林业科学研究 2017,30(5):841～847
Forest Research

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2017.05.018

林分结构调整对云南松次生林生长和土壤性质的影响

高成杰，唐国勇，刘方炎，张春华，孙永玉，李 昆*

（中国林业科学研究院资源昆虫研究所，国家林业局云南元谋荒漠生态系统定位研究站，云南 昆明 650224）

摘要:[**目的**]探究云南松林结构调整对林木生长和土壤性状的影响,为云南松林保护和利用提供科学依据。[**方法**]按照森林抚育规程对林分进行结构调整,采用典型取样法对比分析林分结构调整前后土壤性质和林木生长状况的差异。[**结果**]云南松林结构调整后,(1)结构调整样地单株蓄积量比对照样地提高了近60%,树高和胸径提高幅度均在15%以上,林下天然更新植株数量是对照样地的3.1倍;(2)结构调整后林内植物种类增加,林下灌木层和草本层盖度分别提高了63.3%和22.7%,灌木层和草本层平均高度分别提高了24.7%和17.9%;(3)结构调整样地现存凋落物量显著下降,与对照相比下降了20.4%,土壤表层温度、有机质含量、基础呼吸和土壤微生物生物量显著提高,土壤其他性质参数变幅相对较小。[**结论**]林分结构调整可显著提高云南松生长量,有利于云南松较大径级林木的培育;促进了云南松林下更新和林下植被发育,有利于林分群落结构的形成;提高了土壤微生物数量和活性,加速了土壤有机质转化,研究揭示林分结构调整促进了云南松林土壤—植物系统正反馈作用。

关键词:云南松;林分结构调整;林木生长;土壤性质

中图分类号:S791.257 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-1498(2017)05-0841-07

Effects of Stand Structural Adjustment on Growth and Soil Properties of *Pinus yunnanensis* Secondary Forest

GAO Cheng-jie, *TANG Guo-yong*, *LIU Fang-yan*, *ZHANG Chun-hua*, *SUN Yong-yu*, *LI Kun*

(Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Yuanmou Desertification Ecosystem Research Station of State Forestry Administration, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: [**Objective**] To study the effects of stand structural adjustment on growth and soil properties of *Pinus yunnanensis* secondary forest and provide reference for its further conservation and utilization. [**Method**] The stand structure was adjusted according to the regulations about forest tending of China, the characteristics of growth and soil properties of *P. yunnanensis* secondary forest after 4 years' structural adjustment were analyzed and compared by the method of typical sampling. [**Result**] The results showed that the individual volume, DBH, tree height and the quantity of natural regenerated plants with structural adjustment treatment (SAT) were approximately 1.6, 1.1, 1.2 and 3.1 times that of the control (not adjustment, CK), respectively. The richness of plant species increased in the SAT, and the coverage of the herb and shrub enhanced by 63.3% and 22.7%, while the average height increased by 24.7% and 17.9%, respectively compared with those in the CK. Compared with the CK, the litter mass in the SAT decreased significantly by 20.37%, and the soil temperature, soil organic matter contents, soil microbial biomass and soil basic respiration increased significantly in the SAT, while

收稿日期：2017-01-06
基金项目：国家林业公益性行业科研专项(201304202)
作者简介：高成杰(1986—),男,博士,助理研究员,主要从事干热河谷生态恢复研究.
* 通讯作者：E-mail：caflikun@163.com

the other soil properties kept relative stability. [**Conclusion**] The results show that structural adjustment can significantly increase the growth of *P. yunnanensis* which is conducive to large diameter class wood cultivation. The forest natural regeneration and the understory vegetation are promoted, which benefits the development of the community structure in *P. yunnanensis* secondary forest, and the increased quantity and activity of soil microbes advance the transformation of soil organic matter after the stand structural adjustment. It is proved that stand structural adjustment can promote the positive feedback of soil - plant system in *P. yunnanensis* forest.

Keywords: *Pinus yunnanensis*; stand structural adjustment; stand growth; soil property

云南松(*Pinus yunnanensis* Franch.)林是我国西南地区特有的森林类型,由于云南松生长迅速,适应性强,成为我国重要的用材树种。据统计,云南松林占云南省林地面积的52%,占有林地蓄积的32%[1-2]。由于80%的云南松林为纯林,林分结构相对简单,植物多样性普遍较低,导致林分稳定性差、森林病虫害频发、生态系统服务功能衰退[1-3]。邓喜庆等[2]利用云南省森林资源监测数据对云南松林资源的动态变化进行研究,发现云南松林龄呈明显的低龄化特征,林龄结构现状迫切要求对云南松林进行抚育管理。因此,有必要通过云南松林分结构的调整来提高林地生物多样性水平和生产力[1]。林分密度调整是林分结构调整的重要手段,是实现针叶纯林向天然混交林恢复的有效措施。通过林分密度控制,改变林冠的郁闭度与林分的光辐射状况和光环境,提高保留木光合能力,改变林内小环境,促进林下植被的发展,有利于林地生物多样性增加,从而提高林分的稳定性。土壤肥力状况是构成森林生产力的重要因素,而林分结构调整也能显著影响土壤性状[4-10],本研究拟通过对比林分结构调整后云南松林林木生长量、林下植被变化以及土壤肥力差异,揭示云南松林分密度调整对林木生长的影响和林地土壤肥力的演化趋势,为改善云南松纯林单一结构和恢复退化云南松纯林地力提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于云南省楚雄彝族自治州双柏县太和江林场(24°20′N,101°35′E),海拔1 400～1 500 m,属亚热带半湿润性季风气候,地貌为中山类型,土壤以砂岩和沙页岩发育的山地红壤为主。研究区现存植被类型主要为云南松纯林,其中,混杂少量高山栲(*Castanopsis delavayi* Franch.)、滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides* Scott.)、麻栎(*Quercus acutissima* Carruth.)、旱冬瓜(*Alnus nepalensis* D. Don)和锐齿槲栎(*Quercus aliena* Bl. var. *acutiserrata* Max.)等。太和江林场所辖区域内,云南松中、幼林面积与蓄积比重较大,长期以来未采取任何抚育措施,且云南松林杂灌、杂草丛生,林分密度过大,林下更新不良,林分生态系统功能较差,是滇中高原云南松次生林的典型代表[2]。在森林防火、林业有害生物防治方面也存在较大难度[1]。

2 研究方法

2.1 样地设置、调查与样品采集

2012年3月,在研究区内开展林分结构调整,主要采取卫生抚育+大径材培育,对病虫危害植株通过彻底清除受害木和病源木,改善林分卫生状况,合理控制密度,伐除部分小径级植株,保留1 800株·hm^{-2}左右大径级植株。具体调整措施参照《森林抚育规程》(GB/T 15781-2015),设置不进行林分结构调整为对照样地,林分调整前后样地概况见表1。

采用典型取样法,分别于林分结构调整之前(2012年2—3月)和之后(2016年3月)在结构调整样地和对照样地中具有代表性地段进行样方调查,在每个样地内分别设立5个20 m×20 m样方,对样方内的立木进行每木调查,记录每个立木的树高、胸径、冠幅和生长势。在每个样方的4个角和中心点分别设置1个1 m×1 m的小样方,调查林下植被和树种更新状况,并收集地表全部凋落物,包括未分解层(由新鲜凋落物组成,保持原有形态,颜色变化不明显,质地坚硬,外表无分解的痕迹)和半分解层(叶无完整外观轮廓,多数凋落物已经粉碎),根据叶片形态将凋落物分为针叶和阔叶,带回实验室分别测定其干质量和含水量。2016年1月在样方内多点采集表层(0～20 cm)土样(去除凋落物和腐殖层),形成混合样,每次共采集土壤混合样10个,同时采集环刀样,测量腐殖层厚度。

表 1　结构调整前后云南松次生林概况

Table 1　General situation in *Pinus yunnanensis* secondary forest before and after thinning treatment

处理 Treatment	间伐前 Before thinning						间伐后 After thinning					
	密度 Density/(plant·hm^{-2})	郁闭度 Crown density	胸径 DBH /cm	树高 Height /m	灌木盖度 Shrub coverage /%	草本盖度 Herb coverage /%	密度 Density/(plant·hm^{-2})	郁闭度 Crown density	胸径 DBH /cm	树高 Height /m	灌木盖度 Shrub coverage /%	草本盖度 Herb coverage /%
对照样地 Control plot	5 113	0.96	8.66	9.81	23	17	–	–	–	–	–	–
调整样地 Adjusted plot	4 825	0.95	8.57	9.63	26	18	1 783	0.64	9.09	11.00	23	16

2.2　分析测试方法

土壤密度用环刀法测定;土壤温度用便携式土壤温度计测定;土壤含水量用烘干法;土壤 pH 值用复合电极测定,浸提液(1 moL·L^{-1}氯化钾)与土比例为 2:1;土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;土壤元素按照中国科学院南京土壤研究所推荐的方法进行分析检测[11],其中,全 N、全 P 和全 K 分别采用半微量凯氏法、氢氧化钠碱溶-钼锑抗比色法和氢氧化钠碱溶-火焰光度法进行测定,水解性 N、有效 P 和有效 K 分别采用碱解-扩散法、0.03 moL·L^{-1}氟化氨-0.025 moL·L^{-1}盐酸浸提法和 1 moL·L^{-1}乙酸铵浸提-火焰光度法进行测定;采用熏蒸提取法测定土壤微生物生物量碳、氮、磷[12],同时进行土壤样品预培养[12]。按照 CO_2 释放法测定土壤基础呼吸,并结合土壤微生物生物量碳计算土壤呼吸熵(qCO_2)[13]。

2.3　数据处理与分析

所有数据均通过正态分布检验和方差一致性检验,林分结构调整前后、处理间参数差异显著性用独立样本 t 检验。以上统计分析用 SPSS 11.0 软件处理。

3　结果与分析

3.1　林分结构调整对云南松生长的影响

2012 年林分结构调整时,林分密度由 5 113 株·hm^{-2}调整至 1 783 株·hm^{-2}(表 1),导致林分蓄积量大幅下降(降低了 58.01%,表 2)。经过 4 a 生长,结构调整样地林分蓄积量增加了 21.15 m^3·hm^{-2},提高了 50.26%;而对照样地林分蓄积增加量和增长率分别为 8.13 m^3·hm^{-2}和 8.11%,均远低于结构调整样地。经林分结构调整后,云南松平均单株蓄积量、树高和胸径均明显高于对照样地,其中,单株蓄积量提高了 59.09%,树高和胸径提高幅度均在 15% 以上。这是因为结构调整大幅降低了林分密度,短期内引起云南松整个林分蓄积量的下降,但结构调整后的云南松个体获得了更大的生长空间和光照条件,有利于云南松单株生长和蓄积量的增加。

表 2　林分结构调整对云南松生长的影响

Table 2　Effects of stand structural adjustment on growth of *Pinus yunnanensis*

试验处理 Treatment	调查时间(年-月) Survey time(year-month)	林分蓄积量 Stand volume/(m^3·hm^{-2})	单株蓄积量 Individual volume/m^3	树高 Height/m	胸径 DBH/cm
对照样地 Control plot	2012-02	100.21 a	0.020 b	8.66 b	9.81 b
	2016-03	108.34 a	0.022 b	9.10 ab	11.24 ab
调整样地 Adjusted plot	2012-03	42.08 c	0.024 b	9.09 ab	11.00 ab
	2016-03	63.23 b	0.035 a	10.47 a	13.45 a

注:同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Data followed by different letters in the same row means significant difference at 0.05 level, the same below.

3.2　林分结构调整对林下植被的影响

3.2.1　林下天然更新　云南松纯林单独依靠天然更新达到混交状态是非常困难的,而经过结构调整后很快就有其它树种进入到林地。林分结构调整后,林下植物发生了明显的变化,对照林地出现了白栎(*Quercus fabri* Hance)、麻栎(*Quercus acutissima* Carruth.)、滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides* Scott.)等阔叶树种,它们都是来自林下的天然更新,但是这些树种数量很少,所占比例不高,仅为林下植物总数的 2%。相比之下,结构调整后的云南松林地树种比较丰富,除了以上三种阔叶树种外,还有相当数量的来自天然更新的水锦树(*Wendlandia uvariifolia* Hance)、余甘子(*Phyllanthus emblica* Linn.)、木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)以及部分火绳树

(*Eriolaena spectabilis* (DC.) Planch. ex Mast.)等树种。从结构调整后林下更新植株数看,调整样地内林下天然更新植株数量为4.0株·m^{-2},是对照样地(1.2株·m^{-2})的3.1倍,其中,云南松天然更新植株数量由2012年的0.6株·m^{-2}提高到2016年的2.8株·m^{-2},差异显著($P<0.05$);阔叶树种天然更新植株数量由2012年的0.6株·m^{-2}提高到2016年的1.2株·m^{-2},差异不显著($P>0.05$);针阔叶树种天然更新比(针叶树更新数/阔叶树更新数)由2012年的1.0提高至2016年的2.3。结构调整后云南松和阔叶树更新数量的增加,使得林下天然更新树种的盖度显著高于对照样地,且天然更新的云南松和阔叶树种的平均高度也显著高于对照样地(表3),表明林分结构调整不仅有利于云南松次生林天然更新,也促进了林分中阔叶树种的天然更新和生长。

表3 林分结构调整对林下天然更新的影响

Table 3 Effects of stand structural adjustment on natural regeneration

处理 Treatment	云南松			阔叶树			
	数量 Number/(plant·m^{-2})	高度 Height/cm	盖度 Coverage/%	种类 Species	数量 Number/(plant·m^{-2})	高度 Height/cm	盖度 Coverage/%
对照样地 Control plot	0.6 a	32 a	25 a	13	0.6 a	64 a	28 a
调整样地 Adjusted plot	2.8 b	46 b	36 b	21	1.2 a	79 b	47 b

3.2.2 林下植被 云南松次生林下物种大多数为阳生性,林分密度过大,林内荫蔽的小环境抑制了优势种群的拓展。结构调整后,调整样地比对照样地植物种类增加了8种,多样性指数也有所提高,调整样地内林下灌木层和草本层盖度分别为49%和27%,比对照样地分别提高了63.3%和22.7%;灌木层和草本层平均高度比对照样地分别提高了24.7%和17.9%(表4)。结果显示,云南松林下植被发育明显受林分密度的影响,通过结构调整控制林分密度,降低了林分郁闭度,改善了林下光照条件,使林下植物种类增多,且覆盖度增大,生长较好,有利于云南松人工林群落结构的形成。

表4 林分结构调整对林下植被的影响

Table 3 Effects of stand structural adjustment on understory vegetation

处理 Treatment	植物种类 Plant species			灌木层 Shrub layer		草本层 Herb layer		香农多样性指数 Shannon diversity index	均匀度指数 Evenness index
	科 Family	属 Genus	种 Species	高度 Height/cm	盖度 Coverage/%	高度 Height/cm	盖度 Coverage/%		
对照样地 Control plot	7	11	21	73 a	30 a	39 a	22 a	2.154	0.981
调整样地 Adjusted plot	9	17	29	91 b	49 b	46 b	27 b	2.220	0.810

3.3 林分结构调整初期土壤变化特征

3.3.1 凋落物现存量 林分结构调整后,云南松林现存凋落物量显著降低,约为对照样地的80%,现存凋落物中针阔叶比(针叶凋落物/阔叶凋落物)也由19.65降至8.11;结构调整样地凋落物含水量略低于对照样地,二者差异不显著(表5)。结构调整样地与对照样地的针叶凋落物含水量差异不显著,但结构调整样地的阔叶凋落物含水量显著低于对照样地,仅为对照样地的86.39%,这可能与阔叶树种变化有关。

表5 林分结构调整对地表凋落物和土壤物理性质的影响

Table 5 Effects of stand structural adjustment on the litter and soil physical properties

试验处理 Treatment	凋落物现存量 Litter mass/(g·m^{-2})	凋落物现存量中针阔叶比 Litter ratio of needle to broad leaf	凋落物含水量 Water content of litter/%	针叶凋落物含水量 Water content of needle litter/%	阔叶凋落物含水量 Water content of broad leaf litter/ %	土壤腐殖层厚度 Thickness of soil humus layer/cm	地表温度 Surface temperature of soil/℃	土壤含水量 Soil water content/%	土壤密度 Soil bulk density/(g·cm^{-3})
对照样地 Control plot	717.80 a	19.65 a	21.24 a	15.92 a	29.98 a	18.22 a	12.74 a	16.34 a	1.41 a
调整样地 Adjusted plot	571.60 b	8.11 b	19.80 a	15.09 a	25.90 b	11.23 b	13.36 b	17.29 a	1.52 a

3.3.2 土壤物理性质 林分结构调整后,云南松林地土壤腐殖层厚度和地表温度变化明显,其中,调整样地的腐殖层厚度(11.23 cm)显著低于对照样地(18.22 cm),约为对照样地的60%,这可能与林分

结构调整时林地清理有关,而地表温度(13.36 ℃)显著高于对照样地(12.74 ℃);结构调整样地土壤含水量和土壤密度略高于对照样地,但差异均不显著(表5)。上述表明,林分结构调整初期,土壤结构并未发生明显变化。

3.3.3　土壤化学性质　林分结构调整后,土壤 pH 值、土壤全量养分含量及有效养分含量均未发生显著变化(表6)。结构调整样地土壤有机质含量显著提高,比对照样地增加了 10.43%,而土壤有效养分含量均低于对照样地,但二者差异均不显著。

表 6　林分结构调整对土壤化学性质的影响

Table 6　Effects of stand structural adjustment on the soil chemistry properties

试验处理 Treatment	pH 值	有机质 Soil organic matter/ (g·kg^{-1})	全 N Total N/ (g·kg^{-1})	全 P Total P/ (g·kg^{-1})	全 K Total K/ (g·kg^{-1})	水解性 N Available N/ (mg·kg^{-1})	有效 P Available P/ (mg·kg^{-1})	有效 K Available K/ (mg·kg^{-1})	交换性 Ca Exchangeable Ca/(mg·kg^{-1})
对照样地 Control plot	5.42 a	7.29 b	0.10 a	0.29 a	0.85 a	11.2 a	14.5 a	155.5 a	421.67 a
调整样地 Adjusted plot	4.98 a	8.05 a	0.12 a	0.33 a	0.87 a	10.0 a	11.6 a	146.3 a	364.67 a

3.3.4　土壤微生物活性　林分结构调整后,土壤微生物生物量和土壤基础呼吸显著提高,其中,微生物生物量 C、N、P 分别比对照样地提高了 12.18%、13.17%、20.78%,基础呼吸提高了 31.25%;但不同处理样地中,微生物生物量 C:N、C:P、土壤呼吸熵差异均不显著(表7)。

表 7　林分结构调整对土壤微生物性质的影响

Table 7　Effects of stand structural adjustment on the soil microbes properties

试验处理 Treatment	土壤微生物生物量 Soil microbial biomass/(mg·kg^{-1})			土壤微生物生物量比率 Ratio of soil microbial biomass		基础呼吸 Soil basal respiration/ (g·kg^{-1}·h^{-1})	土壤呼吸熵 qCO_2/ (mg·h^{-1}·g^{-1})
	C	N	P	C:N	C:P		
对照样地 Control plot	160.9 b	16.7 b	7.7 b	9.8 a	21.2 a	0.16 b	1.1 a
调整样地 Adjusted plot	180.5 a	18.9a	9.3 a	9.6 a	20.6 a	0.21 a	1.2 a

4　讨论

4.1　林分结构调整对土壤性质的影响

通常林分结构调整使林分密度下降,导致土壤水分承载压力降低,从而提高土壤含水量[7]。如杨树军等[6]研究发现,沙地樟子松(*Pinus sylvestris* L. var. *mongolica* Litv.)林分结构调整初期,旱季土壤含水量明显高于未调整样地,得出结构调整有利于改善林分土壤水分状况,缓解林分对干旱胁迫的结论。本研究中,云南松林分结构调整 4 a 后,土壤含水量有增加的趋势,但与对照差异不显著。这是由于结构调整虽然降低了林分郁闭度,减少了树干对降雨的截流,提高了凋落物和表土含水量,但调整初期郁闭度的降低又会提高土壤温度,促进土壤蒸发。本研究中,结构调整使林分密度大幅下降,直接导致林间凋落物量减少,林分郁闭度降低,提高了林地土壤温度(表5)。大多数土壤结构的形成和生物地球化学循环转化需要在土壤微生物的参与下才能完成,如土壤养分的活化[14],在土壤含水量相对稳定的情况下,土壤温度升高有利于激活土壤微生物,提高微生物数量和活性,进而加速土壤养分循环,促进凋落物和土壤腐殖质的分解转化[15]。此外,林下植被覆盖度的增加对土壤微生物区系和数量以及土壤酶活性的提高均有明显的促进作用[16]。本研究中,土壤微生物生物量和土壤基础呼吸在林分结构调整后显著提高,这可能是由于土壤微生物对结构调整后林分环境变化敏感所致,包括阔叶树种类和数量的增加,林下植被覆盖度的提高以及土壤水分和温度等环境因子的变化等[13, 15-17]。尽管如此,林分结构调整后土壤呼吸熵、土壤微生物生物量 C:N 和C:P 没有显著变化,表明土壤微生物结构和种群在林分结构调整初期可能没有发生显著变化[18]。

林分结构调整通过影响凋落物组成、凋落物量和分解速率等从而改变土壤有机碳和微生物活性及其分解过程,最终影响土壤的化学性质[17]。于海群等[19]和张鼎华等[20]研究发现,人工林间伐后土壤酶活性增强,微生物数量增加,提高了土壤有效养分含量,认为间伐后林分土壤肥力有效性增加是由于间伐后林下植被生物多样性的提高,进而诱发了土壤微生物多样性和数量的增加,由此增强了土壤的生物活性。研究认为,不同种类凋落物的混合一般会增大分解者的活性,如挪威云杉(*Picea abies* L.)

和苏格兰松(*Pinus sylvestris* L.)混合凋落物的有氧呼吸相比预测值增大39%[21],刘文耀等[22]研究了云南松、滇青冈和元江栲枯叶在针、阔叶林两种生境下的分解及养分动态变化规律,结果表明,滇青冈和元江栲枯叶分解速率高于云南松针叶,且阔叶林生境有利于枯落叶的分解和养分元素的循环。本研究中,结构调整后的云南松林地树种比较丰富,除了对照样地的白栎、麻栎、滇青冈等阔叶树种外,还有相当数量的来自天然更新的水锦树、余甘子、木荷以及部分火绳树等树种也进入林地中,且结构调整样地林下植被覆盖度以及多样性指数均高于对照林地(表3、4)。林分结构调整后阔叶树种类和林下植被覆盖度的增加使土壤微生物生物量和土壤基础呼吸提高(表7),有利于凋落物的分解[16],从而使调整样地内土壤有机质含量增加(表6),这与前人的研究结果一致[10],此外,凋落物现存量和腐殖质层厚度降低也可能受到结构调整时林地清理的影响。尽管如此,结构调整后林地土壤有效养分含量却有所下降,这一方面可能与林分结构调整初期部分林木移走导致林地养分输入减少有关;另一方面,林分结构调整降低了林分郁闭度,使林下获得了更多的光照,保留木和林下阔叶树种类的增加可能促进了对林地土壤养分的吸收,加快了林内养分循环,这与成向荣等[23]和Juan等[24]的研究结果类似。此外,松针叶凋落物存留时间一般较长,结构调整初期以凋落物等形式归还给土壤的养分可能并不多[25],因此,云南松林分结构调整在短期内对于提升林地土壤有效养分并不明显。

4.2 土壤性质变化对林木生长的影响

大量研究表明,林分结构调整能够显著促进林木快速生长和蓄积量的增加[26],间伐8 a后的阔叶红松林(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)平均胸径生长量提高了40.6%[27],杉木(*Cunninghamia lanceolata*(Lamb.) Hook.)人工林间伐3 a后的平均胸径和生长量分别是对照林分的1.30和1.25倍[28]。本研究中,林分结构调整4 a后,云南松生长量表现出明显的优势,平均树高、胸径和单株蓄积量分别是对照样地的1.15、1.20、1.60倍。这一方面与林分结构调整过程中伐除了干扰木有关,被保留的树干通直、长势好,生活力强的林木获得了更多的生长空间和资源,长势良好[1,6];另一方面可能与土壤养分循环加快有关[15]。总体上看,林分结构调整后,地表凋落物量显著下降,地表温度、土壤有机质含量、土壤微生物量和土壤基础呼吸显著提高。由此推测,林分结构调整激发了土壤微生物活性,加速了土壤养分循环,从而促进了林木生长。此外,林分结构调整后,林地阔叶树种凋落物量和比例增加,这也有利于凋落物的分解转化[21-22]。林分结构调整对干扰树的伐除,为林下天然更新提供了空间,使本处于压抑状态的天然更新逐步进入主林层,从而使林分结构发生了较大变化[1-2,6]。本研究中,林分结构调整后,不仅云南松林下天然更新植株数显著提高,而且阔叶树种天然更新数量也提高了1倍(表3),即林分结构调整促进了林下天然更新,这与李春明等[29]的观点一致。通常较厚的针叶凋落物不会影响林木种子天然发芽,但会明显降低林木成苗率,进而影响次生林天然更新[6]。云南松林分结构调整后,林地凋落物量的降低和林下光照环境的改善可能提高了林下幼苗的成活率,从而使林下天然更新植株数显著增加。

5 结论

(1)云南松林分结构调整后,林分内地表凋落物量显著下降,地表温度、土壤有机质含量显著提高,但云南松林分结构调整在短期内对于提升林地土壤含水量和土壤有效养分并不明显。

(2)林分结构调整可显著提高云南松生长量,有利于云南松较大径级林木的培育;促进了云南松林下更新和林下植被发育,有利于林分群落结构的形成;提高了土壤微生物数量和活性,加速土壤有机质转化,促进了云南松林土壤—植物系统正反馈作用;但由于本研究中林分结构调整时间较短,对林木生长和土壤性质的长期影响还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 廖声熙,李 昆,陆元昌,等. 滇中高原云南松林目标树优势群体的生长过程分析[J]. 林业科学研究,2009,22(1):80-84.

[2] 邓喜庆,皇宝林,温庆中,等. 云南松林资源动态研究[J]. 自然资源学报,2014,29(8):1411-1419.

[3] 罗天浩,李文政. 云南松纯林生态效益的初步调查[J]. 云南林学院学报,1983,13(1):76-81.

[4] 杨瑞吉,杨祁峰,牛俊义. 表征土壤肥力主要指标研究进展[J]. 甘肃农业大学学报,2004,39(1):86-91.

[5] 樊后保,李燕燕,黄玉梓,等. 马尾松纯林改造成针阔混交林后土壤化学性质的变化[J]. 水土保持学报,2006,20(4):77-81.

[6] 杨树军,尤国春,肖 巍,等. 沙地樟子松人工林结构调整技术研究[J]. 防护林科技,2015,139(4):16-19,28.

[7] 朱　喜, 何志斌, 杜　军, 等. 间伐对祁连山青海云杉人工林土壤水分的影响[J]. 林业科学研究, 2015, 28(1): 55 – 60.

[8] 李亚男,许中旗,郭云艳. 抚育间伐对冀北山地典型生态公益林林分生长的影响[J]. 河北农业大学学报, 2015, 38(2): 31 – 36.

[9] 徐庆祥,卫　星. 水曲柳落叶松带状混交林结构调整对水曲柳林带土壤理化性质的影响[J]. 林业资源管理, 2013(2): 64 – 70.

[10] 谭桂霞,刘苑秋, 李莲莲, 等. 湿地松林分结构调整对土壤活性有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1307 – 1312.

[11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.

[12] 吴金水, 林其美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.

[13] Anderson T H, Domsch K H. The metabolic quotient for CO_2 (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1993, 25(3): 393 – 395.

[14] García-Palacios P, Bowker M A, Maestre F T, *et al.* Ecosystem development in roadside grasslands: biotic control, plant-soil interactions, and dispersal limitations[J]. Ecology Applications, 2011, 21(7): 2806 – 2821.

[15] Tang G, Li K, Zhang C, *et al.* Accelerated nutrient cycling via leaf litter, and not root interaction, increases growth of *Eucalyptus* in mixed-species plantations with Leucaena[J]. Forest Ecology & Management, 2013, 310(1): 45 – 53.

[16] 盛伟彤. 中国人工林及其育林体系[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014.

[17] Wang Q K, Wang S L. Soil microbial properties and nutrients in pure and mixed Chinese fir plantations[J]. Journal of Forestry Research, 2008, 19(2): 131 – 135.

[18] He Z L, Wu J, O'Donnal D S, *et al.* Seasonal response in microbial biomass carbon, phosphorus and sulphur in soils under pasture[J]. Biology & Fertility of Soils, 1997, 24(4): 421 – 428.

[19] 于海群, 刘　勇, 李国雷, 等. 油松幼龄人工林土壤质量对间伐强度的响应[J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 65 – 70.

[20] 张鼎华, 叶章发, 范必有, 等. 抚育间伐对人工林土壤肥力的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 672 – 676.

[21] Chapman K, Whittaker J B, Heal O W. Metabolic and faunal activity in litters of tree mixtures compared with pure stands[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1988, 24(1 – 3): 33 – 40.

[22] 刘文耀, 刘伦辉, 荆桂芬, 等. 云南松林和常绿阔叶林中枯落叶分解研究[J]. 云南植物研究, 2000, 22(3): 298 – 306.

[23] 成向荣, 冯　利, 虞木奎, 等. 间伐对生态公益林冠层结构及土壤养分的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 355 – 359.

[24] Juan A B, Imbert J B, Federico J C. Thinning affects nutrient resorption and nutrient-use efficiency in two *Pinus sylvestris* stands in the Pyrenees[J]. Ecological Applications, 2009, 19(3): 682 – 698.

[25] 康　冰, 刘世荣, 蔡道雄, 等. 马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2323 – 2331.

[26] 徐金良, 毛玉明, 郑成忠, 等. 抚育间伐对杉木人工林生长及出材量的影响[J]. 林业科学研究, 2014, 27(1): 99 – 107.

[27] 田向华, 李祝贺, 崔昌云, 等. 人工诱导异龄复层阔叶红松林上层抚育研究[J]. 辽宁林业科技, 2005(4): 9 – 11.

[28] 吴建强, 王懿祥, 杨　一, 等. 干扰树间伐对杉木人工林林分生长和林分结构的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 340 – 348.

[29] 李春明, 杜纪山, 张会儒. 抚育间伐对森林生长的影响及其模型研究[J]. 林业科学研究, 2003, 16(5): 636 – 641.

(责任编辑:徐玉秀)