

中国陆地生态系统土壤有机碳变化研究进展

黄耀, 孙文娟, 张稳, 于永强

中国科学院大气物理研究所, 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029
E-mail: huangy@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2010-02-09; 接受日期: 2010-03-10

国家自然科学基金(批准号: 30721140306)、中国科学院知识创新工程(批准号: KZCX2-YW-Q1-15)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2009AA12Z1462)资助项目

摘要 通过文献资料, 对中国陆地生态系统土壤有机碳变化研究进行评述. 20世纪80年代初至21世纪初, 中国森林、草地、灌丛和农田土壤有机碳库合计年均增加(71±19) Tg/a, 三江平原沼泽湿地垦殖导致土壤有机碳损失(6±2) Tg/a. 该结果存在极大的不确定性, 尤其是对森林、灌丛和草地碳库变化的估计. 未来研究需重点关注土地利用变化及其碳源、碳汇效应, 放牧管理对草地土壤有机碳库的影响, 灌丛和非森林树木(经济林、防护林及四旁绿化造林)土壤有机碳变化估算, 深层土壤有机碳变化的测定和估算, 中国土壤的固碳潜力及陆地生态系统碳收支模型开发.

关键词
中国
陆地生态系统
土壤有机碳
变化
不确定性

随着人类活动的加剧, 大气CO₂浓度已从工业革命前的280 mL/m³上升到2008年的385 mL/m³[1]. 政府间气候变化专门委员会第四次评估报告指出, 20世纪中叶以来, 全球平均温度的升高很可能是由于人为温室气体浓度增加所致[2]. 不同SRES(special report on emissions scenarios)的多模式预测表明, 至21世纪末全球平均温度可能增加1.1~6.4℃[2]. 大气CO₂浓度的增加主要源于化石燃料的使用, 陆地生态系统则通过光合作用吸收大气CO₂, 在减缓大气CO₂浓度增加中起着极其重要的作用. 2000~2005年, 全球化石燃料燃烧和水泥生产过程释放的CO₂年均7.2 Pg C (1 Pg=10¹⁵ g), 而陆地生态系统净吸收0.9 Pg C/a[2], 相当于抵消12.5%.

全球土壤有机碳储量约为1500 Pg^[3], 是大气碳库的2倍, 陆地植被碳库的2~4倍^[4,5]; 中国20世纪80年代土壤有机碳储量约为70~90 Pg^[6-9]. 土壤碳库稳定、增加和减少都与大气CO₂浓度变化密切相

关^[10,11]. 自工业革命以来, 土地利用变化和农业耕作导致全球碳损失(136±55) Pg^[12]. 全球土壤固碳潜力估计为0.4~1.2 PgC/a, 可抵消化石燃料释放CO₂的5%~15%^[13].

大气CO₂等温室气体浓度升高引起的气候变化对人类生存环境和社会经济可持续发展产生巨大影响, 通过增加土壤碳汇以减缓大气CO₂浓度升高倍受国际社会关注^[14]. 近10余年来, 中国学者在陆地生态系统土壤有机碳变化方面进行了大量卓有成效的研究. 本文试图对这些研究进展进行分析与评述, 从而明确中国森林、草地、灌丛和农田土壤有机碳储量的变化及其不确定性, 并提出未来研究的重点.

1 土壤有机碳变化

1.1 森林

中国森林面积位居世界第5, 人工林面积居世界

首位. 根据第六次全国森林资源清查(1999~2003年)结果^[15], 全国森林面积 174.9×10^6 ha, 比第二次全国森林资源清查(1977~1981年)增加 59.6×10^6 ha; 森林覆盖率 18.2%, 比第二次全国森林资源清查提高了 6.2%.

不同研究对中国森林有机碳变化的估计结果相差较大(表 1). Piao 等人^[16]利用土壤有机碳与植被碳及气候因子的多元回归方程, 估计 1982~1999 年中国森林土壤有机碳库年均增加 (4.0 ± 4.1) Tg ($1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$). Xie 等人^[9]采用欧洲森林土壤固碳速率估计中国森林土壤有机碳库年均增加 11.7 Tg. Wang 等人^[17]利用 InTEC 模型估计 1950~1987 年平均增加 7.84 Tg/a, 1988~2001 年平均减少 61.54 Tg/a. 陈泮勤等人^[18]的模型估计结果为年均减少 6 Tg. 若就单位面积土壤有机碳(碳密度)变化而言(表 1), Xie 等人^[9]和 Piao 等人^[16]的估计结果较一致.

中国森林类型丰富多样, 具有明显的地带性分布特征, 由北向南的主要类型依次为针叶林、针阔混交林、落叶阔叶林、常绿阔叶林、季雨林和雨林. 虽然 Shao 等人^[19]利用贵州省黎平县和长白山森林土壤有机碳的测定结果对 InTEC 模型的有关参数进行了校正, 但不足以将此扩展到全国尺度. 因此, Wang 等人^[17]的估计结果(表 1)存在极大的不确定性, 而陈泮勤等人^[18]的结果则未考虑森林面积的变化. 若不考虑模型估计结果, 综合 Xie 等人^[9]和 Piao 等人^[16]的研究(表 1), 可得中国森林土壤有机碳密度年均变化量为 (36 ± 33) kg/ha. 按 1980~2000 年平均森林面积为 130×10^6 ha^[16]计算, 土壤有机碳库年均增加 (4.7 ± 4.3) Tg, 这主要归因于森林面积持续增加^[20,21].

1.2 草地

中国天然草原面积约为 400×10^6 ha, 约占国土总

面积的 41.7%^[15], 主要集中分布于西部和北部地区, 其中北方天然草原约占全部草地面积的 78%, 是中国草地的主体^[22]. 迄今为止, 对国家尺度草地土壤有机碳变化研究不多. Piao 等人^[16]基于土壤有机碳与归一化植被指数(NDVI)及气候因子的多元回归方程, 估计 1982~1999 年中国草地(331×10^6 ha)土壤有机碳库年均增加 (6.0 ± 1.0) Tg. 而 Yang 等人^[23,24]基于大样本野外测定数据的分析结果则表明, 过去 20 余年中国北方草地和青藏高原草地(总面积为 196×10^6 ha)土壤有机碳没有明显变化. 显然, 基于多元回归方程的估计值^[16]并不支持 Yang 等人^[23,24]基于测定数据的分析结果. Janssens 等人^[25]估算欧洲土壤碳汇约占生态系统总碳汇的 30%, 美国的土壤碳汇是植被碳汇的 2/3 左右^[26]. 若按 1981~2000 年中国草地植被平均碳汇 7 Tg/a ^[21]计算, 草地土壤碳汇则为 $3 \sim 4.7 \text{ Tg/a}$. 结合 Piao 等人^[16]的研究可得, 中国草地土壤碳库年均增加 (4.9 ± 1.6) Tg, 但此估计值具有极大的不确定性.

1.3 农田

中国是农业大国, 耕地面积为 130×10^6 ha, 农作物播种面积约为 150×10^6 ha. 与自然土壤相比, 农业土壤在全球碳库中最活跃, 极易受农业管理(如耕作、施肥和灌溉)的影响. 在合理的管理措施下, 全球农业土壤的固碳潜力估计为 $0.4 \sim 0.9 \text{ Pg/a}$ ^[13,27].

Huang 和 Sun^[28]报道, 1980~2000 年占中国农田面积 53%~59% 的土壤有机碳含量呈增长趋势, 30%~31% 呈下降趋势, 4%~6% 基本持平. 总体而言, 耕作层(0~20 cm)土壤有机碳贮量年均增加 $15 \sim 20 \text{ Tg}$. 对文献数据的进一步分析表明, 中国农田表土(0~30 cm)有机碳贮量年均增加 $16.6 \sim 27.8 \text{ Tg}$ ^[29]. Xie 等人^[9]、Lu 等人^[30]、Yu 等人^[31]和 Pan 等人^[32]的研究结果与此

表 1 中国森林土壤有机碳变化^{a)}

时间/年	面积/Mha	土壤深度/cm	土壤有机碳变化		研究方法	文献
			碳贮量/Tg·a ⁻¹	碳密度/kg·ha ⁻¹ ·a ⁻¹		
1980~2000	249	-	11.72	47	土壤有机碳变化速率×面积	[9]
1982~1999	130	-	4.0 ± 4.1	31 ± 32	统计模型	[16]
1950~1987	167	0~30	7.84	47	生物地球化学模型(InTEC)	[17]
1988~2001	167	0~30	-61.54	-368	生物地球化学模型(InTEC)	[17]
1982~2002	130	-	-6.00	-46	生物地球化学模型(FORCCHN)	[18]

a) -: 未给出土壤深度

相似. 黄耀等人^[33]利用自主开发并经广泛验证的农业生态系统碳平衡模型 Agro-C^[34], 估计 1980~2000 年中国农业土壤有机碳年均增加 14.5~20.3 Tg. 综合表 2 结果, 近 20 年中国农田土壤有机碳密度增加速率为(167±33) kg·ha⁻¹·a⁻¹. 按全国耕地面积 130×10⁶ ha 计算, 表土有机碳库年均增加(21.7±4.3) Tg/a. 农田土壤有机碳增加主要归因于作物产量的提高^[35]、秸秆还田与有机肥施用及少(免)耕技术的推广等^[28,30].

1.4 灌丛和湿地

灌丛是在中国分布广泛的另一种植被类型, 面积约为 200×10⁶ ha^[16,21], 但对其生产力和碳汇功能的研究不多^[21]. Piao 等人^[16]报道, 1982~1999 年中国灌丛(215×10⁶ ha)土壤有机碳年均增加(39.4±9.0) Tg, 高于森林(表 1)、草地和农田(表 2). 该结果基于灌丛土壤有机碳密度与年均气温、降水总量和 NDVI 的多元回归方程得出^[16]. 就该方程而言, 土壤有机碳增加似乎主要归因于 NDVI 的增加. 必须指出, 该统计方程仅能解释土壤有机碳变化的 33%. 毫无疑问, 目前中国灌丛土壤有机碳变化的估计结果仍存在极大的不确定性.

中国湿地面积为 65.9×10⁶ ha(不包括江河、池塘), 其中天然湿地面积约 25.9×10⁶ ha, 而沼泽湿地面积最大, 约 12×10⁶ ha^[36]. 三江平原是中国沼泽湿地面积最大的地区, 20 世纪 50 年代初为 5.35×10⁶ ha, 但近 50 年来湿地农垦面积不断增加, 至 2000 年湿地面积已减少了约 3×10⁶ ha^[36-38]. 根据 Huang 等人^[38]、刘子刚和张坤民^[39]的估计, 1950~2000 年三江平原湿地农垦导致土壤有机碳共损失 218~240 Tg, 其中 1980~2000 年平均损失(6.2±1.8) Tg/a^[38].

2 不确定性分析

2.1 土地利用变化

土地利用/覆盖类型是决定陆地生态系统碳存储的关键因素, 土地覆盖形式由一种类型转换为另一种类型导致土壤碳存储发生变化^[6,40-50]. 就土地利用变化对陆地生态系统碳收支的影响而言, 主要关注的是林地、草地和耕地之间的相互转换^[51-53].

Fang 等人^[21]基于 1989~1993 和 1999~2003 年森林资源清查资料, 得到该阶段内全国森林(郁闭度为 20%)面积增加了 11.0×10⁶ ha. 但刘纪远等人^[53]根据陆地卫星数据资料得到的结果表明, 1990~2000 年中国林地和草地面积分别减少 1.00×10⁶ 和 3.35×10⁶ ha, 耕地面积增加 4.05×10⁶ ha. 由林地和草地转变为耕地导致的 0~100 cm 土壤有机碳损失量分别为 74.9 和 87.4 Tg^[53], 年均 7.5 和 8.7 Tg, 这个损失量比 Piao 等人^[16]估计的增加量(表 1)还要高.

大量研究表明, 退耕还林、造林和再造林增加植被碳汇和土壤碳汇^[54-59]. Zhou 等人^[60]对中国华南森林观测表明, 即便是树龄大于 400 年的老龄林土壤仍具有较高的碳积累能力, 年均 610 kgC/ha. Post 和 Kwon^[61]通过对大量文献数据的总结分析指出, 退耕还林可使土壤有机碳大幅度提高, 年平均固碳速率为 33.8 gC/m², 可持续 50~100 年. 但也有研究指出, 草地转变为林地种植松树会导致土壤有机碳损失^[62]. 段文霞等人^[63]在四川的研究表明, 栽植柳杉促进土壤有机碳积累, 且积累速率随树龄的增加而加快(图 1(A)). 但王春梅等人^[64]在吉林的研究表明, 退耕还林初期促进土壤有机碳矿化(图 1(B)). Paul 等人^[65]、黄从德等人^[66]和白雪爽等人^[67]也得出类似的结果.

表 2 中国农田土壤有机碳变化^{a)}

时间/年	面积/Mha	土壤深度/cm	土壤有机碳变化		研究方法	文献
			碳贮量/Tg·a ⁻¹	碳密度/kg·ha ⁻¹ ·a ⁻¹		
1980~2000	118	20	15.6~20.1	132~170	文献数据集成分析	[28]
1980s~2000s	156	~20	23.6	151	文献数据集成分析	[9]
1980~2000	130	30	16.6~27.8	128~214	文献数据集成分析	[29]
2000s	118	-	16.5	140	统计模型	[30]
1985~2006	130	20	22.2~27.6	171~212	文献数据集成分析	[32]
1980~2000	98	30	14.5~20.3	148~207	生物地球物理模型(Agro-C)	[33]

a) -: 未给出土壤深度

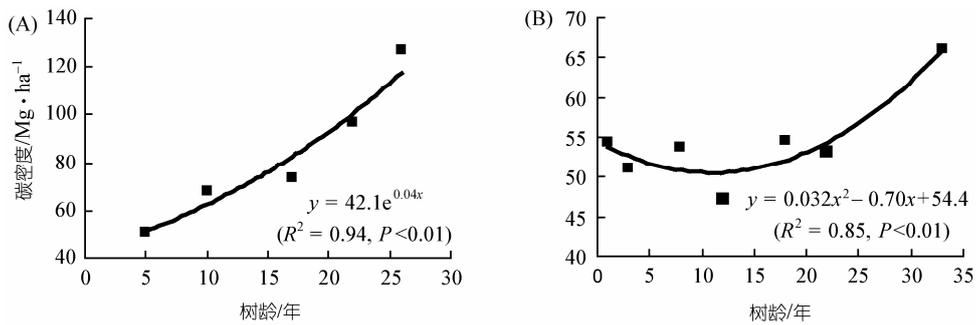


图 1 不同树龄土壤有机碳密度变化

(A) 人工柳杉林, 四川彭州, 数据源: [63]; (B) 长白落叶松, 吉林敦化, 数据源: [64]

过去几十年里, 中国经济林、防护林及四旁绿化造林面积呈显著增加趋势. 以防护林为例, 1978~2007 年累计造林面积达 53×10^6 ha^[68], 仅 2003~2007 年间, 造林面积已占造林总面积的 73%(图 2). 经济林、防护林及四旁绿化造林无疑促进土壤有机碳的积累^[69~71], 但目前对此了解甚少.

2.2 草地管理

由于过度放牧、不合理开垦和乱采滥挖等, 近几十年中国草地退化日趋严重. 过度放牧是天然草地退化的主要原因^[22]. 根据 2006 年中国环境状况公报, 在全国 266 个牧区、半农半牧区县(旗)中有 204 个县(旗)处于超载状态, 天然草原平均超载牲畜 34%左右^[15]. 20 世纪 80 年代末期, 草地退化速度为 130×10^4 ha/a, 至 21 世纪初达 200×10^4 ha/a, 90%的可利用天然草原已不同程度地退化^[20]. 北方重点牧区在 20 世纪 80 年代中期退化草地面积占可利用草地面积的 39.7%, 到 90 年代中期已占该区草地总面积的 50.2%, 其中轻度、中度和重度退化草地面积分别占退化草地

总面积的 57.3%、30.5%和 12.2%^[72]. 中国政府为遏制草地退化采取了一系列措施, 至 2006 年草原围栏面积已达 52.5×10^6 ha, 禁牧、休牧、轮牧草原面积达 86.6×10^6 ha^[20].

草地退化导致土壤有机碳减少^[73,74]. 对野外观测数据^[75~78]的分析结果表明, 重度、中度和轻度退化草地土壤有机碳分别比未退化草地低 $(55 \pm 3)\%$ 、 $(49 \pm 4)\%$ 和 $(27 \pm 8)\%$ (图 3(A)). 随着放牧强度的增加, 土壤有机碳亦呈明显下降趋势^[79~82]. 与对照(无牧)相比, 重牧、中牧和轻牧草地土壤有机碳分别降低 $(50 \pm 15)\%$ 、 $(35 \pm 14)\%$ 和 $(30 \pm 12)\%$ (图 3(B)). 草场围封不仅使退化草地的植被生产力得以恢复, 而且使土壤有机碳逐步增加^[83~89]. 围封 20 年可使土壤有机碳增加 28%; 植被恢复 14~23 和 40~50 年土壤有机碳分别较恢复初期(0~4 年)增加 1.6 和 4.5 倍(图 3(C)).

石锋等人^[92]对文献数据的 meta 分析表明, 轻度、中度、重度和过度放牧下草地土壤有机碳的变化分别为 $-0.54(0.04 \sim -1.94)$ 、 $-0.49(-0.42 \sim -3)$ 、 $-1.52(-0.52 \sim -3.75)$ 和 $-2.34(-0.85 \sim -5.62) \text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 围封和禁牧分别增加土壤有机碳 $0.48(0.28 \sim 2.23)$ 和 $0.19(0.04 \sim 0.68) \text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. 就此结果而言, 围封和禁牧措施下土壤有机碳增加速率低于不同放牧强度下的损失速率. 虽然有证据表明人类活动对中国草地土壤有机碳变化已经产生了重要的影响, 但目前尚缺乏国家尺度的定量估计.

2.3 深层土壤有机碳变化

目前对土壤有机碳变化的估计大都针对表层土壤(表 1 和 2). Boddey 等人^[93]对巴西不同地区长期定位实验点的观测数据分析表明, 免耕对土壤有机碳积累的促进作用可深达 100 cm 土层, 免耕条件下

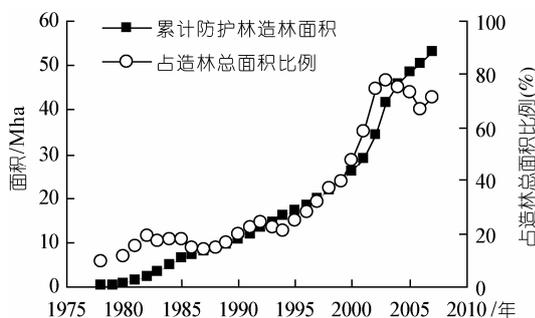


图 2 1978~2007 年中国防护林造林面积及占造林总面积的比例^[68]

0~100 cm 土壤有机碳的增加量是 0~30 cm 的 1.59 倍。但也有研究指出, 免耕对土壤有机碳积累的促进作用仅发生在表层土壤^[94,95]。

由于人力物力等因素的限制, 对深层土壤有机碳变化的研究极少。有限的文献数据^[64,96~100]显示, 农业管理措施和退耕还林/还草对深层土壤有机碳的积累具有重要影响(图 4)。即便在 40~100 cm 土层, 优化的施肥管理(NPK 的不同组合、化肥+有机肥)可使土壤有机碳增加 12% 左右(图 4(A))。退耕还林下 0~100 cm 土壤有机碳的增加量是 0~30 cm 的 1.55 倍(图 4(B)); 不同管理措施下退耕还草 12 年, 0~60 cm 土壤有机碳增量是 0~30 cm 的 1.11 倍(图 4(C))。结果表明, 目前对中国土壤碳汇的估计可能偏低。

2.4 估计方法

利用测定数据估算土壤有机碳变化是通常采用的一种方法^[101]。由于气候、土壤和植被分布的空间异质性, 理论上讲, 在目标区设置的监测点越多越具代表性, 但在实践中往往难以做到。样点(样地)数量与测定和监测的精度有直接关系, 随着精度的提高,

要求的样点(样地)数量呈指数增加^[102]。为降低不确定性, 碳贮量变化的测定必须保证足够的样点(样地)数量。基于 2 次调查数据并结合适当尺度扩展方法也是估算土壤碳库动态变化的重要手段。这类方法一般基于两个时期大量的剖面观测数据, 然后通过遥感和 Kriging 插值等手段实现土壤碳密度由点到面的尺度转换, 在此基础上评估土壤有机碳库的动态变化^[24,103]。然而, 目前中国森林和灌丛生态系统仍缺乏近 10 年的大尺度观测数据, 从而使得对这些类型土壤碳库变化的估算具有极大的不确定性。此外, 通过对大量文献数据的整理分析获得土地利用类型转换或管理措施对碳收支的影响, 也不失为一种行之有效的办法^[28~32,59,92]。Laganière 等人^[59]通过文献获得全球 120 个观测点 189 组数据, 这些数据涉及农田和草地转变为林地对土壤碳积累的影响。他们对这些数据的 meta 分析表明, 控制土壤有机碳恢复的主要因子是造林前的土地利用方式、林木种类和土壤黏粒含量等。

利用模型估计区域、国家乃至全球尺度碳收支的变化是未来发展的必然趋势, 但模型的有效性、尺

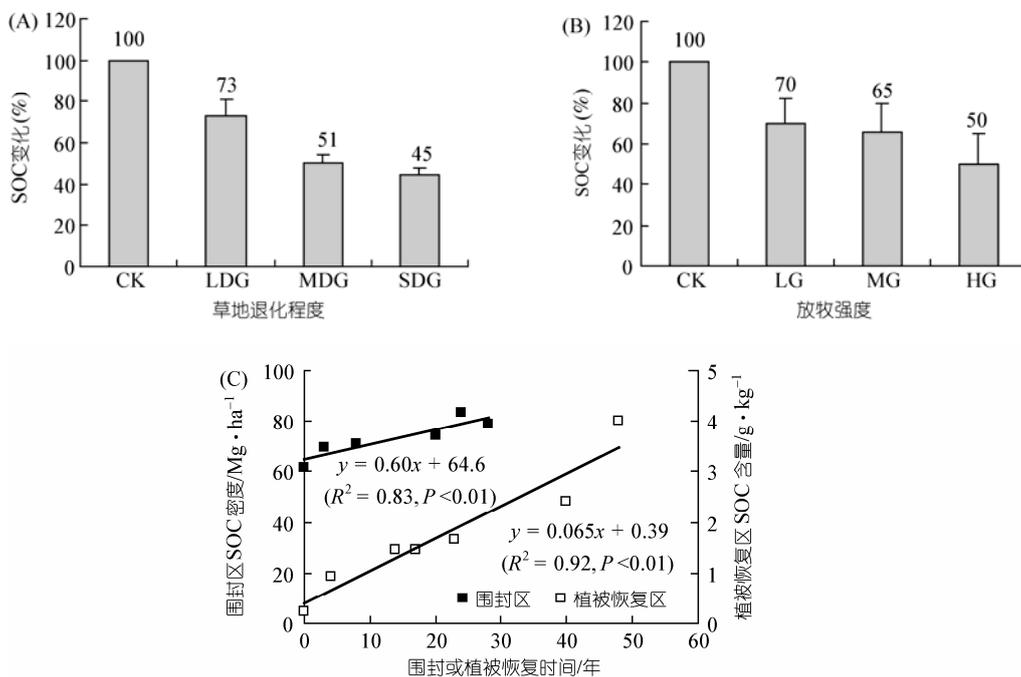


图 3 草地退化、放牧和草地管理对土壤有机碳(SOC)的影响

(A) 不同退化程度草地土壤有机碳. LDG, MDG 和 SDG 分别示轻度、中度和重度退化, CK 为未退化区. SOC 变化指相对于未退化区 SOC 的百分比, 数据源: [75~78]; (B) 放牧强度对 SOC 的影响. LG, MG 和 HG 分别示轻度、中度和重度放牧区, CK 为无牧控制区. SOC 变化指相对于无牧区 SOC 的百分比, 数据源: [79,81,82]; (C) 草场围封和植被恢复对 SOC 的影响, 数据源: [90,91]

度转换和输入参数等会导致估算结果的不确定性^[33,104,105]. Piao 等人^[16]建立了土壤有机碳和气候因子(温度、降水)、植被生物量等的统计方程,并用其估计土壤有机碳的变化,但这些统计方程仅能解释土壤有机碳变化的 23%~53%,利用这些方程外推到全国尺度势必带有极大的不确定性. Li 等人^[106]根据气象及土地利用数据,利用一个生物地球化学模型 DNDC 对美国和中国土壤有机碳变化进行了模拟估计. 结果表明,1990年美国农业土壤有机碳减少 7 Tg,而中国减少了 95 Tg,相当于表土(0~30 cm)有机碳的 1.6%. 与此相反,美国环境保护总署估计 1990 年美国农业土壤有机碳增加了 15.7 Tg^[107]. 分析 Li 等人^[106]的研究结果,发现 DNDC 模型得出中国农业土壤有机碳降低的结论可能主要归因于对有机碳输入的低估. 根据张福春和朱志辉^[108]对全国 300 个农业气象站共 2112 个作物样本的统计分析,中国主要作物的草谷比为 1.30~2.99,而 DNDC 模型仅为 0.94~0.97. 按刘巽浩等人^[109]的测定结果,中国主要作物的根冠比为 0.07~0.11,而 DNDC 模型为 0.057~0.060.

DNDC 模型假定秸秆还田率为 25%,对秸秆产量和根系生物量的低估必然导致模型的有机碳输入量减少.

3 结论与展望

中国陆地生态系统土壤有机碳库变化明显,20 世纪 80 年代初至本世纪初,森林($124 \times 10^6 \sim 143 \times 10^6$ ha)、草地(331×10^6 ha)、灌丛(200×10^6 ha)和农田(130×10^6 ha)土壤有机碳库年均增加(4.7 ± 4.3), (4.9 ± 1.6), (39.4 ± 9.0)和(21.7 ± 4.3) Tg, 合计为(71 ± 19) Tg; 三江平原沼泽湿地垦殖导致土壤有机碳损失(6 ± 2) Tg/a. 虽然上述结果表明,中国陆地生态系统土壤有机碳库在增加,但这些估计值存在极大的不确定性. 这些不确定性主要来自对土地利用变化的判别、农牧业管理的影响、深层土壤有机碳变化的估算、模型的有效性、尺度转换和输入参数的不确定性等.

为客观评价中国陆地生态系统土壤碳汇的变化

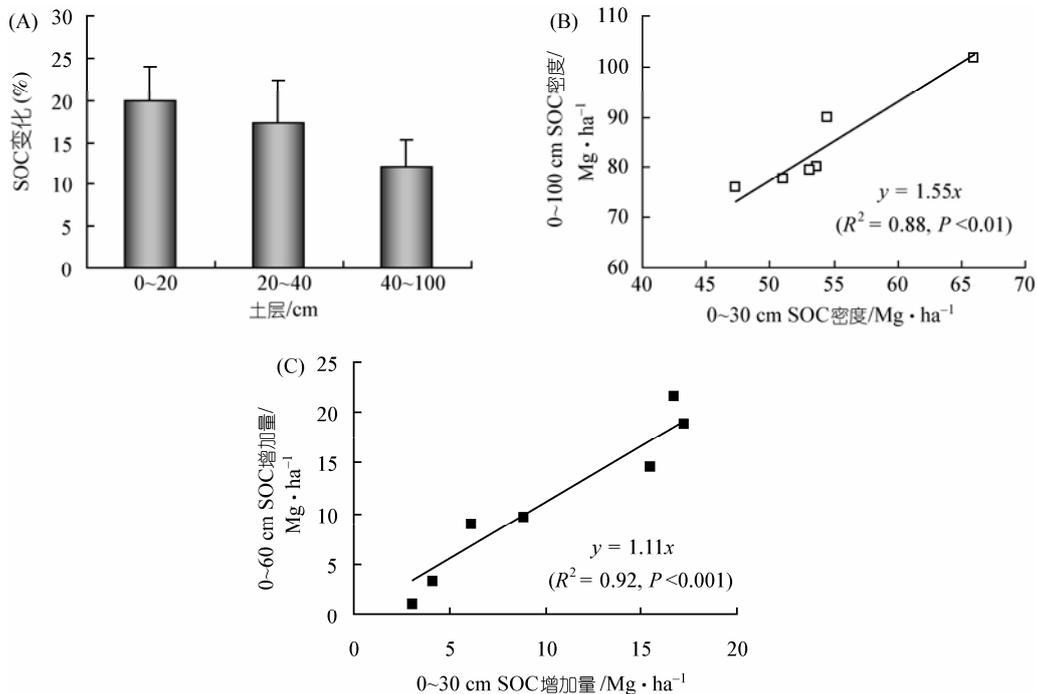


图 4 人为管理对不同土层有机碳变化的影响

(A) 施肥管理(5 个试验点, 共 17 个处理)对不同土层有机碳变化的影响. 为便于比较, SOC 的变化均采用百分比. 如: 化肥+有机肥施用相对于化肥施用下 SOC 的变化用 $(SOC_{CF+OM} - SOC_{CF})/SOC_{CF} \times 100\%$ 计算. 式中: SOC_{CF+OM} 和 SOC_{CF} 分别示化肥+有机肥施用和化肥施用下的土壤有机碳含量或有机碳密度. 数据源: [96~98]; (B) 0~100 与 0~30 cm 土壤(退耕还林 3~33 年, 长白落叶松)有机碳密度的相关性, 数据源: [64]; (C) 0~60 与 0~30 cm 土壤(退耕还草 12 年, 不同的草场管理措施)有机碳增量的相关性. SOC 增量指相对于刈草处理, 数据源: [99]

及减少估计结果的不确定性, 未来亟需开展如下研究:

(1) 土地利用变化及其碳源、碳汇效应. 土壤有机碳变化具有时间连续性, 林地、草地和耕地之间的相互转换极大影响土壤有机碳的变化^[53,59,61-65], 利用陆地卫星资源可望获取高时间分辨率(如逐年)的土地利用变化动态, 有助于估计土壤有机碳的变化.

(2) 放牧管理对草地土壤有机碳库的影响. 虽然有大量证据表明, 过度放牧是中国草地退化的主要原因, 中国政府已采取了包括草原围栏和禁牧、休牧、轮牧等措施以遏制草地退化^[15], 但目前从国家尺度上尚缺乏草地退化和以上管理措施对土壤有机碳库影响的定量估计.

(3) 灌丛和非森林树木土壤有机碳变化估算. 中国灌丛面积大、分布广、恢复快, 是一个重要的潜在碳汇, 但目前对其土壤有机碳变化尚缺乏足够的理解^[21]. 近几十年来, 中国的经济林、防护林及四旁绿化造林面积呈显著增加趋势^[68]. 这不仅增加植被碳固定, 而且促进土壤有机碳积累, 但对此尚无任何定量估计. 若考虑这部分碳汇在内, 中国森林土壤碳汇会比现在的估算值要高.

(4) 深层土壤有机碳变化的测定和估算. 虽然有证据表明, 土地利用变化和农牧业管理对深层土壤有机碳变化具有重要影响, 但目前观测数据较少, 且缺乏系统性研究, 这对客观估算中国乃至全球土壤有机碳的变化带来了极大的难度. 今后亟需加大该方向的研究力度.

(5) 土壤固碳潜力估算. 根据《全国生态环境建设规划》、《应对气候变化林业行动计划》和《全国粮食生产发展规划(2006~2020年)》, 中国将大力实施退耕还林、加大水土流失和荒漠化治理力度、新建人工草地和改良草地、大力推广秸秆还田和保护性耕作等农业管理技术, 这无疑将增加土壤固碳能力. 客观估算中国土壤固碳潜力对于制定减排增汇策略尤为重要.

(6) 模型开发与应用. 利用模型方法估计碳收支的变化是必然发展趋势^[52]. 近年来, 中国陆续开发了一些陆地生态系统碳收支模型, 但对于模型的有效性检验尚有不足, 亦缺乏对模型估计结果的不确定性评价^[33]. 模型的开发和应用不仅有助于定量评估过去和当前陆地碳收支变化及其时空分布特征, 也可用于固碳潜力的评估和未来变化的预测.

参考文献

- 1 World Meteorological Organization. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Using Global Observations through 2008. Switzerland: WMO Greenhouse Gas Bulletin, 2009
- 2 IPCC. Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 3 Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur J Soil Sci*, 1996, 47: 151—163
- 4 Lal R. World soils and the greenhouse effect. *Global Change News Lett*, 1999, 37: 4—5
- 5 Watson R T, Noble I R. Carbon and the science-policy nexus: the Kyoto challenge. In: Steffen W, Jager J, Carson D, eds. *Challenges of a Changing Earth. Proceedings of the global change open science conference*. Berlin: Springer, 2001. 57—64
- 6 Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Distribution and storage of soil organic carbon in China. *Global Biogeochem Cy*, 2003, 17: 1048—1058
- 7 Yu D S, Shi X Z, Wang H J, et al. National scale of soil organic carbon storage in China based on Chinese Soil Taxonomy. *Pedosphere*, 2007a, 17: 11—18
- 8 Yu D S, Shi X Z, Wang H J, et al. Regional patterns of soil organic carbon stocks in China. *J Environ Manage*, 2007b, 85: 680—689
- 9 Xie Z B, Zhu J G, Liu G, et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. *Glob Change Biol*, 2007, 13: 1989—2007
- 10 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: 184—187
- 11 Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440: 165—173
- 12 Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123: 1—22
- 13 Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304: 1623—1627
- 14 Food and Agriculture Organization of the United Nations. Soil carbon sequestration for improved land management. Rome, 2001, 17—43

- 15 国家环境保护总局. 2006 中国环境状况公报. 北京: 2007. 82—89
- 16 Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458: 1009—1013
- 17 Wang S, Chen J M, Ju W M, et al. Carbon sinks and sources in China's forests during 1901~2001. *J Environ Manage*, 2007, 85: 524—537
- 18 陈泮勤, 王效科, 王礼茂, 等. 中国陆地生态系统碳收支与增汇对策. 北京: 科学出版社, 2008. 116—117
- 19 Shao Y, Pan J, Yang L, et al. Validation of soil organic carbon density using the InTEC model. *J Environ Manage*, 2007, 85: 696—701
- 20 中华人民共和国环境保护部. 2008 中国环境状况公报. 北京: 2009. 54—56
- 21 Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981~2000. *Sci China Earth Sci*, 2007, 50: 1341—1350
- 22 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型原生态系统. 北京: 科学出版社, 2000. 1—5
- 23 Yang Y H, Fang J Y, Smith P, et al. Changes in topsoil carbon stock in the Tibetan grasslands between the 1980s and 2004. *Glob Change Biol*, 2009, 15: 2723—2729
- 24 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. *Glob Change Biol*, 2010, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02123.x
- 25 Janssens I A, Freibauer A, Ciais P, et al. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO₂ emission. *Science*, 2003, 300: 1538—1542
- 26 Pacala S W, Hurtt G C, Baker D, et al. Consistent land- and atmosphere-based US carbon sink estimates. *Science*, 2001, 292: 2316—2320
- 27 Metting F B, Smith J L, Amthor J S, et al. Science needs and new technology for increasing soil carbon sequestration. *Climatic Change*, 2001, 51: 11—34
- 28 黄耀, 孙文娟. 近 20 年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势. *科学通报*, 2006, 51: 750—763
- 29 Sun W J, Huang Y, Zhang W, et al. Carbon sequestration and its potential in agricultural soils of China. *Glob Biogeochem Cy*, 2010, 24: GB3001, doi: 10.1029/2009GB003484
- 30 Lu F, Wang X, Han B, et al. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland. *Glob Change Biol*, 2009, 15: 281—305
- 31 Yu Y, Guo Z, Wu H, et al. Spatial changes in soil organic carbon density and storage of cultivated soils in China from 1980 to 2000. *Glob Biogeochem Cy*, 2009, 23: GB2021, doi: 10.1029/2008GB003428
- 32 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. *Agr Ecosyst Environ*, 2010, 136: 133—138
- 33 黄耀, 周广胜, 吴金水, 等. 中国陆地生态系统碳收支模型. 北京: 科学出版社, 2008. 143—211
- 34 Huang Y, Yu Y Q, Zhang W, et al. Agro-C: a biogeophysical model for simulating the carbon budget of agroecosystems. *Agr Forest Meteorol*, 2009, 149: 106—129
- 35 Huang Y, Zhang W, Sun W J, et al. Net primary production of Chinese croplands from 1950 to 1999. *Ecol Appl*, 2007, 17: 692—701
- 36 中国湿地资源开发与环境保护研究课题组. 三江平原开发历史回顾. *国土与自然资源研究*, 1998, 1: 15—19
- 37 刘兴土. 松嫩-三江平原湿地资源及其可持续利用. *地理科学*, 1997, 17: 451—460
- 38 Huang Y, Sun W J, Zhang W, et al. Marshland conversion to cropland in northeast China from 1950 to 2000 reduced the greenhouse effect. *Glob Change Biol*, 2010, 16: 680—695
- 39 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: 788—791
- 40 Bolin B, Sukumar R. Global Perspective. In: Watson R T, Noble I R, Bolin B, eds. *Land Use, Land Use Change, and Forestry*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 23—51
- 41 Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309: 570—574
- 42 Wang X D, Li M H, Liu S Z, et al. Fractal characteristics of soils under different land-use patterns in the arid and semiarid regions of the Tibetan Plateau, China. *Geoderma*, 2006, 134: 56—61
- 43 Li X G, Li F M, Bhupinderpal-Singh, et al. Soil management changes organic carbon pools in alpine pastureland soils. *Soil Till Res*, 2007, 93: 186—196
- 44 Gao J F, Pan G X, Jiang X S, et al. Land-use induced changes in topsoil organic carbon stock of paddy fields using MODIS and TM/ETM analysis: a case study of Wujiang County, China. *J Environ Sci*, 2008, 20: 852—858
- 45 Hu Y L, Zeng D H, Fan Z P, et al. Changes in ecosystem carbon stocks following grassland afforestation of semiarid sandy soil in the southeastern Keerqin Sandy Lands, China. *J Arid Environ*, 2008, 72: 2193—2200
- 46 Yang Y S, Xie J S, Sheng H, et al. The impact of land use/cover change on storage and quality of soil organic carbon in midsubtropical mountainous area of southern China. *J Geogr Sci*, 2009, 19: 49—57
- 47 陈桂秋, 黄道友, 苏以荣, 等. 红壤丘陵区土地不同利用方式对土壤有机质的影响. *农业环境科学学报*, 2005, 24: 256—260

- 48 杨玉盛, 陈光, 王义祥, 等. 格氏栲人工林和杉木人工林碳库及分配. 林业科学, 2006, 42: 43—47
- 49 张履勤, 章明奎. 林地与农地转换过程中红壤有机碳、氮和磷库的演变. 浙江林学院学报, 2006, 23: 75—79
- 50 周涛, 史培军. 土地利用变化对中国土壤碳储量变化的间接影响. 地球科学进展, 2006, 21: 138—143
- 51 Penman J, Gytarsky M, Hiraishi T, et al. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2003, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>
- 52 Denman K L, Brasseur G, Chidthaisong A, et al. Couplings between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: Solomon S, Qin D, Manning M, eds. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 53 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 等. 1990~2000年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化. 地理学报, 2004, 59: 483—496
- 54 Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001, 292: 2320—2322
- 55 Potter C, Klooster S, Hiatt S, et al. Satellite-derived estimates of potential carbon sequestration through afforestation of agricultural lands in the United States. Climatic Change, 2007, 80: 323—336
- 56 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响. 生态学报, 2008, 28: 702—709
- 57 张国斌, 田大伦, 方晰, 等. 会同退耕还林不同造林模式下土壤有机碳分布特征. 中南林业科技大学学报, 2008, 28: 8—12
- 58 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 川西低山丘陵区主要人工林土壤有机碳密度研究. 浙江林业科技, 2009, 29: 5—8
- 59 Laganière J, Angers D A, Paré D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. Glob Change Biol, 2010, 16: 439—453
- 60 Zhou G Y, Liu S G, Li Z A, et al. Old-growth forests can accumulate carbon in soils. Science, 2006, 314: 1417
- 61 Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. Glob Change Biol, 2000, 6: 317—328
- 62 Berthrong S T, Jobbágy E G, Jackson R B. A global meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon, and nitrogen with afforestation. Ecol Appl, 2009, 19: 2228—2241
- 63 段文霞, 朱波, 刘锐, 等. 人工柳杉林生物量及其土壤碳动态分析. 北京林业大学学报, 2007, 29: 55—59
- 64 王春梅, 刘艳红, 邵彬, 等. 量化退耕还林后土壤碳变化. 北京林业大学学报, 2007, 29: 112—119
- 65 Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, et al. Change in soil carbon following afforestation. Forest Ecol Manage, 2002, 168: 241—257
- 66 黄从德, 张健, 邓玉林, 等. 退耕还林地在植被恢复初期碳储量及分配格局研究. 水土保持学报, 2007, 21: 130—133
- 67 白雪爽, 胡亚林, 曾德慧, 等. 半干旱沙区退耕还林对碳储量和分配格局的影响. 生态学杂志, 2008, 27: 1647—1652
- 68 国家统计局. 新中国60年统计资料. 北京: 中国统计出版社, 2009
- 69 李正才, 徐德应, 傅懋毅, 等. 北亚热带土地利用变化对土壤有机碳垂直分布特征及储量的影响. 林业科学研究, 2007, 20: 744—749
- 70 张秀玲, 李君剑, 石福臣. 速生杨人工林对土壤碳氮含量及微生物生物量的影响. 生态与农村环境学报, 2008, 24: 32—35
- 71 万猛, 田大伦, 樊巍. 豫东平原农林复合系统土壤有机碳时空特征. 中南林业科技大学学报, 2009, 29: 1—5
- 72 杜青林. 中国草业可持续发展战略. 北京: 中国农业出版社, 2006
- 73 Wu R, Tiessen H. Effect of land use on soil degradation in alpine grassland soil, China. Soil Sci Soc Am J, 2002, 66: 1648—1655
- 74 Zou C, Wang K, Wang T, et al. Overgrazing and soil carbon dynamics in eastern Inner Mongolia of China. Ecol Res, 2007, 22: 135—142
- 75 邱丹. 青南地区“黑土滩”退化草地植被演替规律的研究. 中国农学通报, 2005, 21: 284—293
- 76 刘兵, 吴宁, 罗鹏, 等. 草场管理措施及退化程度对土壤养分含量变化的影响. 中国农业生态学报, 2007, 15: 45—48
- 77 周万海, 冯瑞章, 满元荣. 黄河源区不同退化程度高寒草地土壤特征研究. 草原与草坪, 2008, 4: 24—28
- 78 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 等. 三江源区高寒草甸不同退化演替阶段土壤有机碳和微生物量碳的变化. 应用与环境生物学报, 2008, 14: 225—230
- 79 裴海昆. 不同放牧强度对土壤养分及质地的影响. 青海大学学报, 2004, 22: 29—31
- 80 王启兰, 曹广民, 王长庭. 放牧对小嵩草草甸土壤酶活性及土壤环境因素的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, 13: 856—864
- 81 董全民, 赵新全, 马玉寿, 等. 放牧强度对高寒人工草地土壤有机质和有机碳的影响. 青海畜牧兽医杂志, 2007, 37: 6—8
- 82 邱英, 干友民, 王钦, 等. 川西北放牧草地退化分类指标体系初探. 湖北农业科学, 2007, 46: 723—726
- 83 瞿王龙, 裴世芳, 周志刚, 等. 放牧与围封对阿拉善荒漠草地土壤有机碳和植被特征的影响. 甘肃林业科技, 2004, 29: 4—6
- 84 薛博, 胡小龙, 刘静, 等. 围封对退化草地土壤肥力及植被特征的影响. 内蒙古林业科技, 2008, 34: 18—21
- 85 贾宏涛, 蒋平安, 赵成义, 等. 围封年限对草地生态系统碳分配的影响. 干旱地区农业研究, 2009, 27: 33—36
- 86 Su Y Z, Li Y L, Cui J Y, et al. Influences of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded sandy grassland, Inner Mongolia, northern China. Catena, 2005, 59: 267—278

- 87 Cui X, Wang Y, Niu H, et al. Effect of long-term grazing on soil organic carbon content in semiarid steppes in Inner Mongolia. *Ecol Res*, 2005, 20: 519—527
- 88 Pei S, Fu H, Wan C. Changes in soil properties and vegetation following enclosure and grazing in degraded Alxa desert steppe of Inner Mongolia, China. *Agr Ecosyst Environ*, 2008, 124: 33—39
- 89 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 Biol Biochem*, 2008, 40: 2952—2959
- 90 Wu L, He N, Wang Y, et al. Storage and dynamics of carbon and nitrogen in soil after grazing exclusion in *Leymus chinensis* grasslands of northern China. *J Environ Qual*, 2008, 37: 663—668
- 91 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复中土壤碳氮变化规律. *植物生态学报*. 2007, 31: 66—74
- 92 石锋, 李玉娥, 高清竹, 等. 管理措施对中国草地土壤有机碳的影响. *草业科学*, 2009, 26: 9—15
- 93 Boddey R M, Jantalia C P, Conceic P C, et al. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. *Glob Change Biol*, 2010, 16: 784—795
- 94 Baker J M, Ochsner T E, Venterea R T, et al. Tillage and carbon sequestration-What do we really know? *Agr Ecosyst Environ*, 2007, 118: 1—4
- 95 Blanco-Canqui H, Lal R. No-Tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. *Soil Sci Soc Am J*, 2008, 72: 693—701
- 96 古巧珍, 杨学云, 孙本华, 等. 灌溉条件下长期定位施肥对壤土剖面养分分布特征的影响. *中国农学通报*, 2004, 20: 139—142
- 97 樊军, 郝明德, 党廷辉. 长期定位施肥对黑垆土剖面养分分布特征的影响. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7: 249—254
- 98 史吉平, 张夫道, 林葆. 长期定位施肥对土壤腐殖质含量的影响. *土壤肥料*, 2002, 1: 15—19
- 99 Franzluebbers A J, Stuedemann J A. Soil-profile organic carbon and total nitrogen during 12 years of pasture management in the Southern Piedmont USA. *Agr Ecosyst Environ*, 2009, 129: 28—36
- 100 Pan G X, Wu L S, Li L Q, et al. Organic carbon stratification and size distribution of three typical paddy soils from Taihu Lake region, China. *J Environ Sci*, 2008, 20: 456—463
- 101 IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan, 2006
- 102 张小全, 陈先刚, 武曙红. 土地利用变化和林业活动碳储量变化测定与监测中的方法学问题. *生态学报*, 2004, 24: 2068—2073
- 103 Holmes K W, Chadwick O A, Kyriakidis P C, et al. Large-area spatially explicit estimates of tropical soil carbon stocks and response to land-cover change. *Global Biogeochem Cy*, 2006, 20: GB3004, doi: 10.1029/2005GB002507
- 104 Knorr W, Heimann M. Uncertainties in global terrestrial biosphere modeling, Part I: a comprehensive sensitivity analysis with a new photosynthesis and energy balance scheme. *Global Biogeochem Cy*, 2001a, 15: 207—225
- 105 Knorr W, Heimann M. Uncertainties in global terrestrial biosphere modeling, Part II: global constraints for a process-based vegetation model. *Global Biogeochem Cy*, 2001b, 15: 227—246
- 106 Li C S, Zhang Y H, Frolking S, et al. Modeling soil organic carbon change in croplands of China. *Ecol Appl*, 2003, 13: 327—336
- 107 U.S. Environmental Protection Agency. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990~2006. Washington, DC: 2008.
- 108 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数. *中国农业科学*, 1990, 23: 83—87
- 109 刘巽浩, 高旺盛, 朱文珊. 秸秆还田的机理与技术模式. 北京: 中国农业出版社, 2001. 1—215