

中国东北样带土壤活性有机碳的分布及其对气候变化的响应

王淑平^{1,2} 周广胜^{1*} 高素华³ 郭建平³

(1 中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

(2 吉林农业大学, 长春 130118) (3 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要 基于中国东北样带 2001 年考察采集土样的实测数据及 CO₂ 浓度升高和干旱胁迫的模拟试验资料, 分析了土壤活性有机碳的分布特征及其对气候变化的响应。结果表明, 样带土壤活性有机碳与土壤有机碳之间呈极显著正相关关系(相关系数 $R = 0.993$, $p < 0.001$)。表层土壤活性有机碳平均为 $(3.52 \pm 0.881) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占表层土壤有机碳的 $13.1\% \pm 0.78\%$; 下层土壤活性有机碳平均为 $(1.14 \pm 0.250) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占下层土壤有机碳的 $10.9\% \pm 0.79\%$ 。样带土壤活性有机碳沿经度分布趋势基本与土壤有机碳一致, 但土壤活性有机碳含量随深度的增加而下降的幅度大于土壤有机碳。土壤活性有机碳和土壤全量氮、磷、硫、锌及有效氮、磷、钾、锰、锌等均呈显著或极显著相关关系, 与土壤 pH 值、土壤容重、持水量及孔隙度也呈显著或极显著相关关系。土壤活性有机碳与降水量之间具有正的相关关系, 其相关系数为 $R = 0.712$ ($p < 0.001$) 高于土壤有机碳与降水量之间的相关系数 $R = 0.677$ ($p < 0.001$)。短期培养条件下, CO₂ 浓度升高及干旱胁迫下, 土壤有机碳的变化不大, 其变异系数为 1.28%; 相比之下, 土壤活性有机碳对气候变化比较敏感, 其变异系数为 29.67%。不同土壤湿度, 土壤活性有机碳含量发生变异的幅度因 CO₂ 浓度升高而降低。

关键词 土壤活性有机碳 中国东北样带 CO₂ 浓度升高 干旱胁迫

DISTRIBUTION OF SOIL LABILE CARBON ALONG THE NORTHEAST CHINA TRANSECT (NECT) AND ITS RESPONSE TO CLIMATIC CHANGE

WANG Shu-Ping^{1,2} ZHOU Guang-Sheng^{1*} GAO Su-Hua³ and GUO Jian-Ping³

(1 Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

(2 Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

(3 The Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract Terrestrial transects have become an important and effective method for the study of global change. The Northeast China Transect (NECT) is one of the fifteen global transects recognized by IGBP, which is assigned along the latitude 43°30' N in the mid-latitude of the temperate zone, located between longitude 112° - 130°30' E, latitude 42° - 46° N. It is about 1 600 km in length and 300 km in width. NECT is mainly driven by precipitation, and has become an effective platform of global change study in China.

Soil labile carbon is a very dynamic proportion of soil organic carbon. In this paper, we got soil labile carbon by oxidation of potassium permanganate. Based on the data from the field survey in 2001 along NECT and a simulated experiment, the distribution of soil labile carbon along the Northeast China Transect (NECT) and its responses to climatic change were analyzed. The results indicated that the average of soil labile carbon was $(3.52 \pm 0.881) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ accounting for $13.1\% \pm 0.78\%$ of soil organic carbon along the NECT. The values of soil labile carbon were $(10.88 \pm 2.236) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in longitude 126° - 131°, $(1.35 \pm 0.327) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in longitude 119° - 126°, $(2.07 \pm 0.342) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in longitude 113° - 119° and $(0.51 \pm 0.216) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in longitude 111° - 113°. Soil labile carbon was significantly related to soil organic carbon ($R = 0.993$, $p < 0.001$). They had a similar trend of the horizontal distribution. The range of decrease of soil labile carbon in depth was bigger than that of soil organic carbon. The content of soil labile carbon had a close linear relationship with soil pH, soil total nitrogen, soil total phosphorus, soil total sulphur, soil total zinc, soil available nitrogen, soil available phosphorus, soil available potassium, soil available manganese, soil available zinc, soil bulk density, water holding capacity, and soil total porosity.

收稿日期: 2003-01-06 接受日期: 2003-08-13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043407)、中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-SW-01-12, KSCX2-1-07)和国家自然科学基金项目(30070642, 30028001, 40231018)

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: zhougs@public2.bta.net.cn

The soil labile carbon had a significant linear relationship with precipitation. Its correlation coefficient was 0.712 ($p < 0.001$) and more than soil organic carbon's ($R = 0.677$ $p < 0.001$).

In the short-term simulated experiment, the coefficient of variation of soil organic carbon was 1.28%. Coefficient of variation of soil labile carbon was 29.67%. Soil labile carbon was relatively more sensitive to doubled CO₂ content and different soil moistures. The variation of soil labile carbon resulting from different soil moistures was reduced with doubled CO₂ content. Thus, it is very important to understand the state and availability of soil organic carbon in the carbon cycle study.

Key words Northeast China Transect (NECT), Soil labile carbon, Doubled CO₂ content, Drought stress, Soil properties

土壤有机碳是土壤中较为活跃的部分,土壤有机碳的动态在土壤生产力和全球碳循环中起着十分重要的作用(Biederbeck *et al.*, 1994)。

全球土壤有机碳储量为 1.395×10^{15} g, 大约是植物碳储量的 2~3 倍(Post *et al.*, 1982; 1990), 与大气交换的土壤有机碳大约占陆地表层生态系统碳储量的 2/3, 土壤每年 CO₂ 排出量大约是化石燃料燃烧 CO₂ 释放量的 10 倍(Post *et al.*, 1982; Mooney *et al.*, 1987)。因此, 弄清陆地土壤有机碳的分布、转化及其对环境变化的响应是正确理解陆地生态系统碳循环过程和准确评估碳排放的关键之一。

土壤有机碳包括活性有机碳和非活性有机碳(Huggins *et al.*, 1998; Blair *et al.*, 1995)。土壤活性有机碳是指在一定的时空条件下, 受环境条件影响强烈、易氧化分解、对植物和微生物活性比较高的那一部分土壤碳素。由于土壤高的背景值和较大的空间异质性, 土壤有机碳的微小变化很难发现。因此, 土壤有机碳的活性部分, 不是土壤有机碳的全量, 它是指示土壤有机碳状态较有用的指标(Powelson & Jenkinson, 1981; Powelson *et al.*, 1987; Lefroy *et al.*, 1993)。土壤活性有机碳含量的高低直接影响土壤微生物的活性, 从而影响温室气体的排放(Yagi & Minami, 1990; 沈宏等, 1999)。土壤活性有机碳根据其测定方法和所指有机碳的组分不同而表述为水溶性有机碳、微生物量碳、轻组有机碳和易氧化活性有机碳。它们都可以在不同程度上反映土壤有机碳的有效性和土壤质量(徐明岗等, 2000)。但有关土壤活性有机碳的分布特征及其对气候变化响应的研究却很少。

Loginow 等(1987)提出采用高锰酸钾氧化法测得土壤活性有机碳, 该方法简单、易行。一些研究结果表明, 该法测得的土壤活性有机碳较全碳更敏感地指示土壤环境及性质的变化。(Lefroy *et al.*, 1993; Blair *et al.*, 1995; Mooney *et al.*, 1998)。

全球变化的陆地样带为理解陆地生态系统的碳循环过程、控制因子及其准确评估陆地生态系统碳

收支提供了有效的研究平台(Koch *et al.*, 1995; Raich *et al.*, 1997)。以水分为主要驱动力的中国东北样带(NECT)即为 IGBP 启动的全球陆地样带之一(张新时等, 1997)。

本文采用高锰酸钾氧化法测得土壤活性有机碳, 以中国东北样带为平台, 结合 CO₂ 浓度升高和干旱胁迫的模拟试验探讨土壤活性有机碳的分布特征及其对气候变化的响应, 以期为正确理解陆地生态系统碳循环过程提供基础资料。

1 材料和方法

1.1 中国东北样带考察

中国东北样带(Northeast China Transect, NECT)位于中纬度温带, 在 112°~130°30' E、42°~46° N 之间, 沿 43°30' N 设置。该样带长约 1 600 km, 宽约 300 km, 是以降水为驱动因素的样带。2001 年 7 月至 8 月, 由中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室组织对中国东北样带进行科学考察。考察队 7 月 26 日从中国吉林珲春出发, 沿 43°30' 向西, 遵循 1997 年中国科学院植物研究所对中国东北样带进行考察的路线, 每隔 25 km 用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)确定采样地点, 进行植物群落、土地利用方式、优势植物光合作用测定; 同时, 选取代表性地段, 挖土壤剖面, 按土壤发生层次选取不同层次土壤样品, 装入布袋, 风干后进行室内化学分析。

1.2 模拟试验

模拟试验在黑龙江省农业科学院的人工气候室内进行。人工气候室内的温度、湿度和日照均自动控制(人工气候室内的结构和性能参见文献(高素华等, 2002))。CO₂ 浓度采用日本 Fushi 公司生产的 ZSD CO₂ 分析仪监测, 并自动控制在一定的误差范围内($20 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)。

模拟试验采用盆栽试验进行, 供试土壤为黑土。2001 年 5 月 11 日播种羊草(*Leymus chinensis*)和针茅

(*Stipa baicalensis*), 6月9日移置到人工气候室, 并进行水分处理。6月12日开始进行 CO₂ 浓度处理, 24 h 连续通气, CO₂ 浓度分别为 650 ~ 700 μmol·mol⁻¹ 和 350 μmol·mol⁻¹。土壤湿度分别设置为土壤田间持水量的 30% ~ 45%, 45% ~ 60% 和 60% ~ 80%。采用称重法补水以保持设计的土壤湿度。10月16日试验结束。收集混合土壤样品, 风干后进行室内分析。

1.3 土壤样品的化学分析方法

(1) 土壤活性有机碳: 高锰酸钾氧化法 (Loginow *et al.*, 1987)。

(2) 土壤有机碳: 重铬酸钾氧化外加加热法 (以下分析方法均参照文献 (鲁如坤, 2000))。

(3) 土壤全 N: 半微量开氏法。

(4) 土壤全 K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, P, S: HNO₃-HF-HClO₄ 消煮-ICP 测定。

(5) 土壤有效 N: 碱解扩散法。

(6) 土壤有效 Fe, Mn, Cu, Zn, S: 0.1 mol·L⁻¹ HCl 浸提-ICP 测定。

(7) 土壤有效 P: 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法。

(8) 土壤有效 K: 1 mol·L⁻¹ 乙酸铵浸提-火焰光度法。

(9) 土壤 CEC: 草酸铵-氯化铵快速法。

(10) 土壤 pH 值: 酸度计测定 (水土比 = 5:1)。

(11) 土壤电导率: 电导率仪测定 (水土比 = 5:1)。

(12) 土壤田间持水量: 用环刀取原状土, 压力膜板法测定。

(13) 土壤机械组成: 吸管法测定。

(14) 土壤团聚体: 吸管法测定。

(15) 土壤容重: 环刀法测定。

2 结果与分析

2.1 土壤活性有机碳的分布特征

2.1.1 土壤活性有机碳的水平分布

土壤活性有机碳是土壤有机碳中活性较高的那部分碳素。中国东北样带土壤活性有机碳与土壤有机碳之间呈极显著正相关关系 (相关系数 $R = 0.993$, $p < 0.001$)。样带表层土壤活性有机碳平均为 $(3.52 \pm 0.881) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占表层土壤有机碳的 $13.1\% \pm 0.78\%$ 。

不同土壤、生物、气候条件, 土壤活性有机碳的数量有很大差异 (图 1)。样带东部 ($126^\circ \sim 131^\circ \text{ E}$) 为

温带针阔混交林山地, 植被种类极其丰富, 地带性土壤为暗棕壤, 并且多为自然土壤, 土壤活性有机碳含量较高。但由于采样区局部地理环境、植被结构及人类干扰程度的不同, 土壤活性有机碳含量变异较大, 平均为 $(10.88 \pm 2.236) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带中部 ($119^\circ \sim 126^\circ \text{ E}$) 为松辽平原栎林草原、农田区和大兴安岭山地草甸草原区, 属半湿润向半干旱过渡的气候。该区域主要土壤类型为黑土、黑钙土、盐化或碱化草甸土及风沙土, 土壤沙化、碱化严重, 土壤活性有机碳含量明显降低, 平均为 $(1.35 \pm 0.327) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带中西部 ($113^\circ \sim 119^\circ \text{ E}$) 为内蒙古高原草甸草原和典型草原区域, 具有典型的半干旱气候特征。该区地带性土壤为栗钙土, 局部丘陵区分布黑钙土, 土壤活性有机碳含量为 $(2.07 \pm 0.342) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带西部 ($112^\circ \sim 113^\circ \text{ E}$) 为内蒙古高原荒漠草原区域, 地带性土壤为棕钙土, 土壤较为贫瘠, 其活性有机碳含量最低, 平均为 $(0.51 \pm 0.216) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。但从总的趋势看, 样带内土壤活性有机碳呈现出随经度降低而下降的趋势 (图 1), 局部因土壤退化而出现波动。这一分布趋势与样带土壤有机碳的分布趋势相一致 (王淑平等, 2002)。

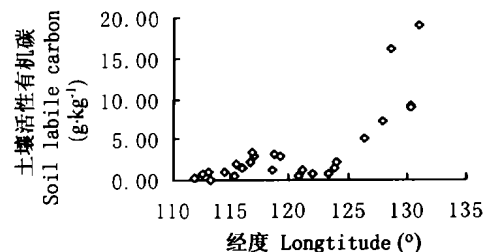


图 1 中国东北样带土壤活性碳的分布
Fig. 1 Distribution of soil labile carbon along NECT

2.1.2 土壤活性有机碳的剖面分布

中国东北样带土壤活性碳的剖面分布基本呈随深度的增加而下降的分布规律 (表 1)。样带下层土壤活性有机碳平均为 $(1.14 \pm 0.250) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 为表层土壤活性有机碳的 32.26%, 而下层土壤有机碳则为表层土壤有机碳的 39.77%。也就是说, 土壤活性有机碳含量随深度的增加而下降的幅度大于土壤有机碳总量随深度的增加而下降的幅度, 这可能与降解系数不同的土壤有机碳在土壤剖面中的分布规律不同有关。Elzein 和 Balesdent (1995) 等研究表明, 降解得比较快的有机碳在土壤中随深度呈指数下降; 而比较稳定的有机碳在剖面中均匀分布。

2.2 土壤活性有机碳的影响因子分析

2.2.1 土壤活性有机碳与土壤生化环境因子之间

表1 土壤活性有机碳的剖面分布
Table 1 Vertical distribution of soil labile carbon

土层 Soil layer	土壤有机碳 Soil organic carbon ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤活性有机碳 Soil labile carbon ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
表层 Top layer (T)	22.3 ± 4.93	3.52 ± 0.881
下层 Sub layer (S)	8.9 ± 1.20	1.14 ± 0.250
下层/表层 S/T (%)	39.77	32.26

表2 土壤活性有机碳与土壤理化性质之间的相关系数
Table 2 Correlation coefficients among soil labile carbon and soil properties

土壤性质 Soil properties	相关系数 Correlation coefficients (R)	显著水平 Significant levels
pH	$-0.639 (n=71)$	$p < 0.001$
全氮 Total nitrogen	$0.962 (n=71)$	$p < 0.001$
全磷 Total phosphorus	$0.569 (n=71)$	$p < 0.001$
全硫 Total sulphur	$0.294 (n=71)$	$p = 0.016$
全锌 Total zinc	$0.280 (n=71)$	$p = 0.018$
有效氮 Available nitrogen	$0.801 (n=71)$	$p < 0.001$
有效磷 Available phosphorus	$0.626 (n=71)$	$p < 0.001$
有效钾 Available potassium	$0.645 (n=71)$	$p < 0.001$
有效锰 Available manganese	$0.608 (n=71)$	$p < 0.001$
有效锌 Available zinc	$0.403 (n=71)$	$p < 0.001$
容重 Bulk density	$0.472 (n=34)$	$p = 0.005$
田间持水量 Water holding capacity	$0.410 (n=34)$	$p = 0.016$
总孔度 Total porosity	$0.472 (n=34)$	$p = 0.005$

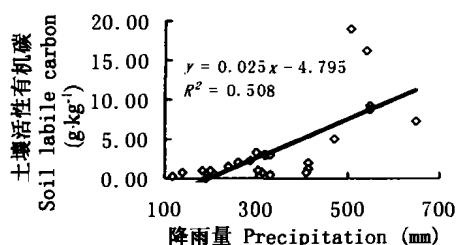


图2 土壤活性有机碳与降水量之间的关系

Fig.2 Relationship between soil labile carbon and precipitation

的关系

土壤活性有机碳来源于动植物及微生物残体,是生物、土壤、气候综合作用的产物。同时,它又影响土壤质量及土壤为栖息于其中的生物输送养分的能力。通过对样带土壤性质的相关分析可以看出(表2),土壤活性有机碳和土壤全量氮、磷、硫及有效氮、磷、钾、锰、锌均呈显著或极显著相关关系;土壤活性有机碳也与土壤容重、持水量及孔隙度呈显著或极显著相关关系。

2.2.2 土壤活性有机碳与气候因子之间的关系

气候因子影响土壤有机碳的数量(Post *et al.*, 1982;王淑平等,2002),也影响土壤活性有机碳的数量。对2001年样带土壤活性有机碳与降水量和年均温之间的关系分析表明,土壤活性有机碳与降雨量之间具有正相关关系(相关系数 $R = 0.712$, $p <$

0.001),而相同样品的土壤有机碳与降水量之间的相关系数 $R = 0.677$ ($p < 0.001$),说明土壤活性碳较有机碳总量对降水量的影响更为敏感;温度对土壤活性有机碳的影响较为复杂,土壤活性有机碳与年均温之间不呈线性关系。这可能和样带主要受降水驱动以及年均温数据与土壤活性有机碳数据的空间尺度不同等因素有关,对此还需进一步进行研究。

2.3 土壤活性有机碳对 CO_2 浓度升高和土壤湿度变化的响应

大气 CO_2 浓度和土壤水分直接影响植物的生长发育及其代谢状况(高素华等,2002),从而势必引起其栽培土壤的有机碳状态发生变化。图3和图4是不同大气 CO_2 浓度下土壤有机碳和活性有机碳对土壤湿度变化的反应。从图3、图4中可以看出,短时间培养情况下, CO_2 浓度升高及干旱胁迫下,土壤有机碳变化不大,其变异系数为1.28%;相比之下,土壤活性有机碳对气候变化比较敏感,整个试验中土壤活性有机碳的变异系数为29.67%。土壤湿度不同,土壤活性有机碳对 CO_2 浓度升高的反应不同。土壤正常湿度(土壤湿度占田间持水量的60%~80%)时,土壤活性有机碳在 CO_2 浓度升高时变化不大;土壤湿度占田间持水量的45%~60%时,和土壤正常湿度相比,土壤活性有机碳有所增加,但这种

增加的趋势由于 CO_2 浓度升高而下降;土壤湿度占田间持水量的 30%~45%时, CO_2 浓度升高与否,土壤活性有机碳含量都处于下降趋势。在 CO_2 浓度为 $700 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 $350 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时,土壤活性有机碳的变异系数分别为 18.87% 和 34.45%。说明不同土壤湿度引起的土壤活性有机碳的变异幅度因 CO_2 浓度升高而降低。

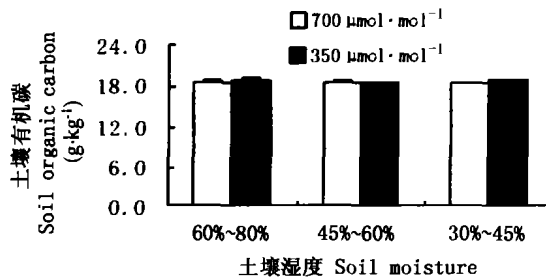


图3 土壤有机碳对不同土壤湿度的反应

Fig. 3 Response of soil organic carbon to different soil moistures

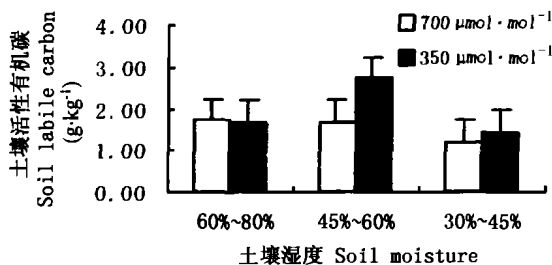


图4 土壤活性有机碳对不同土壤湿度的反应

Fig. 4 Response of soil labile carbon to different soil moistures

3 讨论

土壤有机碳是处于特定生态系统下的平衡值。土壤活性有机碳是土壤中活性较高的那部分有机碳。已有研究表明各种测定方法得到的土壤活性有机碳都较土壤有机碳敏感于环境的变化。Yagi 和 Minami (1990) 研究表明, CH_4 的排放量和土壤活性有机碳呈明显的线性关系。因此, 在研究陆地生态系统碳循环过程及其影响因子时, 不仅要考虑土壤碳储量, 而且也应该考虑土壤有机碳的组成及存在状态。

该文中, 我们对中国东北样带土壤活性有机碳的分布及其影响因子进行了分析。结果表明, 样带土壤活性有机碳与土壤有机碳之间呈极显著正相关关系(相关系数 $R = 0.993, p < 0.001$)。样带表层土壤活性有机碳平均为 $(3.52 \pm 0.881) \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占表层土壤有机碳的 $13.1\% \pm 0.78\%$, 下层土壤活性有机碳平均为 $(1.14 \pm 0.250) \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占下层土壤有机

碳的 $10.9\% \pm 0.79\%$ 。不同生态系统土壤活性有机碳含量不同, 样带土壤活性有机碳沿经度分布趋势与土壤有机碳基本一致, 但土壤活性有机碳含量随深度的增加而下降的幅度大于土壤有机碳。土壤活性有机碳和土壤全量氮、磷、硫、锌及有效氮、磷、钾、锰、锌均呈显著或极显著相关关系; 土壤活性有机碳也与土壤 pH 值、土壤容重、持水量及土壤孔隙度呈显著或极显著相关关系。

气候因子影响土壤有机碳的数量(王淑平等, 2002), 也影响土壤有机碳的组成(Amelung *et al.*, 1997)。本研究中, 土壤活性有机碳与降水量之间具有正相关关系, 其相关系数为 $R = 0.712 (p < 0.001)$, 高于土壤有机碳与降水量之间的相关系数 $R = 0.677 (p < 0.001)$; 土壤活性有机碳与年均温之间不呈线性关系, 这可能和样带主要受降水驱动以及年均温数据与土壤活性有机碳数据的空间尺度不同等因素有关, 对此还需进一步进行研究。

气候变化对土壤活性有机碳的影响很复杂, 短期栽培模拟试验在一定程度上表明土壤活性有机碳对气候变化的响应趋势。不同土壤湿度下, 土壤活性有机碳含量发生变异, 其变异幅度因 CO_2 浓度升高而得到降低。不同土壤湿度、 CO_2 浓度下土壤活性有机碳的变异系数(29.67%) 高于土壤有机碳的变异系数(1.28%), 进一步说明了土壤活性有机碳对气候变化较土壤有机碳更为敏感。

参 考 文 献

- Amelung, W., K.W. Flach & W. Zech. 1997. Climatic effects on soil organic matter composition in the Great Plains. *Soil Science Society of America Journal*, **61**:115~123.
- Biederbeck, V.O., H.H. Janzen, C.A. Campbell & R.P. Zentner. 1994. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment. *Soil Biology & Biochemistry*, **26**:1647~1656.
- Blair, G.J., R.D.B. Lefroy & L. Lisle. 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, **46**:1459~1466.
- Elzein, A. & J. Balesdent. 1995. A mechanistic simulation of the vertical distribution of carbon concentrations and residence time in soil. *Soil Science Society of America Journal*, **59**:1328~1335.
- Gao, S.H. (高素华) & J.P. Guo (郭建平). 2002. Responses of *A. neurolepidium chinensis* under double CO_2 content to soil drought stress. In: Zhou, G.S. (周广胜) ed. *Northeast China Transect and Global Change*. Beijing: Meteorology Press. 340~346. (in Chinese)
- Huggins, D. R., C.E. Clapp, R.R. Allmaras, J.A. Lamb & M. F. Layese. 1998. Carbon dynamics in corn-soybean sequences as estimated from natural ^{13}C abundance. *Soil Science Society of America Journal*, **62**:195~203.
- Koch, G. W., R.J. Scholes, W. L. Steffen, P. M. Vitousek & B.

- H. walker. 1995. The IGBP Terrestrial Transects: Science Plan. IGBP Report No.36. Stockholm: IGBP.
- Lefroy, R. D. B., G. J. Blair & W. M. Strong. 1993. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance. *Plant and soil*, **155/156**:399 ~ 402.
- Loginow, W., W. Wisniewski, S. S. Gonet & B. Ciescinska. 1987. Fraction of organic carbon based on susceptibility to oxidation. *Polish Journal of Soil Science*, **20**:47 ~ 52.
- Lu, R. K. (鲁如坤). 2000. Analysis method of soil and agrochemistry. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press. (in Chinese)
- Mooney, H. A., P. M. Vitousek & P. A. Matson. 1987. Exchange of materials between terrestrial ecosystems and the atmosphere. *Science*, **238**:926 ~ 932.
- Post, W. M., W. R. Emanuel, P. J. Zinke & A. G. Stangenberger. 1982. Soil carbon pools and life zones. *Nature*, **298**:156 ~ 159.
- Post, W. M., T. H. Peng, W. R. Emanuel, A. W. King, V. H. Dale & D. L. DeAngelis. 1990. The global carbon cycle. *American Scientist*, **78**:310 ~ 326.
- Powlson, D. S. & D. S. Jenkinson. 1981. A comparison of the organic matter, biomass, adenosine triphosphate and mineralizable nitrogen contents of ploughed and direct-drilled soils. *Journal of Agricultural Science*, **97**: 713 ~ 721.
- Powlson, D. S., P. C. Brookes & B. T. Christensen. 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology & Biochemistry*, **19**:159 ~ 164.
- Raich, J. W., A. E. Russel & P. M. Vitousek. 1997. Primary productivity and ecosystem development along an elevational gradient on Mauna Loa, Hawaii. *Ecology*, **78**:707 ~ 721.
- Shen, H. (沈宏), Z. H. Cao (曹志洪) & Z. Y. Hu (胡正义). 1999. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, **18**:32 ~ 38. (in Chinese with English abstract)
- Xu, M. G. (徐明岗), R. Yu (于荣) & B. R. Wang (王伯仁). 2000. Progress on the study of soil active organic matter. *Soil & Fertilizer (土壤肥料)*, **6**:3 ~ 7. (in Chinese)
- Wang, S. P. (王淑平), G. S. Zhou (周广胜), Y. C. Lü (吕育财) & J. J. Zou (邹建军). 2002. Distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus along NECT and their relationships with climatic factors. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **26**:513 ~ 517. (in Chinese with English abstract)
- Yagi, K. & K. Minami. 1990. Effects of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Science and Plant Nutrition*, **36**:559 ~ 610.
- Zhang, X. S. (张新时), Q. Gao (高琼), D. A. Yang (杨莫安), G. S. Zhou (周广胜), J. Ni (倪健) & Q. Wang (王权). 1997. A Gradient analysis and prediction on the Northeast China Transect for global change study. *Acta Botanica Sinica (植物学报)*, **39**:785 ~ 799. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 欧阳 华 责任编辑: 张丽赫