

低碳稻作理论与实践

The Theory and Practice of Low Carbon
Rice Farming

曹湊贵 李成芳 等 著



科学出版社

低碳稻作理论与实践

曹凑贵 李成芳 等 著



本书受国家重大科技支撑计划“粮食丰产科技工程”(2004BA520A02、2006BA520A02、2011BAD16B02)、国家自然科学基金(31100319、41101280、31171492、31371570)、中央高校基本科研业务费专项资金(2010QC032、2011PY148、2013PY106)、华中农业大学研究生教育创新工程基金等资助

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合温室气体排放与全球气候变化的学科热点,针对稻作系统温室气体排放及高投入的生产实际问题,提出了增汇、减排、降耗、循环的低碳稻作体系。全书在阐明稻田碳、氮动态特性及碳排放规律和低碳稻作原理的基础上,介绍了不同农艺措施对稻田碳、氮生态过程的影响,重点论述了免耕、施肥、秸秆还田、节水灌溉、稻田养鸭及品种使用等稻作技术对稻田碳排放、碳固定、碳库特性和碳效率的影响,明确了稻田降耗、减排的研究方向。

本书可供农学、生物学、生态学、土壤科学及环境科学等学科专业的本科生、研究生、教师及科研人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

低碳稻作理论与实践/曹凑贵等著. —北京:科学出版社,2014.3
ISBN 978-7-03-039289-3

I. ①低… II. ①曹… III. ①水稻栽培 IV. ①S511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 294089 号

责任编辑:李秀伟 郝晨扬 / 责任校对:郑金红
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年3月第一次印刷 印张:15 1/4 插页:4

字数:350 000

定价:85.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



曹凑贵 江西九江人,1963年11月出生,博士,博士生导师,华中农业大学教授,国家级教学名师。现任华中农业大学植物科学技术学院院长,湖北省生态学会理事长,中国生态学会农业生态专业委员会副主任,中国作物学会常务理事,中国生态学会理事,中国农学会耕作制度分会理事,武汉市农学会副会长,湖北省青年科学技术协会理事,湖北省专家学者科普服务团成员,享受国务院政府特殊津贴。

主要从事水稻栽培生理生态、农业生态学和区域可持续发展的教学和研究工作。承担国家及省部科技项目30多项;获国家教学成果一等奖1项,湖北省教学成果奖特等奖1项、一等奖1项、二等奖1项;获国家科技进步奖二等奖1项,湖北省科技进步奖一等奖1项、二等奖2项、三等奖3项;获农牧渔业丰收奖二等奖1项;获国家发明专利5项;作为主编、副主编编写教材、专著15部;发表科技论文160余篇(SCI、EI论文20篇)。主持“生态学”国家精品课程、国家网络资源共享课程、“生态学”国家教学团队等项目建设,主讲国家网络公开课“生态与可持续发展”。



李成芳 福建厦门人,1978年8月出生,博士,硕士生导师,华中农业大学植物科学技术学院副教授。2002年毕业于华中农业大学资源环境与农业化学系,获学士学位;2005年毕业于华中农业大学资源与环境学院,获农学硕士学位;2008年毕业于华中农业大学植物科学技术学院,获理学博士学位;2008年7月至今,在华中农业大学植物科学技术学院工作。

主要从事“作物-土壤”系统养分循环的研究,研究了不同农艺措施对稻田碳、氮、磷转化的影响;分析了不同农艺措施下稻田系统氮、磷肥的利用效率;探讨了不同农艺措施下稻田系统温室气体排放的规律及其微生物驱动机制。目前,主持国家自然科学基金、中央高校基本科研业务费专项资金、教育部新教师基金、农业部生态农业重点开放实验室开放课题等项目。获得国家发明专利1项,农业部农牧渔业丰收奖二等奖1项,湖北省科技进步奖一等奖、三等奖各1项。以第一作者或通讯作者在 *Plos One*、*Atmospheric Environment*、*Agriculture, Ecosystems & Environment*、*Plant and Soil*、*Applied Soil Ecology*、*Soil & Tillage Research*、*Archives of Environmental Contamination and Toxicology*、*Journal of Soil Science and Plant Nutrition*、《生态学报》、《环境科学学报》、《中国农业科学》、《农业环境科学学报》、《中国水土保持》、《长江流域资源与环境》等期刊发表论文近25篇。现为湖北省生态学会理事、中国生态学会会员,兼任 *Atmospheric Environment*、*Agriculture, Ecosystems & Environment*、*Applied Soil Ecology*、*Rice*、*Science of the Total Environment*、《生态学报》和《农业环境科学学报》的审稿人。



展 茗 河南周口人,1973年1月出生,博士,硕士生导师,华中农业大学植物科学技术学院副教授。1999年毕业于华中农业大学农学系,获农学硕士学位;2009年毕业于华中农业大学植物科学技术学院,获理学博士学位;1999年7月至今,在华中农业大学植物科学技术学院工作。2002年10月~2003年8月在泰国 Kasetsart 大学访问学习;2013年3月~2014年3月在美国内布拉斯加大学林肯分校访问学习。

一直从事农业生态学、作物栽培生理生态的教学与研究工作。主要研究方向为不同农作制度及农田管理措施对农田生态系统碳循环及土壤有机碳变化的影响,玉米非生物环境胁迫生理生态及高产机理与技术。主持国家自然科学基金、湖北省自然科学基金、中央高校基本科研业务费专项资金、农业部重点开放实验室开放课题等项目5项。发表学术论文10多篇;参编教材、专著4部;参与“生态学”国家精品课程、国家网络资源共享课程、“生态学”国家教学团队等项目建设。



汪金平 安徽休宁人,1972年6月出生,博士,硕士生导师,华中农业大学植物科学技术学院副教授。现任湖北省生态学会秘书长,中国耕作制度研究会南方分会理事,中国生态学会会员。1995年毕业于安徽农业大学农学院,获农学学士学位;2003年毕业于南京农业大学农学院,获理学博士学位;2003~2005年在华中农业大学作物学博士后流动站工作;2005年至今,在华中农业大学植物科学技术学院工作。2012年12月~2013年12月在美国

北卡罗来纳州立大学(North Carolina State University)访问学习。

主要从事水稻栽培生理生态、稻田复合种养、全球变化与土壤菌根响应及区域农业可持续发展方面的教学和研究工作。先后承担国家及省部各类项目10余项;获湖北省科技进步奖一等奖1项、三等奖1项;获农牧渔业丰收奖二等奖1项;获国家发明专利1项。参与编写《生态学基础》及《中国旱区农业》等著作,发表论文30余篇。参与“生态学”国家精品课程、国家网络资源共享课程、“生态学”国家教学团队工作,主讲“生态学基础”、“农业生态学”等课程。



李 萍 黑龙江牡丹江人,1981年9月出生,博士,华中农业大学植物科学技术学院讲师。2004年毕业于西北农林科技大学生命科学学院,获工学学士学位;2007年毕业于西北农林科技大学生命科学学院,获理学硕士学位;2012年毕业于西北农林科技大学水利与建筑工程学院,获工学博士学位;2012年至今,在华中农业大学植物科学技术学院工作。2008~2010年,曾先后在美国犹他州立大学、美国爱达荷大学和美国农业部的实验室学习。主要致力于作物抗旱节水的生理生态特性研究,并以第一作者在

Crop Science、*Agronomy Journal* 和 *Australian Journal of Crop Science* 等多个国际期刊上发表论文。

前 言

全球气候变化是目前国际社会公认的全球性环境问题,更是当今人类面临的严峻挑战。温室气体的过量排放,是全球气候变化及其所带来的一系列环境问题的重要根源。农业是温室气体主要的排放源之一,农业源温室气体排放量占人类活动温室气体排放量的10%~17%,全球47%的CH₄、58%的N₂O来自农业活动排放。稻田是温室气体的重要排放来源,每年稻田CH₄排放量达31~112 Tg,1994年我国稻田CH₄排放量6.15 Tg,占全国人类活动排放CH₄的17.9%、农业源CH₄排放量的35.8%和全世界水田土壤CH₄排放量的37.6%。我国农田N₂O排放量0.63 Tg,占全国N₂O总排放量的73.9%。

水稻是世界三大粮食作物之一,常年种植面积1.5亿hm²左右,约占耕地面积的10%,亚洲水稻种植面积占世界的90%,中国水稻种植面积近3000万hm²,占世界水稻种植面积的20%。水稻是我国主要的粮食作物,占全国粮食种植面积的30%,占粮食总产量的50%,在保障粮食安全和生态安全上起着至关重要的作用,因此,研究影响稻田温室气体排放的因素,探索和推广水稻高产、稻田降耗与减排技术措施,实现水稻生产资源节约、环境友好,对发展低碳农业和控制全球气候变化具有重要意义。

碳排放、消耗是一个自然过程,科学的农艺措施可降低稻田碳排放、提高碳效率,这是低碳高产的重要依据。我们科研团队自2004年以来,在国家重大科技支撑计划“粮食丰产科技工程”(编号:2004BA520A02、2006BA520A02、2011BAD16B02)、国家自然科学基金(编号:31100319、41101280、31171492、31371570)、中央高校基本科研业务费专项资金(2010QC032、2011PY148、2013PY106)等项目支持下,以稻田生态系统为对象,针对水稻生产的碳汇、碳源双重特性,以“低碳高产”的理念革新农艺措施,研究评价了不同农艺措施下稻田温室气体的排放及水稻生产的碳成本、碳效率,构建了“增汇优先、减排为重、降耗为主、循环利用”的低碳稻作技术体系。

本书是对我们研究团队近十年研究工作的系统总结。有关水稻低碳高产的研究,我们研究团队已公开发表论文87篇,其中SCI论文19篇,获发明专利2项,获湖北省科技进步奖一等奖1项、二等奖2项、三等奖3项,获农牧渔业丰收奖二等奖1项,相关博士学位论文9篇、硕士论文29篇,形成了新型低碳、简化、高效栽培技术模式,模式实践效果显著,节能20%,土壤有机质提高5.2%,养分利用率提高9.7%,减少温室气体排放,温室潜势降低21.5%,节水30%,水稻单产提高6.14%,亩^①增纯利润190元以上。

全书分8章,在系统介绍低碳稻作原理、低碳稻作技术体系的基础上,依托团队研究成果,以增汇、减排、降耗、循环为主线,系统介绍免耕、施肥、节水、秸秆还田、品种选用等农艺措施对稻田碳排放、碳固定、碳效率的影响及规律,提出低碳稻作技术及发展方向。

^① 1亩≈666.7 m²,后同。

全书由曹凑贵博士负责组织著作,并撰写第1章和第8章,李成芳博士撰写第2章、第5章,李成芳博士和郭梨锦博士共同撰写第3章,李萍博士撰写第4章,展茗博士和江洋博士共同撰写第6章,汪金平博士和江洋博士共同撰写第7章。此外,参加相关研究的博士有程建平、Shahrear Ahmad、潘圣刚、袁伟玲、张建设、黄胜奇、盛锋、张枝盛、徐莹、Ibrahim Mohamed;硕士有刘天奇、田少阳、张建宁、汤颢军、杜华清、邓环、丁子福、王昌付、赵莉、王旭、谢运河、谢宁宁、关照霞、王若涵、金晖、代光照、翟晶、乐丽鑫、通乐嘎、寇志奎、杨金花、郑敏、孔星、张帆、郑大、刘兵、周亮、王丹丹、马玉华、艾福中等。在此,谨向他们表示衷心感谢!

尽管我们就稻田减排、降耗做了大量工作,但目前仍集中在不同农艺措施对基本碳、氮过程动态特征影响的研究。总体来看,该体系仍缺乏完善的基础理论,有许多理论问题、技术问题及政策问题有待深化研究。我们将结合实际技术的适用性、配套性和集成性,注意农机农艺的配套及集成,开展稻田种植的周年及长期定位研究、土壤-作物系统及土壤微生物研究、面尺度及碳模型研究,逐步完善低碳稻作理论及技术体系。

由于本书撰写仓促,加之水平有限,疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

曹凑贵

2013年11月1日

目 录

前言

第 1 章 低碳稻作原理	1
1.1 低碳经济及低碳农业	1
1.1.1 低碳经济的内涵	1
1.1.2 低碳农业	2
1.1.3 低碳农业理论及模式	4
1.2 农田温室气体排放	7
1.2.1 温室气体及农业源温室气体	7
1.2.2 稻田碳循环及 CO ₂ 、CH ₄ 排放	9
1.2.3 稻田氮循环及 N ₂ O 排放	15
1.2.4 水稻生产碳成本及碳效率	18
1.3 低碳稻作理论与技术	21
1.3.1 低碳稻作理论研究及技术评价	21
1.3.2 低碳稻作体系的构想	25
1.3.3 低碳稻作的技术体系	29
1.3.4 低碳稻作案例	30
参考文献	32
第 2 章 免耕栽培与低碳稻作	36
2.1 研究方法	36
2.1.1 不同耕作措施试验	36
2.1.2 免耕施肥试验	37
2.1.3 双季稻免耕抛秧试验	37
2.2 稻田免耕与温室气体减排	37
2.2.1 稻田免耕对 CO ₂ 排放的影响	37
2.2.2 稻田免耕对 CH ₄ 排放的影响	39
2.2.3 稻田免耕对 N ₂ O 排放的影响	40
2.2.4 稻田免耕对温室效应的影响	41
2.3 稻田免耕与土壤碳库	41
2.3.1 稻田免耕对土壤活性有机碳的影响	41
2.3.2 稻田免耕对土壤有机碳固定的影响	42
2.4 稻田免耕与水稻生产	43
2.4.1 稻田免耕对水稻产量的影响	43
2.4.2 稻田免耕与碳效率	44

2.5	稻田免耕对氮肥损失的影响	45
2.5.1	稻田免耕对氮淋失的影响	45
2.5.2	稻田免耕对氮挥发的影响	47
2.6	免耕稻田氮肥运筹对氮挥发与氮肥利用率的影响	48
2.6.1	免耕稻田氮肥运筹对氮挥发的影响	48
2.6.2	免耕稻田氮肥运筹对氮肥利用率的影响	50
2.7	免耕抛秧对双季稻田碳排放及其产量的影响	51
2.7.1	免耕抛秧与水稻生长	51
2.7.2	免耕抛秧与碳排放	52
	参考文献	55
第3章	氮肥运筹与低碳稻作	62
3.1	研究方法	63
3.1.1	施氮水平试验	63
3.1.2	氮肥运筹试验	64
3.1.3	氮肥深施试验	64
3.2	施氮水平对水稻群体动态及产量构成的影响	65
3.2.1	叶面积指数	65
3.2.2	单叶净光合速率	65
3.2.3	齐穗期各层透光率差异	65
3.2.4	不同施肥处理对产量的影响	66
3.2.5	施氮水平对水稻产量的影响	66
3.3	氮肥运筹对稻田水体氮素动态变化及氮素吸收利用效率影响	67
3.3.1	氮肥运筹对稻田田面水三氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和总氮)浓度的影响	67
3.3.2	氮肥运筹对稻田渗漏水三氮浓度的影响	69
3.3.3	氮肥运筹对水稻不同生育期氮素积累的影响	70
3.3.4	氮肥运筹对当季施用的肥料氮(^{15}N)去向的影响	71
3.3.5	氮肥运筹对水稻氮素吸收利用效率的影响	72
3.3.6	施氮运筹对水稻产量及其构成因子的影响	72
3.4	氮肥深施对免耕稻田氮挥发及土壤微生物群落影响	73
3.4.1	氮肥深施对稻田土壤微生物群落的影响	73
3.4.2	氮肥深施后对土壤氮挥发的抑制	73
3.4.3	氮肥深施对水稻地上部分氮素吸收的促进	74
	参考文献	75
第4章	节水灌溉与低碳稻作	79
4.1	研究方法	80
4.1.1	水稻节水大田试验	80
4.1.2	测筒测坑试验	81
4.2	节水灌溉对稻田温室气体排放的影响	82

4.2.1	节水灌溉对 CH ₄ 排放的影响	82
4.2.2	节水灌溉对 N ₂ O 排放的影响	84
4.2.3	CH ₄ 和 N ₂ O 排放对温室效应的影响	86
4.3	节水灌溉对土壤碳库的影响	86
4.3.1	节水灌溉对稻田碳固定的影响	87
4.3.2	节水灌溉对土壤有机碳的影响	95
4.4	节水灌溉对产量及水分利用效率的影响	104
4.4.1	节水灌溉对水稻生长发育的影响	104
4.4.2	节水灌溉对水稻产量的影响	115
4.4.3	节水灌溉对水分利用效率的影响	122
	参考文献	137
第 5 章	秸秆还田与低碳稻作	140
5.1	研究方法	141
5.2	秸秆还田对稻田温室气体排放的影响	142
5.2.1	秸秆还田对 CO ₂ 排放的影响	142
5.2.2	秸秆还田对 CH ₄ 排放的影响	142
5.2.3	秸秆还田对 N ₂ O 排放的影响	143
5.2.4	秸秆还田影响温室气体排放的原因分析	143
5.3	秸秆还田对土壤碳库的影响	145
5.3.1	秸秆还田对土壤微生物群落的影响	145
5.3.2	秸秆还田对土壤活性有机碳组分的影响	147
5.3.3	秸秆还田对土壤团聚体及其有机碳分配的影响	149
5.3.4	秸秆还田对土壤碳固定与净温室效应影响	149
5.4	秸秆还田对水稻产量的影响	152
5.4.1	秸秆还田对水稻产量的影响	152
5.4.2	秸秆还田与碳效率	152
	参考文献	154
第 6 章	稻鸭共育与低碳稻作	159
6.1	研究方法	160
6.2	稻鸭共育对温室气体排放的影响	161
6.2.1	稻鸭共育对 CO ₂ 和 CH ₄ 排放的影响	161
6.2.2	稻鸭共育对 N ₂ O 排放的影响	164
6.2.3	稻鸭共育温室效应评估	165
6.2.4	稻鸭共育温室气体排放影响因素	165
6.3	稻鸭共育对碳氮平衡的影响	171
6.3.1	稻鸭共育对碳平衡的影响	171
6.3.2	稻鸭共育对稻田氮平衡的影响	186
6.4	稻鸭共育对稻田生物的影响	189

6.4.1	稻鸭共育对稻田土壤微生物的影响	189
6.4.2	稻鸭共育对稻田水体生物的影响	190
6.4.3	稻鸭共育对稻田昆虫群落的影响	192
6.5	稻鸭共育对水稻生长和产量的影响	193
6.5.1	稻鸭共育对水稻生长发育及产量的影响	193
6.5.2	稻鸭共育与水稻碳固定	194
	参考文献	198
第7章	水稻品种与低碳稻作	203
7.1	研究方法	205
7.1.1	节水抗旱稻品种试验	205
7.1.2	<i>Bt</i> 转基因水稻品种试验	206
7.1.3	优质稻品种混作试验	206
7.2	节水抗旱稻与低碳稻作	208
7.2.1	节水抗旱稻碳排放	208
7.2.2	节水抗旱稻水分利用效率	209
7.2.3	节水抗旱稻产量与品质表现	210
7.2.4	节水抗旱稻生产效率	214
7.3	<i>Bt</i> 水稻与低碳稻作	215
7.3.1	<i>Bt</i> 水稻产量表现	215
7.3.2	<i>Bt</i> 水稻抗虫特性与生产效率	216
7.4	优质稻混作与低碳高产	217
7.4.1	优质稻混作对产量的影响	217
7.4.2	优质稻混作对品质的影响	220
7.4.3	优质稻混作的抗倒伏效应	221
	参考文献	222
第8章	低碳稻作发展展望	224
8.1	基础理论的完善及深化	224
8.2	技术的适用性及配套性	227
8.3	政策导向及制度保障	228
	参考文献	228
附录 I	2004~2013 年相关专利及研究论文	229
附录 II	相关博士研究生学位论文及博士后出站报告	234
附录 III	相关硕士研究生学位论文	235
	图版	

第 1 章 低碳稻作原理

1.1 低碳经济及低碳农业

随着世界工业经济的发展、人口的剧增、人类欲望的无限上升和生产生活方式的无节制,世界气候面临着越来越严重的问题。尤其是人类温室气体排放造成的全球气候变暖问题日益引起国际社会的普遍关注,面对全球气候变化,急需世界各国协同降低或控制二氧化碳排放。全球变暖严重危害了社会经济的发展,深刻触及能源安全、生态安全、水资源安全和粮食安全,甚至威胁到人类的生存。这一现象也引发了国际社会对现有经济发展模式的反思,在此背景下,“低碳经济”(low carbon economy)的概念应运而生,并越来越受到国际社会的重视。发展低碳经济正成为世界潮流,英国提出“低碳经济”的概念后,日本提出“低碳社会”的理念,美国提出“低碳途径”的策略,低碳经济成为各国统筹经济发展与保护全球气候的战略选择(庄贵阳,2008)。“低碳”概念已扩展到生产、生活各个领域,如出现了低碳社会、低碳消费、低碳技术、低碳经济、低碳生活、低碳城市、低碳文化、低碳农业等概念。

1.1.1 低碳经济的内涵

“低碳经济”的概念最早由英国政府在 2003 年发表的《能源白皮书》(UK Government, 2003)中提出。《能源白皮书》指出,“低碳经济是通过更少的自然资源消耗和更少的环境污染,获得更多的经济产出;低碳经济是创造更高的生活标准和更好的生活质量的途径和机会,也为发展、应用和输出先进技术创造了机会,同时也能创造新的商机和更多的就业机会”。因此,低碳经济是指在可持续发展理念指导下,通过技术创新、制度创新、产业转型、新能源开发等多种手段,尽可能地减少煤炭、石油等高碳能源消耗,减少温室气体排放,达到经济社会发展与生态环境保护双赢的一种经济发展形态。低碳经济与目前国内落实科学发展观、建设资源节约型和环境友好型社会、转变经济增长方式的本质是一致的。

低碳经济形态。作为一种经济形态,其转型过程具有阶段性特征,是碳生产力和人文发展均达到一定水平的一种经济形态,旨在实现控制温室气体排放的全球共同愿景。它是包括生产、交换、分配、消费在内的社会再生产全过程的经济活动低碳化,把二氧化碳排放量尽可能减少到最低限度乃至零排放,获得最大的生态经济效益;也是包括生产、交换、分配、消费在内的社会再生产全过程的能源消费生态化,形成低碳能源和无碳能源的国民经济体系,保证生态经济社会有机整体的清洁发展、绿色发展、可持续发展。

低碳经济模式。作为发展模式就是在实践中运用低碳经济理论组织经济活动,将传统经济发展模式改造成低碳型的新经济模式。具体来说,低碳经济发展模式就是以低能

耗、低污染、低排放和高效能、高效率、高效益为基础,以低碳发展为发展方向,以节能减排为发展方式,以碳中和技术为发展方法的绿色经济发展模式。低碳经济的关键在于提升能源的高效利用、推行区域的清洁发展、促进产品的低碳开发和维持全球的生态平衡。低碳经济是从高碳能源时代向低碳能源时代演化的一种经济发展模式。

低碳经济技术。低碳经济的实质是高能源效率和清洁能源结构问题,核心是能源技术创新和制度创新。低碳技术主要指涉及电力、交通、建筑、冶金、化工、石化等部门,以及在可再生能源及新能源、煤的清洁高效利用、油气资源和煤层气的勘探开发、二氧化碳捕获与埋存等领域开发的有效控制温室气体排放的新技术。减碳技术,是指高能耗、高排放领域的节能减排技术,煤的清洁高效利用、油气资源和煤层气的勘探开发技术等;无碳技术,如核能、太阳能、风能、生物质能等可再生能源技术;去碳技术,典型的是二氧化碳捕获与埋存(carbon capture and storage, CCS)。

1.1.2 低碳农业

1. 低碳农业的背景及概念

农业的发展历程经历了农业文明中的传统农业阶段、工业文明中的现代农业阶段,而现代农业是典型的“高能耗、高物耗、高排放和高污染”的高碳农业发展模式。在高碳农业理念的指导下,人们往往关注农业的经济功能,而忽视了农业的生态和社会功能。因此,发展农业应打造农业经济系统和生态系统耦合的基础,从依靠化石能源向依靠太阳能等方向转变,追求低耗、低排、低污和碳汇,使低碳生产、安全保障、气候调节、生态涵养、休闲体验和文化传承等多功能特性得到加强,实现向可持续经济发展方向转变。

二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)等是主要的温室气体,其排放源主要来自化石燃料的开采和燃烧、土地利用和生态系统呼吸,还来自耕地土壤释放、生物质燃烧和反刍动物肠胃发酵等农业生产。2007年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第4次评估报告表明,农业是温室气体的重要排放源,全球范围内农业排放的非CO₂温室气体占人为排放的非CO₂温室气体总量的14%,其中农业排放了84%的N₂O和47%的CH₄,如果不实施额外的农业政策,预计到2030年农业源CH₄和N₂O排放量将会比2005年分别增加60%和35%~60%,实行农业转型,减少农业源温室气体排放已成发展趋势。

当前世界农业正处在一个由“高碳”向“低碳”的重大转型期。低碳农业是全球性的生态危机特别是全球气候变暖催生的生态革命产物。联合国政府间气候变化专门委员会第4次评估报告(2007)指出,农业是温室气体的第二大来源,农业源温室气体排放占全球人为排放的13.5%;联合国粮食及农业组织和世界银行在其发表的一份由全球400多位科学家撰写的报告《国际农业知识与科技促进发展评估》(2008)中进一步指出:“世界需要一个从严重依赖农药和化肥等化学品、对环境破坏很大的农业模式转化为对环境友好、能保护生物多样性和农民生计的生态农业模式”。在世界多国共同反思高碳农业弊端的同时,世界农业随之步入新型的有机、生态、高效的现代农业发展期,即低碳农业经济时代。

低碳农业是在低碳经济背景下出现的新型农业发展形态,是指以缓解温室气体排放

为目标,以减少碳排放、增加碳汇和适应变化技术为手段,通过加强基础设施建设、产业结构调整、提高土壤有机质、做好病虫害防治、发展农村可再生能源等,转变农业生产和农民生活方式,实现高效率、低能耗、低排放、高碳汇的农业。

2. 低碳农业形态

目前关于低碳农业的认识不尽相同,有些学者认为低碳农业就是生态农业、绿色农业、生物多样性农业或循环农业(高旺盛等,2010);有的突出低碳农业的生态环境安全作用,是“低能耗、低污染、低排放”的新型农业(赵其国和钱海燕,2009;中华人民共和国农业部,2009);有的认为低碳农业还具备“农业生产、安全保障、气候调节、生态涵养、农村金融”多元功能(李晓燕和王彬彬,2010)。综合来看,低碳农业并不是一种简单的农业生产模式,而是农业发展的新理念,是低碳经济在农业和农村领域的具体实现形式和有机组成部分,其核心是技术创新、制度创新和发展观的转变。当然,低碳农业的实现依赖具体的农业技术与生产模式,因此它和绿色农业、生态农业、循环农业是不矛盾的(表 1-1),是这些农业模式的进一步发展。绿色农业、生态农业和循环农业的技术可被低碳农业借鉴和进一步发展(王青等,2012)。

表 1-1 低碳农业与其他类型农业的比较

农业形态	判别标准	关键技术	核心概念
无公害农业	无公害产品	农用化学物质使用限量的控制及替代技术	满足食品安全的基本条件和市场准入,质量标准都是强制性标准
绿色农业	绿色产品	保护生态环境和提高营养水平技术	生产安全、优质农产品,提高市场竞争力
有机农业	有机产品	遵循自然法则,采用国际有机农产品标准规范生产	不使用化学品,提供自然产品,满足特殊人群特殊消费的需求
循环农业	循环再生	采用循环生产模式	资源节约,环境友好
生态农业	生态良性发展	减少外来物质投入,保护利用自然资源	整体、协调、循环、再生
低碳农业	碳消耗、排放	碳足迹和低碳生产技术	低污染、低能耗、低排放和高产出、高效益、高生活质量

3. 低碳农业特征

低碳农业不仅具有减少资源消耗、减少温室气体排放、保护生态环境的功能,还应具备提高农业生产力、发展农村经济、提高农民生活水平的作用。可见,低碳农业的主要特征是“三低、三高”(图 1-1)，“三低”指低消耗、低排放和低污染。一是节约各种资源的消耗,尽可能减少人力、物力、财力的投入;二是减少 CO₂、CH₄、N₂O 等温室气体的排放;三是在农业生产过程中尽可能减少对土壤、水体、大气和农产品的污染。“三高”是指高碳生产率、高经济发展水平、高生活质量。强调一要不断提高农业的生产力,提高产量,确保粮食安全;二要提高经济效益,增加农民收入;三要注重减轻农民的劳动强度,改善农产品品

质,改善农村生活环境,提高农民生活质量。

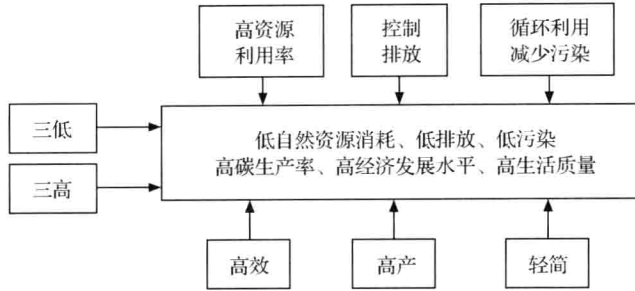


图 1-1 低碳农业的“三低、三高”

发展低碳农业需要在资源节约、环境友好和生态文明等方面进行技术研发或集成创新,既要系统研发农业节能降耗技术,也要全面普及生态环保农业技术,更要在生态文明方面加强技术创新。其技术重点体现在能源清洁高效利用、资源高附加值转化、可再生能源和新能源开发、传统技术改造、碳素平衡等方面,具体到生产实际这些技术主要包括:土壤低碳耕作技术、农田节水灌溉技术、土壤固碳培肥技术、病虫生物防治技术、高光合作物育种技术、畜禽和水产生态养殖技术、生物质能利用技术等。

低碳农业还具有鲜明的体系特征:一是坚持资源节约。通过科学安排不同生物在系统内部的循环利用或再利用,系统开发农业剩余资源,以最少外部资源投入得到更多更好的产品。二是提倡能源低消耗。鼓励农业生产尽可能减少能源消耗量,获得与原来等值的效益,或者是以原来等量能源消耗,获得更高的经济效益。增加可再生、替代性能源利用,减少生产过程对化石能源的依赖,高效率地利用能源。三是限制污染物排放。以清洁生产理念指导全程生产。利用风能、太阳能和生物质能等清洁能源,避免化石能源带来的温室气体排放。通过生态种养,减少农用化学品投入,改善农业环境。对农业废弃物进行资源化利用。四是产出高效优质。低碳农业的转型,不仅意味着农业经济形态的转变,它涉及食品卫生、农村发展、农业增效和农民增收等多方面;并不意味着产出下降,生产停滞不前,而是要求农业持续高效,产品绿色优质。五是系统协调创新。正如其他农业模式一样,低碳农业也是一个有机系统,需要统筹思维,考虑如何从技术、制度、管理等方面降低农业生产对环境的负面影响。具体实施需要生产与生态、资源与环境相协调,同时要求支撑技术与决策管理机制创新。

1.1.3 低碳农业理论及模式

1. 农业碳汇和碳源的双重性

农业是作为人类社会与自然生态系统唯一的界面,在参与碳循环过程中显示出碳汇和碳排放的双重特征(图 1-2,图 1-3)。首先,在农业生产体系中,植物生产(初级生产)包括草地、森林和作物利用太阳能把大气 CO₂ 和水合成碳水化合物,起着碳汇作用;其次,农业生产体系中动物、植物、微生物生命活动呼吸释放 CO₂,同时动物养殖过程中,特别是反刍动物的肠发酵和蠕动及动物排泄出大量的有机肥,也是温室气体(greenhouse gas,

GHG)的主要来源之一,起着碳排放的功能;最后,为了提高农业产量而投入的大量人工辅助能是现代农业体系的主要特征。投入到农业生态系统的大量化肥、农药、浓缩饲料等需要大量化石能源燃烧而获得,是农业碳排放的重要来源。

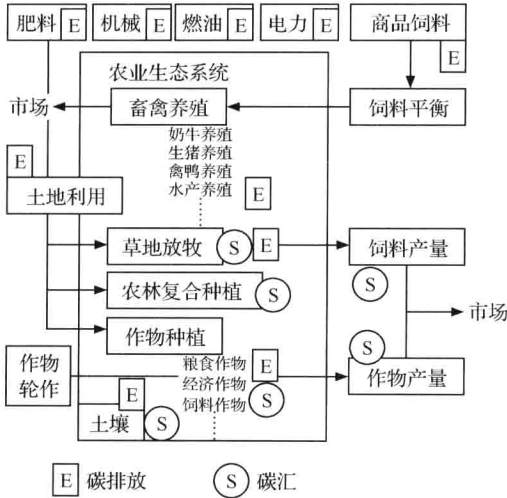


图 1-2 农业生态系统的碳汇与碳源
(改自 Hediger, 2006)

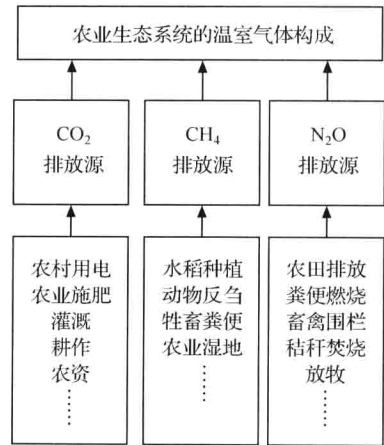


图 1-3 农业生态系统温室气体排放

2. 农业碳汇和碳源功能的可控性

与自然生态系统的森林及其他植被亚生态系统、水生亚生态系统一样,作物吸收和固定大气中 CO_2 , 是农业碳汇功能的主要动力。这部分同化物以生物量、废弃物或是制作成家具等形式存在, 都可以暂时捕捉碳, 或通过其他形式扣押碳而“永久”埋藏在地下。因此, 调整种植制度, 改善种植结构, 实现最大面积、最长时间的绿色覆盖, 利用高效捕捉碳的作物等是低碳农业的根本途径。

农业生态过程的碳排放途径多种多样, 包括各类生物辅助能、工业辅助能消耗造成的碳排放(王松良等, 2012)(图 1-4 中的 E0); 耕作和管理过程对土壤碳汇的扰动、机械动力的消耗、动物饲养过程的碳排放(E1); 收获、加工过程中化石能源燃烧的碳排放, 以及废弃物特别是动物粪肥的碳释放(E2); 作为运输动力的化石能源燃烧的碳排放(E3); 动物(包括人)的粪肥处理和使用过程的碳排放(E4); 生产资料运输动力和交易过程的化石能源燃烧的碳排放(E5)。农业产前、产中、产后的全过程都耗用能源, 造成大量的温室气体排放。但这些排放都可以通过改进工艺、加强管理、减少投入、控制排放措施, 提高效率, 减少碳排放。

3. 低碳农业模式

低碳农业是低碳经济在农业的延伸, 它要求转变农业生产方式, 发展农业生物质能源, 减缓农业温室气体排放, 既保证农作物高产稳产, 又减小对气候变暖增加压力。对于

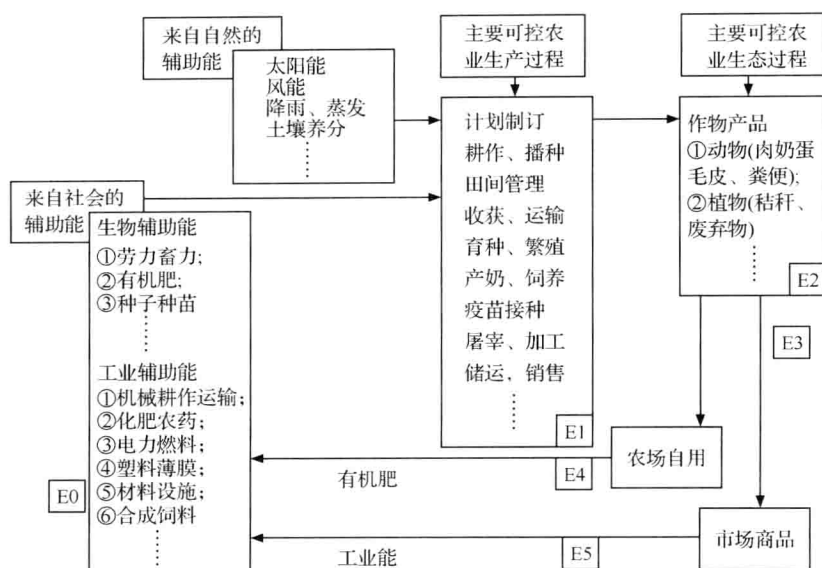


图 1-4 农业生产生态过程辅助能投入及碳排放途径

低碳农业的实施,我国近些年已经展开了一些探索,主要是从生态农业、绿色农业、循环经济等领域出发。结合低碳农业的特征和我国农业发展现状,低碳农业主要有减源型、增汇固碳型和循环型农业发展模式(许广月,2010)。

减源型农业发展模式。利用现代农业先进技术,最大限度地减少能源、化肥、农药等要素的投入,并在农产品的整个生命周期内注入低碳发展理念的新型农业发展模式。这种发展模式着眼于切断农业源温室气体的排放,在农产品投入要素的输入端及整个生命周期内,对农业的发展进行低碳化设计,控制投入,节约资源。重点发展“九节一减”的减量化农业,“九节”即节地、节水、节肥、节药、节种、节电、节油、节柴(节煤)、节粮,“一减”就是减少从事“一产”的农民。这样,首先,通过投入要素的减量化,提高土地、能源等的利用效率,从根本上减少农业源温室气体的产生,有效治理农业面源污染,保护农业生态环境;其次,可以降低农业生产成本,减轻农民负担;最后,通过工业对农业剩余劳动力的承接与吸纳,不仅增加农民收入,而且提高城镇化水平,从而有利于工业化、城镇化与农业现代化的协调发展。

增汇固碳型农业发展模式。农业具有天然的固碳性质,利用耕地、林地、草地和湿地等进行固碳,大力发展增汇固碳型农业,对增强农业在发展低碳经济中的作用具有重要意义。耕地不仅事关中国的粮食安全和经济安全,更事关中国的气候安全,耕地具有固碳型的生态功能,中国 18 亿亩耕地资源,土壤有机质含量若提高 1%,土壤可从空气中净吸收 306 亿 t 二氧化碳,实施耕地保护,发展耕地免耕、有机肥技术和秸秆适量返田技术等是低碳农业的重要内容。林地、草地和湿地具有天然的固碳作用,森林是陆地上最大的储碳库,被誉为“地球之肺”,林木每生长 1 m³,平均吸收 1.83 t 二氧化碳,放出 1.62 t 氧气。据专家估算,1980~2005 年,中国通过开展植树造林和森林管理活动,累计净吸收二氧化碳 46.8 亿 t;通过控制毁林,减少排放二氧化碳 4.3 亿 t,两项合计 51.1 亿 t。因此,建