



中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
ISSN 2096-6237, CN 13-1432/S

《中国生态农业学报(中英文)》网络首发论文

题目: 气候变化背景下农业低碳发展: 国际经验与中国策略
作者: 郑玉雨, 于法稳
收稿日期: 2023-05-31
网络首发日期: 2023-11-07
引用格式: 郑玉雨, 于法稳. 气候变化背景下农业低碳发展: 国际经验与中国策略 [J/OL]. 中国生态农业学报(中英文).
<https://link.cnki.net/urlid/13.1432.s.20231106.1509.001>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.12357/cjea.20230261

郑玉雨, 于法稳. 气候变化背景下农业低碳发展: 国际经验与中国策略[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, DOI: 10.12357/cjea.202300261
ZHENG Y Y, YU F W. Low-carbon agricultural development in the context of climate change: International experiences and China's strategies[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, DOI: 10.12357/cjea.20230261

气候变化背景下农业低碳发展: 国际经验与中国策略*

郑玉雨¹, 于法稳^{2,3**}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 北京 100081; 2. 中国社会科学院农村发展研究所 北京 100732; 3. 中国社会科学院生态环境经济研究中心 北京 100732)

摘要: 在全球共同应对气候变化的时代背景下, 探索国际视野下农业温室气体减排的先进经验, 对于中国践行气候变化国际合作倡议、推动自身农业可持续发展实现具有重要现实意义。以美国、欧盟和日本等国家为对象, 分别梳理其农业低碳发展的主要做法、最新行动和取得成效, 据此, 结合中国特色农业发展的基本理念, 提出农业低碳发展的中国策略。研究表明: 1) 较之于同为新兴经济体的印度, 2020 年中国在农业温室气体排放总量和人均排放量上与其相近, 但中国的单位 GDP 排放量 $[44.52 \text{ t} \cdot (10^6\text{\$})^{-1}]$ 远低于印度 $[278.11 \text{ t} \cdot (10^6\text{\$})^{-1}]$; 较之于同作为超级人口大国的美国, 中国在排放总量方面远高于美国, 但中国的人均排放量 $(0.46 \text{ t} \cdot \text{cap.}^{-1})$ 明显低于美国 $(1.15 \text{ t} \cdot \text{cap.}^{-1})$ 。中国必须充分考虑自身作为人口大国和发展中国家的现实, 科学合理地展开农业温室气体减排目标规划。2) 美国主要在法律法规完善、财政税收和减排补贴、清洁能源开发及推广、碳排放权和碳汇市场交易等方面做出积极探索, 其 2020 年人均农业温室气体排放量较 1990 年下降 19.58%; 欧盟的先进做法主要体现在法律法规完善、财税支持和生态保护补偿、管理创新和技术创新等方面, 其 2020 年人均排放量同比 1990 年下降 29.03%; 日本主要在可再生能源推广、管理创新和技术创新、粮食生产保障和气候适应等方面展开行动, 其 2020 年人均排放量同比 1990 年下降 29.17%。3) 农业低碳发展的中国策略旨在保障粮食供给、减少温室效应和实现生态价值。据此, 提出持续完善相关法律法规体系、加大财税扶持和绿色金融支持、加强管理创新和科技创新、加快能源结构调整和转型升级以及逐步完善碳交易市场机制 5 个方面的政策启示。

关键词: 气候变化; 农业低碳发展; 农业温室气体; 国际经验; 中国策略

中图分类号: F323; X322

开放学科码(资源服务)标识码(OSID):



Low-carbon agricultural development in the context of climate change: International experiences and China's strategies

ZHENG Yuyu¹, YU Fawen^{2,3**}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Rural Development Institute, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China; 3. Research Center for Eco-Environmental Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China)

Abstract: In the context of the global joint response to climate change, it is of great practical significance for China to explore international experiences in agricultural greenhouse gas (GHG) reduction, so as to implement its cooperation initiative on climate change and promote its own sustainable agricultural development. Taking USA, EU and Japan as the representative countries, their main practices, latest actions and achievements in agricultural low-carbon development were sorted out respectively. By combining basic conception with China characteristics, Chinese strategies targeted at agricultural low-carbon development were put forward. The research showed that: (1) Compared with India, as an emerging economy, China's total agricultural GHG emissions and per capita emissions were similar, but China's per GDP emissions, $44.52 \text{ t} \cdot (10^6\text{\$})^{-1}$, were far lower than that of India, $278.11 \text{ t} \cdot (10^6\text{\$})^{-1}$. Compared with USA, as a super-populous country, China's total GHG emissions were much higher, but China's per capita emissions $(0.46 \text{ t} \cdot \text{cap.}^{-1})$ were significantly lower than that of USA $(1.15 \text{ t} \cdot \text{cap.}^{-1})$. China must fully consider its reality as a populous country and a developing

* 中国社会科学院创新工程“学者资助计划”项目(XC2023001)资助

**通信作者: 于法稳, 主要研究方向为生态经济理论与方法、农村生态治理。E-mail: yufaw@cass.org.cn

郑玉雨, 主要研究方向为生态经济理论与方法、农村生态治理。E-mail: yuyuzheng1994@163.com

收稿日期: 2023-05-31 接受日期: 2023-10-30

* This study was supported by Innovation Project "Scholar Funding Program" of Chinese Academy of Social Sciences (XC2023001).

**Corresponding author, E-mail: yufaw@cass.org.cn

Received May 31, 2023; accepted Oct. 30, 2023

economy, and scientifically and reasonably formulate emissions reduction target. (2) USA had made active explorations in perfecting laws and regulations, fiscal taxation and subsidies, clean energy promotion, carbon emission rights and carbon sink market transactions, and its per capita agricultural GHG emissions in 2020 had decreased by 19.58% compared with that in 1990. EU's advanced practices were mainly reflected in laws and regulations improvement, fiscal and taxation supports and ecological compensation, innovations in management and technology, and its per capita GHG emissions in 2020 decreased by 29.03% compared with that in 1990. Japan mainly launched actions in renewable energy promotion, innovations in management and technology innovation, food production guarantee and climate adaptation, and its per capita GHG emissions in 2020 decreased by 29.17% compared with that in 1990. (3) China's strategies for agricultural low-carbon development aimed at ensuring food supply, reducing greenhouse effects and realizing ecological values. In view of that, continuously improving relevant laws and regulations, increasing supports of public finance and taxation plus green finance, strengthening innovations in management and technology, accelerating adjustment and upgrading of energy structure, and gradually improving trading mechanism of carbon market were put forward.

Keywords: Climate change; Low-carbon agriculture development; Agricultural greenhouse gases (GHG); International experiences; China's strategies

随着全球气候风险的增加,气候治理受到的关注度越来越高。为展示中国应对气候变化的决心与责任,2020年9月,中国提出了“努力争取2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和”的国家自主贡献(INDC)目标(简称“双碳”目标)。“双碳”目标的提出,充分展现了中国参与全球气候治理的责任担当,同时也为中国农业低碳发展提供了历史机遇。从现实层面来看,气候变化与农业生产之间的联系紧密,农业(特别是种植业和畜牧业)既是温室气体重要排放源之一,又是受气候变化影响最直接的脆弱行业。因此,推动农业低碳发展,是应对外部气候变化、增强内在农业生态系统韧性的有效路径。当前,在全球共同应对气候变化的时代背景下,中国深度参与全球气候变化治理和国际合作,而总结和借鉴国际农业温室气体减排的经验,既是中国参与气候变化国际合作的生动实践,也是推动中国农业可持续发展的重要途径。

在气候变化议题下,学术界对不同国家和地区农业低碳发展的做法展开了积极探讨。杜志雄和金书秦^[1]选择美国、荷兰和日本等世界农业代表性国家,总结出各国农业向绿色转型过程中的共性特征及经验,提出“十四五”时期及未来中国农业绿色发展的方向。张斌和金书秦^[2]通过对荷兰农业绿色转型政策演进的总结,提出创新循环农业发展模式、加强绿色发展技术支撑、完善农业绿色发展制度体系的发展启示。Lu等^[3]探讨了英国集约化农业对环境的负面影响,发现国家政策的关注点由农业产出政策转型为全面的绿色发展道路。励汀郁和王明利^[4]针对畜牧业低碳发展,梳理了美国、日本及欧洲、亚非拉国家的固碳减排战略和典型模式,分别就牧区和农区提出适合中国畜牧业发展的固碳减排路径。潘友菊等^[5]针对气候智慧型农业的热点和趋势展开分析,发现其研究区域从发达国家向发展中国家拓展,研究内容从关注生物科技技术向社会、经济、政策等多领域协调发展。马健等^[6]通过对日本农业绿色发展相关组织机构创新与法律法规体系演变的梳理,总结日本农业绿色发展现实难题和创新路径,并提出了对中国农业绿色发展的政策启示。

由上述梳理可知,有关国外农业低碳发展的研究,主要是从政策演进、管理模式和技术创新等不同层面,定性展开不同国家的经验总结和分析,但结合定量对比分析的研究较少。本文通过文献梳理和数据收集,比较全球农业温室气体的最新排放情况,凝练国外农业低碳发展的创新做法,以期对推动中国农业低碳发展有所启发。研究的边际贡献包括以下两点:一是在定性层面总结国外农业低碳发展的先进做法,同时在定量层面追踪全球农业温室气体排放的前沿动态,丰富了实践经验总结的研究内容。二是从中国本土农业发展的现实情形出发,结合国外先进做法,构建具有中国特色的经验借鉴思路,拓宽了国际经验借鉴的研究视角。

1 全球应对气候变化的进展与现状

通过梳理全球气候变化议程的进展,聚焦农业部门的温室气体排放,分析以七国集团(G7)为代表的发达经济体和以金砖五国(BRICs)为代表的新兴经济体的农业温室气体减排现状。对比分析中国和其他国家的排放现状,以期为中国温室气体减排目标的制定提供数据支撑。

1.1 气候变化议程进展

自1992年《联合国气候变化框架公约》制定起,国际社会在气候变化方面的议程协定相继出台,同时中国也在积极参与国际气候变化合作,成为应对气候变化的重要参与者和贡献者。1992年以来,全球气候变化议程协定的时间、内容和参与,整理如表1所示。

表 1 全球气候变化议程协定及中国参与

Table 1 Global climate change agenda agreement and china's participation

时间 Year	国际谈判 International negotiation	主要内容 Main contents	中国参与 China's participation
1992	《联合国气候变化框架公约》 “United Nations Framework Convention on Climate Change”	第一个应对全球气候变化的国际公约，确保粮食生产免受威胁 The first international treaty to tackle global climate change to ensure that food production is not threatened	制定《21 世纪议程》《中国可持续发展国家报告》 Formulation of “Agenda 21” and “National Report and National Report on China’s Sustainable Development”
1997	《京都议定书》 “Kyoto Protocol”	对《联合国气候变化框架公约》的补充，要求发达国家从 2005 年起承担减排责任 A supplement to “United Nations Framework Convention on Climate Change”, requiring developed countries to take responsibility for cutting emissions from 2005	坚持“共同但有区别的责任”原则，未作承诺 Adhere to the principle of “common but differentiated responsibilities”, not make a commitment
2009	《哥本哈根协议》 “Copenhagen Accord”	全球平均气温升幅限制在 2℃ 以内 The global average temperature rise should be limited to 2℃	制定《中国应对气候变化国家方案》 Formulation of China’s National Program on Climate Change
2015	《巴黎协定》 “Paris Agreement”	“温控 2℃ 以内”具备法律效力，21 世纪下半叶实现净零排放 “Temperature control within 2℃” has legal effect, and net zero emissions goal will be achieved in the second half of 21th century	2016 年批准中国加入《巴黎气候变化协定》 Ratifying China’s accession to “Paris Agreement on Climate Change” in 2016
2020	联合国大会一般性辩论 General Debate of the United Nations General Assembly	一般性辩论 General Assembly for Climate Change	提出 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的“双碳”目标 Proposal of the goal of peaking carbon by 2030 and achieving carbon neutrality by 2060
2021	《联合国气候变化框架公约》第 26 次缔约方大会(COP26) 26th Conference of the Parties (COP26) to “United Nations Framework Convention on Climate Change”	推动完成《巴黎协定》实施细则后续谈判 Follow-up negotiations on the implementation rules of “Paris Agreement”	提交《中国落实国家自主贡献成效和新目标新举措》《中国本世纪中叶长期温室气体低排放发展战略》 Submission of “China’s Achievements, New Targets and New Measures in Implementing its Intended Nationally Determined Contributions”, and “China’s Mid-Century Long-term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy”

为展示中国应对气候变化的决心，继 2020 年中国提出“双碳”目标后，2021 年 10 月，在《联合国气候变化框架公约》第 26 次缔约方大会(COP26)前 1 个月，中国向秘书处提交了《中国落实国家自主贡献成效和新目标新举措》和《中国本世纪中叶长期温室气体低排放发展战略》，这是中国履行《巴黎协定》的具体举措。2021 年 10 月，生态环境部发表了《中国应对气候变化的政策与行动》白皮书，为中国脚踏实地落实国家自主贡献目标提供强有力支撑。2022 年 11 月，《中国应对气候变化的政策与行动 2022 年度报告》发布，内容包括中国应对气候变化新部署、积极减缓气候变化、主动适应气候变化、完善政策体系和支撑保障、积极参与应对气候变化全球治理 5 个方面，并阐述了中国关于《联合国气候变化框架公约》第 27 次缔约方大会(COP27)的基本立场和主张。

1.2 代表性国家农业温室气体现状

根据《巴黎协定》，几乎每个国家都应对温室气体减排做出承诺，并随时间的推移加强努力。据世界资源研究所数据显示，截至 2020 年，198 个《巴黎协定》缔约方中的 195 方(占全球温室气体排放量 94.3%)提交了国家自主贡献(INDC)目标。国家自主贡献目标包括净零排放时间、温室气体排放总量同比下降比例、单位 GDP 排放强度同比下降比例、非化石能源占一次能源消费比重等指标。其中，净零排放目标得到国际社会的广泛认可，净零排放是包括除了二氧化碳以外的所有温室气体，其排放量与温室气体清除量达到平衡时，被称为净零温室气体排放。截至 2020 年，有 93 个缔约方(代表 97 个国家，占全球温室气体排放量 79.3%)已经传达了净零排放目标，其中在法律文件中制定的有 22 方，政策文件中制定的有 50 方，政治承诺中提出的有 19 方，仍有 104 方未提交净零排放目标。代表性国家温室气体排放和减排承诺时间如表 2 所示。

表 2 代表性国家 2020 年农业温室气体排放量和减排承诺时间

Table 2 Representative countries' agricultural greenhouse gas (GHG) emissions in 2020 and reduction commitment times

类型 Type	组织 Organization	国家 Country	农业温室气体排放总量 Total agricultural GHG emission (Mt)	人均农业温室气体排放量 Agricultural GHG emission per capita (t-cap ⁻¹)	单位 GDP 农业温室气体排放量 Agricultural GHG emission per GDP [t·(10 ⁶ \$) ⁻¹]	是否提交国家自主贡献 Whether to submit the Intended Nationally Determined Contributions	碳中和时间 Carbon neutral year
发达经济体代表 Representatives of developed	七国集团 Group of Seven (G7)	美国 United States	382.01	1.15	18.28	是 Yes	2050
		日本 Japan	31.86	0.17	4.34	是 Yes	2050
		德国 Germany	58.00	0.70	15.08	是 Yes	2045
		英国 United Kingdom	50.03	0.75	18.15	是 Yes	2080

economics	法国 France	71.34	1.06	27.12	是 Yes	2050	
	意大利 Italy	33.24	0.56	17.56	是 Yes	2050	
	加拿大 Canada	63.28	1.66	38.46	是 Yes	2050	
新兴经济体 代表 Representatives of emerging economies	金砖五国 BRICS	中国 China	653.97	0.46	44.52	是 Yes	2060
	印度 India	741.92	0.54	287.11	是 Yes	2070	
	俄罗斯 Russia	104.13	0.72	69.97	是 Yes	2060	
	巴西 Brazil	518.86	2.44	358.19	是 Yes	2060	
	南非 South Africa	28.59	0.48	85.23	是 Yes	2050	

数据来源于世界资源研究所 <https://www.climatewatchdata.org/net-zero-tracker>。Data from World Resources Institute, <https://www.climatewatchdata.org/net-zero-tracker>

农业温室气体排放量以二氧化碳当量(CO₂e)计,核算的温室气体包括甲烷(CH₄)、二氧化碳(CO₂)、含氟化合物(F-Gas)和氧化亚氮(N₂O)。学术界在农业温室气体的定量测算方面,多采用了联合国气候变化政府间专家委员会(IPCC)指南的计算方式^[7-11],即排放因子法。国内农业温室气体核算方法主要参考两种指南,即国际上通行的《2006 IPCC 国家温室气体清单指南 2019 修订版》和中国向《联合国气候变化框架公约》秘书处自主提交的排放清单,国内学者的计算方式以后者居多^[12-17],即将农业温室气体排放划分 5 类碳源:稻田甲烷排放、农田施肥氧化亚氮排放、动物肠道甲烷排放、动物粪便管理甲烷和氧化亚氮排放、秸秆田间燃烧甲烷和氧化亚氮排放。

较之于同为新兴经济体的印度,中国在农业温室气体排放总量和人均排放量上与其相近,但中国的单位 GDP 排放量远低于印度;较之于同作为超级人口大国的美国,尽管总量减排远落后于美国,但中国的人均排放量明显低于美国。这为中国温室气体减排目标的制定提供了有力的数据支撑:中国必须充分考虑自身作为人口大国和发展中国家的现实,科学合理地展开农业温室气体减排目标规划。如表 2 所示,在新兴经济体代表性国家中,中国的农业部门温室气体的排放总量居高,但人均排放量和单位 GDP 排放量最低,中国在平衡农业温室气体减排和农业经济发展方面表现较好。1)和印度相比,2020 年中国在农业部门温室气体的排放总量上相近,在人均排放量上也相近;但二者在单位 GDP 排放量上差距较大,印度和中国分别为 278.11 t·(10⁶\$)⁻¹和 44.52 t·(10⁶\$)⁻¹,金砖五国中印度居最高、中国居最低。同样面临总量减排压力的印度和中国,中国的农业经济发展更快,因此单位农业经济产值的温室气体排放量也更低,在兼顾农业经济效益的同时印度的减排压力更大。2)和美国相比,中国的农业温室气体排放量远高于美国,2020 年中国和美国的排放总量分别为 653.97 Mt 和 382.01 Mt;中国的人均排放量远低于美国,分别为 0.46 t·cap.⁻¹和 1.15 t·cap.⁻¹;中国的单位 GDP 排放量远高于美国,分别为 44.52 t·(10⁶\$)⁻¹和 18.28 t·(10⁶\$)⁻¹。中国作为超级人口大国,相较于美国,在人均排放量方面,面临的减排压力相对较小,但是在考虑农业经济效益的情形下,减排仍面临较大的考验。美国在低碳技术创新和能源技术创新方面位于全球领先行列,因此农业领域的低碳经济取得了快速发展。

发达经济体的碳中和时间基本上早于新兴经济体。根据世界资源研究所数据显示,以七国集团为代表的发达经济体,均对碳中和时间做出了承诺,美国、日本、英国、法国、意大利、加拿大的碳中和时间在 2050 年前,德国在更早的 2045 年;以金砖五国为代表的新兴经济体中,中国、俄罗斯、巴西的碳中和时间为 2060 年前,南非在更早的 2050 年,印度在更晚的 2070 年。

2 主要国家农业低碳发展的实践经验

美国的大农场主模式、欧洲的田园农业、日本的小农精耕细作是全球典型的现代农业模式,在农业低碳发展方面取得了有效的实践进展和创新经验。由此,选取美国、日本、欧盟等国家和地区为研究对象,分别梳理其在农业低碳发展中的主要做法、最新行动和取得成效,并整理在表 3 中。

2.1 美国的实践经验

2.1.1 基本概况

美国作为促进低碳经济的重要倡议者和领导者之一,在清洁能源发展的实践中处于世界前列,是全球节能减排技术的重要基地和最大的清洁能源输出国。2009 年美国通过的《美国清洁能源和安全法案》,以限制碳排放量为核心内容,首次设定了温室气体中长期减排的量化目标,其中包括农业和林业碳抵消的相关内容。美国也是建立全球第一个具有法律约束力气候交易所的国家,在芝加哥气候交易平台,农户可以通过低碳生产模式获得项目资金资助和碳汇经济收益。

2.1.2 主要做法

一是农业绿色低碳生产的法律法规制定方面。美国在《国家环境政策法》的基础上,出台了《能源安全法》《公共水源标准》《土壤保护和国内配额法》等具体的法律法规。在对低碳生产的法律法规制定上,化

学品规范和减量是其最主要的内容。1947年,美国出台的《联邦杀虫剂、杀菌剂和杀鼠剂法》(简称《农药法》),在保障农业投入品的科学使用和农业污染防治中发挥了重要作用。此后,为加强农药管理,相继颁布了《农药登记和分类程序》《农产品农药残留量条例》等法规。

二是低碳农业的财政税收支持和减排补贴方面。美国通过财税政策和补贴政策积极推动农业低碳生产。在《2008农业法案》中,美国提出将财政资金用于温室气体减排技术开发,并提供财政专项用于农业温室气体减排的实际行动。除了财政补贴等激励政策外,还包括环境规制政策,一方面美国对农民的减排行为提供补贴和奖励,鼓励农民进行低碳生产决策行为;另一方面通过农业碳排放限额制度和征收碳税等手段,促进温室效应的外部成本内部化。此外,美国还实行了低碳生产的农产品价格补贴政策,并针对休耕、少耕后产量降低和市场价格走低导致的收入损失,提供目标价格定向收购以减缓农业生产者的后顾之忧^[18]。美国在实行碳税政策方面,对化石燃料的使用采用间接定价,在征收成本时避免使用“税收”和“碳排放”等术语,而是倾向于战略性地改变标签^[19]。

三是清洁能源的开发及推广方面。美国注重节能减排技术和清洁能源技术的引进与研发,在清洁能源发展的实践中处于世界前列。美国为引导新能源的使用,出台了包括《2005年能源政策法案》《2007年能源独立与安全法案》《美国清洁能源与安全法案》等一系列法案。其中,《美国清洁能源与安全法案》包括了农业和林业相关减排抵消在内的5个内容,提出了明确的温室气体减排目标和实施机制,强调了生物质能源的利用。美国通过不断完善的能源政策,积极引导农村新能源使用,并给予了财税、金融方面的政策补贴。

四是农业碳减排和碳汇的市场交易机制方面。2003年成立的芝加哥气候交易所,是全球第一个具有法律约束力的减排和交易平台。在支持农业碳减排方面,交易所项目资金用于支持农业甲烷减排和土壤碳减排,如种草地保户和免耕农业;同时,作为补充手段,美国鼓励农户作为碳抵消额提供者参与芝加哥碳交易市场^[20],有效推动了农户参加碳汇项目的积极性,增加了农户经济收益。此外,美国对碳汇的多元开发和商业化运作也展开了积极探索。

五是农业固碳减排的科技创新方面。为减少机械化生产和农田翻耕带来的温室效应,美国积极开展了生物技术免耕模式、退耕还林还草休耕模式的研究应用。在农业碳汇生产项目上,强化森林碳汇、土壤碳汇等政策激励,并探索地质碳储存的技术模式。在碳汇技术的运作上,加强人力资本开发与投资开发,推动碳捕获和储存技术的商业化运作。在畜禽温室气体减排上,重视源头减排和循环利用,通过饲料研发、改良牧草品种等技术创新手段,减少温室气体排放^[4]。

2.1.3 最新行动

美国在实行低碳农业相关行动方面取得了新的进展。美国在2015年提交的INDC目标制定中,对温室气体减排做出了明确的目标承诺。此后,又制定了一系列2050年实现净零排放的路线规划,并加大了对农业系统碳减排的关注。2020年出台的《应对气候危机的行动计划:建立清洁能源经济和健康、有弹性、公正的美国》中,将“投资美国农业以解决气候问题”作为重要行动之一,提出加大财政和技术援助、教育和研究方面的投资,以鼓励农业生产者实施气候智能型农业实践,促进农业碳减排、土壤固碳、可再生能源利用等。此外,美国进一步加快了农业科技应用于应对气候变化的战略研究,在2021年出台《美国农业创新战略》中,明确了未来10~30年农业科技创新用于减缓温室效应的解决方案,以促进农业的绿色低碳发展。

2.1.4 取得的成效

由世界资源研究所公布的数据,可推算美国农业温室气体减排取得的成效。截至2020年,美国的农业温室气体排放总量,同比1990年上升7.21%,人均农业温室气体排放量同比下降19.58%,其下降的原因在于美国人口同比增长速度较快(32.8%),同时在减缓温室效应方面取得了快速有效的进展。

通过上述梳理,美国农业低碳发展的主要做法及成效可概括如下:美国通过对《美国清洁能源与安全法案》等清洁能源政策的不断完善,极大地推动了农业生产领域清洁能源的应用;以芝加哥碳交易市场为代表的自愿碳市场是美国发展低碳农业的重要举措,积极带动了农户碳减排和碳抵消的相关行为;同时,美国农业固碳减排方面探索出先进的技术模式,包括生物技术免耕、地质碳储存、饲料研发和牧草品种改良等技术模式创新和相关的商业化运作模式创新,为促进农业的绿色低碳发展做出了重要贡献。

2.2 欧盟的实践经验

2.2.1 基本概况

欧盟始终坚持将《联合国气候变化框架公约》作为主体推动气候治理,当前欧盟的低碳农业政策主要以《欧盟共同农业政策》为中心,英国[英国于2020年1月31日正式脱欧,在文中所探讨的绝大部分时期(1990—2019年)英国仍属于欧盟成员国,因此暂未将英国视作欧盟成员国之外的考察对象]、法国、德国在积极践行欧盟相关农业政策的同时,各自就低碳农业相关法律法规进行了补充和完善。欧盟各个国家为推

动低碳农业发展展开了长远规划，对农业温室气体设定了可量化的减排目标^[21]。欧盟倡导实施基于自然的解决方案来实现低碳发展目标^[22]。

2.2.2 主要做法

一是农业低碳生产的法律法规体系方面。英国在 2008 年颁布的《气候变化法》中，首次以法律形式明确温室气体减排目标。2009 年，法国通过了以低碳为核心的新《环境保护法草案》，对气候、农业等领域做出具体部署。为发展低碳农业，德国通过财政支持发展工业原料作物种植，在 2009 年，德国颁布《二氧化碳捕捉和封存法》，将法律法规具体到作物种植领域。在低碳农业生产环节的法规方面，法国于 2009 年出台了《农业手册》，对农药、肥料等使用提出了严格限制，并对市场上的农药进行规范化管理。英国和德国分别就养殖环节中的粪便管理和化肥农药管理做出明确规定。

二是财税支持和生态保护补偿层面。早在 1992 年，欧盟首次在《欧盟共同农业政策》中提出了低碳农业的相关生态保护策略，对退耕还林的农户给予政策补偿。2003 年，《欧盟共同农业政策》中对农场管理及土地管理提出相应的要求，以金融信贷等农业环境经济政策支持低碳农业发展^[21]。英国在《清洁空气战略 2018》中提出，将公共资金用于治理畜禽粪污的设施和设备，并采取统一行动治理粪污氨排放。法国政府于 2008 年颁布了《生态农业 2012 规划》，在生态基金、技术扶持、免税待遇等方面做出了规划，用以大力发展生态农业。

三是管理创新和技术创新方面。荷兰、德国等畜牧业发达的国家，依托适度规模经营和家庭农场，发展农牧结合循环养殖的模式，以减少温室气体排放^[4]。为改善土壤质量和减缓温室效应，欧盟各个国家采取积极的保护性耕作方式。德国充分发展现代科技，将遥感技术、生物技术应用用于农业生产，并投入资金用于低碳技术研发和生物质能源的基础建设。英国也通过加大技术研发投资，推动废弃物的循环利用和清洁能源发展。此外，欧盟排放交易制度对限制二氧化碳排放产生了有效影响，年均碳排放减少量占总量上限的 2%~4%，但对低碳技术投资和低碳创新的影响尚不明确^[23]。

2.2.3 最新行动

欧盟在实行低碳农业相关行动方面的进展较快。2020 年，欧盟委员会提出的《欧洲气候法》法案，拟将 2050 年实现碳中和的目标，变成一项具有法律约束力的目标，在法案中设立了气候目标，包括上调 2030 年的温室气体减排目标等多项修订^[24]，此后，欧盟初步建立了相对完善的低碳发展法规政策体系和发展路线。2019 年发布的《欧证绿色新政》中，制定了碳中和愿景下的长期减排规划，其中包括粮食领域的长期碳减排行动政策。2020 年欧盟发布的《欧洲绿色协议》，将发展低碳农业作为核心发展战略之一，其中的“从农田到餐桌战略”旨在通过农业绿色转型增强粮食系统韧性，并相继出台各项行动计划，以法规制定、资金引导等措施，促进农药可持续利用、发展有机农业和实施低碳农业计划。在 2021 年的《欧盟碳农业实施计划》中，欧盟规划了碳农业支付计划，以激励农业领域的管理者低碳生产和实行基于自然的脱碳方式，包括降低农用化学品投入、扩大有机耕作面积、农田修复等方式。

2.2.4 取得的成效

由世界资源研究所公布的数据，可推算欧盟农业温室气体减排取得的成效。截至 2020 年，欧盟(包含英国在内的 27 个成员国)的农业温室气体排放总量，同比 1990 年下降 24.75%，人均农业温室气体排放量同比下降 29.03%。英国的人均排放量同比 1990 年下降 34.21%，法国同比下降 29.33%，德国同比下降 36.94%，相对而言德国下降比例较大。欧盟为应对气候变化制定了科学合理的减排目标和路线图，并对农业低碳发展的相关法律法规不断进行补充和完善，为减缓农业温室气体提供了有效的制度保障。此外，欧盟各国通过广泛采用有机农业、生态农业、生物技术等模式，以基于自然的解决方案有力推动了农业低碳发展。

2.3 日本的实践经验

2.3.1 基本概况

日本的地理位置特殊，温室效应带来的气候波动，会严重影响日本的农业、渔业等传统产业的发展。日本将低碳农业建设与低碳社会建设联系起来，提倡以社会变革推动农业生产领域的低碳转型，2008 年，日本发布的《面向低碳社会的十二大行动》制定了低碳发展的行动计划，此后在《绿色经济与社会变革》草案中，提出了实现低碳社会的中长期方针。日本非常重视粮食自给率和国产率，并积极研发相关的稳产技术和低碳技术。

2.3.2 主要做法

一是可再生能源发展方面。日本将可再生能源发展作为降碳的重要措施，注重发展低热、风能、生物能和太阳能，其中以太阳能的开发和利用为核心。日本在 2013 年出台《农村地区可再生能源法》，鼓励可再生能源的发展。2005 年颁布的《农业环境规范》，要求农户采取最低限度的环境保护措施，并鼓励农民

采用新能源和新农业生产技术。日本政府通过发展环保型农户，对采用新能源和亲环境农业技术的农户，给予税收、贷款全方面的政策支持。

二是低碳发展的管理创新和技术创新方面。日本通过碳评估的管理模式，对农业生产中的能源消耗和碳排放进行有效监督和控制^[25]。日本在农产品的碳评估方面出台的相关法规包括《日本 TSQ0010 产品碳足迹评估与标签通则》等，2009 年针对企业开始试行碳标签制度，2011 年开始对农产品实施农产品碳标签制度，日本对本国和进口农产品要求自带环保标签，有效推动了本国农场主自主减排的行为。为推动有机农业的规范化管理，日本对有机食品实行严格的标准控制和认证制度。此外，日本围绕智慧农业和绿色食品目标，通过数字化、智能化技术等创新模式助力低碳模式形成。

三是粮食生产保障与气候适应方面。《粮食、农业及农村基本法》是日本农业政策的基础，用以保障粮食稳定生产和农业可持续发展。实现粮食自给有助于减少粮食在运输过程中的碳排放，为保障粮食自给率，日本加强农地资源保护，并建立了适宜的粮食储备机制；另一方面，通过改良品种等技术研发，充分挖掘农业碳减排的空间，进一步提升粮食稳产能力。此外，日本对生产和消费各个环节采取数字技术和自动化等创新技术，来降低粮食损失和浪费带来的碳足迹^[22]。

2.3.3 最新行动

日本在最新的低碳农业相关行动中加大了对粮食系统的重视。2020 年日本推出的《绿色增长战略》，确定了日本到 2050 年实现碳中和的目标及其进度表，战略将“食品、农林和水产产业”作为重点发展任务之一，发展目标包括打造智慧农业、林业和渔业，积极推进农田固碳技术等。2021 年，日本修订并推出新版《农林水产省全球变暖对策计划》和《农林水产省气候变化适应计划》，提高农林渔业领域的全球变暖对策目标，开发和推广应用适应气候变化的稳产技术和品种，以增强粮食生产应对气候变化的能力和稳产保供的能力。

2.3.4 取得的成效

由世界资源研究所公布的数据，可推算日本农业温室气体减排取得的成效。截至 2020 年，日本的农业温室气体排放总量，同比 1990 年下降 25.47%，人均农业温室气体排放量同比下降 29.17%。日本将低碳农业建设与低碳社会建设联系起来，以社会变革推动农业生产领域的低碳转型，通过清洁能源和低碳生产技术发展，有效激励了低碳技术的广泛应用和低碳模式的扩大。在此过程中，日本通过制定一系列粮食系统低碳发展的法规，为粮食稳定生产及应对气候变化提供了有效的制度保障。

2.4 其他国家经验

除美国、欧盟和日本等发达经济体外，针对俄罗斯和印度两个新兴经济体，也对其农业低碳发展的做法和成效进行总结。

俄罗斯农业低碳发展的主要做法。俄罗斯的耕地面积仅占国土面积的 7.4%，农业部门占经济的比重较低，工业发达。为应对气候变化，俄罗斯提出的 2020 年 INDC 中，制定了到 2030 年将温室气体排放量限制在 1990 年水平的 70% 的目标。根据中国碳核算数据库(CEADs)统计报告显示，俄罗斯已着手推进可再生能源的使用，特别是用于发电。根据当前的政策，预计到 2030 年，可再生能源(不包含核能和水能)将占最终能源消费总量的近 5%，为实现这一目标，需要到 2030 年在累计投资 3000 亿美元。从俄罗斯的农业温室气体减排成效来看，根据世界资源研究所公布的数据，截至 2020 年，俄罗斯的农业温室气体排放总量，同比 1990 年下降 56.79%，人均农业温室气体排放量同比下降 55.83%。

印度农业低碳发展的主要做法。印度的产业结构主要依赖服务业和农业，工业占比仅不到三分之一。作为世界第三大能源消费国和二氧化碳排放国，印度政府高度重视气候变化对经济和社会发展造成的影响。根据 CEADs 数据库的统计显示，印度在绿色能源的发展上取得了一定成果，该国的可再生能源装机容量已经突破 100 GW(1 GW=10⁶ kW)。目前印度正执行全球最大的清洁能源计划，旨在 2022 年可再生能源装机容量达到 175 GW。从印度的农业温室气体减排成效来看，根据世界资源研究所公布的数据，截至 2020 年，印度的农业温室气体排放总量，同比 1990 年上升 23.71%，人均农业温室气体排放量同比下降 16.92%。

在新兴经济体农业低碳发展研究方面，Zhang 和 Wang^[26]从供给和需求两个视角，系统梳理了全球 144 个国家在减少居民家庭碳排放方面的政策，结果发现，低收入国家特别是发展中国家较少采取需求侧政策措施，主要依靠目标和法规等供给侧政策，并提出从供给侧政策工具逐步转变为需求侧政策来促进碳减排和金融市场的政策建议。当前高收入国家碳减排多采用需求侧政策，包括碳税、上网电价政策和可交易的可再生能源证书等。供给侧政策工具在经济欠发达时期对推动可持续发展的作用更大，而随着经济发展水平的提高，可持续发展将对需求侧政策工具的依赖度越来越高。Lewis 等^[27]认为在借鉴低碳技术开发和应用的经验时，应该对低碳技术的多样性和交互性展开更多研究，同时应该明确当地的现实背景，特别是要关注新型经济体和发展中国家。Mourad 等^[28]评估了农业公民科学项目(Citizen Science in Agriculture)对瑞典

农业可持续发展的作用，农业公民科学项目是指科学家、专家和农民等共同参与的一系列科学实践活动，研究印证了农民长期能力建设以及科研工作者和农业生产者保持对话对于推动农业可持续发展的重要性，并提出在发展中国家和低收入地区引进这类项目具有一定的必要性，特别是那些依赖农业、面临环境退化、气候和水资源压力的地区。

表 3 主要国家农业低碳发展做法及成效

Table 3 Practices and effects of agricultural low-carbon development in some countries

国家 Country	主要的激励和监管措施 Major incentive and regulatory measures	取得成效 Results achieved	农业温室气体变化 Agricultural greenhouse gas change (%)	
			总量 Gross amount	人均 Per capita
美国 USA	法律法规完善、财政税收支持和减排补贴、清洁能源开发及推广、碳排放权和碳汇市场交易 Perfecting laws and regulations, financial and tax support and emission reduction subsidies, development and promotion of clean energy, and carbon emission rights and carbon sink market transactions	极大地推动了农业生产领域清洁能源的应用，自愿碳市场积极带动了农户碳减排和碳抵消的相关行为，探索出生物技术免耕、地质碳储存等先进技术模式 It has greatly promoted the application of clean energy in agricultural production. Voluntary carbon market has actively promoted farmers' carbon emission reduction and carbon offset. The advanced technical modes such as biotechnology, no-tillage, and geological carbon storage have been explored.	+7.21	-19.58
欧盟 EU	法律法规完善、财税支持和生态保护补偿、管理创新和技术创新 Perfecting laws and regulations, fiscal and tax support and ecological protection compensation, and management innovation and technological innovation	制定了科学合理的减排目标和路线图，广泛采用了有机农业、生态农业、生物技术应用等模式，以基于自然的解决方案有力推动了农业低碳发展 Scientific and reasonable emission reduction targets and road maps have been formulated. Organic agriculture, ecological agriculture and biotechnology application are widely adopted. The low-carbon development of agriculture has been strongly promoted by nature-based solutions.	-24.75	-29.03
日本 Japan	可再生能源推广、管理创新和技术创新、粮食生产保障与气候适应 Promotion of renewable energy, management innovation and technological innovation, and guarantee of grain production and its climate adaptation	提高了农林渔业领域全球变暖对策目标，开发和推广应用适应气候变化的稳产技术和品种，增强了粮食生产应对气候变化和稳产保供的能力 The target of global warming countermeasures in the fields of agriculture, forestry and fisheries has been raised. Stable yield technologies and varieties adapted to climate change have been developed and popularized. The ability of grain production to cope with climate change, to stabilize production and supply has been enhanced	-25.47	-29.17

3 农业低碳发展的中国策略

结合中国农业发展的国情展开本土思考，以“粮食安全”和“以人民为中心”的基本理念为指导方向，构建农业低碳发展经验借鉴的框架思路，并据此提出对中国的政策启示，包括法律法规、财税支持、管理和技术创新、能源转型升级、碳市场机制 5 个方面。

3.1 坚持中国特色——“粮食安全”和“以人民为中心”的基本理念

由数据分析可知，较之于同为新兴经济体的印度，2020 年中国在农业温室气体排放总量和人均排放量上与其相近，但中国的单位 GDP 排放量远低于印度；较之于同作为超级人口大国的美国，中国在排放总量方面远高于美国，但中国的人均排放量明显低于美国。这为中国温室气体减排目标的制定提供了有力的数据支撑：中国必须充分考虑自身作为人口大国和发展中国家的现实，科学合理地展开农业温室气体减排目标规划。低碳目标规划要注重理念先行，结合中国“大国小农”“人多地少”的基本国情，必须深刻认识到，农业低碳发展的底线是粮食安全，出发点和落脚点是人民利益，因此，在理念层面要坚持“粮食安全”的底线思维和“以人民为中心”的基本原则。

第一，守住粮食安全底线，科学把握“双碳”战略机遇和粮食生产经营风险。粮食安全是国家安全的重要组成部分，粮食安全底线思维，是农业低碳发展的首要理念。一方面，“双碳”战略为粮食生产带来了新的发展机遇，生态资源要素保护特别是水土资源保护是农业低碳发展的重要基础，耕地和水资源更是粮食安全的根本。从根本上确保农业生产对优质耕地、优质灌溉用水的需求，是保障粮食数量安全和质量安全切实有效的出路^[29]。另一方面，在我国粮食供求长期处于紧平衡状态的背景下，农业领域的碳减排目标为粮食生产经营和供给带来更高的不确定性，农业领域的碳减排具有长期性、系统性和差异性，短期的运动式减碳会对粮食生产经营和供应产生风险，特别是粮食主产功能区对风险的敏感度会更高，必须合理制定碳减排目标，“减排”政策应与各省的农业产业结构和经济发展相匹配^[30]。统筹协调碳减排和粮食安全双重目标，探索建立国家粮食安全与“双碳”工作相结合的考核指标，分区域施策，从经济、社会和生态等多重角度综合评价农业发展成效^[31]。

第二，坚持以人民为中心的原则，正确处理好农业绿色低碳转型中的基本关系。一是数量目标与质量目标的关系，不仅要保障农业生产的数量，还要重视农业生产的清洁化和绿色化，以“健康的水土”为核心引领农产品绿色生产，满足人民群众日益增长的对优质安全农产品的需求^[29]。二是生态目标与经济目标的关系，在推进农业绿色转型过程中，统筹协调国家生态目标、基层政府经济目标和农业生产者经济目标，充分考虑农业生产者经济效益和人民生产生活基本需求。三是责任与权利的关系，人民既是农业碳减排的责任主体又是受益主体，在“大国小农”的现实背景下，提升小农户的组织化程度，促进农业服务规模经营，能够充分释放小农户承担碳减排责任的潜力；同时，通过构建农业碳普惠机制，让农户感受到碳普惠，才能将农业低碳发展落到实处^[32]。四是现有政策与“双碳”目标的关系，农业绿色发展政策与农业减排固碳目标具有双向协同的关系^[33]；在“双碳”目标下，农业绿色发展的内涵在生产体系、经营体系、产业体系和政策体系方面进一步外延^[34]；在“十四五”农业农村发展规划中增加碳约束指标，使其成为以低碳带动农业绿色转型的量化考核指标^[35]。

3.2 借鉴先进做法——对中国农业低碳发展的启示

中国农业低碳发展的预期成效旨在保障粮食供给、减少温室效应和实现生态价值。参与全球气候变化治理，落实中国碳达峰碳中和重大战略决策，首先要科学谋划农业低碳发展的政策目标。构建中国农业的低碳政策目标，必须守住粮食安全底线、坚持以人民为中心的原则。因此，中国农业低碳发展的预期成效，一是要保障粮食供给，在粮食安全底线思维下科学制定农业碳减排规划和目标；二是要实现生态价值，平衡好生态目标和经济目标的关系，在低碳发展过程中充分考虑农业生产者经济效益和人民生产生活基本需求；三是要减缓温室效应，这是推进农业低碳发展的直接目标。农业低碳发展经验借鉴的思路如图 1 所示，以美国、欧盟、日本等发达经济体和俄罗斯等新兴经济体作为国际经验的借鉴对象，总结其在法律法规保障、政策资金扶持、市场机制构建、科技研发创新、能源转型目标制定和粮食减损防治等方面的具体做法，提出对中国农业低碳发展的不同启发，包括法律法规、财税支持、管理与技术创新、能源转型升级、碳市场机制 5 个方面，最终达到保障粮食供给、减少温室效应和实现生态价值 3 方面的预期成效。

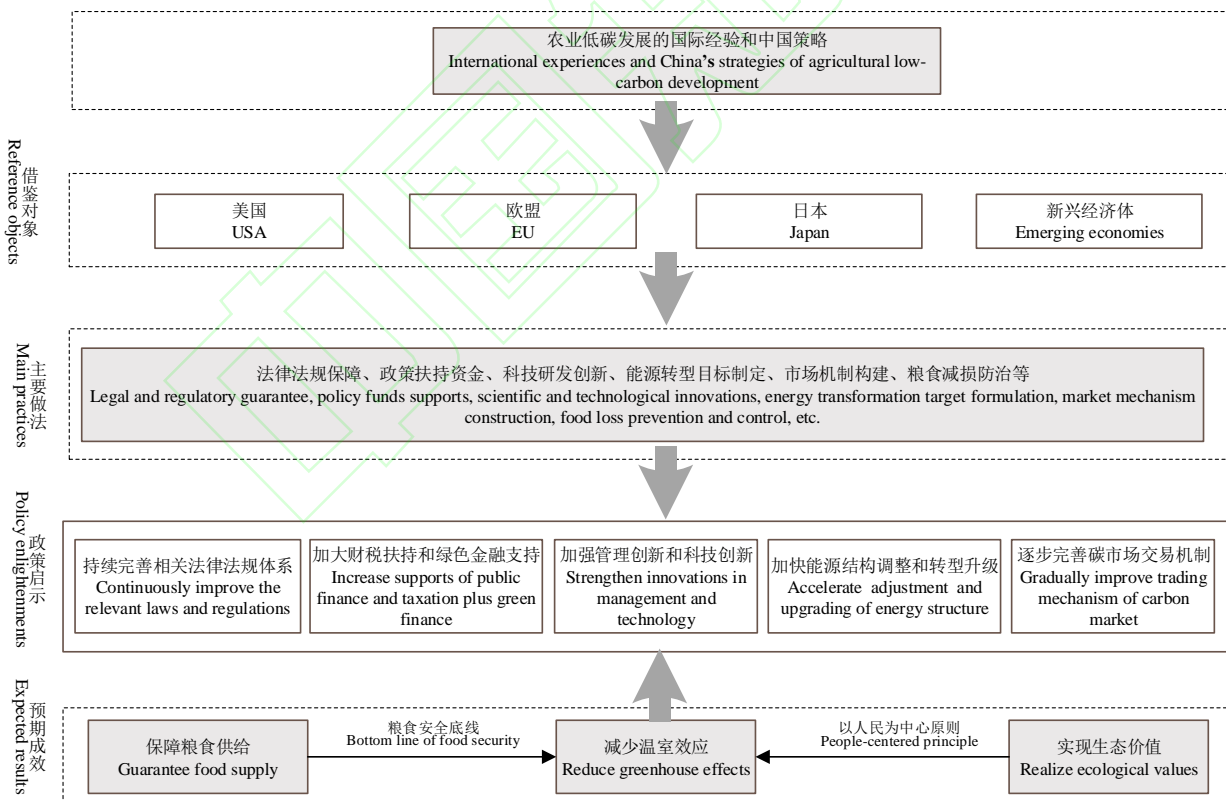


图 1 农业低碳发展经验借鉴的框架思路

Fig. 1 Framework for experiences reference of agricultural low-carbon development

结合中国特色的发展理念，同时借鉴国外主要国家农业低碳发展的经验，提出对中国农业低碳发展的政策启示，包括持续完善相关法律法规体系、加大财税扶持和绿色金融支持、加强管理创新和科技创新、加快能源结构调整和转型升级和逐步完善碳交易市场机制 5 个方面。

3.2.1 持续完善相关法律法规体系

一是研究出台低碳农业发展的政策法规，提升农业温室气体治理能力。目前中国出台了《“十四五”全国农业绿色发展规划》《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》《2030年前碳达峰行动方案》等战略性规划，以及《农业绿色发展技术导则(2018—2030年)》《农药限制使用管理规定》《畜禽规模养殖污染防治条例》等规范性法规，还需加快研究出台有关低碳农业发展的政策法规，统筹《国家应对气候变化法》《可再生能源法》《环境保护法》等法规，为低碳农业发展提供法律保障。二是构建农业低碳发展管理制度，鼓励地方政府积极出台相关条例法规。建立国家统一管理和地方部门分工合作相结合的农业低碳发展管理制度和工作机制，提升农业温室气体治理体系和治理能力现代化。鼓励地方政府积极出台低碳农业发展相关条例法规，创新低碳试点建设工作，积极探索低碳发展路径。

3.2.2 加大财税扶持和绿色金融支持

一是加强地方低碳发展的财税支持，加大低碳农业的生态补偿力度。美国、欧盟和日本均对低碳农业的发展给予充分的财政资金支持和生态补偿。加强财政支农补贴对低碳农业生产的倾向性，加大对低碳生产的基础设施投入，同时，加强税收减免政策对低碳农业的支持。完善农业生态补偿制度，加大生态保护和修复的农业生态补偿力度，保障农业低碳生产的生态补偿，特别是耕地保护的生态补偿。加强农业废弃物资源化利用和处理的补贴力度，探索农业碳汇生态补偿机制。二是加强绿色金融的资金支持，创新农业低碳发展的投融资方式。以绿色信贷等绿色金融的资金支持方式，满足低碳农业企业和生产者的融资需求，助力农业绿色低碳转型。创新低碳发展投融资方式，加强以绿色低碳为导向的农业企业投融资引导机制，营造有利于低碳项目发展的政策环境，引导民间投资和外资进入低碳农业项目领域。

3.2.3 加强管理创新和科技创新

一是创新低碳农业产业化发展模式，加强低碳技术和稳产技术的应用。美国、欧盟和日本将管理创新和技术创新作为推动农业低碳转型的重要举措。加强农业经营管理方式创新，充分发挥土地集约化生产和规模化生产，充分依托家庭农场等规模生产经营主体，推动种养结合和农牧循环发展模式。积极探索和创新低碳农业产业发展模式，建立社会多元主体协同参与的治理机制，构建“种养殖户+企业+科研院所”“农业合作社+企业+科研院所+政府”等多种合作模式，建立与之配套的农户-集体-企业等多方利益共享机制。二是推动农业低碳技术创新和引入，加大稳产技术和气候适应性技术的推广。结合农业低碳技术的自主研发和国外引入两种方式，加快国内农业低碳技术的推广应用，充分发挥社会化服务组织、农业推广机构、企业等技术推广服务作用。加大农业稳产技术和气候适应性技术的推广，提高农业适应气候变化的能力，降低粮食生产减损的风险，有效保障粮食生产供给。

3.2.4 加快能源结构调整和转型升级

一是制定能源中长期发展规划，加快农业领域能源转型发展。美国等发达经济体对能源发展均做出了中长期规划，尤其重视可再生能源比重的提高。俄罗斯和印度作为新兴经济体，也对能源转型做出了明确的中长期规划。中国农业领域以化石能源消费为主，能源消费强度高，污染物减排压力大。为更好地推动能源转型与碳中和顶层设计，必须加快制定中国能源中长期发展战略及规划工作。通过积极引导煤炭、化石能源消费的减少，加快推进高耗能高污染能源结构转型。加强能源结构优化，推广太阳能、风能、水能等可再生能源使用，深入研究推动天然气等新能源的发展与应用，推动化石能源消费转型。二是加大可再生能源的技术开发和利用，促进低碳技术示范推广。欧盟、美国和日本均大力发展可再生能源技术的开发和利用，降低传统能源带来的温室气体排放。加大可再生能源的技术开发和利用，积极探索碳捕集技术和地质储存技术，注重农业废弃物资源化利用技术的集成与创新。构建完整的低碳农业技术体系，加强低碳技术研发、示范和推广应用。

3.2.5 逐步完善碳交易市场机制

一是加快农产品碳标志制度建立，推动农业生态价值实现。中国目前已推行农产品“三品一标”标志制度，借鉴“三品一标”农产品认证和推广经验，加快中国农产品碳标识制度，鼓励农产品生产领域自愿碳标识认证，从而推动农业生态价值实现，提高农业生产者减排固碳行为带来的直接经济效益。实行农业碳汇保险是农业碳汇价值实现的重要路径之一，积极探索出台农业碳汇保险、林业碳汇保险等制度，提高农业生产者绿色低碳转型的风险抵抗力。二是完善碳排放权交易体系建设，逐步发展碳汇市场交易。加快建设全国性碳交易市场，健全完善碳定价制度。在配套管理方面，进一步完善碳交易注册登记制度、碳交易平台建设、碳交易标准制度等。积极开展农林碳汇资产开发，逐步发展碳汇交易市场。

参考文献 References

- [1] 杜志雄, 金书秦. 从国际经验看中国农业绿色发展[J]. 世界农业, 2021(2): 4-9, 18
DU Z X, JIN S Q. Viewing the green development of agriculture in China from international experience[J]. World Agriculture, 2021(2): 4-9, 18
- [2] 张斌, 金书秦. 荷兰农业绿色转型经验与政策启示[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(5): 1-7
ZHANG B, JIN S Q. Green transition and policy enlightenment of agricultural development in the Netherlands[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(5): 1-7
- [3] LU Y L, NORSE D, POWLSON D. Agriculture green development in China and the UK: common objectives and converging policy pathways[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2020, 7(1): 98
- [4] 励汀郁, 王明利. 畜牧业助力“双碳”目标实现路径研究——基于不同国家的经验比较与启示[J]. 世界农业, 2023(1): 5-16
LI T Y, WANG M L. Research on the realization path of carbon peaking and carbon neutrality goals assisted by animal husbandry — based on the experience comparison and enlightenment of different countries[J]. World Agriculture, 2023(1): 5-16
- [5] 潘友菊, 徐玉婷, 於冉, 等. 气候智慧型农业研究: 热点、趋势和展望[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(1): 136-148
PAN Y J, XU Y T, YU R, et al. Climate-smart agriculture research: hotspots, trends, and prospects[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(1): 136-148
- [6] 马健, 虞昊, 周佳. 日本农业绿色发展的路径、成效与政策启示[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(1): 149-162
MA J, YU H, ZHOU J. Sustainable agricultural development from a green perspective in Japan: paths, results, and policy inspirations[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(1): 149-162
- [7] CHEN W D, PENG Y F, YU G Y. The influencing factors and spillover effects of interprovincial agricultural carbon emissions in China[J]. PLoS One, 2020, 15(11): e0240800
- [8] 王若梅, 马海良, 王锦. 基于水-土要素匹配视角的农业碳排放时空分异及影响因素——以长江经济带为例[J]. 资源科学, 2019, 41(8): 1450-1461
WANG R M, MA H L, WANG J. Spatial and temporal differences of agricultural carbon emissions and impact factors of the Yangtze River Economic Belt based on a water-land perspective[J]. Resources Science, 2019, 41(8): 1450-1461
- [9] 刘丽娜, 王春好, 袁子薇, 等. 区域农业碳排放LMDI分解和脱钩效应分析[J]. 统计与决策, 2019, 35(23): 95-99
LIU L N, WANG C Y, YUAN Z W, et al. Analysis of LMDI decomposition and decoupling effect of regional agricultural carbon emissions[J]. Statistics & Decision, 2019, 35(23): 95-99
- [10] 陈银娥, 陈薇. 农业机械化、产业升级与农业碳排放关系研究——基于动态面板数据模型的经验分析[J]. 农业技术经济, 2018(5): 122-133
CHEN Y E, CHEN W. A study on the relationship among agricultural mechanization, industrial upgrading and agricultural carbon emission — the empirical research based on dynamic panel data model[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2018(5): 122-133
- [11] 田云, 林子娟. 长江经济带农业碳排放与经济增长的时空耦合关系[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(1): 208-218
TIAN Y, LIN Z J. Spatio-temporal coupling relationship between agricultural carbon emissions and economic growth in the Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(1): 208-218
- [12] 田云, 张俊飏, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2097-2105
TIAN Y, ZHANG J B, LI B. Agricultural carbon emissions in China: calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects[J]. Resources Science, 2012, 34(11): 2097-2105
- [13] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. 中国人口 资源与环境, 2012, 22(7): 21-27
MIN J S, HU H. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(7): 21-27
- [14] 田云. 中国低碳农业发展: 生产效率、空间差异与影响因素研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015
TIAN Y. The development of China's low-carbon agriculture: Production efficiency, spatial differences and influencing[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015
- [15] 夏四友, 赵媛, 许昕, 等. 近20年来中国农业碳排放强度区域差异、时空格局及动态演化[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3): 596-608
XIA S Y, ZHAO Y, XU X, et al. Regional inequality, spatial-temporal pattern and dynamic evolution of carbon emission intensity from agriculture in China in the period of 1997-2016[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(3): 596-608

- [16] 程琳琳. 中国农业碳生产率时空分异: 机理与实证[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018
CHENG L L. Spatial and temporal differentiation of China's agricultural carbon productivity: Mechanism and demonstration[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018
- [17] 彭立群, 张强, 贺克斌. 基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单[J]. 环境科学研究, 2016, 29(8): 1109–1118
PENG L Q, ZHANG Q, HE K B. Emissions inventory of atmospheric pollutants from open burning of crop residues in China based on a national questionnaire[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(8): 1109–1118
- [18] 李玉梅. 美国低碳农业发展及其对中国的借鉴[J]. 世界农业, 2016(1): 51–53, 58
LI Y M. Development of low-carbon agriculture in the United States and its reference to China[J]. *World Agriculture*, 2016(1): 51–53, 58
- [19] RABE B G, BORICK C P. Carbon taxation and policy labeling: experience from American states and Canadian provinces[J]. *Review of Policy Research*, 2012, 29(3): 358–382
- [20] 朱丽娟, 刘青. 气候变化背景下美国发展低碳农业的经验借鉴[J]. 世界农业, 2012(8): 4, 1–3
ZHU L J, LIU Q. Experience of developing low-carbon agriculture in the United States under the background of climate change[J]. *World Agriculture*, 2012(8): 4, 1–3
- [21] 杨筠桦. 欧洲低碳农业发展政策的实践经验及对中国的启示[J]. 世界农业, 2018(2): 67–72
YANG J H. Practical experience of European low-carbon agricultural development policy and its enlightenment to China[J]. *World Agriculture*, 2018(2): 67–72
- [22] 谢华玲, 迟培娟, 杨艳萍. 双碳战略背景下主要发达经济体低碳农业行动分析[J]. 世界科技研究与发展, 2022, 44(5): 605–617
XIE H L, CHI P J, YANG Y P. Analysis of low-carbon agriculture action in major developed economies under the background of carbon peaking and carbon neutrality strategies[J]. *World Sci-Tech R&D*, 2022, 44(5): 605–617
- [23] LAING T, SATO M, GRUBB M, et al. The effects and side-effects of the EU emissions trading scheme[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2014, 5(4): 509–519
- [24] 生态环境部对外合作与交流中心. 碳达峰与碳中和国际经验研究[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2021
Foreign Environmental Cooperation Center, Ministry of Ecology and Environment. Peak Carbon Dioxide Emissions and International Experience of Carbon Neutralization[M]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2021
- [25] 刘星辰, 杨振山. 从传统农业到低碳农业——国外相关政策分析及启示[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 674–680
LIU X C, YANG Z S. From traditional agriculture to low-carbon agriculture: policies and implications in developed countries[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(6): 674–680
- [26] ZHANG X L, WANG Y. How to reduce household carbon emissions: A review of experience and policy design considerations[J]. *Energy Policy*, 2017, 102: 116–124
- [27] LEWIS J I, NEMET G F. Assessing learning in low carbon technologies: toward a more comprehensive approach[J]. *WIREs Climate Change*, 2021, 12(5): e730
- [28] MOURAD K A, HOSSEINI S H, AVERY H. The role of citizen science in sustainable agriculture[J]. *Sustainability*, 2020, 12(24): 10375
- [29] 于法稳. 新时代农业绿色发展动因、核心及对策研究[J]. 中国农村经济, 2018(5): 19–34
YU F W. An analysis of the reasons, core and countermeasures of agricultural green development in the new era[J]. *Chinese Rural Economy*, 2018(5): 19–34
- [30] 贺青, 张俊飏. 粮食主产区政策对农业碳排放的影响[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2023(4): 47–55
HE Q, ZHANG J B. The impacts of policies in main grain-producing areas on agricultural carbon emissions[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2023(4): 47–55
- [31] 张秀青. “双碳”目标下中国农业稳产保供路径探析[J]. 价格理论与实践, 2023(4): 1–5
ZHANG X Q. Analysis on the path of stabilizing production and supply of agriculture in China under the “Dual Carbon” goal [J]. *Price: Theory & Practice*, 2023(4): 1–5
- [32] 张俊飏, 何可. “双碳”目标下的农业低碳发展研究: 现状、误区与前瞻[J]. 农业经济问题, 2022, 43(9): 35–46
ZHANG J B, HE K. Current situation, misunderstandings and prospects of agricultural low-carbon development under the targets of carbon peak and carbon neutrality[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2022, 43(9): 35–46
- [33] 徐湘博, 李静, 薛颖昊, 等. 减排固碳目标纳入农业绿色发展政策的协同机制[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2091–2101
XU X B, LI J, XUE Y H, et al. Synergistic mechanism to incorporate the targets of greenhouse gas emission reduction and carbon sequestration into agricultural green development policies under a carbon-neutral background[J]. *Journal of Agro-Environment*

Science, 2022, 41(10): 2091–2101

- [34] 张康洁, 于法稳. “双碳”目标下农业绿色发展研究: 进展与展望[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(2): 214–225
ZHANG K J, YU F W. Research on green agricultural development under the dual-carbon goal: review and perspectives[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(2): 214–225
- [35] 金书秦, 林煜, 牛坤玉. 以低碳带动农业绿色转型: 中国农业碳排放特征及其减排路径[J]. 改革, 2021(5): 29–37
JIN S Q, LIN Y, NIU K Y. Driving green transformation of agriculture with low carbon: characteristics of agricultural carbon emissions and its emission reduction path in China[J]. Reform, 2021(5): 29–37

