

减排固碳目标纳入农业绿色发展政策的协同机制

徐湘博, 李静, 薛颖昊, 孙明星, 牛坤玉, 金书秦, 张林秀

引用本文:

徐湘博, 李静, 薛颖昊, 孙明星, 牛坤玉, 金书秦, 张林秀. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0308>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

江苏省农业碳排放时序特征与趋势预测

邱子健, 靳红梅, 高南, 徐轩, 朱津宏, 李庆, 王子清, 徐拥军, 申卫收

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 658–669 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0647>

我国畜禽养殖氨排放特征及减排体系构建研究

王文林, 杜薇, 韩宇捷, 曹秉帅, 李文静, 童仪, 戴铄蕴, 刘波

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2305–2316 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1098>

关于“碳中和生物”环境科学的新概念与研究展望

周启星, 李晓晶, 欧阳少虎

农业环境科学学报. 2022, 41(1): 1–9 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1296>

英国农业面源污染防治对我国的启示

刘坤, 任天志, 吴文良, 孟凡乔, JessicaBellarby, LaurenceSmith

农业环境科学学报. 2016, 35(5): 817–823 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.05.001>

应用生命周期法评价我国测土配方施肥项目减排效果

张卫红, 李玉娥, 秦晓波, 万运帆, 刘硕, 高清竹

农业环境科学学报. 2015(7): 1422–1428 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.07.027>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.



开放科学 OSID

减排固碳目标纳入农业绿色发展政策的协同机制

徐湘博^{1,2}, 李静^{1*}, 薛颖昊³, 孙明星^{1,2}, 牛坤玉⁴, 金书秦⁵, 张林秀^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 联合国环境规划署国际生态系统管理伙伴计划, 北京 100101; 3. 农业农村部农业生态与资源保护总站, 北京 100125; 4. 中国农业科学院农业经济与发展研究所, 北京 100081; 5. 农业农村部农村经济研究中心, 北京 100810)

摘要:碳达峰、碳中和目标对我国农业绿色发展提出了更高要求, 实现农业减排固碳目标与农业绿色发展政策协同发展至关重要。本文综合运用文献归纳、政策文本分析等方法, 全面分析梳理了农业温室气体排放核算框架、农业减排固碳措施研究进展, 刻画了1978年以来我国与农业减排固碳相关的农业绿色发展政策的演进历程, 定性评价了农业绿色发展政策与农业减排固碳目标之间的协同关系, 并且以黑土区齐齐哈尔市为研究区模拟了不同农业减排固碳与农业绿色发展政策协同情景下的农业减排固碳演变趋势。结果表明: 农业减排固碳目标与大部分现行农业绿色发展政策目标是协同推进的, 但在水稻种植、畜禽养殖、秸秆利用、种植结构调整等方面也存在无作用甚至负协同的目标; 通过政策目标调整, 在不同的农业减排固碳技术组合情景下, 黑土区能够促进农业温室气体减排与固碳的脱耦, 最终实现减排与固碳的双赢。基于此, 提出了重视农业减排固碳在促进“双碳”目标中的基础性作用, 统筹将农业减排固碳、促进“双碳”目标纳入政策目标, 并理顺二者政策目标关系的对策建议, 以期“双碳”目标下的农业绿色发展政策制定提供参考借鉴。

关键词: 农业; 绿色发展; 政策; 温室气体; 固碳

中图分类号: F323.22; X322 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2022)10-2091-11 doi:10.11654/jaes.2022-0308

Synergistic mechanism to incorporate the targets of greenhouse gas emission reduction and carbon sequestration into agricultural green development policies under a carbon-neutral background

XU Xiangbo^{1,2}, LI Jing^{1*}, XUE Yinghao³, SUN Mingxing^{1,2}, NIU Kunyu⁴, JIN Shuqin⁵, ZHANG Linxiu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. United Nations Environment Programme-International Ecosystem Management Partnership (UNEP-IEMP), Beijing 100101, China; 3. Rural Energy and Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 4. Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 5. Research Center for Rural Economy, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100810, China)

Abstract: Carbon peak and carbon neutral targets have put forward new objectives for the green development of agriculture in China; therefore, it is very important to achieve synergetic development between agricultural greenhouse gas (GHG) emission reduction, carbon

收稿日期: 2022-03-30 录用日期: 2022-05-05

作者简介: 徐湘博(1988—), 男, 山东潍坊人, 助理研究员, 从事农业绿色发展政策研究。E-mail: ydxu.cc@igsrr.ac.cn

*通信作者: 李静 E-mail: jingli@igsrr.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41901255); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA28130400, XDA26050202, XDA20010303); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(Y2022ZK03)

Project supported: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(41901255); The Strategic Priority Science and Technology Project of Chinese Academy of Sciences(XDA28130400, XDA26050202, XDA20010303); The Fundamental Research Funds for Central Public Welfare Research Institutes(Y2022ZK03)

sequestration, and policies for agricultural green development. This study comprehensively analyzed and compared the accounting framework of agricultural GHG emissions and the research progress of the measures of agricultural GHG emission reduction and carbon sequestration by means of literature summaries and policy analysis and described the evolution process of agricultural green development policies related to agricultural GHG emission reduction and carbon sequestration since 1978. The synergistic relationship between agricultural green development policies and agricultural GHG emission reduction and carbon sequestration targets was qualitatively evaluated, and the changing trend of agricultural GHG emission reduction and carbon sequestration under the coordination of different agricultural green development policies was simulated in a black soil area. The results showed that the targets of GHG emission reduction and carbon sequestration in agriculture were coordinated with most of the current targets of agricultural green development policies, but there were some targets that were not included or even negatively coordinated in rice planting, livestock and poultry breeding, straw utilization, and adjustment of planting structure. Through the adjustment of policy objectives, under different combinations of agricultural GHG emission reduction and carbon sequestration technologies in comparison with historical trends, it can promote the decoupling of agricultural GHG emission reduction and carbon sequestration in the black soil region, and finally achieve a win-win situation of agricultural GHG emission reduction and carbon sequestration. Based on these results, several suggestions are proposed, including paying attention to the fundamental role of agricultural GHG emission reduction and carbon sequestration in the carbon peak and carbon neutral targets, expanding the dimensions of agricultural policies, incorporating agricultural GHG emission reduction and carbon sequestration into the targets of agricultural policies, and coordinating the relationship between the two objectives. It is expected to provide a reference for the policy formulation of agricultural green development against the background of carbon peak and carbon neutrality.

Keywords: agriculture; green development; policy; greenhouse gas; carbon sequestration

改革开放以来,我国农业发展进入了快车道,极大地丰富了农产品供应,并保障了粮食安全。与农业快速发展相伴随的是农药、化肥等农资高投入与畜禽粪污等高排放带来的农业面源污染问题以及黑土地等土壤有机质退化问题。国家统计局数据显示,我国农用化肥折纯量从1978年的 8.84×10^6 t增长到2019年的 5.4036×10^7 t,增幅为511.27%,明显高于粮食产量117.82%的增幅。同时,我国土壤有机质及固碳存量下降严重,《东北黑土地白皮书(2020)》指出,近60年黑土耕作层有机质含量下降了1/3,部分地区下降了50%。目前,我国农业绿色发展政策不断丰富,农业绿色发展理念不断更新,形成了以“控水节水-农药、化肥减量增效-秸秆、畜禽粪便、地膜资源化利用”为核心的农业绿色发展政策体系,同时开展了提高农田土壤固碳能力的黑土地保护利用实践。本质上,农业减排固碳与农业绿色发展具有协同效应,但从政策目标以及全生命周期视角来看,二者又不完全协同,甚至可能存在拮抗效应。

在全球应对气候变化的大背景下,我国提出了“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的战略目标,即碳达峰、碳中和目标(简称“双碳”目标)。2019年我国温室气体(GHG)排放的二氧化碳当量(CO_2e)为 1.4×10^{11} t,占全球排放量的26.72%^[1],是世界第一大国。“双碳”目标的提出对于促进我国经济结构转型以及提高国际影

响力是及时必要的。就GHG排放来源及其贡献来看,从高到低依次是能源活动(9.559×10^{10} tCO_2e),工业生产过程(1.718×10^{10} tCO_2e),农业活动(8.300×10^9 tCO_2e),废弃物处理(1.950×10^9 tCO_2e),土地利用、土地利用变化和林业(-1.115×10^{10} tCO_2e),其中农业活动占比为7.42%^[2]。从全生命周期的视角来看,将种植、加工等环节纳入核算体系,2007—2016年间全球农业、林业和土地利用部门的GHG排放占到全球总净排放的21%~37%^[3]。2015年全球食物系统的GHG排放达到 1.8×10^{11} tCO_2e (我国为 2.4×10^{10} tCO_2e),占GHG总排放量的34%,其中农业、土地利用和土地利用变化贡献最大,为71%^[4]。未来,随着我国能源、工业等部门GHG减排工作不断推进以及食物作为人类必需品的消费结构升级加剧,农业GHG排放占比会不断升高,农业GHG减排固碳将会越来越重要。

基于上述原因,尽快将“双碳”目标纳入农业绿色发展政策体系中,重新理顺现有农业绿色发展政策,尤其是农业面源污染治理政策,进一步厘清并建立农业减排固碳目标与农业绿色发展政策的协同机制与体系,将有助于有效发挥农业在“双碳”目标中的基础减排贡献。本研究系统梳理农业GHG排放核算与研究框架,综述农业减排固碳的国际前沿技术措施,定性评估我国农业减排固碳目标与农业绿色发展政策的协同性,以期为我国农业绿色发展政策针对减排固碳目标的适应性调整提供参考。

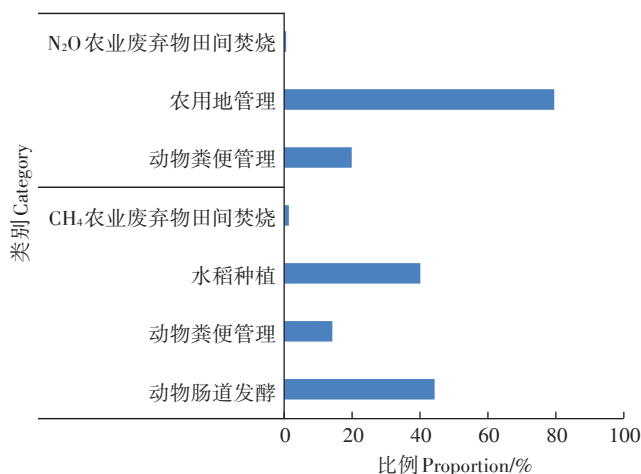
1 农业GHG排放核算与研究框架

针对农业GHG排放的核算研究包括两个维度:一个是横向核算体系,其只关注农业部门本身,类别划分主要包括水稻种植、动物肠道发酵、动物粪便管理、农用地管理、农业废弃物田间焚烧5个方面,该方法被广泛应用于目前的GHG排放核算体系中;另一个是全生命周期视角的纵向核算体系,其是将自然系统、工业系统、农业系统中伴随农业生产活动而产生的所有物质、能量的投入与产出都纳入到核算体系中。

1.1 基于横向核算体系的农业GHG排放核算框架

横向核算体系只关注农业部门本身,不涉及农业部门的上下游部门。根据《IPCC国家温室气体清单指南(2006)》,农业排放的GHG主要是二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)。农业源GHG源汇核算框架如图1所示, CH_4 排放来源于水稻种植、动物肠道发酵、农业废弃物田间焚烧和动物粪便管理四类; N_2O 排放来源于农业废弃物田间焚烧、动物粪便管理和农用地管理三类;值得注意的是,除了土壤碳库变化核算 CO_2 ,农业的其他环节遵守碳中性原则(碳中性是指排放的 CO_2 不会对生物圈的碳浓度产生净影响)。我国《省级温室气体清单编制指南》中核算框架未考虑 CO_2 。另外,农用地利用与农用地利用变化既是GHG排放源,又是GHG吸收汇。

根据《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》数据显示(图2),2014年我国农业活动GHG排放量为 $8.30 \times 10^9 \text{ tCO}_2\text{e}$,其中动物肠道发酵排放占比最高,为24.9%。就GHG种类来看,动物肠道发酵和水稻种植是 CH_4 排放的两大主要来源,占比高达84.4%,农用地排放是 N_2O 排放的主要来源,占比达到



数据来源:中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告(2018)

图2 2014年中国农业GHG排放量与来源构成

Figure 2 Composition of GHG emissions from agriculture of China in 2014

79.5%。农用地利用不仅是GHG排放源,也是GHG吸收汇,GHG吸收量为 $4.9 \times 10^8 \text{ tCO}_2\text{e}^{[2]}$ 。

1.2 基于纵向核算体系的农业GHG排放核算框架

纵向核算指的是从全生命周期视角核算农业GHG排放,如图3所示。纵向核算体系不仅关注农业系统本身,还关注自然系统与工业系统进入和排出农业系统的物质与能量。从全生命周期视角核算的全球粮食系统GHG排放约占全球排放总量的30%,研究发现,即使化石燃料排放立即停止,全球粮食系统目前的排放趋势仍会阻止1.5℃目标的实现^[5],凸显了粮食系统GHG减排的重要性。从系统边界上看,农业生命周期评价包括农产品生产、加工、消费与废弃物处理等环节,农业GHG排放核算将与农业部门相关的能源、工业、建筑与交通等部门都纳入了核算框架中。

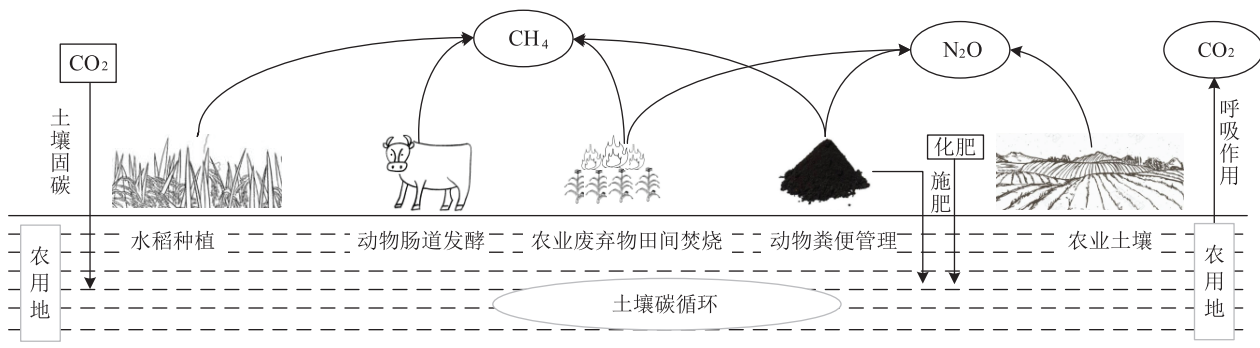


图1 农业源GHG源汇核算框架图

Figure 1 Schematic diagram of GHG emission accounting from agricultural sources

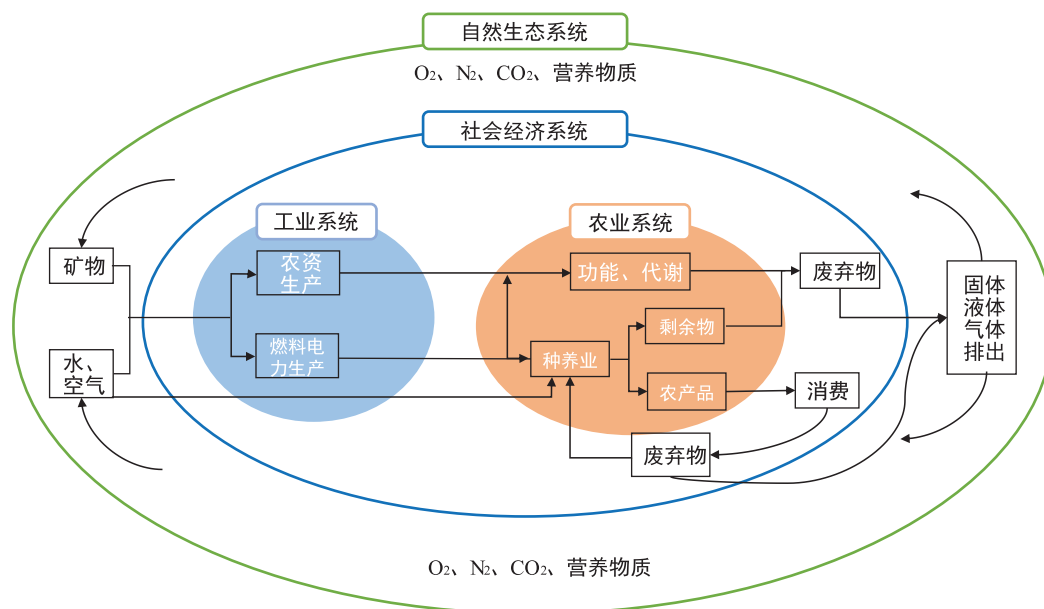


图3 农业生命周期评价框架图

Figure 3 The framework of agricultural life cycle assessment

2 农业GHG减排技术与固碳措施

降低农业GHG排放与增强农业固碳作用,需要从农业GHG排放核算框架入手提出切实可行的措施。本研究将集中讨论分析农业部门本身的农业GHG减排固碳措施,主要包括以下几方面。

2.1 水稻种植

淹水条件下,稻田土壤中的腐烂植物体等有机物被产甲烷细菌分解而产生 CH_4 。关于水稻种植期 CH_4 减排措施已有较多研究,主要包括:持续推进水稻生长季节稻田排水^[6];开发高产低碳排放的水稻品种^[7];调节土壤中硫酸盐含量,通过硫酸盐还原菌与产甲烷细菌竞争底物来实现 CH_4 减排^[8];采用覆膜技术减少水稻种植用水^[9];提高土壤的有机质含量并采用高产新品种^[10]等。另外,将稻草从被淹的稻田中移除有助于 CH_4 的减排,但是这也导致钾、硅等元素的流失,不利于土壤健康,但也有研究发现,有效的作物和土壤管理并不会降低土壤肥力,目前关于稻草从田间移除的利弊尚不明确^[11-12]。

2.2 动物肠道发酵

动物肠道发酵会排放 CH_4 ,其中反刍动物贡献最大。研究发现,与发达国家相比,我国最高效的生产系统中牛奶和牛肉生产的GHG排放强度仍分别高出27%和59%^[13]。目前,减少动物性食物的消费被认为是降低食物来源碳排放的主要措施之一^[14]。除了降

低动物性食物消费,其他减排途径主要有:添加有助于减排的饲料添加剂^[15]和甲烷抑制剂^[16];提高饲料利用率^[17];提高动物的生产力和健康,包括通过提高优良性状遗传潜力和繁殖力缩小养殖规模,并进一步提高增重率来缩短养殖周期^[15];集约化养殖,提高资源利用率和管理效率。

2.3 动物粪便管理

动物粪便管理会同时产生 CH_4 与 N_2O 。动物粪便产生量、储存温度、储存时长以及厌氧分解是影响 CH_4 产生的主要因素^[14],因此在动物粪便管理过程中应注重饲养空间、干湿分离并及时转运粪便。动物粪便 N_2O 排放的主要途径是硝化作用和反硝化作用^[18]。 N_2O 直接排放取决于粪便的碳、氮含量及储存时长和处理方式,且 N_2O 排放会随着环境酸度、硝酸盐浓度的增加与水分的减少而增加^[14]。 N_2O 间接排放来源于粪便收集和储运过程中的 NH_3 和 NO_x 挥发性氮损失、因浸出和径流造成的氮损失以及粪尿在土壤中的沉积。因此,可以通过适量储存粪便来减少因挥发和淋溶导致的氮损失^[19];压实和覆盖动物粪便来避免养分流失到环境中^[20];使用包括硝化反应抑制剂在内的抑制 N_2O 排放技术^[21]。不同的田间粪肥施用时间和管理方式可能导致GHG排放量相差几倍^[15]。另外,施用粪肥部分替代无机肥料可以减少工业部门的生产投入,实现GHG的全生命周期减排^[20, 22]。

2.4 农用地管理

提升农用地管理有助于增加土壤碳固存、减少碳排放^[23]。具体措施有:提高作物单位面积产量、减少农业用地面积、恢复节约土地的植被生境^[24];提高化肥利用率,优化灌溉管理^[25];采取系列农业管理措施,如生物炭等有机改良剂^[26-27]、作物轮作^[28]、秸秆还田^[29]、放牧管理^[30]等;重视耕地弃耕抛荒问题。对于弃耕耕地,一般可以通过次生演替使得生态系统恢复到农业前的植被状态,并且该过程能将碳固定在植被和土壤中^[31]。然而,在某些情况下,弃耕耕地的生态系统恢复力很弱或者根本不会恢复,这需要针对弃耕耕地的生态管理措施的介入,最大程度发挥耕地的碳捕获和碳固存能力^[32-33]。

2.5 农业废弃物田间焚烧

农业废弃物田间焚烧会同时产生CH₄和N₂O,其释放GHG的量与田间焚烧农业废弃物的量高度相关,因此应该坚决制止农业废弃物田间焚烧行为。

3 农业减排固碳目标纳入农业绿色发展政策协同关系的分析与挑战

我国农业绿色发展理念由来已久,并在新发展时

期形成了系统的政策体系。我国农业绿色发展政策的核心是农业面源污染治理政策,治理对象包括节水、农药、化肥、畜禽养殖、秸秆、地膜6个方面。农业的减排固碳措施涉及水稻种植、动物肠道发酵、动物粪便管理、农用地管理、农业废弃物田间焚烧5个方面。从对比分析来看,农业减排固碳目标与农业绿色发展政策涉及到的内容主要是化肥、畜禽养殖、秸秆等方面。与农业减排固碳目标相关的农业绿色发展政策发展历程见图4。《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国农业法》是生态环境领域、农业领域的核心法律,对施肥、畜禽养殖、秸秆综合利用等农业环境保护内容作出了原则性的规定,为农业减排固碳奠定了法律基础。1999年《秸秆焚烧的综合利用管理办法》的实施,标志着农业环境保护进入分类别管理的政策阶段。2014年是我国农业绿色发展政策的转折点,《畜禽规模养殖污染防治条例》、“一控两减三基本”、“农药化肥减量增效”等政策陆续落地实施。2022年初印发的《“十四五”推进农业农村现代化规划》提出了“推动农业农村减排固碳”,但主要是从关注对象和技术研发等方面提出了要求,而未明确政策发展的具体目标与内容。

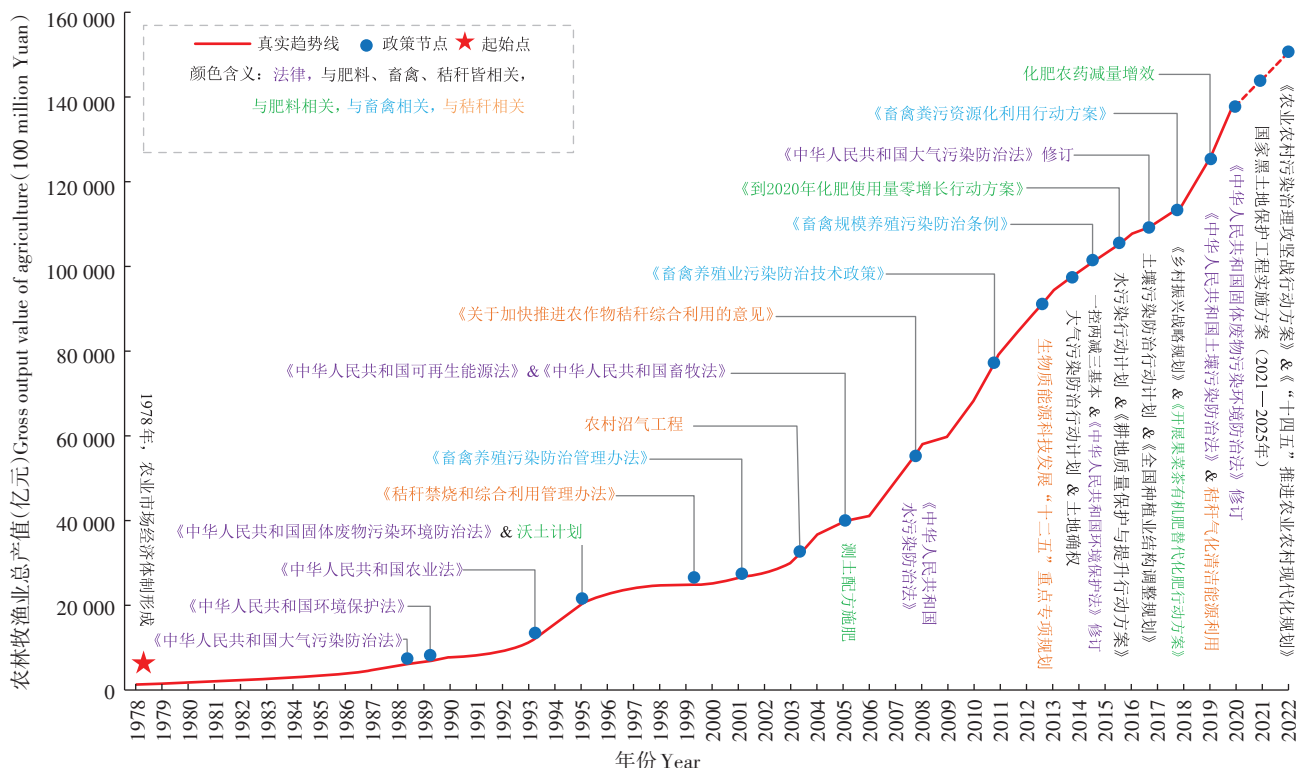


图4 与农业减排固碳相关的农业绿色发展政策发展历程

Figure 4 Development history of agricultural green development policies related to agricultural GHG emission reduction and carbon sequestration

新时期,“双碳”目标为农业绿色发展提出了新要求和新目标。理论上,农业减排固碳目标是农业绿色发展理念的延伸,也是农业绿色发展政策目标的拓展,从本质上要求农业实现“减污降碳”的协同推进。从农业绿色发展政策与农业减排固碳措施实施对象来看,两者虽然均在提倡减量化、资源化,但是在资源化过程中存在二者不协同的可能性。因此,虽然农业绿色发展政策与农业减排固碳的目标对象重合度较高,但是从政策效果、政策目标、政策对象等方面厘清农业绿色发展政策与农业减排固碳目标之间的协同关系对于系统性的政策制定至关重要。本研究通过内容提炼、对比分析我国与农业绿色生产相关的法律、条例、办法、意见、方案等文件,系统总结了潜在可行的农业减排固碳措施与农业绿色发展政策协同关系(图5)。

3.1 水稻种植与农业减排固碳

稻田土壤中的腐烂植物体等有机物被产甲烷细菌分解而产生 CH_4 ,该排放源占农业源 CH_4 总排放的40%以上。稻田排水能够显著降低GHG排放。2015年《耕地质量保护与提升行动方案》中提出,通过排水治理土壤潜育化问题与稻田GHG减排目标存在协同关系。现行政策推行水稻秸秆还田,但在淹水条件下的秸秆还田会增加 CH_4 排放,与GHG减排存在一定的负协同效应。另外,一些低碳技术如水稻地膜覆盖栽培、选育高产低碳的水稻品种、调节土壤硫酸盐含量、改善土壤菌群竞争关系等尚未在相关行动方案和政策措施方面推行。而且现有的农业绿色发展政策主要针对农业面源污染防治而制定,并没有专门针对水稻种植制定和出台专门的减碳政策与措施。

3.2 畜禽养殖政策与农业减排固碳

2001年颁布的《畜禽养殖污染防治管理办法》首次提出针对畜禽粪污处理的“资源化、无害化和减量化”原则。随后2005年颁布并于2015年修订的《中华人民共和国畜牧法》规定“优化畜禽结构,改良性畜品种”“支持畜禽养殖场、养殖小区建设畜禽粪便、废水及其他固体废弃物的综合利用设施”。2014年实施的《畜禽规模养殖污染防治条例》进一步提出要统筹考虑环境承载能力进行合理布局,鼓励和支持采取种养结合的方式促进废弃物利用。2017年实施的《畜禽粪污资源化利用行动方案》明确了到2020年全国畜禽粪污综合利用率达到75%以上的管理目标,从建立健全资源化利用制度、优化畜牧业区域布局、加快畜牧业转型升级、促进畜禽粪污资源化利用、提升种养结合水平、提高沼气和生物天然气利用效率6个

方面提升畜禽粪污资源化利用水平。综上,我国畜禽养殖污染防治政策取得了长足的发展,促进了畜禽养殖的GHG减排,但是畜禽养殖污染防治政策与畜禽养殖GHG减排之间的目标性管理亟需加强。

另外,《饲料和饲料添加剂管理条例》规定在饲料加工、制作、使用过程中可添加少量或者微量的饲料添加剂,以提高饲料利用率。同时,提高畜禽养殖的集约化程度有助于降低边际GHG排放^[19]。目前动物养殖的科学化管理程度还不够。《中华人民共和国畜牧法》以及之后的畜禽养殖用地以及标准化养殖等政策均鼓励和支持加快推进畜禽的规模化养殖。但是,还没有与鼓励和支持使用抑制GHG排放的添加剂相关的政策出台。

3.3 秸秆管理政策与农业减排固碳

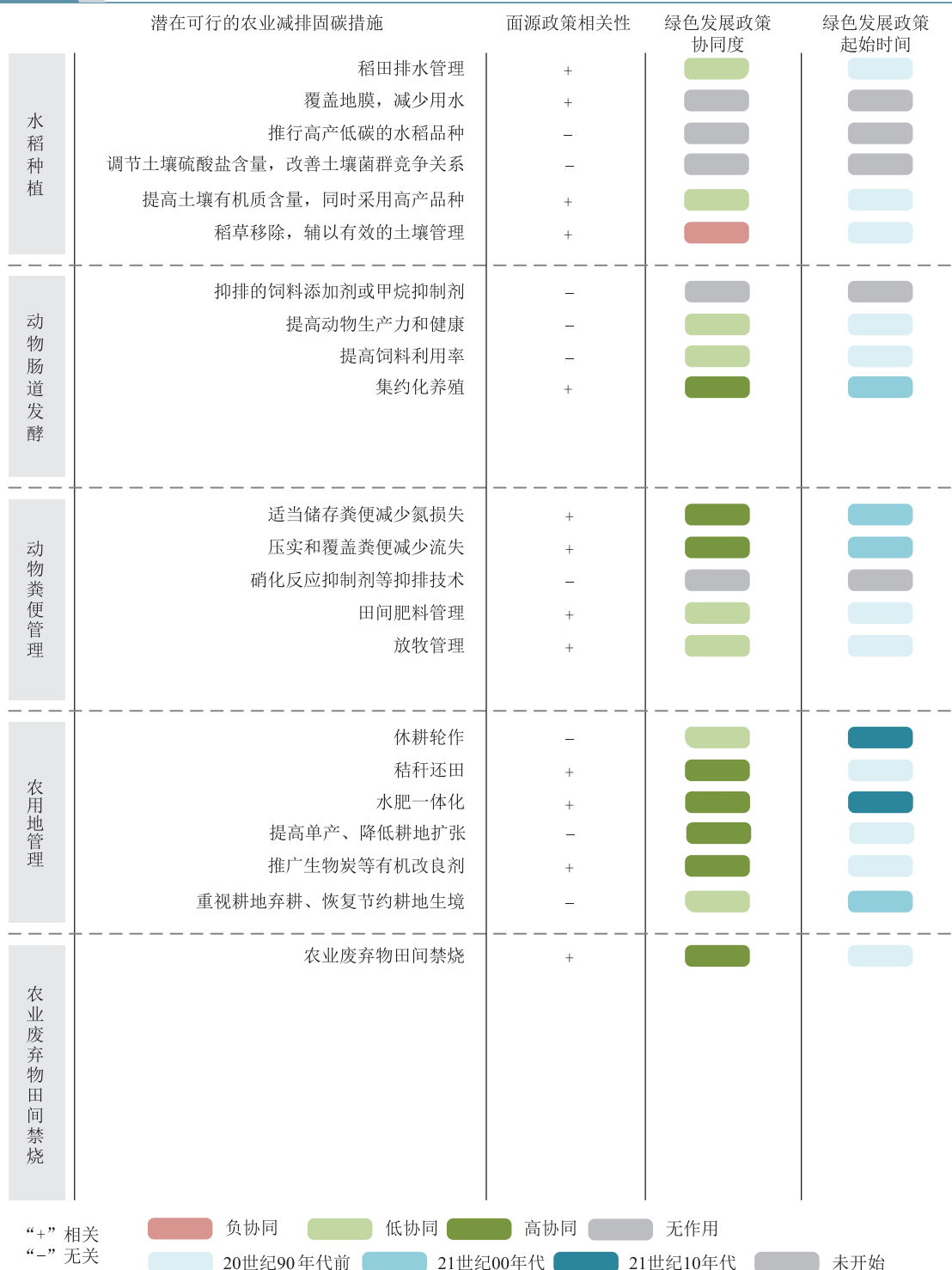
1999年发布实施的《秸秆禁烧和综合利用管理办法》对秸秆禁烧作出了规定,提倡大力推广多种形式的综合利用途径,并明确了重要城市的秸秆综合利用达标率。2000年修订的《中华人民共和国大气污染防治法》规定:禁止在人口集中地区、机场周围、交通干线附近以及当地人民政府划定的区域露天焚烧秸秆;2016年修订版本中除了规定在划定区域禁止露天焚烧秸秆外,还规定了应当建立秸秆收集、贮存、运输和综合利用服务体系,鼓励和支持秸秆的肥料化、饲料化、能源化、工业原料化、食用菌集料化等综合利用途径。

秸秆综合利用方面的法规与政策也紧锣密鼓地相继出台。2007年印发的《全国农村沼气工程建设规划》提出以秸秆为原料生产沼气,实现秸秆的能源化利用。2008年发布了《关于加快推进农作物秸秆综合利用的意见》。2011年发布的《“十二五”农作物秸秆综合利用实施方案》中明确要求年增加饲料化处理能力达到3 000万t。2018年发布的《关于开展秸秆气化清洁能源利用工程建设的指导意见》指出,在坚持农用优先,秸秆饲料化、肥料化利用相对稳定的基础上,实施秸秆气化清洁能源利用工程。

2016年至今,农业农村部开展了农作物秸秆综合利用试点,大幅提高了秸秆直接还田和过腹还田水平,秸秆饲料化利用稳步推进。但是我国秸秆资源化、能源化利用程度仍然不高,以农户为单位的沼气利用持续性并不理想,在探索秸秆还田的有效模式方面还需注重增加固碳与保证作物生长的平衡。

3.4 农用地管理政策与农业减排固碳

1995年,农业农村部(原农业部)在全国实施以



本研究主要通过以下方法与步骤对面源政策相关性、绿色发展政策协同度和绿色发展政策起始时间进行定性判定:首先,根据本文第3部分内容,总结潜在可行的农业减排固碳措施;其次,梳理自1978年至今发布的与农业绿色发展相关的法律、条例、办法等文件;最后,逐条分析文件内容与潜在可行的农业减排固碳措施的面源政策相关性、绿色发展政策协同度。对于面源政策相关性的界定,仅有相关和无关两类。对于绿色发展政策协同度的界定,“无作用”是指当前绿色发展政策尚未有涉及该潜在可行的农业减排固碳措施的内容;“负协同”是指当前绿色发展政策涉及内容与该潜在可行的农业减排固碳措施相悖;“低协同”是指当前绿色发展政策相关规定间接促进了该潜在可行的农业减排固碳措施的实施;“高协同”是指当前绿色发展政策直接规定了该潜在可行的农业减排固碳措施,并促进其实施。对于绿色发展政策起始时间是指与农业绿色发展相关的法律、条例、办法等的实施时间

图5 潜在可行的农业减排固碳措施与农业绿色发展政策的协同关系

Figure 5 The synergistic relationship between potential measures of agricultural GHG emission reduction and carbon sequestration and agricultural green development policies

增施有机肥为核心的“沃土计划”,并在2004年及以后历年的中央一号文件中提及,极大提高了农用地土壤固碳。2005年,农业农村部(原农业部)在全国启动测土配方施肥行动计划,科学提高肥料利用率。2014年“一控两减三基本”目标提出之后,2015年发布的《到2020年化肥使用零增长行动方案》,2018年提出的“化肥农药减量增效”,使我国水稻、玉米、小麦三大粮食作物的化肥利用率由2015年的35.2%提高到了2020年的40.2%。2017年我国制定实施的《推进水肥一体化实施方案(2016—2020年)》系统地推进了水肥一体化,优化了灌溉管理,与农业GHG减排高度协同。2009年,我国开始实行最严格的耕地保护制度,对抛荒弃耕问题逐年加大整治力度,以恢复耕地的农业生产功能。《中华人民共和国土地管理法》禁止任何单位和个人闲置、荒芜耕地。2018年修订的《中华人民共和国农村土地承包法》也规定弃耕抛荒连续两年以上的土地,发包方有权要求终止土地经营权流转合同。2016年印发的《探索实行耕地轮作休耕制度试点方案》,提及了轮作、休耕等典型的生态管理措施。2021年,《国家黑土地保护工程实施方案(2021—2025年)》明确提出,“十四五”期间将完成1亿亩(1亩=667 m²)黑土地保护利用任务,土壤有机质含量平均提高10%以上。潜在可行的农业减排固碳措施基本均已被纳入我国农用地管理政策,形成了较高的协同性。

综上所述,从政策效果来看,我国农业绿色发展

政策基本上正向促进了农业的减排固碳,但也存在水稻秸秆还田促进农业碳排放的负协同措施;从政策目标来看,目前还没有特定的政策文件将农业减排固碳纳入政策目标;从政策对象来看,针对农业减排固碳的技术性措施在农业绿色发展政策中尚未涉及。因此,目前农业绿色发展政策与农业减排固碳目标的协同性基础较好,但是目标性不强,亟需将农业减排固碳目标纳入到农业绿色发展政策体系中,并且理顺提高低协同政策内容与农业减排固碳目标的协同关系。

4 以黑土区齐齐哈尔市为例的农业减排固碳与农业绿色发展政策协同效应案例研究

在定性评价了潜在可行农业减排固碳措施与农业绿色发展政策协同关系之后,选定我国黑土区的齐齐哈尔市开展定量的评价与情景模拟。首先,利用齐齐哈尔市统计年鉴数据与《省级温室气体清单编制指南(试行)》核算了2019年齐齐哈尔市农业GHG净排放量以及各部分的GHG排放量与农业土壤固碳量(图6);其次,通过文献荟萃分析,识别了图5中主要农业减排固碳措施的GHG排放与碳固定系数,并根据齐齐哈尔市的基本情况模拟了其2025年与2030年的农业减排固碳与农业绿色发展政策协同情景(表1),以及农业GHG排放与固碳演变趋势(图7)。

图6的数据显示,2019年齐齐哈尔市农业GHG净碳排放量为 2.92×10^6 t,农业固碳量为 2.20×10^6 t。从不同农业排放部门来看,按照农业GHG排放量从大

表1 基于文献荟萃分析的农业减排固碳措施潜力

Table 1 Potential of agricultural carbon sequestration measures based on literature meta-analysis

类别 Category	措施 Measure	减排固碳潜力 Potential GHG reduction and carbon sequestration	技术情景 Technical scenario		参考文献 References
			2025年	2030年	
水稻种植	稻田排水管理	减排60.46%	10%成效	20%成效	[8]
	推行高产低碳的水稻品种	减排90%	推广1%	推广5%	[9]
	调节土壤硫酸盐含量,改善土壤菌群竞争关系	减排93%	推广1%	推广5%	[10]
	提高土壤有机质含量,同时采用高产品种	减排7.1%	10%成效	20%成效	[12]
动物肠道发酵	抑排的饲料添加剂和甲烷抑制剂	减排30%	推广1%	推广5%	[14,17]
	提高饲料利用率,提高动物生产力和健康	—	效率提高5%	效率提高10%	—
动物粪便管理	适当储存粪便减少氮损失	减排44.1%	10%成效	20%成效	[23]
	压实和覆盖粪便减少流失	减排8.1%	10%成效	20%成效	[23]
	硝化反应抑制剂等抑排技术	减排66.17%	推广1%	推广5%	[22]
农用地管理	秸秆还田	每吨秸秆增加N ₂ O排放0.015 kg	还田比例80%	还田比例90%	[33]
	水肥一体化	减排35.15%	10%成效	20%成效	[26]
	推广生物炭等有机改良剂	减排23.33%	10%成效	20%成效	[27]
农业土壤固碳	秸秆还田	固碳225 kgCO ₂ e·t ⁻¹	还田比例80%	还田比例90%	[33]

注:(1)本部分情景分析并未完全模拟图5中所有的农业减排固碳措施,原因主要是齐齐哈尔市没有此情况、数据不可得或者与其他措施交织度高,本文将未涉及到的情景默认为保持2019年现状不变;(2)在收集减排固碳潜力数据时,遵循本地化研究优先的原则。

到小依次为动物肠道发酵($1.96 \times 10^6 \text{ t}$)、水稻种植($1.76 \times 10^6 \text{ t}$)、农用地管理($7.90 \times 10^5 \text{ t}$)、动物粪便管理($6.10 \times 10^5 \text{ t}$)。从不同行政单位看,2019年齐齐哈尔市农业GHG净排放最高的为龙江县,占全市净排放的20%。从农业固碳与GHG排放比值看,全市农业固碳抵消了43.05%的农业GHG碳排放,但各区县差距较大,讷河市最高为61.41%,泰来县最低为26.05%。

表1中详细展示了本文基于文献荟萃分析得到的农业减排固碳措施潜力,并根据前瞻技术进行示范、传统技术提高效率的原则模拟了2025年和2030年齐齐哈尔市农业减排固碳与农业绿色发展政策协

同的技术情景,并据此情景模拟核算2025年与2030年的齐齐哈尔市农业GHG排放与固碳情况(图7)。1990年至今,齐齐哈尔市农业GHG排放量与农业固碳量均出现了快速增长,并在2015年达到了最高点,之后又呈现下降趋势。进一步分析发现,在2016年以前农业GHG排放的增长率高于农业固碳增长率,而在2016年之后农业GHG排放的增长开始滞后于农业固碳,这可能与我国加强农业面源污染治理密切相关。虽然数据释放了农业减碳的积极信号,但齐齐哈尔市农业减排固碳仍处于农业GHG排放与固碳的耦合阶段。基于技术情景中的减排固碳潜力,2025

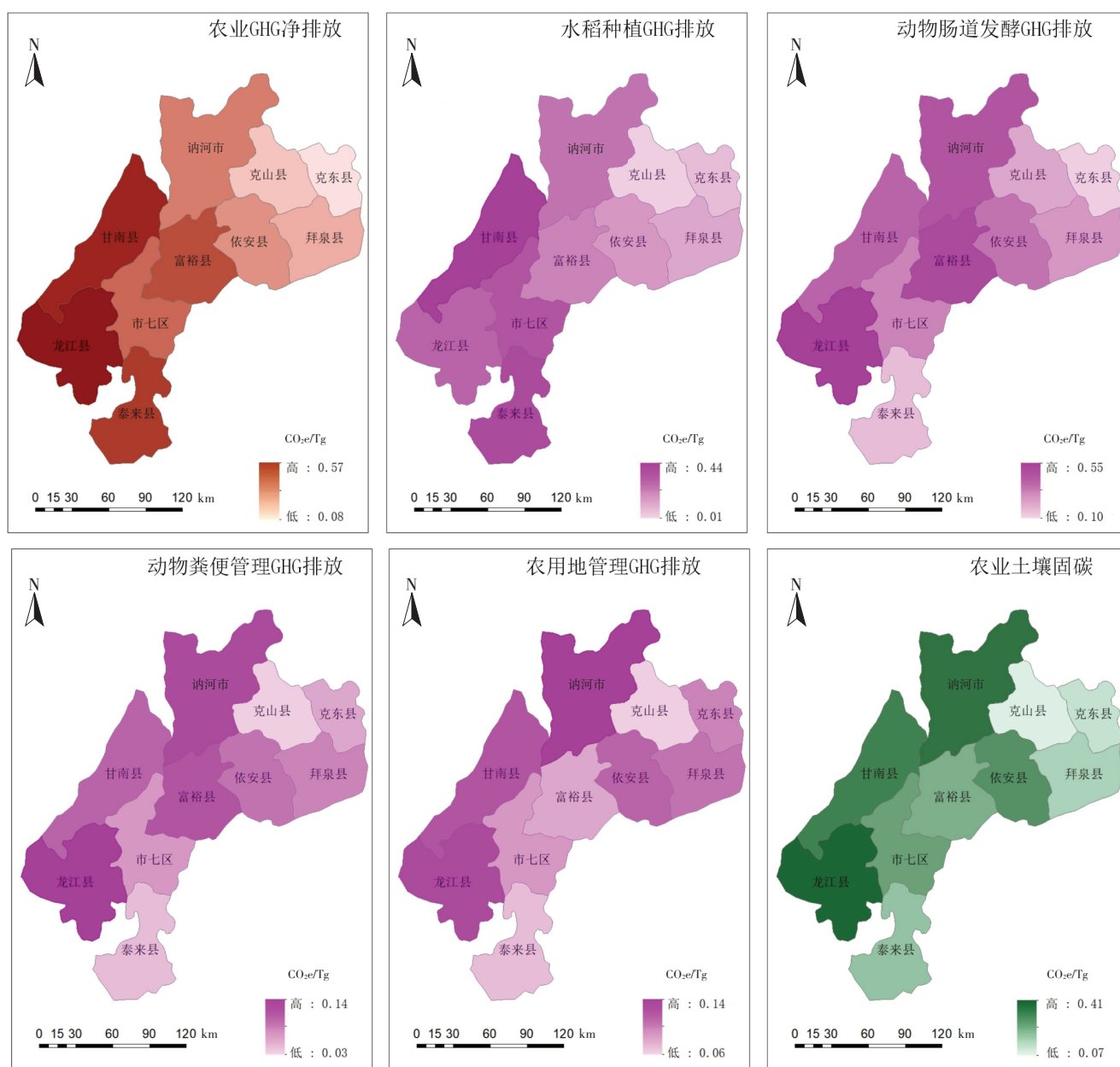


图6 2019年齐齐哈尔市农业GHG排放量与固碳量

Figure 6 Agricultural GHG emissions and carbon sequestration in Qiqihar City in 2019

年和2030年农业GHG净排放分别为 2.33×10^6 t和 1.70×10^6 t。与2019年相比,2025年和2030年齐齐哈尔市农业GHG排放分别减少8.41%和21.25%,农业固碳分别增加17.65%和32.35%,并且实现了齐齐哈尔市农业GHG减排与农业固碳的脱耦。因此,促进我国农业减排固碳与农业绿色发展政策协同发展不仅能有效地促进我国农业GHG减排与农业固碳,而且能够促进农业GHG减排与农业固碳的脱耦,真正实现二者在农业GHG净减排上的合力。

5 农业减排固碳目标与农业绿色发展政策协同发展建议与展望

5.1 重视农业减排固碳促进“双碳”目标的基础性作用

“双碳”目标是我国整个经济体面临的挑战。目前,我国主要关注的是实现能源供给侧的电力碳中和和氢能、生物质能等非电碳中和,以及能源需求侧的工业、交通、建筑的行业脱碳。随着清洁能源技术的发展,上述部门的GHG排放将会迅速下降,但是随着人口增长以及消费升级带来高碳食物消费的增加将会造成农业部门GHG排放的进一步增长,农业部门将成为未来面临GHG减排压力最大的部门。再者,目前国内外GHG排放核算是基于经济部门的横向切分,而政府、企业等的碳中和战略目标规划是基于全生命周期视角横跨农业、工业、交通、建筑等多部门的纵向切分。在操作层面,将农业减排固碳延伸至包括能源、农资生产在内的全产业链,更加突出了农业部门减排固碳的重要性,尤其在其他部门趋于实现碳中和的情景下,农业部门GHG减排将可能会成为阻碍实现碳达峰与碳中和目标的基础性因素。

5.2 统筹将农业减排固碳目标纳入农业绿色发展政策体系

我国农业绿色发展领域的立法与修法、政策与实

施方案制定等方面进展迅速,但在针对农业减排固碳与促进碳达峰与碳中和方面还没有专门的法律与政策,将其纳入农业绿色发展政策迫在眉睫。具体包括:研究明确农业减排固碳路径与潜力,包括水稻种植、动物肠道发酵、动物粪便管理、农用地管理、农业废弃物管理等方面的减排固碳可行路径与潜力优先序;将农业减排固碳的细分目标纳入农业绿色发展政策目标,明确二者在目标管理、政策制定、技术创新、试点示范等领域的协同推进机制;建立农业减排固碳的制度体系,包括明确政府的决策目标和政策导向,构建包括法律基础、基本制度、减排策略、经济政策、监督体系在内的全方位制度体系。

5.3 理顺农业减排固碳目标与农业绿色发展政策目标

农业减排固碳目标与大部分现行农业绿色发展目标是协同推进的,但也有部分无作用甚至负协同的目标。目前,需要统筹的政策目标方向主要有以下几个方面:一是水稻种植应从排水、秸秆还田、覆膜等方面专门制定减排固碳与农业绿色发展的协同政策;二是将不同动物肠道发酵GHG排放差异纳入畜禽养殖结构调整的核心考虑要素,发展抑制 N_2O 排放技术,并进一步提高集约化养殖水平;三是从全生命周期的减排固碳视角,对比秸秆肥料化、饲料化、能源化等利用途径的减排潜力,并根据粮食安全与农业高效发展目标统筹研判秸秆的综合利用途径;四是从农业GHG减排的目标出发,合理调整作物种植结构,平衡传统种植方式与有机种植方式,以及推行种养循环农业。

参考文献:

- [1] United Nations Environment Programme. Emissions gap report[R]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2020.
- [2] 生态环境部. 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告[R]. 北京: 生态环境部, 2018. Ministry of Ecology and Environment. The second biennial update report on climate change of People's Republic

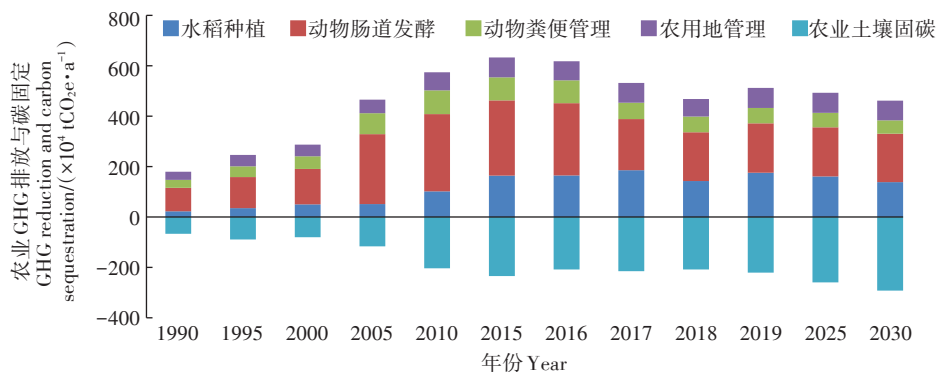


图7 齐齐哈尔市农业GHG排放与固碳历史变化趋势与情景模拟

Figure 7 Historical trend and scenario simulation of agricultural GHG emissions and carbon sequestration in Qiqihar City

- of China[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment, 2018.
- [3] IPCC. IPCC special report on climate change and land[R]. Geneva: IPCC, 2019.
- [4] CRIPPA M, SOLAZZO E, GUIZZARDI D, et al. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions[J]. *Nature Food*, 2021, 2(3): 1–12.
- [5] CLARK M A, DOMINGO N, COLGAN K, et al. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5 °C and 2 °C climate change targets[J]. *Science*, 2020, 370(6517): 705–708.
- [6] WU X H, WEI W, XIE X L, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity as affected by different water management strategies in Chinese double rice-cropping systems[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 779.
- [7] SU J, HU C, YAN X, et al. Expression of barley SUSIBA2 transcription factor yields high-starch low-methane rice[J]. *Nature*, 2015, 523(7562): 602–606.
- [8] SCHOLZ V V, MECKENSTOCK R U, NIELSEN L P, et al. Cable bacteria reduce methane emissions from rice-vegetated soils[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1878.
- [9] YAO Z, ZHENG X, LIU C, et al. Improving rice production sustainability by reducing water demand and greenhouse gas emissions with biodegradable films[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 39855.
- [10] 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.
- [11] ROMASANTA R R, SANDER B O, GAIHRE Y K, et al. How does burning of rice straw affect CH₄ and N₂O emissions? A comparative experiment of different on-field straw management practices[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 239: 143–153.
- [12] SHAN Y H, JOHNSON-BEEBOUT S E, BURESH R J. Chapter 3 Crop residue management for lowland rice-based cropping systems in Asia[J]. *Advances in Agronomy*, 2008, 98: 117–199.
- [13] DU Y, YING G, YUAN R, et al. A global strategy to mitigate the environmental impact of China's ruminant consumption boom[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4133.
- [14] CHIRIACÒ M V, VALENTINI R. A land-based approach for climate change mitigation in the livestock sector[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 283: 124622.
- [15] HERRERO M, HENDERSON B, HAVLÍL P, et al. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(5): 452–461.
- [16] HRISTOV A N, OH J, GIALONGO F, et al. An inhibitor persistently decreased enteric methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(34): 10663–10668.
- [17] THORNTON P K, HERRERO M. Potential for reduced methane and carbon dioxide emissions from livestock and pasture management in the tropics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(46): 19667–19672.
- [18] 宁瑞迪, 宋月青, 王岭. 家畜排泄物驱动的草地氧化亚氮释放及其影响因素[J]. 草业科学, 2019, 36(11): 2775–2785. NING R D, SONG Y Q, WANG L. Nitrous oxide release from grassland driven by livestock excreta and its influencing factors[J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(11): 2775–2785.
- [19] SMITH P, MARTINO D, CAI Z, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 2008, 363(1492): 789–813.
- [20] CHADWICK D, SOMMER S, THORMAN R, et al. Manure management: Implications for greenhouse gas emissions[J]. *Animal Feed Science & Technology*, 2011, 166/167: 514–531.
- [21] SNYDER C S, BRULSEMA 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.
- [22] MAYER A, HAUSFATHER Z, JONES A D, et al. The potential of agricultural land management to contribute to lower global surface temperatures[J]. *Science Advances*, 2018, 4(8): 932.
- [23] LAMB A, GREEN R, BATEMAN I, et al. The potential for land sparing to offset greenhouse gas emissions from agriculture[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(5): 488–492.
- [24] ZHANG X, XIAO G, LI H, et al. Mitigation of greenhouse gas emissions through optimized irrigation and nitrogen fertilization in intensively managed wheat-maize production[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 5907.
- [25] WOOLF D, AMONETTE J E, STREET-PERROTT F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change[J]. *Nature*, 2010, 1: 1–9.
- [26] DIACONO M, MONTEMURRO F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(2): 401–422.
- [27] LAL R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 1–22.
- [28] SUN M X, XU X B, WANG C D, et al. Environmental burdens of the comprehensive utilization of straw: Wheat straw utilization from a life-cycle perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120702.
- [29] SOUSSANA J F, TALLEC T, BLANFORT V. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands[J]. *Animal an International Journal of Animal Bioscience*, 2010, 4(3): 334–350.
- [30] YANG Y, HOBBS S E, HERNANDEZ R R, et al. Restoring abandoned farmland to mitigate climate change on a full earth[J]. *One Earth*, 2020, 3(2): 176–186.
- [31] CRAMER V A, HOBBS R J, STANDISH R J. What's new about old fields? Land abandonment and ecosystem assembly[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23(2): 104–112.
- [32] ZHU X F, XIAO G F, ZHANG D J, et al. Mapping abandoned farmland in China using time series MODIS NDVI[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142651.
- [33] LIU C, LU M, CUI J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366–1381.

(责任编辑:宋潇)