

秦岭山地不同龄组锐齿栎林土壤和枯落物 有机碳、全氮特征

李 哲¹, 董宁宁¹, 侯 琳¹, 张 帆², 马武功²

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省宝鸡市辛家山林业局, 陕西 宝鸡 721700)

摘 要: 锐齿栎林是秦岭山地广泛分布的林分之一, 林龄不仅影响着林分的结构组成, 而且对林木个体碳、氮元素的吸收与排放有重要影响。以秦岭山地不同龄组锐齿栎林为研究对象, 通过野外采样和室内分析, 揭示了秦岭山地不同龄组锐齿栎林土壤和枯落物有机碳、全氮的分布特征, 探讨了林龄对其的影响和限制锐齿栎林正常生长的土壤可利用性养分元素。结果表明: 不同龄组林地土壤 (0 ~ 40 cm) 和枯落物有机碳含量分别为 17.61 ~ 28.31 g/kg, 260.09 ~ 316.96 g/kg; 土壤和枯落物全氮含量分别为 1.54 ~ 1.94 g/kg, 13.12 ~ 16.02 g/kg; 土壤有机碳密度和全氮密度分别为 83.33 ~ 117.33 t/hm², 6.41 ~ 8.46 t/hm²; 土壤有机碳含量、密度与枯落物有机碳和全氮含量均随林龄的增长而增加, 土壤全氮含量和密度随林龄的增长先增加后减少, 近熟林最大。不同龄组林地土壤 C:N 随林龄变化整体呈增长趋势, 成熟林土壤 C:N 为 (18.31 ± 2.25) 显著高于其它龄组。林龄对锐齿栎林土壤和凋落物有机碳、全氮含量及土壤有机碳密度有显著影响, 锐齿栎生长受土壤可利用性氮元素的限制。

关键词: 秦岭; 锐齿栎; 土壤有机碳; 枯落物有机碳; 全氮

中图分类号: S714

文献标志码: A

文章编号: 1673-923X(2017)12-0127-06

Characteristics of soil and litter organic carbon and total nitrogen in different age groups of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forests in the Qinling mountains

LI Zhe¹, DONG Ningning¹, HOU Lin¹, ZHANG Fan², MA Wugong²

(1. College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. Xingjiashan Forestry Administration, Baoji 721700, Shaanxi, China)

Abstract: The forest stand *Quercus aliena* var. *acuteserrata* is extensively distributed in the Qinling mountains. Forest age plays key roles in stand structure formation, absorption and emission of carbon and nitrogen in individuals. To better understand traits of organic carbon and total nitrogen in mineral soil and litter of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* stands with age groups, effects of stand age and limitation of available nutrients in soil for individual growth, samples of litter and mineral soil in the depth 0-40 cm were collected from field and chemical analysis was conducted. The results indicated as following. Organic carbon ranged from 17.61 to 28.31 g/kg in mineral soil and from 260.09 to 316.96 g/kg in litter. Total nitrogen ranged from 1.54 to 1.94 g/kg in mineral soil and from 13.12 to 16.02 g/kg in litter. The density of soil organic carbon and total nitrogen ranged from 83.33 to 117.33 t/hm² in mineral soil and from 6.41 to 8.46 t/hm² in litter. Content of organic carbon both in mineral soil and litter and soil organic carbon density increased with stand age. The same trend was also found in content of total nitrogen in litter. However, the content and density of total nitrogen in mineral soil fluctuated in stand age groups and the maximum values were attained in near-matured stand. The ratio C:N in mineral soil increased with stand age generally and the ratio (18.31 ± 2.25) was highest in matured stand. Content of organic carbon and total nitrogen in mineral soil and litter, and soil organic carbon density were significantly affected by stand age. Growth of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* was limited by soil available nitrogen.

Keywords: Qinling mountains; *Quercus aliena* var. *acuteserrata*; soil organic carbon; litter organic carbon; total nitrogen

收稿日期: 2016-09-20

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项项目 (201304307)

作者简介: 李 哲, 硕士研究生

通讯作者: 侯 琳, 副研究员; E-mail: houlin_1969@nwsuaf.edu.cn

引文格式: 李 哲, 董宁宁, 侯 琳, 等. 秦岭山地不同龄组锐齿栎林土壤和枯落物有机碳、全氮特征 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(12): 127-132, 138.

森林生态系统是陆地生态系统的主体, 维持约 73% 的土壤碳库^[1], 且森林生态系统中 90% 以上的氮包含在土壤中^[2]。由于森林土壤有机碳储量巨大, 因此其微小的变化可能显著影响全球气候变化^[3]。土壤是森林生态系统中生物体生命活动的载体, 为植物的生长提供空间和养分^[4], 土壤有机碳和氮素是土壤养分的重要组成部分, 也是生态系统中极其重要的生态因子, 其含量会影响生态系统的稳定性和持续性。林地土壤有机碳是反映土壤质量和土壤健康的重要指标, 直接影响林地土壤肥力和生产力^[5]。氮素作为大量营养元素, 在物质循环中扮演着重要的角色^[6-7]。因此研究林地土壤有机碳和全氮特征, 对林地经营管理具有重要意义。国内外以往大多关注林分类型^[8-12]、林地非生物因素^[13-15]对土壤碳氮储量的影响, 以及生态系统碳氮的分配格局^[16-18]。

林龄是森林生态系统结构与功能的重要预测指标, 不仅影响生物体对碳、氮元素的吸收与排放, 还对森林生态系统碳储量和碳封存具有重要影响, 是影响土壤有机碳积累的重要因素^[19-21]。锐齿栎 *Quercus aliena* var. *Acutesserata* 是秦岭中山地带 (1 400 ~ 1 800 m) 典型的地带性植被, 在固碳理水、维持区域生态平衡等方面具有重要作用。我国关于林龄对土壤有机碳和全氮的研究多集中在小兴安岭地区^[22-25]和南部亚热带地区^[26-28], 对秦岭山地不同龄组锐齿栎林碳氮特征的研究较少。本研究以秦岭山地不同龄组锐齿栎林为研究对象, 探讨了不同龄组锐齿栎林地土壤和枯落物有机碳与全氮特征, 揭示影响研究区锐齿栎生长的主要养分元素。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地设在秦岭南坡陕西省宝鸡市辛家山 (34°10' ~ 34°20'N, 106°28'E ~ 106°38'E) 和秦岭主梁南侧的陕西省宝鸡市马头滩 (34°04' ~ 34°35'N, 106°54'E ~ 107°11'E) 林区, 2 个林区均属暖温带半湿润山地气候, 年均气温分别为 7.6 °C 和 11 °C, 年均降水量 900 mm, 降水集中于 7—9 月, 土壤类型均以山地棕壤为主, 土层厚度多为 40 cm 且分布不均。两个林区森林覆盖率达 90% 以上, 其中锐齿栎天然林分布面积较大。

1.2 样地设置

在研究区内选取立地条件相近, 处于不同生

长阶段的 (幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林) 锐齿栎林分, 在样地每木调查的基础上, 确定 3 株标准木, 通过生长锥法确定林龄, 并根据《森林资源规划设计调查技术规程》^[29] 将其划分为 4 个不同龄组。每个龄组设置 4 个 20 m×20 m 的样地, 进行样地基本情况调查, 见表 1。

表 1 样地基本概况
Table 1 The general information of plots

龄组	年龄 /a	海拔 /m	坡度 /(°)	坡向	容重 /(g·cm ⁻³)	胸径 /cm	树高 /m	密度 /(株·hm ⁻²)
幼龄林	10	1 482	5	西北	1.28	8.4	7.2	2 025
	11	1 482	3	西北	1.3	9.7	7.3	1 575
	16	1 561	6	南	1.28	12.2	9.8	1 325
	24	1 583	8	东	1.24	16.4	10.7	475
中龄林	42	1 646	28	西	1.27	19.3	10.1	675
	40	1 683	40	西	1.18	19.0	10.6	475
	50	1 684	30	西	1.21	23.8	11.9	400
	45	1 697	28	东北	1.21	20.7	11.5	700
近熟林	60	1 674	20	东北	1.18	24.7	13.1	650
	69	1 686	16	北	1.15	27.7	13.6	475
	66	1 695	18	北	1.17	26.7	14.3	475
	70	1 698	18	北	1.16	27.7	15.6	550
成熟林	88	1 671	5	西	1.08	34.2	16.6	575
	90	1 672	10	北	1.1	36.0	17.0	500
	88	1 548	40	南	1.11	34.5	15.6	525
	81	1 822	23	南	1.16	31.6	16.2	350

1.3 样品采集与处理

于 2015 年 9 月, 在每个样地中按照“S”形布点法选择 5 个采样点, 用 25 cm×25 cm 铁丝框, 将林下枯落物分为未分解、半分解和已分解 3 层收集地表枯落物^[30]; 然后按照 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm、30 ~ 40 cm 分 4 层各采集土壤样品, 同时在土壤坡面用环刀取样, 测定每一层的土壤容重。共采集枯落物样品 36 份, 土壤样品 48 份。

将土壤样品带回实验室自然风干、过 100 目筛, 用于土壤理化性质的测定; 枯落物样品于 80 °C 烘干、粉碎过 60 目筛, 用于枯落物相关元素含量的测定^[31]。有机碳含量的测定使用重铬酸钾外加热法, 全氮含量的测定使用凯氏定氮法, 土壤含水率采用烘干法测定^[32]。

1.4 数据分析

林地土壤有机碳密度 (S_{ocd}) 和全氮密度 (S_{nd}) 按下式计算:

$$S_{\text{ocd}} = \sum_{i=1}^n \rho_i \times (1 - \theta_i) \times SOC_i \times H_i \times 0.1; \quad (1)$$

$$S_{\text{ind}} = \sum_{i=1}^n \rho_i \times (1 - \theta_i) \times STN_i \times H_i \times 0.1. \quad (2)$$

式(1)、式(2)中： n 为土壤采样层次数，本研究为4， ρ_i 为第*i*层的土壤容重(g/cm^3)， θ_i 为第*i*层 $> 2 \text{ mm}$ 的石砾含量(%)， SOC_i 与 STN_i 分别为第*i*层土壤有机碳含量和全氮含量(g/kg)， H_i 为第*i*层土壤厚度(cm)^[26]。

用Oringin 8.5作图，SPSS 19.0进行统计分析。采用One-way ANOVA法分析不同龄组、不同土层间各指标的差异显著性，采用LSD法进行多重比较($p < 0.05$ 为差异显著)。图中不同大写字母代表相同龄组不同土层间存在显著差异($p < 0.05$)，不同小写字母代表相同土层或分解状态，不同龄组间存在显著差异($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同龄组锐齿栎林土壤有机碳含量

同一土层深度，土壤有机碳含量随林龄的增长总体呈递增趋势；相同龄组，随土壤深度的增加有机碳含量减少(图1)。

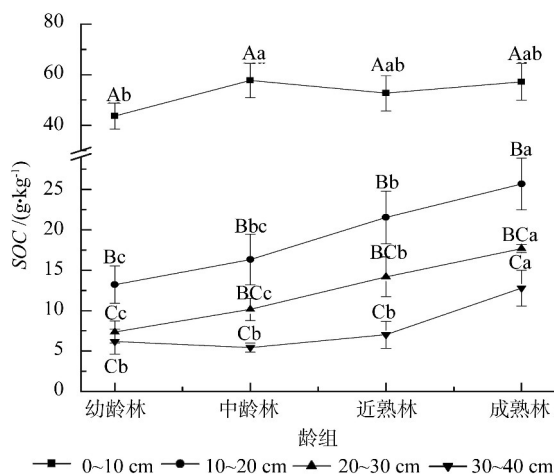


图1 不同龄组土壤有机碳含量
Fig. 1 Contents of soil organic carbon (SOC) within age groups

不同龄组，0~10 cm 土壤有机碳含量在43.68~57.72 g/kg 之间，中龄林达到最大，幼龄林与中龄林存在显著差异(图1)；10~20 cm 土壤有机碳含量随林龄增长而增加，在13.2~25.67 g/kg，幼龄林、近熟林和成熟林两两之间存在显著差异，中龄林与成熟林存在显著差异；20~30 cm 土壤有机碳含量随林龄增长而增加，在7.36~

17.68 g/kg 之间，幼龄林和中龄林与近熟林和成熟林都存在显著差异，近熟林和成熟林间也存在显著差异；30~40 cm 土壤有机碳含量在6.17~12.78 g/kg 之间，成熟林>近熟林>幼龄林>中龄林，且幼龄林和中龄林均与成熟林存在显著差异。

相同龄组土壤有机碳含量随土壤深度增加逐渐减小，且不同龄组土壤有机碳含量随土壤深度的变化差异显著性基本相同。各龄组0~10 cm 土壤有机碳含量与10~20 cm、20~30 cm 和30~40 cm 均存在显著差异；10~20 cm 与30~40 cm 也存在显著差异，除幼龄林10~20 cm 与20~30 cm 存在显著差异外，其它龄组均不存在显著差异。

2.2 不同龄组锐齿栎林土壤全氮

除0~10 cm 外，相同土壤深度，土壤全氮含量随林龄的增长呈先增加后减少的趋势，近熟龄阶段达到最大；相同龄组，土壤全氮含量随土壤深度的增加而减少(见图2)。

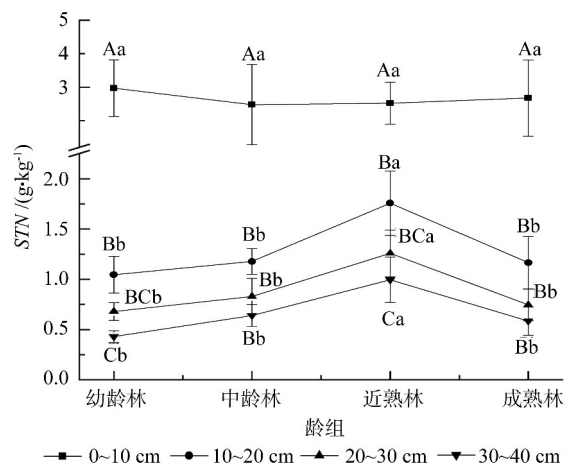


图2 不同龄组土壤全氮含量
Fig. 2 The soil total nitrogen (STN) contents within age groups

不同龄组，0~10 cm 土壤全氮含量变化不明显，在3.74~3.99 g/kg 之间；10~20 cm，20~30 cm 和30~40 cm 土壤全氮含量分别在1.05~1.76 g/kg，0.68~1.26 g/kg，0.43~1.00 g/kg 之间，均表现为近熟林>中龄林>成熟林>幼龄林，近熟林与其它3个龄组均存在显著差异，其它龄组间无显著差异。

相同龄组锐齿栎林，土壤全氮含量随土壤深度的增加而减少。0~10 cm 土壤全氮含量与其它3层均存在显著差异；幼龄林和近熟林土壤全氮含量在10~20 cm 与30~40 cm 存在显著差异，20~30 cm 和10~20 cm 以及30~40 cm 两层

间差异不显著; 中龄林与成熟林 10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 和 30 ~ 40 cm 3 层间不存在显著差异。

2.3 不同龄组枯落物有机碳和全氮含量

不同龄组枯落物层有机碳含量随林龄的增长而增加, 但不同分解状态变化规律不一致, 未分解和半分解层随林龄的增长总体呈增加趋势; 已分解层随林龄的增长先减少后增加 (见图 3)。枯落物层有机碳含量为 260.09 ~ 316.96 g/kg, 近熟林和成熟林显著大于幼龄林与中龄林; 未分解层枯落物中有机碳含量为 297.86 ~ 442.15 g/kg, 近熟林阶段达最大, 幼龄林与中龄林, 中龄林和近熟林以及成熟林之间存在显著差异; 半分解层枯落物有机碳含量在 284.69 ~ 369.68 g/kg 之间, 幼龄林 < 近熟林 < 中龄林 < 成熟林, 幼龄林和近熟林均与成熟林存在显著性差异; 已分解层枯落物有机碳含量为 142.85 ~ 197.72 g/kg, 近熟林 < 中龄林 < 成熟林 < 幼龄林, 中龄林和近熟林都与幼龄林存在显著性差异。

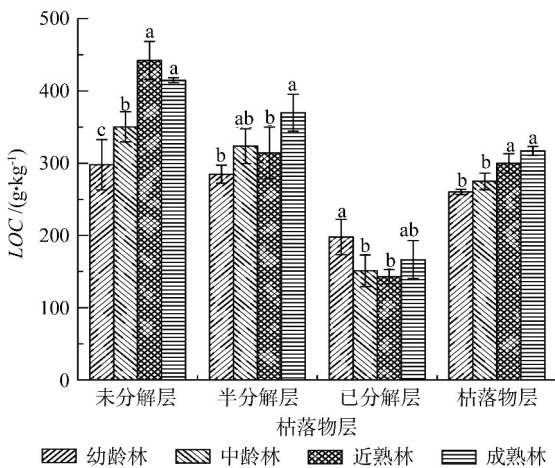


图 3 不同龄组枯落物层有机碳含量
Fig. 3 The organic carbon contents in litter layer (LOC) within age groups

不同龄组枯落物层全氮含量成熟林显著高于其它龄组, 但不同分解状态枯落物全氮含量, 随林龄变化未表现出明显规律 (见图 4)。枯落物层全氮含量为 13.12 ~ 16.02 g/kg, 成熟林达最大值; 未分解层为 13.39 ~ 18.53 g/kg, 随林龄变化先减少后增加, 幼龄林和中龄林都与成熟林差异显著; 半分解层为 11.30 ~ 16.38 g/kg, 随林龄的增长逐渐增加, 幼龄林与近熟林和成熟林差异显著; 已分解层同样先减少后增加, 为 9.81 ~ 13.19 g/kg, 近熟林阶段最小, 显著低于幼龄林和成熟林。

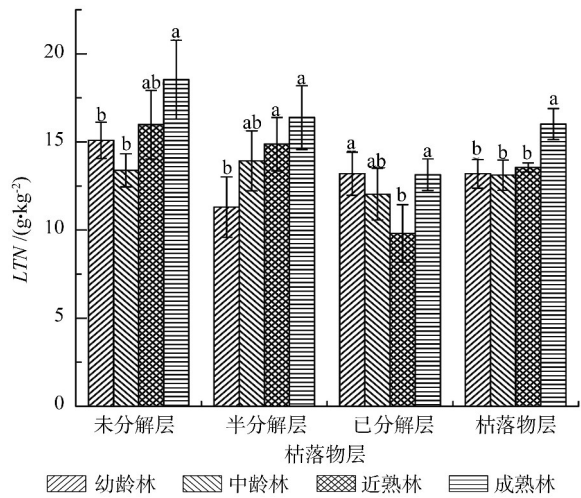


图 4 锐齿栎林枯落物层全氮含量
Fig. 4 The total nitrogen contents in litter layer (LTN) of different age groups

2.4 不同龄组土壤有机碳和全氮密度

土壤有机碳密度随林龄的增长逐渐增加, 土壤全氮密度随林龄的增长先增加后减少, 近熟林达最大值 (见图 5)。土壤有机碳密度在幼龄林到中龄林阶段快速增长, 中龄林到近熟林阶段趋于稳定, 近熟林到成熟林阶段再次快速增长, 随林龄的增长整体呈增加趋势, 在 83.33 ~ 117.33 t/hm² 之间, 且幼龄林显著低于近熟林和成熟林, 中龄林与成熟林也存在显著差异。土壤全氮密度在幼龄林到中龄林阶段保持相对稳定, 中龄林到近熟林阶段快速增加, 由近熟林到成熟林阶段密度降低, 甚至低于幼龄林, 随林龄的增长呈先增加后减少的趋势, 在 6.41 ~ 8.46 t/hm² 之间, 近熟林全氮密度显著高于成熟林。

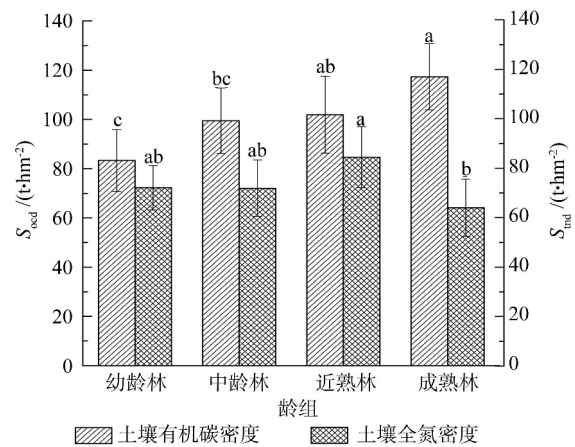


图 5 不同龄组土壤有机碳和全氮密度
Fig. 5 Soil organic carbon density and soil total nitrogen density within age groups

2.5 不同龄组林地土壤和枯落物碳氮比

土壤碳氮比随林龄的增长整体呈增加的趋势,且成熟林与其它龄组存在显著差异;枯落物碳氮比呈现小幅度波动,各龄组间无显著差异(见图6)。锐齿栎不同龄组土壤碳氮比在 12.04 ~ 18.31 之间,近熟林略小于幼龄林和中龄林,成熟林明显大于其它林龄,且存在显著差异。不同龄组枯落物碳氮比在 17.9 ~ 20.90,近熟林略高于其它龄组,各龄组间无显著差异。

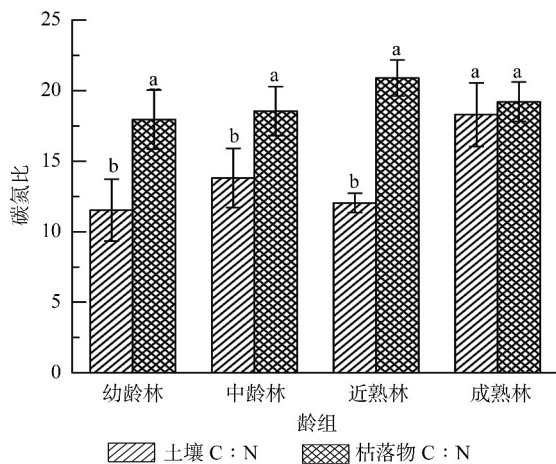


图 6 不同龄组土壤和枯落物碳氮比

Fig. 6 The ratio(soil and litter)of carbon and nitrogen in different age groups

3 讨论

3.1 林龄对林地土壤有机碳的影响

研究表明,土壤有机碳含量和密度,随林龄的增长而增加,这与前人的研究结果一致^[33-35]。土壤有机碳的主要来源是植被地上部分的枯落物、地下部分根分泌物和细根周转产生的碎屑^[36]。幼龄林阶段林分郁闭度低、对光照利用率低,光合产生有机质较少。并且林木处于迅速生长的阶段,光合产物大多用于植物自身的生长,枯落物较少,因此土壤表层和枯落物层有机碳含量均较低。随着林木的生长,林分郁闭度在一定范围内的增加,提高了林分光合利用率,同时郁闭度过度增加产生自然疏枝等现象,导致枯枝落叶增加,因此土壤有机碳也相应增长。

3.2 林龄对林地土壤全氮的影响

土壤表层全氮含量和密度随林龄的增长先增加后减小,与刘冰燕等^[37]的研究结果一致,但与崔宁洁等^[33]、苗娟等^[26]和牛小云等^[38]对不同林龄土壤全氮含量研究结果存在差异。产生差异的原因

可能是,本研究囊括了锐齿栎从幼龄林到成熟林 4 个林龄阶段的变化特征,而苗娟、崔宁洁与牛小云的研究都仅仅包含幼龄林和中龄林两个阶段,在这两个阶段土壤表层全氮含量的变化与本研究一致。在林龄达到一定范围后,一方面可能由于地上部分对土壤氮元素利用增加,另一方面土壤微生物对枯落物的腐化分解速度达到相对饱和状态,不能随枯落物的增加无限增长,导致氮素由土壤层转向植被层和枯落物层,因此出现土壤氮元素含量减小,枯落物层全氮含量在成熟林阶段迅速增加的现象。

3.3 林龄对林地枯落物有机碳和全氮的影响

不同龄组枯落物层有机碳含量随林龄的增长逐渐增加,全氮含量成熟林明显大于其它龄组,与崔宁洁等^[33]、明安刚等^[16]研究结果存在差异。随林龄的增长,林地枯枝落叶逐渐积累,因此枯落物各分解状态有机碳含量增加,密度也相应增加。与其它研究结果存在差异的原因,可能是由于树种特性的不同,以及研究对象龄组划分的差异。但总体看来,由于树种特性、研究方法与具体林分的环境条件的差异,林龄对枯落物有机碳与全氮的影响,仍然存在比较大的不确定性,在不同的研究中未得一致结果。

3.4 林龄对土壤和枯落物中碳氮比的影响

本研究显示随林龄的增长土壤碳氮比呈增长的趋势,成熟林显著大于其它龄组;枯落物碳氮比变化不明显,各龄组差异不显著。陆媛等^[39]认为随着林龄增加,土壤碳氮比显著降低;牛小云等^[38]认为不同林龄土壤碳氮比随林龄增加先减小后增加;崔宁洁等^[33]认为枯落物中碳氮比随林龄的增加而下降,与本研究结果存在差异。不同研究区林地气候条件差异明显,林分类型与树种组成不同,生物学特性差异也较为显著,因此可能导致研究结果存在差异。Hooker 等^[40]认为土壤有机质碳氮比与土壤有机碳的分解速率呈反比,即碳氮比越高有机碳分解速率越低,这也解释了随林龄的增加,土壤有机碳含量与密度增长的现象,支撑本研究的研究结果。由于枯落物中碳氮主要来自未分解和半分解的林地枯枝落叶,而枝叶中碳氮比基本维持在一个变化不大的范围内,因此随林龄的增长枯落物碳氮比变化不明显。

4 结论

(1) 林龄对土壤表层有机碳含量和密度有显著影响,随林龄增长有机碳含量和密度增加;对

全氮含量和密度影响较复杂,在近熟林达到最大值。土壤深度影响土壤有机碳和全氮含量,随土壤深度的增加有机碳和全氮含量减少。

(2) 林龄对枯落物层有机碳和全氮含量影响显著,随林龄的增长枯落物层有机碳和全氮呈增加趋势。枯落物分解状态对枯落物层有机碳和全氮含量变化规律不一致。

(3) 土壤碳氮比受林龄影响,随林龄增长土壤碳氮比呈增长的趋势,成熟林显著大于其它龄组;林龄对枯落物碳氮比影响不显著。土壤碳氮比在成熟林阶段达最大值,表明研究区锐齿栎林受到可利用氮元素的制约,因此在林地管理时补充相应元素提高森林质量。

由于林龄对枯落物有机碳与全氮的影响,仍然存在较大的不确定性,未得一致结论。因此需要对其做进一步研究,揭示产生不同结论的内在机理。

参考文献:

- [1] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, *et al.* Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298(8): 156-159.
- [2] 项文化,黄志宏,闫文德,等.森林生态系统碳氮循环功能耦合研究综述[J].*生态学报*,2006,26(7): 2365-2372.
- [3] 王 棣,耿增超,余 雕,等.秦岭典型林分土壤有机碳储量及碳氮垂直分布[J].*生态学报*,2015,35(16): 5421-5429.
- [4] 薛 立,吴 敏,徐 燕,等.几个典型华南人工林土壤的养分状况和微生物特性研究[J].*土壤学报*,2005,42(6):1017-1023.
- [5] Laishram J, Saxena K G, Maikhuri R K, *et al.* Soil quality and soil health: a review[J]. *International Journal of Ecology & Environmental Sciences*, 2012, 38(1): 19-37.
- [6] 黄 宇,冯宗炜,汪思龙,等.杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量[J].*生态学报*,2005,25(12):3146-3154.
- [7] 杜红梅,王 超,高红真.华北落叶松人工林碳汇功能的研究[J].*中国生态农业学报*,2009,17(4): 756-759.
- [8] Wiesmeier M, Prietzel J, Barthold F, *et al.* Storage and drivers of organic carbon in forest soils of southeast Germany (Bavaria)—implications for carbon sequestration[J]. *Forest Ecology & Management*, 2013, 295(5): 162-172.
- [9] Toriyama J, Mao H, Imai A, *et al.* Effects of forest type and environmental factors on the soil organic carbon pool and its density fractions in a seasonally dry tropical forest[J]. *Forest Ecology & Management*, 2015, 335(1): 147-155.
- [10] Mujuru L, Gotora T, Velthorst E J, *et al.* Soil carbon and nitrogen sequestration over an age sequence of *Pinus patula* plantations in Zimbabwean eastern highlands[J]. *Forest Ecology & Management*, 2014, 313(2): 254-265.
- [11] 孙文义,郭胜利.天然次生林与人工林对黄土丘陵沟壑区深层土壤有机碳氮的影响[J].*生态学报*,2010,30(10):2611-2620.
- [12] 刘世荣,王 晖,栾军伟.中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J].*生态学报*,2011,31(19): 5437-5448.
- [13] Seedre M, Kopáček J, Janda P, *et al.* Carbon pools in a montane old-growth Norway spruce ecosystem in bohemian forest: effects of stand age and elevation[J]. *Forest Ecology & Management*, 2015, 346(2): 106-113.
- [14] 陈建国,田大伦,闫文德,等.鄂西南区域土壤有机碳储量、密度及其影响因子[J].*中南林业科技大学学报*,2011,31(5):57-62.
- [15] 袁知洋,邓邦良,张学玲,等.武功山草甸植被小群落土壤活性有机碳与土壤养分的典型相关分析[J].*中南林业科技大学学报*,2016,36(2):84-90.
- [16] 明安刚,贾宏炎,田祖为,等.不同林龄格木人工林碳储量及其分配特征[J].*应用生态学报*,2014,25(4):940-946.
- [17] 王卫霞,史作民,罗 达,等.我国亚热带几种人工林生态系统碳氮储量[J].*生态学报*,2013,33(3): 925-933.
- [18] 魏亚伟,周旺明,周 莉,等.兴安落叶松天然林碳储量及其碳库分配特征[J].*生态学报*,2015,35(1):189-195.
- [19] 魏亚伟,于大炮,王清君,等.东北林区主要森林类型土壤有机碳密度及其影响因素[J].*应用生态学报*,2013,24(12):3333-3340.
- [20] Martin J L, Gower S T, Jennifer P, *et al.* Carbon pools in a boreal mixedwood logging chronosequence[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(11): 1883-1894.
- [21] 曹小玉,李际平.不同龄组杉木人工林土壤有机碳贮量及分布特征[J].*中南林业科技大学学报*,2014,34(7):104-107.
- [22] 胡海清,罗碧珍,魏书精,等.小兴安岭 7 种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力[J].*植物生态学报*,2015,39(2):140-158.
- [23] 韩营营,黄 唯,孙 涛,等.不同林龄白桦天然次生林土壤碳通量和有机碳储量[J].*生态学报*,2015,35(5):1460-1469.
- [24] 马 炜,孙玉军,郭孝玉,等.不同林龄长白落叶松人工林碳储量[J].*生态学报*,2010,30(17): 4659-4667.
- [25] 刘振花,陈立新,王琳琳.红松阔叶混交林不同演替阶段土壤活性有机碳的研究[J].*土壤通报*,2009,40(5):1098-1103.
- [26] 苗 娟,周传艳,李世杰,等.不同林龄云南松林土壤有机碳和全氮积累特征[J].*应用生态学报*,2014,25(3):625-631.
- [27] 张苏峻,黎艳明,周 毅,等.粤西桉树人工林土壤有机碳密度及其影响因素[J].*中南林业科技大学学报*,2010,30(5):22-28.
- [28] 吴志祥,谢贵水,陶忠良,等.海南儋州不同林龄橡胶林土壤碳和全氮特征[J].*生态环境学报*,2009,18(4):1484-1491.
- [29] 唐小平.GB/T 26424—2010,森林资源规划设计调查技术规程[S].国家林业局调查规划设计院,2011: 8.
- [30] 冯 乐.丝状真菌与外生菌根真菌对红松凋落物分解耦合关系的研究[D].哈尔滨:黑龙江大学,2011:14-15.
- [31] 罗 达,冯秋红,史作民,等.岷江干旱河谷区岷江柏人工林碳氮储量随林龄的动态[J].*应用生态学报*,2015,26(4):1099-1105.

(下转第 138 页)

4 结论与讨论

结合灰色系统和马尔科夫理论,以多种模型对木材需求量进行拟合和预测,选取出最优模型进行马尔科夫修正。预测结果表明,优化后的马尔科夫修正能在一定程度上降低小样本数据在修正时的误差,滑动无偏灰色预测辅以优化后的马尔科夫修正模型预测精度较高,能够为我国木材需求量预测提供有效的理论依据。

此外,在众多预测方法中,一般马尔科夫预测模型是在完全预测出所有待测年份的数据后,以一步、两步及多步转移状态概率矩阵确定预测值所处的状态区间;当出现转移状态无法确定时,参考下一步的转移状态概率矩阵,依次类推。此种预测模型在求解多步转移状态概率矩阵将导致原始数据的损失,步数越多,损失数据越多。在样本数较少时,原始数据损失将导致转移状态概率矩阵求解的偶然性增加,相对误差增大,影响模型的修正效果。本研究出的集成预测模型在原有预测模型基础上对一般马尔科夫预测误差修正进行了优化,解决了小样本数据在进行马尔科夫误差修正时的数据损失问题,进一步提高了模型的预测精度。本研究预测模型存在一些不足,该方法每次只能修正一年数据,修正后同时需将修正值纳入原始数据序列再次进行预测,如此重复,预测过程中需重新进行状态区间划分、转移状态

概率矩阵求解,且状态区间需进行多次重复划分才能得出最优划分。因此,在预测年份较多时,整个预测过程较为繁琐。为了进一步优化该理论模型,在后续的研究中,我们将对小样本预测的状态区间划分问题进行深入的研究。

参考文献:

- [1] 中国国家林业局.中国林业发展报告[R].北京:中国林业出版社,2016:1-15.
- [2] 谭秀凤.中国木材供需预测模型及发展趋势研究[D].北京:中国林业科学研究院,2011:5-8.
- [3] 谢佳利,亢新刚,孔雷,等.2020年我国的木材需求预测[J].中南林业科技大学学报,2011,31(12):154-158.
- [4] 雷渊才.消耗结构模型在木材需求预测中的应用[J].中南林业学院学报,1991,11(2):162-168.
- [5] 田刚,韩璐,张思思.基于GM(1,1)模型的中国对俄罗斯木材进口需求量预测[J].对外经贸,2015(10):7-8.
- [6] 刘思峰.灰色系统理论及其应用[M].北京:电子工业出版社,2014:14-22.
- [7] 杨锦伟,孙宝磊.基于灰色马尔科夫模型的平顶山市空气污染物浓度预测[J].数学的实践与认识,2014,44(2):64-70.
- [8] 侯翔龙,阳辉.基于滑动无偏灰色马尔科夫模型的水库年降雨量预测[J].水土保持通报,2014,34(3):181-184.
- [9] 陈勇明,张明.灰色样条绝对关联度模型[J].系统工程理论与实践,2015,35(5):1304-1310.

[本文编校:文凤鸣]

(上接第132页)

- [32] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2010:23,30,42.
- [33] 崔宁洁,刘小兵,张丹桔,等.不同林龄马尾松(*Pinus massoniana*)人工林碳氮磷分配格局及化学计量特征[J].生态环境学报,2014,23(2):188-195.
- [34] 艾泽民,陈云明,曹扬.黄土丘陵区不同林龄刺槐人工林碳、氮储量及分配格局[J].应用生态学报,2014,25(2):333-341.
- [35] Luan J, Liu S, Zhu X, et al. Soil carbon stocks and fluxes in a warm-temperate oak chronosequence in china[J]. Plant & Soil, 2011, 347(1-2): 243-253.
- [36] 周莉,李保国,周广胜.土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J].地球科学进展,2005,20(1):99-105.
- [37] 刘冰燕,陈云明,曹扬,等.秦岭南坡东段油松人工林生态系统碳、氮储量及其分配格局[J].应用生态学报,2015,26(3):643-652.
- [38] 牛小云,孙晓梅,陈东升,等.辽东山区不同林龄日本落叶松人工林土壤微生物、养分及酶活性[J].应用生态学报,2015,26(9):2663-2672.
- [39] 陆媛,陈云明,曹扬,等.黄土高原子午岭辽东栎林植物和土壤碳氮磷化学计量学特征[J].水土保持学报,2015,29(3):196-201.
- [40] Hooker T D, Compton J E. Forest ecosystem carbon and nitrogen accumulation during the first century after agricultural abandonment[J]. Ecological Applications, 2008, 13(2): 299-313.

[本文编校:文凤鸣]