

方怡然, 蔡金桓, 薛立. 3 种改造人工林的林下植物多样性和土壤物理性质[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(4): 87-92.

3 种改造人工林的林下植物多样性和土壤物理性质

方怡然, 蔡金桓, 薛立

(华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】对广东省佛山市云勇林场 3 种人工林的林下植物多样性和土壤物理性质进行研究, 以期为生态公益林的培育及养护管理提供理论依据。【方法】在石笔木 *Tutcheria championii* 纯林 (简称 P1 样地), 杉木 *Cunninghamia lanceolata*、米老排 *Mytilaria laosensi*、尖叶杜英 *Elaeocarpus apiculatus*、火力楠 *Michelia macclurei*、枫香 *Liquidambar formosana*、盆架子 *Alstonia scholaris* 等为主的针阔混交林 (简称 P2 样地), 以及米老排、红锥 *Castanopsis hystrix*、格木 *Erythrophleum fordii* 等为主的阔叶混交林 (简称 P3 样地) 调查并记录各林分样地内灌木和草本的种类、盖度、株数及平均高度, 运用多样性及均匀度等指标分析不同林分类型的林下植物的物种多样性。在各个样地分别用 100 cm³ 环刀采集 0~20 cm 土层的土样, 测定土壤含水量、土壤容重等物理性质。【结果】各林分灌木层的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数的平均值小于草本层, 但是灌木层的均匀度指数的平均值大于草本层; 各样地草本层生长状况优于灌木层; P1 样地的灌木及草本植物种类、数量均多于 P2、P3 样地; 3 种林分中, P1 样地的土壤容重最大, P2 样地的土壤容重最小; 土壤总孔隙度、自然含水量、毛管持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、通气孔隙度指标均表现为 P2 样地>P3 样地>P1 样地。【结论】混交林的群落结构较纯林合理且对土壤质量的改良效果更好。

关键词: 人工林; 土壤物理性质; 林下植物多样性; 多样性指数; 均匀度指数
中图分类号: S792.39 文献标识码: A 文章编号: 1001-411X(2018)04-0087-06

Undergrowth plant diversity and soil physical properties in three reformed plantations

FANG Yiran, CAI Jinhuan, XUE Li

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To investigate the undergrowth diversity and soil physical properties in three plantations at Yunyong forest farm in Foshan, Guangdong Province and provide a theoretical basis for ecological forest cultivation and management. 【Method】*Tutcheria championii* was planted in a pure broad-leaved plantation (P1 plot); *Cunninghamia lanceolata*, *Mytilaria laosensis*, *Elaeocarpus apiculatus*, *Michelia macclurei*, *Liquidambar formosana* and *Alstonia scholaris* were planted in a mixed conifer-broad leaf plantation (P2 plot); *M. laosensis*, *Castanopsis hystri* and *Erythrophleum fordii* were planted in a mixed broad-leaved plantation (P3 plot). Species diversity, coverage, number of total plants and average height of shrub-herb layer under canopy of above plots were investigated. Diversity and evenness indexes were used to study

undergrowth species diversity of these plantations. The 100 cm³ cutting ring was used to collect soil samples from the 0-20 cm soil layer at three plots, respectively, and soil physical properties such as water content and bulk density were determined. 【Result】 The mean values of Shannon-Wiener diversity index and Simpson diversity index of shrub species were lower than herb species while the mean values of evenness indexes of shrub species were larger than herb species in the three plots. The growth status of herb species were superior to shrub species in the three plots. The species number and quantity of the undergrowth of P1 plot were more than those of P2 and P3 plots. The soil bulk density of P1 plot was the highest among the three plots while that of P2 plot was the lowest. The values of total soil porosity, natural moisture content, capillary moisture capacity, capillary porosity, non-capillary porosity and aeration porosity of the three plots were all in the order of P2 plot > P3 plot > P1 plot. 【Conclusion】 The community structure and soil quality of mixed plantations are better than those of pure plantation.

Key words: plantation; undergrowth diversity; soil physical property; diversity index; evenness index

森林在改良土壤、涵养水源、改善林下植物多样性等方面发挥着巨大的作用^[1]。土壤作为森林的基本组成部分,其土壤物理性质能反映出土壤结构、养分状况和持水、渗透能力,对林地土壤质量评价具有重要意义。林下植物作为森林生态系统的重要结构,其物种多样性是反映植物群落组成和稳定性的重要指标^[2],易受立地条件、环境因子和林分郁闭度等因素的影响^[3]。由于林下植物具有改良土壤、持水固土以及促进生态系统物质循环的作用^[4],因此对两者关系的研究,有利于对森林系统的土壤管理及植物多样性保护。

亚热带人工林作为我国森林生态系统的重要组成部分之一,具有分布广和面积大的特点^[5]。随着社会经济的发展,人类对人工林需求量的快速增长以及经营方式的不当造成人工林出现土壤肥力衰退、水土流失加剧和生态多样性下降等问题。有研究表明,改善林分结构是提高人工林林地质量和土地生产力的途径之一^[6]。目前,国内外关于不同林分类型的人工林林地土壤物理性质^[7-8]、植被多样性^[9-10]已有一定的报道,二者间的关系也在马尾松 *Pinus massoniana* 林^[11]、草地^[12]和热带山地森林^[13]中进行过研究,但缺乏对亚热带人工林的土壤物理性质和生物多样性关系的研究。

本文以亚热带人工林最典型的 3 种林分类型——阔叶纯林、阔叶混交林和针阔混交林作为研究对象,对其土壤物理性质和生物多样性进行调查研究,以期能有效地揭示不同人工林类型之间的差异及相关因素,为亚热带人工林植被恢复选择合理的措施及优化模式提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地原为杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林,位于广东省佛山市云勇生态林养护中心 (112°40'E, 22°53'N),森林面积 1 928.73 hm²。该地属亚热带季风性湿润气候,雨量充沛,年均降雨量为 2 100 mm,集中于 6—8 月,年平均相对湿度 80%。土壤为花岗岩发育的酸性赤红壤 (pH<5),土层厚达 1 m 以上,土地肥沃。

2005 年起,为了营造生态公益林,对原杉木林进行皆伐改造,引入不同类型乡土树种造林。在贼佬坑林地栽种石笔木 *Tutcheria championii* (P1 样地),在白石岗林地栽种以杉木、米老排 *Mytilaria laosensis* 为主,以尖叶杜英 *Elaeocarpus apiculatus*、火力楠 *Michelia macclurei*、枫香 *Liquidambar formosana*、盆架子 *Alstonia scholaris* 为辅的针阔混交林 (P2 样地),在仙人春林地栽种以米老排为主,以红锥 *Castanopsis hystrix*、格木 *Erythrophleum fordii* 为辅的阔叶混交林 (P3 样地),并对以上林分采取相同的管理措施。各样地的基本情况见表 1,样地的主要树种生长情况见表 2。

表 1 试验林概况

Table 1 General situation of the experimental plantations					
样地	海拔/m	坡向	坡度/(°)	郁闭度	主要树种
P1	172	S	42	0.6	石笔木
P2	259	SE	35	0.6	杉木、米老排等
P3	204	SW	40	0.8	米老排等

表 2 树木生长基本情况¹⁾

Table 2 Tree growth status of the experimental plantations

样地	树种	胸径/cm	树高/m	冠幅/m
P1	石笔木	8.59±2.46	7.00±1.00	5.01±1.00
P2	杉木	8.59±1.82	21.26±3.25	8.95±3.21
	米老排	12.28±2.21	14.24±2.21	9.96±2.82
	尖叶杜英	9.72±3.37	9.01±2.85	3.97±1.57
	火力楠	10.80±2.08	9.60±1.56	4.76±0.91
	枫香	11.33±2.78	10.95±2.16	6.13±0.74
	盆架子	8.16±0.68	12.80±1.92	6.78±0.97
P3	米老排	9.24±3.83	10.92±4.44	5.32±1.75
	红锥	11.43±4.38	12.52±3.07	6.78±2.29
	格木	4.30±0.73	4.52±0.17	5.65±0.89

1)表中数据为平均值±标准差

1.2 试验方法

1.2.1 样地设置 2016 年 5 月对试验地 3 种生态公益林进行调查(林分的林龄均为 10 年生), 每种林地设定 3 个规格为 20 m ×20 m 的调查样地。用容积 100 cm³ 的环刀分别在各个标准地的 0~20 cm 土层采集土壤样品, 用于测定土壤的物理性质(3 个重复)。按梅花形在每个标准样地内设置 5 个面积为 2 m×2 m 的样方, 样地调查并记录小样方内全部灌木和草本的种类、盖度、株数及平均高度, 用于分析林下植物的物种多样性。

1.2.2 林下植物多样性调查方法 林下植物的物种多样性指数计算包括下列内容^[14]:

物种丰富度指数表示一个种群在群落中的个体数目或丰富程度, 这里是指某物种在标准地中的总数, 即样方内所有物种数目 (S); 多度为某一种植物的个体总数; 盖度=植物地上部分垂直投影面积/样方面积; 频度=该种植物出现的样方数目/所有调查的样方总数目; 相对多度=某一种植物的个体总数/同—生活型植物个体总数×100%; 相对盖度=某一种植物的盖度/所有种的盖度总和×100%; 相对频度=某一个种的频度/所有种的频度总和×100%; 相对重要值=(相对多度+相对盖度+相对频度)/3。

Simpson 指数 (D)、Shannon-Wiener 指数 (H) 及 Pielou 均匀度指数 (J_{SW} 和 J_{Si}) 分别为:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2,$$

(1)

$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i),$$

(2)

$$J_{SW} = H / \ln S,$$

(3)

$$J_{Si} = D / (1 - 1/S),$$

(4)

式中, P_i 为第 i 物种的相对重要值。

1.2.3 土壤物理性质的测定 土壤含水量采用烘干法测定^[15]; 土壤容重、土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度等物理性质均采用环刀法测定^[16], 每个指标重复测定 3 次。

1.3 数据处理及分析

运用 Microsoft Excel 2003 对数据进行统计分析和图表绘制, 采用 SPSS 22.0 统计分析软件进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 并采用 Duncan's 法对试验结果进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 林下植物多样性

2.1.1 林下植物种类组成与相对重要值 由表 3 可知, P1 样地林下灌木有 5 种, 其中相对重要值最大的是鸭脚木 *Schefflera octophylla*(24.09%), 其次是野牡丹 *Melastoma candidum*(21.27%)。P2 样地和 P3 样地林下灌木种类均为 2 种, 分别为白花酸藤果 *Embelia ribes* 和山苍子 *Litsea cubeba*、银柴 *Aporosa dioica* 和南天竹 *Nandina domestica*, 它们的相对重要值均为 50%。

表 3 林下灌木种类与相对重要值

Table 3 Undergrowth shrub layer species and importance value %

物种	P1样地	P2样地	P3样地
鸭脚木 <i>Schefflera octophylla</i>	24.09		
银柴 <i>Aporosa dioica</i>	19.44		50.00
白花酸藤果 <i>Embelia ribes</i>	19.44	50.00	
黑面神 <i>Breynia fruticosa</i>	15.77		
野牡丹 <i>Melastoma candidum</i>	21.27		
山苍子 <i>Litsea cubeba</i>		50.00	
南天竹 <i>Nandina domestica</i>			50.00

由表 4 可知, P1 样地林下草本植物有 12 种, 相对重要值前 3 位为弓果黍 *Cyrtococcum patens* (24.29%), 乌毛蕨 *Blechnum orientale* (21.82%) 和蔓生莠竹 *Microstegium vagans*(20.68%)。P2 样地林下草本植物有 4 种, 相对重要值大的是乌毛蕨 (44.11%) 和华南鳞盖蕨 *Microlepia hancei* (43.26%)。P3 样地林下草本植物有 6 种, 相对重要值最大的是乌毛蕨 (52.30%), 其次是半边旗 *Pteris semipinnata* (17.33%)。在 3 个林地当中, 乌毛蕨在每个林地中

表 4 林下草本种类与相对重要值
Table 4 Undergrowth herb layer species and importance value

物种	P1样地	P2样地	P3样地
乌毛蕨 <i>Blechnum orientale</i>	21.82	44.11	52.30
玉叶金花 <i>Mussaenda pubescens</i>	4.63		7.42
蔓生莠竹 <i>Microstegium vagans</i>	20.68		
半边旗 <i>Pteris semipinnata</i>	7.00	5.49	17.33
弓果黍 <i>Cyrtococcum patens</i>	24.29		
华南毛蕨 <i>Cyclosorus parasiticus</i>	3.95		
崩大碗 <i>Centella asiatica</i>	1.54		
芒箕 <i>Dicranopteris dichotoma</i>	2.10		
山菅兰 <i>Dianella ensifolia</i>	3.36		
火炭母 <i>Polygonum chinense</i>	1.54		9.87
粽叶芦 <i>Thysanolaena maxima</i>	4.03		
金盏银盘 <i>Bidens biternata</i>	5.07		
华南鳞盖蕨 <i>Microlepia hancei</i>		43.26	
崇澍蕨 <i>Chieniopteris harlandii</i>		7.14	
扇叶铁线蕨 <i>Adiantum flabellulatum</i>			4.72
淡竹叶 <i>Lophatherum gracile</i>			8.36

所占相对重要值均超过 20%。
2.1.2 林下植物多样性指数及均匀度指数 林下灌木的多样性指数和均匀度指数列于表 5。由表 5 可知, P1 样地的 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和均匀度指数 J_{SW} 均最大, P2 样地及 P3 样地的均匀度指数 J_{Si} 最大。

林下草本的多样性指数和均匀度指数列于表 6。由表 6 可知, P1 样地的 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数均最大, P3 样地的均匀度指数 J_{SW} 最大, P2 样地的均匀度指数 J_{Si} 最大。

2.2 3 种改造人工生态公益林的土壤物理性质分析
各样地的土壤物理性质见表 7。各样地土壤容重大小排序为 P1 样地 ($1.33\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)>P3 样地 ($1.25\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)>P2 样地 ($1.08\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), P1 和 P3 样地的土壤容重显著大于 P2 样地。

表 7 土壤物理性质¹⁾
Table 7 Soil physical properties

样地	土壤容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/ %	自然含水量(w)/ %	毛管持水量(w)/ %	毛管孔隙度/ %	非毛管孔隙度/ %	通气孔隙度/ %
P1	1.33±0.010a	49.91±0.363b	24.11±0.499c	30.93±1.543c	4.11±0.192b	45.81±0.344b	46.71±0.435b
P2	1.08±0.022b	59.32±0.823a	38.72±0.934a	46.13±1.249a	4.97±0.058a	54.35±0.801a	55.15±0.822a
P3	1.25±0.088a	52.78±3.332b	33.32±2.339b	37.84±4.059b	4.71±0.156a	48.07±3.179b	48.63±3.345b

1)表中数据为3次重复的平均值±标准误; 同列数据后, 凡是具有一个相同小写字母者表示样地间差异不显著($P>0.05$, Duncan's 法)

表 5 林下灌木多样性指数与均匀度指数
Table 5 Plant diversity index and evenness index of undergrowth shrub layer

样地	Simpson 指数	Shannon-Wiener 指数	均匀度指数	
			J_{SW}	J_{Si}
P1	0.79	1.60	0.62	0.61
P2	0.50	0.69	0.49	1.79
P3	0.50	0.69	0.49	1.79

表 6 林下草本植物多样性指数与均匀度指数
Table 6 Plant diversity index and evenness index of undergrowth herb layer

样地	Simpson 指数	Shannon-Wiener 指数	均匀度指数	
			J_{SW}	J_{Si}
P1	0.84	2.01	0.32	0.81
P2	0.61	1.07	0.28	0.97
P3	0.67	1.42	0.34	0.87

各样地土壤总孔隙度大小排序为 P2 样地 (59.32%)>P3 样地 (52.78%)>P1 样地 (49.91%), P2 样地的土壤总孔隙度显著大于其他 2 个林地。

各样地土壤自然含水量 (w) 大小排序为 P2 样地 (38.72%)>P3 样地 (33.32%)>P1 样地 (24.11%), P3 样地的自然含水量显著小于 P2 样地, 但显著大于 P1 样地。

各样地土壤毛管持水量 (w) 大小排序为 P2 样地 (46.13%)>P3 样地 (37.84%)>P1 样地 (30.93%), 且 3 个样地间差异显著。

各样地土壤毛管孔隙度大小排序为 P2 样地 (4.97%)>P3 样地 (4.71%)>P1 样地 (4.11%), P2 样地和 P3 样地显著大于 P1 样地。

各样地土壤非毛管孔隙度大小排序为 P2 样地 (54.35%)>P3 样地 (48.07%)>P1 样地 (45.81%), P2 样地的土壤非毛管孔隙度显著大于 P1 和 P3 样地。

各样地土壤通气孔隙度排序为 P2 样地 (55.15%)>P3 样地 (48.63%)>P1 样地 (46.71%)。

P2 样地的土壤通气孔隙度显著大于 P1 和 P3 样地。

3 讨论与结论

在 3 个改造人工林地当中, 灌木层的 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数的平均值 (0.99 和 0.60) 均小于草本层 (1.50 和 0.71); 灌木层的 Pielou 均匀度指数 J_{SW} 和 J_{Si} 平均值分别为 0.53 和 1.40, 均大于草本层 (0.31 和 0.88); 阔叶纯林的林下灌木和草本种类及其对应的优势种数量均多于混交林。

本研究的 3 种林地中, P1 样地的土壤容重最大; P2 样地的乔木植物种类较多且冠幅、树高和胸径较大; 除土壤容重外, 其余各项物理指标均表现为 P2 样地>P3 样地>P1 样地。

物种多样性是生态系统及生物群落的本质特征^[17], 能有效反映生物群落和生态系统的复杂性、稳定性, 所以生物多样性是生态系统结构和功能的测量指标。Shannon-Wiener 指数是反映物种丰富度的指数, 物种数量越多, 其数值越大; Simpson 指数主要反映物种的多度, 是一个反映群落优势度的指数, 其数值越小, 表明群落的优势种越明显。在 3 个林地中, 灌木层的 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数的平均值均小于草本层, 可见各林地中的草本层物种数量多于灌木层。与草本相比, 灌木对生长环境的要求更高, 随着时间的推移, 上层林木不断壮大、林分郁闭度不断增加, 使得林下灌木对生长所需的光照、养分等条件的竞争加强^[18], 这将限制林下灌木层的生长。另外, 草本植物的适应性比灌木强, 因此林下草本植物发育较好^[19]。

Pielou 均匀度指数是反映群落均匀度的指标, 与群落内物种个数间的差异及各物种个体数量分配均匀程度有关^[20], 种间的个体数量差异程度越小, 则群落的均匀性越高^[21]。在 3 个林地中, 灌木层的 Pielou 均匀度指数 (J_{SW} 和 J_{Si}) 平均值均大于草本层, 可见各林地中灌木层的物种均匀性高于草本层。由于林下灌木植物的种类数量相对少, 且个体较草本植物大, 所以其在林地的分布相对均匀。而草本植物虽然数量较多, 但是均匀度却不高, 这可能是 3 个林地的郁闭度相对较高, 林隙分布不均, 促使阴生、蕨类植物的富集所致^[10]。此外, 草本植物的生活史短暂, 对环境变化反应敏感, 具有易受干扰和恢复速度快的特点^[18], 更加深了分布不均的程度。

阔叶纯林的林下灌木和草本植物种类及其对应的优势种数量均多于混交林, 这可能是因为 P1 样地的乔木仅有石笔木 1 种, 林冠层结构简单, 林

下光照环境多样化, 喜阳植物和随机入侵种较多的缘故^[11], 另外, 各样地处于幼林向中龄林过度的阶段, 已基本成林, 土壤水分条件较好, 并且郁闭度较大, 为一些阴生植物的生长和定居提供了良好的生存条件, 所以阴生植物的种类和数量较多。虽然阔叶纯林单一的结构有利于草本层物种多样性的改善, 但草本植物多以林下随机生长为主, 均匀度指数较低; 另外 2 种混交林的多样性指数较低, 但其林下草本均匀度指数较高, 群落结构相对合理^[22]。

土壤物理性质与土壤持水和保水能力有着密切关系^[23], 可以影响土壤的肥力状况。在本研究中, 所有林地的土壤总孔隙度在 49.91%~59.32%, 在中国大部分森林生态系统土壤总孔隙度范围 (40%~60%) 内^[8]。当土壤中总孔隙度在 50% 左右, 并且非毛管孔隙度占 1/5~2/5 时, 土壤的通气性、透水性和持水能力较强^[24]。本研究的所有样地非毛管孔隙度在 92% 左右, 明显偏高。这说明 3 种林地的吸、持水分能力低, 但土壤的雨水下渗能力较强, 有利于减少地表径流, 增强土壤的抗冲刷和抗侵蚀能力^[25]。土壤容重作为森林土壤物理性质的优良指标, 对森林土壤的结构性、土壤的孔性、通水透气性能以及持水能力具有重要影响^[26]。通常容重越小, 表明土壤可形成的孔隙越大, 土壤持水和通气能力越强^[8]。由于 P1 样地仅一种乔木, 乔木植物种类不如 P2 样地丰富, 郁闭度又较 P3 样地小, 使其根系对土壤穿插和切割作用较小, 回归土壤的枯落物少, 林地土壤团粒结构的形成相对缓慢^[27], 从而导致土壤疏松程度较小, 土壤较为紧实, 容重相对较大。虽然 P1 样地的林下草本植物丰富, 但是其根系对土壤的穿插和切割作用不及乔木。这是因为乔木的根系数量高于草本植物, 并且前者的主根和侧根更发达, 根系分布较深, 因此对土壤物理性质的改良效果较好^[28]。P2 样地由于其植物根系对土壤的穿插作用较强, 特别是杉木的侧根发达, 穿插能力强, 所以其土壤容重最小, 孔隙多。这也说明杉木与阔叶树种混交, 可以改善土壤物理性质, 增强水土保持的能力。总体来说, 混交林的各项物理性质优于纯林, 这与顾宇书等^[29]的研究结果相一致。

植物多样性与土壤物理性质关系密切^[30]。林下植被的蒸腾作用通常占到森林总蒸腾作用的 20%~30%^[31], 因而林下植被在一定程度上能减少土壤的水分含量^[32]。在本研究中, P1 样地的林下植物最为丰富且数量最多, 土壤含水量较其他林地低, 原因可能是林下植物的叶面积较大, 植物从土壤吸收的水分需求量增多, 导致土壤水分减少。

参考文献:

- [1] 黄继红, 郭仲军, 刘永红, 等. 陕西省宁陕县天然林保护工程生态效益价值评估[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(1): 298-303.
- [2] 魏天兴, 赵健, 朱文德, 等. 退耕还林区水土保持植被恢复及物种多样性特征[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 1-6.
- [3] 李民义, 张建军, 郭宝妮, 等. 晋西黄土区不同密度油松人工林林下植物多样性及水文效应[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1083-1090.
- [4] 郭琦, 王新杰. 不同混交模式杉木人工林林下植被生物量与土壤物理性质研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(5): 70-74.
- [5] 任小丽, 何洪林, 刘敏, 等. 基于模型数据融合的千烟洲亚热带人工林碳水通量模拟[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7313-7326.
- [6] 彭佳红, 王华, 邹冬生, 等. 亚热带区域几种典型人工林生态系统林地土壤质量评价[J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 93-99.
- [7] RASHEED S M K. The Effect of clay content and land use on dispersion ratio at different locations in Sulaimani Governorate, Kurdistan Region, Iraq[J]. Open J Soil Sci, 2016, 6(1): 1-8.
- [8] 谢亚军, 谢永宏, 陈心胜, 等. 洞庭湖湿地土壤持水能力及其影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(8): 1153-1160.
- [9] ALEM S, PAVLIS J, URBAN J, et al. Pure and mixed plantations of *Eucalyptus camaldulensis* and *Cupressus lusitanica*: Their growth interactions and effect on diversity and density of undergrowth woody plants in relation to light[J]. Open J Forestry, 2015, 5(4): 375-386.
- [10] 唐铭灿, 潘登, 潘高. 湘中丘陵区3种林分林下植物多样性与土壤特性研究[J]. 湖南林业科技, 2016, 43(1): 38-43.
- [11] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林林下植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2610-2617.
- [12] 白可喻, 戎郁萍, 杨云卉, 等. 北方农牧交错带草地生物多样性与草地生产力和土壤状况的关系[J]. 生态学杂志, 2013, 32(1): 22-26.
- [13] DE CARVALHO F, GODOY E L, LISBOA F J G, et al. Relationship between physical and chemical soil attributes and plant species diversity in tropical mountain ecosystems from Brazil[J]. J Mount Sci, 2014, 11(4): 875-883.
- [14] 侯晓丽, 薛立. 冰雪灾害对粤北杉木林生物多样性的影响[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(5): 89-94.
- [15] 齐智娟, 冯浩, 张体彬, 等. 干旱区大田玉米膜下滴灌土壤水热效应研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 172-178.
- [16] 丛培东, 刘孝竹, 马红. 蒲石河蓄能电站河岸带土壤性质分析[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(27): 172-174.
- [17] 苏宇乔, 张毅, 贾小容, 等. 几种多样性指标在森林群落分析中的应用比较[J]. 生态科学, 2017(1): 132-138.
- [18] 刘彤, 胡丹, 魏晓雪, 等. 红松人工林林下植物物种多样性分析[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(5): 28-29.
- [19] 张桐, 王玉杰, 王云琦, 等. 晋西黄土区不同森林群落类型植物多样性研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(11): 82-88.
- [20] 潘声旺, 何茂萍, 杨丽娟, 等. 先锋植物丰富度对公路边坡植物群落生长发育及护坡效益的影响[J]. 林业科学, 2013, 49(11): 24-31.
- [21] 刘平, 马履一, 贾黎明, 等. 北京低山油松人工林径阶结构及林下植物多样性特征[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(3): 57-63.
- [22] 高俊芳, 陈云明, 许鹏辉, 等. 不同干扰措施下黄土丘陵区人工刺槐林生长结构及土壤理化性质分析[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 69-74.
- [23] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J]. 植物生态学报, 2011, 35(12): 1209-1218.
- [24] 徐昕, 刘晓勇, 江柳春, 等. 江西省生态公益林5种典型林分类型土壤性质特点分析[J]. 南方林业科学, 2016, 44(5): 54-57.
- [25] 赵筱青, 和春兰, 许新惠. 云南山地尾叶桉类林引种对土壤物理性质的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(11): 1810-1816.
- [26] 马云波, 牛聪傑, 许中旗. 不同造林模式对铁尾矿地土壤性质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 242-248.
- [27] 曹鹤, 薛立, 谢腾芳, 等. 华南地区八种人工林的土壤物理性质[J]. 生态学杂志, 2009, 28(4): 620-625.
- [28] 陈奇伯, 王克勤, 李艳梅, 等. 金沙江干热河谷不同类型植被改良土壤效应研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 67-70.
- [29] 顾宇书, 邢兆凯, 韩友志, 等. 浑河上游4种典型水源林土壤物理性质及其水源涵养功能[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(1): 37-41.
- [30] 叶绍明, 温远光, 杨梅, 等. 连栽桉树人工林植物多样性与土壤理化性质的关联分析[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 246-250.
- [31] 杜忠, 蔡小虎, 包维楷, 等. 林下层植被对上层乔木的影响研究综述[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 963-972.
- [32] TAKAHASHI K, UEMURA S, SUZUKI J I, et al. Effects of understory dwarf bamboo on soil water and the growth of overstory trees in a dense secondary *Betula ermanii*, forest, northern Japan[J]. Ecol Res, 2003, 18(6): 767-774.

【责任编辑 李晓卉】