DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2025.01.010

我国农田碳排放现状及固碳减排技术分析

邵美红[1], 吴芊颖[2], 赵福建[3], 王瑾[2], 何勇[2,4], 唐荣年[5], MOSTAFA Rastgou[2], 李文佑嘉[2], 蒋茜静[2*]

(1. 建德市农业技术推广中心,浙江杭州,311600; 2. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院,浙江杭州,310058; 3. 浙江家乐蜜园艺科技有限公司,浙江上虞,312369; 4. 农业农村部光谱检测重点实验室,浙江杭州,310058; 5. 海南大学机电工程学院,海南海口,570228)

摘要:为应对全球气候变化,减少温室气体排放,助力我国"碳达峰,碳中和"目标如期实现,从农业角度综述了我国农田碳排放现状和固碳减排的实现路径。本研究综合分析了我国各部门碳排放总量、农业排放源组成及各省份间的区域排放差异,结果表明:我国温室气体排放变化可分为平稳增长、快速增长、显著减缓3个阶段,农业领域的温室气体来源主要为家畜肠道发酵、水稻生产释放的CH_4气体和农田土壤微生物分解释放的N_2O气体。这些排放源具有显著的区域和时间差异,具体受制于气候条件、种植结构及管理模式的影响。研究指出,改变现有农业管理模式是实现农业减排的关键,优化管理措施在减缓农业碳排放的同时,还能进一步增强农田碳汇功能。基于我国农田碳排放领域的关键词及未来研究方向进行聚类分析,本研究归纳了当前研究的热点领域与知识空白,指出在水田、旱地等不同类型农用地中,探索具有区域适应性的农艺管理措施对于提升固碳减排效能的重要意义。结合高频农艺措施对增产减排效果的分析结果,本研究从水肥管理优化、种植结构调整、秸秆还田与农业废弃物利用、低碳农业装备等方面系统阐述了农田固碳减排措施的实际可行性。本研究为我国农田固碳减排的理论研究与实践应用提供了系统的科学依据,并对相关节能减排技术的推广提出了指导性建议。通过聚焦未来农业绿色发展路径,本研究为我国农业领域实现"双碳"目标提供了参考思路与方向。

关键词:农田;温室气体;碳排放;甲烷;氧化亚氮;碳汇

中图分类号:F323.22 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2025)01-0099-12

邵美红, 吴芊颖, 赵福建, 王瑾, 何勇, 唐荣年, MOSTAFA Rastgou, 李文佑嘉, 蒋茜静. 我国农田碳排放现状及固碳减排技术分析[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(1): 99-110

SHAO Meihong, WU Qianying, ZHAO Fujian, WANG Jin, HE Yong, TANG Rongnian, MOSTAFA Rastgou, LI Wenyoujia, JIANG Qianjing. A review of current GHG emissions in Chinese farmland and the carbon sequestration and emission reduction technologies [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(1): 99-110

0 引言

农业生态系统在全球碳循环中扮演着重要的碳库角色,然而,农业生产过程中排放的二氧化碳(CO_2)、氧化亚氮(N_2O)和甲烷(CH_4)气体是3大主要温室气体(greenhouse gas, GHG),构成了农业生态系统的广义碳排放,一定程度上削弱了农田生态系统的碳汇作用。政府间气候变化专业委员会(IPCC)第六次评估报告表明,全球范围内农业排放CH_4气体占人类活动造成的CH_4气体排放总量的40%,N_2O气体占60%,而CH_4和N_2O气体的百年尺度温室效应分别是CO_2的27倍和273倍[1],农业领域碳排放的影响不容小觑。

在"碳达峰、碳中和"背景下,中国农业生产具有"增产"和"增绿"的双重压力。一方面,中国的耕地面积占全球9%,需供应全球近20%人口的粮食需求,在有限的耕地面积下提高作物产能、保证供给需求是我国农业贯彻始终的核心目标;另一方面,农业活动加剧温室气体的排放,而温室效应导致的气候变暖又影响作物产量。在此背景下,党的二十大报告明确提出,要"推进美丽中国建设",强调推动绿色发展,促进人与自然和谐共生的重要性,特别是深化农业绿色发展,推广可持续农业生产方式,提升农业固碳减排的科技支撑能力。报告为农业领域实现"双碳"目标提供了明确指引,凸显了加强农业固碳减排技术研发的紧迫性与必

收稿日期:2024-05-30 修回日期:2024-06-24

基金项目:国家自然科学基金面上项目(32271980);浙江省"尖兵"研发攻关项目(2022C02014);浙江省农业重大技术协同推广项目(2023ZDXT02)

第一作者:邵美红,男,1966年生,浙江建德人,研究员;研究方向为水稻生态高效栽培机理研究与农业推广等。E-mail: hzjdsmh@163.com

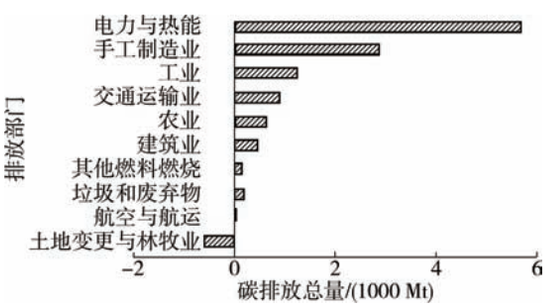
*通信作者:蒋茜静,女,1991年生,浙江台州人,博士,特聘副研究员,博导;研究方向为农业生态碳氮循环模型模拟等。E-mail: jqj713@zju.edu.cn

要性。

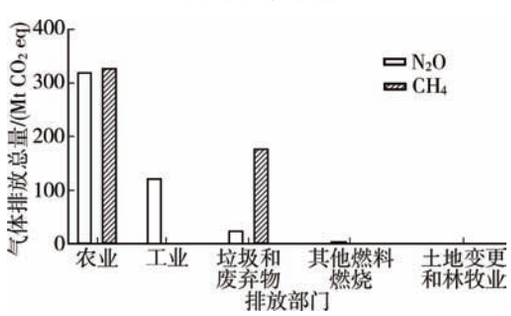
目前,我国有关“双碳”领域的技术研究多集中于能源制造业,农业领域仍缺乏全面的减排指导方案。国外专家学者的研究时间相对较早,提出了许多农业固碳减排措施,但由于不同国家的气候环境、发展政策等因素存在差异,相关措施的普适性较低。本研究结合我国国情,明确了相关农艺管理措施的增产减排潜力,并从水肥管理、种植结构、农业废弃物利用等多方面评估农田种植过程固碳减排的可行性,为我国农田固碳减排技术研究提供思路与方向。

1 我国农田温室气体排放现状及特点

中国温室气体排放的整体趋势分为平稳增长阶段(1990—2000)、快速增长阶段(2001—2012)、显著减缓阶段(2013至今)3个阶段,虽然温室气体总排放量得到了有效控制,即CO_2气体排放快速增长的局面基本扭转,但是作为温室气体重要组成的CH_4和N_2O气体却在2005年后快速增长。农业作为温室气体主要排放部门之一,其排放量仅次于能源、手工业、工业及交通运输部门,如图1(a)所示。CH_4气体和N_2O气体主要在农业活动中产生,其排放量分别约占我国全部生产活动的28%和65%,如图1(b)所示。但由于农业温室气体排放源广而分散,农业往往被认为是最难深度减排的领域,目前国家尚未出台具体的减排制度。



(a) 碳排放总量



(b) CH_4、N_2O气体排放情况

图1 2020年我国碳排放及温室气体排放总量分布

Figure 1 Distribution of total carbon emissions and greenhouse gas emissions in China in 2020

在农业活动领域中,温室气体排放源主要来自农用地、动物肠道发酵、动物粪便管理、水稻种植、秸秆田间燃烧等,各种农业活动的碳排放构成如图2所示。其中,CH_4气体主要来自家畜消化过程(结肠发酵)、动物粪便处理过程以及水稻生产过程,而N_2O气体主要由微生物的硝化和反硝化作用产生,其排放量分别占农业活动温室气体总排放量的56.8%和43.2%。因此,减少农业活动的碳排放、增加农田系统的固碳作用是中国农业未来发展的重要目标。

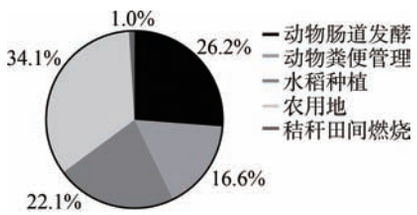


图2 中国农业温室气体排放源占比

Figure 2 Percentage of agricultural GHG emission sources in China

数据来源:中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报。

1.1 温室气体排放的区域化特点

从中国空间结构来看,农业领域温室气体排放具有“排放源分散、区域化”特点,其排放构成很大程度取决于农业生产结构[2]。由于中国地域广阔,各省地区间地形、气候及资源禀赋差异大,导致农业模式侧重不同,呈现出“东种西牧,北麦南稻”的总体格局。另外,不同地域由于种植养殖类别的不同导致温室气体贡献比例存在差异,以养殖业为例,我国西北(内蒙古、西藏)地区以反刍动物放牧为主,畜类CH_4气体排放比重大,而中原(河北、山东)地区以鸡鸭饲养为主,禽类N_2O气体排放比重大[3]。因此,开展农业减排技术研究、制定相关政策等均需要因地制宜结合当地农业结构,提升减排效率。

1.2 农业种植模式与碳排放

目前,中国农业种植模式具有“高产量、高投入”的特点[4]。由于中国农户知识水平不高,传统耕作模式观念难以改变,农户往往采用分散化种植、均一化管理的农作模式,同时为了追求农作物的高产而过量施加化肥农药,这直接导致农业活动产生的碳排放增加。据统计,中国每年用于农业的化肥施用量巨大,导致大量N_2O气体排放。因此,提高农民对现代农业的认知,引入更科学的施肥技术和综合管理措施,鼓励发展集约化、机械化、精细化的农业管理模式,形成“高产量、低投入”的现代化农业,是实现农业活动减排的关键。

此外,传统农业管理方式如秸秆燃烧也显著增加了CH_4和CO_2气体排放。尽管国家已出台多项政策禁止秸秆焚烧,但实际执行中仍存在诸多挑战。同时秸

秆还田的推广也因南方病虫害的频发导致水稻减产而难以广泛开展，因而研发秸秆资源化利用技术、秸秆原位腐解还田产品等是目前的研究重点。

2　农田减排技术和实现途径

2.1　农田固碳减排技术发展趋势

农业发展的关键指标是产量，因此农用地减排的总体原则是在保证产量的基础上尽可能减少与之相关的农业活动所产生的温室气体排放。为了解目前农田碳排放领域的研究进展，本研究借助可视化计量分析软件 CiteSpace，使用关键词共现图谱分析的方式对该领域的研究主题、热点进行探究。在文献检索过程中，以 WOS（Web of Science）为数据来源，检索主题为“carbon emission”及“cropland”，检索时间范围为 2010 年 1 月 1 日—2023 年 9 月 30 日，最终共获得 1 210 篇有效文献并利用 CiteSpace 软件对其进行关键词共现计量分析，结果如图 3 所示。图中包含网络节点 175 个，各节点之间的连线共计 684 条。其中，在高频关键词及中介中心性数据中，较为领先的有排放（emission）、气候变化（climate change）、温室气体排放（greenhouse gas emission）、管理（management）、土壤有机碳（soil organic carbon）等，此外，通过对关键词进行聚类分析，形成了 7 个聚类标签，如碳固持（carbon sequestration）、土壤呼吸作用（soil respiration）、土地使用（land use）等，这些均代表农田碳排放领域的热点话题及未来研究方向，具有一定的指向性。

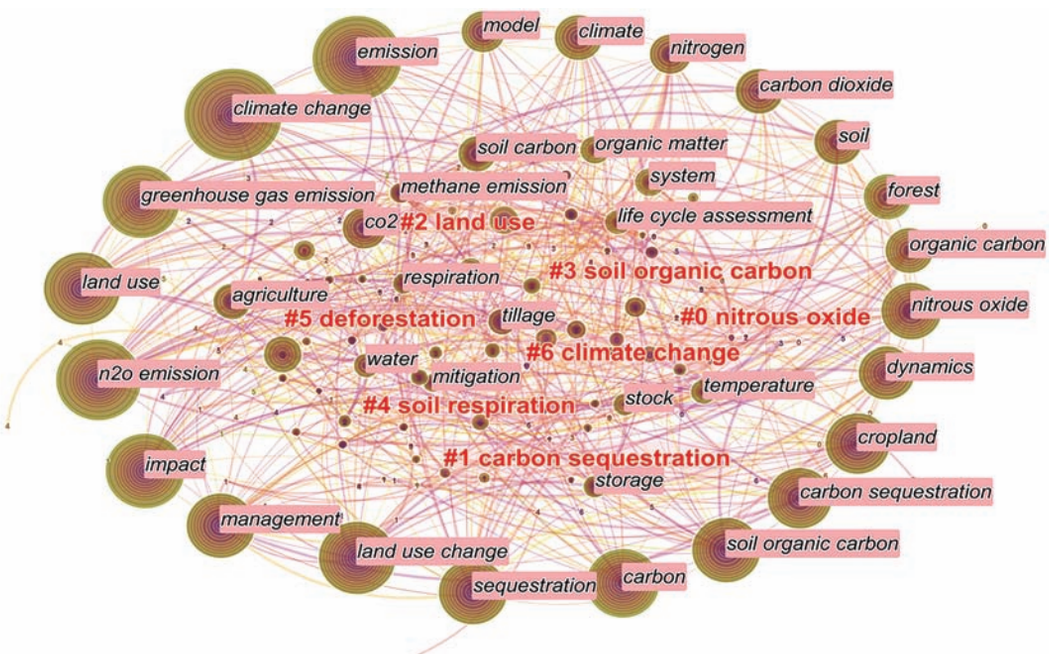


图 3　农田碳排放领域关键词共现及聚类分析

Figure 3　Keywords co-occurrence and cluster analysis in farmland carbon emission field

另外，国内外目前关于农田碳减排技术的相关研究日益增多。本文以 Web of Science（WOS）数据库和中国知网（CNKI）数据库为数据来源，通过将“碳排放＋作物”分别和“灌溉”“施肥”“耕作”“品种”“秸秆还田”等进行关键词组合检索的方式，对国内外近 30 年内（1996—2023 年）与农田碳减排农艺措施相关的文献进行了数量统计，其中排除了会议、资讯等文献类型，统计结果如图 4 所示。文献的数量时间分布结果表明，国内外学者对相关农艺措施增产减排潜力的关注度呈逐年加强趋势，其中，施肥管理和水分管理的增势最为显著。由于农作物产量增减是多种因素相互作用的结果，为进一步探究各种措施增产减排的潜力，本章节列举了不同类型农用地中可能影响作物温室气体排放及产量的多种现代农艺措施并对其进行分析和总结。

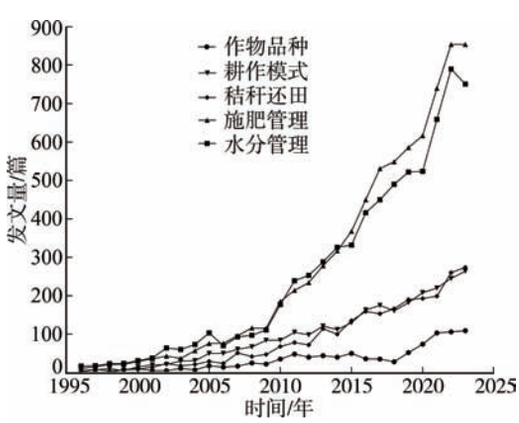


图 4　国内外农田碳减排技术相关文献数量时间分布

Figure 4　The quantity and time distribution of domestic and foreign papers on farmland carbon emission reduction technology

2.2 旱地减排技术与措施

2.2.1 育种选择

作物杂交产生的籽粒存在产量遗传增益的现象[5],通过逐年大田试验和不断育种筛选的过程,可以得到具有高产、耐高密度的作物品种[6]。在其他农业活动不变的条件下,播种优质品种的籽粒能够提高土地的利用率,从而提升单位种植面积作物产量,直接降低了农业温室气体排放强度。

2.2.2 种植制度

1)适宜种植模式。中国旱田作物的种植模式分为连作、轮作和套作3类。传统连作使土壤受到频繁的机械扰动,土壤结构受损进而暴露更多的土壤团聚体,加速土壤有机碳的矿化分解而降低有机碳含量;轮作,是现代农业最常用的种植模式,即在同一田地交替种植不同作物,该方式能有效解决由于长时间连作引发的土壤退化等农田生态系统问题[7],有助于降低作物病虫害发生率[8],提升作物产量;套作,作为现代农业另一可持续发展的耕种策略,在提升产量的同时进一步优化了作物耕种的时空配置。相比于西方"低投入—低产出"的套作模式,中国广泛应用的"高投入—高产出"套作模式具有更大的净增产效应[9]。

2)优化耕作频率。耕作形式对田地生产力、温室气体排放强度具有直接、迅速且持久的影响。与传统耕作形式相比,最小耕作(minimum tillage)与免耕(no-till)能够提升田地土壤团聚性和通透性,有利于田地有机质与水分的保持[10],直接减少了田地N_2O气体的排放[11],同时该方式通过提升田地能源利用率、减少农资的投入,间接减少了农业活动的碳排放。

3)覆盖种植。覆盖种植(cover cropping)通过在田地表面施加覆盖物(有机物、秸秆、草本植物等)的方式提高田地土壤温度和持水力[8]、减少土壤有机碳的损失[12]以及氨气的挥发[13],从而减少温室气体排放。除此之外,一些草本类覆盖物还能够直接吸收土壤中氮素,为后续耕作的经济作物提供营养,这些作为覆盖物的"绿色化肥"对于推动土壤碳循环有重要价值[14]。

2.2.3 氮肥管理

1)氮肥类型选择。通过对氮肥类型的选择和氮肥施加量、施加时间及位置的调整,能够提高氮肥利用率,从而减少营养氮素流失间接导致的N_2O气体排放。在氮肥选择方面,使用缓释氮肥或长效氮肥能够延后N_2O气体的排放高峰,从而减少N_2O气体排放量[15];在氮肥施用方面,相比于传统经验施肥,及时调整氮肥施加量与施用时间,能够同时实现减少环境负担和提高作物产量的双重效益。例如,根据作物不同生长阶段对营养的需求变化,采用分批次变量施肥的方式,可以在有效避免氮素流失的同时显著提高作物产量[16]。

2)测土配方施肥。测土配方施肥是在充分考虑土壤、肥料和作物之间关系的基础之上,建立的1种精准施肥策略。该方法的提出基于合理施肥,并结合了中国土壤条件与农业生产实际[17],具有节能减排双重效益,在提升农民净收益的同时,可降低我国传统施肥方法下约30%的N_2O气体排放量[16]。

3)抑制硝化作用。硝化抑制剂是一类阻碍硝化反应进程的化合物,通过抑制氧化NH_4^+细菌的活性从而减缓硝化反应的速率,减少N_2O气体生成[18]。农药硝化抑制剂包括双氰胺(DCD)、3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)、硝苯菊酯、碳化钙等,其中DCD和DMPP被公认为是高效的硝化抑制剂[19],具有实际推广价值。研究表明,在施肥过程中添加一定量的硝化抑制剂在提高作物对氮素利用率的同时,能有效减少39%~48%的N_2O气体排放[20]。

2.2.4 水分管理

由于水资源匮乏,我国现代农田水分管理以节水灌溉形式逐步取代传统大水漫灌,提升了水资源利用率。滴灌[21]、膜下畦灌/微喷[22]等节水灌溉技术虽然提升了作物产量,但由于灌溉频率增加,在一定程度上促进了农田温室气体的排放[23-24]。中国北方地区由于常年降水稀少,旱田水分缺失严重,而选择在作物快速生长时期进行补充灌溉,能够在降低灌溉频率的基础上保证作物产量[25],由于该方法能够使土壤水分维持在较低水平,反硝化作用受到阻碍,从而减少了N_2O气体的生成[26]。除此之外,水肥一体化耦合式灌溉技术也逐步发展成熟,该技术将施肥与灌溉系统有机结合,具有节约资源、增产增收等综合效益[27],在未来减排技术推广中将具更大的优势和潜力。

2.3 水田减排技术与措施

作为三大粮食作物之一,我国水稻年产量约占全球的30%[28]。水稻种植过程中会产生大量CH_4和N_2O气体[29],温室气体排放量占中国农业活动的22%。因此,稻田减排在实现中国农业"碳达峰、碳中和"过程中具有重要作用。与旱地作物相似,水稻的品种[30-31]、水肥管理方式[32-33]、耕作形式[34]、秸秆生物炭[35]、生态种养模式[36]等均会影响水稻的产量以及温室气体的排放。

2.3.1 品种选择

传统理论认为水稻光合作用产物是诱导CH_4气体

排放的主要因素[37]，随着水稻种植面积的扩大，CH_4气体排放量将快速增长。水稻根系能主动吸收稻田水中溶解的CH_4并从植株中排放，根系大小和活力决定了水稻对稻田CH_4气体的吸收速率；种植根系活力强、产量潜力大的高产水稻品种，对稻田CH_4气体减排是有效的[38]。不同水稻品种在CH_4气体排放量上存在显著差异[30]，低渗透率的水稻品种具有更好的减排潜力[39]。近年，中国农业科学院对33个水稻品种进行了研究，筛选出的高产减排水稻品种，在实现年增产10%的同时减少了我国农业7.1%的CH_4气体排放[31]。上海农业生物基因中心选育的节水抗旱稻兼具水稻和旱稻特性，研究表明，旱管种植节水抗旱稻在水分亏缺情况下具有较高的产量和较低的温室气体排放强度[40]，有效解决南方稻区相对缺水、土壤贫瘠的丘陵山区农田种粮难题。

2.3.2　水肥管理

水肥管理是影响稻田碳排放的重要因素，水分管理决定了稻田碳排放强度的季节性变化，而氮肥管理决定了稻田碳排放峰值的幅度变化[41]。水分通过改变稻田Eh值、产甲烷菌活性、CH_4气体扩散速率，影响稻田CH_4气体的排放[42]，而通过改变NH_4^+-N和NO_3^--N浓度的分布，影响稻田N_2O气体的排放[43]。相较于持续淹水，目前中国主要采用的间歇灌溉模式（前期淹水—中期烤田—后期干湿交替），极大地减少了CH_4气体排放[33]，但由于稻田土壤间CH_4与N_2O气体排放存在消长（trade-off）关系，中期烤田在减少CH_4气体排放的同时加剧了N_2O气体的排放[44]。

由于稻田产生的N_2O气体大部分来自排水后的土壤落干期和复水期[45]，而由于氮肥的施加为N_2O气体的产生提供了丰富氮源，有学者研究表明可以通过施氮期持续淹水灌溉和其余时期间歇式交替灌溉的方式，同时减少稻田CH_4和N_2O的排放[46]。尽管提高氮肥施用量能够显著增加作物产量，但是高氮肥施用量会增加土壤硝态氮（NO_3-N）残留，进而可能导致N_2O排放增加[47]，同时氮肥施用改变了土壤C-N循环模式，从而影响稻田CH_4气体排放。氮肥对稻田CH_4气体排放的影响程度取决于氮肥施用形态，与无机氮相比有机氮更能显著刺激CH_4[48]。尽管已有大量文献报道利用水肥管理措施调控稻田CH_4和N_2O气体的相关研究，但如何在保证水稻产量的前提下，精准进行水肥管理从而降低实际生产中的稻田温室气体排放仍是目前研究的热点之一。

2.3.3　耕作形式

耕作形式上，常见的直播与移栽方式均在不同程度上降低了稻田温室气体排放。直播可有效减少CH_4气体排放[49]，而移栽在提高水稻产量的同时可减少N_2O气体的排放[34]，陶冶[50]通过综合分析两者的全球变暖潜力，认为直播比移栽对稻田减排的贡献程度更高。中国水稻研究所胡国辉[51]进一步研究认为，机插水稻可改变中国南北稻区温室气体排放特征[52]，南北稻区CH_4气体减排幅度分别达43.5%和52.4%，南方稻区N_2O减排量显著减少47.9%。

2.3.4　秸秆碳化利用

秸秆焚烧不仅产生大量CO_2气体，而且严重污染空气。秸秆直接还田若方式不当，有可能增加稻田CH_4气体排放[53]。对秸秆离田做碳化处理，制作成生物炭或碳基有机肥后再还田利用，土壤质地得到改善的同时可以减缓因直接还田造成的CH_4和N_2O气体的排放[54-55]。安徽农业大学韩自强团队[56]研究认为，秸秆生物炭配施尿素能显著降低稻田N_2O和CH_4气体累积排放通量。除了农作物秸秆，动物粪肥、藻类等也可作炭化原料合成生物炭，这些生物炭也可以作为燃料替代化石能源，其燃烧产生的CO_2全部来自植物光合作用，被认为是“零排放”的绿色能源[57]。国外对生物炭研究应用较早，一些地区已有规模化生物炭产业，对当地农业碳汇具有重要作用[58]。

2.3.5　稻田生态种养

稻鱼共生、稻虾共育、稻田养鸭等稻渔综合种养模式因适应性广、效益高，受农民欢迎在我国南方稻区发展迅速。稻田共生动物日常活动会改变土壤特征特性，进而影响稻田温室气体排放。研究表明，稻田养鸭土壤CH_4气体排放可减少12.8%～19.4%[59]；稻鱼共生模式CH_4气体可减排6.4%～15%[60]，稻田和小龙虾共育模式CH_4气体累积排放量可降低29.02%～41.19%，还能显著降低N_2O气体排放[61]。稻鱼、稻鸭、稻虾等生态种养模式可作为水稻绿色生产技术推广应用。

除此之外，不少研究表明降低稻田水生杂草的比例[62]、采用硫酸盐肥料对稻田土壤进行改良[63]、减少秸秆还田[64]等措施均能够在一定程度上减少稻田生态系统的碳排放。

3　绿色农业

3.1　绿色有机肥

绿色有机肥简称绿肥（green manure），是以绿色植物体为原料制成的一种营养全面的生物肥料。近年来，不少农田选择在冬季休耕时期种植绿肥，这不仅是增辟肥源以代替部分无机化肥的有效方法，也对改良土壤具有重要作用。紫云英（*Astragalus sinicus L*）是1种常见的绿肥，因具有良好的固氮作用，能够

减少土壤氮素的流失,已应用于我国南方稻田区来代替传统化肥[65]。此外,利用紫云英翻压还田还可以增加土壤养分,提高土壤活性有机碳氮含量,有利于水稻产量的提高[66-67]。但是,若要充分发挥绿肥的作用,必须做到合理施用。有研究表明,紫云英在固氮的同时,也可能导致稻田 CH_4 和 N_2O 气体排放增加[68]。因此,绿肥品种的选择及其实践效果的评估仍需进一步研究。

3.2 高效农业结构

为应对人口增长和能源、水土资源匮乏的问题,提高资源利用率,减轻农用地压力是未来农业可持续发展的核心。垂直农业(vertical farming)与光伏农业(photovoltaic agriculture)作为新型现代农业结构,从空间利用角度为高效种植、养殖,节能环保提供了解决方案。

3.2.1 垂直农业

垂直农业是通过环境控制实现在城市建筑外部种植作物的城市农业结构。垂直结构采用人工控制的种植模式,无须对作物喷洒农药化肥,加之运输距离缩短,极大地减少了农资投入和与之相关活动产生的碳排放。同时,该结构提高了空间利用率和作物生产效率,极大地减少了对农业生态环境的破坏。国外垂直农业发展较早,许多设计方案已被成功投入应用[69],例如位于美国纽约世界最大的垂直农场 AeroFarms,已和当地多家超市建立了合作关系[70]。

3.2.2 光伏农业

光伏发电是以太阳光作为能源输入,以电力作为能量输出的绿色供能系统。将光伏发电与农业活动相结合的应用方式多样,如光伏温室、光伏养殖、光伏废水净化、光伏抽水等。不同类型的光伏供能系统具有不同的碳减排潜力,与化石燃料供能系统相比,光伏供能可将农业碳排放量显著降低 10~53 个数量级不等[71]。随着光伏建筑一体化与农业的结合,打破了光伏发电依赖大面积土地的瓶颈,在农业用地设施上直接开展分布式的光伏建设,节能环保的同时提高了土地利用率[72]。尽管光伏农业仍处于探索发展阶段,成熟的运作体系与相关政策尚未建立,但在未来“碳中和”目标的引导下,光伏一体化农业将具有更广阔发展空间[73-74]。

3.3 农业装备碳排放情况

农业装备在现代农业生产中扮演着重要角色,然而,其使用过程中产生的碳排放也是不容忽视的。传统农机设备,如拖拉机、收割机等,主要依靠化石燃料(如柴油)提供动力,燃烧过程中会排放大量的二氧化碳(CO_2)和其他温室气体。这些排放不仅对环境造成影响,也在一定程度上影响了农业的可持续发展。据统计,农机设备的碳排放量在农业总碳排放量中占比较大,尤其是在大型农场和机械化程度较高的地区,这一比例更为显著[75]。

3.3.1 新能源农机的应用

为了减少农业装备的碳排放,新能源农机的研发和应用成为了该领域重要的发展方向。电动农机和混合动力农机作为新能源农机的代表,逐渐在市场上崭露头角。电动农机通过电池供电,可以显著减少使用过程中 CO_2 的排放。而混合动力农机则采用了传统燃油和电力两种动力来源,在保证性能的前提下,大大降低了碳排放[76]。此外,太阳能农机的研发也在进行中,这类农机通过太阳能电池板获取能源,完全避免了化石燃料的使用和排放[77]。

3.3.2 农业装备国家标准及其影响

为了进一步推动农业装备碳排放的优化,国家对农机排放标准进行了严格规定,国Ⅳ标准便是其中之一。国Ⅳ标准规定了农机在使用过程中必须达到的排放限值,包括一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)和氮氧化物(NO_X)等有害物质的排放。该标准的执行,对农机制造企业提出了更高的技术要求,促使其研发和生产更加环保、高效的农机设备。同时,政府还提供了一系列政策支持,如补贴、税收优惠等,以鼓励农民和农业企业使用符合国Ⅳ标准的农机设备。这些措施不仅有效减少了农业生产中的碳排放,也为实现农业的绿色可持续发展奠定了基础。

3.3.3 技术和政策推动碳排放的优化

除了新能源农机和排放标准,智能化和精准农业技术的应用也在不断优化农业装备的碳排放。通过物联网、大数据和人工智能等技术,农机可以实现更精准的作业,从而减少不必要的能源消耗和碳排放。例如,精准播种和施肥技术能够根据土壤和作物的实际需求进行操作,避免了过量施肥和浪费能源。同时,政策层面也在不断出台相关法规和激励措施,如碳交易机制、绿色金融支持等,以推动农业装备领域的低碳转型。

4 结论与展望

农业生态系统在全球碳循环中扮演着重要的碳库角色,现代农业既是气候变化的贡献者,也是气候变暖的受影响者。与工业能源部门不同,农业活动产生的温室气体主要为 CH_4 和 N_2O 气体,对气候变化具有显著影响。我国农业温室气体总排放量占比不高,但由于农业排放源分散,地区差异显著,减排措施普适性低,因此具有“增产”和“增绿”的双重压力。

本研究系统地探讨了不同农艺管理措施对农田固碳减排的影响，强调了综合管理的重要性。研究表明，合理的育种选择、耕作形式和优化的水肥管理均具有显著的农田减排潜力。例如，保护性耕作不仅能减少土壤侵蚀，还能显著减少碳排放，而精准农业技术能够提高肥料和水资源的利用效率，减少N_2O气体排放。然而，单一措施往往难以兼顾多种温室气体的减排需求。例如，水稻淹溉可能减少N_2O气体排放，但却增加CH_4气体排放。因此，综合考虑多种农艺管理措施的减排效应是未来研究的重要方向。

为实现农田的固碳减排，本研究建议在先进技术推广、区域化管理、政策支持与激励制度以及农民培训教育上加大力度。推广保护性耕作、精准农业、生物炭施用等技术，能够显著提高农田的固碳能力和减排效果；根据不同地区的气候、土壤和作物特点，因地制宜地制定和实施减排措施，提高减排政策的有效性；政府应加大对低碳农业技术的研发和推广力度，通过财政补贴、税收优惠等措施，鼓励农户采用环保型农资和技术；加强农民培训，提高他们的环保意识和技术水平，使其能够正确理解和应用减排措施；鼓励农业装备的碳排放优化，使其朝着更环保、更高效的方向发展。

总之，本研究通过系统分析和综合管理策略的提出，旨在减少农业活动的碳排放、增加农田系统的固碳作用，为实现我国农业绿色发展提供了科学依据和实践指导。这不仅有助于减缓气候变化，也为农业的可持续发展提供了新的动力。通过技术创新、政策支持和管理优化，可以有效推动我国农业向绿色低碳方向发展，为全球应对气候变化做出积极贡献。

参 考 文 献

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 [R]. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf, 2024－10－20.

[2] HAN J Y, QU J S, MARASENI T N, et al. A critical assessment of provincial-level variation in agricultural GHG emissions in China [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 296: 113190.

[3] 胡向东，王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算[J]. 农业工程学报，2010，26(10)：247－252.
HU Xiangdong, WANG Jimin. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 247－252.

[4] 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 Fawen. An analysis of the reasons, core and countermeasures of agricultural green development in the new era [J]. Chinese Rural Economy, 2018 (5): 19－34.

[5] 巫玉平. 海南省杂交水稻制种产业发展前景分析[J]. 农业展望，2013，9(12)：43－45.
WU Yuping. Prospect of hybrid rice seed production industry development in Hainan Province [J]. Agricultural Outlook, 2013, 9(12): 43－45.

[6] DI MATTEO J A, FERREYRA J M, CERRUDO A A, et al. Yield potential and yield stability of Argentine maize hybrids over 45 years of breeding [J]. Field Crops Research, 2016, 197: 107－116.

[7] MAYER Z, SASVÁRI Z, SZENTPÉTERI V, et al. Effect of long-term cropping systems on the diversity of the soil bacterial communities [J]. Agronomy, 2019, 9(12): 878.

[8] 李林蓉，冯建路，刘苗苗，等. 作物种植模式对土壤微生物和农田有害生物的影响[J]. 中国农学通报，2021，37(29)：99－106.
LI Linrong, FENG Jianlu, LIU Miaomiao, et al. Effect of crop planting patterns on soil microorganisms and crop pests in farmland [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(29): 99－106.

[9] LI C J, HOFFLAND E, KUYPER T W, et al. Syndromes of production in intercropping impact yield gains [J]. Nature Plants, 2020, 6(6): 653－660.

[10] RUSU T. Energy efficiency and soil conservation in conventional, minimum tillage and no-tillage [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2014, 2(4): 42－49.

[11] 崔思远，曹光乔. 秸秆还田年数对稻麦轮作农田土壤团聚体碳氮分布的影响[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2022，3(1)：20－26.
CUI Siyuan, CAO Guangqiao. Effects of straw return years on organic carbon and total nitrogen distribution in soil aggregates from rice-wheat rotation fields [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2022, 3 (1): 20－26.

[12] PLAZA-BONILLA D, NOLOT J M, PASSOT S, et al. Grain legume-based rotations managed under conventional tillage need cover crops to mitigate soil organic matter losses [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156: 33－43.

[13] 徐庆贤，刘芸，罗晓建，等. 养鸡发酵床垫料中氨氮降解菌的分离及鉴定[J]. 中国沼气，2024，42(1)：42－46.
XU Qingxian, LIU Yun, LUO Xiaojian, et al. Isolation

and identification bacteria for efficient removal of amine nitrogen from fermentation mattress material [J]. China Biogas, 2024, 42(1): 42－46.

[14] TONITTO C, DAVID M B, DRINKWATER L E. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 112(1): 58－72.

[15] 廖前超, 李亮, 肖洪环, 等. 测土配方施肥对土壤养分与小麦产量与品质影响研究[J]. 中国沼气, 2024, 42(4): 10－13.
LIAO Qianchao, LI Liang, XIAO Honghuan, et al. study of soil nutrients and wheat yield and quality effected by soil testing formula fertilizer [J]. China Biogas, 2024, 42(4): 10－13.

[16] XIA L L, LAM S K, CHEN D L, et al. Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2017, 23(5): 1917－1925.

[17] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 91－99.
WEN Yanchen, LI Yanqing, YUAN liang, et. al. Comprehensive assessment methodology of soil fertility under different fertilization regimes in North China [J]. Transaction of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2015, 31(7): 91－99.

[18] ZERULLA W, BARTH T, DRESSEL J, et al. 3, 4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP) -a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture [J]. Biology and fertility of soils, 2001, 34(2): 79－84.

[19] YANG M, FANG Y T, SUN D, et al. Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3, 4-dimethypyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: A meta-analysis [J]. Scientific reports, 2016, 6: 22075.

[20] QIAO C L, LIU L L, HU S J, et al. How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input [J]. Global Change Biology, 2015, 21(3): 1249－1257.

[21] GUO X W, SHUKLA M K, WU D, et al. Plant density, irrigation and nitrogen management: three major practices in closing yield gaps for agricultural sustainability in Northwest China [J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2021, 8(4): 525.

[22] 孙梦遥, 徐岚俊, 李小龙, 等. 不同节水方式对油菜水分利用、分配及产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(9): 138－143.
SUN Mengyao, XU Lanjun, LI Xiaolong, et al. Influences of different water-saving methods on water utilization, distribution and yield of rape [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(9): 138－143.

[23] 欧阳扬, 李叙勇. 干湿交替频率对不同土壤CO_2和N_2O释放的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1251－1259.
OUYANG Yang, LI Xuyong. Impacts of drying-wetting cycles on CO_2 and N_2O emissions from soils in different ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1251－1259.

[24] 王保君, 胡乃娟, 顾泽海, 等. 稻秆还田方式对稻麦轮作农田CH_4和N_2O排放的影响[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(3): 367－375.
WANG Baojun, HU Naijuan, GU Zehai, et al. Impact of rice straw return methods on CH_4 and N_2O emissions across a rice-wheat rotation [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2017, 40(3): 367－375.

[25] 刘鑫. 不同水肥管理措施对旱地小麦产量与水分利用效率的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.

[26] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 土壤N_2O和NO产生机制研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(5): 712－718.
CAI Yanjiang, DING Weixin, XIANG Jian. Mechanisms of nitrous oxide and nitric oxide production in soils: A review [J]. Soils, 2012, 44(5): 712－718.

[27] 陈慧玲. 水肥耦合集成灌溉与传统高效节水灌溉效益对比分析[J]. 地下水, 2020, 42(3): 100－102.

[28] FAO 联合国粮食及农业组织[EB/OL]. http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC, 2018.

[29] CAI Z C, XING G X, SHEN G Y, et al. Measurements of CH_4 and N_2O emissions from rice paddies in Fengqiu, China [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1999, 45(1): 1－13.

[30] CHENG W G, KIMANI S M, KANNO T, et al. Forage rice varieties Fukuhibiki and Tachisuzuka emit larger CH_4 than edible rice Haenuki [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2018, 64(1): 77－83.

[31] JIANG Y, VAN GROENIGEN K J, HUANG S, et al. Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars [J]. Global Change Biology, 2017, 23(11): 4728－4738.

[32] CAI Z C, SHAN Y H, XU H. Effects of nitrogen fertilization on CH_4 emissions from rice fields [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, 53(4): 353－361.

[33] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 水分管理影响稻田氧化亚氮排放研究进展[J]. 土壤, 2009, 41(1): 1－7.
LI Xianglan, XU Hua, CAI Zucong. Effect of water management on nitrous oxide emission from rice paddy

field：A review [J]. Soils, 2009, 41(1)：1－7.

[34] ELSORAGABY S, YAHYA A, MAHADI M R, et al. Analysis of energy use and greenhouse gas emissions (GHG) of transplanting and broadcast seeding wetland rice cultivation [J]. Energy, 2019, 189：116160.

[35] 刘志伟，刘娟，吴家森，等．生物炭和腐殖酸施用对稻麦轮作系统CH_4和N_2O综合温室效应的影响[J]．农业工程学报，2023，39(11)：220－229.
LIU Zhiwei, LIU Juan, WU Jiasen, et al. Effects of biochar and humic acid application on global warming potentials of CH_4 and N_2O in a rice-wheat rotation system [J]. Transaction of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2023, 39(11)：220－229.

[36] 何楚．不同种养模式稻田生态系统服务功能及价值评估[D]．武汉：华中农业大学，2023.

[37] WATANABE A, TAKEDA T, KIMURA M. Evaluation of origins of CH_4 carbon emitted from rice paddies [J]. Journal of Geophysical Research：Atmospheres, 1999, 104(D19)：23623－23629.

[38] 邵美红，孙加焱，阮关海，等．稻田温室气体排放与减排研究综述[J]．浙江农业学报，2011，23(1)：181－187.
SHAO Meihong, SUN Jiayan, RUAN Guanhai. Review on greenhouse gases emission and the reduction technology in rice fields [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2011, 23(1)：181－187.

[39] AULAKH M S, WASSMANN R, BUENO C, et al. Impact of root exudates of different cultivars and plant development stages of rice (*Oryza sativa L.*) on methane production in a paddy soil [J]. Plant and Soil, 2001, 230(1)：77－86.

[40] 张鲜鲜，毕俊国，孙会峰，等．旱管种植节水抗旱稻的温室气体减排效应研究[J]．上海农业学报，2022，38(4)：134－140.
ZHANG Xianxian, BI Junguo, SUN Huifeng, et al. Greenhouse gas mitigation potential of water-saving and drought-resistance rice under dry cultivation [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2022, 38(4)：134－140.

[41] 徐丹．寒地黑土稻田水肥管理与温室气体排放关系研究[D]．哈尔滨：东北农业大学，2016.

[42] 王强盛．稻田种养结合循环农业温室气体排放的调控与机制[J]．中国生态农业学报，2018，26(5)：633－642.
WANG Qiangsheng. Regulation and mechanism of greenhouse gas emissions of circular agriculture ecosystem of planting and breeding in paddy [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(5)：633－642.

[43] 焦燕，黄耀．影响农田氧化亚氮排放过程的土壤因素[J]．气候与环境研究，2003，8(4)：457－466.
JIAO Yan, HUANG Yao. Influence of soil properties on N_2O emissions from farmland [J]. Climatic and Environmental Research, 2003, 8(4)：457－466.

[44] 李香兰，徐华，蔡祖聪．稻田CH_4和N_2O排放消长关系及其减排措施[J]．农业环境科学学报，2008，27(6)：2123－2130.
LI Xianglan, XU Hua, CAI Zucong. Trade-off relationship and mitigation options of methane and nitrous oxide emissions from rice paddy field [J]. Journal of Argo-Environment Science, 2008, 27(6)：2123－2130.

[45] HUA X, XING G X, CAI Z C, et al. Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, 49(1)：23－28.

[46] LIAO B, WU X, YU Y F, et al. Effects of mild alternate wetting and drying irrigation and mid-season drainage on CH_4 and N_2O emissions in rice cultivation [J]. Science of the Total Environment, 2020, 698：134212.

[47] SNYDER C S, BRUULSEMA T W, JENSEN T L, et al. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 133(3/4)：247－266.

[48] CAI Z C, SHAN Y H, XU H. Effects of nitrogen fertilization on CH_4 emissions from rice fields [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, 53(4)：353－361.

[49] 杨印生，韦鑫．低碳农业机械化的发展逻辑、影响因素与实现路径[J]．智慧农业(中英文)，2023，5(4)：150－159.
YANG Yinsheng, WEI Xin. The development logic, influencing factors and realization path for low-carbon agricultural mechanization [J]. Smart Agriculture, 2023, 5(4)：150－159.

[50] 陶冶．不同种植方式下水稻产量、水氮利用效率及稻田温室气体排放比较研究[D]．武汉：华中农业大学，2016.

[51] 胡国辉，陈惠哲，张玉屏，等．生物降解膜覆盖对水稻温室气体排放及产量的影响[J]．生态环境学报，2020，29(5)：977－986.

[52] GAO H H, LIU Q, GONG D Z, et al. Biodegradable film mulching reduces the climate cost of saving water without yield penalty in dryland rice production [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2023, 197：107071.

[53] 逯非，王效科，韩冰，等．稻田秸秆还田：土壤固碳与甲烷增排[J]．应用生态学报，2010，21(1)：99－108.
LU Fei, WANG Xiaoke, HAN Bing, et al. Straw return to rice paddy：Soil carbon sequestration and increased methane emission [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(1)：99－108.

[54] WU Z, ZHANG X, DONG Y B, et al. Biochar

amendment reduced greenhouse gas intensities in the rice-wheat rotation system: six-year field observation and meta-analysis [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 278: 107625.

[55] 刘畅, 迟道才, 张丰, 等. 稻草生物炭对干湿交替稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 232－242.
LIU Chang, CHI Daocai, ZHANG Feng, et al. Effects of rice straw biochar on CH_4 and N_2O emissions in alternating wetting and drying rice fields [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(14): 232－242.

[56] 韩自强, 宋贺, 夏炎, 等. 秸秆还田下生物炭和硫酸铵对稻田 N_2O 和 CH_4 排放的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 135－143.
HAN Ziqiang, SONG He, XIA Yan, et al. Effects of biochar and ammonium sulfate on N_2O and CH_4 emissions from paddy soil with straw returning application [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2019, 47(2): 135－143.

[57] SMITH P, MARTINO D, CAI Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences, 2008, 363(1492): 789－813.

[58] GALLAGHER P W, RICHEY J. Growing biomass fuel industry, declining local forage demands, and changing greenhouse gas emissions from US agriculture: A case study [C]// Linköping Electronic Conference Proceedings, Proceedings of the World Renewable Energy Congress-Sweden, 8-13 May, 2011, Linköping, Sweden. Linköping University Electronic Press, 2011.

[59] 袁伟玲, 曹凑贵, 李成芳, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统 CH_4 和 N_2O 温室效应及经济效益评估[J]. 中国农业科学, 2009, 42(6): 2052－2060.
YUAN Weiling, CAO Cougui, LI Chengfang, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice-fish and rice-duck complex ecosystems and the evaluation of their economic significance [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(6): 2052－2060.

[60] 展茗, 曹凑贵, 汪金平, 等. 复合稻田生态系统温室气体交换及其综合增温潜势[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5461－5468.
ZHAN Ming, CAO Cougui, WANG Jinping, et al. Greenhouse gases exchange of integrated paddy field and their comprehensive global warming potentials [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5461－5468.

[61] 徐祥玉, 张敏敏, 彭成林, 等. 稻虾共作对秸秆还田后稻田温室气体排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(11): 1591－1603.
XU Xiangyu, ZHANG Minmin, PENG Chenglin, et al. Effect of rice-crayfish co-culture on greenhouse gases emission in straw-puddled paddy fields [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(11): 1591－1603.

[62] INUBUSHI K, SUGII H, NISHINO S, et al. Effect of aquatic weeds on methane emission from submerged paddy soil [J]. American Journal of Botany, 2001, 88(6): 975－979.

[63] DENIER VAN DER GON H A, VAN BODEGOM P M, WASSMANN R, et al. Sulfate-containing amendments to reduce methane emissions from rice fields: Mechanisms, effectiveness and costs [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2001, 6(1): 71－89.

[64] WANG C, JIN Y G, JI C, et al. An additive effect of elevated atmospheric CO_2 and rising temperature on methane emissions related to methanogenic community in rice paddies [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 257: 165－174.

[65] LIANG H, LI S, ZHANG L, et al. Long-term green manuring enhances crop N uptake and reduces N losses in rice production system [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105369.

[66] 颜志雷, 方宇, 陈济琛, 等. 连年翻压紫云英对稻田土壤养分和微生物学特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1151－1160.
YAN Zhilei, FANG Yu, CHEN Jichen, et al. Effect of turning over Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus L.*) on soil nutrients and microbial properties in paddy fields [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(5): 1151－1160.

[67] 刘春增, 常单娜, 李本银, 等. 种植翻压紫云英配施化肥对稻田土壤活性有机碳氮的影响 [J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 657－669.
LIU Chunzeng, CHANG Danna, LI Benyin, et al. Effects of planting and incorporation of Chinese milk vetch coupled with application of chemical fertilizer on active organic carbon and nitrogen in paddy soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(3): 657－669.

[68] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治雄, 等. 冬季耕作制度对农田氧化亚氮排放的贡献 [J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(4): 49－52.
XIONG Zhengqin, XING Guangxi, TSURUTA H, et al. Nitrous oxide emissions from agricultural soils as affected by winter cropping system [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2002, 25(4): 49－52.

[69] 李启凤, 王宇欣, 韩梦宇. 世界垂直农业发展案例分析与展望[J]. 农业工程, 2013, 3(6): 64－67.

LI Qifeng, WANG Yuxin, HAN Mengyu. Cases study and prospect analysis of vertical farming [J]. Agricultural Engineering, 2013, 3(6): 64－67.

[70] VYAWAHARE M. World′s largest vertical farm grows without soil, sunlight or water in Newark [J]. The Guardian, 2016, 14.

[71] TAWALBEH M, AL-OTHMAN A, KAFIAH F, et al. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook [J]. Science of the Total Environment, 2021, 759: 143528.

[72] 何勇. 光伏农业产业发展探讨[J]. 现代农业科技, 2017(7): 185－186, 191.

[73] 吴楠, 张耀邦, 佘炜, 等. 光伏发电＋农业 解锁农业发展新模式[J]. 蔬菜, 2018(4): 1－7.

[74] XUE J L. Photovoltaic agriculture-New opportunity for photovoltaic applications in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 1－9.

[75] LAL R. Carbon emission from farm operations. Environment international [J]. Environment International, 2004, 30(7): 981－990.

[76] ZHU Z H, CHAI X Y, XU L Z, et al. Design and performance of a distributed electric drive system for a series hybrid electric combine harvester [J]. Biosystems Engineering, 2023, 236: 160－174.

[77] GORJIAN S, EBADI H, TROMMSDORFF M, et al. The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292: 126030.

A review of current GHG emissions in Chinese farmland and the carbon sequestration and emission reduction technologies

SHAO Meihong[1], WU Qianying[2], ZHAO Fujian[3], WANG Jin[2], HE Yong[2, 4], TANG Rongnian[5], MOSTAFA Rastgou[2], LI Wenyoujia[2], JIANG Qianjing[2*]

(1. *Agricultural Technology Promotion Center of Jiande*, *Hangzhou* 311600, *China*; 2. *College of Biosystems Engineering and Food Science*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310058, *China*; 3. *Zhejiang Jialemi Gardening Technology Co., Ltd.*, *Shangyu* 312369, *China*; 4. *The Key Laboratory of Spectroscopy Sensing*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Hangzhou* 310058, *China*; 5. *School of Mechanical and Electrical Engineering*, *Hainan University*, *Haikou* 570228, *China*)

Abstract: To address global climate change, reduce greenhouse gas (GHG) emissions, and support China′s "carbon peaking and carbon neutrality" goals, this study reviews the current state of farmland carbon emissions in China and explores pathways for carbon sequestration and emission reduction from an agricultural perspective. A comprehensive analysis of carbon emissions across sectors, the composition of agricultural emission sources, and regional differences among provinces reveals that the evolution of China′s GHG emissions can be divided into three phases: steady growth, rapid growth, and significant deceleration. The primary sources of greenhouse gas emissions in the agricultural sector include methane (CH_4) emissions from livestock enteric fermentation and rice production, as well as nitrous oxide (N_2O) emissions from microbial decomposition in agricultural soils. These sources exhibit significant regional and temporal variations, influenced by factors such as climate conditions, cropping patterns, and management practices. The study pointed out that changing current agricultural management practices is key to achieving emission reductions in agriculture. Optimizing management measures can not only mitigate agricultural carbon emissions but also enhance the carbon sequestration capacity of farmlands. Based on a cluster analysis of keywords and future research directions in the field of farmland carbon emissions in China, this study identifies current research hotspots and knowledge gaps. It emphasizes the importance of exploring regionally adaptive agronomic management practices to improve the effectiveness of carbon sequestration and emission reduction in different types of agricultural land, such as paddy fields and drylands. By analyzing the effects of high-frequency agronomic practices on increasing yields and reducing emissions, the study systematically elucidates the feasibility of measures such as optimizing water and fertilizer management, adjusting cropping structures, incorporating straw return and agricultural waste utilization,

and adopting low-carbon agricultural equipment. This research provides systematic scientific evidence for theoretical studies and practical applications of farmland carbon sequestration and emission reduction in China. It also offers guidance for the promotion of relevant energy-saving and emission-reduction technologies. By focusing on the future pathways for green agricultural development, this study offers strategic insights for achieving the "dual-carbon" goals in China's agricultural sector.

Keywords: agricultural field; greenhouse gases; carbon emission; CH_4; N_2O; carbon sequestration

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (32271980); Zhejiang Province's Key Pioneer Research Project (2022C02014); Major Agricultural Technology Collaborative Promotion Project of Zhejiang Province (2023ZDXT02)

First Author: SHAO Meihong, E-mail: hzjdsmh@163.com

* **Correspondence Author:** JIANG Qianjing, E-mail: jqj713@zju.edu.cn