

土壤有机碳稳定机制研究进展

刘满强 胡 锋 陈小云

(南京农业大学资源与环境科学学院 土壤生态实验室 南京 210095 )

**摘要** 土壤有机碳的增加不仅有助于农业可持续发展 ,而且对缓解温室气体增加和全球气候变化等也具有重要意义。土壤有机碳的稳定机制决定着土壤固定和储备有机碳的能力 ,对有机碳稳定机制的研究 ,将为政府制定有效的温室气体减排措施提供依据。土壤有机碳的稳定机制主要包括 : (1) 有机碳的难降解性 ; (2) 金属氧化物和粘土矿物与有机碳的相互作用 ; (3) 土壤团聚体的物理保护导致的生物与有机碳空间隔离 ; (4) 土壤生物学机制 , 主要指土壤生物自身对有机碳稳定性的直接贡献。至今 , 有机碳稳定性的主导机制尚不清楚 , 但影响因素与生态系统类型、土壤类型、土层深度、土壤管理措施、土壤生物活性及群落组成等有关。作者建议今后研究有机碳稳定性机制时 , 应同时考虑上述 4 种机制的综合作用 , 并加强探索土壤生物的贡献。

**关键词** 土壤有机碳 难降解性 金属氧化物 粘土矿物 团聚体保护 土壤生物 稳定机制

文章编号 : 1000-0933 (2007) 06-2642-09 中图分类号 : S152.3 S154.1 S181 文献标识码 : A

A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization

LIU Man-Qiang , HU Feng , CHEN Xiao-Yun  
*Soil Ecology Laboratory , College of Resources and Environmental Sciences , Nanjing Agricultural University , Nanjing 210095 , China*  
*Acta Ecologica Sinica* 2007 27 (6) 2642 ~ 2650.

**Abstract** : Increasing soil organic carbon (SOC) levels play a critical role in agricultural sustainability and , maybe more important , in mitigating greenhouse effects and global climate changes. The mechanisms of SOC stabilization are associated with the capacity of SOC sequestration , and studies in this field will help the governments make efficient policies and decisions to reduce greenhouse gas emission. This paper gives a brief review of four stabilization mechanisms of SOC : (1) recalcitrance of organic carbon compounds , (2) interactions with metal oxides and soil mineral surfaces , (3) spatial inaccessibility against decomposers because of micro-aggregate's physical protection , and (4) biological mechanisms , mainly the direct contributions of soil organisms themselves. Until now there are contradictorily results regarding the dominant SOC stabilization mechanisms , possibly depending on factors , such as ecosystem and soil type , soil depth , soil managements , as well as soil biological activity and community composition. The authors will consider future research proposals with an emphasis on a comprehensive understanding of all four mechanisms of SOC stabilization , and will pay more attention on roles of soil bio-community.

**Key Words** : soil organic carbon ; recalcitrance ; metal oxides ; clay mineral ; aggregate protection ; soil organism ; stabilization mechanisms

土壤有机碳的研究可以追溯到 200a 前<sup>[1]</sup>。虽然它仅占矿质土壤总量的极小比例 ,但对土壤质量及功能

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (40501036 )  
收稿日期 2006-06-13 ; 修订日期 2007-02-01  
作者简介 刘满强 (1975 ~ ) , 男 , 山东龙口人 , 博士 , 主要从事土壤生态学和有机碳稳定性研究。 E-mail : liumq@njau.edu.cn  
**Foundation item** The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40501036 )  
**Received date** 2006-06-13 ; **Accepted date** 2007-02-01  
**Biography** LIU Man-Qiang , Ph. D. , mainly engaged in soil ecology and soil organic carbon stability. E-mail : liumq@njau.edu.cn

的调节起着关键作用。与以往相比,今天的研究更关注于其生态环境意义,因为土壤有机碳的微小变化将引起大气 CO<sub>2</sub> 浓度的较大波动,进而影响温室效应和全球气候变化。有关土壤碳库的容量、释放和周转的各种影响因素的研究成为了解全球碳循环、预测全球变化及制定统一的温室气体限排措施的必需知识<sup>[2-7]</sup>。

近一个世纪的大量研究仍没有充分了解土壤有机碳<sup>[8]</sup>,这与其本身高度异质、动态变化、影响因素复杂并依赖于时空尺度有关。有机碳的损失也包括地表径流及淋洗等理化过程,但生物的分解矿化作用仍是最主要的过程。因此有机碳的稳定性也可以广泛理解为生物稳定性<sup>[9]</sup>。虽然有关有机碳稳定机制及影响因素的报道不断增加,但往往是针对某一特定机制进行探讨,尤其令人遗憾的是,对来自土壤生物本身的贡献关注甚少<sup>[10-12]</sup>。全面了解土壤有机碳稳定机制对于估计土壤有机碳的固定潜力,制定相宜的土壤管理措施以提高有机碳固定,充分发挥土壤有机碳的生态功能都非常重要,而至今科学家对于有机碳稳定机制仍没有达成共识<sup>[2,8,13-16]</sup>。

土壤有机碳的稳定性主要受到有机碳的难降解性、土壤理化性质和环境条件及土壤分解者生物群落的影响<sup>[2,8,10-16]</sup>,本文跟踪最新研究进展,从 4 个方面论述土壤有机碳的稳定机制:(1)有机碳的难降解性;(2)金属氧化物和粘土矿物与有机碳的相互作用;(3)土壤团聚体的物理保护导致的生物与有机碳的空间隔离;(4)土壤生物自身对有机碳稳定性的贡献。

1 有机碳的难降解性

有机碳的难降解性有时也被称为有机碳的生化质量<sup>[17]</sup>,由进入土壤的植物残体本身的化学组成、分解程度及分解者生物群落等多种因素所决定<sup>[2,8,12,16]</sup>。

1.1 难降解有机碳的来源

进入土壤的有机物,除了物理破碎和淋洗过程外,在微生物和酶的选择作用下,碳水化合物和蛋白类物质(包括水提取的、酸解的糖类如单糖、多糖和多肽、氨基酸等)最先分解,有机物的颗粒减小,碳氮比也下降<sup>[1]</sup>,导致较难降解的复杂化学结构物质(如具有芳香环结构的木质素和烷基结构的碳)富集。另外,某些活性有机物(如纤维素、多肽、蛋白质)可以与难降解的有机化合物(如木质素、多酚等)形成复合构造,导致微生物很难利用<sup>[1]</sup>。微生物和土壤动物的代谢产物也是难降解有机碳的重要组成,一般来说细胞壁比细胞内容物难降解,真菌和放线菌的合成产物比细菌的难降解<sup>[11,16]</sup>;某些微生物,特别是放线菌还能形成类似腐殖质的多聚物,而微生物的某些胞外酶(过氧化物酶、酚氧化酶)可以将酚氧化成醌,与其他物质反应生成芳香多聚物。可见,土壤有机碳自身的难降解性可以来自物理、化学及生物学过程。另外,腐殖质和黑碳这两类有机碳由于比较复杂而没有在此涉及。

1.2 有机碳难降解性的评价

对有机碳难降解性的认识离不开其测定方法的选择。最常用的方法是古老的 6M HCl 酸解法,最初用来分析土壤有机氮<sup>[18]</sup>。它与经典的碱液连续提取法(分离腐殖物质)最大的缺点均是不能区分均质的有机碳功能组分,然而,新的研究不断验证了酸解残余碳(Non-hydrolyzable residue, NHC)比土壤总有机碳年代久得多<sup>[17,19,20]</sup>。Tan 等<sup>[21]</sup>用 6M HCl 酸解得到 NHC,证明难降解性保护机制(该文称生化保护机制)对土壤有机碳的稳定性具有最重要的作用。由于 HCl 酸解法的简捷性,至今仍被广泛使用<sup>[17,18,21]</sup>,尤其是当它与同位素示踪技术结合将能够提供更丰富的信息<sup>[19,20]</sup>。此外,也有学者利用 2.5mol/L 和 13mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 两步依次水解的方法对土壤有机碳的难降解性进行了成功地评价<sup>[17]</sup>。实际上,结合其它最新提取手段来改进传统酸解方法的工作从没有停止过<sup>[17,22]</sup>。当然,深入了解难降解性对土壤有机碳稳定性的作用机制仍需要利用仪器技术进行分子结构水平的分析<sup>[9]</sup>。例如,化学水解结合比色或气质联用技术可以测定氨基酸、糖类、脂类和来自木质素和木炭的芳香类氧化产物。大分子有机物也可以通过热解分成片段随后利用气质联用技术测定结构。另外,更多的研究者开始关注不破坏土壤混合有机物组成的光谱检测技术,如核磁共振技术。虽然这些分析技术可以提供更精确的有机碳结构信息,但是土壤杂质的干扰及昂贵的仪器限制了其应用<sup>[1]</sup>。

虽然很早就出现了针对有机碳的难降解性的报道,但是直到近年来才有关针对土壤有机碳稳定性的研

究<sup>[21]</sup>。部分研究者认为有机碳的难降解性能够决定土壤有机碳稳定性的潜力<sup>[2,21]</sup>,但最近 Lützow 等<sup>[16]</sup>通过分析现有的大量文献,认为有机碳的难降解性机制主要在活跃表层土壤及有机碳的分解初期起作用,而对于下层土和有机碳的分解后期,主要是粘粒和团聚体物理保护机制起作用,这一结论受到最新研究的支持<sup>[14,16,17]</sup>。显然,如果没有矿质土壤,那么有机碳的稳定性将取决于其自身难降解性,例如土表凋落物层的分解。在土壤有机碳稳定机制中,有机碳难降解性的地位及利用该机制来调控土壤有机碳的稳定性有待更多的研究<sup>[23]</sup>,某些土壤管理措施,如改变植被类型和施用有机物种类,通过提高进入土壤的有机碳难降解性来促进土壤有机碳的稳定性,还需要考虑多因素综合影响的后果。

## 2 金属氧化物和粘土矿物与有机碳的相互作用

土壤金属氧化物(以铁铝氧化物为代表)、粘粒含量及其表面性质(比表面积和表面电荷)、粘土矿物组成会强烈影响土壤有机碳的稳定性<sup>[8,14,16,24~28]</sup>,尤其是高价铁铝氧化物和粘土矿物通过配位体置换、高价离子键桥、范德华力和络合作用等会导致有机碳的生物有效性明显下降,即土壤有机碳稳定性提高<sup>[16]</sup>。

### 2.1 铁铝氧化物

土壤有机碳的积累和稳定性很大程度上取决于铁铝氧化物的巨大比表面积对可溶性有机物的吸附能力<sup>[24]</sup>。Wiseman 和 Puttmann<sup>[25]</sup>分析了德国中部的 6 种土壤后认为,铁铝氧化物决定了该地区土壤有机碳的稳定。越来越多的研究开始关注铁铝氧化物在土壤有机碳稳定上的巨大作用。特别在火山灰土、氧化土或酸性土壤中,非晶形铁铝氧化物与有机碳之间的相互作用可能是最主要的有机碳稳定机制<sup>[24~28]</sup>。Kleber 等<sup>[27]</sup>通过调查酸性土壤底土层,发现草酸提取的非晶形铁铝氧化物通过配位体置换决定了土壤有机碳的稳定性。室内培养实验同样表明了铝-有机质形成了生物稳定复合体<sup>[29]</sup>。总之,非晶形铁铝氧化物通常与土壤有机碳表现出正相关关系,而晶形或游离(DCB 提取)的铁铝氧化物只有在特定条件下才呈现这种关系<sup>[27~30]</sup>。

### 2.2 粘土矿物

由于粘土矿物具有较强的表面吸附能力及更易吸附降解性较差的疏水性有机碳<sup>[24]</sup>,而且粘土矿物通常占粘粒的绝大部分。因此,不难理解粘粒含量通常与土壤有机碳含量表现出正相关关系<sup>[2,14,31]</sup>。粘土矿物类型对有机碳的稳定作用无论在室内还是野外都得到了广泛验证<sup>[25,26,32~34]</sup>。例如,伊利石的比表面积、阳离子交换量决定土壤有机碳的保护能力<sup>[35]</sup>。Hassink<sup>[31]</sup>根据土壤粉砂粒、粘粒与有机碳的密切关系提出了碳饱和容量的概念,将土壤碳的最终保护能力归因于土壤粘粒的含量。不过,也有报道表明粘粒含量与有机碳之间没有必然联系<sup>[36]</sup>,从反面印证了粘土矿物类型在有机碳稳定过程中的重要性。

不同晶层结构的粘土矿物在表面可变电荷和比表面积方面的差异导致对有机碳稳定性的不同影响<sup>[37]</sup>。Saggar 等<sup>[32]</sup>将标记的黑麦草放入 4 种不同质地或矿物类型土壤中,发现在蒙脱石含量高的土壤内碳的滞留时间较长,归因于不同矿物类型比表面积和吸附能力的差异。Six 等<sup>[34]</sup>发现 1:1 型矿物稳定有机碳的能力明显低于 2:1 型矿物。与高岭石相比,胀缩型粘土矿物如蒙脱石和蛭石具有较高的永久表面电荷和较大的比表面积,可以将某些有机碳嵌插到矿物晶层中,因此对土壤有机碳的长期稳定性具有重要作用。另一类非晶态矿物对有机碳的稳定作用往往与铁铝氧化物相联系,如在野外发现非晶态矿物如水铝英石、水铁矿和伊毛缟石与有机碳的稳定性和储备密切相关。值得提及的是 Wattel-Koekkoek 等<sup>[38]</sup>发现粘土矿物类型没有影响粘粒有机碳含量,但不同类型粘粒保护的有机质组成截然不同,暗示了不同类型矿物提供了不同的有机碳稳定机制。

除了直接影响有机碳的稳定性外,粘土矿物和铁铝氧化物还通过土壤团聚过程对稳定性产生间接影响<sup>[39]</sup>。较多的研究者认为粘土矿物和铁铝氧化物对有机碳的稳定机制是土壤有机碳稳定性和最大储备潜力的决定因素<sup>[14,16,28,31,34]</sup>。假如这一观点成立,那么以前关注较少的底层土壤可能对有机碳具有更大的保护潜力<sup>[16]</sup>。不过,由于特定土壤类型在一定程度上决定了硅酸盐粘土矿物和铁铝氧化物的种类、含量,因此该机制在不同地区的重要性明显不同。在富含铁铝和胀缩型粘土矿物的土壤中是有机碳稳定性的主导机制。与表层土相比,底层土壤内的粘土矿物由于具有相对较多的与有机碳作用的活性位点,而会对有机碳的稳定

性起更加重要的作用<sup>[26~28]</sup>。

3 土壤团聚体的物理保护机制

土壤团聚体长久以来被作为土壤结构稳定性的替代指标。团聚体的生态功能意义已被充分阐述,包括提高土壤有机碳稳定性的团聚体物理保护功能<sup>[5]</sup>。

3.1 团聚体与有机碳的物理保护

团聚体形成后内部孔隙降低,有机碳与矿物颗粒的接触更紧密。一般认为,有机碳被团聚体包裹后或者以颗粒形式存在于孔隙中,或者直接与组成微团聚体的矿物颗粒密切联系<sup>[40]</sup>,所以可以用“隔离”和“吸附”过程描述不同级别(或尺度)上团聚体对有机碳的保护。较大的团聚体(如 $>250\mu\text{m}$ )中有机碳的分解需要足够的空气和水,孔隙度的减少直接阻碍分解进程,而微团聚体内(如 $20\sim250\mu\text{m}$ )的孔隙如小于细菌所能通过的限度( $3\mu\text{m}$ )时,有机碳的降解只能依靠胞外酶向基质扩散,对生物来说这是极大的耗能过程,有机碳的分解因而降低;在粘砂粒或微团聚体级别(如 $<20\mu\text{m}$ ),有机碳与金属氧化物和粘土矿物的相互作用将占主导。

生物和非生物因素都影响团聚体的形成。非生物因素包括土壤矿物类型、金属氧化物和外界环境因素(如干湿、冻融等)。非生物因素主导的土壤中,土壤有机碳水平通常与团聚体的稳定性没有必然的联系<sup>[41]</sup>,可能因为对团聚体稳定性的评价通常以大团聚体稳定性为代表,而非生物因素往往在粉砂及粘粒级别的微团聚体上起作用。生物因素主要包括各种生物或生物来源有机质组分,如根系、土壤动物、土壤微生物及它们的代谢产物<sup>[5]</sup>,在多数土壤中都对大团聚体和微团聚体的形成有较大的影响。在这些土壤中,有机碳在土壤内的生物转化过程同时也是通过团聚作用进行自我保护的过程,因此,土壤有机碳的水平通常与稳定性团聚体的数量相联系。由于不同级别团聚体的胶结物质及作用强度不同,团聚体结合的有机碳受到物理保护程度从而也不同。研究者发现有机碳在大团聚体内的寿命只有几年<sup>[42]</sup>,而在微团聚体内可达1个世纪。来自温带地区的研究结果表明,不同级别团聚体不同位置上的有机碳受到物理保护程度的顺序是:粘砂粒结合的 $>$ 微团聚体内的 $>$ 大团聚体内而微团聚体外的 $>$ 团聚体外游离的有机碳<sup>[43]</sup>。

3.2 团聚体对有机碳的物理保护机制

由于土壤团聚过程决定了土壤有机碳被保护的程度<sup>[41]</sup>,因此通过二者关系的研究有助于揭示有机碳的物理保护机制<sup>[5,44]</sup>。团聚体形成和稳定过程的研究从上世纪初就受到了关注,并且涌现出很多强调有机碳作用的团聚体形成模型<sup>[5]</sup>。不过,迄今大部分研究主要围绕团聚体的形成和稳定过程,而以全面了解团聚体对有机碳物理保护机制为目标的研究直到最近10多年才出现<sup>[5,44]</sup>。

团聚体对有机碳物理保护机制是在团聚体形成模型的基础上发展的。团聚体-有机碳相互作用最重要的模型是“层次性概念”(Aggregate hierarchy concept)模型<sup>[45]</sup>。空间和时间是该模型的两个重要尺度,在空间尺度上,土壤团聚体由微团聚体向大团聚体逐级连续层次性形成,而在时间尺度上,胶结物质从多糖(暂时稳定)向菌丝根系(短时间稳定)及芳香类物质(持久稳定)层次性变化。根据这个模型,微团聚体比大团聚体稳定,微团聚体的形成是大团聚体形成的前提条件,而各类有机碳是最重要的胶结物质<sup>[45]</sup>。这一模型特别适用于有机物在团聚体形成中占主导作用时的情况,却不能很好的用来解释有机碳物理保护机制,主要原因是有有机碳是高度异质性的混合物,传统的团聚体分级方法不能很好的区分不同稳定性的有机碳组分。

Oades<sup>[46]</sup>对该模型作了一个重要的改进:根系和菌丝可以直接促进大团聚体的形成,微团聚体可以在大团聚体内形成。后来Golchin等<sup>[44,47]</sup>更进一步强调:大团聚体包裹的颗粒有机物(POM)为微团聚体的形成创造了条件,而微团聚体包裹的颗粒有机物受到了更强的物理保护,对有机碳稳定性具有重要意义。他们还发展了重液和筛分相结合将颗粒有机物与团聚体进行区别的方法,这为研究有机碳的物理保护机制提供了有效的科学途径<sup>[47]</sup>。近来Six等<sup>[3]</sup>发展了以“大团聚体周转”为核心的概念模型,即新鲜有机物促进大团聚体形成,而大团聚体内的颗粒有机物有助于微团聚体的形成,伴随颗粒有机物的分解及其它干扰过程,大团聚体破碎后将微团聚体释放出来。Six等<sup>[48]</sup>的系列研究证实了大团聚体比微团聚体的周转快,因此微团聚体对有机碳物理保护具有重要意义<sup>[5]</sup>。土地利用方式、耕作制度、施肥等土壤管理措施的影响首先在大团聚体级别

上体现出来,而微团聚体内的有机碳则维持在较稳定的水平上<sup>[13,15,23,49]</sup>。不过,虽然大团聚体不能直接长期保护土壤有机碳,但是它们能够固定更多的有机碳,并且通过与有机物和土壤环境相互作用促进了微团聚体的形成,从而为微团聚体对有机碳的长期保护提供了条件<sup>[15,44,50]</sup>。

团聚体对有机碳的物理保护机制非常复杂,至今尚无普遍应用的模型,这一机制与土壤类型、土壤管理措施、土层深度及有机碳难降解性等有关。如现有模型难以解释热带和亚热带地区的氧化土(富含铁铝氧化物)内有机碳的稳定性与团聚体物理保护过程的关系。有机物施用不仅直接为团聚作用提供了胶结物质,而且强烈促进土壤生物活性,真菌和细菌分别对大团聚体和微团聚体的形成具有重要作用<sup>[15]</sup>;可能因为如此,表层(耕层)土壤有机碳的稳定性更依赖于团聚体的物理保护<sup>[51]</sup>。虽然有关有机碳和团聚体相互关系及影响因素的研究很多,至今对团聚体内部有机碳固定、动态和稳定的复杂过程仍不清楚,仍缺乏统一的模型来阐述有机碳物理保护机制。现有的分离有机碳或团聚体组分的测定方法,可能也阻碍人们认识上的突破。而孔隙表面的有机碳和生物学活性尚未得到重视<sup>[52,53]</sup>。由于有机碳组成的异质性及土壤自身生物学和理化性质的复杂性,及它们在团聚过程中的强烈交互作用,今后在有机碳的物理保护机制研究中迫切需要综合多因素的系统研究<sup>[44]</sup>。

#### 4 土壤生物学机制

从生物自身角度探讨有机碳稳定机制的研究很少,生物合成既可以是稳定性碳的直接来源,同时又是其它碳组分转化为稳定性组分的“驱动者”。光合产物是土壤有机碳的来源。各种生产者、消费者和分解者及其与环境之间的相互作用,产生了从简单到复杂、高度异质的有机碳库。生物对有机碳的直接贡献可以分为<sup>[10]</sup>:(1)通过再生或修复自身生物体,表现为周转加快,耗竭活性有机碳,及难降解性有机碳的积累(如脱毛、蜕皮等);(2)形成稳定的、排斥性的或抗生素类物质,表现为生物生长变慢甚至死亡,产生难降解物质(如木质素、角质及几丁质等)。

##### 4.1 生物对能量的摄取

在长期进化过程中,土壤生物分解者进化出各种对策以利用难降解的有机碳,理论上它们可以降解所有种类的有机碳<sup>[16]</sup>。因此,有机碳的稳定性不仅受到有机碳本身难降解性的影响,而且取决于生物本身的降解能力。不过,作为生物体,生物只有在酶降解的产物补偿了微生物付出能量后才能保持的活性。当面对难降解有机碳的时候,微生物生产酶数量增加,当酶的生产超过某一临界值,分解产物不能满足能量消耗时,微生物活性受到负反馈控制,有机碳的分解进程就会受阻<sup>[54]</sup>。

酶降解产物的损失也是微生物不能对基质充分利用的重要原因,酶向基质运输及酶降解产物的返回基本都通过扩散过程<sup>[55]</sup>。在酶与基质距离较远时,酶与降解产物的损失较大,当不能补偿生物消耗时,微生物活性下降。可见,这一过程与团聚体对有机碳的物理保护有关。同样容易理解,当某一位点富集大量微生物时,可以产生明显的互利效应,微生物可以相互利用扩散基质,提高酶效率。所以,土壤团聚体上的有机碳异质分布会对微生物的集聚及降解效率产生影响。此外,由于微生物通常形成具有三维、多物种的生物膜结构<sup>[56]</sup>,细胞镶嵌在生物膜的胞外多糖中,能够保持更高的稳定性和降解能力。总之,土壤中有有机碳的数量和质量、土壤团聚结构及土壤粘粒表面性质等因素与土壤生物自身存在复杂的相互作用,最终影响有机碳的稳定性。

##### 4.2 生物的生境专化和生活史

生境是生物生活的空间及其中全部生态因子的总和。不同大小的生物体,如细菌、真菌、小型节肢动物、大型节肢动物和蚯蚓各自的生态功能随生境的时空尺度增加而变化<sup>[57]</sup>。生物活动的时空尺度直接与土壤生境(土壤结构)的尺度相联系,并决定了对有机碳分解的影响。土壤有机碳稳定性的保持也需要:(1)其本身组成与分布具有时空尺度的复杂性和连续性(保持有机物的不断投入);(2)土壤生境的时空尺度也需要具有连续的、稳定的特点(保持良好的团聚结构和孔隙度)。至于土壤生物不能利用的某些生境尺度下的有机碳,如团聚体内部的极小空间内的有机碳,则与团聚体的物理保护有关。土壤生物生境专化连续性的破坏,可以引起以有机碳转化为核心的土壤生态过程的破坏和崩溃,可能会引起有机碳的耗竭利用或过渡滞留,并导致

土壤自组织结构的破坏及缓冲功能的下降,特别在面临不可抗拒干扰时,土壤有机碳的稳定性会迅速下降。

生活史是指一个生物从出生到死亡所经历的全部过程。生物与生境的关系是长期进化的结果,生物进化形成不同的生活史策略以适应和改造生境。由于长期的进化过程,土壤生物的生活史策略与生境中土壤有机碳的稳定性息息相关。微生物对有机碳的利用和转化主要包括真菌和细菌分别主导的途径,前者对有机碳的稳定性贡献更大<sup>[55]</sup>,主要原因可能是微生物对基质的选择利用<sup>[58]</sup>及代谢产物有差异<sup>[11]</sup>。传统上真菌和细菌的生活史分别属于 K-和 r-策略,对不同质量的有机碳具有不同的偏好,当活性的有机碳被 r-型生物所消耗, K-型生物可获得竞争优势,由于需要分配更多的能量来生产次生产物,真菌对有机碳的利用缓慢但利用效率更高。即使土壤中大量存在活性有机碳, K-型生物也无法充分利用,所以不同有机碳的分解过程并非耦合。此外, K-型生物(如真菌)自身生物体比 r-型生物(如细菌)更难降解,因此真菌主导的微生物群落可导致土壤有机碳的积累及有机碳稳定性的提高<sup>[1, 58, 59]</sup>。Wolters<sup>[60]</sup>认为土壤动物对有机碳稳定性的贡献可能已经成为它们改善自身生境的适应对策,而导致土壤有机碳下降的农业管理措施会降低或消除土壤生物的选择改造优势,产生“反进化”后果,使有机碳稳定性和土壤生物之间的关系趋向“恶性循环”。土壤生物在对有机碳稳定性的影响是否存在一种最佳的平衡,其依赖条件又如何?实际上,土壤生物对有机碳稳定性的贡献是土壤生态系统功能的一个重要方面,因此生物主导的有机碳稳定性理论上应与其它功能协调一致。最近, Janzen<sup>[61]</sup>强调了权衡土壤有机碳积累(稳定性)和生物分解过程(生态功能)之间利益的重要意义。

虽然土壤生物活性的提高是可持续生态系统的标志,但是土壤生物对土壤有机碳稳定性贡献的机制研究目前还很少。土壤有机碳稳定性的生物学机制仍是一种假说,它受到生物适应和改造生境的进化思想的启发。虽然研究已经证明,土壤生物群落结构的改变将对土壤生态系统功能产生深刻的影响,特别是不同生活史策略的生物(如细菌和真菌)在对有机碳周转方面的差异,也暗示它们的相对组成会影响土壤有机碳的稳定性。土壤有机碳稳定性的生物学机制建立在上述 3 个机制基础上,不仅受到自身生物量、群落组成和代谢产物等的直接影响,而且受到来自土壤质地、矿物组成、高价金属离子、团聚作用甚至植物生长和土壤管理措施等的间接影响<sup>[11, 12, 60, 61]</sup>。了解有机碳稳定性的生物学机制尤其需要结合上述 3 个机制进行系统研究<sup>[11]</sup>,对生物机制的研究必将有助于阐述土壤有机碳稳定性的调控因素及内在机制,并有助于协调有机碳稳定性与土壤总体生态功能的关系<sup>[61]</sup>。

5 展望

至今,有关土壤有机碳稳定性的主导机制尚存在较大的分歧,土壤类型、土层深度、土壤管理措施、土壤生物活性及生物群落组成等都可能迥然不同的结论。更多的研究人员开始趋向于承认土壤有机碳的稳定性机制是相互作用的综合过程<sup>[2, 8, 16, 28, 44]</sup>。近来的研究报道也体现了这一趋势,如 Plante 等<sup>[18]</sup>建议结合有机碳难降解性与团聚体物理分组技术进行有机碳稳定性的评价,Basile-Doelsch 等<sup>[33]</sup>强调同时测定矿物性质和有机碳化合物对于理解土壤有机碳动态的重要性。此外还有研究者还发现不同大小土壤颗粒的有机碳固定能力与游离铝含量呈极显著正相关<sup>[62]</sup>,在团聚体形成和稳定过程中,粘土矿物类型能够决定生物和非生物过程的相对贡献<sup>[63]</sup>,而土壤微团聚体的形成则进一步为有机碳与粘粒和铁铝氧化物的相互作用创造了条件<sup>[4]</sup>。最近, Six 等<sup>[11]</sup>强调了将土壤生物(细菌和真菌)的贡献结合到传统有机碳模型中的必要性。所有这些都暗示要全面认识土壤有机碳的稳定机制,迫切需要同时考虑几种“传统”机制的共同作用。

人类活动以远远超过自然的速率影响着土壤有机碳的变化和消长,所以我们比以往任何时候都更关注可储存于土壤中的有机碳的稳定性。虽然已经认识到有机碳稳定机制的复杂性及同时研究多种机制的重要性,但缺乏有效可行的有机碳组分分析技术,及野外土壤有机碳稳定性动态的系统研究,无法准确估量土壤有机碳稳定机制及其调控潜力。所以,土壤有机碳稳定性的研究需要以相互联系的、动态的、层次或等级的辩证思路为指导,今后应加强以下方面的研究:

- (1)不同生态系统类型、土壤类型、土壤深度、土地利用方式和管理措施下的土壤有机碳稳定性研究;
- (2)同时进行多种稳定机制的综合研究,特别注重土壤生物对有机碳稳定性的贡献;

- (3)探索土壤有机碳组分的分离、测定技术及有机碳稳定性的综合评价指标体系；
- (4)开展野外土壤有机碳稳定性及影响因素研究,建立我国不同生态系统的土壤有机碳稳定性的动态平衡预测模型；
- (5)土壤有机碳稳定机制与生态过程的联系,特别是人类干扰生态系统内有机碳稳定性与生态功能的关系。

References：

[1] Baldock J A ,Nelson P N. Soil Organic Matter ,In :Sumner M E ,ed. Handbook of Soil Science. CRC Press Inc. ,Boca Raton ;USA ,1999. B25—B84.

[2] Krull E S ,Baldock J A ,Skjemstad J O. Importance of mechanisms and processes of the stabilization of soil organic matter for modelling carbon turnover. *Functional Plant Biology* ,2003 ,30 :207—222.

[3] Pan G X ,Li L Q ,Zhang X H ,*et al.* Soil organic carbon storage of china and the sequestration dynamics in agricultural lands. *Advances in Earth Science* ,2003 ,18 (4) :609—618.

[4] Peng X H ,Zhang B ,Zhao Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability. *Acta Pedologica Sinica* ,2004 ,41 (4) :618—623.

[5] Zhang G S ,Huang G B ,Chen Y. Soil organic carbon sequestration potential in cropland. *Acta Ecologica Sinica* ,2005 ,25 (2) :351—357.

[6] Zhou L ,Li B G ,Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon. *Advances in Earth Science* ,2005 ,20 (1) :99—105.

[7] Li Y T ,Dai J ,Becquer T ,*et al.* Availability of different organic carbon fractions of paddy soils under two heavy metal contamination levels. *Acta Ecologica Sinica* ,2006 ,26 (1) :138—145.

[8] Sollins P ,Homann P ,Caldwell B A. Stabilization and destabilization of soil organic matter :mechanisms and controls. *Geoderma* ,1996 ,74 :65—105.

[9] Baldock J A ,Masiello C A ,Gelinas Y ,*et al.* Cycling and composition of organic matter in terrestrial and marine ecosystems. *Marine Chemistry* ,2004 ,92 :39—64.

[10] Ekschmitt K ,Liu M Q ,Vetter S ,*et al.* Strategies used by soil biota to overcome soil organic matter stability-Why is dead organic matter left over in the soil ?*Geoderma* ,2005 ,128 :167—176.

[11] Six J ,Frey S D ,Thiet R K ,*et al.* Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am J.* ,2006 ,70 :555—569.

[12] Liu M Q ,Chen X Y ,Guo J H ,*et al.* Soil biota on soil organic carbon stabilization. *Advances in Earth Science* ,2007.

[13] Six J ,Elliott E T ,Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation :a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* ,2000 ,32 :2099—2103.

[14] Six J ,Conant R T ,Paul E A ,*et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter :implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* ,2002 ,241 :155—176.

[15] Six J ,Bossuyt H ,Degryze S ,*et al.* A history of research on the link between (micro)aggregates ,soil biota ,and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* ,2004 ,79 :7—31.

[16] Lützow M v ,Kogel-Knabner I ,Ekschmitt K ,*et al.* Stabilization of organic matter in temperate soils :mechanisms and their relevance under different soil conditions — a review. *European Journal of Soil Science* ,2006 ,57 :426—445.

[17] Rovira P ,Vallejo V R. Labile ,recalcitrant ,and inert organic matter in Mediterranean forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* ,2007 ,39 :202—215.

[18] Plante A F ,Conant R T ,Paul E A ,*et al.* Acid hydrolysis of easily dispersed and microaggregate-derived silt- and clay-sized fractions to isolate resistant soil organic matter. *European Journal of Soil Science* ,2006 ,57 :456—467.

[19] Paul E A ,Collins H P ,Leavitt S W. Dynamics of resistant soil carbon of Midwestern agricultural soils measured by naturally occurring <sup>14</sup>C abundance. *Geoderma* ,2001 ,104 :239—256.

[20] Pelz O ,Abraham W R ,Saurer M ,*et al.* Microbial assimilation of plant-derived carbon in soil traced by isotope analysis. *Biology and Fertility of Soils* ,2005 ,41 :153—162.

[21] Tan Z X ,Lal R ,Lzaurrealde R C ,*et al.* Biochemically protected soil organic carbon at the north Appalachian experimental watershed. *Soil Science* ,2004 ,169 :423—433.

[22] Poirier N ,Derenne S ,Balesdent J ,*et al.* Isolation and analysis of the non-hydrolysable fraction of a forest soil and an arable soil (Lacadee ,

southwest France ). European Journal of Soil Science ,2003 ,54 :243 — 255.

[23 ] Kong A Y Y , Six J , Bryant D C , *et al.* The relationship between carbon input , aggregation , and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. Soil Science Society of America Journal ,2005 ,69 :1078 — 1085.

[24 ] Kaiser K , Guggenberger G , Derenne S , *et al.* The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils. Organic Geochemistry ,2000 ,31 :711 — 725.

[25 ] Wiseman C L S , Puttmann W. Soil organic carbon and its sorptive preservation in central Germany. European Journal of Soil Science ,2005 ,56 :65 — 76.

[26 ] Eusterhues K , Rumpel C , Kogel-Knabner I. Organo-mineral associations in sandy acid forest soils :importance of specific surface area , iron oxides and micropores. European Journal of Soil Science ,2005 ,56 :753 — 763.

[27 ] Kleber M , Mikutta R , Torn M S , *et al.* Poorly crystalline mineral phases protect organic matter in acid subsoil horizons. European Journal of Soil Science ,2005 ,56 :717 — 725.

[28 ] Mikutta R , Kleber M , Torn M S , *et al.* Stabilization of soil organic matter :association with minerals or chemical recalcitrance ?Biogeochemistry ,2006 ,77 :25 — 56.

[29 ] Schwesig D , Kalbitz K , Matzner E. Effects of aluminium on the mineralization of dissolved organic carbon derived from forest floors. European Journal of Soil Science ,2003 ,54 :311 — 322.

[30 ] Kiem R , Kogel-Knabner I. Refractory organic carbon in particle size fractions of arable soils II :Organic carbon in relation to mineral surface area and iron oxides in fractions < 6μm. Organic Geochemistry ,2002 ,33 :1699-1713.

[31 ] Hassink , J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. Plant and Soil ,1997 ,191 :77 — 87.

[32 ] Saggar S , Parshotam A , Sparling G P , *et al.* 14C-labelled ryegrass turnover and residence times in soils varying in clay content and mineralogy. Soil Biology and Biochemistry ,1996 ,28 :1677 — 1686.

[33 ] Basile-Doelsch I , Amundson R , Stone W E E , *et al.* Mineralogical control of organic carbon dynamics in a volcanic ash soil on La Réunion. European Journal of Soil Science ,2005 ,56 :689 — 703.

[34 ] Rasmussen C , Southard R J , Horwath W R. Mineral control of organic carbon mineralization in a range of temperate conifer forest soils. Global Change Biology ,2006 ,12 :834 — 847.

[35 ] Kahle M , Kleber M , Jahn R. Predicting carbon content in illitic clay fractions from surface area , cation exchange capacity and dithionite-extractable iron. European Journal of Soil Science ,2002 ,53 :639 — 644.

[36 ] Percival H J , Parfitt R L , Scott N A. Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands : is clay content important ?Soil Science Society of America Journal ,2000 ,64 :1623 — 1630.

[37 ] Bayer C , Mielniczuk J , Martin Neto L , *et al.* Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. Plant and Soil ,2002 ,238 :133 — 140.

[38 ] Wattel-Koekkoek , E J W , van Genuchten P P L , Buurman P , *et al.* Amount and composition of clay-associated soil organic matter in a range of kaolinitic and smectitic soils. Geoderma ,2001 ,99 :27 — 49.

[39 ] Deneff K , Six J. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization. European Journal of Soil Science ,2005 ,56 :469 — 479.

[40 ] Feller C , Beare M H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. Geoderma ,1997 ,79 :69 — 116.

[41 ] Oades J M , Waters A G. Aggregate hierarchy in soils. Australian Journal of Soil Research ,1991 ,29 :815 — 828.

[42 ] Puget P , Chenu C , Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. European Journal of Soil Science ,2000 ,51 :595 — 605.

[43 ] Carter M R. Soil quality for sustainable land management : organic matter and aggregation interactions that maintain soil function. Agronomy Journal ,2002 ,94 :38 — 47.

[44 ] Blanco-Canqui H , Lal R. Mechanism of C sequestration in soil aggregates. Critical Review in Plant Science ,2004 ,23 :481 — 504.

[45 ] Tisdall J M , Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. Journal of Soil Science ,1982 ,62 :141 — 163.

[46 ] Oades J M. Soil organic matter and structural stability : mechanisms and implications for management. Plant and Soil ,1984 ,76 :319 — 337.

[47 ] Golchin A , Oades J M , Skjemstad J O , *et al.* Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state 13C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. Australian Journal of Soil Research ,1994 ,32 :285 — 309.

[48 ] De Gryze S , Six J , Merckx R. Quantifying water-stable soil aggregate turnover and its implication for soil organic matter dynamics in a model study. European Journal of Soil Science ,2006 ,57 :693 — 707.

[49 ] Deneff K , Six J , Merckx R , *et al.* Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. Soil Science Society of America Journal ,2004 ,68 :1935 — 1944.



[50] Balabane M , Plante A F. Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques. *European Journal of Soil Science* , 2004 ,55 :415 — 427.

[51] Oorts K , Bossuyt H , Labreuche J , *et al.* Carbon and nitrogen stocks in relation to organic matter fractions , aggregation and pore size distribution in no-tillage and conventional tillage in northern France. *European Journal of Soil Science* , 2006.

[52] Bol R , Amelung W , Friedrich C. Role of aggregate surface and core fraction in the sequestration of carbon from dung in a temperate grassland soil. *European Journal of Soil Science* , 2004 ,55 :71 — 77.

[53] Ashman M R , Hallett P D , Brookes P C. Are the links between soil aggregate size class , soil organic matter and respiration rate artefacts of the fractionation procedure ? *Soil Biology and Biochemistry* , 2003 ,35 :435 — 444.

[54] Schimel J P and Weintraub M N. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil : a theoretical model. *Soil Biology and Biochemistry* , 2003 ,35 :549 — 563.

[55] Koch A L. Diffusion : the crucial process in many stages of the biology of bacteria. *Advances in Microbiological Ecology* , 1990 ,11 :37 — 70.

[56] Webb J S , Givskov M , Kjelleberg S. Bacterial biofilms : prokaryotic adventures in multicellularity. *Current Opinion in Microbiology* , 2003 ,6 :578 — 585.

[57] Lavelle P. Faunal activities and soil processes : adaptive strategies that determine ecosystem function. *Advances in Ecological Research* , 1997. 27 : 93 — 132.

[58] Fontaine S , Mariotti A , Abbadie L. The priming effect of organic matter : a question of microbial competition ? *Soil Biology and Biochemistry* , 2003 ,35 :837 — 843.

[59] Bailey V L , Smith J L , Bolton Jr H. Fungal-to-bacterial ratios in soils investigated for enhanced C sequestration. *Soil Biology and Biochemistry* , 2002 ,34 :997 — 1007.

[60] Wolters V. Invertebrate control of soil organic matter stability. *Biology and Fertility of Soils* , 2000 ,31 :1 — 19.

[61] Janzen H H. The soil carbon dilemma : Shall we hoard it or use it ? *Soil Biology and Biochemistry* , 2006 ,38 :419 — 424.

[62] Curtin D. Possible role of aluminum in stabilizing organic matter in particle size fractions of Chernozemic and Solonchic soils. *Canadian Journal of Soil Science* , 2002 ,82 :265 — 268.

参考文献：

[3] 潘根兴,李恋卿,张旭辉,等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题. *地球科学进展* , 2003 ,18 (4) :609 ~ 618.

[4] 彭新华,张斌,赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展. *土壤学报* 2004 ,41 (4) :618 ~ 623.

[5] 张国盛,黄高宝, Yin Chan. 农田土壤有机碳固定潜力研究进展. *生态学报* 2005 ,25 (2) :351 ~ 357.

[6] 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. *地球科学进展* , 2005 ,20 (1) :99 ~ 105.

[7] 李永涛,戴军, Becquer T ,等. 不同形态有机碳的有效性在两种重金属污染水平下水稻土壤中的差异. *生态学报* , 2006 ,26 (1) :138 ~ 145.

[12] 刘满强,陈小云,郭菊花,等. 土壤生物对土壤有机碳稳定性的影响. *地球科学进展* , 2007.