

黄土高原不同植被覆盖下土壤有机碳的分布特征及其同位素组成研究

李龙波^{1,2}, 涂成龙^{1*}, 赵志琦¹, 崔丽峰^{1,2}, 刘文景^{2,3}

(1. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

2. 中国科学院北京研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要:土壤有机碳(SOC)含量及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值随深度变化的趋势可以反映植物残体的输入及其在土壤中分解累积特征,有助于揭示SOC循环过程及规律。本研究以黄土高原不同植被类型覆盖条件下的黄土剖面为研究对象,通过测定土壤属性、SOC含量和植物优势种、枯枝落叶、土壤有机质的稳定同位素组成,对该区域SOC深度分布和有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值组成差异进行探讨。研究结果显示SOC含量变化范围在1.1~31.2 g/kg之间,且随土层深度增加而逐渐降低。SOC主要集中在表层土壤,其含量变化规律为阔叶林地>针叶林地>灌木林地>草地>荒地。但各剖面SOC在不同土壤层次处出现急剧下降。其中,阔叶林地和针叶林地在10 cm深度处、灌木林地和草地在20 cm深度处和荒地在5 cm深度处,SOC含量急剧减少。但60 cm深度以下各剖面SOC含量变化均较小。在枯枝落叶转化为表层土壤有机质的过程中, $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值升高了0.5‰~3.2‰,与其它地区相比 ^{13}C 富集更大。剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值在-26.3‰~-20.8‰之间变化,均随着土壤深度的加深而增加。但不同植被条件下的变化幅度各不相同,这反映了土壤有机质分解过程中碳同位素分馏效应的强弱程度。剖面有机质碳同位素分馏程度的变化规律为阔叶林地>针叶林地>草地>灌木林地>荒地。这可能是由于阔叶林地上生物量大及微生物对有机质的分解作用强,有机质来源较多且组成、结构不同所致。而荒地剖面坡度很大,地上植被来源较单一,表层枯枝落叶很少,故导致其剖面土壤有机质的分馏效应最低。对比研究表明:不同植被类型覆盖条件下土壤有机质的深度分布特征具有明显差异,土壤有机质的稳定同位素地球化学组成具有地域性特征。

关键词:黄土高原;土壤有机碳;稳定碳同位素

中图分类号:S153.6;P597 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9250(2011)04-0441-09

土壤有机碳储量巨大,是土壤质量的核心,在全球碳循环中起关键作用。它既是碳汇又是碳源,是地球表层系统中最大且最具有活动性的生态系统碳库之一,对土壤质量和气候变化都具有重大的影响^[1,2]。因此,开展黄土高原土壤有机碳循环的研究,对该地区有机质的生物地球化学循环具有重要意义。国内外学者的研究表明,碳同位素组成在土壤碳循环过程中,能有效地揭示土壤有机质的分解程度、土壤有机碳的不同来源和降解过程,以及评估新老土壤有机碳对碳储量的相对贡献^[3-6]。

位于黄土高原腹地的子午岭林区,是1866年战乱期间当地人口大量外迁,多数土地弃耕后自然恢

复的天然次生林^[7],在近150年中形成了比较完整的天然次生植被,是目前黄土高原上发育和保存较好的天然次生林,具有黄土高原“绿岛”的美誉,对西部地区调节气候、保持水土、维持生态平衡具有重要意义^[8]。目前,对子午岭林区土壤碳研究主要集中在土壤养分和森林群落碳储量估计^[9-12]等方面,而从地球化学的角度对不同植被类型覆盖条件下黄土剖面有机碳组成、来源、迁移转化的报道较少。本研究以黄土高原不同植被覆盖条件下黄土母质土壤剖面为研究对象,比较分析了土壤有机碳含量变化及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值组成差异,结合部分土壤属性等分析结果,探讨不同植被类型覆盖对土壤有机碳(SOC)

收稿日期:2011-05-23;改回日期:2011-07-11

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-102)和国家自然科学基金创新群体项目(40721002)

第一作者简介:李龙波(1982-),男,博士研究生,研究方向为环境地球化学。E-mail:lilongbo1982@163.com.

*通讯作者:涂成龙,E-mail:chenglongtu@163.com.

含量变化和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值组成差异的影响,揭示黄土高原碳循环过程特征及规律为黄土高原地区有机质的生物地球化学循环和荒漠化防治提供理论依据。

1 样品与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于子午岭北部甘肃省庆阳市合水县连家砭林场和甘肃省庆阳市环县赵小掌村。其中,连家砭林场位于 $\text{N } 36^{\circ}03' \sim 36^{\circ}05'$, $\text{E } 108^{\circ}31' \sim 108^{\circ}32'$,为典型黄土高原丘陵沟壑区,海拔 1211~1435 m,属中温带大陆性季风气候区。四季分明,雨热同季,光照充足,冬冷漫长,夏热短促。全年无霜期平均 110~155 d,年降雨 560~590 mm,主要集中在每年的 7~9 月,年均气温 $7 \sim 8^{\circ}\text{C}$,年蒸发量为 1460~1592 mm。由于地处暖温带半干旱气候区,子午岭属暖温带落叶阔叶林地带,森林植被由落叶阔叶林、针叶林和灌丛群落组成^[13]。土壤均发育于原生(山坡)或次生(沟谷)黄土,在黄土侵蚀露出的红土或基岩上少见。以石灰性褐土为主,其次是粗骨褐色土。此外,沟底及两侧低阶地发育有潜育化草甸土^[14,15]。庆阳市环县赵小掌村位于 $\text{N } 36^{\circ}42'$, $\text{E } 107^{\circ}22'$,为典型黄土高原梁峁状丘陵沟壑及残源沟壑区,海拔 1450 m,水土流失严重,气候属中温带大陆性季风气候区,年均温 7.9°C ($6.7^{\circ}\text{C} \sim 9.2^{\circ}\text{C}$), $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 3242.4°C ,平均降水量 407.3 mm,由东南向西北逐渐减少,平均蒸发量 1667.9 mm,干燥系数 1.8。北部土壤以栗钙土为主,南部多为黑垆土^[16]。

1.2 采样及分析方法

2010 年 8 月,分别在研究区域内采集了五个剖面样品,包括 ZWL-VII 灌木林地剖面,ZWL-III 针叶林地剖面,ZWL-V 草地剖面,HX-荒地剖面,ZWL-II 阔叶林地剖面。其中,所选择的 HX-荒地剖面处的坡度较大,表层枯枝落叶较少,植被比较单一,具体采样剖面情况见表 1。在剖面土层 50 cm 以内按

5 cm 间隔进行采样,50 cm 以下按 10 cm 间隔采集。同时,在剖面附近采集了枯枝落叶及植物优势种的新鲜叶片。

1.2.1 土壤 pH 值测定

称取 10 g 过 10 目筛的土壤样品,置于 50 mL 高脚烧杯中,以氯化钙溶液作浸提剂,以 1:2.5 的土水比测定土壤 pH 值,轻摇使水土混合均匀,在磁力搅拌仪上搅拌 2 min,静止 30 min,然后用 pH 计连续测定三次 pH 值,取其平均值。所用 pH 计为美国 HACH 公司的 Sension 156 多参数水质分析仪。

1.2.2 土壤有机碳含量和 C/N 比值测定

研磨过 100 目筛的土样用 2 mol/L 的盐酸溶液浸泡 24 h,以去除土壤中的碳酸盐,然后用去离子水洗涤至中性, 60°C 烘干后研磨。用 PE2400 型元素分析仪测定其 C、N 含量和 C/N 比值。

1.2.3 有机质稳定碳同位素分析

植物样品用去离子水洗净, 65°C 烘干粉碎。枯枝落叶在 65°C 下烘干 48 h,粉碎。将植物样品、枯枝落叶及预处理过的土样送中国科学院环境地球化学国家重点实验室,用 MAT252 型质谱仪测定样品有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,每个样品至少测两个平行样,分析误差小于 $\pm 0.1\%$ 。

2 结果与讨论

2.1 土壤 C/N、pH 值和土壤有机碳

土壤中的 C/N 比值能反映土壤有机质分解过程的重要信息。对于某一特定土壤而言,C/N 比值基本为一个常数,而 SOC 含量水平在某种程度上取决于土壤中能够同化成腐殖质的有效氮的含量水平^[17]。C/N 比值相对较高的林地土壤,其抗分解能力较强,有利于 SOC 的积累^[18]。研究结果显示:灌木林地、针叶林地、草地和荒地剖面表层土壤的 C/N 比值小于阔叶林地(图 1)。除灌木林地剖面土壤 C/N 比值呈现先增加后减小的趋势外,其它四个剖面都是随着土层深度的增加而降低。但是,灌木林

表 1 采样点基本情况

Table 1 Basic features of the soil profiles studied

采样地区	剖面号	土地利用类型	经度	纬度	主要植被类型
环县赵小掌村	HX	荒地	$107^{\circ}22'$	$36^{\circ}42'$	红足蒿
	ZWL-II	阔叶林地	$108^{\circ}28'$	$36^{\circ}06'$	白桦
子午岭连家砭林场	ZWL-III	针叶林地	$108^{\circ}28'$	$36^{\circ}04'$	远东羊茅、油松
	ZWL-V	草地	$108^{\circ}28'$	$36^{\circ}00'$	野艾蒿、柴胡、缘毛鹅观草
	ZWL-VII	灌木林地	$108^{\circ}28'$	$36^{\circ}00'$	暴马丁香、栎树、椿树

地和阔叶林地剖面土壤的 C/N 比值在 60 cm 以下变化比较复杂,呈现锯齿型下降。

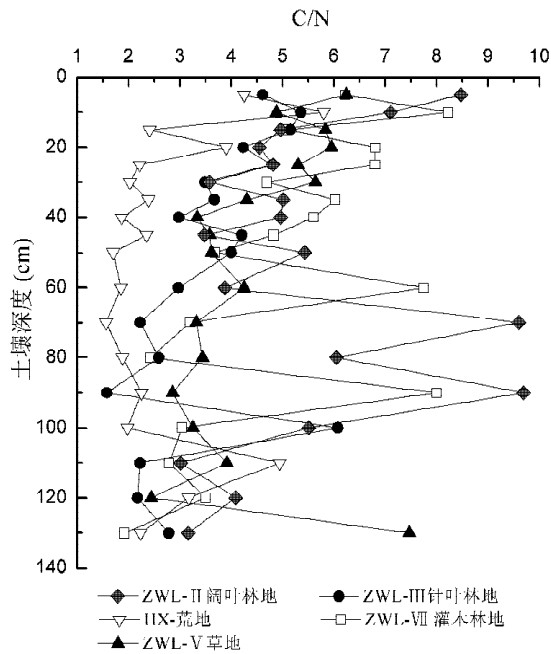


图 1 土壤 C/N 比值随剖面深度变化
Fig.1 Variations in C/N mass ratio through the profiles studied

研究区土壤 pH 均呈碱性。随土壤深度的增加,pH 变化不大,从表层到底部,pH 在 7.1~7.9 之间变化(平均值为 7.5)(图 2)。不同生境中土壤 pH 存在一定的差异,具体表现为:荒地>草地>林地。其中林地剖面中土壤 pH 变化为阔叶林地>灌木林地>针叶林地。

土壤有机碳是影响土壤质量的重要因素,研究不同植被覆盖与土壤有机碳之间的关系是揭示植被和土壤相互作用机理的重要途径^[19]。土壤有机碳含量主要取决于植被每年的归还量和分解速率,而植被类型、气候特点以及土壤性质的差异,均会影响有机碳含量及分布^[20]。所研究的 5 个剖面具有不同的有机碳含量,且主要集中在表层土壤。表层有机碳含量依次为阔叶林地 31.2 g/kg、针叶林地 15.8 g/kg、草地 12.4 g/kg、灌木林地 10.9 g/kg 和荒地 6.5 g/kg(图 3)。有机碳主要集中在表层土壤是由于土壤表层地表枯枝落叶较为丰富,土壤有机质较为丰富,使得表层有机碳含量较高;而亚表层和底层受枯枝落叶的影响较小,有机质相对较低,因此其有机碳含量低于表层。这与其他人的研究结果相一致^[21]。

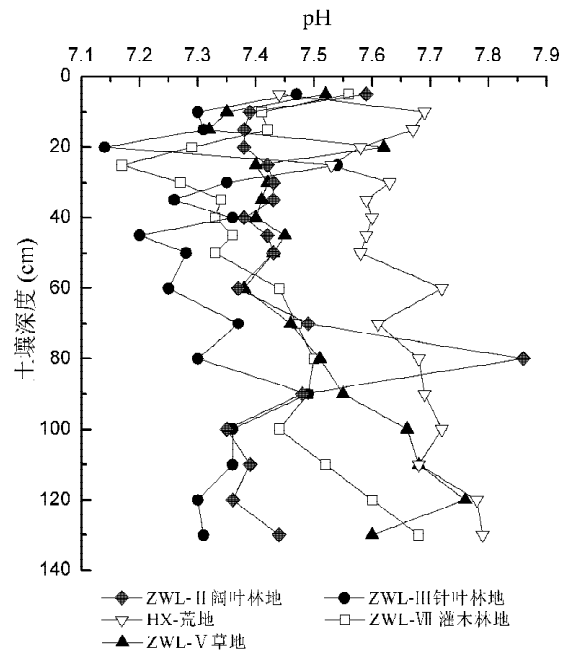


图 2 土壤 pH 值随剖面深度变化
Fig.2 Variations in pH through the profiles studied

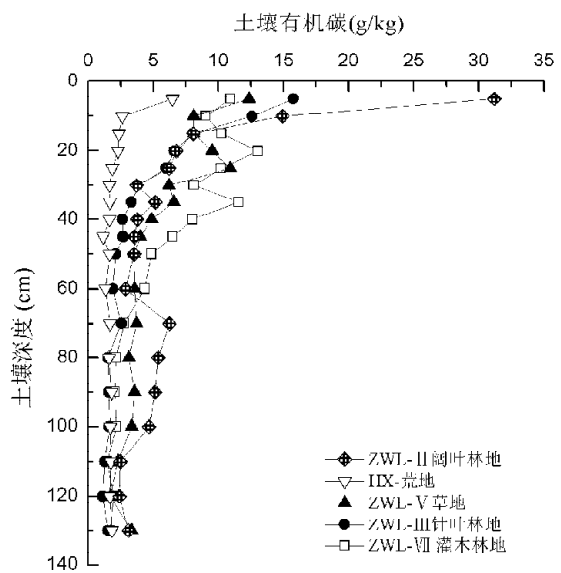


图 3 土壤有机碳含量随剖面深度变化
Fig.3 Variations in SOC contents through the profiles studied

植被类型可以影响土壤有机碳的剖面分布^[22]。周莉等(2005)研究认为土壤有机碳的主要来源多为枯枝落叶^[17]。不同植被类型覆盖条件下黄土剖面地表枯枝落叶有所不同,因而导致各剖面土壤有机碳含量存在差异。各剖面 SOC 含量变化为阔叶林地 2.4~31.2 g/kg、针叶林地 1.1~15.8 g/kg、灌

木林地 1.5~13.1 g/kg、草地 1.7~12.4 g/kg 和荒地 1.2~6.5 g/kg(图 3)。研究结果显示:从荒地、草本、灌木到乔木 SOC 含量逐渐升高。这是因为乔木覆盖下土壤枯枝落叶等凋落物量大,地表生物量大;随着根系分泌物的分解,释放养分归还土壤,故有机质含量高。草本植物根系多且深,有机质分布均匀。灌木则介于乔木和草本之间。荒地土壤几乎裸露,缺乏植物荫蔽,直接受气象因素(如:水、热、风等)影响,土壤有机质矿化作用增强,导致土壤有机质含量降低^[23]。由此证明,该地区植被的发育能增强土壤腐殖化作用,促进土壤有机质的发育,在不同植被覆盖条件下,土壤腐殖化作用有所差异,导致其有机质含量增加的不同。

与杨晓梅等^[20](2010)的研究结果相似,在剖面垂直分布上,所有研究的土壤剖面表层土壤有机碳含量最大,并均随土层深度的加深递减。但不同剖面从表层向下有机碳含量变化的趋势不同。阔叶林地和针叶林地剖面从表层向下至 10 cm 深度处、灌木林地和草地剖面从表层向下至 20 cm 深度处、荒地剖面从表层向下至 5 cm 深度处,土壤有机碳含量急剧减少(图 3)。具体下降幅度为阔叶林地剖面 10~20 cm 深度内相对于 0~10 cm 深度内 SOC 含量下降了 67.9%、针叶林地 10~20 cm 深度内相对于 0~10 cm 深度内 SOC 含量下降了 48.4%、灌木林地 20~40 cm 深度内相对于 0~20 cm 深度内下降了 12.4%、草地 20~40 cm 深度内相对于 0~20 cm 深度内下降了 25.0%、荒地剖面 5~10 cm 深度内相对于 0~5 cm 深度内下降了 59.6%。可见,荒地剖面最不利于 SOC 的积累,在 5 cm 深度处 SOC 含

量急剧减少。这可能是由于荒地剖面坡度较大,地表植被和枯枝落叶较少,土壤几乎直接暴露在外面,受气象因素的影响较大所致。另外,荒地剖面 C/N 比值较其它剖面低(图 1),也指示了该剖面抗分解能力较弱,不利于 SOC 的积累。但各剖面 60 cm 深度以下土壤有机碳含量差异均较小,这主要是因为土壤成土母质大致相同造成的,此时植被类型的差异对其影响不大。

2.2 植物优势种、枯枝落叶和表层土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值

因为土壤有机质是由分解的植物残体逐渐转化和积累起来的,所以土壤有机碳同位素组成与其上的植被同位素组成有直接关系^[24-27]。研究结果表明:阔叶林地、针叶林地、灌木林地、草地和荒地的植物优势种均是 C_3 植物,叶子的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 -27.5‰ 、 $-30.3\sim-29.2\text{‰}$ 、 $-28.5\text{‰}\sim-27.2\text{‰}$ 、 $-27.8\text{‰}\sim-26.0\text{‰}$ 和 -26.35‰ (表 2),枯枝落叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 -26.8‰ 、 -28.1‰ 、 -27.4‰ 、 -27.2‰ 和 -25.4‰ ,表层土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于枯枝落叶(表 2),分别为 -26.3‰ 、 -25.9‰ 、 -24.2‰ 、 -25.0‰ 和 -23.2‰ 。可见 5 个剖面上从植被到凋落物再到土壤,有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐变大(表 2),有富 ^{13}C 现象。这一结果与前人的研究结果相一致^[28-33]。从植被到凋落物再到土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐升高的最主要原因是有机质分解过程中的同位素分馏。微生物分解有机质的过程会发生同位素分馏,轻同位素(^{12}C)优先进入释放的 CO_2 中,而 ^{13}C 则更多地进入到微生物生物量碳中,最终返回到土壤有机质中。

表 2 研究区剖面主要植物优势种叶片和枯枝落叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值
Table 2 The $\delta^{13}\text{C}$ values of the dominant species foliage and litter in the studied soil profiles

剖面号	土地利用类型	优势植被	$\delta^{13}\text{C}_{\text{植被}}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{凋落物}}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$
					0~5 cm 土壤
HX	荒地	红足蒿	-26.4	-26.4	-23.2
ZWL-II	阔叶林地	白桦	-27.5	-26.8	-26.3
		油松	-29.2		
ZWL-III	针叶林地	远东羊茅	-30.3	-28.1	-25.9
		茅草	-30.6		
		野艾蒿	-27.8		
ZWL-V	草地	柴胡	-27.6	-27.2	-25.0
		缘毛鹅观草	-26.0		
		椿树	-27.6		
ZWL-VII	灌木林地	暴马丁香	-27.2	-26.4	-24.2
		栾树	-28.5		

与其他地区的研究结果^[34]相一致,在叶子衰老、凋落、枯枝落叶腐烂和土壤有机质形成期间,有机质的稳定碳同位素组成显示了一个明显的¹³C富集过程。表层土壤有机质主要来源于地表植被的枯枝落叶,Balesdent等^[35]的研究表明,C₃植被下通气良好的表层土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于枯枝落叶,造成这种现象的原因通常是腐殖化过程中发生的生物和生物化学转化导致残余有机碳中¹³C富集(与枯枝落叶相比)。例如,木质素比整体植物组织的 $\delta^{13}\text{C}$ 值低约2.0‰~6.0‰^[36],因此在腐殖化过程中,枯枝落叶中木质素的分解可能促进表层土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值的升高。从上述可知,阔叶林地、针叶林地、灌木林地、草地和荒地剖面表层土壤 $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值相对于枯枝落叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别增加了0.5‰、2.3‰、2.2‰、2.2‰和3.2‰。表层土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值的上升幅度主要由其周转速度控制,周转速度越慢,升幅越小^[37]。荒地剖面表层土壤有机质较相应枯枝落叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值高3.2‰,而针叶林地、阔叶林地、灌木林地和草地剖面表层土壤有机质与相应枯枝落叶间的 $\delta^{13}\text{C}$ 差异较小。这说明荒地剖面有机质的周转速度较快,可能是因为该剖面pH值相对其它剖面pH值较高,微生物的活性增强,表层土壤有机质较高的分解速率和周转速度产生较大的碳同位素分馏,从而使表层土壤有机质较相应枯枝落叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有较高的上升幅度。

2.3 土壤剖面有机碳同位素组成特征

从图4可以看出阔叶林地和针叶林地剖面有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值随土壤深度变化具有相似的变化特征, $\delta^{13}\text{C}$ 值均随土壤深度的加深而逐渐增加,至一定深度后趋于稳定。两种林地剖面在0~40 cm深度内均从表土层向下迅速增加;40 cm深度以下,土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化较小,趋于稳定。阔叶林地剖面有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值变幅为4.1‰、针叶林地为4.0‰。而灌木林地剖面有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值的深度变化与阔叶林地和针叶林地剖面具有差异,0~20 cm深度内呈现先增加后减小的趋势,在15 cm深度处出现拐点。20~40 cm深度内表现为逐渐增加,40 cm深度以下缓慢变小直至趋于稳定。整个剖面有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高与最低的差值为3.4‰。

草地剖面表层土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于阔叶林地和针叶林地,其深度变化趋势与阔叶林地和针叶林地相一致,整个剖面有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高与最低的差值为3.9‰。然而荒地剖面土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值的

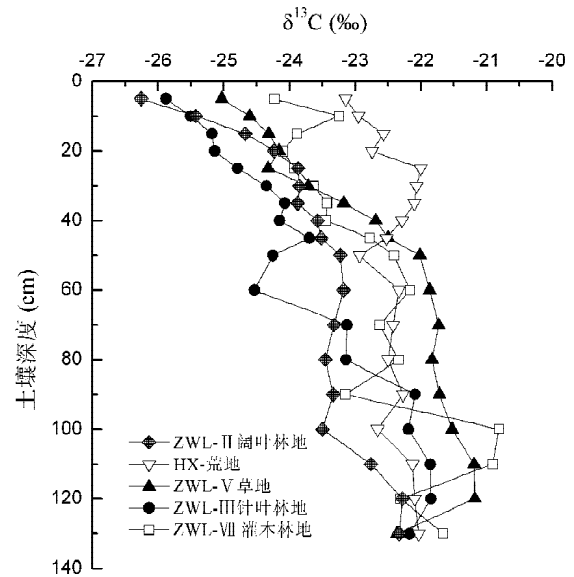


图4 土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值随剖面深度变化
Fig. 4 Variations in the $\delta^{13}\text{C}$ values of soil organic matter through the profiles studied

深度分布明显不同于林地和草地剖面(图4)。与其它4个剖面相比,荒地剖面土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值总体上偏大,变化范围为-22.0‰~-23.2‰(图4)。具体变化规律为0~20 cm深度内随土层深度的加深而逐渐增加,20~50 cm深度内有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化比较复杂,呈现出增加-减小-增加的趋势,50 cm深度以下变化比较缓慢直至趋于稳定。整个剖面有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高与最低的差值为1.2‰,明显低于其他4个剖面。另外,五个土壤剖面60 cm深度以下土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值组成差异变化较小(图4)。这主要是因为所研究区的土壤成土母质大致相同造成的,此时植被类型的差异对其影响不大。

表层土壤有机质主要来源于地表植被的枯枝落叶,随着土层深度的增加,土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值从初始值(枯枝落叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值)发生变化,在排水良好的表层土壤中,通常显示有1.0‰~2.0‰快速升幅^[38]。其中C₃生态系统土壤有机碳和土壤CO₂的 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高最为明显^[39]。但Delgado等(2003)认为该趋势与土壤的物理化学性质关系不大,可能与凋落物分解作用和腐殖化作用的同位素分馏有关^[40];Nadelhoffer和Fry(1988)的研究指出土壤有机质腐殖化过程中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的增加也可能归功于¹³C贫化的有机化合物的分解作用或老的、¹³C贫化的土壤有机碳的相互混合^[28]。本研究中5个剖面的分析结果也表现出上述类似的变化, $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值均随土壤深度的加深有升高趋势,这说明在该地区土壤

有机质降解程度会随着土壤深度的加深而更为彻底。这与大多数学者的研究结论一致^[41,42]。其主要原因归纳起来有 3 个方面:①微生物在对有机质进行降解过程中,优先分解富含¹²C 的部分,使残留部分富集¹³C^[43];②Benner 等(1987)研究认为随着土壤深度的增加,易降解类物质(如单糖类物质)逐渐减少,难降解类物质(如纤维素)逐渐增加,而难降解类物质比易降解类物质富含¹³C^[36];③由于近百年来,化石燃料的燃烧和土壤有机质矿化作用的加强,使大气 CO₂ δ¹³C 值降低,通过光合作用吸收大气 CO₂ 的植物可能会导致表层土壤有机质 δ¹³C 值降低^[38]。不同剖面土壤有机质 δ¹³C 值的上升幅度各不相同(图 4),它反映了土壤有机质分解过程中碳同位素分馏效应的强弱程度,上升幅度越大,说明分馏效应强度越大,指示有机质分解程度越高^[3]。分析结果表明:剖面有机质碳同位素分馏效应的变化规律为阔叶林地>针叶林地>草地>灌木林地>荒地。阔叶林地剖面有机质碳同位素分馏效应最大的原因可能是由于地上生物量大及微生物对有机质的分解作用强,有机质来源较多且组成、结构不同所致。针叶林地剖面有机质碳同位素分馏效应跟阔叶林地差异不大。草地剖面由于植物根系多且深,有机质分布均匀,因而剖面有机质碳同位素的分馏作用不大。灌木林地介于草地和荒地之间。而荒地土壤坡度很大,地上植被来源较单一,表层枯枝落叶很少,故导致其剖面土壤有机质的碳同位素分馏效应最低。另外,土壤剖面成土演化对有机质深度分布具有显著影响^[44],虽然 5 个剖面发育明显,土壤厚度较大,但通常认为各剖面的绝对年龄存在差异,在相似的地形条件下,不同土层土壤的成土环境(如气候、生物等)也不同,从而使土壤有机质分解程度出现差异,这可能是导致不同剖面土壤有机质 δ¹³C 值深度分布不同的主要因素。

3 结 论

黄土高原不同植被覆盖条件下黄土剖面有机碳含量和稳定同位素组成存在差异。有机碳在剖面上的总体变化均表现出从上至下逐渐减小的趋势,剖面不同层位 SOC 变幅不同。其中,阔叶林地和针叶林地在 10 cm 深度处,灌木林地和草地在 20 cm 深度处,荒地剖面在 5 cm 深度处,SOC 含量急剧下降。但 60 cm 深度以下各剖面 SOC 含量变化均较小。表层土壤有机碳含量随荒地→草地→灌木林地→乔木林地有逐渐升高的趋势。这一变化趋势类似于自然生态系统植被的演替过程,由此我们认为在黄土高原地区,坡地退耕还林,恢复植被,对改善土壤质量有重要意义。

在枯枝落叶转化为表层土壤有机质的过程中,δ¹³C_{soe}值升高了 0.5‰~3.2‰,与其它地区相比¹³C 富集更大。随着土壤深度的加深 δ¹³C_{soe}值均有升高趋势,但不同植被覆盖条件下黄土剖面 δ¹³C_{soe}值变化幅度各不相同,反映了土壤有机质分解过程中碳同位素分馏效应的强弱程度。分馏程度大小依次为阔叶林地>针叶林地>草地>灌木林地>荒地,这主要是由于上覆植被类型和不同土层成土环境(如气候、生物等)差异所致。另外,研究剖面有机质含量和稳定碳同位素组成的剖面特征表明,土壤有机质的深度分布具有明显区域性特征且变化非常复杂,进一步研究该地区土壤有机质分解转化的区域性特点有助于揭示黄土高原地区碳循环过程及规律。

致 谢:衷心感谢中国科学院地球化学研究所梁重山副研究员在采样过程中和安宁及耿龙年工程师在样品测试过程中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] Eswaran H, Berg E V, Reich P. Organic carbon in soils of the world [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57: 192-194.
- [2] 潘根兴,李恋卿,张旭辉. 土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿问题:兼开展中国水稻土有机碳固定研究的建议[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(3): 100-109.
- [3] Wedin D A, Tieszen L L, Dewey B. Carbon isotope dynamics during grass decomposition and soil organic matter formation [J]. Ecology, 1995, 76(5): 1383-1392.
- [4] Bernoux M, Cerri C C, Neill C, et al. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates [J]. Geoderma, 1998, 82: 43-58.

- [5] 刘启明,王世杰,朴河春,等. 稳定碳同位素示踪农林生态转换系统中土壤有机质的迁移和赋存规律[J]. 环境科学,2002,23(4):89-92.
- [6] DelGaldo I, Six J, Peressotti A, *et al.* Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1204-1213.
- [7] 刘立品. 子午岭木本植物志[M]. 兰州:兰州大学出版社,1998:224.
- [8] 邹厚远,刘国彬,王晗生. 子午岭林区北部近50年植被的变化发展[J]. 西北植物学报,2002,22(1):1-8.
- [9] 徐香兰,张科利,徐宪立,等. 黄土高原地区土壤有机碳估算及其分布规律分析[J]. 水土保持学报,2003,17(3):13-15.
- [10] 魏孝荣,邵明安,高建伦. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳与环境因素的关系[J]. 环境科学,2008,29(10):2879-2875.
- [11] 贾松伟. 黄土丘陵区不同坡度下土壤有机碳流失规律研究[J]. 水土保持研究,2009,16(2):30-33.
- [12] 程积民,赵凌平,程杰. 子午岭60年辽东栎林种子质量与森林更新[J]. 北京林业大学学报,2009,31(2):10-16.
- [13] 吴钦孝,杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展[M]. 北京:科学出版社,1998:19-32.
- [14] 陈昌笃. 陕甘边境子午岭梢林区的植被及其在水土保持上的作用[J]. 植物生态学与地植物学资料丛刊,1958,(2):152-223.
- [15] 张平仓,郑粉莉. 子午岭地区自然区域特征及其与土壤侵蚀的关系[J]. 中国科学院、水利部水土保持研究所集刊,1993,17:11-16.
- [16] 李师翁,范小峰. 甘肃环县天然草地植被近40年演变的研究[J]. 水土保持学报,2003,17(6):114-117.
- [17] 周莉,李保国,周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展,2005,20(1):99-105.
- [18] 姜勇,张玉革,梁文举,等. 潮棕壤不同利用方式有机碳剖面分布及碳储量[J]. 中国农业科学,2005,(3):119-125.
- [19] 周印东,吴金水,赵世伟,等. 子午岭植被演替过程中土壤有机质与持水性能变化[J]. 西北植物学报,2003,23(6):895-900.
- [20] 杨晓梅,程积民,孟蕾,等. 不同林地土壤有机碳储量及垂直分布特征[J]. 中国农学通报,2010,26(9):132-135.
- [21] 渠开跃,冯慧敏,代力民,等. 辽东山区不同林型土壤有机碳剖面分布特征及碳储量研究[J]. 土壤通报,2009,40(6):1316-1320.
- [22] 袁海伟,苏以荣,郑华,等. 喀斯特峰丛洼地不同土地利用类型土壤有机碳和氮素分布特征[J]. 生态学杂志,2007,26(10):1579-1584.
- [23] 吕家珑,张一平,王旭东,等. 农田生态对土壤肥力的保护效应[J]. 生态学报,2001,21(4):613-616.
- [24] Cerling T E, Quade J, wang Y, *et al.* Carbon isotopes in soil and paleosols as ecologic and paleoecologic indicators [J]. *Nature*, 1989, 341: 38-139.
- [25] Schwartz D, Mariotti A, Lanfranchi R, *et al.* $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of soil organic matter as indicators of vegetation changes in the Congo [J]. *Geoderma*, 1986, 39: 97-103.
- [26] Hattee C, Fontugne M, Rousseau D D, *et al.* $\delta^{13}\text{C}$ variations of loess organic matter as a record of the vegetation response to climatic changes during the Weichselian [J]. *Geology*, 1998, 26(7): 583-586.
- [27] Wang H, Follmer L R. Proxy of monsoon seasonality in carbon isotopes from paleosols of the southern Chinese Loess Plateau [J]. *Geolog*, 1998, 26: 987-90.
- [28] Nadelhoffer K J, Fry B. Controls on natural nitrogen-15 and carbon-13 abundances in forests soil organic matter [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52: 1633-1640.
- [29] Feng X, Peterson J C, Quideau S A, *et al.* Distribution, accumulation and fluxes of soil carbon in four monoculture lysimeters at San Dimas Experimental Forest, California [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63: 1319-1333.
- [30] 陈庆强,沈承德,彭少麟,等. 华南亚热带山地土壤有机质更新特征及其影响因子[J]. 生态学报,2002,22:1446-1454.
- [31] Torn M S, Lapenis A G, Timofeev A, *et al.* Organic carbon and carbon isotopes in modern and 100-year-old-soil archives of the Russian steppe [J]. *Globe Change Biol*, 2002, 8: 941-953.
- [32] 沈承德,易惟熙,孙彦敏,等. 鼎湖山森林土壤 ^{14}C 表现年龄及 $\delta^{13}\text{C}$ 分布特征[J]. 第四纪研究,2000,20:335-344.
- [33] Wang G A, Feng X H, Han J M, *et al.* Paleovegetation reconstruction using $\delta^{13}\text{C}$ of soil organic matter [J]. *Biogeosciences*, 2008, 5: 1325-1337
- [34] Buchmann N, Kao W Y, Ehleringer J. Influence of stand structure on carbon-13 of vegetation, soils, and canopy air within deciduous and evergreen forests in Utah, United States [J]. *Oecologia*, 1997, 110: 109-119.

- [35] Balesdent J, Girardin C, Mariotti A. Site-related $\delta^{13}\text{C}$ of tree leaves and soil organic matter in a temperate forest [J]. *Ecology*, 1993, 74: 1713–1721.
- [36] Benner R, Fogel M L, Sprague E K, *et al.* Depletion of ^{13}C in lignin and its implications for stable carbon isotope studies [J]. *Nature*, 1987, 329: 708–710.
- [37] 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.
- [38] Friedli H, Löttscher H, Oeschger H, *et al.* Ice core record of the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmosphere CO_2 in the past two centuries [J]. *Nature*, 1986, 324: 237–238.
- [39] Decamargo P B, Trumbore S, Martinelli L, *et al.* Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amazonia [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5: 693–702.
- [40] Ehleringer J R, Buchmann N, Flanagan L B. Carbon isotope ratios in below ground carbon cycle process [J]. *Ecological Application*, 2000, 10: 412–422.
- [41] Georg G, Kaiser K. Dissolved organic matter in soil: Challenging the paradigm of sorptive preservation [J]. *Geoderma*, 2003, 113: 293–310.
- [42] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 坡耕地黑土剖面有机碳的分布和 $\delta^{13}\text{C}$ 值研究 [J]. *土壤学报*, 2005, 42(6): 957–964.
- [43] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter [J]. *Australia Journal of Soil Research*, 1992, 30: 1995–2007.
- [44] 陈庆强, 沈承德, 孙彦敏, 等. 鼎湖山土壤有机质深度分布的剖面演化机制 [J]. *土壤学报*, 2005, 42(1): 1–8.

Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Isotopic Composition for Soil Profiles of Loess Plateau under Different Vegetation Conditions

LI Long-bo^{1,2}, TU Cheng-long^{1*}, ZHAO Zhi-qi¹, CUI Li-feng^{1,2}, LIU Wen-jing^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract: Variations in soil organic carbon (SOC) contents and $\delta^{13}\text{C}$ values of SOC with depth in different soil profiles can provide the information about plant residue and accumulation, which helps to understand the process and mechanism of soil carbon cycle. In this study, five typical soil profiles under different vegetation conditions in loess areas, Northwest China, were selected as a case to study the profile distribution and stable isotopic composition in terms of the physical properties and carbon isotopic composition of foliage, litter and SOC. The results showed that the SOC was mainly enriched in surface soils and decreased with increasing depth. SOC contents varied in the range of 1.1–31.2 g/kg. It was found that the SOC contents of the soils varied according to the vegetation conditions, in the following order: broadleaf plant > coniferous plant > shrub > grassland > wasteland. Rapid changes were noticed at the 10 cm depth for the broadleaf forest and coniferous forest, at the 20 cm depth for the shrubs and grassland and at the 5 cm depth for the wasteland. The SOC contents decreased slowly below the 60 cm depth in the studied soil profiles. Compared with other regions, ^{13}C was enriched and $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ increased by 0.5‰–3.2‰ during litter degrading to SOC in surface soil. The $\delta^{13}\text{C}$ values of SOC increased with depth, and varied between –26.3‰ to –20.8‰, showing a significant difference in vertical patterns of variation, but the variation ranges were different in different soil profiles. In general, the $\delta^{13}\text{C}$ values in different soil profiles decreased in the following order: broadleaf plant > coniferous plant > grassland >

shrub > wasteland. This may have resulted from the abundant litter materials (e. g. , leaf fall) in broadleaf forest and more active microbial action in its soil, leading to higher carbon isotope fractionation of organic matter. The wasteland seldomly had a vegetation cover and litter was present in a small amount in the topsoil and there occurred less fractionation of SOC. The results indicated that there existed significant differences in vertical patterns of SOC contents and $\delta^{13}\text{C}$ values of SOC between different soil profiles. The stable carbon isotope geochemistry of soil organic matter shows distinct regional characteristics in loess areas.

Key words: loess area; soil organic carbon; stable carbon isotope