

天山云杉林土壤有机碳矿化特征

何相宜,刘肖肖,戴 伟*

(北京林业大学 林学院,北京 100083)

摘 要:将新疆天山云杉林分布区划分为 1 800~2 000、2 000~2 200、2 200~2 400、2 400~2 600 m 和 2 600~2 800 m 5 个海拔梯度,利用 S 型采样法分别采集不同海拔梯度 0~20、20~40、40~60 cm 的土壤混合样品。在 28℃ 的室内条件下分别培养 1、4、6、8、12、14、24、34、44、54、65、75、86 d 和 96 d,测定不同培养时间土壤有机碳的累积矿化量,并进一步利用双指数模型拟合土壤有机碳的矿化过程,探讨不同海拔梯度下土壤有机碳矿化异同以及土壤活性碳、微生物碳含量、降雨量和温度对土壤有机碳矿化的影响。结果表明,双指数模型可以很好地拟合出不同海拔各层土壤有机碳矿化过程, R^2 达到 0.97~1.00;云杉林土壤有机碳 96 d 的累积矿化量和矿化速率随土层加深而降低,随海拔的升高表现出先降低、再升高,此后逐渐降低的变化趋势,两者最大值位于海拔 2 200~2 400 m,0~20 cm 土壤分别为 4.10 g·kg⁻¹ 和 42.71 mg·kg⁻¹·d⁻¹;0~20 cm 土壤活性碳含量为 1.98~13.68 g·kg⁻¹,表聚现象明显,具有与土壤有机碳累积矿化量和矿化速率相同的海拔变化特征;土壤微生物量和土壤有机碳矿化特征呈显著正相关,土壤微生物是影响土壤有机碳矿化的主要因素。

关键词:云杉林土壤;土壤有机碳矿化;土壤活性碳;土壤微生物碳

中图分类号:S714.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2019)02-0001-07

Mineralization Features of *Picea schrenkiana* Forest Soil

HE Xiang-yi, LIU Xiao-xiao, DAI Wei*

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The distribution area of *Picea schrenkiana* occurring in Xinjiang was divided into five elevation gradients: 1 800—2 000, 2 000—2 200, 2 200—2 400, 2 400—2 600 and 2 600—2 800 m. Stype sampling method was adopted to collect the soils with the depths of 0—20, 20—40, and 40—60 cm in different elevations. Soil samples were cultured in door at 28 °C for 1, 4, 6, 8, 12, 14, 24, 34, 44, 54, 65, 75, 86 and 96 days, respectively. The cumulative amounts of soil organic carbon mineralization (SOCM) in different culture time were determined. The mineralization process was simulated by the double exponential model. Effects of soil active carbon, microbial carbon content, rainfall and temperature on SOCM in different elevations were studied. The results showed that the double exponential model could well fit the process of SOCN at different elevations. The values of R^2 reached 0.97—1.00. The cumulative amount and rate of SOCM in 96 days decreased with the soil depth. With the increase of the elevation, the cumulative amount and rate of SOCM presented a trend of decrease-increase-decrease. The maximum values of cumulative amount and rate of SOCM were 4.10 g·kg⁻¹ and 42.71 mg·kg⁻¹·d⁻¹, respectively in 0—20 cm soil layer with the elevation of 2 200—2 400 m. The content of soil active carbon in 0—20 cm soil layer ranged from 1.98—13.68 g·kg⁻¹. The apparent aggregation phenomenon was significant. The variation pattern of soil active carbon

收稿日期:2018-06-10 修回日期:2018-08-22
基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2011CB403201)。
作者简介:何相宜,女,在读硕士,研究方向:土壤修复与健康。E-mail:15501125112@163.com
* 通信作者:戴 伟,男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向:森林土壤。E-mail:daiw163@163.com

with the change of elevation was the same as cumulative amount and rate of SOCN. The soil microorganism quantity was significantly correlated with SOCM characteristics, which was the main factor affecting the soil organic carbon mineralization.

Key words: *Picea* forest soil; soil organic carbon mineralization; soil active carbon; soil microbial carbon

土壤有机碳库组分及其矿化特征是土壤碳库的重要研究内容,国内外很多学者从多角度开展了相关方面的研究^[1-19],主要包括土壤有机碳的海拔变化规律,不同的土地利用状况、土壤层次、碳氮比以及各种土壤酶活性等因子对活性有机碳库的影响^[10-12]。也有学者探讨了土壤温度、湿度、森林类型、季节变化和凋落物等对土壤有机碳矿化的影响以及土壤有机碳含量对矿化强度的作用^[13-18]。利用数学模型拟合是研究和探讨土壤有机碳矿化过程的重要手段,此前指数模型曾被广泛的应用^[3-6],但有学者认为该模型具有局限性,认为双指数模型更能反映土壤矿化特点^[7],此后很多学者在此基础上开展了相关研究^[20]。例如,安晓娟^[21]等比较了3种数学模型的拟合效果,认为双指数方程更能反映我国6种天然林土壤有机碳的矿化过程和特点;巩晟萱^[22]、刘浩宇^[23]和麻泽宇^[24]等利用该模型分别拟合丝栗栲林和冷杉林土壤有机碳的矿化过程。

天山云杉林(*Picea schrenkiana*)植被类型单一,是新疆森林最主要的建群种,其资源占全疆森林总资源的62%,在区域土壤碳循环中发挥着重要作用,但目前针对其开展的土壤有机碳矿化及活性碳特征的研究还未见报道。为此,本研究将天山云杉林分布区划分为1 800~2 000、2 000~2 200、2 200~2 400、2 400~2 600 m和2 600~2 800 m 5个海拔梯度,分层采集各海拔梯度0~20、20~40、40~60 cm的土壤样品,通过室内矿化培养和双指数模

型拟合的手段,分析比较土壤有机碳矿化特征及变化规律,探讨土壤活性碳含量、土壤微生物量以及降雨量、温度对土壤矿化的影响,为深入理解和掌握该地区天山云杉林在土壤碳循环中的作用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地位于天山中段,地理位置 87°27′43″—87°28′18″E,43°24′45″—43°26′21″N,属温带大陆性干旱半干旱气候,年均气温 2.0℃,年降水量 400~600 mm,雨季集中在 6—8 月份,年蒸发量 980~1 150 mm,年均相对湿度 65%,干燥度 1.4,无霜期 89 d,积温 1 170.5℃。土壤母质主要为黄土状物质和钙质风化物,土壤类型为山地灰褐色森林土,森林群落的优势树种为天然云杉,郁闭度介于 0.4~0.8,森林覆盖率达 60%,林下草本层平均盖度<3%。

1.2 样地布设与土壤样品采集

根据天山云杉林的海拔分布,划分出 1 800~2 000、2 000~2 200、2 200~2 400、2 400~2 600 m和 2 600~2 800 m 5 个海拔梯度。各海拔梯度设置 3 个 20 m×20 m 的调查样地,分层采集 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 的土壤混合样品,根据《森林土壤分析方法》^[25]处理后,备用。样地基本概况见表 1。

表 1 样地基本概况

Table 1 The general situation of the study area

海拔 /m	林龄 /a	平均树高 /m	平均胸径 /cm	郁闭度	年均 温度 ^[26] /℃	年均 雨量 ^[26] /mm	坡向	林分密度 /(株·hm ⁻²)	林下 植被盖度
1 800~2 000	40~80	23.12	18.87	0.47	3.46	543	北阴坡	1 590	1.33
2 000~2 200	60~100	22.73	16.01	0.41	2.82	558	北阴坡	1 533	2.10
2 200~2 400	40~80	22.45	21.28	0.73	1.72	528	北阴坡	1 320	2.23
2 400~2 600	40~100	18.67	19.56	0.37	0.35	492	北阴坡	527	1.02
2 600~2 800	40~80	13.83	13.62	0.32	-0.54	489	北偏西阴坡	389	1.33

注:林下植被种类:黑果小檗(*Berberis heteropoda*)、红果小檗(*Berberis nummularia*)、天山早熟禾(*Poa tianschanica*)、草原老鹳草(*Geranimum pratense*)、羊角芹(*Aegopodium podagraria*)、新疆党参(*Codonopsis clematidea*)、天山蒲公英(*Taraxacum tianschanicum*)、二裂婆婆纳(*Veronica biloba*)、绣线菊(*Spiraea hyperici folia*)等。

1.3 测定方法

微生物碳:氯仿薰蒸浸提法^[27]。
土壤有机碳矿化过程中 CO₂ 释放量:利用室内恒温培养、碱液吸收法^[28],分别在培养后的 1、4、6、8、12、14、24、34、44、54、65、75、86 d 和 96 d 测定

CO₂ 释放量。

土壤有机碳矿化速率的计算(mg·kg⁻¹·d⁻¹)^[29]:1 kg 干土矿化释放的 CO₂ 累积量除以 96 d。

1.4 数据处理

土壤活性碳的计算:利用室内矿化培养获取的

不同时间 CO₂ 的释放量和 Boylehe Paul 双指数模型 $C_{\min}=C_o(1-e^{-k_o t})+C_s(1-e^{-k_s t})$ ^[30] 拟合获得。式中, C_{\min} : 经过 t 时间后土壤中累积释放的 CO₂ 量 ($g \cdot kg^{-1}$); C_o : 土壤中活性有机碳含量 ($g \cdot kg^{-1}$); k_o : 活性有机碳库周转速率 ($g \cdot d^{-1}$); C_s : 土壤中缓效性有机碳的含量 ($g \cdot kg^{-1}$); k_s : 缓效有机碳库周转速率 ($g \cdot d^{-1}$)。

所得数据采用 SPSS18.0 进行方差分析,并用 F 检验 ($P<0.05$) 分析数据的差异性;使用 Matlab 软件对土壤有机碳矿化过程进行拟合。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳矿化过程及强度

利用双指数方程对土壤有机碳矿化过程中 CO₂ 的累积矿化量拟合结果可以发现,实测值和拟合值间的相关系数 (R^2) 达到 0.97~1.00,表现出很好的拟合效果(表 2、图 1)。

表 2 不同海拔梯度下土壤矿化过程双指数方程拟合效果
Table 2 Fitting with double-exponential model for soil samples of different elevations

海拔 /m	土壤深度 /cm	不同层次土壤 有机碳矿化拟合方程	R^2
1 800~2 000	0~20	$y=5.57(1-e^{-0.004})+0.50(1-e^{-1.152})$	0.99
	20~40	$y=1.65(1-e^{-0.007})+0.38(1-e^{-1.025})$	0.99
	40~60	$y=1.12(1-e^{-0.010})+0.37(1-e^{-1.420})$	0.98
2 000~2 200	0~20	$y=2.15(1-e^{-0.006})+0.41(1-e^{-1.142})$	0.99
	20~40	$y=1.98(1-e^{-0.005})+0.35(1-e^{-1.342})$	0.99
	40~60	$y=0.83(1-e^{-0.005})+0.36(1-e^{-0.470})$	0.99
2 200~2 400	0~20	$y=4.40(1-e^{-0.005})+0.70(1-e^{-1.775})$	1.00
	20~40	$y=2.35(1-e^{-0.004})+0.67(1-e^{-0.204})$	0.98
	40~60	$y=3.24(1-e^{-0.006})+0.44(1-e^{-0.580})$	0.98
2 400~2 600	0~20	$y=3.30(1-e^{-0.002})+0.50(1-e^{-1.524})$	0.99
	20~40	$y=0.97(1-e^{-0.006})+0.36(1-e^{-1.455})$	0.98
	40~60	$y=0.95(1-e^{-0.009})+0.38(1-e^{-1.314})$	0.98
2 600~2 800	0~20	$y=1.98(1-e^{-0.005})+0.49(1-e^{-1.744})$	0.99
	20~40	$y=1.13(1-e^{-0.001})+0.44(1-e^{-1.785})$	0.98
	40~60	$y=1.20(1-e^{-0.008})+0.40(1-e^{-1.773})$	0.97

拟合结果表明,不同海拔各层土壤有机碳矿化

过程都表现初期强烈,后期趋于平缓的总体变化特点,但不同土层变化强度不同,经过 96 d 的矿化培养后,0~20 cm 土层的矿化曲线仍然保持比较强烈的上升趋势,而 20~40 cm 和 40~60 cm 土层则明显趋于平缓(图 1)。

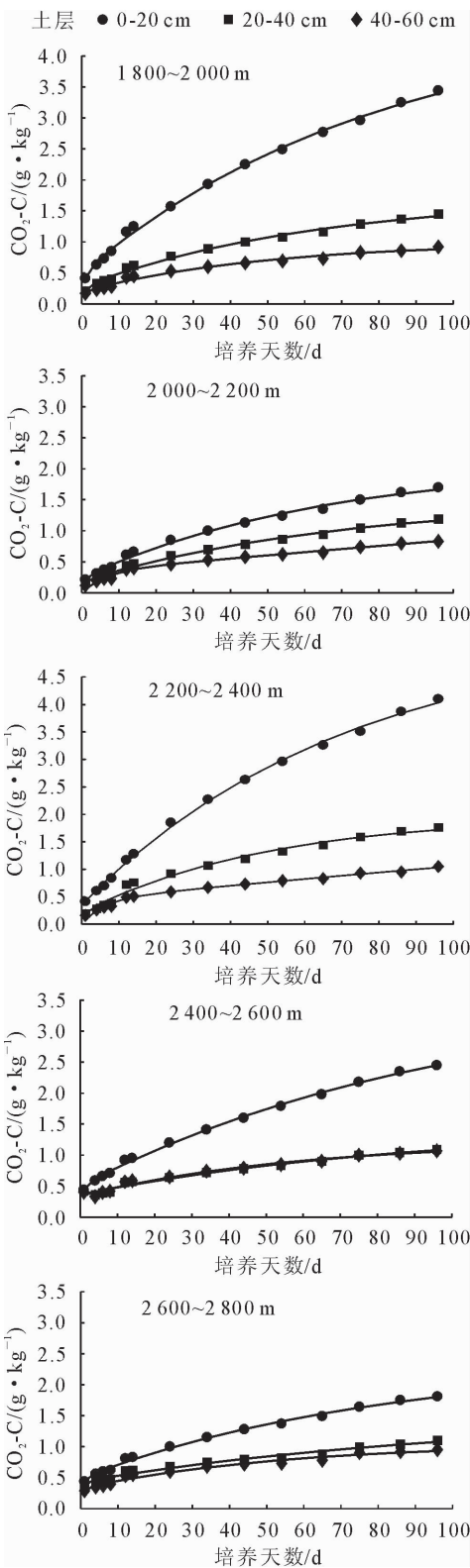
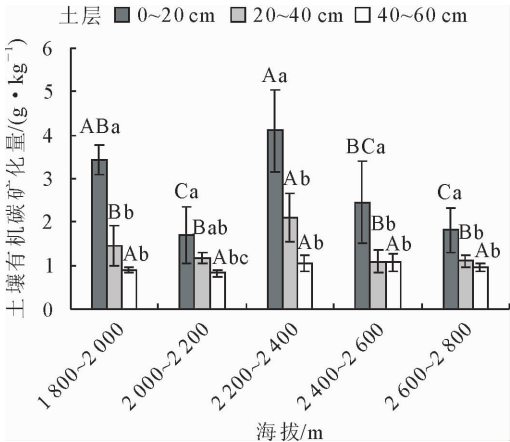


图 1 不同海拔土壤有机碳矿化过程
Fig. 1 Organic carbon mineralization process with different altitudes

各海拔土壤有机碳矿化强度都表现出随土壤加深而降低的特点,96 d 累积矿化量剖面垂直变化强烈,其中,1 800~2 000 m 和 2 200~2 400 m 海拔处剖面变化尤为明显,0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 层间均达到显著差异水平。其他 3 个海拔 0~20 cm 土壤 96 d 累积矿化量分别达到 1.70、2.45、1.81 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于其下 2 层,但 20~40 cm 和 40~60 cm 土层间没有显著差异(图 2)。

随着海拔的升高,0~20 cm 土壤有机碳 96 d 累积矿化量分别为 3.44、1.70、4.10、2.45、1.81 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,表现出高、显著降低、显著增加和逐步降低的海拔变化特点。20~40 cm 土壤也具有相同的变化趋势,在 2 200~2 400 m 达到最大值,显著高于其他海拔同层土壤,但 1 800~2 200 m 和 2 400~2 800 m 都并没有出现明显变化,40~60 cm 土层海拔变化不明显(图 2)。



注:A,B,C 表示同一土层不同海拔差异水平;a,b,c 表示相同海拔不同深度差异水平($P<0.05$)。下同。

图 2 不同海拔各层土壤有机碳 96 d 累积矿化量

Fig. 2 Soil organic carbon mineralization in the same layer at different altitudes in 96 days

2.2 土壤有机碳矿化速率

土壤有机碳矿化速率的剖面垂直变化和同层海拔间的变化与土壤有机碳累积矿化量相同,同样表现为随土壤深度的增加而降低的剖面特点以及随海拔的升高先降低后升高再逐渐降低的海拔特征(图 2、图 3)。0~20 cm 和 20~40 cm 土壤最高矿化速率均出现在海拔 2 200~2 400 m,分别为 42.71 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 22.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (图 3)。

2.3 土壤活性碳含量变化

土壤活性碳含量表聚特征明显,0~20 cm 土壤表现出高一低一高一逐步降低的海拔变化,剖面层间和不同海拔同层土壤间的变化规律与土壤有机碳累积矿化量和矿化速率的规律基本一致,但显著性差异变化特征不同(图 2、图 3、图 4)。1 800~2 000

m、2 200~2 400 m、2 400~2 600 m 3 个海拔处 0~20 cm 表层土壤活性碳含量均与其下 1 层达到显著性差异($P<0.05$),其中 1 800~2 000 m 和 2 200~2 400 m 海拔处表聚现象强烈,0~40 cm 土壤活性碳含量分别为 4.40~2.35 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 5.57~1.655 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;2 000~2 200、2 600~2 800 m 海拔处 0~20 cm 表层土壤活性碳含量与下层差异不显著,但明显高于下层土壤活性碳含量(图 4)。

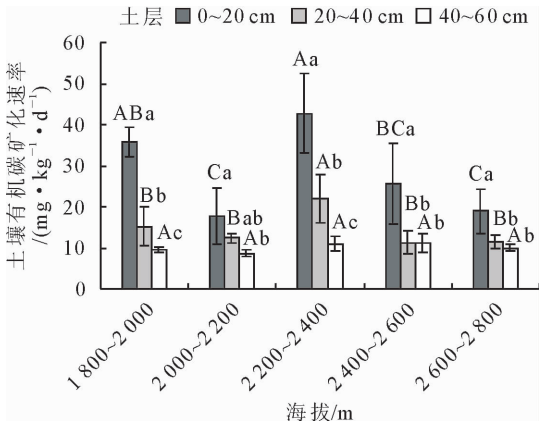


图 3 不同海拔土壤有机碳矿化速率

Fig. 3 Soil organic carbon mineralization rate at different altitudes

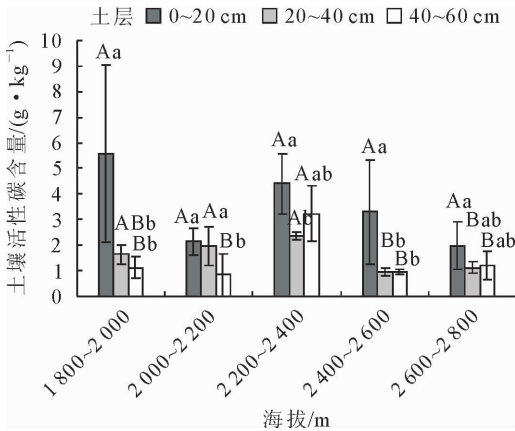


图 4 不同海拔土壤活性碳含量变化

Fig. 4 Changes of soil active carbon content at different altitudes

经过 96 d 的矿化培养后,多数土壤层次累积矿化量/活性碳含量比仍 $<100\%$ (表 3),土壤中还有不同程度的活性碳残存,土壤矿化强度会继续保持较强的增加态势。

2.4 不同海拔土壤微生物碳含量变化

各海拔土壤微生物碳量都表现出随土壤深度加深而降低的剖面特点,在 1 800~2 000 m 和 2 200~2 400 m 海拔处,土壤层间变化强烈,0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 都达到显著差异水平($P<0.05$),而其他 3 个海拔则表现出逐渐降低的特征(表 4)。

不同海拔同层土壤生物碳量的差异主要表现在

0~20 cm 土层,变异系数为 56%~25%,随着海拔升高出现高、显著降低、显著增加和逐步降低的海拔变化,与土壤矿化强度变化一致。20~40 cm 土层虽也有相同的海拔变化,但土层间没有明显的差异。40~60 cm 土层间差异不明显(表 4)。

2.5 土壤有机碳矿化特征相关分析

土壤活性碳含量与土壤微生物碳含量显著正相关,相关系数为 0.892。有机碳矿化速率和累积矿化量与土壤微生物碳含量达到 0.01 极显著正相关水平,但其他因子关系并不显著(表 5)。

表 4 不同海拔土壤微生物碳含量变化

Table 4 Changes of soil microbial carbon content at different altitudes

海拔/m	土层/cm			变异系数/%
	0~20	20~40	40~60	
1 800~2 000	3.40±0.82ABa	1.31±0.03Ab	0.57±0.29Ac	109.61
2 000~2 200	1.10±0.41Ca	1.14±0.59Aa	0.62±0.15Aab	50.68
2 200~2 400	3.77±1.98Aa	1.80±1.00Ab	0.60±0.07Ab	100.09
2 400~2 600	1.50±0.80BCa	0.98±0.39Aab	0.81±0.60Aab	63.52
2 600~2 800	1.33±0.55Ca	0.87±0.19Aab	0.39±0.29Ab	62.86
变异系数/%	56.80	29.86	25.01	

表 5 土壤矿化指标与影响因子的相关分析

Table 5 Correlation analysis of soil organic carbon mineralization characteristics

指标	活性碳含量	有机碳矿化速率	有机碳累积矿化量	微生物碳含量	年降雨量	年均温度
活性碳含量	1					
有机碳累积矿化速率	0.873	1				
有机碳累积矿化量	0.873	1.000**	1			
微生物碳含量	0.892*	0.975**	0.975**	1		
年均雨量	-0.706	-0.422	-0.422	-0.489	1	
年均温度	0.506	0.311	0.311	0.395	-0.37	1

注:“*”表示土壤有机碳矿化特征与各因子显著相关($P<0.05$);“**”表示土壤有机碳矿化特征与各因子显著相关($P<0.01$)。

3 结论与讨论

在矿化初期土壤微生物首先迅速分解土壤中易分解的活性有机碳,矿化作用表现强烈。随着活性有机碳类物质被消耗,微生物被迫分解难分解的物质,矿化强度减弱^[10]。各层土壤有机碳累积矿化量随培养时间延长表现出现快速增加再缓慢降低的趋势。有研究认为,该现象与土壤有机碳性质有关^[31]。由于天山植被类型单一,土壤有机碳主要由云杉凋落物及死亡根系分解转化形成,相对简单的碳源,使土壤有机碳性质具有较高的相似度,因此,影响各土层矿化强度和趋势变化的主要因素不应是土壤有机碳性质间的差异,而是土壤微生物数量及活性碳含量的多少。

土壤活性碳属易分解的有机物,主要来自动植物残体、凋落物、根系分泌物等^[31]。云杉属浅根性树种,根系分布多在 20~40 cm 的土壤表层中,每年

表 3 土壤有机碳 96 d 累积矿化量与活性碳含量比(%)

Table 3 The soil organic carbon ratio of accumulated mineralization and activated carbon in 96 days

海拔/m	土层/cm		
	0~20	20~40	40~60
1 800~2 000	61.83	88.18	82.00
2 000~2 200	79.01	60.04	100.38
2 200~2 400	93.13	90.04	32.46
2 400~2 600	74.27	111.64	111.84
2 600~2 800	91.66	97.85	79.38

死亡根系及凋落物是土壤活性碳的主要来源,同时年均降雨量较低为 500 mm 左右(表 1),淋溶作用较弱,导致土壤活性碳含量“表聚现象”明显(图 4),40%~60%的活性碳集中分布在土壤表层,并随土壤深度加深而降低(图 3)。另外,由于不同海拔气候条件以及云杉林的树高和胸径的共同影响,使各层土壤有机碳密度随海拔升高呈现先下降后增加再下降的趋势变化,不同海拔土壤活性碳含量呈现与之相同的海拔变化规律(图 4)。土壤活性碳含量是土壤微生物重要碳源,是影响土壤微生物的繁殖和活动的的重要因素,两者存在显著关系(表 5),因此,土壤活性碳含量在不同海拔梯度及土壤剖面垂直分布上的差异使土壤微生物碳量表现出与其相似的变化特征,在一定程度上反映土壤微生物的数量和活动强度^[32]。

土壤累积矿化量和矿化速率是土壤矿化过程及强度的重要指标。在室内培养条件下,两者虽然都

表现出与土壤活性碳含量和土壤微生物碳量相似的高一低一高一低的海拔变化特征和随土壤深度增加而降低的土壤垂直剖面特点。但相关分析表明,土壤累积矿化量和矿化速率仅与土壤微生物碳量存在显著相关,相关系数均达到 0.975 的极显著相关水平,但与土壤活性碳含量并没有显著相关。这表明,在温湿度相同的条件下,土壤矿化过程在海拔和土壤层间的差异变化主要受到土壤微生物数量的影响,而活性碳含量则是通过影响土壤微生物对矿化产生间接影响。但应该指出的是,野外土壤有机碳矿化除了受凋落物种类和性质、有机碳含量和组成、土壤微生物数量和活性外,还受到土壤湿热状况等多种因素的影响^[32],更为复杂。因此,室内培养获取的“潜在有机碳矿化速率和累积矿化量”等指标与野外原位土壤的“现实有机碳矿化速率和累积矿化量”间可能仍存在很大区别^[31]。一些研究表明,环境因素中的温度和湿度是影响土壤有机碳矿化过程的重要因素^[33-35]。但在本研究中,土壤有机碳累积矿化量和矿化速率与原位土壤年均温度呈现无显著正相关,这与高菲^[31]等对小兴安岭原始阔叶红松林、杨桦次生林土壤研究结论相同,但与原位土壤年均降水量为不显著负相关。反映出自然条件下土壤矿化特征与土壤湿热状况的复杂关系,要真正了解天山云杉林土壤矿化过程的海拔和层间变化规律还需结合野外具体情况做进一步深入研究。

双指数模型可以很好地拟合不同海拔云杉林各层土壤有机碳矿化过程。土壤有机碳累积矿化量和矿化速率均随土层加深而降低的剖面垂直变化以及随海拔升高表现出显著降低,再显著升高,之后逐步降低的海拔变化规律,两者最大值都出现在海拔 2 200~2 400 m 处。土壤活性碳含量表聚现象明显,与有机碳累积矿化量和矿化速率相似的海拔变化特点。土壤微生物是影响天山云杉林土壤有机碳矿化的主要因素。

致谢:感谢新疆林科院天山森林生态定位站在野外调查工作中的大力支持。

参考文献:

- [1] PARTON W J, SANDFORD L, SANCHEZ A, *et al.* Modeling soil organic matter dynamics in tropical soils[J]. *Soil Sci. Am.*, 1989, 39: 153-171.
- [2] DALAL R C, CHAN K Y. Soil organic matter in rain fed cropping systems of the Australian cereal belt[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2001, 9: 435-464.
- [3] 王红, 王邵军, 李宇航, 等. 森林土壤呼吸及其主要调控因素进展[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(1): 92-97.
WANG H, WANG S J, LI J H, *et al.* Characteristics and the influencing factors of forest soil respiration: a review[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(1): 92-97. (in Chinese)
- [4] MURWIRA H K, KIRCHMAN H, SWIFT M J. The effect of moisture on the decomposition rate of cattle manure[J]. *Plant Soil*, 1990, 122: 197-199.
- [5] CORDVIL C M D S, COUTINHO J, GOSS M, *et al.* Potentially mineralisable nitrogen from organic materials applied to a sandy soil: fitting the one-pool exponential model[J]. *Soil Use Manage*, 2005, 21: 65-72.
- [6] RIBEIRO H M, FANGUEIRO D, ALVES F, *et al.* Carbon-mineralization kinetics in an organically managed cambic arenosol amended with organic fertilizers[J]. *Plant Nutr. Soil Sci.*, 2010, 173(1): 39-45.
- [7] LIM S S, LEE K S, LEE S I, *et al.* Carbon mineralization and retention of livestock manure composts with different substrate quality in three soils[J]. *Soils Sediments*, 2012, 12: 312-322.
- [8] PANG H, ZHANG R, DAI W, *et al.* Application of two exponential equations in the study of soil organic carbon mineralization in natural forests[J]. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2014, 6(10): 1117-1123.
- [9] PANG H, DAI W, WANG B, *et al.* Organic carbon content and mineralization characteristics of soil in a subtropical *Pinus massoniana* forest[J]. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2013, 5(12): 1363-1369.
- [10] 朱凌宇, 潘剑君, 张威, 等. 祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究[J]. *环境科学*, 2013, 29(2): 668-675.
ZHU L Y, PAN J J, ZHANG W, *et al.* Study on soil organic carbon pools and turnover characteristics along an elevation gradient in Qilian Mountain[J]. *Environmental Science*, 2013, 29(2): 668-675. (in Chinese)
- [11] 周焱, 徐宪根, 阮宏华, 等. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳矿化速率的比较[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(11): 1901-1907.
ZHOU Y, XU X G, RUAN H H, *et al.* Mineralization rates of soil organic carbon along an elevation gradient in Wuyi Mountain of Southeast China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(11): 1901-1907. (in Chinese)
- [12] 丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 等. 大围山不同海拔森林土壤有机碳垂直分布特征[J]. *水土保持学报*, 2015, 34(2): 258-262.
DING X Q, MA H J, ZHU X L, *et al.* The vertical distribution characteristics of soil organic carbon in different altitude of Dawei Mountain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 34(2): 258-262. (in Chinese)
- [13] GIARDINA CP, RYAN MG. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature[J]. *Nature*, 2000, 404(6780): 858-860.
- [14] LEIROS MC, TRASAR-CEPEDA C, SEOANE S, *et al.* Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(3): 327-335.
- [15] REY A, PETSIKOS C, JARVIS PG, *et al.* Effect of temperature and moisture on rates of carbon mineralization in a *Mediteranean oak* forest soil under controlled and field conditions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(5): 589-599.
- [16] FANG C, MONCRIEFF J B. The dependence of soil CO₂ ef-

flux on temperature[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(2):155-165.

[17] DAVIDSON E A, JANSSENS I A. Temperature sensitivity of carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. Nature, 2006, 440(7081):165-173.

[18] HOPKINS D W, SPARROW A D, ELBERLING B, *et al.* Carbon, nitrogen and temperature controls on microbial activity in soils from an antarctic dry valley[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(10):3130-3140.

[19] 杨添, 戴伟, 安晓娟, 等. 天然林土壤有机碳及矿化特征研究[J]. 环境科学, 2014, 36(3):1105-1110.

YANG T, DAI W, AN X J, *et al.* Organic carbon and carbon mineralization characteristics in nature forestry soil[J]. Environmental Science, 2014, 36 (3):1105-1110. (in Chinese)

[20] BOYLE M, PAUL E A. Carbon and nitrogen mineralization kinetics in soil previously amended with sewage sludge[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(1):99-103.

[21] 安晓娟, 李萍, 戴伟, 等. 亚热带几种林分类型土壤有机碳变化特征及与土壤性质的关系[J]. 中国农学通报, 2012, 28(22):53-58.

AN X J, LI P, DAI W, *et al.* The variation characteristics of soil organic carbon and its relationship with soil properties in typical subtropical plantations[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(22):53-58. (in Chinese)

[22] 巩晟萱, 王丹, 戴伟, 等. 不同生长时期丝栗栲林下土壤有机碳含量及矿化特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5):59-63.

GONG S X, WANG D, DAI W, *et al.* Content and mineralization characteristics of soil organic carbon under *Castanopsis fargesii* forests in different growth periods[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35 (5):59-63. (in Chinese)

[23] 刘浩宇, 巩晟萱, 王兵, 等. 阿尔泰山冷杉林下土壤有机碳矿化特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1):327-331.

LIU H Y, GONG S X, WANG B, *et al.* Mineralization characteristics of soil organic under *Abies nephrolepis* forest in Altai Mountains[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(1):327-331. (in Chinese)

[24] 麻泽宇, 王丹, 戴伟, 等. 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[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5):134-140.

MA Z Y, WANG D, DAI W, *et al.* Soil characteristics and fertility evaluation of *Abies sibirica* forest at different altitude gradients in Altai Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(5):134-140. (in Chinese)

[25] 国家林业局. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.

[26] 阿米娜木·艾力, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山云杉林土壤有机碳沿海拔的分布规律及其影响因素[J]. 生态学报, 2014, 34(5):1626-1634.

AMINEM E L, CHANG S L, ZHANG Y T, *et al.* Altitudinal distribution rule of *Picea schrenkiana* forest's soil organic carbon and its influencing factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5):1626-1634. (in Chinese)

[27] ZOU X M, RUAN H H, FU Y, *et al.* Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation-incubation procedure [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(10):1923-1928.

[28] JENKINSON D S, POWLSON. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V. a method for measuring soil biomass [J]. Soil Biol Biochem, 1976, 8(3):209-213.

[29] 吴建国, 张小全, 徐德应, 等. 六盘山林区几种土地利用方式对土壤有机碳矿化影响的比较[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4):530-538.

WU J G, ZHANG X Q, XU D Y, *et al.* The mineralization of soil organic carbon under different land uses in the Liupan Mountain forest zone[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28 (4):530-538. (in Chinese)

[30] BOYLE M, PAUL E A. Carbon and nitrogen mineralization kinetics in soil previously amended with sewage sludge[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(1):99-103.

[31] 高菲, 林维, 崔晓阳. 小兴安岭两种森林类型土壤有机碳矿化的季节动态[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1):9-16.

GAO F, LIN W, CUI X Y. Seasonal dynamics of soil organic carbon mineralization for two forest types in Xiaoxing'an Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, Jan. 2016, 27(1):9-16. (in Chinese)

[32] 谷丽萍, 郭永清, 泽桑梓, 等. 云南干热河谷不同密度麻疯树人工林土壤活性有机碳特征[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(2):26-31.

GU L P, GUO Y Q, ZE S Z, *et al.* Characteristics of soil organic carbon in *Jatropha curcas* plantations with different densities in dry-hot valley area of Yunnan Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(2):26-31. (in Chinese)

[33] RASMUSSEN C, SOUTHARD R J, HORWATH W R. Mineral control of organic carbon mineralization in a range of temperate conifer forest soils[J]. Global Change Biology, 2006, 12:834-847.

[34] REY A, PETSİKOS C, JARVIS P G, *et al.* Effect of temperature and moisture on rates of carbon mineralization in a *Mediteranean oak* forest soil under controlled and field conditions [J]. European Journal of Soil Science, 2005, 56:589-599.

[35] WANG Y X, WANG F, WENG B Q, *et al.* Effect of sod cultivation on mineralization of soil organic carbon in nectarine orchards[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(6):86-92.