

中国土壤有机碳密度和储量的估算 与空间分布分析*

解宪丽^{1,2} 孙波² 周慧珍² 李忠佩² 李安波¹

(1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097) (2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要 基于 1:400 万的《中华人民共和国土壤图》和第二次土壤普查数据, 运用地理信息系统技术, 对中国土壤有机碳密度及储量做出估算, 并且分析了土壤有机碳密度的空间分布差异。结果表明: 100 cm 深度的土壤有机碳密度介于 1.19 kg m^{-2} 到 176.46 kg m^{-2} 之间, 20 cm 深度的土壤有机碳密度介于 0.27 kg m^{-2} 到 53.46 kg m^{-2} 之间; 100 cm 和 20 cm 深度的土壤有机碳储量分别为 84.4 Pg ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$) 和 27.4 Pg ; 土壤有机碳密度具有高度的空间变异性, 东北地区、青藏高原的东南部、云贵高原等森林、草甸分布的地区有机碳密度最高, 准噶尔盆地、塔里木盆地、阿拉善高原与河西走廊、柴达木盆地等沙漠化地区的土壤有机碳密度最低; 土壤有机碳密度的空间分布主要受气候、植被以及人类活动的影响。

关键词 土壤有机碳密度; 有机碳储量; 碳密度分布图; 中国

中图分类号 S153.6 文献标识码 A

地球上的碳平衡表现为海洋碳库、大气碳库及陆地系统碳库之间的相互作用^[1], 大气中 CO_2 浓度的波动取决于它们之间碳交换通量的变化。土壤碳库是陆地碳库的重要组成部分, 包括土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 与无机碳。由于土壤无机碳库(碳酸盐碳)很少变动^[2], 无机碳对碳循环的意义不大。土壤有机碳主要分布于上层 1 m 深度以内, 处于大气圈、水圈、岩石圈和生物圈交汇的地带, 对碳循环有重要影响。目前对全球土壤有机碳储量的计算或者是基于植被类型, 或是土壤类型, 或是碳循环模型^[3]。据估计全球土壤有机碳库介于 1.395 Pg ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$) 到 2.200 Pg 之间^[1,4-6], 是陆地植被碳库 ($500 \sim 600 \text{ Pg}$) 的 2~3 倍, 是全球大气碳库 (750 Pg) 的 2 倍多^[7]。IPCC 估计土壤和凋落物对大气 CO_2 年通量的贡献是 50 Pg , 是化石燃料贡献量的 10 倍^[8]。人类活动如土地利用方式的变化加速了土壤有机碳的变化, 反过来又影响了全球变化的过程。同时, 土壤有机碳影响着土壤中的生物、物理和化学过程, 从而影响了土壤质量的长期变化。

我国幅员辽阔, 土壤类型众多, 在全球变化研究

中占据十分重要的地位^[9]。虽然国内已经有一些研究涉及中国陆地土壤有机碳库的估算, 但不同研究者的估计结果存在较大的差异, 例如潘根兴根据《中国土种志》(1~6 册) 的基本数据, 统计计算得到中国土壤有机碳库总量为 50 Pg ^[9]; 王绍强等根据中国第一次和第二次土壤普查数据估算的中国陆地生态系统土壤有机碳总量分别为 100.18 Pg ^[10] 和 92.4 Pg ^[11]; 李克让等用模型计算的中国土壤碳储量为 82.65 Pg ^[12]。由于土壤中有机碳含量具很高的空间变异性, 传统方法又难以准确估算不同类型土壤的面积, 以及缺乏相关数据和数据来源不一致等原因, 导致在全国范围内对土壤中碳储量的准确估算困难很大。此外, 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^[13], 目前还没有研究者对中国 1 m 深度土壤有机碳储量做出估算, 而且缺少对中国表层土壤有机碳储量的估算。目前, 碳源与碳汇分布图的绘制已经成为全球变化研究中的一个热点, 我国还没有完成这方面的工作。为此, 本文利用全国第二次土壤普查数据作为基础资料, 运用 GIS 技术, 建立土壤空间和属性数据库,

* 中国准备初始国家信息通报的能力建设项目 (CPR/00/G31/A/1G/99) 资助

- 通讯作者: E-mail: zhou@issas.ac.cn

作者简介: 解宪丽 (1974~), 女, 山东临沂人, 1999 年在兰州大学地质系获得硕士学位, 现为南京师范大学地理科学学院和中国科学院南京土壤所联合培养 2001 级博士研究生, 研究方向为地图学与地理信息系统

收稿日期: 2003-01-14; 收到修改稿日期: 2003-06-04

计算了2 456个剖面的两种深度(100 cm、20 cm)的土壤有机碳密度,并把这些剖面归并到土壤图的各项制图单元中,计算出不同土壤类型的有机碳密度及储量,绘制出中国土壤100 cm和20 cm深度的有机碳的分布图,以期评估中国陆地生态系统截留碳的能力提供有价值的参考数据,促进中国土壤有机碳的精确估算以及碳源与碳汇分布图的绘制工作。

1 材料和方法

1.1 数据获取

建立土壤剖面数据库所需要的基础数据主要来自于全国第二次土壤普查的成果,包括《中国土种志》(1~6册)^[14]、《中国土壤》^[15]和区域性的土壤普查资料^[16]。该数据库主要包括以下内容:每个剖面的土壤类型、地理位置、剖面描述、土层划分、土层厚度、有机质含量、容重、> 2 mm的石砾含量。该数据库共收集了2 456个土壤剖面(8 714个土层)。

土壤剖面的容重数据和> 2 mm石砾含量是有机碳密度计算的重要因素,而数据库中只有少部分剖面(3 486个土层)有容重数据,而且在不同土壤中的分布很不均衡,例如水稻土的容重数据较多,而分布在高寒、干旱漠境地区的土壤类型的容重数据则很少甚至没有。虽然特征相似的土壤其容重与有机质含量、土层厚度、土壤结构之间具有简单的公式关系^[3],但由于本研究的数据来源众多,土壤性质的分析方法不尽相同,用公式推导未知的容重数据会出现较大误差。因此,对于容重数据较多的土壤类型,我们把有机质含量、土层厚度作为影响因素,利用BP神经网络算法进行回归,计算出没有容重分析数据的剖面的容重值。对于容重数据较少的土壤类型,根据剖面构型相似、土壤分析数据相近的原则,利用已有的剖面容重数据或使用该土壤类型容重数据的平均值来代替没有容重分析数据的剖面的容重值。对于没有容重数据的土壤类型,使用相近土壤类型的容重数据。对于部分剖面没有> 2 mm石砾含量的数据,我们参考剖面的文字描述,根据第二次土壤普查的砾质度的划分标准(轻砾质< 15%,中砾质15%~50%,粗骨土> 50%),取其中值。

研究所需数据经过上述方法的处理,可有效减少由于所需数据的缺乏以及数据来源的不一致而造成的误差。

1.2 土壤图件

采用2000年版的1:400万的《中华人民共和国

土壤图》^[17]作为土壤有机碳储量估算和绘制土壤有机碳密度分布图的基础图件,利用该图获得各土壤类型的面积。该图划分出72个一级制图单元(见表1)、246个二级制图单元。数字化后的土壤图包括8 005个图斑。扣除冰川雪被、盐壳以及水体的面积之后,可以得出中国的土壤面积约为924万km²。

由于土壤剖面数据库中的土壤类型是根据第二次土壤普查分类系统^[15]命名的,而2000年版1:400万中国土壤图制图单元命名则是以中国土壤系统分类首次方案^[18]为基础的,二者的分类系统不一致,例如,第二次土壤普查分类系统中的灰色森林土、冷棕钙土在土壤图中被分别命名为灰黑土、腐钙土,等等。因此,我们把土壤剖面数据库中的剖面根据其所在地的土壤与土地信息和土壤属性数据进行解译,对照2000版1:400万中国土壤图制图单元应有的土壤信息与属性标准,将该剖面所属的土壤类型对应到中国土壤图上它应有的类型中(限于篇幅没有列出土壤类型对照表)。

1.3 土壤剖面有机碳密度的计算

土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的储量,由于排除了面积因素的影响而以土体体积为基础来计算,土壤碳密度已成为评价和衡量土壤有机碳储量的一个极其重要的指标。

某一土层*i*的有机碳密度 SOC_i (kg m⁻²)计算公式如下^[3, 4, 6, 19]:

$$SOC_i = C_i D_i E_i (1 - G_i) / 10 \quad (1)$$

式中, C_i 为土壤有机碳含量(%), D_i 为容重(g cm⁻³); E_i 为土层厚度(cm); G_i 为大于2 mm的石砾所占的体积百分比(%)。

如果某一土体的剖面由*k*层组成,那么该剖面的有机碳密度 SOC_t 的计算公式为:

$$SOC_t = \sum_{i=1}^k SOC_i = \sum_{i=1}^k C_i D_i E_i (1 - G_i) / 10 \quad (2)$$

从上述公式可以看出,土壤有机碳密度的计算并不复杂,但是获得计算所需要的数据较为困难,特别是容重和石砾含量的数据。

1.4 100 cm深度土壤有机碳密度的计算

根据收集到的资料,除粗骨土等薄层土以外,绝大多数的土壤剖面被划分成三个以上的层次,其中有些剖面的采样深度大于100 cm,而有些则小于100 cm。为了计算100 cm深度的有机碳密度,首先需要确定100 cm深度处的有机碳含量。为此,我们根据公式(3)^[20]模拟剖面土壤有机质浓度与深度的关系,进行插值,求出100 cm深度处的有机质含量,

然后乘以 Bemmelen 换算系数(0.58)得到 100 cm 深度处的有机碳含量。对于深度为 d 的剖面来说, 如果 d 大于 100 cm, 那么 100 cm 深度有机碳密度 $SOC_{(0-100)}$ 等于 0~100 cm 之间的各土层的有机碳密度相加, 其中, 100 cm 深度处所在土层的有机碳密度的计算, 采用插值所得的 100 cm 深度处的有机碳含量, 其容重和石砾含量采用其所在土层的数据。如果 d 小于 100 cm, 则 $SOC_{(0-100)}$ 等于剖面有机碳密度 SOC_i 加上 $SOC_{(d-100)}$, 其中 $SOC_{(d-100)}$ 的计算采用插值所得的 100 cm 深度处的有机碳含量, 容重和石砾含量采用剖面最下面的土层的数据。对于粗骨土和石质土等薄层土, 采用其实际剖面深度的有机碳密度作为 100 cm 深度的有机碳密度。

$$Y = 1/(a + bX) \quad (3)$$

式中 Y 为土壤有机质浓度(%), X 为深度(cm), 参数 a, b 通过规划求解确定。

1.5 20 cm 深度土壤有机碳密度的计算

20 cm 的土壤有机碳密度 $SOC_{(0-20)}$ 采用公式(1)进行计算, 其中有机碳含量采用插值所得的 20 cm 处的有机碳含量, 土层厚度为 20 cm, 容重和石砾含量采用 20 cm 深度所在土层的数据。对于粗骨

土和石质土等薄层土, 采用其剖面表层的土壤有机碳密度作为 20 cm 的有机碳密度。

2 结果与讨论

2.1 不同土壤类型的有机碳密度

土壤图基本制图单元为二级制图单元, 其有机碳密度是由属于该制图单元的各土壤剖面的有机碳密度计算而来的, 为了去除极端值的影响, 我们取各剖面的有机碳密度的中值来代表每个二级制图单元的土壤有机碳密度。由于漂白黄棕壤、铝饱和灰棕壤、石环冻漠土等 10 个二级制图单元(面积约占中国土壤总面积的 0.4%) 缺乏剖面数据, 我们采用与其属于同一个一级制图单元而且性质相近的二级制图单元的数值来代替其有机碳密度, 例如用普通黄棕壤的代替漂白黄棕壤、普通灰棕壤的代替铝饱和灰棕壤。对于土壤图的各一级制图单元, 采用其二级制图单元有机碳密度的面积加权平均值作为其有机碳密度。表 1 中列出了各一级制图单元的有机碳密度(限于篇幅不再列出各二级制图单元的有机碳密度)。

表 1 中国土壤 100 cm 和 20 cm 深度的有机碳密度和储量

Table 1 Carbon density and storage of the soils in China

土壤类型 Soil type	剖面数 Amount of profiles	100 cm 深度	100 cm 深	占总量 百分比 Percentage (%)	20 cm 深	20 cm 深	占总量 百分比 Percentage (%)	面积 Area (10^{10} m^2)	占总面积 百分比 Percentage (%)
		碳密度 C density (kg m^{-2})	度碳储量 100 cm depth C storage (10^{10} kg)		度碳密度 20 cm depth C density (kg m^{-2})	度碳储量 20 cm depth C storage (10^{10} kg)			
灰壤 Podzols	3	27.63	124.17	1.47	7.78	34.93	1.28	4.49	0.49
寒棕壤 Cryo-brown soils	3	10.12	55.60	0.66	2.42	13.32	0.49	5.50	0.59
暗棕壤 Dark brown soils	47	15.12	452.42	5.36	5.87	175.59	6.42	29.93	3.24
灰黑土 Greyzems	8	16.54	47.58	0.56	6.19	17.82	0.65	2.88	0.31
白浆土 Albisols	19	10.80	72.30	0.86	4.15	27.80	1.02	6.70	0.72
酸性棕壤 Acid brown soils	3	10.46	7.85	0.09	5.18	3.89	0.14	0.75	0.08
棕壤 Brown soils	76	8.46	195.62	2.32	3.12	72.17	2.64	23.11	2.50
灰棕壤 Grey-brown soils	16	37.00	370.27	4.39	11.78	117.88	4.31	10.01	1.08
褐土 Cinnamon soils	103	7.00	155.95	1.85	1.97	43.93	1.61	22.27	2.41
灰褐土 Grey-cinnamon soils	17	16.84	141.77	1.68	6.04	50.88	1.86	8.42	0.91
黄棕壤 Yellow-brown soils	36	11.22	269.91	3.20	3.24	77.98	2.85	24.05	2.60
黄褐土 Yellow-cinnamon soils	19	5.00	23.13	0.27	1.69	7.82	0.29	4.63	0.50
准黄壤 Para-yellow soils	2	21.48	25.58	0.30	7.18	8.55	0.31	1.19	0.13

续表

土壤类型		100 cm 深度 剖面数	100 cm 深度 碳密度	100 cm 深度 碳储量	占总量 百分比	20 cm 深度 碳密度	20 cm 深度 碳储量	占总量 百分比	面积	占总面积 百分比
Soil type		Amount of profiles	100 cm depth C density (kg m^{-2})	100 cm depth C storage (10^{10} kg)	Percentage (%)	20 cm depth C density (kg m^{-2})	20 cm depth C storage (10^{10} kg)	Percentage (%)	Area (10^{10} m^2)	Percentage (%)
黄壤	Yellow soils	60	10.25	288.58	3.42	3.95	111.11	4.06	28.16	3.05
准红壤	Para-red soils	10	5.11	9.31	0.11	1.86	3.38	0.12	1.82	0.20
红壤	Red soils	114	8.25	539.47	6.39	3.04	198.98	7.27	65.43	7.08
赤红壤	Lato-red soils	35	9.47	230.39	2.73	3.34	81.30	2.97	24.32	2.63
砖红壤	Latosols	17	8.85	9.76	0.12	3.53	3.90	0.14	1.10	0.12
红褐土	Red cinnamon soils	3	6.21	6.02	0.07	1.82	1.76	0.06	0.97	0.10
燥红土	Dry red soils	13	4.91	3.03	0.04	1.58	0.97	0.04	0.62	0.07
黑土	Black soils	36	13.70	114.84	1.36	4.10	34.34	1.25	8.38	0.91
黑钙土	Chernozems	69	13.17	251.61	2.98	4.38	83.77	3.06	19.10	2.07
栗钙土	Chestnut soils	73	10.27	357.13	4.23	3.19	111.00	4.06	34.77	3.76
黑垆土	Heilu soils	19	7.75	44.81	0.53	1.86	10.74	0.39	5.78	0.63
褐钙土	Haplo-calc soils	1	4.09	16.37	0.19	1.36	5.45	0.20	4.00	0.43
棕钙土	Brown calc soils	14	6.28	141.34	1.68	1.40	31.59	1.15	22.52	2.44
灰钙土	Sierozems	33	6.10	36.21	0.43	1.42	8.45	0.31	5.94	0.64
龟裂土	Takyr soils	2	1.19	1.06	0.01	0.27	0.24	0.01	0.89	0.10
褐漠土	Haplo-desert soils	2	1.21	0.11	0.00	0.47	0.04	0.00	0.09	0.01
灰漠土	Grey desert soils	11	5.06	42.73	0.51	1.59	13.43	0.49	8.44	0.91
棕漠土	Brown desert soils	11	2.38	131.31	1.56	0.68	37.53	1.37	55.06	5.96
潮土	Chao soils	289	5.81	260.68	3.09	1.61	72.15	2.64	44.87	4.86
暗潮土	Umbrinhumus chao soils	26	17.62	120.93	1.43	6.58	45.19	1.65	6.86	0.74
砂姜黑土	Shajiang black soils	22	5.78	29.65	0.35	1.56	7.99	0.29	5.13	0.56
叶垫潮土	Foliated-Chao soils	5	6.13	18.98	0.22	1.83	5.66	0.21	3.09	0.33
潜育土	Gley soils	31	21.83	349.51	4.14	6.62	105.93	3.87	16.01	1.73
泥炭土	Peat soils	7	115.93	62.07	0.74	27.91	14.94	0.55	0.54	0.06
盐土	Solonchaks	58	5.02	62.69	0.74	1.34	16.73	0.61	12.49	1.35
干盐土	Arid solonchaks	6	5.75	22.06	0.26	1.62	6.22	0.23	3.84	0.42
碱土	Solonetz	19	2.99	0.65	0.01	1.02	0.22	0.01	0.22	0.02
黑色石灰土	Rendzinas	10	22.17	30.71	0.36	6.56	9.09	0.33	1.39	0.15
黄色石灰土	Yellow limestone soils	9	13.56	81.03	0.96	4.27	25.48	0.93	5.97	0.65
棕色石灰土	Brown limestone soils	19	14.16	99.78	1.18	4.92	34.69	1.27	7.05	0.76
红色石灰土	Red limestone soils	10	11.71	21.63	0.26	4.77	8.81	0.32	1.85	0.20
磷积石灰土	Phospho-calc soils	3	16.49	0.79	0.01	12.67	0.61	0.02	0.05	0.01
水稻土	Paddy soils	523	9.79	292.99	3.47	3.12	93.31	3.41	29.93	3.24
灌淤土	Irrigation-warping soils	51	8.88	26.80	0.32	2.54	7.67	0.28	3.02	0.33
土	Tier soils	11	7.93	16.70	0.20	1.53	3.22	0.12	2.11	0.23
堆垫土	Cumulated soils	2	19.55	2.64	0.03	3.64	0.49	0.02	0.13	0.01
厚熟土	Fimus soils	2	10.35	0.36	0.00	3.50	0.12	0.00	0.04	0.00

续表

土壤类型 Soil type	剖面数 Amount of profiles	100 cm 深度 碳密度 100 cm depth C density (kg m^{-2})	100 cm 深度 碳储量 100 cm depth C storage (10^{10} kg)	占总量 百分比 Percentage (%)	20 cm 深度 碳密度 20 cm depth C density (kg m^{-2})	20 cm 深度 碳储量 20 cm depth C storage (10^{10} kg)	占总量 百分比 Percentage (%)	面积 Area (10^{10} m^2)	占总面积 百分比 Percentage (%)
冲积土 Alluvial soils	35	6.51	24.09	0.29	1.92	7.11	0.26	3.70	0.40
风砂土 Blown sand soils	40	1.49	97.44	1.15	0.38	24.57	0.90	65.47	7.08
滨海砂土 Coastic sand soils	2	1.57	0.47	0.01	0.55	0.16	0.01	0.30	0.03
黄绵土 Loessal soils	47	4.51	83.35	0.99	1.14	21.03	0.77	18.49	2.00
紫色土 Purple soils	82	6.68	184.32	2.18	2.11	58.21	2.13	27.59	2.99
红色土 Red bed soils	19	4.82	6.88	0.08	1.46	2.08	0.08	1.43	0.15
暗色土 Umbrinemic soils	3	7.04	1.90	0.02	1.69	0.67	0.02	0.10	0.01
黑粘土 Black clay soils	1	14.51	0.91	0.01	6.10	0.38	0.01	0.08	0.01
火山灰土 Ando soils	9	11.18	1.66	0.02	3.74	0.55	0.02	0.15	0.02
粗骨土 Skeletal soils	96	4.93	122.80	1.46	1.99	49.61	1.81	24.92	2.70
薄层土 Leptisols	51	5.98	131.07	1.55	2.50	54.75	2.00	21.92	2.37
腐棕土 Humus brownified soils	20	27.04	28.92	0.34	7.20	7.70	0.28	1.07	0.12
腐钙土 Humus calc soils	12	8.35	18.30	0.22	2.26	4.95	0.18	2.19	0.24
寒黑土 Crye-black soils	2	15.29	1.52	0.02	8.07	0.80	0.03	0.10	0.01
寒毡土 Crye-sod soils	14	10.50	340.39	4.03	3.39	109.74	4.01	32.41	3.51
寒钙土 Crye-calc soils	11	12.88	134.65	1.60	4.03	42.13	1.54	10.45	1.13
冷漠土 Cold desert soils	4	1.72	10.13	0.12	0.52	3.08	0.11	5.91	0.64
寒冻毡土 Frost-sod soils	13	19.64	726.86	8.61	6.96	257.64	9.41	37.00	4.00
寒钙毡土 Crye-calc sod soils	9	5.14	295.14	3.50	1.59	91.09	3.33	57.42	6.21
冻漠土 Frost desert soils	3	4.15	145.12	1.72	0.73	25.50	0.93	34.93	3.78
冰潜育土 Geli-gley soils	2	40.27	5.54	0.07	12.31	1.69	0.06	0.14	0.01
冰泥炭土 Geli-peat soils	3	176.46	409.26	4.85	53.46	124.00	4.53	2.32	0.25
总计 Total	2 456		8 437.59	100		2 736.52	100	923.97	100

从表1中可以看出,不同类型土壤的有机碳密度差别较大。就100 cm深度的有机碳密度而言,冰泥炭土和泥炭土的有机碳密度最大,大于 100 kg m^{-2} ;冰潜育土次之,为 40.27 kg m^{-2} ;灰棕壤、灰壤、腐棕土、黑色石灰土、潜育土以及准黄壤的有机碳密度介于 $20\sim 40 \text{ kg m}^{-2}$;龟裂土、雏漠土、风砂土、滨海砂土、冷漠土的有机碳密度最低,小于 2 kg m^{-2} 。对于20 cm深度的有机碳密度,泥炭土和冰泥炭土的大于 20 kg m^{-2} ;磷积石灰土、冰潜育土、灰棕壤的介于 $10\sim 20 \text{ kg m}^{-2}$;龟裂土、风砂土、雏漠土、冷漠土、滨海砂土、冻漠土、棕漠土的小于 1 kg m^{-2} 。从20 cm深度的有机碳密度在100 cm深度的有机碳密度所占的比重上可以看出,磷积石灰土的值(76.83%)最大,其它大部分土壤类型的值介于20%~40%之间。造成土壤有机碳密度差异较大的原因存在于土壤

的成土环境、成土特征的不同。一般地,水成土、半水成土、淋溶土、半淋溶土以及湿寒高山土的有机碳密度较高,而漠土、干旱土、干寒高山土以及新积土中的龟裂土和风砂土的有机碳密度较低。例如:泥炭土、潜育土都是水成土,是在地面积水或土层长期水分饱和状态、生长喜湿耐湿植被下形成的土壤^[15],由于土层长期处于嫌气还原状态,有利于有机质的积累,而不利于有机质的分解,因此土壤中的有机质含量很高;雏漠土、棕漠土、灰漠土主要形成于极度干旱地区,土壤水分以蒸发逸失为主,植被覆盖率极低,以半灌木和灌木种属为主,植物残体腐解慢而矿化快,因而土壤中的有机质积累很弱;冻漠土、冷漠土是在高寒干旱条件下生成的高山、亚高山土壤,植被覆盖率极低,土壤冻融作用较强,因此土壤有机质含量很少;龟裂土是发育在干旱荒漠地区

山前细土洪积平原和古老冲积平原成土时间短暂的初育土^[15], 土壤质地粘重, 植物生长困难, 因而土壤中有机质含量很少; 磷积石灰土, 由于表层中含钙、磷丰富的鸟粪大量积聚, 土壤生物积累作用强, 表土层有机质含量高, 而心、底土层有机质含量则急剧降低, 因而其 20 cm 深度的有机碳密度在 100 cm 深度的有机碳密度中所占的比重很高。

对于某些土壤类型的有机碳密度, 本文的计算结果与已有的一些研究结果相近。例如, 对于红壤、赤红壤、砖红壤这三种热带、亚热带地区典型土壤, 本文计算的 100 cm 深度有机碳密度分别为 8.95、9.47、8.85 kg m⁻², 与李忠等^[20]计算的东南热带、亚热带地区的这三种土壤的有机碳密度(分别为 8.46 ± 2.37、8.80 ± 2.31、8.01 ± 2.71 kg m⁻²)相近, 也接近 Kimble 等^[21]对全球热带老成土(8.3 kg m⁻²)和全球热带氧化土(9.7 kg m⁻²)的计算结果。

2.2 中国土壤有机碳密度的空间分布

为了分析土壤有机碳密度的地理分布, 我们把土壤图上的每一块图斑按照其所属的制图单元赋予其 100 cm 和 20 cm 深度有机碳密度值, 绘制出中国土壤 100 cm 和 20 cm 深度的有机碳密度分布图(见彩图 1、彩图 2)。

从图上可以看出, 中国土壤有机碳密度分布很不均匀。总体上来看, 就中国自然区划^[18]而言, 土壤有机碳密度最低的地区是准噶尔盆地、塔里木盆地、阿拉善高原与河西走廊、柴达木盆地等沙漠化地区, 其次是黄土高原、昆仑山地、藏北高原, 华北地区和华中地区的土壤有机碳密度变化幅度较大, 但华北地区明显小于华中地区, 华南地区的土壤有机碳密度分布较高而且较均匀, 土壤有机碳密度最高的地区是东北地区和青藏高原区的藏东川西区、藏南、祁连山与阿尔金山、东喜马拉雅南坡、云贵高原以及西北地区的阿尔泰山与附近山地和天山山地。

由于本研究是基于土壤类型对土壤有机碳密度进行计算, 因此土壤有机碳密度的分布也具有地带性分布特征, 表现出受气候和植被影响的特征。

中国北方(北纬约 40°~45°)沿准噶尔盆地—马鬃山—阿拉善高原—内蒙古高原—东北平原—长白山脉一线, 同属于中温带, 降水量、植被和土壤自西向东发生变化, 年降水量由 100~200 mm 逐渐增加到 600~1000 mm; 植被由干旱区(半荒漠、荒漠带)、极端干旱区(荒漠、裸露荒漠带)、干旱区(半荒漠、荒漠带)过渡到半干旱区(草原带)、半湿润区(森林草

原带)、湿润区(针叶落叶阔叶林带)^[22]; 土壤由漠土、棕钙土、栗钙土逐渐过渡到黑钙土、黑土、灰色森林土、暗棕壤; 100 cm 土壤有机碳密度自西向东, 由 0~2 kg m⁻²增加到 10~20 kg m⁻², 20 cm 土壤有机碳密度由 0~1 kg m⁻²增加到 5~10 kg m⁻²。中国东部自东北到华南, 沿大兴安岭—长白山脉—华北平原—黄土高原—秦岭—大巴山脉—江南丘陵—南岭—雷洲半岛—海南岛一线, 气候、植被逐渐发生变化, 植被由寒温带落叶针叶林带、温带针阔叶混交林带、暖温带落叶阔叶林带过渡到过渡性亚热带含针叶树的落叶阔叶林带、亚热带常绿阔叶林带、过渡性热带雨林型阔叶林带、热带季雨林、雨林带; 年降水量和 ≥10℃年积温逐渐增加, 分别由 500 mm、100~1700℃增加到 1000~2000 mm、8000~9000℃^[22]; 土壤由棕色针叶林土、暗棕壤、棕壤逐渐过渡到黄棕壤与黄褐土、黄壤、红壤、赤红壤、砖红壤。沿该线, 大兴安岭土壤有机碳密度最高, 100 cm 有机碳密度为 10~20 kg m⁻², 黄土高原的土壤有机碳密度最低, 其次是华北平原, 华南地区的有机碳密度增加为 8~10 kg m⁻²。这是由降水量与温度的共同作用导致的, 降水量的增加有利于植被生长和有机质的积累, 不利于有机质的分解, 而温度的增加则利于提高有机质的分解效率。值得注意的是, 华北地区和华中地区的有机碳密度变化范围较大, 由于这些地区人口密集, 土地利用程度高, 强烈人类活动的扰动可能是导致土壤有机碳密度变化幅度较大的重要原因。

总的说来, 降水量的增加、气温的降低会使土壤的有机碳密度增加, 人类活动则加大了土壤有机碳密度的变化幅度。

2.3 不同类型土壤的有机碳储量的估算

不同类型土壤的有机碳储量等于该类型土壤的有机碳密度与其面积的乘积。本研究中, 由于数字化土壤图基本制图单元为二级制图单元, 因此首先计算各二级制图单元有机碳储量, 然后把属于相同一级制图单元的二级制图单元有机碳储量相加得到该一级制图单元的有机碳储量(见表 1)。需要说明的是, 对于高山和亚高山土壤, 由于其面积采用的是土壤图上的平面面积而不是实际的土壤分布面积, 因此这些土壤的有机碳储量的计算结果会偏低。从表 1 中可以看出, 风沙土的面积最大, 占我国土壤面积的 7%, 而其 100 cm 深度有机碳储量才占全国土壤 100 cm 深度有机碳储量的 1.15%。

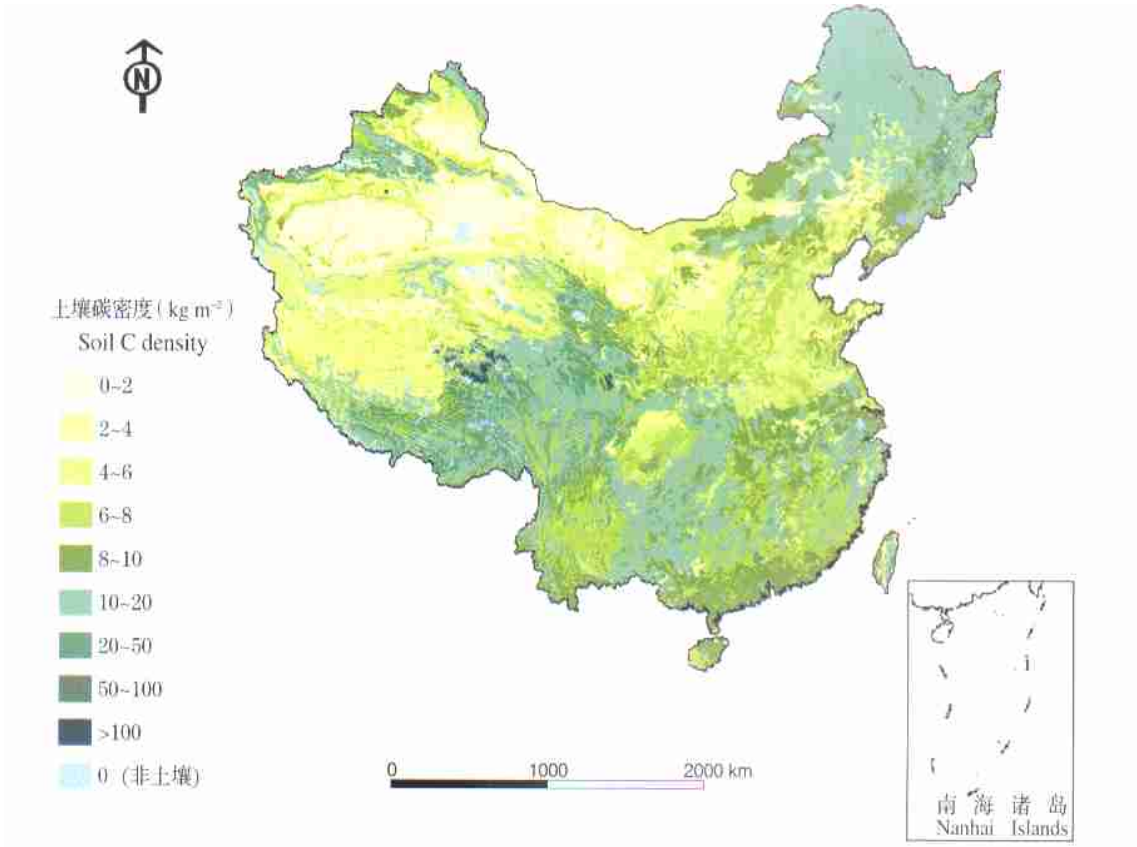


图 1 中国土壤 100 cm 深度的有机碳密度

Fig. 1 Soil carbon density at 100 cm depths in China

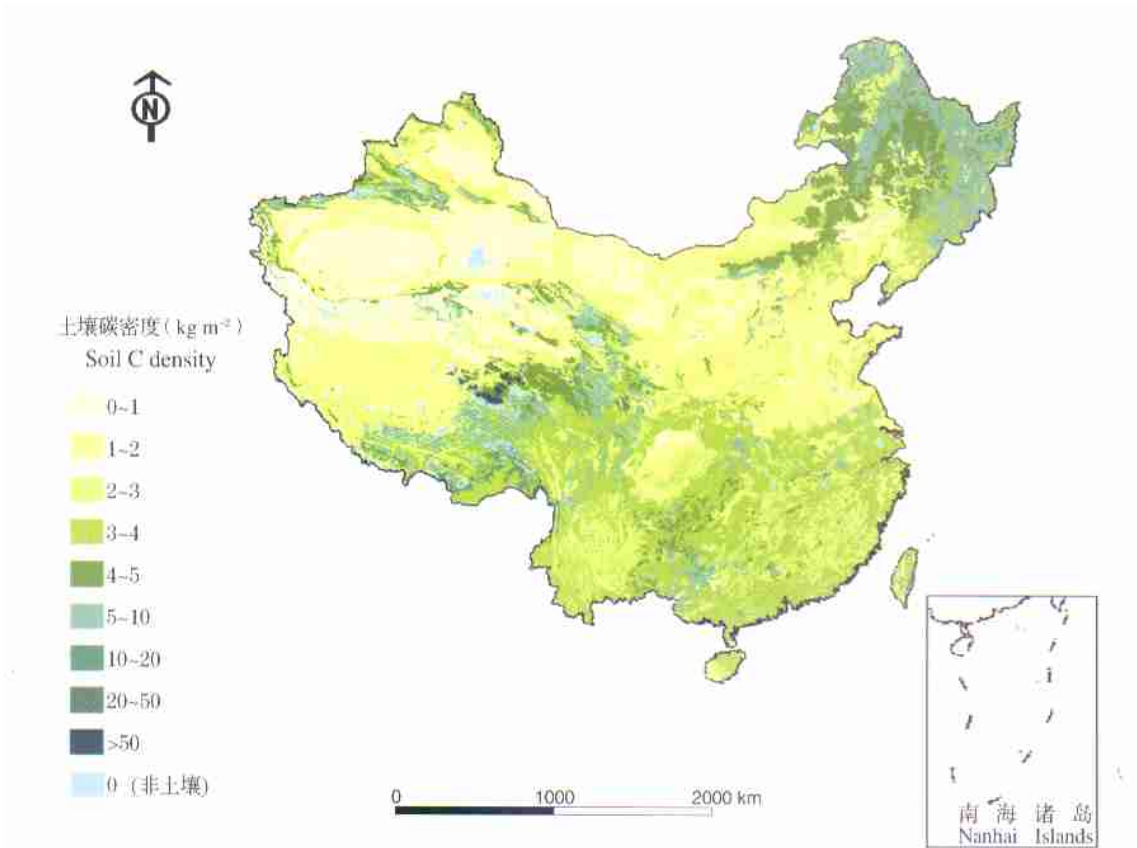


图 2 中国土壤 20 cm 深度的有机碳密度

Fig. 2 Soil carbon density at 20 cm depths in China

累加不同类型土壤的有机碳储量后得到中国土壤 100 cm 和 20 cm 深度的有机碳储量分别为 84.4 Pg 和 27.4 Pg, 20 cm 有机碳储量占 100 cm 有机碳储量的 32%。中国 100 cm 土壤有机碳储量占全球 100 cm 土壤有机碳储量的 6.05% (见表 2), 这一方面反映出中国土壤有机碳库在全球碳循环中占有重要地位, 另一方面也反映出我国土壤的有机碳储量水平较低。本文对中国 100 cm 深度土壤有机碳储量的估算结果与李克让等^[12]用模型计算的结果相近, 低于王绍强等^[11]的计算结果, 这主要是由于计算方法的不同而导致的。本文采用 2000 年版由中国科学院南京土壤研究所编制的 1:400 万的《中华人民共和国土壤图》作为基础图件来获取各类型土壤的分布面积, 而且在计算过程中考虑了 > 2 mm 的石砾含量对有机碳密度和储量的影响, 对中国土壤 100 cm 和 20 cm 深度有机碳储量估算的结果可以为计算全球土壤有机碳储量、分析不同区域的土壤有机碳储量的分布提供有意义的和可对比的数据。

表 2 中国土壤有机碳库与全球土壤有机碳库的对比

Table 2 Comparison of soil organic carbon storage between China and the globe

	人口 (10^8)	土地面积 (10^4 km ²)	土壤有机碳储量 (10^{15} g)
	Population	Land area	Soil organic carbon storage
中国	12.95	924	84.4
全球	61.34*	13425*	1395.34
中国占全球的百分比	21.1%	6.88%	6.05%

* 联合国粮农组织数据库 (FAO Statistical Databases, FAOSTAT), <http://apps.fao.org/page/collections>

3 结 语

中国土壤的有机碳密度变化较大, 100 cm 深度的有机碳密度介于 1.19 kg m⁻² 到 176.46 kg m⁻² 之间, 20 cm 深度的有机碳密度介于 0.27 kg m⁻² 到 53.46 kg m⁻² 之间。水成土、半水成土、淋溶土、半淋溶土以及湿寒高山土的有机碳密度较高, 而漠土、干旱土、干寒高山土以及新积土中的龟裂土和风砂土的有机碳密度较低。土壤有机碳密度的地理分布受气候、植被以及人类活动的影响, 东北地区、青藏高原的东南面、云贵高原等森林、草甸分布的地区有机碳密度最高, 土壤有机碳密度最低的地区是准噶尔盆地、塔里木盆地、阿拉善高原与河西走廊、柴达木盆地等沙漠化地区。中国土壤 100 cm 和 20 cm 深度的有机碳储量分别为 84.4 Pg 和 27.4 Pg。

土地利用变化对碳循环的影响是目前全球变化研究中的一个热点, 本文的研究成果可以为其提供必要的基础数据。同时, 本研究对于克服因区域差异导致的精确估算全球土壤碳库量的困难, 改善通过集合区域估计而获得全球土壤有机碳储量估算^[23]也是有益的探索。

致 谢 感谢中国科学院南京土壤研究所金峰博士为查阅第二次土壤普查资料提供方便, 同时衷心感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所于兴修博士为本文提出修改意见。

参 考 文 献

- [1] Eswaran H, van Den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 192~194
- [2] 陈庆强, 沈承德, 易惟熙, 等. 土壤碳循环研究进展. *地球科学进展*, 1998, 13(6): 555~563. Chen Q Q, Shen C D, Yi W X, et al. Processes in soil carbon cycle researches (In Chinese). *Advance in Earth Sciences*, 1998, 13(6): 555~563
- [3] Rodríguez-Murillo J C. Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain. *Biol. Fertil. Soils*, 2001, 33: 53~61
- [4] Post W M, Emanuel W R, Zinke P, et al. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(8): 156~159
- [5] Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, 46: 1118~1119
- [6] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.*, 1996, 47: 151~163
- [7] 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. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 220~228. Su Y Z, Zhao H L. Advances in researches on soil organic carbon storage, affecting factors and its environmental effects (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 2002, 22(3): 220~228
- [8] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Scientific Assessment of Climate Change*. World Meteorological Organization/United Nations Environmental Program. Cambridge University Press, New York, 1990. 81
- [9] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量的研究. *科技通报*, 1999, 15(5): 330~332. Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China (In Chinese). *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(5): 330~332
- [10] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算. *地理研究*, 1999, 18(4): 349~355. Wang S Q, Zhou C H. Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China (In Chinese). *Geographical Research*, 1999, 18(4): 349~355
- [11] 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. *地理学报*, 2000, 55(5): 533~544. Wang S Q, Zhou C H, Li K R, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 533~544
- [12] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量. *中国科学*,

- 2003, 33(1): 72~ 80. Li K R, Wang S Q, Cao M Q. Vegetation and soil carbon storage in China (In Chinese). *Science in China*, 2003, 33(1): 72~ 80
- [13] 金峰, 杨浩, 蔡祖聪, 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. Jin F, Yang H, Cai Z C, *et al.* Calculation of density and reserve of organic carbon in soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(4): 522~ 528
- [14] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(1~ 6册). 北京: 中国农业出版社, 1993~ 1996. The National Soil Survey Office. *Soil Species of China (Vol. I ~ Vol. VI)* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Press, 1993~ 1996
- [15] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998. The National Soil Survey Office. *Soils of China* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Press, 1998
- [16] 全国土壤普查办公室. 中国第二次土壤普查数据(未刊资料). The National Soil Survey Office. *The Second National Soil Survey Data* (In Chinese) (not published)
- [17] 高以信, 李锦, 周明祯, 等. 中华人民共和国土壤图(1: 4 000 000). 北京: 科学出版社, 2000. Gao Y X, Li J, Zhou M Z, *et al.* *China Soil Map (1: 4 000 000)* (In Chinese). Beijing: Science Press, 2000
- [18] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类(首次方案). 北京: 科学出版社, 1993. Soil Taxonomic Classification Research Group, Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomic Classification. *Chinese Soil Taxonomic Classification (first proposal)* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1993
- [19] Schwartz D, Namri M. Mapping the total organic carbon in the soils of the Congo. *Global and Planetary Change*, 2002, 33: 77~ 93
- [20] 李忠, 孙波, 赵其国. 我国东部土壤有机碳的密度和储量. *农业环境保护*, 2001, 20(6): 385~ 389. Li Z, Sun B, Zhao Q G. Density and storage of soil organic carbon in East China (In Chinese). *Agronomy-environmental Protection*, 2001, 20(6): 385~ 389
- [21] Kimble J, Cook T, Eswaran H. Organic matter in soils of the tropics. In: Proc. Symp. Characterization and Role of Organic Matter in Different Soils. Int. Congr. Soil Sci. 14th, Kyoto, Japan, 1990. 250~ 258
- [22] 刘明光主编. 中国自然地理图集. 北京: 中国地图出版社, 1997. 63~ 112. Liu M G. ed. *China Geographical Atlas* (In Chinese). Beijing: China Map Press, 1997. 63~ 112
- [23] Bernoux M, Conceicao Santana Carvalho M, Volkoff B, *et al.* Brazil's soil carbon stock. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, 66: 888~ 896

ORGANIC CARBON DENSITY AND STORAGE IN SOILS OF CHINA AND SPATIAL ANALYSIS

Xie Xianli^{1,2} Sun Bo² Zhou Huizhen² Li Zhongpei² Li Anbo¹

(1 *Geography College, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China*)

(2 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract Soil organic C plays an essential role in carbon cycle and carbon storage in a native ecosystem reflects that ecosystem's capacity to sequester carbon. Based on soil map of China (1: 4 000 000) combined with a soil database from the second soil survey of China, soil organic carbon storage to the depths of 100 cm and 20 cm were estimated for China using geographical information system. Carbon density of different soil types ranged from 1.19 kg m⁻² to 176.46 kg m⁻² at depth of 100 cm, and from 0.27 kg m⁻² to 53.46 kg m⁻² at depth of 20 cm. In total, about 84.4 Pg was stored in 0~ 100 cm, and 27.4 Pg in the 0~ 20 cm soil layer. The amount of carbon varied significantly at different districts in China. Northeast China, the south and east of Qinghai-Tibet Plateau and southwest China had high carbon density. Tarim Basin, Caidam Basin, Junggar Basin and other desertification districts had low carbon density. This distribution showed an important climatic influence. Soil organic carbon would diminish with decreasing precipitation and increasing temperature. On the other hand, the activities of human beings may affect the range of soil carbon.

Key words Soil organic carbon density; Carbon storage; Map of carbon density; China