文,刘金秋,杜中曼.高寒草地灌丛化对土壤团聚体稳定性及其铁铝氧化物分异的研究.草业学报,2020,29(9):73-84.
- [13] Yin Y, Wang L, Liang C H, Xi F M, Pei Z J, Du L Y. Soil aggregate stability and iron and aluminium oxide contents under different fertiliser treatments in a long-term solar greenhouse experiment. *Pedosphere*, 2016, 26(5): 760-767.
- [14] Xiao L, Zhang Y, Li P, Xu G C, Shi P, Zhang Y. Effects of freeze-thaw cycles on aggregate-associated organic carbon and glomalin-related soil

- protein in natural-succession grassland and Chinese pine forest on the Loess Plateau. *Geoderma*, 2019, 334: 1-8.
- [15] Ferrol N, Azcón-Aguilar C, Pérez-Tienda J. Review: Arbuscular mycorrhizas as key players in sustainable plant phosphorus acquisition: an overview on the mechanisms involved. *Plant Science*, 2019, 280: 441-447.
- [16] Jeewani P H, Luo Y, Yu G H, Fu Y Y, He X H, van Zwieten L, Liang C, Kumar A, He Y, Kuzyakov Y, Qin H, Guggenberger G, Xu J M. Arbuscular mycorrhizal fungi and goethite promote carbon sequestration via hyphal-aggregate mineral interactions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 162: 108417.
- [17] 黄艺, 王东伟, 蔡佳亮, 郑维爽. 球囊霉素相关土壤蛋白根际环境功能研究进展. *植物生态学报*, 2011, 35(2): 232-236.
- [18] 夏梓泰, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀. 周年轮作休耕模式对土壤球囊霉素和团聚体稳定性的影响. *农业环境科学学报*, 2022, 41(1): 99-106.
- [19] Zhu G Y, Shanguan Z P, Deng L. Soil aggregate stability and aggregate-associated carbon and nitrogen in natural restoration grassland and Chinese red pine plantation on the Loess Plateau. *CATENA*, 2017, 149: 253-260.
- [20] 刘鹏, 吴国芳. 大别山植物区系的特点和森林植被的研究. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 1994(1): 76-81.
- [21] Yang Y, Wu P. Soil bacterial community varies but fungal community stabilizes along five vertical climate zones. *CATENA*, 2020, 195: 104841.
- [22] Yang Y J, Liu S R, Wang H, Chen L, Lu L H, Cai D X. Reduction in throughfall reduces soil aggregate stability in two subtropical plantations. *European Journal of Soil Science*, 2019, 70(2): 301-310.
- [23] Muleta D, Assefa F, Nemomissa S, Granhall U. Composition of coffee shade tree species and density of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) spores in Bonga natural coffee forest, southwestern Ethiopia. *Forest Ecology and Management*, 2007, 241(1/2/3): 145-154.
- [24] Wright S F, Upadhyaya A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science*, 1996, 161(9): 575-586.
- [25] Zhang X K, Wu X, Zhang S X, Xing Y H, Wang R, Liang W J. Organic amendment effects on aggregate-associated organic C, microbial biomass C and glomalin in agricultural soils. *CATENA*, 2014, 123: 188-194.
- [26] 白秀梅, 韩有志, 郭汉清. 庞泉沟自然保护区典型森林土壤大团聚体特征. *生态学报*, 2014, 34(7): 1654-1662.
- [27] 黎宏祥, 王彬, 王玉杰, 王云琦. 不同林分类型对土壤团聚体稳定性及有机碳特征的影响. *北京林业大学学报*, 2016, 38(5): 84-91.
- [28] 周纯亮, 吴明. 中亚热带四种森林土壤团聚体及其有机碳分布特征. *土壤*, 2011, 43(3): 406-410.
- [29] 陈健, 刘顺, 史作民, 赵广东. 川西亚高山三种森林恢复途径对土壤生物有效磷的影响. *生态学报*, 2021, 41(7): 2698-2708.
- [30] Zhao J S, Chen S, Hu R G, Li Y Y. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides. *Soil and Tillage Research*, 2017, 167: 73-79.
- [31] 袁瑱, 周志勇, 赵洪涛, 史佳伟, 张欢. 太岳山森林土壤有机碳矿化随温度、湿度和培养时间的变化特征. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(5): 1021-1029.
- [32] 肖瑞晗, 满秀玲, 丁令智. 大兴安岭北部天然针叶林土壤氮矿化特征. *生态学报*, 2019, 39(8): 2762-2771.
- [33] 王子龙, 胡斐南, 赵勇钢, 谭文峰, 赵世伟, 黄菁华, 张耀方, 杜璨, 尚应妮. 土壤胶结物质分布特征及其对黄土大团聚体稳定性的影响. *水土保持学报*, 2016, 30(05): 331-336.
- [34] Vanderhoof M K, Christensen J, Beal Y J G, DeVries B, Lang M W, Hwang N, Mazzarella C, Jones J W. Isolating anthropogenic wetland loss by concurrently tracking inundation and land cover disturbance across the mid-Atlantic region, US. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1464.
- [35] Bai Y X, Zhou Y C, He H Z. Effects of rehabilitation through afforestation on soil aggregate stability and aggregate-associated carbon after forest fires in subtropical China. *Geoderma*, 2020, 376: 114548.
- [36] 曹本福, 姜海霞, 刘丽, 陆引罡, 王茂胜. 丛枝菌根菌丝网络在植物互动中的作用机制研究进展. *应用生态学报*, 2021, 32(9): 3385-3396.
- [37] Staunton S, Saby N P A, Arrouays D, Quiquampoix H. Can soil properties and land use explain glomalin-related soil protein (GRSP) accumulation? A nationwide survey in France. *CATENA*, 2020, 193: 104620.
- [38] Matos F A R, Magnago L F S, Aquila Chan Miranda C, de Menezes L F T, Gastauer M, Safar N V H, Schaefer C E G R, da Silva M P, Simonelli M, Edwards F A, Martins S V, Meira-Neto J A A, Edwards D P. Secondary forest fragments offer important carbon and biodiversity cobenefits. *Global Change Biology*, 2020, 26(2): 509-522.