

文章编号: 1000-5692(2006)02-0207-10

森林土壤碳库研究方法进展

周国模¹, 刘恩斌¹, 余光辉²

(1. 浙江林学院 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300; 2. 南京林业大学
森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 森林土壤有机碳库是全球碳循环的重要组成部分, 其积累和分解的变化直接影响全球的碳平衡, 土壤有机碳库研究方法对准确估算土壤碳蓄积, 反映土壤肥力, 对生物多样性的保护有着重要作用。概述了森林土壤碳储量及其分布, 介绍了森林土壤有机碳库的各种估算与测定方法, 并就各种方法的特点及优缺点做了进一步的分析, 表明各种方法都受条件限制, 还有待完善, 但用的最多的还是土壤类型法与生命带法, GIS方法近几年才得到应用, 模型方法应用较早但还不成熟。针对各种方法估算存在的误差, 从提高精度的角度出发, 又对估算方法误差做了统计分析。阐述了森林土壤碳释放的测定方法, 并对碳释放的一些研究成果做了总结, 在此基础上, 就目前土壤碳库研究方法上尚存在的一些问题作了概括与分析。参71

关键词: 土壤学; 森林; 土壤碳库; 综述; 估算方法; 碳平衡; 碳循环
中图分类号: S714 **文献标识码:** A

森林在全球碳平衡中起着重要的作用, 森林土壤中碳占全球土壤碳的73%^[1]。森林土壤碳含量大约是森林生物量的2~3倍。在农林复合生态系统中, 土壤作为一个重要的亚系统, 在生物循环中具有特殊的生态学意义。此外土壤还从岩石分化过程中富集了生物所需的养分与凋落物分解后的养分, 然后将这些养分提供给植物吸收利用, 同时土壤还给微生物和土壤动物提供了生活的场所。因此, 对土壤碳库的研究与植被相比是同样重要的。但目前, 土壤碳循环的研究是陆地碳循环研究中最不充分的部分, 例如 Houghton 等^[2]认为, 热带、温带和寒带森林在采伐后地表和土壤中的碳会下降35%, 50%和15%, 而在进一步的开垦过程中碳损失可达50%, 而 Houghton 等^[3]在最近的研究中又认为, 采伐本身对土壤碳含量没有多大影响, 进一步垦殖会使土壤碳减少25%。Dotwiler^[4]认为, 采伐和林地物质的燃烧并不会减少土壤碳含量, 也许还会使它略有增加。这些不同的假设使他们的计算差别很大, 这就说明对森林土壤碳排放进行深入研究的重要性, 同时也说明对土壤碳库做进一步研究的重要性。

1 森林土壤碳库及分布

1.1 森林土壤碳分布

森林土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库。全球森林土壤有机碳储量为402~787 Gt^[5,6] (1 Gt

收稿日期: 2005-10-27; 修回日期: 2005-11-21

基金项目: 浙江省科学技术攻关项目(2003C32029)

作者简介: 周国模, 教授, 从事退化林地改造及森林经理学研究。E-mail: zhougm@zjfc.edu.cn

$= 10^9$ t), 占全球陆地土壤中碳储量的 25%~50%。Woodwell^[7] 估算全球森林土壤碳储量为 0.925×10^{12} ~ 2.775×10^{12} t。Ajay 等^[5] 研究认为, 全球森林土壤碳储量中, 热带雨林为 82 Gt, 热带季雨林 41 Gt, 温带森林 72 Gt, 北方林 135 Gt, 林地及灌木林 72 Gt。Houghton^[8] 估算出热带森林土壤有机碳储量为 187 Gt, 温带森林 117 Gt, 极地森林 241 Gt, 热带疏林及稀树草原 88 Gt, 温带疏林草原 251 Gt。全球森林土壤碳库的地理分布格局与森林植被碳库有显著的不同。按纬度划分, 以高纬度地区森林土壤碳储量最大, 约占全球森林土壤碳储量的 60%, 低纬度地区森林土壤碳储量占 27%, 中纬度地区森林土壤碳储量占 13%。森林土壤的碳储量在森林总碳储量中所占的比重, 在高纬度的北方森林中约占 84%, 在中纬度的温带森林中约占 63%, 在低纬度热带森林中约占 50%, 即森林土壤碳储量在森林总碳库中所占的比重随着纬度的降低而降低。森林土壤平均碳密度也呈现类似的变化规律, 以高纬度的北方森林土壤最大, 中纬度的温带森林土壤次之, 低纬度的热带森林最小。森林土壤碳库及碳密度的这种纬向分布规律是气候、植被和土壤相互作用平衡后的一种结果。森林枯落物是森林土壤有机质的主要来源, 森林土壤碳密度与森林地表枯落物的积累量成正比, 而地表枯落物的积累量主要决定于枯落物生成量与分解速度, 二者又同时受温度与水分的控制^[8, 10]。

1.2 森林土壤碳储量

Humington^[11] 研究认为, 美国东南部森林生态系统土壤固碳速率可达 $1.8 \sim 2.3 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。周玉荣等^[12] 估算中国主要森林生态系统土壤碳储量为 2.10×10^{10} t, 占中国森林生态系统碳总储量的 74.6%, 约占全球森林土壤碳储量的 2.7%。李克让等^[13] 按面积加权估算中国森林土壤平均碳密度为 $81.39 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 土壤碳储量为 1.05×10^{10} t, 约占中国森林生态系统碳库的 66%。Zhao^[14] 对中国热带、亚热带地区森林土壤有机碳储量作了初步研究: 针叶林在 100 cm 土层内东部储量为 1.93 Gt, 西部为 4.18 Gt, 在 20 cm 土层内东部储量为 0.72 Gt, 西部为 1.72 Gt; 阔叶林 100 cm 土层, 东部为 1.06 Gt, 西部为 3.58 Gt, 20 cm 土层内东部为 0.44 Gt, 西部为 1.46 Gt; 灌丛和萌生矮林 100 cm 土层, 东部为 4.62 Gt, 西部为 7.94 Gt, 20 cm 土层内东部为 1.74 Gt, 西部为 2.87 Gt; 草原和稀树灌木草原 100 cm 土层内东部为 0.05 Gt, 西部为 0.37 Gt, 20 cm 土层内东部为 0.02 Gt, 西部为 0.16 Gt。黄承才^[15] 采用重铬酸钾-浓硫酸容量法, 研究了中亚热带东部毛竹 *Phyllostachys pubescens* 林和茶 *Camellia sinensis* 园土壤有机碳储量, 得出毛竹林和茶园土壤有机碳储量分别为 $224.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $92.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 进一步估算出浙江省毛竹林和茶园土壤有机碳储量为 9.94×10^7 t 和 4.67×10^7 t。

2 森林土壤碳储量主要估算方法

在以往的研究中, 对土壤有机碳储量的估计方法归纳起来主要有如下 4 种类型: ①根据植被类型推算。假定土壤有机质质量分数与植被类型相关, 根据各植被类型下的土壤平均碳含量及面积推算总碳储量。②根据土壤类型推算。利用土壤普查资料中的各土壤类型面积及土壤类型剖面或结合植被类型的土壤剖面平均含碳量来推算该类土壤的碳储量。③根据生命气候带推算。利用分布于各生命气候带内的土壤剖面数据来推算气候带内各主要生态系统的碳储量。④模型计算。以主要气候因子及土壤枯落物的输入量为影响因子建立数学模型, 来推算不同气候带及不同植被类型下土壤的有机质质量分数。但在众多估算方法中以 Batjes^[16] 所用的按土壤类型的研究方法和 Post^[17] 的按生命带方法的研究最有代表性。

2.1 按土壤类型的研究方法

土壤类型法实际上是土壤分类学方法, 通过土壤剖面数据计算分类单元的土壤有机碳储量, 根据各种分类层次聚合土壤剖面数据, 再按照区域或国家尺度土壤图上的面积得到土壤有机碳蓄积总量。

Batjes^[16] 将世界土壤图划分为 0.5 经度 $\times 0.5$ 纬度的基本面积单元, 每个单元需要土种分布、土壤深度、土壤容重、有机碳及砾石含量等数据, 用来计算面积单元的平均碳密度。设 j 代表地球表面面积网格单元, i 代表土层单元, 则各个面积单元 j 中的平均有机碳密度 T_{jd} 为: $T_{jd} = \sum_{i=1}^k \rho_i P_i D_i (1 - S_i)$ 。其中 ρ_i 为第 i 层土壤容重, P_i 为第 i 层土壤有机碳平均储量, D_i 为 i 层土壤厚度, S_i 为大于 2 mm 的平均砾

石含量。然后,可以推算出全球区域面积的土壤有机碳总量 $M_d = \sum_{j=1}^k A_j T_{jd}$ 。其中 A_j 是网格单元 j 的面积, T_{jd} 是 j 单元平均有机碳密度, n 为世界土壤图面积网格单元总数 (259 200 个)。

Betjes 方法需要具备较完整的全球各类土壤理化性质数据,若这项条件能满足(实际上难以做到),则统计结果相对较为准确可靠。

2.2 生命带研究方法

生命带法是按生命地带土壤有机碳密度与该类型分布面积计算土壤有机碳蓄积量。Post^[17,18] 使用了可反映全球各主要生命带的 2 696 个土壤剖面,其中大多数来自美国土壤保持局的数据库,其余为其本人所发表的研究结果。计算时对于没有实测容重数据的土层,其容重根据土壤有机碳的密度与深度关系来拟合求出: $B_D = b_0 + b_1 D + b_2 \lg C_f$ 。其中 B_D 为土壤容重, b_0, b_1, b_2 为不同植被类型下的已知土壤容重和碳密度所确定的常数, D 是从土表到土层中心的深度, C_f 为有机碳质量分数。于是单位面积 (1 m^2) 土层的平均碳密度 (C) 可由下式计算: $C = C_f B_D (1 - \delta_{2\text{mm}}) V$ 。其中 $\delta_{2\text{mm}}$ 为直径大于 2 mm 的砾石分数, V 为土层体积。用碳密度乘以各个生命带所对应的土地面积并累加,可得全球土壤有机碳总储量 (1 m 土层深度)。

使用该方法能较为容易地了解不同生命地带类型的土壤有机碳库蓄积总量,而且各类型还可以包含多种土壤类型,分布范围更加广泛,更能反映气候因素及植被分布对土壤有机碳蓄积的影响。但 Post 方法中全球植被类型与面积难以精确统计,植被与土壤类型并不一一对应,加之土地利用方式在人为影响下不断变化,这样,统计中不确定因素增多,计算误差也会较大。不过,在缺乏土壤剖面资料的情况下,推算所得结果仍具有一定意义。

2.3 GIS 估算土壤有机碳储量

首先用地理信息系统软件 ARC/INFO 将一定比例土壤图数字化,建立以土属为单位的空间数据库,然后计算各土壤土属每个土层的有机质质量分数:选取该土属内所有土种的典型土壤剖面,按照土壤发生层分别采集土壤有机质质量分数、土层厚度和容重等数据,计算出每个土层的土壤有机质平均质量分数和土层平均深度及其平均容重等,并建立土壤有机质的属性数据库,利用 ARC/INFO 的空间分析功能计算出各类土壤的有机碳储量。

各类土壤的总碳量^[19]: $C_i = 0.58 S_i \sum (H_j Q_j W_j)$ 。其中 i 为土壤类型, C_i 为第 i 种土壤类型的有机碳储量 (t), 0.58 为碳储量由有机质质量分数乘以 Bemmelen 换算系数, S_i 为第 i 种土壤类型的面积, H_j 为第 i 种土壤的 j 层的土属平均厚度, Q_j 为第 i 种土壤 j 层的土属平均有机质质量分数, W_j 为第 i 种土壤 j 层的土属平均容重。

GIS 估算方法可以对土壤图进行较为精确的类型划分,在此基础上应用 ARC/INFO 的空间分析功能与上面的公式可估算出比一般方法较准确的土壤有机碳储量,并可绘制其空间分布特征图。

2.4 模型估算土壤有机碳储量

国际上已经开发了多种土壤碳循环的模型^[21~25]。模型的类型既有相关关系模型和机理过程模型,也有基于实测数据和遥感数据的模型。尽管统计分析是土壤碳库评价中最小化空间变异性的可行方法,但模型却可以将剖面数据外推到相似的土壤和生态区域,解决尺度转换的问题^[26]。模型方法最大的限制性因素是缺乏大量相关和连续观测的数据,使模型的参数化和初始化更加困难。随着实验方法的改善,人们可以通过积累大量土壤碳动力学的信息,改善土壤碳模型,以提高管理土壤有机碳库的能力。

2.5 相关关系估算法

相关关系估算法主要是通过分析土壤有机碳蓄积量与采样点的各种环境变量、气候变量和土壤属性之间的相关关系,建立一定的数学统计关系,从而在有限数据基础上计算土壤有机碳蓄积量的目的^[27~30]。这种方法要求建立的相关性较高,可以通过测采样点的一些环境因子来得到土壤有机碳蓄积,具有方便、省力和简单等优点。

建立土壤有机碳含量与降水、温度、土壤厚度、土壤质地、海拔高度和容重之间的相关关系是普遍采用的一种方式。然而它们的相关关系并非普遍适用,在不同的地方主要控制因素是不同的,各种相关性表现不一,因此所确定的统计关系需要得到检验和验证,才能在本区域上应用,这是在实际应用中应注意的问题。

2.6 统计估算法

用该方法计算土壤碳库的公式如下: $\bar{c}_j = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \times H_i}{\sum H_i}$; $c = \sum_{j=1}^n \bar{c}_j \times 10 \div 1.724 \times \rho \times S \times \frac{2000}{3} \times \sum H_j \times 10^{-2}$ 。其中 \bar{c}_j 为第 j 个土种的加权平均有机质质量分数 ($g \cdot kg^{-1}$), c_i 为统计剖面第 i 层土壤的有机质质量分数 ($g \cdot kg^{-1}$), H 为第 i 层土壤厚度 (cm), c 为碳库 (kg), ρ 为土壤容重,取平均 $1.4 t \cdot m^{-3}$, $2000/3$ 为换算成平方米的系数, S 为 j 个土种的面积 (hm^2)^[31]。

统计估算法适用于国家尺度或区域尺度的土壤碳库计算,是一种较早应用并比较成熟的计算方法。用以上计算公式可以推出无机碳的估算公式^[31],说明它的应用与适应范围是比较广的。

2.7 土壤有机碳蓄积量估算方法误差分析方法

土壤有机质是受各种外在和内在因素影响而不断变化的^[32],依靠大量土壤普查获取的数据只是代表当时土壤的状况,是静态数值,并不能反映土壤的动态变化。土壤有机碳蓄积量的估算也只能是逐渐逼近真实值,不可能用一个值来代表土壤碳蓄积量。因此,分析土壤碳蓄积量的误差范围,以及土壤采样带来的随机误差和系统性误差,是准确反映土壤有机碳实际存储量的一个方法。大部分研究者在估算区域或国家、全球尺度土壤有机碳时,分析了不同土壤类型或生态系统类型土壤碳库的变异系数^[16,33]和误差范围^[16,34],认为不确定性范围在 20%~50%。概括起来,计算土壤碳密度误差项时有 4 种统计方法^[16,28,34]: ①土壤碳密度 ± 土壤碳密度的标准差 (standard error); ②土壤碳密度 ± 土壤碳密度平均值的标准差 (standard error of means); ③土壤碳密度 ± 1/2 的土壤碳密度标准差 (1/2 standard deviation); ④首先使用 t 检验计算每个土壤亚类的碳密度精度范围 L_a (limit of accuracy): $L_a = \frac{t \cdot D_s}{\sqrt{n}}$ 。其中, t 是显著性概率 0.05 水平下的分布值 (置信度为 95%, 可根据实际情况设置不同的置信度), 根据样本数查找数学手册中的 t 分布表可得 t 值, D_s 是土壤碳密度的标准差, n 为自由度 (样本数)。然后乘以亚类的面积得到各个土壤亚类碳蓄积量的误差范围,加上所有土壤亚类的误差得到国家尺度土壤有机碳蓄积量估计的总误差范围。

除了自然原因无法抗拒和改变之外,土壤分类、土壤观测和实验、数据收集、土壤采样和计算方法等人为因素也是产生土壤有机碳蓄积量估算误差的重要来源。此估算方法正是基于此而提出的。该估算方法的研究克服了因区域差异导致精确估算全球土壤碳库量的困难,通过改善区域估计而获得全球土壤有机碳储量的估算方法。

3 森林土壤活性有机碳测定方法

土壤活性有机碳库是指在一定的时空条件下,受植物和微生物影响强烈,具有一定溶解性,在土壤中移动比较快,不稳定,易氧化,易分解,易矿化,其形态和空间位置对植物和微生物来说活性比较高的那一部分土壤碳素。国外描述这一部分碳素的术语为微生物量碳和一部分微生物产物的碳。它包括溶性有机碳 (DOC) 和水溶性有机碳 (WSOC) 和土壤微生物量碳。

DOC 和 WSOC 是养分移动的载体因子,对土壤的碳、氮、磷、硫等的迁移转化起着重要作用,可预测碳和氮的土壤分布状况,也是环境污染物移动的载体因子,对重金属迁移转化起重要作用,DOC 的多少和在土壤中的存在时间与土壤的氧化物和黏土矿物对它的吸附有密切的相关性,DOC 也与微生物量有极好的相关性,土壤有机质损失的重要途径主要是 DOC 的淋失。由此可知 DOC 与 WSOC 的分析测定对开展土壤养分迁移转化、土壤有机质的生态化学过程乃至污染方面的研究都具有实际意

义。土壤微生物量碳与土壤中的碳、氮、磷和硫等养分的循环密切相关, 其变化可直接或间接地反映土壤耕作制度和土壤肥力的变化, 还可反映土壤污染的程度, 因此对它的研究也有重要的意义。

森林土壤活性有机碳的测定与通常所说的土壤活性有机碳测定方法类似。目前, 国内外有关活性土壤有机碳库的测定方法概括起来可分为三大类: 一类是物理分组法, 一类是化学方法, 再一类是微生物学方法。

3.1 物理分组法

用物理分组方法分离土壤活性有机碳是从 20 世纪 70 年代开始的^[35]。由于应用物理分组方法对有机质结构破坏程度极小, 分离的有机碳组分能够反映原状有机质结构与功能, 尤其反映有机质周转特征^[36], 所以这种方法在土壤有机碳的研究中受到更多的重视。常用的物理分组法包括颗粒大小分组法, 颗粒相对密度分组法(原称比重分组法)或这 2 种方法的结合。测定活性有机碳一般多用相对密度分组法^[37]。

迄今涉及物理分组法本身的研究很少。因此, 许多实验操作步骤还较模糊, 目前要严格地区分轻组和重组还不可能。在相对密度分组法中, 相对密度溶液也可以是有机溶液, 也可以是无机溶液, 在选择相对密度溶液时, 应该考虑到相对密度溶液的毒性和价格等因素。目前, 在还没有找到一种较为理想的溶液之前, 无机溶液选用溴化锌, 有机溶液选用溴仿-乙醇混合液都是可取的。

3.2 化学方法

活性有机碳包含土壤有机质易被氧化和易水解的那部分, 所以可以用温和氧化剂和酸溶液提取的化学方法来测定土壤活性有机碳。

3.2.1 氧化法 Blair 等^[38]认为对农业可持续发展系统来说, 土壤碳库容量是很重要的因子, 其变化主要发生在易氧化碳库里。Biederbeck 等^[39]通过动力学研究指出, 土壤有机质的短暂波动主要发生在易氧化分解部分, 并选择易氧化碳作为土壤活性有机碳的指示因子。化学氧化方法是将易氧化、不稳定的有机质作为活性有机质, 是根据土壤与氧化剂作用后, 有机质氧化消耗的氧化剂而确定。常用的氧化剂有 MnO_4^- , O_2 和 H_2O_2 。目前, 最常用的氧化剂是 $KMnO_4$ ^[40]。土壤易氧化碳的测定较迅速, 克服了测定微生物量需要做培养试验而且极易受环境因子影响的缺点。该方法方便简单, 适于大批样品的分析, 但需要昂贵的仪器, 要求实验器皿洁净度高, 操作技术熟练。

3.2.2 酸溶液提取法 Polglas^[41]采用一系列温度不同的三氯乙酸溶液来提取有机质, 即在 $4\text{ }^\circ\text{C}$, $0.3\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 三氯乙酸和 $90\text{ }^\circ\text{C}$, $0.15\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 三氯乙酸溶液中提取出来的有机质总和被认为是活性土壤有机碳。Hu 等^[42]使用 $12\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($22\text{ }^\circ\text{C}$) 和 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($100\text{ }^\circ\text{C}$) 的硫酸来提取土壤碳水化合物。

土壤碳水化合物是易被矿化的土壤碳库, 是有机质的重要部分, 占 $5\% \sim 25\%$ 。可见, 土壤碳水化合物与土壤有机碳之比在一定程度上能体现土壤活性有机碳。用酸溶液提取土壤时, 要把与腐殖质有关的受到生物降解保护的物质提取出来, 这样就降低了用酸溶液提取法来测定土壤活性有机碳的准确度。

3.2.3 氯仿熏蒸提取法 该方法将土壤经氯仿熏蒸处理之后进行培养。该过程中有大量的二氧化碳(CO_2)释放出来, 所释放的 CO_2 是来源于被氯仿熏蒸杀死的微生物。以不熏蒸土壤在培养期间所释放的 CO_2 量作为空白, 根据二者之间的差值来计算土壤微生物量碳。该方法最大的困难是空白的选择, 不适用于 $pH < 4.5$ 的酸性土壤, 也不能用于含有大量易分解有机物的土壤, 基本操作程序为熏蒸—培养—测 CO_2 —微生物量碳的浸提—微生物量碳的测定^[43, 44]。

氯仿熏蒸提取法是目前较成熟的方法, 适于大批样品的测定, 一次提取, 可同时测定微生物量碳和氮。并且该方法可用于淹水土壤的微生物生物量的测定。但是, 这种方法有 2 个方面的欠缺: 第一, 这个有效性指标受环境影响较敏感, 并且部分依赖于土壤本身的物理特性; 第二, 微生物量碳仅仅是土壤活性有机库的一部分。

3.3 土壤溶性有机碳(DOC)和土壤水溶性有机碳(WSOC)的测定

DOC 和 WSOC 通常采用的提取剂分别是稀盐溶液和水, 常用的稀盐溶液有 $CaCl_2$, KCl 和

K_2SO_4 ^[45], 也可使用磷酸盐缓冲溶液^[46,47]。DOC 以往是采用碳氮自动分析仪测定。其原理为所提取的溶性 DOC (由土壤溶液或水体取得) 先低温蒸干水分, 然后高温氧化燃烧, 测定产生的 CO_2 量, 即求得 DOC 量。目前采用 TOC 仪直接对提取液进行测定。

4 森林土壤碳释放

4.1 测定方法

4.1.1 碱液吸收法 具体步骤如下: ①选定合适的监测地点, 安置收集桶。②用吸管吸取一定浓度一定量的 NaOH 溶液 2 份置于烧杯中, 并分别将它们放置在收集桶内, 用来吸收土壤中和空气中的 CO_2 。③用盐酸滴定吸收液。④计算土壤中 CO_2 释放量。

所用化学公式反应方程式为 $CO_2 + 2NaOH = Na_2CO_3 + H_2O$, $Na_2CO_3 + BaCl_2 = 2NaCl + BaCO_3$, $NaOH + HCl = NaCl + H_2O$ 。

土壤中 CO_2 的释放量: $M_{CO_2} = (V_1 - V_2)NE/6M$ 。其中 V_1 为滴定收集空气中 CO_2 的 NaOH 溶液所消耗的盐酸体积 (mL); V_2 为滴定直接放置在地面上收集土壤中的 CO_2 的 NaOH 溶液所消耗的盐酸体积 (mL); N 为盐酸摩尔浓度 ($mol \cdot L^{-1}$); E 为 CO_2 的摩尔质量, 取值为 44; M 为收集桶口的面积, 一般 1 次实验经 1 个昼夜每隔 1 h 连续观测得到 24 个测值^[48]。

4.1.2 放射性碳同位素测定土壤呼吸释放的 CO_2 Wang 等^[49] 设计了一个土壤呼吸释放 CO_2 放射性同位素测量设备, 通过建立模型将土壤呼吸释放 CO_2 的碳放射性值和土壤碳循环联系起来, 并分离出根呼吸和异养呼吸。

$\Phi_T = \Phi_R + \Phi_H$, $\Phi_H = \Phi_T F = kC = C/t$, $(^{14}C)_{st} = (1 - F)(^{14}C)_{am} + F(^{14}C)_{sm}$ 。其中 Φ_T 是土壤释放的总 CO_2 , Φ_R 是根呼吸产生的 CO_2 , Φ_H 是微生物分解产生的 CO_2 , k 是土壤有机质的分解率 (该分解率是气候因子和土壤质地的函数), C 是土壤碳储量, F 是土壤有机质分解释放的 CO_2 的比率; t 是土壤有机质的周转时间; $^{14}C_{st}$ 为土壤呼吸释放的总 CO_2 的 ^{14}C 含量; $(^{14}C)_{sm}$ 和 $(^{14}C)_{am}$ 分别为有机质分解释放和根呼吸释放 CO_2 的 ^{14}C 值。由上式即可算出土壤呼吸释放的 CO_2 。

4.2 森林土壤碳释放量

对森林土壤碳释放量国内外已经做了大量的研究。Goreau^[50] 估算出巴西常绿森林土壤呼吸量为 $2.96 \sim 3.53 g \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$, 后来 Steudler^[51] 又估算出巴西森林土壤呼吸为 $3.66 \sim 3.72 g \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$ 。Lessard^[52] 估算出加拿大落叶林为 $2.33 g \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$ 。Rayment^[53] 估算加拿大黑云杉 *Picea mariana* 为 $14.53 g \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$ 。Rey^[54] 估算意大利栋树 *Azadirachta indica* 林为 $3.01 g \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$ 。Kutsch^[55] 估算出德国柞木 *Alnus glutinosa* 为 $4.81 g \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$ 。Toland^[56] 估算美国密歇根州北方阔叶林为 $1.29 \sim 1.31 g \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$ 。Fernandez^[57] 估算美国缅因州落叶林为 $2.10 g \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$ 。Hudgens^[58] 估算美国纽约赤松 *Pinus densiflora* 为 $0.41 g \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$ 。Huang^[59] 估算浙江青冈 *Cyclobalanopsis glauca* 林和毛竹林分别为 $1.80 g \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$ 和 $2.30 g \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$, 福建杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林为 $0.22 g \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$ (1 月) 和 $1.81 g \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$ (8 月)。

5 问题与讨论

CO_2 作为温室气体, 在大气中的浓度不断上升, 前面已经提到全球森林土壤有机碳储量约为 $402 \sim 787 Gt$ ^[5,6], 因此森林土壤有机碳库储量较小幅度的变动, 都会影响到全球气温的变化, 而且森林土壤有机碳储量还能反映土壤肥力, 对生物多样性的保护也有着重要作用, 但过去对全球碳库的研究侧重于地上部分, 对地下部分与土壤碳的研究没有引起足够重视, 致使这方面的研究不够深入。文章主要是总结了国内外对土壤碳方面的研究成果, 但由于土壤圈具有巨大的有机碳库, 又是对全球变化反应灵敏复杂的系统, 在减少碳汇不确定性方面理应具有极为重要的作用, 但目前尚未引起足够重视, 致使对这方面的研究尚存在不少问题^[60]。

5.1 土壤碳蓄积量的不确定性

土壤分类系统的不统一, 采样方法的差异, 以及选用不同的土壤碳蓄积量计算方法和参数估计方法使目前的土壤碳蓄积量的估算存在极大的不一致, 土壤实测数据不充分和缺乏连续、可靠、完整、统一的土壤剖面数据也使碳密度量测的可行性大打折扣^[61]。土壤碳氮含量、质地、容重等理化性质存在很大的空间差异, 气候、母岩、植被和土地利用对土壤碳库容量的综合影响也很难确定^[61], 各地区土壤厚度和面积统计资料来源不同也是蓄积估算不确定性存在的重要原因之一^[62]。不同尺度上的影响因子及主要控制因子也存在很大差异, 所以由此得到的土壤碳蓄积机理过程模拟及其潜在分解、固定和储存能力分析都会有所不同^[61]。

5.2 放射性碳同位素测定的准确性和显著性仍是一个值得深入讨论的问题

因为土壤有机质的形成是一个不断进行的过程, 它不断吸收新的含碳物质(如根系生长, 溶解于水中的有机成分的渗漏, 微生物影响以及土壤动物活动等), 并且这种测定方法中有一个基本的假设, 即土壤有机质呼吸释放 CO₂ 的¹⁴C 值可以以植物在非生长季生命活动 1 h, 土壤呼吸释放 CO₂ 的值来近似估计, 但是这种假设的正确性还有待于进一步探讨^[63~65]。

5.3 土壤有机碳测定方法上存在的问题

尽管不同方法在不同程度上反映有机质的有效性, 指示土壤有机质或土壤质量, 但国内外不同研究者对活性有机碳的测定方法和所指活性有机碳的部分不尽相同, 而且用不同方法测定出的结果差异性比较大, 相互并不能解释, 因此进一步完善土壤有机碳的测定方法是将来的研究重点。

5.4 模型计算土壤有机碳存在的问题

土壤微生物量碳与全碳的比值, 作为土壤碳库质量的敏感指示因子可以推断碳素有效性, 土壤矿化碳与全碳的比值可以指示土壤有机碳活性, 土壤易氧化碳与全碳的比值可以度量土壤有机碳氧化的活性^[66~68]。用模型推算土壤有机质碳, 存在着许多假设条件, 目前在假设条件下模拟与真实情况之间的差距较大, 且这种假设的正确与否还有待进一步研究, 因此发展更接近于事实, 更简单易行的方法和模型来研究土壤有机碳库非常必要。GIS 估算方法与模型的结合有着很好的应用前景。

5.5 应建立对土壤有机碳动态综合模拟的模型

建立基于主导影响因子的土壤有机碳动态模型是理解土壤有机碳储量及其对环境响应的关键, 现有的模型大多只是反映了某些影响因子及其未来情景将对土壤有机碳产生的影响, 没有反映综合因子的影响, 特别是对于人类活动影响的定量描述还很不够, 亦没有将土壤有机碳对全球变化的反馈体现出来。

针对以上问题, 在今后的研究中应着力于建立适用于全球或区域等不同尺度上的多个土壤分类系统, 推进观测采样和度量计算方法的规范化完善化^[69, 70], 扩充研究地点, 积累更为连续完整的土壤调查数据^[71], 做好不同时空尺度上数据的整合和集成工作, 考虑多方面影响因子的综合作用, 提高对土壤碳蓄积与碳密度估测的准确性。

参考文献:

- [1] SEDJO R A. The carbon cycle and global forest ecosystem [J]. *Water Air Soil Pollut*, 1993, **70**: 295—307.
- [2] HOUGHTON R A, HOBBIE J E, MELILLO J M, *et al.* Changes in carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO₂ to the atmosphere [J]. *Ecol Monogr*, 1983, **53**: 235—262.
- [3] HOUGHTON R A, SKOLE K L, LEFKOWITZ D S. Changes in the landscape of Latin America between 1850 and 1985 (I) Net release of CO₂ to the atmosphere [J]. *For Ecol Manage*, 1991, **38**: 173—199.
- [4] DETWILER R P. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils [J]. *Biogeochem*, 1986, **2**: 67—93.
- [5] AJTAY G L, KETNER P, DUVIGNEAUD P. Terrestrial primary production and phytomass [M] // BOLIN B. *The Unhal Rarhnn Cvde*. New Vnk-Inhn; Wileys & Sons, 1979; 129—181.
- [6] WBGU. *The Accounting of Biological Sinks and Sources Under the Kyoto Protocol—a Step Forwards of Backwards for Glnbal Environmental Protection* [R]. Brenehaven; WBGU, 1998; 46—50.
- [7] WOODWELL G M. The biota and world carbon budget [J]. *Science*, 1978, **199**: 141—146.

- [8] HOUGHTON R A. Land-use change and carbon cycle [J] . *Global Change Bio*, 1995, **1**: 275—287.
- [9] 蒋有绪. 世界森林生态系统结构与功能的研究综述 [J] . 林业科学研究, 1995, **8** (3): 314—321.
- [10] 陈遐林. 华北主要森林类型的碳汇功能研究 [D] . 北京: 北京林业大学, 2003.
- [11] HUMINGTON T. Carbon sequestration in an aggrading forest ecosystem in the southeast USA [J] . *Soil Sci Soc Am J*, 1995, **59**: 1459—1467.
- [12] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳储量和碳平衡 [J] . 植物生态学报, 2000, **24** (5): 518—522.
- [13] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环 [M] . 北京: 气象出版社, 2002: 1—3.
- [14] ZHAO Q G, LI Z. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* [M] . Netherland: Kluwer Academic Publishers, 1997: 1—6.
- [15] 黄承才. 浙江省毛竹 *Phyllostachys pubescens* 林和茶 *Camellia sinens* 园土壤碳库的研究 [J] . 绍兴文理学院学报, 2001, **21** (1): 55—57.
- [16] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J] . *Eur Soil Sci*, 1996, **47**: 151—163.
- [17] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, *et al.* Soil carbon pools and world life zones [J] . *Nature*, 1982, **298**: 156—159.
- [18] POST W M, MANN L K. Changes in soil organic carbon and nitrogen as a result of cultivation [M] //BOUWMAN A F. *Soils and the Greenhouse Effect*. England: John Wiley & Sons, 1990: 410—416.
- [19] 甘海华. 广东土壤有机碳储量及空间分布特征 [J] . 应用生态学报, 2003, **14** (9): 1499—1502.
- [20] ARROUAYS D, PELISSIER P. Modeling carbon storage profiles in temperate forest humic loamy soils of France [J] . *Soil Sci*, 1993, **167** (3): 185—192.
- [21] JENKINSON D S, ADAMS D E, WILD A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming [J] . *Nature*, 1991, **361**: 304—306.
- [22] KING A W, EMANUEL R W, WULLSCHLEGER D S, *et al.* A search of the missing carbon sink: a model of terrestrial biospheric response to land use change and atmospheric CO₂ [J] . *Tellus*, 1995, **47B**: 510—519.
- [23] PARTON W J, SCHIMEL D S, COLE C V, *et al.* Analysis of factors controlling soil organic matter levels in the Great Plains grasslands [J] . *Soil Sci Soc Am J*, 1987, **51**: 1173—1179.
- [24] PARTON W J, RASMUSSEN P E. Longterm effects of crop management in wheat/fallow (II) century model simulations [J] . *Soil Sci Soc Am J*, 1994, **58**: 530—536.
- [25] VEMAP M. Vegetation/ecosystem modelling and analysis project: comparing biogeography and biogeochemistry models in continental-scale study of terrestrial ecosystem responses to climate change and CO₂ doubling [J] . *Global Biogeochem Cycles*, 1995, **4**: 407—437.
- [26] LAL R. Soil organic dynamics in cropland and rangeland [J] . *Env Iron Pollut*, 2002, **116** (supp): 353—362.
- [27] KERN J S. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous United States [J] . *Soil Sci Soc Am J*, 1994, **68**: 439—455.
- [28] FRANZMEIER D P, LEMME G D, MILES R J. Organic carbon in soils of north central United States [J] . *Soil Sci Soc Am J*, 1985, **49**: 702—708.
- [29] POST W M, IZAURRALDE R C, MANN L K, *et al.* Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil [J] . *Clim Change*, 2001, **51**: 73—99.
- [30] BURKE I C, YONKER C M, PARTON W J, *et al.* Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U. S. grass-land soils [J] . *Soil Sci Soc Am J*, 1989, **53**: 800—805.
- [31] 杨丽霞. 利用森林生态系统循环综合模型模拟土壤有机碳动态变化 [D] . 南京: 南京农业大学, 2004.
- [32] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 杉木人工林土壤有机碳的垂直分布特征 [J] . 浙江林学院学报, 2004, **21** (4): 418—423.
- [33] BATJES N H, DIJKSHOORN J A. Carbon and nitrogen stocks in the soils of the Amazon region [J] . *Geoderma*, 1999, **89**: 273—286.
- [34] STONE E L, HARRIS W G, BROWN R B, *et al.* Carbon storage in Florida Spodosols [J] . *Soil Sci Soc Am*, 1993, **67**: 179—182.
- [35] OADES J M, LADD, J N. Biochemical properties: carbon and nitrogen metabolism [M] //RUSSELL J S, GREACEN E L. *Soil Factors in Crop Production in a Semi-arid Environment*. St Lucia: University of Queensland Press, 1977: 127—160.

- [36] CHRISTENSEN B T. Physical fraction of soil and organic matter in primary particle size and density separates [J] . *Adv Soil Sci*, 1992, **20**: 1—90.
- [37] 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.
- [38] BLAIR B J, LEFROY R D. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the developments of a carbon management index for agricultural systems [J] . *Aust J Agric Res*, 1995, **46**: 1 456—1 466.
- [39] BIEDERBECK B O, ZENTNER R P. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in a nared environment [J] . *Soil Biol Biochem*, 1994, **26** (12): 1 647—1 656.
- [40] LOGNINOW W, WISNIEWSKI W, STRONY W M, *et al.* Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation [J] . *Polish J Soil Sci*, 1987, **20**: 47—52.
- [41] POLGLASE P J, JOKELA E J, COMERFORD N B. Phosphorus, nitrogen, and carbon fractions in litter and soil of southern pine plantations [J] . *Soil Sci Soc Am J*, 1992, **56**: 566—572.
- [42] HU S, COLEMAN D C, CARROLL C R, HENORIX P E, *et al.* Labile soil carbon pools in subtropical forest and agricultural ecosystems as influenced by management practices and vegetation types [J] . *Agric Ecosys Environ*, 1997, **65**: 69—78.
- [43] JENKINSON D S. The rothamsted long-term experiments: are they still of use? [J] . *J Agr*, 1991, **83**: 2—10.
- [44] 王晶. 土壤活性有机质(碳)的内涵和现代分析方法概述 [J] . *生态学杂志*, 2003, **22** (6): 109—112.
- [45] MURPHY D V, MACDONALD A J, STOCKDALE E A, *et al.* Soluble organic nitrogen in agricultural soils [J] . *Biol Fertil Soils*, 2000, **30** (5/6): 374—387.
- [46] LEE D Y, FARMER J. Dissolved organic matter interaction with napropamide and four other nonionic pesticides [J] . *Environ Qual*, 1989, **18**: 468—474.
- [47] NELSON P N, DICTORM C, SOULAS G. Availability of organic carbon in soluble and particle size fractions from a soil profile [J] . *Soil Biol Biochem*, 1994, **26**: 1 549—1 550.
- [48] 张晓龙. 西安吴家坟秋季土壤的碳释放规律研究 [J] . *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2002, **30** (1): 115—120.
- [49] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析 [J] . *地理学报*, 2000, **55** (5): 533—545.
- [50] GOREAU T J, MELLO W Z. Tropical deforestation: some effects on atmospheric chemistry [J] . *Ambio*, 1988, **17**: 275—281.
- [51] STEUDLER P A, FEIGL B J, MELILLO J M, *et al.* Annual patterns of soil CO₂ emissions from Brazilian forests and pastures [J] . *Biogeochemistry*, 2000, **49**: 523—531.
- [52] LESSARD R, ROCHETTE P, TOPP E, *et al.* Methane and carbon dioxide fluxes from poorly drained adjacent cultivated and forest sites [J] . *Can J Soil Sci*, 1994, **74**: 139—146.
- [53] RAYMENT M B, JARVIS P G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest [J] . *Soil Biol Biochem*, 2000, **32**: 35—45.
- [54] REY A, POGORARO E, TEDESCHI V, *et al.* Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in central Italy [J] . *Global Change Biol*, 2002, **8** (9): 851—866.
- [55] KUTSCH W L, STAACK A, WOTZEL J, *et al.* Field measurements of root respiration and total soil respiration in an alder forest [J] . *New Phytol*, 2001, **160** (1): 157—168.
- [56] TOLAND D E, ZAK D R. Seasonal patterns of soil respiration in intact and clear-cut northern hardwood forests [J] . *Can J For Res*, 1994, **24** (8): 1 711—1 716.
- [57] FERNANDEZ I J, SON Y, KRASKE C R, *et al.* Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and after harvest [J] . *Soil Sci Soc Am J*, 1993, **57**: 1 115—1 121.
- [58] HUDGENS E, YAVITT J B. Land-use effects on soil methane and carbon dioxide fluxes in forests near Itaca [J] . *Ecosci*, 1997, **4**: 214—222.
- [59] HUANG C C, GE Y, CHANG J, *et al.* Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid-subtropical zone, China [J] . *Acta Ecol Sin*, 1999, **19** (3): 324—328.
- [60] 方精云, 朴世龙, 赵淑清. CO₂ 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇 [J] . *植物生态学报*, 2001, **25** (5): 594—602.
- [61] 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** (3): 797—

802.

- [62] 王绍强, 周成虎, 罗承文. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(3): 238—245.
- [63] PERRIN R M S, WILLIS E H, HODGE D A H. Dating of humus podzols by residual radiocarbon activity[J]. *Nature*, 1964, 202: 165—166.
- [64] SCHARPENSEEL H W, BECHER H P. 25 years of radiocarbon dating soils: a paradigm of erring and learning[J]. *Radiocarbon*, 1991, 33: 238.
- [65] WANG Y, HSIEH Y P. Uncertainties and novel prospects in the study of the soil carbon dynamics[J]. *Chemosphere*, 2002, 49: 791—804.
- [66] DOBBINS D C. Methodology for assessing respiration and cellular incorporation of radiolabeled substrates by soil microbial communities[J]. *Microb Ecol*, 1988, 15: 257—272.
- [67] BRADLEY R L, FYLES J W. A kinetic parameter describing soil available C and its relationship to rate increase in C mineralization[J]. *Soil Biol Biochem*, 1995, 27(2): 167—172.
- [68] SPARLING G P. Relationship between the amount and the activity of the microbial biomass in dutch grassland soils: composition of the fumigation incubation method and the substrate induced respiration method[J]. *Soil Biol Biochem*, 1993, 25(3): 530—538.
- [69] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99—105.
- [70] 方精云, 刘国华, 徐篙龄. 中国森林植被生物量和净生产力[J]. 生态学报, 1996, 16(4): 497—508.
- [71] FANG J Y, WANG G G, LIU G H, *et al.* Forest biomass of China: an estimation based on the biomass-volume relationship[J]. *Ecol Appl*, 1998, 8: 1084—1091.

Summary of estimated methods on forest soil's carbon pool

ZHOU Guo-mo¹, LIU En-bin¹, SHE Guang-hui²

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: Forestry soil organic carbon is an important component of the global carbon cycle, and it has direct effects on the global carbon balance. The estimated methods of soil carbon pool had important function to exactly estimate carbon pool, to reflect soil fertility, to protect biological diversity. This paper particularly summarized carbon reserves and carbon distributing of forestry soil, introduced all kinds of estimated methods on forestry soil's carbon, analyzed character and excellence and disadvantage of each method, indicated each method had its restricted condition and should be improved, methods of soil taxonomy, holdridge zones were most used, method of GIS was used recently, model was early used but was not mature; aiming at error of methods estimated, statistically analyzed error estimated in order to improved precision, finally expounded methods released of forestry soil and summarized harvest on this aspect. On this base, this paper summed up and analyzed existed problem on research methods. [Ch, 71 ref.]

Key words: pedology; forest; soil carbon pool; review; estimated methods; carbon balance; carbon cycle