DOI: 10.20103/j.stxb.202201110108

蔡亚楠, 鞠正山, 黄勤, 冯金超, 沈颖. 土壤有机碳汇内涵与核算方法辨析. 生态学报, 2024, 44(2): 602-611.

Cai Y N, Ju Z S, Huang Q, Feng J C, Shen Y. Analysis on the contents and methods of soil organic carbon sink. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 602-611.

土壤有机碳汇内涵与核算方法辨析

蔡亚楠^{2,3}, 鞠正山^{1,3,*}, 黄勤^{2,3}, 冯金超^{1,3}, 沈颖^{1,3}

1 自然资源部国土整治中心, 北京 100035

2 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083

3 自然资源部土地工程技术创新中心, 北京 100035

摘要:在“碳达峰、碳中和”战略需求下,土壤有机碳汇作为生态系统碳汇的重要组成部分,土壤碳库容量以及如何开展土壤有机碳汇核算日益成为生态碳汇的研究热点。梳理了国内外土壤有机碳汇及核算相关研究成果,解析了土壤有机碳汇的概念内涵,提出了以稳定性有机碳作为土壤有机碳汇的表征指标及获取方法。从土壤发生学角度提出了土壤碳汇阈值的概念,土壤中有机碳的含量随着分解转化最终会达到动态平衡,此时稳定有机碳含量值约是常数,这个常数就是稳定碳库的库容,在特定的成土因素下,碳库的核算值不会超过平衡时的常态值。在客观上,体现在非人类干扰状态下不同土壤类型自然状态下的稳定性有机碳含量。参照土壤有机质平衡理论,提出了土壤碳汇核算的量化方法,为土壤碳汇的度量 and 核算提供了一套技术思路。下一步土壤有机碳汇的核算应在科学研究基础上多角度凝聚共识,制定碳汇核算标准,确定不同尺度下可操作、可重复以及可复制的土壤有机碳汇核算技术与方法。

关键词:土壤有机碳汇;碳汇内涵;核算方法

Analysis on the contents and methods of soil organic carbon sink

CAI Yanan^{2,3}, JU Zhengshan^{1,3,*}, HUANG Qin^{2,3}, FENG Jinchao^{1,3}, SHEN Ying^{1,3}

1 Land Consolidation and Rehabilitation Center of the Ministry of Natural Resource, Beijing 100035, China

2 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing, Beijing 100083, China

3 Land Engineering Technology Innovation Center of the Ministry of Natural Resource, Beijing 100035, China

Abstract: Soil organic carbon sink is an important part of ecosystem carbon sinks under the strategic requirement of “carbon peak and carbon neutralization”. The capacity of soil carbon storage and conduction of soil organic carbon sink accounting have increasingly become the research hotspots on soil organic carbon sink. This paper reviews the domestic and foreign research results of soil organic carbon sink and accounting. On the basis of relevant research results, three research contents are proposed around soil carbon sink accounting: analyzes the concept and connotation of soil organic carbon sink, and puts forward the characterization index and acquisition method of soil organic carbon sink with stable organic carbon. From the perspective of soil genesis, the concept of soil carbon sink threshold is proposed. The content of organic carbon in soil will eventually reach a dynamic equilibrium with decomposition and transformation. At this time, the stable organic carbon content value is about a constant, which is the storage capacity of the stable carbon pool. Under specific soil forming factors, the calculated value of the carbon pool will not exceed the normal value at equilibrium. Objectively, it is reflected in the content of stable organic matter of different soil types under natural conditions under non-human interference. Referring to the theory of soil organic matter balance, a quantitative method for soil carbon sequestration accounting has

基金项目:第三次新疆综合科学考察课题“塔里木河流域土地资源利用现状与演变调查”项目(2021xjkk0202)

收稿日期:2022-01-11; **网络出版日期:**2023-10-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: juzhengshan@lcr.org.cn

#本研究尚缺中国港澳台统计数据。

been proposed, which provided a set of technical approaches for measuring and accounting soil carbon sink. In the next step, the accounting of soil organic carbon sinks should be based on scientific research to build consensus from multiple perspectives, formulate carbon sink accounting standards, and determine operable, repeatable and reproducible soil organic carbon sink accounting techniques and methods at different scales.

Key Words: soil organic carbon sink; connotation of carbon sink; accounting method

根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告显示,人类活动致使全球气候以前所未有的速度变暖,目前全球的地表平均温度较工业化时期高出了约 1℃。报告同时还预估在未来的几十年内,所有地区的气候变化都将加剧。已有研究证明,当前严重威胁人类生存与发展的气候变化主要是工业革命以来人类活动造成的二氧化碳等温室气体排放所致^[1]。应对气候变化的关键在于“控碳”,其必由之路是实现碳中和。2020 年第七十五届联合国大会上,中国向世界做出了“双碳”承诺。在中央财经委员会第九次会议上,习近平总书记也提出要提升生态碳汇能力,强化国土空间规划和用途管控,有效发挥森林、草原、湿地、海洋、土壤、冻土的固碳作用,提升生态系统碳汇增量。

实现碳中和目标,在减少碳排放的基础上,重要的是增加碳汇。土壤碳库是全球碳循环的重要组成部分,在全球碳收支中占据重要地位,其微小变化都会对全球碳平衡产生重要影响^[2]。土壤能否增加碳储量和增强碳汇效应是关系陆地生态系统继续发挥对二氧化碳吸收和固定的重要基础。根据研究,土壤有机碳库约有碳储量 1300 亿 t,约是大气碳的两倍,全球约 80%的碳储存在土壤中,其中与大气交换的土壤有机碳约占整个生态系统的三分之二^[3]。与自然土壤相比,农田土壤在全球碳库中最为活跃,在自然因素和农业管理的作用下,农田土壤碳库不断的发生着变化。农田土壤既可以成为大气中二氧化碳的源,也可以成为汇,在全球碳循环中扮演着增大不确定性的角色^[4]。因此,计算土壤有机碳含量,探索科学的碳汇核算方法,评估其碳汇能力,可为土壤碳储存现状分析和增加做出贡献。

1 土壤有机碳汇研究综述

1.1 土壤有机碳汇内容研究

对于土壤有机碳汇的研究,多是从土壤碳储量角度探讨土壤有机碳库各方面内容,评估土壤碳汇效应。土壤有机碳汇当前多指一定时间内土壤碳库的变化,从而研究不同耕作措施或管理条件下土壤固碳能力大小和碳汇潜力。

1.1.1 土壤有机碳库研究

土壤有机碳库的研究早在很久之前就开始,多数研究从国家、区域等大尺度进行,或针对单一生态系统进行研究。从中国的陆地土壤有机碳库研究来看,不同时期,不同数据来源和不同估算方法对于土壤有机碳库的估算数值差异较大,但除了根据早期实测资料估算出的有机碳库量与其他值相比存在较大差距外,其他方法估算有机碳库值都在 69—92Pg C 之间。因此,选择合适的估算方法和数据对于土壤有机碳库的估算尤为重要(表 1)。

1.1.2 土壤固碳潜力研究

土壤固碳潜力是指土壤在未来可以固定有机碳数量的多少,数量越大,说明该地区在未来可以固定土壤有机碳的能力就越大。Pan 等^[18]利用文献数据,统计分析不同时期和不同地区的土壤有机碳动态变化,根据当前有机碳水平,估算稻田和旱土有机碳固碳潜力理论上为 0.91 和 1.01Pg。张亚峰等^[19—20]按照有机碳单位表层土壤储量计算方法,根据多目标区域地球化学调查数据和全国第二次土壤普查有机碳储量数据,以及有机碳饱和水平与当前有机碳量的差值计算青海、西藏两省各类土壤类型固碳潜力。韩冰、郭然等^[21—22]研究农田和草地土壤固碳潜力,发现我国农田土壤的固碳潜力相当于能源碳排放量的 23.9%,退化草地恢复后土壤

有机碳库可增加 4.56Pg C。当前土壤固碳潜力的计算多是估计未来土地利用和管理情况与现状的差值计算潜力,但同时不同学者对于未来土地利用和管理的估算存在一定的主观性且所带来的误差是不可避免的。

表 1 我国有机碳库对比表
Table 1 Comparison of soil organic carbon pool

数据来源 Data sources	有机碳库量/(亿吨 Pg C) Organic carbon pool	文献来源 Literature resources
实测数据 Measured data	119.8	[5]
中国科学院土壤资源数据 Soil resources data, Chinese academy of sciences	83.8	[6]
土壤普查数据 Soil census data	92.4	[7]
	70.3	[8]
	84.4	[9]
	69.4	[10]
	89.6	[11]
	87.4	[12]
	83.5	[13]
普查+采样 Census+Samplin	75	[14]
	69.1	[15]
模型模拟 Model simulation	100.6	[16]
	82.8	[17]

1.1.3 不同影响因素对土壤固碳能力的影响

随着对土壤有机碳库和土壤固碳潜力的研究,越来越多的学者进一步从影响土壤有机碳含量的因素入手探讨其对土壤固碳能力的影响。对于农田生态系统,多数从不同管理措施入手,探讨在免耕、少耕、正常耕作、保护性耕作等不同耕作措施,有机肥、化肥及肥料施入数量等不同投入情况以及土地不同管理情况下土壤的固碳能力有何差异。Hu 等^[23]研究南方水稻连作及秸秆还田下的土壤固碳效率,发现 37 年间肥料的施用和秸秆还田使土壤中有机碳比例仅维持在初始水平。Lemma 等^[24]采用生物地球化学模型(DAYCENT 模型)分析小农农田在综合管理措施下的土壤固碳潜力,如果地区内所有田块均实现此方法,有机碳封存量在 30 年内可以再次增加。郭洋、苏培玺等^[25-26]在干旱半干旱区研究显示,土壤有机碳固碳能力高低除了各种人为干扰外,与生物量、分解速率、土壤类型等也有密切关系,在干旱区,不同的管理措施对土壤无机碳的固碳能力的影响比有机碳更为强烈。徐英明等^[2]研究不同造林模式对土壤碳积累和碳汇功能的影响。柳叶等^[27]通过对沙地樟子松人工林不同树龄对有机碳的影响研究发现,随着树龄增加,土壤有机碳呈现先增加后减小的趋势。季波等^[28]就宁夏荒漠草原翻耕补播措施对土壤碳储量的影响进行了探讨,不同翻耕补播措施对于不同土层有机碳含量的影响不同。而于志慧等^[29]发现土壤有机碳含量会随着放牧强度的增加而下降,放牧的干扰会对土壤有机碳的累积产生负面效应。

1.2 土壤有机碳储量核算方法研究

尽管土壤有机碳汇与土壤有机碳储量不是一个等同的概念,现在对于土壤有机碳汇的核算,大多数学者均是从土壤碳库储量核算角度出发,估算土壤有机碳储量年际变化或一段时间内土壤有机碳储量变化情况,评估土壤的碳汇能力。当土壤有机碳储量前后变化为正时,土壤表现为碳汇效应,差值即为变化时间内的碳汇值。而对于土壤有机碳储量的核算有不同的核算方法,国际上发布的有《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》,用来估算土壤的年际变化。除此之外常用的也有土壤类型法、生命地带、生态系统类型法和植被类型估算法、模型模拟法、相关关系统计法、地理信息系统(GIS)估算法等^[30],用来估算不同时间段的土壤有机碳储量情况。

1.2.1 IPCC 国家温室气体清单指南

《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》是 IPCC 发布的一项有关温室气体计算标准,在国际上广为认可

和使用。指南中给出了土壤碳库年度变化三个层次计算方法。这种方法根据所选方法层次所需要获取数据量不同,在数据缺乏地区可以依据第一层方法给定参数进行估算,计算简单。随着估算精度提高所需数据量和数据精确性有所提高,并在计算时考虑了不同管理措施所带来碳储量变化的不同。但其没有考虑气候等自然因素的影响,土地管理等因子亦采用静态缺省值,未考虑其动态变化。计算结果体现为土壤碳库的线性变化,计算结果也多为宏观估算。Sperow^[31]基于 2019 年指南更新估算了美国农业用地的土壤碳储量,讨论了更新前后各管理因子的变化情况。

1.2.2 土壤类型法

土壤类型法是以土壤类型为基础,基于土壤发生学分类,通过土壤剖面数据计算分类单元的土壤碳含量,最后按照各土壤类型面积聚合得到土壤碳储量的方法。因不同种类土壤有机质含量、土壤容重等基本理化性质存在不同,此方法可以根据研究区域内不同土壤分类计算区域有机碳量。土壤类型法是一种传统计算方法,应用较为成熟,但估算时需要前期采样数据的支持,数据的多少对精度影响较大,且在计算时未考虑自然和人为因素对土壤的影响和干扰。Bohn^[32]利用粮农组织土壤图,估算了单位平均土壤碳值,结果得出全球土壤碳储量在 2946Gt 水平下。刘国华等^[33]针对环渤海地区土壤有机碳库进行了土壤类型分类研究,发现在整个土壤碳库中棕壤的有机碳库最大,潮土次之,而风沙土所占比例最小。陈富荣等^[34]研究了安徽省中东部单位土壤碳储量,计算了单位土壤有机、无机及全碳表层及中层碳储量。土壤估算法估计土壤碳储量可以根据不同的土壤类型估计各个土壤类型的碳汇情况。

1.2.3 生命地带、生态系统类型法和植被类型法

生命地带、生态系统类型法和植被类型法是根据各自分类系统条件下形成的土壤碳密度和各用地面积估算土壤碳储量。该方法能够反映气候、植被因素对土壤有机碳含量的影响,了解不同生命地带、生态系统类型法和植被类型的土壤有机碳。但此方法数据来源广泛,数据种类要求多,统计口径不一等会带来数据可信度的下降、误差大等问题。比较经典的是 Post 等^[3]运用此方法,研究了植被和气候对全球土壤碳密度的空间分布特征的影响及三者的关系,并对 1 米深土壤进行了土壤有机碳含量和碳储量的估算。

1.2.4 模型模拟法

模型模拟法是根据相关关系模型、实测数据与遥感影像结合,通过土壤碳循环过程机理,结合实测数据,建立土壤碳评估预测模型,估算区域土壤碳储量。相较于其他方法,它可以从机理上研究土壤碳储量,在最终结果中碳库也较其他方法进行了更进一步的划分。同时,在进行初始运行时,不同模型考虑了气候、管理等不同参数,反映了不同因子带来的影响。同时可以根据参数进行模拟和预测。但模型同样存在一定局限,例如模型参数的选取、模型的精度训练等。常用的模型有基于过程的陆地生态系统生物地球化学循环模型(CENTURY 模型)、土壤有机质周转计算机模拟模型(Roth C 模型)、反硝化-分解模型(DNDC 模型)以及 Soil-C 模型^[35]。其中,CENTURY 模型、Roth C 模型、Soil-C 模型与农田稳定性碳库密切相关(表 2)。

Yang 等^[36]应用 CENTURY 模型模拟了我国东北玉米地土壤碳的动态变化,Brandani 等^[37]模拟了土壤管理对甘蔗地土壤有机碳动态变化的影响。

除了上述的模型之外,还有一种经验模型——簿计模型,模型中记录了土地利用变化、土地利用历史和生态系统碳库对不同土地利用方式变化的响应曲线,可以用来描述土地利用变化不同时期的碳变化量。这个模型适用于 IPCC 第三层方法,相对于前两层方法两点间的线性变化,簿计模型这种经验模型可以很好的模拟在整个变化期间的土壤碳库变化,获得一种相对连续数据,得到土壤碳库的非线性变化^[38]。但该模型所需数据量较大,实际可操作性差,结果精度受到外界环境影响会降低,影响了其应用。

1.2.5 相关关系统计法

相关关系统计法是运用统计学方法原理,建立数学统计模型,建立土壤有机碳含量与影响因子及采样点等其他相关信息的指数关系计算土壤中的碳储量。在一定程度上,它可以反映土壤碳储量与影响因子的定量关系,但它是借助样点进行关系建立,在大尺度采样点较少的情况下,所建立的统计模型可信度不高。且因各

区域自然因素差异,统计模型很难具有普适性。何志斌等^[39]通过调查祁连山云杉林水文、土壤和植被等数据,分析了表层土壤有机碳含量特征及其与地形、植被和土壤之间的关系。

表 2 土壤碳储量估算模型对比

Table 2 Comparison of soil carbon storage estimation models

模型 Models	原理 Theories	应用 Applications
基于过程的陆地生态系统生物地球化学循环模型(CENTURY 模型) CENTURY Model	将土壤有机质库分为 5 个分库,依据所输入的土壤物理属性参数、气象、初始有机质和管理参数等估算有机碳储量,可以估算土壤从初始到平衡的各碳库碳量。	适用于各种尺度的生态系统,是最全面的生态系统土壤有机碳估算模型之一。
土壤有机质周转计算机模拟模型(Roth C 模型) Roth C Model	将有机质库分为了 5 个分室,利用气候和土壤数据可以模拟输入碳的分解转化情况或估算达到平衡状态所需要投入的有机质量。	依据长期大田试验建立起的土壤有机碳周转模型,它不考虑植被的生物量和植物残体进入土壤的归还量,仅考虑土壤活动。
Soil-C 模型 Soil-C Model	利用温度、湿度和土壤物理属性数据模拟外源碳进入土壤的分解情况,可以模拟出进入土壤的碳最终被微生物利用和存入土壤碳库的含量。	土壤有机碳动态模拟的模型,主要为农田土壤管理提供科学依据。

1.2.6 GIS 估算法

GIS 估算法主要是基于地理信息系统、遥感等现代信息技术手段,利用各种土壤数据计算平均值,建立土壤有机质属性数据库,并利用空间分析功能计算土壤有机碳储量。近年来,随着遥感、地理信息系统等的发展,GIS 方法可以与其他方法结合,是一个综合性方法,适用于各种尺度的估算,且估算精度相较于之前有所提高。同时,相比其他方法,GIS 估算法更能凸显土壤有机碳空间分布与变化规律^[31],能够反映研究区域的空间属性和时间变化。但它需要以实测数据为基础,对数据数量和质量要求较高。于东升等^[40]基于 1:100 万中国土壤类型图和全国第二次土壤普查数据,借助 GIS 手段估算出全国土壤有机碳库储量为 89.14Pg。罗勇等^[41]结合 GIS 和全球定位系统(GPS)技术针对县域尺度农田有机碳密度碳储量进行了估算,并计算了碳储量丰度。

1.2.7 ¹³C 同位素示踪

¹³C 同位素示踪法区别于前面所提的方法,它不是碳储量核算的一种方法,但可以从微观角度定量的研究土壤有机碳的输入输出情况,较为清楚直观的看到外源碳进入土壤后在土壤中的转换贮存空间和数量。相较于前面所提方法,能够从土壤碳机理方面阐述碳在土壤中的作用过程。它是从田块小尺度出发,结合实际采样,清查田块尺度中具体的碳含量,结合耕作管理定量分析土壤有机碳动态变化。但同样局限性也非常明显,由于同位素标记技术和成本限制,仅适用于小尺度微观研究,田块尺度的清查核算若没有足够的数量和均匀的点量分布无法自下而上核算至更大尺度,较大尺度无法确保数据的可靠性。现在¹³C 同位素示踪法在土壤碳循环中的应用多是研究稳定¹³C 同位素在土壤中的固碳机理及 CO₂排放、土壤有机碳分解对碳同位素分馏的影响以及土壤有机碳的来源、动态变化和循环特征的定量化^[42]。

1.3 小结

通过上述梳理,土壤有机碳汇内容主要涉及宏观土壤有机碳库容量、特定利用方式下碳固存量及潜力研究等,对土壤有机碳汇的科学内涵均没有进行清晰界定。在土壤有机碳汇核算方法方面,以宏观评估性研究为主,对大尺度土壤有机碳汇评估具有重要价值,但不同方法的差异性较大,在实际应用过程中,因各方法有其各自所需条件和自身局限性(表 3),土壤类型法、模型模拟法和 GIS 估算法是最常采用的方法,通过采样结合相关参数特征进行估算。

综上所述,土壤有机碳汇的核算多数以大尺度宏观研究为主,所研究的土壤有机碳为土壤中的有机碳全碳。在模型模拟方法中,虽然可以具体区分有机碳种类,但学界并没有对土壤有机碳汇进行统一的内涵界定。文章接下来基于对土壤有机碳赋存形态长期定位监测和机理识别,通过梳理土壤有机碳赋存分类和机理识别,对土壤有机碳汇的概念内涵解析,尝试提出一种可操作的土壤有机碳汇的核算方法,基于土壤发生学理论

探究土壤有机碳汇阈值大小。

表 3 碳汇核算方法比较分析

Table 3 Comparative analysis of carbon sink accounting methods

方法 Methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
基于政府间气候变化专门和仁(IPCC)指南核算 Accounting based on IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories	可以为一些无法进行清查的国家提供碳核算的指标,从而进行粗略的估算,也提供了一种国际通用认可的核算方法,可以进行初步的估算。	对于缺少本地信息的地区,估算精度就会下降,而估算时只能反应研究节点的土壤碳储量,无法反应周期内的变化。
土壤类型法 Soil types method	有基础数据资料的地区,可以根据已有资料数据较为准确的估算出不同土壤类型碳储量。	方法需要大量的前期数据,需要长期的数据积累。
生命地带、生态系统类型法和植被类型法 Life zone, ecosystem types method and vegetation types method	一定程度上可以反映与气候、植被间的关系,提高一定精度。	建立的关系模型只反应了部分影响因素,不能反映土壤碳的非线性变化。
模型模拟法 Model simulation method	从机理上对碳固存及其影响因素进行及解释,土壤碳量估算精度有所提高。	需要对空间数据进行采集、数据量大,且要对模型进行长期训练。
相关关系统计法 Correlation statistical method	建立土壤碳固存与各相关关系的统计模型,一定程度上可以反映与环境各要素间的关系,提高一定精度。	很难建立一个具有普适性的逻辑模型;在较大尺度中依据少量样点建立的模型可信度低;建立的关系模型只反映了部分影响因素。
地理信息系统(GIS)估算法 GIS estimation method	估算精度较高,可以反映土壤有机碳空间分布与变化规律,是现在发展较快的一种方法手段。	所需参数较多,还需要区域的空间特征数据。
¹³ C 同位素示踪法 ¹³ C isotope tracer method	更为直观的区分土壤中各部分碳的转化和去留情况,可以具体的估算出外界投入土壤中的碳的转化情况,从微观碳转化机理角度探究碳储量。	更适用于田块小尺度定量核算,所受限制较多,较大尺度无法确保数据准确性;研究对象为进入土壤外源碳转化情况,土壤本底碳无法定量。

2 土壤有机碳汇内涵辨析与核算方法

在上述土壤有机碳储量或有机碳汇研究中,基本将土壤有机碳作为土壤碳的衡量指标。对全域或全球尺度的碳储量评估,以土壤有机碳作为碳储量或近似的碳汇指标是相对合适的,但对流域等小尺度或具体土地利用系统的土壤有机碳汇核算,以土壤有机碳指标表征土壤碳汇值得商榷。土壤是一个复杂的,不断发展演化的自然生态系统,土壤有机质始终处在矿化和腐殖化同时存在的动态变化过程中,对特定土壤生态系统,土壤是碳源还是碳汇是一个需要具体分析的问题。基于此,研究土壤有机碳汇核算,首先有三个基本科学问题需要界定。一是土壤有机碳汇的内涵,二是土壤有机碳汇的阈值,三是土壤有机碳汇的核算方法。

2.1 土壤碳汇内涵解析

土壤有机碳是赋存在土壤中复杂的有机体混合物,同时存在矿化和腐殖化过程,不能简单的作为土壤有机碳汇的指标。土壤有机碳中,只有在相对较长时间内相对稳定的有机质组分碳才可理解为土壤有机碳汇范畴。土壤有机碳中稳定性组分与有机质的类型和赋存状态密切相关,土壤有机碳依据不同标准划分种类略有不同,但划分原理大体相似:

①土壤有机碳可简单分为大分子有机碳和小分子有机碳。小分子有机碳易被土壤中的微生物利用,矿化分解变成二氧化碳释放到大气,大分子有机碳相较于小分子有机碳质地结构更为稳定,被微生物利用更少,因此能在土壤中相对长期保存。

②在物理组分上分,可以分为轻组分有机碳和重组分有机碳。轻组分有机碳是浸在溶液中密度相对较低的有机物质,稳定性不高,矿化分解速度相对较快,重组分有机碳是密度相对较高的有机物质,可以看作与土

壤粘粒结合较为紧密的部分,这一部分有机碳在土壤中存在较前者更为稳定,更易长期保存在土壤中。

③也有将土壤有机碳分为稳定性有机碳与营养性有机碳。营养性土壤有机碳是指土壤有机碳中活跃的、易于转化的组分,稳定性土壤有机碳主要存在于土壤黏粒和细粉粒中。稳定性有机碳在土壤中很难被分解和矿化,使其在土壤中能够保存数百年以上^[43]。

无论何种分法均可看出,在土壤有机碳库中存在相对易分解和不易分解的部分,易分解的部分会被微生物利用消耗,难分解部分会被保留在土壤中,成为土壤有机碳的主要组成。且在难分解部分,多与土壤中的粘粒结构等存在关系。

有机碳在土壤中会通过自身难降解部分、与土壤金属氧化物、土壤团聚体结合稳定在土壤中,而土壤中的微生物也会通过自身的活动稳定有机碳。土壤自身难降解的部分主要构成为土壤中的腐殖质部分与植物残体进入土壤中未被微生物分解留在土壤中的部分^[44-47],这一部分与土壤有机碳的稳定性息息相关。土壤中的金属氧化物也与土壤稳定性有一定的联系。除此之外,土壤中的团聚体结构能对有机碳形成物理保护,其能够包裹有机碳或有机碳以颗粒的形式存在于团聚体的孔隙之中,或有机碳与团聚体直接结合形成较为稳定的矿物结合态有机碳,用来隔绝和减缓外界和周围环境对土壤有机碳的分解,在一定程度上保护了土壤有机碳,提高了有机碳的稳定性。而土壤本身是一个复杂的生态系统,土壤中生物自身及其活动对于稳定性的提高也有贡献。已有研究显示^[4],外界投入土壤中的碳进入土壤多在第一年就会矿化分解大半,剩余未分解的部分会随着时间的推移逐渐被微生物消耗,最终留在土壤中的有机碳相对较少。这段转化作用过程经历时间漫长。而土壤有机碳的稳定性也与土壤中粘粉粒的含量有着正向的关系,粘粉粒所占比例越高,土壤的稳定性越强。

因此,土壤中的有机碳不能简单的作为土壤有机碳汇的指示指标,有机碳中有大部分会通过土壤有机质矿化过程或植被利用,转化成二氧化碳排放到大气中,只有能够长期保留在土壤中、不易被矿化分解的有机碳才可作为长期稳定的碳算到土壤碳汇中。需要说明的是,土壤稳定性有机碳也是一个相对概念,是在一定时间内相对保持稳定,比如土壤腐殖质,通过长期定位试验,年际变化不显著,属于长期稳定有机碳类别。

综上所述,尽管存在对土壤稳定性碳的组分和赋存机理存在学术争议,但以土壤腐殖质为稳定性有机质组分作为土壤有机碳汇核算指标内涵是相对清楚,在稳定性碳指标的获取方式上,以碱提取液测定方法或土壤全碳与易氧化有机碳之差获得土壤有机碳组分作为土壤稳定性碳,也即土壤碳汇核算的碳指标具有科学性、可操作性和现实意义。

2.2 土壤有机碳汇阈值解析

一般理解,不同土壤的固碳增汇潜力不能无限扩大,存在一个阈值。土壤有机碳汇阈值是土壤碳汇研究无法回避的问题。从土壤发生学的角度,土壤是地理环境下受气候、生物、母质、地形、时间等成土因素长期演化形成的历史自然综合体^[48]。根据有机碳在土壤中的分解累积作用可知,土壤中有有机碳含量随着分解转化最终会达到动态平衡,动态平衡时的常数即为稳定碳库的库容,且在特定的成土因素下不受外界干扰。在客观上,体现在非人类干扰状态,不同土壤类型自然状态下的有机碳含量,稳定性有机碳(碳汇核算)与有机碳相互转化呈动态平衡状态。例如东北黑土在低温高湿草甸植被下有机碳含量高,而南方高温高湿强烈风化条件下土壤有机碳再人为投入也无法达到东北黑土的有机碳含量水平。不同自然地理条件下土壤有机碳(碳汇)含量有一个阈值,这个阈值可理解为自然状态下所形成的不同土壤类型的稳定性有机质含量,也即土壤类型所对应的最大碳储量含量值。这个碳储量值就是理论上土壤有机碳汇的最大值,土壤有机碳汇的大小决定于核算时初始碳汇储量的大小。也有研究将碳汇潜力估算时多目标调查数据对应的各土壤类型有机碳含量累积超过97.5%的对应值作为该类土壤类型有机碳含量最大值^[19],或通过构建线性函数计算有机碳饱和时饱和碳密度^[35],均与本文提出的碳汇阈值具有相同思想,即有机碳含量存在一个最高值。在区域小尺度范围内,有机碳含量的最高值与土壤中的粘粉粒含量有关。但对于同种类型土壤,其所处环境不同粘粉粒含量及饱和度也有差距,无法根据其来确定土壤有机碳阈值。而根据发生学原理来确定同类型土壤中有有机碳含量

最高值较之更为可行。

2.3 土壤有机碳汇核算方法

基于土壤有机碳汇的内涵界定和阈值分析,文章尝试提出一种内涵清晰,具有可操作性及可重复性核算的土壤有机碳汇核算方法。土壤有机碳汇核算包括 2 方面内容,碳汇潜力的核算和不同时点碳汇过程的界定与核算。

①碳汇潜力的核算。碳汇潜力的核算比较明晰,碳汇潜力=理论碳汇最高值-碳汇现状时值。

$$CSP_{SOC_t} = A - CS_{SOC_t} \quad (1)$$

式中, CSP_{SOC_t} 为土壤碳汇潜力; A 为该地区同类型土壤腐殖质含量最大阈值,理论上阈值为常数; CS_{SOC_t} 为 t 时刻下以土壤腐殖质为指示指标的碳储量值,即土壤中稳定性碳的含量。

②碳汇(增汇或减汇)过程界定与核算。基于稳定性碳当量平衡法界定和核算不同时点碳汇(增汇或减汇)过程。

$$CS_{SOC_t} = CS_{SOC_{t_0}} + CE \times T \quad (2)$$

$$CE = CS_{SOC_{input}} - CS_{SOC_{output}} \quad (3)$$

式中, CS_{SOC_t} 为 t 时刻土壤碳储量值; $CS_{SOC_{t_0}}$ 为初始节点土壤碳储量值; CE 为土壤碳当量增减平衡值; T 为时间; $CS_{SOC_{input}}$ 为特定作物种植模式下单位时间内以土壤腐殖质为指标的土壤稳定性有机碳的生成量; $CS_{SOC_{output}}$ 为特定作物种植模式下以土壤腐殖质为指标的土壤稳定性有机碳需求(消耗)量。上述数值需要通过长期定位试验获取。

公式(2)表示, t 时间段内土壤有机碳汇(增汇/减汇)量等于初始状态土壤碳汇量加上 t 时间段内土壤碳汇当量变化量。其中,土壤碳汇变化量等于 t 时间段内土壤输出(耗散)碳汇量与土壤输入(耗散)碳汇量的差值公式(3)。当 t 时间段内土壤碳汇(增汇/减汇)量等于 A ,即该地区同类型土壤最大值时, CE 即为土壤碳汇潜力 CSP_{SOC_t} ,公式(1)与公式(2)吻合。需要说明的是,土壤输入/输出碳当量与土壤有机质测定不同,需要通过长期定位试验测定核算出来。从操作性角度,原则上需要 5 年以上的长期定位时间试验数据支持。

3 讨论与展望

3.1 观点讨论

(1)在“碳达峰、碳中和”战略需求下,土壤有机碳汇作为生态系统碳汇的重要组成部分,土壤有机碳库容量以及如何开展土壤有机碳汇核算日益成为生态碳汇的研究热点之一。一方面该领域研究有力推动了对宏观土壤有机碳储量潜力,土壤有机碳汇对陆地生态系统碳汇贡献的科学认识,提供了方法工具。另一方面土壤有机碳汇宏观评估复杂性和结果低重复性也反映出土壤有机碳汇宏观评估方法的局限性和不确定性。

(2)土壤有机碳是土壤最活跃的成分之一,对土地利用方式和环境变化敏感,存在碳源/碳汇动态可逆平衡,不宜作为土壤有机碳汇表征指标。从土壤有机碳汇角度,需要一定时间内相对稳定性的有机碳组分进行表征。由于土壤有机质组分及动态变化的复杂性,尽管对土壤稳定性碳的组分和赋存机理存在学术争议,但以土壤腐殖质为稳定性有机质组分作为土壤有机碳汇核算指标内涵相对清楚,在稳定性碳指标的获取方式上,以碱提取液获得土壤有机质组分作为土壤稳定性碳,也即土壤有机碳汇核算的碳指标具有科学性、可操作性和现实意义。

(3)土壤有机碳汇潜力是土壤有机碳汇核算和评估的另一个重要概念。从土壤发生学的角度,土壤中有有机碳的含量随着分解转化最终会达到动态平衡,此时稳定有机碳含量值约是常数,这个常数就是稳定碳库的库容,无论外界如何干扰,在特定的成土因素下,碳库的核算值不会超过平衡时的常态值。在客观上,体现在非人类干扰状态下不同土壤类型自然状态下的有机质含量,其中,稳定性有机碳(碳汇核算)与有机碳相互转化呈特定数量关系的动态平衡状态。不同自然地理条件下土壤有机碳(碳汇)有一个阈值,这个阈值可理解为自然状态下所形成的不同土壤类型的稳定性有机碳含量,也即土壤类型所对应的最大有机碳汇潜力。

(4) 该论文提出的土壤有机碳汇的概念内涵及表征指标、测定方法,土壤有机碳汇阈值的内涵及确定方法边界清晰,相关指标测定具有可操作性、客观性和重复性,适用于微观层面的有机碳汇核算,适合碳交易层级的有机碳汇核算。另一方面,通过确定不同土壤类型的有机碳汇阈值,也可用于宏观层面基于土壤类型的有机碳汇核算和评估。在土壤有机碳汇核算标准的制订等方面具有重要参考依据。

3.2 未来展望

(1) 文章在解析土壤有机碳汇内涵和碳汇阈值确定的基础上,参照土壤有机质平衡理论,基于土壤输入、输出碳汇当量提出了土壤碳汇核算的定量化方法。该方法尽管在稳定性有机碳内涵解析、碳当量核算等方面还存在进一步的科学界定及不同的学术观点,其进步性意义在于提出了一种可操作性的定量化的核算方法,在未来碳交易中,对提供一种相对客观、定量化的核算工具具有一定进步价值或启示。

(2) “碳达峰、碳中和”战略最终要落到可操作层面,与碳减排路径碳核算与交易相比,生态碳汇,尤其是土壤生态碳汇是一个双向动态的过程,其定义、核算复杂的多。下一步土壤有机碳汇的核算应在科学研究基础上多角度凝聚共识,制定碳汇核算国际标准;在 IPCC 土壤碳库核算体系中制定中国技术参数及标准;研究不同尺度下可操作、可重复以及可复制的土壤有机碳汇核算技术与方法;基于土壤发生学理论根据不同土壤类型或自然地理分区进行有机碳汇阈值研究,为未来生态碳汇市场化交易提供一套科学的核算技术标准体系。

参考文献(References):

- [1] Monastersky R. Global carbon dioxide levels near worrisome milestone. *Nature*, 2013, 497(7447): 13-14.
- [2] 徐英明, 虞依娜, 李鑫, 李昊, 何明威, 林森. 南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳积累与碳汇功能. *生态学报*, 2019, 39(1): 355-362.
- [3] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [4] 张维理, KOLBE H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展. *中国农业科学*, 2020, 53(2): 317-331.
- [5] Ni J. Carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems: approaching a more accurate estimate. *Climatic Change*, 2013, 119(3): 905-917.
- [6] Li Z P, Han F X, Su Y, Zhang T L, Sun B, Monts D L, Plodinec M J. Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China. *Geoderma*, 2007, 138(1/2): 119-126.
- [7] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 533-544.
- [8] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China. *Global Change Biology*, 2003, 9(3): 305-315.
- [9] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩, 李安波. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35-43.
- [10] Xie X L, Sun B, Zhou H Z, Li A B. Soil Organic Carbon Storage in China. *Pedosphere*, 2004, 14(4): 491-500.
- [11] Xie Z B, Zhu J G, Liu G, Cadisch G, Hasegawa T, Chen C M, Sun H F, Tang H Y, Zeng Q. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 2007, 13(9): 1989-2007.
- [12] Xu L, He N P, Yu G R, Wen D, Gao Y, He H L. Differences in pedotransfer functions of bulk density lead to high uncertainty in soil organic carbon estimation at regional scales: evidence from Chinese terrestrial ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(8): 1567-1575.
- [13] Xu L, Yu G R, He N P. Increased soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s. *地理学报(英文版)*, 2019, 029(001): 49-66.
- [14] Tang X L, Zhao X A, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Hu H F, He N P, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [15] Yang Y H, Mohammad A, Feng J M, Zhou R, Fang J Y. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*, 2007, 84(2): 131-141.
- [16] Peng C H, Apps M J. Contribution of China to the global carbon cycle since the last glacial maximum. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1997, 49(4): 393-408.
- [17] Ji J J, Huang M, Li K R. Prediction of carbon exchanges between China terrestrial ecosystem and atmosphere in 21st century. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(6): 885-898.

- [18] Pan G X, Xu X W, Smith P, Pan W N, Lal R. An increase in topsoil SOC stock of China's croplands between 1985 and 2006 revealed by soil monitoring. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 136(1/2): 133-138.
- [19] 张亚峰, 姚振, 马强, 姬丙艳, 苗国文, 许光, 马凤娟. 青藏高原北缘土壤碳库和碳汇潜力研究. *地球科学进展*, 2018, 33(2): 206-212.
- [20] 张亚峰, 马强, 姬丙艳, 姚振, 代璐, 田兴元. 青海周边地区土壤碳汇潜力评价. *中国矿业*, 2016, 25(S1): 271-273, 295.
- [21] 韩冰, 王效科, 逯非, 段晓男, 欧阳志云. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力. *生态学报*, 2008, 28(2): 612-619.
- [22] 郭然, 王效科, 逯非, 段晓男, 欧阳志云. 中国草地土壤生态系统固碳现状和潜力. *生态学报*, 2008, 28(2): 862-867.
- [23] Hu Y M, Wang L, Chen F X, Ren X N, Tan Z X. Soil carbon sequestration efficiency under continuous paddy rice cultivation and excessive nitrogen fertilization in South China. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105108.
- [24] Lemma B, Williams S, Paustian K. Long term soil carbon sequestration potential of smallholder croplands in southern Ethiopia with DAYCENT model. *Journal of Environmental Management*, 2021, 294: 112893.
- [25] 郭洋, 李香兰, 王秀君, 王家平, 王旭峰, 马明国, 谢先红, 孙敏敏. 干旱半干旱区农田土壤碳垂直剖面分布特征研究. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1433-1443.
- [26] 苏培玺, 王秀君, 解婷婷, 王旭峰, 王黎明, 周紫韵, 侍瑞. 干旱区荒漠无机固碳能力及土壤碳同化途径. *科学通报*, 2018, 63(8): 755-765.
- [27] 柳叶, 任悦, 高广磊, 丁国栋, 张英, 王家源, 郭跃. 沙地樟子松人工林土壤碳氮磷储量分布特征. *中国水土保持科学: 中英文*, 2021, 19(6): 27-34.
- [28] 季波, 何建龙, 王占军, 刘凤凤, 田波, 吴旭东, 俞鸿千, 任小玢, 蒋齐. 翻耕补播措施对宁夏荒漠草原土壤碳氮储量的影响. *中国草地学报*, 2022, 44(1): 30-38.
- [29] 于志慧, 吕广一, 王新雅, 徐学宝, 贾东璇, 王成杰. 放牧强度对内蒙古荒漠草原土壤碳氮及其稳定同位素的影响. *草地学报*, 2022, 30(3): 544-552.
- [30] 赵广帅, 李发东, 李运生, 李静, 欧阳竹. GIS 空间插值模拟法与土壤类型法估算比较土壤碳储. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 155-162, 339.
- [31] Sperow M. Updated potential soil carbon sequestration rates on U.S. agricultural land based on the 2019 IPCC guidelines. *Soil and Tillage Research*, 2020, 204: 104719.
- [32] Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40(3): 468-470.
- [33] 刘国华, 傅伯杰, 吴钢, 段桂兰. 环渤海地区土壤有机碳库及其空间分布格局的研究. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1489-1493.
- [34] 陈富荣, 梁红霞, 邢润华, 陶春军, 贾十军. 安徽省土壤固碳潜力及有机碳汇(源)研究. *土壤通报*, 2017, 48(4): 843-851.
- [35] 杨柯. 我国典型农耕地土壤固碳潜力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [36] Yang J M, Yang J Y, Dou S, Yang X M, Hoogenboom G. Simulating the effect of long-term fertilization on maize yield and soil C/N dynamics in northeastern China using DSSAT and CENTURY-based soil model. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2013, 95(3): 287-303.
- [37] Brandani C B, Abbruzzini T F, Williams S, Easter M, Pellegrino Cerri C E, Paustian K. Simulation of management and soil interactions impacting SOC dynamics in sugarcane using the CENTURY Model. *GCB Bioenergy*, 2015, 7(4): 646-657.
- [38] 常瑞英, 刘国华, 傅伯杰. 区域尺度土壤固碳量估算方法评述. *地理研究*, 2010, 29(9): 1616-1628.
- [39] 何志斌, 赵文智, 刘鹤, 苏永中. 祁连山青海云杉林斑表层土壤有机碳特征及其影响因素. *生态学报*, 2006, 26(8): 2572-2577.
- [40] 于东升, 史学正, 孙维侠, 王洪杰, 刘庆花, 赵永存. 基于 1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2279-2283.
- [41] 罗勇, 王小国, 高美荣, 唐家良, 田琳琳, 朱波. 川中丘陵区典型农田土壤有机碳储量及空间分布特征. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(4): 669-675.
- [42] 稳定碳同位素示踪技术在土壤有机碳循环中的应用研究. 中国环境科学学会 2019 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分论坛论文集(一). 西安, 2019: 288-291, 375.
- [43] 张维理, KOLBE H, 张认连, 冀宏杰. 农田土壤有机碳管理与有机质平衡算法. *中国农业科学*, 2020, 53(2): 332-345.
- [44] 徐英德. 基于保护性农业的土壤固碳过程研究进展. *中国生态农业学报: 中英文*, 2022, 30(4): 658-670.
- [45] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 2015, 528(7580): 60-68.
- [46] 潘根兴, 丁元君, 陈硕桐, 孙景玲, 冯潇, 张晨, Marios D, 郑聚锋, 张旭辉, 程琨, 刘晓雨, 卞荣军, 李恋卿. 从土壤腐殖质分组到分子有机质组学认识土壤有机质本质. *地球科学进展*, 2019, 34(5): 451-470.
- [47] Cotrufo M F, Soong J L, Horton A J, Campbell E E, Haddix M L, Wall D H, Parton W J. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 776-779.
- [48] 林培. 区域土壤地理学: 北方本. 北京: 中国农业大学出版社, 1993.