

DOI: 10.5846/stxb202005071134

刘波, 陈林, 庞丹波, 祝忠有, 刘丽贞, 吴梦瑶, 李学斌. 六盘山华北落叶松土壤有机碳沿海拔梯度的分布规律及其影响因素. 生态学报, 2021, 41 (17): 6773-6785.

Liu B, Chen L, Pang D B, Zhu Z Y, Liu L Z, Wu M Y, Li X B. Altitudinal distribution rule of *Larix principis-rupprechtii* forest's soil organic carbon and its influencing factors in Liupan Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (17): 6773-6785.

六盘山华北落叶松土壤有机碳沿海拔梯度的分布规律及其影响因素

刘 波^{1,2}, 陈 林^{1,2}, 庞丹波^{1,2}, 祝忠有^{1,2}, 刘丽贞^{1,2}, 吴梦瑶^{1,2}, 李学斌^{1,2,*}

1 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 银川 750021

2 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

摘要:以六盘山自然保护区华北落叶松林地土壤(海拔范围为 1800—2700 m)为研究对象,选取 1900、2100、2300、2500 m 4 个海拔梯度,研究华北落叶松林地土壤有机碳含量、有机碳密度沿海拔梯度的分布规律及其影响因素,以期为准准确估算华北落叶松林地土壤有机碳储量及其固碳效益评价提供科学依据。结果表明:(1)六盘山不同海拔梯度华北落叶松林地土壤粒径范围主要集中在粗粉粒、细粉粒和极细砂粒,粘粒含量最少,不足 1%。林地土壤呈中性或弱碱性,pH 均值范围为 6.74—8.19;除土壤 pH 外,其他土壤理化指标沿海拔梯度的分布差异不显著($P>0.05$)。(2)在 1 m 的标准土壤剖面内,土壤有机碳含量变化范围为 15.80—35.45 g/kg,总有机碳密度的分布在 21.34—42.28 kg/m²,且深层(40—100 cm)土壤有机碳含量及其密度在各海拔梯度内的变异程度大于表层土壤。(3)随着海拔的升高,土壤有机碳含量及其密度的表聚现象逐渐不明显;同一海拔高度,土壤有机碳含量和碳密度均随土层深度的增加而逐渐降低;同一土层深度土壤有机碳含量及其密度均随海拔的升高呈先增加后减少的趋势,而在整个土壤剖面上,土壤有机碳含量及其密度在较低海拔区域(小于 2100 m)的变异程度较大。(4)冗余分析(RDA)表明:土壤理化性质可以解释华北落叶松林地土壤有机碳含量及其密度 81.02% 的变异,其中电导率是影响华北落叶松土壤有机碳沿海拔梯度变异的主导因子,占环境因子总解释量的 67.4%。

关键词:六盘山;华北落叶松;土壤有机碳;海拔梯度;冗余分析

Altitudinal distribution rule of *Larix principis-rupprechtii* forest's soil organic carbon and its influencing factors in Liupan Mountain

LIU Bo^{1,2}, CHEN Lin^{1,2}, PANG Danbo^{1,2}, ZHU Zhongyou^{1,2}, LIU Lizhen^{1,2}, WU Mengyao^{1,2}, LI Xuebin^{1,2,*}

1 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: The *Larix principis-rupprechtii* forest soils from four altitudes (1900 m, 2100 m, 2300 m, and 2500 m) in Liupan Mountain Nature Reserve were chosen as the research object to analyze the distribution rules of soil organic carbon content, organic carbon density at different soil depths and its influencing factors. This study provides a scientific basis for the accurate estimation of soil carbon storage and evaluation of carbon sequestration effects in *Larix principis-rupprechtii* forest. The results showed that: (1) The soil particles in *Larix principis-rupprechtii* forest are mainly composed of coarse silt, fine silt and very fine sand, clay content was the lowest, less than 1%. The forest land were neutral or alkaline, other soil physicochemical indicators along the altitude gradient distribution difference was not significant ($P>0.05$). (2) In 1 m standard soil profile, soil organic carbon content change range was 15.80—35.45 g/kg, total organic carbon density distribution was 21.34—42.28 kg/m², and deep (40—100 cm) soil organic carbon content and density in each altitude gradient within the variation degree greater than surface soil. (3) With the increase of altitude, the surface accumulation phenomenon of soil organic carbon content and density gradually became not obvious; at the same altitude, soil organic carbon content and density both decreased with the increase of soil depth; at the same soil depth, soil organic carbon content and density both increased and then decreased with the increase of altitude, while in the whole soil profile, soil organic carbon content and density in the lower altitude area (less than 2100 m) had a larger degree of variation. (4) Redundancy analysis (RDA) showed: soil physicochemical properties can explain 81.02% of the variation of soil organic carbon content and density in *Larix principis-rupprechtii* forest, of which electrical conductivity is the dominant factor affecting the variation of soil organic carbon content and density along the altitude gradient, accounting for 67.4% of the total explained variance of environmental factors.

基金项目:宁夏重点研发计划项目(2018BFG02015);国家自然科学基金(31960359);第三批宁夏青年科技人才托举工程项目(TJGC2018068);宁夏高等学校一流学科建设(生态学)资助项目(NXYLXK2017B06)

收稿日期:2020-05-07; 网络出版日期:2021-06-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lixuebin@nxu.edu.cn

and the pH value ranged from 6.74 to 8.19. Except the pH value, the variation of other soil physicochemical properties along the elevation gradient was not significant ($P>0.05$). (2) In 1m depth standard soil profile, the value of soil organic carbon content ranged from 15.8 to 35.45 g/kg, organic carbon density ranged from 21.34 to 42.28 kg/m², and the variation degree of them in the deep layer (40—100 cm) was greater than that in the surface soil (0—40 cm). (3) With the increase of altitude, the surface accumulation of soil organic carbon was gradually unobvious. During the same altitude gradient, soil organic carbon content and organic carbon density showed a decreasing trend with the increase of soil depth. However, in the same soil depth, soil organic carbon content and organic carbon density tend to increase at first and then decrease with the increase of altitude. In addition, soil organic carbon content and organic carbon density caused the least degree of variation at elevation < 2100 m throughout the soil profiles. (4) Results from the redundancy analysis showed that soil physicochemical properties can explain 81.02% total variation of soil organic carbon content and organic carbon density in *Larix principis-rupprechtii* forest. Among them, electrical conductivity was a main factor driving the variation of soil organic carbon in *Larix principis-rupprechtii* forest along altitudinal gradients, accounting for 41.21% of total interpretation. This study revealed the change regularity of soil organic carbon in *Larix principis-rupprechtii* forest along the elevation gradient, and it can provide basis for rational carbon management and sustainable development of plantation.

Key Words: Liupan Mountains; *Larix principis-rupprechtii*; soil organic carbon; altitudinal gradient; redundancy analysis

陆地生态系统作为全球碳循环的重要组成部分,在全球碳收支平衡中占有主导地位,是预测大气 CO₂ 含量及气候变化的重要基础^[1]。森林作为陆地生态系统的主体,是陆地上面积最大、结构最复杂、初级生产力最高的生态系统,其土壤碳贮量约占陆地土壤的 73%^[2-3],因此森林土壤碳库在调节全球碳平衡以及减缓全球气候变化中起着关键的作用。土壤有机碳作为土壤碳库中重要组成部分,其性质十分活跃且具有明显的空间变异性,易受外界环境因素和土壤内部属性的影响^[4]。因此研究森林土壤有机碳分布格局及其影响因素已成为国内外学者的关注热点^[5-7]。

海拔梯度是对区域尺度下水热条件的再分配,它包含了温度、湿度和光照等各种环境因子,这些因子的差异对森林土壤理化性质、植被分布以及凋落物量都有较大影响,进而影响到森林土壤碳库大小及组成^[8-9]。山地生态系统在垂直方向上存在着海拔变化,由此引发山地区域小气候、土壤理化特征、植被类型的梯度效应,因此成为森林土壤有机碳海拔格局研究的理想场所^[10]。由于山地植被往往呈现出垂直地带性分异规律^[11],因此,目前有关山地森林生态系统土壤有机碳海拔梯度格局的研究大多集中在不同海拔梯度下的不同植被类型^[12-14],而针对山地生态系统中单一植被类型土壤有机碳沿海拔梯度分布格局研究相对较少。对于某一植被类型,影响其土壤有机碳在不同海拔区间分布的因子究竟为何?以及哪种因子占主导作用。这些问题目前仍尚不明确。尤海舟等^[15]研究发现,植被因子(枯落物储量、林木生物量)和土壤因子(全氮)是小五台山白桦天然次生林土壤有机碳密度沿海拔分布的主导因子;孟苗婧等^[16]发现土壤理化性质是影响黄山松阔叶混交林土壤有机碳稳定性的重要因素;曾立雄等^[9]研究表明,年夏季平均气温是影响祁连山青海云杉林土壤有机碳密度沿海拔分异的关键生态因子。不同山地生态系统因受到气候条件、海拔高度、植被类型、土壤理化性质等多方面的影响,导致不同区域土壤有机碳变化规律存在差异。因此,研究单一植被土壤有机碳沿海拔梯度的分布规律,可为研究森林土壤有机碳形成机理及正确评估山地生态系统的土壤碳储量提供一定的参考。

宁夏回族自治区南端的六盘山地处我国西北半湿润区到半干旱区的过渡带,是泾河、清水河等黄土高原主要河流的发源地,发挥着水资源供给和生态平衡维护等独特而重要的作用^[17],生态环境脆弱且极为敏感。华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)是六盘山地区的主要造林树种,其自 1964 年引入,已逐渐成为该地区最主要的人工林类型^[18]。华北落叶松具有生长快、材质优良、用途广、抵抗不良气候能力较强等特点,对涵养水源、水土保持和林区生态系统的形成与维护起着重要作用^[19]。目前关于华北落叶松林土壤有机碳的研究

大多集中于土地利用方式^[20-21]、不同林龄^[22-23]、经营措施^[24-25]等方面,而关于华北落叶松林土壤有机碳海拔梯度分布格局的研究尚少。

本研究依据六盘山华北落叶松的分布范围,调查分析华北落叶松林土壤有机碳含量、有机碳密度以及土壤理化性质海拔梯度的分布规律,旨在揭示影响华北落叶松林土壤有机碳的主要因子,以为六盘山华北落叶松林土壤碳库科学管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

六盘山自然保护区位于宁夏南部(105°30—106°30'E,34°30—36°30'N),地处宁夏、甘肃、陕西三省交界地带,处于干旱草原向森林草原过渡的地带,森林覆盖率达80%以上^[26]。该区气候具有大陆性和海洋季风边缘气候特点。年均气温5.8℃,年均降水量676 mm,主要集中在6—9月,年均蒸发量1425 mm^[27-28]。区内植被类型主要分为温性针叶林、落叶阔叶林、常绿竹类灌丛、落叶阔叶灌丛、草原和草甸等^[29]。土壤呈现出明显的垂直地带性分布特征,随海拔升高,依次分布山地灰褐土、山地棕壤和山地草甸土。其中以灰褐土为主,占林区土壤总面积的90%以上。华北落叶松是保护区内主要的造林树种,分布在海拔1800—2700 m,郁闭的华北落叶松林下,灌木覆盖度很低且种类稀少,主要有虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、蒙古荚蒾(*Viburnum mongolicum*)、西北栒子(*Cotoneaster zabelii*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)和沙棘(*Hippophae ramnoides*)等。林下草本层主要有铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、东方草莓(*Fragaria orientalis*)、华北苔草(*Carex hancockiana*)、羽叶凤毛菊(*Saussurea maximowczii*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)等^[18,30]。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic situation of the sample plot

| 样地编号 Sample plot No. | 地点 Location | 经纬度 Longitude and latitude | 海拔 Elevation/m | 坡度 Slope degree/(°) | 坡向 Slope aspect | 坡位 Slope position |
|----------------------------|----------------|----------------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | 卧羊川林场 | 106°20'6.3",35°39'25.2" | 1874 | 54 | 东北坡 | 坡中 |
| 2 | 卧羊川林场 | 106°20'7.08",35°39'24.7" | 1878 | 47 | 东北坡 | 坡中 |
| 3 | 二龙河林场 | 106°20'25.08",35°20'14.7" | 2134 | 32 | 北坡 | 坡中 |
| 4 | 二龙河林场 | 106°16'34.32",35°23'19.25" | 2172 | 21 | 东坡 | 坡中 |
| 5 | 叠叠沟 | 106°8'23.64",35°56'16.296" | 2196 | 55 | 西南坡 | 坡上 |
| 6 | 和商铺林场 | 106°13'58.08",35°41'1.572" | 2283 | 26 | 东坡 | 坡中 |
| 7 | 西峡林场 | 106°13'6.96",35°31'16.5" | 2330 | 21 | 东坡 | 坡底 |
| 8 | 峰台林场 | 106°11'15.72",35°38'42.36" | 2356 | 62 | 东北坡 | 坡中 |
| 9 | 西峡林场 | 106°13'4.44",35°31'11.82" | 2365 | 63 | 东南坡 | 坡顶 |
| 10 | 西峡林场 | 106°13'4.8",35°31'16.97" | 2376 | 45 | 东南坡 | 坡中 |
| 11 | 西峡林场 | 106°12'15.48",35°28'44.328" | 2458 | 12 | 南坡 | 坡中 |
| 12 | 西峡林场 | 106°12'45.36",35°28'56.82" | 2642 | 59 | 西北坡 | 坡顶 |

1.2 土壤样品的采集与处理

选取六盘山海拔1800—2700 m内的华北落叶松林为研究对象。2018年8月,在此范围内选取4个代表性海拔梯度(分别为1900、2100、2300、2500 m),根据具体实施条件沿海拔梯度共选取12个20 m×20 m纯林样地,样地土壤类型皆为灰褐土。各样地情况如表1所示。每块样地沿S型或对角线随机设置3-5个采样点,去除地表凋落物,每个样点分别采集0—20、20—40、40—60、60—100 cm土层土壤样品,将同样地内采集的土样按层混合均匀,共48份土样。同时用环刀(100 cm³)分层采集土壤样品测定土壤密度。将土样带回实验室自然风干,磨细过筛(孔径为1 mm和0.25 mm),用于土壤基本理化性质的测定。

1.3 指标测定

土壤粒度使用马尔文激光粒度仪 (Master 2000) 进行测定,按美国制^[31]分级最终划分为 7 个等级:粘粒 (0.001—0.002 mm)、细粉粒 (0.002—0.02 mm)、粗粉粒 (0.02—0.05 mm)、极细砂粒 (0.05—0.1 mm)、细砂粒 (0.1—0.25 mm)、中砂粒 (0.25—0.5 mm)、粗砂粒 (0.5—1 mm)、极粗砂粒 (1—2 mm)。电导率采用电极法,pH 采用电位法 (水:土=2.5:1),土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定^[32]。

土壤有机碳密度 (SOC_D) 利用下列方程进行计算^[33]:

$$\text{SOC}_D = \sum_i^m \text{SOC}_i \text{BD}_i D_i$$

式中,SOC_D 表示土壤有机碳密度 (kg/m²),SOC_i 表示第 *i* 层的土壤有机碳含量 (g/kg),BD_i 表示第 *i* 层的土壤密度 (g/cm³),D_i 表示第 *i* 层的土层厚度 (m),*m* 表示土层的数量。

1.4 数据分析

由于海拔 1900 和 2500 m 处找不到理想的第 3 块实验样地,故将现有两块样地数据平均值作为第三组数据代入运算。应用 SPSS 22.0 对数据进行统计分析,采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 中的 LSD 法对不同海拔及不同土层的土壤有机碳含量及其密度、土壤理化性质进行多重比较,差异显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。采用双因素方差分析 (two-way ANOVA) 探究海拔、土层及两者的相互作用对土壤理化性质的影响。利用 Canoco 5.0 软件分析土壤理化性质与华北落叶松林土壤有机碳的关系。首先,进行除趋势对应分析 (DCA),根据 DCA 排序轴的梯度长度选择适宜的排序方法。一般排序轴梯度长度 < 3 时,宜采用线性模型排序;梯度长度 > 4 时,宜采用单峰模型排序;梯度长度介于 3 和 4 之间,两种模型都适合^[34]。采用蒙特卡洛检验对环境因子进行贡献率排序。最后,采用 *t*-value 双序图确定单一因子对华北落叶松林土壤有机碳及其密度的影响。此外,为使数据符合正态分布,对土壤有机碳和土壤理化因子数据进行对数转换 $\lg(X+1)$ ^[35]。使用 SigmaPlot 14.0 软件制图。图中的误差棒代表标准误 (SE)。

2 结果与分析

2.1 不同海拔梯度土壤理化性质分异规律

不同海拔梯度土壤机械组成的分异规律如图 1 所示,总体而言,六盘山不同海拔华北落叶松林土壤粒径范围主要集中在粗粉粒、细粉粒和极细砂粒,三者含量之和在 80% 以上,粘粒含量最少,不足 1%。

各海拔梯度内的土壤粒径中粘粒、细粉粒、粗粉粒含量在 20—40 cm 土层分布较多,而在 0—20 cm 土层分布较少;极细砂粒、细砂粒、中砂粒和粗砂含量在 0—20 cm 土层的分布相对较多,而在 20—40 cm 土层的分布相对较少。海拔 1900 m 处的土壤粒径中粘粒、细粉粒、粗粉粒和极粗砂粒在各土层间分布的颗粒含量相对较多,细砂粒—极粗砂粒的颗粒含量较少;而海拔 2300 m 处的土壤粒径中,极细砂粒—极粗砂粒在各土层间分布的颗粒含量较多,粘粒—粗粉粒的颗粒含量相对较少。

由图 2 可知,六盘山华北落叶松林地土壤呈中性或偏碱性,pH 均值范围为 6.74—8.19,其最大值出现在海拔 1900 m 的 40—60 cm 土层土壤,最小值出现在海拔 2300 m 的 0—20 cm 土层土壤。从土层深度来看,海拔 1900、2500 m 土壤 pH 随土层深度的增加呈先增加后减少趋势;在 2100、2300 m 两个海拔高度上,土壤 pH 随土层深度的增加而增加。从海拔梯度来看,除 60—100 cm 土层的土壤 pH 随海拔的升高而减少,其余土层土壤 pH 随海拔的升高呈先减少后增加的趋势。

华北落叶松林土壤电导率均值范围为 45.3—133.42 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (图 2),其最大值出现在海拔 2300 m 的 0—20 cm 土层土壤,最小值出现在海拔 2500 m 的 60—100 cm 土层土壤。电导率在海拔 2100 m 处随土层深度的增加呈先减少后增加的趋势,其他海拔高度内随土层深度的增加而减少。除 60—100 cm 土层外,其余土层土壤电导率在海拔梯度上的排序为:2300 m > 1900 m > 2500 m > 2100 m。

由表 2 可以看出,海拔对华北落叶松林土壤 pH 的影响显著 ($P < 0.01$),但土层深度、海拔和土层深度的交

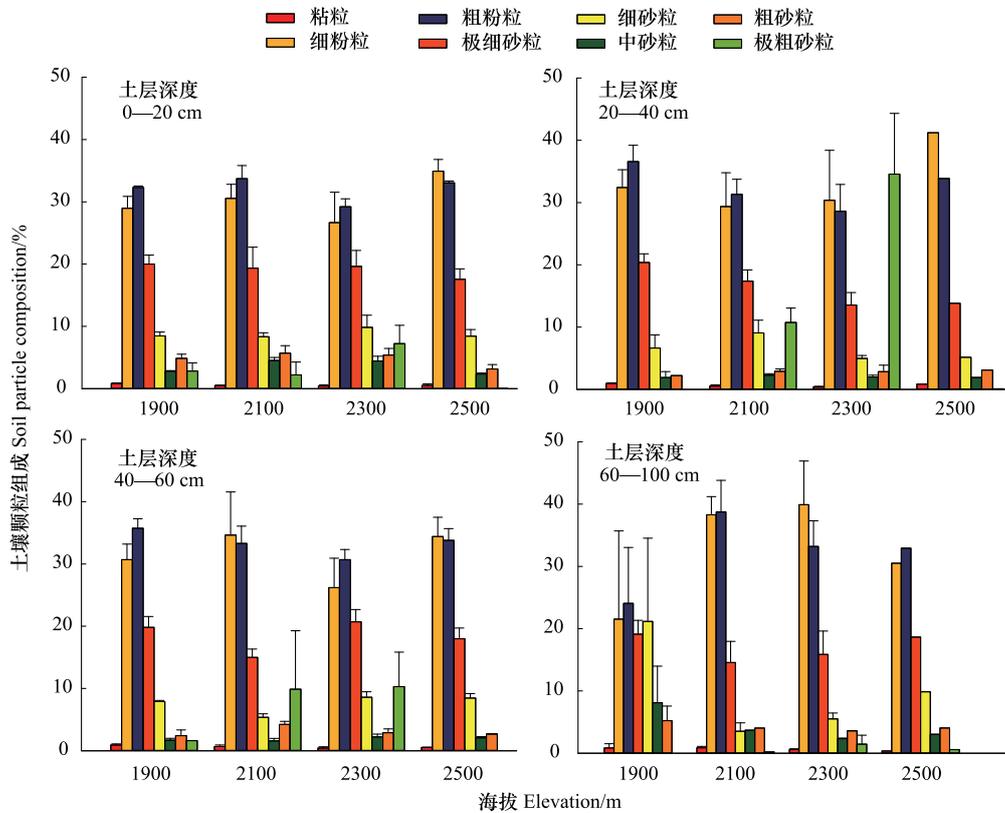


图 1 不同海拔不同土层土壤理化性质的分异规律

Fig.1 Variations of soil Physicochemical properties in different soil layers under the gradient of altitude

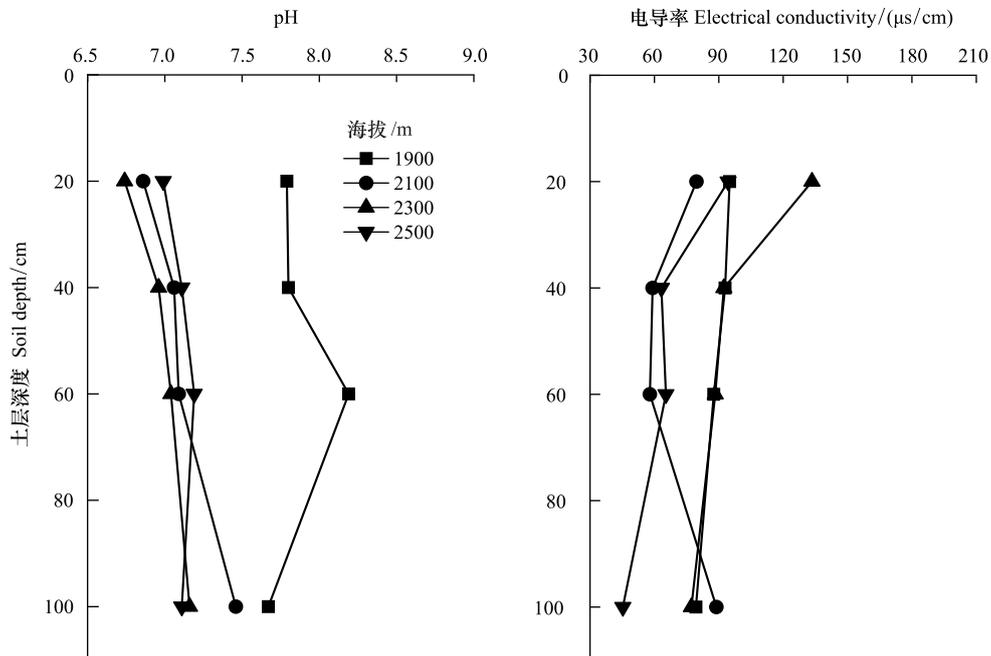


图 2 不同海拔华北落叶松林土壤化学性质的分异规律

Fig.2 Variation pattern of soil chemical properties in different altitude

互作用对其影响并不显著($P>0.05$)。此外,海拔、土层深度以及海拔和土层深度的交互作用对其他土壤理化指标的影响均未达到显著水平($P>0.05$)。

表 2 海拔和土层深度对土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of altitude and soil depth on Soil mechanical composition

| 指标 Indicator | 样本数 Samples | 海拔 Altitude | | 土层深度 Soil depth | | 海拔×土层深度 Altitude and soil depth | |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------|--------------------|----------|------------------------------------|----------|
| | | <i>F</i> | <i>P</i> | <i>F</i> | <i>P</i> | <i>F</i> | <i>P</i> |
| 酸碱度 pH | 44 | 6 | 0.003 | 0.647 | 0.591 | 0.244 | 0.984 |
| 电导率 Electrical conductivity | 44 | 1.172 | 0.338 | 0.844 | 0.481 | 0.252 | 0.982 |
| 粘粒 Clay | 42 | 2.351 | 0.096 | 0.163 | 0.92 | 0.284 | 0.973 |
| 细粉粒 Fine silt | 42 | 0.562 | 0.645 | 0.139 | 0.936 | 0.608 | 0.779 |
| 粗粉粒 Coarse silt | 42 | 1.196 | 0.331 | 0.116 | 0.95 | 1.134 | 0.375 |
| 极细砂粒 Very fine sand | 42 | 0.919 | 0.445 | 0.753 | 0.531 | 0.691 | 0.711 |
| 细砂粒 Fine sand | 42 | 1.802 | 0.172 | 0.907 | 0.451 | 2.066 | 0.072 |
| 中砂粒 Medium sand | 39 | 0.534 | 0.664 | 2.562 | 0.08 | 1.23 | 0.325 |
| 粗砂粒 Coarse sand | 37 | 0.328 | 0.805 | 2.438 | 0.093 | 0.409 | 0.916 |
| 极粗砂粒 Very coarse sand | 28 | 3.376 | 0.049 | 2.555 | 0.097 | 1.351 | 0.298 |

2.2 不同海拔梯度土壤有机碳含量的分布规律

由图 3 可知,同一海拔梯度不同土层内,土壤有机碳含量随着土层深度的增加而逐渐降低。土壤有机碳含量最大值出现在海拔 2300 m 的 0—10 cm 土层,其平均值为 42.97 g/kg,最小值出现在海拔 1900 m 的 60—100 cm 土层,其平均值为 7.74 g/kg。通过计算同一海拔梯度内不同土层有机碳含量的变异系数可知,各海拔变异程度的大小为 2300 m(17.67%)<2500 m(30.62%)<2100 m(34.71%)<1900 m(54.70%),表明在高海拔区域,整个剖面内土壤有机碳含量的分布相对均匀。

海拔 1900 m 处 0—20 cm、20—40 cm 土层的有机碳含量均显著高于 40—100 cm 的两个土层,而海拔 2100 m、2300 m、2500 m 内的有机碳含量在 4 个土层中未表现显著性差异,且各海拔梯度 0—20 cm 土层的有机碳含量占整个土层的比例均最高,为 30.3%(2300 m)—41.2%(1900 m),表明随着海拔的升高,土壤有机碳含量的表聚现象逐渐不明显。六盘山华北落叶松林土壤 0—100 cm 土层有机碳含量的平均值为 23.21 g/kg。各海拔梯度土壤 0—100 cm 土层有机碳含量的平均值大小为:1900 m(15.80 g/kg)<2500 m(20.54 g/kg)<2100 m(21.07 g/kg)<2300 m(35.45 g/kg),其中,海拔 2300 m 与其余 3 个海拔梯度在 0—100 cm 土层的平均有机碳含量存在显著差异。

同一土层不同海拔梯度内,土壤有机碳含量随海拔的升高呈先增加再减少的趋势。海拔 1900 m、2100 m 和其余两个海拔梯度上 40—60 cm 土层的土壤有机碳含量平均值存在显著差异,而其他土层在不同海拔梯度上土壤有机碳含量的平均值变化均无显著差异。相较于 0—20 cm 和 20—40 cm 土层,40—60 cm 和 60—100 cm 土层土壤有机碳含量随海拔的变化较大,其范围分别为 9.60—35.46 g/kg 和 7.74—27.64 g/kg。通过比较

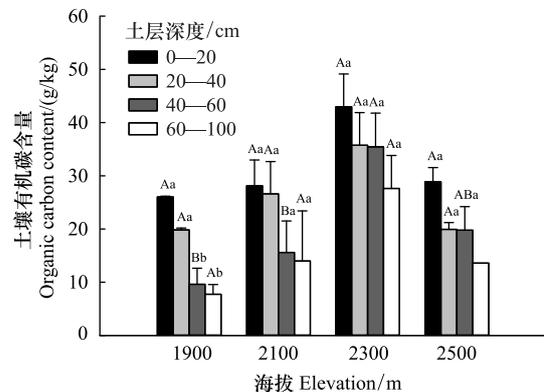


图 3 不同海拔梯度不同土层土壤有机碳含量的分布规律

Fig.3 Variations of soil organic carbon content in different soil layers under the gradient of altitude

不同大写字母表示同一土层不同海拔间显著差异,不同小写字母表示同一海拔不同土层间显著差异($P<0.05$)

不同土层在 4 个海拔梯度上土壤有机碳含量的变异系数,可得其大小顺序为 40—60 cm (54.97%) > 60—100 cm (53.58%) > 20—40 cm (29.44%) > 0—20 cm (24.59%), 表明深层 (40—100cm) 土壤有机碳含量的变异程度大于表层土壤。

2.3 不同海拔梯度土壤有机碳密度的分布规律

同一海拔梯度不同土层内,土壤有机碳密度随着土层深度的增加而逐渐降低(图 4),而图 4 中 60—100 cm 土层的有机碳密度均高于 40—60 cm 土层,这是由于有机碳密度的计算公式中包含土层厚度这一参数,60—100 cm 的土层厚度为 40 cm,其他土层厚度均为 20 cm,因此 60—100 cm 土层的有机碳密度高于 40—60 cm 土层。土壤有机碳密度最高为海拔 2300 m 的 60—100 cm 土壤,其平均值为 13.34 kg/m²,最低为海拔 1900 m 的 40—60 cm 土壤,其平均值为 2.9 kg/m²。通过计算同一海拔梯度内不同土层有机碳密度的变异系数可知,各海拔变异程度的大小为 2500 m (17.30%) < 2300 m (19.10%) < 2100 m (24.51%) < 1900 m (38.86%),可以看出海拔越高的地区,不同土层土壤有机碳密度的变异系数越小,表明有机碳密度在高海拔地区 0—100 cm 土壤剖面中的分布较均匀。

海拔 1900 m 内 0—20 cm 土层的有机碳密度显著高于 40—100 cm 的两个土层,而海拔 2100 m、2300 m 和 2500 m 土壤有机碳密度在标准剖面 0—100 cm 的 4 个土层中没有显著性差异,且各海拔梯度 0—20 cm 土层的有机碳密度占整个土层比例最高,为 25.5% (2300 m)—26.6% (1900 m),表明随着海拔的升高,土壤有机碳密度的表聚现象逐渐不明显。六盘山华北落叶松林土壤 0—100 cm 土层土壤有机碳密度的平均值为 28.87 kg/m²。各海拔梯度土壤 0—100 cm 土层土壤有机碳密度的平均值大小为:2300 m (42.28 kg/m²) > 2100 m (26.97 kg/m²) > 2500 m (24.90 kg/m²) > 1900 m (21.34 kg/m²)。

同一土层不同海拔梯度内,土壤有机碳密度随海拔的升高呈先增加再减少的趋势。不同海拔土壤 0—100 cm 的 4 个土层中土壤有机碳密度的平均值变化均无显著性差异。相较于 0—20 cm 和 20—40 cm 土层,40—60 cm 和 60—100 cm 土层土壤有机碳密度随海拔的变化较大,其范围分别为 2.90—9.13 kg/m² 和 4.67—13.34 kg/m²。通过比较不同土层在 4 个海拔梯度上土壤有机碳密度的变异系数,可得其大小顺序为 40—60 cm (48.91%) > 60—100 cm (47.62%) > 20—40 cm (23.57%) > 0—20 cm (17.58%),可见,深层 (40—100cm) 土壤有机碳密度的变异程度大于表层土壤。

华北落叶松林土壤总有机碳密度随着海拔梯度的增加呈先增加后减少的趋势。总有机碳密度平均在 21.34—42.28 kg/m² 之间,其中海拔 2300 m 总有机碳密度最高,而海拔 1900 m 总有机碳密度最低,各海拔总有机碳密度变化没有显著差异。

2.4 华北落叶松林土壤有机碳含量及其密度沿海拔分异的影响因素

2.4.1 土壤有机碳含量及其密度与土壤理化因子的 RDA 排序

DCA 排序结果显示,排序轴中梯度长度最大值为 0.3,因此采用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 探讨土壤理化性质对华北落叶松林土壤有机碳的影响,本研究以土壤有机碳含量、有机碳密度为响应变量,以土壤 pH、电导率、粘粒、细粉粒、粗粉粒、极细砂粒、细砂粒、中砂粒、粗砂粒和极粗砂粒含量这 10 个土壤因子为环境解释变量,首先使用向前选择法筛选出高变异膨胀因子 (VIF > 20)^[34],结果显示极细砂粒属于高膨胀因子,将其去除后,剩余 9 个因子的膨胀系数均小于 20,将这 9 个土壤因子纳入模型进行 RDA 分析。

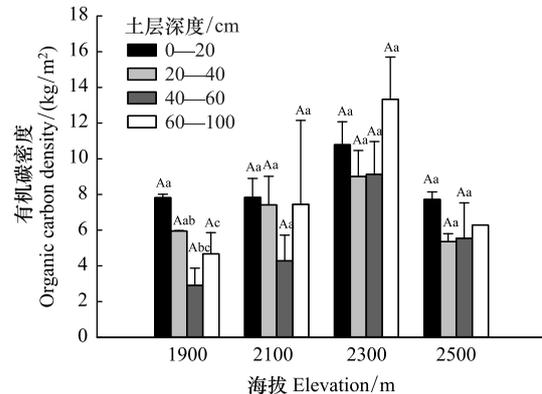


图 4 不同海拔梯度不同土层土壤有机碳密度的分布规律

Fig. 4 Variations of soil organic carbon density in different soil layers under the gradient of altitude

不同大写字母表示同一土层不同海拔间显著差异,不同小写字母表示同一海拔不同土层间显著差异 ($P < 0.05$)

RDA 分析结果表明(表 3),9 个环境变量解释了 81.02% 的数据总变异,其中第一轴和第二轴的解释率分别为 79.03% 和 1.99%,土壤有机碳-环境因子排序轴的相关系数分别为 0.916 和 0.583,第一排序轴的土壤有机碳-环境因子关系累积百分比达 97.54%,说明其相关系数很高,可解释土壤有机碳和环境总方差的 97.54%,因此,前两个排序轴已能较好地反映土壤有机碳与地形和土壤因子间的相关关系。

表 3 RDA 分析排序轴特征值、土壤有机碳与土壤理化因子的相关系数

Table 3 Eigenvalues for RDA axis and correlation between soil organic carbon and environmental factors

| 轴 Axes | 轴 1 Axis 1 | 轴 2 Axis 2 | 轴 3 Axis 3 | 轴 4 Axis 4 |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 特征值 Eigenvalues | 0.7903 | 0.0199 | 0.152 | 0.038 |
| 土壤理化因子的累计贡献率 Explained variation (cumulative)/% | 79.03 | 81.02 | 96.24 | 100 |
| 土壤有机碳与土壤理化因子的相关系数 Pseudo-canonical correlation | 0.916 | 0.583 | 0 | 0 |
| 土壤有机碳与土壤理化因子变化累计贡献率 Explained fitted variation (cumulative) | 97.54 | 100 | | |
| 典范特征值 Canonical eigenvalues | 0.810 | | | |
| 总特征值 All eigenvalues | 1 | | | |

RDA: 冗余分析 Redundancy analysis

如图 5 所示,虚线空心箭头表示土壤环境因子,实线黑色箭头分别表示土壤有机碳含量和土壤有机碳密度。箭头连线的长短表示各指标对模型贡献率的大小,箭头连线越长对模型贡献率越大,反之,则越小;箭头与排序轴的夹角表示相关性的大小,夹角越小,相关性越大;而土壤环境因子箭头连线在土壤有机碳箭头连线上的垂直投影越长(余弦值越大),其对土壤有机碳的影响越大^[36-37]。可以看出,电导率(EC)、细砂粒(FSD)、粘粒(C)的箭头连线最长,表示电导率、细砂粒和粘粒含量对土壤有机碳差异性有较好的解释,其中,电导率(EC)与土壤有机碳含量(SOC)、粗砂粒与有机碳密度(SOCD)夹角很小且方向一致,呈正相关关系;细砂粒(FSD)与土壤有机碳含量、有机碳密度均呈负相关,但与有机碳密度的相关性不大;从投影长度来看,电导率在土壤有机碳含量、有机碳密度箭头连线上的投影长度最长,表示电导率对土壤有机碳含量、有机碳密度存在明显的正效应,说明电导率是影响土壤有机碳含量及其密度的主导因子,其次,对土壤有机碳含量影响较大的土壤因子有粘粒含量和细砂粒含量;对有机碳密度有较大影响的因子是粗粉粒含量。其余因子中,pH 在土壤有机碳含量和有机碳密度箭头连线的延长线上的投影最短,说明 pH 对土壤有机碳含量和有机碳密度的影响最小。

对环境因子进行蒙特卡洛检验,得到各环境因子解释量的贡献率(表 4)。环境因子对有机碳含量和有机碳密度解释量的贡献率排序大小依次为:电导率>粗粉粒>粘粒>pH>细粉粒>中砂粒>细砂粒>极粗砂粒>粗砂粒,其中电导率、粗粉粒和粘粒对土壤有机碳含量及密度的影响达到显著水平($P < 0.05$),占环境因子总解释量的比例分别为 67.4%、16% 和 7.9%,说明土壤理化因子中的电导率、粗粉粒含量、粘粒含量是影响华北落叶松林土壤有机碳的关键因素。

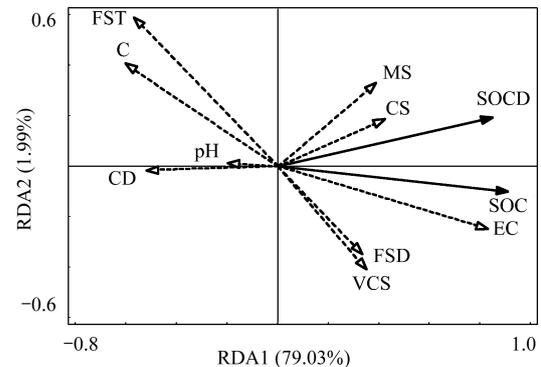


图 5 土壤有机碳含量、有机碳密度与土壤理化性质的冗余分析
Fig.5 Redundancy analysis of soil enzyme activities and physicochemical properties

SOC: 有机碳含量 Soil organic carbon content; SOCD: 有机碳密度 Soil organic carbon density; EC: 电导率 Electrical conductivity; C: 粘粒含量 Clay content; FST: 细粉粒含量 Fine silt content; CD: 粗粉粒含量 Coarse dust content; FSD: 细砂粒含量 Fine sand content; MS: 中砂粒含量 Medium sand content; CS: 粗砂粒含量 Coarse sand content; VCS: 极粗砂粒含量 Very coarse sand content

表 4 环境因子贡献率和显著性检验结果

Table 4 Contribution and signification level of environmental factors

| 环境因子 Environmental factor | <i>F</i> | <i>P</i> | 贡献率 Contribution/% | 环境因子 Environmental factor | <i>F</i> | <i>P</i> | 贡献率 Contribution/% |
|------------------------------|----------|----------|-----------------------|------------------------------|----------|----------|-----------------------|
| EC | 31.3 | 0.002 | 67.4 | MS | 1.1 | 0.328 | 1.3 |
| CD | 10 | 0.004 | 16 | FSD | 0.6 | 0.524 | 0.7 |
| pH | 2.7 | 0.102 | 4.1 | VCS | 0.1 | 0.83 | 0.2 |
| FST | 1.7 | 0.202 | 2.4 | CS | <0.1 | 0.966 | <0.1 |
| C | 6.8 | 0.008 | 7.9 | | | | |

EC:电导率 Electrical conductivity;C:粘粒含量 Clay content;FST:细粉粒含量 Fine silt content;CD:粗粉粒含量 Doarse dust content;FSD:细砂粒含量 Fine sand content;MS:中砂粒含量 Medium sand content;CS:粗砂粒含量 Coarse sand content;VCS:极粗砂粒含量 Very coarse sand content

2.4.2 单一因子对土壤有机碳含量、有机碳密度影响分析

为了进一步确定单一因子对华北落叶松林土壤有机碳的影响,将上述研究中对土壤有机碳含量及其密度有显著影响的土壤因子使用 t-value 双序图进行逐一分析。t-value 双序图可解释华北落叶松林土壤有机碳对环境因子的依赖程度,若某指标箭头连线完全落入实线圆圈内,表示该指标与这一因子呈正相关;若指标箭头连线完全落入虚线圆圈内,则表示该指标与这一因子呈负相关^[36]。

图 6 表示电导率、粗粉粒含量、粘粒含量对有机碳含量和有机碳密度的影响,可以看出有机碳含量与有机碳密度箭头完全落入 EC(电导率)实线圈内,表明土壤有机碳、有机碳密度与电导率呈显著正相关,即随着电导率的增加,土壤有机碳含量和有机碳密度均呈现出明显增加的趋势;土壤有机碳密度完全穿过 CD(粗粉粒含量),表明土壤有机碳密度与粗粉粒含量呈显著负相关;土壤有机碳含量的箭头未完全落入实线圈内,但其大部分在虚线圈内,表明粗粉粒含量的增加将会导致土壤有机碳含量在一定程度上的降低。

土壤有机碳含量、有机碳密度完全落入 C(粘粒含量)虚线圈内,表明土壤有机碳含量、有机碳密度与粘粒含量呈显著负相关。

3 讨论

3.1 海拔梯度对华北落叶松林土壤理化性质的影响

海拔包含了多种环境因子的梯度效应,海拔变化会引起土壤的水热条件及植被发生变化,因而山地土壤的理化性质与海拔高度的变化有密切关系^[38]。

六盘山不同海拔华北落叶松林土壤颗粒组成比例大小均为:粉粒>砂粒>粘粒。粉粒兼备了砂粒和粘粒的优点,其含量优势既保证了良好的土壤通透性,又维持了一定的土壤肥力^[39]。低海拔处(1900 m)的土壤粒径中粘粒—极细砂粒的颗粒含量相对较多,细砂粒—极粗砂粒的颗粒含量较少;而高海拔(2300 m)处的土壤粒径中,极细砂粒—极粗砂粒的颗粒含量较多,粘粒—粗粉粒的颗粒含量相对较少,说明海拔越高的地区,其土壤平均粒径越大。这是由于高海拔地区的细碎土壤受到强风侵蚀而流失,致使土壤颗粒平均粒径较大^[40]。

六盘山华北落叶松林地土壤 pH 均值范围为 6.74—8.19,其最大值出现在海拔 1900 m,最小值出现在海拔 2300 m,土壤 pH 随海拔的升高呈先减少后增加的趋势。这可能是由于在海拔 1900—2300 m 区域的华北落叶松林生长状况良好,地表针叶成分的枯落物较厚,加剧了酸性淋溶过程,使土壤 pH 逐渐降低^[41],但当海拔高度超过 2500 m 时,森林土壤及其母质的淋溶作用继续发生变化^[42],从而导致土壤 pH 增加;土壤电导率均值范围为 45.3—133.42 us/cm,两者在不同海拔上的分异规律性均不明显,其在海拔梯度上的排序均为:2300 m>1900 m>2500 m>2100 m。

3.2 海拔梯度对华北落叶松林土壤有机碳含量和密度的影响

六盘山不同海拔华北落叶松林土壤有机碳含量的变化范围为 15.8—35.45 g/kg,均值为 23.21 g/kg,低于刘延惠等^[17]在六盘山南部调查的华北落叶松林 0—45 cm 土层的平均有机碳含量为 23.17—31.05 g/kg,高于吴建国等^[21]在六盘山北部调查的华北落叶松林 0—110 cm 平均有机碳含量(10.96—16.53 g/kg),这可能与

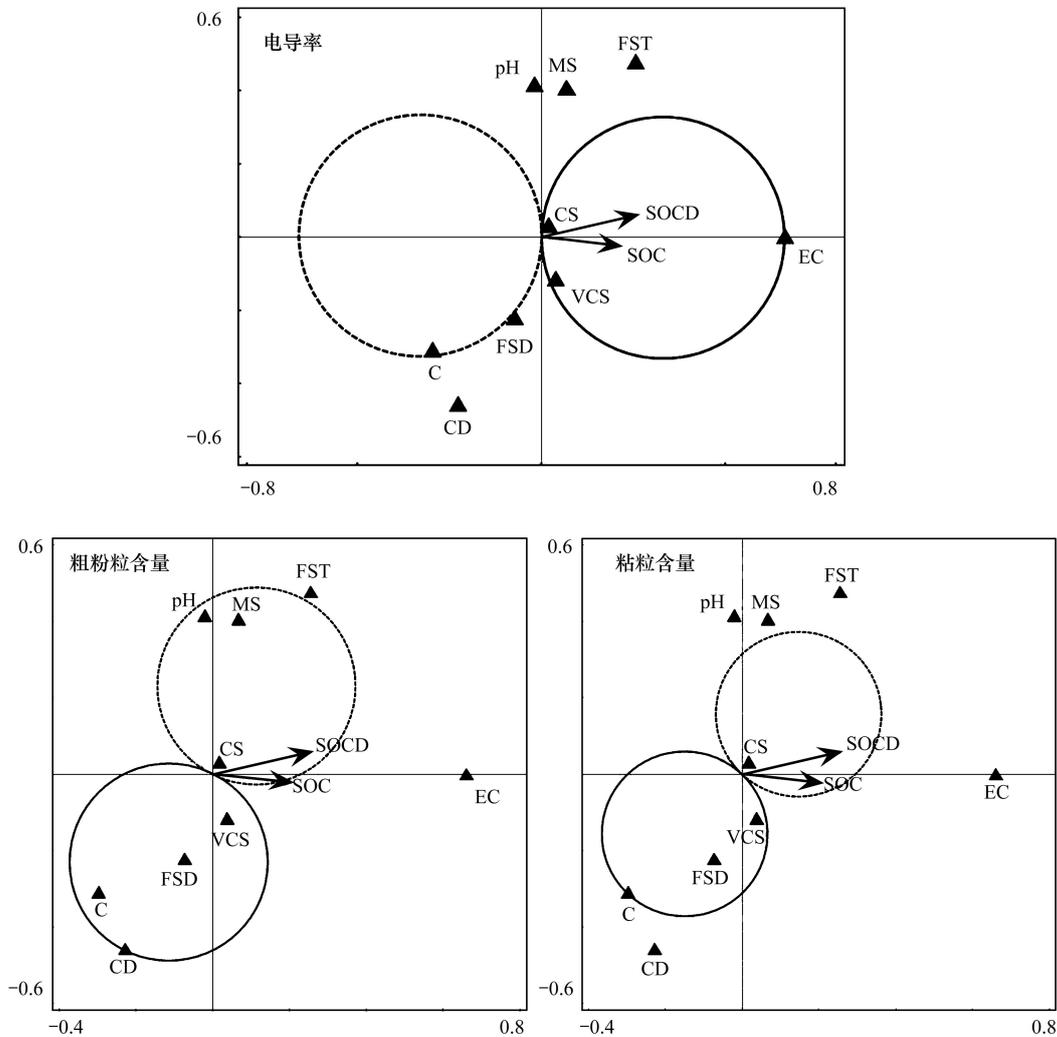


图6 单一关键理化对土壤有机碳影响的 t-value 检验结果

Fig.6 T-value test results for single crucial physicochemical factors influencing soil organic carbon

采样时间、采样地点及采样深度有关。不同海拔华北落叶松林 0—100 cm 土层的土壤平均有机碳密度的变化范围为 21.34—42.28 kg/m², 均值为 28.87 kg/m², 显著高于我国森林土壤平均碳密度 10.78 kg/m² [43], 说明华北落叶松林具有巨大的土壤碳截存能力。

研究结果表明, 同一海拔高度内, 土壤有机碳含量和有机碳密度均随土层深度的增加而逐渐减低, 因为土壤有机碳主要来源于地表的枯枝落叶层, 且随着土层加深, 土壤温度、水分和养分以及微生物活性逐渐下降 [44]。随着海拔的升高, 土壤有机碳含量及其密度的表聚现象逐渐不明显, 这与刘文惠等 [45] 的研究结果相反, 这可能是由于低海拔区域频繁受到人为因素的干扰, 使其土壤有机碳的表聚性较为明显 [46]。

有研究表明, 土壤有机碳含量随海拔的升高而降低 [47-48], 也有研究发现, 土壤有机碳随海拔升高而增加 [49-51]。而本研究发现, 随着海拔高度的增加, 土壤有机碳含量及其密度呈先增加后减小趋势。因为在海拔 1900—2300 m 范围内, 随海拔升高, 人类活动减弱, 湿度增加, 华北落叶林的生长状况逐渐转好, 凋落物储备量增加, 土壤枯枝落叶和根系分泌物较多 [52], 促进植物凋落物转化为土壤有机质, 有利于土壤有机质的积累, 因此, 土壤有机碳含量及密度随海拔的升高呈增加趋势。但随着海拔的继续增加, 低温高湿的环境抑制了土壤微生物的活性, 使得土壤有机碳含量及密度随海拔的升高而有所下降 [53]。

深层 (40—100 cm) 土壤有机碳含量及其密度在不同海拔梯度间的变异程度大于表层土壤。通常来讲,

表层土壤易受外界环境影响,而本研究中深层土壤有机碳含量及其密度在不同海拔梯度间的波动较大,与程浩等^[54]的研究结果相似,具体原因有待进一步研究。从整个土壤剖面来看,土壤有机碳含量及其密度在较低海拔区域(1900—2100 m)的变异程度较大。这可能同样与低海拔地区土壤易受到人类活动频繁地干扰有关^[55]。

3.3 华北落叶松林土壤有机碳的主要影响因素

土壤的粒径分布作为影响土壤碳储存的重要机制,对土壤有机碳具有物理保护作用^[56]。土壤 pH 通过影响土壤微生物的活动来影响土壤有机碳的固定和积累^[57]。土壤电导率可以表征土壤盐分的多少,而土壤盐分可通过影响微生物的活性,进而影响土壤有机质的分解^[58]。土壤理化因子通过影响土壤结构与植被间接影响土壤有机碳的含量与分布,二者息息相关^[59-60]。

冗余分析结果表明,土壤有机碳含量、有机碳密度与电导率呈显著正相关,这与杨昊天等^[61]、王鑫等^[62]、陈永乐等^[63]的研究结果相似。由前面研究可知,2300 m 处的土壤有机碳含量最高,同时该区域内的土壤 pH 值最小,电导率最高。这可能是由于该区域内华北落叶松林的生长状况较好,华北落叶松林在生长和繁殖的过程中,造成较多数目的土壤可溶性离子,从而导致了电导率的增加^[64],同时,分泌的有机酸及土壤微生物的相互作用导致土壤 pH 值下降,进而增加土壤养分含量以及增强有效养分的吸收和利用^[65]。电导率对土壤有机碳含量、有机碳密度存在明显的正效应,且解释贡献率达 67.4%,说明电导率是影响土壤有机碳含量及其密度的主导因子。

土壤细颗粒(粘粒+粉粒)可以通过影响地上植被组成和生产力来调控有机碳向土壤中的输入量^[66],被认为是影响土壤有机碳的关键因子^[67-68],本研究中,土壤有机碳含量、有机碳密度与粗粉粒含量、粘粒含量呈显著负相关,这与王会利等^[69]、郝翔翔等^[70]的研究结果一致,但通常来讲,土壤有机碳含量与粘粒、粉粒含量呈显著正相关,这是因为高海拔地区受到强风及淋溶作用的影响,导致土壤细颗粒随海拔升高而逐渐降低。但由于华北落叶松林在海拔 1900—2300 m 的区域内,随着海拔升高,生境适合华北落叶松的生长,导致土壤有机碳沿海拔的升高呈增加趋势,最终表现为土壤有机碳含量及其密度与粘粒、粗粉粒含量呈显著负相关。

4 结论

(1) 六盘山华北落叶松林土壤机械组成以粗砂粒为主,细砂粒次之,粘粒含量相对较低。林地土壤呈中性或偏碱性,且除土壤 pH 外,海拔对其他土壤理化指标的影响均未达显著水平($P>0.05$)。

(2) 华北落叶松林土壤有机碳含量介于 15.80—35.45 g/kg,有机碳密度介于 21.34—42.28 kg/m²。随着海拔的升高,土壤有机碳含量及密度均呈先增加后减少的趋势,且其表聚现象逐渐不明显。在高海拔区域,土壤有机碳含量及密度的变异程度较小;而在整个土层,深层土壤有机碳的变异程度大于表层土壤。

(3) 土壤理化性质可以解释华北落叶松土壤有机碳的大部分变异,其中电导率、粗粉粒含量、粘粒含量对华北落叶松林土壤有机碳的影响显著($P<0.05$),而电导率的贡献率最大,是影响华北落叶松土壤有机碳沿海拔梯度变异的主导因子。

本研究因有限的样地数量设置,且忽略了坡度、坡向等地形因子对土壤有机碳的影响,亦没有考虑林龄、林分密度、林分结构以及凋落物层厚度等林分状况,所以对于综合分析华北落叶松林土壤有机碳沿海拔梯度分异的影响因素方面仍有欠缺。

参考文献(References):

- [1] 任继周,林慧龙. 草地土壤有机碳储量模拟技术研究. 草业学报, 2013, 22(6): 280-294.
- [2] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [3] 姜志林. 森林生态学(二): 森林生态系统的特点. 生态学杂志, 1984, (3): 61-64.
- [4] 李龙, 秦富仓, 姜丽娜, 姚雪玲. 赤峰市散汉旗土壤有机碳含量的垂直分布及其影响因素. 生态学报, 2019, 39(1): 345-354.
- [5] Johnson D W, Curtis P S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management*, 2001, 140(2/3):

227-238.

- [6] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 张旭辉. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展. 土壤学报, 2007, 44(2): 327-337.
- [7] 唐朋辉, 党坤良, 王连贺, 马俊. 秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度影响因素. 生态学报, 2016, 36(4): 1030-1039.
- [8] 向慧敏, 温达志, 张玲玲, 李炯. 鼎湖山森林土壤活性碳及惰性碳沿海拔梯度的变化. 生态学报, 2015, 35(18): 6089-6099.
- [9] 曾立雄, 雷蕾, 王晓荣, 朱建华, 肖文发, 刘贤德, 敬文茂. 海拔梯度对祁连山青海云杉林乔木层和土壤层碳密度的影响. 生态学报, 2018, 38(20): 7168-7177.
- [10] 谷晓楠, 贺红土, 陶岩, 靳英华, 张心昱, 徐志伟, 王钰婷, 宋祥霞. 长白山土壤微生物群落结构及酶活性随海拔的分布特征与影响因素. 生态学报, 2017, 37(24): 8374-8384.
- [11] 胡实, 赵茹欣, 贾仰文, 牛存稳, 刘梁美子, 占车生. 中国典型山地植被垂直地带性特征及其影响要素. 自然杂志, 2018, 40(1): 12-16.
- [12] 任玉连, 陆梅, 曹乾斌, 李聪, 冯峻, 王志胜. 南滚河国家级自然保护区典型植被类型土壤有机碳及全氮储量的空间分布特征. 北京林业大学学报, 2019, 41(11): 104-115.
- [13] 柯炳氨, 张璐, 苏志尧. 粤北亚热带山地森林土壤有机碳沿海拔梯度的变化. 生态与农村环境学报, 2012, 28(2): 151-156.
- [14] 周晨霓, 马和平. 西藏季拉山典型植被类型土壤活性有机碳分布特征. 土壤学报, 2013, 50(6): 1246-1251.
- [15] 尤海舟, 毕君, 王超, 任启文, 李联地. 河北小五台山不同海拔白桦林土壤有机碳密度分布特征及影响因素. 生态环境学报, 2018, 27(3): 432-437.
- [16] 孟苗婧, 张金池, 郭晓平, 吴家森, 赵有朋, 叶立新, 刘胜龙. 海拔变化对黄山松阔叶混交林土壤有机碳组分的影响. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42(6): 106-112.
- [17] 刘延惠, 王彦辉, 于澎涛, 熊伟, 郝佳, 张晓蓓, 徐丽宏. 六盘山南部华北落叶松人工林土壤有机碳含量. 林业科学, 2012, 48(12): 1-9.
- [18] 刘泽彬, 王彦辉, 徐丽宏, 刘宇, 邓秀秀, 王亚蕊, 左海军. 六盘山华北落叶松林坡面的土壤水分时间稳定性. 水土保持学报, 2017, 31(1): 153-159, 165-165.
- [19] 石慧, 王孝安, 郭华. 秦岭华北落叶松人工林群落结构及物种多样性. 安徽农学通报, 2008, 14(15): 159-162, 204-204.
- [20] 李君剑, 赵溪, 潘恬豪, 严俊霞, 李洪建. 不同土地利用方式对土壤活性有机质的影响. 水土保持学报, 2011, 25(1): 147-151.
- [21] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响. 应用生态学报, 2004, 15(4): 593-599.
- [22] 吴然, 康峰峰, 韩海荣, 程小琴, 周文嵩, 王烁鑫, 陈晶, 田平. 山西太岳山不同林龄华北落叶松林土壤微生物特性. 生态学杂志, 2016, 35(12): 3183-3190.
- [23] 张泽辉, 程顺, 侯海潮. 不同林龄华北落叶松人工林土壤化学性质. 林业与生态科学, 2018, 33(3): 270-274.
- [24] 马俊勇. 四种森林经营措施对土壤活性有机碳组分影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019: 119-119.
- [25] 郝磊. 不同经营措施下的华北落叶松人工林土壤有机碳及养分特征[D]. 北京: 北京林业大学, 2019: 70-70.
- [26] 曲潇琳, 龙怀玉, 曹祥会, 谢平. 宁夏山地土壤的发育规律及系统分类研究. 土壤学报, 2019, 56(1): 65-77.
- [27] 黄琳琦, 向业凤, 魏孝荣, 张兴昌. 六盘山林区土壤物理性质分布特征. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 60-65.
- [28] 曹荣荣, 胡永强, 杨彩虹, 徐秀琴. 六盘山西峡林区降雨量与海拔高度关系的初步研究. 园艺与种苗, 2018, 38(2): 26-27.
- [29] 王占印. 六盘山植被特征及其对水分条件的响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009: 95-95.
- [30] 韩新生, 王彦辉, 李振华, 王艳兵, 于澎涛, 熊伟. 六盘山半干旱区华北落叶松人工林林下日蒸散特征及其影响因素. 林业科学, 2019, 55(9): 11-21.
- [31] 朱鹤健, 陈健飞, 陈松林. 土壤地理学(第三版). 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [32] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [33] 张彦军, 郁耀阔, 牛俊杰, 龚兰兰. 秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局. 生态学报, 2020, 40(2): 629-639.
- [34] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [35] 谭一波, 申文辉, 田红灯, 付孜, 叶建平, 郑威, 黄善琪. 猫儿山不同海拔植物群落树木构型差异及其影响因素. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2614-2620.
- [36] 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜. 塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性. 环境科学, 2016, 37(4): 1516-1522.
- [37] 朱美玲, 贡璐, 张龙. 塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析. 环境科学, 2015, 36(7): 2678-2685.
- [38] 胡雷, 王长庭, 阿的鲁骥, 字洪标. 高寒草甸植物根系生物量及有机碳含量与土壤机械组成的关系. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2015, 41(1): 6-11.
- [39] 麻泽宇, 王丹, 戴伟, 张毓涛, 戴奥娜. 阿尔泰山不同海拔梯度天然冷杉林土壤特征及肥力综合评价. 水土保持研究, 2016, 23(5): 134-140.
- [40] 王雅琼, 张建军, 李梁, 周宇鹏, 张守红, 陈宝强, 赵荣玮, 孙若修, 茹豪. 祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性影响因素. 生态学报, 2018, 38(1): 122-131.

- [41] 李兴民, 车克钧, 杨永红, 王辉, 马维维, 王惠, 黄蓉. 白龙江上游不同海拔森林土壤养分变化规律研究. 甘肃农业大学学报, 2014, 49(6): 131-137.
- [42] 魏新, 郑小锋, 张硕新. 秦岭火地塘不同海拔梯度森林土壤理化性质研究. 西北林学院学报, 2014, 29(3): 9-14.
- [43] 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. 生态学报, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [44] 徐侠, 陈月琴, 汪家社, 方燕鸿, 权伟, 阮宏华, 徐自坤. 武夷山不同海拔高度土壤活性有机碳变化. 应用生态学报, 2008, 19(3): 539-544.
- [45] 刘文惠, 武红旗, 蒋平安, 张文太, 盛建东, 李新川, 张佩佩. 1980-2014 年天山北麓不同土地覆被土壤有机碳的变化特征. 新疆农业大学学报, 2016, 39(3): 239-245.
- [46] 周义贵, 郝凯婕, 李贤伟, 范川, 陈栋霖, 王谢, 王晓红. 川西亚高山不同土地利用类型对土壤微生物量碳动态特征的影响. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1944-1956.
- [47] 郑梓萱, 曾辰. 纳木错典型小流域土壤有机碳含量空间分布. 南方农业学报, 2017, 48(12): 2152-2156.
- [48] 王根绪, 程国栋, 沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义. 冰川冻土, 2002, 24(6): 693-700.
- [49] Du B M, Kang H Z, Pumpanen J, Zhu P H, Yin S, Zou Q, Wang Z, Kong F Q, Liu C J. Soil organic carbon stock and chemical composition along an altitude gradient in the Lushan Mountain, subtropical China. Ecological Research, 2014, 29(3): 433-439.
- [50] 姜霞, 吴鹏, 谢涛, 崔迎春. 雷公山自然保护区森林土壤碳、氮、磷化学计量特征的垂直地带性. 江苏农业科学, 2018, 46(14): 292-295.
- [51] 钟兆全. 闽北毛竹林土壤有机碳含量特征及其影响因素. 福建林业科技, 2017, 44(2): 36-42, 81-81.
- [52] 赵伟文, 梁文俊, 魏曦. 关帝山不同海拔华北落叶松人工林土壤养分特征. 江西农业大学学报, 2019, 41(6): 1103-1112.
- [53] 胡健, 吕一河, 傅伯杰, 孙飞翔. 祁连山排露沟流域土壤水热与降雨脉动沿海拔梯度变化. 干旱区研究, 2017, 34(1): 151-160.
- [54] 程浩, 张厚喜, 黄智军, 徐自坤, 杨强, 刘爱琴. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳含量变化特征. 森林与环境学报, 2018, 38(2): 135-141.
- [55] 姜广争, 宫渊波. 干旱河谷区土壤有机碳及其质量分配特征. 安徽农业科学, 2018, 46(27): 137-142.
- [56] 王峰, 王义祥, 江福英, 吴志丹, 尤志明, 张文锦, 翁伯琦. 丘陵山地茶园土壤团聚体及其碳含量分布特征研究. 福建农业学报, 2012, 27(1): 87-92.
- [57] 姜俊彦, 黄星, 李秀珍, 闫中正, 李希之, 丁文慧. 潮滩湿地土壤有机碳储量及其与土壤理化因子的关系——以崇明东滩为例. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 540-547.
- [58] 王磊, 何冬梅, 刘华, 江浩, 王火. 江苏滨海湿地不同植被演替阶段土壤有机碳分布特征. 安徽农业大学学报, 2017, 44(6): 1064-1069.
- [59] Lu H B, Liu S R, Wang H, Luan J W, Schindlbacher A, Liu Y C, Wang Y. Experimental throughfall reduction barely affects soil carbon dynamics in a warm-temperate oak forest, central China. Scientific Reports, 2017, 7(1): 15099.
- [60] Edwards K R, Picek T, Čížková H, Zemanová K M, Stará A. Nutrient addition effects on carbon fluxes in wet grasslands with either organic or mineral soil. Wetlands, 2015, 35(1): 55-68.
- [61] 杨昊天, 王增如, 贾荣亮. 腾格里沙漠东南缘荒漠草地不同群落类型土壤有机碳分布及储量特征. 植物生态学报, 2018, 42(3): 288-296.
- [62] 王鑫, 杨德刚, 熊黑钢, 柳妍妍, 安尼瓦尔·买买提. 新疆干旱区 4 种怪柳灌丛碳贮量特征. 生态学报, 2017, 37(13): 4384-4391.
- [63] 陈永乐, 张志山, 赵洋. 人工固沙区土壤碳分布及其与土壤属性的关系. 中国沙漠, 2017, 37(2): 296-304.
- [64] Peiffer J A, Spor A, Koren O, Jin Z, Tringe S G, Dangl J L, Buckler E S, Ley R E. Diversity and heritability of the maize rhizosphere microbiome under field conditions. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(16): 6548-6553.
- [65] 黄文, 陈颖卓, 庄远红. 油茶根际与非根际土壤养分含量和微生物数量的季节变化. 江苏农业科学, 2017, 45(19): 265-270.
- [66] Li X R, Zhang Z S, Zhang J G, Wang X P, Jia X H. Association between vegetation patterns and soil properties in the southeastern Tengger desert, China. Arid Land Research and Management, 2004, 18(4): 369-383.
- [67] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.
- [68] Callesen I, Liski J, Raulund-Rasmussen K, Olsson M T, Tau-Strand L, Vesterdal L, Westman C J. Soil carbon stores in Nordic well - drained forest soils-relationships with climate and texture class. Global Change Biology, 2003, 9(3): 358-370.
- [69] 王会利, 王绍能, 宋贤冲, 秦丽玲, 唐林峰, 叶建平, 曹继钊, 邓小军. 广西猫儿山水青冈林土壤剖面有机碳垂直分布特征及影响因素. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(11): 89-94, 122-122.
- [70] 郝翔翔, 韩晓增, 李禄军, 邹文秀, 陆欣春, 乔云发. 土地利用方式对黑土剖面有机碳分布及碳储量的影响. 应用生态学报, 2015, 26(4): 965-972.