

土壤有机碳的剖面分布特征及其密度的估算方法研究

——以我国东北地区为例

孙维侠 史学正 于东升

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘要 土壤有机碳(C)库在全球变化研究中具有极其重要的地位,而土壤剖面中有机C分布特征及估算是精确计算土壤有机C库的前提。本文收集了《中国土种志》和东北3省土种志中有关的土壤剖面属性数据,建立以土壤有机C为主体的数据库,讨论了土壤剖面有机C的分布特征及土壤剖面不同分类单元下土壤有机C的估算方法,为合理和准确地估算土壤有机C密度及土壤有机C库提供科学依据。

关键词 有机C密度;土壤类型;分布特征;估算方法

中图分类号 S153.6, S155

由于工业化进程不断加剧,大气中温室气体浓度迅速上升,全球变暖已经成为各国政府、科学家及公众强烈关注的人类生存环境问题。其根源是由于人类活动的影响,加速或改变自然界各种自然过程,工业化进程消耗了越来越多的能源,释放了大量的CO₂和其它温室气体到大气中,从而产生温室效应和全球变暖问题。这些过程改变和破坏了地球原有的生态环境和生态平衡,对人类自身的生存和发展提出了严峻的挑战^[1,2]。

土壤是陆地生态系统的核心,是连接大气圈、水圈、生物圈及岩石圈的纽带。据估算全球大约有1500 Gt的C是以有机质形态存在于地球表层土壤中^[3]。对土壤有机C贮存总量及其动态的详细研究,是深入揭示土壤有机C贮量变化的关键,这有助于揭开全球C“未知汇”之谜^[4]。土壤有机C密度不仅是估算土壤有机C贮量的最为重要的参数,其本身也是一项反应土壤有机C分布特性的重要指标。土壤有机C密度与贮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都是至关重要的^[5]。当前土壤C循环仍然是陆地C循环研究中最缺乏的部分,尤其对土壤有机C动态变化的研究还不够深入,各研究结果之间仍存在相当大的差异。尽管现在对全球C循环的部分定性定量结果已有了解,但要更加精确地确定C在循环中各个环节的收支平衡,仍存在许多难点^[6]。为此,如何计算土壤有机C密度是精确估算土壤有机C贮量的前提,也是土壤有机C

贮量估算过程中首先所遇到的问题。

目前国内外通常都是根据文献、统计资料、调查数据、调查报告等土壤剖面的土壤有机C含量数据来估计土壤C密度。Olson(1983)、Post等(1982)曾比较全面地估计了全球各种生态系统类型的C密度^[7],但他们也是仅仅以有限的样本进行估计,对于全球尺度的土壤C库来说,估计的精度和质量难以保证,很难精确计算全球土壤C储量。我国对土壤有机C密度的研究刚刚起步,李忠等根据我国第二次土壤普查数据,估算了我国东部土壤有机C的密度,但对于估算各种类型土壤剖面的有机C密度并没有详细的说明^[8]。金峰等根据我国第二次土壤普查数据,用7种形式的回归方程,对每一个单独的土壤剖面有机C进行回归拟合,估算土壤剖面有机C密度^[5]。但以单独剖面进行统计分析时,有机C随土层深度的分布并没有很好的相关性,拟合曲线方程需要进一步验证。王邵强则没有采取统一的剖面深度,而是根据第二次全国土壤普查资料的采样实际深度,计算土壤有机C密度^[9],这样与国际上很难进行比较和交流。本文以我国东北3省为研究区,通过收集增补东北3省《土种志》中的土壤剖面数据,系统地研究土壤有机C的剖面分布特征和各种类型土壤剖面有机C密度估算方法,总结其规律性,为合理选取估算模型,方便、快捷、合理地计算土壤有机C密度,进一步精确地统计全球土壤有机C贮量提供可靠的计算方法。

1 材料与方法

1.1 数据源

全国第二次土壤普查从1979年开始,历时16年,共完成2444个县、312个国营农(牧、林)场和44个林业区的土壤普查,汇总编著了《中国土壤》和《中国土种志(六卷)》等专著,编写出土壤志和土种志等5500多份,专题调查报告6800多份,并编绘不同比例尺土壤图和土壤养分图等共计44000多幅。这次土壤普查面广量大,内容十分丰富,积累了大量的空间和属性数据。本文收集了东北3省全国第二次土壤普查数据,共计736个典型土壤剖面的实测数据,其中362个剖面摘自《中国土种志》(第二卷)^[10],其余的374个剖面数据分别摘自《黑龙江土种志》^[11]152个、《吉林省土种志》^[12]122个和《辽宁省土种志》^[13]100个。这3个省的736个土壤剖面共分成23个土类,其中草甸土剖面数最多,有137个;50~100个剖面的土类有黑土、黑钙土、暗棕壤、棕壤和水稻土;而沼泽土、白浆土、褐土、风砂土、潮土、泥碳土等土类的剖面较少,都在50个以下。

1.2 土壤剖面有机C密度的估算途径

国际上土壤有机C密度通常是指土壤剖面深度为1m,每平方米土体中所含有的土壤有机C质量,单位为 Kg/m^2 ,就是指土壤剖面深度1m作为估算土壤有机C库的基准,然后进行比较。这样如何精确地估算1m土体内土壤有机C含量就成了陆地生态系统土壤有机C估算的关键。本文在土壤剖面有机C密度计算过程中,就是采用国际通用的土壤剖面1m的深度基准。由于自然界的土壤千差万别,自然土壤剖面深度不可能正好就是1m。对于1m的剖面,计算土壤C密度就比较简便,取土壤剖面深度为1m就可以计算出土壤有机C密度。但东北3省700多个土壤剖面中,有许多剖面深度都不到1m,这些剖面具体有两种情况,一种是土体本身的实际厚度所限,剖面深度不到1m,土层以下为坚硬的岩石,这就是石质接触,对于这种情况,就可以根据现有剖面实测的有机C含量进行估算土壤剖面的有机C含量,土层以下土壤有机C为零。另一种情况是实际土层厚度超过1m,但当时采样深度不到1m,对于这种情况,就要根据土壤剖面深度和采样分析数据都>1m的剖面,拟合出一条土壤有机C含量随土壤剖面深度变化的曲线,根据拟合曲线来估算实际土壤剖面深

度超过1m、但采样深度不到1m的剖面土壤有机C密度。本文收集到的东北地区736个典型土壤剖面中,共有12个剖面为石质接触,522个剖面深度等于或超过1m,202个剖面的土层厚度1m,而采样深度不到1m,在计算土壤有机C密度时需要进行估算。

1.3 土壤有机C的分布表征及其C密度的估算方法

本文把收集到的所有土壤剖面数据经整理并建立以土壤有机C为主体的数据库。首先,分别根据土壤剖面所属的土壤类型进行归类整理,取采样土层的中间深度与相应的土壤有机C含量为一对数值,作成土壤有机C在土壤剖面中的分布图,相对直观地揭示土壤有机C在土壤剖面中的分布表征。其次,为了对土层厚度>1m而采样深度不到1m的土壤剖面有机C密度估算得更精确,按土类选取采样深度1m的剖面,利用数据统计软件SPSS11.0进行相关统计分析,探讨土壤有机C含量随剖面深度的变化规律,根据相关性显著程度及反应数据离散程度的标准差、方差等统计量,对土壤有机C随剖面深度变化规律性强、数据分布集中的土类,建立回归模型及拟合曲线方程,今后可以直接应用这些回归模型及拟合曲线方程进行土壤C密度的估算。第三,对于那些土壤有机C在剖面中的分布较离散、分布规律性差的土类,为了得到拟合度高的曲线,我们将按更低的土壤分类单元如亚类或土属进行相关性统计分析。由于土壤较低分类单元数量太大,本文只选取主要土类中有代表性的亚类或土属进行讨论。

2 结果与讨论

2.1 土壤有机C的剖面分布表征

东北地区其气候、地貌和植被等自然环境独特,是全球变化最为敏感的区域之一,因而东北地区生物地球化学循环特征将对其陆地生态系统的演化、区域气候和中国温室气体源汇总量等产生深刻的影响(董云社等,2000)。在温度、水分状况、地貌条件、植被和成土母质的影响下,东北地区土壤具有显著的冷湿性森林和草甸草原土壤的特色,各类土壤的有机C含量均高于其他地区。根据本文统计,不同土壤类型之间土有机C含量差异明显,各土类表层土壤平均有机C含量见表1。

为了直观地比较不同土壤类型有机C在土体内的分布规律,利用收集到的东北地区所有土壤剖面数据,以土壤有机C含量为横坐标,相应土体深

度为纵坐标作图。有机 C 随土层深度的空间分布主要有两种类型：一种为数据分布比较集中的土类，如棕壤和白浆土；另一种是数据分布比较离散、分布规律性不明显的土类，如黑钙土和草甸土(图 1)。

表1 东北地区各土类表层(0~20cm)土壤有机C含量(g/kg)
Table 1 Average organic carbon contents in surface soil layers (0~20cm) of different types of soils in Northeast China

土类名称	剖面数	平均含量(g/kg)	土类名称	剖面数	平均含量(g/kg)	土类名称	剖面数	平均含量(g/kg)
暗棕壤	75	48.2	黑土	55	28.4	盐土	10	16.6
白浆土	35	33.4	红粘土	8	8.7	沼泽土	36	60.0
滨海盐土	3	21.0	火山灰土	8	50.3	棕壤	56	16.4
草甸土	137	25.3	山地草甸土	3	118.1	棕色针叶林土	5	68.4
潮土	19	11.5	栗钙土	7	16.4	黑钙土	89	20.0
粗骨土	7	19.2	泥炭土	13	146.7	新积土	18	17.4
风砂土	33	6.8	碱土	12	15.0	石质土	9	24.8
褐土	32	13.8	水稻土	67	39.7			

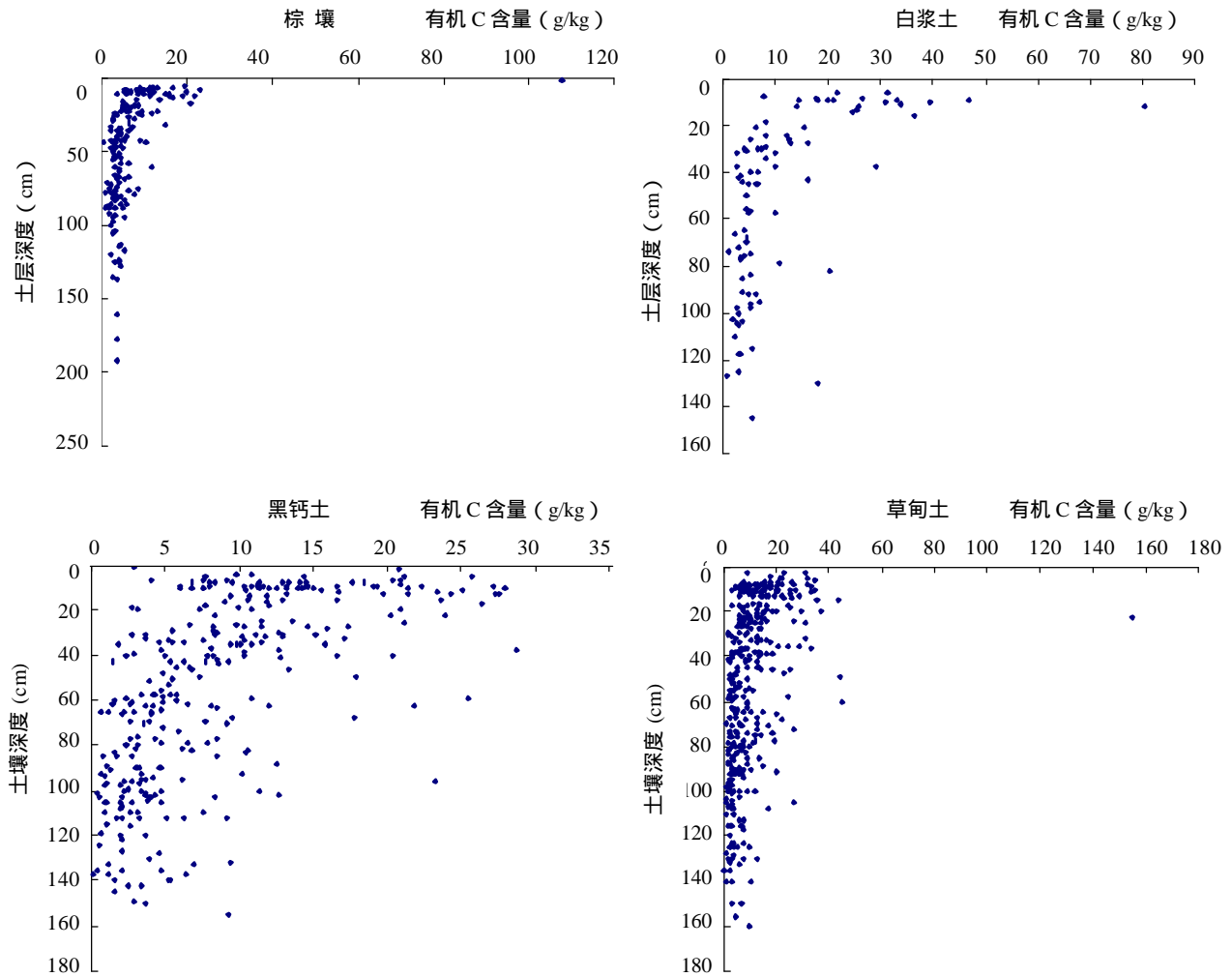


图 1 部分土类有机 C 在土体中的分布特征

Fig. 1 Characteristics of organic carbon distribution in solums of some types of soils

根据本文统计，东北地区 23 个土类中，除泥炭土和山地草甸土外，其它土类有机 C 含量与土层深

度均在 0.01 或 0.05 水平上显著相关。根据土壤有机 C 随土壤剖面深度变化特征，就可以来估算土层厚度 > 1m 而采样深度不到 1m 的土壤剖面有机 C 密度。对于数据分布比较集中、分布规律性相对较高的土类，可以根据土类进行回归拟合，估算所指定深度下的土壤有机 C 含量。有机 C 在土体中分布比较离散、分布规律性相对较差的土类，主要是由于更低级土壤分类单元的剖面数据分异和受土地利用等因素所造成的，对于这些土壤类型本文将根据土壤分类中较低分类单元如亚类和土属分别进行统计分析，以拟合出最佳的回归曲线方程。

2.2 以土类为单元的拟合曲线

对于数据分布比较集中、分布规律性比较明显的土类，以各土类中土体深度 1m 的剖面为数据基础，利用数据统计软件 SPSS 进行统计分析，根据相关显著性水平、方差、标准差等统计量综合选取一种最佳回归模型即回归曲线方程。本文对土壤有机 C 含量与土层深度在 0.01 水平上显著相关、标准差 40 的剖面数据，以土类为单元选取回归曲线方程。结果表明，在 23 个土类中，有 8 个土类可以根据土类选取回归方程，这些土类的统计分析数据及拟合曲线方程见表 2。

表 2 按土类拟合的土壤有机 C 随剖面深度的统计结果及回归曲线方程

Table 2 Statistics of soil-group-based simulated variation of soil organic carbon with the depth in profile and regression curve equations

土类名称	剖面数	相关系数	显著性水平	最佳回归模型	拟合曲线方程
暗棕壤	27	-0.563	0.01	幂函数	$Y=30.505 \times t^{(-0.6808)}$
白浆土	22	-0.554	0.01	幂函数	$Y=30.1917 \times t^{(-0.7388)}$
风砂土	22	-0.575	0.01	幂函数	$Y=14.155 \times t^{(-0.5461)}$
褐土	24	-0.399	0.01	幂函数	$Y=15.953 \times t^{(-1.0012)}$
红粘土	8	-0.599	0.01	幂函数	$Y=6.4118 \times t^{(-1.3916)}$
火山灰土	3	-0.770	0.01	幂函数	$Y=18.719 \times t^{(-0.9488)}$
栗钙土	5	-0.790	0.01	幂函数	$Y=19.648 \times t^{(-0.8221)}$
棕壤	41	-0.354	0.01	幂函数	$Y=17.617 \times t^{(-0.9678)}$

说明：(1) Y表示土壤有机C含量(g/kg), t表示土层深度 (cm); (2) 只有土层深度 1m的剖面才参与统计分析(以下同)。

以白浆土和棕壤为例，拟合曲线如图2所示。

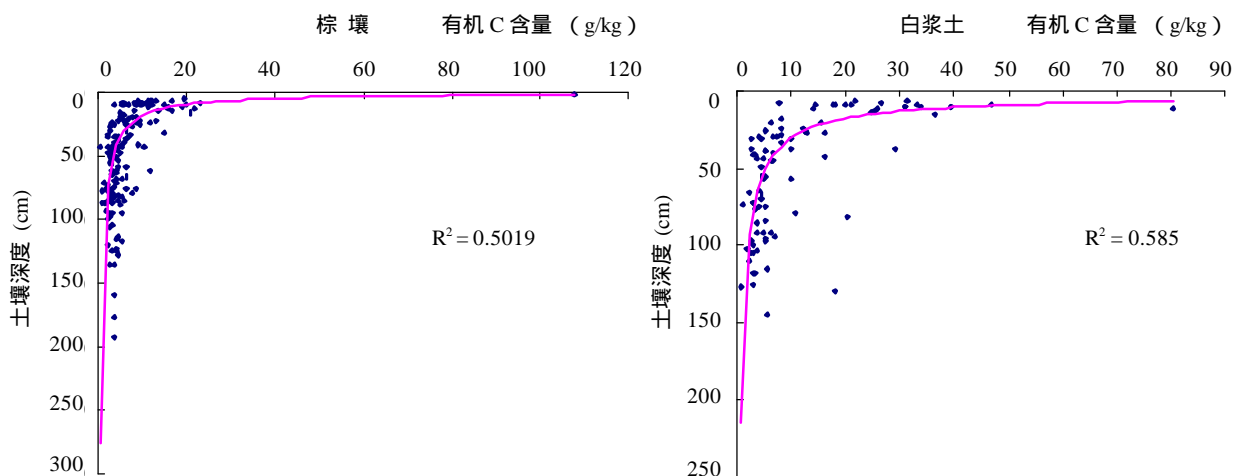


图 2 按土类拟合的土壤有机C随剖面深度变化的回归曲线

Fig. 2 Regression curves of the soil-group-based simulated variation of soil organic carbon with the depth in profile

2.3 以亚类或土属为单元进行统计分析(以黑钙土为例)

在 23 个土类中,有 13 个土类尽管有机 C 含量与土体深度达到显著相关,但有机 C 在土体中数据分布比较离散,方差、标准差较大,数据分布规律性不明显。对于这些类型,以较低的亚类或土属为分类单元,根据各土类中土体深度 1m 的剖面数据进行统计分析,并拟合出最佳回归曲线方程。同理,对土壤有机 C 含量与土层深度在 0.01 水平上显著相关、标准差<40 的剖面数据,以亚类为单元选取回归曲线方程。由于该类型土类及土壤较低分类单元

数量太大,本文仅以黑钙土为例进行详细分析。根据本文划分标准,东北地区黑钙土土类中共有 7 个亚类,其中淡黑钙土、淋溶黑钙土和石灰性黑钙土能够以亚类为单元进行拟合,拟合结果如下(表 3)。

与土类分类单元一样,对于以数据分布比较集中、分布规律性明显的亚类,则根据亚类的拟合曲线方程来估算该指定深度下的土壤有机 C 含量;对于数据分布比较离散、分布规律性不明显的亚类,如黑钙土土类中的草甸黑钙土、碱化黑钙土、盐化黑钙土和黑钙土亚类按更低的分类单元土属进行拟合。对黑钙土中以土属为单元的统计结果如下(表 4)。

表3 按黑钙土亚类拟合的土壤有机C随剖面深度的统计结果及回归曲线方程
Table 3 Statistics of soil-subgroup-based simulated variation of soil organic carbon with the depth in profile and regression curve equations

亚类名称	剖面数	相关系数	显著性水平	最佳回归模型	拟合曲线方程
淡黑钙土	7	-0.794	0.01	对数函数	$Y=28.54+(-38.325) \times \ln t$
淋溶黑钙土	6	-0.662	0.01	指数函数	$Y=156.32 \times e^{(-1.1084 \times t)}$
石灰性黑钙土	23	-0.694	0.01	对数函数	$Y=40.231+(-33.31) \times \ln t$

表4 按黑钙土各土属拟合的土壤有机C随剖面深度的统计结果及回归曲线方程
Table 4 Statistics of soil-family-based simulated variation of soil organic carbon with the depth in profile and regression curve equations

土属名称	剖面数	相关系数	显著性水平	最佳回归模型	拟合曲线方程
碱化草甸黑钙土	3	-0.815	0.01	指数函数	$Y=138.11 \times e^{(-1.1865 \times t)}$
砾底草甸黑钙土	2	-0.859	0.01	指数函数	$Y=119.98 \times e^{(-1.3092 \times t)}$
砂底草甸黑钙土	2	-0.538	不显著		
石灰性草甸黑钙土	2	-0.857	0.01	幂函数	$Y=41.222 \times t^{(-1.4018)}$
锈黑黄土	8	-0.607	0.01	指数函数	$Y=91.782 \times e^{(-1.0529 \times t)}$
盐化草甸黑钙土	1	-0.969	不显著		
黑黄土	7	-0.457	0.05	幂函数	$Y=31.247 \times t^{(-0.5677)}$
黑泥砂土	5	-0.799	0.01	指数函数	$Y=123.6 \times e^{(-1.9652 \times t)}$
红粘质黑钙土	1	-0.997	不显著		
黄土质黑钙土	2	-0.570	不显著		
砾石底黑钙土	3	-0.730	0.01	指数函数	$Y=2.402 \times e^{(-0.026 \times t)}$
砂质黑钙土	3	-0.820	0.01	指数函数	$Y=103.75 \times e^{(-1.6143 \times t)}$
粘质黑钙土	1	-0.986	不显著		
碱黑黄土	1	-0.981	0.05	指数函数	$Y=239.83 \times e^{(-2.444 \times t)}$
黄土质苏打盐化黑钙土	1	-0.573	不显著		
砂黄土质苏打盐化黑钙土	1	-0.903	0.05	幂函数	$Y=18.043 \times t^{(-1.0961)}$
砂黄土质盐化黑钙土	1	-0.469	不显著		

从上表可以看出,以土属为单位进行统计分析时,仍有一部分土壤剖面有机 C 含量随土体深度的变化规律性不显著。由于这部分剖面大部分都由少数一两个剖面组成,因此按单独剖面进行分析结果

与按土属分析结果相同或接近。因此对于以土属为单元其有机 C 在土体中分布规律性不明显的剖面,建议采用土壤剖面相似或就近的原则来估算指定深度下的土壤剖面有机 C 密度。

3 结论

(1) 按土壤类型法统计结果表明：除泥炭土和山地草甸土外，其它土类的土壤有机 C 含量与土体深度均在 0.01 或 0.05 水平上呈显著负相关。

(2) 土壤类型的有机 C 在土体中的分布特征及分布规律不尽相同。暗棕壤、白浆土、风砂土、褐土、红粘土、火山灰土、栗钙土、棕壤 8 种土类的有机 C 含量随土体深度的分布规律性相对较高，可以土类为单元选取拟合曲线方程来估算指定深度下的土壤有机 C 含量；草甸土、黑钙土、黑土、滨海盐土、潮土、粗骨土、碱土、水稻土、新积土、盐土、沼泽土、棕色针叶林土 12 种土类的有机 C 含量在土体中分布比较离散，必须以较低的土壤分类单元选取拟合曲线方程。

(3) 对于按土类进行统计太分散的类型，按其亚类或土属进行估算可以得到较好的效果，如黑钙土。

(4) 有些类型如泥炭土，土壤有机 C 在土体中的分布没有明显的规律性，有机 C 含量与土体深度的相关性不显著，因此不能按土壤类型方法来推算指定深度下的有机 C 浓度。建议对于这些土类只能按土壤剖面相似和就近的原则进行估算。

参考文献

1 Houghton JT, Jenkins GJ, et al. Climate Change, The IPCC Scientific Assessment. New York: Cambridge University

Press, 1990

- 2 Houghton JT, Callander BA, et al. Climate Change, The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. New York: Cambridge University Press, 1992
- 3 Eswarran H, Van Den Berg EV, Reich P. Organic carbon in soils of the world. Soil Sci Soc Am J, 1993, 57: 192~194
- 4 陈庆强, 沈承德等. 土壤碳循环研究进展. 地球科学进展, 1998, 13 (6): 555~563
- 5 金峰, 杨浩等. 土壤有机碳密度及储量的统计研究. 土壤学报, 2001, 38 (4): 522~528
- 6 金峰, 杨浩等. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展. 土壤, 2000, 32 (1): 11~17
- 7 Post WM. Soil carbon pools and world life zone. Nature, 1982, 298: 156~159
- 8 李忠, 孙波等. 我国东部土壤有机碳的密度及转化的控制因素. 地理科学, 2001, 21 (4): 301~307
- 9 王绍强, 周成虎等. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨. 地理科学进展, 1999, 18 (3): 238~244
- 10 全国土壤普查办公室. 中国土种志(第二卷). 北京: 中国农业出版社, 1994: 1~736
- 11 黑龙江省土壤普查办公室. 黑龙江土种. 黑龙江省土地勘测利用技术中心, 1990: 1~446
- 12 吉林省土壤肥料总站. 吉林土种志. 长春: 吉林科技出版社, 1997: 6~393
- 13 辽宁省土壤肥料总站. 辽宁土种志. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1991: 17~523

DISTRIBUTION PATTERN AND DENSITY CALCULATION OF SOIL ORGANIC CARBON IN PROFILE

Sun Weixia Shi Xuezheng Yu Dongsheng

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008)

Abstract Significance of the organic carbon pool in the soil in the study of global change is well recognized. Characteristics of the distribution of organic carbon in soil profile and methods of its assessment are the premise for precise calculation of the pool in the soil. On the basis of the results of the second national soil survey in China, a soil-organic-carbon-based database was established, and characteristics of the distribution of organic carbon in soil profile and methods for assessing organic carbon in soils of different soil taxonomic units were discussed, thus providing a scientific basis for rational and accurate calculation of the density of soil organic carbon and organic carbon pool in the soil.

Key words Organic carbon, Soil type, Distribution characteristic, Calculation method