

· 专论 ·

中药生态农业服务碳达峰和碳中和的贡献及策略

郭兰萍^{1*}, 蒋靖怡², 张小波¹, 康传志¹, 王升¹, 万修福¹, 崔秀明³, 杨野^{3*}

(1. 中国中医科学院 中药资源中心 道地药材国家重点实验室培育基地, 北京 100700;

2. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125; 3. 昆明理工大学 生命科学与技术学院, 云南 昆明 650031)

[摘要] 碳达峰和碳中和已成为当今国内和国际政治经济活动的热点问题, 实现“双碳”目标的过程将对国内各行业的结构与发展产生深远影响。中药生态农业在生产优质药材的同时注重生态系统的平衡和可持续发展, 通常不用化学合成的肥料、农药及生长调节剂, 重视农副产品的循环利用, 减少废弃物输出, 因而对生态环境的负面影响极小, 是典型的低碳源和高碳汇农业。该文综述了中药生态农业在碳达峰和碳中和发挥作用的机制与潜力, 并选择典型模式为案例分析了中药生态农业减少碳源和增加碳汇的具体方式, 进而提出加强中药生态农业及“双碳”理论和方法研究, 为低碳高效发展指明方向; 全面推进中药生产由化学农业向生态农业模式转变, 提升碳中和贡献率的综合收益; 探索建立中药生态农业碳汇补偿机制, 为中药生态农业持续健康发展提供保障; 加强中药生态农业及“双碳”理论和技术培训, 提升中药生态农业可持续发展能力, 以期为中药生态农业的生态功能提升及通过生态功能助力经济功能发展提供思考和借鉴。

[关键词] 中药; 生态农业; 绿色发展; 碳中和; 碳达峰

Contributions and strategies of eco-agriculture of Chinese medicine services for carbon dioxide peaking and carbon neutrality

GUO Lan-ping^{1*}, JIANG Jing-yi², ZHANG Xiao-bo¹, KANG Chuan-zhi¹, WANG Sheng¹, WAN Xiu-fu¹,
CUI Xiu-ming³, YANG Ye^{3*}

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Dao-di Herbs, National Resource Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China; 2. National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China; 3. Faculty of Life Science and Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650031, China)

[Abstract] Carbon dioxide peaking and carbon neutrality have become hot issues of political and economic activities in China and abroad. The structure and development of various industries in China will be profoundly affected in the process of accomplishing "Dual Carbon" goals. Eco-agriculture of Chinese medicine (EACM) highlights the balance and sustainable development of the ecosystem while producing high-quality medicinal materials. With chemically synthesized fertilizers, pesticides, and growth regulators prohibited, EACM emphasizes the recycling of agricultural and sideline products and the reduction of waste output, which results in the minimal negative impact on the ecological environment. Therefore, it is typical agriculture with low-carbon sources and high-carbon sinks. This study reviewed the mechanism and potential of EACM in carbon dioxide peaking and carbon neutrality, analyzed the specific ways of EACM in reducing carbon sources and increasing carbon sinks based on the typical ecological planting pattern, and proposed the point of view to strengthen EACM as well as the "Dual Carbon" theory and research methods, so as to direct low-carbon and efficient development. Furthermore, this study advocated to comprehensively promote the transformation of Chinese medicine production from chemical agriculture to eco-agriculture to improve the comprehensive benefits of contribution rate of carbon neutrality, explore and establish carbon sink compensation mechanism to ensure the sustainable and healthy development of EACM, and strengthen the training of EACM and "Dual Carbon" theory and technologies to continuously improve the capacity of EACM in sustainable development. This

[收稿日期] 2021-09-23

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2017YFC1700701); 国家自然科学基金重大项目(81891014); 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系项目(CARS-21)

[通信作者] * 郭兰萍, 研究员, E-mail: glp01@126.com; * 杨野, 教授, E-mail: yangyekm@163.com

study is expected to provide a reference for the development of ecological functions in EACM and the development of economic functions through ecological functions.

[Key words] Chinese medicine; eco-agriculture; green development; carbon neutrality; carbon peaking

DOI:10.19540/j.cnki.cjcm.20211129.101

气候变化全球治理已是当今国际政治议程的重要议题。应对气候变化是中国重要国策,也是中国参与国际事务、体现大国担当的具体途径。习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上表示中国将采取更加有力的政策和措施提高国家自主贡献力度,力争于2030年前碳排放达到峰值,到2060年前实现“碳中和”(简称“3060”目标或“双碳”目标)。为了践行习近平总书记对全世界的庄严承诺,体现中华民族在世界民族之林的责任担当,中国正在以前所未有的力度推进低碳转型与绿色低碳创新。

中药生态农业是应用生态学原理和生态经济规律,以确保障中药材质量和安全为目标,以社会、经济、生态综合效益为指标,结合系统工程方法和现代科学技术,因地制宜地设计、布局、生产和管理中药农业生产的发展模式^[1]。中药生态农业是生态文明思想指导下的环境友好型农业,由于其突出的低碳特征,在实现“双碳”目标中,中药生态农业具有传统农业不可替代的优势。本文综述了农田生态系统在碳源与碳汇中发挥的作用,分析了中药生态农业的低碳特征及其在“双碳”目标实现中的潜力,以及几种典型中药生态农业模式对碳中和的贡献。最后,提出了中药生态农业服务“双碳”目标的建议,以期对中药生态农业的生态功能及通过生态功能助力经济功能提升提供思考和借鉴。

1 农田生态系统在碳达峰和碳中和中的作用

1.1 碳达峰和碳中和的概念及其“碳”的来源

温室气体是造成全球气候变暖的主要原因。碳达峰和碳中和(carbon peaking and carbon neutrality)是描述特定时间一定区域内中碳排放状态的2个名词。碳达峰指的是碳排放进入平台期后,进入平稳下降阶段。碳中和是指直接或间接产生的温室气体排放总量,通过植树造林、节能减排等形式,抵消自身产生的二氧化碳排放,实现二氧化碳的“收支相抵”,达到“零排放”。碳中和除了指二氧化碳“零排放”的状态,也常常被用来代指推动绿色发展的低碳行为。与碳达峰和碳中和密切相关的另外2个词是碳源与碳汇,碳源是指自然界中向大气释放碳的母体,碳汇是指自然界中碳的寄载体。减少二氧化碳排放量的手段,一是碳封存,主要增加土壤、森林和海洋等天然碳汇吸收储存空气中的二氧化碳;二是碳抵消,通过开发可再生能源和低碳清洁技术,减少二氧化碳排放量。

《京都议定书》明确规定对6种温室气体进行削减,包括二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)及六氟化硫(SF₆)。农业生态系统中的温室气体,主要由能源消耗等产生的CO₂,家畜

反刍消化的肠道发酵、畜禽粪便和稻田等产生的CH₄,使用化肥、秸秆还田和动物粪便等产生的N₂O等组成^[2]。虽然CO₂的温室效应在所有温室气体中不是最强的,但却是占比最大的,占有温室气体总量的65%^[3]。而且CO₂还与其他温室气体的排放有协同关系,即减少CO₂排放量的同时也可以减少其他温室气体的排放,因而当前世界各国将控制CO₂的排放作为控制气候变暖的主要手段^[4]。在计算碳排放量时通常将其他温室气体折算成二氧化碳当量(CO₂eq)的数量。根据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)报告,以CO₂为基准,1单位CO₂使地球变暖潜能值为1 CO₂eq(当量吨数),1单位CH₄和N₂O折合为CO₂eq的系数分别是25和298(当量吨数)^[5]。

1.2 农田生态系统在“双碳”目标中将发挥巨大作用

1.2.1 农田生态系统是重要的碳源 农田生态系统的碳排放是全球碳排放的重要来源之一,约占总排放量的30%^[6],贡献了全球范围内约14%的人为温室气体排放量和58%的非人为CO₂排放^[7]。中国自然资源部公布的数据显示,2014年全国温室气体净排放总量为111.86亿吨CO₂eq,其中农业排放占比为7.4%。2018年中国农业总碳排放量为8.7亿吨,种植业碳排放总量为7850.39万吨,其中化肥、农膜、农药、农用柴油、灌溉、翻耕引致的种植业碳排放量分别占种植业碳排放总量的66.83%、16.68%、10.38%、3.69%、1.76%、0.66%(图1)^[8]。可见,排放量前三位的化肥、农膜和农药投入导致的碳排放约占总碳排放量的94%,而施用化肥导致的碳排放量更高达总碳排放量的2/3。因此,采取有效的农艺和农技术手段,减少化肥、农膜和农药的使用是农田生态系统减少碳排放的有效手段。

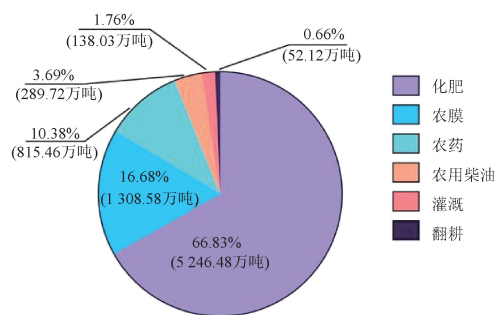


图1 2018年中国种植业碳排放分布

Fig.1 Distribution of carbon emissions from China's planting industry in 2018

2015年《到2020年化肥使用量零增长行动方案》指出,中国农作物亩均化肥用量21.9 kg,远高于世界平均水平(8 kg/亩,1亩 \approx 667 m²),是美国的2.6倍,欧盟的2.5倍^[9]。2016年,中国各省农药平均施用强度为10.4 kg·hm⁻²,比国际警戒线(7 kg·hm⁻²)高出48.6%^[10](图2)。可见,与发达国家的发展经验相比,中国在农业生产中仍有巨大的减排空

间。虽然已有的研究结果表明中国碳排放增速已明显放缓^[11],但中国的农业仍然处于高消耗、高排放的发展阶段。为此,中国政府于2015年提出“一控两减三基本”的要求,旨在保障作物产量和品质的情况下,通过提高“一控两减”技术水平,结合优化农作物生产结构和种植布局,从而不断地降低碳排放量。

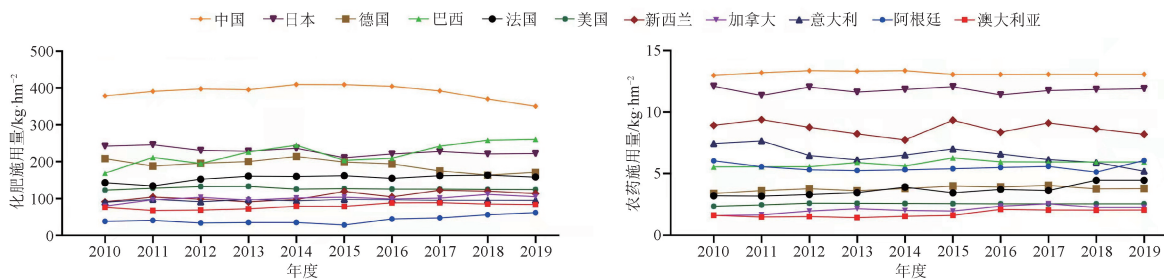


图2 中国与世界其他国家化肥和农药的施用情况(数据来源于联合国粮农组织数据库)

Fig. 2 Application of fertilizers and pesticides in China and other countries in the world (data from the UN Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database)

1.2.2 农田生态系统是重要的碳汇 农业在提供农产品和工业原料的同时,还发挥着供应生态产品的重要功能^[12]。因此,农业生态系统也是重要的碳汇。农田系统作为碳汇,主要包括农田土壤的碳汇和农作物碳汇两部分。土壤固碳量是输入土壤的有机物与其通过分解释放的温室气体的差值;农作物碳汇是用农作物整个生命周期内光合作用所吸收的CO₂减去农作物呼吸作用所释放的CO₂来表示,即折算农作物干重来表示农作物光合作用所固定的碳量^[13]。陆地生态系统碳储量80%以上存储于土壤中,而农田表层土壤有机碳储量约占陆地土壤碳储量的10%,有着巨大的碳储存潜力^[14],通常农田生态系统的碳源/汇为(0.043±0.010)Pg C/年^[15]。

近年来,以农田生态系统为整体的碳源/汇研究逐渐增多,主要包括对碳吸收量及碳排放量的平衡关系进行估算,并分析其时空变化规律、影响因素等。刘巽浩等^[16]对1950年以来的全国农田系统碳流进行分析指出,农田生态系统碳平衡都是固碳>耗碳,具有净固碳作用。近年来,很多省份针对各自的农业特征进行了农田生态系统的碳汇评价。作为中部产粮大省的河南,农田系统2017年碳吸强度为5.26 t·hm⁻²,碳排放强度为0.873 6 t·hm⁻²,其农田生态系统处于碳生态盈余的状态,且碳足迹较低,碳足迹效益较高^[17]。田志会等^[18]对2005—2014年京津冀农田生态系统的碳汇、碳源、碳足迹的年度研究表明,碳足迹平均为161.2万hm²/年,呈现出逐年减少趋势,处于碳生态盈余状态。郝小雨^[19]对北方农业大省的黑龙江农田系统研究发现,该省碳汇能力较强,碳吸收量明显高于碳排放量,两者比例为19.4:1,其农田生态系统处于良好的碳生态盈余状态,具有较好的生态屏障作用。可见,农田生态系统会释放大量的碳,但同时也因土壤碳汇和

农作物碳汇等贮存了大量碳,总体上在碳中和方面发挥了十分积极的作用。正确评价农田生态系统碳汇强度,制订合理的减排策略对提高农田生态系统的碳中和能力具有重要意义。

2 中药生态农业在实现“双碳”目标中的作用

2.1 低碳发展是中药生态农业的显著特征

生态农业的特征是知识更密集,需要利用时空尺度的系统设计和规划,通过实现生物防治、物质能量循环、景观布局等目标,使农业生态系统更具复杂性和稳定性,从而确保环境和中药材的优质安全^[20]。中药生态农业“不向农田抢地,不与草虫为敌,不惧山高林密,不负山青水绿”的发展理念完全切合种植业“双碳”的国家发展战略,具有低碳发展的显著特征,具体表现为中药生态农业追求生态平衡,要求减少或不用化学合成的肥料、农药及生长调节剂,减少环境污染;通过设计形成内部组成与结构较复杂的能自我维持的系统,有较强的自我调节和抵抗外界干扰的能力;合理利用自然资源,重视综合收益,注重农、林、牧、副、渔全面发展;强调间作、套作、轮作等栽培模式,重视农业副产品的循环利用,坚持减少废弃物输出,实现农业系统的循环发展等^[20]。可见,中药生态农业在通过干物质累积固碳增加碳汇的同时,通过减少投入可极大降低碳排放,低碳效果显著,有望在实现“双碳”目标中担当重任。

2.2 中药生态农业在碳中和中具有巨大的潜力

历经短短5年的发展时间,中药生态农业已集成推广了天麻、霍山石斛、附子等100余项种植模式和技术,通过对30种不同中药材的种植模式的分析,发现其较常规种植每亩年均增收4000余元,其中25种植模式的中药材平均增产17.58%,生态种植的人参、黄芪、苍术和柴胡的年均收益是

常规种植的6倍,投入产出比平均下降57.90%。中药生态农业如此惊人的发展速度,说明其顺应了时代发展的潮流,是人民群众对用药质量和安全的认可,是药农和药企对经济效益的认可,也是地方政府对发展模式的认可。2020年生态种植中药材为500万亩,相对于8 822万亩的总种植面积,中药生态农业还具有巨大的发展空间。2018年全国森林面积33亿亩,其中天然林21亿亩,人工林12亿亩,同时荒山荒地、沙荒地等宜林地面积达到7.50亿亩,占全国林地总面积的15.44%,预计到2035年全国森林覆盖率将达到26%,林草中药材发展生态种植展现出了更加广阔的前景。因而,快速发展中药生态农业不仅将在乡村振兴中发挥巨大作用,其也必将在碳中和中发挥深远的影响。

2.3 典型中药生态农业模式在碳中和中的作用

2.3.1 测土配方施肥技术在碳中和中的作用

中药材生产中,通常选择秸秆还田、堆肥还田、饲料过腹还田等措施将碳转化为土壤有机质而长期储存^[21]。筛选高固碳作物品种、科学的轮作措施^[22]及免耕^[23]等技术手段均能增加农田土壤的碳汇。通过施用有机肥并结合测土配方施肥满足作物养分需求,可以减少化学肥料的投入并增加土壤碳的固定。三七是中药材大品种,在地面积常年达50万亩。由于其经济价值极高,为追求利益最大化,种植户尚未摆脱奢侈施肥的种植习惯,也很少重视氮钾肥平衡施用,三七种植中氮肥(N)习惯用量为225~450 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)习惯用量为225~450 kg·hm⁻²^[24-25]。崔秀明研究团队发现与氮钾肥习惯施肥(N-K₂O 1:1,二年生300 kg·hm⁻²,三年生450 kg·hm⁻²)相比,减少氮肥用量(二年生150 kg·hm⁻²和三年生225 kg·hm⁻²)并维持钾肥用量(N-K₂O 1:2)可以使三七根腐病发病率降低19%,存苗率增加11%,地上部和地下部产量分别增加3%、8%,皂苷量增加3%,该团队制定了《三七平衡施肥技术规程》云南省地方标准^[26-27],在三七种植过程中实现减施氮肥10 kg/亩,仅氮肥一项可实现每年减施5 000 t。国内外学者研究施肥对农田土壤CO₂排放研究表明,施用氮肥比不施肥会显著提高土壤CO₂的排放。如YAO P等^[28]研究表明施用氮肥会造成玉米种植土壤CO₂释放量增加,王艳群等^[29]研究表明与习惯施肥相比,每亩减少氮肥施用4 kg,会使小麦季CO₂平均排放通量显著降低8.3%。

2.3.2 间套作技术在碳中和中的作用

通过间套作的方式降低病虫害的发生,减少农药的使用和残留;通过林下生态种植的方式,由天然林提供遮荫替代薄膜遮阳网、由伴生植物建立抗病环境、由林下土壤提供养分、通过减少翻耕降低水土流失等方式综合实现低碳产出和高碳储存。YU L等^[30]研究发现甘蔗/大豆条带间作比单做具有更大的碳封存潜力和净碳平衡。ZHANG X等^[31]研究表明小麦和玉米间作系统也可以增加土壤碳汇。周涛团队^[32]研究了黄柏与草本药用植物芍药的间套作生态种植模式。这种模式的优势是根据不同药材生长时对阳光需求的密度差异和周期性,将喜阳与喜阴、木本

与草本、短期与长期的药材进行间套作立体栽培,在不投入任何农用物资的情况下,使作物充分吸收养分,使有限的土地资源得到充分利用,并在中药材种植区增加了物种的生态多样性,维持栽培地的生境平衡和稳定。黄柏与芍药间套作之后,每亩可增加种植芍药500株,第三年每亩可收益8 000元/年左右。更为重要的是,芍药在种植期间每年可以获得44.4 kg/亩的干物质量,在获得经济效益的同时实现了农作物碳汇。这种种植模式下,黄柏作为乔木原本就具有较强的固碳能力,加之套种芍药进一步提高了林药生态系统的固碳能力,而且由于具有持续的经济收益,使得这种种植模式能够持续发展。此外,芍药花期长,种植区内可形成景观,开展旅游休闲活动有利于生态环境的可持续、多维度发展。

2.3.3 拟境栽培技术在碳中和中的作用

通过在荒漠化、石漠化和沙漠化地区进行道地药材对粮食作物的替代种植,减少频繁收获对土壤的扰动,适应性强的道地乔木、灌木和草本类药材提高植被覆盖的同时减少了对水肥的需求。霍山石斛的设施栽培模式是采用最多的一种种植模式,主要是指大棚覆盖栽培设施,包含可人为调控的石斛栽培装置,如离地苗床、铺设基质的支撑面、遮阳网、供水、控温与供电系统等,需要投入大量的生产物资。而拟境栽培完全模拟其野生状态的生长环境,选取具有适宜的温度、湿度、光照条件及水傍山崖石边,将石斛幼苗移栽至山崖石缝中任其自然生长,投入成本低、用工少、无需喷水和通风、无病虫害。韩邦兴团队^[33]通过比较设施栽培和拟境栽培的霍山石斛发现,拟境栽培霍山石斛投入产出比为1:7.4,设施栽培为1:3.7,从经济效益角度看,拟境栽培霍山石斛种植投入产出比最低。拟境栽培因不占用土地和良田、种植后不需投入其他农用物资,其以零碳排放成本完成了中药材生产,在生态效益上是其他种植模式无法比拟的。

3 中药生态农业服务“双碳”目标的建议

3.1 加强中药生态农业及“双碳”理论和方法研究,为低碳高效发展指明方向

虽然中药生态农业较常规种植起步晚,其对碳中和的贡献作用及机制尚缺乏研究,但中药生态农业将对碳中和做出积极贡献是不可否认的,尽快开展机制研究,对促进中国的碳中和进程具有重要意义。从低碳农业的理论基础、内涵、特征、类型划分、排放测算与评价方法等方面系统构建出中药生态农业理论框架体系与研究方法。以减源和增汇为抓手对中药生态农业发展现状进行评估,对典型生态种植模式的运行成效进行科学分析与评价,进而提出中药生态农业的高效低碳发展战略、实施路径与保障体系。获得国内和国际认可的计算模型,既要使中药生态农业完成生产优质药材的根本任务,又要避免低碳概念成为限制其发展的瓶颈。

3.2 全面推进中药生产由化学农业向生态农业模式转变,提升碳中和贡献率的综合收益

全面推进中药生产模式转变,通过减少化学农业种植,

扩大中药生态种植面积,尤其是生态种植在中药农业中的比重,快速推进中药生态农业由生产型向生产、生态和文化等复合功能转变,是从根本上实现中药材低碳生产的关键。应尽快在中药生态农业理论指导下开展全国中药生态农业总体布局,并根据区域特点,制定各地主要的生态农业模式与配套技术,以技术为依托实现中药产量与品质、经济效益与社会影响、碳达峰与碳中和的协调平衡发展,从而实现中药生态农业的健康、持续、自我完善和促进的良性发展,并带来经济、生态与社会效益的全面提高。

3.3 探索建立中药生态农业碳汇补偿机制,为中药生态农业持续健康发展提供保障

在进行科学的碳源与碳汇计算基础上,中药生态农业研究人员应建立中药生态农业碳补偿机制,如《中药生态农业碳汇补偿管理办法》等法律法规,将其作为农业部门碳汇补偿专门立法的补充。同时,还应帮助不同地理区域下的政府制定符合当地实际条件的政策,保障中药生态农业系统碳补偿的政府补偿和市场补偿顺利开展,帮助中药生态农业更多的活力渠道,以维持其持续健康发展。

3.4 加强中药生态农业及“双碳”理论和技术培训,持续提升中药生态农业可持续发展能力

加强基层推广技术队伍建设,定期组织推广人员的主题培训与专题讲座,提升技术人员对中药生态农业的认识和专业技能,通过科普和试验示范,使公众和从业者了解中药生态农业在产业、经济、社会发展与碳达峰和碳中和中的贡献,使农民有低碳生产的意识,公众养成低碳生产、低碳消费的习惯,提升个人与国家全球战略息息相关的使命感与自豪感,从而最终实现“3060”目标。

[参考文献]

[1] 郭兰萍,周良云,莫歌,等. 中药生态农业——中药材 GAP 的未来[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(17): 3360.

[2] 金书秦,韩冬梅,林煜,等. 碳达峰目标下开展农业碳交易的前景分析和政策建议[J]. 农村金融研究, 2021(6): 3.

[3] WMO Greenhouse Gas Bulletin. The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2020[R]. 2021.

[4] DENG H, LIANG Q. Assessing the synergistic reduction effects of different energy environmental taxes: the case of China [J]. Nat Hazards (Dordr), 2017, 85(2): 811.

[5] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis[M]// SOLOMON S, QIN D, MANNING M, et al. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.

[6] JIA G S, SHEVLIKOVA E, ARTAXO P, et al. Land-climate interactions [EB/OL]//IPCC special report on climate change and land. (2019-11-05)[2021-11-29]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/11/05_Chapter 2-2.pdf.

[7] 石岳峰,吴文良,孟凡乔,等. 农田固碳措施对温室气体减

排影响的研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(1): 43.

[8] 丁宝根,赵玉,邓俊红. 中国种植业碳排放的测度、脱钩特征及驱动因素研究[J]. 中国农业资源与区划, [2021-11-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20210607.1244.018.html>.

[9] 农业部关于印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》的通知[EB/OL]. (2017-11-29)[2021-11-29]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2015/san/201711/t20171129_5923401.htm.

[10] 谢邵文,杨芬,冯含笑,等. 中国化肥农药施用总体特征及减施效果分析[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(4): 490.

[11] 李波,张俊飏,李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8): 80.

[12] 杨世琦,杨正礼,高旺盛. 国家尺度区域农业系统协调度评价[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 4047.

[13] 吴昊玥,何宇,黄瀚蛟,等. 中国种植业碳补偿率测算及空间收敛性[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(6): 113.

[14] 徐丽,于贵瑞,何念鹏. 1980s—2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化[J]. 地理学报, 2018, 73(11): 49.

[15] 赵宁,周雷,庄杰,等. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7648.

[16] 刘巽浩,徐文修,李增嘉,等. 农田生态系统碳足迹法: 误区,改进与应用——兼析中国集约农作碳效率[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(6): 1.

[17] 郭永奇. 河南省农田生态系统碳源、碳汇及其碳足迹动态变化[J]. 东北农业科学, 2021, 46(6): 87.

[18] 田志会,刘瑞涵. 基于京津冀一体化的农田生态系统碳足迹年际变化规律研究[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 167.

[19] 郝小雨. 黑龙江省30年来农田生态系统碳源/汇强度及碳足迹变化[J]. 黑龙江农业科学, 2021(8): 9.

[20] 郭兰萍,康传志,周涛,等. 中药生态农业最新进展及展望[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(8): 1851.

[21] 张卫建,严圣吉,张俊,等. 国家粮食安全与农业双碳目标的双赢策略[J]. 中国农业科学, 2021, 54(18): 3892.

[22] 白保勋,陈东海,徐婷婷,等. 主要粮经作物与轮作模式净碳汇价值分析[J]. 生态经济, 2021, 37(9): 97.

[23] 张雄智,李帅帅,刘冰洋,等. 免耕与秸秆还田对中国农田固碳和作物产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(5): 1.

[24] 韦美丽,陈中坚,孙玉琴,等. 3年生三七吸肥规律研究[J]. 特产研究, 2008(1): 38.

[25] 余前进,李佳洲,韩蕊莲,等. 不同施肥模式对三七生长及有效成分的影响[J]. 北方园艺, 2015(15): 143.

[26] OU X, CUI X, ZHU D, et al. Lowering nitrogen and increasing potassium application level can improve the yield[J]. Front Plant Sci, 2020, 11: 595095.

[27] 云南省市场监督管理局. 三七栽培技术规程. DB53/T 1022-2021[S]. 2020.

- [28] YAO P, LI X, NAN W, et al. Carbon dioxide fluxes in soil profiles as affected by maize phenology and nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2017, 236:120.
- [29] 王艳群, 彭正萍, 马阳, 等. 减氮配施氮转化调控剂对麦田 CO₂ 和 CH₄ 排放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(7): 1657.
- [30] YU L, LUO S, XU X, et al. The soil carbon cycle determined by GeoChip 5.0 in sugarcane and soybean intercropping systems with reduced nitrogen input in South China [J]. *Appl Soil Ecol*, 2020, 155: 103653.
- [31] ZHANG X, XU M, LIU J, et al. Greenhouse gas emissions and stocks of soil carbon and nitrogen from a 20-year fertilised wheat-maize intercropping system: a model approach [J]. *J Environ Manage*, 2016, 167: 105.
- [32] 王艳红, 周涛, 郭兰萍, 等. 以生态农业指导理论为基础探讨黄柏间套作药用植物种植模式分析 [J]. *中国中药杂志*, 2020, 45(9): 2046.
- [33] 易善勇, 康传志, 王威, 等. 霍山石斛种植模式比较及拟境栽培的优势分析 [J]. *中国中药杂志*, 2021, 46(8): 1864.

[责任编辑 吕冬梅]