

# CO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度升高对土壤碳水化合物累积分布特征的影响

房蕊<sup>1,2</sup>, 鲁彩艳<sup>1</sup>, 史奕<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 碳水化合物作为土壤有机质重要成分之一, 一直被认为是较为灵敏的有机质示踪成分。在全球气候变化趋势下, CO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度升高可改变植物群落组成, 碳在地下生态系统的分配等最终间接地改变土壤化学特性。在未来大气环境变化趋势下, CO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度升高对植物-土壤生态系统的影响已成为众多学者研究的热点问题, 并取得了一定的成果, 而对土壤有机质研究中作为重要指标和主要对象——碳水化合物的影响研究相对较少, 为此综述了 CO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度升高对碳水化合物累积分布特征影响方面的最新进展, 并提出今后开展研究的建议。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度升高; 积累和分配; 土壤碳水化合物

中图分类号: S153.6 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2010)增刊-0285-04

## A Review: Effects of Elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> on Accumulation and Distribution Characteristics of Soil Carbohydrate

FANG Rui<sup>1,2</sup>, LU Cai-yan<sup>1</sup>, SHI Yi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Liaoning Shenyang, 110016, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Soil carbohydrates are a significant part and sensitive tracer of the soil organic matter. In global change trend, the studies on effects of elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> on plant-soil ecosystem become hotspot matter and obtain determinate harvest. However, few investigations focused on impact on soil carbohydrates. The newly progress in the effects of elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> on accumulation and distribution characteristics of soil carbohydrate are reviewed. Future systematic research in this field are also recommended.

**Keywords:** elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>; accumulation and distribution; soil carbohydrate

土壤有机质(SOM)是评价土壤质量的主要指标。碳水化合物和腐殖质分别被看作土壤有机C库中的活性部分和稳定部分<sup>[1]</sup>。碳水化合物作为土壤中最重要最易降解的有机成分之一, 一直被认为是较为灵敏的有机质示踪成分。碳水化合物是生物圈中最大的碳储备库<sup>[2]</sup>, 作为土壤的活性有机碳库部分, 虽然是易于降解的有机成分之一, 但是仍占土壤有机质总量的10%~20%<sup>[3]</sup>, 因而其变化规律可以指示土壤

有机质库的总体变化。

植物根及其分泌物是土壤碳水化合物的重要来源, 它们经微生物的快速降解可合成微生物碳水化合物并累积在土壤中。不同来源的碳水化合物的差异反映在单糖组分上, 一般认为, 植物来源的糖类水解后以葡萄糖、阿拉伯糖和木糖为主, 而微生物来源的糖类水解产物主要是葡萄糖、半乳糖和甘露糖等六碳糖, 而葡萄糖在两种来源的有机质中的分布比较均匀<sup>[4]</sup>。因此, 一些学者提出用六糖/五糖比值的变化来反映碳水化合物的相对来源。糖/有机碳比值可以反映有机质向腐殖质转化的成熟度和生物有效性<sup>[5]</sup>。正是基于上述原因, 碳水化合物能够灵敏指示有机质的变化。

收稿日期: 2009-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(30570348)

作者简介: 房蕊, 女, 硕士生, 主要从事农田土壤对全球变化响应方面研究。

通讯作者: 史奕 E-mail: shiyi@iae.ac.cn

## 1 土壤碳水化合物种类及影响因素

### 1.1 来源与种类

植物和土壤微生物是土壤中碳水化合物的主要来源,其中,植物是土壤碳水化合物的最初来源,微生物通过迅速降解植物残体,从而使土壤中累积微生物碳水化合物<sup>[6]</sup>。

碳水化合物是多数生物贮藏和消耗能量的主要方式,大多以多糖形式存在,并且大部分以与其他有机质组分紧密键合的形式存在<sup>[7]</sup>。土壤中的碳水化合物主要包括中性单糖、氨基单糖和酸性单糖。中性单糖主要包括木糖(Xylose)、阿拉伯糖(Arabinose)、核糖(Ribose)、葡萄糖(Glucose)、半乳糖(Galactose)、甘露糖(Mannose)、岩藻糖(Fucose)和鼠李糖(Rhamnose) 8种糖。土壤中存在11种氨基糖<sup>[8]</sup>,其中4种氨基糖被定量化,分别为氨基葡萄糖(GluN)、氨基半乳糖(GalN)、甘露糖胺(ManN)和胞壁酸(Mur)<sup>[9]</sup>。酸性单糖主要包括葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸<sup>[6]</sup>。

通常用中性糖来评价土壤有机质稳定性,而氨基糖则广泛用于评价土壤有机质的不同微生物来源。中性糖中的五碳糖聚合物(阿拉伯糖和木糖)来源于植物,在微生物作用下可以被合成为六碳糖聚合物(如半乳糖、甘露糖、岩藻糖、鼠李糖)释放到土壤中<sup>[10]</sup>。因此,可以用糖的浓度和组成评价SOM动力学的植物-微生物关系<sup>[11]</sup>,用六碳糖和五碳糖的比值(如(半乳糖)/(阿拉伯糖+木糖),半乳糖/阿拉伯糖及(半乳糖+甘露糖)/(阿拉伯糖+木糖))的变化来反映碳水化合物的相对来源<sup>[10]</sup>。由于氨基糖不会随着外界环境因素的改变而迅速变化<sup>[12]</sup>,很多人已经将氨基葡萄糖与胞壁酸的比例和氨基葡萄糖与氨基半乳糖的比例有效结合,来研究细菌和真菌对土壤氨基糖的相对贡献,进而研究真菌和细菌对土壤SOM转化和积累的动态变化机制的影响。

### 1.2 影响土壤中碳水化合物分布的因素

作为土壤微生物细胞必需的组成物质和主要能源,碳水化合物与土壤微生物存在密切的关系<sup>[5]</sup>。Hu等<sup>[4]</sup>在研究中发现,土壤中的碳水化合物与微生物生物量碳之间呈现明显的正相关。碳水化合物的含量和特性不仅影响土壤微生物活性,而且与土壤结构的形成有密切相关,因而对土壤环境质量和土壤中物质转化与循环有着重要的影响<sup>[13]</sup>。Yousefi等<sup>[14]</sup>分析表明,土壤团聚体的稳定性与热水浸提及弱酸浸提碳水化合物的相关性好于土壤有机碳,指出热水浸

提及弱酸浸提碳水化合物可以作为反映土壤质量,特别是和土壤团聚体相关的土壤质量的指示剂。作为一种较活泼、较易降解的土壤有机质,碳水化合物分布易受到各种因素的影响,如土壤的颗粒的密度和粒度、气候变化、微生物、土地利用、施肥等<sup>[15-16]</sup>。

已有研究表明,较粗的组分如砂砾大小的颗粒有机质中主要集中了植物来源的阿拉伯糖和木糖,而细的组分如黏粒中优先积累的是微生物来源的半乳糖和甘露糖<sup>[17]</sup>。碳水化合物在土壤机制中的位置和矿物颗粒结合程度对土壤有机质的动力学过程具有强烈的影响<sup>[18]</sup>。

有研究表明,湿润地区土壤有机质中的中性糖含量要高于相应的干燥地区,这是由于湿度不仅促进了植物和微生物多糖的含量增加,还加强了它们与矿物颗粒的结合,增强了中性糖在土壤中的稳定性<sup>[15]</sup>。

土地利用或管理措施的变化能够引起土地覆盖生物量的变化,打破土壤中C的输入和输出平衡<sup>[19]</sup>,从而引起土壤C库的相应调节<sup>[20]</sup>,导致包括土壤组成和功能在内的生态系统性质的显著变化。Jolivet等<sup>[16]</sup>发现,森林砍伐和耕作导致总土壤有机碳、碳水化合物和碳水化合物占有机碳比例的下降,土壤中性单糖的组成也发生了显著变化。转换用于耕作之后,植物源碳水化合物的比例随时间延长而增加,同时微生物源碳水化合物减少。正是因其对外界因素的响应远比有机质总体的变化更为明显,碳水化合物的含量和特性已成为土壤有机质研究中一项重要指标和主要对象<sup>[13]</sup>。

Angers等<sup>[21]</sup>的研究表明,施用有机肥在增加碳水化合物的绝对含量的同时,也增加了碳水化合物占土壤有机质的比例。Debosz等<sup>[22]</sup>研究了长期施肥(超过100a)对团聚体中碳水化合物的影响时,发现动物厩肥和矿质肥料会使团聚体中的碳水化合物增加,且两者差异不显著。

## 2 CO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>浓度升高对土壤碳水化合物累积分布特征的影响

由于城市化和工业化的发展,人类在改变着地球的气候。CO<sub>2</sub>是最重要的人为温室气体。公元1750年前,大气中CO<sub>2</sub>含量基本保持在280 μmol·mol<sup>-1</sup>左右。自工业革命以来的一个半世纪里,大气CO<sub>2</sub>浓度已升高了近100 μmol·mol<sup>-1</sup>,从280 μmol·mol<sup>-1</sup>升高到现在的370 μmol·mol<sup>-1</sup>,并每年以1~2 μmol·mol<sup>-1</sup>的速度增加,预计本世纪末CO<sub>2</sub>浓度将

增加一倍,达到  $700 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  [23]。CO<sub>2</sub> 是植物光合作用的唯一 C 源,是植物生存的基础,也是整个生态系统的基础,大气中 CO<sub>2</sub> 浓度升高必然会对植物的生理生态活动产生影响,事实表明,其对植物生长发育及生理代谢和产量已造成一定的影响 [24]。大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高主要通过以下 3 方面对土壤系统产生影响:(1)刺激了植物的光合作用,植物的生物量增加,输入到土壤中的物质增加;(2)使植物的化学组成改变,输入到土壤中的物质成分改变,同时减少蒸腾,增加土壤中的水分含量,影响土壤中物理、化学过程;(3)改变植物的生理机制,削弱了植物光合作用而促进了呼吸作用,改变碳在植物中的分配,也对土壤系统产生直接或间接的影响 [25-26]。

Bock 等 [11] 在大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高 (FACE) 条件下,研究了温带草地植物源和微生物源糖的周转,和对照相比,在 FACE 处理 7 年后 28% 的总糖返还到土壤中,糖在土壤颗粒组分中贡献为沙 < 粉沙 < 粘粒。微生物源在粉沙和粘粒中占优势,植物源糖在沙粒组分中更丰富。但到目前为止,很少研究是针对 FACE 条件下农田土壤碳水化合物累积和分布特征的。

关于臭氧,众所周知,在地表海拔 15 ~ 50 km 范围内的平流层中,O<sub>3</sub> 可以吸收太阳的高能紫外辐射,从而保护了地球上的生物免于遭受紫外线的危害。但是,在海平面距离地面 15 km 范围内的对流层中的,它却是一种对地球上的生命包括人类和动植物等有害的气体污染物。近几十年来,近地层 O<sub>3</sub> 浓度以每年 0.5% ~ 2.5% 的速度增长,O<sub>3</sub> 污染事件频发、持续时间增长、影响范围和破坏程度不断增大 [27]。据 2007 年 IPCC 报告预测,在本世纪末,北半球大陆夏季大气 O<sub>3</sub> 浓度将增加一倍,势必对整个生物界和地球生态环境产生深刻的影响 [23]。研究表明,O<sub>3</sub> 通过气孔进入植物体内,伤害植物组织,降低其光合速率,并改变碳在植物体内的分配,抑制光合作用和养分的吸收,使作物生物量和产量降低 [28-29]。植物通过根系向周围环境中释放有机物质,不同植物的根系分泌物还可影响根际微生物的种类。臭氧胁迫下可溶性根系分泌物的改变可能影响根际微生物的活性,从而潜在的改变根际的生态和营养动态 [30]。陈展等 [31] 研究表明,高浓度 O<sub>3</sub> ( $110 \text{ nmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) 会造成根际土壤微生物量碳降低 9.3%,非根际土壤微生物量碳下降 5.3%,显著降低根际土壤微生物的丰富度指数和多样性指数,分别比对照降低 23% 和 12%。Jones 等 [32] 研究也显示,暴露在 O<sub>3</sub> 浓度升高环境下

泥炭地可溶性有机碳 (DOC) 将减少 55% 以上。同时,O<sub>3</sub> 浓度增加引起植物根系的一些变化还会导致土壤微生物、土壤酶活性及土壤酚类物质的变化,从而对陆地生态系统碳循环产生深远影响 [33-34]。因此,土壤碳水化合物对 O<sub>3</sub> 浓度增加的响应需要进一步研究。

### 3 展望

CO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度的变化主要是通过改变植物群体组成,碳在地下生态系统的分配、土壤可溶性碳水化合物库的大小最终间接地改变土壤化学特性。在未来大气环境变化趋势下,CO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度升高对植物-土壤生态系统的影响已成为众多学者研究的热点问题,已经取得了一定的成果,而对土壤有机质研究中作为重要指标和主要对象——碳水化合物的影响研究相对较少,需进一步深入研究。我国是一个人口众多、耕地相对较少的农业大国,保持土地的可持续利用,在农业生产中占有举足轻重的地位。如果能通过易受到外界因素影响的碳水化合物的组成变化,探讨和了解近地层大气 CO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 含量的增加对易分解土壤有机质构成物质特征及功能,土壤微生物与土壤有机质之间的互作机制的影响,将为在大气环境变化背景下,我国农田可持续利用提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] Spaccini R, Conte P, Zena A, et al. Carbohydrates distribution in size - aggregates of three European soils under different climate [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2000a, 9: 468 - 476.
- [2] Macko S A, Ryan M, Engel M H. Stable isotope analysis of individual carbohydrates by gas chromatographic/combustion/ isotope ratio mass spectrometry [J]. *Chemical Geology*, 1998, 152: 205 - 210.
- [3] Ball B C, Cheshire M V, Robertson E A G, et al. Carbohydrate composition in relation to structural stability, compactibility and plasticity of two soils in a long - term experiment [J]. *Soil Tillage Research*, 1996, 39: 143 - 160.
- [4] Hu S, Coleman D C, Hendrix P F, et al. Biotic manipulation effects on soil carbohydrates and microbial biomass in a cultivated soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27: 1127 - 1135.
- [5] Piao H C, Hong Y T, Yuan Z Y. Seasonal changes of microbial biomass carbon related to factors in soils from karst areas of southwest China [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30: 294 - 297.
- [6] Cheshire M V. Nature and origin of carbohydrates in soils [M]. London: Academic Press, 1979.
- [7] 王俊儒,尉庆丰,曲 东,等. 土壤多糖及其在肥力上的意义 (一) [J]. *土壤通报*, 1995, 26: 239 - 240.  
WANG Jun - ru, WEI Qu - feng, QU Dong, et al. The significance of Soil polysaccharide on soil fertility (1) [J]. *Soil Bulletin*, 1995, 26:

- 239–240.
- [8] Stevenson F J. Isolation and identification of amino sugars in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47: 61–65.
- [9] Zhang X, Amelung W. Gas chromatographic determination of muramic acid, glucosamine, galactosamine, and mannosamine in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28: 1201–1206.
- [10] Oades J M. Soil organic matter and structural stability mechanisms and implications for management[J]. *Plant Soil*, 1984, 76: 319–337.
- [11] Bock M, Glaser B, Millar N. Sequestration and turnover of plant – and microbially derived sugars in a temperate grassland soil during 7 years exposed to elevated atmospheric pCO<sub>2</sub>[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 478–490.
- [12] Chantigny M H, Angers D A, Prévost D, Chalifour F P, et al. Soil aggregation and fungal and bacterial biomass under annual and perennial cropping systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61: 262–267.
- [13] Zhang W, He H B, Zhang X D. Determination of neutral sugars in soil by capillary gas chromatography after derivatization to aldonitrile acetates[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2007, 39: 2665–2669.
- [14] Yousefi M, Hajabbasi M, Shariatmadari H. Cropping system effects on carbohydrate content and water – stable aggregates in a calcareous soil of Central Iran[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 101: 57–61.
- [15] Amelung W, Flach K W, Zech W. Neutral and acidic sugars in particle – size fractions as influenced by climate[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 865–873.
- [16] Jolivet C, Angers D A, Chantigny M H, et al. Carbohydrate dynamics in particle – size fractions of sandy spodosols following forest conversion to maize cropping[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 2834–2842.
- [17] Guggenberger G, Christensen B T, Zech W. Land – use effects on the composition of organic matter in particle – size separates of soil (I): Lignin and carbohydrate signature[J]. *European Journal of Soil Science*, 1994, 45: 449–458.
- [18] Schulten H R, Leinweber P. New insights into organic – mineral particles: Composition, properties and molecular structure[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30: 399–432.
- [19] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 345–360.
- [20] Bolin B, Sukumar R. Global perspective[C]// Watson R T, Noble I R, Bolin B. (Eds), *Land Use, Land Use Change, and Forestry*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2000.
- [21] Angers D A, N' Dayegamiye A. Effects of manure application on carbon, nitrogen and carbohydrate contents of a silt loam and its particle – size fractions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, 11: 79–82.
- [22] Debosz K, Vognsen L, Labouriau R. Carbohydrates in hot water extracts of soil aggregates as influenced by long term management[J]. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33: 623–634.
- [23] IPCC. Summary for Policymakers. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M/OL]. Ed. Richard Alley, Terje Bernsen, Nathaniel L. Bindoff, Zhenlin Chen et al. pp. 1–7 Website: <http://www.ipcc.ch>
- [24] 徐玲, 赵天宏, 胡莹莹, 等. CO<sub>2</sub> 浓度升高对春小麦光合作用和籽粒产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2008, 28(5): 867–872. XU Ling, ZHAO Tian – hong, HU Ying – ying, et al. Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on photosynthesis and grain yield of spring wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2008, 28(5): 867–872.
- [25] Shi Y, Wang S Y, Han L, et al. Soil nitrification and denitrification potentials in a wheat field soil as affected by elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and rice straw incorporation[J]. *Bulletin Environ Contam Toxicol*, 2006, 77: 694–699.
- [26] Glaser B, Miller N, Blum H. Sequestration and turnover of bacterial – and fungal – derived carbon in a temperate grassland soil under long – term elevated atmospheric pCO<sub>2</sub>[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 1521–1533.
- [27] Vingarzan R. A review of surface ozone background levels and trends[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 33: 3431–3442.
- [28] 黄辉, 王春乙, 白月明, 等. O<sub>3</sub> 与 CO<sub>2</sub> 浓度倍增对大豆叶片及其总生物量的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(4): 52–55. HUANG Hui, WANG Chunyi, BAI Yue min, et al. Impact of O<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub> concentration doubling on the soybean leaf development and biomass[J]. *Chinese Journal of Eco – Agriculture*, 2005, 13(4): 52–55.
- [29] Li G M, Shi Y, Chen X. Effects of elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> on phenolic compounds in spring wheat and maize leaves[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2008, 81: 436–439.
- [30] McCrady J K, Andersen C P. The effect of ozone on below – ground carbon allocation in wheat[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 107: 465–472.
- [31] 陈展, 王效科, 段晓男, 等. 臭氧浓度升高对盆栽小麦根系和土壤微生物功能的影响[J]. *生态学报*. 2007, 27(5): 1803–1808. CHEN Zhan, WANG Xiao Ke, DUAN Xiao – nan, et al. Ozone effects on wheat root and soil microbial biomass and diversity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1803–1808.
- [32] Chung H, Zak D R, Lilleskov E A. Fungal community composition and metabolism under elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>[J]. *Oecologia*, 2006, 147: 143–154.
- [33] 李果梅, 王昱屹, 史奕, 等. O<sub>3</sub> 浓度升高对麦田土壤酶活性及酚酸类物质含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 0121–0125. LI Guo – mei, WANG Shu – yi, SHI Yi, et al. Effects of elevated ozone and temperature on soil enzymes activities and phenolic compounds content in spring wheat[J]. *Journal of Agro – Environment Science*, 2008, 27(1): 0121–0125.
- [34] Johnson R M, Pregitzer K S. Concentration of sugars, phenolic acids, and amino acids in forest soils exposed to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 3159–3166.