

土壤有机碳密度及储量的统计研究*

金 峰 杨 浩 蔡祖聪 赵其国

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要 阐明了土壤有机碳密度及储量统计的重要意义, 介绍了国内外有关土壤有机碳储量研究的最新进展, 探讨了一种较为精确的土壤有机碳密度计算方法并列举了计算实例, 为全面而细致地统计我国土壤有机碳储量提供了一条可能途径。

关键词 土壤, 有机碳, 储量

中图分类号 S153.6

土壤圈与大气圈之间的碳平衡目前正受到越来越多的干扰, 自然因素和人为因素都会影响土壤有机碳储量, 如毁林、燃烧生物和化石燃料、气候变化、土地利用方式改变等等, 这些过程大多会加速向大气排放 CO_2 等各种温室气体。鉴于对全球温室效应的关注, 人们也在集中研究碳的储量、分布和在不同系统中的行为及影响关系, 联合国气候变化框架公约已要求签约国确定国家级尺度上温室气体净排放通量。对土壤有机碳密度和储量计算以及对土壤有机碳库所受影响因素的研究, 就是这项重要工作的一部分。土壤碳库量的统计远比海洋碳库和大气碳库的统计复杂, 已有的一些统计结果因过于粗略而未能令人满意, 全球更有相当大面积的一部分土壤的有机碳储量统计仍为空白。为此, 本文将对如何较为精确地统计我国有机碳的方法作一探讨, 以促进我国土壤有机碳储量的研究。

1 土壤有机碳储量研究的重要意义

近代的人类活动, 已对碳在地球各圈层特别是气圈与土圈之间的平衡机制产生相当显著的影响, 造成大气二氧化碳浓度的持续增高已为公认的事实^[1]。二氧化碳 (CO_2) 作为温室气体, 其浓度变化直接影响着地球表面对太阳热量的吸收和散发, 进而影响全球气候变化。虽然人们对于气候变暖的预报证据以及气候变暖对生态圈总体影响效果的利弊尚有争论, 但目前较一致的看法是: 全球气温升高加剧, 致使自远古以来一直在缓慢调节的生物圈生态平衡被迫在较短时间内作出适应, 这将不可避免地造成各微循环机制的许多环节表现异常^[2]。土壤碳库储量约为大气碳库的 2 倍^[3], 土壤有机碳库储量较小幅度的变动, 都可通过向大气排放温室气体而影响温室效应; 另一方面, 土壤有机碳的分解受土壤

* 中国科学院南京土壤研究所土壤圈物质循环开放研究实验室基金和 G1999011805 基金资助项目

收稿日期: 2000-01-28; 收到修改稿日期: 2001-05-25

温度与水分的影响显著, 土壤有机碳的积累和分解的速率决定着土壤碳库储量, 因此, 气候变化又反作用于土壤有机碳库的动态平衡。联合国《气候变化框架条约》要求签约国提交国家级水平的温室气体净排放清单, 其中包括与地面有关的 CO₂ 的源与汇, 这促使人们研究碳的数量、分布, 在不同系统中的行为及影响, 并进一步提出了有关模型的框架, 制定国家级碳收支计算的一般方法^[4]。建立土壤有机碳数据库是研究碳循环收支平衡计算的重要手段, 是统计土壤有机碳库储量的一项必不可少的基础工具。由于 GIS 技术的发展, 使土壤数据资料可利用性提高, 人们对区域性和全球性土壤有机碳储量的研究也愈趋广泛和深入。为保护珍贵的土壤资源, 同样需要人们对碳在各库之间的储量与流动通量有清晰的认识。有机碳是土壤肥力的重要组成部分, 耕作土壤有机碳含量不断降低所造成的土壤贫瘠化与土地利用方式密切相关, 定量地跟踪分析土壤与植物组成的陆地碳循环的每一个小过程及其规律性便十分重要。

统计我国的土壤有机碳储量及其分布状况, 也是研究全球土壤有机碳储量所必不可少的一个环节。我国于 1979 年起, 历时 16 年, 完成了全国第二次土壤普查, 汇集了较为详尽的土壤数据资料, 这为全面地精确统计我国土壤有机碳提供了必要条件。中国是个耕地资源匮乏的农业大国, 研究土壤有机碳的分布特征及影响因素, 探求如何科学地利用和保护有限的土壤资源并提高生产力以及减缓土壤中温室气体排放, 这不仅对我国国民经济的持续发展和生态环境的保护都具有重要的理论意义和较高的应用价值, 同时也可作为世界范围的碳循环研究提供宝贵的数据。

2 土壤有机碳密度及储量的统计方法

2.1 国内外研究现状

目前国内外有关土壤有机碳储量研究一般采用土壤类型法、植被类型法、生命带类型法和模型法。国外开展土壤有机碳储量及其影响因素的研究较早, 多数学者以世界土壤图等资料为主要依据, 用土壤类型法对统一的 1 米深度地球土壤碳库储量作了估算。60、70 年代的研究结果由于所用资料来源及处理方法的不同, 之间存在较大的差异, 90 年代以来各研究结果相对较为接近, 全球土壤有机碳储量统计值大多为 1500 Pg 左右。表 1 为一些较具代表性的全球土壤碳库统计研究结果:

表 1 国外有关全球土壤有机碳储量的一些研究结果

Table 1 Some research findings on the reserve of organic carbon in the soils of the earth

研究者(年代) Researcher(years)	土壤有机碳储量 Reserve of organic carbon in the soils of the world (Pg)	研究者(年代) Researcher(years)	土壤有机碳储量 Reserve of organic carbon in the soils of the world (Pg)
Bohn (1976) ^[5]	3000	Post (1990) ^[10]	1200~ 1600
Bolin (1977) ^[6]	700	Schleisinger(1990) ^[11]	1,500
Bohn (1982) ^[7]	2200	Eswaran (1993) ^[3]	1,576
Post (1982) ^[8]	1395	Batjes (1995) ^[12]	1,462~ 1,548
Buringh (1984) ^[9]	1427		

国内的研究者对土壤有机碳密度与储量也做过一些近似估算,例如本文作者之一曾初步统计了我国热带、亚热带地区不同植被分类类型下的土壤有机碳储量^[13, 14]。

影响土壤有机碳库储量估算精确度的因素一般有以下一些方面:土壤碳密度的空间变异性;容重受土壤含水量、松紧度等因素影响;对不同土壤或植被类型的面积资料不准确;植被与土地利用方式已发生较大变化;统计样本偏小;土壤有机碳的浓度、土壤容重及砾石数量等资料的匮乏;此外,较粗略计算方法也会造成最终相当大的累计误差。这些缺陷都或多或少地存在于目前的研究中。本文研究的目的是最大程度地合理采集我国第二次土壤普查资料数据,建立较完善的土壤有机碳数据库,并在计算方法上尽可能做到精确。

2.2 土壤有机碳储量的统计

可以根据已有的我国第二次土壤普查的数据资料和现行的土壤分类系统,用土壤类型法来统计我国土壤有机碳密度与储量。

土壤的理化性质具有时空变异性,其理化性质往往存在较大差异。我国第二次土壤普查的土壤分类系统由土纲、亚纲、土类、亚类、土属、土种(及变种)六级分类单元组成,高级分类单元包括一个以上的次一级单元。一般来说,所属分类单元越低,土壤的成土条件越趋一致,其理化性质越相近,土壤有机质含量的变异性就越小。因此,考虑到土壤理化性质对空间的变异性较大,所统计的地理区域范围不宜过大;同时,必须尽量保证数据资料的权威性与完整程度。因此,宜选取省级以上土壤普查资料为基础,以各省的土壤亚类为基本的统计单元,以土属为计算的延伸基层。首先以亚类的各土属面积为权,求土属的有机碳密度的加权平均值,即亚类的土壤有机碳密度;然后根据亚类面积,可统计出本亚类的土壤有机碳储量。

某区域(省或自治区为单位)土壤的有机碳总量 $M = \sum_i^n A_i T_i$ 。式中, A_i 是某土壤亚类的面积, T_i 是该亚类的平均有机碳密度,即单位面积 1 米深土体所含土壤有机碳质量, n 为此区域所包括的土壤亚类总数($i = 1, 2, \dots, n$)。

土壤的有机碳密度和面积是计算有机碳总量的两个最基本数据,对不同类型土壤的面积数据准确与否,将直接影响计算的可靠性。对此,应利用有相应比例尺保证的土壤图,这样不但可以较准确地获得面积数据,而且可以将全国土壤有机碳分布以统一比例尺在图上绘制出来,不同级别的碳密度土壤以不同图斑表示。建立数据库应注意使土壤分类系统和所用的土壤图保持一致,这样才能将确立的基本单元中的土壤有机碳密度与土壤数字化图提供的面积结果相对应,碳密度才能在相应得地图上得到反映。由于土壤图与第二次普查的土壤分类系统并不完全一致,需要对一些非共同的土类或亚类进行近似归并^[14]。

2.3 土壤有机碳密度的计算

土壤有机碳密度是不仅是统计土壤有机碳储量主要参数,其本身也是一项反映土壤特性的重要指标,它是由土壤有机碳含量、砾石(粒径 > 2mm)含量和容重所共同确定的。对于共分为 m 层的某土壤剖面,若其的第 j 层中土壤有机碳平均含量为 c_j (g kg^{-1}), 平均容重为 ρ (g cm^{-3}), 砾石的体积分数为 $\xi\%$, 厚度为 d_j (cm), 则此剖面深度内土壤有机碳密度 T_0 (kg m^{-3}):

$$T_0 = \sum_j^m \frac{(1 - \delta\%) \rho_{cdj}}{100}$$

目前国内外大多数研究是以 1 m 深度为计算参照标准的, 这样有利于结果之间相互比较。由于我国第二次土壤普查的剖面深度一般小于 1 m, 因此需要以原剖面数据为基础来推算 1 m 深度土壤的有机碳密度(某些土壤因土体很薄而不能推算至 1 m, 应按实际深度计算): 以各土层有机碳平均含量为横坐标(c_j), 以各层中点深度为纵坐标(y_i), 以诸点(c_j, y_j)按非线性回归方法可求得有机碳含量与土壤深度的曲线方程 $c = c(y)$, 然后对所求的深度范围利用数值计算方法求解积分值。这样, 1 m 深度的土壤有机碳密度 T_{1m} 为:

$$T_{1m} = T_0 + \int_{y_b}^{1m} \frac{(1 - \delta\%) \rho(y) c(y)}{100} dy$$

式中, T_0 为原始剖面深度范围内土壤有机碳密度, y 为深度坐标, $\rho(y)$ 为按各土层平均容重所回归得到的容重函数, y_b 为土壤原始剖面底边深度坐标值。根据 y_b 与 1 m 深度的上下位置关系, 积分项可为正或负值。土壤普查资料中列出的往往是有机质数据, 有机碳数据还需通过乘以转换系数得到^[15]。

一般来说, 土壤有机碳含量随深度增加而减小。以往有人按土壤类型(土类或亚类)求解有机碳的总体分布规律, 然而大量的土壤普查剖面数据表明, 有机碳沿深度分布函数形式与所属土壤种类并没有高度一致的关系。因而, 用某一种固定的回归方程及回归系数来代表某类土壤所有剖面的有机碳分布规律, 易造成大多数剖面分布的回归方程相关系数 r 过小和残差标准差 s 过大, 造成本可避免的额外计算误差。对此, 本研究根据实测数据, 动态地用不同形式非线性(包括线性)方程分别对每一个土壤剖面有机碳分布都单独进行回归拟合, 选取一种相关系数 r 最大而残差标准差 s 最小的形式。本文共用了 7 种形式的方程:

- (1) 线性函数 $c = a + by$,
- (2) 双曲函数 $c^{-1} = a + by^{-1}$,
- (3) 幂函数 $c = ay^b$,
- (4) 指数函数 $c = ae^{by}$,
- (5) 指数函数 $c = ae^{by^{-1}}$,
- (6) 对数函数 $c = a + b \lg y$,
- (7) S 型函数 $c = (a + be^{-y})^{-1}$ 。

式中, a, b 为回归方程系数, 回归方程的相关系数与残差标准差公式有文献可查^[15], 此处省略。实际计算时, 以上表达式中的非线性回归系数、相关系数、标准差和积分值都可用计算机编程求解。使用本文这种细致的统计方法虽然增加了一些工作量, 但借助计算机做大量复杂计算还是方便的(如数值积分), 而且对于土壤有机碳的繁杂多样的剖面分布, 都可以很快找出最佳的回归方程, 这样便大大地提高了计算精确度和工作效率。

3 土壤有机碳密度及储量的统计实例

本文以山东省土壤为例, 运用上述计算方法, 统计了全省各亚类土壤的有机碳密度及

其储量(表 2)。全省总面积占全国的 1.6%, 其中土壤面积为 12 110 372 hm^2 , 耕地面积为 8 533 000 hm^2 , 有 14 种土类和 34 种土壤亚类, 因篇幅所限, 表中未列出各土属数据, 土壤普查资料可详见^[16~20]。全省土壤的 1 米土体有机碳总储量约为 0.62 Pg。依照本文方法, 可较细致地统计出全国的土壤有机碳密度和总储量, 进一步可统计全国耕型土壤的耕作层有机碳密度和储量。

表 2 山东省各亚类土壤有机碳密度与储量统计表

Table 2 Statistics of densities and reserves of organic carbon in soils of Shan' dong Province

土类 Soil order	亚类 Soil suborder	土类面积 Area of soil order (hm^2)	亚类面积 Area of soil suborder (hm^2)	1m 深度土体内有 机碳密度 SOC density in soil body of 1m in depth (kg m^{-2})	1m 深度土体内有 机碳储量 SOC reserve in soil body of 1m in depth (t)
棕壤	棕壤	1 777 374	1 008 357	3.29	33 154 773
	白浆化棕壤	0	71 261	2.26	1 612 646
	潮棕壤	0	345 916	5.30	18 326 622
	棕壤性土	0	351 839	5.10	17 926 214
褐土	褐土	1 775 092	408 949	4.68	19 130 612
	石灰性褐土	0	143 871	3.99	5 740 463
	淋溶褐土	0	380 063	5.23	19 881 095
	潮褐土	0	683 377	8.25	56 399 125
	褐土性土	0	158 832	5.99	9 506 111
红粘土	红粘土	63 868	63 868	3.82	2 437 836
新积土	冲积土	74 363	74 363	2.84	2 114 147
风沙土	草甸风沙土	55 397	55 397	0.22	124 088
石质土	酸性石质土	154 987	95 907	0.86	827 675
	中性石质土	0	5 357	1.34	71 735
	钙质石质土	0	53 723	1.23	659 178
粗骨土	酸性粗骨土	2 397 685	1 610 090	0.44	7 084 397
	中性粗骨土	0	215 676	1.98	4 276 849
	钙质粗骨土	0	571 919	2.60	14 858 464
砂姜黑土	砂姜黑土	536 638	383 098	7.55	28 916 206
	石灰性砂姜黑土	0	153 540	8.98	13 794 051
山地草甸土	山地草甸土	1 440	1 440	3.58	51 600
潮土	潮土	4 665 808	3 075 787	7.38	226 870 073
	脱潮土	0	476 878	4.60	21 936 403
	湿潮土	0	175 774	7.62	13 395 700
	盐化潮土	0	924 079	6.62	61 174 051
	碱化潮土	0	13 289	3.42	453 821
	草甸盐土	草甸盐土	74 676	71 251	3.39
滨海盐土	碱化盐土	0	3 426	1.62	55 563
	滨海盐土	388 584	265 174	5.93	15 732 801
	滨海沼泽盐土	0	5 675	7.30	414 203
	滨海潮滩盐土	0	117 735	2.62	3 079 935
碱土	草甸碱土	755	755	2.57	19 438
水稻土	潜育水稻土	143 706	1 059	9.67	102 415
	淹育水稻土	0	142 647	12.84	18 308 725
合计		12 110 372	12 110 372		620 853 143

4 结 语

土壤有机碳密度与储量的统计数据对于研究土壤与大气间温室气体通量、研究土地利用方式对土壤质量的影响及土地质量演变规律等等, 都是至关重要的, 对于研究全球碳循环来说更是必不可少, 这些需要有大量的统计工作为铺垫, 而任何深入的研究都依赖于基本土壤普查资料的完整性和准确性。目前尽管有大量的第二次土壤普查资料作基础, 但各地区主要土壤的分析数据相对来说仍较欠缺, 而且各地所提供的数据质量参差不齐; 另外, 这些数据反映的是我国十多年前的情况。近十年因经济建设不断加速发展, 土地利用尤其是耕地情况变化很大, 生态环境也发生了一定的变化, 因此, 有必要切合实际情况继续进行更深入细致的基础研究。

参 考 文 献

1. Conway T J, Tans P P, Wateman L S, *et al.* Evidence for inter annual variability of the carbon cycle from the NOAA/CM DL global air sampling network. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99D: 22831~ 22855
2. Samiento J L, Lequere C. Oceanic CO₂ uptake in a model of century scale global warming. *Science*, 1996, 274: 1346~ 1350
3. Eswaran H, Van Den Berg E V, Reich P. Organic carbon in soil of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 192~ 194
4. Parson E A. A summary of the major documents signed at the earth summit and the global forum. *Environment*, 1992, 34: 12~ 15
5. Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1976, 40: 468~ 470
6. Bolin B. Changes of land biota and their importance for the carbon cycle. *Science*, 1977, 196(4290), 613~ 615
7. Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, 46: 1118~ 1119
8. Post W M. Soil carbon pools and world life zone. *Nature*, 1982, 298: 156~ 159
9. Buringh P. Organic carbon in soil of the world: The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle. *Scope*, 1984, 23: 91~ 109
10. Post W M. The global carbon cycle. *American Scientists*, 1990, 78: 310~ 326
11. Schleisinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon storage potential of soils. *Nature*, 1990, 348: 232~ 234
12. Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47: 151~ 163
13. Zhao Qiguo, Li Zhong. Organic carbon storage in soils of southeast China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherland, 1997, 00: 1~ 6
14. Li Zhong, Zhao Qiguo. Carbon dioxide fluxes and potential mitigation in agriculture and forestry of tropical and subtropical China. *Climatic Change*, 1998, 40: 119~ 133
15. 邓勃. 分析测试数据的统计处理方法. 北京: 清华大学出版社, 1995. 105~ 150
16. 中科院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科技出版社, 1978. 133
17. 山东省土壤肥料工作站. 山东土壤. 北京: 中国农业出版社, 1994
18. 山东省土壤肥料工作站. 山东土种志. 北京: 中国农业出版社, 1993
19. 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998
20. 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查数据. 北京: 中国农业出版社, 1997

CALCULATION OF DENSITY AND RESERVE OF ORGANIC CARBON IN SOILS

Jin Feng Yang Hao Cai Zurong Zhao Qirguo

(LMCP. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Summary

In this paper, efforts are made to illustrate the significance of statistics of the reserve and density of organic carbon in soil, to introduce the latest development of the research in this field both at home and abroad, and to explore an accurate method for calculating densities of carbon in soils with an example, and hence to provide a potential approach to a general meticulous statistics of the organic carbon reserve in the soils of China.

Key words Soil, Organic carbon, Reserve