

川西高山树线交错带海拔梯度上土壤有机碳稳定性特征

王小沁,陈玉雯,孙 辉*,李 菊,刘 杨

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

摘 要:高山树线交错带是高海拔地带对环境变化最为敏感的生态系统之一,土壤有机碳库及其稳定性在生态系统变化中具有显著指示作用。通过物理-化学方法对土壤不同活性有机碳进行连续分级分离,研究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,高山树线交错带土壤有机碳主要集中在物理分级组分(≥ 0.02 mm),且粒径越大有机碳含量越高,即主要以颗粒态有机碳形式存在,占比均高于98%;在 < 0.02 mm 有机-无机复合体中有机碳采用化学分级分离,这部分有机碳占比低于土壤总有机碳2%,且主要以腐殖质(胡敏素)形式存在(占土壤总有机碳0.6%~0.8%),腐殖质占有有机碳比例远低于一般土壤;随着海拔升高,土壤有机碳总量上升,颗粒态有机碳(物理分级组分)比例升高,胡敏素类腐殖质比例下降。因此,川西高海拔树线交错带的高寒土壤有机碳,主要以不稳定有机碳(POC)形式存在,随着温度上升(海拔降低)将导致土壤矿质化和腐殖化加剧,有机碳总量下降,土壤不稳定性组分(物理分级组分)降低,土壤稳定性(腐殖化比例)上升。

关键词:高山树线交错带;土壤有机碳;土壤粒级;土壤腐殖质;有机碳稳定性

中图分类号:S718.516 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)01-0001-07

Stabilization of Soil Organic Carbon in Alpine Treeline Ecotone along Altitudinal Gradient in the West of Sichuan Province

WANG Xiao-qin, CHEN Yu-wen, SUN Hui*, LI Ju, LIU Yang

(Department of Environmental Science and Engineering, Sichuan University; Sichuan Research Center for Soil Environment Protection Engineering and Technology, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: The alpine treeline ecotone (ATE) is one of the most sensitive ecosystems for environmental change at high altitudes. The soil organic carbon pool and its stability have significant indications in ecosystem changes. In this paper, the physio-chemical methods were used to continuously separate the different activities of soil organic carbon, and the distribution characteristics and stability of different components of soil organic carbon under the elevation of environmental gradient were studied. The results showed that the soil organic carbon in the interlaced zone of alpine tree line was mainly concentrated in the physical fractionation component (≥ 0.02 mm), and the bigger the soil particle size, the higher the organic carbon content, i. e. the organic carbon existed mainly in the particulate form with the proportion of higher than 98%. Organic carbon in < 0.02 mm organic-inorganic composites was chemically fractionated, which accounted less than 2% of total organic carbon in soil, and mainly existed in the form of humus (humin) (organic carbon 0.6%—0.8%), the proportion of humus in organic carbon was much lower than that in general soil. Along with the increase of elevation, soil organic carbon increased, the total organic carbon and the proportion of particulate organic carbon (physical fractionation) increased, and the proportion of humin in humus

收稿日期:2019-03-08 修回日期:2019-05-04

基金项目:国家自然科学基金(41271094;40871124)。

作者简介:王小沁,男,硕士在读,研究方向:土壤环境。E-mail:wangxq_scu@qq.com

* 通信作者:孙 辉,男,博士,教授,研究方向:土壤生态。E-mail:sunhuifiles@gmail.com

decreased. It is conclude that the alpine soil organic carbon in the high-altitude tree line interlace zone in western Sichuan is mainly in the form of unstable organic carbon (particulate organic carbon, POC). As the temperature rises (decreases altitude), soil mineralization and humification will increase, and the total amount of organic carbon will increase. As the soil component (physical fractionation component) decreases, soil stability (humidification ratio) increase.

Key words: alpine tree line ecotone (ATE); soil organic carbon (SOC); soil particle size; soil humus; SOC stabilization

土壤碳库是陆地生态系统最大的有机碳库^[1], 土壤有机碳约占全球陆地生态系统碳库 74% (约 1 415 Pg), 几乎是动植物生物量碳的 3 倍^[2-3]。土壤碳库较小幅度的变化就可能影响到有机碳向大气的排放, 进而影响到全球气候变化^[4]。土壤碳库处于生物量碳输入和有机碳矿化输出的动态平衡之中, 而土壤有机碳矿化又受到有机碳稳定化(固定)过程的影响。土壤有机碳矿化与有机碳稳定化过程的相互影响和相互作用非常复杂, 是有机碳在土壤基质中发生物理、化学与生物过程的综合作用的结果^[5-8]。土壤有机碳是土壤的重要组成部分^[9], 土壤有机碳与不同大小土壤颗粒或松散或紧密地结合, 产生了结构、功能与活性的分异, 从而客观上构成了不同活性特征的有机碳组分, 这也成为土壤有机碳组分分级的基础。因此, 深入认识不同活性的土壤有机碳及其库容大小, 对于预测全球变化背景下的不同区域土壤的环境效应是不可或缺的^[10]。

有机碳稳定性是有机碳抵御微生物等分解作用的性质, 稳定性越高的组分反应活性越低^[6], 目前针对有机碳的不同活性组分多采用物理^[11-17]、化学或物理与化学结合^[18-21]的方法进行分级。

为更加清晰区分不同活性有机碳组分, 越来越多的研究将有机碳稳定性与其分离提取剂的化学活性关联起来, 而且对有机碳不同组分进行连续提取分离也成为一种趋势。因此, 很多研究采用物理-化学方法联合分级对土壤有机碳进行研究, 特别是对于物理分级中 $<20\ \mu\text{m}$ 的有机-无机复合组分中有有机碳进行分级, 作为土壤有机碳腐殖化与矿质化趋势的重要指标。如采用 K_2SO_4 溶液^[18]、 NaOH 溶液、 $\text{Na-NaP}_2\text{O}_7$ 溶液^[19]、 HCl 溶液或 H_2SO_4 溶液^[20]、 NaOCl 或 H_2O_2 溶液^[21] 等提取土壤有机碳, 不同提取溶液代表了不同有机碳受到化学与生物保护的强度。

高山树线交错带 (alpine treeline ecotone, ATE) 是高海拔地带自森林线 (郁闭森林分布上限, forest line) 至乔木线 (乔木分布上限, tree limit) 之间, 介于亚高山森林与高山草甸之间的群落过渡带。ATE 处于高寒严酷气候胁迫的临界状态, 成为高海

拔生态系统承受环境变化压力最大的生态系统之一, 全球性和区域性气候变暖必然在这一生态界面上有所反映。在全球气候变化背景下, 土壤有机碳转化过程与机理已成为土壤学、环境学和生态学领域所关注的热点。目前, 对于高海拔低温生态系统土壤有机碳形态与空间分异的相关研究还比较缺乏。为有效区分和深入认识有机碳组分在空间上的异质性, 建立科学合理的土壤有机碳分级测定方法至关重要。因此, 对土壤有机碳形态进行分级分析, 定量揭示高寒土壤有机碳形态分布的时空格局, 对认识高寒土壤碳库动态具有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

研究区域位于四川省阿坝藏族羌族自治州小金县与马尔康县之间交界的梦笔山西南坡。梦笔山由大雪山和邛崃山系交界北部地段多个海拔高于 4 000 m 的高峰组成, 为典型的高原高山深谷地形, 坡度 35° 左右; 土壤从下至上分别为山地棕色针叶林土和高山草甸土。研究区海拔 3 200~3 800 m, 主要是以岷江冷杉 (*Abies faxoniana*) 和紫果云杉 (*Picea balfouriana*) 为建群种的暗针叶林, 林龄 50~200 a; 除乔木树种外, 林下和林窗零星分布有细枝茶藨子 (*Ribes tenue*)、四川忍冬 (*Lonicera szechuanica*)、红毛五加 (*Acanthopanax giraldii*)、杜鹃花多个种 (*Rhododendron* spp.)、高山柳 (*Salix* spp.) 等灌木植物。高山灌丛草地或者高山草地一般分布在海拔 3 800~4 100 m, 主要是高山杜鹃 (*Rhododendron delavayi*)、千里香杜鹃 (*R. thymifolium*) 灌丛, 呈丛状散生, 逐渐向高山草甸过渡。该区域高山树线交错带分布海拔高度 3 800~4 200 m。因为在高山树线交错带很小海拔梯度范围内 (垂直高差 200 m 左右) 生态环境急剧变化, 导致植被、环境、微环境气候等在海拔梯度上的急剧变化。

选择 ATE 位置和高度、坡向和坡度等因素尽量一致的 3 个坡面, 3 个坡面之间的水平距离 800~1 500 m, 坡度 $30^\circ\sim52^\circ$, 坡向均为东北, 地理范围 $31.313^\circ\sim31.513^\circ\text{E}$, $102.355^\circ\sim102.357^\circ\text{N}$, 在微地

形环境相似的位置各设置 1 条 ATE 样带,作为 3 个重复。在每个 ATE 按照过渡区植被类型特点设置采样线,即 ATE 下沿(海拔 3 900 m \pm 50 m)、ATE 中部(海拔 4 080 m \pm 60 m)、ATE 上沿(海拔 4 200 m \pm 30 m)3 个位置各布设 1 条采样线。每个样线横向长约 20 m,在坡面上标出之后,在每条样线上随机选取 8~10 个采样点,取其下 0~20 cm 土壤,去掉表层凋落物与腐殖层(或草粘层),混匀成 1 个土样。土壤冷藏带回实验室风干,过 2 mm 筛后低温保存,或立即分析。

1.2 土壤有机碳分级分离及样品测定

采用连续提取方法对 ATE 土壤有机碳分级,进行有机碳组分分离和测定。具体方法参考土壤有机-矿质复合体中有机碳连续分离方法^[22],并根据实际情况进行改进,包括物理分级和化学分级 2 个系列的连续提取过程,每个步骤提取 1 个有机碳组分,并测定相应组分的含量。

土壤有机碳分级有物理分级和化学分级 2 部分。

物理分级:将过 2 mm 筛的土壤样品经超声波分散后,采用湿筛法分级分离,主要是针对粒径 >0.02 mm 的非有机-无机结合态的颗粒有机碳。其中,0.25~2 mm 组分用 f_1 表示,0.05~0.25 mm 组分用 f_2 表示,0.02~0.05 mm 组分用 f_3 表示, <0.02 mm 组分用 f_4 表示。

化学分级:本方法提取容器均为塑料容器,提取均采用加入提取液(通常每次加 65 mL),160 r \cdot min⁻¹ 震荡 16 h(所有提取时间一致),必要时需调节 pH;分离都采用 3 300 g 离心 15 min;每步一般提取 2 次,第 2 次一般是震荡 1 h 后离心(都采用 3 300 g 离心 15 min);将 2 次离心后的上清液合并,冷冻保存或者立即分析。

1)称取 <20 μ m 样品 2 g,放入 250 mL 高型烧杯,加入 200 mL 去离子水,再加入 3 mL 饱和 KAl(SO₄)₂ 溶液,沉淀 2 d,收集上清液,余下部分转入 100 mL 离心管,3 300g 离心 15 min,取出上清液,2 次得到的上清液混合,得组分 1。沉淀为有机-无机复合体,做下一步研究。

2)在上一步的沉淀中加入 40 mL 0.5 mol \cdot L⁻¹ 的 K₂SO₄,震荡浸提 16 h 后 3 300 g 离心 15 min,取出上清液,余下部分加入 40 mL 0.5 mol \cdot L⁻¹ 的 K₂SO₄ 震荡浸提 1 h 后 3 300 g 离心 15 min,2 次离心的上清液收集后混合,得组分 2。

3)在上一步第 2 次离心后的沉淀中加入 pH 为 9.7 的 0.1 mol \cdot L⁻¹ 的无水四硼酸钠 40 mL,震荡浸提 16 h,3 300 g 离心 15 min 后取出上清液,余下

部分加入 40 mL 上述溶液震荡浸提 1 h,3 300 g 离心 15 min 取出上清液,将两次取出的上清液混合,得组分 3。

4)在上一步第二次离心后的沉淀中加入 pH 为 10.2 的 0.1 mol \cdot L⁻¹ 焦磷酸钠提取液 40 mL,震荡浸提 16 h,3 300 g 离心 15 min,取上清液后,余下部分加入 40 mL 上述溶液震荡浸提 1 h 后,3 300 g 离心 15 min 取上清液,将这 2 次取出的上清液混合,得组分 4。

5)在上一步第 2 次离心后的沉淀中加入 40 mL 0.1 mol \cdot L⁻¹ NaOH,震荡浸提 16 h 后 3 300 g 离心 15 min,取出上清液后,余下部分加入 40 mL 上述溶液震荡浸提 1 h 后,3 300 g 离心 15 min 取上清液,将这 2 次取出的上清液混合,得组分 5。

6)在上一步第 2 次离心后的沉淀中加入 5 mL 5 $^{\circ}$ C 0.33 mol \cdot L⁻¹ H₂SO₄ 酸化 10 min 至 pH 为 1.5,加入 40 mL 的 0.1 mol \cdot L⁻¹ NaOH 溶液,震荡浸提 16 h 后 3 300 g 离心 15 min 取出上清液,余下部分加入 40 mL 的 0.1 mol \cdot L⁻¹ NaOH 溶液震荡浸提 1 h,3 300 g 离心 15 min 取上清液,将这两次上清液混合,得组分 6。

7)在上一步第 2 次离心后的沉淀中加入 pH 为 8 的 0.1 mol \cdot L⁻¹ 连二亚硫酸钠溶液 20 mL 处理 10 min,加入 0.1 mol \cdot L⁻¹ NaOH 溶液 20 mL,震荡浸提 16 h 后 3 300 g 离心 15 min 取出上清液,余下部分加入 40 mL 的 0.1 mol \cdot L⁻¹ NaOH 溶液震荡浸提 1 h,3 300 g 离心 15 min 取上清液,将这 2 次上清液混合,得到组分 7。然后加入 40 mL 去离子水震荡浸提 1 h,3 300 g 离心 15 min,去掉上清液,本步骤为洗去残存的连二亚硫酸钠。

8)在上一步第 2 次离心后的沉淀中加入 20 mL 8 mol \cdot L⁻¹ 的氢氟酸处理 10 min,加入 0.1 mol \cdot L⁻¹ NaOH 20 mL 震荡浸提 16 h 后 3 300 g 离心 15 min 取出上清液,余下部分加入 0.1 mol \cdot L⁻¹ NaOH 40 mL 震荡浸提 1 h 后 3 300 g 离心 15 min 取出上清液,2 次上清液混合后用 0.1 mol \cdot L⁻¹ NaOH 中和后定容,得到组分 8。沉淀用去离子水 40 mL 震荡浸提 1 h,3 300 g 离心 15 min 去掉上清液,洗出氢氟酸残留。

9)余下不溶组分,为组分 9,胡敏素(腐殖质)碳。

以下将组分 1~9 都称为 CF₁~CF₉。

固体样品中碳含量,采用元素分析仪(Vario EL/micro cube,德国 Elementar)测定;提取液体样品中碳含量,采用 TOC/TN 分析仪(Multi N/C 2100S,德国 Jena)分析。

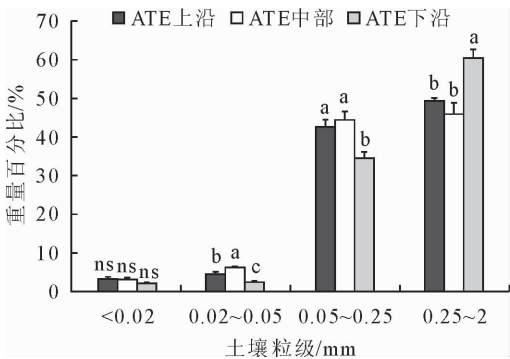
1.3 数据分析方法

数据统计分析采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 海拔梯度上土壤粒级分布特征

图 1 可以看出,在同一海拔上,随着粒级减小土壤质量百分比急剧降低。 f_3 和 f_4 粒级颗粒物的质量百分比很低,而 f_1 和 f_2 粒级颗粒物的质量百分比远远高于 f_3 和 f_4 粒级,其中 f_1 粒级略高于 f_2 粒级, f_3 粒级略高于 f_4 粒级。对比 f_1 、 f_2 粒级土壤颗粒物质量百分比,ATE 上沿和 ATE 下沿处 f_1 粒级明显高于 f_2 粒级,而 ATE 下沿处 f_1 粒级比 f_2 粒级高出近 2 倍。对于 f_3 、 f_4 粒级土壤颗粒物质量百分比,ATE 上沿和 ATE 下沿处 f_3 粒级略高于 f_4 粒级,而在 ATE 中部位置处 f_3 粒级比 f_4 粒级高出近 2 倍。



注:图中值为平均值±标准差,下同。不同小写字母表示海拔梯度上土壤同一粒级质量百分比差异达到显著性水平 ($P < 0.05$),ns 表示该海拔梯度上土壤同一粒级质量百分比差异不显著 ($P > 0.05$)。

图 1 高山树线交错带不同粒级土壤质量百分比

Fig. 1 Percentage by weight of soil with different grain sizes in alpine treeline ecotone

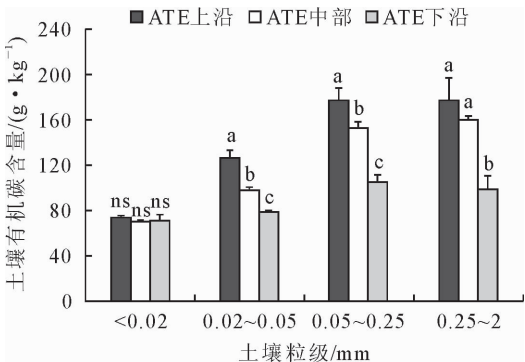
对比同一粒级不同海拔土壤质量百分比, f_1 粒级土壤颗粒物质量百分比趋势表现为 ATE 下沿高于 ATE 上沿高于 ATE 中部; f_2 、 f_3 粒级土壤颗粒物质量百分比总体趋势表现为 ATE 中部高于 ATE 上沿高于 ATE 下沿; f_4 粒级土壤颗粒物质量百分比趋势表现为 ATE 上沿高于 ATE 中部高于 ATE 下沿。

由于野外采样空间异质性很强,且采用的干筛法可能造成一定误差,故大致可以看出随着高山树线交错带海拔的升高, f_1 粒级土壤质量百分比呈现出降低的趋势, f_2 、 f_3 、 f_4 粒级土壤质量百分比呈现出升高的趋势,且只有 f_4 粒级土壤颗粒物质量百分比严格呈现出升高的趋势。对于高山树线交错带土壤,土壤颗粒组成主要是以粗颗粒物为主,土壤质量百分比随着粒级减小而降低,其中 f_1 与 f_2 粒级相

比适量降低, f_2 与 f_3 粒级相比显著降低, f_3 与 f_4 粒级相比降低不明显。对于 f_1 、 f_2 和 f_3 粒级,ATE 上沿、ATE 中部和 ATE 下沿土壤颗粒物质量百分比差异均达到显著性水平。

2.2 土壤有机碳物理分级特征

高山树线交错带不同粒级有机碳含量见图 2。可以看出,该区域土壤有机碳含量很高,其中 f_1 粒级的 ATE 上沿位置处土壤有机碳含量最高,达到 $179.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, f_4 粒级的 ATE 中部位置处有机碳含量最低,但至少也有 $69.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 f_1 、 f_2 粒级有机碳含量显著高于 f_3 、 f_4 粒级。



注:不同小写字母表示海拔梯度上不同生态系统类型土壤在同一粒级上的有机碳含量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有机碳含量差异不显著 ($P > 0.05$)。

图 2 高山树线交错带不同粒级土壤有机碳含量

Fig. 2 Soil organic carbon content of different grain grades in alpine treeline ecotone

对比不同粒级同一个海拔梯度上的土壤,土壤有机碳含量的总趋势是随着土壤粒径的减小而降低。ATE 上沿和 ATE 中部 f_1 粒级土壤有机碳含量最高,ATE 下沿 f_2 粒级有机碳含量最高,3 个位置 f_4 粒级土壤有机碳含量最低。ATE 下沿位置处土壤有机碳含量降低的幅度最小,变化趋势为先升高后降低。ATE 上沿位置处和 ATE 中部位置处的土壤有机碳含量降低的幅度比较显著, f_1 粒级与 f_2 粒级相比变化幅度不大,而 f_2 、 f_3 、 f_4 粒级相比表现出随粒级的减小而显著降低的趋势,且 f_1 、 f_2 粒级显著比 f_4 粒级有机碳含量的 2 倍还高。

对比同一粒级不同海拔的土壤有机碳含量,发现 f_1 、 f_2 、 f_3 粒级土壤有机碳含量变化趋势表现为 ATE 上沿 > ATE 中部 > ATE 下沿, f_4 粒级土壤有机碳含量变化趋势表现为 ATE 上沿 > ATE 下沿 > ATE 中部。

由此看出,在高山树线交错带表土中,土壤有机碳主要是以粗有机质形式存在。在该区域内同一粒级的有机碳含量随海拔的升高而升高,可能是由于海拔的升高,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^[23]得出的高海拔有利于碳的固存的结论。通过多重比较,可以看出除 f_4 粒级外,其他粒级土壤在不同海拔处的有机碳含量均呈现显著性差异,可能的原因是较大粒级中的土壤有机质的分解比较活跃,而 f_4 粒级的土壤处于更加稳定的状态。

2.3 土壤有机碳化学分级特征

从图3中可以看出,在ATE上沿、中部、下沿3个位置,CF₁、CF₂、CF₈组分有机碳含量都呈现出先降低后升高的变化趋势;在海拔梯度上,CF₁、CF₂组分有机碳含量表现为ATE中部>ATE上沿>ATE下沿,CF₈组分有机碳含量表现为ATE上沿

>ATE中部>ATE下沿。对于CF₃、CF₅、CF₉组分,有机碳含量在ATE上沿、ATE中部呈现逐渐升高的变化趋势,在ATE下沿呈现出先降低后升高的变化趋势;在海拔梯度上,有机碳含量变化趋势CF₃组分表现为ATE上沿>ATE中部>ATE下沿,CF₅、CF₉组分表现为ATE中部>ATE上沿>ATE下沿。对于CF₄、CF₆、CF₇组分有机碳含量,在ATE上沿呈现先降低后升高的变化趋势,在ATE中部呈现逐渐升高的变化趋势,在ATE下沿呈现先升高后降低的变化趋势;在海拔梯度上,CF₄组分有机碳含量表现为ATE上沿>ATE下沿>ATE中部,CF₆组分表现为ATE下沿>ATE中部>ATE上沿,CF₇组分表现为ATE中部>ATE上沿>ATE下沿。

2.4 高山树线交错带土壤有机碳的稳定性

在有机碳组分的连续提取中,越难提取的组分稳定性越高。粒径大的颗粒态有机碳(POC,粒径≥0.02 mm)活性高,占比越大则土壤有机碳活性越高,稳定性越低;粒径<0.02 mm的土壤有机-无机复合体中组分CF₁~CF₉活性逐渐降低,CF₁活性最高,CF₉活性最低,活性低的CF₉组分占比大则说明土壤有机碳活性低,稳定性高。

由表1可以看出,对于川西高山树线交错带地区3个海拔位置的土壤有机碳,粒径≥0.02 mm的颗粒态有机碳占比最大,均占到了98%以上,其中粒径0.25~2 mm的有机碳基本占到了50%以上,而粒径<0.02 mm的化学分级有机碳含量<2%;对于颗粒态有机碳和化学分级有机碳,占比最大的位置均为ATE下沿,颗粒态占比最大的为粒径

表1 有机碳含量在总有机碳中的占比

Table 1 Proportion of organic carbon in total organic carbon %			
有机碳组分	ATE 上沿	ATE 中部	ATE 下沿
物理分级有机碳含量比率			
<0.02 mm	1.46±0.35	1.50±0.27	1.58±0.12
0.02~0.05 mm	3.28±0.54	4.12±0.23	1.99±0.60
0.05~0.25 mm	43.95±3.56	45.39±3.04	36.72±3.87
0.25~2.00 mm	51.31±2.67	48.99±3.42	59.71±4.55
化学分级有机碳含量比率			
CF ₁	0.02±0.01	0.04±0.01	0.02±0.00
CF ₂	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00
CF ₃	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00
CF ₄	0.24±0.05	0.25±0.04	0.25±0.04
CF ₅	0.09±0.02	0.09±0.03	0.10±0.01
CF ₆	0.25±0.04	0.28±0.06	0.20±0.05
CF ₇	0.08±0.04	0.11±0.02	0.13±0.02
CF ₈	0.10±0.02	0.14±0.03	0.12±0.02
CF ₉	0.64±0.15	0.56±0.14	0.76±0.02

注: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为碳酸盐闭蓄有机碳,CF₇为土壤矿物强固持有机碳(铁氧化物),CF₈为土壤矿物强固持有机碳,CF₉为胡敏素碳。下同。
不同小写字母表示海拔梯度上各组分有机碳含量差异达到显著性水平($P<0.05$)。

图3 高山树线交错带化学分级土壤有机碳含量 (粒径<0.02 mm)

Fig.3 Soil organic carbon content in chemically graded alpine treeline ecotone

0.25~2 mm 有机碳,占比达到了59.71%,化学分级有机碳占比最大的为组分 CF₉,占比达到了0.76%。

由表 2 可以看出,对于含量<2%的有机-无机复合体有机碳,其中活性最低的组分 CF₉,即胡敏素碳的占比最高,占化学分级有机碳中的 37%~49%,占比最大的位置为 ATE 下沿,达到了48.42%;反而活性最高的组分 CF₁、CF₂,即可溶性有机碳的占比很低,最高的 ATE 中部组分 CF₁ 与 CF₂ 占比也不足 4%;虽然化学分级活性最低的胡敏素碳含量最高,但也仅占总有机碳的 0.6%~0.8%,主要以活性高的颗粒态有机碳形式存在,说明川西高山树线交错带地区土壤碳库活性很高,较不稳定。

表 2 有机-无机复合体中各化学分级有机碳占比

Table 2 Proportion of organic carbon in organic-inorganic complexes with different chemical grades %

有机碳组分	ATE 上沿	ATE 中部	ATE 下沿
CF ₁	1.10±0.18	2.97±0.86	1.07±0.20
CF ₂	0.38±0.02	0.58±0.05	0.39±0.02
CF ₃	0.38±0.03	0.56±0.08	0.39±0.04
CF ₄	16.76±1.20	16.68±0.53	15.61±1.77
CF ₅	6.42±0.22	5.81±1.69	6.33±0.32
CF ₆	17.66±1.17	19.05±3.41	12.23±2.45
CF ₇	5.21±1.73	7.67±1.62	8.20±1.06
CF ₈	7.36±0.81	9.65±1.88	7.34±0.51
CF ₉	44.72±3.21	37.05±3.53	48.42±4.81

3 结论与讨论

3.1 结论

川西高山树线交错带地区土壤有机碳存在形式主要是活性高的颗粒态有机碳(POC),占总有机碳的 98%以上,且主要集中在物理分级粒径 0.25~2 mm中;土壤粒径越大,有机碳含量越大。土壤有机-无机复合体中有机碳占比均低于总有机碳 2%,且主要集中在活性低的腐殖质(胡敏素,占总有机碳的 0.6%~0.8%),胡敏素碳比例远低于一般土壤。这显示川西高寒土壤有机碳活性高,腐殖化有机质比例极低。

川西高山树线交错带不同位置,颗粒态有机碳含量是 ATE 下沿显著低于 ATE 上沿和 ATE 中部,有机-无机复合体有机碳各组分含量是 ATE 下沿显著低于 ATE 上沿和 ATE 中部,或至少低于其中一处,这显示高海拔土壤有机碳,海拔越低活性越低;对于最稳定的腐殖质碳比例,ATE 下沿高于 ATE 上沿和 ATE 中部,这显示在树线交错带,海拔低的位置有机碳腐殖化比例越高。

川西高山树线交错带土壤总有机碳含量是海拔最高的 ATE 上沿最高,显示因受低温制约有机碳的矿质化和腐殖化均随海拔升高降低,有机碳在土壤中主要以活性高的颗粒态有机碳蓄积。如果树线位置随着气候变暖上移,土壤颗粒态有机碳矿质化和腐殖化程度提高,导致目前树线交错带土壤有机碳库总量降低而稳定性升高。

3.2 讨论

土壤有机碳的物理分组方法包括对土壤有机碳密度分组和颗粒大小分组。密度分组是以土壤在一定密度(1.6~2.5 g·mL⁻¹)溶液中将有机碳分组,分别称作轻组有机碳(LFOC,易分解有机碳)和重组有机碳(HFOC,稳定有机碳)。依据土壤有机碳的颗粒大小分组,有机碳可以分为有砂粒(>50 μm)、粗粉砂粒(20~50 μm)、细粉砂粒(2~20 μm)、粗粘粒(0.2~2 μm)和细粘粒(<0.2 μm)有机碳^[24],砂粒、粗粉砂粒、细粘粒组有机碳被认为是易分解有机碳,细粉砂粒和粗粘粒组中有机碳是惰性有机碳。

土壤有机碳化学分组一般采用传统的 NaOH 提取,此外还有使用特定化学试剂,从而溶解不同稳定性的土壤有机碳组分。由于 NaOH 提取后不溶组分占大部分土壤有机碳,P. Duchaufour^[25]提出进行进一步处理,包括用连二亚硫酸钠还原,用氢氟酸提取和密度分级。M. Schnitzer 等^[26]使用有机溶剂提取脂质后,用粒径大小分级和焦磷酸钠-氢氧化钠序列化学分级。

本研究将粒径分级和化学分级 2 种方法进行衔接和完善,与本研究方法最接近是 S. J. González 等^[27]的方法,主要有 3 点不同:1)在水溶性有机碳(DOC)初始提取时使用 0.5 mol·L⁻¹ 硫酸钾^[18],避免高估四硼酸钠提取有机质组分;2)用粒径分级代替密度分级的方法,有机碎屑被分离作为颗粒态有机碳(POC,≥0.02 mm)^[28]。密度分级包含改变土壤有机碳性质的化学物质,而粒径分级只要求水洗。3)本研究提到的分离方法尽可能将不同活性的有机碳组分分离开来,使对于不同组分的有机碳的量化成为可能,不同活性的有机碳对于气候变化的响应更易获得信息并进行分析,有利于系统地研究气候变化对土壤有机碳的影响机制。

颗粒态有机碳(POC)具较高生物活性,是土壤中不稳定有机碳库,很多研究显示高山低温土壤有机碳中颗粒态有机碳比例很高,因此高寒土壤有机碳有很高的不稳定性。由 B. T. Christensen^[29]研究显示,在温带土壤中颗粒态有机碳(20~2 000 μm)占土壤有机质<10%。在寒带不同地区有机层大部

分都是活性有机碳,活性碳库的变化范围是总碳库的 16%~49%。B. Zollinger 等^[30]对瑞士阿尔卑斯高山土壤的研究显示冻土层自由态(59%)和结合态(27%)有机碳占土壤总有机碳 86%;非冻土层自由态(42%)和结合态(16%)有机碳占土壤总有机碳 58%。本研究土壤有机质中颗粒态有机碳约占总有机碳 98%,高于阿尔卑斯山脉和其他寒带土壤。

有机质中胡敏素通常占土壤总有机碳比例超过 50%^[31]。森林土壤中不溶于氢氟酸的胡敏素(腐殖质)超过 12%^[32],C. Lope 等^[22]的研究中发现西班牙土壤不溶性胡敏素最高占有机质比例为 32%。B. Zollinger 等^[30]研究结果显示高寒土壤冻土区稳定有机碳比例为 13%,亚高山非冻土为 9%。本研究分析结果显示,川西高山树线交错带土壤胡敏素含量远低于其他研究。因此,不论是从 POC 占有机碳比例,还是从胡敏素占有机碳比例,川西高海拔土壤有机碳的不稳定性均高于阿尔卑斯等高山土壤,不稳定性也高于很多高纬度土壤有机碳。这与一些前期研究青藏高原东缘高山土壤有机碳的结果一致^[21]。

参考文献:

[1] 宋彦彦,张言,赵忠林,等. 长白山西部不同林型土壤有机碳和全氮的分布特征[J]. 西北林学院学报,2018,33(3):39-44.
SONG Y Y,ZHANG Y,ZHAO Z L,*et al.* Distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen of different forest types in the west of Changbai Mountain [J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(3):39-44. (in Chinese)

[2] BERG E V D,REICH P. Organic carbon in soils of the world [J]. Soil Science Society of America Journal,1993,57(1):192-194.

[3] SCHARLEMANN J P W,TANNER E V J,HIEDERER R,*et al.* Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool[J]. Carbon Management,2014,5(1):81-91.

[4] 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 active 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)

[5] STOCKMANN U,ADAMS M A,CRAWFORD J W,*et al.* The knowns,known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon[J]. Agriculture,Ecosystems & Environment,2013,164(Complete):80-99.

[6] LÜTZOW M,KÖGEL I,EKSCHMITT K,*et al.* Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions-a review [J]. European Journal of Soil Science,2006,57(4):426-445.

[7] KONG A Y Y,SIX J,BRYANT D C,*et al.* The relationship between carbon input,aggregation,and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems[J]. Soil Science Society of America Journal,2005,69(4):1078-1085.

[8] PLAZA C,COURTIER D,FERNÁNDEZ J M,*et al.* Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: a central role for microbes and microbial by-products in C sequestration[J]. Soil Biology and Biochemistry,2013,57:124-134.

[9] 戴全厚,刘国彬,薛莲,等. 侵蚀环境退耕撂荒地土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J]. 西北林学院学报,2008,23(6):24-28.
DAI Q H,LIU G B,XUE S,*et al.* Active organic matter and carbon pool management index of soil at the abandoned cropland in erosion environment[J]. Journal of Northwest Forestry University,2008,23(6):24-28. (in Chinese)

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

[11] CHRISTENSEN,BENT T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates [J]. Advances in Soil Science,1992(20):1-90.

[12] BUYANOVSKY G A,ASLAM M,WAGNER G H. Carbon turnover in soil physical fractions[J]. Soil Science Society of America Journal,1994,58(4):1167-1173.

[13] MUTUO P K,SHEPHERD K D,ALBERCHT A,*et al.* Prediction of carbon mineralization rates from different soil physical fractions using diffuse reflectance spectroscopy[J]. Soil Biology and Biochemistry,2006,38(7):1658-1664.

[14] BALESDENT J,BESNARD E,ARROUAYS D,*et al.* The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence[J]. Plant and Soil,1998,201(1):49-57.

[15] JANZEN H H,CAMPBELL C A,BRANDT S A,*et al.* Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. Soil Science Society of America Journal,1992,56(6):1799-1806.

[16] MCLAUCHLAN K K,HOBBIE S E. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques[J]. Soil Science Society America Journal,2004,68(5):1616-1625.

[17] SIX J,ELLIOTT E T,PAUSTIAN K,*et al.* Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1998,62(5):1367-1377.

[18] JONES D L,WILLETT V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry,2006,38(5):991-999.

[19] WATTEL E J W,BUURMAN P,DER J V,*et al.* Mean residence time of soil organic matter associated with kaolinite and smectite[J]. European Journal of Soil Science,2003,54(2):269-278.

[20] TRUMBORE S. Age of soil organic matter and soil respiration: radiocarbon constraints on belowground C dynamics[J]. Ecological Applications,2000,10(2):399-411.

[18] ORIGO N,CALDER K,NIGHTINGALE J,*et al.* Influence of levelling technique on the retrieval of canopy structural parameters from digital hemispherical photography [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*,2017,237:143-149.

[19] WOODGATE W,ARMSTON J D,DISNEY M,*et al.* Quantifying the impact of woody material on leaf area index estimation from hemispherical photography using 3D canopy simulations [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*,2016,226:1-12.

[20] LIU Z,WANG C,CHEN J M,*et al.* Empirical models for tracing seasonal changes in leaf area index in deciduous broadleaf forests by digital hemispherical photography [J]. *Forest Ecology & Management*,2015,351:67-77.

[21] 区余端,苏志尧. 粤北山地常绿阔叶林自然干扰后冠层结构空间异质性动态 [J]. *植物科学学报*,2012,30(3):223-229.

OU Y D,SU Z Y. Spatial heterogeneity dynamics of canopy structure in a montane evergreen broadleaved forest following a natural disturbance in north Guangdong[J]. *Plant Science Journal*,2012,30(3):223-229. (in Chinese)

[22] 贾小容,苏志尧,区余端,等. 三种人工林分的冠层结构参数与林下光照条件 [J]. *广西植物*,2011,31(4):473-478.

JIA X R,SU Z Y,OU Y D,*et al.* ,Canopy structural parameters and understory light regimes of 3 artificial forest stands in south China[J]. *Guhaia*,2011,31(4):473-478. (in Chinese)

[23] YAMAMOTO S I. Forest gap dynamics and tree regeneration [J]. *Journal of Forest Research*,2000,5(4):223-229.

[24] MUSCOLO A,BAGNATO S,SIDARI M,*et al.* A review of the roles of forest canopy gaps [J]. *Journal of Forest Research*,2014,25(4):725-736.

[25] 王永强,蔡燕茹,曾焕忱,等. 不同林冠开度下亚热带林下植物的组成和多样性 [J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*,2016,44(5):64-72.

WANG Y Q,CAI Y R,ZENG H C,*et al.* ,Composition and diversity of understory plant species in subtropical forests under different canopy openness[J]. *Journal of Northwest A&F University:Natural Science Edition*,2016,44(5):64-72. (in Chinese)

[26] BODE C A,COLLIN A,MICHAEL P,*et al.* Subcanopy solar radiation model: predicting solar radiation across a heavily vegetated landscape using LiDAR and GIS solar radiation models [J]. *Remote Sens Environment*,2014,154:387-397.

[27] ALEXANDER C,MOESLUND J E,BÖCHER P K,*et al.* Airborne laser scanner (LiDAR) proxies for understory light conditions [J]. *Remote Sens Environment*,2013,134(5):152-161.

[28] 朱良宽,刘亮,东旭,等. 基于 DSP 的林木冠层图像采集与处理系统[J]. *森林工程*,2018,34(1):60-64.

ZHU L K,LIU L,DONG X,*et al.* Forest canopy image acquisition and processing system based on DSP[J]. *Forest Engineering*,2018,34(1):60-64. (in Chinese)

[29] CHAZDON R L,PEARCY R W. The Importance of sunflecks for forest understory plants: photosynthetic machinery appears adapted to brief,unpredictable periods of radiation [J]. *Bioscience*,1991,41(11):760-766.

[30] 区余端,苏志尧. 粤北山地常绿阔叶林自然干扰后冠层结构与林下光照动态 [J]. *生态学报*,2012,32(18):5637-5645.

OU Y D,SU Z Y. Dynamics of canopy structure and understory light in montane evergreen broadleaved forest following a natural disturbance in north Guangdong[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2012,32(18):5637-5645. (in Chinese)

[31] PROMIS A,SCHINDLER D,REIF A,*et al.* Solar radiation transmission in and around canopy gaps in an uneven-aged *Nothofagus betuloides* forest [J]. *International Journal of Biometeorology*,2009,53(4):355-367.

(上接第 7 页)

[21] LEIFELD J,KÖGEL I. Organic carbon and nitrogen in fine soil fractions after treatment with hydrogen peroxide[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2001,33(15):2155-2158.

[22] LOPE 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.

[23] 秦纪洪,王琴,孙辉,等. 高山树线交错带及其对全球气候变化的响应研究进展[J]. *浙江林业科技*,2012,32(1):63-70.

[24] ANDERSON D W,SAGGAR S,BETTANY J R,*et al.* Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter:I. The nature and distribution of forms of carbon,nitrogen,and sulfur[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1981,45(4):767-772.

[25] DUCHAUFOUR P. Dynamics of organic matter in soils of temperate regions; its action on pedogenesis[J]. *Geoderma*,1976,15(1):31-40.

[26] SCHNITZER M,SCHUPPLI P. Method for the sequential extraction of organic matter from soils and soil fractions[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1989,53(5):1418-1424.

[27] GONZÁLEZ S J,CARBALLAS T. Modified method for the fractionation of soil organic nitrogen by successive hydrolyses [J]. *Soil Biology and Biochemistry*,1988,20(1):1-6.

[28] ROVIRA P,JORBA M,ROMANYÀ J. Active and passive organic matter fractions in Mediterranean forest soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*,2010,46(4):355-369.

[29] CHRISTENSEN B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover [J]. *European Journal of Soil Science*,2001,52(3):345-353.

[30] ZOLLINGER B,ALEWELL C,KNEISEL C,*et al.* Effect of permafrost on the formation of soil organic carbon pools and their physical-chemical properties in the eastern Swiss Alps [J]. *Catena*,2013,110:70-85.

[31] SONG G,HAYES M H B,NOVOTNY E H,*et al.* Isolation and fractionation of soil humin using alkaline urea and dimethylsulphoxide plus sulphuric acid[J]. *Naturwissenschaften*,2011,98(1):7-13.

[32] MIKUTTA R,KLEBER M,TORN M S,*et al.* Stabilization of soil organic matter: association with minerals or chemical recalcitrance[J]. *Biogeochemistry*,2006,77(1):25-56.