

DOI: 10.5846/stxb201506041127

侯浩, 张宋智, 关晋宏, 杜盛. 小陇山不同林龄锐齿栎林土壤有机碳和全氮积累特征. 生态学报, 2016, 36(24): - .

Hou H, Zhang S Z, Guan J H, Du S. Accumulation of soil organic carbon and total nitrogen in *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forests at different age stages in the Xiaolongshan Mountains, Gansu Province. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): - .

小陇山不同林龄锐齿栎林土壤有机碳和全氮积累特征

侯 浩^{1,2}, 张宋智³, 关晋宏^{1,2}, 杜 盛^{2,*}

1 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

2 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

3 甘肃省栎类次生林生态系统重点实验室, 小陇山林业科学研究所, 天水 741022

摘要:以甘肃小陇山林区 3 个林龄阶段(中龄林、近熟林和成熟林)的锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)天然次生林为对象,研究了土壤中有有机碳和全氮的垂直分布及其积累特征。结果表明:林地土壤有机碳和全氮含量在各龄级土壤剖面中的垂直变化规律一致,表层土壤含量最高,随着土层深度逐渐降低。1 m 土层范围有机碳和全氮密度随着林龄的增加而增加,中龄林、近熟林和成熟林的碳密度分别为 122.92、242.21 和 280.53 t/hm²,龄组之间差异显著($P < 0.05$);3 个林龄阶段的土壤全氮密度分别为 10.37、18.94 和 24.76 t/hm²,差异显著($P < 0.05$)。有机碳和全氮密度在 0—20 cm 土层中占有很高比重,达 37%—56%。土壤有机碳与全氮含量呈极显著的线性正相关($P < 0.0001$)。土壤有机碳和全氮积累速率随林龄阶段存在差异,在生长旺盛期(中龄林-近熟林)的土壤有机碳(10.84 t hm⁻² a⁻¹)和全氮(0.78 t hm⁻² a⁻¹)的积累速率要大于成熟期(近熟林-成熟林)的土壤有机碳(1.92 t hm⁻² a⁻¹)和全氮(0.29 t hm⁻² a⁻¹)积累速率。

关键词:小陇山;锐齿栎天然次生林;土壤有机碳;土壤全氮

Accumulation of soil organic carbon and total nitrogen in *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forests at different age stages in the Xiaolongshan Mountains, Gansu Province

HOU Hao^{1,2}, ZHANG Songzhi³, GUAN Jinhong^{1,2}, DU Sheng^{2,*}

1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

3 Key Laboratory of Oak Secondary Forest Ecosystems in Gansu Province, Xiaolongshan Forest Research Institute, Tianshui 741022, China

Abstract: It has been reported that soil constitutes the largest carbon pool in terrestrial ecosystems. Soil organic carbon (SOC) in forest ecosystems is considered a major stock of carbon sequestered by vegetation biomass production. Soil total nitrogen (STN) is typically closely coupled with SOC and contributes to ecosystem productivity. Studies on soil carbon and nitrogen in the forests of Northwest China are relatively few. In order to provide a more accurate assessment of the carbon storage and accumulation characteristics in the forests of this region, we investigated the representative natural secondary forests of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* in the Xiaolongshan Mountains of Gansu Province. These broadleaved forests are typically found at elevations of 1400—1800 m in this area, the western part of the Qinling Mountains. We selected forest stands of *Q. aliena* var. *acuteserrata* at three age stages (mid-aged, pre-mature, and mature), and three representative plots (30 m × 20 m) were established for each age stage. Soil samples were taken at three points diagonally across the plot

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050202)

收稿日期:2015-06-04; 网络出版日期:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shengdu@ms.iswc.ac.cn

using a soil auger (6-cm internal diameter) at depths of 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—50 cm and 50—100 cm. The cored samples from the same depth in each plot were mixed and all samples were then transferred to the laboratory for further analyses. They were air dried and ground to pass through a 0.25-mm sieve prior to the analyses of carbon and nitrogen. In each plot, we also dug a soil profile (1 m depth) and sampled undisturbed soil, with two replicates for each soil layer, using a cutting ring (100 cm³). These soil samples were weighed and their moisture was measured to calculate the bulk density of each layer. The SOC content was determined by the potassium dichromate-sulfuric acid oxidation method. STN content was determined using a FOSS-8400 full-automatic Kjeldahl apparatus. Both SOC and STN densities over a forest area were calculated using their contents multiplied by the soil bulk density at each profile depth and soil profile thickness. The results showed the following. (1) Changes in SOC and STN contents along the soil profiles were consistent among the forests at different age stages. The surface soil layers had the highest SOC and STN contents, and they gradually decreased with increasing vertical gradient. (2) Both SOC and STN densities in the 1-m layer increased with increasing forest age. The SOC densities in mid-aged, pre-mature, and mature forests were 122.92, 242.21, and 280.53 t/hm², respectively, with the difference being statistically significant ($P < 0.05$). The STN densities in the three age stages were 10.37, 18.94, and 24.76 t/hm², respectively, and the differences were significant ($P < 0.05$). SOC and STN stored in the top 0—20 cm of soil accounted for large proportions of the whole 1 m soil, reaching 37%—56%. (3) SOC and STN contents showed significant positive linear correlation ($P < 0.0001$). In addition, both SOC and STN showed significant negative relationships with the soil bulk density. (4) The accumulation rates of SOC and STN varied with growth periods, and the accumulation rate of SOC (10.84 t hm⁻² a⁻¹) and STN (0.78 t hm⁻² a⁻¹) during the relatively young period (from mid-aged to pre-mature stages) were higher than the rate of SOC (1.92 t hm⁻² a⁻¹) and STN (0.29 t hm⁻² a⁻¹) during the mature period (from pre-mature to mature stages).

Key Words: Xiaolongshan Mountain; *Quercus aliena* var. *acuteserrata*; soil organic carbon; soil total nitrogen

碳和氮是重要的生命物质,也是陆地生态系统的重要元素。它们在地球各个圈层之间不断的循环流动,构成了碳和氮的生物地球化学循环。土壤是陆地生态系统中最大的碳库,全球大约 1500 Pg 的碳是以有机质形态储存于土壤中,是全球大气碳库(750 Pg)的 2 倍多,是陆地植被碳库(500—600 Pg)的 2—3 倍^[1]。森林土壤中储存的有机碳约占全球土壤有机碳库的 73%^[2],而森林土壤中储存的氮素超过森林生态系统总氮储量的 85%^[3]。近年来,国内外学者对森林土壤碳氮累积给予了高度关注,例如 Adrien 等人^[4]在 1998 年对美国康涅狄格州 6 个不同树种土壤碳氮贮存进行了比较系统地的研究,2008 年 Vesterdal 等人^[5]研究了欧洲 6 种典型树种土壤碳氮库的特征。国内方面,在不同地域针对不同森林类型也开展了一系列研究,并取得了一定成果^[6-10]。前人的研究主要是针对不同森林类型土壤碳氮储存现状的估算,而对森林在不同林龄阶段的土壤碳氮储存能力和碳库、氮库动态变化的研究还较少。研究森林土壤碳、氮的动态变化,可为森林生态系统碳氮耦合提供基础数据,并对分析和评价森林生态系统的综合服务功能有着重要意义。

锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)是我国暖温带的重要落叶阔叶林建群种,主要分布在辽宁、陕西、甘肃、河南、山东等省。小陇山自然保护区位于秦岭西段北坡的山地,是中国天然锐齿栎群落分布的最西北端。锐齿栎群落分布在该区 1400—1800 m 的海拔范围内,为典型的地带性植被,对该地水土保持、水源涵养和维持区域生态平衡发挥着极其重要的作用。近年来国内学者对锐齿栎生态系统的结构和功能做了大量的研究,特别是在锐齿栎林的地上和地下生物量、蓄积量等方面^[11-16],而对锐齿栎林土壤有机碳、氮库及其积累特征的相关报道还很少。本文通过对小陇山林区 3 个林龄阶段(中龄林、近熟林和成熟林)锐齿栎林的抽样调查,采集测定土壤剖面的主要理化参数,研究了土壤有机碳与全氮含量的垂直分布和积累特征,旨在探明当地锐齿栎林生态服务功能特征并为科学管理提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

小陇山林区位于甘肃省东南部,地理坐标为 104°22'—106°43'E, 33°30'—34°49'N,地处秦岭西段。该区气候为大陆性季风气候,属暖温带湿润区。年平均气温 7—12℃,极端最高气温 39.2℃,极端最低气温-23.2℃,≥10℃的积温 2444—3825℃。年平均降雨量 460—800 mm;降雨变率较大,雨季集中,冬季降水仅占全年的 1%—3%;春季增温较速,易发生春旱,7、8、9 三个月降水丰富,约占全年的 70%以上。年蒸发量 989—1658 mm,相对湿度 68%—78%,林区相对湿度达 78%。干燥度 0.89—1.29^[17-19]。林区内的地带性土壤,秦岭以北为灰褐土,以南为黄褐土;垂直分布较明显,北坡由低到高有碳酸盐灰褐土、山地褐色土、山地淋溶褐色土、山地棕壤、山地草甸棕壤、山地草甸土、亚高山草甸草原土;南坡由低到高有黄褐土、黄棕壤、山地棕壤、暗棕壤等。林地有机质含量较高,pH 值 6.5—7.5,土壤质地多属壤土、轻壤土和轻土^[11]。

锐齿栎林是小陇山林区海拔 2200 m 以下主要分布的天然次生林之一,在该林带内,除锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)外,还分布有栓皮栎(*Quercus variabilis*)、华山松(*Pinus armandii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、千金榆(*Carpinus cordata*)等乔木树种;主要灌木有悬钩子(*Rubus* sp.)、蔷薇(*Rosa* sp.)、榛子(*Corylus heterophylla*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、毛樱桃(*Cerasus tomentosa*)、卫矛(*Euonymus alatus*)、中华绣线菊(*Spiraea chinensis*)等;草本植物包括苔草(*Carex tristachya*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、白草(*Pennisetum flaccidum*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、灯心草(*Juncus effusus*)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、野棉花(*Anemone hupehensis*)、唐松草(*Thalictrum* sp.)等^[20-22]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地调查及采样

在 2011 年 8 月和 2012 年 8 月,在小陇山林区锐齿栎林典型分布区的党川林场、百花林场和李子园林场选取生长健康具有一定代表性的锐齿栎天然次生林群落,设置中龄林(40—60 a)、近熟林(60—80 a)、成熟林(80—120 a)标准样地各 3 个,林龄确定采用对优势木进行抽样调查钻取生长锥的方法,样地面积为 20 m×30 m,土壤类型一致(均为山地褐土)。各标准样地基本信息见表 1。

表 1 锐齿栎天然次生林标准样地概况

Table 1 General information of sampling plots for *Quercus aliena* forests

龄组 Age group	林龄 Age/a	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	坡位 Position	海拔 Altitude/m	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)	平均胸径 Mean DBH/ cm	平均树高 Mean height/m	林下植被 Underground vegetations
中龄林 Mid-aged	46	34	东南	中坡	1629	2292	8.2	6.5	卫矛-披碱草林
	55	31	东	中坡	1575	2065	11.0	8.6	胡枝子-苔草林
近熟林 Pre-mature	55	19	西南	上坡	1581	2697	8.6	7.0	胡枝子-苔草林
	65	42	西北	上坡	1686	3297	10.1	7.3	秦岭箭竹-苔草林
成熟林 Mature	60	30	西南	中坡	1857	1178	12.7	9.7	榛-苔草林
	65	34	东南	中坡	1632	2052	9.4	6.9	忍冬-苔草林
	85	3	西南	上坡	1721	2103	10.7	8.9	忍冬-苔草林
	85	2	西南	上坡	1733	2161	9.2	8.1	榛-苔草林
	81	34	西北	中坡	1703	4101	6.8	7.7	绣线菊-蕨林

注:DBH≥2 cm 作为起测胸径,林分密度为样地内所有乔木树种个数除以样地投影面积

在调查样地内沿一个对角线确定 3 个土壤取样点,使用内径 6 cm 的土钻,按 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—50 cm 和 50—100 cm 5 个层次钻取土壤样品,等层等量混合为一个样品。样品尽早带回室内进行

风干处理,磨碎后过 0.25 mm 的筛后测定有机碳和全氮含量。在调查样地内选择一个未受人为干扰、植被结构和土壤均具代表性的地段,挖掘一个 100 cm 深的土壤剖面。按照上述相同的五个层次,用 100 cm³ 环刀取原状土,每层取 2 个重复。土样带回实验室在 105 °C 下烘干 24 h 至恒重,用于计算各土层土壤容重。

土壤有机碳含量的测定采用重铬酸钾-硫酸氧化法,土壤全氮的测定采用 FOSS-8400 全自动凯氏定氮仪。

1.2.2 土壤有机碳、全氮密度的计算

土壤剖面各层次有机碳密度(SOCD, t/hm²)和全氮密度(STND, t/hm²)计算公式如下:

$$SOCD = \sum C_i \times D_i \times T_i \times (1 - G_i) \times 0.1 \quad (1)$$

$$STND = \sum N_i \times D_i \times T_i \times (1 - G_i) \times 0.1 \quad (2)$$

式中, C_i 、 N_i 分别为第 i 层土壤的平均有机碳含量和全氮含量(g/kg); D_i 为第 i 层土壤平均容重(g/cm³); T_i 为第 i 层土壤厚度(cm); G_i 为直径大于 2mm 的石砾所占的体积百分数(%),由于本研究中各层土壤剖面(0—100 cm)无直径大于 2 mm 的石砾,所以公式中 G_i 为 0; i 为土层($i=1,2,3,4,5$)。

1.2.3 土壤有机碳、全氮积累速率的计算

土壤有机碳和全氮积累速率是利用时空互代法将实验样地分为两个阶段: t_1 (中龄林-近熟林)、 t_2 (近熟林-成熟林)。由样地信息得到 t_1 (52—63 a)阶段为 11 a, t_2 (63—83 a)阶段为 20 a,同一龄组的林龄使用其 3 个样地林龄的平均值。然后计算各阶段土壤有机碳、全氮的差值,除以相应阶段的时间,即为该阶段土壤有机碳和全氮的积累速率。

1.2.4 数据处理

所有数据经 Excel 2010 处理后,用 SPSS 17.0 软件完成统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan 检验比较不同数据组之间的差异,显著性水平设定为 0.05。使用软件 SigmaPlot 12.5 作图。

2 结果与分析

2.1 锐齿栎林土壤容重变化特征

图 1 为各林龄阶段锐齿栎林各土层的土壤容重,从中可以看出,锐齿栎林的土壤容重范围在 0.83—1.59 g/cm³,且各林龄的土壤容重均呈现随着土层的加深而逐渐增大的趋势。方差分析表明,0—10 cm 土层的土壤容重与其他各层之间均存在显著性差异($P<0.05$),而其他各土层之间没有显著性差异($P>0.05$)。各层土壤容重均表现为中龄林>近熟林>成熟林(0—10 cm 土层略有不同),即随着林龄的增加土壤质地趋于松软,但该变化趋势未达到显著水平。

2.2 不同林龄锐齿栎林土壤有机碳和全氮含量

从图 2 中可以看出,3 个林龄阶段锐齿栎林土壤有机碳和全氮含量随着土层深度的变化基本一致,0—10 cm 土层的有机碳和全氮含量显著高于其他各层,随深度增加土壤有机碳和全氮含量降低。其中,位于相同土层不同林龄阶段的土壤有机碳和全氮含量除了 0—10 cm 土层、土壤全氮在 10—20 cm 和 20—30 cm 土层上,中龄林与近熟林之间差异不显著($P>0.05$),外,其余各层的中龄林与近熟林、成熟林之间均差异显著($P<0.05$),近熟林与成熟林之间仅土壤全氮在 10—20 cm 土层上差异显著($P<0.05$)。位于同一林龄不同土层的土壤有机碳和全氮含量在相邻土层 0—10 cm 和 10—20 cm 两个土层之间差异显著($P<0.05$),而在之后的 20—30 cm、30—50 cm 和 50—100 cm 3 个土层之间均无显著性差异($P>0.05$)。

2.3 不同林龄锐齿栎林土壤有机碳、全氮含量和土壤容重的关系

对测得的三个林龄阶段锐齿栎林土壤有机碳和全氮含量进行线性拟合,拟合结果如图 3,从中可以看出二者之间呈现极显著的线性正相关关系。分别对土壤有机碳含量、全氮含量与土壤容重进行线性拟合(图 4),结果表明,土壤有机碳含量、全氮含量与土壤容重之间均存在极显著的负相关关系, R^2 分别为 0.6659、0.6522。这说明随着林龄的增加,森林土壤内的有机碳不断累积,土壤理化性质同时产生变化,主要表现为土

壤有机质含量的增加和容重的减小。

2.4 不同林龄锐齿栎林土壤有机碳密度和全氮密度

由图 5 可以看出,随着林龄的增大,锐齿栎林的土壤有机碳和全氮密度逐渐增多。三个林龄阶段的锐齿栎林土壤有机碳密度(0—100 cm)之间差异显著($P < 0.05$),分别为 122.92、242.21 t/hm^2 和 280.53 t/hm^2 ,而在土壤表层(0—20 cm)的有机碳密度各龄组之间差异不显著($P > 0.05$),其表层(0—20 cm)土壤有机碳密度分别为 68.61、91.56、111.15 t/hm^2 。三个林龄阶段的土壤全氮密度(0—100 cm)之间差异显著($P < 0.05$),分别为 10.37、18.94 t/hm^2 和 24.76 t/hm^2 ,而三个林龄阶段的土壤表层(0—20 cm)全氮密度分别为 5.32、5.98 t/hm^2 和 9.21 t/hm^2 ,其中,成熟林林地的土壤表层(0—20 cm)全氮密度与中龄林、近熟林林地之间均存在显著性的差异($P < 0.05$),而中龄林与近熟林之间差异不显著

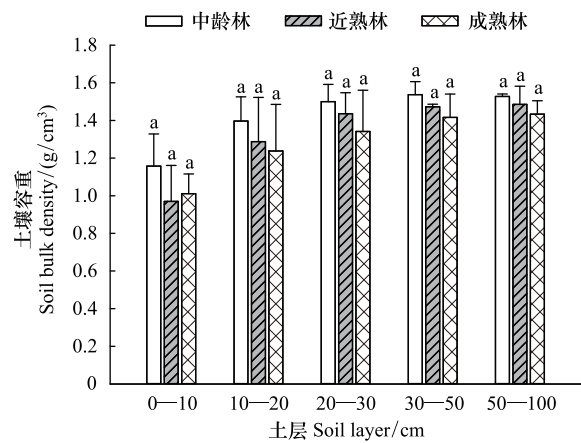


图 1 不同林龄锐齿栎林各土层土壤容重

Fig.1 Soil bulk density of different layers in three age stages of *Quercus aliena* forests (Mean±SD)

相同字母表示相同土层不同林龄之间未达到显著水平 ($P < 0.05$)

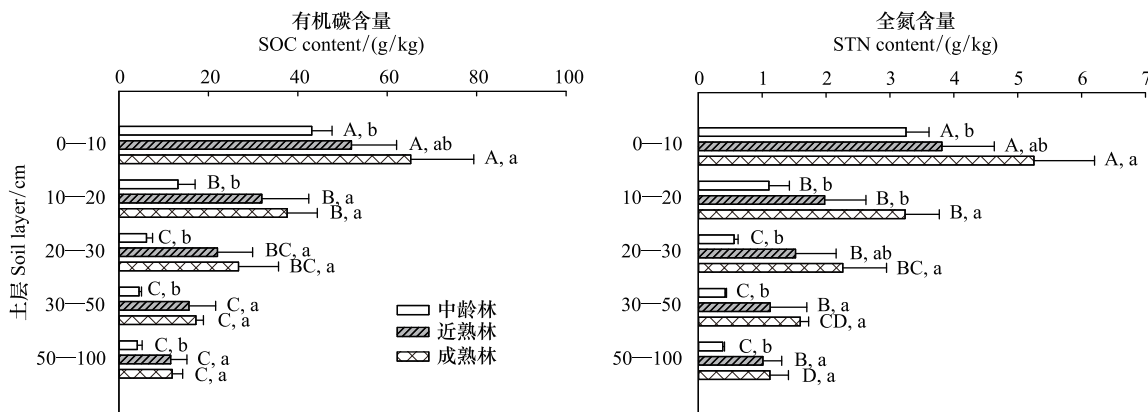


图 2 不同林龄级锐齿栎林各土层土壤有机碳和全氮含量

Fig.2 SOC and STN contents in different soil layers in three age stages of *Quercus aliena* forests (Mean±SD)

不同大写字母表示同一林龄不同土层之间差异显著 ($P < 0.05$),不同小写字母表示同一土层不同林龄之间差异显著 ($P < 0.05$)

($P > 0.05$)。这表明在整个土层尺度(0—100 cm)上,土壤有机碳和全氮是随着林龄的增大而增多的,但是在土壤表层(0—20 cm)尺度上,土壤有机碳和全氮是处于一个较稳定的状态。

2.5 土壤有机碳和全氮的积累速率

利用时空互代法,将调查的样地分为两个生长阶段, t_1 生长旺盛期(中龄林-近熟林)和 t_2 成熟期(近熟林-成熟林)。由图 6 可以看出,在两个生长阶段中锐齿栎林各土层的土壤有机碳和全氮积累速率存在差异,除 0—10 cm 土层的有机碳和全氮的积累速率为 $t_2 > t_1$ 之外,其余土层的有机碳和全氮的积累速率均为 $t_1 > t_2$ 。在 t_1 生长阶段中,土壤有机碳和全氮积累速率随着土层的加深而逐渐增加,土壤的有机碳和全氮积累速率分别

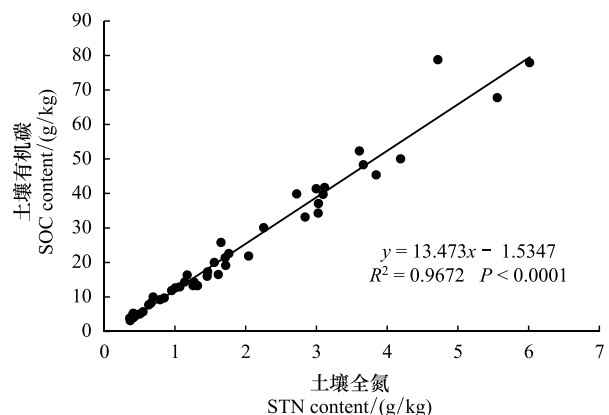


图 3 土壤有机碳和全氮的关系

Fig.3 Relationship between soil organic carbon and total nitrogen

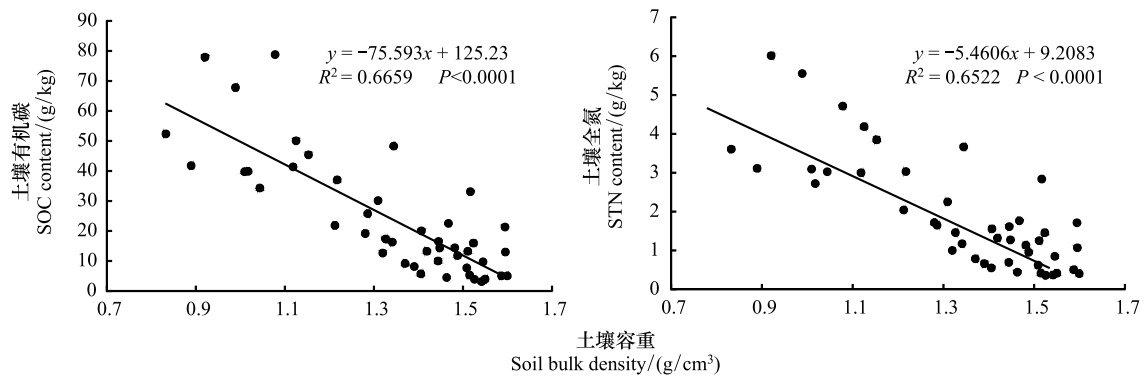


图4 土壤有机碳和全氮含量与土壤容重的关系

Fig.4 Relationships between soil bulk density and organic carbon or total nitrogen

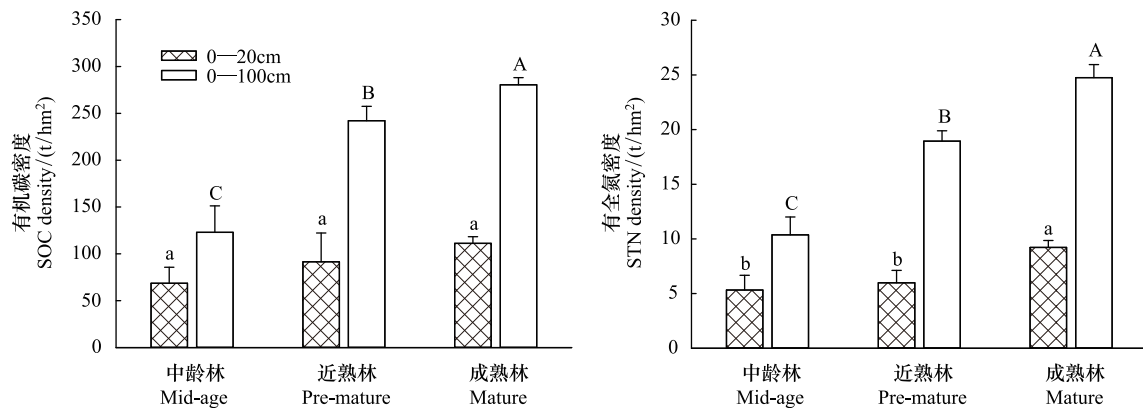


图5 不同林龄锐齿栎林土壤有机碳密度和全氮密度

Fig.5 SOCD and STND in different ages of *Quercus aliena* forests (mean±SD)

不同大写字母表示不同林龄在土层 0—100 cm 差异显著,不同小写字母表示不同林龄在土层 0—20 cm 差异显著 ($P < 0.05$)

达到 $10.84 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $0.68 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。而在 t_2 生长阶段,按照土层的垂直梯度,土壤有机碳和全氮积累速率呈现一个先降后升的趋势,其中 20—30 cm 土层是转折点。 t_2 阶段的土壤碳氮积累速率分别为 $1.92 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $0.35 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,是 t_1 阶段的 0.18 倍和 0.51 倍。

3 讨论

3.1 林龄对锐齿栎林土壤有机碳和全氮含量的影响

研究结果显示,中龄林、近熟林和成熟林的土壤有机碳含量依次为 14.21、26.64 g/kg 和 31.74 g/kg,土壤全氮含量依次为 1.14、1.89、2.69 g/kg。三个不同林龄的天然锐齿栎林土壤有机碳和全氮含量均随着林龄的增大而增加,并且在土壤的垂直梯度中具有明显的层次性,表层(0—10 cm)含量最高,这说明锐齿栎林土壤有机碳和全氮含量也具有“表聚作用”。随着土层深度的增加,有机碳和全氮含量逐渐降低。这与梁启鹏等^[23]对北京妙峰山林场不同林分土壤有机碳密度的研究结论相同,同时也与王棣等^[24]对秦岭典型森林类型(锐齿栎、油松、华山松、云杉等)土壤有机碳储量垂直分布特征的研究结果一致。崔静^[25]对陕西省不同地区(陕北、关中、陕南)栎林的研究中表明:陕西省不同地区的栎林土壤有机碳含量均随着土层的垂直梯度逐层递减,相同地区 0—100 cm 的同一土层不同林龄阶段的栎林土壤有机碳含量之间差异不显著 ($P > 0.05$)。而本文中在同一土层不同林龄阶段中,中龄林与近熟林之间差异显著 ($P < 0.05$),可能是因为其调查的陕西栎林中不只是锐齿栎,还包含有辽东栎、栓皮栎以及麻栎,造成结果的不一致。其他结论如栾军伟等^[26]对暖温带

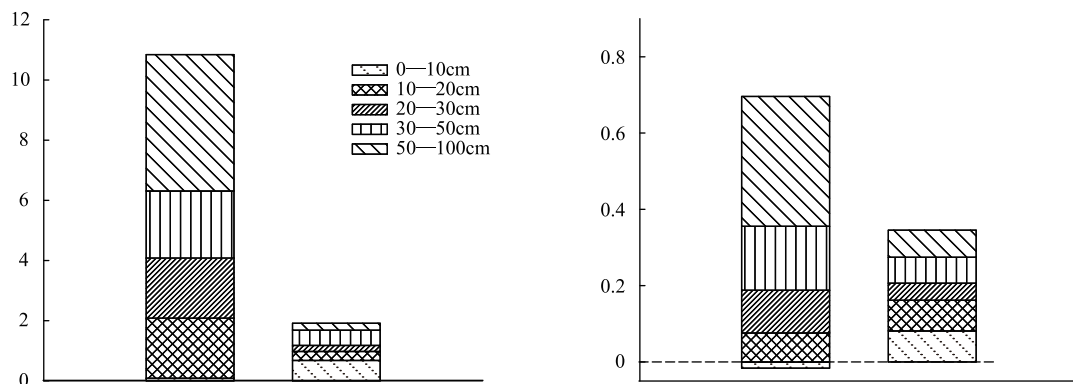


图6 锐齿栎林土壤有机碳与全氮的积累速率

Fig.6 Accumulation rates of SOC and STN in the *Quercus aliena* forests ($t\text{ hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)

52a、63a 和 83a 分别为中龄林、近熟林和成熟林调查样地的平均年龄

锐齿栎林土壤有机碳的研究以及刘恩等^[27]对南亚热带不同林龄红锥人工林碳储量的研究也都证明土壤有机碳含量随着林龄的增大而增加。土壤的有机碳含量,主要由土壤有机质的输入、输出以及相关土壤性质和过程来决定的。对于相同的土地利用类型来说,造成土壤有机碳含量的不同主要是在于不同生长阶段,林分密度、郁闭度、林下枯落物以及地下部分根系活动共同作用的结果。

3.2 林龄对锐齿栎林土壤有机碳和全氮密度的影响

本研究中,中龄林、近熟林和成熟林锐齿栎林的土壤有机碳密度依次为 122.92 、 242.21 t/hm^2 和 280.53 t/hm^2 (图 5),各林龄阶段之间差异显著 ($P < 0.05$)。除了中龄林之外,近熟林和成熟林的土壤碳密度均大于我国落叶阔叶林土壤碳密度平均值 208.90 t/hm^2 ^[28]。在土壤表层(0—20 cm)的有机碳密度各龄组之间差异不显著 ($P > 0.05$),其表层土壤有机碳密度分别为 68.61 、 91.56 t/hm^2 和 111.15 t/hm^2 ,各自在其林龄阶段中占到了 55.8%、37.8% 和 39.6%。可见,表层土对土壤有机碳密度做的贡献最大,尤其是中龄林的表层土占到了整个土层(100 cm)有机碳密度的一半以上。这是由于处在生长旺盛期的锐齿栎林,根系中细根生物量占有很大的比例^[29],且都集中在表层土壤中^[29-30]。细根分解后转化为有机质,因此导致土壤有机碳主要集中在土壤表层。3 种林龄的锐齿栎林土壤全氮密度依次为 10.37 、 18.94 t/hm^2 和 24.76 t/hm^2 ,不同林龄之间差异显著 ($P < 0.05$)。近熟林和成熟林的土壤全氮密度要高于我国暖温带落叶阔叶林土壤层全氮密度的平均值 14.82 t/hm^2 ^[31]。而三个林龄阶段的土壤表层(0—20 cm)全氮密度分别占 100 cm 土层的 51.4%、31.6% 和 37.2%。以上结果表明,锐齿栎林土壤有机碳和全氮的积累,土壤表层的贡献最大,但随着森林群落的演替,逐渐向深层土壤转移。

3.3 林龄对锐齿栎林土壤有机碳和全氮积累速率的影响

本文利用空间序列代替时间序列的方法,估算了锐齿栎林在不同生长阶段土壤有机碳和全氮的积累速率。土壤有机碳和全氮的累积,是由物质输入与输出的差值决定的。物质输入的主要途径包括凋落物的分解、大气中含碳、氮物质的沉降,岩床释放氮素^[32-33]及死根的腐烂分解^[34]。其中凋落物输入和细根分解是森林土壤有机碳和氮素积累的主要来源^[35]。

图 6 中的结果表明,在 1 m 深的土层内,有机碳的积累速率大于全氮的积累速率。前后两个阶段也有差异, t_1 生长阶段 0—100 cm 的土壤有机碳和全氮的积累速率分别是 t_2 阶段的 5.7 倍和 2.7 倍,表明锐齿栎林在到达成熟林的过程中,土壤有机碳、全氮的积累速率均减缓,而且有机碳减缓的幅度更大。在 0—10 cm 土层内,土壤有机碳和全氮的积累速率为 $t_2 > t_1$,且 t_1 的有机碳积累速率较小,只有 0.09 $t\text{ hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。这是因为生长旺盛期的林地土壤水热条件较好,表层土的代谢活动比较活跃,虽然微生物分解凋落物和细根产生了有机质,

但同时表层土存在很大的土壤呼吸速率,有机质消耗量也较高^[36]。表层土壤有机质的收支特征导致 t_1 时期 0—10 cm 土层有机碳和全氮的积累速率较低。随着林龄的增长,凋落物输入的有机质增加,表层土壤的富集能力也逐渐增强。本研究对 0—40 cm 土层的细根生物量进行了分析,发现其细根生物量随着林龄增大逐渐降低。而且在森林演替过程中,土壤的 pH 也发生着变化,张俊华等人^[37]的研究中提出,随着锐齿栎林发育阶段的递进,土壤 pH 值逐渐递减。锐齿栎林土壤有机质的变化与土壤 pH 值的变化趋势一致,即酸性土壤导致土壤肥力的下降,继而影响森林的生产力,以及土壤中微生物的活性。Luan 等人^[38]对栎林的土壤呼吸研究中发现,林龄越大的样地中,测得土壤中的异养呼吸和根呼吸越多。因此,以上这些原因导致在 t_2 生长阶段中土壤有机碳和全氮的积累速率减缓,除 0—10 cm 土层,其他土层碳氮积累速率均低于 t_1 时期。土壤有机碳和全氮积累速率在土层垂直梯度上的变化规律涉及到的影响因子较多,如植物根系的结构、土壤微生物群落特征、土壤的 pH 变化及有机质矿化速率等,要探明其变化机理还需后期更全面和深层次的研究。据最近一期全国森林资源清查资料,小陇山林区天然林中幼中龄林面积超过 70%,由此可见,在今后相当长一个时期内,土壤有机碳和全氮将持续积累,作为该区域主要的天然阔叶林类型,小陇山栎林在森林植被碳固存和抵消温室气体方面将发挥重要作用。

致谢: 本研究在野外样品采集和室内分析中得到了张建国、何秋月、邓磊和陈秋文的帮助,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 1990, 348(6298): 232-234.
- [2] Sedjo R A. The carbon cycle and global forest ecosystem. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1993, 70(1/4): 295-307.
- [3] Reichle D E. *Dynamic Properties of Forest Ecosystems*. London: Cambridge University Press, 1981: 341-409.
- [4] Finzi A C, Van Breemen N, Canham C D. Canopy tree-soil interactions within temperate forests: Species effects on soil carbon and nitrogen. *Ecological Applications*, 1998, 8(2): 440-446.
- [5] Vesterdal L, Schmidt I K, Callesen I, Nilsson L O, Gundersen P. Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(1): 35-48.
- [6] 史作民,刘世荣,程瑞梅. 内蒙古鄂尔多斯地区四个植物群落类型的土壤碳氮特征. *林业科学*, 2004, 40(2): 21-27.
- [7] 刘纪远,王绍强,陈镜明,刘明亮,庄大方. 1990-2000 年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化. *地理学报*, 2004, 59(4): 483-496.
- [8] 张鹏,张涛,陈年来. 祁连山北麓山体垂直带土壤碳氮分布特征及影响因素. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 518-524.
- [9] Fu X L, Shao M A, Wei X R, Horton R. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2010, 155(1/2): 31-35.
- [10] 董志玲. 干旱荒漠区人工梭梭林土壤碳氮储量分布规律及影响因子研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2014.
- [11] 索安宁,巨天珍,张俊华,王勤花. 甘肃小陇山锐齿栎群落生物多样性特征分析. *西北植物学报*, 2004, 24(10): 1877-1881.
- [12] 索安宁,巨天珍,张俊华,葛剑平. 甘肃小陇山锐齿栎群落生物量动态研究. *生态学杂志*, 2005, 24(4): 377-381.
- [13] 王勤花,巨天珍,常成虎,曹春. 甘肃小陇山锐齿栎种群结构分析. *广西植物*, 2006, 26(1): 38-42.
- [14] 程堂仁. 甘肃省小陇山森林生物量及碳储量研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.
- [15] 赵中华,惠刚盈,袁士云,刘文桢,王润喜. 小陇山锐齿栎天然林空间结构特征. *林业科学*, 2009, 45(3): 1-6.
- [16] 巨天珍,郝青,葛建团,张宋智,李沛祺,康丽丹,王立峰,赵继超. 甘肃小陇山锐齿栎林空间分布格局分析. *林业资源管理*, 2010, 8(4): 27-30.
- [17] 魏智海. 小陇山林业局天然林保护工程社会效益分析. *西北林学院学报*, 2004, 19(1): 156-160.
- [18] 巨天珍,王彦,任海峰,姚晶晶,王蒙,孟凡涛,王继伟. 小陇山国家级自然保护区次生林分类、排序及演替. *生态学杂志*, 2012, 31(1): 23-29.
- [19] 刘小林,张宋智,李惠萍,蔺岩雄,郑子龙,袁一超. 小陇山森林生态系统服务功能价值评估. *西北林学院学报*, 2013, 28(6): 69-74.
- [20] 安定国. 甘肃小陇山高等植物志. 兰州:甘肃民族出版社,1995.
- [21] 程堂仁,马钦彦,冯仲科,罗旭. 甘肃小陇山森林生物量研究. *北京林业大学学报*, 2007, 29(1): 31-36.
- [22] 袁士云,张宋智,刘文桢,马建伟. 小陇山辽东栎次生林的结构特征和物种多样性. *林业科学*, 2010, 46(5): 27-34.
- [23] 梁启鹏,余新晓,庞卓,王琛,吕锡芝. 不同林分土壤有机碳密度研究. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 889-893.
- [24] 王棣,耿增超,余雕,和文祥,侯琳. 秦岭典型林分土壤活性有机碳及碳储量垂直分布特征. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1569-1577.

- [25] 崔静. 陕西省栎林土壤固碳特征及影响因素分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [26] Luan J W, Liu S R, Zhu X L, Wang J X. Soil carbon stocks and fluxes in a warm-temperate oak chronosequence in China. *Plant and Soil*, 2011, 347(1/2): 243-253.
- [27] 刘恩, 王晖, 刘世荣. 南亚热带不同林龄红锥人工林碳贮量与碳固定特征. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 335-340.
- [28] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-522.
- [29] 刘建军, 王得祥, 雷瑞德, 吴钦孝. 火地塘天然油松锐齿栎林细根生物量及其空间变化. *西北林学院学报*, 2004, 19(1): 1-4, 72-72.
- [30] 郭忠玲, 郑金萍, 马元丹, 韩士杰, 李庆康, 于贵瑞, 范春楠, 刘万德, 邵殿坤. 长白山几种主要森林群落木本植物细根生物量及其动态. *生态学报*, 2006, 26(9): 2855-2862.
- [31] 张春娜, 延晓冬, 杨剑虹. 中国森林土壤氮储量估算. *西南农业大学学报: 自然科学版*, 2004, 26(5): 572-579.
- [32] Holloway J M, Dahlgren R A. Geologic nitrogen in terrestrial biogeochemical cycling. *Geology*, 1999, 27(6): 567-570.
- [33] Morford S L, Houlton B Z, Dahlgren R A. Increased forest ecosystem carbon and nitrogen storage from nitrogen rich bedrock. *Nature*, 2011, 477(7362): 78-81.
- [34] Jobbágy E G, Jackson R B J. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [35] Gao Y, Cheng J M, Ma Z R, Zhao Y, Su J S. Carbon storage in biomass, litter, and soil of different plantations in a semiarid temperate region of northwest China. *Annals of Forest Science*, 2014, 71(4): 427-435.
- [36] 常建国, 刘世荣, 史作民, 康冰, 陈宝玉. 锐齿栎林土壤呼吸对土壤水热变化的响应. *林业科学*, 2006, 42(12): 21-27.
- [37] 张俊华, 王胜利, 巨天珍, 南忠仁. 天水小陇山锐齿栎群落土壤动态特征分析. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(8): 118-122.
- [38] Luan J W, Liu S R, Wang J X, Zhu X L, Shi Z M. Rhizospheric and heterotrophic respiration of a warm-temperate oak chronosequence in China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(3): 503-512.