

徐美花, 韦翔华, 胡钧铭, 等. 集约化稻田土壤有机碳稳定性及碳库保护综述[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(14): 1–7.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.14.001

# 集约化稻田土壤有机碳稳定性及碳库保护综述

徐美花<sup>1,2</sup>, 韦翔华<sup>1</sup>, 胡钧铭<sup>2</sup>, 马洁萍<sup>1,2</sup>, 李婷婷<sup>2</sup>, 张俊辉<sup>2</sup>, 郑富海<sup>2</sup>, 莫书权<sup>1,2</sup>

(1. 广西大学农学院, 广西南宁 530004; 2. 广西农业科学院农业资源与环境研究所/广西耕地保育重点实验室, 广西南宁 530007)

**摘要:**以化肥过量投入的集约化稻作生产方式, 严重影响了土壤碳库资源及其稳定性, 系统评价集约化稻田土壤有机碳的稳定性有利于促进农田碳库保护和绿色低碳稻作转型发展。根据集约化稻作及土壤碳库环境特征, 通过查阅国内相关研究文献, 系统梳理稻田土壤有机碳组分及碳库输入、输出及平衡稳定机制。集约化稻作生产影响粮食安全和气候变化, 从集约化稻田土壤碳排放及土壤有机碳稳定性角度, 系统梳理了稻作生产中土壤无机碳、土壤团聚体、土壤 pH 值、土壤养分、土壤微生物等环境因素及土壤无机碳组分和热敏感性对土壤有机碳物理结构稳定性、化学稳定性、生物稳定性的影响, 并分析了土壤有机碳稳定性评价方法, 探讨了土壤有机碳稳定性和碳库稳定性在土壤物理性状、土壤生物、土壤化学组分 3 个方面的研究不足, 展望了集约化稻作低碳优化路径及土壤碳库保护措施。不同稻作生产模式下土壤有机碳固持能力、稳定性及稳定机制明显存在差异, 保护性稻作有利于平衡土壤结构与碳排放。

**关键词:**集约化稻作; 土壤; 碳组分; 有机碳稳定性; 低碳模式; 碳库保护

**中图分类号:**S511.06<sup>+</sup>1; S153.6<sup>+</sup>2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)14-0001-06

农业集约化生产是指可以通过大幅度减少单位产品的劳动消耗, 同时也能够节省大量的劳动力、财力和技术, 从而获得更高的单位面积产量的一种生产方式<sup>[1]</sup>。水稻是世界三大主粮作物之一, 实行集约稻作生产有着重要而特殊的意义<sup>[2]</sup>。随着我中国人口的不断增长和化肥工业的快速发展, 以化肥过量投入的集约化稻作生产在促进水稻增产和维护国家粮食安全方面作出了巨大的贡献<sup>[3]</sup>, 但也给稻田土壤环境及生态系统造成了严重的负面影响, 随着国家减肥增效和“双碳”目标的实施, 集约化稻作生产亟待通过优化转型发展绿色低碳稻作生产。

农田化肥的过分投入对集约化农业可持续发展产生了巨大的影响<sup>[4]</sup>。土壤有机碳是土壤有机质矿质稳定后的产物, 与土壤养分利用、温室气体排放及土壤碳库组分有关<sup>[5]</sup>。土壤有机碳对土壤

肥力有重大影响, 它可以促进土壤生态系统中营养物质在生物之间传输、提高土壤养分有效性<sup>[6]</sup>。农业生产上化肥不当使用会导致作物养分失衡、降低生物活性, 影响土壤有机碳含量<sup>[7]</sup>。稻作是地球上重要的农业生态系统<sup>[8]</sup>。土壤有机碳含量是稻田土壤肥力的重要指标<sup>[9]</sup>, 集约化稻作生产影响土壤碳排放和土壤质量改善。以化肥过分投入的集约化稻作生产过分地消耗了土壤碳资源, 影响了土壤有机碳稳定性和碳库平衡<sup>[10]</sup>。土壤有机碳稳定性是衡量土壤有机碳在外界扰动下抗干扰和恢复原有水平的能力。以化肥过量投入的集约化稻作生产影响稻田碳库稳定性, 有关集约化稻作的土壤有机碳稳定性及碳库保护概述性研究较少, 因此系统评估集约化稻作对稻田土壤有机碳和碳库平衡的影响, 对优化集约化稻作生产和碳库保护和绿色低碳稻作转型发展具有重要价值。

不同稻作生产方式下土壤有机碳固持能力、稳定性及稳定机制存在明显差异, 本研究针对集约化稻作土壤环境及有机碳稳定性的影响, 通过查阅国内相关研究文献, 从集约化稻田土壤碳排放及土壤有机碳稳定性角度, 系统梳理了稻作生产中土壤无机碳、土壤团聚体、土壤 pH 值、土壤养分、土壤微生物等环境因子及土壤无机碳组分和热敏感性对土壤有机碳物理结构稳定性、化学稳定性、生物稳定性的影响, 并分析了土壤有机碳稳定性评价方法,

收稿日期: 2023-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41661074); 广西“新世纪十百千人才工程”专项资金(编号: 2018221); 广西农业科学院创新团队项目(编号: 桂农科 2021YT040)。

作者简介: 徐美花(1994—), 女, 广西贺州人, 硕士, 主要从事稻作生态与应用推广研究, E-mail: 2432820953@qq.com; 共同第一作者: 韦翔华(1964—), 男, 广西南宁人, 博士, 副教授, 主要从事土壤微生物及环境生态研究, E-mail: 623473653@qq.com。

通信作者: 胡钧铭, 博士, 研究员, 主要从事农业有机资源利用与生境调控及逆境生态研究。E-mail: jmh06@126.com。

探讨了土壤有机碳稳定性和碳库稳定性在土壤物理性状、土壤生物、土壤化学组分等 3 个方面研究的不足,展望了集约化稻作低碳优化路径及潜在的土壤碳库保护途径,以期可为可持续低碳稻作及碳库保护提供理论参考。

## 1 集约化稻作与粮食安全

### 1.1 粮食安全面临的挑战

粮食安全关乎着国家的经济进步和社会的发展<sup>[11]</sup>。目前国内外商业模式、国内外粮食供给和自然环境都发生了巨大的改变,继续保持国家粮食产量丰富的供给趋势,确保国家粮食安全,将需要面对许多困难和越来越多的挑战,当前我国粮食生产种植需要大量资金,单位面积继续增加产量的内部能力存在局限性,粮食种植战略与农业资源发展存在冲突。面对粮食安全的各种挑战,需采取相应的措施,改善我国稻田土壤有机碳的碳密度分布对提高粮食丰产具有重要作用。

### 1.2 集约化稻作对粮食安全的影响

化肥是粮食产出的一种重要的生产投入要素,以化肥过量投入作为集约化稻作生产方式,为我国粮食产量持续增加做出了重要贡献<sup>[12]</sup>。化肥的施用行为是追求粮食产量的体现,施用化肥可以提高粮食产量和提高粮食的品质,保障了粮食安全,在一定程度上提高了土壤的肥力。集约化稻作提高了粮食产量,使得粮食的产量比过去 40 年翻一番,根据我国统计局发布的数据可知,2019 年化肥施用量比 1978 年施用量增长 6 倍左右,占世界总用量的 1/3。但过量的化肥施用,导致资源浪费的同时,还引发了恶劣的环境污染问题,出现稻田面源污染、土壤重金属污染,进而破坏农田生物多样性和增加温室气体排放等,从而降低粮食产量和损害稻米品质。

### 1.3 集约化稻作对气候变化的影响

施肥通过影响稻田有机碳的含量来调控土壤呼吸,进而改善土壤呼吸速率和土壤累计呼吸量<sup>[13]</sup>。但随着化肥施用量的增多,土壤呼吸累计量开始减少<sup>[14]</sup>,不合理的施肥方式,导致空气污染,温室气体排放在下层大气中臭氧含量增加,可导致巨大的危害。随着科学技术的发展,采用集约化农业方式能有效减少二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)的排放量,从而实现环境保护。因此,采用先进的农业生产方法,提高粮食的收获率和降低污染源等<sup>[15]</sup>,将是一个具有重大意义的研究课

题。我国碳排放总量在世界碳排放量的占比较大,探索和讨论我国粮食主产区农田温室气体排放特性和减排渠道,估算我国水稻主要种植范围农田温室气体排放量与减排潜在能力,有利于为我国未来作物生产战略和环境政策的制定提供理论基础。

## 2 集约化稻作对土壤碳库的影响

随着集约化农业的发展,土壤碳排放和土壤质量受到了严重的影响<sup>[16]</sup>。为了有效提高土壤固定碳的能力,采取施用有机肥的举措刻不容缓。在施用有机肥的情况下,运用轮作种植模式,能够有效地促进大团聚体有机碳的形成,使得土壤大团聚体有机碳的总含量在土壤有机碳含量中占比增大<sup>[17]</sup>。随着化肥施用的逐年增多,我国水稻生产的碳足迹正在持续减少,同时水稻产量的增长比土壤碳排放的增长更为显著。然而,就水稻生产过程中的碳排放结构而言,物质投入的碳排放量却在逐步上升,这表明,化肥施用量的增加正对水稻的碳排放产生越来越大的影响。

有机肥与化肥配施的有机碳的积累功效要比单施化肥方式好,通过采用有机肥与无机肥配施的方法,有利于提高土壤有机碳含量<sup>[18]</sup>。将有机肥与化肥结合施用,有利于加强土壤固碳减排的能力,增加土壤总有机碳含量。常年施用有机肥可以为土壤固定更多的碳,不仅提高了有机质含量,而且随着施用有机肥总量的增多,有机质含量增加的范围出现了显著性;常年施用化肥,特别是无机氮肥的施用,加强了土壤有机碳分解的能力,造成土壤有机碳含量的减少。减少化肥的施用,采用有机无机的配施方法,有利于提高土壤有机碳含量。

## 3 集约化稻田土壤有机碳稳定性

### 3.1 土壤有机碳物理稳定性

团聚体中有机碳的封存使土壤有机碳积累发生改变<sup>[19]</sup>。通过形成的土壤团聚体,不仅能够有效地调节和平衡土壤的肥力,而且还能够有效促进有机碳的活性和分布,从而使得土壤疏松熟化层得到有效的支撑。此外,土壤中的团聚体有机碳的比例接近 90%,因此,土壤团聚体的存在也为有机碳的稳定性提供了有效的保障<sup>[20]</sup>。土壤中有机碳的变化对土壤团聚体的产生起到了关键性的作用<sup>[21]</sup>,根据研究结果显示,团聚体主要由各种大小不同的土壤颗粒构成<sup>[22]</sup>。其中有机碳的含量变动及稳定性受到

多种因素影响<sup>[23]</sup>。因此,为了准确地衡量团聚体稳定性,通常采用土壤团聚体分类技术,这种方法既反映了团聚体稳定性,也反映了团聚体物理稳定性,从而更加准确地预测团聚体结构,提升了农业生产效率。

团聚体粒径的增加可以有效地提高土壤有机碳的含量。对于土壤中有有机碳的累积,采用合适的方法施用有机肥可以增强土壤团聚体对有机碳的物理保护作用<sup>[24]</sup>。长时间施用化肥不利于推动水稳性大团聚体的产生,减缓其的水稳性。施用化肥,会导致土壤中的有机碳含量逐渐减少,同时也会导致土壤有机碳总量减少,并进一步削弱团聚体对土壤有机碳的物理保护能力及提升化学组分在土壤有机碳中的重要性,进而影响到稻田土壤有机碳含量的变化与稳定性。因为有机碳数量受到多种因素的影响及土壤本身的特殊性,有机碳和土壤在团聚体形成过程中的相互影响,所以未来在对有机碳的物理防护机制需要进行多方面的考虑并进行系统研究,进行稻田土壤有机碳物理稳定性全面、系统的科学研究,对增加稻田团聚体的稳定性和稻田土壤有机碳的保护具有重要价值。

### 3.2 土壤有机碳化学稳定性

土壤有机碳的化学稳定性就是通过有机碳与无机碳的交互作用,从而使土壤有机碳的化学稳定性发生变化,减少土壤有机质的化学有效性,提高土壤碳的稳定性<sup>[25]</sup>。土壤碳库由 2 种类型构成,分别是土壤有机碳(SOC)和无机碳(SIC),土壤无机碳的形成有利于促进土壤有机碳稳定性,碳酸钙在土壤无机碳中占据重要地位<sup>[26]</sup>。钙离子在土壤中的黏土矿物和腐殖物质之间担任重要的角色,在我国北部地区的中性土壤与石灰性土壤主要以一种特殊的共价键的方式形成了有机碳与无机碳复合体,有机碳与无机碳复合体是土壤团聚体产生的前提条件。研究发现,钙键有利于土壤团聚体保持稳定<sup>[27]</sup>。钙键的形成有利于提高土壤有机碳的含量<sup>[28]</sup>,促进稳定性有机碳含量增加<sup>[29]</sup>。稳定性有机碳化学组分对土壤抵抗外界因素变化和固存碳的潜在能力具有决定性的作用,而土壤以稳定形式固存有机碳的潜力受到土壤有机碳的稳定性机制的影响<sup>[30]</sup>。Hassink 首次提出了土壤黏粒含量的多少直接影响土壤的固碳作用<sup>[31]</sup>。土壤的黏土矿物中有着较多的表面电荷,土壤黏土矿物具有良好的吸附功能,其对土壤有机碳有很强的吸附能力,致使土壤黏粒是影响土壤有机碳含量的重要因素<sup>[32]</sup>。

土壤养分是土壤肥力最重要的物质基础,采用正确的施肥措施可以改善土壤养分,降低土壤呼吸温度敏感性(Q10),并增强对气候变化的适应能力。使用化肥与有机肥能够提高红壤水稻土 Q10<sup>[33]</sup>。有研究指出,在旱作耕作环境下,施肥会导致土壤 Q10 下降,这很大程度上取决于碳氮比例<sup>[34]</sup>,进而分解有机碳的活化能<sup>[35]</sup>。另外,受到施肥方式的影响,土壤 pH 值会改变,从而致使 Q10 改变,造成这种情况的原因是 pH 值对微生物的形成具有重要的影响,此外, pH 值的变动也会间接地影响 Q10<sup>[36-37]</sup>,常年使用化肥,致使土壤中 pH 值出现显著性下降,这会使土壤中微生物和可溶性有机碳受到影响,从而使土壤呼吸、Q10 以及土壤有机碳含量发生改变<sup>[38]</sup>。当处于较高 pH 值时,会使土壤微生物受到影响,这会削弱微生物分解土壤有机质的能力,会降低土壤有机碳含量<sup>[39]</sup>。随着有机碳的分解,它们会释放出大量的养分元素,提高了土壤有机碳含量<sup>[40]</sup>。稻田土壤有机碳的化学成分影响了土壤有机碳的分解速率<sup>[41]</sup>。陈小云等结合硫酸和盐酸水解法,发现单施钾肥会显著增加水稻土有机碳的含量<sup>[42]</sup>,有机碳具有的活性是影响有机碳含量的最重要的因素。此外,通过适当施用氮肥,可以有效地提高土壤中不易分解的有机碳数量,并且可以增强土壤中有有机碳的化学稳定性,从而有效地调控草甸黑土的有机碳含量及其稳定性<sup>[43]</sup>。加强稻田土壤有机碳化学稳定性研究,可以更好地理解土壤碳固定机制。

### 3.3 土壤有机碳生物稳定性

土壤生物群落的活力和多样性对维护陆地生态系统至关重要。微生物群落结构可显著影响土壤碳库稳定性<sup>[44]</sup>,保持土壤有机碳的生物稳定性则是人类发展绿色低碳农业的重要组成部分,因此,加强土壤有机碳的生物稳定性,不仅可以改善土壤质量,还可以减轻全球气候变化带来的影响。通过施肥,生态系统中的生物群体构成会发生转变,进而使土壤有机碳生物群的稳定性受到影响。当施肥过量,导致土壤养分失衡,并加剧土壤酸化程度,导致土壤致病菌的大量繁殖,造成生物群落的结构发生转变。而适当施用氮肥,可使土壤微生物群落的结构发生改变,提升土壤碳循环的能力,减弱微生物的代谢活动,进一步促进有机碳的积累。

通过分解、周转、调节等多种方式,植物可以将其所产生的有机质转化为可以在土壤中持续存在

的有机碳<sup>[45]</sup>,而这些有机碳的形成受到多种因素的共同作用,其中包括根际细菌和真菌以及其他相关的小型土壤生态系统。通过改变土壤有机碳含量,微生物可以有效调节其环境,从而改善其环境质量。然而,如果采取了不正确的农业管理方式,就会出现“恶性循环”的现象<sup>[46]</sup>。微生物的功能非常强大,其不仅有利于分解有机碳,还能通过让其代谢产物来重新构建土壤中的有机碳<sup>[47]</sup>,从而改善土壤的生态平衡。虽然一些有机碳具有抗性,但随着时间的推移,微生物已经拥有分解各种有机碳的能力<sup>[48]</sup>,它们可以通过调节营养元素的摄取量来满足自身的需求,特别是当氮和磷的摄取量不足时,矿化酶的分泌量也会增加,这就会影响到土壤有机碳的分解速率<sup>[5]</sup>。经过长期施用化肥,稻田土壤生态系统的有机质抗微生物分解的能力受到了显著的削弱,这就要求降低生物呼吸量,同时也需要依靠有机碳的分解来维持土壤的稳定性<sup>[49]</sup>。化肥减施不仅可以增加稻田土壤活性有机碳含量,而且可以增加稻田土壤微生物量碳。加强稻田土壤有机碳生物稳定性研究,可以更好地为研究微生物固碳机制提供精确的方法。

## 4 集约化稻田土壤碳库保护研究不足之处

### 4.1 碳库温度敏感性研究有待加强

受条件限制,通过室内矿化培养试验模拟田间土壤呼吸与自然环境存在一定差异,室内是控制变量,但是室外试验环境因素是多变的。通过开展室内培养试验,在不同温度梯度下培养并计算土壤呼吸温度敏感性(Q10),系统剖析土壤有机碳对温度变化的响应。但是采用的技术手段存在较大差异,造成了Q10运算结果的不确定性。在温变环境下,Q10的数值通常介于1.5~2.0之间,而恒定环境下,土壤呼吸过程Q10的值可以高达1.6~2.7,较前者高出了6.7%~35.0%<sup>[50]</sup>;此外,滕泽宇等在室内培养试验中发现,在室内培养试验中,Q10差异的产生,是由于土壤温变环境下底物消耗分配失衡及土壤微生物对特定培养温度耐受能力<sup>[51]</sup>。

通常情况下,不易分解有机碳对温度的响应比易分解有机碳更敏感,然而有研究发现,易分解有机碳的温度敏感性并不总是低于不易分解有机碳的温度敏感性<sup>[52]</sup>,这种情况的出现由于土壤有机碳储存的不平衡导致,团聚体与矿物质吸附会对土壤有机碳的分解速度产生影响,而这些过程也受温度

的影响,然而因为这2种因素都受到温度的影响,所以它们对于温度敏感性的影响很难准确地衡量。此外,微生物的生理特征、群落结构和布局也会对土壤温度敏感性产生影响,然而,因为微生物个体无法衡量单一微生物对土壤呼吸敏感性的调节机制,并且由于微生物多样性和科研方法的限制,微生物群体对温度敏感性影响的研究还非常缺乏<sup>[52]</sup>。

### 4.2 碳库生物组分研究有待深入

在陆地生态系统里,土壤是储量最大并且流动速度最慢的碳贮藏地,由2种类型组成,分别是土壤有机碳库与土壤无机碳库。土壤碳循环在整个系统中占据了重要地位,生物组分是土壤碳循环中重要的组成部分。通过对生物组分的分类,将土壤有机碳分为微生物生物量碳和可矿化碳<sup>[53]</sup>。在土壤活性有机碳库中,土壤微生物量碳是最重要的碳,而且土壤微生物也是参与土壤有机碳代谢的关键因素,微生物固定的有机碳也是碳循环的重要一环。土壤微生物量碳就是土壤中体积较小活的和死的微生物体内碳的总和,土壤微生物分解土壤无机固态矿物和有机质,影响土壤发展、碳循环和肥力及土壤结构。一般情况下,通过使用三氯甲烷熏蒸直接提取法或者三氯甲烷熏蒸培养法来测定土壤微生物量碳<sup>[54]</sup>。土壤微生物量碳与土壤物理和化学性质的变化呈正相关关系。但是,这种方法对环境变化的敏感度高,且所需培养时间较长。土壤可矿化碳是土壤有机碳生物组分重要的组成部分。土壤有机碳的矿化是指土壤中的可矿化碳作为生物组分的关键部分,经过微生物的分解和转变后,其会转变为稳定的无机碳形态。在这个过程中,会释放出二氧化碳(CO<sub>2</sub>)。一般运用土壤培养方法进行测定。土壤有机碳矿化已被普遍用来评价土壤中微生物活性<sup>[55]</sup>。然而,该培养对密闭环境要求高,并受温度和湿度影响极大,稍有松懈就会带来较大偏差,甚至失败<sup>[56]</sup>。如今,土壤微生物对世界变迁的响应研究受到较多学者关注,然而对世界范畴的土壤微生物研究相对较少;在土壤内部,土壤、微生物与植被根系有着紧密的关系,导致生化过程纵横交错,但是当前大多数研究都只考虑了单一因素对土壤微生物质量和多样性的影响,跟农田土壤的真实环境存在很大差距<sup>[57]</sup>。

### 4.3 地上和地下稻田碳协同研究有待加强

地上和地下稻田碳平衡,有利于生态系统的稳定性。研究表明,植物地上与地下输入不仅对土壤

碳库含量、成分和稳定性都产生了深远影响<sup>[58-60]</sup>,而且这些输入的变化会导致土壤有机碳含量发生相应的变化<sup>[61]</sup>。在贡献方面,植物地下输入比地上输入对土壤有机碳的贡献更大。地上凋落物输入是土壤中地下碳输入保留率的 1/5。稻田生态系统持续性生产力与其生态功能的发挥有着密切的联系,为了实现稻田生态系统的可持续发展,须构建集约化稻田水稻碳资源高效型群体,强化地上与地下凋落物分解对土壤碳变化影响的共同效应体系的研究<sup>[62]</sup>。

## 5 集约化稻田土壤有机碳库保护研究趋势

### 5.1 加强稻田碳库温度敏感性研究

在碳中和、碳达峰的双重背景下,气候变化已经对我国稻田生态系统造成了严重的破坏,并且正在不断地影响着经济社会的发展。近年来,华南地区遭遇的高温、干旱等极端气候事件导致水稻种植方式和布局显著改变,因此,构建一个适应气候变化的稻田粮食安全保障体系以及加强经济社会体系是迫切需要解决的问题。扩大室外土壤有机碳分解 Q10 的试验范围,开展室外试验时可以采用原位增温或者土柱置换的方法研究 Q10。在温变环境下,土壤碳库对环境变化的响应并非唯一的,需要进行多方面交互影响的试验,以探究多方面产生的叠加效果或抵消影响,深入探讨各种因素对有机碳分解温度敏感性的相对影响<sup>[52]</sup>。

### 5.2 开展稻田土壤碳库生物组分研究

随着全球气候变化,为深入了解对土壤微生物生物量及其多样性高级生态系统,需要全面考虑土壤现状、地表植被和土壤管理条件等多个方面,并且深入探讨它们之间的相互影响。此外,因为土壤有机碳生物组分的复杂性,研究方式也存在一定的差异性,所以须完善土壤有机碳生物学组分与化学组分、物理组分之间的关系与研究方式。尽管对微生物量的测定方法已被广泛使用,但根据目前的科学手段,仍然无法直接测定土壤微生物量。所以,通过采用可以迅速便捷地直接测定稻田土壤微生物量的新措施,应加快土壤微生物量测定的速度和强化精度,给生态体系建立模型提供依据,是未来开展土壤微生物量研究范畴中应该重视的问题。

### 5.3 建立稻田土壤碳平衡协同研究

对于集约化稻田土壤中有机碳饱和度问题,其在水田中所占比例通常超过旱地。应深入探讨采用关于如何实现有机碳潜力的实际有效的技术方

法,加强地上和地下稻田碳捕获、碳固定研究,完善和发展稻田地上和地下协同的新技术。外源碳和养分输入会影响土壤有机碳的形成和矿化,植物地上部分与地下部分之间相互影响,地下根系会影响地上植物有效吸取营养,同时,地上植物会给地下根系提供光合产物,因此通过研究确定靶标、区域适应性强的地下微生物调控举措,研究加强地上植物吸收养分能力的措施,达到地上一地下生物的协同调控和营养成分有效使用,从而建立稻田土壤碳平衡协同发展。

### 参考文献:

- [1] 李楚海,陈文裕,陈金凤,等. 集约化农业对土壤质量的影响研究:以惠州平潭某农场为例[J]. 惠州学院学报,2021,41(3): 12-17.
- [2] 李伟光,侯美亭,张京红,等. 华南主产区双季水稻物候变化及其与气候条件的关系[J]. 中国农业气象,2021,42(12):1020-1030.
- [3] 刘成武,楠楠,黄利民. 中国南方稻作区不同规模农户土地集约利用行为的差异比较[J]. 农业工程学报,2018,34(17): 250-256.
- [4] 邹丰华. 农田土壤化肥污染及对策[J]. 湖北农机化,2020(6):28.
- [5] 徐嘉晖,孙颖,高雷,等. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展[J]. 中国生态农业学报,2018,26(2):222-230.
- [6] 朱锟恒,段良霞,李元辰,等. 土壤团聚体有机碳研究进展[J]. 中国农学通报,2021,37(21):86-90.
- [7] 郭光光,杨俐苹,曹磊. 关于化肥对土壤的污染及有效治理举措阐述[J]. 环境与发展,2020,32(1):78-79.
- [8] 张鸿祥,肖群,李小军,等. 稻田土壤有机碳固定研究及其展望[J]. 现代农业科技,2011(11):257-258,270.
- [9] 汪洋,杨殿林,王丽丽,等. 农田管理措施对土壤有机碳周转及微生物的影响[J]. 农业资源与环境学报,2020,37(3):340-352.
- [10] 郭光光,曹磊,杨俐苹. 农田土壤化肥污染及防治对策[J]. 现代农业科技,2019(23):155-156.
- [11] 何志鹏. 我国粮食安全面临的挑战及建议[J]. 黑龙江粮食,2022(12):44-46.
- [12] 王祖力,肖海峰. 化肥施用对粮食产量增长的作用分析[J]. 农业经济问题,2008,29(8):65-68.
- [13] 姜继韶. 施氮和轮作对黄土高原旱塬区土壤温室气体排放的影响[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2015.
- [14] Shao R X, Deng L, Yang Q H, et al. Nitrogen fertilization increase soil carbon dioxide efflux of winter wheat field: a case study in Northwest China[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 143: 164-171.
- [15] 姜梨. 长江经济带低碳农业发展评价及影响因素分析[D]. 南昌:江西财经大学,2020:37-48.

- [16] 郑聚峰,陈硕桐. 土壤有机质与土壤固碳[J]. 科学,2021,73(6):13-17,4.
- [17] Benbi D K, Singh P, Toor A S, et al. Manure and fertilizer application effects on aggregate and mineral associated organic carbon in a loamy soil under rice-wheat system[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,2016,47(15):1828-1844.
- [18] 任凤玲. 不同施肥下我国典型农田土壤有机碳固定特征及驱动因素[D]. 北京:中国农业科学院,2021:43-46.
- [19] 郭凌珂. 城郊农用地利用方式转变对土壤团聚体稳定性及有机碳物理保护的影响[D]. 雅安:四川农业大学,2020:19-22.
- [20] 沈酊宇. 氮磷添加对青藏高原高寒草甸土壤有机碳物理保护和化学稳定性的影响[D]. 南京:南京农业大学,2018:1-3.
- [21] 王西和,杨金钰,王彦平,等. 长期施肥措施下灰漠土有机碳及团聚体稳定性特征[J]. 中国土壤与肥料,2021(6):1-8.
- [22] 王静静. 盐碱土区农田土壤团聚体有机碳组分变化特征与影响因素研究[D]. 长春:吉林大学,2020:8-9.
- [23] Nascente A S, Li Y C, Crusciol C A C. Soil aggregation, organic carbon concentration, and soil bulk density as affected by cover crop species in a no-tillage system[J]. Revista Brasileira De Ciência Do Solo,2015,39(3):871-879.
- [24] 毛霞丽,陆扣萍,何丽芝,等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 土壤学报,2015,52(4):828-838.
- [25] 马红亮,朱建国,谢祖彬,等. 高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下农田土壤有机质的化学稳定性研究[J]. 农业环境科学学报,2007,26(6):2211-2215.
- [26] 张 力. 土壤有机碳和无机碳耦合关系研究进展[J]. 安徽农业科学,2017,45(32):121-123,133.
- [27] 陈 红,马文明,王长庭,等. 高寒草地灌丛化对土壤团聚体稳定性及其胶结物质的影响[J]. 土壤学报,2023,60(1):151-163.
- [28] 赵天鑫,俄胜哲,袁金华,等. 土壤中钙与有机碳之间相互作用的研究进展与展望[J]. 中国农学通报,2022,38(14):77-81.
- [29] 张欣怡. 刺槐林恢复中土壤碳库组分及稳定性对有机碳激发效应的响应[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021:4-5.
- [30] Cai A D, Feng W T, Zhang W J, et al. Climate, soil texture, and soil types affect the contributions of fine-fraction-stabilized carbon to total soil organic carbon in different land uses across China[J]. Journal of Environmental Management,2016,172:2-9.
- [31] Hassink J. Preservation of plant residues in soils differing in unsaturated protective capacity[J]. Soil Science Society of America Journal,1996,60(2):487-491.
- [32] 姚 远. 科尔沁退化草地土壤团聚体稳定性及有机碳含量变化的影响机制研究[D]. 长春:东北师范大学,2021:61-63.
- [33] 陈晓芬,吴 萌,江春玉,等. 不同培养温度下长期施肥红壤水稻土有机碳矿化特征研究[J]. 土壤,2019,51(5):864-870.
- [34] 袁胜南,商雨晴,王 俊. 不同温度下添加绿肥对旱作农田土壤有机碳矿化的影响[J]. 干旱地区农业研究,2020,38(5):45-50.
- [35] Leifeld J, von Lützow M. Chemical and microbial activation energies of soil organic matter decomposition[J]. Biology and Fertility of Soils,2014,50(1):147-153.
- [36] Jin Q S, Kirk M F. pH as a primary control in environmental microbiology: 1. thermodynamic perspective [J]. Frontiers in Environmental Science,2018,6:21.
- [37] Min K, Lehmeier C A, Ballantyne F, et al. Differential effects of pH on temperature sensitivity of organic carbon and nitrogen decay[J]. Soil Biology and Biochemistry,2014,76:193-200.
- [38] Wei L, Razavi B S, Wang W Q, et al. Labile carbon matters more than temperature for enzyme activity in paddy soil[J]. Soil Biology and Biochemistry,2019,135:134-143.
- [39] 常 帅,于红博,曹聪明,等. 锡林郭勒草原土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 干旱区研究,2021,38(5):1355-1366.
- [40] 张雅柔,安 慧,刘秉儒,等. 短期氮磷添加对荒漠草原土壤活性有机碳的影响[J]. 草业学报,2019,28(10):12-24.
- [41] 李 忠,孙 波,林心雄. 我国东部土壤有机碳的密度及转化的控制因素[J]. 地理科学,2001,21(4):301-307.
- [42] 陈小云,郭菊花,刘满强,等. 施肥对红壤性水稻土有机碳活性和难降解性组分的影响[J]. 土壤学报,2011,48(1):125-131.
- [43] 李 林,李 鹤,秦治家,等. 不同施氮水平对草甸黑土有机碳化学稳定性的影响[J]. 吉林农业大学学报,2014,36(5):595-600.
- [44] 国 靖. 黄海森林公园土地利用方式对土壤有机碳稳定性及微生物群落多样性的影响[D]. 南京:南京林业大学,2020:86-90.
- [45] 马志良,赵文强. 植物群落向土壤有机碳输入及其对气候变暖的响应研究进展[J]. 生态学杂志,2020,39(1):270-281.
- [46] 安 静,邓 波,韩建国,等. 土壤有机碳稳定性影响因子的研究进展[C]//农区草业论坛论文集. 厦门,2008:62-67.
- [47] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property [J]. Nature,2011,478(7367):49-56.
- [48] Lützow M V, Kögel-knabner I, Ekschmitt K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soil: mechanisms and their relevance under different soil conditions; a review [J]. European Journal of Soil Science,2010,57(4):426-445.
- [49] 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[J]. 地球科学进展,2007,22(2):152-158.
- [50] Zhu B, Cheng W X. Constant and diurnally-varying temperature regimes lead to different temperature sensitivities of soil organic carbon decomposition[J]. Soil Biology and Biochemistry,2011,43(4):866-869.
- [51] 滕泽宇,陈智文,白 震,等. 恒、变温培养模式对土壤呼吸温度敏感性影响之异同[J]. 土壤通报,2016,47(1):47-53.
- [52] 朱 珠,徐 侠,杨赛兰,等. 陆地生态系统土壤有机碳分解温度敏感性研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(1):33-39.
- [53] 钱 栋. 施肥对土壤有机碳组分的研究进展[J]. 江西化工,2018(5):17-20.
- [54] 梁贻仓. 不同农田管理措施下土壤有机碳及其组分研究进展[J]. 安徽农业科学,2013,41(24):9964-9966.
- [55] 张敬智,马 超,郅红建. 淹水和好气条件下东北稻田黑土有机碳矿化和微生物群落演变规律[J]. 农业环境科学学报,2017,36(6):1160-1166.

刘浩浩,李 黎,刘 巍,等. 植物微生物组群落构建及其病害防治应用进展[J]. 江苏农业科学,2024,52(14):7-14.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.14.002

# 植物微生物组群落构建及其病害防治应用进展

刘浩浩<sup>1,2</sup>, 李 黎<sup>2</sup>, 刘 巍<sup>1</sup>, 黄丽丽<sup>1</sup>, 钟彩虹<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学植物保护学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院武汉植物园/中国科学院植物种质创新与特色农业重点实验室/  
中国科学院猕猴桃产业技术工程实验室, 湖北武汉 430074)

**摘要:**植物表面及内部定殖着种类丰富的微生物群落,这些微生物与植物经过长期进化形成了互利共生的功能整体,植物寄主为微生物提供生长空间和营养,而微生物则在植物生长发育、营养摄取及植物逆境抗性等方面发挥作用。微生物群落的变化受到各种生物和非生物因素影响,目前人们对于不同因素如何驱动微生物群落构建及如何利用功能微生物提高寄主植物抗逆性等的认识仍不深入,这严重阻碍了微生物群落应用的发展。明确微生物群落构建的机制和微生物群落之间的相互作用机制,有利于拓宽微生物群落应用的深度和广度。本文总结了不同植物寄主、同一寄主不同生态位及不同生长阶段下的微生物群落差异,阐述了生物因素(生态位、病原入侵等)及非生物因素(地理位置、季节变化等)对植物地上及地下微生物群落的影响及作用机制,解析了植物微生物间的相互作用以及微生物通过竞争和诱导植物系统抗性降低病害发生的机理,介绍了合成菌群在植物应用中的研究进展,最后对微生物组在未来发展过程中可能遇见的问题进行了展望,将有效助力微生物组在植物病害防治方面的绿色高效应用。

**关键词:**植物微生物组;群落构建;高通量测序;病害防治;研究进展

**中图分类号:**S182;S184 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)14-0007-08

植物微生物组(plant microbiomes)由生活在植物上的所有微生物和其遗传信息组成<sup>[1-3]</sup>,主要包括细菌、真菌、古菌和一些病毒等。植物微生物中

的益生菌与寄主植物经过长期的进化,发展出一种互利共生关系,寄主为微生物提供空间和营养,微生物在植物养分吸收、生长发育、对不良环境抵抗等方面发挥相应的功能<sup>[4-5]</sup>。植物微生物组包括根际、叶际和内生微生物群落,植物不同生态位的微生物群落构成复杂,其多样性、偏好性和丰度受寄主植物和环境的共同影响<sup>[6]</sup>。大量研究表明,微生物群落的构建受到多种环境因素的影响,其中不同生态位和外部病原物的入侵作为主要的选择压力影响着植物微生物群落的构建<sup>[7]</sup>。解析微生物群落构建的驱动因素有助于人为干预微生物组,以提高植物抗逆性及产量、品质等性状。

近年来,在作物微生物组领域,众多科研工作者对于微生物-寄主植物-病害之间的相互关系

收稿日期:2024-03-13

基金项目:国家重点研发计划(编号:2022YFD1400200);湖北省重点研发计划(编号:2022BBA0076);国家现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS-26)。

作者简介:刘浩浩(1998—),男,河南焦作人,硕士,从事猕猴桃溃疡病的研究,E-mail:457055198@qq.com;共同第一作者:李 黎(1985—),女,湖北仙桃人,博士,从事猕猴桃重大病害研究,E-mail:lili@wbcas.cn。

通信作者:钟彩虹,博士,研究员,从事猕猴桃等果树的种质资源保护、遗传育种和产业技术研究,E-mail:zhongcaihong@wbcas.cn;黄丽丽,博士,教授,从事小麦、果树病害的病原学和综合防治研究,E-mail:huanglili@nwsuaf.edu.cn。

[56]杨丽霞,潘剑君. 土壤活性有机碳库测定方法研究进展[J]. 土壤通报,2004,35(4):502-506.

[57]张 青,王 辰,孙宗湜,等. 土壤微生物生物量及多样性影响因素研究进展[J]. 北方园艺,2022(8):116-121.

[58]Phillips R P, Meier I C, Bernhardt E S, et al. Roots and fungi accelerate carbon and nitrogen cycling in forests exposed to elevated CO<sub>2</sub>[J]. Ecology Letters,2012,15(9):1042-1049.

[59]Song J, Wan S Q, Piao S L, et al. A meta-analysis of 119 manipulative experiments on terrestrial carbon-cycling responses to

global change[J]. Nature Ecology & Evolution,2019,3(9):1309-1320.

[60]于世勇,史绍林. 全球变化对森林的影响[J]. 温带林业研究,2021,4(2):8-12.

[61]Lajtha K, Bowden R D, Crow S, et al. The detrital input and removal treatment (DIRT) network: insights into soil carbon stabilization[J]. Science of the Total Environment,2018,640:1112-1120.

[62]苏卓侠,苏冰倩,上官周平. 植物凋落物分解对土壤有机碳稳定性影响的研究进展[J]. 水土保持研究,2022,29(2):406-413.