

阿尔泰山冷杉林下土壤有机碳矿化特征

刘浩宇¹, 巩晟萱¹, 王兵², 戴伟¹, 庞欢¹, 张毓涛³

(1. 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 2. 中国林科院 森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 3. 新疆林科院 森林生态研究所, 新疆 乌鲁木齐 830063)

摘要: [目的] 探讨阿尔泰山天然冷杉混交林不同海拔梯度下土壤有机碳矿化特征, 为天然冷杉林土壤有机碳的分解转化过程研究提供理论依据。[方法] 以新疆布尔津县境内阿尔泰山 1 300~1 500, 1 500~1 700, 1 700~1 900 m 这 3 个海拔梯度的冷杉(*Abies nephrolepis*)混交林下土壤为研究对象, 在研究了土壤有机碳含量特征的基础上, 进一步利用双指数模型对有机碳矿化特点进行了探讨。[结果] (1) 3 个海拔梯度的土壤有机碳含量均表现出随土层加深而降低的趋势, 表层富集现象明显, 且该趋势不随海拔梯度的变化而变化; (2) 3 个海拔梯度的各土层有机碳矿化趋势相似。即矿化初期 CO₂-C 累积量增幅较大, 而到了中、后期矿化曲线逐渐趋于平缓, CO₂-C 累积量增幅减小; (3) 双指数方程可以很好地拟合出冷杉林土壤有机碳的矿化趋势; (4) 土壤有机碳矿化过程进行到 100 d 时各海拔梯度的各土层活性碳均未被完全分解; (5) 矿化碳与土壤有机碳总量和活性碳含量均达到极显著相关水平。[结论] 土壤有机碳矿化过程表现出明显随海拔变化的特征。土壤活性碳含量是影响矿化作用的直接因素。

关键词: 冷杉混交林; 土壤有机碳; 土壤有机活性碳; 矿化过程; 双指数模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)01-0327-05

中图分类号: S714.2

文献参数: 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.058

Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon Under *Abies Nephrolepis* Forest in Altai Mountains

LIU Haoyu¹, GONG Shengxuan¹, WANG Bing², DAI Wei¹, PANG Huan¹, ZHANG Yutao³

(1. School of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Institute of

Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

3. Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region 830063, China)

Abstract: [Objective] The research was conducted to analyze the mineralization characteristics of soil organic carbon in *Abies nephrolepis* forest at different elevations in Altai mountains in order to provide the theoretic basis for the decompose and conversion processe study of soil organic carbon under *A. nephrolepis* forest. [Method] The soil samples were collected in *A. nephrolepis* mixed forests at elevation of 1 300~1 500 m, 1 500~1 700 m and 1 700~1 900 m in Altai mountains in Burqin County in Xinjiang Uygur Autonomous Region, and soil organic carbon content was analyzed and compared. The mineralization characteristics of soil organic carbon were further explored using double exponential equation. [Results] (1) Soil organic carbon and active carbon content decreased with increasing soil depth in all three elevation gradient, and the surface accumulation was obvious. (2) The trend of mineralization of soil organic carbon at three elevation gradient was similar. The cumulant of CO₂-C was bigger at early stage of mineralization. In the middle and late stage, the curve flatten out gradually, the increasing rate of cumulant of CO₂-C decreased. (3) The mineralization characteristics of soil organic carbon in *A. nephrolepis* forest in each layer can be well simulated using double exponential equation. (4) After 100 days of mineralization, the soil activated carbon at each elevation gradient was not still fully decomposed. (5) Mineralized carbon and soil total organic carbon and active carbon content

收稿日期: 2014-06-27

修回日期: 2014-07-19

资助项目: 中国森林土壤调查、标准规范及数据库构建(2014FY120700)。

第一作者: 刘浩宇(1990—), 男(汉族), 云南省曲靖市人, 硕士, 研究方向为森林土壤。E-mail: flyingdance1990@hotmail.com。

通讯作者: 戴伟(1964—), 男(汉族), 北京市海淀区人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事为森林土壤研究。E-mail: daiw163@163.com。

were significantly correlated. [Conclusion] The mineralization process of soil organic carbon obviously varied with elevation, soil active carbon concentration affected mineralization process directly.

Keywords: *Abiese nephrolepis* mixed forests; soil organic carbon; active carbon; mineralization process; double exponential equation

近些年全球温室效应所带来的一系列问题越来越引起人们的关注,作为陆地生态系统最大的碳库—森林土壤,在调节碳平衡、减缓大气中二氧化碳等温室气体浓度上升方面具有不可替代的作用^[1]。而作为土壤碳最重要的部分——土壤有机碳,其含量及矿化特征已成为碳循环领域中的研究热点。为此,很多学者做了相关的研究,在国外,Ribeiro 等^[2]、FernándezI 等^[3]分别研究了有机肥和火烧对土壤有机碳矿化动力学特征的影响。阿米娜木·艾力等^[4]以天山云杉森林土壤为研究对象,对土壤有机碳海拔分布的规律及其影响因素进行了深入的研究,研究发现天山云杉森林土壤有机碳密度沿海拔的变化是水热梯度变化及受其影响的森林长势二者共同作用的结果。王秀丽等^[5]研究了北京山区土壤有机碳分布及其影响因素,得出海拔所造成的水热条件和植被覆盖度的差异是影响土壤表层有机碳分布的主导环境因子;为了进一步研究土壤有机碳矿化过程,E. A. Paul 等^[6],R. Alvarez 等^[7]利用单、双指数方程等模型分别拟合了土壤活性碳的矿化过程和土壤有机碳矿化过程,并对拟合效果进行了评价。在中国,Yang Lixia 等^[8]曾利用双指数模型对中国不同森林带土壤有机碳矿化的动态变化规律进行了预测。Pang Huan 等^[9]利用双指数模型分别对亚热带地区的 3 种马尾松(*Pinus massoniana*)林型的土壤有机碳矿化过程进行拟合,比较了 3 种土壤有机碳的矿化特点,并从根系、地表凋落物和土壤微生物等角度分

析了 3 种林型土壤有机碳矿化过程的差异。

天然冷杉林是中国重要的森林资源,也是重要的森林土壤碳循环影响因素。但迄今针对天然冷杉混交林开展的土壤有机碳矿化过程研究仍十分缺乏。为此,本文以中国新疆阿尔泰山不同海拔梯度上分布的天然冷杉混交林土壤为研究对象,在比较不同海拔林下土壤有机碳含量特征的基础上,利用双指数方程探讨不同海拔梯度下土壤有机碳矿化特征,以期为今后更深入研究天然冷杉林土壤有机碳的分解转化过程提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究区位于新疆境内阿尔泰山布尔津县地区,地理位置 48°23′19—48°33′14″N,87°13′26—87°26′54″E,属大陆性北温带寒凉气候,夏季干热,冬季严寒,降水量小,蒸发量大,昼夜温差大,光照充足,全年多季风。年均温-2~3℃,年均降雨量 500~800 mm。

1.2 样品采集与分析方法

将阿尔泰山北坡冷杉林主要分布区划分为 1 300~1 500 m,1 500~1 700 m,1 700~1 900 m 这 3 个海拔梯度,每个海拔梯度分别设置 3 块 20 m×20 m 的标准地,每块标准地按“S”形挖掘 5 个深度 1 m 的土壤剖面,分别采集 0—10,10—20,20—40,40—60 和 60—100 cm 的土壤混合样品,根据《森林土壤分析方法》^[10]风干,并分别过 2 和 0.149 mm 筛处理后备用。样地基本概况见表 1。

表 1 样地基本概况

海拔/m	林 型	林 龄/a	平均树高/m	平均胸径/cm	郁闭度/%	坡度坡向/(°)
1 300~1 500	针阔混交林(冷杉+白桦+落叶松)	80~160	18.2	21.9	45	N22
1 500~1 700	针阔混交林(冷杉+白桦+落叶松)	40~80	14.7	18.0	35	NW13
1 700~1 900	针叶混交林(冷杉+落叶松)	40~80	11.4	20.4	47	NW10

注:海拔 1 300~1 500 m 林下植被主要为冰草(*Agropyron cristatum*)、芍药(*Paeonia lactiflora*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、苜蓿(*Medicago falcata*)、路边青(*Geum aleppicum*)、茶藨子(*Ribes saxatile*)、忍冬(*Lonicera japonica*)、红果山楂(*Crataegus sanguinea*)、新疆党参(*Codonopsis clematidea*)、柳兰(*Chamerion angustifolium*)、苔藓(*Hypnaceae rebolutum*)等;

海拔 1 500~1 700 m 林下植被主要为冰草、窄叶芍药(*Paeonia anomala*)、白喉乌头(*Aconitum leucostomum*)、鹿蹄草(*Pyrola calliantha*)、地钱(*Marchantia polymorpha*)、阿尔泰羽衣草(*Alchemilla pinguis*)、阿尔泰蒲公英(*Taraxa cum altaicum*)、阿尔泰铁角蕨(*Marchantia polymorpha*)、尖刺蔷薇(*Rosa oxyacantha*)、茶藨子、忍冬、全缘铁线莲(*Clematis integrifolia*)等;

海拔 1 700~1 900 m 林下植被主要为阿尔泰羽衣草、白喉乌头、勿忘草(*Myosotis alpestris*)、著(*Achillea asiatica*)、全叶青兰(*Dracocephalum integrifolium*)、阿勒泰堇菜(*Viola altaica*)忍冬、尖刺蔷薇(*Rosa oxyacantha*)、悬钩子(*Rubus sachalinensis*)、阿尔泰藜芦(*Vertrum lobelianum*)等。

土壤有机碳含量:重铬酸钾—外加热法^[11];土壤有机碳矿化过程中 CO₂ 释放量:室内恒温培养、碱液

吸收法^[12],称取 2 mm 的风干土壤样品 100 g,加蒸馏水使其土壤含水量为田间持水量的 60%,混合均匀,

放特制的培养瓶底部。温度保持在 28 ℃,避光预培养 7 d。之后,在培养瓶内,悬挂注入了 25 ml 浓度为 0.4 mol/L NaOH 碱液的吸收小瓶,保证在要求时间内能吸收土壤呼吸产生的 CO₂。同时在同等条件下放置装有相同重量的石英砂的培养瓶作为空白对照。将所有的培养瓶放在 28 ℃下避光培养。分别在第 1, 4, 7, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 98 d 测定吸收瓶内的 CO₂ 含量,培养过程共计 98 d。再用过量的 BaCl₂ 溶液沉淀吸收瓶里 NaOH 溶液中的碳酸氢根(HCO₃⁻)和(碳酸根 CO₃²⁻)离子。摇匀后加入两滴酚酞作为指示剂,用 0.4 mol/L HCl 滴定中和未消耗的 NaOH,直到到粉红色消失。最后根据消耗的盐酸含量计算 CO₂ 释放量

1.3 土壤有机碳矿化过程拟合方程

Boylehe Paul 双指数模型^[6],
$$C_{\min}=C_o(1-e^{-k_o t})+C_s(1-e^{-k_s t})$$
式中: C_{\min} ——经过 t 时间后土壤中累积释放的 CO₂ 量(g/kg); C_o ——土壤中活性有机碳含量(g/kg); k_o ——活性有机碳库周转速率(d); t ——土壤避光培

养时间(d); C_s ——土壤中缓效性有机碳的含量(g/kg); k_s ——缓效有机碳库周转速率(d)。

1.4 数据处理

所得数据采用 SPSS 17.0 进行方差分析;土壤有机碳矿化过程的拟合采用 Origin 8.6 软件进行。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳分布特征

研究结果表明(表 2),冷杉混交林 3 个海拔梯度下土壤有机碳含量均表现出一致的剖面变化特征,即随土层深度的加深有机碳含量逐渐降低。0—10 cm 土层有机碳含量占整个剖面的比例从 41.98%(1 300~1 500 m 高度)增加到 52.00%(1 500~1 700 m 高度),均与下层达到显著性差异($p<0.05$);10—20 cm 的比例从 20.46%(1 700~1 900 m 高度)增加到 25.05%(1 300~1 500 m 高度),与下层土壤有一定差异,但差异不显著;20—100 cm 的 3 层所占比例从 24.77%~32.97%。可见 0—20 cm 土层有机碳含量占整个剖面的比例高达 67.03%到 75.23%,表现出明显的表层富集现象^[13]。

表 2 土壤有机碳含量特征

土层深度/cm	海拔高度/m			变异系数/%
	1 300~1500	1 500~1700	1 700~1900	
0—10	43.48±17.67 ^{Aa}	54.94±17.23 ^{Aa}	49.19±13.19 ^{Aa}	11.65
10—20	25.95±4.11 ^{Ba}	24.54±8.53 ^{Ba}	20.24±0.07 ^{Ba}	12.62
20—40	15.70±3.36 ^{BCa}	12.59±3.07 ^{BCa}	15.22±2.56 ^{BCa}	11.54
40—60	10.47±2.27 ^{BCa}	8.70±3.47 ^{BCa}	8.53±0.98 ^{Ca}	11.64
60—100	7.98±4.90 ^{Ca}	4.89±1.01 ^{Ca}	5.74±0.81 ^{Ca}	25.73
变异系数/%	69.87	95.99	87.90	

注:A,B,C,D 表示同一海拔不同土层有机碳含量差异水平($p<0.05$);a,b,c,d 表示同一土层不同海拔有机碳含量差异水平($p<0.05$)。下同。

不同海拔土壤剖面总的有机碳含量在 98.92~105.66 g/kg;不同海拔同层土壤间有机碳含量差异均不显著。

垂直土壤剖面有机碳含量变异系数为 69.87%~95.99%,变幅较不同海拔相同土层变异系数(11.54%~25.73%)变化范围大,说明垂直土壤剖面有机碳含量变化差异更大。

2.2 土壤有机碳矿化特征

由双指数拟合结果可以看出,双指数方程能很好地拟合出冷杉混交林土壤有机碳矿化趋势,且吻合度很高,实测值与拟合值相关系数高达 0.99~1.00。完全可以反映出土壤有机碳的矿化过程。由图 1 看出,3 个海拔梯度的土壤有机碳矿化趋势相似,即矿化初期 CO₂-C 累积量增幅较大,而到了中、后期矿化曲

线逐渐趋于平缓,CO₂-C 累积量增幅减小;各海拔的 0—10 cm 土层有机碳矿化强度均明显高于下层,且都达到显著性差异($p<0.05$);3 个海拔的 0—10 cm 以下各层虽差异显著性不规律,但基本呈现出随土层的加深 CO₂—C 含量逐渐减少的趋势(图 1,表 3)。

从表 3 看出,对于不同海拔相同土层而言,0—10 cm 土层 100 dCO₂-C 矿化累积量均达到显著性差异($p<0.05$),表现为随海拔的增高 CO₂-C 矿化累积量由低变高再变低的趋势;而 0—10 cm 以下各土层同层间 CO₂-C 矿化累积量虽然差异显著性不一致,但均体现出随海拔的升高 CO₂-C 矿化累积量逐渐减少的趋势;3 个海拔的各土层的矿化碳/活性碳比值均小于 1,即累积矿化 100 d 后,活性碳均未被完全分解。

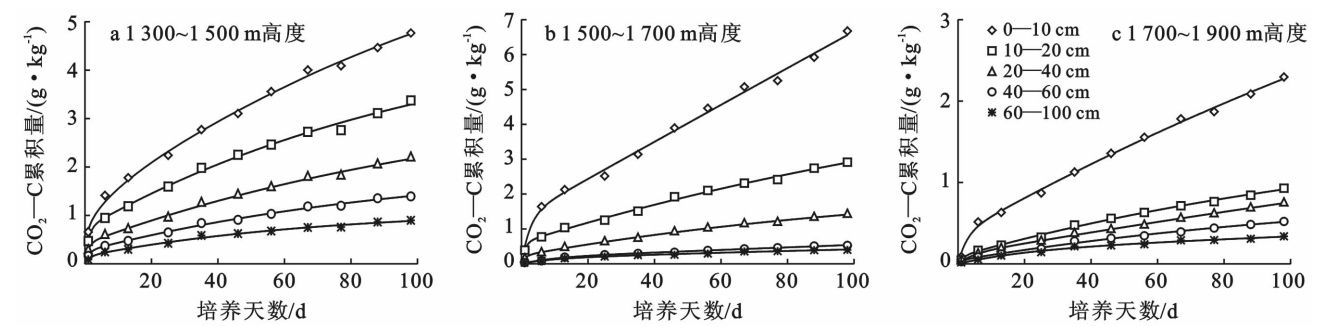


图 1 土壤有机碳矿化过程双指数方程拟合曲线

表 3 土壤有机碳矿化特征

海拔高度/m	深度/cm	矿化碳/(g·kg ⁻¹)	活性碳/(g·kg ⁻¹)	矿化碳/活性碳	拟合系数
1 300~1 500	0—10	4.77±0.08 ^{Ab}	7.09±2.25 ^{Aa}	0.67	1.00
	10—20	3.38±0.30 ^{Ba}	4.31±1.14 ^{Ba}	0.78	0.99
	20—40	2.19±0.50 ^{Ca}	3.26±1.17 ^{BCa}	0.67	1.00
	40—60	1.39±0.12 ^{Da}	1.80±0.06 ^{Ca}	0.77	1.00
	60—100	0.90±0.24 ^{Da}	0.99±0.13 ^{Ca}	0.91	0.99
1 500~1 700	0—10	6.68±0.11 ^{Aa}	8.58±0.07 ^{Aa}	0.78	0.99
	10—20	2.92±0.74 ^{Ba}	3.11±0.54 ^{Bab}	0.94	0.99
	20—40	1.42±0.59 ^{Cb}	2.29±1.17 ^{Ba}	0.62	1.00
	40—60	0.53±0.04 ^{Db}	1.18±0.04 ^{Cc}	0.45	1.00
	60—100	0.40±0.15 ^{Db}	0.45±0.06 ^{Cb}	0.89	0.99
1 700~1 900	0—10	2.30±0.13 ^{Ac}	6.02±0.90 ^{Aa}	0.38	1.00
	10—20	0.93±0.19 ^{Bb}	2.00±1.35 ^{Bb}	0.47	1.00
	20—40	0.75±0.17 ^{BCb}	2.90±0.40 ^{BCa}	0.26	1.00
	40—60	0.52±0.08 ^{CDb}	1.19±0.43 ^{CDbc}	0.44	0.99
	60—100	0.34±0.02 ^{Db}	0.40±0.08 ^{Db}	0.85	1.00

2.3 土壤活性有机碳分布特征

由表 3 看出,土壤活性有机碳含量的剖面垂直变化趋势与有机碳、矿化碳含量变化趋势基本一致,表现出随土层的加深含量逐渐减少的变化趋势;3 个海拔 0—10 cm 土层活性碳含量所占比例分别为 40.63%(1 300~1 500 m),54.96%(1 500~1 700 m),51.10%(1 700~1 900 m),均与下层土壤达到显著性差异($p<0.05$)。

比较不同海拔相同土层的活性有机碳含量发现,其变化趋势与矿化碳变化非常吻合,即 0—10 cm 土层活性有机碳含量由低变高再变低,且虽然 0—10 cm 以下各土层同层间其含量差异显著性也不一致,但均体现出随海拔的升高活性有机碳含量逐渐减少的特点。

2.4 土壤矿化碳与有机碳、活性有机碳相关性比较

由表 4 可以看出,土壤矿化碳与有机碳、活性有机碳均达到极显著相关水平,相关系数分别为 0.793 和 0.897。

表 4 土壤有机碳矿化和有机碳、活性碳的相关性

项 目	有机碳	活性碳	矿化碳
有机碳	1		
活性碳	0.863 **	1	
矿化碳	0.793 **	0.897 **	1

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3 讨论

(1) 3 个海拔的土壤剖面有机碳含量均表现出随土层加深而降低的趋势,0—10 cm 有机碳含量显著高于以下各层,与下层均达到显著性差异($p<0.05$),表现出明显的表层富集现象,这与很多研究结果一致^[14-15]。大量的凋落物,增加了有机碳的输入,黄从德等^[16]指出土壤表层是发生凋落物分解、腐殖化作用以及微生物分解活动的主要区域,且这些活动的强度随着深度增加而减弱;比较不同海拔相同土层间有机碳含量可以发现,0—10,10—20,20—40,40—60,60—100 cm 差异均不显著,海拔的变化并未引起土

壤有机碳含量的显著差异。

(2) 3 个海拔梯度的各土层有机碳具有相似的矿化趋势。即矿化初期 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积量增幅较大,而到了中、后期矿化曲线逐渐趋于平缓, $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积量增幅减小。有研究认为,在矿化初期,土壤中单糖等易分解的活性有机碳类物质首先被迅速分解,随着这类物质的分解和消耗,导致微生物在矿化后期被迫分解较难分解的有机碳类物质,分解速率逐渐降低, CO_2 释放量减少^[17]。

3 个海拔梯度的垂直土壤剖面 0—10 cm 土壤有机碳矿化强度明显高于下层,且都达到显著性差异($p < 0.05$),这是因为土壤表层积累的有机碳含量要显著高于其下各土层,且表层通气性良好,加之良好的水热条件,导致大量的微生物聚集在该土层,微生物活动激烈,有效地将有机碳分解转化为 CO_2 等无机碳溢出,即表层的矿化碳含量显著高于以下各层;除海拔 1 700~1 900 m 的 10—20 cm 土层 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积量与下层差异不显著外,其他两个海拔的 10—20 cm 土层 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积量均与下层达到显著性差异($p < 0.05$),这是因为冷杉林地被物非常茂盛、根系相对较浅,0—20 cm 土层内有机碳占总量的 45%~55%,因此 0—10 cm,10—20 cm 内碳源充足,加之微生物数量较下层更多,活动激烈,矿化过程随之加剧,导致 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积量显著高于下层。

(3) 比较表 3 中的矿化碳/活性碳值可以明显看出,其比值范围为 0.26~0.94。即矿化过程进行到 100 d 时各海拔的各土层活性碳均未被完全分解,且 1 300~1 500,1 500~1 700 m 两海拔梯度的矿化碳/活性碳比值均大于 0.5,而 1 700~1 900 m 的矿化碳/活性碳值基本都小于 0.5,这可能是因为 1 700~1 900 m 海拔梯度温度更低,微生物活动弱,导致该海拔梯度矿化强度较弱,100 d 后分解不足一半的活性有机碳。

(4) 有研究表明,土壤有机碳作为土壤有机碳矿化的底物,其含量必将直接对土壤有机碳矿化作用产生影响^[18-19],本研究结果也得出类似的结论,矿化强度(矿化碳含量)与土壤有机碳总量和活性碳含量均达到极显著相关水平,相关系数分别为 0.793 和 0.897,同时比较活性有机碳含量特征发现(表 3),其含量变化趋势与矿化碳变化趋势非常吻合,所以土壤有机碳总量相比,土壤活性碳含量是影响矿化作用更直接的因素。

4 结论

(1) 3 个海拔的土壤剖面有机碳含量均表现出随

土层加深而降低的趋势,0—10 cm 有机碳含量与下层均达到显著性差异($p < 0.05$),表现出明显的表层富集现象。

(2) 3 个海拔梯度的各土层有机碳具有相似的矿化趋势。即矿化初期 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积量增幅较大,而到了中、后期矿化曲线逐渐趋于平缓, $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积量增幅减小;垂直土壤剖面 0—10 cm 土壤有机碳矿化强度明显高于下层,且都达到显著性差异($p < 0.05$)。

(3) 矿化过程进行到 100 d 时各海拔的各土层活性碳均未被完全分解。

(4) 双指数方程能很好地拟合出冷杉混交林土壤有机碳矿化趋势,吻合度高,相关系数高达 0.99~1.00,能很好的体现出土壤有机碳的矿化过程。

(5) 土壤有机碳矿化强度(矿化碳含量)与有机碳总量和活性碳含量均达到极显著相关水平,与土壤有机碳总量相比,土壤活性碳含量是影响矿化作用更直接的因素。

[参 考 文 献]

- [1] 周国模,姜培坤,徐秋芳. 竹林生态系统中碳的固定与转化[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [2] Ribeiro H M, Fangueiro D, Alves F, et al. Carbon-mineralization kinetics in an organically managed Cambic Arenosol amended with organic fertilizers[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2010,173(1):39-45.
- [3] Fernández I, Cabaneiro A, Carballas T. Carbon mineralization dynamics in soils after wildfires in two Galician forests[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(13):1853-1865.
- [4] 阿米娜木·艾力,常顺利,张毓涛. 天山云杉森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(7):1627-1634.
- [5] 王秀丽,张凤荣,朱泰峰. 北京山区土壤有机碳分布及其影响因素研究[J]. 资源科学,2013,35(6):1152-1158.
- [6] 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.
- [7] Alvarez R, Alvarez C R. Soil organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1): 184-189.
- [8] Yang Lixia, Pan Jianjun, Yuan Shaofeng. Predicting dynamics of soil organic carbon mineralization with a double exponential model in different forest belts of China[J]. Journal of Forestry Research, 2006, 17(1): 39-43.

(下转第 336 页)

性发生了较大变化,各生长指标逐渐下降,植株衰老退化严重,因此,建议在柠条锦鸡儿灌木生长的后期要及时进行平茬复壮。

(2) 柠条锦鸡儿灌木林生物量和株高的生长变化,在降雨量和积温的共同作用下,不同生长坡位间的差异显著,表现为坡下生物量积累受植株分枝数量的影响,坡中生物量积累受植株分枝数量、地径和株高生长的共同影响,坡上生物量积累受地径、株高和株丛冠幅的共同影响。

(3) 柠条锦鸡儿灌木林在生长的初期阶段和中期阶段,0—8 m 土壤贮水量在不同生长坡位均产生了显著影响,而在生长的后期阶段坡下土壤贮水量远高于坡中和坡上,同时,柠条锦鸡儿灌木林的各生长指标与土壤贮水量均呈正相关关系。表明柠条锦鸡儿灌木林在生长的初期阶段主要是靠天然降雨量的影响,而到生长的中期阶段和后期阶段主要是靠天然降雨量和土壤水分的双重影响。

(4) 在柠条锦鸡儿灌木林生长的不同区域受水热条件的变化影响,研究结果均有一定差异^[5-7]。本研究在黄土高原半干旱地区的结果表明,水热条件是影响柠条锦鸡儿灌木林生长的主要限制因子,因此,通过生物量与气候因子、生长因子,贮水量与气候因子的分析表明,气候因子和土壤贮水量对生物量的增

长影响明显^[8-9],这对指导黄土高原半干旱地区柠条锦鸡儿灌木林的生长及生物量估测无疑具有重要的实用意义和参考价值。

[参 考 文 献]

- [1] 牛西午,张强,杨治平. 柠条人工林对晋西北土壤理化性质变化的影响研究[J]. 西北植物学报,2003,23(4):628-632.
 - [2] 程积民,杜峰,万惠娥. 黄土高原半干旱区集流灌草立体配置与水分调控[J]. 草地学报,2000(3):210-219.
 - [3] 程积民,万惠娥,王静. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究[J]. 林业科学,2005,41(2):37-41.
 - [4] 王力,邵明安,王全九. 林地土壤水分运动研究述评[J]. 林业科学,2005,41(2):147-153.
 - [5] 周择福,洪玲霞. 不同林地土壤水分入渗和入渗模拟的研究[J]. 林业科学,1997,33(1):9-17.
 - [6] 郭建平,高素华,刘玲. 气候变坏对红松气候生产力的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2003,11(2):129-131.
 - [7] 张彩琴,杨持. 几种不同生活型草原植物生长动态的比较研究[J]. 内蒙古大学学报:自然科学版,2007,38(9):557-564.
 - [8] 胡宏友,林鹏,杨志伟. 宽叶雀稗群落生物量和生长规律的研究[J]. 福建农业学报,2002,17(4):226-230.
 - [9] 王倩,程积民,万惠娥. 环境因素影响草地柠条生长的主成分及典型相关分析[J]. 草地学报,2009,17(3):321-326.
-
- (上接第 331 页)
- [9] Pang Huan, Dai Wei, Wang Bing. 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] 国家林业局. 森林土壤分析方法[M]. 北京:中国标准出版社,1999.
 - [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
 - [12] Zou Xiaoming, Ruan Honghua, Fu Yun. 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.
 - [13] 李艳忠,罗格平,许文强,等. 天山北坡三工河流域中山带森林发育与气候土壤的关系[J]. 山地学报. 2011,29(1):33-42.
 - [14] 张于光,张小全,肖烨. 米亚罗林区土地利用变化对土壤有机碳和微生物量碳的影响[J]. 应用生态学报, 2006,17(11):2030-2033.
 - [15] 石培礼,于贵瑞. 拉萨河下游河谷不同土地利用方式下土壤有机碳储量格局[J]. 资源科学,2003,25(5):96-102.
 - [16] 黄从德,冉华. 岷江上游不同森林类型土壤有机碳含量及密度特征[J]. 四川林业科技,2010,31(2):36-38.
 - [17] Collins H P, Rasmussen P E, Douglas C L. Crop rotation and residue management effects on soil carbon and microbial dynamics[J]. Soil Science Society of America, 1991,56(3):783-788.
 - [18] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. Nature, 2006,440(7081):165-173.
 - [19] 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.