

DOI: 10.5846/stxb202105161277

王轶浩, 陈展, 周建岗, 张媛媛. 重庆酸雨区马尾松纯林改造对土壤酸化特征及团聚体稳定性的影响. 生态学报, 2021, 41(13): 5184-5194.

Wang Y H, Chen Z, Zhou J G, Zhang Y Y. Effects of transformation of Masson pine forest on characteristics of soil acidification and aggregate stability within polluted areas of Chongqing. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5184-5194.

重庆酸雨区马尾松纯林改造对土壤酸化特征及团聚体稳定性的影响

王轶浩¹, 陈展^{2,*}, 周建岗³, 张媛媛¹

1 重庆师范大学地理与旅游学院 重庆市三峡库区地表生态过程野外科学观测研究站, 重庆 401331

2 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

3 山西省沁县漳源林场, 长治 046400

摘要: 马尾松对酸沉降危害极其敏感, 生产实践中往往通过林分改造来应对酸沉降危害。为掌握酸雨区马尾松纯林改造对土壤酸化环境的影响及科学指导经营管理, 采用空间代替时间的方法, 对重庆铁山坪林场的马尾松纯林及其阔叶化改造后的香樟林、木荷林、马尾松×香樟混交林和马尾松×木荷混交林土壤养分、酸化特征及团聚体稳定性进行研究。结果表明: (1) 除木荷混交林的腐殖质层土壤有机碳和全氮含量显著增加外, 其他森林类型总体均减少 ($P < 0.05$); 香樟林及其混交林的各层土壤全磷和全钾含量均增加, 但木荷林及其混交林均减少 ($P < 0.05$)。 (2) 改造为香樟林及其混交林能显著提高土壤 pH 值、交换性盐基离子含量和盐基饱和度, 降低交换性 Al^{3+} 含量, 但改造为木荷林及其混交林则总体对土壤酸化特征影响不明显 ($P > 0.05$)。 (3) 木荷林及其混交林淀积层的水稳性大团聚体含量增加, 香樟林及其混交林则是微团聚体含量增加 ($P < 0.05$)。 (4) 改造对各森林类型腐殖质层和木荷林淋溶层及淀积层的土壤团聚体稳定性均无显著影响, 但能增强马尾松混交林和香樟林淋溶层或淀积层的土壤团聚体稳定性 ($P < 0.05$)。综合来看, 改造能改变土壤酸化环境, 但各森林类型的影响不同, 改造为香樟林或其混交林的改善效果总体好于木荷林或其混交林。因而对酸雨区马尾松纯林改造, 还应根据改造树种特性及林分特征, 科学确定相应的改造方法, 尤其应注重改造林分的全过程抚育经营, 以营造良好的林下环境。

关键词: 土壤酸化; 土壤团聚体; 土壤养分; 森林类型; 森林经营; 酸沉降

Effects of transformation of Masson pine forest on characteristics of soil acidification and aggregate stability within polluted areas of Chongqing

WANG Yihao¹, CHEN Zhan^{2,*}, ZHOU Jiangang³, ZHANG Yuanyuan¹

1 College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University; Field Science Observation and Research Station for Surface Ecological Process of Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China

2 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

3 Zhangyuan Forest Farm of Qinxian County, Shanxi Province, Changzhi 046400, China

Abstract: Soil acidification is a formidable environmental issue which acts as a driver of change to alter forest tree species community composition over time. Forests characterized by the dominant tree species, *Pinus massoniana*, have shown extreme sensitivity to the increased soil acidity and are undergoing transformational shifts in community composition as a response. Planting treatments are a strategy often used to mitigate the harmful effects of increasing soil acidity, though little

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (CAFYBB2018SZ004); 国家自然科学基金面上项目 (31971630); 重庆师范大学基金项目 (20XLB005); 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJQN202000502)

收稿日期: 2021-05-16; 修订日期: 2021-07-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenzhan0508@caf.ac.cn

is known about how different treatments may affect soil physicochemical properties in *P. massoniana* forests. In this study, we characterized soil nutrient levels, stable soil aggregates, and soil acidification status of five different forest types (including pure stands of *P. massoniana*, *Cinnamomum camphora*, *Schima superba* and mixed stands of *C. camphora*-*P. massoniana*, *S. superba*-*P. massoniana*) to show how shifts in community composition may affect soil quality and help to inform management in areas impacted by acid rain. We collected and analyzed soil samples from O, A, and B horizons at 10 points within 20 m × 20 m plots replicated 3-4 times within each forest type. For O horizon soils, organic carbon and total nitrogen were lower in all forest types ($P < 0.05$) compared to those measured in stands of pure *P. massoniana*, with the exception of mixed stands of *S. superba*-*P. massoniana*. Total phosphorus and total potassium levels were greater in *C. camphora* and mixed *C. camphora*-*P. massoniana* stands as compared to pure *P. massoniana* for all horizons, while pure *S. superba* and mixed *S. superba*-*P. massoniana* stands showed significantly lower amounts ($P < 0.05$). Our findings suggest that planting *C. camphora* may improve soil acidification status, while planting *S. superba* is unlikely to have a significant effect ($P > 0.05$). Stable soil macro aggregates were greater in B horizon soils of pure *S. superba* and mixed *S. superba*-*P. massoniana* stands, while micro aggregate abundances were greater in pure *C. camphora* and mixed *C. camphora*-*P. massoniana* stands ($P < 0.05$) compared to pure stands of *P. massoniana*. Soil aggregate stability showed no significant differences in O horizon soils across all forest types or A and B horizon soils from pure *S. superba* stands, though stability was greater in A and B horizon soils from mixed *P. massoniana* stands and pure stands of *C. camphora* ($P < 0.05$) as compared to pure *P. massoniana* stands. In conclusion, different tree planting treatments demonstrated ability to alter soil acidification status within a *P. massoniana* plantation, though the effects of different treatments varied. Further study is needed to determine the most effective management strategies for restoring acid-polluted forest sites.

Key Words: soil acidification; soil aggregate; soil nutrient; forest types; forest management; acid deposition

酸沉降是全球面临的主要环境问题之一,对全球生态系统造成极大威胁,严重影响着人类生存与发展。我国已成为继欧洲和北美之后的世界第三大酸雨区,特别是我国南方的酸雨污染尤为严重^[1]。重庆是我国老酸雨区,早在 20 世纪 80 年代就报道了重庆南山风景区马尾松林受酸雨影响普遍生长不良,甚至大面积死亡的现象^[2]。虽然自 2010 年开始重庆酸沉降量总体呈下降趋势,但其降水 pH 值仍然较低^[3],并且酸沉降引起的土壤酸化现象短期内不会消除。马尾松(*Pinus massoniana*)对酸沉降危害极其敏感,已有研究表明,马尾松受到酸沉降危害后会表现出明显的落叶率增加^[4]、根系分布变浅^[5]、生物量下降^[6]等受害特征。同时,马尾松在我国南方山地丘陵区广泛分布,是当地主要造林树种和先锋树种,这种马尾松林和酸沉降区的空间分布范围高度重叠,给我国南方山地丘陵区森林经营管理带来了极大困难和挑战。

为应对酸沉降对马尾松林的危害,进行马尾松纯林的阔叶林替代或林下补植阔叶树种是常采用的主要改造措施。目前国内外学者对于酸沉降影响森林已做了大量研究^[7-10],取得了较多成果,如表明酸沉降能引起土壤酸化,进而造成土壤盐基离子淋失及一些有毒元素活化^[11];王轶浩等^[12]研究认为酸沉降导致马尾松林土壤水文物理性质变差,涵养水源功能下降。土壤团聚体作为土壤结构与肥力的重要指标,对土壤养分的维持、供给和转化等都有重要影响^[13],其中土壤团聚体含量及稳定性是表征土壤结构好坏的重要参数^[14],而土壤团聚体稳定性往往通过几何平均直径(Geometric Mean Diameter, GMD)和平均质量直径(Mean Weight Diameter, MWD)衡量^[15],GMD 和 MWD 值越大表明土壤团聚体的平均粒径团聚度越高,稳定性越强^[16]。但以往研究更多关注酸沉降对森林植被、土壤、地表水等方面的影响,而对马尾松纯林的不同阔叶化改造措施的影响还缺乏研究,尤其对土壤酸化特征及团聚体稳定性的影响还未见研究报道,这限制着酸雨区马尾松林科学经营管理。

本文在酸沉降影响严重的重庆江北区铁山坪林场,采用空间代替时间的方法,以马尾松天然次生林纯林为对照,研究改造成香樟(*Cinnamomum camphora*)林、木荷(*Schima superba*)林、马尾松×香樟混交林、马尾松×

木荷混交林后的土壤酸化特征及团聚体稳定性变化,以期掌握马尾松纯林的不同改造措施的影响差异,从而为酸雨区马尾松林改造成效评价及其可持续经营与管理提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市江北区铁山坪林场(北纬 29°38',东经 106°41'),属亚热带湿润气候,多年平均降水量 1100 mm,年均气温 18 ℃。该地属四川盆东平行岭谷地貌,海拔变化在 242—584 m,坡度变化在 5°—30°。土壤以砂岩上发育的山地黄壤为主,土壤质地为粉砂壤土和粉砂粘壤土,厚度 50—80 cm。研究区酸沉降影响严重,测定的林外和林内降水 pH 值平均为 4.06 和 3.20,土壤酸化明显^[12]。森林主要为起源于 20 世纪 60 年代天然林皆伐后自然更新形成的马尾松次生林,因受酸沉降危害特征明显,落叶率多年平均为 40%—50%^[4]。故 20 世纪 80、90 年代以来,陆续在马尾松林下及其采伐迹地、火烧迹地补植了阔叶树种,或结合森林防火栽植或补植防火树种木荷,目前已形成了马尾松纯林、香樟林、木荷林以及针阔混交林等多种森林类型镶嵌分布的空间格局,森林覆盖率达 90% 以上。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

采用空间代替时间的方法,在铁山坪林场楠木湾选择马尾松天然次生林纯林、香樟林、木荷林、马尾松×香樟混交林、马尾松×木荷混交林等 5 种森林类型,以马尾松纯林为对照,研究对比马尾松纯林不同改造措施的效果差异。马尾松纯林的林龄平均约为 62 a,下木有杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)、杉木(*Cuninhamia lanceolata*)、榿木(*Loropetalum chinense*)等,草本植物以铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)为主。香樟林为 20 世纪 80 年代初在马尾松林采伐迹地营造的人工林,林龄约为 37 a,下木有杜英、木荷、白栎(*Quercus fabric*)等,草本植物有铁芒萁。木荷林是 20 世纪 90 年代初在马尾松林火烧迹地上营造的人工林,林龄约为 29 a,无下木,仅零星分布有草本植物。马尾松×香樟混交林是 20 世纪 80 年代初在马尾松林下通过星状补植香樟形成的,其中,马尾松林龄约为 62 a,香樟林龄约为 37 a,林分平均林龄约为 50 a,下木有杜英、木荷、杉木等。马尾松×木荷混交林是 20 世纪 90 年代初建设生物防火隔离带时,在马尾松林下带状栽植木荷形成的,其中,马尾松林龄约为 62 a,香樟林龄约为 29 a,林分林龄平均约为 45 a,下木有香樟、杜英、杉木等。

在以上 5 种森林类型中,选择土壤、地形条件基本一致的代表性地点,设置规格为 20 m×20 m 的典型样地 18 个,其中马尾松纯林、香樟林和马尾松×香樟混交林各 4 个,木荷林和马尾松×木荷混交林各 3 个。调查各样地的基本情况,并每木检尺(表 1)。

1.2.2 土壤取样

2018 年 8 月,首先在各典型样地按“S”型布设 10 个取样点,之后在各取样点挖一个土壤剖面,并按土壤形成层(O 层、A 层、B 层)取样,其中 O 层为腐殖质层,即有机残留物层,有明显的枯枝落叶等有机物残体;A 层为淋溶层,富含有机质,颜色较暗;B 层为淀积层,中度风化,颜色较浅。最后将各土层的全部取样点土壤按样地分别混合,即每个典型样地获得三个不同土层的混合土样。

1.2.3 土壤指标测定

将土样带回实验室,测定土壤的 pH 值和有机碳、全氮、全磷、全钾、交换性阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+})含量,以及阳离子交换量、土壤团聚体及其有机碳含量等指标^[17],其中,土壤 pH 值测定采用电位法;土壤有机碳测定采用重铬酸钾容量-外加热法;土壤全氮、全磷、全钾测定均采用硫酸-双氧水消煮,半微量凯氏定氮法;交换性阳离子用电感耦合等离子体原子发射光谱仪测定;阳离子交换量在采用草酸铵-氯化铵法浸提后用半微量凯氏定氮法测定;土壤团聚体及其有机碳含量采用湿筛法-重铬酸钾容量外加热法测定。

土壤盐基饱和度($BS, \%$)^[18]、土壤团聚体的几何平均直径(GMD, mm)和平均质量直径(MWD, mm)^[15]分别通过公式(1)、(2)、(3)计算得到。

表 1 典型样地基本概况

Table 1 Basic information of sample plots

森林类型 Forest types	密度 Density/ (株/lm ²)	郁闭度 Canopy density	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	土层类型 Soil types	海拔 Altitude/m	坡度 Slope gradient/(°)	坡位 Slope position	坡向 Slope aspect
马尾松纯林 Pi	725	0.75	14.80	20.18	山地黄壤	543	8	中上坡	南坡
	800	0.80	13.88	20.10	山地黄壤	542	5	中上坡	南坡
	650	0.75	15.93	20.68	山地黄壤	537	5	中上坡	南坡
	750	0.75	17.24	21.31	山地黄壤	532	3	中坡	东南坡
香樟林 Ci	1050	0.82	16.68	23.08	山地黄壤	515	8	中下坡	南坡
	525	0.70	17.55	28.66	山地黄壤	516	10	中下坡	南坡
	800	0.80	14.89	24.08	山地黄壤	535	5	中坡	东南坡
	600	0.75	16.79	29.95	山地黄壤	527	3	中坡	东南坡
木荷林 Sc	1875	0.90	11.52	17.58	山地黄壤	526	7	中坡	东南坡
	1925	0.95	11.26	14.68	山地黄壤	526	7	中坡	东南坡
	1975	0.95	9.76	12.89	山地黄壤	537	10	中上坡	东南坡
马尾松×香樟混交林 Pi_Ci	525	0.75	14.79	25.23	山地黄壤	522	10	中坡	南坡
	550	0.75	14.65	23.71	山地黄壤	528	8	中坡	东南坡
	350	0.60	15.00	24.84	山地黄壤	538	5	中上坡	东南坡
马尾松×木荷混交林 Pi_Sc	375	0.65	14.97	28.91	山地黄壤	538	8	中上坡	南坡
	900	0.85	12.24	19.60	山地黄壤	527	5	中坡	南坡
	1125	0.90	12.85	19.75	山地黄壤	526	7	中坡	东南坡
	750	0.80	13.30	21.00	山地黄壤	530	5	中坡	东南坡

Pi: 马尾松纯林 *Pinus massoniana* forest; Ci: 香樟纯林 *Cinnamomum camphora* forest; Sc: 木荷纯林 *Schima superba* forest; Pi_Ci: 马尾松×香樟混交林 *Pinus massoniana* and *Cinnamomum camphora* mixed forest; Pi_Sc: 马尾松×木荷混交林 *Pinus massoniana* and *Schima superba* mixed forest

$$BS = \frac{EBC}{CEC} \times 100 \quad (1)$$

式中, EBC 为土壤交换性盐基离子含量 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) ($cmol/kg$), CEC 为土壤阳离子交换量 ($cmol/kg$)。

$$GMD = \text{Exp} \left(\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i \right) \quad (2)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (3)$$

式中, \bar{x}_i 为土壤各粒径团聚体的平均直径 (mm), w_i 为土壤各粒径团聚体的质量百分比 (%)。

1.2.4 数据处理

采用 Excel 2019 和 Origin9.0 软件对数据进行处理与作图, 利用 SPSS 23.0 软件进行马尾松纯林改造后不同森林类型、不同土壤层次之间的土壤养分含量、酸化特征、团聚体稳定性的单因素方差分析 (one-way ANOVA) 及 LSD 检验法的多重均值比较分析。

2 结果

2.1 马尾松纯林改造对土壤养分的影响

由图 1 可知, 马尾松纯林改造对各土层的有机碳、全氮、全磷和全钾含量均有显著影响 ($P < 0.05$), 但各森林类型对不同土层的影响不同。对 O 层土壤有机碳含量, 除马尾松×木荷混交林显著增加外, 其他森林类型则均显著降低 ($P < 0.05$); 对 A 层土壤有机碳含量, 香樟林和马尾松×木荷混交林均显著增加, 其他 2 种森林类型则变化不显著 ($P > 0.05$); 对 B 层土壤有机碳含量, 改造后的 4 种森林类型均显著降低 ($P < 0.05$)。同样地,

对 O 层土壤全氮含量,马尾松×木荷混交林相比其他森林类型均显著增加,而 A、B 层土壤全氮含量均以香樟林最高。

香樟林和马尾松×香樟混交林的各土层全磷含量和 B 层土壤全钾含量均显著增加($P<0.05$),而木荷林和马尾松×木荷混交林的各土层全磷和全钾含量总体上均显著下降(图 1)。这说明改造成香樟林或其混交林有助于增加土壤的全磷、全钾含量,而改造成木荷林或其混交林则可能对磷、钾吸收利用较多而归还不足。总体上,除土壤全钾含量外,各森林类型的土壤有机碳、全氮和全磷含量随土层加深的变化规律一致,均表现为 O 层>A 层>B 层,即随土层加深而显著降低。

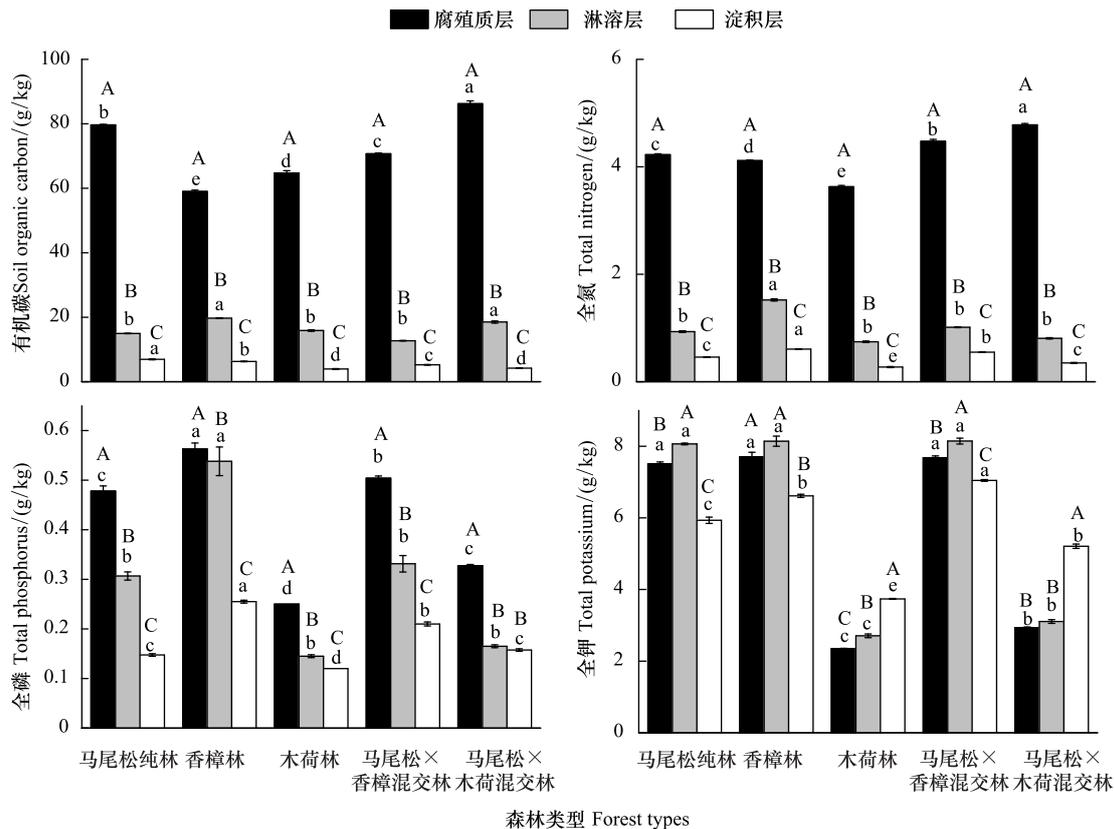


图 1 不同森林类型各土层的土壤养分含量变化

Fig.1 Variation of soil nutrient contents in various soil layers of different forest types

不同大写字母表示同一森林类型不同土层之间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一土层的不同森林类型之间差异显著($P<0.05$)

2.2 马尾松纯林改造对土壤酸化特征的影响

马尾松纯林改造对土壤 pH 值、阳离子交换量和盐基饱和度均有显著影响($P<0.05$)。由图 2 可知,5 种森林类型的各层土壤 pH 值变化在 3.80—4.84 之间,说明当地土壤酸化仍然严重。马尾松纯林改造成香樟林和马尾松×香樟混交林后,除马尾松×香樟混交林的 B 层土壤外,其他各层土壤 pH 值均显著升高($P<0.05$);改造成木荷林和马尾松×木荷混交林后,其 B 层及马尾松×木荷混交林的 O 层土壤 pH 值均显著降低($P<0.05$),其他土层的 pH 值则变化不明显($P>0.05$)。

与马尾松纯林相比,改造成香樟林和马尾松×香樟混交林的各土层阳离子交换量差异均不显著($P>0.05$),但木荷林除 B 层外的其他各土层均显著降低($P<0.05$),马尾松×木荷混交林则除 O 层显著增加外,其他各土层变化均不显著。当马尾松纯林改造为香樟林和马尾松×香樟混交林后,除 B 层土壤的盐基饱和度差异不显著外,其他各层均显著增加($P<0.05$),但木荷林和马尾松×木荷混交林的各土层差异均不显著($P>0.05$)。

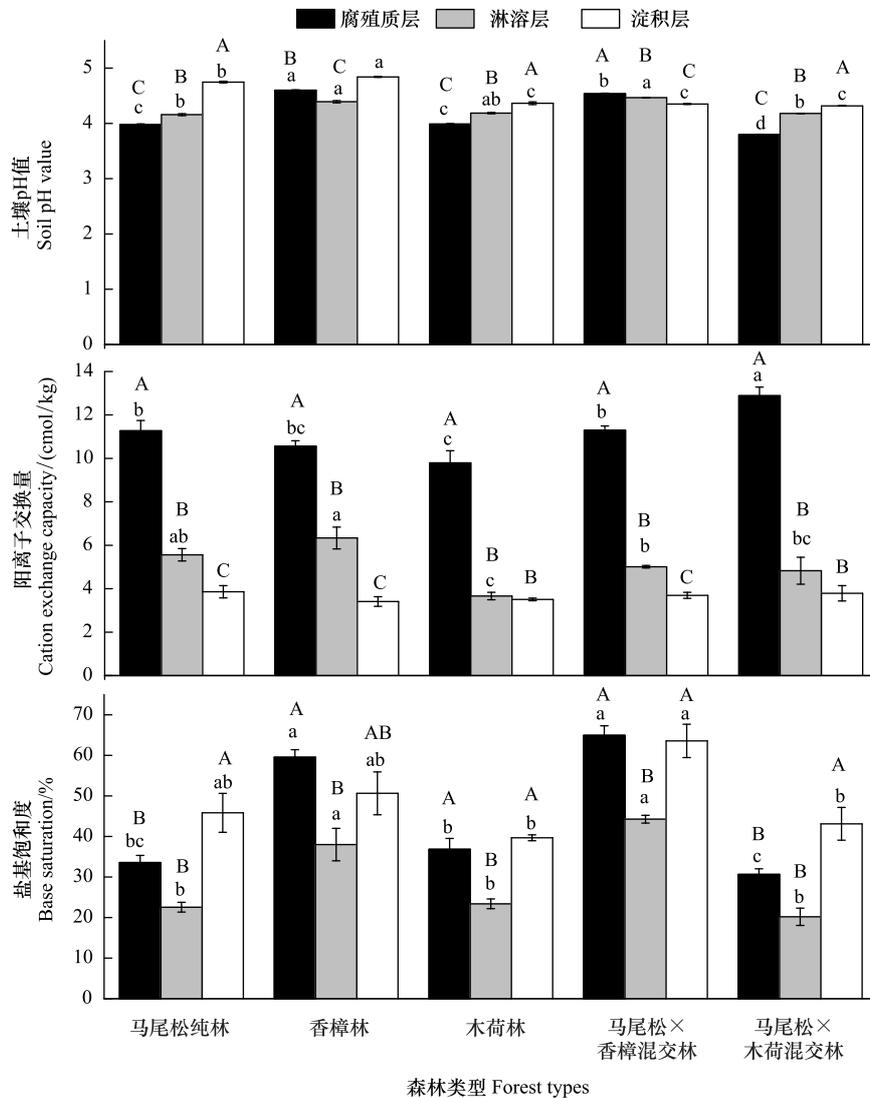


图 2 不同森林类型各土层的 pH 值、阳离子交换量和盐基饱和度变化

Fig.2 Variation of soil pH-value and cation exchange capacity and base saturation in various soil layers of different forest types

由图 3 可知,马尾松纯林改造对土壤交换性阳离子含量影响显著($P < 0.05$),改造为香樟林和马尾松×香樟混交林后,除 B 层土壤受影响总体不明显外,其他各土层的交换性盐基离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})含量均显著增加($P < 0.05$),且土壤致酸阳离子(Fe^{3+} 、 Al^{3+})含量均显著减少($P < 0.05$)。与马尾松纯林相比,木荷林各土层的交换性盐基离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})含量总体显著降低;对土壤致酸阳离子(Fe^{3+} 、 Al^{3+})含量,除 A 层的 Fe^{3+} 显著增加外, O 层的 Fe^{3+} 及 Al^{3+} 和 A 层的 Al^{3+} 均显著降低,而 B 层的 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 变化均不显著($P > 0.05$)。改造为马尾松×木荷混交林后, O 层土壤的交换性 Na^+ 、 Mg^{2+} 显著增加,交换性 Al^{3+} 显著降低($P < 0.05$),其他各交换性阳离子则变化不明显($P > 0.05$); A 层土壤除交换性 Fe^{3+} 显著增加外,其他各交换性阳离子均显著降低($P < 0.05$); B 层土壤除交换性 K^+ 显著降低和 Al^{3+} 显著增加外,其他各交换性阳离子变化不明显($P > 0.05$)。

2.3 马尾松纯林改造对土壤团聚体稳定性的影响

由图 4 可知,马尾松纯林改造成其他森林类型后,对 0.25—2 mm 水稳性团聚体含量,除木荷林和马尾松×木荷混交林 B 层土壤显著增加外,各森林类型的其他各土层均变化不明显($P > 0.05$)。对 0.053—0.25 mm 水稳性团聚体含量,马尾松×香樟混交林的 O 层和 A 层、马尾松×木荷混交林的 O 层和香樟林的 A 层均显著增加($P < 0.05$),其他则变化不明显。对 < 0.053 mm 水稳性团聚体含量,木荷林 O 层显著增加,但香樟林和马尾

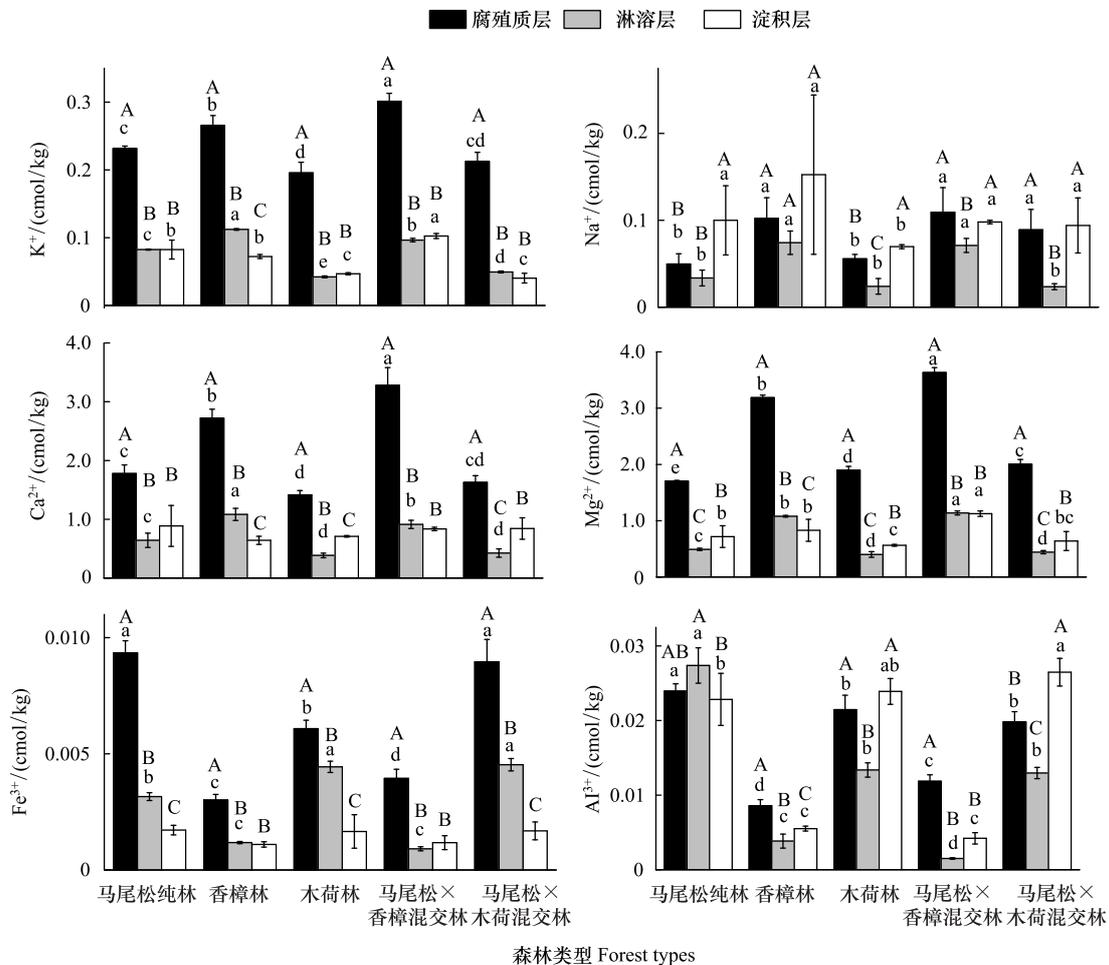


图3 不同森林类型各土层的土壤交换性阳离子含量变化

Fig.3 Variation of soil exchangeable cations in various soil layers of different forest types

松×香樟混交林 A 层显著降低($P<0.05$),其他则不明显。总体上,马尾松纯林改造对土壤团聚体含量的影响不太明显,但能有效促进香樟林和马尾松×香樟混交林土壤微团聚体(0.053—0.25 mm)含量增加,而黏粉粒(<0.053 mm)含量减少。各森林类型的土壤水稳性大团聚体(0.25—2 mm)含量均以 O 层最高、微团聚体含量以 A 层最高、黏粉粒含量则以 B 层最高,说明各森林类型的土壤均随土层加深而愈加紧实。

马尾松纯林改造对土壤团聚体有机碳含量影响显著($P<0.05$),其中香樟林的 O 层土壤 0.25—2 mm 团聚体有机碳含量显著降低,但在 A 层显著增加,其他各森林类型的 B 层土壤 0.25—2 mm 团聚体有机碳含量均也显著降低(图 4)。相比马尾松纯林,香樟林 O 层土壤 0.053—0.25 mm 团聚体有机碳含量显著降低,但在 A 层显著增加,其他森林类型的 A 层土壤 0.053—0.25 mm 团聚体有机碳含量则显著降低;在 B 层土壤中,仅木荷林显著降低,其他森林类型则差异不显著。同样地,香樟林 O 层土壤 <0.053 mm 团聚体有机碳含量也显著降低,木荷林、马尾松×香樟混交林和马尾松×木荷混交林的 B 层土壤 <0.053 mm 团聚体有机碳含量也显著降低,但香樟林、木荷林、马尾松×木荷混交林的 A 层和马尾松×木荷混交林的 O 层土壤 <0.053 mm 团聚体有机碳含量均显著增加($P<0.05$)。

由图 5 可知,各森林类型的 O 层土壤 GMD、MWD 分别变化在 3.19—4.02 mm、0.53—1.03 mm 之间,马尾松纯林改造对其影响不明显($P>0.05$),但对 A、B 层土壤 GMD 和 B 层土壤 MWD 的影响均显著($P<0.05$),表现为香樟林和马尾松×香樟混交林的 A 层土壤 GMD 分别显著增加 21.51%、14.34%;马尾松×木荷混交林 B 层土壤的 GMD 和 MWD 也分别显著增加 16.81%、47.22%,而其他森林类型的差异并不显著($P>0.05$)。

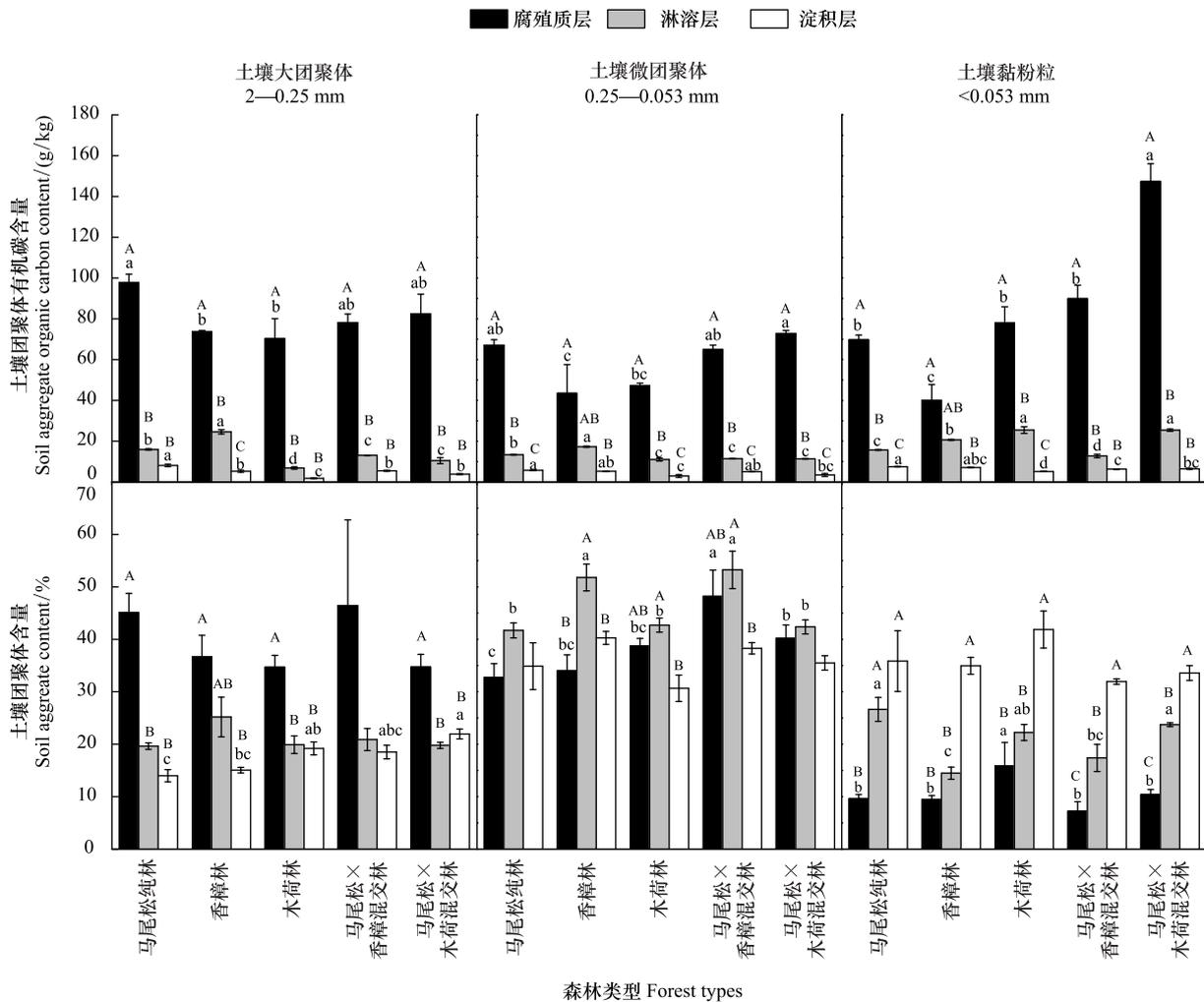


图4 不同森林类型各土层土壤团聚体及其有机碳含量变化

Fig.4 Variation of soil aggregates and its organic carbon content in various soil layers of different forest types

3 结论与讨论

土壤肥力高低影响着植物的分布、组成、生长、结构和功能,反过来植被又影响土壤养分的分布及循环^[19],而土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量是土壤肥力评价的主要指标^[20]。本研究中,马尾松纯林的阔叶化改造对土壤的有机碳、全氮、全磷和全钾含量均有显著影响,这与卢立华等^[21]研究结果一致。但各森林类型对各土层养分的影响不同,如改造为马尾松×香樟混交林后,其腐殖质层土壤有机碳含量显著降低,但各土层全磷和淀积层全钾含量均显著增加;当改造成马尾松×木荷混交林后,其腐殖质层土壤有机碳和全氮含量均显著增加,但各土层全磷和全钾含量却显著下降,这与简尊吉等^[20]研究结果不同。

多数研究表明,马尾松混交林土壤养分含量高于马尾松纯林^[22-23],这是因马尾松混交林的林下植物种类普遍较丰富,有助于凋落物分解和促进土壤养分回归^[24],而马尾松纯林的凋落物一般以马尾松针叶为主,富含单宁、树脂、木质素等难分解物质,限制了凋落物养分释放和归还土壤^[25]。本研究中改造成马尾松混交林的腐殖质层土壤的部分养分指标下降可能与土壤养分淋溶、迁移有关,也可能与林分起源有关^[20]。简尊吉等^[20]研究表明马尾松天然林土壤有机质、全氮、全钾含量均显著高于人工林,正如本研究中马尾松天然次生林改造成香樟、木荷人工林后,其腐殖质层土壤养分含量普遍下降,尤其木荷人工林,各层土壤养分含量均显著减低。究其原因可能主要还是受研究区木荷林生长快、对土壤养分吸收与积累较多和其林下环境对凋落物

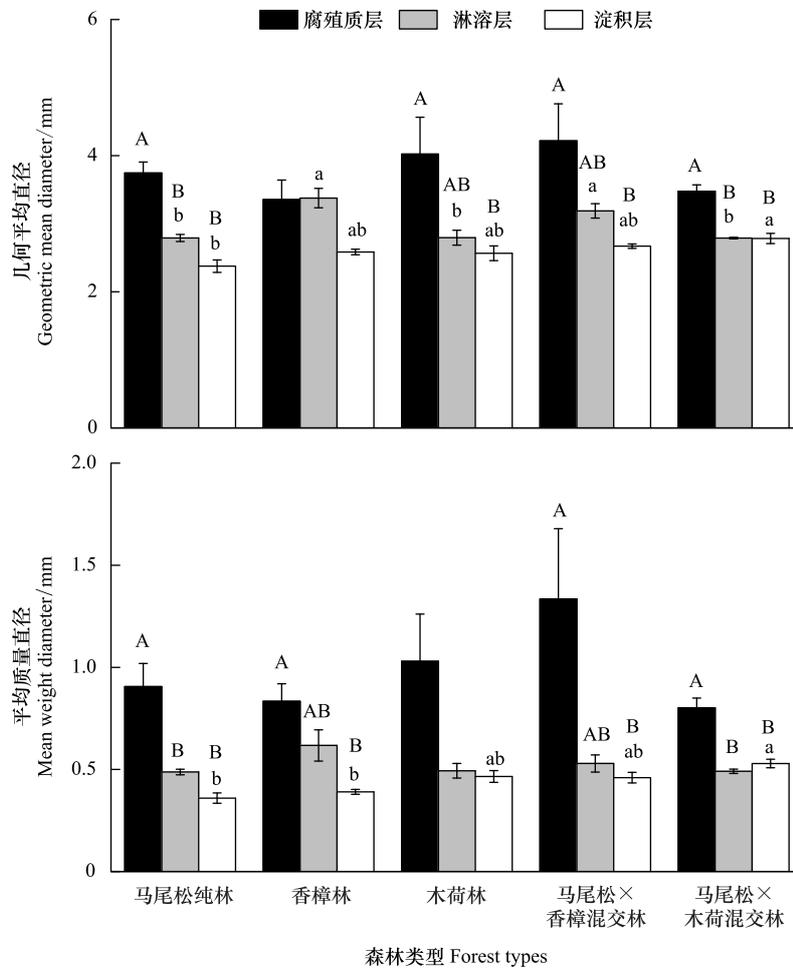


图5 不同森林类型各土层土壤几何平均直径和平均质量直径变化

Fig.5 Variation of soil geometric mean diameter (GMD) and mean weight diameter (MWD) in various soil layers of different forest types

分解的影响所致,本研究中木荷人工林密度大(表1),林下光照不足,且林下分布的植物种类和数量较少,不利于凋落物分解及其养分释放。任来阳等^[26]在酸雨区同一林下环境的研究表明,马尾松和木荷的凋落物分解速率并无显著差异。可见,在酸雨区营造适宜的森林类型及其林下环境,对于改善土壤养分条件非常重要。

土壤 pH 值、阳离子交换量、交换性阳离子含量和盐基饱和度均是反映土壤酸化程度的重要指标^[27],这些指标一般随土壤酸化程度加重而降低,但交换性 Al^{3+} 含量增加^[28]。本研究表明,马尾松纯林改造对土壤酸化特征影响明显,改造成香樟林和马尾松×香樟混交林后能显著提高土壤 pH 值、交换性盐基离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})含量和盐基饱和度,明显降低土壤致酸阳离子(Fe^{3+} 、 Al^{3+})含量;当改造成木荷林和马尾松×木荷混交林后,部分土层的 pH 值和交换性盐基离子含量显著降低,而部分土层的大部分土壤酸化指标变化不显著。这说明马尾松纯林改造成香樟林和马尾松×香樟混交林能有效减弱土壤酸化程度,提高对土壤酸的缓冲能力,但对淀积层影响作用不明显,这可能与凋落物归还养分和树木根系的影响随土层加深而变弱有关;改造成木荷林和马尾松×木荷混交林虽总体上对土壤酸化特征影响不明显,但能通过降低土壤 pH 值使土壤进一步酸化,这与李志勇等^[17]、任来阳等^[26]在该区域的研究结果一致。李志勇等^[17]研究表明,木荷抗酸能力很强,在酸雨区生长迅速,枝叶繁茂,往往不利于林下植物生长及天然更新和生物多样性保护。可见,木荷虽是优良的森林防火树种^[29],但用作酸雨区马尾松纯林改造的替代树种时应慎重,至少首先应科学确定合理的栽植密度和混交方式,并加强木荷林分的全过程抚育经营管理,以促进其林下植物生长及天然更新和物种多样性增加,进而改善凋落物组分和加快凋落物分解及养分回归,避免对土壤环境产生不利影响。

≥ 0.25 mm 水稳性大团聚体可在一定程度上表征土壤结构和质量的好坏^[30],其含量越高,土壤结构稳定性越好^[31]。本研究表明,马尾松纯林改造成其他森林类型后,总体对各粒径土壤团聚体含量的影响不太明显,但木荷林及马尾松×木荷混交林能有效增加淀积层的土壤水稳性大团聚体(0.25—2 mm)含量;香樟林和马尾松×香樟混交林能增加土壤微团聚体(0.053—0.25 mm)含量,而减少黏粉粒(<0.053 mm)含量。这说明马尾松纯林改造成其他森林类型后可有效改善部分土层的土壤结构及其稳定性,这可能与各森林类型的根系深度分布特征有关,根系及其分泌物的增加有利于大颗粒团聚体形成^[32]。GMD 和 MWD 是评价土壤团聚体稳定性的重要参数^[15],本研究表明马尾松纯林改造对各森林类型的腐殖质层和木荷林的淋溶层及淀积层的土壤团聚体稳定性无显著影响,但均能显著增强香樟林、马尾松×香樟混交林和马尾松×木荷混交林的淋溶层或淀积层的土壤团聚体稳定性,尤其马尾松×木荷混交林,这与徐海东等^[33]研究结果一致。

土壤团聚体作为土壤有机碳储存的重要场所,影响着土壤有机碳转化^[34],其中土壤大团聚体虽能储存更多有机碳,但不稳定,而微团聚体利于有机碳长期固定^[35]。有机碳则能促进土壤团聚体形成,增强其稳定性^[31]。本研究表明马尾松纯林改造成马尾松×木荷混交林后腐殖质层的大团聚体有机碳含量有所降低,对应的微团聚体及黏粉粒有机碳含量却均增加,说明马尾松×木荷混交林有助于将腐殖质层大团聚体中储存的有机碳向微团聚体和黏粉粒转变,从而促进土壤有机碳的长期固定。香樟林腐殖质层的各粒径团聚体有机碳含量均显著降低,而其淋溶层的各粒径团聚体有机碳含量均显著增加,这与其土壤有机碳含量变化一致(图 1),说明改造成香樟林有助于有机碳向淋溶层富集^[36]。

综上,酸雨区马尾松纯林改造对土壤养分、酸化特征及团聚体稳定性的影响较为明显,其中以改造成香樟林和马尾松×香樟混交林的改善效果总体上较好,而改造成木荷林和马尾松×木荷混交林的改善效果相对较差,尤其木荷林。因此,对酸雨区马尾松纯林改造,首先应科学选择马尾松替代树种及其林下补植树种,然后根据所选树种的生物学、生态学特性及林分特征,合理确定相应的改造方法及措施,避免对土壤环境产生不利影响。然而,由于受实验条件所限,本研究只能采用空间代替时间的方法来反映马尾松纯林改造的不同林分类型,未能从时间尺度对马尾松纯林改造前后开展原位研究,今后需加强马尾松纯林改造控制试验设计及其长期固定监测样地建设,以对同一地点的马尾松纯林改造前后开展土壤环境监测研究。同时,还需加强对已改造林分的地上、地下部分特征长期定位监测,以更加全面认识营林措施及其林分特征对土壤酸化环境的影响机理与时间效应,并能结合改造林分的现状及问题动态调整营林措施,进而实现林分改造全过程的可持续管理。

参考文献 (References):

- [1] Duan L, Yu Q, Zhang Q, Wang Z F, Pan Y P, Larssen T, Tang J, Mulder J. Acid deposition in Asia: Emissions, deposition, and ecosystem effects. *Atmospheric Environment*, 2016, 146: 55-69.
- [2] 刘厚田, 田仁生. 重庆南山马尾松衰亡与土壤铝活化的关系. *环境科学学报*, 1992, 12(3): 297-305.
- [3] 郑珂, 赵天良, 张磊, 曾宁, 郑小波, 杨清健. 2001—2017 年中国 3 个典型城市硫酸盐和硝酸盐湿沉降特征. *生态环境学报*, 2019, 28(12): 2390-2397.
- [4] Wang Y H, Solberg S, Yu P T, Myking T, Vogt R D, Du S C. Assessments of tree crown condition of two Masson pine forests in the acid rain region in south China. *Forest Ecology and Management*, 2007, 242(2/3): 530-540.
- [5] 张治军, 王彦辉, 于澎涛, 袁玉欣, 李志勇, 张国增, 刘英亘. 不同优势度马尾松的生物量及根系分布特征. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(4): 71-75.
- [6] 陈展, 王琳, 尚鹤. 接种彩色豆马勃对模拟酸沉降下马尾松幼苗生物量的影响. *生态学报*, 2013, 33(20): 6526-6533.
- [7] 王轶浩, 王彦辉, 于澎涛, 熊伟, 李振华, 郝佳, 段健. 重庆酸雨区马尾松林凋落物特征及对干旱胁迫的响应. *生态学报*, 2013, 33(6): 1842-1851.
- [8] 于浩, 陈展, 尚鹤, 曹吉鑫. 野外模拟酸雨胁迫下接种外生菌根真菌对马尾松幼苗的缓解作用. *生态学报*, 2017, 37(16): 5418-5427.
- [9] Tian D S, Niu S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2): 024019.
- [10] Li Y, Sun J, Tian D S, Wang J S, Ha D L, Qu Y X, Jing G W, Niu S L. Soil acid cations induced reduction in soil respiration under nitrogen enrichment and soil acidification. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 1535-1546.

- [11] Zhu H H, Chen C, Xu C, Zhu Q H, Huang D Y. Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 99-106.
- [12] 王轶浩, 王彦辉. 酸沉降背景下马尾松林土壤水文物理性质比较研究. *四川农业大学学报*, 2021, 39(1): 63-70.
- [13] 吴士文, 索炎炎, 张峥嵘, 卢升高. 南方茶园土壤酸化特征及交换性酸在水稳性团聚体中的分布. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 195-199.
- [14] Anderson A N, Mcbratney A B. Soil aggregates as mass fractals. *Australian Journal of Soil Research*, 1995, 33(5): 757-772.
- [15] 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. *生态学报*, 2013, 33(18): 5493-5499.
- [16] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 李保国. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1973-1979.
- [17] 李志勇, 陈建军, 王彦辉, 于澎涛, 杜士才, 何萍, 段健. 重庆酸雨区人工木荷林对土壤化学性质的影响. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 632-638.
- [18] 樊后保, 李燕燕, 黄玉梓, 林德喜, 袁颖红, 黄荣珍. 马尾松纯林改造成针阔混交林后土壤化学性质的变化. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 77-81.
- [19] Crawford K M, Bauer J T, Comita L S, Eppinga M B, Johnson D J, Mangan S A, Queenborough S A, Strand A E, Suding K N, Umbanhowar J, Bever J D. When and where plant-soil feedback may promote plant coexistence: a meta-analysis. *Ecology Letters*, 2019, 22(8): 1274-1284.
- [20] 简尊吉, 倪妍妍, 徐瑾, 雷蕾, 曾立雄, 肖文发. 中国马尾松林土壤肥力特征. *生态学报*, 2021, 41(13). (2021-04-27). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CAPJLAST&filename=STXB2021042600D>.
- [21] 卢立华, 李华, 陈琳, 明安刚, 杨予静. 经营模式对马尾松近熟林土壤理化性质和化学计量比的影响. *生态学杂志*, 2021, 40(3): 654-663.
- [22] Xie J S, Guo J F, Yang Z J, Huang Z Q, Chen G S, Yang Y S. Rapid accumulation of carbon on severely eroded red soils through afforestation in subtropical China. *Forest Ecology and Management*, 2013, 300: 53-59.
- [23] 谭玲, 何友均, 覃林, 陈绍志. 南亚热带红椎、马尾松纯林及其混交林土壤理化性质比较. *西部林业科学*, 2014, 43(2): 35-41.
- [24] Zeng L X, He W, Teng M J, Luo X, Yan Z G, Huang Z L, Zhou Z X, Wang P C, Xiao W F. Effects of mixed leaf litter from predominant afforestation tree species on decomposition rates in the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 679-686.
- [25] He W, Ma Z Y, Pei J, Teng M J, Zeng L X, Yan Z G, Huang Z L, Zhou Z X, Wang P C, Luo X, Xiao W F. Effects of predominant tree species mixing on lignin and cellulose degradation during leaf litter decomposition in the Three Gorges Reservoir, China. *Forests*, 2019, 10(4): 360.
- [26] 任来阳, 于澎涛, 刘霞, 王彦辉, 李振华, 王轶浩. 重庆酸雨区马尾松与木荷的叶凋落物分解特征. *生态环境学报*, 2013, 22(2): 246-250.
- [27] Chen D M, Lan Z C, Bai X, Grace J B, Bai Y F. Evidence that acidification-induced declines in plant diversity and productivity are mediated by changes in below-ground communities and soil properties in a semi-arid steppe. *Journal of Ecology*, 2013, 101(5): 1322-1334.
- [28] 胡波, 张会兰, 王彬, 王云琦, 郭平, 刘春霞, 唐晓芬. 重庆缙云山地区森林土壤酸化特征. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(2): 300-309.
- [29] 陈永瑞, 刘允芬, 林耀明, 李家永, 张宏志. 江西千烟洲试区木荷阔叶林的水文过程及养分动态研究. *林业科学*, 2003, 39(4): 145-150.
- [30] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 2002, 47(2): 133-149.
- [31] 王冰, 周扬, 张秋良. 兴安落叶松林龄对土壤团聚体分布及其有机碳含量的影响. *生态学杂志*, 2021. (2021-03-24). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CAPJLAST&filename=STXZ20210322009>.
- [32] 苑亚茹, 韩晓增, 李禄军, 丁雪丽. 低分子量根系分泌物对土壤微生物活性及团聚体稳定性的影响. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 96-99.
- [33] 徐海东, 苑海静, 熊静, 虞木奎, 成向荣. 杉阔异龄复层林对土壤团聚体稳定性和有机碳及养分储量的影响. *林业科学研究*, 2020, 33(3): 107-115.
- [34] Xie J, Peng B, Wang R, Batbayar J, Hoogmoed M, Yang Y, Zhang S, Yang X, Sun B. Responses of crop productivity and physical protection of organic carbon by macroaggregates to long-term fertilization of an Anthroisol. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(3): 555-567.
- [35] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 447-455.
- [36] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 665-676.