

土壤孔隙结构与土壤微环境和有机碳周转关系的研究进展

张维俊¹, 李双异¹, 徐英德¹, 刘旭¹, 安婷婷¹, 朱平², 彭畅², 汪景宽¹

(1.沈阳农业大学土地与环境学院,农业部东北耕地保育重点实验室,土壤资源高效利用国家工程实验室,沈阳 110866;2.吉林省农业科学院,农业资源与环境研究所,长春 130033)

摘要: 土壤结构是土壤功能的基础,不仅影响土壤养分的供应、水分的保持及渗透、气体的交换等过程,还为土壤微生物提供了物理生境,并调控土壤有机碳的周转这一关键过程。土壤的孔隙特征能够直接、真实地反映土壤结构的好坏;用土壤的孔隙特征作为试验指标能更好地反映土壤结构对这些过程的调节作用。在此基础上,将高度异质性的土壤孔隙结构同土壤微环境的变化和土壤有机碳的周转过程进行定量分析,对深入了解土壤结构在土壤生态系统中的功能至关重要。因此,着重从土壤孔隙结构对土壤微环境的影响及其与有机碳的关系两方面展开,剖析土壤孔隙结构调控作用下的土壤微环境响应过程,阐述土壤孔隙结构对土壤有机碳周转产生的直接、间接影响,强调土壤孔隙结构在调节土壤有机碳周转进程中的重要作用,并对土壤孔隙结构在调节土壤有机碳周转、植物残体分解及其与微生物协调作用机制等方面研究提出展望。

关键词: 土壤结构; 土壤孔隙; 土壤微环境; 土壤有机碳

中图分类号: S153. **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)04-0001-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.001

Advances in Research on Relationships Between Soil Pore Structure and Soil Microenvironment and Organic Carbon Turnover

ZHANG Weijun¹, LI Shuangyi¹, XU Yingde¹, LIU Xu¹,

AN Tingting¹, ZHU Ping², PENG Chang², WANG Jingkuan¹

(1.Key Laboratory of Cultivated Land Conservation in Northeast, Ministry of Agriculture, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources,

College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866; 2.Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033)

Abstract: Soil structure is the foundation of soil function, which not only affects the processes of soil nutrient supply, water retention and infiltration, gas exchange, but also provides the physical habitats for soil microorganisms and regulates the key process of organic carbon turnover. The pore characteristics of soil can directly and truthfully reflect the quality of soil structure, and they can better reflect the regulating effect of soil structure on these processes. On this basis, quantitative analysis of the highly heterogeneous soil pore structure and the changes of soil microenvironment and the turnover process of soil organic carbon is essential to further understand the function of soil structure in soil ecosystem. Therefore, this paper focuses on the influence of soil pore structure on soil microenvironment and its relationship with organic carbon, analyzes the response process of soil microenvironment under the regulation of soil pore structure, expounds the direct and indirect effects of soil pore structure on soil organic carbon turnover, emphasizes the important role of soil pore in regulating soil organic carbon turnover process. Finally this paper prospects the research on soil pore structure in regulating the soil organic carbon cycle, the decomposition of plant residues and its coordination with microorganisms and so on.

Keywords: soil structure; soil porosity; soil microenvironment; soil organic carbon

收稿日期: 2019-01-17

资助项目: 国家重点研发计划项目“耕地地力影响化肥养分利用的机制与调控”(2016YFD0200304)

第一作者: 张维俊(1993—), 女, 在读博士研究生, 主要从事土壤肥力研究。E-mail: zwj_2368983781@163.com

通信作者: 李双异(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤肥力研究。E-mail: lishuangyi1979@163.com

土壤结构在调节土壤肥力与生态功能中扮演着重要的角色,其形成和演变不仅与诸多土壤性质与过程息息相关,而且也与很多生态环境问题紧密联系^[1-2]。良好的土壤结构对支撑地下一地上动植物生命、调节土壤水气的保持与平衡、减缓温室气体排放及防止水土流失等方面意义重大^[3-4]。因此,有关土壤结构的形成、异质性以及土壤其他过程关系的研究一直以来备受关注。然而,土壤结构由固相、液相和气相等共同组成,是人类所认识结构最复杂的^[5]。同时,土壤孔隙结构在土壤中的分布呈现出高度的异质性,并且极易受周围环境的影响,这极大地限制了对土壤结构真实形态的认识和定量化的进程。

人们在对土壤结构认识逐渐深入的过程中,逐步明确土壤结构是控制土壤有机质累积和矿化的重要机制。近年来,基于微观尺度下土壤结构分异而导致的土壤有机碳的物理保护作用被认为是土壤有机质稳定性的基础,但其具体的驱动机制至今仍无定论^[6]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,以往关于土壤结构与有机碳关系的研究大多集中在土壤团聚体的稳定性、大小、数量上,而忽略了土壤团聚体结构的本质,即其孔隙特征^[7]。土壤的孔隙特征能够真实地反映土壤结构内部的框架^[6]。土壤中发生的物理、化学和生物过程之间的相互作用均受孔隙的形状、大小分布、表面密度、连通性、曲折度的影响^[1,8]。因此,土壤孔隙结构量化、可视化的信息可为探索土壤中有机碳在微观尺度下的转化过程提供了新的视角。随着先进的显微扫描技术在土壤学研究中的发展,使得量化土壤孔隙结构与土壤有机碳的关系变成可能^[9-10]。此外,土壤孔隙结构在直接参与调控土壤有机碳周转及基础上,还能通过影响土壤内部微环境的布局而对土壤有机碳的周转产生间接地调节作用,而将土壤孔隙参与土壤有机碳周转的直接、间接过程相结合并进行量化目前还一直处于摸索的状态。但毫无疑问,深刻地理解土壤结构的本质以及发生在土壤孔隙结构中各过程的相互关系,是明晰土壤系统生态服务功能的基础,也是建立土壤有机碳周转模型、模拟全球碳循环的关键。

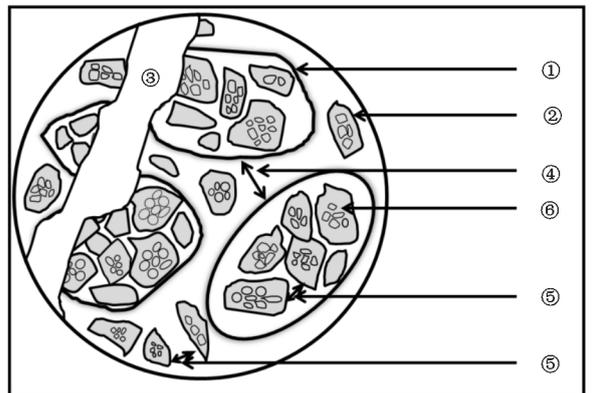
基于此,本文在梳理土壤结构相关概念及量化研究方法的基础上,从土壤孔隙结构对土壤微环境(水分、气体、微生物)的影响及其与土壤有机碳的关系两方面,剖析土壤孔隙结构调控作用下的土壤微环境响应过程,阐述土壤孔隙结构对土壤有机碳周转产生的直接和间接影响,明确土壤孔隙结构在调节土壤有机碳周转进程中的重要作用,并提出未来在土壤孔隙结构调节土壤有机碳周转、植物残体分解及其与微生物协同作用机制等方面的研究展望。

1 土壤孔隙结构概述

1.1 土壤结构与土壤孔隙定义

随着对土壤孔隙相关研究的逐渐深入,关于土壤结构的定义也在不断演化与发展。通常我们将不同形状、大小的原生初级颗粒和团聚体的空间排列定义为土壤结构,但从土壤孔隙的角度来看,将土壤颗粒的表面作为孔隙的孔隙壁,土壤结构则被定义为“不同类型孔隙的组合”^[1,4],其中由土壤原生初级颗粒排列产生的孔隙称为“质地孔隙”,即颗粒与颗粒之间的孔隙;而由气候、田间管理和生物活动产生的较大的孔隙称为“结构孔隙”,即团聚体与团聚体之间的孔隙。本文主要基于第 2 种定义展开。

类似于团聚体的分级理论,按照团聚体的排列情况,可将孔隙分为 4 种:(1)大孔隙;(2)大团聚体之间的孔隙;(3)微团聚体之间的孔隙(包括大团聚体内微团聚体之间的孔隙);(4)微团聚体内的孔隙^[4](图 1)。也有报道^[11]提出“孔隙不相容理论”,认为较低级别的团聚体占用较高级别团聚体之间的孔隙空间。根据孔隙的孔径大小及功能,将孔隙分为大孔、中孔和微孔,但是目前不同孔隙大小并没有完全统一的阈值^[12]。按土壤孔隙的持水功能和毛管上升情况可将其分为 3 类:非活性孔隙(当量孔径 $<2\ \mu\text{m}$),没有毛管作用,几乎总是被土粒表面的吸附水填充,不能被植物吸收,根毛和微生物均不能进入;毛管孔隙(当量孔径 $2\sim 20\ \mu\text{m}$),植物细根、原生动物和真菌不能进入,但根毛和细菌可在其中活动;非毛管孔隙(当量孔径 $>20\ \mu\text{m}$),植物的细根可伸入 $>200\ \mu\text{m}$ 的粗孔中, $20\sim 200\ \mu\text{m}$ 的中孔为原生动物、真菌和根毛提供了良好的栖息地^[13]。此外,Lal 等^[14]将 $0.5, 50\ \mu\text{m}$ 作为孔隙的分界线, $>50\ \mu\text{m}$ 的孔隙用来调控空气、水分的运移; $<0.5\ \mu\text{m}$ 的孔隙用来维持土壤基质中离子的保持和扩散; $0.5\sim 50\ \mu\text{m}$ 的孔隙用来保留水分防止因重力作用而流失。



注:①、②分别表示大团聚体和微团聚体;③表示大孔隙;④表示大团聚体之间的孔隙;⑤表示微团聚体之间的孔隙(包括大团聚体内微团聚体之间的孔隙);⑥表示微团聚体内的孔隙^[4]。

图 1 土壤孔隙在土壤中的分布

1.2 土壤孔隙结构定量化的研究方法

关于微尺度下土壤结构的研究主要通过团聚体的稳定性来体现。对团聚体的分离方法大多为筛分法(湿筛或干筛),然后得到不同粒径大小团聚体的重量和百分比,用平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(F)等指标来评估土壤团聚体的稳定性^[15-18]。但是采用筛分法不仅在一定程度上会破坏土壤的原始结构,更不能真实地反映出团聚体内部真实的孔隙分布^[9]。即使不同大小的团聚体与土壤不同大小的孔隙之间存在一定的相关性,而实际上在某种程度上仍属于定性的方法。

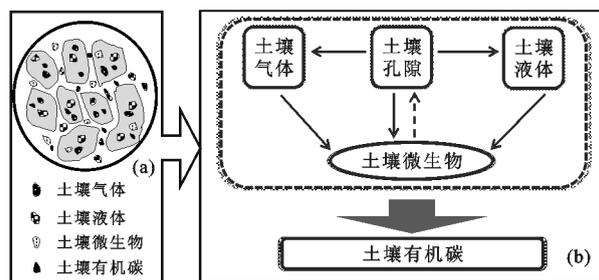
土壤孔隙结构的定量分析是认识土壤结构、阐明土壤结构与有机碳关系的前提^[9],通常将其定量化的方法分为间接法和直接法。一般利用土壤水、气的信息间接获得土壤孔隙大小的状况,常用的方法有容重法、压汞法(MIP)、水分特征曲线法和气体吸附法等^[19-24]。容重法能笼统地得到土壤的总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度,而计算所用到的 2.65 g/cm^3 与实际土壤比重不一致,误差较大。MIP 法不能检测到闭合或孤立的孔隙,汞的高压侵入可能会对土壤结构造成变形或破坏,尤其在结构松散或有裂缝的土壤中更为明显,并且无法检测到团聚体表面的孔隙信息,导致低估土壤总孔隙度^[6,9]。在有膨胀性黏土矿物存在的情况下,由于孔隙的排水和收缩,土壤水分有损失,因此水分特征曲线法也不能准确检测到土壤中孔隙的分布,并且在测定土壤孔隙分布时所需的时间比 MIP 还要长^[6,9]。气体吸附法可以利用氮气(N_2)、二氧化碳(CO_2)和水蒸气等吸附剂推导出土壤的孔隙分布特征,适用于 $1\sim 5 \text{ mm}$ 的土壤样品,孔径限制非常小($1\sim 200 \text{ nm}$)^[9]。另外,气体吸附法在分析样品之前,需要对样品加热去除内部吸附的水分子,但是这样会导致某些氧化物和氢氧化物的化学性质发生改变、黏土矿物夹层中的水分子流失以及土壤有机质结构重组等问题^[24]。此外,通过光学显微镜、电子显微镜和数字图像分析等技术可以对土壤薄片或土块进行观察和量化,能直接得到土壤孔隙的二维图像信息^[1,12,25],但制备土壤薄片切片过程繁琐,在制备切片的过程中可能会破坏土壤团聚体结构。综上,这些方法在实际应用过程中会在不同程度上对土壤样品造成破坏,而不能真实客观地反映土壤结构内部的真实特征,导致提供的土壤孔隙信息有限且分散^[25]。

应用上面提到的对土壤结构定量化的研究方法,虽然可以得到部分土壤团聚体内部孔隙的分布特征,但是并不能清楚、完整地呈现出团聚体内部孔隙结构

的三维图像。最近,计算机断层扫描技术(CT),尤其是同步辐射显微 CT 扫描技术(X-ray mCT)具有高分辨率和对比度、扫描快、对样品无破坏性的优势,可以在微米或毫米的分辨率下对团聚体内的孔隙结构定量化,不仅可以提供孔隙数量和孔隙大小分布的数据,而且还可以对孔隙方向和复杂性进行量化和可视化,实现二维原位动态相衬成像和三维成像^[25-27],使得研究土壤孔隙结构与有机碳的定量化关系更加准确、全面。应用 CT 扫描技术需要掌握一定的图像处理技术,构建土壤样品的三维结构需要对扫描的图像首先去除噪声,进行二值化,然后利用 3DMA-ROCK、Image J 等软件提取孔隙特征参数^[8,25-27]。采用同步辐射显微 CT 扫描技术研究土壤孔隙结构与土有机碳周转的关系能对过去采用非 CT 技术得到的一些结论做更进一步的补充与验证,同时为土壤结构—植物—微生物之间的相互作用关系的研究开辟新的道路。值得注意的是,同步辐射显微 CT 技术只能提供某个状态下土壤样品的孔隙特征,并不能展示出不同大小孔隙中微环境的差异以及不同微生物、元素等细胞、分子水平物质在孔隙中的空间分布等额外信息。

2 土壤孔隙结构与土壤微环境

不同大小的团聚体排列造就了土壤的多孔系统,形成独特的土壤结构,加上内部土壤气体、液体的填充,形成适合土壤动物、微生物生存的微环境。这种微环境下发生的有机碳的分解与固定的一系列过程主要由微生物主导,不同的孔隙特征(大小、连续性和形状)调控微尺度下土壤中液体、气体以及微生物的运移,进而影响微生物的功能与活性,接着影响有机碳的分解与固定(图 2)^[9,28-31]。该部分将首先阐述微观尺度下土壤孔隙结构及其周围微环境的关系,来说明土壤孔隙结构对土壤有机碳的周转产生的间接调节作用。



注:(a)、(b)分别表示土壤团聚体内土壤气体、液体、微生物和土壤有机碳的分布及其之间的相互关系模型^[9]。

图 2 土壤孔隙结构与微环境之间的相互关系及其对土壤有机碳周转的关系

2.1 土壤孔隙结构与土壤液体

土壤水力特性主要受土壤结构的影响,土壤中的水分由毛细管压力控制,而土壤孔隙直接影响水分的渗透和保持^[23]。孔隙形态越接近于圆形、越规则,越有利于水分在土壤中的传输,提高土壤的入渗能力。相反,孔隙形状越复杂、越不规则,越不利于水分向下层土壤运移,但有助于水分的保持^[32]。另外,水分可以在小孔隙与大孔隙中双向填充^[23]。大孔隙之间的连接对控制土壤中的优先流有重要作用^[33]。土壤结构孔隙(团聚体间的孔隙)允许水分快速流动,形成非平衡的优先流,其中液相中的溶质和颗粒物质,对水质有潜在的影响^[34]。

土壤孔隙中液相的空间分布影响孔隙的连通性以及空气扩散的速度和程度,进而影响微生物的分布和活动^[35]。孔隙中的液体薄膜阻碍养分的扩散,从而限制微生物对营养物的获取。由土壤动物活动而产生的大孔隙,表面光滑且有潜在的有机质。这种孔隙一般不容易产生裂缝,水分在这种孔隙中不易积累,加上它们表面的疏水性,更容易失水^[36]。小孔隙和孤立的大孔隙流动路径相对弯曲,当一个较大的孔隙相对活跃时,这些孔隙对土壤中水分的流动贡献可能被忽略^[37]。较大的孔隙要完全干燥需要的时间较长,而使较小的毛孔完全充满水分也需要较长的时间,这都会降低微生物活性^[38]。

2.2 土壤孔隙结构与土壤气体

团聚体内的气体扩散在调节微生物活动和相关的生物地球化学反应中发挥着重要作用,从而决定团聚体的稳定性、土壤质量以及养分的供应和转化^[5]。不同大小团聚体的排列组合产生了形式多样的孔隙,一般团聚体内部的土壤孔隙平均直径为几微米,而团聚体之间的为几毫米^[23]。团聚体内气体的运动需要克服气体分子之间、气体分子与孔隙壁之间相互碰撞的阻力^[5,39]。一次碰撞的相对程度与团聚体的孔径、疏水性和含水量有关^[23]。当然,土壤中气体的扩散不仅取决于孔隙度,还取决于孔隙的大小和孔隙之间的连接度^[23]。Li 等^[23]将孔隙模型与 X 射线断层扫描技术相结合来计算土壤团聚体的有效气体扩散系数,并评估了粉尘—气体模型的准确性和可靠性。

土壤孔隙结构影响 CO₂、CH₄ 等温室气体的排放。一方面,土壤 CO₂ 通量受土壤孔隙度的影响,土壤孔隙网络可以把微生物呼吸作用产生的 CO₂ 输送到土壤表面;另一方面,土壤孔隙度增加也有利于土壤中气体的扩散,使得氧气更容易被微生物利用,促进有机质和植物残体的分解^[9]。Mangalassery 等^[38]

通过研究不同大小的团聚体对土壤孔隙结构、温室气体排放的影响,结果显示土壤孔隙特征(如孔隙度和孔隙大小)显著影响不同温室气体(如 CO₂ 和 CH₄)的释放,小团聚体中释放的 CH₄ 较多且 CH₄ 排放量与平均孔隙大小呈反比。

2.3 土壤孔隙结构与土壤微生物

土壤微环境是影响微生物功能、活性和异质性的主要因素,其中最主要的是土壤孔隙特征^[29]。微生物在土壤中的分布和活动不仅与孔隙大小有关,还与孔隙的连接度、通气性有关^[40-42]。土壤孔隙以多种方式来控制微生物的活性与功能,对微生物群落组成有直接和间接的影响,在空间上直接控制微生物的移动,进而影响其群落之间的相互作用以及微生物群落的组成和多样性;间接为微生物活动提供气体和液体来影响其功能^[4,9]。微生物在土壤孔隙网络中的不同部位上非随机式排列^[43],不同大小的孔隙为微生物提供了其独特的生存空间^[44]。另外,土壤中孤立或极小的孔隙限制了微生物的活动范围,这也是造成一定区域内微生物多样性极高的主要原因,因此不同大小的孔隙中微生物群落结构的差异很大^[41]。

微生物与其微环境之间存在有序且复杂的相互作用。当缺水的孔隙中有水分时,也会造成微生物被动式的向周围扩散运移。由非生物驱动形成的孔隙,表面相对粗糙,能为细菌的生长提供了较好的附着位点^[45-46]。Negassa 等^[47]结合 X-ray mCT 与 DNA 测序技术研究了植物残体在不同大小的团聚体孔隙中的腐解特征以及相应的微生物群落变化,发现在含水量相同、总孔隙度相同、团聚体粒径不同的 2 个组分中,1~2 mm 组分中的细菌群落结构与 0.05~0.1 mm 组分显著不同;在有植物残体添加的样品中,大孔隙中有较多的微生物群落,主要是纤维素分解菌(拟杆菌、变形菌、放线菌和厚壁菌),而小孔隙中主要是寡营养的酸杆菌。但是也有人证明土壤物理性质(如团聚体大小和孔隙度)和微生物群落分布没有相关性^[48]。Liang 等^[49]选取田间原位土壤对团聚体进行 X-ray、电子显微镜扫描以及磷脂脂肪酸(PLFA)分析后,发现团聚体外部总孔隙度、小孔隙/中孔隙数量等孔隙参数与微生物量呈正相关,而团聚体内部孔隙的这些孔隙特征与微生物量没有显著的相关性。

此外,越来越多的证据^[50]表明,微生物本身的活性可以直接或间接通过改变土壤孔隙结构而影响它们周围的微环境。活性微生物群落可以通过改变土壤孔隙的几何形状和连通性来改变它们周围的微环境,因此可以影响较大范围内的土壤性质,进而影响

土壤的运输传递功能^[50],如真菌通过其菌丝体与土壤颗粒胶结在一起形成团聚体^[51]。也有研究^[50-52]证明,细菌通过其分解活动在产生气体时可以导致新孔隙的形成,且可能比单个生物体的大小大几个数量级。这些研究证明土壤孔隙与微生物之间存在反馈机制,孔隙越多,微生物的活性越大,而较大的微生物活性又进一步促进了孔隙的产生^[45]。

3 土壤孔隙结构与土壤有机碳周转的关系

土壤团聚体结构所产生的“分室作用”是有机质稳定存在的物理基础,尤其是微团聚体(微米粒级以下的)为其提供了有效的固存位点^[10]。Chenu 等^[53]、Kinyangi 等^[54]发现,较难分解的小分子有机质在物理保护作用下被固定于小孔隙中,突出了微观尺度土壤孔隙结构的重要性。团聚体结构的物理性质与长期的土壤有机碳周转和稳定性密切相关,微观尺度下土壤孔隙在调节土壤有机碳的分解与固定过程中起着重要的作用。

3.1 土壤孔隙结构与土壤有机碳的动态变化

土壤结构在土壤有机碳的固存和分配方面起着关键作用^[10]。土壤孔隙调控土壤有机碳的去向,对土壤有机碳的周转有着直接和间接的影响。Kemmitt 等^[55]研究得出,碳矿化速率受土壤非生物性质的调节。Kravchenko 等^[45]将筛分的团聚体培养 120 天后,利用 X 射线计算显微断层扫描,研究了土壤孔隙对颗粒有机物(POM)分解的影响,发现土壤孔隙连通性越好团聚体内有机碳分解的越多,尤其是 $>13 \mu\text{m}$ 的孔隙对 POM 分解贡献最大。土壤孔隙对有机碳的调控一方面直接通过物理屏障来决定有机底物与微生物细胞或酶的可及性^[56],使土壤有机碳免受分解(或稳定);另一方面通过调节扩散到团聚体内的氧气、液体来影响微生物活性,从而促进/抑制土壤有机碳分解,这主要与水弯月面堵塞孔隙有关^[57]。这种情况在具有微孔隙或结构疏松的土壤中比较明显^[58]。另外,土壤中固碳过程也会对土壤结构产生正反馈,增加中孔和微孔的数量,从而降低土壤有机碳在大孔隙中的快速扩散和分解。

团聚体内土壤有机碳的分布取决于其内部孔隙的发育程度,可移动性可溶有机物主要分布在大、中孔隙中($>0.2 \mu\text{m}$),非移动性有机物主要分布在微孔隙中($<0.2 \mu\text{m}$)^[59-60]。有研究^[61]发现,脂质和其他大多数易被分解的有机物主要分布在 $>6 \mu\text{m}$ 的孔隙中,而相对复杂的有机化合物(如木质素、单宁)主要分布在小孔隙中。Lugato 等^[62]、Strong 等^[28]研究发

现,有机碳与 $0.1\sim 5, <1.2 \mu\text{m}$ 的孔隙有很强的正相关,而与 $15\sim 60, 30\sim 75 \mu\text{m}$ 的孔隙呈负相关,说明土壤有机碳主要被保留在小孔隙中,间接表明大孔隙对土壤有机碳的保护作用较弱。Liang 等^[49]研究发现,在团聚体外部孔隙数量与有机碳呈负相关,而与微生物密度呈正相关,这是因为团聚体之间的孔隙比团聚体内的孔隙更大、更连续、通气性更好,有利于微生物活动,所以团聚体外部的土壤有机碳更容易被分解。而 Gao 等^[63]的研究结果则与上面提到的不一致,他们发现在保护性耕作下大团聚体内部孔隙度高,但是内外层有机碳含量没有差异,证明土壤有机碳的转化与孔隙分布没有关系。研究结果的不一致可能与环境变量(如土壤本身性质、降水、温度)以及田间耕作管理措施(如轮作、免耕、秸秆还田等)等复杂因素有关。

关于微尺度下土壤有机碳的保护机制目前已有大量研究。以微米级或纳米孔隙为主的结构(如黏质土壤)能够通过和矿物表面的相互作用和层状硅酸盐的夹层作用来保护土壤有机碳,而以中孔隙或大孔隙为主导的结构(如沙质土壤)保护土壤有机碳的能力较低^[64]。Lugato 等^[62]研究得到的腐殖质单体与 $<0.1 \mu\text{m}$ 之间的关系证明有机碳与矿物颗粒表面存在相互作用,且有机碳在小孔隙中容易得到保护。小孔隙中相对复杂的土壤有机碳(芳香族碳)易被分解,比粗孔隙中简单的有机碳损失量多,表明土壤中对有机碳的保护作用主要是物理保护机制^[31,61]。在一些孔隙中,孔隙中的里氏木霉真菌能迅速分解大量的水溶性碳,表明受土壤物理作用保护的有机碳可能会受到局部微生物的影响^[61]。有研究者^[65]认为,土壤有机碳的吸附会导致微小孔隙($<2 \text{nm}$)堵塞,这可能是一种对抗化学、生物分解的额外机制;也有研究^[28,59]发现,富集在小孔隙中的芳香族碳不易被微生物分解,证明土壤有机碳在生物化学作用的保护下有抗分解的潜在机制。土壤环境中微观尺度结构的异质性影响土壤物理—化学—生物作用对有机碳的保护机制。因此,微观尺度下土壤有机碳的具体保护机制及其之间的相互关系仍需做进一步研究。

3.2 土壤孔隙结构与新输入植物残体之间的相互作用关系

在土壤中添加植物残体不仅能有效增加土壤有机碳含量,而且能够改善土壤结构。土壤孔隙特征调节水分及气体扩散、化学物质移动以及微生物的活动,进而影响添加底物(如植物残体)的分解^[47,66]。据报道^[28],作物残体或有机底物的分解速度及微生物活性强度与土

壤孔隙大小有关。一些研究结果^[67-68]表明,被分解的植物残体碎屑会形成一个碎屑球来影响其周围 1~10 mm 的土壤,在这个局部范围内土壤有机碳转化及微生物群落组成与整个土壤不同,其易受土壤孔隙特征的影响,尤其是在 $<35\ \mu\text{m}$ 的孔隙中最为明显^[47]。Juarez 等^[69]发现,在孔隙结构调控的区域内(如 $<1\ \mu\text{m}$ 的孔隙或土壤颗粒表面)土壤“老”有机碳分解快。另外,一些研究^[50]将新鲜的植物残体添加到具有不同孔隙大小的土壤中,对比发现植物残体的分解不仅受孔隙特征的影响,而且分解的植物残体自身也可以促进新孔隙的形成。这是因为植物残体分解的初始产物具有可溶性和亲水性^[70],在有利的扩散条件下,它们可以迅速扩散到邻近的土壤中^[68]。植物残体的分解产物是否会扩散到周围邻近土壤以及扩散的距离取决于邻近土壤的孔隙特征^[50,71]。

新添加的植物残体碳能促进土壤“老”有机碳的分解,即激发效应(priming effect),该过程同样受控于土壤孔隙结构。用完整的土壤团聚体进行的试验表明,无论新鲜植物残体添加与否,随着土壤中“老”有机碳含量的增加,孔隙对有机碳的分解影响越大^[45]。在有植物残体添加的土壤样品中,不同孔隙结构对累积 CO_2 排放量产生的影响差异明显;而在没有添加植物的样品中仅观察到微小的差异。该现象表明在没有新鲜有机物料投入的情况下,孔隙结构对土壤“老”土壤有机碳的分解影响甚微^[47,71]。Toosi 等^[71]发现,大孔隙能够促进植物叶片的分解,而其分解产物主要分布在小孔隙(5~10 μm)中,同时小孔隙能产生更大的激发效应,且孔隙大小分布对输入土壤植物残体去向的影响较土壤湿度水平或土壤管理历史等其他指标更显著。该研究结果说明,植物残体及其分解产物的去向很大程度上由周围土壤的物理特性(例如孔隙结构)驱动。当植物残体附近的土壤中存在大量大孔隙时,残体的分解速度较快,残体碳大多数转化为 CO_2 并排放到大气中,只有少量的分解产物进入并保存在邻近的土壤。然而,在小孔隙占主导的土壤中,植物残体分解慢,分解产物大多数迁移到邻近土壤中,这也会激发土壤“老”有机碳的分解,产生正激发效应。以上研究结果均表明土壤孔隙的分布与组合是影响激发效应的启动与强度的重要因素^[47,67,71]。

4 结语与展望

土壤结构通过调节固相、气相、液相之间产生相互作用的界面来决定水分和气体在土壤孔隙中的运动,为生活在土壤中的不同生物构建了生态位^[2];同时,也控制着土壤碳循环这一关键生物地球化学过

程。当前,土壤结构在反馈土壤生物活动和非生物环境中的重要作用已受到了土壤学界的广泛关注,无论是在土壤结构的形成,还是在土壤孔隙结构与有机碳周转的相互作用关系等方面均取得明显的进展。然而,传统研究大多是通过模拟自然系统或者通过以试验结果为导向的研究获得对这些过程的定性认识。而如何将纷繁复杂的土壤孔隙结构同变化莫测的土壤发生过程、高度异质性的土壤组分建立起定量关系仍是未来研究的巨大挑战。此外,从当前的研究结果来看,还不能够将田间原位研究和室内培养研究等不同模式的研究结果进行很好的融合、统一。采用田间原位试验研究土壤孔隙结构的相关问题不仅难以控制自然条件变量(如土壤含水量、温度),并且在样品选择过程中可能会因为主观因素使选取的分析样品缺乏代表性^[6]。而室内试验的研究则存在试验结果不能代表田间真实发生的状态的缺陷。如前所述,通过 2 种研究方法对土壤孔隙结构在土壤微环境、有机碳固定与分解等方面的作用所得到的试验结果均存在不同程度的分歧,这也为理清土壤结构变化和作用机制带来很大的困难。本文通过总结土壤孔隙结构与土壤微环境和土壤有机碳定量化关系的相关研究进展,认为未来研究的方向应关注的方面为:

(1)加强不同研究技术的融合。土壤结构的复杂性导致传统研究结果所得数据存在不同程度的偏差,而自然条件下真实存在的土壤结构也并不是简单的线性或叠加关系。因此,不断探索土壤结构定量化的新技术是逼近土壤结构真实面目的动力源泉。将高分辨率显微成像技术(如同步辐射显微 CT 扫描、扫描电镜)同稳定同位素标记、分子生物学(如 DNA/RNA/PLFA-SIP)以及核磁共振等先进技术进行有机结合,从空间分布—碳的流动—微生物功能等不同视角综合探明不同孔隙中有机碳周转的微生物内在作用机理,进一步探索新添加碳源(不同数量、质量的植物残体)分解产物与土壤孔隙结构的相互作用关系,从而明确微观尺度下土壤有机碳周转的保护机制以及不同保护机制贡献的大小,有助于模拟并建立土壤结构与有机碳周转模型。

(2)不同环节研究相互促进和相辅相成。具有高度异质性和易变性的土壤孔隙结构在自身的动态变化过程中也对土壤微生物的代谢、土壤气体和液体的空间分布和土壤有机无机胶体的复合产生深刻的影响。想要弄清土壤孔隙—气体—液体—微生物—土壤有机碳之间的相互作用,建立完善的土壤结构数据网络,必须建立起跨越物理学、生物学和土壤学等不

同学科的综合研究体系,将不同学科的研究结果相统一,而不是“各自为政”的单一研究。此外,还要综合衡量气候变化、土壤环境、干湿交替和人为管理等外界影响因子的作用和权重,这将有助于更深刻的认识土壤结构形成的层次性及其变化特性,在理论上深化对土壤有机碳的循环过程及调控机理的认知。

(3)不同尺度研究循序渐进与有机结合。在微观尺度上认识土壤结构的异质性以及其与土壤微生物的相互作用是认识土壤结构与有机碳定量化关系的基础。因此,应在室内培养试验同田间试验紧密结合的基础上,首先将微观尺度(微米级以下)下土壤有机碳循环过程及内在调控机理弄清楚,同时也不能忽略植物生长与土壤有机碳、土壤结构之间的关系,然后再逐步过度并解释中尺度(区域尺度)和大尺度(景观尺度)的土壤碳循环机理研究。最终,将不同尺度下土壤结构的定量化信息融入到有机碳周转的模型中,精确地模拟全球碳生物地球化学循环过程,并预测气候变幻等外界因素导致的全球碳反馈机制,这些将有利于制定有效的碳库管理策略,达到土壤生态系统碳汇潜力的最大化。

参考文献:

- [1] Pagliai M, Vignozzi N. The soil pore system as an indicator of soil quality[J]. *Advances in Geo-ecology*, 2002, 35:69-80.
- [2] Martín M Á, Martínez F S J, Perfect E, et al. Soil structure and function in a changing world: Characterization and scaling[J]. *Geoderma*, 2017, 287:1-3.
- [3] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2):3-22.
- [4] Elliott E T, Coleman D C. Let the soil work for us[J]. *Ecological Bulletins*, 1988, 39(39):23-32.
- [5] Young I M, Crawford J W. Interactions and self-organization in the soil-microbe complex[J]. *Science*, 2004, 304(5677):1634-1637.
- [6] Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review[J]. *Geoderma*, 2018, 314:122-137.
- [7] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68(1):A4-A9.
- [8] Zhou H, Peng X, Perfect E, et al. Effects of organic and inorganic fertilization on soil aggregation in an Ultisol as characterized by synchrotron based X-ray micro-computed tomography[J]. *Geoderma*, 2013, 195:23-30.
- [9] Kravchenko A N, Guber A K. Soil pores and their contributions to soil carbon processes[J]. *Geoderma*, 2017, 287:31-39.
- [10] Smucker A J M, Wang W, Kravchenko A N, et al. Forms and functions of meso and micro-niches of carbon within soil aggregates[J]. *Journal of Nematology*, 2010, 42(1):84-86.
- [11] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure[J]. *Soil and Tillage Research*, 1988, 11(3):199-238.
- [12] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(3):345-353.
- [13] 林大仪, 谢英荷. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011:50-52.
- [14] Lal R, Shukla M K. Principles of soil physics[M]. UK: CRC Press Inc., 2004.
- [15] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47(4):715-722.
- [16] Li S Y, Gu X, Zhuang J, et al. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155(2):199-206.
- [17] 代文才, 钱盛, 高明, 等. 施用生物质灰渣对柑橘园土壤团聚体及有机碳分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2):260-265.
- [18] 周虎, 吕贻忠, 李保国. 土壤结构定量化研究进展[J]. *土壤学报*, 2009, 46(3):501-506.
- [19] Dal Ferro N, Delmas P, Duwig C, et al. Coupling X-ray microtomography and mercury intrusion porosimetry to quantify aggregate structures of a cambisol under different fertilisation treatments[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 119:13-21.
- [20] Sasanian S, Newson T A. Use of mercury intrusion porosimetry for microstructural investigation of reconstituted clays at high water contents[J]. *Engineering Geology*, 2013, 158:15-22.
- [21] Hajnos M, Lipiec J, Świeboda R, et al. Complete characterization of pore size distribution of tilled and orchard soil using water retention curve, mercury porosimetry, nitrogen adsorption, and water desorption methods[J]. *Geoderma*, 2006, 135:307-314.
- [22] Echeverria J C, Morera M T, Mazkiarán C, et al. Characterization of the porous structure of soils: Adsorption of nitrogen (77 K) and carbon dioxide (273 K), and mercury porosimetry[J]. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(3):497-503.
- [23] Li Z Y, Zhang X X, Liu Y. Pore-scale simulation of gas diffusion in unsaturated soil aggregates: Accuracy of the dusty-gas model and the impact of saturation[J].

- Geoderma, 2017, 303:196-203.
- [24] Heister K. The measurement of the specific surface area of soils by gas and polar liquid adsorption methods: Limitations and potentials[J]. Geoderma, 2014, 216:75-87.
- [25] Garbout A, Munkholm L J, Hansen S B. Temporal dynamics for soil aggregates determined using X-ray CT scanning[J]. Geoderma, 2013, 204:15-22.
- [26] Dal Ferro N, Charrier P, Morari F. Dual-scale micro-CT assessment of soil structure in a long-term fertilization experiment[J]. Geoderma, 2013, 204:84-93.
- [27] Van Loo D, Bouckaert L, Leroux O, et al. Contrast agents for soil investigation with X-ray computed tomography[J]. Geoderma, 2014, 213:485-491.
- [28] Strong D T, Wever H, Merckx R, et al. Spatial location of carbon decomposition in the soil pore system [J]. European Journal of Soil Science, 2004, 55(4):739-750.
- [29] Or D, Smets B F, Wraith J M, et al. Physical constraints affecting bacterial habitats and activity in unsaturated porous media: A review[J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(6/7):1505-1527.
- [30] Rabot E, Lacoste M, Hénault C, et al. Using X-ray computed tomography to describe the dynamics of nitrous oxide emissions during soil drying [J]. Vadose Zone Journal, 2015, 14(8):1-10.
- [31] Dungait J A J, Hopkins D W, Gregory A S, et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance[J]. Global Change Biology, 2012, 18(6):1781-1796.
- [32] 杨永辉, 武继承, 毛永萍, 等. 利用计算机断层扫描技术研究土壤改良措施下土壤孔隙[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23):99-108.
- [33] Jarvis N, Larsbo M, Koestel J. Connectivity and percolation of structural pore networks in a cultivated silt loam soil quantified by X-ray tomography[J]. Geoderma, 2017, 287:71-79.
- [34] Paradelo M, Katuwal S, Moldrup P, et al. X-ray CT-derived soil characteristics explain varying air, water, and solute transport properties across a loamy field[J]. Vadose Zone Journal, 2016, 15(4):1-13.
- [35] Pot V, Peth S, Monga O, et al. Three-dimensional distribution of water and air in soil pores: Comparison of two-phase two-relaxation-times lattice-Boltzmann and morphological model outputs with synchrotron X-ray computed tomography data[J]. Advances in Water Resources, 2015, 84:87-102.
- [36] Bachmann J, Guggenberger G, Baumgartl T, et al. Physical carbon-sequestration mechanisms under special consideration of soil wettability[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(1):14-26.
- [37] Rezanezhad F, Quinton W L, Price J S, et al. Examining the effect of pore size distribution and shape on flow through unsaturated peat using computer tomography [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(10):1993-2002.
- [38] Mangalassery S, Sjögersten S, Sparkes D L, et al. The effect of soil aggregate size on pore structure and its consequence on emission of greenhouse gases[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 132:39-46.
- [39] Cunningham R E, Williams R J J. Diffusion in gases and porous media[M]. New York: Plenum Press, 1980.
- [40] Dechesne A, Pallud C, Debouzie D, et al. A novel method for characterizing the microscale 3D spatial distribution of bacteria in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(12):1537-1546.
- [41] Ruamps L S, Nunan N, Chenu C. Microbial biogeography at the soil pore scale[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(2):280-286.
- [42] Kravchenko A N, Negassa W, Guber A K, et al. New approach to measure soil particulate organic matter in intact samples using X-ray computed microtomography [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(4):1177-1185.
- [43] Ruamps L S, Nunan N, Pouteau V, et al. Regulation of soil organic C mineralisation at the pore scale[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2013, 86(1):26-35.
- [44] 张斌, 许玉芝, 李娜, 等. 土壤团聚结构变化的关键控制过程研究进展[J]. 土壤与作物, 2014, 3(2):41-49.
- [45] Kravchenko A N, Negassa W C, Guber A K, et al. Protection of soil carbon within macro-aggregates depends on intra-aggregate pore characteristics[J]. Scientific Reports, 2015, 5:16261.
- [46] Ananyeva K, Wang W, Smucker A J M, et al. Can intra-aggregate pore structures affect the aggregate's effectiveness in protecting carbon? [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57:868-875.
- [47] Negassa W C, Guber A K, Kravchenko A N, et al. Properties of soil pore space regulate pathways of plant residue decomposition and community structure of associated bacteria [J]. PLoS One, 2015, 10(4):e0123999.
- [48] Bailey V L, McCue L A, Fansler S J, et al. Micrometer-scale physical structure and microbial composition of soil macroaggregates[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 65:60-68.
- [49] Liang A Z, Zhang Y, Zhang X P, et al. Investigations of relationships among aggregate pore structure, microbial biomass, and soil organic carbon in a Mollisol

- using combined non-destructive measurements and phospholipid fatty acid analysis[J].*Soil and Tillage Research*,2019,185:94-101.
- [50] Helliwell J R, Miller A J, Whalley W R, et al. Quantifying the impact of microbes on soil structural development and behaviour in wet soils[J].*Soil Biology and Biochemistry*,2014,74:138-147.
- [51] Ritz K, Young I M. Interactions between soil structure and fungi[J].*Mycologist*,2004,18(2):52-59.
- [52] Crawford J W, Deacon L, Grinev D, et al. Microbial diversity affects self-organization of the soil-microbe system with consequences for function[J].*Journal of the Royal Society Interface*,2011,9(71):1302-1310.
- [53] Chenu C, Plante A F. Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: Revisiting the concept of the 'primary organo-mineral complex'[J].*European Journal of Soil Science*,2006,57(4):596-607.
- [54] Kinyangi J, Solomon D, Liang B, et al. Nanoscale biogeochemical complexity of the organomineral assemblage in soil [J].*Soil Science Society of America Journal*,2006,70(5):1708-1718.
- [55] Kemmitt S J, Lanyon C V, Waite I S, et al. Mineralization of native soil organic matter is not regulated by the size, activity or composition of the soil microbial biomass - A new perspective[J].*Soil Biology and Biochemistry*,2008,40(1):61-73.
- [56] Killham K, Amato M, Ladd J N. Effect of substrate location in soil and soil pore-water regime on carbon turnover[J].*Soil Biology and Biochemistry*,1993,25(1):57-62.
- [57] Sextstone A J, Revsbech N P, Parkin T B, et al. Direct measurement of oxygen profiles and denitrification rates in soil aggregates 1[J].*Soil Science Society of America Journal*,1985,49(3):645-651.
- [58] Lützow M, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions-a review[J].*European Journal of Soil Science*,2006,57(4):426-445.
- [59] 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[J].*土壤学报*,2004,41(4):618-623.
- [60] Larsbo M, Koestel J, Kätterer T, et al. Preferential transport in macropores is reduced by soil organic carbon[J].*Vadose Zone Journal*,2016,15(9):1-7.
- [61] Bailey V L, Smith A P, Tfaily M, et al. Differences in soluble organic carbon chemistry in pore waters sampled from different pore size domains[J].*Soil Biology and Biochemistry*,2017,107:133-143.
- [62] Lugato E, Morari F, Nardi S, et al. Relationship between aggregate pore size distribution and organic-humic carbon in contrasting soils[J].*Soil and Tillage Research*,2009,103(1):153-157.
- [63] Gao L L, Becker E, Liang G P, et al. Effect of different tillage systems on aggregate structure and inner distribution of organic carbon [J].*Geoderma*,2017,288:97-104.
- [64] Simonetti G, Francioso O, Dal Ferro N, et al. Soil porosity in physically separated fractions and its role in SOC protection[J].*Journal of Soils and Sediments*,2017,17(1):70-84.
- [65] Kaiser K, Guggenberger G. Mineral surfaces and soil organic matter[J].*European Journal of Soil Science*,2003,54(2):219-236.
- [66] Juarez S, Nunan N, Duday A C, et al. Effects of different soil structures on the decomposition of native and added organic carbon[J].*European Journal of Soil Biology*,2013,58:81-90.
- [67] Gaillard V, Chenu C, Recous S. Carbon mineralisation in soil adjacent to plant residues of contrasting biochemical quality [J].*Soil Biology and Biochemistry*,2003,35(1):93-99.
- [68] Marschner P, Marhan S, Kandeler E. Microscale distribution and function of soil microorganisms in the interface between rhizosphere and detritusphere[J].*Soil Biology and Biochemistry*,2012,49:174-183.
- [69] Juarez S, Nunan N, Duday A C, et al. Soil carbon mineralisation responses to alterations of microbial diversity and soil structure[J].*Biology and Fertility of Soils*,2013,49(7):939-948.
- [70] De Troyer I, Amery F, Van Moorlegheem C, et al. Tracing the source and fate of dissolved organic matter in soil after incorporation of a ¹³C labelled residue: A batch incubation study[J].*Soil Biology and Biochemistry*,2011,43(3):513-519.
- [71] Toosi E R, Kravchenko A N, Guber A K, et al. Pore characteristics regulate priming and fate of carbon from plant residue[J].*Soil Biology and Biochemistry*,2017,113:219-230.