

DOI: 10.5846/stxb202107211970

徐丽, 何念鹏, 于贵瑞, 赵航, 柴华. 基于地面观测的陆地生态系统碳储量多源数据整合方法. 生态学报, 2023, 43(11): 4359-4368.

Xu L, He N P, Yu G R, Zhao H, Chai H. The integrative method of multi-source data on terrestrial ecosystem carbon storage from field observation. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4359-4368.

基于地面观测的陆地生态系统碳储量多源数据整合方法

徐 丽¹, 何念鹏^{1,2,3,*}, 于贵瑞^{1,2}, 赵 航¹, 柴 华³

1 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 东北师范大学草地科学研究所植被生态科学教育部重点实验室, 长春 130024

摘要: 陆地生态系统有机碳储量通常指一定面积的植被、土壤和凋落物的有机碳存储量总和。准确评估陆地生态系统碳储量现状和变化, 对于揭示全球变化对陆地生态系统碳库的影响、指导政府决策者制定气候应对策略和评估现有措施的有效性等具有重要意义。地面观测数据是生态系统碳储量及其变化评估的重要数据源之一, 但目前除少数生态站开展了长期地面数据观测外, 绝大多数地面观测数据呈现出多源化、相互不匹配、时间不连续等特点; 因此, 迫切需要发展科学、规范化的多源数据整合方法, 将这些多源、分散的地面观测数据整编形成长期系统的地面动态观测数据集, 提高数据资源价值。从陆地生态系统碳储量组分及其基本算法着手, 系统梳理了植被和土壤碳储量估算中植被不同器官生物量和碳含量、土壤碳含量、土壤容重等关键参数的观测现状, 并详细介绍了这些关键参数的科学推导方法。此外, 也进一步讨论了多源地面观测碳储量数据整合的方法, 并展望了该方法体系未来的发展方向, 期待能为后续相关研究提供可借鉴的规范性方法。

关键词: 陆地生态系统; 碳储量; 植被; 土壤; 多源数据; 数据整合

The integrative method of multi-source data on terrestrial ecosystem carbon storage from field observation

XU Li¹, HE Nianpeng^{1,2,3,*}, YU Guirui^{1,2}, ZHAO Hang¹, CHAI Hua³

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Key Laboratory of Vegetation Ecology, Ministry of Education, Institute of Grassland Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

Abstract: The organic carbon (C) of terrestrial ecosystems refers to the total organic C storage of a certain area of vegetation, soil, and litter. It is one of the important parameters for evaluating the C sequestration effect of terrestrial ecosystems. Accurate estimation of terrestrial ecosystem C storage and changes will not only help reveal the impact of global changes on terrestrial ecosystem C pools, but also help policy makers to develop climate response strategies and assess the effectiveness of the existing measures. Field observation data is one of the critical data sources for C storage estimation, however, only a few ecological stations have carried out the long-term observation. Most of the field observation data show characteristics of multiple-source, mismatch, and time discontinuities. Therefore, it is urgent to develop a scientific and standardized multi-data integration technology to reorganize these multi-source and scattered field observation data into a

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32171544, 42141004); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0500202)

收稿日期: 2021-07-21; **网络出版日期:** 2023-02-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hennp@igsrr.ac.cn

long-term systematically dynamic observation dataset, so as to increase the value of the data sources. In this paper, we systematically sorted out the observation status of some key parameters such as biomass and C content in different vegetation organs, soil organic C content, and bulk density in estimation of the vegetation and soil C storage. Additionally, we introduced scientific derivation methods of these key parameters and analyzed the method of multi-source field observation C storage data integration, which would provide reference for subsequently related research.

Key Words: terrestrial ecosystem; carbon storage; vegetation; soil; multi-source data; data integration

陆地生态系统是地球表层系统最重要的碳库之一,其碳库的微小变化(增加或减少)都可能会导致大气 CO₂浓度显著变化,进而对全球碳平衡及气候环境产生深刻的影响^[1-2]。据最新统计,全球陆地生态系统 2010—2019 年间的平均固碳速率约为(3.4 ± 0.9) Pg C/a,约占同期人为活动排放量的 29.6%^[3]。增加陆地生态系统碳储量被认为是环境友好、经济有效的固碳途径^[4-5];因此,准确评估陆地生态系统碳储量现状和变化不仅有助于揭示全球变化对陆地生态系统碳库的影响,也有助于政府决策的制定和现有气候应对策略有效性的评估^[6]。

陆地生态系统有机碳储量(简称碳储量)通常是指一定面积的植被、土壤和凋落有机碳存储量总和,它是反映生态系统碳存储能力的重要指标之一^[7]。其中,植被碳储量是单位面积中所有植被所含有机碳的量,它是植物群落碳吸收过程(光合作用)与碳释放过程(生物呼吸和死生物量)长期平衡后的结果^[8]。土壤有机碳储量是指一定面积一定土层深度有机碳的量,单位面积的土壤有机碳储量称为土壤有机碳密度,它是进入土壤的生物残体等有机物质的输入与以土壤微生物分解作用为主的有机物质损失之间的平衡^[9]。凋落物碳储量是单位面积地表保存的植物、动物或微生物还未分解或半分解凋落物的量,它是凋落物输入和分解后的净累积量,虽然凋落物碳库相对量较少,但在生物地球化学循环的养分回收过程中发挥着重要作用^[10]。

从观测技术和数据获取方式来看,评估陆地生态系统碳储量及其变化的数据来源主要包括三大类:地面观测数据、遥感数据和模型模拟数据^[4, 6, 11]。其中,地面观测数据是最基础、核心的数据,遥感数据和模型模拟数据均需要结合地面观测数据进行参数校正或模型结果验证。地面观测数据在区域或全球陆地生态系统碳储量及其变化评估中具有重要作用,尤其是长期、系统、动态、规范化的地面观测数据^[6, 11-12]。近三十年,随着观测技术的快速发展和相关研究队伍的不断扩增,积累了大量的地面观测数据。然而,受研究目的、监测方法、观测时间和研究对象差异以及科研经费等因素的影响,当前除少数生态站开展了长期、系统的地面观测外,绝大多数地面观测时间都较短,监测内容相对单一,使得观测数据呈现出相互不匹配、时间不连续等特点。如何将这些多源、分散的地面观测数据整合起来,形成长期系统的地面动态观测数据集,提高其数据资源价值,成为当前科研人员面临的巨大挑战;因此,迫切需要研究人员结合当前有关地面监测数据的现状,发展科学、规范化的多源数据整合方法。

鉴于此,本文从陆地生态系统碳储量组分及其基本算法着手,以现有的研究结果为基础,通过系统梳理各组分碳储量估算中关键参数的观测现状和主要处理技术,对陆地生态系统碳储量评估中的关键参数制定了各自对应的数据整合方法。考虑到陆地生态系统约 95%以上的碳分配在植被和土壤中,凋落物碳储量相对较少,因此本文将重点阐述植被和土壤碳储量的多源数据整合方法,期望能为相关研究提供新思路和方法学参考。

1 多源长时间序列植被碳储量数据整合方法

植被碳储量长期动态监测数据具有重要的生态学意义,同时对生态系统管理也具有重要的启示意义。首先,从生态系统物质循环角度看,植被碳库是生态系统碳循环的重要组成部分,与其它元素循环密切联系,了解植被碳储量长时间动态变化是解析生态系统物质循环过程及调控机制的关键。其次,植物碳储量和生物量

指标一样,是反映生态系统质量或健康状况的重要指标之一,人们可依据植被碳储量变化(或生物量变化),科学诊断不同区域的生态环境质量变化情况^[13]。在全球变化背景下,植被碳储量的增减直接关系到陆地生态系统碳源/汇,并影响着全球变化应对策略的制定。因此,在现有植被碳储量监测现状的基础上,应充分利用已有数据资源,科学整合多源的地面调查资料,进而获得长期动态的植被碳储量数据。

1.1 多源植被碳储量数据整合方法及其整理思路

从区域、国家或全球尺度估算植被碳储量方法主要有清单调查法和模型模拟法。其中,清单调查法主要包括收获法、平均生物量法和相对生长法^[14]。清单调查法比较简单、直接,估算精度较高,但受生态系统空间异质性的影响,该方法比较适合样地或小区域尺度的碳储量研究,然而它可为大尺度的碳储量模型构建提供样本数据,是区域或全球陆地生态系统碳储量研究的基础。模型模拟法是通过构建数学模型估算生态系统碳储量,是研究大尺度碳循环的重要手段,主要包括经验模型、过程模型和遥感估算模型^[15]。模型模拟法是常用的区域和全球尺度陆地生态系统碳储量评估方法^[16],但构建的模型通常含有较为复杂的结构,模型驱动参数较多,同时也需要大量的地面实测数据进行参数的校正和优化。

一般地,采用样方调查法获取的植被地面观测数据是开展区域、国家或全球尺度植被碳储量估算的基础。针对当前多源的地面调查数据,如何将分散的植物各器官(叶、枝、干、根)生物量或碳储量数据,如乔、灌、草生物量或碳储量数据,地上或地下生物量和碳储量数据等整合为生态系统植被碳储量数据,其整合方法和关键参数是数据整合的核心,也是必需攻克的技术难点。理论上,生态系统植被碳储量可以通过如下方程来计算:

$$\text{Veg}_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \text{Bio}_{ij} \times C_{ij} \quad (1)$$

式中, Veg_c 表示植被碳密度(kg C/m^2); Bio_{ij} 表示*i*物种的生物量(kg/m^2); C_{ij} 表示植物*j*器官的碳含量(g/g);*n*代表样方内的物种总数。*m*代表植物器官总数,其中乔木的植物器官包括叶、枝、干和根, $m=4$;灌木的植物器官包括叶、枝和根, $m=3$;草本的植物器官包括叶和根, $m=2$ 。

公式(1)表明植物各器官生物量和对应的碳含量是准确评估植被碳储量的关键参数。在实际操作过程,研究人员需根据获取的植被地面观测数据的状态,采取不同的方法进行整合。通常情况下,多源植被地面观测数据状态可分为三类:(1)包含生态系统植被碳储量数据信息;(2)只包含详细的群落结构调查数据,无器官水平的生物量和对应的碳含量信息;(3)只包含部分器官/功能群的生物量数据,无对应的碳含量信息。其中,对于第一类数据,可直接提取其植被碳储量数据。对于第二类和第三类数据,则需要通过查询整理不同区域典型生态系统内优势物种和常见物种的生长量方程,不同区域典型生态系统内乔木、灌木和草本生物量分配系数和植被各器官生物量分配系数等方式计算获取植被各器官的生物量;同时整理不同区域典型生态系统优势种和常见种植物叶、枝、干、根碳含量数据等,进而计算生态系统植被碳储量。通过以上方式将当前广泛分布的、不同时期开展的全类型生态系统植被碳储量的多源数据整合形成生态系统尺度的植被碳储量长期动态数据(如图1)。

1.2 植物不同器官生物量数据整理与推导

生物量是估算植被碳储量的关键参数之一。对于森林生态系统,乔木生物量通常是基于单株植物测定的形态指标(如胸径或高度),同时结合植物异速生长方程和群落调查数据进行推算的^[17];因此,详细的群落结构调查和乔木物种的异速生长方程是准确估算乔木层生物量的关键。学者们常采用经验林木生物量模型,即利用构建的不同器官生物量与胸径(*D*)、树高(*H*)或 D^2H 等因子之间的异速生长模型,并结合实测*D*和*H*推导该调查时间内的植物各器官生物量。在实际操作中发现,当植被分布于中低海拔或辐射较弱的环境中,仅含*D*参数的植物异速生长模型就能很好地拟合不同器官的生物量;但当植被分布于高海拔或强辐射等极端环境时,采用仅含*D*参数的植物异速生长模型则会显著影响估算结果。例如,在青藏高原高海拔地区,为了适应当地特殊的环境,有些乔木的胸径很大,但高度较低,如果忽略植株高度,采用仅含*D*参数的植物异速生

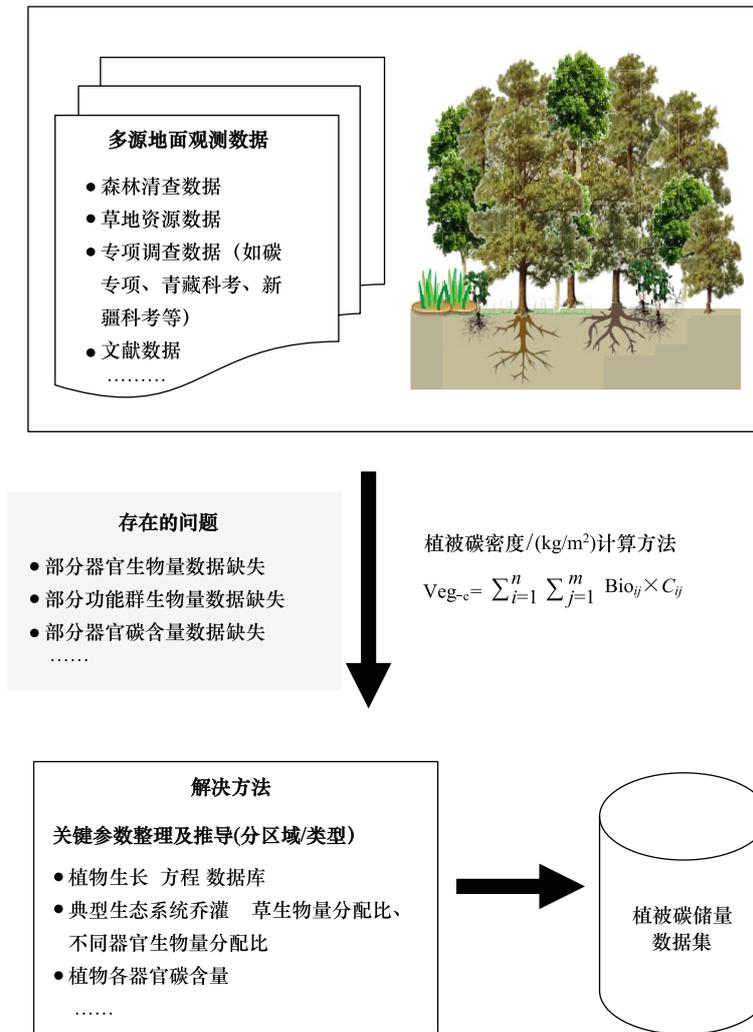


图1 植被碳储量多源数据整合的理念及基本方法

Fig.1 Concept and method of multi-source data integration of vegetation carbon storage

Veg-c 表示植被碳密度 (kg C/m^2) ; Bio_{ij} 表示 i 物种的生物量 (kg/m^2) ; C_{ij} 表示植物 j 器官的碳含量 (g/g) ; n 代表样方内的物种总数

长模型可能会显著高估该地区的乔木生物量。因此,为了降低生物量的估算不确定性,选用植物异速生长模型时需综合考虑当地的自然环境特征。

当前,学者们针对林木生物量估算模型已从省域、国家、洲际或全球尺度开展了大量的研究工作^[17-19]。根据文献统计,全球建立的生物量模型已超过 2300 个,涉及的树种超过 100 个^[18]。中国近些年在林木生物量估算模型方面也取得较大进展,并以论文、书籍或报告形式共享了相关成果。这些公开的林木生物量估算模型可将分散报道各种器官的数据较科学地推导成配套的、系统的数据,为后续开展植被碳储量数据整合工作奠定了方法基础。目前,公开发表的有关中国植物林木生物量异速生长方程的集成性资料主要包括《中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型》^[20]、《中国主要林木生物量模型手册》^[17]和《中国森林生态系统碳储量——生物量方程》^[21]。其中,《中国森林生态系统碳储量——生物量方程》^[21]中除了提供各省分物种、混合种、全国优势种的生物量方程外,还提供了中国主要群系生物量方程,为快速估算/整合相关数据提供重要的依据,但尺度的上升必然会影响到其估算精度。因此,在整合某一时间的森林群落调查数据时,应根据调查数据的特征合理选择生物量方程。

对于灌丛植被,虽然早期公开报道的植被生物量方程较少也较零散,但近期由谢宗强等^[22]整编的《中国

常见灌木生物量模型手册》对我国灌丛植被生物量方程进行了较为系统的梳理和完善,为整理只包含详细群落调查信息的灌木植被碳储量数据提供方法基础。对于草地生态系统,学者们针对草地植被地上生物量与地下生物量关系已开展大量的研究工作^[23-25],马安娜等^[26]在综合前期研究成果的基础上,进一步分析了草地植被地上和地下生物量的关系,并提供了中国不同类型草地地上-地下生物量的比例系数,为部分地下生物量数据插补以及多源草地植被碳储量数据整合提供一定参考。总之,学者们前期有关林木生长模型、灌木生长模型、草地植被生物量比例关系等研究成果为开展长期多源数据的整合工作奠定了坚实的方法基础和科学的参考依据。

1.3 植物不同器官碳含量数据整理与推导

植物各器官的生物量及其对应的碳含量是决定植被碳储量的两个关键参数。目前,对于植被尤其是森林植被生物量和生产力的研究较多,估算也较准确,但有关植被碳含量的研究相对较少。学者们常采用碳含量系数 0.45 或 0.50 g/g 估算植被碳储量^[6, 27],但由于植被类型丰富多样,不同地区物种组成、气候环境差异显著,该碳含量系数是否具有普适性仍需进一步探讨。近期,Zhao 等^[28-29]基于大量野外实测数据和历史文献数据(3280 个物种实测叶、枝、干和根碳含量数据、以及 1980—2015 年间在 web of Science 和中国知网上发表的有关植物碳含量数据)研究了中国森林生态系统植被碳含量及其变异性,发现乔木层植被碳含量在不同器官间差异显著($P < 0.05$),其碳含量大小变化趋势主要表现为:干(477.61 g/kg) > 叶(470.74 g/kg) > 根(463.60 g/kg) > 枝(455.17 g/kg);灌木层植物枝的碳含量(456.80 g/kg)明显高于叶(450.79 g/kg)和根(452.99 g/kg);草本层各器官的碳含量差异均不显著;同时,研究也发现不同区域的森林生态系统植被各器官的碳含量差异显著($P < 0.05$)。因此,获取各器官碳含量数据是降低植被碳储量估算不确定性的方法。

考虑到植被不同器官碳含量存在差异,部分研究者为了提高估算精度,通过实测植被各器官碳含量来评估其目标区域的植被碳储量。如 Hou 等^[30]结合森林群落结构数据以及植物各器官实测碳含量数据评估了中国温带针阔混交林的植被碳储量,同时分析比较发现传统碳含量系数 0.45 或 0.5 g/g 分别低估 2.99% 或高估 8.41% 的植被碳储量。然而,通过实测获取各器官碳含量所需人力、物力成本较高,仅适用于小空间范围内的植被碳储量评估研究。因此,在区域或国家尺度的植被碳储量评估中,对于一些缺失碳含量信息的器官,建议通过搜集整理已有的有关植被各器官碳含量测试数据,构建一套能够平衡区域、物种和器官差异的碳含量参数来辅助植被碳储量的估算。目前,王万同等^[14]结合碳专项中大量的调查测试数据,整理出中国森林主要树种和主要群系的各器官碳含量;Zhao 等^[28-29]利用大量的实测数据和历史文献数据整理出中国不同生态区森林植被各器官的碳含量,这些研究成果为后续开展多源数据的整合工作提供了科学参考。

2 多源长时间序列土壤碳储量数据整合方法

土壤是陆地生态系统最大的碳库,大约存储 1500 Pg 的有机碳(1Pg = 10^{15} g),约为全球大气碳库(730 Pg)的两倍,植被碳库(500 Pg)的三倍^[31]。土壤碳库的微小波动都会引起大气 CO₂浓度的巨大变化,影响陆地生态系统的组成、结构、功能和分布,也会影响全球气候环境^[32]。精确估算陆地生态系统土壤碳储量有助于揭示全球变化对土壤碳库的影响,也有助于正确评估土壤碳库的变化方向和速率,对准确预测气候变化以及制定气候变化策略和措施具有重要指导作用。因此,亟须发展多源数据整合技术和方法,通过对多源土壤调查数据的整合构建长期土壤碳储量数据集,从而为碳循环理论研究和生态系统碳管理提供科学依据。

2.1 多源土壤碳储量数据计算方法及其整理思路

区域、国家和全球尺度土壤碳储量的估算方法主要包括土壤类型法,植被类型、生态系统类型或生命地带法,模型估算法,地理信息系统(GIS)法,相关关系法等。其中,土壤类型法是以土壤类型为分类标准,根据土壤剖面信息计算不同类型土壤碳密度,然后乘以对应的面积得到储量^[33];该方法简单,广泛运用于区域或全球尺度土壤碳储量评估^[34]。植被类型、生态系统类型或生命地带法是根据不同类型的植被、生态系统或生命地带土壤碳密度与其对应的分布面积计算土壤碳储量;该方法在区域或全球尺度土壤碳储量评估中运用较

广。模型估算法是采用各种土壤碳循环模型估算土壤碳储量^[11,35];该方法综合考虑影响土壤有机质的输入和分解的多个因素来估算土壤碳储量。GIS 估算法是建立以土壤属性为单位的空间数据库,然后依据各样点基本信息(碳含量、容重、厚度和砾石含量等)建立土壤碳属性数据库,再利用 GIS 的空间分析功能估算研究区域的土壤碳储量。相关关系统计法是根据土壤碳密度与所处环境和气候因素间的相关关系,建立相应数学统计关系,进而估算区域土壤碳储量^[36-37]。

以上土壤碳储量评估方法均是以样地实测的单位面积土壤碳储量数据为基础,并且获取的样点数量越多,区域、国家或全球尺度土壤碳储量评估精度就越高。考虑到本文的关注点是探讨多源数据的整合,因此将重点围绕生态系统土壤碳储量如何计算和多源数据如何整合为核心来展开讨论,暂不分析点-面空间拓展尺度方法。

理论上,生态系统土壤碳储量可以通过如下方程来计算:

$$\text{SOC}_D = \sum_{i=1}^n \text{SOC}_i \times \text{BD}_i \times D_i \times (1 - \delta_i) \times 0.1 \quad (2)$$

式中, SOC_D 表示土壤碳密度(kg C/m²); SOC_{*i*} 表示第 *i* 层土壤的有机碳含量(%); BD_{*i*} 表示第 *i* 层土壤的容重(g/cm³); D_{*i*} 表示第 *i* 层土壤深度(cm), δ_{*i*} 表示第 *i* 层土壤的砾石含量(%); *n* 代表土壤总层数。

公式(2)表明土壤有机碳含量、容重、砾石含量和土壤深度是准确计算模式生态系统土壤碳储量的 4 个关键参数。在开展具体的数据整合工作时,首先需根据获取的多源土壤调查数据的状态来确定整理方法。一般地,已有的土壤地面观测数据状态可分为三类:(1)包含关键参数信息也包含生态系统土壤碳储量数据;(2)包含全部关键参数信息,但无生态系统土壤碳储量数据;(3)部分关键参数缺失,且无生态系统土壤碳储量数据。其中,对于第一类和第二类数据,整理方法十分简单,可直接提取或通过公式(2)计算获得土壤碳储量数据。对于第三类数据,需科学地插补缺失的关键参数,进而计算获取生态系统土壤碳储量。当前,已有的土壤数据库或较大空间尺度的土壤调查数据集都存在部分关键参数缺失的问题,尤其是土壤容重和有机碳含量这两个参数,因此,本文在介绍土壤碳储量多源数据整合方法时将着重探讨这两个关键参数的插补方法。通过采用科学的插补方法,完善已有的土壤碳属性数据集和一些分散的土壤碳储量调查数据,进而将各时期开展的土壤碳储量数据整合形成生态系统土壤碳储量长期动态数据。

2.2 不同层次土壤碳含量数据整理与推导

在整理多源土壤碳属性数据过程中,常会遇到特定土层或深层土壤碳含量数据缺失的问题,一定程度制约了土壤碳属性数据的应用。然而,有学者研究发现土壤碳含量随着土壤深度的增加呈现规律性变化,而这种变化可通过拟合曲线来表征^[38-40]。Chai 等^[40]以中国生态系统研究网络(CERN)中覆盖主要陆地生态系统类型的 35 个生态台站的 78 个长期监测样地的数据为基础,采用统一的方法对 0—100 cm 深度土壤剖面的碳含量分布特征进行定量化的拟合评估。研究发现所有样地的土壤碳含量均随深度增加而降低,并且这种降低趋势可用拟合的数学函数来表征;同时,研究发现人工和自然生态系统的土壤碳含量剖面特征函数形式存在较大的差异,其中农田生态系统的最佳拟合函数为指数函数,而自然生态系统(森林、草地和荒漠)的最佳拟合函数为幂函数。以上研究成果启示,在整合不同时期开展的土壤调查数据时,对于部分土层碳含量缺失的土壤剖面,可通过如下两种方法来插补。方法一:根据待插补调查点所属生态系统类型(人工或自然)确定拟合函数形式,并结合该剖面其他土层碳含量实测数据进一步确定拟合函数中的各个系数,进而推算缺失土层的碳含量。方法二:建议结合土壤剖面碳含量信息完整的样点,分土壤类型或分区域建立土壤碳含量剖面分布特征曲线方程,从而估算缺失的土壤碳含量。

2.3 不同区域、不同层次土壤容重数据的整理与推导

土壤容重是指一定容积内(包括土壤孔隙)的土壤重量,是土壤最重要的基本物理性质之一,它能一定程度地反映土壤质量^[41-42],同时也是计算土壤碳储量的重要参数之一^[43-44]。当前最经典、运用最广泛的土壤容重测量方法是土壤剖面+环刀法,该方法能很好地运用于农田、草地或部分成土条件较好的区域;但对于土

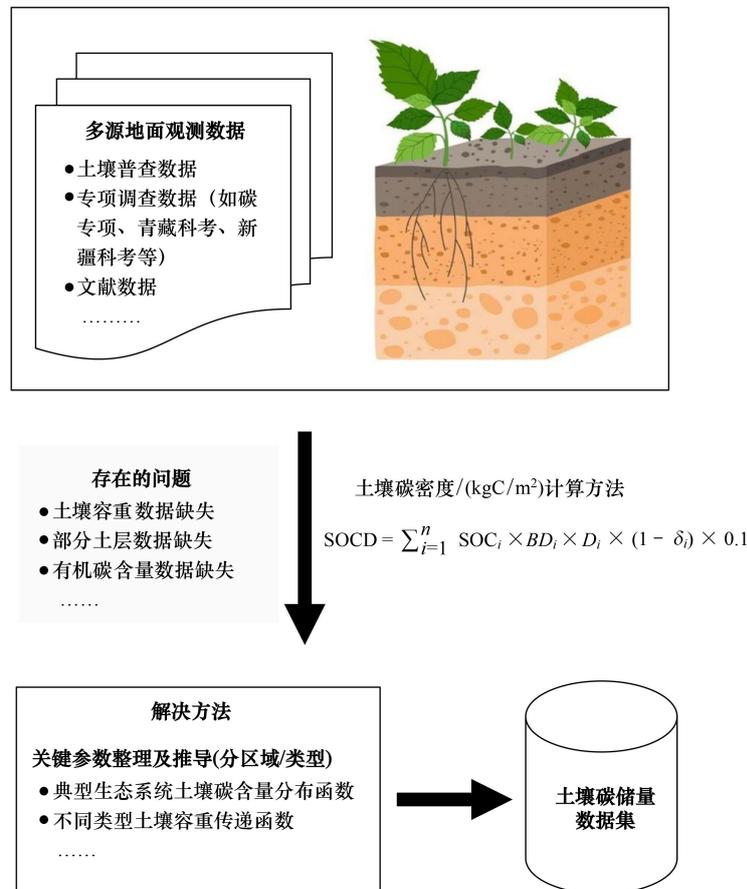


图2 土壤碳储量多源数据整合的理念及基本方法

Fig.2 Concept and method of multi-source data integration of soil organic carbon storage

SOCD 表示土壤碳密度 (kg C/m^2); SOC_i 表示第 i 层土壤的有机碳含量 (%); BD_i 表示第 i 层土壤的容重 (g/cm^3); D_i 表示第 i 层土壤深度 (cm), δ_i 表示第 i 层土壤的砾石含量 (%); n 代表土壤总层数

壤根系较多、砾石含量高或成土条件较差区域,该方法操作起来较为困难(图3),并且大量测定土壤容重耗时、耗力、监测成本也很高^[42,45]。因此,目前大部分土壤调查数据中,容重数据严重缺失。

为了系统整理中国区域内丰富的土壤调查数据,需要了解土壤容重分布特征及规律,并筛选确定科学的插补方法。柴华等^[46]收集和整理了中国第二次土壤普查数据、CERN 监测数据和 1980—2014 年文献中有关中国土壤容重数据(共 11845 条记录),分析发现:中国陆地生态系统土壤容重数据整体呈正态分布,平均值为 1.32 g/cm^3 ,中值为 1.35 g/cm^3 ;随着土层深度的增加土壤容重呈增加趋势,并且二者表现为显著的幂函数关系;土壤容重与有机质含量呈显著的正相关关系,与沙粒含量的负相关关系较弱。这些发现启示在插补缺失容重数据时,可以采用均值或中值替代,或利用土壤容重跟有机质含量的关系(容重传递函数)推算。Xu 等^[47]结合第二次土壤普查中的容重实测数据,定量评估了均值替代法、中值替代法和容重传递函数法这三类插补方法的差异,并发现容重传递函数法具有更高的估算精度。目前,已有学者针对不同类型的土壤或生态系统类型构建了一些容重传递函数^[48—52],其中一些容重传递函数已经用于区域或国家尺度的碳储量评估^[6,12]。因此,当前在整合多源的、不同时期开展的土壤属性数据时,对于缺失容重的土壤样点,可结合其他已知属性(如有机质含量)并参考已有的相同区域、同类型土壤或同生态系统类型的容重传递函数进行插补,进而完善各时期的土壤调查数据。

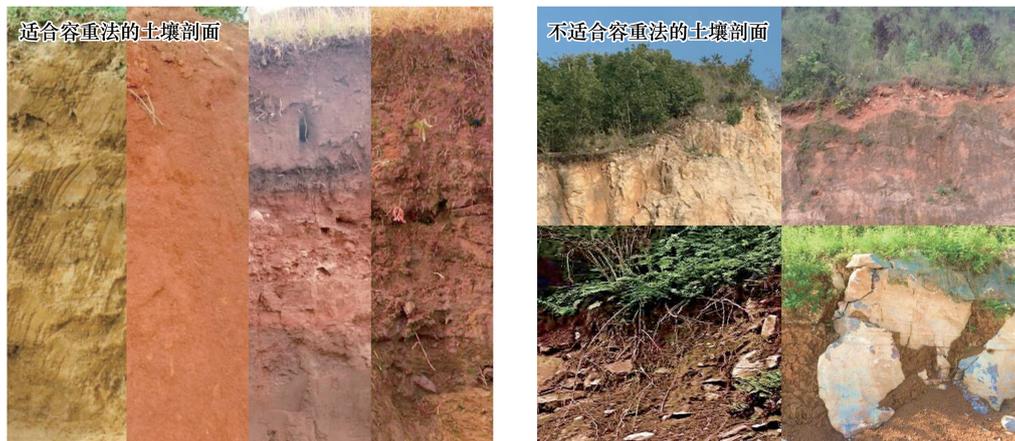


图3 不同类型的土壤剖面

Fig.3 Different types of soil profile

土壤剖面+环刀法多适用于农田土壤、部分草地土壤和沉积型土壤,但不适用于长期被开垦和砍伐影响、砾石含量高或土壤分布不连续的土壤

3 多源陆地生态系统碳储量数据的整合及应用

基于上述有关植被和土壤碳储量评估中关键参数的整理和推导方法,学者们可将部分信息不全(如植被器官碳含量、土壤容重或碳含量等信息缺失)的地面调查数据插补完整;进而将近几十年已开展的多源地面观测数据整合形成中国陆地生态系统碳储量长期动态数据集。该数据集覆盖面积大,时间尺度长,同时涵盖多个生态气候区、多个类型的生态系统和土壤,具有广泛的应用价值。首先,基于多源地面观测数据整合形成中国陆地生态系统碳储量数据集可用于精确估算陆地生态系统碳库大小。其次,构建的长期动态数据集有助于准确评估碳库的变化方向和速率,进而指导政府决策者制定气候变化策略和措施。再次,该数据集包含大量的地面观测数据,可为生态模型提供基础参数,提高模型的拟合精度。此外,根据数据集中样点的时空分布信息,可为学者们后续实验设计提供参考;例如对于样点分布较少的区域或观测频度较低的区域,未来可适当增加一些采样工作。

4 小结与展望

陆地生态系统碳储量数据整合方法的整体思路是从样地碳储量基本计算方法入手,确定植被碳储量和土壤碳储量估算中关键参数的科学推导方法,进而将多源、不匹配、零散的地面观测数据整编形成长期动态数据,提高已有数据资源价值。本文主要从方法学角度展开分析讨论,试图为后续相关研究提供可借鉴的规范性方法。然而,受篇幅限制,文中主要是从植被和土壤这两个碳库主体概括介绍了其算法体系和部分关键参数的整理和推导方法。

结合当前的研究现状,本文在此进一步指出该方法体系未来使用和发展过程中需要重点关注的几个方面:(1)植物生长方程的适用性。近年来学者们针对不同区域植物或不同优势物种构建了对应的生长方程,但这些方程绝大多数都界定了适用范围(如区域、植被类型或胸径大小等),对于范围之外的植物生物量估算还存在较大的不确定性,因此未来还应加强相关研究,补充完善植物生长方程。(2)土壤砾石含量数据。当前有关区域或国家尺度的土壤砾石含量数据缺失严重,学者们常采用均值替代法平均值法来插补缺失的土壤砾石含量,这也是区域土壤碳储量评估不确定性的重要来源,未来应进一步加强该参数的监测工作。(3)土壤厚度的不确定性。土壤厚度也是影响区域或国家尺度碳储量估算精度的重要因素之一,未来应进一步借助电磁感应、探地雷达等高新技术获取该基本参数。方法学改进是提高区域碳储量估算精度的重要途径之一,

如何通过整合多源可获取数据来解决区域尺度计算所需的关键参数集,既经济又科学,应受到管理部门和科学家的高度重视。

参考文献(References):

- [1] Cox P M, Betts R A, Jones C D, Spall S A, Totterdell I J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 2000, 408(6809): 184-187.
- [2] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [3] Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, Andrew R M, Hauck J, Olsen A, Peters G P, Peters W, Pongratz J, Sitch S, Le Quéré C, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Alin S, Aragão L E O C, Arneeth A, Arora V, Bates N R, Becker M, Benoit-Cattin A, Bittig H C, Bopp L, Bultan S, Chandra N, Chevallier F, Chini L P, Evans W, Florentie L, Forster P M, Gasser T, Gehlen M, Gilfillan D, Gkritzalis T, Gregor L, Gruber N, Harris I, Hartung K, Haverd V, Houghton R A, Ilyina T, Jain A K, Joetzer E, Kadono K, Kato E, Kitidis V, Korsbakken J I, Landschützer P, Lefèvre N, Lenton A, Lienert S, Liu Z, Lombardozi D, Marland G, Metz N, Munro D R, Nabel J E M S, Nakaoka S I, Niwa Y, O'Brien K, Ono T, Palmer P I, Pierrot D, Poulter B, Resplandy L, Robertson E, Rödenbeck C, Schwinger J, Séférian R, Skjelvan I, Smith A J P, Sutton A J, Tanhua T, Tans P P, Tian H Q, Tilbrook B, van der Werf G, Vuichard N, Walker A P, Wanninkhof R, Watson A J, Willis D, Wiltshire A J, Yuan W P, Yue X, Zaehle S. Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 3269-3340.
- [4] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [5] 方精云, 于贵瑞, 任小波, 刘国华, 赵新全. 中国陆地生态系统固碳效应——中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展. *中国科学院院刊*, 2015, 30(6): 848-857.
- [6] Xu L, Yu G R, He N P, Wang Q F, Gao Y, Wen D, Li S G, Niu S L, Ge J P. Carbon storage in China's terrestrial ecosystems; a synthesis. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2806.
- [7] 吕超群, 孙书存. 陆地生态系统碳密度格局研究概述. *植物生态学报*, 2004, 28(5): 692-703.
- [8] Fan S, Gloor M, Muhlman J, Pacala S, Sarmiento J, Takahashi T, Tans P. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science*, 1998, 282(5388): 442-446.
- [9] 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.
- [10] 温丁, 何念鹏. 中国森林和草地凋落物现存量的空间分布格局及其控制因素. *生态学报*, 2016, 36(10): 2876-2884.
- [11] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [12] Tang X L, Zhao X, 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.
- [13] 欧阳志云, 王桥, 郑华, 张峰, 侯鹏. 全国生态环境十年变化(2000—2010年)遥感调查评估. *中国科学院院刊*, 2014, 29(4): 462-466.
- [14] 王万同, 唐旭利, 黄玫. 中国森林生态系统碳储量——动态及机制. 北京: 科学出版社, 龙门书局, 2018.
- [15] 王军邦. 中国陆地净生态系统生产力遥感模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [16] Piao S L, Sitch S, Ciais P, Friedlingstein P, Peylin P, Wang X H, Ahlström A, Anav A, Canadell J G, Cong N, Huntingford C, Jung M, Levis S, Levy P E, Li J S, Lin X, Lomas M R, Lu M, Luo Y Q, Ma Y C, Myneni R B, Poulter B, Sun Z Z, Wang T, Viovy N, Zaehle S, Zeng N. Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO₂ trends. *Global Change Biology*, 2013, 19(7): 2117-2132.
- [17] 罗云建, 王效科, 逯非. 中国主要林木生物量模型手册. 北京: 中国林业出版社, 2015.
- [18] Chojnacky D C. Allometric scaling theory applied to FIA biomass estimation//McRoberts R E, Reams G A, Van Deusen P C, Moser J W, eds. *Proceedings of the Thrid Annual Forest Inventory and Analysis Symposium; Gen. Tech. Rep. NC-230*. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station, 2002: 96-102.
- [19] Vallet P, Dhôte J F, Le Moguédec G, Ravart M, Pignard G. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management*, 2006, 229(1/3): 98-110.
- [20] 罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型[D]. 北京: 中国科学院研究生院(国家计划委员会自然资源综合考察委员会), 1996.
- [21] 周国逸, 尹光彩, 唐旭利. 中国森林生态系统碳储量——生物量方程. 北京: 科学出版社, 龙门书局, 2018.
- [22] 谢宗强, 王杨, 唐志尧, 徐文婷. 中国常见灌木生物量模型手册. 北京: 科学出版社, 龙门书局, 2018.
- [23] Fan J W, Zhong H P, Harris W, Yu G R, Wang S Q, Hu Z M, Yue Y Z. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground biomass. *Climatic Change*, 2008, 86(3): 375-396.

- [24] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, Tan K, Tao S. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(2): GB2002.
- [25] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, Guo D L, Mohammad A. Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(2): 268-277.
- [26] 马安娜, 于贵瑞, 何念鹏, 王秋风, 彭舜磊. 中国草地植被地上和地下生物量的关系分析. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 769-776.
- [27] Cook R L, Binkley D, Mendes J C T, Stape J L. Soil carbon stocks and forest biomass following conversion of pasture to broadleaf and conifer plantations in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 2014, 324: 37-45.
- [28] Zhao H, Xu L, Wang Q F, Tian J, Tang X L, Tang Z Y, Xie Z Q, He N P, Yu G R. Spatial patterns and environmental factors influencing leaf carbon content in the forests and shrublands of China. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(6): 791-801.
- [29] 赵航. 中国森林植被碳氮含量及碳氮比值的变异性与影响因素研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [30] Hou J H, Tian J X, Xu L, Zhang Z H, Chen Z, He N P. Selective harvesting at rational intervals promotes carbon sequestration in temperate coniferous and broad-leaved mixed forests in China. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32(3): 1025-1033.
- [31] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [32] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 2015, 528(7580): 60-68.
- [33] 王绍强, 刘纪远, 于贵瑞. 中国陆地土壤有机碳蓄积量估算误差分析. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 797-802.
- [34] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [35] Arrouays D, Pelissier P. Modeling carbon storage profiles in temperate forest humic loamy soils of France. *Soil Science*, 1994, 157(3): 185-192.
- [36] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [37] Meersmans J, De Ridder F, Canters F, De Baets S, Van Molle M. A multiple regression approach to assess the spatial distribution of Soil Organic Carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). *Geoderma*, 2008, 143(1/2): 1-13.
- [38] Álvarez C R, Costantini A O, Bono A, Taboada M Á, Boem F H G, Fernández P L, Prystupa P. Distribution and vertical stratification of carbon and nitrogen in soil under different managements in the pampean region of Argentina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2011, 35(6): 1985-1994.
- [39] van der Wal A, de Boer W, Lubbers I M, van Veen J A. Concentration and vertical distribution of total soil phosphorus in relation to time of abandonment of arable fields. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 79(1): 73-79.
- [40] Chai H, Yu G R, He N P, Wen D, Li J, Fang J P. Vertical distribution of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in typical Chinese terrestrial ecosystems. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(5): 549-560.
- [41] Reichert J M, Suzuki L E A S, Reinert D J, Horn R, Håkansson I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 2009, 102(2): 242-254.
- [42] Sequeira C H, Wills S A, Seybold C A, West L T. Predicting soil bulk density for incomplete databases. *Geoderma*, 2014, 213: 64-73.
- [43] Don A, Schumacher J, Scherer-Lorenzen M, Scholten T, Schulze E D. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites—Implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma*, 2007, 141(3/4): 272-282.
- [44] Holmes K W, Wherrett A, Keating A, Murphy D V. Meeting bulk density sampling requirements efficiently to estimate soil carbon stocks. *Soil Research*, 2011, 49(8): 680-695.
- [45] Brahim N, Bernoux M, Gallali T. Pedotransfer functions to estimate soil bulk density for Northern Africa: tunisia case. *Journal of Arid Environments*, 2012, 81: 77-83.
- [46] 柴华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义. *生态学报*, 2016, 36(13): 3903-3910.
- [47] Xu L, He N P, Yu G R. Methods of evaluating soil bulk density: impact on estimating large scale soil organic carbon storage. *CATENA*, 2016, 144: 94-101.
- [48] 邱亚群, 甘国娟, 刘伟, 刘妍, 侯洪波, 李裕元, 彭佩钦. 湖南典型土壤磷素剖面分布特征及其流失风险. *中国农学通报*, 2012, 28(8): 223-227.
- [49] 门明新, 彭正萍, 许峰, 宇振荣. 河北省土壤容重的传递函数研究. *土壤通报*, 2008, 39(1): 33-37.
- [50] 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.
- [51] 乔宇鑫, 钟华平, 朱华忠, 邵小明, 李愈哲. 中国北方温带草原区土壤容重分层数据重建与空间格局分析. *草业学报*, 2021, 30(1): 1-11.
- [52] 韩光中, 王德彩, 谢贤健. 中国主要土壤类型的土壤容重传递函数研究. *土壤学报*, 2016, 53(1): 93-102.