

1980s-2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化

徐 丽¹, 于贵瑞^{1,2}, 何念鹏^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190)

摘要: 土壤作为陆地生态系统有机碳库的主体, 在全球碳循环中起着重要作用。然而, 当前区域土壤有机碳储量的变化情况及其碳源/汇功能仍然不清楚。利用中国 1980s (1979-1985 年) 第二次土壤普查数据, 同时收集整理 2010s (2004-2014 年) 已发表的有关中国土壤有机碳储量 (0~20 cm 和 0~100 cm) 的文献数据, 综合评估了 1980s-2010s 中国土壤有机碳储量的变化情况, 并分析森林、草地、农田和湿地等生态系统土壤碳源/汇功能; 同时结合现有的中国植被碳储量变化研究, 进一步探讨了 1980s-2010s 中国陆地生态系统的碳源/汇效应。研究发现: ① 1980s-2010s 中国土壤 (0~100 cm) 有机碳储量净增长 $3.04 \pm 1.65 \text{ Pg C}$, 增长速率为 $0.101 \pm 0.055 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 其中表层土壤 (0~20 cm) 的碳汇效应明显; ② 森林土壤是固碳主体, 净增长 $2.52 \pm 0.77 \text{ Pg C}$, 而草地和农田土壤增长有限, 分别为 0.40 ± 0.78 和 $0.07 \pm 0.31 \text{ Pg C}$; ③ 湿地有机碳储量净减少 $0.76 \pm 0.29 \text{ Pg C}$; ④ 中国陆地生态系统的碳汇效应较强, 总碳汇量相当于同期 (1980-2009 年) 化石燃料和水泥生产排放 CO_2 总量的 14.85%~27.79%。随着中国森林和草地生态系统植被和土壤的进一步保护、恢复和重建, 中国陆地生态系统具有较大的碳汇潜力, 在未来全球碳平衡中将发挥更大的作用。

关键词: 中国陆地生态系统; 土壤有机碳; 储量; 变化

DOI: 10.11821/dlxb201811008

1 引言

土壤是陆地生态系统最大的碳库, 全球陆地生态系统超过 80% 的碳存储于土壤中^[1-2]。土壤碳库既会通过供给植物生长所需养分、改善土壤肥力、固定或分解污染物等方式直接或间接影响全球粮食安全, 也会因其微小波动 (增加或减少) 引起大气 CO_2 浓度的剧烈变化, 对全球碳平衡以及气候环境产生深刻影响^[3-4]。增加陆地生态系统尤其是土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 储量, 被认为是最经济有效的固碳途径, 也是应对气候变化的重要策略之一。因此, 准确估算区域 SOC 储量变化对于认识碳循环过程, 指导制定科学合理的陆地生态系统碳管理措施具有重要意义。

随着地面观测和 3S 技术的发展, 学者们以森林、草地清查数据或遥感影像数据为基

收稿日期: 2017-12-08; 修订日期: 2018-06-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0500202); 国家自然科学基金项目 (31290221, 41571130043, 31570471); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA19020302; XDA05050702) [Foundation: National Key Research Project of China, No.2016YFC0500202; National Natural Science Foundation of China, No.31290221, No.41571130043, No.31570471; The Chinese Academy of Sciences Strategic Priority Research Program, No.XDA19020302, No.XDA05050702]

作者简介: 徐丽 (1987-), 女, 助理研究员, 主要从事生态系统碳循环研究。E-mail: xuli@igsnr.ac.cn

通信作者: 于贵瑞 (1959-), 男, 研究员, 主要从事全球变化与生态系统碳氮水循环、生态系统管理研究。

E-mail: yugr@igsnr.ac.cn

础,开展了大量有关陆地生态系统碳储量的研究工作^[5-7]。但当前的研究多是针对植被(如森林、草地)碳储量现状和变化的研究,而有关区域SOC储量的研究则多是评估其现状,很少探讨其变化情况(表1)。同时,全球或区域SOC储量评估结果之间具有较高的不确定性,如全球SOC储量估算值变化范围为1395~2949 Pg C^[1-2, 26-28],中国SOC储量估算值为50~185.7 Pg C^[18-21]。有限的土壤监测数据是限制全球或区域SOC储量研究的关键因素,也是SOC储量估算结果较高不确定性的主要原因^[6, 25, 29-30]。相对于森林、草地植被定期、系统全面的清查和遥感调查工作,区域尺度土壤样品的采集和监测工作具有频度低、周期长等特点,使得土壤数据库中常常缺乏反映SOC储量现状的监测数据,严重制约着SOC储量的研究^[31-32]。此外,评估方法也是区域尺度SOC储量估算值之间存在较大差异的重要原因^[25, 33]。目前,学者们主要采用模型法或统计学法探讨全球或区域SOC储量变化情况^[1, 6, 18-21, 27-28, 34]。但在利用这些估算方法时,模型的基本结构、影响因素的选择、关键参数的优化方式以及尺度拓展等都会一定程度地增加评估结果的不确定性^[15]。因此,获取更新、更全面系统的土壤监测数据,优化评估方法能有效地提高全球或区域SOC储量现状及变化的估算精度。

中国作为全球陆地生态系统的重要组成部分,其碳库的变化(增加或减少)都会对全球碳收支产生巨大影响。自20世纪80年代以来,中国政府为应对全球气候变化,保护生态环境,启动了一系列重大的生态保护工程,如三北防护林工程、长江防护林工程、珠江防护林工程、北方森林保护工程和天然林保护工程等;此外,也实施了一系列新型的农业施肥和生产技术以增加农业产量和保护农田土壤^[35]。这些工程措施能一定程度地增加陆地生态系统植被和土壤的碳储量,从而有效地应对全球气候变化带来的挑战^[32, 36-38]。当前,学者们针对陆地生态系统碳储量动态变化开展了大量的研究工作,但多数研究只是探讨某一生态系统或整个陆地生态系统植被碳储量的变化^[39-43],虽然Yang等^[44]利用实地调查数据与历史数据估算了中国北方草地生态系统SOC储量的变化,Pan等^[45]和Yang等^[32]利用已发表的文献数据分别探讨了中国农田和森林生态系统的SOC储量变化情况,但有关中国陆地生态系统SOC储量变化的研究却非常少,而有研究表明土壤和植被具有相似的固碳能力,甚至高于植被的固碳能力^[46]。因此,准确评估中国SOC储量在过去30年的变化情况,了解森林、草地、农田、湿地等主要生态系统SOC储量的变化情况,不仅有助于准确评估中国陆地生态系统固定大气CO₂的能力,也有助于评估各生态保护措施固碳成效。

本文利用中国第二次土壤普查数据(1979-1985年),同时收集整理2010s(2004-2014年)已发表的有关中国SOC储量(0~20 cm和0~100 cm)的文献数据,构建了1980s和2010s两个时期的土壤实地监测数据库。该数据库覆盖了中国森林、草地、农田和湿地等主要生态系统。主要研究目标:① 综合评估1980s和2010s两个时期的中国SOC储量,并估算1980s-2010s中国SOC储量的变化情况;② 分析探讨森林、草地、农田和湿地等生态系统SOC储量碳源/汇功能;③ 结合现有的中国植被碳储量变化研究,进一步评估1980s-2010s中国陆地生态系统的碳源/汇效应。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 土壤碳密度数据 本研究中所用的数据资料主要包括1980s和2010s两个时期。其中,1980s时期的数据主要来自中国第二次土壤普查(1979-1985年),包括《中国土种

表 1 中国陆地生态系统 SOC 密度和储量已有研究结果之间的比较

Tab. 1 Estimates of SOC density and storage in Chinese terrestrial ecosystems reported in different studies

生态系统	时期	方法	数据源	面积 (10 ⁴ km ²)	土壤		参考文献
					碳密度 (kg C m ⁻²)	碳储量 (Pg C)	
森林	1989-1993	统计法	文献数据+森林调查数据	108.62	19.36	21.02	[8]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据	150.00	11.59	17.39	[9]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据	249.32	13.73	34.23	[10]
	1979-2004	统计法	第二次土壤普查数据+实验调查数据	197.13	10.50	20.7	[11]
	2003-2014	统计法	文献数据	151.55	14.49	21.96	[12]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据	271.54	10.61±2.63	28.81±7.13	本研究
	2004-2014	统计法	文献数据+调查数据	273.58	11.45±2.11	31.34±5.78	本研究
草地	1981-1988	统计法	草地资源调查数据	298.97	13.16	41.03	[13]
	1981-1998	模型法(CEVSA)	FAO 数据	166.96	9.99	16.69	[14]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据	223.00	8.83	19.68	[9]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据	278.51	13.54	37.71	[10]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据+实验调查数据	268.35	9.17	24.60	[11]
	1981-1988	统计法	文献数据	331.41	8.48	28.11	[15]
	2003-2014	统计法	文献数据	355.05	7.96	29.37	[16]
农田	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据	284.20	8.20±2.42	23.31±6.87	本研究
	2004-2014	统计法	文献数据	280.44	8.46±1.67	23.72±4.68	本研究
	1981-1998	模型法(CEVSA)	FAO 数据	172.89	10.84	18.73	[14]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据	182.00	8.07	14.67	[9]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据+实验调查数据	167.03	7.57	12.65	[11]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据	175.74	8.59±2.03	15.10±3.56	本研究
	2004-2014	统计法	文献数据+调查数据	171.53	8.84±1.16	15.17±1.99	本研究
湿地		统计法	文献数据	22.50		5.04~6.19	[17]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据	16.05	28.12±10.18	4.51±1.63	本研究
	2004-2014	统计法	文献数据	14.46	25.93±6.18	3.75±0.89	本研究
陆地生态系统	1958-1960	统计法	第一次土壤普查数据+森林调查数据	944.86	20.3	185.70	[18]
		模型法(OBM)	WOSCN 数据	968	10.33	100.00	[19]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据	915	4.86	50.00	[20]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据	877.63	10.53	92.42	[21]
		模型法(BIOME3)	WOSCN 数据	959.63	12.48	119.80	[22]
	1981-1998	模型法(CEVSA)	FAO 数据	901.14	9.17	82.65	[14]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据	881.81	8.01	70.31	[23]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据	870.94	10.29	89.61	[10]
	1979-2004	统计法	第二次土壤普查数据+实验调查数据	880.37	7.80	69.10	[11]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据	928.10	9.60	89.14	[24]
			文献数据			119.76	[25]
	1979-1985	统计法	第二次土壤普查数据	926.52	9.01±1.28	83.46±11.89	本研究
	2004-2014	统计法	文献数据+调查数据	925.64	9.34±0.94	86.50±8.71	本研究

注：土壤深度约为 100 cm。

志》(1~6册)、全国各省(直辖市)和地方土种志资料,共收集了8897个土壤剖面的数据资料,包括每个剖面的地理位置、土壤类型、厚度、有机质含量等(图1)。2010s时期的数据主要来源分为两类:①本实验组和相关实验组的野外样地实际监测数据;②正式发表的文献数据,主要选取2004-2014年在ISI数据库(<http://apps.webofknowledge.com>)和中国知网(<http://www.cnki.net>)中公开发表的有关土壤碳密度数据的期刊论文和学位论文,其中,本文以“土壤有机碳(SOC)”“土壤有机碳密度(soil organic carbon density)”和“土壤有机碳储量(soil organic carbon storage)”作为关键词检索

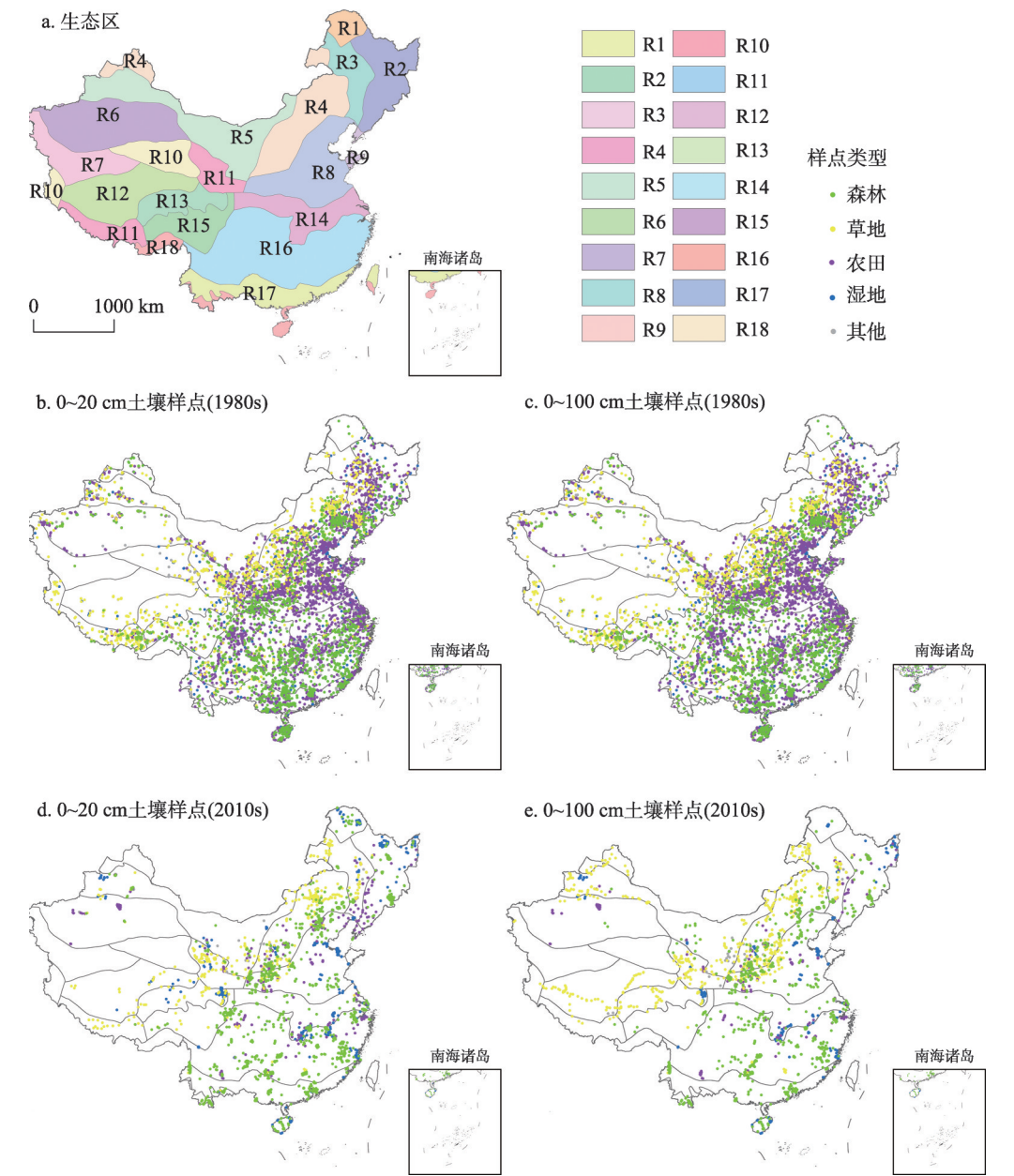


图1 中国陆地生态系统生态区划及1980s和2010s中国土壤样点分布图

Fig. 1 Regional division of terrestrial ecosystems and the distribution of soil samples collected in the 1980s and 2010s

文献。文献数据筛选遵循以下标准：① SOC密度数据必须是样地实际监测数据，不包括模型拟合和文献统计数据；② 野外采样监测工作必须在2000年之后进行；③ SOC密度的监测方法应具有可比性。在此筛选标准下，共收集了7683个土壤样点数据（4536个表层土壤（0~20 cm）数据和3147个深层土壤（0~100 cm）数据）（图1），覆盖了森林、草地、农田和湿地等中国主要生态系统。其中，1980s和2010s两个时期各生态系统类型的样点数、SOC密度均值和方差等基本信息如表1所示，2010s年0~20 cm和0~100 cm深度的SOC密度数据集参照Xu等^[47]的附件。

表2 1980s和2010s不同类型生态系统的土壤样点数及其土壤有机碳密度(kg C m⁻²)分布特征

Tab. 2 The properties of soil samples and SOC density (kg C m⁻²) in different ecosystems in the 1980s and 2010s

		1980s					2010s				
		森林	草地	农田	湿地	其他	森林	草地	农田	湿地	其他
0~20 cm	N	1990	1367	4175	498	867	1861	931	840	796	108
	Min	0.04	0.13	0.05	0.14	0.09	<0.01	0.03	0.28	0.18	0.11
	Max	15.02	16.94	17.09	57.42	12.26	13.59	13.40	7.91	23.75	6.28
	Mean	3.93	3.39	2.95	7.11	2.52	4.48	4.06	3.03	5.60	1.72
	SD	2.45	2.53	1.89	5.15	1.74	2.83	2.99	1.56	4.82	1.24
	CV	0.62	0.74	0.64	0.72	0.69	0.63	0.74	0.51	0.86	0.72
0~100 cm	N	1989	1349	4175	498	867	1344	842	544	328	89
	Min	0.04	0.13	0.23	0.71	0.11	0.50	0.39	0.94	0.55	0.41
	Max	55.87	30.84	49.89	176.17	40.98	34.66	30.01	22.44	85.12	27.50
	Mean	10.11	8.56	8.49	23.80	7.06	10.12	8.23	8.16	14.87	5.96
	SD	6.90	6.02	5.76	19.07	4.50	6.23	5.74	4.06	14.81	5.09
	CV	0.68	0.70	0.68	0.80	0.64	0.62	0.70	0.50	0.99	0.85

注：表中N表示样点总个数；Min、Max、Mean和SD分别表示各类型生态系统的土壤有机碳密度的最小值、最大值、均值和标准差（kg C m⁻²），CV表示变异系数。

2.1.2 生态区划数据 根据中国气候、地貌、地形等特征，以傅伯杰等^[48]中国生态区划方案为基础，本研究将中国陆地生态系统划分为18个不同的生态区域。这些区域分别为：寒温带湿润地区（R1），中温带湿润地区（R2），中温带亚湿润地区（R3），中温带半干旱地区（R4），中温带干旱地区（R5），暖温带干旱地区（R6），青藏高原寒带干旱地区（R7），暖温带亚湿润地区（R8），暖温带湿润地区（R9），青藏高原温带干旱地区（R10），青藏高原温带半干旱地区（R11），青藏高原亚寒带半干旱地区（R12），青藏高原亚寒带亚湿润地区（R13），北亚热带湿润地区（R14），青藏高原温带湿润、亚湿润地区（R15），中亚热带湿润地区（R16），南亚热带湿润地区（R17）和热带湿润地区（R18）（图1）。各生态区域中不同类型生态系统的面积则分别根据1990年和2010年土地利用/覆被图确定^[49]。除去水系和台湾地区，中国陆地生态系统面积约为9.26×10⁶ km²。

2.2 数据分析方法

2.2.1 SOC密度的计算 当前有关SOC储量评估多是针对0~20 cm和0~100 cm深度的土壤，为了便于研究结果之间的比较，本文分别估算了1980s时期和2010s时期所有土壤样点0~20 cm和0~100 cm深度的SOC密度。有关SOC密度（kg C m⁻²）的具体计算方法为：

$$SOC\ density = \sum_{i=1}^n SOC_i \times BD_i \times D_i \times (1 - \delta_i) \times 0.1 \quad (1)$$

式中：SOC_i为第i层土壤有机碳百分含量（%）；BD_i为第i层土壤容重（g cm⁻³）；D_i为第i

层土壤厚度 (cm); δ_i 为第 i 层土壤 $> 2 \text{ mm}$ 石砾百分含量 (%); n 为参与计算的土壤层次总数。对于只有土壤有机质含量但没有有机碳含量记录的样点, 利用换算系数 0.58 将有机质含量转换成有机碳含量^[10]。对于缺乏容重信息的样点, 采用土壤容重传递函数推算^[11, 50], 对于石砾含量缺失的样点采用已知同类型土壤的均值代替。

2.2.2 SOC 储量的计算 估算 1980s 和 2010s 两个时期的 SOC 储量主要分为两步: 第一步估算每个生态区的 SOC 储量, 即根据不同类型生态系统 SOC 密度计算其对应的 SOC 储量, 进而估算各生态区的 SOC 储量 (图 2); 第二步从区域尺度到国家尺度, 即将第一步计算所得的各个生态区的 SOC 储量加和得到中国陆地生态系统总的 SOC 储量^[47]。具体的计算思路如图 2 所示, 计算公式如下:

$$SOC \text{ storage} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (SOC D_{ij} \times S_{ij}) \quad (2)$$

式中: i 为生态区类型; j 为生态系统类型; m 为生态区的类型总数; n 为生态系统的类型总数; S_{ij} 为第 i 类生态区第 j 类生态系统的面积; $SOC D_{ij}$ 为第 i 类生态区第 j 类生态系统 SOC 密度。特别地, 第一步中若生态区内某一类型生态系统的土壤样点数少于 10 个, 或生态区内某一类型生态系统的土壤样点空间分布极不均匀 (如样点集中分布在很小的区域, 而大部分区域没有样点), 则需要结合相邻的、气候环境相似生态区中同一类型生态系统的样点数据来估算^[47]。

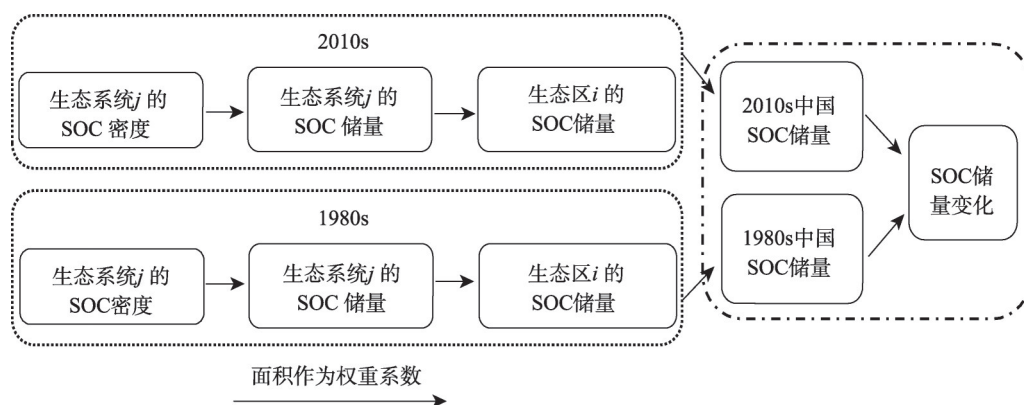


图2 1980s-2010s 中国土壤碳储量及变化评估流程图

Fig. 2 Flow diagram of soil organic carbon (SOC) storage change calculation during the 1980s-2010s

2.2.3 1980s-2010s 中国陆地生态系统 SOC 储量的变化 SOC 储量变化速率 (ΔV_s , Pg C yr^{-1}) 的计算公式如下:

$$\Delta V_s = \frac{SOC S(2010s) - SOC S(1980s)}{30} \quad (3)$$

式中: $SOC S(1980s)$ 和 $SOC S(2010s)$ 分别为 1980s 和 2010s 的中国陆地生态系统 SOC 储量 (Pg C)。

3 结果

3.1 1980s 和 2010s 中国陆地生态系统 SOC 密度和储量

1980s 时期, 中国表层土壤 (0~20 cm) 的 SOC 储量为 $30.94 \pm 3.93 \text{ Pg C}$, 约为 0~100

cm 深度 SOC 储量的 37.07% (0~100 cm 的 SOC 储量为 83.46 ± 11.89 Pg C) (图 3)。其中, 森林、草地、农田和湿地生态系统表层深度 SOC 储量分别为 11.30 ± 2.44 Pg C、 9.01 ± 2.33 Pg C、 5.26 ± 1.13 Pg C 和 1.36 ± 0.44 Pg C, 对应的 SOC 密度为 4.16 ± 0.90 kg C m⁻²、 3.17 ± 0.82 kg C m⁻²、 2.99 ± 0.64 kg C m⁻² 和 8.49 ± 2.73 kg C m⁻²。同时, 对于 0~100 cm 深度, 森林、草地、农田和湿地生态系统的 SOC 储量分别为 28.81 ± 7.13 Pg C、 23.31 ± 6.87 Pg C、 15.10 ± 3.56 Pg C 和 4.51 ± 1.63 Pg C, 对应的 SOC 密度为 10.61 ± 2.63 kg C m⁻²、 8.20 ± 2.42 kg C m⁻²、 8.59 ± 2.03 kg C m⁻² 和 28.12 ± 10.18 kg C m⁻² (图 4)。

2010s 时期, 中国 0~20 cm 深度的 SOC 储量为 34.62 ± 3.71 Pg C, 约为 0~100 cm 深度 SOC 储量的 40.02% (0~100 cm 的 SOC 储量为 86.50 ± 8.71 Pg C) (图 3)。其中, 森林、草地、农田和湿地生态系统表层深度 SOC 储量分别为 13.93 ± 2.66 Pg C、 10.06 ± 2.19 Pg C、 5.66 ± 0.79 Pg C 和 1.20 ± 0.24 Pg C, 对应的 SOC 密度为 5.09 ± 0.97 、 3.59 ± 0.78 、 3.30 ± 0.46

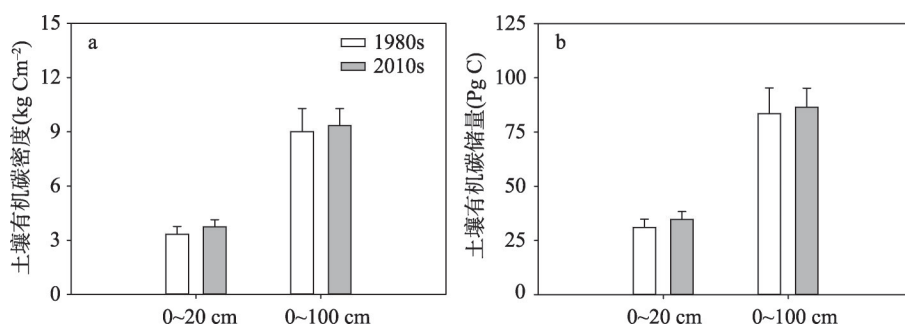


图3 1980s和2010s中国陆地生态系统SOC密度(a)和储量(b)

Fig. 3 SOC density (kg C m⁻²) and storage (Pg C) in China during the 1980s-2010s

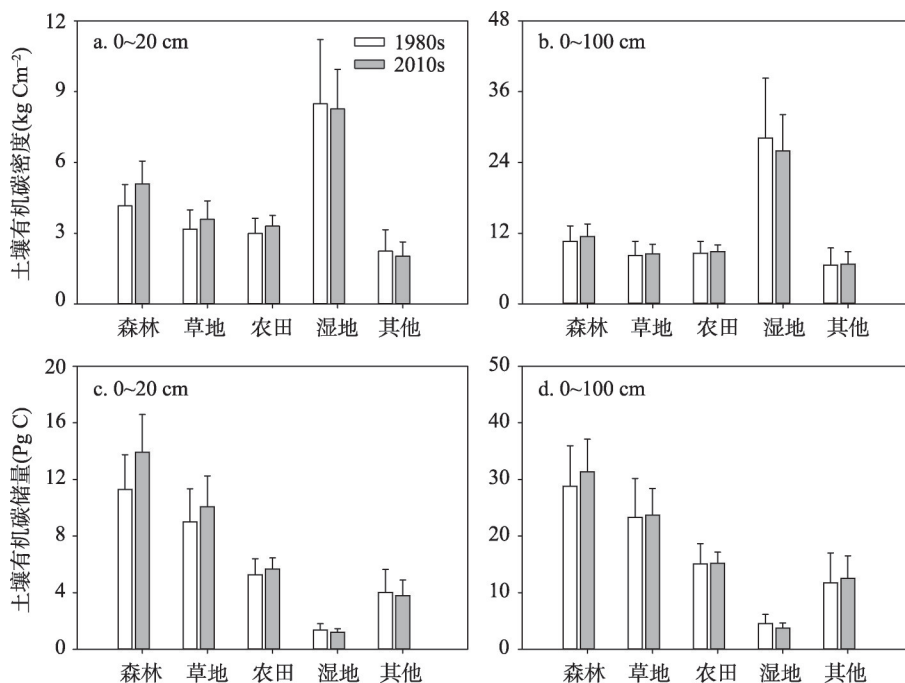


图4 1980s和2010s不同生态系统SOC密度(a, b)和储量(c, d)

Fig. 4 SOC density (a, b; kg C m⁻²) and storage (c, d; Pg C) in different ecosystems in China

和 $8.27 \pm 1.68 \text{ kg C m}^{-2}$ (图4)。而对于 0~100 cm 深度, 森林、草地、农田和湿地生态系统的 SOC 储量分别为 $31.34 \pm 5.78 \text{ Pg C}$ 、 $23.72 \pm 4.68 \text{ Pg C}$ 、 $15.17 \pm 1.99 \text{ Pg C}$ 和 $3.75 \pm 0.89 \text{ Pg C}$, 对应的 SOC 密度为 $11.45 \pm 2.11 \text{ kg C m}^{-2}$ 、 $8.46 \pm 1.67 \text{ kg C m}^{-2}$ 、 $8.84 \pm 1.16 \text{ kg C m}^{-2}$ 和 $25.93 \pm 6.18 \text{ kg C m}^{-2}$ 。

3.2 1980s-2010s 中国陆地生态系统土壤有机碳密度和储量的变化

1980s-2010s, 中国 0~20 cm 和 0~100 cm 深度的 SOC 储量净增长量分别为 $3.68 \pm 0.53 \text{ Pg C}$ 和 $3.04 \pm 0.65 \text{ Pg C}$, 增长速率约为 $0.123 \pm 0.018 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 和 $0.101 \pm 0.055 \text{ Pg C yr}^{-1}$ (图3、图5)。表层 (0~20 cm) 的 SOC 储量增长率 (11.88%) 高于 0~100 cm 深度的 SOC 储量增长率 (3.64%) (图5b)。

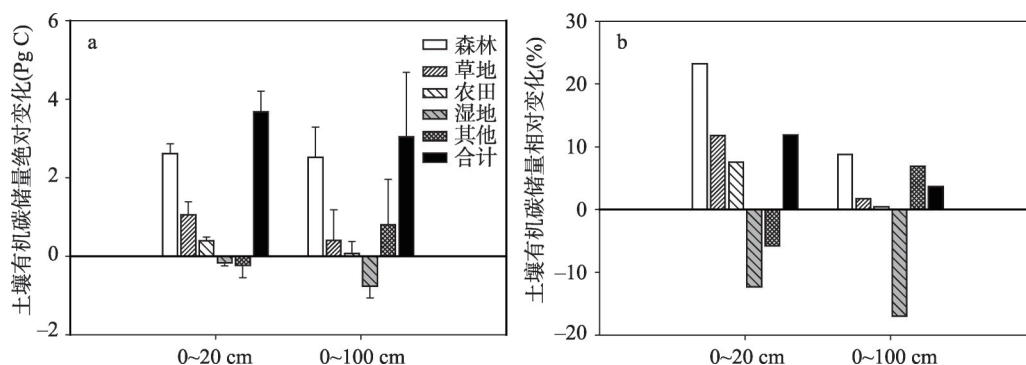


图5 1980s-2010s 不同生态系统 SOC 储量的绝对变化(a)和相对变化(b)

Fig. 5 Absolute (a, Pg C) and relative (b, %) changes in soil organic carbon (SOC) storage in different ecosystems in China

1980s-2010s, 森林、草地和农田生态系统的 SOC 储量均呈增长趋势, 其中森林生态系统的 SOC 储量增长量最大, 农田生态系统的 SOC 储量增长量最小。对于森林生态系统, 其 0~20 cm 的 SOC 密度和储量净增长量 ($0.96 \pm 0.09 \text{ kg C m}^{-2}$ 和 $2.62 \pm 0.24 \text{ Pg C}$) 高于 0~100 cm 深度 SOC 密度和储量的净增长量 ($0.92 \pm 0.28 \text{ kg C m}^{-2}$ 和 $2.52 \pm 0.77 \text{ Pg C}$), 两个深度对应的 SOC 储量增长速率分别为 0.087 和 $0.084 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 。草地生态系统 0~20 cm 和 0~100 cm 深度的 SOC 储量净增长量分别为 $1.06 \pm 0.33 \text{ Pg C}$ 和 $0.40 \pm 0.78 \text{ Pg C}$, 对应的增长速率分别为 $0.035 \pm 0.011 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 和 $0.013 \pm 0.026 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 。相比较而言, 农田生态系统 SOC 储量变化较小, 其表层 (0~20 cm) SOC 储量增加了 $0.40 \pm 0.10 \text{ Pg C}$, 储量增长速率为 $0.013 \text{ Pg C yr}^{-1}$; 而 0~100 cm 深度的 SOC 储量基本保持不变 ($0.07 \pm 0.31 \text{ Pg C}$), 增长速率约为 $0.002 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 。然而, 湿地生态系统在 1980s-2010s 年间, 其 0~20 cm 和 0~100 cm 深度的 SOC 密度分别减少了 $1.16 \pm 0.51 \text{ kg C m}^{-2}$ 和 $5.29 \pm 2.02 \text{ kg C m}^{-2}$, 对应的 SOC 储量净减少量分别为 $0.17 \pm 0.07 \text{ Pg C}$ 和 $0.76 \pm 0.29 \text{ Pg C}$ 。

3.3 不同生态区土壤有机碳储量的变化

在 1980s-2010s 年间, 中国绝大部分区域的 SOC 密度和储量均在增加 (表3)。其中 0~20 cm 深度时, 位于东北的寒温带湿润地区 (R1) 的 SOC 密度增长量最大 ($2.84 \pm 0.56 \text{ kg C m}^{-2}$), 而位于中南部中亚热带湿润区 (R16) 的 SOC 储量增长量最大 ($1.03 \pm 0.14 \text{ Pg C}$); 0~100 cm 深度时, 青藏高原温带干旱区 (R10) 的 SOC 密度和储量增长量最大, 分别为 $3.33 \pm 0.77 \text{ kg C m}^{-2}$ 和 $1.23 \pm 0.29 \text{ Pg C}$ (表3)。但对于温带半干旱区 (R4)、温带干旱区 (R5)、青藏高原亚寒带半干旱区 (R12) 和热带湿润区 (R18), 其 0~20 cm 和 0~100 cm 深度的 SOC 密度和储量均在减少。其中温带干旱区 (R5) 减少量最大, 0~20 cm 深度 SOC 密度和储量分别减少了 $0.45 \pm 0.22 \text{ kg C m}^{-2}$ 和 $0.42 \pm 0.20 \text{ Pg C}$; 0~100 cm

表3 1980s-2010s 中国不同生态区SOC密度和储量的变化
Tab. 3 Changes in SOC density and storage across Chinese regions from the 1980s to the 2010s

生态区	1980s				2010s				变化(2010s-1980s)			
	0~20 cm		0~100 cm		0~20 cm		0~100 cm		0~20 cm		0~100 cm	
	面积 ($\times 10^4$ km ²)	密度 (kg C m ⁻²)	储量 (Pg C)	密度 (kg C m ⁻²)	面积 ($\times 10^4$ km ²)	密度 (kg C m ⁻²)	储量 (Pg C)	密度 (kg C m ⁻²)	面积 ($\times 10^4$ km ²)	密度 (kg C m ⁻²)	储量 (Pg C)	密度 (kg C m ⁻²)
R1	14.52	6.12±2.97	0.89±0.43	16.15±8.86	2.35±1.29	14.53	8.96±2.53	1.30±0.37	0.01	2.84±0.56	0.41±0.08	2.23±2.26
R2	52.79	5.25±1.95	2.77±1.03	13.82±5.70	7.29±3.01	52.66	6.20±1.43	3.26±0.75	-0.13	0.94±0.24	0.49±0.13	0.48±0.72
R3	29.68	3.70±1.07	1.10±0.32	10.24±3.33	3.04±0.99	29.83	4.12±1.40	1.23±0.42	0.15	0.42±0.23	0.13±0.07	0.32±0.68
R4	78.55	2.84±1.56	2.23±1.22	8.20±4.70	6.44±3.69	78.84	2.74±1.39	2.16±1.09	0.29	-0.10±0.12	-0.07±0.09	-1.22±0.33
R5	91.86	2.79±1.63	2.57±1.50	8.25±5.17	7.58±4.75	91.78	2.34±1.25	2.15±1.15	-0.08	-0.45±0.22	-0.42±0.20	-1.46±0.70
R6	86.20	2.35±1.73	2.03±1.49	7.29±5.79	6.28±4.99	86.02	2.14±1.13	1.85±0.97	-0.18	-0.21±0.32	-0.18±0.27	1.18±1.20
R7	41.49	2.51±1.44	1.04±0.60	7.25±4.09	3.01±1.70	41.34	2.35±1.63	0.97±0.68	-0.15	-0.16±0.29	-0.07±0.12	0.12±0.82
R8	70.73	2.38±1.06	1.68±0.75	6.96±2.88	4.92±2.04	70.67	2.83±0.71	2.00±0.50	-0.06	0.45±0.07	0.32±0.05	0.46±0.20
R9	3.48	1.58±0.42	0.06±0.02	4.87±1.67	0.17±0.06	3.49	2.81±0.71	0.10±0.03	0.01	1.23±0.09	0.04±0.00	2.56±0.34
R10	37.18	1.44±0.80	0.53±0.30	3.99±2.49	1.48±0.93	37.08	2.34±1.38	0.87±0.51	-0.10	0.90±0.22	0.33±0.08	3.33±0.77
R11	41.92	4.01±1.58	1.68±0.66	11.03±4.66	4.62±1.95	41.86	5.06±2.22	2.12±0.93	-0.06	1.05±0.22	0.44±0.09	1.63±0.68
R12	63.16	2.56±1.44	1.62±0.91	5.95±3.22	3.76±2.04	62.80	2.22±1.14	1.39±0.72	-0.36	-0.34±0.28	-0.22±0.18	-0.73±0.46
R13	28.52	5.67±2.48	1.62±0.71	14.32±7.22	4.08±2.06	28.51	6.44±2.24	1.84±0.64	-0.01	0.77±0.45	0.22±0.13	-0.70±1.28
R14	42.60	3.18±1.15	1.36±0.49	8.50±3.20	3.62±1.36	42.43	3.95±1.15	1.68±0.49	-0.17	0.77±0.15	0.32±0.07	1.03±0.44
R15	37.71	5.02±1.68	1.89±0.63	11.11±3.82	4.20±1.44	37.71	6.59±1.76	2.49±0.66	<0.01	1.57±0.39	0.59±0.15	2.26±0.93
R16	142.92	3.92±1.44	5.60±2.06	9.99±4.32	14.27±6.17	142.72	4.64±1.65	6.63±2.35	-0.20	0.73±0.10	1.03±0.14	0.26±0.26
R17	45.01	3.42±1.40	1.54±0.63	9.26±4.72	4.17±2.12	45.01	4.17±1.43	1.88±0.64	<0.01	0.75±0.14	0.34±0.06	1.03±0.44
R18	18.19	4.12±2.07	0.75±0.38	11.95±7.36	2.17±1.34	18.17	3.94±1.61	0.72±0.29	-0.02	-0.18±0.24	-0.03±0.04	-0.73±0.80
Total	926.52	3.34±0.43	30.94±3.94	9.01±1.28	83.46±11.89	925.64	3.74±0.40	34.62±3.71	-0.88	0.40±0.06	3.68±0.53	0.33±0.18

注：R1：寒温带湿润地区；R2：中温带湿润地区；R3：中温带半干旱地区；R4：中温带干旱地区；R5：中温带半干旱地区；R6：暖温带干旱地区；R7：青藏高原寒带干旱地区；R8：暖温带湿润地区；R9：暖温带湿润地区；R10：青藏高原湿润地区；R11：青藏高原湿润地区；R12：青藏高原湿润地区；R13：青藏高原湿润地区；R14：北亚热带湿润地区；R15：青藏高原湿润地区；R16：中亚热带湿润地区；R17：南亚热带湿润地区；R18：热带湿润地区。

深度 SOC 密度和储量分别减少 $1.46 \pm 0.70 \text{ kg C m}^{-2}$ 和 $1.34 \pm 0.65 \text{ Pg C}$ 。然而, 对于暖温带干旱区 (R6) 和青藏高原寒带干旱区 (R7), 0~20 cm 深度的 SOC 密度和储量都在减少, 但 0~100 cm 深度的 SOC 密度和储量却在增加。相反, 青藏高原亚寒带亚湿润区 (R13) 表层 (0~20 cm) 的 SOC 密度和储量在增加, 但 0~100 cm 深度的 SOC 密度和储量却在减少。

1980s-2010s 年间, 对于森林生态系统, 除中温带亚湿润地区 (R3)、中温带半干旱地区 (R4)、中温带干旱地区 (R5)、暖温带干旱地区 (R6) 和热带湿润地区 (R18) 的 SOC 储量略微减少, 大部分生态区中森林生态系统的 SOC 储量均在增加 (表4、表5)。同样的, 虽然北方部分生态区中草地生态系统的 SOC 储量在减少, 但中国草地生态系统 SOC 储量总体呈增加的变化趋势, 且青藏高原和南方草地在 SOC 储量积累方面均发挥着重要作用 (表4、表5)。对于农田生态系统, 中国的农业主产区 (如: 中温带湿润地区 (R2)、暖温带亚湿润地区 (R8) 和北亚热带湿润地区 (R14)) 的 SOC 储量略微增长。然而, 大部分生态区内的湿地生态系统 SOC 储量均在减少 (表4、表5)。

4 讨论

4.1 1980s 和 2010s 中国陆地生态系统土壤有机碳储量估算结果的不确定分析

中国陆地生态系统在 1980s 和 2010s 时期的 SOC 储量 (0~100 cm) 分别为 $83.46 \pm 11.89 \text{ Pg C}$ 和 $86.50 \pm 8.71 \text{ Pg C}$, 对应的 SOC 密度分别为 $9.01 \pm 1.28 \text{ kg C m}^{-2}$ 和 $9.35 \pm 0.94 \text{ kg C m}^{-2}$ 。本研究估算的结果与早期部分研究的估算值差异较大^[18, 20], 但与当前多数研究结果接近 (表1)。其中, 不同的数据源是各研究结果间差异的重要原因。早期的研究多是直接利用第一次土壤普查资料 (1958-1963 年) 估算中国 SOC 储量^[18, 51], 而 2000 年以来, 有关土壤有机碳储量的研究则多是利用第二次土壤普查资料 (1979-1985 年) 或是将第二次土壤普查数据与近期野外实测数据相结合来评估中国 SOC 储量^[10-11, 23]。本研究中, 考虑到中国土地利用/覆被在 1980s-2010s 时期的巨大变化, 本文利用 1979-1985 年开展的第二次土壤普查数据作为 1980s 时期 SOC 储量估算的基础数据; 在估算中国 SOC 储量现状 (2010s) 时, 则是通过收集整理 2004-2014 年公开发表的有关 SOC 密度的文献资料 (文献中涉及到的野外采样工作都开展于 2000 年后), 同时结合课题组 2000 年后的相关实验测试数据, 获取大量的 SOC 密度实地监测数据, 覆盖了中国森林、草地、农田和湿地等主要生态系统类型。相比较而言, 本文所利用的数据较全面系统, 能更真实地反映中国在这两个时期的 SOC 储量状态。同时, 不同的评估方法也是 SOC 储量估算结果之间较大差异的重要原因^[11, 33]。早期有关区域或全球尺度 SOC 储量的研究多是采用模型法, 生态系统类型、植被类型或土壤类型统计法^[1-2, 23-28], 本研究在前人研究的基础上, 充分考虑气候、植被类型和土地利用等因素对 SOC 储量空间分布格局的影响^[1, 28, 30], 采用分生态区域、分生态系统类型统计方法估算 SOC 储量。虽然部分生态区域 (如西北地区) 的野外监测样点较少或分布不均匀, 但本研究采用结合相邻的、气候环境相似生态区中同类型生态系统的样点信息的方法来计算该区域 SOC 密度和储量, 能一定程度降低由样点数量和分布情况引起的不确定性, 提高估算精度。此外, 土壤容重、土壤深度、砾石含量、面积等参数也是储量估算的重要不确定源, 不同处理方式都会给评估结果带来一定的差异。其中, 本研究在计算 SOC 密度时, 对于容重缺失的样点, 主要选用当前中国区域尺度估算精度相对较高的土壤容重传递函数来估算未知容重^[47], 可一定程度的提高区域 SOC 储量的估算精度。然而, 受西北地区地理环境的限制, 本研究搜集到该区域的土壤

表4 1980s-2010s不同生态区内各类型生态系统0-20 cm深度土壤有机碳密度和储量的变化
Tab. 4 Changes in SOC density (kg C m⁻²) and storage (Pg C) across different ecological regions from the 1980s to the 2010s (0-20 cm layer)

生态区	森林				草地				农田				湿地			
	面积 (×10 ⁴ km ²)	密度 (kg C m ⁻²)	储量 (Pg C)		面积 (×10 ⁴ km ²)	密度 (kg C m ⁻²)	储量 (Pg C)		面积 (×10 ⁴ km ²)	密度 (kg C m ⁻²)	储量 (Pg C)		面积 (×10 ⁴ km ²)	密度 (kg C m ⁻²)	储量 (Pg C)	
R1	0.03	3.14±0.63	0.37±0.07		0.06	-0.35±0.61	<0.01		0.05	0.12±0.18	0.002±0.001		-0.02	2.18±1.52	0.05±0.03	
R2	-0.20	2.28±0.40	0.61±0.11		-0.10	0.94±0.24	-0.01±0.00		1.18	0.12±0.18	0.08±0.04		-1.19	-0.65±2.20	-0.14±0.05	
R3	0.03	-0.93±0.60	-0.07±0.04		-0.41	0.42±0.23	0.05±0.02		0.74	0.41±0.33	0.08±0.04		-0.27	4.66±0.65	0.11±0.02	
R4	0.13	-1.14±0.27	-0.12±0.03		-0.39	-0.10±0.12	0.18±0.08		0.19	-0.49±0.16	-0.06±0.02		-0.03	-2.21±0.65	-0.03±0.01	
R5	-0.04	-2.86±0.97	-0.21±0.07		-1.61	-0.45±0.22	-0.24±0.15		1.54	-0.69±0.17	-0.02±0.01		<0.01	-6.74±0.98	-0.01±0.00	
R6	-0.81	-0.07±0.61	-0.03±0.04		-0.64	-0.21±0.32	<0.01		1.35	-0.25±0.20	0.02±0.01		0.05	-6.44±0.73	-0.01±0.00	
R7	0.01	-0.04±0.55	<0.01		-0.16	-0.16±0.29	-0.02±0.09		0.03	-0.20±0.21	<0.01		0.001	-6.44±0.84	-0.01±0.00	
R8	0.64	0.85±0.22	0.17±0.04		0.11	0.45±0.07	-0.01±0.02		-3.14	0.39±0.07	0.09±0.03		-0.09	-1.46±0.53	-0.01±0.00	
R9	0.03	2.38±0.29	0.02±0.00		-0.02	1.23±0.09	<0.01		-0.22	0.95±0.09	0.02±0.00		-0.01	-1.73±0.63	<0.01	
R10	<0.01	4.70±0.73	0.03±0.00		0.01	0.90±0.22	0.10±0.05		<0.001	0.12±0.24	<0.01		<0.01	-4.07±0.59	-0.01±0.00	
R11	0.03	2.63±0.67	0.15±0.04		0.10	1.05±0.22	0.38±0.08		-0.21	-0.75±0.45	-0.03±0.02		<0.01	2.03±0.84	0.02±0.01	
R12	<0.01	2.87±0.47	0.03±0.00		-0.13	-0.34±0.28	-0.09±0.17		<0.001	-0.66±0.41	<0.01		<0.01	-1.97±1.50	-0.03±0.02	
R13	<0.01	2.27±0.48	0.05±0.01		0.02	0.77±0.45	0.32±0.12		-0.001	-2.11±0.48	<0.01		-0.03	-3.52±1.37	-0.09±0.03	
R14	0.16	0.90±0.28	0.16±0.05		0.02	0.77±0.15	0.02±0.01		-1.92	0.82±0.21	0.11±0.04		-0.04	-1.94±0.53	-0.01±0.00	
R15	0.01	2.60±0.53	0.43±0.09		<0.01	1.57±0.39	0.26±0.11		-0.01	-2.20±0.48	-0.01±0.00		<0.01	-0.10±1.12	<0.001	
R16	1.85	0.79±0.12	0.83±0.12		-0.38	0.73±0.10	0.10±0.06		-3.18	0.50±0.13	0.06±0.04		0.02	-2.95±0.37	-0.001±0.001	
R17	0.09	0.76±0.19	0.24±0.06		-0.09	0.75±0.14	0.03±0.02		-0.49	0.73±0.15	0.05±0.01		0.01	-1.97±0.49	<0.01	
R18	0.08	-0.35±0.31	-0.03±0.04		-0.02	-0.18±0.24	<0.01		-0.11	0.72±0.21	<0.01		<0.01	-0.04±0.89	<0.01	
Total	2.04	0.93±0.09	2.62±0.24		3.76	0.38±0.12	1.06±0.33		-4.21	0.30±0.06	3.68±0.53		-1.59	-1.16±0.51	-0.17±0.07	

表5 1980s-2010s不同生态区内各类型生态系统0~100 cm 深度土壤有机碳密度和储量的变化
Tab. 5 Changes in SOC density (kg C m⁻²) and storage (Pg C) across different ecological regions from the 1980s to the 2010s (0-100 cm layer)

生态区	森林				草地				农田				湿地			
	面积 (×10 ⁴ km ²)	密度 (kg C m ⁻²)	储量 (Pg C)		面积 (×10 ⁴ km ²)	密度 (kg C m ⁻²)	储量 (Pg C)		面积 (×10 ⁴ km ²)	密度 (kg C m ⁻²)	储量 (Pg C)		面积 (×10 ⁴ km ²)	密度 (kg C m ⁻²)	储量 (Pg C)	
R1	0.03	4.94±2.55	0.59±0.30		0.06	-6.05±2.01	-0.02±0.001		0.05	-6.05±2.01	-0.02±0.001		-0.02	-11.33±5.93	-0.25±0.13	
R2	-0.20	2.35±1.06	0.61±0.29		-0.10	-5.56±2.24	-0.03±0.00		1.18	-5.56±2.24	-0.03±0.00		-1.19	-10.94±8.74	-0.69±0.20	
R3	0.03	-0.31±1.86	-0.02±0.13		-0.41	-0.14±0.98	-0.04±0.05		0.74	-0.14±0.98	-0.04±0.05		-0.27	9.84±3.75	0.21±0.10	
R4	0.13	-2.46±0.59	-0.25±0.06		-0.39	-0.34±0.49	-0.20±0.24		0.19	-0.34±0.49	-0.20±0.24		-0.03	-10.32±2.91	-0.12±0.03	
R5	-0.04	-6.99±3.54	-0.51±0.26		-1.61	-2.36±1.01	-1.10±0.41		1.54	-2.36±1.01	-1.10±0.41		<0.01	-21.50±4.16	-0.03±0.03	
R6	-0.81	-0.16±3.10	-0.08±0.23		-0.64	9.05±1.43	1.06±0.18		1.35	9.05±1.43	1.06±0.18		0.05	-21.02±3.04	-0.05±0.01	
R7	0.01	-0.02±2.85	<0.001		-0.16	0.28±0.87	0.05±0.21		0.03	0.28±0.87	0.05±0.21		0.001	-21.02±3.56	-0.03±0.01	
R8	0.64	0.37±0.57	0.12±0.10		0.11	-1.21±0.54	-0.06±0.03		-3.14	-1.21±0.54	-0.06±0.03		-0.09	-7.84±1.54	-0.03±0.00	
R9	0.03	3.95±0.93	0.04±0.01		-0.02	-1.19±0.61	<0.01		-0.22	-1.19±0.61	<0.01		-0.01	-9.49±2.17	-0.002±0.001	
R10	<0.01	1.03±3.01	0.01±0.02		0.01	2.37±0.82	0.37±0.13		<0.01	2.37±0.82	0.37±0.13		<0.01	-16.06±2.13	-0.04±0.01	
R11	0.03	6.48±2.23	0.38±0.13		0.10	1.51±0.90	0.41±0.24		-0.21	1.51±0.90	0.41±0.24		<0.01	16.44±3.41	0.17±0.04	
R12	<0.01	6.57±2.22	0.06±0.02		-0.13	-1.20±0.51	-0.62±0.26		<0.01	-1.20±0.51	-0.62±0.26		<0.01	25.84±4.33	0.39±0.07	
R13	<0.01	5.80±2.20	0.13±0.05		0.02	-0.07±1.64	-0.01±0.34		<0.01	-0.07±1.64	-0.01±0.34		-0.03	-11.07±5.11	-0.27±0.12	
R14	0.16	0.73±0.59	0.14±0.10		0.02	5.51±1.88	0.05±0.02		-1.92	5.51±1.88	0.05±0.02		-0.04	-6.00±1.91	-0.02±0.01	
R15	0.01	4.33±1.79	0.71±0.29		<0.01	1.27±1.07	0.21±0.18		-0.01	1.27±1.07	0.21±0.18		<0.01	5.07±4.12	0.01±0.00	
R16	1.85	0.17±0.33	0.35±0.31		-0.38	3.13±1.65	0.22±0.14		-3.18	3.13±1.65	0.22±0.14		0.02	-12.88±1.71	-0.005±0.001	
R17	0.09	1.24±0.60	0.40±0.19		-0.09	5.26±1.83	0.11±0.04		-0.49	5.26±1.83	0.11±0.04		0.01	-8.96±1.66	<0.01	
R18	0.08	-1.06±1.02	-0.14±0.14		-0.02	0.60±1.82	<0.01		-0.11	0.60±1.82	<0.01		<0.01	-0.16±4.26	-0.004±0.001	
Total	2.04	0.84±0.28	2.52±0.77		3.76	0.14±0.28	0.40±0.78		-4.21	0.14±0.28	0.40±0.78		-1.59	-4.74±1.80	-0.76±0.29	

样点数据相对较少, 这会影响该区域 SOC 储量的估算精度, 因此在未来相关研究中, 应加强这些地区土壤样品的采集和监测工作。

4.2 1980s-2010s 中国主要生态系统土壤的碳源/汇功能

1980s-2010s 年间, 虽然少数生态区内的森林 SOC 表现出下降的趋势, 但整体来看, 中国森林生态系统的土壤发挥着巨大的碳汇作用 (表 3、表 4)。其中 0~100 cm 深度的 SOC 储量的净增长量为 $2.52 \pm 0.77 \text{ Pg C}$, 增长速率为 $0.084 \pm 0.026 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 固碳量约占中国陆地生态系统土壤固碳量的 83%。本文的研究结果与 Xie 等^[10]、Piao 等^[6]和 Yang 等^[32]的研究结果一致。Xie 等^[10]主要根据森林平均 SOC 密度的增长速率来估算全国森林 SOC 储量变化; Piao 等^[6]主要是通过建立 SOC 密度和气候要素、生物量之间的回归关系来推算中国森林 SOC 的变化; Yang 等^[32]则是直接根据两个时期 501 组点对点的森林土壤样点来评估 0~10 cm 深度的中国森林 SOC 变化情况。从数据源、估算方法以及评估时间来看, 本文的估算值具有较高的估算精度, 更能真实地反映森林 SOC 储量的变化情况。由于中国大部分植树造林、天然林保护等生态恢复工程开始于 1980s, 因此随着林龄的增长, 其固碳能力 (植被和土壤) 将会继续增加, 未来将会发挥更大的碳汇功能^[53-54]。同时, 本研究发现森林生态系统表层土壤 (0~20 cm) 的碳增量高于 0~100 cm 深度的碳增量, 这可能是因为深层土壤 (20~100 cm) 较表层土壤更稳定, 短期变化较小, 但它在森林碳固定方面仍发挥着重要作用, 当前有关森林深层 SOC 的研究相对较少, 因此未来应加强这方面的研究。

草地生态系统土壤在 1980s-2010s 年间发挥着弱碳汇功能, 其 0~20 cm 和 0~100 cm 深度的 SOC 储量净增长量分别为 1.06 ± 0.33 和 $0.40 \pm 0.78 \text{ Pg C}$ 。我们的研究结果与 Piao 等^[6]基于草地 SOC 密度与温度、降水和 NDVI 指数等因素建立的回归模型评估的中国草地土壤在 1982-1999 年间发挥碳汇功能的结论一致, 但与 Xie 等^[10]根据前人报道的由于草地退化导致青藏高原草地 SOC 损失速率为基础, 估算 1980s-2000s 中国草地土壤作为碳源的结论相反。草地碳储量统计方法和草地面积的不同可能是各研究结果间存在差异的主要原因。本研究显示中国草地 SOC 储量整体呈增长状态, 且这种增长主要体现在南方草地和青藏高原区草地, 但北方部分草地 (如寒温带湿润区 (R1), 温带湿润区 (R2), 温带亚湿润区 (R3), 温带半干旱区 (R4) 和温带干旱区 (R5)) 0~100 cm 深度的 SOC 密度和储量均在减少 (表 5)。然而, 一些研究发现: 随着中国政府实施围封禁牧、休牧和退耕还草等草地生态恢复和管理政策以来, 中国北方草地地上植被生物量呈增长的变化趋势^[6, 34, 41-42]。因此, 本文估算出的部分草地 SOC 储量减少的原因可能是现阶段土壤有机质的分解量仍大于有机质的输入量, SOC 的增长滞后于植物生物量的增长^[55]。此外, 中国草地 SOC 的增加也可能是因为草地植被生物量的增加导致草地温度下降, 使土壤有机质的分解速率下降, 进而促进了 SOC 的积累^[56-57]。

相对于森林和草地生态系统, 中国农田表层 (0~20 cm) SOC 储量 30 年间呈缓慢增长状态, 变化速率约为 $0.013 \pm 0.003 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 但 0~100 cm 深度的土壤碳库基本没有变化。表层 SOC 储量的增加可能是受中国近些年农业总产量增加、农田管理 (秸秆还田、增施有机肥等) 等影响^[10, 58]。因为随着农田净初级生产力的增长, 农作物总生物量也随之增长, 归还到土壤的秸秆总量增加, 因此增加了土壤有机质的输入量^[58-59]。但对于南方农业区, 农田开发利用历史悠久, 并且适宜的水热条件使得大部分农田都实行一年两季或一年三季的作物种植模式, 农田被高强度的开发利用, 虽然通过一定的管理措施增加了表层 SOC 储量, 但 0~100 cm 深度的 SOC 储量仍表现出减少趋势。

1980s-2010s 年间, 中国湿地生态系统 0~20 cm 和 0~100 cm 深度的 SOC 储量均在减少

(图5、表4和表5)。这可能是因为近些年中国经济快速发展, 土地利用/覆被发生了巨大变化^[49], 同时气候环境的变化(如温度和降水变化等)影响了湿地生态系统的水位和面积^[60]。而水位的下降或湿地面积的减少会引起土壤温度升高、土壤孔隙度和渗透性增强等一系列问题, 进而加快土壤有机质的分解^[60-61], 降低SOC含量和储量。本研究发现湿地面积和SOC密度的减少是中国湿地SOC储量减少的直接原因, 虽然湿地面积占国土总面积比例较小(1.6%~1.7%), 但湿地SOC密度一般都远高于其他类型生态系统, SOC储量约占全国SOC储量的4.3%~5.4%, 因此未来需加强湿地植被和土壤保护。此外, 当前从国家尺度开展有关湿地碳源/汇功能的研究相对缺乏, 未来应加强这方面的研究工作, 从而深入揭示湿地生态系统的碳循环过程。

4.3 1980s-2010s 中国陆地生态系统碳储量的变化

整体来看, 1980s-2010s年间中国陆地生态系统土壤发挥着碳汇功能(净固碳量 $3.04 \pm 1.65 \text{ Pg C}$), 固碳速率约为 $0.101 \pm 0.055 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 本研究的估算值略高于Piao等^[6]基于清查和遥感数据, 采用过程模型法估算的中国土壤碳汇速率值($0.075 \text{ Pg C yr}^{-1}$), 但整体变化趋势基本一致。方精云等^[39]根据地面观测数据估算1981-2000年中国植被固碳速率约为 $0.100 \pm 0.006 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 若将其植被固碳速率与本研究土壤固碳速率相结合, 则整个中国陆地生态系统的固碳速率约为 $0.201 \pm 0.061 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 这与欧洲陆地生态系统的固碳速率相近^[62], 但低于美国陆地生态系统的固碳速率^[63](图6)。因此, 中国陆地生态系统1980s-2010s的累计固碳量约为 $6.03 \pm 1.83 \text{ Pg C}$, 碳汇量大约可抵消同期化石燃料和水泥生产排放的 CO_2 总量(28.28 Pg C)的14.85%~27.79%(由<http://www.globalcarbonproject.org>获取中国 CO_2 排放数据)。

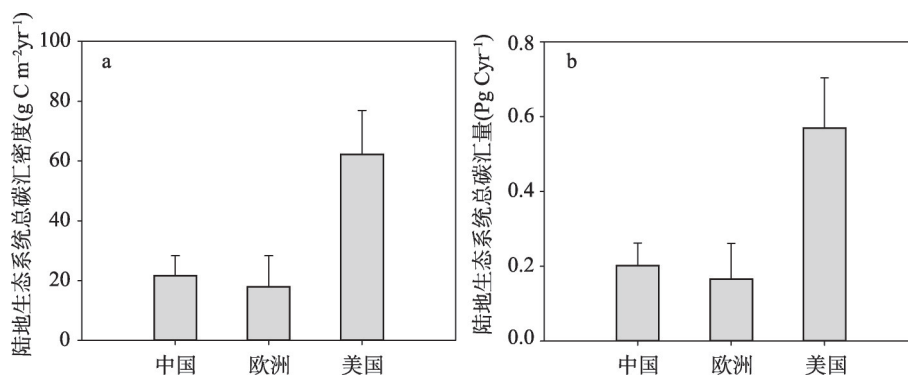


图6 中国、美国和欧洲陆地生态系统固碳速率比较

欧洲和美国陆地生态系统固碳速率数据来源于Peters等^[62]和Xiao等^[63]

Fig. 6 Overall C sink capacity of terrestrial ecosystems in China, Europe, and the United States.

Data for Europe and United States are derived from Peters et al.^[62] and Xiao et al.^[63]

5 结论

本文以中国第二次土壤普查数据和2004-2014年间的文献数据为基础, 评估了1980s和2010s两个时期的SOC储量以及30年的SOC储量变化。中国SOC储量在30年中充分发挥碳汇功能, 0~100 cm SOC储量净增长 $3.04 \pm 1.65 \text{ Pg C}$, 表层土壤(0~20 cm)的碳汇效应明显($3.68 \pm 0.53 \text{ Pg C}$)。森林生态系统土壤是主要碳汇, 而草地和农田生态系统的碳汇效应相对较弱; 湿地生态系统0~100 cm深度的SOC储量减少了 $0.76 \pm 0.29 \text{ Pg C}$, 因

此未来应加强湿地生态系统的保护。结合现有的中国植被固碳现状 ($0.100 \pm 0.006 \text{ Pg C yr}^{-1}$), 中国陆地生态系统的固碳速率约为 $0.201 \pm 0.061 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 总碳汇量相当于同期化石燃料和水泥生产排放的 CO_2 总量的 14.85%~27.79%。随着中国森林和草地生态系统的进一步保护、恢复和重建, 中国陆地生态系统在未来全球碳平衡中将发挥更大的作用。

参考文献(References)

- [1] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [2] Eswaran H, Vandenberg E, Reich P. Organic-carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 192-194.
- [3] Cox P M, Betts R A, Jones C D, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 2000, 408(6813): 184-187.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [5] Janssens I A, Freibauer A, Ciais P, et al. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO_2 emissions. *Science*, 2003, 300(5625): 1538-1542.
- [6] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [7] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [8] Zhou Yurong, Yu Zhenliang, Zhao Shidong. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 518-522. [周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-522.]
- [9] Xie Xianli, Sun Bo, Zhou Huizhen, et al. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 35-43. [解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35-43.]
- [10] Xie Z B, Zhu J G, Liu G, et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s, *Global Change Biology*, 2007, 13(9): 1989-2007.
- [11] Yang Y H, Mohammad A, Feng J M, et al. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*, 2007, 84(2): 131-141.
- [12] Peng S L, Wen D, He N P, et al. Carbon storage in China's forest ecosystems: Estimation by different integrative methods. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(10): 3129-3145.
- [13] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(2): 205-218.
- [14] Li K R, Wang S Q, Cao M K. Carbon storage in vegetation and soil of China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 33(1): 72-80. [李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(1): 72-80.]
- [15] Fang Jingyun, Yang Yuanhe, Ma Wenhong, et al. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands. *Science China Life Sciences*, 2010, 40(7): 566-576. [方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7): 566-576.]
- [16] Ma A N, He N P, Yu G R, et al. Carbon storage in Chinese grassland ecosystems: Influence of different integrative methods. *Scientific Reports*, 2016, 6: srep21378.
- [17] Zheng Yaomin, Niu Zhenguo, Gong Peng, et al. Preliminary estimation of the organic carbon pool in China's wetlands. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(2): 170-180. [郑姚闽, 牛振国, 宫鹏, 等. 湿地碳计量方法及中国湿地有机碳库初步估计. *科学通报*, 2013, 58(2): 170-180.]
- [18] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Soil carbon pool in China and its global significance, *Journal of Environment Science*, 1996, 8(2): 249-254.
- [19] Peng C H, Apps M J. Contribution of China to the global carbon cycle since the last glacial maximum-reconstruction from palaeovegetation maps and an empirical biosphere model. *Tellus B*, 1997, 49(4): 393-408.
- [20] Pan Genxing. Study on carbon reservoir in soils of China. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(5): 330-332. [潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究. *科技通报*, 1999, 15(5): 330-332.]

- [21] Wang Shaoqiang, Zhou Chenghu, Li Kerang, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 533-544. [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.]
- [22] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: Estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change. *Climatic Change*, 2001, 49(3): 339-358.
- [23] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Distribution and storage of soil organic carbon in China. *Global Biogeochemical Cycle*, 2003, 17(2): 1048. DOI:10.1029/2001GB001844.
- [24] Yu D S, Shi X Z, Wang H J, et al. National scale analysis of soil organic carbon storage in China based on Chinese soil taxonomy. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 11-18.
- [25] Ni J. Carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems: approaching a more accurate estimate. *Climatic Change*, 2013, 119(3): 905-917.
- [26] Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40(3): 468-470.
- [27] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [28] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [29] Schrumpf M, Schulze E D, Kaiser K, et al. How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? *Biogeosciences*, 2011, 8(1): 723-769.
- [30] Wiesmeier M, Sporlein P, Geuss U, et al. Soil organic carbon stocks in southeast Germany (Bavaria) as affected by land use, soil type and sampling depth. *Global Change Biology*, 2012, 18(7): 2233-2245.
- [31] Hayes D J, Turner D P, Stinson G, et al. Reconciling estimates of the contemporary North American carbon balance among terrestrial biosphere models, atmospheric inversions, and a new approach for estimating net ecosystem exchange from inventory-based data. *Global Change Biology*, 2012, 18(4): 1282-1299.
- [32] Yang Y H, Li P, Ding J Z, et al. Increased topsoil carbon stock across China's forests. *Global Change Biology*, 2014, 20(8): 2687-2696.
- [33] Wang Shaoqiang, Liu Jiyuan, Yu Guirui. Error analysis of estimating terrestrial soil organic carbon storage in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 797-802. [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. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 797-802.]
- [34] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999. *Global Biogeochemical Cycle*, 2007, 21(2): GB2002. DOI:10.1029/2005GB002634.
- [35] Huang Y, Sun W X. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(15): 1785-1803.
- [36] Wang Y F, Fu B J, Lu Y H, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China. *Catena*, 2011, 85: 58-66.
- [37] Liu Y C, Yu G R, Wang Q F, et al. How temperature, precipitation and stand age control the biomass carbon density of global mature forests. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(3): 323-333.
- [38] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [39] Fang Jingyun, Guo Zhaodi, Piao Shilong, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 37(6): 804-812. [方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981-2000年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(6): 804-812.]
- [40] Xu Xinliang, Cao Mingkui, Li Kerang. Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China. *Progress in Geography*, 2007, 26(6): 1-10. [徐新良, 曹明奎, 李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究. *地理科学进展*, 2007, 26(6): 1-10.]
- [41] Xin Xiaoping, Zhang Baohui, Li Gang, et al. Variation in spatial pattern of grassland biomass in China from 1982 to 2003. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(9): 1582-1592. [辛晓平, 张保辉, 李刚, 等. 1982-2003年中国草地生物量时空格局变化研究. *自然资源学报*, 2009, 24(9): 1582-1592.]
- [42] Ma Wenhong, Fang Jingyun, Yang Yuanhe, et al. Biomass carbon stocks and their changes in northern China's grasslands during 1982-2006. *Science China Life Sciences*, 2010, 40(7): 632-641. [马文红, 方精云, 杨元合, 等. 中国北方草地生物量动态及其与气候因子的关系. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7): 632-641.]
- [43] Liang W, Yang Y T, Fan D M, et al. Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 204: 22-36.

- [44] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, et al. Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 2010, 16(11): 3036-3047.
- [45] Pan G X, Xu X W, Smith P, et al. An increase in topsoil SOC stock of China's croplands between 1985 and 2006 revealed by soil monitoring. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 136(1): 133-138.
- [46] Lal R. Offsetting China's CO₂ emissions by soil carbon sequestration. *Climatic Change*, 2004, 65(3): 263-275.
- [47] Xu L, Yu G R, He N P, et al. Carbon storage in China's terrestrial ecosystems: A synthesis. *Scientific Reports*, 2018, 8: srep2806.
- [48] Fu Bojie, Liu Guohua, Chen Liding, et al. Scheme of ecological regionalization in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 1-6. [傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 等. 中国生态区划方案. *生态学报*, 2001, 21(1): 1-6.]
- [49] Wu Bingfang, Yuan Quanzhi, Yan Changzhen, et al. Land cover changes of China from 2000 to 2010. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(4): 723-731. [吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 等. 21 世纪前十年的中国土地覆盖变化. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 723-731.]
- [50] Xu L, He N P, Yu G R, et al. Differences in pedotransfer functions of bulk density lead to high uncertainty in soil organic carbon estimation at regional scales: Evidence from Chinese terrestrial ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120: 1567-1575.
- [51] Wang Shaoqiang, Zhou Chenghu. Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China. *Geographical Research*, 1999, 18(4): 349-356. [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): 349-356.]
- [52] Piao S L, Fang J Y, Zhu B, et al. Forest biomass carbon stocks in China over the past 2 decades: Estimation based on integrated inventory and satellite data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2005, 110: G01006. DOI: 10.1029/2005GB002634.
- [53] Zhou G Y, Liu S G, Li Z A, et al. Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science*, 2006, 314(5804): 1417-1417.
- [54] Luyssaert S, Schulze E D, Börner A, et al. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 2008, 455(7210): 213-215.
- [55] Hu Z M, Li S G, Guo Q, et al. A synthesis of the effect of grazing exclusion on carbon dynamics in grasslands in China. *Global Change Biology*, 2016, 22(4): 1385-1393.
- [56] He N P, Wang R M, Gao Y, et al. Changes in the temperature sensitivity of SOM decomposition with grassland succession: Implications for soil C sequestration. *Ecology and Evolution*, 2013, 3(15): 5045-5054.
- [57] He N P, Yu Q, Wu L, et al. Carbon and nitrogen store and storage potential as affected by land-use in a *Leymus chinensis* grassland of northern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(12): 2952-2959.
- [58] Sun W J, Huang Y, Zhang W, et al. Carbon sequestration and its potential in agricultural soils of China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24: GB GB3001. integrated inventory and satellite data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2005, 110: G01006.
- [59] Huang Y, Zhang W, Sun W J, et al. Net primary production of Chinese croplands from 1950 to 1999. *Ecological Applications*, 2007, 17(3): 692-701.
- [60] Liu Zigang, Zhang Kunmin. Wetland soils carbon stock in the Sanjiang Plain. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2005, 45(6): 788-791. [刘子刚, 张坤民. 黑龙江省三江平原湿地土壤碳储量变化. *清华大学学报: 自然科学版*, 2005, 45(6): 788-791.]
- [61] Zhou Wenchang, Suolang Duoerji, Cui Lijuan, et al. Effects of drainage on soil organic carbon stock in the Zoige peatlands, estern Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(8): 2123-2132. [周文昌, 索郎夺尔基, 崔丽娟, 等. 排水对若尔盖高原泥炭地土壤有机碳储量的影响. *生态学报*, 2016, 36(8): 2123-2132.]
- [62] Peters W, Krol M C, Van Der Werf G R, et al. Seven years of recent European net terrestrial carbon dioxide exchange constrained by atmospheric observations. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1317-1337
- [63] Xiao J F, Zhuang Q L, Law B E, et al. Assessing net ecosystem carbon exchange of U.S. terrestrial ecosystems by integrating eddy covariance flux measurements and satellite observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(1): 60-69.

Changes of soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s

XU Li¹, YU Guirui^{1,2}, HE Nianpeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Soils store a large amount of the terrestrial ecosystem carbon (C) and play an important role in maintaining global C balance. However, very few studies have addressed the regional patterns of soil organic carbon (SOC) storage and the main factors influencing its changes in Chinese terrestrial ecosystems, especially using field measured data. In this study, we collected information on SOC storage in the main types of ecosystems (forest, grassland, cropland, and wetland) across 18 regions of China during the 1980s (from the Second National Soil Survey of China, SNSSC) and the 2010s (from studies published between 2004 and 2014), and evaluated whether trends changed over the 30-year period. The SOC storage (0-100 cm) in China was 83.46 ± 11.89 Pg C in the 1980s and 86.50 ± 8.71 Pg C in the 2010s, and the net increase over 30 years was 3.04 ± 1.65 Pg C, with a rate of 0.101 ± 0.055 Pg C yr⁻¹. This increase was mainly observed in the topsoil (0-20 cm). Forest, grassland, and cropland SOC storage increased by 2.52 ± 0.77 , 0.40 ± 0.78 , and 0.07 ± 0.31 Pg C, respectively, which can be attributed to the several ecological restoration projects and agricultural practices implemented. On the other hand, SOC storage in wetlands declined by 0.76 ± 0.29 Pg C, most likely due to the decrease in wetland area and SOC density. These results, combined with those of vegetation C sink (0.100 Pg C yr⁻¹), show that the net C sink in Chinese terrestrial ecosystems was about 0.201 ± 0.061 Pg C yr⁻¹, which offsets 14.85%-27.79% of the C emissions from fossil fuels from the 1980s to the 2010s. These estimates of soil C sink based on field measured data supported the premise that China's terrestrial ecosystems have a large C sequestration potential, and further emphasized the importance of forest protection and reforestation to increase SOC storage capacity.

Keywords: Chinese terrestrial ecosystems; soil organic carbon; storage; change