

文章编号: 0375-5444 (2000) 05-0533-12

中国土壤有机碳库及空间分布特征分析

王绍强¹, 周成虎¹, 李克让¹, 朱松丽², 黄方红¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 北京师范大学环境科学研究所, 北京 100875)

摘要: 土壤有机碳库是陆地碳库的主要组成部分, 在陆地碳循环研究中有着重要的作用。根据中国第二次土壤普查实测 2 473 个典型土壤剖面的理化性质, 以及土壤各类型分布面积, 估算中国土壤有机碳库的储量约为 924.18×10^8 t, 平均碳密度为 10.53 kg/m^2 , 表明中国土壤是一个巨大的碳库。其空间分布总体规律上表现为: 东部地区大致是随纬度的增加而递增, 北部地区呈现随经度减小而递减的趋势, 西部地区则呈现随纬度减小而增加的趋势。

关键词: 碳循环; 全球变化; 土壤有机碳库

中图分类号: S159.2 **文献标识码:** A

1 前言

全球变化研究引起了许多科学家对陆地生态系统中碳平衡以及碳存储和分布的关注, 由于土壤中所存储的碳大约是植被的 1.5~3 倍^[1,2], 而且是全球生物地球化学循环中极其重要的生态因子, 因而土壤有机碳的分布及其转化日益成为全球有机碳循环研究的热点^[3,4]。

土壤是陆地生态系统中最大且周转时间最慢的碳库。它由有机碳库和无机碳库两大部分组成, 且土壤无机碳库占的比例较小^[5]。国际上很早就开展了土壤碳研究, 其中 Post 根据全球 2 696 个土壤剖面估计全球土壤有机碳为 $13\,953 \times 10^8 \text{ t}$ ^[6], 而与大气交换的土壤有机碳大约占陆地表层生态系统碳储量的 $2/3$ ^[6]。目前对于全球陆地碳循环认识的不确定性, 大部分是关于土壤有机碳库的分布和动力学^[7], 全球变暖将会加速土壤向大气的碳排放, 加剧大气 CO_2 浓度的上升, 这将进一步加强全球变暖的趋势^[8]。

土地利用/土地覆盖变化既可改变土壤有机物的输入, 又可通过对小气候和土壤条件的改变来影响土壤有机碳的分解速率, 从而改变土壤有机碳储量。土地利用的变化, 特别是森林砍伐所引起的变化, 减少土壤上层的有机碳达 20%~50%^[9]。不合理的土地利用, 会导致土壤储存的碳和植被生物量减少, 使更多的碳素释放到大气中, 从而导致大气 CO_2 浓

收稿日期: 2000-05-15; 修订日期: 2000-07-10

基金项目: 中国科学院“九五”重大 A 类项目 (KZ95T-03-02-04) 及国家重点科技攻关专题项目 (96-911-01-01)

[Foundation Item: The Key Project of Chinese Academy of Science, No. KZ95T-03-02-04; and the Key Project of State Science Technique, No. 96-911-01-01]

作者简介: 王绍强 (1972-), 男, 博士, 湖北襄樊市人。1997 年在北京师范大学资源与环境科学系获得硕士学位, 2000 年在中国科学院地理科学与资源研究所获得博士学位。主要从事全球变化、地理信息系统和遥感的应用研究, 在 Int. J. of Remote Sensing 等刊物发表论文 8 篇。E-mail: wslxf@263.net

度的增加, 又进一步增加了全球变暖的趋势和与之有关的气候变化, 所以, 精确估计土壤有机碳库和土地利用/土地覆盖变化对陆地生态系统碳平衡的影响是当前全球陆地表层碳循环研究的重点内容^[10]。

我国科学家也早已开始了对土壤有机碳的研究工作。方精云^[11]计算中国土壤有机碳库约为 $1\,856.9 \times 10^8$ t, 王艳芬等^[3]、李凌浩等^[12]研究了人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响, 吴仲民等^[13, 14]、李意德等^[15]对尖峰岭热带森林土壤碳含量进行了研究。国内土壤碳循环的研究主要是针对特定的地区和生态群落进行的^[3, 4, 11~20], 由于缺乏全面、详细、可靠的实测数据, 对中国陆地土壤有机碳库的估算有待深入研究。

2 资料来源与研究方法

第二次全国土壤普查 (1979~1984 年) 比较详细地对中国土壤状况进行了调查和研究^[21, 22]。利用第二次全国土壤普查所测定的 2 473 个典型土种剖面资料 (图 1), 包括土壤剖面的地理位置、土层深度、有机质含量、容重、面积、主要性状、典型剖面、生产性能和理化分析数据, 其中部分土壤容重数据采用的是平均值^[11], 并采用中国资源环境数据库 1:400 万中国土壤类型分布图^[23], 分析中国土壤碳密度的空间分布特征。

估计土壤有机碳和土壤碳通量的最好方法就是直接测定不同类型土壤不同深度的有机碳含量、土壤有机质输入速率和分解速率、土壤呼吸速率等, 然后根据土壤面积计算总碳

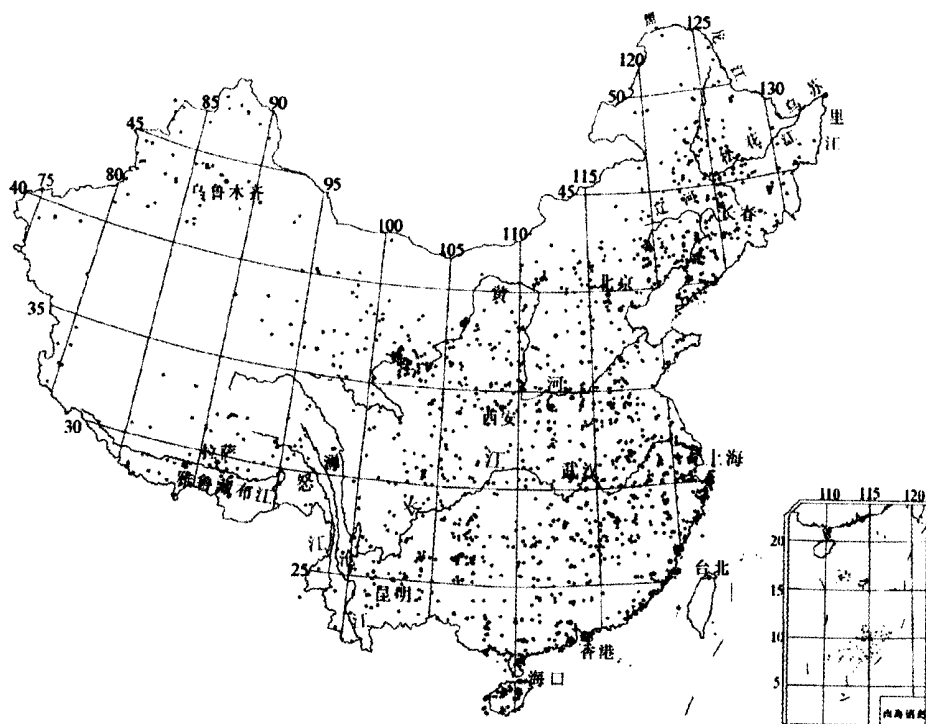


图 1 典型土种剖面采样点的空间分布 (未包括台湾省和南海诸岛)

Fig. 1 Spatial distribution of sample soil profiles

储量和碳通量。这种方法能保证土壤有机碳和碳通量估计的精确性, 但是通过植物的光合作用直接估计对 CO₂ 的吸收是很困难的, 而且也难以通过直接测定大尺度土壤有机质的分解和土壤呼吸作用估计 CO₂ 的释放量。直接测定 CO₂ 净通量的最实际技术是采用微气候技术, 但是这些技术要求条件高, 且观测和试验时间很长, 耗费比较大。因而本研究主要是根据全国土壤普查的实测数据来估计中国土壤有机碳库。

从第二次全国土壤普查资料 2 473 个土种剖面资料中, 分别读取每个剖面每层深度土壤的理化性质。碳含量由有机质含量乘以 Benmelen 换算系数 (即 0.58 gC/gSOC)^[11] 求得。首先计算各土壤类型和亚类的每个土种各个土层的碳含量, 然后以土层深度作为权重系数, 求得各土种的平均理化性质, 通过面积加权平均得到各土壤类型和亚类的平均深度、平均有机质、平均容重、平均碳密度 (图 2)。

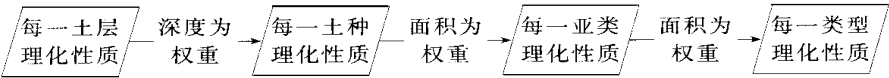


图 2 土壤碳密度计算流程图

Fig. 2 Flow diagram of soil carbon density calculation

各类土壤的总碳量由下列公式求得:

$$C_j = 0.58 S_j H_j O_j W_j \tag{2-1}$$

式中 j 为土壤类型, C_j 为第 j 种土壤类型的碳储量 (t), S_j 为第 j 种土壤类型分布面积 (hm^2), H_j 为第 j 种土壤类型的平均厚度 (cm), O_j 为第 j 种土壤类型的平均有机质含量 (%), W_j 为 j 种土壤类型的平均容重 (g/cm^3)。

根据第二次土壤普查的统计资料^[21, 22], 扣除了水域、冰川、常年积雪、裸岩、石质山地面积后, 中国土壤面积约为 $877.63 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (未包括台湾省的土壤资源面积)。

3 结果与讨论

3.1 中国土壤有机碳库估算

计算结果表明, 第二次土壤普查我国土壤的平均容重为 $1.30 \text{ g}/\text{cm}^3$, 土壤剖面的平均厚度为 87 cm, 平均有机质含量为 1.78%, 土壤平均碳密度为 $10.53 \text{ kg}/\text{m}^2$, 若按统计的 $877.63 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 国土面积计算, 中国陆地土壤总有机碳储量约为 $924.18 \times 10^8 \text{ t}$ 。

从中国土壤各类型碳密度分布 (图 3) 中看出, 广泛分布在我国东北和青藏高原边缘地带的漂灰土、暗棕壤、灰色森林土等森林土壤和青藏高原东北部和东南部的沼泽土、草毡土、黑毡土及薄黑毡土等高山土壤, 土壤碳密度明显高于其它地域。我国东北地区植被茂密, 气候湿润, 有机质主要以地表枯枝落叶的形式进入土壤, 土壤表层的腐殖质积累过程十分明显。加之全年平均气温较低, 地表常有滞水, 土壤有机质分解程度低, 使土壤有机碳积累很高。青藏高原东南部及四川西部主要为高山带上部平缓山坡、古冰渍平台和侧碛物、冰水沉积物及残积-坡积物为主, 气候寒冷而较湿润, 地表植被多低矮但丰富, 有机物分解速度极为缓慢, 草皮层和腐殖质层发育良好, 进行着强烈的泥炭状有机质的积累过程。土壤有机质中碳含量主要取决于土壤的形成条件, 如温度、水分、母质、植物、微生物和动物等因素。人类活动 (主要通过耕作、施肥等措施) 对土壤有机质含量也有极其明显的

影响: 例如在集约耕作历史悠久的黄土高原和黄淮海平原, 有机质含量都有所下降; 而在长期淹水的水稻土, 由于还原环境缓解了有机质的矿化速率, 有利于有机质的积累。我国水稻土约有 $29.79 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的面积^[21], 占统计国土面积的 3.39%, 总土壤碳储量为 $30.72 \times 10^8 \text{ t}$, 占全国土壤总碳库的 3.32%, 说明我国农田土壤碳储量并不高。我国西部沙漠和半沙漠地区由于水分、温度的限制, 地表植被覆盖少, 土壤有机质输入量少, 因而土壤碳密度最低。

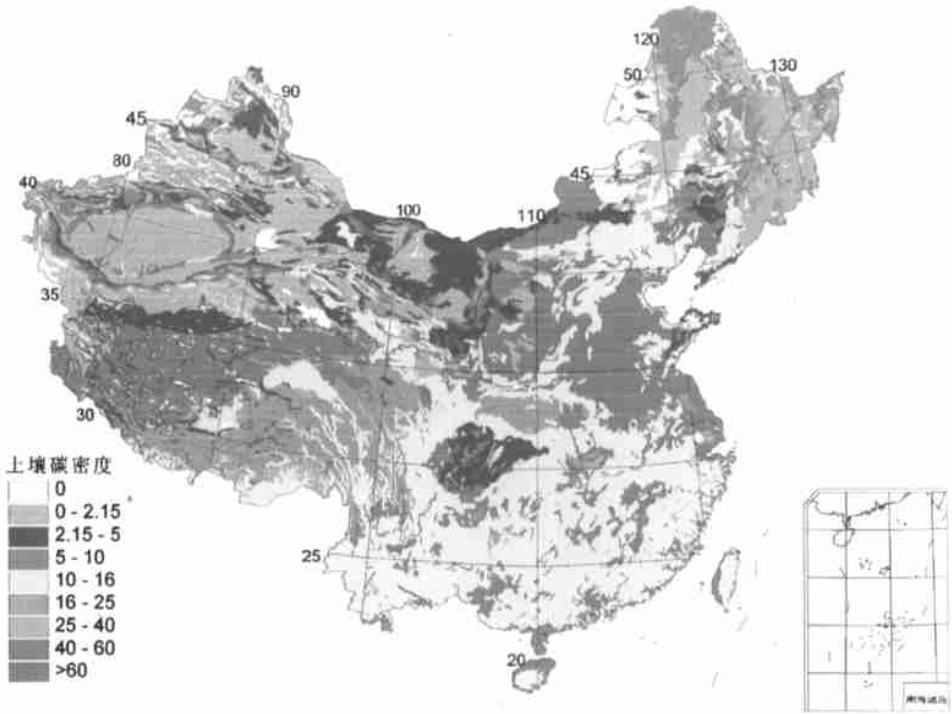


图 3 中国土壤碳密度 (kg/m^2) 分布图

Fig. 3 Soil Carbon density (kg/m^2) distribution map in China

3.2 土壤碳密度水平地带分布特征

中国土壤碳密度分布与我国土壤水平带谱是一致的。本文为了揭示土壤碳密度的空间分布特征, 采用 ArcView 桌面 GIS 软件的空间分析模块沿着从中国土壤碳密度分布图上东部、北部和西部随机作出 3 条剖面线, 分别表示东部、北部和西部土壤碳密度的变化趋势。沿着东部地区在 $23^\circ \sim 50^\circ \text{N}$ 和 $115^\circ \sim 133^\circ \text{E}$ 之间的范围做一个剖面线 (图 4), 从南到北土壤平均碳密度从 $8 \text{ kg}/\text{m}^2$ 增加到 $60 \text{ kg}/\text{m}^2$ 以上 (图 5a)。从图 3 可以看出, 我国东部地区土壤碳密度由寒温带向亚热带, 是逐步降低的。水平地带分布在东部地区大致是: 随热量的递减由南向北, 植被类型是热带雨林、季雨林、常绿阔叶林、落叶与常绿阔叶混交林、落叶阔叶林、针阔混交林、寒温带针叶林植被, 相应的土壤类型由南向北为砖红壤、赤红壤、红壤与黄壤、黄棕壤与黄褐土、棕壤、暗棕壤、棕色针叶林土, 其中, 水稻土分布面积较广, 土壤碳密度是逐渐增加的 (图 5a 和表 1), 总体上表现出东部地区土壤碳密度随纬

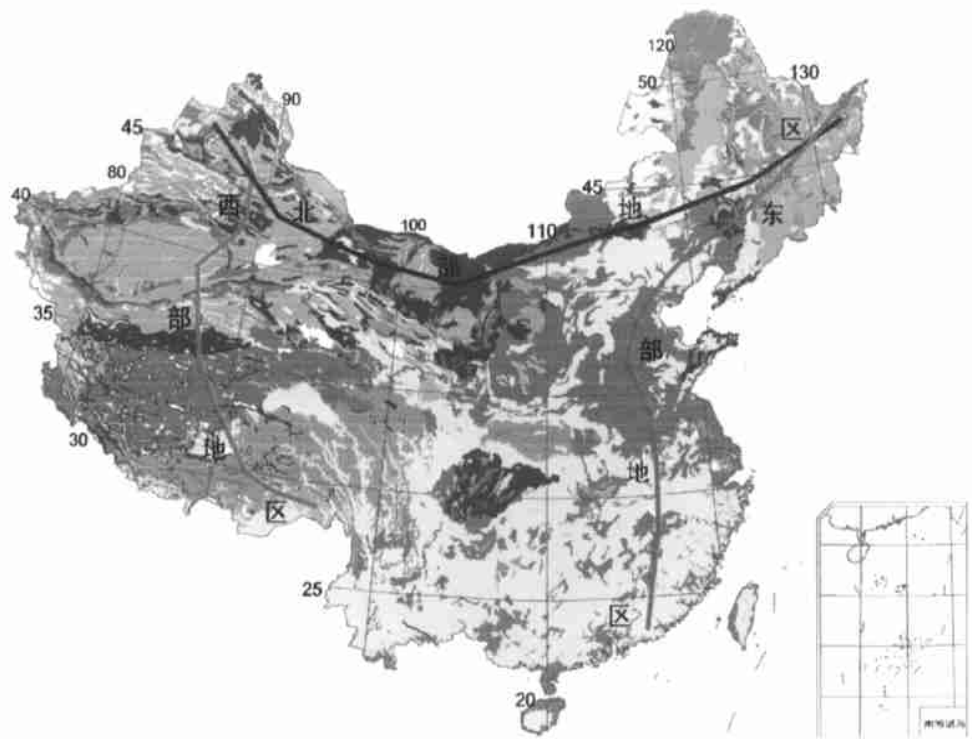


图 4 中国土壤碳密度剖面线分布图

Fig. 4 Profiles lines spatial distribution of soil carbon density in China

度增加而增加的趋势。同时，东部地区又是我国重要的农业生产基地，农田生态系统对CO₂的吸收和释放量也是巨大的。然而，长期的耕作活动导致水稻土土壤有机质含量下降，低于森林地区土壤碳密度（表 1）。
另一条水平地带谱在北部的排列顺序是：随水分的递减由东向西，从湿润温带森林下的暗棕壤起，向西逐步可见黑土、灰色森林土、黑钙土、暗栗钙土、栗钙土以至表层累积甚少的淡栗钙土、草被稀疏矮小的棕钙土。由此向西进入漠境时，更趋于干旱少雨，植被覆盖率更低，出现有灰漠土、灰棕漠土，土壤碳密度是逐渐降低的（图 3 和表 2）。沿着北部地区在 40°~ 50°N 和 85°~ 133°E 之间的范围做一个从东到西的剖面线（图 4），土壤碳密度从 50 kg/m² 下降到 3 kg/m² 以下（图 5b），而且东北地区由于大面积的农业开垦和不重视水土保持，暗棕壤、黑土和黑钙土等土壤有机质含量在逐渐下降。我国北部地区总体上表现出土壤碳密度随经度减小而降低的趋势。这种分布特征与我国热量、水分和植被分布特征是一致的。

表 1 中国东部地区土壤碳密度比较

Tab. 1 The comparison of soil organic carbon density in Eastern China

土壤类型	有机质 /%	深度 /cm	容重 /(g/cm ³)	碳密度 /(kg/m ²)
砖红壤	1.33	97	1.18	8.86
赤红壤	1.40	112	1.35	12.28
红壤	1.24	103	1.37	10.18
黄棕壤	1.87	92	1.31	11.41
棕壤	1.40	102	1.42	11.46
水稻土	1.45	93	1.33	10.31
暗棕壤	3.18	85	1.13	17.55
棕色针叶林土	7.54	79	1.3	44.61

在中国西部地区, 土壤碳密度是从新疆准噶尔盆地—塔里木盆地—青藏高原由 0~2.15 kg/m² 到 16~25 kg/m² 逐渐升高 (图 3)。沿着 85°~105°E 和 47°~28°N 之间的范围向南做一个剖面线 (图 4), 从我国北部的阿尔泰山灰黑土、黑毡土区向南, 经过准噶尔盆地风沙土、灰漠土、灰棕漠土区, 塔里木盆地、罗布泊棕漠土区, 到达青藏高原草原土带, 雅鲁藏布江河谷冷棕钙土、黑毡土区, 中喜马拉雅山北侧冷钙土带, 主要的土壤类型有灰黑土、风沙土、灰漠土、灰棕漠土、灰钙土、棕漠土、寒钙土、冷棕钙土、黑毡土、冷钙土, 土壤碳密度呈现出随纬度减小而增加的趋势 (图 5c 和表 3), 这与青藏高原大地形对气候的影响有关。

表 2 中国北部地区土壤碳密度比较

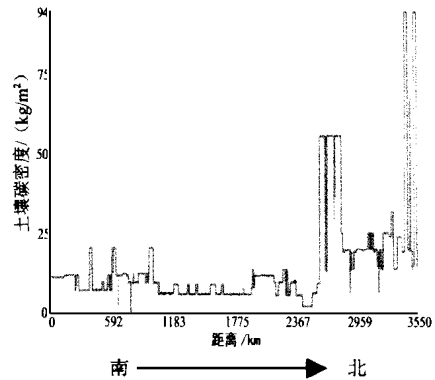
Tab. 2 The comparison of soil organic carbon density in Northern China

土壤类型	有机质 /%	厚度 /cm	容重 /(g/cm ³)	碳密度 /(kg/m ²)
暗棕壤	3.18	85	1.13	17.55
黑 土	1.87	113	1.31	17.03
灰色森林土	2.30	58	1.28	10.25
黑钙土	1.97	115	1.29	17.99
暗栗钙土	1.69	112	1.24	13.61
栗钙土	1.01	129	1.24	9.37
淡栗钙土	0.82	123	1.24	7.25
棕钙土	0.64	95	1.40	4.86
灰钙土	0.75	113	1.35	6.71
灰漠土	0.60	86	1.25	3.73
灰棕漠土	0.37	84	1.25	2.23

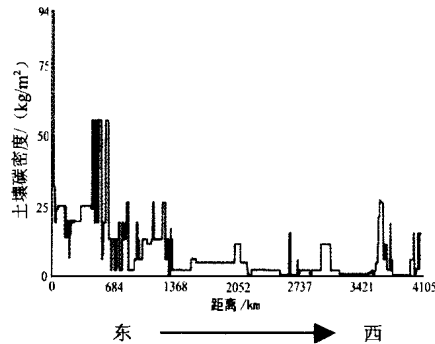
表 3 中国西部地区土壤碳密度

Tab. 3 Soil carbon density in Western China

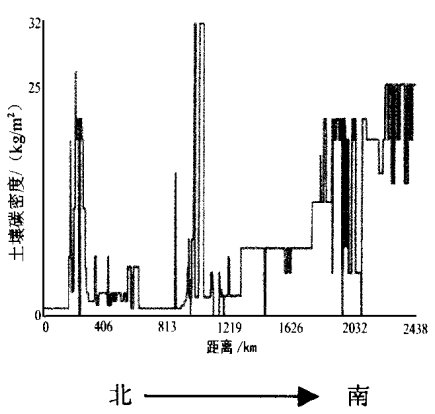
土壤类型	有机质 /%	厚度 /cm	容重 /(g/cm ³)	碳密度 /(kg/m ²)
灰色森林土	2.83	73	1.28	15.34
风沙土	0.27	102	1.51	2.41
灰漠土	0.59	117	1.25	5.00
灰棕漠土	0.45	85	1.25	2.77
灰钙土	0.87	118	1.35	8.04
寒钙土	1.17	87	1.25	7.38
冷棕钙土	5.43	91	1.2	34.39
黑毡土	4.03	73	1.2	20.48
冷钙土	1.59	88	1.25	10.14



a. 东部地区



b. 北部地区



c. 西部地区

图 5 中国东部、北部和西部土壤碳密度比较

Fig. 5 Comparison of soil carbon density in East, North and West China

我国土壤碳密度水平分布并非简单地只按上述经线与纬线作东西或南北向排列, 还有一定的偏转, 从图 3 可见, 在我国中西部之间跨我国地势的第三和第二阶梯, 土壤碳密度在界线两旁差异是比较大的, 这是由于大地形关系和我国季风特征综合形成的结果^[21]。处于我国第三阶梯的地区主要是位于大兴安岭东侧的东北平原西部, 包括松嫩沙地和科尔沁沙地。第二阶梯包括辽西山地、大兴安岭南部的低山丘陵、冀北山地、黄土高原、秦岭和大巴山地、横断山区以及云贵高原的大部分地区。从东北到西南, 中西部地区的土壤类型主要为: 黑钙土、暗栗钙土、草甸土、风沙土、褐土、黄绵土、淡灰钙土、黄棕壤、棕壤、黄壤、紫色土、红壤、黄红壤、山地棕壤、山地草甸土、石灰土, 自然植被也从北方的温带森林、森林草原过渡到羊草草原、针茅草原、山地森林、山地灌丛, 原始森林破坏严重, 气候差异大。由于自然和人为因素的作用, 中西部地区生态环境恶化, 水土流失严重, 土壤有机质含量也在不断下降。

3.3 中国土壤碳库的全球位置

我国中南部红壤、砖红壤、赤红壤、黄棕壤、褐土、棕壤等分布地区的碳密度在 2.14 ~ 10 kg/m² 之间, 分布面积最广, 说明我国广大地区土壤的有机质含量是不高的。我国风沙土分布面积约为 67.56 × 10⁶ hm², 约占统计国土面积的 7.70%, 但其碳密度为 2.54 kg/m², 所以碳储量仅为 17.146 × 10¹⁴ g, 占全国土壤碳库的 1.89%。第二次普查中我国土壤碳密度小于平均值 10.53 kg/m² 的土壤类型面积总共为 571.713 × 10⁶ hm², 约占统计国土面积的 65.10%, 但其碳储量仅为 320.09 × 10¹⁴ g, 占全国土壤碳库的 34.60%。这也从另外一个侧面说明, 我国大部分土壤的有机质含量低, 而且由于分布面积广, 土壤碳库总储量小。中国土壤有机碳储量相对较低, 究其原因, 一是中国森林覆盖率远小于世界平均水平, 并且森林的生产力低; 二是中国草地、沙漠分布面积广, 地表覆盖植被稀疏, 土壤输入的有机质量少; 三是目前沙漠化和水土流失严重, 土壤有机碳损失量较大; 四是土地利用/土地覆盖变化的范围和速率大。

全球土壤碳库的估算中 (表 4), 取 13 732 × 10⁸ t 为全球的平均值, 则中国土壤碳库占全球土壤碳库约为 6.73%, 而中国国土面积仅占全球陆地面积的 6.4%^[11]; 中国土壤平均碳密度为 10.53 kg/m², 不同计算的全球土壤平均碳密度为 10.77 kg/m²^[6]、10.40 kg/m²^[25], 中国土壤平均碳密度与全球碳密度是相当的, 以上说明中国土壤有机碳库对全球碳循环平衡具有重要作用, 保护中国

表 4 陆地表层碳存储(单位: ×10⁹ t)

Tab. 4 Carbon storage in Global Terrestrial (Unit: ×10⁹ t)

	植被	土壤	残落物	NPP
Post(1982) ^[6]		1395.3		
Post(1990) ^[11]	574	1 300	72	62
Prentice, Fung(1990) ^[24]	748	1 143		
Sombroke(1993) ^[9]		1 220		
Foley(1995) ^[25]	800.2	1 373.2	150.7	62.1
King(1995) ^[26]	778.4	1 537.9	69.1	46.05

土地具有全球意义。国外对全世界土壤有机碳库的计算, 传统上都是根据 1 m 深度以内的含量得出的^[6, 9, 25], 我国是根据实测的典型土壤剖面深度进行计算, 不同深度土层的有机质含量也是不同的, 而且大部分深度不到 1 m。实际许多土壤都比较厚, 而且心土层含有大量的碳 (有机和无机的), 虽然有机碳含量随土壤中的深度而降低, 但是在 1 m 深以下的心土中的碳, 在总碳库中占重要成分^[24], 实际中国土壤有机碳库应该更大。

3.4 中国土壤碳库计算结果讨论

方精云等^[11,27]先后估算了全国土壤有机碳储量(表5),由于土壤分类系统不统一,加上土壤各类型剖面数据和面积统计资料来源不同,因而估计的土壤有机碳库储量存在一定差异。

表 5 中国土壤碳库估算对比
Tab. 5 The comparison of soil carbon reservoir in China

土壤普查	面积 /($\times 10^6 \text{hm}^2$)	平均有机质 /%	平均厚度 /cm	平均容重 /(g/cm^3)	平均碳密度 /(kg/m^2)	碳储量 /($\times 10^8 \text{t}$)
第二次土壤普查	877.63	1.78	87	1.30	10.53	924.18
方精云(1996) ^[11]	944.86	3.04	86.2	1.6	20.3	1 856.9

差异存在的具体原因是:① 本文采用 $877.63 \times 10^6 \text{hm}^2$ 作为土壤总面积^[21]来计算中国土壤碳库;方精云^[11]则利用 1:1 000 万中国土壤类型图,测得各类土壤的面积总计为 $944.86 \times 10^6 \text{hm}^2$,比本文的计算多 $67.13 \times 10^6 \text{hm}^2$;② 本文根据 2 473 个典型土种剖面估算碳密度;而方精云^[11]根据 725 个土壤剖面资料进行计算,双方的资料来源和数量差异较大;③ 本文采用的是 1988 年修订的《中国土壤分类系统》^[21];方精云^[11]采用的是 1978 年的《中国土壤分类暂行草案》,为对比分析带来一定的难度。如何减少计算中的不确定性差异,提高土壤碳库储量的估算精度,有待于进一步研究。

由于土地利用变化 20 世纪 80 年代全球平均每年释放约 $1.6 \pm 0.7 \times 10^9 \text{t}$ 碳素^[28~30],而 Houghton 估计由于森林砍伐,中国森林和草地从 1850~1980 年间损失 $9.0 \times 10^9 \text{t}$,平均每年释放 $0.692 \times 10^8 \text{t}$ 到大气中^[28],相比较而言,中国土地利用变化年释放总量占全球平均的 4.33%,这也说明中国陆地生态系统碳库对全球大气 CO_2 浓度上升的贡献较小。

中国的人口从 1949 年的 4 亿增长到现在的 12 亿多,城市建设和生活用地快速扩大,土地利用/土地覆盖变化的速率大大加快,耕地面积从 1949 到 1995 年的 47 年间减少 $290 \times 10^6 \text{hm}^2$ ^[31],导致人均耕地已由 1984 年的 0.1hm^2 下降到 1995 年的 0.08hm^2 ^[32]。目前全国水土流失面积为 $367 \times 10^6 \text{hm}^2$,占国土面积的 38%^[32]。我国土地沙漠化面积达 $149 \times 10^6 \text{hm}^2$,是全国土地面积的 15.5%,从 50 年代末到 70 年代中,北方沙漠化面积每年的增长速度达 $15.70 \times 10^4 \text{km}^2$ ^[33]。大量森林和草原转变为耕地,耕地转变为城市建设和工业用地,导致从植物残体释放碳素,使土壤没有植被保护,水土流失严重,进入土壤的腐殖质减少,并且耕作措施破坏了土壤有机质的保护,增加了土壤腐殖质的矿化作用,土壤有机质积累量减少;由于沙漠化、过度开垦和放牧,草场退化,也导致土壤有机碳的释放,这些均会降低我国土壤有机碳存储量,应该引起我们的高度重视。

3.5 问题及不确定性讨论

当前土壤碳循环仍然是陆地碳循环研究中最缺乏的部分,尤其对土壤有机碳动态变化的了解,然而对于全球土壤碳库的估计差异也很大(表4)。本文估算了中国陆地土壤中有有机碳的总量,但存在不确定性及误差,主要因为:① 土壤具有复杂的结构,空间分布不均匀,由于气候、陆地植被和其它生物发生复杂的相互作用,土壤空间变异性很大;② 区域尺度上的土壤碳循环研究仍然有大量的问题急需解决,例如土壤有机碳的驻留时间、枯枝落叶分解速率、土壤呼吸速率、土壤内植物细根的周转速率、土壤容重等方面,都缺乏标

准化的观测方法; ③ 土壤碳库估计中的不确定性还与土壤实测调查数据不充分有关, 在土壤取样和土壤剖面分析方法、计算方法、土壤参数估计方法 (例如土壤容重、质地、植物根量等)、土壤分类方法、土壤厚度和面积估算等方面存在种种差异^[34]; ④ 控制土壤碳储量的重要因子有气候 (温度和水汽)、植物类型、母岩 (粘土含量和土壤排水层次)、温度、水汽和颗粒大小在土壤剖面内不同深度分布的变化是极大的, 所以土壤碳的潜在分解和储存也很可能对深度 (土壤厚度) 很敏感^[35]; ⑤ 由于农业生产大量施用有机肥和绿肥, 会使土壤有机碳库有较大增加, 而且提高农业生产力也能增加土壤碳贮存^[36], 本文没有考虑农业系统碳汇功能对土壤碳库的作用, 可能过低估计了中国土壤碳库储量。土壤圈层在全球变化中的作用, 是通过土壤圈与其它圈层间的物质、能量交换, 影响土壤全球变化, 进而影响全球气候变化, 对全球增温有显著影响^[37]。应加强对中国土地的管理和保护森林, 开展大规模的人工造林计划和活动, 在增加土壤碳储存的可能性基础上, 加强对碳储存与流动以及与水、土壤和土地管理的关系的研究^[38], 确定增加未来土地碳存储的管理策略。

4 结语

研究表明, 根据第二次全国土壤普查统计资料, 按照 $877.63 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 国土面积计算, 中国陆地土壤总有机碳储量约为 $924.18 \times 10^8 \text{ t}$, 平均碳密度为 10.53 kg/m^2 , 土壤碳库储量约占全球的 6.73%, 说明中国土壤是一个巨大的碳库, 在全球碳循环及全球气候变化中起着相当重要的作用。中国土壤有机碳储量的空间分布总体上表现出: 在东部地区大致是随纬度的增加而递增, 在北部地区随经度减小而递减的趋势; 但存在一定的偏转, 中西部地区的土壤碳密度差异较大; 在西部地区则呈现随纬度减小而增加的趋势。

中国土壤空间分布差异大, 结构不均匀, 土壤实测深度不一, 类型划分不统一, 土壤采样不系统, 而且由于面积差异、估算方法的不同、数据收集和处理及可行性问题, 导致对土壤碳库的估计也产生了一定的误差, 需要进一步解决土壤呼吸以及有机质转化等问题, 建立统一和标准的观测和采样方法。今后应该使用规范化的观测实验方法, 重视土壤碳库、碳通量和碳循环过程的研究, 注意空间和时间尺度 (包括区域测量合适的时空尺度)、数据综合和集成等问题。

致谢: 中国农业科学院农业气象研究所林而达教授和北京大学城市与环境学系方精云教授为本文提出了有益的建议, 在此一并表示感谢。

参考文献 (References):

- [1] Post W M, Peng T H, Emanuel W R et al The Global Carbon Cycle[J] *American Scientist*, 1990, 78: 310-326
- [2] Houghton R A, Skole D L Carbon The Earth As Transformed by Human Action[M] In: Turner B L, Clark W C, Kates R W et al eds Cambridge University Press, 1990 393-408
- [3] Wang Yanfen, Chen Zuozhong, Larry T Tieszen Distribution of soil organic carbon in the major grasslands of Xilinguole, Inner Mongolia, China[J] *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(6): 545-551 (In Chinese) [王艳芬, 陈佐忠, Larry T Tieszen 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响[J] *植物生态学报*, 1998, 22(6): 545-551]
- [4] Wang Q ibing, Li L inghao, Liu Xianhua et al Spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen in an Xilin River basin grassland, InnerMongolia[J] *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(5): 409-414 (In Chinese) [王其兵, 李凌浩, 刘先华等 内蒙

- 古锡林河流域草原土壤有机碳及氮素的空间异质性分析[J]. 植物生态学报, 1998, 22(5): 409-414.]
- [5] Schlesinger W H. Carbon storage in the caliche of arid soils: a case study from Arizona[J]. *Soil Science*, 1982, 133: 247-255
- [6] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J et al. Soil carbon pools and life zones[J]. *Nature*, 1982, 298: 156-159
- [7] Torn M S, Trumbore S E, Chadwick O A et al. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover[J]. *Nature*, 1997, 389: 170-173
- [8] Jenkinson D S, Adams S D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming[J]. *Nature*, 1991, 351: 304-306
- [9] Sombroek W G, Nachtergaele F O, Hebel A. Amount, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils[J]. *AMBIO*, 1993, 22(7): 417-426
- [10] Sampson R N, Apps M, Brown S et al. Terrestrial biosphere carbon fluxes quantification of sinks and sources of CO₂[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1993, 70: 3-15
- [11] Fang Jinyun, Liu Guohua, Xu Songling. Carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China[A]. In: Wang Gengchen, Wen Yuping eds. Monitoring and Relevant Process of Greenhouse Gas Concentration and Emission[C]. Beijing: China Environment Sciences Publishing House, 1996. 109-128. (In Chinese) [方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库[A]. 见: 王庚辰, 温玉璞主编. 温室气体浓度和排放监测及相关过程[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 109-128.]
- [12] Li L inghao, Liu Xianhua, Chen Zuozhong. Study on the carbon cycle of Leymus Chinensis steppe in the Xilin River basin[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(10): 955-961. (In Chinese) [李凌浩, 刘先华, 陈佐忠. 内蒙古锡林河流域羊草草原生态系统碳素循环研究[J]. 植物学报, 1998, 40(10): 955-961.]
- [13] Wu Zhongmin, Zeng Qingbo, Li Yide et al. A preliminary research on the carbon storage and CO₂ release of the tropical forest soils in Jianfengling, Hainan island, China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(5): 416-423. (In Chinese) [吴仲民, 曾庆波, 李意德等. 尖峰岭热带森林土壤C储量及CO₂排放量的初步研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(5): 416-423.]
- [14] Wu Zhongmin, Zeng Qingbo, Li Yide et al. Carbon reservoir of tropical mountain rain forests in Jianfengling and effect of clear-cutting on it[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(4): 341-344. (In Chinese) [吴仲民, 曾庆波, 李意德等. 尖峰岭热带山地雨林C素库及皆伐影响的初步研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9(4): 341-344.]
- [15] Li Yide, Wu Zhongmin, Zeng Qingbo et al. Carbon reservoir and carbon dioxide dynamics of tropical mountain rain forest ecosystem at Jianfengling, Hainan island[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(4): 371-378. (In Chinese) [李意德, 吴仲民, 曾庆波等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究[J]. 生态学报, 1998, 18(4): 371-378.]
- [16] Li Zhongpei, Wang Xiaojun. Simulation of soil organic carbon dynamic after changing land use pattern in hilly red soil region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(4): 365-370. (In Chinese) [李忠佩, 王效举. 红壤丘陵区土地利用方式变更后土壤有机碳动态变化的模拟[J]. 应用生态学报, 1998, 9(4): 365-370.]
- [17] Li L inghao. Effects of land-use change on soil carbon storage in grassland ecosystem s[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(4): 300-302. (In Chinese) [李凌浩. 土地利用变化对草原生态系统土壤碳贮量的影响[J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 300-302.]
- [18] Xu Deying. The effect of human management activities on the carbon in forest soils[J]. *World Forestry Research*, 1994, 5: 26-31. (In Chinese) [徐德应. 人类经营活动对森林土壤碳的影响[J]. 世界林业研究, 1994, 5: 26-31.]
- [19] Liu Shaohui, Fang Jingyun, Makoto Kiyota. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(2): 119-126. (In Chinese) [刘绍辉, 方精云, 清田信. 北京山地温带森林的土壤呼吸[J]. 植物生态学报, 1998, 22(2): 119-126.]
- [20] Zhang Linbo, Cao Hongbo, Gao Jixi et al. Effect of plant changes induced by elevated atmospheric CO₂ on soil biota[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17(4): 33-38. (In Chinese) [张林波, 曹洪波, 高吉喜等. 大气CO₂浓度升高对土壤微生物的影响[J]. 生物学报, 1998, 17(4): 33-38.]
- [21] National soil survey office. Chinese Soils[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998. 1-1252. (In Chinese) [全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998. 1-1252.]
- [22] National soil survey office. Chinese soil genus records, Volume 1- Volume 6[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995. (In Chinese). [全国土壤普查办公室. 中国土种志, 第一卷~第六卷[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.]
- [23] Tian Qi, Li Jun, Huang Fanghong et al. Chinese Soil Map[A]. In: Pei Xiangbin (ed.). The database of resources and environment in China (1: 4000000)[C]. The State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, 1996. (In Chinese) [田

- 琦, 李军, 黄方红 等 中国土壤分布图[A] 见: 裴相斌 主编 中国资源环境数据库(1: 400 万)[C] 中国科学院地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 1996]
- [24] Prentice K C, Fung I Y. The sensitivity of terrestrial carbon storage to climate change[J] *Nature*, 1990, **346**: 48-51
- [25] Foley J A. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget[J] *Tellus*, 1995, **47**(B): 310-319
- [26] King A W, Emanuel W R, Wullschlegel S D 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, **47**(B): 501-519
- [27] Fang Jinyun, Liu Guohua, Xu Songling. Carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China[A] In: Wang Gengchen, Wen Yuping eds. Monitoring and relevant process of greenhouse gas concentration and emission[C] Beijing: China Environment Sciences Publishing House, 1996 129-139 (In Chinese) [方精云, 刘国华, 徐嵩龄 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义[A] 见: 王庚辰, 温玉璞 主编 温室气体浓度和排放监测及相关过程[C] 北京: 中国环境科学出版社, 1996 129-139]
- [28] Houghton R A. Land-use change and the carbon cycle[J] *Global Change Biology*, 1995, **1**: 275-287
- [29] Houghton R A. Land-use change and terrestrial carbon: the temporal record[M] NATO ASI Series, Vol 140 Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996 117-134
- [30] Houghton R A. Terrestrial sources and sinks of carbon inferred from terrestrial data[J] *Tellus*, 1996, **48**(B): 420-432
- [31] Dang Anrong, Yan Shouyong. A study on the temporal variation of China's farmland area and grain-crop sown area[J] *Progress in Geography*, 1998, **17**(1): 36-43 (In Chinese) [党安荣, 阎守邕 我国耕地面积与粮播面积的时序变化研究[J] 地理科学进展, 1998, **17**(1): 36-43]
- [32] Zhou Guangsheng. Impact of climate change on NPP of agriculture and animal husbandry in ecologically vulnerable areas: mechanism and modelling[J] *Resources Science*, 1999, **21**(5): 46-52 (In Chinese) [周广胜 气候变化对生态脆弱地区农牧业生产力影响机制与模拟[J] 资源科学, 1999, **21**(5): 46-52]
- [33] Feng Qi, Cheng Guodong, Mmikan i. Water resources in China: problems and countermeasures[J] *AMBIO*, 1999, **28**(2): 202-203 (In Chinese) [冯起, 程国栋, 三上正男 中国水资源的问题和对策[J] 人类环境杂志, 1999, **28**(2): 202-203]
- [34] Rozhkov V A, Wagner V B et al. Soil carbon estimates and soil carbon map for Russia[R] IASA work paper, WR96- 60, 1996 1-44
- [35] Harden J W, Fries T L, Huntington T G. Mississippi basin carbon project- upland soil database for sites in Yazoo basin[R] Northwestern Mississippi, U. S. Geological Survey, 1999
- [36] Liu Yunfen. Carbon sink functions of Chinese agriculture system[J] *Agro-environmental Protection*, 1999, **17**(5): 197-202 (In Chinese) [刘允芬 中国农业系统碳汇功能[J] 农业环境保护, 1999, **17**(5): 197-202]
- [37] Zhao Qiguo. Significance and research scope of pedosphere in global changes[J] *Earth Science Frontiers*, 1997, **4**(2): 153-162 (In Chinese) [赵其国 土壤圈在全球变化中的意义与研究内容[J] 地学前缘, 1997, **4**(2): 153-162]
- [38] Sven Sandström. Carbon Storage and Flow: Their relationship to Water, Soil and Land Management[J] *AMBIO*, 1993, **22**(7): 438-441

Analysis on Spatial Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon Reservoir in China

WANG Shao-qiang¹, ZHOU Cheng-hu¹, LI Ke-rang¹,
ZHU Song-li², HUANG Fang-hong¹

(1. The State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Institute of Environmental Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract The paper respectively adopted physiochemical properties of every soil stratum from 2 473 soil profiles of the second soil survey. The corresponding carbon content of soil

is estimated by utilizing conversion coefficient 0.58 First, we calculated the carbon content of every stratum of different soil stirp in the same soil subtype Then, we took soil stratum depth as weight coefficient to acquire the average physiochemical properties of various kinds of soil stirp Finally, we got the average depth, organic content, duck density and carbon density of different soil subtypes through area averaging

The total carbon quantity of different kinds of soil can be calculated by the following expression:

$$C_j= 0.58S_jH_jO_{wj}$$

w here j is the soil type, C_j is the carbon storage of j soil type, S_j is the distribution area of j soil type, H_j is the average depth of j soil type, O_j is the average organic content of j soil type, and W_j is the average bulk density of j soil type

In the second soil survey, the total amount of soil organic carbon is about 924.18×10^8 t and carbon density is about 10.53 kgC/m^2 in China according to the statistic country area $877.63 \times 10^6 \text{ hm}^2$. The spatial distribution characteristics of soil organic carbon in China are that the carbon storage increases w ith the increase of latitude in eastern China and the carbon storage decreases w ith the decrease of longitude in northern China There is a transition zone where carbon storage varies greatly in China Moreover, there is an increasing tendency of carbon density w ith the decrease of latitude in western China Soil circle has implications on global change, but the difference in soil spatial distribution is substantial in China Because the structure of soil is inhomogeneous, mistakes will be resulted in estimating soil carbon reservoir It is thus necessary to farther resolve soil respiration, organicmatter conversion and others related problem s, and build uniform and normal methods of measument and sampling

Key words: terrestrial eco system; global change; soil carbon reservoir; carbon cycle

* * * * *

更 正

本刊 55 卷第 4 期“中国东部河流颗粒物的地球化学性质”一文中表 1 第 18 行漏印一行“河流 样品数 Cu Pb Zn Cd Cr Co Ni V”,特此更正,并向作者和读者致歉。