

2 种人工林演变的次生林植物群落特征与土壤理化性质研究

符明珠, 符 溶, 杜尚嘉, 符生波, 吴海霞

海南省林业科学研究院 (海南省红树林研究院), 海南海口 571100

摘要: 次生林对全球森林资源的贡献程度大, 具有丰富的类型。全球资源与环境正面临严峻局面, 维护好次生林资源不受更多破坏, 科学研究、合理利用和有效管理是科学缓解的重要手段。以五指山不同次生林为研究对象, 设置典型样地, 从不同层次对群落植物进行调查, 并分析其群落组成、重要值和植物多样性, 分析不同层次土壤理化性质在含量上的差异性, 并采用逐步回归分析法, 分析植物多样性与土壤理化性质的相关性。研究结果表明: (1) 研究区域内主要以乔灌层为主, 草本层植物中深绿卷柏占绝对优势; (2) 不同次生林群落中物种丰富度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数表现为乔木层>灌木层>草本层, Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数表现为灌木层>乔木层>草本层; (3) 研究区内土壤呈酸性, 土壤有机质、全氮、全钾及碱解氮随土壤层次增加呈逐渐降低趋势, 土壤理化性质各项测定指标在不同土壤层次表现为无显著差异; (4) 影响植物多样性指数较大的土壤因子有土壤饱和含水量、土壤毛管孔隙度、土壤容重、全磷及全钾。土壤含水量、土壤养分、土壤质地等多样的变化特点及其复杂的互作关系, 协同作用于次生林群落植物多样性的变化。植被的多样性与土壤作用的关系主要表现为正相关效应。通过研究五指山市不同次生林的地上植物群落与土壤理化性质, 掌握五指山不同次生林群落多样性的基本情况, 阐明不同次生林群落演替的差异性, 揭示次生林的变化情况, 为森林群落演替的合理利用和保护提供理论依据。

关键词: 逐步回归分析; 次生林; 植物多样性; 土壤理化性质

中图分类号: Q948 文献标识码: A

Plant Community Characteristics and Soil Physical and Chemical Properties of Secondary Forests Evolved from Two Plantations

FU Mingzhu, FU Rong, DU Shangjia, FU Shengbo, WU Haixia

Hainan Academy of Forestry (Hainan Academy of Mangrove), Haikou, Hainan 571100, China

Abstract: Secondary forests contribute to the global forest resources to a large extent and have a rich variety of types. Global resources and environment are facing a critical situation, and maintaining secondary forest resources from more damage, scientific research, rational use and effective management are important means of scientific mitigation. In this paper, different secondary forests in Wuzhishan were used as research objects, typical sample plots were set up, community plants were investigated from different levels, and the community composition, importance values and plant diversity were analyzed, the differences of soil physicochemical properties at different levels in terms of content were analyzed, and the correlation between plant diversity and soil physicochemical properties was analyzed by stepwise regression analysis. The study area was dominated by tree and shrub layers, and the herbaceous layer was dominated by dark green curly cypress. The species richness index and Shannon-Wiener diversity index of different secondary forest communities showed that tree layer>shrub layer>herbaceous layer, and the Simpson dominance index and Pielou evenness index showed that shrub layer>tree layer>herbaceous layer. The soil in the study area was acidic, the organic matter, total nitrogen, total potassium and alkaline nitrogen content of soil show a gradual decreased with increasing soil levels. While there was no significant difference in the physical properties of soil in different soil layers. The soil factors affecting the plant diversity index significantly were soil saturation water content, soil capillary void space, soil ca-

收稿日期 2022-06-07; 修回日期 2022-08-03

基金项目 海南省林业科学研究院 (海南省红树林研究院) 基础性科研项目 (No. KYYS-2021-04)。

作者简介 符明珠 (1998—), 女, 本科生, 研究方向: 森林生态学。*通信作者 (Corresponding author): 吴海霞 (WU Haixia), E-mail: 116556651@qq.com。

capacity, total phosphorus and total potassium. The diverse characteristics of soil water content, soil nutrients, soil texture and their complex interaction had a synergistic effect on the change of plant diversity of secondary forest community. There was a positive correlation between vegetation diversity and soil action. By studying the physical and chemical properties of aboveground plant community and soil of different secondary forests in Wuzhishan City, the basic situation of community diversity of different secondary forests in Wuzhishan was mastered, the difference of community succession of different secondary forests was clarified, and the change of secondary forests was revealed, in order to provide theoretical basis for rational utilization and protection of forest community succession.

Keywords: stepwise regression analysis; secondary forest; plant diversity; soil physical and chemical properties

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.06.022

植物群落多样性反映了植物个体间复杂的相互关系, 为保护生物多样性的研究工作提供重要基础^[1], 同时体现生物群落组成和结构的发展规律^[2], 体现土壤质地和土壤养分的变化规律^[3]。次生林一直是国内外学者的关注热点, 次生林、生物多样性和热带雨林是研究过程中的高频关键词^[4]。土壤作为植物生长过程中的重要部分, 可以通过不同的土壤性质影响森林群落的稳定性。深入研究不同次生林土壤因子对植物的复杂作用, 探寻植物多样性与土壤理化性质之间相关性的成果逐渐增加。笔者对人工林演变的次生林群落植物物种多样性与土壤理化性质进行研究, 旨在了解五指山不同次生林“植被-土壤”的相互作用, 探讨人工林自发演变后植物群落特征与土壤理化性质, 对海南热带雨林公园中森林群落稳定性的形成机制具有积极作用, 为海南热带雨林公园中人工林退出提供科学依据, 同时为保护五指山植物物种多样性与热带雨林森林的高效经营管理奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

研究区域位于海南中部山区五指山市阿陀岭国家森林公园, 选取杉木人工林和加勒比松人工林经过封山育林演变形成的次生林。研究区域属热带季雨林气候, 区域内土壤类型主要为砂质红壤, 植被类型主要为热带雨林、热带常绿阔叶林等。

1.2 方法

1.2.1 样地设置与群落调查 采用标准样地法, 在研究区域内选择植被类型均匀的次生林样地 2 个, 其中 A₁ 为杉木林人工林演变形成的次生林, A₂ 为加勒比松人工林演变形成的次生林。分别布设 3 个 20 m×20 m 的调查样方, 在对每个样方内的乔木进行每木检尺, 记录每株树的种名、胸径、

高度、冠幅等; 灌木调查样方记录灌木种名、株高和盖度等; 草本调查样方记录草本种名、盖度、株数、株高等调查指标。

1.2.2 土壤理化性质测定 采用环刀取样法, 分别在 20 m×20 m 的调查样方内挖取土壤剖面, 刮除土壤表层腐殖质后, 分别在 0~20、20~40、40~60 cm 三个土壤层次用 100 cm² 环刀采集土壤样品, 重复采集 3 次。同时用封口袋采集 3 个土壤层次的散装土壤样品各约 500 g, 用于进行土壤化学性质的测定及分析。

土壤理化性质测定所有指标均参照国家林业行业标准 LY/T 1213—1999^[5]。指标测定方法: 土壤 pH 采用电极法; 有机质 (SOC) 采用重铬酸钾外加热法; 全氮 (TN) 采用凯氏定氮法; 全磷 (TP) 采用钼锑抗分光光度法; 全钾 (TK) 采用火焰光度法; 碱解氮采用碱解扩散法; 有效磷采用盐酸-氟化铵提取-钼锑抗比色法; 速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法; 土壤容重、孔隙度、土壤饱和含水量采用浸泡法。

1.3 数据处理

物种重要值计算: IV (乔木层) = (相对多度 + 相对频度 + 相对显著度) / 3; IV (灌木层、草本层) = (相对多度 + 相对盖度 + 相对频度) / 3; 植物物种多样性测度方法: 物种丰富度指数 S = 调查样方中出现的物种数; Simpson 优势度指数 $D = 1 - \sum P_i^2$; Shannon-Wiener 多样性指数 $H' = -\sum P_i \ln P_i$; Pielou 均匀度指数 $J_{sw} = (-\sum P_i \ln P_i) / \ln S$ 。式中, S 为物种数; N 为所有个体数; P_i 为第 i 种物种的个体数 N 占有所有个体总数 N 的比例。

所有数据采用 Microsoft Excel 2010 软件进行野外调查及室内实验数据的整理并绘图, 使用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件对物种 α 多样性测度和土壤理化特性进行方差分析。以乔木层、灌

木层和草本层物种多样性指数为因变量, 自变量为土壤理化性质指标, 采用逐步多元回归进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同次生林群落物种组成及重要值

2.1.1 群落物种组成 统计 2 种不同次生林调查样地内乔木层、灌木层和草本层植物的科、属、种组成表明, 不同植物群落的物种组成不同。如表 1 所示, 在 2 种不同林分次生林中, 乔木层植物 56 种, 隶属 26 科 45 属。其中 A₁ 次生林群落乔木层 30 种, 隶属 17 科 25 属, 主要以樟科 (Lauraceae)、茜草科 (Rubiaceae) 和芸香科 (Rutaceae) 为主; A₂ 次生林群落乔木层植物 39 种, 隶属 26 科 34 属, 主要以樟科 (Lauraceae)、桃金娘科 (Myrtaceae)、五列木科 (Pentaphylacaceae) 居多。灌木层植物调查共 50 种, 隶属 28 科 39 属, 主要以樟科 (Lauraceae)、茜草科 (Rubiaceae)、五列木科 (Pentaphylacaceae) 为主。草本层植物记录到 9 种, 隶属 9 科 9 属, 其中隶属卷柏科 (Selaginellaceae) 卷柏属 (*Selaginella*) 深绿卷柏 (*Selaginella doederleinii*

Hieron.) 占绝对优势。

2.1.2 群落物种重要值 重要值通过综合数值表示某一物种在植物群落中所处的地位及作用^[6]。评估重要值可获得某一群落中主要的优势树种。对调查样地内乔木层植物重要值进行计算分析, 重要值排前五的优势种见表 2, 在森林群落中不同群落层面, 植物的重要值和优势种不同。A₁ 乔木层的优势种有芳樟润楠、海南鹅掌柴、水锦树、华润楠和杉木等, 其中隶属于樟科润楠属芳樟润楠的重要值为 0.1097, 处于主导地位; 同科同属的华润楠重要值为 0.0637, 位居第四; 海南鹅掌柴和水锦树的重要值分别为 0.0901 和 0.0749, 仅次于芳樟润楠; 杉木的重要值为 0.0609, 位居第五, 说明以杉木作为人工更新树种, 随着演替进程的推进, 杉木人工林发生退化现象, 或者更适于生长的树种出现占据了林地的大部分空间, 致使与其他树种争夺林地内资源能力降低, 替代杉木的主要优势位置。A₂ 乔木层, 细齿叶桉的重要值为 0.1419, 在 A₂ 中处于重要位置; 加勒比松隶属于松科松属, 重要值为 0.1318, 仅次于细齿叶桉; 细叶桉、山乌柏和海南鹅掌柴的重要值分别

表 1 不同次生林群落物种组成

Tab. 1 Species composition of different secondary forest communities

群落类型 Community type	乔木层 Tree layer			灌木层 Shrub layer			草本层 Herbaceous layer		
	科数	属数	种数	科数	属数	种数	科数	属数	种数
	No.of family	No.of genus	No.of species	No.of family	No.of genus	No.of species	No.of family	No.of genus	No.of species
A ₁	17	25	30	21	28	34	11	12	12
A ₂	26	34	39	19	27	32	6	6	6
A ₁ +A ₂	26	45	56	28	39	50	9	9	9

表 2 乔木层中植物种类排前五的重要值

Tab. 2 Top 5 significant values for plant species in tree layers

群落类型 Community type	种名 Species	科 Family	属 Genus	重要值 Important value
A ₁	芳樟润楠 (<i>Machilus gamblei</i>)	樟科	润楠属	0.1097
	海南鹅掌柴 (<i>Schefflera hainanensis</i>)	五加科	南鹅掌柴属	0.0901
	水锦树 (<i>Wendlandia uvariifolia</i>)	茜草科	水锦树属	0.0749
	华润楠 (<i>Machilus chinensis</i>)	樟科	润楠属	0.0637
	杉木 (<i>Cunninghamia lanceolata</i>)	柏科	杉木属	0.0609
A ₂	细齿叶桉 (<i>Eurya nitida</i>)	五列木科	桉属	0.1419
	加勒比松 (<i>Pinus caribaea</i>)	松科	松属	0.1318
	细叶桉 (<i>Eucalyptus tereticornis</i>)	桃金娘科	桉属	0.0850
	山乌柏 (<i>Triadica cochinchinensis</i>)	大戟科	乌柏属	0.0726
	海南鹅掌柴 (<i>Schefflera hainanensis</i>)	五加科	南鹅掌柴属	0.0573

为 0.0850、0.0726 和 0.0573。

由表 3 可知, A₁ 灌木层植物中重要值排前五的优势种为三桠苦、九节、海南鹅掌柴、青藤公和水东哥, 其重要值分别为 0.1088、0.1029、0.0843、0.0753 和 0.0712。A₂ 灌木层中三桠苦为主要优势树种, 重要值为 0.1205; 海南鹅掌柴的重要值为 0.0993, 仅次于三桠苦; 越南山矾和黧蒴锥的重要值相近, 分别为 0.0836 和 0.0822。海南杨桐的重要值为 0.0691, 位居第五。

由表 4 可知, A₁ 草本层重要值排前三的优势种为深绿卷柏、海南山姜和海南草珊瑚, 其重要值分别为 2.0601、1.0089 和 0.6348; A₂ 草本层植物中深绿卷柏占绝对优势, 其重要值为 0.4268。簕竹的重要值为 0.2631, 仅次于深绿卷柏。单叶新月蕨的重要值为 0.1015。

2.2 不同次生林群落植物物种多样性

植物群落层次物种多样性反映了植物的立体结构和群落中乔灌草的组合状况, 良好的群落层次结构有利于形成稳定的群落环境^[5]。物种多样性是群落物种组成及结果的关键指标, 主要从生

态学的角度来衡量群落中生物的组成结构、群落组织层次、形成演变过程及维持体系^[6-7]。本研究分别计算了不同植被类型乔木层、灌木层和草本层的物种丰富度指数 (S)、Simpson 优势度指数 (D)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 和 Pielou 均匀度指数 (J_{sw})。由表 5 可知, A₁ 中乔木层与灌木层植物的 D 值、 H' 值和 J_{sw} 值相近, A₂ 中 D 值与 J_{sw} 值相近。不同群落中乔灌层与草本层的 S 、 D 和 H' 均存在显著差异, 其 J_{sw} 无显著差异。 S 值表现为乔木层 > 灌木层 > 草本层。

2.3 不同次生林群落土壤理化性质特征

2.3.1 不同次生林群落土壤物理性质

由图 1 可知, A₁ 土壤含水率随土层加深呈先下降后上升的趋势, A₁ 表层土壤的饱和含水量高于其他土壤层次 (20~40、40~60 cm) 土壤饱和含水量, 分别增高 32% 和 25%; A₂ 土壤含水率随土层加深呈先上升后下降的趋势。土壤的饱和含水量不同次生林群落中均表现为在不同土层中无显著差异。在不同次生林群落中, 土壤总孔隙度与土壤毛管孔隙度均无较大变化, 同时不同土壤层次之间均无显

表 3 灌木层中植物种类排前五的重要值

Tab. 3 Top 5 significant values of plant species in shrub layer

群落类型 Community type	种名 Species	科 Family	属 Genus	重要值 Important value
A ₁	三桠苦 (<i>Melicope pteleifolia</i>)	芸香科	蜜茱萸属	0.1088
	九节 (<i>Psychotria asiatica</i>)	茜草科	九节属	0.1029
	海南鹅掌柴 (<i>Schefflera hainanensis</i>)	五加科	南鹅掌柴属	0.0843
	青藤公 (<i>Ficus langkokensis</i>)	桑科	榕属	0.0753
	水东哥 (<i>Saurauia tristyla</i>)	猕猴桃科	水东哥属	0.0712
A ₂	三桠苦 (<i>Melicope pteleifolia</i>)	芸香科	蜜茱萸属	0.1205
	海南鹅掌柴 (<i>Schefflera hainanensis</i>)	五加科	南鹅掌柴属	0.0993
	越南山矾 (<i>Symplocos cochinchinensis</i>)	山矾科	山矾属	0.0836
	黧蒴锥 (<i>Castanopsis fissa</i>)	壳斗科	锥属	0.0822
	海南杨桐 (<i>Adinandra hainanensis</i>)	五列木科	杨桐属	0.0691

表 4 草本层植物种类排前三的重要值

Tab. 4 Top 3 significant values for plant species in the herbaceous layer

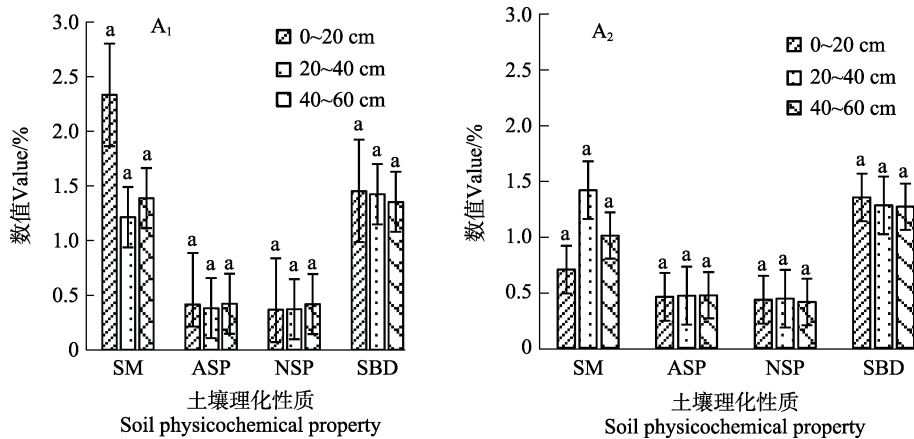
群落类型 Community type	种名 Species	科 Family	属 Genus	重要值 Important value
A ₁	深绿卷柏 (<i>Selaginella doederleinii</i>)	卷柏科	卷柏属	2.0601
	海南山姜 (<i>Alpinia hainanensis</i>)	姜科	山姜属	1.0089
	海南草珊瑚 (<i>Sarcandra glabra</i> subsp)	金粟兰科	草珊瑚属	0.6348
A ₂	深绿卷柏 (<i>Selaginella doederleinii</i>)	卷柏科	卷柏属	0.4268
	簕竹 (<i>Pseudosasa hindsii</i>)	禾本科	矢竹属	0.2631
	单叶新月蕨 (<i>Pronephrium simplex</i>)	金星蕨科	新月蕨属	0.1015

表 5 不同次生林群落植物物种多样性
Tab. 5 Plant species diversity in different secondary forest communities

群落类型 Community type	植被层 Plant layer	S	D	H'	J _{sw}
A ₁	乔木	24.0000±4.3588 ^a	0.8947±0.0167 ^a	2.5731±0.2096 ^a	0.8484±0.0177 ^a
	灌木	19.3333±2.8868 ^a	0.9004±0.0084 ^a	2.5704±0.1295 ^a	0.8706±0.0270 ^a
	草本	4.0000±1.7321 ^b	0.5502±0.0909 ^b	0.9151±0.1966 ^b	0.7164±0.2192 ^a
A ₂	乔木	22.6667±4.0415 ^a	0.8262±0.0329 ^a	2.2821±0.1375 ^a	0.7343±0.0369 ^a
	灌木	20.0000±4.3589 ^a	0.8958±0.0283 ^a	2.5504±0.2393 ^a	0.7963±0.1592 ^a
	草本	6.0000±1.0000 ^b	0.6398±0.0483 ^b	1.2323±0.1036 ^b	0.6936±0.0602 ^a

注：不同小写字母表示不同次生林群落植物物种多样性差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference in plant species diversity in different secondary forest communities ($P<0.05$).



SM: 土壤饱和含水量; ASP: 土壤总孔隙度; NSP: 土壤毛细管孔隙度; SBD: 土壤容重。

不同小写字母表示不同次生林群落土壤物理性质差异显著 ($P<0.05$)。

SM: Saturated moisture; ASP: Total porosity; NSP: Soil capillary porosity; SBD: Bulk density. Different lowercase letters indicate significant difference in soil physical properties in different secondary forest communities ($P<0.05$).

图 1 不同次生林群落土壤理化性质

Fig. 1 Soil physicochemical properties of different secondary forest communities

著差异。2 种次生林群落中，土壤容重随土壤层次的增加呈下降趋势，同时 A₁ 的土壤容重高于 A₂ 的土壤容重。A₁ 土壤容重的变化范围为 1.35%~1.45%；A₂ 土壤容重的变化范围为 1.27%~1.36%。土壤容重在不同土壤层次中均无显著差异。

2.3.2 不同次生林群落土壤化学性质 2 种次生林群落不同土壤层次 (0~20、20~40、40~60 cm) 下，其土壤化学性质测定结果分析见表 6。土壤的化学性质各项指标中，土壤的 pH 可以作为研究土壤养分是否发挥有效性作用的重要指标^[8]。在研究区域内 2 种次生林群落中，不同深度土壤的 pH 均呈酸性。土壤 pH 在 0~20 cm 处表现酸性较强，同时随着土壤层次的加深，其酸性程度逐渐减弱。土壤有机质对植物的生长是十分重要的一个环节，也是构成固相土壤的组成成分之一。在 A₁、A₂ 中，土壤有机质随着土壤层次加深逐渐降低，

其中 A₁ 中 0~20 cm 处与其他土壤层次存在显著差异，同时 A₂ 中各土壤层次间呈显著差异。氮元素可以通过影响光合作用，以此影响植物的生长发育。在 A₁、A₂ 中，土壤全氮与碱解氮均随着土壤层次加深逐渐降低，且不同土壤层次间均表现为显著差异。磷元素能够促进植物的生长，同时可以提高植物的抗性。A₁ 中土壤全磷无明显变化，土壤有效磷在土壤层次为 0~20 cm 与 40~60 cm 之间存在显著差异；而 A₂ 中土壤全磷随着土壤层次加深逐渐降低，在不同土壤层次间均存在显著差异，土壤有效磷在土壤层次为 0~20 cm 与 20~40、40~60 cm 均存在显著差异。钾元素在植物的光合作用中位于重要地位，同时能够促进植物加快吸收氮和磷。A₁ 和 A₂ 土壤全钾含量、A₁ 速效钾含量均表现为在土壤层次为 0~20 cm 与 20~40、40~60 cm 存在显著差异，且其含量在土壤表层高

表 6 不同次生林群落土壤化学性质
Tab. 6 Soil chemical properties of different secondary forest communities

群落类型 Community type	土壤层 Soil layer/cm	有机质 SOM/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	全钾 TK/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 AN/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)	pH
A ₁	0~20	20.76±3.13 ^a	1.18±0.06 ^a	0.24±0.02 ^a	17.58±1.72 ^a	83.59±4.36 ^a	142.74±4.32 ^a	169.12±8.74 ^a	4.41±0.13 ^b
	20~40	13.01±2.65 ^b	0.80±0.03 ^b	0.22±0.03 ^a	12.54±0.36 ^b	59.79±2.01 ^b	135.01±5.50 ^{ab}	113.63±10.82 ^b	4.81±0.20 ^a
	40~60	10.05±2.52 ^b	0.66±0.05 ^c	0.23±0.01 ^a	11.80±2.36 ^b	31.63±3.78 ^c	128.41±4.90 ^b	114.43±15.78 ^b	5.00±0.10 ^a
A ₂	0~20	20.72±1.23 ^a	1.28±0.07 ^a	0.34±0.01 ^a	18.98±1.03 ^a	168.26±12.18 ^a	214.56±11.59 ^a	162.03±8.28 ^a	4.56±0.28 ^b
	20~40	12.51±0.83 ^b	0.75±0.07 ^b	0.21±0.02 ^b	10.29±0.52 ^b	52.50±1.54 ^b	128.07±10.05 ^b	106.26±8.11 ^b	4.83±0.08 ^{ab}
	40~60	8.77±0.73 ^c	0.56±0.06 ^c	0.17±0.02 ^c	12.20±3.40 ^b	33.21±4.57 ^c	118.10±8.79 ^b	102.65±36.23 ^a	4.97±0.13 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

于其他土壤层次。A₂ 中速效钾含量在 20~40 cm 处较低, 并与其他土壤层次呈显著差异。

2.4 不同次生林群落植物物种多样性与土壤理化性质相关性

依据研究区域调查的数据, 采用逐步回归分析法, 对调查样地内的植物多样性与土壤理化性质指标进行回归分析 (表 7), 结果表明在不同的植被层次, 植物多样性指数与土壤理化性质之间的相关性有所不同。乔木层中, H' 值与土壤饱和和含水量呈正相关, 回归方程为 $Y=0.379X_1+1.917$ ($R^2=0.823$); J_{sw} 值与土壤容重呈正相关, 回归方程为 $Y=0.766X_4-0.248$ ($R^2=0.632$)。灌木层中, D 值与土壤全磷呈正相关, 可由 81.80% 的概率

解释二者之间相关性, 其回归方程为 $Y=0.306X_7+0.826$; H 值与土壤全钾呈正相关, 回归方程为 $Y=0.047X_8+1.909$, 可由 88.80% 的概率解释二者之间相关性。草本层中, S 值与土壤毛管孔隙度的正相关性存在 79.20% 的概率解释其变化规律, 回归方程为 $Y=50.735X_3-15.632$; D 值、 H' 值分别与土壤含水量存在负相关, 其回归方程为 $Y=-0.142X_1+0.786$ ($R^2=0.891$) 和 $Y=-0.392X_1+1.602$ ($R^2=0.910$)。

3 讨论

3.1 不同次生林群落植物物种多样性差异分析

研究区域内特殊的地理环境及复杂的气候条件^[9], 孕育了丰富的植物种类。本次调查中乔木层植物共 26 科 45 属 56 种, 主要以樟科、茜草科、芸香科、桃金娘科、五列木科为主。灌木层植物调查共 50 种, 隶属 28 科 39 属, 主要以樟科、茜草科、五列木科为主。草本层植物共 6 种, 隶属 6 科 6 属, 主要以卷柏科植物以及姜科植物为主。次生林建群树种的种子萌发和幼苗较少, 灌木层主要优势种为三桠苦、九节及海南鹅掌柴等植物, 表明最初杉木和加勒比松作为人工更新树种, 随着演替的发展逐渐消失并终将被其他树种所替代。2 种不同次生林优势种存在相似之处, 物种相对单一, 乔灌木层植物对草本层植物的生长有一定的抑制作用^[10]。草本层植物优势种深绿卷柏同时存在 2 个群落中, A₂ 出现了区别于 A₁ 的植物种类为蕨竹, 在 A₂ 中除草本调查样方内, 还在整个样地内广泛分布。群落物种的种类出现范围小但聚集的程度较强, 表现出复杂的种间竞争与不稳定的群落结构^[11]。灌木层出现了与乔木层相对

表 7 植物多样性与土壤理化性质的参数估计

Tab. 7 Parameter estimation of species diversity and soil physicochemical properties

植被层 Plant layer	多样性指数 Diversity index	土壤因子 Soil factor	回归方程 Regression equation	R^2
乔木	H'	X_1	$Y=0.379X_1+1.917$	0.823
	J_{sw}	X_4	$Y=0.766X_4-0.248$	0.632
灌木	D	X_7	$Y=0.306X_7+0.826$	0.818
	H'	X_8	$Y=0.047X_8+1.909$	0.888
草本	S	X_3	$Y=50.735X_3-15.632$	0.792
	D	X_1	$Y=-0.142X_1+0.786$	0.891
	H'	X_1	$Y=-0.392X_1+1.602$	0.910

注: 表中 X_1 为土壤饱和和含水量; X_2 为土壤总孔隙度; X_3 为土壤毛管孔隙度; X_4 为土壤容重; X_5 为有机质; X_6 为全氮; X_7 为全磷; X_8 为全钾; X_9 为碱解氮; X_{10} 为速效磷; X_{11} 为有效钾; X_{12} 为 pH。

Note: X_1 is saturated water content; X_2 is total soil porosity; X_3 is capillary porosity; X_4 is bulk density; X_5 is organic matter; X_6 is total nitrogen; X_7 is total phosphorus; X_8 is total potassium; X_9 is alkaline hydrolyzable nitrogen; X_{10} is available phosphorus; X_{11} is available potassium; X_{12} is pH.

应的树种, 其中海南鹅掌柴作为优势种并占有相对优势地位, 说明随着时间的推移, 次生林能够实现自我更新, 群落的更新有利于维持次生林相对稳定的群落结构。

3.2 不同次生林群落土壤理化性质的差异分析

不同的植被种类和土壤母质层状态等是影响次生林群落土壤理化性质的原因。土壤理化性质能够反映土壤的肥力变化情况, 同时体现不同生境变化与差异的重要指标^[12]。本研究中, A₁ 土壤表层的饱和含水量大于 A₂, 其原因可能是随着演替的进行, 灌草层的植被覆盖度 A₁ 大于 A₂, 覆盖度的增加, 对气候降水有一定截流作用, 水分将缓慢渗入土层。另一方面, 地表植被枯落物较厚, 缓解太阳直射的温度, 减少了土壤表层的水分蒸发量。A₂ 不同土壤层次的总孔隙度和非毛管孔隙度大于 A₁。造成此现象的原因可能是 A₂ 群落中乔木层植物种类数量比 A₁ 多, 乔木层植物种类的数量增加, 植被的郁闭度相对较大, 能够降低降水等因素对土壤的直接侵蚀程度, 同时利于土壤生物的活动, 增加了土壤的孔隙度。整体而言, 本研究次生林群落的土壤理化性质处于良好的发展状态, 虽存在起伏的变化, 但是波动的幅度不大。

由于调查区域内的植物吸收养分的效率增加, 虽然氢离子不断地从根系中释放出来, 但是土壤中碱性阳离子逐步被固定于植被的生物量中, 使得土壤溶液的氢离子浓度升高^[13], 同时土壤生物生命活动过程中产生的酸性物质, 进而造成本次调查区域中土壤呈酸性。土壤表层土壤有机质、全氮、全钾及碱解氮较高, 造成此结果可能是, 土壤表层有植物凋落物和其他生物的残体存在, 或者是植物根系的活动^[14]使得土壤的养分较高。因此, 协调群落的植物生长与土壤理化性质关系上要注重合理搭配, 使得次生林群落形成一种动态平衡。

3.3 不同次生林群落植物物种多样性与土壤理化性质的相关性分析

植物多样性与土壤理化性质之间关系复杂, 研究的热点主要是以不同演替过程中的植物群落与土壤等环境因子关系, 但研究的结果存在差异^[15-17]。随着森林群落的演替进程发展, 土壤的理化性质发生不断的变化^[18-20]。五指山地域特殊的环境因素, 研究结果可能与其他地区的研究存在差异。物种的多样性与土壤理化性质之间的作

用是相互的, 物种多样性的变化可能会引起土壤因子产生影响。植物群落的组成与结构特征会直接或间接影响森林生态系统多样性、群落功能特征、维持森林内水源和土壤的养分供给等^[21]。本次研究采用逐步回归分析进行相关性分析, 植物群落物种多样性指数 S 值、 D 值、 H' 值与 J_{sw} 值与土壤饱和含水量、土壤容重、土壤毛管孔隙度、全氮、全钾存在相关性, 与闫玮明等^[22]对粤北阔叶人工林与次生林中植物多样性与土壤因子的相关性研究存在不同, 可能是处于不同的生境中, 植物群落的生长阶段、群落类型和气候条件等不同有关。次生林乔木群落物种多样性的群落类型分布主要受土壤最大持水量的影响^[23]。对于乔木层和草本层的调查研究中, H' 值与土壤饱和含水量、 J_{sw} 值与土壤容重存在相关性。灌木层中 D 值与土壤全磷、 H' 值与土壤全钾存在相关性。草本层植物物种多样性相对于灌木层而言, 与土壤理化性质的相关性较强。形成该结果极可能是由于草本层对外的抗干扰能力弱, 对土壤因子的变化敏感性较强。因此土壤理化性质对于草本层植物物种多样性的影响较大。全磷、全钾、土壤饱和含水量、土壤容重和土壤毛管孔隙度是影响研究区植物物种多样性的主要因素, 对于植物多样性维持及次生林正向演替有深远影响, 需在今后的森林管理和土壤保育研究工作中予以特别关注。

参考文献

- [1] 王飞, 曹秀文, 刘锦乾, 齐瑞, 赵阳, 张涛, 陈学龙, 曹家豪, 王若鉴, 武亚男, 杨静. 白龙江林区 2 种次生林群落组成与结构特征[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(3): 44-58.
WANG F, CAO X W, LIU J Q, QI R, ZHAO Y, ZHANG T, CHEN X L, CAO J H, WANG R J, WU Y N, YANG J. Community composition and structural characteristics of two secondary forest species in Bailongjiang forest area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(3): 44-58. (in Chinese)
- [2] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报, 1995(3): 268-277.
MA K P, HUANG J H, YU S L, CHEN L Z. Plant community diversity in Dongling mountain, Beijing China: II. species richness, evenness and species diversity[J]. Acta Ecologica Sinica, 1995(3): 268-277. (in Chinese)
- [3] 罗亚勇, 孟庆涛, 张静辉, 赵学勇, 秦戎. 青藏高原东缘

- 高寒草甸退化过程中植物群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1298-1305.
- LUO Y Y, MENG Q T, ZHANG J H, ZHAO X Y, QIN Y. Species diversity and biomass in relation to soil properties of alpine meadows in the eastern Tibetan Plateau in different degradation stages[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1298-1305. (in Chinese)
- [4] 陈仕友, 白彦锋, 王辉, 姜春前. 近20年次生林研究动态分析: 基于文献计量学[J]. 温带林业研究, 2021, 4(4): 17-23.
- CHEN S Y, BAI Y F, WANG H, JIANG C Q. A bibliometric review on secondary forest research in recent years[J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2021, 4(4): 17-23. (in Chinese)
- [5] 中国林业科学研究院. 森林土壤分析方法: LY/T 1213—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- Chinese Academy of Forestry. Forest soil analysis methods: LY/T 1213—1999[S]. Beijing. Standards Press of China, 1999. (in Chinese)
- [6] 郝建锋, 王德艺, 李艳, 姚小兰, 张逸博, 詹美春, 齐锦秋. 人为干扰对川西金凤山楠木次生林群落结构和物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(23): 6930-6942.
- HAO J F, WANG D Y, LI Y, YAO X L, ZHANG Y B, ZHAN M C, QI J Q. Effects of human disturbance on species diversity of *Phoebe zhenan* communities in Jinfengshan Mountain in western Sichuan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(23): 6930-6942. (in Chinese)
- [7] 朱锦懋, 姜志林, 郑群瑞, 蒋伟. 福建万木林自然保护区森林群落物种多样性研究[J]. 南京林业大学学报, 1997(4): 13-18.
- ZHU J M, JIANG Z L, ZHENG Q R, JIANG W. A study on the species diversity in the forest community of Wanmulin Nature Reserve Fujian province[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 1997(4): 13-18. (in Chinese)
- [8] 张继义, 赵哈林. 植被(植物群落)稳定性研究评述[J]. 生态学杂志, 2003(4): 42-48.
- ZHANG J Y, ZHAO H L. Review on the study of vegetation stability[J]. Journal of Ecology, 2003(4): 42-48. (in Chinese)
- [9] 胡鹏程, 刘闯, 陈伟岸, 殷崇敏, 杜家贤, 张荣京. 海南五指山国家级自然保护区野生蜜源植物资源研究[J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(5): 55-57.
- HU P C, LIU C, CHEN W A, YIN C M, DU J X, ZHANG R J. Wild nectar plants resources in Wuzhishan National Nature Reserve, Hainan[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2020, 39(5): 55-57. (in Chinese)
- [10] KUMAR P, CHEN H Y H, THOMAS S C, SHAHI C. Linking resource availability and heterogeneity to understorey species diversity through succession in boreal forest of Canada[J]. Journal of Ecology, 2018, 106(3): 1266-1276.
- [11] 刘浩栋, 陈巧, 徐志扬, 刘洋, 姜怡, 陈永富. 海南岛霸王岭陆均松天然群落物种多样性及地形因子的解释[J]. 生态学杂志, 2020, 39(2): 394-403.
- LIU H D, CHEN Q, XU Z Y, LIU Y, JIANG Y, CHEN Y F. Effects of topographical factors on species diversity across *Dacrydium pectinatum* natural community in Hainan island[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(2): 394-403. (in Chinese)
- [12] 张海涛, 梁继业, 周正立, 吕瑞恒. 塔里木河中游荒漠河岸林土壤理化性质分布特征与植被关系[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 6-12.
- ZHANG H T, LIANG J Y, ZHOU Z L, LYU R H. Relationship between distribution characteristics of soil physicochemical properties and vegetation in desert riparian forests in the middle reaches of the Tarim River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(2): 6-12. (in Chinese)
- [13] YU Z P, CHEN H Y H, SEARLE E B, SARDANS J, CIAIS P, PENUELAS J, HUANG Z Q. Whole soil acidification and base cation reduction across subtropical China[J]. Geoderma, 2020, 361: 114107.
- [14] CHEN G S, YANG Z J, GAO R, XIE J S, GUO J F, HUANG Z Q, YANG Y S. Carbon storage in a chronosequence of Chinese fir plantations in southern China[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 300: 68-76.
- [15] 周润惠, 苏天成, 喻静, 向琳, 陈聪琳, 张瀚文, 李婧, 郝建锋. 碧峰峡常绿阔叶林不同群落物种多样性和土壤理化性质[J]. 生态学杂志, 2022, 41(1): 1-8.
- ZHOU R H, SU T C, YU J, XIANG L, CHEN C L, ZHANG H W, LI J, HAO J F. Species diversity and soil physicochemical properties of different communities in Bifengxia evergreen broad-leaved forest[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(1): 1-8. (in Chinese)
- [16] 林丽, 代磊, 林泽北, 吴际通, 颜伟, 王志杰. 黔中城市森林群落植物多样性及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态环境学报, 2021, 30(11): 2130-2141.
- LIN L, DAI L, LIN Z B, WU J T, YAN W, WANG Z J. Plant diversity and its relationship with soil physicochemical properties of urban forest communities in central Guizhou[J]. Ecology and Environmental Sciences, 30(11): 2130-2141. (in Chinese)
- [17] 余飞燕, 叶鑫, 周润惠, 董洪君, 王敏, 陈聪琳, 郝建锋. 金马河温江段河岸带不同生境植物物种多样性与土壤理化性质的动态变化[J]. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(1): 1-8.
- YU F Y, YE X, ZHOU R H, DONG H J, WANG M, CHEN C L, HAO J F. Dynamic changes in plant diversity and soil physical and chemical properties in different habitats in

- Wenjiang section of Jinma river[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2021, 29(1): 1-8. (in Chinese)
- [18] 黄永涛. 海南霸王岭热带低地雨林不同演替阶段土壤理化性质比较[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
HUANG Y T. Comparison of soil physical under different succession series of tropical lowland rainforest in Bawangling, Hainan island[D]. Chongqing: Southwest University, 2013. (in Chinese)
- [19] 李书杨. 大兴安岭地区森林演替过程土壤碳素变化特征[D]. 黑龙江: 东北林业大学, 2019.
LI S Y. Characteristics of soil carbon changes during forest succession in Daxing'an Mountains[D]. Heilongjiang: Northeast Forestry University, 2019. (in Chinese)
- [20] 薛沛沛, 齐代华, 陈昆鹏. 香樟林演替过程中土壤理化性质动态变化及土壤肥力评价[J]. 林业调查规划, 2019, 44(1): 64-70.
XUE P P, QI D H, CHEN K P. Dynamics of soil physical-chemical properties and soil fertility evaluation in *Cinnamomum camphora* forest succession[J]. Forest Inventory and Planning, 2019, 44(1): 64-70. (in Chinese)
- [21] FU X L, YANG F T, WANG J L, DI Y B, DAI X Q, ZHANG X Y, WANG H M. Understory vegetation leads to changes in soil acidity and in microbial communities 27 years after reforestation[J]. Science of the Total Environment, 2015, 502: 280-286.
- [22] 闫玮明, 孙冰, 裴男才, 王旭, 李非凡, 罗鑫华, 邹滨. 粤北阔叶人工林和次生林植物多样性与土壤理化性质相关性研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5): 898-907.
YAN W M, SUN B, PEI N C, WANG X, LI F F, LUO X H, ZOU B. Correlation analyses on plant diversity and soil physical-chemical properties between evergreen broad-leaved plantations and natural secondary forests in North Guangdong, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 28(5): 898-907. (in Chinese)
- [23] 周晓雷, 武利玉, 赵安, 鲁明耀, 史瑞锦, 周旭姣, 朱潮. 裕河次生乔木群落分类及其物种多样性与土壤理化性质的关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(2): 1-9.
ZHOU X L, WU L Y, ZHAO A, LU M Y, SHI R J, ZHOU X J, ZHU C. Relationship between the classification of secondary arbor community and its species diversity and the physicochemical properties of soil in Yuhe[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(2): 1-9. (in Chinese)