

# 辽东山区天然次生栎林土壤有机碳含量及其与理化性质的关系

祁金虎

(辽宁省森林经营研究所辽宁辽东半岛森林生态系统国家定位观测研究站, 辽宁 丹东 118000)

**摘要:** 通过对设置在辽东山区本溪市草河口镇和庄河市仙人洞镇两个典型天然次生栎林(*Quercus spp.*)样地内的土样进行分层(0—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm)采集和室内分析, 研究了 0—40 cm 土层土壤有机碳、全氮、全磷等含量的剖面分布特征, 探讨了有机碳与理化性质间的关系。结果表明: 土壤有机碳及全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、阳离子交换量的含量均随土层加深而降低, 而土壤容重随土层加深而增加, 由 *t* 检验和方差分析得知, 各指标含量在土层间差异均达到 5% 显著水平; 土壤有机碳与粉粒、pH、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、阳离子交换量间均呈显著正相关( $r=0.430\ 9\sim0.919\ 0, n=44, P<0.01$ ), 与土壤容重、砂粒间均呈显著负相关( $r=0.388\ 3\sim0.670\ 6, n=44, P<0.01$ ), 而与黏粒间无显著相关性; 由逐步回归分析得知土壤碱解氮、碳氮比、全钾、pH、全氮与有机碳间关系最为紧密。土壤有机碳与其他理化性质间关系密切, 且以全氮、碱解氮、碳氮比、全钾和 pH 对其影响最大; 同时, 各指标均具有明显的剖面分布规律。

**关键词:** 辽东山区; 天然次生林; 栎林; 土壤有机碳; 土壤理化性质

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0135-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.04.022

## Contents of Soil Organic Carbon and Its Relations with Physicochemical Properties of Secondary Natural Oak Forests in Eastern Mountain Area of Liaoning Province

QI Jinhu

(Forest Management Research Institute of Liaoning Province, Liaotung

Peninsula Forest Ecosystem Long-term Research Station, Dandong, Liaoning 118000)

**Abstract:** Based on the sampling (0—10, 10—20, 20—30 and 30—40 cm) and lab analysis of two representative natural secondary oak forest plots in Liaodong mountain area, which was located in the town of Benxi City River Estuary and the fairy town of Zhuanghe City, the distribution characteristics of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus at the depth of 0—40 cm was studied, and the relationship between organic carbon and other physical and chemical properties was discussed. Results showed that soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available nitrogen, available phosphorus, available potassium and cation exchange capacity tended to decline with the increasing soil depth, however soil bulk density generally increased with increasing soil depth. According to the *t* test and variance analysis, there was a significant difference between the experiment indicators and the soil layer ( $P<0.05$ ). Moreover, the content of silt showed a very high positive correlation with the soil organic carbon, pH value, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkaline hydrolysis nitrogen, available phosphorus, available potassium and cation exchange capacity ( $r=0.430\ 9\sim0.919\ 0, n=44, P<0.01$ ). While soil bulk density and the content of sand had a significant negative correlation with soil organic carbon ( $r=0.388\ 3\sim0.670\ 6, n=44, P<0.01$ ). But the content of clay had no significant correlation with soil organic carbon. Stepwise regression analysis showed that the relationship between soil available nitrogen, the ratios of carbon to nitrogen, total potassium, pH, total nitrogen and organic carbon was the closest. Overall, there was close

relationships between soil organic carbon and other physical and chemical properties, and the total nitrogen, available nitrogen, the ratios of carbon to nitrogen, total potassium and pH had big impact on it. At the same time, each index had obvious profiles distribution.

**Keywords:** eastern mountain area of Liaoning; natural secondary forest; oak forest; soil organic carbon; soil physicochemical properties

土壤碳库是陆地生态系统中储量最大、周转周期最长的碳库。据估算,在 0—100 cm 土层内,全球土壤碳库(2 300 Pg,1 Pg=10<sup>15</sup> g)约是大气碳库的 3 倍,生物碳库的 2~3.8 倍<sup>[1-4]</sup>。森林生态系统作为最大的陆地生态系统,拥有占全球 39% 的土壤碳库(约 89 t/hm<sup>2</sup>),其任何微小变化都可能会对气候变化、陆地植被构成及功能等造成显著影响。

近年来,围绕森林生态系统土壤有机碳开展的研究逐渐增加<sup>[5]</sup>。土壤有机碳不仅对全球碳循环有影响,还对土壤质量有影响,主要表现在对土壤肥力水平、结构性状和持水性能等多个方面;一般表现为土壤有机碳含量增加,则土壤质量提升<sup>[6]</sup>。研究发现土壤全氮、碳氮比、阳离子交换量等主要肥力指标,一般与有机碳含量呈正相关<sup>[7]</sup>;土壤 pH 值与有机碳的关系尚不明确,但多数认为在一定界限范围内,两者之间呈负相关<sup>[8]</sup>;关于有机碳与无机碳之间关系的研究结果也不统一,耿元波等<sup>[9]</sup>认为两者间呈负相关,而杨黎芳等<sup>[10]</sup>认为二者呈正相关关系。此外,不同林型土壤有机碳研究表明,森林土壤碳储量一般以天然林最大,天然次生林居中,人工林最小<sup>[11]</sup>;阔叶林的土壤碳储量显著高于针叶林<sup>[12]</sup>;无论是天然林还是人工林,土壤碳储量均随林龄和海拔的增加而增大,随土层深度的增加而减小<sup>[13-15]</sup>。

栎树(*Quercus spp.*)作为我国主要的造林树种之一,广泛分布在温带气候区,现有栎林面积超出 1 800 万 hm<sup>2</sup>,其对维持区域碳平衡作用巨大。近年来,围绕栎林土壤有机碳储量、分布特征、循环机制和土壤呼吸特征等开展的研究虽有很多<sup>[16-18]</sup>,但有关栎林土壤有机碳与土壤理化性质间关系的研究较少,如侯浩<sup>[19]</sup>等在小陇山所做的研究发现中熟、近熟和成熟锐齿栎林土壤有机碳与全氮间呈极显著的线性正相关关系;且迄今为止,并未见到在辽东山区有开展过此类研究的报道。辽宁省现有天然次生林中 60% 的面积为天然次生栎林所占有<sup>[20]</sup>,因此本研究以辽宁辽东半岛国家森林生态系统定位观测研究站(以下简称“辽东半岛森林生态站”)内天然次生栎林为研究

对象,在分析土壤有机碳、全氮、全磷等含量剖面分布特征的基础上,探讨有机碳与理化性质间的关系,以期为实现辽宁乃至全国天然次生栎林土壤有机碳库科学管理提供理论依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区选在辽东半岛森林生态站所辖的本溪市草河口镇(123°54′E,40°52′N)和庄河市仙人洞镇(122°57′E,39°58′N)两个观测区的天然次生栎林样地,两地栎林组成树种基本相同,均为辽东栎(*Quercus wutaishansea* Mary)、蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb)、麻栎(*Quercus acutissima* Caruth.)、栓皮栎(*Quercus variabilis* Bl.)和槲栎(*Quercus aliena* Bl.)等。该站始建于 2009 年,地处温带亚湿润季风气候和温带大陆性气候区,华北、长白植物区系过渡带,土壤类型为棕壤或暗棕壤,pH 4.5~6.5。其中,草河口镇平均海拔约 645 m,年均气温约 6.5℃,降水量约 926 mm,年均日照时数约 2 285 h;仙人洞镇平均海拔约 450 m,年均气温约 9.5℃,年均降水量约 1 000 mm,年均日照时数约 2 480 h。

1.2 样地设置与取样方法

辽东半岛森林生态站建站时,分别在辽东山区本溪市草河口镇、庄河市仙人洞镇布设了面积为 6 hm<sup>2</sup>和 1 hm<sup>2</sup>的天然栎林长期定位观测区。于 2014 年复测各区基本信息见表 1。本研究在两个观测区内随机选取了 17 块样地(包括草河口 12 块、仙人洞 5 块),各块样地大小均为 20 m×20 m。具体取样方法为:在每个样地均依蛇形布设 5 个取样点,分层采集土样(草河口样地按 0—20 cm 和 20—40 cm 取样;仙人洞样地按 0—10,10—20,20—30,30—40 cm 取样)。其中,采取环刀样用以测定土壤容重和孔隙度;应用混合取样法(即将采自同一层次的 5 点土样进行混合)采集土样,经风干、研磨后,过 10 目孔径筛测定黏粒、砂粒、粉粒等物理性质指标含量,过 100 目孔径筛后测定土壤有机碳、全氮等化学性质指标含量。

表 1 样地基本情况

观测区	海拔/m	坡度/(°)	林龄/a	树高/m	胸径/cm	郁闭度	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )
草河口	773	25.3	71	21.2	32.2	0.7	298
仙人洞	177	15.2	55	12.8	26.3	0.7	353

1.3 测定项目与方法

土壤理化性质测定参照《土壤农化分析方法》和《中华人民共和国林业行业标准(LY/T 1952—2011)森林生态系统长期定位观测方法》进行<sup>[21-22]</sup>。具体为土壤容重和孔隙度采用环刀法测定,本研究共取环刀样 220 个(草河口 120 个,仙人洞 100 个);土壤颗粒分级(砂粒 2~0.02 mm、粉粒 0.02~0.002 mm、黏粒<0.002 mm)采用吸管法测定;土壤 pH 值使用 pH 计(PHS—3C,上海精密科学仪器有限公司,中国)测定(土水比 1:2.5);土壤全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定;土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定;土壤全磷含量采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定;土壤速效磷含量采用双酸浸提—钼锑抗比色法测定;土壤全钾含量采用氢氧化钠熔融—原子吸收分光光度法测定;土壤速效钾含量采用乙酸铵浸提—原子吸收分光光度法测定;土壤阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵交换法测定;土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量—外加加热法测定。

1.4 数据处理

本研究所有数据经 Excel 2010 软件处理后,使用 SPSS 16.0 软件中的 *t* 检验、Duncan 检验(显著性水平设定为 0.05)对土壤有机碳、全氮、全磷等剖面含量进行差异显著性分析;采用线性回归对有机碳与其他理化性质间关系进行相关分析。文中所有图表均使用 Excel 2010 绘制。

2 结果与分析

2.1 天然次生栎林土壤有机碳含量的剖面分布特征

由表 2 可知,两观测区天然次生栎林土壤有机碳含量的剖面分布特征相同,均表现为随土层加深而降低的趋势。从表层至 40 cm 土层,草河口观测区(43.70~56.78 g/kg)降幅达 23.57%,仙人洞观测区(20.14~35.82 g/kg)降幅达 43.78%。经 *t* 检验及方差分析结果表明,两观测区表层土壤有机碳含量均显著高于下层

(其中,草河口观测区 0—20 cm 土层是 20—40 cm 土层的 1.31 倍,仙人洞观测区 0—10 cm 土层分别是 10—20、20—30、30—40 cm 土层的 1.14、1.41、1.78 倍)。此外,从表 2 还可看出,相比仙人洞观测区,草河口观测区土壤有机碳的整体含量更高,变异幅度更大,原因主要是地域性差异所致,包括地形、林分密度及林龄等。

表 2 不同观测区天然次生栎林土壤有机碳含量

观测区	土层 深度/cm	平均含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	标准差	变异 系数/%
草河口	0—20	56.78±3.77a	13.05	22.98
	20—40	43.40±3.34b	11.57	26.67
	0—10	35.82±3.34a	7.47	20.84
仙人洞	10—20	31.51±2.16ab	4.82	15.31
	20—30	25.45±1.97bc	4.40	17.28
	30—40	20.14±1.49c	3.32	16.51

注:表中平均含量的表示形式为均值±标准误;草河口和仙人洞观测区的样本数 *n* 分别为 12 和 5;同列不同字母代表同一观测区不同土层间差异显著(*p*<0.05);相同字母代表同一观测区不同土层间差异不显著(*p*>0.05)。下同。

2.2 天然次生栎林土壤理化性质的剖面分布特征

从表 3 可以看出,草河口和仙人洞两个观测区天然次生栎林土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、阳离子交换量的剖面分布特征均相同,都呈现随土层加深而降低的趋势,且经 *t* 检验及方差分析可知,土壤表层含量均显著高于下层,与大多数研究结果相同,符合土壤养分的变化规律。土壤容重随土层加深呈现不断增加的趋势,这是因为森林、尤其是天然林,人为扰动较小,地表枯枝落叶经多年累积,分解后与表层土壤混合,对土壤表层起到疏松作用,减小土壤容重,而这种作用会随着土层加深而逐渐减小,相应的土壤容重逐渐增加。土壤机械组成中以砂粒为主,可占 50.22%~71.33%。此外,同土壤有机碳一样,草河口观测区土壤养分整体含量要明显高于仙人洞观测区。

表 3 不同观测区天然次生栎林土壤理化性质

土壤理化性质	草河口		仙人洞			
	0—20 cm	20—40 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm
pH	5.70±0.10a	5.67±0.07a	4.92±0.05a	4.97±0.04a	5.09±0.10a	5.13±0.09a
全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	3.21±0.40a	2.21±0.25b	1.15±0.12a	1.00±0.09ab	0.87±0.06b	0.91±0.06ab
全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.36±0.04a	0.35±0.04a	0.32±0.01a	0.30±0.01ab	0.28±0.01ab	0.26±0.01b
全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	28.21±0.78a	28.21±0.56a	12.99±0.39a	12.39±0.39a	12.94±0.64a	12.25±0.64a
碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	272.38±30.88a	183.32±20.38b	105.05±12.02a	96.81±8.83a	91.67±2.64a	80.20±3.02a
速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	6.04±0.52a	4.32±0.43b	1.51±0.16a	0.82±0.12b	0.53±0.06bc	0.26±0.03c
速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	114.63±13.88a	74.66±8.47b	94.80±4.52a	79.46±4.52b	72.09±3.83b	67.67±6.27b
阳离子交换量/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	21.67±1.65a	16.95±1.44b	17.19±1.06a	15.82±0.54a	16.17±1.27a	16.25±1.25a
土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.94±0.04a	1.08±0.04b	1.14±0.03a	1.16±0.04a	1.17±0.03a	1.20±0.02a
砂粒/%	51.17±4.43a	50.22±4.06a	71.33±3.50a	69.03±2.64a	70.95±4.07a	68.18±4.70a
粉粒/%	32.34±4.31a	32.29±4.22a	12.12±3.53a	14.34±3.47a	11.87±2.48a	11.96±2.99a
黏粒/%	16.59±1.32a	17.50±1.23a	16.55±0.57a	16.62±1.48a	17.18±2.58a	19.86±2.41a

### 2.3 天然次生柞林土壤有机碳含量与土壤物理性质的关系

天然次生柞林土壤有机碳含量与土壤容重间呈显著负相关关系(图 1), 主要是因为有机碳含量直接决定了有机质含量, 当有机碳含量增加时, 意味着土壤有机质含量增加, 相应的土体结构得到改善, 变得疏松, 即土壤容重减小; 反之, 则土壤容重增加。

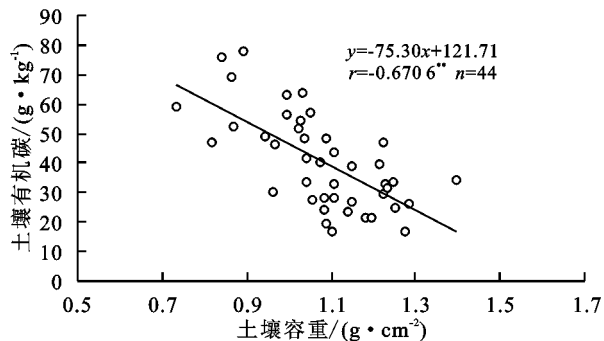


图 1 土壤容重与土壤有机碳的关系

天然次生柞林土壤有机碳含量与粉粒间呈正相关关系, 因为粉粒含量直接关系着土壤结构及物质组成, 高粉粒含量能够促进植被生长, 而植物根系生长能够改善土体环境、加快微生物对植物残体的分解速度, 进而增加土壤有机碳积累; 此外, 还与砂粒间呈负相关, 与黏粒间无显著相关关系(图 2)。

### 2.4 天然次生柞林土壤有机碳含量与土壤化学性质的关系

天然次生柞林土壤有机碳与土壤 pH 的相关分析结果表明, 两者间呈显著正相关关系, 相关系数为 0.6478(图 3)。即 pH 4.81~6.25 范围内, 有机碳含量随着 pH 值的增大而增加。

相关分析表明, 天然次生柞林土壤有机碳含量与全氮和碱解氮含量均呈显著线性正相关(图 4), 相关方程的斜率分别为 11.48 和 0.15, 即每当土壤中全氮变动 1 g、碱解氮变动 1 mg 时, 对应的有机碳变动将分别达到 11.48 g 和 0.15 mg, 而这种变化又会直接影响到土壤中微生物的活动能力, 进而反过来对土壤有机碳积累及碳库储量产生影响。

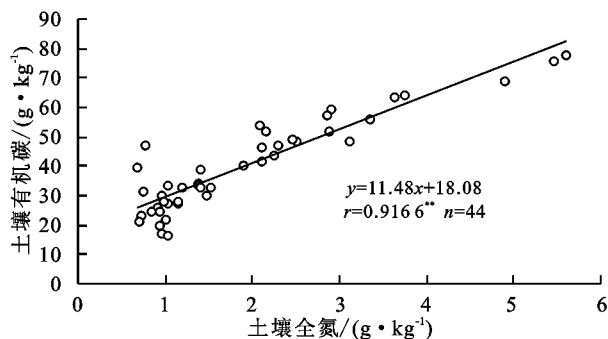


图 4 土壤氮素与土壤有机碳的关系

从图 5 可以看出, 天然次生柞林土壤全磷和速效磷含量均随土壤有机碳含量的增加(图 5), 即表

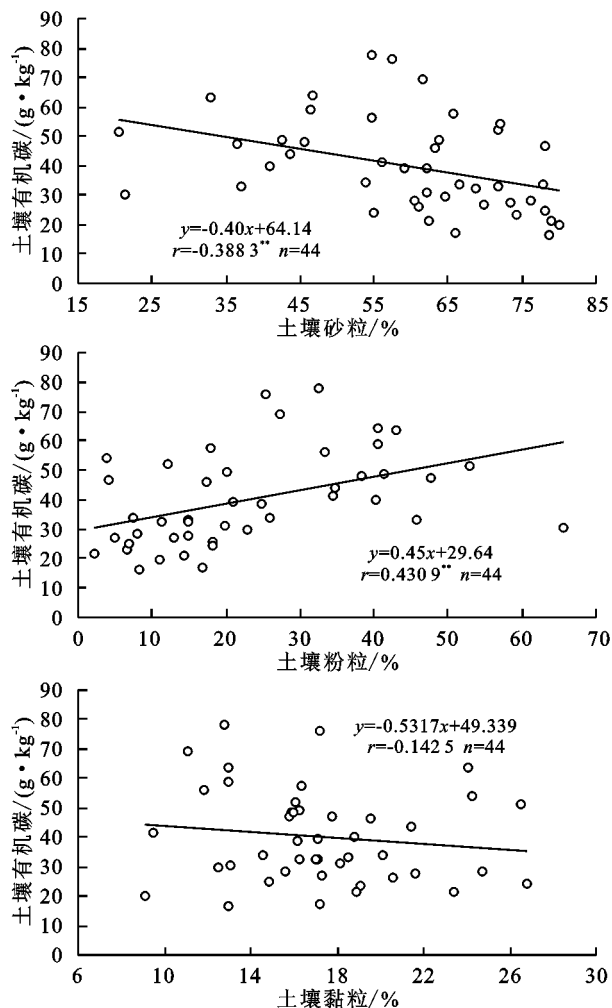


图 2 土壤质地与土壤有机碳的关系

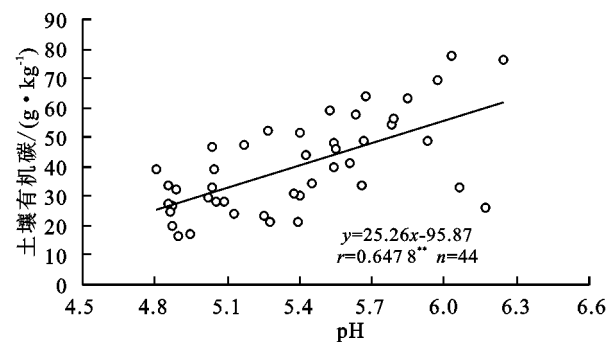
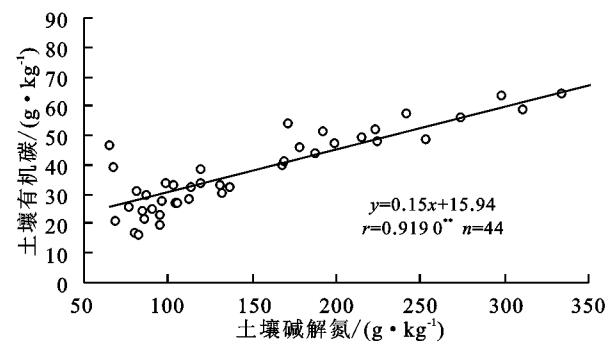
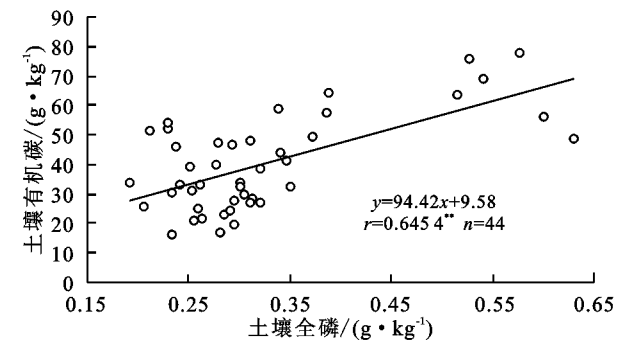


图 3 土壤 pH 与土壤有机碳的关系



现为正相关趋势、且经相关性检验该趋势显著, 其中有有机碳与速效磷的相关性( $r=0.7750$ )大于全磷

( $r=0.6454$ )。相关方程的斜率分别为 94.42 和 4.69,意味着每当土壤中全磷变动 1 g、速效磷变



动 1 mg 时,对应的有机碳变动将分别达到 94.42 g 和 4.69 mg。

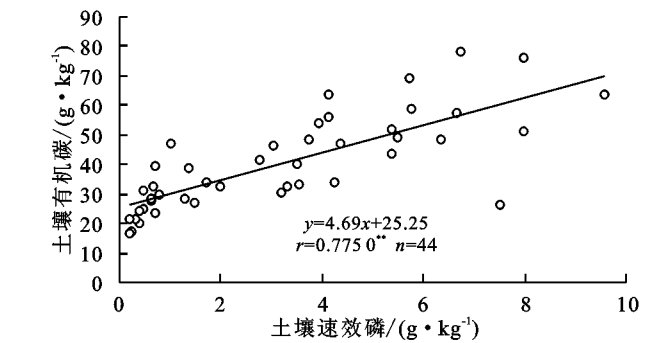
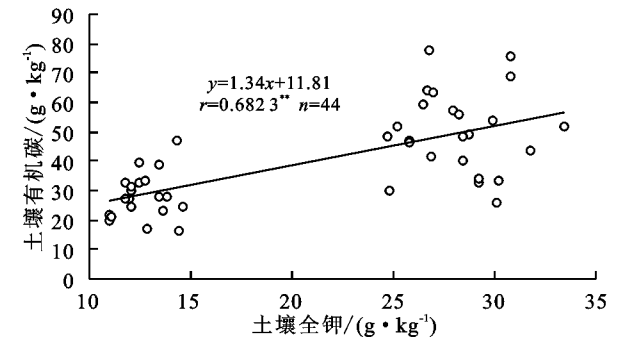


图 5 土壤磷素与土壤有机碳的关系

从图 6 可知,对天然次生柞林土壤有机碳与全钾、速效钾关系进行分析可知,有机碳与全钾和速效钾之间均存在显著线性正相关关系,相关方程和系数



分别为:  
 $y=1.34x+11.81, r=0.6823$  和  $y=0.27x+16.52, r=0.5910$ 。

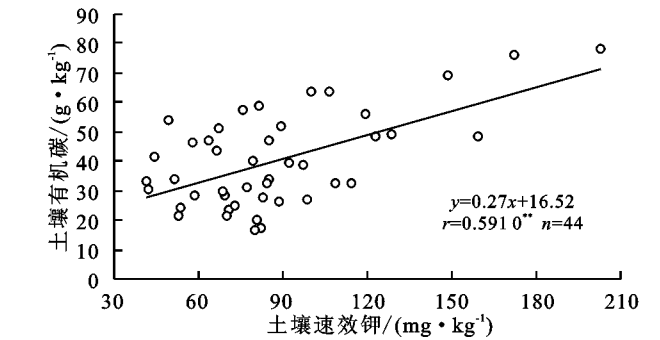


图 6 土壤钾素与土壤有机碳的关系

土壤阳离子交换量(CEC)是指吸附在土壤胶体表面、能够被土壤溶液中阳离子所交换替代的所有阳离子总量,其大小可以表征土壤保肥能力。本研究结果表明天然次生柞林土壤有机碳含量与土壤阳离子交换量呈显著正相关关系(图 7),相关系数为 0.6943,方程为  $y=2.33x-1.62$ 。

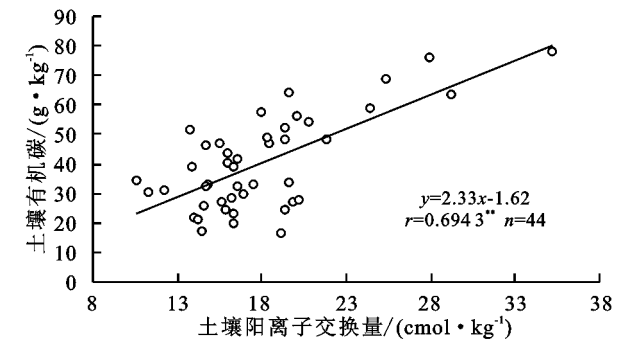


图 7 土壤阳离子交换量与土壤有机碳的关系

3 结论与讨论

本研究结果表明,天然次生柞林土壤有机碳含量与土层深度的变化趋势相同,即随之加深而降低,两观测区内土壤有机碳含量的变化范围为 20.14~56.78 g/kg,表层至 40 cm 土层,草河口观测区降幅达 23.57%,仙人洞观测区降幅达 43.78%,随土层变化的结果与绝大多数研究者观点一致<sup>[23-24]</sup>。土壤有机碳含量随剖

面加深而递增的原因主要与枯落物归还土壤数量、植物根系分布特征及其分泌物数量、土壤微生物种群数量及活性等因素密切相关,天然次生林,人为扰动较小,林木及林下灌木、草本等植被的枯落物经年累积,使得地表覆盖了厚度很大的枯枝落叶层,蓄积了大量的有机碳,经微生物分解及降水淋洗等作用进入土体,伴随土层不断加深,土壤容重增加(对此本研究有证实),不利于植物根系生长、微生物活动以及有机碳向下淋溶迁移,致使土壤有机碳含量出现明显降低趋势。同时,本研究采自两个观测区的土壤,其有机碳含量差异明显(草河口观测区平均含量 50.09 g/kg,仙人洞观测区平均含量 28.23 g/kg),亦与刘金福等<sup>[25]</sup>在福建测定的结果(平均含量 17.60 g/kg)不同,原因可能与测定区域选择、土壤取样点位置以及数量、林龄、林分结构等因素不同有关。

土壤作为森林生态系统组成物质基础,其基本理化性质直接关系着其上森林的生长状况,影响着森林生态价值的高低。本研究结果表明,随土层深度的增加,天然次生柞林土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、阳离子交换量均呈现逐渐降低趋势,而容重呈增加趋势,这符合多数研究所得土壤理化性质的剖面变化规律<sup>[26]</sup>。相关分析结果表明,天然柞林土

壤有机碳与多数土壤理化性质间相关性显著。土壤有机碳与容重间呈极显著负相关关系,同祖元刚等<sup>[27]</sup>研究结果相同;与粉粒间呈正相关关系,同丁咸庆等<sup>[28]</sup>研究结果一致;与砂粒间呈负相关、与黏粒间无显著相关性,这同周慧杰等<sup>[29]</sup>研究结果不一致,可能原因是研究区域、林分类型、气候条件等不同所致;与阳离子交换量间呈显著正相关关系,同徐薇薇等<sup>[30]</sup>研究结果一致;与全氮、碱解氮间呈显著正相关关系,同王丹等<sup>[31]</sup>研究结果一致;与全钾、速效钾间呈显著正相关关系,同李萍<sup>[32]</sup>研究结果相同;与全磷、速效磷间显著正相关关系,这同周慧杰等<sup>[29]</sup>研究结果相反,原因可能是土壤磷素含量虽与土壤有机碳含量紧密相关,但其更多的是受土壤质地的影响,黏粒对土壤全磷、速效磷都有极强的吸附作用,其才是决定土壤中磷素含量高低的主要性因素<sup>[33]</sup>,当然这种观点同样需要后续开展研究予以验证。此外,本研究认为有机碳与 pH 间呈显著正相关关系,这与祖元刚等<sup>[27]</sup>结果相反,原因主要是本文所做研究 pH 范围为 4.8~6.2、偏酸性,而祖元刚等所做研究 pH 范围多在 6.5~10.5 之间,偏碱性,但他同时推断得出单位 pH 改变对偏酸性土壤影响要大于偏碱性土壤的结果,在一定程度上又证实了本研究成果。结合两个研究结果看,土壤 pH 过大或过小均不利于土壤有机碳积累,主要是因为土壤酸碱度直接影响微生物的数量及活性,而对有机碳来源物质起决定分解作用的细菌适宜 pH 为中性偏碱<sup>[34]</sup>。

综上所述,为确定众多土壤理化性质指标对有机碳影响的贡献程度,进行逐步回归分析,得出方程:

$$y = 23.379 + 0.093x_1 + 0.673x_2 + 0.657x_3 - 7.580x_4 + 6.115x_5, r = 0.9917$$

式中:  $x_1 \sim x_5$  分别代表碱解氮、碳氮比(C/N)、全钾、pH、全氮,这与曹小玉等<sup>[35]</sup>研究结果类似。原因是土壤碳氮含量、及酸碱度(pH)直接决定了土壤微生物的活动能力,适宜的 C/N 和 pH 能够促进微生物对有机物质的分解,从而增加土壤有机碳含量。

#### 参考文献:

- [1] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1):2-3.
- [2] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2):423-436.
- [3] Lal R, Kimble J, Mtimet A, et al. Global climate change and pedogenic carbonate[M]. New York: Lewis Publishers, 2000.
- [4] Fantappie M, Costantini E A C. The influence of climate change on the soil organic carbon content in Italy from 1961 to 2008[J]. *Geomorphology*, 2011, 135(3/4): 343-352.
- [5] Yang Y S, Guo J F, Chen G H, et al. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China[J]. *Plant and Soil*, 2009, 323(1):153-162.
- [6] 徐薇薇, 乔木. 干旱区土壤有机碳含量与土壤理化性质相关分析[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6):1558-1561.
- [7] 王文艳, 张丽萍, 刘俏. 黄土高原小流域土壤阳离子交换量分布特征及影响因子[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5):123-127.
- [8] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系析[J]. *生态学报*, 2005, 25(3):513-519.
- [9] 耿元波, 罗光强, 袁国富, 等. 农垦及放牧对温带半干旱草原土壤碳素的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6):2518-2523.
- [10] 杨黎芳, 李贵桐, 赵小蓉, 等. 栗钙土不同土地利用方式下有机碳和无机碳剖面分布特征[J]. *生态环境*, 2007, 16(1):158-161.
- [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] Wang Q K, Wang S L. Soil organic matter under different forest types in Southern China[J]. *Geoderma*, 2007, 142(3/4):349-356.
- [13] Luan J W, Liu S R, Zhu X L, et al. Soil carbon stocks and fluxes in a warm-temperate oak chronosequence in China[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1):243-253.
- [14] Xu X, Zhou Y, Ruan H H, et al. Temperature sensitivity increases with soil organic carbon recalcitrance along an elevational gradient in the Wuyi Mountains, China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10):1811-1815.
- [15] 向成华, 栾军伟, 骆宗诗, 等. 川西沿海拔梯度典型植被类型土壤活性有机碳分布[J]. *生态学报*, 2010, 30(4):1025-1034.
- [16] 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.
- [17] Schindlbacher A, Rodler A, Kuffner M, et al. Experimental warming effects on the microbial community of a temperate mountain forest soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(7):1417-1425.
- [18] Law B E, Ryan M G, Anthoni P M. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(2):169-182.
- [19] 侯浩, 张宋智, 关晋宏, 等. 小陇山不同林龄锐齿栎林土壤有机碳和全氮积累特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(24):1-9.
- [20] 尤文忠, 赵刚, 张慧东, 等. 抚育间伐对蒙古栎次生林生长的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(1):56-64.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.