

DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-3142. 2013. 05. 023

常小峰, 汪诗平, 徐广平, 等. 土壤有机碳库的关键影响因素及其不确定性 [J]. 广西植物, 2013, 33 (5): 710-716

Chang XF, Wang SP, Xu GP, et al. Estimating uncertainties and determinants of soil organic carbon stock [J]. Guihaia, 2013, 33 (5): 710-716

土壤有机碳库的关键影响因素及其不确定性

常小峰^{1,4}, 汪诗平^{2*}, 徐广平³, 白玲⁵

(1. 中国科学院西北高原生物研究所 高原生物适应与进化重点实验室, 西宁 810008; 2. 中国科学院青藏高原研究所 高寒生态学和生物多样性实验室, 北京 100101; 3. 广西壮族自治区 广西植物研究所, 中国科学院 广西 桂林 541006; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 西藏大学, 拉萨 850000)

摘要: 土壤是陆地生态系统最大的有机碳库, 比植被碳库或大气碳库的两倍还多。准确评估土壤有机碳库是预测全球变化与土壤有机碳之间反馈关系的关键。但目前对土壤有机碳库的估算还存在很大不确定性。该文综述了土壤有机碳库估算及其影响因素和土壤有机碳库估算不确定性的来源和常用的采样方法, 以及计算土壤碳汇的最新研究进展。未来技术进步以及模型的不断完善可能会降低土壤有机碳库估算的不确定性, 提高其估算的精度。

关键词: 土壤有机碳库; 不确定性; 采样方法; 碳汇

中图分类号: Q948. 1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142 (2013) 05-0710-07

Estimating uncertainties and determinants of soil organic carbon stock

CHANG Xiao-Feng^{1,4}, WANG Shi-Ping^{2*}, XU Guang-Ping³, BAI Ling⁵

(1. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 2. Key Laboratory of Alpine Ecology and Biodiversity, Institute of Tibetan Plateau Research, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and the Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. University of Tibet, Lhasa 850000, China)

Abstract: Soil is the largest organic carbon reservoir in the terrestrial biosphere, about two times larger than that of vegetation or the atmosphere. Robust and accurate estimate of soil organic carbon (SOC) stocks is critical for predicting feedbacks of SOC to global change. However, the current storage of SOC remains largely uncertain. It is the objective of this paper to review the estimates of SOC stocks and their determinants, the sources of uncertainties in SOC stock assessments and the sampling methodologies commonly used, and advances in measuring SOC sequestration. Future advances in technology and research programs with modeling may have the potential to reduce uncertainties and improve SOC stock assessment.

Key words: SOC stock; uncertainty; sampling methodology; carbon sequestration

准确估算土壤有机碳库, 揭示其分布格局和动态变化有助于评价土壤在陆地生态系统碳循环中的重要作用, 也有助于预测陆地生态系统与气候变化之间的反馈效应 (Jobbagy *et al.*, 2000; Yang *et*

收稿日期: 2012-10-09 修回日期: 2013-01-23

基金项目: 中国科学院碳专项 (XDA05070205); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目 (科发人教字 [2011] 180号); 西藏科学与技术厅项目

作者简介: 常小峰 (1984-), 男, 博士, 助理研究员, 陕西榆林人, 主要从事草地生态学研究, (E-mail) changxf12@yahoo.cn。

* 通讯作者: 汪诗平, 博士, 研究员, 主要从事气候变化与草地管理研究, (E-mail) wangship2008@yahoo.cn。

al., 2007, 2008)。许多学者在全球、国家和区域等尺度上开展了土壤碳库及其影响因素的研究 (Batjes, 1996; Fang *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2008)。但即使在同一尺度不同研究结果之间仍然存在很大差异。这些研究采用的数据源、样本大小、土壤植被分类系统、估算面积、计算深度和方法的不同是导致估算结果差异的主要原因 (Yang *et al.*, 2007; Fang *et al.*, 2010)。土壤有机碳库的影响因素也会因研究的尺度不同而改变。任何地点的土壤有机碳都会受到植被、气候、土壤类型、母质、地形、人为管理措施以及它们相互作用的影响 (Allen *et al.*, 2010)。因此, 土壤有机碳具有很大的时空变异性, 这就增加了有效采样的难度。同时这些时空变异性也为设计合理的采样方法提供了信息。大量的采样分析才能代表特定研究对象的特征, 但对于采样量如何影响结果的准确度知之甚少。如何降低估算的不确定性或者在一定准确度和置信区间内获得估计值是目前土壤有机碳库研究需要迫切解决的问题。

进行土壤有机碳库估算时, 只有明确空间变异的影响因素, 才能设计出合理高效的采样方法 (如采样量和采样位置的确定), 以保证获得较为可靠的估算值, 进而量化土壤的碳排放和碳固持潜力, 即判断不同气候变化情景下或不同管理措施下土壤是碳源还是碳汇 (Muukkonen *et al.*, 2009)。为此本文综述了土壤有机碳及其影响因素, 土壤有机碳库估算不确定性的来源和常用的采样方法, 计算土壤碳汇方法的最新研究进展, 以期为提高土壤有机碳库估算精度提供参考。

1 土壤有机碳库的估算

土壤碳库包括土壤有机碳库和无机碳库。因为无机碳库相对稳定, 周转时间大于 1 000 a (Zhou *et al.*, 2010), 所以本文综述中未包括土壤无机碳库。过去的几十年, 大量学者估算了全球土壤有机碳的储量 (表 1)。早期对土壤有机碳库的估算是根据少数几个土壤剖面资料进行推算, 如 Rubey (1951) 根据美国 9 个土壤剖面的碳含量, 推算全球土壤有机碳库为 710 Pg C。Bohn (1976) 利用土壤分布图及相关土组的有机碳含量, 通过土组合并, 相似土类数据互补和插值, 计算出全球有机碳库为 2 950 Pg C, 比 Post *et al.* (1982) 估计值 (1 395 Pg C) 高了两倍多。进入 20 世纪 90 年代以

后, 由于科学家对土壤碳认识的深入和土壤调查数据的不断积累补充, 虽然计算方法趋于多元化, 但土壤碳库估算不确定性却有一定程度的降低, 研究结果也较为接近。Batjes (1996) 分析了 4 000 多个土壤剖面数据, 使用 FAO-UNESCO 的世界土壤地图估算的全球陆地生态系统土壤碳库在 1 462~1 548 Pg 之间, 与 Schlestinger (1990) 的研究结果 (1 500 Pg C) 和 Jobbagy *et al.* (2000) 的研究结果 (1 502 Pg C) 相差不大。因此, 一般认为全球土壤 1 m 深度有机碳库在 1 500~1 600 Pg C 之间。基于 FAO 土壤分类系统, 如果考虑土壤 1~2 m 的深度, 以 1 m 深度估算的全球土壤有机碳库低估了 60% (Batjes, 1996)。根据 1 m 土壤剖面数据建立有机碳密度和深度的关系, 然后计算 3 m 深度土壤的有机碳密度, 则 1~2 m 和 2~3 m 土壤深度的有机碳库分别为 491 和 351 Pg C, 这样全球土壤 3 m 深度的有机碳库达 2 344 Pg C (Jobbagy *et al.*, 2000)。

表 1 全球土壤有机碳库的估算

Table 1 Estimates of soil organic carbon stock in the world

作者 (年份) Author (year)	有机碳库 SOC stock (Pg C)	作者 (年份) Author (year)	有机碳库 SOC stock (Pg C)
Rubey (1951)	710	Smith <i>et al.</i> (1992)	1158.5
Bohn (1976)	2 950	Sombroke (1993)	1 200
Bolin <i>et al.</i> (1979)	1 672	Foley (1995)	1373.2
Post <i>et al.</i> (1982)	1 395	Fang (1996)	1 472
Buringh (1984)	1 477	Cao <i>et al.</i> (1998)	1 358
Prentice <i>et al.</i> (1990)	1 143	Jobbagy <i>et al.</i> (2000)	1 502

来源于 Fang *et al.*, 1996; 于贵瑞等, 2003。

据统计, 2000 年全球草地面积达 3.5×10^7 km², 占陆地表面面积的 26%, 其土壤有机碳库为 343 Pg C, 约占全球陆地生态系统土壤总碳库的 20%, 约为森林土壤碳库的 50% (Conant, 2009)。研究者或研究机构对草地概念的界定、全球草地面积的大小、研究方法的选择等都会给草地土壤有机碳的估算带来差异 (钟华平等, 2005)。近年来, 我国学者在草地碳循环方面开展了大量工作, 也初步完成了我国草地土壤碳库的估计 (Fang *et al.*, 2010) (表 2)。Fang *et al.* (1996) 率先利用全国第一次土壤普查资料和文献中获取的信息, 依据非常粗糙的植被分类系统估算出全国草地土壤有机碳库总量为 74.74 Pg C。随着对全球变暖和土壤碳库的关注度迅速增加, 国家尺度和区域尺度草地土壤碳库研究也成为热点领域。一些研究利用全球土壤碳氮数据库, 或第二次土壤普查资

料,或基于大范围的野外调查资料,或采用生物地球化学模型(Ni, 2001, 2002; Wang *et al.*, 2002; Xie *et al.*, 2007; Tan *et al.*, 2010)来估计草地土壤碳库及其变化。研究结果的不确定性依然很大(Yang *et al.*, 2007; Fang *et al.*, 2010),尤其是青藏高原草地土壤有机碳库的估算差异幅度更大(7.4~33.52 Pg C)(表2)。Wang *et al.* (2002)利用青藏高原东部地区调查的样带数据并结合青海省和西藏自治区土地资源调查资料,对高寒草地土壤深度0~75 cm有机碳库进行了估算,得到约33.52 Pg C的估计值,是同区域所有估算值中最高的。Yang *et al.* (2008)认为全国第二次土壤普查中西北地区的数据相对不足,又补充了2001~2004年在青藏高原高寒草地分布区调查的135处样点405个土壤剖面数据,并结合MODIS-EVI卫星遥感数据,估算出青藏高原高寒草地1 m深度土壤有机碳库为7.4 Pg C。此外,基于不同模型估算的青藏高原草地土壤有机碳库在9.7~14.87 Pg C之间(表2),但考虑到模型涉及的土

壤深度,研究结果的不确定性可能更大。

利用模型模拟土壤有机碳及其变化已得到广泛应用。但模型结构和模拟过程对生态系统的简化,输入参数的误差等均会影响模拟结果的精度。如对气象数据的空间插值分析、数据资料的空间分辨率、模型模拟的假设条件以及对人类活动(如放牧)简单的模拟或排除等导致估计值的差异(Zhang *et al.*, 2007; Tan *et al.*, 2010)。利用遥感数据估测土壤有机碳库也是目前常用的方法,它可以减少因土壤空间异质性带来的不确定性(Yang *et al.*, 2008, 2009)。植被归一化指数与土壤有机碳密度的拟合关系并不能完全解释碳密度的时空变异,其中未能解释的部分会引入部分估测误差(Yang *et al.*, 2009)。另外土壤砾石含量和容重等数据的缺乏,样本数量的多少、采样点的分布情况也会给土壤碳库估算带来不确定性(Fang *et al.*, 2010)。如何降低土壤碳库估算中的不确定性仍然是目前土壤有机碳库研究面临的问题。

表2 我国有关草地土壤有机碳库研究结果的比较

Table 2 Comparison of soil organic carbon in China's grasslands among different studies

研究区域 Region	面积 Area (10 ⁴ km ²)	土壤深度 Soil depth (cm)	土壤有机碳库 SOC stock (Pg C)	数据来源 Data source	参考文献 Reference
中国草地 China's grasslands	569.90	68.5	74.74	第一次全国土壤普查数据及其他	Fang <i>et al.</i> , 1996
	405.87	100	53.72	全球土壤数据库	Ni, 2001
	298.97	100	41.03	全球土壤数据库	Ni, 2002
	278.51	82.1	37.71	第二次全国土壤普查数据	Xie <i>et al.</i> , 2007
青藏高原草地 Tibetan grasslands	162.70	75	33.52	实测数据结合第二次全国土壤普查数据	Wang <i>et al.</i> , 2002
	147.70	20	9.7	第二次全国土壤普查数据结合 Century 模型	Zhang <i>et al.</i> , 2007
	112.82	100	7.4	2001~2004 实测数据及遥感数据	Yang <i>et al.</i> , 2008
		50	6.13		
		30	4.99		
	112.82	30	4.39	2001~2004 实测数据及遥感数据	Yang <i>et al.</i> , 2009
	139.00	100	11.94	第二次全国土壤普查数据结合 ORCHIDEE 模型	Tan <i>et al.</i> , 2010
	122.65	—	12.48~14.87	TEM 模型	Zhuang <i>et al.</i> , 2010

2 土壤有机碳库的影响因素

2.1 自然因素

土壤有机碳库是陆地生态系统长期光合作用和分解作用动态平衡的结果(Allen *et al.*, 2010)。因此凡是影响生态系统光合和呼吸过程的因子如气候、地形、土壤质地等都都将控制着土壤有机碳库的动态变化(Allen *et al.*, 2010)。对土壤有机碳的输入与分解过程起关键作用的气候因子主要是温度和水分(Percival *et al.*, 2000)。一方面,气候条

件决定着植被的分布,影响植被生产力和凋落物的性质,从而决定输入土壤有机碳的数量和性质(Jobbagy *et al.*, 2000);另一方面,气候通过影响土壤水分和土壤温度,影响微生物对地面凋落物、土壤有机碳的分解和转化(Hobbie *et al.*, 2000)。从全球看,土壤有机碳密度一般随着年均温度的下降而增加,寒冷气候区土壤含有丰富的有机碳(Jobbagy *et al.*, 2000)。比如,北半球的苔原生态系统土壤储藏了全球陆地生态系统碳库的20%~60%(Hobbie *et al.*, 2000)。植被凋落物的化学成分影响着其在土壤中的滞留时间,难分解

物质(芳香族 C 等)唯有特性酶对其分解转化,因此易于长期存留在土壤中,有利于土壤有机碳的积累(Hobbie *et al.*, 2000)。

土壤理化性质影响着土壤有机碳的储存和分解,其中研究最多的当属土壤质地(Percival *et al.*, 2000)。土壤碳与粘粒矿物的相互作用形成如团聚体结构的物理保护,使土壤有机碳不易被微生物或酶分解,因此能够较长期蓄积在土壤中;另一方面,土壤中粘粒含量和粉粒含量高增加了土壤的保水能力,促进了植物的生长,使更多的碳输入到土壤中(Yang *et al.*, 2008)。大量的土壤碳与土壤质地间的关系证明了土壤质地特别是粘粒含量是固持土壤碳的关键因素。全球 1 m 深度土壤有机碳与粘粒含量显著正相关,与砂粒含量显著负相关(Jobbagy *et al.*, 2000)。相反, Percival *et al.* (2000) 发现新西兰山地土壤有机碳的积累与粘粒含量的关系很弱,但铝离子与水铝英石的含量却可以很大程度上解释土壤有机碳的变异。矿物类型、pH 值、土壤可利用养分的状况等也影响土壤有机碳的积累(周莉等, 2005)。例如, 2:1 型硅酸盐矿物蒙脱石,具有较高的阳离子交换量(CEC),吸附芳香族碳化合物能力强; 1:1 型高岭石, CEC 低,吸附能力弱(Wattel-Koekoek *et al.*, 2004)。

这些因子对土壤有机碳的影响作用的大小在不同生态系统或不同研究尺度也不相同(Yang *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2010a)。青藏高原高寒草地和温带草地土壤有机碳密度都随着降水量增加呈增加趋势,但二者与温度的关系却不同:高寒草地土壤有机碳密度随着年均温的上升呈微弱上升的趋势,而温带草地土壤有机碳密度与温度之间呈显著负相关关系(Yang *et al.*, 2010)。由于土壤类型、生态系统和地形方位的不同,区域和省级尺度土壤有机碳密度的控制因子也随之而改变,气候因子与土壤有机碳密度的关系随着尺度减小趋弱。在较大的区域尺度气候因子对土壤有机碳密度起主要作用,但在市、县尺度上土壤质地是主要控制因素(Wang *et al.*, 2010a, b)。

2.2 人为因素

放牧、围封、土地利用变化等人为因素会导致土壤有机碳的动态变化(Fang *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011)。放牧主要通过 3 种方式对土壤有机碳库起作用:(1) 改变净初级生产力(NPP); (2) 改变土壤氮库; (3) 改变土壤有机质分解(Pineiro *et al.*, 2010)。放牧采食降低了植

被碳素向土壤中的输入,改变了植物同化物质向地上和地下的分配(Pineiro *et al.*, 2010; Hafner *et al.*, 2011)。牲畜踩踏压缩土壤,增加了土壤容重,破坏土壤团聚体(Steffens *et al.*, 2008);放牧采食增加了裸露地表,使地表温度增加或干湿交替加剧(Kay, 1998),均促进了土壤有机质的分解和土壤侵蚀,致使土壤有机碳含量下降。但是并不是所有的放牧强度都会导致土壤有机碳密度的减少。由于放牧的补偿性生长作用,在适度放牧下土壤有机碳有时候会呈增加的趋势(Hafner *et al.*, 2011)。通过综合 133 篇中国北方草原有关土地利用变化和管理措施对土壤有机碳含量和碳密度影响的文献资料, Meta 分析显示:过度放牧和由自由放牧地转化为农田将导致中国北方草地土壤有机碳密度下降 30%~35%,平均每年下降 2.3%~2.8%;而改良的管理措施可以使土壤碳库损失的情况得到扭转,如围封放牧地和将农田转化为撂荒地等措施可以使土壤有机碳含量分别增加 34%和 62%,平均每年净增加土壤碳库碳 130.4 g·m⁻²和 128.0 g·m⁻²(Wang *et al.*, 2011)。合理的施肥以及农田作物残茬归还有利于土壤稳定团聚体的形成,这些农业措施的广泛运用使得中国农田 1985~2006 年间表层(0~20 cm)土壤有机碳增加了(0.52±0.05) Pg C (Pan *et al.*, 2010)。

3 土壤有机碳估算不确定性与采样方法

关于土壤有机碳库的研究仅给出了估算值,而没有明确估算的范围或不确定性,这就很难进行研究结果间的比较,也很难评价该估算值的意义(Goidts *et al.*, 2009)。估算值的不确定性普遍存在,不确定性的来源也很多(Fang *et al.*, 1996; Yang *et al.*, 2007)。Goidts *et al.* (2009) 利用误差传递和蒙特卡洛两种方法分析了不同研究尺度和景观单元土壤有机碳估算时不确定性的来源和大小,认为不确定性主要来自砾石含量和土壤有机碳含量的变异,不确定性随尺度扩大而增加。对欧洲碳综合项目(Europe Integrated Carbon Program)的 12 个点土壤有机碳计算的误差传递分析也显示土壤有机碳含量是少石块土壤有机碳空间变异的主要原因,而容重的异质性导致了多石块土壤有机碳库空间变异(Schrumpf *et al.*, 2011)。任何生态

系统的空间异质性反映的是其内在的空间格局, 这势必对采样设计, 包括采样的数量以及采样点的空间分布的确定产生影响 (Conant *et al.*, 2003)。一般大量的高密度采样才能反映研究区域的真实情况 (Muukkonen *et al.*, 2009)。但与极大的空间异质性相比, 目前许多野外调查采样量相对不足 (Yang *et al.*, 2008), 不能在多种尺度上充分捕捉空间异质性 (Allen *et al.*, 2010), 使得土壤有机碳估算值的可信度大打折扣。

野外调查通常采用随意采样、随机采样和代表性采样 (De Gruijter, 2006) 三种方法。随意采样方法的优点不言而喻, 但缺乏统计上的严谨性, 因此结果受到很大的质疑。与随机采样和代表性采样相对应产生了两种计算方法: 基于设计的方法和基于模型的方法 (Allen *et al.*, 2010)。例如, 利用 6 种采样密度对中国南部江西省余江县红土区进行系统随机的巢式采样, 发现土壤有机碳含量的变异随着采样密度的增加而逐渐减低 (Yu *et al.*, 2011)。利用序列指示模拟 (Sequential Indicator Simulation, SIS) 量化美国南部灌木化盛行的大草原土壤有机碳密度的空间变异, 结果显示空间变异影响着土壤有机碳密度的估算准确度, 分层但采样密度不相等的随机采样和依据生态系统内在梯度而设计的样带采样能产生很好的结果, 完全随机采样不仅需要很大的采样密度而且比较低效 (Liu *et al.*, 2011)。模型方法其实就是基于统计模型的地统计方法, 需要用先验的模型知识确定带有目的的采样位置 (Allen *et al.*, 2010)。同样在美国南部大草原, 土壤有机碳密度的空间分布格局呈现出代表灌丛影响的小尺度变异 (10 m) 和以木本植物群与周围草本斑块之间距离的大尺度变异 (40~45 m), 因此局部小尺度下估算的土壤有机碳密度不能简单的外推到更大的尺度上; 巢式或网格设计采样能够反映多尺度的空间变异, 利用由此而推导的算法才能准确估算大尺度的土壤有机碳密度 (Liu *et al.*, 2010)。Dou *et al.* (2010) 结合 GIS 和地统计技术研究了阿拉斯加州海岸线土壤有机碳密度的空间变异, 结果表明利用剔除全局趋势后的具有块金效应的高斯函数建立的二维各向同性模型可以很好的预测土壤有机碳密度在较大空间尺度的分布。

无论采用何种采样方法, 都必须知道究竟需要多少采样量才能获得研究对象的无偏估计值, 还需要保证这些采样量并没有造成财力物力的浪费 (Allen *et al.*, 2010)。Bootstrap 方法可以在给定

的原始样本基础上通过不断重复的抽取观测信息, 而不需要进行分布假设或增加新的样本信息, 从而对某一指标总体的分布特征进行统计推断。例如, 1 000 次重复抽取生物量数据, 计算与采样量相对应的估算精度, 可以准确地得到区域温室气体减排行动 (RGGI) 下造林协议设定的采样误差为 8% 时所需要的采样量 (Fahey *et al.*, 2010)。最小检出量 (minimum detectable difference, MDD) 方法可以用来计算检测土壤有机碳变化需要的取样量 (Conant *et al.*, 2002, 2003)。美国在县、州、国家尺度分别需要采集 34、224 和 501 个样本量可以监测到草地土壤有机碳 $2.3 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的变化量 (Conant *et al.*, 2002)。这两种方法都是基于样本去推断总体的统计特征的, 因此都需要利用土壤有机碳含量或碳密度初步调查数据或收集同一研究区域的文献资料数据。

4 土壤碳汇潜力的估算

改善土地管理, 增加陆地生态系统碳汇是抵消 CO_2 排放、降低大气 CO_2 浓度的有效手段之一 (Conant, 2009, 2010)。通常, 可以综合已发表的有关管理措施对土壤有机碳影响的研究结果, 利用分析后得到的信息估算土壤的碳汇潜力 (Conant *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011)。例如, 以国内长期定位实验数据为基础, 郭然等 (2008) 评价了我国草地生态系统的固碳潜力, 表明通过减少放牧率等方法恢复退化草地, 我国草地土壤有机碳库可以增加至 $4\,561.62 \text{ Tg C}$, 通过种草、退耕还草和草场围栏 3 种措施每年新增的固碳能力分别为 5.70 、 0.38 、 3.09 Tg C 。Wang *et al.* (2011) 综合我国近 10 年有关草地管理措施和草地利用方式变更对土壤有机碳影响的 133 篇发表文献资料, 根据我国农业部的有关规划, 如果至 2020 年将 $150 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的严重退化草地围封禁牧和建植 $30 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的人工草地, 我国每年将固碳 0.24 Pg C , 这相当于我国 2006 年化石燃料燃烧 CO_2 排放量的 16%。诚然, 综合众多定位实验结果可以提供某一管理措施下土壤有机碳的平均变化值, 但是这样的结果仅适用于特定的地点, 草地管理措施在不同的地域也千差万别, 而且不同地域气候条件、土壤、土地利用历史等也不尽相同, 如果利用这些结果去估算区域的碳汇潜力将会带来很大的不确定性 (Conant *et al.*, 2010)。

生态系统模型可以用来量化土壤有机碳库的变化 (Conant *et al.*, 2010; Tan *et al.*, 2010)。GEFSOC (Global Environmental Facility Soil Organic Carbon) 模型模拟西班牙东北部草地、森林和农田土壤有机碳库及其变化, 预测显示 0~30 cm 土层土壤有机碳库在近 30 年增加了 34 Tg C (Álvaro-Fuentes *et al.*, 2011)。利用 RothC 模型模拟未来气候变化情景 (B2, 生态环境的改善具有区域化) 下中国传统农业用地 0~30 cm 土壤有机碳库将在 2020、2050、2080 年分别减少 2.7、6.0 和 7.8 t·hm⁻² (Wan *et al.*, 2011)。生态系统的机理模型因其可以模拟不同气候、土地管理措施等, 而且驱动数据少, 还可以及时更新数据, 非常灵活, 易于使用 (Jones *et al.*, 2004)。但是模型模拟也存在着局限性 (Tan *et al.*, 2010)。由于现有知识对复杂生态系统结构、过程和机理的认识不足, 模型只能对生态系统进行简化模拟。例如在估算土壤有机碳库时往往假设生态系统有一个平衡态, 但生态系统是否具有平衡态尚不可知 (Tan *et al.*, 2010)。模型部分输入参数获取困难, 如土地利用历史资料的缺失或调查资料的不充分, 模型模拟的土地利用方式或管理措施, 也往往不能反映真实的情况。但模型仍不失为直接监测手段的补充, 是估算土壤有机碳库变化的一种有效工具。

5 展望

准确估算土壤有机碳库是一项富有挑战性的工作, 因为它牵涉到带有误差的多个变量。土壤有机碳库还因土地管理措施变更、气候变化、植被演替等外界扰动和内在过程会出现时间空间上的变化, 相对于巨大的土壤碳库, 这些变化很难被监测到 (Schrumpf *et al.*, 2011)。如果不确定性得不到有效降低, 我们将很难准确评估土壤有机碳的储量, 也很难监测到土壤有机碳库的变化。但高效合理的采样设计、新技术新方法的应用和模型的不断改进, 土壤有机碳库估算的不确定性将大幅度降低。

(1) 在采样设计时, 土壤或植被的空间异质性是不能忽视的。利用前期土壤调查的数据或同一研究区域的文献资料数据提供的有机碳含量或碳密度的空间变异信息来确定采样点的空间分布和采样密度。随机模拟方法可以用来评估土壤有机碳估算的空间不确定性, 而且还有助于设计高效的采样方

法, 控制采样量同时也保证获得土壤有机碳库的无偏估算值 (Liu *et al.*, 2011)。分层高密度采样或系统的巢式采样可以反映出土壤有机碳空间异质性的信息, 利用这些信息确定哪些独立的样品是可以混合在一起的, 以有效降低样点尺度土壤碳含量或密度的差异, 合理估算较大尺度土壤有机碳库及其空间分布 (Goidts *et al.*, 2009; Allen *et al.*, 2010)。建立基准站点, 采用配对重复取样可以提高土壤有机碳变化的监测信度和灵敏度 (Conant *et al.*, 2003; Schrumpf *et al.*, 2011)。

(2) 土壤有机碳含量、容重和砾石含量是有机碳库估算时的主要误差来源。Bellon-Maurel *et al.* (2011) 综述了近红外反射光谱技术 (NIRS) 在实验室分析和用 NIRS 航拍或卫星影像解译土壤性质, 以及在土壤质量进行评估时的应用。Moreira *et al.* (2009) 证实了 NIRS 技术在测定巴西亚马逊流域容重的可行性, 并与土壤转化函数的结果进行比较。他们还提出了偏最小二乘法回归分析用于校正预测的土壤容重。这些新技术的应用大大降低了取样和分析的费用和时间, 提高了估算土壤碳库的能力和准确度。

(3) 遥感可以提供有效的气象、植被、土壤等空间信息, 而且未来更先进的遥感技术将确保这些空间信息更加精准。充分利用这些高精度的空间信息, 建立能够直观反映生态系统空间异质性的景观模型, 使模拟不同尺度土壤有机碳库的变化更加细致而准确 (Tornquist *et al.*, 2009)。随着科学研究的不断深入, 生态系统碳循环的控制机理也越来越明朗; 研究数据积累愈来愈多, 为模型进一步修正提供了基本参数, 使模型更能生动地模拟生态系统的主要过程, 使全球或区域生态系统在社会经济驱动下的预测结果更可信。

可以预见, 经济高效、严谨有致的土壤调查和监控网络的建设, 地面调查, 空间遥感和生态系统模型的相互补充和融合, 将从多角度和多尺度监测土壤有机碳储量及其变化, 为预测气候变化和人类活动下土壤有机碳的响应提供更加精准和全面的信息。

致谢 感谢广西植物研究所李先琨老师、蒋巧媛老师提出宝贵的建议。

参考文献:

- 于贵瑞, 李海涛, 王绍强. 2003. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积 [M]. 北京: 气象出版社: 123-187
Allen DE, Pringle MJ, Page KL, *et al.* 2010. A review of sam-

- pling designs for the measurement of soil organic carbon in Australian grazing lands [J]. *Rangel J*, **32**: 227–246
- Álvaro-Fuentes J, Easter M, Cantero-Martínez C, *et al.* 2011. Modelling soil organic carbon stocks and their changes in the northeast of Spain [J]. *Eur J Soil Sci*, **62**: 685–695
- Batjes NH. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *Eur J Soil Sci*, **47**: 151–163
- Bellon-Maurel V, Mcbratney A. 2011. Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils-critical review and research perspectives [J]. *Soil Biol Biochem*, **43**: 1 398–1 410
- Bohn HL. 1976. Estimate of organic carbon in world soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, **40**: 468–470
- Conant RT. 2009. Challenges and opportunities for carbon sequestration in grassland systems [C]. Rome: FAO technical report
- Conant RT, Ogle SM, Paul EA, *et al.* 2010. Measuring and monitoring soil organic carbon stocks in agricultural lands for climate mitigation [J]. *Front Ecol Environ*, **9**: 169–173
- Conant RT, Paustian K. 2002. Spatial variability of soil organic carbon in grasslands; implications for detecting change at different scales [J]. *Environ Poll*, **116**: S127–S135
- Conant RT, Smith GR, Paustian K. 2003. Spatial variability of soil carbon in forested and cultivated sites; Implications for change detection [J]. *J Environ Qual*, **32**: 278–286
- De Gruijter JJ. 2006. Sampling for Natural Resource Monitoring [M]. Berlin and Heidelberg: Springer Verlag
- Dou FG, Yu X, Ping CL, *et al.* 2010. Spatial variation of tundra soil organic carbon along the coastline of northern Alaska [J]. *Geoderma*, **154**: 328–335
- Fahey TJ, Woodbury PB, Battles JJ, *et al.* 2010. Forest carbon storage: ecology, management, and policy [J]. *Front Ecol Environ*, **8**: 245–252
- Fang JY, Liu GH, Xu SL. 1996. Soil carbon pool in China and its global significance [J]. *J Environ Sci*, **8**: 249–254
- Fang JY, Yang YH, Ma WH, *et al.* 2010. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands [J]. *Sci Chin Life Sci*, **53**: 757–765
- Goidts E, van Wesemael B, Crucifix M. 2009. Magnitude and sources of uncertainties in soil organic carbon (SOC) stock assessments at various scales [J]. *Eur J Soil Sci*, **60**: 723–739
- Guo R (郭然), Wang XK (王效科), Lu F (逯非), *et al.* 2008. Soil carbon sequestration and its potential by grassland ecosystems in China (中国草地生态系统固碳现状与潜力) [J]. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, **28**: 862–867
- Hafner S, Unteregelsbacher S, Seeber E, *et al.* 2011. Effect of grazing on carbon stocks and assimilate partitioning in a Tibetan montane pasture revealed by ¹³CO₂ pulse labeling [J]. *Glob Change Biol*, **18**: 528–538
- Hobbie SE, Schimel JP, Trumbore SE, *et al.* 2000. Controls over carbon storage and turnover in high-latitude soils [J]. *Glob Change Biol*, **6**: 196–210
- Jobbagy EG, Jackson RB. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecol Appl*, **10**: 423–436
- Kay B. 1998. Soil Structure and Organic Carbon: A Review [M] //Lai R, Kimble JM, Follett RF, *et al.* Soil Processes and the Carbon Cycle. Boca Raton; FL. CRC Press: 169–197
- Liu F, Wu XB, Bai E, *et al.* 2010. Spatial scaling of ecosystem C and N in a subtropical savanna landscape [J]. *Glob Change Biol*, **16**: 2 213–2 223
- Liu F, Wu XB, Bai E, *et al.* 2011. Quantifying soil organic carbon in complex landscapes; an example of grassland undergoing encroachment of woody plants [J]. *Glob Change Biol*, **17**: 1 119–1 129
- Moreira C, Brunet D, Verneyre L, *et al.* 2009. Near infrared spectroscopy for soil bulk density assessment [J]. *Eur J Soil Sci*, **60**: 785–791
- Muukkonen P, Kkinen HM, Kip MR. 2009. Spatial variation in soil carbon in the organic layer of managed boreal forest soil-implications for sampling design [J]. *Environ Monit Assess*, **158**: 67–76
- Ni J. 2001. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China; estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change [J]. *Clim Change*, **49**: 339–358
- Ni J. 2002. Carbon storage in grasslands of China [J]. *J Arid Environ*, **50**: 205–218
- Pan G, Xu X, Smith P, *et al.* 2010. An increase in topsoil SOC stock of China's croplands between 1985 and 2006 revealed by soil monitoring [J]. *Agr Ecosyst Environ*, **136**: 133–138
- Pineiro G, Paruelo JM, Oesterheld M, *et al.* 2010. Pathways of grazing effects on soil organic carbon and nitrogen [J]. *Rangel Ecol Manage*, **63**: 109–119
- Rubey WW. 1951. Geologic history of sea water [J]. *Geol Soc Am Bull*, **62**: 1 111–1 148
- Schlestinger WH. 1990. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soil [J]. *Nature*, **348**: 232–234
- Schrumpf M, Schulze E, Kaiser K, *et al.* 2011. How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? [J]. *Biogeosciences*, **8**: 723–769
- Steffens M, Kölbl A, Totsche Ku, *et al.* 2008. Grazing effects on soil chemical and physical properties in a semiarid steppe of Inner Mongolia (PR China) [J]. *Geoderma*, **143**: 63–72
- Tan K, Ciais P, Piao S, *et al.* 2010. Application of the ORCHIDEE global vegetation model to evaluate biomass and soil carbon stocks of Qinghai-Tibetan grasslands [J]. *Glob Biogeochem*, **24**: GB 1013
- Tornquist CG, Gassman PW, Mielniczuk J, *et al.* 2009. Spatially explicit simulations of soil C dynamics in Southern Brazil; Integrating century and GIS with i-Century [J]. *Geoderma*, **150**: 404–414
- Wan YF, Lin E, Xiong W, *et al.* 2011. Modeling the impact of climate change on soil organic carbon stock in upland soils in the 21st century in China [J]. *Agr Ecosyst Environ*, **141**: 23–31
- Wang DD, Shi XZ, Wang HJ, *et al.* 2010a. Scale effect of climate and soil texture on soil organic carbon in the uplands of northeast China [J]. *Pedosphere*, **20**: 525–535
- Wang DD, Shi XZ, Wang HJ, *et al.* 2010b. Scale effect of climate on soil organic carbon in the uplands of northeast China [J]. *J Soils Sed*, **10**: 1 007–1 017
- Wang GX, Qian J, Cheng GD, *et al.* 2002. Soil organic carbon pool of grassland soils on the Qinghai-Tibetan Plateau and its global implication [J]. *Sci Total Environ*, **291**: 207–217
- Wang SP, Wilkes A, Zhang Z, *et al.* 2011. Management and land use change effects on soil carbon in northern China's grasslands: a synthesis [J]. *Agr Ecosyst Environ*, **142**: 329–340

(下转第 668 页 Continue on page 668)

- Exp Bot*, **53** (372): 1 331—1 341
- Dou JH (窦俊辉), Yu SX (喻树迅), Fan SL (范术丽), *et al.* 2010. SOD and Plant stress resistance (SOD与植物胁迫抗性) [J]. *Mol Plant Breed* (分子植物育种), **8** (2): 359—364
- Kaminaka H, Morita S, Tokumoto OM. 1999. Molecular cloning and characterization of a cDNA for an iron-superoxide dismutase in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, **63** (2): 302—308
- Kurepa J, Herouart D, Van MM. 1997. Differential expression of CuZn- and Fe-superoxide dismutase genes of tobacco during development, oxidative stress, and hormonal treatments [J]. *Plant Cell Physiol*, **38** (4): 463—470
- Kwon SI, An CS. 2003. Cloning and expression of mitochondrial Mn-SOD from the small radish (*Raphanus sativus* L.) [J]. *Mol Cells*, **16** (2): 194—200
- Li LL (李琳玲), Cheng H (程华), Xu F (许锋), *et al.* 2009. Molecular cloning, characterization and expression of iron superoxide dismutase gene from *Ginkgo biloba* (银杏铁型超氧化物歧化酶基因的克隆与表达) [J]. *J Fruit Sci* (果树学报), **26** (6): 840—846
- Manuel GC, Pierre V. 1996. Computational method to predict mitochondrially imported proteins and their targeting sequences [J]. *Eur J Biochem*, **241** (3): 779—786
- Marchler BA, Zheng C, Chitsaz F, *et al.* 2013. CDD: conserved domains and protein three-dimensional structure [J]. *Nucleic Acids Res*, **41** (1): 348—52
- Mckersie BD, Murnaghan J, Jones KS. 2000. Iron-superoxide dismutase expression in transgenic alfalfa increases winter survival without a detectable increase in photosynthetic oxidative stress tolerance [J]. *Plant Physiol*, **122** (4): 1 427—1 438
- Mallik S, Nayak M, Sahu BB, *et al.* 2011. Response of antioxidant enzymes to high NaCl concentration in different salt-tolerant plants [J]. *Biol Plant*, **55** (1): 191—195
- Soon IK, Chung SA. 2006. Differential expression of two SOD (superoxide dismutase) genes from small radish (*Haphanus sativus* L. var. *sativus*) [J]. *J Plant Biol*, **49** (6): 477—483
- Stepien P, Klobus G. 2005. Antioxidant defense in the leaves of C3 and C4 plants under salinity stress [J]. *Physiol Plant*, **125**: 31—40
- Van CW, Caoia K, Van MM. 1996. Enhancement of oxidative stress tolerance in transgenic tobacco plants overproducing Fe-superoxide dismutase in chloroplasts [J]. *Plant Physiol*, **112** (4): 1 703—1 714
- Wu XJ (武新娟), Wei QR (魏峭嵘), Shi Y (石瑛), *et al.* 2009. Cloning and sequence analysis of *Fe-SOD* from potato (马铃薯抗逆基因 *Fe-SOD* 的克隆与序列分析) [J]. *J Northeast Agric Univ* (东北农业大学学报), **40** (4): 17—20

~~~~~

( 上接第 716 页 Continue from page 716 )

- Wattel-Koekkoek EJW, Buurman P. 2004. Mean residence time of kaolinite and smectite-bound organic matter in Mozambiquan soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, **68**: 154—161
- Xie ZB, Zhu JG, Liu G, *et al.* 2007. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s [J]. *Glob Change Biol*, **13**: 1 989—2 007
- Yang YH, Mohammad A, Feng J, *et al.* 2007. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China [J]. *Biogeochemistry*, **84**: 131—141
- Yang YH, Fang JY, Ma WH, *et al.* 2010. Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s to 2000s [J]. *Glob Change Biol*, **16**: 3 036—3 047
- Yang YH, Fang JY, Smith P, *et al.* 2009. Changes in topsoil carbon stock in the Tibetan grasslands between the 1980s and 2004 [J]. *Glob Change Biol*, **15**: 2 723—2 729
- Yang YH, Fang JY, Tang YH, *et al.* 2008. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands [J]. *Glob Change Biol*, **14**: 1 592—1 599
- Yu DS, Zhang ZQ, Yang H, *et al.* 2011. Effect of soil sampling density on detected spatial variability of soil organic carbon in a red soil region of China [J]. *Pedosphere*, **21**: 207—213
- Zhang YQ, Tang YH, Jiang J, *et al.* 2007. Characterizing the dynamics of soil organic carbon in grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Sci Chin Ser D*, **50**: 113—120
- Zhong HP (钟华平), Fan JW (樊江文), Yu GR (于贵瑞), *et al.* 2005. The research progress of carbon storage in grassland ecosystem (草地生态系统碳蓄积的研究进展) [J]. *Prat Sci* (草业科学), **22**: 4—11
- Zhou J, Chafetz HS. 2010. Pedogenic carbonates in Texas: stable-isotope distributions and their Implications for reconstructing region-wide paleoenvironments [J]. *J Sed Res*, **80**: 137—150
- Zhou L (周莉), Li BG (李保国), Zhou GS (周广胜). 2005. Advances in controlling factors of soil organic carbon (土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展) [J]. *Adv Earth Sci* (地球科学进展), **20**: 99—105
- Zhuang Q, He J, Lu Y, *et al.* 2010. Carbon dynamics of terrestrial ecosystems on the Tibetan Plateau during the 20th century: an analysis with a process-based biogeochemical model [J]. *Glob Ecol Biogeogr*, **19**: 649—662