

低碳农业: 从理论构想到科学实践的若干问题

王成己, 王义祥, 黄毅斌, 翁伯琦

(福建省农业科学院农业生态研究所, 福建 福州 350013)

摘 要: 全球气候变化背景下,“低碳经济”已成为全球热点,被誉为人类第四次“技术革命”,温室气体排放已经深度触及了农业和粮食安全。低碳农业成为经济社会发展的必然趋势。当前,低碳农业已由理论构想转向了科学实践。其发展途径主要包括: (1) 发展新型能源,推广清洁技术; (2) 优化耕作制度,提高复种指数; (3) 培育优良品种,延长减排链条; (4) 改进施肥技术,优化养分管理; (5) 实施保护耕作,减少碳素流失; (6) 合理开发草业,保护草地资源; (7) 发展生物能源,推行过腹还田; (8) 整治养殖污染,实施规模养殖。发展低碳农业的保障机制主要涉及: (1) 完善相关法律法规; (2) 转变农业发展方式; (3) 大力依靠科技进步; (4) 民众广泛参与。发展低碳农业、实现资源的可持续利用,对增强农业的基础地位、通过农业措施来减缓全球气候变化具有重要的战略意义。

关键词: 全球变化; 温室气体; 低碳经济; 低碳农业; 发展模式

中图分类号: F 320 7 **文献标识码:** A

Issues on Low carbon Agriculture: From Theory to Practices

WANG Cheng ji, WANG Yi xiang, HUANG Yi bin, WENG Bo qi

(Institute of Agricultural Ecology, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou,
Fujian 350013, China)

Abstract: Low carbon economy has become a global hot spot, known as the Fourth Technological Revolution under global climate change. At present, greenhouse gas emissions have already imperiled agriculture and food security. Low carbon agriculture becomes the inevitable trend of economic and social development. Currently, the concept of low carbon agriculture has turned from scientific theory to practices, including its approach to development: (1) development of new energy resources, promoting clean technologies; (2) optimize the farming systems, raising multiple cropping index; (3) develop and popularize fine varieties to extend the chain of emission reduction; (4) improve the fertilization techniques, optimize the nutrient management; (5) implementation of conservation tillage, reduce carbon loss; (6) rational development of grass industry, protection of grassland resources; (7) development of bio energy resources, raising the application of cattle manure; (8) farming pollution remediation and extending scale livestock breeding. Safeguard mechanisms of the low carbon agriculture development include: (1) improve relevant laws and regulations; (2) the adjustment of economic growth mode; (3) rely on scientific and technological progress; (4) increase public participation. Development of low carbon agriculture is important for sustainable use of resources and enhanced the agriculture foundation, through agricultural measures to mitigate global climate change has important strategic significance.

Key words: global change; greenhouse gases; low carbon economy; low carbon agriculture; development model

20 世纪 90 年代以来,随着温室气体浓度的升高,农田土壤有机碳及其动态变化成为评价农业管理措施影响全球气候变化程度的重要议题^[1- 5]。在此背景下,农业土壤固碳减排与农业低碳发展作为减缓全球气候变化的有效措施越来越受到世人的关注。当前,低碳农业已经从理论构想逐渐转向了科

学实践。

1 低碳农业的概念与内涵

1. 1 低碳经济的产生

近百年来,化石燃料使用引起的二氧化碳等温室气体大量排放使大气温度不断上升,全球正在明

收稿日期: 2010- 07- 03 初稿; 2011- 04- 13 修改稿

作者简介: 王成己 (1972-), 男, 博士, 助理研究员, 从事土壤碳循环与气候变化研究 (E mail: wangchengji2006@yahoo.com.cn)

通讯作者: 翁伯琦 (1957-), 男, 研究员, 从事土壤肥料与生态农业技术研究 (E mail: boqiwen@yahoo.com.cn)

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2008BAD95B08); 福建省农业科学院博士基金项目 (2009BS-3); 福建省属公益类科研院所专项 (2010R10195)

显变暖。全球气候变化已经深度触及到了粮食安全、水资源安全、能源安全、生态安全和公共卫生安全^[6]。在此背景下, 英国政府于2003年发布了能源白皮书——《我们能源的未来: 创建低碳经济》, 首次明确提出发展“低碳经济”^[7-9]。英国计划到2010年二氧化碳排放量在1990年水平上减少20%, 到2050年减少60%, 建立低碳经济社会。

低碳经济是指低排放、低能耗、低污染, 经济效益、社会效益和生态效益相统一的经济发展新模式, 是人类社会继原始文明、农业文明、工业文明之后的又一次重大进步^[9]。低碳经济的实质是提高能源效率和优化能源结构, 其核心是技术创新和制度创新, 目标是减缓气候变化和促进可持续发展。低碳经济有两个基本特征: 一是在社会再生产的全过程中实现经济活动低碳化, 使二氧化碳排放量最小化乃至零排放; 二是倡导能源经济革命, 形成低碳能源和无碳能源的国民经济体系, 实现清洁发展、绿化发展和可持续发展。因此, 低碳经济指的是依靠技术创新和政策措施, 实施一场能源革命, 建立一种较少排放温室气体的经济发展模式, 以减缓气候变化^[6]。

1.2 低碳农业的概念与内涵

国内最早提出低碳农业经济概念的学者王昀认为: 低碳农业经济应该是低耗能、低污染、低排放的“三低”经济; 是在农业生产、经营中排放最少的温室气体, 同时获得整个社会最大收益的经济; 其本质是节约型、效益型、安全型经济^[10]。因此, 低碳农业不是新生事物, 与之接近的相关概念如可持续农业、生态农业、循环农业等都具有“低碳”的内涵。王沅^[11] (1995) 认为可持续农业的本质特征是: 农业生产过程不仅仅是单纯的资源消耗和污染环境的废物积聚过程, 也是新的资源不断再生、废物不断被转化为新资源的过程。覃龙华等^[12] (2006) 认为, 生态农业是以生物和环境之间物质循环和能量转化为基本特征的农业生产形态, 是适应生态文明时代需要的生态型集约的、可持续发展的农业生产体系。翁伯琦等 (2006, 2008) 则认为, 循环经济是以资源的循环利用为核心, 以环境保护为前提, 以自然资源、经济、社会协调发展为目的的新型经济增长模式^[13-14]。

可见, 无论是可持续农业、生态农业还是循环农业都对“低排放”做出了要求, 因此, 低碳农业是对现有农业发展模式的一种升华, 一种在农业生产、经营、消费过程中实现碳能源的低消耗、环境的低污染、温室气体的低排放, 并同时获得最大社

会收益的农业发展形式; 其本质是节约型、安全型、健康型、效益型经济^[10]。低碳农业减少了农药、化肥等的施用, 保护了农业生物多样性, 从这个角度讲, 低碳农业又可称为“生物多样性农业”。

2 农业低碳发展的必然性

农业生产对碳循环的影响具有双重作用, 既是碳“源”, 又是碳“汇”。农业生产中可以通过土地利用方式的变化、土地整治等农业管理措施增加碳“汇”, 使农业生产效应由碳“源”变为碳“汇”。

2.1 农业生产的碳源效应

农业生产活动导致生态系统发生显著变化。毁林开荒破坏了森林植被, 过度放牧使草场发生严重退化, 不合理的种植也会造成农田功能退化。研究表明: 土地利用变化已成为大气中碳含量增加的第二大来源, 其作用仅次于化石燃料的燃烧^[15]。Paustain 等^[16] 研究表明, 由于土地利用变化每年向大气中排放 $1.6 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$, 约占人类活动总排放量的20%。长期以来大量自然生态系统向人工生态系统转换, 增加了大气中 CO_2 的含量。值得注意的是, 施肥不当也会加剧温室效应。耕作是引起农田土壤有机碳含量下降的主要原因: 耕作的机械作用使土壤破碎、分散和混合, 直接或非直接地造成土壤有机碳含量的下降^[17]; 耕作使土壤团聚体破碎, 导致土壤有机碳的物理保护层破坏, 使有机碳暴露于微生物的分解之下, 造成在耕种条件下土壤有机碳的下降^[18]。

2.2 温室气体排放深度触及了农业和粮食安全

温室气体排放导致全球气候变暖、生态系统退化、自然灾害频发, 深度触及了农业和粮食安全。

短时间的 CO_2 浓度增加会加快作物生长发育, 抑制作物呼吸作用, 提高作物产量, 但随着 CO_2 浓度的持续增加, 温度继续升高, 产量将随之下降, 4°C 或更高的温度增长, 将使全球粮食产量受到严重的影响^[19-20]。温室气体增多, 改变了气候生产潜力, 改变了生态系统的初级生产力和农业的土地承载力^[21-28]。 CO_2 浓度增加对大部分土壤的影响是积极的, 会提高土壤肥力、改善土壤物理性状^[29], 但同时会加快土壤有机碳矿化速率^[30]。气候变暖使中纬度部分地区降水趋于减少、干旱加剧, 同时导致低纬度地区洪涝和高纬度地区渍涝灾害增多^[31]。受气候变暖影响, 冬季越冬菌量和虫源量增多, 农作物受病虫害危害加重^[32]。

2.3 土壤的碳库效应与固碳减排技术

土壤圈是碳素的重要贮存库和转化器, 其贮存

的有机碳量占整个生物圈总碳储量的 3/4。同时, 农田土壤有机碳的矿化向大气中排放了大量的 CO₂ 和 CH₄ 等温室气体, 据估算, 全球每年由土壤释放到大气中的碳约为 $0.8 \times 10^{15} \sim 4.6 \times 10^{15}$ g, 其中水稻土每年排放的 CH₄ 占全球 CH₄ 排放总量的 10%~15%^[33]。因此, 土壤呼吸的微量变化将导致大气 CO₂ 浓度的显著变化, 从而影响由于 CO₂ 浓度升高所伴随的全球变暖和其他气候因素的变化。

以 CO₂ 为主的温室气体减排, 可以通过 CO₂ 减排和固定来实现。有关研究表明, 改变农艺方式将会使未来 20~50 年内世界农田土壤固碳潜力增加, 控制土壤侵蚀可增加 $80 \sim 120 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$, 土壤恢复可增加 $20 \sim 30 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$, 盐渍土改良可增加 $20 \sim 40 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$, 改善种植方式可增加 $180 \sim 240 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$, 高产农作物补充碳可增加 $300 \sim 400 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[34-35]; 转变为保护性耕作后, 土壤直接能耗明显降低, 减少了 CO₂ 的释放, 如北美连续 10 年实行保护性耕作后, 耕作层土壤中有有机碳含量增加值为 7%~30%^[36-37]。据 Lal 和 Bruce 估计, 施用化肥全球农田土壤平均固碳速率为 $125 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 总固碳能力可达 $100 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[38], 施用生物黑炭后, 贫瘠土壤的有机碳含量可以快速提高而且稳定, 显著改善土壤结构, 提高旱地作物的生产力和品质。

2.4 发展低碳农业是调整农业结构的重要途径

农业既是重要的温室气体来源, 同时又受到温室效应的严重影响。因此, 确定农业温室气体排放量并探寻减排办法已成为世界各国的当务之急^[39]。王昀^[10] (2008) 认为气候变化使农业生产的不稳定性增加, 产量波动增大。这就对农业结构调整提出了新要求。发展适应气候变化、减少温室气体排放的低碳农业经济已是迫在眉睫。农业现代化要求农业设施现代化, 很显然只有低能耗、低污染、低排出、高收益的农业机械才有生命力。现代农业要求农业科学技术现代化, 要大力推广先进的节能降耗的资源节约型、生态环保的环境友好型农业技术, 创新能源技术, 提高能源利用效率和清洁能源比重。可见, 以低能耗、低污染、低排放为基础的低碳农业经济模式, 适应了现代农业建设的要求, 在应对全球气候变化中应运而生, 是调整农业结构的重要途径。

3 低碳农业研究的主要领域

3.1 农业生产过程碳排放研究

与化石燃料消费有关的农业生产过程包括: 农

业机械化程度; 化肥、农药的使用; 农产品加工、储存与运输; 食物结构; 集约化畜牧业发展等。这些要素皆与碳排放密切相关, 因此通过农业生产的生物燃料代替化石燃料消费具有一定的潜力。这些措施除减少碳排放之外, 还可提高土壤肥力、保护土地持续利用。

3.2 生产对象利用方式改变研究

土地利用模式和土地利用变化对陆地碳库和通量的影响及其反馈是当前研究的难点和热点^[40]。王春峰^[41] (2008) 认为林业是全球发展低碳经济、应对气候变化的重要选择。森林在发展低碳经济、减缓全球气候变暖中的作用关键就是要增强森林的碳汇功能, 减少和控制森林成为温室气体的排放源。

3.3 生产对象固碳效应研究

赵荣钦等^[42] (2004) 指出农田生态系统碳循环过程可分为对碳的吸收、固定、排放和转移 4 个部分。农业土壤对大气温室气体的累积贡献巨大, 积累量占人类活动释放大气中 CO₂ 的 1/4^[43]。农业生态系统在碳的增汇减排中占有重要地位和作用, 通过采用合理的农业管理措施, 减少农田土壤释放 CO₂ 或增强土壤固碳能力, 增加土壤碳库的存量, 提高土壤质量及其农业生产力, 这样可以实现农业增产、农民增收、社会稳定, 环境改善^[44]。方华军等^[43] (2003) 认为通过采用合理的农业管理措施减少农用地土壤释放 CO₂ 或增加土壤吸收大气中的 CO₂, 可以增加土壤碳库、改善土壤质量并提高农业生产力, 对农民、社会和环境来说是“三赢”之举。

3.4 农村生产生活过程中碳的低效利用及碳排放研究

能源消费在满足人类需求的同时还带来环境污染、生态破坏和气候变化。随着经济发展, 家用电器的普及带动了农村能源消费快速增长。根据“八五”到“十五”期间 15 年中国人均商品性生活用能的统计数据测算, 2010 年, 中国人均商品性生活用能将达 245.9 kg 标准煤, 农村发展对常规能源的需求将达到 3.5 亿 t 标准煤以上。农村用生物质能替代固体成型燃料煤带来的“减碳”效果将非常明显。因此, 农村能源服务需要开发生物质能源以替代煤炭, 降低农业生产过程对化石能源的依赖, 探索生产生物柴油、乙醇汽油在推进农村液体燃料自给方面的可行路径, 从而形成“低碳”经济模式和碳减排空间。

4 低碳农业发展的可能途径

选择适宜的低碳农业发展方式和模式，是发展低碳农业的紧迫任务。农业生产中减少碳排放的途径称为低碳途径，这些途径具有减少农田碳排放、提高土壤肥力、保持土地持续利用、提高农业生物多样性以及农业节支增效的“多赢”效果。就低碳农业发展途径而言，要从“三低一高”入手，切实把把握好以下8个重要环节^[45-46]：

(1) 发展新型能源，推广清洁技术。以生物燃料代替化石燃料，减少农业生产中的碳排放。农业生物燃料有广阔的发展空间，每年可代替化石燃料消费的8%~27%。

(2) 优化耕作制度，提高复种指数。气候变暖有利于发展多熟种植，应因地因时提高复种指数，调整耕作制度，改变农业经济结构。

(3) 培育优良品种，延长减排链条。培育或引进高光效、抗高温、抗干旱、抗病害作物品种，将固碳减排的关口前移，延长减排链条，从源头上实现节能减排的目标，以确保在不利生态环境中稳定与提高作物产量，扩大碳的吸收与存储。

(4) 改进施肥技术，优化养分管理。发展生物多样性农业，实施测土施肥，减少化肥和农药的使用量；实施有机肥与无机肥的配施。

(5) 实施保护耕作，减少碳素流失。包括机械化秸秆还田，秸秆收获打捆，覆盖免耕等。结合秸秆还田的保护性耕作，可减少土壤中碳的流失。

(6) 合理开发草业，保护草地资源。改良天然草地，扩大人工草地，既能减少土壤碳排放，又有利于提高产草量，促进畜牧业生产，增加碳储存。同时还要保护草地资源，保护农业生物多样性。

(7) 发展生物能源，推行过腹还田。提升农副产品深加工水平，扩大秸秆资源化比例；推行过腹还田，发展沼气；研制生物肥料、加强生物能源的商品化技术研究与推广等。

(8) 整治养殖污染，实施规模养殖。整治养殖业分散粗放的养殖模式，实施规模化养殖，减少畜牧业的污染与碳排放。

5 低碳农业发展机制

低碳农业的发展离不开国家制度的支持。就低碳农业发展机制而言，要着重从4个方面入手，不仅要提供法律保障，还要提供技术支持和服务保障。

第一，完善相关法律法规。中国政府分别于

2003年1月和2008年8月颁布了《中华人民共和国清洁生产促进法》和《循环经济促进法》，这两项法律的实行都带来了很好的效果。但是要进一步发展可再生能源，需要制定和实施有助于低碳经济发展的经济政策。

第二，转变农业发展方式。据估计，中国污染的23%都由生产出口产品造成。这是一种高碳且不可持续的经济。必须要有战略、政策和具体措施限制高碳污染出口产品的生产。

第三，大力依靠科技进步。在发展和使用本国低碳经济技术的同时，积极引进国外先进技术。一是吸引拥有技术的外国企业投资，鼓励他们在中国建设低碳设备；二是中国利用现有的多边环境条约下的国际机制来吸引技术。

第四，民众广泛参与。低碳经济并不仅仅是一种技术选择，也是一种社会选择。生活方式和习惯将给未来排放带来相当的影响，因此应该鼓励民众选择低碳生活方式和消费方式。

参考文献：

- [1] LAL R. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect [J]. Crit Rev Plant Sci, 2003, 22: 151-184.
- [2] 潘根兴, 赵其国, 蔡祖聪. 《京都议定书》生效后我国耕地土壤碳循环研究若干问题 [J]. 中国基础科学, 2005, (7): 12-18.
- [3] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全 [J]. 地球科学进展, 2005, 20 (4): 384-393.
- [4] SMITH P, MARTINO D, CAI Z, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture [J]. Philos Trans R Soc B, 2008, 363: 789-813.
- [5] 潘家华, 孙翠华, 邹骥, 等. 减缓气候变化的最新科学认知 [J]. 气候变化研究进展, 2007, 3 (4): 187-194.
- [6] 庄贵阳. 中国经济低碳发展的途径与潜力分析 [J]. 国际技术经济研究, 2005, (11): 8-12.
- [7] 张迎新. 我们能源的未来: 创建一个低碳经济体 [J]. 中国发展观察, (2005-08-31).
- [8] 张坤民. 低碳世界中的中国: 地位、挑战与战略 [J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18 (3): 1-7.
- [9] 张坤民, 潘家华, 崔大鹏. 低碳经济论 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [10] 王昀. 低碳农业经济略论 [J]. 中国农业信息, 2008, (8): 12-15.
- [11] 王沅. 优质高产高效生态农业的基本原理 [J]. 当代生态农业, 1995, (Z1): 15-22.
- [12] 覃龙华, 王会肖. 生态农业原理与典型模式 [J]. 安徽农业科学, 2006, 34 (11): 2484-2486.
- [13] 翁伯琦, 陈奇榕, 黄跃东. 循环经济与现代农业 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006, (5): 158-186.
- [14] 翁伯琦, 陈奇榕, 王义祥. 试论循环经济与现代生态农业发展

[J]. 江西农业大学学报: 社会科学版, 2008, 7 (3): 21– 26.

[15] 李晓兵. 国际土地利用——土地覆盖变化的环境影响研究 [J]. 地球科学进展, 1999, 14 (4): 395– 400.

[16] PAUSTIAN K, COLE C V, SAUERBECK D, et al. CO₂ mitigation by agriculture: an overview [J]. Climatic Change, 1998, 40 (1): 135– 162.

[17] ROBERTS W P, CHAN K Y. Tillage– induced increases in carbon dioxide loss from soil [J]. Soil and Tillage Research, 1990, 17: 143– 151.

[18] DAVIDSON S. Cultivation and soil organic matter [J]. Rural Research, 1986, 131: 13– 18.

[19] RADIN J W, KIMBALL B A, HENDRIX D L, et al. Photosynthesis of cotton plants exposed to elevated levels of carbon dioxide in the field [J]. Photosynthetic Research, 1987, 12: 191– 203.

[20] LAWLOR D W, MITCHELL R A C. The effects of increasing CO₂ on crop photosynthesis and productivity: A review of field studies [J]. Plant, Cell Environ, 1991, 14: 807 – 818.

[21] MCKENNYM S, ROSENBERGN J. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change [J]. Agriculture and Forest Meteorology, 1993, 64: 81 – 110.

[22] BAKER J T, ALLEN L H J. Contrasting crop species response to CO₂ and temperature [J]. Vegetation, 1993, 104: 239.

[23] 喻梅, 高琼, 高素华. 全球变化条件下植物个体的生理生态学模型 [J]. 植物学报, 1997, 39 (9): 811– 820.

[24] HU I D, LUO Y, CHEN G W, et al. Canopy radiation, and water use efficiencies as affected by elevated CO₂ [J]. Global Change Biology, 2001, (7): 75– 91.

[25] 王春乙, 潘亚茹, 白月明, 等. CO₂浓度倍增对中国主要作物影响的试验研究 [J]. 气象学报, 1997, 55 (1): 86– 94.

[26] KIMBALL B A, MANUEY J R, NAKAYOMA F S, et al. Effects of increasing atmospheric CO₂ on vegetation [J]. Vegetation, 1993, 103: 65– 75.

[27] 崔读昌. 气候变暖对我国农业生产的影响与对策 [J]. 中国农业气象, 1992, 13 (2): 16– 20.

[28] 高素华, 陈隆勋, 潘亚茹, 等. 大气中 CO₂上升后的温室效应对我国主要粮食作物产量的可能影响 [J]. 中国环境科学, 1992, 12 (6): 427– 431.

[29] FAKHR I. Global climate change and agricultural production [C]. London: Bookcraft (Bath) Ltd, 1996.

[30] ALVAREZR C R. Temperature regulation of soil carbon dioxide production in the humid Pampa of Argentina: estimation of carbon fluxes under climate change [J]. Biol Ferti Soils, 2001, 34: 282– 285.

[31] TURNER B L, MOSS R H, SKOLE D L. Region land use and global land cover change [J]. IGBP, 1993, 24: 8– 15.

[32] 李淑华. 气候变暖病虫害的影响及防治对策 [J]. 中国农业气象, 1993, 14 (1) : 41– 47.

[33] 刘德辉, 陶于祥. 土壤、农业与全球气候变化 [J]. 火山地质与矿产, 2000, 21 (4): 190– 195.

[34] LAL R, FOLLETT R F, KIMBLE J M, et al. Managing U. S. cropland to sequester carbon in soil [J]. Soil and Water Conservation, 1999, 54: 374– 381.

[35] IPCC: 2001, Climate Change 2001: The Scientic Basis, Technical Summary by Workgroup I of the Intergovernmental Panel on Climatic Change [M]. Cambridge, UK, Cambridge University Press.

[36] ANGERS D A, BOLINDER M A, CARTER M R, et al. Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada [J]. Soil and Tillage Research, 1997, (41): 191– 201.

[37] PAUSTIAN K, COLLINS H P, PAUL E A. Management controls on soil carbon. In: Paul EA (Ed), Soil Organic Matter in Temperate Agro ecosystems [J]. CRC Press, Boca Raton, F L, 1997, 15– 49.

[38] LAL R, BRUCE J P. The potential of world crop land soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect [J]. Environmental Science & Policy, 1999, 2: 177– 185.

[39] 马友华, 王桂苓, 石润圭, 等. 低碳经济与农业可持续发展 [J]. 生态经济, 2009, (6): 116– 118.

[40] 王绍强, 陈育峰. 美国土地覆盖与土地利用研究动向 [J]. 地球信息, 1998, (1): 60– 63.

[41] 王春峰. 低碳经济下的林业选择 [J]. 世界环境, 2008, (2): 37– 39.

[42] 赵荣钦, 黄爱民, 秦明周, 等. 中国农田生态系统碳增汇/减排技术研究进展 [J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2004, 34 (1): 60– 65.

[43] 方华军, 杨学明, 张晓平. 农田土壤有机碳动态研究进展 [J]. 土壤通报, 2003, 34 (6): 562– 568.

[44] 李友华. 关于发展中国碳汇经济的几个问题 [J]. 学术交流, 2008, (3): 87– 91.

[45] 翁伯琦, 胡习斌, 翁志辉. 低碳农业导论 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 3.

[46] 王义祥, 翁伯琦, 黄毅斌. 全球气候变化对农业生态系统的影响及研究对策 [J]. 亚热带农业研究, 2006, 2 (3): 203– 207.

(责任编辑: 柯文辉)