



基于稳定碳同位素分析宁夏典型林分土壤 有机碳分布格局及影响因素

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

(1 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; 2 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021)

摘 要: 选择宁夏自北向南方向的贺兰山、罗山和六盘山(3 座山的降水量呈现逐渐增加的趋势)共有的青海云杉林和油松林土壤作为研究对象, 分析两种针叶林土壤有机碳特征[土壤有机碳(SOC)含量、稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)和有机碳分解速率(β 值)]的变化情况, 并采用冗余分析法分析土壤化学指标对土壤有机碳特征的影响作用, 探究干旱半干旱区土壤稳定碳同位素特征, 为揭示干旱区山地森林土壤碳动态变化规律提供依据。结果表明: (1) 随样地降水量的增加, 青海云杉和油松林地土壤 SOC 含量均逐渐增加, 而土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 和 β 值均逐渐减少, 且在同等降水量条件下, 青海云杉比油松更有利于土壤有机碳的累积。(2) 青海云杉和油松林地土壤 SOC 含量均随土层深度的增加而下降, 而其有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 均随土层深度的增加而增加。(3) 宁夏贺兰山、罗山和六盘山青海云杉、油松森林土壤有机碳特征与其土壤化学指标间的冗余分析发现, 碱解氮是影响土壤有机碳分布特征的主导因子。

关键词: 有机碳; 稳定性碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$); 碳分解; β 值; 影响因素

中图分类号: Q948.113; S714.2

文献标志码: A

Soil Organic Carbon Distribution Patterns and Influencing Factors in Ningxia Typical Stand Based on Stable Carbon Isotope Analysis

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

(1 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to understand the dynamics of soil carbon in mountain forests with different precipitation gradients, we selected the soil samples of *Picea crassifolia* and *Pinus tabulaeformis* in Helan Mountains, Luoshan Mountains and Liupan Mountains in Ningxia as the research objects. The vertical and horizontal distribution of soil organic carbon characteristics [soil organic carbon (SOC), stable carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) and β value] in *Picea crassifolia* and *Pinus tabulaeformis* were analyzed, and the effects of soil chemical indexes on soil organic carbon (SOC) characteristics were investigated by redundancy analysis. We explored the characteristics of soil stable carbon isotopes in arid and semi-arid regions, in order to provide a basis for revealing the dynamic change of soil carbon in mountainous forests in arid re-

收稿日期: 2021-01-11; 修改稿收到日期: 2021-04-11

基金项目: 宁夏重点研发计划(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(TJGC2018068); 宁夏自然科学基金(2020AAC03102)

作者简介: 刘丽贞(1993—), 女, 硕士, 主要从事土壤碳循环研究。E-mail: lizhenliu2019@163.com

* 通信作者: 李学斌, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤碳循环研究。E-mail: lixuebin@nxu.edu.cn

gions. The results showed that: (1) with the increase of precipitation in the sample land, the soil SOC content of both *Picea crassifolia* and *Pinus tabuliformis* increased gradually, while the soil $\delta^{13}\text{C}$ and β values decreased gradually. Under the same precipitation condition, *Picea crassifolia* was more conducive to soil organic carbon accumulation than *Pinus tabuliformis*. (2) The SOC content of both *Picea crassifolia* and *Pinus tabuliformis* decreased with soil depth increasing, while the $\delta^{13}\text{C}$ of both increased with soil depth increasing. (3) Redundancy analysis between soil organic carbon characteristics and soil chemical indexes of *Picea crassifolia* and *Pinus tabuliformis* forests in Helan, Luoshan and Liupan in Ningxia revealed that alkali-hydrolyzable nitrogen was the dominant factor affecting soil organic carbon distribution characteristics.

Key words: soil organic carbon; stable carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$); carbon dynamics; β value; influence factors

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是土壤碳库的重要组成部分,在全球碳循环和气候变化中发挥着重要作用。在 100 cm 深度的土壤中有有机碳储量约为 1 500~1 600 Pg^[1],而土壤有机碳是大气二氧化碳的潜在来源,了解有机碳分布格局是预测未来土壤碳动态的关键。稳定碳同位素技术是了解陆地生态系统碳循环的主要工具之一,其中土壤稳定碳同位素丰度特征可用于描述有机碳分布^[2-6]。因此,可利用稳定同位素技术研究土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度的变化规律,分析有机碳动态,阐释有机碳的循环与周转特征。在稳定碳同位素研究中,将 SOC 含量的对数和 $\delta^{13}\text{C}$ 之间的线性回归斜率定义为 β ,该值可作为有机碳分解速率的代表,且 β 值越小,有机碳分解速率越快^[4, 7]。气候条件、土壤特征和植被类型的异质性会导致土壤有机碳分解速率变化,进而影响 SOC 分布规律。因此,研究土壤有机碳对气候条件、土壤特征和植被类型的响应规律,对于了解有机碳分布的控制因素具有重要意义,并能更准确地量化土壤有机碳的动态变化。

宁夏回族自治区是中国典型的少林省区,其森林资源多分布在贺兰山、罗山和六盘山等林区^[8]。贺兰山林区位于宁夏西北部,是中国西北干旱风沙区典型的森林生态系统,可阻挡沙漠入侵、涵养水源,被称为银川平原的天然屏障^[9]。罗山林区位于宁夏中部干旱带,是中国西北部温带草原和荒漠地区的交界线^[10]。六盘山林区位于宁夏南部,是重要的水源涵养林地,对宁南山区的气候调节意义重大^[11]。因此,研究宁夏山地森林土壤有机碳分布情况与分解速率对于了解气候变化下西北宁夏山地生态系统碳循环具有重要意义。

北半球中高纬度干旱和半干旱地区的亚高山山地生态系统通常被认为是对气候变化最敏感和脆弱的生态系统,是研究气候变化下有机碳循环的理想

地区^[12]。降水量变化可改变土壤有机碳分布格局、土壤肥力和植被组成。在黄土丘陵区,土壤有机碳含量随降水量的增加(368~591 mm)而显著增加^[13]。降水量与 β 值的关系则较为复杂,有研究表明在降水量 3 000 mm 处发现了 β 值的拐点;降水量大于 3 000 mm 的地区,降水量与 β 值呈负相关;而降水量小于 3 000 mm 的地区,降水量与 β 值呈正相关^[14]。此外,在夏威夷森林生态系统中,叶和根的分解率随着降水量的增加(2 020~3 000 mm)而显著下降^[15]。然而,在半干旱地区,影响山地森林生态系统土壤有机碳分布的主要化学因素还不清楚。因此,本研究以宁夏山地生态系统针叶林地土壤为对象,分析不同山地类型下土壤有机碳分布格局的变化,探讨土壤化学因素对山地生态系统土壤有机碳分布的影响,对于提高干旱半干旱区域山地生态系统土壤碳汇能力及应对全球气候变化具有重要理论意义。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区的贺兰山、罗山和六盘山,自北向南涉及银川市贺兰县、吴忠市同心县、吴忠市红寺堡区和固原市隆德县。贺兰山海拔为 2 275~2 434 m,年降水量为 240~350 mm;罗山海拔为 2 350~2 567 m,年降水量为 400~600 mm;六盘山海拔为 2 209~2 805 m,年降水量为 638~676 mm。三山均位于中国西北部(37.28°~38.78°N, 106.09°~106.28°E),它们优势种均有青海云杉(*Picea crassifolia*)、油松(*Pinus tabuliformis*)、山杨(*Populus davidiana*)、杜松(*Juniperus rigida*)、小叶金露梅(*Potentilla parvifolia*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)等,土壤类型均以灰褐土为主,且土壤 pH 均偏碱性。

表 1 采样区基本概况

Table 1 Basic situation of the sampling standards in the study area

植被类型 Forest type	山地类型 Mountain type	年均降水量 MAP/mm	经度 Longitude/°	纬度 Latitude/°	海拔 Altitude/m	土壤类型 Soil type
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	贺兰山 Helan	350	106.1	38.78	2 434	灰褐土 Gray-brown soil
	罗山 Luoshan	600	106.28	37.30	2 567	灰褐土 Gray-brown soil
	六盘山 Liupan	676	106.2	35.67	2 805	灰褐土 Gray-brown soil
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	贺兰山 Helan	270	106.09	38.78	2 275	灰褐土 Gray-brown soil
	罗山 Luoshan	400	106.28	37.28	2 350	灰褐土 Gray-brown soil
	六盘山 Liupan	638	106.24	35.60	2 209	灰褐土 Gray-brown soil

1.2 研究方法

2019 年 8 月进行野外采样,根据山地类型变化和土壤类型,选择贺兰山(HL)、罗山(LS)和六盘山(LP)为研究区。选择三山共有青海云杉纯林和油松纯林,每个林分随机设置 3 个 20 m×20 m 样方(表 1),利用 GPS(G307,Garmin,USA)测量各点的坐标和高程。使用直径为 3 cm 的土钻在每个样方取 3 个土芯,分层(0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~100 cm)采集土壤样品,并将同一土层的 3 个土芯样品混合作为一个混合样品。将样品带回实验室预处理,每个土壤样品均过 2 mm 筛,去除根和凋落物等杂质。部分筛分土样用于测定土壤全氮(TN)、全磷(TP)、全盐(S)、速效磷(AP)、碱解氮(AN)和速效钾(AK)。用球磨机将土壤样品研磨至均匀,以进行 SOC 和 δ¹³C 的测定。

土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全盐(S)、速效磷(AP)、碱解氮(AN)和速效钾(AK)的测定参考张义凡^[15]和 Gao 等^[16]的方法。在进行稳定碳同位素分析之前,选取 2 g 土壤样品,用 1 mol·L⁻¹ HCl 溶液预处理 24 h,以除去碳酸盐。再使用同位素质谱仪(DELTA V Advantage, Thermo Fisher Scientific, Inc., USA)测定稳定碳同位素(δ¹³C),该仪器的测量精度为 0.1‰。碳稳定同位素值(δ¹³C)和 PDB(Pee-Dee-Belennite)进行对比,用标准 δ(δ)表示。

1.3 计算和统计分析

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD),分别比较贺兰山、罗山和六盘山相同植被类型不同土层和相同土层不同植被类型有机碳含量、有机碳 δ¹³C 的差异显著性,相同林分不同山地类型中 β 的差异显著性,以及相同林分不同山地类型间和相同山地类型不同林分间的土壤 C/N、全氮(TN)、全磷(TP)、全盐(S)速效磷(AP)、

碱解氮(AN)和速效钾(AK)的差异显著性。采用 Canoco 5.0 软件进行蒙特卡洛分析并绘制冗余分析图,分析三山青海云杉与油松土壤有机碳特征与土壤化学性质之间的关系。采用 SPSS 22.0 和 Origin 2019 进行统计分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同山地类型下青海云杉和油松立地土壤化学特征

土壤化学特征测定结果(表 2)显示,青海云杉立地土壤 C/N、全氮(TN)、全磷(TP)、速效磷(AP)、碱解氮(AN)和速效钾(AK)含量在山地类型间存在显著差异($P < 0.05$),油松土壤 C/N、TN、TP、全盐(S)和 AP 含量在不同山地类型间也存在显著差异。同时,贺兰山土壤 C/N、S 和 AP 含量,罗山土壤 TN 和 S 含量,以及六盘山土壤 TN、TP、S、AP 和 AN 含量在两种典型林分间均存在显著差异。总的来说,青海云杉立地土壤 C/N,以及青海云杉和油松立地土壤全盐含量均表现为贺兰山>罗山>六盘山,呈现随降水量增多逐渐减小趋势;青海云杉土壤全氮含量、青海云杉土壤碱解氮含量均表现为六盘山>罗山>贺兰山,即呈现随降水量增多逐渐增加趋势;土壤全磷、碱解氮含量均表现为青海云杉大于油松,土壤速效钾含量均表现为油松大于青海云杉。

2.2 不同山地类型下青海云杉和油松立地土壤有机碳特征

图 1 显示,青海云杉和油松立地 0~100 cm 土壤剖面有机碳含量和 δ¹³C 在不同山地类型间均存在显著性差异($P < 0.05$)。其中,有机碳含量在 3 个山地中均随土层的加深而降低,且 3 个山地中均表现为青海云杉林土壤有机碳含量高于油松林;青海云杉林地有机碳含量在 0~10 cm 土层表现为

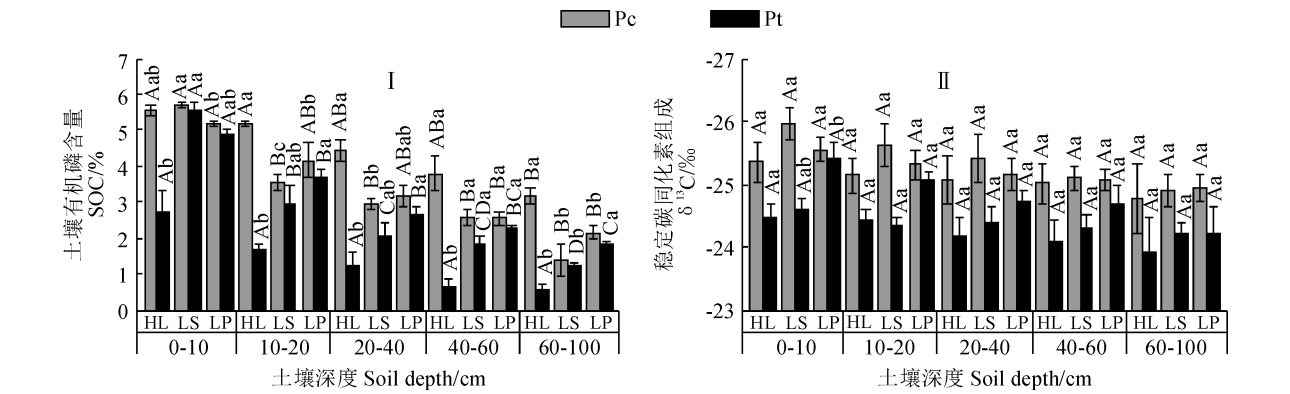
表 2 不同山地类型典型林分土壤化学指标(平均值±标准差)

Table 2 Comparison of soil characteristics of different precipitation gradients (mean ± SD)

土壤特性 Soil property	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>			油松 <i>Pinus tabuliformis</i>		
	HL	LS	LP	HL	LS	LP
C/N	17.77±2.18Aa	13.34±5.56Aab	10.03±3.38Ab	6.91±3.59Bb	17.39±9.31Aa	7.98±3.26Ac
TN/%	0.25±0.07Ab	0.26±0.03Ab	0.38±0.08Ba	0.22±0.03Ab	0.17±0.04Bb	0.44±0.06Aa
TP/%	0.05±0.01Ab	0.07±0.01Ab	0.13±0.00Aa	0.04±0.01Ac	0.06±0.01Ab	0.11±0.00Ba
S/(g/kg)	0.72±0.52Aa	0.46±0.16Aa	0.23±0.03Aa	0.61±0.58Ba	0.45±0.14Bb	0.23±0.06Ab
AP/(mg/kg)	4.30±3.01Aab	2.46±1.40Bb	6.59±4.25Aa	3.46±1.89Bb	3.59±2.00Aa	3.57±1.62Ba
AN/(mg/kg)	165.99±83.42Ab	199.86±59.98Aab	243.72±22.30Aa	122.66±66.91Aa	175.24±50.45Aa	169.67±40.12Ba
AK/(mg/kg)	67.93±37.64Bb	151.01±88.15Aa	78.78±41.28Aab	119.29±50.24Aa	164.36±87.71Aa	98.05±32.36Aa

注:HL. 贺兰山;LS. 罗山;LP. 六盘山;TN. 全氮;TP. 全磷;S. 全盐;AP. 速效磷;AN. 碱解氮;AK. 速效钾。同行不同小写字母表示相同林分内山地类型间在 0.05 水平存在显著性差异,不同大写字母表示相同山地类型内林分间在 0.05 水平存在显著性差异($P<0.05$);表内数值为均值±标准差($n=18$);下同

Note: HL. Helan Mountain; LS. Luoshan Mountain; LP. Liupan Mountain; TN. Total nitrogen; TP. Total phosphorus; S. Salt; AP. Available phosphorus; AN. Alkali-hydrolyzale nitrogen; AK. Rapidly available potassium. Different normal letters in the same stand indicate significant differences at the 0.05 level among the mountain types, while different capital letters within the same mountain type indicate significant differences at the 0.05 level among the forest types. Values in the table are mean ± standard deviation ($n=18$); The same as below



不同大写字母表示相同林分内不同土层的显著差异($P<0.05$)

图 1 不同山地类型青海云杉(Pc)和油松(Pt)林地土壤 SOC 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化特征

Different capital letters indicate the significant differences among different soil layers in the same stand ($P < 0.05$)

Fig. 1 Changes of SOC and $\delta^{13}\text{C}$ value in forest land of *Picea crassifolia* (Pc) and *Pinus tabuliformis* (Pt) from different mountains

罗山>贺兰山>六盘山,在其余土层大多表现为贺兰山>六盘山>罗山;油松林地有机碳含量在 0~10 cm 土层表现为贺兰山<六盘山<罗山,在其他层均表现为贺兰山<罗山<六盘山(图 1, I)。土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 在 3 个山地中均呈现随土层加深而增加的趋势,且在 3 个山地中均为青海云杉林低于油松林;土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 仅在油松林地 0~10 cm 土层表现为六盘山显著高于贺兰山、罗山,在其余林分土层山地类型间均差异不显著(图 1, II)。另外,在不同山地类型下,青海云杉土壤 β 值表现为罗山>六盘山>贺兰山,且其间差异不显著;油松土壤 β 值在表现为贺兰山>罗山>六盘山,且其间差异显著(图 2)。在三

山 0~100 cm 剖面内每层土壤有机碳含量均表现为青海云杉高于油松,而土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 均表现为青海云杉低于油松。

2.3 林地土壤化学特征与其有机碳含量的关系

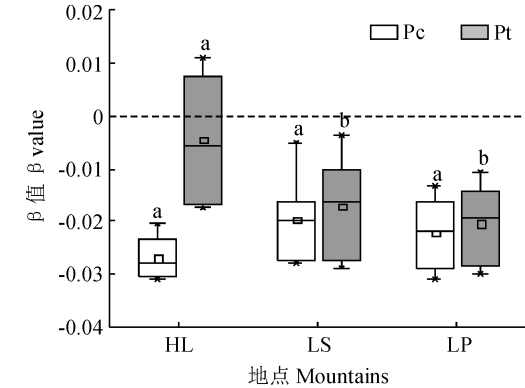
宁夏贺兰山、罗山和六盘山青海云杉、油松土壤有机碳特征(土壤有机碳含量、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 β 值)与土壤化学指标之间的冗余分析结果如图 3 所示。在青海云杉林地中,7 个土壤化学指标在第一、二轴的解釋量分别为 42.03%、4.75%,由此表明前两轴能够反映土壤有机碳特征与土壤化学指标关系的大部分信息,且主要由第一轴决定。其中,S、AN 和 AP 的箭头连线最长,表明这三者能够较好地解释土壤有机

碳特征的差异;AK、AN、AP、TN 和 TP 含量与有机碳含量的夹角小且方向一致,呈显著正相关关系,而 S 含量与有机碳含量呈显著负相关关系。同时,S 含

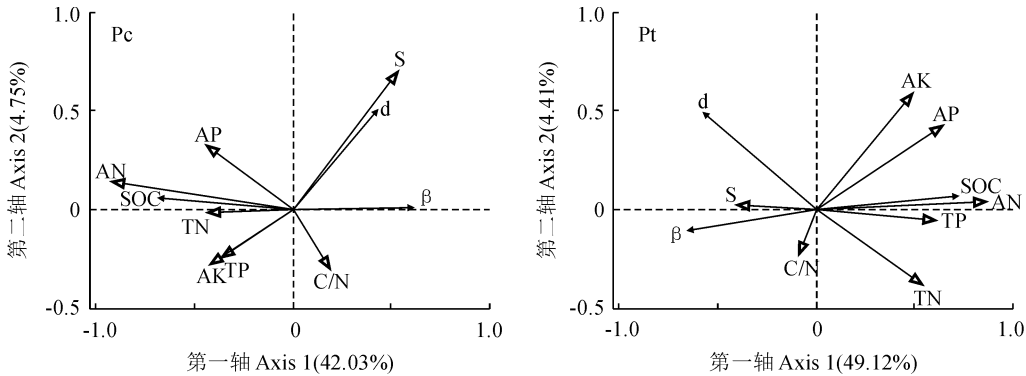
量与 $\delta^{13}\text{C}$ 夹角小且方向一致,呈显著正相关关系; C/N 与 β 夹角小且方向一致,呈显著正相关关系, AK、AN、AP、TN 和 TP 含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 和 β 呈负相关关系。

在油松林地中,7 个土壤化学指标在第一、二轴的
解释量分别为 49.12%、4.41%,由此表明前两轴
能够反映土壤有机碳特征与土壤化学指标关系的大
部分信息,且主要由第一轴决定。其中,AN、AP 和
TP 含量与有机碳含量的夹角小且方向一致,呈显
著正相关关系,S 含量和有机碳含量呈显著负相关
关系;S 含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 夹角小且方向一致,呈显著正
相关关系;S 含量和 C/N 与 β 夹角小且方向一致,
呈显著正相关关系,而 AN、AP、TN 和 TP 含量与
 $\delta^{13}\text{C}$ 和 β 呈负相关关系。

通过对土壤化学指标进行蒙特卡洛检验排序,
研究土壤化学指标对土壤有机碳特征影响的重要程
度。表 3 显示,青海云杉林各土壤指标对其土壤有
机碳特征影响重要性由大到小为 AN>S>C/N>



方框显示数据的上下四分位数
图 2 不同山地类型青海云杉(Pc)与油松(Pt)
土壤 β 值变化特征
The boxes show the upper and lower quartiles of the data
Fig. 2 Changes of β value of *Picea crassifolia* (Pc)
and *Pinus tabuliformis* (Pt) from different mountains



SOC. 有机碳含量; δ . 稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)
图 3 青海云杉(Pc)与油松(Pt)土壤有机碳特征与土壤化学性质的冗余分析图
SOC. Soil organic carbon content; δ . Stable carbon isotope composition($\delta^{13}\text{C}$)

Fig. 3 Redundancy analysis of soil carbon and soil properties of *Picea crassifolia* (Pc)and *Pinus tabuliformis* (Pt)

表 3 土壤特征解释的重要性排序和显著性检验

Table 3 Importance and significance level of soil properties

土壤指标 Soil property	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>				油松 <i>Pinus tabuliformis</i>			
	解释量 Explained variation/%	贡献率 Contribution /%	F	P	解释量 Explained variation/%	贡献率 Contribution /%	F	P
AN	35.1	75.1	28.1	0.002	36.6	68.4	30.0	0.002
S	5.2	11.1	4.4	0.032	0.5	0.9	0.5	0.606
C/N	2.7	5.8	2.4	0.128	6.0	11.2	5.7	0.016
AP	1.3	2.7	1.1	0.264	1.1	2.1	1.1	0.3263
TN	1.1	2.3	0.9	0.376	5.0	9.3	4.4	0.024
AK	0.7	1.5	0.6	0.488	3.4	6.4	3.4	0.046
TP	0.8	1.6	0.7	0.444	0.9	1.7	0.9	0.360

AP>>TNAK>TP,其中AN对土壤有机碳特征的影响达到极显著水平($P < 0.01$),S对土壤有机碳特征的影响达到显著水平($P < 0.05$),两者对土壤有机碳特征差异性大小的解释量分别达到35.1%和5.2%。油松林各土壤指标对土壤有机碳特征影响重要性由大到小为AN>TN>C/N>AK>AP>TP>S,其中AN对土壤有机碳特征的影响也达到极显著水平($P < 0.01$),TN对土壤有机碳特征的影响达到显著水平($P < 0.05$),两者对土壤有机碳特征差异性大小的解释量分别达到36.6%和5.0%。

3 讨 论

本研究中宁夏贺兰山、罗山和六盘山青海云杉、油松土壤有机碳含量均随土层的加深显著减小,分析其原因可能是因为:一方面大多数SOC输入发生在土壤表层^[2],同时集中在土壤0~20 cm的细根可储存大量有机碳^[17-18];另一方面随土层加深微生物的数量和活动减少,有机质分解作用减少导致产生的有机碳减少,从而使得表层土壤有机碳含量高于深层土壤^[19]。本研究区土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 随土层加深逐渐偏正,与前人对土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 垂直变化研究结果相似^[2, 4, 17]。 $\delta^{13}\text{C}$ 随土壤深度变化可能与Suess效应有关^[4],还可能与C的化学键有关,在酶催化反应中 ^{12}C 的化学键较 ^{13}C 化学键更易断裂分解,难分解的 ^{13}C 随土壤深度逐渐累积导致 $\delta^{13}\text{C}$ 值在深层土壤中升高^[20]。

降水可能通过多种机制影响土壤有机碳的分解作用,例如,通过影响微生物活动、养分的可用性、细根和凋落物的C输入等^[4, 14]。有研究发现,随降水量的增加,植被凋落物和根系的分解率显著下降^[14],而植被凋落物和根系是土壤碳的主要来源,土壤碳输入减少, $\delta^{13}\text{C}$ 值较小。本研究中贺兰山、罗山和六盘山年均降水量呈现逐渐增大的趋势,结果表明随着降水量的增加,0~100 cm深度土壤 ^{13}C 含量显著减小,这与Amundson等^[21]在墨西哥加利福尼亚的研究结果一致。本研究区土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值是-24.91‰,相比年均降水量1050 mm的美国肯塔基州(-25.88‰)和年均降水量为1220 mm的阿巴拉契亚山脉(-27.08‰)温带森林的结果偏正^[7, 22]。较高降水量导致酶活性减弱,土壤有机碳分解速率缓慢,而SOC含量较高^[17, 23]。相关研究表明, β 值越小表示土壤有机碳的分解速率越快^[7]。本研究中,随着贺兰山、罗

山和六盘山年均降水量的增加,SOC含量显著增加而 β 显著减小,该结果与成熟山毛榉林土壤有机碳的变化规律一致^[24]。本研究中青海云杉林地的年均降水量和海拔均高于油松林,青海云杉林土壤有机碳分解速率受高湿、低温的影响,微生物活力减弱,有机质的消耗减少,分解速率较油松林土壤慢。本研究发现青海云杉林土壤有机碳含量较油松林高,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 低于油松林。因此,我们认为青海云杉的固碳潜力优于油松林。

降水和植被类型对土壤有机碳特征的影响普遍存在^[23],而土壤化学特征决定土壤有机碳分布的空间差异^[4]。有研究发现有机碳含量与全盐含量负相关^[17],是因为较高的盐分可以在一定程度上增加微生物的分解并降低SOC含量^[17, 25]。本研究中,土壤盐分含量与土壤有机碳含量呈负相关关系,与 $\delta^{13}\text{C}$ 呈正相关关系,这可能归因于高盐分增加微生物分解速率造成土壤有机碳消耗,而微生物会优先利用 ^{12}C ^[20],导致土壤 ^{13}C 比例增加。相反,土壤盐分含量与 β 呈正相关关系,分析其原因可能是受土壤性质综合影响^[25]。研究表明氮磷元素加剧微生物分解,加速对有机碳的利用,这可能是由于微生物分解受到底物质量的限制^[26],土壤养分高,微生物的分解速度较快^[16]。本研究中土壤全氮和全磷与 $\delta^{13}\text{C}$ 、 β 均呈负相关关系,与前人研究结果相似^[14]。本研究结果表明速效磷和速效钾与有机碳含量呈正相关关系,与 $\delta^{13}\text{C}$ 、 β 呈负相关关系。其原因可能是土壤速效养分含量高,土壤肥力高,导致基质质量增加,微生物分解速率加快。碱解氮来源于土壤有机质中易碱解的氮素,通过微生物分解作用影响有机碳的累积与消耗^[27]。本研究中,碱解氮对土壤有机碳特征的影响达到极显著水平($P < 0.01$),对土壤有机碳特征差异性大小的解释量达到34.7%。碱解氮与有机碳含量呈显著正相关关系,与之前研究结果相似^[28-29]。土壤C/N是土壤基质质量的一个指标,可通过影响土壤微生物分解活动,进而影响土壤有机碳分布情况^[30]。Zhao等^[4]与Acton等^[20]的研究均发现高C/N土壤的碳分解速率较低,土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值较小。本研究中C/N与有机碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 相关性均不显著,而全氮与表征土壤氮素供应情况的碱解氮均与有机碳含量呈正相关关系,可能由于干旱半干旱区土壤贫瘠且受较大的水分限制,养分元素如氮素的固持能力受到干扰,最终导致元素之间的耦合失衡。

4 结 论

宁夏贺兰山、罗山和六盘山森林土壤有机碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 随土层深度均发生了显著变化, SOC 含量随土层深度的增加而下降, 而 $\delta^{13}\text{C}$ 随土层深度的增加而增加。三山中两种针叶林 SOC 含量和 β 值均表现为青海云杉高于油松, $\delta^{13}\text{C}$ 表现青海云杉低于油松。随降水量增加, 青海云杉和油松林地 SOC 含量均逐渐增加, 而其 $\delta^{13}\text{C}$ 逐渐减少。总体

而言, 青海云杉比油松更有利于土壤有机碳的累积; 不同山地类型下青海云杉与油松土壤有机碳含量变化均主要受碱解氮的影响。 β 值可指征有机碳分解速率, 但 β 值仅能定性地说 明生态系统土壤有机碳分解动态快慢, 并不能量化有机碳分解速率大小。因此, 应谨慎使用 β 值作为土壤有机碳分解指标, 未来应结合 ^{13}C 示踪技术来深入理解土壤有机碳的分解转化机制。

参考文献:

[1] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, **47**(2): 151-163.

[2] AN H, LI Q, YAN X, *et al.* Desertification control on soil inorganic and organic carbon accumulation in the topsoil of desert grassland in Ningxia, northwest China[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 127: 348-355.

[3] BRUNN M, SPIELVOGEL S, SAUER T, *et al.* Temperature and precipitation effects on $\delta^{13}\text{C}$ depth profiles in SOM under temperate beech forests [J]. *Geoderma*, 2014, 235-236: 146-153.

[4] ZHAO Y, WANG X, OU Y, *et al.* Variations in soil $\delta^{13}\text{C}$ with alpine meadow degradation on the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geoderma*, 2019, 338: 178-186.

[5] BENNER R, FOGEL M L, SPRAGUE E K, *et al.* Depletion of ^{13}C in lignin and its implications for stable carbon isotope studies[J]. *Nature* (London), 1987, **329**(6 141): 708-710.

[6] 司高月, 李晓玉, 程淑兰, 等. 长白山垂直带森林叶片-凋落物-土壤连续体有机碳动态——基于稳定性碳同位素分析[J]. *生态学报*, 2017, **37**(16): 5 285-5 293.

SI G Y, LI X Y, CHENG S L, *et al.* Organic carbon dynamics of the leaf-litter-soil continuum in the typical forests of the Changbai Mountain transect: an analysis of stable carbon isotope technology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(16): 5 285-5 293.

[7] 程积民, 金晶炜, 田 瑛, 等. 宁夏森林植被及土壤碳密度分布特征[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(13): 109-117.

CHENG J M, JIN J W, TIAN Y, *et al.* Distribution characteristics of vegetation and soil carbon density of different forests in Ningxia[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (Transactions of the CSAE), 2016, **32**(13): 109-117.

[8] 季 波, 许 浩, 何建龙, 等. 宁夏贺兰山青海云杉林土壤碳储量研究[J]. *生态科学*, 2014, **33**(5): 920-925.

JI B, XU H, HE J L, *et al.* Research on soil carbon storage of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) in Ningxia Helan Mountain [J]. *Ecological Science*, 2014, **33**(5): 920-925.

[9] 苏纪帅, 程积民, 高 阳, 等. 宁夏大罗山 4 种主要植被类型的细根生物量[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(3): 626-632.

SU J S, CHENG J M, GAO Y, *et al.* Fine root biomass of four main vegetation types in Daluo Mountain of Ningxia, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(3): 626-632.

[10] 王云霓, 熊 伟, 王彦辉, 等. 六盘山主要树种叶片稳定性碳同位素组成的时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2012, **19**(3): 42-47.

WANG Y N, XIONG W, WANG Y H, *et al.* Spatial-temporal pattern of stable carbon isotope composition of dominant tree species in Liupanshan Mountain [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, **19**(3): 42-47.

[11] ALBERTO F J, AITKEN S N, ALÍA R, *et al.* Potential for evolutionary responses to climate change-evidence from tree populations[J]. *Global Change Biology*, 2013, **19**(6): 1 645-1 661.

[12] 孙 龙, 张光辉, 栾莉莉, 等. 黄土丘陵区表层土壤有机碳沿降水梯度的分布[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(2): 532-538.

SUN L, ZHANG G H, LUAN L L, *et al.* Distribution of soil organic carbon in surface soil along a precipitation gradient in loess hilly area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(2): 532-538.

[13] WANG C, BENJAMIN Z H, LI D W, *et al.* Stable isotopic constraints on global soil organic carbon turnover[J]. *Biogeosciences*, 2018, **15**(4): 987-995.

[14] SCHUUR E. Effect of water on decomposition dynamics in Mesic to Wet Hawaiian Montane Forests[J]. *Ecosystems*, 2001, **4**: 259-273.

[15] 张义凡. 荒漠草原三种典型群落土壤有机碳库稳定性及其影响因素研究[D]. 银川:宁夏大学, 2018.

[16] GAO Y, ZHOU J, WANG L, *et al.* Distribution patterns and controlling factors for the soil organic carbon in four mangrove forests of China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 17: e575.

[17] HOU G, DELANG C O, LU X. Afforestation changes soil organic carbon stocks on sloping land: The role of previous land cover and tree type[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 152: 105-860.

[18] 庞丹波. 断陷盆地地区典型林分土壤有机碳组分特征研究[D]. 北京:北京林业大学, 2019.

[19] 赵云飞, 汪 霞, 欧延升, 等. 若尔盖草甸退化对土壤碳、氮和稳定性碳同位素的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1 405-1 411.

ZHAO Y F, WANG X, OU Y S, *et al.* Effects of alpine meadow degradation on soil carbon, nitrogen, and stable carbon isotope in Zoige Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(5): 1 405-1 411.

[20] ACTON P, FOX J, CAMPBELL E, *et al.* Carbon isotopes for estimating soil decomposition and physical mixing in well-drained forest soils[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 118(4): 1 532-1 545.

[21] AMUNDSON R, FRANCO-VIZCAÍNO E, GRAHAM R C, *et al.* The relationship of precipitation seasonality to the flora and stable isotope chemistry of soils in the Vizcaíno desert, Baja California, México[J]. *Journal of Arid Environments*, 1994, 28(4): 265-279.

[22] CAMPBELL J E, FOX J F, DAVIS C M, *et al.* Carbon and nitrogen isotopic measurements from Southern Appalachian Soils: Assessing soil carbon sequestration under climate and land-use variation[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, 135(6): 439-448.

[23] ZHANG K, DANG H, ZHANG Q, *et al.* Soil carbon dynamics following land-use change varied with temperature and precipitation gradients: evidence from stable isotopes[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(7): 2 762-2 772.

[24] MEIER I, LEUSCHNER C. Variation of soil and biomass carbon pools in beech forests across a precipitation gradient[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(3): 1 035-1 045.

[25] MAVI M S, MARSCHNER P, CHITTLEBOROUGH D J, *et al.* Salinity and sodicity affect soil respiration and dissolved organic matter dynamics differentially in soils varying in texture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 45: 8-13.

[26] YANG Y, JI C, CHEN L, *et al.* Edaphic rather than climatic controls over ¹³C enrichment between soil and vegetation in alpine grasslands on the Tibetan Plateau[J]. *Functional Ecology*, 2015, 29(6): 839-848.

[27] 杨 苏, 李传哲, 徐 聪, 等. 绿肥和凹凸棒添加对黄河故道潮土土壤结构和碳氮含量的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 199-204.

YANG S, LI C Z, XU C, *et al.* Effects of adding straw and attapulgit on soil structure and carbon and nitrogen contents of old Yellow River course[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(2): 199-204.

[28] JING Y L, ZHANG Y H, HAN I, *et al.* Effects of different straw biochars on soil organic carbon, nitrogen, available phosphorus, and enzyme activity in paddy soil[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 8 837.

[29] 梁方晖, 赵凌平, 谭世图, 等. 灌草立体配置对退化草地土壤水分和养分的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(12): 18-25.

LIANG F H, ZHAO L P, TAN S T, *et al.* Influences of shrub-grass patterns on soil water and nutrient of grassland[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2020, 48(12): 18-25.

[30] XU X, SHI Z, LI D, *et al.* Soil properties control decomposition of soil organic carbon: Results from data-assimilation analysis[J]. *Geoderma*, 2016, 262: 235-242.

(编辑:裴阿卫)