

海拔梯度上川西高山土壤有机碳稳定性研究

刘 杨¹, 李 菊², 孙 辉¹, 陈玉雯¹, 李 鑫¹

(1.四川大学 环境科学与工程系, 成都 610065; 2.四川省土壤环境保护工程技术中心, 成都 610065)

摘 要:为研究土壤有机碳库极其稳定性对高寒生态系统碳的源汇效应,通过物理—化学方法对不同海拔高度(3 400~4 100 m)高寒土壤不同活性有机碳进行连续分级分离,研究了土壤有机碳不同组分在海拔环境梯度下分布特征及稳定性。结果表明:(1) 海拔梯度上高山土壤主要以粗颗粒为主(0.25~2 mm);在 >0.02 mm 的物理分级中,土壤有机碳含量随海拔的增加先增加后减小;在 <0.02 mm 土壤化学分级的有机—无机复合体中,土壤有机碳占总有机碳比例为 2%左右,低于一般低海拔土壤,且随海拔升高有增加的趋势,但在 4 100 m 海拔处显著降低。(2) 有机—无机复合体中的有机碳主要以腐殖质形式存在,随海拔增高有增加的趋势。因此,川西高山海拔梯度上土壤有机碳库以不稳定的颗粒态有机碳(POC)形式存在,在全球气候变化进程中随着温度升高,土壤有机碳矿化速率将加快。

关键词:高寒土壤; 海拔梯度; 土壤有机碳; 有机碳稳定性

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0123-05

Stability of Soil Organic Carbon Along the Altitudinal Gradient in Alpine of the West of Sichuan Province

LIU Yang¹, LI Ju², SUN Hui¹, CHEN Yuwen¹, LI Xin¹

(1.Department of Environmental Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2.Sichuan Research Center for Soil Environment Protection Engineering and Technology, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to explore the effect of soil organic carbon storage and stability on the source and sink of carbon in alpine ecosystems, soil samples were collected along the altitudinal gradients ranging from 3 400 m to 4 100 m in the western Sichuan Province, and organic carbon in these samples were fractionated according to a physio-chemical sequential extract method to evaluate changes in soil carbon stability at different elevations of alpine. The results showed that: (1) the soils along the alpine elevation gradient was dominated by coarse particles(0.25~2 mm), in the physical classification(>0.02 mm), the soil organic carbon content increased at first and then decreased with the increase of the altitude, that was, the soil organic carbon mainly existed in the form of particulate organic carbon; organic-inorganic carbon (carbon in organic-inorganic complex <0.02 mm) increased with altitude except at the highest altitude (4 100 m), the ratio of which was around 2% in total organic carbon and lower than that in lowland soil; (2) humus carbon was the major form of carbon in the organic-inorganic complex, and content of humus also increased with altitude. Therefore, soil organic carbon of alpine was mainly sequestered as liable organic carbon in the form of particulate organic carbon in western Sichuan Province, and organic carbon mineralization would be accelerated due to soil warming in the cold area of alpine in scenario of global climate change.

Keywords: alpine soil; altitudinal gradient; soil organic carbon (SOC); organic carbon stability

土壤是全球陆地生态系统中最大碳库,全球约 1 400~1 500 Gt 的 C 以有机质形式储存于土壤中^[1],土壤碳储量相当于大气碳库 2 倍、植被碳库 3 倍^[2],对大气 CO₂ 浓度和全球碳循环有巨大影响。土壤有

机碳(SOC)是地球表层系统中最大且最具有活性的碳库之一,由于气候变暖及土地利用变化等影响,全球土壤有机碳库在不断地减小^[3],因此,土壤有机碳已经成为全球碳循环领域研究热点。Melillo 等^[4]持

收稿日期:2019-05-14

修回日期:2019-06-04

资助项目:国家自然科学基金(41271094,40871124)

第一作者:刘杨(1995—),女,四川绵阳人,硕士研究生,研究方向为土壤与水环境质量。E-mail:liuyangre@qq.com

通信作者:孙辉(1971—),男,四川南充人,博士,教授,主要从事土壤环境学研究。E-mail:sunhuifiles@gmail.com

续 26 a 的土壤增温试验表明,增温可致土壤有机碳减少和向大气中排放 CO_2 增加。在全球尺度上,升温通过改变植被及微生物过程,改变土壤中有有机物分解转化,进而影响土壤有机质中活性与组分,改变土壤碳库稳定性^[5]。土壤有机碳库汇/源功能转换对维持全球碳循环平衡,减缓温室效应意义重大^[6]。高寒土壤因其具有较高碳密度而在全球碳估算中不容忽视,在全球土壤有机碳库中占有重要地位,如青藏高原高寒草地有机碳密度为 26.86 万 kg/hm^2 ,土壤有机碳储量达 21.52 Gt^[7]。

由于土壤有机质组成、结构及赋存形式复杂,关于土壤有机碳稳定性的研究一般从土壤有机碳不同活性的组分分级入手,有机质中不同活性组分的构成不一样,活性则不一样。从已有研究来看,土壤有机碳组分分级方法主要包括物理分级、化学分级和物理—化学联合分级方法。物理—化学联合分级方法因其综合考虑土壤有机碳不同稳定机制,因而可尽量体现对总有机碳中不同活性组分的响应特征,近年来受到越来越多的应用。国内对高寒土壤碳研究,主要集中于青藏高原及周边区域、天山、祁连山等高海拔土壤及东北等高纬度土壤有机碳变化及特征,包括土壤有机碳密度与储量^[7]、有机碳转化矿化与排放^[8]、有机碳动态^[9]、有机碳剖面分布与空间特征^[10-11]、全球变化背景下的有机碳效应^[12]等方面。土壤有机碳(SOC)的稳定性特征研究,是认识土壤碳库对全球变化响应的基本问题,而有机碳不同活性组分研究是认识有机碳稳定性特征的基础。高寒土壤有机碳积累和动态因海拔导致环境因子变化的影响而分异,对海拔梯度上土壤有机碳组分特征及分布格局进行定量分析研究,有助于增进对高寒土壤碳库特征及赋存形式的了解。

1 材料与方法

1.1 土壤样品制备

采样点地处梦笔山,土壤为山地棕色针叶林土至高寒草甸土高寒土壤海拔梯度系列(4 100, 3 800, 3 600, 3 400 m),地理位置为 $102.313^\circ\text{—}102.377^\circ\text{E}$, $31.707^\circ\text{—}31.597^\circ\text{N}$ 。未分解生物质主要为石粒及枯枝落叶等,高山土壤经反复冻融后团聚体结构差, $>2\text{ mm}$ 的土粒并不多见,因此对分析结果无显著性影响。每个海拔高度选择 3 个相邻相似样带作为重复,每个样带带长约 20 m,在每个样带随机采取 15 个样点凋落物腐殖层(或草黏层)之下 0—20 cm 的土壤,混匀成一个土样。土样冷藏带回实验室,快速风干,剔除砾石、树根草根和凋落物,过 2 mm 筛后密闭保存以待测定。

1.2 研究方法

采用连续提取方法对川西高寒土壤有机碳分级,进行有机碳组分分离和测定,从而确定海拔梯度上高寒土壤有机碳稳定性的特征。连续提取是根据有机碳活性强度或与矿质结合强度不同,通过利用不同化学试剂(特定化学试剂对应土壤有机碳特定组分和强度)按照有机碳活性由强到弱的顺序,对土壤有机碳组分进行分步顺序提取^[13],并根据实际情况进行改进。样品中固体碳含量采用元素分析仪(型号 Vario EL/micro cube,德国 elementar)测定,提取液样品中碳含量用 TOC/TN 分析仪(型号 Milti N/C 2100S,德国 Jena)分析。

1.2.1 有机碳的物理分级 采回的土壤风干混匀并过 2 mm 筛,分为有机物碎片(0.25~2 mm, 0.05~0.25 mm, 0.02~0.05 mm)及有机矿质复合体($<0.02\text{ mm}$),将分级土壤称重并记录。

1.2.2 有机碳的化学分级

(1) 称取 2 g $<0.02\text{ mm}$ 土样放入高型烧杯,加入去离子水定容至 1 L,再加入 3 ml 饱和硫酸铝钾(AlKSO_4)作为絮凝剂,混合均匀,置于 4°C 低温培养箱冷藏静置。2 天后取出烧杯,利用虹吸法收集上清液,余下部分转入离心管离心 15 min,取出上清液,将上述上清液混匀得 CF_1 ,余下沉淀为有机—无机复合体。

(2) 向上一步装有沉淀的离心管中加入 30 ml 的 0.5 mol/L 的硫酸钾(K_2SO_4)溶液振荡浸提 16 h 之后离心 15 min,取上清液;再加入 30 ml 的 0.5 mol/L 的 K_2SO_4 溶液振荡混合 1 h,离心 15 min,取上清液;将两次所得上清液混合均匀得 CF_2 。

(3) 向上一步所剩沉淀的离心管中加入 30 ml 的 pH 值为 9.7 的 0.1 mol/L 的无水四硼酸钠($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)缓冲液,振荡浸提 16 h 之后离心 15 min,取上清液;再加入 30 ml 上述溶液振荡混合 1 h 后离心 15 min,取上清液;将两次所得上清液混合均匀得 CF_3 。

(4) 向上一步所剩沉淀的离心管中加入 30 ml 的 pH 值为 10.2 浓度为 0.1 mol/L 的焦磷酸钠($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$)缓冲液,振荡浸提 16 h 之后离心 15 min,取上清液;再加入 30 ml 该溶液振荡混合 1 h 后离心 15 min,取上清液;将两次所得上清液混合均匀得 CF_4 。

(5) 向上一步所剩沉淀的离心管中加入 30 ml 浓度为 0.1 mol/L 的氢氧化钠(NaOH)溶液,振荡浸提 16 h 之后离心 15 min,取上清液;再加入 30 ml 该溶液振荡混合 1 h 后离心 15 min,取上清液;将两次所得上清液混合均匀得 CF_5 。

(6) 向上一步所剩沉淀的离心管中加入 5 ml 的 5°C 的 0.33 mol/L 的硫酸(H_2SO_4)酸化 10 min 至 pH 值

为1.5后加入30 ml浓度为0.1 mol/L的NaOH溶液,振荡16 h后离心15 min,取上清液;再加入30 ml浓度为0.1 mol/L的NaOH溶液,振荡混合1 h后离心15 min,取上清液;将两次所得上清液混合均匀得CF₆。

(7) 向上一步所剩沉淀的离心管中加入20 ml新配置的pH值为8,浓度为0.1 mol/L的连二亚硫酸钠(Na₂S₂O₄)溶液处理10 min,加入15 ml浓度为0.1 mol/L的NaOH溶液,振荡浸提16 h后离心15 min,取上清液;再加入30 ml的0.1 mol/L的NaOH溶液,振荡浸提1 h后离心15 min,取上清液;将两次所得上清液混合均匀得CF₇。然后加入30 ml去离子水振荡浸提1 h离心15 min,为洗去残留Na₂S₂O₄。

(8) 向上一步所剩沉淀的离心管中加入20 ml的8 mol/L的氢氟酸(HF)溶液处理10 min后,加入15 ml的0.1 mol/L的NaOH溶液,振荡浸提16 h后离心15 min,取上清液;再加入30 ml的0.1 mol/L的NaOH溶液,振荡浸提1 h后离心15 min,取上清液;将两次上清液混合滴加0.1 mol/L的NaOH溶液至中和得CF₈。沉淀用40 ml去离子水振荡浸提1 h后离心15 min去除上清液,为洗出残留氢氟酸。

(9) 将上一步离心管中的沉淀用玻璃滤纸进行抽滤,得到的固体为胡敏素碳,烘干称重得CF₉。

1.3 数据统计分析

数据统计与分析采用Microsoft Office Excel 2010和IBM SPSS Statistics 19.0完成。

2 结果与分析

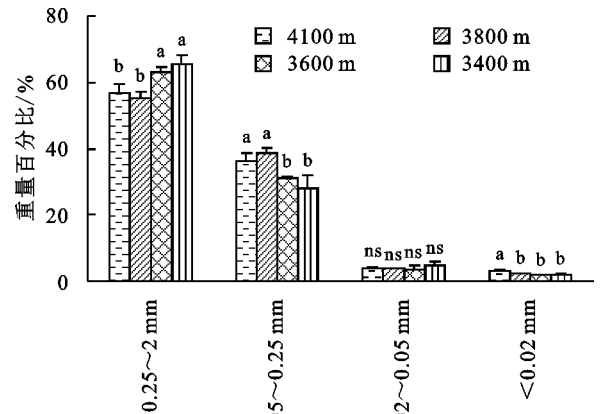
2.1 高山土壤不同粒级重量百分比分布特征

f₁表示0.25~2 mm粒级,f₂表示0.05~0.25 mm粒级,f₃表示0.02~0.05 mm粒级,f₄表示<0.02 mm粒级。由图1可以看出,川西高山土壤组成以粗颗粒为主,比例随着粒级减小而显著降低。不同粒级土壤重量百分比都表现为f₁>f₂>f₃>f₄,且随粒级的减小占比显著降低,f₁,f₂粒级含量远高于f₃,f₄粒级。对比同一粒级不同海拔土壤重量百分比发现,随着海拔升高,f₁,f₃粒级土壤重量百分比呈现降低趋势,f₂,f₄粒级土壤重量百分比却呈升高趋势。其中f₂粒级相比f₁粒级占比大幅降低,f₃粒级与f₂粒级相比降低明显,f₃粒级与f₄粒级相比降低相对不明显。f₁,f₂和f₄粒级的土壤重量百分比差异均达到显著性水平。

2.2 高山土壤有机碳物理分级特征

高山土壤不同粒级有机碳含量见图2。该区域有机碳含量较高,不同粒级土壤有机碳含量都呈显著性差异,可能土壤有机质分解相对较活跃。f₂粒级在3800 m处的有机碳含量最高达151.76 g/kg,f₄粒级在3400 m处有机碳含量最低也有43.82 g/kg。对

比不同一海拔上同一粒级土壤,土壤有机碳含量都是f₂粒级最高,f₁粒级最低。海拔梯度上各粒级有机碳含量分布相对均匀,不同海拔土壤粒级变化都表现为随着粒级的减小,有机碳含量先升高后降低。可能是因海拔升高,温度降低,微生物的活动减弱,对土壤碳库中碳的释放能力并不高,这并不违背秦纪洪等^[9]得出的高海拔有利于碳的固存的结论。在4100 m处各粒级土壤有机碳含量变化明显,可能是由于该处土壤植被类型、生物积累量、碳的释放能力等因素的变化导致土壤有机碳含量随海拔升高而降低。



注:条形图上标注的字母为Duncan法进行多重比较的结果。小写字母不同者表示海拔梯度上不同生态系统类型土壤在同一粒级上的重量百分比差异达到显著性水平($p < 0.05$),ns表示该海拔梯度上不同生态系统类型土壤在同一粒级上的重量百分比差异不显著($p > 0.05$),下同。

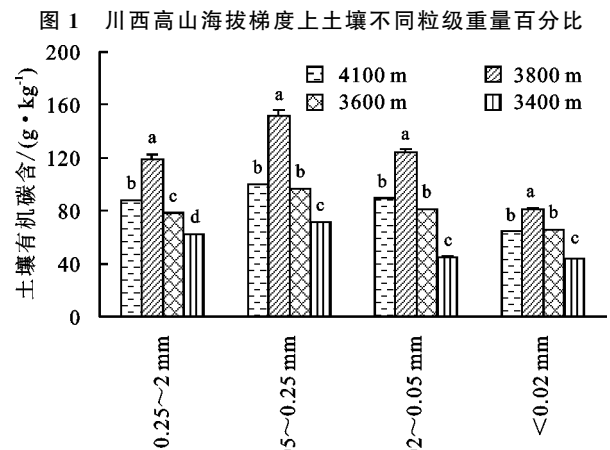


图2 川西高山海拔梯度上不同粒级土壤有机碳的含量

2.3 高山土壤有机碳化学分级特征

粒径<0.02 mm高山海拔梯度上化学分级土壤有机碳含量见图3(CF₁为水溶性有机碳,CF₂为可溶性有机碳,CF₃为土壤矿物弱固持有机碳,CF₄为阳离子固持有机碳,CF₅为大量有机碳,CF₆为碳酸盐固持有机碳,CF₇为土壤矿物强固持有机碳,CF₈为土壤矿物强固持有机碳,CF₉为胡敏素碳)。化学分离可提取小于0.02 mm粒级总有机碳含量的60%~70%,余下的则以胡敏素碳的形态存在。

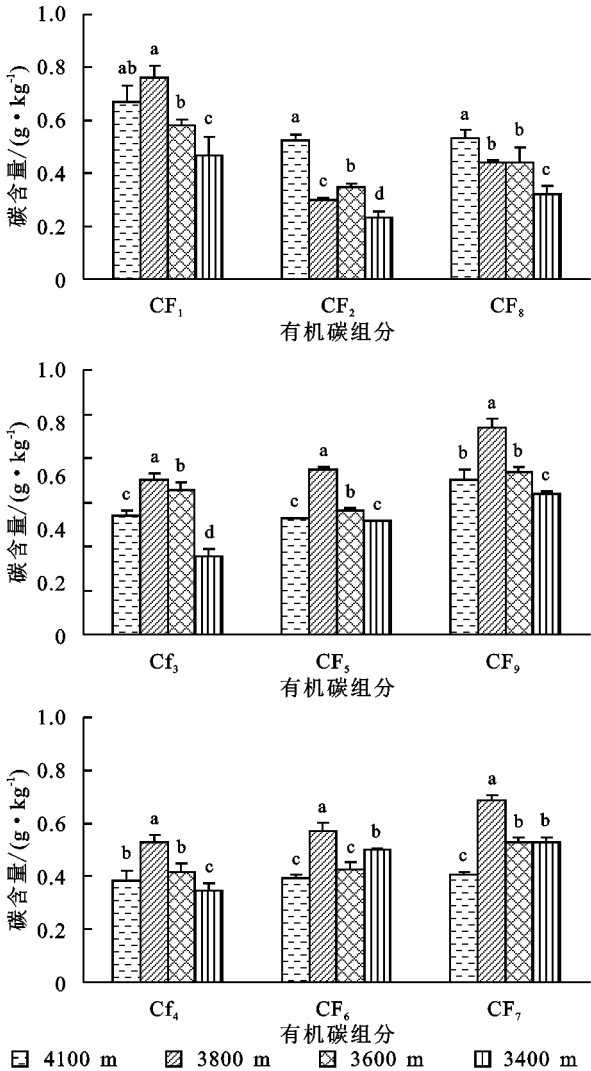


图 3 川西高山海拔梯度上土壤有机碳化学分级各组分含量

土壤有机碳含量 CF_9 组分最高, CF_2 组分最低。 CF_1, CF_2, CF_8 组分有机碳含量变化范围相同, 不同组分间相同位置有机碳含量于 4 100, 3 800, 3 600, 3 400 m 都呈现出先降低后升高的变化趋势, 但具体海拔变化又有所差别。 CF_3, CF_5, CF_9 组分有机碳含量在相同变化范围内, 不同组分间相同位置有机碳含量于 4 100, 3 800, 3 400 m 呈现出逐渐升高的变化趋势, 3 600 m 呈现出先降低后升高的变化趋势, 不同组分间不同位置有机碳含量变化趋势 CF_3, CF_5, CF_9 组分表现为 3 800 m > 3 600 m > 4 100 m > 3 400 m。 CF_4, CF_6, CF_7 组分有机碳含量在相同变化范围内, 不同组分间相同位置有机碳含量 4 100, 3 800, 3 600, 3 400 m 都呈现逐渐升高的变化趋势, 只是 CF_4 组分和 CF_6, CF_7 组分内不同位置有机碳含量变化趋势有所差别。

2.4 高山土壤海拔梯度上有机碳的稳定性分析

从表 1 可以看出, 大多数土壤有机碳存在于粗颗粒之中, 粒径 > 0.02 mm 的颗粒态有机碳 (POC) 占总有机碳比例最大, 均达 98% 左右, 其中粒径 0.25 ~ 2 mm 的有机碳基本占到了 50% 以上。粗有机碳是土壤有机碳中的不稳定组分, 其大部分是新近加入土壤的植物生物量^[14]。活性最高的水溶性有机碳 (CF_1) 和可溶性有机碳 (CF_2) 有机碳含量极低, 最多不超过 1%, 在此进行合并分析。有机矿质复合体有机碳含量极低, 粒径 < 0.02 mm 的化学分级有机碳含量不足 2%, 化学分级有机碳占比最大的为组分 CF_9 , 占比达到了 1.03%。

表 1 各组分有机碳占总有机碳百分比

有机碳组分		海拔梯度			
		4100 m	3800 m	3600 m	3400 m
物理分级	0.25~2.00 mm	54.56±3.21	49.84±0.75	59.11±1.68	63.74±3.21
	0.05~0.25 mm	39.51±2.50	44.89±0.79	35.71±0.80	31.61±3.47
	0.02~0.05 mm	3.71±0.50	3.74±0.04	3.55±0.90	3.41±0.35
	<0.02 mm	2.22±0.38	1.53±0.07	1.62±0.15	1.25±0.23
化学分级	CF_1+CF_2	0.04±0.02	0.02±0.00	0.02±0.00	0.02±0.01
	CF_3	0.02±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00
	CF_4	0.37±0.04	0.27±0.07	0.33±0.05	0.20±0.04
	CF_5	0.13±0.04	0.10±0.03	0.11±0.02	0.10±0.02
	CF_6	0.36±0.04	0.28±0.03	0.27±0.04	0.30±0.08
	CF_7	0.13±0.02	0.11±0.02	0.10±0.00	0.15±0.05
	CF_8	0.14±0.01	0.13±0.02	0.13±0.02	0.15±0.02
	CF_9	1.03±0.31	0.61±0.10	0.64±0.16	0.32±0.05

在含量为 2% 左右的有机-无机复合体有机碳组分 (化学分级组分) 构成中 (表 2), 活性最高的可溶性有机碳组分 (CF_1, CF_2) 占比很低。活性最低的组

分 CF_9 (胡敏素碳) 占比最高, 达 26% ~ 49%, 尽管如此, 也只占总有机碳的 0.3% ~ 1.0%, 有机碳主要以活性高的颗粒态有机碳形式存在, 说明川西高山土壤

碳库活性很高,较不稳定。

表 2 化学分级中各组分有机碳占比 %

有机碳组分	不同位置各组分有机碳占比			
	4100 m	3800 m	3600 m	3400 m
CF ₁ +CF ₂	1.86±0.06	1.28±0.25	1.44±0.06	1.60±0.36
CF ₃	0.82±0.01	0.38±0.04	0.54±0.04	0.53±0.05
CF ₄	16.93±2.10	17.77±3.40	20.44±3.93	16.13±0.72
CF ₅	5.94±1.04	6.64±2.06	6.50±1.20	7.91±0.86
CF ₆	16.52±1.82	18.61±2.22	17.21±3.72	23.49±3.44
CF ₇	6.15±1.80	6.99±1.42	6.54±0.79	11.38±2.08
CF ₈	6.39±1.84	8.59±0.91	8.15±0.92	12.13±0.70
CF ₉	45.40±6.62	39.75±6.47	39.19±6.37	26.82±4.98

3 讨论

土壤有机碳动态过程主要包括两方面,一方面土壤有机碳通过矿化变成 CO₂,另一方面是通过腐殖化过程变成更加稳定的部分。高海拔地区的土壤有机碳储量显著高于低海拔地区^[16-17],因此揭示高海拔土壤有机碳在海拔梯度上的分布格局及其影响机理,在全球气候变化研究中具有重要意义。本文研究结果显示,在海拔梯度上土壤有机碳随着海拔增加呈现先升高再降低,这与当地较低海拔(3 400 m 以下)土壤有机碳受人类活动频度影响较高,植被为高寒次生林,有机碳储量较低;在一定海拔高度区间,高寒针叶林为主,土壤有机碳储量最高;到树线交错带以上(3 800~4 000 m),随着温度降低,植被类型逐渐转为高山灌丛和灌丛草地,生物量和凋落物积累随之降低有关。这与李丹维等^[18]对太白山土壤有机碳研究发现其在海拔梯度上的分布规律具有相似性。

大于 20 μm 有机碳被称为颗粒态有机碳(POC, particulate organic carbon),被认为是土壤中未受到土壤结构性保护的有机碳,活性比有机—无机复合体中的有机碳高^[19],因此,POC 占总有机碳比例可以作为衡量有机碳活性(稳定性)的一个指标^[20]。本研究发现,川西高海拔地区土壤有机碳含量非常高,但是主要以 POC 形式储存(98%左右),这证实了川西高寒土壤有机碳库不稳定性非常高,这与很多高海拔地区土壤有机碳稳定性的研究结论是一致的^[9-21]。尽管胡敏素碳含量随海拔升高逐渐增加,显示有机碳化学保护组分的腐殖化过程随着海拔梯度有所升高,但是这部分占总有机碳比例极低,因此腐殖化过程并不是高寒土壤有机碳的主要过程。

4 结论

(1) 高寒土壤有机碳物理组分主要集中在不稳定粗颗粒土壤中,存在形式主要为 POC,占总有机碳

98%左右。其中不同海拔梯度上 0.05~0.25 mm 粒级土壤有机碳含量最高,<0.02 mm 粒级处最低。随着海拔升高土壤有机碳含量先增加后减少,同一粒级不同海拔梯度上土壤重量百分比和有机碳含量差异显著,在 3 800 m 处土壤有机碳含量最高达 151.76 g/kg,最低在 3 400 m 为 43.82 g/kg,显示土壤有机碳库活性高。

(2) 海拔梯度上土壤化学分级有机碳含量占总有有机碳的 2%左右,腐殖化有机质比例极低,且主要集中在低活性的腐殖质(胡敏素碳)中,随海拔升高有增加的趋势,但在 4 100 m 海拔处显著降低,显示随着海拔的升高土壤腐殖化程度有降低的可能,川西高寒土壤有机碳不稳定性较高。如果土壤温度随气候变暖而升高,高海拔梯度土壤有机碳的矿化速率将加快。

参考文献:

[1] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils[J]. Nature, 1990,348(6298):232-234.

[2] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(2):681-689.

[3] Jackson R B, Lajtha K, Crow S E, et al. The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2017,48:419-445.

[4] Melillo J M, Frey S D, Deangelis K M, et al. Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world[J]. Science, 2017,358(6359):101-105.

[5] Purton K, Pennock D, Leinweber P, et al. Will changes in climate and land use affect soil organic matter composition: Evidence from an ecotonal climosequence[J]. Geoderma, 2015, 253/254:48-60.

[6] 张仲胜,李敏,宋晓林,等.气候变化对土壤有机碳库分子结构特征与稳定性影响研究进展[J].土壤学报,2018, 55(2):273-282.

[7] 陶贞,沈承德,高全洲,等.高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征[J].地理学报,2006,61(7):720-728.

[8] 王建林,欧阳华,王忠红,等.高寒草原生态系统表层土壤活性有机碳分布特征及其影响因素[J].生态学报, 2009,29(7):3501-3508.

[9] 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[J].生态学报,2013,33 (18):5858-5864.

[10] 孙慧兰,李卫红,杨余辉,等.伊犁山地不同海拔土壤有机碳的分布[J].地理科学,2012,32(5):603-608.

林土壤酶演变特征[J].林业科学,2010,46(12):23-29.

[26] 黄勇,杨忠芳.土壤质量评价国外研究进展[J].地质通报,2009,28(1):130-136.

[27] 张连金,赖光辉,孔颖,等.基于因子分析法的北京九龙山土壤质量评价[J].西北林学院学报,2016,31(3):7-14.

[28] 李国雷,刘勇,吕瑞恒.华北落叶松人工林密度调控对林下植被发育的作用过程[J].北京林业大学学报,2009,31(1):19-24.

[29] 姚瑞玲,丁贵杰,王胤.不同密度马尾松人工林凋落物及养分归还量的年变化特征[J].南京林业大学学报:自然科学版,2006,30(5):83-86.

[30] 孙书存,高贤明,包维楷,等.岷江上游油松造林密度对油松生长和群落结构的影响[J].应用与环境生物学报,2005,11(1):8-13.

[31] 王艳霞,吴承祯,洪伟,等.杉木人工林生长对密度效应的响应[J].森林与环境学报,2007,7(1):25-29.

[32] 鲁昭伟,陈波,潘青华,等.北京山地不同密度侧柏人工林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2013,27(1):224-228.

[33] 康冰,刘世荣,蔡道雄,等.马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响[J].应用生态学报,2009,20(10):2323-2331.

[34] 赵广亮,王继兴,王秀珍,等.油松人工林密度与养分循环关系的研究[J].北京林业大学学报,2006,28(4):39-44.

[35] 张伟,杨传强,赵青.山东省侧柏人工林立地指数表的编制[J].山东林业科技,2014,44(3):6-10.

[36] 孙千惠,吴霞,王媚臻,等.林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J].应用生态学报,2019,39(3):732-738.

[37] 赵广亮,王继兴,王秀珍,等.油松人工林密度与养分循环关系的研究[J].北京林业大学学报,2006,28(4):39-44.

[38] 梁燕,葛忠强,谢同利,等.鲁中山地侧柏人工林下植物多样性分析与评价[J].山东林业科技,2018,48(2):19-27.

[39] 李民义,张建军,郭宝妮,等.晋西黄土区不同密度油松人工林林下植物多样性及水文效应[J].生态学杂志,2013,32(5):1083-1090.



(上接第 127 页)

[11] 高俊琴,欧阳华,白军红.若尔盖高寒湿地土壤活性有机碳垂直分布特征[J].水土保持学报,2006,20(1):76-86.

[12] 田玉强,欧阳华,宋明华,等.青藏高原样带高寒生态系统土壤有机碳分布及其影响因子[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2007,33(4):443-449.

[13] Lopez-Sangil L, Rovira P. Sequential chemical extractions of the mineral-associated soil organic matter: An integrated approach for the fractionation of organo-mineral complexes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013,62:57-67.

[14] Fortuna A, Harwood R R, Paul E A. The effects of compost and crop rotations on carbon turnover and the particulate organic matter fraction[J]. Soil Science, 2003,168(6):434-444.

[15] Walther G R. Community and ecosystem responses to recent climate change[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2010, 365(1549):2019-2024.

[16] Du B, Kang H, Pumpanen J, et al. Soil organic carbon stock and chemical composition along an altitude gradient in the Lushan Mountain, subtropical China[J]. Ecological Research, 2014,29(3):433-439.

[17] Leifeld J, Zimmermann M, Fuhrer J, et al. Storage and turnover of carbon in grassland soils along an elevation gradient in the Swiss Alps[J]. Global Change Biology, 2009,15(3):668-679.

[18] 李丹维,王子泉,田海霞,等.太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J].土壤学报,2017,54(1):160-170.

[19] Six J, Conant R. T, Paul E, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002,241(2):155-176.

[20] Kammer A, Hagedorn F, Shevchenko I, et al. Tree-line shifts in the Ural mountains affect soil organic matter dynamics[J]. Global Change Biology, 2009,15(6):1570-1583.

[21] Hagedorn F, Mulder J, Jandl R. Mountain soils under a changing climate and land-use[J]. Biogeochemistry, 2010,97(1):1-5.