

尕海湿地植被退化过程中土壤碳矿化特征研究

孔同伟, 马维伟, 宋元君, 朱正青, 梁鹏飞, 李 燕

(甘肃农业大学, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 以甘肃省甘南尕海则岔自然保护区内的未退化、轻度退化、中度退化及重度退化的湿地为研究对象, 采用野外取样和室内测试相结合的方法, 应用室内矿化培养实验, 分析了植被退化过程中土壤在不同土层(0~10、10~20、20~40 cm)中的有机碳矿化特征。结果表明, 植被退化程度、培养时长、温度高低和土层深度均对土壤有机碳矿化速率有显著影响。不同退化程度土壤有机碳矿化量均随着土层加深而降低, 未退化[475.74 CO₂/(mgC/g)]>重度退化[329.302 CO₂/mgC/g]>轻度退化[291.50 CO₂/(mgC/g)]>中度退化[253.11 CO₂/mgC/g]。不同退化程度土壤有机碳矿化量均随着培养时间的变长而降低, 且平均在2~6 d下降速度较快, 平均在13 d左右后下降速度平缓, 基本保持不变。按照CO₂-C释放速率变化程度, 将矿化曲线划分为快速矿化(平均约12 d)、缓慢矿化(平均约26 d)和平衡矿化三个阶段, 其中快速矿化阶段主要为活性碳矿化。双库一级动力学方程可以较好的拟合植被退化中土壤有机碳矿化过程, 不同退化程度土壤有机碳矿化量均随土层加深而降低, 浅层和未退化土壤矿化能力较强, 对难分解有机碳库的利用程度较高, 可以有效促进碳循环, 提高土壤固碳能力, 在研究全球碳循环时应给予重视。

关键词: 土壤有机碳矿化; 植被退化; 双库一级动力学方程

中图分类号: X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1463(2019)03-0018-08

doi: 10.3969/j.issn.1001-1463.2019.03.004

Characteristics of Soil Carbon Mineralization in Vegetation Degradation Process in Gahai Wetland

KONG Tongwei, MA Weiwei, SONG Yuanjun, ZHU Zhengqing, LIANG Pengfei, LI Yan
(Gansu Agriculture University, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: This paper studies the characteristics of organic carbon mineralization of soil in different soil layers (0~10、10~20、20~40 cm) in the process of vegetation degradation by using the method of field sampling combined with indoor testing to study the non-degraded, slightly degraded, moderately degraded and severely degraded wetlands in Gahai Zecha Nature Reserve in Gansu Province. The results show that vegetation degradation degree, culture duration and soil depth have significant effects on soil organic carbon mineralization rate. The accumulated mineralization amount of soil organic carbon decreases with soil depth at different degradation degrees (low non-degradation[475.74 CO₂/(mgC/g)]> severe degradation[329.30 CO₂/(mgC/g)]> mild degradation [291.50 CO₂/(mgC/g)]> moderate degradation [253.11 CO₂/(mgC/g)]. The accumulated mineralization of soil organic carbon at the same degradation degree decreased with the longer culture time, and the average decline rate was faster at 2~6 days, and the average decline rate was flat after 13 days, basically unchanged. The mineralization curve was divided into three stages, namely rapid mineralization (about 12 days

收稿日期: 2018-12-03

基金项目: 甘肃农业大学青年导师资金资助项目 (GAU-QNDS-201713); 甘肃省GEF/OP12三期专题研究(GS-GEF/OP12-01); 国家自然科学基金项目(41561022; 31260155); 甘肃农业大学省级大学生创新创业训练计划项目资助(201810733003)。

作者简介: 孔同伟(1995—), 男, 甘肃永靖人, 本科生, 主要从事水土保持研究。联系电话: (0)18809442707。Email: 2601421 528@qq.com。

通信作者: 马维伟(1980—), 男, 甘肃靖远人, 副教授, 博士后, 主要从事水土保持研究。联系电话: (0)13919026726。Email: maww@gsau.edu.cn

in average), slow mineralization (about 26 days in average) and balanced mineralization, according to the variation degree of CO₂-C release rate. Double library first order kinetics equation could better fit vegetation degradation in soil organic carbon mineralization process. Organic carbon cumulative mineralization amounts in different degrees of degradation of soil all reduced in deeper soils. Shallow and not degraded soils had stronger mineralization ability and higher utilization of organic carbon pool which was the difficult to decompose, could effectively promote the carbon cycling, improve the ability of soil carbon sequestration, and should obtain full attention when studying global carbon cycle.

Key words: Mineralization of soil organic carbon; Vegetation degradation; Two-library first-order dynamic equation

有机碳矿化被认为是土壤中重要的生物化学过程,与温室气体的形成和释放以及土壤质量的保持等有直接关系,同时影响土壤 CO₂ 的释放量,与全球气候变化紧密相关。湿地生态系统作为全球三大生态系统之一,虽仅占陆地面积的 4%~6%(面积约 5.3~5.7×10⁸ hm²),但其陆地碳库占全球陆地碳库的 12%~20%,其碳库的稳定在全球气候变化中有着特殊的地位与作用^[1]。21 世纪以来,受经济发展、气候变化、人为活动等影响,湿地植被退化已成为一种全球现象,特别是全球气候变化敏感的青藏高原湿地植被退化现象更为明显^[2]。青藏高原湿地退化后,湿地生态功能发生重大改变,特别是土壤碳矿化过程发生了明显变化,引起湿地对碳库的调节功能消失或降低,减缓湿地植被的恢复过程,加剧温室气体的排放。因此,正确认识青藏高原湿地退化过程中土壤碳矿化特征^[3],对开展青藏高原生态安全屏障保护与建设,减缓温室气体排放有重要的指导意义^[4-5]。

尕斯库勒湖位于全球气候变化最为敏感的地区—青藏高原东南缘,是维系高寒湿地生态安全的重要屏障,已被列入国际重要湿地名录,属于国家重点保护湿地。因地处高寒区域,常年冷湿环境使得湿地生态系统积累了大量有机物质,成为青藏高原自然生态系统最为重要的碳库之一,对区域碳循环以及大气温室气体平衡有着重要的功能和作用。

近年来,受气候变暖^[6-7]、过度放牧及湿地排水疏干等作用,尕斯库勒湖出现了不同程度的退化现象^[8]。湿地退化必然会引起湿地生态系统结构转变,功能衰退,进而影响植被生产力和土壤有机碳的周转^[9]。而湿地土壤碳矿化过程如何响应植被退化对于理解本区域湿地碳循环过程十分重要。我们以尕斯库勒湖植被退化过程中的土壤为研究对象,通过室内培养,研究了甘南尕斯库勒湖不同植被退化过程中土壤有机碳在不同温度、时间、土层深度条件下的矿化速率^[10],以期为尕斯库勒湖湿地土壤有机碳库及其稳定性状况提供基础资料^[11]。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

尕斯库勒湖位于青藏高原东南缘的甘肃省碌曲县尕斯库勒—则岔自然保护区内,地理坐标为北纬 33° 58' 12"~34° 30' 24",东经 102° 05' 00"~102° 29' 45"。尕斯库勒湖区域总面积 56 737 hm²,湿地面积 43 176 hm²。该区域为典型的高原湿地,属青藏高原高寒大陆性季风气候类型区,受季风环流的影响和高原地形的作用,雨量比较充沛,光照较丰富,气温比较低。该区域年平均气温在 2.3℃左右,年平均日较差 13.7℃左右,没有绝对无霜期。年降水量为 781.8 mm,年蒸发量 1 150.5 mm,年太阳总辐射量 51 983.9 J/cm²,年生理辐射量 25 510.6 J/cm²。最热月份为 7 月,平均气温为 12.4℃;最冷月份

为 1 月, 平均气温 $-9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12]。植被类型以藏嵩草(*Kobresia tibetica* Maxim)、华扁穗草(*Blysmus sinocompressus* Tang et Wang)、线叶蒿(*Artemisia subulata* Nakai)、蕨麻(*Potentilla anserina* L.)、散穗早熟禾(*Poa subfastigiata* Trin)、密毛白莲蒿(*Artemisia sacrorum* var. *Messerschmidtiana* (Bess.) Y.R.Ling)、冷蒿(*Artemisia frigida* Willd)为主[13]。土壤类型主要包括暗色沼泽化草甸土等[14]。

1.2 样地设置

通过对尕斯库勒湖生态环境特征和植被特征实地调查及相关资料的分析, 采用空间序列代替时间序列的方法, 选择确定尕斯库勒湖周边的退化沼泽化草甸为调查区, 以现生长季可见的原生湿地为中心向外延伸的办法, 选择地势相对平缓、坡向一致的地段, 根据植被组成、植被总覆盖度、植被平均高度及地上生物量等特征, 将沼泽化草甸划分为未退化(UD)、轻度退化(LD)、中度退化(MD)及重度退化(HD)4种退化类型, 并在每个退化类型区域随机布设 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 定位研究样地, 每个样地重复 3 次, 重复之间间隔大于 10 m , 共计 12 块样地, 围栏以避免人畜的干扰[15]。样地植物和土壤基本特征见表 1[16]。

1.3 土壤样品采集

2018 年 4 月的中旬在样地内采用“蛇”形布点法(5点), 用土钻在各样地分层取

$0\sim 10\text{ cm}$ 、 $10\sim 20\text{ cm}$ 、 $20\sim 40\text{ cm}$ 的土样。相同土层的土壤组成 1 个混合土样, 四分法取部分, 共 60 份土样, 去掉植物残根和石块, 带回实验室自然风干, 过 2 mm 筛, 用以土壤有机碳矿化特征测定。

1.4 试验方法

采用室内恒温培养和碱液吸收法对土壤有机碳矿化进行测定[17]。称取土样 25 g , 放入 500 mL 的玻璃培养瓶内。将装有 20 mL 0.5 mol/L NaOH 的小培养瓶放入大培养瓶内, 用于吸收培养过程中土壤释放的 CO_2 。为了提高土壤的通透性, 在所有培养瓶内加入 3 g 石英砂, 搅拌混匀。调节样品含水量为田间持水量的 60% , 在试验期间, 每隔 2 d 称重子秤、补水, 保持土壤含水量恒定。试验设 3 组重复和 1 个空白对照。将培养瓶置于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱内培养 4 d 后, 再移至 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 培养箱内, 分别在培养 $2、4、6、13、20、27、34、41\text{ d}$ 取出装有 NaOH 的培养瓶, 用已配制好的标准 0.5 mol/L HCl 溶液进行滴定, 以测定有机碳矿化释放量(mgC/g), 并计算矿化速率。有机碳矿化量计算公式为[18]:

$$\text{CO}_2\text{-C} = \frac{(V_0 - V) \times C_{\text{HCl}}}{2} \times 44 \times \frac{1}{2} \times \frac{12}{44} \times \frac{1}{m(1-a)}$$

式中, $\text{CO}_2\text{-C}$ 为培养期间土壤有机碳的矿化释放量(mgC/g); V_0 为空白标定时消耗

表 1 样地基本情况

退化程度	优势种组成	盖度 /%	高度 /cm	生物量 (干质量) /(g/m^2)	容重 /(g/cm^3)	有机质含量 /(g/kg)
UD	藏嵩草+蕨麻+散穗早熟禾	96	16.31	2 133.34	0.36	65.82
LD	苔草+冷蒿+棘豆	86	13.33	1 378.23	0.39	65.45
MD	密毛白莲蒿+线叶蒿	45	7.61	347.86	0.61	54.39
HD	由于地下水位较低, 过度放牧和严重鼠害导致地表植被覆盖度接近于零				0.56	53.63

的标准盐酸的体积(mL); V 为样品滴定时消耗标准盐酸的体积(mL); C 为样品滴定时消耗标准盐酸的浓度(mol/L); m 为土壤样品质量(g); a 为土壤含水量。

采用一级动力学方程拟合土壤有机碳随时间的矿化动态, 公式如下^[19]:

$$C_t = C_0(1 - e^{-kt})$$

式中, C_t 为 t 时间土壤有机碳含量(g/kg); C_0 为土壤潜在矿化有机碳量(g/kg); k 为分解速率常数(d^{-1})。

$$T_{1/2} = \ln(2/k)$$

式中, $T_{1/2}$ 为土壤有机碳的矿化分解时间^[20]。

1.5 数据分析

采用 Excel 2010 对数据做处理, 并进行曲线拟合, SPSS19.0 软件进行数据统计分析。采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)及多重比较法(LSD)分析不同退化程度各变量的差异显著性($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 尕斯库勒湖不同植被退化阶段土壤有机碳矿化释放量

植被退化对尕斯库勒湖土壤有机碳矿化影响显著(图 1)。各退化程度 0~40 cm 土层土壤有机碳累积矿化量均值为 UD(0.186 g/kg) > HD(0.109 g/kg) > LD(0.097 g/kg) > MD(0.83

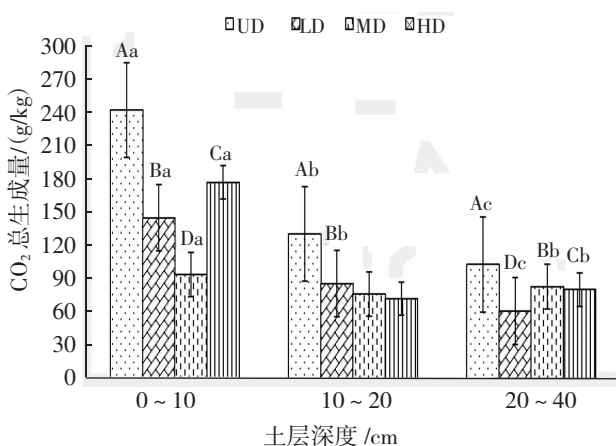


图 1 25 °C 不同退化梯度 CO₂ 总生成量

g/kg), 总体随植被退化加剧逐渐减小, 但重度退化高于轻度退化和中度退化, 说明植被重度退化加速了土壤有机碳向活性碳库的周转, 导致土壤有机碳积累。在 0~10 cm、10~20 cm 土层, 随植被退化加剧, 土壤有机碳含量显著下降, 变化趋势与整个剖面一致; 在 20~40 cm 土层, 退化土壤有机碳含量在 0.081 7 g/kg 左右波动, 受植被变化影响较小。表明植被退化对土壤表层有机碳的影响更显著。在 0~10 cm 土层富集, 含量均值为 0.164 7 g/kg, 随土层深度的增加呈递减趋势, 不同土层间差异显著 ($P<0.05$)。这主要是因为沼泽化草甸植被地上部分的枯萎和凋落物归还主要沉积在土壤表面, 为有机质提供了丰富的来源, 而凋落物对 10~40 cm 土层的影响逐渐减弱, 植物根系和微生物残体成为有机碳的主要来源。

如图 2 所示, 在 0~40 cm 不同土层植被退化阶段下有机碳释放量均随培养时间的延长而降低。在 0~40 cm 土壤剖面上, 不同退化阶段土壤有机碳释放量均随着土层加深而降低, 除 0~10 cm 土层重度退化, 释放量稍微高。在 0~40 cm 土层, 不同土层退化阶段下土壤有机碳矿化量整体呈 U 形变化趋势, 表现为未退化 [475.74 CO₂/(mgC/g)] > 重度退化 [329.30 CO₂/(mgC/g)] > 轻度退化 [291.50 CO₂/(mgC/g)] > 中度退化 [253.11 CO₂/(mgC/g)], 其中未退化土壤有机碳矿化量显著高于其他退化阶段。重度退化和轻度退化阶段下 20~40 cm 土层的累积矿化量仍达到了较高水平, 分别为 80.23 mg/kg 和 60.90 mg/kg。0~40 cm 不同土层植被退化阶段下有机碳释放量均随培养时呈现动态变化, 大概都在培养 13 d 后呈现上下波动的稳定趋势。

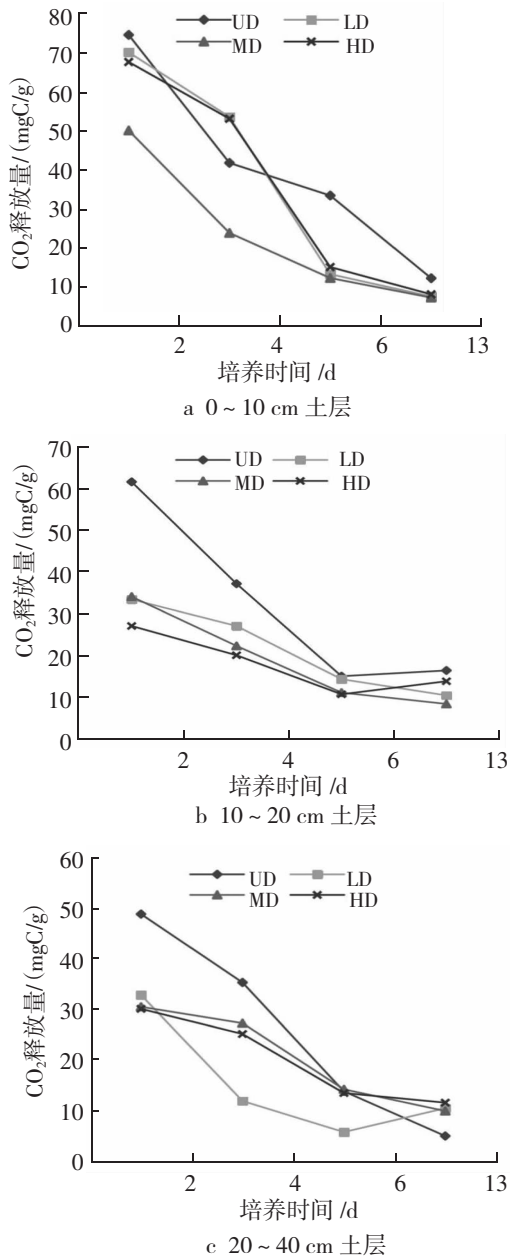


图 2 土壤有机碳矿化释放量时间动态

2.2 尕海湿地不同植被退化阶段土壤有机碳矿化速率

不同退化阶段土壤有机碳矿化速率均随着培养时间呈现出先升后降的趋势(图3)。总体上表现为培养前6 d, 不同退化阶段土壤有机碳矿化速率上升较快; 6 d 以后矿化速率下降较快。4 种退化阶段土壤有机碳矿化速率随着土层加深而降低, 其中 0~20 cm 土层的矿化速率均显著高于其他土层, 其他土层间无显著性差异。不同退化阶段土壤有

机碳矿化速率大体呈现出重度退化>中度退化>轻度退化>未退化, 并且 4 种退化阶段大体表现出同步变化, 其土壤有机碳矿化速率均在 6 d 左右达到最大值。

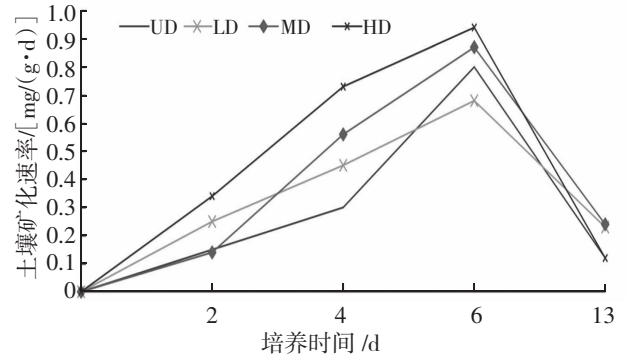


图 3 不同植被退化阶段土壤有机碳矿化速率

2.3 尕海湿地不同温度土壤有机碳矿化速率

不同温度土壤有机碳矿化速率均随着培养时间呈现出先降后升的趋势(图4)。不同温度土壤有机碳矿化速率, 在培养初期(0~6 d) 随着培养时间的延长缓慢速下降; 7~13 d, 不同温度土壤有机碳矿化速率又有所增加, 其中 25 °C 下土壤有机碳矿化速率整体高于 15 °C 时, 但在 13 d 时 15 °C 高于 25 °C。

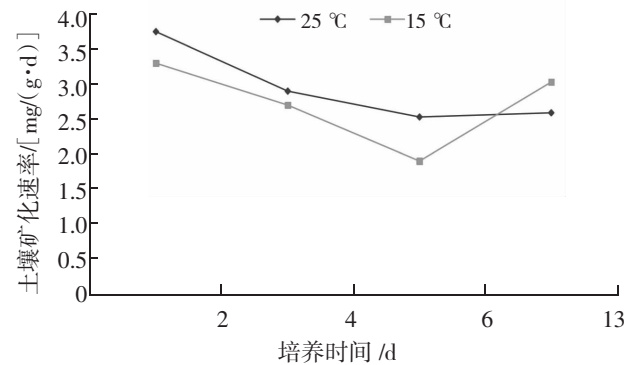


图 4 不同温度土壤有机碳矿化速率随时间动态变化

2.4 土壤有机碳矿化拟合模型

采用一级动力学方程对不同退化程度湿地土壤有机碳累积矿化量进行拟合(表 2), 效果均较好。不同退化程度草地土壤潜在矿

化碳库(C_0)为 13.190 ~ 62.550 g/kg, 分解速率常数(K)为 0.014 ~ 0.115 d^{-1} , 半衰期为 2.855 ~ 4.961 d。k 表示土壤易分解有机碳矿化速率常数, k 在土层之间也无明显规律, 不同退化程度下 k 值表现为重度退化最高, 其次为中度退化和轻度退化, 未退化的最低。

表 2 不同退化程度湿地土壤有机碳矿化拟合模型

退化程度	土层 /cm	C_0 / (g/kg)	k / d^{-1}	$T_{1/2}$ /d
未退化(UD)	0~10	62.310	0.018	4.711
	10~20	44.990	0.049	3.709
	20~40	43.890	0.023	4.465
	平均	50.346	0.030	4.291
轻度退化(LD)	0~10	62.550	0.020	4.605
	10~20	22.890	0.077	3.257
	20~40	22.390	0.042	3.863
	平均	35.907	0.046	3.904
中度退化(MD)	0~10	42.800	0.014	4.961
	10~20	25.880	0.053	3.631
	20~40	20.640	0.085	3.158
	平均	29.744	0.051	3.913
重度退化(HD)	0~10	59.510	0.018	4.711
	10~20	13.190	0.115	2.855
	20~40	18.540	0.092	3.079
	平均	30.383	0.075	3.545

3 结论与讨论

不同退化阶段下土壤有机碳矿化量与土层深度和培养时间有显著关系。0~10 cm 土层中未退化和重度退化有机碳矿化量较高, 而 10~20 cm 土层中土壤有机碳矿化量表现为未退化 > 轻度退化 > 中度退化 > 重度退化, 20~40 cm 土层中土壤有机碳矿化量表现为未退化 > 中度退化 > 重度退化 > 轻度退化。不同退化阶段土壤有机碳矿化速率均随着培养时间延长而下降, 不同退化土壤矿化速率均呈现出随着土层加深而降低的趋势。不同温度下土壤有机碳矿化速率均随着培养时间延长呈现出先降后升的趋势; 其中 25

℃土壤有机碳矿化速率整体高于 15 ℃土壤有机碳矿化速率。

土壤有机碳矿化是土壤重要的生物化学过程, 直接关系到土壤养分元素的释放与供应、 CO_2 气体的排放以及土壤质量的维持。土壤类型的差异会造成土壤物理化学性质, 尤其是土壤有机碳含量的改变, 加之其它生物要素和非生物要素的差异, 从而对土壤有机碳的矿化过程和矿化速率产生不同程度的影响。在控制温度和湿度条件的实验室培养下, 土壤有机碳矿化量反映了不同类型土壤中易被利用的有机碳的有效性及土壤环境因素的差异。在不同退化梯度植被退化阶段下土壤有机碳释放量均随培养时间的延长而降低。矿化培养初期, 易分解组分快速分解, 释放大量的养分, 土壤微生物与有机碳充分接触, 代谢所需营养物供应充足, 营养源不是限制微生物活动的主要因素。随着可供微生物利用的易分解有机碳的矿化, 营养源不断减少, 营养物的供应则逐渐成为限制微生物活动的关键因素, 因而随着培养时间的延长, 土壤类型对有机碳矿化的影响越来越小, 有机碳的矿化释放量也处于相对稳定的较低水平^[21]。在 0~40 cm 土壤剖面上, 不同退化阶段土层土壤有机碳释放量均随着土层加深而降低, 而 0~10 cm 土层重度退化, 释放量稍微高于中度退化和轻度退化。这主要是因为沼泽化草甸植被地上部分的枯萎和凋落物归还主要沉积在土壤表面, 为有机质提供了丰富的来源, 而凋落物对 20~40 cm 土层的影响逐渐减弱, 植物根系和微生物残体成为有机碳的主要来源。而 0~10 cm 土层重度退化, 释放量稍微高于中度退化和轻度退化, 说明植被重度退化加速了土壤有机碳向活性碳库的周转, 导致土壤有机碳积累。

土壤有机碳矿化速率是表征单位质量土壤在单位时间内矿化释放 CO₂ 的量, 矿化速率越高表明土壤中微生物的数量越多, 活性越强^[22]。有研究表明, 随着培养时间的延长, 矿化速率继续下降, 但幅度较小; 培养后期, 矿化速率较低且相对稳定, 这与以往的大多数研究结论相同^[23-25]。本研究中, 随着培养时间的延长, 不同退化梯度下土壤有机碳矿化速率也呈现出逐渐下降的趋势, 但重度退化高于轻度退化、中度退化和未退化, 可见重退化土壤表层的微生物数量和活性较好, 为土壤有机碳的分解利用提供了良好的环境。在 29 d 培养期间, 不同退化梯度土壤的有机碳矿化速率均表现为前期迅速下降, 中期下降速度减缓, 后期平缓的趋势, 这与高菲等^[26]研究相同。这是由于培养土壤有机碳矿化分解初期, 土壤中的易分解有机碳含量较高, 其中的易分解组分首先被微生物分解, 释放大养养分, 土壤有机碳释放量迅速增加; 随着易分解有机碳含量的减少, 微生物开始分解难分解有机碳, 同时也降低了土壤中微生物的活性, 分解速度显著下降, 土壤有机碳释放量缓慢增加, 因此在培养中后期有机碳矿化速率趋于平缓^[27]。此外, 随着土层的加深, 土壤有机碳矿化速率有显著降低, 一方面是因为土壤碳、氮、磷等养分是影响土壤微生物生长繁殖的重要营养元素, 其含量的高低会影响土壤有机碳的矿化^[28]。本研究中随着土层加深, 土壤碳、氮、磷的含量逐渐降低, 微生物缺少了必要的养分来源, 导致其数量和活性均低于土壤表层。另一方面, 植被根系和凋落物主要分布在表层土壤中, 表层土壤的有机质输入量显著高于底层, 因此有机碳矿化速率表现为随土层加深而降低的趋势。

不同温度间土壤有机碳矿化速率也存在

显著差异。本研究中 25 °C 矿化速率较高, 而 15 °C 较低。这是因为温度会影响土壤酶的活性, 进而影响土壤有机质的分解速度, 会影响输入土壤的有机质的数量和活性, 进而影响其分解和循环^[29]。未退化地表凋落物中富含易被分解利用的木质素和纤维素, 可以有效提高输入土壤的有机碳的含量, 因此, 未退化土壤有机碳矿化速率高于其他退化类型。此外, 随着土层的加深, 土壤有机碳矿化速率有显著降低。这是因为土壤中碳、氮、磷等养分是影响土壤微生物生长繁殖的重要营养元素, 其含量的高低会影响土壤有机碳的矿化^[30]。本研究中随着土层加深, 不同退化类型的土壤有机碳矿化速率不同。不同温度土壤有机碳矿化速率均随着培养时间呈现出先降后升的趋势, 而且 25 °C 高于 15 °C 土壤有机碳矿化速率。

参考文献:

- [1] JIA Y P. Study advance in the distribution and storage of soil carbon [J]. Journal of Taiyuan Teachers College, 2004, 3(4): 62-64.
- [2] 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, 35(3): 1105-1110.
- [3] 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[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6370-6378.
- [4] 马昕昕, 许明祥, 杨凯. 黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3893-3900.
- [5] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, et al. Soil carbon pools and world life zones [J]. Nature., 1982, 298(5870): 156-159.
- [6] 张政, 蔡小真, 唐偲颀, 等. 可溶性有机质输入对杉木人工林表层土壤有机碳矿化的激发效应[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7660-7667.
- [7] 马维伟, 王辉, 王修华, 等. 甘南尕斯库勒

- 同湿地类型土壤物理特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 194-198.
- [8] 汪业勤, 赵士洞, 牛 栋. 陆地土壤碳循环的研究动态[J]. 生态学杂志, 1999, 18(5): 29-35.
- [9] 车启龙. 甘肃尕斯库勒湿地保护对策研究[J]. 环境科学, 2008, 37(1): 44-45, 87.
- [10] 杨开军, 杨万勤, 贺若阳, 等. 川西亚高山3种典型森林土壤碳矿化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(5): 851-856.
- [11] 王元峰, 王 辉, 马维伟, 等. 尕斯库勒湿地泥炭土土壤理化性质[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 118-122.
- [12] 黄 蓉, 王 辉, 马维伟, 等. 尕斯库勒洪泛湿地退化过程中土壤理化性质的变化特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 221-227.
- [13] 许延昭, 马维伟, 李 广, 等. 尕斯库勒湿地植被退化过程中土壤轻重组有机碳动态变化特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 205-211.
- [14] 连树清, 王 辉, 马维伟. 尕斯库勒湿地泥炭土土壤理化性质[J]. 甘肃农业大学学报, 2009, 44(3): 128-132.
- [15] 马维伟, 王 辉, 王修华, 等. 甘南尕斯库勒不同湿地类型土壤物理特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 194-198.
- [16] 王元峰, 王 辉, 马维伟, 等. 尕斯库勒4种湿地类型土壤水分特性研究[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 598-603.
- [17] 杨钙仁, 张文菊, 童成立, 等. 水温度对湿地沉积物有机碳矿化的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 243-248.
- [18] 杨继松, 刘景双, 孙丽娜. 温度、水分对湿地土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(1): 38-42.
- [19] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1217-1226.
- [20] 王媛华, 苏以荣, 李 杨, 等. 水田和旱地土壤有机碳周转对水分的响应[J]. 中国农业科学, 2012, 45(2): 266-274.
- [21] 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.
- [22] 张 睿, 白 杨, 刘 娟, 等. 亚热带天然阔叶林转换为杉木人工林对土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 2946-2952.
- [23] 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.
- [24] 黄东迈, 朱培立, 王志明, 等. 旱地和水田有机碳分解速率的探讨与质疑[J]. 土壤学报, 1998, 35(4): 482-492.
- [25] 唐国勇, 童成立, 苏以荣, 等. 含水量对¹⁴C标记秸秆和土壤原有有机碳矿化的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(3): 538-543.
- [26] JHA P, GARG N, LAKARIA B L, et al. Soil and residue carbon mineralization as affected by soil aggregate size[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 121(3): 57-62.
- [27] THIESSEN S, GLEIXNER G, WUTZLER T, et al. Both priming and temperature sensitivity of soil organic matter decomposition depend on microbial biomass - An incubation study[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 57(3): 739-748.
- [28] 吴建国, 艾 丽, 朱 高, 等. 祁连山北坡云杉林和草甸土壤有机碳矿化及其影响因素[J]. 草地学报, 2007, 15(1): 20-28.
- [29] 黄 耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响应用[J]. 生态学报, 2002, 13(6): 709-714.
- [30] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 等. 不同退化沙地土壤碳的矿化潜力[J]. 生态学报, 2004, 24(2): 372-378.

(本文责编: 陈 珩)