

■ 水土资源与环境 ■

文章编号: 1672-3317(2023)02-0095-08

有机物料改良土壤结构及其定量化研究方法综述

宣可凡^{1,2}, 李晓鹏¹, 张佳宝¹, 蒋一飞^{1,2}, 刘建立^{1*}

(1.中国科学院 南京土壤研究所, 南京 210008; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:【目的】秸秆、有机肥、生物炭等众多有机物料被广泛应用于农业实际生产之中, 改良土壤结构是其主要效用之一。在此基础上, 定量评价改良效果成为当前国内外的研究热点。【方法】本文针对不同有机物料对土壤结构的改良效应及其定量化评价方法进行了归纳和评述。【结果】在低温干旱地带, 有机肥和聚丙烯酰胺对土壤结构的改良效果较好; 在气候多变以及高温潮湿地区, 秸秆的改良效果更优; 生物炭适用于改良粗质土壤结构; 木本泥炭适用于改良细质土壤结构; 为多尺度、定量化地评价有机改良剂对土壤结构特性的影响, 土壤原状结构的无损获取技术以及相对应的数字图像处理方法成了当下和未来的主要研究手段。【结论】在今后的研究中应当根据土壤的理化性质合理选择改良物料, 通过多学科交叉对各尺度的土壤物理结构进行优化, 对未来研究土壤结构的新方法等作了展望。

关键词: 土壤结构; 土壤改良; 有机物料; 定量研究

中图分类号: S152.4⁺5

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021565

OSID:



宣可凡, 李晓鹏, 张佳宝, 等. 有机物料改良土壤结构及其定量化研究方法综述[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 95-102.

XUAN Kefan, LI Xiaopeng, ZHANG Jiabao, et al. Improving Soil Structure by Organic Material Amendments: A Review[J].

Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 95-102.

0 引言

目前, 由于土壤功能退化而导致的作物生长不良、病虫害严重、作物品质以及产量降低等问题日益严重, 究其原因很大程度上是土壤结构遭受破坏。土壤结构可以反映土体中水分和养分库容大小以及运移的能力, 并为根系、微生物等土壤生物提供活动的场所, 与土壤水分运动、作物养分供应、根系生长发育等重要的生态过程都密切相关。改良土壤结构、修复退化土壤、保护土壤健康已经到了刻不容缓的地步。有机肥、秸秆、生物炭等有机物料作为农业生产中的重要肥源, 不仅可以增加土壤有机碳量, 优化土壤的结构特性, 提高土壤的肥力水平, 而且可以减少滥用化肥所造成的环境问题, 对于提高土壤抗侵蚀性及缓解气候变化等都具有重要的意义^[1-2]。本文重点关注了国内外关于有机物料改良土壤物理结构的研究及其在农业生产上的体现, 并归纳了土壤结构研究方法及相关进展, 对今后该领域的研究方向和热点进行了展望。

1 土壤结构与土壤功能的概念

1.1 土壤结构

土壤结构是构成土壤肥力和维持农田生产力的关键要素, 通常是指由土壤颗粒或团聚体与土壤孔隙所组成的三维结构, 其优劣常以团聚体(尤其是大团聚体)的数量和质量指标来判断^[3]。通常情况下, 将 $>0.25\text{ mm}$ 的团聚体称为大团聚体, 其量越高说明团聚体的结构越稳定, 越有利于通气、持水以及养分的保持和释放^[4]。因此, 在团聚体的数量指标评价中, 常用 $>0.25\text{ mm}$ 的水稳定性团聚体作为评价指标。除此以外, 团聚体的直径也应受到重视。Bavel^[5]采用加权求和方法提出了结构体平均质量直径(Mean weight diameter, MWD)的概念, Gardener^[6]在此基础上提出了几何平均直径(Geometric mean diameter, GMD)的概念, 二者作为团聚体状况综合评价指标已被广泛应用。

在土壤结构的相关研究中, 团聚体作为大尺度指标, 重点关注的是土壤的固相, 而微观尺度上的孔隙结构则是土壤中水分、养分、气体传输以及植物根系生长的真正空间, 因此在进行相关研究时也必须将孔隙结构考虑在内。土壤孔隙结构指孔隙的大小、几何形态及其在土体中的空间分布特征。目前, 针对不同的孔径大小可将孔隙分为大孔隙、中孔隙和微孔隙, 但是目前仍没有一个统一的划分标准^[7]。通常采用孔

收稿日期: 2021-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771265); 中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA28010400)

作者简介: 宣可凡(1996-), 女。博士研究生, 主要从事土壤结构改良的研究。E-mail: kfxuan@issas.ac.cn

通信作者: 刘建立(1973-), 男。研究员, 主要从事土壤溶质运移模型以及农田信息获取与监测技术研究。E-mail: jlliu@issas.ac.cn

隙度、孔隙形状、孔隙分布等作为土壤结构的数量以及形态学特征指标。在评价孔隙在土体中的分布以及相互联通状况等空间分布特征时,常常采用孔隙的相关指标,例如孔隙数、有效喉道体积、孔隙大小分布等,以及相关的诸如孔隙连通性(三维欧拉数)、饱和导水率等评价指标^[8-9]。通过以上围绕团聚和孔隙为中心的特征参数,可从形态、数量、以及空间上对土壤结构从宏观至微观有一个较为全面而系统的认知。

1.2 土壤功能

土壤功能是一种固有属性,往往与成土因素和耕作相关的动态变化有关^[10]。数年来相关专家学者对土壤功能的内容进行了多次的补充与完善,1992年在美国召开的土壤质量会议,认为土壤的主要功能包括3个方面:①生产力;②环境质量;③动物健康^[11]。2002年欧洲委员会将土壤功能分为粮食和其他生物的生产功能、存储过滤和转换功能、栖息地和基因库功能、自然和文化景观功能以及原材料来源功能^[12]。而在英国的第一部土壤行动计划中,则将土壤主要功能分为6个,即生产功能、土壤对水和空气的环境交互功能、生物多样性保留功能、发展平台功能、提供原料功能和文化遗产保护功能^[13]。

在农业生态系统中,土壤功能是土壤物质储存、传输、转化过程的外在体现,而土壤结构作为植物根系、动物以及微生物的活动场所,改善结构可以使得土壤功能的优化体现在水肥高效利用、促进作物生长等方面。改善了土壤结构,也就改善了农业土壤的功能。

2 常见有机改良剂及其效果

土壤有机质是团聚体形成和稳定的主要胶结剂,通过施加有机物料不仅可以增加土壤中有机质量,同时可以进一步促进土壤微生物的活动与分解,使其在分解转化过程中胶结不同粒级的团聚体,提高团聚体的稳定性,改良土壤结构,改善土壤的透水性、蓄水性、通气性、适耕性以及根系生长环境,在农业生产上直接体现为作物的增产增收^[4,14]。因此,以土壤有机质管理为中心,通过施入作物秸秆、有机肥、生物炭、木本泥炭、聚丙烯酰胺(Polyacrylamide,简称PAM)等激发土壤微生物活性,促进土壤中有机无机复合,同时利用保护性耕作减少物理性扰动,是目前改良土壤结构的主要调控措施,对土壤结构的形成和稳定起到至关重要的作用。

2.1 秸秆还田

秸秆主要由纤维素、半纤维素和少量的木质素和蛋白等构成,常用的还田方式为直接还田、堆沤还田、

过腹还田和焚烧还田等^[15]。还田之后,在微生物的作用下腐解转化得到的腐殖酸可以与土壤中的钙、镁离子结合形成稳定的团粒结构,从而改善土壤的理化性状^[16]。众多学者在秸秆还田影响土壤结构、水分运动、作物产量方面做了若干研究。丁莫元等^[17]基于双指数土壤水分特征曲线模型研究发现,将氮化秸秆掺入粉砂壤土中培养可以显著增大土壤中大孔隙数量,并进一步提高土壤孔隙度。于博等^[18]在内蒙古沙壤土上进行定位试验发现多年秸秆深翻还田可提高土壤的累计入渗量和平均入渗速率。周延辉等^[19]对多篇田间试验数据资料进行整理发现,秸秆还田技术在潮土、壤土和水稻土上对小麦的增产效果显著,免耕和翻耕较旋耕也更有利于秸秆发挥效用。Wang等^[20]研究发现秸秆还田显著提高了玉米产量,但却未观察到其对小麦产量的显著影响。许多学者有试验表明农作物产量对秸秆还田的轻微负面反应,多数减产是在小麦(凉季作物)而非玉米、水稻(暖季作物)中发现的^[21]。

影响秸秆还田效果的关键在于秸秆的腐解程度。综上,建议运用免耕和翻耕的耕作技术。将秸秆还田多应用在有利于秸秆分解的气候地区,例如多变气候条件的秦岭淮河一带和温热潮湿的南方,并针对土壤类型、作物种类和种植方式,应对秸秆的管理做更多综合的调查和评价。此外,发展新型秸秆还田方式,如沟埋秸秆还田、秸秆还田与地膜覆盖相结合等等也应引起重视。

2.2 有机肥

有机肥可促进大团聚体中有机质的形成,提高团聚体稳定性,还能提高土壤微生物活性、增加其代谢物^[22],具体可体现在水分储存与运动、养分传输以及作物增产。肖庆礼等^[23]在黄壤中施加牛粪有机肥,发现随着其用量增加可以降低土壤体积质量、残余含水率(θ_r)和进气值倒数(α),提高土壤总孔隙度(主要提高中小微的孔隙比例)、饱和含水率(θ_s)和饱和导水率(K_s)。Wang等^[24]对中国北方的田间试验进行meta分析发现,施用有机肥料可以提高谷物20%的产量而不影响蒸发量,进而增加土壤水分利用率。任科宇等^[25]通过对我国不同地区添加有机肥后的作物产量分析发现,玉米的增产效果优于小麦,再次是水稻,在地区上体现为西北地区>东北地区,华北地区>南方地区>华东地区。Guo等^[26]从1982年开始的长期田间试验得出施肥,尤其是施加有机改良剂,不仅显著提高了作物的生产力和土壤养分,而且影响了土壤的微生物群落,但是与Yang等^[27]和Gu等^[28]短期的研究结果有出入:在形成土壤微生物群落时,作物的生育阶段以及时间变化是比短期施加有机肥更强的影响因素。

通过众多研究结果发现施用有机肥是改善土壤结构,促进农田水养运移,提高作物产量的有效途径。与短期施用相比,长期添加有机肥的改良效果更加显著。此物料更推荐用于低温少雨温带季风区的旱作物上,例如玉米和小麦,而对高温潮湿的亚热带季风区主要作物水稻则增产效果一般。

2.3 生物炭

生物炭(Biochar)也称为生物质炭,是生物质在完全或部分缺氧条件下热解形成的一种高度芳香化物质^[29]。当土壤中施加生物炭后,土壤的相关物理性质发生变化,其作用机制仍有待深入,不同的研究者得出的结论并不一致,这可能与生物炭性质、施用量、土壤特性及试验周期等有关。Burrell等^[30]应用盆栽试验探究生物炭对黑钙土、锥形土、粗质地的黏磐土的物理性质影响,发现在黏磐土中体积质量和团聚体的稳定性改良效果最好,得出生物炭在质地粗糙的土壤中对土壤物理特性的影响是最有效的;陈姣等^[31]研究发现添加生物炭在红壤中可以增加土体中的有效孔隙和大孔隙,而在水稻土中则会提高微孔比例。王浩等^[32]试验结果表明在潮土中添加玉米秸秆生物炭可以有效提高土壤的持水性能,但是随着其施用量的增加,作物对水分的利用难度也在逐渐升高。类似的,在中国东南地区的稻田中施加低含量的富氮生物炭可以使水稻增产,但是提高生物炭用量之后反而不利于作物的养分吸收和产量提高^[33]。

关于施加生物炭后土壤和作物对其的响应,我们发现生物炭的种类、施用量以及作用的土壤类型差异明显,在粗质地土壤中施用少量生物炭似乎是该物料发挥最大效用的途径。但在当前的众多研究中我们对生物炭制备的热化学过程知之甚少,且许多结论都是在短期试验之后得到的。因此今后相关学者必须系统地考虑生物炭的定向功能(如生物炭的养分、孔隙结构等)对生物炭进行定向制备,并根据不同类型土壤进行长期的附加研究才能真正达到改良土壤的目的。

2.4 木本泥炭

泥炭是藓类植物、草本植物或木本植物的残体长期处于潮湿缺氧环境中经厌氧菌不完全分解而形成的产物^[34],由此一般可分为藓类泥炭、草本泥炭和木本泥炭3种^[35]。国内外应用较多的为草本泥炭和藓类泥炭,对于木本泥炭的相关研究应用很少,国内近几年才出现相关研究报道。曲成闯等^[36]研究发现添加木本泥炭可以降低典型红壤的体积质量,提高其孔隙度,进而改善土体的通气性能。赵文慧等^[37]研究表明在潮土区短期施用木本泥炭可能会降低玉米产量,但与秸秆配施则能改善这一不良影响。Fu等^[38]在4种典型的退化农业土壤中添加木本泥炭均会提高小麦产量,

在红壤地区格外显著,但是在粗质地土壤中有机的下降速度要远高于细质地土壤。

有多项研究已经证实木本泥炭在提高土壤孔隙度、有机质量以及作物产量等方面有一定的效用,尤其对红壤等细质地土壤的改良效果显著,但是对木本泥炭自身的理化性质、与其他肥料的不同组合在不同土壤环境下的分解和作用情况仍有待进一步探究。

2.5 聚丙烯酰胺(PAM)

PAM是聚丙烯酰胺及其衍生物的统称,主要分为阴离子型、阳离子型和非离子型。其中,阴离子型PAM由于其分子链长,分子结构中的基键与土壤颗粒产生吸附力,使土壤颗粒胶结形成大团聚体,从而起到改善土壤结构的作用(图1)^[39]。王永敏等^[40]研究表明随着PAM浓度的升高,潮土中大团聚体的数量明显增加,小团聚体(<0.25 mm)数量逐渐减少,同时降低了团聚体分形维数,其施用的最优浓度约为1 g/kg。纪立东等^[41]在贺兰山的淡灰钙土区域配施有机肥和PAM,结果表明可以提高该地区土壤的水稳定性团聚体含量和储水能力。Wei等^[42]研究表明在整个玉米生长过程中,PAM处理的0~100 cm土壤含水率比对照提高5.62%~10.96%,一定程度上可以缓解玉米秃尖现象,提高产率,但是其节水增产机理还需要进一步的试验研究。

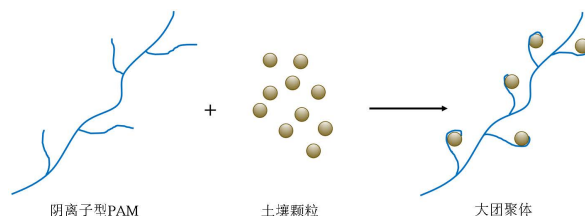


图1 阴离子型PAM改良土壤结构原理

Fig.1 Schematic diagram of soil structure improved by anionic PAM

PAM由于其良好的胶结性和吸附性,可以有效应用于干旱地区农业生产,提高该区域土壤的持水性能。一般来说PAM对环境无毒害,但是由于PAM的类型较多,不同种类的PAM降解产物是否一致还无相关研究,同时由于PAM价格较高,建议应用在具有较高附加值的经济作物上。

3 土壤结构的定量化研究

3.1 土壤结构的传统获取技术

通过团聚体的抗水化和抗机械破碎的能力来评价其稳定性,进行定量分级的方法常用的有筛分法(干筛法、湿筛法)、水滴法以及人工降雨模拟法。早在20世纪30年代Yoder就提出了筛分法,但是该方法耗时耗力,且在处理和表达结果时有一定的

局限^[43]。而后 McCalla 等提出使用水滴法来评价团聚体的稳定性,但其精准度不高^[44];在田间试验中常常采用人工模拟降雨法^[45]。在 20 世纪 20 年代末, Le Bissonnais 法在前人的基础上应运而生,成了较统一的团聚体的研究方法^[46],却仍旧没有突破会破坏土壤结构的局限。

针对土壤微观孔隙结构的早期研究往往通过的是间接手段来获取,例如土壤孔隙度或孔隙大小分布可以从土壤水分特征曲线估计,但是这种间接方法耗时长,精度低,且不能提供孔隙空间分布的信息^[47-48]。随着土壤微形态学的兴起,相关学者制备土壤切片,并使用数码相机扫描电镜 (SEM) 等技术手段观察其图像来对土壤孔隙进行研究。刘建立等^[49]使用数码相机拍摄砂壤土的切面,由此建立了土壤的孔隙网络模型并对其水力学特性进行了预测。耿雨晗等^[50]结合 SEM 与压汞试验,得出了黄河三角洲盐碱土结构性和渗透性较差的结论。但是上述 2 种方法切片制作过程复杂,且仍存在破坏土壤孔隙结构的可能。

3.2 土壤结构的无损获取技术

随着科学技术的发展,当前无损技术常用的有 X 射线断层扫描技术 (CT) 以及核磁共振技术 (NMR) 等。计算机断层扫描是一种非破坏性成像技术,可以真实地获取毫米到微米尺度的土壤孔隙特征^[51]。同时,CT 技术也已经被应用于表征微生物群落结构、作物根系形态与分布^[52]、以及溶质运移^[53]等与土壤功能相关的参数之中。例如, Hamamoto 等^[54]研究了 CT 技术所测得的土壤颗粒尺寸和形状、总孔隙度对孔隙网络结构参数的影响,以及孔隙网络结构参数与传质参数之间的联系。Liang 等^[55]结合 SEM、CT 以及磷脂脂肪酸 (PLFA) 测量结合提供了一种通过将土壤结构与土壤微生物特性联系起来以研究土壤有机碳变化机制的新方法。Zhou 等^[56]利用 CT 可视化并量化土壤结构和小麦根系,研究结果表明小麦根系在田间的发育受土壤大孔系统的影响比小麦基因型的影响更大。

近些年,土壤科学学者想探究更小尺度的土壤结构,例如团聚体内部的相关物理特性,较常使用的是基于同步辐射的 X 射线断层扫描 (SR-mCT) 技术,该技术较普通 CT 成像效果更好,分辨率更高。例如 Yu 等^[57]利用 SR-mCT 和数字图像处理技术,使大团聚体内部的结构可视化,以此探究其对长期施肥的响应。吴呈峰等^[58]结合同步辐射与土壤团聚体内部结构的数字图像,揭示了红壤团聚体孔隙的形态及空间分布特征。姜宇等^[59]在东北黑土区利用该技术研究表明冻融次数与黑土团聚体内部孔隙度成正比。

与 CT 相比,核磁共振技术分辨率较高,可以观测多孔介质中孔隙的结构、大小分布以及孔隙中流体的流速等^[60]。在土壤物理学的研究中常被用于研究土壤孔隙水以及有机质结构。例如固态 ^{13}C 核磁共振技术 (^{13}C -NMR) 可以根据不同有机质量的黑土碳结构来建立不同有机质梯度的黑土分子生态网络^[61]。Dong 等^[62]利用核磁共振技术研究干湿循环次数对膨胀土结构特性的影响,结果表明循环次数主要增加土壤大孔隙,而对土壤微小孔隙影响较小。Xu 等^[63]利用多重交叉极化/魔角旋转 NMR 结合偶极去相技术,定量地表征出各腐殖质组分的化学性质与土壤类型、种植制度、土壤通气和施肥处理等环境条件有关。

图 2 总结了以上 3 种土壤结构无损获取技术的主要适用对象,相关学者应当根据研究目的筛选合适的方法。高分辨率工业 CT 可以极好的完成超大样品(土柱等)的扫描,对于小样品也可以达到亚微米级的分辨率,因此适用于大多数土壤科学的研究中。同步辐射微纳米 CT 可以实现同轴相衬成像,对生物样品优势更大,但是无法扫描大样本,且在高分辨率下扫描时间太长。核磁共振技术可以探究到更小尺度的土壤结构,例如微团聚体间孔隙以及颗粒间孔隙,并且可以确定多孔介质中的流域性质,但受限于其昂贵的成本,当前无法进行大规模的推广应用。

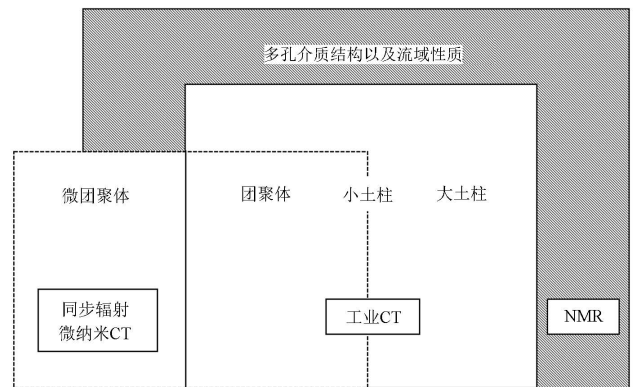


图 2 土壤结构主要无损获取技术及其适用对象

Fig.2 Main non-destructive acquisition techniques of soil structure and their applicable objects

3.3 数字图像处理与三维形态重构方法

上述无损研究方法往往获取到的是土壤原状结构的数字图像,若想对其进行定量化分析,则必须掌握数字图像的处理技术。在该领域的探索初期,大多运用数学方法提取数字图像中的土壤结构信息。Peyton等^[64]对X射线CT数据进行迭代计算,量化了原状土芯中的大孔隙周长、等效孔隙直径和孔隙率。Perrier等^[65]利用计算机模拟生成了土壤的分形结构,并且模拟了土壤的水力性质及其涨缩过程。张萌等^[66]结合数字图像和多重分形方法,以此分析作物影响下

的土壤裂隙网络及其均匀性。以上对数字图像的处理方法大多数是间接获取土壤结构参数并粗略估计其物理特性,有一定概率对结果做出错误的推断,如今已经难以满足土壤科学的研究需求。

随着越来越多土壤结构数字图像获取技术的出现,相关配套软件应运而生。这类软件通常以三维重构及可视化作为最大特点而被相关学者广泛应用。Image J是一个基于JAVA的开源图形设计程序,允许用户根据自身需求编写各种分析插件,因此赋予了其强大的图像处理功能^[67]。其安装方便快捷,对计算平台要求较低,可以轻松实现土壤数字图像的前处理(去噪、图像归一化、二值化等),并利用3D Viewer和Bone J等插件对多张的二维图像进行三维结构的还原并直接定量获取相关参数。Singh等^[68]利用Image J分析CT扫描图像,用Particle Analyser、Skeletonize 3D等插件获取了孔隙度、孔圆度、弯曲度等土壤孔隙结构的相关参数,以此探究草地向农田转变过程中的动态变化。Fernández等^[69]通过Image J定量描述土壤孔隙,从而通过孔隙周长和面积等形态参数揭示阿根廷半干旱大草原土壤结构形成的生物和物理过程的相互作用。

近年来,由于Image J常被局限于较小的图像数据处理量,VGStudioMAX和AVIZO等一些商用软件也被用于处理土壤结构的数字图像。高宙等^[70]利用AVIZO处理灌丛根系以及土壤大孔隙的CT图像,发现不同种类灌丛根系在土壤中的分布深度不同,但根系的体积密度均随着土壤大孔隙度的增大而增大。Ferreira等^[71]为在微观尺度评估免耕系统(NTS)下石灰对酸性土壤的微形态和几何特性(孔隙率、孔隙数、孔隙长度、伸长率、形状、连通性和曲折度)的影响,在显微CT获取数字图像后,使用了AVIZO软件中进行图像的可视化、处理和分析。VGStudioMAX软件曾在南非以甜高粱为基础的种植系统中用于探究耕作、轮作和残留管理对土壤微观结构的影响^[72]。这些商用软件通常自带较为完备的图像处理功能,无须用户进行源代码的撰写,并可以处理更多类型的图像,且3D渲染和动画设计的表现也更出色。因此对计算平台要求较高,在优秀的工作站支持下可以计算几十GB甚至上百GB, TB级别数据。除了上述优点之外,商业软件自身以及所需高性能计算平台的构建都会产生高昂的费用,应当结合实际科研需求选择合适的数字图像处理方法

4 结论与展望

在针对有机物料对土壤结构改良以及定量化评价方法的大方向上,虽然在改良效果、获取途径、研

究方法上已取得一定进展,但其中仍存在不少有待完善的方面,今后应从以下几个方面开展研究:

1) 充分了解被改良土壤的理化性质,从而选取适宜的、适量的有机物料。

通过以上文献总结,我们认为在北方低温少雨的干旱地区,施用有机肥和聚丙烯酰胺是改良该地区土壤结构的良好途径;气候多变的南北方交界处以及温暖湿润的南方,秸秆可以更好地发挥效用;生物炭适用于改良粗质地土壤结构,而木本泥炭适用于改良细质地土壤结构。但是大多数有机物料的作用效果受到施用量、土壤类型等因素的影响很大,在进行改良前仍应当做好土壤调查工作。同时,各种措施的经济效益以及环境友好性在实际生产中也应当被考虑。

2) 多尺度、多学科交叉地综合改良土壤结构。

在研究施用有机物料对土壤结构、土壤功能的改良时,应由大及小的多重尺度来考虑问题,从宏观的功能着眼,用微观的机制来阐释其机理。不能仅关注相关物理性状上的变化,并由此单一角度来探究其优化机理。实际上,土壤结构和功能的改变是土壤物理、化学、生物过程的复杂交互,在研究时需要多学科、多手段的交叉和融合,从多尺度切入,以此真正揭示其内在的原理和机制。

3) 探寻定量评价土壤结构的新技术与新方法。

由于土壤结构的复杂性,如何全面而准确地描述土壤结构仍旧是土壤学领域的一个难题。大多数研究都是将土壤结构作为一种静态或准静态的性状,很少关注土壤结构(尤其微观孔隙结构)对土壤水分养分循环、作物生长发育等动态过程的响应。我们期望在今后可以利用不断进步的数字图像获取手段和分析技术来建立新的模型,寻找这些问题的答案。

参考文献:

- [1] 陈源泉, 隋鹏, 严玲玲, 等. 有机物料还田对华北小麦玉米两熟农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 94-102.
CHEN Yuanquan, SUI Peng, YAN Lingling, et al. Effects of different organic wastes incorporation on soil organic carbon and its fraction under wheat-maize cropping system in North China plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(S2): 94-102.
- [2] SODHI G P S, BERI V, BENBI D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 103(2): 412-418.
- [3] LAL R. Soil structure and sustainability[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 1991, 1(4): 67-92.
- [4] HILLEL D. Environmental Soil Physics[M]. London, UK: Academic Press, 1998.
- [5] BAVEL C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. Soil Science Society of America

- Journal, 1950, 14(C): 20-23.
- [6] GARDENER W R. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution[J]. Soil Science Society of America Journal, 1956, 20(2): 151-153.
- [7] 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.
- [8] LUO L F, LIN H, HALLECK P. Quantifying soil structure and preferential flow in intact soil using X-ray computed tomography[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(4): 1 058-1 069.
- [9] YU X L, LU S G. Reconfiguration of macropore networks in a silty loam soil following biochar addition identified by X-ray microtomography and network analyses[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70: 591-603.
- [10] 孙波, 解宪丽. 全球变化下土壤功能演变的响应和反馈[J]. 地球科学进展, 2005, 20(8): 903-909.
SUN Bo, XIE Xianli. Response and feedback of soil function evolvement to global change[J]. Advances in Earth Science. 2005, 20(8): 903-909.
- [11] 赵其国, 孙波, 张桃林. 土壤质量与持续环境I.土壤质量的定义及评价方法[J]. 土壤, 1997, 29(3): 113-120.
ZHAO Qiguo, SUN Bo, ZHANG Taolin. Soil quality and sustainable environment I. Definition and evaluation method of soil quality[J]. Soils, 1997, 29(3): 113-120.
- [12] European Commission. Towards a thematic strategy for soil protection[C]. Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Commission of the European Communities, Brussels, 2002.
- [13] THOMPSON T R E, TRUCKELL I. Protecting Hampshire's Soils: Development of a soil function-based methodology[C]. NDRI Project TF1018V, 2005.
- [14] BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(2): 22.
- [15] 陈传琳. 秸秆还田的方式及技术[J]. 安徽农业, 2004(6): 40-41.
CHEN Chuanlin. Method and technology of straw returning to field[J]. Anhui Agricultural, 2004(6): 40-41.
- [16] 申源源, 陈宏. 秸秆还田对土壤改良的研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(19): 291-294.
SHEN Yuanyuan, CHEN Hong. The progress of study on soil improvement research with straw stalk[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(19): 291-294.
- [17] 丁莫元, 冯浩, 赵英, 等. 氮化秸秆还田对土壤孔隙结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 650-658.
DING Dianyuan, FENG Hao, ZHAO Ying, et al. Effect of ammoniated straw returning on soil pore structure[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(3): 650-658.
- [18] 于博, 于晓芳, 高聚林, 等. 秸秆全量深翻还田和施加生物炭对不同土壤持水性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(5): 25-32.
YU Bo, YU Xiaofang, GAO Julin, et al. Change in hydraulic properties of soils amended with biochar following plough of straw stalk into deep soil horizon[J]. Journal of Irrigation and Drainage. 2018, 37(5): 25-32.
- [19] 周延辉, 朱新开, 郭文善, 等. 中国地区小麦产量及产量要素对秸秆还田响应的整合分析[J]. 核农学报, 2019(1): 129-137.
ZHOU Yanhui, ZHU Xinkai, GUO Wenshan, et al. Meta-analysis of the response of wheat yield and yield components to straw returning in China[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences. 2019(1): 129-137.
- [20] WANG L, YUAN X L, LIU C, et al. Soil C and N dynamics and hydrological processes in a maize-wheat rotation field subjected to different tillage and straw management practices[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 285.
- [21] WANG J Z, WANG X J, XU M G, et al. Crop yield and soil organic matter after long-term straw return to soil in China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 102(3): 371-381.
- [22] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. European Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
- [23] 肖庆礼, 陈昆燕, 代先强, 等. 牛粪有机肥对植烟黄壤理化性质及持水能力的影响[J]. 中国烟草学报, 2020, 26(2): 57-64.
XIAO Qingli, CHEN Kunyan, DAI Xianqiang, et al. Effect of cattle manure organic fertilizer on physicochemical properties and water-holding capacity of tobacco-planting yellow soil[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2020, 26(2): 57-64.
- [24] WANG L L, LI Q, COULTER J, et al. Winter wheat yield and water use efficiency response to organic fertilization in northern China: A meta-analysis[J]. Agricultural Water Management, 2020, 229: 10.
- [25] 任科宇, 徐明岗, 张露, 等. 我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 143-150.
REN Keyu, XU Minggang, ZHANG Lu, et al. Response of grain crop yield to manure application in different regions of China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(1): 143-150.
- [26] GUO Z B, WAN S, HUA K K, et al. Fertilization regime has a greater effect on soil microbial community structure than crop rotation and growth stage in an agroecosystem[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 149: 13.
- [27] YANG W, GUO Y T, WANG X, et al. Temporal variations of soil microbial community under compost addition in black soil of Northeast China[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 121: 214-222.
- [28] GU S Y, GUO X J, CAI Y T, et al. Residue management alters microbial diversity and activity without affecting their community composition in black soil, Northeast China[J]. Peerj, 2018, 6: 17.
- [29] 赵建坤, 李江舟, 杜章留, 等. 施用生物炭对土壤物理性质影响的研究进展[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(3): 95-101.
ZHAO Jiankun, LI Jiangzhou, DU Zhangliu, et al. Effects of biochar application on soil physical properties: a review[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(3): 95-101.
- [30] BURRELL L D, ZEHETNER F, RAMPAZZO N, et al. Long-term effects of biochar on soil physical properties[J]. Geoderma, 2016, 282: 96-102.
- [31] 陈姣, 吴凤平, 王辉, 等. 生物炭对南方红壤和水稻土水力学特性的影响分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 73-80.
CHEN Jiao, WU Fengping, WANG Hui, et al. The effects of biochar amendment on hydraulic properties of red and paddy soils in Southern China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 73-80.
- [32] 王浩, 焦晓燕, 王劲松, 等. 生物炭对土壤水分特征及水胁迫条件下高粱生长的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 253-257, 287.
WANG Hao, JIAO Xiaoyan, WANG Jinsong, et al. Effects of biochar on water characteristics of soil and sorghum growth under conditions of soil water stress[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 253-257, 287.
- [33] YIN X L, PENUELAS J, SARDANS J, et al. Effects of nitrogen-enriched biochar on rice growth and yield, iron dynamics, and soil carbon storage and emissions: A tool to improve sustainable rice cultivation[J]. Environmental Pollution, 2021, 287.
- [34] 林军章, 杨翔华, 顾锡慧, 等. 泥炭在农业上的综合利用[J]. 中国资源综合利用, 2004(4): 18-21.
LIN Junzhang, YANG Xianghua, GU Xihui, et al. Comprehensive utilization of peat in agriculture[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2004(4): 18-21.
- [35] 王忠强, 张心昱, 孟宪民, 等. 泥炭形成过程对泥炭基质替代物研究的启示[J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1 252-1 258.
WANG Zhongqiang, ZHANG Xinyu, MENG Xianmin, et al. The

- Enlightenment of Nature Peat Formation to Peat Substitute Research[J], Journal of Natural Resources, 2012, 27(7): 1 252-1 258.
- [36] 曲成闯, 陈效民, 张佳宝, 等. 基于木本泥炭快速构建红壤新垦耕地优质耕作层技术与效果[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 134-140.
QU Chengchuang, CHEN Xiaomin, ZHANG Jiabao, et al. Techniques and effects of quickly constructing high-quality tillage layers for newly-cultivated arable land in red soil and paddy field based on woody peat and organic materials[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 134-140.
- [37] 赵文慧, 马垒, 徐基胜, 等. 秸秆与木本泥炭短期施用对潮土有机质及微生物群落组成和功能的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 153-164.
ZHAO Wenhui, MA Lei, XU Jisheng, et al. Effect of application of straw and wood peat for a short period on soil organic matter and microbial community in composition and function in fluvo-aquic soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(1): 153-164.
- [38] FU W, FAN J, WANG S, et al. Woody peat addition increases soil organic matter but its mineralization is affected by soil clay in the four degenerated erodible soils[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2021, 318(4): 107 495.
- [39] 陆绍娟, 王占礼. 土壤改良剂聚丙烯酰胺的研究进展[J]. 人民黄河, 2016, 38(7): 73-77.
LU Shaojuan, WANG Zhanli. Research progress of soil conditioner polyacrylamide[J]. Yellow River, 2016, 38(7): 73-77.
- [40] 王永敏, 李俊颖, 王定勇. PAM对潮土水稳性团聚体的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 297-299.
WANG Yongmin, LI Junying, WANG Dingyong. Effect of PAM on soil water stable aggregates in alluvial soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(6): 297-299.
- [41] 纪立东, 李磊, 司海丽, 等. PAM对砾石土水肥保蓄及酿酒葡萄产量与品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(12): 7-15.
JI Lidong, LI Lei, SI Haili, et al. The effects of polyacrylamide amendment on ability of gravelled soil to retain water and fertilizer and its consequence for yield and quality of wine grape[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(12): 7-15.
- [42] WEI X D, YUAN X F, LI Y M, et al. Research on the water-saving and yield-increasing effect of polyacrylamide[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11(Part B): 573-580.
- [43] YODER R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1936, 28(5): 337-351.
- [44] MCCALLA T M. Water-drop method of determining stability of soil structure[J]. Soil Science, 1944, 58(2): 117-122.
- [45] YOUNG R A. A Method of measuring aggregate stability under waterdrop impact[J]. Transactions of the Asae, 1984, 27(5): 1 351-1 354.
- [46] LE B Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(4): 425-437.
- [47] JURY W A, GARDNER W R, GARDNER W H. Soil physics[M]. John Wiley, 1991.
- [48] GANTZER C J, ANDERSON S H. Computed tomographic measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds[J]. Soil & Tillage Research, 2002, 64(1): 101-111.
- [49] 刘建立, 徐绍辉, 刘慧, 等. 预测土壤水力性质的形态学网络模型应用研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 218-224.
LIU Jianli, XU Shaohui, LIU Hui, et al. Determination of soil hydraulic properties using a morphology-based pore scale network model[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 218-224.
- [50] 耿雨晗, 刘传孝, 李克升, 等. 黄河三角洲粉质盐碱土土壤结构特征与渗透性关系分析[J]. 节水灌溉, 2020(2): 27-31, 36.
GENG Yuhan, LIU Chuanxiao, LI Kesheng, et al. Analysis of relationship between soil structure characteristics and permeability of silty saline-alkali soil in the Yellow river delta[J]. Water Saving Irrigation, 2020(2): 27-31, 36.
- [51] RAB M A, HALING R E, AARONS S R, et al. Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils[J]. Geoderma, 2014, 213(1): 460-470.
- [52] MOONEY S J, PRIDMORE T P, HELLIWELL J, et al. Developing X-ray computed tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil[J]. Plant & Soil, 2012, 352(2): 1-22.
- [53] ANDERSON S H, HEINZE D J, PEYTON R L. Assessment of selected methods for estimating chemical transport parameters from computed tomographic imaging[J]. Procedia Computer Science, 2015, 61: 460-465.
- [54] HAMAMOTO S, MOLDRUP P, KAWAMOTO K, et al. Pore network structure linked by X-ray CT to particle characteristics and transport parameters[J]. Soils & Foundations, 2016, 56(4): 676-690.
- [55] 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.
- [56] ZHOU H, WHALLEY W R, HAWKESFORD M J, et al. The interaction between wheat roots and soil pores in structured field soil[J]. Journal of Experimental Botany, 2021, 72(2): 747-756.
- [57] YU X L., HONG, C., PENG, G. et al. Response of pore structures to long-term fertilization by a combination of synchrotron radiation X - ray microcomputed tomography and a pore network model[J]. European Journal of Soil Science, 2018, 69(2): 290-302.
- [58] 吴呈锋, 於修龄, 卢升高. 运用同步辐射显微CT揭示红壤团聚体内孔隙形态与空间分布[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1 422-1 429.
WU Chengfeng, YU Xiuling, LU Shenggao. Synchrotron-based X-ray tomographic microscopy reveals morphology and spatial structure of intra-aggregate pores in red soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(6): 1 422-1 429.
- [59] 姜宇, 范昊明, 侯云晴, 等. 基于同步辐射显微CT研究冻融循环对黑土团聚体结构特征的影响[J]. 生态学报, 2019(11): 4 080-4 087.
JIANG Yu, FAN Haoming, HOU Yunqing, et al. Characterization of aggregate microstructure of black soil with different number of freeze-thaw cycles by synchrotron-based micro-computed tomography[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019(11): 4 080-4 087.
- [60] DAVIES S, KALAM M Z, PACKER K J, et al. Pore-size distributions from nuclear magnetic resonance spin-lattice relaxation measurements of fluid-saturated porous solids. II. Applications to reservoir core samples[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 67(6): 3 171.
- [61] 尚秋彤, 黄瑞林, 倪浩为, 等. 黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4 305-4 313.
SHANG Qitong, HUANG Ruilin, NI Haowei, et al. Interactions of fungi community and relationship with the carbon structure in Arable Mollisols with gradient organic matter content[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4 305-4 313.
- [62] DONG J G., LYU, H B, XU G Y, et al. NMR-based study on soil pore structures affected by drying-wetting cycles[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020, 45(5): 4 161-4 169.
- [63] XU J S, ZHAO B Z, LI Z Q, et al. Demonstration of chemical distinction among soil humic fractions using quantitative solid-state ¹³C NMR[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(29).
- [64] PRYTON R L, HAEFFNER B A, ANDERSON S H, et al. Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores[J]. Geoderma, 1992, 53(3): 329-340.
- [65] PERRIER E, RIEU M, SPOSITO G, et al. Models of the water retention

- curve for soils with a fractal pore size distribution[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(10): 3 025-3 031.
- [66] 张萌, 申同庆, 马荣, 等. 作物根系影响下的农田干缩裂隙网络多重分形分析[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(8): 45-52.
- ZHANG Meng, SHEN Tongqing, MA Rong, et al. Multifractal analysis of shrinkage and fracture in farmland under the influence of crop root system[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(8): 45-52.
- [67] 毕利东, 张斌, 潘继花. 运用Image J软件分析土壤结构特征[J]. *土壤*, 2009(4): 5.
- BI Lidong, ZHANG Bin, PAN Jihua. Analysis of soil structural properties by using Image-J software[J]. *Soils*, 2009(4): 5.
- [68] SINGH N, KUMAR S, UDAWATTA R P, et al. Grasslands conversion to croplands impacted soil pore parameters measured using X-ray computed tomography[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2021, 85: 73-84.
- [69] FERNANDEZ R, FRASIER I, QUIROGA A, et al. Pore morphology reveals interaction of biological and physical processes for structure formation in soils of the semiarid Argentinean Pampa[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 191:256-265.
- [70] 高宙, 胡霞. 基于CT扫描研究灌丛根系对土壤大孔隙的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(3): 315-319.
- GAO Zhou, HU Xia. Influence of shrub roots on soil macropores using X-ray computed tomography[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(3): 315-319.
- [71] FERREIRA T R, PIRES L F, WILDENSCHILD D, et al. X-ray microtomography analysis of lime application effects on soil porous system[J]. *Geoderma*, 2018, 324(15): 119-130.
- [72] MALOBANE M E, NCIIZAH A D, BAM L C, et al. Soil microstructure as affected by tillage, rotation and residue management in a sweet sorghum-based cropping system in soils with low organic carbon content in South Africa[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209.

Improving Soil Structure by Organic Material Amendments: A Review

XUAN Kefan^{1,2}, LI Xiaopeng¹, ZHANG Jiabao¹, JIANG Yifei^{1,2}, LIU Jianli^{1*}

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Objective】Organic materials including crop straws, organic fertilizers, biochar have been widely used in agriculture as an agent to improve soil structure and fertility, but how, and to what extent, their efficacy varies with soil texture and environmental factors remains elusive. This review aims to fill this knowledge gap. 【Method】Our review is based on papers published over the past decades, which reported the effects of different organic material amendments on structure and fertility of soils with various textures in different climatic regions. 【Result】In low-temperature and arid regions, application of organic fertilizer and polyacrylamide works better for improving soil structure, while in regions characterized by changeable climate and high temperature and humidity, incorporating straw to soils has the edge to improve physical properties of the soils. Amending coarse-textured soils with biochar improves soil structure more than other amendments, while woody peat works better for fine-textured soils. We also review the latest development in non-destructive imaging technologies inducing x-ray computed tomography and digital image processing which have been increasingly used to quantify soil structural alteration due to natural and management practice changes. 【Conclusion】Soils are hierarchically structured and there is no universal rule to select an amending material to improve their structure. Its selection should consider the inherent physical and chemical properties of the soils to be amended and the climate region.

Key words: soil structure; soil improvement; organic materials; quantitative study

责任编辑: 赵宇龙