2022, 35(3): 112-122
http://www.lykxyj.com

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.03.013

南亚热带不同人工林对土壤理化性质的影响及土壤质量评价

袁星明[1,3]，朱宁华[1]，郭　耆[2*]，周光益[3]，
蒙敏燕[2]，吴尚勇[2]，杨乐苏[3]

(1. 中南林业科技大学林学院，湖南 长沙　410004；2. 广西生态职院教学实验林场，广西 柳州　545004；
3. 中国林业科学研究院热带林业研究所，广东 广州　510520)

摘要:［**目的**］探讨相同立地条件下的不同人工林对土壤理化性质的影响，为实现人工林养分的精确调控和可持续经营提供科学依据。［**方法**］选取在柳州沙塘林场马尾松采伐迹地上同为 1987 年营造的木荷、米老排、蓝果树和杉木人工纯林为研究对象，以未造林灌草地为对照，分层（0～15、15～30、30～50、50～70、70～100 cm）测定 14 个土壤理化性质指标，结合 KMO 和 Bartlett 球形度检验，采用主成分分析法对土壤质量进行综合评价。［**结果**］同种林分内，随土层加深，土壤密度递增，孔隙度、土壤有机碳、全 N、碱解 N、有效 P 含量递减。不同林分间各土壤理化性质差异明显，5 种林地的土壤 pH 值变幅为 3.94～5.12；土壤有机碳、全 N、碱解 N、有效 P 含量以及化学计量特征 C:N、C:P、N:P 比值均表现为：阔叶林>针叶林>灌草地；杉木林土壤的全 P 含量在所有林分中最低，杉木林生长可能消耗更多的磷元素；与对照灌草地相比，营造这 4 种人工林后使土壤全 K 含量明显减少，速效 K（除米老排林外）也有相似规律，这种变化规律暗示了人工林对 K 元素的消耗量大；木荷林和杉木林土壤的 pH 值、全 K、速效 K 及阳离子交换量的含量明显低于其它林分和灌草地。土壤综合质量根据主成分得分依次为：米老排林 >蓝果树林 >木荷林 >灌草地 >杉木林。［**结论**］（1）人工阔叶林比针叶林能更有效地积累土壤有机碳、N 和 P 等养分，并能明显地优化土壤密度和孔隙度，在今后的造林实践中应优先考虑阔叶林。（2）人工林营造 33 a 后，土壤全 K 含量明显地小于对照灌草地，且不同林分间具有差异，因此，在森林经营时应注重 K 元素调控管理。

关键词: 人工林；土壤理化性质；土壤养分；土壤化学计量；土壤质量评价
中图分类号: S714.2　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1001-1498(2022)03-0112-11

森林土壤是维持森林生态系统的结构组成和动态平衡的重要因子，它是植物生存的基质，也是物质循环、能量流动、水分平衡等众多生态活动的载体[1]。土壤肥力是土壤理化性质和生物性质的综合反映，影响植被的发生、发育和演替进程，同时植物群落结构及其产生的凋落物以及营造的生态环境和生物环境都会影响生态系统中土壤养分的分布和循环[2-3]。植被的凋落物和枯木的理化性质决定了养分的降解速度和生物有效性，枯枝落叶分解完成后，根系会重新分配养分，从而决定养分积累的垂直和水平变化[4]，各个土壤类型在不同的植被类型中均表现出不同的土壤理化性质，并随着植被的演替而发生变化[5-6]。因此，森林土壤的肥力因植被的类型、结构和演替年限的不同而不尽相同[7]。

近年来，人工林所引起的土壤养分循环受阻和生态系统不稳定等诸多问题已引起广泛关注，土壤

收稿日期：2021-12-11　　修回日期：2022-02-23
基金项目：中央级科研院所基本科研业务费重点项目“华南地区典型森林的退化机制与恢复技术”（CAFYBB2019SZ003）
作者简介: 袁星明，硕士研究生。主要研究方向：森林培育。电话：15700781939。Email：837567503@qq.com
* 通讯作者: 郭耆，林业工程师。主要研究方向：森林培育。电话：13978082512。Email：2561798258@qq.com

肥力已成为人工林恢复与重建工程的关键所在[8]。国内外众多学者对不同气候带的不同植被类型人工林土壤的理化性质和土壤质量的研究表明，植被恢复后，不同林分类型土壤养分含量差异显著，土壤改良效果阔叶林优于针叶林，有林地优于荒草地[9-10]；不同植被恢复模式下，乡土树种的土壤质量改善能力优于外来树种，造林时应遵循适地适树原则，以植被自然正向演替改良土壤质量[11-12]；人工林土壤养分的吸收量和实际归还量不均衡是导致土壤肥力下降重要原因，其中，针叶人工林加剧了土壤地力退化[13-14]。尽管有关植被恢复对土壤理化性质的报道较多，但主要集中在不同的海拔、地形、成土母质、林分起源等因素对森林土壤理化性质的影响，而不同的立地条件可能造成森林土壤的理化性质具有较强的异质性[15]。然而，在南亚热带区域，针对在相同的立地条件下，不同树种在同一时间营造的人工纯林对土壤理化性质的影响却鲜见报道。

为此，本文选取柳州市沙塘林场马尾松采伐迹地上 1987 年营造的木荷（*Schima superba* Gardn. et Champ.）、杉木（*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.）、蓝果树（*Nyssa sinensis* Oliv.）、米老排（*Mytilaria laosensis* Lec.）4 种人工纯林为研究对象，以未造林灌草地为对照，旨在分析不同树种组成的人工纯林在经过 33 年生长后土壤的理化性质和化学计量学特征，揭示在相同立地条件下不同人工林恢复对土壤理化性质的影响规律，并对不同林分的土壤质量进行评价，以期为柳州丘陵地区人工林营造及可持续经营提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于广西柳州市沙塘林场（109°21′～109°28′ E，24°27′～24°34′ N），属南亚热带季风气候区，光照充足，雨热同季，年均气温 20.1 ℃，年均日照时间 1 634.9 h，年均降水量 1 200～1 500 mm，月年均蒸发量 1 599.8 mm，年均相对湿度 78%，年均无霜期长达 357 d。林场海拔区间 150～230 m，主要地貌类型为低山丘陵，土壤为砂岩发育成的红壤，土壤深厚且层次不明显。造林地之前为马尾松林分，马尾松皆伐后，在其采伐迹地上营造人工林，初植密度 2 500 株·hm^{-2}，现存人工林 1 000.5 hm^2，其中，木荷 1.3 hm^2，杉木 2.1 hm^2，蓝果树 2.0 hm^2，米老排 4.7 hm^2，4 种林分均为 1987 年造林；灌草地则是在马尾松采伐迹地上次生演替而来，长年无人为干扰。

1.2　研究方法

2020 年 8 月中旬，在马尾松采伐迹地的连续山地选取木荷、杉木、蓝果树、米老排 4 种林分，对照灌草地遵循就近原则选取，林分平均海拔 160 m。在各个林分中至少间隔 20 m 设置 3 个代表性样地（20 m × 20 m）。再在每个样地内选取 3 个土壤取样点，除去表面植被和凋落物，用 100 cm^3 的土壤环刀（土钻：型号 Edelman，产地 Germany）分别采集不同层次（0～15、15～30、30～50、50～70、70～100 cm）土样，用于测定土壤水分物理性质；同时取 500 g 左右土样装入样品袋，剔除较大的植物残体和石渣，风干后研磨用于测定土壤化学性质。对样方内胸径≥1 cm 的乔木每木检尺，记录种名、胸径、树高，同时在每个样方内随机布设 2 个 2 m × 2 m 小样方进行灌草调查，记录灌草的种名、株数、盖度、高度。各林分基本情况见表 1，其中，主要灌草植被有罗伞（*Brassaiopsis glomerulata* (Bl.) Regel）、淡竹叶（*Lophatherum gracile* Brongn.）、狗脊（*Cibotium barometz* (L.) J.Sm）、弓果黍（*Cyrtococcum*

表 1　样地基本情况

Table 1　Basic information of sample plot

林分类型 Stand types	坡度 Slope/(°)	林分密度 Density/(株·hm^{-2})	郁闭度 Canopy/%	胸径 DBH/cm			平均树高 Mean height/m	灌草种类 Species/种	灌草盖度 Coverage/%
				D_{min}	D_{max}	$\overline{D}$			
木荷 *Schima superba*	7	459	87	16.8	42.4	29.4	18.7	27	17.3
杉木 *Cunninghamia lanceolata*	8	1 592	93	3.0	31.9	20.2	15.6	19	60.3
蓝果树 *Nyssa sinensis*	11	792	82	4.4	36.7	20.4	16.4	40	64.7
米老排 *Mytilaria laosensis*	14	1 292	91	3.0	35.3	16.7	14.1	35	11.9
灌草地 Irrigate grassland	13	—	—	—	—	—	—	52	75.6

patens (L.) A. Camus）、玉叶金花（*Mussaenda Pubescens* Ait.f.）、半边旗（*Pteris semipinnata* L.）、小蜡（*Ligustrum sinense* Lour.）、粗叶榕（*Ficus hirta* Vahl）等。

1.3 土壤理化性质测定方法

土壤物理性质测定：土壤密度、最大持水量、毛管孔隙度、总孔隙度参照中华人民共和国林业行业标准-森林土壤分析方法[16]。

土壤化学性质测定[17]：pH 值用土水比 1∶2.5 pH 计法，土壤有机碳用重铬酸钾容量外加热法，全氮含量用半微量凯氏定氮法，全磷含量用王水酸熔—钼锑抗比色法，全钾含量用王水酸熔—火焰光度计法，碱解氮含量用碱解扩散法，有效磷含量用盐酸—氟化铵法，速效钾含量用醋酸铵浸提—火焰光度法，阳离子交换量用乙酸铵静置交换法，土壤水溶性硫酸根离子用分光光度法。

1.4 土壤质量综合评价方法

用模糊数学原理对数据进行标准化处理，实现对各土壤性质的量纲归一化，使得各个指标具有可比性。当土壤指标对土壤功能呈正相关时，将最大持水量、毛管孔隙度、总孔隙度、土壤有机碳、全 N、全 P、全 K、碱解 N、有效 P、速效 K、阳离子交换量、硫酸根离子分为“S”形，当土壤指标对土壤功能有一个最佳的适宜范围时，将 pH 值、土壤密度分为抛物线形[18-19]。其公式分别为：

$$X_i = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad X_i = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{1}$$

式（1）中：X_i 为各个评价指标的隶属度值；X 表示各个评价指标原始数值；$X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别表示各个评价指标的最大值和最小值。

然后，进行 KMO 和 Bartlett 球形度检验，检验后的数据经过主成分分析得到成分矩阵、成分得分系数矩阵、特征值、贡献率和公因子方差。提取特征值>1 的主成分，根据成分得分系数构建数学模型，如公式（2）。最后根据各主成分的方差贡献率为权重，加权求和。

$$F = \sum_{i=1}^{n} a_i \times X_i \tag{2}$$

式（2）中：F 为土壤质量综合指数，n 为主成分数量；a_i 为各个因子的得分系数。

1.5 数据统计分析

不同林分类型的土壤理化性质采用 Excle 2016 进行数据统计，采用 SPSS 26 进行显著性检验、KMO 和 Bartlett 球形度检验以及主成分分析，用 Origin 2018 作图。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质

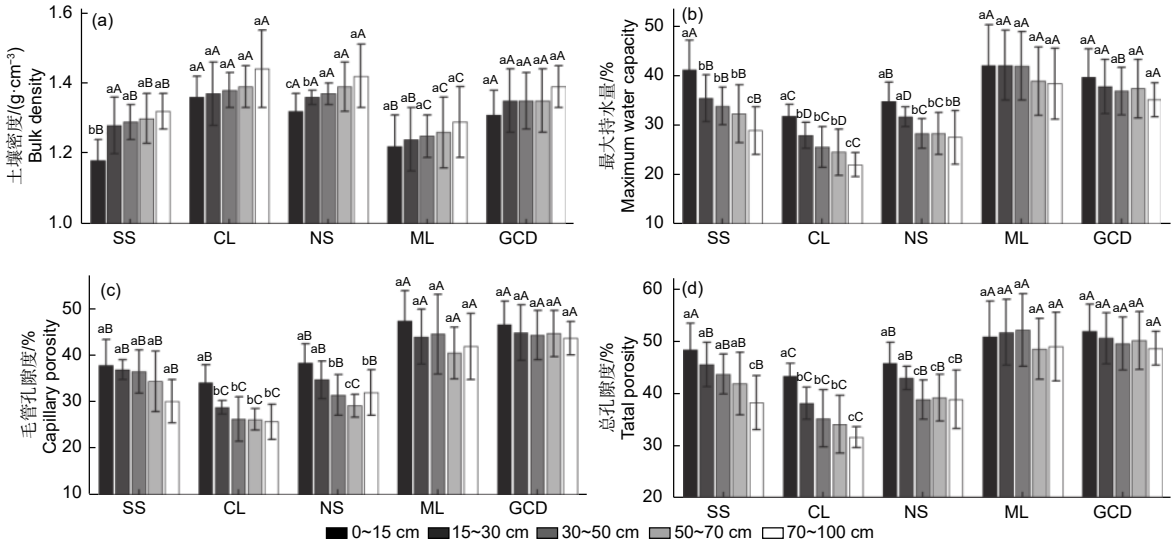
由图 1(a) 可知：各个林分的土壤密度随着土层加深而增加。5 种林地的平均土壤密度从大到小依次为杉木林（1.39 g·cm^{-3}）>蓝果树林（1.37 g·cm^{-3}）>灌草地（1.35 g·cm^{-3}）>木荷林（1.28 g·cm^{-3}）>米老排林（1.25 g·cm^{-3}），但差异不显著（p>0.05）。杉木林每层土壤密度均高于其他林分的同层土壤，说明杉木林林地可能因枯落物少、须根多粗根少等原因，对土壤物理性质（密度）改善不如阔叶树种。

土壤孔隙度衡量土壤透气和水分渗透程度，影响土壤与大气之间的水气交换和植物对土壤中水分和养分的吸收。由图 1(c、d) 可知：同种林分随着土层深度的增加，毛管孔隙度和总孔隙度都整体上呈现逐渐递减的趋势。不同林分间毛管孔隙度和总孔隙度差别明显，阔叶林的土壤孔隙度大于针叶林，可能是阔叶林的凋落物量大，凋落物的分解有利于土壤动物和微生物的活动，并且阔叶林的根系发达，使得土壤颗粒疏松，透气性和透水性增加；而针叶林土壤透气保水性相对较差，这也证明了杉木林土壤密度大，含水率低。灌草地土壤孔隙度与米老排林相近，表明灌木和草本能够改良土壤孔隙度。

2.2 土壤化学性质

2.2.1 土壤 pH 值和有机碳含量 土壤的 pH 值是由土壤母质、气候和林分经营措施综合控制的，与微生物的活动、土壤元素的转移有关，对植物的生长发育有重要影响。图 2(a) 表明：不同森林类型土壤 pH 值的平均变化范围为 3.94～5.12，土壤呈强酸性或酸性，pH 值均随土壤深度的增加而升高。各林分的土壤 pH 值无明显差异，其中，米老排林的平均 pH 值最高，为 4.77，木荷林的平均 pH 值最低，为 4.09。

土壤有机碳作为林木营养的来源，直接影响和改变土壤的理化性质和微生物特性。图 2(b) 表明：不同林分的土壤有机碳具有明显差异，且随土壤深度的增加而逐渐减少，0～15 cm 层土壤有机碳含量明显高于其它土层，表聚效应明显，其中，



注：SS：木荷；CL：杉木；NS：蓝果树；ML：米老排；GCD：灌草地。不同的小写字母表示同一森林类型不同土层间差异显著（p<0.05），不同大写字母表示不同森林类型同一土层差异显著（p <0.05）。下同。

Notes: SS: *Schima superba*; CL: *Cunninghamia lanceolata*: NS: *Nyssa sinensis*; ML: *Mytilaria laosensis*; GCD: irrigated grassland. The same as below. Different lowercase letters indicate significant difference between different soil layers of the same forest type (p<0.05), and different uppercase letters indicate significant difference between the same soil layer of different forest types (p<0.05). The same below.

图 1　5 种林分类型土壤各土层水分物理性质

Fig. 1　Water physical properties of soil layers of five stand types

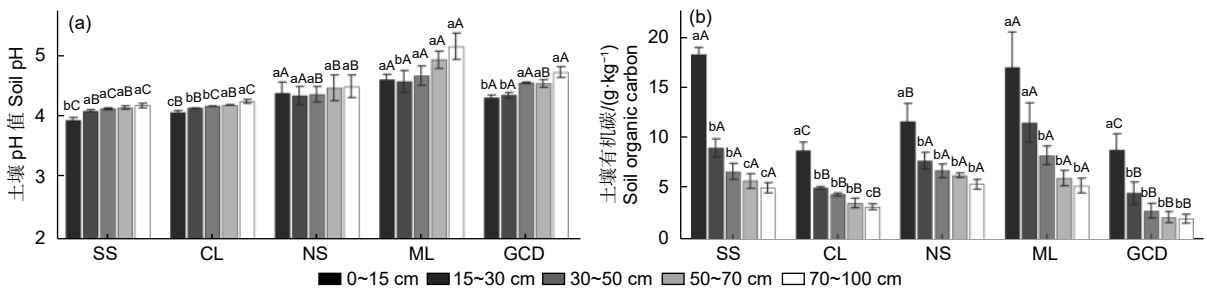


图 2　5 种林分类型土壤 pH 值和有机碳含量变化

Fig. 2　Changes of soil pH value and organic carbon content of five stand types

木荷林 0～15 cm 层的土壤有机碳含量高，达 18.36 g·kg^{-1}。平均土壤有机碳含量依次为米老排林（9.70 g·kg^{-1}）>木荷林（9.04 g·kg^{-1}）>蓝果树林（5.51 g·kg^{-1}）>灌草地（4.15 g·kg^{-1}）>杉木林（3.26 g·kg^{-1}）。与对照灌草地相比，营造米老排、木荷、蓝果树人工林能分别提高 133.7%、117.8%、32.8% 的土壤有机碳，而营造杉木人工林对土壤有机碳的贡献还不如灌草地，说明阔叶树对土壤有机碳积累的效应强于针叶树。

2.2.2　土壤氮素　全 N 是土壤 N 的储备指标，说明了土壤供应 N 元素的能力，碱解 N 能较好的反应出近期土壤 N 的供应状况和 N 的释放速率。图 3(a、b) 表明：全 N 含量的范围为 0.30～1.43 g·kg^{-1}，碱解 N 含量的范围为 17.17～163.09 mg·kg^{-1}，土壤 N 素含量差异显著（p<0.05），N 素含量阔叶林>针叶林>灌草地，同种林分中随土层深度的增加而减少。米老排林、木荷林、蓝果树林全 N 含量和碱解 N 含量在 0～15 cm 层中差别明显，全 N 含量分别为 1.43、1.33、0.99 g·kg^{-1}；碱解 N 含量分别为 163.09、122.50、90.94 mg·kg^{-1}，但随着土层深度逐渐增加，3 种林分的全 N 和碱解 N 在土壤 70～100 cm 层的差别不明显，表明土壤 N 素异质化的过程受到植物群落组成的制约，米老排林分的 N 素积累优于其他林分。与对照灌草地相比，营造米老排、木荷、蓝果树、杉木人工林能分别提高 117.7%、132.3%、95.4%、33.1% 的土壤全 N 含量。

2.2.3　土壤磷素　全 P 是衡量土壤中各种形态

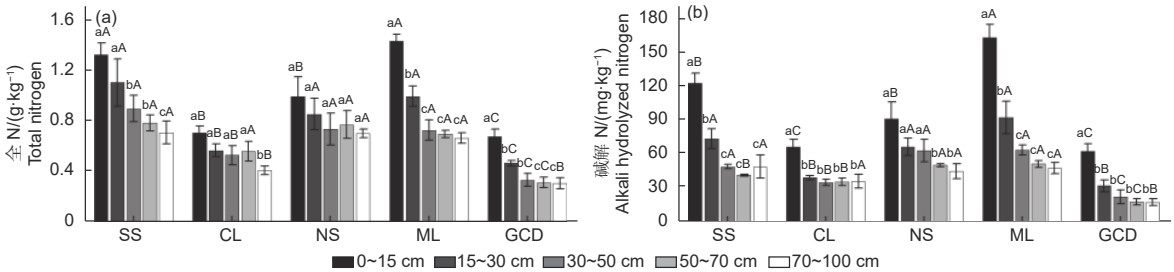


图 3　5 种林分类型土壤氮素含量变化

Fig. 3　Changes of soil nitrogen content of five stand types

P 素的总和，有效 P 则衡量土壤供应 P 素水平的高低。图 4(a) 表明：同种林分各土层的全 P 含量差异不显著（p>0.05），各林分平均全 P 含量依次为蓝果树林（0.27 g·kg^{-1}）>米老排林（0.24 g·kg^{-1}）>木荷林（0.22 g·kg^{-1}）>灌草地（0.21 g·kg^{-1}）>杉木林（0.19 g·kg^{-1}）。与对照灌草地相比，营造米老排、木荷、蓝果树人工林能分别提高 12.9%、3.5%、25.5%（依据原始数据计算）的土壤全 P 含量，杉木林土壤的全 P 含量在所有林分中最低，杉木林生长可能消耗更多的 P 元素。图 4(b) 表明：5 种林分土壤平均有效 P 的含量为 0.15～0.46 mg·kg^{-1}，相同林分不同土层间有效 P 含量存在显著差异（p<0.05），总体上随着土壤深度的增加而减少，表层有效 P 含量明显大于深层，各个林分 0～30 cm 层有效 P 含量急剧下降，随后下降趋势减缓，木荷林和杉木林 0～15 cm 层的有效 P 含量约为深层的 2 倍。有林地的有效 P 含量均高于灌草地，其中，蓝果树林的平均有效 P 的含量最高，为 0.26 mg·kg^{-1}，而灌草地的平均有效 P 含量最低，为 0.19 mg·kg^{-1}。

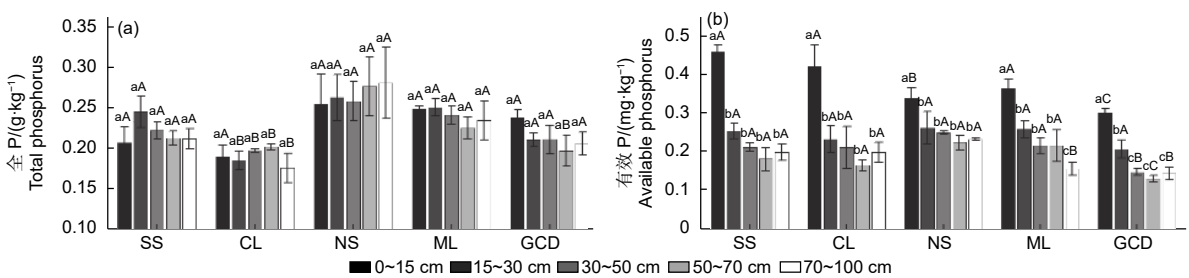


图 4　5 种林分类型土壤磷素含量变化

Fig. 4　Variation of soil phosphorus content of five stand types

2.2.4　土壤钾素　土壤 K 素与植物生存息息相关，速效 K 含量虽占比极少，但能真实反映土壤中 K 含量的供应情况。图 5(a、b) 表明：土壤 K 素含量在不同林分间存在显著差异（p<0.05），同种林分间差异不显著（p>0.05）。全 K 含量随着土层深度的增加呈上升趋势，5 种林分土壤 0～15 cm 层的全 K 含量均低于土壤深层。灌草地全 K 含量最高，均值为 23.81 g·kg^{-1}，蓝果树林和米老排林全 K 含量相近，均值分别为 17.21、19.03 g·kg^{-1}，木荷林和杉木林土壤的全 K 含量较少，均值分别为 10.63、9.83 g·kg^{-1}。米老排林、蓝果树林、灌草地林的速效 K 含量在 0～50 cm 层呈下降趋势，之后随土层深度的增加缓慢上升，木荷林和杉木林总体上呈现下降的趋势。与对照灌草地相比，营造米老排、木荷、蓝果树、杉木人工林使土壤全 K 含量分别减少了 20.1%、55.3%、27.7%、58.7%，速效 K（除米老排林外）也有相似规律，这种变化规律暗示了人工林对 K 元素的需求量较大，尤其是木荷林和杉木林，因此，在人工林经营过程中需要对不同树种人工林进行针对性的 K 元素调控管理。

2.2.5　土壤阳离子交换量、硫酸根离子　阳离子交换量是指土壤胶体所能吸附各种阳离子的总量，是土壤肥力形成的基础，直接决定了植物产量和品质。图 6(a) 表明：5 种林分的阳离子交换量变幅为 6.15～11.31 cmol·kg^{-1}，平均阳离子交换量含量依次为蓝果树林（10.71 cmol·kg^{-1}）>米老排林（10.56 cmol·kg^{-1}）>灌草地（9.60 cmol·kg^{-1}）>木

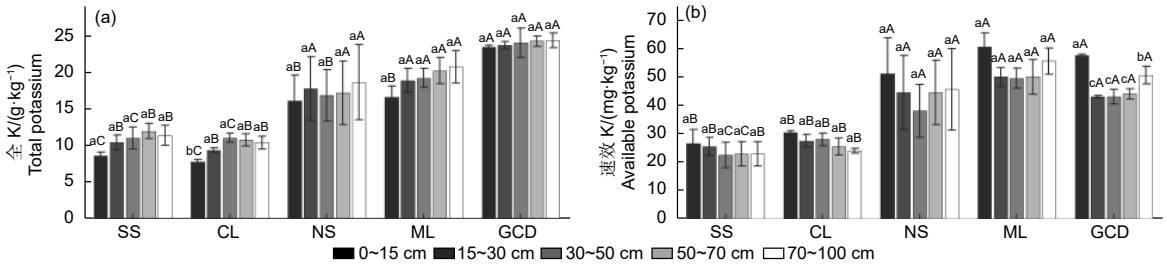


图 5　5 种林分类型土壤钾素含量变化

Fig. 5　Variation of soil potassium content of five stand types

荷林（7.61 cmol·kg^{-1}）>杉木林（6.68 cmol·kg^{-1}），蓝果树林、米老排林、灌草地的阳离子交换量平均含量相近，木荷林、杉木林的阳离子交换量含量明显低于其它林分，各林分不同土层的阳离子交换量无明显差异。根据土壤阳离子交换量>20 cmol·kg^{-1}为保肥能力强、10～20 cmol·kg^{-1}为中等保肥能力、<10 cmol·kg^{-1}为弱保肥能力可知[20]，蓝果树、米老排保肥能力中等，灌草地、木荷林、杉木林保肥能力弱。

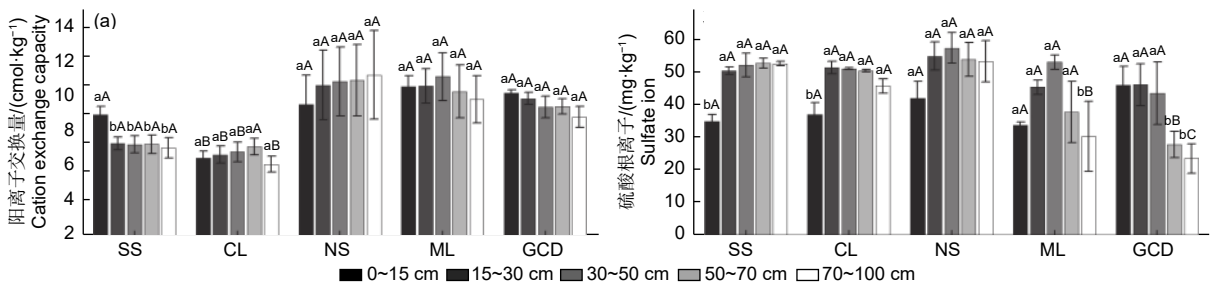


图 6　5 种林分类型土壤阳离子交换量和硫酸根离子含量变化

Fig. 6　Changes of soil cation exchange capacity and sulfate ion content of five forest types

硫酸盐在自然界中广泛存在，水溶性 SO_4^{2-}的含量会影响土壤含盐量，从而影响林分的生长。由图 6(b) 可知：平均水溶性 SO_4^{2-}含量依次为蓝果树林（52.49 mg·kg^{-1}）>木荷林（48.71 mg·kg^{-1}）>杉木林（47.31 mg·kg^{-1}）>米老排林（40.19 mg·kg^{-1}）>灌草地（37.57 mg·kg^{-1}）。有林地的水溶性 SO_4^{2-}含量在 0～30 cm 层相近，都呈上升的趋势，并且 50～100 cm 层的 SO_4^{2-}含量（除米老排林 50～100 cm 层外）明显大于表层，而灌草地 0～50 cm 层显著大于 50～100 cm 层的 SO_4^{2-}含量，说明环境对不同森林浅层土壤的 SO_4^{2-}含量的影响相同，林分生长吸附 SO_4^{2-}后，经过渗透作用富集在深层土壤中。

2.3　土壤化学计量学特征

由表 2 可知：5 种林分的土壤除 C:N 和 C:P 比值外，其它化学计量比值存在显著差异。C:N 比值的变化范围为 9.100～10.359，低于中国土壤 C:N 的平均范围（10～12）[21]；C:P 比值的变化范围为 25.061～31.245，低于中国土壤 C:P 比均值（61）[22]；N:P比值的变化范围为 1.917～4.378，低于中国土壤 N:P 比均值（5.2）[22]。5 种林分相比，木荷林（除C:N 外）土壤元素比值均最高，而阔叶林 C:N、C:P、N:P 比值整体上高于针叶林，针叶林高于灌草地。

2.4　土壤质量综合评价

主成分分析法在可以损失很少的信息的前提下，将不同林分类型的多个土壤理化性质指标降维简化为几个重要指标，能够很好的处理各个指标的多重相关性而又保留独立性[23-24]。通过 KMO 和 Bartlett 球形度检验，KMO 值等于 0.650，说明各个变量间存在较高的相关性，巴特利特球形度检验的近似卡方为 631.475，Sig 值为 0.000，说明各个指标数据能够进行因子降维分析，两项结果检验都表明该数据适用主成分分析。表 3 表明：公因子方差最小为 0.683，说明各个变量都能被很好的表达，按照特征值>1 的原则，提取了 3 个主成分因

表 2 不同人工林土壤化学计量特征

Table 2 Soil stoichiometric characteristics of different artificial forests

比值 Ratios	木荷 *Schima superba*	杉木 *Cunninghamia lanceolata*	蓝果树 *Nyssa sinensis*	米老排 *Mytilaria laosensis*	灌草地 Irrigate grassland
C:N	9.100±3.068 a	9.103±2.386 a	9.511±1.860 a	10.359±2.378 a	9.123±2.971 a
C:P	30.00±7.024 a	26.835±11.090 a	29.413±9.655 a	31.245±7.965 a	25.061±12.322 a
N:P	4.378±1.289 a	2.903±0.633 b	3.057±0.599 b	3.737±1.853 a	1.917±0.609 c
C:K	0.933±0.664 a	0.550±0.318 b	0.504±0.220 b	0.532±0.328 b	0.175±0.131 c
N:K	0.095±0.039 a	0.058±0.019 b	0.051±0.015 b	0.049±0.023 b	0.017±0.007 c
P:K	0.021±0.004 a	0.020±0.003 a	0.017±0.004 b	0.013±0.002 c	0.009±0.001 d

注：数据为“平均值 ± 标准差”；不同小写字母表示同一元素比值在不同林分间差异显著（$p < 0.05$）。

Notes: the data is "mean ± standard deviation"; Different lowercase letters indicate that the ratio of the same element has significant difference among different stands ($p < 0.05$).

子，其特征值分别为 6.257、4.146、1.880，累积方差累积为 87.733%，说明提取的 3 个主成分可以解释各个林分 87.733% 土壤指标的综合信息，其中，速效 K、阳离子交换量、最大持水量、毛管孔隙度、总孔隙度在第 1 主成分发挥重要作用；土壤有机碳、全 N、全 K、碱解 N、有效磷 P 在第 2 主成分发挥重要作用；全 P 在第 3 主成分发挥重要作用。

根据 3 个主成分得分系数建立主成分模型表达式[25]，将隶属度值代入表达式，从而求出各主成分的得分（表 4），然后按照各主成分的方差百分比占总累积方差的百分率，得到各主成分的权重，最终求得土壤质量综合评价函数，计算公式为：F= 0.509 × F1 + 0.338 × F2 + 0.153 × F3。5 种林分的土壤质量综合得分排名为：米老排林（0.393）>蓝果树林（0.363）>木荷林（0.353）>灌草地

表 3 土壤理化性质主成分因子载荷矩阵、因子权重及公因子方差

Table 3 Principal component factor load matrix, factor weight and common factor variance of soil physical and chemical properties

土壤属性 Soil properties	主成分 Principal component			公因子方差 Common factor variance
	PCA1	PCA2	PCA3	
土壤酸碱度 pH value	0.519	−0.677	0.131	0.745
土壤有机碳 Soil organic content	0.635	0.759	0.021	0.979
全氮 Total nitrogen	0.519	0.800	0.172	0.939
全磷 Total phosphorus	0.492	0.044	0.829	0.932
全钾 Total potassium	0.530	−0.804	0.120	0.941
碱解氮 Alkali hydrolyzed nitrogen	0.628	0.717	0.092	0.918
有效磷 Available phosphorus	0.370	0.790	−0.038	0.763
速效钾 Available potassium	0.783	−0.446	0.243	0.871
阳离子交换量 Cation exchange capacity	0.731	−0.298	0.552	0.927
硫酸根离子 Sulfate ion	−0.440	0.270	0.645	0.683
土壤密度 Bulk density	−0.743	−0.416	0.275	0.802
最大持水量 Maximum water capacity	0.917	−0.044	−0.305	0.937
毛管孔隙度 Capillary porosity	0.859	−0.318	−0.292	0.923
总孔隙度 Total porosity	0.888	−0.220	−0.294	0.922
特征值 Eigenvalue	6.257	4.146	1.880	—
方差贡献率 Variance contribution/%	44.691	29.612	13.431	—
累积方差贡献率 Accumulateed contribution of variance/%	44.691	74.302	87.733	—

表 4　不同林分类型土壤质量综合评价结果

Table 4　Comprehensive evaluation results of soil quality of different stand types

林分类型 Frosttypes	主成分 Principal component				综合排名 Comprehensive rank
	F1	F2	F3	F	
木荷 *Schima superba*	0.474	0.053	0.614	0.353	3
杉木 *Cunninghamia lanceolata*	0.303	−0.002	0.588	0.244	5
蓝果树 *Nyssa sinensis*	0.472	0.020	0.760	0.363	2
米老排 *Mytilaria laosensis*	0.685	−0.045	0.388	0.393	1
灌草地 Irrigate grassland	0.646	−0.286	0.212	0.265	4

（0.265）>杉木林（0.244）。

3　讨论

森林土壤的形成和演化是一个长期复杂的过程，受到母质类型、地形地貌、气候条件以及人为等因素的干扰，具有很强的空间异质性，并且随着植物群落的正向演替，土壤的理化性质也会不断的改善[26]。本研究中，同种林分内随着土层变深，土壤密度增加，土壤含水率、孔隙度递减，这与前人的研究结果一致[27-28]。不同林分间的土壤物理性质存在明显差异，总体上阔叶林的土壤密度和孔隙度优于针叶林。杉木林的枯枝落叶少，且根系（须根多粗根少）集中，减少了土壤有机碳的返还，土壤密度高；而阔叶林的地下根系发达且向更大范围伸展，凋落物多且分解快，有效改善了土壤贮水功能和孔隙度。

pH 值会对植物的生长、微生物的正常活动和土壤的肥力状况及其他理化性质产生影响，不同的林分类型会导致土壤 pH 值差异显著[29]。本研究表明，5 种林分的土壤呈强酸性或酸性，比广西凭祥的人工林土壤 pH 值还要低[30]，而且 5 种林分土壤的 SO_4^{2-}含量在表层土壤相近，有林地深层土壤的 SO_4^{2-}含量明显大于表层，而灌草地则呈现递减的趋势，并且有林地土壤的 SO_4^{2-}含量大于灌草地，说明林分生长会吸附 SO_4^{2-}等酸根离子，并经过渗透作用富集在深层土壤中[31]，这是否与柳州工业城市的酸雨污染有关还需要进一步研究。总体看，木荷和杉木林地土壤 pH 值、全 K、速效 K 及阳离子交换量明显低于其他林分和灌草地，可能是这 2 种林分吸收更多的大气酸性污染物，导致土壤亚系统释放更多的阳离子，阳离子消耗与酸性物的中和[32]。

土壤养分（如土壤有机碳、N、P、K）由地表枯落物分解、植物根系释放的养分及根系分泌物所形成，大多先进入土壤表层，随土壤深度增加进入的有机质和养分量逐渐下降，因而表层土壤有机碳、养分含量高于深层土壤[33]。本研究中，5 种林分的土壤有机碳、全 N、碱解氮、有效磷随土层变深而降低，土壤养分表聚效应明显，与大多数研究结果一致[34-36]。不同林分的土壤有机碳、N、P、K 含量阔叶林高于针叶林，主要原因是土壤养分来源于植物的凋落物，受到凋落物的性质和数量的显著影响[33]，而阔叶林凋落物量大，分解速度快，养分归还量大，有利于土壤养分的积累[8]。本研究结果表明，与对照灌草地相比，营造米老排、木荷、蓝果树、杉木人工林后，对土壤有机碳、有效 P、全 N、碱解 N 的积累具有促进作用，这与谭秋锦等[37]对贵州峡谷型喀斯特地区不同群落类型土壤肥力的研究一致，说明人工林比灌草更能改善原来立地的土壤肥力；而对于土壤全 K 来说，与对照灌草地相比，营造米老排、木荷、蓝果树、杉木人工林后含量显著减少（尤其是木荷林和杉木林），速效 K 也有相似规律，这种变化规律暗示了人工林对 K 元素的需求量较大。钟继洪等[38]研究表明，在雷州半岛种植桉树 40 a 后，与原本为稀疏干旱矮草的土壤相比，土壤全 K 含量下降了 81.7%；龙鹏等[39]对云南棕榈研究和王清奎等[40]对福建杉木的研究都表明，人工林生长与 K 元素含量高度正相关，因此，在人工林施肥中注重 K 肥的配比，有利于促进人工林生长及产量的提高。土壤 N、P、K 含量与全国第二次土壤普查分类标准相比，土壤有机碳、全 N、碱解 N、全 K 含量属于中下水平，全 P、速效 K 属于低水平，有效 P 属于极低水平，这与中国亚热带丘陵地区的红壤严重缺 P 有关。化学计量特征 C:N、C:P、N:P 比值阔叶林高于针叶林，但均低于全国平

均水平，林分土壤养分需要适当的人为干预。

土壤综合质量综合得分排名为：米老排林>蓝果树林>木荷林>灌草地>杉木林。阔叶林的土壤质量高于针叶林，阔叶林养分返还速率快，对提高土壤肥力，增加土壤养分具有显著的意义[41]。针叶林的土壤质量低于灌草地，可能是因为灌草地长年未人为干扰，自然演替后灌草种类和数量增多，形成结果较为稳定的群落，植物吸收量小，土壤也没有发生矿物元素淋失的现象，灌草植被自然恢复比针叶人工林改善土壤的效果更有优势[8]。本研究只对采伐迹地上不同人工林生长和灌草自然恢复 33 a 后的土壤理化性质进行了综合质量评价，其结果可能具有一定的局限性。在今后的研究中，应充分考虑研究区的气候、生物、成土母质、林下更新、林分经营措施等因素对林地土壤质量的影响，使得土壤综合质量评价的结果更客观事实。

4 结论

柳州市沙塘林场土壤的理化性质受到林分类型的明显影响，5 种林地土壤的 N、P、K 含量和 C:N、C:P、N:P 比值都偏低，不同林分间具有明显差异。从土壤改良角度看，阔叶林比针叶林能更有效地积累土壤有机碳、N 和 P 等养分，并明显地提高土壤的非毛管孔隙度和总孔隙度等。与对照灌草地相比，营造米老排、木荷、蓝果树、杉木人工林后使土壤全 K 含量明显减少，速效 K（除米老排林外）也有相似规律，这种变化规律说明了人工林（尤其是木荷林和杉木林）对 K 元素的消耗量大，因此，在管理不同森林类型时应针对性地进行肥料类型的施用，尤其是 K 元素调控管理。土壤质量综合评价结果显示，阔叶林优于针叶林与灌草地，在今后的人工林营造和森林质量提升管理的实践中，应优先考虑乡土阔叶树种。本研究 5 种林地土壤的 pH 值低于广西其他地区，并且有林地土壤的 SO_4^{2-}含量大于灌草地，这是否与柳州工业城市的酸雨污染有关还需要进一步研究。

参考文献：

[1] 冯 广, 艾训儒, 臧润国, 等. 鄂西南亚热带常绿落叶阔叶混交林不同群落类型土壤特征分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31（7）: 1173-1184.

[2] Vicca S, Luyssaert S, Penuelas J, *et al*. Fertile forests produce biomass more efficiently[J]. Ecology Letters, 2012, 15(6): 520-526.

[3] Yuan Y, Li X Y, Xiong D H, *et al*. Effects of restoration age on water conservation function and soil fertility quality of restored woodlands in phosphate mined-out areas[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(23): 1-14.

[4] Lukina N V, Orlova M A and. Isaeva L G. Forest soil fertility: the base of relationships between soil and vegetation[J]. Contemporary Problems of Ecology, 2011, 4(7): 725-733.

[5] Peng X H, Tamura K, Asano M, *et al*. Changes in Soil Physical and Chemical Properties during Vegetation Succession on Miyake-jima Island[J]. Forests, 2021, 12(11): 1435.

[6] 邵国栋, 艾娟娟, 孙启武, 等. 昆嵛山不同林分类型土壤质量状况及评价[J]. 林业科学研究, 2018, 31（6）: 175-184.

[7] 李 洁, 滑 磊, 任启文, 等. 冀西北3种植被恢复类型土壤理化性质差异及肥力评价[J]. 生态环境学报, 2020, 29（8）: 1540-1546.

[8] 李静鹏, 徐明锋, 苏志尧, 等. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价[J]. 生态学报, 2014, 34（9）: 2297-2307.

[9] 胡慧蓉, 胡庭兴, 谭九龙, 等. 华西雨屏区不同植被类型对土壤氮磷钾及有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2014, 46（4）: 630-637.

[10] 刘 畅, 张建军, 张海博, 等. 晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价[J]. 水土保持学报, 2021, 35（5）: 101-107.

[11] Griscom H P, Ashton M S. Restoration of dry tropical forests in Central America: a review of pattern and process[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(10): 1564-1579.

[12] 刘永贤, 熊柳梅, 韦彩会, 等. 广西典型土壤上不同林分的土壤肥力分析与综合评价[J]. 生态学报, 2014, 34（18）: 5229-5233.

[13] 陈文静, 祁凯斌, 黄俊胜, 等. 川西次生灌丛和不同类型人工林对土壤养分的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23（6）: 1081-1088.

[14] 白小芳, 徐福利, 王渭玲. 我国落叶松人工林地力衰退与施肥研究综述[J]. 世界林业研究, 2016, 29（1）: 75-79.

[15] 刘晓彤, 李海奎, 曹 磊, 等. 广东省森林土壤养分异质性析因[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43（2）: 90-101.

[16] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准-森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国行业标准出版社, 2000: 1210-1275.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社; 2011: 25-250.

[18] 卢翠玲, 张俊华, 丁亚鹏, 等. 基于模糊数学法的河南黄泛区土壤质量综合评价——以开封和周口为例[J]. 河南大学学报:自然科学版, 2018, 48（6）: 660-668.

[19] 张凯旋, 商侃侃, 达良俊. 上海环城林带不同植物群落土壤质量综合评价[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2015, 39（3）: 71-77.

[20] 包维斌, 白一茹, 杨 帆, 等. 宁夏中宁枸杞林地粉壤土阳离子交换量空间分布预测方法对比[J]. 生态学杂志, 2020, 39（4）: 1377-1386.

[21] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28（8）: 3937-3947.

[22] Tian H Q, Chen G S, Zhang C; *et al*. Pattern and variation of C:N:P ratios in China' s soils: a synthesis of observational data[J]. Hall, 2010, 98(1-3): 139-151.

[23] Adhikari P, Shukla M K, Mexal J G, *et al*. Assessment of the soil physical and chemical properties of desert soils irrigated with treated wastewater using principal component analysis[J]. Soil science, 2011, 176(7): 356-366.

[24] 王晓荣, 胡文杰, 庞宏东, 等. 湖北省主要森林类型土壤理化性质及土壤质量[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40（11）：156-166.

[25] 刘　杰, 马履一, 贾忠奎, 等. 不同林龄华北落叶松林下土壤理化性质及微生物学指标评价[J]. 水土保持通报, 2013, 33（6）：88-93.

[26] Ma T S, Deng X W, Chen L, *et al*. The soil properties and their effects on plant diversity in different degrees of rocky desertification[J]. Science of The Total Environment, 2020, 736: 139667.

[27] 魏　强, 凌　雷, 柴春山, 等. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质[J]. 生态学报, 2012, 32（15）：4700-4713.

[28] 冯嘉仪, 储双双, 王　婧, 等. 华南地区5种典型林分类型土壤肥力综合评价[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39（3）：73-81.

[29] 纪文婧, 程小琴, 韩海荣, 等. 山西太岳山好地方典型植被类型土壤理化特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35（1）：141-148.

[30] 王　倩, 李振双, 杨富成, 等. 广西凭祥红锥-马尾松混交林菌根际微生物群落结构[J]. 菌物学报, 2021, 40（6）：1343-1356.

[31] 唐晓芬, 王云琦, 王玉杰, 等. 重庆酸雨区缙云山典型林分冠层酸雨淋洗特征[J]. 林业科学研究, 2013, 26（5）：548-553.

[32] Taugbøl G, Neal C. Soil and stream water chemistry variations on acidic soils. Application of a cation exchange and mixing model at the catchment level[J]. Science of The Total Environment, 1994, 149(1): 83-95.

[33] 王利彦, 周国娜, 朱新玉, 等. 凋落物对土壤有机碳与微生物功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2021, 41（7）：1-10.

[34] Duan A G, Lei J, Hu X Y, *et al*. Effects of planting density on soil bulk density, pH and nutrients of unthinned Chinese fir mature stands in south subtropical region of China[J]. Forests, 2019, 10(4): 351.

[35] 耿玉清, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京山地森林的土壤养分状况[J]. 林业科学, 2010, 46（5）：169-175.

[36] Xie H T, Tang Y, Yu M K, *et al*. The effects of afforestation tree species mixing on soil organic carbon stock, nutrients accumulation, and understory vegetation diversity on reclaimed coastal lands in Eastern China[J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 26: e01478.

[37] 谭秋锦, 宋同清, 曾馥平, 等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤养分及其生态化学计量特征[J]. 农业现代化研究, 2014, 35（2）：225-228.

[38] 钟继洪, 李淑仪, 蓝佩玲, 等. 雷州半岛桉树人工林土壤肥力特征及其成因[J]. 水土保持通报, 2005, 25（3）：44-48.

[39] 龙　鹏, 韦小丽, 彭凌帅. 不同立地条件对棕榈人工林生长及产量的影响[J]. 福建农林大学学报:自然科学版, 2019, 48（2）：182-187.

[40] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 杉木人工林土壤可溶性有机质及其与土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2005, 25（6）：1299-1305.

[41] Shao G D, Ai J J, Sun Q W, *et al*. Soil quality assessment under different forest types in the Mount Tai, central Eastern China[J]. Ecological Indicators, 2020, 115(6): 106439.

Effects of Different Plantations on Soil Physical and Chemical Properties and Soil Quality Evaluation in South Subtropical Zone

YUAN Xing-ming[1,3], *ZHU Ning-hua*[1], *GUO Qi*[2], *ZHOU Guang-yi*[3], *MENG Min-yan*[2], *WU Shang-yong*[2], *YANG Le-su*[3]

(1. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hu'nan, China; 2. Teaching experimental forest farm of Guangxi ecological Vocational College, Liuzhou 545004, Guangxi, China; 3. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

Abstract: [**Objective**] To explore the effects of different plantations on soil physical and chemical properties under the same site conditions for providing a scientific basis for the accurate nutrient regulation and sustainable management of plantations. [**Methods**] The forests of *Schima superba*, *Mytilaria laosensis*, *Nyssa sinensis* and *Cunninghamia lanceolata* planted in 1987 on the clearcut sites of *Pinus massoniana* in Shatang forest farm of Liuzhou were used for analyses, and the non-forested site was used as the control. The 14 soil physical and chemical property indexes were measured in layers (0-15, 15-30, 30-50, 50-70 and 70-100 cm). Combining with KMO and Bartlett's Test of Sphericit, principal component analysis was used for evaluating soil quality. [**Results**] In the same stand, with deepening soil layer, the soil bulk density increased, on the contrast, the contents of porosity, soil organic carbon, total N, alkali hydrolyzable N, and available P decreased. There were significant differences in soil physical and chemical properties among different stands. The soil pH values in the five stands ranged from 3.94 to 5.12. The contents of soil organic carbon, total N, alkali hydrolyzable N, available P, and the stoichiometric characteristics of C:N, C:P and N:P ratios in the broad-leaved forests were the largest, followed by coniferous forests and control stand. The total P content of soil in *Cunninghamia lanceolata* forest was the lowest. Compared with the control stand, the total K content of soil decreased significantly after planting forests, as well as the available K (except *Mytilaria laosensis* forest), indicating that the plantations have a large consumption of K element. Moreover, the contents of pH value, total K, available K, and cation exchange capacity of soil in *Schima superba* forest and *Cunninghamia lanceolata* forest were significantly lower than those in other forests and control stand. According to the principal component results, the soil quality of *Mytilaria laosensis* forest were the best, followed by *Nyssa sinensis*, *Schima superba*, control stand, and *Cunninghamia lanceolata*. [**Conclusion**] (1) Compared with coniferous forest, broad-leaved forests can accumulate soil organic carbon, N and P more effectively, and can significantly optimize soil bulk density and porosity. Broad-leaved forest should be given priority in afforestation practice in the future. (2) After 33 years of plantation, the total K content of soil is significantly lower than that of the control stand, and there are differences among different forest stands. Therefore, we should pay attention to the regulation and management of K element in forest management.

Keywords: Plantation; Soil physical and chemical properties; Soil nutrient; Soil stoichiometry; Soil quality evaluation

（责任编辑：张 研）