

云南哀牢山湿性常绿阔叶林土壤碳分布特征

赵双梅¹, 刘宪斌^{1,2}, 李红梅^{1,2}, 董文彩¹, 沈健萍¹, 包金美¹, 梁芳¹, 鲁美¹

(¹玉溪师范学院化学生物与环境学院, 云南玉溪 653100;

²玉溪师范学院化学生物与环境学院/生物与环境工程研究院, 云南玉溪 653100)

摘要:通过调查亚热带森林生态系统中各类属性土壤碳在2种不同类型土壤剖面中的分布规律, 分析和探讨原生土和淤积土在森林土壤碳循环过程中发挥的重要作用。本研究地点位于云南省哀牢山亚热带中山湿性常绿阔叶原生林生态系统, 以海拔高度较高的上游森林原生土和海拔高度较低的下游灌草淤积土为采样点, 沿着土壤剖面分层取样, 重点研究土壤剖面根层(0~45 cm)土壤中全碳、活性有机碳、微生物量碳、可溶性碳和水溶性碳的垂直分布规律。研究表明: 本研究过程中所调查的5类不同属性土壤碳在两种不同类型土壤剖面中均呈衰减指数式分布。土壤全碳、活性有机碳和水溶性碳在淤积土中的平均含量均显著高于原生土; 土壤微生物量碳在2种类型土壤剖面中的平均含量差异不显著; 而土壤可溶性碳在淤积土中的含量显著低于原生土, 说明在哀牢山亚热带中山湿性常绿阔叶原生林生态系统中原生土和淤积土在储存不同属性土壤碳和碳循环方面发挥着不同作用。本研究结果充分证明不同属性土壤碳在同一亚热带森林生态系统不同类型土壤剖面中虽然垂直分布规律一致, 但是平均储量存在着明显的空间异质性, 这为全球热带和亚热带森林生态系统中土壤碳库不同属性土壤碳的估算和不同类型土壤碳循环的研究提供新的理论依据和研究方向。

关键词:土壤全碳; 土壤活性有机碳; 土壤微生物量碳; 土壤可溶性碳; 土壤水溶性碳; 哀牢山亚热带常绿阔叶林; 原生土; 淤积土

中图分类号: S714.2

文献标志码: A

论文编号: casb2021-0354

Distributional Characteristics of Soil Carbon in Moist Evergreen Broad-leaved Forest in Ailao Mountains of Yunnan Province

ZHAO Shuangmei¹, LIU Xianbin^{1,2}, LI Hongmei^{1,2}, DONG Wencai¹,

SHEN Jianping¹, BAO Jinmei¹, LIANG Fang¹, LU Mei¹

(¹School of Chemistry, Biology and Environment, Yuxi Normal University, Yuxi, Yunnan 653100;

²Institute of Biology and Environmental Engineering, School of Chemistry, Biology and Environment, Yuxi Normal University, Yuxi, Yunnan 653100)

Abstract: By investigating the distributional pattern of soil carbon with various properties in two types of soil profile in a subtropical forest ecosystem, the primary soil and warp soil were analyzed and explored for their important roles in the process of soil carbon cycle. We conducted the study in a subtropical mountainous moist evergreen broad-leaved forest in the Ailao Mountains of Yunnan Province, took the primary soil in the forest area with high altitude and the warp soil in the shrubby-meadow area with low altitude as sampling sites,

基金项目: 云南省教育厅大学生创新创业训练计划项目“通过修改营养液配方来调控观赏树木的花期和花量”(2019A02); 云南省教育厅科学研究基金项目“教师类项目”(2019J0739)。

第一作者简介: 赵双梅, 女, 1997年出生, 云南临沧人, 本科在读, 研究方向: 热带森林生态系统土壤碳循环和养分循环、植物营养。通信地址: 653100 云南省玉溪市红塔区凤凰路134号 玉溪师范学院化学生物与环境学院, Tel: 0877-2052169, E-mail: 2903281279@qq.com。

通讯作者: 刘宪斌, 男, 1981年出生, 河北邯郸人, 讲师, 博士后, 主要从事热带森林生态系统土壤碳循环和养分循环、热带森林生态系统干旱干扰、植物营养等方面的研究。通信地址: 653100 云南省玉溪市红塔区凤凰路134号 玉溪师范学院化学生物与环境学院, Tel: 0877-2052169, E-mail: liuxianbin@yxnu.edu.cn。

收稿日期: 2021-04-04, 修回日期: 2021-07-08。

collected soil samples in different soil layers along the two types of soil profile, and focused on the vertical distribution pattern of soil carbon with various properties including soil total organic carbon, labile organic carbon, microbial biomass carbon, dissolved carbon and water dissolved carbon in the soil layers with most plant roots (0–45 cm). The results show that the concentrations of all determined soil carbon with different properties decrease exponentially along the two types of soil profile. The concentrations of soil total organic carbon, labile organic carbon and water dissolved carbon in the warp soil are statistically higher than those in the primary soil; the concentration of soil microbial biomass carbon is not statistically different between the two types of soil; and the concentration of dissolved carbon in the warp soil is significantly lower than that in the primary soil, indicating that the primary and warp soil play different roles in storing and circulating soil carbon with different properties in the subtropical mountainous moist evergreen broad-leaved forest ecosystem in the Ailao Mountains. The results adequately demonstrate that although the vertical distribution pattern of soil carbon with various properties in different soil profiles of the same subtropical forest ecosystem is consistent, the average storage has obvious spatial heterogeneity. The paper could provide a new theoretical basis and research direction for the estimation of soil carbon with different properties in the global tropical and subtropical forest ecosystems and the study on soil carbon cycle in different types of soil profile.

Keywords: soil total organic carbon; soil labile organic carbon; soil microbial biomass carbon; soil dissolved carbon; soil water dissolved carbon; subtropical evergreen broad-leaved forest in the Ailao Mountains; primary soil; warp soil

0 引言

土壤是地球上所有陆地生态系统各个组成部分中最大的碳库,贮存于其1 m深度之内的有机碳总量超过了陆地上所有植被和大气中有机碳的总和,达到1500 Gt^[1-3]。在对分布于全球各地不同类型自然生态系统157个深度为1 m的土壤剖面中有机碳数据分析的过程中发现,不同纬度和植被类型的土壤剖面中有机碳的平均含量和分布规律也不相同^[2]。在中国,已经有研究证明土壤是一个巨大的碳库,储量约为 924.18×10^8 t,平均碳密度为 10.53 kg/m^2 ^[4]。在1979—1984年间进行的第二次全国土壤普查的实测结果显示,中国东部地区土壤有机碳含量随着纬度的增加而增加,西部地区随着纬度的增加而减少,北部地区随着经度的增加而增加,3个地区之间的土壤有机碳储量差异较大^[4]。针对此次调查的2473个土壤剖面中有机碳数据和中国植被分布图进行分析,结果表明不同植被下的土壤有机碳含量差异明显(森林17.39 Gt,农田14.69 Gt,灌丛13.62 Gt,草甸12.22 Gt,草原7.46 Gt,荒漠3.93 Gt)^[4-5]。即使在同一个陆地自然生态系统中,不同位置和类型的土壤剖面中有机碳含量也会显著不同^[6]。对于森林生态系统领域的相关研究人员来说,能够更加清楚地了解各种类型土壤剖面中不同属性土壤碳的分布规律,对于更加准确地估算森林生态系统土壤剖面中的碳储量和研究碳循环至关重要。

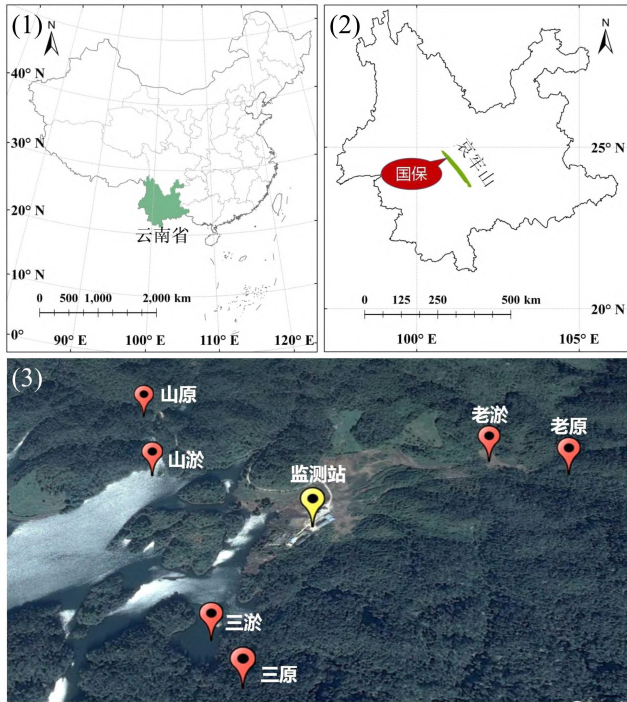
中山湿性常绿阔叶林是我国常绿阔叶林的重要组

成部分。由于其特殊的地理位置、气候条件和植被类型,中山湿性常绿阔叶林在土壤碳库和碳循环等方面也有着其独有的特征^[7-9]。陡峭山地等地理地势条件和温暖湿润等气候条件容易在森林生态系统中发育成上游原生土和下游淤积土两种类型土壤^[6,10]。长期以来,由于处于山地上游的原生土占据森林生态系统中的绝大部分面积,分布于生态系统下游区域较小的淤积土并没有受到研究人员的足够重视,因此,关于中山湿性常绿阔叶林森林生态系统中原生土和淤积土土壤剖面中各种不同属性土壤碳分布规律的对比研究相对较少。本研究以云南省哀牢山中山湿性常绿阔叶林为研究地点,选择生态系统中上游原生土和下游淤积土为研究对象,测定植物根层土壤(0~45 cm)中不同属性的土壤碳含量,分析植物根层土壤中土壤全碳、活性有机碳、土壤微生物量碳、可溶性碳和水溶性碳的垂直分布规律,以期补充和拓展中国在中山湿性常绿阔叶林森林生态系统中对不同属性土壤碳库和碳循环等领域的相关研究。

1 材料与方法

1.1 样地信息

本研究选择在云南省哀牢山徐家坝地区的亚热带中山湿性常绿阔叶林生态系统中进行(图1)。徐家坝地区位于哀牢山国家自然保护区内,中心位置 $24^{\circ}32'N$, $101^{\circ}01'E$,平均海拔2450 m左右,也是中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站和云南哀牢山森林生



(1)中深绿色区域为中国云南省;(2)中浅绿色区域为哀牢山脉,“国保”是哀牢山国家自然保护区的缩写形式;(3)中“老原”和“老淤”分别是老君山神山谷上游原生土和下游淤积土的缩写形式,“三原”和“三淤”分别是三棵树山谷上游原生土和下游淤积土的缩写形式,“山原”和“山淤”分别是山门口山谷上游原生土和下游淤积土的缩写形式,“监测站”是云南哀牢山森林生态系统国家野外科学观测研究站和中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站的缩写形式

图1 位于中国云南省哀牢山国家自然保护区内许家坝地区6个采样点的物理位置

态系统国家野外科学观测研究站所在位置。该地区位于西南季风气候区,属于典型的亚热带山地气候。年平均气温为11.3℃,7月为全年最热月份,平均气温为15.3℃;1月为全年最冷月份,平均气温为5.0℃^[11]。年平均降水量为1930 mm左右,干湿季节交替明显,干季从每年的11月持续到第二年的4月,降水量占全年总降水量的15%左右;湿季从每年的5月持续到当年

的10月,降水量占全年总降水量的85%左右^[12]。土壤母质由古生代板岩、微晶片岩、绿泥片岩、石英片岩、石英岩等组成。土壤多为山地棕壤和黄棕壤^[10]。0~30 cm土层中pH 4.2~4.5,有机质含量为5%~9%,土壤有机碳含量约为5.03%,氮含量约为0.35%,磷含量约为0.07%,钾含量约为0.37%^[13]。该森林生态系统属于原生林,以云南景东当地特有植物种为森林生态系统优势种和建群种,优势树种主要有景东石栎(*Lithocarpus chintungensis* Y. C. Hsu et H. J. Qian)、薄叶马银花(*Rhododendron leptothrium* Balf. f. et Forrest)、乌饭(*Vaccinium dudouxii* Thunb.)、木果石栎[*Lithocarpus xylocarpus* (kurz) markg.]、腾冲栲(*Castanopsis wattii*)、滇木荷等(*Schima reinw. ex Bl.*),林下灌木主要以华西箭竹[*Sinarundinaria nitida* (Mitford ex Stapf) Nakai]为主^[13]。

1.2 采样方法

在云南哀牢山森林生态系统国家野外科学观测研究站和中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站附近,围绕许家坝地区杜鹃湖,本研究选择3个相邻的、同时具有上游原生土和下游淤积土的山谷为野外样地确定土壤剖面采样点,当地人分别称之为:山门口、老君山神和三棵树(图1)。在每一个山谷的上游原生土分布区域和下游淤积土分布区域分别选择一个地点垂直挖掘土壤剖面。3个山谷和6个采样点的基本信息如表1所示。在哀牢山中山湿性常绿阔叶原生林生态系统中,由于绝大部分植物根系分布于0~45 cm土层内,本研究中土壤样品的采集也是集中在这一范围的土层内,并且按照5个土层依次进行分层采样:0~5、5~15、15~25、25~35、35~45 cm。

1.3 指标测定

土壤颗粒组成按照美国农业部土壤质地分类方法测定^[14-15]。土壤有机碳含量按照重铬酸钾氧化-外加热法测定^[16-17]。土壤活性有机碳按照连续熏蒸培养方法测定^[18-19]。土壤微生物量碳含量按照熏蒸滴定法测

表1 位于中国云南省哀牢山国家自然保护区内许家坝地区6个采样点的基本信息

山谷	土壤类型	地理坐标	海拔/m a.s.l.	坡向	坡度/°	植被类型
山门口	原生土	24°32'48.38"N; 101°01'21.37"E	2511	东	26.6	原生林
	淤积土	24°32'42.08"N; 101°01'25.27"E	2489	西南	9.6	稀疏灌木草地
老君山神	原生土	24°32'49.68"N; 101°01'58.50"E	2513	西南	22.3	原生林
	淤积土	24°32'50.53"N; 101°01'52.11"E	2490	西	3.8	稀疏灌木草地
三棵树	原生土	24°32'25.28"N; 101°01'40.29"E	2514	东北	38.3	原生林
	淤积土	24°32'28.35"N; 101°01'36.70"E	2489	北	8.1	稀疏灌木草地

定^[19-20]。土壤可溶性碳按照溶解离心法测定^[21-22]。土壤水溶性碳按照离心过滤法测定^[23-24]。

1.4 数据分析

笔者用衰减指数方程式分别拟合土壤全碳、活性有机碳、微生物量碳、可溶性碳和水溶性碳与土壤剖面深度之间的线性关系,公式如(1)所示。

$$Y=A \times e^{-BX} / y=a \times e^{-bx} \dots\dots\dots (1)$$

其中, $Y(y)$ 分别代表原生土(淤积土)中土壤全碳、活性有机碳、微生物量碳、可溶性碳和水溶性碳等指标的含
量,单位为g/kg; $X(x)$ 代表原生土(淤积土)中土壤剖面的深度,单位为cm; $A(a)$ 代表在原生土(淤积土)土壤表层土中这些土壤碳达到的最大值,单位为g/kg; $B(b)$ 代表这些不同属性土壤碳在原生土(淤积土)土壤剖面中随着土层深度的衰减速率。

本研究中所有数据用Excel 2017 分别进行前期分析处理和后期作图,用SPSS 20.0 软件进行统计学分析。

2 结果与分析

2.1 土壤质地和有机质

土壤含水量、质地和有机质含量在原生土和淤积土2种不同类型土壤剖面中含量差异明显(表2)。土壤含水量在原生土中的最大值为37.02(±1.54)%,平均值为34.03(±0.96)%;在淤积土中的最大值为54.06(±3.24)%,平均值为43.07(±3.23)%;原生土土层中的土壤最大含水量和平均含水量都显著低于淤积土。沿着两种不同类型的土壤剖面,土壤含水量总体上随着土层深度的增加而减少。两种类型土壤质地都以沙粒为主,其中原生土最大含量为91.04(±0.83)%,平

均值为90.63(±0.23)%;淤积土最大含量为92.18(±0.94)%,平均值为91.45(±0.20)%;2种类型土壤土层中沙粒的最大值和平均值差异不显著。壤粒平均含量占比在原生土中为7.17(±0.10)%,在淤积土中为6.68(±0.21)%。土壤黏粒的平均含量在原生土中为2.20(±0.16)%,显著高于淤积土的1.87(±0.11)%。土壤质地组成在两种不同类型土壤剖面中的垂直分布规律并不明显。

土壤有机质含量在两种类型土壤剖面中的分布规律一致,都是随着土壤深度的增加而减少(表2)。原生土中土壤有机质含量的最大值为167.67(±4.17) g/kg,最小值为30.19(±1.01) g/kg,平均值为75.64(±14.83)%;淤积土中土壤有机质含量的最大值为192.38(±14.35) g/kg,最小值为47.67(±1.27) g/kg,平均值为90.95(±15.45)%。2种不同类型土壤剖面中同一土层中,淤积土土壤有机质含量均显著高于原生土土壤。

2.2 土壤全碳和活性有机碳

土壤全碳含量在原生土和淤积土两种不同类型土壤剖面中均以衰减指数规律垂直分布,其中在原生土土壤剖面中的衰减系数为0.046,略大于淤积土土壤剖面中衰减系数0.035(图2)。除了5~15 cm的土层外,虽然淤积土土壤剖面中每一层土壤全碳的含量均明显高于相对应土壤深度的原生土土壤,但平均含量在2种不同类型土壤中的差异并不显著,原生土为43.88(±7.92) g/kg,淤积土为52.75(±8.65) g/kg。

土壤活性有机碳含量在原生土和淤积土2种不同类型土壤剖面中以不同的衰减速率指数方式垂直分布,在淤积土土层中的衰减系数为0.042,显著高于原

表2 哀牢山中山湿性常绿阔叶原生林原生土和淤积土的土壤质地组成和有机质含量

土壤类型	土层/ cm	土壤含水量/ % (±SE)	土壤质地/(±SE)			土壤有机质/ (g/kg)(±SE)
			沙粒	壤粒	黏粒	
原生土	0~5	37.02 (1.54)	90.02 (0.62)	7.24 (0.34)	2.74 (0.31)	167.67 (4.17)
	5~15	35.34 (0.86)	91.04 (0.83)	7.00 (0.38)	2.00 (0.45)	94.57 (4.09)
	15~25	32.40 (0.66)	91.03 (0.67)	7.00 (0.52)	2.00 (0.27)	52.03 (1.84)
	25~35	31.80 (0.47)	90.98 (0.11)	7.15 (0.26)	1.88 (0.20)	33.76 (1.63)
	35~45	33.60 (0.23)	90.09 (0.37)	7.49 (0.08)	2.42 (0.37)	30.19 (1.01)
淤积土	0~5	54.06 (3.24)	91.01 (0.57)	7.01 (0.29)	1.97 (0.57)	192.38 (14.35)
	5~15	45.62 (3.03)	91.46 (0.84)	6.51 (0.29)	2.04 (0.55)	96.19 (5.58)
	15~25	41.36 (3.69)	92.18 (0.94)	6.03 (0.62)	1.79 (0.35)	67.51 (2.41)
	25~35	39.28 (5.31)	91.30 (0.83)	7.23 (0.60)	1.47 (0.22)	50.98 (2.20)
	35~45	35.03 (3.63)	91.30 (1.28)	6.63 (1.12)	2.06 (0.16)	47.67 (1.27)

注:圆括号中的数字为标准误。

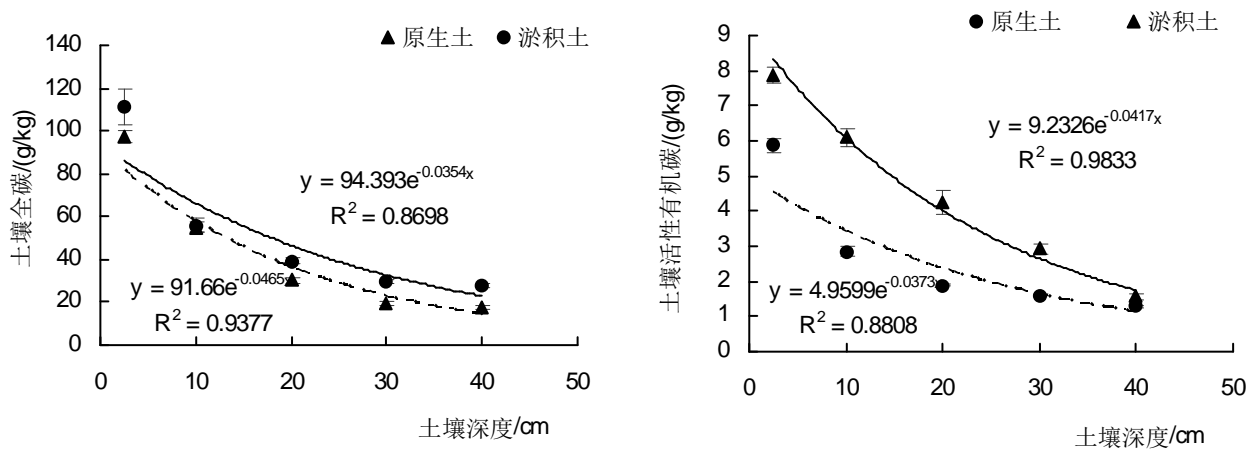


图2 哀牢山中山湿性常绿阔叶原生林原生土和淤积土中土壤全碳和活性有机碳与土壤深度的指数关系

生土中0.037(图2)。除了35~45 cm土层外,淤积土土壤剖面中各个土层活性有机碳含量均显著高于相对应的原生土土层,其中均以表层土含量为最高,淤积土为7.84(±0.23) g/kg,原生土为5.88(±0.19) g/kg。

律分布,衰减系数在原生土土层中为0.024,明显低于淤积土中的0.046(图4)。在各个土层中,原生土中的土壤可溶性碳含量都显著高于相对应深度土层的淤积

2.3 土壤微生物量碳

土壤微生物量碳含量在原生土和淤积土2种不同类型土壤剖面中均呈衰减指数方式分布,衰减系数和各个土层中的微生物量碳含量在两种不同类型土壤剖面中相对应的土层中差异均不显著(图3)。在2种类型土壤剖面中,表层土壤中微生物量碳含量最高,约为1.85 g/kg左右;35~45 cm土层中微生物含量最低,约为0.30 g/kg左右。

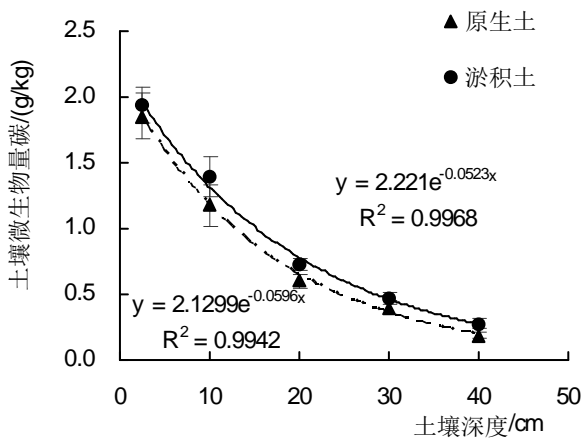
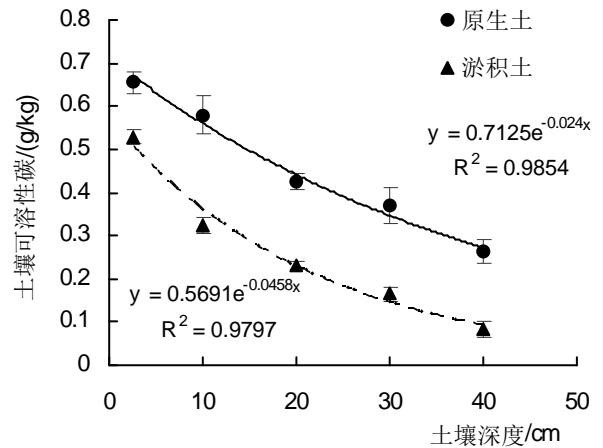


图3 哀牢山中山湿性常绿阔叶原生林原生土和淤积土中土壤微生物量碳与土壤深度的指数关系

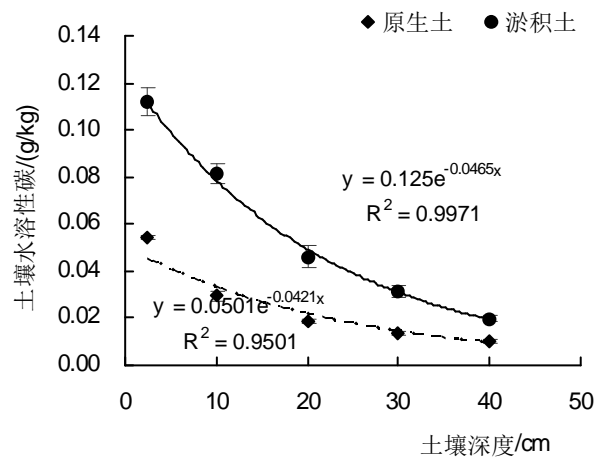


图4 哀牢山中山湿性常绿阔叶原生林原生土和淤积土中土壤可溶性有机碳和水溶性有机碳与土层深度的指数关系

2.4 土壤可溶性碳和水溶性碳

土壤可溶性碳含量在原生土和淤积土两种不同类型土壤剖面中随着土层深度的增加而呈指数型衰减规

土中的可溶性碳含量。土壤可溶性碳在原生土土壤剖面中的最大值为 $0.66(\pm 0.03)$ g/kg, 平均值为 $0.46(\pm 0.07)$ g/kg; 在淤积土土壤剖面中的最大值为 $0.53(\pm 0.02)$ g/kg, 平均值为 $0.27(\pm 0.08)$ g/kg。

土壤水溶性碳含量在原生土和淤积土两种不同类型土壤剖面中均呈衰减指数形式垂直分布, 衰减系数在原生土中为 0.042 , 在淤积土中为 0.047 (图4)。在2种不同类型土壤剖面相对应的各个土层中, 淤积土中的水溶性碳含量均显著高于相对应土层中原生土的水溶性碳含量。在淤积土中, 水溶性碳含量最高值为 $0.11(\pm 0.01)$ g/kg, 平均值为 $0.06(\pm 0.02)$ g/kg; 在原生土中, 水溶性碳含量最高值为 $0.06(\pm 0.01)$ g/kg, 平均值为 $0.03(\pm 0.01)$ g/kg。

3 结论

(1) 土壤全碳、活性有机碳、微生物量碳、可溶性碳和水溶性碳在云南省哀牢山中山湿性常绿阔叶原生林生态系统中高海拔森林区域的原生土和低海拔灌草区域的淤积土根层(0~45 cm)土壤剖面中均呈衰减指数型垂直分布。就本研究中所测定的5种不同属性土壤碳平均数值来说, 土壤全碳数值最大, 活性有机碳和微生物量碳次之, 可溶性碳和水溶性碳最小; 就本研究中原生土和淤积土2种不同类型土壤来说, 原生土土壤剖面各土层中可溶性碳含量显著高于淤积土土壤剖面中相对应土层的含量, 微生物量碳在两种不同类型土壤剖面中相对应各土层中的含量没有显著差异, 原生土土壤剖面各土层中土壤全碳、活性有机碳和水溶性碳均显著低于淤积土土壤剖面中相对应土层的含量(5~10 cm的土壤全碳和35~45 cm土壤活性有机碳除外)。

(2) 本研究中, 土壤全碳和微生物量碳含量沿着2种类型土壤剖面呈现衰减形式垂直分布的规律符合前人的研究成果, 活性有机碳、可溶性碳和水溶性碳含量均沿着两种类型土壤剖面呈现衰减形式垂直分布的规律是对森林生态系统土壤碳储量和碳循环研究领域的扩展和补充, 为全球热带和亚热带森林生态系统不同类型土壤剖面中土壤碳库各组分中不同属性土壤碳的估算和不同类型土壤碳循环的研究提供新的理论依据和研究方向。

(3) 本研究中涉及到的6个采样区域植物根系主要分布在0~45 cm土层内, 但是在采样过程中发现45 cm深度以下高海拔森林原生土区域乔木树种的根系数量明显多于低海拔灌草淤积土区域的灌木和草本植物根系数量, 因此, 对于45 cm深度以下至土壤母质层中土壤全碳、活性有机碳、微生物量碳、可溶性碳和

水溶性碳含量和分布规律在2种不同类型土壤中的分布规律应该有明显差异, 这些研究假设和工作内容应该成为下一步研究的重点。

4 讨论

自然状态下, 森林生态系统中土壤碳含量主要由2个因素决定: 地上部有机碳输入量和地下部土壤碳输出量, 土壤碳储量是两者互相作用和动态平衡的结果^[25-27]。地上部有机碳输入的主要来源是森林生态系统中地上部植被在完成其生命周期过程中某一阶段或全部后所产生的凋落物和通过根系产生的分泌物; 地下部土壤碳输出主要包括土壤一些生物理化性状变化过程中产生的土壤呼吸和随着水分流失而淋溶掉的碳^[13, 28]。由森林生态系统地上部植被产生的大量植物有机残体在转化为土壤碳之前都需要经过土壤微生物的分解和转化, 而决定森林土壤微生物总量和多样性的因素又包括一系列生物和土壤理化性状, 如植物种类、气候、土壤矿物质-有机质胶体、地势、土壤空气、温湿度、土壤结构、养分、pH和Eh值等^[28-30]。由于这些环境因素和森林植被根系在土壤剖面中的垂直分布差异, 造成土壤微生物总量和多样性在土壤剖面中的垂直空间分布规律。严登华等^[31]在滦河流域25个土壤样点观测到的结果是土壤微生物量碳随着土壤剖面深度的增加基本上呈衰减指数式分布。罗明等^[32]在新疆天山云杉林区的两个不同土壤林区中发现土壤微生物在土壤剖面中的垂直分布趋势一致: 表层土壤各类微生物种类最多, B层土壤向下微生物数量急剧减少, C层土壤中各类微生物数量极少。这些前人研究结果与本研究的最后结果基本一致: 土壤微生物量碳在土壤剖面中呈衰减指数式分布(图3)。综合这些生物和非生物因子, 土壤全碳含量在森林土壤剖面中的衰减指数式分布也可以得到理解。其实, 在与哀牢山位于相似纬度、具有相似地形地势条件、气候类型和森林植被组成的广东鼎湖山生物保护区内的6个土壤剖面中, 经研究, 土壤全碳的含量也全部都是呈衰减指数式分布^[33]。在本研究中, 除了土壤全碳和微生物量碳, 土壤活性碳、可溶性碳和水溶性碳在哀牢山中山湿性常绿阔叶原生林两种不同类型土壤剖面中也呈衰减指数式分布, 这说明在森林土壤剖面中土壤碳库的各个组分都是随着土壤深度的增加而呈衰减指数型减少, 而且各个碳组分减少的比例可能相似。

从成土来源角度分析, 处于森林生态系统上游的原生土主要来源于土壤剖面底部土壤母质的风化和累积, 而处于生态系统下游的淤积土主要来源于上游原生土的冲刷和淤积。加上两种不同类型土壤所在区域

植被组成和地形地势条件的不同,两种不同类型土壤的生物和理化性状往往有很大差异^[6,34]。处于森林生态系统上游的原生土虽然被年生长量相对较大的乔木树种植被覆盖,但是各种养分含量较高的表层土容易在雨水充沛的湿季随着地表径流的流失而聚集在下游的淤积土区域;而处于下游区域的淤积土除了在表层土累积了大量本区域植被的凋落物(灌木和草本),而且还接收了从上游随着地表径流冲刷下来大量的原生土表层土和凋落物,从而造成在淤积土的土壤剖面中积累了大量的土壤矿质养分、全碳、可溶性碳和水溶性碳^[34-35]。在本研究中,土壤全碳、活性有机碳和水溶性碳在淤积土中的平均含量显著高于原生土,说明淤积土在森林生态系统中的碳库方面发挥着比原生土还重要的作用;土壤微生物量碳在两种类型土壤剖面中的差异不明显,说明在这2种类型土壤中虽然微生物的种类差别较大,原生土以好气性微生物种类为主,淤积土以厌气性微生物种类为主,但是两者土层中微生物量差异可能并不大;土壤可溶性碳在原生土土壤剖面中的含量显著高于淤积土土壤剖面中的含量,说明地表径流只是淋溶带走了原生土中的水溶性碳到下游淤积土中,而将多数不溶于水但属于土壤可溶性碳范畴的组分碳留在原生土中,这可能与两种土壤的不同理化性状和该区域水文条件有关。

参考文献

- [1] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*,1996,47(2):151-163.
- [2] HE Y J, TRUMBORE S E, TORN M S, et al. Radiocarbon constraints imply reduced carbon uptake by soils during the 21st century[J]. *Science*,2016,353(6306):1414-1424.
- [3] 覃智莲,杨孝民,宋照亮,等. 成土母质和土地利用方式对土壤有机碳化学组成的影响[J]. *土壤通报*,2020,51(306):123-131.
- [4] 王绍强,周成虎,李克让,等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. *地理学报*,2000,55(5):533-544.
- [5] 解宪丽,孙波,周慧珍,等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量和影响因子[J]. *土壤学报*,2004,41(5):687-699.
- [6] RICKER M C, STOLT M H, ZAVADA M S. Comparison of soil organic carbon dynamics in forested riparian wetlands and adjacent uplands[J]. *Soil Science Society of America Journal*,2014,78(5):1817-1827.
- [7] 王斌,杨校生. 4种典型地带性森林生态系统碳含量和碳密度比较[J]. *湖南农业大学学报:自然科学版*,2010,36(4):464-473.
- [8] 周杰,冉秋月,杨永霞,等. 乌蒙山栎木荷林群落特征[J]. *广西植物*,2019,39(2):248-260.
- [9] 任玉连,陆梅,曹乾斌,等. 南滚河自然保护区森林土壤酶活性对海拔升高的响应[J]. *林业科学*,2020,56(4):25-37.
- [10] 徐跃. 哀牢山山地黄棕壤腐殖质的研究[J]. *山地研究*,1992,10(1):33-38.
- [11] 刘玉洪,张克映. 哀牢山气温时空分布特征[J]. *山地研究*,1996,14(4):230-234.
- [12] 李月,齐实,程伯涵,等. 哀牢山山区降水时空分布的影响因素及插值方法比较[J]. *地球与环境*,2017(6):600-611.
- [13] 冯文婷,邹晓明,沙丽清,等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤呼吸季节和昼夜变化特征及影响因子比较[J]. *植物生态学报*,2008,32(1):31-39.
- [14] 张时煌,彭公炳,黄玫. 基于地理信息系统技术的土壤质地分类特征提取与数据融合[J]. *气候与环境研究*,2004,9(1):65-79.
- [15] 吴克宁,赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. *土壤学报*,2019,56(1):227-241.
- [16] 双龙,妮萨娜,杜江,等. 重铬酸钾氧化-外加热法测定化探土壤样品中有机碳含量[J]. *安徽化工*,2016,42(4):110-112.
- [17] 王梅. 重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤中有机碳含量的方法讨论[J]. *新疆有色金属*,2019,42(196):102-103.
- [18] ZOU X M, RUAN H H, FU Y, et al. 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.
- [19] LIU X B, ZENG X C, ZOU X M, et al. Responses of soil labile organic carbon to a simulated hurricane disturbance in a tropical wet forest[J]. *Forests*,2018,9(7):420.
- [20] 林启美,吴玉光,刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进[J]. *生态学杂志*,1999,18(2):63-66.
- [21] GIESLER R, LUNDSTROM U. Soil solution chemistry: effects of bulking soil samples[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1993,57(5):1283-1288.
- [22] 庞学勇,包维楷. 森林生态系统土壤可溶性有机质(碳)影响因素研究进展[J]. *应用与环境生物学报*,2009,15(3):390-398.
- [23] TIROL- Padre A, LADHA J K. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*,2004,68(3):969-978.
- [24] 倪进治,徐建民,谢正苗. 土壤水溶性有机碳的研究进展[J]. *生态环境*,2003(1):74-78.
- [25] 王清奎. 碳输入方式对森林土壤碳库和碳循环的影响研究进展[J]. *应用生态学报*,2011,22(4):1075-1081.
- [26] 孔青. 植物残体去除对帽儿山落叶林土壤碳含量和矿化的影响[M]. 哈尔滨:东北林业大学,2018:18-45.
- [27] 宋娅丽,康峰峰,韩海荣,等. 自然因子对中国森林土壤碳储量的影响分析[J]. *世界林业研究*,2015,28(3):6-12.
- [28] 金峰,杨浩,赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J]. *土壤*,2000(1):1-17.
- [29] 姚槐应,黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京:科学出版社,2006:3-6.
- [30] 易志刚,蚁伟民,周丽霞,等. 鼎湖山主要植被类型土壤微生物生物量研究[J]. *生态环境*,2005,14(5):727-729.
- [31] 严登华,王刚,金鑫,等. 滦河流域不同土地利用类型土壤微生物量C、TN、TP垂直分异规律及其影响因子研究[J]. *生态环境学报*,2010,19(8):1844-1849.
- [32] 罗明,庞俊峰,李叙勇,等. 新疆天山云杉林区森林土壤微生物学特性及酶活性[J]. *生态学杂志*,1997,16(1):26-30.

-
- [33] CHEN Q Q, SHEN C D, Sun Y M, et al. Spatial and temporal distribution of carbon isotopes in soil organic matter at the Dinghushan Biosphere Reserve, south China[J]. *Plant and Soil*, 2005, 273:115-128.
- [34] RUAN H H, LI Y Q, ZOU X M. Soil communities and plant litter decomposition as influenced by forest debris: variation across tropical riparian and upland sites[J]. *Pedobiologia*, 2005, 49:529-538.
- [35] MULHOLAND P J. Regulation of nutrient concentrations in a temperate forest stream: roles of upland, riparian, and instream processes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(7):1512-1526.