



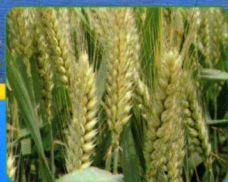
NONGTIAN TURANG

农田土壤

YOUJITAN BIANHUA YANJIU

有机碳变化研究

许信旺 著



安徽师范大学出版社

国家自然科学基金委国际合作重大项目（编号40710019002）资助项目

教育部重大项目（我国农田土壤有机碳库演变及其调控机制研究）资助项目

安徽省教育厅自然科学基金课题（编号2004kj297）资助项目

安徽省教育厅自然科学基金重大课题（编号ZD2008009-1）资助项目

池州学院学术专著基金资助项目

NONGTIAN TURANG

农田土壤

YOUJITAN BIANHUA YANJIU

有机碳变化研究

许信旺 著

安徽师范大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

农田土壤有机碳变化研究/许信旺著. —芜湖: 安徽师范大学出版社, 2011. 1
ISBN 978 - 7 - 81141 - 157 - 7

I. ①农… II. ①许… III. ①土壤有机质—有机碳—研究 IV. ①S153.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 011268 号

农田土壤有机碳变化研究

许信旺 著

出 版 人: 张传开

责任编辑: 吴毛顺

装帧设计: 桑国磊

出版发行: 安徽师范大学出版社

芜湖市九华南路 189 号安徽师范大学花津校区 邮政编码: 241002

发 行 部: 0553 - 3883578 5910327 5910310 (传真) E-mail: asdcbsfxb@126.com

经 销: 全国新华书店

印 刷: 芜湖新欣传媒有限公司

版 次: 2011 年 5 月第 1 版

印 次: 2011 年 5 月第 1 次印刷

规 格: 787 × 960 1/16

印 张: 7.25

字 数: 106 千

书 号: ISBN 978 - 7 - 81141 - 157 - 7

定 价: 18.00 元

凡安徽师范大学出版社版图书有缺漏页、残破等质量问题, 本社负责调换

序

本书是一部研究农田土壤碳库及其变化的专著。作者选择县域、省域和全国为研究尺度，通过第二次全国土壤普查资料、实地监测数据和已发表文献，分析了农田土壤有机碳的分布和变化特征。研究表明了农田土壤有机碳库处于增长趋势，并估算了近 20 年来我国农田土壤碳库增长量，提出了农田土壤碳贮量达到饱和的年限。对于阐明我国农田土壤固碳减排潜力具有重要意义。

世界土壤（在 1m 深度内）保有有机碳库达 1 500 Pg，另含有超过 1 000 Pg 无机碳库，在全球陆地碳循环与气候变化中具有关键影响。IPCC 第 4 次气候变化评估报告认为，世界农业土壤具有巨大的缓解气候变化的潜力，特别是在亚洲地区。因此，农业土壤固碳与温室气体减排已经被国际社会接受为扭转日益增加的大气 CO_2 浓度的可选途径。然而，土壤碳库与温室气体排放随时空及农业管理条件的变异，限制着可实现潜力的认识及实际操作实施的选择对象与措施，这个问题也就成为当前全球碳循环与缓解气候变化研究的前沿问题。

碳贮存与变化研究是全球陆地生态系统碳循环和应对气候变化的重要课题，近期研究表明，农田土壤具有重大的固碳潜力。中国拥有耕地总面积 130 Mhm²，约占全球 7%，然而，中国农田土壤固碳潜力和固碳持续期尚未得到量化。农田生态系统土壤碳库受到强烈的人为干扰，同时又可以在较短的时间尺度上进行人为调节，研究不同尺度区域影响土壤有机碳固定的因素显得更加迫切。本书的研究成果是一次有益的尝试。

本研究收集了我国 1980—2006 年 1 099 个样点的农田土壤实测数据，计算了相对变化幅度，并以此作出农田土壤有机碳动态变化的定量

评估，证实我国农业发展中，土壤有机碳库处于增长状态，支持了应用某些模型估计我国农田有机碳处于总体损耗的结论不符合我国农田实际状况。希望在这个领域出现更多更好的研究成果，也是我对作者今后研究方向的期望。

潘根兴

2011 年 4 月

前 言

土壤碳是陆地生态系统最大的碳库，有机碳贮量约为 $1\,550\text{Pg}$ ($1\text{Pg} = 10^{15}\text{g}$) (Eswaran, 1993)，其中农田土壤贮存的碳占陆地土壤碳贮量的 $8\% \sim 10\%$ (林而达 等, 2005)。由于土地利用的变化，不仅使土壤碳库和大气碳之间的碳循环平衡遭到破坏，而且造成大量土壤有机碳被氧化并以 CO_2 等形式释放到大气中 (杨景成 等, 2003; 赵荣钦 等, 2004)， CO_2 浓度对全球变暖贡献率为 63.7% (IPCC, 1996a)。农田土壤已被认同是大气 CO_2 的一个重要源，农田土壤碳库的消长会直接影响大气中碳库的源汇效应。另外，土壤 CO_2 排放与土壤退化、土壤有机质含量减少和土壤质量下降密切相关 (赵荣钦 等, 2004)。土壤有机碳含量常被认为是评价土壤质量的一个重要指标，对土壤营养元素循环和农业可持续发展都有重要意义。大量土壤有机碳的损失还造成了土壤退化和农业可持续性降低 (Dala & Chan, 2001)。因此，研究农田有机碳平衡、变化规律和调控措施，对于揭示农田碳源汇特征、减缓温室效应、提高土壤质量和粮食安全具有重要意义 (潘根兴、赵其国, 2005)。《京都协议书》3.4 款提出可以通过增加生态系统碳库来补偿经济发展中的碳排放，在全球陆地生态系统中，农业土壤碳库是唯一在短时间尺度内受人为干扰和调节的碳库，对于温室气体的减排起着重要作用。

到目前为止，估算的全球土壤有机碳库介于 $1\,395\text{Pg} \sim 2\,200\text{Pg}$ 之间 (Post et al., 1982; Eswaran et al., 1993; Batjes, 1996)，中国土壤碳库估算的结果存在较大差异性，丰富和规范省级尺度的土壤碳估算无疑是提高全国碳库估算准确度的途径之一，而省级尺度的准确性又与县级尺度的基础研究分不开。不同尺度下影响土壤有机碳含量和密度估算的

因素存在明显的差异性,研究不同尺度下土壤尤其是农田有机碳含量及变化的影响因素,包括自然和人为因素的强度和效应,能为调控农田土壤碳对全球气候变化的效应有重大作用。

目前对自然生态系统碳库及其动态的研究较多,对人类干扰下的农田土壤碳库动态与演变机制的研究仍存在许多空白,尤其是土地利用方式变更、不同农业管理措施下土壤碳库消长程度的认识还存在很多不足之处。从土壤有机碳的贮存和固定潜力来说,中国农田生态系统也属于较脆弱的生态系统(潘根兴、赵其国,2005)。李长生(2000)利用DNDC模型对中国 $1.03 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 农业土壤(包括 $9.59 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 农田和 $7.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 草地和牧场)1年的碳循环过程进行模拟,其结果表明:中国农业土壤年净排放碳量为73.8Tg($1\text{Tg} = 10^{12} \text{ g}$),其中损失的碳量为366Tg,农作物残留物补给的碳量为293Tg,这种结果与我国学者在各地的实测实证分析(潘根兴、赵其国,2005;徐艳等,2004;李忠佩等,2002)有较大差异。本书试图基于县级尺度农田土壤有机碳现状的全面调查与分析,将结果与第二次普查时土壤有机碳状况对比,判断农田土壤有机碳是增加还是减少?增减幅度有多大?全国尺度主要是选择1980年全国第二次土壤普查以来的各种数据进行研究,数据主要来源于《全国耕地土壤监测论文集》以及公开发表的文献。目的在于揭示全国农田土壤有机碳变化及其区域分布特点,分析有机碳变化与影响因子的关系,进而为定量预测农田土壤固碳持续期和饱和度提供科学依据。

从中国许多长期定位实验站监测的资料可以发现,中国农田土壤碳含量从20世纪80年代以来,整体上呈现出增加的趋势,但在区域上表现有所不同(黄耀、孙文娟,2006)。中国农田土壤碳固定的饱和容量估算主要集中在南方部分地区的水稻土(李忠佩等,2002),缺乏全国尺度的定量预测。针对这些研究的不确定性,我们试图回答的问题是:我国耕作土壤有机碳含量近20年来变化幅度到底有多大?何时达到平衡?中国土壤固碳潜力有多大?这些新问题的解决不仅有利于定量揭示土壤碳库的变化特征,而且可为土地管理政策的制定与调整提供参照。

本研究选择安徽省池州市贵池区作为县域尺度案例,探讨了县域尺

度农田耕层土壤有机碳 20 多年来的变化特征,从地形地貌、耕作制度、灌溉方式、农田基本设施条件等方面,分析其对农田土壤有机碳的影响;选择安徽省作为省域尺度土壤有机碳的研究对象,估算安徽省表层土壤有机碳密度及有机碳库,运用典型剖面估算全剖面土壤有机碳库和有机碳密度,分析影响省域尺度土壤有机碳分布的气候、地形、土地利用等因素;广泛收集第二次全国土壤普查以来我国耕作土壤有机碳含量实测变化数据,运用统计分析,以揭示全国农田土壤有机碳变化特征,并对我国农田土壤固碳饱和度、持续期及固碳量进行估测。

1. 选择代表性县域尺度,全面调查县域范围内的农田土壤利用和肥力现状,计算土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 和有机碳密度 (Dsoc),按地理单元、土壤类型、土地利用分别统计 SOC 和 Dsoc,分析其分布特征;与第二次普查时土壤 SOC 和 Dsoc 相比,判断其变化特征。土壤的有机碳密度 (Dsoc) = 有机碳含量 $\times$ 土壤容重 $\times$ 土层厚度。

2. 土壤有机碳库估算。整理第二次土壤普查基础数据,计算省域尺度 (安徽省) 土壤有机碳密度和碳库。有机碳库 (Psoc) = 土壤面积 $\times$ 土壤有机碳密度。

3. 开展不同尺度土壤有机碳含量影响因素分析。通过统计和相关分析,确定土壤有机碳含量与环境变量 (包括年平均气温、年平均降水量、海拔以及土壤性质等变量) 之间的关系。

4. 全国农田土壤有机碳库饱和度和持续期预测。通过收集全国农田土壤有机碳变化数据,定义土壤有机碳的相对年变幅 RAI (Relative Annual Increment) 为: $RAI (\%/a) = (SOC_t - SOC_0) / SOC_0 \times 100 / t$, SOC_t 为观测 t 年后的土壤有机碳含量 (g/kg), SOC_0 为观测初始时的土壤有机碳量 (g/kg), t 为观测期 (年)。运用 Meta analysis 分析 RAI 与时间 (t) 的关系,构建模拟函数,分别求出水田和旱地碳固定持续期,考察 RAI 与初始 SOC 的关系,建立数学模型求得农田土壤固碳饱和度。

目 录

序	潘根兴
前 言	1

相 关 理 论

第一章 农田土壤有机碳在地球系统中的意义	3
第一节 农田土壤有机碳在全球变化中的地位	4
第二节 水稻土与旱作土固碳效益差异	4
第三节 水稻土有机碳贮存与结合机制	6
第四节 农田土壤有机碳贮存与变化	7
第二章 农田土壤有机碳研究进展	9
第一节 农田土壤有机碳影响因子研究进展	9
一、气候因子	9
二、植被因子	11
三、地形及海拔高度	12
四、土壤理化特性	12
五、土地利用方式	13
六、耕作方式与管理	15
第二节 不同尺度区域土壤有机碳及变化研究	16
第三节 问题与展望	18
一、从不同的时间和空间尺度探讨农田土壤变化特征和强度	18
二、进一步加强对农田土壤固碳水平、饱和容量及潜力的研究	

.....	18
三、从整体和系统的角度来研究农田土壤有机碳的变化原因及 影响因子	19
四、环境变量和土壤有机碳贮量之间的关系统计分析	19

应 用 研 究

第三章 贵池区耕作土壤有机碳变化及影响因素	23
第一节 材料与方法	23
一、土壤资料来源	23
二、监测土壤类型选择	24
三、样品采集与调查分析	24
四、土壤有机碳密度计算方法	26
第二节 结果与分析	26
一、农田耕层土壤有机碳分布及变化	26
二、不同地貌类型区农田耕层土壤有机碳分布	31
三、不同母质对土壤有机碳的影响	34
四、耕层土壤性质与有机碳变化相关分析	35
五、粘粒对耕层土壤有机碳固定容量的影响	36
六、耕作制度对耕层土壤有机碳的影响	37
七、灌溉条件对耕层土壤有机碳的影响	39
第三节 讨 论	41
第四节 小 结	42
第四章 安徽省不同土地利用类型下有机碳变化	44
第一节 土壤有机碳密度与碳库的估算方法	45
一、研究区概况	45
二、资料来源	45
三、计算方法	46
第二节 结果与分析	46
一、土壤有机碳含量及密度分布特征	46

二、土壤有机碳库分布特征	50
三、影响有机碳的因素分析	52
第三节 小 结	59
第五章 中国农业土壤有机碳变化	61
第一节 数据来源和处理	62
一、土壤数据来源	62
二、气候资料选取	63
三、数据处理与统计方法	63
第二节 结果与分析	64
一、中国耕作土壤有机碳的变化特征	64
二、不同观测年限内耕作土壤有机碳的变化	65
三、不同地理区域土壤有机碳变化差异	67
四、不同区域气候对土壤有机碳的影响	68
五、气温对农田土壤有机碳动态的影响	71
六、降水量对土壤有机碳水平及动态的影响	74
第三节 讨 论	75
一、土壤固碳持续期估测	75
二、土壤有机碳固定饱和容量预测	78
三、近 20 多年来中国农田土壤碳固定总量	80
第四节 小 结	81
第六章 研究展望	83
第一节 农田土壤有机碳的变化趋势	83
第二节 不同尺度区域影响农田土壤有机碳水平的因素	84
第三节 农田土壤有机碳变化因素探讨	86
参考文献	89
后 记	105

相 关 理 论

第一章 农田土壤有机碳

在地球系统中的意义

农业作为主要的人类土地利用活动，对土壤碳库贮存及其演变的影响在全球系统碳循环研究中被予以广泛注意。IPCC（2005）第三工作组利用现有各种资料，进行了缓解全球气候变化潜力的评估研究，其第四次评估报告已在2005年下半年经过秘鲁利马会议讨论，并在2006年2月于北京举行的IPCC Working Group III全体会议上交叉讨论，在2006年IPCC AR4报告中，提出了农业是当前具有很大缓解能力和潜力的一个重要的陆地生态系统，全球农业减排的自然总潜力（Total Biophysical Potential）每年高达7.3（-1.1~16.9）Gt CO₂ 当量（1Gt CO₂ 当量 = 10 亿吨 CO₂ 当量），其中93%来自减少土壤 CO₂ 释放（固定土壤碳），并且进一步认为东南亚是全球最大的农业（土壤）固碳与温室气体减排的潜力所在（Smith P et al., 2005）。为了明确农业土壤固碳与温室气体减排的自然潜力和主要途径，农业土壤固碳研究已经成为近年来日益活跃而飞速发展的一个新兴研究领域（潘根兴等，2007）。

目前，世界各国都开始通过增加土壤碳截获来缓解本国碳排放的压力。农田耕作是世界上与土壤相关的最大规模的人类活动，全球大约10%的土地用于种植业生产，这样的巨大干扰提供了一个减少人类向大气排放碳的潜在机制（于贵瑞，2003）。从农业经营管理上来说，保持农业的可持续发展并发挥农业土壤的碳收集能力，对于全球粮食供应与缓解气候变化趋势具有双重的积极意义（潘根兴、赵其国，2005）。

现有的研究已初步表明，农业土地利用在全球固碳方面具有重要意义，水稻土和旱作土的碳固定研究已成为陆地生态系统碳循环研究的热点。围绕认识土壤的固碳容量，判断全球土壤和农业温室气体减排的自

然潜力，评估土地利用/土地覆盖对全球环境变化的响应，区域有机碳库演变规律，固碳与减排的潜力等研究受到越来越多的重视。

第一节 农田土壤有机碳在全球变化中的地位

全球土壤碳库贮量约为 1 550Pg，是大气碳库的 2 倍，土壤碳库的微小扰动都会导致大气 CO₂ 浓度发生很大变化，进而影响全球变化 (Eswarran H et al. , 1993)。据 Buringh (1984) 估计，全球农业土壤碳贮量为 142Pg。农田土壤贮存的碳占陆地土壤碳贮量的 8% ~ 10%。由于土地利用的变化，自 19 世纪以来，大气中增加的 CO₂ 有很大一部分来自于自然土壤转变为永久性农田所致，因而农田土壤碳库的消长会直接影响大气中碳库的源汇效应。在全球陆地生态系统碳库中，农田生态系统土壤碳库受到强烈的人为干扰，同时又可以在较短的时间尺度上进行人为调节。开垦荒地和翻耕农田一方面加剧营养元素流失、土壤结构破坏，同时消耗土壤有机碳。目前土地开垦已使土壤有机碳减少了 30% ~ 50% (Somebroek et al. , 1993; Burke et al. , 1995)，全球每年因耕作损失的碳为 0.8Gt，大部分以 CO₂ 的形式释放到大气中，农业土壤对大气温室气体累积贡献最大，积累量占人类活动释放到大气 CO₂ 的 1/4 (Aguila et al. , 1988; IPCC, 1996)。农田土壤已被认同是大气 CO₂ 的一个重要源。近年来，土壤有机碳动态变化研究虽然取得很大进步，但仍存在许多问题急需解决。确定土壤有机碳库的大小、组成及驻留时间，能更好地理解陆地生态系统对气候的响应，也是解决碳“未知汇”的途径之一。土壤有机质作为土壤肥力的核心物质，对土壤营养元素的循环和农业可持续发展都有重要意义。

第二节 水稻土与旱作土固碳效益差异

农业生产对土壤有机碳库的效应各异。就水稻生产来说，世界上大多数雨养稻作系统中普遍存在土壤有机碳下降的趋势 (Naklang et al. , 1999)。统计资料显示，近 38 年来，阿尔巴尼亚的农业灌溉土壤有机碳

含量显著提高,碳积累速率达到 $210\text{g/m}^2/\text{a}$,因而对大气 CO_2 的固存有积极贡献 (Zdruli, 1995)。而泰国雨养条件下,水稻秸秆还田只在第一年提高了土壤固碳,以后并没有显著增加。中国植稻已有 7 000 年历史,水稻土面积约 3 000 万公顷,占全国耕地总面积的 $1/4$,占世界水耕土面积的 23%,生产中国 44% 的粮食 (李庆逵, 1992)。中国水稻土主要分布于南方各省,东北、西北面积较小,但分布集中,气候和农业利用条件各异。水耕土壤 (广义的水稻土) 是自然土壤在人为水耕熟化过程中形成的,是特殊的人为湿地土壤,属《中国土壤系统分类》中独特的人为土纲,国际上公认为中国特色的土壤。水稻土在土壤发生、肥力特性和利用类型上有广泛的多样性。最近几年,对中国土壤有机碳库进行的统计研究 (潘根兴 等, 2002; Song et al., 2005) 表明,中国表层土壤有机碳库约 44.6Pg,其中水稻土占 1.3Pg,是主要土壤类型之一。水稻土水耕熟化过程中有机碳的积累是普遍趋势,20 世纪 80 年代以来,中国尤其是江苏省水稻土呈现出土壤有机碳库的增长,土壤有机碳固定效应十分显著。

灌溉是我国农业的特色,灌溉及其水耕熟化作用是我国大面积农业土壤保持有机碳的主要途径。据对我国第二次土壤普查资料的统计,全国水田土壤有机碳含量普遍高于旱地土壤。据计算,我国水田土壤 (含灌淤土) 共 0.3 亿公顷,保存表层有机碳达 0.9Pg,其碳密度是旱地土壤的 137.7%。因此,我国灌溉农业的发展相当于增加有机碳固定达 0.3Pg。这种增加的碳固定在华南、长江中下游、华北和黄土高原区最为显著 (Song et al., 2005)。

我国目前已开展了多个省域尺度农田土壤碳固定研究。据江苏省第二次土壤普查 (江苏省土壤普查办公室, 1995),全省旱地土壤平均有机碳含量约 6g/kg ,而水田则为近 12g/kg 。1949 年全省水田面积为 9.347×10^5 公顷,1998 年达 2.6697×10^6 公顷,40 年间的碳固定效应可达 17Tg,其碳固定速率达到 $20\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。湖南省第二次土壤普查资料表明,水田土壤与旱地土壤的平均有机碳含量分别为 18.36g/kg 和 10.22g/kg ,不同母质起源的土壤中,水田土壤有机碳均显著高于旱地土壤。同样,江西省是南方土壤有机碳十分缺乏的省份,旱地土壤有机

碳的平均含量为 9g/kg, 而水田土壤达 16.6g/kg, 截至 1980 年, 该省水田土壤发展到 300 万公顷, 而旱地则削减到 46 万公顷 (刘勋等, 1999)。这种水田土壤的碳固定作用即使是在土壤水分条件较差的荒漠地区也十分明显 (陈隆亨、曲耀光, 1992), 资料表明甘—新干旱平原区不同荒漠土壤在引水灌溉和耕垦培肥后有机碳的升高幅度在 1~3g/kg (王根绪、程国栋, 1999)。宁夏植稻历史较长的灌淤土有机碳含量显著高于普通灌淤土 (王吉智等, 1996)。因此, 水耕熟化作用使水田土壤中有有机碳得到稳定提高。根据第二次全国土壤普查中容重、耕层厚度和面积等资料 (全国普查办公室, 1993, 1994a, 1994b, 1995a, 1995b, 1996) 计算, 我国灌溉农业下的水田土壤累计碳固定效应达 0.22Pg。

第三节 水稻土有机碳贮存与结合机制

水稻土中有机碳的固定机制目前尚不清楚。20 世纪 70 年代以来, 对水稻土中有机碳的含量、分布及其微团聚体分配、有机无机结合的数量与性质进行了较多研究。对于相同类型的水稻土来说, 运用重液区分法得到的有机碳复合量一般与全土有机碳呈线性相关, 但复合度与有机碳含量无关 (何云峰等, 1998), 说明有机碳在水稻土中与不同物质的结合关系是复杂的。有机碳复合度在不同粒径团聚体中的分布因土壤类型与肥力状况而异。对这种固定效应还不能仅用物理保护作用来解释。采用不同的络合浸提剂提取土壤中和不同粘土矿物结合的腐殖质, 与不同酸性土壤用碱性焦磷酸钠提取的结合态腐殖质的稳定性相似, 可能意味着这些土壤的结合态腐殖质的化学特点类似, 化学保护机制相同 (何云峰等, 1998)。我们的研究表明, 太湖地区黄泥土中新增加的有机碳主要固定在 0.25~2mm 粒组的微团聚体中, 提示不同粒径团聚体中有有机碳的组成与活泼性存在差异 (潘根兴等, 2000a)。最近对太湖地区三种水稻土的培养试验表明, 不同发生起源与土壤矿物组成的水稻土, 其有机碳在升温下的碳损失规律迥异, 渗育型富晶质氧化高铁黄泥土的有机碳在升温下仍然十分稳定, 而沼泽起源与贫氧化铁矿物水稻土有机