

DOI: 10.5846/stxb201411132242

赵芳, 欧阳勋志. 飞播马尾松林土壤有机碳空间分布及其影响因子. 生态学报, 2016, 36(9): - .

Zhao F, Ouyang X Z. Assessing relative contributions of various influencing factors to soil organic carbon in aerially-seeded *Pinus massoniana* plantations. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): - .

# 飞播马尾松林土壤有机碳空间分布及其影响因子

赵 芳, 欧阳勋志\*

江西农业大学林学院, 南昌 330045

**摘要:** 本文以飞播马尾松林为研究对象, 通过典型样地调查和样品测定, 采用简单相关分析和增强回归树分析 (Boosted regression tree analysis; BRT) 相结合的方法分析地形、林分、土壤以及林下植被条件对飞播马尾松林土壤有机碳的影响。结果表明: 飞播马尾松林 0—10 cm、10—20 cm 土层有机碳含量的平均值分别为 10.22 g/kg 和 6.64 g/kg, 土壤有机碳含量随土层的加深而降低, 两土层有机碳含量的变异系数分别为 59.5% 和 60.1%, 均属于中等程度变异。土壤有机碳含量主要受土壤条件的影响, 其次为林分条件、地形条件和林下植被条件, 土壤、林分、地形和林下植被条件对 0—10 cm 土层有机碳含量的相对影响力分别为 63.4%, 19.3%, 10.9% 和 6.4%, 对 10—20 cm 土层的相对影响力分别为 60.4%, 21.9%, 10.6% 和 7.1%。全氮和全磷是影响土壤有机碳含量的主要因子, 对 0—10 cm 土层有机碳含量影响最大的因子是全氮, 其相对影响力为 40.2%, 对 10—20 cm 土层有机碳含量影响最大的因子是全磷, 相对影响力为 31.2%; 全氮、全磷和平均胸径与两土层有机碳含量均呈显著正相关, 林分密度和土壤容重与 0—10 cm 土层有机碳含量呈显著负相关, 坡向与 0—10 cm 土层有机碳含量则表现为越向阳坡有机碳含量越高的规律, 其他影响因子与土壤有机碳的相关性不显著。

**关键词:** 土壤有机碳; 影响因子; 飞播马尾松林; 增强回归树分析; 兴国县

## Assessing relative contributions of various influencing factors to soil organic carbon in aerially-seeded *Pinus massoniana* plantations

ZHAO Fang, OUYANG Xunzhi\*

College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

**Abstract:** Influencing factors of soil organic carbon were more focus on national-scale to landscape-scale in the previous studies, while studies based on fine-scale such as stand-scale were less. Analysing the spatial distribution characteristics of soil organic carbon and assessing relative contributions of various influencing factors to soil organic carbon in stand-scale can provide a theoretical basis for the ecosystem carbon sink research and forest management. By using the the data of typical plots investigation which including 50 sample plots with area of 20 m × 20 m and sample determination, combining simple correlation analysis and boosted regression tree analysis, the relative contributions of possible influencing factors, including topography, stand characteristics, soil property and understory vegetation conditions to soil organic carbon content were evaluated in the aerially-seeded *Pinus massoniana* plantations in this study. Our results showed that the average soil organic carbon content in the aerially-seeded *Pinus massoniana* plantations was 10.22 g/kg at a soil depth of 0—10 cm and 6.64 g/kg at 10—20 cm, respectively. Soil organic carbon content decreased with soil depth. Coefficients of variation of soil organic carbon in those two soil layers were 59.5% and 60.1%, respectively, which belonged to moderate variation. The relative influence of soil property, stand characteristics, topography and understory vegetation conditions on soil organic

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31160159, 31360181)

收稿日期: 2014-11-13; 网络出版日期: 2015- -

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: oyxz\_2003@hotmail.com

carbon at the soil depth of 0—10 cm were 63.4%, 19.3%, 10.9%, and 6.4%, and were 60.4%, 21.9%, 10.6%, and 7.1% at the soil depth of 10—20 cm, which indicated that soil organic carbon contents were mainly affected by soil property conditions, followed by stand characteristics, topography, and understory vegetation conditions. Total nitrogen and total phosphorus were the main factors influencing soil organic carbon content, of which, total nitrogen had the largest contribution to soil organic carbon content at the soil depth of 0—10 cm, with a relative influence of 40.2%, while total phosphorus was the most important factor on soil organic carbon content at the soil depth of 10—20 cm, with a relative influence of 31.2%. The results of correlation significance test in simple correlation analysis and the fitting curve in boosted regression tree analysis all showed that total nitrogen, total phosphorus, and average diameter at breast height had significant positive correlations with soil organic carbon content at the two soil layers. Stand density and soil bulk density had significant negative correlations with soil organic carbon content at the depth of 0—10 cm. In addition, soil organic carbon content at the depth of 0—10 cm was higher in the place which more exposed to the sun. The other influencing factors related to soil organic carbon were not significant.

**Key Words:** soil organic carbon; influencing factors; aerially-seeded *Pinus massoniana* plantations; boosted regression tree analysis; Xingguo County

土壤有机碳是陆地生态系统碳库的主要部分,占整个陆地生态系统碳库的  $2/3$ <sup>[1]</sup>,约为植物碳库的  $2.5—3.0$  倍<sup>[2]</sup>,为大气碳库的  $2—3$  倍<sup>[3]</sup>,在全球碳循环中起着重要作用。其储量较小幅度的变动,都可直接导致大气层二氧化碳浓度升高,从而以温室效应影响全球气候变化<sup>[4]</sup>。土壤有机碳表现出明显的空间异质性,受土壤性质、地形地貌、气候条件和植被类型等自然因素以及土地利用方式等人类活动的影响<sup>[5-7]</sup>,具有尺度效应<sup>[8-14]</sup>。不同的尺度条件下,影响土壤有机碳的主导因子存在差异。在大陆或国家尺度,气候条件对土壤有机碳有重要作用<sup>[8]</sup>,如 Homann 等分析了美国大陆七个生态区内土壤有机碳和气候的关系后认为土壤表层有机碳与年均降水量呈正相关,除西北温带森林区外,与年均气温均呈负相关<sup>[9]</sup>;在省域尺度,许信旺认为尽管气候类型有所不同,气温和降雨会表现出一定程度的地域分异,但土壤类型、植被类型、地貌及土地利用方式等因素对土壤有机碳分布特征的影响更强<sup>[10]</sup>,顾成军也认为,土壤类型和土地利用是省域表层土壤有机碳密度空间分布的重要影响因子<sup>[11]</sup>;在县域尺度,Liu 等研究发现土壤有机碳空间格局的控制因子是地形和土地利用方式<sup>[12]</sup>;在景观尺度,Wang 等认为土壤有机碳储量的主要影响因子是高程<sup>[13]</sup>,唐国勇研究表明,利用方式和地形(高程和坡度)是亚热带典型红壤丘陵景观土壤有机碳空间变异的主要原因<sup>[14]</sup>。可以看出,众多学者从国家尺度到景观尺度对土壤有机碳的影响因子进行了深入广泛的研究,相比而言,针对同一生态系统内部或林分类型等小尺度土壤有机碳影响因子的研究较少<sup>[7]</sup>,然而其对于理解不同尺度土壤有机碳影响因子的演变机理以及基于林分尺度上的不同森林类型的碳汇研究和经营管理具有重要意义。

马尾松(*Pinus massoniana*)广泛分布于我国长江流域及其以南各省区,具有适应性强、耐干旱与贫瘠的特点。不少学者对马尾松天然林的碳储量特征进行了研究<sup>[15-17]</sup>,但由于飞播林与天然林起源的环境背景及林分结构等方面存在差异,两者的碳储量特征尤其是土壤有机碳特征及其影响因素可能不同。赣南(江西省南部)曾是我国水土流失最严重的地区之一,尤其是该区的兴国县,水土流失范围广强度大,曾被称为“江南沙漠”。兴国县自 20 世纪 70 年代开始就陆续开展了大面积的以治理水土流失为目的马尾松飞播造林活动,以恢复森林植被,取得了显著成效。据兴国县林业局相关统计资料,在 1973—2001 年期间马尾松飞播造林多达 20 次,目前保存面积  $6.4$  万  $\text{hm}^2$ ,占现有全县有林地面积的  $29.5\%$ <sup>[18]</sup>。因此,基于曾经强烈的水土流失背景,研究飞播马尾松林土壤有机碳特征及其影响因子,对于兴国县乃至整个赣南的飞播马尾松林的经营管理具有重要的意义。

## 1 研究区域

兴国县地处我国中亚热带南部,江西省中南部,赣州市北部( $26^{\circ}03'—26^{\circ}42' \text{ N}$ ,  $115^{\circ}01'—115^{\circ}51' \text{ E}$ )。该

区为中亚热带温暖湿润气候,年均温 18.9℃,年积温 6029.9℃,年均降雨量为 1539 mm,雨量多集中在 4—6 月,无霜期 280—300 d。母岩主要为花岗岩、第四纪红色粘土、砂页岩、千枚岩等,土壤类型主要为红壤。森林资源丰富,主要植被类型有常绿阔叶林、马尾松林和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林等。其中,飞播马尾松的林下植被主要有六月雪(*Serissa serissoides*)、欐木(*Loropetalum chinense*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)、雀稗(*Paspalum thunbergii*)、野古草(*Arunfinella hirta*)和五节芒(*Miscanthus floridulus*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

于 2012 年 7—8 月对研究区的飞播马尾松林分布区域进行踏查,选择在近 10 年来几乎未受人为对植被干扰区域,综合考虑坡向、坡度、坡位、海拔等地形条件,林木大小与密度、郁闭度等林分条件以及林下植被盖度、林下植被优势类型等林下植被条件,设置飞播马尾松纯林典型样地 50 个,样地面积为 20 m×20 m,土壤类型均为红壤。样地调查内容包括地形、林分以及林下植被因子,同时进行土样的采集。

### 2.2 土样采集及指标测定

在样地内选取 2 处具有代表性地块分别挖土壤剖面,沿剖面 0—10 cm、10—20 cm 分层用环刀采集土壤以测定土壤容重,并在打环刀旁用铝盒取约 10 g 土壤用于及时测定土壤含水量。土壤有机碳、全氮、全磷的取样采用土钻分别在样地的上、中、下方 3 个取样点的 0—10 cm、10—20 cm 分层采集土壤样品,将每个土层 3 个取样点的土样混合均匀,每个样地得到 2 个混合样,将混合样各取 1 kg 左右带回实验室自然风干后测定。土壤含水量采用酒精燃烧法,土壤容重采用环刀法,土壤有机碳采用重铬酸钾氧化—外加加热法,全氮采用硫酸消化—凯氏定氮法,全磷采用酸溶—钼锑抗比色法。

### 2.3 数据处理与分析

采用简单相关分析和增强回归树分析(Boosted regression tree analysis: BRT)相结合的方法分析地形、林分、土壤和林下植被条件与 0—10 cm、10—20 cm 土层有机碳含量的关系及其影响。地形条件中,因飞播区主要为中丘地貌,样地海拔分布在 149—292 m,变化范围小,且大多数样地的坡长较短,坡位属于全坡,因此只选取坡向(Slope aspect, ASP)和坡度(Slope, SLO)2 个因子,坡向按邵方丽的方法划分等级并量化<sup>[19]</sup>;林分条件选择平均胸径(Average diameter at breast height, DBH)、郁闭度(Canopy density, CAN)和林分密度(Stand density, DEN)3 个因子;土壤条件选择能反映土壤基本理化性质的全氮(Total nitrogen, TN)、全磷(Total phosphorus, TP)、土壤含水量(Soil water content, SWC)以及容重(Soil bulk density, SBD)4 个因子;林下植被条件则包括林下植被盖度(Understory vegetation coverage, UVC)和林下植被优势类型(Understory dominant type, UDT)2 个因子,对于林下植被优势类型,芒萁类、禾本类、灌木类分别定义为“1”、“2”、“3”。

数据分析时,首先运用简单相关分析法分析选取的 11 个因子与土壤有机碳含量的相关性,然后进一步用 BRT 的方法分析各因子对土壤有机碳含量的相对影响力。BRT 方法是基于分类回归树算法(Classification and regression tree, CART)的一种自学习方法,能够得出自变量对因变量的影响载荷,及其他自变量取均值或不变的情况下,该自变量与因变量的相互关系,并且输出的因变量与自变量关系很直观,结果容易理解,在生物数据建模方面有很大的益处<sup>[20-23]</sup>。该方法在运算过程中多次随机抽取一定量的数据分析自变量对因变量的影响程度,剩余数据用来对拟合结果进行检验,对生成的多重回归树取均值并输出,能够提高模型的稳定性和预测精度。这种方法在处理不同数据格式时具有很大的灵活性,且对预测变量的独立性毋须做出事先假设,能够适应复杂的非线性关系<sup>[21-22]</sup>。

简单相关分析在 SPSS19.0 软件中完成,BRT 分析在 R 语言中完成,参数设置时,学习速率(learning rate)设置为 0.01,树的复杂性(tree complexity)设置为 5。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤有机碳特征及其与各因子的相关性

##### 3.1.1 各因子的统计特征分析

基于样地的调查及测定数据,对因子特征进行分析,结果见表1。由表1可知,0—10 cm 土层有机碳含量的平均值为 10.22 g/kg,中值为 8.69 g/kg,变异系数为 59.5%;10—20 cm 土层有机碳含量的平均值为 6.64 g/kg,中值为 6.05 g/kg,变异系数为 60.1%。土壤有机碳含量表现为随土层的增加而降低,但两土层有机碳含量的变异程度相差不大,按照变异系数的划分等级:弱变异性, $CV < 10\%$ ,中等变异性, $10\% \leq CV \leq 100\%$ ,强变异性, $CV > 100\%$  [24],两土层有机碳含量在空间上均表现为中等程度变异。土壤全氮、全磷在 0—10 cm 土层平均含量分别为 0.077 g/kg 和 0.024 g/kg,10—20 cm 土层平均含量分别为 0.066 g/kg 和 0.023 g/kg。对于各因子的变异程度,除 10—20 cm 土层容重的变异程度小于 10%,属于弱变异性外,其他因子的变异程度范围在 10.1%—83.3%,均属于中等程度变异。整体来看,土壤全磷的变异程度最大,然后是有机碳,其次为全氮。非参数单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验结果表明,土壤有机碳及各因子均呈正态分布。

表 1 各因子的统计特征

Table 1 Statistical characteristics of the various factors

| 项目<br>Item                                      | 土层<br>Layer | 平均值<br>Mean | 标准误<br>Standard<br>error | 中值<br>Median | 最高值<br>Maximum | 最低值<br>Minimum | 标准差<br>Standard<br>deviation | 变异系数<br>CV/% |
|-------------------------------------------------|-------------|-------------|--------------------------|--------------|----------------|----------------|------------------------------|--------------|
| 土壤有机碳                                           | 0—10 cm     | 10.22       | 0.86                     | 8.69         | 25.70          | 2.20           | 6.08                         | 59.5         |
| Soil organic carbon/(g/kg)                      | 10—20 cm    | 6.64        | 0.56                     | 6.05         | 16.67          | 1.90           | 3.99                         | 60.1         |
| 土壤容重                                            | 0—10 cm     | 1.38        | 0.02                     | 1.37         | 1.62           | 1.02           | 0.14                         | 10.1         |
| Soil bulk density/(g/cm <sup>3</sup> )          | 10—20 cm    | 1.39        | 0.02                     | 1.36         | 1.61           | 1.08           | 0.12                         | 8.6          |
| 土壤含水量                                           | 0—10 cm     | 9.4         | 0.7                      | 8.7          | 28.3           | 2.0            | 5.0                          | 53.2         |
| Soil water content/%                            | 10—20 cm    | 11.2        | 0.6                      | 11.8         | 18.0           | 3.7            | 4.0                          | 35.7         |
| 全氮                                              | 0—10 cm     | 0.077       | 0.005                    | 0.077        | 0.143          | 0.020          | 0.032                        | 41.6         |
| Total nitrogen/(g/kg)                           | 10—20 cm    | 0.066       | 0.005                    | 0.055        | 0.206          | 0.021          | 0.038                        | 57.6         |
| 全磷                                              | 0—10 cm     | 0.024       | 0.003                    | 0.018        | 0.088          | 0.003          | 0.020                        | 83.3         |
| Total phosphorus/(g/kg)                         | 10—20 cm    | 0.023       | 0.002                    | 0.021        | 0.063          | 0.003          | 0.017                        | 73.9         |
| 平均胸径<br>Average diameter<br>at breast height/cm |             | 8.91        | 0.50                     | 8.25         | 16.00          | 3.50           | 3.53                         | 39.6         |
| 林分密度<br>Stand density/(株/hm <sup>2</sup> )      |             | 1955        | 100                      | 1913         | 3350           | 600            | 710                          | 36.3         |
| 郁闭度 Canopy density                              |             | 0.47        | 0.03                     | 0.45         | 0.90           | 0.20           | 0.20                         | 42.6         |
| 林下植被盖度 Understory<br>vegetation coverage/%      |             | 68          | 3                        | 73           | 100            | 10             | 24                           | 35.3         |
| 坡度 Slope/(°)                                    |             | 23          | 1                        | 25           | 36             | 3              | 9                            | 39.1         |

样本数  $n = 50$

##### 3.1.2 土壤有机碳与各因子的相关性

土壤有机碳含量与各因子的简单相关系数见表2,在 0—10 cm 土层,土壤有机碳含量与全氮、全磷、平均胸径以及坡向呈显著正相关,与林分密度、土壤容重呈显著负相关。在 10—20 cm 土层,土壤有机碳含量与全磷、全氮及平均胸径呈显著正相关。

#### 3.2 各因子对土壤有机碳含量的影响

为进一步说明各因子对土壤有机碳含量的相对影响力,采用增强回归树方法进行分析。

表 2 土壤有机碳含量与各因子的相关性

Table 2 The correlation of soil organic carbon and each factor

| 项目<br>Item    | 样本数<br>Number of<br>samples | 土层<br>Layer/<br>cm | 平均<br>胸径<br>DBH | 林分<br>密度<br>DEN | 林分<br>郁闭度<br>CAN | 土壤<br>容重<br>SBD | 土壤<br>含水量<br>SWC | 全氮<br>TN | 全磷<br>TP | 林下植<br>被类型<br>UDT | 林下植<br>被盖度<br>UVC | 坡向<br>ASP | 坡度<br>SLO |
|---------------|-----------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|----------|----------|-------------------|-------------------|-----------|-----------|
| 土壤有机<br>碳 SOC | 50                          | 0—10               | 0.492 **        | -0.403 **       | -0.114           | -0.409 **       | -0.179           | 0.745 ** | 0.379 ** | 0.242             | -0.261            | 0.373 **  | 0.072     |
|               |                             | 10—20              | 0.328 *         | -0.101          | -0.110           | 0.137           | 0.156            | 0.519 ** | 0.527 ** | 0.157             | 0.086             | 0.185     | 0.231     |

\* 表示在 0.05 水平上显著相关, \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关; 其中林下植被类型和坡向为 Spearman 相关系数,其他均为 Pearson 相关系数;

SOC:碳 Soil organic carbon;DBH:平均胸径 Average diameter at breast height;DEN:林分密度 Stand density;CAN:林分郁闭度 Canopy density; SBD:土壤容重 Soil bulk density;SWC:土壤含水量 Soil water content;TN:全氮 Total nitrogen;TP:全磷 Total phosphorus;UDT:林下植被类型 Understory dominant type;UVC:林下植被盖度 Understory vegetation coverage;ASP:坡向 Slope aspect; SLO:坡度 Slope。

### 3.2.1 各因子对 0—10 cm 土层有机碳的影响

运用增强回归树分析得出的 11 个因子对 0—10 cm 土层有机碳含量的影响结果见图 1。图 1 中,括号里的百分比表示各因子对 0—10 cm 土层有机碳含量的相对影响力,曲线表示各因子在其它因子取均值时,该因子对有机碳含量的边际效应。从图 1 可知,对 0—10 cm 土层有机碳含量影响最大的因子是全氮,相对影响力为 40.2%,其后依次为全磷、林分密度、土壤容重、平均胸径、坡度、林下植被盖度、土壤含水量、坡向、郁闭度以及林下植被优势类型。根据各因子对土壤有机碳含量影响的边际效应曲线,全氮、全磷、平均胸径、坡度、坡向以及林下植被优势类型分别与土壤有机碳含量呈正相关,林分密度、土壤容重、林下植被盖度、土壤含水量以及郁闭度分别与土壤有机碳含量呈负相关。其中,根据坡向和林下植被优势类型的量化方法可得出,坡向对有机碳含量的影响表现为越向阳,有机碳含量越高,林下植被优势类型对有机碳含量的影响表现为禾本类、灌木类下的有机碳含量高于芒萁类。该曲线结果与简单相关分析的结果整体趋势一致。因此综合分析可以得

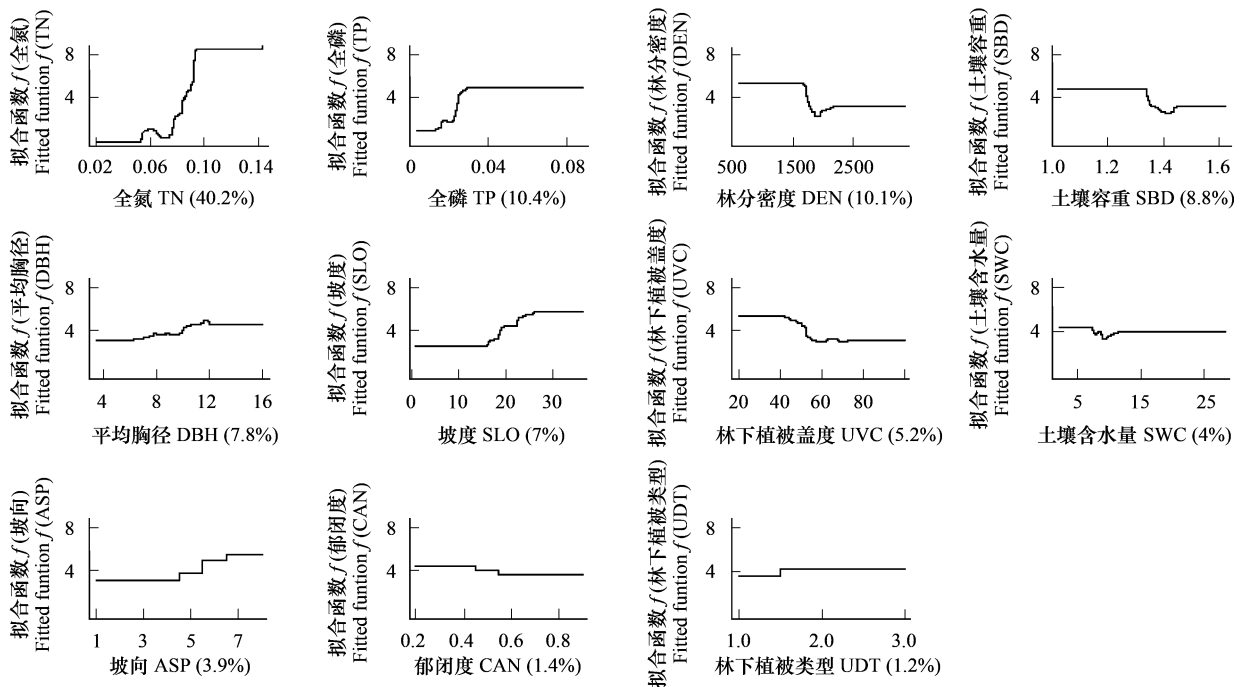


图 1 0—10 cm 土层有机碳含量影响因子相对影响力及其边际效应

Fig. 1 Relative influences of different factors on soil organic carbon and its marginal effect at soil depth of 0—10 cm

括号中的百分数表示各因子对土壤有机碳的相对影响力。曲线表示各因子在其它因子取均值时,该因子对有机碳含量的边际效应

TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; DEN: Stand density; SBD: Soil bulk density; DBH: Average diameter at breast height; SLO: Slope; UVC: Understory vegetation coverage; SWC: Soil water content; ASP: Slope aspect; CAN: Canopy density; UDT: Understory dominant type

出,全氮、全磷、林分密度、土壤容重以及平均胸径不仅对土壤有机碳含量的相对影响力较大,而且与其相关性均达显著水平。

整体而言,土壤条件决定了 0—10 cm 土层有机碳含量变异的 63.4%,是土壤有机碳含量的主要影响因素,而林分、地形及林下植被条件分别决定了 0—10 cm 有机碳含量变异的 19.3%、10.9%和 6.4%。

### 3.2.2 各因子对 10—20 cm 土层有机碳的影响

11 个因子对 10—20 cm 土层有机碳含量的影响见图 2。结果显示:对 10—20 cm 土层有机碳含量影响最大的因子是全磷,相对影响力为 31.2%,其后依次为全氮、平均胸径、土壤含水量、坡度、土壤容重、林分密度、林下植被盖度、郁闭度、坡向和林下植被优势类型。根据边际效应曲线,全磷、全氮、平均胸径、土壤含水量、坡度、土壤容重、坡向以及林下植被优势类型均分别与土壤有机碳含量呈正相关,郁闭度与土壤有机碳含量呈负相关。各因子中,除林分密度和林下植被盖度与土壤有机碳含量的关系未表现出明显规律性变化以外,其他因子与土壤有机碳含量的相关性简单相关分析的结果整体趋势一致。因此可以得出,全磷、全氮、平均胸径对土壤有机碳含量的相对影响力较大,且与其呈显著正相关。

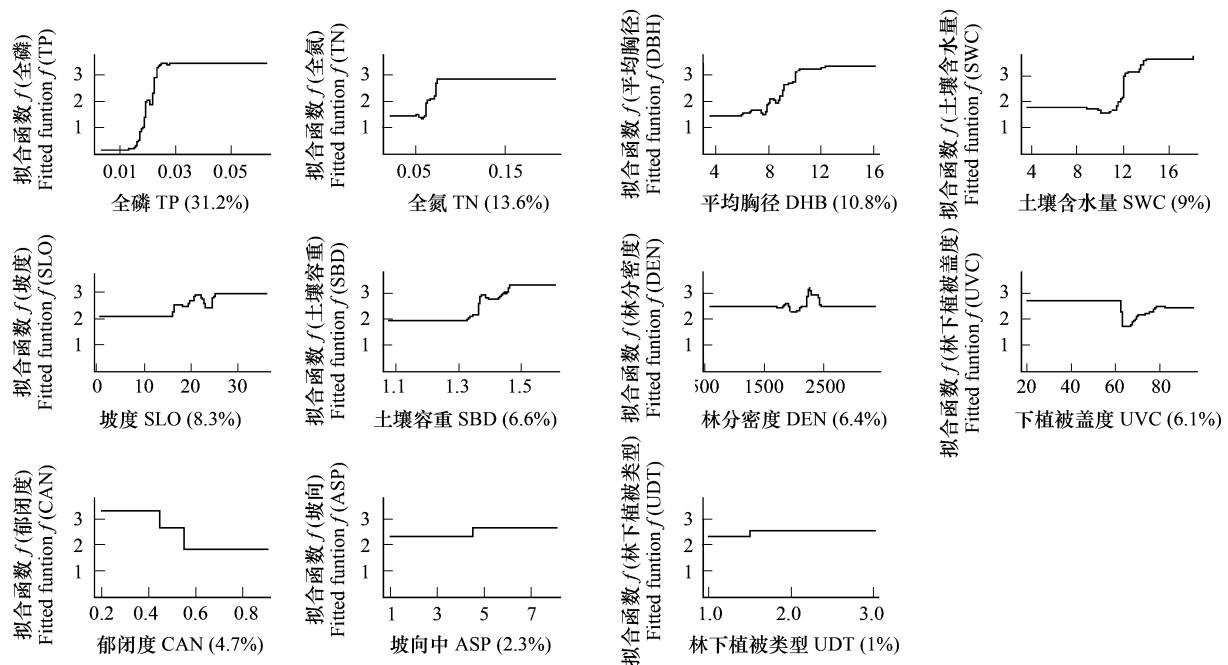


图 2 10—20 cm 土层有机碳影响因子相对影响力及其边际效应

Fig. 2 Relative influences of different factors on soil organic carbon and its marginal effect at soil depth of 10—20 cm

总的来说,土壤条件决定了 10—20 cm 土层有机碳含量变异的 60.4%,仍是有机碳含量的主要影响因素,而林分、地形及林下植被条件分别决定了 10—20 cm 土层有机碳含量变异的 21.9%、10.6%和 7.1%,土壤、林分、地形及林下植被条件对 10—20 cm 土层有机碳含量的影响与各条件对 0—10 cm 土层有机碳含量的影响整体表现出较为一致的规律。全氮和全磷是影响两土层有机碳含量的前两个主要影响因子,且均与土壤有机碳含量呈显著正相关。

## 4 结论与讨论

### 4.1 土壤有机碳含量及全氮、全磷特征

本研究得出,飞播马尾松林 0—10 cm、10—20 cm 土层有机碳含量分别为 10.22 g/kg 和 6.64 g/kg,土壤有机碳含量随土层的加深而降低,0—20 cm 土层的平均值为 8.43 g/kg。这与杨添等人在研究江西大岗山马尾松天然林得出的其土壤有机碳含量随土层的加深而降低的结果一致,其马尾松天然林 0—10 cm 土层有机碳

含量达 30.0 g/kg 以上,10—20 cm 土层有机碳含量约为 8.0 g/kg<sup>[17]</sup>,而王大鹏等通过总结近 10 a(2004—2013)内中国 9 种人工林土壤有机碳文献资料的统计分析得出,全国马尾松人工林 0—20 cm 土层有机碳含量为 22.0 g/kg<sup>[25]</sup>。全氮、全磷的特征表明,飞播马尾松林的土壤全氮、全磷在 0—10 cm 土层平均含量分别为 0.077 g/kg 和 0.024 g/kg,10—20 cm 土层平均含量分别为 0.066 g/kg 和 0.023 g/kg,根据第二次全国土壤普查中所采用的土壤等级分为 6 级的划分依据<sup>[26]</sup>,飞播马尾松林土壤的全氮、全磷均为第 6 级,属于极低水平。而潘鹏等研究江西中部马尾松天然林 0—10 cm、10—20 cm 土层全氮含量均达 0.50 g/kg 以上、全磷含量均达 0.10 g/kg 以上<sup>[27]</sup>。可以看出,飞播马尾松林土壤有机碳含量不仅低于马尾松天然林,也低于全国马尾松人工林的平均水平,其全氮、全磷含量也低于马尾松天然林。究其原因,这可能与飞播马尾松林形成的背景有关,其分布区曾是水土流失严重区,曾经的水土流失对土壤养分影响深刻,导致了林地土壤养分贫瘠。此外,从变异系数来看,飞播马尾松林土壤有机碳及全氮、全磷的空间变异性较大,这可能是与曾经水土流失强度的不均匀性有关。

#### 4.2 土壤有机碳含量影响因子

本研究表明,飞播马尾松林土壤有机碳含量主要受土壤条件的影响,其中,对 0—10 cm 土层有机碳含量影响最大的因子是全氮,对 10—20 cm 土层有机碳含量影响最大的因子是全磷,全氮和全磷是影响飞播马尾松林土壤有机碳含量的主要因子,且均与其呈显著正相关,这一结果与相关研究得出的结论类似:李慧等基于结构方程模型研究了 0—20 cm 土层有机碳的平衡过程后得出,土壤性质对有机碳的直接影响系数最大,气候环境等则通过土壤性质传递并影响土壤有机碳平衡<sup>[28]</sup>;刘满强等也认为,土壤有机碳的稳定性更多的受到土壤性质和土壤生物分解者的影响<sup>[29]</sup>;王淑芳等研究表明土壤全氮是密云水库上游流域 0—10 cm、10—20 cm 及 20—40 cm 三个土层有机碳含量影响最显著的因子,也是草地、农田、落叶松林、油松林、杨桦林及辽东栎林 6 种典型土地利用类型土壤有机碳含量的主要影响因子<sup>[30]</sup>;杜虎等研究得出土壤氮素是影响喀斯特峰丛洼地不同植被类型土壤有机碳含量的主要因子<sup>[31]</sup>;王丹等也认为土壤氮状况是影响不同发育阶段杉木林土壤有机碳变异的主导因子<sup>[32]</sup>。

大量研究表明,土壤全氮、全磷或土壤氮、磷状况能对土壤有机碳含量产生重要影响<sup>[30-34]</sup>,对于全氮和土壤有机碳之间存在高度的正相关性,这在不同的森林类型<sup>[7, 32-36]</sup>、不同的植被类型<sup>[37-40]</sup>及不同的土地利用类型下<sup>[30]</sup>均得到了证实。对于碳磷之间,其一方面可通过不同形态磷的转换与碳的分解相互影响<sup>[41]</sup>,另一方面还能通过成土过程中有机质的积累产生联系<sup>[42]</sup>。此外,氮磷之间以及碳氮磷三者间也能在森林演替进展过程或生物地球化学循环过程中产生联系<sup>[43-44]</sup>。土壤碳氮磷循环通过植物生产和土壤微生物紧密联系<sup>[38]</sup>,森林土壤有机碳主要来源于植物凋落物、土壤动物微生物残体等有机物质,土壤氮磷状况不仅能通过作用植被生长来影响凋落物等有机物质的归还,还能直接控制土壤中有机碳的分解速率。有研究表明,土壤中较低的矿质态氮和较高的 C/N 比可使土壤有机碳的分解速率减缓<sup>[45-46]</sup>,从而导致土壤有机碳的积累;也有研究得出土壤有机碳矿化受到磷营养水平(C/P)的影响<sup>[47]</sup>。此外,土壤碳氮磷还能通过土壤微生物产生紧密联系,碳氮磷是土壤中微生物和酶类合成的物质基础,影响着微生物和酶类的合成与活性<sup>[31]</sup>,而土壤微生物一方面通过利用碳氮磷等元素及土壤有机碳分解产生的能量这一合成过程来影响有机碳的含量,另一方面还能通过直接影响有机碳的难降解性及通过空间不可接近性等机制对土壤有机碳的稳定性产生重要作用<sup>[29]</sup>。可以看出,土壤中氮磷状况对土壤有机碳含量有重要影响,而这种影响可能在退化生态系统中表现得更为明显,如赵汝东等人的研究得出,江西省鹰潭市退化马尾松林地的恢复主要受到土壤氮及其有效性和土壤全磷的限制<sup>[48]</sup>,本研究也表明,飞播马尾松林土壤全氮、全磷含量均处于极低水平。然而,当前对于土壤碳氮磷间耦合关系的研究较少,尤其是在氮磷限制的背景下,其耦合机理尚不明确,因此,全氮、全磷对土壤有机碳含量的影响机制有待进一步深入研究。

飞播马尾松林土壤有机碳含量除主要受土壤条件的影响外,林分、地形和林下植被条件对其也产生一定的影响,对 0—10 cm 土层有机碳含量的影响力分别为 19.3%、10.9%和 6.4%,而对 10—20 cm 土层的影响力

分别 21.9%, 10.6% 和 7.1%, 其对两土层有机碳含量的影响整体表现出较为一致的规律。研究结果显示, 平均胸径对 0—10 cm, 10—20 cm 土层有机碳含量的影响均较大, 且与两土层有机碳含量的正相关性达显著水平, 说明林木的生长有利于土壤有机碳的积累, 平均胸径越大, 林木生长越好, 一方面能有效改善土壤条件, 另一方面枯枝落叶的积累也越多, 因而土壤有机碳含量也就越高。此外, 林分密度和郁闭度可通过改变林下光照、林下植被等影响土壤有机碳含量, 林分密度和郁闭度高会造成林下光照不足, 而坡向则与日照时数和太阳辐射强度直接相关。本研究得出, 林分密度与 0—10 cm 土层有机碳含量呈显著负相关, 郁闭度与其呈负相关但未达显著水平, 坡向与其呈显著正相关, 0—10 cm 土层有机碳含量整体表现出随光照强度的增加而增加, 这一结果也基本验证了程先富等得出的兴国县森林土壤 0—20 cm 土层有机碳含量与坡向呈显著正相关关系的结论<sup>[49]</sup>。

#### 参考文献 (References):

- [1] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soil. *Nature*, 1990, 348(6298): 232-234.
- [2] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, King A W, Dale V H, DeAngelis D L. The global carbon cycle. *American Scientist*, 1990, 78: 310-326.
- [3] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Biogeochemistry: Soil warming and organic carbon content. *Nature*, 2000, 408(6814): 789-790.
- [4] 金峰, 杨浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展. *土壤*, 2000, 32(1): 11-17.
- [5] 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. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 90-105.
- [6] Tan Z X, Lal R, Smeck N E, Calhoun F G. Relationships between surface soil organic carbon pool and site variables. *Geoderma*, 2004, 121(3-4): 187-195.
- [7] 刘金福, 苏松锦, 何中声, 洪伟, 吴彩婷, 董金相, 黎丽珍. 格氏栲天然林土壤有机碳空间分布及其影响因素. *山地学报*, 2011, 29(6): 641-648.
- [8] 缪琦, 史学正, 于东升, 王洪杰, 任红艳, 孙维侠, 赵永存. 气候因子对森林土壤有机碳影响的幅度效应研究. *土壤学报*, 2010, 47(2): 270-278.
- [9] Homann P S, Kapchinske J S, Boyce A. Relations of mineral-soil C and N to climate and texture: regional differences within the conterminous USA. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 303-316.
- [10] 许信旺. 不同尺度区域农田土壤有机碳分布与变化 [D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [11] 顾成军, 史学正, 于东升, 徐胜祥, 孙维侠, 赵永存. 省域土壤有机碳空间分布的主控因子—土壤类型与土地利用比较. *土壤学报*, 2013, 50(3): 425-432.
- [12] Liu D W, Wang Z M, Zhang B, Song K S, Li X Y, Li J P, Li F, Duan H T. Spatial distribution of soil organic carbon and analysis of related factors in croplands of the black soil region, Northeast China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 113(1/4): 73-81.
- [13] Wang H Q, Coenell J D, Hall C A S, Marley D P. Spatial and seasonal dynamics of surface soil carbon in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Ecological Modelling*, 2002, 147(2): 105-122.
- [14] 唐国勇, 黄道友, 黄敏, 吴金水. 红壤丘陵景观表层土壤有机碳空间变异特点及其影响因子. *土壤学报*, 2010, 47(4): 753-759.
- [15] 庞宏东, 王晓荣, 张家来, 郑兰英, 崔鸿侠. 湖北省马尾松天然林碳储量及碳密度特征. *东北林业大学学报*, 2014, 42(7): 40-43.
- [16] 潘鹏, 吕丹, 欧阳勋志, 王雄涛. 赣中马尾松天然林不同生长阶段生物量及碳储量研究. *江西农业大学学报*, 2014, 36(1): 131-136.
- [17] 杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞. 天然林土壤有机碳及矿化特征研究. *环境科学*, 2014, 35(3): 1105-1110.
- [18] 丁松, 应学亮, 吕丹, 欧阳勋志. 赣南飞播马尾松林林下植被盖度对土壤质量的影响. *水土保持研究*, 2014, 21(3): 31-36.
- [19] 邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 王贺年. 北京山区防护林优势树种分布与环境的关系. *生态学报*, 2012, 32(19): 6092-6099.
- [20] Wilson J P, Gallant J C. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York: John Wiley and Sons, 2000.
- [21] De'ath G. Boosted trees for ecological modeling and prediction. *Ecology*, 2007, 88(1): 243-251.
- [22] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802-813.
- [23] Prasad A M, Iverson L R, Liaw A. Newer classification and regression tree techniques: bagging and random forests for ecological prediction. *Ecosystems*, 2006, 9(2): 181-199.
- [24] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 郭月峰. 赤峰市黄花甸子流域土壤有机碳含量的空间变异特征研究. *环境科学学报*, 2014, 34(3): 742-748.
- [25] 王大鹏, 王文斌, 郑亮, 罗雪华, 邹碧霞, 张永发, 吴小平. 中国主要人工林土壤有机碳的比较. *生态环境学报*, 2014, 23(4): 698-704.
- [26] 全国土壤普查办公室. *中国土壤*. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [27] 潘鹏, 甘文峰, 欧阳勋志, 肖欣. 马尾松天然林土壤碳氮磷含量与碳密度的关系. *西北林学院学报*, 2014, 29(6): 1-5.
- [28] 李慧, 汪景宽, 裴久渤, 李双异. 基于结构方程模型的东北地区主要旱田土壤有机碳平衡关系研究. *生态学报*, 2015(02). <http://www.ecologica.cn>

cnki.net/kcms/detail/10.5846/stxb201303300562.html. (未出版)

- [29] 刘满强, 陈小云, 郭菊花, 李辉信, 胡锋. 土壤生物对土壤有机碳稳定性的影响. 地球科学进展, 2007, 22(2): 152-158.
- [30] 王淑芳, 王效科, 欧阳志云. 密云水库上游流域土壤有机碳特征及其影响因素. 土壤, 2011, 43(4): 515-524.
- [31] 杜虎, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 彭晚霞, 付威波, 李莎莎. 喀斯特峰丛洼地不同植被类型碳格局变化及影响因子. 生态学报, 2015(14).  
<http://www.cnki.net/kcms/detail/10.5846/stxb201311192768.html>. (未出版)
- [32] 王丹, 王兵, 戴伟, 李萍, 胡文, 郭浩. 不同发育阶段杉木林土壤有机碳变化特征及影响因素. 林业科学研究, 2009, 22(5): 667-671.
- [33] 曹小玉, 李际平, 张彩彩, 房晓娜, 谢肖昀. 不同龄组杉木林土壤有机碳和理化性质的变化特征及其通径分析. 水土保持学报, 2014, 28(4): 200-205.
- [34] 丁访军, 高艳平, 周凤娇, 潘明亮, 吴鹏. 贵州西部 4 种林型土壤有机碳及其剖面分布特征. 生态环境学报, 2012, 21(1): 38-43.
- [35] 王海燕, 雷相东, 张会儒, 杨平. 近天然落叶松云冷杉林土壤有机碳研究. 北京林业大学学报, 2009, 31(3): 11-16.
- [36] 张亚茹, 欧阳旭, 褚国伟, 张倩媚, 刘世忠, 张德强, 李跃林. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤有机碳和全氮的空间分布. 应用生态学报, 2014, 25(1): 19-23.
- [37] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 舒世燕, 何寻阳, 杨珊, 潘复静. 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被演替阶段的土壤脲酶活性. 生态学报, 2011, 31(19): 5789-5796.
- [38] 陶贞, 次旦朗杰, 张胜华, 解晨骥, 林培松, 廖强, 高全洲, 刘龙海. 草原土壤有机碳含量的控制因素. 生态学报, 2013, 33(9): 2684-2694.
- [39] Fu X L, Shao M G, 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.
- [40] Yimer F, Ledin S, Abdelkadir A. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by topographic aspect and vegetation in the Bale Mountains, Ethiopia. *Geoderma*, 2006, 135: 335-344.
- [41] Gressel N, McColl J G, Preston C M, Newman R H, Powers R F. Linkages between phosphorus transformations and carbon decomposition in a forest soil. *Biogeochemistry*, 1996, 33(2): 97-123.
- [42] 姜勇, 庄秋丽, 张玉革, 梁文举. 东北玉米带农田土壤磷素分布特征. 应用生态学报, 2008, 19(9): 1931-1936.
- [43] 詹书侠, 陈伏生, 胡小飞, 甘露, 朱友林. 中亚热带丘陵红壤区森林演替典型阶段土壤氮磷有效性. 生态学报, 2009, 29(9): 4673-4680.
- [44] Quinton J N, Govers G, van Oost K, Bardgett R D. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. *Nature Geoscience*, 2010, 3: 311-314.
- [45] Wang L, Ouyang H, Zhou C P, Zhang F, Song M H, Tian Y Q. Soil organic matter dynamics along a vertical vegetation gradient in the Gongga Mountain on the Tibetan Plateau. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(4): 411-420.
- [46] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系. 生态学报, 2010, 30(5): 1217-1226.
- [47] Amador J A, Ronald J D. Response of carbon mineralization to combined changes in soil moisture and carbon-phosphorus ratio in a low phosphorus histosol. *Soil Science*, 1997, 162(4): 275-282.
- [48] 赵汝东, 樊剑波, 何园球, 宋春丽, 屠人凤, 谭炳昌. 退化马尾松林下土壤障碍因子分析及酶活性研究. 土壤学报, 2011, 48(6): 1287-1292.
- [49] 程先富, 史学正, 于东升, 潘贤章. 兴国县森林土壤有机碳库及其与环境因子的关系. 地理研究, 2004, 23(2): 211-217.