

DOI: 10.5846/stxb201311032655

王 棣, 耿增超, 余 雕, 和文祥, 侯琳. 秦岭典型林分土壤有机碳储量及碳氮垂直分布. 生态学报, 2015, 35(16): 5421-5429.

Wang D, Geng Z C, She D, He W X, Hou L. Soil organic carbon storage and vertical distribution of carbon and nitrogen across different forest types in the Qinling Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5421-5429.

## 秦岭典型林分土壤有机碳储量及碳氮垂直分布

王 棣<sup>1</sup>, 耿增超<sup>1,\*</sup>, 余 雕<sup>2</sup>, 和文祥<sup>1</sup>, 侯 琳<sup>3</sup>

1 西北农林科技大学资源环境学院, 杨陵 712100

2 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨陵 712100

3 西北农林科技大学林学院, 杨陵 712100

**摘要:**以秦岭典型林分锐齿栎(马头滩林区)、油松、华山松、松栎混交林、云杉、锐齿栎(辛家山林区)为对象,研究了不同林分土壤剖面上有机碳、全氮、有机碳储量的分布规律。结果表明:在秦岭地区,随着土壤剖面深度增加,不同林分的土壤有机碳、全氮含量均逐渐降低;不同林分的土壤有机碳、氮素的积累和分解存在一定差异。其中,云杉和松栎混交林的土壤有机碳、全氮含量较高,锐齿栎(辛家山林区)含量较低,不同林分土壤剖面有机碳、全氮含量平均值分别为 13.46—26.41 g/kg、4.47—9.51 g/kg,大小顺序均为云杉>松栎混交林>锐齿栎(马头滩林区)>油松>华山松>锐齿栎(辛家山林区);各个林分的土壤 C/N 在 5.93—15.47 之间, C/N 平均值大小为松栎混交林>华山松>油松>云杉>锐齿栎(辛家山林区)>锐齿栎(马头滩林区);各个林分 0—60 cm 土层的土壤有机碳储量大小为云杉>锐齿栎(马头滩林区)>松栎混交林>华山松>锐齿栎(辛家山林区)>油松,分别为 150.94、135.28、124.93、109.24、102.15、96.62 t/hm<sup>2</sup>;各个林分土壤有机碳含量与土壤全氮含量存在极显著正相关,土壤有机碳、全氮与 C/N 则没有明显相关性。

**关键词:**垂直分布;有机碳储量;土壤有机碳;全氮

## Soil organic carbon storage and vertical distribution of carbon and nitrogen across different forest types in the Qinling Mountains

WANG Di<sup>1</sup>, GENG Zengchao<sup>1,\*</sup>, SHE Diao<sup>2</sup>, HE Wenxiang<sup>1</sup>, HOU Lin<sup>3</sup>

1 College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

3 College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

**Abstract:** The main forest areas of Shaanxi Province lie in the Qinling Mountains. These forests have important ecological and economic significance. The distribution patterns of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and SOC storage in the soil profiles have not been systematically studied. The objective of this study was to estimate SOC, TN, and SOC storage for six forest types in the Matoutan forest farm and in the Xinjiashan forest farm of the Qinling mountain range. All forest types in this study were natural secondary forests: namely *Quercus aliena* var *acuteserrata* (Matoutan forest farm), *Pinus tabulaeformis* Carr, *Pinus armandii* Franch, pine-oak mixed forest, *Picea asperata* Mast, and *Quercus aliena* var *acuteserrata* (Xinjiashan forest farm). Five replicate samples were taken in an “S” pattern for each forest type. The profiles were divided into 0—10, 10—20, 20—40, and 40—60 cm groups and then sampled, summing up to 72 soil samples. The physical and chemical properties of the soils were measured using conventional methods. The results were analyzed using univariate analysis of variance. Differences among forest types and soil horizons were analyzed with SPSS statistics 18.0. The

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201304307)

收稿日期:2013-11-03; 网络出版日期:2014-10-08

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gengzengchao@126.com

results showed that the content of SOC and TN of different soil layers decreased with increasing soil depth in all six soil profiles. The accumulation and decomposition of SOC and TN differed between forest types. Among the six forest types, the SOC and TN contents of *Picea asperata* Mast and *pine-oak* mixed forest were higher than in the others, and that of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* (Xinjiashan forest farm) was the lowest. The SOC and TN content in the intervals of the six forest soils were 13.46—26.41 g/kg and 4.47—9.51 g/kg, respectively, and the order was *Picea asperata* Mast > *pine-oak* mixed forest > *Quercus aliena* var. *acuteserrata* (Matoutan forest farm) > *Pinus tabulaeformis* Carr > *Pinus armandii* Franch > *Quercus aliena* var. *acuteserrata* (Xinjiashan forest farm). The ratio of carbon to nitrogen (C/N) ranged from 5.93 to 15.47, the mean C/N was in the order of *pine-oak* mixed forest > *Pinus armandii* Franch > *Pinus tabulaeformis* Carr > *Picea asperata* Mast > *Quercus aliena* var. *acuteserrata* (Xinjiashan forest farm) > *Quercus aliena* var. *acuteserrata* (Matoutan forest farm). SOC storage of the 0—60 cm layer of the six soils was 150.94 t/hm<sup>2</sup> for *Picea asperata* Mast > 135.28 t/hm<sup>2</sup> for *Quercus aliena* var. *acuteserrata* (Matoutan forest farm) > 124.93 t/hm<sup>2</sup> for *pine-oak* mixed forest > 109.24 t/hm<sup>2</sup> for *Pinus armandii* Franch > 102.15 t/hm<sup>2</sup> for *Quercus aliena* var. *acuteserrata* (Xinjiashan forest farm) > 96.62 t/hm<sup>2</sup> for *Pinus tabulaeformis* Carr, which was greater than the national average SOC storage (96.0 t/hm<sup>2</sup>). SOC storage was influenced by SOC content, soil bulk density (BD), soil thickness, and volume of gravel; therefore, the distribution regularity in the soil profile was poorer. Correlation analysis showed that there were highly significant positive correlations between SOC and TN, but no significant correlations between C/N and SOC and TN.

**Key Words:** vertical distribution; soil carbon storage; soil organic carbon; total nitrogen

土壤作为森林生态系统生命活动的主要场所,为森林生长提供养分<sup>[1]</sup>。森林土壤中的碳占全球土壤有机碳的 73%<sup>[2]</sup>,森林土壤中的氮素含量超过森林生态系统总氮量的 85%<sup>[3]</sup>。土壤有机质和氮素是土壤养分的重要组成部分,也是生态系统中及其重要的生态因子<sup>[4]</sup>,其含量的多少会影响整个生态系统的稳定性和持续性,影响全球生态系统中大气二氧化碳浓度和碳氮循环。土壤有机质是反映土壤质量和土壤健康的一个重要指标,其含量多少直接影响着土壤中的物理、化学和生物过程以及土壤肥力和土地生产力<sup>[5]</sup>。氮素作为一种大量营养元素,在物质循环中也扮演着非常重要的角色<sup>[6-8]</sup>。在森林生态系统中,生物对氮的需求量往往大于土壤有机氮矿化速率,所以森林生态系统通常表现为氮缺乏型<sup>[9]</sup>。揭示土壤有机质和全氮的空间变异规律和分布特征对实现土壤资源的合理利用和可持续发展具有重要意义<sup>[10]</sup>。

森林是地球上最大的陆地碳库,约占陆地总碳库的 46%,对全球碳循环和碳平衡至关重要。森林土壤碳库是森林生态系统碳库的主体,包括无机碳库和有机碳库两部分。森林土壤无机碳贮量相对较小且变动不大,森林土壤的有机碳贮量约为 787 PgC,约占全球土壤有机碳贮量的 39%,大约为森林生态系统有机碳库的 2/3<sup>[11]</sup>。由于森林土壤有机碳贮量的巨大库容,其较小幅度的变化就可能有大量的碳向大气排放,并通过温室效应影响全球气候变化。

本研究以秦岭地区典型林分为研究对象,比较研究了不同林分土壤剖面上土壤有机碳、全氮和有机碳贮量的分布,并分析了不同林分土壤剖面有机碳、全氮和有机碳贮量分布差异,以及碳氮的变化规律,以期为该地区生态环境的研究提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域包括秦岭马头滩(34°04'—34°35'N, 106°54'—107°11'E)和辛家山(34°10'—34°20'N, 106°28'—106°38'E)所辖林区。其中马头滩林区位于秦岭西部主梁两侧,属秦岭腹地,林地总面积为 34668 hm<sup>2</sup>,海拔 1500—2650 m<sup>[12]</sup>;境内属北亚热带北缘暖温带山地湿润气候区,气候垂直变化明显,小气候差异大,光热条件不足,降水集中,分布不均;气温日差大,年平均气温 11 °C,年降水量 600—900 mm。林区森林植被垂直分布

明显,构成林分的优势树种有冷杉(*Abies holophylla*)、华山松(*Pinus armandii* Franch)、红桦(*Betula albo-sinensis* Burk)、栎类(*Quercus* Linn)等。辛家山林区位于秦岭西部南坡,秦岭主梁南侧嘉陵江上游,境内属暖温带半湿润山地气候区,由于山地高差悬殊,气候垂直变化明显,小气候差异大,年平均气温 7.6 ℃,年平均降雨量 900 mm,多集中于 7、8、9 月。该区域森林覆盖率 96.8%,林区资源丰富,主要树种为冷杉(*Abies* Mill)、云杉(*Picea asperata*)、红桦(*Betula albo-sinensis* Burk)、锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、辽东桦(*Betula schmidtii*)、华山松(*Pinus armandii* Franch)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、漆树(*Toxicodendron succedaneum*)、山杨(*Populus davidiana*)等。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 样品的采集和处理

在研究区域内进行实地勘察,依据典型林分的分布情况选定 6 个样地,根据实际环境条件,确定样地大小为 60 m×40 m,样地基本概况参见表 1。在各样地内设置 3 个面积为 20 m×20 m 的样方作为重复,在各个样方内按照 S 型布点法选择 5 个采样点,除去地表凋落物后进行采样,采样深度为 60 cm。每个采样点按 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 将土壤剖面分 4 层,每层取环刀测定土壤容重,最后,将每个样方内各采样点的土样按层混合均匀,作为分析样品带回实验室,共计 72 份土样。土样带回实验室后,置于通风、阴凉、干燥的室内风干,以四分法取样磨细并过筛(孔径:2 mm、1 mm、0.25 mm),备用<sup>[13]</sup>。

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic status of sampling plots

林分类型 Forest type	林区 Forest zone	林分起源 Origin of forest	林龄/a Age	海拔/m Elevation	地理位置 Position	坡位 Slope position	土壤类型 Soil type
锐齿栎 <i>Quercus aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	马头滩林区	天然次生林	40	1777	N 34°13'34.5" E 106°59' 30.7"	南坡	棕壤
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr	马头滩林区	天然次生林	40	1591	N 34°13'26.5" E 106°59' 12.3"	南坡	棕壤
华山松 <i>Pinus armandii</i> Franch	马头滩林区	天然次生林	40	1605	N 34°13' 14.0" E 106°59' 3.7"	南坡	棕壤
松栎混交林 Pine-oak mixed forest	马头滩林区	天然次生林	38	1653	N 34°13' 18.5" E 106°59' 15.1"	南坡	棕壤
云杉 <i>Picea asperata</i> Mast	辛家山林区	天然次生林	40	2175	N 34°16' 51.4" E 106°31' 38.0"	南坡	暗棕壤
锐齿栎 <i>Quercus aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	辛家山林区	天然次生林	38	1639	N 34°12' 46" E 106°35' 12"	南坡	棕壤

### 1.2.2 样品理化指标的测定

土壤各项理化指标的测定均采用常规方法,并作 3 次平行。其中,土壤容重采用环刀法,pH 采用电位法(水:土=2.5:1),土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加加热法,全氮含量采用半微量凯氏法。

土壤水分采用(105±2)℃烘箱烘干法,计算公式为:

$$\text{土壤含水量} = (W_{\text{湿}} - W_{\text{干}}) / (W_{\text{干}} - W) \quad (1)$$

式中, $W_{\text{湿}}$ 为湿土重+铝盒重(g); $W_{\text{干}}$ 为干土+铝盒重(g); $W$ 为铝盒重(g)。

土壤砾石体积含量采用排水法<sup>[14-15]</sup>,待测定完土壤容重后,将环刀内的土壤过 2 mm 土壤筛,然后用清水洗净砾石表面的土壤颗粒,再将其表面水分凉干后用量杯(精度 0.5 mL)通过排水法测定砾石体积,用以计算土壤砾石的体积含量。

土壤剖面有机碳储量用下列公式计算<sup>[16-18]</sup>:

$$C_{\text{so}} = C \times D \times E \times (1 - G) / 10 \quad (2)$$

式中, $C_{\text{so}}$ 为土壤有机碳储量(t/hm<sup>2</sup>), $C$ 为土壤有机碳含量(g/kg), $D$ 为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>), $E$ 为土层厚度(cm), $G$ 为直径>2 mm 的石砾所占的体积比例(%)。

土壤 C/N 计算公式如下:

$$C/N = \text{有机碳} / \text{全氮} \quad (3)$$

### 1.2.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 和 Spss18.0 进行数据处理和制图,应用单因素方差分析法(one-way ANOVA)分析不同样地间各指标的差异显著性,采用双变量相关分析法计算各项理化性质两两之间的 Pearson 相关系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳的剖面分布

土壤有机碳不仅影响土壤的物理特性和肥力,还影响生物的生长和产量,其含量多少能为土壤生产力、土壤水文特性和以碳为基础的温室气体研究提供非常重要的信息<sup>[19-20]</sup>。

由表 2 可知,不同林分的土壤有机碳含量随土层深度的增加不断减小。除松栎混交林的 0—10 cm 土层与 10—20 cm 土层、锐齿栎(辛家山林区)的 20—40 cm 土层与 40—60 cm 土层的有机碳含量差异不显著外,其余样地的土壤有机碳含量在各土层间均表现为显著性差异。

松栎混交林 0—10 cm 土层的有机碳含量为 44.10 g/kg,是所有土层中的最大值,其它林分的 0—10 cm 土层的有机碳含量在 22.73—42.37 g/kg 之间,华山松的 0—10 cm 土层的有机碳含量最低,为 22.73 g/kg。各个林分的 0—10 cm 土层的有机碳含量占土壤剖面的 40.11%—53.74%,这与耿增超等<sup>[21]</sup>人的研究结果一致,说明了土壤有机碳的分布具有比较明显的表聚现象。

通过对不同林分的比较发现,松栎混交林土壤剖面的有机碳含量变化幅度最大,从 0—10 cm 土层的 44.10 g/kg 减小为 40—60 cm 土层的 4.88 g/kg。不同林分间的土壤有机碳含量存在较大的差异,这主要是受到成土过程中的环境特点和植被类型等方面的影响<sup>[22]</sup>。在整个剖面上,云杉和松栎混交林的土壤有机碳含量保持了一个相对较高的水平,不同林分的有机碳含量平均值大小为云杉(26.41 g/kg) > 松栎混交林(26.22 g/kg) > 锐齿栎(马头滩林区)(21.01 g/kg) > 油松(14.22 g/kg) > 华山松(13.66 g/kg) > 锐齿栎(辛家山林区)(13.46 g/kg)。

表 2 典型林分不同土层有机碳含量/(g/kg)  
Table 2 SOC content at different soil depth in different forest types

土层深度/cm Soil depth	锐齿栎 (马头滩林区) <i>Quercus aliena</i> <i>var acuteserrata</i> (MaToutan forest)	油松 <i>Pinus</i> <i>tabulaeformis</i> Carr	华山松 <i>Pinus armandii</i> Franch	松栎混交林 <i>Pine-oak mixed</i> <i>forest</i>	云杉 <i>Picea asperata</i> <i>Mast</i>	锐齿栎 (辛家山林区) <i>Quercus aliena var</i> <i>acuteserrata</i> (XinJiashan forest)
0—10	40.69±2.16aA	30.57±1.66aB	22.73±1.14aC	44.10±0.45aA	42.37±1.25aA	25.98±1.42aC
10—20	22.75±1.44bC	15.71±1.27bD	14.98±0.72bD	43.83±0.87aA	33.38±0.53bB	11.70±0.51bE
20—40	16.58±1.58cB	6.48±0.28cD	11.97±1.72 cC	12.09±0.89bC	21.05±1.34cA	8.22±0.69cD
40—60	4.01±0.32dB	4.12±0.98dB	4.96±6.74dB	4.88±0.34cB	8.84±1.62dA	8.16±0.35cA

列中小写字母相同表示同一林分不同土层之间差异不显著( $P>0.05$ ),反之差异显著( $P<0.05$ );行中大写字母相同表示同一土层不同林分之间差异不显著( $P>0.01$ ),反之差异显著( $P<0.01$ )

### 2.2 土壤全氮的剖面分布

氮是森林生态系统生产力构成的重要因素,是植物生长发育的必需元素,且 90% 以上的氮存在于森林土壤中<sup>[23]</sup>。

由表 3 可知,各个林分的土壤全氮含量随着土层深度增加不断减少。除华山松外,其余林分的土壤剖面至少有 3 个土层的全氮含量表现为显著性差异,锐齿栎(马头滩林区)、松栎混交林、云杉土壤剖面的各个土层均表现为差异性显著,这与土壤有机碳的土壤剖面垂直分布规律相似,这可能是因为土壤中大部分氮素以

有机态存在,有机碳对全氮分布的影响比较重要<sup>[24]</sup>。

各个林分 0—10 cm 土层的全氮含量在 1.64—3.45 g/kg 之间,除锐齿栎(马头滩林区)0—10 cm 土层的全氮含量与松栎混交林、云杉的 0—10 cm 土层的全氮含量差异不显著外,其余各个林分的 0—10 cm 土层的全氮含量均表现为差异显著。云杉的 0—10 cm 土层的全氮含量为 3.45 g/kg,是所有林分 0—10 cm 土层中的最大值,其它林分的 0—10 cm 土层的全氮含量在 1.64—3.34 g/kg 之间,华山松的 0—10 cm 土层的全氮含量最低,为 1.64 g/kg。各个林分的 0—10 cm 土层的全氮含量占土壤剖面的 33.81%—46.13%,由此可知土壤全氮的表聚现象相对土壤有机碳较差。

在整个土壤剖面上,云杉和松栎混交林全氮含量相对较高,锐齿栎(辛家山林区)的全氮含量相对较低,各个林分土壤剖面全氮含量大小为云杉(9.51 g/kg)>松栎混交林(7.59 g/kg)>锐齿栎(马头滩林区)(7.55 g/kg)>油松(5.18 g/kg)>华山松(4.85 g/kg)>锐齿栎(辛家山林区)(4.47 g/kg),这与各个林分间土壤有机碳含量的分布情况一致。

表 3 典型林分不同土层全氮含量/(g/kg)

Table 3 Contents of total nitrogen at different soil depth in different forest types

土层深度/cm Soil depth	锐齿栎 (马头滩林区) <i>Quercus aliena</i> <i>var acuteserrata</i> (MaToutan forest)	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr	华山松 <i>Pinus armandii</i> Franch	松栎混交林 Pine-oak mixed forest	云杉 <i>Picea asperata</i> Mast	锐齿栎 (辛家山林区) <i>Quercus aliena var</i> <i>acuteserrata</i> (XinJiashan forest)
0—10	3.34±0.15aAB	2.39±0.03aC	1.64±0.01aE	3.13±0.06aB	3.45±0.03aA	1.98±0.12aD
10—20	1.98±0.03bB	1.78±0.35bBC	1.51±0.21aC	2.83±0.06bA	2.92±0.01bA	0.94±0.18bD
20—40	1.56±0.02cB	0.66±0.08cD	0.92±0.02bC	0.96±0.11cC	2.24±0.07cA	0.89±0.11bcC
40—60	0.67±0.04dB	0.35±0.08cC	0.78±0.01bAB	0.67±0.01dB	0.90±0.09dA	0.66±0.02cB

列中小写字母相同表示同一林分不同土层之间差异不显著( $P>0.05$ ),反之差异显著( $P<0.05$ );行中大写字母相同表示同一土层不同林分之间差异不显著( $P>0.01$ ),反之差异显著( $P<0.01$ )

### 2.3 土壤 C/N 的变化

C/N 是指土壤有机质中的有机碳总量和氮素总量之比,其大小可反映有机质的分解状况,被认为是氮素矿化能力的标志<sup>[25]</sup>。一般认为微生物在生命活动过程中,需要土壤最佳的 C/N 约为 25:1,即 C/N 越接近 25:1 时越有利于有机质的转化,C/N 比 25:1 小时,有机质不仅易转化,还可以为土壤提供充足的氮素;C/N 大于 25:1 时,有机质较难转化,而且会出现微生物与植物的争氮现象,但却有利于土壤有机质的积累<sup>[26]</sup>。

由图 1 可知,供试林分 6 个土壤剖面的 C/N 基本在 5.93—15.47 之间,均小于 25:1,表明各个样地土壤腐殖化程度较高,氮素的矿化能力较强。一般来说,土壤 C/N 范围大致位于 2—70 之间,在此范围之外的 C/N 在其他分析中应做为特殊值处理<sup>[17]</sup>。该试验中的 C/N 均处在正常合理范围内,说明各个林分土壤有效氮的释放能力较强。锐齿栎(马头滩林区)和锐齿栎(辛家山林区)的 C/N 随着土壤剖面深度增加不断减小,符合土壤 C/N 在剖面的一般变化规律<sup>[27]</sup>,然而,其他林分的规律性则没有那么明显。各个林分的 0—10 cm 土层的 C/N 以松栎混交林最大,大小为 14.06,但松栎混交林的 10—20 cm 土层的 C/N 却为其剖面的最大值,其它林分的以 0—10 cm 土层的 C/N 为各自剖面的最大值。各个林分 C/N 平均值大小为松栎混交林(12.33)>华山松(10.75)>油松(10.71)>云杉(10.70)>锐齿栎(辛家山林区)(10.58)>锐齿栎(马头滩林区)(10.02)。

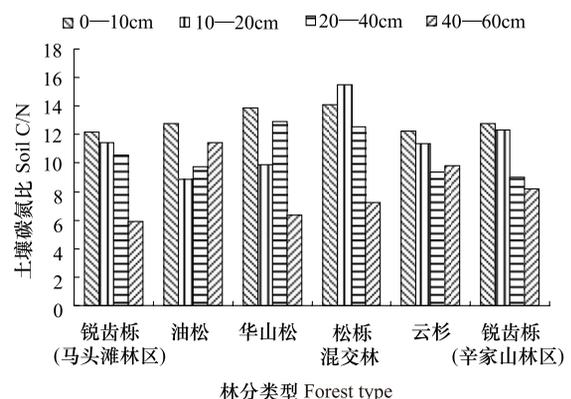


图 1 典型林分土壤碳氮比

Fig.1 Soil C/N in different forest types

## 2.4 土壤有机碳储量的剖面分布

由表 4 可知,各个林分土壤有机碳储量差异显著,各个林分 0—60 cm 土壤有机碳储量大小为云杉>锐齿栎(马头滩林区)>松栎混交林>华山松>锐齿栎(辛家山林区)>油松,其有机碳储量分别为 150.94、135.28、124.93、109.24、102.15、96.62 t/hm<sup>2</sup>,各个林分土壤有机碳储量均大于全国土壤平均碳储量(96.0 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[28]</sup>。各个林分 0—10 cm 土层的有机碳储量百分比大小顺序为:油松(39.92%)>锐齿栎(辛家山林区)(34.59%)>锐齿栎(马头滩林区)(34.29%)>松栎混交林(31.21%)>华山松(29.83%)>云杉(23.98%)。各个林分 0—20 cm 土层的土壤有机碳储量占各自剖面土壤有机碳总储量的 46%以上,这与梁启鹏等<sup>[29]</sup>的研究结果一致,表明土壤有机碳储量具有比较明显的表聚现象。除油松的土壤有机碳储量表现为随土层深度增加不断减小外,其余林分的土壤有机碳储量随土层变化规律性较差,各土层有机碳储量变化幅度不同,且表现出较大的波动性,个别林分的土壤有机碳储量甚至表现为随着土层深度增加而增加的趋势。

表 4 典型林分土壤有机碳储量/(t/hm<sup>2</sup>)

Table 4 SOC storage at different soil depth in different forest types

土层深度/cm Soil depth	锐齿栎 (马头滩林区) <i>Quercus aliena</i> var <i>acuteserrata</i> (MaToutan forest)	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr	华山松 <i>Pinus armandii</i> Franch	松栎混交林 Pine-oak mixed forest	云杉 <i>Picea asperata</i> Mast	锐齿栎 (辛家山林区) <i>Quercus aliena</i> var <i>acuteserrata</i> (XinJiashan forest)
0—10	46.39±2.46aA	38.18±2.07aB	32.59±1.63aC	38.98±0.41aB	36.61±1.14bBC	35.34±1.13aBC
10—20	28.88±1.83bC	22.78±1.84bD	21.95±1.06bD	41.24±0.82aA	34.19±0.58bcB	17.32±0.71dE
20—40	47.63±4.54aA	20.36±0.88bD	36.99±5.34aB	30.97±2.28bBC	56.99±1.37aA	22.94±1.97cCD
40—60	12.38±0.99cB	14.31±0.34cB	17.07±4.86bB	13.72±0.97cB	25.66±6.68cA	27.53±1.20bA

列中小写字母相同表示同一林分不同土层之间差异不显著( $P>0.05$ ),反之差异显著( $P<0.05$ );行中大写字母相同表示同一土层不同林分之间差异不显著( $P>0.01$ ),反之差异显著( $P<0.01$ )

## 2.5 土壤有机碳、全氮与土壤容重、含水率、pH 值、有机碳、全氮、C/N 相关性

以研究区域内各个林分及各土壤层次的平均值进行相关性分析。

由表 5 可知,秦岭地区各个林分的土壤有机碳含量与土壤全氮含量存在极显著正相关,相关系数在 0.879—0.992 之间,各个林分土壤有机碳含量与土壤 pH 存在极显著负相关,相关系数在 -0.839—-0.975 之间。除锐齿栎(辛家山林区)土壤有机碳含量与土壤容重无明显相关性外,其余林分土壤有机碳含量与土壤容重相关性显著,松栎混交林达到极显著水平。除油松、云杉土壤有机碳含量与土壤含水量显著正相关外,其余林分土壤有机碳含量与土壤含水量无明显相关性。此外,各个林分土壤有机碳含量与土壤 C/N 无明显相关性。

表 5 土壤有机碳与土壤容重、含水率、pH、全氮、C/N 相关系数

Table 5 Correlation coefficient of between soil organic carbon (SOC) content and bulk density (BD), water content (WC), pH, total nitrogen (TN), C/N under different forest types

林分类型 Forest type	样本数 Samples	相关系数 Correlation coefficient				
		SOC 与 BD	SOC 与 WC	SOC 与 pH	SOC 与 TN	SOC 与 C/N
锐齿栎(马头滩林区) <i>Quercus aliena</i> var <i>acuteserrata</i> (MaToutan forest)	36	-0.983 *	0.892	-0.911 **	0.990 **	0.869
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr	36	-0.987 *	0.978 *	-0.904 **	0.953 **	0.486
华山松 <i>Pinus armandii</i> Franch	36	-0.969 *	0.948	-0.962 **	0.879 **	0.822
松栎混交林 Pine-oak mixed forest	36	-0.990 **	0.812	-0.876 **	0.992 **	0.858
云杉 <i>Picea asperata</i> Mast	36	-0.996 *	0.980 *	-0.975 **	0.982 **	0.888
锐齿栎(辛家山林区) <i>Quercus aliena</i> var <i>acuteserrata</i> (XinJiashan forest)	36	-0.758	0.931	-0.839 **	0.963 **	0.763

\* 表示  $P<0.05$ ; \*\* 表示  $P<0.01$

以研究区域内各个林分及各土层的平均值进行相关性分析。

由表 6 可知,秦岭地区各个林分土壤全氮含量与土壤有机碳含量存在极显著正相关,相关系数在 0.879—0.992 之间。除油松、松栎混交林的土壤全氮含量与土壤 pH 值显著负相关外,其余林分的土壤全氮含量与土壤 pH 值无明显相关性。除华山松、锐齿栎(辛家山林区)的土壤全氮含量与土壤容重无明显相关性外,其余林分土壤的全氮含量与土壤容重显著负相关,相关系数在-0.956—-0.987 之间。油松、华山松、云杉土壤全氮含量与土壤含水量显著正相关,相关系数在 0.954—0.985 之间,其余林分的土壤全氮含量与土壤含水量则没有明显的相关性。此外,各个林分的土壤全氮含量与土壤 C/N 无明显相关性。

表 6 土壤全氮与土壤容重、含水率、pH、有机碳、C/N 相关系数

Table 6 Correlation coefficient of between total nitrogen (TN) content and bulk density (BD), water content (WC), pH, soil organic carbon (SOC), C/N under different forest types

林分类型 Forest type	样本数 Samples	相关系数 Correlation coefficient				
		TN 与 BD	TN 与 WC	TN 与 pH	TN 与 SOC	TN 与 C/N
锐齿栎(马头滩林区) <i>Quercus aliena</i> var <i>acuteserrata</i> (MaToutan forest)	36	-0.979 *	0.885	-0.908	0.990 **	0.859
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr	36	-0.956 *	0.976 *	-0.962 *	0.953 **	0.247
华山松 <i>Pinus armandii</i> Franch	36	-0.937	0.954 *	-0.885	0.879 **	0.540
松栎混交林 Pine-oak mixed forest	36	-0.987 *	0.865	-0.854	0.992 **	0.815
云杉 <i>Picea asperata</i> Mast	36	-0.969 *	0.985 *	-0.999 *	0.982 **	0.796
锐齿栎(辛家山林区) <i>Quercus aliena</i> var <i>acuteserrata</i> (XinJiashan forest)	36	-0.775	0.941	-0.816	0.963 **	0.734

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$

### 3 讨论

#### 3.1 土壤有机碳和全氮的分布特征

研究结果表明,秦岭地区典型林分锐齿栎(马头滩林区)、油松、华山松、松栎混交林、云杉、锐齿栎(辛家山林区)的土壤有机碳及全氮含量呈现极显著正相关,均随着土壤深度的增加而不断降低,且降幅较大;同一林分不同土层间有机碳含量存在显著差异的主要原因在于土壤不同层次上有机物质的输入存在规律性差异,一般情况下,土壤表层积累了大量的枯枝落叶等植物残体,且植物根系的密度一般随着土层的变深而减小。

不同林分间土壤有机碳、全氮分布情况均为:云杉>松栎混交林>锐齿栎(马头滩林区)>油松>华山松>锐齿栎(辛家山林区);不同林分间的差异反映了土壤有机碳、全氮的含量受到多方面因素的影响,如土壤的物理性质、土壤生境、凋落物的输入、土壤微生物的活动等<sup>[24]</sup>。各个林分的有机碳、全氮主要集中在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层,主要是受地表植被凋落物的矿化分解、转化积累和土壤呼吸等过程的综合影响<sup>[30]</sup>。

#### 3.2 土壤碳氮比的分布特征

土壤碳氮比可以影响土壤中微生物的代谢活动,进而对土壤有机质的矿化产生作用。一般认为,土壤碳氮比在 15—25 之间,有机质供肥状况优越<sup>[31]</sup>。

研究结果表明,秦岭各个林分 C/N 大小为松栎混交林>华山松>油松>云杉>锐齿栎(辛家山林区)>锐齿栎(马头滩林区),这与各个林分所处环境的气候条件和植被类型等因素密切相关。各个供试林分土壤剖面 C/N 基本在 5.93—15.47 之间,这在一定程度上说明了土壤中的有机质分解比较容易,尤其是土壤氮素的矿质化作用明显,可以释放更多的有效态氮,能够为土壤提供充足的氮素,但也容易造成土壤中氮素的大量流失<sup>[19]</sup>。

#### 3.3 土壤有机碳储量分布特征

秦岭各个林分 0—60 cm 土层的土壤有机碳储量由高到低排序为云杉>锐齿栎(马头滩林区)>松栎混交林>华山松>锐齿栎(辛家山林区)>油松。各个林分的土壤有机碳储量具有比较明显的表聚作用,在一定程度

上表明森林土壤有机碳储量的稳定性较差,不合理的人为活动较易破坏表层,极易引起水土流失,从而使得土壤有机碳储量减少。

除油松外,其余林分的土壤有机碳储量随土层变化规律性差,具体表现为各土层的有机碳储量变化幅度不同,且出现较大的波动性,这主要是因为土壤有机碳储量受土壤有机碳含量、土壤容重、土层厚度、砾石体积质量多个因素的影响,因此不同林分不同土层的土壤有机碳储量变化规律与土壤有机碳、全氮的变化存在差异。

### 3.4 土壤有机碳、氮素与土壤容重、含水率、pH 值、有机碳、全氮、C/N 相关性

研究区域内,各个林分的土壤 pH 值与有机碳存在极显著负相关,与全氮的相关性仅存在于油松、松栎混交林中,这与白红军等<sup>[32]</sup>对霍林河流域湿地土壤的研究存在较大差异,具体原因尚有待于进一步探讨。除锐齿栎(辛家山林区)土壤有机碳、全氮含量,华山松的全氮含量与土壤容重无明显相关性外,其余林分土壤有机碳、全氮含量与土壤容重相关性显著。土壤容重是反映土壤物理性质的重要指标,与土壤的水、热状况密切相关。对森林土壤而言,土壤物理性状不仅能反映土壤的结构状况,而且也是森林植被及土壤持水、蓄水性能的重要指标之一。除油松、云杉的土壤有机碳、全氮含量,华山松的全氮含量与土壤含水量显著正相关外,其余林分土壤有机碳、全氮含量与土壤含水量无明显相关性,这主要是因为土壤中碳、氮的蓄积除与含水量相关外,还受到植被类型、土壤温度、微生物等因素的影响<sup>[33]</sup>。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 薛立, 吴敏, 徐燕, 李燕, 屈明. 几种典型华南人工林土壤的养分状况和微生物特性研究. 土壤学报, 2005, 42(6): 1017-1023.
- [ 2 ] Sedjo R A. The carbon cycle and global forest ecosystem. Water, Air, and Soil Pollution, 1993, 70(1/4): 295-307.
- [ 3 ] Cole D W, Rapp M. Elemental Cycling in Forest Ecosystems. London: Cambridge University Press, 1981: 341-409.
- [ 4 ] 贾晓虹, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复中土壤碳氮变化规律. 植物生态学报, 2007, 31(7): 66-74.
- [ 5 ] Doran J W, Jones A J, Arshad M A. Determinants of Soil Quality and Health. Florida: CRC Press, 1999: 17-36.
- [ 6 ] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 冯兆忠, 张红星, 徐永荣. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量. 生态学报, 2005, 15(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. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 756-759.
- [ 8 ] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur. Biogeochemistry, 1991, 13(2): 87-115.
- [ 9 ] 邓小文, 韩士杰. 氮沉降对森林生态系统土壤碳库的影响. 生态学杂志, 2007, 26(10): 1622-1627.
- [ 10 ] 胡克林, 余艳, 张风荣, 王茹. 北京郊区土壤有机质含量的时空变异及其影响因素. 中国农业科学, 2006, 39(4): 764-771.
- [ 11 ] Lal R. Forest soils and carbon sequestration. Forest Ecology and Management, 2005, 220(1/3): 242-258.
- [ 12 ] 杨文杰, 徐小草, 方丽, 雒和忠. 国有林场发展问题探讨——陕西省马头滩林业局发展调查研究. 西北林学院学报, 2005, 20(1): 189-192.
- [ 13 ] 中华人民共和国林业局. 森林土壤分析方法(中华人民共和国林业行业标准). 北京: 中国标准出版社, 1999: 1-167.
- [ 14 ] 解迎革, 李霞. 土壤中砾石含量的测定方法研究进展. 土壤, 2012, 44(1): 17-22.
- [ 15 ] 时忠杰, 王彦辉, 于澎涛, 徐丽宏, 熊伟, 郭浩. 六盘山森林土壤中的砾石对渗透性和蒸发的影响. 生态学报, 2008, 28(12): 6091-6098.
- [ 16 ] Rodríguez-Murillo J C. Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain. Biology and Fertility of Soils, 2001, 33(1): 53-61.
- [ 17 ] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European Journal of Soil Science, 1996, 47(2): 151-163.
- [ 18 ] Schwartz D, Namri M. Mapping the total organic carbon in the soils of the Congo. Global and Planetary Change, 2002, 33(1): 77-93.
- [ 19 ] 陈翠玲, 蒋爱风, 介元芬, 李来泉. 土壤微团聚体与土壤有机质及有效氮、磷、钾的关系研究. 河南职业技术学院学报, 2003, 31(4): 7-9.
- [ 20 ] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义. 土壤学报, 1994, 31(1): 18-25.
- [ 21 ] 耿增超, 姜林, 李珊珊, 余雕, 候磊. 祁连山中段土壤有机碳和氮素的剖面分布. 应用生态学报, 2011, 22(3): 665-672.
- [ 22 ] 党坤良, 雷瑞德, 耿增朝, 张硕新, 申卫军. 秦岭火地塘林区不同土壤类型化学性质的研究. 西北林学院学报, 1996, 11(增): 26-30.
- [ 23 ] 傅民杰, 王传宽, 王颖, 刘实. 四种温带森林土壤氮矿化与硝化时空格局. 生态学报, 2009, 29(7): 3747-3758.

- [24] 肖伟伟, 范晓晖, 杨林章, 孙波. 长期定位施肥对潮土有机氮组分和有机碳的影响. 土壤学报, 2009, 46(2): 274-280.
- [25] Springob G, Kirchmann H. Bulk soil C to N ratio as a simple measure of net N mineralization from stabilized soil organic matter in sandy arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(4): 629-632.
- [26] 李珊珊, 耿增超, 姜林, 余雕, 罗志伟. 秦岭火地塘林区土壤剖面碳氮垂直分布规律的研究. 西北林学院学报, 2011, 26(4): 1-6.
- [27] 吴志祥, 谢贵水, 陶忠良, 周兆德, 王旭. 海南儋州不同林龄橡胶林土壤碳和全氮特征. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1484-1491.
- [28] 于东升, 史学正, 孙维侠, 王洪杰, 刘庆花, 赵永存. 基于 1: 100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及处理研究. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2279-2283.
- [29] 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.
- [30] 徐欢欢, 曾从盛, 王维奇, 翟继红. 艾比湖湿地土壤有机碳垂直分布特征及其影响因子分析. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2010, 26(5): 86-91.
- [31] 文启孝, 杜丽娟, 张晓华. 土壤有机质研究法. 北京: 农业出版社, 1984: 1-7.
- [32] 白军红, 邓伟, 朱颜明, 栾兆擎, 张玉霞. 霍林河流域湿地土壤碳氮空间分布特征及生态效应. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1494-1498.
- [33] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Soil warming and organic carbon content. *Nature*, 2000, 408(6814): 789-790.