

模拟增温对长白山北坡垂直样带森林土壤有机碳稳定碳同位素的影响*

樊金娟¹ 孟宪菁^{1,2} 张心昱^{2**} 孙晓敏² 高鲁鹏^{2,3}

(¹ 沈阳农业大学生物科学技术学院, 沈阳 110161; ² 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室 CERN 水分分中心, 北京 100101; ³ 国家科技基础条件平台中心, 北京 100862)

摘要 分析了长白山北坡垂直样带3种典型原始森林地表凋落物及不同粒径土壤组分中有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,并将在岳桦林样地(EB,海拔1996 m)采集的20 cm土柱分别置换到云冷杉林(SF,海拔1350 m)和阔叶红松林(PB,海拔740 m),云冷杉林样地采集的土柱置换到阔叶红松林中,进行为期1年的野外模拟增温试验.结果表明:3种林型土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均显著高于凋落物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,凋落物和土壤有机质中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值由地表凋落物向土壤下层逐渐增加,而土壤粒径中有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随粒径减小而增大.3种林型中,凋落物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化趋势为云冷杉林(-28.3‰)>阔叶红松林(-29.0‰)>岳桦林(-29.6‰),而土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化趋势为岳桦林(-25.5‰)>阔叶红松林(-25.8‰)>云冷杉林(-26.2‰).在土壤温度增加 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,土壤及其各粒级的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均呈下降趋势,而且 $<2\text{ }\mu\text{m}$ 粘粒和 $2\sim 63\text{ }\mu\text{m}$ 粉粒 $\delta^{13}\text{C}$ 值的降幅(0.48‰ 和 0.47‰)高于 $>63\text{ }\mu\text{m}$ 砂粒 $\delta^{13}\text{C}$ 值的降幅(0.33‰).未来气候变暖可能对储藏在细小颗粒中年龄较长的有机碳带来较大的影响.

关键词 长白山 垂直样带 稳定碳同位素 模拟增温 土柱置换试验 土壤粒级

文章编号 1001-9332(2010)07-1621-06 **中图分类号** S154.1 **文献标识码** A

Forest soil organic matter $\delta^{13}\text{C}$ along a altitudinal transect on northern slope of Changbai Mountains under effects of simulated warming. FAN Jin-juan¹, MENG Xian-jing^{1,2}, ZHANG Xin-yu², SUN Xiao-min², GAO Lu-peng^{2,3} (¹College of Biotechnology, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; ²Sub-Center for Water Monitoring and Research, Chinese Ecosystem Research Network, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ³National Science and Technology Infrastructure Center, Beijing 100862, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(7): 1621-1626.

Abstract: The litters, bulk soils, and soil particle-size fractions were sampled from three typical natural forests, *i. e.*, broadleaf Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest (PB, altitude 740 m), spruce-fir (*Picea asperata*-*Abies nephrolepis*) forest (SF, altitude 1350 m), and Erman's birch (*Betula ermanii*) forest (EB, altitude 1996 m), on the northern slope of Changbai Mountains to analyze their organic matter $\delta^{13}\text{C}$ values, and the intact soil cores (20 cm depth) from EB (high altitude) were relocated to PB and SF (low altitudes) for a year to study the responses of the $\delta^{13}\text{C}$ values to simulated warming. It was shown that the litters had a significantly lower $\delta^{13}\text{C}$ value than the soils, and the $\delta^{13}\text{C}$ values of the litters and soils increased downward through the litter- and soil layers in all the three typical forest types. Soil particle-size fractions had an increased $\delta^{13}\text{C}$ value with decreasing particle size fractions. The $\delta^{13}\text{C}$ value of the litters was in the order of SF (-28.3‰)>PB (-29.0‰)>EB (-29.6‰), while that of the soils was in the order of EB (-25.5‰)>PB (-25.8‰)>SF (-26.2‰). Over one-year soil warming (an increment of $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$), the $\delta^{13}\text{C}$ values of the bulk soils and soil particle-size fractions all presented a

* 国家自然科学基金面上项目(40701186,30600091)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-433-01)资助.

** 通讯作者. E-mail: zhangxy@igsrr.ac.cn

2009-12-08 收稿,2010-05-09 接受.

decreasing trend, and the decrement of the $\delta^{13}\text{C}$ value was larger in $<2\ \mu\text{m}$ (0.48‰) and 2–63 μm fractions (0.47‰) than in $>63\ \mu\text{m}$ fraction (0.33‰). The results suggested that climate warming could have great effects on the older organic carbon associated with fine soil particle-size fractions.

Key words: Changbai Mountains; altitudinal transect; stable carbon isotope; simulated warming; soil core relocation experiment; soil particle-size fraction.

温室气体排放导致全球气候变暖已成公认事实. IPCC 第 3 次评估报告指出, 过去 100 年来, 中国东北地区温度升高了 $1.7\ ^\circ\text{C}$, 未来 50 ~ 100 年全球平均温度将升高 $1.5\ ^\circ\text{C} \sim 4.5\ ^\circ\text{C}$ [1]. 气候变暖对陆地生态系统影响受到广泛关注, 而利用土柱在自然气候变化梯度上进行置换试验是廉价、易操作、有效的增温模拟研究方法, 为研究气候变暖对陆地生态系统凋落物和土壤的影响提供了有效手段 [2–3].

全球温带森林生态系统土壤碳储量为 $104.3 \times 10^{15}\ \text{g}$ [4], 在调节全球碳平衡中具有重要作用. 目前稳定碳同位素在植物-土壤生态系统碳循环研究中得到广泛应用 [5–6], 是定量研究与气候变化、土地利用变化相关的 C_3 、 C_4 植物之间演替历史和土壤碳更新历史的有效手段 [7–8]; 与有机碳分组技术 [9]、土壤粒级分类技术 [5, 10] 相结合, 可以量化土壤有机碳分解速率及不同年龄有机碳分布状况. 已有研究表明, 高等植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在垂直样带上的分布规律很可能与温度变化有关 [11–12]. 而土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值在垂直梯度带的分布状况是否也与温度有关? 土壤及其各粒级组分中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值对温度升高的响应如何? 这些问题对研究气候变化下陆地生态系统碳周转和碳平衡具有重要意义. 本试验选择长白山北坡垂直样带阔叶红松林 (海拔 740 m)、云冷杉林 (海拔 1350 m)、岳桦林 (海拔 1996 m) 3 种典型温带原始森林土壤, 并将土柱从高海拔样地向低海拔样地做置换试验, 探讨了 3 种原始森林地表凋落物和土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值在自然垂直样带、不同土壤粒级分布状况及其对土柱置换模拟增温的响应, 旨在为未来全球变暖情景下森林土壤碳循环提供基础数据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本试验在位于长白山北坡的长白山自然保护区 ($42^\circ24'\ \text{N}$, $128^\circ28'\ \text{E}$) 内进行, 其植被随着海拔高度的变化呈完整的垂直带谱, 自下而上分布着阔叶红松林、云冷杉林和岳桦林. 阔叶红松林分布在海拔 600 ~ 1100 m, 年均气温 $0.9\ ^\circ\text{C} \sim 3.9\ ^\circ\text{C}$, 年均降水量为 700 mm, 主要乔木为红松 (*Pinus koraiensis*)、椴

树 (*Tilia amurensis*)、水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*) 等, 黄土母质, 土壤类型为暗棕色森林土. 云冷杉林分布在海拔 1100 ~ 1700 m, 年均气温为 $-2.3\ ^\circ\text{C} \sim 0.9\ ^\circ\text{C}$, 年均降水量为 800 mm, 主要乔木为鱼鳞云杉 (*Picea jezoensis*)、红皮云杉 (*Picea koyamai* var. *koraiensis*) 和臭冷杉 (*Abies neophrolepis*) 等, 火山灰沙母质, 土壤类型为棕色针叶林土. 岳桦林分布在海拔 1700 ~ 2000 m, 年均气温为 $-3.2\ ^\circ\text{C} \sim -2.3\ ^\circ\text{C}$, 年均降水量在 1000 ~ 1400 mm, 乔木主要为岳桦 (*Betula ermanii*), 火山灰沙和坡积石砾母质, 土壤类型为山地生草森林土 [13].

1.2 研究方法

1.2.1 样地布置与土柱置换试验 2007 年 6 月 8 日, 在长白山北坡阔叶红松林、云冷杉林和岳桦林各设置 5 个 $3\ \text{m} \times 3\ \text{m}$ 样方 (3 个为对照, 2 个用作采集或安置土柱), 样方间距 2 m. 用直径 30 cm、高 30 cm PVC 管采集高海拔样地土壤土柱, 并保持地表凋落物原状, 然后安置到低海拔样地事先挖好的土坑中, 将土柱四周压实, 同时保持样方微地形不变. 在 1 个云冷杉林样方中采集 8 个土柱, 安置到阔叶红松林样方中; 在 2 个岳桦林样方采集土柱, 分别安置到云冷杉林样方 (8 个) 和阔叶红松林样方 (8 个).

1.2.2 样品采集 2007 年 6 月 9 日, 在上述 9 个对照样方中采集凋落物和土壤样品, 用 $0.33\ \text{m} \times 0.33\ \text{m}$ 的标准框采集未分解和已分解凋落物, 每个样方中采集 3 个标准框样品混匀, 用直径为 2.5 cm 的土钻采集 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土壤, 每个样方中采集 6 钻土壤混匀. 2008 年 8 月 12 日采集 9 个对照样方中 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土壤, 同时, 在每个埋设土柱样方中随机选择 3 个土柱, 移除覆盖其上的凋落物, 采集土柱中 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土壤. 共采集 18 个凋落物样品和 54 个土壤样品. 凋落物立即自然风干, 土壤需剔除植物残体和细根, 过 2 mm 筛, 密封并低温冷藏.

1.2.3 测定方法 5 cm 土层温度使用数字测温仪测定. 0 ~ 20 cm 土壤湿度采用铝盒烘干法. 将 2007 年采集的凋落物和土壤样品磨碎, 过 0.15 mm 筛. 将 2008 年采集的相同类型的 3 个土壤样品各称取 20 g

后,均匀混合,自然风干,取部分土样磨碎,过 0.15 mm筛,另一部分用于土壤不同粒径组分的物理分级.土壤颗粒分级采用湿筛法分离>1000 μm、500~1000 μm和63~500 μm的砂粒部分,吸管法分离2~63 μm粉粒和<2 μm的粘粒部分^[14],所有组分60℃烘干,过0.15 mm筛.用MAT253型稳定同位素质谱仪(美国热电公司 Thermo Scientific)测定总有机碳(TOC)、全氮(TN)和稳定C同位素组成($\delta^{13}\text{C}$ 值).供试凋落物和土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值以千分比(‰)为单位,采用PDB(pee dee belemnite)标准,分析误差<0.1‰.部分土壤和凋落物数据见表1和参考文献[15].

1.3 数据处理

所有数据分析均采用SPSS 13.0软件中LSD进行多重比较,Paired T-Test进行配对比较,用Pearson相关系数(r)表示土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤温度、湿度及土壤碳、氮养分间的相关关系.

2 结果与讨论

2.1 长白山北坡垂直样带原始林凋落物与土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 状况

由图1可以看出,3种林型地表凋落物到20 cm层土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在-29.6‰~-25.2‰之间变化,且土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-26.4‰~-25.2‰)明显高于凋落物 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-29.6‰~-28.3‰).这说明0~20 cm层土壤有机碳主要源于地表凋落物为C₃植物来源的有机碳^[6,16],由于土壤中富含¹²C的活性有机碳比凋落物中¹²C有机碳的分解能力强,土壤¹³C相对富集^[6,8].

在垂直样带上,3种林型地表凋落物到20 cm层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值自上向下逐渐增加,这种趋势在土壤层中更加明显.阔叶红松林(PB)样地中已分解凋落物 $\delta^{13}\text{C}$ 值比未分解凋落物 $\delta^{13}\text{C}$ 值高

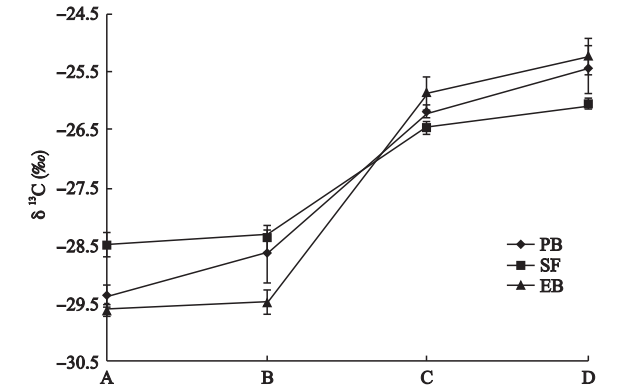


图1 2007年6月3种林型凋落物和土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值
Fig. 1 $\delta^{13}\text{C}$ values in the three typical forest soils and litters in June 2007 (mean±SE, n=3).

PB:阔叶红松林 Broadleaf-Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest; SF:云冷杉林 Spruce-fir (*Picea asperata*-*Abies nephrolepis*) forest; EB:岳桦林 Erman's birch (*Betula ermanii*) forest. 下同 The same below. A:未分解凋落物 Undecomposed litter; B:已分解凋落物 Decomposed litter; C:0~10 cm土层 0~10 cm soil layer; D:10~20 cm土层 10~20 cm soil layer.

0.8‰($P<0.05$),而云冷杉林(SF)和岳桦林(EB)样地中已分解凋落物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与未分解凋落物 $\delta^{13}\text{C}$ 值无明显差异;3种林型中10~20 cm土层有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值均明显高于0~10 cm土层(LSD).自工业革命以来,富¹²C化石燃料的燃烧使大气CO₂的 $\delta^{13}\text{C}$ 值由-6.5‰下降到-7.8‰^[17],固定在植物-土壤系统中的有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值也逐年下降,由于土壤有机碳的平均年龄随土层深度增加而增大,因此,早期形成的下层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值比新近形成的上层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值高^[18].研究发现,随着土壤深度增加,有着长期相同植物群落历史的土壤剖面有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加,其中C₃生态系统土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值的富集作用最明显,这可能与凋落物分解作用有关^[8].

在垂直样带,未分解和已分解凋落物 $\delta^{13}\text{C}$ 值大小均表现为云冷杉林(-28.3‰)>阔叶红松林(-29.0‰)>岳桦林(-29.6‰);0~10 cm和10~

表1 长白山北坡样方凋落物与土壤基本理化状况

Tab.1 Characteristics of litter and soil samples in the sampling plots on Changbai Mountains (mean±SE, n=3)

样地 Plot	土壤温度* Soil temperature (℃)	土壤湿度* Soil moisture (%)	凋落物全碳** Litter total C (g·kg ⁻¹)	凋落物全氮** Litter total N (g·kg ⁻¹)	土壤全碳** Soil total C (g·kg ⁻¹)	土壤全氮** Soil total N (g·kg ⁻¹)
PB	15.6±0.1a	28.8±1.2b	434.92±6.60ab	16.89±0.22b	40.12±5.46b	小3.09±0.47ab
SF	14.9±0.1b	24.5±0.7b	463.54±10.31a	13.48±0.33c	40.53±1.75b	1.86±0.09b
EB	12.7±0.4c	40.9±1.2a	390.17±39.71b	20.56±2.38a	80.23±11.46a	5.35±0.57a

每列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different letters were significant at 0.05 level in the same column (LSD). PB:阔叶红松林 Broadleaf-Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest; SF:云冷杉林 Spruce-fir forest (*Picea asperata*-*Abies nephrolepis*); EB:岳桦林 Erman's birch (*Betula ermanii*) forest. * 2008年8月12日测量值 Values measured in August 12th 2008; ** 2007年6月9日测量值,凋落物C、N含量为未分解和已分解平均值,土壤C、N含量为0~10 cm和10~20 cm平均值 Values measured in June 9th 2007, litter total C and N values were means of decomposed and undecomposed litter, soil total C and N values were means of 0~10 cm and 10~20 cm soil layers.

20 cm 土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值均表现出岳桦林 (-25.5‰) > 阔叶红松林 (-25.8‰) > 云冷杉林 (-26.2‰) 的变化趋势. 其中, 岳桦林样地中凋落物 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低, 土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高, 说明岳桦林土壤经过多年的分解, 已成为年龄相对较长、较稳定的碳库, 而云冷杉林地则相反.

土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤温度呈显著负相关 ($r = -0.788, P < 0.05$), 与土壤湿度呈显著正相关 ($r = 0.856, P < 0.05$), 而与土壤全碳、全氮含量不相关 ($r = -0.333, r = -0.146, P > 0.05$), 说明垂直样带上土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值受温度和湿度的共同影响(图2). 长白山垂直样带土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值随温度变化趋势与 Bird 等^[5] 在加拿大西部南北样带土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化趋势一致; 而土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值随湿度的变化则与 Bird 等^[19] 的研究结果相反, 可能由于后者在大尺度研究范围内, 样地间降水量增加伴随着 C_3/C_4 植物比例的增大, 而长白山垂直样带的植被类型均为 C_3 植物.

2.2 长白山北坡垂直样带原始林土壤各粒级组分中有有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 状况

由图3可以看出, 0~10 cm 土壤各粒级组分中有有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显低于 10~20 cm 土壤相应粒级的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 平均降幅为 0.6‰. 0~10 cm 土壤砂粒 ($>63\text{ }\mu\text{m}$)、粉粒 ($2\sim63\text{ }\mu\text{m}$) 和粘粒 ($<2\text{ }\mu\text{m}$) 有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值在垂直梯度样带上的变化趋势基本一致,

均表现为岳桦林 > 云冷杉林 > 阔叶红松林; 10~20 cm 土壤砂粒有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现为岳桦林 > 阔叶红松林 > 云冷杉林; 粉粒和粘粒 $\delta^{13}\text{C}$ 值均表现出阔叶红松林 > 岳桦林 > 云冷杉林的变化趋势. 3 种林型土壤不同粒级组分中有有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值随粒径减小而增大, 其中, 粘粒 ($<2\text{ }\mu\text{m}$) 和粉粒 ($2\sim63\text{ }\mu\text{m}$) 有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值均明显高于砂粒 ($>63\text{ }\mu\text{m}$) $\delta^{13}\text{C}$ 值.

Bird 等^[5] 认为, 与砂粒相比, 粒径较小的粘粒和粉粒组分的 ^{14}C 放射性活度较低, 有机碳在土壤中存留时间较长, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对较高; 另外, 由于土壤粒径较小组分与微生物的交互作用更密切, 而且土壤微生物生物量碳 (MBC) 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比其整体土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正 1.1‰~4.5‰, 因此富 ^{13}C 的 MBC 被固定在粒径较小的粘粒和粉粒中, 使土壤粘粒和粉粒 $\delta^{13}\text{C}$ 值比砂粒 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正.

2.3 土柱置换试验对土壤及其各粒级组分中有有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

经过 1 年土柱置换增温试验后, 云冷杉林和岳桦林两种原始林整体土壤 (bulk soil) $\delta^{13}\text{C}$ 值均呈下降趋势(图4). 其中, 岳桦林土柱置换到阔叶红松林 (EB-PB) 后, 土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值降幅最大, 为 0.7‰; 其次为岳桦林土柱置换到云冷杉林 (EB-SF) 和云冷杉林土柱置换到阔叶红松林 (SF-PB), 分别降低了 0.5‰ 和 0.3‰. 2008 年 8 月 EB-PB 土壤温度增加了 2.9℃, 而 EB-SF 和 SF-PB 的增温幅度相

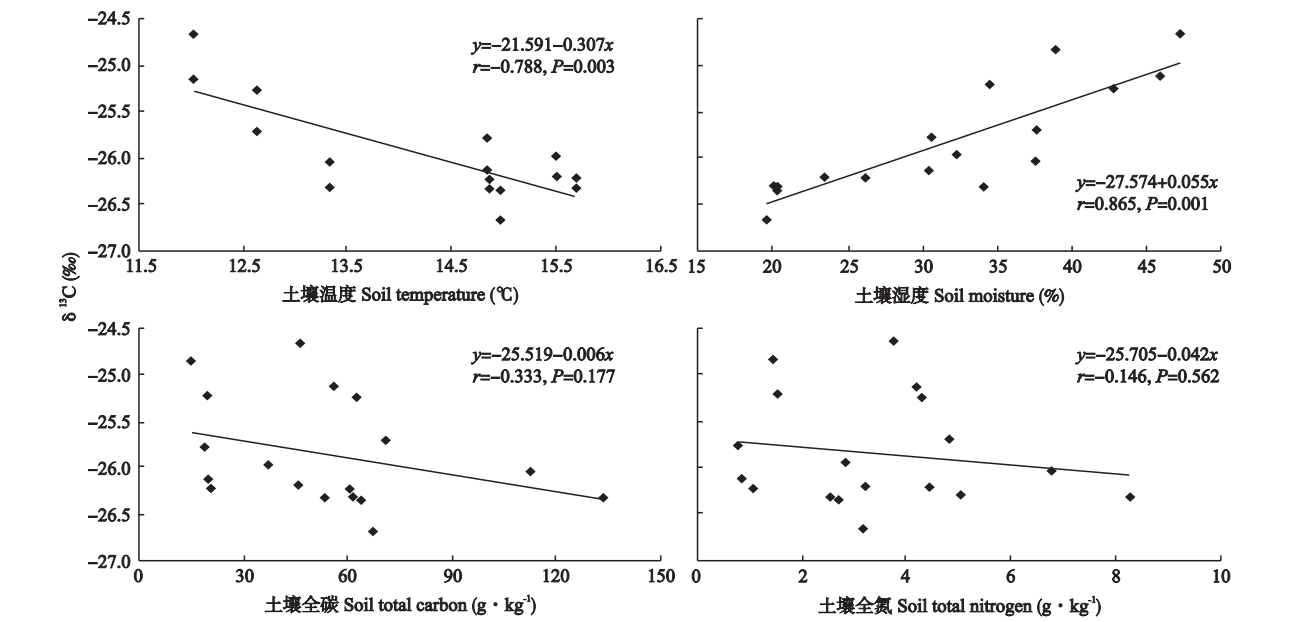


图2 3种林型土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤温度、湿度、全碳和全氮的相关关系
Fig. 2 Correlations between soil $\delta^{13}\text{C}$ values and temperature, moisture, total carbon and total nitrogen under three typical natural forest types on Changbai Mountains.

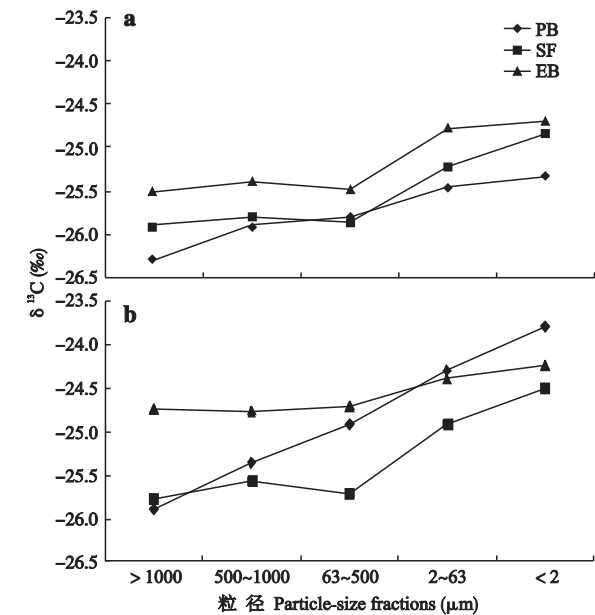


图3 长白山森林土壤不同粒径土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布 (2008-08)

Fig. 3 $\delta^{13}\text{C}$ values of organic carbon in particle-size fractions in forest soils of Changbai Mountains in August 2008.

a) 0 ~ 10 cm; b) 10 ~ 20 cm. 下同 The same below.

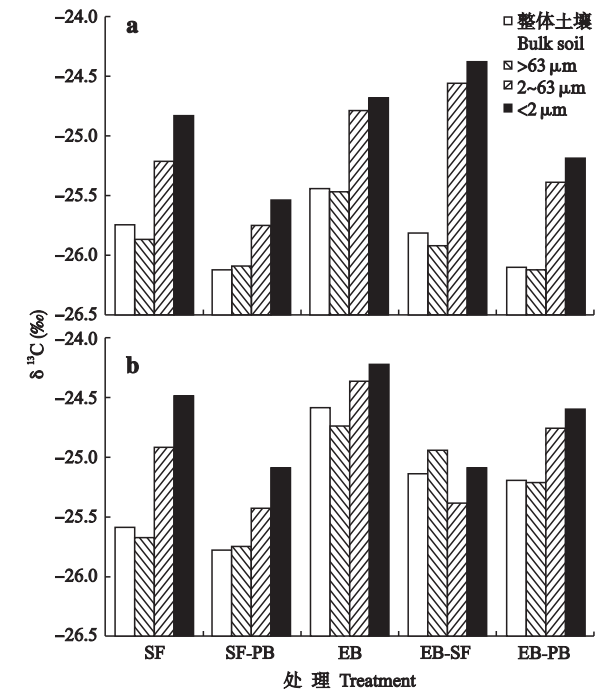


图4 置换土柱处理与对照处理土壤及其各粒级 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (2008-08)

Fig. 4 $\delta^{13}\text{C}$ values of soils and particle-size fractions in the transferred soil cores and their control treatments in August 2008.

SF-PB:从云冷杉林采集土柱埋置在阔叶红松林 The soil cores of Spruce-fir forest transferred to Broadleaf-Korean pine mixed forest; EB-SF:从岳桦林采集土柱埋置在云冷杉林 The soil cores of Erman's birch forest transferred to Spruce-fir forest; EB-PB:从岳桦林采集土柱埋置在阔叶红松林 The soil cores of Erman's birch forest transferred to Broadleaf-Korean pine mixed forest.

对较小,分别为 2.2 $^{\circ}\text{C}$ 和 0.7 $^{\circ}\text{C}$ (表 1). 这说明土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值的降幅可能与土壤增温幅度有关.

土柱置换试验与垂直样带获得的结果基本一致. 但由于垂直样带土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值受到温度和湿度的共同影响, $\delta^{13}\text{C}$ 值没有表现出随着海拔梯度下降而降低的趋势,而土柱置换增温试验土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值随海拔下降则呈降低趋势. Bird 等^[5,17,20] 对生长 C_3 植物的表层土壤的研究结果表明,低纬度、低海拔区的高温环境可能引起该地区土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值低于高纬度、高海拔区,如热带森林土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值比同海拔高纬度区森林土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负约 1‰.

不同样带土柱置换后,EB-PB 的土壤粘粒、粉粒和砂粒有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值比对照土壤相应粒级 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低 0.4‰ ~ 0.6‰;EB-SF 的 10 ~ 20 cm 层土壤各粒级组分中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值均下降,而且粘粒和粉粒 $\delta^{13}\text{C}$ 值降幅大于砂粒 $\delta^{13}\text{C}$ 值降幅;SF-PB 的土壤粘粒 (<2 μm) 和粉粒 (2 ~ 63 μm) 有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值比对照土壤相应粒级 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低 0.5‰ ~ 0.7‰,而土壤砂粒 (>63 μm) $\delta^{13}\text{C}$ 值仅比对照降低 0.1‰ ~ 0.2‰. 土柱置换增温试验后,土壤各粒级中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值总体呈下降趋势,其中砂粒有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值平均降幅较小 (0.33‰),粉粒和粘粒 $\delta^{13}\text{C}$ 值降幅较大 (0.47‰和 0.48‰). 已有研究表明,土壤有机碳的年龄随着土壤颗粒粒径的减小而增加^[5],而土壤粒径较小组分中有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值对温度升高的响应更强烈,说明未来气候变暖可能对储藏在土壤细小颗粒中年龄较长的有机碳带来明显影响.

3 结 论

在长白山北坡垂直样带,3 种原始林地表凋落物到 20 cm 层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值由上层向下层呈逐渐增加趋势. 土壤不同粒径组分中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值均随粒径减小而增大. 凋落物 $\delta^{13}\text{C}$ 值为云冷杉林>阔叶红松林>岳桦林;土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值为岳桦林>阔叶红松林>云冷杉林. 土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤温度呈显著负相关,与土壤湿度呈显著正相关.

经过 1 年土柱置换增温试验后,供试土壤及其各粒级组分中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值均呈下降趋势,粉粒和粘粒 $\delta^{13}\text{C}$ 值的降幅较大,说明未来气候变暖可能对储藏在细小颗粒中年龄较长的有机碳带来明显影响.

致谢 野外工作在中国科学院长白山森林生态系统定位研究站进行;野外采样、室内分析工作中戴冠华、徐丽君提供帮助,一并致谢.

参考文献

[1] IPCC. Intergovernmental panel on climate change, Climate change 2001: The scientific basis// Houghton JT, ed. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2001

[2] Hart SC, Perry DA. Transferring soils from high- to low-elevation forests increases nitrogen cycling rates: Climate change implications. *Global Change Biology*, 1999, **5**: 23–32

[3] Hart SC. Potential impacts of climate change on nitrogen transformations and greenhouse gas fluxes in forests: A soil transfer study. *Global Change Biology*, 2006, **12**: 1032–1046

[4] Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ, *et al.* Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, **298**: 156–159

[5] Bird MI, Santruckova H, Lloyd J, *et al.* The isotopic composition of soil organic carbon on a north-south transect in western Canada. *European Journal of Soil Science*, 2002, **53**: 393–403

[6] Liu W (刘 微), Lü H-H (吕豪豪), Chen Y-X (陈英旭), *et al.* Applications of stable carbon isotope technique in the research of carbon cycling in soil-plant system. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2008, **19**(3): 674–680 (in Chinese)

[7] Liu QM, Wang SJ, Piao HC, *et al.* The variation of soil organic matter in a forest-cultivation sequence traced by stable carbon isotopes. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2003, **22**: 83–88

[8] Yu G-R (于贵瑞), Wang S-Q (王绍强), Chen P-Q (陈泮勤), *et al.* Isotope trace approaches in soil organic carbon cycle research. *Advances in Earth Science (地球科学进展)*, 2005, **20**(5): 568–577 (in Chinese)

[9] Bird JA, Kleber M, Torn MS. ¹³C and ¹⁵N stabilization dynamics in soil organic matter fractions during needle and fine root decomposition. *Organic Geochemistry*, 2008, **39**: 465–477

[10] Bird M, Kracht O, Derrien D, *et al.* The effect of soil texture and roots on the stable carbon isotope composition of soil organic carbon. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, **41**: 77–94

[11] Korner C, Farquhar GD, Wong SC. Carbon isotope discrimination by plants follows latitudinal and altitudinal

trends. *Oecologia*, 1991, **88**: 30–40

[12] Morecroft MD, Woodward FI. Experimental investigation on the environmental determination of ¹³C at different altitudes. *Journal of Experimental Botany*, 1990, **41**: 1303–1308

[13] Wang M (王 森), Ji L-Z (姬兰柱), Li Q-R (李秋荣), *et al.* Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in different forest types in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2003, **14**(8): 1234–1238 (in Chinese)

[14] Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry (中国林业科学院林业研究所). Determination of Forest Soil Particle-Size Analysis: Mechanical Analysis GB 7845–1987. Beijing: China Standards Press, 1987 (in Chinese)

[15] Zhang X-Y (张心昱), Meng X-J (孟宪菁), Gao L-P (高鲁鹏), *et al.* Soil nutrient contents and their responses to the soil core transferring experiment of three typical natural forests along Changbai Mountain transect. *Journal of Natural Resources (自然资源学报)*, 2009, **24**(8): 1386–1392 (in Chinese)

[16] Smith BN, Epstein S. Two categories of ¹³C/¹²C ratios for higher plants. *Plant Physiology*, 1971, **47**: 380–384

[17] Bird MI, Chivas AR, Head J. A latitudinal gradient in carbon turnover times in forest soils. *Nature*, 1996, **381**: 143–146

[18] Zhu S-F (朱书法), Liu C-Q (刘丛强), Tao F-X (陶发祥), *et al.* Geochemical characteristics of stable carbon isotopes in soil organic matter from Karst areas. *Earth and Environment (地球与环境)*, 2006, **34**(3): 51–58 (in Chinese)

[19] Bird MI, Veenendaal EM, Lloyd JJ. Soil carbon inventories and ¹³C along a moisture gradient in Botswana. *Global Change Biology*, 2004, **10**: 342–349

[20] Bird MI, Haberle SG, Chivas AR. Effect of altitude on the carbon-isotope composition of forest and grassland soils from Papua New Guinea. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, **8**: 13–22

作者简介 樊金娟,女,1972 年生,博士,副教授. 主要从事植物生理生态学研究. E-mail: jinjuanf@hotmail.com

责任编辑 李凤琴