

DOI: 10.5846/stxb201811302603

康成芳, 宫渊波, 车明轩, 许蔓菁, 吕 宸, 刘 韩. 川西高寒山地灌丛草甸不同海拔土壤有机碳矿化的季节动态. 生态学报, 2020, 40(4): 1367-1375.

Kang C F, Gong Y B, Che M X, Xu M J, Lü C, Liu H. Seasonal dynamics of soil organic carbon mineralization for alpine shrub meadow at different elevations, western Sichuan. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1367-1375.

川西高寒山地灌丛草甸不同海拔土壤有机碳矿化的季节动态

康成芳¹, 宫渊波^{1,*}, 车明轩¹, 许蔓菁¹, 吕 宸¹, 刘 韩²

1 四川农业大学林学院, 温江 611130

2 四川省甘孜州林业科学研究所, 康定 626001

摘要:为探明高寒山地灌丛草甸不同海拔土壤碳矿化潜力,选取折多山 3800 m、4000 m、4200 m 3 个海拔梯度的灌丛草甸,采用室内培养法测定不同季节土壤累积矿化量和矿化速率,运用一级动力学方程对土壤碳矿化过程进行拟合,并分析不同海拔土壤活性碳组分季节变化及累积矿化量与土壤环境因子的关系。结果表明:土壤累积矿化量及活性碳组分均呈现出 0—20 cm 土层显著高于 20—40 cm 土层,且夏季最高的季节变化,而海拔变化趋势不一致,但大体呈现出 3800 m 灰化土最大。土壤碳矿化速率随着培养时间的推移逐渐降低慢慢趋于平缓,且前 21 d 降低幅度显著高于后 21 d。各海拔 C_0 和 C_0/SOC 均夏季最高,表明高寒灌丛草甸夏季土壤固碳能力最低,且 3800 m 灰化土固碳能力最低。土壤碳矿化与土壤全氮、有机碳、活性碳显著相关,且微生物量碳更能直接影响土壤碳矿化。土壤碳矿化季节性变化受土壤理化性质和环境因素综合影响,这些因子共同作用使得土壤有机碳库各组分发生复杂变化,所以对于高寒灌丛草甸地区植被多样性的保护及夏季牧场的合理控制至关重要。

关键词:灌丛草甸;土壤碳矿化;活性碳;动态方程;季节变化

Seasonal dynamics of soil organic carbon mineralization for alpine shrub meadow at different elevations, western Sichuan

KANG Chengfang¹, GONG Yuanbo^{1,*}, CHE Mingxuan¹, XU Manjing¹, LÜ Chen¹, LIU Han²

1 College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, China

2 Ganzi Institute of Forestry Research, Kangding 626001, China

Abstract: To explore soil mineralization potential at different elevations in alpine shrub meadow, we selected alpine shrub meadow soils at 3 elevation gradients (3800 m, 4000 m, and 4200 m) in Zheduo Mountains and investigated the carbon mineralization characteristics and carbon mineralization rate by using indoor analysis methods. We used simultaneous reaction model to describe carbon mineralization kinetics and estimated organic carbon mineralization parameters. The relations between soil cumulative mineralization amounts and their influencing factors were also analysis. Results showed that soil cumulative mineralization amounts and activated carbon contents were significantly higher in 0—20 cm soil layer than 20—40 cm soil layer and both of them were largest in summer; There was no consistent change of soil cumulative mineralization amounts and activated carbon contents among different elevations, but the podzolic soil (at 3800 m elevation) was the largest. The soil carbon mineralization rate gradually decreased with the duration of cultivation time, and the decrease rate in initial 21 days were significantly higher than later stage. C_0 and C_0/SOC value were significantly higher in summer, indicating that the carbon sequestration capacity of summer was relatively lower than that of other seasons and

基金项目:四川省科技厅重点课题(2015FZ0022)

收稿日期:2018-11-30; 网络出版日期:2019-11-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gyb@sicau.edu.cn

the podzolic soil was lowest. Soil carbon mineralization was significantly correlated with soil total nitrogen, soil organic carbon and soil activated carbon. Moreover, microbial biomass carbon could directly affect organic carbon mineralization. The seasonal variation of soil carbon mineralization amounts was affected by the combination of soil physical and chemical properties and environmental factors. These factors worked together to make complex changes in the components of soil organic carbon pool. Therefore, the protection of vegetation and the rational control of summer pastures were essential in alpine shrub meadows.

Key Words: shrub meadow; soil carbon mineralization; activated carbon; dynamic equations; season dynamics

土壤有机碳库是陆地生态系统中最大的碳库,在全球碳循环中起重要作用^[1]。土壤有机碳矿化作为重要的土壤生物化学过程,不仅关系土壤中温室气体的产生,也影响土壤养分元素的释放与供应、土壤质量的保持等^[2],反映土壤有机碳的周转速度和土壤的稳定性^[3]。土壤有机碳的矿化过程是在微生物的参与下进行的,直接受土壤有机碳质量及土壤微生物生物量的影响,间接受温度条件、水分状况、土壤理化性质等诸多因素的影响^[4]。目前我国对于土壤有机碳矿化的研究已有不少,但主要集中于森林和农田生态系统中添加外源物质^[5-7]、温湿度变化^[8,9]、土地利用管理方式^[10,11]、土地类型^[12]等对其的影响,且这些研究都是基于某一季节采样进行的,而对于高寒灌丛草甸土壤碳矿化的季节变化动态研究尚少。因此,探究高寒山地土壤有机碳矿化规律对于养分的科学管理及全球变暖的有效控制等都有十分重要的实践意义。

折多山位于我国青藏高原东缘,是我国一、二级阶地的结合部,是重要的地理分界线,也是土壤环境变化最剧烈的区域,属于典型的生态环境脆弱区及温度变化敏感区。而高山灌丛草甸作为高山生态系统中的第一道防线,是高寒地区主要的夏季牧场,也是高山生态系统中的重要组成部分。因此,对于高寒山地灌丛草甸土壤碳矿化季节变化规律的研究具有重要意义。本研究以高寒山地灌丛草甸为研究对象,在川西折多山不同季节采集 3800 m、4000 m、4200 m 三个海拔梯度土样,在测定土壤累积矿化量、碳矿化速率基础上,对土壤可矿化碳量、潜在可矿化量等进行参数拟合,并分析土壤碳矿化量与理化性质间的关系,探讨折多山土壤碳矿化的季节性变化规律和影响因素,以期高寒山地灌丛草甸土壤碳季节性周转及固定提供参考和数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省甘孜州折多山西侧(N30°00′—30°08′,E101°44′—101°51′),最高海拔 4962 m,垭口海拔 4298 m。气候为亚寒带季风气候与高原大陆性气候的交揉区,气候温和偏寒,缓坡为草,低谷为林,年日照 2000—2500 h 以上,年平均降水量 1600 mm,年平均气温 8℃ 以下,冷季漫长,无明显夏季。主要土壤类型为山地棕色针叶林土、山地灰化土和高山草甸土。

1.2 样地设置

研究区因地形、地貌多样,在充分考虑海拔、植被、坡向等的前提下,选择 4200 m(4240—4290 m)、4000 m(3970—4010 m)、3800 m(3800—3850 m)三个海拔设置研究样地,具体各样地基本情况见表 1。

1.3 样品采集

样品于 2017 年 7 月(夏季)、2017 年 10 月(秋季)、2018 年 5 月(春季)在折多山 3 个海拔设置 3 个大样地,在每块样地内均设置 3 块 20 m × 20 m 标准样地,在每块标准样方内采用 S 形取样法根据土壤发生学层次挖 2 个土壤剖面,分淋溶层(0—20 cm)、淀积层(20—40 cm)2 个土层取土,各层样品重复 3 次取样,并将相同土层混匀。将新鲜土样手工挑除根系和杂质后分为两份,一份过 2 mm 筛,放入 4℃ 保温箱进行鲜样保存,用于测定土壤碳矿化、微生物量碳、可溶性有机碳和土壤自然含水率;另一份风干后,分别过 2 mm 和 0.149 mm 土壤筛后备用,过 2 mm 筛的土壤样品用于测定土壤 pH 值,过 0.149 mm 筛的土壤样品用于测定土壤有机碳、易氧化有机碳、全氮。

表 1 样地基本情况

Table 1 General status of sampling sites

样地编号 Sample number	海拔 Elevation	坡向 Slope direction	土壤类型 Soil type	主要植被 Plant type
1	4200 m	NE	高山草甸土	草原杜鹃、隐蕊杜鹃、委陵菜、绵毛水苏、紫菀
2	4000 m	NE	高山草甸土	杜鹃、海桐、金露梅、小檗、卷耳、茅莓、长梗蓼
3	3800 m	NE	高山草甸土(漂灰化)	杜鹃、高山柏、云杉、冷杉、小檗、高山蔷薇

草原杜鹃(*Rhododendron telmateium*)、隐蕊杜鹃(*Rhododendron intricatum*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、绵毛水苏(*Stachys lanata*)、紫菀(*Aster tataricus*)、海桐(*Pittosporum tobira*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)、小檗(*Berberis thunbergii*)、卷耳(*Cerastium arvense*)、茅莓(*Rubus parvifolius*)、长梗蓼(*Polygonum calostachyum*)、高山柏(*Sabina squamata*)、云杉(*Picea asperata*)、冷杉(*Abies fabri*)、高山蔷薇(*Rosa transmorrissonensis*)

1.4 分析方法

1.4.1 土壤有机碳累积矿化量和矿化速率

土壤有机碳累积矿化量和矿化速率采用室内恒温培养-碱液吸收法^[13]测定。称取过 2 mm 土壤筛的新鲜土壤样品 50 g 鲜土三份,放入 500 mL 广口瓶中,内置装有 10 mL 0.2 mol/L NaOH 溶液的小瓶,用以吸收有机碳矿化释放的 CO₂,用实验室专用封口膜密封后置于 20℃ 的恒温培养箱培养 42 d。同时在培养箱中设置 2 个不含土样的培养瓶作为对照。在第 1、7、14、21、28、35、42 d 将吸收液取出并换上新的吸收瓶,再按上述方法继续培养。取出的 NaOH 吸收液,加入过量的 1 mol/L BaCl₂溶液以及 2 滴酚酞指示剂,用 0.1 mol/L HCl 溶液进行滴定至红色消失,记录滴定所用 HCl 量。试验结果按 HCl 量计算土壤 CO₂释放量,土壤有机碳矿化速率用于土 1 kg/d 释放的 CO₂-C mg 来表征,公式为:

$$C_{\min} = [(V_0 - V) \times C_{\text{HCl}}] / 2 \times 44 \times 12 / 44 \times 1 / m (1 - w) \times 1000 / t$$

式中, $C_{\min}$ 为培养期间土壤碳矿化速率(mg kg⁻¹ d⁻¹), V_0 为空白标定时消耗的标准盐酸的体积(mL), V 为样品滴定时消耗的标准盐酸的体积(mL), C_{HCl} 为标准盐酸浓度(mol/L), m 为每个玻璃瓶中的鲜土质量(g), w 为土壤水分质量分数(%), t 为培养时间(d)。

1.4.2 土壤基本理化性质测定

土壤有机碳:采用重铬酸钾氧化-外加热法^[14];土壤微生物量碳:采用氯仿熏蒸 K₂SO₄浸提方法^[15];易氧化有机碳:采用高锰酸钾比色法^[16];土壤可溶性碳:采用 K₂SO₄浸提总有机碳分析仪^[17];土壤全氮:采用凯氏定氮法;土壤 pH:pH 计;土壤自然含水率:采用 105℃ 烘干法。样地土壤基本理化性质见表 2。

表 2 土壤基本理化性质

Table 2 Basic soil physical and chemical properties

海拔 Elevation/m	土层 Soil layer/cm	有机碳 Organic carbon/(g/kg)			全氮 Total nitrogen/(g/kg)			含水率 Water content/%			pH		
		夏	秋	春	夏	秋	春	夏	秋	春	夏	秋	春
4200	0—20	56.69	63.78	59.62	3.47	4.36	4.18	68.16	57.47	70.1	5.53	5.8	5.53
	20—40	37.84	43.37	35.43	1.52	2.31	2.39	75.38	76.69	77.95	5.63	5.73	5.67
4000	0—20	53.92	60.10	57.32	2.67	4.22	3.82	61.1	64.39	66.63	5.83	5.87	5.7
	20—40	30.33	36.72	27.53	0.95	1.28	1.46	76.39	81.22	78.36	6.33	6.27	6.01
3800	0—20	50.48	48.60	35.76	2.37	2.68	2.51	69.96	68.78	71.14	4.95	5.46	5.16
	20—40	55.90	59.82	46.97	1.18	2.13	1.94	76.97	74.33	78.64	5.6	5.63	5.5

1.5 数据处理

采用一级动力学方程^[18]对每个土壤样品有机碳的矿化过程进行独立拟合,一级动力学方程如下:

$$C_m = C_0(1 - e^{-kt}) + C_1$$

式中, C_m 为 t 时刻的有机碳累计矿化量; C_0 为潜在可矿化有机碳含量; C_1 为易矿化有机碳含量; k 为有机碳矿化速率常数。

运用 Excel 2007 统计各项指标平均值、标准差。利用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA) 的 LSD 法检验各项指标的差异显著性 ($P < 0.05$), Pearson 相关性分析方法分析各因素之间的相关性; 用 SigmaPlot12.5 软件进行有机碳矿化方程的拟合和绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳累积矿化量与碳矿化速率

如图 1 所示, 各海拔土壤累积矿化量均呈现出夏季最高的季节变化趋势, 可能由于夏季温湿度较高, 植物进入生长旺季, 植物光合、代谢速率加快, 根系分泌物多, 使得土壤微生物和活性碳含量较大导致^[19]。且 0—20 cm 土层土壤累积矿化量显著高于 20—40 cm 土层 ($P < 0.05$)。除 3800 m 春季, 0—20 cm 土层土壤累积矿化量大体为随着海拔的降低而升高, 且各海拔间差异显著 ($P < 0.05$), 而 20—40 cm 土层随着海拔的降低呈先降低后升高的趋势, 表明不同海拔土壤累积矿化量因季节和土壤层次而异。夏秋季 3800 m 灰化土累积矿

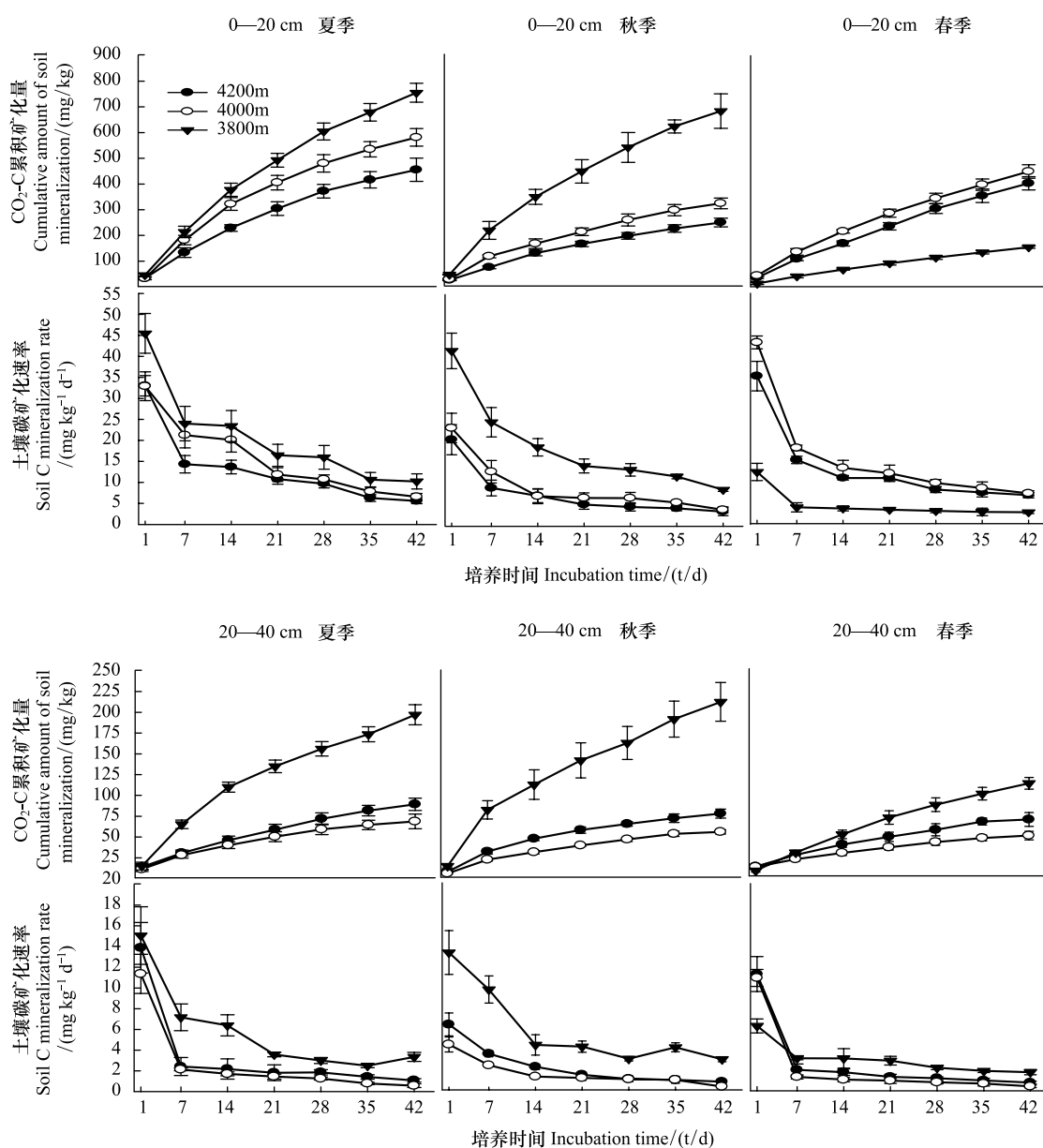


图 1 土壤累积矿化量和碳矿化速率

Fig.1 Cumulative amount of soil carbon mineralization and soil carbon mineralization rate

化量显著高于其他海拔($P<0.05$)。

不同海拔不同季节土壤碳矿化速率随着时间的推移呈现出基本一致的变化规律,即培养前期快速下降、后期趋于平稳。在培养第 1 d 时,矿化速率最高。3800 m 海拔 0—20 cm、20—40 cm 土层矿化速率分别为 12.46—45.48 mg/kg/d、6.25—15.06 mg/kg/d,4000 m 分别为 23.34—43.3 mg/kg/d、4.39—11.36 mg/kg/d,4200 m 分别为 20.46—35.29 mg/kg/d、6.32—13.87 mg/kg/d;从第 1 d 到第 7 d,矿化速率迅速下降,之后矿化速率缓慢下降并逐渐趋于稳定。整体来看前 21 d 土壤矿化速率降低幅度显著高于后 21 d。

同一季节 0—20 cm 土层土壤碳矿化速率大体为 3800 m>4000 m>4200 m,而 20—40 cm 土层均表现出 3800 m>4200 m>4000 m。且 3 个季节 0—20 cm 土层碳矿化速率均显著高于 20—40 cm 土层($P<0.05$)。

2.2 土壤有机碳矿化模型拟合

由表 3 可知,一级动力学方程能够很好的拟合有机碳矿化动态且拟合度均达 0.99 以上。各海拔 C_0 季节变化与累积矿化量季节动态基本一致。0—20 cm 土层 C_0 大体为夏季最高,春季次之,秋季最低,且差异显著($P<0.05$);而 20—40 cm 土层没有一致的季节变化趋势,表明季节变化对表层土壤碳矿化影响较大。不同海拔 C_0 差异显著($P<0.05$)且在 3800 m 灰化土达到最高,表明灰化土土壤碳矿化作用最强。

表 3 不同海拔土壤有机碳矿化的一级动力学参数

Tabal 3 Parameters of the first-order kinetics for the organic carbon mineralization

海拔 Elevation/m	土层 Soil layer/cm	季节 Season	C_1 / (mg/kg)	C_0 / (mg/kg)	C_0 /SOC/%	k	R^2
4200	0—20	夏	13.61±2.65Aa	955.17±165.21Aa	2.24	0.032	0.999
		秋	11.01±2.79Aa	327.67±14.26Bb	0.75	0.029	0.999
		春	25.47±4.99Ba	599.93±11.41Ca	1.01	0.012	0.999
	20—40	夏	9.29±0.72Aa	126.55±6.23Ab	0.80	0.023	0.999
		秋	3.19±1.94Ba	79.78±2.99Bb	0.29	0.055	0.998
		春	11.06±1.41Aa	84.66±7.22Bb	0.30	0.029	0.998
4000	0—20	夏	8.87±3.33Ab	686.99±15.2Ab	2.62	0.042	0.999
		秋	17.79±4.2Bb	406.4±40.38Bb	0.78	0.032	0.997
		春	21.82±4.45Ca	674.71±39.79Aa	1.18	0.022	0.999
	20—40	夏	5.62±0.84Ab	72.92±2.17Ac	0.63	0.041	0.999
		秋	9.46±1.69Bb	62.69±4.22Ab	0.26	0.042	0.997
		春	9.46±0.52Ba	56.71±2.87Ac	0.41	0.028	0.999
3800	0—20	夏	16.23±5.89Aa	1010.25±27.05Aa	2.83	0.032	0.999
		秋	22.64±8.26Bc	883.35±48.58Ba	3.32	0.032	0.999
		春	9.01±1.01Cb	328.92±27.7Cb	0.82	0.014	0.999
	20—40	夏	8.25±5.31Aa	224.26±14.05Aa	0.83	0.04	0.997
		秋	11.74±6.78Bb	246.94±31.38Aa	0.66	0.037	0.993
		春	2.16±0.54Ca	178.39±4.82Ba	0.43	0.023	0.999

不同大写字母表示同一海拔同一土层不同季节之间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一季节同一土层不同海拔之间差异显著($P<0.05$)

C_0 /SOC 值能反映土壤有机碳的固存能力,该值越高,土壤有机碳矿化能力越强,有机碳固存能力越小。 C_0 /SOC 值在 0—20 cm 土层为 0.75—3.32,20—40 cm 土层为 0.26—0.83,表明上部土层显著高于下部土层。同一土层不同海拔间表现出 3800 m 最大,且不同季节间大体表现出夏季最大,春季次之,秋季最小。

各海拔 C_1 没有一致的季节变化规律,但在海拔和土层间大体呈现出 3800 m>4200 m>4000 m 且 0—20 cm 土层 C_1 显著高于 20—40 cm 土层($P<0.05$)。各海拔土壤矿化速率常数(k)在 0—20 cm 土层范围为 0.012—0.042,20—40 cm 土层范围为 0.023—0.055,说明土壤碳矿化速率常数变化范围较窄,且随着季节的推移没有一致的变化规律。

2.3 不同海拔土壤活性碳季节变化

土壤有机碳矿化受诸多因子交互影响的复杂过程,不同活性碳组分分解速率不同,而有机碳矿过程中土壤微生物优先分解活性较高的简单组分,再缓慢分解相对较难分解的复杂组分^[20]。且活性有机碳组分对环境变化高度敏感,具有明显的季节变化^[21]。因此,土壤活性碳季节变化间接影响土壤有机碳矿化的季节变化。由图 2 可知,各海拔土壤微生物量碳呈现出夏季最高,且季节差异显著。在 0—20 cm 土层土壤微生物量碳含量为 157.63—538.52 mg/kg,而 20—40 cm 土层土壤微生物量碳含量为 52.84—247.92 mg/kg,表明上部土层土壤微生物量碳显著高于下部土层。0—20 cm 土层各季节土壤微生物量碳随着海拔的降低而降低;而 20—40 cm 土层随着海拔的降低先降低后升高且均在 3800 m 达最高。

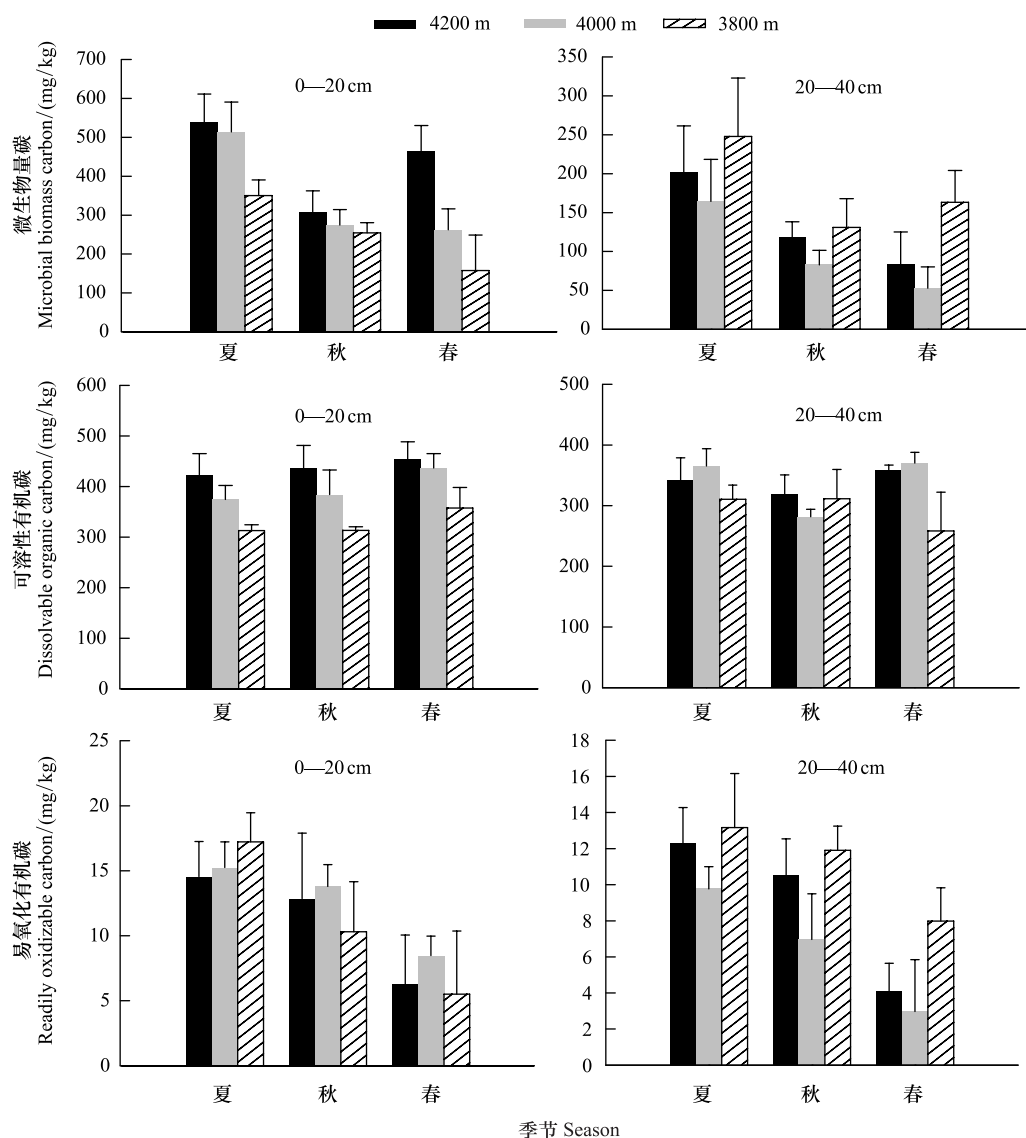


图 2 不同海拔土壤微生物量碳、可溶性碳、易氧化有机碳季节变化

Fig. 2 Seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon, dissolvable organic carbon and readily oxidizable carbon for different elevations

土壤可溶性有机碳季节、海拔差异均不显著。不同季节土壤可溶性有机碳含量大体为夏春大于秋。0—20 cm 土层各季节土壤可溶性有机碳均随着海拔的降低而降低,而 20—40 cm 土层随着海拔的降低先降低后升高,与土壤微生物量碳变化一致。

0—20 cm 和 20—40 cm 土层各海拔土壤易氧化有机碳在夏、秋、春分别为 14.56—17.23 g/kg、12.1—14.78 g/kg、5.5—8.48 g/kg 和 9.77—18.16 g/kg、6.97—11.9 g/kg、2.98—7.98 g/kg,均表现出夏季最高,秋季次之,春季最低。各季节 0—20 cm 土层土壤易氧化有机碳没有一致的海拔变化,而 20—40 cm 土层随着海拔降低呈先降低后升高的趋势,且均在 3800 m 达最大。土壤活性碳受诸多外在因素的相互作用,各海拔均表现出夏季最高,这可能由于季节变化引起的温湿度变化使得土壤微生物活性增强,从而对土壤活性有机碳含量产生影响^[22]。

2.4 土壤碳矿化与土壤理化性质关系

土壤碳矿化受土壤物理、化学等性质的重要影响。从表 4 可以看出,土壤累积矿化碳与土壤微生物量碳极显著相关($P<0.01$),与土壤含水率、全氮、有机碳、可溶性碳、易氧化碳含量显著相关($P<0.05$)。土壤全氮、有机碳、微生物量碳、易氧化碳、可溶性碳之间存在显著相关性($P<0.05$),其中全氮与土壤有机碳、可溶性有机碳极显著相关,表明土壤有机质中的氮素占全氮的主要部分。土壤 pH、含水率与土壤可溶性碳存在显著相关性($P<0.05$),表明土壤可溶性碳受土壤酸碱度、含水量的重要影响。土壤有机碳矿化的季节性变化受各种物质和环境因子的综合影响,同时在这些因子的驱动下土壤有机碳组分也发生着复杂的变化。

表 4 土壤碳矿化与各理化指标间相关性分

Table 4 Correlation coefficients between soil carbon mineralization and soil properties

土壤理化指标 Soil property	pH	含水率 Water content	全氮 Total nitrogen	有机碳 Organic carbon	微生物量碳 Microbial biomass carbon	可溶性碳 Dissolvable organic carbon	易氧化碳 Readily oxidizable carbon
有机碳	-0.291	-0.679 **	0.715 **	1			
微生物量碳	-0.387	-0.435	0.579 *	0.58 *	1		
可溶性碳	-0.675 **	-0.503 *	0.719 **	0.503 *	0.517 *	1	
易氧化碳	-0.026	0.127	0.183	0.638 **	0.581 *	0.502 *	1
累积矿化碳	-0.298	-0.514 *	0.486 *	0.538 *	0.743 **	0.542 *	0.568 *

* $P<0.05$, ** $P<0.01$

3 讨论

土壤有机碳矿化季节变化是受诸多因子交互影响的复杂过程,不同海拔因植被类型、凋落物数量及质量的季节变化、土壤温湿度等的不同均会导致各海拔间土壤碳矿化季节变化差异^[23]。在恒定温度下进行室内土壤碳矿化培养,能够很好的反映土壤有机碳的有效性及其土壤环境因素的差异^[24]。本研究中,各海拔土壤累积矿化量整体呈现出 0—20 cm 土层显著高于 20—40 cm 土层,且均表现出夏季最高的季节变化及 3800 m 灰化土达最大的海拔变化,表明夏季高寒地区土壤碳矿化量较大,且灰化土土壤累积矿化量较高寒草甸土高。研究还发现,不同季节土壤碳矿化速率随着培养时间的推移逐渐降低且最后趋于相对稳定,这与许多研究结果^[25-27]基本一致。培养初期矿化速率最高,这可能由于初期土壤活性碳较高,给微生物提供充足的养分,微生物活性增强,使得土壤碳矿化速率高且出现最大值。而随着培养的进行,土壤易氧化有机碳降低,土壤微生物活性慢慢降低,使得土壤碳矿化速率减小并逐渐趋于相对稳定。本研究中土壤有机碳矿化速率在培养前 21 d 显著高于后 21 d,且 21 天后土壤碳矿化速率开始逐渐趋于相对稳定。说明 21 d 可能是土壤活性碳慢慢向缓效碳转变的转折点。土壤有机碳矿化与土壤全氮、含水率、有机碳及活性碳组分显著相关,且微生物量碳相关性最高,表明活性碳组分中微生物量碳含量更能直接影响碳矿化。因土壤有机碳、微生物量碳、易氧化碳存在一定的海拔季节差异,从而使得土壤有机碳矿化产生一定海拔季节差异。

在短期室内碳矿化培养实验中,一级动态方程更好对其拟合^[28],因为培养初期土壤中活性较高的部分最先被消耗,而缓效和惰性部分在土壤中较难分解^[29]。本研究中,一级动态方程能够很好的拟合碳矿化过程,各海拔 C_0 和 C_0/SOC 值均表现出 0—20 cm 土层显著高于 20—40 cm 土层,且夏季最高。因此高海拔地区夏

季土壤固碳能力最弱,且 0—20 cm 土层土壤固碳能力低于 20—40 cm 土层。可能由于夏季高海拔土壤温度、微生物量碳及易氧化有机碳较春季高,使得土壤微生物活性及活性碳含量在夏季最大^[30]。同一季节不同海拔 C₀/SOC 均表现出 3800 m 最大,表明灰化土固碳能力更弱,这可能与其特殊的土壤类型有关。

土壤活性有机碳是土壤中具有易溶解、易氧化、易矿化、易分解、不稳定对植物和微生物活性较高的有机碳^[31]。占土壤有机碳比例极小,却直接参与土壤物质循环、能量转化等生态功能过程,影响着陆地生态系统各种养分的循环过程^[32]。土壤活性碳受气候、土壤、植被等诸多因素影响,因此由于诸多因素的主导主用不同,使得土壤活性碳并没有一致的季节变化趋势。土壤微生物量碳在不同地区有夏高冬低^[31,33]、夏低冬高^[34]、干湿季节交替^[35]等;土壤易氧化有机碳在不同地区有夏高冬低^[31,36]、季节变化不明显^[37];土壤可溶性碳有不同地区有夏高冬低^[34]、冬高夏低^[38]、季节变化不明显^[37]。本研究中,土壤微生物量碳和易氧化有机碳均表现出夏季较高,而可溶性有机碳季节变化不明显,并且上部土层土壤活性碳显著高于下部土层。这可能由于夏季土壤温度较高,微生物活性大,植物和微生物都进入生长旺季,从而促进活性碳的转化和积累,且表层凋落物为土壤提供主要的有机碳来源,使表层具有较高的养分和水分条件,凋落物和根系分泌物经微生物分解是土壤活性有机碳的主要来源^[39,40]。不同测量方法所得的土壤活性碳之间显著相关,表明各活性碳组分之间关系密切,它们虽然表述与测定方法不同,但都在一定程度上表征了土壤中活性较高的部分碳含量。

4 结论

(1) 各海拔土壤累积矿化量与碳矿化速率均呈现出夏季最高的季节变化及灰化土最大的海拔变化。土壤碳矿化速率随着培养时间段推移逐渐降低并趋于稳定,且前 21 d 降幅显著高于后 21 d 且慢慢趋于平缓。

(2) 各海拔夏季土壤固碳能力最低,且灰化土土壤固碳能力低于高山草甸土。土壤碳矿化与土壤全氮、含水率、有机碳及活性碳组分显著相关,且微生物量碳对其影响更直接。

(3) 高寒灌丛草甸土壤碳矿化季节性变化受各种物质和环境因子综合影响,这些因子共同作用使得土壤有机碳库各组分发生复杂变化。对于高寒灌丛草甸地区植被多样性的保护及夏季牧场的合理利用至关重要。

参考文献 (References):

- [1] Pan G X, Li L Q, Wu L S, Zhang X H. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils. *Global Change Biology*, 2004, 10(1): 79-92.
- [2] 陈涛, 郝晓辉, 杜丽君, 林杉, 冯明磊, 胡荣桂, 高璟赟. 长期施肥对水稻土土壤有机碳矿化的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1494-1500.
- [3] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 刘文飞, 刘苑秋. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响. *生态学报*, 2012, 32(2): 517-527.
- [4] 李英臣, 宋长春, 侯翠翠, 王宪伟, 孙晓新. 氮可利用性对东北不同类型湿地土壤有机碳矿化的影响. *地理科学*, 2011, 31(12): 1480-1486.
- [5] Iris Lochon, Pascal Carrère, Sandrine Revaillo, Juliette M. G. Bloor. Interactive effects of liming and nitrogen management on carbon mineralization in grassland soils. *Applied Soil Ecology*, 2018, 130(1): 142-148.
- [6] Daniel Geisseler, Patricia A. Lazicki, Kate M. Scow. Mineral nitrogen input decreases microbial biomass in soils under grasslands but not annual crops. *Applied Soil Ecology*, 2016, 106(2): 1-10.
- [7] 白洁冰, 徐兴良, 宋明华, 何永涛, 蒋婧, 石培礼. 温度和氮素输入对青藏高原三种高寒草地土壤碳矿化的影响. *生态环境学报*, 2011, 20(5): 855-859.
- [8] Gudas C, Bastviken D, Steger K, Premke K, Sobek S, Tranvik L. Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments. *Nature*, 2010, 466(7305): 478-481.
- [9] 徐丽, 于书霞, 何念鹏, 温学发, 石培礼, 张扬建, 代景忠, 王若梦. 青藏高原高寒草地土壤碳矿化及其温度敏感性. *植物生态学报*, 2013, 37(11): 988-997.
- [10] Chen C P, Juang K W, Cheng C H, Pai C W. Effects of adjacent land-use types on the distribution of soil organic carbon stocks in the montane area of central Taiwan. *Botanical Studies*, 2016, 57(1): 32-39.

- [11] 王媛华, 苏以荣, 李杨, 吴金水, 郑华, 朱捍华, 胡乐宁. 稻草还田条件下水田和旱地土壤有机碳矿化特征与差异. 土壤学报, 2011, 48(5): 979-987.
- [12] Gao J Q, Ouyang H, Lei G C, Xu X L. Effects of temperature, soil moisture, soil type and their interactions on soil carbon mineralization in Zoigê alpine wetland, Qinghai-Tibet Plateau. Chinese Geographical Science, 2011, 21(1): 27-35.
- [13] 常宗强, 马亚丽, 刘蔚, 冯起, 苏永红, 席海洋, 司建华. 土壤冻融过程对祁连山森林土壤碳氮的影响. 冰川冻土, 2014, 36(1): 200-206.
- [14] Six J, Paustian K, Elliott ET, Combrink C. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(2): 681-689.
- [15] 刘秉儒. 红砂植被盖度对土壤不同形态碳、氮及细菌多样性的影响. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 155-162.
- [16] 李平, 王国兵, 郑阿宝, 沈玉娟, 赵琦齐, 王琳飞, 蒋如生, 李莉, 阮宏华. 苏南丘陵区 4 种典型人工林土壤活性有机碳分布特征. 南京林业大学学报, 2012, 36(4): 79-83.
- [17] Kate A. Edwards, Jennifer McCulloch, Peter Kershaw G, Robert L. Jefferies. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(9): 2843-2851.
- [18] Jones Allan C. Estimation of an active fraction of soil nitrogen1. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1984, 15(1): 23-32.
- [19] 张仕吉, 项文化, 孙伟军, 方晰. 湘中丘陵区不同土地利用方式土壤水溶性有机碳含量. 生态学杂志, 2014, 33(8): 2065-2071.
- [20] 严毅萍, 曹建华, 杨慧, 尹辉, 梁毅, 王培. 岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳库及周转时间的影响. 水土保持学报, 2012, 26(2): 144-149.
- [21] Zhou G M, Jian-Ming X U, Jiang P K. Effect management practices on seasonal dynamics of organic carbon in soils under bamboo plantations. Pedosphere, 2006, 16(4): 525-531.
- [22] Anthony Gauthier, Philippe Amiotte-Suchet, Paul N. Nelson, Jean Lévêque, Bernd Zeller, Catherine Hénault. Dynamics of the water extractable organic carbon pool during mineralisation in soils from a douglas fir plantation and an oak-beech forest-an incubation experiment. Plant and Soil, 2010, 330(1-2): 465-479.
- [23] 史学军, 潘剑君, 陈锦盈, 杨志强, 张黎明, 孙波, 李忠佩. 不同类型凋落物对土壤有机碳矿化的影响. 环境科学, 2009, 30(06): 1832-1837.
- [24] 朱小叶, 王娜, 方晰, 刘兆丹, 陈金磊, 张仕吉. 中亚热带不同退化林地土壤有机碳矿化的季节动态. 生态学报, 2019 39(1): 1-14.
- [25] Weintraub M N, Schimel J P. Interactions between carbon and nitrogen mineralization and soil organic matter chemistry in arctic tundra soils. Ecosystems, 2003, 6(2): 129-143.
- [26] 张玲, 张东来, 毛子军. 中国温带阔叶红松林不同演替系列土壤有机碳矿化特征. 生态学报, 2017, 37(19): 6370-6378.
- [27] 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. 应用生态学报, 2016, 27(1): 9-16.
- [28] 杨开军, 杨万勤, 贺若阳, 庄丽燕, 李志杰, 聂富育, 王壮, 徐振锋. 川西亚高山 3 种典型森林土壤碳矿化特征. 应用与环境生物学报, 2017, 23(5): 851-856.
- [29] 宋媛, 赵溪竹, 毛子军, 孙涛, 侯玲玲. 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性. 生态学报, 2013, 33(2): 443-453.
- [30] 聂阳意, 王海华, 李晓杰, 任寅榜, 金昌善, 徐自坤, 吕茂奎, 谢锦升. 武夷山低海拔和高海拔森林土壤有机碳的矿化特征. 应用生态学报, 2018, 29(3): 748-756.
- [31] 辜翔, 张仕吉, 项文化, 李雷达, 刘兆丹, 孙伟军, 方晰. 中亚热带 4 种森林类型土壤活性有机碳的季节动态特征. 植物生态学报, 2016, 40(10): 1064-1076.
- [32] 陆昕, 孙龙, 胡海清. 森林土壤活性有机碳影响因素. 森林工程, 2013, 29(1): 9-14.
- [33] 刘纯, 刘延坤, 金光泽. 小兴安岭 6 种森林类型土壤微生物量的季节变化特征. 生态学报, 2014, 34(2): 451-459.
- [34] 朴河春, 洪业汤. 贵州喀斯特地区土壤中微生物量碳的季节性变化. 环境科学学报, 2000, 20(1): 106-110.
- [35] 吴艺雪, 杨效东, 余广彬. 两种热带雨林土壤微生物生物量碳季节动态及其影响因素. 生态环境学报, 2009, 18(2): 658-663.
- [36] 石亚攀, 陈立新, 段文标, 张雪, 徐非, 刘晓锐. 红松阔叶混交林林隙土壤总有机碳和易氧化有机碳的时空异质性研究. 水土保持学报, 2013, 27(6): 186-192.
- [37] 周程爱, 张于光, 肖烨, 张小全, 李迪强. 土地利用变化对川西米亚罗林土壤活性碳库的影响. 生态学报, 2009, 29(8): 4542-4547.
- [38] 刘荣杰, 李正才, 王斌, 吴亚丛, 程彩芳, 马少杰, 格日乐图. 浙西北丘陵地区次生林与杉木林土壤水溶性有机碳季节动态. 生态学杂志, 2013, 32(6): 1385-1390.
- [39] 秦纪洪, 王琴, 孙辉. 川西亚高山-高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化. 生态学报, 2013, 33(18): 5858-5864.
- [40] 徐侠, 王丰, 栾以玲, 汪家社, 方燕鸿, 阮宏华. 武夷山不同海拔植被土壤易氧化碳. 生态学杂志, 2008(7): 1115-1121.