



石燕,武燕,王娑娑,等.不同龄组马尾松人工林土壤表层与团聚体碳氮磷储量变化[J].黑龙江农业科学,2023(5):57-61.

# 不同龄组马尾松人工林土壤表层与 团聚体碳氮磷储量变化

石 燕,武 燕,王娑娑,杨 燕,丁 波  
(贵州师范学院 生物科学学院,贵州 贵阳 550018)

**摘要:**为促进马尾松人工林土壤养分评价和可持续发展,以西南喀斯特地区不同龄组(中龄林、近熟林、成过熟林)马尾松人工林土壤团聚体为研究对象,分析 0~20 cm 土层土壤团聚体碳氮磷储量的变化,并探讨其与土壤碳氮磷储量的关系。结果表明,不同龄组之间,马尾松人工林土壤碳氮磷储量的变化趋势均为近熟林>成过熟林>中龄林,林龄对土壤碳氮磷储量影响显著。随着林龄的增长,黏粉粒氮储量逐渐升高,黏粉粒中成过熟林氮储量比中龄林显著增加了 43.40%。土壤大团聚体磷储量随着林龄的增长表现出先升高后降低的趋势,近熟林显著高于成过熟林 18.21%。土壤全氮储量与大团聚体全氮储量、土壤全磷储量与大团聚体、微团聚体和黏粉粒全磷储量均存在显著正相关关系。林龄对马尾松人工林土壤黏粉粒全氮储量、大团聚体全磷储量影响显著,而团聚体磷储量受土壤磷储量影响较大,对马尾松人工林经营管理可适当施加磷肥并注重对近熟林的管护。

**关键词:**马尾松人工林;土壤团聚体;碳氮磷储量;林龄

中国是世界上喀斯特面积最大、分布最广的国家,主要集中在西南部区域,贵州喀斯特地区因受地理位置分布和高原河流等影响,喀斯特地貌分布尤为突出,近些年来该地区呈现明显的植被退化现象,土壤肥力和活性大幅下降,土壤稳定性下降,整体呈现显著的生态退化<sup>[1]</sup>。土壤碳氮磷元素是土壤肥力和生产力的重要表征,也是树木生长发育和森林土壤养分所必需的重要元素,其储量变化影响森林生态系统生产力和功能<sup>[2-5]</sup>。团聚体对土壤碳氮磷的保护作用是土壤碳氮磷稳定的重要机制,团聚体的包裹可减少碳氮磷与胞外酶的接触,并限制微生物与底物的接触,相应的大颗粒团聚体可以固持更多碳氮磷,这有利于减少碳氮磷矿化及温室气体的大量排放<sup>[4]</sup>。大量研究表明,林龄<sup>[5]</sup>、林分类型<sup>[1]</sup>、林分密度<sup>[6]</sup>、树种组成<sup>[7]</sup>及人类活动<sup>[8]</sup>等诸多因子均会影响土壤碳氮磷储量的分布,尤其植被恢复年限的变化,会影响植物干物质合成累积量,进而影响植物对土壤养分储量的需求量<sup>[3]</sup>。马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)

是我国南方退耕还林和荒山造林的先锋树种之一,具有速生、耐干旱瘠薄和适应性强等优良特性。贵州省是世界上面积最大、最集中连片的喀斯特区域,马尾松作为先锋树种是喀斯特地区植被恢复和生态建设的关键<sup>[9]</sup>。而目前关于植被恢复年限差异影响西南喀斯特地区马尾松人工林土壤团聚体碳氮磷储量变化的研究鲜有报道,在此区域开展森林土壤团聚体碳氮磷储量动态变化的研究意义重大。

基于此,本研究选取贵州省凤冈县马尾松人工林中龄林、近熟林、成过熟林土壤为研究对象,分析不同植被恢复阶段马尾松人工林土壤碳氮磷及团聚体碳氮磷储量的变化特征,同时探究不同粒径团聚体碳储量与土壤碳储量之间的关系,以期马尾松人工林土壤养分评估及可持续经营管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于贵州省遵义市凤冈县,属中亚热带季风气候,雨热同季,年平均气温 15.2℃,年平均降水量 1 257 mm,年平均雨日 180 d,年平均日照时数 1 139 h,无霜期 239~299 d。土壤类型以黄壤为主,是典型的中国亚热带黄壤特征,土壤呈酸性,马尾松人工林乔木层主要树种为马尾松(*Pinus massoniana* Lamb),灌木层主要以铁仔(*Myrsine africana* Linn.)、六月雪[*Serissa*

收稿日期:2023-01-27

基金项目:贵州省科学技术厅基础研究计划(黔科合基础[2023]282号);贵州省农业科技攻关资助项目(黔科合支撑[2017]2520-2);贵州师范学院大学生创新创业训练计划项目(202214223002)。

第一作者:石燕(1999—),女,本科生,专业方向为土壤生态学。E-mail:3222873702@qq.com。

通信作者:武燕(1975—),女,博士,副教授,从事森林土壤生态研究。E-mail:3462721717@qq.com。

*japonica* (Thunb.) Thunb. ]、白栎 (*Quercus fabri* Hance) 等为主,草本层主要以沿阶草 (*Ophiopogon bodinieri* Levl.)、芒 (*Miscanthus sinensis* Anderss.)、芒萁 [*Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Berhn.] 等为主。

1.2 样地的选取及样品采集

野外调查与样品采集于 2021 年 2 月进行,选择地形、海拔、坡度和坡向等条件基本一致,长势均匀、无病虫害的不同龄组(中龄林、近熟林、成过

熟林)马尾松人工林样地。样地要避免树干基部,选择能反映林分基本特征,具有代表性的地段,设置面积为 25.82 m×25.82 m(666.67 m<sup>2</sup>),基本情况如表 1 所示。分别在样地按“S”型选取 5 个点采集原装土样组成一个样品。采样前除去表面的枯枝落叶,采样深度为 0~20 cm。将采集的原装土样放入铝制盒中,以保持原状土壤结构,带回实验室。剔去粗根、叶片和小石块等杂物,待自然风干。

表 1 样地基本情况

龄组	平均海拔/m	平均坡度/°	平均胸径/cm	平均树高/m	平均密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	地貌	土壤类型
中龄林	831.00	20.50	12.80	12.77	2092.43	低山	黄壤
近熟林	785.60	22.67	15.14	13.31	1460.97	低山	黄壤
成过熟林	922.00	13.00	19.35	17.83	1369.93	低山	黄壤

1.3 样品处理和碳氮磷的测定方法

土壤团聚体湿筛:对 ELLIOTT 湿筛法<sup>[10]</sup>进行了改进,具体步骤如下,称取每一样地自然风干的土壤样品 100.0 g,置于湿筛筛子组(0.25 mm 和 0.053 mm)最上层,调整桶内水面的高度移动到最高位置时最上一层筛中的团聚体刚好淹没于水面以下,浸泡 5 min 后振荡 20 min,筛分完成后收集每一层筛上的水稳性团聚体(>0.250 mm、0.250~0.053 mm、<0.053 mm),于 65℃下烘至恒重后称重,并装袋标记,保存备用。

测定方法:有机碳含量采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;全磷含量采用 NaOH 碱溶-钼锑抗比色法进行测定<sup>[11]</sup>。

1.4 数据分析

土壤碳(氮,磷)储量计算公式为:

$$S_{C(N,P)1} = C_1 \rho_1 D_1 / 10$$

式中: $S_{C(N,P)1}$  为研究区域 0~20 cm 土层土壤 C(N 或 P)储量(t·hm<sup>-2</sup>); $C_1$  为 0~20 cm 土层土壤有机 C(N 或 P)含量(g·kg<sup>-1</sup>); $\rho_1$  为 0~20 cm 土层土壤容重(g·cm<sup>-3</sup>); $D_1$  为土层厚度(cm)。

采用 Excel 2016 对数据进行整理、SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析,Origin 2017 软件绘图。采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)分析马尾松人工林不同龄组间土壤碳氮磷储量差异以及土壤团聚体相同粒径、不同龄组间碳氮磷储量差异( $\alpha=0.05$ ),采用 Pearson 相关分析明确土壤碳氮磷储量与土壤团聚体碳氮磷储量之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同龄组马尾松人工林土壤碳氮磷储量特征

由图 1 可知,不同龄组马尾松人工林土壤碳氮磷储量最大值均出现在近熟林,最小值均在中龄林,随着林龄的增长,土壤碳氮磷储量均呈现出先升高后降低的趋势。土壤有机碳储量变化范围在 26.42~38.65 t·hm<sup>-2</sup>,近熟林土壤有机碳储量显著高于中龄林,近熟林和成过熟林之间及中龄林和成过熟林之间土壤有机碳储量差异不显著。马尾松人工林不同龄组土壤全氮储量变化范围为 1.30~2.34 t·hm<sup>-2</sup>,近熟林和成过熟林土壤全氮储量均显著高于中龄林,而近熟林和成过熟林之间全氮储量无显著差异。马尾松人工林土壤全磷储量变化范围在 0.69~0.80 t·hm<sup>-2</sup>,不同龄组间土壤全磷储量无显著差异。

2.2 不同龄组马尾松人工林土壤团聚体碳氮磷储量特征

由图 2 可知,马尾松人工林土壤团聚体有机碳储量的变化范围为 27.41~34.40 t·hm<sup>-2</sup>,土壤微团聚体和黏粉粒有机碳储量均随着林龄的增长而增加,但大团聚体、微团聚体和黏粉粒有机碳储量在马尾松人工林不同龄组之间差异均不显著。马尾松人工林土壤团聚体全氮储量的变化范围为 0.21~1.58 t·hm<sup>-2</sup>,大团聚体和微团聚体中全氮储量均以近熟林最高,但在 3 个龄组之间全氮储量差异均不显著,黏粉粒中全氮储量随着林龄的增长而升高,且近熟林和成过熟林显著高于中龄林。马尾松人工林土壤团聚体全磷储量的变化范围为 0.39~0.70 t·hm<sup>-2</sup>,大团聚体中全磷储量

从大到小的顺序为近熟林>中龄林>成过熟林,且近熟林和成过熟林之间全磷储量差异显著,微团聚体和黏粉粒中全磷储量均在成过熟林表现最低,但3个龄组之间全磷储量差异均不显著。

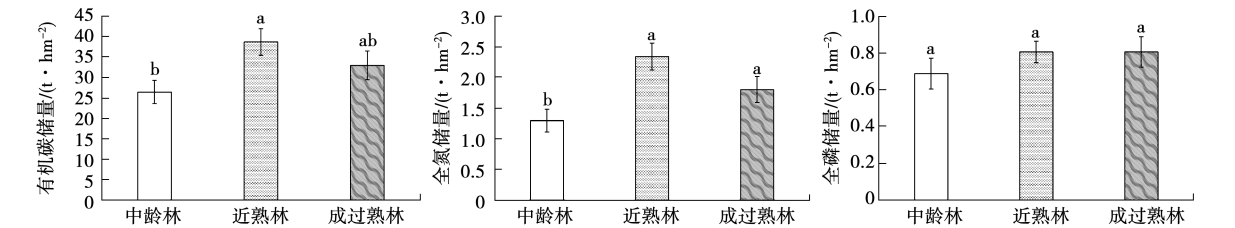


图1 不同龄组马尾松人工林土壤碳、氮、磷储量特征

注:不同小写字母表示不同龄组间差异显著(P<0.05)。下同。

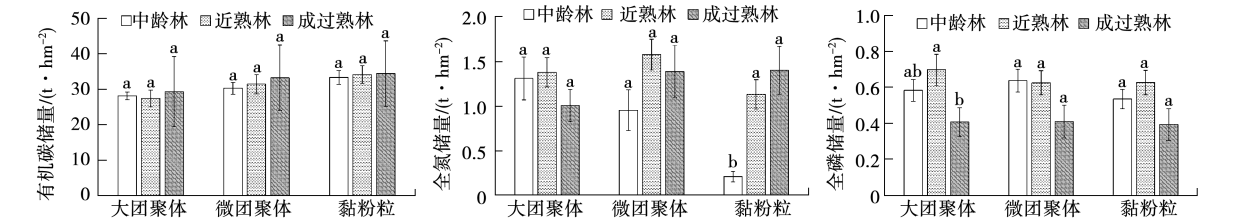


图2 不同龄组马尾松人工林土壤团聚体碳、氮、磷储量特征

2.3 马尾松人工林土壤碳氮磷储量与团聚体碳氮磷储量的相关性

由表2可知,马尾松人工林土壤有机碳储量与大团聚体、黏粉粒有机碳储量之间呈负相关关系,与微团聚体有机碳储量呈正相关关系,但相关性均不显著。土壤全氮储量与大团聚体、微团聚

体和黏粉粒全氮储量之间均呈正相关关系,其中与大团聚体全氮储量的相关性达到显著水平,与微团聚体和黏粉粒全氮储量之间的相关性不显著。土壤全磷储量与大团聚体和黏粉粒全磷储量之间存在显著正相关关系,与微团聚体全磷储量存在极显著正相关关系。

表2 马尾松人工林土壤碳氮磷储量与团聚体碳氮磷储量的相关分析

项目		土壤有机碳储量	土壤全氮储量	土壤全磷储量
团聚体有机碳储量	大团聚体	-0.107		
	微团聚体	0.011		
	黏粉粒	-0.030		
团聚体全氮储量	大团聚体		0.356 *	
	微团聚体		0.272	
	黏粉粒		0.272	
团聚体全磷储量	大团聚体			0.355 *
	微团聚体			0.552 * *
	黏粉粒			0.411 *

注:\*表示在P<0.05水平显著相关,\*\*表示在P<0.01水平显著相关。

3 讨论

3.1 不同龄组马尾松人工林土壤碳氮磷储量变化特征

土壤养分储量是土壤生产力高低和土壤质量好坏的体现。本研究中,不同龄组马尾松人工林土壤有机碳储量变化范围在26.42~38.65 t·hm<sup>-2</sup>,全氮储量变化范围为1.30~2.34 t·hm<sup>-2</sup>,全磷储量变化范围在0.69~0.80 t·hm<sup>-2</sup>,土壤碳氮储量均远低于中国森林土壤平均水平值(193.55 t·hm<sup>-2</sup>)<sup>[12]</sup>和中

国森林土壤氮储量平均值(34.64 t·hm<sup>-2</sup>)<sup>[13]</sup>,土壤磷储量接近于滇中磨盘山(0.71~2.00 t·hm<sup>-2</sup>)<sup>[13]</sup>,远低于相同气候和土壤类型的四川截流堰小流域林地土壤全磷储量(153 t·hm<sup>-2</sup>)<sup>[14]</sup>。龄组间土壤碳氮储量差异显著、磷储量无显著变化,这与柳叶等<sup>[3]</sup>及何高迅等<sup>[7]</sup>研究结果一致。表层土壤不仅能直接吸收植物根系生长代谢物,还能摄取凋落物输入的碳氮元素,具有富集作用<sup>[15-16]</sup>,且马尾松人工林的生长年限不同,林木间凋落物也不同,因此不同龄组间土壤碳储量和氮储量差异显著<sup>[7]</sup>。



本研究显示,土壤碳氮磷储量均随着林龄的增长呈现出先升高后降低的趋势,这与一些学者的研究结论有些不一致。柳叶等<sup>[3]</sup>的研究表明,随着林龄的增加,沙地樟子松人工林土壤碳储量先增加后减小,氮储量呈逐渐增加的趋势,磷储量变化无明显规律。李智超等<sup>[17]</sup>对江西大岗山不同林龄杉木人工林土壤碳氮储量的研究表明,随着林龄的增加,有机碳和全氮储量均呈现先下降后上升的趋势,在幼龄林阶段碳氮储量最高。竹万宽等<sup>[18]</sup>研究表明,不同林龄之间桉树人工林土壤碳氮储量变化不明显。表明不同林分类型的生长特性和林下凋落物的差异导致土壤碳氮磷储量随林龄变化表现不同特征<sup>[19]</sup>。本研究中马尾松人工林在中林龄时期处于快速生长阶段,凋落物的输入量和植物根系生长的分泌物量会随着林龄的增长而增加。林分在变成成熟期间,由于营养供应的限制等因素会使种群生物量开始下降,凋落物输入量随之改变。近熟林土壤养分消耗量降低,与累积量之间不平衡,最终影响土壤碳氮储量。不同龄组间土壤磷储量无显著差异,可能是因为土壤磷储量主要受土壤母质的影响,且土壤中磷素具有固持、迟效等功能,可能导致其储量在不同龄组间无明显差异<sup>[20]</sup>,因此其不同林龄上的变异性较小<sup>[21]</sup>。此外,不同马尾松人工林造林年限对土壤碳氮磷的固持机制也不同,不同林龄马尾松林下环境存在差异,直接影响地被植物的生存与定居,进而影响土壤养分能力及土壤基质的稳定性<sup>[5-6]</sup>。

### 3.2 不同龄组马尾松人工林土壤团聚体碳氮磷储量变化特征

在土壤养分循环中,水稳性团聚体粒级占比分配具有重要作用,而团聚体粒级分布主要受土壤类型、养分输入等因素的影响<sup>[4]</sup>。有研究表明,不同植茶年限中各粒级团聚体有机碳储量均随植茶年限延长而增加<sup>[22]</sup>。本研究发现,土壤微团聚体和黏粉粒有机碳储量均随着马尾松人工林造林年限的增加而增加,但在不同林龄间差异不显著。表明马尾松人工林的林龄可能不是影响土壤团聚体碳储量的主要因素。本研究中黏粉粒中全氮储量随着林龄的增长而升高,且3个龄组间全氮储量差异显著。表明随着马尾松人工林的发展,土壤团聚作用增强了土壤氮固持能力,黏粉粒中土壤氮素正向积累。本研究中大团聚体的磷储量水平随着马尾松人工林造林年限的增加呈现先升高后降低的趋势。可能是由于人工林林龄的增长,植物群落物种丰富度逐渐增大,导致植物生长对

磷的需求增加或无机磷与土壤中的铝结合,从而降低了土壤团聚体中的磷循环。

### 3.3 土壤碳氮磷储量对土壤团聚体碳氮磷储量的影响

土壤团聚体是土壤碳氮磷固定、保护及储存的场所,不同粒径大小团聚体储存碳氮磷的能力也不同<sup>[23]</sup>。本研究中土壤有机碳储量对各粒径团聚体有机碳储量的影响不明显,但土壤全氮储量与大团聚体全氮储量、土壤全磷储量与大团聚体、微团聚体和黏粉粒全磷储量之间存在显著正相关关系。刘学彤<sup>[23]</sup>通过对黄土高原退耕地土壤团聚体碳氮分布特征的研究表明,水蚀风蚀交错带3种退耕模式土壤碳氮储量均与各粒径团聚体碳氮储量存在极显著正相关关系;黄土高原退耕刺槐林地土壤有机碳储量均与各粒径团聚体有机碳储量呈极显著正相关;土壤全氮储量与大团聚体和微团聚体全氮储量呈极显著正相关,与黏粉粒全氮储量无显著相关性,这与本研究结果有些不一致。分析其原因可能是,土壤碳元素作为团聚体形成的主要胶结物质,同时团粒结构对包裹性更好,故土壤有机碳储量对团聚体有机碳储量影响不明显。土壤全氮储量只对大团聚体全氮储量具有指示作用。马尾松人工林土壤团聚体全磷储量可以间接表征土壤全磷储量。

## 4 结论

西南喀斯特地区马尾松人工林土壤碳氮磷储量在不同龄组之间的变化趋势均为近熟林>成过熟林>中龄林,且近熟林中的碳氮储量均显著高于中龄林。随着马尾松人工林造林年限的增加,黏粉粒氮储量逐渐积累,而大团聚体中磷储量水平下降。马尾松人工林土壤全氮储量与大团聚体全氮储量之间、土壤全磷储量与大团聚体、微团聚体和黏粉粒全磷储量之间均存在显著的正相关关系。

### 参考文献:

- [1] 喻国军,谢晓尧.喀斯特地区造林对土壤团聚体稳定性及微生物代谢活性的影响[J].水土保持研究,2020(6):21-27,36.
- [2] 许窈孜,邹祖有,叶彩红,等.江门市3种亚热带林分类型土壤碳氮磷储量分布特征[J].林业与环境科学,2022,38(3):34-38.
- [3] 柳叶,任悦,高广磊,等.沙地樟子松人工林土壤碳氮磷储量分布特征[J].中国水土保持科学,2021,19(6):27-34.
- [4] 徐海东,苑海静,熊静,等.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[J].林业科学研究,2020,33(3):107-115.
- [5] 李玉凤,马姜明,何静桦,等.广西不同林龄马尾松人工林土

- 壤碳储量动态变化[J]. 广西科学, 2020, 27(6): 638-645.
- [6] 李玉凤, 李妹珍, 马姜明, 等. 林分密度对马尾松人工林土壤碳储量及其分配特征的影响[J]. 广西林业科学, 2021, 50(1): 54-59.
- [7] 何高迅, 王越, 彭淑娴, 等. 滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4425-4435.
- [8] 黄凤生, 袁健军, 余雪琴. 间伐对杉木人工林凋落物-土壤碳氮磷含量及储量的影响[J]. 浙江林业科技, 2020, 40(1): 32-36.
- [9] 何斌, 李青, 陈群利, 等. 贵州省西北部马尾松人工林种群数量特征与动态[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(11): 129-137, 155.
- [10] 韩贞贵, 周运超, 任娇娇, 等. 马尾松人工林土壤各粒径团聚体湿筛后的有机碳分配[J]. 生态学报, 2021, 41(23): 9388-9398.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-96.
- [12] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
- [13] 王瑞璋, 黎建强, 杨关吕, 等. 磨盘山典型森林生态系统土壤营养元素储量及其价值量评估[J]. 西部林业科学, 2019, 48(6): 93-99.
- [14] 李义玲, 李太魁, 顾令爽, 等. 紫色土丘陵区小流域不同土地利用方式土壤氮磷储量特征[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(31): 133-137.
- [15] 沈会涛, 张韬, 马文才, 等. 太行山东坡不同林龄杏树林碳储量及其分配特征[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 722.
- [16] 朱海强, 李艳红, 张小萌. 艾比湖湿地不同植物群落下土壤全磷空间变异[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 45.
- [17] 李智超, 张勇强, 宋立国, 等. 江西大岗山不同林龄杉木人工林土壤碳氮储量[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(10): 116-122.
- [18] 竹万宽, 许宇星, 王志超, 等. 不同林龄桉树人工林土壤碳氮储量及 C/N 化学计量特征[J]. 桉树科技, 2018, 35(3): 16-19.
- [19] 王洋, 何超银, 齐也, 等. 粤北不同林分类型土壤有机碳含量和碳储量垂直分布特征研究[J]. 林业与环境科学, 2022, 38(4): 88-93.
- [20] 向云西, 潘萍, 陈胜魁, 等. 天然马尾松林土壤碳氮磷特征及其与凋落物质量的关系[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(11): 95.
- [21] 宁志英, 李玉霖, 杨红玲, 等. 沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力和多样性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 141.
- [22] 李玮, 郑子成, 李廷轩, 等. 不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2014(21): 6326-6336.
- [23] 刘学彤. 黄土高原退耕地土壤团聚体碳氮分布特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.

## Changes of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Soil Surface and Aggregates in Different Age Groups of *Pinus massoniana* Plantation

SHI Yan, WU Yan, WANG Suosuo, YANG Yan, DING Bo

(College of Biological Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550018, China)

**Abstract:** In order to promote soil nutrient evaluation and sustainable development of *Pinus massoniana* plantation, the soil aggregates of *Pinus massoniana* plantation in different age groups (middle-aged forest, near-mature forest, mature and over-mature forest) in Karst Area of southwest China were studied. The changes of soil aggregate carbon, nitrogen and phosphorus storage in 0-20 cm soil layer were analyzed, and their relationship with soil carbon, nitrogen and phosphorus storage were discussed. The results showed that among different age groups, the variation trend of soil carbon, nitrogen and phosphorus storage in *Pinus massoniana* plantation was near-mature forest > mature and over-mature forest > middle-aged forest, and forest age had a significant effect on soil carbon and nitrogen storage. With the increase of forest age, the nitrogen storage of clay silt increased gradually, and the nitrogen storage of mature and over-mature forest in clay silt increased significantly by 43.40% compared with that of middle-aged forest. The phosphorus storage of soil macroaggregates increased first and then decreased with the increase of forest age, and the phosphorus storage of near-mature forest was significantly higher than that of mature and over-mature forest by 18.21%. There was a significant positive correlation between soil total nitrogen storage and total nitrogen storage of macroaggregates, soil total phosphorus storage and total phosphorus storage of macroaggregates, microaggregates and clay silt. It is concluded that forest age has a significant effect on the total nitrogen storage of soil clay silt and the total phosphorus storage of macroaggregates in *Pinus massoniana* plantation, while the phosphorus storage of macroaggregates is greatly affected by soil phosphorus storage. Phosphorus fertilizer can be appropriately applied to the management of *Pinus massoniana* plantation and attention should be paid to the management and protection of near-mature forest.

**Keywords:** *Pinus massoniana* plantation; soil aggregates; carbon, nitrogen and phosphorus storage; forest age