

DOI: 10.20103/j.stxb.202401100090

张佳怡, 王轶浩, 余龙飞, 高澳寒, 邓洁. 酸沉降减弱背景下重庆城郊马尾松林结构特征及土壤性质变化特征. 生态学报, 2024, 44(23): 10745-10756.

Zhang J Y, Wang Y H, Yu L F, Gao A H, Deng J. Structural characteristics and soil properties changes of *Pinus massoniana* forest in the suburbs of Chongqing under the background of weakened acid deposition. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23): 10745-10756.

酸沉降减弱背景下重庆城郊马尾松林结构特征及土壤性质变化特征

张佳怡¹, 王轶浩^{1,*}, 余龙飞², 高澳寒¹, 邓洁¹

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

2 清华大学深圳国际研究生院, 深圳 518055

摘要: 酸雨作为全球性环境问题, 给森林生态系统带来极大危害, 不过近十多年来我国酸雨状况持续得到改善, 在此背景下为科学认识和准确理解酸雨区森林结构与土壤性质变化及响应, 以重庆城郊的马尾松林为研究对象, 采用原位监测方法, 对比分析 2011、2021 年马尾松林结构特征、土壤水文物理性质、土壤养分与酸化特征及其变化, 结果表明: (1) 十年期间马尾松林密度、平均树高和胸径均降低, 但树种多样性指数均增大。 (2) 马尾松、杉木等针叶树种重要值、生物量及其占比均下降, 其中马尾松下降尤为明显 ($P < 0.05$), 但阔叶树种均上升, 且新增了较多幼树和中大径级树木。 (3) 各土层容重均减小, 而土壤非毛管孔隙均增大, 且表层土壤总孔隙度、毛管孔隙度也增大, 但底层却减小。 (4) 各层土壤 pH 值均降低 ($P < 0.05$), 但土壤交换性盐基离子含量均增加 ($P < 0.05$), 且腐殖质层、表层土壤有机质含量也增加。总体上, 酸沉降减弱背景下重庆城郊马尾松林结构得到有效改善, 土壤水文物理性质得到一定改良, 土壤酸化有向好转变趋势, 但其进程明显滞后于酸雨控制。

关键词: 林分结构; 土壤酸化; 城郊森林; 时间变化; 恢复

Structural characteristics and soil properties changes of *Pinus massoniana* forest in the suburbs of Chongqing under the background of weakened acid deposition

ZHANG Jiayi¹, WANG Yihao^{1,*}, YU Longfei², GAO Aohan¹, DENG Jie¹

1 College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University; Three Gorges Reservoir Area Earth Surface Ecological Processes of Chongqing Observation and Research Station, Chongqing 401331, China

2 Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China

Abstract: Acid rain is a global environmental problem and Chongqing is one of cities where acid rain occurred earliest in China. The acid deposition in the suburbs of Chongqing was extremely serious and exerted a significant threat to forest ecosystem and soil acidification. *Pinus massoniana* is a common afforestation species in southern China and one of the most dominant vegetation types in this region, but it is extremely sensitive to the hazard of acid deposition. Under the long-term influence of acid rain, *Pinus massoniana* has undergone significant disturbance. However, in recent years, acid rain has been greatly alleviated in southern China. Under this background, it is necessary to scientifically understand and accurately comprehend the changes and the responses of forest structure and soil properties in acid rain region, and will provide a scientific basis for the assessment of forest adaptability in the later stage of acid rain impact and forest sustainable management. However, previous studies have mainly focused on the short-term effect of acid deposition on structure and

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目 (CSTB2023NSCQ-MSX0741); 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJQN202000502); 重庆师范大学基金项目 (20XLB005); 重庆市大学生创新创业训练计划项目 (S202210637032)

收稿日期: 2024-01-10; 网络出版日期: 2024-09-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wyih515@163.com

function of *Pinus massoniana* forests. A long-term study of *Pinus massoniana* forests in response to the gradual control of acid rain has not been so far. Over the past decade, we monitored the changes of structural characteristics, soil hydro-physical properties, soil nutrients and acidification characteristics of *Pinus massoniana* forest in the suburbs of Chongqing. The results showed that the density, average tree height and average diameter at breast height (DBH) of *Pinus massoniana* forest decreased after ten years, but species diversity index increased. Importance value, biomass and its proportion of coniferous species including *Pinus massoniana* and *Cuninhama lanceolata* decreased, with *Pinus massoniana* declining the most ($P<0.05$); by contrast, the broadleaf species increased, with more young trees and medium to large diameter-trees added. Soil bulk density of each soil layer decreased, while soil non-capillary porosity increased. Total porosity and capillary porosity of the top soil layer also increased, but the bottom layer decreased. Soil pH decreased in all layers ($P<0.05$), but soil exchangeable saline base ion content increased ($P<0.05$), and humus layer and surface soil organic matter content also increased. Overall, under the background of weakened acid deposition, structure of *Pinus massoniana* forest in the acid rain region was effectively improved over the past decade. Soil hydro-physical properties were somewhat improved and showed a trend of recovering from acid rain impact, but compared with the control of acid rain, soil acidification improvement has an obvious lagging effect and its process is longer and more complex.

Key Words: stand structure; soil acidification; suburban forest; time variation; recovery

酸雨是一个全球性的环境问题,我国是继欧洲和北美之后的世界第三大酸雨区^[1],其中重庆地区又是我国酸雨发生最早的地区之一,尤其受工业化、城市化进程影响,重庆城郊酸沉降异常严重且森林土壤酸化明显^[2]。马尾松(*Pinus massoniana*)作为我国南方的主要造林树种和重要乡土树种,在当地森林资源组成及其生态服务功能发挥中占有重要地位^[3],但其对酸沉降危害极其敏感,常表现出落叶率增加、根系分布变浅、生物量下降等明显的受害特征^[4-6]。

目前国内外学者对酸沉降影响马尾松个体及林分结构与功能方面已做了不少研究,也取得了较多成果,比如,研究表明酸沉降对马尾松的危害是多方面的、持续累积的,随着时间延长而危害加重,且在酸沉降胁迫下,马尾松叶面积明显减少、光合作用下降,从而生长受到抑制、生物量减少^[7];受到酸沉降危害的马尾松林土壤容重增大,总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙减小,削减地表径流能力明显下降^[8]等等,但以往研究主要集中在酸沉降对马尾松林结构与功能的短期影响,而对较长时期的酸雨区马尾松林结构特征及土壤性质的变化研究还未见报道。尤其自 2007 年以来我国酸雨持续改善,表现为降水的平均 pH 明显回升,酸雨区面积有所减少^[9],其中重庆地区的酸沉降量自 2010 年以来也总体呈下降趋势^[10]。在此背景下,其森林结构特征及其土壤性质如何响应并是否协同得到改善尚不得而知,这严重制约着对酸雨区森林生态系统健康现状认识、适应性评估及其受酸沉降影响程度的科学理解,也大大限制着酸雨区森林健康恢复及可持续经营管理。

本文在酸沉降危害严重但作为重庆主城“肺叶”之一的铁山坪林场,以马尾松林为研究对象,对比分析 2011 年、2021 年这十年前后同一地点的马尾松林结构特征、土壤水文物理性质、土壤养分与酸化特征及其变化,以期掌握近年来酸雨持续改善背景下酸雨区森林生态系统的变化规律,为酸雨区后期森林适应性评估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(29°38'N, 106°41'E),属亚热带湿润气候,多年平均降水量 1100mm,年均气温 18℃。该地属四川盆东平行岭谷地貌,海拔变异范围在 242—584m,坡度变化在 5°—30°,土壤以砂岩上发育的山地黄壤为主,土层厚度一般变化在 50—80cm。研究区酸沉降严重,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^[8]。森林主要是 20 世纪五六十年代天然林经破坏后自然更新

形成的马尾松次生林,林分的分层现象明显,上层以马尾松为主,并伴有少量香樟(*Cinnamomum camphora*)、楠木(*Phoebe zhennan*),其中马尾松受酸沉降危害特征明显,落叶率多年平均为 40%—50%^[4];下木层主要为木荷(*Schima superba*)、茜树(*Aidia cochinchinensis*)、杉木(*Cuninhamia lanceolata*)、青皮木(*Schoepfia jasminodora*)等;草本层以铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

2011 年 5 月,在铁山坪林场林中园小流域随机选择代表性地点,设置规格为 30×30m 的马尾松林典型样地 3 个,调查其土壤、地形基本情况(表 1)。

表 1 马尾松林典型样地基本概况

Table 1 The basic situation of sample plots

样地编号 Plot number	土层深度 Soil depth/cm	土壤类型 Soil type	海拔 Altitude/m	坡度 Slope gradient/(°)	坡位 Slope position	坡向 Slope aspect
1	80	山地黄壤	547	10	上坡	西南
2	80	山地黄壤	570	10	中坡	西北
3	80	山地黄壤	570	5	中坡	北

1.2.2 植被特征调查与计算

分别于 2011 年、2021 年的 5 月份对马尾松林各样地的植被特征进行详细调查,包括树木种类、林分密度、郁闭度、灌木层盖度、草本层盖度等,并对胸径≥5cm 的活立木进行每木检尺,记录树种名称、树高、胸径等。然后分别以树木高度、胸径对所有调查树木进行等级划分,其中,以 5m 为树高阶距,划分为 5 个树高级,即 I 级(1m<H≤5m)、II 级(5m<H≤10m)、III 级(10m<H≤15m)、IV 级(15m<H≤20m)、V 级(20m<H≤25m);以 5cm 为胸径阶距,划分为 6 个径级,即 I 级(5cm<DBH≤10cm)、II 级(10cm<DBH≤15cm)、III 级(15cm<DBH≤20cm)、IV 级(20cm<DBH≤25cm)、V 级(25cm<DBH≤30cm)、VI 级(DBH>30cm)。用于表征树种多样性的 Margalef 丰富度指数(R)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Simpson 多样性指数(D)、Pielou 均匀度指数(E)和树种重要值(IV ,%)分别通过公式(1)、(2)、(3)、(4)、(5)计算所得。

$$R = \frac{(S - 1)}{\ln N} \quad (1)$$

$$H = - \sum_{i=1}^{N_i} (P_i \ln P_i) \quad (2)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (3)$$

$$E = \frac{H}{\ln S} \quad (4)$$

$$IV = (Rf + Rd + Pr) / 3 \quad (5)$$

式中, S 为树种种数; N 为所有树种的个数; N_i 为第 i 种树种的个数, P_i 为第 i 种树种个数占树种总数的百分比(%); Rf 为相对频度,即样地中某个树种的频度占全部树种频度之和的百分比(%); Rd 为相对密度,即样地中某个树种的密度占全部树种密度之和的百分比(%); Pr 为相对显著度,即样地中某个树种的胸高断面积占全部树种胸高断面积之和的百分比(%)。

树木个体生物量通过现有的树种生物量异速生长方程,并结合样地每木检尺数据计算所得。为确保计算结果符合实际且精确,尽量选用了同一地区、同一树种的异速生长方程,其中,马尾松、杉木、常绿阔叶树种生物量异速生长方程分别选用张治军等^[5]、郭耆等^[11]、Shuai Ouyang 等^[12]研究成果,然后对样地各树木生物量进行求和,得到马尾松林样地的乔木层生物量。

1.2.3 土壤样品采集及其理化性质测定

2011 年 5 月,在马尾松林各样地随机选取 3 个取样点,在各取样点挖掘一个土壤剖面(1m×1m),用规格为 200 cm³ 环刀分 0—20、20—40、40—60cm 土层取原状土样,每层 2—3 个重复,带回实验室后采用环刀法测定土壤容重、孔隙度、持水量等土壤物理性质^[13]。同时,在各土壤剖面按同样分层再采集一部分土样,将同一土层不同取样点的土样混合,即每个样地取得 3 个混合土样,用于测定土壤化学性质,其中土壤 pH 值采用电位法,有机质采用重铬酸钾—外加热法,全氮采用凯氏定氮法,全磷采用钼锑抗比色法,交换性 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 含量采用原子吸收光度法,交换性 H⁺ 含量采用氯化钾交换-中和滴定法。2021 年 5 月,采用同样方法对马尾松林各样地进行土样采集及其理化性质测定。

1.2.4 数据处理

使用 SPSS 25.0 软件进行数据分析,其中,采用独立样本 T 检验方法比较十年前后马尾松林结构特征、土壤理化性质的差异性;采用单因素方差分析(one-way ANOVA)方法检验同一年份不同土层土壤理化性质的显著性,并利用 Origin 2022 软件作图。

2 结果

2.1 马尾松林树高和胸径分布

2011 年马尾松林密度为 785 棵/hm²、平均树高为 14.52m,2021 年则分别为 633 棵/hm²、11.14m,相比 2011 年分别降低 19.36%、23.28%。由图 1 可知,2011、2021 年马尾松林树高均主要分布在Ⅱ、Ⅳ级,其中树高Ⅱ级木分别达到 35.38%、38.94%。相比 2011 年,2021 年马尾松林树高Ⅱ—Ⅴ级木的个数均明显减少,但新增了树高Ⅰ级木。依树种看,2021 年各树高级的马尾松数量相比 2011 年均减少,同样,树高Ⅱ、Ⅲ级杉木也明显减少,减幅分别达 63.64%、38.46%;阔叶树种则除树高Ⅲ级木明显减少(减幅达 22.22%)外,其他树高级的树木数量均不同程度增加,尤其新增了树高Ⅰ、Ⅴ级木。总体来看,2021 年马尾松林树高呈正态分布,其树

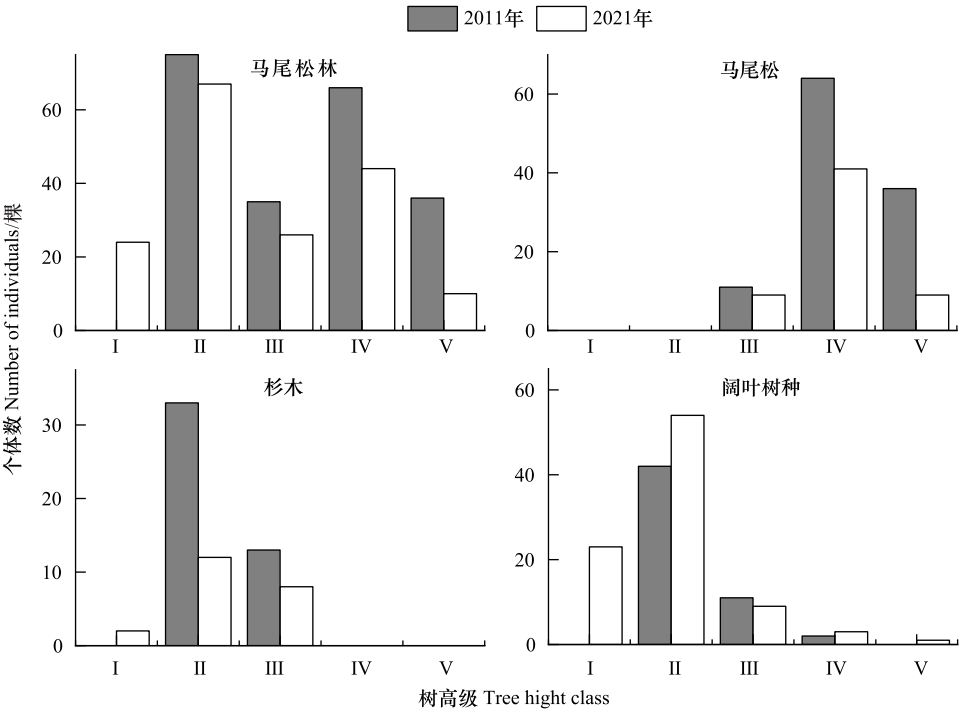


图 1 马尾松林及其组成树种的树高分布

Fig.1 Tree height distribution of *Pinus massoniana* forest and its component species

I:一级; II:二级; III:三级; IV:四级; V级:五级; VI:六级

高Ⅱ—Ⅴ级木的减少主要是因相应树高级的马尾松、杉木数量减少,而新增树高Ⅰ级木主要是因新增了阔叶树种的树高Ⅰ级木,除此之外,阔叶树种还新增了树高Ⅴ级木,说明阔叶树种已逐渐占据了马尾松林的亚优势层或优势层。

由图 2 可知,2011、2021 年马尾松林均以 5—10cm 径级树木为主,同样,杉木和阔叶树种也均主要分布在 5—10cm 径级,但 5—10、10—15cm 径级的马尾松却很少。相比 2011 年,2021 年马尾松林 10—15、>30cm 径级的树木均有所增加,而 15—20、20—25、25—30cm 径级的树木却明显减少,这使得马尾松林平均胸径从 17.16cm 降低到 15.60cm,降幅达 9.09%。除>30cm 径级外,2021 年马尾松其他各径级树木相比 2011 年均明显减少,减幅均达到 40% 以上,尤其 5—10、10—15cm 径级马尾松已没有,说明铁山坪酸雨区的马尾松已没有自然更新,预测未来随着马尾松林自然演替进程,马尾松在该研究区将逐步退出。同样,相比 2011 年,2021 年 15—20cm 径级杉木已没有,且 5—10cm 径级杉木也明显减少,减幅达 75%,相反,除 20—25cm 径级外,2021 年阔叶树种(包括白栎木、茜树、青皮木等)的各径级树木相比 2011 年均明显增加,尤其新增了 20—25cm 以及>30cm 的中大径级树木,这说明随着马尾松林自然演替,杉木在林木种间竞争中愈发处于劣势,而阔叶树种则不仅个体数量在不断增加,且生长状况良好,也反映出当前马尾松林已处于向针阔混交林演替阶段。

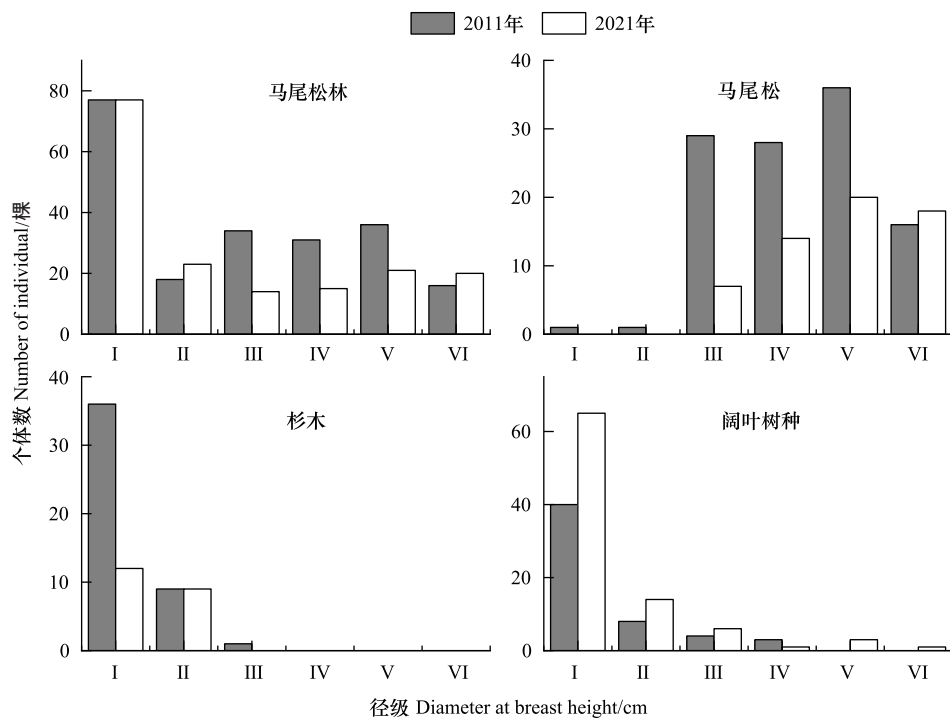


图 2 马尾松林及其组成树种的胸径分布

Fig.2 Diameter at breast height distribution of *Pinus massoniana* forest and its component species

2.2 马尾松林树种组成及多样性

由表 2 可知,2011 年马尾松林 3 个典型样地一共有树木 12 种 212 棵,而 2021 年一共有 14 种 171 棵。相比 2011 年,2021 年马尾松林树木种类有所增加,包括新增了石栎、山茶、赤楠、木姜子 4 种树种,但消失了羽叶山黄麻、青冈 2 种树种;马尾松、杉木分别减少了 52、25 棵,减幅均接近 50%,茜树和白栎木则分别增加 26、9 棵。同时,2021 年马尾松林的树种成分分布更为均匀,各树种所占比例变化在 0.88%—34.51% 之间,而 2011 年各树种变化在 0.47%—52.36% 之间,其中马尾松所占比例达到 52.36%。可见,十年期间马尾松林树种组成与分布发生了明显变化,主要表现为马尾松、杉木等针叶树种的数量、所占比例均明显下降,而茜树等阔叶树种的种类、数量和所占比例整体均呈增加趋势。

表 2 马尾松林树种组成变化
Table 2 Species composition change of *Pinus massoniana* forest

树种 Tree species	2011 年			2021 年		
	个体数 Individual number/棵	比例 Percentage/%	存在情况 Existing situation	个体数 Individual number/棵	比例 Percentage/%	存在情况 Existing situation
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	111	52.36	有	59	34.51	有
杉木 <i>Cuninham lanceolata</i>	46	21.70	有	21	12.39	有
茜树 <i>Aidia cochinchinensis</i>	3	1.42	有	29	16.81	有
白欏木 <i>Loropetalum chinensis</i>	8	3.77	有	17	9.73	有
青皮木 <i>Schoepfia jasminodora</i>	15	7.08	有	14	7.96	有
毛桐 <i>Mallotus barbatus</i>	9	4.25	有	8	4.42	有
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	8	3.77	有	1	0.88	有
石栎 <i>Lithocarpus glabra</i>	—	—	—	8	4.42	有
漆树 <i>Anacardiaceae</i>	4	1.89	有	5	2.65	有
羽叶山黄麻 <i>Trema laevigata</i>	3	1.42	有	—	—	—
楠木 <i>Phoebe zhenna</i>	3	1.42	有	3	1.77	有
山茶 <i>Camellia japonica</i>	—	—	—	3	1.77	有
赤楠 <i>Syzygium buxifolium</i>	—	—	—	1	0.88	有
木姜子 <i>Litsea pungens</i>	—	—	—	1	0.88	有
桤木 <i>Alnus cremastogyne</i>	1	0.47	有	1	0.88	有
青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	1	0.47	有	—	—	—
合计 Total	212		12	171		14

由图 3 也可知,2011—2021 年期间马尾松林的树种多样性得到提升,表现为 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 指数、Pielou 均匀度指数由 2011 年的 1.76、1.37、0.63、0.65 分别增加到 2021 年的 1.97、1.52、0.75、0.70,增幅分别达到 12.33%、10.68%、19.68%、8.21%,其中 Simpson 指数增加显著 ($P<0.05$)。

2.3 马尾松林组成树种重要值

2011—2021 年期间马尾松林各组成树种的重要值发生较大变化(表 3)。相比 2011 年,2021 年虽然马尾松仍然是马尾松林的优势树种,但其重要值明显下降 ($P<0.05$);杉木重要值降低了 5.06,总体排序则由 2011 年第 2 位降低到 2021 年第 3 位;阔叶树种(青皮木、茜树、白欏木)的重要值均升高,其中茜树重要值升高了 11.27($P<0.05$),总体排序由 2011 年第 5 位升高到 2021 年第 2 位。

2.4 马尾松林乔木层生物量

由表 4 可知,2011 年马尾松林乔木层生物量为 162.78 t/hm²,其中马尾松生物量达 150.40 t/hm²,占乔木层生物量的 92.40%,而其他树种的生物量一共仅占 7.60%。2021 年马尾松林乔木层生物量为 125.55 t/hm²,相比 2011 年减少了 37.23 t/hm²,这可能主要因十年期间马尾松的大量衰退死亡所致。正如表 4 所示,2021 年马尾松生物量相比 2011 年减少了 44.12t/hm²,减幅达 29.34%,其占乔木层生物量的比例也降低到 84.65%,而除马尾松、杉木外,各阔叶树种的生物量均增加,共为 18.36 t/hm²,占乔木层生物量的比例增加到 14.62%。

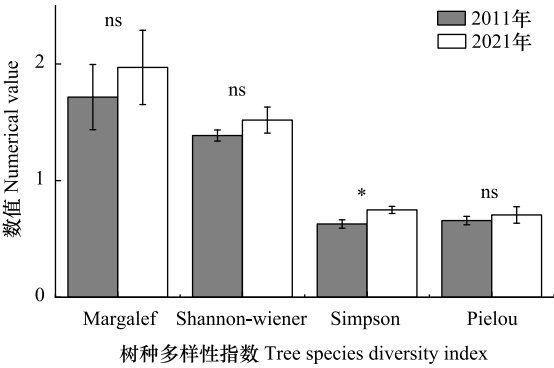


图 3 马尾松林树种多样性变化

Fig.3 Species diversity change of *Pinus massoniana* forest

ns 表示同一指标不同年份间差异不显著, * 表示同一指标不同年份间差异显著 ($P<0.05$)

表 3 马尾松林主要组成树种重要值变化

Table 3 Importance values of main tree species in *Pinus massoniana* forest

树种 Tree species	重要值 Importance value/%		<i>P</i>	位次 Degree		变化 Difference
	2011 年	2021 年		2011 年	2021 年	
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	65.31	49.89	0.045 *	1	1	0
杉木 <i>Cuninhamia lanceolata</i>	13.63	8.56	0.569	2	3	-1
青皮木 <i>Schoepfia jasminodora</i>	5.37	6.53	0.504	3	4	-1
茜树 <i>Aidia cochinchinensis</i>	1.61	12.58	0.048 *	5	2	+3
白欏木 <i>Loropetalum chinensis</i>	2.10	5.26	0.561	4	5	-1

* 表示 $P<0.05$

表 4 马尾松林主要组成树种生物量变化

Table 4 Biomasses of main tree species in *Pinus massoniana* forest

树种 Tree species	2011		2021		变化 Difference	
	生物量 Biomass/ (t/hm ²)	比例 Percentage/%	生物量 Biomass/ (t/hm ²)	生物量 Biomass/ (t/hm ²)	比例 Percentage/%	生物量 Biomass/ (t/hm ²)
马尾松 <i>Pinus massoniana</i> Lamb	150.40	92.40	106.28	84.65	-44.12 *	-7.74
杉木 <i>Cuninhamia lanceolata</i>	1.64	1.01	0.91	0.73	-0.73	-0.28
白欏木 <i>Loropetalum chinensis</i>	0.69	0.42	2.08	1.66	1.39	1.24
青皮木 <i>Schoepfia jasminodora</i>	2.59	1.59	4.71	3.75	2.12	2.16
茜树 <i>Aidia cochinchinensis</i>	0.13	0.08	1.47	1.13	1.34	1.09
其他树种 <i>Other species</i>	7.33	4.51	10.10	8.05	2.77	3.54
总计 Total	162.78		125.55		-37.23	

2.5 马尾松林土壤理化性质

由表 5 可知,2011、2021 年马尾松林土壤水文物理性质随土层深度变化有所不同,表现为 2011 年马尾松林土壤容重随土层加深而增大,非毛管孔隙度随土层加深而减小 ($P<0.05$),其他土壤水文物理性质均随土层加深而先减小后增大;2021 年马尾松林土壤容重则随土层加深而增大,且表层(0—20cm)土壤容重显著低于底层(40—60cm) ($P<0.05$),其他土壤水文物理性质均随土层加深而减小,除毛管孔隙度无显著变化外,其他均为表层显著高于底层 ($P<0.05$)。总体来看,2011、2021 年马尾松林土壤容重、孔隙度和持水量等水文物理性质均以表层最好,表现为土壤容重最小,而土壤孔隙度、持水量最大。

表 5 马尾松林土壤水文物理性质变化

Table 5 Hydro physical properties changes of *Pinus massoniana* forest

年份 Years	土层深度 Soil depth/cm	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	总孔隙度 Total porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	饱和持水量 Saturated water content	毛管持水量 Capillary water content	田间持水量 Field water capacity
2011 年	0—20	1.45±0.13a	43.99±3.79a	35.07±3.02a	8.92±1.05a	31.77±6.26a	25.13±4.82a	24.28±4.62a
	20—40	1.60±0.07a	39.24±3.27a	34.66±2.79a	4.58±0.85bc	24.66±3.07a	21.77±2.68a	21.18±2.65a
	40—60	1.61±0.04a	40.54±1.77a	36.79±1.61a	3.75±0.61c	25.30±1.66a	22.95±1.46a	22.20±1.33a
	0—60	1.55±0.07a	41.26±2.35a	35.51±2.27a	5.75±0.14b	27.24±2.94a	23.28±2.61a	22.56±2.55a
2021 年	0—20	1.25±0.11b	45.06±3.90a	35.50±2.19a	9.56±2.14a	36.83±6.57a	28.92±4.16a	22.65±3.24a
	20—40	1.50±0.07a	39.00±2.72ab	32.25±3.17a	6.75±1.25ab	26.24±2.62b	21.62±2.55b	16.74±2.24b
	40—60	1.59±0.05a	37.70±2.35b	33.08±1.99a	4.63±0.78b	23.78±2.25b	20.85±1.92b	16.18±1.75b
	0—60	1.45±0.06a	40.59±2.49ab	33.61±2.06a	6.98±0.68ab	28.95±3.18ab	23.80±2.50ab	18.53±2.03ab

同列不同小写字母表示同一年份不同土层间差异显著 ($P<0.05$)

相比 2011 年,2021 年马尾松林各土层土壤容重和田间持水量均降低,非毛管孔隙度均升高,而其他土壤

水文物理性质在各土层的变化并不一致,表现为 0—20cm 土层土壤总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量均升高,但 20—40、40—60cm 土层的土壤总孔隙度、毛管孔隙度、毛管持水量却降低。总体来看,十年期间马尾松林的土壤水文物理性质有所改善,其中以表层(0—20cm)土壤的改善效果最好,但除 40—60cm 土层的田间持水量变化明显外($P<0.05$),其他土层的各土壤水文物理性质变化均不显著($P>0.05$)。

由图 4 可知,2011、2021 年马尾松林土壤 pH 值分别变化在 3.64—4.03、3.33—3.77 之间,均属强酸性土壤,且均随土层加深而增大。相比 2011 年,马尾松林平均土壤 pH 值由 2011 年 3.9 下降到 2021 年 3.6,且各层土壤 pH 值均显著下降($P<0.05$),这说明相比 2011 年,2021 年马尾松林土壤酸化更为严重。2011、2021 年马尾松林土壤有机质、全磷、全氮含量均随土层加深而下降。与 2011 年相比,2021 年马尾松林腐殖质层和 0—20cm 土层的土壤有机质含量均增加,但变化并不明显($P>0.05$);腐殖质层的全氮含量增加($P<0.05$),但 0—20cm 土层全氮含量却降低($P<0.05$);各土层的全磷含量均增加,但仅 40—60cm 土层达到显著水平($P<0.05$)。

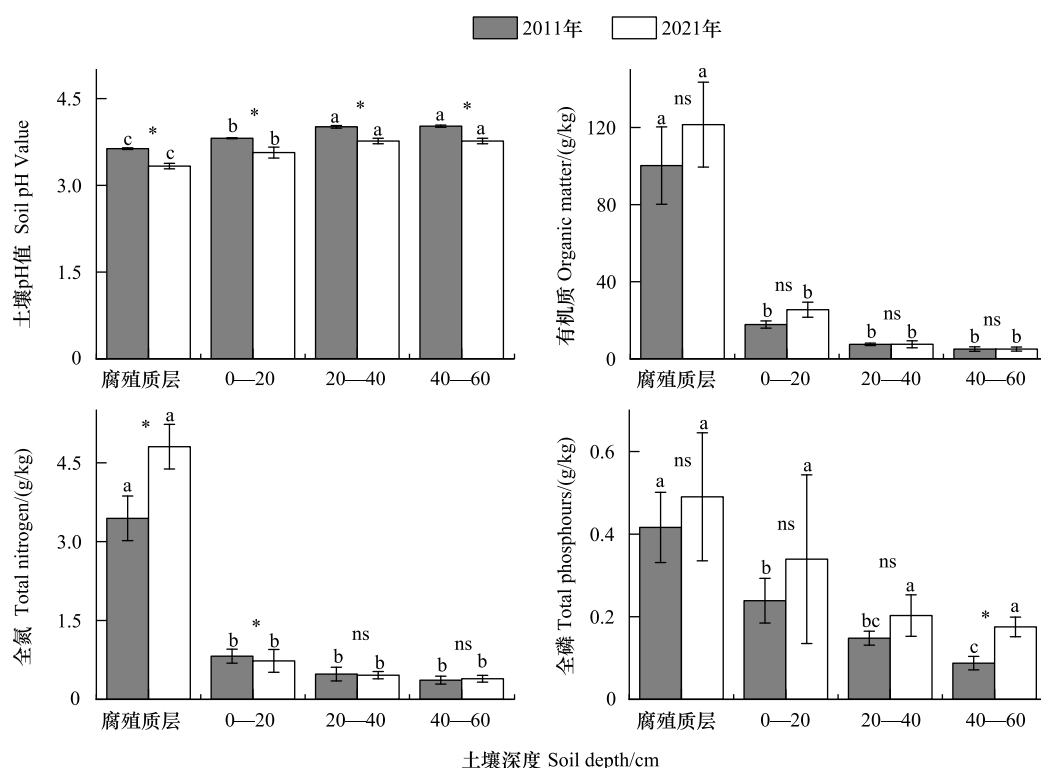


图 4 马尾松林土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷变化

Fig.4 Soil pH, organic matter, total nitrogen and total phosphorus changes of *Pinus massoniana* forest

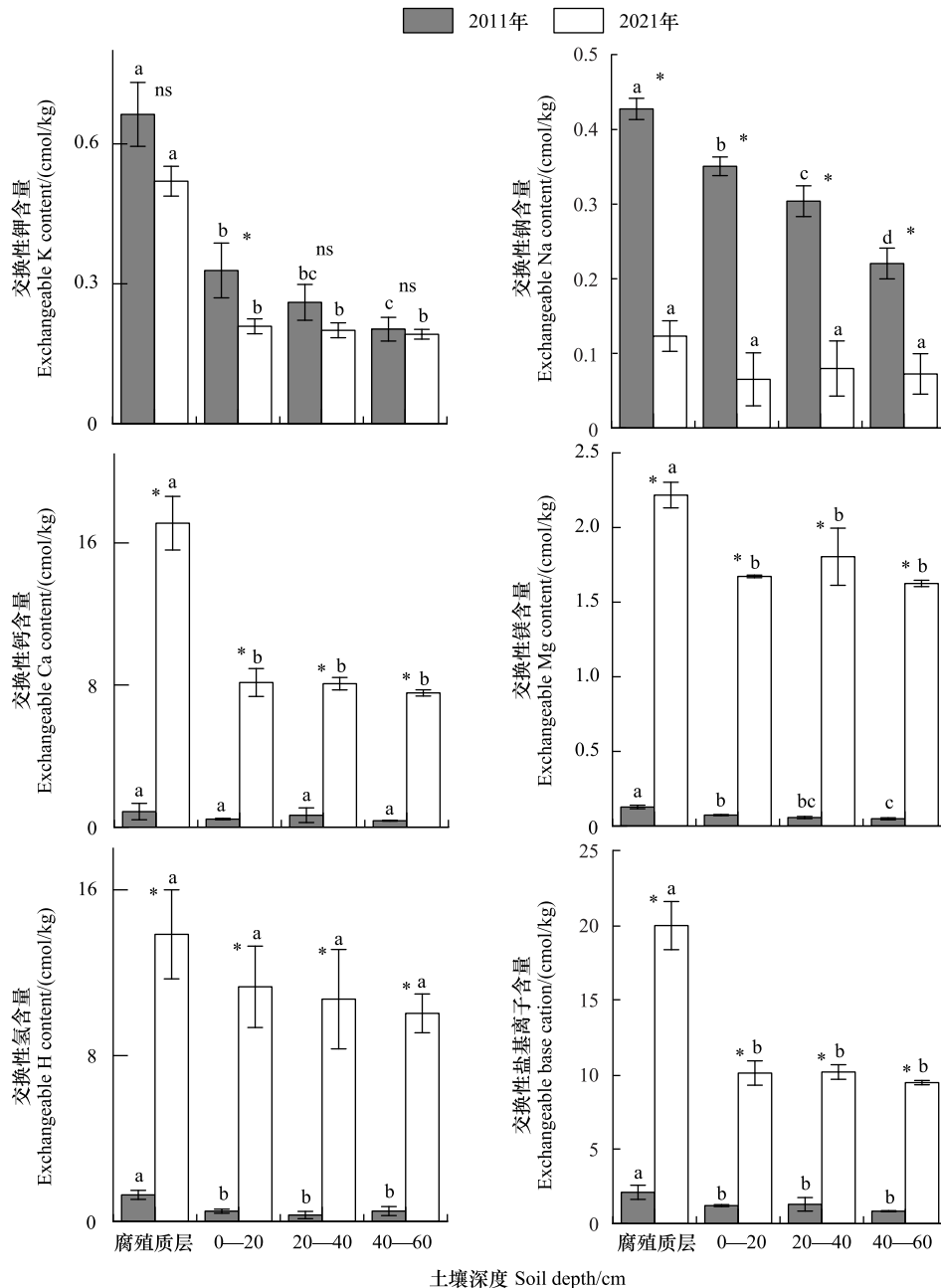
同一年份的不同小写字母表示不同土层间差异显著($P<0.05$)

由图 5 可知,2011 年马尾松林土壤交换性 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 含量随土层加深而降低,其中 Ca^{2+} 、 H^+ 含量均以腐殖质层最大。同样地,2021 年马尾松林土壤交换性阳离子均以腐殖质层最大,其中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 H^+ 含量也随土层加深而降低。相比 2011 年,2021 年马尾松林各土层的土壤交换性 K^+ 、 Na^+ 含量均减少,但 K^+ 含量变化并不显著($P>0.05$);各土层 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 H^+ 含量及交换性盐基离子含量均显著增加($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 酸雨区马尾松林结构特征时间变化

树木胸径、高度及其分布是反映森林生长状况及结构的基本指标^[14],本研究十年期间马尾松林胸径、树高及其分布均发生了明显变化,与 2011 年相比,2021 年马尾松林平均胸径、平均树高均减小,这主要是因为

图5 马尾松林土壤交换性阳离子(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、H⁺)变化Fig.5 Soil exchangeable cations(K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H⁺) changes of Pinus massoniana forest

十年期间马尾松林中大径级(10—15、15—20、20—25cm)树木大幅减少,且树高Ⅱ—Ⅴ级木也明显减少,但新增了较多低矮的树高Ⅰ级木。从树种组成来看,十年期间各径级、树高级马尾松、杉木等针叶树木总体上均减少,尤其中小径级(5—10、10—15cm)马尾松已没有。马尾松、杉木树木总数减幅均接近50%,这主要是因为马尾松对酸沉降危害极其敏感,在长期的酸沉降影响下马尾松健康水平明显降低,极易遭受病虫害危害和干旱胁迫^[15],从而发生衰退和死亡;杉木则为较喜光树种且不耐旱,而本研究区存在明显的伏旱季节(夏季持续的高温少雨)^[16],可能是造成杉木大幅减少的主要原因,同时杉木往往处于马尾松林的下木层,林下光照不足可能也是造成杉木死亡的原因之一。但各径级、树高级的阔叶树木总体上均增加,并且新增了20—25、>30cm的中大径级树木和树高Ⅰ、Ⅴ级木。说明本研究区马尾松已没有自然更新,马尾松、杉木等针叶树种总体呈衰

退趋势,而青皮木、白欆木、茜树等阔叶树种则自然更新较好,且个体不断增多与壮大,逐渐占据马尾松林优势层,这与戴冬等^[17]研究结果相似,也表明本研究区马尾松林已处于向针阔叶混交林演替阶段^[18]。

树种多样性是评价森林健康与否的重要指标,一般来说,树种越丰富,森林越健康稳定^[19]。本研究表明,十年期间酸雨区马尾松林新增了4种树种(均为阔叶树种),减少了羽叶山黄麻、青冈2种树种,其中羽叶山黄麻为喜光树种,青冈则对酸沉降危害非常敏感^[20],它们消失可能与研究区马尾松林郁闭度高、林下光照不足以及长期受酸沉降影响有关,不过总体上马尾松林的树种种类增多,并且各树种的多样性指数均升高,说明马尾松林正趋向健康稳定转变,种间竞争仍较为激烈,适者生存,否则被淘汰。树种重要值作为一个综合衡量指标,可以反映森林中优势树种组成及其所处的优势程度,本研究中2021年马尾松、杉木的重要值相比2011年均均有较大幅度下降,而青皮木、茜树、白欆木的重要值均增大,但仍低于马尾松的重要值,表明马尾松仍是当前林分的优势树种,而阔叶树种的优势程度则不断增强。丁圣彦等^[21]研究表明,马尾松作为阳性树种,光补偿点高,林下幼苗不耐荫,在缺乏阳光的林下较为弱势。在自然演替进程中,随着树种多样性增加,马尾松幼苗个体竞争力较弱,强烈的环境筛选和种内竞争关系导致马尾松幼苗死亡率较高^[22]。然而,本研究调查发现不仅2021年马尾松林中小径级马尾松消失,而且2011、2021年马尾松林中均没有天然更新的马尾松幼苗,这除与马尾松林自然演替有关外,可能还与酸雨对马尾松更新的影响有关^[7]。有研究表明酸雨对马尾松生长的胁迫影响是多方面的,比如植株幼小、根系分布表层化、生物量下降等,最终导致死亡^[23],可见,酸雨区马尾松衰退不可避免。但作为先锋树种,马尾松可为林下阔叶树种幼苗提供适宜的生长环境,所以马尾松林中青皮木、茜树、白欆木等阔叶树种的重要值不断上升,也反映出阔叶树种对酸雨环境胁迫具有更强的适应性。

生物量是评估森林生产力及其碳汇功能的关键数据和重要指标^[24-25],本研究2021年马尾松林生物量虽然相比2011年降低,但均高于我国森林生物量的平均值(84.08 t/hm^2)^[26],说明本研究区马尾松林仍然具有较强的碳汇功能。张日施等^[27]对广西壮族自治区的马尾松林研究表明,乔木层生物量随林龄增加而增加,而本研究十年间马尾松林乔木层生物量却明显下降,减幅达到22.87%,这主要是因为马尾松个体数量大幅减少(表2)。十年间马尾松林中青皮木、茜树、白欆木等阔叶树种的生物量及其所占乔木层生物量比例则均大幅增加或提高,说明青皮木、茜树、白欆木等阔叶树种在马尾松林中正发挥着越来越重要的生态服务功能与作用。

3.2 酸雨区马尾松林土壤水文物理性质时间变化

土壤容重是表征土壤水文物理性质的重要指标,一般认为,土壤容重小则土质疏松,利于拦截降水、促进入渗和减缓地表径流^[8]。本研究表明,2021年马尾松林各层土壤容重均小于2011年,说明随着时间进程,酸雨区马尾松林土壤入渗增加、削减地表径流能力增强,这与秦佳双等^[28]研究结果一致。但与酸化程度较轻的同处于亚热带的福建莘口林场^[29]及武夷山^[30]、江西大岗山^[31]的马尾松林相比,本研究区2011、2021年马尾松林0—60cm各土层的土壤容重均较大,说明相比酸化程度较轻的马尾松林,本研究区的马尾松林土壤仍然较为紧实,究其原因:一方面可能是因为酸雨区森林枯落物分解减慢^[32]和根系生物量减少^[5],从而归还土壤养分的速率减慢和根系在土壤中穿插等物理作用减弱;另一方面可能与土壤酸化使得土壤动物、微生物种类、数量和活动减少有关^[33]。

土壤孔隙状况是评价土壤通透性的重要指标,其大小直接影响着土壤水分状况^[34]。相比2011年,2021年马尾松林各层土壤的非毛管孔隙度均增大,说明十年期间马尾松林土壤的透水性能得到改善。同样地,相比2011年,2021年马尾松林表层(0—20cm)土壤总孔隙度、毛管孔隙度也增大,但底层(20—40、40—60cm)却减小,说明十年期间马尾松林表层土壤的孔隙状况和持水性能均得到改善,而底层土壤的总孔隙状况和持水性能却有所变差,这可能与酸雨区马尾松根系分布表层化^[5]、底层土壤根系分布较少及长期的淋溶作用有关。

3.3 酸雨区马尾松林土壤酸化特征时间变化

土壤酸化及其恢复是一个长期且艰难的过程,单一指标很难对此过程进行定性描述^[35],而土壤pH值是衡量土壤酸化程度的最重要指标,且受酸雨直接影响。本研究马尾松林各土层均呈酸性或强酸性,土壤pH

值随土层加深而升高。虽然有研究表明该区域近年来酸雨类型由硫酸为主型向硫酸、硝酸复合型转变^[2],且降雨 pH 值有所上升^[10],但相比 2011 年,2021 年马尾松林各层土壤 pH 值均降低,各层土壤 H^+ 含量则均显著增加($P<0.05$),说明十年期间该区域马尾松林土壤酸化程度愈发严重,这可能主要是因为一方面酸雨类型的改变使得土壤中 NH_4-N 比例升高,而植物根系吸收 NH_4^+ 后释放 H^+ ,加剧了土壤酸化^[36];另一方面马尾松林枯落物分解产生了许多酸性物质,其输入土壤后导致土壤酸化^[37]。该研究结果也表明酸化土壤的改善较酸雨控制存在明显的滞后效应,且比酸雨控制要困难得多、过程也更为复杂。

土壤有机质是衡量土壤肥力的重要指标之一,其大小与土壤酸化环境息息相关,Berger 等^[35]研究表明土壤 pH 值与土壤有机质之间呈很强的负相关性,这是因为土壤 pH 值升高促进了土壤有机质矿化速率。本研究也证实,2021 年马尾松林腐殖质层、表层(0—20cm)土壤有机质含量相比 2011 年均增加,而其土壤 pH 值却降低,这与戴万宏等^[38]的研究结果一致。当然,森林土壤有机质的变化还受到林分起源、结构、林龄等多种因素影响,他人研究也表明无论是天然林还是人工林,马尾松混交林的土壤有机质含量均高于纯林^[30, 39],这是因为相比纯林,马尾松混交林的物种组成较丰富,尤其阔叶树种的介入与补充更有利于枯落物分解及对土壤养分的归还^[40—41]。本研究也表明,经过十年自然演替,马尾松林树种多样性增加,尤其新增了 4 种阔叶树种(表 2),但其 0—20、20—40cm 土层有机质含量相比我国马尾松林土壤有机质含量的平均水平(33.78、19.92g/kg)^[41]仍然偏低,这可能是因本研究区马尾松林土壤酸化严重,导致马尾松根系和土壤动物、微生物种类及数量减少,从而减少了土壤有机质补充来源,同时,也不利于动植物残体分解及其养分归还^[42]。

土壤交换性盐基离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})含量是反映土壤酸化程度的重要指标之一,本研究表明,相比 2011 年,2021 年马尾松林各土层交换性盐基离子含量均显著增加($P<0.05$),这说明 2021 年马尾松林土壤中有更多的盐基离子可用于置换酸雨中的 H^+ ,从而增强了对酸雨的缓冲作用。王轶浩等^[3]在该区域研究表明,马尾松林改造对土壤酸化特征影响明显,但因树种而异,当改造成香樟林及其混交林时能有效减弱土壤酸化程度;当改造成木荷林及其混交林时,反而降低了土壤 pH 值使土壤进一步酸化。随着自然演替进程,马尾松林十年期间已处于向针阔混交林演替阶段,其中阔叶树种的重要值和优势度不断提升,但土壤 pH 值却进一步降低和土壤 H^+ 含量进一步增加,而土壤交换性盐基离子含量反而明显增加,不同于以往研究结果^[2],即土壤交换性盐基离子含量一般随土壤酸化程度加重而降低,这是否与土壤交换性盐基离子对酸沉降输入减弱的响应更加敏感有关,尚需进一步验证。酸沉降输入变化(类型、强度)背景下森林及其土壤如何响应或者健康恢复也需要更长时间尺度的定位监测研究,还需要开展严格的对比控制试验研究,以明晰酸沉降输入变化的影响及其机理。

4 结论

酸沉降减弱背景下重庆城郊马尾松林结构及其土壤理化性质均发生了较大变化,表现为马尾松林密度、平均树高和平均胸径均降低,其中,各树高级、径级的马尾松、杉木等针叶树木均减少,且重要值和生物量及其比例均下降;各树高级、径级的阔叶树木总体上均增加,尤其新增了中大径级木和幼树,且阔叶树种的重要值和生物量及其比例均上升,同时马尾松林的树种多样性指数均增大。各层土壤容重均减少,而土壤非毛管孔隙度均增大,同样地,表层土壤总孔隙度、毛管孔隙度和持水性能均增大,但底层却减小。各层土壤 pH 值均降低,而土壤交换性盐基离子含量均增加,且腐殖质层、表层土壤有机质含量也增加。总体来看,十年期间酸雨区马尾松林结构得到有效改善,土壤水文物理性质得到一定改良,土壤酸化性质有向好转变趋势,但相比酸雨控制具有明显的滞后效应,且过程更为漫长和复杂。

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] 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.
- [3] 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.
- [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] 黄益宗, 李志先, 黎向东, 吴坤婷, 孙建中. 模拟酸雨对华南典型树种生长及营养元素含量的影响. 生态环境, 2006, 15(2): 331-336.
- [8] 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.
- [9] 余倩, 段雷, 郝吉明. 中国酸沉降: 来源、影响与控制. 环境科学学报, 2021, 41(3): 731-746.
- [10] 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.
- [11] 郭耆, 赵厚本, 周光益, 隆卫革, 甘谷列, 吴尚勇, 蒙敏燕, 陈金兰. 亚热带 4 个树种人工林生物量及其分配格局. 林业科学研究, 2022, 35(1): 182-189.
- [12] Ouyang S, Xiang W H, Wang X P, Zeng Y L, Lei P F, Deng X W, Peng C H. Significant effects of biodiversity on forest biomass during the succession of subtropical forest in South China. Forest Ecology and Management, 2016, 372: 291-302.
- [13] 林业部科技司. 森林生态系统定位研究方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 90-104.
- [14] 刘慧, 朱建, 王嘉楠, 王智诚, 曹兴俊. 合肥环城公园植物群落结构动态变化. 生态环境学报, 2017, 26(8): 1284-1291.
- [15] 杨金宽, 姬兰柱, 邵玉华, 曲世鹏, 危永亮. 马尾松酸雨危害与次期性害虫之间关系的研究. 环境科学, 1991, 12(1): 33-37, 95.
- [16] 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.
- [17] 戴冬, 彭楚才, 黄鑫, 郑夔荣, 滕明君, 周志翔, 孙林山, 刘小宇. 鄂中地区马尾松人工林群落演替特征研究. 林业科学研究, 2019, 32(6): 48-55.
- [18] 张亚昊, 佃袁勇, 黄光休, 刘晓阳, 韩泽民, 菅永峰, 李源, 王熊. 不同演替阶段马尾松林分空间结构对物种多样性的影响. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2357-2365.
- [19] 丁茂, 汪宇坤, 何煜然, 徐晓阳, 周守标, 王智. 安徽鹞落坪国家级自然保护区落叶阔叶林树种多样性、种间联结及群落稳定性变化. 生态学报, 2023, 43(7): 2818-2830.
- [20] 商天其, 叶诺楠. 模拟不同程度酸雨对秃瓣杜英和青冈光合生理特征的影响. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(1): 64-70, 85.
- [21] 丁圣彦, 宋永昌. 浙江天童常绿阔叶林演替系列优势种光合生理生态的比较. 生态学报, 1999, 19(3): 30-35.
- [22] 何斌, 李青, 陈群利, 薛晓辉, 李望军. 贵州省西北部马尾松人工林种群数量特征与动态. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(11): 129-137, 155.
- [23] 周思婕, 王平, 张敏, 陈舒展, 许雯, 朱丽婷, 何销勤, 龚书锐. 酸胁迫对马尾松幼苗生长及根际铝形态的影响. 应用与环境生物学报, 2019, 25(6): 1292-1300.
- [24] Pilli R, Anfodillo T, Carrer M. Towards a functional and simplified allometry for estimating forest biomass. Forest Ecology and Management, 2006, 237(1): 583-593.
- [25] 刘建峰, 倪健. 我国主要树种类型通用生物量相对生长方程的建模比较. 第四纪研究, 2021, 41(4): 1169-1180.
- [26] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [27] 张日施, 汤雷吼, 曹继钊, 何斌, 惠柳笛, 南雅薇. 桂西南不同林龄马尾松人工林生物生产力及其分布特征. 广西林业科学, 2021, 50(4): 373-377.
- [28] 秦佳双, 李明金, 宋尊荣, 零天旺, 马姜明, 杨章旗, 颜培栋, 菅瑞, 陆绍浩. 不同年龄阶段马尾松人工林土壤水分-物理性质. 广西科学, 2019, 26(2): 245-251.
- [29] 林德喜, 樊后保, 苏兵强, 刘春华, 蒋宗培, 沈宝贵. 马尾松林下套种阔叶树土壤理化性质的研究. 土壤学报, 2004, 41(4): 655-659.
- [30] 游秀花. 马尾松天然林不同演替阶段土壤理化性质的变化. 福建林学院学报, 2005, 25(2): 121-124.
- [31] 王旭琴, 戴伟, 夏良放, 邓宗付, 于海霞, 聂立水. 亚热带不同人工林土壤理化性质的研究. 北京林业大学学报, 2006, 28(6): 56-59.
- [32] 安晓楠, 王云琦, 李一凡. 模拟酸雨淋溶对缙云山针阔混交林与常绿阔叶林凋落物分解的影响. 浙江农林大学学报, 2022, 39(3): 516-523.
- [33] 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.
- [34] 杜皎皎, 周运超, 白云星, 张薰元. 阔叶树种引入后马尾松人工林土壤水文物理性质研究. 水土保持研究, 2021, 28(4): 105-112.
- [35] Berger T W, Tütscher S, Berger P, Lindebner L. A slight recovery of soils from Acid Rain over the last three decades is not reflected in the macro nutrition of beech (*Fagus sylvatica*) at 97 forest stands of the Vienna Woods. Environmental Pollution, 2016, 216: 624-635.
- [36] 倪秀雅, 冯永霞, 李如华, 尚鹤, 陈展. 重庆酸雨区不同林型对土壤酸化和真菌群落的影响. 生态学报, 2023, 43(17): 7203-7215.
- [37] 李志勇, 陈建军, 王彦辉. 酸沉降影响下香樟纯林和马尾松纯林的土壤化学性质分析. 华南农业大学学报, 2007, 28(2): 5-8.
- [38] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 俞佳. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系. 土壤学报, 2009, 46(5): 851-860.
- [39] 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.
- [40] 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. The Science of the Total Environment, 2018, 639: 679-686.
- [41] 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): 5279-5288.
- [42] Lucas R W, Klaminder J, Futter M, Bishop K, Bishop K, Egnell G, Laudon H, Högberg P. A meta-analysis of the effects of nitrogen additions on base cations: implications for plants, soils, and streams. Forest Ecology and Management, 2011, 262(2): 95-104.