

刘学东,陈 林,李学斌,等. 草地生态系统土壤有机碳储量的估算方法综述[J]. 江苏农业科学,2016,44(8):10-16.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.08.003

草地生态系统土壤有机碳储量的估算方法综述

刘学东,陈 林,李学斌,樊瑞霞

(宁夏大学西北土地退化与生态系统恢复与重建教育部重点实验室,宁夏银川 750021)

摘要:近年来,碳储量问题逐渐成为全球变暖与生态环境研究领域的前沿与热点问题。草地生态系统作为陆地生态系统的主体,对陆地生态系统的碳储量和碳收支平衡发挥着极为重要的作用,草地土壤有机碳储量的估算成为生态领域的重要研究内容之一。综述了区域尺度、国家尺度以及全球的碳储量,介绍了我国草地生态系统植被和土壤有机碳储量的研究现状;对草地土壤有机碳的估算方法以及各自的优缺点和适用范围进行了比较和详述;通过对不同研究尺度上已有的结论进行对比和分析,为全面精确估算我国草地生态系统土壤有机碳储量提供可能的途径和有益参考。

关键词:草地;土壤有机碳;有机碳储量;估算方法

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)08-0010-06

草原覆盖地球土地表面的 1/4 左右,对气候和环境的变化有非常灵敏的响应,草原生态系统的碳循环是维持陆地生态系统稳定平衡的基本机制之一,其碳循环具有独特的生物地球化学循环过程和作用,是全球碳循环非常重要的组成部分。自工业革命以来,人类活动对生物圈的影响已从区域范围扩展到全球尺度,特别是大气中 CO_2 和 CH_4 等气体浓度逐年增加造成全球温室效应和气候变化已引起人们的广泛关注^[1]。草原作为世界上最广泛分布的植被类型之一,是目前人类活动影响最严重的区域,对全球气候变化有重大影响,草地生态系统参与了包括陆地生态系统在内的全球碳循环过程。早期草地生态系统碳循环过程研究主要集中在草地群落土壤呼吸和碳平衡方面^[2-3]。现阶段研究者尝试建立估算模型来量化探求碳素在大气与土壤的动态变化,为此学者们对于不同尺度地区的草地碳储量进行了估算,由于估算方法的差异(假设条件、各类参数取值、测定的土壤深度、调查的土壤类型、植被类型全面与否等)以及各种不确定因素的影响,导致估算值存在很大差异。目前,对草地土壤的碳储存和碳释放能力的不同认识,是草地生态系统 CO_2 源与汇能力之争的核心^[4]。

草地碳素行为活动很活跃,在面对气候变化的同时,草地生态系统具有很强的固碳能力,而且碳成本相对低廉,固碳形式相对稳定,这些潜在碳汇对于全球碳循环发挥着积极作用^[5]。因此,对草地生态系统碳储量及其影响因素研究是认识全球碳循环以及碳收支平衡的关键之一^[6],估算其碳储存量对于系统分析草地植被在全球气候变化中的重要作用、研究陆地碳循环机制和全球碳收支平衡等均具有重要意义,同

时也有助于探求如何科学地利用和保护有限的草地资源,减缓草地土壤向大气中碳素的输出、增加土壤碳固存能力、提高草地土壤质量,对退化草地的生态恢复、植被恢复以及缓解大气温室效应都具有重要意义^[7]。

1 草地生态系统碳储量估算研究现状

1.1 全球及国家尺度碳储量估算

随着联合国气候框架公约的建立,各国科学家纷纷响应并致力于国际研究前沿,加强了在全球及国家尺度上碳素动态的研究。全球及国家尺度碳循环和碳收支平衡已成为全球气候变化研究和宏观生态学研究的核心内容之一。揭示全球或区域尺度碳源/汇的大小、分布及其变化规律作为热点科学问题,已引起国际社会广泛关注,研究者基于大量的数据支持,运用先进的技术手段期望碳储量估算及其空间分布分析更为精确^[8]。

20 世纪 70—90 年代,国外组织机构和学者采用不同方法对全球范围草地生态系统碳储量进行了估算。根据 WBGU(德国全球变化咨询委员会)的估算,全球草地生态系统的碳储量约为 1 200 Pg(1 Pg = 10^{15} g),其中,草地植被层碳储量为 110 Pg,土壤碳储量为 1 100 Pg。Potter 等利用碳密度方法对全球草地生态系统植被碳储量进行估算后的结果为 50.4 Pg^[9],Olson 等利用碳密度方法对全球草地生态系统植被碳储量进行估算后的结果为 50.4 Pg^[10],而 Prentice 等利用同样的方法估算出的全球草地生态系统总碳储量约为 279 Pg,其中,植被碳储量为 27.9 Pg,土壤碳储量 250.5 Pg^[11]。Batjes 等对全球范围内土壤有机碳储量进行估算,结果为 1 395 ~ 2 949 Pg^[12]。Post 等采用常规调查法,计算得到全球不同草地中土壤碳储量为 435.7 Pg,并研究了全球 41.6 亿 hm^2 的草地碳储量为 279 Pg^[13]。Schlesinger 曾对世界主要生态系统中的土壤有机碳进行了统计,结果显示,热带草地土壤有机碳的平均含量(以 C 计,下同)为 4 200 g/m^2 ,温带草地为 18 900 g/m^2 ^[14],由于温带草地与热带草地相比,其温度高,因而植物的生长特征、凋落物的腐化速度以及土壤有机碳的分解速率存在明显差异,导致热带草

收稿日期:2015-07-17

基金项目:国家自然科学基金(编号:31260581);教育部科学技术研究项目(编号:413060)。

作者简介:刘学东(1990—),男,宁夏银川人,硕士研究生,主要从事植物生态学研究。E-mail:1697024030@qq.com。

通信作者:李学斌,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事草地生态学、土壤碳循环方面的研究。E-mail:lixuebin@nxu.edu.cn。

原土壤有机碳积累低于温带草原。

国外学者对全球草地生态系统碳储量进行大量估算的同时对西方主要发达国家草地生态系统的碳源、碳汇也进行了较为系统的研究分析。Parton 等曾对全世界 12 个典型草原区土壤表层 0~20 cm 中有机碳含量进行了分析,结果显示,土壤表层有机碳的含量在 2 000~10 000 g/m² 之间,其中热带草地土壤碳平均含量为 3 000 g/m²,温带草地为 5 700 g/m²^[15]。相对于西方发达国家,我国对草地生态系统研究起步稍晚,自 20 世纪 90 年代后期,很多国内外学者开始开展我国国家尺度草地生物量估算的研究^[16],研究多集中在估算某些植被和土壤类型的区域碳储量,缺乏对生态系统层面的整体评估。近年来,国内研究者对我国草地碳储量开展了大量研究,积累了很多基础数据,为评估草地生态系统土壤碳储量奠定了重要基础。然而,不同研究获得的估算值存在很大差异,比较这些估算结果发现,中国草地植被碳储量的估算值范围在 0.56~4.67 Pg 之间,最大值与最小值相差近 8 倍;生物量碳密度的范围为 215.8~1 148.2 g/m²,差异也是十分显著^[17]。马文红等基于 2000—2005 年实际观测数据和遥感影像估算的中国北方草地生物量碳库仅为 0.6 Pg^[18],研究值与 Ni 等的研究结果很接近。在未来研究中对于大尺度区域的研究应当建立一套系统完善的估算方法,能够适用于各种土壤类型和植被类型,也更准确地判断和评估草地生态系统平衡及其储量。

1.2 区域尺度碳储量估算

不同气候类型条件和不同区域环境下的草地生态系统碳储量之间有很大的差异^[19]。热带草原净初级生产力和碳蓄积能力要大于温带草原,在温带草原区,欧洲草地固碳能力比中国草地强。内蒙古草原是我国北方温带草原的主体,其生态系统碳储量在我国草地碳平衡中占有重要位置^[20]。马文红等对内蒙古温带草地植被碳储量进行大范围的实测研究,基于 846 万 hm² 草地面积,估算出总植被碳储量为 (226.0 ± 13.27) Tg,其中不同植被类型草地生物量碳库差异较大,由于典型草原分布面积最大,所以其储存的碳大约为 113.25 Tg^[18];朴世龙等分别用遥感数据和草地普查资料,估算内蒙古草地生物量碳库分别为 274.0 Tg 和 188.5 Tg^[20~21]。傅野思等根据内蒙古自治区土壤资料中 461 个土壤剖面数据估算的内蒙古土壤有机碳储量为 10.79 Pg^[22]。Yang 等选用内蒙古草地面积值为 4 410 万 hm²,然后基于 2001—2005 年实测数据,估算出 0~100 cm 土壤有机碳储量为 2.9 Pg^[23]。由于不同学者研究草地的范围、面积以及数据来源和地上、地下生物量比值的不同等因素导致研究结果存在较大的差异性。

受降水量的时空变异制约,我国典型草原固碳水平最低,我国草甸草原土壤环境水分条件相对优越,肥力较高,因而地上、地下生物量碳密度较高,但因分布面积小,其生物量碳库仅占内蒙古温带草地总生物量碳库的 22%^[24];降水是荒漠草原的限制性因子,由于降水量少、气候干旱、土壤养分贫瘠、植物生长受限,从而致使荒漠草原植被生物量碳库最小,向土壤中输入有机碳的量也相应最小^[25]。与草甸草原相比,典型草原地处我国北方半干旱向干旱的过渡区域,土壤水分是植物生长的限制性因子,典型草原的土壤碳储量比湿润地区小;而

干旱区分布是荒漠草原的土壤含水量更少,造成植被初级生产力与地上生物量较低,进而向土壤中输送的有机碳也较少;通过对比典型草原和荒漠草原 0~20 cm 深度土壤有机碳的含量,结果显示,荒漠草原土壤含碳量比典型草原少^[26]。高寒草甸土壤 0~60 cm 土层中有机碳平均贮存量 2.317×10^5 kg/hm²^[27],由于该地区植被地下根系生物量较高、海拔较高、土壤温度较低、土壤湿度大、土壤微生物酶活性低以及土壤有机碳分解缓慢等因素的综合作用,使得高寒草甸土壤相应深度的热带森林土壤、灌丛土壤和草地土壤的有机碳贮存量高 1~5 倍^[28]。田玉强等利用第 2 次土壤普查数据和 1:100 万土壤数据库估算了青藏高原的平均土壤有机碳密度约为 7.2 kg/m²,其土壤碳储量为 18.37 Pg^[29]。刘伟等研究黄土高原 4 种主要的草地类型,4 种草平均土壤有机碳密度从高到低顺序依次为高寒草甸草原 18.30 kg/m²、典型草原 4.98 kg/m²、森林草原 4.69 kg/m²、荒漠草原 1.50 kg/m²,黄土高原天然草地 1 m 深度土壤有机碳储量为 1.06 Pg^[30]。王艳芳等通过对锡林郭勒草原研究,得到同样的结果,该地区土壤有机碳的储量草甸草原 > 典型草原 > 荒漠草原,且每一个草地类型土壤有机碳含量沿土壤垂直剖面呈逐渐降低的趋势^[31]。杨婷婷等通过对 2008 年全国草原检测数据以及遥感数据的分析,对 2008 年中国草地的碳储量进行了估算,结果显示,2008 年中国草地总有机碳为 35.96 Pg,其中地上生物量有机碳为 0.161 3 Pg,地下生物量碳为 0.739 5 Pg,地下根系储存的碳是地上碳储量的 5 倍左右,中国草地土壤有机碳为 35.06 Pg^[32]。

综上所述,研究者从不同层面上揭示了我国草地生态系统碳储量的分布状况,其中包括对区域草地土壤碳储量的估算,对土壤碳储量的分布特征以及影响因素的探讨,结果表明,我国草地存在巨大的空间异质性。全球尺度、国家尺度及区域尺度草地生态系统碳储量估算存在很大的不确定性,影响因素主要有草地概念的界定、草地面积、研究方法、数据变异性、试验年限不同以及方法等不一致^[33,21]。因此,在开展多维度研究基础上,建立一套统一、完善的研究方法和测试标准,将对于科学系统估算生态系统碳储量,并在学术界达成一致共识具有重要影响意义。

2 草地生态系统有机碳储量估算方法

草地生态系统的碳储量估算包括对植被的碳储量和土壤碳储量的估算。

2.1 草地植被碳储量估算

国外对于土壤碳储量相关研究起步较早,我国草地生态系统碳储量研究发展也有 30 年以上,经历了 2 次土壤普查,随着 3S 技术的迅速发展,我国学者将其应用于碳储量的研究和估算^[34],从区域和国家等不同尺度对草地生物量及碳储量进行了估算。

目前,国内外计算草地生态系统植物碳储量通常利用生物量乘以植物碳含量(国际通用指数为 0.45)的换算方法,而生物量主要有 2 种估算方法:(1)利用全球植被类型平均生物量和对应的面积进行估算^[14];(2)利用实测数据建立生物量遥感估测模型^[20],或利用草地普查资料数据直接估算。方精云等通过对生物量碳库的大量研究分析表明,中国草地生

物量碳密度平均值为 300.2 g/m^2 , 范围在 $215.8 \sim 348.1 \text{ g/m}^2$ 之间^[21], 采用目前使用最广泛的草地面积数据, 估算中国草地植被碳储量为 1.0 Pg 。Ni 对于中国草地生态系统碳储量也做了大量的工作, 研究结果表明中国草地生态系统碳储量为 44.09 Pg ^[35], 与世界草地碳储存与分布特征基本一致, 土壤中的碳储量是植被碳储量的 13.5 倍。

早期估算区域生物量的研究多使用生物量密度和面积的方法, 现阶段“3S”技术被大量应用于植被生物量的估算, 由于遥感图像光谱信息具有良好的时效性和综合性特点, 并且与草地生物量之间存在较好的相关性。因此, 利用遥感信息估算较大时空尺度的生物量比传统方法更突显优越性。一般区域尺度植被生物量估测的模型可分为 2 类: (1) 统计模型。该模型多为描述性的, 不涉及过程机理问题, 较易实现, 利用草地清查资料数据直接估算生物量的关键是参数间的统计分析^[21]。(2) 综合模型。该模型是在植被、气象和遥感等信息的基础上, 利用实测调查资料建立生物量与遥感参数之间的回归模型^[20]。但是无论采用哪种方法, 实测生物量数据的缺乏, 尤其是地下生物量数据资料, 是草地生物量以及碳储量估算存在较大差异的直接原因。目前, 在国家或全球尺度上利用平均碳密度和地上、地下比例推算生物量仍然是较好的方法^[18], 但在区域水平上可能产生较大误差, 因此大量的实地观测数据有助于准确评价草地生态系统碳储量及其在全球碳循环中的作用。

2.2 草地生态系统土壤碳储量的估算

土壤是陆地生态系统最大的碳库, 其碳储量占整个生态系统碳库的 $2/3$, 约为植物碳库的 3 倍、大气碳库的 2 倍, 是全球碳循环非常重要的组成部分^[35]。草地生态系统地上碳库不明显, 总碳储量的 90% 储存于土壤中, 我国土壤碳库是地上碳库的 13.5 倍, 草地土壤碳库的微小变化均会对大气 CO_2 浓度产生巨大影响^[36]。由于土壤碳储量在植被-土壤系统中的含量比例较高, 故草地生态系统的碳储量研究主要考虑土壤的碳储量^[37], 土壤碳储量的评估对于保证草地生态系统碳储量评估的准确性至关重要。近年来, 国内外许多学者对土壤碳储量估算进行了大量研究; 土壤物理空间结构是一个不均匀的三维结构体, 在水平和垂直方向上均呈现复杂的镶嵌性和不均匀性, 加之研究区植被、气候和生物与土壤之间相互作用, 使得土壤有机碳密度存在很大的空间异质性, 导致土壤碳库的估算一定程度上存在差异^[38]。由于研究者对草地土壤有机碳储量的估算方法(各类参数取值、土壤测定的深度、土壤类型、气候类型以及植被类型)、研究侧重点、研究尺度等不同造成了实际估算中的各种不确定性和估算值之间的差异。

当前土壤有机碳储量的估算方法有多种, 研究学者依据不同的研究角度、研究区规模尺度对估算方法有不同的分类, 主要有直接估算法、间接估算法, 直接估算法又分为 2 种, 即基于土壤类型的估算法和基于生态系统类型的估算法。基于土壤类型的估算法是依据土壤类型的空间分布及各土壤类型的平均碳储量来进行估算^[39], 而基于生态系统类型的估算法则是依据生命地带的分布来进行估算。

基于土壤自身的物理结构特点, 又可将土壤有机碳估算方法分为 2 类: (1) 土壤剖面上的估算, 根据其数据来源的数

量性和精确性, 可分为分层中间点法、主因子法和有限数据推测法; (2) 在水平空间上的估算, 分为土壤类型法、生命地带和生态系统类型法、公式模型法、相关关系统计法、GIS 估算等方法^[40], 各种估算方法的原理、适用范围以及优缺点见表 1^[41]。

2.2.1 土壤剖面估算法 土壤剖面有机碳储量的估算方法均是基于土壤土层有机碳储量或有机碳密度的实测和计算, 不同之处在于不同估算方法估算过程中所考虑影响因素的差异。

2.2.1.1 分层中间点计算法 先以土层中间层的土壤有机质、土壤厚度、土壤容重对土层有机碳含量进行计算, 再依据土壤剖面的各个土层计算结果累计汇总得到总土壤有机碳储量^[41]。这种估算法虽然能够真实地估算出研究区土壤有机碳储量, 但是需要大量的实测土壤基础数据作为支持, 人力、物力投入大, 因此很难在大尺度区域展开研究和应用。

2.2.1.2 主因子计算法 先通过计算土壤各个土层有机碳密度, 然后再对各土层有机碳密度累计求和, 得到各单元内土壤有机碳密度^[12]。该法仅需考虑影响土壤有机碳的主要因素而忽略其他影响因素的干扰, 能简单方便地得到较为准确的数据, 但也因此造成估算精确度的降低, 主因子计算法是目前最长采用的一种估算方法。

2.2.2 水平空间估算法 在估算区域土壤有机碳库时, 一般常用的传统估算方法是土壤类型法、植被类型和生命地带法^[42]。以上估算方法均是基于精确计算土壤剖面有机碳密度, 再加权平均得到土壤亚类、植被亚类、生态类型亚类的有机碳密度, 然后根据亚类的分布面积, 计算出亚类的土壤有机碳储量, 最后累计处理计算得到区域土壤有机碳储量^[43]。

2.2.2.1 土壤类型法 土壤类型法是基于土壤剖面的实测数据, 以土壤类型作为分类单元然后结合区域或国家尺度土壤类型图来估算土壤有机碳储量, 并且根据土壤类型图可以获取掌握草地土壤有机碳密度的空间分布规律和分布格局。由于理化性质相同的土壤在土壤碳蓄积的调控因素上具有相似性, 因此该估算方法较易识别土壤有机碳的空间格局, 可以减少估算的不确定性和复杂性, 是目前估算土壤有机碳储量研究较为常用的方法^[7]。在具备较详细的各类土壤理化性质数据的前提条件下, 利用土壤类型法估算统计的结果较为准确可靠。由于土壤类型法需要基于大量土壤剖面的实测数据及土壤类型划分标准作为估算的基础数据支撑, 而且在测量中实测数据的缺乏和对植被、土地利用方式及人类活动等影响因素的忽略, 在一定程度上增加了估算结果的差异性与不确定性, 影响了土壤有机碳储量估算的精确性。土壤在发生过程中引起的土壤空间格局分布的变异性和土壤剖面分布的非均匀性导致此种方法的局限性^[44]。

2.2.2.2 生命地带法和生态系统类型法 分别以生命地带或生态系统类型作为分类单元来计算土壤有机碳储量。生命地带法是利用植被、生命地带或生态系统类型的土壤有机碳密度与相对应类型的分布面积来计算土壤碳储量, 该方法便于了解不同生命地带类型(包含多种土壤类型)的土壤有机碳储量。该土壤类型分布范围广泛, 更能反映研究区域内气候因素、植被分布和土地利用方式对土壤有机碳储量的影响^[45]。生命地带法适用于较小尺度的地带区域研究^[41],

表 1 不同土壤有机碳储量研究方法对比

类型	研究方法	估算原理	优点或适用范围	不足
土壤剖面估算法	分层中间点计算法	以土层中间点土壤剖面数据进行计算,再汇总各土层计算结果,得到总土壤有机碳储量	比较真实地反映出土壤有机碳储量	需要大量实测土壤数据作为支持,限制了在大范围区域的应用
	主因子计算法	通过计算土壤土层有机碳密度,然后再对各土层求和,得到各单元内土壤有机碳密度	仅考虑影响土壤有机碳的主要因素,是目前采用最多的方法。把整个面积单元作为计算的对象	没有直接考虑土壤单个剖面的有机碳储量
	有限数据推算法	通过土壤有机碳含量与其他因素之间关系,用统计方法来计算	数据极少的区域	需要大量时间完成估算,所以降低了统计所造成的估算误差,目前应用较少
水平空间估算法	土壤类型法	通过土壤剖面数据,再根据分类层次聚合	适用于区域国家或更大尺度面积的土壤有机碳储量的估算	需要准确的土壤分类数据以及土壤容重等数据,获得较难
	生命地带及生态系统类型法	按照生命地带及生态系统类型土壤有机碳密度与分布面积计算	较小的地带区域和生态系统内,具有较大的应用价值	生态类型与土壤面积难以精确统计,与土壤类型之间也相互对应不足
	相关关系法	利用环境,气候和土壤属性的相关关系,建立数学统计关系	可以分析土壤有机质与形成影响因素之间的相关关系	不能解释有机碳储量积累或释放机理,形成与影响因素,应用范围小
新估算方法	公式模型法	通过各种土壤碳循环模型估算	具有较好的系统性和整体性	所需数据必须来自实测值,很难将所有的因子包括在内,存在较大的误差
	GIS 估算法	使用 GIS 软件将土壤图数字化,建立属性数据库来实现	模拟大尺度上的土壤碳储量	土壤有机质质量分数,土层厚度和容重等数据获取较难

随着研究区域尺度的扩大,生态类型与影响因素复杂多样,难以精确统计,加之近年来土地利用方式的多变性与不确定性因素造成的误差相对较大,制约了此法的广泛推广与应用,导致该估算方法在更多细节上存在局限性^[46],无法对局域尺度上土壤母质变化和土壤层厚度信息做出解释。虽然生命地带内土壤有机碳存在大量空间异质性和不确定性导致该方法在空间地理数据研究中的应用和聚合方法的使用受到了限制,但是在缺乏土壤剖面资料的情况下推算所得结果仍具有一定的研究意义^[47],被其他研究广泛引用并作为对照。

2.2.2.3 相关关系统计法 是 1 种相对比较简单土壤有机碳储量的估算方法,主要是通过对土壤剖面有机碳含量的实测数据的统计分析,然后建立与研究区域的各种环境因子、气候因子和土壤属性之间的数学统计相关关系^[48],以达到利用有限数据来估算较大区域尺度土壤有机碳储量的目的。Sims 等统计分析了美国蒙大拿州 130 个土壤 A 层数据,结果表明,土壤黏粒含量与土壤含碳量之间没有显著的相关关系,然而海拔高度和平均年降水量与土壤有机碳表现出很好的相关关系,可以作为指标来预测有机碳含量^[49]。McDaniel 等研究表明,在中温带地区土壤质地和碳含量有着明显的相关关系,在自然草地采样点,有机碳含量与海拔高度之间的相关关系显著,但在人工耕地则不存在相关性^[50]。Burke 等在美国中部平原研究中发现高降水、高黏土含量和低气温与有机碳含量有密切联系^[51]。因而建立土壤有机碳含量与降水、温度、土壤厚度、地形之间的相关关系是普遍采用的一种方式。由于相关系数统计法无法解释土壤有机碳截留、储存或释放的过程、机理、形成与影响因素以及对相应参数进行调整,加之各区域土壤有机碳的主控因子不同,从而导致相关性表现

不一,因此只有对相关测量数据在实际情况下进行验证,才能应用到该研究区域上^[43]。

2.2.3 新估算方法 传统方法的估算值通常存在较大差异,因此寻求新方法以降低土壤有机碳储量估算的不确定性显得尤为迫切。公式模型法的广泛应用伴随着 3S 技术的迅速发展为草地土壤有机碳的估算开辟新的途径。

2.2.3.1 公式模型法 公式模型法定量研究有机碳储量及评估土壤固碳潜力的一种重要途径,它是在掌握土壤碳循环过程与机理的基础上,通过建立土壤有机碳的表征、评估或预测模型,然后依据大量的实测数据,进一步估算研究区域草地土壤有机碳储量,同时也可以以环境因子、气候因子、土壤基本属性等基础参数为影响因子建立土壤有机碳估算数学模型,来预测和反推在不同影响因子作用下的土壤碳储量动态变化趋势,探讨土壤有机碳蓄积和固定潜力^[52]。模型法提出有效排除了静态模型估算中的不确定因素对估算精度的影响,充分应用现有剖面数据,然后将其推算到相似的土壤和生态研究区域,降低了估算过程中由于研究区域尺度转换而造成的误差。模型法估算土壤碳储量,可以综合考虑到输入土壤碳的数量、质量以及影响土壤碳分解速率产生的各种因子^[53]。在描述区域化变异中,插值法是利用区域化变量对未采样点取值进行最优估计的一种常用方法。常用的插值方法为克里格法(泛克里格法、对数克里格法、简单克里格法等)^[41],根据样本分布特征和研究区土壤类型选取不同克里格法。通常模型采用了较复杂的研究模式,建立数学模型的参数化、初始化等均需要大量连续观测的实测数据,难以综合考虑所有参数和环境影响因子^[43]。模型中存在许多自我设定的参数和假设条件,如何能缩小假设条件与实际情况之间

的差距是提高土壤有机碳估算精度的重要举措。模型法的完善关键在于研究数据的积累和试验方法的改进,随着大量研究数据的积累,研究技术和手段的提高以及土壤碳动力学研究的迅速发展,不断完善了土壤碳储量模型^[54]。

2.2.3.2 GIS 估算法 是一种估算土壤碳储量非常高效的新方法,模型估算法与 GIS 估算方法相结合对于解决土壤碳储量研究范围从样点尺度推算到大范围的区域尺度所带来的尺度扩展问题很有前景,GIS 估算方法也便于和其他技术手段相结合使用。遥感作为一门具有高时空分辨率的现代技术,不仅可以提供土壤表面状况及其性质的空间信息,而且为土壤普查、土壤有机碳的动态变化及碳储量估算基础数据的获取提供了强有力的技术途径^[55]。基于遥感影像估算土壤碳储量的方法通常有遥感影像直接估算方法和植被指数估算方法^[56]。但现有的遥感数据源无法直接探测土壤有机碳储量的空间分布,估算时必须依靠相应的替代指标,利用有限的遥感数据很难提高土壤有机碳估算的精度^[57]。

综合考虑各种方法在估算土壤有机碳储量空间分布方面所具有的优缺点,目前,诸多研究中均将土壤有机碳的直接估算方法与基于遥感的碳循环过程模型的间接估算方法结合起来,充分利用现有实测数据源,估算了较高分辨率下的中国典型土壤的碳储量的空间分布^[58]。与传统方法相比,GIS 技术估算土壤碳储量较为精确,但因 GIS 估算对计算机系统的高要求、监测数据的连续性、地图的高精度以及模型参数等因素而受到制约^[54]。如何优化模型设计参数,提高监测数据的连续相关性将成为拓宽 GIS 技术的有效途径。

3 存在问题及研究展望

3.1 存在问题

目前,我国草地生态系统土壤碳储存过程以及相关研究还处于初级阶段,前期科研力量不足,国家针对性政策出台较晚。通过对国内外学者研究结果的分析发现,估算方法和考虑因素等不同致使土壤碳储量的具体含量存在很大的不确定性,我国草地生态系统碳储量研究开展中尚存在以下问题。

3.1.1 研究尺度的问题 国内外对土壤碳库的研究多集中在宏观尺度上,关于小区域尺度的研究较少,草地生态系统有机碳储量研究主要集中在 0~20 cm 的表层土壤中,而对草地土壤更深处有机碳储量的研究相对缺乏。而且研究多集中在植物的生长期,缺乏整体的长期定位连续观测,增加了估算的不确定性。同时由于研究者实际测量面积和估算研究区尺度不同,因此在估算工作中常使用不同空间尺度间的转换,也降低了估算的精确性^[59]。目前,研究学者常采用模型法和空间分析理论相结合,将实测土壤剖面数据外推到相似的土壤区域,从而解决了估算的尺度转换问题,在一定程度上提高了估算精度,由于研究区土壤种类和质地的不同,因而对于大尺度研究区域由已知区域推算其他土类时,需要首先分析和探讨土壤有机碳的分布特征以及土类之间土壤有机碳的分布规律^[60]。

3.1.2 估算方法的问题 世界各国土壤碳储量研究一般按植被类型、土壤类型、生命带或模型法来作统计,不同研究者所用统计方法本质上并无差别,通常都是用各种类型的平均碳密度乘以相应的土地面积并累加获得土壤碳库储量。实际

上,即便在同一植被类型、土壤类型或生命带内,土壤碳密度也可能存在较大差异,用平均碳密度值代替实际值过于简单,土壤碳作为土壤的有机组成部分,其含量在空间上是连续渐变的,理论上通过制作土壤碳含量和容重等的空间分布等值线图,利用地理信息系统强大的分析功能可以突破类型界限,获得土壤碳库储量。

3.1.3 不能综合考虑影响因素造成的估算误差 在估算草地土壤有机碳储量时,研究者们只着眼于单一影响因素而不能全面考虑各因素间的相互作用,土壤理化性质、地下植被生物量以及气候条件存在很大的空间差异,它们对土壤有机碳储量的综合因素很难确定,直接降低了土壤有机碳的估算精度,导致估算的不确定性。

3.2 研究展望

鉴于土壤有机碳储量全球变化研究中的重要意义,以及当前在定量化研究土壤有机碳储量过程中存在的各种不确定性,笔者建议未来较长时间内关于草地生态系统土壤有机碳储量应加强开展以下几方面研究。(1)由于草地土壤有机碳库蓄积量的计算是非常困难和复杂,具有很大的不确定性,而土壤分类、土壤观测数据收集、土壤采样、计算方法是人为产生土壤有机碳蓄积量估算误差的重要来源,因此,未来研究应当进一步加强和完善土壤剖面实测数据,完善我国草地土壤分类标准和划分依据。这将对正确认识和评估我国草地在全球乃至中国土壤有机碳的地位有极其重要的意义。(2)在草地生态系统中,加强对植物、枯落物和土壤各个部分的时间及空间动态变化机理、过程的探求,对碳元素各个贮存库间的定量迁移和转化关系还需要系统综合地研究。碳素的动态迁移和转化是个复杂的化学生物变化过程,对草地碳源汇的物理、化学和生物过程的影响因素以及草地生态系统的碳循环机制尚需进一步的深入研究。(3)估算土壤碳储量需要大量连续、可靠、完整的土壤剖面实测数据以及土壤理化性质等的基础数据,而基础数据的准确性直接影响土壤碳储量的估算精度,所以提高基础数据的精确度是准确估算碳储量的关键,采用更科学、系统、准确的生物化学计量分析方法以提高基础数据的准确度,进而提高土壤有机碳的估算精度。(4)模型方法是草地土壤碳储量估算的重要手段,但是要提高模型的估算精度,则需要综合考虑草地气候、土壤、植被和人类活动等因素的共同的、注重碳循环的机理过程,研究草地生态系统土壤碳在水平和垂直方向的变化规律,完善模型和估算方法,提高模型预测的准确性和可行性,对建立更为精确的估算模型有着极为重要的作用。

参考文献:

- [1] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect[J]. Science, 1990, 248(4960): 1217-1219.
- [2] Kucera C L, Kirkham D R. Soil respiration studies in tall-grass prairie in Missouri[J]. Ecology, 1971, 52(5): 912-915.
- [3] Behera N, Pati D P. Carbon budget of a protected tropical grassland with reference to primary production and total soil respiration[J]. Rev Ecol Biol Sol, 1986(23): 167-181.
- [4] Paustian K. Sustainable management of soil organic matter[M]. London: CAB International Press, 2001: 43-53.
- [5] 刘加文. 应对全球气候变化决不能忽视草原的重大作用[J]. 中

- 国牧业通讯,2010,18(1):12-14.
- [6]穆少杰,周可新,陈奕兆,等. 草地生态系统碳循环及其影响因素研究进展[J]. 草地学报,2014,22(3):439-447.
- [7]刘留辉,邢世和,高承芳. 土壤碳储量研究方法及其影响因素[J]. 武夷科学,2007,23(1):219-226.
- [8]解宪丽,孙波,潘贤章. 红壤丘陵区土壤有机碳储量模拟[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(9):146-152.
- [9]Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
- [10]Olsen J S, Watts J A, Allison L J. Carbon in live vegetation of major world ecosystems[M]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1983: 50-51.
- [11]Prentice I C, Heimann M, Sitch S. The carbon balance of the terrestrial biosphere: ecosystem models and atmospheric observations[J]. Ecological Applications, 2000, 10(6): 1553-1573.
- [12]Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. European Journal of Soils Science, 2010, 47: 151-163.
- [13]Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. Nature, 1982, 298: 156-159.
- [14]Sehlesinger W C, Lai R E A. Soils and global change[M]. Boca Raton: CRC Press, 1995: 9-25.
- [15]Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S. Observation and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide[J]. Global Biogeochem Cycles, 1993, 7: 785-809.
- [16]Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change[J]. Climatic Change, 2001, 49(3): 339-358.
- [17]方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [18]马文红, 韩梅, 林鑫, 等. 内蒙古温带草地植被的碳储量[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3): 192-195.
- [19]李凌浩, 陈佐忠. 草地生态系统碳循环及其对全球变化的响应 I. 碳循环的分室模型、碳输入与贮量[J]. 植物学通报, 1998, 2(2): 14.
- [20]朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491-498.
- [21]方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 566-576.
- [22]傅野思, 夏学齐, 杨忠芳, 等. 内蒙古自治区土壤有机碳库储量及分布特征[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 886-895.
- [23]Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, et al. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands[J]. Global Change Biology, 2008, 14(7): 1592-1599.
- [24]章力建, 刘帅. 保护草原增强草原碳汇功能[J]. 中国草地学报, 2010, 32(2): 1-5.
- [25]金峰, 杨浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J]. 土壤, 2000, 32(1): 11-17.
- [26]李晓兵, 陈云浩, 张云霞, 等. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响[J]. 地球科学进展, 2002, 17(2): 254-261.
- [27]陶贞, 沈承德, 高全洲, 等. 高寒草甸土壤有机碳储量和 CO₂ 通量[J]. 中国科学: 生命科学, 2007, 37(4): 553-563.
- [28]樊江文, 钟华平, 梁颺, 等. 草地生态系统碳储量及其影响因素[J]. 中国草地, 2003, 25(6): 51-58.
- [29]田玉强, 欧阳华, 徐兴良, 等. 青藏高原土壤有机碳储量与密度分布[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 933-942.
- [30]刘伟, 程积民, 陈芙蓉, 等. 黄土高原中部草地土壤有机碳密度特征及碳储量[J]. 草地学报, 2011, 19(3): 425-431.
- [31]王艳芬, 陈佐忠, Tieszen L T. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响[J]. 植物生态学报, 1998, 22(6): 545-551.
- [32]杨婷婷, 吴新宏, 王加亭, 等. 中国草地生态系统碳储量估算[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 127-130.
- [33]钟华平, 樊江文, 于贵瑞, 等. 草地生态系统碳循环研究进展[J]. 草地学报, 2005, 13(增刊1): 67-73.
- [34]岳曼, 常庆瑞, 王飞, 等. 土壤有机碳储量研究进展[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1173-1178.
- [35]Ni J. Carbon storage in grasslands of China[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 50(2): 205-218.
- [36]Bolin B, Degens E T. The global biogeochemical carbon cycle[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 8: 555-558.
- [37]郭然, 王效科, 逯非, 等. 中国草地土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 862-867.
- [38]程先富, 史学正, 于东升, 等. 兴宁县森林土壤有机碳库及其与环境因子的关系[J]. 地理研究, 2004, 23(2): 211-217.
- [39]李甜甜, 季宏兵, 孙媛媛, 等. 我国土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2007, 28(1): 93-97.
- [40]张林. 雀儿山西南坡植被碳储量与土壤有机碳储量估算[D]. 雅安: 四川农业大学, 2007.
- [41]刘苗, 刘国华. 土壤有机碳储量估算的影响因素和不确定性[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1222-1232.
- [42]Wang H Q, Cornell J D, Hall C A S, et al. Spatial and seasonal dynamics of surface soil carbon in the Luquillo Experiment Forest, Puerto Rico[J]. Ecological Modelling, 2002, 147: 105-122.
- [43]邵月红, 潘剑君, 许信旺, 等. 浅谈土壤有机碳密度及储量的估算方法[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 1007-1011.
- [44]李东, 高明. 土壤有机碳循环研究进展[J]. 江西农业学报, 2008, 20(2): 60-63, 75.
- [45]吴瑾, 吴克宁, 赵华甫, 等. 土壤有机碳储量估算方法及土地利用调控措施研究进展[J]. 中国土地科学, 2010, 24(10): 18-24.
- [46]Kem J S. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous United States[J]. Soil Sci Am J, 1994, 58: 439-455.
- [47]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[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 797-802.
- [48]杨红飞, 穆少杰, 孙成明, 等. 草地生态系统土壤有机碳估算研究综述[J]. 中国草地学报, 2011, 33(5): 107-114.
- [49]Sims Z R, Nielsen G A. Organic carbon in Montana soils as related to clay content[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50: 1269-1271.
- [50]McManiel Y A, Munn L C. Effect of temperature on the relationship between organic carbon and texture in Mollisols and Aridisols[J]. Soil Soc Am J, 1985, 49(6): 1486-1489.
- [51]Burke I C, Yonkr C M, Parton W J, et al. Texture, climate and cultivation effects on soil organic matter content in U. S. grassland soils[J]. Soil Sci Soc, 1989, 53: 800-805.
- [52]常瑞英, 刘国华, 傅伯杰. 区域尺度土壤固碳量估算方法评述[J]. 地理研究, 2010, 29(9): 1616-1628.
- [53]苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 220-228.

郑侃,陈婉芝. 深松机具研究现状与展望[J]. 江苏农业科学,2016,44(8):16-20.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.08.004

深松机具研究现状与展望

郑侃,陈婉芝

(中国农业大学工学院/现代农业装备优化设计北京市重点实验室,北京 100083)

摘要:深松是提高作物产量的一项重要耕作方式,对于促进我国农业可持续发展和保障粮食安全具有重要意义。介绍近年深松面积和深松机数量的变化情况,根据深松铲工作原理及结构特点将深松机分为凿式深松机、全方位深松机,详细描述这2类机具的工作原理、作业特点,并总结现有的典型机具;最后分析现有深松机存在的问题并提出解决方法,为深松机的研究提供参考依据。

关键词:深松机具;凿式深松机;全方位深松机;现状;展望

中图分类号: S224.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)08-0016-05

深松是指使用专用深松机,在不打乱原有土壤耕层结构的前提下进行深度松土的一种机械化耕整地作业方式,是保护性耕作的重要组成部分^[1]。传统翻耕深度为16~30 cm,旋耕深度一般为14~16 cm^[2],翻耕、旋耕作业时犁铧、旋耕刀会对土壤有挤压、打击作用,长期使用会使耕层以下形成坚硬的犁底层,影响作物根系生长,使作物产量下降;虽然免耕减少了土壤耕作,保护了土壤结构,但播种、收获、植保时农具作业造成的土壤压实,再加上土壤的自然沉降,同样会导致土壤的紧实度、容重增加,影响作物生长^[3-4]。通过深松作业可打破坚硬的犁底层,同时疏松土壤,增加土壤的透水性和透气性,改善土壤理化特性以及作物根系生长环境,是一项重要的作物增产技术^[5-6]。

深松机是实现机械化深松作业的关键机具,深松铲则是深松机的关键工作部件。欧美等地区在20世纪30年代初对深松耕作和深松机具开展研究,现已形成较完善的理论体系和系列化的深松机具。我国于20世纪60年代开始对深松技术进行研究,近些年深松部件和深松机具的研制开发越来越受到重视,并取得了丰硕的成果^[7],但与国外先进的深松机具相比,仍然存在材料质量差、阻力功耗大、配套动力不足、结构设计不合理、种类繁多以及无法进行标准化、系列化管理等问题^[8-9]。因此,了解和掌握深松机具及其关键部件的主要

类型和特点,探讨存在的主要问题,对于我国深松技术的研究和推广具有重要意义。

1 近年来深松面积和深松机数量变化情况

自2009年国务院常务会议决定对深松作业进行补贴以后,深松作业在全国适宜省份迅速展开,深松补贴实施后5年内的深松实施面积与深松机拥有量变化趋势如图1所示^[10],可以看出,全国深松作业面积和深松机拥有量明显增加,其中2013年全国深松面积为1 078.47万hm²,比2008年多211.49万hm²;2013年全国深松机拥有量为23.36万台,比2008年多14.79万台。2011年农业部办公厅印发的《全国农机深松整地作业实施规划(2011—2015年)》(农机发[2011]1号)^[11]文件中指出:2013—2015年,在东北地区、黄淮海地区、南方蔗区、西北地区全面实施深松;2011—2015年,5年累计深松整地作业面积0.713亿hm²。农业部在2015年2月

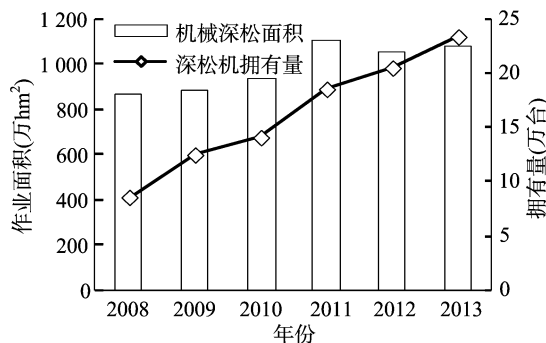


图1 2008—2013年全国深松面积及深松机拥有量变化

收稿日期:2015-11-20

基金项目:教育部创新团队发展计划(编号:IRT13039);公益性行业(农业)科研专项(编号:201503136)。

作者简介:郑侃(1987—),男,河南上蔡人,博士,主要从事保护性耕作秸秆还田机具研究。E-mail:zhengkan0219@163.com。

[54]田娜,王义祥,翁伯琦. 土壤碳储量估算研究进展[J]. 亚热带农业研究,2010,6(3):193-198.

[55]周涛,史培军,罗巾英,等. 基于遥感与碳循环过程模型估算土壤有机碳储量[J]. 遥感学报,2007,11(1):127-136.

[56]武曼曼,马友华,王强,等. 土壤碳储量及其碳固定研究[J]. 皖西学院学报,2014,30(2):124-128.

[57]于东升,史学正,孙维侠,等. 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[J]. 应用生态学报,2005,16(12):

2279-2283.

[58]雷能忠,黄大鹏,王心源,等. 基于ArcGIS的土壤有机碳密度及储量计算[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2008,31(11):1740-1743.

[59]程鹏飞,王金亮,王雪梅,等. 森林生态系统碳储量估算方法研究进展[J]. 林业调查规划,2009,34(6):39-45.

[60]Turner M G, Gardner R H. Quantitative methods in landscape ecology[M]. New York:Springer-Verlag,1991:479-517.